

한울 3,4호기
스트레스테스트 수행보고서
(2차 질의답변 반영분)

2018. 9. 14

목 차

제1장 일반사항

제2장 설계기준 초과 극한자연재해의 특성

제3장 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성

제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력

제5장 중대사고 관리능력

제6장 방재 및 비상대응능력

제7장 운영기술 능력

제8장 종합결론

제1장 일반사항

목 차

제1절 스트레스테스트 개요	1
제2절 후쿠시마 원전사고 이후 안전성 강화 노력	4
제3절 발전소 일반현황	5
제4절 부지특성	6
제5절 설계특성	7
제6절 주요 설비 및 계통	8
제7절 참고문헌	20
제8절 그림	21

그림

그림 1-1 한울 3,4호기 주변 지형도	21
그림 1-2 한울 3,4호기 부지 배치도	22

제1절 스트레스테스트 개요

1.1 수행배경

국내는 후쿠시마 원전사고 이후 설계기준을 초과하는 수준의 지진, 해일 등과 같은 극한자연재해 상황에서의 원전 안전성에 대한 국민적 우려와 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 설계기준을 초과하는 극한자연재해 상황에서 대부분의 원전 안전설비가 기능을 상실하는 극단적인 상황을 가정하여 원전의 안전성과 대응능력을 재평가하여 중대사고 예방, 방지 및 사고관리 개선대책을 도출하고 시행함으로써, 원전의 안전성을 강화하기 위한 목적으로 스트레스테스트를 수행한다.

원전 스트레스테스트는 후쿠시마 원전사고 발생(2011.3.11.) 이후 유럽연합(EU) 원전 보유국가 전체와 그 외 러시아, 스위스, 우크라이나, 아르메니아, 벨라루스, 크로아티아, 터키, 캐나다, 일본, 한국 등(미국 제외)의 국가에서 극한재해 대응대책으로 시행되었다. 국내의 경우, 국민 안전을 최우선으로 하는 정부의 원전 안전정책의 일환으로 지난 2013년 계속운전 대상원전인 월성 1호기, 고리 1호기를 대상으로 스트레스테스트를 수행하였다.

2015년 9월 원자력안전위원회(이하, “원안위”)는 스트레스테스트의 긍정적인 개선효과를 확인하고 국내 전 가동원전에 대해 스트레스테스트를 확대 적용하기로 정책적으로 결정하였다. 이에 따라, 월성 1호기 및 고리 1호기 평가 경험 및 해외 규제대응 사례를 참고하여 평가기준을 구체화하고 강화한 “가동원전 스트레스테스트 수행지침”(이하, “수행지침”)이 개발되었다. 또한, 원안위는 이와는 별도로 사고관리계획서 개발 및 제출 의무를 법제화함으로써 복수의 규제요건으로 다수호기 극한재해에 대한 원전 사업자의 대응능력 향상을 요구하고 있다.

원전 사업자인 한국수력원자력(이하, “한수원”)은 이와 같은 정부 정책과 규제요건을 충분히 만족시키기 위해 원안위가 개발한 스트레스테스트 수행지침을 기반으로 “가동원전 스트레스테스트 사업자 수행계획”(이하, “수행계획”)을 개발하여 원안위의 승인을 취득(2017년 7월)하였으며, 수행계획에 따라 한울 3,4호기 스트레스테스트 평가를 수행하게 되었다.

또한, 원자력안전법 제20조(운영허가)에 따라 2019년 6월까지 원안위에 제출해야 하는 사고관리계획서와 병행하여 동시에 규제요건을 만족할 수 있도록, 본 평가에서는 既수립(2017.4.)한 “다수호기 극한재해 사고관리전략(MACST : Multi-barrier Accident Coping Strategy)”을 적극 활용하였으며, 한울 3,4호기 스트레스테스트 수행결과 도출된 안전개선사항은 현재 추진 중인 ‘국내원전 안전점검 개선사항’, ‘고리 1호기 및 월성 1호기 스트레스테스트 안전개선사항’과 별도로 구분하여 서술하였다.

1.2 평가목적과 안전철학

스트레스테스트는 후쿠시마 원전사고와 같은 설계기준을 초과하는 극한자연재해에 대한 원전의 대응능력을 평가하고 다중의 대응능력을 월등한 수준으로 개선하기 위해 3단계 자기부정(自己不定) 방법론을 사용한다.

3단계 자기부정 방법론이란 스트레스테스트의 기반 안전철학으로 다음과 같이 진행된다. 즉, 사고단계 별로 원전이 가진 대응능력의 한계(Cliff Edge)를 확인하고 원안위 수행지침에 만족하는지 확인한다. 그리고 보수적으로 가정하여 원전 사고단계별 대응능력이 충분함에도 불구하고 사고단계를 진전시켜 다음 단계에서의 대응능력을 평가하는 방법을 사용한다. 구체적으로 서술하면 아래와 같다.

첫 번째 단계는 구조물, 계통 및 기기에 대한 극한재해 대응능력 평가 개선 부분이다. 원전은 설계기준에 따라 구조물, 계통 및 기기가 설계되지만 실제로는 설계기준 값 보다 높은 안전여유도를 가지도록 시공된다. 이에 스트레스테스트에서는 설계기준을 초과하는 극한자연재해에 대해 실제로 원전이 가진 안전여유도에 기반한 극한재해 대응능력 수준을 평가하고, 필요한 경우 안전대책을 도출하여 원전 대응능력을 강화한다.

두 번째 단계는 보수적 가정에 첫 번째 단계의 모든 안전방벽과 안전대책이 불능상태가 되어 필수안전기능이 상실되는 경우 원전의 대응능력을 평가하고 필요한 안전대책을 도출한다. 이를 통해 다양한 종류의 이동형 비상대응설비, 비상대응조직, 비상대응설비의 보관시설 등을 보유하도록 요구한다.

세 번째 단계에서는 또 다시 보수적 가정에 첫 번째 및 두 번째 단계의 모든 안전방벽과 안전대책이 불능상태가 되고, 결과적으로 중대사고 상황이 발생한다는 가정 하에 중대사고 완화 및 수습(관리) 대응능력을 평가하고 개선대책을 도출함으로써, 최종적으로 일반대중의 방사선피폭 방지와 환경보호를 강화한다.

이러한 3단계 자기부정 방법론은 비현실적인 설정과 다단계 가정을 포함한 보수적 방법론을 통해 사업자가 궁극적으로 다수 호기 극한재해에 대해 충분히 안전한 원전을 만들어 가도록 대응능력을 개선하는데 목적이 있다.

참고로, 미국 원전의 경우 이러한 비현실적 설정과 보수적 가정에 동의하지 않는다는 점을 들어 스트레스테스트를 수행하지 않고 있다.



< 3단 자기부정 방법론을 사용한 스트레스테스트 안전철학>

1.3 평가방법 및 내용(범위)

원안위는 스트레스테스트가 세계 최초 적용된 유럽연합(EU)의 ENSREG/WENRA 방법론(Specification)을 기반으로 국제원자력기구(IAEA), 미국 및 일본의 안전조치사항, 국제 환경단체 등에서 제기한 지적사항 등을 추가 반영하여 국내 고유의 스트레스테스트 수행지침과 검증지침을 개발하였다.

가동원전 스트레스테스트 세부 평가분야는 ① 설계기준 초과 극한자연재해의 특성, ② 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성, ③ 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력, ④ 중대사고 관리능력, ⑤ 방재 및 비상대응능력, ⑥ 운영기술 능력 등 6개 분야로 구성된다.

한울 3,4호기 원전 스트레스테스트의 분야별 주요 평가항목은 다음과 같다.

설계기준 초과 극한자연재해의 특성 평가분야에서는 지진, 홍수, 강풍, 저수위, 수온상승 등 원전안전에 영향을 줄 수 있는 부지고유의 자연현상에 대하여 설계기준 및 설계기준을 초과하는 극한자연재해의 수준을 평가하였다.

극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성 평가분야에서는 원전안전에 영향을 줄 수 있는 지진, 홍수, 강풍, 저수위, 수온상승 등의 부지고유 자연재해에 대하여 설계기준 및 설계기준을 초과하는 수준의 규모에서 원전이 견디는 정도를 확인하고, 자연재해에 대한 구조물·계통·기기의 건전성을 평가하였다.

전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가분야에서는 소외전력상실·소내 정전·최종열제거원 상실조건에서의 사고 시나리오 및 예비전력공급원 지속시간 등 발전소 대응능력을 평가하였다.

중대사고 관리능력 평가분야에서는 노심냉각기능·격납건물 건전성·사용후연료 저장조 냉각기능의 확보방안 및 동 기능 상실시 중대사고 관리방안에 대해 평가하였다.

방재 및 비상대응능력 평가분야에서는 장기 정전사고시 통신체계 건전성, 중대사고 발생시 환경방사선 감시 및 선량평가 능력, 비상조직 및 지휘·통제체계의 적절성 등을 평가하였다.

운영기술 능력 평가분야에서는 사고대응을 위해 수립된 대응전략 및 이행가능성을 확인하고, 실제 사고발생 시 대응을 위한 주요 운전원조치, 이를 수행하기 위한 주요 자원(인간-시스템연계 설비, 절차서, 조직/인력 등) 등의 적절성 확인을 통해 사고대응 능력 확인 및 운영기술 능력을 평가하였다.

결론적으로 한울 3,4호기 스트레스테스트는 원안위에서 제시한 수행지침에 따라 구조물·계통·기기의 건전성과 대응능력을 평가하고 안전성이 확보될 수 있도록 한계상황에서의 대처방안을 제시하였다. 또한 대응능력 한계 도달시간 등 정량적 결과 도출과 함께, 다양한 설비 활용에 따른 인적 오류·의사결정 오류 최소화 방안도 함께 평가하였다.

제2절 후쿠시마 원전사고 이후 안전성 강화 노력

한수원은 후쿠시마 원전사고 이후 지속적인 원전 안전성을 강화를 위해 노력하고 있다.

후쿠시마 원전사고 후 수행된 국내원전 안전점검 결과에 따라 ① 지진에 대한 안전성, ② 해일에 대한 안전성, ③ 침수 대비 대응능력, ④ 중대사고 대응능력, ⑤ 비상대응 및 비상진료체계, ⑥ 고리 1호기 등 장기 가동원전 등 6개 분야에 대해 총 56건의 후쿠시마 후속조치를 이행하고 있다. 그 결과, 극한자연재해에 대한 원전 대응능력을 확보하기 위한 충분한 기반을 갖추고 있다고 판단된다.

또한, 후쿠시마 원전사고 이후 해외 각국의 안전성 강화대책을 국내에 반영하여 ① 대형재해를 발굴하고 대비할 수 있는 안전설비보강, ② 중대사고시 사고대응 및 수습관리를 지원할 수 있는 비상대응조직 운영, ③ 설계기준 초과사고 발생 시 사고대응요원 보호 및 지휘·통제에 필요한 비상대응거점 확보 등을 추진하고 있다.

그 뿐만 아니라, 월성 1호기 및 고리 1호기 스트레스테스트 평가결과 도출된 안전 개선사항을 가동원전에 선제적으로 확대·적용하여 원전 안전성을 지속적으로 강화하고 있다. 대표적으로 원전의 모든 설비가 사용 불가능한 최악의 상황에서도 이동형 비상대응설비를 활용하여 원전을 안전하게 유지시킬 수 있도록, 별도의 통합보관고 신축을 통해 ‘호기 별 이동형 비상대응설비’를 안전하게 보관할 수 있도록 추진할 예정이다.

한수원은 가동원전 스트레스테스트를 통해 안전성 강화 노력의 유효성을 확인하고, 추가적으로 필요한 안전개선사항을 자발적이고 선도적으로 도출, 개선하여 지속적으로 원전 안전성을 강화할 계획이다.

제3절 발전소 일반현황

한울 3,4호기 발전소의 설계 및 건설, 시운전은 한수원(주)의 주도하에 수행되었으며 설계 및 구매, 시공관리 기술지원 용역은 한국전력기술(주) 및 미국의 썬앤런디(S&L)사가 수행하였다. 핵증기공급계통은 두산중공업(Doosan Heavy Industries & Construction Co.)과 한국원자력연구원(KAERI) 그리고 에이비비컴버스천 엔지니어링주식회사(ABB-Combustion, Engineering, Inc.)가 공급한 것으로서 2개의 냉각재 유로를 갖춘 가압경수로형(PWR)이며 프리스트레스드(Pre-Stressed) 콘크리트에 강철이 라이닝된 격납건물 내부에 수용되어 있다.

핵증기공급계통은 정격 열출력인 2,825 MWth으로 설계되었으며 터빈발전기는 핵증기공급계통열출력 2,825 MWth와 터빈발전기 정격출력 1,050 MWe으로 정격 운전된다. 터빈발전기는 두산중공업과 제네럴일렉트릭사(General Electric Company)가 공급하였다[1-2]. 한울 3,4호기의 주요 연혁은 아래와 같다.

- 3,4호기 건설허가(1993)
- 3호기 운영허가(1997)
- 4호기 운영허가(1998)
- 3호기 최초 계통병입(1998. 1)
- 4호기 최초 계통병입(1998.12)
- 3호기 상업운전(1998. 8)
- 4호기 상업운전(1999.12)
- 발전소 제어계통 캐비닛 공급전원 이중화(2001)
- 제어봉연산기 소형전산기용 전원공급기 개선(2004)
- EDG 조속기 설비 교체(2004)
- 지진원자로자동정지시스템(ASTS) 설치(2013)

- 피동축매형수소재결합기 설치(2013)
- 주제어실 내진등급 지진경광등 설치(2014)
- 소방차와 연계한 대체수원 확보(2015)
- 증기발생기 교체(2015)
- 원전 안전정지유지계통 내진성능 보강공사(2015)

제4절 부지특성

한울 3,4호기는 한반도 동쪽인 경상북도 동북단의 강원도계 인접지역 해변에 위치하며 행정구역상 경상북도 울진군 북면 부구리에 소재하고 있다. 발전소 부지의 경위도 중심좌표는 이다. 부지로부터 반경 16 km 내에는 태백산맥의 지맥이 중첩되어 있고 동쪽 동해 해안선을 제외하고는 경사가 급박하며 부지로부터 반경 10 km 이내에는 동일 부지에 위치한 한울 1,2,5,6호기 및 부지 남쪽에 건설중인 신한울 1,2호기 원전 이외에 특기할 만한 인공구조물이 존재하지 않는다.

남서쪽의 구릉과 동쪽의 해안 및 북쪽의 하천(부구천)에 의해 둘러싸여 있는 부지 지역은 해발고도 200 m 이하의 구릉성 산악지대로 동쪽으로 경사를 보이고 있다. 부지주변의 주요한 산은 서쪽 8.0 km 지점에 위치한 장재산(표고 515.6 m), 서남서쪽 7.3 km 지점에 위치한 쇠치봉(표고 328.9 m) 등이다. 그리고 이들 산지를 수원으로 하는 하천들이 서쪽으로부터 동해로 유입하고 있으며 일반적으로 평야가 적고 동부지대에 약간의 평지가 형성되어 있을 뿐 대부분 산지로 형성되어 있다.

부지주변에는 큰 하천은 없고 몇몇 소하천이 북서계곡으로부터 시작하여 남동방향으로 평행선을 이루며 동해로 흘러간다. 이들 하천은 부지와 인접하여 흐르는 부구천(길이 15.5 km), 부지로부터 북북서쪽으로 3.8 km 거리에 위치한 나곡천(길이 8.0km) 등이 있다. 그림 1-1에는 한울 3,4호기 부지주변의 지형을 나타내었다.

한울 3,4호기의 제한구역경계거리는 700 m이며 제한구역경계 거리 내에서의 활동을 통제하기 위하여 물리적 및 행정적인 통제조치가 수행되고 있고, 발전소 운영과 무관한 활동 또는 사전에 통보되어 승인 받지 못한 활동은 금지된다. 부지 부근의 주요 교통로는 7번국도, 36번국도 및 동해중부선 철도(건설 중) 이다.

이러한 부지특성을 반영하여 지진, 홍수, 기타 자연재해에 대한 설계기준 자연재해의 적절성 및 설계기준초과 자연재해의 규모는 제2장 “설계기준 초과 극한자연재해의 특성” 보고서에서 평가하였다.

제5절 설계특성

한울 3,4호기는 미국 원자력규제위원회(NRC)의 일반설계기준(GDC)에 따라 설계, 제작 및 건설되었다. 원자력 안전설계 기본개념인 심층방어(Defence In Depth)에 따라 충분한 안전 여유도를 가지고 설계·건설하고 다중의 안전설비가 마련되어 있다. 한울 3,4호기 최종안전성분석보고서 제3장에서는 다음의 11개 항목에 대한 계통·기기·구조물의 설계특성을 기술하고 있다.

- 미국 원자력규제위원회 일반설계기준과의 일치성
- 계통·기기·구조물의 분류
- 풍하중 및 회오리바람하중
- 수위설계
- 비산물 방호
- 가상배관파단에 따른 동적영향 방호
- 내진설계
- 내진범주 I 구조물의 설계
- 기계계통 및 기기
- 내진범주 I 급 계측기 및 전기기기의 내진검증
- 기계 및 전기기기의 내환경설계

한울 3,4호기 설계에 반영한 주요 설계기준은 다음과 같다.

- 어떠한 상태의 부지조건 하에서도 가상 설계기준사고(DBA)시 안전정지 상태를 유지하도록 설계되었음
- 어떠한 경우에도 외부로의 방사성물질 방출이 원안위 및 미국 원자력규제위원회(NRC)의 규정에 의해 정해진 제한치를 초과하지 않음
- 한울 3,4호기는 1989년 12월31일까지 발행된 한국 및 미국의 적용 가능한 법규, 규제지침, 규격 및 표준에 따라 설계, 제작 및 건설되었음. 적용 가능한 규격 및 표준에는 미국기계학회(ASME), 미국원자력학회(ANS), 미국재료시험협회(ASTM), 미국국립표준협회(ANSI), 미국전기전자기술자협회(IEEE) 및 미국용접학회(AWS) 등이 포함됨
- 한울 3,4호기는 원전의 국산화를 위한 국가 목적을 달성하기 위하여 한국의 규정, 규격, 표준 및 산업관행이 발전소 안전성 및 신뢰도에 위배되지 않는 한 가능한 최대도로 반영됨
- 기기 및 구조물들은 방사성물질이 위험 수준 이상으로 방출되지 않도록 적절한 안전여유도를 갖도록 설계되었음

제6절 주요 설비 및 계통

6.1 발전소 배치

한울 3,4호기 발전소 건물은 격납건물, 1차 보조건물, 2차 보조건물, 출입통제건물, 터빈건물 등으로 구성되어 있으며 3,4호기 공용인 방사성폐기물건물이 별도로 배치되었다. 각 호기는 기존 한울 1,2호기의 가동 및 한울 5,6호기 부지와의 간섭을 피하여 배치되었으며 발전소 정상가동시 단일 통제 장소를 통하여 사람의 출입을 통제할 수 있도록 배치되었다. 한울 3,4호기 부지 배치도는 그림 1-2와 같다.

6.2 핵증기공급계통

핵증기공급계통의 열출력은 2,825 MWth이며 2개의 독립적인 1차냉각유로로 구성되어있으며 각 유로는 2개의 원자로냉각재펌프와 증기발생기, 원자로냉각재 출구관 1개와 원자로냉각재입구관 2개로 구성되어 있다. 가압된 물은 원자로냉각재펌프에 의해서 원자로노심을 관통하여 증기발생기의 수직 U자형 전열관 축을 통하여 원자로냉각재펌프로 되돌아가며 증기발생기에서 생산된 포화증기는 터빈으로 공급된다.

6.2.1 원자로노심

원자로노심은 177개의 핵연료 집합체로 구성되며 핵증기공급계통 전체 열출력은 노심열출력 2,815 MWth와 원자로냉각재펌프열출력 10 MWth을 포함하여 2,825 MWth이다. 제어봉집합체는 니켈-크롬-철 합금 피복제의 붕소탄화물 흡수봉과 흡수강도가 약한 흡수봉으로 구성되어 있으며 핵연료집합체에 있는 안내관에 의해 삽입 및 인출이 유도된다.

6.2.2 원자로내부구조물

원자로내부구조물은 노심지지동체, 하부지지구조물 및 노내계측기기 노즐집합체, 노심보호벽, 그리고 상부안내구조물로 구성된다. 설계기준은 모든 정상운전, 비정상, 비상 및 사고 상태에서 노심을 수직으로 지지하며, 수평방향의 움직임을 제한하는 것이다.

6.2.3 원자로냉각재계통

원자로냉각재계통은 원자로압력용기에 대칭으로 연결된 2개의 폐쇄루프로 구성된다. 각 루프는 고온관 1개, 증기발생기 1대, 저온관 2개 및 원자로냉각재펌프 2대로 구성된다. 가압기가 두 번째 루프의 고온관에 연결되어 있고 안전주입 배관들

이 4개의 저온관 및 2개의 고온관 각각에 연결된다.

원자로에서 생성된 열은 1차냉각재에 의해 2대의 증기발생기로 전달되어 터빈발전기를 구동하는 증기를 생산한다. 증기발생기의 전열관(Tube)측으로는 원자로냉각재가 흐르고 셸(Shell) 측으로는 2차냉각재가 흐르는 일체형 이코노마이저(Economizer)가 장착된 수직 U-전열관을 갖는 열교환기이다.

6.3 공학적안전설비 및 비상계통

공학적안전설비는 원자로냉각재상실사고(LOCA) 등과 같은 예상치 않은 방사성 핵분열물질이 원자로계통으로부터 방출되는 가상사고시 10CFR100에서 요구하는 방사선 준위 이하로 유지시킬 수 있도록 사고를 국소화, 통제, 완화 또는 종결시키는 역할을 한다.

6.3.1 격납건물계통

6.3.1.1 격납건물살수계통

격납건물살수계통은 설계기준사고 발생시 격납건물 대기로 살수용액을 공급하여 핵분열생성물, 특히 요오드원소들을 제거함으로써 발전소 외부로의 방사성물질 누출을 최소화시키고 동시에 안전주입모드와 재순환모드동안 격납건물 대기의 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다.

격납건물살수계통은 100% 용량을 가진 2개의 계열로 이루어지며 각 계열은 각 1대씩의 펌프와 열교환기 및 살수모관과 살수노즐로 구성된다. 격납건물살수펌프의 취수원은 초기 안전주입모드에서는 핵연료재장전수탱크, 재순환모드에서는 격납건물재순환 집수조이다.

6.3.1.2 격납건물

격납건물은 원통형 벽체와 반구형 돔 및 원형의 전면 기초로 구성되며, 원통형 벽체와 반구형 돔은 수평방향(원환방향) 및 역 U자 형태의 수직방향 텐돈으로 구성되는 포스트텐션 방식에 의해 양 방향으로 프리스트레싱 되어 있다. 격납건물 외벽의 내측면은 기밀성 유지를 위해 라이너 플레이트로 피복되었다. 기초의 상부에는 콘크리트 바닥 보호 슬래브(fill slab)가 기초 상부의 라이너 플레이트 위에 설치되었으며 외벽 콘크리트는 정상운전 및 사고시 생물학적 차폐 역할을 한다.

격납건물은 냉각재상실사고시에도 주변 환경으로의 방사성물질의 누출량이 사고 후 24시간 이내에는 격납건물 총 자유체적(total containment free volume)의

0.2%, 24시간 이후에는 0.1%를 각각 초과하지 않도록 설계되었다. 내부구조물은 기기비산물 방호역할을 하며 운전종사자에 대한 생물학적 차폐 역할을 한다. 격납 건물은 시공하중 조건, 시험하중 조건, 정상하중 조건, 냉각재상실사고시의 비정상 하중 조건 및 기타 환경조건을 포함하는 모든 가능한 하중조합의 경우에 대하여 안전하도록 설계되었다. 격납건물의 설계압력은 57 psig(4.0 kg/cm²)로서 배관 파단사고의 결과로 발생할 수 있는 침투압력보다 크다.

6.3.1.3 격납건물송풍팬냉각기계통

정상운전시 격납건물 대기를 냉각하기 위해 격납건물송풍팬냉각기계통이 설치되었으며 각 50% 용량의 4대 격납건물송풍냉각기(fan cooler)가 설치되어 있다.

6.3.2 안전주입계통

고압 및 저압 안전주입펌프와 안전주입탱크를 포함한 안전주입계통은 냉각재상실사고시 원자로냉각재계통에 봉산수를 주입하여 노심손상과 핵분열생성물의 방출을 제한하도록 노심을 냉각하고 충분한 정지여유도를 확보하게 한다. 또한 재순환 모드에서도 격납건물 재순환집수조로부터 원자로냉각재계통에 봉산수를 공급하여 사고 후에도 장기간 동안 연속적으로 노심을 냉각시킨다.

6.3.3 보조전력계통

각 호기별로 안전관련 전기부하와 일부 비안전 전기부하를 공급하기 위한 소내 1E급 전원(소외전원상실시)으로서 2대의 비상디젤발전기가 각각 설치되어 있다. 각 1E급 비상디젤발전기는 냉각재상실사고와 동시에 수반되는 소외전원상실시 안전정지에 필요한 전기부하에 전력을 공급할 수 있다.

소외전원상실과 동시에 비상디젤발전기가 운전불능인 소내정전사고(SBO)에 대비한 대체교류전원(AAC)을 확보하기 위해 한울 3~6호기 공용으로 대체교류전원 디젤발전기를 1대 설치하여 운영중에 있다. 대체교류전원 디젤발전기는 4개호기 중 어느 한 호기에라도 발전소 안전정지에 필요한 전기부하에 전력을 공급할 수 있다.

6.3.4 화재방호계통

화재방호는 화재예방, 감지 및 소화의 과정으로 이루어진다. 발전소 건설시 화재발생의 잠재성을 감소시키고 화재시 화염강도를 제한하기 위하여 불연성 및 내열재료가 사용되었다. 다중 안전계통의 기기들 사이는 충분히 격리되어 발전소가 안전하게 정지될 수 있도록 최소한 하나의 계통 건전성이 유지되도록 하였다. 기기

들 사이를 충분하게 격리할 수 없는 경우에는 계통의 건전성을 유지하기 위하여 2개의 안전계통 사이에 내화재가 사용되었다.

화재발생과 위치를 감지하기 위하여 열 감지기 및 연기 감지기가 발전소 전체에 설치되었고 감시 및 관리경보신호는 주제어실 내에 위치한 제어패널에 기록된다. 일부 화재방호계통은 내진범주 I 기준을 만족하도록 설계되었다. 이 부분의 화재방호계통은 안전정지에 필요한 기기가 위치한 발전소 구역 내에 2개의 소화전 작동에 필요한 수동 소화능력을 제공하며 정상상태시 비내진범주 계통에서 소화수를 공급받는다. 정상상태의 소화수를 이용할 수 없는 경우에 2대의 100% 내진범주 I 전동기구동 소방펌프가 내진범주 I 계통으로 소화수를 공급하기 위해 작동된다.

6.3.5 주제어실 공기조화계통

주제어실 공기조화계통은 비상모드로 운전하여 가상의 냉각재상실사고 또는 주제어실 외기 흡입구에서 고준위 방사능이 감지되는 가상사고기간 동안 주제어실 지역의 거주성을 유지하도록 설계되었다.

주제어실 공기조화계통은 2개의 다중 계열로 구성되어 있으며 급기용 공기조화기, 순환송풍기, 비상보충공기정화기 그리고 관련 덕트와 덕트 부속물들을 포함한 부속기기들로 이루어져있다. 주제어실 공기조화계통 설계는 서로 떨어진 곳에 위치한 2개의 외기 흡입구를 포함하며 각각은 보충공기정화기와 연결되어 있으며 교차 연결되어 있어 2개의 외기 흡입구 중 어느 것이든 사용이 가능하다. 안전주입 작동신호(ESFAS-SIAS) 또는 주제어실 비상환기작동신호(ESFAS-CREVAS)를 받는 즉시 주제어실 공기조화계통은 자동적으로 비상운전 모드로 바뀌며 운전중 사자가 공기의 청정도에 따라 외기 흡입구를 수동으로 선택할 수도 있다. 또한 정상운전 모드에서 비상운전 모드로의 전환은 주제어실에서 수동으로 이루어질 수도 있다.

6.3.6 격납건물격리계통

격납건물격리계통은 격납건물 외부로 방사성물질의 방출을 초래하는 가상사고시 격납건물 대기와 외부환경을 격리하기 위하여 설치되었다. 사고기간 동안에 작동이 요구되지 않는 모든 격납건물 관통배관이 격리밸브 및 기타 방벽에 의해 차단됨으로써 격납건물 대기가 외부환경과 격리된다.

격납건물격리계통은 방사능 방출을 방지하는데 중요한 누설 방지 방벽을 제공하며 10CFR100의 제한 범위 내로 방사능 방출을 제한한다.

6.3.7 가연성기체제어계통

가상 냉각재상실사고 후 격납건물 대기 속의 수소농도를 4 v/o 미만으로 제어할 수 있도록 수소재결합기가 설치되어 있다. 이 계통은 100% 용량의 2개 계열로 이루어지며 각 계열은 1대의 수소재결합기를 연결할 수 있도록 흡입관 및 배출관으로 구성된다.

6.3.8 보조급수계통

급수계통이 운전되지 않고 원자로냉각재 온도가 177℃(350°F) 이상이면 보조급수계통이 증기발생기의 2차측에 급수를 공급한다. 이 계통은 2대의 전동기구동(1E급)펌프와 2대의 터빈구동펌프로 구성되어 있다. 발전소 비상냉각시 보조급수계통은 원자로냉각재계통으로부터 붕괴열과 잔열을 제거하기 위해 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 설계되었다.

전동기 및 터빈구동 보조급수펌프는 보조급수작동신호나 다중보호계통으로부터의 신호에 의해 관련 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 자동 기동된다.

6.4 계측제어

발전소의 안전한 운전을 위해 자동으로 작동되는 보호계통, 제어계통 그리고 연동장치가 설치되었다. 상기 계통 및 장치들에 대한 정상적인 보조제어 형태로서 수동운전을 할 수 있도록 계측 및 제어장비가 설치되었다. 보호계통 및 관련 계측장비는 제어계통, 기기, 또는 계측채널의 고장이나 사용중 제거되더라도 보호계통의 기능이 방해되지 않도록 제어계통 및 관련된 계측장비로부터 분리되어 있다.

6.4.1 보호계통

6.4.1.1 원자로보호계통

제어 가능한 원자로 변수들은 원자로의 고유특성, 원자로제어계통, 용해성 붕소농도 및 발전소 운전절차서에 의해 허용운전제한치 내로 정상적으로 유지된다. 원자로보호계통의 4개의 독립 채널들은 선정된 발전소 변수들을 감시하며 하나의 운전 변수에 대해 2개 이상의 신호가 설정치에 도달할 때에는 언제든지 보호동작을 개시하도록 설계되어 있다. 만약 이러한 경우가 발생하면, 제어봉구동장치로 공급되는 전원이 차단되고 제어봉집합체들이 노심속으로 낙하되어 원자로를 정지시킨다. 보호계통은 제어봉집합체 인출금지 신호를 제외하고 수동 및 자동제어계통들로부터 독립, 분리되어 있다.

6.4.1.2 다중보호계통

다중보호계통은 원자로보호계통의 전반적인 신뢰성을 증대시키기 위해 간단하지만 타 계통과는 분리된 장치를 제공한다. 다중보호계통은 원자로정지와 보조급수의 기동을 위해 원자로보호계통으로부터 분리되어 있고 다중화된 논리를 이용함으로써 원자로 보호기능을 증대시킨다. 다중보호계통은 가압기 압력이 설정된 값을 초과할 때 원자로정지신호를 발생시키거나 증기발생기 수위가 설정된 값 이하로 떨어질 때 증기발생기로 보조급수를 공급한다.

6.4.2 공학적안전설비작동계통

공학적안전설비작동계통은 공학적안전설비계통들을 자동적으로 작동시키기 위해 원자로보호계통과 유사한 방법으로 운전되며 제어계통과는 완전히 독립적이다. 동계통 또는 운전원 조치 신호를 받은 후 보조설비 보호동작을 수행하는 각 공정계통 장비 및 기기들을 동작시키기 위해 적절한 작동신호를 발생한다.

공학적안전설비작동계통의 계측제어 기기는 계통의 보호기능을 수행하기 위해 요구되는 능력을 유지하는 동안에도 시험할 수 있도록 설계되었다. 계통 내의 단일고장이 발생하더라도 공학적안전설비 고유의 보호기능 수행능력이 유지되도록 다중 계측제어설비 간에 독립성이 부여되어 있다.

6.4.3 안전정지에 필요한 계통

안전정지에 필요한 계통은 원자로를 정지시키고 안전정지 상태로 유지하는데 필요한 계통이다. 본 계통의 계측제어 기기는 소외전원의 가용여부와 무관하게 안전정지가 가능하도록 하였다. 정상적인 정비나 시험시에도 안전정지를 달성하는 능력이 손상되지 않도록 설계되었으며 계통 내의 단일고장이 발생하더라도 고유의 기능 수행능력이 유지되도록 다중의 계측제어설비 간에 독립성이 부여되어 있다.

6.4.4 안전관련 지시계측설비

안전관련 지시계측설비는 운전원이 필요한 안전기능을 수행하기 위한 정보를 제공한다. 이들 설비는 원자로냉각재계통, 격납건물 및 원자로 내부 상태, 원자로정지계통, 공학적안전설비계통, 안전정지에 필요한 계통 및 사고후 감시계통들의 기능을 감시하며 정상운전, 예상과도상태, 사고 및 사고후 상태 등 예상 가능한 모든 운전상태에서 가능하도록 설계되어 있다.

6.4.5 기타 계측제어계통

6.4.5.1 원자로제어계통

원자로제어계통은 원자로의 기동과 정지를 위해 사용되며 터빈부하 요구에 따라 원자로 출력조절을 위해 사용된다.

원자로는 제어봉집합체의 움직임 및 원자로냉각재 내에 용해된 붕산과의 조합으로 제어되고 붕산은 냉각재온도의 변화, 제논 농도 그리고 핵연료 연소에 의한 반응도 변화를 위해 사용된다. 원자로를 정지시키거나 출력을 변경시키기 위한 반응도 변화에 사용되는 제어봉집합체는 원자로용기 헤드에 설치된 제어봉구동장치에 의해 구동되며 제어봉구동장치는 제어봉집합체가 중력에 의해 원자로 노심으로 급속히 삽입될 수 있도록 설계되어 있다.

증기우회제어계통은 원자로에서 만들어지는 출력과 터빈에서 사용되는 출력 사이의 불일치가 큰 경우 2차측 증기를 배출하기 위해서 사용되며 원자로가 정지하지 않고 출력을 유지하도록 한다.

6.4.5.2 핵계측기기

핵계측기기는 노외 및 노내 중성자속 검출기와 이와 관련된 신호처리장비로 구성되어 있다. 8개 채널로 구성된 노외 핵계측기기가 원자로출력을 감시한다. 2개 채널은 원자로 기동시 사용되고, 2개 채널은 원자로 출력 제어용이며, 4개 채널은 원자로 보호용으로 사용된다. 노내 핵계측기기는 노심 내 중성자속 분포에 대한 정보를 제공하는 자기전원공급형(self-powered) 검출기로서 노심 내에 분산 배치되어 있다.

6.4.5.3 발전소감시계통

발전소감시계통은 핵증기공급계통 및 보조설비에 대한 일반적인 감시를 수행한다. 발전소 운전조건에 대한 연속적 기록(logging), 추이표시(trending) 및 경보(alarms) 등이 발전소감시계통의 주 기능을 이룬다. 발전소감시계통은 어떤 안전기능도 직접 수행하지 않으며 노심운전제한치감시계통(COLSS)을 그 기능의 일부로 포함한다.

6.5 전력계통

6.5.1 송전 및 발전계통

주발전기는 1800 rpm, 3상, 60 Hz, 동기 발전기이며 터빈축에 연결되고 정지형 여자방식이다. 발전기에서 생산되는 전력은 주변압기에서 22 kV를 345 kV로 승압되어 가스절연 모선과 송전선을 통해 2개 호기가 공유하는 345 kV 옥외변전소에 송전된다. 옥외변전소는 가스절연 형식이고, 345 kV 송전선 3회선과 한울 1,2호기

옥외변전소와 연결되는 345 kV 2회선, 한울 5,6호기 옥외변전소와 연결되는 345 kV 1회선으로 소외 송전망과 연결된다.

6.5.2 배전계통

옥외변전소로부터 전기사용 부하를 위해서 각 호기의 소내전력계통에 공급되는 전력은 2개의 독립적인 회로를 통해서 공급된다. 배전계통은 1E급 및 비 1E급 교류와 직류계통으로 구성되었다. 각 호기의 1E급 교류계통은 2개의 독립적이고 다중성인 부하 계열로 구성되며 계측 및 제어 전력 공급용의 독립적인 4개의 120 V 필수교류전력원이 있다. 부하계열은 4.16 kV 고압 폐쇄배전반, 480 V 저압차단기반 및 전동기 제어반 등으로 구성되었다.

필수교류 계장 및 제어 전력공급계통은 인버터, 전압 조정 변압기 및 분전반 등으로 구성되었다. 비 1E급 교류계통은 13.8 kV 고압폐쇄배전반, 4.16 kV 고압폐쇄배전반, 480 V 저압차단기반, 전동기제어반 및 비 1E급 120 V 필수교류전력계통 등으로 구성되었다. 각 호기의 1E급 직류계통은 4개의 독립적인 1E급 125 V 축전지와 충전기에서 전력을 공급받으며 비 1E급 250 V와 125 V 축전지와 충전기는 비 1E급 직류계통 부하에 전력을 공급한다.

6.6 동력변환계통

터빈발전기는 1,800 rpm, 텐덤, 복수형 4개 케이싱(1개 고압 케이싱, 3개 저압 케이싱), 109 cm(43 inch) 최종단 회전익 그리고 디지털제어감시계통을 포함하는 재열형 설비이다. 터빈발전기의 보증출력은 1.5inch HgA(38 mm HgA) 배압에서 1,050 MWe이다.

증기는 2대의 증기발생기에서 고압터빈으로 공급된다. 고압터빈을 나온 증기는 2대의 습분분리재열기를 통하여 3대의 저압터빈으로 공급되는데 습분분리재열기에서는 습분이 제거되고 증기는 2단계에 걸쳐 재열된다. 1단계 재열을 위하여 고압 추기증기가 공급되며 2단계 재열을 위하여 주증기가 공급된다. 저압터빈은 3대의 복수기로 증기를 배기하며 복수기에서는 증기가 응축된다.

6.7 핵연료 취급 및 저장계통

원자로의 재장전은 사용후연료를 원자로로부터 사용후연료저장조나 발전소 외부로 이송하기 위해 사용후연료캐스크에 담을 때까지 이를 수중 취급하는 기기에 의해 수행된다. 사용후연료의 수중이송은 방사선 차폐효과와 붕괴열의 제거를 위한 신뢰성 있는 냉각효과를 제공한다.

핵연료 취급 작업은 재장전시 냉각수가 채워지는 격납건물 재장전수조, 사용후연료저장조 및 이와 연결된 핵연료 이송수로의 두 구역에서 수행되며 격납건물재장전수조와 핵연료건물 이송수로는 핵연료이송관으로 연결된다. 핵연료취급계통은 핵연료집합체를 안전하게 취급할 수 있게 하고 요구되는 조립 및 분해작업과 원자로용기 상부구조물 및 내부구조물의 보관 작업을 할 수 있게 한다.

사용후연료는 격납건물로부터 핵연료이송수로를 지나 핵연료건물의 사용후연료저장조 내에 설치된 저장대에 보관된다. 사용후연료저장조는 스테인리스강 라이너플레이트가 장착된 콘크리트 구조물이며, 기존 678다발에서 1,498다발의 조밀저장대로 2008년 교체하였다. 사용후연료집합체는 붕소가 함유되지 않은 냉각수에서도 미임계상태를 유지하도록 설계된 수직형 저장대에 보관된다.

신연료는 핵연료건물의 신연료저장고 내에 설치된 수직형 저장고에 저장되며 저장용량은 최소한 1회분의 교체량을 수용하도록 설계되어 있다.

6.8 냉각수 및 기타 보조계통

6.8.1 정지냉각계통

정지냉각계통은 원자로냉각재 온도를 177℃(350°F)에서 재장전온도인 약 51.7℃(125°F)까지 냉각시키고 재장전기간 동안 원자로냉각재 온도를 적절하게 유지시키기 위하여 사용된다. 이 계통은 2대의 정지냉각열교환기를 통하여 원자로냉각재를 순환시켜 원자로냉각재계통으로 되돌려 보내기 위해 저압안전주입펌프를 사용한다. 기기냉각수계통은 정지냉각열교환기에 냉각수를 공급한다.

6.8.2 화학 및 체적제어계통

화학 및 체적제어계통은 원자로냉각재의 순도, 체적 및 붕소농도를 조절한다. 냉각재 일부를 우회시켜 연속적으로 정화함으로써 원자로냉각재계통의 냉각재 순도를 조절한다. 원자로냉각재계통에서 유출된 냉각재는 재생열교환기에서 냉각된 다음 유출수 열교환기를 지나 부식 및 핵분열생성물을 제거하기 위해 필터와 탈염기를 통과한다. 그 후 냉각재는 체적제어탱크로 분사되고 충전펌프에 의해 원자로냉각재계통으로 다시 주입되기 전 예열시키는 재생열교환기로 보내진다.

화학 및 체적제어계통은 가압기의 설정된 수위를 유지하기 위하여 원자로냉각재의 양을 자동으로 조절한다. 수위프로그램은 원자로냉각재 온도변화에 따른 비체적의 변화와 원자로냉각재펌프 조절 밀봉누설을 보상한다.

화학 및 체적제어계통은 정화된 유출수를 붕산회수계통으로 방출하고 농축붕산수

나 탈염수를 충전펌프로 주입하는 “주입 및 방출” 방법에 의해 원자로냉각재 붕소농도를 조절한다. 방출되는 냉각재는 이온교환과 탈기과정을 거쳐 봉산수농축기로 보내진다. 봉산수농축기의 농축수는 봉산수로 재사용하기 위해 재장전수탱크로 보내지고 증류액은 먼저 이온교환기를 통과한 후 탈염수로 재사용하기 위해 원자로보충수탱크로 보내진다. 또한 재장전수탱크는 안전주입계통과 격납건물살수계통의 봉산수원으로 사용된다.

6.8.3 냉각수계통

발전소에서 사용되는 용수계통은 기기냉각해수계통, 기기냉각수계통, 탈염수보충계통, 생활용수 및 오수정화 설비계통, 복수저장 및 이송계통, 재장전수탱크, 2차측 기기냉각해수 및 기기냉각수계통, 순환수계통, 냉수계통, 최종 열제거원 그리고 기타 용수계통으로 구성된다. 이중 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통, 재장전수탱크, 필수냉수계통 복수저장 및 이송계통들은 설계기준사고시 발전소 안전정지 및 사고완화를 위하여 필요한 계통들이다.

기기냉각수계통은 원자로의 여러 보조계통에 냉각수를 공급하여 열을 제거한다. 기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기에 최종 열제거원인 동해로부터 냉각수인 해수를 공급한다. 기기냉각해수계통은 2개의 독립된 계열로 구성되어 있으며 각 계열은 펌프 및 관련 배관으로 구성되어 있다. 한 계열에 의해 가상 설계기준사고에서 발전소 안전정지에 필요한 충분한 냉각수가 공급된다.

재장전수탱크는 원자로냉각재상실사고시 격납건물살수계통 및 안전주입계통에 봉산수를 공급하며 화학 및 체적제어계통으로도 공급한다.

복수저장 및 이송계통은 증기발생기 냉각을 위해 보조급수계통에 급수를 공급하며 최종열제거원은 사고에 의한 원자로정지 후 잔열제거를 위해 필요하며 사고시 동해로부터 충분한 냉각수를 공급한다.

6.8.4 기타 보조계통

공정보조계통에는 압축공기계통, 시료채취계통, 기기 및 바닥배수계통들이 있다. 압축공기계통은 여과 및 건조되고 기름이 섞이지 않은 공기를 공기식 계기 및 제어기기에 연속적으로 공급한다. 이 계통은 또한 발전소 전반에 걸쳐있는 공기식 공구 및 기타 작업용 공기를 필요로 하는 곳에 작업용 공기를 공급한다.

시료채취계통은 원자로냉각재계통 및 기타 2차계통으로부터 시료를 채취하기 위한 계통이다. 시료채취는 발전소에서 사용되는 다양한 유체의 화학 및 방사화학적 조건을 결정하기 위해 사용된다.

기기 및 바닥배수계통은 각종 기기 및 바닥배수를 건물 집수정으로 모을 수 있도록 설계되어 있고 방사능 물질을 함유할 수 있는 배수는 액체폐기물계통에서 처리되며 액체폐기물계통에서 처리되지 않는 배수는 예기치 않은 방사능의 방출을 차단할 수 있도록 감시설비에 의해 감시된다.

6.8.5 환기계통

환기계통은 발전소 정상운전과 설계기준사고들을 위한 설비이다. 보조건물, 터빈 건물, 핵연료건물, 공학적안전설비, 전기기기실, 디젤발전기실, 방사성폐기물건물, 순환수취수건물, 주 제어실, 출입통제건물, 대체교류디젤발전기 건물 그리고 격납건물에 공기조화계통이 설치되었다.

이러한 환기계통은 기기와 사람들에게 적절한 환경을 제공한다. 최종 배기 전에 청정 구역으로부터 잠재적으로 보다 큰 방사능 오염구역으로의 공기 흐름을 유도하기 위해 건물 내에 환기 구역이 설정되었다.

6.9 방사성폐기물관리계통

방사성폐기물관리계통은 방사능 및 방사성 오염 가능성이 있는 액체, 기체, 고체 폐기물을 안전하게 처리하도록 설계되었으며 방사성물질 방출로 인한 총 소외선량이 합리적으로 달성 가능하도록 낮게 설계되었다.

6.9.1 액체방사성폐기물계통

액체방사성폐기물계통은 방사성액체 및 화학폐기물을 규제기준과 ALARA 기준에 적합하게 처리할 수 있도록 설계되었다. 또한, 폐액을 충분히 처리함으로써 최대한 발전소 용수로 재사용 가능하도록 설계하였다. 액체방사성폐기물을 가장 적절하게 처리하기 위해 용존 및 부유 고체를 기준으로 수집, 분류한다. 저용존고형물을 함유하고 있는 액체방사성폐기물은 여과기 및 이온교환기로 처리하며 고용존고형물을 함유하고 있는 액체방사성폐기물은 여과기 및 증발기로 처리한다.

6.9.2 기체방사성폐기물계통

기체방사성폐기물계통은 원자로냉각재로부터 방출되는 수소를 주로 함유한 고방사성기체를 처리하도록 설계되었다. 방사성기체는 모관에 수집되고, 수분을 제거한 후 방사능 붕괴기간 동안 활성탄 지연대에 흡착된다. 활성탄 지연대에서 지연된 방사성기체는 적절한 여과처리 및 방사능에 대한 감시를 한 후, 발전소 공기조화계통을 거쳐 소외로 방출된다.

6.9.3 고체방사성폐기물계통

고체방사성폐기물계통은 슬러지, 슬러리, 농축폐액 및 기타 고체폐기물들을 운송 및 처분에 적합하게 처리할 수 있도록 설계되어 있다. 이들 처리폐기물에는 폐수지, 탱크바닥 찌꺼기, 화학 및 체적제어계통 농축기와 액체방사성폐기물계통의 증발기로부터 발생된 농축폐액, 폐 여과기, 기타 오염된 잡고체 폐기물 등이 포함된다. 농축폐액은 운송 및 처분 부피를 최소화하기 위해 건조 처리한다. 농축폐액의 건조분말 및 기타 습식폐기물은 처분을 위해 적절한 고형화 물질 및 고화제와 섞어 폐기물 드럼에 넣어 포장하며 기타 저방사성 고체폐기물들은 드럼에 넣어 압축 포장한다.

제7절 참고문헌

- 1-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침, 개정1, 2016.
- 1-2. 한수원(주), 한울 3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR).

제8절 그림

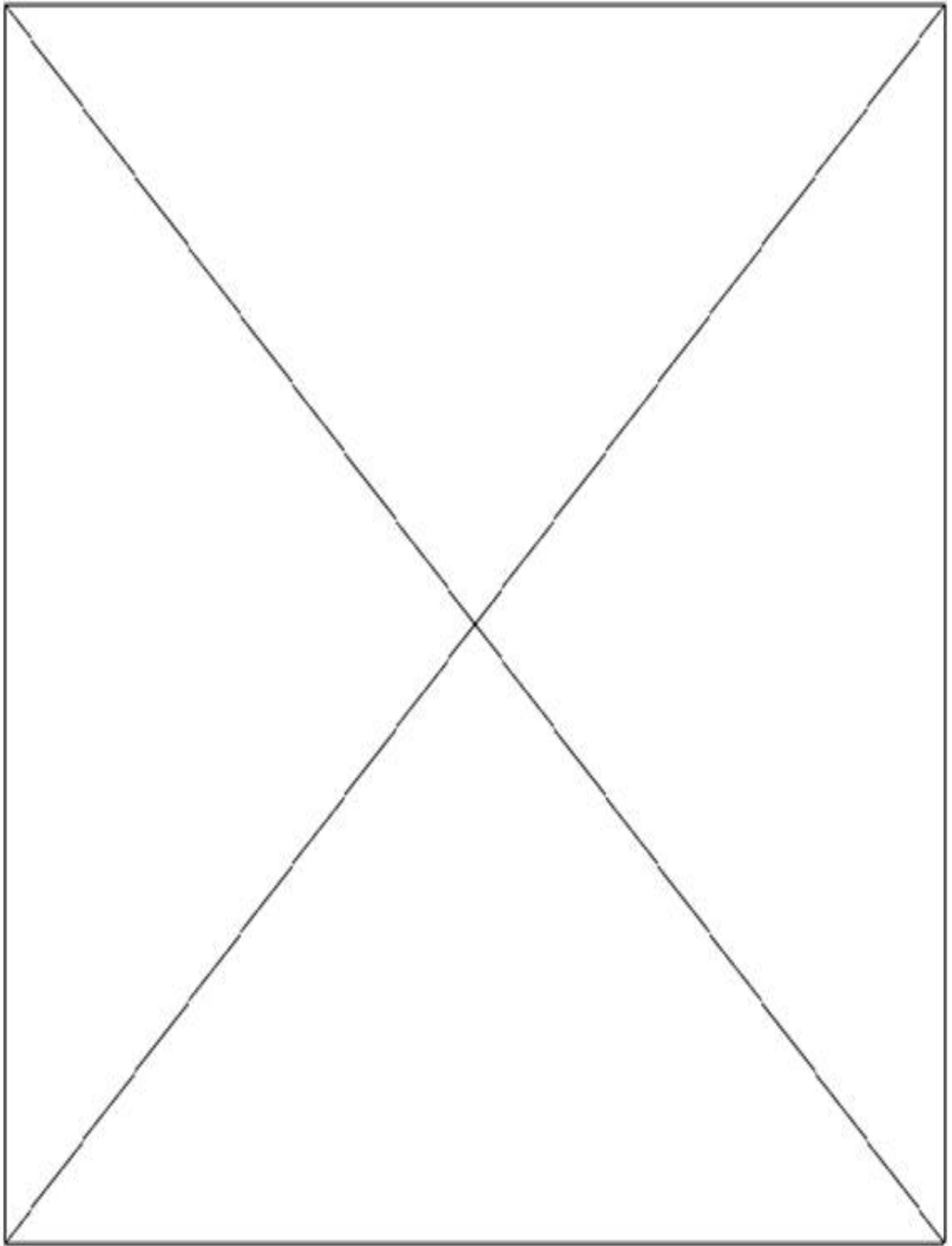


그림 1-1 한울 3,4호기 주변 지형도

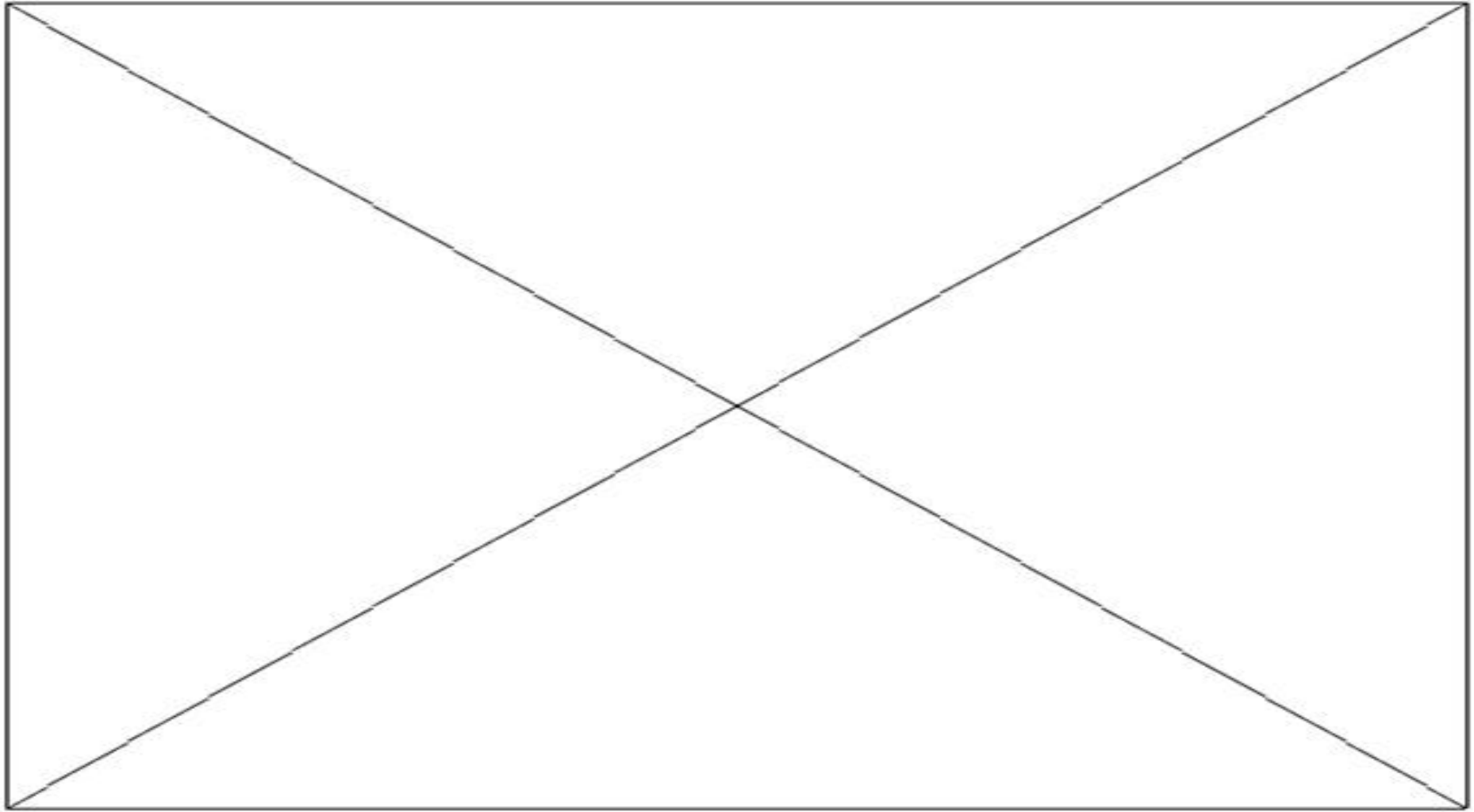


그림 1-2 한울 3,4호기 부지 배치도

제2장 설계기준 초과 극한자연재해의 특성

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가내용	1
2.1 지진	1
2.1.1 설계기준지진의 수준	1
2.1.2 설계기준지진의 타당성	3
2.1.3 지진발생시 지반변형에 의한 안전성 검토	5
2.2 설계기준 홍수 및 기타 자연재해	7
2.2.1 평가대상 자연재해 검토	7
2.2.2 설계기준 홍수	8
2.2.3 홍수를 제외한 설계기준 자연재해	15
2.2.4 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 설 계기준초과 홍수 수준	17
2.2.5 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 홍 수를 제외한 설계기준초과 자연재해	30
제3절 안전 개선사항	34
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	34
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인	35
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	35
제4절 결론	35
제5절 참고문헌	38
제6절 표, 그림	40

표, 그림

표 2-1 지체구조와 관련한 최대지진	40
표 2-2 최대지진에 의한 부지가속도	41
표 2-3 단층의 위치적 특성에 따른 강성계수	42
표 2-4 단층 파라미터(Case1~Case10)	43
표 2-5 계산영역별 격자구성 및 계산조건	44
표 2-6 지진해일에 의한 한울 부지 전면에서의 해수면 상승고	44
표 2-7 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track01)	45
표 2-8 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track02)	46
표 2-9 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track03)	47
표 2-10 1분 평균 최대풍속이 최대일 때의 태풍 파라미터	48
표 2-11 한울 폭풍해일 수치모의를 위한 계산조건	48
표 2-12 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 한울3,4호기 최대 폭풍해일고	48
표 2-13 한울부지의 가능최대강수량 비교	48
표 2-14 울진관측소 지속기간 60분 확률강우량-후우면적 변환	49
표 2-15 한울3,4호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과	50
표 2-16 10,000년 빈도 최대풍속 계산 입·출력자료(단위 : m/s)	51
표 2-17 10,000년 빈도 순간최대풍속 계산 입·출력자료(단위 : m/s)	52
표 2-18 10,000년 빈도 최대풍속 및 최대순간풍속 계산 입·출력자료(포항)	53
표 2-19 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	54
그림 2-1 한울3,4호기 주변 지형도	55
그림 2-2 부구천 유역	56
그림 2-3 타당성 분석을 위한 이상적인 가상 지진 자료 분포도	56
그림 2-4 가상 자료를 사용한 tapered G-R분포와 quadratic 분포의 비교	57
그림 2-5 동해 동연부의 지진 자료 분포도	57
그림 2-6 동해 동연부의 1,000년, 10,000년 빈도 지진규모 결정	58
그림 2-7 동해 동연부 10,000년 빈도 지진규모의 연동형 지진 개념도	58
그림 2-8 동해 동연부 지진해일 초기수면변위(Case1~Case4)	59
그림 2-9 동해 동연부 지진해일 초기수면변위(Case5~Case8)	60
그림 2-10 동해 동연부 지진해일 초기수면변위(Case9~Case10)	61
그림 2-11 광역 계산영역 및 수심 분포	62
그림 2-12 상세역 계산영역 및 수심 분포	63
그림 2-13 최상세역 계산영역 및 한울 원전 주변 수심 분포	64
그림 2-14 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고 분포(Case1~	

Case4)	65
그림 2-15 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고 분포(Case5~Case8)	66
그림 2-16 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고 분포(Case9~Case10)	67
그림 2-17 재현주기(Return period)에 따른 한울3,4호기 주변의 최대풍 풍속	67
그림 2-18 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 이동경로	68
그림 2-19 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 최대풍 중심기압 분포	68
그림 2-20 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 최대풍 반경 분포	69
그림 2-21 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 풍속 분포	70
그림 2-22 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 이동경로	70
그림 2-23 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 중심기압 분포	71
그림 2-24 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 최대풍 반경 분포	71
그림 2-25 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 풍속 분포	72
그림 2-26 폭풍해일 광역 계산영역 및 한울 원전 주변 수심 분포	72
그림 2-27 폭풍해일 최상세역 계산영역 및 한울 원전 주변 수심 분포	73
그림 2-28 폭풍해일로 인한 한울 원전 주변 약최고만조위 상 최대 해수면 상승고 분포	74
그림 2-29 폭풍해일로 인한 한울 원전 주변 약최고만조위 상 유의파고 및 파향	75
그림 2-30 한울3,4호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과(침수심 분포)	76

제1절 개요

설계기준 초과 극한자연재해의 특성에서는 지진, 홍수, 강풍, 저수위, 수온상승 등 원전의 안전에 영향을 줄 수 있는 부지고유의 자연현상에 대하여 설계기준 및 설계기준을 초과하는 극한자연재해의 수준을 평가한다. 또한 여기서 평가된 설계기준 초과 자연재해의 수준은 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성 평가의 기준으로 고려된다.

이를 위해 본 장에서는 스트레스테스트 수행지침[2-1]에 따라 한울3,4호기 설계기준지진의 수준과 타당성을 평가하고, 설계기준 초과 지진과 관련하여 발전소의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준까지 평가하였다. 또한 지진과 수반되는 지표단층작용, 사면붕괴 등의 지반변형 가능성도 함께 검토하였다.

그리고 지진 이외의 홍수(지진해일, 폭풍해일, 강수 등), 강풍, 저수위, 수온상승 등에 대하여 설계기준 자연재해의 수준 및 타당성을 평가하고, 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준까지 설계기준 초과 자연재해의 수준을 평가하였다.

제2절 평가내용

2.1 지진

2.1.1 설계기준지진의 수준

원자력발전소는 지진으로부터의 영향에 견딜 수 있도록 설계된다. 지진 발생에 의한 부지 지반가속도는 해당 부지에 영향을 줄 수 있는 잠재적으로 가장 큰 지진동으로부터 계산되며, 이 값을 포괄할 수 있는 지진동 값을 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake; SSE)으로 결정한다. 안전정지지진이란 안전정지 상태를 유지하여야 하는 구조물·계통·기기의 기능과 관련된다. 추가로 운전기준지진도 결정되는데 이것은 발전소가 운전상태에 있을 때 발전소 안전설비 기능이 유지될 수 있는 지진동으로 정의된다.

한울3,4호기 안전정지지진의 영주기 수평지반가속도는 0.2g, 영주기 수직지반가속도는 0.13g이다. 상기 안전정지지진은 부지 반경 320km의 11개의 지진지체구조구와 읍천단층 및 Z단층(Z21+Z31)으로부터 잠재적인 최대지진을 평가하여 결정하며, 최대지진은 계기지진자료를 고려하여 평가하였다. 각 지진지체구조구의 최대지진은 각 구조구 내에서 부지에 가장 가까운 점까지 이동되며 부지까지 감쇄된

다. 이때, 부지가 포함된 지진지체구조구 내에서는 부지 직하로 이동하여 감쇄시킨다. 지진발생구조의 경우, 최대지진이 지진발생구조 상에서 부지에 가장 가까운 지점에서 발생하는 것으로 가정한다.

각각의 최대지진에 대하여 90년대 이후 국내에서 개발된 8개의 감쇄식을 사용하여 부지에서의 가속도를 산출하였다. 가속도 계산은

8개의 감쇄식을 사용하였다.

부지에서의 최대지반가속도 평가는 계기지진 목록을[2-10] 이용하여 계산하였으며, 역사지진 목록[2-10]에 제시된 지진은 규모와 진앙위치에 대한 불확실성의 이유로 최대지반가속도 평가에 제외하였다. 그러나 이러한 역사지진자료는 확률론적 지진재해도분석의 입력자료 도출에 활용되어 평가에 반영하였다. 계기지진 목록으로부터 각 지진지체구조구 별 최대지진의 지진요소 및 부지와의 최근거리를 표 2-1에 제시하였으며 이로부터 위의 감쇄식을 이용하여 부지에서의 최대지반가속도를 계산하여 표 2-2에 제시하였다[2-10].

표 2-2에 의하면 한울부지가 포함된 영남육괴에서는 규모 5.0의 지리산지진에 의해 부지에서의 최대지반가속도가 구해진다. 지리산지진이 부지에서 발생하였다고 가정하고 규모 5.0을 8개의 감쇄식에 대입하여 최대지반가속도를 구하면 최대값은 0.145g가 얻어진다. 따라서 지진지체구조구와 계기지진목록을 이용하여 도출되는 부지의 최대지반가속도는 0.145g이다. 한편, 부지가 포함된 지진지체구조구 영남육괴는 전기원생대 준탄상지 육괴로 북쪽으로 옥천대와 경계하며 백악기에 중첩된 경상분지가 남동부에 위치한다. 소규모의 구조분지들을 발달시키는 단층대로 경기육괴와 접하는 옥천대는 영남육괴와도 단층 혹은 강한 연성전단대의 경계를 수반한다. 옥천대의 지진지체구조적 대비는 임진강분지의 지체구조 대비와도 관련이 있으며 이에 대해서는 여러 가지 이론들이 있지만, 옥천대가 경기육괴나 영남육괴와는 지진지체구조적으로 독립되어야 한다는 것에는 이견이 없다.

그럼에도 불구하고 지진지체구조구의 경계는 불확실성이 내재되어 있으며 지질학적으로는 경계가 뚜렷하지만 지진활동성과의 연관성 또한 불분명한 경우가 많다. 이러한 불확실성을 고려하고, 보다 보수적인 평가를 위하여 부지가 속한 지진지체구조구와 바로 인접한 지진지체구조구와의 경계를 구분하지 않았을 경우를 가정하여 최대지반가속도를 산정해 볼 필요가 있다. 즉 영남육괴와 인접한 지진지체구조구인 옥천대와 한반도 대륙붕, 경상분지에서 발생한 지진이 부지에서 발생하였다고 가정할 경우 최대지반가속도를 산정하였다. 옥천대, 한반도 대륙붕, 경상분지 중 옥천대와 한반도 대륙붕의 최대지진은 각각 1978년 발생한 규모 5.2의 속리산지진과 2004년 발생한 규모 5.2의 울진 앞바다 지진이다. 따라서 규모 5.2의 지진이 부지에서 발생한 것을 가정하여 부지에서의 최대지반가속도를 구하면 최대

0.179g가 얻어진다. 참고적인 사항으로 한반도에서 발생한 지진 중 규모와 거리의 영향을 고려할 때 부지에서의 영향을 평가할 필요가 있다고 판단되는 2007년 1월 발생한 규모 4.8의 오대산지진을 상기 감쇄식들을 이용하고, 부지까지의 진앙거리 및 진원 깊이를 적용하여 감쇄시키면 부지에서의 최대지반가속도는 0.006g가 얻어진다.

또한 신월성1,2호기 부지 및 중저준위 방사성폐기물 처분시설 부지의 안전정지 지진 결정시 평가되었던 읍천단층과 방폐장 부지단층에서 지진이 발생할 경우 부지에서의 최대지반가속도를 구하였다. 읍천단층과 방폐장 부지단층에서 발생한 계기 지진기록은 없으나 구조지질학적 단층 특성을 이용하여 구조지질 전문가에 의해 평가된 최대잠재지진은 각각 모멘트 규모 6.0과 규모 5.2이다. 이 두 단층으로부터 부지까지의 최단거리는 각각 약 155km와 151km이며 감쇄식에 대입하면 읍천단층에서 발생하는 잠재지진의 경우 0.01g, 방폐장 부지단층에서 발생하는 잠재지진의 경우 0.0042g의 최대지반가속도를 유발하는 것으로 계산된다. 이상의 검토사항을 기초로 할 때 부지에서의 최대 잠재 영주기 지반가속도는 0.2g로 설정하였다.

2.1.2 설계기준지진의 타당성

2.1.1의 결정론적 방법과는 별도로 한울3,4호기 안전정지지진의 타당성을 검증하기 위하여 지진원의 경계, 감쇄함수, 지진활동성 및 최대 잠재지진에 대한 불확실성을 고려한 확률론적 지진재해도 분석이 수행되었다.

평가결과, 부지의 최대지반가속도 0.2g에서의 연초과빈도는 평균값에 대해 8.450×10^{-5} /년이다. 이를 재현주기로 환산하면 약 12,000년에 해당된다. 한편 0.3g에 대한 연초과빈도는 평균값에 대해 3.170×10^{-5} /년으로 계산되었다. 이를 재현주기로 환산하면 약 31,500년에 해당된다[2-11]. 한편 한울3,4호기 부지에서의 재현주기 10,000년 빈도 지진동은 평균값 기준으로 약 0.18g에 해당하므로 안전정지지진의 지진동 크기(0.2g)에 미치지 못한다.

한울3,4호기 운영허가 이후 2016년까지 한반도에서 발생한 주요 지진은 1996년 영월지진(1996. 12. 13, 규모 4.5), 2004년 울진해역지진(2004. 5. 29, 규모 5.2), 2007년 오대산지진(2007. 1. 21, 규모 4.8) 및 2016년 9.12지진(2016. 9.12, 규모 5.8)이다. 이들 지진 중 부지에서 가장 가까운 곳에서 발생했던 울진해역지진은 지진지체구조구 상으로 한반도 대륙붕에 속하는데 이 지진이 부지에서 발생한 것으로 가정하여 부지에서의 최대지반가속도를 구하면 최대 0.179g가 얻어지며, 이 값은 한울3,4호기 안전정지지진(0.2g) 값 보다 작다.

9.12지진에 의한 진동 또한 남한전역에서 감지되었으며, 진도 II~VI을 나타낼 정도로 감진구역이 컸다. 기상청이 평가한 진도는 경주와 대구에서 최대진도 VI을

나타내고 울산, 부산, 창원지역에서 진도 V, 대전, 청주지역에서 진도 IV, 광주와 서울지역에서는 진도 II~III을 나타내었다. 9.12지진 발생지점에서 가장 가까이에 위치한 월성 원전부지에서 관측된 최대지반가속도는 0.0981g로 설계지진 0.2g에 못 미침을 확인하였다.

9.12지진 발생 후 국내 연구기관 및 대학 연구진 등에 의해 여진 분포에 따른 진원특성 연구가 이루어졌다. 추가적인 조사가 진행 중에 있으나 현재까지 분석결과로는 여진이 지하 11~16km 지점에 집중적으로 분포하며, 분포형태가 판상의 형태를 보여주고 있어 9.12지진을 유발한 지하단층을 확인하였으나 지표 현장조사 및 탄성과 탐사결과에서 9.12지진과 관련된 단층운동 또는 지표파열은 나타나지 않았으며 지하의 9.12지진을 유발한 단층이 지표까지 확장되지는 않은 것으로 확인되었다[2-12].

한편 정부에서는 범부처 조사단을 구성하고 정밀조사를 통해 양산단층 및 인근지역 단층의 활성여부 등을 추가적으로 확인중에 있다. 향후 범부처 조사단의 단층정밀조사를 통하여 원자력법에 따른 원자력발전소의 안전성에 영향을 미칠 수 있는 활동성 단층이 확인될 경우, 발전소의 설계지진에 미치는 영향을 추가적으로 검토할 예정이다. 한수원(주)에서는 경주지진을 유발한 지하 단층에 대하여 현재 단층 지진원 효과 등에 대한 분석을 수행중이다. 또한, 월성1호기 스트레스트테스트 안전개선사항으로 수행되고 있는(2019년 말까지) “월성부지 인근 단층조사 및 확률론적 지진재해도 평가” 연구에서 경주지진 특성 및 선형지진원 평가 결과를 반영한 확률론적 지진재해도 평가를 수행중이다. 범부처 조사를 통한 9.12지진의 발생원인 및 발생 지역 인근의 정밀조사 결과는 2021년 도출을 목표로 진행 중에 있으므로, 현 시점에서 가용할 수 있는 최신의 자료를 활용하여 확률론적 지진재해도 분석을 수행중이다(2018년 10월 최종 보고서 제출 예정).

그리고 일본 근해에서 발생한 후쿠오카지진(2005년 3월 20일 발생, 규모 7.0)은 진앙거리가 약 190km 이상 떨어져 있음에도 불구하고 부산을 포함한 경상남도 남동부에 고층 아파트 내의 화분이 바닥에 떨어지고 주민들이 공포를 느껴 대피하는 등 비교적 큰 진동이 나타났다. 기상청이 평가한 진도는 경상남도 남동부 및 경상북도 동부 일부에서 최대진도 IV를 나타내고 경상남북도 서부, 전라남북도, 충청남북도, 제주도에서 진도 III, 서울, 경기도 및 강원도 남부지역에서 진도 II를 나타내었다. 후쿠오카지진에 의해 유발된 최대수평가속도는 부산 일대에서 경미한 수준인 0.01g 이하로 분석되었으며, 고리 원전부지에서 측정된 최대지반가속도는 0.013g이다.

결론적으로 운영허가 이후 현재까지 부지 부근에서 발생한 어떤 지진도 한울3,4호기 안전정지지진의 최대 영주기 수평가속도(수평 : 0.2g) 값에 영향을 주지 못했으며 최근까지 발생한 한반도에서의 주요 지진 등도 안전정지지진을 초과하지 않

는다. 또한 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침 1.7항에서는 “재해도 곡선으로부터 안전정지지진 추정 값에 대한 연간 초과빈도의 평균값을 계산한다. 평균연초과빈도가 1.0×10^{-3} /년을 초과할 경우, 초과하지 않도록 지진동 값을 상향 조정한다. 그러나 평균초과빈도가 1.0×10^{-3} /년보다 작더라도 지진동 값을 하향 조정하지 않는다. 이러한 과정을 거쳐 선정된 지진동을 안전정지지진으로 결정한다.” 라고 기술하고 있으며, 한울3,4호기 안전정지지진에 대한 확률론적 지진재해도 재평가결과는 이를 초과하지 않으므로 상향 조절할 필요가 없으며, 안전정지지진 값은 적절한 것으로 검토되었다.

2.1.3 지진발생시 지반변형에 의한 안전성 검토

2.1.3.1 지표단층 작용

부지 주변 지표단층 작용에 대한 검토결과, 광역적인 구조선으로는 부지반경 40km 북부에서 서부 지역에 걸쳐서는 오십천단층을 비롯한 NNW-NNE 방향 계열의 연장성이 좋은 단층대들이 밀집되어 분포하며, 부지반경 40km 남부에서 남서부에 걸쳐서는 양산단층 계열의 NNE 방향의 단층대들과 WNW 내지 EW 방향의 단층대들이 산포되어 있다[2-10]. 부지반경 8km 지역은 한반도의 지체구조구상으로 영남육괴 북동부 말단에 위치하며 주로 선캠브리아기의 편마암 및 편암류와 화강편마암류 등이 기저를 이루며, 이들을 후기에 관입한 시대미상의 화강암류, 캠브리아기의 퇴적암류, 그리고 백악기 화산암류가 일부 지역에서 분포한다. NNE 방향의 오십천단층과 철암단층이 부지에서 30~40km 서북측에 위치하며, 연장 2~5km의 중소규모의 단층이 반경 8km 지역에 발달한다. 부지반경 1km 지역은 영남육괴 북동부에 속하며, 변성퇴적암인 호산리층과 이를 관입한 분천화강편마암 및 흑운모화강편마암 등 선캠브리아기 암석으로 이루어져 있다. 부지반경 1km 지역에서 NW-SE, NS, EW 방향의 선형구조들이 상대적으로 연장성이 길고 우세하게 발달하며, 이 외에도 NNE-SSW와 NNW-SSE 방향들이 잘 나타난다[2-10].

부지반경 8km 지역의 단층은 4개 그룹(NW, EW, NE, NS)의 고각단층과 EW그룹의 저각단층(북쪽 혹은 남쪽 경사)이 우세하게 나타난다. 위성사진 분석에서 추출된 선구조를 기초로 하여 야외조사를 수행하였고, 나곡단층, 태봉동단층, 검성동단층, 중리단층, 마분동단층 등 총 5개의 연장 300m 이상 단층을 확인하였다. 이 중 제4기층을 절단하는 단층은 발견되지 않았지만 ESR 연대측정에 의거하여 제4기에 활동한 단층이 일부 확인되었다. 그러나 50만 년 이내에 2회 이상, 3만 5천 년 이내에 1회 이상 움직인 활동성 단층은 확인되지 않았다. 따라서 한울3,4호기 부지에서는 지표단층 작용으로 인한 변형은 발생하지 않을 것으로 검토되었다.

2.1.3.2 액상화 발생 여부 및 영구사면 안정성 평가

한울3,4호기 안전관련 구조물들은 대부분이 보통 풍화된 암 상부 또는 암반위에 타설한 채움콘크리트 위에 설치되고 이 구조물에 대한 뒷채움은 배수가 잘 되는 조립상의 채움재를 평균 상대밀도 80% 이상으로 다져 시공하였으므로 지진에 의한 액상화현상은 일어나지 않는다[2-13].

한편 부지 내 영구사면은 설계시부터 사면의 붕괴로 안전관련 구조물의 운전이나 안전성에 영향이 미치지 않도록 정적 및 동적 설계 하중하에서 사면안정성을 분석하였다. 영구사면 중 붕괴 가능성이 있는 지역에 대하여 정확한 붕괴 형태를 파악하고 필요한 보강방법을 강구하며 붕괴원인을 규명하고자 지표지질조사와 시추조사를 실시하였다. 조사 결과 붕괴가능성이 있는 구간은 붕괴형태를 Modelling 한 후 지역에 따라 강관 Pile, S.P. Grouting 등으로 보강하였다. 이후 방사성폐기물처리건물의 위치가 영구사면 인접지역으로 결정됨으로서 사면이 새롭게 형성되었으며 이 사면의 일부지역에서 사면안정성을 재검토 하였다. 검토 결과, 4개 지역에서 붕괴 가능성이 있는 것으로 파악되어 최적의 붕괴형태를 모델링 한 후 지역에 따라 역지말뚝공법, 수동보강(Nail) 공법 등으로 보강을 완료하였다[2-13]. 따라서 부지에서의 10,000년 빈도 지진동(0.18g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서 한울3,4호기 부지 내 영구사면은 발전소의 안전성에 영향을 끼치지 않는다.

사면붕괴로 왕복 2차로의 이동로가 완전히 유실되는 영향은 없을 것으로 검토되었다. 또한 한울6호기부터 한울3,4호기까지의 2개 이동로 중 1개 이동로상에는 사면이 존재하지 않으므로 지진으로 인한 사면붕괴가 발생한다 하더라도 대형 이동형발전차의 이동은 가능할 것으로 평가되었다.

한편 안전정지지진(0.2g) 수준을 초과하는 설계기준 초과 지진동에서의 영구사면 안정성평가는 현재 평가방법 등과 관련하여 추가적인 검토가 필요한 상황이므로, 이를 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항으로 도출하여 수행중이다.

2.1.3.3 침하

한울3,4호기 내진범주 I급 구조물은 보통 풍화된 암 상부, 또는 암반위에 타설한 빈배합 콘크리트(재령 28일 압축강도는 140kg/cm² 이상)와 같은 견고한 채움재 상에 시공되었다. 따라서 부지에서의 10,000년 빈도 지진동(0.18g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서 내진범주 I급 구조물은 침하로 인한 영향을 받지 않는다. 한편 안

전정지진(0.2g) 수준을 초과하는 지진동에서도 암반 위에 구조물이 시공된 설계 특성상 침하로 인한 영향은 없을 것으로 판단되나, 추가적으로 설계기준 초과 지진동 발생시 안전관련 구조물 하부 암반 지지력을 평가하여 적절성을 확인하였다.

2.2 설계기준 홍수 및 기타 자연재해

한울3,4호기 부지는 한반도 동쪽인 경상북도 동북단의 강원도계 인접지역 해안에 위치하며 행정구역상 경상북도 울진군 북면 부구리에 소재하고 있다. 부지의 남쪽으로는 한울5,6호기가 인접하여 위치하고 남쪽으로 약 1.5km 떨어진 곳에서는 신한울1,2호기가 건설중에 있다. 부지 주변에는 큰 하천은 없고 몇몇 소하천이 북서계곡으로부터 시작하여 남동방향으로 거의 평행선을 이루며 동해로 흘러간다. 이들 하천으로는 부지와 인접하여 흐르는 부구천(길이 15.5km), 부지로부터 북북서쪽으로 3.8km 거리에 위치한 나곡천(길이 8.0km) 등이 있다.

부지가 해안에 위치하기 때문에 파랑에 의한 해수위와 냉각수계통 설계를 고려하여 주요 안전관련 구조물이 위치한 본관건물 지역의 부지는 인천평균해수면 기준 EL.(+)10.0m로 정지되었다.

한울3,4호기의 냉각수 취배수 방식은 순환수계통과 기기냉각해수계통 모두 표층취수 및 배수 방식으로 설계되었다. 발전소 부지는 해안에 인접해 있으므로 부지의 수문학적 특성은 동해의 영향을 받으며 발전 냉각수원으로는 해수를 이용한다. 부지 주변의 수계를 포함한 지형도는 그림 2-1과 같다.

2.2.1 평가대상 자연재해 검토

본 평가에서는 설계기준 및 설계기준초과 자연재해로서 한울3,4호기 부지특성을 고려하여 지진해일, 폭풍해일, 강수, 강풍, 토네이도, 저수위, 해수온도 상승 및 폭설을 선정하였다. 한울3,4호기는 온대성 기후 지역에 위치하며 해안에 접하고 있어 기온의 일교차 및 연교차가 비교적 적은 온화한 해양 기후에 해당되므로 극한 기후와 관련한 영향은 고려하지 않는다.

한편 산불의 경우 지진이나 강우, 해일과는 달리 발전소 주변 산림의 크기, 이격 거리에 따라 그 규모와 위해 영향이 결정된 자연재해이다. 또한 발전소에서는 산불이 발전소로 직접 전파되지 않도록 부지와 산지사이에는 인공블럭 및 잔디로 된 사면이 형성되어 있어 산불차단막의 역할을 하고 있다. 만약 불씨가 강풍으로 비화되더라도 한울3,4호기 안전관련 구조물의 외부는 모두 노출 콘크리트 또는 강재로 구성되어 있는 비가연성 물질이며, 화재방호계통은 화재를 신속하게 감지 및 소화할 수 있으므로 산불은 발전소의 안전정지와 노심냉각 기능에 영향을 끼치지 않는다. 따라서 산불은 평가대상 자연재해로 고려하지 않는다.

그리고 취수구에서의 해양생물/개펄 유입의 경우 최종열제거원의 기능 상실로 이어질 수 있으나 이는 본 평가의 “전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력”에서 기본적으로 고려되는 사항이며 지진과는 달리 다른 안전계통 기기에는 영향을 주지 않는다. 또한 최종열제거원 기능 상실의 경우 복수저장탱크, 탈염수저장탱크 및 원수저장탱크 등의 급수원을 통하여 노심냉각이 가능하므로 해양생물/개펄 유입은 평가대상 자연재해로 고려하지 않는다. 또한 황사의 경우 주로 4월, 5월에 중국대륙의 황토지역으로부터 황사가 강풍에 의해 상승하여 편서풍을 타고 한반도를 통과하므로 연평균 4~5회 정도의 황사현상이 나타난다. 그러나 부지 내에 황사가 도달하더라도 이로 인하여 구조물 내부에 있는 안전정지 및 노심냉각 관련 기기가 어떠한 물리적 영향도 받지 않으므로 평가대상 자연재해로 고려하지 않는다.

2.2.2 설계기준 홍수

한울3,4호기의 안전관련 계통·기기를 수용하는 격납건물, 1,2차 보조건물 등 안전관련 구조물이 위치한 부지정지고는 EL.(+)10.0m이다. 또한 주요 안전관련 구조물들의 1층 출입문 문턱은 부지정지고를 기준으로 30cm~40cm정도 더 높다.

상기 부지정지고와 안전관련 구조물들의 1층 출입문 문턱 높이와 비교하여 지진해일, 폭풍해일 및 가능최대강수(Probable Maximum Precipitation, PMP)에 의한 설계기준 홍수 수준을 한울3,4호기 FSAR[2-13], 한울3,4호기 주기적 안전성평가(PSR) 보고서[2-16] 및 한울5,6호기 주기적 안전성평가(PSR) 보고서[2-17]에 근거하여 다음과 같이 검토하였다.

2.2.2.1 지진해일 및 폭풍해일에 의한 설계기준 홍수

가. 지진해일

(1) 한울3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR)

한울3,4호기 FSAR[2-13]에서는 동해안에 지진해일을 일으키는 지진의 진원지를 분석하여 부지에 가능최대지진해일을 일으킬 것으로 예상되는 일본 서해에서의 진원지와 지진 강도를 가정하고, 이를 전산 프로그램에 입력하여 부지에서의 가능최대지진해일을 분석하였으며, 그 수위를 3.0m로 추정하였다. 이 경우 부지에서의 가능최고해수위는 가능최대지진해일과 바람에 의한 파랑효과(0.7년 빈도) 및 10% 초과 고조위가 결합된 5.73 m MSL로 제시하였다.

(2) 주기적안전성평가(PSR)

계기지진 기록에 의하면 부지 근해에서 발생한 최대 지진규모는 5.2로 경북 울진

동쪽 약 80km 해역에서 발생하였다(2004. 5.29). Iida(1970)의 연구결과에 따르면 지진해일을 발생시킬 수 있는 최소 지진규모는 6.3으로서 부지 근해의 계기지진 기록에 의한 최대 지진규모 5.2는 지진해일 유발 최소 지진규모 보다 작으므로 부지 근해의 지진에 의한 지진해일 발생 가능성은 없는 것으로 검토되었다.

부지 원해의 경우, 동해의 동연부는 유라시아판(eurasian plate)과 북미판(north american plate)이 접하는 판경계가 형성되어 있고, 이 판 경계를 따라 발생한 해저지진에 의하여 우리나라 동해연안에 지진해일을 발생시켰으며 1971년부터 우리나라 동해안에 영향을 미친 지진해일 기록은 총 5회이다. 따라서 부지에서의 지진해일은 동해 동연부에 위치한 판경계를 따라 발생하는 지진에 의하여 발생하며 판경계의 지질학적 구조는 유라시아판과 북미판이 상호 충돌하는 형태를 보인다.

부지에서의 가능최대지진해일 유발 단층은 동해 동연부의 유라시아판과 북미판 경계에서 발생하는 해저지진에 의하여 발생하는 것으로 가정하였다. 부지의 가능최대지진해일고는 1983년 동해중부 지진, 1993년 북해도 남서 외해 지진과 지진공학백역이론에 의한 가상의 지진에 대하여 발생하는 부지에서의 지진해일고를 평가한 후, 최대지진해일을 부지에서의 가능최대지진해일로 결정하였다. 1983년 동해중부 지진해일의 Akita-10 단층모형, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 DCRC-17a 단층모형 및 지진공학백역 이론에 따른 KINS-2 단층모형을 이용하여 수치모의한 결과 한울 부지 전면에서의 최대 처오름 높이 및 최대 처내림 높이는 1993년 DCRC-17a 단층모형에 의하여 발생하였다. 그러나 한울3,4호기 취수구조물 전면에는 방파제가 위치하고 있어 취수로 내부에서는 정진현상이 발생하게 되고 이로 인하여 부지 전면보다도 더 큰 처오름 및 처내림이 발생한다. 이에 대하여 2006년에 한전전력연구원에서 수행한 ‘울진원전 부지의 지진해일에 따른 처오름 해석 및 모델분석의 적정성 평가’[2-18]에서는 한울3,4호기 취수로(기기냉각해수펌프 전면)에서의 최대 처오름 높이를 2.71m(KINS-2 단층모형), 최대 처내림 높이를 -2.67m(1983년 지진해일 모형)로 평가하였다. 그러나 한울3,4호기 FSAR에서는 부지에서의 가능최대지진해일고를 처오름과 처내림의 경우 모두 3.0m로 산정하였으므로 이 값을 적용하면 부지의 가능최대지진해일에 의한 가능최고해수위 및 가능최저해수위는 다음과 같다.

- 가능최고해수위 = 약최고고조위의 1.1배 + 최대 지진해일 처오름 높이 + 바람에 의한 파랑효과(0.7년 빈도, 한울5,6호기 FSAR)
 $= 0.33\text{m} + 3.0\text{m} + 2.4\text{m} = \text{EL.}(+)5.73\text{m}$
- 가능최저해수위 = 최극저조위 + 최대 지진해일 처내림 높이
 $= (-)0.3\text{m} + (-)3.0\text{m} = \text{EL.}(-)3.3\text{m}$

한편 인접하여 위치한 한울5,6호기에서 최근 평가된 주기적 안전성평가결과 약 최고고조위 및 최극저조위를 인천평균해수면으로 환산하면 각각 EL.(+)0.018m 및

EL.(-)0.692m가 되므로 지진해일에 의한 가능최고해수위 및 가능최저해수위는 최종적으로 다음과 같다.

- 가능최고해수위 = 약최고고조위의 1.1배 + 최대 지진해일 처오름 높이 + 바람에 의한 파랑효과(0.7년 빈도, 한울5,6호기 FSAR)
= EL.(+)0.02m + 3.0m + 2.4m = EL.(+)5.42m
- 가능최저해수위 = 최극저조위 + 최대 지진해일 처내림 높이
= EL.(-)0.692m + (-)3.0m = EL.(-)3.692m

(3) “원전부지 설계기준 해수위 조사·연구” 평가결과

한편, 후쿠시마 후속조치로 수행된 ‘원전부지 설계기준 해수위 조사·연구’ 용역 [2-19]에서는 동해 동연부에서 지진해일(지진규모 8.1) 발생시 한울3,4호기 취수로 내부에서의 가능최고해수위를 EL.(+)5.974m, 호안(방파제) 전면에서 EL.(+)4.931m로 각각 평가하였다. 따라서 지진해일 관련 한울3,4호기의 설계기준 홍수 수준은 최근 평가결과와 비교하여 50cm 정도의 차이가 발생하나 이는 지진해일을 일으키는 지진 규모 차이에 기인하며, 두 평가결과 모두 부지정지고 EL.(+)10.0m 이하이다.

또한 상기 평가[2-19]에서 동해 동연부에서 지진해일(지진규모 8.1) 발생시 한울3,4호기 취수로 내부에서의 가능최저해수위는 EL.(-)3.704m로 평가되었으며 이 값은 설계기준인 EL.(-)3.692m와 유사한 값이다.

나. 폭풍해일

(1) 한울3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR)

한울3,4호기 FSAR[2-13]에서는 태풍 Dinah(1987. 8. 31)에 의한 부지에서의 수위 상승은 0.89m로 추정하였고, 심해파의 설계파고에 의한 처오름높이(Wave runup)은 3.0m로 제시하였다[2-20]. 그러나 폭풍해일에 의한 가능최고해수위는 별도로 제시하지 않았으며, 부지에서의 가능최고해수위는 가능최대지진해일과 바람에 의한 파랑효과(0.7년 빈도)가 결합된 5.73m MSL로 기술되어 있다.

(2) 주기적안전성평가(PSR)

부지에서의 가능최대폭풍해일고를 산정하기 위하여 우선 부지해역에 발생 가능한 최대태풍을 산정하여야 한다. 그러나 부지해역에서는 충분한 태풍 관측기록이 없으므로 과거에 한반도 동해안에 가장 큰 영향을 미친 태풍을 고려하여 산정하였다. 폭풍해일고를 산정하기 위하여 필요한 태풍의 기상학적 매개변수는 중심기압 강하량과 최대풍반경에서의 최대풍속이다. 2016년까지 부지에 가장 큰 파랑을 발생시킨 태풍은 1987. 8. 31의 Dinah이다. Dinah에 의한 부지에서의 순간최대풍속

은 40.0m/sec이며 이 때 태풍의 최저중심기압은 960hPa로 관측되었다. 폭풍해일로 인한 수위증가는 바람에 의한 취송작용과 기압강하에 의한 흡상작용으로 인해 발생하며, 다음과 같이 각각 분리하여 산정한다.

○ 바람에 의한 수위상승

항만시설물 설계시 간편하게 폭풍해일고를 산정하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 Colding식을 적용하여 바람에 의한 수위증가량을 구하였다.

$$Y = K \cdot F \cdot V^2 \cdot \sin(\Theta) / h$$

$$K = \gamma_s^2 \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \frac{1}{g}$$

여기서 Y = 바람에 의한 수위증가량(m)

h = 취송거리의 평균수심(m)

V = 기왕순간최대풍속(m/sec)

Θ = 호안에 대한 바람의 입사각(°)

F = 취송거리(m)

K = 해안에 따라 변하는 상수

γ_s^2 = 해면의 저항계수

$\frac{\rho_a}{\rho}$ = 공기밀도에 대한 해수밀도의 비(1.2×10^{-3})

g = 중력가속도(9.8m/sec^2)

바람에 의한 수위상승량을 산정하기 위해서 우선 구하여야할 변수들은 태풍에 의한 취송거리(F), 취송거리에 대한 평균수심(h), 해면의 저항계수(γ_s^2), 기왕순간최대풍속(V)등이며 적용된 값은 다음과 같다.

- 평균수심(h) = 1,000m
- 100년 빈도 최대풍속(V) = 40.0m/sec
- 호안에 대한 바람의 입사각(0°)
- 취송거리 = $700 \times 10^3\text{m}$
- 해면의 저항계수 = 2.5×10^{-3}

위의 값들을 Colding식에 대입하여 정리하면 바람에 의한 수위상승량은 0.36m가 된다.

○ 기압강하에 의한 수위상승

부지에서의 기압강하에 의한 수위 상승량은 다음과 같다.

$$h = 0.99 \cdot \Delta p \quad (\text{cm})$$

여기서 h = 저기압에 의한 수위상승량(cm)

Δp = 표준기압에 대한 기압감소량(hPa)

표준기압을 1기압인 1,013hPa로 하면 기압감소에 의한 수위상승량은 0.53m가 된다. 따라서 부지해역의 기왕최대태풍인 Dinah에 의한 폭풍해일고는 0.89m로 추정되었다.

○ 파랑 활동

부지해역에서의 가능최고해수위를 산정하기 위하여 바람에 의한 풍파를 산정하고 가능최고해수위 조합시 이용하기 위하여 부지해역에서 조사된 설계파고를 검토하였다. 부지에서의 설계파를 추정하기 위하여 1980년 해양연구소는 부지부근의 후포파랑관측소에서 관측된 장기파랑자료를 이용하여 부지에서의 예상파랑을 추정하였다. 또한 한울1,2호기 부지정지시 냉각수계통 및 해상구조물 기본계획단계에서 동해안에 위치한 항구의 설계파고를 고려하여 부지의 심해설계파고를 결정하였다. 그러나 1987년 2월 설계파를 상회한 이상파랑의 내습으로 인하여 북방파제의 일부 두부구간이 피해를 입었으며, 남방파제는 취수구 입구의 일부구간을 제외한 대부분의 구간에서 부분적으로 피해를 입었다. 따라서 기 발생한 피해의 원인을 분석하였으며 설계기준을 재검토하였다.

부지의 심해설계파고를 산정하기 위하여 부지인근 묵호항의 최대파고와 유의파고의 상관식에 의한 방법과 1986년 해양연구소와 한국항만협회가 공동으로 수행한 파랑관측 업무 개선방안 연구자료에서 천해파 변환모형을 이용하여 심해파고를 추정하는 방법의 2가지 방법을 이용·산정하였다. 이상의 2가지 방법에 의하여 부지에 적용한 심해파의 제원을 아래와 같이 결정하였다.

- 파향 : NNE, NE, ENE, E
- 파랑주기 : $T = 14$ 초
- 심해유의파고 : 8.7m

심해파는 대륙붕을 지나 부지의 천해지역으로 진입할 때 해저마찰이나 쇄파로 인하여 분산된다. 따라서 천해파고의 산정은 천수효과, 반사, 회절, 굴절, wave setup 및 쇄파에 의한 영향을 고려하여 심해파를 분석함으로써 수행한다. 설계파고의 결정은 해상구조물에 영향을 미치는 각 방향의 진행파를 파향 및 수심별로 계산하여 가장 위험한 파고를 설계파고로 결정하였다. 진행파에 의한 처오름높이는 각 구조물의 형상, 조도계수, 바닥수심, 전면의 바닥경사 및 진행파의 특성에 의하여 결정되는 데, 이러한 여러 영향을 고려하여 한울3,4호기 FSAR 작성시 결정된 처오름높이와 같이 3.0m로 평가되었다. 부지해역을 통과하는 가능최대태풍

에 의한 부지에서의 가능최고해수위 및 가능최저해수위는 다음과 같다.

- 가능최고해수위 = 최극고조위 + 가능최대폭풍해일고 + 처오름고
= 0.92m + 0.89m + 3.0m = EL.(+)4.81m
- 가능최저해수위 = 최극저조위 + 가능최저폭풍해일고
= (-)0.36m + (-)0.89m = EL.(-)1.25m

한편 인접하여 위치한 한울5,6호기에서 최근 평가된 주기적 안전성평가결과 최극고조위 및 최극저조위를 인천평균해수면으로 환산하면 각각 EL.(+)0.588m 및 EL.(-)0.692m가 되므로 폭풍해일에 의한 가능최고해수위 및 가능최저해수위는 최종적으로 다음과 같다.

- 가능최고해수위 = 최극고조위 + 가능최대폭풍해일고 + 처오름고
= EL.(+)0.588m + 0.89m + 3.0m = EL.(+)4.478m
- 가능최저해수위 = 최극저조위 + 가능최저폭풍해일고
= EL.(-)0.692m + (-)0.89m = EL.(-)1.582m

(3) “원전부지 설계기준 해수위 조사·연구” 평가결과

한편, 후쿠시마 후속조치로 수행된 ‘원전부지 설계기준 해수위 조사·연구’ 용역[2-19]에서는 슈퍼태풍 급의 폭풍해일 발생시 한울3,4호기 취수로 내부에서의 가능최고해수위를 EL.(+)1.021m, 호안(방파제) 전면에서 EL.(+)3.971m로 각각 평가하였다. 따라서 폭풍해일 관련 한울3,4호기의 설계기준 홍수 수준[EL.(+)4.478m]은 상기 후쿠시마 후속조치 평가결과와 비교하여 호안전면 기준으로 50cm 정도 더 높은 것으로 평가되었고, 부지정지고 EL.(+)10.0m 이하이다.

또한 상기 평가[2-19]에서 슈퍼태풍 급의 폭풍해일 발생시 한울3,4호기 취수로 내부에서의 가능최저해수위는 EL.(-)0.544m로 평가되었으므로 설계기준 EL.(-)1.582m가 더 보수적인 값에 해당한다.

2.2.2.2 가능최대강수에 의한 설계기준 홍수

가. 가능최대강수량에 의한 안전관련 구조물의 홍수영향

(1) 1차원적(광정위어 방법에 의한) 홍수영향 평가

한울 부지에서 가장 최근에 수행된 한울5,6호기 주기적안전성평가[2-17]에서는 가능최대강수량에 의한 한울부지 내 안전성관련 구조물의 홍수영향을 평가하기 위하여 부지의 가능최대강수량을 통계학적 방법과 수문기상학적 방법을 이용하여 검토하였다. 그리고 상기 2개 값 중 가장 큰 값

으로서 미육군공

병단(USACE)의 HEC-HMS(hydrologic modeling system)를 이용하여 한울부지에 예상되는 첨두유량(peak runoff)을 미국의 SCS(soil conservation service, 현재는 natural resources conservation service, NRCS) 단위도법으로 산정하였다.

최종적으로 한울 부지의 최대 침수심은 부지 내 유출수의 유출통로가 되는 건물과 건물 사이를 광정위어로 가정하고, 광정위어 공식을 적용하여 부지 내 가능최대강수량에 의한 침수심을 산정하였다. 산정된 침수심과 안전관련 구조물 1층 바닥고를 비교함으로써 안전관련 구조물의 침수영향을 평가하였다.

평가결과 가능최대강수량 발생시 한울부지의 침수심은 [] 평가되었다. 한울3,4호기 안전관련 구조물의 지상 1층 바닥표고 및 출입구의 문턱표고는 부지 정지 면에서 [] 있으므로 국지적인 가능최대강수에 의해 안전관련 구조물 및 내부에 설치된 계통, 기기의 침수 가능성은 없는 것으로 검토되었다.

(2) 2차원적(TUFLOW에 의한 2차원 모델링 방법) 홍수영향 평가

본 보고서 2.2.4.3절(재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수 수준)에서는 부지 내 건물, 도로, 화단 등 구조물에 의한 배수 및 저류 효과를 고려하도록 한울3,4호기 부지 전체에 대한 2차원적 침수영향 해석을 수행하였다. 여기서는 부지의 각 지점별 최고수위를 XP-SWMM의 내부 2D 모형인 TUFLOW 모형을 사용하여 2차원 수치모의를 수행하여 산정하였고, 이렇게 구한 각 지점별 최고수위와 안전관련 구조물의 1층 출입구 표고를 비교함으로써 안전관련 구조물의 침수 영향을 평가하였다[2-21].

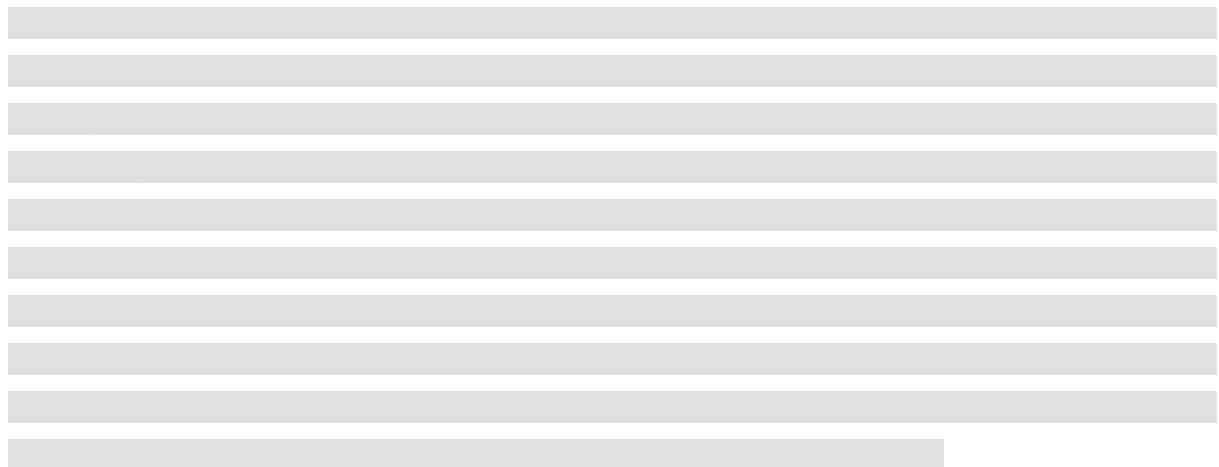
또한 이 평가에서는 가능최대강우로 발전소의 우수배수계통이 그 기능을 상실하는 상황을 가정하였다. 평가결과 한울3,4호기 대부분의 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심이 구조물 출입구 보다 [] 높아 침수가 발생하는 것으로 검토되었다. 상기와 같이 1차원적과 2차원적 평가결과가 상이한 것은 2차원적 침수 평가에서는 유입되는 우수의 흐름 해석에서 부지 내 건물, 도로, 화단 등에 의한 배수 및 저류 효과가 실제와 동일하게 반영됨에 따른 영향인 것으로 확인되었다.

나. 하천과 강의 가능최대홍수에 의한 홍수영향

부지와 인접하여 위치한 한울5,6호기 FSAR[2-20]에서는 하천과 강의 가능최대홍수에 의한 부지의 홍수영향평가를 위하여 1988년에 한국건설기술연구원에서 작성한 한국 가능최대강수량도를 사용하였다. 여기서 6시간 1,000km²에 대한 가능최대강수량은 265mm이었으며 이를 부구천의 유역면적, 55km²에 대한 값으로 환산하기 위한 면적감소계수 1.21을 곱하여 부구천의 6시간 가능최대강수량을 321mm로 산정한 바 있다. 그러나 2000년도에 국토해양부에서 “한국 가능최대강수량 추정”

을 개정 발행하였고, 이를 수정·보완한 “전국 PMP도 재작성 보고서(국토부, 2004)”가[2-21] 발행되었다. 따라서 이 자료를 사용하여 부구천의 유역면적 55km²에 대한 6시간 가능최대강수량을 재산정하였다. 자료 독치 및 분석결과 한울부지에서 지속시간 6시간 동안 유역면적 55km²에 대한 가능최대강수량은 434.1mm로 평가되었다. 한편 1972년부터 2013년까지 울진기상관측소에서 관측된 시우량자료로 평가한 통계학적 방법에 의한 가능최대강수량은 지속시간 6시간에 대하여 353.9mm이므로 상기 수문기상학적 방법에 의하여 평가된 값보다 작다. 따라서 한울부지에서 유역면적 55km²에 대한 6시간 가능최대강수량은 434.1mm이나, 이 값은 한울3,4호기 PSR 평가에서 사용된 438mm 보다 작은 것으로 검토되었다. 그러므로 한울부지에서 가능최대강우시 하천과 강의 가능최대홍수에 의한 홍수위는 한울3,4호기 PSR 평가결과인 EL.(+)7.67m가 유효하며, 부지[EL.(+)10.0m]는 이 홍수위에 대하여 안전하게 방호되는 것으로 검토되었다.

다. 가상 댐파괴에 의한 홍수영향 평가



2.2.3 홍수를 제외한 설계기준 자연재해

가. 설계기준 강풍 및 토네이도

한울3,4호기의 설계풍속은 부지 인근 강릉과 포항 기상관측소에서 관측된 풍속자료를 통계 분석한 결과와 우리나라 건축법규에서 규정하고 있는 각 지역별 설계기준 풍속을 기준으로 검토하였다[2-14]. 검토결과 안전관련 구조물의 설계에 적용된 풍속으로는 45m/sec를 적용하였다. 이 설계풍속은 ASCE 7-88(Minimum Design Loads in Buildings and other Structures)에 정의된 지형노풍도 C에 대한 지상 33ft(10m)에서의 최대 마일(mile) 풍속이며, 부지에서의 100년 빈도 풍속인 40m/sec와 우리나라 건축법규에서 규정된 45m/sec를 비교하여 100mph(45m/sec)로 결정되었다.

한편 토네이도는 미국 중남부에서 주로 발생하는 반시계 방향의 강한 소용돌이 바람을 말하며 적란운의 하층으로부터 깔때기 모양의 구름이 만들어지며, 매우 강한 소용돌이를 이루며 이동한다. 그 규모는 일반적인 회오리바람보다 훨씬 커 지름이 수백 미터에 달하며, 풍속은 평균 83m/sec~222m/sec 정도로 알려져 있다. 토네이도는 일반적으로 차고 건조한 대륙성 한랭기단과 따뜻하고 습한 해양성 기단이 지형적 장벽이 없는 평야지대에서 만남으로써 발생한다. 토네이도가 발생하기 위해서는 하층에 고기압이 정체하여야 하므로 우리나라의 산악지형 같이 지형 지물이 많은 곳에서는 발생하기 어렵다. 반면 우리나라 해안에서는 지형지물의 영향이 비교적 작아 토네이도의 일종인 용오름 현상이 가끔 관측된다.

최근까지 국내에서 발생한 토네이도 및 용오름에 대한 기록을 살펴보면, 1964년 9월 서울근교 독섬지방을 지나간 작은 규모의 토네이도와 1980년 7월 사천에서 발생한 토네이도, 1985년 가을과 1988년 10월 18일 울릉도 동쪽 해상에 발생한 용오름, 1985년 7월 횡성-평창에서 발생한 토네이도, 1989년 10월 홍성에서 발생한 토네이도, 1996년 11월 제주도 서귀포에서 관측된 용오름, 1997년 1월과 1998년 1월 제주도 서귀포에서 관측된 토네이도, 2005년 전북 장수지역에서의 강력한 돌풍 등의 발생기록이 있다. 또한 2014년 6월에는 경기도 고양에서 토네이도가 발생하여 비닐하우스 20여동이 피해를 입고 부상자가 발생하였다. 이 토네이도는 기상청에서 용오름 현상이라고 발표되었으며, 개선된 후지타(Fujita) EF0 규모 이하로 추정되었다.

한편 울릉도에서는 1985년 이후 2011년까지 총 6회의 용오름 현상이 관측되었으며 최근 2012년 강릉 앞바다 및 제주시 이호동 앞바다에서도 용오름이 관측된 바 있다. 그러나 이러한 용오름은 보통 지름이 100m 이하이며 풍속도 초속 25m 이하로 일반적인 토네이도보다 규모가 작고 파괴력도 약하다.

한울3,4호기 설계에서는 우리나라에서 발생 가능한 토네이도의 크기를 후지타-피어슨의 F1급을 초과하지 않을 것으로 예상하였으며, F1급 토네이도의 특성을 다음과 같이 평가하였다[2-14].

- 최대 회전풍속 : 88.4mph(39.5m/sec)
- 최대 병진풍속 : 21.3mph(9.5m/sec)
- 최대 기압력강하 : 0.27psi(18.7hPa)
- 최대 회전속도의 반경 : 164ft(50m)

또한 상기 특성을 고려한 토네이도의 회오리바람 압력은 태풍의 풍압을 초과하지 않는 것으로 검토하고[2-15], 태풍하중을 설계풍속으로 고려하였다. 참고문헌 2-15에 의하면 상기 검토과정에서 Reg Guide 1.76(Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Rev. 0) 및 Reg Guide

1.117(Protection Against Extreme Wind Events and Missiles for Nuclear Power Plants, Rev. 1)이 평가에 활용되었다.

이에 의한 비산물하중이 구조물 설계에 반영되었다.

나. 저수위 및 해수온도

안전관련 냉각수원인 1차기기냉각해수계통의 냉각수는 동해의 해수를 취수하여 사용하므로 해수위의 저하에 의한 냉각수의 공급영향을 검토하여야 한다. 부지해역의 정진현상을 고려하여 폭풍해일 및 지진해일에 의한 해양의 가능최저해수위를 산정하였다. 폭풍해일에 의한 가능최저해수위[EL.(-)1.582m]는 가능최대지진해일에 의한 가능최저해수위인 EL.(-)3.692m보다 높으므로 부지에서의 가능최저해수위는 EL.(-)3.692m 이다.

그리고 한울3,4호기 FSAR 9.2.1.2(기기냉각해수계통)에 의하면 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도는 88.8°F(31.5℃) 이다. 한편 2006년부터 2017년 8월까지 최근 10년간 한울3,4호기 기기냉각해수계통에서 관측된 최고 해수온도는 26.8℃이며, 여기에

최고 설계온도 31.5℃에 미치지 못한다.

최신의 온배수재순환 평가결과에 근거했을 때 한울3,4호기의 해수온도는 최고 설계온도 이내이다.

다. 폭설

한울3,4호기 FSAR에 따르면 부지 주변 강릉과 울진에서의 100년 빈도 최심적설량이 118.8cm와 39.9cm로 각각 평가되어, 부지에서의 100년 빈도 최심적설량을 105cm 이하로 고려하였다.

2.2.4 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 설계기준초과 홍수 수준

2.2.4.1 지진해일에 의한 설계기준초과 홍수 수준

한울 부지를 포함한 우리나라 동해안은 일본 서쪽 해안(우리나라 동해 동연부)에서

발생하는 지진으로 인한 지진해일의 영향을 받게 된다. 본 평가에서는 10,000년 빈도의 해저 지진 발생빈도 분석을 통하여 우리나라 동해 동연부(West Coast of Hokkaido and North Honshu)에서 발생 가능한 지진 규모를 평가하였고, 이로부터 한울 부지 해수위 영향 검토를 위한 지진해일 수치모의를 수행하였다.

가. 지진 빈도분석 기법

재현기간 별 지진규모 결정을 위한 지진빈도분석은 기본적으로 G-R(Gutenberg-Richter) 분석을 사용한다. G-R 방법의 타당성 검토를 위해 그림 2-3과 같이 1981년부터 2016년까지의 35년간에 걸친 이상적인 가상 지진자료를 구성하였다. 이 지진자료를 이용하여 각 지진규모별 초과치의 연간누적횟수를 구하여 반대수지(Semi-log)에 도시하면 그림 2-4와 같이 $5.0 \leq M_w$ (모멘트 규모) ≤ 7.5 구간은 직선으로, $M_w \geq 7.5$ 구간은 곡선으로 나타난다. G-R방법은 그림 2-4에 제시된 바와 같이 직선구간에 대한 직선 회귀식을 사용하여 빈도분석이 수행되므로 재현주기가 증가할수록 지진규모가 과대평가 될 수 있다. 그러나 Kagan(1997, 2001)은 재현기간별 지진규모 결정을 위한 지진 빈도분석법으로 Tapered G-R기법을 제안한 바, 그림 2-4에 제시된 바와 같이 직선구간과 곡선구간을 지수함수를 이용하여 1개의 식으로 나타내었다. 이와 같은 곡선부에 대한 고려는 G-R방법을 통해 발생될 수 있는 재현주기 증가에 따른 지진규모의 과대평가를 효과적으로 저감시킬 수 있으며, 보다 현실적인 빈도분석 결과를 도출시키는 방법이라고 판단된다.

본 평가에서는 Tapered G-R기법을 단순화하기 위해 빈도분석 구간을 직선구간과 곡선구간을 분리하고 2개의 회귀식, 즉 1차식과 2차식으로 나타내는 방식을 사용하였다. 그림 2-4에 보인 바와 같이 $M_w \geq 7.5$ 의 곡선구간에 대한 2차 회귀식은 Tapered G-R기법에 의한 회귀식과 거의 일치하는 결과를 보인다. 따라서 그림 2-4에 나타낸 바와 같이 일정 규모 이상의 자료만을 사용하여 2차 회귀식의 적용을 통해 빈도 분석을 수행하는 것이 타당함을 확인할 수 있다.

나. 동해 동연부(일본 서해안 지역) 지진 빈도분석

상기 ‘가’에서의 지진 빈도분석 기법을 적용하여 우리나라 동해 동연부의 지진 빈도분석을 수행하였다. 현재 기록으로 남겨진 지진 자료들은 각 지역에 따라 길게는 1,000년 이상, 짧게는 100년 이하의 기간 동안의 자료가 존재한다. 이 자료 중 1900년 이후의 지진기록은 계기지진이며, 그 이전 자료는 모두 역사기록이나 지층탐사에 의한 추정치로서 중소 규모의 지진기록이 포함되어 있지 않다. 또한 최대 규모의 지진도 일부만 포함되며, 특히 지진규모의 정확성에 있어서 신뢰도가 낮다.

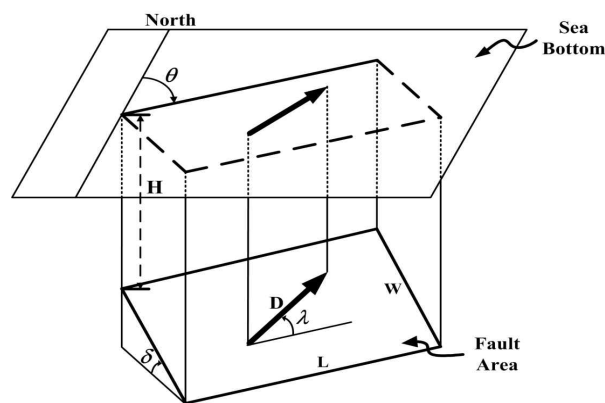
1900년 이후의 계기지진 기록도 1960년 이전 자료는 상당 부분 누락되어 있다.

우리나라 동해안에 영향을 미치는 지진해일의 파원역인 동해 동연부의 지진 발생 분포는 그림 2-5와 같다. 그림 2-5에서 알 수 있는 바와 같이 1900년 이전 자료는 관측기간에 비하여 지진 규모 M_w 7.0이하의 지진이 많이 기록되어 있지 않다. 따라서 신뢰도가 높은 지진규모 M_w 7.0을 초과하는 자료에 대한 분석을 수행하였으며, 2차 회귀식을 구한 결과는 그림 2-6에 제시하였다. 그림 2-6으로부터 동해 동연부의 1,000년 빈도 지진규모는 $M_w=7.9$ (7.85에서 반올림), 10,000년 빈도의 지진규모는 $M_w=8.2$ (8.19에서 반올림)로 평가되었다.

최근(2013. 6. 6) 일본 원자력규제위원회에서 발표한 ‘기준 지진해일 및 내지진해일 설계방침에 관한 조사 가이드’에 의하면, 일본의 태평양 해역(동쪽 해역)에서 발생 가능한 최대 지진은 2011년 대지진 발생으로 기존 평가보다 크게 상향되었다. 그러나 일본 서측 해역(동해 동연부)에서 발생 가능한 최대 지진은 $M_w=7.9$ 로 기술되어 있다. 또한 일본 지진조사연구추진본부(2013. 7.19)에서는 일본 홋카이도 북서 해역에서 규모 7.8 지진의 재발 간격을 3,900년으로 발표한 바 있다. 따라서 본 보고서에서 평가된 1,000년 및 10,000년 빈도의 지진규모($M_w=7.9$ 및 $M_w=8.2$) 평가 결과는 현재까지 일본에서의 발표 자료에 비추어 볼 때 충분한 타당성을 가지는 것으로 검토되었다.

다. 재현주기 10,000년 빈도 지진해일의 단층 파라미터

지진해일에 의한 초기 수면변위 생성을 위한 단층 파라미터의 개념도는 다음과 같다.



$$M_0 = \mu LWD \quad (2-2)$$

여기서 $\mu(N/m^2)$ 는 지층의 강성계수(Rigidity Modulus)이다. 단층의 위치적 특성에 따른 강성계수 μ 는 표 2-3과 같이 구분된다.

단층의 폭(W)은 지진이 발생하는 지각의 두께에 따라 최대 한계치가 존재하며 식 (2-3)은 최대 단층의 폭을 계산하기 위한 관계식을 보여준다. 일본 토목학회의 연구에 따르면 동해 동연부(일본 서해안)의 경우 지진이 발생하는 지각의 두께가 최대 15km라고 제시한 바 있다. 따라서 동해 동연부 지각의 두께 15km와 경사각(δ)의 관계를 통해 물리적으로 최대 발생할 수 있는 단층의 폭(W)을 결정할 수 있다.

$$W = (\text{지각의 두께}) / \sin \delta \quad (2-3)$$

일본 토목학회의 연구에 따르면 동해 동연부의 경사각(δ)은 $30^\circ \sim 60^\circ$, 미끄럼 각도(λ)는 90° 로 제시된 바 있다. 따라서 본 평가에서는 상기 내용을 바탕으로 동해 동연부의 10,000년 빈도 지진규모($M_w=8.2$)에 따른 단층 파라미터를 설정하였으며 이를 표 2-4에 제시하였다. 표 2-4에 설정된 단층파라미터에서 단층의 경사각(δ)은 일본 토목학회 연구결과 중 가장 큰 초기수면변위를 발생시킬 수 있는 60° 를 적용하였으며, 단층면의 상연깊이(H) 역시 가장 큰 초기수면변위가 발생할 수 있는 조건인 1km를 적용하였다.

표 2-4에 제시된 단층파라미터는 연동형 지진을 고려하여 설정되었다. 과거 동해 동연부(일본 서쪽 해안)에서 발생되어 우리나라 동해안에 지진해일 피해를 발생시킨 지진은 1983년 동해 중부 해저지진($M_w=7.9$)과 1993년 북해도 남서외해 해저지진($M_w=7.7$)이며 이러한 지진이 연동하여 10,000년 빈도 지진규모($M_w=8.2$)의 지진이 발생됨을 설정하였다. 그림 2-7은 동해 동연부(일본 서안)에서의 10,000년 빈도 지진규모($M_w=8.2$)의 연동형 지진 발생 개념도를 보여준다. 연동되는 3개의 지진 단층은 원전부지 설계기준 해수위 조사·연구[2-19]에서 사용한 M_w 7.9- M_w 7.9 2개 단층 연동 조합에 북측으로 M_w 7.8 단층을 추가 배치를 기본으로 설정하였다. 북측으로 추가된 M_w 7.8의 단층은 동해 동연부를 따라 분포하는 단층대를 따라 배치하였으며 각각 연동되어 발생함을 가정하였다. 식(2-1)을 이용하여 계산된 상기 5개의 지진에 따른 지진모멘트(M_0) 총합은 $M_w=8.2$ 의 지진규모로 계산되었으며, 이를 통해 본 평가에 적용된 동해 동연부의 연동형 지진은 10,000년 빈도의 지진규모($M_w=8.2$)임을 알 수 있다.

표 2-4에 제시한 바와 같이 연동형 지진의 단층 파라미터는 지진단층의 조합과 주향각(θ) 변화에 따라 총 10가지 Case로 설정하였다. 그림 2-8~그림 2-10은

Mansinha and Smylie(1971)의 해석해 및 표 2-4에 제시된 각 case별 단층 파라미터를 적용하여 생성된 지진해일 초기 수면변위를 보여준다. 초기수면변위의 최대치는 $M_w=7.9$ 단층에서 발생되며 각 Case 별로 최대치는 약 7.0~7.5m의 수면고가 계산되었다.

라. 지진해일 수치모형

(1) 선형 천수방정식(Linear Shallow Water Equation, LSWE)

지진해일은 풍파에 비해 파장이 매우 길어 장파로 간주되지만 조석에 비하면 파장이 짧아 상대적으로 분산성이 강하다. 특히, 지진해일은 먼 거리를 전파하기 때문에 반드시 물리적인 분산효과를 고려하여 해석하여야 한다. 또한 지진해일은 수심이 매우 작은 해안에 인접한 해역을 제외하면 대부분의 해역에서 파장이 매우 길고 수면변위가 매우 미소하므로 비선형성을 무시할 수 있다. 약한 분산효과를 고려한 식으로는 2차원 선형 Boussinesq 방정식이 있으나 이 방정식은 수치해석시 발생하는 수치오차를 줄이기 위해서 작은 크기의 계산격자를 사용해야 하므로 먼 거리를 전파하는 지진해일 수치모의에 적용하기에는 비효율적이다.

따라서 지진해일이 대양을 전파하는 것과 같이 먼 거리를 전파할 때는 분산효과와 Coriolis 효과가 중요한 역할을 한다(Kajiura and Shuto, 1990). 따라서 본 평가에서는 Cho et al.(2007)이 제안한 물리적 분산효과를 고려하기 위한 분산보정 계수가 포함된 선형 천수방정식에 Coriolis 항을 추가하여 지진해일 전파 수치모의를 위한 운동방정식을 설정하였다.

(2) 비선형 천수방정식(Nonlinear Shallow Water Equation, NSWE)

대양을 전파해 오는 지진해일은 물리적인 분산효과가 중요하게 작용하지만, 수심이 얇은 해안 근처에서 지진해일의 거동은 분산효과보다 상대적으로 비선형 효과와 바닥마찰이 지배적으로 작용한다. 그러므로 수심이 얇고 복잡한 해안구조물이 존재하는 영역에서는 비선형 및 바닥마찰을 고려할 수 있는 2차원 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 적용하였다. 아울러 범람모형으로는 Yoon and Cho(2001)에 의해 발표된 이동경계(Moving Boundary, MB)를 도입한 비선형 천수방정식모형을 적용하였다.

(3) 수치모형 검증

상기 지진해일 수치모형의 정확성을 검증하기 위해 이 수치모형으로 1983년 동해 중부 지진해일을 적용하여 수치모의를 수행하고, 이 결과와 1983년 지진해일 당시 부지 부근의 포항항 및 울산항 검조소의 검조기록을 비교하였다. 비교 결과 수치모의 결과치와 검조소의 관측치가 잘 일치하고 있는 것으로 나타나 본 평가에 적용된 수치모형의 적용성이 검증된 것으로 판단되었다.

마. 지진해일 수치모의

(1) 계산영역 설정 및 수치모의 조건

지진해일 전파 및 범람 수치모의를 위한 계산영역은 그림 2-11에 제시한 바와 같이 동서방향으로는 경도 115.0°E~153.3°E 사이, 남북방향으로 위도 13.2°N~44.3°N 사이의 동해와 서해 그리고 동중국해 및 북서태평양의 일부 영역을 포함하도록 설정되었다. 계산격자의 크기는 동서방향 격자경도 간격($\Delta\psi$)을 1min으로 정하고 격자위도 간격($\Delta\phi = \cos\phi \Delta\psi$)은 격자망이 국부적으로 정사각형이 되도록 보정하여 사용하였다. 지진해일은 외해로부터 해안으로 전파해 오면서 수심의 감소로 인해 파장이 짧아지므로 전체영역에 대해 격자간격 1min의 대격자만을 사용하면 수심이 작은 해안 근처에서는 격자 분해능이 저하되어 수치오차가 발생하게 된다. 그러므로 한울 부지 전면 상세역에 대해서는 상세격자 및 동적격자접속기법을 적용하여 격자 분해능을 유지하였다. 표 2-5는 지진해일 전파 및 범람 수치모의에 적용된 격자정보 및 계산조건을 보여주며 그림 2-12와 그림 2-13은 동적격자접속기법을 통해 그림 2-11에 제시된 광역 계산영역에 연결되는 상세역의 계산영역, 수심 분포를 보여준다.

(2) 수치모의 결과

동해 동연부의 지진해일로 인한 한울3,4호기 부지 전면 해역에서의 해수면 상승고 평가를 위하여 그림 2-8~그림 2-10에 제시된 초기 수면변위를 적용하여 지진해일 전파 및 범람 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과 각 Case별 지진해일로 인한 한울부지 전면 해역에서의 최대 해수면 상승고 분포는 그림 2-14~그림 2-16과 같으며, 표 2-6에는 이를 기준으로 도출된 방파제 내부에서의 각 Case 별 최대 해수면 상승고를 제시하였다. 10개의 Case 중에서 Case2에서 가장 큰 해수면 상승치(4.98m)가 도출되었다.

또한 방파제 내부를 제외한 부지 호안전면에서는 배수로의 방파제와 호안이 만나는 위치에서 10개의 Case 중 Case4의 계산 결과에서 가장 큰 해수면 상승치(6.26m)가 도출되었다. 결론적으로 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 한울 3,4호기 부지 전면에서의 가능최고해수위는 다음과 같다.

○ 방파제 외부

$$\begin{aligned}\text{가능최고해수위} &= 10\% \text{ 초과고조위} + \text{재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 해수면상승고} + 25\text{년 빈도 파랑의 처오름고} \\ &= \text{EL.}(+)0.201\text{m} + 6.26\text{m} + 1.32\text{m} = \text{EL.}(+)7.781\text{m}\end{aligned}$$

○ 방파제 내부

$$\begin{aligned} \text{가능최고해수위} &= 10\% \text{ 초과고조위} + \text{재현주기 } 10,000\text{년 빈도 지진해일에 의한 해} \\ &\quad \text{수면상승고} \\ &= \text{EL.}(+)0.201\text{m} + 4.98\text{m} = \text{EL.}(+)5.181\text{m} \end{aligned}$$

상기와 같이 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능 최고해수위는 EL.(+)7.781m로 평가되었다.

2.2.4.2 폭풍해일에 의한 설계기준초과 홍수 수준

한울 부지가 위치한 우리나라의 동해안은 하절기(7월~9월)에 북태평양의 남서해상(북위 5~20°, 동경 110~180°)에서 발생하는 태풍에 의한 해일의 영향을 직접 받을 수 있다. 본 평가에서는 이러한 태풍에 의한 해일 영향을 평가하기 위해서 먼저, 한울3,4호기 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 태풍 규모를 산정하고, 이를 이용하여 해수위 영향 검토를 위한 폭풍해일 수치모의를 수행하였다.

가. 재현주기 10,000년 빈도의 태풍 규모

한울3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 규모(진로, 최대풍 반경, 최대풍속, 이동속도)를 결정하기 위해서는 확률론적 분석이 필요하다. 이에 본 평가에서는 USNRC의 JLD-ISG-2012-06(Guidance for Performing a Tsunami, Surge, or Seiche Hazard Assessment)[2-24]에서도 기술된 바 있는 Kerry Emanuel 등(2006, 2008)이 제안한 방법을[2-25, 2-26] 적용하였다. 이 방법에서는 확률분석의 신뢰도를 향상시키기 위하여 부지 반경 100km를 통과하는 약 30,000개 인공태풍의 진로를 1980-2016년까지의 NCAR(National Centers for Environmental Prediction)/NCEP(National Centers for Atmospheric Research)의 재분석 자료를 이용하여 작성하였다.

상기 30,044개의 인공태풍을 바탕으로 그림 2-17과 같이 한울3,4호기 부지 주변에서의 최대풍(1분 평균 최대풍속)에 대한 빈도분석을 수행하였다. 그림 2-17에서 보듯이 한울3,4호기 부지 주변에서의 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속은 약 99.7knot($\approx 51\text{m/sec}$)임을 확인할 수 있다. 이에 따라 본 평가에서는 한울 부지 주변(반경 100km 범위)에서 재현주기 10,000년 빈도 최대풍 풍속(약 51m/sec)을 발생시키는 태풍을 선정하였다.

30,044개의 인공태풍 중 한울 부지에서 최대풍속(99.5~99.9knot)을 발생시키는 태풍은 총 22개로 파악되었으며, 선정된 각 태풍의 이동경로 및 중심기압, 최대풍 반경, 최대풍속을 그림 2-18~그림 2-21에 각각 제시하였다. 이 중 3개 태풍을 선정하여 태풍의 중심 위치가 위도 25°N 이상일 때부터 40°N까지 위치하는 동안 2시간 간격으로 해당 태풍의 파라미터(태풍 중심의 이동경로, 중심기압, 최대풍 반경 및 최대풍속)를 표 2-7~표 2-9와 그림 2-22~그림 2-25에 제시하였다. 그리고 표 2-7~표 2-9에는 위도와 상관없이 발생 후 한울 부지 주변을 지나 소멸되기까지 1분 평균 최대풍속 중 최대값을 별도로 표시하였다. 30,044개의 인공태풍 중 선정된 3개의 태풍은 5321번, 8814번과 10624번 태풍이며 이하 트랙번호의 흐름차순으로 Track01, Track02 그리고 Track03으로 지칭한다.

미국의 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서는 태풍의 분류에 있어서 1분 평균 최대풍속의 크기가 65m/s(130knot, 150mph)인 태풍을 슈퍼태풍(Super-typhoon)으로 분류하고 있다. 상기 3개의 태풍(Track01~Track03)은 발생 후 한울 부지 주변을 지나 소멸되기까지 130knot를 초과하는 1분 평균 최대풍속이 존재하므로 슈퍼태풍으로 분류될 수 있다. 표 2-10에는 3개 태풍에 대해 발생부터 소멸까지 가장 큰 풍속이 발생할 당시의 태풍 중심 위치, 중심기압 및 1분 평균 최대풍속을 제시하였다.

본 평가에서는 상기 인공태풍을 실제 폭풍해일 및 파랑 수치모의에 적용하기 위하여 1분 평균 최대풍속을 10분 평균 최대풍속으로 변환하였다. Coastal

Engineering Manual(2003)에서는 식(2-4)와 같이 1시간 지속 풍속을 기준으로 지속시간 변화에 따른 풍속을 계산할 수 있는 식을 제시하였다.

$$U_t/U_{3600} = 1.277 + 0.296 \tanh \{0.9 \log_{10}(45/t)\} \quad (2-4)$$

이에 3개 인공태풍(Track01~Track03)의 1분 평균 최대풍속을 식(2-4)에 따라 10분 평균 최대풍속으로 변환하였다. 그 결과 10분 평균 최대풍속은 1분 평균 최대풍속의 약 84%에 해당하는 것으로 계산되었다.

나. 폭풍해일 및 파랑 수치모형

(1) 폭풍해일 수치모형

폭풍해일은 주기가 수십 초에서 수십 분에 달하는 장주기파이기 때문에 천수이론(Shallow Water Theory)으로 해석될 수 있다. 천수이론은 작은 상대수심 즉, 파장에 대한 수심의 비가 작은 조건의 파 해석에 적합한 근사이론으로 현재 조석, 지진해일, 폭풍해일 등의 장파해석을 위해 널리 사용되는 이론이다. 아래 식(2-5)~식(2-7)은 폭풍해일 수치모의를 위한 지배방정식인 2차원 비선형 천수방정식(Nonlinear Shallow Water Equation)을 보여준다. 비선형 천수방정식은 바닥마찰과 비선형성이 중요한 요소로 작용하는 상세역 수치모의를 위한 지배방정식으로 적용되며, 광역 수치모의를 위해서는 선형천수방정식(Linear Shallow Water Equation, LSWE)에 식(2-6)과 식(2-7)과 같이 태풍의 바람을 고려하기 위한 항이 추가되어 적용되었다. 아울러 최상세역은 범람 수치모의를 위해 이동경계(Moving Boundary)를 도입한 비선형 천수방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) = -fQ - gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} P \sqrt{P^2 + Q^2} + \frac{\rho_a}{\rho_w} C^* W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) = fP - gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} Q \sqrt{P^2 + Q^2} + \frac{\rho_a}{\rho_w} C^* W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (2-7)$$

2차원 비선형 천수방정식을 이용한 수치모의를 위하여 본 평가에서는 정방향 및

갈림 격자를 사용하였으며, 수치기법으로는 양해법인 Leap-frog 유한차분법을 적용하였다.

(2) 파랑 수치모형

본 평가에서는 네덜란드 델프트(Delft) 대학에서 개발된 SWAN(ver. 40.91) 모형을 태풍 바람에 의해 생성되는 파랑의 영향을 파악하기 위한 수치모형으로 적용하였다. 본 모형은 파랑변형 계산용 수치모델로서 바람에 의한 파의 생성, 수심변화에 따른 파의 굴절, 회절, 백파와 바닥마찰, 쇄파에 의한 파의 소멸 등을 고려할 수 있다. 또한 주어진 바람과 해저면 및 해류 조건에 대한 연안역, 호수 및 하구의 파랑변형을 계산할 수 있다. 본 모형의 기본방정식은 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation)이며, 사용되는 파랑에너지의 원천항(source terms)에 따라 제1세대, 제2세대 및 제3세대 모델로 구분한다. 본 평가에서는 제3세대 모형을 사용하였다.

(3) 폭풍해일 수치모형 검증

상기 폭풍해일 수치모형의 정확성을 검증하기 위해 이 수치모형을 이용하여 태풍 매미 당시 검조소 기록이 존재하는 마산항에 대해서 폭풍해일 수치모의를 수행하였다. 태풍 매미에 의한 압력 및 풍속분포, 폭풍해일고 시계열을 비교한 결과, 수치모의 결과치와 실제 관측치가 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타나 본 평가에 적용된 수치모형의 적용성이 검증된 것으로 판단되었다.

다. 폭풍해일 수치모의

(1) 폭풍해일 수치모의를 위한 계산영역 설정

한울3,4호기 부지에 대한 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일 수치모의를 위해 그림 2-26에 제시한 바와 같이



표 2-11은 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일 수치모의에 적용된 격자정보 및 계산조건을 보여준다. 표 2-11의 상세역의 계산격자 크기는 광역의 1/3로 설정되어 그림 2-26에 제시된 광역 A영역으로부터 그림 2-27의 최상세역 F영역 까지 총 6단계로 동적격자접속기법을 통해 연속적으로 연결되어 수치모의가 수행되도록 설정하였다.

(2) 폭풍해일 수치모의 결과

재현주기 10,000년 빈도 태풍 Track01~Track03에 대한 폭풍해일 수치모의를 수행하였다. 상기 표 2-7~표 2-9에 제시된 각 태풍별 파라미터가 입력 자료로 적용되었으며, 태풍의 풍속은 10분 평균 최대풍속으로 변환되어 입력되었다. 평가결

과 그림 2-28과 같이 각 태풍 Track별로 한울3,4호기 부지 최상세역에서 계산된 최대폭풍해일고가 도출되었으며, 표 2-12에는 각 태풍 Track별 최대 폭풍해일고 (0.40m)를 제시하였다.

라. 파랑 수치모의

재현주기 10,000년 빈도 태풍의 바람에 의해 생성되는 파랑이 한울3,4호기 부지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 SWAN(ver. 40.91) 수치모형을 활용한 파랑수치모의를 수행하였다. 수치모의에는 상기 제시된 각 태풍별 파라미터가 입력 자료로 적용되었으며, 태풍의 풍속은 10분 평균 최대풍속으로 변환되어 입력되었다. 평가결과 그림 2-29에 보인 바와 같이 각 태풍 Track별로 한울3,4호기 부지 상세역에서의 유의파고 분포와 파향벡터도가 도출되었으며, Track03에서의 유의파고가 제일 큰 값을 나타내었다.

마. 파수위 상승(Wave Setup) 및 처오름높이(Wave Runup)

상기 파랑 수치모의 결과 도출된 유의파고에 대하여 한울3,4호기 부지범람에 의한 영향을 평가하기 위해서는 바람에 의한 파랑을 직접적으로 이용하지 않으며 풍파가 천해로 이동되어 쇄파되면서 연안역의 수위를 증가시키는 파수위 상승(Wave Setup)에 의한 수위 상승량만을 고려한다. 태풍에 의한 한울3,4호기 부지 호안 전면에서의 파수위 상승량은 Coastal Engineering Manual(2003)에서 제시한 방법으로 평가하였으며, 평가결과 파수위 상승량은 0.83m로 평가되었다. 또한 재현주기 10,000년 빈도 태풍 발생시 예상되는 유의파고에 의한 부지 호안에서의 처오름높이(wave runup)는 파랑의 진행 특성, 제방의 형상 등을 참조하여 유럽커뮤니티(EC)가 해안방어와 구조물에서의 월파를 산정하기 위하여 제안한 EurOtop에 의한 평가결과 7.298m로 산정되었다. 한편 방파제 내부의 경우 폭풍해일고와 파수위상승은 방파제 외부와 동일하나 파랑에 의한 처오름높이는 발생하지 않으며, 취수로 내부 유의파고 및 전면 방파제 월파로 인한 수위상승이 최고 1m까지 발생할 수 있다.

바. 재현주기 10,000년 빈도 태풍에 의한 가능최고해수위

재현주기 10,000년 빈도 태풍에 의한 부지 전면 방파제 외부 및 내부에서의 가능최고해수위는 다음과 같다.

○ 방파제 외부

$$\begin{aligned} \text{가능최고해수위} &= 10\% \text{ 초과고조위} + \text{폭풍해일고(Storm surge)} + \text{파수위상승} \\ &\quad (\text{Wave setup}) + \text{처오름높이(wave runup)} \\ &= 0.201\text{m} + 0.4\text{m} + 0.83\text{m} + 7.298\text{m} = \text{EL.}(+)8.729\text{m} \end{aligned}$$

○ 방파제 내부(취수로)

$$\begin{aligned}\text{가능최고해수위} &= 10\% \text{ 초과고조위} + \text{폭풍해일고(Storm surge)} + \text{파수위상승} \\ &\quad (\text{Wave setup}) + \text{취수로 내부 유의파고 및 방파제 월파로 인한} \\ &\quad \text{수위상승} \\ &= 0.201\text{m} + 0.4\text{m} + 0.83\text{m} + 1.0\text{m} = \text{EL.}(+)2.431\text{m}\end{aligned}$$

상기와 같이 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 태풍에 의한 가능최고 해수위는 방파제 외부에서의 EL.(+)8.729m이며, 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m 보다 낮다.

2.2.4.3 재현주기 10,000년을 초과하는 국지강우에 의한 홍수 수준

가. 가능최대강우에 의한 안전관련 구조물의 홍수영향

가능최대강우에 의한 한울3,4호기 설계기준 홍수 수준 평가에서는 통계학적으로 약 10,000년 빈도를 초과하는 가능최대강수량(PMP)을 적용하였다. 그러나 본 보고서 “2.2.2.2 가능최대강수에 의한 설계기준 홍수”에서 보듯이 설계기준 홍수에서는 광정위어를 이용한 1차원적 침수심 평가만 수행되었으므로 본 평가에서는 설계기준초과 홍수영향을 평가하기 위하여 부지 내 건물, 도로, 화단 등 구조물에 의한 배수 및 저류 효과를 고려하도록 한울3,4호기 부지 전체에 대한 2차원적 침수영향 해석을 수행하였다.

이를 위하여 수문기상학적 방법[가능최대강수량도(PMP도) 이용], 포락선 방법 및 통계학적 방법으로 가능최대강수량을 평가하였다. 상기 3개 값 중 가장 큰 값(수문기상학적 방법에 의해 평가된 1시간 PMP 162mm, 표 2-13 참조)을 이용하여 부지에 예상되는 가능최대홍수량(PMF)을 미육군공병단의 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형을 이용, Clark 방법으로 산정하였다. 상기 지속시간 1시간 동안 162mm의 강수량은 부지가 속한 울진관측소의 시간별 강우자료를 분석하여 지속기간별 재현기간에 따른 확률강우량을 산정한 결과 약 90만년 정도의 발생빈도에 해당되는 것으로 검토되었다(표 2-14, 가능최대강우 산정에서 유역면적 25km²~20,000km²의 가능최대강수량도의 독치한 값을 회귀분석하여 2.5km²의 가능최대강수량을 산정하였으므로 Thiessen망도상 울진관측소의 면적인 242.6km²를 2.5km²로 회귀분석하여 지속기간 1시간의 재현기간에 따른 확률강우량을 산정).

한편 10,000년 빈도의 경우 지속기간 1시간 강우는 120mm, 십만년 및 백만년 빈도의 경우 각각 약 142mm, 164mm인 것으로 검토되었다. 최종적으로 부지의 각 지점별 최고수위를 XP-SWMM의 내부 2D 모형인 TUFLOW 모형을 사용하여 2

차원 수치모의를 수행하여 산정하였고, 이렇게 구한 각 지점별 최고수위와 안전관련 구조물의 1층 출입구 표고를 비교함으로써 안전관련 구조물의 침수 영향을 평가하였다.

또한 이 평가에서는 가능최대강우로 발전소의 우수배수계통이 그 기능을 상실하는 상황을 가정하였다. 평가결과 한울3,4호기 대부분의 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심이 구조물 출입구 보다 6cm~24cm 높아 침수가 발생하는 것으로 검토되었다(표 2-15, 그림 2-30). 상기와 같이 침수가 발생하는 원인은 한울3,4호기와 인접하여 위치한 한울1,2호기의 부지고가 3,4호기 보다 평균 약 10cm~15cm 높아 강우의 흐름이 1,2호기에서 3,4호기 방향으로 발생하고, 강우가 해안으로 방출되는 지점(순환수 취수구조물 전면)의 높이가 3,4호기 부지정지고 보다 약 10cm 정도 높기 때문인 것으로 검토되었다. 이에 대한 구조물·계통·기기의 건전성은 제3장(극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성) 보고서에서 평가된다.

나. 가능최대강우의 1.5배 국지강우 발생시 안전관련 구조물의 홍수영향

극한 자연재해에 대한 한울3,4호기 대응능력 확인 차원에서 규제기관 검증지침에서 요구하고 있는 가능최대강우의 1.5배 해당하는 국지강우가 부지에 발생할 경우 안전관련 구조물의 홍수영향을 추가적으로 검토하였다. 이 평가에서는 부지 내 건물, 도로, 화단 등 구조물에 의한 배수 및 저류 효과를 고려하도록 한울3,4호기 부지 전체에 대한 2차원적 침수영향 해석을 수행하였다. 여기서는 부지의 각 지점별 최고수위를 XP-SWMM의 내부 2D 모형인 TUFLOW 모형을 사용하여 2차원 수치모의를 수행하여 산정하였고, 이렇게 구한 각 지점별 최고수위와 안전관련 구조물의 1층 출입구 표고를 비교함으로써 안전관련 구조물의 침수 영향을 평가하였다.

또한 이 평가에서는 가능최대강우로 발전소의 우수배수계통이 그 기능을 상실하는 상황을 가정하였다. 평가결과 한울3,4호기 대부분의 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심이 구조물 출입구 보다 3cm~37cm 높아 침수가 발생하는 것으로 검토되었다.

다. 가능최대강우의 1.5배 국지강우 발생시 하천과 강의 가능최대홍수에 의한 홍수영향

2.2.2.2절 ‘나’항에서 평가된 ‘하천과 강의 가능최대홍수에 의한 홍수영향’에서는 가능최대강우 발생시의 홍수영향을 평가하였다. 본 절에서는 가능최대강우의 1.5배 해당하는 국지강우가 부지 부근에 발생할 경우 부구천의 홍수위를 평가하였다.

설계기준초과 폭풍해일 발생시 부구천 하구의 가능최대수위(처오름높이 제외)는 EL(+1.431m이며, 이 수위는 EL(+2.66m(계획홍수위, 하천정비기본계획) 보다 작으므로 하천정비계획의 계획홍수위인 EL(+2.66m를 적용하였다. 상류단의 유입 유량은 1,405.09m³/sec(PMP 조건)과 2,107.64m³/sec(1.5배 PMP 조건)이며, 부구천 지형자료는 하천정비기본계획의 현황 측량자료를 이용하였다. 상기 입력자료를 이용하여 부구천에 대한 1차원 배수곡선 계산(HEC-RAS 모형 적용)을 수행하였고, 이때 한울부지 인근에서의 최대 홍수위는 부지고(EL.+10.00m) 보다 낮으므로 홍수영향이 발생하지 않는다.

2.2.5 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 홍수를 제외한 설계기준초과 자연재해

2.2.5.1 설계기준초과 강풍 및 토네이도 평가

가. 설계기준초과 강풍

본 평가에서는 설계기준을 초과하는 강풍의 영향을 평가하고자 한울 부지의 10,000년 빈도 최대풍속(10분 평균 최대풍속) 및 최대순간풍속(3초 평균 최대풍속)을 검토하였다. 10,000년 빈도의 풍속을 평가하는데 있어 정확성을 향상시키기 위해서는 가능한 오래전부터의 풍속 측정 자료가 필요하므로 부지의 북쪽인 강릉과 부지의 남쪽인 울진 및 포항에서 기상관측 이래 2016년까지 관측된 풍속자료를 사용하였다. 최대풍속의 경우 강릉은 1916년에서 2016년까지, 울진은 1971년에서 2016년까지, 포항은 1949년에서 2016년까지의 관측 자료를 사용하였다. 최대순간풍속의 경우 강릉은 1961년에서 2016년까지, 울진은 1978년에서 2016년까지, 포항은 1962년에서 2016년까지의 관측 자료를 사용하였다(표 2-16, 표 2-17, 표 2-18).

자료의 극치 즉, 최대치 또는 최소치 계열을 분석하는 경우에는 극치분포가 자주 쓰이므로 IAEA-SSG-18 요건에서는 분석하고자 하는 기상변수에 따라 Fisher-Tippett Type I(Gumbel), II(Frechet), III(Weibull) 분포를 권고하고 있다. 상기 방법 중 Gumbel 분포는 기상자료와 같이 상한 값이 존재하지 않으면서 분포의 끝이 지수함수형으로 감소하는 자료의 극치분석에 주로 사용된다. 본 평가에서 사용된 아래의 Gumbel-Chow 분포는 특정한 형태의 확률분포 형을 가지고 있는 것이 아니라 극치확률분포 중의 하나인 Gumbel 분포에 대하여 Chow(1951)가 빈도계수법(frequency factor analysis)을 적용하였기 때문에 붙여진 이름이다. 따라서 실질적으로는 매개변수 추정방법 중의 하나인 모멘트법과 동일한 결과를 가진다. 그러므로 Gumbel-Chow 분포는 Gumbel 분포형에 매개변수 추정방법 중의 하나인 모멘트법을 적용한 것이므로 Gumbel 분포와 다르지 않다. 이에 재현주기 10,000년 빈도 강풍 평가시는 Gumbel-Chow 분포를 사용하였다.

기상관측자료와 같이 상한 값이 존재하지 않으면서 분포의 끝이 지수함수형으로 감소하는 자료의 극치분석에 활용되는 제1형 극치분포(Type I extremal distribution)를 이용하여 재현기간 10,000년 빈도값을 산정한 바, 제1형 극치분포가 왜곡도 1.1396인 특별한 경우의 대수정규분포라고 가정하면 재현기간 T에 해당하는 최대값은 Chow에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$X_T = \mu - \left[0.45 + 0.7797 \ln \left\{ -\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \cdot \sigma \quad (2-8)$$

여기서,

X_T : 재현기간 T에 해당하는 최대값

μ : 표본의 평균

σ : 표본의 표준편차

평가결과 계산된 부지의 10,000년 빈도 최대풍속은 강릉지방 55.54m/s, 울진지방 55.72m/s, 포항지방 62.36m/s, 10,000년 빈도 최대순간풍속은 강릉지방 58.35m/s, 울진지방 84.51m/s, 포항지방 54.73m/s 이었다. 상기 10,000년 빈도 풍속에 대한 구조물·계통·기기의 건전성은 제3장(극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성) 보고서에서 평가된다.

나. 설계기준초과 토네이도

토네이도는 미국 중남부에서 주로 발생하는 반시계 방향의 강한 소용돌이 바람을 말하며 적란운의 하층으로부터 깔때기 모양의 구름이 만들어지며, 매우 강한 소용돌이를 이루며 이동한다. 그 규모는 일반적인 회오리바람보다 훨씬 커 지름이 수백 미터에 달하며, 풍속은 평균 83m/sec~222m/sec 정도로 알려져 있다. 토네이도는 일반적으로 차고 건조한 대륙성 한랭기단과 따뜻하고 습한 해양성 기단이 지형적 장벽이 없는 평야지대에서 만나기 때문에 발생한다. 토네이도가 발생하기 위해서는 하층에 고기압이 정체하여야 하므로 우리나라의 산악지형 같이 지형지물이 많은 곳에서는 발생하기 어렵다. 반면 우리나라 해안에서는 지형지물의 영향이 비교적 작아 토네이도의 일종인 용오름 현상이 가끔 관측된다.

최근까지 국내에서 발생된 토네이도 및 용오름에 대한 기록을 살펴보면, 1964년 9월 서울근교 뚝섬지방을 지나간 작은 규모의 토네이도와 1980년 7월 사천에서 발생된 토네이도, 1985년 가을과 1988년 10월 18일 울릉도 동쪽 해상에 발생한 용오름, 1985년 7월 횡성-평창에서 발생된 토네이도, 1989년 10월 홍성에서 발생된 토네이도, 1996년 11월 제주도 서귀포에서 관측된 용오름, 1997년 1월과 1998년 1월 제주도 서귀포에서 관측된 토네이도, 2005년 전북 장수지역에서의 강력한 돌풍 등

의 발생기록이 있다. 또한 2014년 6월에는 경기도 고양에서 토네이도가 발생하여 비닐하우스 20여동이 피해를 입고 부상자가 발생하였다. 이 토네이도는 기상청에서 용오름 현상이라고 발표되었으며, 후지타(Fujita) EF0 규모 이하로 추정되었다.

한편 울릉도에서는 1985년 이후 2011년까지 총 6회의 용오름 현상이 관측되었으며 최근 2012년 강릉 앞바다 및 제주시 이호동 앞바다에서도 용오름이 관측된 바 있다. 그러나 이러한 용오름은 보통 지름이 100m 이하이며 풍속도 초속 25m 이하로 일반적인 토네이도보다 규모가 작고 파괴력도 약하다.

토네이도의 강도를 나타낼 때에는 토네이도에 의한 피해를 기준으로 정한 후지타 규모(Fujita Scale)가 주로 쓰인다. 후지타 규모는 F0에서 F5까지 6개의 등급으로 구분되는데, 최근에는 풍속과 피해규모에 따라 개선된 새로운 후지타 규모를 사용하고 있다. 개선된 후지타 규모는 EF0에서 EF5까지 6개의 등급으로 구분되며 다음과 같다.

- EF0 : 풍속이 29~38m/s이며 나뭇가지가 부러지고 간판이 피해를 입는 단계
- EF1 : 풍속이 39~49m/s이며 나무가 꺾이고 창문이 깨지는 단계
- EF2 : 풍속이 50~60m/s이며 큰 나무의 뿌리가 뽑히고 약한 건축물이 파괴되는 단계
- EF3 : 풍속이 61~74m/s이며 나무는 완전히 파헤쳐지고 자동차는 뒤집히며 빌딩 벽이 무너지는 단계
- EF4 : 풍속이 75~89m/s이며 조립식 벽이 파괴되는 단계
- EF5 : 풍속이 90m/s 이상이며 자동차 크기의 구조물은 100m 이상 이동하고 철 구조물도 큰 피해를 입는 단계

한울3,4호기 설계에서는[2-14] 후지타-피어슨의 F1급 토네이도의 회오리바람 압력은 태풍의 풍압을 초과하지 않는 것으로 검토하고, 태풍하중을 적용하였다. 또한 토네이도 비산물 평가와 관련하여 가상 태풍에 의한 비산물로서 6" Sch. 40 Pipe 등 6가지를 고려하였고, 이에 의한 비산물하중을 구조물 설계에 반영하였다. 한편 최근에 한울3,4호기와 인접하여 건설된 신한울1,2호기에서는 우리나라에서 수집된 토네이도 발생자료를 이용하여 설계기준토네이도를 결정하였고, Fujita 규모로 분석한 설계기준 토네이도를 EF1 급으로 결정한 바 있다. 따라서 한울 부지에서의 설계기준 토네이도는 Fujita 규모로 분석한 EF1 급으로 볼 수 있다.

토네이도 관련 연구결과[2-27]에서는 우리나라의 경우 구조물에 피해를 입힐 정도로 큰 규모의 토네이도 발생사례 및 발생된 토네이도의 관측 자료가 매우 적어 우리나라 육지에서의 토네이도 발생빈도를 $1.6 \times 10^{-6} / \text{km}^2 \cdot \text{yr}$ 로 산정한 바 있다. 또한 그 규모를 서울(1964년) 및 홍성(1989년)에서 발생한 토네이도에 대한 피해 사진을 분석하여 Fujita 규모의 토네이도 등급 중 EF0 내지 EF1 급의 토네이도

로 추정된 바 있다. 따라서 발전소의 서쪽이 산지에 막혀 있는 부지의 특성을 고려한다면 한울 부지에서 EF1 급의 토네이도는 발생가능성이 거의 없으며, 따라서 EF1 급의 토네이도는 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있다. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 상황을 가정하여 3장 보고서에서 구조물·계통·기기의 건전성을 평가하였다.

2.2.5.2 설계기준초과 가능최저해수위 및 해수온도

가. 설계기준초과 가능최저해수위

한울3,4호기 부지에서의 가능최저해수위는 지진해일에 의한 해수위가 지배적이며, 앞서 평가된 재현주기 10,000년 빈도 설계기준초과 지진해일 수치모의 결과 취수로 내부에서의 가능최저해수위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{가능최저해수위} &= \text{최극저조위} + \text{재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 처} \\ &\quad \text{내림고} \\ &= (-)0.49\text{m} + (-)3.16\text{m} = \text{EL.}(-)3.65\text{m} \end{aligned}$$

상기와 같이 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최저해수위는 EL.(-)3.65m로 평가되었다.

나. 설계기준초과 해수온도

한울3,4호기 FSAR []에 의하면 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도는 []이다. 한편 2006년부터 2017년 8월까지 최근 10년간 한울3,4호기 기기냉각해수계통에서 관측된 최고 해수온도는 26.8℃이며, 여기에

[] 최고 설계온도 31.5℃에 미치지 못한다. []

[] 최신의 온배수재순환 평가결과에 근거했을 때 한울3,4호기의 해수온도는 최고 설계온도 이내이다.

한편 지구 온난화에 따른 해수온도 상승이 전세계적으로 문제가 되고 있으며 우리나라에서도 이와 관련한 조사 및 연구 활동이 보고되고 있다. 국립수산물과학원에서는 1961년~2007년까지의 해수온도 관측치를 근거로 우리나라 연안에서의 연간 수온상승률을 조사하였고, 부지가 속한 동해 중부연안에서의 연간 수온상승률은 최고 0.04℃/year로 평가된 바 있다. 그러므로 한울3,4호기 운영종료시까지 향후

약 20년을 고려할 경우 수온은 현재보다 약 0.8℃가 상승할 수 있다. 또한 2014년에 발표된 IPCC(정부간 기후변화 협의체) 제5차 보고서에서는 해양에서 가장 강력한 온난화는 열대와 북반구 아열대의 표층에서 나타날 것으로 전망되었으며, 금세기 말까지 해양 상층부 백미터에서 해양온난화의 최적 추정치가 0.6℃(RCP 2.6, 온실가스 배출을 당장 적극적으로 감축하는 경우)~2.0℃(RCP 8.5, 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우)로 검토되었다. 따라서 이를 보수적으로 적용할 경우 금세기말까지 해수온도가 2.0℃ 상승 가능하므로 향후 약 20년을 고려하면 0.5℃ 정도의 상승이 가능하다. 따라서 한울3,4호기 운영종료시까지 향후 약 20년을 고려할 경우 설계기준초과 해수온도 산정에서 기후변화로 인한 수온 상승치는 최대 0.8℃로 가정함이 타당할 것이다. 이 경우 기 평가된 28.9℃에 0.8℃를 더한 29.7℃를 설계기준초과 해수온도로 볼 수 있다.

2.2.5.3 설계기준초과 폭설


부지와 인접하여 위치한 울진 및 강릉지방 기상대에서 기상관측 이래 2016년까지 관측된 최심적설량을 기준으로 Gumbel-Chow 분포 방법으로 평가한 재현주기 10,000년 빈도의 최심적설량은 약 106cm(울진) 및 205cm(강릉) 이다, 이 적설량은 설계기준으로 고려한 최심적설량 105cm와 비교하여 울진에서의 관측치는 큰 차이가 없으며 강릉에서의 관측치는 약 1m가 더 큰 것으로 검토되었다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

설계기준초과 극한자연재해의 특성과 관련하여 한울3,4호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행된 사항은 다음과 같다.

가. 지진 자동 정지설비 설치

일정규모  이상의 지진이 감지될 경우 원자로가 자동정지 되도록 지진원자로자동정지시스템을 설치하였다.

나. 원전부지 최대지진에 대한 조사·연구

고리, 월성, 한울, 한빛 등 4개 원전부지에 대하여 “원전부지 최대지진 조사·연구” 수행을 완료하였다.

다. 원전 설계기준 해수위 조사·연구

고리, 월성, 한울, 한빛 등 4개 원전부지에 대하여 지진해일, 폭풍해일 등과 관련한 “원전설계기준 해수위 조사·연구” 수행을 완료하였다.

3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

가. 월성1호기 스트레스테스트

“설계기준초과 극한자연재해의 특성”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항의 반영여부를 확인한 결과 표 2-18에서 보듯이 “자연재해에 의한 월성부지 안전성 및 원자로격납건물 건전성 확인”의 3가지 세부사항은 한울3,4호기 평가에서 안전 개선사항으로 도출되었거나 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

해당사항 없음

3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 9.12지진을 반영한 확률론적지진재해도 분석(PSHA) 추가 수행

2016년 발생한 9.12지진을 반영하여 2018년 10월까지 PSHA를 추가로 수행하고, 기존 분석 결과와 비교할 예정이다.

나. 설계기준초과 지진 발생시 영구사면 안정성 평가 및 침하 안전성 평가

설계기준지진인 0.2g를 초과하는 지진동 발생시 한울3,4호기 영구사면의 안정성을 평가하고, 침하 안전성과 관련하여 설계기준초과 지진동 발생시에 안전관련 구조물 기초 하부 암반 지지력의 적절성을 검토한다.

제4절 결론

한울3,4호기 스트레스테스트 평가분야 중 “설계기준 초과 극한자연재해의 특성”을 평가하기 위하여 1) 설계기준지진의 수준, 2) 설계기준지진의 타당성, 3) 지진발생시 지반변형에 의한 안전성 검토, 4) 설계기준 홍수, 5) 홍수를 제외한 설계기준 자연재해, 6) 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 설계기준초과 홍수 수준, 7) 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또

는 재현주기 10,000년 수준의 홍수를 제외한 설계기준초과 자연재해를 검토하였다. 상기 7개 항목에 대한 평가결과는 다음과 같다.

- 한울3,4호기 안전정지지진(0.2g)은 한울 부지 반경 320km 11개의 지진지체구조구와 읍천단층 및 방폐장 부지단층으로부터 잠재적인 최대지진을 평가하여 결정하였으며, 울진해역지진 및 확률론적지진재해도(PSHA) 평가결과 등에 근거했을 때 설계기준지진은 타당한 것으로 검토되었음
- 지반변형에 의한 안전성 검토 결과 한울3,4호기 부지 반경 8km 내에서는 활동성 단층이 확인되지 않아 지표단층 작용으로 인한 변형은 발생하지 않을 것으로 검토되었음. 또한 안전관련 구조물 하부 지반에서는 액상화현상이 일어나지 않으며, 10,000년 빈도 지진동(0.18g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서는 영구사면 안정성을 유지할 수 있고 침하 영향도 없을 것으로 평가되었음
- 한울3,4호기 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준해수위와 가능최대강우에 의한 침수 등 설계기준 홍수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있음. 또한 상기 설계기준 홍수 수준은 후쿠시마 후속조치로 수행된 ‘원전부지 설계기준 해수위 조사·연구’ 용역 결과 및 주기적안전성평가 결과 등과 비교했을 때 유사하거나 보수적으로 검토된 바 설계기준으로 타당함
- 한울3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 및 그로 인한 해수면 상승고를 평가한 결과, 부지 전면 해역에서의 해수면 상승고는 최대 6.26m로 평가되었음. 이 때 가능최고 해수위는 최대 EL.(+)7.781m로 검토되었음
- 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고 해수위는 EL.(+)8.729m로 평가되었음
- 재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수 수준평가에 적용된 지속시간 1시간의 가능최대강수량 162mm는 재현주기가 약 90만년에 해당하는 것으로 평가되었음. 상기 강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였음
- 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 최대순간풍속을 평가한 결과 부지의 최대풍속은 62.36m/s, 최대순간풍속은 84.51m/s 이었음. 한울3,4호기 부지에서 EF1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있음. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도를 설계기준초과 토네이도로 고려함
- 한울3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최저해수위 평가결과 해수위는 EL.(-)3.65m로 검토되었음. 한편 설계기준초과 해수온도는 발전소 운영종료시까지 향후 약 20년을 고려할 경우 기후변화로 인한 수온 상승치 최대 0.8℃를 포함하여 29.7℃로 평가되었음

상기와 같은 한울3,4호기의 설계기준초과 극한자연재해의 평가결과에 근거하여 제 3장 보고서(극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성)에서는 극한자연재해에 대한 한울3,4호기 구조물·계통·기기의 건전성을 평가하였다.

제5절 참고문헌

- 2-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침(개정 1), 2016.
- 2-2. 노명현, 이기화, 한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(II): 예측공식의 개발, 대한지질학회, 31, No. 3, pp. 175-187, 1995.
- 2-3. Baag, C.E., Seismic wave attenuation in the Korean Peninsula, International Workshop & Seminar on Probabilistic Hazard Analysis held at Daejeon on Nov. 17-20, 1997.
- 2-4. 박동희, 이정모, 박창업, 김준경, 한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇄식, 지질학회지, 제37권, 제1호, pp. 21-30, 2001.
- 2-5. 박지역, 노명현, 이기화, 한반도 남부 지역의 지진동 감쇄식 개발, 한국지진공학 논문집, 제3권, 제1호, pp. 21-27, 1999.
- 2-6. 이정모, 한반도 강지진동 감쇄특성, KINS/HR-480, 한국원자력안전기술원, 2002.
- 2-7. Jung-Goo Junn, Nam-Dae Jo, and Chang-Eob Baag, Stochastic prediction of ground motions in southern Korea, Geosciences Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 203-214, 2002.
- 2-8. 조남대, 박창업, 한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇄상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사, 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, pp. 59-70, 2003.
- 2-9. 과기부, 원전부지 최대 지진력 평가연구 최종연구보고서, pp. 531, 2006.
- 2-10. 한수원(주), 신한울1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR 2차 초안) 2장.
- 2-11. 한국전력기술(주), 한울3,4호기 확률론적 지진재해도분석(PSHA) 보고서, 2017.
- 2-12. 한국지질자원연구원, 경주지진 중간 조사결과 발표자료, 동남권 지진·단층 연구사업 발표회, 2017.
- 2-13. 한수원(주), 한울3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR) 중 2장.
- 2-14. 한수원(주), 한울3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR) 중 3장.
- 2-15. 한국전력기술(주), 울진 3,4호기 토네이도에 대한 구조물 안전성 검토, 1992.
- 2-16. 한수원(주), 한울3,4호기 주기적 안전성평가보고서(PSR) 중 I.2장.
- 2-17. 한수원(주), 한울5,6호기 주기적 안전성평가보고서(PSR) 중 IV.6장.
- 2-18. 한전전력연구원, 울진원전 부지의 지진해일에 따른 처오름 해석 및 모델분석의 적정성 평가, 2006.
- 2-19. 한수원(주), 원전부지 설계기준 해수위 조사·연구 용역 보고서, 2015.
- 2-20. 한수원(주), 한울1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR) 중 2장.
- 2-21. 한국전력기술(주), 가능최대강우에 의한 한울 3,4호기 안전관련 구조물의 침수영향 검토보고서, 2018.
- 2-22. 한수원(주), 신한울1,2호기 수중취배수 설계특성 반영 온배수 재순환평가 기술검토보고서

- 2-23. 일본 토목학회, Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan, 2002.
- 2-24. USNRC, JLD-ISG-2012-06(Guidance for Performing a Tsunami, Surge, or Seiche Hazard Assessment), 2012.
- 2-25. Emanuel, K., S. Ravela, E. Vivant and C. Risi, 2006: A Statistical-Deterministic Approach to Hurricane Risk Assessment. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 299 - 314.
- 2-26. Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89, 347-367.
- 2-27. 한국강구조학회지 제5권 2호, p 247~260, 원자력 발전소 구조물의 건전성에 미치는 토네이도 영향 연구, 1993.

제6절 표, 그림

표 2-1 지체구조와 관련한 최대지진

TECTONIC PROVINCE	DATE OF MAXIMUM EARTHQUAKE			EPICENTER OR PLACE OF MAXIMUM INTENSITY		DEPTH OF FOCUS (if know) (km)	EPICENTRAL DISTANCE TO SITE (km)	ADJUSTED DISTANCE TO SITE (km)		LIBRARY AND SOURCE	MAGNITUDE OR INTENSITY
	Year	Mont h	Day	Latitude	Longitud e			EPL.	HYPO.		
<div></div>											

표 2-2 최대지진에 의한 부지가속도

TECTONIC PROVINCE	MAXIMUM MAGNITUDE E ¹⁾	ADJUSTED DISTANCE TO SITE ¹⁾	HORIZONTAL GROUND ACCELERATION (g) ¹⁾								Maximum Potential Ground Acc.
<div></div>											

[신 한울 1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR) 2차 초안]

표 2-3 단층의 위치적 특성에 따른 강성계수

위치 (Location)	강성계수 (Rigidity modulus)
<ul style="list-style-type: none"> • 일본 남서부 육지판 - Continental plates in south-west Japan • 동해 동연부(일본 서안) - Eastern margin of the East Sea • 깊이가 20km 미만인 얇은 판의 경계 - Shallow levels of plate boundaries(when the entire fault surface exists within a depth of less than 20km) 	$3.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
<ul style="list-style-type: none"> • 해양판 - Oceanic plates • 깊이가 20km 이상인 깊은 판의 경계 - Deep levels of plate boundaries (when the entire fault surface exists within a depth of greater than 20km) 	$7.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
<ul style="list-style-type: none"> • 판경계의 중심부 - Central portion of plate boundaries (when the entire fault plane exists across a depth of 20km) 	$5.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

표 2-4 단층 파라미터(Case1~Case10)

Case	Location		H (km)	Θ ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	λ ($^{\circ}$)	L (km)	W (km)	D (m)	M_w
	Lat. ($^{\circ}$ E)	Long. ($^{\circ}$ N)								

표 2-5 계산영역별 격자구성 및 계산조건

Region	No. of Grids	Grid spacing $\Delta\psi$	$\Delta t(\text{sec})$	Remarks

표 2-6 지진해일에 의한 한울 부지 전면에서의 해수면 상승고

Case	Maximum water surface displacement (m)	
	방파제 내부	방파제 외부

표 2-7 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track01)

No.	Location		Central Pressure (hPa)	Maximum circular wind speed (knot)	Radius of maximum circular wind (km)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)			

표 2-8 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track02)

No.	Location		Central Pressure (hPa)	Maximum circular wind speed (knot)	Radius of maximum circular wind (km)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)			

표 2-9 재현주기 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track03)

No.	Location		Central Pressure (hPa)	Maximum circular wind speed (knot)	Radius of maximum circular wind (km)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)			
<div></div>					

표 2-10 1분 평균 최대풍속이 최대일 때의 태풍 파라미터

Tack	Location		Central Pressure (hPa)	Maximum circular wind speed (knot)	Radius of maximum circular wind (km)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)			

표 2-11 한울 폭풍해일 수치모의를 위한 계산조건

Region	No. of Grids	Grid spacing $\Delta\psi$	$\Delta t(\text{sec})$	Remarks

표 2-12 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 한울3,4호기 최대 폭풍해일고

Track	Maximum water surface displacement (m)
1	0.36
2	0.30
3	0.40

표 2-13 한울부지의 가능최대강수량 비교

구분	지속기간별 가능최대강수량(mm)						채택
	1hr	2hr	6hr	12hr	24hr	48hr	

표 2-14 울진관측소 지속기간 60분 확률강우량-호우면적 변환
(242.6 km² → 2.5 km² 변환)

재현기간 (년)	확률강우량(mm)		재현기간 (년)	확률강우량(mm)		재현기간 (년)	확률강우량(mm)	
	242.6km ²	2.5km ²		242.6km ²	2.5km ²		242.6km ²	2.5km ²
1,000	72.6	97.4	65,000	102.4	137.4	1,300,000	123.8	166.1
2,000	77.6	104.1	70,000	103.0	138.2	1,400,000	124.3	166.8
3,000	80.5	108.0	75,000	103.4	138.8	1,500,000	124.8	167.5
4,000	82.5	110.7	80,000	103.9	139.4	1,600,000	125.3	168.2
5,000	84.1	112.9	85,000	104.3	140.0	1,700,000	125.7	168.7
6,000	85.4	114.6	90,000	104.7	140.5	1,800,000	126.1	169.2
7,000	86.5	116.1	95,000	105.1	141.0	1,900,000	126.5	169.8
8,000	87.5	117.4	100,000	105.5	141.6	2,000,000	126.9	170.3
9,000	88.3	118.5	110,000	106.2	142.5	3,000,000	129.8	174.2
10,000	89.1	119.6	120,000	106.8	143.3	4,000,000	131.8	176.9
11,000	89.8	120.5	130,000	107.4	144.1	5,000,000	133.4	179.0
12,000	90.4	121.3	140,000	107.9	144.8	6,000,000	134.7	180.8
13,000	90.9	122.0	150,000	108.4	145.5	7,000,000	135.8	182.2
14,000	91.5	122.8	160,000	108.9	146.1	8,000,000	136.8	183.6
15,000	92.0	123.5	170,000	109.3	146.7	9,000,000	137.6	184.7
16,000	92.4	124.0	180,000	109.7	147.2	10,000,000	138.4	185.7
17,000	92.9	124.7	190,000	110.1	147.8	11,000,000	139.0	186.5
18,000	93.3	125.2	200,000	110.4	148.2	12,000,000	139.7	187.5
19,000	93.7	125.7	300,000	113.3	152.0	13,000,000	140.2	188.1
20,000	94.0	126.1	400,000	115.4	154.9	14,000,000	140.8	189.0
25,000	95.6	128.3	500,000	117.0	157.0	15,000,000	141.2	189.5
30,000	96.9	130.0	600,000	118.3	158.8	16,000,000	141.7	190.2
35,000	98.0	131.5	700,000	119.4	160.2	17,000,000	142.1	190.7
40,000	99.0	132.9	800,000	120.3	161.4	18,000,000	142.5	191.2
45,000	99.8	133.9	900,000	121.2	162.6	19,000,000	142.9	191.8
50,000	100.6	135.0	1,000,000	121.9	163.6	20,000,000	143.3	192.3
55,000	101.2	135.8	1,100,000	122.6	164.5			
60,000	101.9	136.7	1,200,000	123.2	165.3			

표 2-15 한울3,4호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과

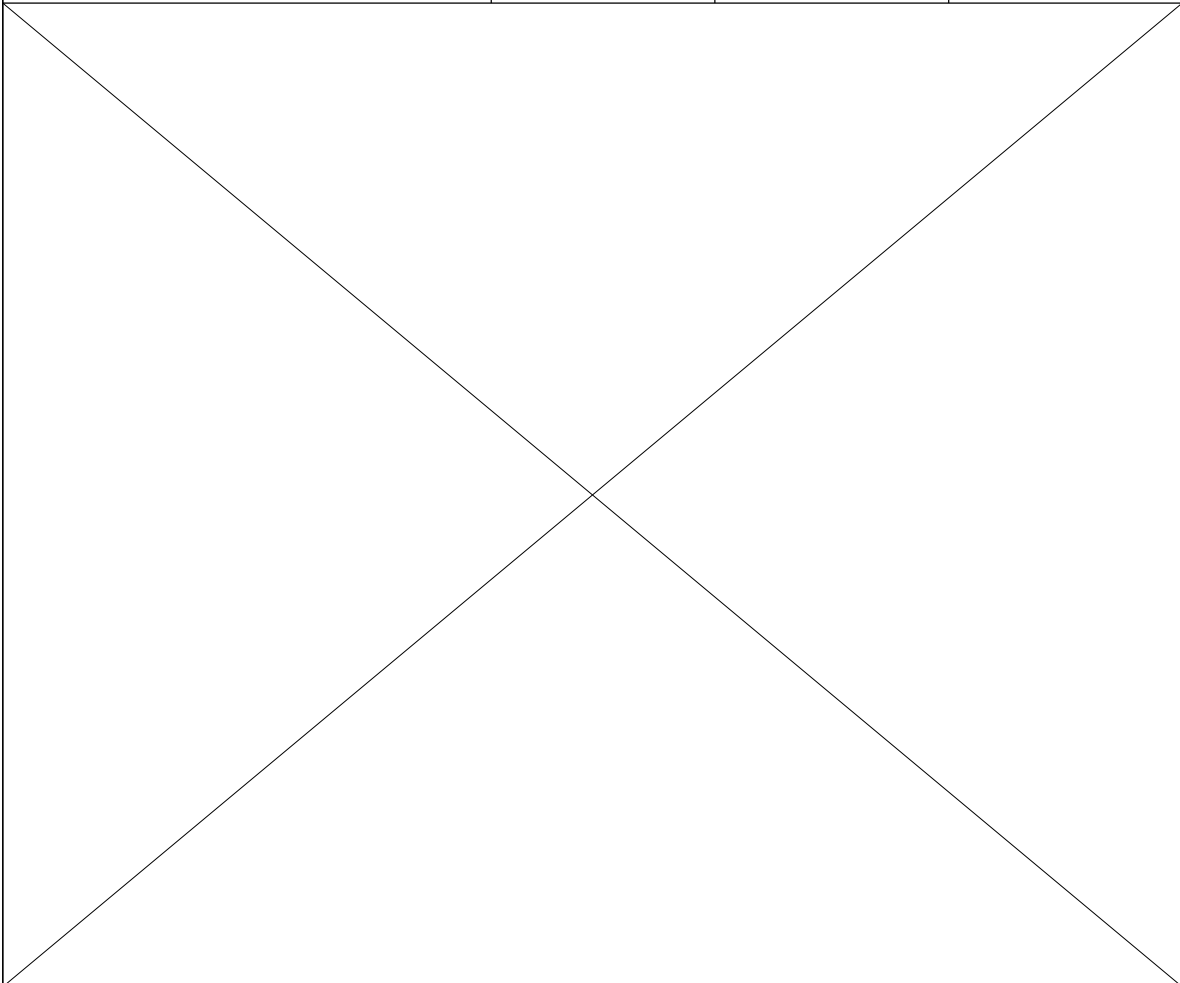
출입문	출입문 표고 (EL. m)	최대침수위 (EL. m)	침수심 (m)
			

표 2-16 10,000년 빈도 최대풍속 계산 입·출력자료(단위 : m/s)

연 도	강 령	연 도	강 령	연 도	울 진
1916	29.2	1967	15.3	1971	17
1917	23.1	1968	21.3	1972	20
1918	27.7	1969	18.3	1973	21
1919	30.9	1970	16.7	1974	21
1920	35.3	1971	18.3	1975	17.5
1921	26.8	1972	18.3	1976	21
1922	24.2	1973	16.8	1977	16.5
1923	22.9	1974	23.3	1978	23.7
1924	22.3	1975	13.3	1979	23
1925	26.3	1976	15.3	1980	21.3
1926	26.3	1977	15	1981	20
1927	23.3	1978	16.7	1982	21.7
1928	24.2	1979	15	1983	35
1929	16.7	1980	17.3	1984	18
1930	18	1981	14	1985	21.3
1931	21.9	1982	14.3	1986	28
1932	16.6	1983	21	1987	28
1933	17.8	1984	15	1988	14.7
1934	15.4	1985	12.3	1989	17
1935	14.5	1986	15.3	1990	25.7
1936	19.7	1987	17.7	1991	17.3
1937	19.7	1988	16.7	1992	19
1938	24.7	1989	14.3	1993	22.7
1939	17.5	1990	15.3	1994	22
1940	21.2	1991	12.7	1995	13.2
1941	20.1	1992	13.3	1996	15
1942	25.2	1993	13.3	1997	31.7
1943	15.8	1994	16.7	1998	15.7
1944	16.8	1995	16.3	1999	13
1945	20	1996	13.7	2000	16
1946	17.2	1997	14.3	2001	12.9
1947	15.8	1998	18.7	2002	20
1948	14.5	1999	16.7	2003	28.2
1949	17.3	2000	17.8	2004	22.4
1950	35.5	2001	13	2005	18
1951	27.3	2002	18	2006	24.2
1952	17.5	2003	14.1	2007	14.4
1953	17.8	2004	18	2008	13.2
1954	25.7	2005	13.5	2009	15.3
1955	18.3	2006	16	2010	13.5
1956	20.3	2007	14.9	2011	16.1
1957	31.7	2008	12.9	2012	18.4
1958	36.7	2009	13.2	2013	12.4
1959	18.3	2010	14.9	2014	11.4
1960	21	2011	11.4	2015	12.5
1961	16	2012	10.8	2016	11.7
1962	24	2013	14.3		
1963	17	2014	11.6		
1964	21	2015	10.7		
1965	15	2016	11.1		
1966	13				
10,000년 빈도 최대풍속		55.54		10,000년 빈도 최대풍속	55.72

표 2-17 10,000년 빈도 순간최대풍속 계산 입·출력자료(단위 : m/s)

연 도	강 령	연 도	강 령	연 도	울 진
1961	21.1	2000	24.5	1978	30
1962	32.6	2001	23.9	1979	31
1963	30.2	2002	29.6	1980	34.1
1964	25.6	2003	22.2	1981	29.1
1965	30	2004	28.1	1982	29.2
1966	31.8	2005	28.2	1983	50
1967	28.7	2006	28.7	1984	27.1
1968	36	2007	25.2	1985	35.1
1969	29.6	2008	22.3	1986	49
1970	32	2009	25.5	1987	44.5
1971	29.8	2010	23.4	1988	25
1972	27	2011	20.5	1989	25.2
1973	32	2012	21.3	1990	43
1974	38	2013	23.1	1991	29.1
1975	28.5	2014	19.8	1992	30
1976	25	2015	20.2	1993	33
1977	23.6	2016	21.9	1994	34.2
1978	27.1			1995	31.6
1979	27.5			1996	34
1980	32			1997	51.9
1981	25.6			1998	41
1982	33			1999	26.2
1983	41.6			2000	25
1984	27.3			2001	24
1985	26.6			2002	32.7
1986	27.5			2003	36.3
1987	36.2			2004	33.8
1988	24.3			2005	32.6
1989	24			2006	35.8
1990	32.2			2007	24.2
1991	28.4			2008	24.8
1992	27.6			2009	28.9
1993	22.7			2010	29.6
1994	24.8			2011	30
1995	27			2012	30.2
1996	24.8			2013	22.7
1997	32.4			2014	18.7
1998	25			2015	20.9
1999	27			2016	22.3
10,000년 빈도 최대풍속		58.35		10,000년 빈도 최대풍속	84.51

표 2-18 10,000년 빈도 최대풍속 및 최대순간풍속 계산 입·출력자료(포항)

연도	포항	연도	포항	연도	포항	연도	포항
1949	20.0	1983	17.7	1962	27.0	1996	18.3
1950	-	1984	14.7	1963	27.9	1997	22.4
1951	39.8	1985	18.0	1964	28.1	1998	25.1
1952	30.3	1986	16.7	1965	29.4	1999	24.2
1953	35.0	1987	23.0	1966	24.0	2000	24.0
1954	31.0	1988	15.0	1967	18.5	2001	21.4
1955	21.7	1989	15.0	1968	22.7	2002	22.5
1956	29.3	1990	15.0	1969	22.0	2003	29.3
1957	23.3	1991	17.3	1970	19.9	2004	21.6
1958	20.0	1992	15.0	1971	20.8	2005	21.1
1959	28.0	1993	13.3	1972	26.2	2006	23.5
1960	33.3	1994	13.3	1973	22.5	2007	19.8
1961	30.0	1995	11.3	1974	29.7	2008	18.3
1962	18.3	1996	12.0	1975	24.0	2009	22.7
1963	21.0	1997	15.7	1976	34.0	2010	21.7
1964	23.0	1998	13.7	1977	31.8	2011	20.8
1965	22.0	1999	12.3	1978	20.9	2012	22.4
1966	15.0	2000	15.3	1979	24.0	2013	15.6
1967	15.2	2001	10.6	1980	28.0	2014	15.2
1968	20.4	2002	14.6	1981	25.8	2015	16.0
1969	19.2	2003	18.5	1982	24.4	2016	17.3
1970	16.7	2004	11.1	1983	23.2		
1971	19.3	2005	10.1	1984	25.0		
1972	18.0	2006	10.8	1985	34.0		
1973	16.7	2007	11.2	1986	27.6		
1974	21.7	2008	8.4	1987	38.0		
1975	16.0	2009	11.7	1988	22.5		
1976	23.3	2010	9.5	1989	25.7		
1977	20.0	2011	9.4	1990	24.5		
1978	15.0	2012	12.7	1991	27.7		
1979	18.3	2013	11.0	1992	25.0		
1980	17.3	2014	10.5	1993	24.0		
1981	18.0	2015	11.7	1994	20.0		
1982	16.7	2016	12.7	1995	20.5		
10,000년 빈도 최대풍속		62.36		10,000년 빈도 최대순간풍속		54.73	

표 2-19 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

제목	세부 내용	한울 3,4호기 반영	비고

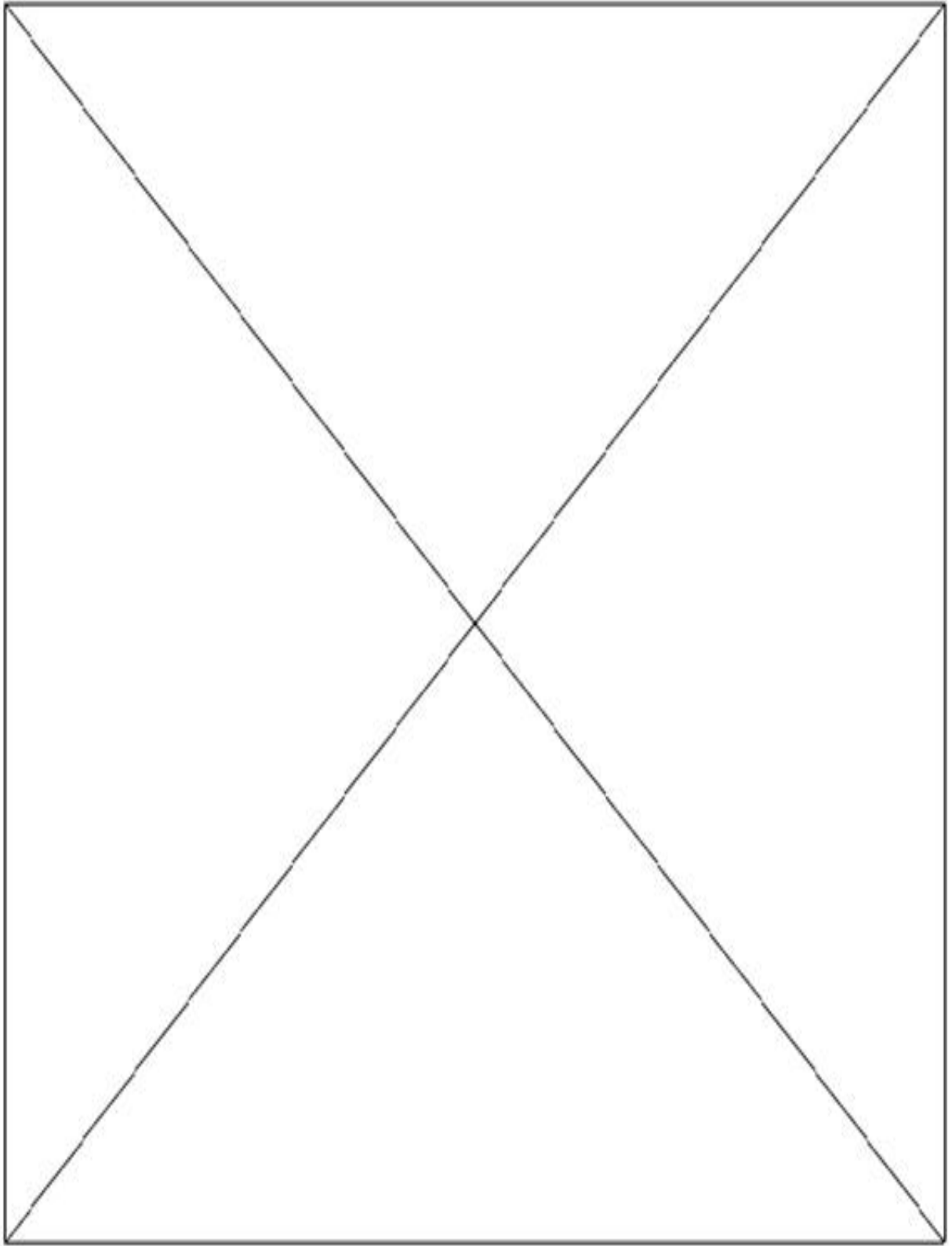


그림 2-1 한울3,4호기 주변 지형도

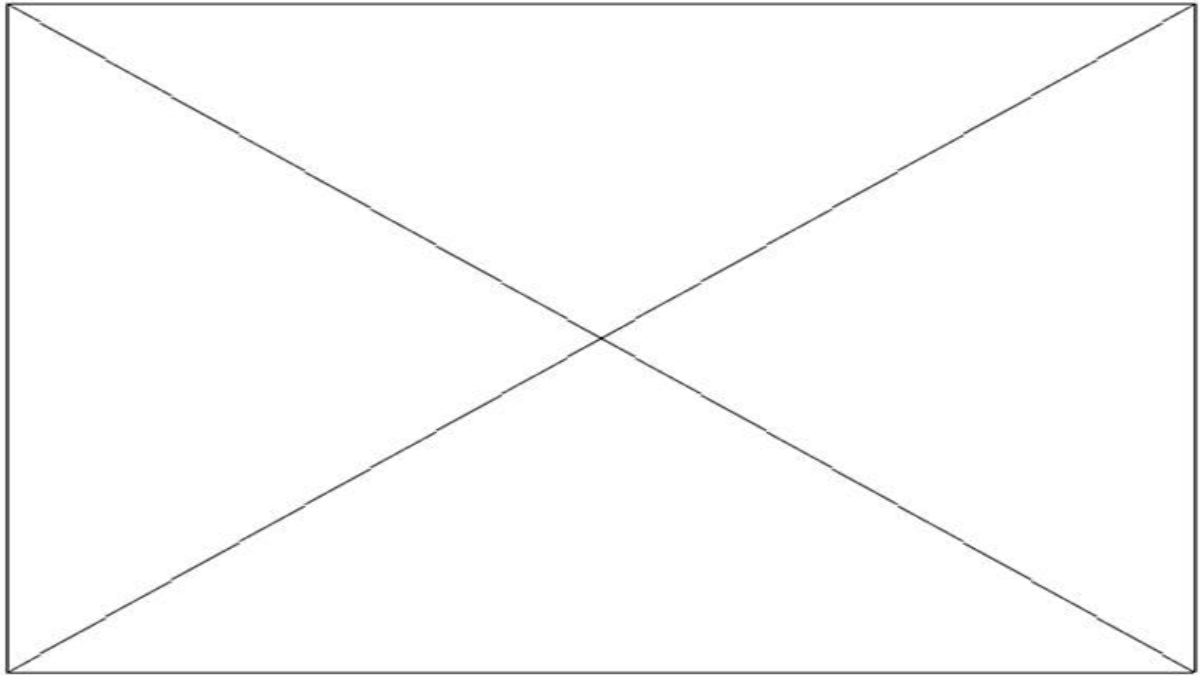


그림 2-2 부구천 유역

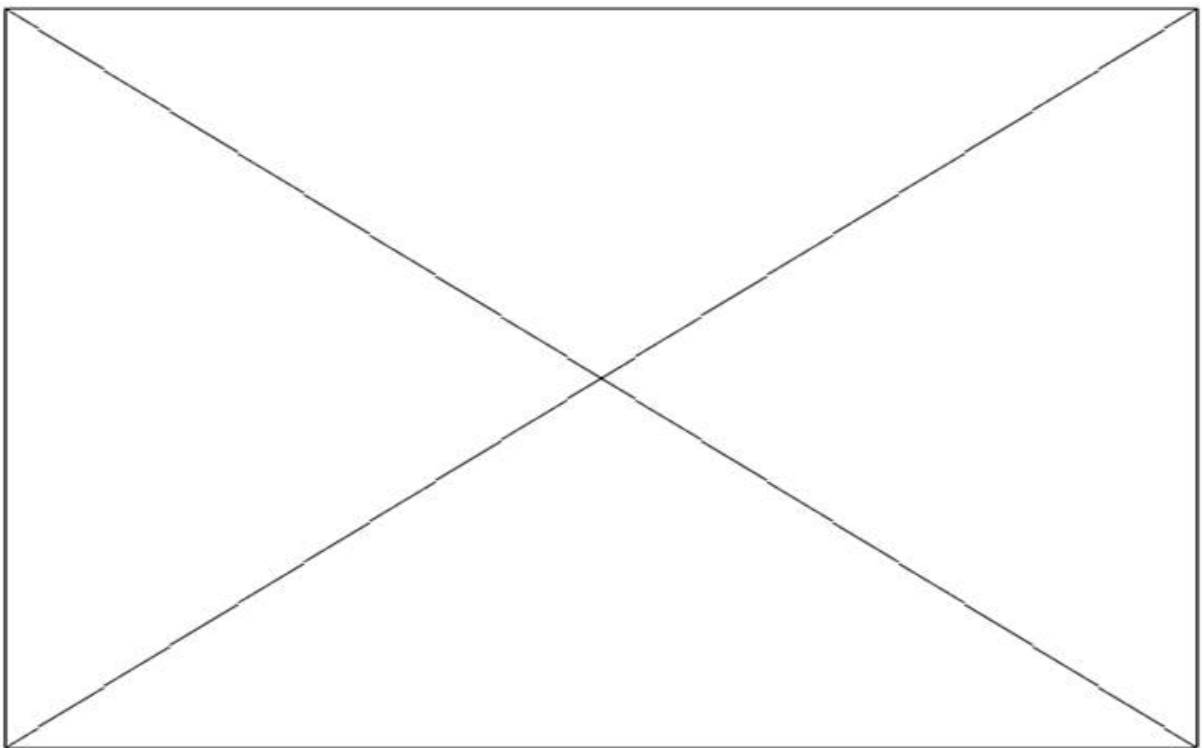


그림 2-3 타당성 분석을 위한 이상적인 가상 지진 자료 분포도

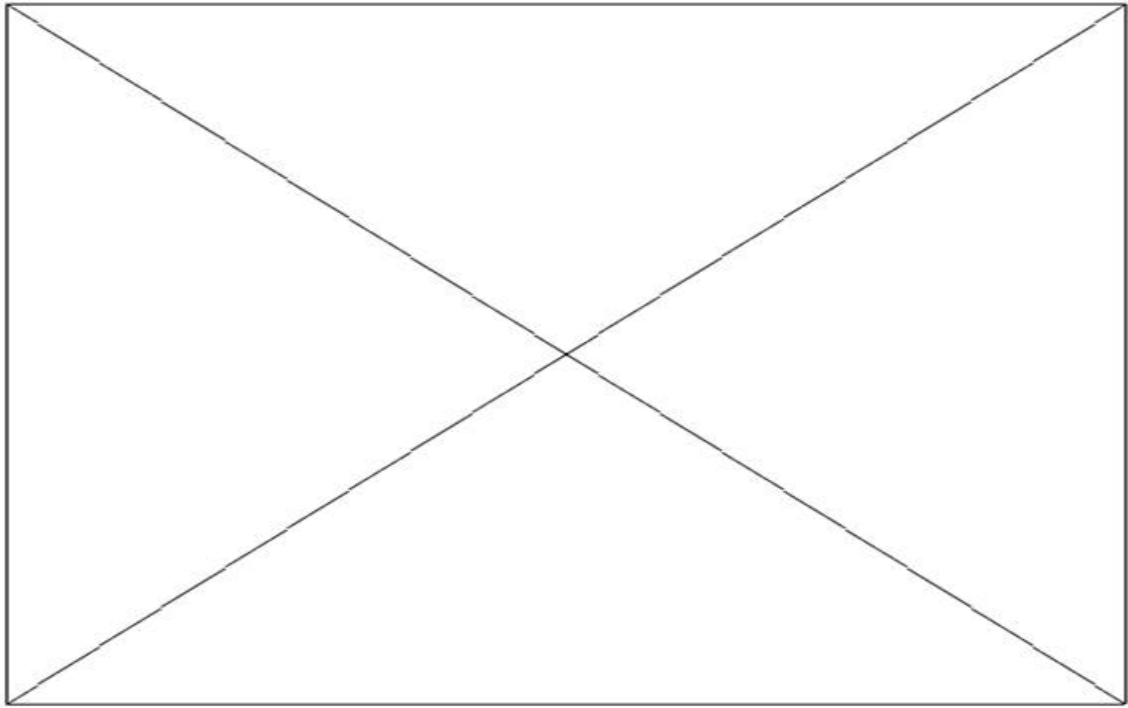


그림 2-4 가상 자료를 사용한 tapered G-R분포와 quadratic 분포의 비교

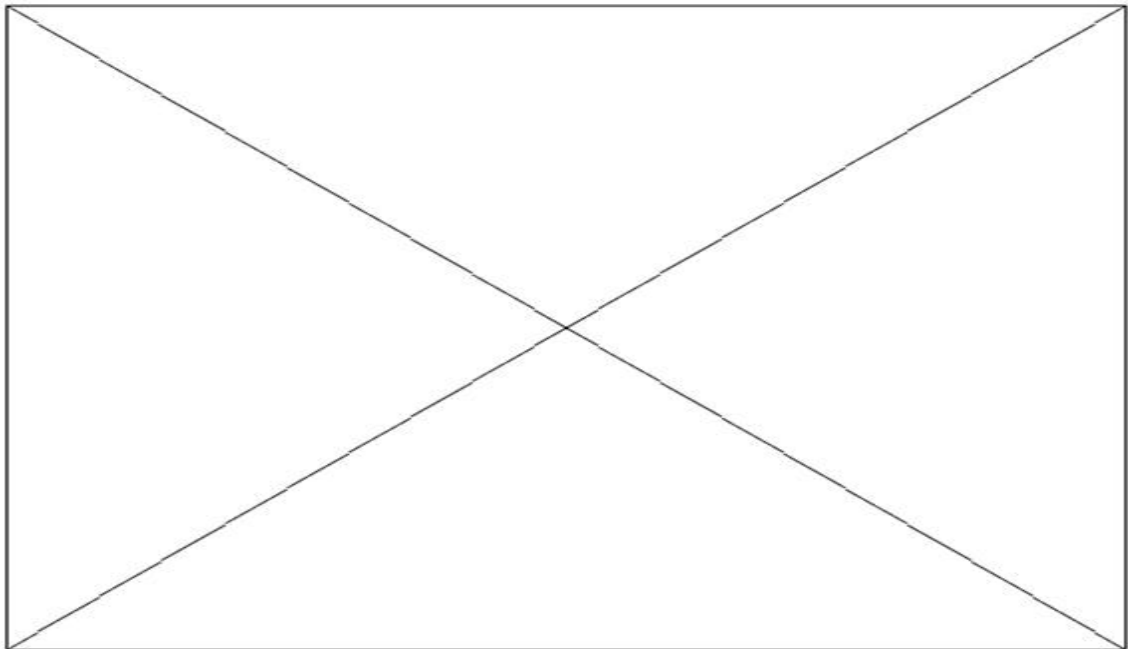


그림 2-5 동해 동연부의 지진 자료 분포도

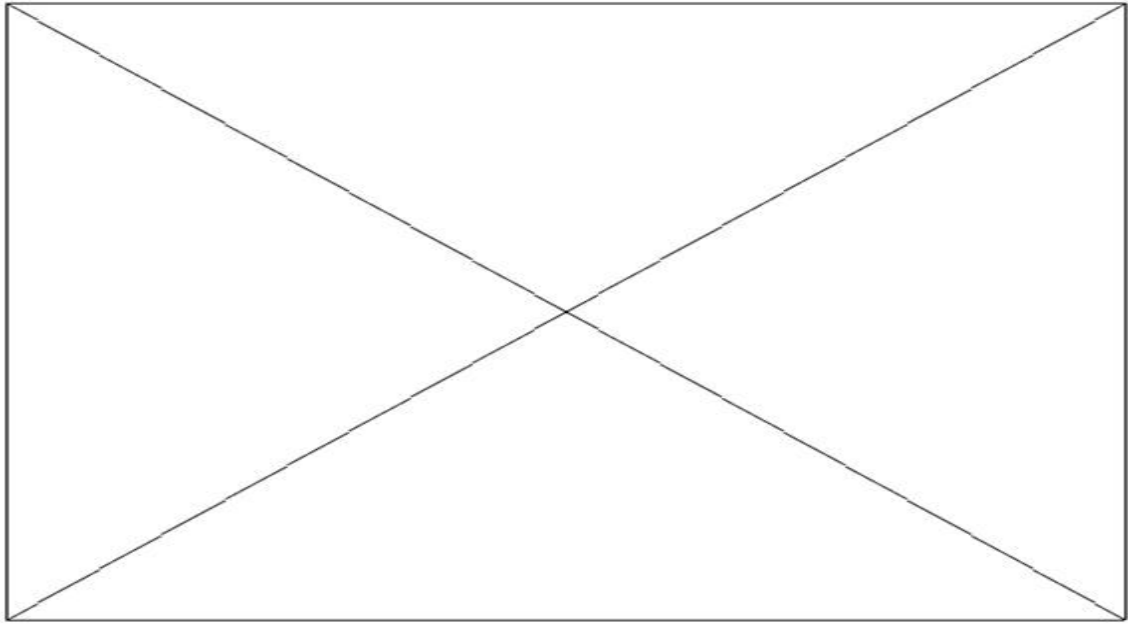


그림 2-6 동해 동연부의 1,000년, 10,000년 빈도 지진규모 결정

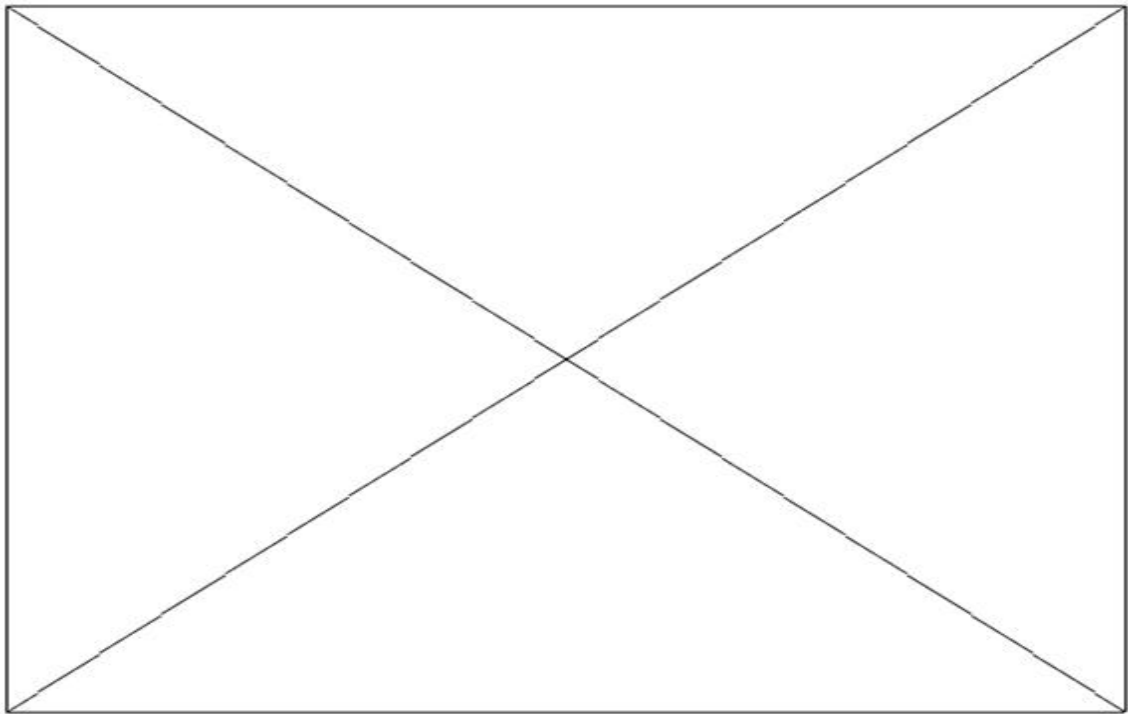


그림 2-7 동해 동연부 10,000년 빈도 지진규모의 연동형 지진 개념도

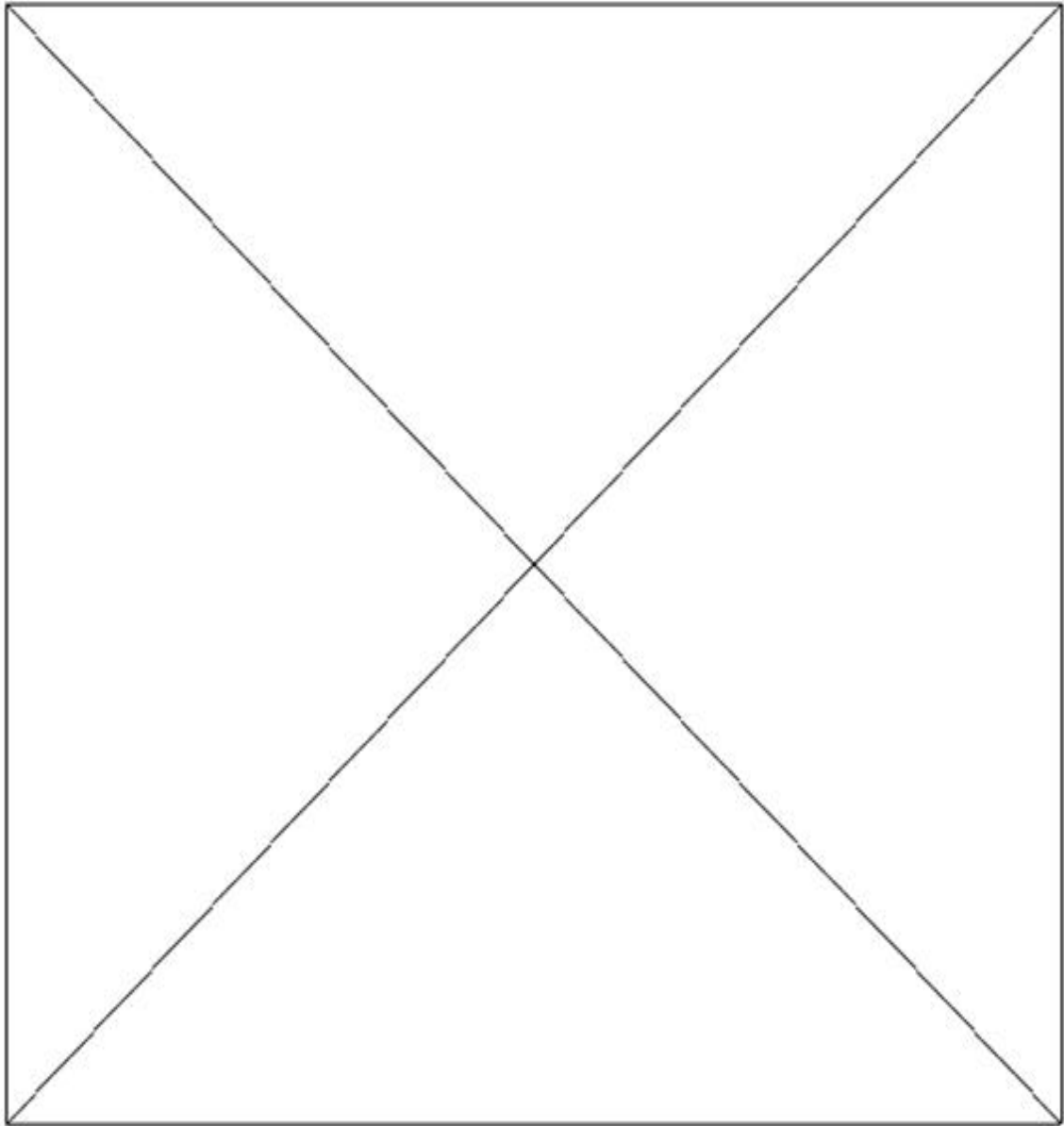


그림 2-8 동해 동연부 지진해일 초기수면변위 (Case1~Case4, 단위: m)

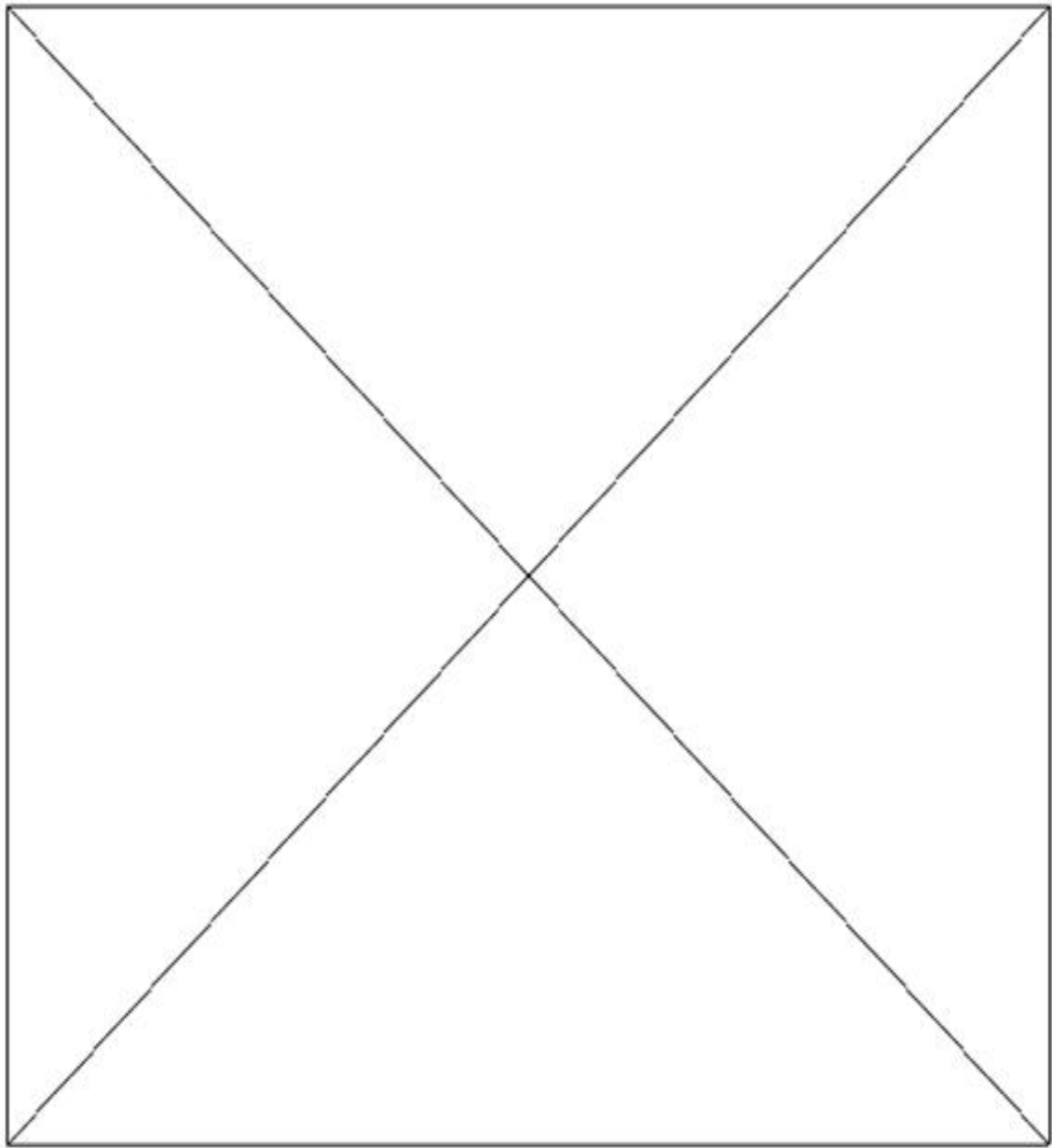


그림 2-9 동해 동연부 지진해일 초기수면변위 (Case5~Case8, 단위: m)

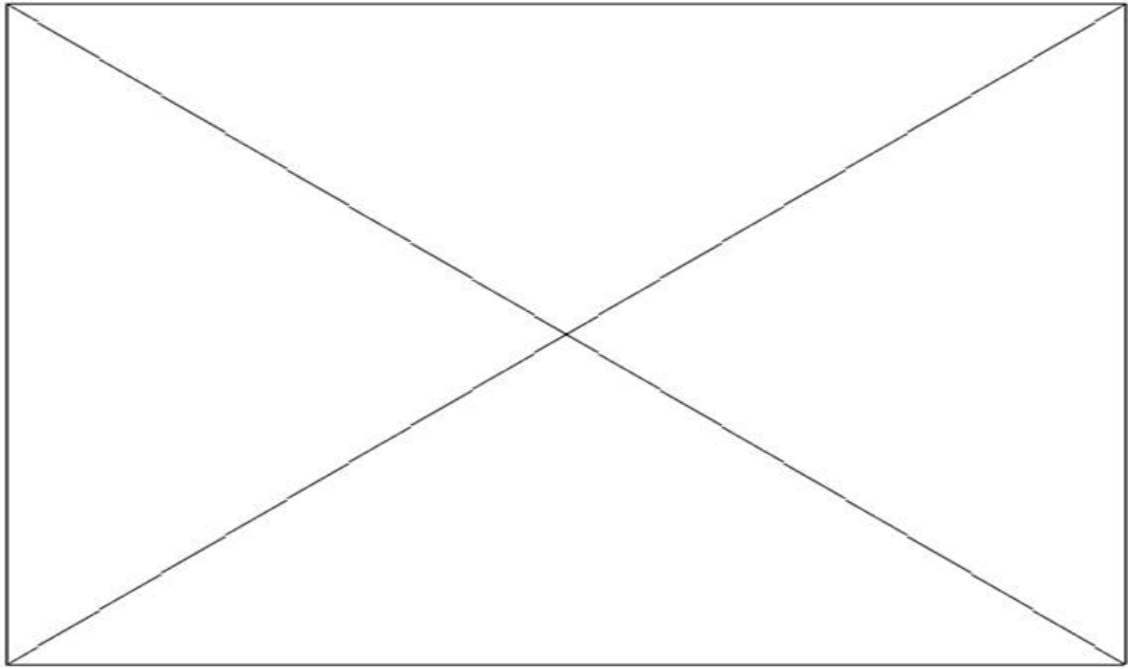


그림 2-10 동해 동연부 지진해일 초기수면변위 (Case9~Case10, 단위: m)

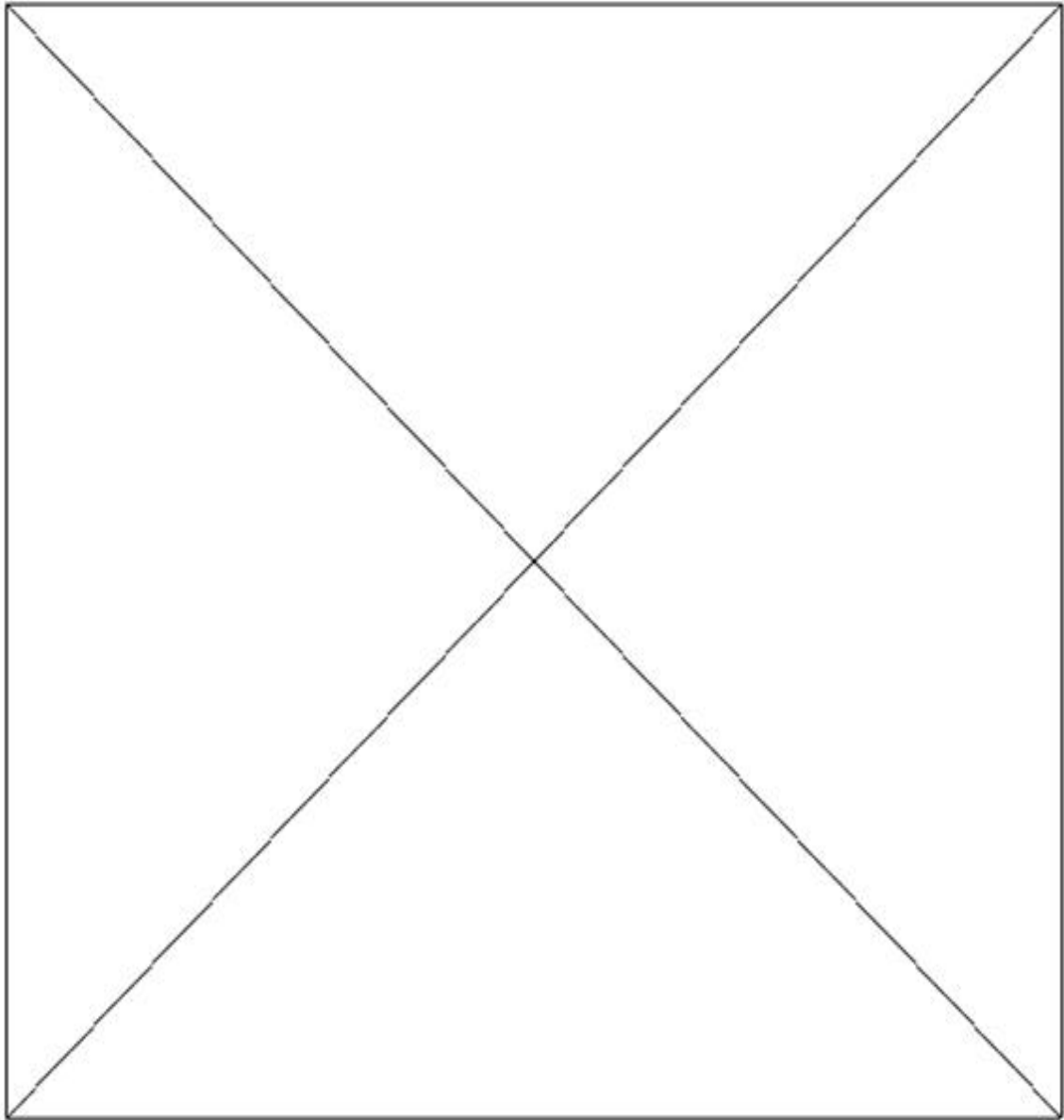


그림 2-11 광역 계산영역 및 수심 분포(단위:m)

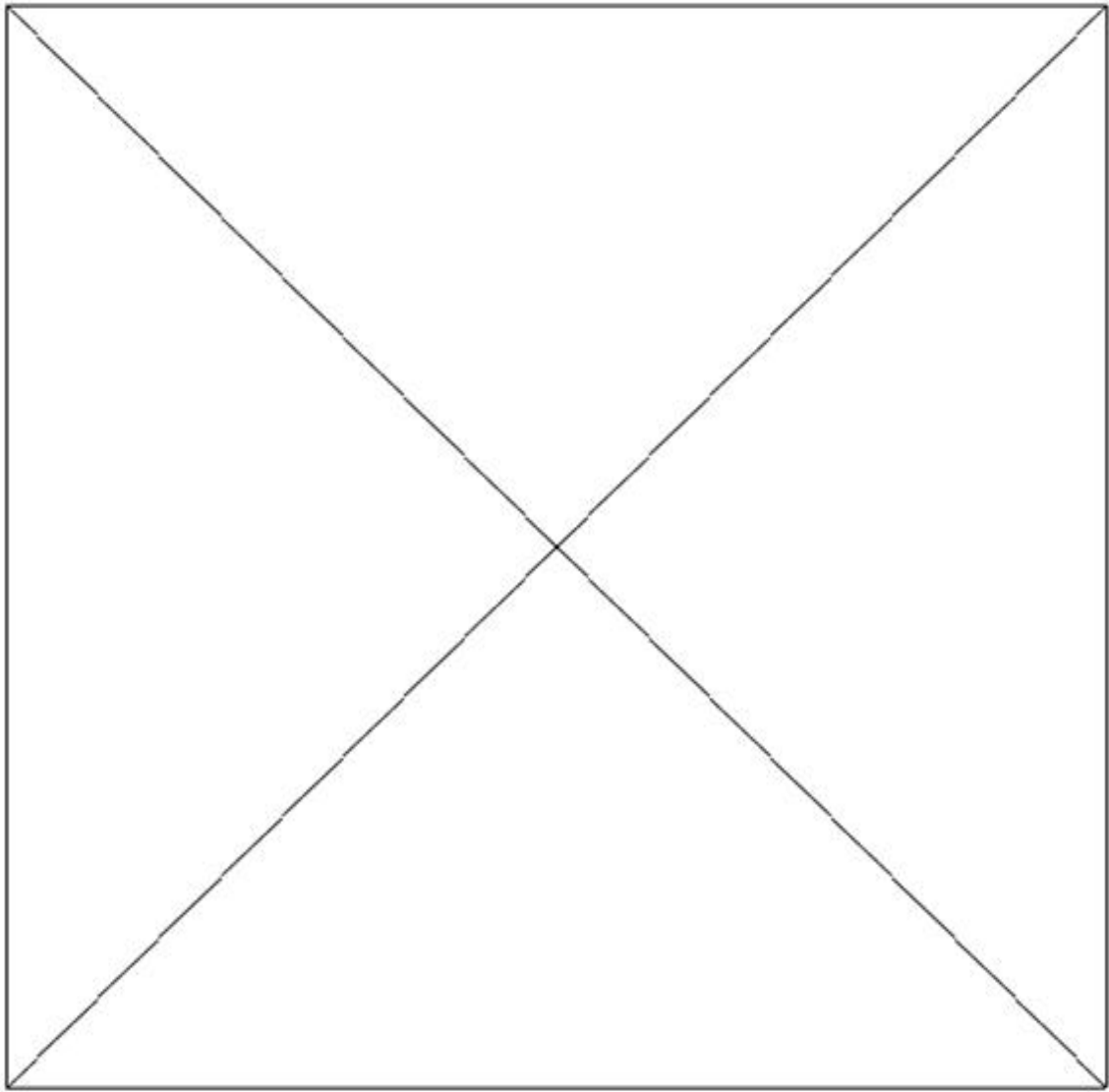


그림 2-12 상세역 계산영역 및 수심 분포(단위: m)

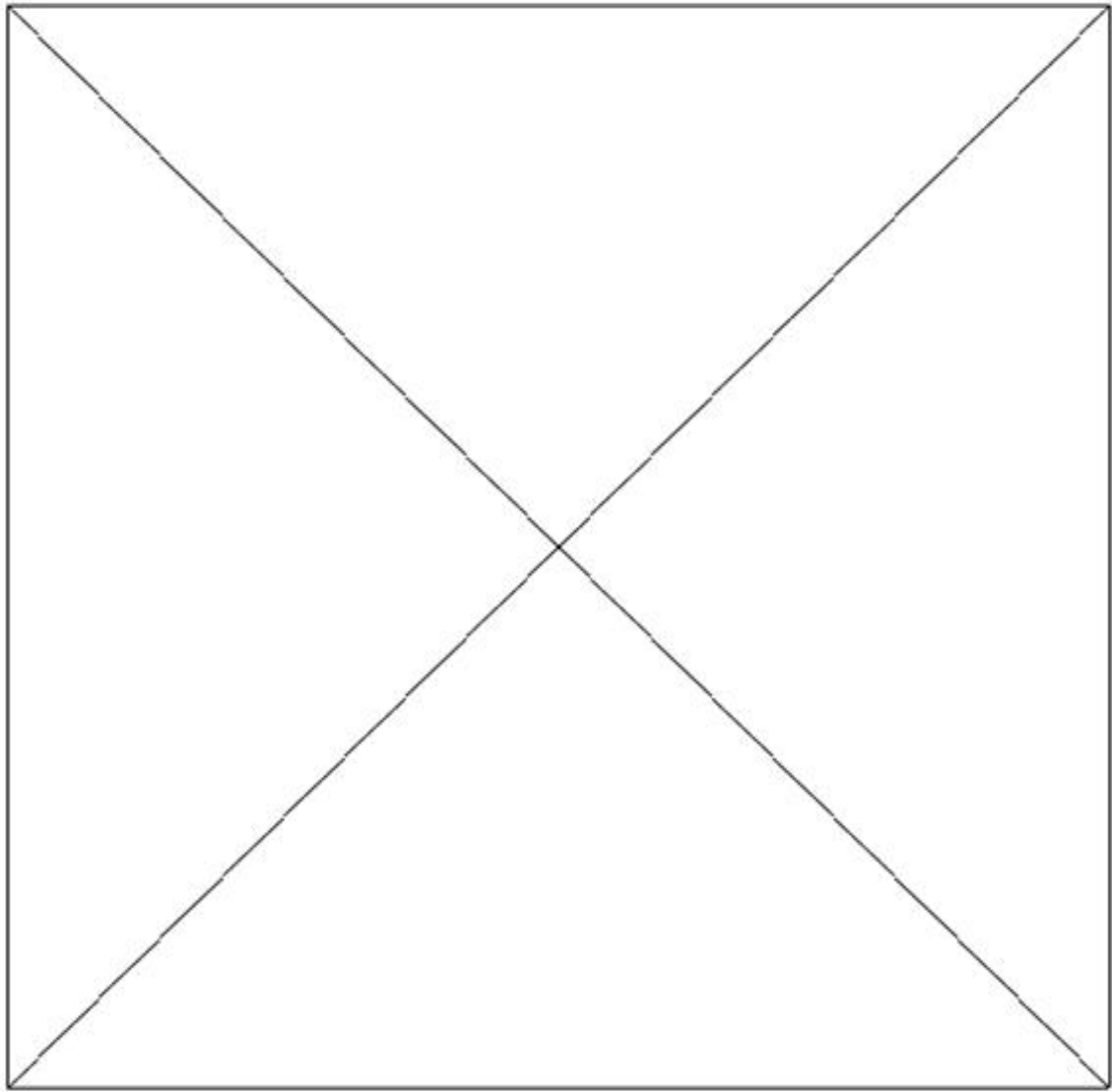


그림 2-13 최상세역 계산영역 및 한울 원전 주변 수심 분포(단위: m)

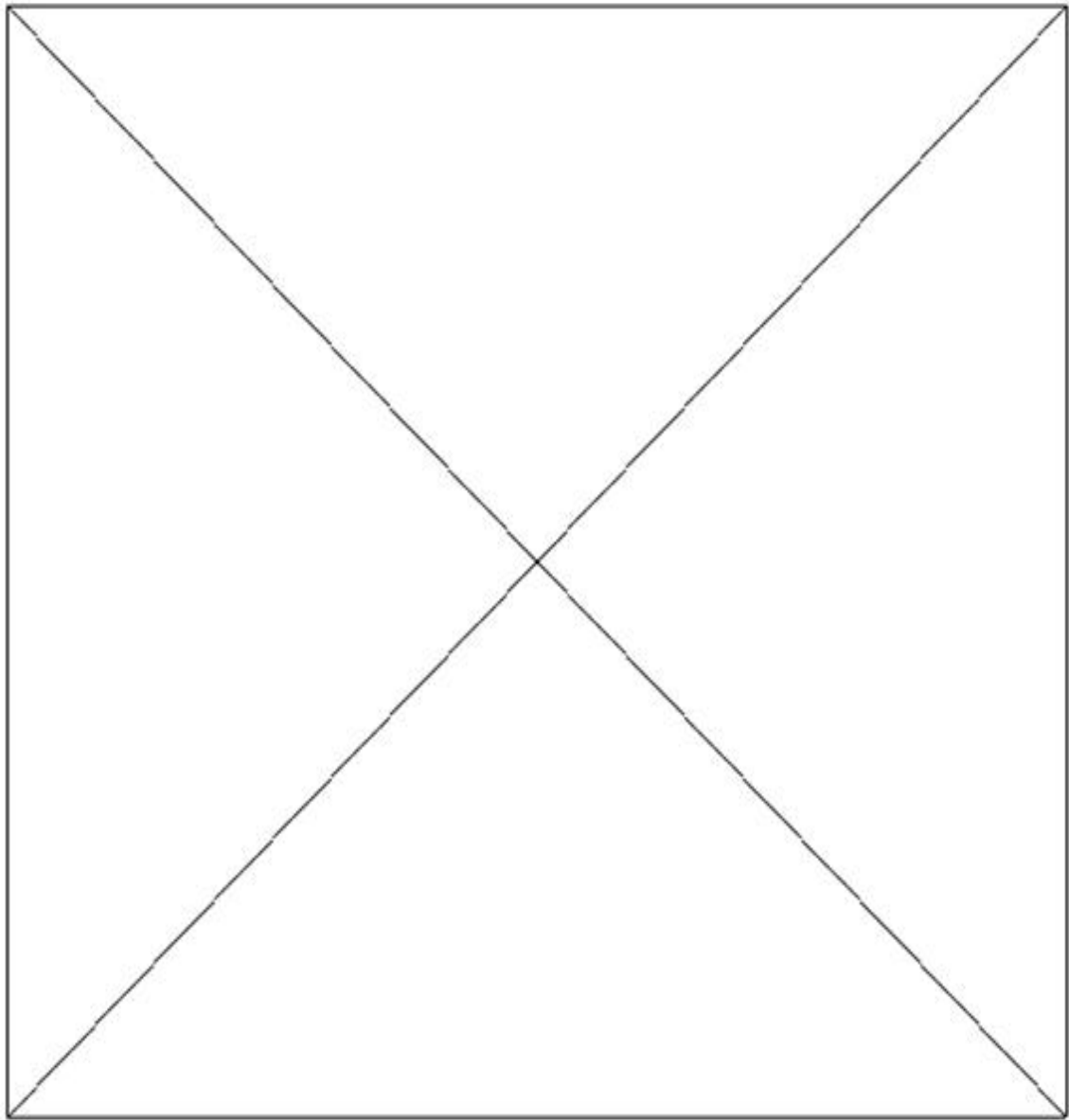


그림 2-14 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고
분포(Case1~Case4, 단위: m)

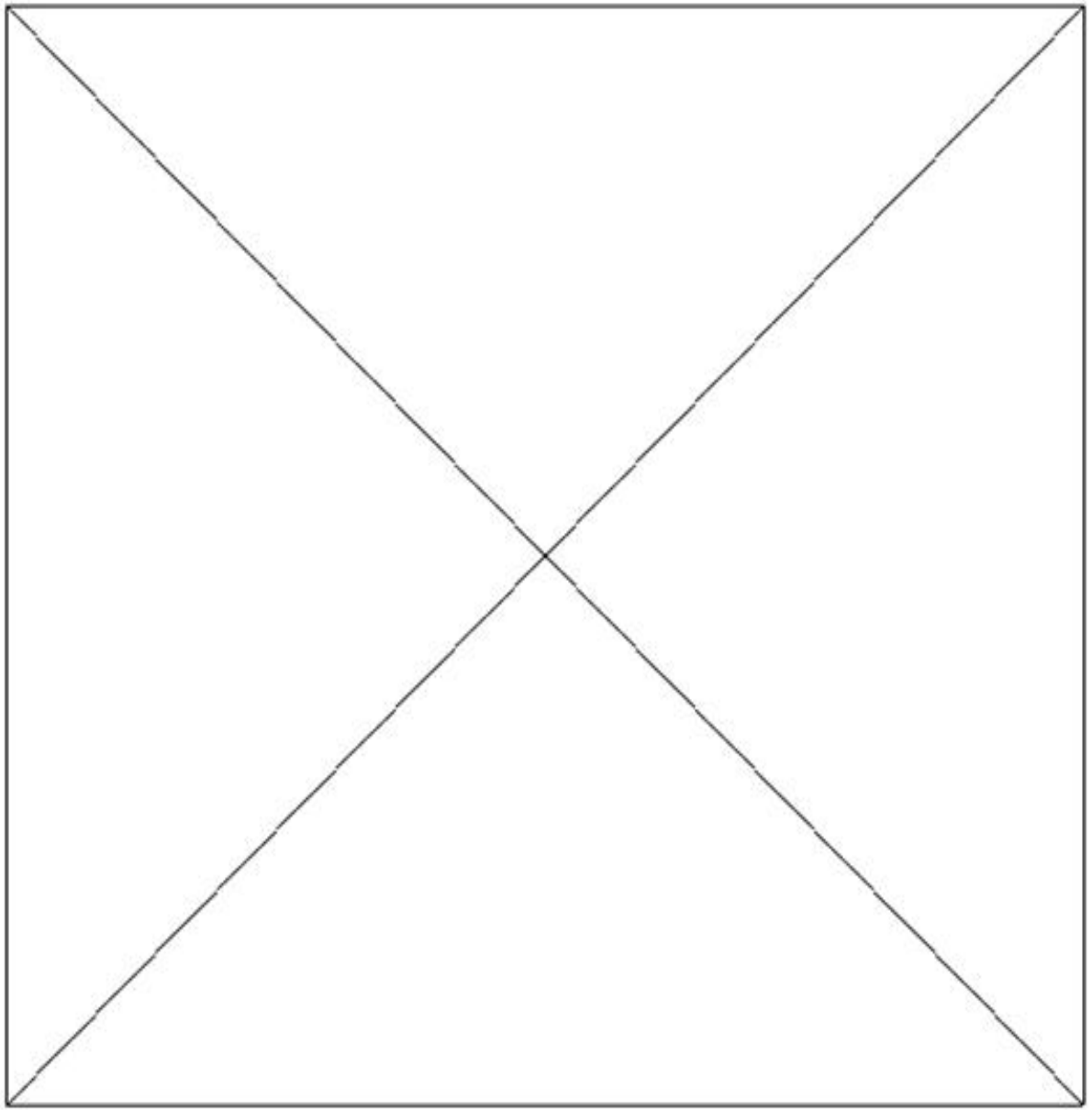


그림 2-15 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고
분포(Case5~Case8, 단위: m)

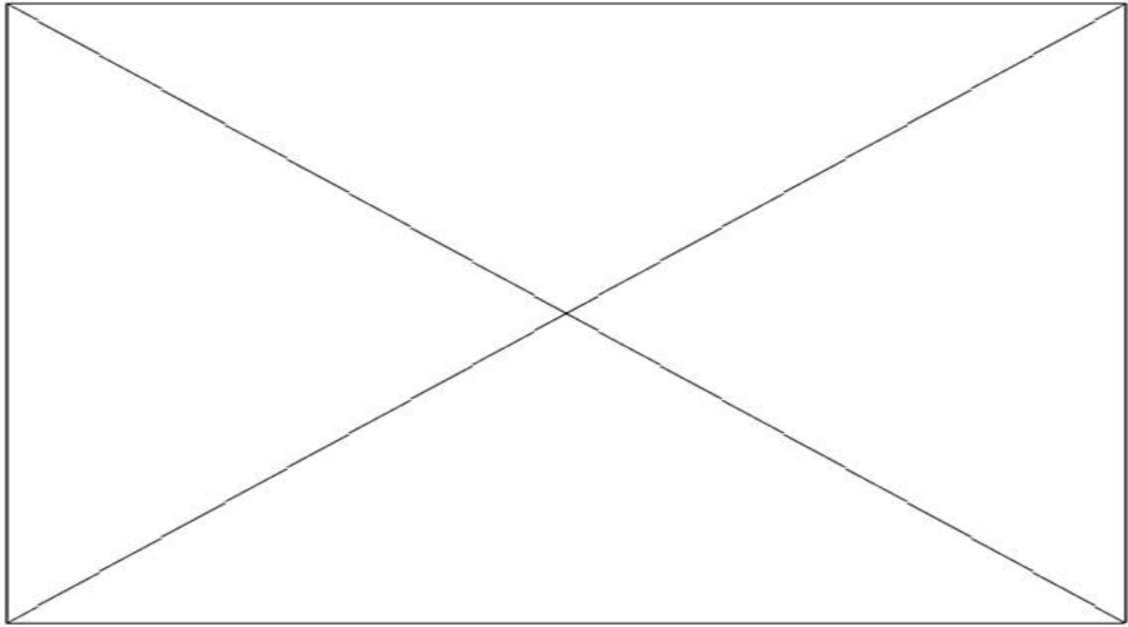


그림 2-16 지진해일로 인한 한울원전 주변 최대 해수면 상승고
분포(Case9~Case10, 단위: m)

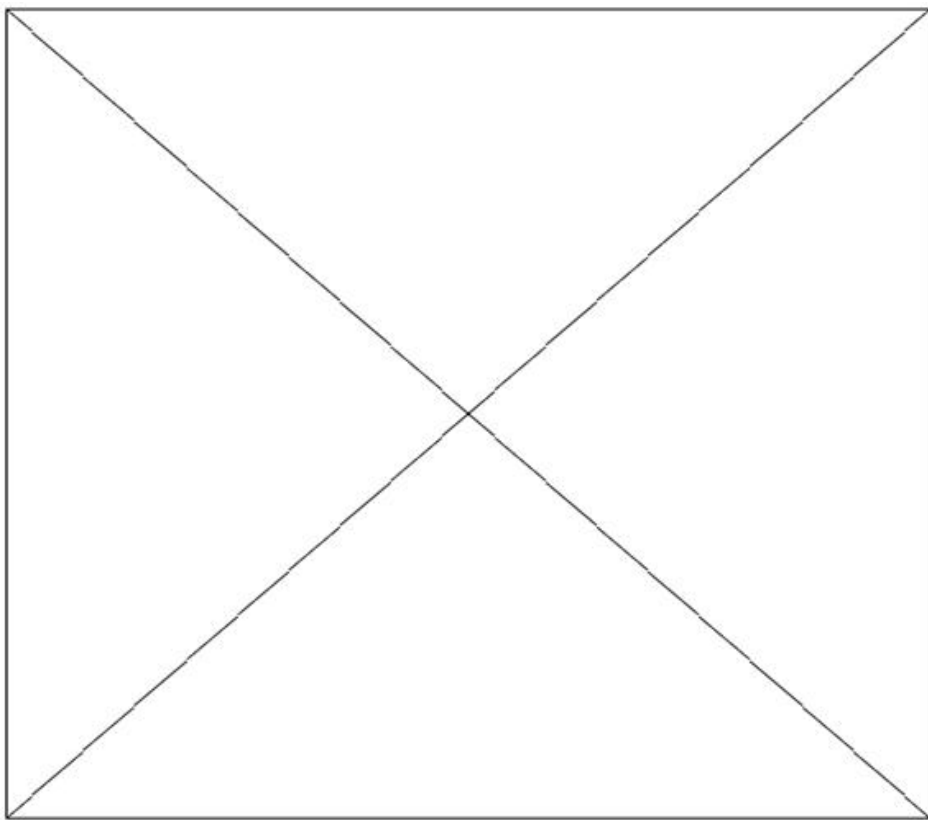


그림 2-17 재현주기(Return period)에 따른 한울3,4호기 주변의
최대풍 풍속

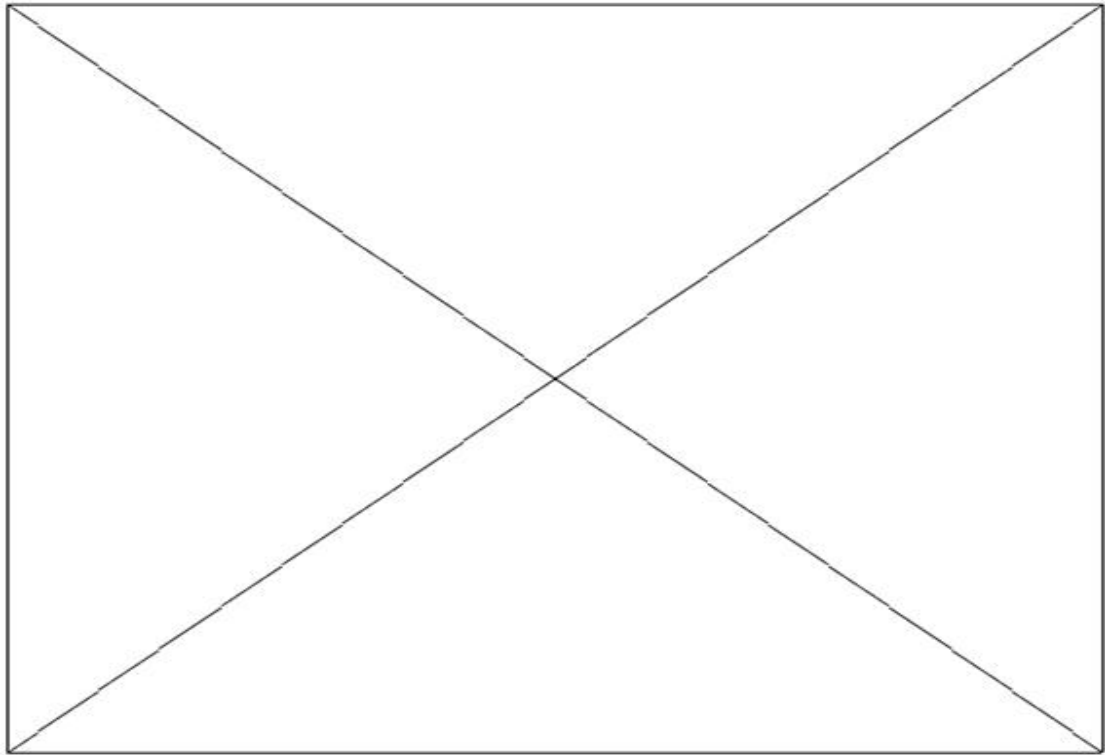


그림 2-18 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 이동경로

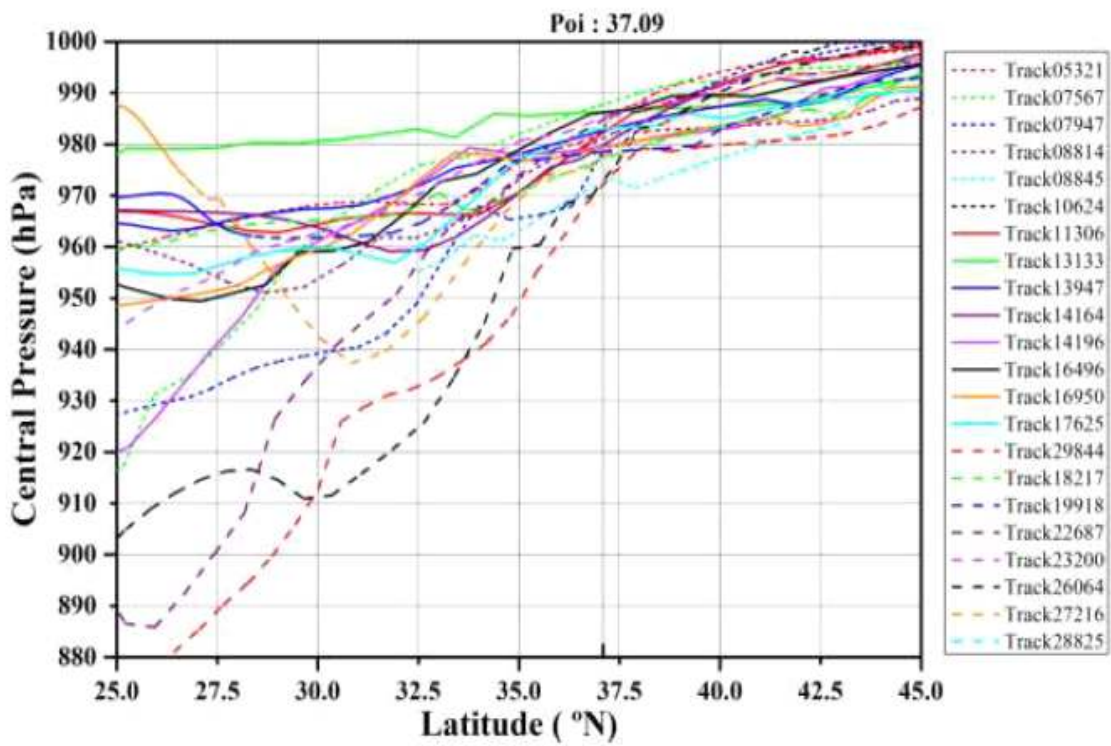


그림 2-19 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 최대풍 중심기압 분포

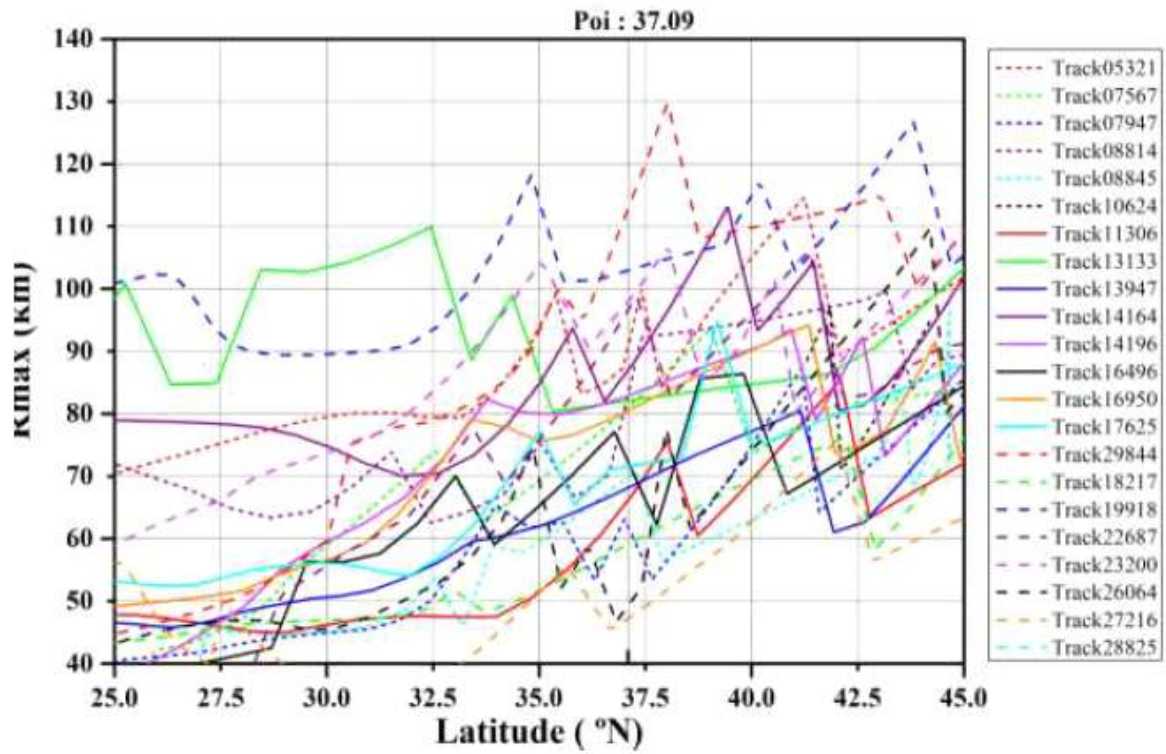


그림 2-20 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 최대풍 반경 분포

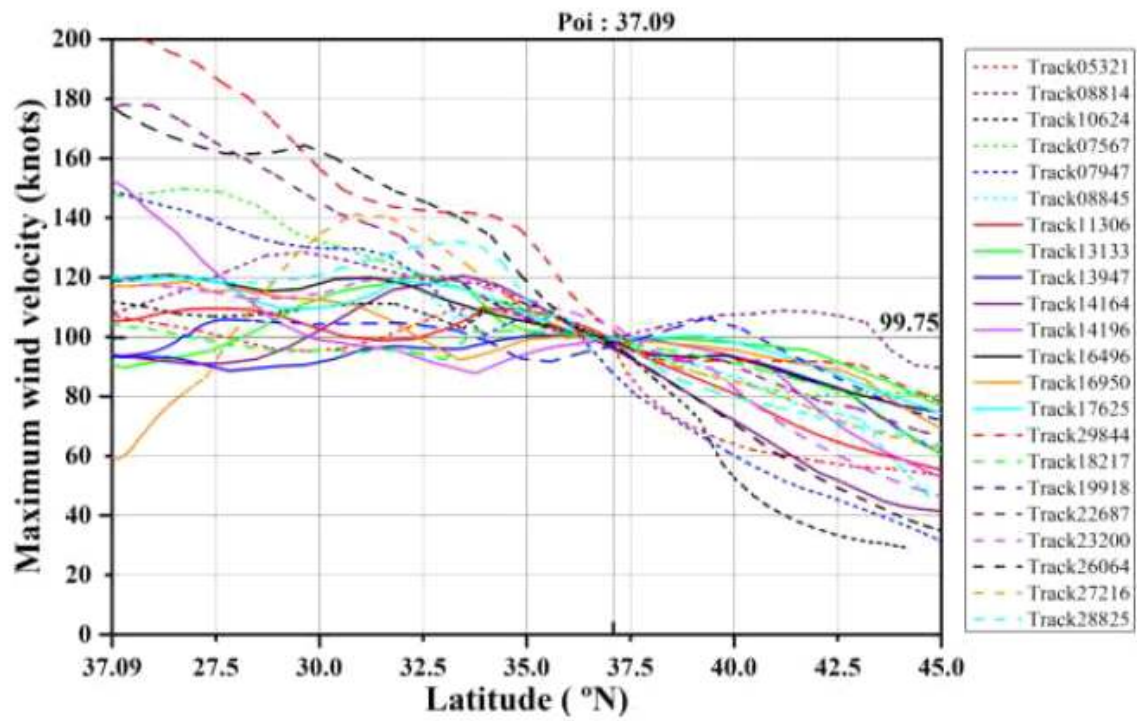


그림 2-21 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍들의 풍속 분포

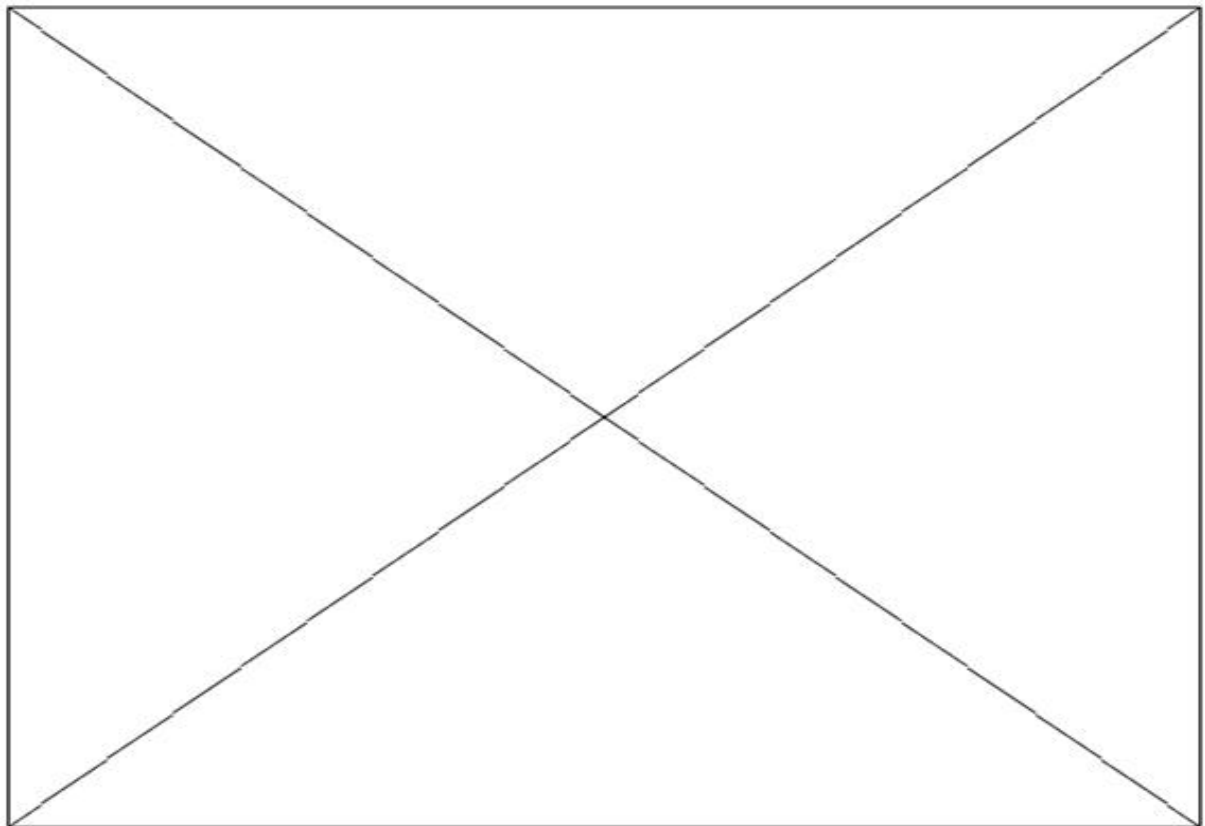


그림 2-22 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 이동경로

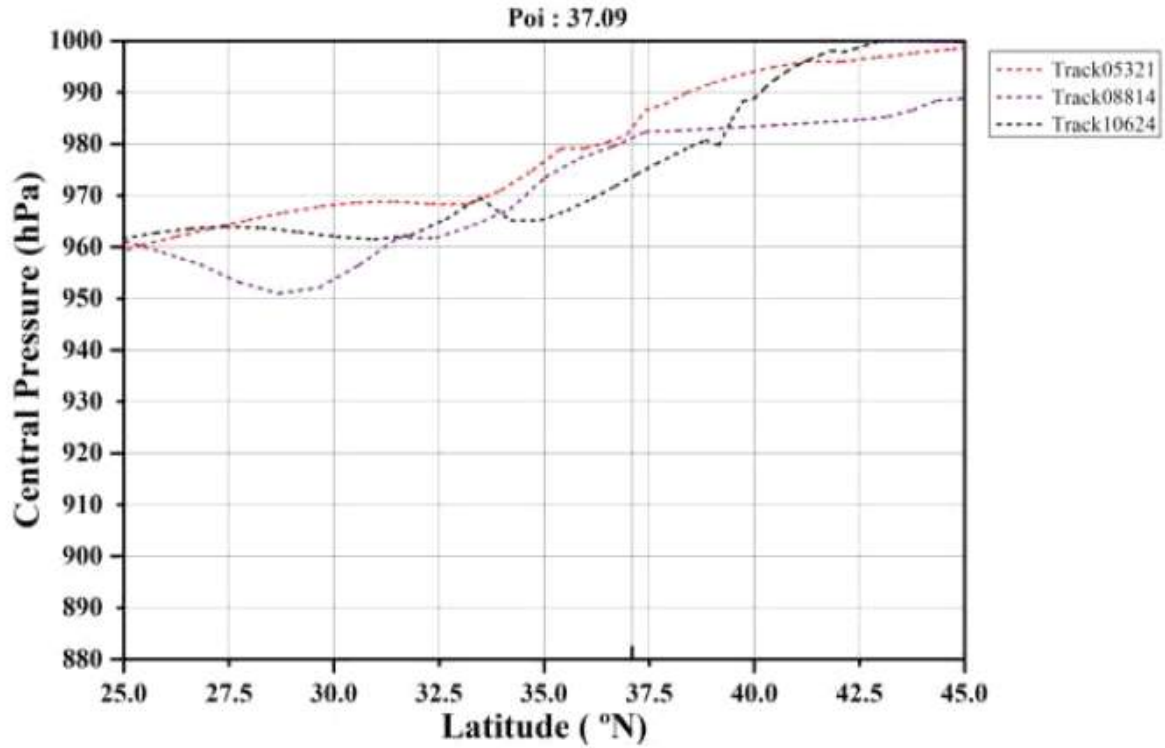


그림 2-23 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 중심기압 분포

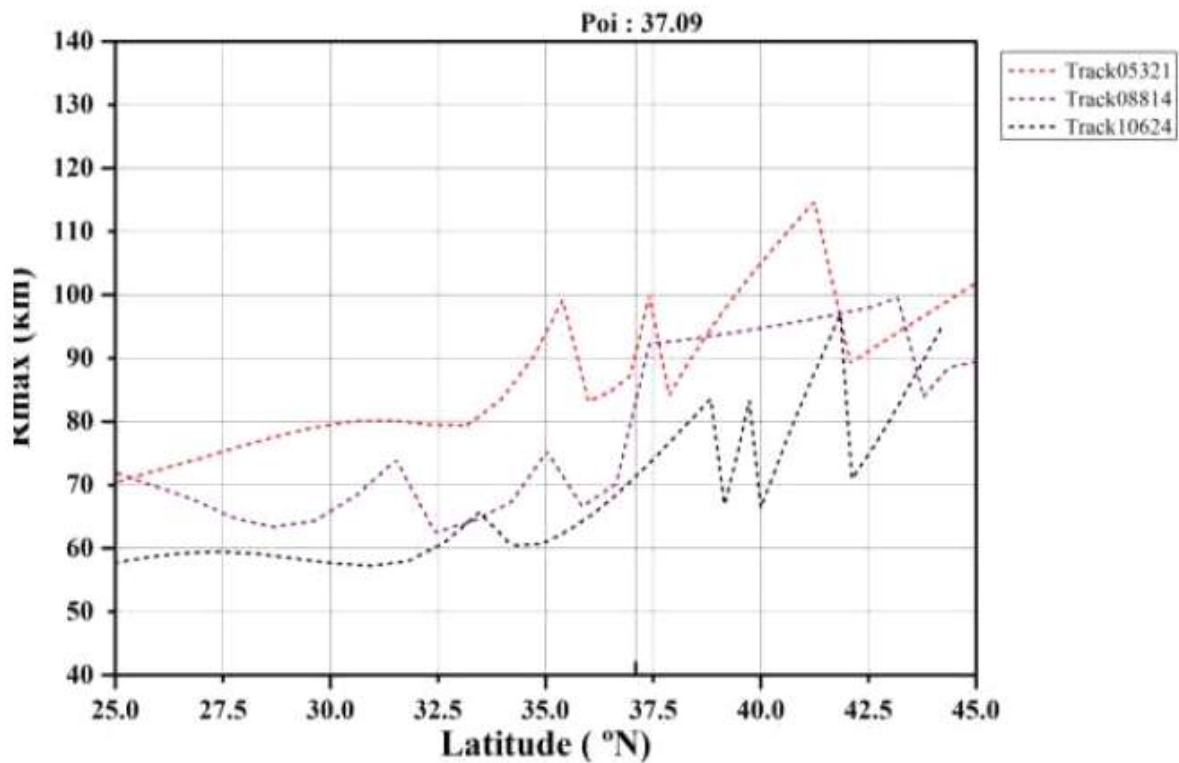


그림 2-24 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 최대풍 반경 분포

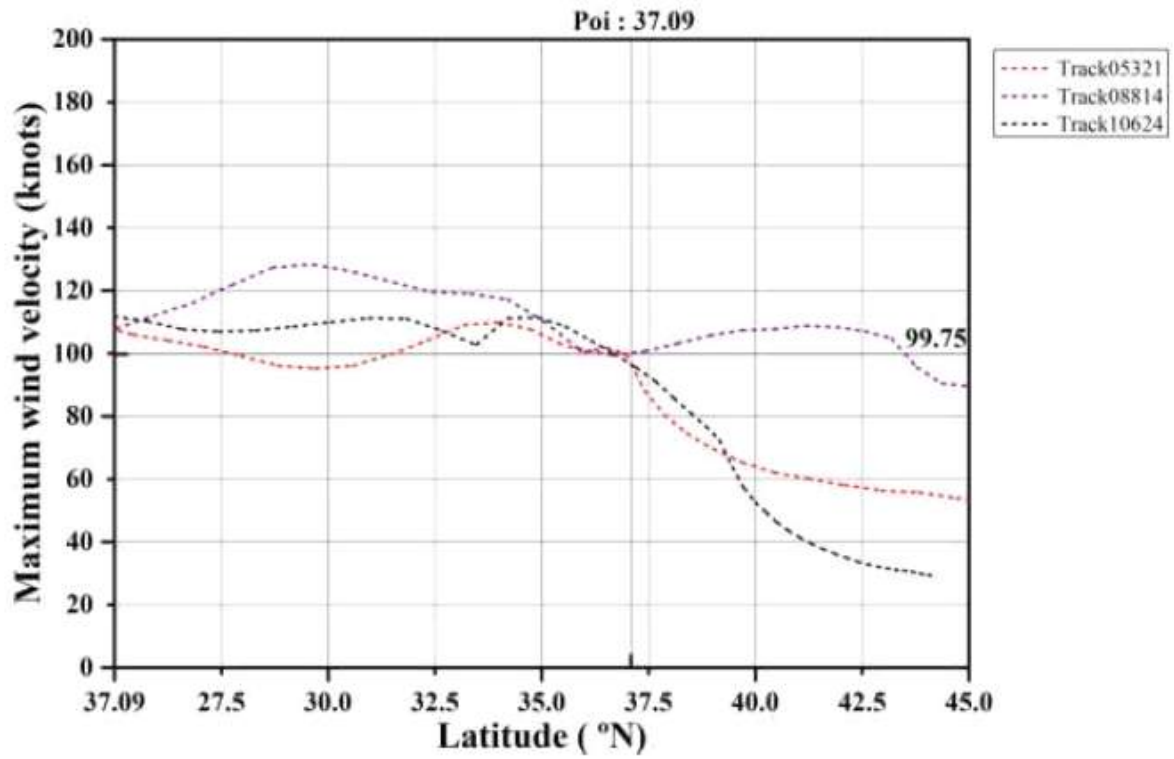


그림 2-25 한울원전 주변을 지나는 재현주기 10,000년 빈도 태풍 중 선정된 3개 태풍의 풍속 분포

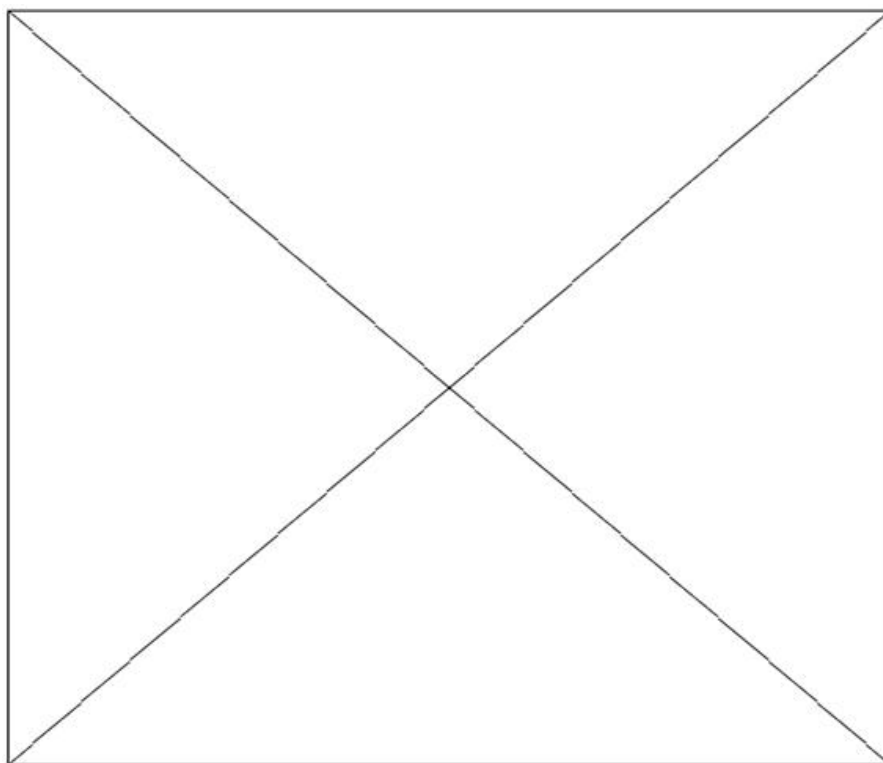


그림 2-26 폭풍해일 광역 계산영역 및 한울 원전 주변 수심 분포(단위 : m)

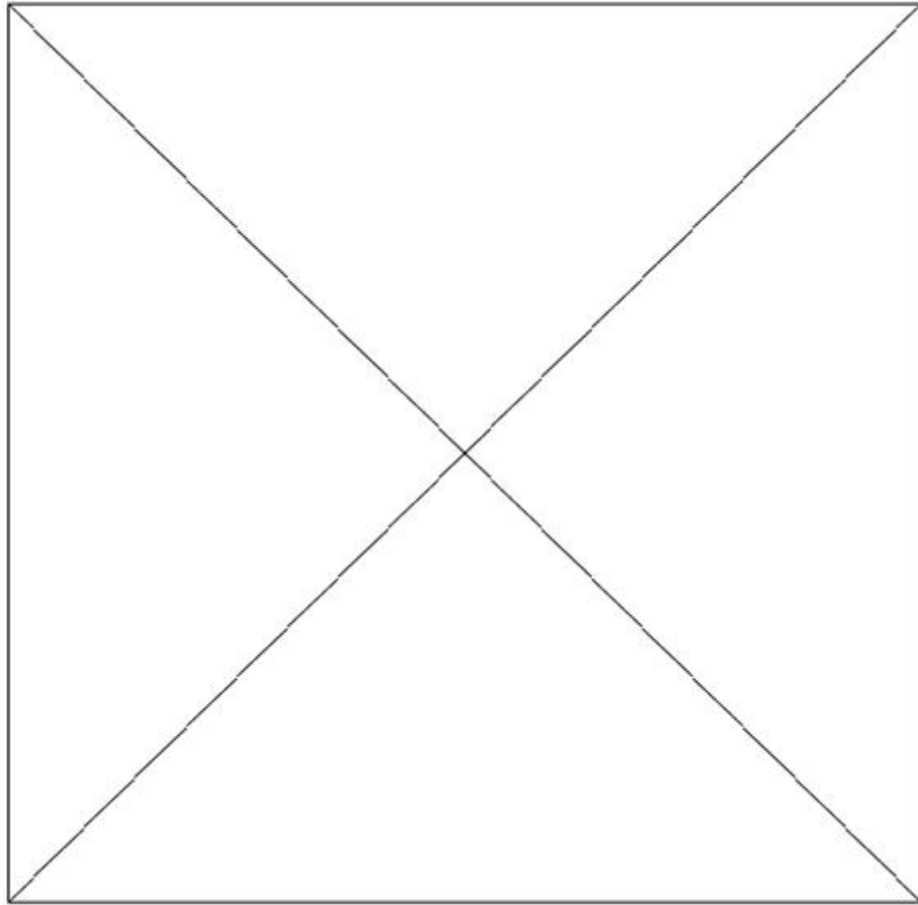


그림 2-27 폭풍해일 최상세역 계산영역 및 한울 원전 주변
수심 분포(단위 : m)

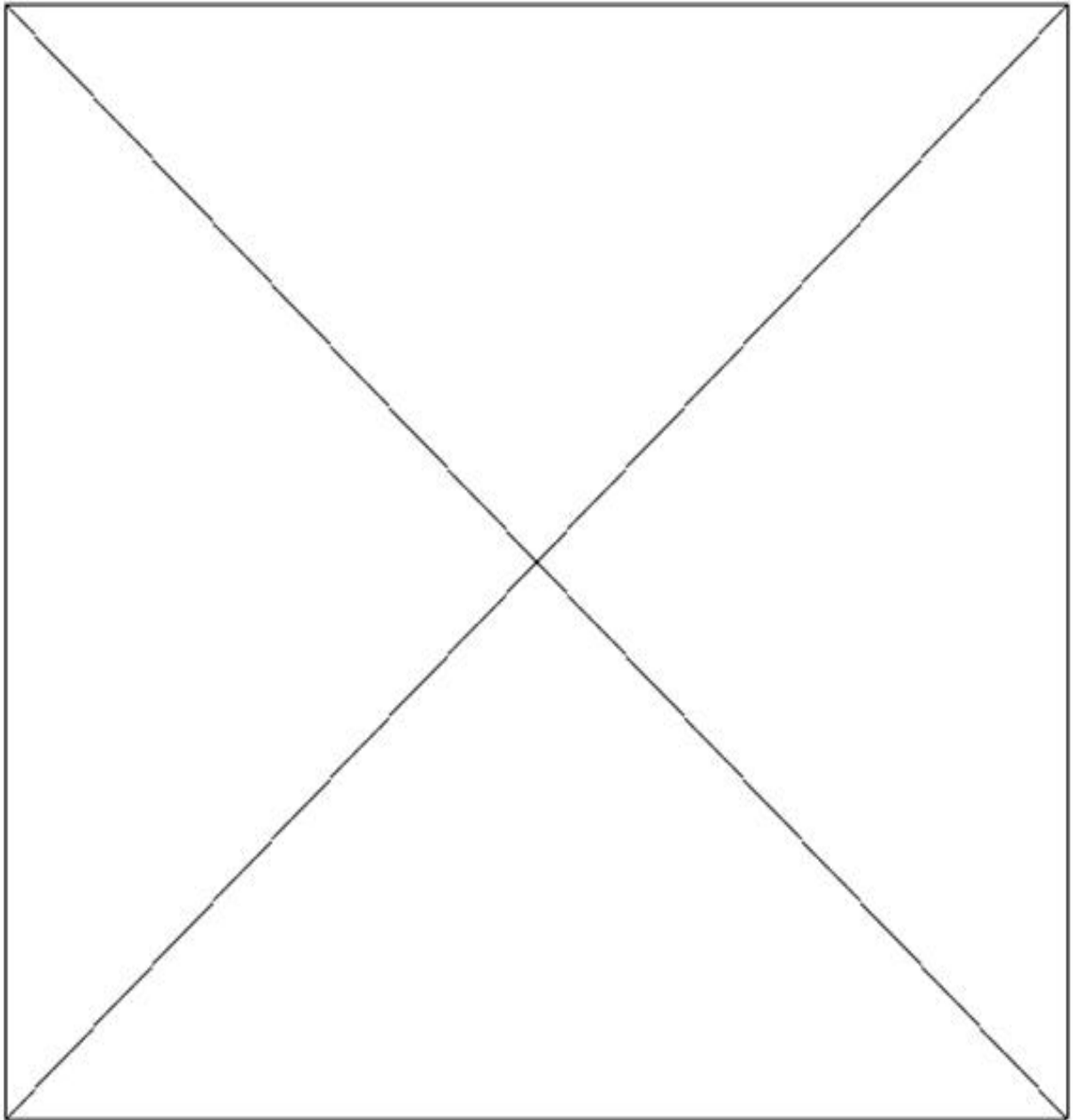


그림 2-28 폭풍해일로 인한 한울 원전 주변 약최고만조위 상 최대 해수면 상승고
분포(Track01 ~ Track03, 단위 : m)

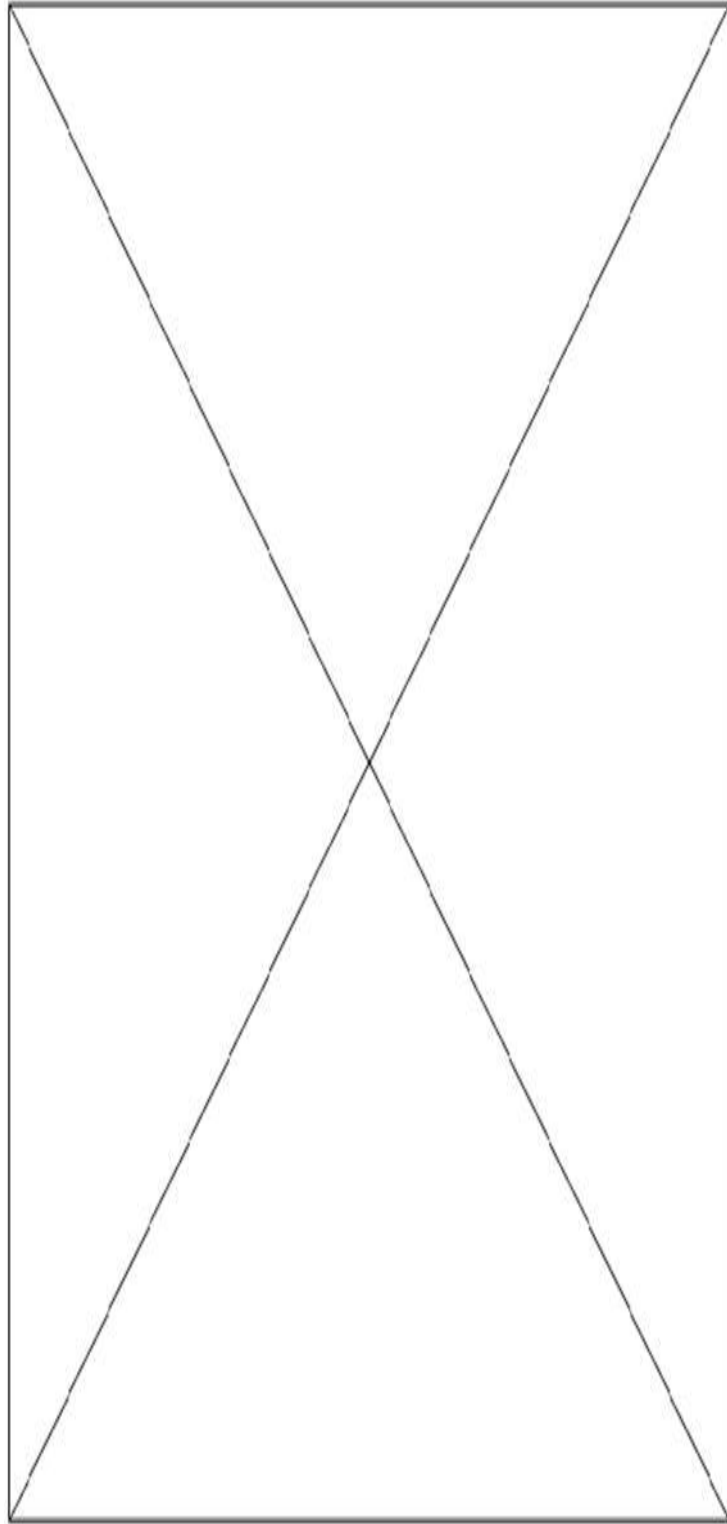


그림 2-29 폭풍해일로 인한 한울 원전 주변
약최고만조위 상 유의파고 및 파향

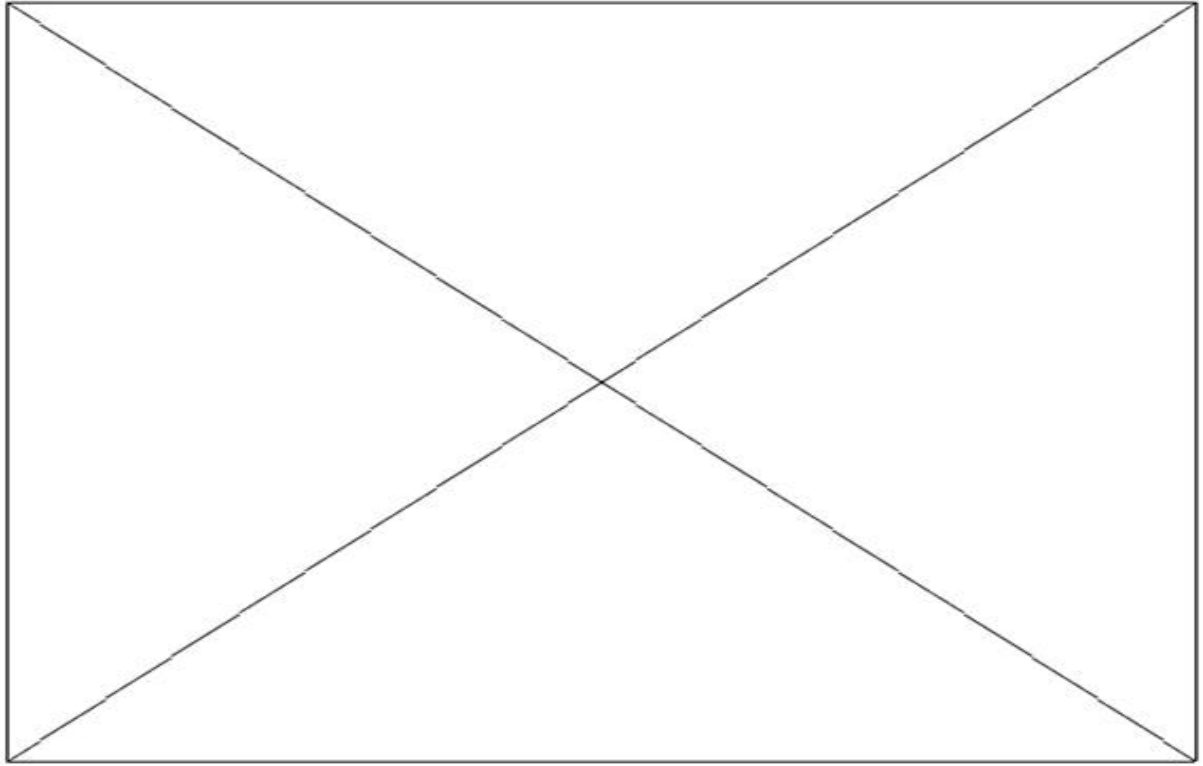


그림 2-30 한울3,4호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과(침수심 분포)

제3장 극한자연재해에 대한 구조물 · 계통 · 기기 건전성

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가내용	1
2.1 지진에 대한 구조물·계통·기기 건전성	1
2.1.1 설계기준지진 조건에서의 원전의 보호 조치	1
2.1.2 지진에 의한 간접영향	10
2.1.3 주요 안전기능 상실/심각한 핵연료 손상 유발 가능 지진의 심각도 범위 ...	11
2.1.4 격납건물 건전성을 손상시킬 수 있는 지진심각도 범위	16
2.2 지진에 의한 내부 침수에 대한 구조물·계통·기기의 건전성	16
2.2.1 격납건물 내부 침수	17
2.2.2 기타 안전관련 구조물에서의 내부 침수	17
2.3 지진에 의한 내부 화재에 대한 구조물·계통·기기의 건전성	18
2.3.1 화재방호계통 설명	18
2.3.2 지진화재 영향 평가	21
2.3.3 발전소 및 외부 소방대 수동진압능력 평가	28
2.3.4 화재인지방안, 인적오류·의사결정 오류 최소화 방안	31
2.3.5 평가 결과	33
2.4 홍수 및 기타 자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성	33
2.4.1 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호 조치	33
2.4.2 설계기준 초과 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호조치	35
제3절 안전 개선사항	38
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	38
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인	40
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	40
제4절 결론	41
제5절 참고문헌	45
제6절 표, 그림	47

표, 그림

표 3-1 내진등급 분류 기준 비교	47
표 3-2 설계응답스펙트럼의 통제점 진동수 및 스펙트럼 증폭계수(수평)	47
표 3-3 설계응답스펙트럼의 통제점 진동수 및 스펙트럼 증폭계수(수직)	48
표 3-4 설계 감쇄비 비교	48
표 3-5 내진성능 평가 대상계통	49
표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통)	50
표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통)	106
표 3-8 내진성능 평가 대상기기(사용후연료 냉각계통)	111
표 3-9 한울3,4호기 최종 정비이력 분석 대상	112
표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 구조물	113
표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기	114
표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록	121
표 3-12 계전기 오동작 관련 선별 분석 결과	135
표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록	139
표 3-14 현장조사 선별제거 요약표	144
표 3-15 안전관련 구조물 내부 고에너지 및 중에너지 유체계통	146
표 3-16 필수대처기기 목록	147
표 3-17 지진화재 취약지역 목록	156
표 3-18 한울본부 초동소방대 조직	157
표 3-19 광역화재 발생시 응원협조기관	158
표 3-20 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간	159
표 3-21 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	160
표 3-22 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	161
그림 3-1 한울3,4호기 설계지반응답스펙트럼(SSE)	162
그림 3-2 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(동서방향-EW, 2%)	163
그림 3-3 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(남북방향-NS, 2%)	164
그림 3-4 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(수직방향-VT, 2%)	165
그림 3-5 소외 지원인력(장비)의 한울3,4호기 접근로	166

제1절 개요

극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성 평가에서는 원전의 안전에 영향을 줄 수 있는 지진, 홍수, 강풍, 저수위, 수온상승 등의 부지고유 자연재해에 대하여 설계기준 및 설계기준을 초과하는 수준의 규모에서 원전이 견디는 정도를 확인하고, 자연재해에 대한 구조물·계통·기기의 건전성을 확인한다.

이를 위해 본 장에서는 스트레스테스트 수행지침[3-1]에 따라 설계기준지진 조건에서의 한울3,4호기의 보호 조치를 검토하고 현장점검 등을 통하여 지진에 의한 간접영향을 확인한다. 또한 설계기준초과 지진 발생과 관련하여 주요 안전기능의 상실, 핵연료(노심 및 사용후연료) 손상 및 격납기능 관련 설비의 건전성 손상을 유발시킬 수 있는 지진의 규모를 평가하고 이에 대한 건전성 평가결과를 제시한다. 그리고 재현주기 10,000년 수준의 설계기준 초과 지진에 따른 내부홍수에 의한 주요 설비의 침수 발생 가능성을 평가하고 그 결과를 제시한다. 마지막으로 설계기준 초과 지진 발생에 따른 내부 광역 화재 발생 가능성을 평가하고 이에 따른 필수대처설비의 건전성을 검토한다.

한편, 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호 조치를 확인하고, 제2장 보고서에서 평가된 설계기준 초과 홍수 및 자연재해 발생과 관련하여 구조물·계통·기기의 건전성을 평가한다.

제2절 평가내용

2.1 지진에 대한 구조물·계통·기기 건전성

2.1.1 설계기준지진 조건에서의 원전의 보호 조치

2.1.1.1 구조물·계통·기기의 내진설계

한울3,4호기 FSAR 3.2절의[3-2] 계통분류에서는 계통을 크게 NSSS(Nuclear Steam Supply System, 핵증기공급계통)와 BOP(Balance of Plant, 보조설비계통)로 분류하고 각각에 대한 계통분류별 기기목록을 작성하였다. NSSS 기기에 대해서는 내진범주 I, II 및 비내진범주(NS)로 구분하고 BOP 기기에 대해서는 내진범주 I, II, III으로 구분하였으며, 구조물·계통·기기들이 10CFR50의 부록 A 일반설계기준(GDC, General Design Criteria)의 요건을 만족하기 위해서 Reg. Guide 1.29에 따라 설계되었음을 명시하고 있다. Reg. Guide 1.29에서는 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)에서도 ‘A. 격납건물냉각재 압력 경계의 건전성 확보’, ‘B. 격납건물의 안전정지 및 정지상태의 유지’, ‘C. 10CFR100의 소외피

폭선량 제한치를 초과할 우려가 있는 상황을 예방하거나 완화시키는 기능'을 갖는 기기를 내진범주 I급으로 분류하였으며, NSSS 기기의 경우 ANSI 51.1-1983에 따라 선정된 안전등급 1, 2 및 3의 모든 기기가 내진범주 I급 기기로 분류되어 있다.

Reg. Guide 1.29와 ANSI 51.1에 따라 한울3,4호기 FSAR 3.2절에는 계통별 내진범주 I급 기기의 명칭이 수록되어 있으며 내진검증 대상기기에 적용된 기술기준도 명시되어 있다. 한울3,4호기는 규제기준인 Reg. Guide 1.29와 Reg. Guide 1.100 및 산업기준인 IEEE Std 344-1987의 기준에 따라 기기를 분류·검증하였다(표 3-1 참조). FSAR 3.10절 및 3.11절에 한울3,4호기 설계 당시의 내진검증 계획에 포함된 내진범주 I급의 기기목록과 내진검증 결과가 수록된 검증보고서 목록이 명시되어 있다.

가. 입력지진동

한울3,4호기 FSAR 3.7절, 3.9절 및 3.10절[3-2]에서 구조물의 내진해석 및 기기의 내진검증을 위한 지진입력은 설계응답스펙트럼과 가속도시간이력으로 규정하고 있다. 설계응답스펙트럼은 부지의 지표면에서 정의되는 표준응답스펙트럼으로서 구조물의 내진설계와 가속도시간이력의 목표응답스펙트럼을 정의하는데 사용되었다. 기기의 내진검증을 위해서는 기기 및 계통을 포함하고 있는 구조물 각 층에서의 층응답스펙트럼(FRS, Floor Response Spectrum)이 필요하므로 이를 얻기 위하여 가속도시간이력이 입력운동으로 사용되었으며, 이는 제반 설계인허가 기술요건을 만족하도록 작성된 인공지진시간이력가속도이다.

한울3,4호기의 설계지진은 두 가지 수준으로서 운전기준지진(OBE, Operating Basis Earthquake)과 안전정지지진(SSE)으로 구분되며, 운전기준지진은 심한 환경조건에, 안전정지지진은 극심한 환경조건에 해당한다. 운전기준지진의 크기는 안전정지지진의 1/2로 정의되었다. 설계지진의 형태는 지반응답스펙트럼으로 정의되었고, 설계지반응답스펙트럼의 최대수평지반가속도 및 최대수직지반가속도는 표 3-2 및 표 3-3에 보인 바와 같다.

설계지반응답스펙트럼의 최대수평지반가속도는 SSE 조건에서 0.2g이고, OBE 조건에서는 SSE의 1/2 수준인 0.1g로 설정되어 있다. 부지의 설계지반응답스펙트럼은 Reg. Guide 1.60[3-3]의 표준응답스펙트럼을 따랐다. 설계지반응답스펙트럼의 영주기가속도(ZPA, Zero Period Acceleration)에 해당하는 진동수를 수평방향의 경우는 33Hz로, 수직방향의 경우는 50Hz로 지정하고 있다.

설계응답스펙트럼의 형태는 Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 부지 특성에 무관한 표준응답스펙트럼과 동일하며, 자유장 부지의 기초저면 위치에서의 운동으로

정의하였다. 한울3,4호기 SSE의 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 해당하는 0.2g로 비례 조정된 지반응답스펙트럼의 형태는 그림 3-1에서 보는 바와 같다. 그림 3-1의 지반응답스펙트럼의 통제진동수(control point frequency)와 각 통제진동수에서의 스펙트럼증폭계수(spectrum amplification factor)는 표 3-2와 표 3-3에 수평방향과 수직방향으로 분리하여 정리하였다. 그림 3-1의 응답스펙트럼가속도는 표 3-2와 표 3-3에 정리된 증폭계수에 부지 최대지반가속도 값을 곱하여 얻을 수 있다. 각종 구조물 및 설비별로 설계에 적용된 감쇄비는 표 3-4와 같다.

기기 내진검증을 위해 필요한 층응답스펙트럼을 생성하기 위하여 사용된 입력지반진동은 지속시간 24초의 인공지진시간이력으로 정의되었으며, 이는 수평과 수직 방향 설계지반응답스펙트럼을 각각 포괄하고 있다(그림 3-2~그림 3-4 참조).

설계기준지진 지반응답스펙트럼과 스펙트럼이 일치하는 수평 가속도시간이력의 동서방향 및 남북방향을 각각 Random Vibration 이론 및 결정론적 방법으로 작성하였으며, 이는 지속시간이 약 24초로서 모두 스펙트럼포괄 요건을 만족하고 있음을 알 수 있다(그림 3-2~그림 3-4 참조).

나. 주요 구조물 · 계통 · 기기의 내진설계(해석)

한울3,4호기 내진설계에 사용된 최대 수평지반가속도는 안전정지지진의 경우 0.2g, 운전기준지진의 경우 0.1g이며, 최대 수직지반가속도는 안전정지지진의 경우 0.13g, 운전기준지진의 경우 0.067g이다. 또한 설계지반응답스펙트럼과 부합하는 단일 세트의 가속도 인공시간이력을 작성하였으며, 인공시간 이력으로부터 계산된 스펙트럼 값은 안전심사지침 3.7.1(Rev. 2)에 기술된 설계 응답스펙트럼의 포괄조건을 만족한다. 각 시간이력은 지속시간이 24초이며, 0.005초의 시간 간격을 갖는다. 인공시간이력으로부터 응답스펙트럼을 작성할 때 고려된 주기는 구간 0.02초에서 5초까지 76개이며 이는 Reg. Guide 1.122[3-4]에 부합한다.

한울3,4호기 내진해석의 경우 응답스펙트럼해석을 사용하였는데 응답스펙트럼이란 단자유도를 갖는 시스템에 대하여 특정 지반응답스펙트럼이 작용할 때 그에 대한 응답을 가속도, 속도, 변위에 대한 그래프로 표현한 것이다. 그림 3-1은 수평방향 안전정지지진 지반응답스펙트럼을, 표 3-4는 내진해석에 사용한 설계 감쇄값을 나타내고 있다. 설계 감쇄값은 안전정지지진과 운전기준지진으로 구분하여 정의하였으나, 안전정지지진의 경우는 실제 응력수준에 따라 서로 다른 값을 정의하였다. 각 층에 위치한 기기와 배관의 응답은 안전정지지진과 운전기준지진의 지반응답스펙트럼으로부터 도출된 층응답스펙트럼(FRS)으로부터 결정되었다.

구조물은 다자유도 시스템으로 모델링하여 내진해석을 수행하였다. 내진해석을 위

해서는 두개의 독립된 모델이 사용되었다. 하나는 수평방향 입력운동에 대한 해석을 위해 사용되고 다른 하나는 수직방향 입력운동에 대한 해석을 위해 사용되었으며 이는 다른 형태의 입력운동 대한 구조물의 거동을 보다 더 정확하게 나타내기 위한 것이다.

내진범주 I 구조물들은 암반상에 위치하므로, 내진해석은 고정지반을 가정하여 수행하였다.

구조요소의 해석 및 설계는 일반적인 탄성론에 따른다. 건물은 전단벽으로 구성되는 격막구조물로 해석하며, 구조해석모델은 부재의 불연속부와 큰 개구부를 고려하여 작성되었다. 해석모델에서의 경계조건은 경계점에 연결된 부재의 강성(휨, 비틀림, 축방향)을 검토하여 결정하였으며, 이들 경계조건은 실제의 구속조건을 가능한 한 정확하게 나타내도록 정하였다. 전단벽은 지진 및 풍하중에 의해 발생하는 수직하중, 모멘트, 횡방향 전단력 및 전도모멘트의 조합에 저항하도록 설계되었다.

다. 기기 내진검증

내진검증에 포함된 기기가 설치된 위치에서의 진동수준과 특성을 결정하기 위해서는 구조물의 지진응답해석이 선행되어야 한다. 한울3,4호기의 내진검증에 포함된 기기를 지지하는 안전관련 구조물의 내진해석 모델은 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) 또는 집중질량모델(lumped mass model)로 이상화하였으며 기초하부의 지반은 등가의 스프링 및 감쇠기로 나타내어 지반-구조물 상호작용(SSl, Soil-Structure Interaction) 효과도 고려하였다. 기기 내진검증에 사용된 층응답스펙트럼을 작성하기 위한 지진응답해석에는 선형시간이력해석법을 사용하였다.

내진검증에 포함된 기기를 지지하는 안전관련 구조물을 유한요소모델 또는 집중질량모델로 이상화하는 것은 안전심사지침의 요건을 만족한다. 안전심사지침에 따르면, 층응답스펙트럼 작성을 위하여 설계지반응답스펙트럼에 적합한 인공지진을 작성하고 이를 구조물에 입력지진동으로 작용시킨 시간이력해석을 수행하도록 요구하고 있다. 구조물의 층응답시간이력은 지진의 세 방향 성분 각각에 대한 시간이력해석을 별도로 수행한 경우에는 각 지진방향 성분별 동일 방향 응답을 산술합계로 계산하였다. 반면에 세 방향성분을 동시에 작용시켰을 경우에는 운동방정식의 직접적분에 의한 최종응답을 계산하였다. 최종 계산된 층응답시간이력으로부터 각 층의 층응답스펙트럼을 작성하였다.

한울3,4호기의 검증계획에 포함된 기기의 내진검증은 IEEE Std 344-1987[3-5]에 따라 수행하였다. 이 기준은 기기의 내진성능 요건을 충족할 수 있는지를 입증하

는데 필요한 절차를 기술한 문서로서 해석에 의한 검증, 시험에 의한 검증 및 해석과 시험의 조합에 의한 검증을 명시하고 있다. 따라서 한울3,4호기는 내진검증 대상기기에 대해 당시 기준에 합당한 방법을 적용하여 내진검증을 수행한 것으로 확인되었다.

내진검증과 관련한 현행 요건은 Reg. Guide 1.100[3-6]에 규정하고 있으며, 이 기준에서 IEEE Std 344-1987이 명시하는 내진검증 방법을 적용 가능한 방법으로 인정하고 있다. 내진검증에서 중요시 하는 네 가지 파라미터를 대상으로 기술기준의 만족 여부를 다음과 같이 확인하였다.

(1) 입력 가진 방향 규정

내진검증시 실제 지진파를 모의하기 위하여 삼축 방향 혹은 최소 이축 방향으로 동시에 가진하여 검증을 수행할 것을 요구하고 있다. 한울3,4호기에서도 IEEE Std 344-1987에 따라 검증을 수행하였으므로 상기 기술기준을 만족하고 있다.

(2) 입력운동 파형 규정

랜덤 복수진동수(Random Multi-Frequency) 파형을 입력운동으로 사용할 것과 시험응답스펙트럼(TRS, Test Response Spectrum)이 요구응답스펙트럼(RRS, Required Response Spectrum)을 규정 요건에 맞게 포괄하도록 시험응답스펙트럼을 작성하여 내진검증을 수행할 것을 요구하고 있다. 또한 시험입력운동의 지속시간이 SSE의 강진구간보다 길고 최소 15초 이상이 되도록 요구하고 있다. 한울3,4호기에서도 IEEE Std 344-1987에 따라 검증을 수행하였으므로 상기 기술기준을 만족하고 있다.

(3) 기능성 감시 방법

Class 1E 기기는 진동시험전, 시험중 그리고 시험후에도 지속적인 기능성 감시요건을 요구하고 있다. 한울3,4호기에서도 IEEE Std 344-1987에 따라 검증을 수행하였으므로 상기 기술기준을 만족하고 있다.

(4) 시험 방법

내진검증 과정에 진동 피로 영향을 반영한 시험검증 요건을 요구하고 있다. 이에 따라 지진동으로 인한 누적 피로 현상을 반영하기 위하여 5회의 OBE 시험후 1회의 SSE 시험을 요구하고 있다. 한울3,4호기에서도 IEEE Std 344-1987에 따라 검증을 수행하였으므로 상기 기술기준을 만족하고 있다.

2.1.1.2 구조물·계통·기기의 내진 현장점검

가. 점검대상 목록 검토

원전의 안전정지를 달성하고 이를 유지할 수 있는 내진성능 평가대상 구조물 및 기기 목록은 계통 분석 결과를 이용하여 작성하였으며, 구조물 및 기기는 아래와 같이 구분된다.

- 구조물 : 내진성능 분석 대상 기기를 포함하고 있거나 지진에 의한 파손시 대상 기기를 포함한 인접 구조물에 영향을 미칠 수 있는 구조물
- NSSS 설비 : 대형 냉각재상실사고를 유발할 수 있는 NSSS 설비
- BOP 기기 : 안전정지 달성 및 유지를 위해 전위계통 및 지원계통에 요구되는 기능을 수행하기 위하여 요구되는 기기 가운데 지진에 의하여 손상 가능성이 있는 모든 기기를 목록화하여 내진성능 분석 대상으로 선정

또한 안전정지 달성 및 유지에 요구되는 아래의 4가지 필수 안전기능과 관련된 자동제어 기능 및 운전원에게 필요한 정보 제공 기능을 수행하는 계측기 및 지시기를 식별하여 내진성능 분석 대상기기로 목록화 하였다.

- 반응도 제어
- 격납건물냉각재계통 압력 제어
- 격납건물냉각재계통 재고량 제어
- 노심 붕괴열 제거

지진에 의한 손상시 발전소 리스크에 영향이 없거나 낮은 구조물 및 기기는 분석 대상에서 제외하고 지진에 의한 손상시 발전소 리스크에 영향을 미칠 수 있는 구조물 및 기기를 선별적으로 선정하였다. 또한 선정된 구조물 및 기기 가운데 상세 내진성능 평가를 수행해야 하는 구조물 및 기기를 결정하는 절차는 다음과 같다.

- 발전소의 계통 및 내진설계와 관련된 자료를 검토하여 지진으로 인한 방사능 누출사고에 민감한 구조물 및 기기를 선정
- 취약도 분석을 위한 구조물과 기기의 선정 기준
 - 내부사건 PSA 모델에서 파악된 기기(즉, 계통 고장수목에 있는 기기의 기본 사건)
 - 낮은 고장 확률로 인해 내부사건의 고장 모델에는 포함되지 않았으나 지진에 대한 조건부 고장 확률이 큰 수동 기기(Passive Components)
 - 위에서 파악된 기기들이 위치하고 있는 구조물
- 취약도 분석 상세평가 선별기준
 - 지진 PSA 보고서[3-7]에 기술된 바와 같이 NUREG/CR-4334[3-8]의 선별제거 기준 및 제한사항을 확인하여 선별함. 선별제거 기준에 따라 선별제거 되지 않은 기기들은 상세 분석 후 메디안 지반가속도 내력이 1.5g 이상인 기기들은 지진 PSA의 결과인 노심손상빈도(CDF)에 영향을 주지 않을 것으로 도출되어 지진정량화 모델 개발 시 선별제거 항목으로 표시

기존 지진 PSA 내진성능 결과는 앞서 설명한 바와 같이 NUREG/CR-4334의 선별제거 기준에 따라 수행되므로 스트레스테스트 평가에서 다루는 필수대처기능(안전정지, 노심냉각, 격납건물 격리, 사용후연료 냉각 등)과 관련된 모든 기기를 포괄하지 못한다. 따라서 격납건물 격리계통, 사용후연료냉각계통의 기기의 추가가 필요하다. 이러한 사항을 보완하기 위해 후쿠시마 후속조치로 수행한 “원전 안전정지유지계통 내진성능평가 용역”[3-9]의 계통분석 결과를 참고하였다. 상기와 같은 검토과정을 거쳐 도출된 평가대상 계통은 표 3-5에 제시하였다. 또한 계통 내 평가대상 기기 중 안전정지유지계통 기기는 표 3-6, 격납건물 격리계통 기기는 표 3-7, 사용후연료냉각계통 기기는 표 3-8에 각각 제시하였다.

한편 현재 물리적 상태가 반영된 점검 및 평가를 위하여 원전 안전정지유지계통 내진성능평가 용역의 종료 시점인 2014년을 기점으로 발전소의 정비이력을 확인하였다. 표 3-9와 같이 잠재적으로 내진 성능에 영향을 줄 수 있는 작업을 분류하였으며 확인결과 상기 작업들은 기기 내진성능에 영향을 주지 않을 것으로 검토되었다.

NUREG/CR-4334의 선별제거 기준에 따라 표 3-6, 표 3-7 및 표 3-8에 기술된 기기 중 내진성능이 우수한 기기들을 선별제거한 후, 한울3,4호기 내진성능 분석을 위한 최종 대상 기기 목록을 표 3-10에 제시하였다.

내진성능 분석 대상 계전기는 발전소 안전정지에 관련된 계통 및 기기들의 오동작을 유발하여 안전정지에 영향을 미칠 수 있는 계전기로서, 다음과 관련된 신호 및 기기들의 제어회로상의 모든 계전기이다.

- 계전기의 오동작으로 인해 영향을 받는 동력 구동 능동기기
- 피동기기이나 계전기 오동작으로 인해 안전정지에 영향을 미칠 수 있는 기기
- 안전정지에 필요한 안전관련 신호

계전기 분석은 과거 한울3,4호기 지진 PSA 보고서[3-7]를 참조하였다. 지진 PSA 보고서에 따르면 계전기의 선정 및 확인 절차 수행 후, 분석 대상으로 선정된 계전기들은 지진사건시 고려되는 관련 기기, 계통의 이용불능으로 인해 초래될 수 있는 지진에 의한 초기사건을 선정하는데 반영하였다. 계전기의 오동작이 반영된 초기사건은 주로 4.16kV 교류 모선 캐비닛, 480V 부하 센터 캐비닛 및 배터리 충전기 등 주로 필수 전원 상실 유발과 관련이 있는 것으로 분석되었으며, 관련 상세 내용은 표 3-11, 표 3-12 및 표 3-13에 제시하였다. 본 평가에서는 최종 선별된 개별 계전기를 앞서 도출된 캐비닛 단위의 현장점검을 통해 선별제거의 타당성을 확인하였다.

나. 현장점검 결과

현장점검은 계통분석 담당자가 선정한 구조물 및 기기의 현장 가동 및 보존 상태를 확인하는 과정이다. 현장점검 대상으로 선정된 설비는 물론 자체적인 계통간의 상호작용 문제를 고려하기 위해 필요한 부계통과 현장에서 지진에 취약할 것으로 판단되는 대상물도 포함된다. 현장점검의 목적은 다음과 같다.

- 선별제거 된 기기들의 현장점검으로 충분히 높은 내력을 갖고 있는지 확인
- 대상 구조물 및 기기의 파손모드, 검토방법 등의 결정을 위한 기초자료로 이용
- 잠재된 문제점을 내포하고 있다고 판단되는 계통간의 상호관계를 확인
- 발전소 배치와 기기들 간의 상관관계에 대한 정보를 확인

현장점검은 ASME/ANS. Std. 2009[3-10]에서 제시한 EPRI NP-6041-SL “A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin”[3-11] 방법론을 이용하여 수행하였다. 여기서 제시된 현장점검지는 각 대상 항목에 대해 대표 기기를 선별하여 기술하도록 하고 있다. 따라서 모든 항목에 대해 상세 기술을 보완하기 위해 후쿠시마 후속조치를 위해 개발된 EPRI 1025286 “Seismic Walkdown Guidance”[3-12]의 Area Walk-by 현장점검지를 추가적으로 활용하여 수행하였다. 이러한 현장점검을 통해 운영 중인 원자력발전소의 내진성능 평가 대상기와 선별제거 된 기기들이 적절히 시공되었는지, 시공 상태는 건전한지, 지진사건이 발생하였을 때 선정된 기기에 잠재적인 간섭 영향을 줄 수 있는 다른 요인이 있는지 등을 조사하였다.

한울3,4호기 현장점검은 표 3-6, 표 3-7 및 표 3-8에 제시된 기기들에 대해 수행하였다. 상세 현장점검을 위해 EPRI NP-6041[3-11]의 25개 대표그룹에 대한 현장점검지와 EPRI 1025286[3-12]의 Area Walk-by 현장점검지가 활용되었다.

현장 점검팀(Seismic Review Team, SRT)은 계통전문가 1인과 내진평가자(Seismic Capable Engineer, SCE) 2인 그리고 발전소 현장 운전원 1인으로 구성되어 있으며, 특히 각 전문가는 다음과 같은 전문 지식이 있는 자에 한해서 선정하였다.

- 지진사건 시 구조물, 탱크, 열교환기, 배관, 공정 및 제어 장비, 능동형 전기기기 등의 파손모드 및 성능에 대한 지식
- 원자력 발전소의 주요 계통에 대한 구조적, 기계적 내진성능 평가분석을 수행할 수 있는 능력을 가졌으며, 동시에 SQUG 교육훈련과정을 이수하여 인증된 내진평가자(SCE)
- 시스템 모델, 시스템 분석 및 결과에 대한 이해

한울3,4호기 평가대상 기기에 대한 내진 현장점검을 2017년 7월 및 2018년 1월에 수행하였다(한울4호기는 계획예방정비기간인 2018년에 수행완료). 현장점검 대상

기기는 표 3-6, 표 3-7 및 표 3-8에 제시된 안전정지유지계통, 격납건물 격리계통 그리고 사용후연료냉각계통 관련 1,572개의 기기이다.

현장점검 기간 중 한울3,4호기가 가동중인 관계로 일부 고방사능구역과 격납건물 내부는 출입이 불가하여 이 지역 내 기기에 대한 추가적인 현장점검은 3호기의 경우 2018년 1월에 수행하였고, 4호기는 2018년 계획예방정비기간 중에 수행할 예정이다.

대상 기기에 대해서는 EPRI NP-6041[3-11]에 기술된 25개 기기의 분류별 특성을 고려한 선별평가기록지(Screening Evaluation Work Sheet; SEWS) 및 EPRI-1025286(Seismic Walkdown Guidance)[3-12]의 Area Walk-by Sheet를 작성하여 현장점검 결과를 기록하였다[3-13]. 한울3호기의 현장점검 결과 대부분의 기기가 건전성에 이상이 없었으며, 약 150건의 Easy Fix 사항, 6건의 추가 검토 필요 사항, 3건의 보강 필요 사항이 도출되었다. Easy Fix 사항의 경우 현장점검 이후 바로 조치를 하였거나 2018년 계획예방정비기간 중에 조치 완료하였으며, 6건의 추가 검토 필요사항 중 4건은 검토 결과 내진성능에 이상이 없음을 확인하였고 2건은 적절한 조치를 진행 중에 있다. 또한 3건의 보강 필요 사항에 대해서는 모두 조치를 완료하였다.

2.1.1.3 지진 발생에 따른 운전조치

한울3,4호기 부지에서 지진이 발생하면

또한 발전소에서는

운전원 및 관련 부서가 합동으로 냉각재계통 등 각 계통의 운전 상태를 상세히 점검하고, 발전소 내 주요 기기와 구조물의 상태를 확인한다.

한편

상기 지진원자로자동정지계통은 지진발생시 발전소

의 대응능력을 제고하기 위하여 수평방향 0.17g, 수직방향 0.10g 이상의 지진 및 이를 초과하는 규모의 지진이 발생할 경우에도 별도의 운전원 조치 없이 원자로를 자동정지 할 수 있도록 설치되었다.

상기와 같이 원자로가 자동 정지되는 안전정지지진 수준 또는 이를 초과하는 지진이 부지에 발생하게 되면 소외전원이 상실될 수 있다. 그러나 이 경우에도 1E 급 축전지들이 0.3g 이상의 지진내력을 보유한 비상디젤발전기가 이용 가능할 때까지 최소 4시간 동안 모든 격납건물제어 및 보호계통에 전원을 공급할 수 있다. 상기 축전지 랙(지진내력 0.4g)과 축전지가 위치한 1차 보조건물은 0.5g 이상의 지진내력을 보유하고 있어 설계기준지진 발생시 사용이 가능하다.

한편 비상디젤발전기가 기동하게 되면 설계기준지진 이상의 지진내력을 보유하고 있는 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 및 정지냉각계통이 사용가능하므로 자연순환냉각 절차에 따라 발전소를 잔열제거 진입조건까지 냉각 및 감압한 뒤 정지냉각계통을 운전함으로써 발전소는 저온정지상태로 안전하게 유지된다. 또한 설계기준지진 이상의 지진내력을 보유하고 있는 사용후연료저장조 냉각계통도 사용가능하므로 사용후연료저장조의 냉각기능을 유지할 수 있다.

그리고 상기 비상디젤발전기가 이용 불가능한 경우가 발생하더라도 한울원자력본부에 구비된 이동형발전차를 이용하여 공학적안전설비에 전력을 공급할 수 있다. 또한 사용후연료저장조에는 외부 주입유로를 활용하여 소방차 또는 이동형펌프를 사용한 외부 충수를 시행함으로써 사용후연료냉각이 가능하다.

2.1.2 지진에 의한 간접영향

2.1.2.1 비내진 구조물·계통·기기에 의한 주요 구조물·계통·기기의 손상유발

상기 2.1.1.2절에서 제시한 현장점검에서는 인접한 비내진 구조물·계통·기기로 인하여 필수 안전정지 기능을 보증하는 안전정지경로 상의 기기가 손상 받을 가능성을 확인하기 위하여 지진상호작용 여부를 점검하였다. 지진상호작용은 (1) 근접효과(Proximity Effects), (2) 구조물 파손 및 낙하(Structural Failure and Falling), (3) 부착된 라인과 케이블의 유연성(Flexibility of Attached Lines and Cables) 등이 주요 확인사항이며 이들 절차는 EPRI NP-6041 Appendix F에 제시되어 있다.

현장점검 결과 구속되지 않은 소화기, 경량부착물, 작업도구, 크레인 체인 등 일부 경미한 사항이 발견된 것 이외에, 다른 모든 안전정지경로 상의 기기는 인접 비내진 구조물·계통·기기로부터의 영향은 없는 것으로 확인되었다. 이에 대해서는 계획예방정비기간 중 조치할 예정이다.

사용후연료냉각계통 기기에 대하여도 인접한 비내진 등급의 기기, 계통 혹은 구조물로부터의 지진상호작용 여부를 EPRI NP-6041에 따라 점검을 수행하였으며, 그 결과 점검대상 기기는 지진상호작용 영향이 없음이 확인되었다. 격납건물 격리계통 기기(격리밸브)에 대한 지진상호작용 여부는 3호기의 경우 2018년 1월에 추가 현장점검을 통해 확인하였으며, 4호기는 2018년 계획예방정비기간 중에 현장점검을 수행할 예정이다.

한편 안전정지지진을 초과하는 지진 발생으로 터빈건물 내부의 접근성이 제한될 수 있으나 주제어실과 원격정지제어반은 터빈건물을 통하지 않고 외부에서 보조 건물을 통하여 직접 진입할 수 있어 접근성에 제한을 받지 않는다.

2.1.2.2 외부 지원인력(장비)의 접근성

한울 발전소 본부부터 한울2발전소 및 한울2발전소 정문부터 3,4호기 안전관련 구조물까지의 이동로 부지표고는 EL.(+) 10.0m로 동일하고, 상기 2곳의 이동로상 및 주변에는 영구사면, 교량이 존재하지 않는다. 따라서 한울3,4호기의 안전정지지진인 0.2g 또는 설계기준초과 지진인 0.3g의 지진동이 부지에 발생할 경우 일반적으로 차량 및 인원통행에 제한을 줄 수 있는 도로 피해형태는 도로상 균열발생, 지반 액상화에 의한 도로 침하이다. 그리고 10,000년 빈도의 강풍이나 토네이도가 발생할 경우 상기 이동로 주변 가로등 및 가로수가 전도되거나 외부 비산물이 도로상에 낙하할 수 있다.

그러나 지진으로 인한 도로상 균열의 경우 0.2g 정도의 지진규모에서는 차량통행이 가능할 것으로 예상되며, 0.3g 정도의 지진에서는 도로상 균열이 발생할 수 있다. 그러나 도로 균열이 발생하더라도 인원의 이동은 가능하며 소내에 보유중이거나 도입예정인 로더 등의 중장비를 이용하여 복구할 경우 차량통행이 가능하다. 한편 지반 액상화에 의한 도로 침하의 경우 도로 하부의 토질에 따라 발생 여부가 달라지나, 발전소 내 이동로는 매립지나 느슨한 사질토, 충적토 상에 시공되지 않아 액상화 가능성은 없다. 또한 10,000년 빈도의 강풍이나 토네이도가 발생하여 이동로 주변 가로등 및 가로수가 전도되거나 외부 비산물이 도로상에 낙하하여도 인원의 이동은 가능하며, 소내에 보유중이거나 도입예정인 지게차, 로더 등의 중장비를 이용하여 복구할 경우 차량통행이 가능하다.

2.1.3 주요 안전기능 상실/심각한 핵연료 손상 유발 가능 지진의 심각도 범위

제2장 보고서(설계기준초과 극한자연재해의 특성)에서 검토하였듯이 한울3,4호기 부지에서의 PSHA 평가결과 재현주기 10,000년 빈도 수준 지진동은 영주기 수평 지반가속도가 0.18g로 평가되었다. 한편 한울3,4호기의 안전관련 구조물 및 필수 안전정지기능을 보증하는 안전정지경로 상의 기기, 사용후연료냉각계통의 기기 및

격납계통의 격리기능을 수행하는 기기들은 수평지반가속도 0.2g의 지진을 고려하여 설계되고, 내진검증 되었다. 스트레스테스트 수행지침에 따르면 한울3,4호기는 지진 확률론적안전성분석(S-PSA) 또는 내진여유도분석(SMA) 방법을 이용하여 주요 안전기능의 상실, 핵연료의 심각한 손상을 유발시킬 수 있는 지진의 규모를 평가하고 그 결과를 제시하도록 하고 있다. 이에 본 평가에서는 설계기준 지진동을 초과하는 구조물 및 기기의 고유 내진성능을 분석하였다.

내진성능 평가 대상 기기와 구조물은 상기 2.1.1.2절에서 제시한 바 있는 표 3-10의 기기 및 안전관련 구조물이다. 도출된 구조물 및 기기에 대해 결정론적 파손내력평가방법 또는 변수분리법을 적용하여 개별 설비의 고신뢰도저파손확률(HCLPF)을 구하였다. 내진성능의 세부 평가결과는 다음과 같다.

2.1.3.1 내진성능 평가 가정 사항 및 분석방법

한울3,4호기 내진성능 평가 대상 설비들의 HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) 값을 도출하는데 사용된 필수 가정 사항은 다음과 같다.

- 한울3,4호기 내진성능 평가는 기존 지진 PSA 결과[3-7] 값과 후쿠시마 후속조치로 수행된 “원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역”[3-9]의 내진성능 값을 활용
- 추가 분석이 필요한 기기는 발전소 고유 지진으로 ASME/ANS Std. 2009[3-10]에서 제시한 NUREG CR-0098[3-14] 및 방법론을 활용하여 평가를 수행

내진성능 평가(지진취약도 분석)의 목적은 선정된 대상 설비의 지반가속도내력을 계산하는 것이다. 이 내력은 특정한 지점에 위치해 있는 대상 설비의 지진응답이 대상 설비의 저항내력을 초과하여 파손될 때의 값을 최대지반가속도(PGA)의 비로 정의한다. 이러한 지진취약도 결과는 부지 고유지진동인 PGA에 대한 조건부 확률로 표현되며, 95% 신뢰도를 갖는 5% 파손확률의 값을 HCLPF 즉, 고신뢰도저파손확률값으로 도출된다. 이는 동시에 단일 신뢰도로 나타낼 경우 99% 신뢰도에서 1% 파손확률을 의미한다.

지진취약도 분석을 위해서는 발전소 기본 설계 및 해석단계에서 고려된 여유도, 실제 시공된 현장상태 그리고 시공 시 사용한 재료 특성 등을 근거로 계산한다. 지진취약도 분석은 변수분리법(Separation of Variables, SOV) 그리고 보수적 결정론적 파손내력(Conservative Deterministic Failure Margin, CDFM) 방법을 통해 수행되며, 분석방법은 다음과 같다.

- 결정론적 파손내력 방법(CDFM)

○ 변수분리법(SOV)

2.1.3.2 선별제거 및 평가대상 설비

USNRC에서는 전문가 판단 및 선별제거 기준표에 따른 선별제거를 허용하고 있다. 미국 EPRI는 과거의 지진 경험 데이터베이스와 설계기준에 대한 평가, 그리고 설계 관행을 검토하여 선별제거 기준을 수립하였다. 한울3,4호기 PSA 보고서에 따르면, 상세 지진 PSA분석을 위해 NUREG/CR-4334의 선별제거 요건을 활용하여 선별제거 하였다. ASME/ANS Std. 2009의 HLR-SFR-B의 SFR-B1에 따르면 NUREG/CR-4334, EPRI NP-6041를 허용하고 있으므로 과거 지진 PSA의 선별제거 요건은 현장점검 및 정착부 상세 계산이 되면 유효하게 활용할 수 있다.

따라서 최종 내진성능 평가 대상기기의 선별제거 방법의 타당성을 확인하기 위해 EPRI NP-6041의 “Table 2-3, Table 2-4”의 선별제거 기준을 활용하여 현장점검을 수행하였으며, 관련 제한사항에 대해서는 표 3-14에 요약하여 제시하였다. 한울3,4호기 내진성능 평가 대상기기 중 EPRI NP-6041의 선별제거 요건에 따라 선별한 대상 기기는 최종 내진성능 평가결과인 표 3-10에 기술하였으며, 선별제거된 항목에 대해서는 아래와 같이 현장점검 및 정착부 분석을 통해 적절성을 확인하였다.

2.1.3.3 내진성능 평가결과

가. 구조물 평가 결과

구조물 내진성능 평가는 발전소 안전정지유지계통, 격납건물 격리계통, 사용후연료 냉각계통의 기기들을 포함하여, 파손시 발전소 안전에 영향을 주는 대상에 대해 다음과 같이 분석하였다.

- 격납건물 : 원통형 벽체와 반구형 돔으로 구성되는 프리스트레스 콘크리트 셸 구조로서 원형의 기초슬래브에 의해 지지되었으며, 안전정지지진(0.2g)에 대하여 내진설계 되었음.

- 1차 및 2차 보조건물 : 1차 보조건물은 격납건물과 터빈건물 사이에 위치하며, 철근콘크리트의 전면기초, 전단벽, 내부 격벽 및 슬래브로 구성됨. 2차 보조건물은 1차 보조건물과 일체로 연결되어 있으며 공통 전면기초 위의 전단벽과 슬래브로 구성된 철근콘크리트 구조물임. 또한, 안전정지지진(0.2g)에 대하여 내진설계 되었음.

- 핵연료건물 : 핵연료건물은 격납건물에 인접해 있으며, 격납건물을 사이에 두고 보조건물 맞은편에 위치함. 핵연료건물은 정지면 위의 전면기초로 지지되는 철근콘크리트 전단벽 및 격막구조로 되어있음. 층슬래브는 2방향 슬래브-보 구조와 데크플레이트 위의 콘크리트 슬래브를 강재 보로 지지하는 구조들로 되어 있음. 지붕은 강재 보로 지지되는 데크플레이트 콘크리트 슬래브 구조임.

- 연료유 저장탱크 구조물 : 비상디젤발전기의 연료유 저장탱크 구조물은 비상디젤발전기 인근 1차 보조건물 및 2차 보조건물에 위치하고 있음. 이 구조물은 전면 기초에 지지되는 상자형 전단벽 구조로써 지하에 있으며 1차 및 2차 보조건물과 구조적으로 일체로 연결되어 있다.

- 기기냉각해수 취수구조물 : 취수로에 인접하여 위치하는 기기냉각해수 취수구조물은 전면기초 위의 철근콘크리트 전단벽과 격막슬래브 구조물임. 슬래브와 지붕은 2방향 슬래브와 보로 구성되며 내부벽체는 철근콘크리트 구조임.

- 기기냉각수 열교환기 건물 : 기기냉각수 열교환기 건물은 기기냉각해수 취수구조물 옆에 있으며 전면기초에 지지되는 전단벽 격막구조임. 외부전단벽 및 지붕슬래브는 비산물 방호역할을 하며 중간층 및 지붕은 연속슬래브와 철근콘크리트 보로 구성되어 있고 내부 격벽은 철근콘크리트 구조임. 기기냉각수 열교환기 건물의 기초슬래브는 다른 건물과 분리되어 있음.

- 한울본부 3.2Mw 이동형발전차 차고건물 :

나. 기기 평가 결과

필수 안전정지 기능, 사용후연료 냉각 및 격납건물 격리기능을 수행하는 1,572개의 기계, 전기기기에 대하여 기존 PSA 분석보고서 결과 및 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 보고서의 내진성능 값을 참조하였으며, 상세평가가 되지 않고 선별제거 된 기기 또는 일부 추가 분석이 필요한 기기에 대해서는 ASME/ANS PRA Std. 2009에서 제시한 평가지진(NUREG/CR-0098) 및 방법론을 적용하여 상세 분석 및 정착부 평가를 통해 내진성능을 최종 평가하였다. ASME/ANS PRA Std. 2009에 따라 한울 3,4호기의 모든 평가대상 기기는 상세평가 예정이며, 이 결과를 활용하여 기존 분석값(기존 PSA 등)을 활용한 기기들에 대한 Gap 분석도 함께 수행할 예정이다. 평가결과 대부분의 기기의 HCLPF 내진성능이 0.3g 이상 확보하는 것으로 평가되었다. 필수 계통의 대상기기 중 밸브, 계측기 등은 내진검증문서 등을 확인하여 내진성능이 0.5g 이상임을 추가로 분석하였다. 이와 더불어 현장조사 중 구조적 건전성 확인이 필요한 것으로 검토된 6개의 기기 중 4개의 기기에 대해서는 설계문서, 시방서 등의 확인을 통하여 정착부를 추가로 검토하였거나 변위영향이 없음을 확인하였으며, 2개의 기기는 검토중에 있다. 한울3,4호기 구조물 및 기기의 내진성능평가 결과는 표 3-10에 제시하였다.

상기 평가결과와 같이 한울3,4호기의 안전관련 구조물 및 필수 안전정지 기능을 보증하는 안전정지경로 상의 기기 모두 0.3g 이상의 HCLPF 내력을 보유하고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 한울3,4호기의 필수 안전정지 기능을 보증하는 구조물·계

통·기기는 부지에서 재현주기 30,000년 빈도 수준 지진을 초과하는 지진(0.3g)이 발생하는 경우에도 해당 기능을 유지할 수 있을 것으로 평가되었다.

2.1.4 격납건물 건전성을 손상시킬 수 있는 지진심각도 범위

제2장 보고서(설계기준초과 극한자연재해의 특성)에서 검토하였듯이 한울3,4호기 부지에서의 PSHA 평가결과 재현주기 10,000년 빈도 수준 지진동은 영주기 수평 지반가속도가 0.18g로 평가되었다. 한편 한울3,4호기의 격납건물과 격납계통의 격리기능을 수행하는 기기들은 수평지반가속도 0.2g의 지진을 고려하여 설계되고, 내진검증 되었다. 스트레스트 테스트 수행지침에 따르면 한울3,4호기는 지진 확률론 적안전성분석(S-PSA) 또는 내진여유도분석(SMA) 방법을 이용하여 격납기능 관련 설비의 건전성 손상을 유발시킬 수 있는 지진의 규모를 평가하고 그 결과를 제시하도록 하고 있다. 이에 본 평가에서는 설계기준 지진동을 초과하는 격납기능 관련 설비의 고유 내진성능을 분석하였다.

본 절에서의 내진성능 평가 대상 구조물과 기기는 격납건물 및 격납건물 격리밸브이다. 격납건물 격리밸브 목록은 표 3-7에 제시한 바 있다. 격납건물 및 격납건물 격리밸브의 내진성능 분석결과는 다음과 같다.

- 격납건물 : 원통형 벽체와 반구형 돔으로 구성되는 프리스트레스 콘크리트 셸 구조로서 원형의 기초슬래브에 의해 지지되었으며, 안전정지지진(0.2g)에 대하여 내진설계 되었음.

- 격납건물 격리밸브 : 격리밸브는 상세평가를 통해 내진성능이 0.5g 이상임을 확인하였음. 격납건물 격리밸브에 대해서 현장점검을 수행하였으며, 현장 점검시 격납건물 격리밸브에 대한 점검결과 특이사항은 발견되지 않았음

상기 평가결과와 같이 한울3,4호기의 격납건물과 격납건물 격리밸브 모두 내력을 보유하고 있는 것으로 분석되었다.

2.2 지진에 의한 내부 침수에 대한 구조물·계통·기기의 건전성

본 평가에서는 안전정지지진 또는 이를 초과하는 지진발생시 한울3,4호기의 안전 정지경로 상의 기기가 위치하는 격납건물, 1,2차 보조건물 등 안전관련 구조물 내부에서 유체계통의 배관 파단으로 발생하는 내부 침수 및 이로 인한 영향을 평가 하였다.

2.2.1 격납건물 내부 침수

격납건물 내부 유체계통 배관은 내진범주 I, II로 설계된 배관이다. USNRC의 문서 NUREG/CR-4334(An Approach to the Quantification of Seismic Margins in NPP)의 “Seismic Capacities of Piping Systems”에 따르면 원자력발전소의 NSSS 및 BOP 배관의 경우 내진성능이 매우 높으며 HCLPF은 최소 0.5g로 기술되어 있다. 또한 IAEA-TECDOC-1333 (Earthquake Experience and Seismic Qualification by Indirect Methods in Nuclear Installations)에서는 지진경험자료 조사 결과에 따르면, 발전소 배관의 경우 비록 수평 지진하중에 대한 설계가 고려되지 않았더라도 0.4g 까지는 손상이 발생하지 않았고, 지진의 관성력에 의한 파괴는 일어나지 않았다고 기술하고 있다.

따라서 모든 배관이 내진범주 I, II로 설계된 격납건물 내부에서는 안전정지지진 및 설계기준초과 지진시 0.3g 지진동 수준까지는 배관 파손이 발생하지 않으므로 이에 의한 내부 침수 영향은 발생하지 않는다.

한편 한울3,4호기

내부 침수로 인한 영향을 받지 않는다고 기술하고 있다.

2.2.2 기타 안전관련 구조물에서의 내부 침수

본 평가에서는 안전정지지진 또는 이를 초과하는 지진발생시 건물 내 배관 중 내진범주 I, II로 설계되지 않은 배관 손상으로 배관 내부의 유체가 건물 내부로 유출되는 것을 고려하였다.

보조건물 등 안전관련 구조물 내부에는 표 3-15에서 보듯이 고에너지 유체계통 배관, 중에너지 유체계통 배관 및 화재방호계통 배관이 존재한다. FSAR 표 3.2-3에 의하면 표 3-15에 기술된 유체계통의 배관은 대부분이 내진범주 I 또는 II로 설계되어 있으며 비안전등급의 배관(발전소 난방계통, 소내 용수계통, 액체폐기물 계통, 탈염수계통)도 안전관련 지역에 있는 배관은 내진범주 II로 설계되었다고 기술되어 있다. 따라서 이들 배관 중 발전소 냉수계통, 음용수계통이 비내진으로 설계되어 있다(표 3-15 참조). 또한 화재방호계통의 경우 지진화재 발생시 계통의 동작으로 소화용수가 유출될 수 있으나 설계기준초과지진 발생시 전원상실로 소화수펌프가 작동하지 않으므로 대규모의 용수유출은 발생하지 않는다.

비내진으로 설계되어 있는 음용수계통의 배관이 손상될 경우 한울3,4호기 FSAR

3.4절의 내부침수 분석에 따르면

가 직접 영향을 받을 수 있으나, 이때 해당 격실에서의 최대침수위는 6 in에 불과하여 격실 내 기기에 영향을 주지 않는다. 또한 비내진으로 설계되어 있는 발전소 냉수계통의 배관이 손상될 경우 보조건물 144'에 위치한 전동기 발전기실이 직접 영향을 받을 수 있으나, 이때 해당 격실에서의 최대침수위는 6 in에 불과하여 격실 내 기기에 영향을 주지 않는다. 한편 상기 2개 계통에서 유출되는 유량이 보조건물 최하층부로 침수되더라도 침수되는 유량은 불과하다. 따라서 설계기준초과 지진으로 인하여 안전관련 구조물 내부에서의 침수영향은 발생하지 않는다.

2.3 지진에 의한 내부 화재에 대한 구조물·계통·기기의 건전성

본 절에서는 설계기준(안전정지지진) 초과지진에 따른 내부 광역화재 발생가능성을 평가하고, 그 결과로 인해 필수대처기능의 상실을 초래하는 것으로 나타날 경우 이에 대한 대응방안을 제시하였다.

2.3.1 화재방호계통 설명

한울3,4호기에 설치되어 있는 화재진압계통 및 화재감지계통의 설계는 발전소 전체의 잠재적 화재의 위험성 평가 및 안전정지 상태를 달성하고 유지하는 능력, 환경으로의 방사능 누출을 최소화시키고 제한하는 능력, 발전소 자산과 인원을 보호하는 능력에 대해 가상 화재가 미치는 영향을 고려하여 설치되어 있다.

물, 이산화탄소와 같은 소화재를 사용하는 고정식 진압계통은 잠재적 화재 피해가 안전정지에 손상을 미치는 지역 또는 BTP CMEB 9.5-1에서 요구되는 발전소 지역에 갖추어져 있다.

열, 연기 또는 화염 감지기 같은 고정식 화재감지계통이 화재 발생 여부를 자동적으로 감지하도록 발전소 전체에 설치되어 있다.

가. 소화수 공급설비

한울3,4호기 소화용수 공급계통은 2개의 소화수 저장탱크에서 공급되며, 전용 펌프실에 설치된 펌프를 통하여 발전소 전 지역에 공급된다.

소화수배관은 [redacted] 설치되어 있다. 옥외의 소화배관은 [redacted] 대형 건물의 옥내소화 모관에 소화용수를 공급하도록 되어있으며, 분할 및 격리 목적의 밸브가 각 모관을 격리하기 위해 갖추어져 있다.

각 호기의 소화용수 공급계통은 [redacted] 스프링클러와 소화전의 최대 요구량을 공급할 수 있다. 소화용수 공급계통은 자동 스프링클러 또는 물분무 계통에서 요구되는 최대의 유량과 동시에 소화전에 [redacted]의 유량을 공급하도록 되어 있다. 최소 요건으로서 소방펌프는 [redacted] 소화전 유량을 추가로 공급할 수 있다.

나. 내진범주 I 소화설비

안전성관련 지역에 위치한 화재진압계통(옥내소화전 및 주배관)에 소화용수를 공급하기 위하여, [redacted] 소화수 저장탱크 [redacted]가 [redacted]에 설치되어 있으며, 원수공급계통에서 소화용수를 공급받는다.

[redacted] 소화수 펌프가 2대 설치되어 있으며, 최소 2개의 옥내소화전에 [redacted] 유량을 공급한다. 내진범주 I 소화설비는 안전정지 관련기기가 설치된 [redacted] 건물 등에 소화용수를 공급한다.

다. 소화기

이동식 소화기는 발전소 건물의 각층마다, 바닥으로부터 1.5m 이하 장소에 설치되어 있다. 한울3,4호기에 설치된 소화기는 이산화탄소소화기(BC급), 분말소화기(ABC급)로써 건물 내에 적절하게 배치되어 있다. ABC 분말소화기는 발전소 전 지역에 배치되어 있으며, 이산화탄소 소화기는 전기화재 또는 유류화재가 발생할 수 있는 장소에 배치되어 있다.

라. 옥내소화전설비

옥내소화전설비는 발전소 전지역에 고루 설치되어 있다. 옥내소화전에는 30m 길이의 40mm 소방호스가 호스걸이에 설치되어 있다. 옥내소화전은 호스함 방식으로 발전소 전체 건물에 위치표시등과 함께 설치되었으며, 각각의 호스함은 개별 밸브에 의해 수동으로 제어된다. 호스의 노즐은 적절한 흐름을 조절할 수 있으며 고전압이 흐르는 전기기기 등의 지역은 사용이 제외된다.

마. 옥외소화전설비

옥외소화전계통은 소방펌프 각각으로부터 별개의 지하 모관 연결부에서 소화용수를 공급받는다. [REDACTED]

[REDACTED] 옥외소화전함은 각각의 소화전에 위치해 있고, 소화전함에는 호스, 분무노즐, 렌치, 커플링이 포함되어 있다. 지관들은 옥외 환형 모관으로부터 각 발전소의 건물로 연결되어 있다.

바. 스프링클러설비

습식 스프링클러설비와 준비작동식 스프링클러설비가 설치되어 있어 화재를 자동으로 진압한다. [REDACTED]

[REDACTED]

사. 물분무 설비

감지기, 개방형헤드, 텔루지 밸브로 구성된 자동 물분무설비와 열감지기, 물분무노즐, 안전등급 차단밸브로 구성되어 있는 수동물분무설비가 설치되어 있다. [REDACTED]

[REDACTED]

아. 이산화탄소 소화설비

저압식 이산화탄소소화설비가 설치되어 있으며 소화약제 저장용기, 기동장치, 분사헤드, 방출표시등, 사이렌 등으로 구성되어 있다. 이산화탄소가 방출되거나 누출될 가능성이 있는 지역의 출입구 주위에는 경보등 또는 경보표시가 설치되어 있다. [REDACTED]

[REDACTED]

자. 청정소화약제소화설비

청정소화약제소화설비(IG-541)는 소화약제 저장용기, 기동장치, 분사헤드, 방출표시등, 사이렌, 감지기, 기동용기, 배관 등으로 구성되어 있다. 기동방식은 공기흡입형 연기감지기 연동 [REDACTED]에 의한 자동기동방식을 선택하고 있다.

차. 폼 소화설비

폼 소화설비는 [REDACTED] 화재진화를 위하여 [REDACTED] 설치되어 있으며, 열감지기에 의하여 자동으로 동작된다. 현장제어반 또는 방출밸브 개방을 통하여 수동으로 기동이 가능하다.

카. 화재감지계통

화재감지 및 경보계통은 화재감지기, 화재경보함 및 주화재 제어반으로 구성된다.

[REDACTED] 교류전원의 상태는 항상 감시되며 고장과 동시에 경보가 발생한다. 직류전원은 주화재 제어반에 내장된 충전회로와 교류전원 차단시 24 시간 동안 전력을 공급할 수 있는 충분한 용량의 배터리가 설치되어 있다.

화재감지기는 연기감지기, 열감지기, 불꽃감지기 등 3종이 설치되어 있으며 중계기를 통해 주화재 제어반으로 화재신호를 전송한다.. 중계기는 화재경보함과 화재진압 제어반에 설치되고 각각의 중계기는 화재발생 감지신호 및 고장신호를 주화재 제어반으로 전송한다. 공기조화계통의 덕트에도 화재감지기가 설치되어 있으며, 활성탄 여과기에는 저항 온도감지기가 있어 설정된 온도에 이르면 주제어실에 경보를 보낸다. 환기 계통의 특정 부분에는 고온 온도조절장치가 위치하여 주제어실에 경보를 보내고 과도한 고온공기에서 필요시 팬을 정지시킨다.

2.3.2 지진화재 영향 평가

2.3.2.1 지진화재 발생가능 지역 선별

지진 발생시 원자력발전소에 화재가 발생할 가능성이 있는 지역은 내진설계가 되어있지 않은 지역, 내진설계는 되어있으나 용기나 배관 내 인화성 기체 또는 액체, 전기캐비닛이 존재하는 지역이다.

전기캐비닛 또는 인화성물질을 수용하고 있는 용기나 배관은 내진설계가 되어 있는 경우라 하더라도 설계기준을 초과하는 지진이 발생할 경우에는 캐비닛 또는 용기나 배관의 손상으로 인하여 화재가 발생할 수 있다.

한울3,4호기에서 지진으로 인하여 화재 발생이 가능한 지역을 도출하기 위해 한울 3,4호기 화재위험도분석 적합성 재평가 최종보고서[3-15]를 검토하였고 추가로 현장조사를 수행하였다.

2.3.2.2 지진화재 취약지역 도출

가. 지진화재 취약지역 도출 방법

지진화재 취약지역은 설계기준을 초과하는 지진에 의해 발생하는 화재로 인해 필수 대처기능이 상실될 가능성이 있는 지역을 의미한다. 지진화재 취약지역 도출을 위해 한울3,4호기 화재위험도분석 적합성 재평가 최종보고서와 한울3,4호기 스트레스테스트의 3,4분야 보고서에서 도출된 필수대처기기를 참조하였다.

안전정지 기능의 목표는 화재 발생 후 발전소를 안전정지 상태로 만들어 노심내 핵연료봉의 건전성을 유지하고 격납건물 압력용기 및 부속배관, 그리고 격납건물의 건전성을 유지하는 것이다. 안전정지 상태는 일차적으로 고온대기상태를 유지하고 그 다음 저온정지 상태에 도달하는 것을 말한다. 고온대기와 저온정지의 정의는 다음과 같다.

- 고온대기 : 원자로가 운영기술지침서에 명시된 충분한 정지여유도를 가지고 미임계 상태이며 원자로 냉각수계통의 평균 온도가 350 °F(176.7 °C) 이상인 발전소 상태
- 저온정지 : 원자로가 운영기술지침서에 명시된 충분한 정지여유도를 가지고 미임계 상태이며 원자로 냉각수계통의 평균 온도가 210 °F(98.9 °C) 미만인 발전소 상태

화재발생시 주제어실 또는 원격정지제어반에서 고온정지를 달성하는데 필요한 최소한 하나의 안전정지 성공경로는 손상되지 않아야 한다. 고온정지를 위한 안전정지 기능은 다음과 같다.

- 반응도 제어(Reactivity Control)
- 냉각재 보충(Reactor Coolant Makeup)
- 냉각재 압력조절(Pressure Control)
- 잔열 제거(Decay Heat Removal)

- 공정 감시(Process Monitoring)
- 보조 기능(Support Functions)

화재발생시 저온정지를 달성하는데 필요한 계통의 다중 성공경로가 동시에 손상될 수 있으나 최소한 하나의 성공경로는 소내 능력으로 72시간 내에 복구되어야 한다. 저온정지를 위한 안전정지 기능에서는 원자로 정지나 냉각재 수위조절, 냉각재 압력조절, 공정감시 등의 기능은 필요하지 않으나 다음의 3가지 기능은 계속 필요하다.

- 냉각 및 감압(Pressure Reduction to RHR Capability)
- 잔열 제거(Decay Heat Removal)
- 보조 기능(Support Functions)

한울3,4호기 화재위험도분석 적합성 재평가 최종보고서에는 169개 방화지역 각각에 대하여 성공경로 A 또는 성공경로 B에 해당하는 기기나 케이블의 존재여부와 다중의 성공경로 사이의 격리상태가 평가되어 있다. 화재 후 안전정지 성공경로 A, B에 해당하는 계통 및 기기들은 내진설계가 되어 있으며 3시간 내화방벽으로 서로 격리되어 있다. 또한 한울3,4호기 스트레스트스트의 3,4분야 보고서에서 도출된 필수대처기기들에 해당되는 계통 및 기기들도 내진설계 되어 있으며 성공경로 A, B 사이는 3시간 내화방벽으로 서로 격리되어 있다. 일부 지역에 성공경로 A, B에 속하는 기기 및 케이블들이 공존하고 있으나 화재방호체로 보호되고 있기 때문에 지진화재가 발생하더라도 A, B계열의 기기 또는 케이블의 동시손상으로 필수대처 기능이 상실되지 않는다. 그러나 일부 화재방호체가 설치되지 않아 A, B 계열의 기기 또는 케이블의 동시손상으로 필수대처 기능을 상실할 수 있는 지역이나 운전원의 수동조치가 필요한 지역을 지진화재 취약지역으로 도출하였다. 한울3,4호기의 화재 후 안전정지 기능을 담당하는 계통 및 기기는 표 3-16과 같다.

나. 지진화재 취약지역 도출 결과

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block 1]

[Redacted text block 2]

[Redacted text block 3]

[Redacted text block 4]

[Redacted text block 5]

[Redacted text block 6]

[Redacted text block 7]

[Redacted text block 8]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

2.3.2.3 지진에 의한 내부 광역화재 영향평가

앞에서 기술한 바와 같이 설계기준 초과지진이 발생하면 내진설계가 되어있는 성공경로 A/B 계열 안전정지기 및 관련 케이블들의 건전성은 유지된다. 그러나 지진과 동시에 화재가 발생하여 성공경로 A/B 계열이 동시에 손상되는 경우에는 안전정지를 달성할 수 없다. 대부분의 A, B계열의 케이블이 동시에 존재하는 지역은 B계열 케이블을 화재방호체로 래핑하여 물리적으로 격리하였으므로 지진화재시에도 필수대처기능이 상실되지 않으므로 취약지역으로 도출하지 않았다. [Redacted]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

한울3,4호기의 안전성관련 지역에는 내진 옥내소화전이 설치되어 있으므로 지진화재 발생시 취약지역 인근에 비치된 소화기와 옥내소화전을 사용하여 화재를 진압할 수 있다. 또한 자체소방대의 화학소방차, 외부소방대의 소방펌프차의 지원을 받아 화재를 진압할 수도 있다.

원활한 시야확보를 위해 내진 비상조명등의 추가가 필요하며, 화재 취약지역의 화재 조기감지를 위한 내진화재감지기의 설치가 필요하다.

5개 취약지역에 대한 개선사항은 다음과 같다.

- 취약지역 내진비상조명등 설치
- 화재순찰자, 운전원, 자체소방대원의 이동경로에 내진비상조명등 설치
- 취약지역의 화재발생시 조기감지를 위한 내진화재감지설비 설치
- 지진화재 발생시 대응 관련 절차서 개발

2.3.3 발전소 및 외부 소방대 수동진압능력 평가

지진화재로 인하여 고정식 소화설비를 사용할 수 없는 경우 화재진압은 소방대의 수동소화능력에 의존해야 한다. 본 절에서는 화재진압 능력을 확인할 수 있는 발전소 및 본부 화재방호 조직의 비상대응 능력과 외부 소방대의 진압능력을 검토하였다[3-16, 3-17]

2.3.3.1 발전소 및 본부 수동진압능력 평가

가. 초동소방대

초동소방대는 원자력안전위원회 고시 제2015-12호(화재방호계획의 수립 및 이행에 관한 규정)에 근거하여 발전소 호기별 교대근무자를 대상으로 편성된다. 초동소방대 조직 구성은 비상운전 담당 필수 운전원

으로 구성된다(표 3-18 참조).

초동소방대에는 공기호흡기, 예비공기통, 방열복, 방열화, 방열장갑 등의 개인용 보호 장비가 구비되어 있다. 초동소방대원은 보호 장비를 착용 후 발전소 내 화재를 초기에 진압한다. 한울2발전소 화재방호운영계획서에는 초동소방대원이 화재진압시 이용할 수 있도록 발전소 내 각 방화지역별 화재발생시 진압방법, 진압도면, 이용진압설비, 자동동작사항, 후속조치, 주의사항 등을 수록하고 있다. 초동소방대의 임무는 아래와 같다.

나. 자체소방대

자체소방대는 발전소 내 화재를 예방하고 화재발생시 신속히 진압하여 인명과 재산을 최대한 보호하기 위하여 본부 내에 설치 운영된다. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] 자체소방대의 임무는 아래와 같다.

- 초동소방대와 공조하여 화재진압 활동
- 효과적인 소화설비를 사용하여 2차적 피해 또는 안전정지에 영향이 없도록 소화활동 전개
- 울진소방서와 합동 화재진압 및 지원 활동

자체소방대 건물은 화학소방차 및 화재진압장비를 보관하고 자체소방대원이 근무하는 장소이다. 자체소방대 건물은 [REDACTED] 설계기준 초과 해일이 발생하는 경우에도 영향을 받지 않는다. 그러나 자체소방대 건물은 설계기준지진을 견딜 수 있는 내진설계가 되어있지 않아 대형 지진이 발생할 경우 구조적 건전성을 보장할 수 없으므로 소방차 및 화재진압장비를 사용할 수 없다. 이에 자체소방대 건물의 내진보강을 극한자연재해 대응을 위한 안전개선사항으로 도출하였다. 자체소방대가 보유하고 있는 장비는 다음과 같다.

[REDACTED]

다. 자위소방대

자위소방대는 발전운전에 영향을 받지 않는 종사원으로 구성된다. [REDACTED]

[REDACTED]

한울본부에서는 소방교육과 병행하여 년 1회 이상 소방훈련을 실시하고 있다. 또한 외부소방대와 상호 응원협정에 따라 울진소방서와 년 1회의 합동훈련을 실시하고 있다.

라. 소방계획서 평가

한울본부는 후쿠시마 후속조치의 일환으로 지진화재에 대비하여 광역화재 발생시 적절한 대응체계를 구축하기 위해 한울본부 소방계획서를 개정 완료하였다. 소방계획서에는 화재예방, 화재진압에 대한 내용 등이 수록되어 있다.

소방계획서의 화재예방 부분에는 소방시설 점검, 소방 안전순찰, 소방안전교육, 화기사용 제한 등의 내용이 수록되어 있고 화재진압 부분에는 소방훈련, 소방조직의 운영(화재진압활동 포함), 외부소방대 응원협조 체계 등의 내용이 수록되어 있다.

마. 소내 소방대 평가 결과

한울본부 자체소방대는 화학소방차 2대를 보유하고 있으며 한울1,2,3 발전소에서 발생하는 화재를 진압한다. [REDACTED]

초동소방대원은 발전소의 운전요원이 담당하며 화재발생 초기에 화재진압을 수행한다. 초기에 화재가 진화되지 않을 경우에는 자체소방대원이 화재를 진압하여야 한다. 자체소방대원은 발전소 내의 화재진압을 위해 외부기관인 소방학교에 위탁하여 전문적인 화재진압훈련 및 교육을 받고 있다. 자체소방대 건물에 대한 내진보강을 검토 중이며, 내진보강시 내진 화재경보시스템을 구축할 예정이다.

2.3.3.2 외부소방대 수동진압능력 및 협력체계 평가

한울3,4호기에서 지진화재가 발생하여 발전소 초동소방대 및 본부 자체소방대의 수동진압능력을 초과할 경우 화재진압은 발전소 외부소방대의 지원을 받아야 한다. [REDACTED]

울진소방서는 한울본부의 지원요청에 대비하여 원자력시설 및 방사능관련 교육을 실시하였고 방사선방호복 및 방사선량계(ADR)를 확보하고 있다. 연간 계획으로 한울본부와 합동훈련을 지속적으로 실시하고 있다. 2012년부터는 한울본부 2개 호기에서 동시에 화재가 발생할 경우를 가정하여 이에 대비한 훈련을 실시하고 있다. 한울본부와 울진소방서와의 합동훈련은 연 2회 실시하고 있다. 이와 같이 한울3,4호기에서 발생하는 지진광역화재는 한울본부 자체소방대 및 응원협조 기관인 외부소방대를 활용하여 효과적으로 진압할 수 있을 것으로 평가되었다.

2.3.4 화재인지방안, 인적오류·의사결정 오류 최소화 방안

2.3.4.1 화재인지방안

가. 지진발생시 화재인지 및 진압

한울3,4호기에 설치된 화재감지기는 내진설계가 되어있지 않아 설계기준 초과지진에 의해 광역화재가 발생할 경우 감지기를 통한 화재의 조기감지가 불가능할 수 있다. 이에 한울2발전소에서는 내진화재감지설비가 설치되기 이전까지 화재순찰조를 편성하여 운영할 예정이다.

나. 지진시 순찰 이동경로의 화재발생 가능성, 시야확보

2.3.4.2 인적오류 및 의사결정오류 최소화방안

가. 인적오류 최소화방안

내진화재감지설비가 설치되기 전까지 지진화재 발생시의 화재인지 방안은 화재감지기가 아닌 화재순찰조의 현장 확인을 통해 화재발생 상황을 인지하여야 한다. 즉 화재순찰조가 취약지역을 돌아보고 화재상황을 파악해야 하기 때문에 인적오류가 발생할 수 있다.

이러한 인적오류를 최소화하기 위해서는 절차서 개정, 정기적인 소방교육 및 훈련을 실시하여야 한다. 0.1g 이상의 지진발생시 화재순찰조의 운영을 위해 운영절차서 []는 화재순찰조의 순찰경로, 화재시 행동요령 등을 보완하여 개정할 예정이다. 화재순찰조는 운전원, 초동소방대, 자체소방대 및 외부소방대와 정기적으로 소방교육 및 합동 소방훈련을 실시하여 신속하게 화재 상황에 대처하고 있다. 초동소방대는 한울본부 소방계획서와 2발전소 화재방호운영계획서에 의거 년 4회의 초동소방훈련과 년 1회의발전소 자체훈련을 실시하고 있고, 외부소방대와는 년 2회의 소방서 합동훈련을 실시하고 있다. 또한 소방훈련시 화재순찰조를 반드시 참여시키고 취약지역에서 지진화재가 발생한 것으로 가정하여 훈련을 함으로서 인적오류를 최소화한다.

나. 의사결정오류 최소화방안

화재순찰조는 지진화재가 발생하면 즉시 주제어실의 발전팀장에게 보고한다. 화재 발생 상황을 보고받은 발전팀장은 화재의 진압을 위해 초동소방대와 자체소방대를 즉시 출동시킨다. 설계기준 초과지진에 의한 광역화재가 발생했을 때 화재의 규모가 크지 않을 경우에는 초동소방대를 동원하여 진압할 수 있으나 화재규모가 클 경우에는 자체소방대와 외부소방대의 인원 및 장비가 화재진압에 동원된다. []

[] 이 경우에는 시간적인 제약을 받지 않고 가용한 자원으로 순차적으로 화재진압을 수행하면 된다.

발전팀장은 해당 호기의 취약지역에 대한 화재방호 정보를 사전에 인식하고 소방훈련에 참여하여 각각의 화재 시나리오에 맞게 신속한 조치를 취함으로써 의사결정 오류를 방지하여 화재를 진압한다.

2.3.5 평가 결과

한울3,4호기에서 설계기준초과 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 지역이 도출되었다. 이들 지역에 대한 내부 광역화재 영향 평가 결과는 아래와 같다.

취약지역에서 발생하는 지진화재는 소화기, 옥내소화전을 사용하여 화재를 진압하며, 초기진화에 실패할 경우에는 자체소방대 및 외부소방대의 지원을 받아 화재를 진압하므로 설계기준초과 지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 발전소에서 발생할 수 있는 지진에 의한 내부화재를 보다 적극적으로 진압하기 위한 대책으로 아래와 같은 안전 개선사항을 도출하였다.

- 취약지역 내진 비상조명등 설치
- 화재순찰자, 운전원, 자체소방대원의 이동경로에 내진 비상조명등 설치
- 취약지역의 화재발생시 조기감지를 위한 내진 화재감지설비 설치
- 지진화재 발생시 대응 관련 절차서 개발

2.4 홍수 및 기타 자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성

2.4.1 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호 조치

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성)의 평가결과에 제시한 바와 같이 한울3,4호기 주요 안전관련 구조물의 부지정지고는 지진해일 및 폭풍해일에 의한 가능최고해수위 보다 높아 홍수 영향이 발생하지 않으나 안전관련 구조물의 출입구에서는 가능최대강우 발생시 침수영향이 발생할 수 있는 것으로 검토되었다. 한편 한울3,4호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전정지기기를 수용하고 있는 1,2차 보조건물 등의 안전관련 구조물 출입구에 2019년까지 방수문을 설치할 예정이므로 재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강우가 부지에 발생하여도 안전관련 구조물에는 침수가 발생하지 않는다. 현재 방수문 설치를 위한 조치가 진행중이므로

방수문 설치 이전까지의 건전성 확보를 위하여 추가적인 물리적 방호조치 및 자연재해 예방과 관련된 절차서 개정 등의 안전 개선사항을 제3절(안전 개선사항)에 기술하였다..

또한 한울3,4호기에서는 기상청에서 조기에 경보되는 태풍, 호우, 강풍, 해일 관련 기상특보가 발령되는 경우 상기 지침서에 따라 각 상황에 따른 점검 및 관련 조치를 수행하고 있다. 또한 동해안에 지진해일이 발생하게 되면 기상청으로부터 발전소 주제어실로 지진해일 정보가 즉시 통보되므로 발전소에서는 상기 지침서에 따라 관련 조치를 수행할 수 있다. 이 점검에서는 건물 외부 출입문의 닫힘 상태와 기기냉각해수건물 및 기기냉각해수계통 기기들을 점검하고, 각 건물의 침수조 수위, 배수구 막힘 및 배수펌프의 운전상태를 점검한다. 또한 부지 내 배수로, 사면 상태와 주요 안전관련 구조물의 누수여부 등을 점검한다. 한울3,4호기의 안전관련 구조물의 설계에 적용된 설계풍속은 ASCE 7-88(Minimum Design Loads in Buildings and other Structures)에 정의된 지형노풍도 C에 대한 지상 33ft(10m)에서의 최대 마일(mile) 풍속이며, 부지에서의 100년 빈도 풍속인 40m/sec와 우리나라 건축법규에서 규정된 45m/sec를 비교하여 100mph(45m/sec)로 결정되었다. 또한 FSAR 3.5 절에 의하면 가상 태풍에 의한 비산물로서 6" Sch. 40 Pipe 등 6가지를 고려하였고, 이에 의한 비산물하중이 구조물 설계에 반영되었다.

한편 방사선비상계획서[3-20]에 의거 이상일 때는 백색비상을 발령하고 이에 따른 운전 및 비상조치를 취하도록 하고 있다. 또한 이상일 때는 청색비상을 발령하고 관련 비상운전절차를 수행한다.

현장점검 결과 한울3,4호기의 안전관련 구조물에는 일부 관통배관 이외에 지표에서 인입되는 전선관, 덕트, 트렌치 등은 없으므로 각 구조물의 1층 이상 출입문과 루버 등 개구부 이외에는 평가에 고려할 만한 다른 침수경로는 없었다. 한편 지하로부터 구조물의 벽체로 관통되는 일부 관통배관이 존재하므로 지하수가 배관 관통부 등을 통하여 건물 내부로 침투할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 안전관련 구조물 주변에는 지하매설 구조물의 벽체를 통한 지하수 침투를 방지하기 위해 영구지하수배수계통이 설치되어 있어 지하수가 구조물에 영향을 끼치지 않도록 하고 있으며 구조물 외부에는 방수막을 지표정지면까지 포설하였다. 한편 배관 관통부 밀폐재에 대해서는 밀폐재의 건전성을 주기적으로 점검하고 있으므로 관통부를 통한 침수영향은 발생하지 않는다. 또한 한울3,4호기의 강풍방호구조물 및 비산물 방호체는 안전관련 구조물의 외벽 자체 및 지상 외벽에 설치된 개구부와 일부 출입문을 방호하기 위한 콘크리트 방호벽이다. 이들 외벽 및 방호벽은 안전관련 구조물의 일부로서 반기 주기의 일상점검과 5년 주기의 정밀점검을 통하여 구조물의 건전성을 관리하고 있으며 점검 결과에 따라 보수 등의 조치를 수행하

고 있다.

2.4.2 설계기준 초과 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호조치

2.4.2.1 설계기준초과 해일에 의한 안전성 및 대응능력 평가

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성)의 평가결과에 따르면 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)7.781m로 평가되었다. 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m보다 낮으므로 한울3,4호기의 모든 안전관련 구조물·계통·기기는 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 검토되었다. 또한 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)8.729m로 평가되었다. 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m보다 낮으므로 한울3,4호기의 안전정지기능을 수행하는 구조물·계통·기기에는 침수영향이 발생하지 않는다. 또한 안전관련 구조물 출입구에는 후쿠시마 후속조치로 2019년까지 방수문이 설치될 예정이므로 안전정지기능 및 사용후연료 냉각기능을 수행하는 구조물·계통·기기에는 해일에 의한 침수영향이 발생하지 않는다.

그러나 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 또는 태풍발생시 해일과 강풍 등의 영향으로 취수구 주변으로 이물질이 유입되어 해수 취수가 불가할 경우 최종열제거원이 상실될 수 있다. 이러한 경우에도 발전소는 안전정지 및 유지가 가능하고 노심 냉각기능을 확보할 수 있으며, 관련한 발전소의 대응능력은 스트레스테스트 보고서 제4장(전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력)의 2.3(전력상실, 최종열제거원상실시 발전소 대응능력)절에 상세히 기술되어 있다.

2.4.2.2 설계기준초과 강우 평가에 의한 안전성 및 대응능력 평가

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성) 보고서에서 한울3,4호기 부지의 재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수 수준을 평가한 결과 3,4호기 대부분의 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심이 구조물 출입구 보다 높아 침수가 발생하는 것으로 검토되었다. 침수가 발생하는 원인은 한울3,4호기와 인접하여 위치한

때문인 것으로 검토되었다.

그러나 한울3,4호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전정지기기를 수용하고 있는 1,2차 보조건물 등의 안전관련 구조물 출입구에 2019년까지 방수문을 설치할 예정이므로 재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강우가 부지에 발생하여도 안전관

런 구조물에는 침수가 발생하지 않는다. 단, 현재 방수문 설치를 위한 조치가 진행중이므로 방수문 설치 이전까지의 건전성 확보를 위하여 추가적인 물리적 방호 조치 및 자연재해 예방과 관련된 절차서 개정 등의 안전 개선사항을 제3절(안전 개선사항)에 기술하였다.

2.4.2.3 설계기준초과 강풍 및 토네이도에 의한 안전성 및 대응능력 평가

가. 설계기준초과 강풍

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성) 보고서에서 평가한 바와 같이 부지의 10,000년 빈도 최대풍속은 62.36m/s, 10,000년 빈도 최대순간풍속은 84.51m/s 이었다. 상기 평가결과에 따라 10,000년 빈도 최대풍속과 순간최대풍속에 의한 풍압을 도출하고 이를 한울3,4호기 구조물 설계에 적용된 풍압과 비교하였다. 현재 국내 원전 구조물 설계에서는 풍하중 산정 기준으로 국내 건축법규와 ASCE 7-98에 의한 방식을 사용하고 있다. 국내 건축법규에서는 100년 빈도의 최대풍속을 설계풍속으로 사용하며, ASCE 7-98에서는 50년 또는 100년 빈도의 순간최대풍속을 설계에 적용하고 있다.

따라서 본 평가에서는 국내 건축법규[건축물 하중기준 및 해설(2000)]에 따른 10,000년 빈도 최대풍속(62.36m/s)을 적용한 설계풍압과 ASCE 7-98에 따른 10,000년 빈도 최대순간풍속(84.51m/s)을 적용한 설계풍압을 각각 평가하였다.

그러나 슈퍼태풍 발생관련 원자력시설의 안전성 검토보고서[3-21]에 따르면 국내 원전의 안전관련 구조물은 지진하중이 설계하중을 결정

또한 “울진3,4호기 토네이도에 대한 구조물 안전성 검토 보고서”에 따르면

수준이다. 따라서 안전관련 구조물이 상기와 같이 안전정지지진 하중에 의해 설계되었음을 고려할 때 설계풍속의 증가가 한울3,4호기 안전관련 구조물의 안전성에 끼치는 영향은 없는 것으로 검토되었다.

나. 설계기준초과 토네이도

토네이도는 일반적으로 차고 건조한 대륙성 한랭기단과 따뜻하고 습한 해양성 기단이 지형적 장벽이 없는 드넓은 평야지대에서 만남으로써 발생한다. 우리나라의 경우 구조물에 피해를 입힐 정도로 큰 규모의 토네이도 발생사례 및 발생된 토네이도의 관측 자료가 매우 적어 육지에서의 토네이도 발생빈도를 $1.6 \times 10^{-6} / \text{km}^2 \cdot \text{yr}$ 로 산정한 바 있다. 또한 발전소의 서쪽이 산지에 막혀 있고 평야면적이 작은 한울3,4호기 부지의 특성을 고려한다면 토네이도의 발생 가능성은 거의 없다.

그럼에도 불구하고 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 상황을 가정하여 발전소의 대응능력을 아래와 같이 평가하였다. 부지에서 설계기준을 초과하는 EF2 급(풍속 50~60m/s)의 토네이도가 발생할 경우 토네이도 비산물이 안전관련 구조물의 외부 콘크리트 벽체를 관통할 수 있는 지에 평가를 수행하였다.

평가결과 두 경우 모두 토네이도에 의해 비산물이 구조물에 충돌해도 안전관련 구조물의 외부 콘크리트 벽체에는 관통이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

2.4.2.4 설계기준초과 저수위 및 해수온도 상승에 의한 안전성 및 대응능력 평가

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성) 보고서에서 평가한 바와 같이 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 동해동연부(일본 서해안)에서 지진해일 발생시의 EL.(-)3.65m이다.

발전소는 안전정지 및 유지가 가능하고 노심 냉각 기능을 확보할 수 있으며, 관련한 발전소의 대응능력은 스트레스테스트 보고서 제4장(전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력)의 2.3(전력상실, 최종열제거원상실시 발전소 대응능력)절에 상세히 기술되어 있다.

제2장 보고서에서 평가한 바와 같이 2006년부터 2017년 8월까지 최근 10년간 한울3,4호기 기기냉각해수계통에서 관측된 최고 해수온도는 26.8℃이며,

최고 설계 온도 31.5℃에 미치지 못한다. 또한 한울3,4호기 운영종료시까지 향후 약 20년을 고려할 경우 설계기준초과 해수온도 산정에서 기후변화로 인한 수온 상승치는 최대 0.8℃로 검토되었다. 따라서 상기 평가된 28.9℃에 0.8℃를 더할 경우 해수온도는 29.7℃이며, 최고 설계 해수온도 보다 낮으므로 해수온도 상승이 최종열제거원에 끼치는 영향은 없을 것으로 검토되었다.

2.4.2.5 설계기준초과 폭설에 의한 안전성 및 대응능력 평가

제2장(설계기준초과 극한자연재해의 특성) 보고서에서 평가한 바와 같이 부지에서 재현주기 10,000년 빈도의 최심적설량은 약 205cm(강릉)로서 설계기준으로 고려한 최심적설량 105cm와 비교하여 약 1m가 더 큰 것으로 검토되었다. 그러나 이에 따른 적설하중은 발전소 안전관련 구조물에 적용된 설계하중보다 작아 구조물의 안전성에 끼치는 영향은 없는 것으로 검토되었다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성과 관련하여 한울3,4호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행되었거나 이행중인 안전성 증진사항은 다음과 같다.

가. 지진원자로자동정지시스템(ASTS) 설치

일정 기준 이상의 지진동이 부지에 발생할 경우 원자로가 자동 정지되도록 지진 원자로자동정지시스템(ASTS)을 2012년에 설치하였음

나. 안전정지유지계통 내진성능 개선

원전 안전정지유지계통 내진성능 평가결과 조치가 필요한 것으로 도출된 예외기 기들에 대하여 해당 품목 내진성능 입증시험 등 개선조치를 완료하였다.

다. 용수 공급관로 내진성능 평가

용수관로 내진성능평가 용역을 2014년에 수행하여 공급관로의 내진성능 값이 []을 확인하였다.

라. 방수문 설치

설계기준을 초과하는 해일 등으로부터의 침수에 대비하여 비상전력계통 등 주요 안전정지기기를 수용하는 구조물의 출입구에 2019년까지 방수문을 설치할 예정이다.

마. 방수형 배수펌프 설치

설계기준을 초과하는 해일 등으로부터의 침수에 대비하여 안전설비 설치 구역에 대한 누설률 평가, 침수수위 및 안전설비 침수허용수위 산정 등을 토대로 펌프설치구역 및 운영방식(펌프형식)을 도출하고 현재 인허가 심사중이다.

바. 최종 열제거설비 침수방지 및 복구대책 마련

해일시 침수에 대비하여 기기냉각해수계통 펌프의 예비용 전동기를 구매하였으며 전동기 예비품 확보 및 기능상실 시 복구대책을 수립하였다.

사. 냉각해수 취수능력강화 및 해일대비 시설 개선

설계기준 해수위 조사·연구결과 냉각수펌프의 취수능력이 적절함을 확인하였다.

아. 소방계획서 개선 및 협력체계 강화

지진화재에 대비하여 광역화재 발생시 적절한 대응체계를 구축하기 위해 한울본부 소방계획서를 개정 완료하였다. 또한 한울본부와 인근 지역 외부소방대와의 협력체계를 강화하였다.

자. 소방차와 연계한 대체수원 확보

소방차와 연계한 대체수원을 2014년에 설치완료 하였다.

차. 화재방호 설비 및 자체소방대 대응능력 개선

정부협의를 및 '12년 예산 및 인력 신청시 충원을 요청하였으며, 인력증원 등 조치 결과를 2014년에 제출하였다.

카. 원전 성능위주 소방설계 도입

원전 소방설계 최적화 및 규범개선 방안을 협의하고, 소방청-원안위 원전특성을 고려한 별도 화재안전기준 제정을 2012년에 합의하였다.

3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

가. 월성1호기 스트레스테스트

“극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항의 반영여부를 확인한 결과 표 3-21에서 보듯이 “비상급수 저장조 불투수층 주기점검, 제2제어실 및 비상전력실 보강”등 2개 항목의 11개 세부사항들은 한울3,4호기 평가에서 안전 개선사항으로 도출되었거나 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

“극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성”과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항의 반영여부를 확인한 결과 표 3-22에서 보듯이 “SFP 냉각 계통 기기 등에 내진성능 재검토 및 후속조치 수행”등 3개 항목의 6개 세부사항들은 한울3,4호기 평가에서 안전 개선사항 도출, 평가에 기반영 및 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 내진 현장점검 결과 도출된 예외기기에 대한 후속조치

한울3호기 및 한울4호기의 내진 현장점검 결과에서 도출되는 조치 필요 기기에 대하여 내진 건전성 확보를 위한 적절한 조치를 신속히 수행할 예정이다.

나. ASME PRA Standard 2009를 활용한 SSC 내진성능 평가

가동원전 스트레스테스트 평가 대상 전체 발전소에 공통 적용되는 사항이며, 한울 3,4호기는 시범평가 대상 원전이다. 이에 ASME PRA Standard 2009에 따라 필수 대처설비의 내진 현장점검을 수행하였으며, 내진성능평가 대상기기를 대상으로 ASME/ANS PRA Std. 2009에서 제시한 NUREG/CR-0098 및 방법론을 활용하여 기존 선별제거 기기의 적절성 검토, 추가평가 및 25개 Class별 대표기기 내진성능을 평가할 계획이다. 이 결과는 다른 가동원전의 내진성능 Gap 분석에 적용되며 2019년까지 평가를 완료할 예정이다.

다. 가능최대강우 시 구조물의 홍수 방호조치

가능최대강수량에 의한 안전관련 구조물의 침수영향 평가결과 구조물의 출입구에서 침수심이 출입구 표고보다 높아 침수가 발생할 수 있는 것으로 검토되었다. 이에 2019년 방수문 설치 이전에 상기 침수 영향이 발생하는 출입구에 대하여는 추가적인 물리적 침수 방호조치 및 발전소 절차서 반영 등을 이행하여 침수영향이 발생하지 않도록 조치할 예정이다.

라. 필수대처기능 상실 가능지역 화재방호설비 개선

한울3,4호기 지진화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약지역으로 도출된 5개 지역에 대하여 다음과 같은 개선조치를 수행할 예정이다.

- 취약지역 내진비상조명등 설치
- 화재순찰차, 운전원, 자체소방대원의 이동경로에 내진비상조명등 설치
- 취약지역의 화재발생시 조기감지를 위한 내진화재감지설비 설치
- 화재발생시 대응 관련 절차서 개발

마. 소내 수동진압능력 개선

광역화재에 대비한 소내 수동진압능력 증진과 관련하여 다음과 같은 개선조치를 수행할 예정이다.

- 자체소방대 건물 내진 보강시 내진 화재경보시스템 구축
- 자체소방대 건물 내진 보강
- 화재순찰조 편성 운영

제4절 결론

한울3,4호기 스트레스테스트 평가분야 중 “극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성”을 평가하기 위하여 1) 지진에 대한 구조물·계통·기기 건전성, 2) 지진에 의한 내부 침수에 대한 구조물·계통·기기의 건전성, 3) 지진에 의한 내부 화재에 대한 구조물·계통·기기의 건전성, 4) 홍수 및 기타 자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성을 검토하였다. 상기 4개 항목에 대한 평가결과는 다음과 같다.

- 한울3,4호기의 필수대처기능(안전정지, 노심냉각, 격납건물 격리, 사용후연료저장조 냉각 등)을 수행하는 기기에 대하여 ASME/ANS. Std. 2009에서 제시한 EPRI NP-6041 방법론을 이용하여 현장점검을 수행하였음. 3호기 현장점검 결

과 대부분의 기기가 건전성에 이상이 없었으며, 도출된 Easy Fix 사항들은 2018년 계획예방정비기간 중에 조치 완료하였으며, 일부 추가 검토나 보강 필요 사항에 대해서도 적절한 조치를 수행중에 있음. 4호기는 2018년 계획예방정비기간 중에 현장점검을 수행함. 한편 한울3,4호기에서는 절차서 []에 따라 지진발생시 적절한 운전조치를 취할 수 있으며, 안전정지지진 발생시 한울3,4호기의 대응능력을 확인한 결과, 노심 및 사용후연료의 냉각기능 유지에는 문제가 없음

- 인접한 비내진 구조물·계통·기기(SSC)로 인하여 발전소의 필수대처기능을 수행하는 기기가 손상 받을 가능성을 확인하기 위하여 현장점검을 수행하였음. 점검 결과 구속되지 않은 소화기, 경량부착물, 작업도구, 크레인 체인 등 일부 경미한 사항이 발견된 것 이외에, 다른 모든 필수대처기능 수행 기기는 인접 비내진 구조물·계통·기기로부터의 영향은 없는 것으로 확인되었음
- 확률론적지진재해도 분석 결과 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 수준의 지진은 영주기 수평지반가속도가 0.18g인 지진으로 평가되어 설계기준 지진인 0.2g에 미치지 못하였음. 그러나 본 평가에서는 설계기준지진을 초과하는 지진동에서의 발전소 대응능력을 평가하므로 설계기준 지진동을 초과하는 구조물 및 기기의 고유 내진성능을 분석하였음. 내진성능은 결정론적 파손내력평가방법 또는 변수분리법을 적용하여 개별 설비의 고신뢰도저파손확률(HCLPF)을 평가하였으며, 기존 지진 PSA 결과 값과 후쿠시마 후속조치로 수행된 “원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역”의 내진성능 값을 활용하였음. 또한 추가 분석이 필요한 기기는 발전소 고유 지진으로 ASME/ANS Std. 2009에서 제시한 NUREG CR-0098 및 방법론을 활용하여 평가를 수행하였음
- 내진성능 평가결과 모든 안전관련 구조물의 HCLPF 내진성능은 [] 확인되었으며, 필수대처기능을 수행하는 기기들의 내진성능 평가결과 모든 기기의 HCLPF 내진성능이 [] 확보하는 것으로 검토되었음. 대상 기기 중 밸브, 계측기 등은 내진검증문서 등을 확인하여 내진성능이 []을 추가로 분석하였음. 개별 기기들의 내진성능평가 결과는 본 보고서의 표에 상세 제시하였음
- 설계기준 초과지진에 의해 발생하는 내부 광역화재 영향 평가 결과, 한울3,4호기에서 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약 [] 지역이 도출됨
- 한울본부는 초동소방대, 자체소방대, 자위소방대가 조직되어 발전소 내 화재진압에 대비하고 있고, 외부소방대와 응원협정을 통하여 발전소 내 화재 확대에 대비하고 있음. 이러한 소내·외 소방대의 화재에 대비한 역량과 추가적인 소내 수동진압능력 개선 사항이 완료될 경우 한울3,4호기에서 발생하는 안전정지지진을 초과하는 지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가됨
- 한울3,4호기 내부 침수 방호 설계에서 고려된 격납건물 내부 침수 수준(대형 냉각재상실사고 고려 등)은 실제 설계기준초과 지진발생시에 격납건물 내부에

서 발생할 수 있는 침수 수준보다 크므로 지진에 의한 격납건물 내부 침수 영향은 발생하지 않는 것으로 평가되었음. 안전관련 구조물에서의 내부 침수 방호 설계 중 유체이송계통 배관 파손 가정시에 대부분의 내진설계 된 배관들이 내진성능 값을 가짐에도 불구하고 완전 파단 및 관통 균열 등으로 인한 파손을 가정하였으므로 설계에서 고려된 내부 침수 수준은 실제 설계 기준초과 지진발생시에 안전관련 구조물 내부에서 발생할 수 있는 침수 수준보다 크며, 지진에 의한 내부 침수 영향은 발생하지 않는 것으로 검토되었음

- 한울3,4호기의 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준해수위와 가능최대강우에 의한 침수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있어 별도의 침수방지 설계와 설비는 요구되지 않음. 그럼에도 불구하고 발전소는 태풍, 호우, 강풍, 지진해일 등의 상황시 자연재해 예방점검 절차에 따라 주요 구조물·계통·기기에서 안전기능의 저하가 발생하지 않도록 적절한 점검과 운전조치를 취하고 있음
- 한울3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)7.781m로 검토되었으며 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m보다 낮으므로 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었음. 한편 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)8.729m로 평가되었으며, 이 값은 부지정지고 EL.(+)10.0m보다 낮으므로 태풍(폭풍해일)에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었음.
- 재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수 수준평가에 적용된 지속시간 1시간의 가능최대강수량 162mm는 재현주기가 약 90만년에 해당하는 것으로 평가되었음(1분야 평가결과). 상기 강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였음. 한울3,4호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전관련 구조물 출입구에 2019년까지 방수문을 설치할 예정이므로 침수를 방지할 수 있으나 현재 방수문 설치를 위한 조치가 진행중이므로 추가적인 물리적 방호조치 등의 안전 개선사항을 수행할 예정임
- 한울3,4호기 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 순간 최대풍속을 평가하고, 이에 따른 풍압을 계산하여 안전관련 구조물의 안전성에 끼치는 영향을 검토한 결과 설계시 고려한 풍하중과 지진하중의 차이에 의해 구조물에 끼치는 영향은 없는 것으로 검토되었음.
- 한울3,4호기 부지는 발전소의 서쪽이 산지에 막혀 있는 특성을 고려한다면 부지에서 EF1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있음. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 것을 가정하여 구조물·계통·기기의 안전성을 평가하였음. 평가결과 토네이도 비산물이 안전정지기기를 수용하고 있는 구조물에 충돌해도 구조물의 외부 콘크리트 벽체에는 관통이 발생하지 않는 것으로 평가되었음

- 한울3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 동해동연부 (일본 서해안)에서 지진해일 발생시의 EL.(-)3.65m임. [REDACTED]

[REDACTED] 이러한 경우에도 발전소는 안전정지 및 유지가 가능하고 노심 냉각 기능을 확보할 수 있으며, 관련한 발전소의 대응능력은 스트레스테스트 보고서 제4장(전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력)에 상세히 기술되어 있음. 한편 부지의 설계기준초과 해수온도는 29.7℃로 평가되었으나(기후변화 영향 포함), 이 온도는 FSAR에 기술된 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도인 [REDACTED] 보다 낮으므로 해수온도 상승이 최종열제거원에 끼치는 영향은 없을 것으로 검토되었음

한울3,4호기 스트레스테스트의 필수대처기능을 수행하는 구조물, 기기에 대하여 설계기준을 초과하는 극한자연재해 발생시 건전성을 평가한 결과, 전반적으로 극한자연재해에 대한 대응능력이 확보되어 있는 것으로 평가되었다. 또한 후쿠시마 후속조치로서 이행중인 “방수문 설치” 등과 본 평가에서 검토된 극한 자연대해 대응을 위한 안전 개선사항의 이행을 통하여 극한자연재해에 대한 대응능력을 더욱 확보할 예정이다.

제5절 참고문헌

- 3-1. 원자력안전위원회, 스트레스트 테스트 수행지침(개정 1), 2016.
- 3-2. 한수원(주), 한울3,4호기 최종안전성분석보고서(FSAR).
- 3-3. USNRC, Reg. Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Rev 1, December 1973.
- 3-4. USNRC, Reg. Guide 1.122, Development of Floor Response Spectra for Seismic Design of Floor Supported Equipment or Components, Rev.1, 1978, February.
- 3-5. IEEE Standard 344, IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1987
- 3-6. USNRC, Reg. Guide 1.100, Seismic Qualification of Electric Equipment for Nuclear Power Plants, Rev.1, 1977.
- 3-7. 한수원(주), 한울3,4호기 전출력 외부사건(지진) Level 1 PSA 보고서, 2015.
- 3-8. USNRC, NUREG/CR-4334, An Approach to the Quantification of Seismic Margins in Nuclear Power Plants, 1085.
- 3-9. 한수원(주), 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 최종보고서, 2014.
- 3-10. ASME/ANS RA-Sa-2009, “Addenda to ASME/ANS RA-S-2008, Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Application”, an American National Standard and the American Society of Mechanical Engineers, New York, Rev. 0, 2009.
- 3-11. Reed, J.W., Kennedy, R.P., Buttemer, D.R., and Idriss, I.M. J.W., A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin, Rev. 1, NP-6041-SL, EPRI, Final Report, 1991.
- 3-12. EPRI 1025286, Seismic Walkdown Guidance for Resolution of Fukushima Near-Team Task Force Recommendation 2.3 Seismic.
- 3-13. 한국전력기술(주), 한울3호기 현장점검(seismic walkdown) 보고서, 2018.
- 3-14. USNRC, NURE/CR-0098, Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plant.
- 3-15. 한수원(주), 한울3호기 화재위험도분석(FHA) 주기적합성검토 보고서. 2008.
- 3-16. 한수원(주) 한울원자력본부, 한울1발전소 화재방호계획서, Rev. 4.
- 3-17. 한수원(주) 한울원자력본부, 2013년도 소방계획서, 2013.
- 3-18. 한울원자력본부, 울진소방서 소방상호응원협정서.
- 3-19. 한수원(주), [REDACTED]
- 3-20. 한수원(주) 한울원자력본부, 방사선비상계획서.
- 3-21. 한국원자력안전기술원, 슈퍼태풍 발생관련 원자력시설의 안전성 검토 보고

서, 2007.

- 3-22. USNRC, Reg. Guide 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Rev.1, 2007.

제6절 표, 그림

표 3-1 내진등급 분류 기준 비교

한울3,4호기 기술기준	
내진범주	해당 계통 또는 설비
I	<ul style="list-style-type: none"> - 격납건물냉각재 압력경계의 건전성 보증 - 격납건물의 안전정지 및 정지 상태 유지 능력 보증 - 10CFR100의 소외피폭선량 제한치를 초과할 가능성이 있는 사고를 방지하거나 결과를 완화시킬 수 있는 능력 보증
II	<ul style="list-style-type: none"> - 안전관련 기준은 만족하지 않아도 되나, 구조적인 손상이나 상호작용이 내진범주 I급 설비의 안전관련 기능을 허용할 수 없는 수준으로 저하시킬 수 있는 설비 - 주제어실의 근무자에게 해를 입힐 수 있는 설비
NS, III	내진범주 I급 및 II급에 해당되지 않는 모든 설비

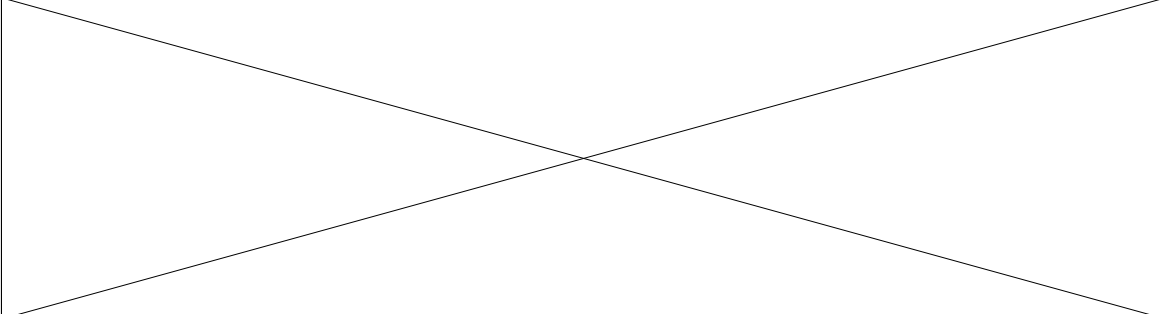
[자료 : 한울3,4호기 FSAR]

표 3-2 설계응답스펙트럼의 통제점 진동수 및 스펙트럼 증폭계수(수평)

Percent of Critical Damping	Amplification Factors for Control Points			
	Acceleration			Displacement ^(*)
	A(33 cps)	B(9 cps)	C(2.5 cps)	D(0.25 cps)

(*) Maximum ground displacement is taken proportional to maximum ground acceleration, and is 36in.(91 cm) for ground acceleration of 1.0 gravity.

표 3-3 설계응답스펙트럼의 통제점 진동수 및 스펙트럼 증폭계수(수직)

Percent of Critical Damping	Amplification Factors for Control Points				
	Acceleration				Displacement ^(*)
	A(50 cps)	A(33 cps)	B(9 cps)	C(3.5 cps)	D(0.25 cps)
					

(*) Maximum ground displacement is taken proportional to maximum ground acceleration, and is 36in.(91 cm) for ground acceleration of 1.0 gravity.

표 3-4 설계 감쇄비 비교(임계감쇄비, 단위 %)

Structure or Component	한울 3,4호기	
	OBE	SSE
Equipment(steel assembly)	2.0	3.0
Piping (diameter ≤ 12 inches)	1.0	2.0
Piping (diameter > 12 inches)	2.0	3.0
Welded steel structures	2.0	4.0
Bolted steel structures	4.0	7.0
Prestressed concrete structures	2.0	5.0
Reinforced concrete structures	4.0	7.0
Cable Tray	10.0	15.0

[자료 : 한울3,4호기 FSAR]

표 3-5 내진성능 평가 대상계통

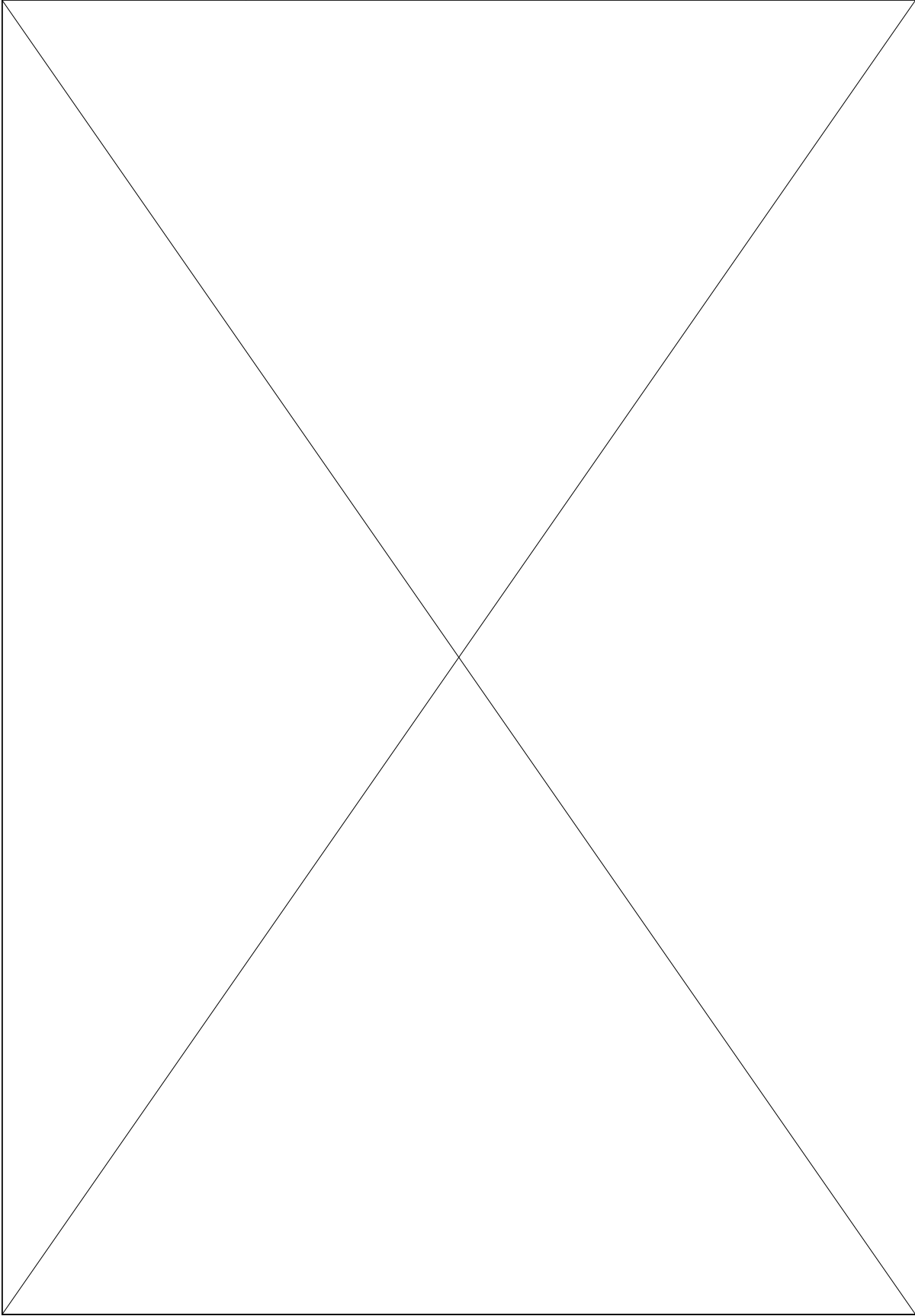
계통	계통 설명
	

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 1/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 2/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 3/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 4/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 5/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 6/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지 계통, 7/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지 계통, 8/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지 계통, 9/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 10/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 11/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 12/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 13/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 14/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 15/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 16/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 17/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 18/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 19/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 20/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 21/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 22/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 23/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 24/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 25/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 26/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 27/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 28/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 29/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 30/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 31/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 32/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 33/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 34/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 35/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 36/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 37/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 38/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 39/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 40/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 41/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 42/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 43/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 44/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 45/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 46/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 47/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 48/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 49/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 50/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 51/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 52/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 53/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 54/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 55/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-6 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 56/56)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 1/5)

No	계통	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	선정 사유 (지진에 의한 손상시 영향)

표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 2/5)

No	계통	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	선정 사유 (지진에 의한 손상시 영향)

표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 3/5)

No	계통	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	선정 사유 (지진에 의한 손상시 영향)

표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 4/5)

No	계통	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	선정 사유 (지진에 의한 손상시 영향)

표 3-7 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 5/5)

No	계통	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	선정 사유 (지진에 의한 손상시 영향)

표. 3-8 내진성능 평가 대상기기(사용후연료 냉각계통)

No	계통	분류	구조물/설비/기기 설명	Equipment ID	위치 (건물)	Room No.	선정 사유 (지진에 의한 손상 시 영향)

표 3-9 한울3,4호기 최종 정비이력 분석 대상

No.	Equipment ID	Description	추가평가 필요	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 구조물

번호.	구조물	파손모드	HCLPF(g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(1/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(2/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(3/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(4/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(5/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(6/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-10 한울3,4호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(7/7)

No	분류	기기명	기기 ID	위치	진동수	파손모드	HCLPF (g)	비고

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(1/14)

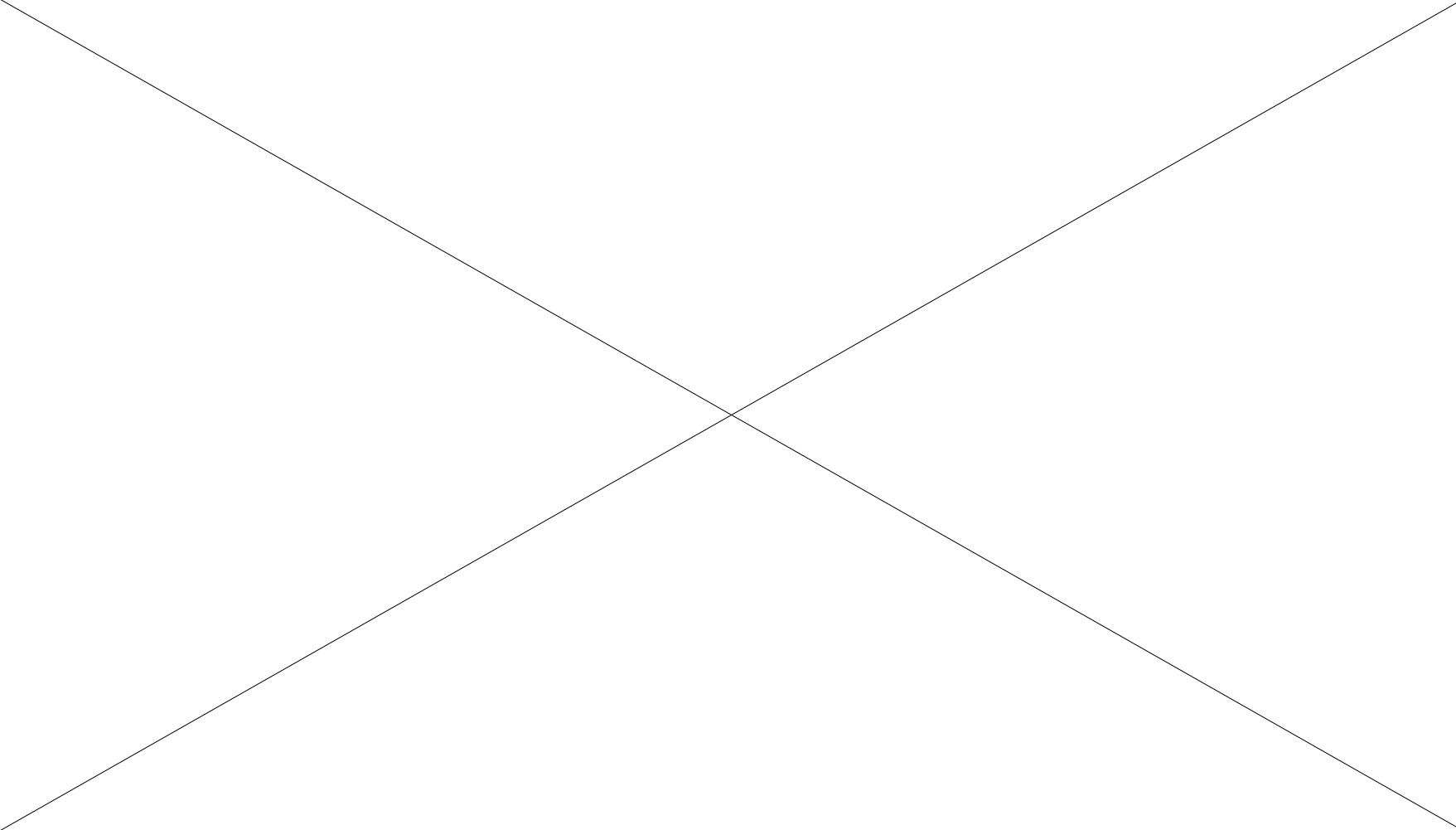
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(2/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(3/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(4/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(5/14)

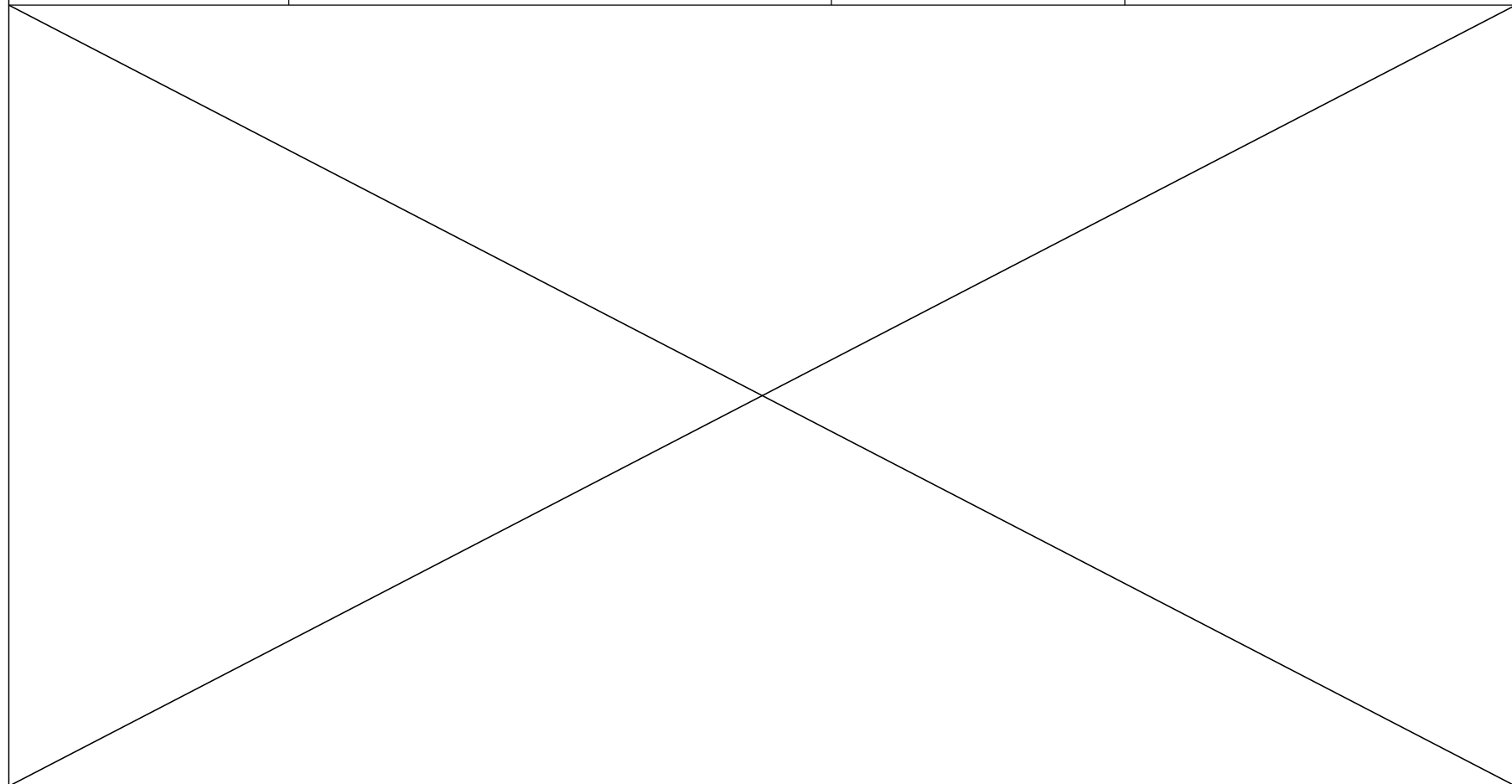
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(6/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(7/14)

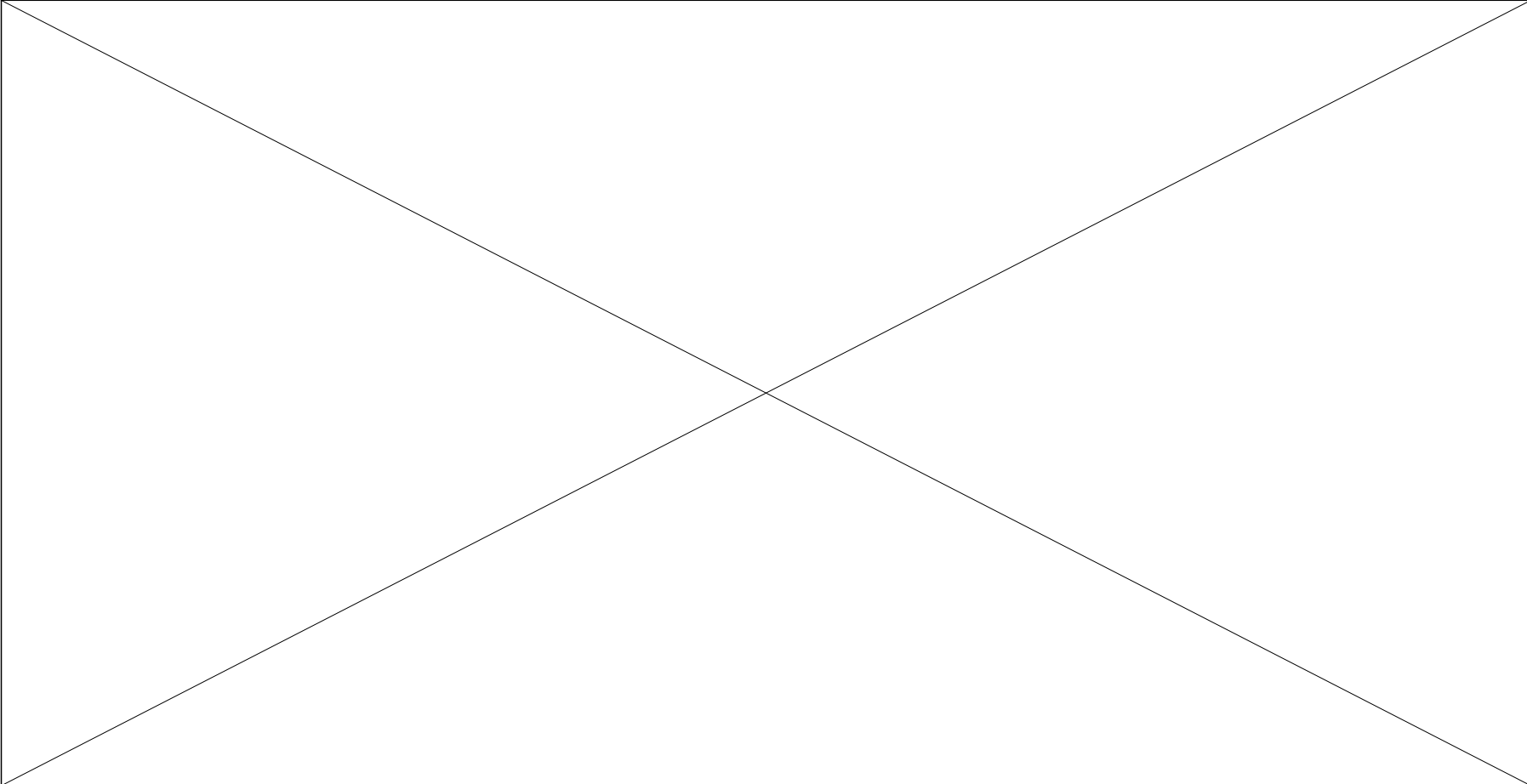
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(8/14)

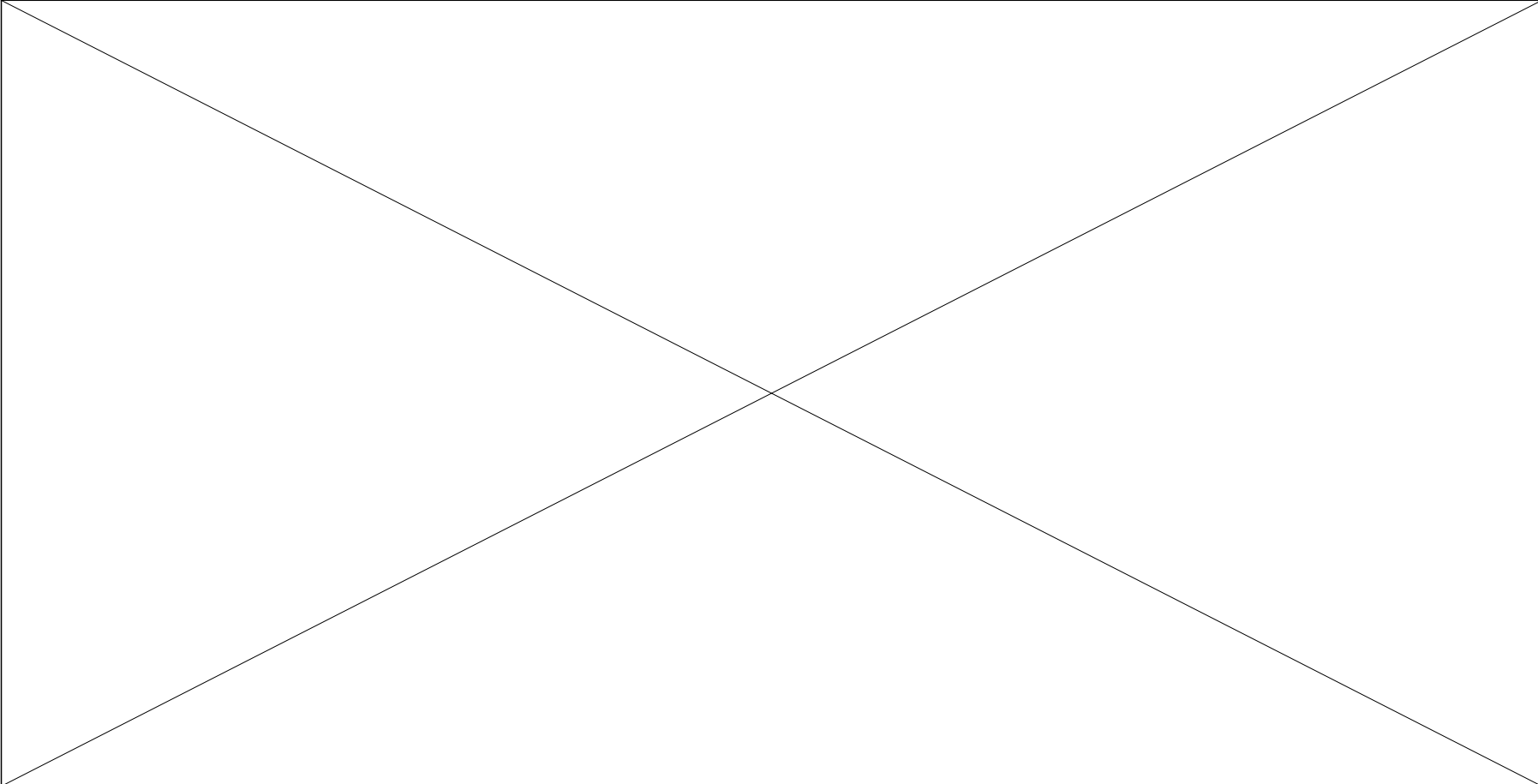
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(9/14)

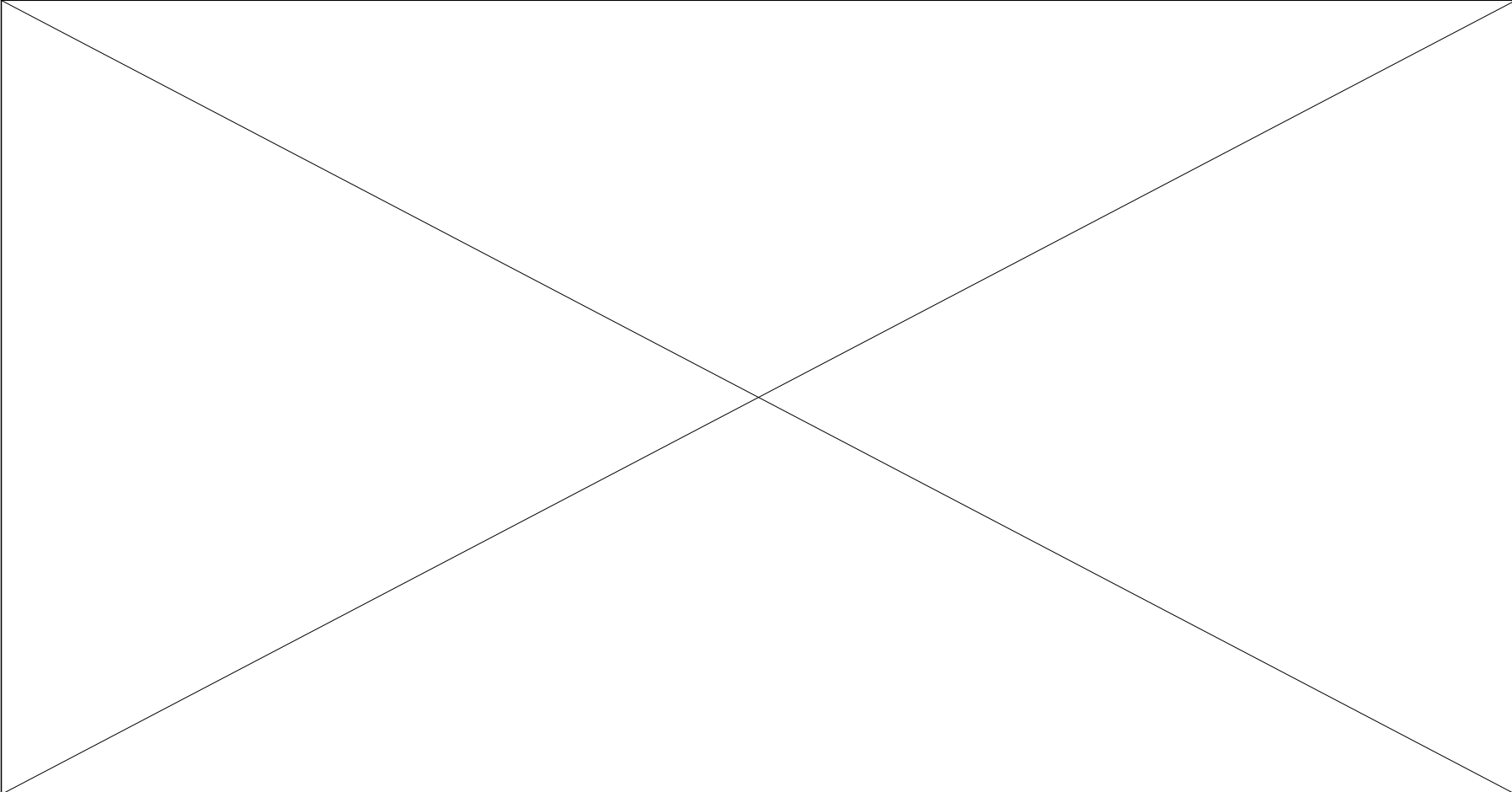
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(10/14)

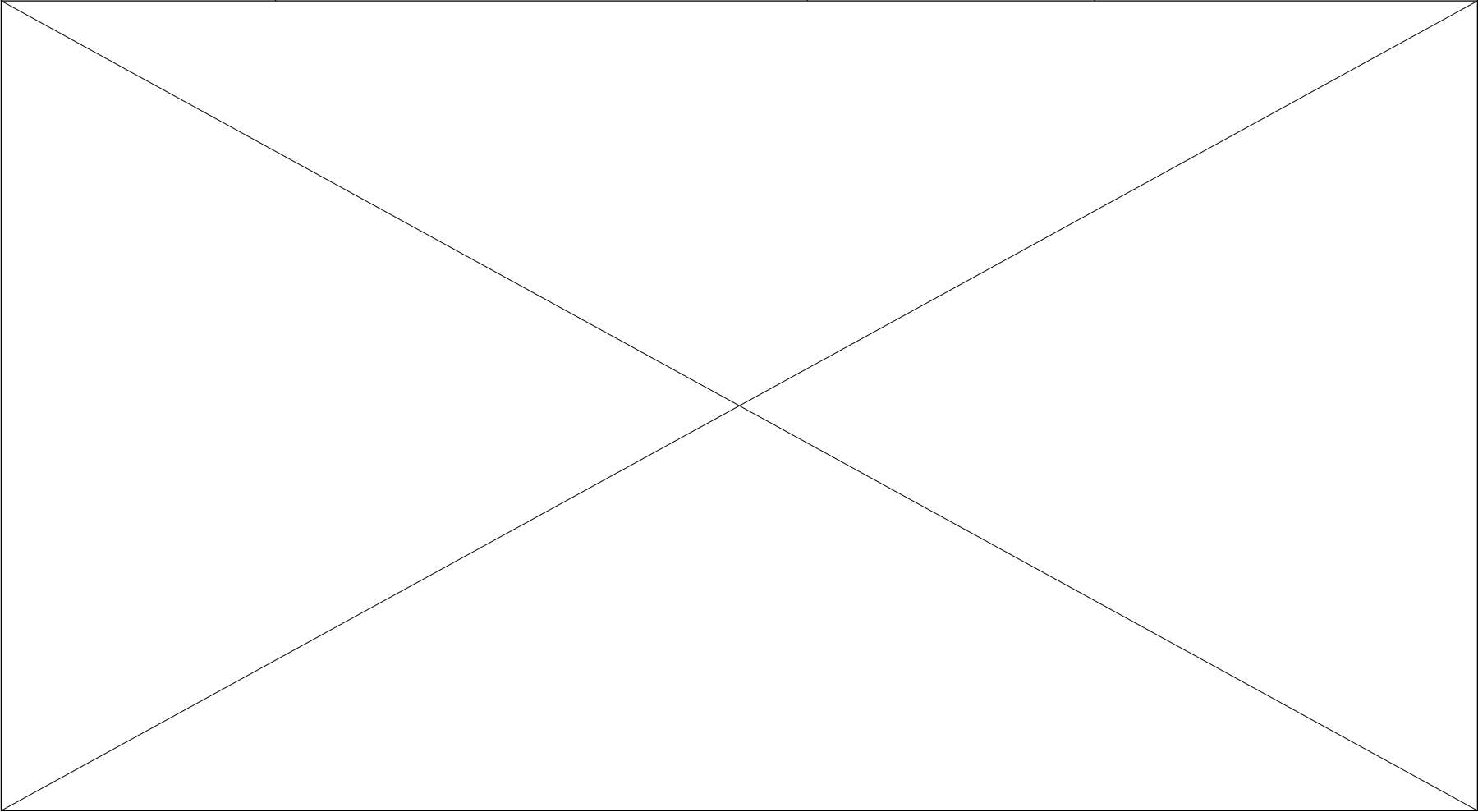
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(11/14)

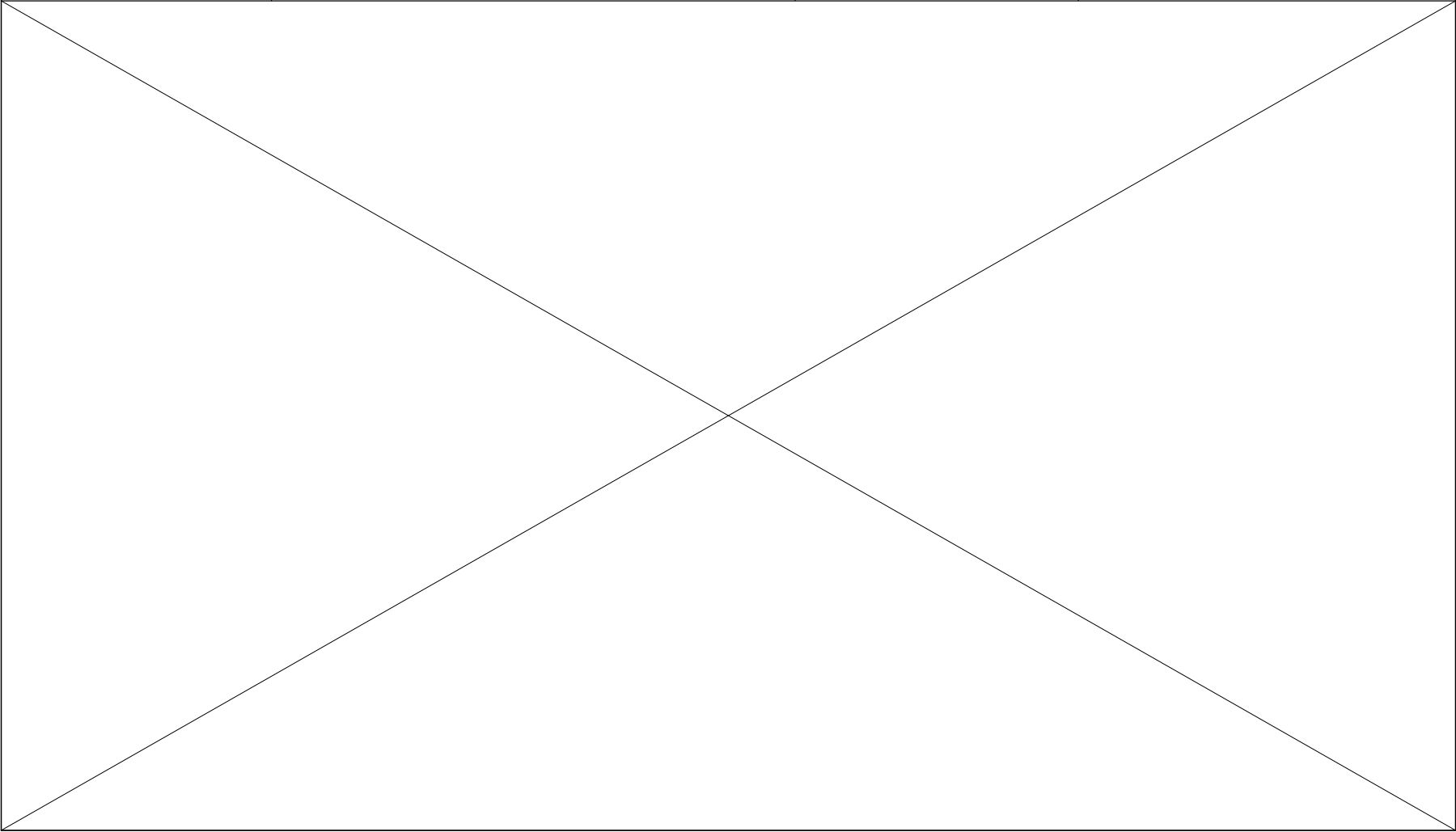
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(12/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
<div></div>			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(13/14)

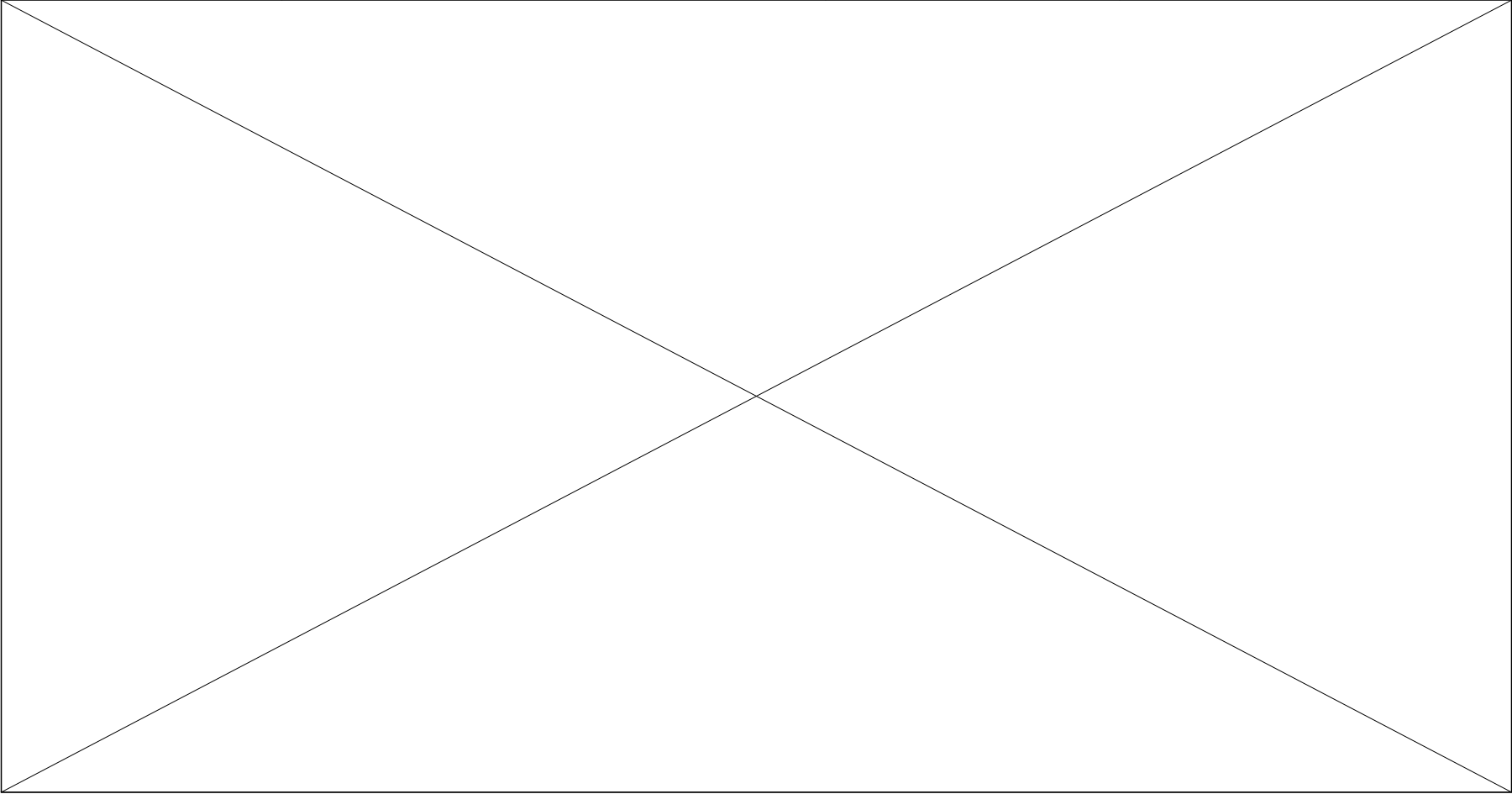
계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기
			

표 3-11 계통 및 기기 관련 계전기 목록(14/14)

계통	관련 기기	공급전원	관련 계전기

표 3-12 계전기 오동작 관련 선별 분석 결과(1/4)

RELAY NO.	TYPE	VENDOR	RELAY FUNCTION	SCREENING RESULT

표 3-12 계전기 오동작 관련 선별 분석 결과(2/4)

RELAY NO.	TYPE	VENDOR	RELAY FUNCTION	SCREENING RESULT

표 3-12 계전기 오동작 관련 선별 분석 결과(3/4)

RELAY NO.	TYPE	VENDOR	RELAY FUNCTION	SCREENING RESULT

표 3-12 계전기 오동작 관련 선별 분석 결과(4/4)

RELAY NO.	TYPE	VENDOR	RELAY FUNCTION	SCREENING RESULT

표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록(1/5)

계 통	기 기	계전기 번호	계전기 오동작 영향	계전기 위치

표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록(2/5)

계 통	기 기	계전기 번호	계전기 오동작 영향	계전기 위치

표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록(3/5)

계 통	기 기	계전기 번호	계전기 오동작 영향	계전기 위치

표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록(4/5)

계 통	기 기	계전기 번호	계전기 오동작 영향	계전기 위치

표 3-13 계통 및 기기 관련 계전기 목록(5/5)

계 통	기 기	계전기 번호	계전기 오동작 영향	계전기 위치

표 3-14 현장조사 선별제거 요약표(1/2)

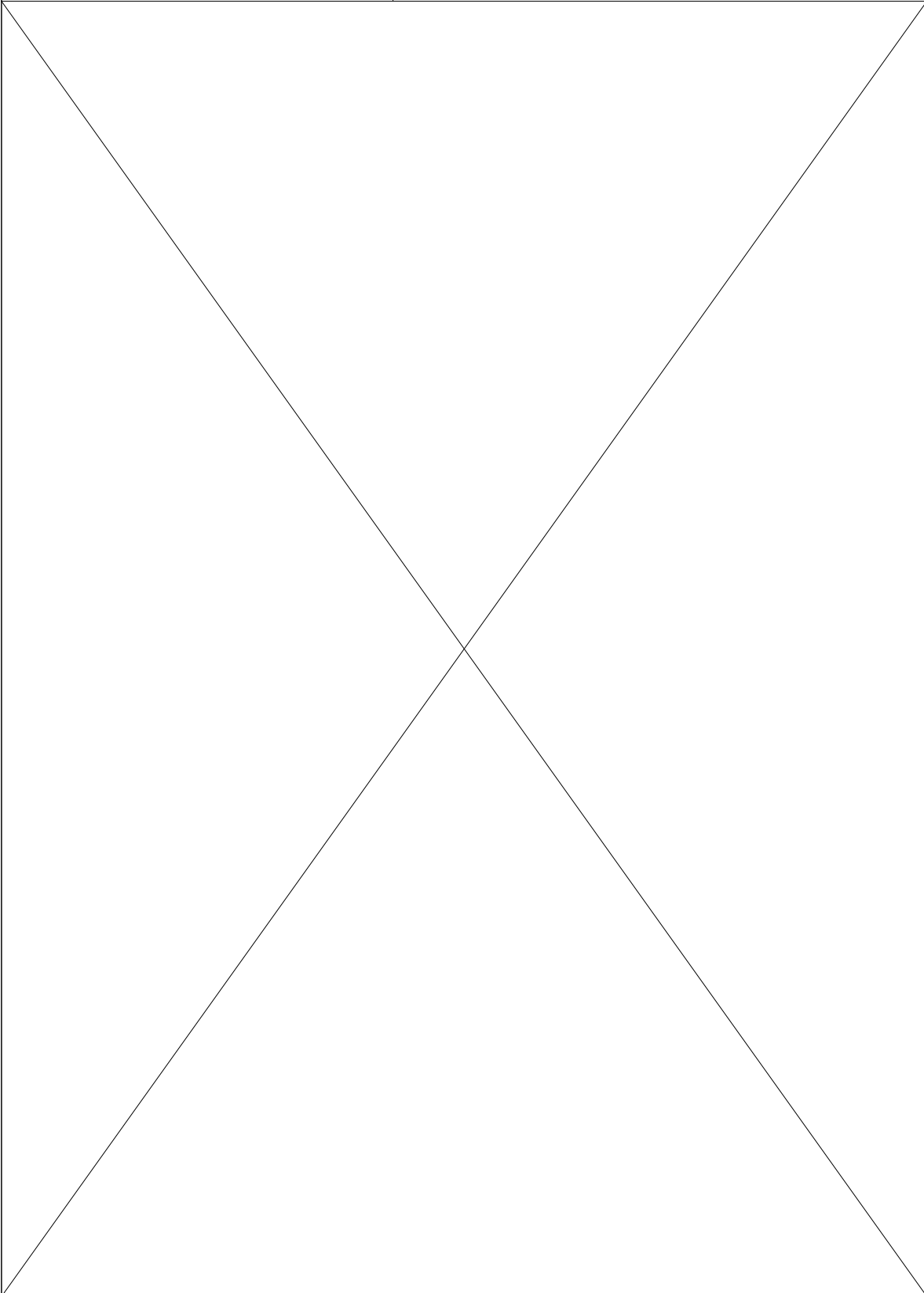
항 목	선 별 기 준
	

표 3-14 현장조사 선별제거 요약표(2/2)

항 목	선 별 기 준

[자료 : EPRI NP-6041-SL (A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin) Table 2-3, Table 2-4]

표 3-15 안전관련 구조물 내부 고에너지 및 중에너지 유체계통

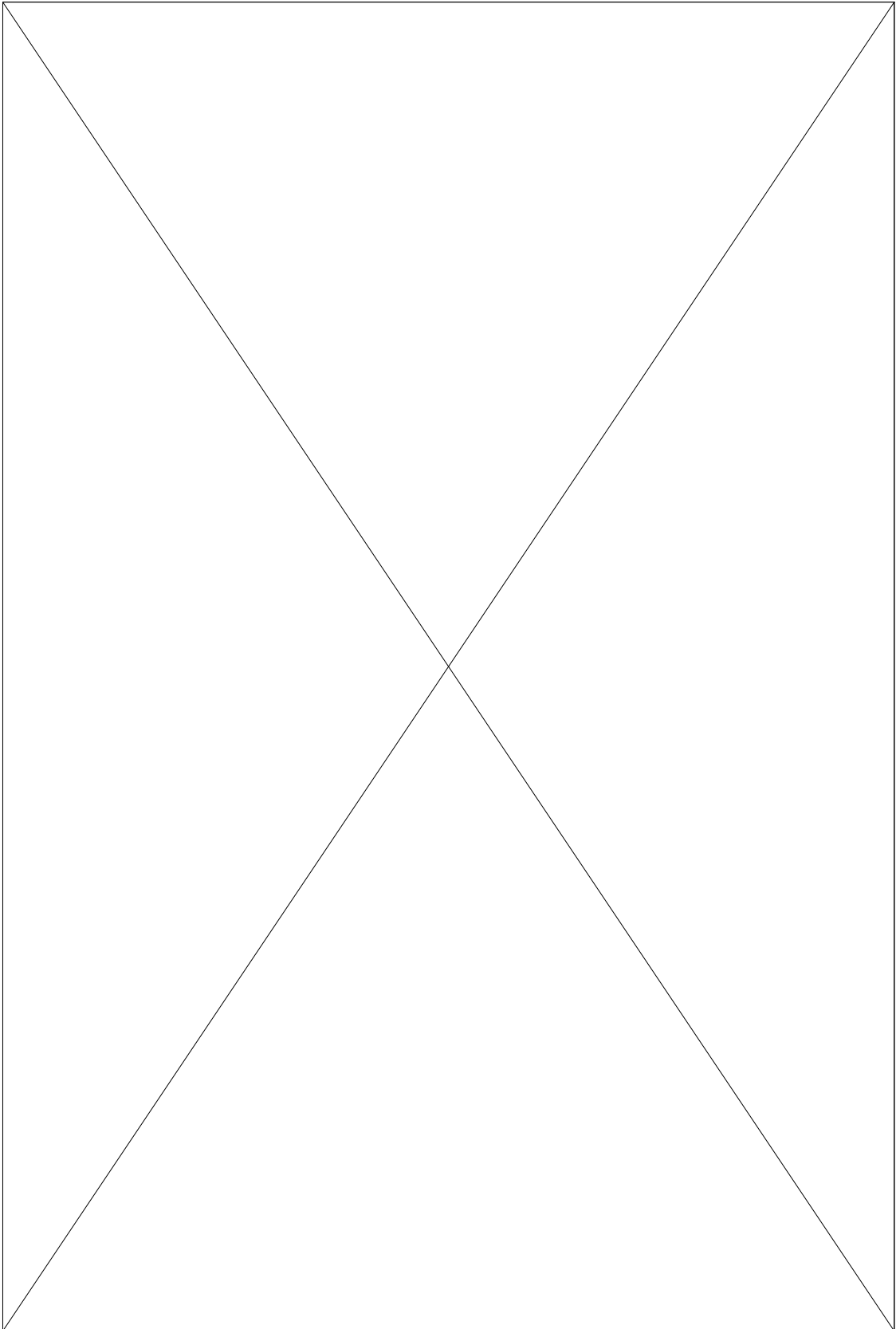


표 3-16 필수대처기기 목록(1/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(2/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(3/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(4/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(5/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(6/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(7/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(8/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-16 필수대처기기 목록(9/9)

No.	안전기능	주요설비 (계통/기기)	기기번호	기기명	비고

표 3-17 지진화재 취약지역 목록

No.	F/A No	F/A Name	취약지역 선정 사유	안전정지관련	
				기기	케이블

표 3-18 한울본부 초동소방대 조직

초동소방대	제1발전소		제2발전소		제3발전소	
	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기

표 3-19 광역화재 발생시 응원협조기관

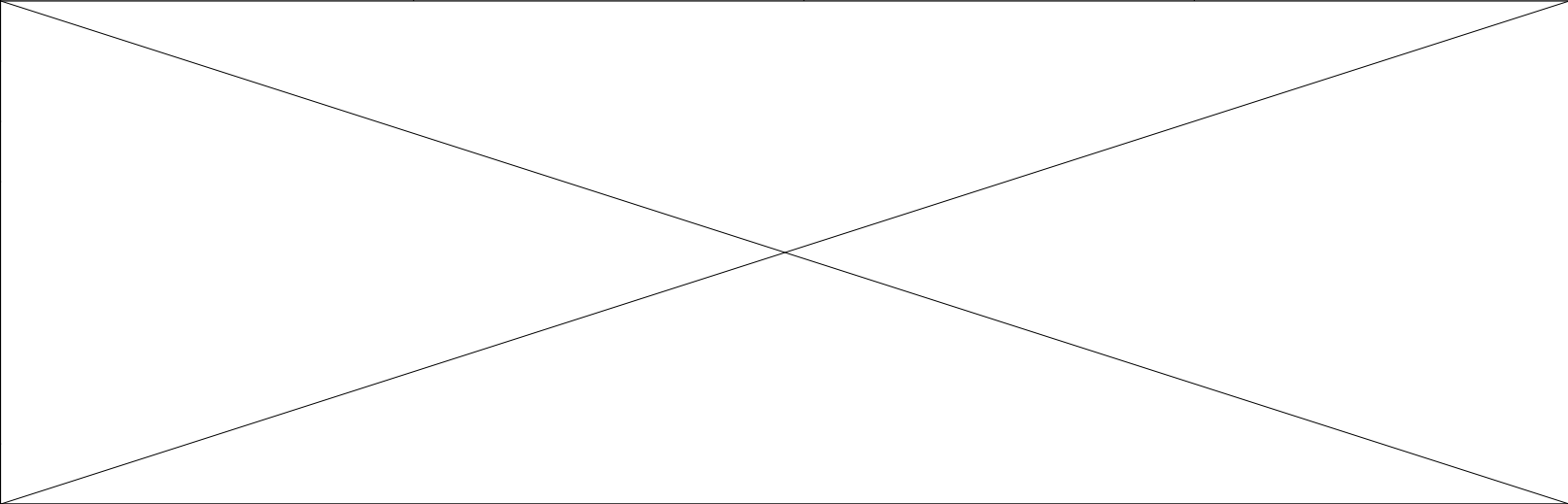
구 분	북면119 대기소	죽변 119 안전센터	울진소방서 구조대	대응구조구급과 (대응팀)
거 리				
소요시간				
인 원				
장 비				
전 화				

표 3-20 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간

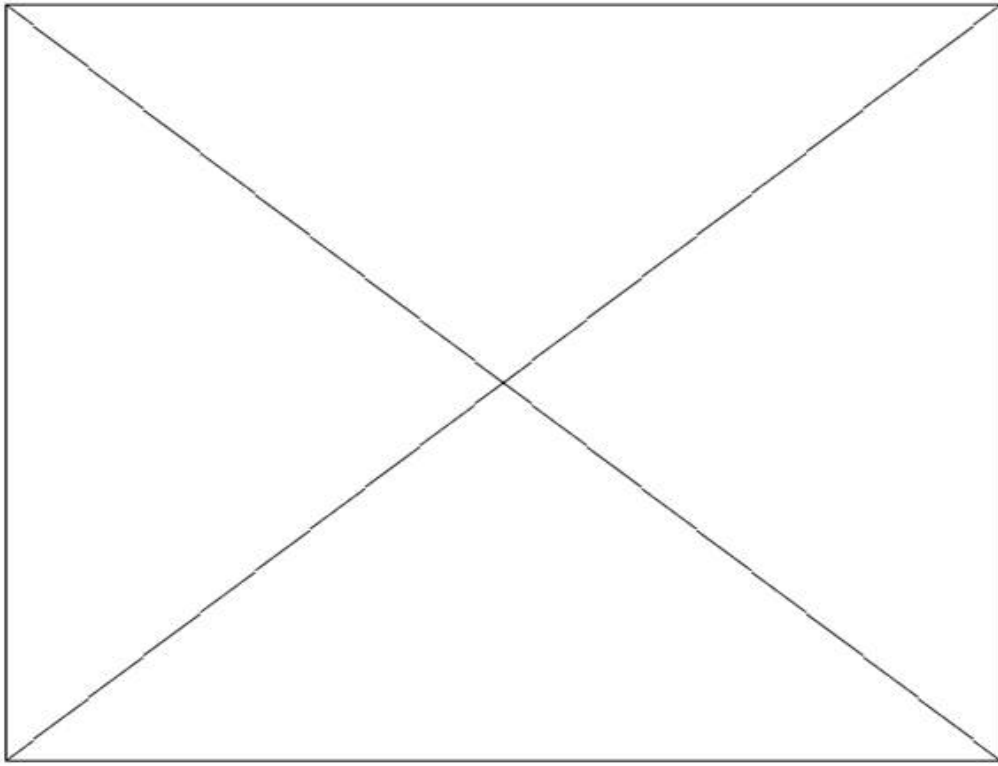
No	출발지역 F/Z Name	방사선 관리 구역	중간 이동통로					도착지역 F/N Name	이동 소요 시간
			1	2	3	4	5		

표 3-21 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영 여부 확인

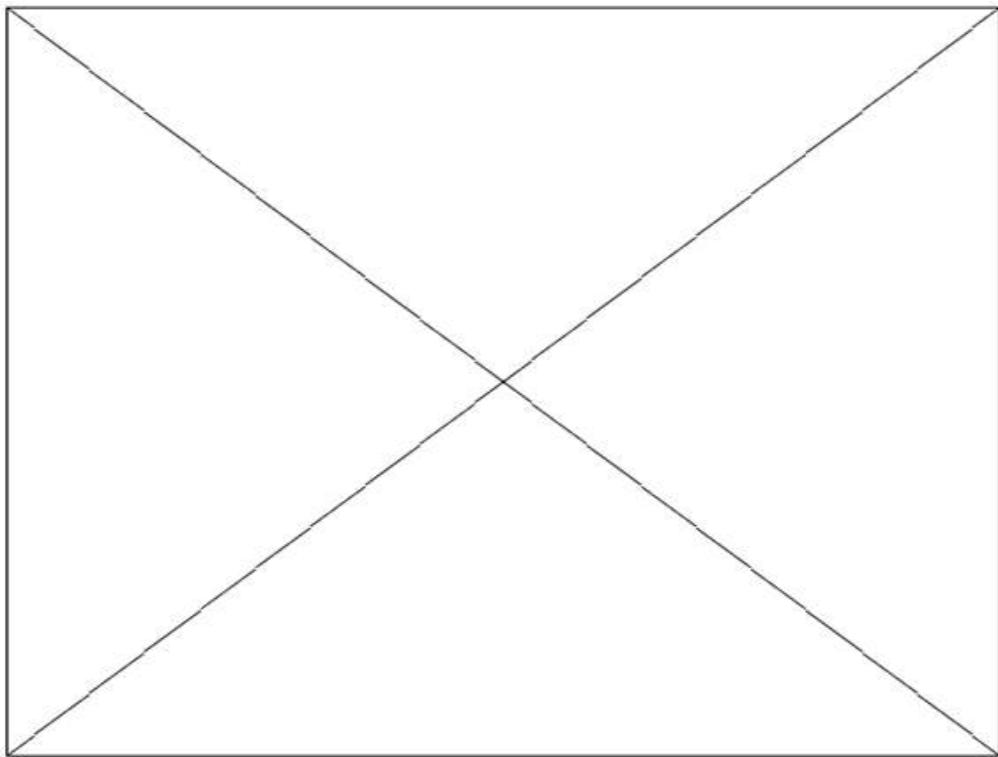
제목	세부 내용	한울3,4호기 반영	비고

표 3-22 고리1호기 스트레스트스트 안전 개선사항 반영 여부 확인

제목	세부 내용	한울3,4호기 반영	비고



(a) 수평방향



(b) 수직방향

그림 3-1 한울3,4호기 설계지반응답스펙트럼(SSE)

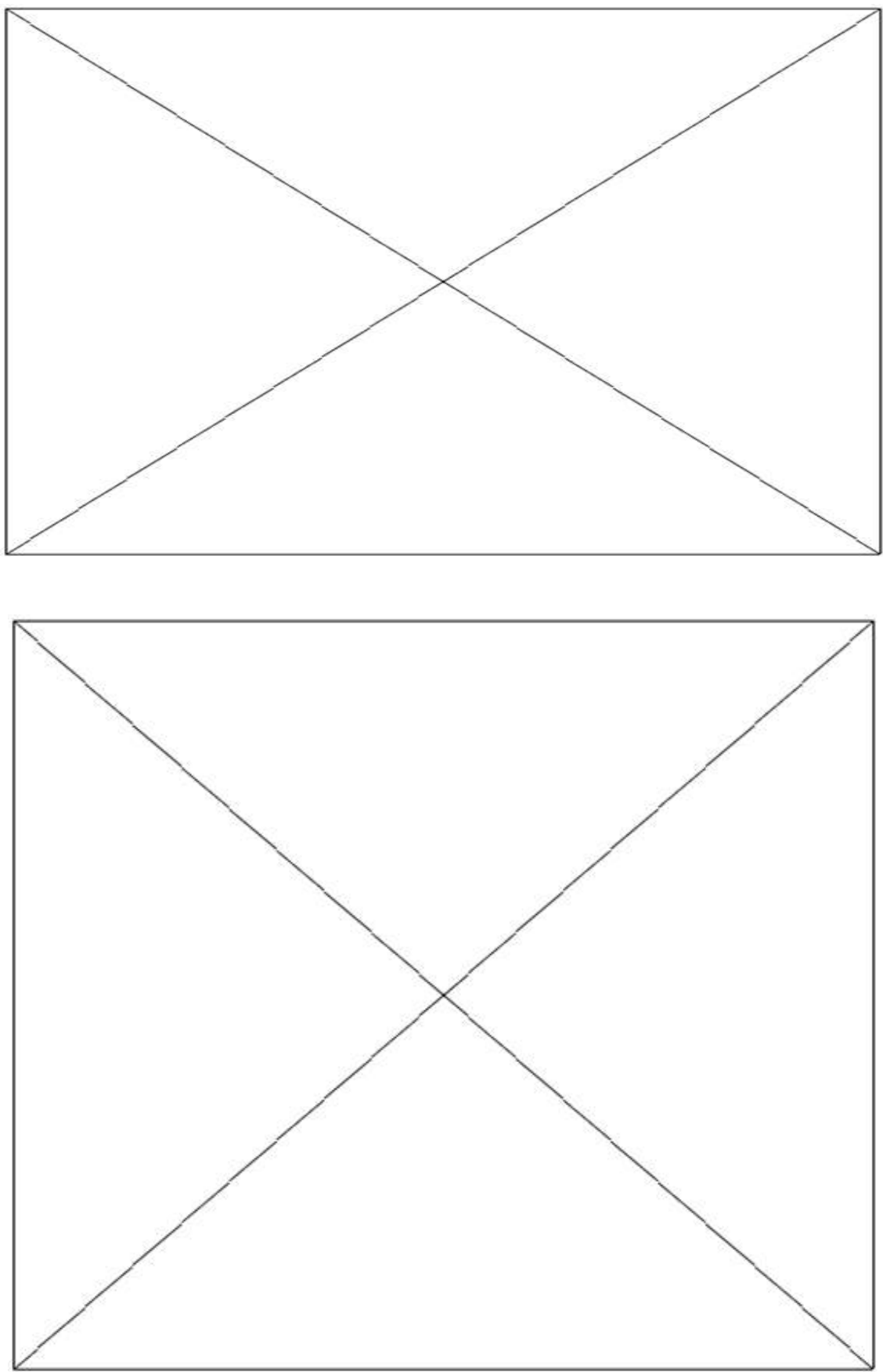


그림 3-2 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(동서방향-EW, 2%)

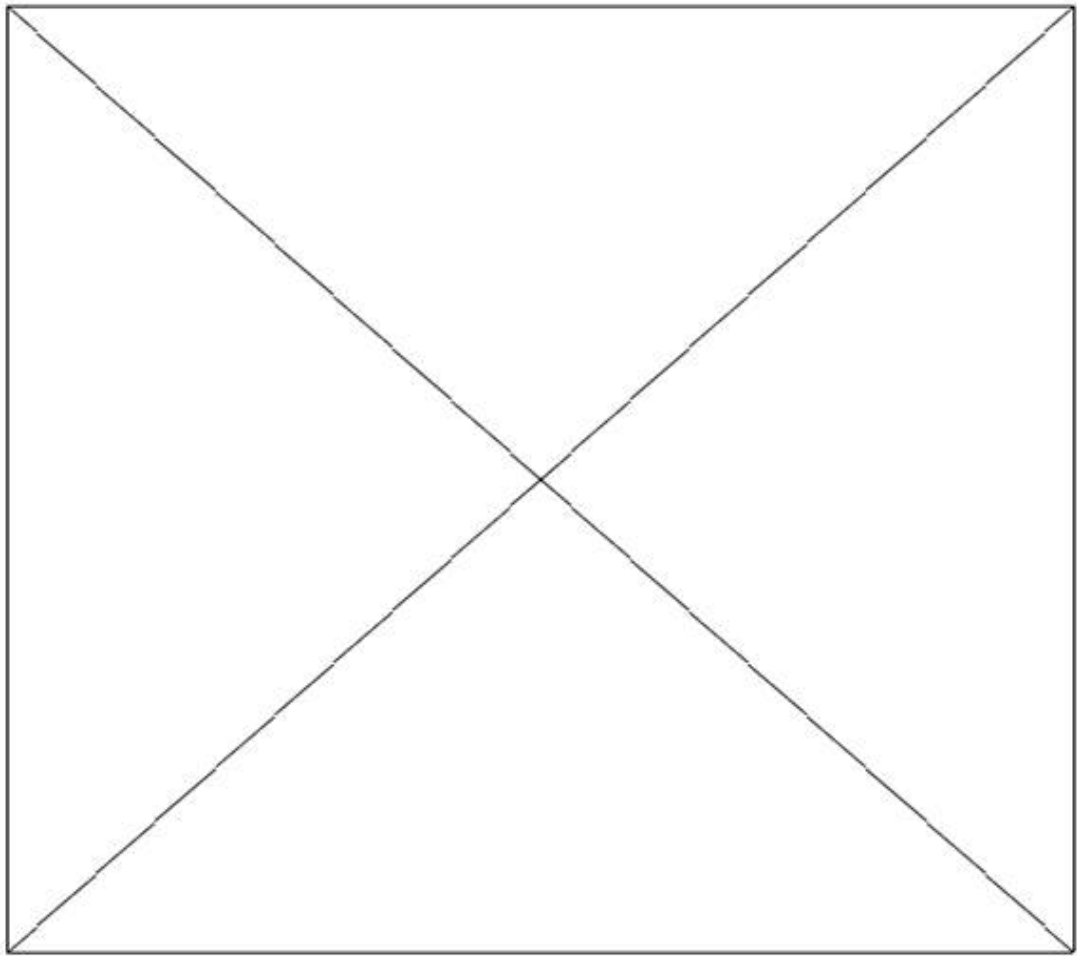
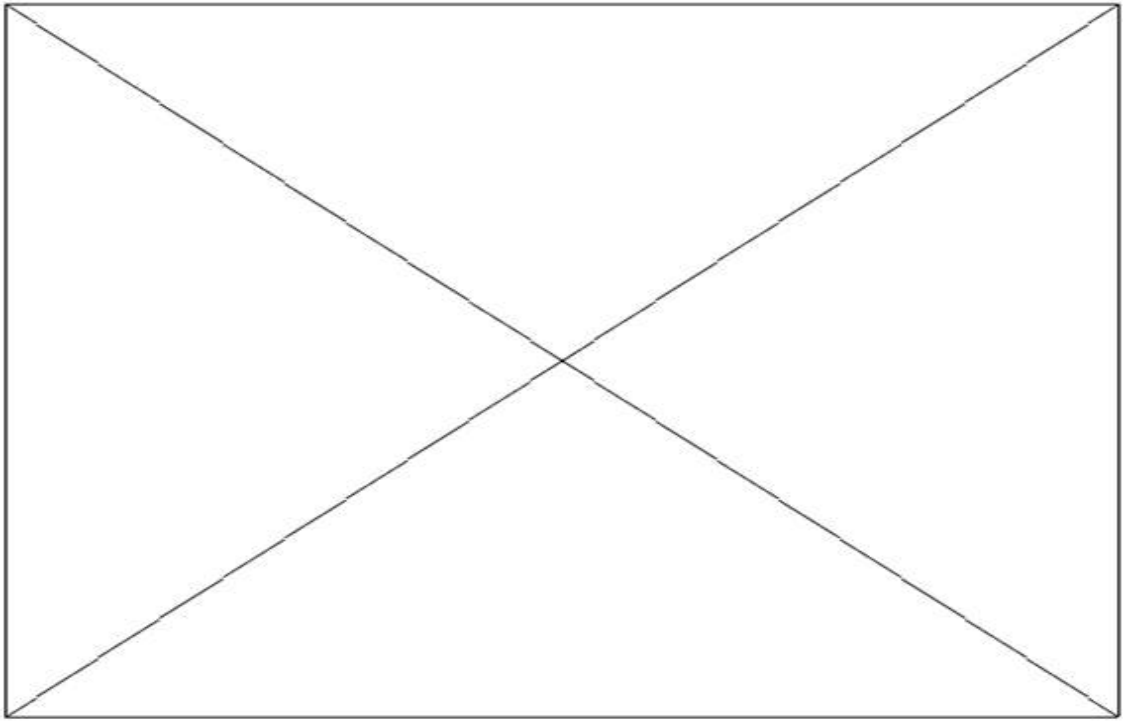


그림 3-3 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(남북방향-NS, 2%)

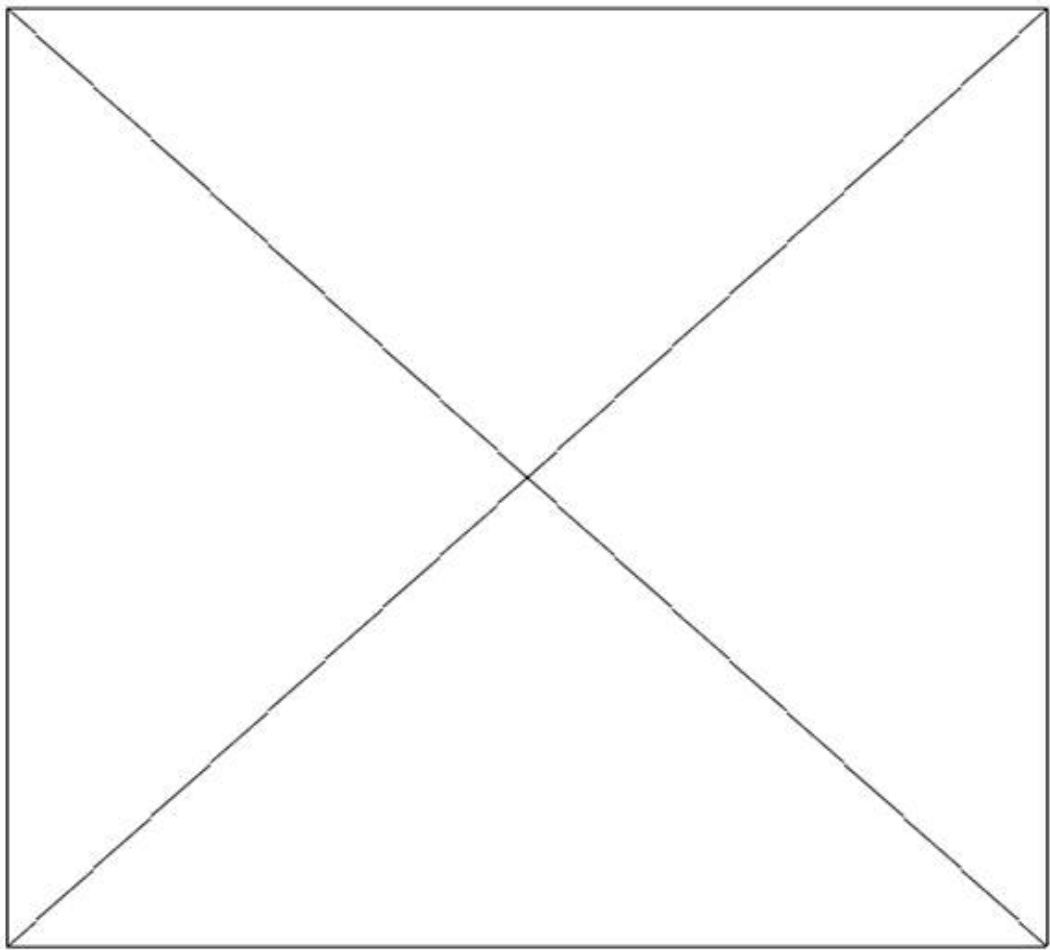
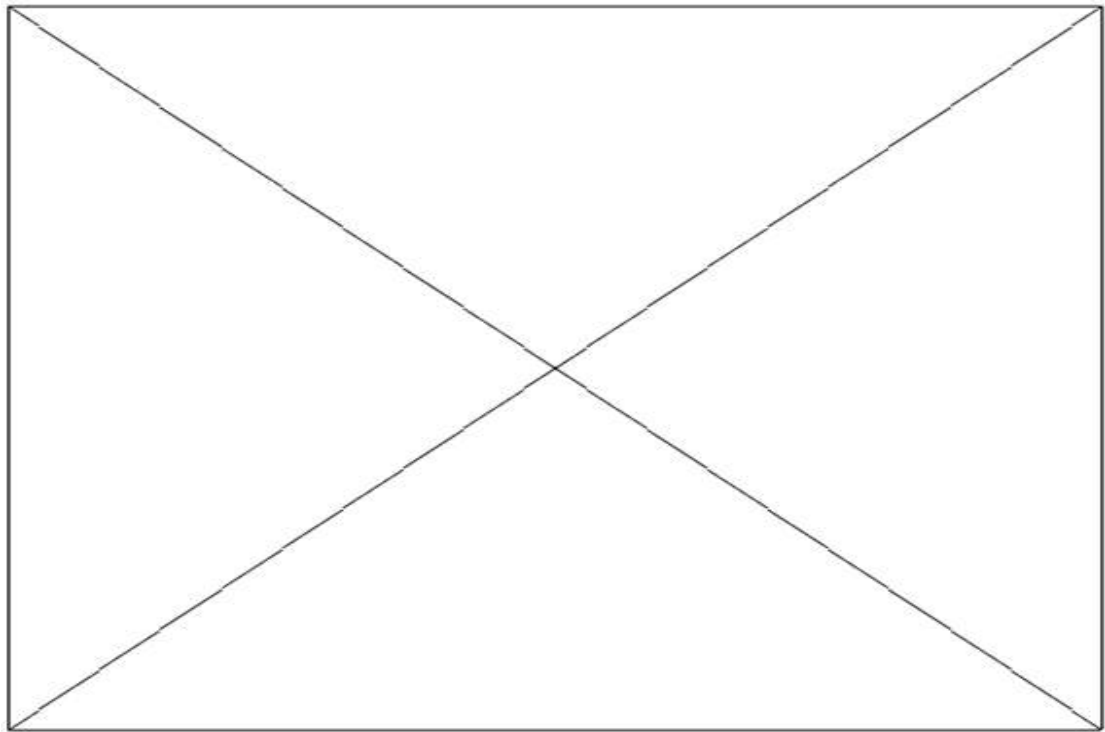


그림 3-4 한울3,4호기 안전정지지진 인공지진시간이력(수직방향-VT, 2%)

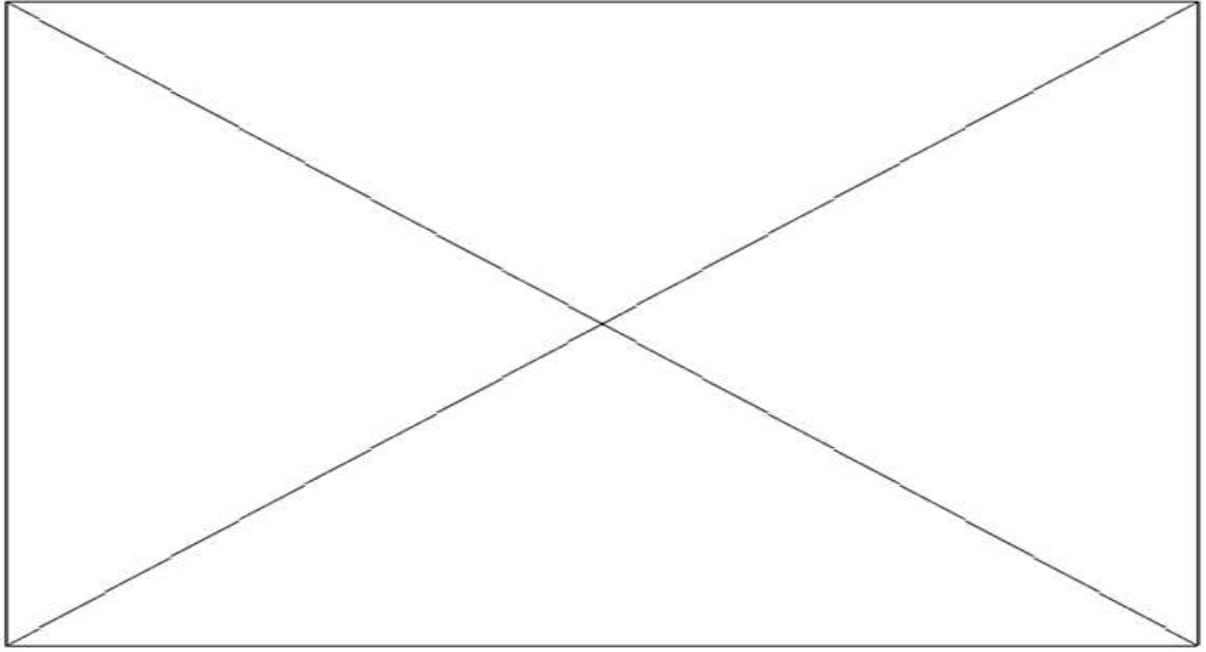


그림 3-5 소외 지원인력(장비)의 한울3,4호기 접근로

제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가내용	2
2.1 필수대처기능	2
2.2 필수대처기능 유지 및 복구를 위한 설비	2
2.2.1 모선별 부하목록 및 모선 정전시 영향	2
2.2.2 필수대처기능 설비	5
2.2.3 계통별 기능유지를 위한 보조설비	22
2.2.4 도출된 설비들의 물리적 위치 및 안전/품질/전기/내진등급	28
2.2.5 소외전원상실 시 대처를 위해 설계된 소내 예비전력공급원 및 설계 시 고려된 사항	36
2.2.6 최종열제거원 상실시 대처를 위해 설계된 사항	41
2.3 전력상실, 최종열제거원상실시 발전소 대응능력	41
2.3.1 전력상실 조건	42
2.3.2 최종열제거원상실 조건	51
2.3.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)	54
2.4 극한 자연재해에 따른 안전기능 상실을 고려한 발전소 대응능력	59
2.4.1 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일(시나리오 7)	60
2.4.2 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우(시나리오 8)	60
2.4.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9)	61
2.5 한울3,4호기 차이점	62
제3절 안전 개선사항	62
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	62
3.2 월성 1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ...	65
3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	65
제4절 결론	66
제5절 참고문헌	67
제6절 표, 그림	68

표, 그림

표 4-1 전력계통 모선별 부하목록	68
표 4-2 모선정전 시 영향	135
표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비	139
표 4-4 필수대처기능 상태 확인	152
표 4-5 소내 가용한 발전기의 사용가능 시간	153
표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준	154
표 4-7 열제거원으로 가용한 수원	155
표 4-8 사고시나리오별 필수대처설비인 전력원 이용가능성	156
표 4-9 사고시나리오별 필수대처설비인 열제거원 이용가능성	157
표 4-10 소외전원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 1)	158
표 4-11 소외전원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 1)	159
표 4-12 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 2)	160
표 4-13 소내정전 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 2)	161
표 4-14 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 3)	162
표 4-15 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 3)	163
표 4-16 필수대처기능 확보 방안(시나리오 3)	165
표 4-17 최종열제거원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 4)	166
표 4-18 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 4)	167
표 4-19 필수대처기능 확보 방안(시나리오 4)	168
표 4-20 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 6)	169
표 4-21 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6)	170
표 4-22 필수대처기능 확보 방안(시나리오 6)	172
표 4-23 절차서 및 지침서 개선항목	173
표 4-24 월성 1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인항목	173
표 4-25 고리 1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인항목	173

그림 4-1 소내 전력계통 단선도	174
그림 4-2 비상전원 전력모선도	176
그림 4-3 한울3,4호기 비상냉각수 주입설비 단순계통도	177
그림 4-4 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 4, 5)	178
그림 4-5 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 4, 5)	178
그림 4-6 원자로냉각재계통 온도(시나리오 4, 5)	179
그림 4-7 원자로냉각재 배기밸브 유량(시나리오 4, 5)	179
그림 4-8 가압기 수위(시나리오 4, 5)	180
그림 4-9 충전 및 유출 유량(시나리오 4, 5)	180
그림 4-10 누적 충전 유량(시나리오 4, 5)	181
그림 4-11 증기발생기 수위(시나리오 4, 5)	181
그림 4-12 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 4, 5)	182
그림 4-13 보조급수 유량(시나리오 4, 5)	182
그림 4-14 누적 보조급수 사용량(시나리오 4, 5)	183
그림 4-15 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량 (시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	183
그림 4-16 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	184
그림 4-17 원자로냉각재계통 온도(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	184
그림 4-18 원자로냉각재펌프 밀봉누설 유량 (시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	185
그림 4-19 원자로용기하향유로 및 노심 응축수위 (시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	185
그림 4-20 안전주입탱크 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	186
그림 4-21 증기발생기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	186
그림 4-22 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)	187
그림 4-23 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	187
그림 4-24 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	188
그림 4-25 원자로냉각재계통 온도(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	188
그림 4-26 원자로냉각재펌프 밀봉누설 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	189
그림 4-27 가압기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	189
그림 4-28 원자로용기하향유로 및 노심 응축수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	190
그림 4-29 안전주입탱크 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	190
그림 4-30 충전 및 유출 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	191
그림 4-31 누적 충전 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	191
그림 4-32 증기발생기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	192
그림 4-33 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	192
그림 4-34 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	193
그림 4-35 누적 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)	193

제1절 개요

OPR1000의 대표원전인 한울3,4호기에 대하여 후쿠시마 원전 사고와 같은 설계기준을 초과하는 극한자연재해로 인하여 전력계통과 최종열제거원이 상실되는 상황이 발생한다고 가정하여 한울3,4호기가 견디는 정도를 확인하고, 하드웨어·절차·운영 측면의 취약분야를 평가·보완하여 발전소의 안전성을 증진하기 위해 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가를 수행하였다.

이를 위해 본 장에서는 스트레스테스트 수행지침(개정 1)[4-1]에 따라 “안전기능 유지 및 복구를 위한 설비”를 조사하고 “전력상실, 최종열제거원 상실시 발전소 대응능력”과 “극한 자연재해에 따른 안전기능 상실시 대응능력”을 평가하였다.

세부 평가사항으로는 안전기능 상실시 원자로 내 연료 손상 없이 노심을 충분히 냉각시킬 수 있는 능력, 과도상태 이후 원자로냉각재계통의 압력경계가 손상되지 않도록 제어할 수 있는 능력 그리고 격납건물의 건전성이 유지되도록 압력과 온도를 제어할 수 있는 능력 등이 유지되는지 확인하였다. 또한 전력상실과 최종열제거원상실시 발전소 대응능력을 평가하기 위하여 아래와 같은 사고시나리오를 고려하였으며 각 사고에 대한 대응능력 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

- 소외전원상실(Loss Of Offsite Power, LOOP) 조건(시나리오 1)
- 소내정전(Station Black-Out, SBO) 조건(시나리오 2)
- 대체교류디젤발전기(AAC DG)상실을 포함한 소내정전 조건(시나리오 3)
- 최종열제거원상실(Loss Of Ultimate Heat Sink, LOUHS) 조건(시나리오 4)
- 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건(시나리오 5)
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)

상기 사고시나리오를 기준으로 지진해일, 해일 및 강우, 지진과 같은 극한 자연재해 조건이 추가로 발생하는 다음과 같은 사고시나리오에 대한 발전소 대응능력도 평가하였다. 극한 자연재해는 스트레스테스트 수행지침(개정1)[4-1]에 따라 기본적으로 동일부지 내 모든 원전이 동시에 영향을 받는다고 가정하였다.

- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 사고를 동반한 지진해일(시나리오 7)
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 사고를 동반한 해일 및 강우(시나리오 8)
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 사고를 동반한 0.3g 지진(시나리오 9)

제2절 평가내용

원자력발전소 설계시 안전 목표는 정상운전 및 사고조건에서도 원자력발전소를 안정시키고 원전 종사자 뿐 만 아니라 일반 대중의 안전을 위해 방사성물질 누출로 인한 피해를 최소화하는 것이다. 본 스트레스테스트에서는 극한 자연재해 상황에서 한울3,4호기가 안전성을 확보할 수 있는 지를 평가하였다. 상기 안전성 평가를 위하여 필수대처 기능을 정립하고, 이에 필요한 설비 및 보조설비들을 선별하여 전원상실, 최종열제거원 기능상실 및 자연재해 각각의 경우에 대한 사고 시나리오를 도출하여 안정성 확보 여부를 평가하였다.

2.1 필수대처기능

극한 자연재해 시 원자력발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능이란 발전소를 안전하게 정지시키고 원전 종사자와 일반대중의 안전을 확보하기 위한 기능을 말한다. 본 스트레스테스트에서는 이러한 안전성을 확보하기 위해 다음과 같이 3가지 안전기능의 필수대처기능 확보여부를 평가한다.

- 원자로 정지 및 미임계 유지
- 노심 냉각(열제거)능력 확보
- 격납건물 건전성 유지

필수대처기능의 최우선 순위는 원자로정지 확인 및 원자로 미임계 유지이다. 두 번째 안전기능은 연료 손상을 방지하기 위한 노심냉각(열제거) 능력 확보이다. 마지막으로 격납건물 건전성 유지이다.

본 절에서는 필수대처기능을 수행하는 계통들의 필수 기능과 기능 수행에 필요한 주요 설비들의 평가, 그리고 주요 설비들의 기능수행을 위한 보조설비들에 대해 전원, 수원, 기기냉각수 필요여부, 위치, 설계등급 및 지진에 대한 생존가능성 여부를 평가하여 표 4-3에 정리하였다.

2.2 필수대처기능 유지 및 복구를 위한 설비

상기 3가지 필수대처기능 평가를 위해 전기 모선별 부하목록과 모선 정전시 영향을 평가하였으며, 필수대처기능을 수행하는 계통과 그 기능을 수행하는 주요기기 및 보조설비들에 대해 평가하였다.

2.2.1 모선별 부하목록 및 모선 정전시 영향

한울3,4호기 소내 전력공급 및 배전은 그림 4-1에 제시되어 있고, 비상전원 전력

모선도는 그림 4-2와 같다.

2.2.1.1 모선별 부하목록

한울3,4호기 소외전력계통은 독립된 1루트 2회선 345 kV 송전선로 2개와 1루트 2회선 345 kV 연락선로 2개로 구성되어 있다. 발전소 기동 시 요구되는 소내전력은 345 kV 소외전력계통으로부터 주변압기와 소내보조변압기를 통하여 공급되며, 첫 번째 우선전력(Preferred Power Supply)은 345 kV 계통으로부터 주변압기 및 소내보조변압기를 통하여 공급되고 두 번째 우선전력은 345 kV 계통으로부터 대기보조변압기를 통하여 공급된다.

한울3,4호기 소내전력계통의 모선은 13.8 kV, 4.16 kV, 480 V, 250 VDC, 125 VDC 비안전모선 및 120 V 계기용 비필수 모선과 4.16 kV, 480 V, 125 VDC 안전모선 및 120 V 계기용 필수 모선으로 구분되며, 소내 전력공급 및 배전은 그림 4-1에 제시하였고 각 모선별 부하목록은 표 4-1에 기술하였다.

표 4-1에 기술된 바와 같이 4.16 kV 안전모선에는 모터구동보조급수펌프, 1차측 기기냉각수펌프(이하 기기냉각수펌프), 1차측 기기냉각해수펌프(이하 기기냉각해수펌프) 및 안전주입펌프 등이 연결되어 있으며, 13.8 kV 비안전모선에는 원자로 냉각재펌프, 주급수펌프 및 순환수펌프 등이, 4.16 kV 비안전모선에는 2차측 기기 냉각수펌프 및 보조보일러급수펌프 등이 연결되어 있다.

480 V 안전모선에는 충전펌프, 사용후연료저장조냉각펌프(Spent Fuel Pool Cooling Pump), 필수냉방수펌프(Essential Chilled Water Pump), 안전급 충전기(Class 1E Battery Charger) 등이 연결되어 있으며 480 V 비안전모선에는 고온수 순환펌프 및 복수기진공펌프 등이 연결되어 있다.

125 VDC 안전모선에는 제어, 필수계측 및 인버터 등이, 125 VDC 비안전모선에는 제어, 경보, 터빈 보호 설비 등이, 250 VDC 비안전모선에는 직류유회유펌프(Emergency Bearing & Seal Oil Pump) 및 충전기 등이 연결되어 있다.

120 V 필수 및 비필수 패널에는 계측채널의 연속적인 감시 및 제어를 위한 계기용 설비들이 연결되어 있다.

공학적안전설비 전력계통은 2개의 독립된 채널 A와 B의 부하그룹으로 구성되며, 그림 4-2에 비상전원 전력모선도를 제시하였고 각 부하그룹은 4.16 kV, 480 V, 125 VDC 안전모선 및 120 V 필수모선에 연결되어 있다.

2.2.1.2 모선정전 시 영향

- 소외전원상실
- 소내정전
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전

전원이 공학적안전설비를 수동으로 기동함으로써 원자로를 안전정지 상태로 유지한다.

다. 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전

소외전원상실과 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기의 기동실패에 따른 교류전원 완전상실에 대비하여 이동형발전차(Mobile Generator, MG)가 구비되어 있으며 이는 내진설계된 이동형설비 통합보관고를 신축하여 보관할 예정이다. 이동형발전차는 한울본부 공용으로 3.2 MW 정격용량을 가진 발전차 1대가 구비되어 있으며 한울 본부 각 호기마다 1 MW 정격용량을 가진 발전차 1대가 추가로 구비될 예정이다.

모든 교류전원 상실이후 안전등급 필수 제어기기에 대한 전원은 안전등급 축전지로부터 연속적으로 4시간 동안 공급 가능하다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 상실사고를 확인한 후 최대 2시간 이내에 1 MW 이동형발전차를 비상디젤발전기 건물 입구로 이동하여 수동으로 4.16 kV 안전모선()을 가압하여 필수적인 부하에 전원을 공급하여 운전원이 사고 상황에 따른 완화조치단계에 따라 필요한 운전부하를 선택하여 원자로를 안전정지 상태로 유지한다.

이동형발전차를 사용하여 공학적안전설비에 부하를 공급하기 전까지 내진설계되고 침수의 영향을 받지 않는 축전지에 의해 발전소 제어 및 보호 기능이 유지된다. 발전소 안전기능 유지를 위한 필수부하는 축전지의 부하차단(Load Shedding)운전으로 최소 8시간 이상 축전지로부터 전력을 공급받을 수 있다.

2.2.2 필수대처기능 설비

2.1항에서 정의한 필수대처기능 수행에 필요한 계통들에 대해 각 계통들이 수행하는 필수대처기능을 파악하고 전원상실 및 최종열제거원 상실시 영향에 대해 평가하였다.

2.2.2.1 원자로 정지 및 미임계 유지

가. 원자로 트립계통

원자로정지 설정치(가변 과출력, 고 대수출력준위, 고 국부출력밀도, 저 핵비등 이탈률, 가압기 고압력, 가압기 저압력, 증기발생기 저수위, 증기발생기 저압력, 격납 건물 고압력, 증기발생기 고수위, 원자로 냉각재 저유량 등)에 의해 원자로 트립

계통이 작동된다. 상기 변수들이 설정치를 초과할 경우 논리회로를 통하여 제어봉 구동장치에 공급되는 전원이 차단되어 제어봉이 노심으로 자유 낙하하여 원자로가 정지된다.

교류전원이 상실되면 제어봉에 공급되는 전원이 차단되어 제어봉이 노심으로 자유 낙하하여 원자로가 정지된다. 노심보호연산기계통은 원자로냉각재펌프 축의 회전 속도를 측정하여 원자로유량을 계산하며 이를 DNBR 계산에 사용한다. 원자로냉각재펌프 축회전 속도가 [] 이하로 떨어지면 노심보호연산기계통은 원자로트립을 발생한다. 교류전원 상실에 따른 원자로냉각재펌프 축 회전 속도는 []초 이후에 [] 이하로 떨어지고 노심보호계통 및 발전소보호계통의 신호처리 지연 시간은 [] 후에 원자로정지차단기가 개방된다. 이후 제어봉제어계통(CEDMCS)에서 제어봉구동장치(CEDM) 코일의 에너지를 감쇄하는데 최대 0.5초가 소요되고, 제어봉은 자유낙하하여 [] 삽입위치에 도달한다.

원자로 트립기능을 수행하는 발전소보호계통으로 공급되는 4개 채널 중 2개 채널 이상의 전원이 상실되면 Fail-safe 설계에 따라 원자로정지가 발생되도록 설계되어 있다. 또한 최종열제거원 상실시에도 원자로정지 신호가 발생되면 원자로가 정지될 수 있다.

한울3,4호기에 구비되어 있는 지진원자로자동정지시스템(Automatic Seismic Trip System, ASTS)는 [] 이상의 지진이 발생할 때 지진감지 신호로 원자로를 정지시킨다.

그리고 운전원은 제어봉위치 지시등의 제어봉 바닥 지시등의 점등, 원자로 정지 차단기의 개방 및 중성자 준위 등의 상태를 파악하여 원자로정지를 확인하는데 만약 원자로가 정지되지 않았으면 운전원이 주제어실에서 원자로를 수동으로 정지시킬 수 있다.

나. 미임계 유지

노외중성자속감시계통에서 원자로 저출력을 감시할 수 있는 수단은 [] 전원을 받는 안전채널 대수출력신호와 [] 전원을 받는 기동채널 중성자속신호이다. 노외중성자속 안전채널은 핵분열함 검출기를 사용하여 $2 \times 10^{-8} \sim 200\%$ 출력의 범위를 감시한다. 또한 노외중성자속 기동채널은 비례계수기 검출기를 사용하며 초기 원자로 기동시, 장기간 원자로 정지 중, 원자로 정지 후 및 핵연료 재장전 후 기동시 원자로 출력을 감시하여 운전원에게 미임계시 출력정보를 제공한다.

2.2.2.2 노심냉각 및 재고량 유지

정지냉각계통은 증기계통과 급수 또는 보조급수계통과 함께 운전정지 후 원자로냉각재계통의 온도를 정상 운전온도에서부터 재장전 온도까지 낮추는 기능을 수행한다. 정지냉각계통은 증기발생기의 대기방출기능 및 보조급수계통과 더불어 소형과단냉각재상실사고 후에 원자로냉각재계통을 냉각시키는데 사용된다. 정지냉각계통은 증기관과 급수관 파단사고, 증기발생기 전열관 파단사고 후와, 발전소 기동시 원자로냉각재펌프가 운전되기 전에 노심으로의 유량을 유지시키기 위한 기능을 수행한다.

정지냉각계통은 원자로의 안전정지에 필수적인 계통이므로 내진범주 I급 계통으로 설계되었으며, 설계기준 지진하에서 기능을 수행하도록 설계되었다.

정지냉각계통은 원자로냉각재계통의 압력 및 온도가 28.8 kg/cm²A(410 psia)와 176.7℃(350°F)부터 재장전조건인 대기압과 51.7℃(125°F)까지 원자로냉각재를 냉각시킨다. 정지냉각계통은 배관 파단 없이 원자로냉각재계통 전체압력을 견딜 수 있고 계통간 냉각재상실사고 (Interfacing System LOCA)의 확률을 낮출 수 있도록 정지냉각계통 흡입부 및 토출부의 설계압력은 []로 설정되었다.

정지냉각계통 기기들의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 동 계통을 사용한 노심냉각 기능은 유지가 가능하다.

다만 최종열제거원상실시 정지냉각열교환기 등에 기기냉각수 공급이 상실되므로

정지냉각시스템의 기능은 상실된다.

나. 안전주입계통

안전주입계통은 냉각재상실사고와 같은 예상치 않은 사고시 노심 냉각을 할 수 있는 안전기능을 수행한다. 안전주입계통은 냉각재상실사고 후 상당기간 동안 노심의 심각한 변형을 막고, 핵연료 용융을 방지하며, 핵연료 피복재와 냉각재와의 반응을 제한하고, 노심내에 발생하는 에너지를 제거하며, 노심을 미임계상태로 유지하도록 한다.

또한, 안전주입계통은 주증기배관파단사고와 같은 예상치 않은 사고시 노심에 부반응도를 증가시키기 위하여 원자로냉각재계에 봉산수를 주입하는 기능도 담당한다. 또한 증기발생기전열관 파단사고나 제어봉집합체 인출사고와 같은 사고에서도 안전주입이 이루어진다. 이러한 안전주입계통은 자동적으로 작동한다.

안전주입계통은 두개의 작동신호로 제어된다. 하나는 안전주입작동신호로 가압기 저압력과 격납건물 고압력의 경우 안전주입계통이 작동된다. 두번째의 제어신호는 재순환작동신호이다. 재순환작동신호는 안전주입계통의 수원을 재장전탱크에서 재순환집수정으로 변경하여, 재장전수탱크로부터의 물이 고갈되어도 노심에 계속적인 유량을 제공할 수 있게 한다. 재순환작동신호는 재장전수탱크 저수위에 의하여 작동되며, 안전주입작동신호와 재순환작동신호는 수동 혹은 자동으로 작동된다.

- 가압기 저압력() 신호,
- 격납건물 고압력() 신호, 또는
- 안전주입 동작 버튼을 누름(수동)

안전주입계통의 기기들의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤 발전기에 의해 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 동 계통을 사용한 노심냉각 기능은 유지가 가능하다.

또한 ELAP 상황에서 동 계통의 기기에 이동형발전차를 사용한 전원공급이 가능하다면 노심냉각 기능을 수행할 수 있다.

안전주입탱크는 4대로 구성되며 냉각재상실사고의 결과로써 감압된 원자로냉각재계에 저장된 봉산수를 주입한다. 각각의 탱크는 원자로용기 입구 부근의 원자로냉각재계통 배관에 위치한 안전주입 노즐을 경유하여 원자로냉각재계통 저온관에 연결되어 있다. 정상운전중 각각의 안전주입탱크는 직렬로 연결된 두 개의 체크밸브에 의해 원자로냉각재계통과 격리되어 있다. 원자로 운전중 원자로냉각재계통 압력이 안전주입탱크 압력이하로 감압되면 안전주입탱크 봉산수는 자동적으로 원

자로냉각재계통에 주입되므로 전원상실과 최종열제거원상실시에도 안전주입탱크의 봉산수 주입기능은 유지된다.

다. 보조급수계통

보조급수계통은 정지냉각계통이 운전되는 온도 및 압력까지 발전소를 안전하게 냉각시킬 수 있도록 각각의 증기발생기에 충분한 보조급수를 공급하는 기능을 한다. 보조급수계통은 발전소 정상운전 시에 사용되지 않으며, 주급수 상실사고 시 증기발생기에 냉각수를 공급한다.

보조급수계통은 독립된 2개의 부속 계통으로 구성되며, 각 부속 계통은 100% 용량의 전동기구동 보조급수펌프()와 100% 용량의 터빈구동 보조급수펌프()로 구성된다. 각 부속 계통은 해당 증기발생기에 급수를 공급할 수 있으며, 복수저장탱크로의 재순환 유로가 있다. 보조급수펌프로 공급되는 냉각수원은 최소한 이 가용 가능한 복수저장탱크() 50% × 2대이며, 복수저장탱크의 물이 고갈되었을 경우 탈염수저장탱크 또는 원수저장탱크로부터 대체냉각수를 공급받을 수 있다.

보조급수계통은 안전관련 기기에 1E급 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기의 전원이 공급되므로 소외전원상실, 소내정전조건에서 보조급수를 공급할 수 있다. 또한 동계통은 안전관련 기기의 축전지 또는 이동형발전차로부터 전원이 공급되므로 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 보조급수를 공급할 수 있다.

보조급수계통은 보조급수 작동신호에 의해 자동 기동되며, 수동 작동 수단도 구비되어 있다. 보조급수작동 신호()는 해당 증기발생기의 저수위(23.6% WR)에 따라 독립적으로 발생되며, 보조급수 작동 신호 발생 시 전동기구동 보조급수펌프 및 터빈구동 보조급수펌프 모두 해당 증기발생기로 보조급수를 공급한다. 증기발생기에서 급수를 비등시키고, 발생한 증기를 주증기 대기방출밸브를 통하여 대기로 방출시킴으로써 원자로에서의 열을 제거시킨다. 주복수기가 이용 가능한 경우 증기를 터빈우회계통에 의하여 복수기로 방출시킬 수도 있다.

보조급수는 증기발생기의 하향유로 노즐로 공급되며, 각 터빈구동 보조급수펌프는 급수를 공급하는 해당 증기발생기의 주증기배관 가지배관 내 터빈증기공급밸브()를 통해 증기를 공급받는다. 각 터빈 증기차단밸브() 전단의 응축수가 터빈의 비상자동기동 시 터빈 속으로 유입되지 못하게 하기 위하여 주증기배관으로부터 터빈예열밸브()를 통해 유입된 증기는 유량제한용 오리피스()를 통해 연속적으로 배출된다. 추가적인 배수가 필요한 경우를 대비하여 각 배수 오리피스에 우회배관 및 밸브()가

설치되어 있다.

보조급수조절밸브()는 증기발생기의 수위를 유지하기 위해 자동 조절된다. 보조급수조절밸브는 전원 상실 시 고장 열림으로 설계되어 있으며, 이 경우 보조급수격리밸브()들이 NSSS PPS (Plant Protection System) 캐비닛으로부터의 사이클링 신호에 의해 정해진 고/저 수위 범위 내에서 증기발생기 수위를 유지할 수 있다. 보조급수격리밸브는 필요시 수동조작을 위한 핸드휠을 구비하고 있다.

보조급수계통의 각 부속 계통은 2대의 복수저장탱크로부터 냉각수를 공급받을 수 있도록 상시 열림 자물쇠잠금 수동밸브()와 상시 닫힘 자물쇠잠금 수동밸브()가 있는 복수저장탱크 간의 교차연결배관이 각 부속계통의 보조급수펌프 흡입 배관에 각각 설치되어 있다. 만약 보조급수펌프 운전 동안 복수저장탱크의 냉각수가 고갈되면 보조급수펌프 흡입배관에 설치되어 있는 대체냉각수 공급배관 상의 자물쇠 잠금 수동밸브()를 열고, 탈염수저장탱크로부터의 대체냉각수 공급배관 상에 있는 자물쇠 잠금 수동밸브()를 열거나 원수저장탱크로부터의 대체냉각수 공급배관 상에 있는 Removable Spool을 연결 후 수동밸브() 및 나비형 밸브()를 열어 탈염수저장탱크 또는 원수저장탱크로부터 대체냉각수를 공급받을 수 있다.

보조급수계통 및 주증기 대기방출밸브를 이용하여 노심의 잔열을 제거하기 위해서는 상시 열림으로 설계된 전동기구동밸브인 주증기 대기방출밸브 격리밸브()와 고장 열림으로 설계된 보조급수펌프터빈 증기공급밸브() 및 증기차단밸브()의 열림을 확인하여야 하고 현장에서 수동 조작이 가능한 주증기 대기방출밸브()는 유량 조절이 가능해야 한다.

아래 밸브들은 증기발생기 격리를 위한 밸브들이다.

- 주증기격리밸브()
- 주증기격리 우회밸브()
- 주급수격리밸브()
- 주급수화학약품주입밸브()
- 증기발생기 취출격리밸브()
- 증기발생기 시료채취 격리밸브()

여기서 주증기격리밸브, 주증기격리밸브 우회밸브 및 주급수격리밸브는 가스유압식 구동밸브이며 고장 닫힘으로 설계되어 있다. 주급수화학약품주입밸브, 증기발

생기 취출격리밸브 및 증기발생기 시료채취 격리밸브는 공기구동밸브이며 고장 단힘으로 설계되어 있다.

이상에서 설명한 보조급수계통의 주요설비와 감시를 위한 계측기는 표 4-3에 정리하였다.

라. 화학 및 체적제어계통

화학 및 체적제어계통은 정상운전 및 정지운전 중에 원자로냉각재의 수질 유지, 1차계통 온도변화로 인한 원자로냉각재의 수축 및 팽창 그리고 소형배관 파단 사고 시 냉각재 손실을 보상함으로써 1차계통의 냉각재 요구체적을 유지하는 기능을 수행한다. 이외에 1차계통의 붕소농도 조절, 원자로냉각재펌프의 밀봉수 주입 및 회수, 주살수 이용 불능시 보조살수를 사용한 가압기의 감압 기능을 제공한다.

화학 및 체적제어기능은 발전소 사고 시 발전소 안전정지를 위한 보조적 수단으로 사용되며, 실질적 발전소 안전정지는 전용의 안전계통(예, 안전주입계통, 보조급수계통 및 정지냉각계통 등)을 사용한다.

그러나 화학 및 체적제어계통은 재장전수탱크와 같은 대용량 탱크로부터 수원을 받을 수 있으며, 또한 사용후연료저장조에 붕산수 공급이 가능한 유로를 갖고 있어 사고 시 본 계통이 가용하다면 사고 완화를 위한 기능수행은 유용하다.

화학 및 체적제어계통에는 4대의 왕복동형 충전펌프가 설치되어 있으며, 각 충전펌프의 용량은 4대의 원자로냉각재펌프 밀봉주입유량[]보다 큰 []을 주입 가능하다. 충전펌프는 정상운전, 발전소 기동 및 정지운전 동안 소외전원 뿐만 아니라 소내 비상디젤발전기로부터 전원을 공급받는다. 충전펌프의 운전은 기술지침서의 요건에 따르는 발전소 전 운전모드에서 총 3대를 초과하지 않는다. 다른 1대에 공급되는 전원은 차단 상태에 있다.

정상운전, 발전소 기동 및 정지운전 동안 충전펌프의 수원은 체적제어탱크이다. 체적제어탱크에는 2개의 수위지시계가 독립적으로 설치되어 있으며, 체적제어탱크의 수위가 저-저 수위()에 도달하면 충전펌프의 수원은 저-저 수위 연동로직에 따라 자동으로 재장전수탱크로 전환된다. 체적제어탱크에서 충전펌프로의 유로에는 2대의 모터구동밸브()가 설치되어 있고, 재장전수탱크에서 충전펌프로의 중력급수유로에도 2대의 모터구동밸브()가 설치되어 있다. 이들 밸브는 모두 소외전원 뿐만 아니라 소내 비상디젤발전기로부터 전원을 받으며, 체적제어탱크 수위지시기로부터 신호를 받아 개폐된다. 이들 밸브에 모든 전원공급이 상실된 경우 수동으로 조작 가능하다.

원자로냉각재펌프 밀봉수 주입 및 기기냉각수가 상실되면 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생할 수 있다. 충전펌프는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 또는 대체교류디젤발전기에 의해 구동 전원을 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실 및 소내정전 조건에서도 충전펌프 기능은 유지된다. 4대의 충전펌프 중 2대의 충전펌프()는 모선 A에서, 나머지 2대의 충전펌프()는 모선 B를 통해 전원을 공급받는다. 따라서 원자로냉각재펌프에 밀봉수를 주입하여 밀봉수 손상에 따른 냉각재 상실을 방지할 수 있다.

또한, ELAP 상황에서 동 계통의 기기에 이동형발전차를 사용한 전원공급이 가능하다면 원자로냉각재시스템의 냉각수 보충 및 원자로냉각재펌프의 밀봉수 주입 기능을 수행할 수 있다.

충전펌프 격실 냉각은 필수냉방수계를 통해 수행되나, 최종열제거원 상실 시 충전펌프 격실문 개방으로 충전펌프의 기능은 유지할 수 있다.

마. 기기냉각수계통과 기기냉각해수계통

기기냉각수계통은 정상운전, 정지냉각운전 및 사고시 안전성 및 비안전성관련 기기로부터 발생하는 열부하를 제거하기 위해 냉각수를 공급하며, 기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하여 기기냉각수계통으로 전달된 열부하를 최종열제거원인 바다로 방출한다.

기기냉각수계통은 냉각재상실사고시 격납건물의 건전성을 보장하고 원자로 안전정지시 노심으로부터 붕괴열을 제거하기 위해 격납건물살수열교환기 및 정지냉각열교환기에 냉각수를 공급하는 안전기능을 수행한다. 또한 소외전원 상실시 비상디젤발전기 냉각기 및 필수냉동기 응축기에 냉각수를 공급함으로써 안전성 관련 기기들의 운전성을 보장할 수 있다.

기기냉각수계통은 2개의 독립적인 다중 계열로 구성되며, 계열 당 기기냉각수열교환기 2대, 기기냉각수펌프 2대, 기기냉각수보충펌프 1대, 완충탱크 1대, 화학약품주입탱크 1대, 그리고 관련 배관, 밸브, 및 계측 제어기기 등으로 구성된다.

정상운전시 기기냉각수계통은 계열당 펌프 1대와 열교환기 1대가 운전되며 안전성관련 기기인 필수냉동기 응축기, 사용후연료저장조 냉각열교환기와 비안전성관련 기기인 원자로건물냉동기 응축기, 원자로냉각재펌프/전동기 냉각기, 유출열교환기, 봉산응축기, 탈기기 등에 냉각수를 공급한다. 정지냉각운전 초기에는 정상운전 대비 정지냉각열교환기에 추가적인 냉각수 공급이 요구되기 때문에 계열당 2대의 펌프가 운전된다. 사고시 안전주입작동신호(SIAS)가 발행될 경우 비안전성관련기기 냉각수 공급모관이 자동 격리되며 비상디젤발전기 냉각수 공급배관 격

리밸브가 자동 개방되어 운전성을 보장한다. 또한 격납건물살수작동신호(CSAS)가 발생할 경우 격납건물살수열교환기 냉각수 공급배관 격리밸브가 자동 개방되어 열교환기로부터 열부하를 제거하며, 원자로냉각재펌프/전동기 냉각기 냉각수 공급배관은 자동 격리된다.

기기냉각해수계통은 계열 당 1대씩 운전되는 기기냉각수 열교환기에서 발생하는 열부하를 제거하여 최종열제거원인 바다로 방출한다. 기기냉각해수계통은 기기냉각수계통에 냉각해수를 공급함으로써 노심 붕괴열 제거 및 격납건물 건전성을 보장하는 안전기능을 지원한다.

기기냉각해수계통은 2개의 독립적인 다중 계열로 구성되며, 계열 당 냉각해수펌프 2대, 이물질여과기 2대, 그리고 관련 배관, 밸브 및 계측 제어기기 등으로 구성되며, 각 계열은 정상출력 및 사고시 설계온도 이내의 해수를 공급하도록 설계된다.

정상운전 및 사고시 기기냉각해수계통은 계열당 펌프 1대가 운전되며, 기기냉각수 열교환기 1대에 냉각해수를 공급한다. 정지냉각운전 초기에는 노심 붕괴열이 크기 때문에 계열당 2대의 펌프가 운전될 수 있다. 기기냉각수계통은 최종열제거원이 바다로부터 냉각해수를 취수하므로 해수위가 변동되어도 계통내 적절한 유량을 보장하기 위해 주제어실에서 수동으로 유량조절밸브의 개도를 조절할 수 있다.

기기냉각수계통의 주요설비로서 기기냉각수펌프()와 기기냉각수열교환기()를 선정하였다. 동 설비들은 계통내 유체이송 및 안전성관련 기기에 냉각수 공급을 위한 열제거 기능을 수행하며, 기기냉각수계통의 운전성을 결정하는 필수 기기이다. 또한 격납건물살수열교환기 냉각수 공급배관 격리밸브(), 정지냉각열교환기 냉각수 공급배관 격리밸브(), 비상디젤발전기 냉각수 공급배관 격리밸브()는 계통 안전기능 수행시 자동개방이 요구되며, 비안전성기기 냉각수 공급 및 회수배관 격리밸브(), 원자로냉각재펌프/전동기 냉각기 냉각수 공급 및 회수배관 격리밸브()는 안전성기기로의 냉각수 유량확보를 위해 자동 닫힘이 요구된다. 따라서 동 밸브들 또한 기기냉각수계통의 주요설비로 선정하였다. 기기냉각수 재고량 상실시 복수저장탱크로부터 기기냉각수보충펌프()를 이용하여 완충탱크(B)로 냉각수가 보충될 수 있으나, 이는 계통 고유의 냉각수 공급운전과 직접적인 연관성이 없으며, 사고시 비 내진범주로 설계된 냉각수 공급유로가 자동 격리되어 완충탱크의 재고량이 완전히 상실될 가능성이 매우 희박하므로 기기냉각수보충펌프와 완충탱크는 주요기기 평가에서는 제외하였다. 또한 화학약품주입탱크()는 안전기능이 없는 비안전성기기로 평가가 불필요하다.

기기냉각해수계통의 주요설비로서 기기냉각해수펌프()

)를 선정하였다. 동 설비들은 계통내 유체이송 및 기기냉각수열교환기에 냉각수를 공급하는 기능을 수행하며, 기기냉각해수계통의 운전성을 결정하는 필수 기기이다. 또한 기기냉각해수 방출배관 유량조절밸브()는 해수위 변동에 의해 기기냉각해수펌프의 운전유량이 변경될 경우 펌프 정격유량을 확보를 위해 조절기능이 요구되므로 주요설비로 선정하였다. 계통내 설치된 타 모터구동밸브의 경우 상시 개방되어 있으며, 전원상실시 운전상태를 지속적으로 유지(Fail-As-Is)하기 때문에 주요기기 평가에서 제외하였다. 또한 이물질여과기()의 경우 이물질 증가에 따른 차압 증가시 역세척 운전을 수행하기 위해 전원이 요구되나, 이는 기기냉각수 열교환기로 냉각해수를 공급하는 안전기능과 무관하기 때문에 주요기기 평가에서 제외하였다.

기기냉각수계통 및 기기냉각해수계통 운전에 필요한 주요설비에 대한 평가는 표 4-3에 기술되어 있다.

기기냉각수펌프 및 기기냉각해수펌프는 안전성관련 기기로 1E급 전원을 공급받는다. 따라서 소외전원이 상실되더라도 비상디젤발전기를 통해 전원을 공급 받을 수 있고, 비상디젤발전기를 사용할 수 없는 경우에도 대체교류디젤발전기를 사용할 수 있으나, 대체교류디젤발전기까지 사용이 불가한 극한 재해에서는 정지냉각열교환기, 격납건물살수열교환기 등에 냉각수를 공급할 수 없으므로 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보 및 노심 붕괴열을 제거기능이 상실된다.

최종열제거원 상실은 기기냉각수해수계통 기능상실에 의한 기기냉각수계통으로 전달되는 열부하를 제거할 수 없음을 의미한다. 따라서 정지냉각열교환기 및 격납건물살수열교환기 등의 운전이 불가하므로 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 노심으로부터 발생하는 열부하 제거 및 격납건물 건전성 확보 기능이 상실된다. 또한 기기냉각수계통 기능상실시 비상디젤발전기 냉각기 및 필수냉동기 응축기 및 사용후연료저장조 냉각열교환기 등에 냉각수 공급이 불가하기 때문에 안전성 관련 주요 설비들의 운전성을 보장할 수 없다.

기기냉각해수펌프의 전원상실 뿐만 아니라 극한 자연재해로 인한 계통 취수기능 상실과 같은 사고 발생시에도 기기냉각수열교환기 냉각해수 공급유로가 차단되어 최종열제거원의 기능이 상실될 수 있다. 단순 교류전원의 상실로 유발된 최종열제거원 기능상실은 이동형발전차를 이용하여 기기냉각해수펌프에 전원을 공급함으로써 복구가 가능하나, 취수 구조물이 상실될 경우 기기냉각해수펌프의 기동만으로는 냉각해수의 공급이 불가하나 이동형고유량펌프를 연결하여 기기냉각수계통에 냉각해수를 공급할 수 있다.

바. 원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통(원자로냉각재계통 격리)

원자로를 안전하게 정지시키기 위해서는 원자로냉각재 재고량 유지 기능이 확보되어야 한다. 정상 출력운전 상태에서 원자로냉각재계통을 격리하는데 필요한 밸브로는 안전감압밸브(), 유출수 격리밸브(), 유출배관 격납건물격리밸브() 및 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격납건물밸브()가 있다.

안전감압밸브는 정상상태시 닫혀있으므로 원자로냉각재계통 격리를 위해 동 밸브들의 작동은 불필요하다.

유출수 격리밸브, 유출배관 격납건물격리밸브 및 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격납건물격리밸브는 공기상실, 전원상실 등과 같은 고장시 단힘으로 설계되어 있다.

충전수 주입배관의 격납건물격리밸브()와 밀봉수 주입배관 격납건물격리밸브()는 모터구동밸브로 정상운전 시 개방상태에 있으며, 사고 시 충전수 주입 및 원자로냉각재 밀봉수 공급을 위해 충전펌프가 운전 상태에 있을 경우 개방 상태를 유지하는 것이 바람직하다. 그러나 이 밸브들은 1E급 전원, 비상디젤발전기 또는 이동형발전차로부터 구동 전원을 공급받으므로 소외전원 상실, 소내정전, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 필요시 격리가 가능하다. 만약에 이 밸브들이 기능 상실과 같은 이유로 격리가 안 될 경우라도 이들 배관의 격납건물 내부에 역지밸브()가 원자로냉각재의 역류를 차단한다.

따라서 원자로냉각재계통 격리기능은 소외전원상실, 및 소내정전 조건에서도 기능을 유지할 수 있다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로 냉각재 계통은 기본적으로 열원, 열제거원, 순환계통 등으로 구성되고, 2개의 폐회로가 원자로에 연결된다. 각 폐회로는 하나의 42인치 내경 출구관(고온관), 하나의 증기발생기, 두 개의 30인치 내경 입구관(저온관) 및 두 대의 원자로냉각재펌프로 구성되고, 한 개의 폐회로 고온관에 가압기가 연결되었다. 모든 원자로냉각재계통 기기는 원자로건물 내에 위치하며, 환경설계지침에 따라 내환경 설계되었다.

원자로냉각재는 원자로를 통과함에 따라 노심 내 핵분열로부터 방출된 에너지에 의해 가열되고, 증기발생기에서 2차 계통으로 열전달을 하여 터빈-발전기를 구동시킬 증기를 생산한다. 정상운전 중에 냉각재는 원자로냉각재펌프에 의해 원자로와 증기발생기를 통과하도록 연속 순환된다. 원자로냉각재는 중성자 감속재의 역

할도 하고, 반응도 제어를 위해 봉산을 함유하며, 고온 노심유로에서의 일부 국부 비등을 제외하고는, 순환 냉각재는 가압기에 의해 과냉상태가 유지된다. 원자로냉각재계통 압력은 증기와 물이 열적평형을 이루고 있는 가압기에 의해 유지 및 제어되며, 가압기체적은 전출력운전시 포화증기 및 물이 각각 약 50%씩 차지한다. 가압기의 침수형 전기가열기와 살수에 의해 원자로냉각재계통의 운전압력을 유지하고 과도상태시 압력변동을 제한한다. 원자로냉각재계통은 증기발생기를 통해 주증기계통으로 2,825 MWt를 전달하며, 이중 2,815 MWt는 노심에서, 나머지 10 MWt는 원자로냉각재펌프에서 발생된다.

원자로냉각재계통 압력경계의 과압보호는 가압기의 상부에 설치된 세 개의 스프링 장착 안전밸브(개방 설정치 :)에 의해 이루어진다. 이 밸브를 통해 방출된 증기는 원자로배수탱크의 물속으로 배출되어 응축 및 냉각된다. 증기 방출량이 원자로배수탱크 용량을 초과하면, 증기는 탱크에 설치된 파열판을 통하여 원자로건물 내의 대기로 방출된다.

완전급수상실사고 시에 노심 냉각을 위해 냉각원자로냉각재계통을 안전주입펌프 토출 압력 이하로 감압시켜 안전주입펌프에 의한 주입운전(Feed & Bleed Operation)을 수행할 수 있도록 안전감압밸브()가 가압기 상부에 설치되었다.

발전소 기동 및 정지 시에 원자로냉각재계통의 배기 운전뿐만 아니라 사고 시에는 원자로냉각재계통의 감압 및 비응축성 기체를 배기할 수 있도록 원자로냉각재 배기밸브()가 가압기 및 원자로 상부에 설치되었다.

원자로냉각재계통의 압력을 감소시킬 필요가 있을 때 원자로냉각재계통의 감압을 수행한다. 원자로냉각재계통의 감압은 가압기 상부에 위치해 있는 안전감압밸브() 또는 원자로냉각재 배기밸브()로 수행된다.

안전감압밸브는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 축전지() , 또는 이동형발전차로부터 구동 전원을 공급받을 수 있어 소외전원상실 및 소내정전 조건에서 동 밸브들의 기능은 유지된다. 또한 원자로냉각재 배기밸브는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차로부터 구동 전원을 공급받을 수 있어 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 밸브들의 기능은 유지된다.

아. 주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)

원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재 재고량 상실을 최소화하기 위해서는

증기발생기를 신속히 냉각 및 감압시켜 원자로냉각재계통의 압력을 감소시킬 필요가 있다. 증기발생기 감압과 압력조절에는 주증기 대기방출밸브()가 사용된다.

주증기 대기방출밸브는 전기유압식 구동 밸브이며 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기 또는 이동형발전차에서 구동 전원을 공급받는다. 주증기 대기방출밸브는 필요 시 수동조작을 위한 장치인 핸드펌프를 구비하고 있다. 따라서, 주증기 대기방출밸브는 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 기능이 유지되며, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서는 현장에서의 수동 조작이 요구된다.

증기발생기 과압을 방지하는 데는 주증기 안전밸브()가 사용되며, 스프링 구동 방식으로 소외전원 상실, 소내정전, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 기능이 유지된다.

2.2.2.3 격납건물 건전성 유지

격납건물의 건전성은 격납건물 내 방사성 물질의 최소화, 격납건물의 격리 및 가연성기체제어 등을 통해 확보된다.

가. 격납건물 살수계통

격납건물살수계통은 원자로냉각재 압력경계 또는 격납건물 내부에서의 주증기 및 주급수계통의 배관 파단시 격납건물 상부로 봉산수를 공급하여 격납건물내의 온도와 압력을 감소시키고 핵분열 생성물을 제거함으로써 격납건물의 건전성을 유지하고 외부로의 방사성물질 누출을 제한하는 안전기능을 수행한다.

격납건물살수계통은 2개의 독립적인 다중 계열로 구성되며, 계열 당 1대의 격납건물살수펌프, 1대의 격납건물살수열교환기, 1개의 독립된 주살수 및 보조살수 모관, 배관, 계측기 및 제어기기들로 구성되어 있다.

정상운전시 격납건물살수계통은 계통내 기기들의 가동중시험을 제외하면 대기상태를 유지한다. 냉각재상실사고후 CSAS가 발생할 경우 격납건물살수펌프()가 자동 기동되며 살수노즐 차단밸브()가 자동 개방되어 살수운전을 보장한다. 격납건물살수열교환기()는 냉각재상실사고 발생 1시간 이내 격납건물 압력을 계산첨두압력(Peak Calculated Pressure)의 1/2 이하로 감소시키기에 충분한 용량으로 설계되며 CSAS 발생시 기기냉각수계통으로부터 냉각수를 공급받는다.

격납건물살수계통의 주요설비로서 격납건물살수펌프, 격납건물살수열교환기 및 살수노즐 차단밸브를 선정하였다. 동 설비들은 계통내 유체이송 및 격납건물 내 열제거 기능을 수행하며, 격납건물살수계통의 운전성을 결정하는 필수 기기이다. 상기 주요설비를 제외한 타 밸브 및 노즐과 같은 설비는 전원이 불필요한 피동기기로 압력유지 건전성만 확보될 경우 운전성이 입증되므로 평가에서 제외하였다.

격납건물살수계통 운전에 필요한 주요설비에 대한 평가는 표 4-3에 기술되어 있다.

격납건물살수펌프 및 살수모관 격리밸브는 안전성관련 기기로 1E급 전원을 공급받는다. 따라서 소외전원이 상실되더라도 비상디젤발전기를 통해 전원을 공급받을 수 있고, 비상디젤발전기를 사용할 수 없는 경우에서도 대체교류디젤발전기를 사용할 수 있으나, 대체교류디젤발전기까지 사용이 불가능 극한 재해에서는 살수운전이 불가하므로 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보기능이 상실된다.

최종열제거원이 상실될 경우 살수열교환기로의 기기냉각수 공급이 불가하므로 격납건물살수계통의 운전성을 보장할 수 없다. 따라서 최종열제거원 상실시 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보 및 방사성물질의 누출제한 기능이 상실된다.

나. 격납건물 격리계통

격납건물 격리계통은 사고시 운전되는 공학적안전설비 계통을 제외한 모든 격납건물 관통부를 의미하며 격납건물의 건전성을 유지하여 핵분열 생성물의 환경유출을 방지하는 안전기능을 수행한다.

격납건물 격리는 안전주입신호 또는 격납건물격리신호에 의해 자동으로 이루어지며, 격납건물 관통부를 통과하는 배관계에는 2개의 격리밸브가 존재한다.

격납건물 격리밸브는 모터구동밸브 또는 공기구동밸브로 설계된다. 모터구동밸브는 안전성관련 기기로 1E급 전원을 공급받는다. 따라서 소외전원이 상실되더라도 비상디젤발전기를 통해 전원을 공급받을 수 있고, 비상디젤발전기를 사용할 수 없는 경우에서도 대체교류디젤발전기를 사용할 수 있으나, 대체교류디젤발전기까지 사용이 불가능 극한 재해에서는 격납건물 격리가 불가하므로 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보기능이 상실된다.

공기구동밸브는 계기용 공기 상실시 닫힘(Fail Close)으로 설계되기 때문에 대체교류디젤발전기까지 사용 불가능 극한 재해에서도 운전성이 보장된다.

다. 격납건물 수소제어계통

격납건물수소제어계통은 사고시 노심 및 원자로건물에서 발생하는 수소를 제거하여 격납건물의 건전성을 유지하고 외부로의 방사성물질 누출을 제한하는 안전기능을 수행한다.

격납건물수소제어계통은 설계기준사고시 격납건물내 수소농도를 최소 연소 제한치인 4 v/o 이하로 유지시키기 위한 2개의 수소재결합기와 중대사고시 격납건물내 수소농도를 10 v/o 이하로 유지시키기 위한 다수의 수소점화기로 구성되어 있다. 또한 후쿠시마 후속조치에 따라 극한 재해시 원자로건물내 수소제어 기능을 확보하기 위해 피동촉매형수소재결합기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)를 추가로 설치하였다. PAR는 백금의 촉매체를 이용하여 낮은 온도 및 수소농도에서 산소와 수소를 결합시켜 수증기를 만들 때 발생하는 반응열로 자연대류를 형성시켜서 사고시 발생하는 수소를 지속적으로 제거한다. 동 설비는 별도의 전원공급이 불필요한 피동형 기기로 냉각수의 공급도 요구되지 않기 때문에 전원상실 및 최종열제거원상실을 포함한 극한 재해 환경에서도 운전성이 보장된다.

2.2.2.4 안전기능 유지를 위한 설비

필수안전기능은 미임계 유지, 노심냉각 유지, 열제거원 유지, 원자로냉각재계통 건전성 유지, 격납건물 건전성 유지 및 원자로냉각재계통 재고량 조절을 의미한다. 이들 필수안전기능의 상태추적은 표 4-4의 계측기를 사용하여 수행되며, 이들 계측기는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 구동 전원을 공급받는다.

가. 주제어실 공기조화계통

주제어실 공기조화계통(Control Room HVAC System)은 3가지 필수대처기능을 수행하기 위해 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 관련 기기 등에 적합한 온도를 제공하는 안전기능을 수행한다.

주제어실 공기조화계통의 공기조화기(), 전기 덕트 가열기() 및 순환송풍기()는 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 기기 등에 적합한 온도를 제공하기 위한 설비이므로 주요설비로 선정된다.

주제어실 공기조화계통 내에 설치된 공기정화기()는 안전주입작동신호(SIAS) 또는 주제어실비상환기작동신호(CREVAS)에 의해 자동으로 기동되는 기기로 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 관련

기기 등에 적합한 온도를 제공하는 기기가 아니므로 주요설비 평가에서 제외하였다.

주제어실 공기조화시스템의 계기용 공기를 공급받는 격리제어댐퍼의 공기상실로 인한 고장시 () (고장시 열림, Fail-Open)를 제외한 모든 고장시 닫힘(Fail-Close)이며, 계기용 공기를 공급받는 격리제어댐퍼의 고장시 열림 또는 고장시 닫힘에서 주제어실 공기조화시스템은 외부공기 유입이 없는 100% 재순환 형태를 유지하여 적합한 온도를 제공하므로 안전기능 수행에 영향을 주지 않아 계기용 공기를 공급받는 격리제어댐퍼는 주요기기 평가에서 제외하였다. 또한, 수동댐퍼는 전원이 필요치 않으며 기존 상태를 유지하고 있으므로 안전기능 수행에 영향을 주지 않아 주요기기 평가에서 제외하였다.

주제어실 공기조화시스템의 주요설비는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동/제어 전원을 공급받아 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 운전/제어가 가능하며 이에 필요한 보조설비 확인과 평가는 표 4-3에 정리하였다.

최종열제거원 상실시 기기냉각수계를 사용하는 필수냉동기()의 기능은 상실되며, 필수냉동기에서 필수냉방수를 공급받는 주제어실 공기조화시스템의 공기조화기 또한 기능이 상실되므로 주제어실 공기조화시스템의 안전기능은 상실된다.

나. 필수냉방수계통

필수냉방수계통(Essential Chilled Water System)은 3가지 필수대처기능을 수행하기 위한 주제어실 공기조화시스템의 공기조화기()에 냉방수를 제공하는 안전기능을 수행한다.

필수냉동기(), 필수냉방수펌프() 및 순수이송펌프()는 주제어실 공기조화시스템의 공기조화기에 냉방수를 제공하기 위한 설비이므로 주요설비로 선정된다.

필수냉동기 응축기 냉각수제어밸브()는 고장시 열림(Fail-Open)으로 전원이 상실되어도 기능이 유지되어 안전기능 수행에 영향을 주지 않아 주요기기 평가에서 제외하였다. 또한, 수동밸브는 전원이 필요치 않으며 기존 상태를 유지하고 있으므로 안전기능 수행에 영향을 주지 않아 주요기기 평가에서 제외하였다.

필수냉방수계통의 주요설비는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기,

또는 이동형발전차에 의해 구동/제어 전원을 공급받아 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 운전/제어가 필요하며 이에 필요한 보조설비 확인과 평가는 표 4-3에 정리하였다.

필수냉방수계통의 주요설비는 안전성이며 1E급 전원을 공급받는다. 소외전원이 상실되더라도 비상디젤발전기를 통해 전원을 받을 수 있고, 비상디젤발전기를 사용할 수 없는 경우에도 대체교류디젤발전기를 사용할 수 있으나, 이 모든 설비들을 사용할 수 없는 경우에는 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 관련 기기 등에 적합한 온도를 제공하는 안전기능을 수행할 수 없다.

필수냉방수계통의 재고량을 유지하는데 필요한 순수이송펌프()는 비 1E급 전원에 의해서만 전원을 공급받아 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 필수냉방수계통의 누설시 필수냉방수계통의 기능은 상실하므로 필수냉방수계통의 안전기능은 상실된다.

필수냉동기()는 기기냉각수계통을 사용하여 필수냉동기 응축기의 폐열을 제거하고 최종열제거원 상실시 필수냉방수계통은 기능은 상실하므로 필수냉방수계통의 안전기능은 상실된다.

다. 공학적안전설비 작동계통

공학적안전설비를 작동하여 비상노심냉각을 통한 핵연료피복재의 보호, 격납건물의 격리 등을 통한 격납건물의 건전성 보장, 사고시 방출되는 에너지의 최소화, 격납건물 대기의 핵분열생성물 제거 기능을 수행한다.

공학전안전설비 작동계통은 다양한 변수를 측정하는 다중 계측 채널을 이용하여 사고조건을 감지함으로써 공학적안전설비를 자동으로 작동시키며, 운전원 조치에 의하여 수동 작동도 가능하다.

공학적안전설비에는 안전주입계통, 정지냉각계통, 보조급수계통, 주증기격리계통, 격납건물 살수계통 및 격납건물 격리계통 등이 있다. 1차 및 2차계통의 감시변수가 보호동작을 요구하는 상태에 도달하면 원자로건물격리작동신호, 원자로건물살수작동신호, 주증기격리신호, 안전주입작동신호, 채순환작동신호 및 보조급수작동신호들을 발생시켜 이와 연동된 공학적안전설비를 작동시킨다.

공학적안전설비 작동을 위한 계측기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 축전지에 의해 구동 전원을 공급받는다.

공학적안전설비 작동계통 개시신호를 발생하는 발전소보호계통으로 공급되는 4개 채널 중 2개 채널 이상의 전원이 상실되면 Fail-safe 설계에 따라 공학적안전설비

작동신호가 발생되도록 설계되어 있다. 또한 최종열제거원 상실시에도 발전소 변수가 공학적안전설비 작동을 위한 상태에 도달하면 원자로건물격리작동신호, 원자로건물살수작동신호, 주증기격리신호, 안전주입작동신호, 재순환작동신호 및 보조급수작동신호와 같은 공학적안전설비작동신호가 발생된다.

또한 ELAP 상황에서 동 설비에 이동형발전차를 사용한 전원공급이 가능하다면 공학적안전설비의 기능을 수행할 수 있다.

2.2.3 계통별 기능유지를 위한 보조설비

2.2.2절에서 도출된 안전기능 유지를 위한 필수대처기능 설비가 기능을 발휘하려면 표 4-3에 기술된 바와 같은 구동 및 제어 전원, 계측기, 수원 등과 같은 보조설비가 정상적으로 작동되어야 한다. 표에는 보조설비 중 필수안전변수를 감시하는데 필요한 전원등급과 밸브와 같은 기기의 경우 구동 전원, 제어 전원, 그리고 펌프의 경우에는 구동 전원, 제어 전원, 수원, 기기냉각수 및 관련 설비가 기술되어 있다. 안전계통 운전에 필요한 제어기와 계측기들은 안전계통과 동일한 등급으로 설계되어 있다. 2.2.2절에서 기술된 각 계통들의 보조설비에 대한 상세 검토결과는 다음과 같다.

2.2.3.1 원자로트립계통

원자로트립계통이 작동되기 위해서는 제어 및 신호 전원이 필요하며 원자로트립 차단기의 경우 1E급 전원을 공급받으며 별도의 공기원 및 수원 등과 같은 보조설비들은 요구되지 않는다.

지진원자로자동정지시스템(ASTS)에는 자체 무정전 전원 공급장치(Uninterruptible Power Supply, UPS) 2대가 구비되어 있으며 1대는 정상 구동하고 다른 1대는 대기상태를 유지하며 비1E급 전원이 상실되더라도 30분 동안 작동된다.

2.2.3.2 노심냉각 및 재고량 유지

가. 정지냉각계통

정지냉각계통의 주요설비는 저압안전주입펌프(), 정지냉각열교환기() 및 관련 밸브들이며, 상세 내역은 표 4-3에 열거하였다.

정지냉각계통의 주요설비 작동을 위해 구동/제어전원과 기기냉각수계통 및 기기

냉각해수계통의 운전이 필요하다.

즉, 정지냉각 기능을 유지하는데 필요한 펌프, 모터구동밸브의 작동/정지 및 조절 기능을 유지하기 위한 구동/제어 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에서 공급받으며, 또한 ELAP 상황에서 이동형발전차에 의해 전원을 공급받아야 한다.

나. 안전주입계통

안전주입계통의 주요설비는 고압안전주입펌프(), 저압안전주입펌프(), 정지냉각열교환기() 및 관련 밸브들이며, 상세 내역은 표 4-3에 열거하였다.

안전주입계통의 주요설비 작동을 위해 구동/제어전원과 기기냉각수계통 및 기기 냉각해수계통의 운전이 필요하다.

즉, 안전주입 기능을 유지하는데 필요한 펌프, 모터구동밸브의 작동/정지 및 조절 기능을 유지하기 위한 구동/제어 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에서 공급받으며, 또한 ELAP 상황에서 이동형발전차에 의해 전원을 공급받아야 한다.

1차 계통에는 4대의 안전주입탱크가 설치되어 있으며, 이들 탱크는 봉산수로 채워져 있고, 질소가스가 의 상태로 가압되어 있다. 냉각재상실과 같은 사고 조건에서 원자로냉각재계통이 감압되면 저장된 봉산수를 원자로냉각재계통으로 방출한다. 이들 탱크의 후단 밸브들은 정상 운전 중 항상 개방되어 있다. 따라서 안전주입탱크의 원자로냉각재계통의 봉산수 방출을 위한 보조설비는 필요하지 않다.

다. 보조급수계통

보조급수계통의 수원인 복수저장탱크, 탈염수저장탱크 및 원수저장탱크는 전원과 관련이 없으므로 전원상실이 발생해도 기능이 유지되며 기기냉각수계통이 사용되지 않으므로 최종열제거원 상실시에도 기능은 유지된다.

터빈구동 보조급수펌프의 구동원은 주증기배관의 증기이며, 터빈구동을 위한 전원을 필요로 하지 않는다. 터빈구동 보조급수펌프를 작동시키기 위해서는 제어전원 상실 시 고장 열림으로 설계된 보조급수펌프터빈 증기공급밸브() 및 증기차단밸브()가 개방되어야 한다. 이 밸브들의 제어 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의

해 공급받는다. 보조급수펌프터빈 증기공급배관 응축수의 추가 배수를 위한 응축수 배수밸브()는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에서 제어 전원을 공급받으며, 제어전원 상실 시 고장 열림으로 설계된다. 따라서 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 터빈구동보조급수펌프 관련 보조설비 기능은 유지된다.

전동기구동 보조급수펌프 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받는다. 따라서 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 전동기구동 보조급수펌프 관련 주요설비의 기능이 유지된다.

보조급수조절밸브()는 증기발생기의 수위를 유지하기 위해 자동 조절된다. 보조급수조절밸브는 전원 상실 시 고장 열림으로 설계되어 있으며 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 공급받는다. 보조급수격리밸브()의 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 공급받는다.

상기에서 설명한 주요기기를 포함한 주요기기의 기능유지를 위한 보조설비는 표 4-3에 정리되어 있다.

라. 화학 및 체적제어계통

노심냉각 및 재고량유지를 위한 기능을 수행하는 화학 및 체적제어계통의 주요설비는 4대의 충전펌프()와 4대의 모터구동밸브()이다. 이들 기기의 작동을 위한 보조설비는 표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 구동전원, 충전펌프 격실 냉각을 위한 필수냉방수계통이며, 충전펌프의 수원은 재장전수탱크이다.

재장전수탱크로부터 충전펌프로 유로를 확보하기 위하여 재장전수탱크 중력급수배관의 격리밸브()를 개방하기 위한 제어 및 구동전원이 필요하지만 전원이 상실된다하더라도 이들 밸브를 수동으로 개방하면 재장전수탱크와 충전펌프의 유로는 확보된다.

충전펌프의 작동 기능을 유지하기 위해서는 제어 및 구동전원이 필요하고 충전펌프를 지속적으로 작동하기 위해서는 격실 냉각이 필요하다. 구동/제어를 위한 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 또는 대체교류디젤발전기 의해 공급받으므로, 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 충전펌프의 제어기능은 유지된다. 또한 ELAP 상황에서는 이동형발전차로부터 전원을 공급받을 경우 동 기능의 유지는 가능하

다.

충전펌프 격실 냉각에 필수냉방수계통이 사용되지만 충전펌프 격실 문을 개방하고 충전펌프를 운전하면 충전펌프의 기능은 유지된다.

마. 기기냉각해수계통과 기기냉각수계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 기기냉각수계통의 보조설비는 기기냉각수펌프() 및 사고시 작동이 요구되는 모터구동밸브의 제어 및 구동전원과 기기냉각수계통으로 부터 열을 제거해 주는 기기냉각해수계통이다. 또한 기기냉각수계통은 폐회로(Closed Loop) 계통이므로 별도의 수원이 불필요하나, 계통내 온도변화에 따른 체적변동 또는 누설 등에 대비하여 필요시 완충탱크가 추가적인 냉각수를 공급하거나 수용할 수 있도록 설계되었다. 기기냉각수펌프의 기능을 유지하기 위한 제어 및 구동전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 공급받으므로, 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 기기냉각수펌프의 제어기능은 유지된다.

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 기기냉각해수계통의 보조설비는 기기냉각해수펌프()의 제어 및 구동전원과 최종열제거원인 바다이다. 기기냉각수해수펌프의 기능을 유지하기 위한 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 공급받는다. 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 기기냉각해수펌프의 제어기능은 유지된다.

바. 원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통(원자로냉각재계통 격리)

원자로냉각재계통의 격리기능을 수행하는 주요설비는 표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 안전감압밸브(), 유출수 격리밸브(), 유출배관 격납건물격리밸브() 및 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격납건물격리밸브(), 충전수 주입배관의 격납건물격리밸브()와 밀봉수 주입배관 격납건물격리밸브(), 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격리밸브()

이들 주요설비 구동을 위한 보조 설비는 다음과 같다.

- 안전감압밸브()의 제어 및 구동전원은 1E급 전원 또는 비상디젤발전기이며, ELAP 상황에서는 이동형발전차에 의해 전원을 공급받아야 한다.

- 화학 및 체적제어계통을 원자로냉각재계통으로부터 격리 수단으로 유출수 격리밸브(), 유출배관 격납건물격리밸브() 및 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격납건물격리밸브()를 사용한다. 이들 밸브들은 공기 및 전원상실 시 고장단힘으로 닫힌 상태를 유지하며, 사고 완화를 위해 밸브 개방이 요구되지 않으므로, 별도의 보조설비는 필요하지 않다.
- 충전수 주입배관의 격납건물격리밸브()와 밀봉수 주입배관 격납건물격리밸브()는 모터구동밸브로 정상운전 시 개방상태에 있으며, 사고 시 충전수 주입 및 원자로냉각재 밀봉수 공급을 위해 충전펌프가 운전 상태에 있을 경우 개방상태를 유지하는 것이 바람직하다. 그러나 이들 밸브를 필요시 닫기 위해서는 1E급 전원, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기 전원이 필요하며, ELAP 상황에서는 이동형발전차로부터 구동 전원을 공급받아야 한다. 만약 이 밸브들의 기능 상실유로 격리가 안 될 경우, 이들 배관의 격납건물 내부에 역지밸브()가 원자로냉각재의 역류를 차단한다.
- 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격리밸브()는 정상시 개방되어있고, 공기 및 전원상실 시 고장열림상태이며 운전원 수동 조작이 가능하나 격납건물 내부에 위치하므로 극한자연재해 시 접근이 어렵다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)의 주요설비는 표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 안전감압밸브()와 원자로냉각재 배기밸브()이다.

안전감압밸브들과 원자로냉각재 배기밸브들을 작동하기 위해서는 작동기능을 위한 전원이 필요하다. 제어 및 구동을 위한 전원은 1E급 전원 및 비상디젤발전기의 전원을 공급받으며, ELAP 상황에서는 이동형발전차에 의해 전원 공급이 필요하다.

아. 주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 주증기계통(증기발생기 감압)의 보조설비는 주증기 대기방출밸브 구동을 위한 솔레노이드 밸브 및 유압 펌프 모터의 제어 및 구동 전원이다. 솔레노이드밸브 제어 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 공급받고 유압 펌프 모터의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 공급받는다. 따라서, 주증기 대기방출밸브는 소외전원 상실, 소내정전 조건에

서 기능이 유지되며, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서는 현상에서의 수동 조작이 요구된다.

2.2.3.3 격납건물 건전성 유지

가. 격납건물 살수계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 격납건물 살수계통의 보조설비는 격납건물 살수펌프()의 수원인 재장전수탱크와 재순환집수조 그리고 격실 냉각 등을 위한 기기냉각수 및 동 계통의 기기들의 제어전원이다.

격납건물 살수펌프, 격납건물 살수노즐 차단밸브를 작동하기 위한 제어 및 구동전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차이다. 따라서 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계통의 제어기능은 유지된다. 격납건물살수펌프는 기기냉각수계통에서 냉각수를 공급하는 필수냉동기를 통해 격실냉각이 수행되어야 성능이 보장될 수 있으며, 격납건물살수열교환기는 기기냉각수계통에서 냉각수를 제공하므로 최종열 제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다.

나. 격납건물 격리계통

격납건물 격리기능을 수행하는 격리밸브의 보조설비들은 계기용 공기와 제어전원이다. 계기용 공기를 이용하는 격납건물 격리밸브의 경우 고장시 닫힘(Fail-Close)로 설계되어 있으며, 전동기 구동밸브의 경우 제어전원은 1E급 전원 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 전원공급이 가능하므로 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 격납건물 격리계통의 기능은 유지된다.

다. 격납건물 수소제어계통

동 계통은 전원 및 수원 등의 공급이 요구되지 않는 피동형 기기이므로 보조설비가 요구되지 않는다.

2.2.3.4 안전기능 유지를 위한 설비

가. 주제어실 공기조화계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 주제어실 공기조화계통(Control Room HVAC System)의 보조설비는 주제어실 공기조화기()의 냉방수코일에 사용

되는 안전성관련 필수냉방수계통과 기기냉각수계통의 제어 및 구동 전원이다.

동 계통의 공기조화기 송풍기 및 전기 덕트 가열기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 제어 및 구동 전원을 공급받으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건에서도 제어 및 구동 기능은 유지된다.

나. 필수냉방수계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 필수냉방수계통의 보조설비는 냉동기()에 사용되는 기기냉각수계통과 순수계통 그리고 필수냉동기, 필수냉방수펌프()와 순수이송펌프()의 제어 및 구동 전원이다.

필수냉방수펌프와 필수냉동기 제어 및 구동을 위한 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 공급받으며 순수이송펌프 제어 및 구동을 위한 전원은 비1E급 전원에 의해서만 공급받는다.

필수냉방수펌프와 필수냉동기의 구동 및 제어기능은 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 유지되나 필수냉방수계통의 재고량을 유지하는데 필요한 순수이송펌프()의 제어 및 구동 전원은 비1E급 전원에 의해 전원을 공급받아 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 필수냉방수계통의 누설시 필수냉방수계통의 기능은 상실하므로 필수냉방수계통의 안전기능은 상실된다.

필수냉동기()는 기기냉각수계통을 사용하여 필수냉동기 응축기의 폐열을 제거하므로 최종열제거원 상실시 필수냉방수계통은 기능은 상실하므로 필수냉방수계통의 안전기능은 상실된다.

다. 공학적안전설비 작동계통

공학적안전설비 작동계통을 위한 계측기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 제어전원을 공급받는다.

라. 필수안전기능 상태추적

필수안전기능 상태추적을 위한 계측기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 제어전원을 공급받는다.

2.2.4 도출된 설비들의 물리적 위치 및 안전/품질/전기/내진등급

2.2.2절 및 2.2.3절에서 도출된 안전기능 유지 및 확보를 위한 필수 및 보조설비들을 조사하여 표 4-3에 제시하였고, 본 표에는 도출된 설비들의 물리적인 위치와 안전, 품질, 전기, 내진(HCLPF 포함) 등급을 기술하였다. 이러한 안전기능 유지를 위한 설비의 설계특성은 사고시나리오에 따른 설비의 신뢰성과 가용성에 영향을 미친다.

안전성 관련 기기들이 배치되어 있는 건물들은 해일 및 강우로 인한 침수 영향을 받지 않도록 []까지 방수문이 설치될 예정이다. 또한 방수문 설치 이전에는 침수영향을 받지 않도록 추가적인 물리적 방호조치를 수행할 예정이다(2분야 보고서 안전 개선사항 참조). 따라서 필수대처기능 설비들은 해일 및 강우로 인한 침수 영향이 없다.

2.2.4.1 원자로트립계통

원자로트립계통은 안전등급으로 설계되어 있고 []로 내진설계 되어 있으며 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진의 극한재해 상황에서도 생존이 가능하다. 원자로트립계통의 기기는 [] 내에 있다. 지진원자로자동정지시스템(ASTS)는 비안전등급이며, 품질등급은 []로 내진설계되어 있다. 지진원자로자동정지시스템 측정 센서는 보조건물에 있으며 지진원자로자동정지시스템 캐비닛은 []에 있다.

동 계통의 기기는 비1E급 전원에 의해 전원을 공급받으므로 전원이 상실되면 제어봉제어차단기에 공급되는 전원이 차단되어 제어봉이 노심으로 자유낙하되어 원자로가 정지되거나, 원자로정지 설정치에 따라 원자로가 정지되거나, 또는 [] 이상의 지진이 발생하는 경우에는 지진원자로자동정지시스템(ASTS) 지진신호에 의해 원자로가 정지된다.

2.2.4.2 노심냉각 및 재고량 유지

가. 정지냉각계통

정지냉각계통은 안전관련 계통으로, 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 정지냉각계통의 기기들은 [] 내에 있다.

정지냉각계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 제어 및 구동 전원을 공급받을 수 있으므로, 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 정지냉각계통의 기능은 유지된다. 정지냉각열교환기([])는 기기냉각수계통을 사

용하므로 최종열제거원 상실시 정지냉각시스템의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해[]시 정지냉각시스템의 기능은 상실된다.

나. 안전주입계통

안전주입계통은 안전관련 계통이고 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 안전주입계통의 기기들은 [] 내에 있다.

안전주입계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받으므로, 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 안전주입계통의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 안전주입계통의 기능은 상실된다.

다만 격납건물 내에 있는 안전주입탱크의 내진성능 값(HCLPF)은 [] 이고, 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 원자로냉각재계통으로의 봉산수 주입기능은 [] 까지의 지진동하에서 유지된다. 그러나 []를 초과하는 지진동에서 안전주입탱크의 기능은 상실된다.

안전주입계통의 펌프 격실 냉각은 필수냉방수계통을 통해 수행된다.

다. 보조급수계통

보조급수계통은 안전관련 계통이고 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진에서 생존이 가능하다.

탈염수저장탱크 및 원수저장탱크는 비내진 설계되어 있으므로 지진 발생시 보조급수계통은 []에도 견디는 복수저장탱크의 급수를 우선 사용할 수 있다.

보조급수계통의 기기들은 [] 내에 있다. 보조급수계통은 전동기구동 보조급수펌프 관련 기기들과 터빈구동 보조급수펌프 관련 기기들로 구분할 수 있다.

전동기구동 보조급수펌프 관련 기기들과 터빈구동 보조급수펌프 관련 기기들 모두에 사용되는 공통 기기는 증기발생기 격리에 사용되는 밸브가 있다. 동 공통 기기는 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조

전에서 기능은 유지된다(2.2.2절과 2.2.3절 참조). 그리고 동 공통 기기는 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 공통 기기의 기능은 유지되며 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시에도 공통 기기의 기능은 유지된다.

전동기구동 보조급수펌프는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 전원을 공급받으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서는 기능이 유지되나, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서는 기능이 상실된다. 또한 전동기구동 보조급수펌프는 최종열제거원 상실시 공기조화기의 기능 상실로 인해 기능이 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시 전동기구동 보조급수펌프의 기능은 상실된다.

터빈구동 보조급수펌프 관련 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받으므로, 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 터빈구동 보조급수펌프의 기능은 유지된다. 터빈구동 보조급수펌프 관련 기기들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 터빈구동 보조급수펌프의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()

라. 화학 및 체적제어계통

4대의 충전펌프는 안전관련 기기이고 품질등급은 로 설계되었다. 충전펌프의 수원을 제공하는 체적제어탱크와 재장전수탱크 연결 배관에 설치된 관련 밸브들()도 로 설계되었으며, 충전펌프와 관련 밸브들을 포함한 동 계통은 로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 내에 설치되어 있다.

소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계통의 기능은 유지되며, 충전펌프 격실 냉각에 필수냉방수계통을 사용하지만 최종열제거원상실시 충전펌프 격실 문을 개방하고 충전펌프 운전할 수 있다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해())시 동 계통의 충전펌프 기능은 유지된다.

마. 기기냉각해수계통과 기기냉각수계통

기기냉각수계통은 안전관련 계통으로 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 기기냉각수계통의 기기들은 [] 내에 있다. 기기냉각수계통의 기기는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받는다.

소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 기기냉각수계통의 기능은 유지되지만, 기기냉각수열교환기가 기기냉각해수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 기기냉각수계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 기기냉각수계통의 기능은 상실된다.

바. 원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통(원자로냉각재계통 격리)

원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통의 격리 설비는 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건하에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 [] 내에 있다.

원자로냉각재계통으로부터 화학 및 체적제어계통의 격리는 유출수 격리밸브([]), 유출배관 격납건물격리밸브([]) 및 원자로냉각재펌프 밀봉수 회수배관 격납건물격리밸브([])를 통해 이루어진다. 이들 밸브는 모두 [] 밸브로 설계되었으며, 이들 중 원자로냉각재계통과 직접 연결된 유출배관의 격리밸브([])로 설계되었고, 그 외의 밸브들은 []로 설계되었다. 이들 밸브 모두는 []로 내진설계 되어 있고 최대 [] 지진동에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 [] 내에 설치되어 있다.

소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계통의 기능은 유지된다. 원자로냉각재계통 격리에 사용되는 밸브들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 동 계통의 기능은 유지된다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)은 안전관련 계통으로 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건하에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 [] 내에 있다. 원자로냉각재계통 감압에 사용되는 밸브들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받는다.

소외전원상실 및 소내정전 조건에서 원자로냉각재계통 감압 기능은 유지된다. 원자로냉각재계통 감압에 사용되는 밸브들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 유지된다. 따라서 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시 동 계통의 기능은 유지된다.

자연순환 냉각시 원자로냉각재계통의 감압 및 비응축성기체 배기기능을 수행하는 원자로냉각재 배기밸브()들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동계통의 기능은 유지된다. 따라서 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시 동 계통의 기능은 유지된다.

아. 주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)

주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)은 안전관련 계통으로 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 증기발생기 감압 및 과압방지를 위한 동 계통의 기기들은 [] 내에 있다.

증기발생기 감압에 사용되는 주증기 대기방출밸브는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기 또는 이동형발전차에 의해 구동 전원을 공급받으므로 소외전원상실, 소내정전 조건에서는 기능이 유지되나, 대체교류발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서는 현장에서 수동 조작이 요구된다.

증기발생기 감압에 사용되는 주증기 대기방출밸브와 과압방지에 사용되는 주증기 안전밸브는 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시 동 계통의 기능은 유지된다.

2.2.4.3 격납건물 건전성 유지

가. 격납건물 살수계통

격납건물 살수계통은 안전관련 계통으로 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 격납건물 살수계통의 기기들은 [] 내에 있다. 격납건물 살수계통의 기기는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받을 수 있으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 격납건물 살수계통의 기능은 유지되지만, 격납건물살수 열교환기([])가 기기냉각수계통으로 부터 냉각수를 공급받기 때문에 최종열제거원 상실시 격납건물살수계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 격납건물 살수계통의 기능은 상실된다.

나. 격납건물 격리계통

격납건물 격리계통은 안전관련 계통으로 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진 조건에서 생존이 가능하다. 격납건물 격리계통의 기기들은 [] 내에 있다.

다. 격납건물 수소제어계통

격납건물 수소제어계통의 피동축매형수소재결합기(PAR)는 [] 내에 있으며 []로 내진 설계되어 있고 침수에 견딜 수 있다.

2.2.4.4 안전기능 유지를 위한 설비

가. 주제어실 공기조화계통

주제어실 공기조화계통은 안전성관련 계통이고 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 최소 [] 이상 지진에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 [] 내에 설치되어 있다. 동 계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받을 수 있으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계통의 기능은 유지된다. 주제어실 공기조화기([])는 필수냉방수계통 및 기기냉각수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 동 계통의 기능은 상실된다.

나. 필수냉방수계통

필수냉방수계통은 안전성관련 계통이고 품질등급 []로 내진설계 되어 있고 최소 [] 이상 지진에서 생존이 가능하다. 동 계통의 기기들은 [] 내에 있다. 동 계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받는다. 그러나 필수냉방수계통에 적절한 재고량을 유지하는 순수계통은 비안전관련 계통이며, 비내진 및 비1E급 전원으로 설계되어 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 필수냉방수계통의 누설시 필수냉방수계통의 기능은 상실하므로 필수냉방수계통의 기능은 상실된다.

필수냉동기([])는 기기냉각수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 동 계통의 기능은 상실된다.

다. 공학적안전설비 작동계통

공학적안전설비 작동계통은 안전관련 계통이고 품질등급은 []로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [] 이상 지진에서 생존이 가능하다. 동 계통의 계측설비들은 [] 내에 있다. 동 계통의 계측설비들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 전원을 공급받는다.

소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계통의 기능은 유지된다. 동 계통의 계측설비들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([])시 동 계통의 기능은 유지된다.

라. 필수대처기능 상태확인

필수대처기능 상태확인과 관련 있는 계측설비는 []로 내진설계 되어 있고 최소 [] 이상 지진에서 생존이 가능하며, 격납건물 방사선준위 계측설비(품질등급: [])를 제외한 필수대처기능 상태확인 감시 계측설비들의 품질등급은 Q이다. 동 계측설비들은 [] 내에 있다.

동 계측설비들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 구동(미임계 유지 계측기만 해당) 또는 제어 전원을 공급받는다. 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 계측설비들의 기능은 유지된다. 동 계측설비들은 기기냉각수계통을 사

용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 설비의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해()시 동 설비의 기능은 유지된다.

2.2.5 소외전원상실 시 대처를 위해 설계된 소내 예비전력공급원 및 설계 시 고려된 사항

한울3,4호기의 소내 비상전력계통은 2대의 비상디젤발전기와 4개의 직류 축전지로 구성되어 있으며, 이와 같은 소내 비상전력은 원자로정지 및 잔열제거, 계측 및 제어 전력 공급, 원자로 변수감시, 보호설비 운전 개시 및 필요시 격납건물 격리가 가능하도록 소내전력을 공급한다.

또한 한울3,4,5,6호기 공용으로 사용되는 1대의 대체교류디젤발전기 및 관련 설비가 본관 건물로부터 분리되어 있는 독립적인 대체교류디젤발전기 건물(한울2발부지)에 설치되어 있어 소내정전시 대체교류전력을 공급한다.

후쿠시마 원전사고 후속 대책으로 소외전원상실, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기의 기동실패 시 최대한 빠른 시간 내에 전원공급이 가능하도록 3.2 MW 발전차를 1대 구비하였고 향후 1 MW 발전차를 확보할 예정이다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 상실사고를 확인한 후 최대 2시간 이내에 1 MW 이동형발전차를 비상디젤발전기 건물 입구로 이동하여 수동으로 4.16 kV 안전모선()을 가압하여 필수적인 부하에 전원을 공급하여 운전원이 사고 상황에 따른 완화조치단계에 따라 필요한 운전부하를 선택하여 원자로를 안전정지 상태로 유지한다.

표 4-5는 발전소 내 가용한 발전기의 사용 가능시간을 산정한 것이다. 1대의 비상디젤발전기가 자체연료를 모두 사용할 경우 약 , 대체교류디젤발전기는 자체연료로 약 , 이동형발전차는 자체연료로 약 동안 연속운전이 가능하다

2.2.5.1 축전지

가. 한울3,4호기 축전지 용량

용량을 가진 4개의 1E급 축전지들은 소외전원상실 시 소외전원이 복구되거나 비상디젤발전기가 이용 가능할 때까지 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있다. 또한 이들 축전지는 비상디젤발전기의 자동작동에 필요한 전력을 공급한다.

안전급 축전지의 주요 부하는 벨브(CVCS, SI 용 등), IP 인버터, Reactor Tip 차단기반, 디젤발전기 제어 패널, Ann. Isolation Cabinet 및 4.16 kV 고압차단기반 제어전원 등이다. 축전지 용량은 [redacted] 동안 주요부하에 전원을 공급하나 IP 인버터의 경우 [redacted] 이후에는 부하를 사용하지 않는 것으로 축전지 용량산정에 반영되었다.

이러한 축전지들은 최소 [redacted] 동안 축전지 단자전압이 105 V 이하로 떨어지지 않는 상태에서 각각 발전소 정지와 모든 교류전원 상실에 따른 예상정지부하에 전력을 공급하며, [redacted]에 설치되어 있다.

4개의 축전지 충전기들은 각각 위와 같이 부분적으로 방전(108 V~125 V)된 축전지들이 정상부하에 전력을 공급하는 동안 [redacted] 이내에 재충전(129 V~135 V)되도록 한다.

나. 한울3,4호기 8시간 축전지 용량 확보 방안

비상디젤발전기가 상실되는 소내정전 시, 대체교류디젤발전기가 대체교류전력을 공급할수 있을 경우 125 V 직류계통(제어센터, 축전지 및 충전기)은 건전성은 확보 될 수 있으나 외부 소외전원 공급이 물리적으로 불가할 경우, 기존 설계기준사고를 기준으로한 축전지 부하 선정시 ELAP을 고려하여야 한다.

기존 [redacted] 축전지를 [redacted] 운전성을 확보하기 위해서는 발전소 건전성을 유지하기 위한 최소 부하를 제외한 모든 부하를 차단시켜야 한다. 부하차단은 ELAP 발생후 [redacted] 이내에 완료되는 것을 기준으로 한다. 주요 축전지 부하는 원자로 냉각 및 열제거, RCS 재고량 제어, 원자력 압력 제어 및 열제거, 노심 계측 및 사용후연료저장조 냉각계통으로 확인되었다. 부하차단 후 축전지 운전부하 목록은 아래표와 같다.

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 A)

기기번호	부하명	부하용량(A)
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 B)

기기번호	부하명	부하용량(A)
[redacted]	[redacted]	[redacted]

2대의 비상디젤발전기는 각각 서로 분리되어 있고 내진설계되어 있는 비상디젤발전기 건물에 설치되어 있으며 비상디젤발전기 건물에는 방수문이 설치될 예정이며, 이 방은 난방이 되어 추운 날씨에도 비상디젤발전기의 작동이 보장되며, 비상디젤발전기 상태는 주제어실에서 감시할 수 있다.

비상디젤발전기 건물에는 각각 최소 []의 연료를 보유하고 있는 일일연료탱크가 2대 설치되어 있다. 1대의 일일연료탱크는 1대의 비상디젤발전기가 100% 지속 정격부하에서 최소한 [] 동안 운전할 수 있는 용량을 제공한다. 1개의 연료저장탱크에는 최소 []의 연료가 보관되어 있고 이 연료는 연료유 이송 펌프를 통하여 각각의 일일연료탱크에 공급된다. 표 4-5에서 보는 바와 같이 각각의 비상디젤발전기 디젤연료유 저장량으로 1대의 비상디젤발전기가 최소한 [] 동안 전 부하 운전이 가능하다.

비상디젤발전기의 안전관련 부하목록(소모부하 포함)은 최종안전성분석보고서(FSAR) 표 []에 제시되어 있고 순차부하는 FSAR 표 []에 기술되어 있다.

2.2.5.3 대체교류디젤발전기

비상디젤발전기가 상실되는 소내정전 시 대체교류전력을 공급하기 위한 계통은 대체교류디젤발전기, 4.16 kV 스위치기어, 480 V 로드센터, 480 V 전동기제어반, 125V 직류계통(제어센터, 축전지 및 충전기) 및 120 V 무정전전원공급장치로 구성되어 있으며 []에 설치되어 있다.

비1E급, 연속 정격용량 []인 1대의 대체교류디젤발전기는 한울3,4,5,6호기 공용으로 각 호기의 주제어실에서 수동으로 기동하여 소내정전 시작 [] 이내에 4.16 kV 안전모선([])에 전력을 공급하도록 설계되어 있으며, 표 4-5에서 보는 바와 같이 대체교류디젤발전기 연료저장탱크의 연료들을 사용하면 약 9일 동안 연속운전이 가능하다.

대체교류디젤발전기의 소내정전사고 부하목록(소모부하 포함)은 FSAR 표 []에 제시되어 있고 순차부하는 대체교류디젤발전기 운전절차서에 기술되어 있다.

2.2.5.4 이동형발전차

한울3,4호기에는 한울부지에서 공용으로 사용하는 이동형발전차 1대가 구비되어 있다. 이동형발전차는 해일 및 강우에 의한 침수에 대비하여 내진설계된 []에 있다. 이동형발전차의 이동경로는 인간공학 유효성 평가보고서에 나타나 있으며, 이동형발전차는 []

이동한다.

이동형발전차는 트럭에 탑재되어 이동 가능한 발전설비로서, 차량 타이어와 차량 자체의 충격흡수장치(Shock Absorber)를 통해 외부 충격 흡수 및 차량 주행시 곡선 운전과 급가속 및 급정거 등의 이동조건에서도 충분히 안전성이 유지되도록 제작되어 있다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 모든 교류전원 상실사고가 발생하면 이동형발전차 운전절차서에 따라 이동형발전차를 이동형발전기 전원 연결용 단자함 근처로 이동하고 이동형발전기(가스터빈발전기)와 임시케이블을 이용하여 4.16kV 안전모선()을 가압하여 사고 진단 후 2시간 이내에 공학적안전설비에 전력을 공급한다.

이동형발전기의 연속운전 정격용량은 1 MW, 3.2 MW이며 이동형발전차에는 이동형발전기를 1시간 연속운전이 가능하도록 자체연료탱크가 설치되어 있으며, 추가적인 연속운전을 위하여 이동용 연료이송펌프를 통하여 내진설계된 비상디젤발전기 연료를 공급받는다.

표 4-5에서 보는 바와 같이 이동형발전차는 지진이 발생할 때나 지진이 발생하지 않을 때에 비상디젤발전기용 연료를 추가로 사용하여 4.16 kV 안전모선에 전원을 공급할 경우 사고발생 시점부터 약 동안 운전이 가능하다.

표 4-6은 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 노심 자연순환냉각 후 잔열제거 운전을 위해 필요한 부하 용량을 산출한 것으로 이동형발전차는 한 울3,4호기에 충분한 비상전원을 제공한다. 운전원은 발전소 사고 상황 및 그에 대한 사고완화 조치단계에 따라 이동형발전기 용량을 초과하지 않는 범위에서 운전 부하를 선택하여 운전할 수 있다.

현재 3.2 MW 이동형발전차의 경우 제작사 권고사항(월간 무부하 시험만 권고)외에 유사설비의 운전경험 등을 반영하여 월간 예방점검, 월간 무부하시험(수행 중) 및 18개월 주기 부하(Load Bank)시험/예방정비(예정)을 통해 제작사 권고사항보다 강화된 성능 감시를 수행하고 있으며 이동형발전차 점검 및 정비를 위해 기존 정비협력사와 정비 계약을 완료하는 등 기존 발전설비 관리 프로세스에 반영 중에 있다. 그리고 이동형발전차의 안정적 성능을 확보하기 위하여 비상시 이용 가능하도록 ‘이동형 발전차 신뢰도 프로그램 관리 지침’ 및 ‘이동형 발전차 신뢰도 프로그램 종합관리’ 절차서에 따라 목표신뢰도(최소 0.95) 설정 및 유지를 위한 관리방안을 마련하였다. 또한, 각 호기마다 추가로 구비될 예정인 1 MW 이동용발전차도 동일한 기준으로 관리할 예정이다. 이동형 발전차의 사고대응전략 이행에

관한 실증시험은 ■년 이내 주기로 수행할 예정이다.

2.2.6 최종열제거원 상실시 대처를 위해 설계된 사항

최종열제거원상실은 기기냉각해수계통의 기능 상실을 의미한다. 한울3,4호기의 기기냉각해수계통은 두 계열이 독립적으로 설계되어 있어 설계기준사고에서는 기기냉각해수계통 양 계열의 완전 상실을 가정하지 않으므로 한울3,4호기에서 최종열제거원상실에 대비한 대체열제거원은 고려되지 않았다.

기기냉각해수계통과 기기냉각수계통의 기기들 그리고 기기냉각해수 취수구조물과 기기냉각수열교환기건물은 최대 ■■(기기) 및 ■■ 이상(구조물)의 지진에서도 견디고 방수문이 설치될 예정이므로 외부 침수의 영향을 받지 않는다.

표 4-7에는 한울3,4호기에서 열제거원으로 가용한 1차계통 및 2차계통의 수원을 제시하였다.

2.2.6.1 외부주입유로 및 이동형펌프

한울3,4호기에는 전원상실과 관계없이 그림 4-3에서 보는 바와 같이 외부주입 유로와 이동형펌프를 이용하여 원자로냉각재계통과 증기발생기에 열제거원을 공급할 수 있는 설비들의 설계가 진행 중이지만 신설 예정인 이동형고유량펌프를 이용하여 최종열제거원상실에 대처할 수 있으므로, 본 장에서는 이 설비들을 이용한 사고완화는 평가하지 않았다.

2.3 전력상실, 최종열제거원상실시 발전소 대응능력

본 절에서는 후쿠시마 원전에서 발생한 전력상실 및 최종열제거원상실 사고가 한울3,4호기에서 발생할 경우 현재의 설계 및 운영조건에서 발전소의 대응능력을 평가한다.

전원과 열제거원의 단계적 상실을 가정하여 수립한 6개의 시나리오에 대해 각 상황에 적합한 운전원 조치가 수반된 경우의 발전소 거동과 한계시간을 평가한다.

분석에는 최적해석 열수력 전산코드인 RELAP5/MOD3[4-4]를 사용하고, 100% 출력의 정상 운전조건에서 최적 평가를 수행한다. 분석에 사용한 주요 초기조건 및 가정 사항은 아래와 같다.

- 초기조건은 100% 출력 정상 운전 조건이다.
- 붕괴열은 ANSI/ANS-5.1-1979를 고려하였다.

- 원자로냉각재펌프 밀봉누설은 기기냉각수계통 및 밀봉수 공급이 상실될 때 발생하며 누설유량은 사고 초기부터 전출력 운전조건에서 펌프당 []으로 가정한다.
- 주증기 대기방출밸브 개방을 통한 원자로냉각재계통 냉각 시 냉각률은 []으로 가정한다.

2.2절에서 도출된 필수대처설비의 작동 관점에서 각 시나리오별 가용한 전력원과 열제거원을 표 4-8과 표 4-9에 요약하였다.

2.3.1 전력상실 조건

2.3.1.1 소외전원상실 조건(시나리오 1)

본 시나리오를 평가할 때 사용한 가정사항들은 표 4-10과 같다.

가. 필수대처기능 상태

(1) 원자로 미임계 유지

소외전원상실 시 제어봉제어차단기에 공급되는 전원이 차단되어 제어봉이 노심으로 자유낙하되어 원자로가 정지되거나, 또는 원자로냉각재펌프가 정지하여 관성서행함에 따라 노심을 통과하는 원자로냉각재 유량이 감소하여 발생하는 원자로냉각재저유량 신호에 의해 원자로는 정지된다. 원자로트립계통의 모든 지시 및 논리회로의 전원은 안전등급 축전지로부터 공급되므로, 소외전원이 상실되더라도 원자로정지가 보장된다.

본 시나리오에서는 충전펌프를 통한 원자로냉각재계통으로의 봉산수 주입이 가능하므로, 정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도와 더불어 봉산수 주입에 따른 추가적인 부 반응도를 통해, 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 궤환효과로 인해 발생하는 정 반응도를 충분히 보상할 수 있다. 따라서 전체 과도상태에 걸쳐 충분한 수준의 정지여유도를 확보할 수 있다.

(2) 노심냉각 및 재고량 유지

소외전원상실 시 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전력을 공급하기 위해 비상디젤발전기가 [] 이내에 자동으로 기동되어 부하가 순차적으로 투입된다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 주증기안전밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측

으로 전달되며, 소외전원상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환냉각 현상에 의해 이루어진다.

소외전원상실로 인해 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동 설정치에 도달하면 모터구동보조급수펌프 및 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환냉각이 가능하다.

소외전원상실로 인해 충전펌프가 정지되면 원자로냉각재펌프 밀봉의 건전성이 상실될 수 있으나, 비상디젤발전기가 자동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 충전펌프가 가용해지므로 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 없고 노심의 재고량이 적절히 유지된다.

주증기 대기방출밸브를 개방하여 최대 [REDACTED]의 냉각률 이내로 원자로냉각재계의 냉각 및 감압이 가능하므로, 주증기 대기방출밸브를 통한 대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계의 온도 및 압력이 감소하고 주증기안전밸브는 닫히게 된다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재 배기밸브의 개방으로 원자로냉각재계의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계를 정지냉각계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

비상디젤발전기가 자동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 및 정지냉각계통이 가용해지므로, 정지냉각계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압이 완료된 후, 정지냉각계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 또는 충전펌프 상실이 발생하지 않으므로, 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지 않는다.

(3) 격납건물 건전성 유지

본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실에 의한 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지 않는다. 따라서 이로 인한 격납건물의 온도 및 압력 상승은 발생하지 않는다.

나. 대응능력 및 한계사항 평가

대응능력 평가는 사고를 완화하기 위한 수행조치, 관련 절차서 및 인적오류 발생가능성을 사건발생, 사고확인 및 조치, 발전소 안전상태 유지의 순서로 기술한다.

한계사항 평가는 수행조치와 관련된 상황인지, 대처방안의 결정 및 이행, 여유시

간을 판단하기 위한 것으로, 사고진행 단계별 주요 대응조치 미이행 시 한계조건 도달시간을 평가한다.

각 시나리오별 대응능력 및 한계사항 평가는 표의 형태로 제공된다. 아래는 표에 기술된 각 항목에 대한 설명이다.

- 수행조치 : 사건발생, 원자로정지, 사고확인 또는 사고를 완화하기 위한 운전원 조치를 의미함.
- 절차서 : 수행조치와 관련된 절차서 번호와 절차서 명을 기술함.
- 방해요소, 취약분야, 대응능력 확보 : 운전원 조치를 수행하는데 방해가 되거나 어려움이 발생할 것으로 예상되는 부분과 이를 해결하기 위한 방안을 기술함.
- 상황인지 시점 : 상황인지 시점은 자동 조치의 확인 또는 운전원 조치의 필요성을 인지하는 시점.
- 결정 : 수동 조치 이행을 결정하는 시점.
- 이행 : 운전원 조치를 실제로 이행하는 시점을 의미하며, 충분히 보수적으로 고려하여 결정함.
- 여유시간 : 운전원 조치가 필요한 수행조치 항목에 대해 운전원 조치를 이행하였을 경우 한계시간 대비 여유시간을 의미함.
- 한계시간 : 운전원 조치가 필요한 수행조치 항목에 대해 해당 운전원 조치를 수행하지 않았을 경우, 벼랑끝 효과(Cliff-Edge Effect)가 발생하는 시간을 의미하며 설계자료 및 열수력 전산코드 분석결과 등을 활용하여 발생 원인별로 평가됨.

모든 시나리오에서 사고확인은 사고발생 후 15분에 완료되는 것으로 가정하였으며, 운전원 조치는 사고확인 후에 상황인지, 결정 및 이행을 거쳐 수행된다.

상황인지 시점, 대처방안의 결정 및 이행 시간은 시나리오의 성격과 수행조치의 성격 등을 고려하여 충분히 보수적으로 평가되었으며, 모두 사고발생 후 누적 시간으로 기술한다.

(1) 한계사항 평가

본 시나리오에서는 사고발생 후 ■■■ 이내에 비상디젤발전기가 자동으로 기동되어 부하가 순차적으로 투입되므로 전원에 대한 한계사항은 존재하지 않지만, 비상디젤발전기 연료의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-5에 기술된 바와 같이 비상디젤발전기 연료는 사고발생 후 약 9일까지 가용한 것으로 예상되며, 3일 내에 소외로부터 연료를 추가 공급할 수 있을 것으로 예상되므로 결과적으로 전원에 의한 한계시간은 없어진다.

노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환냉각 운전을 지속하기 위해서는 증기발생기에 지속적으로 급수를 공급해야하는데, 여기서 2차측 급수원의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 사용 가능한 2차측 급수원은 복수저장탱크 및 원수저장탱크이며, 해당 급수원의 재고량으로 약 [REDACTED] 동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

그러나 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 통해 동 한계시간 내에 정지냉각계통 진입조건에 도달할 수 있을 것으로 예상되고, 정지냉각계통 운전 이후에는 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

소외전원상실 사고가 발생하면 제어봉 구동장치(CEDM)는 비여자되고, 원자로냉각재펌프가 정지하며, 원자로는 정지된 후 원자로 출력은 감소된다. 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서 [REDACTED]을 수행하고, 다음 비상운전절차서 [REDACTED]를 통해 소외전원상실 사고를 진단한 후, 비상운전절차서 [REDACTED]으로 진입한다.

비상운전절차서에 따라 먼저 필수대처기능이 유지되는지 확인한다. 즉, 필수대처기능 상태점검을 수행함으로써 진단이 정확하여 절차서와 발전소가 진단된 사건에 대해 적절히 작용하는지, 또는 사고 재진단이 수행되어야 하는지를 판단한다. 그 다음은 상실된 교류모선에 연결된 차단기를 모두 개방하고 원자로냉각재계통 재고량, 압력 그리고 열제거 제어를 수행한다. 이후, 비안전등급 13.8 kV 및 4.16 kV 모선에 교류전원을 복구하는 조치를 수행한다. 만약 전원이 복구되면, 비안전등급 13.8 kV 및 4.16 kV 모선을 재가압한다. 만약 원자로냉각재펌프의 재기동 조건이 만족되면 강제순환을 복구하기 위해 원자로냉각재펌프를 재기동한다. 만약 전원이 복구되지 않았거나 원자로냉각재펌프의 재기동 조건이 만족되지 않으면 자연순환냉각을 계속 유지한다. 절차의 마지막 부분은 정지냉각계통 진입조건까지 냉각 및 감압을 수행하는 것이며, 정지냉각계통을 운전하여 안전정지 상태를 유지한다.

위의 평가를 종합하여 표 4-11에 시나리오 1에 대한 발전소의 대응능력과 한계사항에 대한 평가결과를 제시하였다.

본 시나리오의 경우 전원에 대한 한계사항이 발생되지 않으며, 2차측 급수원 또는 비상디젤발전기 연료의 재고량에 대한 한계사항이 발생하나, 앞서 기술된 바와 같이 정지냉각계통 운전 시에 모두 해소된다. 그리고 정지냉각계통의 운전 착수 또한 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건(시나리오 3)에 비해 훨씬 덜

심각하므로 본 시나리오에 대한 열수력 분석 결과는 별도로 제시하지 않는다.

2.3.1.2 소내정전 조건(시나리오 2)

본 시나리오를 평가할 때 사용한 가정사항들은 표 4-12와 같다.

가. 필수대처기능 상태

(1) 원자로 미임계 유지

본 시나리오에서는 시나리오 1에서 기술한 바와 동일하게 원자로가 안전하게 정지되고, 미임계가 유지된다.

(2) 노심냉각 및 재고량 유지

소내정전 시 대체교류디젤발전기를 ■■■■■ 이내에 수동으로 기동하여 교류전원이 복구되면, 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전력을 공급할 수 있다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 주증기안전밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 소내정전으로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환냉각 현상에 의해 이루어진다.

소내정전으로 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 안전등급 축전지가 ■■■■■ 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있으므로, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동 설정치에 도달하면 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환냉각이 가능하다. 대체교류디젤발전기 기동 후에는 모터구동 보조급수펌프도 사용 가능하다.

소내정전으로 충전펌프가 정지되면 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생할 수 있으나, 대체교류디젤발전기가 수동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 충전펌프가 가용해지므로 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 없고 노심의 재고량이 적절히 유지된다.

주증기 대기방출밸브를 개방하여 최대 ■■■■■의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 주증기 대기방출밸브를 통한 대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통의 온도 및 압력이 감소하고 주증기안전밸브는 닫히게 된다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재 배기밸브

의 개방으로 원자로냉각재계의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계를 정지냉각계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

대체교류디젤발전기가 수동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 및 정지냉각계통이 가용해지므로, 정지냉각계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압이 완료된 후, 정지냉각계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 교류전원이 상실되어 원자로냉각재펌프 밀봉유량이 상실된 기간 동안 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생할 수 있으나, 노심 재고량 유지에 미치는 영향은 시나리오 6에 비해 미미할 것으로 예상되므로 본 시나리오에서는 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생되지 않는 것으로 가정하였다.

(3) 격납건물 건전성 유지

본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실에 의한 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지 않는다. 따라서 이로 인한 격납건물의 온도 및 압력 상승은 발생하지 않는다.

나. 대응능력 및 한계사항 평가

(1) 한계사항 평가

본 시나리오에서의 한계시간은 시나리오 1과 유사하다.

본 시나리오에서는 사고발생 후 ■■■■ 이내에 운전원이 수동으로 대체교류디젤발전기를 기동하여 부하가 순차적으로 투입되므로 전원에 대한 한계사항은 존재하지 않지만, 대체교류디젤발전기 연료의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-5에 기술된 바와 같이 대체교류디젤발전기 연료는 사고발생 후 약 ■■■■까지 가용한 것으로 예상되며, ■■■■ 내에 소외로부터 연료를 추가 공급할 수 있을 것으로 예상되므로 결과적으로 전원에 의한 한계시간은 없어진다.

노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환냉각 운전을 지속하기 위해서는 증기발생기에 지속적으로 급수를 공급해야하는데, 여기서 2차측 급수원의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 사용 가능한 2차측 급수원은 복수저장탱크 및 원수저장탱크이며, 해당 급수원의 재고량으로 약 ■■■■ 동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

그러나 원자로냉각재계의 냉각 및 감압을 통해 동 한계시간 내에 정지냉각계통 진입조건에 도달할 수 있을 것으로 예상되고, 정지냉각계통 운전 이후에는 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

교류전원 완전상실 사고가 발생하면 제어봉 구동장치 및 원자로냉각재펌프의 전원 공급이 상실되어 원자로 및 터빈/발전기가 정지된다. 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서 []을 수행하고, 다음 비상운전절차서 []을 통해 교류전원 완전상실 사고를 진단한 후, 비상운전절차서 []로 진입한다. []

비상운전절차서에 따라 교류전원 완전상실 절차 수행 중 먼저 필수대처기능 상태 점검을 수행하여 발전소가 복구중임을 확인한다. 그 다음은 원자로냉각재계의 열제거를 수행하고 상실된 교류모선에 연결된 차단기를 모두 개방한다. 이후, 최소한 1계열의 안전등급 4.16 kV 교류 모선을 복구하기 위한 조치를 수행한다. 교류전원 완전상실 사고시 복구 전략은 교류 전원이 복구되었을 경우 발전소를 안정화시키기 위해 필요한 전원 및 안전등급 기기의 복구 절차를 수행하고, 교류 전원이 복구되지 않았을 경우 자연순환냉각 확인 및 지속적인 전원 복구 조치에 관한 절차를 수행한다. 즉, 전원이 복구될 때까지 적절한 자연순환냉각을 이용한 노심 냉각 유지 및 필수대처기능을 만족시키기 위한 조치를 수행한다. 교류 전원이 복구된 후 발전소 냉각수 계통과 배기 계통을 복구하고 비안전등급 13.8 kV 및 4.16 kV 교류 모선을 재가압한다. 만약 원자로냉각재펌프의 재기동 조건이 만족되면, 강제순환을 복구하기 위해 원자로냉각재펌프를 재기동한다. 만약 원자로냉각재계의 재기동 조건이 불만족되면, 자연순환냉각을 유지한다. 절차의 마지막 부분은 정지냉각계통 진입조건까지 냉각 및 감압을 수행하는 것이며, 정지냉각계통을 운전하여 안전정지 상태를 유지한다.

위의 평가를 종합하여 표 4-13에 시나리오 2에 대한 발전소의 대응능력과 한계사항에 대한 평가결과를 제시하였다.

본 시나리오의 경우 전원에 대한 한계사항이 발생되지 않으며, 2차측 급수원 또는 비상디젤발전기 연료의 재고량에 대한 한계사항이 발생하나, 앞서 기술된 바와 같이 정지냉각계통 운전 시에 모두 해소된다. 그리고 정지냉각계통의 운전 착수 또한 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건(시나리오 3)에 비해 훨씬 덜 심각하므로 본 시나리오에 대한 열수력 분석 결과는 별도로 제시하지 않는다.

2.3.1.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건(시나리오 3)

본 시나리오를 평가할 때 사용한 가정사항들은 표 4-14와 같다.

가. 필수대처기능 상태

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전은 소외전원상실과 비상디젤발전기상실 그리고 대체 설비인 대체교류디젤발전기의 동시 상실을 의미한다.

(1) 원자로 미임계 유지

시나리오 1에서 기술한 바와 같이 원자로는 안전하게 정지된다.

본 시나리오에서는 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크의 자동주입 및 1 MW 이동형발전차 연결 후 충전펌프의 운전을 통해 원자로냉각재계통으로의 봉산수 주입이 가능하므로, 정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도와 더불어 봉산수 주입에 따른 추가적인 부 반응도를 통해, 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 제환효과로 인해 발생하는 정 반응도를 충분히 보상할 수 있다. 따라서 전체 과도상태에 걸쳐 충분한 수준의 정지여유도를 확보할 수 있다.

(2) 노심냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 시 모든 교류전원이 상실되나, 안전등급 축전지가 [REDACTED] 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있다. 2.2.5.1절에 기술된 바와 같이 안전등급 축전지는 비필수 부하차단 시 약 1 [REDACTED] 동안 사용이 가능하다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 주증기안전밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 모든 교류전원 상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환냉각 현상에 의해 이루어진다.

모든 교류전원 상실로 인해 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동설정치에 도달하면 터빈구동 보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환냉각이 가능하다.

모든 교류전원 상실로 인해 기기냉각수계통의 기능이 상실되고 충전펌프가 작동하지 않으므로, 원자로냉각재펌프 밀봉의 건전성이 상실되어 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생될 것으로 예상된다.

하지만 주증기 대기방출밸브를 개방하여 최대 [REDACTED]의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 주증기 대기방출밸브를 통한

대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통 압력 및 온도가 감소하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설도 감소하게 된다.

주증기 대기방출밸브의 제어를 위해서는 교류전원이 요구되지만, 필요 시 수동조작을 위한 장치인 핸드펌프를 이용해 현장에서 수동개방 할 수 있다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)의 한계사항 평가에 기술된 바와 같이 원자로냉각재펌프 1대 당 [REDACTED] 누설을 고려하여 발전소 냉각을 수행할 경우 약 [REDACTED] 동안 안전주입 탱크의 자동주입에 의해 노심냉각 및 재고량 유지가 가능한 것으로 평가되었다. 따라서 [REDACTED] 이전에 1 MW 이동형발전차를 연결하고, 충전펌프를 기동하면 원자로냉각재계통의 재고량은 유지된다.

1 MW 이동형발전차의 연결 후 교류전원이 복구되지만, 1 MW 이동형발전차만으로는 기기냉각수계통 운전을 위한 충분한 전원을 공급할 수 없다. 따라서 정지냉각계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 정지냉각계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서 계속 유지해야한다. 만약 정지냉각계통 운전 진입조건에 도달하기 이전에, 터빈구동보조급수펌프의 운전을 위한 최소 증기발생기 압력에 도달하면 원자로냉각재계통의 냉각을 중단하고 발전소를 고온대기상태에서 계속 유지해야한다.

하지만 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 충분한 전원이 확보되면, 정지냉각계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 모든 교류전원 상실로 인해 기기냉각수계통의 기능 및 충전펌프가 상실되어 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지만, 노심냉각 및 재고량이 충분히 유지되어 노심건전성이 확보된다.

(3) 격납건물 건전성 유지

본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실에 의한 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생할 수 있다. 그러나 이로 인한 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고 대비 미미하므로 격납건물 건전성은 확보될 수 있다.

나. 대응능력 및 한계사항 평가

(1) 한계사항 평가

본 시나리오의 한계사항은 시나리오 6과 동일하다.

(2) 대응능력 평가

대체교류디젤발전기상실을 포함하는 모든 교류전원 완전상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서 [] 을 수행하고, 다음 비상운전절차서 [] 을 통해 교류전원 완전상실 사고를 진단한 후, 비상운전절차서 [] 로 진입한다. []

[] 비상운전절차서에 따라 교류전원 완전상실 절차 수행 중 먼저 필수대처기능 상태점검을 수행하여 발전소가 복구중임을 확인한 후, 최소한 1계열의 안전등급 4.16 kV 교류 모선을 복구하기 위한 조치를 수행한다. 만약 최소한 1계열의 안전등급 4.16 kV 교류 모선 복구가 불가능할 경우 모든 교류전원 완전상실을 선언한 후, 1 MW 이동형발전차 이동을 지시한다. 다음 다중방어 운영지침서(MOG)에 따라 모든 교류전원 완전상실시 직류전원 수명연장을 위해 필수 직류전원을 제외한 모든 직류모선의 부하를 탈락시킨 후, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행한다. 1 MW 이동형발전차가 연결된 이후, 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 노심냉각 및 원자로냉각재계통 냉각재 재고량을 유지하기 위해 충전펌프를 운전하고, 기기 건전성을 확보하기 위해 충전펌프실의 출입문을 개방한다. 또한, 안전주입탱크가 주입된 후 원자로냉각재계통내 질소가스가 유입되는 것을 막기 위하여 480 V 소형 이동형 발전기를 연결하여 안전주입탱크 격리밸브 구동전원을 확보한 후 안전주입탱크 격리를 수행한다. 다음 정지냉각계통 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차 이동을 지시, 배치한 후 3.2 MW 이동형발전차를 연결한다. 정지냉각계통 진입을 위한 조건이 만족되면 최종적으로 정지냉각계통을 운전을 안전정지 상태를 유지한다.

위의 평가를 종합하여 표 4-15에 시나리오 3에 대한 발전소의 대응능력과 한계사항에 대한 평가결과를 요약하여 제시하였다.

시나리오 3에 대한 사고 초기의 필수대처기능별 대처설비 가용 여부와 사고 전개에 따른 필수대처기능 확보 방안은 표 4-16에 요약하여 제시되었다.

본 시나리오에 대한 발전소의 열수력 거동은 시나리오 6과 유사하므로 분석 결과는 별도로 제시하지 않는다.

2.3.2 최종열제거원상실 조건

2.3.2.1 최종열제거원상실 조건(시나리오 4)

본 시나리오를 평가할 때 사용한 가정사항들은 표 4-17과 같다.

가. 필수대처기능 상태

최종열제거원상실은 기기냉각해수계통의 완전 상실을 의미한다. 기기냉각해수계통의 완전 상실 시 기기냉각수계통은 냉각수의 온도가 한계치에 도달하기 전까지 일정기간 동안 대처설비의 열부하를 감당할 수 있다. 하지만 본 시나리오에서는 보수적으로 2차측 해수계통과 순환수계통의 상실을 동반하는 것으로 가정하여, 기기냉각수계통의 기능 및 기기냉각수에 의해 냉각되는 필수, 비필수 열부하 설비 및 계통의 기능이 즉시 상실되는 것으로 평가하였다.

(1) 원자로 미임계 유지

최종열제거원이 상실될 경우 기기냉각수계통의 기능이 상실되어 복수기 작동불능에 따라 터빈이 정지되고, 이에 따라 원자로는 운전원에 의해 수동정지되거나 원자로냉각재계통의 압력 상승으로 가압기고압력 신호에 의해 정지된다. 또는 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 원자로냉각재펌프가 정지하여 관성서행함에 따라 노심을 통과하는 원자로냉각재 유량이 감소하여 발생하는 원자로냉각재저유량 신호에 의해 정지된다.

본 시나리오에서는 충전펌프를 통한 원자로냉각재계통으로의 봉산수 주입이 가능하므로, 정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도와 더불어 봉산수 주입에 따른 추가적인 부 반응도를 통해, 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 궤환효과로 인해 발생하는 정 반응도를 충분히 보상할 수 있다. 따라서 전체 과도상태에 걸쳐 충분한 수준의 정지여유도를 확보할 수 있다.

(2) 노심냉각 및 재고량 유지

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 주증기안전밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실로 원자로냉각재펌프의 밀봉 냉각이 불가능하므로 운전원은 원자로냉각재펌프를 수동으로 정지하여 밀봉과 손에 의한 밀봉누설을 방지해야 한다. 충전펌프가 가용하므로 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 없고 노심의 재고량이 적절히 유지된다. 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환냉각 현상에 의해 이루어진다.

최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 주급수펌프가 정지되어 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동설정치에 도달하면 모터구동보조급수펌프 및 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환냉각이 가능하다.

주증기 대기방출밸브를 개방하여 최대 [REDACTED]의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 주증기 대기방출밸브를 통한 대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통의 온도 및 압력이 감

소하고 주증기안전밸브는 닫히게 된다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재 배기밸브의 개방으로 원자로냉각재계통의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계통을 정지냉각계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 정지냉각계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 정지냉각계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서 계속 유지해야 한다.

하지만 이동형고유량펌프를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 최종열제거원이 확보되면, 정지냉각계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실이 발생되지만, 충전펌프가 가용하여 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지 않는다.


(3) 격납건물 건전성 유지

본 시나리오에서는 최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실이 발생되지만, 충전펌프가 가용하여 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지 않는다. 따라서 이로 인한 격납건물의 온도 및 압력 상승은 발생하지 않는다.

나. 대응능력 및 한계사항 평가

(1) 한계사항 평가

본 시나리오에서는 최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실에 의해 정지냉각계통의 운전이 불가능하여 발전소를 고온정지상태에서 유지해야 한다. 이 기간 동안 노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환냉각 운전을 지속하기 위해서는 증기발생기에 지속적으로 급수를 공급해야 하는데, 여기서 2차측 급수원의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 사용 가능한 2차측 급수원은 복수저장탱크, 탈염수저장탱크 및 원수저장탱크이며, 해당 급수원의 재고량으로 약  동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

따라서 동 한계시간 이전에 이동형고유량펌프를 연결하여 최종열제거원이 복구되면, 정지냉각계통 운전이 가능하여 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

최종열제거원상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서

을 수행하고, 다음 비상운전절차서)를 통해 최종열제거원상실에 따른 사고를 진단한 후, 비상운전절차서 으로 진입한다. 절차에 따라 먼저 필수대처기능 상태를 확인하여 발전소가 복구중임을 확인한다. 자연순환냉각을 계속 유지하면서 정지냉각계통 진입조건까지 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행하며, 최소한 1대 이상의 1차 기기냉각해수펌프가 운전중인지 확인하여 모든 1차 기기냉각해수펌프가 상실되었을 경우 운전중인 충전펌프 격실문을 개방하고 이동형고유량펌프 이동을 지시한다. 이후 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 이동형고유량펌프를 운전하고, 최종적으로 정지냉각계통 진입조건 도달시 정지냉각계통을 운전하여 안전정지 상태를 유지한다.

위의 평가를 종합하여 표 4-18에 시나리오 4에 대한 발전소의 대응능력과 한계사항에 대한 평가결과를 요약하여 제시하였다.

시나리오 4에 대한 사고 초기의 필수대처기능별 대처설비 가용 여부와 사고 전개에 따른 필수대처기능 확보 방안은 표 4-19에 요약하여 제시되었다.

그림 4-4 ~ 4-14는 본 시나리오에서 정지냉각계통 운전 진입조건에 도달할 때까지 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압하고, 이후 사고발생 후 시간까지 고온정지 상태를 유지할 때의 발전소의 열수력 거동을 보여준다. 시간은 이동형고유량펌프가 연결되어 정지냉각계통 운전을 시작할 수 있는 충분한 시간이고, 정지냉각계통 운전 이후에는 더 이상의 한계사항이 없으므로 정지냉각계통 운전 이후에 대한 분석결과는 생략한다.

2.3.2.2 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건(시나리오 5)

한울3,4호기는 대체열제거원이 구비되어 있지 않기 때문에 본 시나리오에 대한 필수대처기능 유지를 위한 대응능력 평가결과는 시나리오 4와 동일하다.

2.3.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건 (시나리오 6)

본 시나리오를 평가할 때 사용한 가정사항들은 표 4-20과 같다.

가. 필수대처기능 상태

(1) 원자로 미임계 유지

시나리오 3에서 기술한 바와 같이 원자로는 안전하게 정지되고, 전체 과도상태에 걸쳐 충분한 수준의 정지여유도를 확보하여 미임계가 유지된다.

(2) 노심냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 시 모든 교류전원이 상실되나, 안전등급 축전지가 [REDACTED] 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있다. 2.2.5.1절에 기술된 바와 같이 안전등급 축전지는 비필수 부하차단 시 약 [REDACTED] 동안 사용이 가능하다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 주증기안전밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 모든 교류전원 상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환냉각 현상에 의해 이루어진다.

모든 교류전원 및 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동설정치에 도달하면 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환냉각이 가능하다.

모든 교류전원 및 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 충전펌프가 작동하지 않으므로, 원자로냉각재펌프 밀봉의 건전성이 상실되어 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생될 것으로 예상된다.

하지만 주증기 대기방출밸브를 개방하여 최대 [REDACTED]의 냉각을 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 주증기 대기방출밸브를 통한 대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통 압력 및 온도가 감소하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설도 감소하게 된다.

주증기 대기방출밸브의 제어를 위해서는 교류전원이 요구되지만, 필요 시 수동조작을 위한 장치인 핸드펌프를 이용해 현장에서 수동개방 할 수 있다.

한울3,4호기 원자로냉각재펌프의 밀봉누설량은 최근 웨스팅하우스형 원전에 대한 밀봉누설평가 결과를 참고하여 보수적으로 펌프 1대당 [REDACTED]으로 가정하였다[4-5].

원자로냉각재펌프 1대 당 [REDACTED]의 누설을 고려하여 발전소 냉각을 수행할 경우 약 [REDACTED] 동안 안전주입탱크에 의해 노심냉각 및 재고량 유지가 가능한 것으로 평가되었다. 따라서 [REDACTED] 이전에 1 MW 이동형발전차를 연결하고, 충전펌프를 기동하면 원자로냉각재계통의 재고량은 유지된다.

1 MW 이동형발전차의 연결 후 교류전원이 복구되지만, 1 MW 이동형발전차만으로는 기기냉각수계통 운전을 위한 충분한 전원 및 최종열제거원을 공급할 수 없다. 따라서 정지냉각계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 정지냉각계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서 계속 유지해야한다. 만약 정지냉각계통 운전 진입조건에 도달하기 이전에, 터빈구동보조급수펌프의 운전을 위한 최소 증기발생기 압력에 도달하면 원자로냉각재계통의 냉각을 중단하고 발전소를 고온대기상태에서 계속 유지해야한다.

하지만 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 충분한 전원을 확보하고, 이동형고유량펌프를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 최종열제거원이 확보되면, 정지냉각계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 모든 교류전원 및 최종열제거원의 상실로 인해 기기냉각수계통의 기능 및 충전펌프가 상실되어 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생하지만, 노심냉각 및 재고량이 충분히 유지되어 노심건전성이 확보된다.

(3) 격납건물 건전성 유지

본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실에 의한 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 발생할 수 있다. 그러나 이로 인한 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고 대비 미미하므로 격납건물 건전성은 확보될 수 있다.

나. 대응능력 및 한계사항 평가

(1) 한계사항 평가

본 시나리오에서는 축전지 가용시간, 원자로냉각재계통 재고량 유지와 관련한 안전주입탱크 및 재장전수탱크의 가용시간, 발전소를 고온대기상태 또는 고온정지상태에서 유지할 때의 2차측 급수원의 가용시간 등을 종합적으로 검토하여 다음과 같이 결정된다.

축전지 가용시간에 의한 한계시간

2.2.5.1절에 기술된 바와 같이 안전등급 축전지가 ■■■ 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있고, 비필수 부하차단 시 약 ■■■ 동안 사용이 가능하다. 만약 동 한계시간까지 전원복구를 위한 아무런 조치를 취하지 않은 경우, 축전지가 고갈(방전)되므로 이후 발전소는 제어불능 상태가 된다. 따라서 운전원은 동 한계시간 이전에 1 MW 이동형발전차를 연결하여 교류전원을 복구해야 한다.

안전주입탱크 및 재장전수탱크 재고량에 의한 한계시간

본 시나리오에서는 모든 교류전원 상실로 인해 기기냉각수계통 및 충전펌프가 작동하지 않아 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생되고, 이로 인해 원자로냉각재계통의 재고량은 감소하게 된다. 하지만 사고발생 후 []에 주증기 대기방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압하면, 원자로냉각재펌프의 밀봉누설량이 감소하고, 총 4대의 안전주입탱크로부터 원자로냉각재계통으로 자동으로 봉산수가 주입되어 원자로냉각재계통의 재고량은 충분히 유지된다.

그림 4-15 ~ 4-22은 터빈구동보조급수펌프가 정상적으로 작동하여 2차측에 급수가 공급되고, 사고발생 후 []에 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 시작하여 터빈구동보조급수펌프의 운전을 위한 최소 증기발생기 압력에서 원자로냉각재계통의 냉각을 중단하고 고온대기상태를 계속 유지하는 동안, 원자로냉각재계통의 재고량을 복구하기 위한 아무런 수동조치를 취하지 않은 경우의 발전소의 열수력 거동을 보여준다. 이 경우 안전주입탱크는 원자로냉각재계통의 감압으로 자동으로 주입되기 시작하여, 사고발생 후 약 []에 고갈되는 것으로 평가되며, 이후 원자로냉각재펌프의 밀봉누설에 의해 노심노출이 발생할 것으로 예상된다.

따라서 운전원은 동 한계시간 이전에 1 MW 이동형발전차를 연결하고 충전펌프를 기동하여 원자로냉각재계통의 재고량을 복구해야 하며, 안전주입탱크 고갈 시 원자로냉각재계통으로의 질소가스 유입을 방지하기 위해 안전주입탱크를 격리해야 한다. 그러나 1 MW 이동형발전차는 4.16 kV 안전모선([]) 두 계열 중 하나의 계열에만 교류전원을 공급함에 따라, 총 4대의 안전주입탱크 중 2대에 대해서만 안전주입탱크 격리밸브를 닫아 격리할 수 있다. 나머지 2대의 안전주입탱크의 격리를 위해서는 1 MW 이동형발전차가 연결되지 않은 계열에 별도의 480 V 교류전원을 공급하여 안전주입탱크 격리밸브를 제어할 수 있도록 해야 하는데, 이를 위해 480 V 소형 이동형 발전기를 신설할 예정이다. 480 V 소형 이동형 발전기가 480 V 전동기제어반에 연결되어 해당 계열에 교류전원을 공급하면, 나머지 2대의 안전주입탱크 격리밸브의 제어가 가능해지므로, 결과적으로 모든 안전주입탱크를 격리하여 원자로냉각재계통으로의 질소가스 유입을 방지할 수 있다.

충전펌프가 기동되면, 원자로냉각재계통은 1차측 봉산수원으로부터 봉산수를 공급받아 재고량을 유지할 수 있다. 표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 충전펌프의 수원으로 사용 가능한 1차측 봉산수원은 체적제어탱크 및 재장전수탱크이다. 평가에는 보수적으로 재장전수탱크의 재고량만을 고려하였으며, 재장전수탱크의 재고량으로 약 [] 동안 원자로냉각재계통에 봉산수를 공급할 수 있는 것으로 평가되었다.

정지냉각계통 운전 불가능 시 2차측 급수원 재고량에 의한 한계시간

본 시나리오에서는 모든 교류전원 및 최종열제거원상실로 인해 기기냉각수계통의 기능 상실이 발생되어 정지냉각계통의 운전이 불가능하여 발전소를 고온대기상태 또는 고온정지상태에서 계속 유지해야 한다. 이 기간 동안 노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환냉각 운전을 지속하기 위해서는 증기발생기에 지속적으로 급수를 공급해야하는데, 여기서 2차측 급수원의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 사용 가능한 2차측 급수원은 복수저장탱크 및 원수저장탱크이며, 해당 급수원의 재고량으로 약 [REDACTED] 동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

따라서 운전원은 동 한계시간 이전에 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 충분한 전원을 확보하고, 이동형고유량펌프를 연결하여 최종열제거원이 복구되어 기기냉각수계통이 가용해지면, 정지냉각계통 운전이 가능하여 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

대체교류디젤발전기상실을 포함하는 모든 교류전원 완전상실 및 최종열제거원상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서 [REDACTED] [REDACTED]을 수행하고, 다음 비상운전절차서 [REDACTED]을 통해 교류전원 완전상실 사고를 진단한 후, 비상운전절차서 [REDACTED] [REDACTED]로 진입한다. 비 [REDACTED] 비상운전절차서에 따라 교류전원 완전상실 절차 수행 중 먼저 필수대처기능 상태점검을 수행하여 발전소가 복구중임을 확인한 후, 최소한 1계열의 안전등급 4.16 kV 교류 모선을 복구하기 위한 조치를 수행한다. 만약 최소한 1계열의 안전등급 4.16 kV 교류 모선 복구가 불가능할 경우 모든 교류전원 완전상실을 선언한 후, 1 MW 이동형발전차 이동을 지시한다. 다음 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 모든 교류전원 완전상실시 직류전원 수명연장을 위해 필수 직류전원을 제외한 모든 직류모선의 부하를 탈락시킨 후, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행한다. 1 MW 이동형발전차가 연결된 이후, 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 노심냉각 및 원자로냉각재계통 냉각재 재고량을 유지하기 위해 충전펌프를 운전하고, 기기 건전성을 확보하기 위해 충전펌프실의 출입문을 개방한다. 또한, 안전주입탱크가 주입된 후 원자로냉각재계통 내 질소가스가 유입되는 것을 막기 위하여 480 V 소형 이동형 발전기를 연결하여 안전주입탱크 격리밸브 구동전원을 확보한 후 안전주입탱크 격리를 수행한다. 다음 정지냉각계통 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차와 이동형고유량펌프의 이동을 지시, 배치한 후 3.2 MW 이동형발전차와 이동형고유량펌프를 연결한다. 정지냉각계통 진입을 위한 조건이 만족되면 최종적으로 정지냉각계통을 운전을 안전정지 상태를 유지한다.

위의 평가를 종합하여 표 4-21에 시나리오 6에 대한 발전소의 대응능력과 한계사항에 대한 평가결과를 요약하여 제시하였다.

시나리오 6에 대한 사고 초기의 필수대처기능별 대처설비 가용 여부와 사고 전개에 따른 필수대처기능 확보 방안은 표 4-22에 요약하여 제시되었다.

그림 4-23 ~ 4-35은 본 시나리오에서 터빈구동보조급수펌프의 운전을 위한 최소 증기발생기 압력에 도달할 때까지 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압하고, 이후 사고발생 후 3일까지 고온대기상태를 유지할 때의 발전소의 열수력 거동을 보여준다. 3일은 3.2 MW 이동형발전차가 연결되어 전원이 복구되는데 충분한 시간이며, 전원이 복구된 이후에도 수원에 대한 한계사항이 존재하나, 이는 이동형고유량펌프를 한계시간 내에 연결하고 정지냉각계통을 운전하여 해소할 수 있다. 정지냉각계통 운전 이후에는 더 이상의 한계사항이 없으므로, 3.2 MW 이동형발전차의 연결 이후에 대한 분석결과는 생략한다.

2.4 극한 자연재해에 따른 안전기능 상실을 고려한 발전소 대응능력

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)에서 지진해일, 해일 및 강우, 강진과 같은 자연재해의 심각도 상승에 따른 아래와 같은 사고 시나리오들에 대하여 한울3,4호기의 대응능력을 평가하였다.

극한 자연재해는 스트레스테스트 수행지침(개정1)[4-1]에 따라 기본적으로 동일부지 내 모든 원전이 동시에 영향을 받는다고 가정하였다. 증기발생기로부터 대기방출밸브를 통한 붕괴열 제거 수원으로는 호기별로 가용한 복수저장탱크 및 탈염수 저장탱크와 부지공용의 원수저장탱크 사용을 가정하였고, 대처설비로서 호기별로 가용한 이동형고유량펌프 및 1 MW 이동형 발전차와 부지별로 가용한 3.2 MW 이동형 발전차를 가정하였다.

- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일, 해일 및 강우, 또는 10,000년 빈도를 초과하는 지진동을 발생시키는 지진이 발생할 때 필수대처기능 유지를 주요설비 및 보조설비, 연료, 전원, 수원, 열제거원의 가용여부는 표 4-3, 표 4-5, 표 4-7, 표 4-8, 표 4-9에 기술되어 있다.

2.4.1 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일(시나리오 7)

보고서 제2장(지진에 의한 구조물·계통·기기 안전성)에서 평가된 바와 같이 한울3,4호기 부지에서의 10,000년 빈도 지진동은 [] 이하이다. 또한 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능 최고 해수위는 부지정지고([]) 미만이며, 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 가능 최고 해수위는 부지정지고 보다 낮은 것으로 제3장에 기술되어 있다. 따라서 본 시나리오에서는 10,000년 빈도 지진해일을 고려하여 0.2g의 지진동을 가정하였고, 해일에 의한 외부침수는 없음을 가정하였다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일 발생 시, 표 4-3, 표 4-5, 표 4-7, 표 4-8, 표 4-9에 기술된 바와 같이 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비, 연료, 전원, 수원, 열제거원의 가용성이 시나리오 6과 동일하므로, 본 시나리오에서 필수대처기능 유지를 위한 대응능력 및 한계사항은 시나리오 6과 동일하다.

원수저장탱크는 비내진으로 설계되었으나, 후쿠시마 후속조치 사항으로서 내진성능 값이 [] 이상임이 확인되어 본 시나리오에서 가용한 것으로 가정하였다.

따라서 필수대처기능 확보 방안 및 발전소의 열수력 거동은 시나리오 6과 동일하므로 별도로 제시하지 않는다.

2.4.2 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우(시나리오 8)

보고서 제3장에 기술된 바와 같이 한울 3,4호기 부지에서 10,000년 빈도의 지진해일 또는 폭풍해일 발생 시 가능 최고 해수위는 부지정지고보다 낮은 것으로 평가된다.

따라서 한울3,4호기 부지에 해일 및 강우 발생 시 해일에 의한 외부침수는 없을 것으로 예상되나, 강우에 의해 필수대처설비를 수용하고 있는 보조건물 및 기기냉각해수건물 등에 외부침수가 발생될 수 있다.

이를 방지하기 위해 한울3,4호기 보조건물 및 기기냉각해수건물에 방수문을 설치하여 극한자연 재해 시 외부침수가 발생하지 않도록 할 예정이다. 본 시나리오에서는 방수문이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우를 구분하여, 각각의 경우에서 발전소의 대응능력을 평가한다.

2.4.2.1 격납건물을 제외한 모든 구조물의 1층 이하에 침수가 발생한 경우

격납건물을 제외한 모든 구조물의 부지정지고 이하에 위치한 필수대처설비들의 외부침수를 가정할 경우, 표 4-3에 기술된 바와 같이 저압안전주입펌프, 고압안전주입펌프, 터빈구동보조급수펌프, 충전펌프, 기기냉각수펌프, 기기냉각해수펌프, 격납건물살수펌프 및 축전지 등과 같은 주요 필수대처설비들의 기능이 상실된다.

특히 축전지가 상실되면 운전원은 발전소 상황을 파악하지 못하게 되고 발전소는 제어불능 상태가 되므로, 필수대처기능을 유지하기 위한 어떠한 조치도 취하지 못한 채 주증기안전밸브와 같은 피동형 기기만 작동하게 된다.

이러한 이유로 한울3,4호기에서는 외부침수에 대한 대응능력을 확보하기 위하여 후쿠시마 후속조치로 보조건물, 기기냉각해수건물 등 안전관련 구조물에 방수문을 설치할 예정이다.

2.4.2.2 외부침수가 발생하지 않는 경우

필수대처설비를 수용하고 있는 보조건물, 기기냉각해수건물 등 안전관련 구조물에 방수문이 설치될 경우, 해일 및 강우로 인한 필수대처설비들의 외부침수는 발생되지 않는다. 즉, 표 4-3, 표 4-5, 표 4-7, 표 4-8, 표 4-9에 기술된 바와 같이 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비, 연료, 전원, 수원, 열제거원의 가용성이 시나리오 6과 동일하므로, 본 시나리오에서 필수대처기능 유지를 위한 대응능력 및 한계사항은 시나리오 6과 동일하다.

따라서 필수대처기능 확보 방안 및 발전소의 열수력 거동은 시나리오 6과 동일하므로 별도로 제시하지 않는다.

2.4.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 10,000년 빈도를 초과하는 0.3g 지진 발생 시, 표 4-3, 표 4-5, 표 4-7, 표 4-8, 표 4-9에 기술된 바와 같이 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비, 연료, 전원, 수원, 열제거원의 가용성이 시나리오 6과 동일하므로, 본 시나리오에서 필수대처기능 유지를 위한 대응능력 및 한계사항은 시나리오 6과 동일하다.

원수저장탱크는 비내진으로 설계되었으나, 후쿠시마 후속조치 사항으로서 내진성능 값이 0.3g 이상임이 확인되어 본 시나리오에서 가용한 것으로 가정하였다.

이동형발전차를 포함한 이동형 설비들의 경우, 내진설계된 이동형 설비 통합보관고에 보관될 예정이므로, 본 시나리오에서 모두 가용한 것으로 가정하였다.

따라서 필수대처기능 확보 방안 및 발전소의 열수력 거동은 시나리오 6과 동일하므로 별도로 제시하지 않는다.

2.5 한울3,4호기 차이점

한울 3, 4호기에 대한 발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능은 동일한 설계개념을 적용하였으므로 원자로 정지 및 미임계유지, 노심 냉각(열제거)능력 확보 및 격납건물 건전성 유지에 필요한 설비 및 전략은 동일하다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

안전기능 유지 및 확보와 관련하여 한울3,4호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행 중인 안전 개선사항은 다음과 같다.

가. 한울3,4호기 비상대체설비 운영지침서 개발

모든 교류전원 상실 그리고/또는 최종열제거원 상실 조건 등을 대처하기 위한 연계지침서는 개발 완료 하였다.

나. 침수 발생시 전력, 냉각계통 관련

○ 이동형발전차 및 축전지 등 확보

소외전원이 상실되고 비상디젤발전기(EDG) 및 대체교류디젤발전기(AAC DG)를 이용할 수 없을 경우 노심냉각 필수부하에 전원을 공급하기 위한 이동형발전차를 구비하였고, 이동형발전차 이용에 필요한 전원 연결용 접속함을 설치 완료하였다.

○ 대체비상디젤발전기 설계기준 개선

후쿠시마 사고 이후 대체비상디젤발전기의 연료 용량은 최소 1일 확보할 것으로 권고된 사항이나 한울3,4호기의 경우 대체비상디젤발전기의 연료공급용량은 약 9일 사용 가능 용량으로 충분하므로 별도의 설계기준 개선은 불필요하다.

○ 예비변압기 앵커볼트 체결

지진이나 해일 발생 시 예비변압기의 손상을 방지하기 위해 한울3,4호기 대상 7대의 예비변압기에 대한 앵커볼트를 체결 완료하였다.

○ 스위치야드 설비 관리 주체 개선

지진 또는 해일에 의한 소외전원상실 시 신속한 복구를 위해 스위치야드 설비 주체를 한전과 협의 및 조치 완료하였다.

○ 사용후연료저장조 냉각기능 상실시 대책 확보

사용후연료저장조의 냉각기능 완전상실시 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조를 충수할 수 있는 비상냉각수 공급유로와 외부 주입을 위한 대체 수원 확보를 위하여 정수장에서 발전소로 공급하는 용수배관에 이동형펌프로 급수가 가능하도록 분기관 연결부위를 설치 완료하였다.

○ 최종 열제거설비 침수방지 및 복구대책 마련

해일시 침수에 대비하여 기기냉각해수계통 펌프의 전동기와 전력함 등 전기설비에 대한 방수 조치 차원에서 방수문을 설치할 예정이며, 기능상실시 전동기 복구 절차 수립도 완료 하였다.

○ 옥외 설치탱크 방호벽 설치

원전부지 설계기준 해수위를 조사, 연구한 결과 현 상태 유지로도 만족되는 것으로 평가되었다.

○ 소방계획서 개선 및 협력체계 강화

지진화재에 대비하여 효율적인 화재예방과 신속한 대응을 위해 국민안전처 표준매뉴얼을 적용하여 소방계획서를 전면 개정 완료하였다. 또한, 한울본부와 울진소방서는 상호 협약을 통해 재난·화재·응급의료지원에 대한 신속대응 협력체계를 강화하였다.

○ 화재방호 설비 및 자체소방대 대응능력 개선

자체소방대 대응능력을 개선하기 위하여 소방전문업체에 자체소방대 위탁용역이 []부터 진행중이며 현재 소방대원 []명, 화학소방차 []대를 운영중이다.

○ 원전 성능위주 소방 설계 도입

원전 성능위주의 소방 설계 도입은 법령개정사항으로 정부(소방방재청) 주관사항이며, 원전 소방관련 이중규제 개선사안으로 정부 관련부처 협의 및 공조를 통해

조치 완료하였다.

○ 사용후연료저장조 계측기 안전등급화

주제어실에서 사용후연료저장조의 주요 변수(수위, 온도, 방사선 준위)를 감시할 수 있도록, 사용후연료저장조 수위전송기, 온도계측기, 방사선감시기를 안전등급 계측기로 교체하였다.

○ 사용후연료저장조 비상전원 확보 관련 기술지침서 개정

사용후연료저장조에 조사된 연료저장 시 운전모드에 관계없이 한 트레인의 비상전원을 확보하도록 기술지침서를 개정 완료하였다.

다. 장기 가동원전 대책 및 추가 대책 관련

○ 정기검사 등 안전검사 대폭 강화

기존 정기검사 항목에 한울3,4호기 계속운전 관련 경년열화관리 및 안전성 증진 항목을 추가하여 이행 중으로 조치 완료되었다.

○ 주요 기기 및 배관의 가동중검사 강화

원자로용기 노심대 용접부 검사 주기를 기존 10년에서 5년으로 단축하고, 안전1등급 배관의 가동중검사 범위를 기존 ■■■에서 ■■■이상 확대하여 적용 중으로 조치 완료되었다.

○ 경년열화 관리계획 통합관리방안 수립·이행

계속운전 요건에 따라 작성된 한울3,4호기 수명평가보고서 중 경년열화관리계획(AMP)의 체계적이고 종합적인 관리를 위해 통합관리 지침 개발, 전담조직 설치, 관리 절차서 개발 및 통합관리 전산시스템 개발이 완료되었다.

○ 주요 기기 성능변수 관리강화

장기 가동원전의 주요 기기 성능변수에 대한 관리 강화를 위해 안전관련 펌프 및 밸브의 성능변수에 대한 경향분석을 수행하고, 가동중시험결과 Data Base를 구축하여 가동 중에 있다.

○ 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진

발전정지 유발기기의 신뢰도 증진을 위해 과거 고장사례 및 고장 근본원인 분석 결과를 예방정비 프로그램에 반영하는 조치를 완료하였고, 협력-용역업체의 인적 오류 예방 및 정비용역 품질을 확보할 수 있도록 종사자 교육훈련용 정비 아차사례집 발간 및 보급을 완료되었다.

3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

가. 월성1호기 스트레스테스트

안전기능상실과 관련된 월성1호기 스트레스테스트 “안전 개선사항”의 반영 여부를 확인한 결과 표 4-24에서 보듯이 “내진축전기 설치(최소 8시간 용량)”외 2건 중 한울3,4호기에 해당하는 사안은 조치완료 하였다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

안전기능상실과 관련된 고리1호기 스트레스테스트 “안전 개선사항”의 반영 여부를 확인한 결과 표 4-25에서 보듯이 “축전기 전원공급시간 상향”외 4건은 한울3,4호기 평가에 따라 만족한 것으로 확인되었으며 일부 사항은 향후 조치예정인 것으로 확인 하였다.

3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 최종열제거원 복구를 위한 이동형고유량펌프 확보

최종열제거원상실에 대처할 수 있는 이동형고유량펌프를 확보할 예정이다.

나. 사고대응 절차서 및 지침서 보완

모든 교류전원 완전상실과 최종열제거원의 상실을 고려하여 비상운전절차서를 표 4-23과 같이 보완할 예정이다.

다. 480 V 소형 이동형 발전기 확보

총 4대의 안전주입탱크의 격리를 위해서는, 각각의 안전주입탱크 격리밸브를 모두 주제어실에서 제어할 수 있어야한다. 그러나 모든 교류전원 상실 조건에서 1 MW 이동형발전차를 연결해도 두 안전모선 계열 중 하나에만 교류전원을 공급할 수 있어, 나머지 하나의 계열에는 별도의 교류전원 공급설비가 필요하다. 따라서 480 V 소형 이동형 발전기를 신설하여, 필요시 1 MW 이동형발전차에 연결되지 않은 안전모선 계열에 교류전원을 공급하여 모든 안전주입탱크 격리밸브를 동작할 수

있도록 조치할 예정이다.

라. 원자로냉각재펌프 밀봉회수배관 냉각재 누설을 방지 설계개선

모든 교류전원 상실시 원자로냉각재펌프 밀봉회수배관 후단에 설치된 방출밸브 격리밸브는 고장 열림(Fail Open)으로 지속적인 냉각재 누설을 초래한다. 따라서, 원자로냉각재 누설을 최소화하기 위한 개선이 필요하다.

제4절 결론

본 장에서는 한울3,4호기 스트레스테스트(Stress Test) 평가분야 중 전력계통 등 필수대처기능 상실에 대한 대응능력을 평가하기 위하여 필수대처기능 유지 및 복구를 위한 설비를 조사하고, 소외전원상실·소내정전·최종열제거원상실 조건에서의 6개 시나리오와 여기에 지진해일·해일 및 강우·10,000년 빈도를 초과하는 지진의 극한 자연재해를 동반한 3개 시나리오를 추가로 고려하여, 총 9개 시나리오에 대하여 한울3,4호기의 대응능력을 평가하였다.

소외전원상실·소내정전·최종열제거원상실 조건에서의 6개 시나리오 중 가장 제한적인 시나리오는 모든 교류전원 및 최종열제거원이 동시에 상실되는 경우(시나리오 6)이다. 해당 조건에서의 필수대처기능 유지를 위해 필요한 주요설비 및 이를 지원하는 보조설비들을 도출하여 발전소의 대응능력을 평가하였고, 소내 고정형 설비, 이동형 설비 및 소외자원을 활용하여 발전소를 안전하게 정지할 수 있음을 확인하였다. 그리고 해당 설비들의 극한 자연재해 조건에서의 가용성을 확인한 결과 모두 가용한 것으로 평가되어, 한울3,4호기는 극한 자연재해를 동반한 모든 교류전원 및 최종열제거원의 동시 상실 조건에서도 발전소의 자체 대응능력과 운전원의 적절한 대응조치를 통해 안전하게 정지될 수 있음을 확인하였다.

운전원 대응조치 사항을 절차화하기 위해 설계기준사고, 설계기준초과사고 및 중대사고와의 유기적인 연계지침서를 개발하고 비상운전절차서들을 보완할 예정이며, 이를 바탕으로 훈련을 수행하면 인적오류와 의사결정오류 발생 가능성을 배제할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 각 시나리오에 대한 필수대처설비, 절차서 및 운영사항에 대한 적절성을 확인하기 위해, 세부 수행 시나리오를 개발하여 인간공학 유효성 평가를 수행하였다.

제5절 참고문헌

4-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침[개정1], 2016

4-2. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 최종안전성분석보고서.



4-3. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 비상운전절차서.



4-4. NUREG/CR-5535/Rev.P5, “RELAP5/MOD3.3 Code Manual,” June 2016.

4-5. WCAP-17601-P, Rev.0, “Reactor Coolant System Response to the Extended Loss of AC Power Event for Westinghouse, Combustion Engineering and Babcock & Wilcox NSSS Designs,” Section 4.4.1, August 2012.

4-6. 다중방어운영지침서

제6절 표, 그림

표 4-1 전력계통 모선별 부하목록

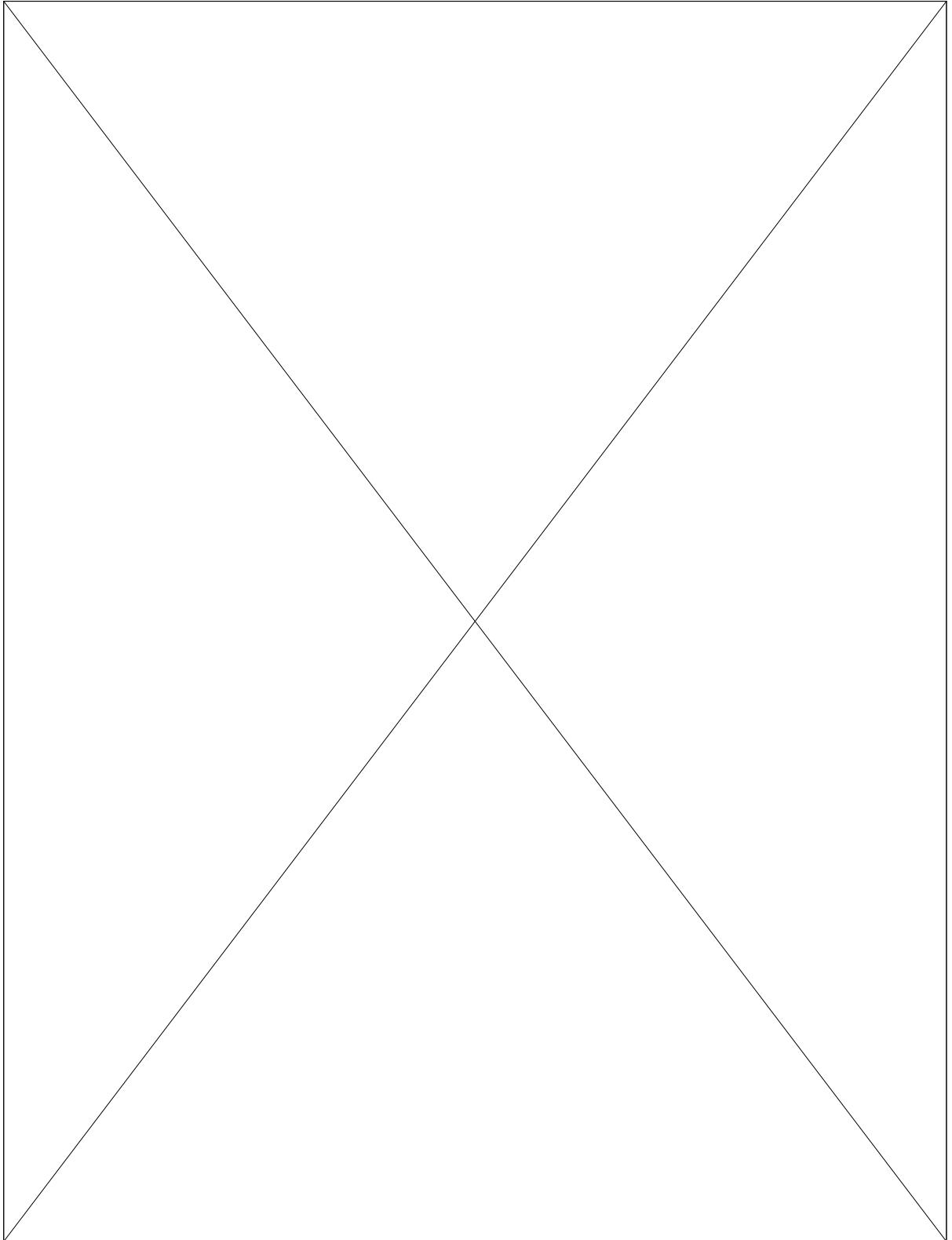


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

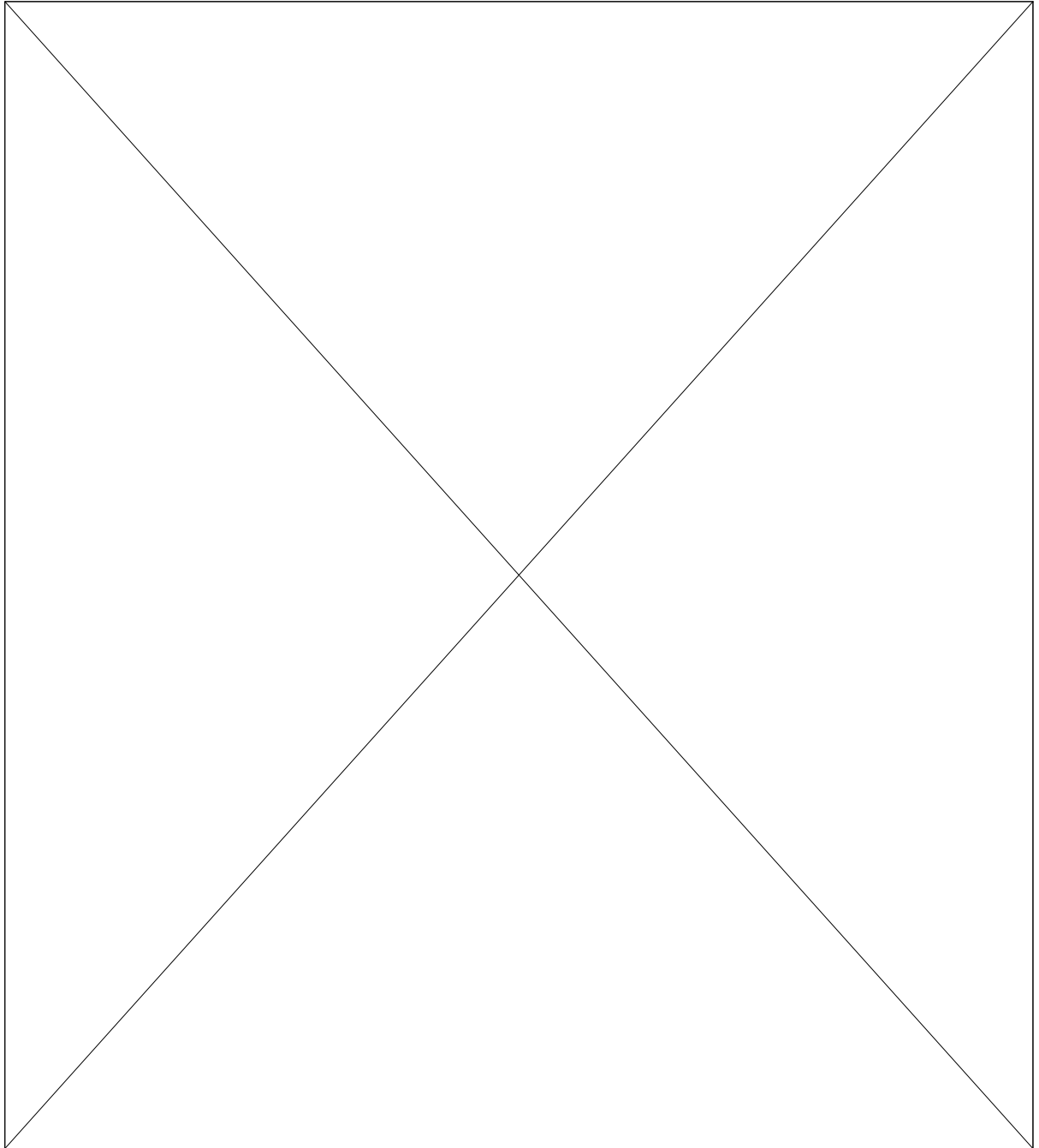


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

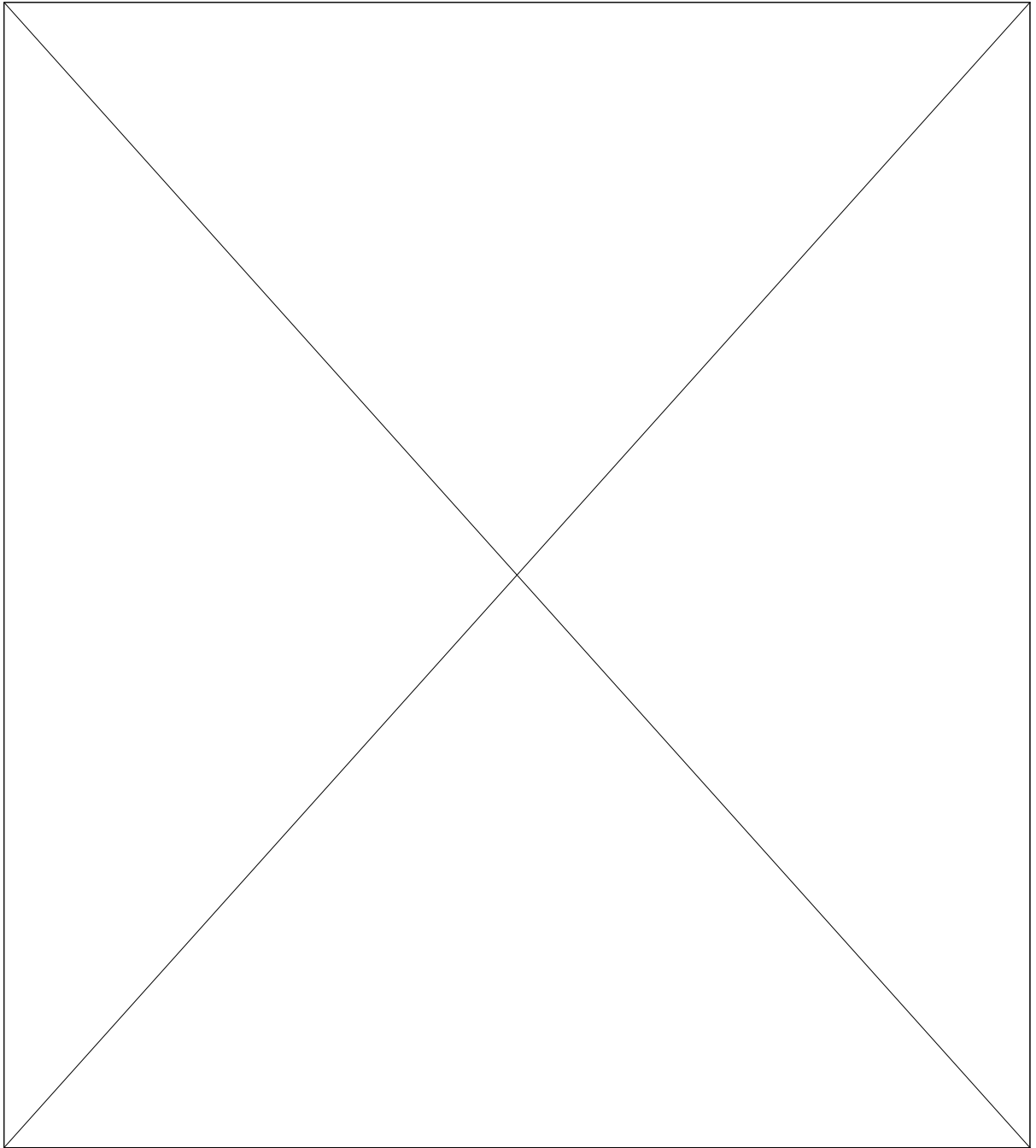


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

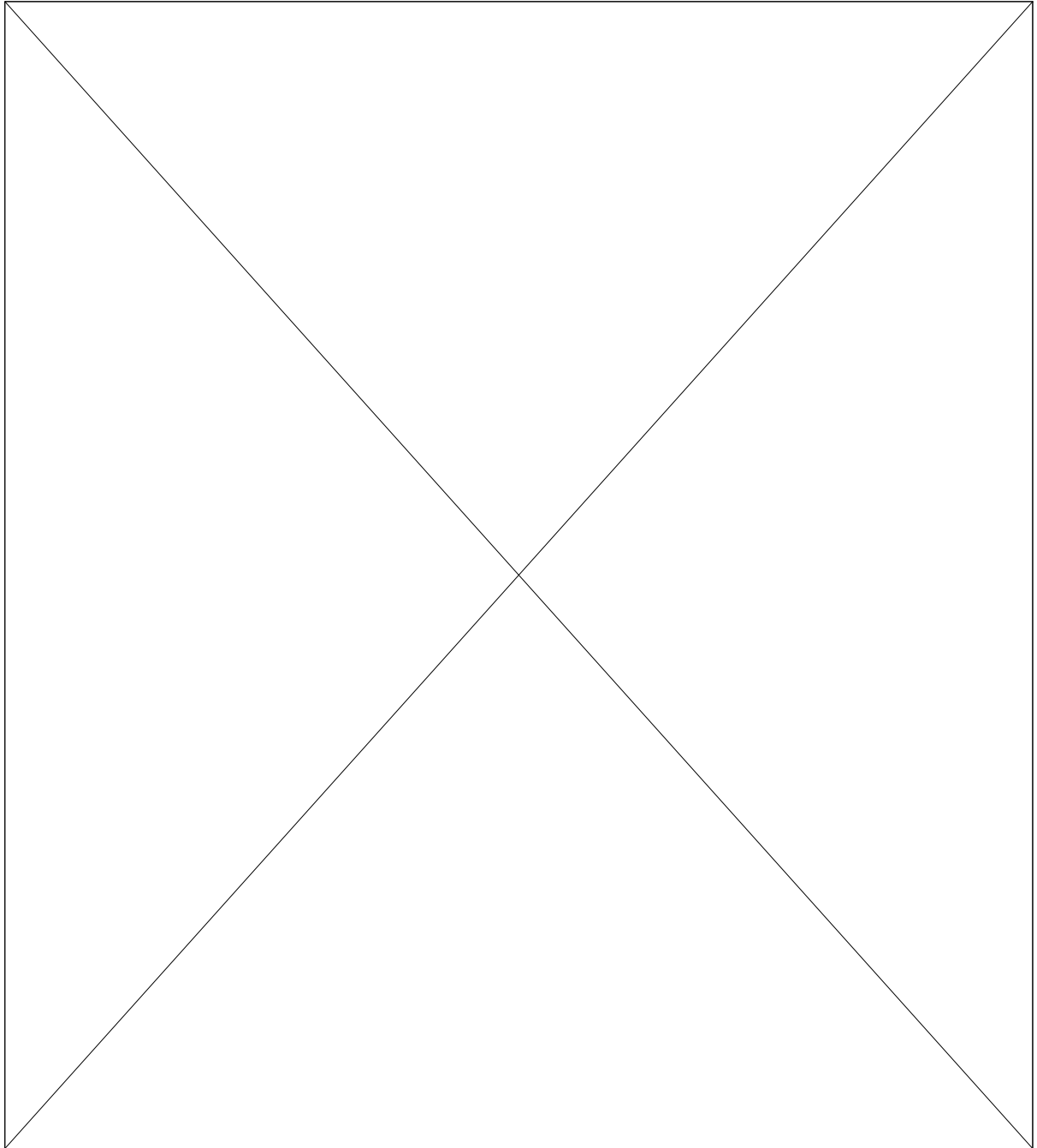


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

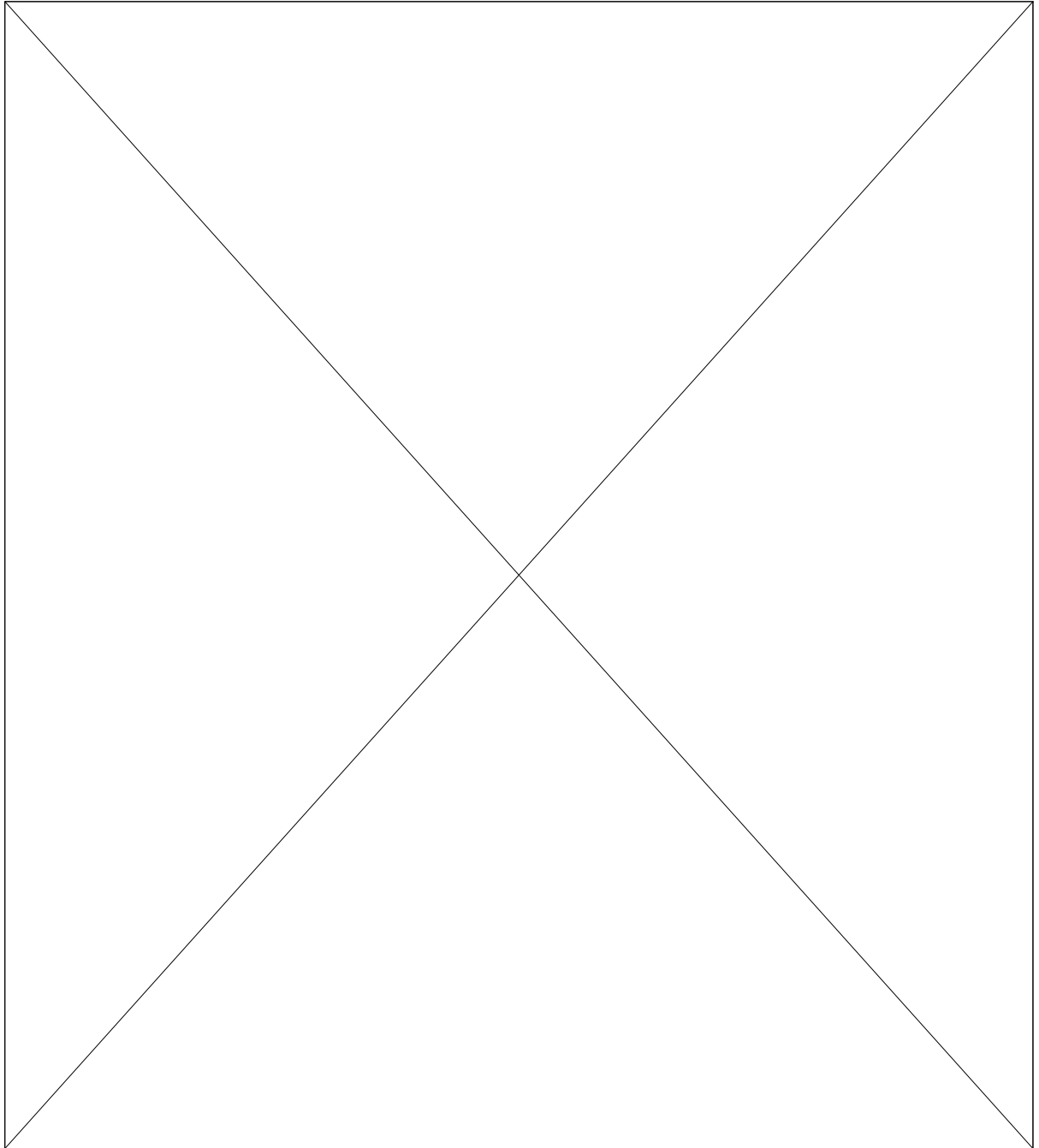


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

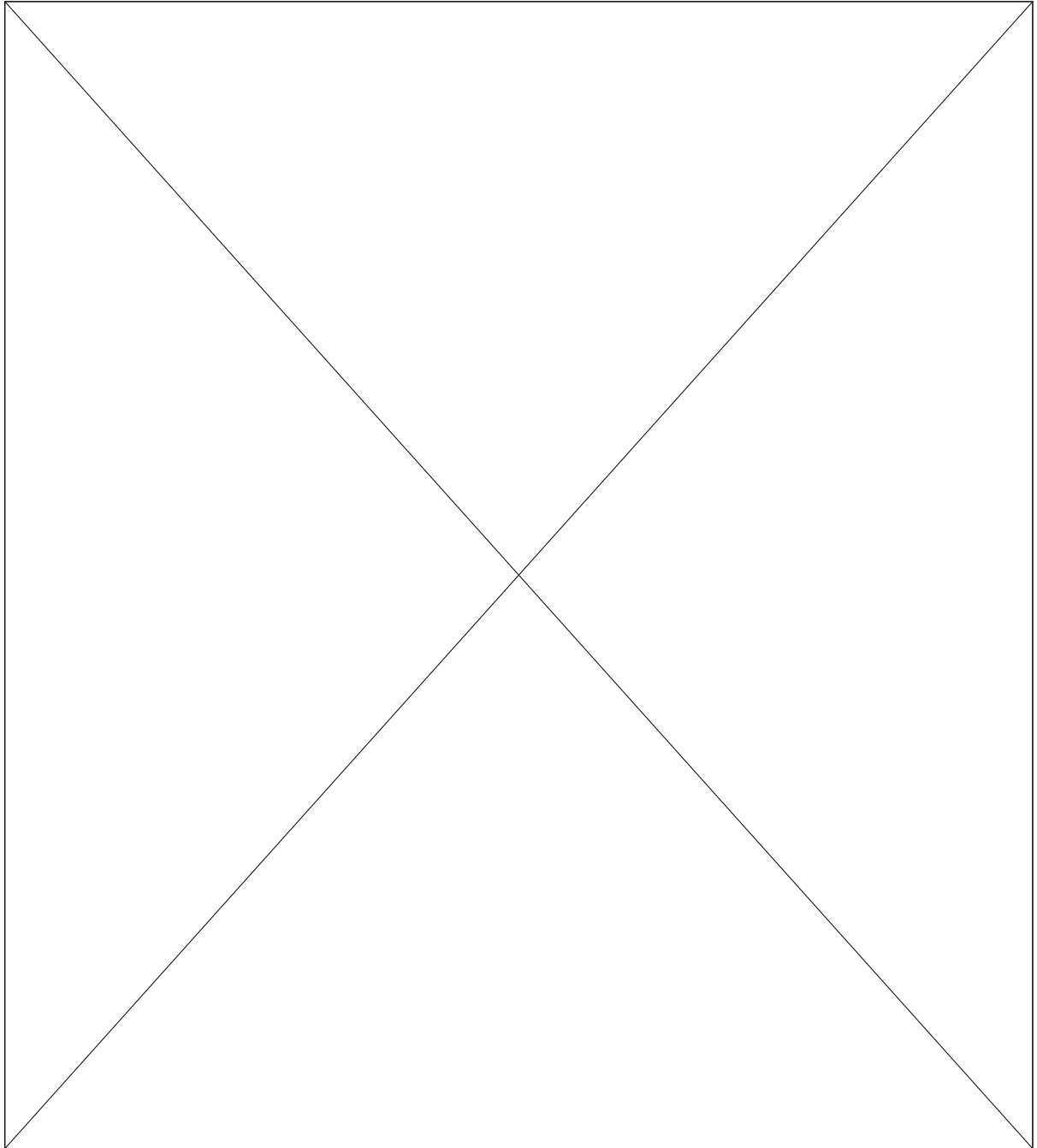


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

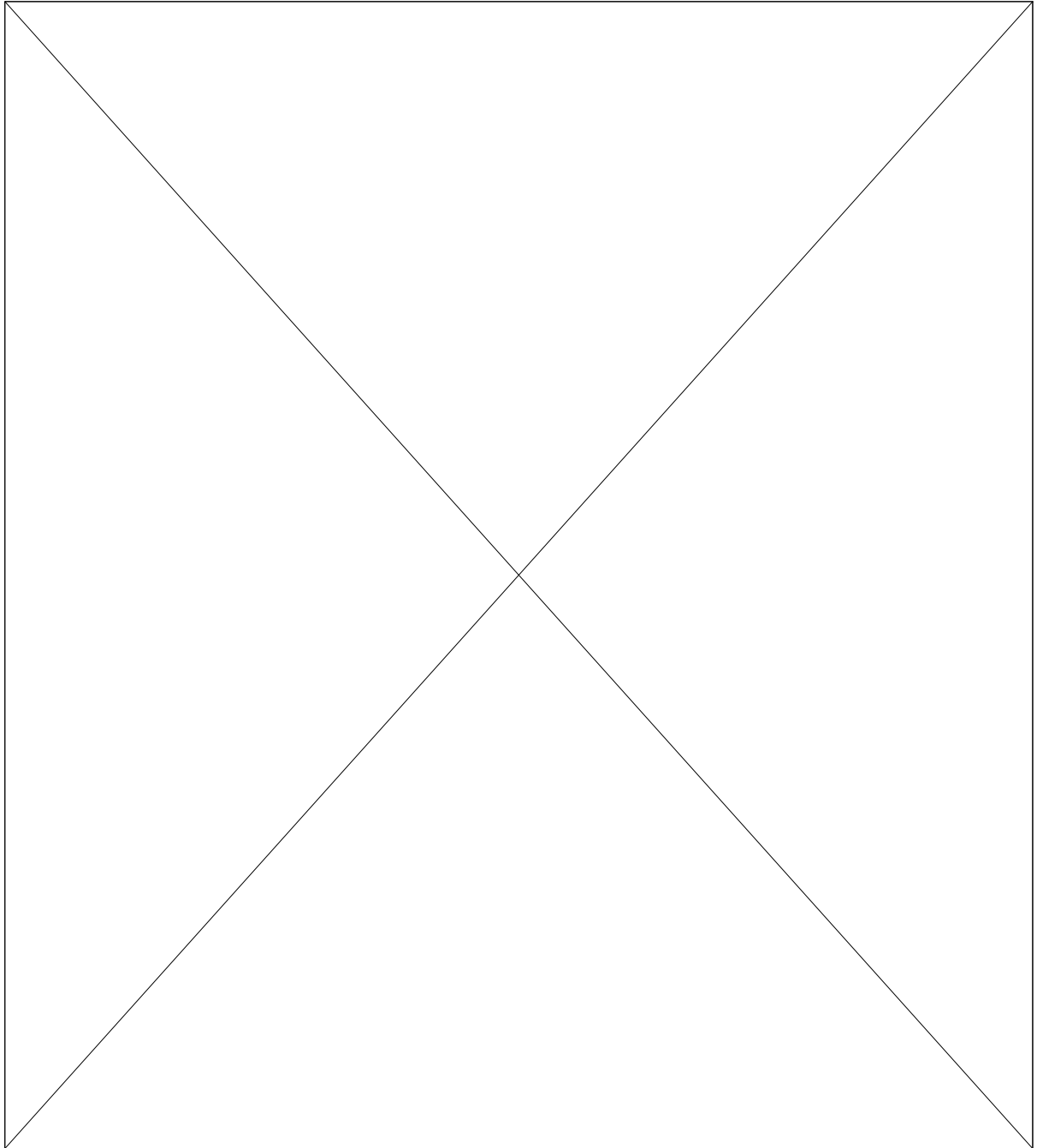


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

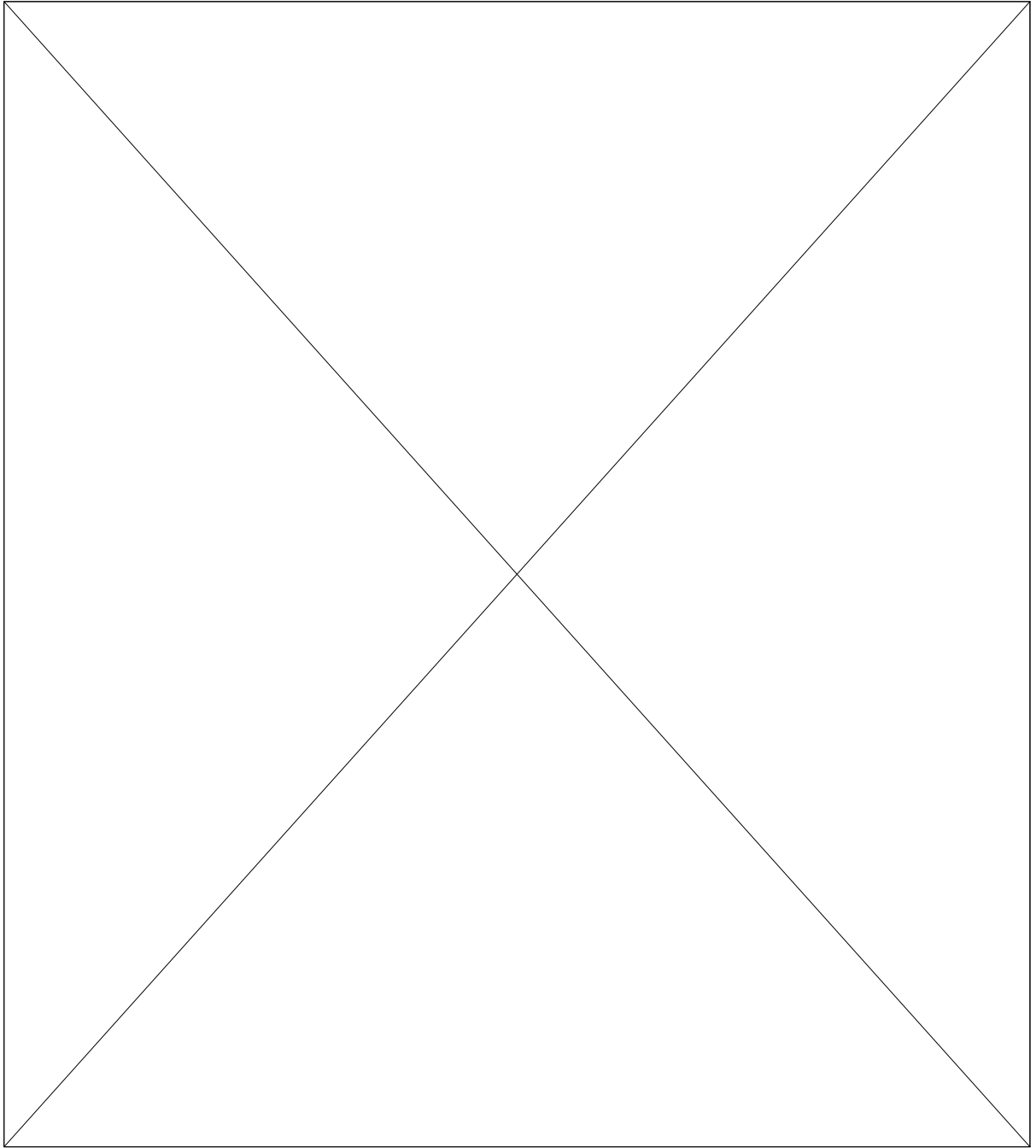


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

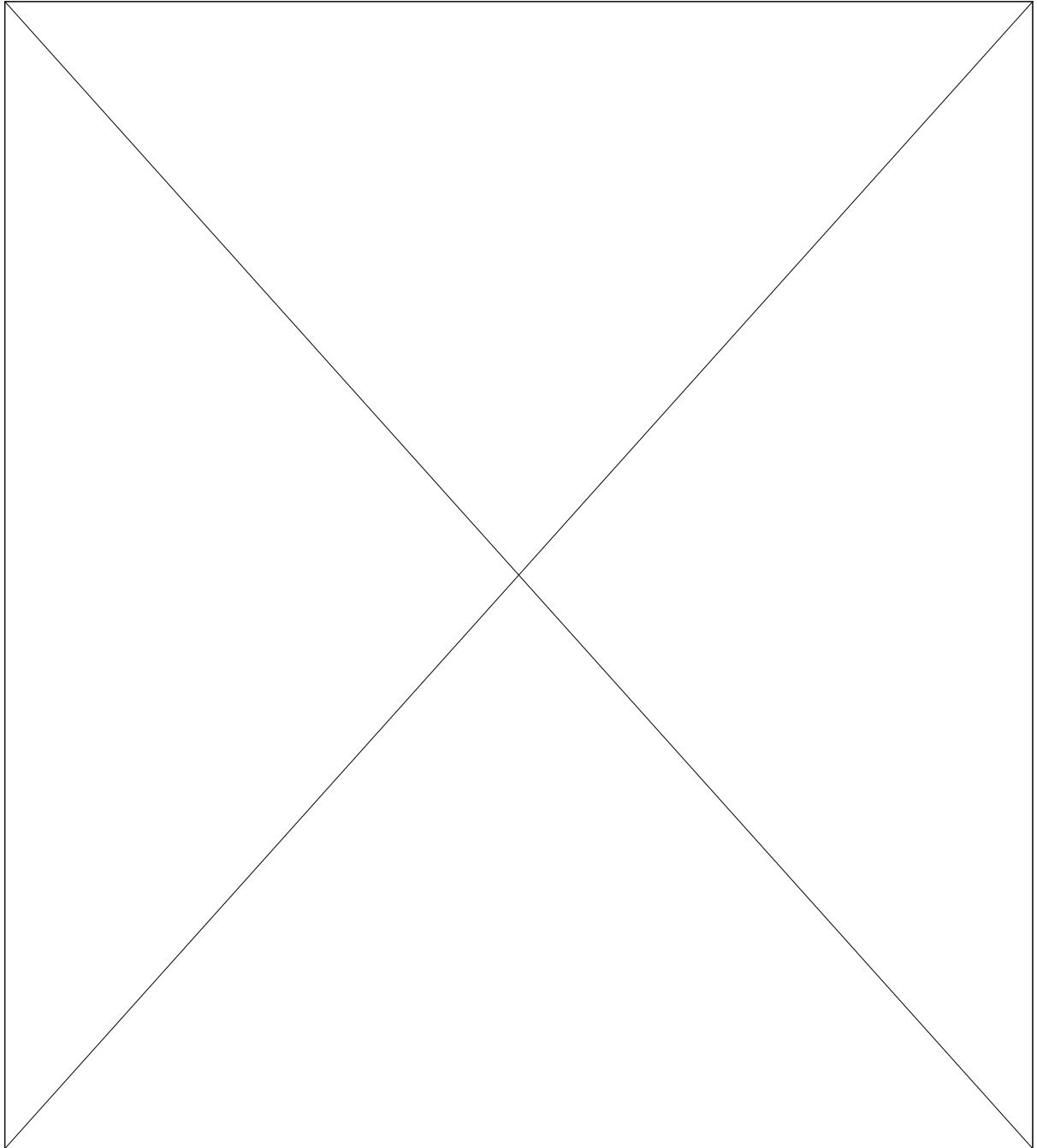


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

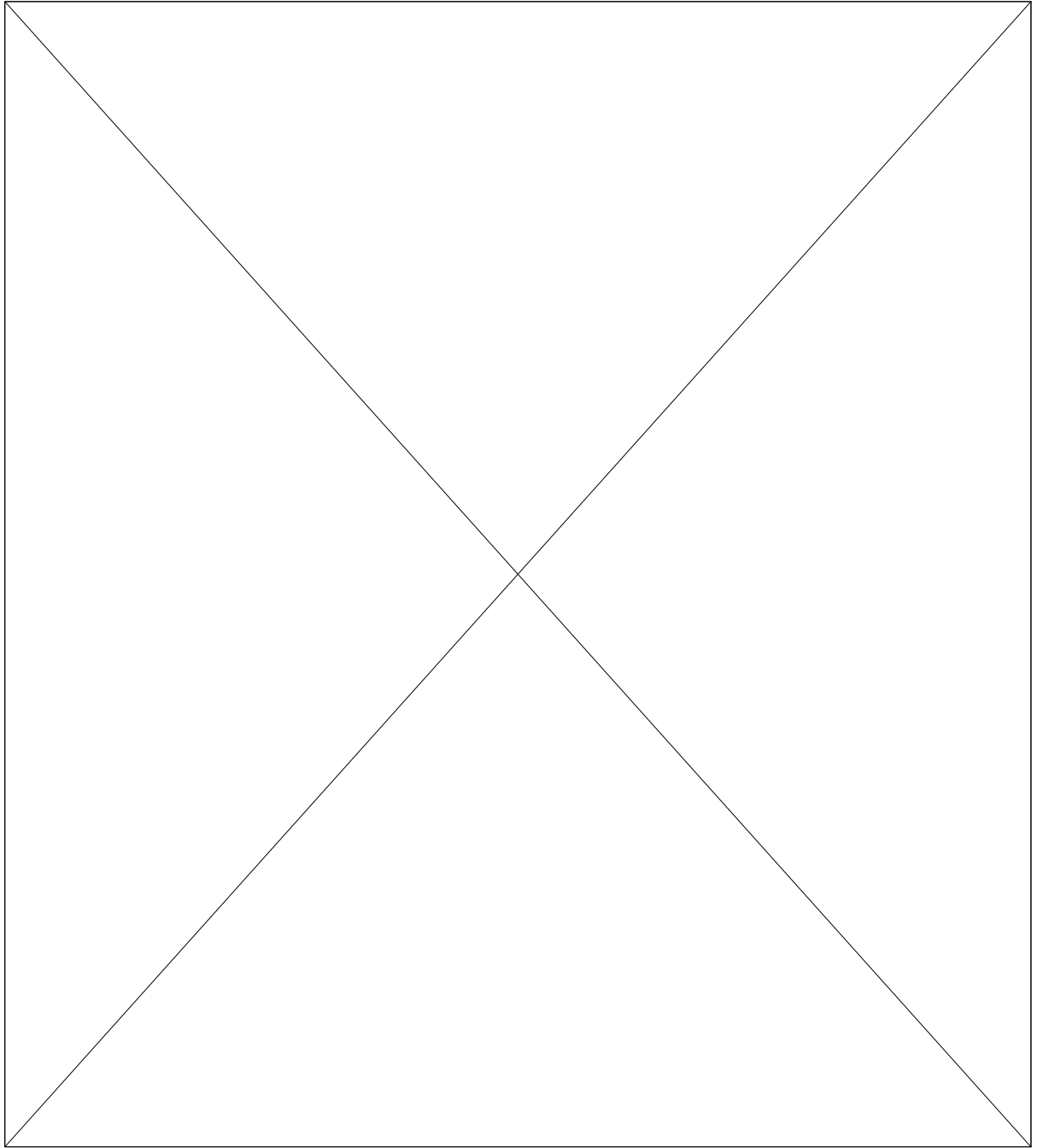


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

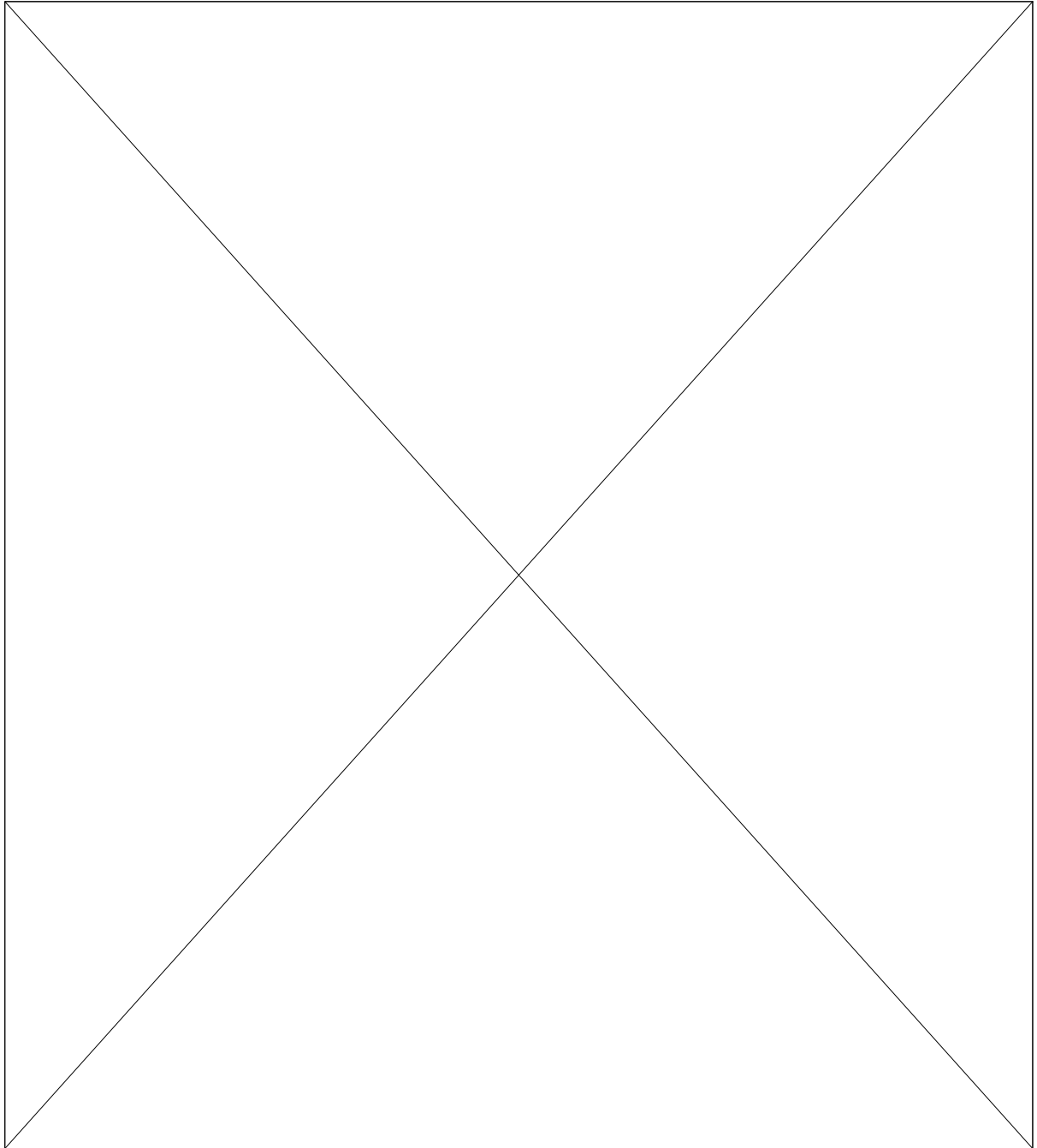


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

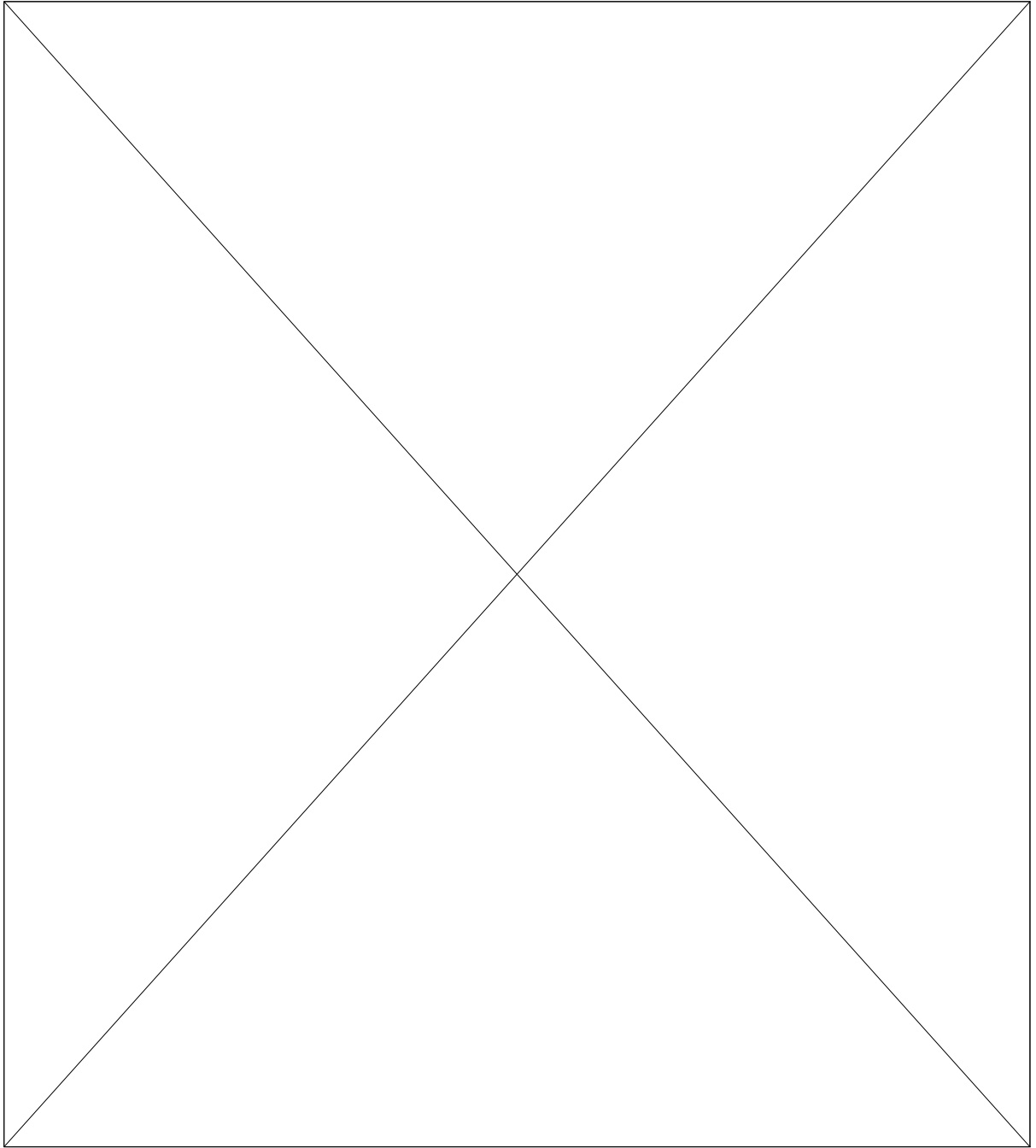


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

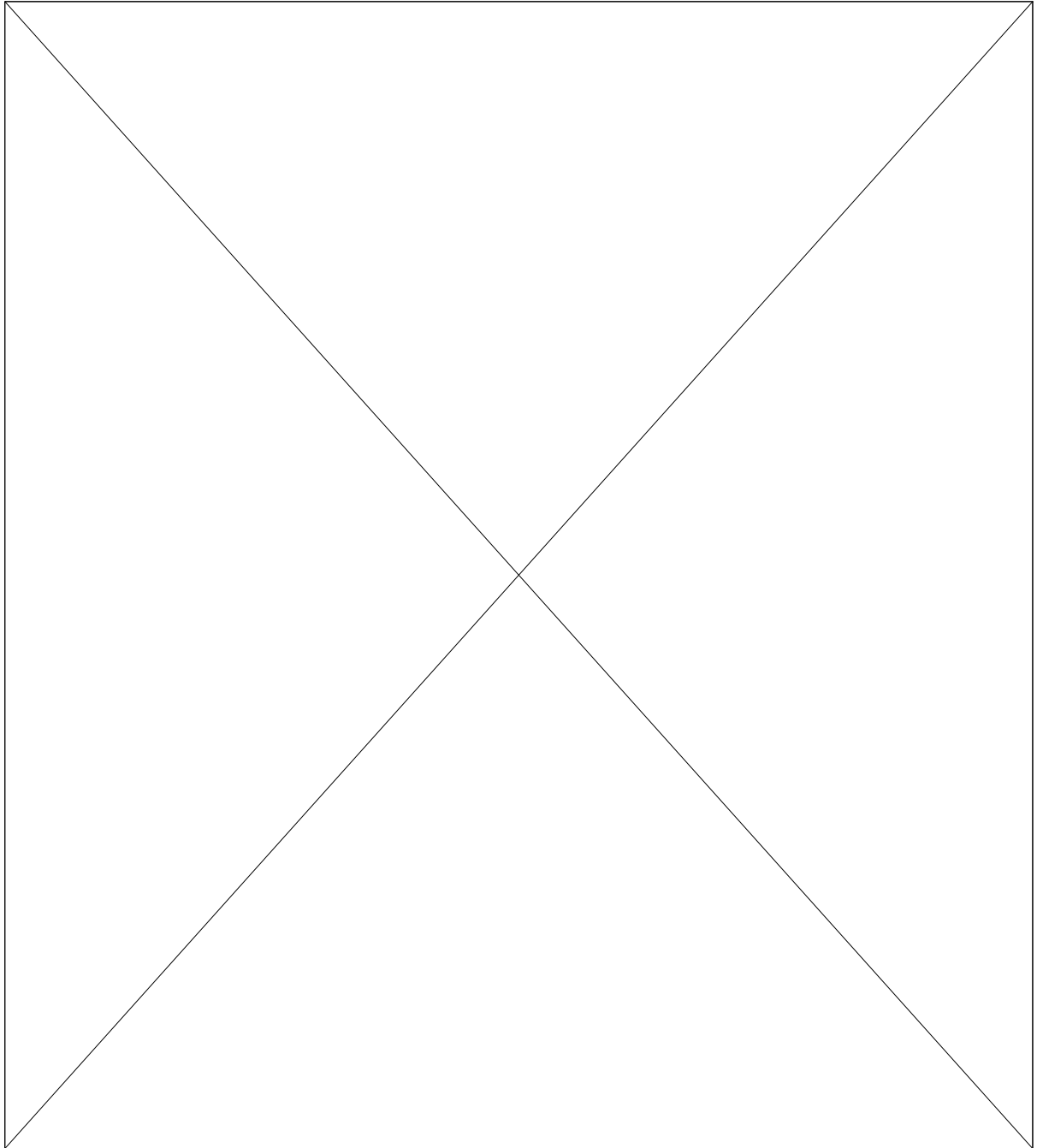


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

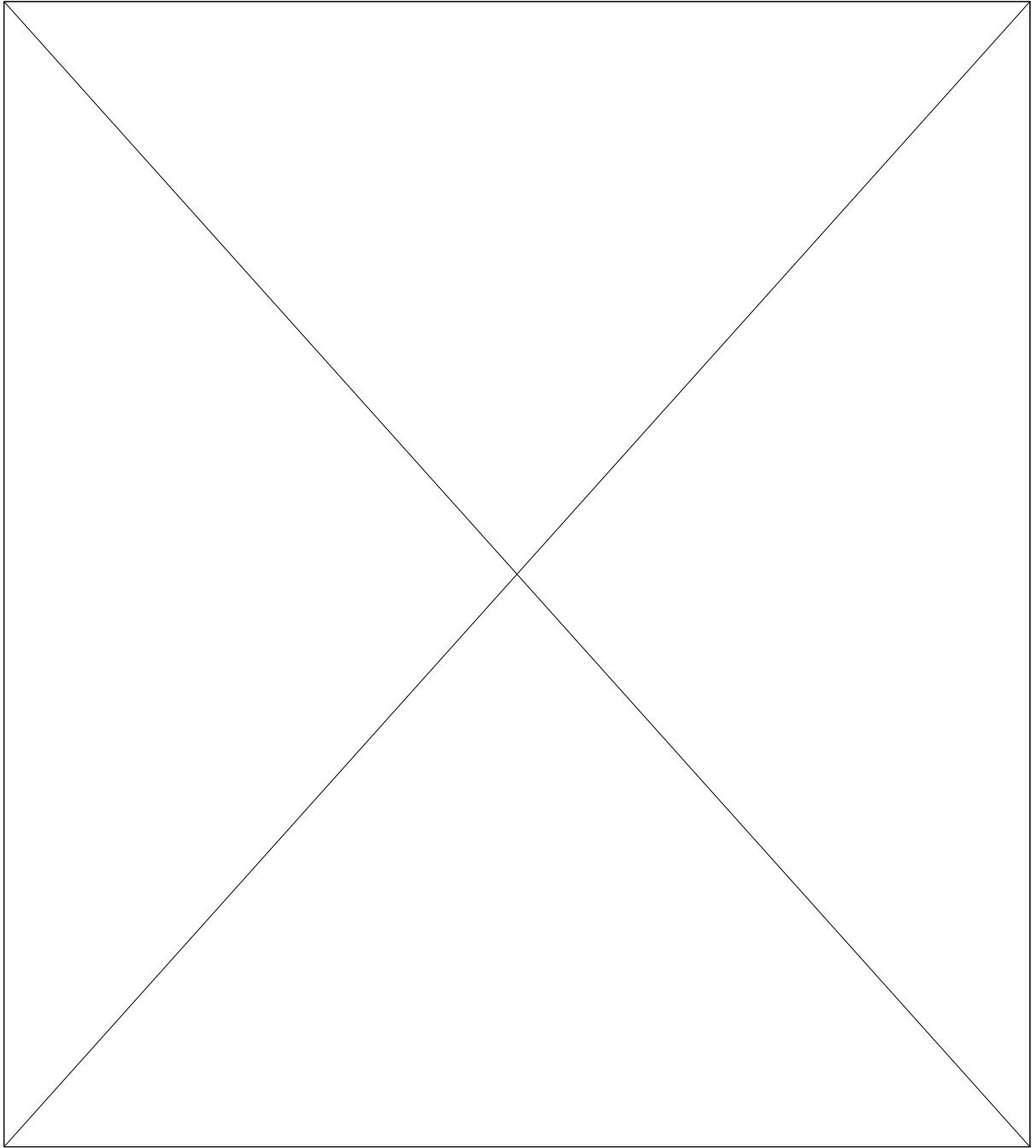


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

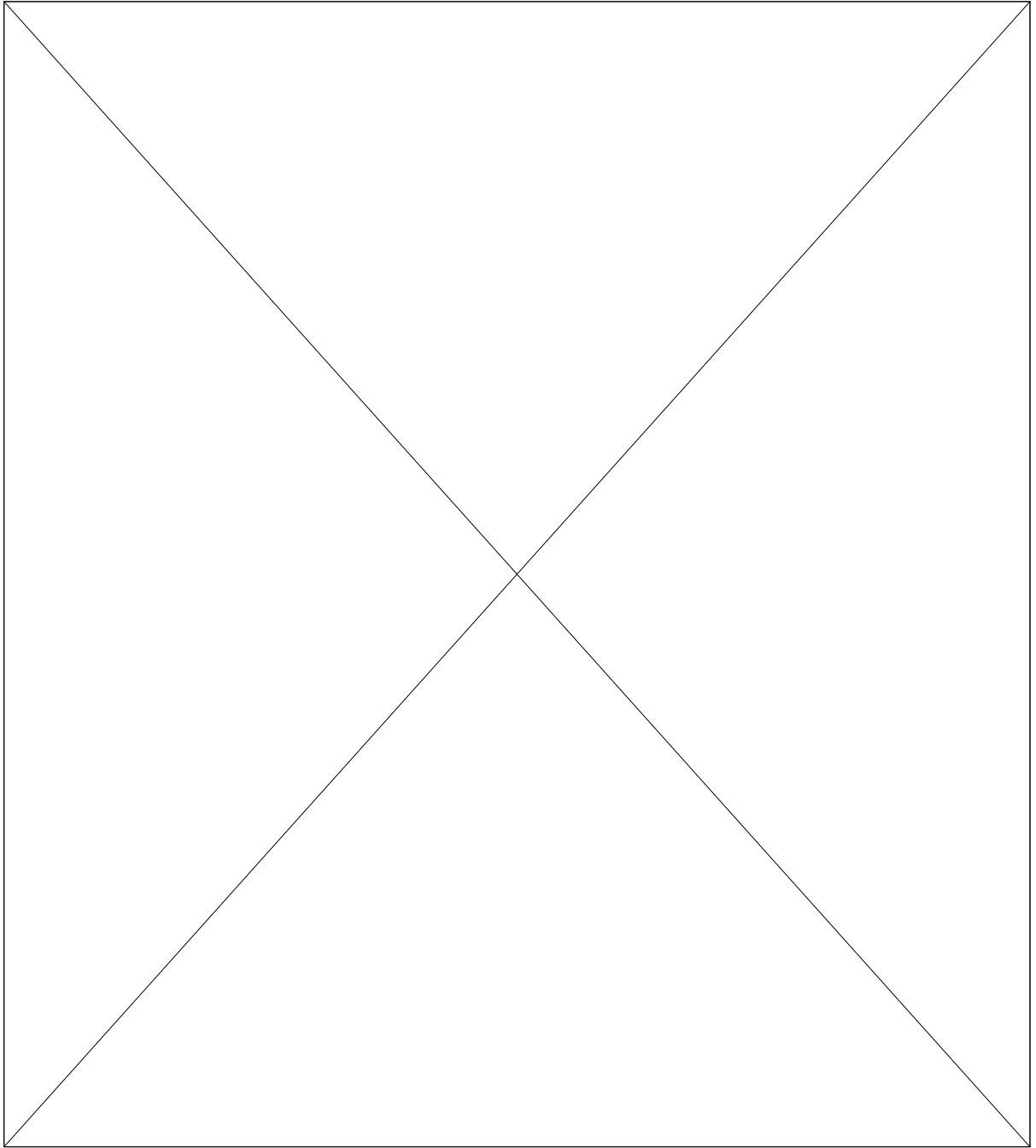


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

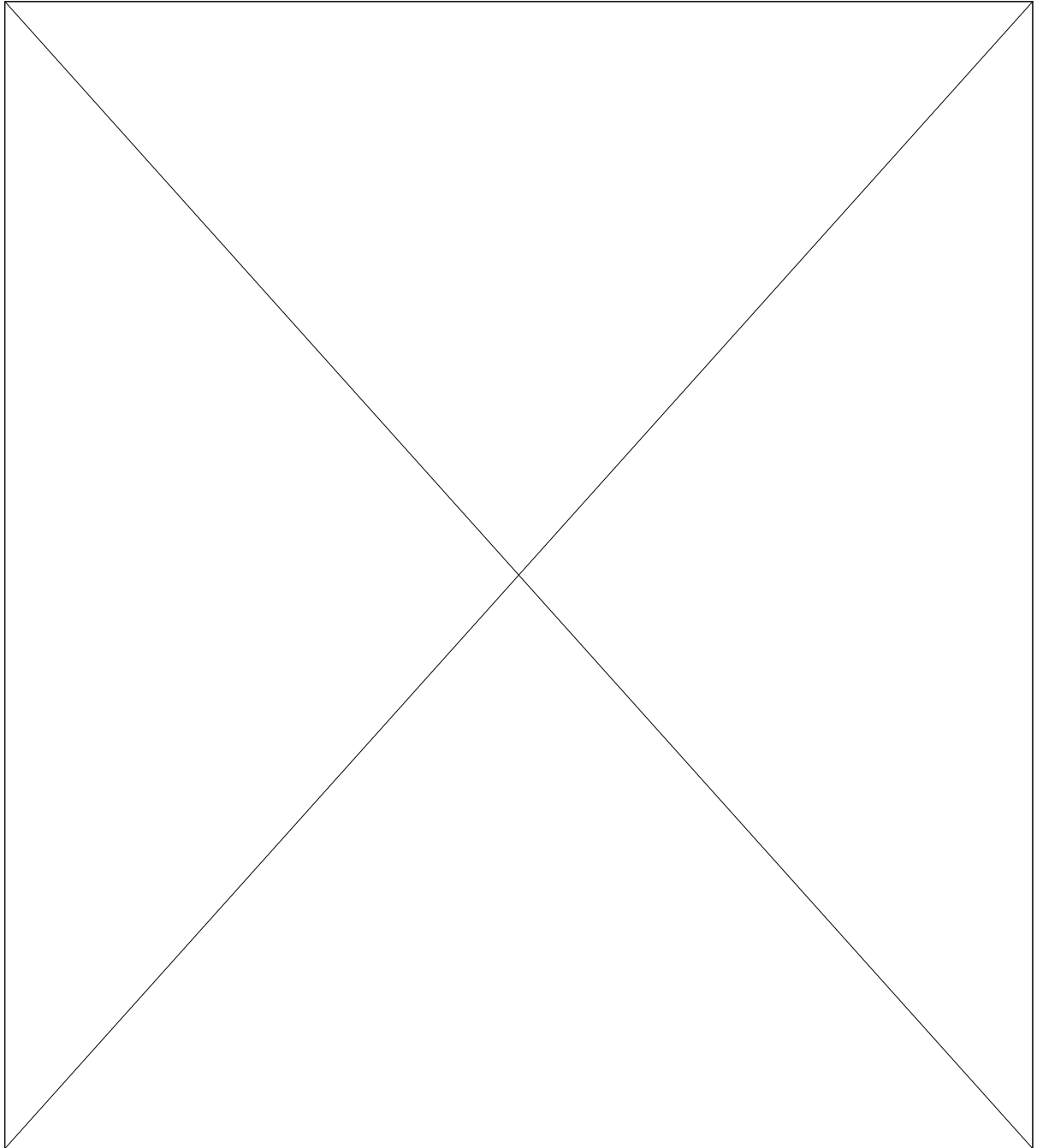


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

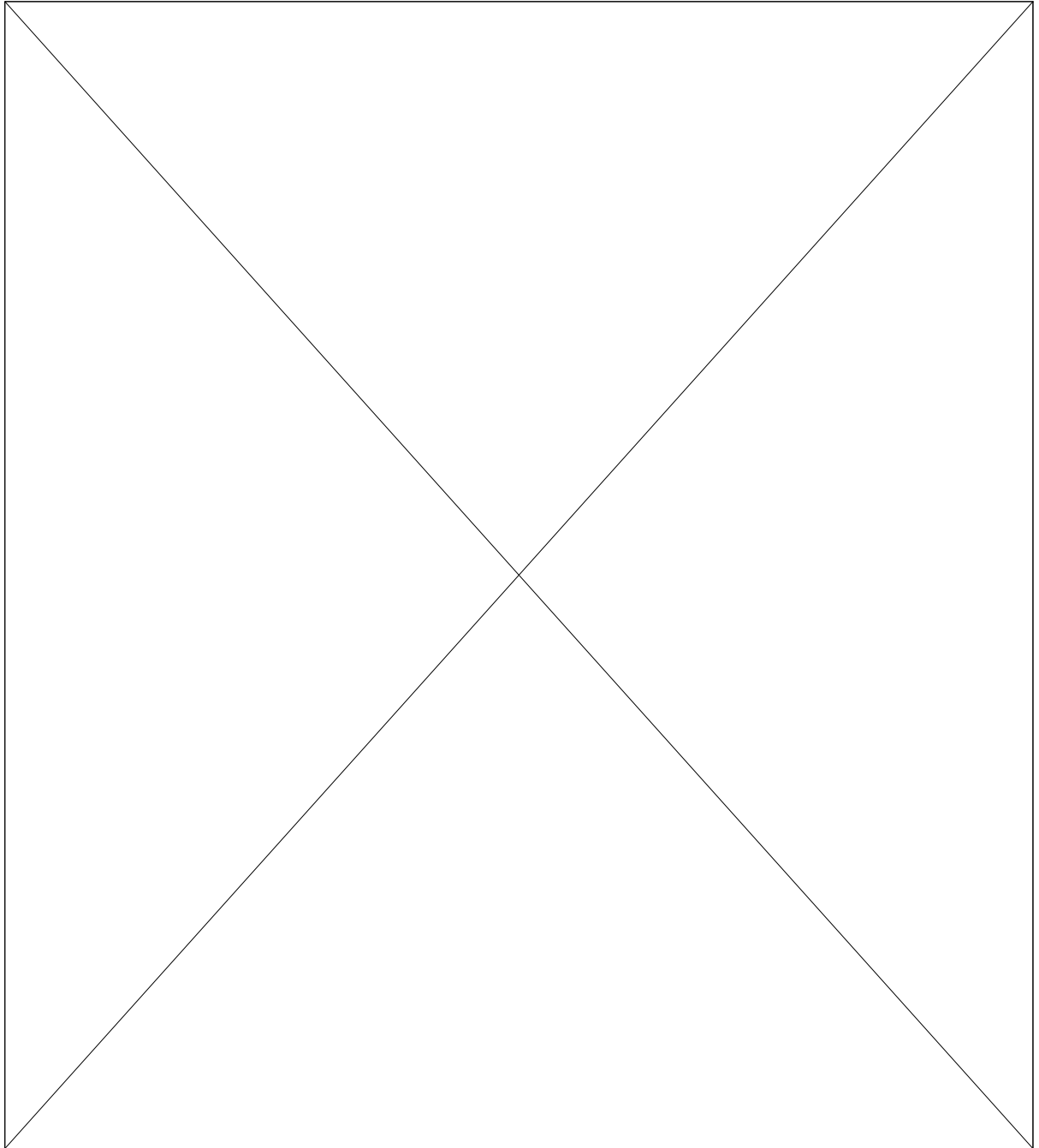


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

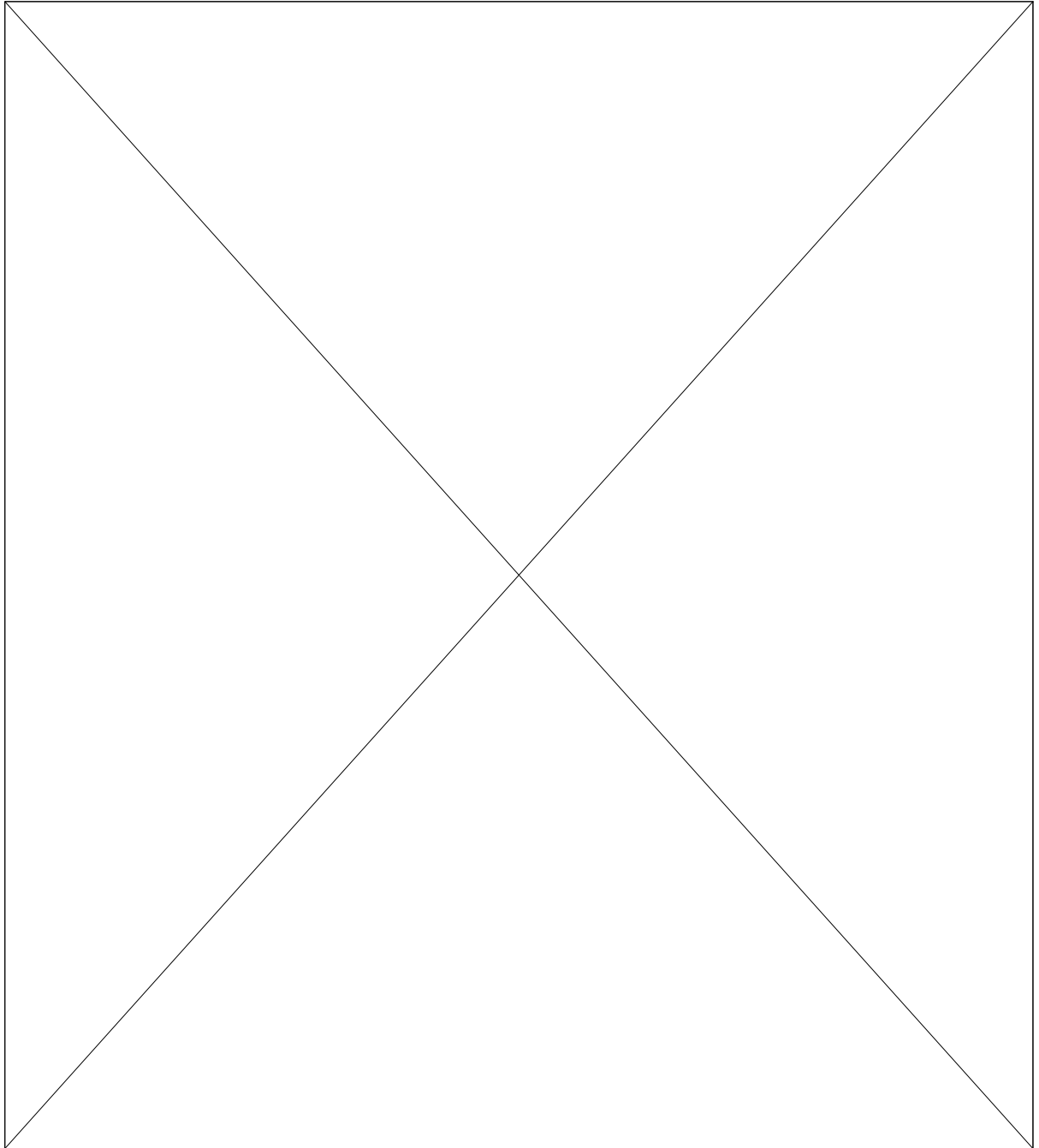


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

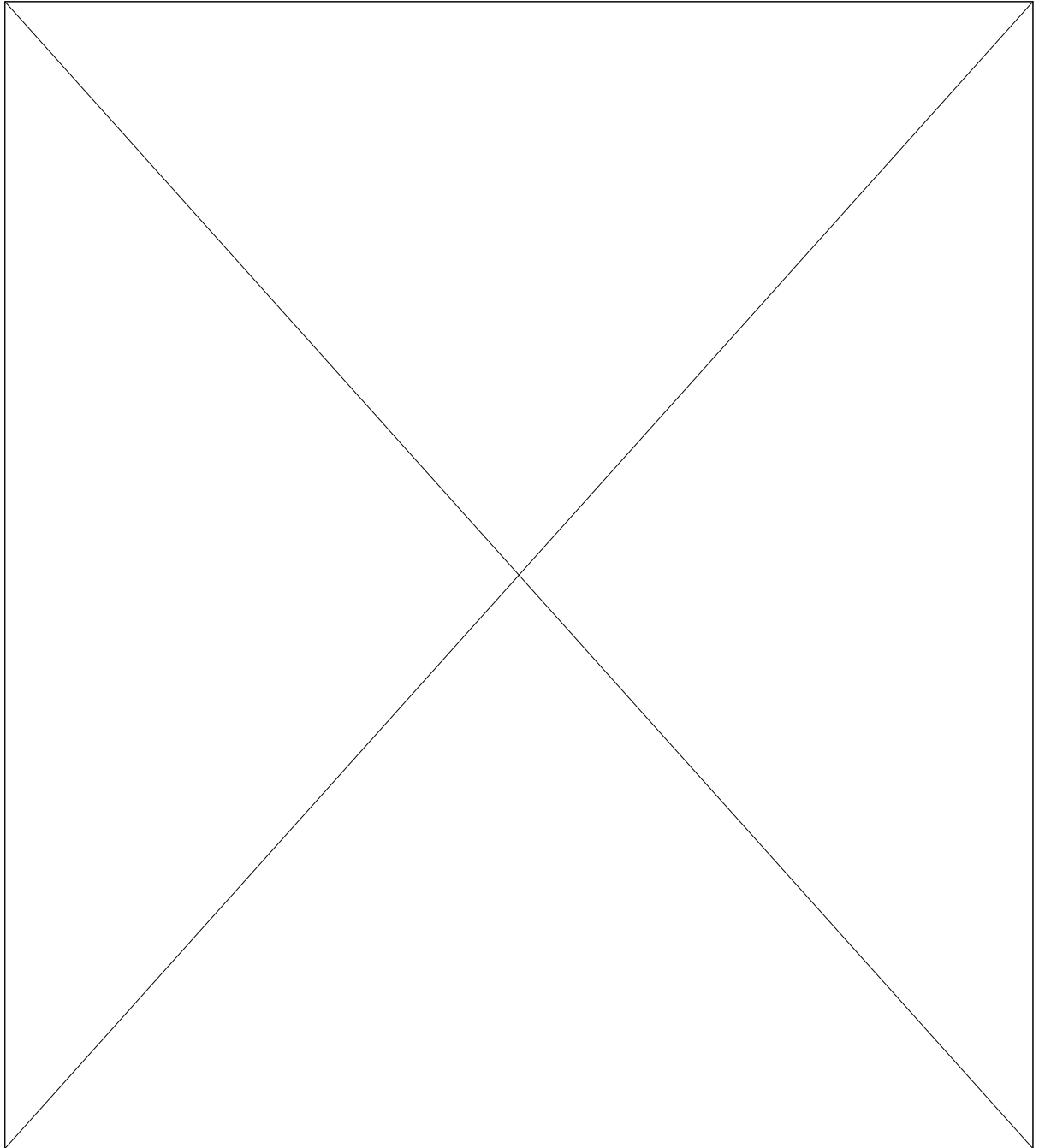


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

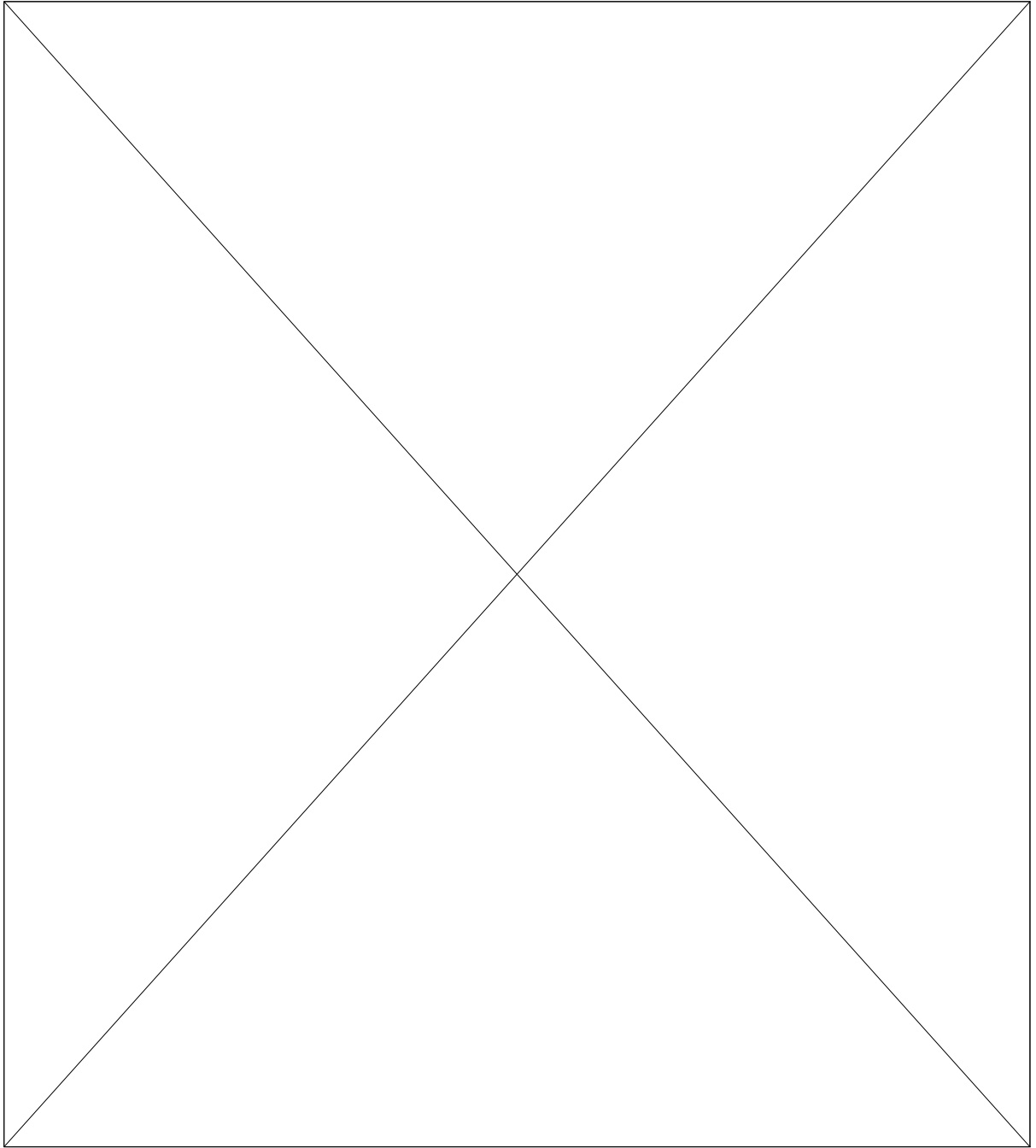


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

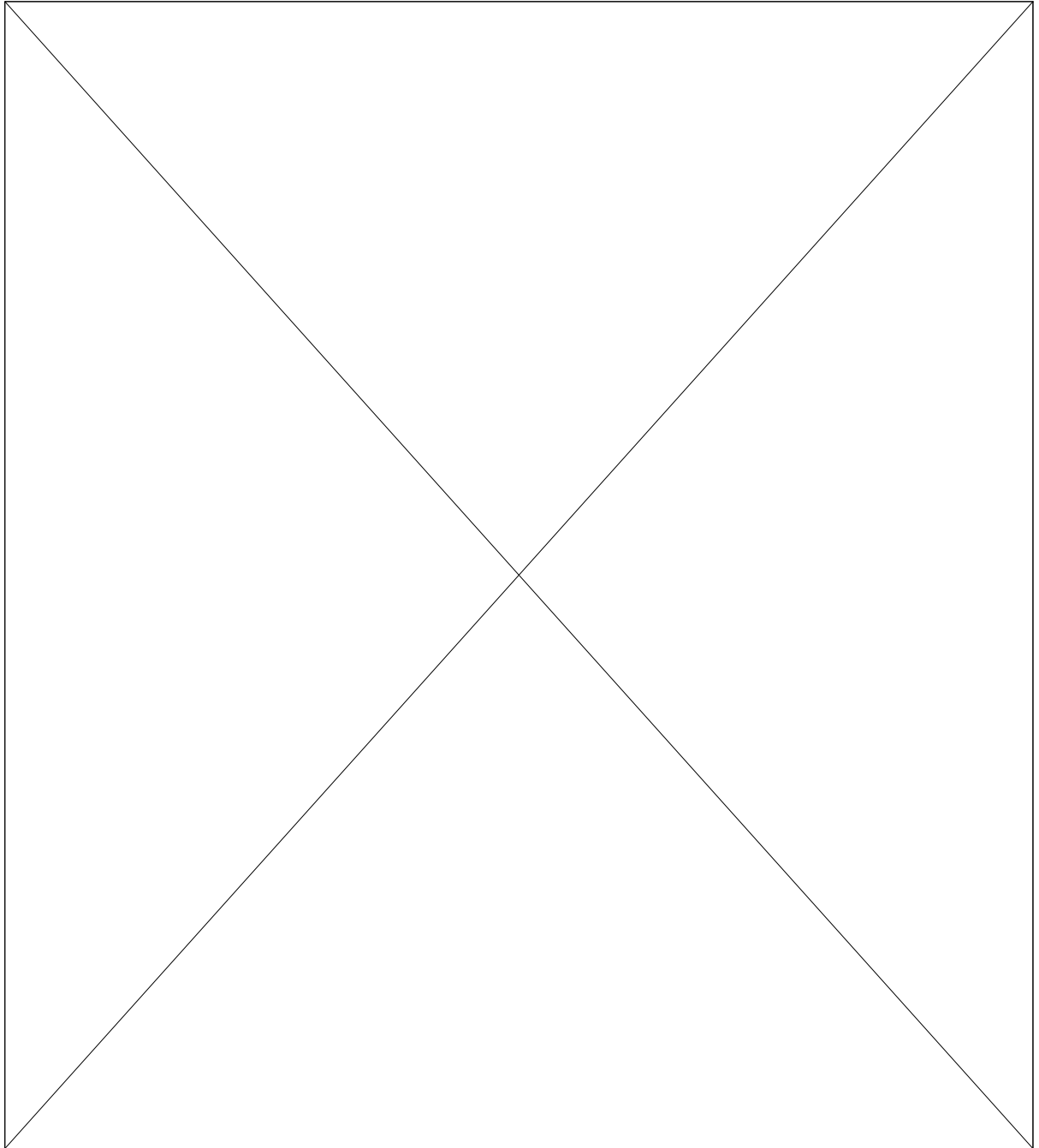


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

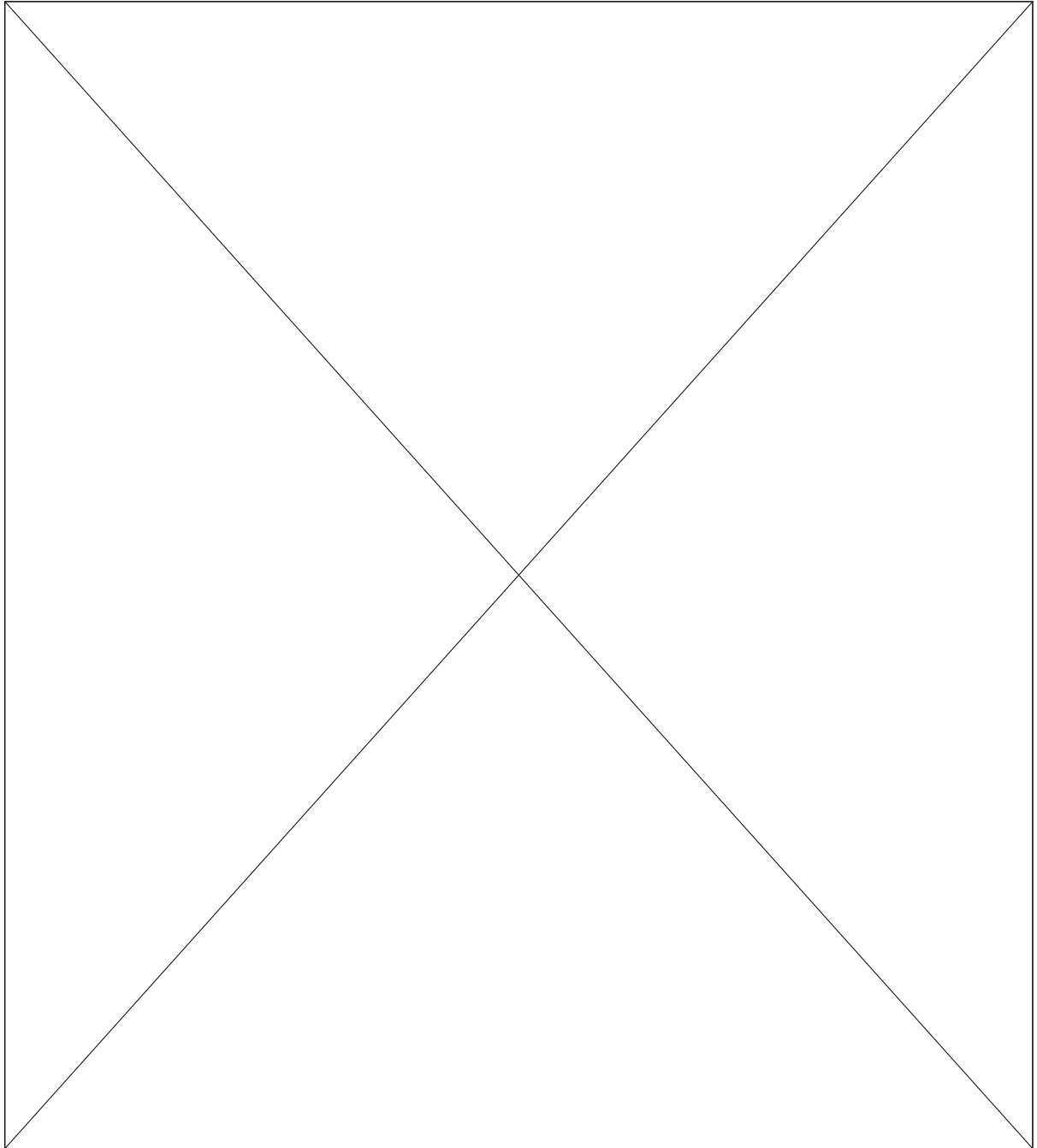


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

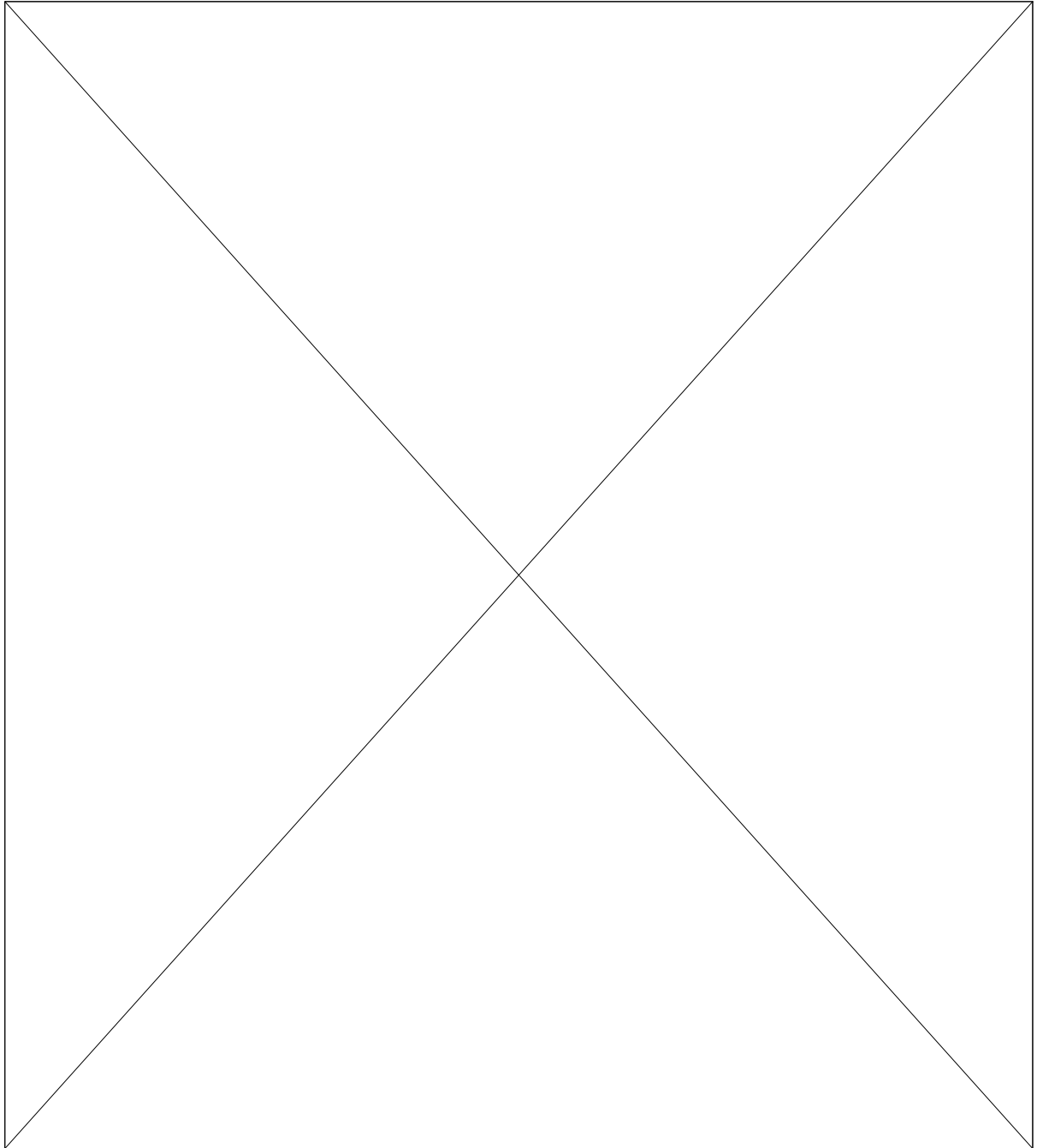


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

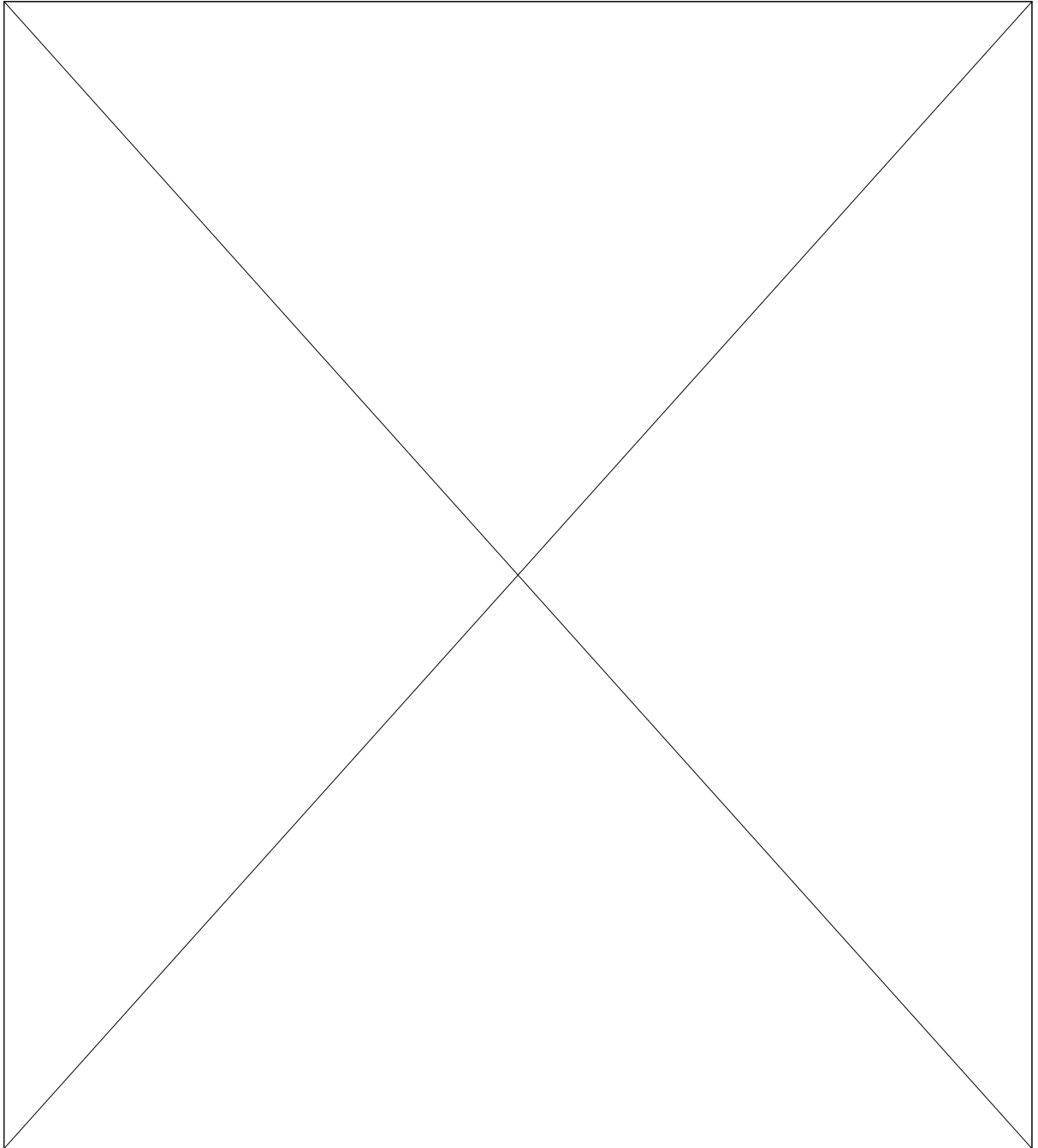


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

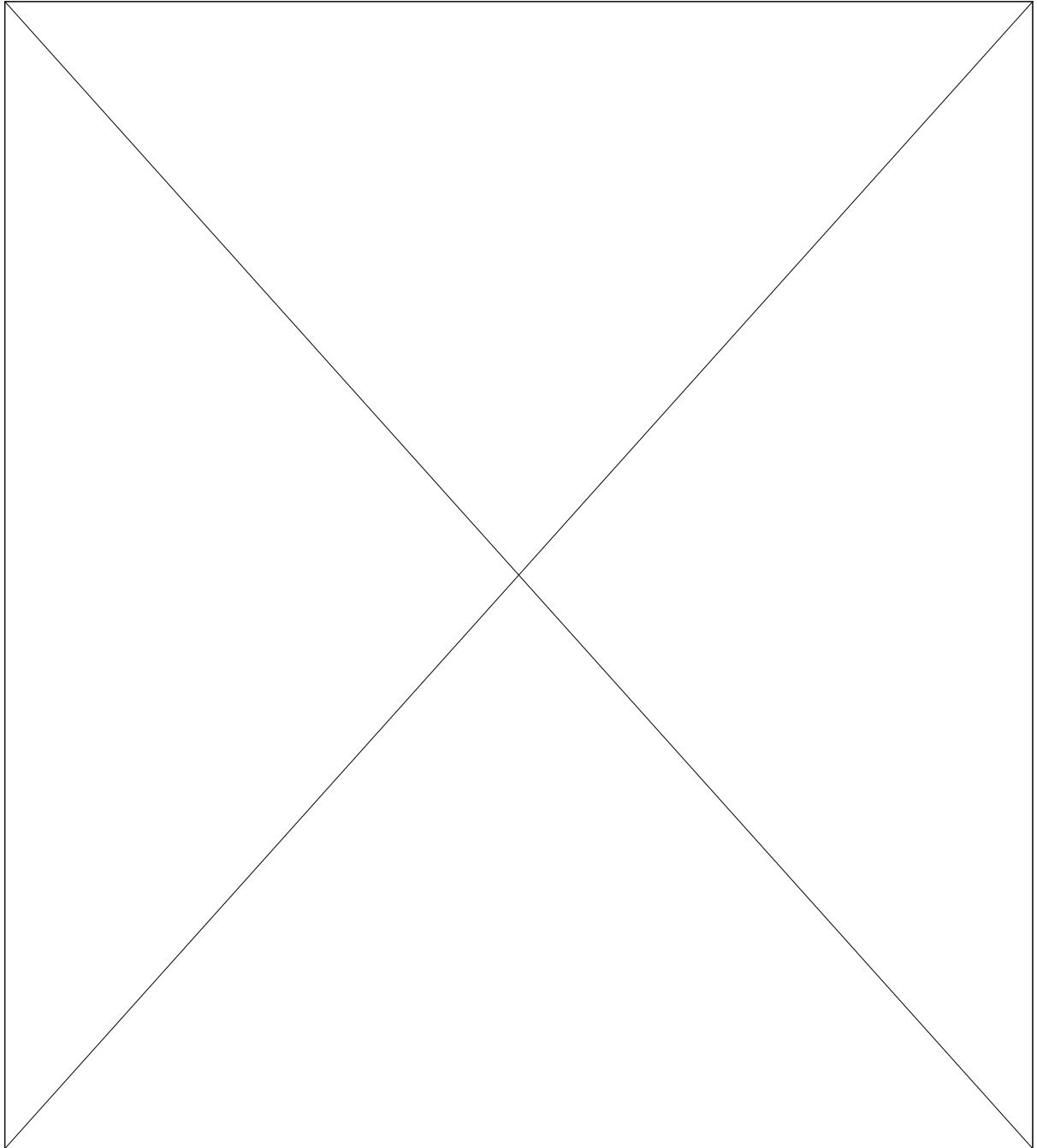


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

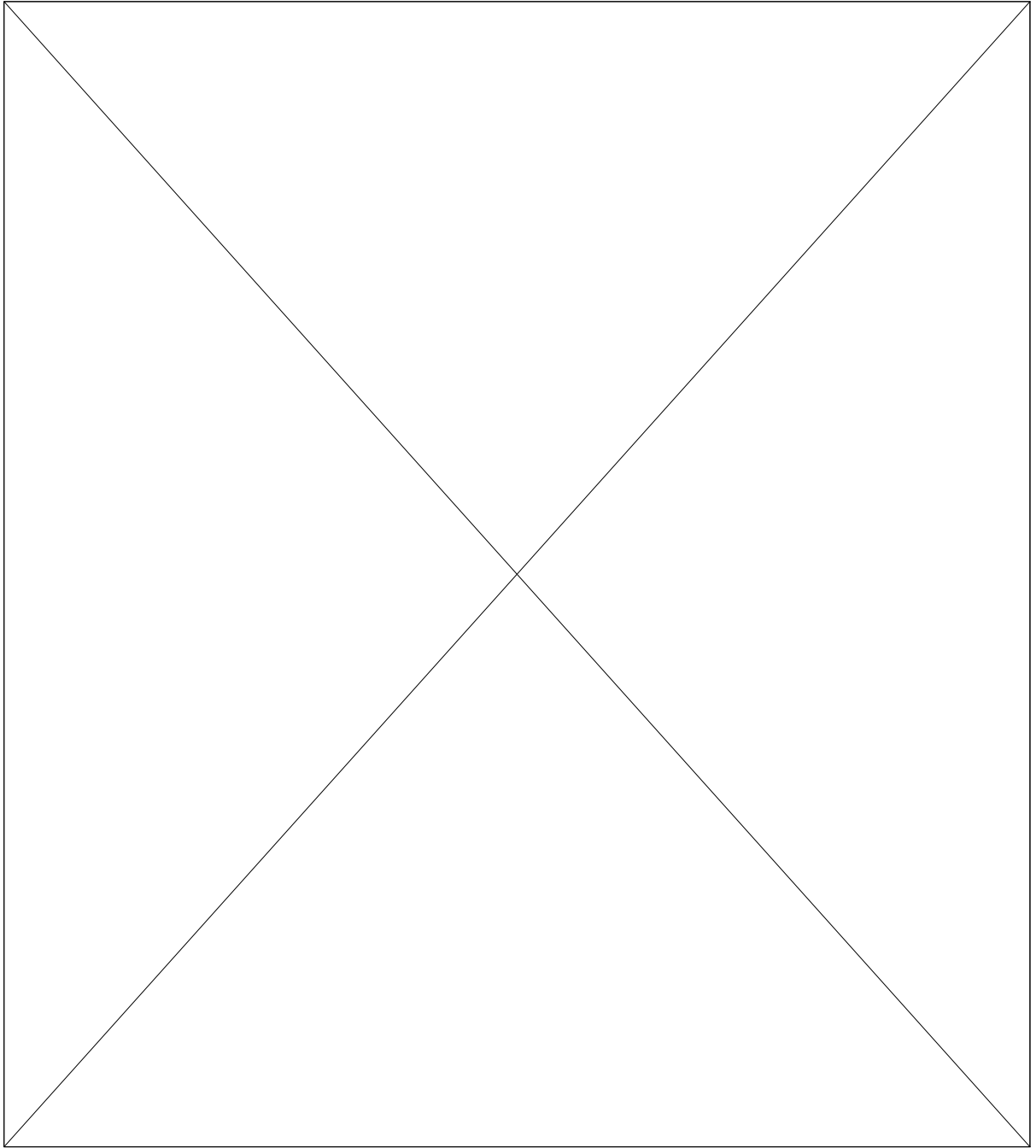


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

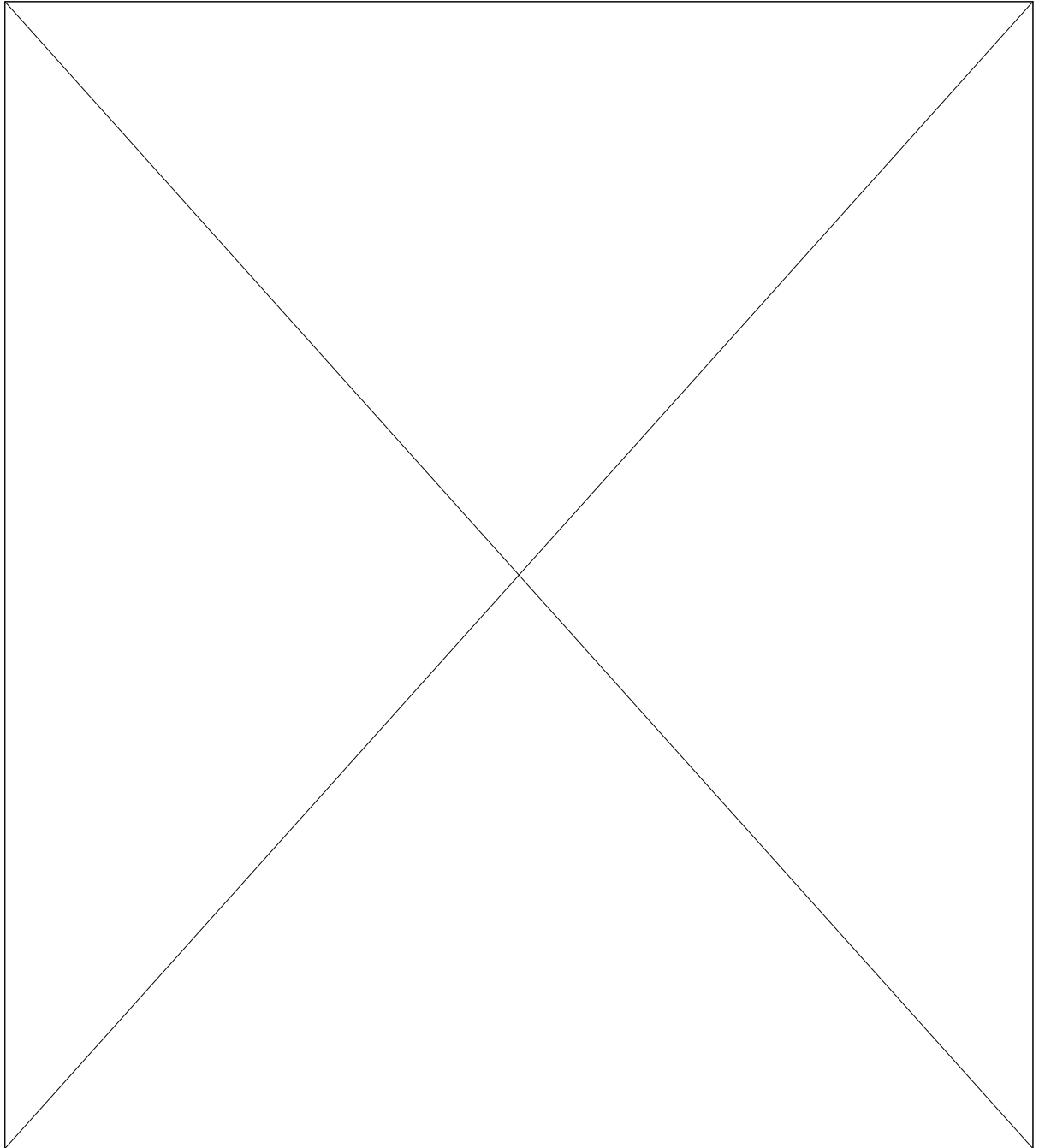


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

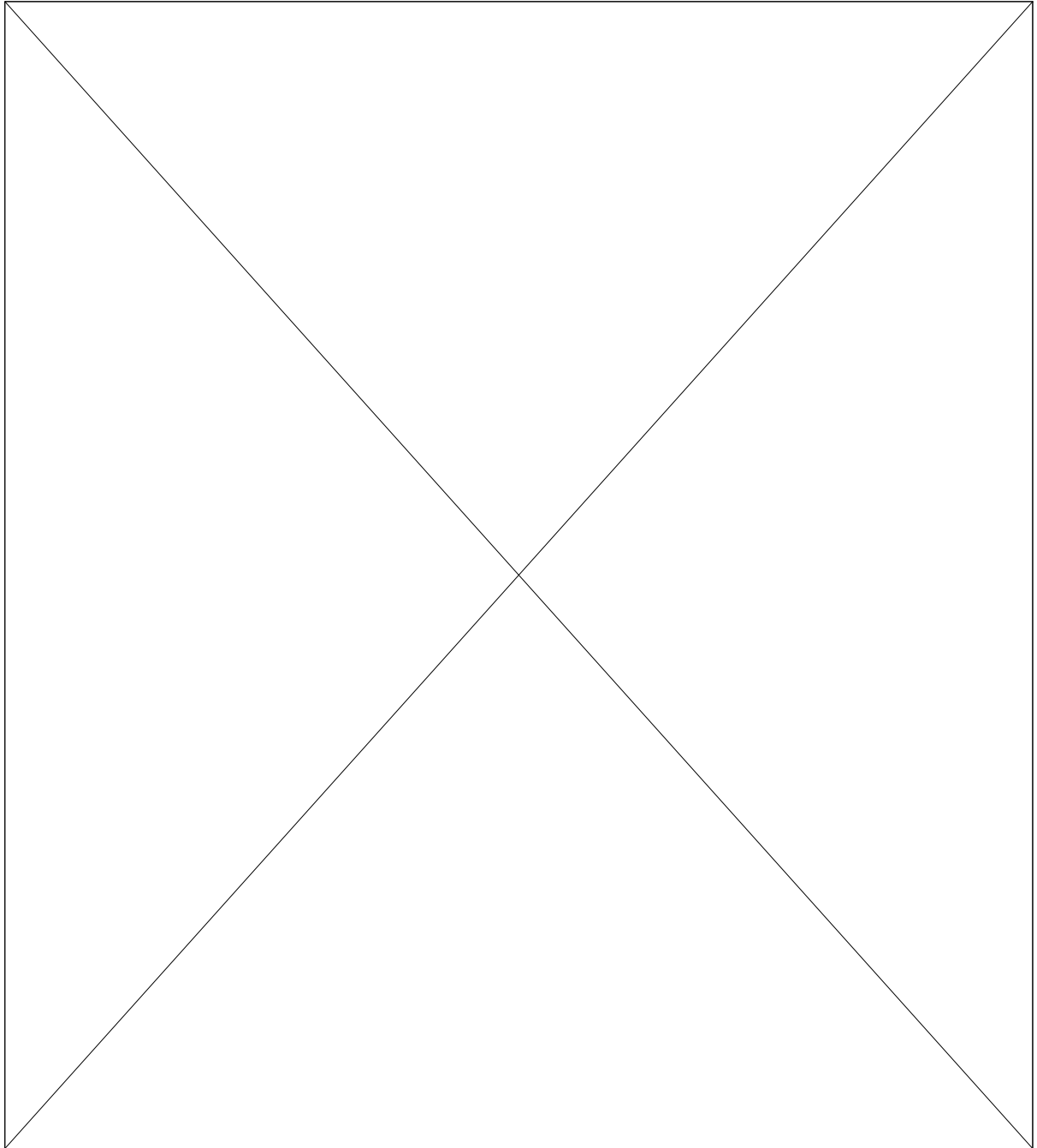


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

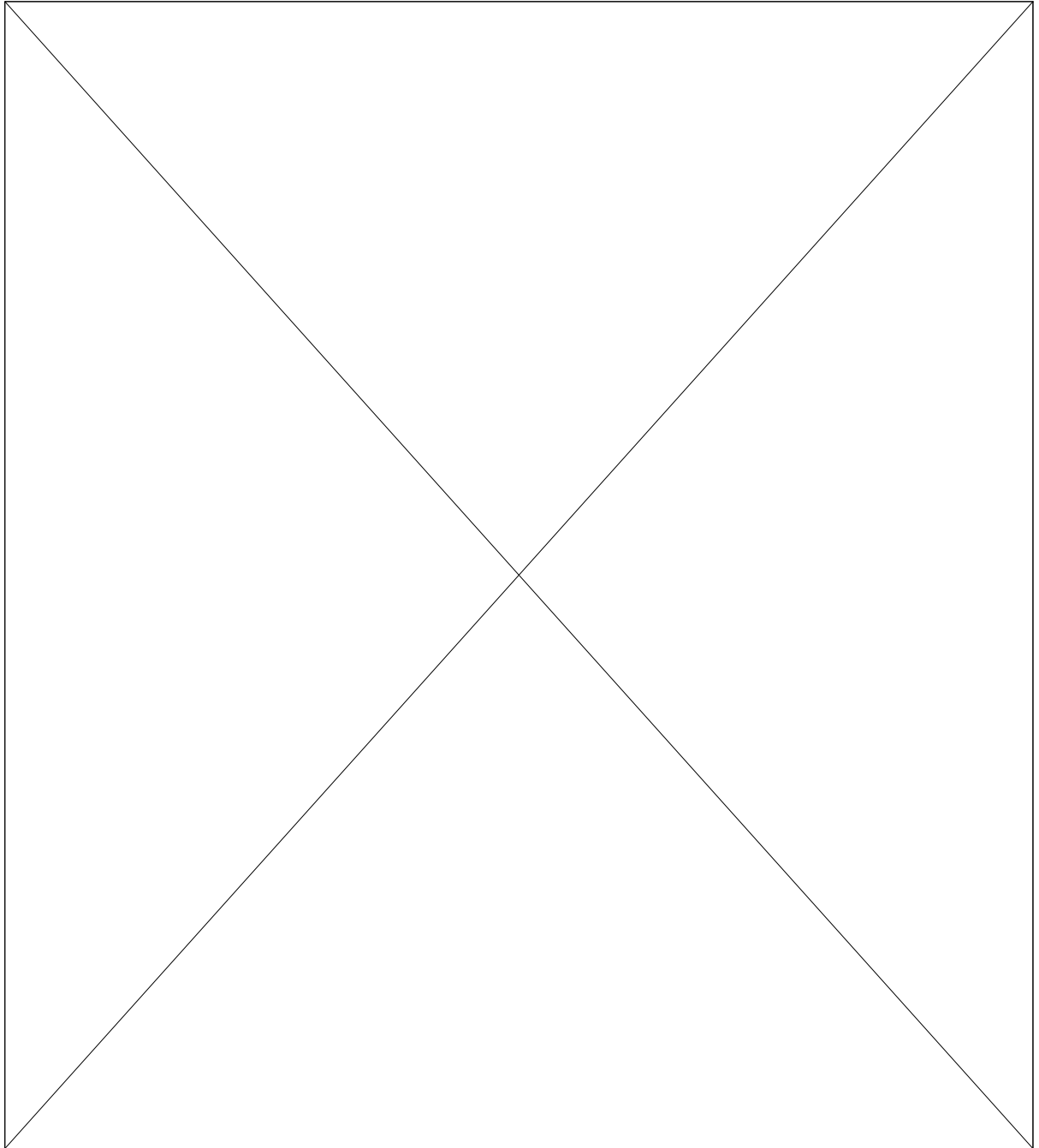


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

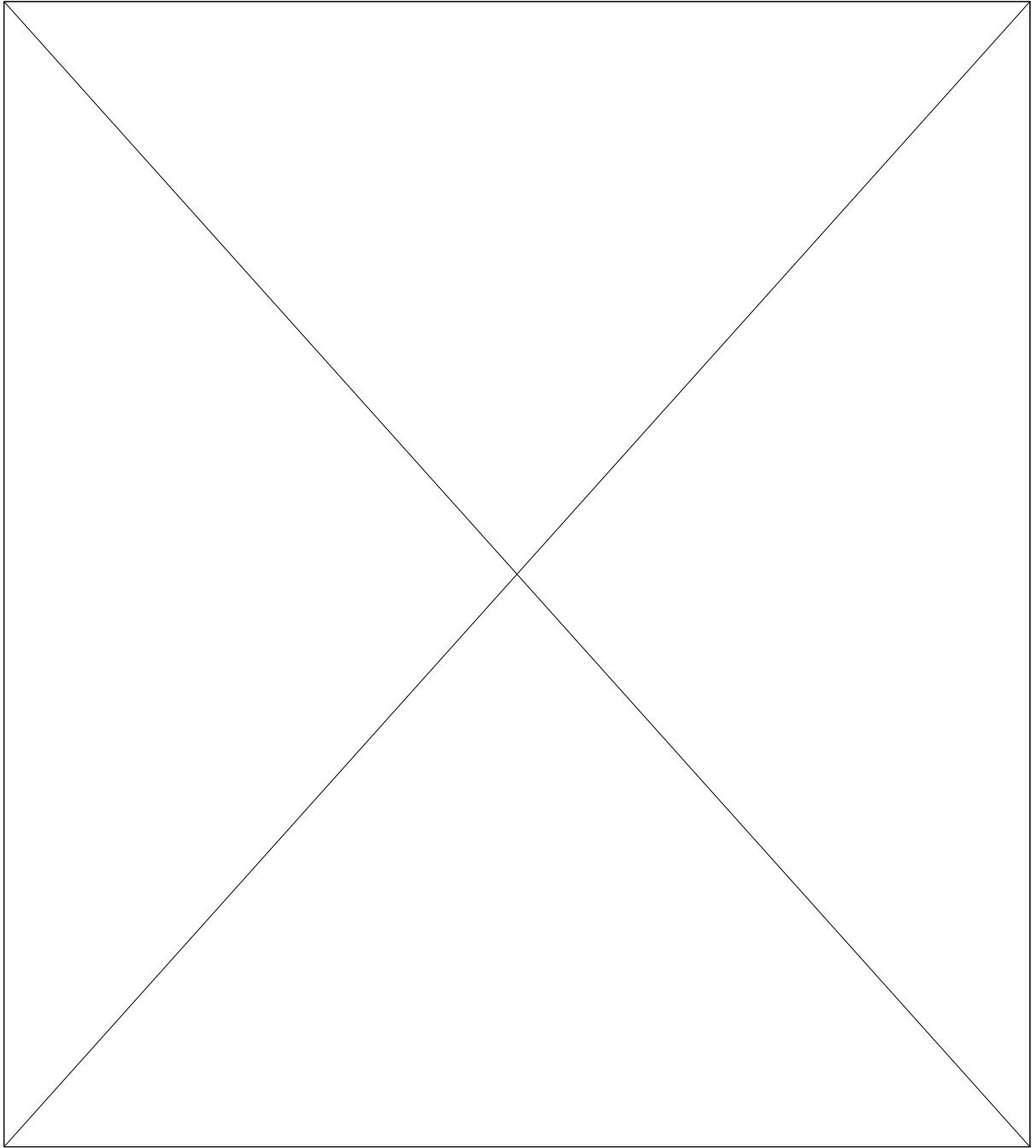


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

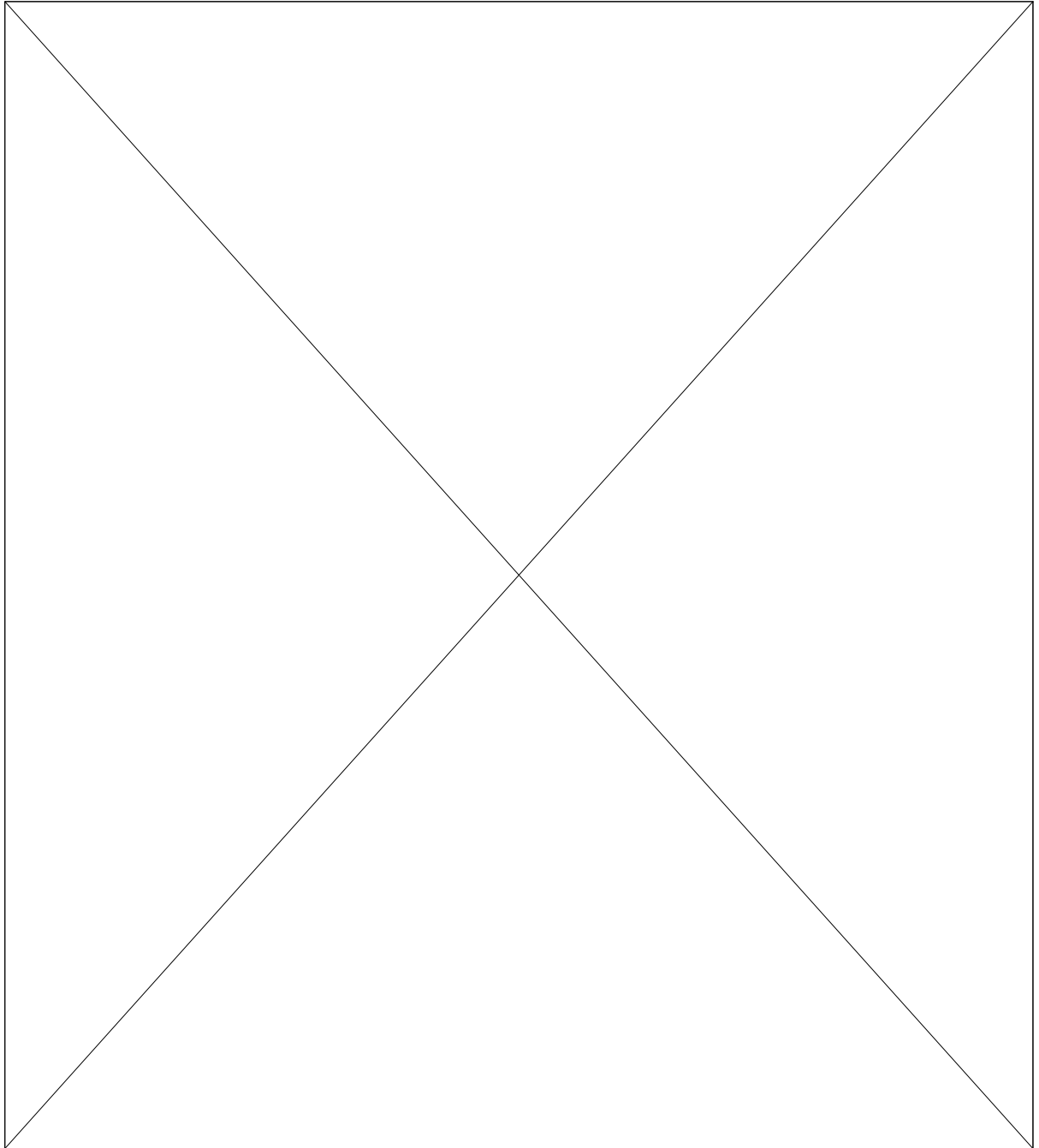


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

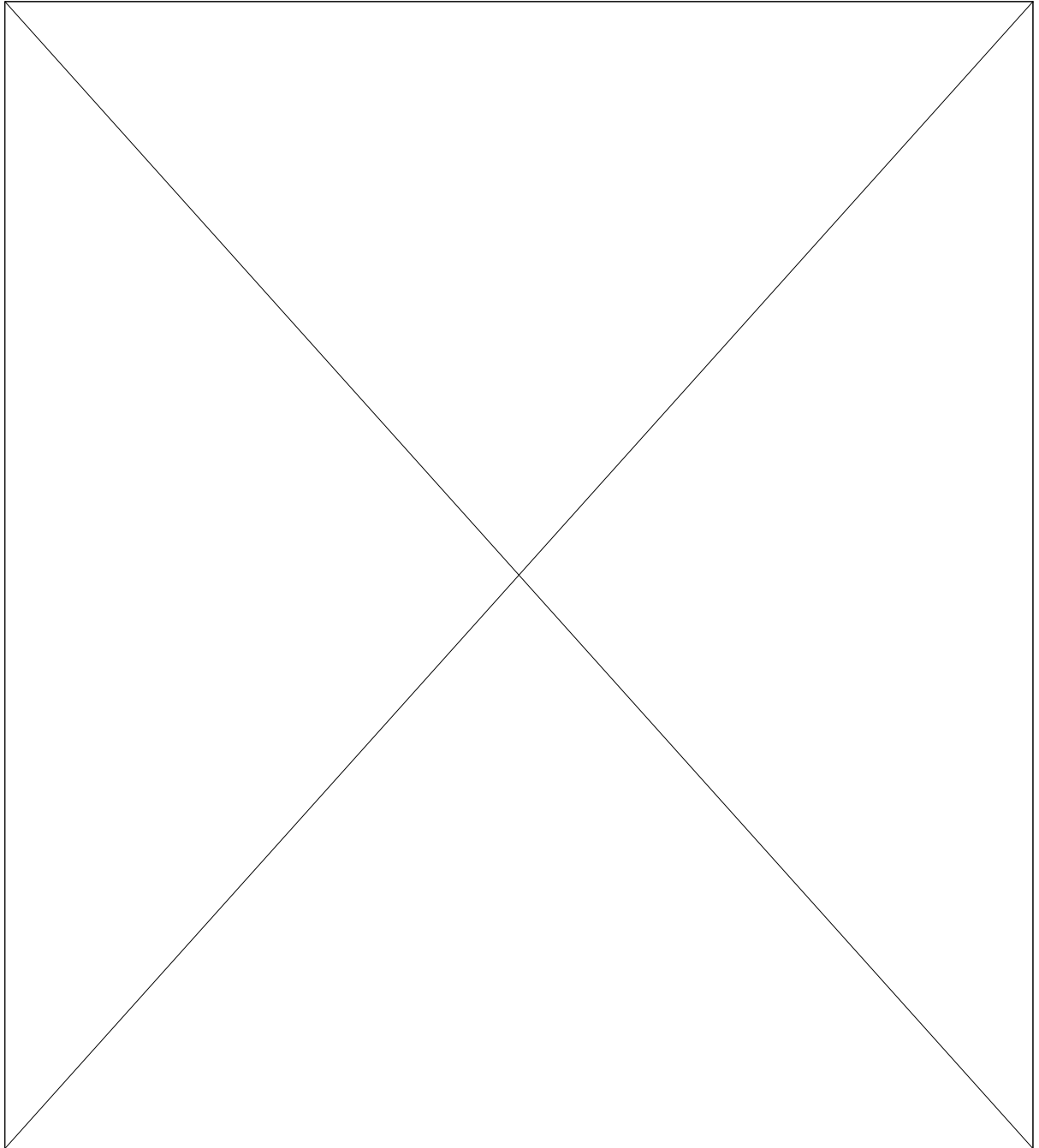


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

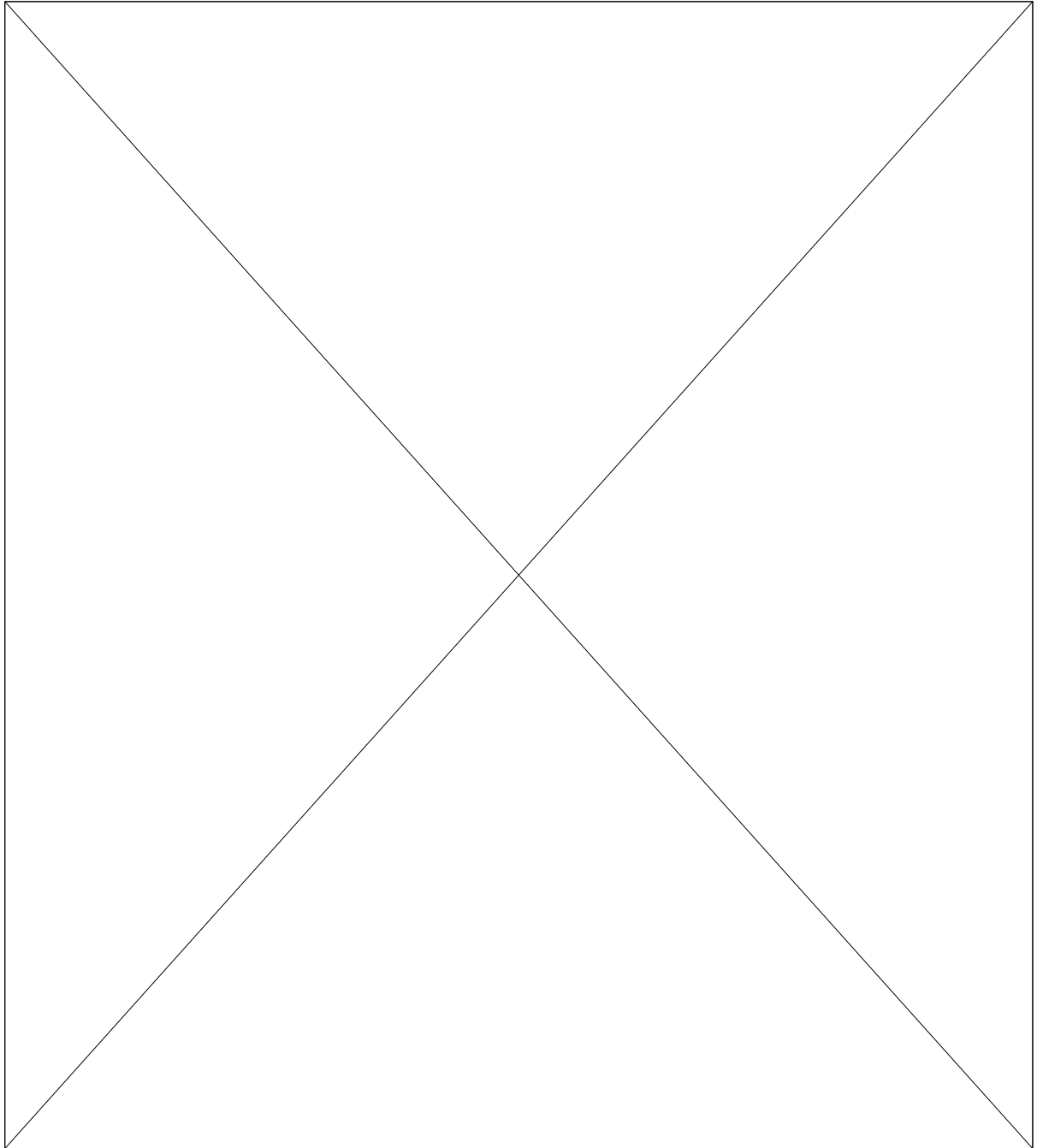


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

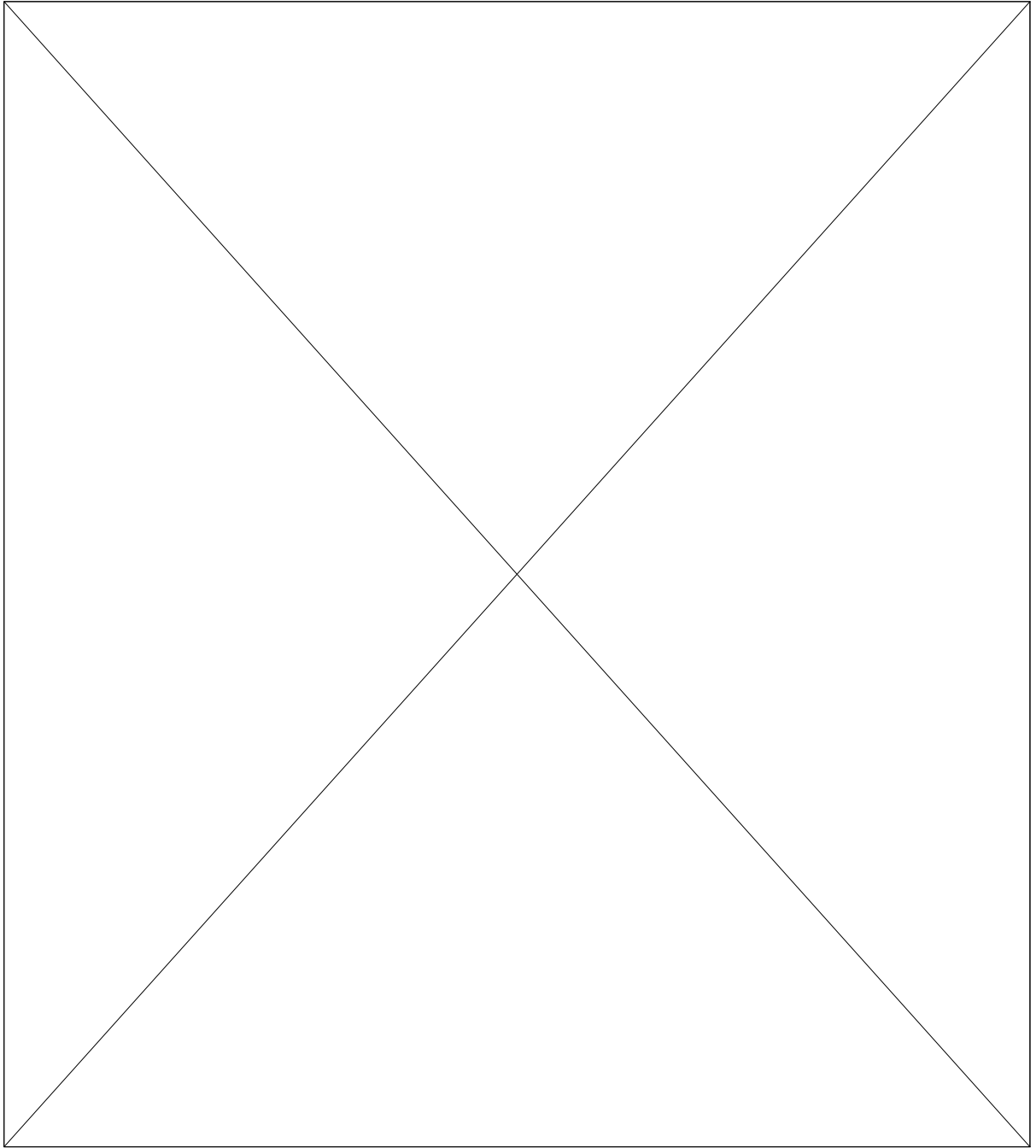


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

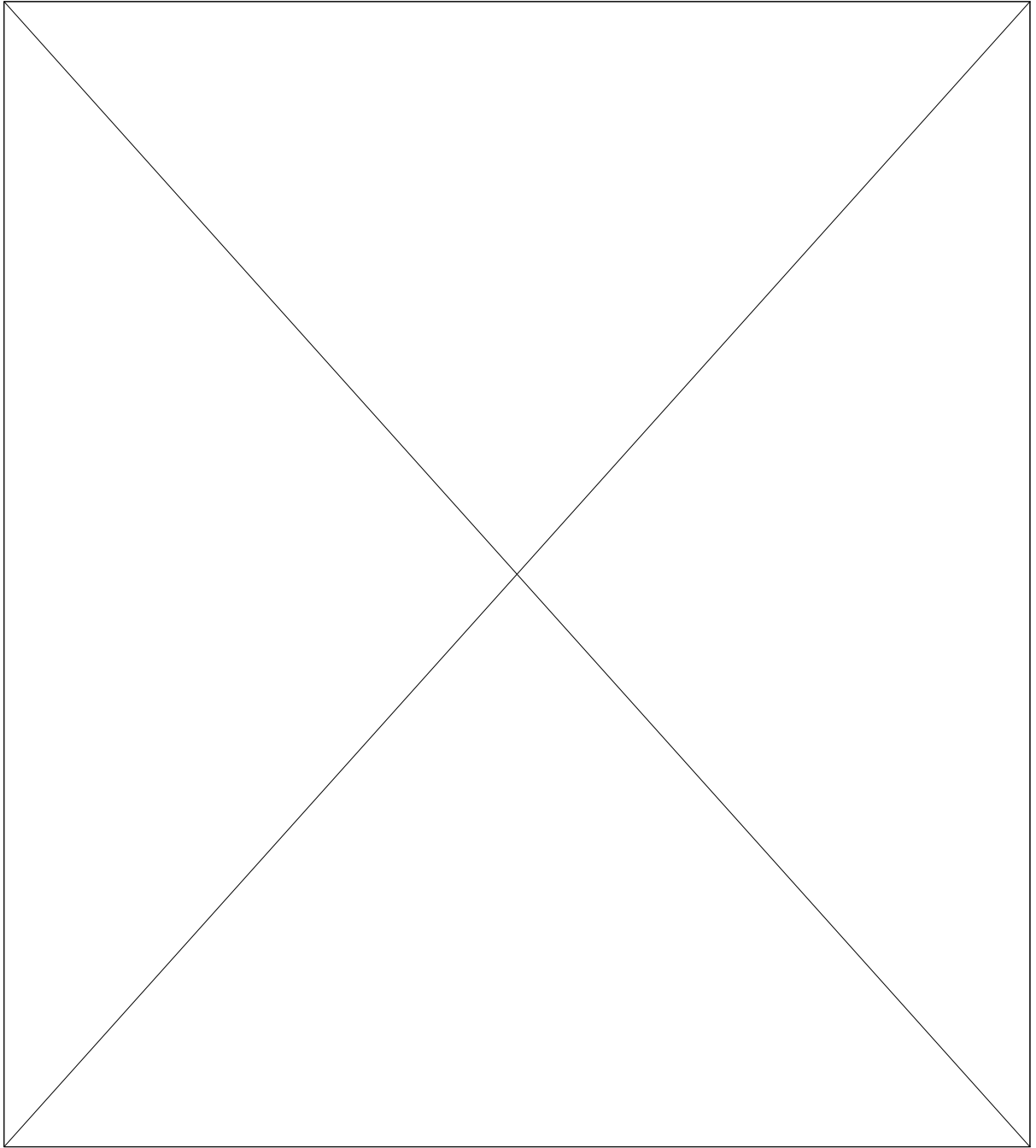


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

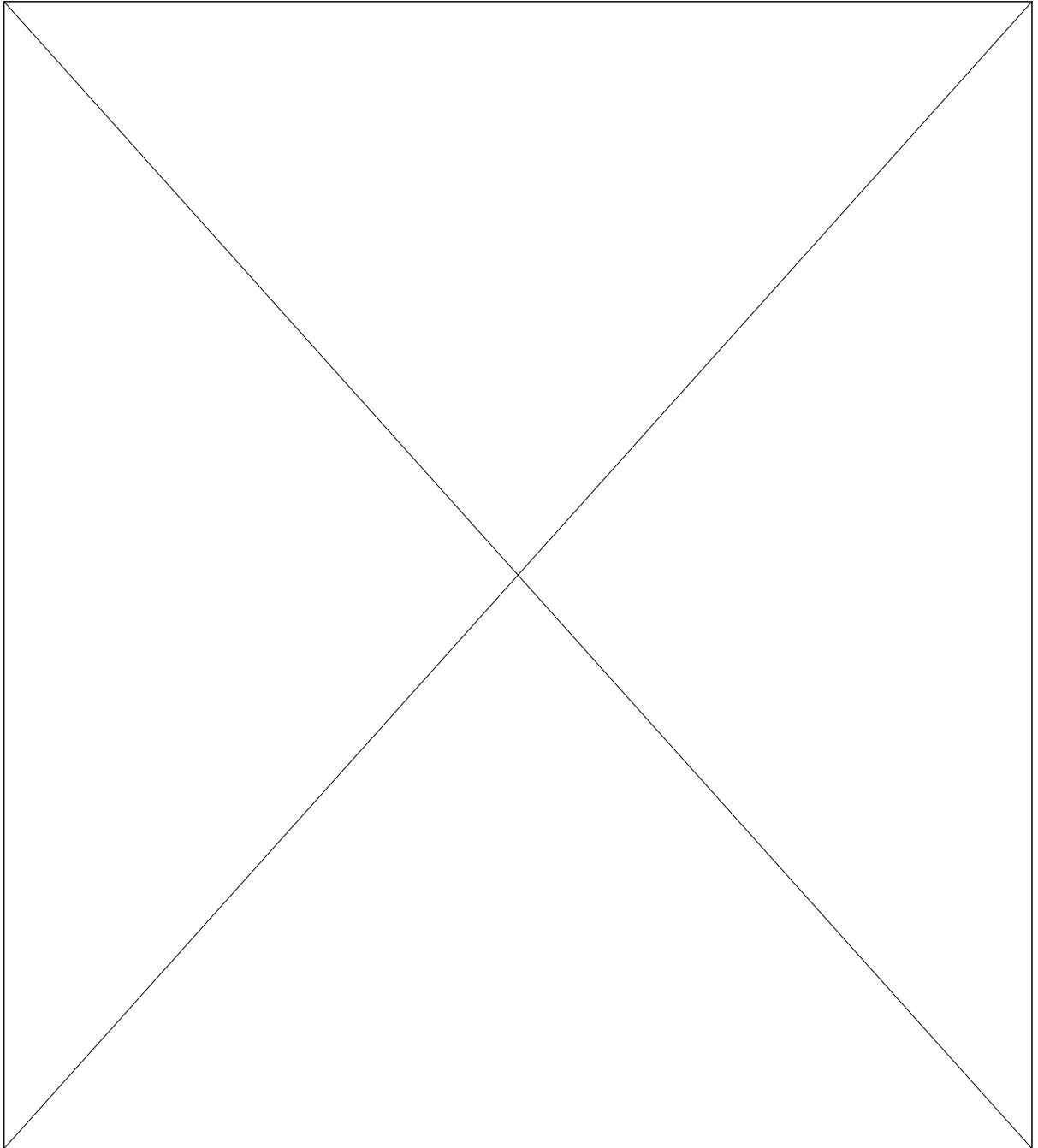


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

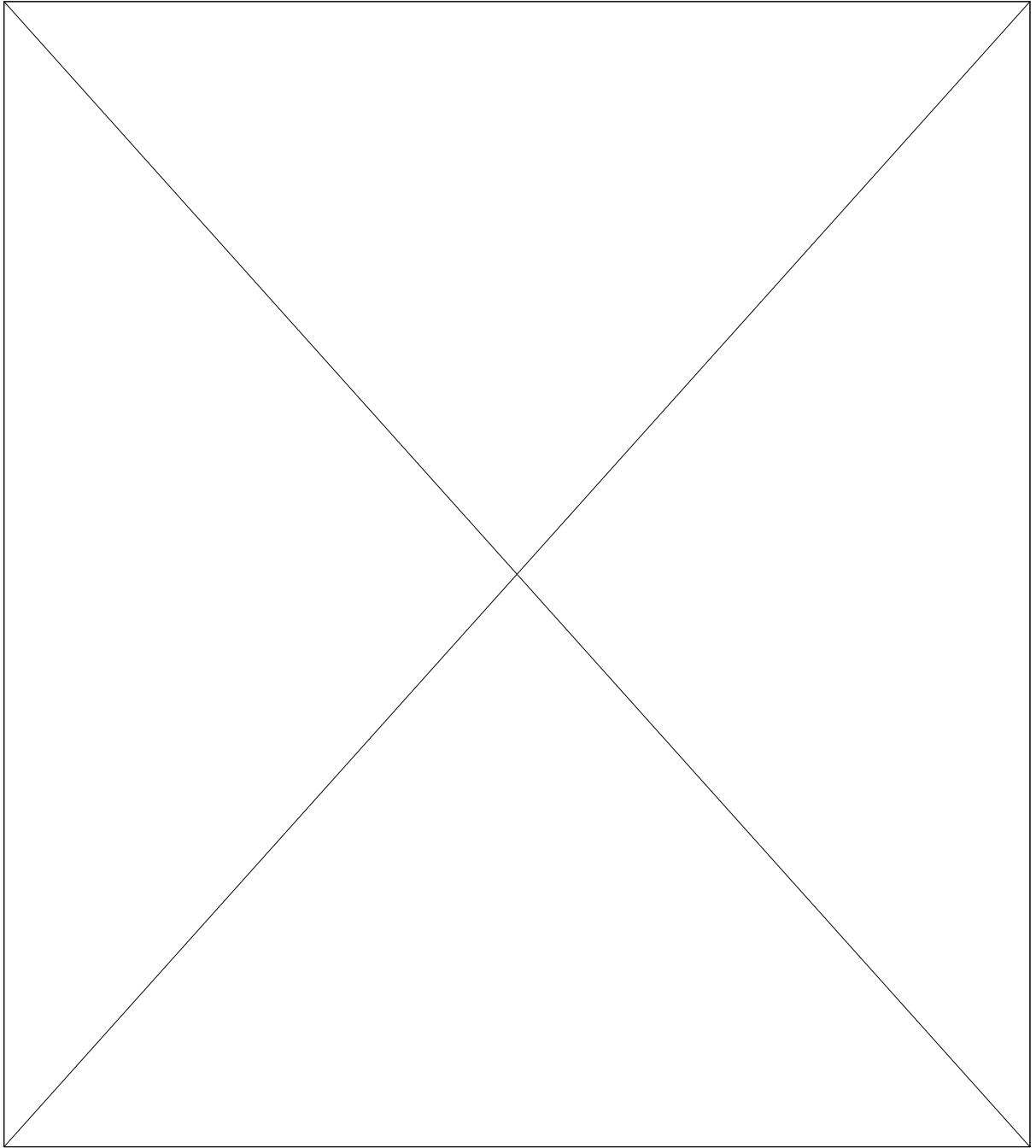


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

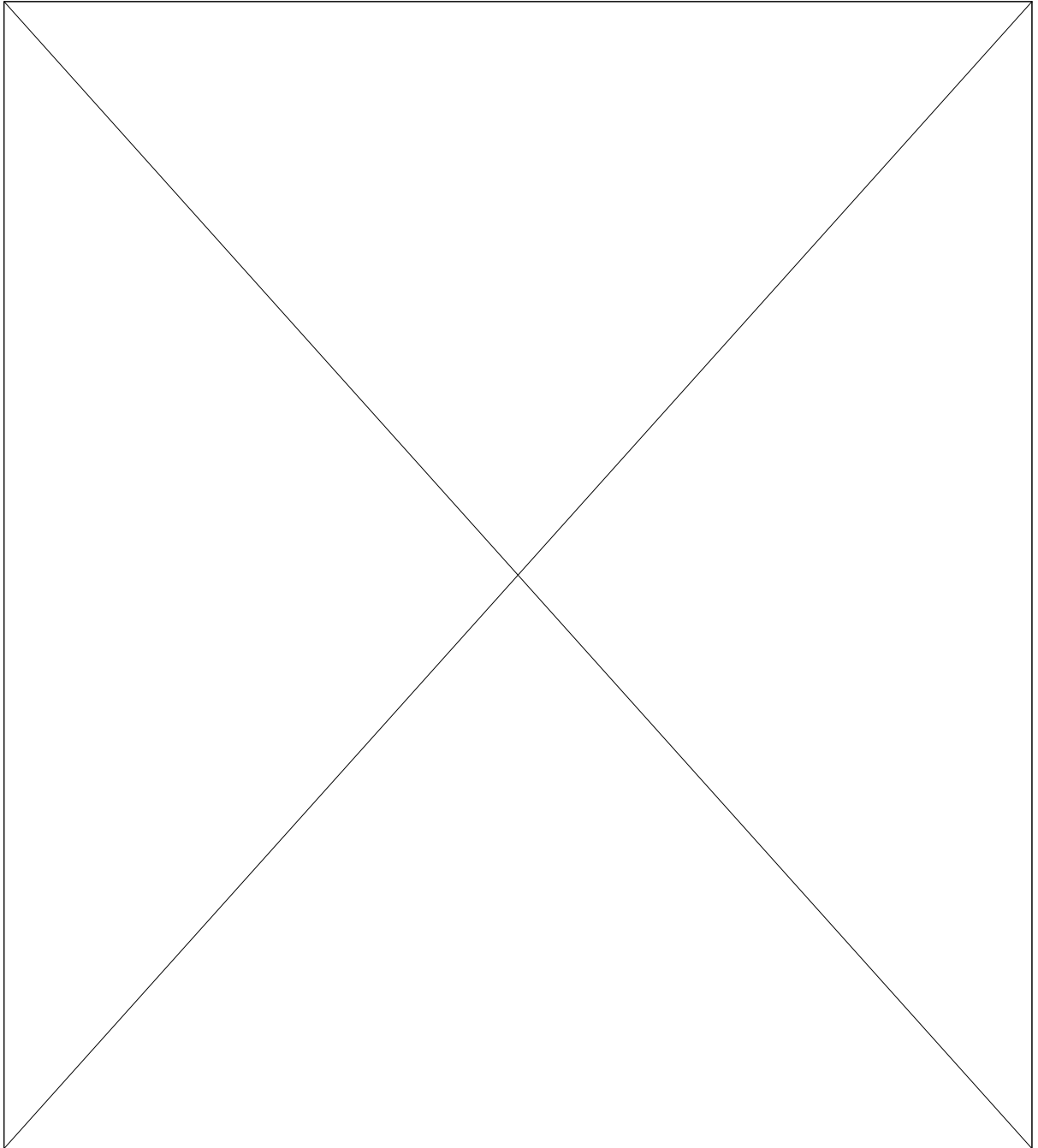


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

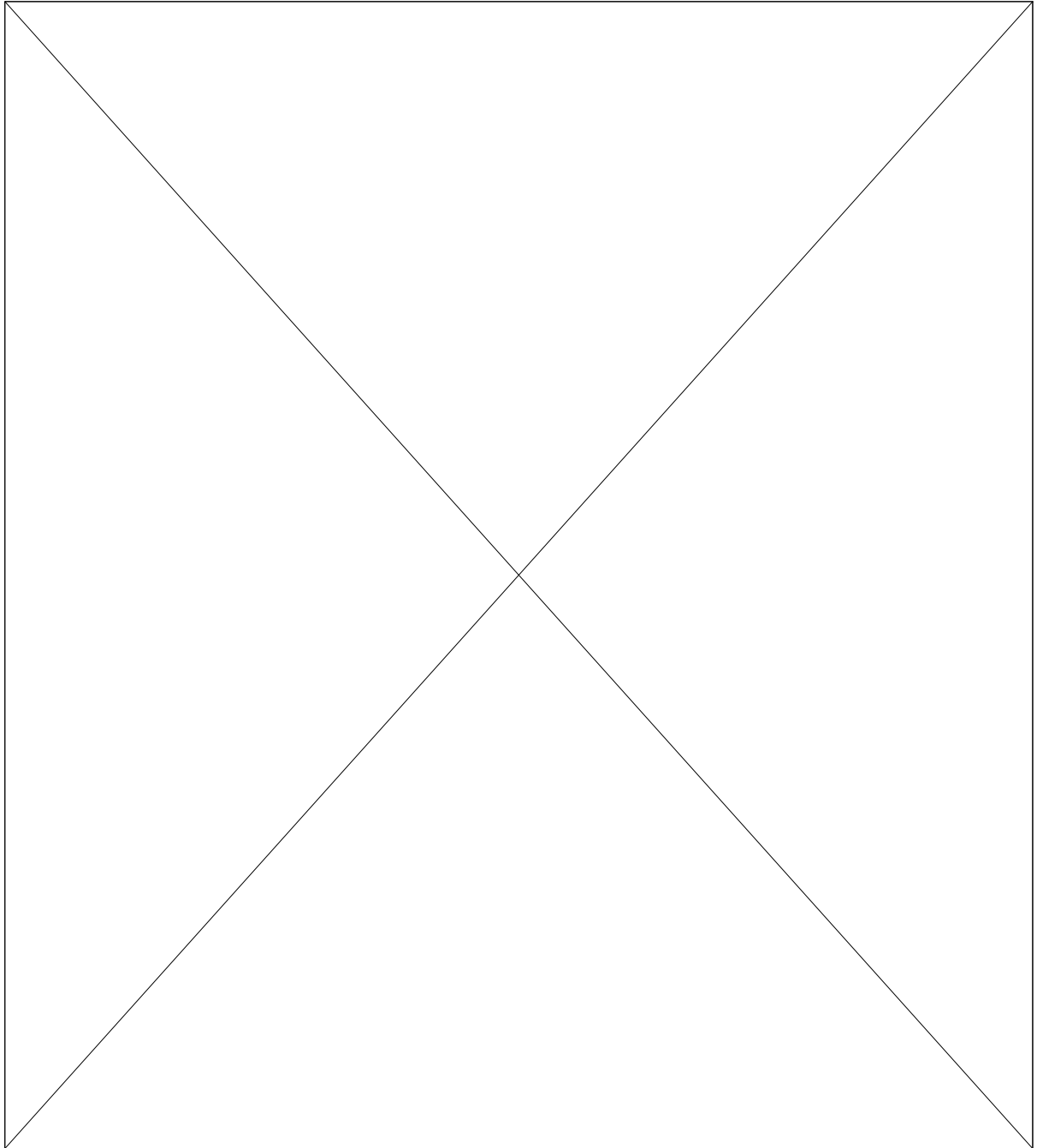


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

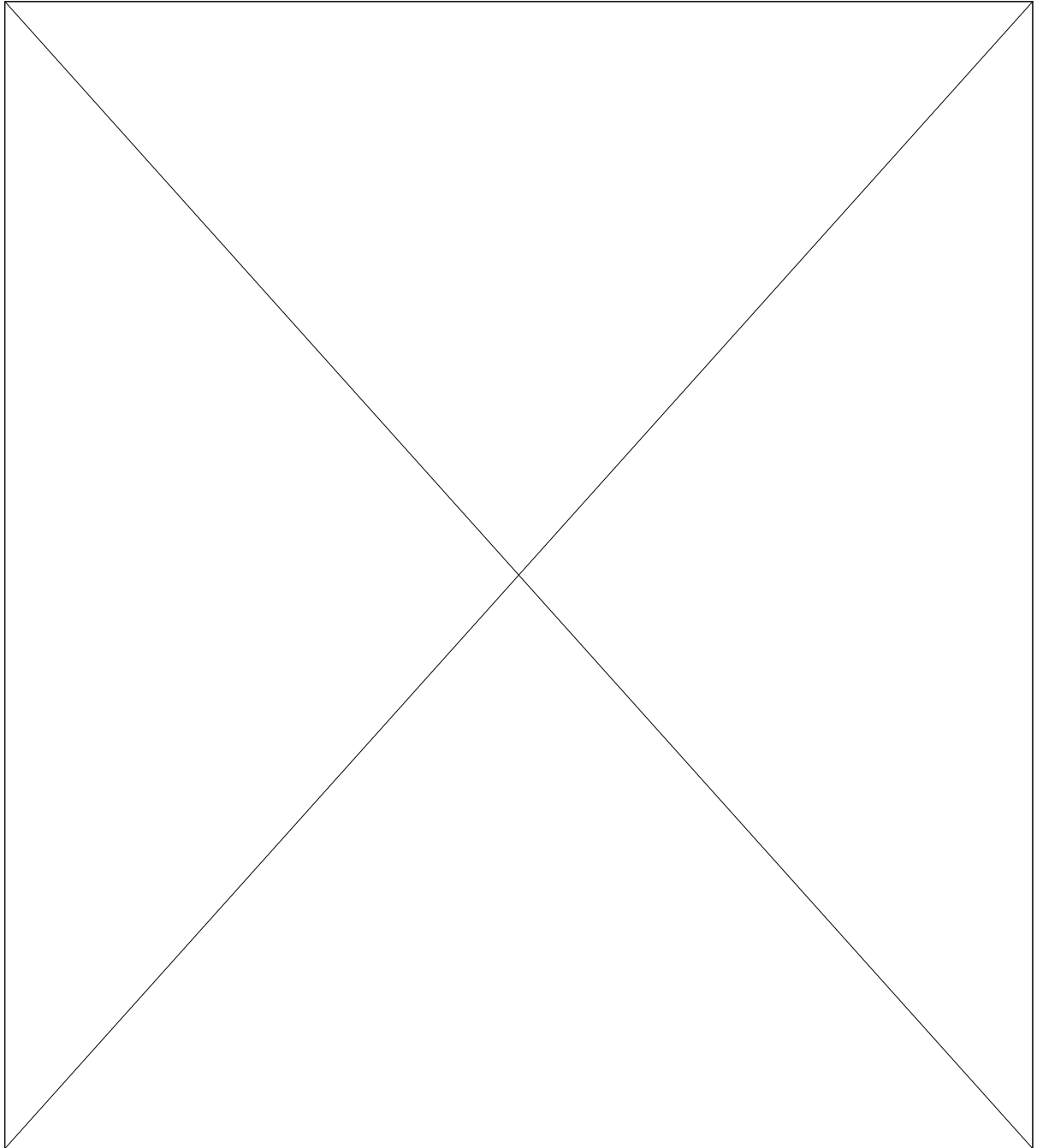


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

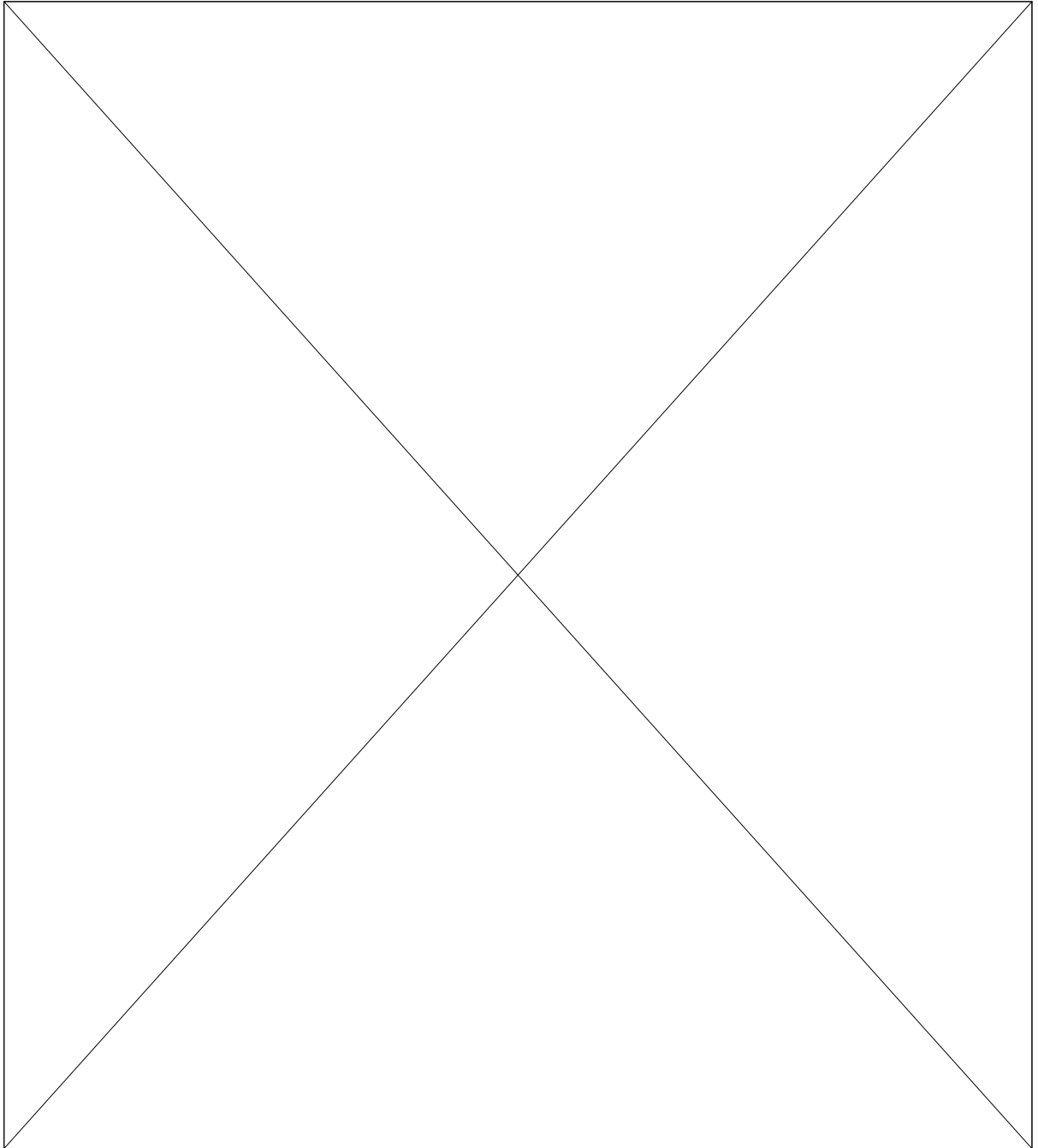


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

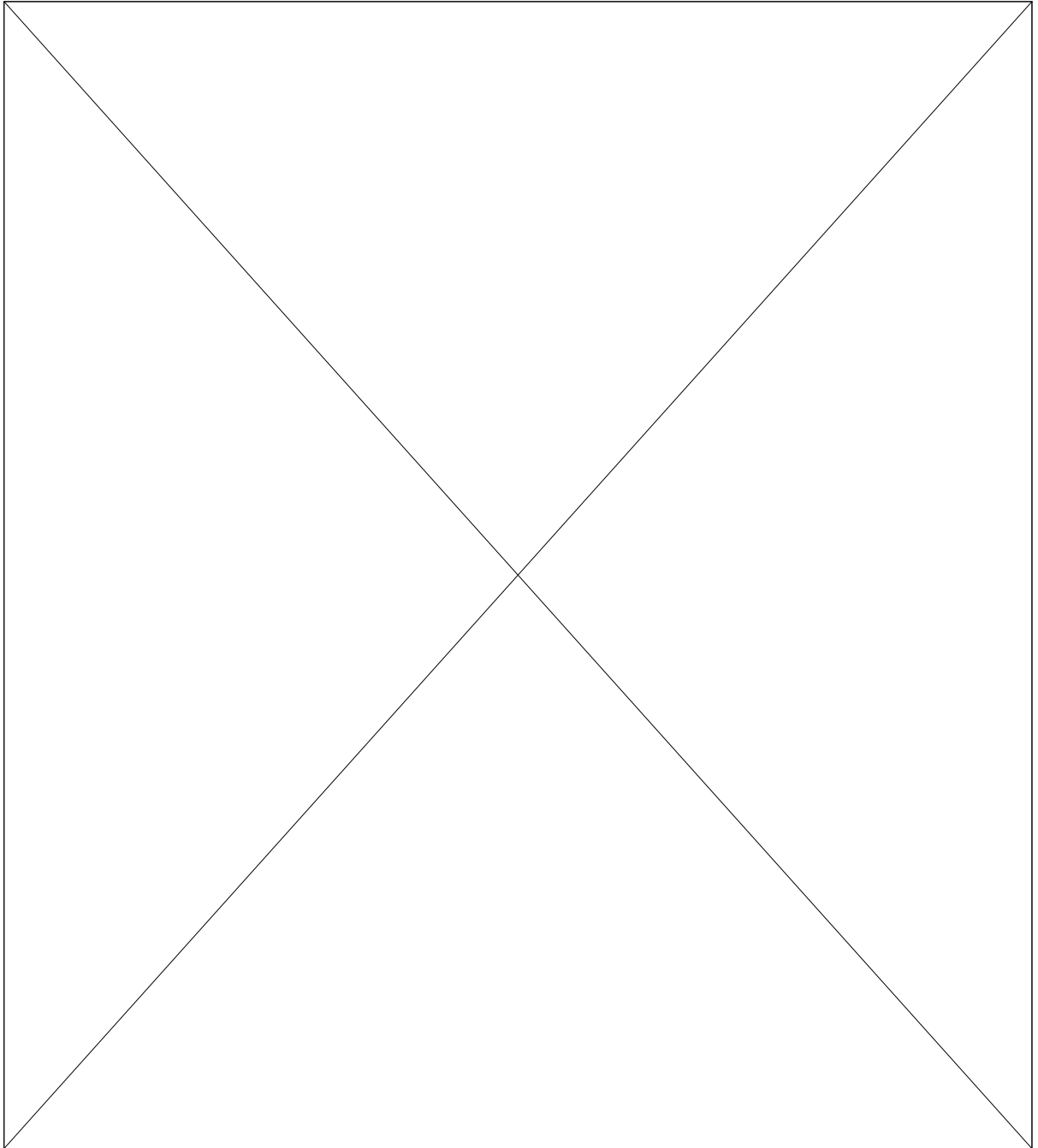


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

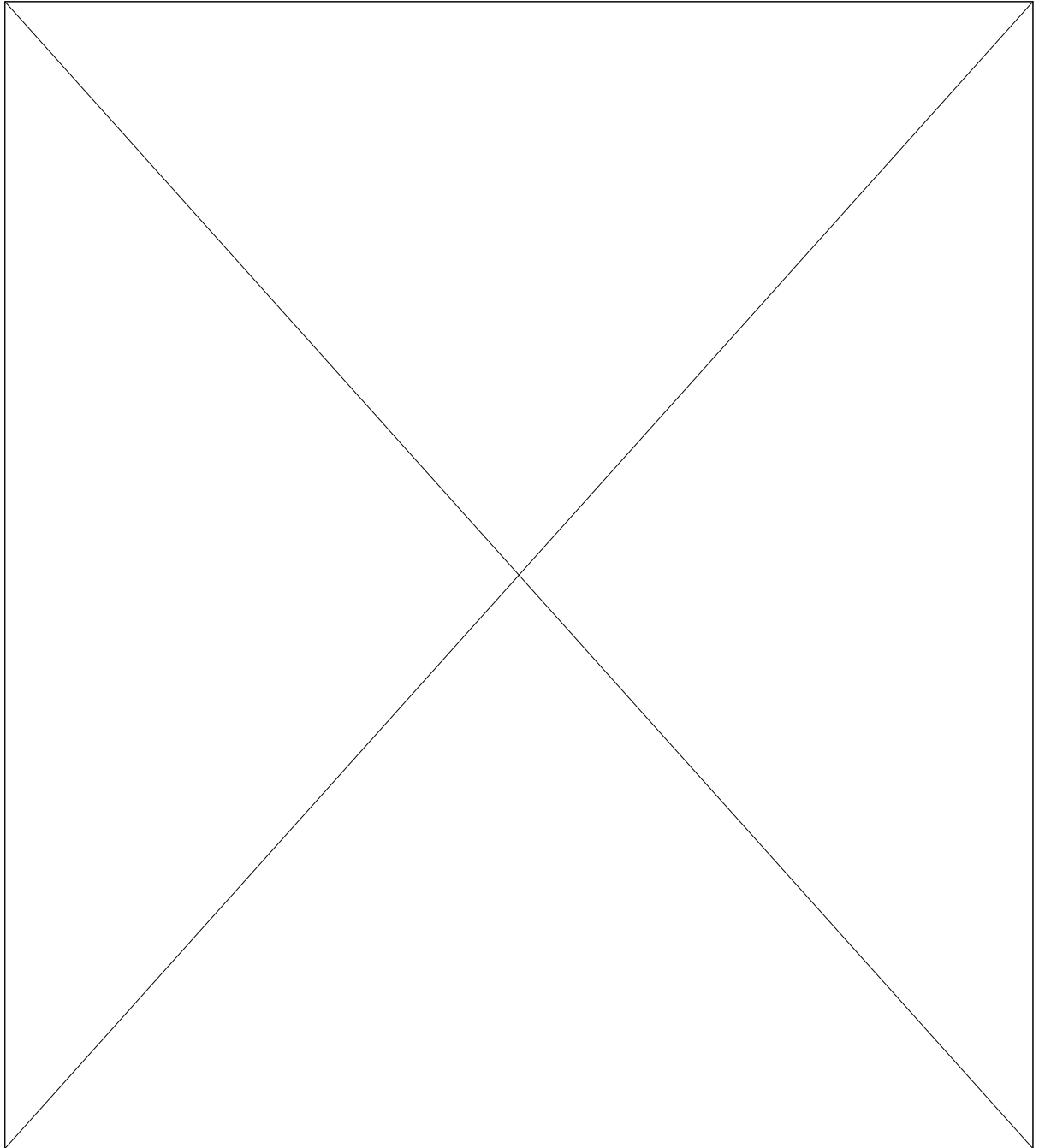


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

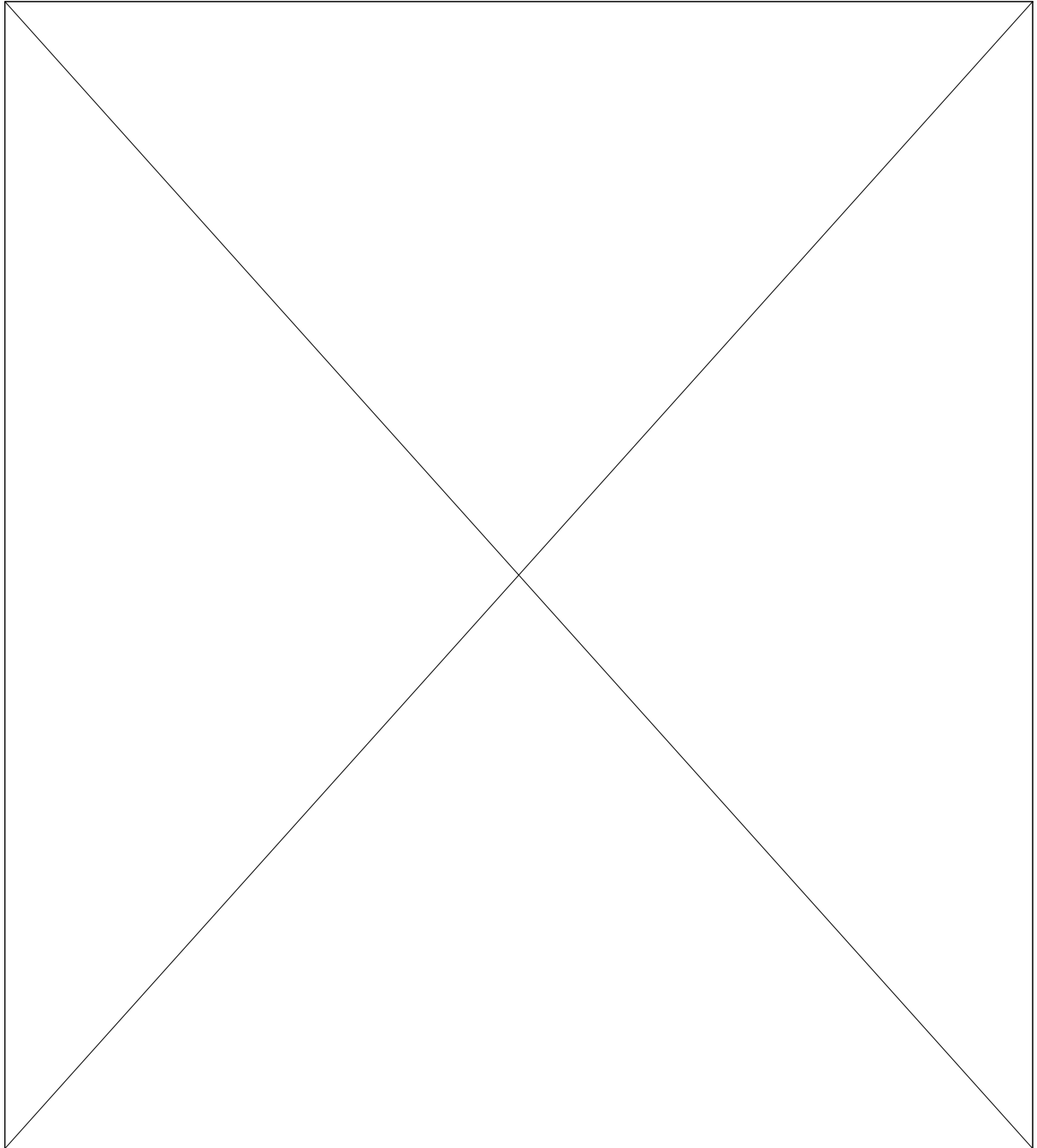


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

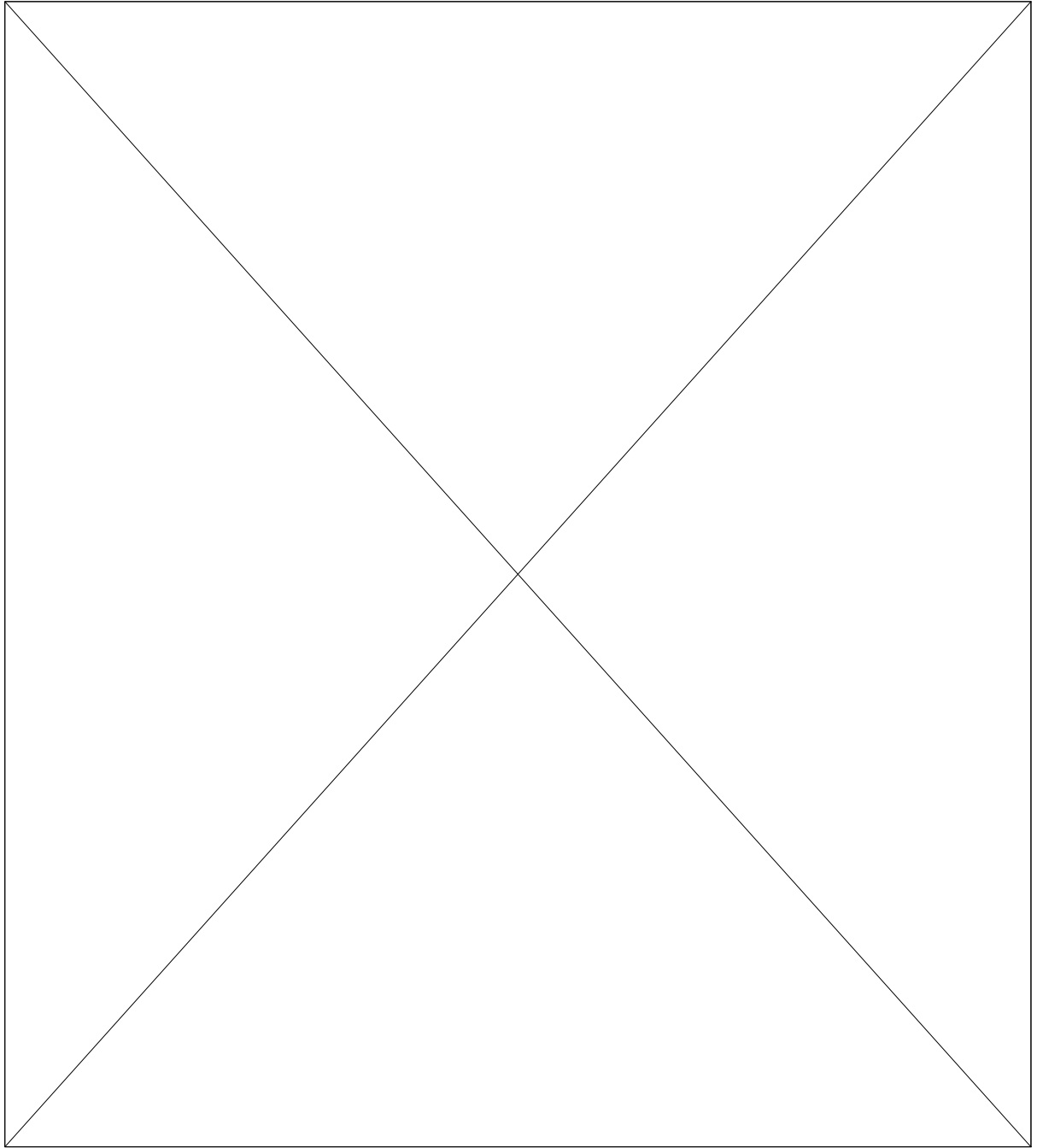


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

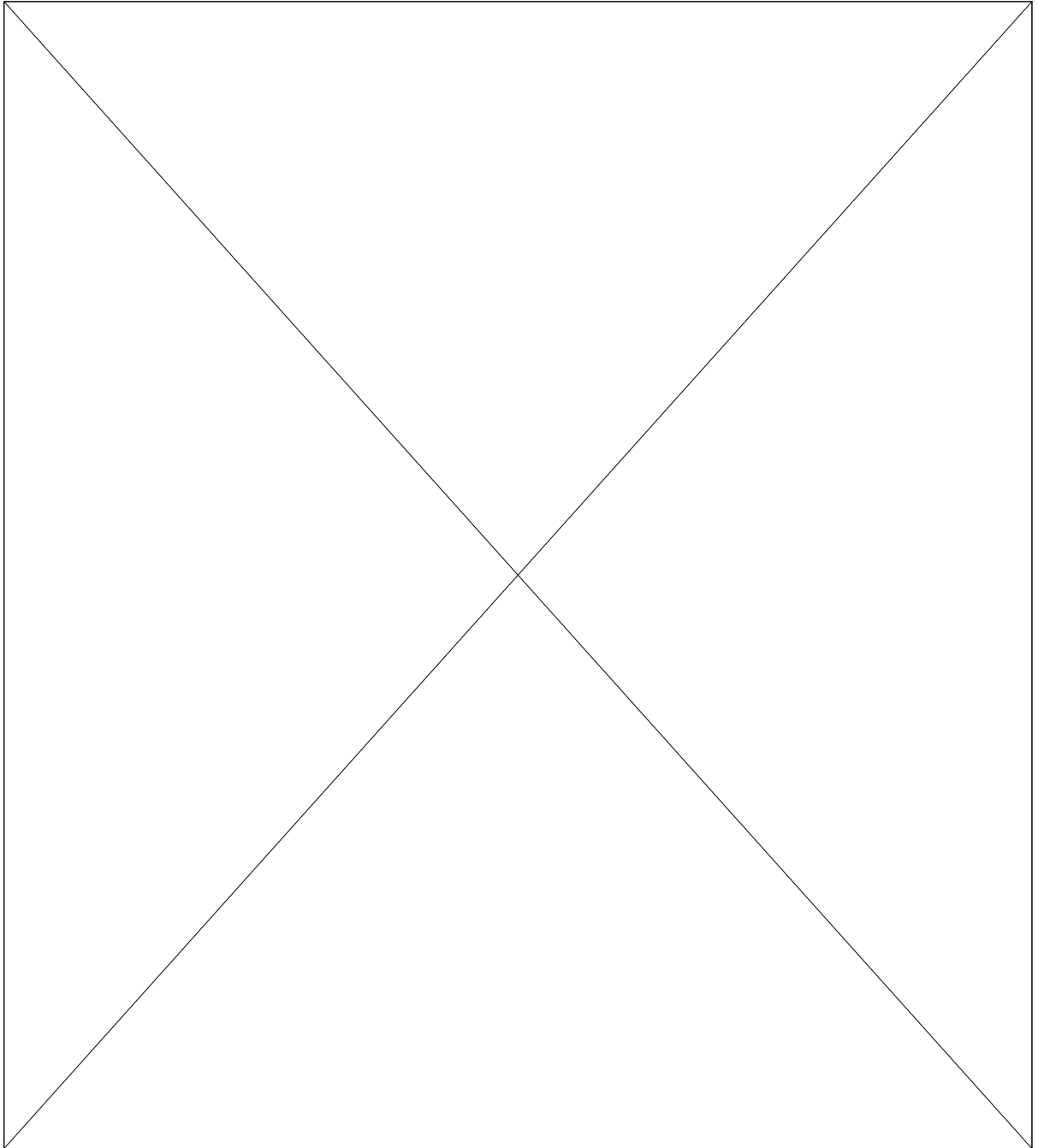


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

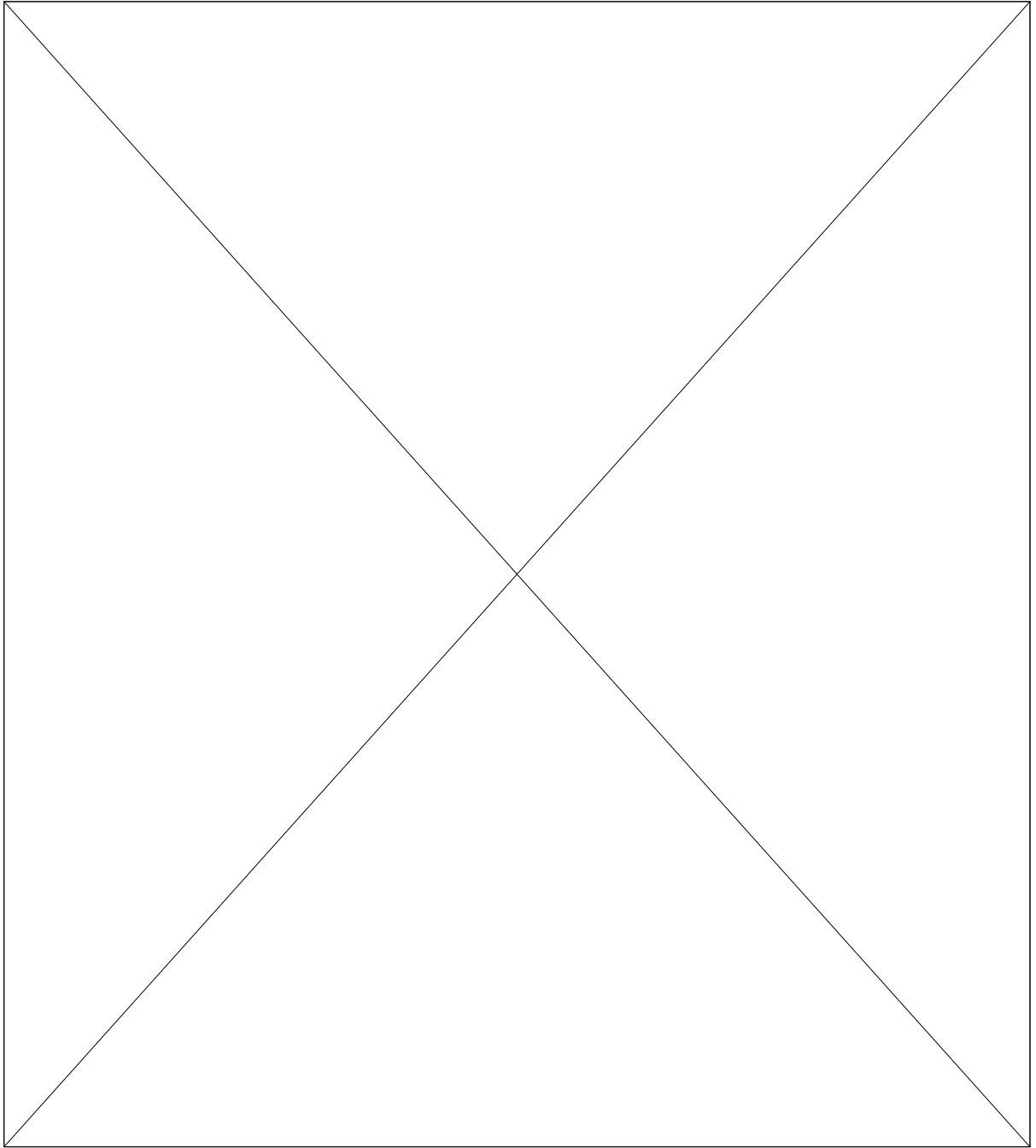


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

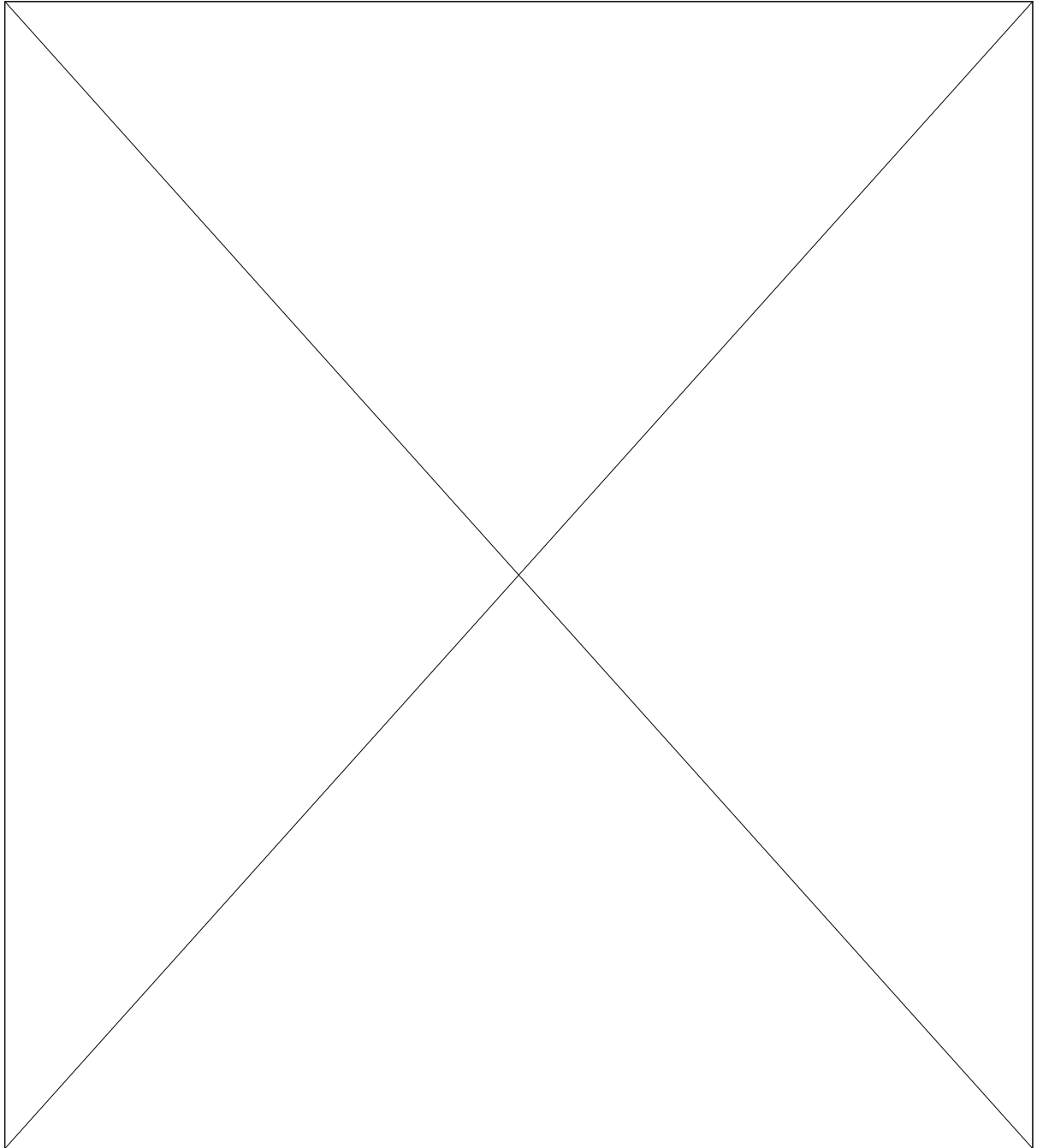


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

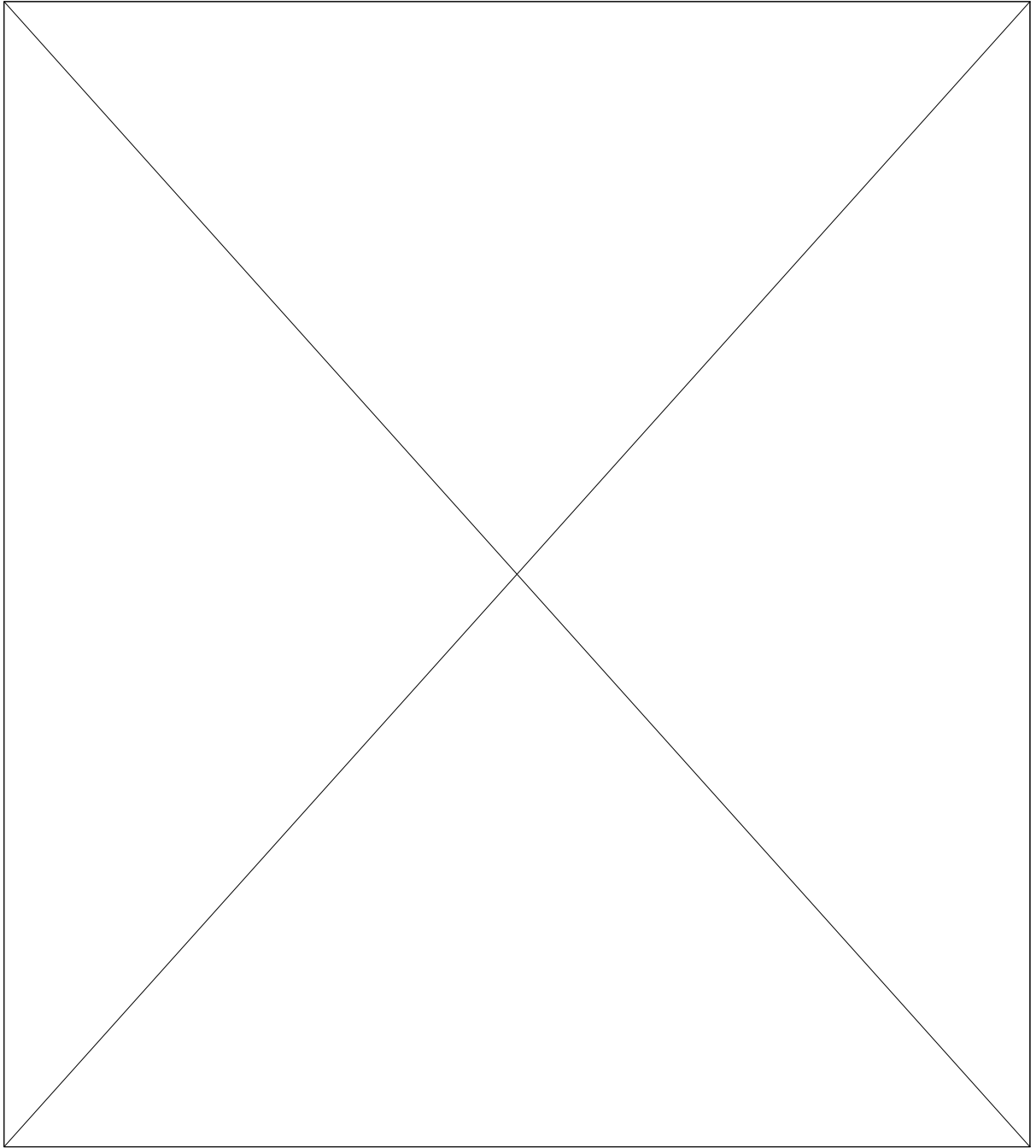


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

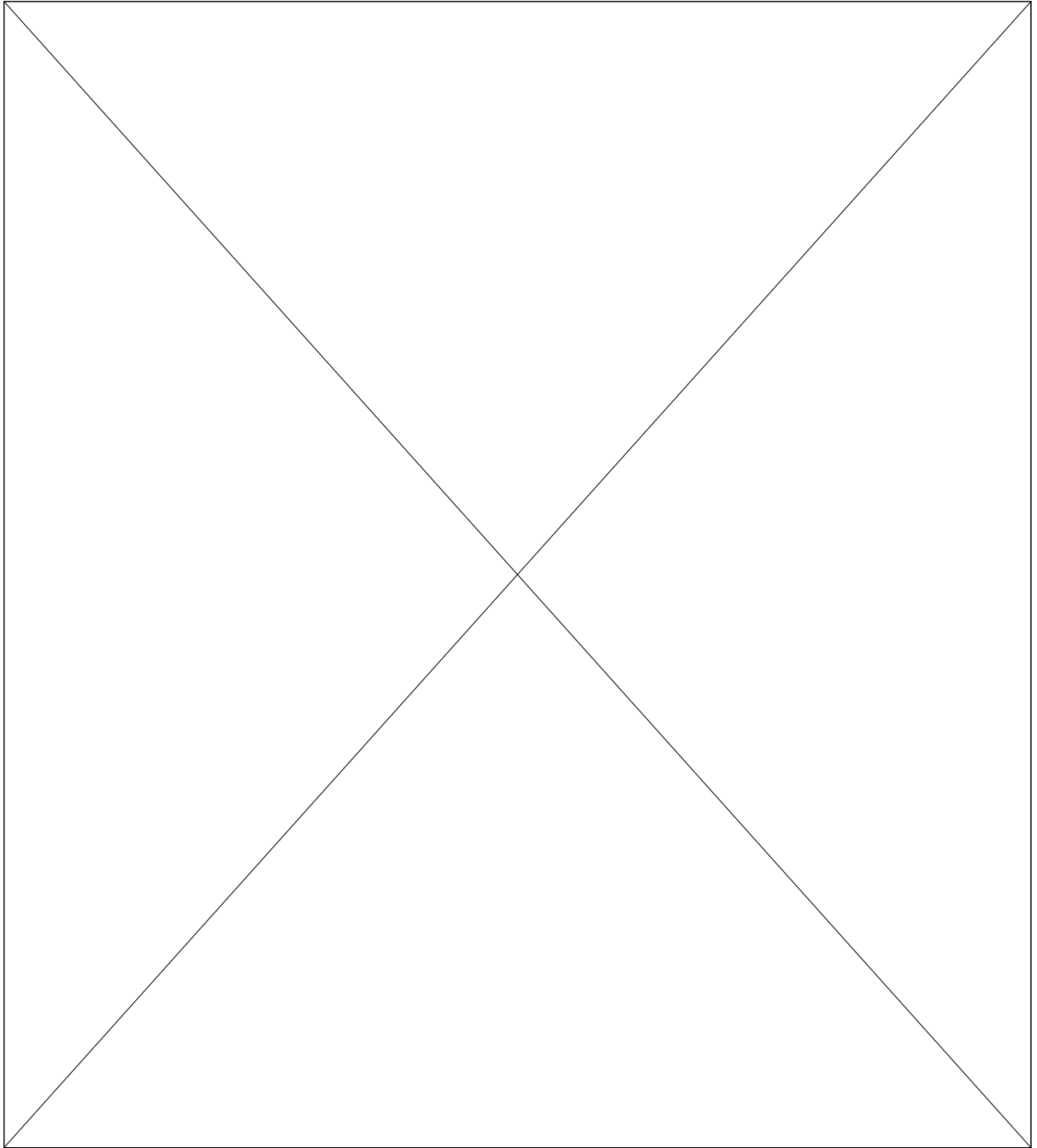


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

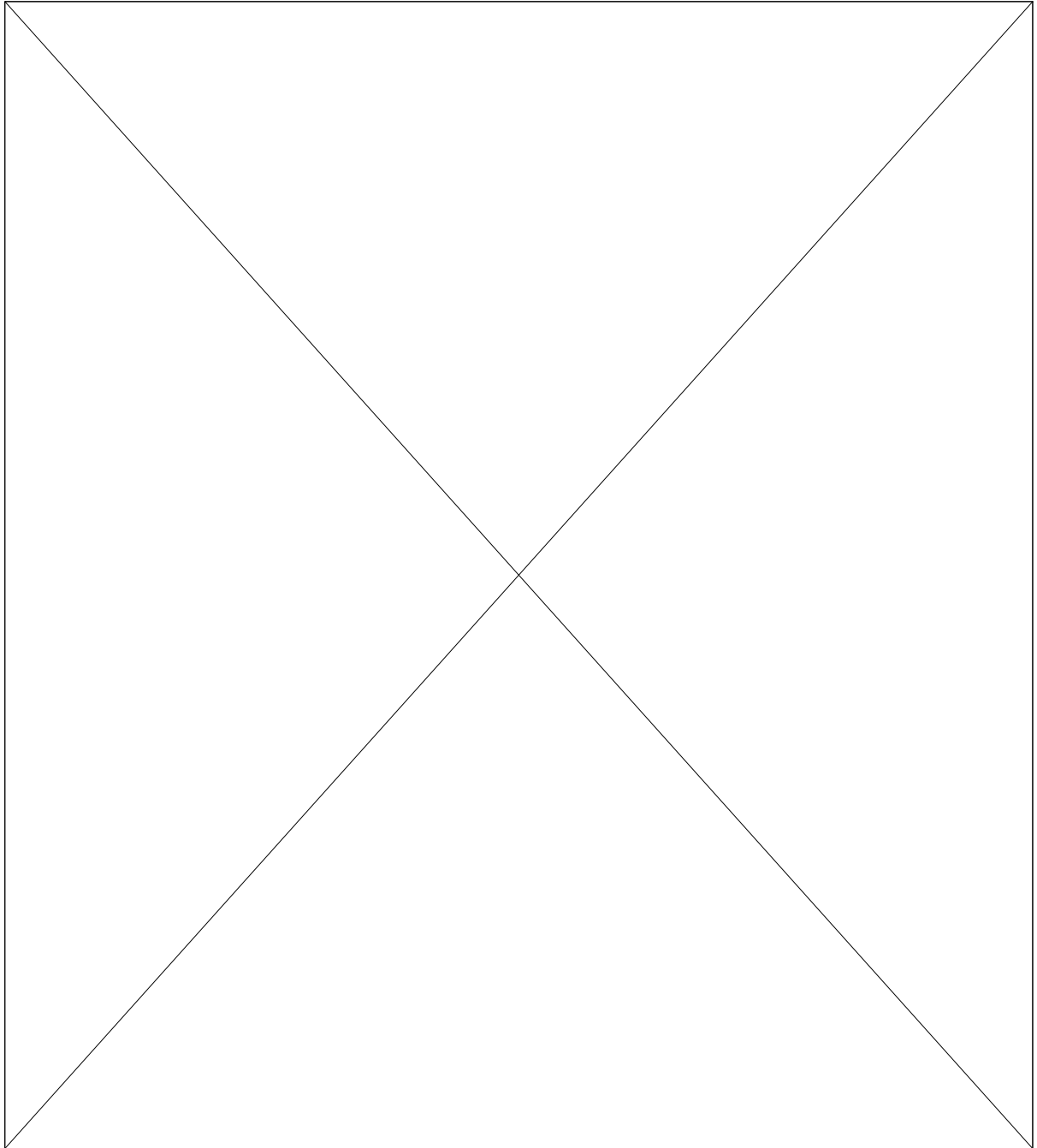


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

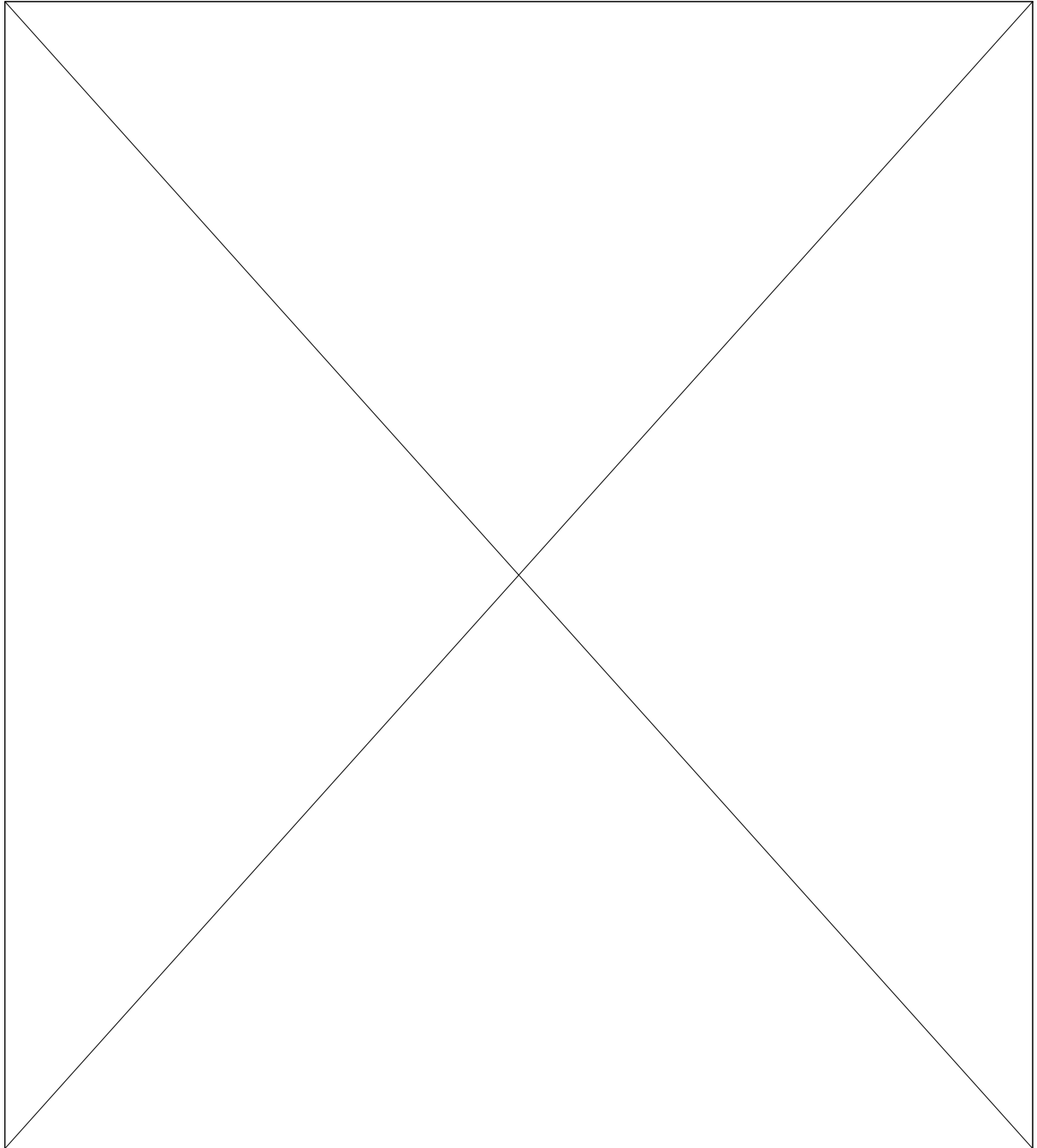


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

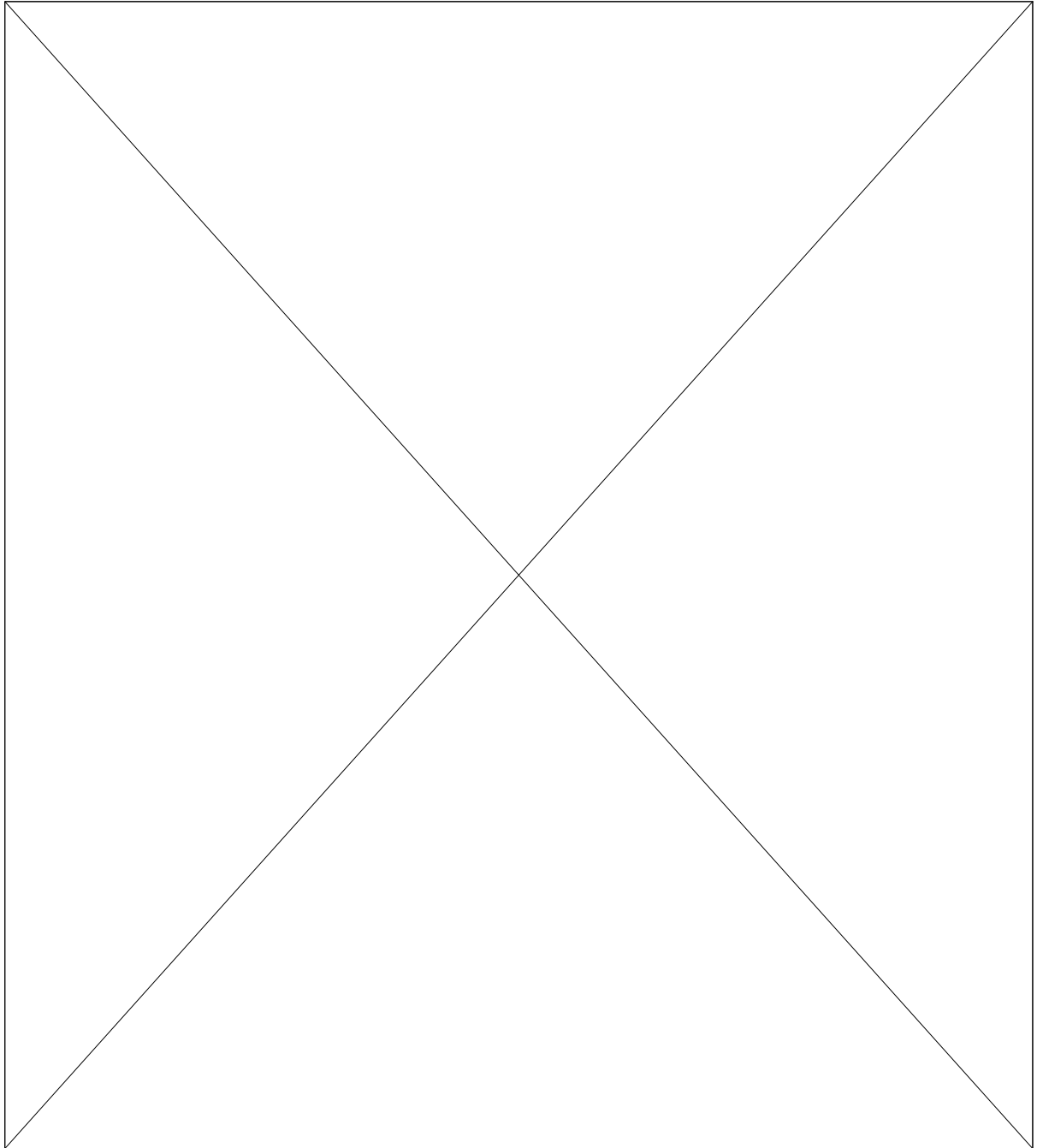


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

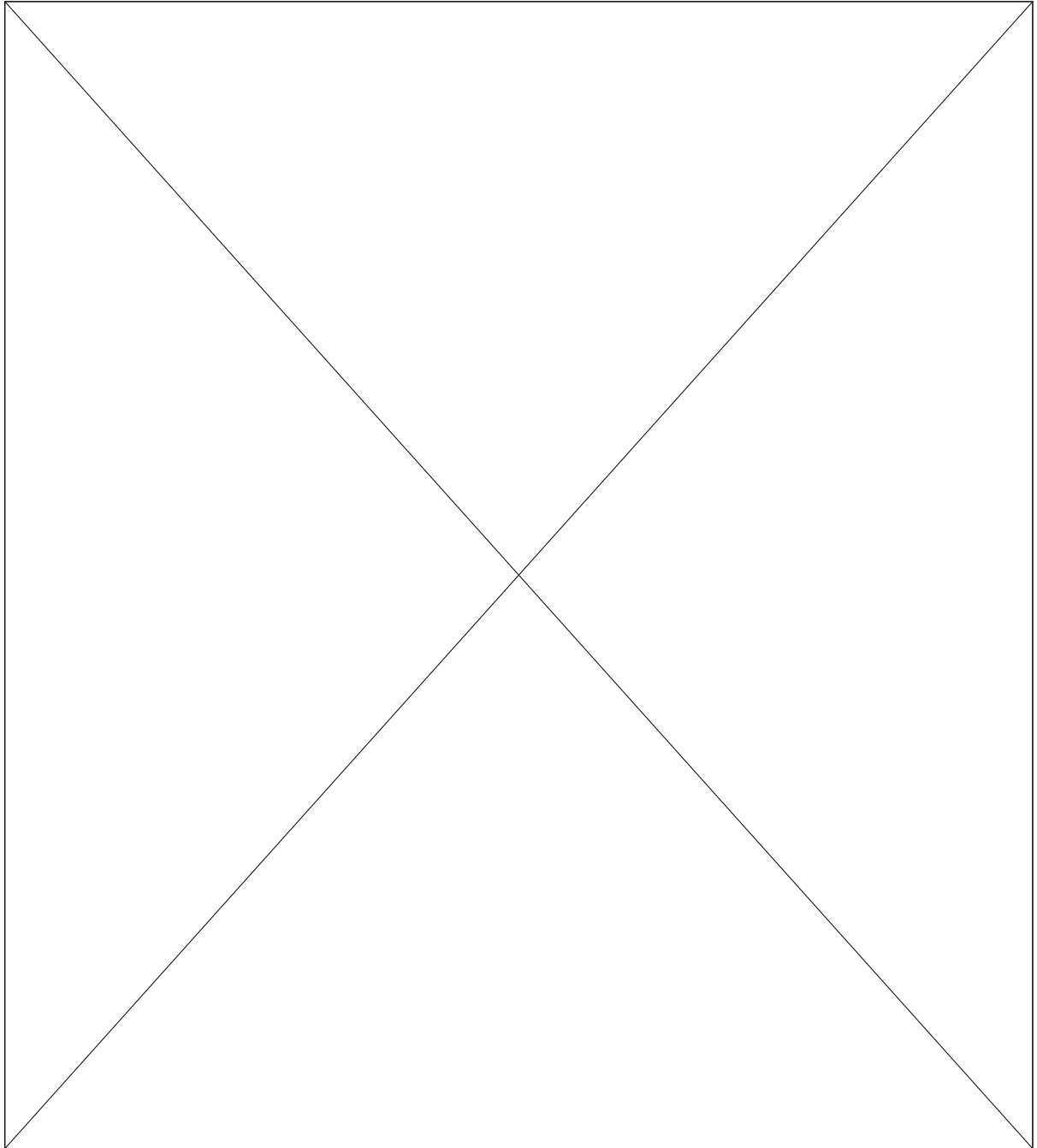


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

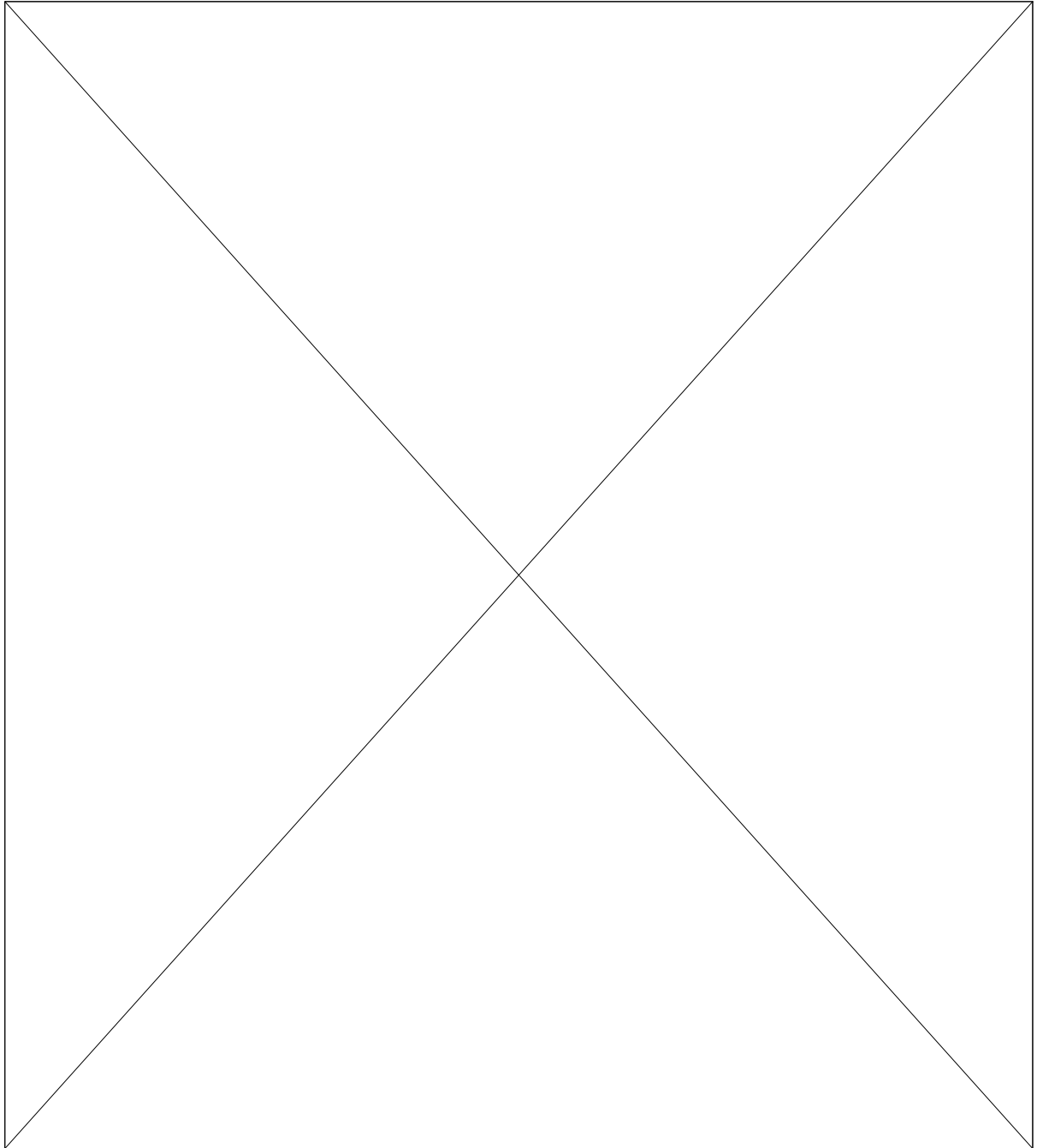


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

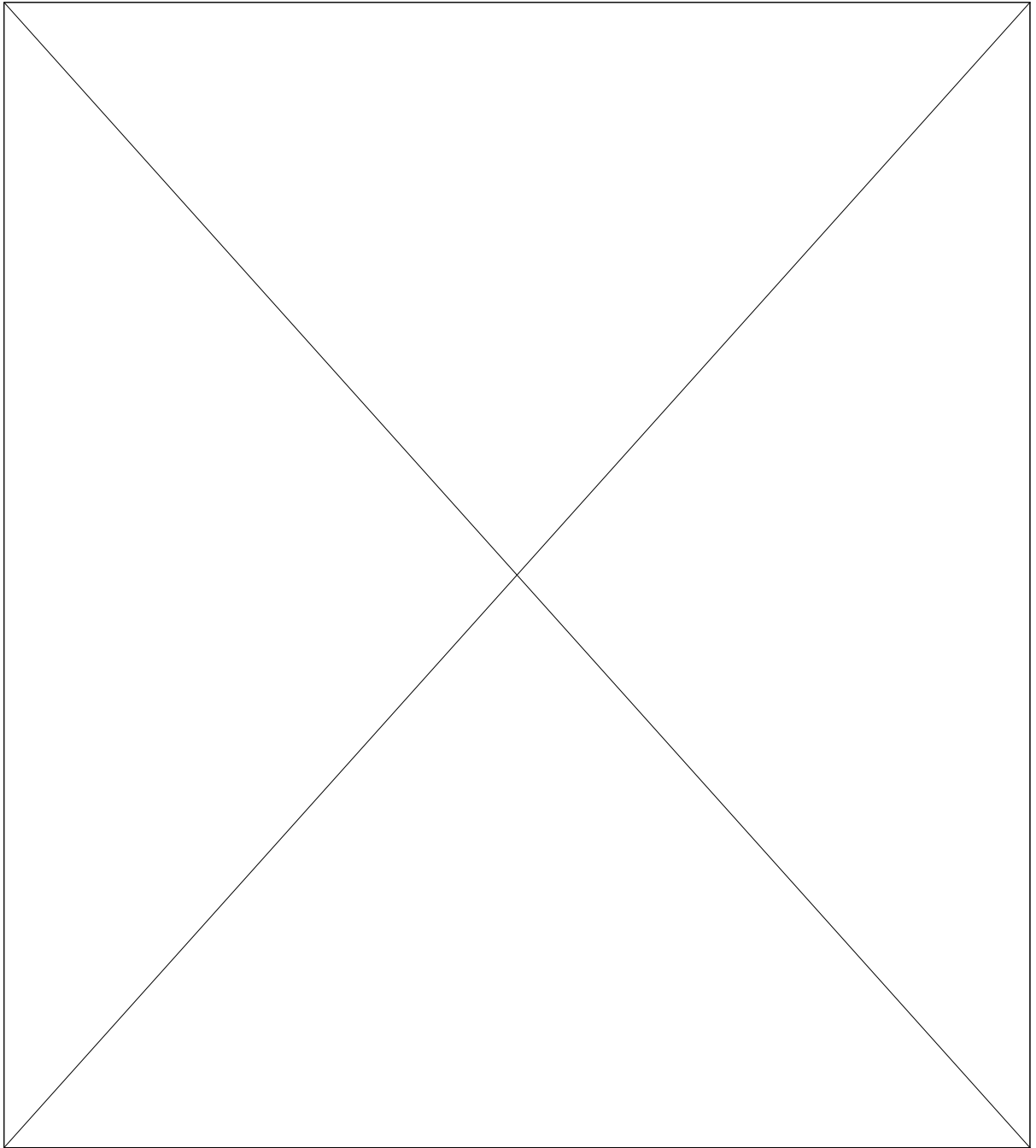


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

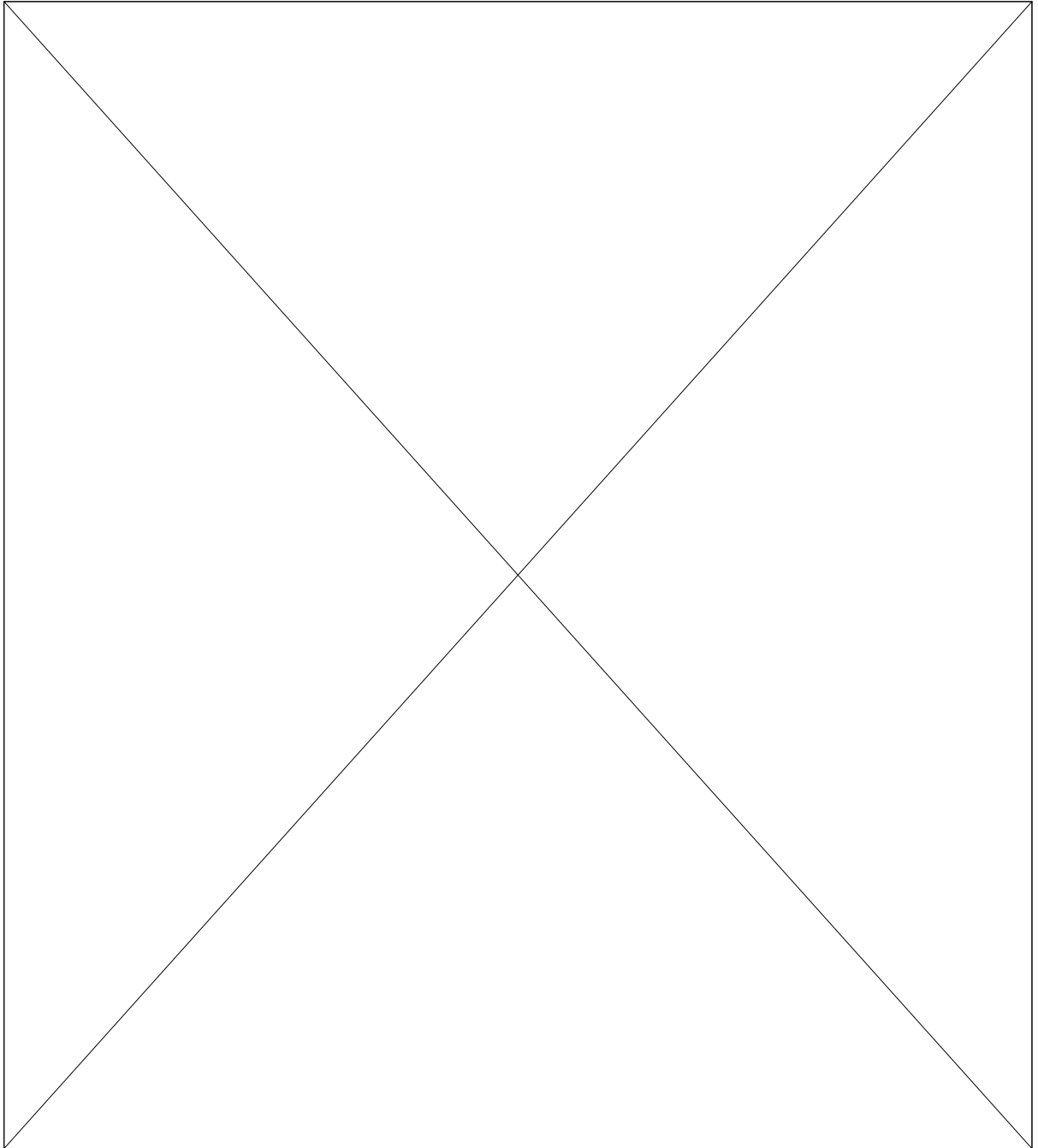


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

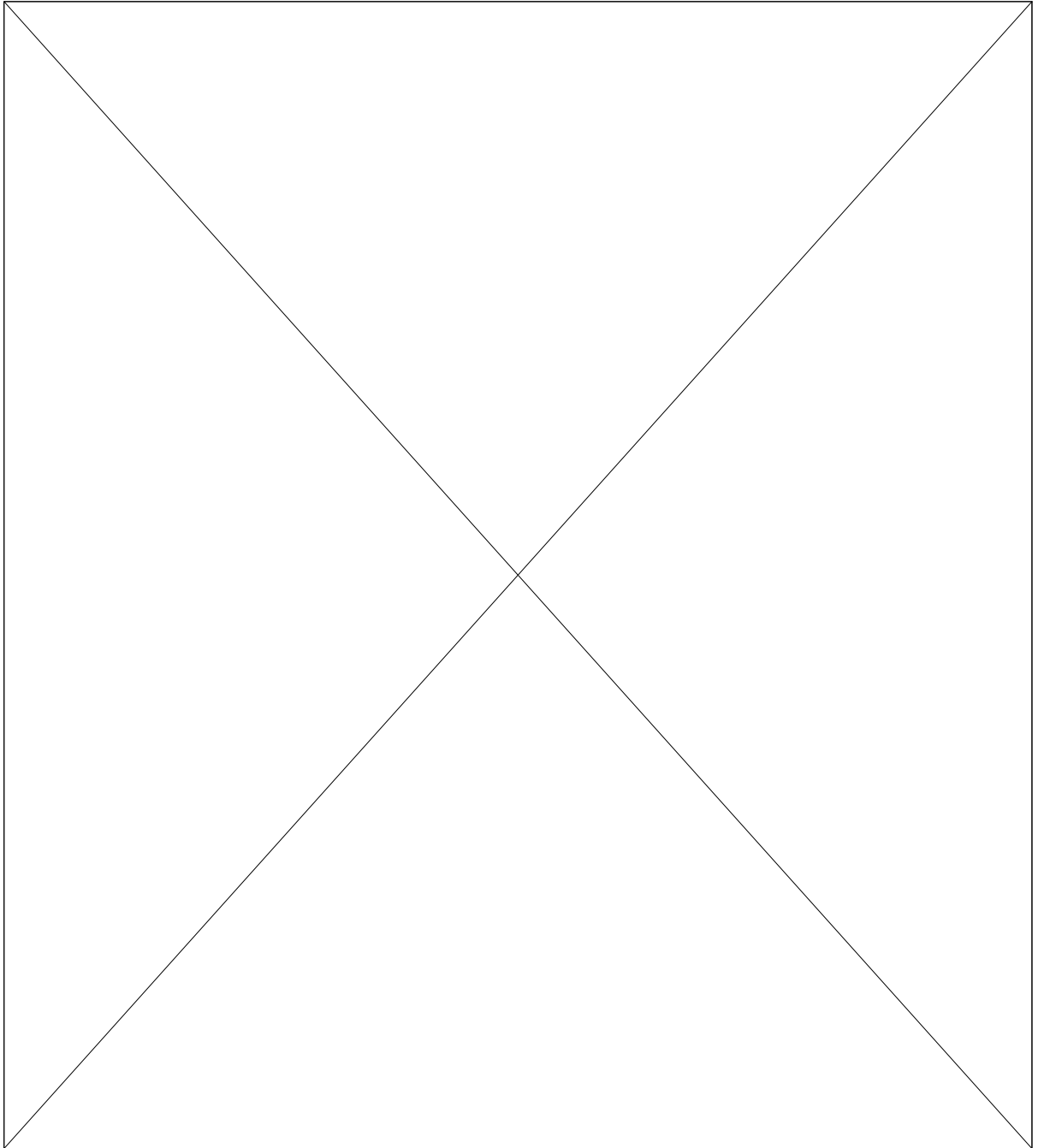


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

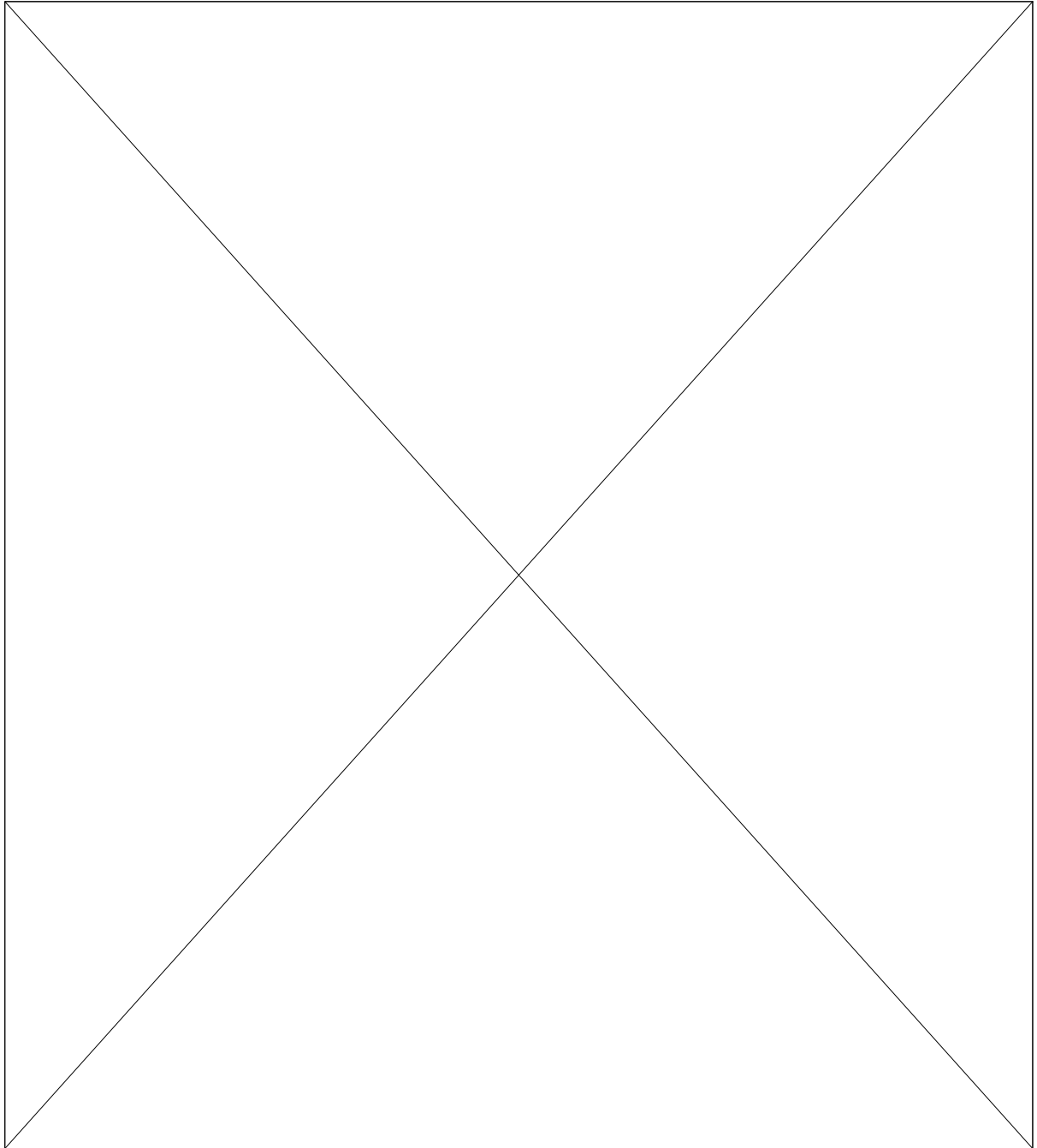


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

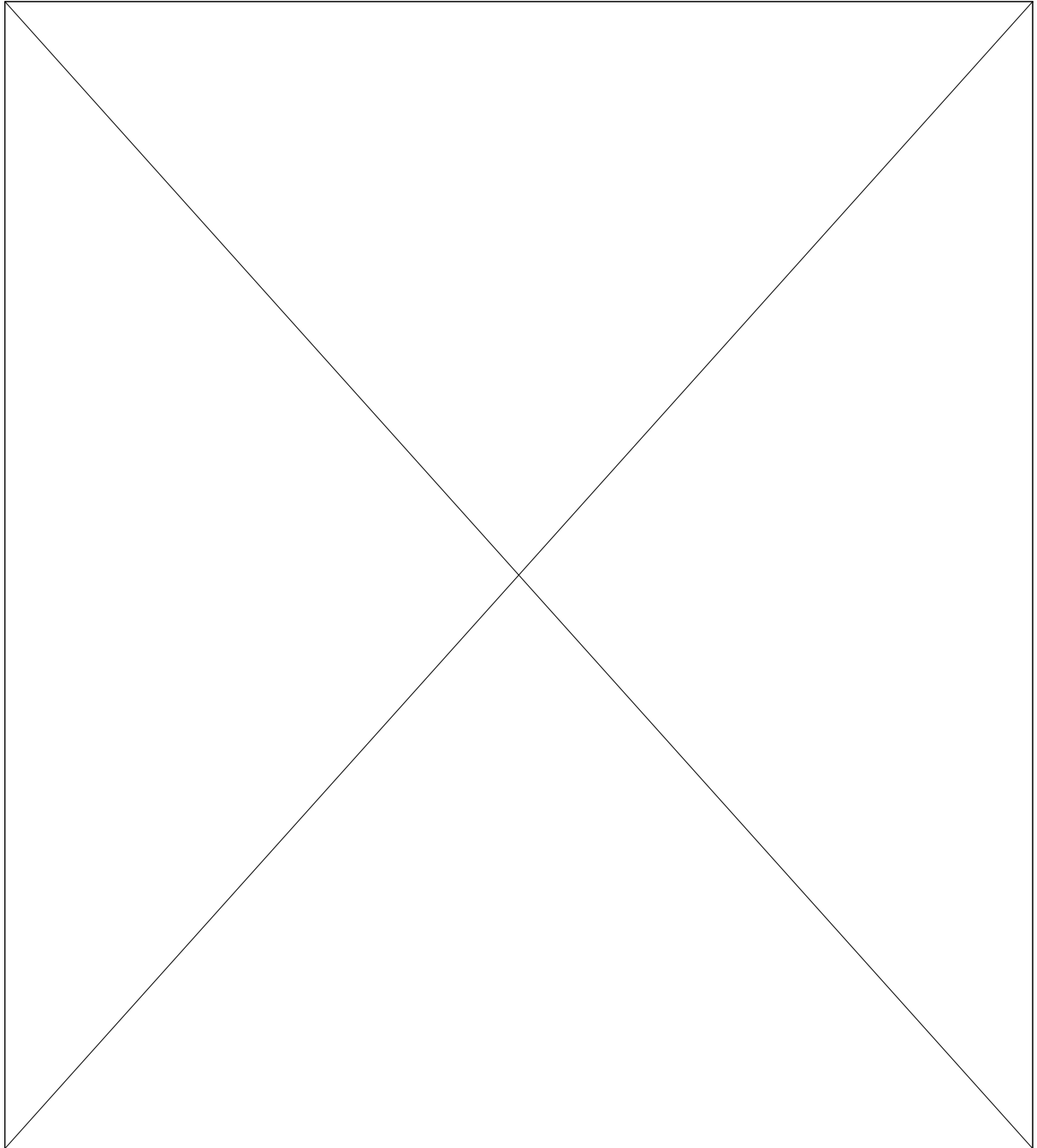


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

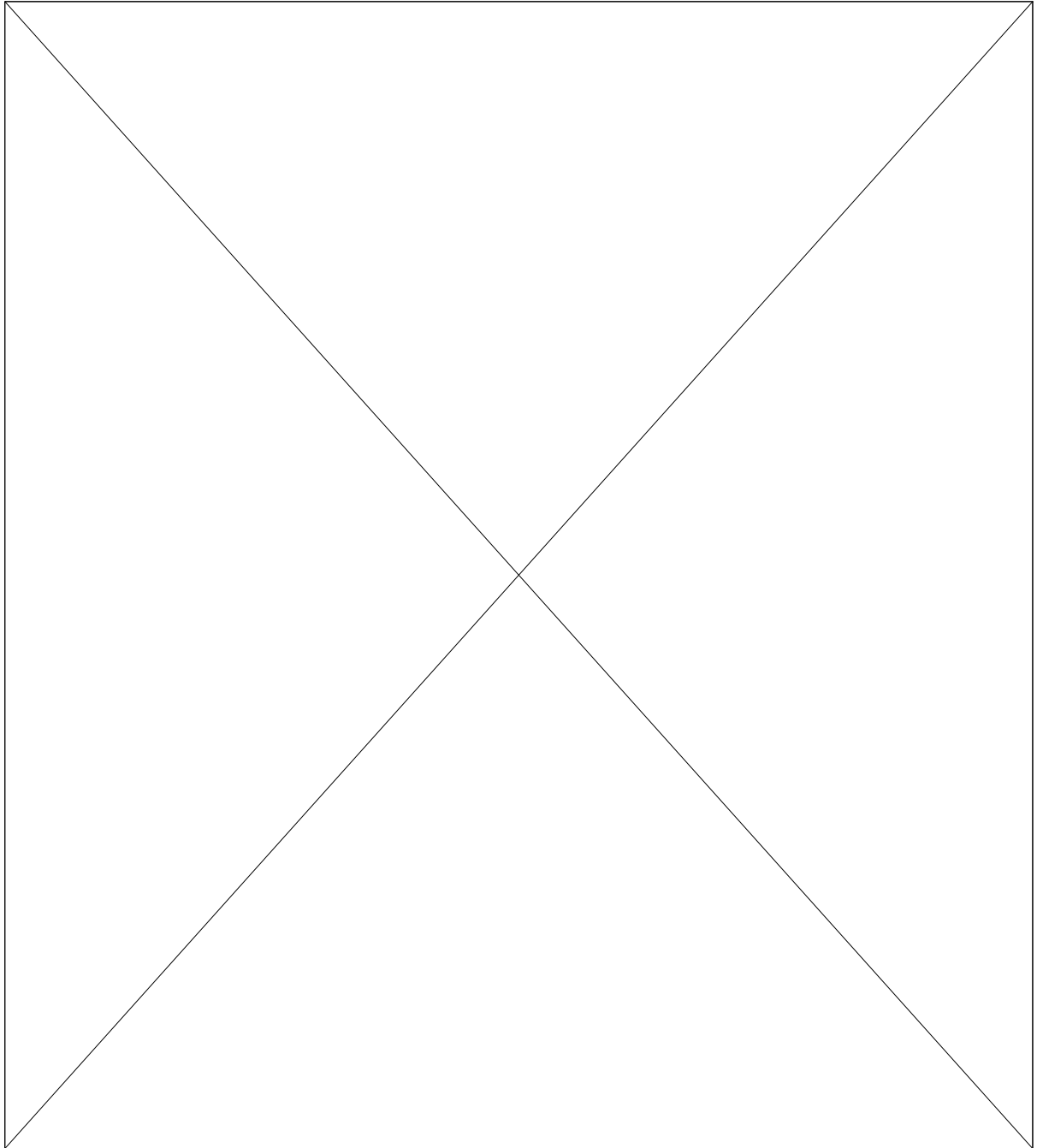


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

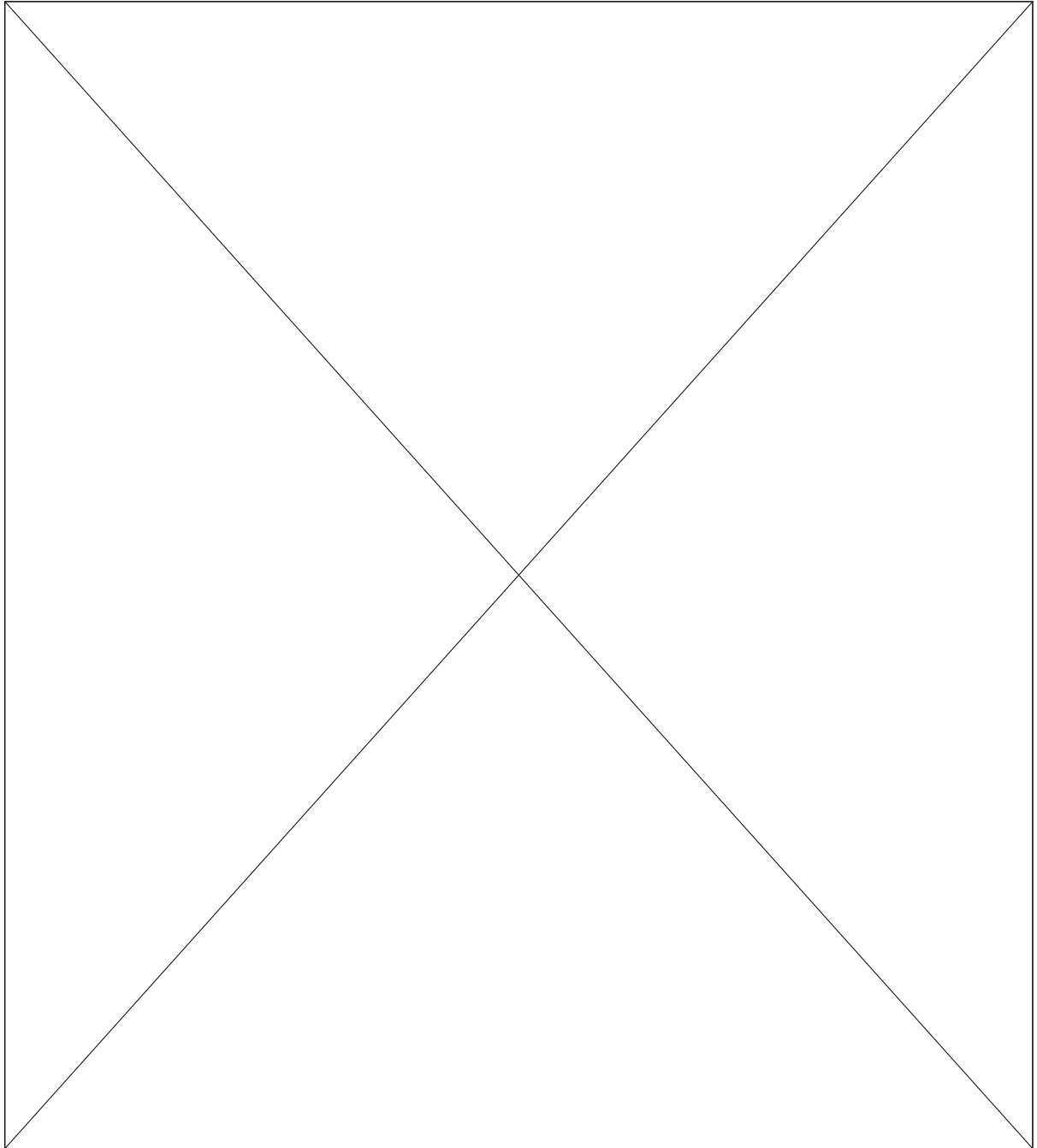


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

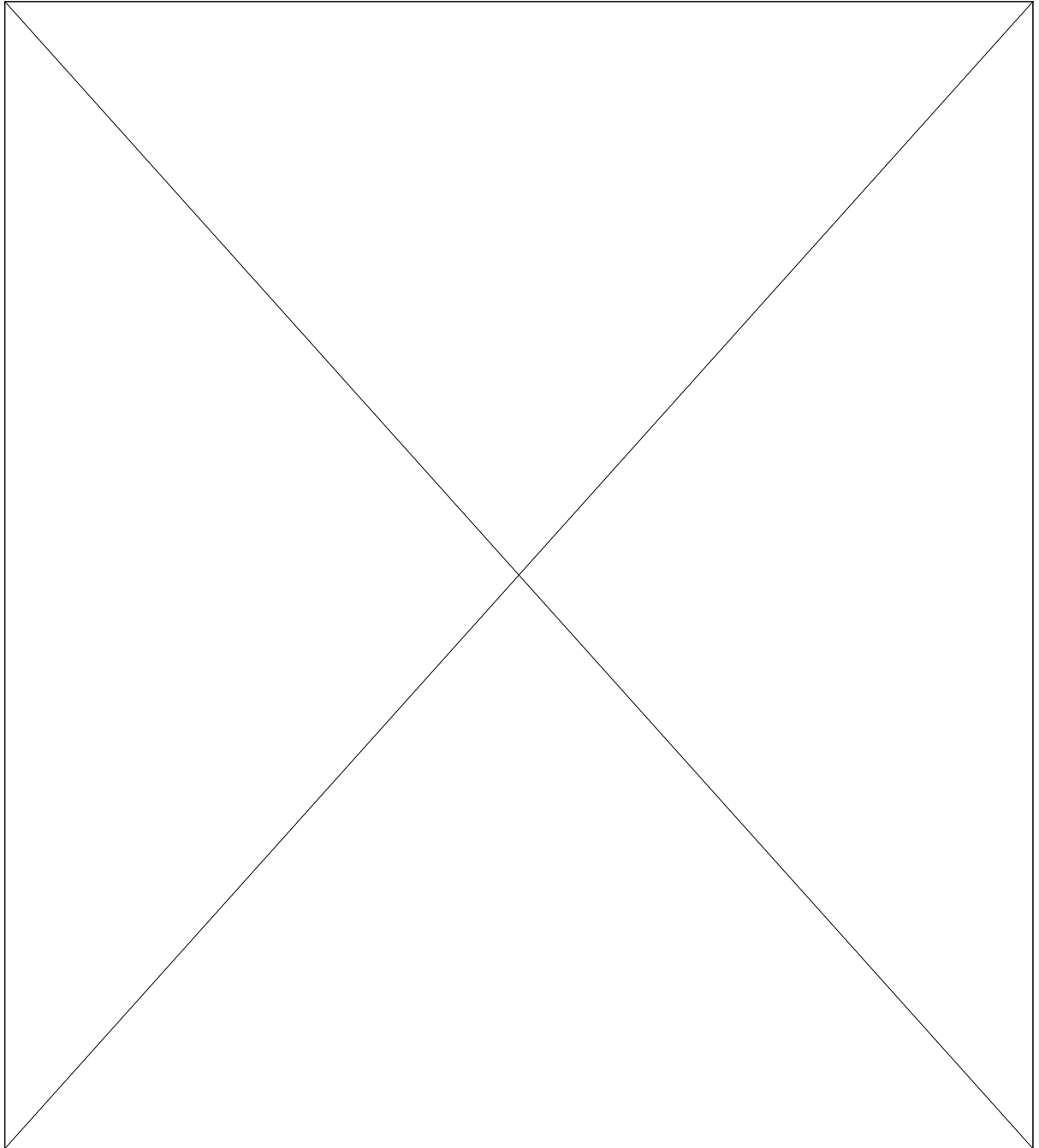


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

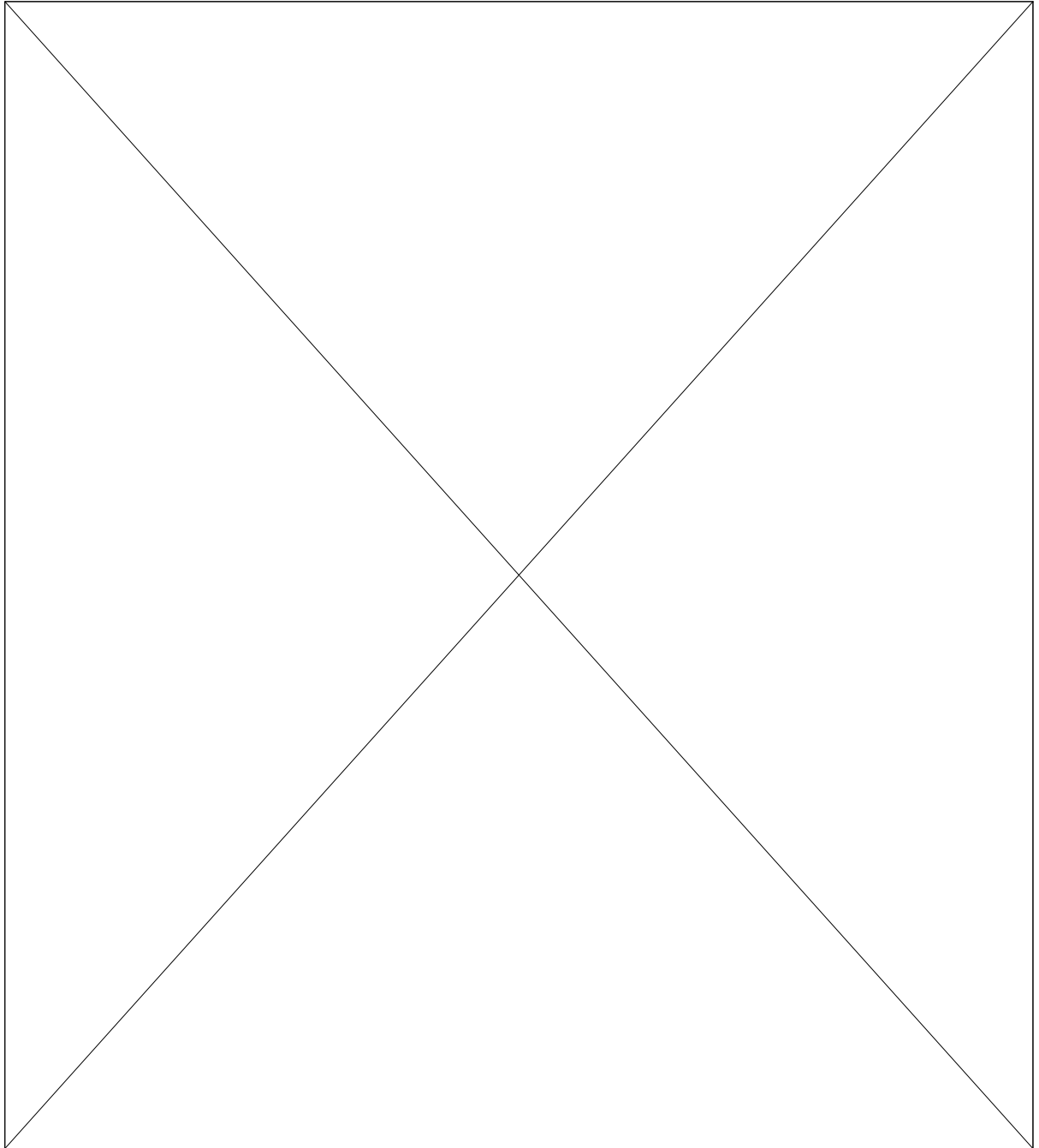


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

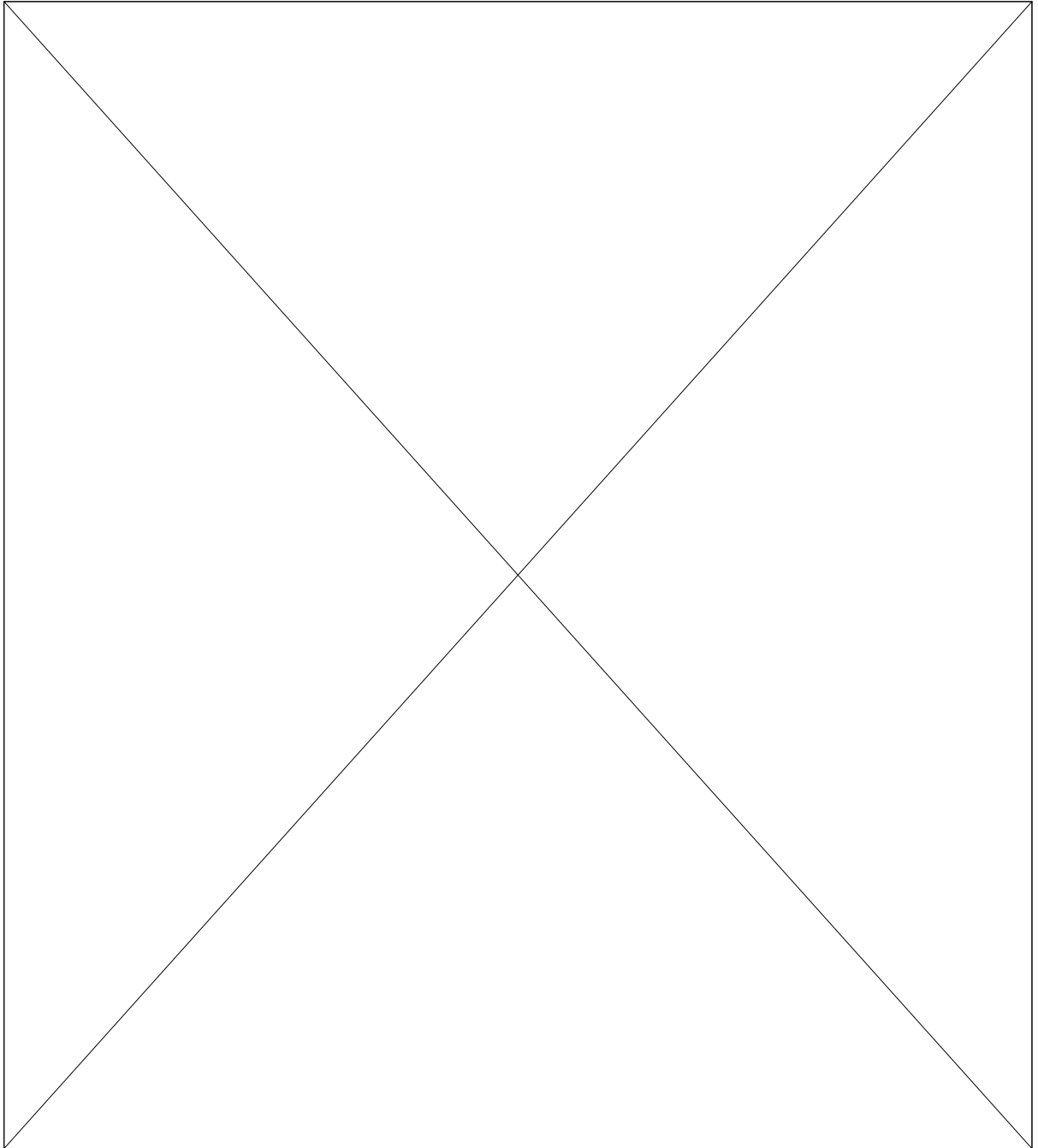


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

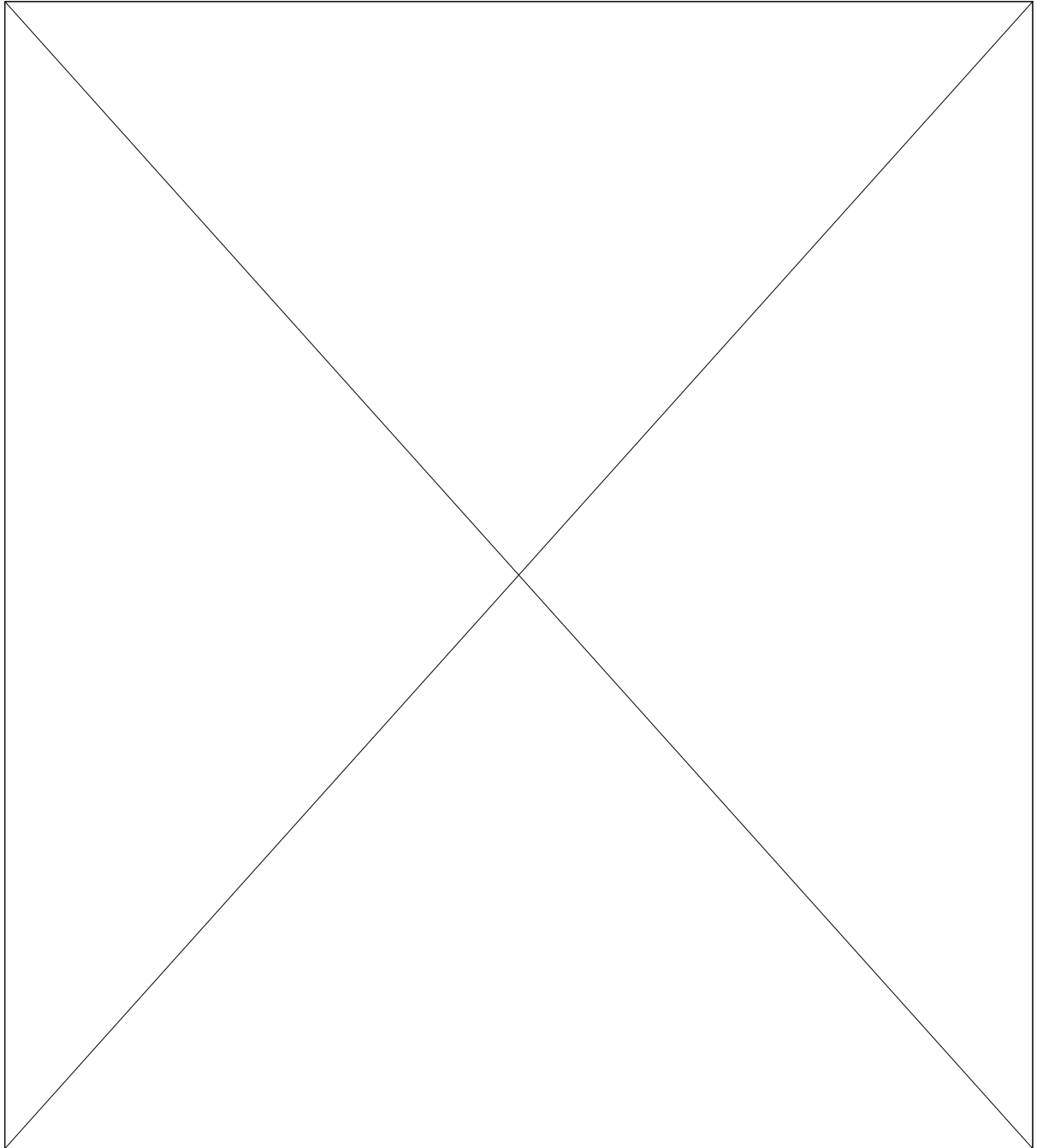


표 4-1 전력계통 모선별 부하목록(계속)

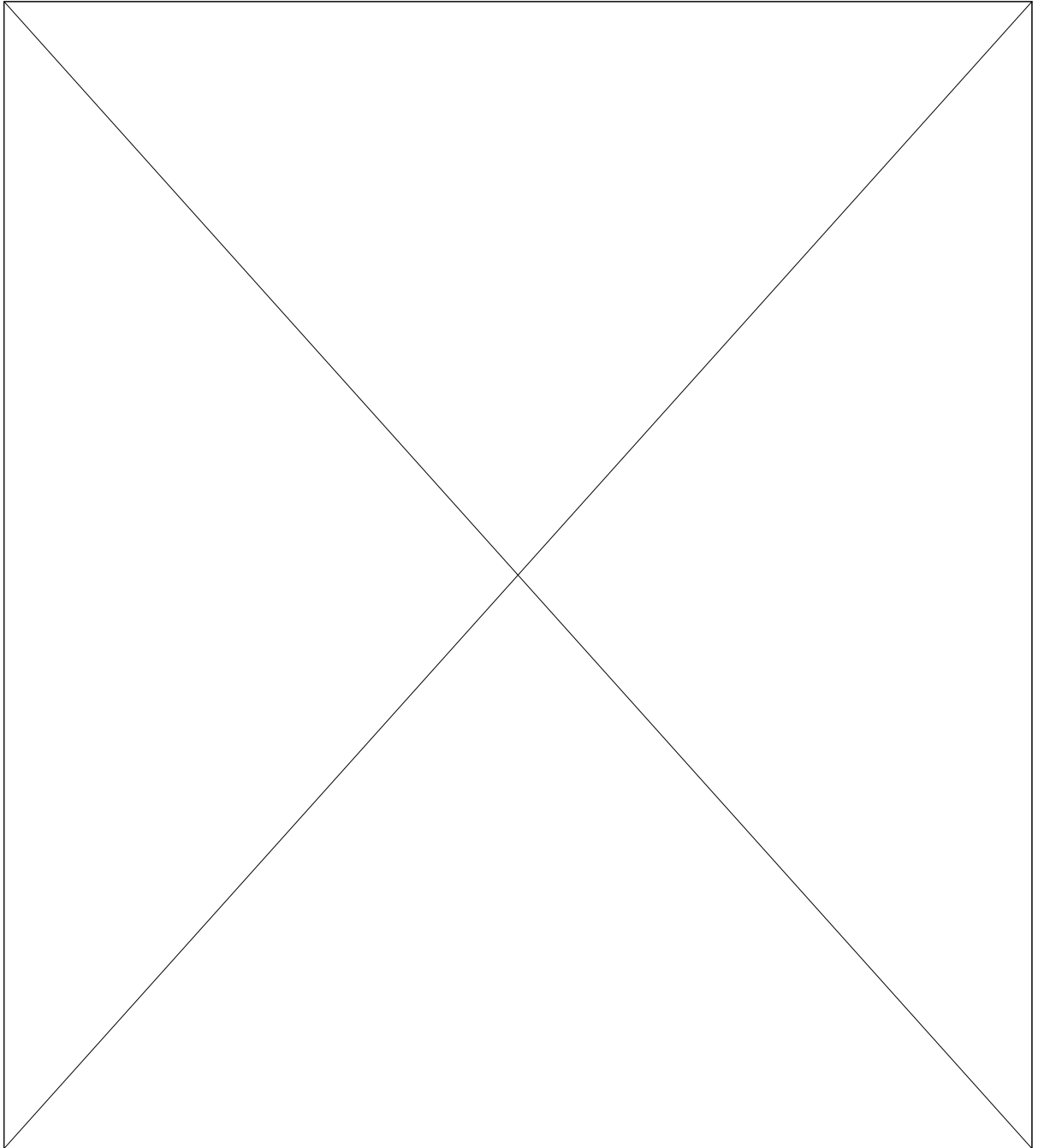


표 4-2 모선정전 시 영향

가) 소외전원 상실

모선정전	주요기기	계통영향	발전소 대처기능 (발전소영향)
13.8 kV 비안전 ()		345 kV 소외전력이 모두 상실되면 정 지됨	4.16 kV 안전모선의 저전압 신호 발생 후 비상디젤발전기가 원자로를 안전정지 상태로 유지함 비상디젤발전기가 수동으로 기동함
4.16 kV 비안전		소외전원 상실 시	
480 V비안전		전력이 공급됨	
120 V비필수		비상디젤발전기가	
250 VDC 비안전		연결된 모든 부하는 기능을 상실함	
125 VDC 비안전			

표 4-2 모선정전 시 영향(계속)

가) 소외전원 상실(계속)

모선정전	주요기기	계통영향	발전소 대처기능 (발전소영향)
4.16 kV 안전		비상디젤발전기가 기동하여 각 안전 모선에 전력이 공급되면 다음과 같은 공학적안전설비에 전력이 공급되어 공학적안전설비가 작동함에 따라 원자로를 안전정지 상태로 유지함	
480 V 안전			
120 V 필수			
125 VDC 안전			

표 4-2 모선통전 시 영향(계속)

나) 소내정전

모선통전	주요기기	계통영향	발전소 대처기능 (발전소영향)
가)항과 동일	가)항과 동일	<p>소내정전이 발생하면 상기 []</p> <p>[]</p> <p>[] 원자료가 정지됨.</p> <p>소외전원 상실시 []</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[] 전력을 공급함.</p>	<p>소내정전 []</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[] 원자료를 안 전정지 상태로 유지함</p>

표 4-2 모선정전 시 영향(계속)

다) 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전

모선정전	주요기기	계통영향	발전소 대처기능 (발전소영향)
가)항과 동일	가)항과 동일	<p>대체교류디젤발전기 [redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급함</p> <p>이동형발전차가 [redacted]의 해 발전소 감시, 제어 및 보호 기능이 유지됨</p> <p>대체교류디젤발전기를 [redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted] 냉각수를 공급함</p>	<p>대체교류디젤발전기 기동 실패에 따 른 사고 진단 2시간 이내에 [redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>[redacted]</p> <p>원자로를 안전정지 상태로 유지함</p>

표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비

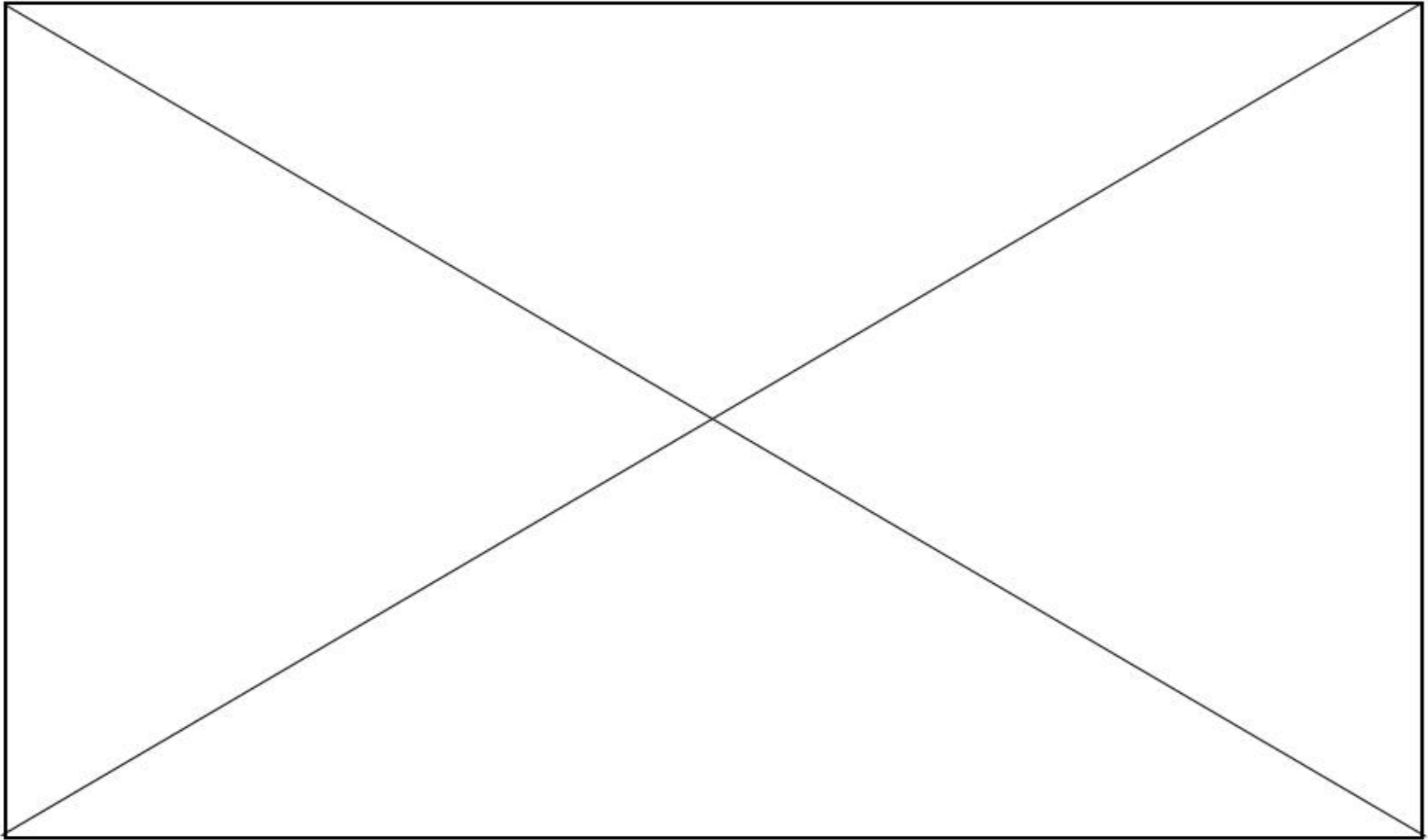


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

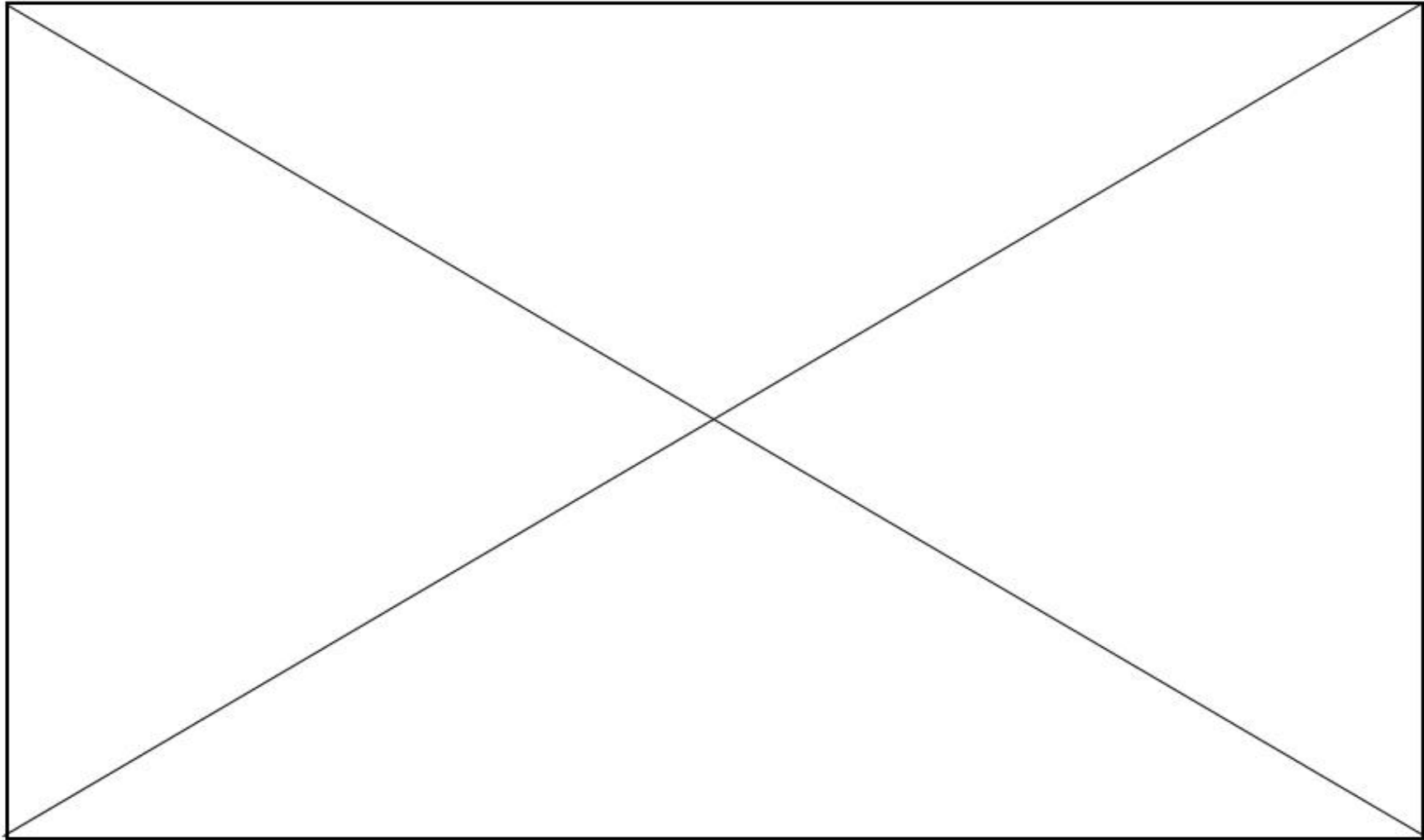


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

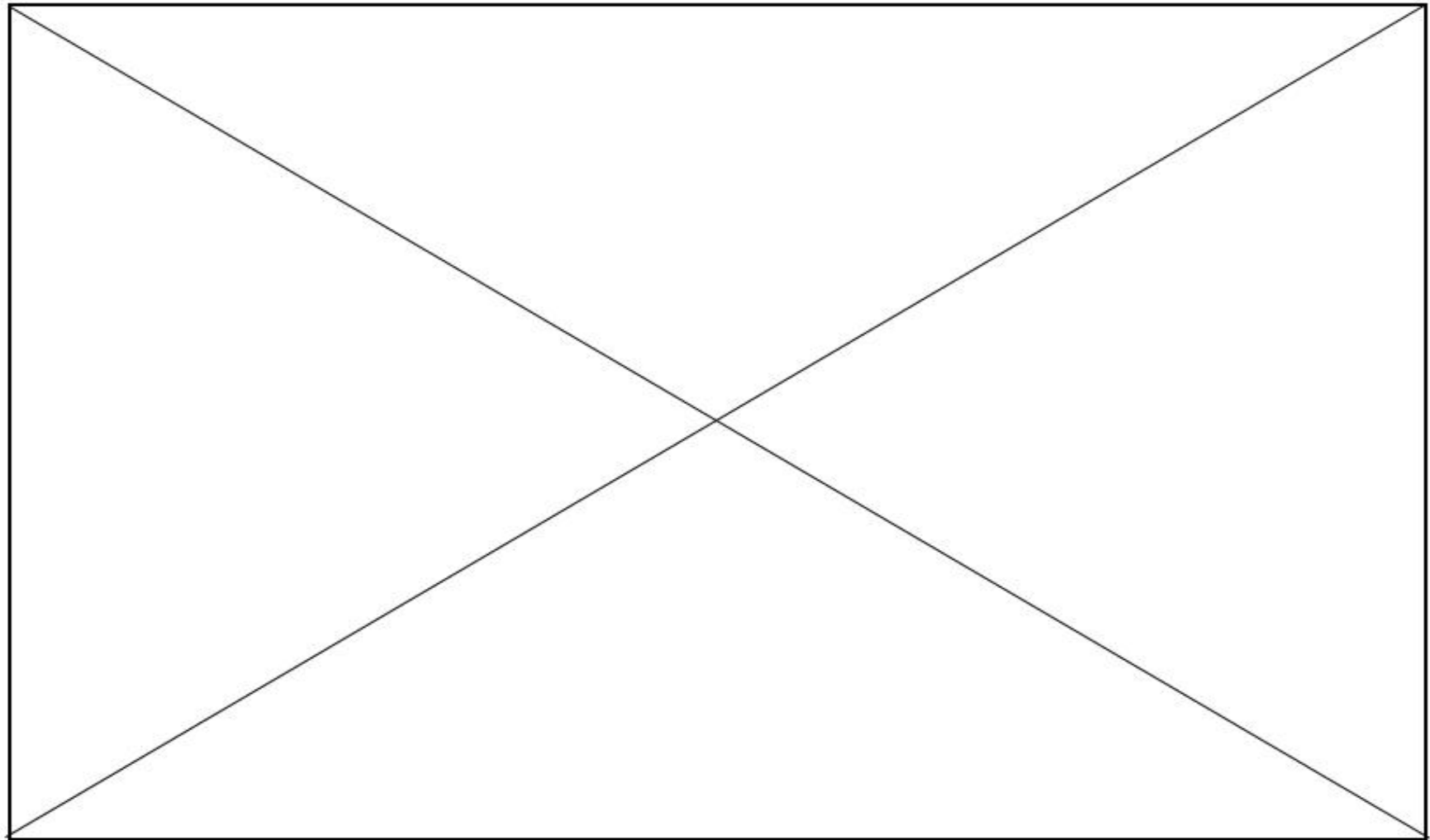


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

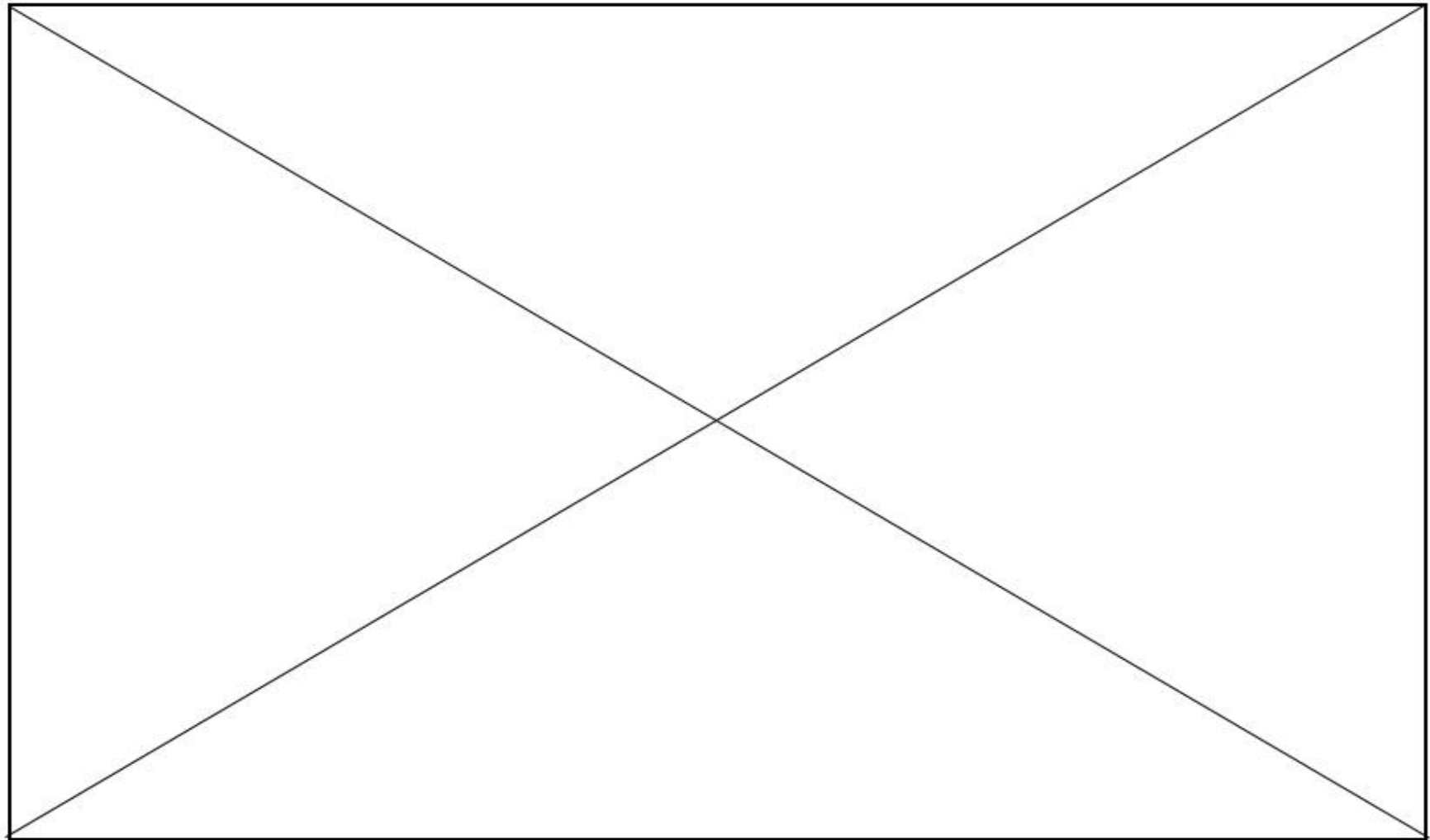


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

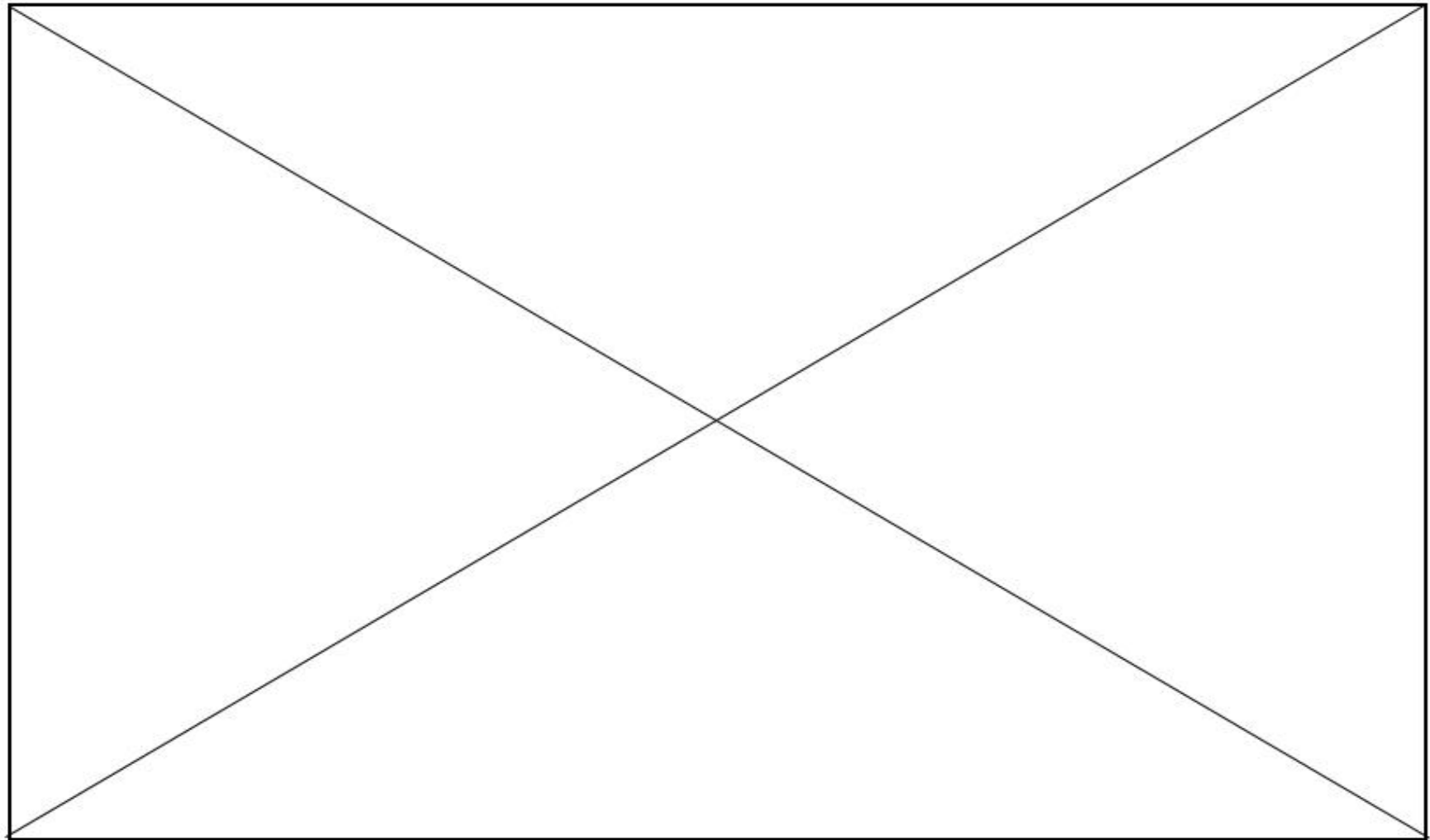


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

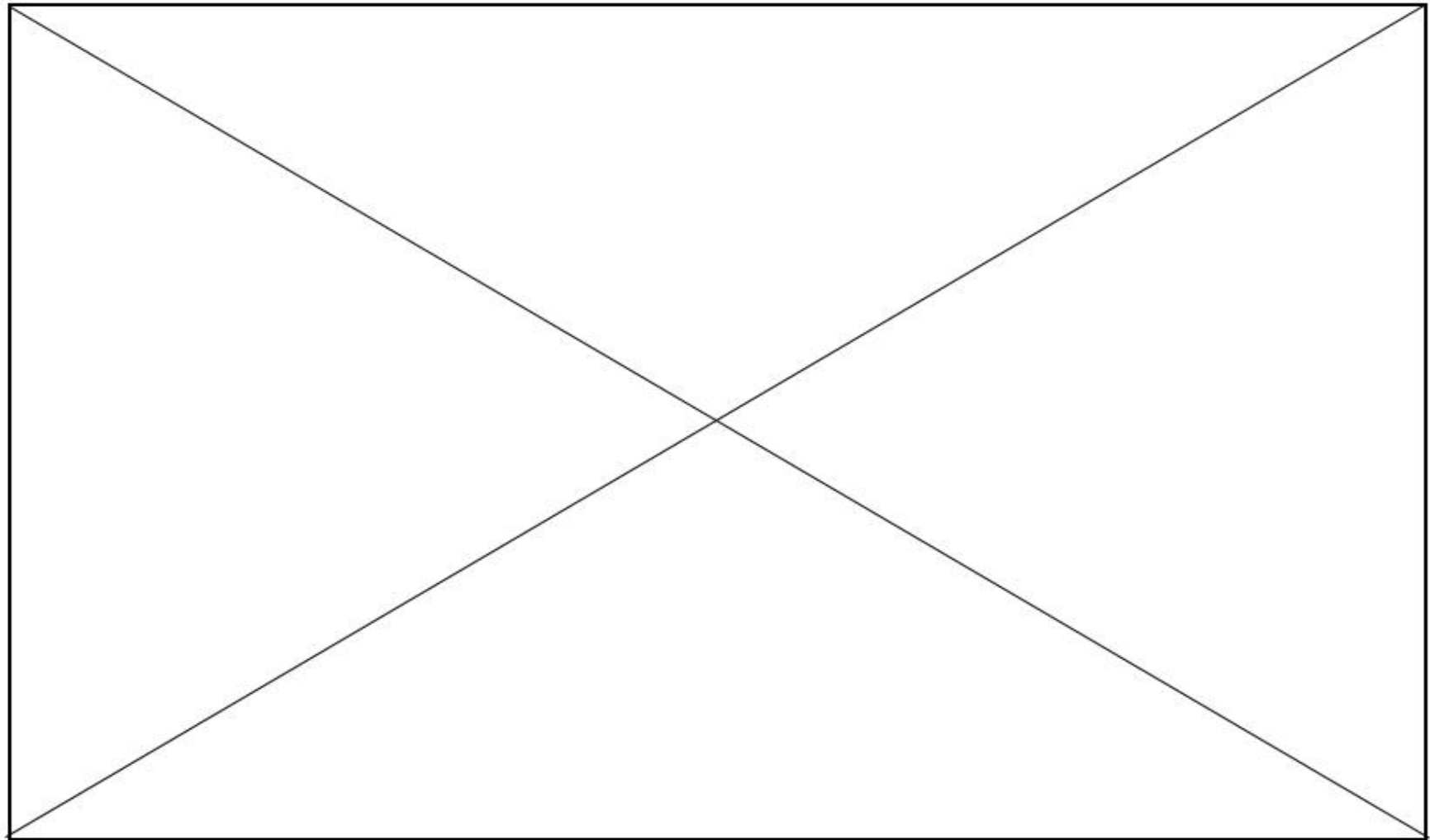


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

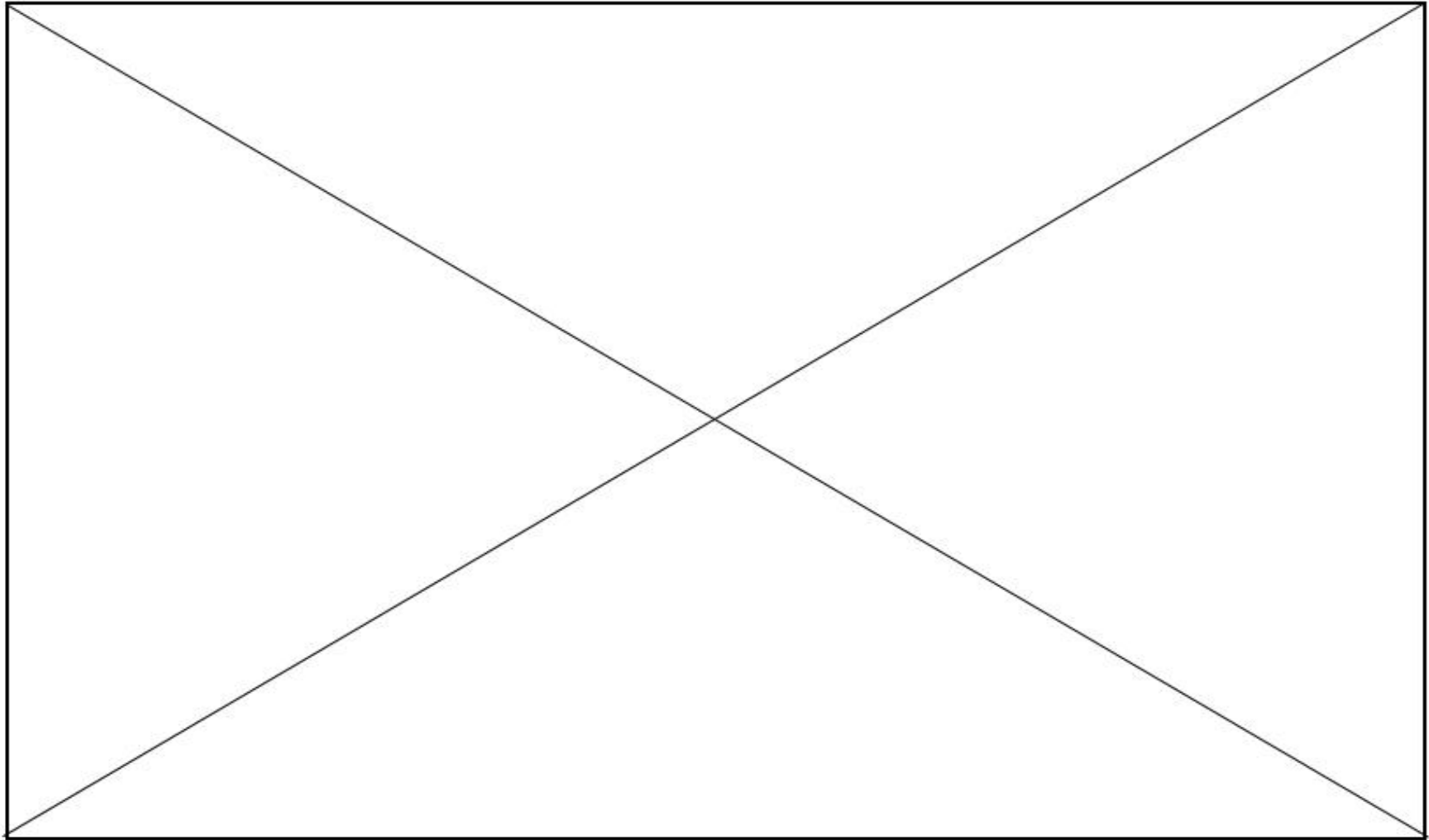


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

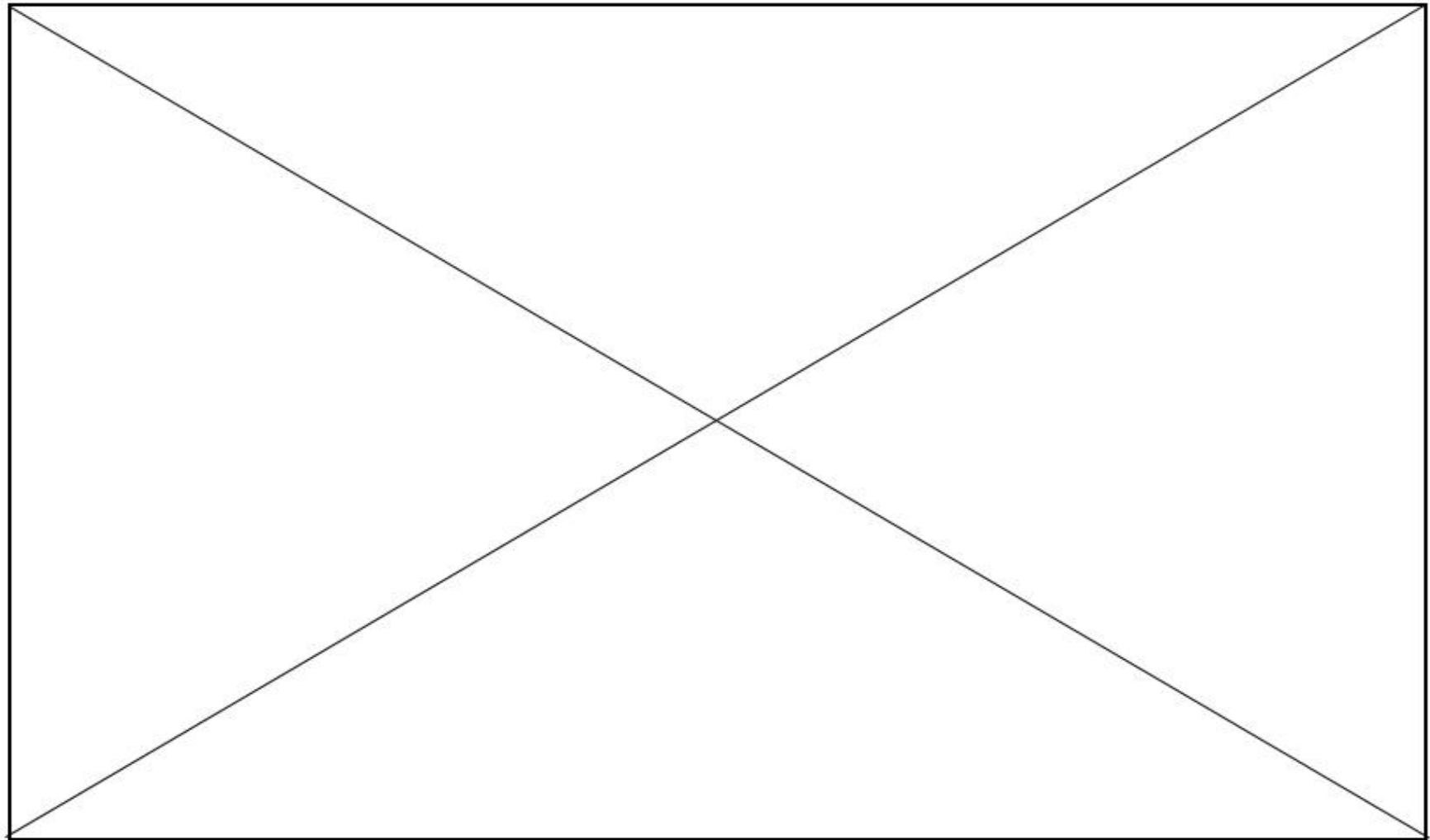


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

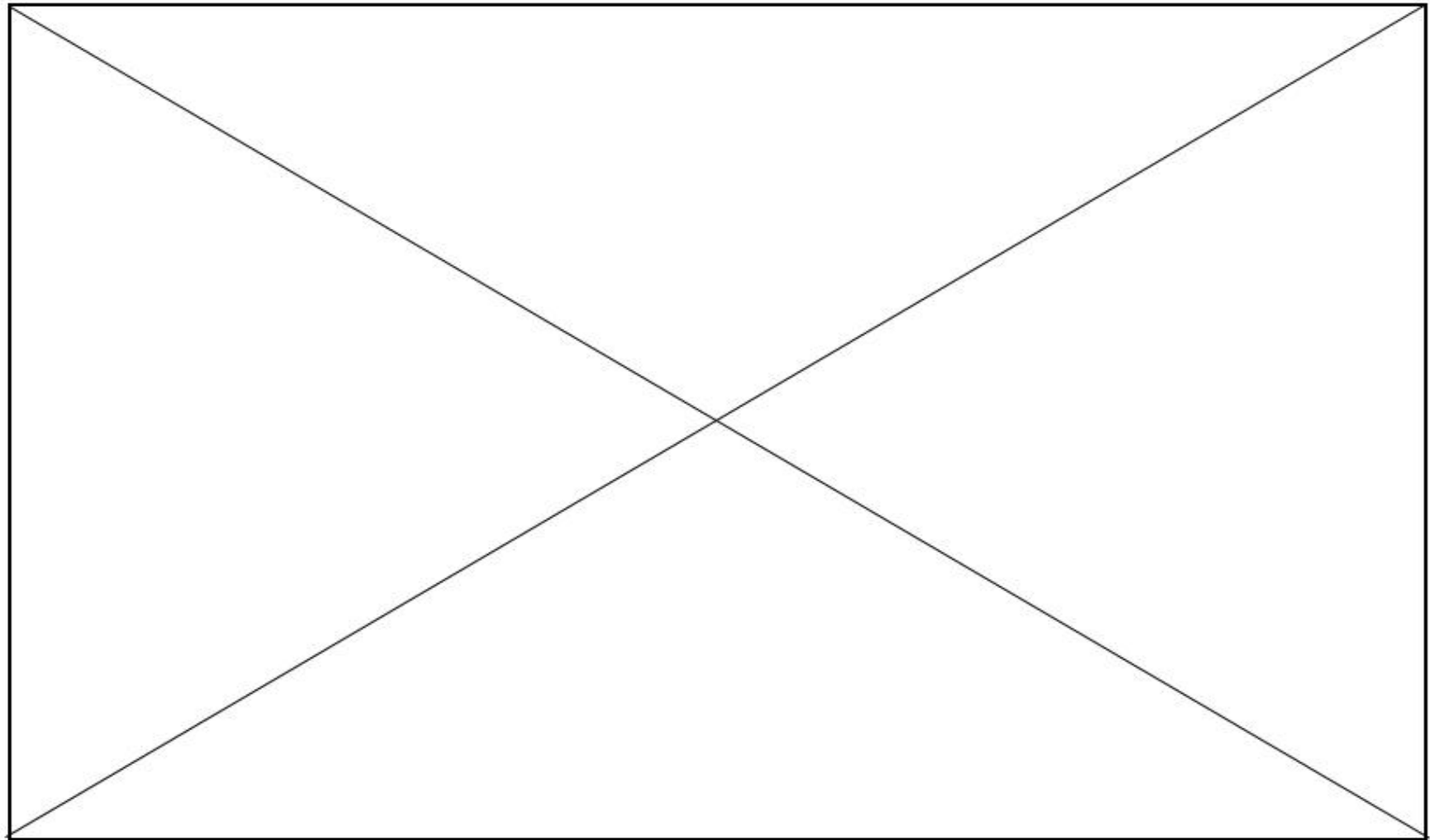


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

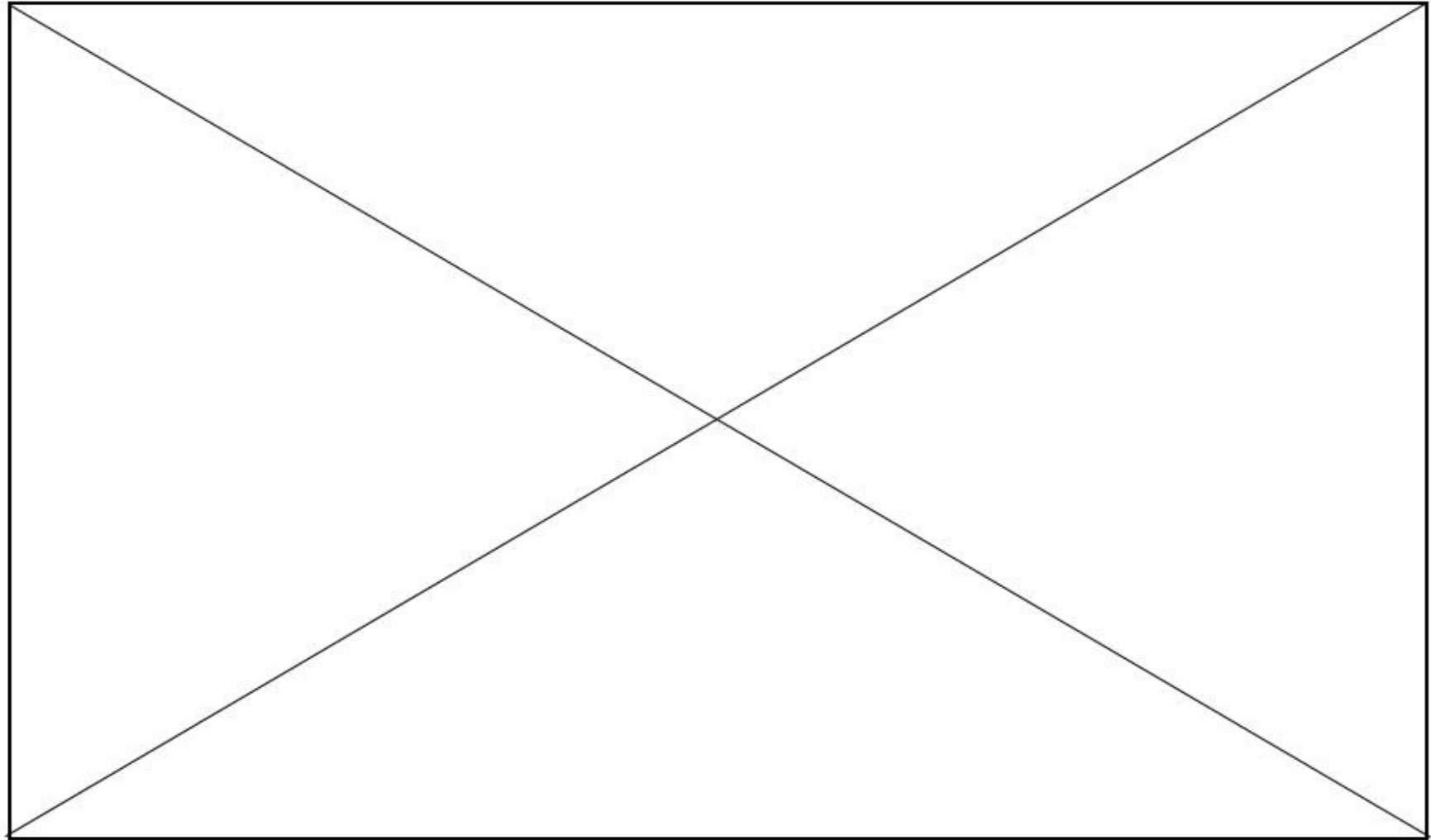


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

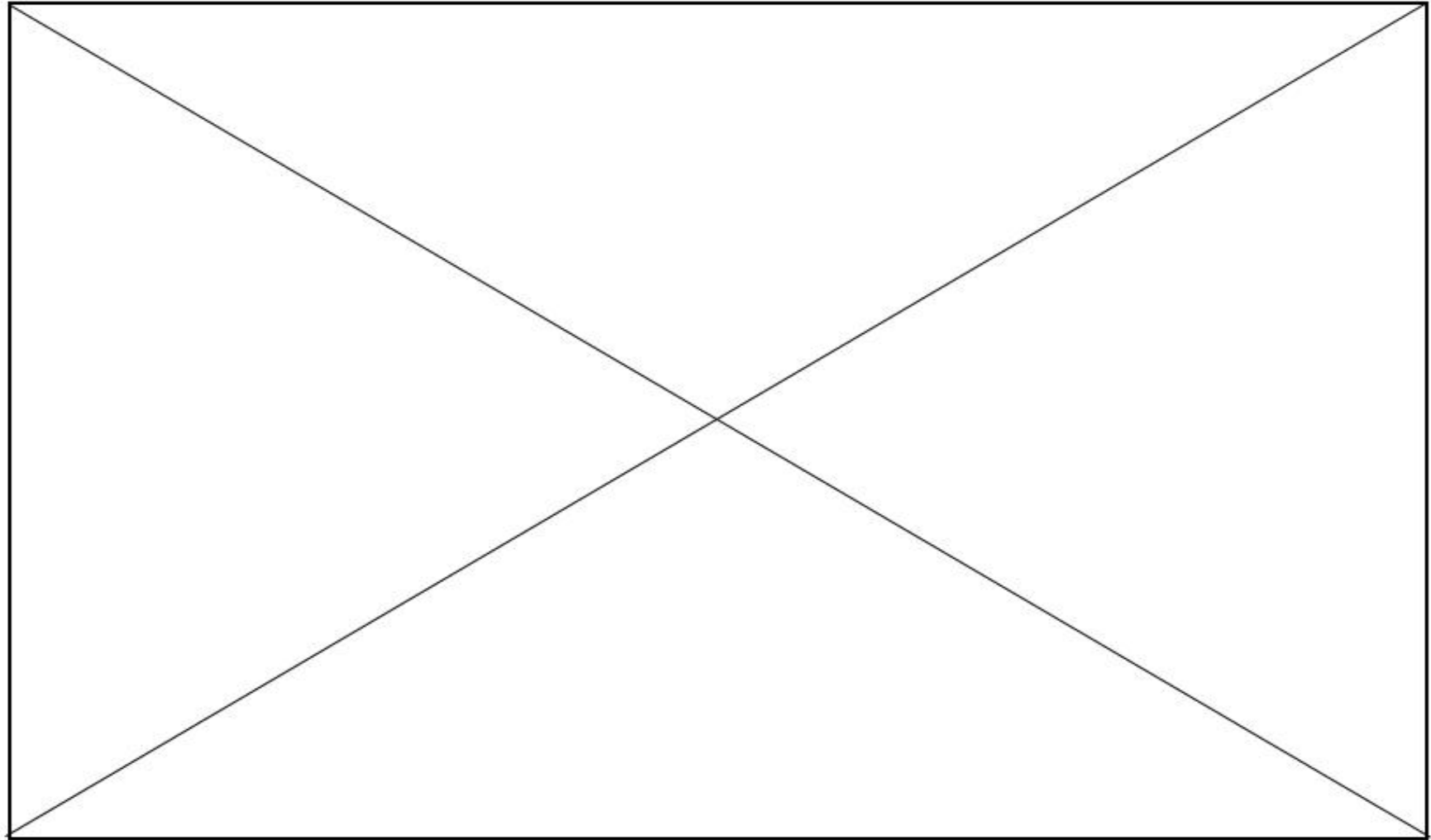


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

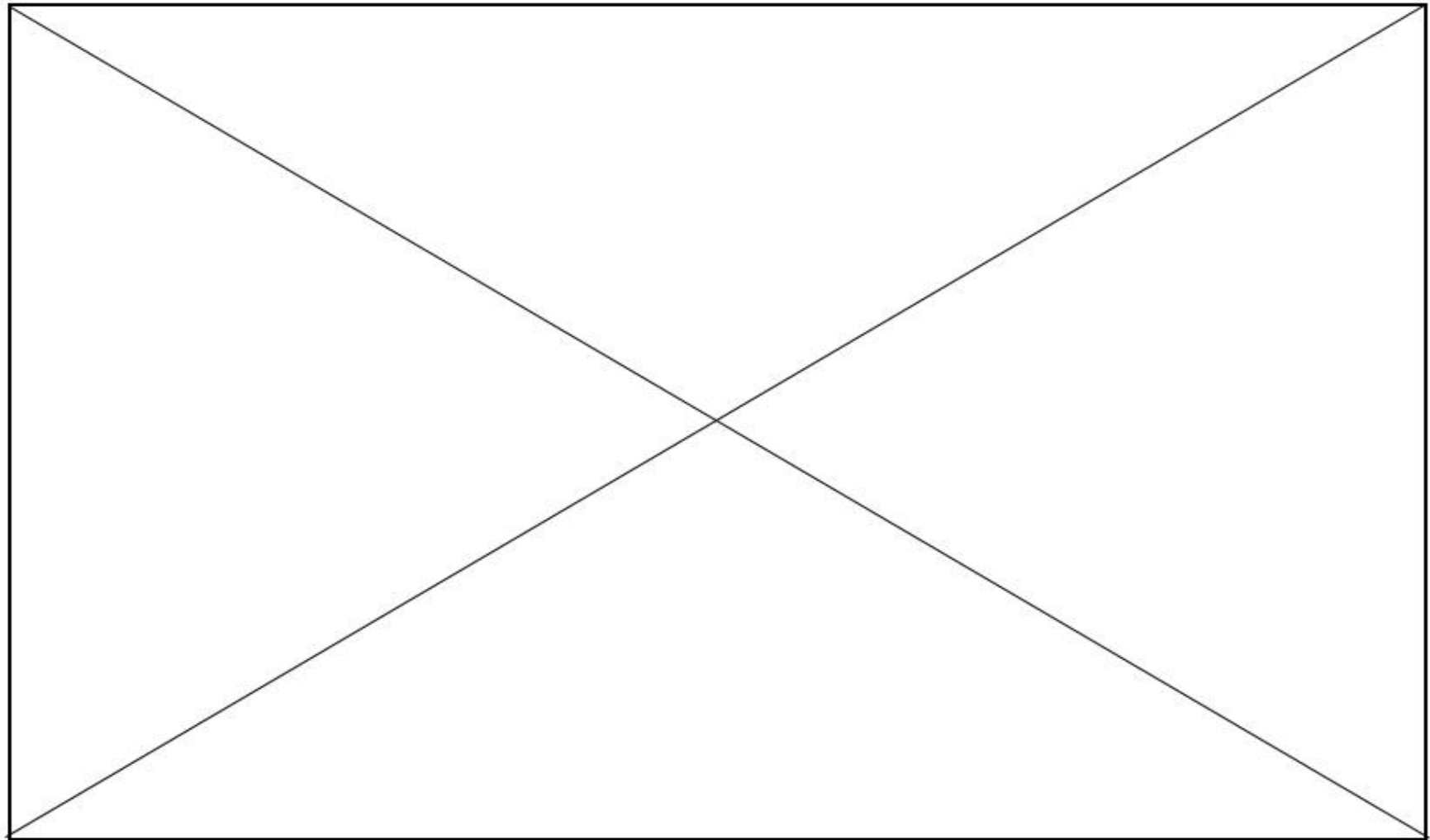


표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비(계속)

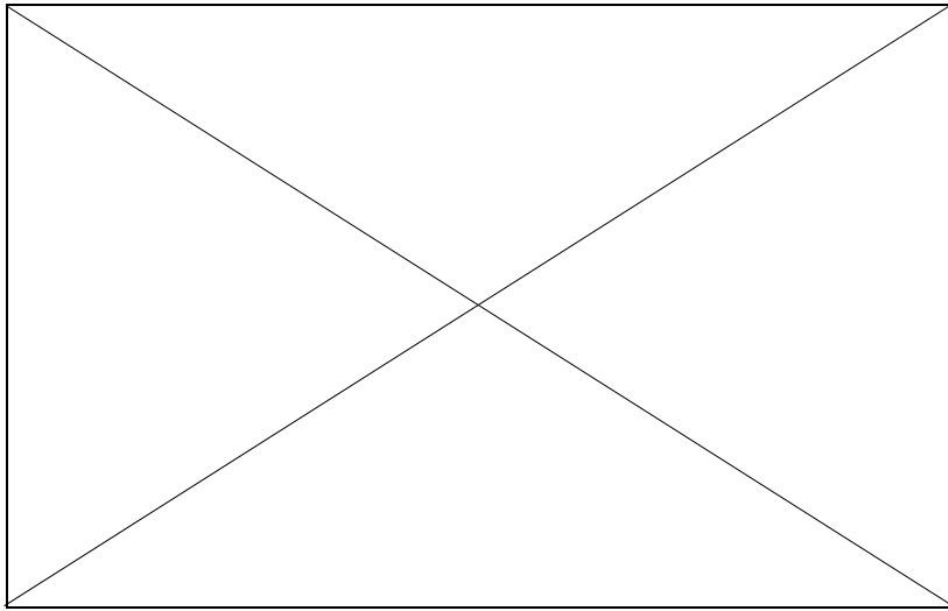


표 4-4 필수대처기능 상태 확인

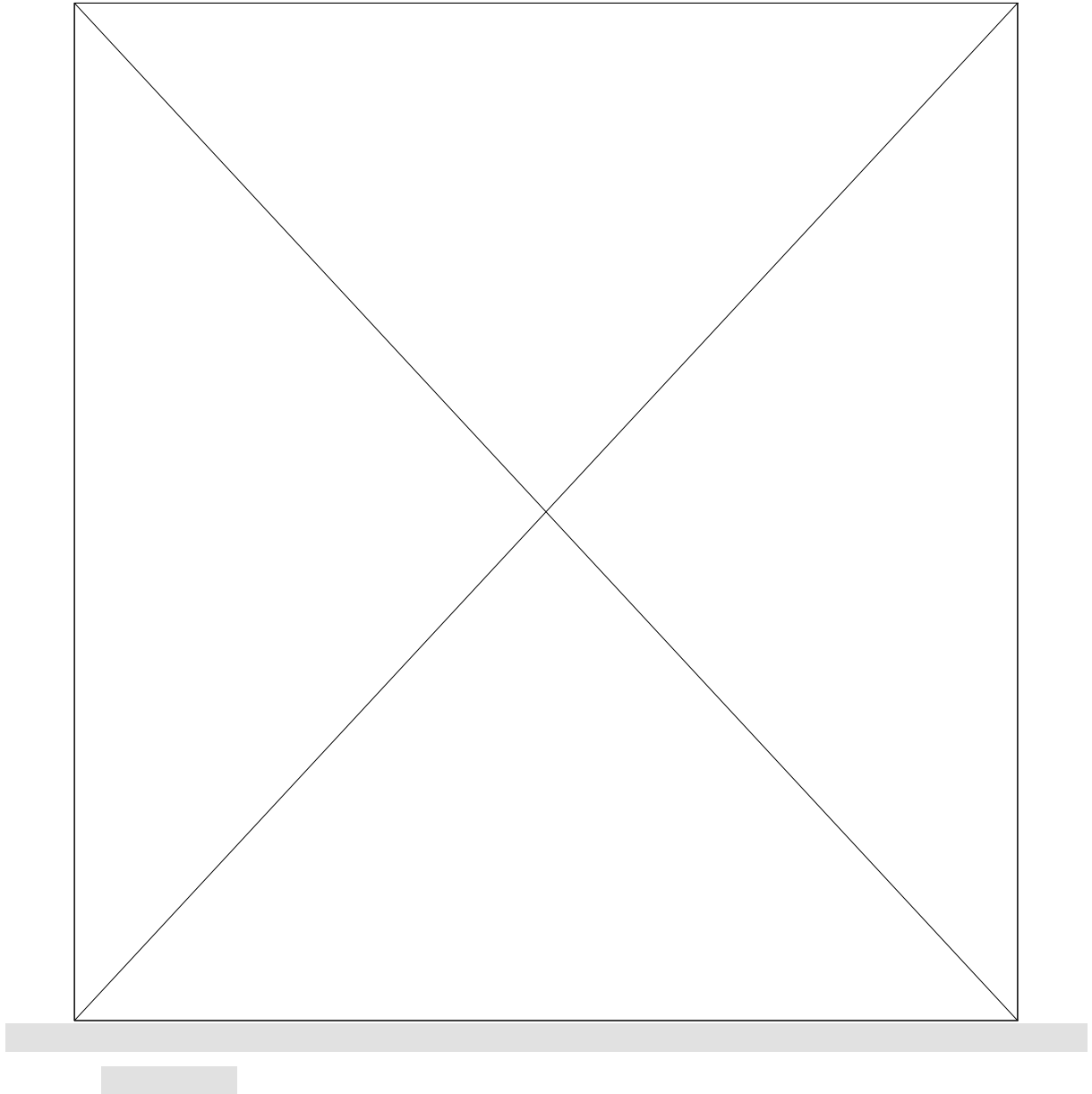


표 4-5 소내 가용한 발전기의 사용가능 시간

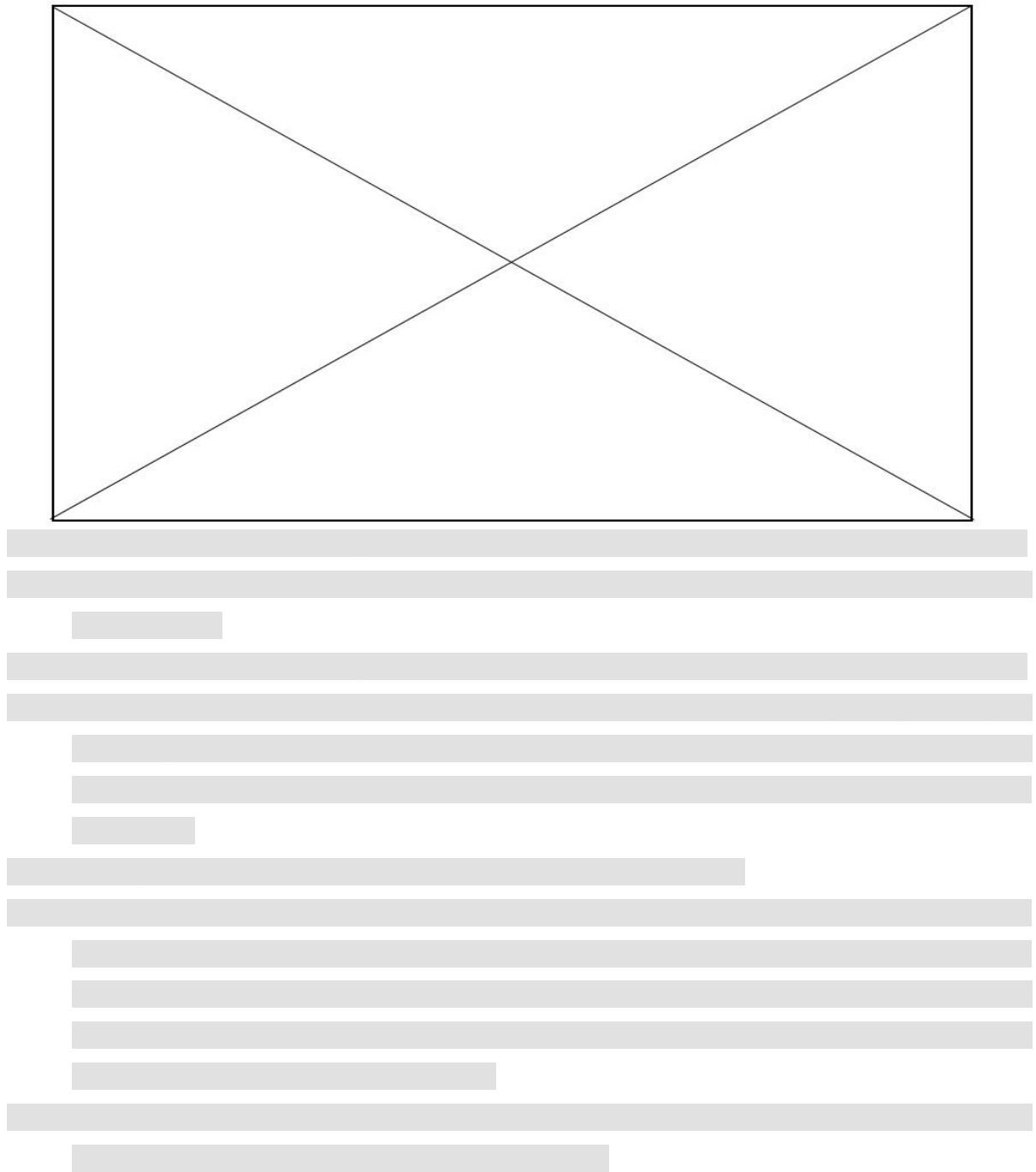


표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고시 요구되는
이동형발전차 부하 산정기준

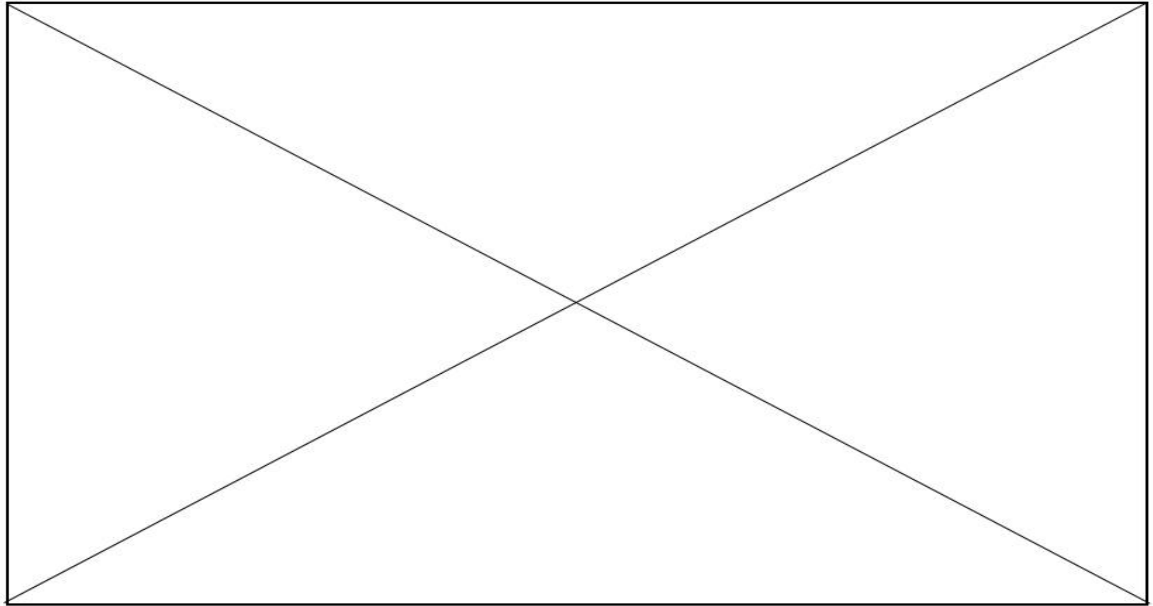


표 4-8 사고시나리오별 필수대처설비인 전력원 이용가능성

A square with a light gray background. Two thin black lines represent the diagonals of the square, intersecting at the center. One diagonal runs from the top-left corner to the bottom-right corner, and the other runs from the top-right corner to the bottom-left corner. The intersection point is exactly in the middle of the square.

표 4-10 소외전원상실 조건 평가시 가정사항(시나리오 1)

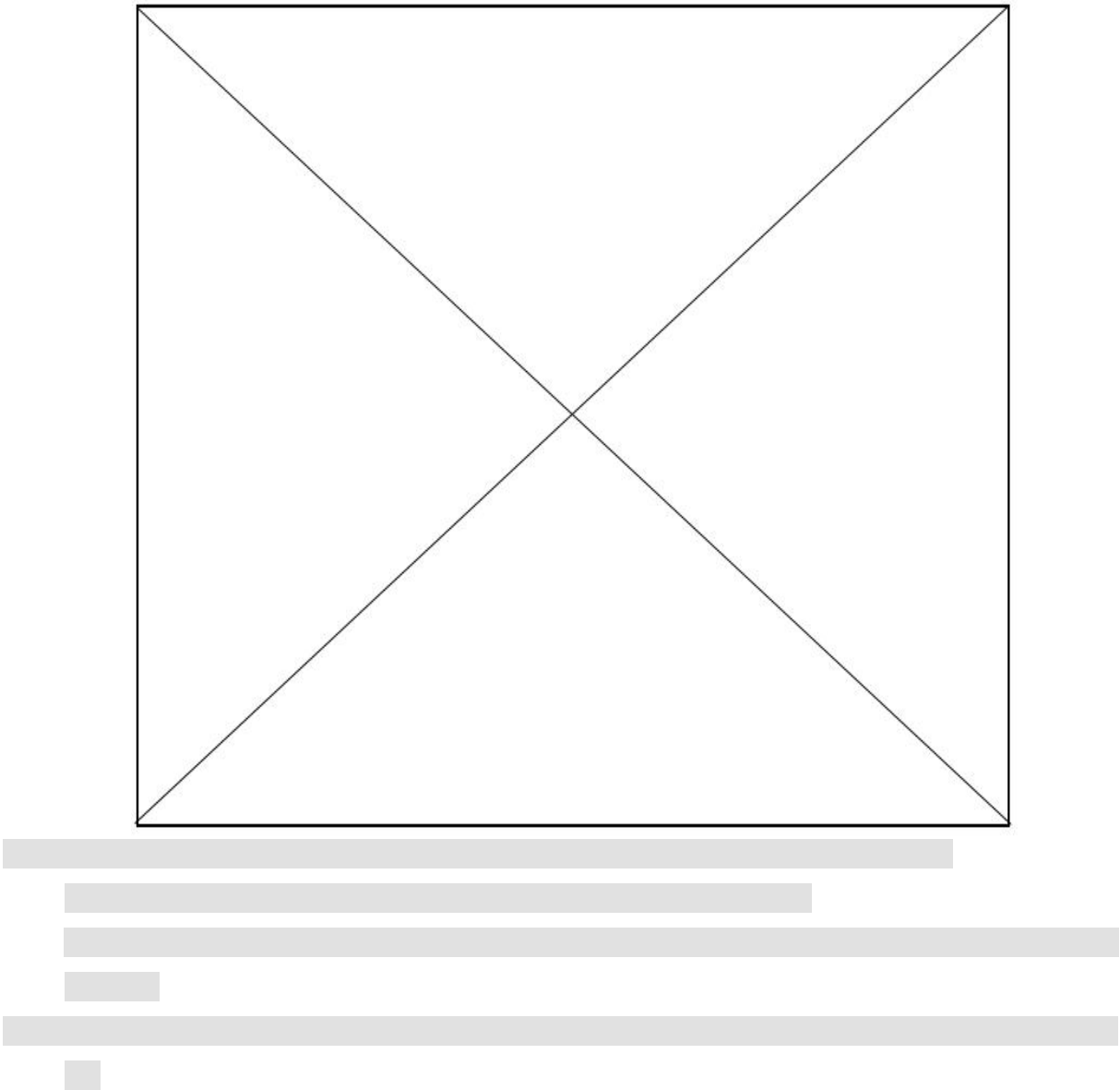


표 4-11 소외전원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 1)

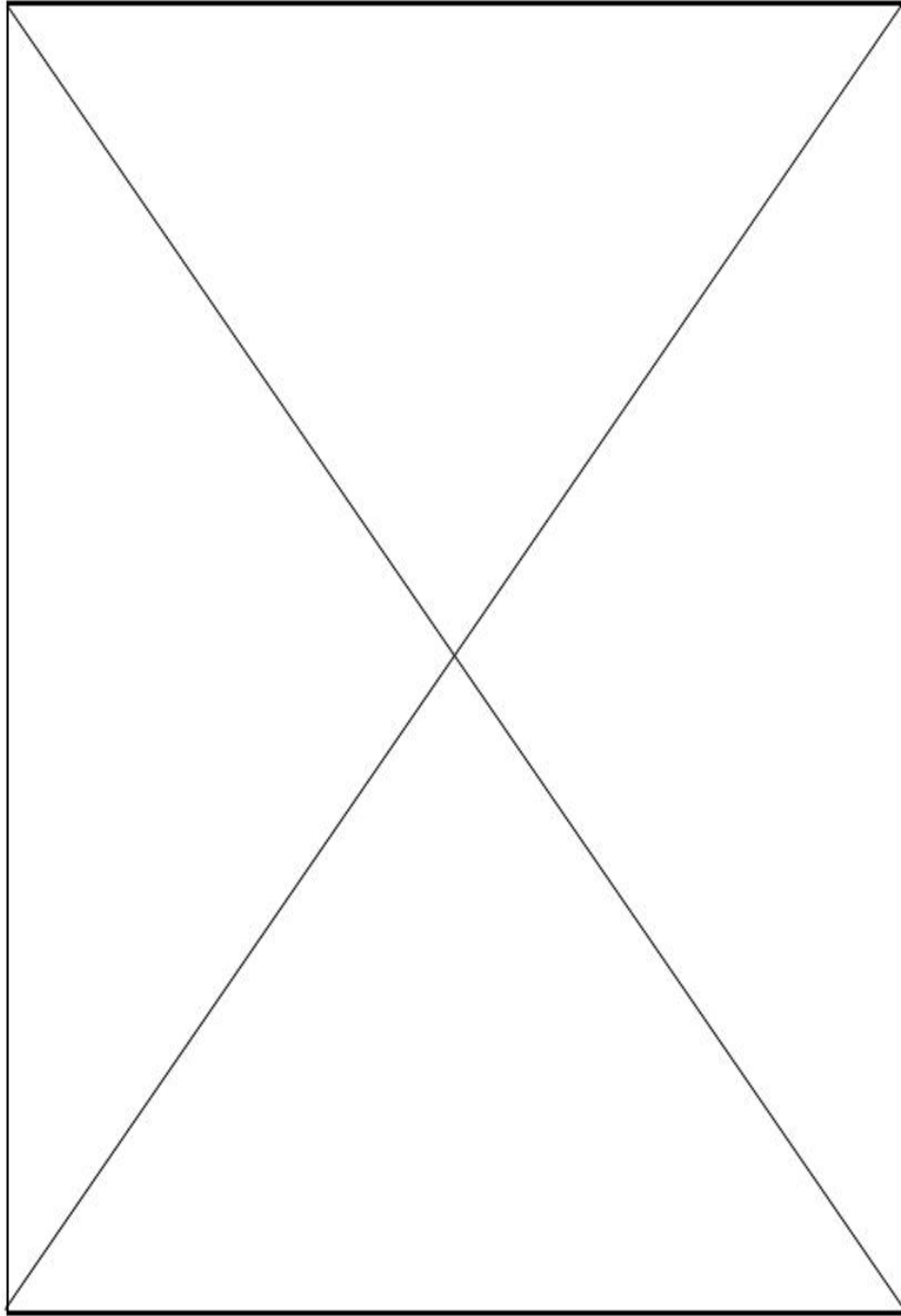


표 4-12 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 2)

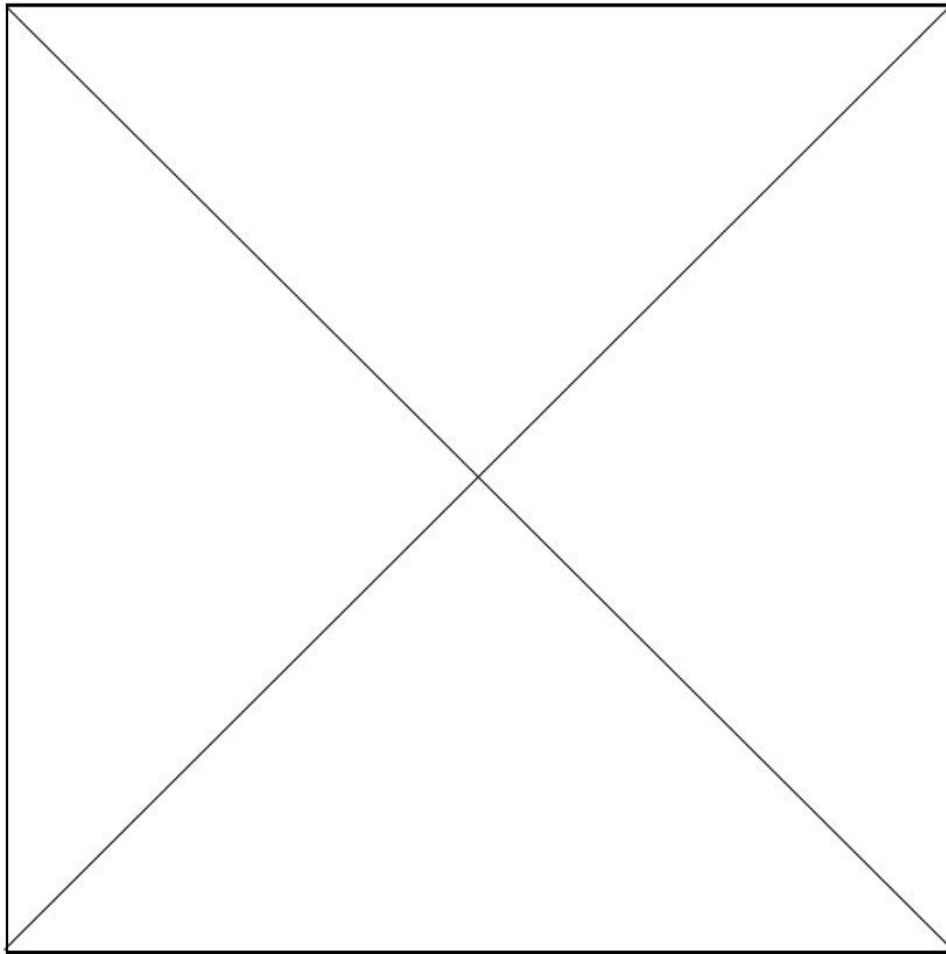
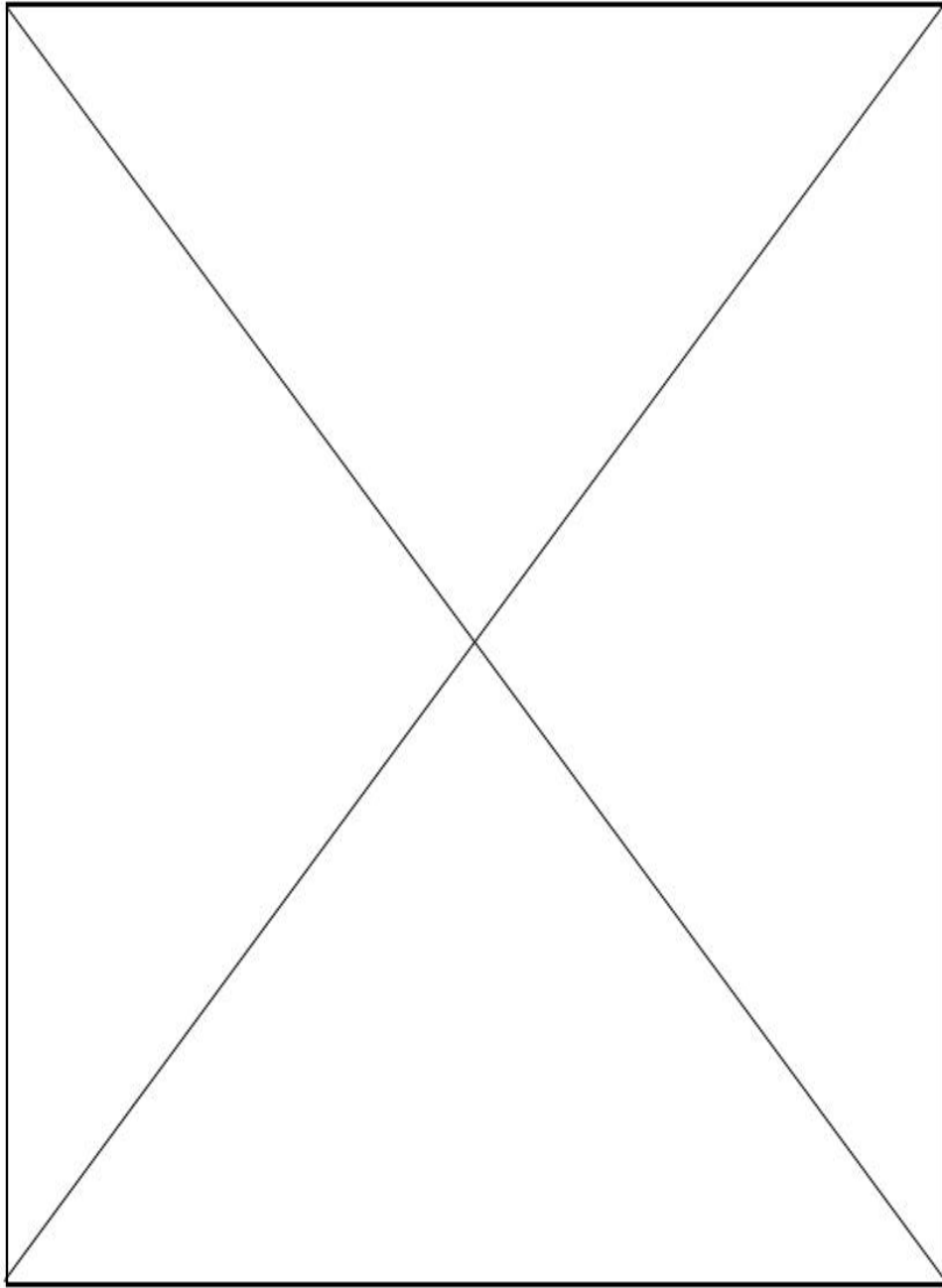


표 4-13 소내정전 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 2)



A square with a black border and two diagonal lines forming an 'X' shape. Below the square is a series of horizontal gray bars of varying lengths, stacked vertically. The bars are arranged in a way that suggests a list or a series of items, with some bars being longer than others. The overall image is a simple, abstract graphic.

표 4-15 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건의 대응능력 및
한계사항 평가(시나리오 3)

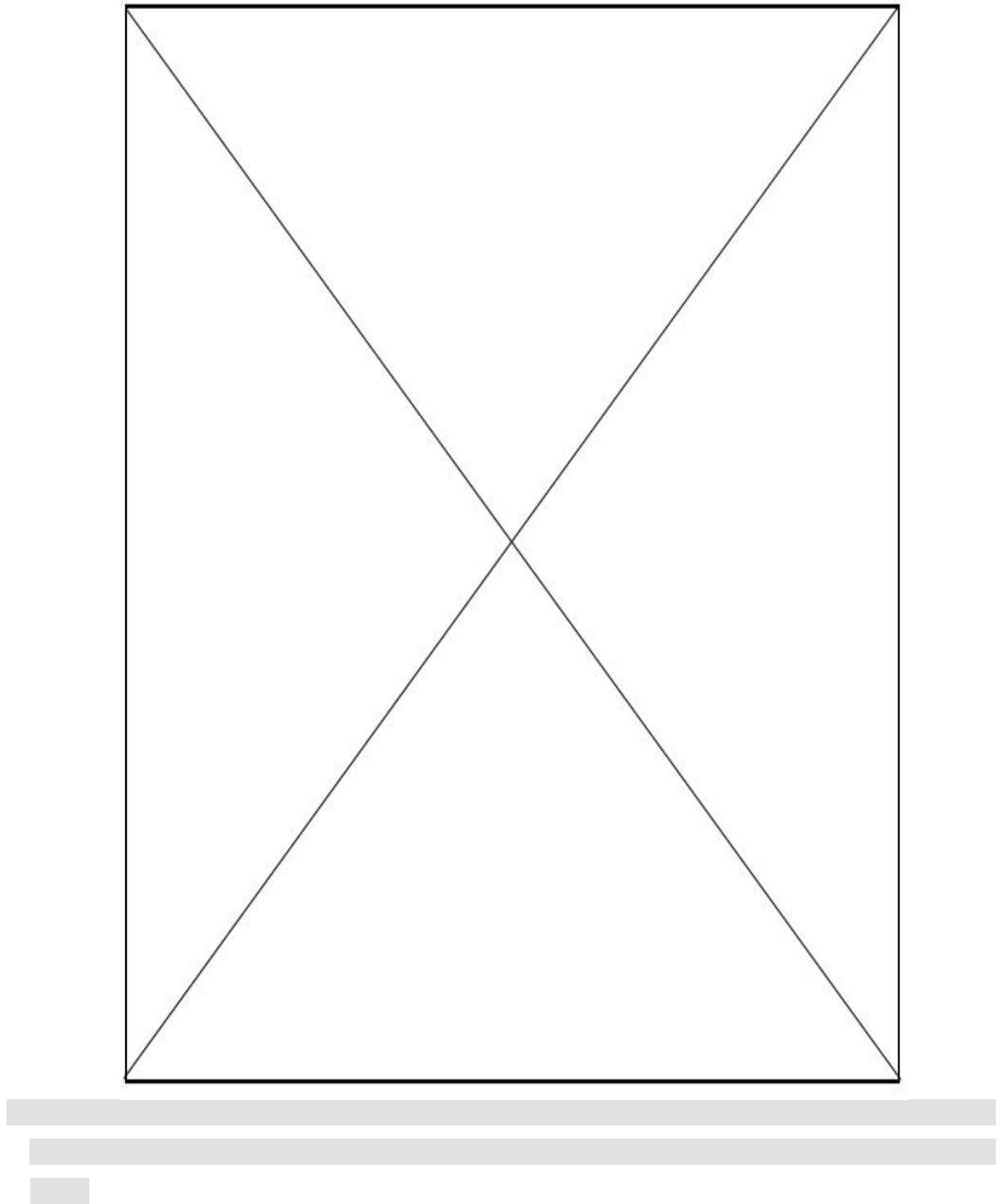


표 4-15 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건의 대응능력 및
한계사항 평가(시나리오 3) (계속)

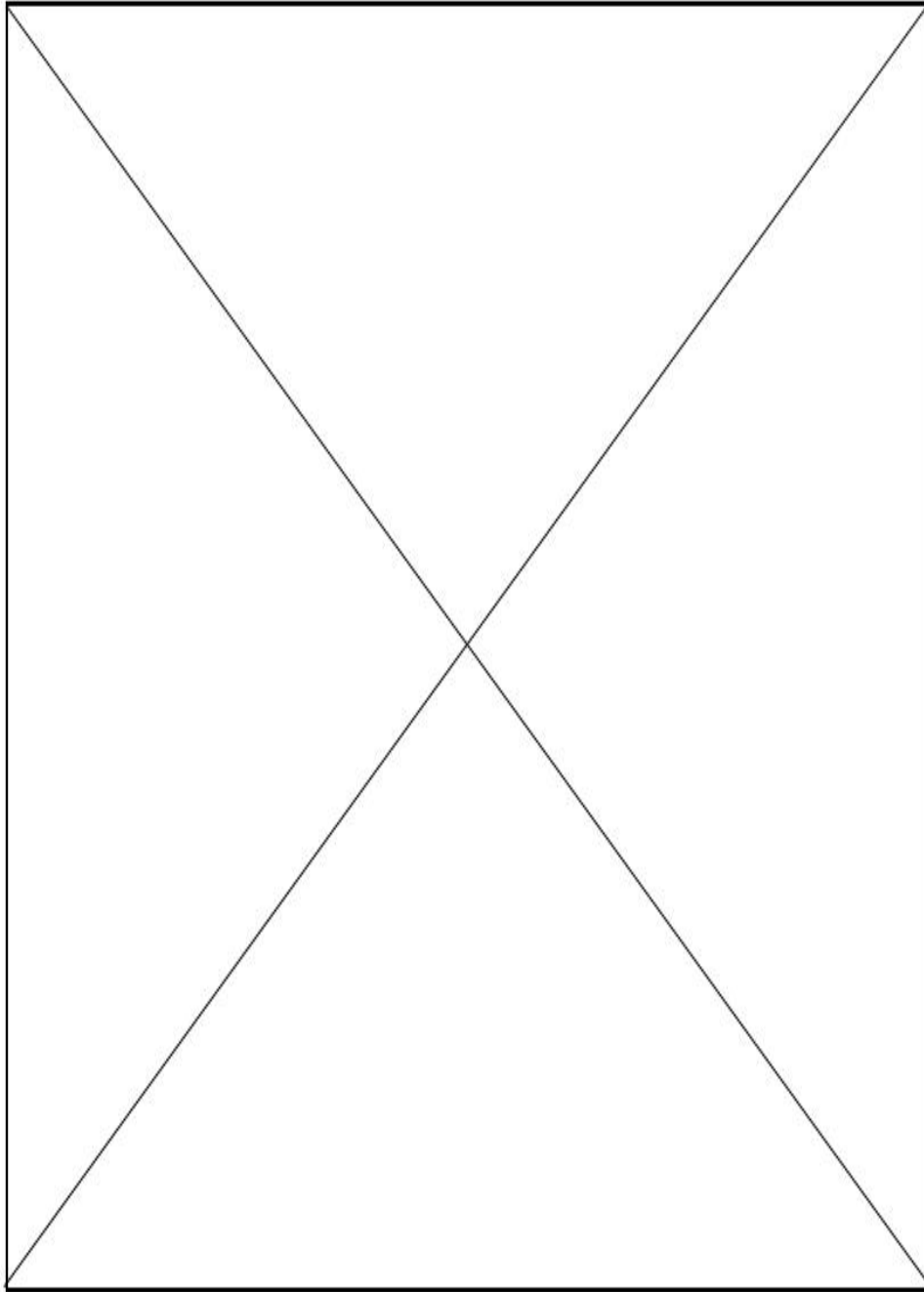


표 4-16 필수대처기능 확보 방안(시나리오 3)

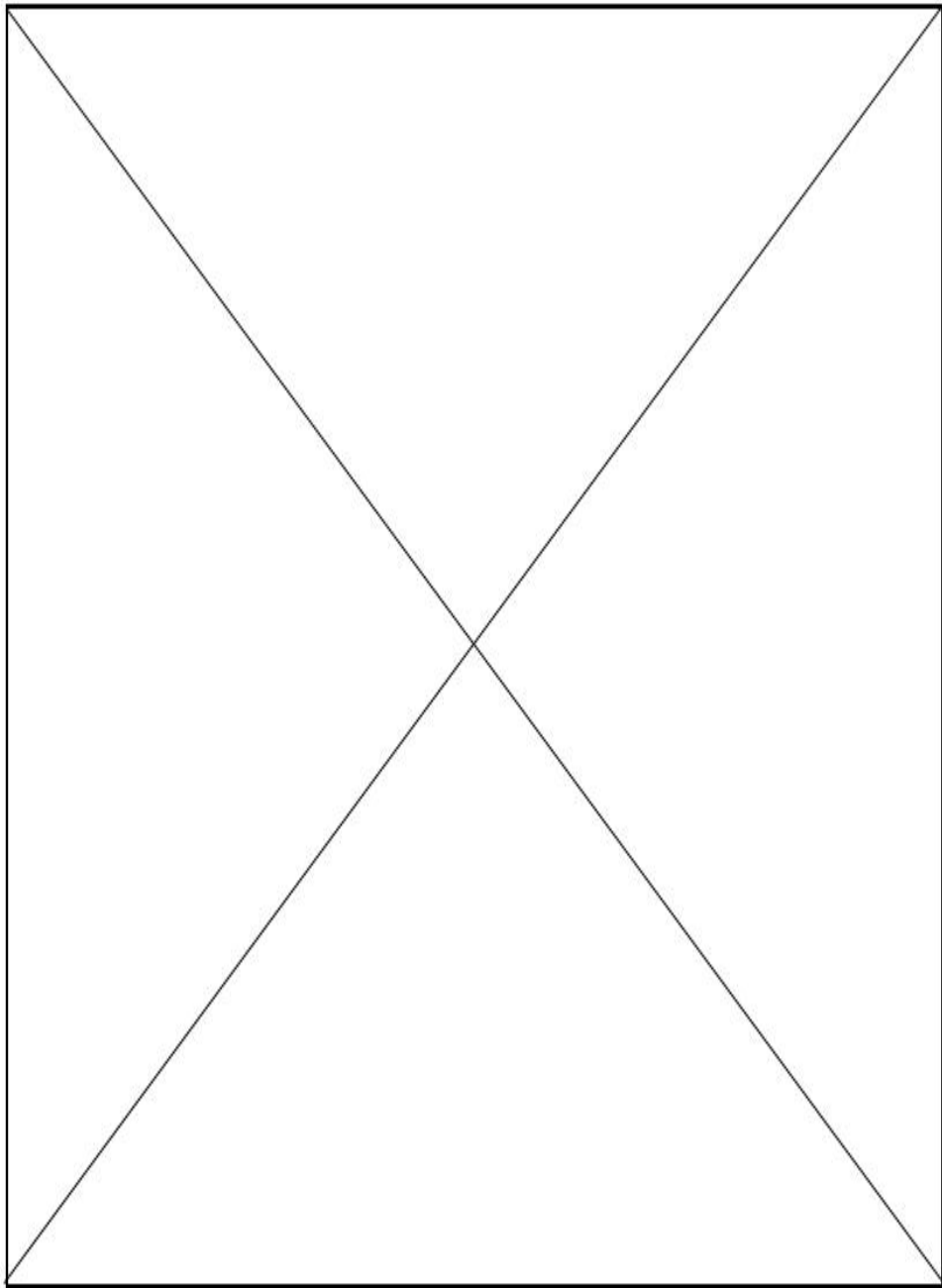


표 4-17 최종열제거원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 4)

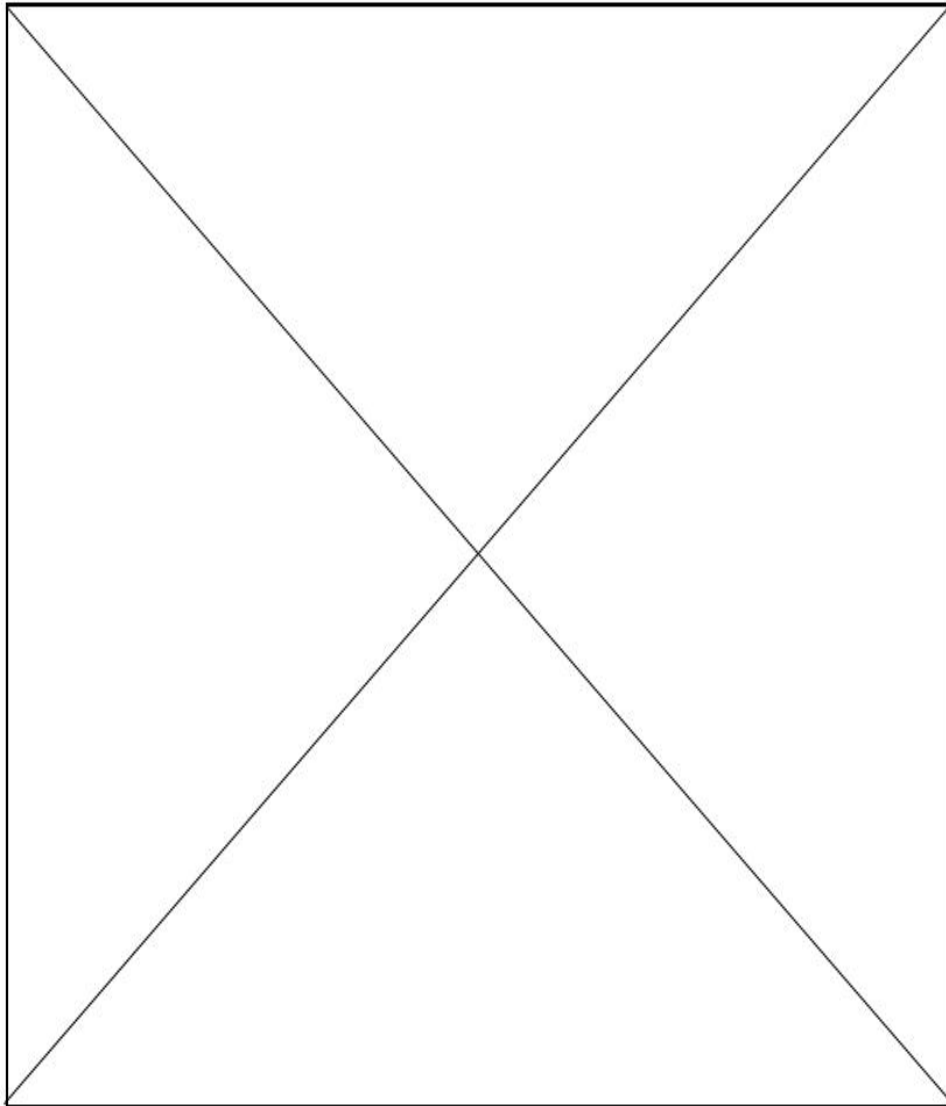
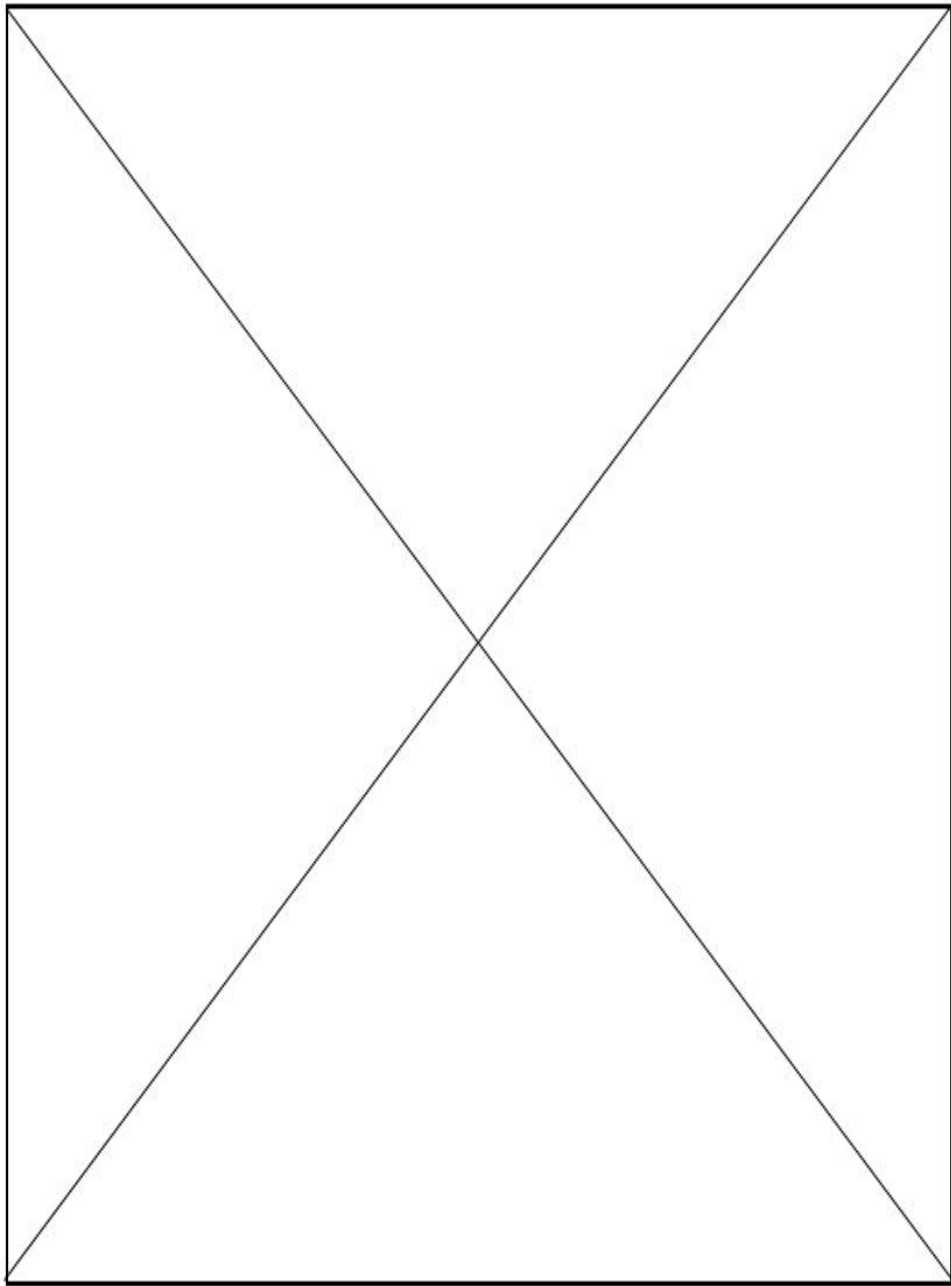


표 4-18 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 4)



[Redacted text block]

표 4-19 필수대처기능 확보 방안(시나리오 4)

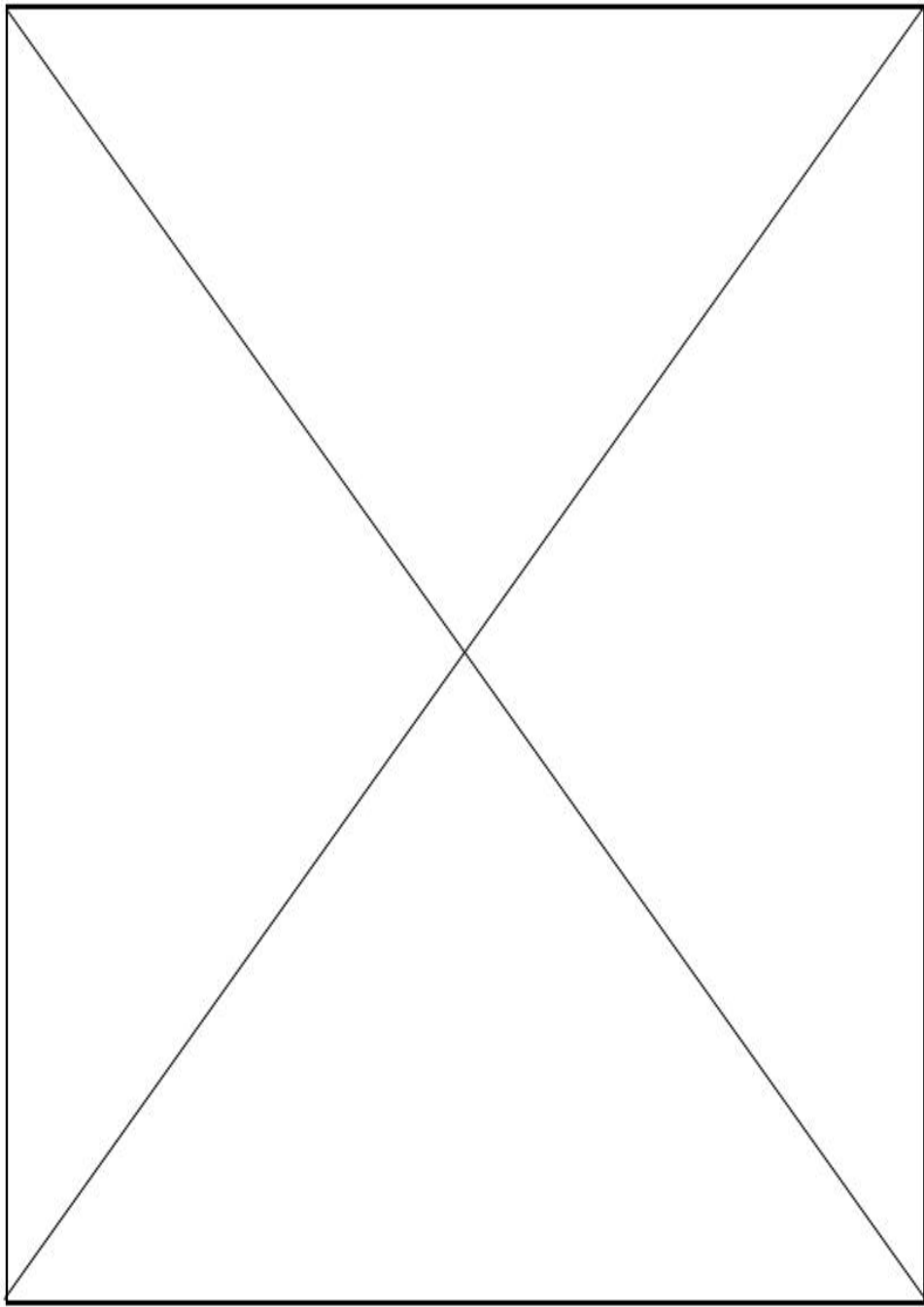


표 4-20 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건
평가 시 가정사항(시나리오 6)

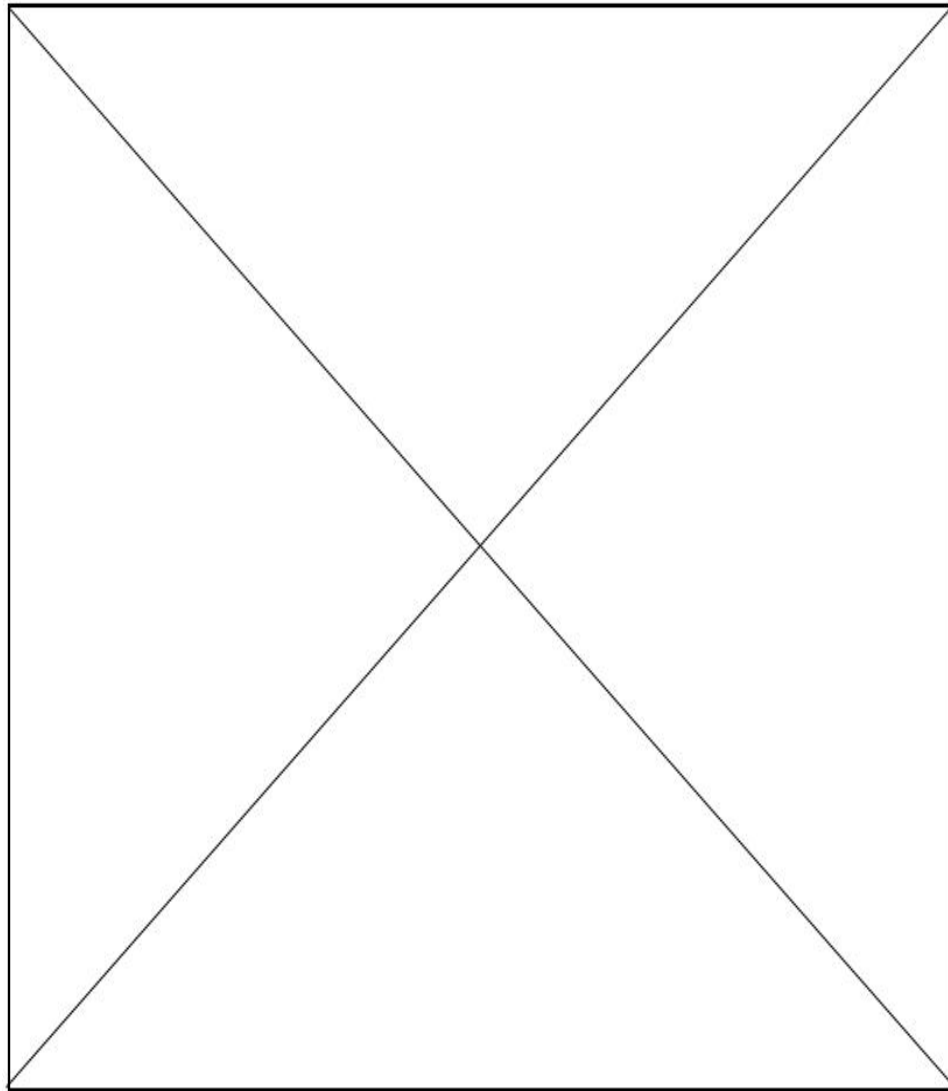
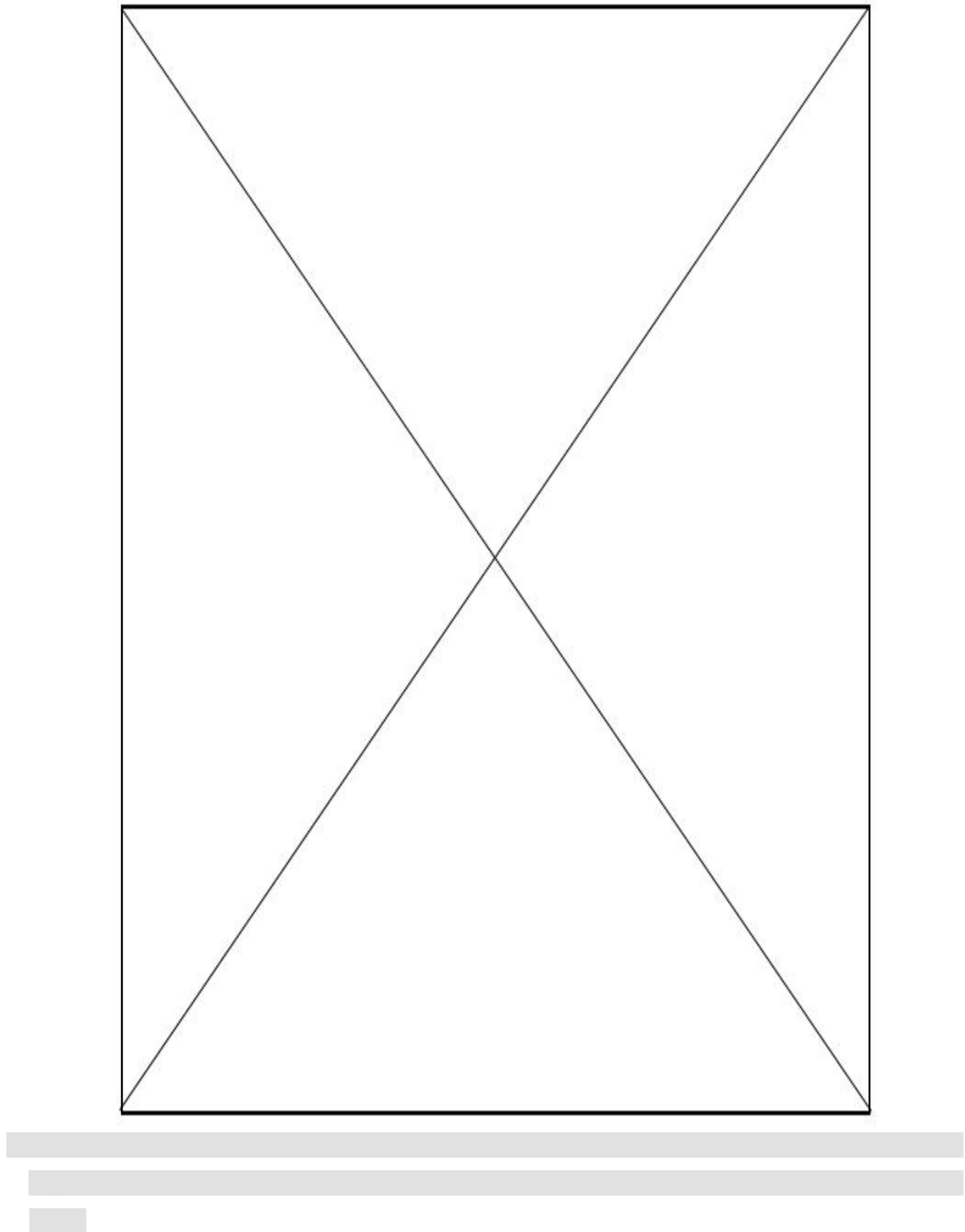


표 4-21 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건의
대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6)



The image consists of a square with a black border and a black 'X' formed by two diagonal lines crossing at the center. Below the square, there are ten horizontal gray bars of varying lengths, stacked vertically. The bars are of different widths and are positioned at regular intervals, creating a series of horizontal lines that extend across the lower portion of the image.

표 4-22 필수대처기능 확보 방안(시나리오 6)

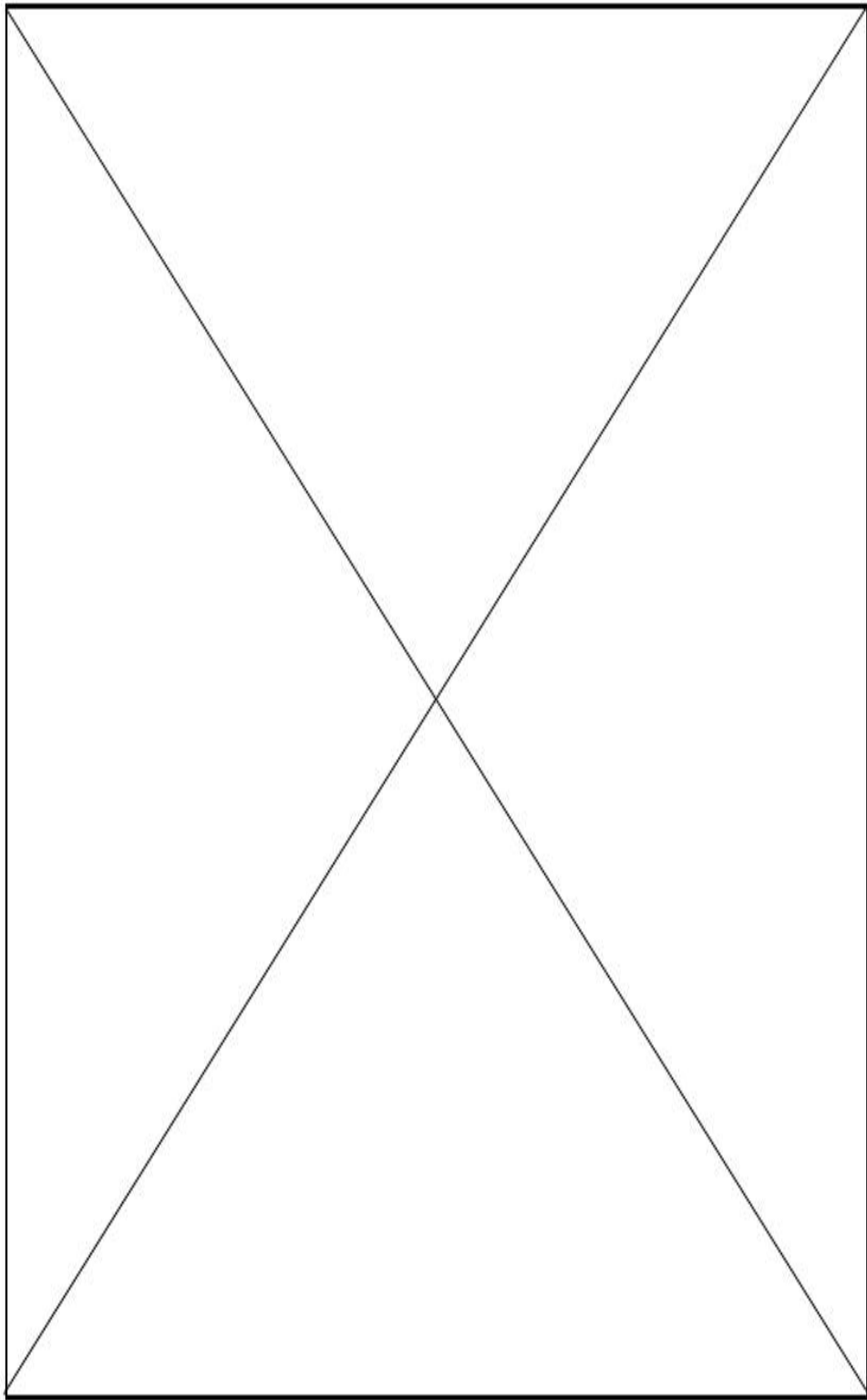


표 4-23 절차서 및 지침서 개선항목

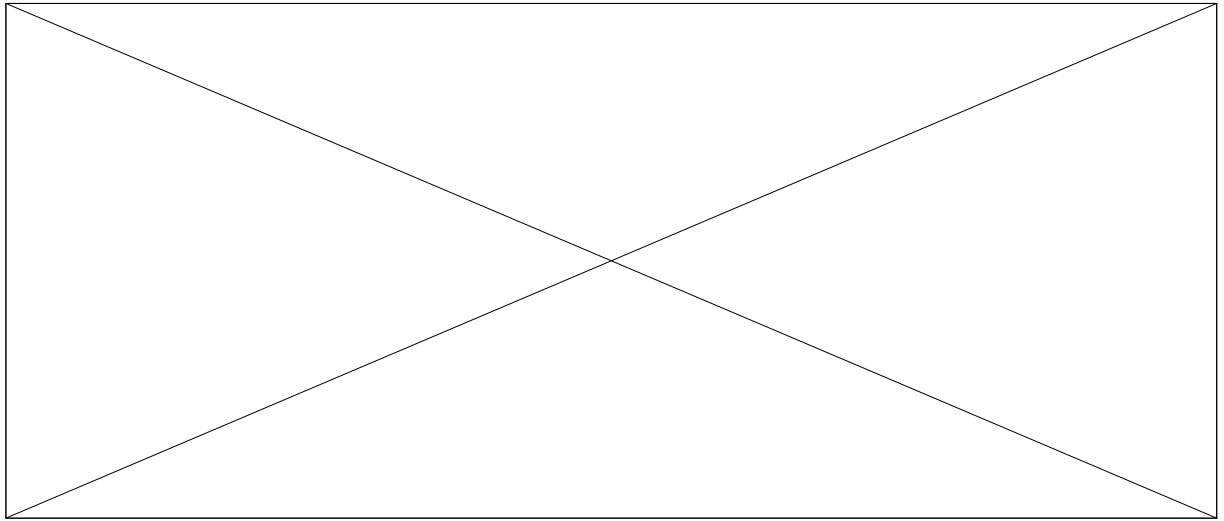


표 4-24 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

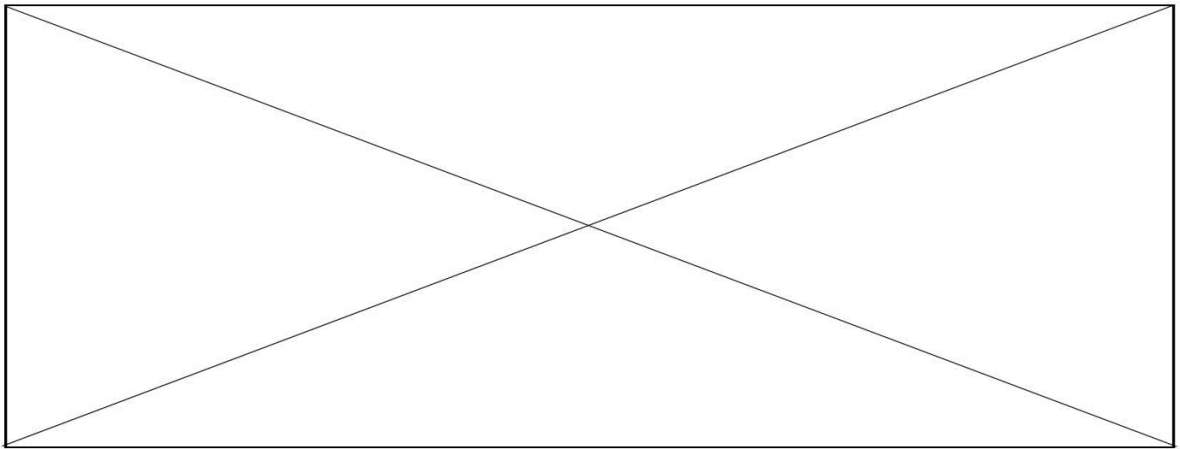
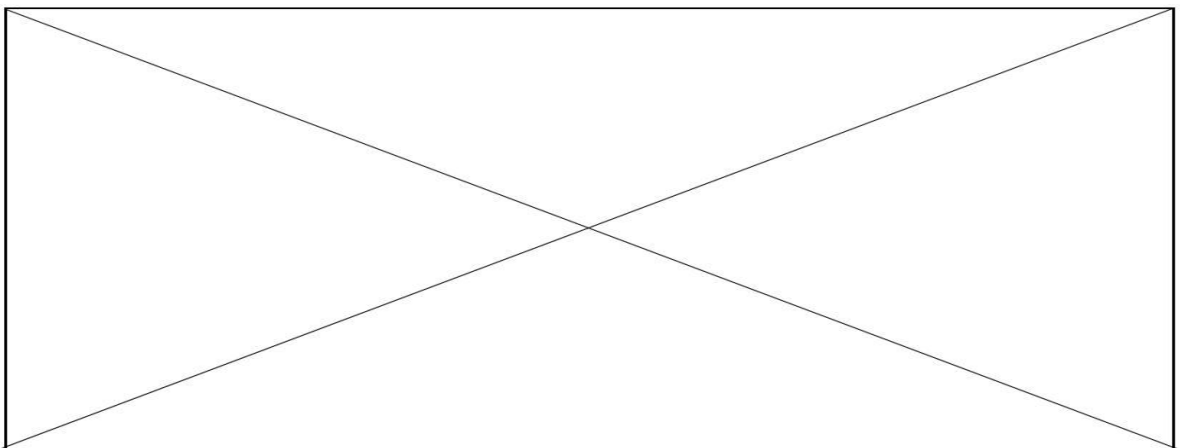


표 4-25 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목



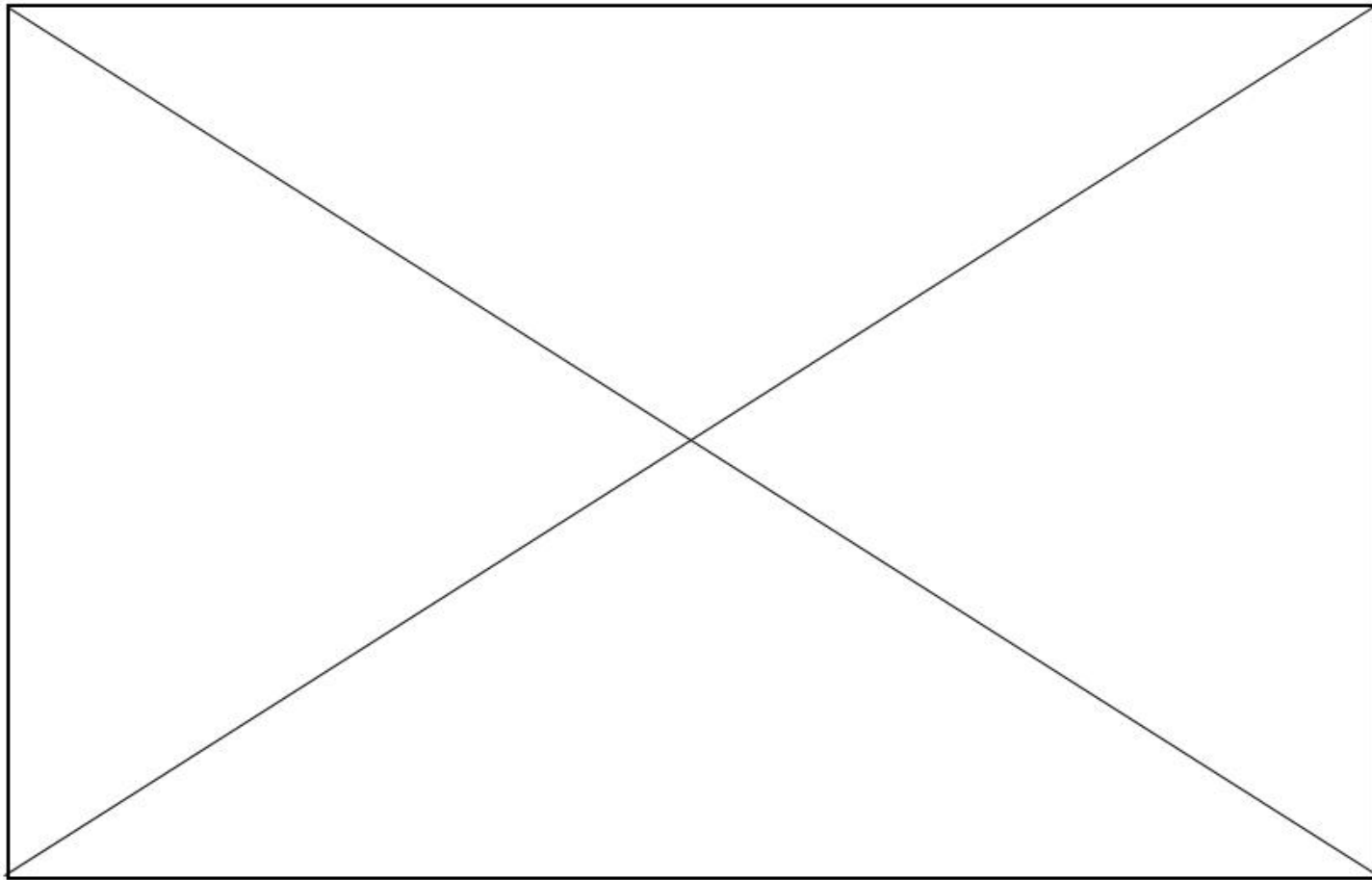


그림 4-1 소내 전력계통 단선도 (1/2)

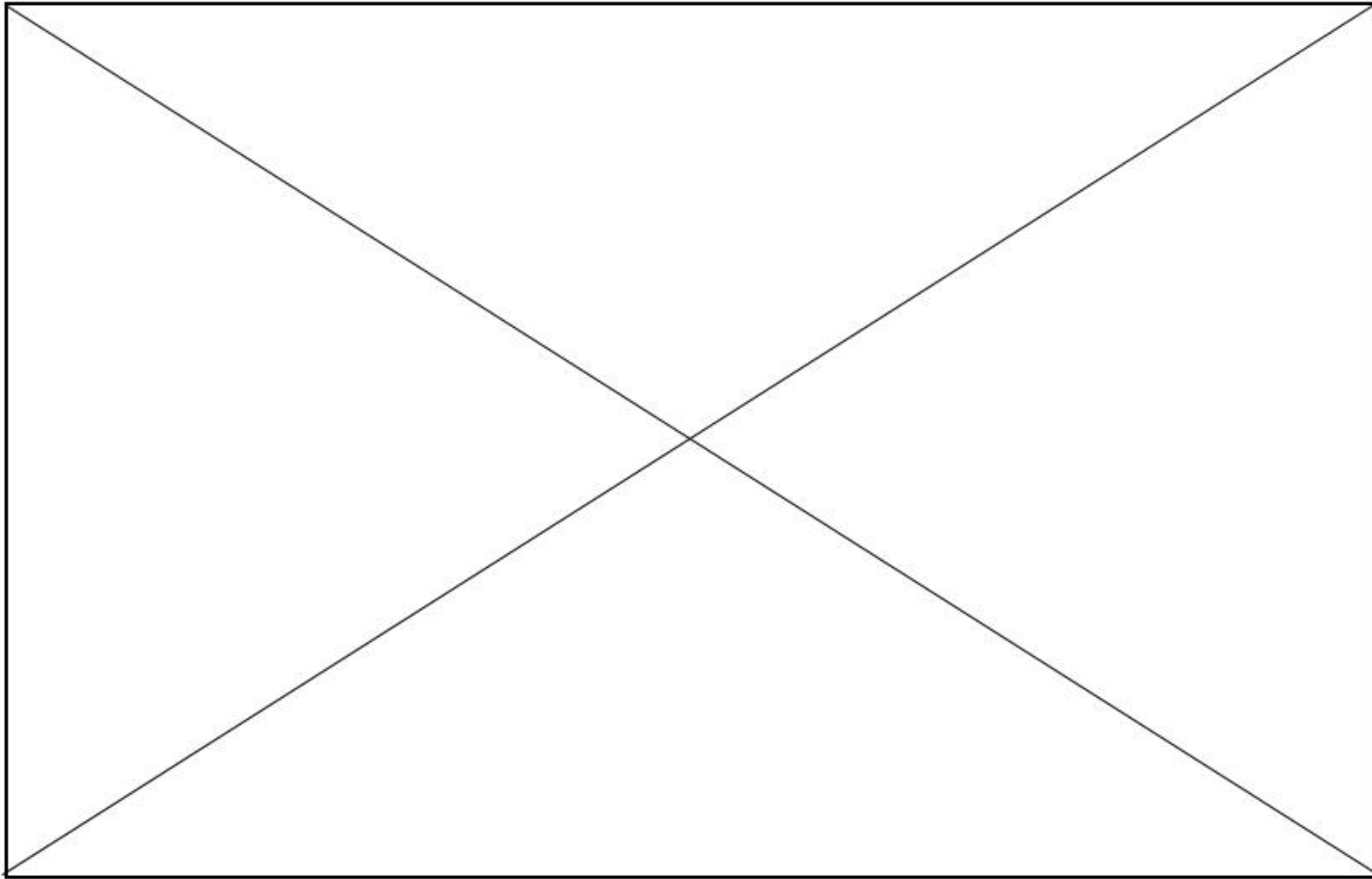


그림 4-1 소내 전력계통 단선도 (2/2)

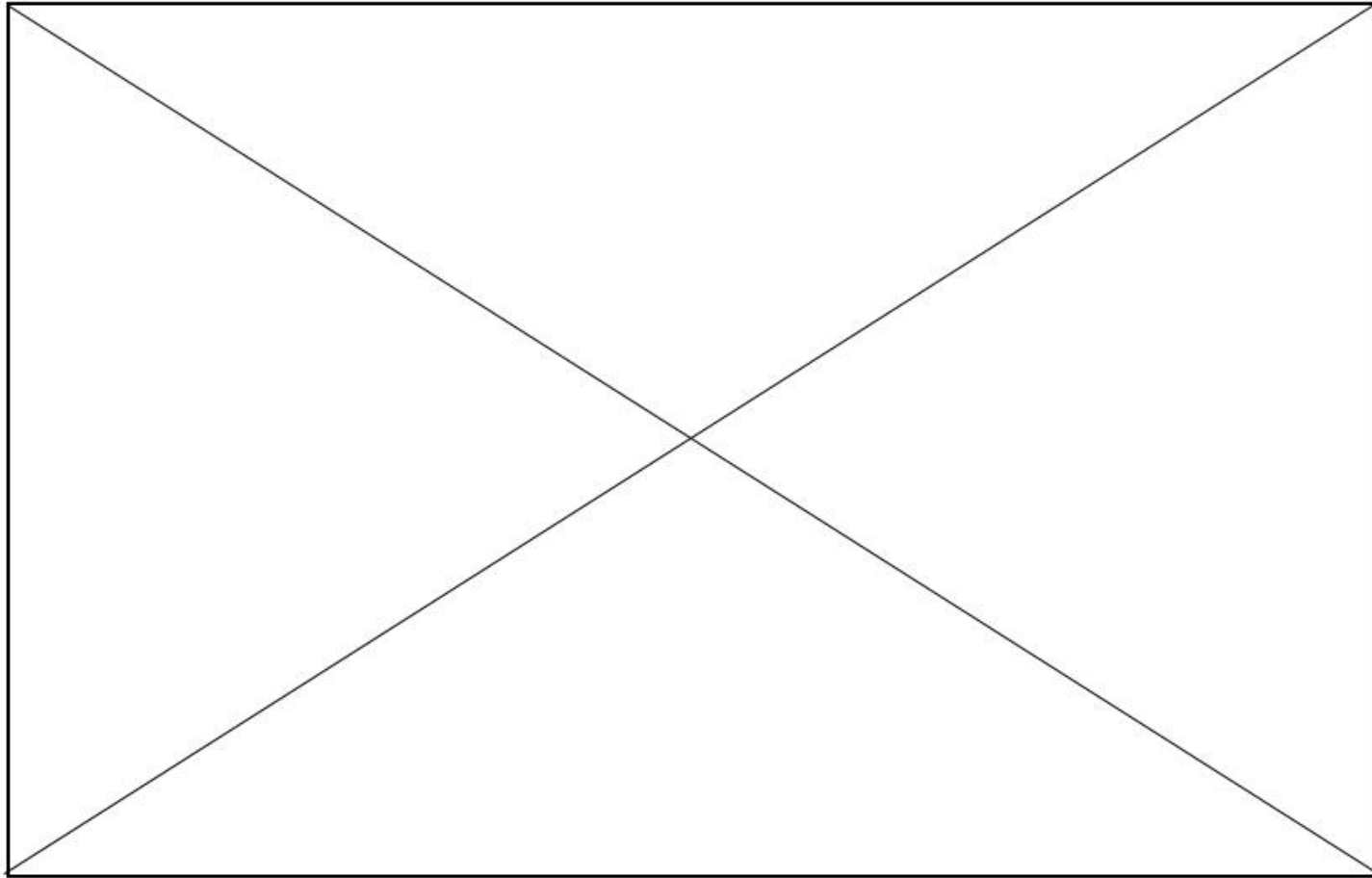


그림 4-2 비상전원 전력모선도

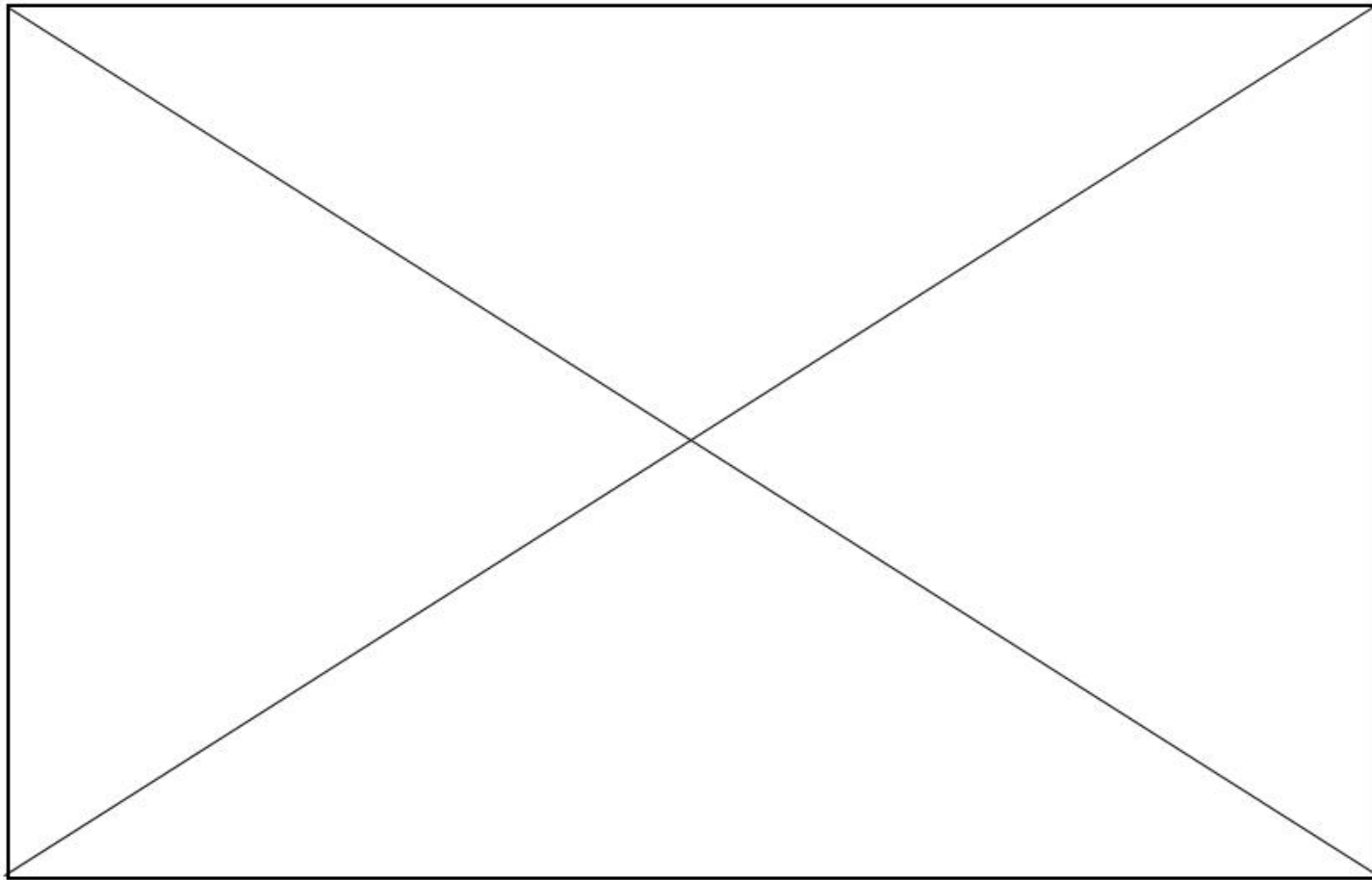


그림 4-3 한울3,4호기 비상냉각수 주입설비 단순계통도

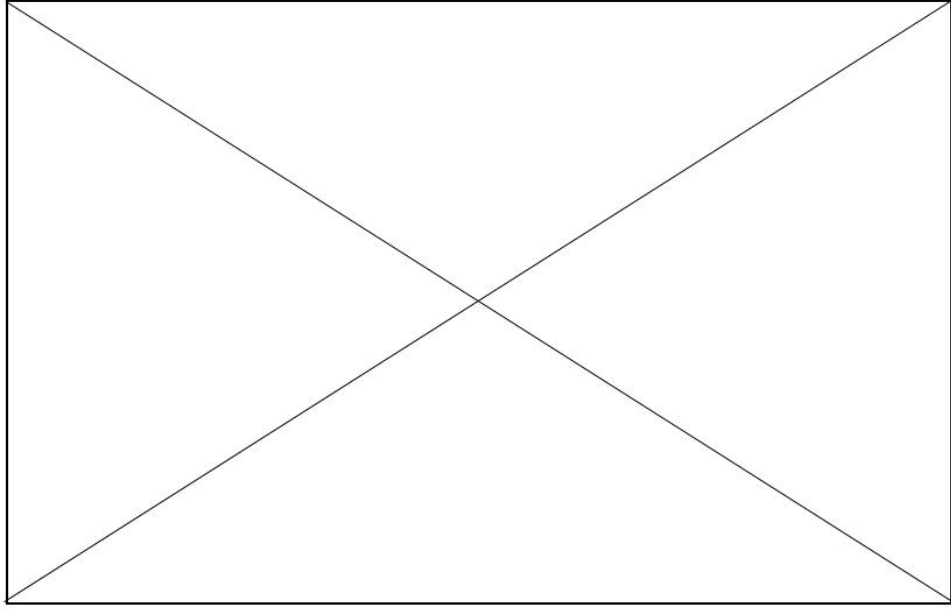


그림 4-4 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 4, 5)

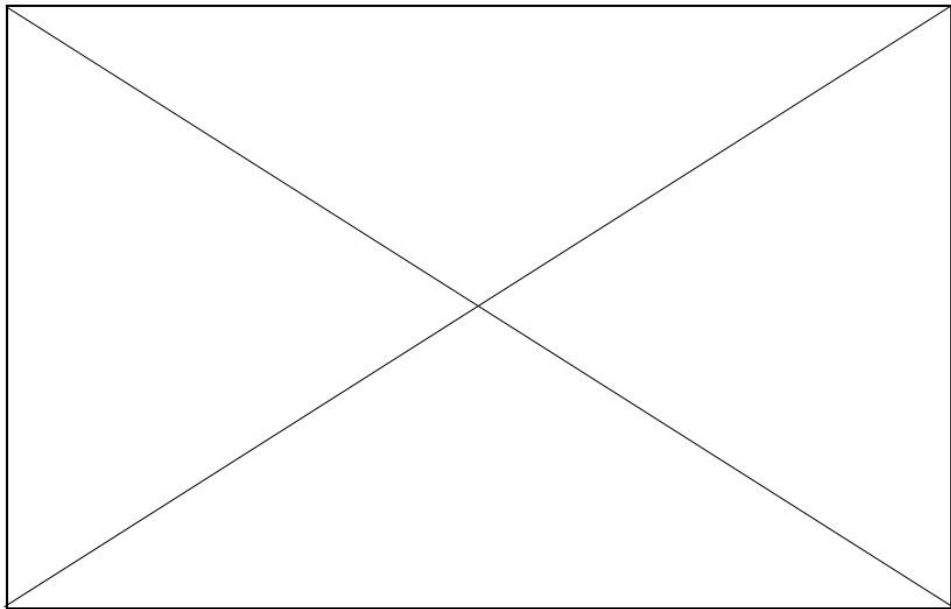


그림 4-5 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 4, 5)

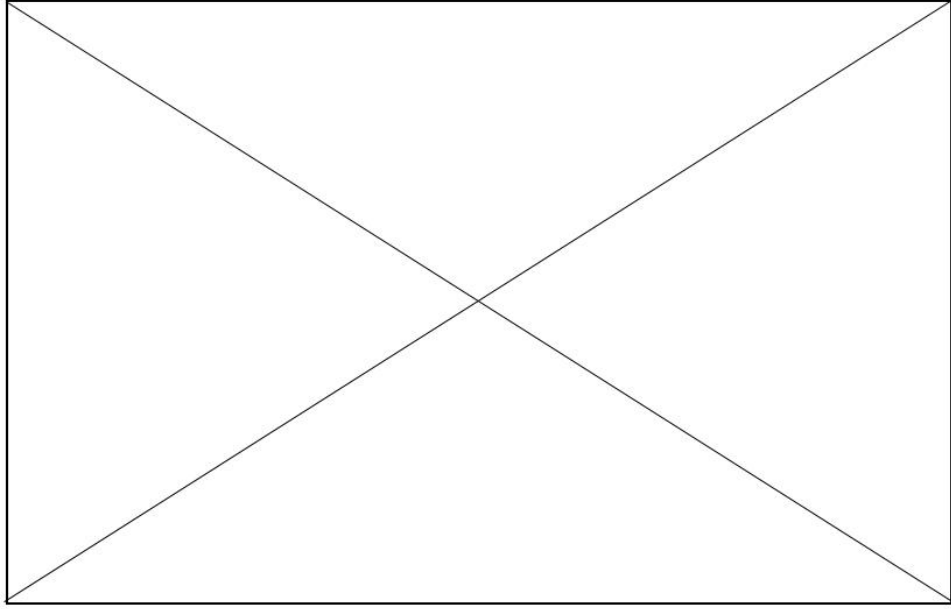


그림 4-6 원자로냉각재계통 온도(시나리오 4, 5)

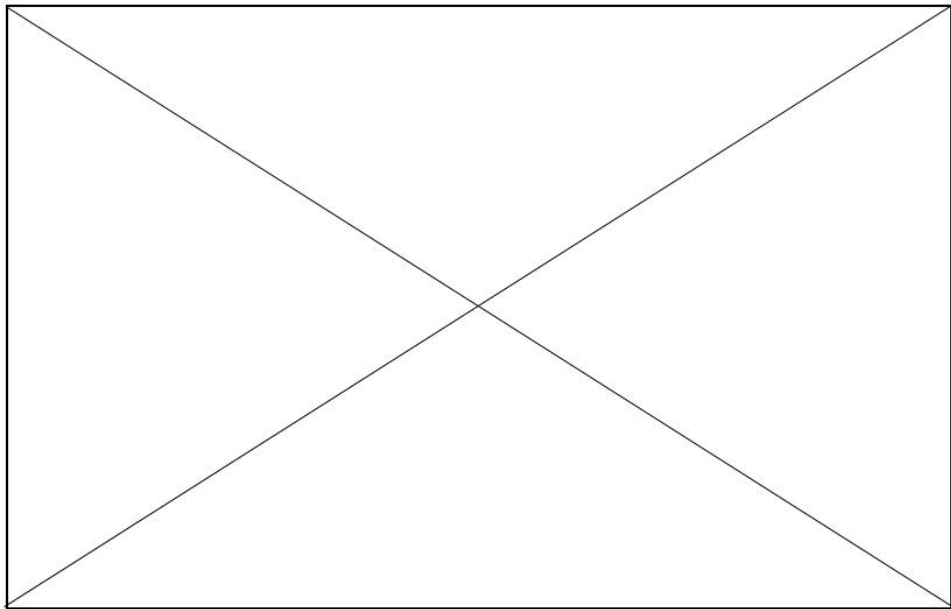


그림 4-7 원자로냉각재 배기밸브 유량(시나리오 4, 5)

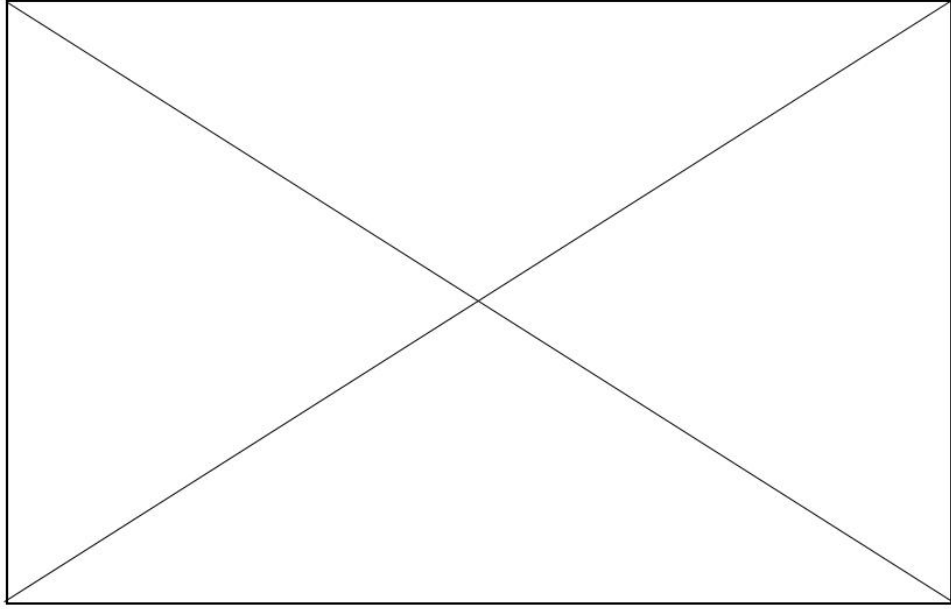


그림 4-8 가압기 수위(시나리오 4, 5)

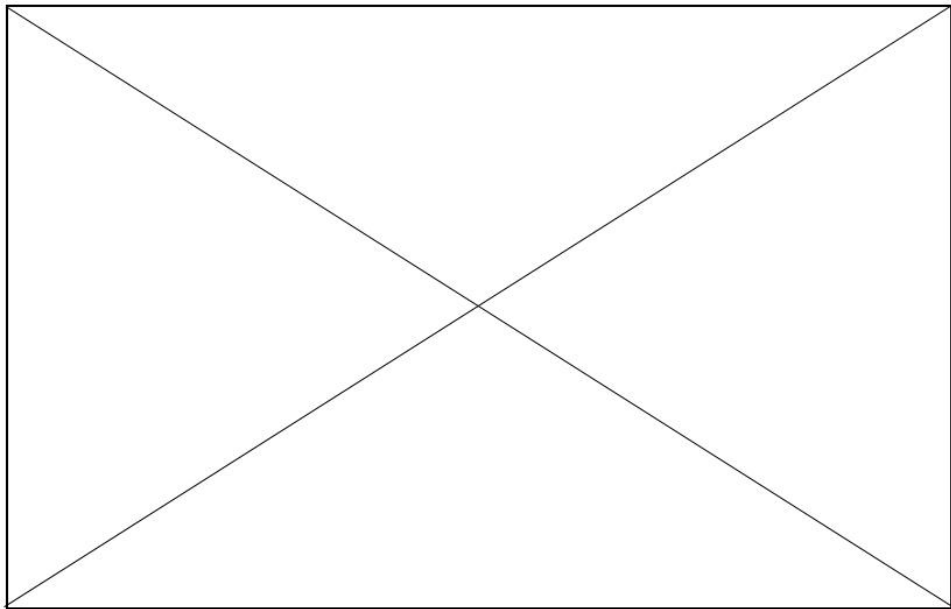


그림 4-9 충전 및 유출 유량(시나리오 4, 5)

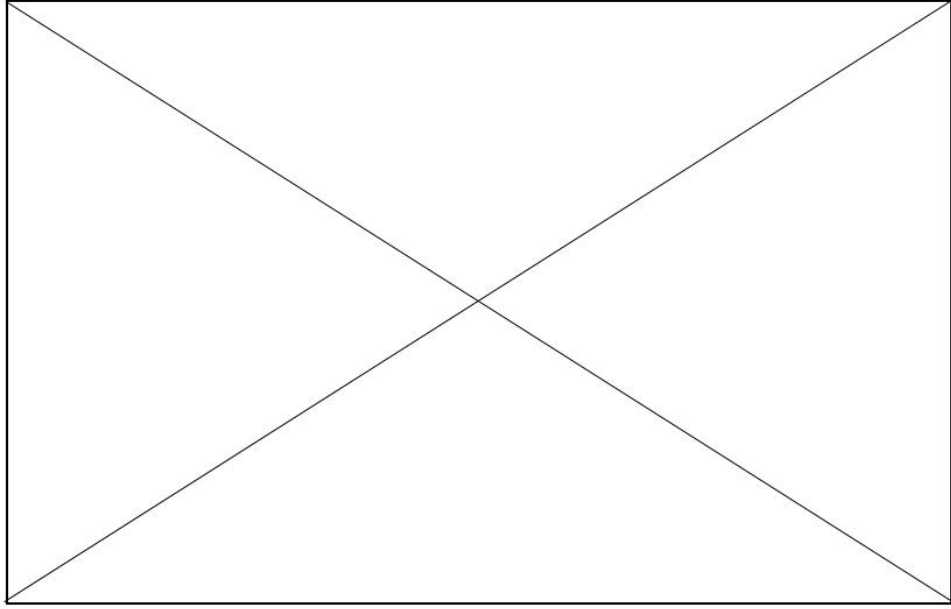


그림 4-10 누적 충전 유량(시나리오 4, 5)

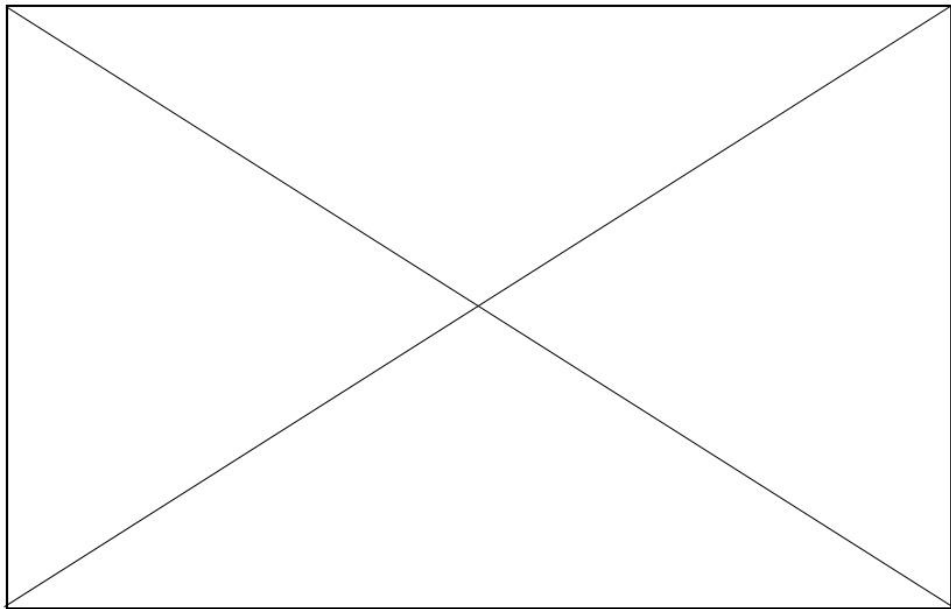


그림 4-11 증기발생기 수위(시나리오 4, 5)

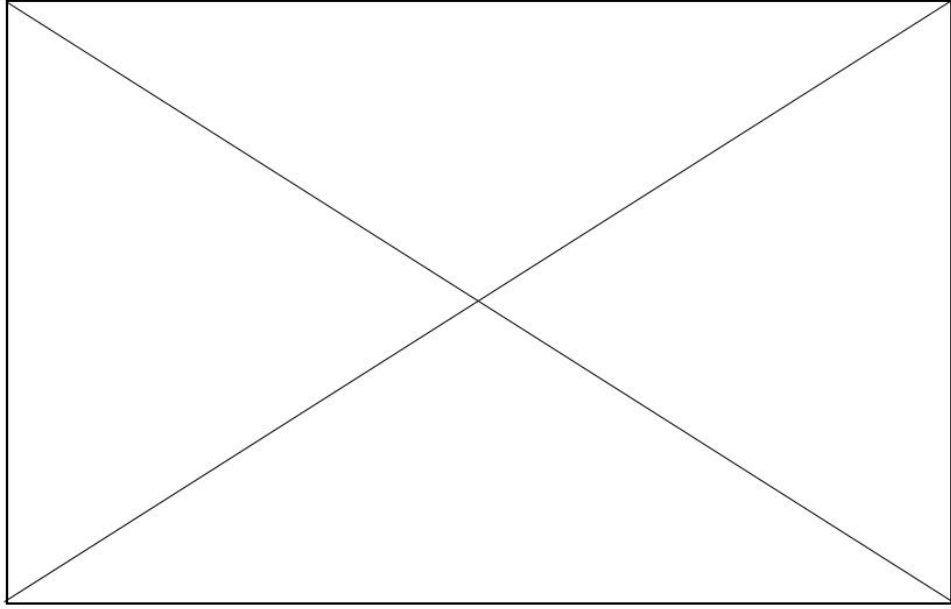


그림 4-12 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 4, 5)

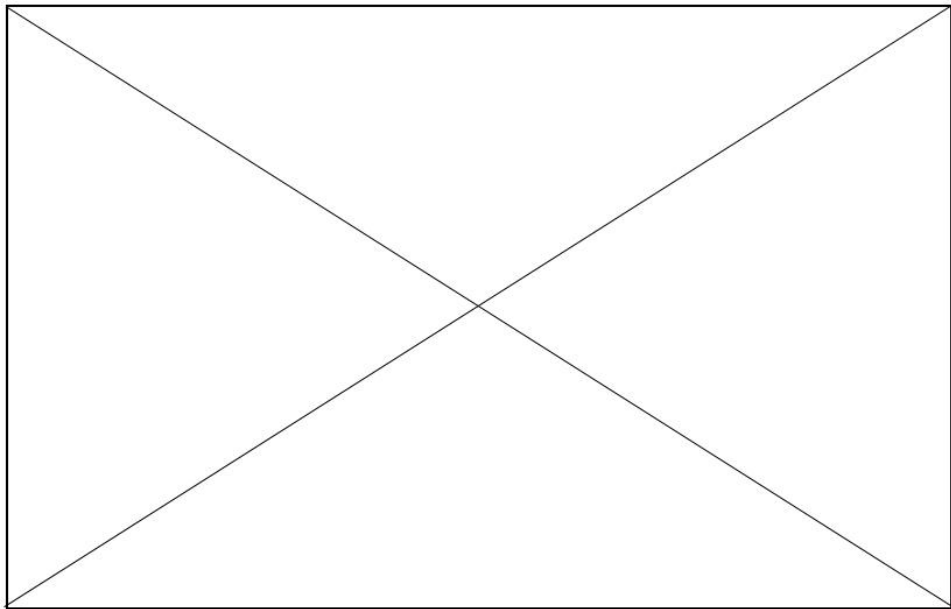


그림 4-13 보조급수 유량(시나리오 4, 5)

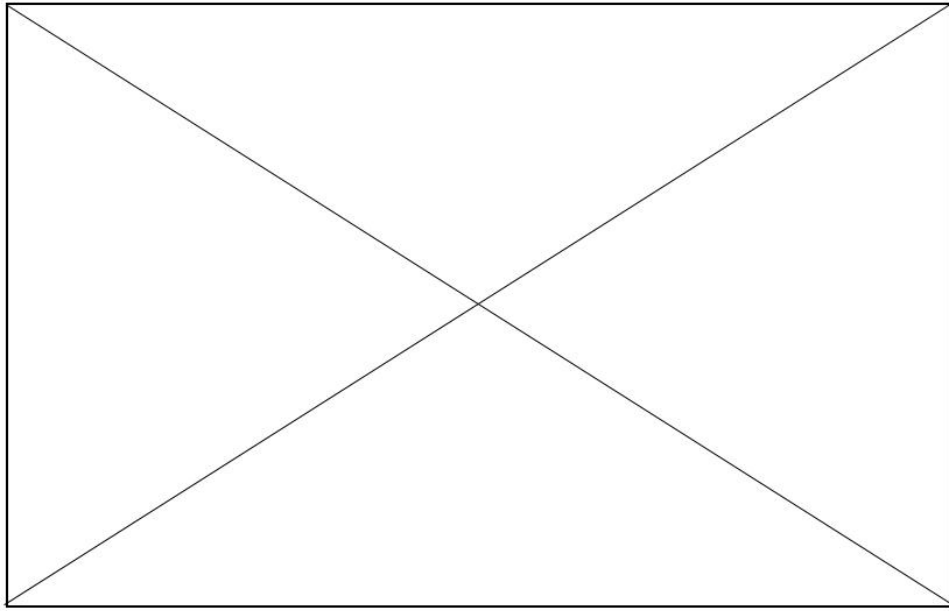


그림 4-14 누적 보조급수 유량(시나리오 4, 5)

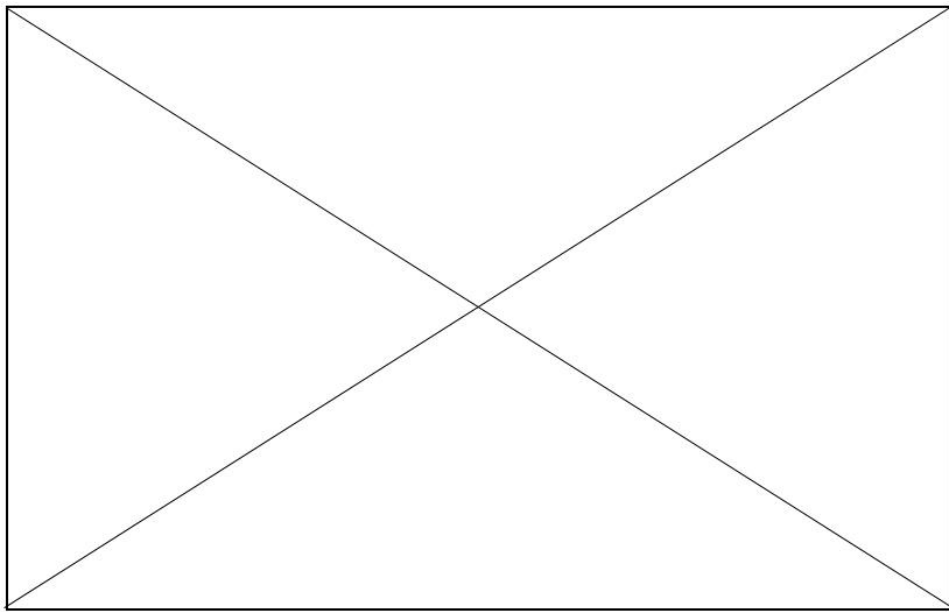


그림 4-15 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

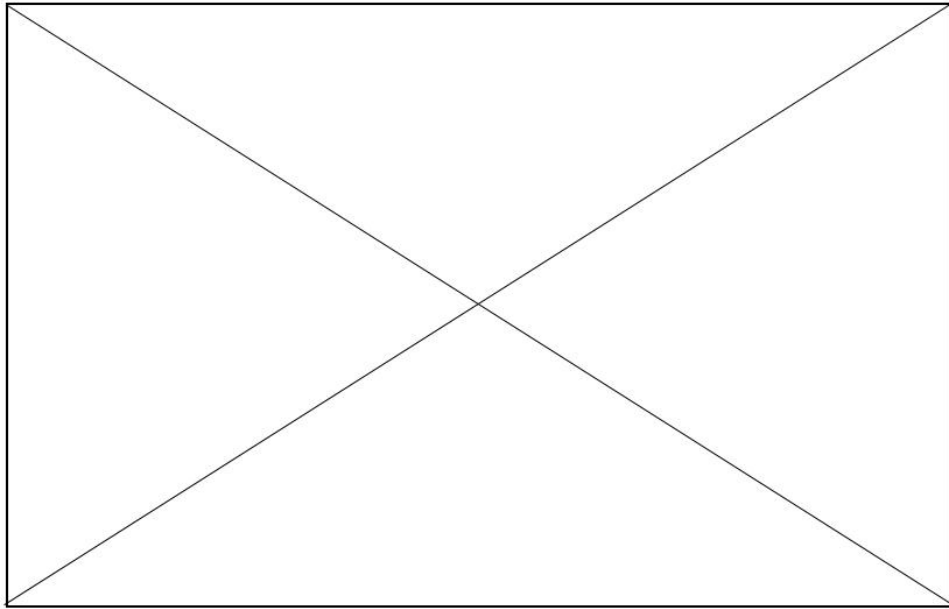


그림 4-16 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

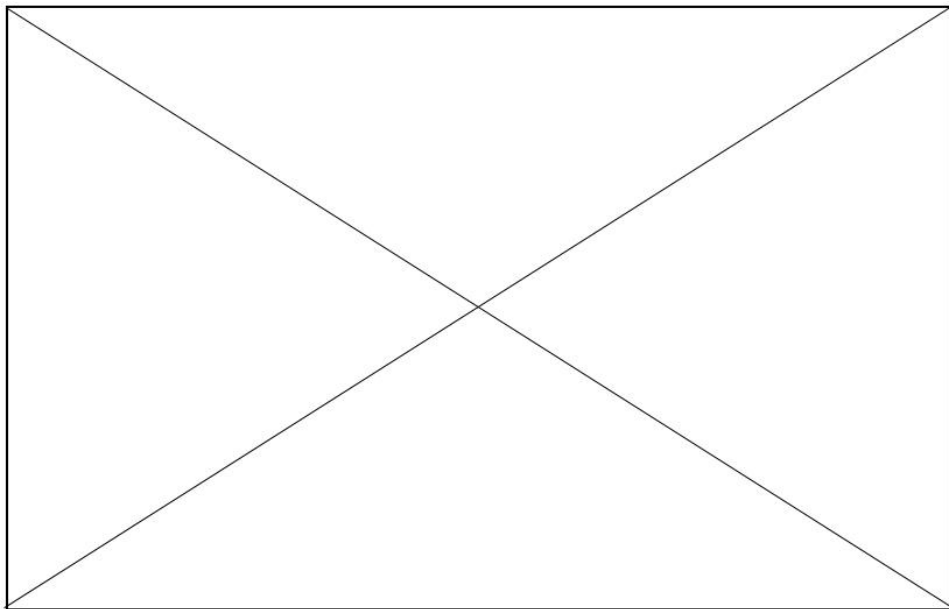


그림 4-17 원자로냉각재계통 온도(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

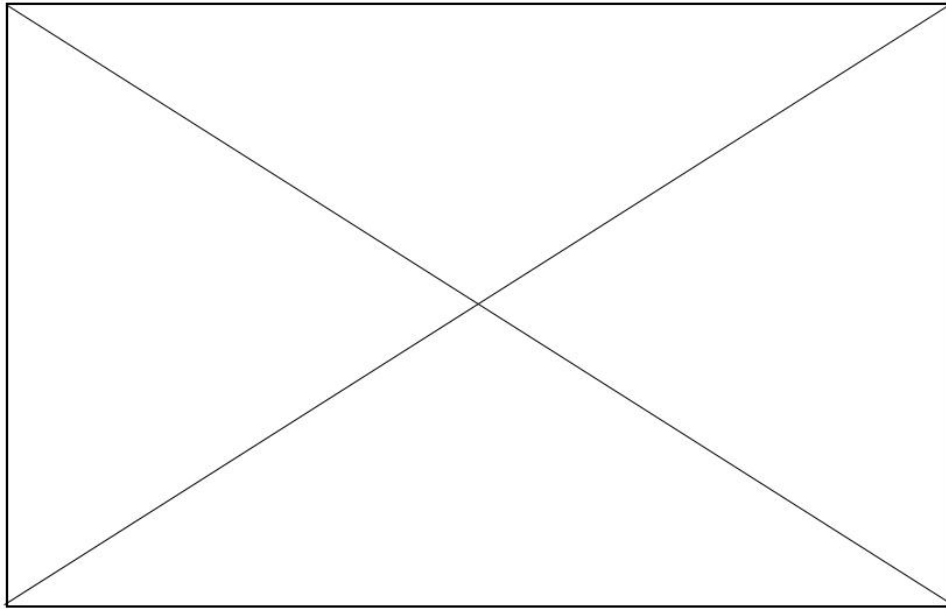


그림 4-18 원자로냉각재펌프 밀봉누설 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

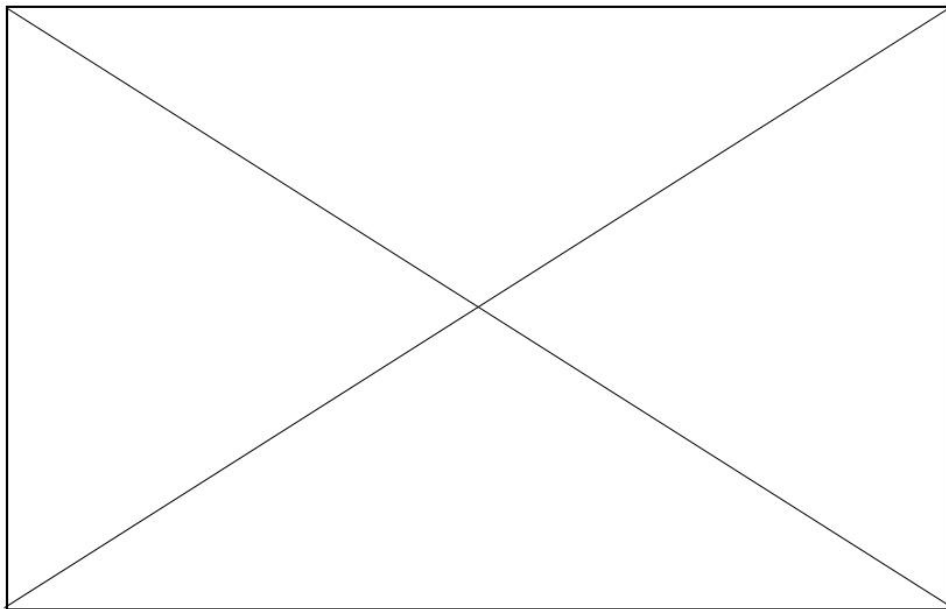


그림 4-19 원자로용기하향유로 및 노심 응축수위
(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

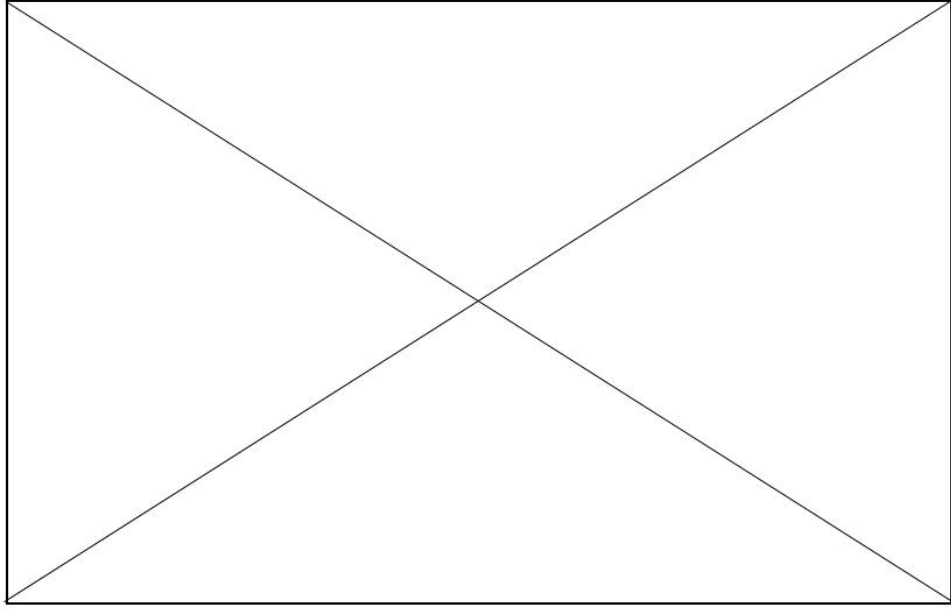


그림 4-20 안전주입탱크 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

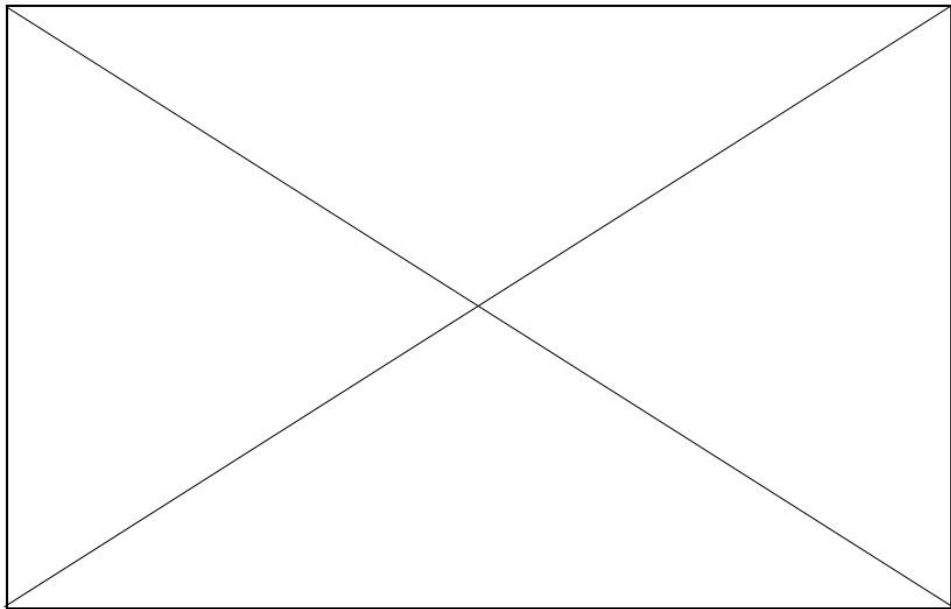


그림 4-21 증기발생기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

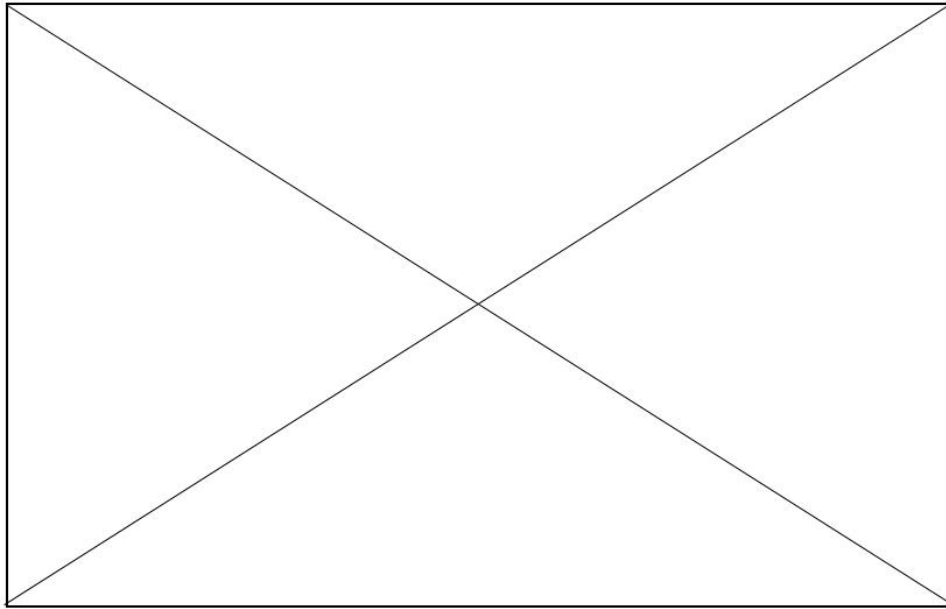


그림 4-22 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈 시)

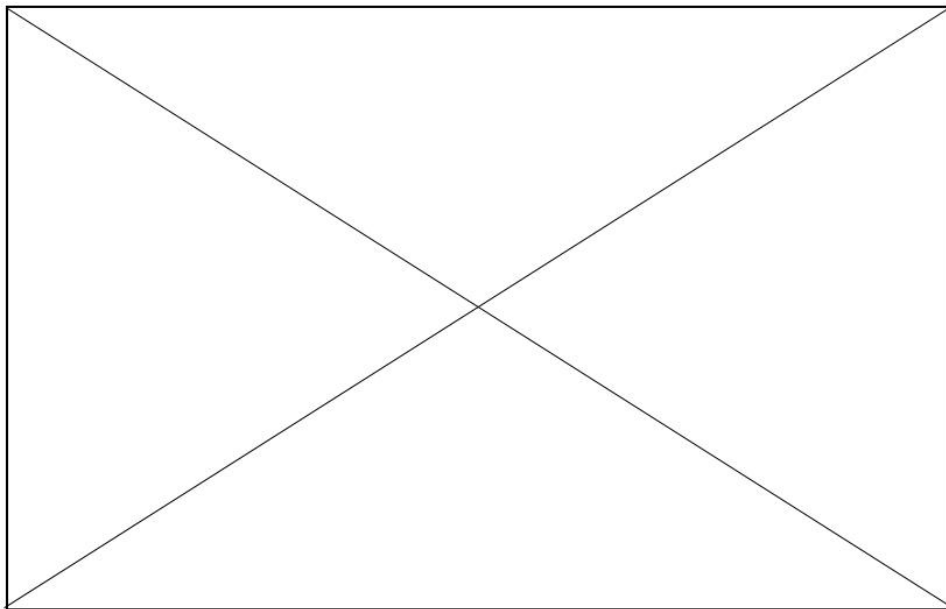


그림 4-23 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

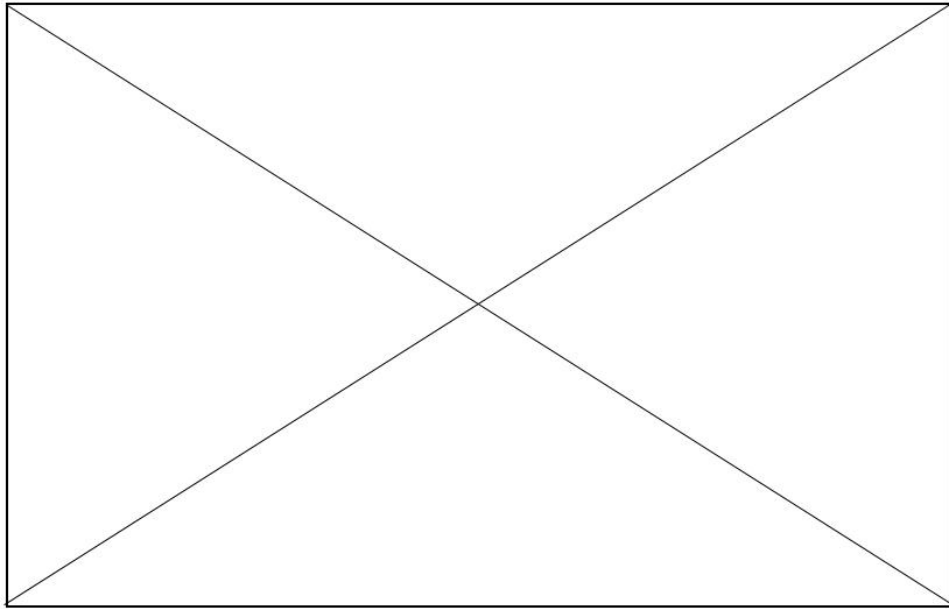


그림 4-24 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

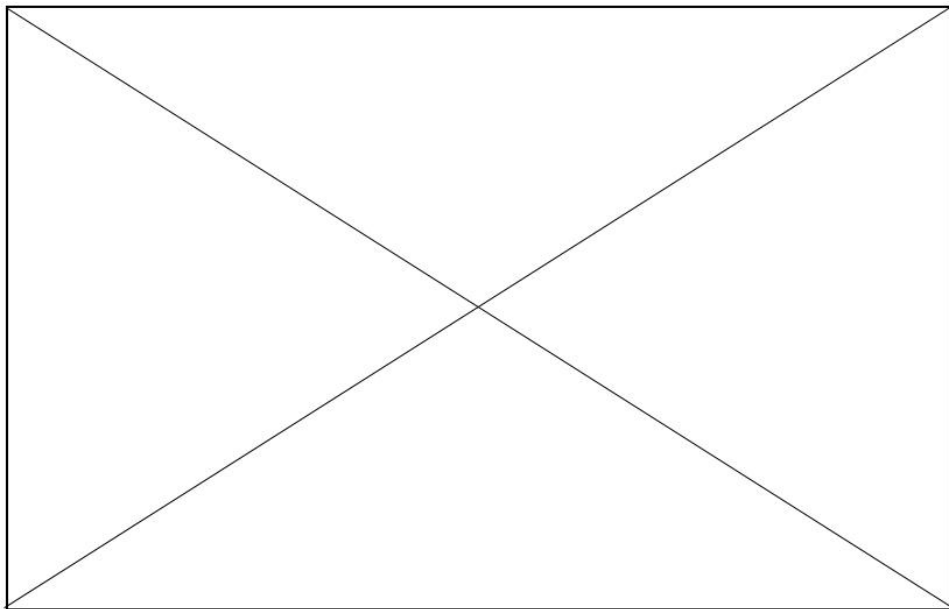


그림 4-25 원자로냉각재계통 온도(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

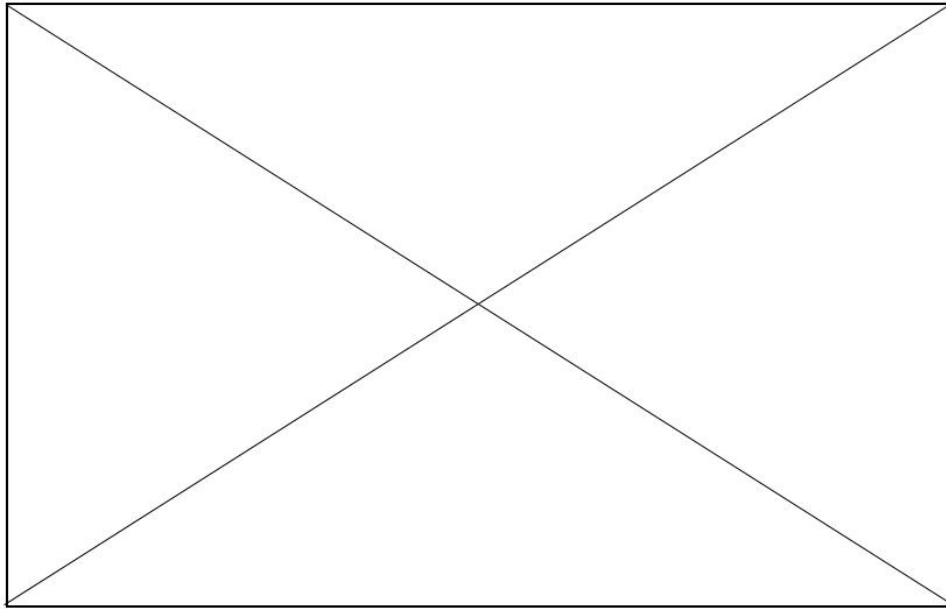


그림 4-26 원자로냉각재펌프 밀봉누설 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

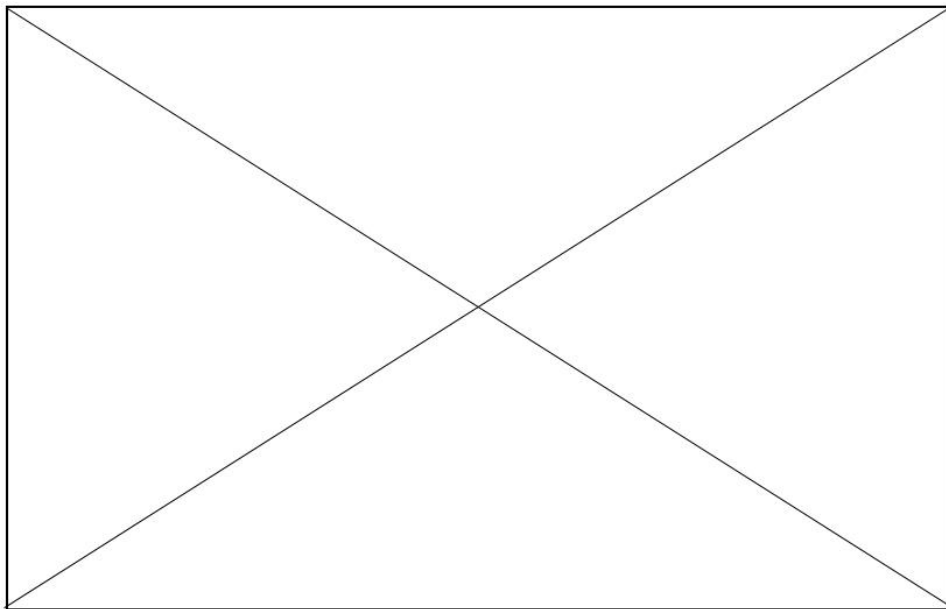


그림 4-27 가압기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

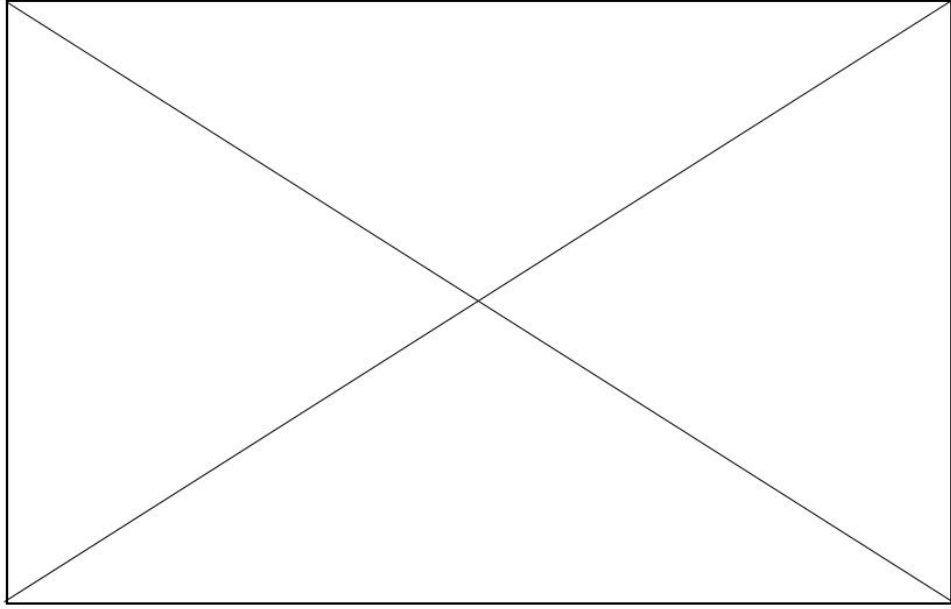


그림 4-28 원자로용기하향유로 및 노심 응축수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

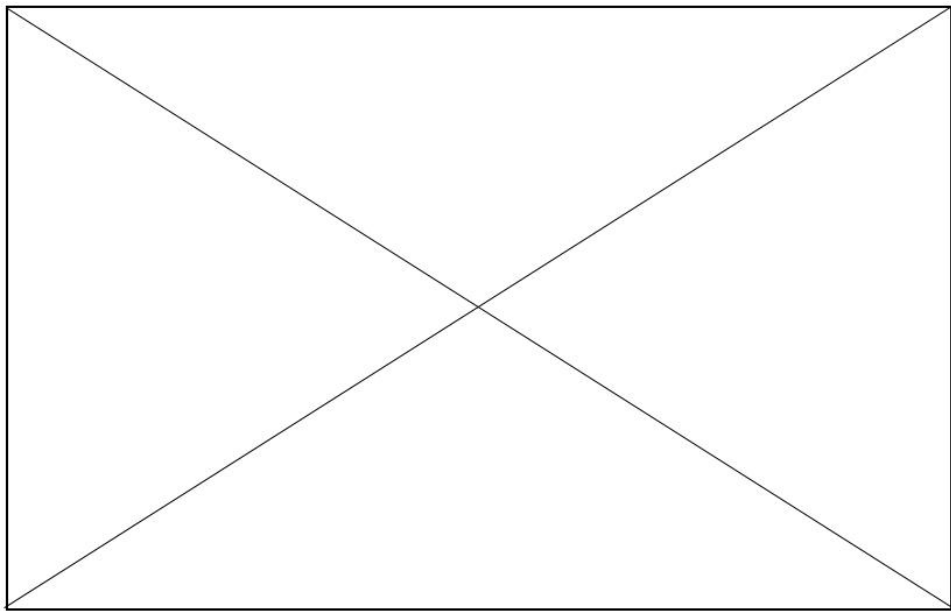


그림 4-29 안전주입탱크 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

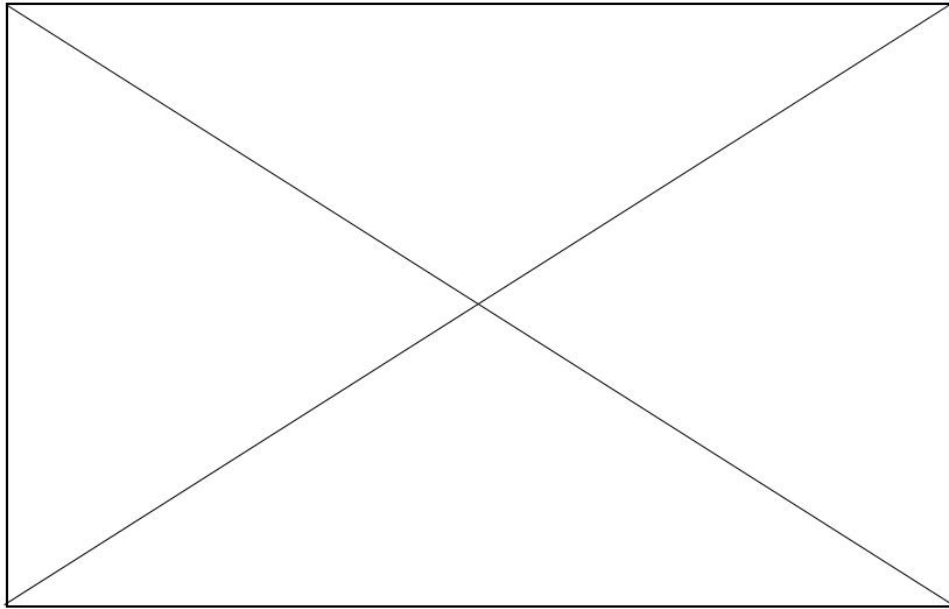


그림 4-30 충전 및 유출 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

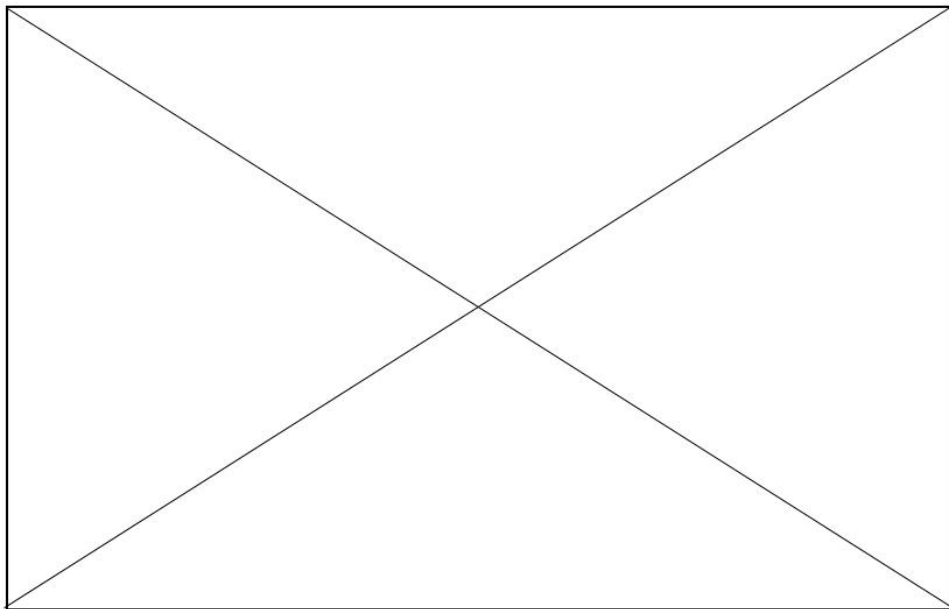


그림 4-31 누적 충전 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

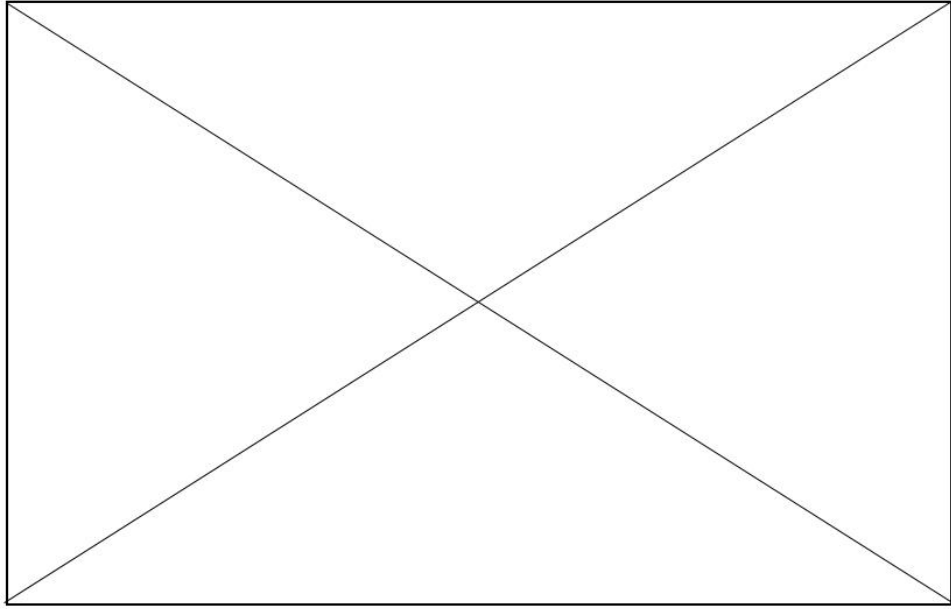


그림 4-32 증기발생기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

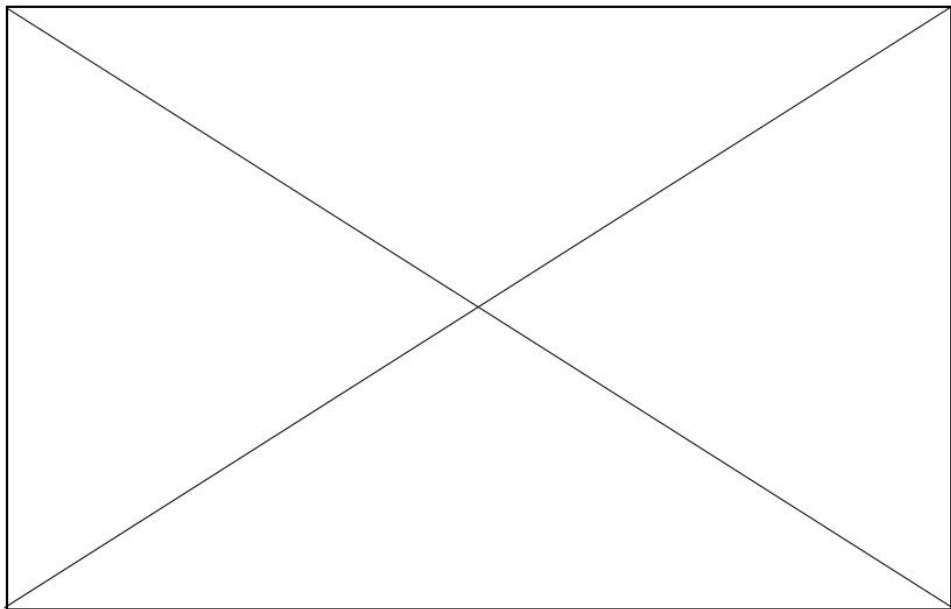


그림 4-33 주증기 대기방출밸브 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

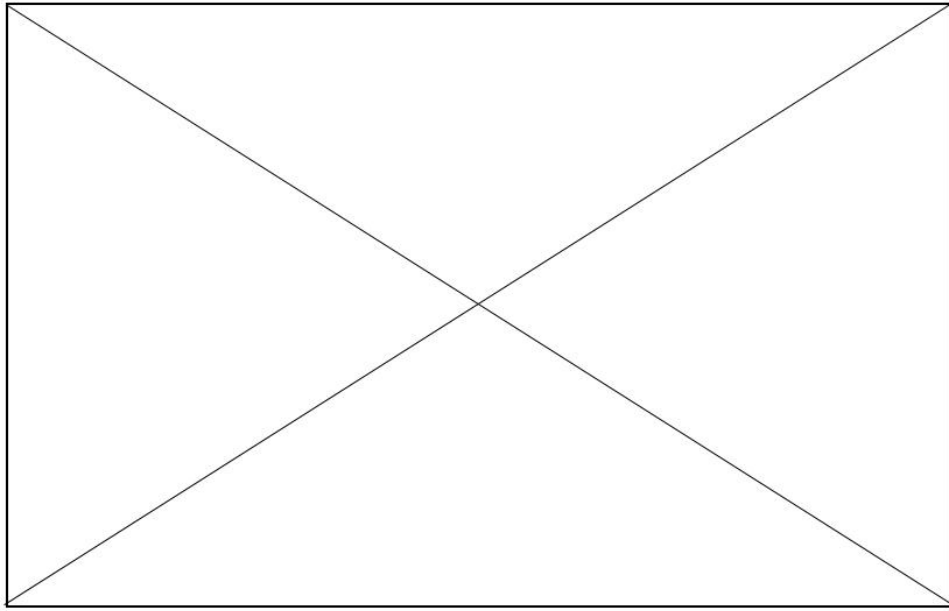


그림 4-34 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

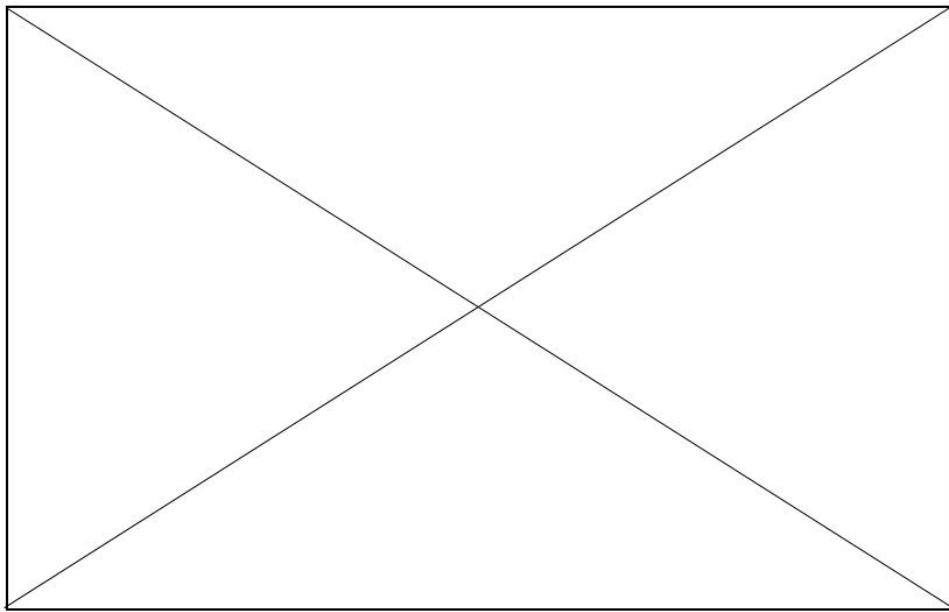


그림 4-35 누적 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

제5장 중대사고 관리능력

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가내용	1
2.1 노심냉각기능 확보 방안	1
2.1.1 원자로용기 내의 연료손상 전	2
2.1.2 원자로용기 내의 연료손상 후	4
2.1.3 원자로용기 손상 이후	6
2.1.4 노심냉각기능 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램	7
2.1.5 노심냉각기능 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가	7
2.2 격납건물 건전성 확보 방안	8
2.2.1 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지	8
2.2.2 수소폭발 방지	9
2.2.3 격납건물 과압 방지	11
2.2.4 재임계 방지	12
2.2.5 격납건물 바닥 용융관통 방지	12
2.2.6 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램	13
2.2.7 격납건물 건전성 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가	13
2.3 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안	14
2.3.1 방사선 차폐기능	15
2.3.2 사용후연료 냉각기능	19
2.3.3 연료 손상	20
2.3.4 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램	20
2.3.5 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가	21
2.4 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비	21
2.4.1 중대사고 관리방안별 이행 설비	21
2.4.2 전략이행 보조설비	24
2.4.3 전략이행설비 설계사양	25
2.5 극한자연재해를 고려한 중대사고 관리능력	25
2.5.1 발전소 대응능력 평가	25
2.5.2 중대사고 관리방안 이행의 저해요소	27
2.5.3 대응능력 한계사항 대처방안	31
2.6 한울3,4호기 차이점	33
제3절 안전 개선사항	33
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	33
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인	35
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	35
제4절 결론	36

제5절 참고문헌	39
제6절 표, 그림	41

표, 그림

표 5-1	비상운전절차서 구성	41
표 5-2	중대사고관리지침서의 증기발생기 냉각수 주입 수단	42
표 5-3	중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 감압 수단	43
표 5-4	중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 냉각수 주입 수단	44
표 5-5	중대사고관리지침서의 격납건물 냉각수 주입 수단	45
표 5-6	격납건물 격리상태 점검표	46
표 5-7	피동축매형수소재결합기 위치 및 용량	47
표 5-8	사용후연료저장조 운전 상태	48
표 5-9	사용후연료저장조 냉각수 주입 수단	49
표 5-10	중대사고 관리전략 이행 설비	50
표 5-11	중대사고 관리전략 이행 보조 설비	53
표 5-12	중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성	66
표 5-13	모든 전원 및 열제거원 상실 시 중대사고 진행과정	73
표 5-14	대응능력 한계상황에서의 중대사고 사건 전개	74
표 5-15	사용후연료저장조 비상충수 운전원 조치시간 평가결과	75
표 5-16	월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목	76
표 5-17	고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목	77
그림 5-1	사용후연료저장조 냉각 계통	78
그림 5-2	사용후연료저장조 수위 및 사건전개 이력	79
그림 5-3	비상냉각수 외부주입에 따른 노심출구온도 변화	80
그림 5-4	비상냉각수 외부주입에 따른 격납건물 압력 변화	80
그림 5-5	비상냉각수 외부주입 누적 냉각수량	81
그림 5-6	이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 노심출구온도 변화	81
그림 5-7	이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 격납건물 압력 변화	82

제1절 개요

중대사고 관리능력 평가의 목적은 극한자연재해 시 중대사고 진입을 예방하기 위한 여러 설비들이 의도된 기능을 발휘하지 못하여 중대사고가 발생했다고 가정하고, 하드웨어, 절차 및 운영 측면을 확인하여 이에 대한 대처 가능 여부를 평가하여 한울3,4호기의 안전성을 증진하기 위함이다.

중대사고 관리능력 평가는 극한 자연재해 및 장기 소내정전사고 조건에서 격납건물 손상방지 관리능력과 사용후연료저장조(Spent Fuel Pool, SFP) 냉각기능 상실 시 차폐기능 및 냉각기능 회복능력을 평가하여 방사성물질이 환경으로 누출되어 일반인에 대한 피해를 막을 수 있는지를 평가한다.

한울3,4호기의 현 상태를 확인하고 추가적으로 요구되는 안전성 확보방안을 수립하기 위해 원자력안전위원회가 제시한 스트레스테스트 수행지침에 따라 다음과 같은 세부 항목으로 구분하여 평가를 수행한다.

- 노심냉각기능 확보 방안
- 격납건물 건전성 확보 방안
- 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안
- 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비
- 극한자연재해를 고려한 중대사고 완화조치 저해요소

한울3,4호기 중대사고 관리능력을 평가하기 위한 사고 시나리오는 한울 부지에서 설계기준을 초과하여 발생 가능한 최대 규모의 외부 자연재해와 발전소 전력 공급의 장기간 상실이 동시 발생하는 상황을 설정한다. 극한자연재해로 인한 사고 시나리오는 재현주기 10,000년 빈도를 초과하는 의 지진이 발생하고 발전소 전력공급이 장기간 상실되는 상황으로 설정한다.

중대사고 대응능력 평가에서는 상기 사항에 따라 전원 상실로 인해 사고완화를 위한 모든 소내 고정형 설비를 구동시킬 수 없는 상태에서 중대사고가 발생한다고 가정한다.

제2절 평가내용

2.1 노심냉각기능 확보 방안

한울3,4호기는 비상운전절차서(Emergency Operating Procedure, EOP)[5-1] 및 중대사고관리지침서(Severe Accident Management Guideline, SAMG)[5-2]에 의거

수 있다.

는 의 적용이 불가능할 경우, 발전소를 안전한 상태로 유지하기 위해 필요한 운전원 조치사항을 기술한 절차서이다. 운전원이 수행하는 증상 중심의 회복전략은 핵연료/피복재, 원자로냉각재계통 압력 경계 및 격납건물의 건전성을 유지하도록 개발되었다. 이들 방어벽의 건전성을 유지하는 안전기능은 다음과 같이 정의된다.

- 반응도 제어
- 필수 전원(AC 및 DC) 확보
- 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS) 재고량 제어
- RCS 압력 제어
- 노심 및 RCS 열제거
- 격납건물 격리
- 격납건물 온도 및 압력 제어
- 격납건물 가연성 가스 제어

위 안전기능 상태를 점검하고 평가하여 이상 시에는 기능 회복을 위해 적합한 절차서를 쉽게 찾을 수 있도록 수목도 형식으로 작성된 도표(회복절차 적용)는 의 불임으로 작성되었다.

한울3,4호기에서 사고 시 노심냉각기능과 관련된 주요 안전계통은 다음과 같다.

- 정지냉각계통 : 원자로냉각재계통의 온도를 저온정지까지 낮추는 동안 사용되며, 냉각재상실사고 시 안전주입 및 재순환 과정에서 비상노심냉각기능도 수행한다.
- 안전주입계통 : 냉각재상실사고 또는 이차계통에 의한 냉각기능 상실시 원자로 노심에 냉각수를 주입하는 것이 목적이다. 이 기능은 핵연료 피복재 온도 상승을 제한하고 노심이 건전하도록 보장한다.
- 보조급수계통 : 주급수계통의 정상운전 불능 시 기기를 보호하고 발전소의 안전을 보증하기 위한 급수계통의 대체사용 시 노심 잔열제거 수단을 제공한다.
- 원자로정지 및 공학적 안전설비 작동계통 : 원자로정지계통 및 공학적 안전설비 작동계통은 기능적인 면에서 여러 가지 설계기준사고에 대해서 2 가지 이상의 다양한 보호기능이 자동적으로 발생하여 부적절한 결과를 초래하지 않도록 되어 있다. 각각의 보호신호는 다중으로 발생하도록 하여 단일고장기준을 만족한다.

이들 안전계통은 안전기능을 수행하도록 다중채널로 구성되어 있으며 채널별로 독립성을 유지하고 물리적으로 격리되어 있다. 안전계통은 비안전계통과 독립성을

유지하고 물리적으로 격리되어 있다. 또한 안전계통과 비안전계통이 전기적으로 연계될 경우에는 비안전계통에서 발생하는 예상최대 과도 전압 및 전류에 의하여 안전계통 회로의 작동성능을 허용수준 이하로 저하시키지 않도록 신호격리기가 설치되어 있다. 안전계통의 단일고장기준은 계통의 다양성, 다중성, 독립성 및 분리를 유지하여 만족한다[5-4].

상기한 바와 같이 연료손상 발생 전 사고관리 대응은 설계기준사고 범위 내에서 규정된 절차 및 수단에 따라 이루어지며, 극한자연재해 사고 시 대응능력은 2.5절에서 다루어진다.

2.1.2 원자로용기 내의 연료손상 후

비상운전절차서에 따른 사고 관리는 연료손상을 방지하는데 목적이 있다. 그러나 [redacted] 하고 있으며 [redacted] 할 경우 이후의 사고 관리 즉, 중대사고 진입 후 사고 관리는 중대사고관리지침서에 따라 발전소의 상태를 감시하고 사고 완화전략을 수행하도록 되어있다.

원자로용기내의 연료손상 이후의 중대사고 관리전략은 노심 냉각 기능을 유지하고 1차 측 과압을 방지하기 위한 전략으로 구성되어 있다. 한울3,4호기는 원자로용기 내의 연료손상 이후의 사고완화를 위해 다음과 같은 전략을 가지고 있다.

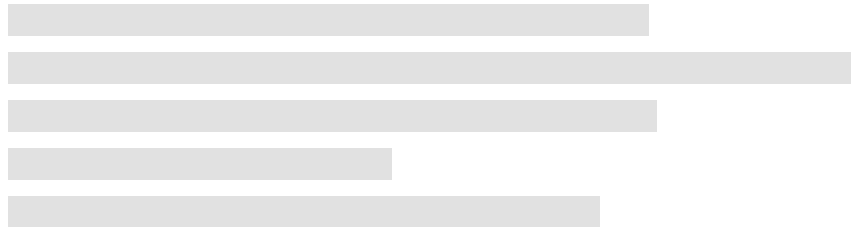
[redacted]
[redacted]
[redacted]

중대사고관리지침서 [redacted] 전략은 중대사고가 진행되는 동안 증기발생기에 급수를 주입함으로써 사고를 완화하는 전략이다. 중대사고시 증기발생기에 급수를 주입하면 다음과 같은 사고완화 기능을 수행할 수 있다.

[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]

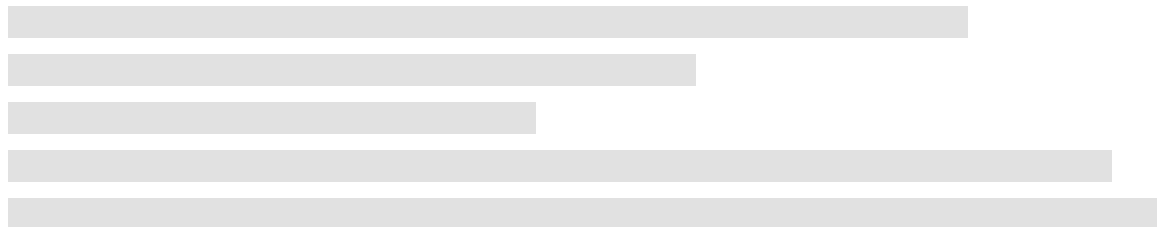
한울3,4호기 중대사고관리지침서에서는 노심 냉각 기능을 유지하고 원자로냉각재 계통 과압을 방지하기 위해 표 5-2와 같이 증기발생기에 냉각수를 주입하는 수단을 제공하고 있다.

중대사고관리지침서 [redacted] 전략은 중대사고가 진행되는 동안 원자로냉각재계통의 압력을 낮춤으로써 사고를 완화할 수 있다. 중대사고 진행 기간 동안 원자로냉각재 계통 압력을 낮게 유지하면 다음과 같은 사고 완화 기능을 수행할 수 있다.



원자로냉각재계통의 감압 전략을 수행하기 위해 중대사고관리지침서는 표 5-3과 같은 다양한 감압 수단을 제공하고 있다.

중대사고관리지침서 [redacted] 전략은 중대사고가 진행되는 동안 원자로냉각재계통 즉 노심에 냉각수를 주입함으로써 사고를 완화할 수 있다. 중대사고 진행 기간 동안 노심에 충분한 유량이 공급되면 다음과 같은 사고 완화 기능을 수행할 수 있다.



또한, 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 이용하여 격납 건물로 냉각수를 충수함으로써 [redacted] 원자로용기 파손 방지 또는 지연에 긍정적인 효과를 얻을 수 있다.

한울3,4호기 중대사고관리지침서에서는 중대사고시 원자로냉각재계통으로 냉각수 주입을 통해 노심 냉각 기능을 유지하기 위해 표 5-4와 같이 냉각수 주입 수단을 제공하고 있다.

한울3,4호기는 상기와 같은 다양한 계통들을 통해 연료손상 이후에 노심 냉각을 유지할 수 있다. 아울러 노심 냉각 기능을 유지함으로써 원자로용기 손상을 방지하여 노외 중대사고 진행을 방지할 수 있다.

상기한 바와 같이 연료손상 발생 이후의 사고관리 대응은 설계기준을 초과하는 사고가 발생되더라도 발전소에 갖추어진 수단 및 절차에 따라 이루어질 수 있으

며, 극한자연재해 사고 시 대응능력은 2.5절에서 다루어진다.

2.1.3 원자로용기 손상 이후

연료 손상 이후 원자로용기 내로 냉각수가 공급되지 않는다면 사고가 계속 진행되어 노심이 손상되고 용융되어 최종적으로 원자로용기 하부로 노심용융물이 재배치된다. 재배치된 노심용융물은 원자로용기를 파손시킬 수 있다.

원자로용기 손상 이후의 노심 냉각은 원자로용기 내의 잔존 노심물질과 파손부를 통해 원자로공동으로 방출된 노심용융물에 대해 요구된다. 원자로용기 내에 잔존하는 노심 물질은 원자로용기 파손 전과 마찬가지로 [redacted] 전략에 따라 원자로냉각재계통으로 냉각수를 주입함으로써 냉각이 가능하다.

원자로용기 손상 이후, 파손부를 통해 방출된 노심용융물은 원자로공동에 재배치된다. 원자로공동 바닥은 노심용융물의 퍼짐과 냉각을 위해 [redacted] 으로 설계되어 있다. 원자로용기 손상 이후 노외 용융물에 의한 중대 사고 현상을 완화하기 위해 한울3,4호기 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 이용하여 냉각수 주입이 가능하며, 격납건물로 냉각수를 충수하면 다음과 같은 긍정적인 사고 완화 효과를 얻을 수 있다.

[redacted]
[redacted]
[redacted]

한울3,4호기 중대사고관리지침서에서는 중대사고 시 격납건물 냉각수 주입을 통해 사고 완화 기능을 수행하기 위해 표 5-5와 같은 냉각수 주입 수단을 제공하고 있다.

격납건물 냉각수 주입 수단을 통해 주입된 냉각수가 재순환집수조나 원자로공동으로 흘러 들어가게 되면 격납건물 수위는 상승하게 된다. 이 때 냉각수가 과도하게 주입되면 격납건물 내부의 안전관련 기기가 침수될 수 있다. 이러한 침수를 방지하기 위하여 중대사고관리지침서 [redacted] 는 유입되는 냉각수량에 따른 격납건물 수위 정보를 제공하고 있다. 격납건물 냉각수 주입 전략 수행 시 해당 계산표에 근거하여 주입원에 따른 침수위를 고려하여 안전관련 기기가 침수되지 않도록 전략을 수행한다.

또한, [redacted] 전략에 따라 사용 가능한 설비를 이용하여 [redacted] 함으로써 노외 용융물 냉

각 기능을 확보할 수도 있다.

한편, 원자로용기 손상 시점에 원자로냉각재계통의 압력이 높을 경우, 고압용융물 분출(High Pressure Melt Ejection, HPME) 및 격납건물 직접가열(Direct Containment Heating, DCH) 현상으로 격납건물 건전성이 위협 받을 수 있다. 한울3,4호기는 중대사고관리지침서 [] 전략을 통하여 원자로용기가 손상되는 시점에서의 원자로냉각재계통 압력을 격납건물직접가열 문턱압력인 [] 이하로 낮춤으로써 고압용융물분출 및 격납건물 직접가열을 방지할 수 있다.

2.1.4 노심냉각기능 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램

중대사고시 사고관리 전략 수행의 최종 의사결정은 비상기술지원실(Technical Support Center, TSC) 발족 후 비상기술지원실장에 의해 이루어진다. 비상기술지원실장은 중대사고 대처에 대한 모든 책임과 권한을 가지며 비상운전반, 기술지원반, 방사선대책반의 의견을 참고하여 중대사고 관리 전반의 중요사항을 최종 결정하게 된다. 다수호기 동시사고 시에는 방사선비상계획에 따라 발전소별 비상기술지원실이 구성되며, 하부 비상 조직으로 호기별 비상운전반이 구성되어 비상기술지원실의 지시에 따라 사고관리전략을 수행하게 된다.

노심냉각기능 확보를 위한 사고관리 전략 수행은 중대사고관리지침서 []에 따라 이루어진다. 해당 전략의 수행에는 고정형 설비와 이동형 설비를 포함하고 있다. 전략 수행을 위한 운전원과 방사능 방재요원의 중대사고관리 교육훈련은 []에 따라 정기적으로 이루어진다.

2.1.5 노심냉각기능 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가

본 절에서는 극한자연재해 및 장기 소내정전사고 조건에서 노심냉각기능 확보방안에 따른 중대사고 대응능력을 평가하였다. 해당 시나리오 상황에서 사고관리 전략 이행 설비는 표 5-12와 같이 극한자연재해 사고환경에서 가용한 것으로 평가된 []

[]
[] 설비로 한정하였다.

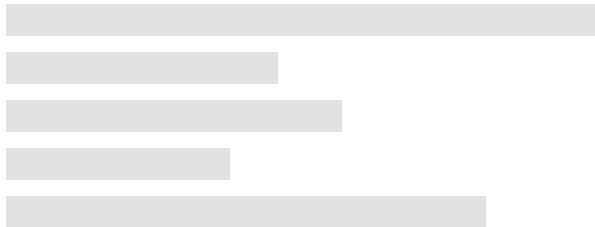
핵심대응전략을 기준으로 선정한 가용설비 사용 시나리오는 다음과 같다.

[]
[]

상기 시나리오를 바탕으로 [redacted]를 이용한 노심냉각기능 확보 방안에 따른 중대사고 대응능력을 평가하였다. 분석 결과 비상냉각수 외부주입 설비를 이용하여 원자로냉각재계통 1차측으로 냉각수를 주입하거나, 이동형발전차를 이용하여 [redacted]을 통해 냉각수를 주입할 경우 주입된 냉각수에 의해 노심의 열이 제거됨으로써 그림 5-3 및 그림 5-6과 같이 노심출구온도가 감소하여 [redacted] 이하로 유지됨을 확인하였다.

2.2 격납건물 건전성 확보 방안

격납건물은 중대사고를 포함한 모든 사고 기간 동안 방사성물질이 환경으로 누출되는 것을 제한함으로써 대중 및 환경을 보호하기 위한 최종 물리적 방호벽이다. 본 절에서는 중대사고시 다음과 같은 격납건물 건전성 위협요소를 검토함으로써 한울3,4호기 격납건물의 건전성을 확보하는 방안을 평가하였다.



2.2.1 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지

격납건물격리계통은 격납건물 외부로 방사성물질의 방출을 야기할 수 있는 사고시 그 양을 최소화하도록 격납건물 격리밸브를 자동으로 차단함으로써 격납건물 대기를 외부환경으로부터 격리시키는 기능을 수행한다. 격납건물 격리는 전원상실시 고장 닫힘(Fail Closed) 기능을 갖춘 자동잠김 밸브 혹은 체크밸브(Check Valve) 등을 통해 이중 격리 기능을 갖추고 있으며, 격납건물격리계통은 격리기능이 보장되도록 설정된 시험주기에 따라 정기적으로 기능 및 누설시험이 수행된다[5-7].

한편, 한울3,4호기 중대사고관리지침서 [redacted]에 따르면 비록 격납건물 자동격리가 실패하더라도 주제어실(Main Control Room, MCR)에서 각 격납건물 격리밸브들의 상태(표 5-6 참조)를 확인하고 격납건물을 수동으로 격리시킬 수 있다[5-2]. 또한, 전동기 구동형 격리밸브의 경우 SBO를 포함한 모든 교류전원 상실시 개방된 상태로 유지되므로 이동형발전차를 통해 [redacted]에 전원을 공급하여 주제어실에서 원격으로 격리시킬 수 있다. 따라서 한울3,4호기는 중대사고시에 설령 격납건물 자동격리가 실패하더라도 고유 안전특성에 의하여 격납건물의 격리기능을 확보할 수 있다.

격납건물 우회는 핵분열생성물이 격납건물을 우회하여 직접 격납건물 외부로 방출되는 경우를 지칭한다. 증기발생기세관파단(Stream Generator Tube Rupture, SGTR) 사고와 저압경계부냉각재상실사고(Interfacing System LOCA, ISLOCA)가 대표적인 경우이다. 증기발생기세관파단사고 시에는 격납건물이 파손되지 않더라도 핵분열생성물이 파손된 증기발생기 세관을 통하여 격납건물 외부로 방출될 수 있고, 저압경계부냉각재상실사고 시에는 원자로냉각재계통과 연결된 고압 및 저압 안전주입계통간 연계 부분 또는 고압안전주입계통의 격납건물 외부 배관이 파단되어 냉각재가 격납건물 외부로 방출될 수 있다. 한울3,4호기 확률론적안전성평가 보고서[5-5]에 따르면, 격납건물 우회사고의 발생빈도는 [redacted] 이고, 이 중 대부분의 경우 우회는 증기발생기세관파단에 의해 발생하는 것으로 발생빈도는 [redacted] 으로 평가되었다.

한울3,4호기는 중대사고 동안 증기발생기세관파단이 발생하여 일부 핵분열생성물이 증기발생기로 이동하더라도 중대사고관리지침서 [redacted] 전략에 따라 [redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted] 할 수 있다. 따라서 한울3,4호기에서는 중대사고시 격납건물 우회사고가 발생하더라도 핵분열생성물 방출을 최소화할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다.

2.2.2 수소폭발 방지

한울3,4호기는 중대사고 시 수소연소가 발생하더라도 격납건물 건전성이 유지되도록 가연성기체제어계통을 설치하였다. 동 계통은 전원공급이 필요 없는 피동축매형수소재결합기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)로 구성되어 있으며, 가연한계 미만의 낮은 농도에서 수소를 자동적으로 제거함으로써 중대사고시 수소폭발에 의한 격납건물 손상을 예방한다.

한울 3,4호기 가연성기체제어계통은 규제기준에 따른 연소안전성 평가와 연계하여 격납건물내 격실 구조 분석 및 실사 결과를 반영하여 설계되어 있다. 가연성기체제어계통은 [redacted] 의 중대사고 전용 피동축매형수소재결합기와 [redacted] 의 설계기준사고 및 중대사고 겸용 피동축매형수소재결합기로 구성되며, 설치위치 및 사양은 표 5-7에 요약되어 있다.

한울3,4호기 피동축매형수소재결합기의 위치는 규제기준에 따른 연소안전성 평가와 연계하여 격납건물 내 격실 구조 분석 및 실사 결과를 반영하여 사고 시 비산

물 및 배관 타격에 의한 충격 배제 등 안전기기 일반 설계 기준, 10CFR50.34(f) 균일수소농도 요건, 각 격실별 국부적 자유체적, 대류유동과 지역 경계 및 유지보수 용이성을 고려하여 선정하여 원자로 건물의 수소제어 능력을 확인하였다[5-10].

한울3,4호기 피동축매형수소재결합기의 성능은 가연성기체제어계통에 대하여 확률론적 및 결정론적 관점에서 선정된 주요 사고경위를 대상으로

노외 노심용융물-콘크리트 반응(Molten Core-Concrete Interaction, MCCI)에 의한 수소 발생, 원자로건물 내부 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)에 의한 작동지연 현상 등을 고려하여 수행하였으며, 수행 결과를 바탕으로

수소연소 안전성을 평가하였다. 분석결과, 한울3,4호기 가연성기체제어계통은 고려된 모든 사고경위들에서 광범위한 화염가속 또는 연소폭발천이가 발생하지 않도록 수소를 제어함으로써 관련 규제요건[5-8]을 만족하며, 격납건물의 건전성을 유지하는데 충분한 수소제어능력을 확보한 것으로 확인되었다[5-10].

또한, 한울3,4호기 중대사고관리지침서에서는 피동설비인 피동축매형수소재결합기에 의한 수소제어 방법뿐만 아니라, 비상조치에 의한 능동적인 완화전략을 제공한다. 한울3,4호기 중대사고관리지침서에서는 수소폭발을 방지하기 위한 수소점화기 작동, 인위적인 수소연소, 수소재결합기 작동, 수소 연소 예방 전략 및 각각의 전략이행을 위한 수단을 기술함으로써 수소폭발을 방지하기 위한 대응방안을 제공하고 있다[5-2].

중대사고시 격납건물 이외 지역에서 수소 축적 가능성이 있는 구역은 보조건물과 사용후연료저장조 지역이다. 보조건물의 경우 격납건물 누설이 발생한다면 수소 축적 가능성이 있으나, 사고 시 격납건물격리계통에 의해 격납건물이 완전히 격리되기 때문에 보조건물로 수소가 방출되지 않는다. 또한 PAR에 의해 격납건물 내부의 수소가 자동으로 제거되기 때문에 누설에 의한 보조건물에서의 수소 축적 가능성은 낮다. 사용후연료저장조의 경우, 저장조의 연료가 손상된다면 수소 발생 및 축적 가능성이 있다. 본 보고서의 2.3.3절에 기술되어 있는 바와 같이 냉각기능 상실 시 연료손상에 이르기까지 수 일이 소요된다. 따라서 연료손상 발생 이전에 사용후연료저장조에 비상보충수를 공급하는 조치를 수행함으로써 사용후연료의 손상을 방지할 수 있다. 결과적으로 사용후연료저장조에서의 수소 발생 및 축적 가능성은 극히 낮다.

상기한 바와 같이, 한울3,4호기는 국부적으로 수소 축적으로 인한 폭발에 대처 가능한 피동수소제어설비를 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서를 통해 추가적인 완화전략 및 수단을 제공하고 있으므로 수소폭발 방지를 위한 대응능력을 확보하고

있는 것으로 평가되었다.

2.2.3 격납건물 과압 방지

노심손상을 유발하는 중대사고시에는 붕괴열뿐만 아니라 금속산화반응에 의한 발열 등 다양한 열원에 의해 생성되는 증기로 인하여 격납건물 내 압력이 상승함으로써 격납건물 건전성을 위협할 수 있다. 이러한 가능성에 대비하여 한울3,4호기에는 격납건물 살수계통과 격납건물 팬냉각기가 설치되어 있다.

첫째, 한울3,4호기 격납건물 살수계통은 냉각재상실사고에 따른 격납건물 가압 시 격납건물 내의 온도와 압력을 감소시키고, 핵분열생성물을 제거하는 기능을 수행한다. 동 계통은 격납건물 압력이 []를 초과하면 자동으로 작동하며 주제어실에서 수동으로 작동이 가능하다. 본 계통은 두 계열로 되어 있으며, 비상전원 모선으로부터 전원을 공급받는다. 격납건물살수계통은 2대의 격납건물 살수펌프, 2대의 격납건물 살수 열교환기, 2개의 독립된 주살수 및 보조살수 모관, 배관, 계측장비로 구성되어 있다. 격납건물 살수펌프는 재장전수탱크 또는 격납건물물 재순환집수조에서 취수하여 살수모관 및 각 살수 노즐을 통하여 격납건물 상부대기로 붕산수를 살수함으로써 격납건물의 과압을 방지한다[5-2, 5-5, 5-7]. 격납건물 살수계통은 안전등급 및 내진 I 등급으로서 극한자연재해시에도 그 기능을 유지하며, 소내정전사고시 비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기의 기동이 실패해도 이동형발전차를 통하여 비상전원 모선으로 전원을 공급받을 수 있다.

둘째, 한울3,4호기 격납건물 팬냉각기는 격납건물 내 습도, 온도 및 압력이 높아질 경우 냉각코일을 통해 격납건물 대기에 있는 수증기를 응축시킴으로써 격납건물을 냉각하는 기능을 수행한다. 본 계통은 [] 격납건물 팬 냉각기 4대로 구성되며, 2개를 1조로 배열하여 각 조에서 1대씩 운전되며, 냉각코일의 냉방수는 []으로부터 공급된다[5-2, 5-7]. 격납건물 팬냉각기는 발전소 정상운전시에는 2개의 고속 팬이 격납건물 내 대기를 냉각 및 순환시켜 [] 유지 하도록 설계되어 있다. 정상전원이 차단되고 원자로가 고온 대기상태를 유지하고 있는 상황에서도 비상전원으로부터 동력을 공급받아 운전할 수 있는 장치를 갖추고 있다[5-5]. 격납건물 팬냉각기는 비안전성 계통으로서 극한자연재해시에는 그 작동성은 보장되지 않을 수 있다. 다만 설비의 이용이 가능하다면 비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기 기동이 실패하는 소내정전 사고 시에도 이동형발전차를 통하여 [] 전원을 공급받을 수 있다.

또한 한울3,4호기 중대사고관리지침서 []에서는 격납건물의 건전성을 유지하기 위한 종합적인 격납건물 과압방지 전략을 제공한다. 동지침서에서는 앞에서 제시한 격납건물살수계통 및 격납건물 팬냉각기 등을 이용한 격납건물 감압 수단의 결정, 전략수행에 따른 제한사항, 전략 성공여부의 확인

등 격납건물 과압을 방지하기 위한 일련의 의사결정 및 완화조치 수행 방법을 기술하고 있다[5-2].

상기한 바와 같이, 한울3,4호기는 중대사고시 격납건물 과압방지를 위한 설비를 갖추고 있으며, 또한 중대사고관리지침서를 통해 체계적인 완화전략 및 수단을 제공하고 있으므로 격납건물 과압방지를 위한 대응능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

2.2.4 재임계 방지

가압경수형 원자로의 중대사고 진행과정에서 노심의 재임계는 핵연료가 구조적으로 건전하고 제어봉이 부분적으로 혹은 완전히 파손된 상황에서 노심 재충수(Re-flooding)를 시도할 경우에만 발생 가능하다고 알려져 있다[5-11].

상기 상황에서는 제어봉의 음의 반응도(Reactivity Worth)가 노심의 반응도를 제어하는데 사용되지 못하므로, 노심 설계에 따른 초기 임계붕산 농도 이상의 붕산수를 주입하여야 재임계 가능성을 완전히 배제할 수 있다. 한울3,4호기의 경우 상기 상황에서 안전주입탱크 및 재장전수탱크의 고농도 붕산수가 사고 완화를 위해 주입된다. 한울3,4호기의 초기 최대 임계붕산 농도는 [redacted]이며, 1차 측으로 주입되는 [redacted] 초기 최대 임계붕산 농도 이상이므로 재임계 가능성은 없다.

상기한 바와 같이 한울3,4호기는 핵연료는 건전하나 제어봉이 부분적으로 혹은 완전히 파손된 상황에서 노심 재충수(Re-flooding)를 시도할 경우에도 일정 농도 이상의 붕산수가 주입되므로 재임계 가능성은 없다. 또한 노심이 손상되어 용융물이 하부로 재배치되거나 원자로용기 외부로 방출되는 사고 진행과정에서는 비붕산수가 주입되는 보수적인 상황에서도 재임계 가능성은 없는 것으로 평가되었다[5-12]. 또한, 중대사고관리지침서 [redacted]에서 장기 관심사항으로 냉각수 주입으로 인한 붕산 희석을 감시하고 필요시 붕산수 주입 전략을 수행하도록 붕산을 보유하고 있다.

2.2.5 격납건물 바닥 용융관통 방지

원자로용기가 손상된 이후, 원자로공동으로 분출된 노심용융물은 풀(pool)을 형성할 수 있다. 이러한 노심용융물 풀의 냉각가능성은 형성되는 용융물(풀)의 형상(깊이)과 원자로공동 침수가능성에 의해 좌우된다. 풀의 깊이는 원자로공동 내 용융물의 냉각가능성을 판단하는데 중요한 변수이다. 용융물이 넓은 면적에 퍼져 냉각이 용이한 형태일 경우, 원자로공동을 침수시켜 용융물을 냉각함으로써 노심용융물-콘크리트 반응(MCCI)에 의한 원자로공동 바닥 침식을 완화할 수 있다.

원자로용기 파손 후 원자로공동으로 노심용융물이 방출될 경우 노심용융물이 퍼질 수 있는 원자로공동 바닥면적은 [redacted]이다. 해당 면적은 EPRI URD(Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document)[5-13]에 기술된 노외 용융물의 냉각을 보장하기 위한 열출력당 공동바닥면적 요건인 0.02 m²/MWt을 만족하고 있다. 또한, 한울3,4호기 원자로공동은 격납건물 살수 혹은 RCS 파단 등에 의해 격납건물로 냉각수가 유입되면 중력에 의해 원자로공동으로 자연적으로 충수되는 구조로 되어 있다.

한울3,4호기 중대사고관리지침서 [redacted]에서는 노외로 방출된 용융물의 냉각을 위한 사고완화 전략을 규정하고 있으며, 이 때 가용한 냉각수 주입 수단은 표 5-5에 제시되어 있다[5-2]. 또한, 격납건물 냉각 기능에 의해 격납건물이 과압되지 않은 경우에 재장전수탱크(Refueling Water Tank, RWT) 중력배수를 통하여 격납건물 격실의 노외 노심용융물을 냉각시키기 위한 냉각수를 주입할 수 있다. 그 밖에 대처방안의 하나로 외부주입유로를 이용하여 원자로용기 손상부를 통해 원자로공동으로 충수가 가능하다.

외부로부터 격납건물로 냉각수를 주입하는 경우 냉각수가 격납건물 내에 존재하는 일차냉각재, 비상노심냉각수, 살수 등과 혼합되어 전체 계통수의 pH가 낮아질 가능성이 있다. 이에 대비하여 한울3,4호기에는 [redacted] 주변에 인산삼나트륨(Tri-Sodium Phosphate, TSP) 분말이 설치되어 있다. 사고 시 격납건물 내로 방출된 계통수는 집수조의 수위가 상승하면 설치된 TSP 분말이 용해되어 [redacted] 수용성 유기 요오드의 휘발을 억제할 수 있다[5-14].

한울3,4호기 원자로공동은 노외로 방출된 노심용융물 냉각을 보장하기 위한 원자로공동 바닥면적이 확보되어 있고, 격납건물내 냉각수에 의해 침수되는 구조이며, 노외 용융물의 냉각을 위한 사고완화 전략 및 수단을 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 MCCI에 의한 격납건물 바닥 용융관통을 완화하기 위한 능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

2.2.6 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램

중대사고 시 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 전략의 수행은 중대사고관리지침서에 따라 이루어진다. 해당 전략의 수행에는 고정형 설비와 후쿠시마 후속조치로 설치된 설비를 포함하고 있다. 전략 수행을 위한 운전원과 방사능 방재요원의 중대사고관리 교육훈련은 [redacted]에 따라 정기적으로 이루어진다.

2.2.7 격납건물 건전성 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가

본 절에서는 극한자연재해 및 장기 소내정전사고 조건에서 격납건물 건전성 확보 방안에 따른 중대사고 대응능력을 평가하였다. 해당 시나리오 상황에서 사고관리 전략 이행 설비는 표 5-12와 같이 극한자연재해 사고환경에서 가용한 것으로 평가된

로 한정하였다.

핵심대응전략을 기준으로 선정한 가용설비 사용 시나리오는 다음과 같다.

비상냉각수 외부주입 설비를 이용하여 원자로냉각재계통 1·2차 측 냉각수 주입을 수행한 경우, 비상냉각수 외부주입이 수행되는 동안에 격납건물 압력은 지속적으로 상승하지만, 증기발생기를 통한 열 제거가 적절히 수행되어 그림 5-4에서와 같이 72시간 이내에는 격납건물 압력이 를 초과하지 않음을 확인할 수 있다.

이동형발전차를 이용한 을 통해 원자로냉각재계통 1차측에 냉각수를 주입하는 경우, 를 이용한 주입운전이 진행되는 동안에는 격납건물 압력이 지속적으로 상승하나, 이 후 운전을 통해 적절한 붕괴열 제거가 수행되어 그림 5-7에서와 같이 격납건물 압력이 상승한 후 점진적으로 감소하여 설계압력인 이하로 유지됨을 확인할 수 있다.

2.3 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안

사용후연료저장조는 핵연료취급계통의 일부이며 사용후연료건물에 위치한다. 사용후연료저장조는 스테인리스강 라이너 플레이트가 부착된 콘크리트 구조물이고 항상 물로 채워져 있으며 내부에는 스테인리스강 재질의 사용후연료 저장대가 설치되어 있다.

사용후연료 저장대는 핵연료 재료성분 및 저장조의 붕산수 환경에 맞도록 제작되었으며, 다발의 사용후연료집합체를 저장할 수 있고, 으로 분류된다[5-7].

원자로에서 인출된 사용후연료는 사용후연료저장조로 이송되어 수면 아래에 저장

된다. 사용후연료저장조의 물은 사용후연료에서 방출되는 방사선을 차폐하고 사용후연료에서 발생하는 붕괴열을 제거한다.

사용후연료저장조 냉각계통은 [REDACTED] 으로 설계되었으며, 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료의 붕괴열을 제거하는 기능을 수행한다. 사용후연료저장조 냉각계통 배관은 사용후연료저장조 냉각 및 차폐를 위한 최소수위를 유지하기 위해 저장조 벽을 관통하는 모든 배관을 사용후연료 저장대에 저장된 사용후연료집합체 상부로부터 [REDACTED] 이상 위에 위치시켰다. 사용후연료저장조 냉각계통 기기는 [REDACTED] 펌프 2대, [REDACTED] 열교환기 2대 등으로 구성되어 있으며 계통의 개략도는 그림 5-1에 제시되어 있다[5-7]. 사용후연료저장조 운전상태는 표 5-8에 제시되어 있다[5-15].

[REDACTED] 방사능 위험에 대한 경고 수단을 현장제어반과 주제어실에 제공한다. 사용후연료저장조의 수위 및 온도 정보는 현장제어반 및 주제어실에 제공되어 감시 및 경보 확인이 가능하다[5-7]. 또한, 후쿠시마 원전사고 후속조치의 일환으로 사용후연료저장조 내 온도계의 등급을 비안전등급에서 안전등급으로 상향시켜 신뢰성을 향상시켰다[5-16].

사용후연료저장조 지역에는 사용후연료건물 배기계통이 설치되어 있어 정상시 정상배기계통의 공기정화기를 통해 지속적으로 배기가 이루어지며, 사용후연료저장조 차폐 수위 상실에 따른 사용후연료건물 비상환기 작동신호 발생시 비상 배기 공기정화기를 통해 비상 배기가 이루어진다. 다중의 각 비상 배기계통은 단일고장 기준을 만족시키기 위해 분리된 2개의 필수 전원 중의 하나로부터 전력을 공급받으며, 이는 모든 형태의 발전소 운전 시에 이 계통의 지속적인 운전을 보증한다. 정상운전 시 배기는 전량 고효율입자여과기를 통과하여 걸러진다. 사용후연료건물 비상 환기 작동신호 발생 시 비상배기계통이 운전되어 정상급기 공기조화기 흡입측, 정상 배기 공기정화기 배기측 및 배관터널 배기덕트 내에 위치한 안전성 관련 격리댐퍼를 자동으로 차단시키고 건물을 부압으로 유지시킨다. 사용후연료건물 정상 배기공기정화기 및 비상 배기공기정화기의 용량은 [REDACTED]

교류전원 완전상실, 1차 측 기기냉각수 상실(또는 최종열제거원 상실), 사용후연료저장조 냉각계통 배관 파단 등의 설계기준 초과사고에 따른 저장조 냉각기능 상실에 대비한 저장조 방사선 차폐 및 냉각기능에 대한 평가결과는 다음음의 세부절에 제시되어 있으며, 평가결과는 저장조 냉각기능 상실을 초래하는 초기사건에 대한 대응전략 및 조치와 별개로 냉각기능 상실에 따른 저장조 수위감소 시간 및 영향만을 평가하였다.

2.3.1 방사선 차폐기능

방사선 차폐기능은 사용후연료저장조 내의 선량률을 차폐설계기준 이내로 유지함으로써 확보된다. [redacted] 절차서에 따라 저장조 수위를 일정하게 유지함으로써 과도사건을 포함한 정상운전 상태에서의 방사선 차폐기능이 유지된다. [redacted]

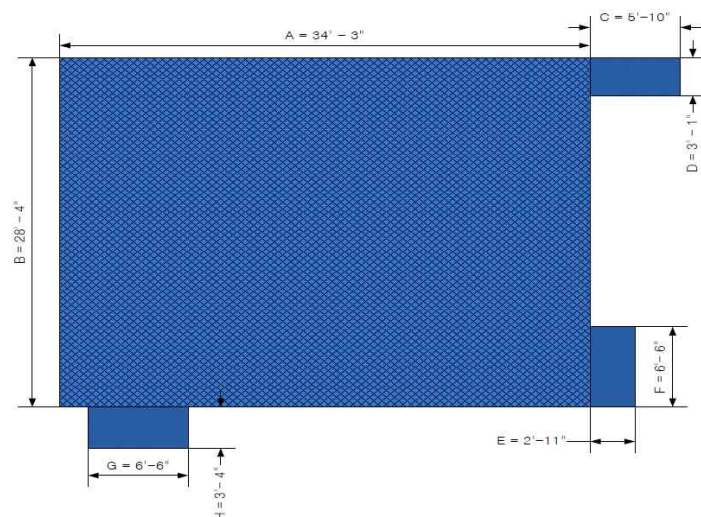
[redacted]에 의하면, 사용후연료저장조 냉각기능의 완전 상실 등으로 인하여 사용후연료저장조 수위가 감소할 경우에는 [redacted]

[redacted] 비상보충수를 공급한다. 표 5-9는 사용후연료저장조의 냉각수 주입 수단을 보여준다.

만일 사용후연료저장조의 냉각기능이 모두 상실되면 사용후연료저장조 내의 연료가 손상되기 전까지 다음과 같은 순서로 사건이 진행된다(그림 5-2 참조)[5-15].

[redacted]

참고문헌 5-15, 한울 3,4호기 사용후연료저장조 비상충수 대처방안 평가보고서에 따르면, 교류전원 완전상실로 인한 사용후연료저장조 냉각기능 상실 시 비등온도 도달시간은 사용후연료저장조에 저장된 연료의 상태에 따라 [redacted]이다. 또한, [redacted] 저장조 저수위 경보 발생 수위 [redacted] 도달시간은 다음과 같이 계산된다.





상기와 같이 저장조 저수위 경보 발생 도달시간은 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 [] 시간으로 예상되며, 비정상운전절차서 []에 따라 사용후연료저장조 비상충수를 수행한다. 비정상운전절차서에 따른 사용후연료저장조의 충수는 다음과 같은 3 가지 방법에 의하여 이루어진다.

○ 디젤구동 소방펌프를 이용한 충수



○ 이동형 디젤구동 펌프를 이용한 충수



○ 원수저장조 수두를 이용한 충수

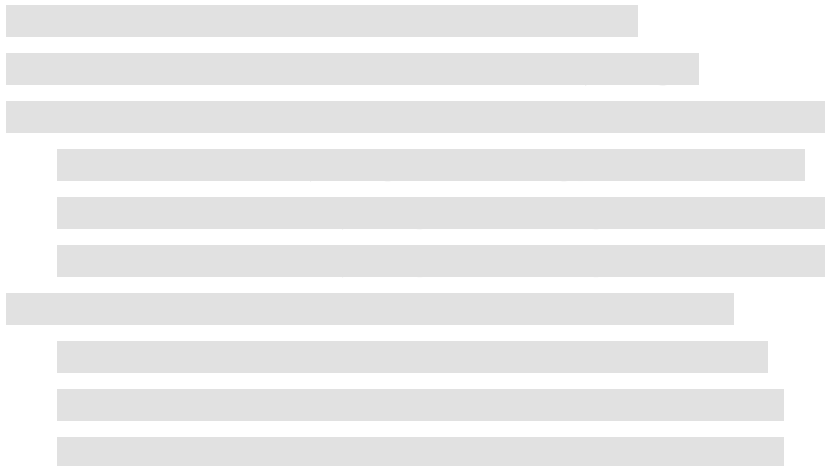


사용후연료저장조 냉각기능 상실로 수위가 지속적으로 감소하여 사용후연료저장조 수위가 []에 도달하면 중대사고관리지침서 []에 따라 조치를 수행하게 된다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 [] 도달시간은 [] 아래와 같이 계산된다.



상기와 같이 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 [] 도달 시간은 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료 상태에 따라 [] 시간으로 예상된다. 이 시간은 중대사고관리지침서 []에 따라 조치를 수행하여 저장조 수위를 회복하는데 충분하다.

중대사고 예방조치 진입 후에 수위가 지속적으로 감소하여 수위가 저장대 상부 [] 미만으로 감소하면 방사선 차폐에 요구되는 최소수위를 상실하게 된다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 [] 도달 시간은 [] 아래와 같이 계산된다.



상기와 같이 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 [] 도달 시간은 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료 상태에 따라 [] 시간으로 예상된다. 이 시간은 중대사고관리지침서 []에 따라 조치를 수행하여 방사선 차폐기능이 상실되기 전에 저장조 수위를 회복하는데 충분하다.

만일 저장조 수위가 지속적으로 감소하여 방사선 차폐기능이 상실된다 하더라도 다음과 같은 조치를 통해 사용후연료저장조 수위를 다시 확보할 수 있다.

- 우선적으로 사용후연료저장조에 보충수를 비상 충수하기 위한 가용한 수단을 파악한다. 그리고 냉각수 보충에 의한 영향을 평가한 후 냉각수 보충을 실시하여 사용후연료저장조 수위를 회복한다. 냉각수는 재장전수탱크, 탈염수저장탱크, 복수저장탱크로부터 사용후연료저장조 정화펌프, 봉산보충펌프, 탈염수이송펌프, 기기냉각수 보충펌프를 이용하여 보충하며, 이들 기기가 가용하지 않은 경우에는 화재방호계통을 이용하여 충수하고 이들이 모두 이용 불가할 경우에는 이동형 디젤구동 펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 냉각수를 보충한다.

2.3.2 사용후연료 냉각기능

사용후연료저장조내 사용후연료 상부 노출이 발생하기 이전에는 중대사고 관리조치가 필요한 시점을 기준으로 아래의 두 가지 조치가 가능하다.

- 중대사고 관리조치 이전

에 따라 재장전수탱크, 탈염수저장탱크, 복수저장탱크, 청수저장탱크, 원수저장조로부터 사용후연료저장조 정화펌프, 봉산보충펌프, 탈염수이송펌프, 기기냉각수 보충펌프, 디젤구동 소방펌프 및 이동형 디젤구동 펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 비상보충수를 공급한다.

- 중대사고 관리조치 이후

사용후연료저장조 수위가 이하 또는 사용후연료건물 방사선 준위가 이상일 때 중대사고 관리전략에 따라 우선적으로 사용후연료저장조에 보충수를 비상 충수하기 위한 가용한 수단을 파악한다. 그리고 냉각수 보충에 의한 영향을 평가한 후 냉각수 보충을 실시하여 사용후연료저장조 수위를 회복한다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 중대사고 관리조치가 필요하기까지의 소요시간은 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료 상태에 따라 에 따라서 조치를 수행하여 사용후연료저장조 내의 연료 상부 노출이 발생하기 이전에 사용후연료저장조 수위 회복을 위해 조치할 수 있는 시간이 충분하다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장대 상단까지 수위가 감소하는 시간은 참고문헌 5-15에 기술된 바와 같이 사용후연료저장조에 저장된 연료 상태에 따라 이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 소요시간은 중

대사고 관리조치에 따라 사용후연료저장조 정화펌프, 봉산보충펌프, 탈염수이송펌프, 기기냉각수 보충펌프, 디젤구동 소방펌프 및 이동형 디젤구동 펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 비상보충수를 공급하는 조치를 수행하여 사용후연료저장조내 사용후연료 상부 노출이 발생하기 이전에 사용후연료저장조 수위를 회복하는데 충분하다.

2.3.3 연료 손상

사용후연료 손상은 사용후연료가 대기에 노출된 이후 발생할 수 있으며, 사용후연료 노출은 냉각기능 상실로부터 [] 이상이 소요된다[5-15]. 이러한 소요시간은 탈염수저장탱크 및 탈염수이송펌프, 재장전수탱크 및 봉산보충펌프, 청수저장탱크 및 디젤구동 소방펌프, 이동형 디젤구동 펌프 등을 이용하여 사용후연료저장조에 보충수를 공급함으로써 사용후연료가 대기에 노출되기 전에 사용후연료저장조 수위를 회복하는데 충분하다. 사용후연료는 대기에 노출되지 않는 한 손상되지 않으며 수소 또한 생성되지 않는다.

그럼에도 불구하고 사용후연료저장조 수위가 지속적으로 감소하여 사용후연료가 대기에 노출되고 수소가 생성되면 사용후연료건물 문 개방, 개구부 형성 및 사용후연료건물 배기계통을 통해 사용후연료건물내 수소제어 전략을 수행할 수 있다.

사용후연료 미임계 유지 측면에서 한울3,4호기 사용후연료 저장대는 정상운전시 사용후연료저장조 봉소농도를 고려하지 않아도 사용후연료 유효증배계수(K_{eff})가 [] 초과하지 않도록 설계되었으며, 사용후연료가 손상된 경우에도 사용후연료저장조 봉소농도 []에서 미임계를 유지한다. 실제 사용후연료저장조내 봉소농도는 []으로 유지되고, 사용후연료저장조의 물이 비등에 의해 일부 손실되더라도 봉소의 손실은 미미하므로 [] 이상의 봉소농도 유지가 가능하며, 보충수가 주입되더라도 [] 이상의 봉소농도가 유지되어 사용후연료가 임계에 도달할 가능성은 없다.

2.3.4 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램

사용후연료저장조 냉각기능이 상실되는 비정상 상황이 발생하면 비정상운전의 의사결정은 발전팀장에 의해 이루어진다. 발전팀장은 냉각기능 복구를 위한 비정상운전절차서 []의 적용 및 수행에 대한 모든 책임과 권한을 가진다. 운전원은 발전팀장의 지시에 따라 사용후연료저장조 비상충수 절차를 수행하게 된다. 비정상운전절차서에 대한 교육훈련은 정기적인 운전원 교육훈련을 통해 이루어진다.

중대사고시 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 사고관리전략은 중대사고관

리지침서 []에 따라 이루어지며, 중대사고관리 지침서에 대한 교육훈련은 정기적인 운전원 교육훈련을 통해 이루어진다[5-6].

2.3.5 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 중대사고 관리능력 평가

본 절에서는 극한자연재해 및 장기 소내정전사고 조건에서 사용후연료저장조 냉각기능 확보방안에 따른 중대사고 대응능력을 평가하였다. 해당 시나리오 상황에서도 5-12와 같이 극한자연재해 사고환경에서 가용한 것으로 평가된 이동형펌프를 사용하여 보충수를 공급함으로써 사용후연료저장조 수위를 회복할 수 있다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실 시 사용후연료저장조 온도상승시간 및 수위감소시간을 확인하여 표 5-15에 제시하였으며 운전원이 사용후연료저장조 충수조치를 수행할 시간이 충분함을 확인하였다.

2.4 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비

본 절에서는 한울3,4호기 중대사고관리지침서에 제시된 중대사고 관리전략을 정리하고, 전략이행 필수설비와 전략이행 필수설비의 기능유지를 위한 보조설비를 제시하였다. 또한, 사고관리방안의 이행가능성을 파악하기 위한 기초 자료로서 이들 설비들의 세부 설계사항을 제시하였다.

2.4.1 중대사고 관리방안별 이행 설비

한울3,4호기 중대사고관리지침서는 중대사고 관리방안 및 그에 따른 주요 완화전략을 제시하고 있다[5-2]. 동 지침서는 비상기술지원실 발족 이전에 사용하는 [] 전략과 비상기술지원실 발족 이후에 사용하는 [] 전략과 사고종료를 위한 [] 전략을 포함한다. 한울3,4호기 중대사고관리지침서[5-2]에 제시된 중대사고 완화전략은 다음과 같다.

- 증기발생기 급수 주입 []
- 원자로냉각재계통 감압 []
- 원자로냉각재계통 냉각수 주입 []
- 격납건물 냉각수 주입 []
- 핵분열생성물 방출 제어 []
- 격납건물 상태 제어 []
- 격납건물 수소 제어 []
- 사용후연료저장조 상태 제어 []

2.4.1.1 노심냉각기능 확보를 위한 중대사고 완화전략

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

2.4.1.2 격납건물 건전성 확보를 위한 중대사고 완화전략

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

2.4.1.3 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 중대사고 완화전략

2.4.1.4 중대사고관리 전략이행 설비

상기 사고관리전략을 이행하는 데에 요구되는 이행설비를 요약하여 표 5-10에 정리하였다. 표에서 제시된 필수 기기 및 계측기는 중대사고 환경 하에서 기능이 수행되도록 작동성이 보장되어야 한다. 그러나 극한자연재해로 인해 중대사고가 발생하는 경우에는 현실적으로 전략에 사용하는 모든 설비의 작동성이 보장되지 않을 수 있다.

중대사고 시 원자로냉각재계통 및 증기발생기 2차 측으로의 냉각수 주입은 안전주입펌프, 격납건물 살수펌프, 보조급수펌프 및 주급수펌프를 이용하여 수행 가능하다. 이동형발전차와 견인식디젤발전기는

에 비상전원을 공급하는 역할을 한다[5-20, 5-21].

2.4.2 전략이행 보조설비

본 절에서는 2.4.1절에서 도출된 전략이행설비를 지원하기 위한 보조설비를 파악하였다. 보조설비는 주설비가 가용하기 위해 요구되는 구동원, 수원 및 관련 설비들을 기준으로 분류하였다. 방사선 감시기, 압력계 및 수위계와 같은 사고 감시

설비는 해당 설비의 전원등급을 확인하였다. 그리고 밸브와 같은 능동기기는 제어 및 구동을 위한 전원 및 공기구동원을 확인하였으며 펌프에 대해서는 냉각수를 공급수원을 함께 파악하였다. 한울3,4호기 중대사고 완화전략 이행을 위한 보조설비는 표 5-11에 제시되어 있다.


2.4.3 전략이행설비 설계사양


본 절에서는 2.4.1절 및 2.4.2절에서 도출된 전략이행 주설비 및 보조설비들에 대한 설계사양을 파악하였다. 중대사고 관리전략이행을 위한 설비의 설계특성은 사고 시나리오에 따른 설비의 신뢰성과 가용성에 영향을 준다. 계통설계문서, 설계지침서, 계통도면(P&ID), 전기부하 목록[5-22] 및 최종안전성분석보고서[5-7] 등을 검토하여 전략이행 필수 및 보조설비에 대한 물리적 위치, 안전, 품질, 전기 및 내진등급 등의 주요 설계사양을 확인하여 표 5-12에 제시하였다. 또한 중대사고 대처용 기기생존성 평가보고서[5-23] 등을 참조하여 중대사고 환경조건에서의 전략이행 필수 및 보조설비의 가용성을 검토하였다.

2.5 극한자연재해를 고려한 중대사고 관리능력

2.5.1 발전소 대응능력 평가

2.5.1.1 평가 시나리오 선정

한울3,4호기 중대사고 관리능력을 평가하기 위한 사고 시나리오는 한울 부지에서 설계기준을 초과하여 발생 가능한 최대 규모의 외부 자연재해가 발생하고 이로 인하여 발전소 전력 공급이 장기간 상실되는 상황을 설정하였다. 극한자연재해로 인한 사고 시나리오는 재현주기 10,000년 빈도를 초과하는 의 지진이 발생하고 발전소 전력공급이 장기간 상실되는 상황으로 설정하였다. 이러한 극한자연재해 상황에서도 비상디젤발전기(EDG)는 사용 가능하며 소내정전사고에 대응하기 위한 대체교류디젤발전기(AAC DG)도 구비되어 있으나 발전소 대응능력을 보수적으로 평가하기 위해 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기도 상실된 것으로 가정하였다.

극한자연재해로 인하여 소외 전력 상실이 지속되는 기간은 로 가정하였다.

상기와 같이 발전소에서 가용한 전원이 전혀 없다고 가정하면 사고완화를 위한 모든 소내 고정형 설비의 작동이 불가능해지므로, 본 분석에서는 발전소 외부의 자연재해로 인하여 사고 초기에 모든 전원이 상실된 상태에서 중대사고가 발생한다고 가정하였다.

2.5.1.2 대응조치가 없는 경우의 발전소 상태

사고 초기부터 대응조치가 전혀 이루어지지 않은 경우에 대하여 한울3,4호기의 사고진행 추이를 분석하였다. 중대사고 시나리오 분석은 [5-5]에 제시된 [5-5]에 제시된 [5-5]로 설정하였다.

[5-5] 분석 결과는 표 5-13에 제시되어 있는데, 운전원 조치 없이 사고 후 [5-5] 펌프가 작동하였으며 증기발생기가 고갈되는 시점은 [5-5], 노심은 사고 후 [5-5]에 노출되기 시작하였다. 그리고 사고 후 [5-5] 중대사고로 진입하였다. [5-5]에는 노심이 용융되어 원자로용기 하부로 노심용융물이 재배치되기 시작하였다. 그리고 [5-5]에 원자로용기 하부가 파손되어 노심용융물이 원자로공동으로 방출된다. 열 제거원의 상실로 인해 격납건물 압력은 지속적으로 상승하여 사고 후 [5-5]에 격납건물 파손압력인 [5-5]에 도달한다. 이와 같이, 극한자연재해로 인한 중대사고 발생 시 아무런 대응조치를 하지 않는 경우에도 한울3,4호기 격납건물의 건전성은 [5-5] 확보되는 것으로 평가되었다.

또한 상기 사고 시나리오의 전개 과정에서 중대사고 관리를 위한 운전원의 사고관리조치 시점은 냉각재가 고갈되는 시점에서부터 노심용융물이 원자로용기 하부 헤드로 재배치되는 시점인 사고 후 약 [5-5] 사이에서 결정되어야 할 것으로 판단된다(표 5-13 참조). 아울러, 격납건물 파손이 예상되는 사고 후 [5-5] 내에 격납건물 건전성을 유지하는 사고관리전략이행이 이루어져야 할 것으로 예상된다.

사용후연료저장조의 경우, [5-5]의 지진이 발생더라도 사용후연료저장조 구조물 자체의 건전성뿐만 아니라 사용후연료저장조 냉각계통 배관의 건전성도 유지된다. 따라서 극한자연재해로 인한 사용후연료저장조의 누설은 발생하지 않는다. 이에 따라 극한자연재해 시는 2.3절의 사고 시나리오와 동일한 사건 전개를 보인다.

사용후연료저장조의 연료 저장상태가 정상상태인 경우 중대사고 관리진입은 사고 후 [5-5]시간, 방사선 차폐기능 상실은 [5-5]시간, 저장대 상단 노출은 [5-5]시간이 소요되는 것으로 평가되었다[5-15]. 따라서 사용후연료저장조의 연료 상태가 정상상태인 경우는 72시간 동안 아무런 운전원 조치가 요구되지 않는다.

사용후연료저장조의 연료 저장상태가 비정상상태인 경우는 중대사고 관리진입, 방사선 차폐기능 상실 및 저장대 상단 노출이 각각 [5-5]시

간에 발생한다. 이 경우에는 운전원이 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조를 비상 충수할 시간이 충분하다.

2.5.2 중대사고 관리방안 이행의 저해요소

사고대응을 위한 완화조치를 수행하는 데 필요한 발전소 내부 및 외부의 기반시설 이용가능성 등 발전소 대응능력이 극한자연재해로 인한 중대사고 환경에서 장애를 받는지를 검토하였다.

2.5.2.1 발전소 접근성

본 절에서는 극한자연재해 발생 시 타 부지 및 외부지원 기관으로부터의 중대사고 대응 지원을 위한 접근성에 영향이 있는지를 확인하고 중대사고 완화조치 수행 전략에 대한 장애 여부를 검토하였다.

○ 본부 내 접근로:

○ 비상대책실 접근로:

따라서 극한자연재해가 발생하더라도 한울3,4호기는 타부지 및 외부지원 기관으로부터 비상요원 및 비상장비의 지원이 가능하며 비상대책실도 정상 운영이 가능하다. 발전소 접근로 현황 및 극한자연재해 시 복구전략에 대한 상세사항은 본 보고서 제6장 2.1.3절에 기술되어 있다.

2.5.2.2 사고환경에서의 작업 장애

본 절에서는 상기 2.5.1절에서 가정한 극한자연재해로 인한 중대사고 환경에서 핵심 사고관리조치 이행이 방해를 받을 수 있는 작업환경에 대하여 검토하였다. 핵심 사고관리조치는 이동형발전차 및 견인식디젤발전기를 이용한 소내 전원공급,

안전주입펌프를 통한 격납건물 냉각수 주입 그리고 원자로 냉각기능 장기상실에 대비한 비상냉각수 외부주입이 있다.

이동형발전차를 통한 전원공급을 수행하기 위해서는 이동형발전차와 비상전원 연결용 접속함을 연결해야 한다. 비상전원 연결용 접속함은

에 위치한다[5-20]. 접속함이 사고 발생 시 예상피폭방사선량이 높지 않으며, 만일 예상피폭방사선량이 높을 경우에는 긴급작업에 대한 절차와 관리계획을 통해 법적 제한선량 이내에서 작업을 수행한다. 조명은 시설 내의 비상등과 이동형발전차에 비치된 휴대용 손전등을 이용하여 확보한다.

한울3,4호기는 추가적인 중대사고 완화조치의 하나로 원자로냉각재계통 및 증기발생기 2차 측에 이동형펌프를 이용하여 비상냉각수를 주입하는 외부주입유로가 구비되어 있다. 원자로 비상냉각수 외부주입 지점은 위치하여 작업자의 예상피폭방사선량이 높지 않을 것으로 예상된다. 원자로냉각재계통의 외부주입유로 확보를 위해

, 극한자연재해 사고 시에도 격납건물 격리 기능이 보장되므로 동 상황에서 해당 작업구역에서 예상되는 방사선 피폭량은 높지 않아 방사선 장애요인이 되지 않을 것으로 예상된다. 또한 해당 작업 수행 시 필요한 조명은 주제어실 및 이동형펌프에 비치된 휴대용 손전등을 이용하여 확보한다.

2.5.2.3 주제어실 및 원격정지제어반 접근성 및 거주성

한울3,4호기의 비상대응시설 중 하나인 주제어실(MCR)은 에 위치하여 외부 홍수에 의해 운전원 거주성에는 직접적인 영향을 받지 않는다. 또한, 주제어실은 설계기준사고에 의한 방사선비상상황 하에서 충분한 거주성을 확보하고 있다[5-7].

외부 방사선에 대하여 운전원의 피폭선량을 50 mSv 이하로 유지하도록 차폐 설계되어 있으며 공조계통을 통한 외부 방사선물질 유입에 대비하여 비상환기계통을 구비하고 있다. 주제어실 사고선량 분석에 의하면 비상환기계통은 가장 제한적인 냉각재 상실사고 시에도 주제어실 운전원을 공기 중 방사능으로부터 보호할 수 있는 방호수단을 제공한다[5-7]. 주제어실 비상환기계통은 장기 소내 정전사고 시에도 이동형발전차에서 전원을 공급받을 계획이다.

주제어실 내의 운전원에게 필요한 비상식량 및 비상용품(구급용구, 비상약품 및 위생용품) 관리에 대한 제반절차가 수립되어 있다[5-29]. 주제어실의 거주성이 상

실되는 상황에서는 [redacted]에 따라 운전원들이 원격정지제어반(Remote Shutdown Panel, RSP)으로 이동하여 필요한 조치를 수행한다[5-30]. 원격정지제어반의 원격정지계통은 주제어실 이외의 다른 장소에서 발전소를 안전한 정지상태로 만들고 유지할 수 있도록 운전원에게 충분한 계측설비와 제어기를 제공한다. 주제어실 거주성 및 원격정지제어반 접근성에 대한 상세사항은 본 보고서 제6장 2.3.1절 및 2.3.2절에 기술되어 있다.

2.5.2.4 통신 설비 및 체계 건전성

본 절에서는 비상통신설비의 현황을 확인하고 장기 소내정전 사고 시 사용가능성을 확인하였다. 한울3,4호기는 비상시에 비상연락, 비상정보교환, 비상활동 지휘 등을 수행하도록 다음과 같은 소내외 통신설비를 이용한다.

○ 본부 구내설비:

[redacted]

○ 외부 통신설비:

[redacted]

본부 구내 비상통신설비 및 외부 비상통신설비에 대한 상세사항은 본 보고서 제6장 2.1.4절에 기술되어 있다.

2.5.2.5 핵심대응전략의 사고대응능력

본 절에서는 극한자연재해로 인하여 장기간 발전소 전원이 상실되어 중대사고가 발생하는 상황에 대응하기 위한 최소 핵심설비를 파악하고, 해당 설비를 이용한 수행전략의 사고대응능력을 평가하였다.

중대사고 발생 시 대응전략의 핵심은 냉각수 공급을 통한 중대사고의 진행을 완화시키고 격납건물의 건전성을 유지하는데 있다. 극한자연재해로 인하여 장기간 발전소 전원이 상실될 경우 이동형발전차를 통해 소내 고정형 설비에 전원을 공급하여 1·2차 측 및 격납건물 냉각수 주입 조치를 수행할 수 있다.

원자로 및 증기발생기 비상냉각수 외부주입 설비 설치가 진행 중이다. 또한, 격납건물의 건전성과 관련하여 격납건물 수소농도의 경우, 발전소 전원상실 시에도 작동성이 보장된 피동축매형수소재결합기에 의해 제어될 수 있다. 따라서 상기 극한

자연재해로 인한 중대사고 환경에서 요구되는 능동 대응전략을 요약하면 다음과 같다.

상기 핵심 대응전략의 대응능력은 대응목표를 달성할 수 있는 대응 요구시간을 기준으로 평가하였으며, 사고 상황파악, 의사결정 및 지시, 지시 이행과정 및 이행 방법 등 시나리오 전개과정을 가상적으로 상정하여 평가하였다. 또한, 사고대응에 요구되는 설비는 본 보고서 2.4절 평가에서 극한자연재해 시 가용한 것으로 평가된 설비로 한정하였다.

이동형발전차와 견인식디젤발전기는

비상전원을 공급하기 위한 설비이다. 두 설비는 시간 이내에 전원을 공급하도록 하고 있다. 이동형발전차의 연료탱크 저장량은 연속 최대부하 공급량이며 견인식디젤발전기는 보조연료탱크에 운전용량의 연료를 저장하고 있다[5-20 및 5-21]. 또한, 이동형발전차는 지진이 발생할 때나 지진이 발생하지 않을 때에 비상디젤발전기용 연료를 추가로 사용하여 에 전원을 공급할 경우 사고발생 시점부터 동안 운전이 가능하다. 이동형 발전차의 가용시간에 대한 상세사항은 본 보고서 제 4장 2.2.5절에 기술되어 있다.

확보된 이동형발전차로 전원을 공급하여 안전주입펌프 또는 격납건물살수펌프를 통해 원자로냉각재계통(RCS)으로 냉각수 주입이 가능하며, 보조급수펌프를 통해 증기발생기로 냉각수 주입이 가능하다.

외부주입유로 설비를 통한 비상냉각수 외부주입 조치에 대한 사고대응능력도 함께 평가하였다.

이동형펌프를 이용한 비상냉각수 외부주입의 경우, 1차 측 원자로냉각재계통으로 비상냉각수를 주입하는 목적은 노심의 냉각 및 수위 회복에 있으며, 증기발생기 2차측의 경우에는 방사선 물질의 방출 제어 및 붕괴열 제거에 있다.

이동형펌프는 구동 회전수(RPM)를 조절하여 주입유량을 조정할 수 있으며, 중대사고 완화조치에 필요한 주입유량을 확보할 수 있는 성능을 가지고 있다.

2.5.3 대응능력 한계사항 대처방안

2.5.1절에서 선정한 사고 시나리오에 대하여 극한자연재해 사고환경에서의 사고관리 저해요소를 고려한 중대사고 대응능력을 평가하였다. 해당 시나리오 상황에서 사고관리 전략 이행 설비는 극한자연재해 사고환경에서 가용한 것으로 평가된

설비로 한정하였다.

표 5-12에 제시된 바와 같이 극한자연재해 사고환경에서도 다양한 고정형 설비들이 가용하나 이들 중 핵심대응전략에 필요한 최소한의 고정형 및 이동형 설비만 가용하다고 보수적으로 가정하였다. 그리고 중대사고 환경에서 운전원 조치 시 장애요소를 포함한 보수적인 조치이행시간을 감안하여 중대사고 진행과정을 분석하였다.

이동형발전차를 이용한 소내 고정형 설비를 이용한 냉각수 주입 외에, 개선사항으로 추진중인 원자로냉각재계통 및 증기발생기 비상냉각수 외부주입설비도 평가대상으로 선정하였다. 또한, 설치가 완료된 사용후연료저장조 비상보충수 외부주입설비를 이용한 보충수 주입 전략을 평가하였다. 핵심대응전략을 기준으로 선정한 가용설비 사용 시나리오는 다음과 같다.

2.5.3.1 비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 냉각수 주입

비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 시나리오에 대한 분석 시 중대사고관리 진입 후 조치가 시작되는 것으로 가정하였다. 한울3,4호기의 원자로 및 증기발생기 비상냉각수 외부주입설비는 설계결과[5-19]에 따른 동 설비의 성능을 반영하여 분석을 수행하였다.

MAAP5 코드[5-27, 5-28]를 이용한 발전소 대응능력 한계상황에서의 중대사고 전개과정 분석 결과를 표 5-14에 제시하였다. 2.5.1.2절의 사고 초기부터 대응조치가 전혀 이루어지지 않는 경우에서 밝힌 바와 같이, 노심노출이 발생된 이후, 노심출구온도가 상승하여 중대사고 진입에 도달한다. 중대사고관리 진입 후

통해 1차 측 및 2차 측의 압력을 감압하고 원자로 비상냉각수 외부주입을 위한 밸브 배열

등을 수행하여 중대사고관리 진입 후 []에 1차
측 및 2차 측으로 냉각수 주입이 개시된다. 동 분석에서는 극한자연재해 사고환경
에서 []

[] 비상냉각수 외부주입을 수행하고, []
[] 하는 것으로 가정하였다.

주입된 냉각수에 의해 노심의 열이 제거됨으로써 그림 5-3에서와 같이 노심출구
온도가 감소하여 [] 이하로 유지됨을 확인할 수 있다. 그리고 비상냉
각수 외부주입이 수행되는 동안에 격납건물 압력은 지속적으로 상승하지만, 증기
발생기를 통한 열 제거가 적절히 수행되어 그림 5-4에서와 같이 [] 이내에는
격납건물 압력이 []를 초과하지 않음을 확인할 수
있다.

72시간 동안 터빈구동 보조급수펌프 및 비상냉각수 외부주입을 위해 요구되는 냉
각수의 양은 그림 5-5에 제시한 바와 같이 1차 측의 경우 []
[] 2차 측의 경우 []로 평
가되었다.

2.5.3.2 이동형발전차를 이용한 냉각수 주입

이동형발전차 전원을 이용한 소내 고정형 설비 사용 시나리오에 대한 분석 시 중
대사고관리 진입 후 []에 조치가 시작되는 것으
로 가정하였다. 주요 조치는 []

[]
[]
[]
[] 것이다.

[]를 이용한 동 분석 결과도 표 5-14에 제시하였다. 노심
출구온도가 상승하여 중대사고 진입 []에 도달한 후 []
[] 원자로냉각
재계통의 압력을 감압하고, []를 작동하여 원자로냉각재계통으로
냉각수 주입이 개시된다.

주입된 냉각수에 의해 노심의 열이 제거됨으로써 그림 5-6에서와 같이 노심출구
온도가 감소하여 [] 이
하로 유지됨을 확인할 수 있다. 그리고 이 후 열교환기의 지원을 받는 저압안전주
입펌프를 이용한 재순환냉각 운전 중에 노심용융물의 원자로용기 하부 재배치가
일어났으나 지속적인 재순환냉각 운전을 통해 적절한 붕괴열 제거가 수행되어 그

림 5-7에서와 같이 격납건물 압력이 [] 시점에서 []
[] 상승한 후 점진적으로 감소하여 [] 내에 설계압력인 []
이하로 유지됨을 확인할 수 있다.

2.5.3.3 비상보충수 외부주입설비를 이용한 사용후연료저장조 보충수 주입

본 절에서는 한울3,4호기 사용후연료저장조 비상보충수 신설에 대한 설계변경서 [5-31]에 제시된 냉각기능 상실 후 온도상승시간을 토대로 비상보충수 주입전략을 평가하였다. 사용후연료저장조는 저장된 연료 상태에 따라 정상상태, 재장전상태 및 비정상상태로 구분될 수 있으며 각 상태조건은 표 5-8과 같다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실 시 사용후연료저장조 온도상승시간 및 수위감소 시간을 확인하여 표 5-15에 제시하였다[5-31]. 평가결과 운전원이 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조를 비상 충수할 시간이 충분함을 확인하였다.

2.6 한울 3,4호기 차이점

한울 3, 4호기에 대한 발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능은 동일한 설계개념을 적용하였으므로 노심 냉각기능 확보, 격납건물 건전성 유지 및 사용후연료저장조 냉각기능 상실 시 관리조치에 필요한 설비 및 대응 전략은 동일하다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

후쿠시마 후속조치와 관련하여 중대사고 예방 및 관리에 직접적으로 관련이 있는 사항으로 다음과 같은 항목들이 있으며, 항목별 이행현황은 다음과 같다.

- 이동형 발전차량 및 축전지 등 확보(3-1)
소외전원을 포함한 모든 교류전원이 상실되는 경우 필수부하에 전원을 공급하기 위한 이동형발전차를 구비하였고, 이동형발전차 이용에 필요한 전원 연결점을 설치 완료하였다. 한울3,4호기의 경우 8시간 이상 소내 축전기 전원을 사용할 수 있으므로(3장 축전지 전원 평가 참조) 추가 축전지 확보는 고려하지 않았다.
- 사용후핵연료저장조 냉각기능 상실시 대책확보(3-5)
사용후연료저장조의 냉각기능 완전상실 시 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조를 충수할 수 있는 비상보충수 공급유로를 설치 완료하였다.

- 피동형수소제거 설비 설치(4-1)
격납건물 내에 설비의 중대사고 전용 피동축매형수소재결합기와 설계기준사고 및 중대사고 겸용 피동축매형수소재결합기를 설치 완료하여 격납건물의 건전성을 유지하는데 충분한 수소제어능력을 확보하도록 하였다.
- 격납건물 배기 또는 감압설비 설치(4-2)
중대사고시 격납건물 내 과도한 압력상승을 방지하기 위한 여과/배기 설비로서 한울3,4호기의 경우 현재 미 설치되어 있으나 설치를 완료할 계획이다.
- 원자로 비상냉각수 외부 주입유로 설치(4-3)
원자로 비상냉각수 외부주입유로는 전원상실로 인한 원자로 냉각기능의 장기상실에 대비한 추가적인 대응전략 확보를 목적으로 외부에서 원자로 및 증기발생기 2차 측으로 비상냉각수를 주입하기 위한 설비로서 한울3,4호기의 경우 설치가 완료되었다.
- 중대사고 교육훈련 강화(4-4)
운전원의 중대사고 관리 능력향상을 위해 호기별 중대사고 특성을 반영한 교육훈련에 대한 기본계획이 수립되어 각 사업소에 통보되었으며, 교육훈련은에 따라 정기적으로 이루어진다.
- 중대사고 관리지침서 개정(4-5)
사고관리전략 실효성 강화를 위해 원자로공동을 냉각시키기 위한 충수유로 가용성 및 냉각성능을 평가하여 중대사고 관리지침서에 반영하였고 소외전원상실 시 중대사고 대응설비들의 생존성을 평가하고 전원 공급을 위한 절차를 반영하여 중대사고 관리지침서를 개정완료 하였다.
- 정지저출력 중대사고 관리지침서 개발(4-6)
정지저출력 운전 중 중대사고 발생 시 사고관리를 위한 한울3,4호기 정지저출력 중대사고관리지침서를 반영한 통합 중대사고관리지침서(ISAMG) 작성을 완료하였다.
- 중대사고 시 사고대응 및 수습관리를 위한 비상대응조직 운영(추가-2)
중대사고 교육훈련 강화를 바탕으로 사고 시 전문적인 기술지원을 할 수 있도록 SAFE-T 조직을 운영 중에 있다.
- 이동형 디젤구동펌프 확보(4-A1)
이동형 디젤구동펌프는 원자로 비상냉각수 공급, 사용후연료저장조 비상보충수 주입 및 침수지역 배수를 위한 기기로서 한울본부에 차량탑재형 이동형펌프 도입되어 호기별로 배치되었다.
- 비상 충수용 장거리 호스 확보(4-A2)
비상 충수용 장거리 호스는 원수 공급라인과 비상충수 라인을 연결하는 장거리 호스로서 '원자로 비상냉각수 외부주입유로 설치(4-3)'와 '이동형 디젤구동펌프(4-A1)' 현안과 연계된 사항으로, 한울본부에 장거리호스를 확보

보하였다.

3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

○ 월성1호기 스트레스테스트

“중대사고 관리능력”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 [5-33]의 반영여부를 확인한 결과, 표 5-16에서와 같이 안전 개선사항 7건에 대한 9가지 세부사항은 한울3,4호기 평가에서 자체 안전 개선사항으로 도출되었거나 후쿠시마 후속조치 등으로 수행 중인 것으로 검토되었다.

○ 고리1호기 스트레스테스트

“중대사고 관리능력”과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행 현황[5-34]의 반영여부를 확인한 결과, 표 5-17에서와 같이 안전 개선사항 1건에 대한 사항은 한울3,4호기 평가에서 자체 안전 개선사항으로 도출되어 비상 대응 통신망 구축 컨설팅을 시행하였으며, 설계기준 초과 지진에 대한 소내 비상통신 대응방안을 계획 중이다.

3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 사용후연료저장조 추가 비상살수수단 확보

극한자연재해 시 방사선 차폐기능이 상실되기 전에 이동형 펌프를 통해 비상 보충수를 공급함으로써 사용후연료저장조의 냉각기능을 확보할 수 있는 것으로 평가되었으나 사용후연료저장조의 냉각수 손실로 인한 연료 손상 예방능력을 강화하기 위해 추가로 고압 이동형 살수차를 이용하여 사용후연료저장조 상부에 살수할 수 있도록 안전성을 증진할 예정이다

나. 격납건물 대체살수수단 확보

극한자연재해로 인한 중대사고 시 격납건물 건전성은 확보되는 것으로 평가되었으나, 추가로 이동형 고유량 펌프를 이용하여 전원상실시 격납건물 내부 살수 기능 및 핵분열생성물 방출제어 기능을 확보할 계획이다. 이는 대형 이동형발전차를 이용한 살수기능 회복과 더불어 추가로 살수 설비를 확보할 수 있으며, 이를 통한 격납건물 감압 기능을 강화할 수 있다. 또한, 살수 된 냉각수는 중력에 의해 원자로공동으로 자연 충수될 수 있으므로 중대사고 진입(표 5-13 분석결과 참조)전에 원자로 공동에 침수시켜 노심용융물-콘크리트 반응(MCCI)을 완화시킬 수 있다. 해당 이동형 고유량 펌프는 4장의 최종열제거원 복구전략에 사용되는 이동형 고유량 펌프를 공용으로 사용할 예정이다.

제4절 결론

한울3,4호기 스트레스테스트(Stress Test) 평가분야 중 “중대사고 관리능력”을 평가하기 위하여 중대사고 시 노심냉각기능 확보, 격납건물 건전성 확보, 사용후연료저장조 냉각기능 확보, 중대사고 관리방안 이행설비 및 극한자연재해를 고려한 중대사고 관리능력을 검토하였다. 상기 항목에 대한 평가결과는 다음과 같다.

○ 중대사고 시 노심냉각기능 확보 방안

중대사고 시 연료손상 전·후 및 원자로용기 손상 이후 사고완화를 위한 노심냉각기능 확보 방안을 평가하였다. 중대사고 시 노심냉각기능 확보는 비상운전절차서 및 중대사고지침서의 절차에 따라 이루어진다. 연료손상 발생 전 사고관리 대응은 비상운전절차서에 규정된 절차 및 수단에 따라 이루어지며, 사고의 징후 및 유형별로 대응함으로써 노심냉각기능을 확보하도록 하고 있다. 연료손상 이후는 중대사고관리지침서

전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다. 원자로용기 손상 이후에는 중대사고관리지침서 전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다.

○ 격납건물 건전성 확보 방안

중대사고 시 격납건물 건전성 확보를 위해 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지, 수소폭발방지, 격납건물 과압방지, 재임계 방지 및 격납건물 바닥 용융관통 방지 방안을 평가하였다. 격납건물 격리기능은 격리밸브의 고장 단힘(Fail Closed) 설계와 중대사고관리지침서 전략을 통해 확보되는 것으로 평가되었다. 격납건물 우회사고의 경우 중대사고관리지침서 전략을 통해 격납건물 외부로의 핵분열생성물 방출을 최소화 할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다. 한울3,4호기는 중대사고에 대처가능한 피동축매형수소재결합기를 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서 전략을 통한 추가적인 수소폭발 방지 대응능력을 갖추고 있는 것으로 평가되었다. 격납건물 과압방지의 경우 중대사고관리지침서에 따라 격납건물 팬냉각기 및 격납건물 살수계통 등을 이용한 격납건물 과압을 방지할 수 있는 것으로 평가되었다. 노심 재임계 방지의 경우 사고 진행과정에서 보충수가 주입되는 상황에서도 재임계 가능성은 없으며, 중대사고관리지침서의 장기 관심사항으로 냉각수 주입으로 인한 봉산 희석감시 및 봉산수 주입전략을 제공하여 재임계 방지능력을 확보하는 것으로 평가되었다. 바닥 용융관통 방지의 경우 원자로공동이 노외로 방출된 노심용융물 냉각을 보장하기 위한 바닥면적을 확보하고 있고, 중대사고관리지침

서

전략을 통해 원자로 공동으로 냉각수를 주입할 수 있도록 되어 있어 격납건물 바닥 용융관통을 완화하기 위한 능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

○ 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안

사용후연료저장조 냉각기능 평가에서는 사용후연료저장조의 냉각 기능이 상실되는 경우에 대한 사고 시나리오를 평가하였다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 사고는 방사선 차폐기능 상실, 연료 냉각기능 상실, 연료 손상 전·후 등의 사고 진행에 따라 비정상운전절차서 및 중대사고관리지침서 전략을 수행하여 냉각수를 주입함으로써 완화가 가능한 것으로 평가되었다. 특히 극한자연재해 시 이동형펌프를 통해 비상보충수 충수를 함으로써 사용후연료저장조의 냉각기능을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

○ 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비

중대사고 관리방안에 따라 중대사고 관리전략이행에 필수설비와 해당 설비의 기능유지를 위해 필요한 보조설비를 제시하고 사고 시나리오에 따른 필수 설비들의 신뢰성 및 가용성을 파악하기 위해 세부 설계사항을 제시하였다.

○ 극한자연재해를 고려한 중대사고 완화조치 저해요소 평가

극한자연재해에 의한 중대사고 시 사고관리 저해요소를 발전소 접근성, 운전원 거주성, 사고환경에서의 작업장애, 통신설비 및 체계 건전성 측면에서 평가하였다. 또한, 사고관리 저해요소를 고려한 중대사고 대응능력 평가를 위해, 가용 장비를

로 한정하였을 때의 발전소 대응능력을 평가하였다. 평가결과 극한자연재해 및 소내전력이 장기간 상실되어 중대사고가 발생할 경우에도 이동형발전차를 통한 소내전원공급, 그리고 이동형펌프를 이용한 1·2차측 비상냉각수 주입 전략을 이행함으로써 사고관리 저해요소로 인한 대응능력 한계상황에서도 충분히 대응할 수 있는 것으로 평가되었다.

이상과 같이 한울3,4호기에 대하여 스트레스테스트 세부 평가요건에 따라 중대사고 시 노심 냉각기능 확보, 격납건물 건전성 확보 및 사용후연료저장조 냉각기능 확보 능력 등을 평가한 결과 중대사고관리지침서 전략 수행을 통해 충분한 대응능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다. 또한 지속적인 설비 개선 및 후쿠시마 후속조치의 이행을 통하여 극한자연재해로 인한 대응능력 한계상황에서도 충분한 대응능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

제5절 참고문헌

- 5-1. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-2. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-3. 한울3,4호기 후쿠시마 후속조치 이행사항
- 5-4. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 주기적안전성평가 보고서
- 5-5. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 확률론적안전성평가보고서
- 5-6. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-7. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 최종안전성분석보고서
- 5-8. 원자력안전위원회, 고시 제2014-31호, 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침, 2014
- 5-9. OECD Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R(2000)7, Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety, 2000
- 5-10. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-11. IAEA, Safety Reports Series No. 56, “Approaches and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants”, 2008
- 5-12. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-13. EPRI, TR-016780-V2R8, ‘Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Volume 2, Revision 8: ALWR Evolutionary Plant’, 1999
- 5-14. 한국수력원자력(주), 한울 3,4호기 Containment Building Floor Plan [redacted]
- 5-15. 한국전력기술(주), [redacted]
- 5-16. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-17. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-18. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-19. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-20. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-21. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-22. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 5-23. 한국수력원자력(주), [redacted]

- 5-24. NRC, SECY-93-087, Policy, “Technical, and licensing Issues Pertaining to Evolutionary and Advanced Light-Water Reactor Designs”, 1993.
- 5-25. ENSREG, “EU Stress Test Specification”, 2011
- 5-26. 한국수력원자력(주), “고리1호기 원전 스트레스테스트 수행보고서”, 2013.12.
- 5-27. [REDACTED]
[REDACTED]
- 5-28. 한국수력원자력(주), [REDACTED]
[REDACTED]
- 5-29. 한국수력원자력(주), [REDACTED]
- 5-30. 한국수력원자력(주), [REDACTED]
- 5-31. 한국수력원자력(주), [REDACTED]
[REDACTED]
- 5-32. 한국수력원자력(주), 국내원전 안전점검 개선대책 추진현황 및 관리방안, 2017.09
- 5-33. 한국수력원자력(주), 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황, 2017.07
- 5-34. 한국수력원자력(주), 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황, 2017.07

제6절 표, 그림

표 5-1 비상운전절차서 구성

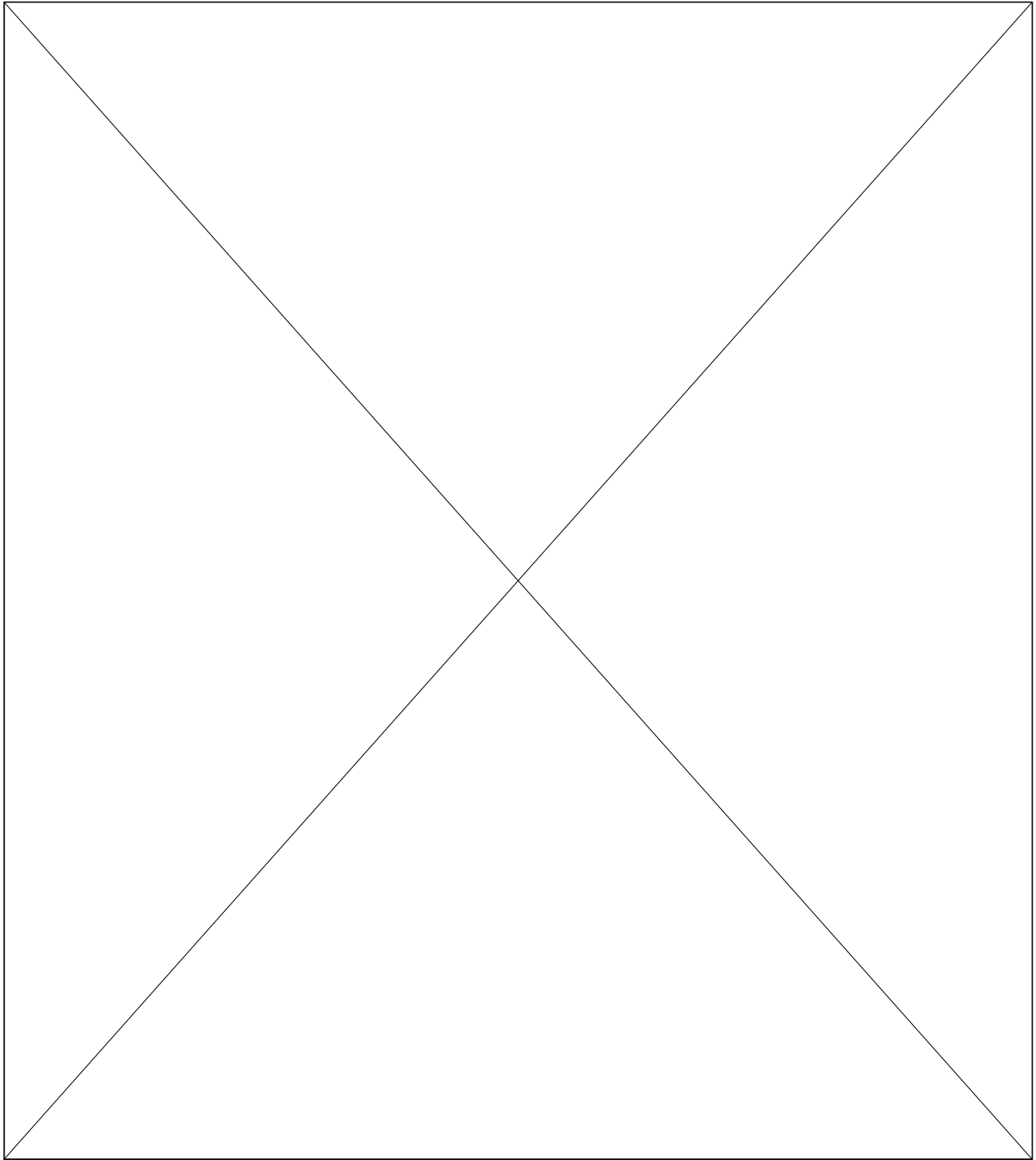


표 5-2 중대사고관리지침서의 증기발생기 냉각수 주입 수단

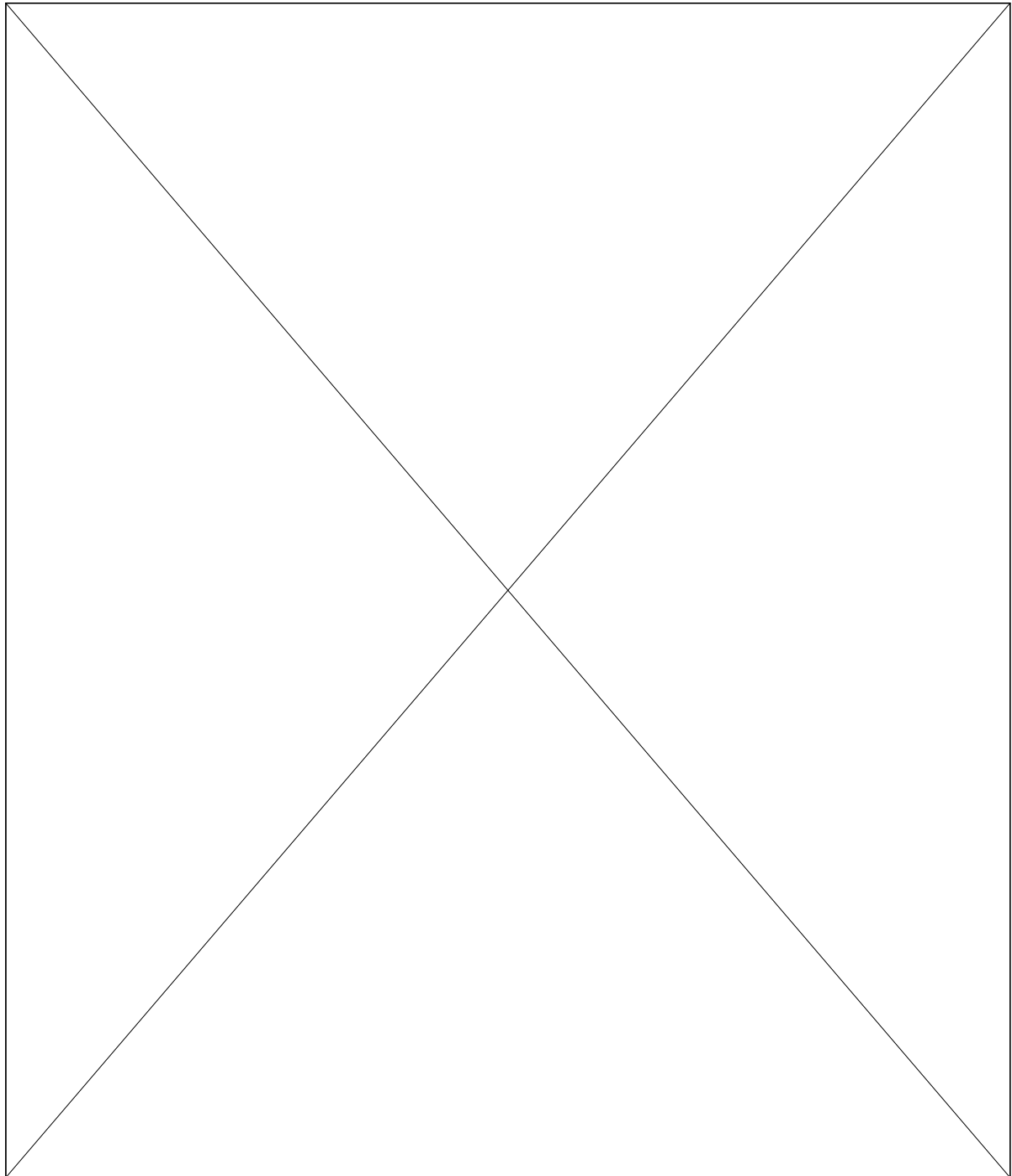


표 5-3 중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 감압 수단

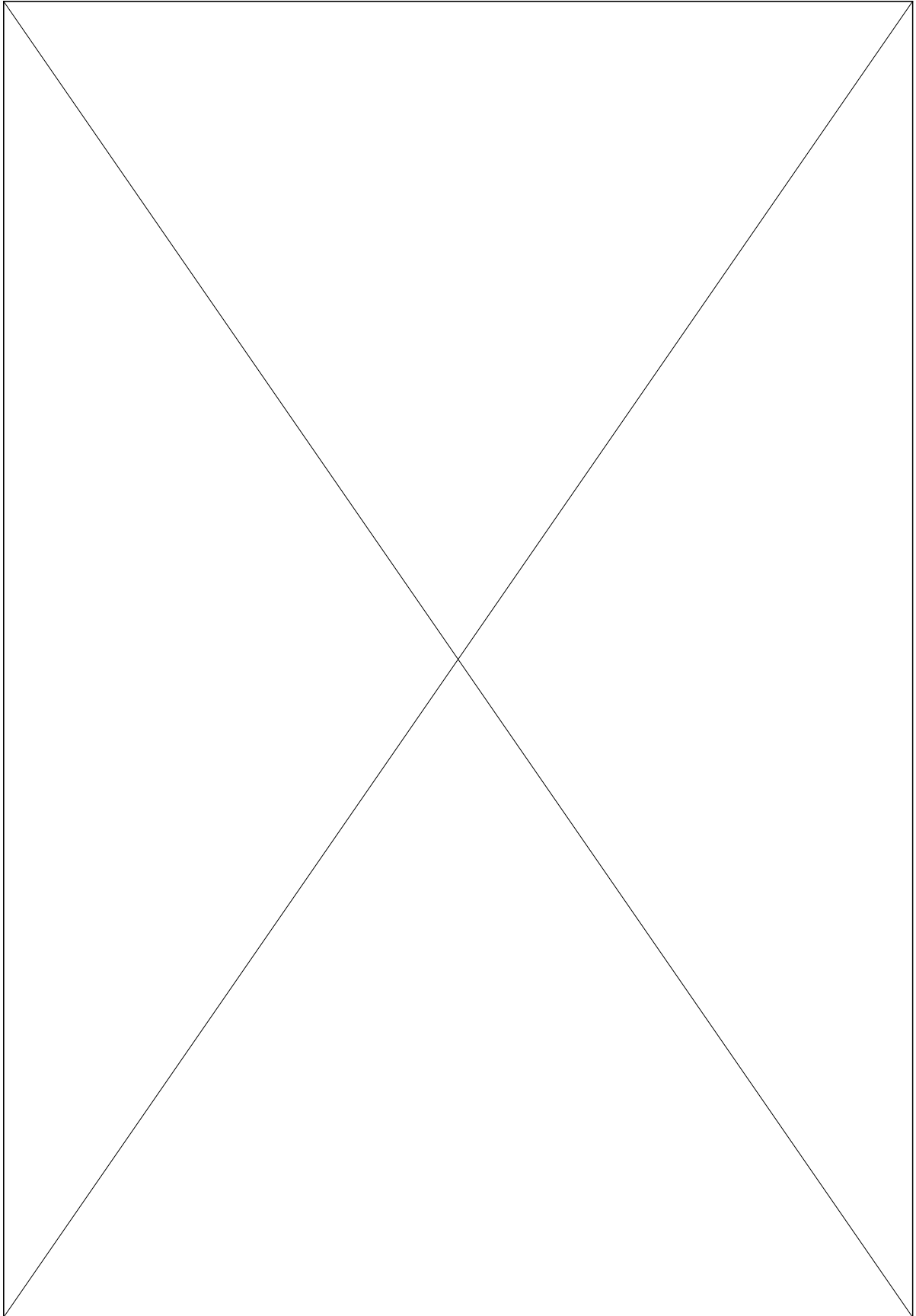


표 5-4 중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 냉각수 주입 수단

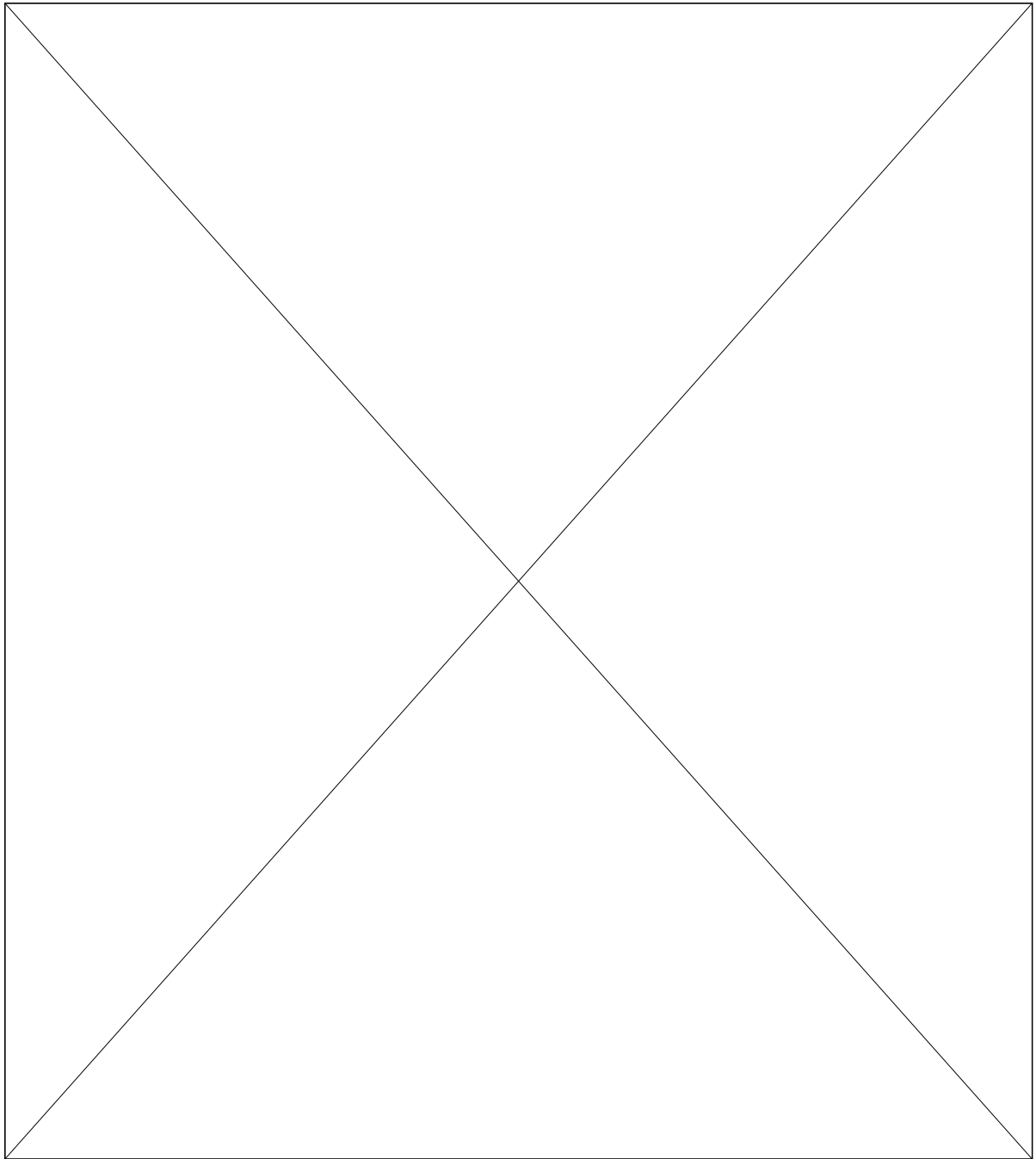


표 5-5 중대사고관리지침서의 격납건물 냉각수 주입 수단

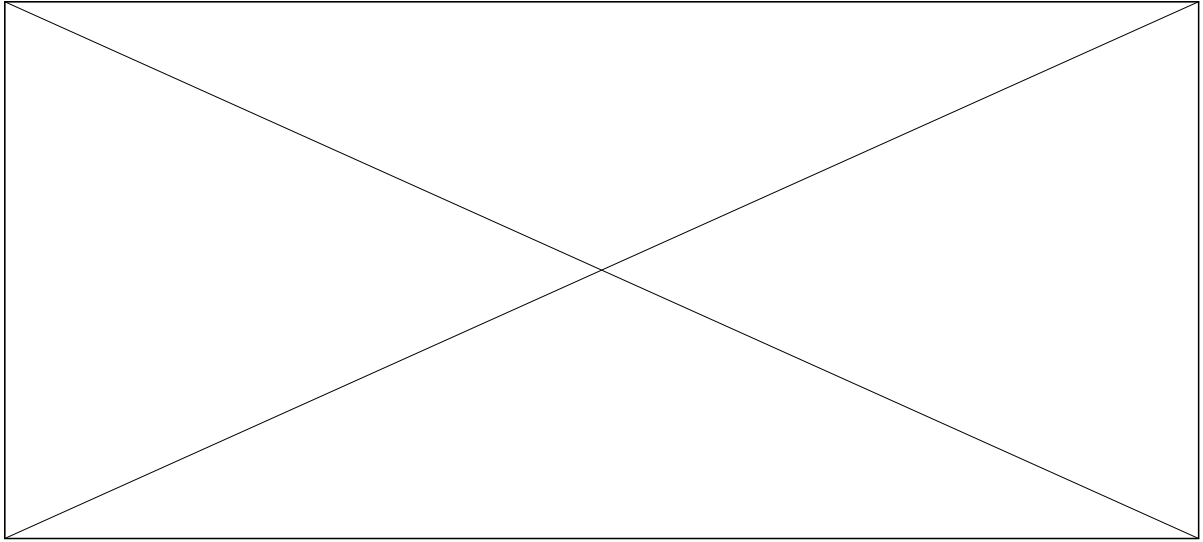


표 5-6 격납건물 격리상태 점검표

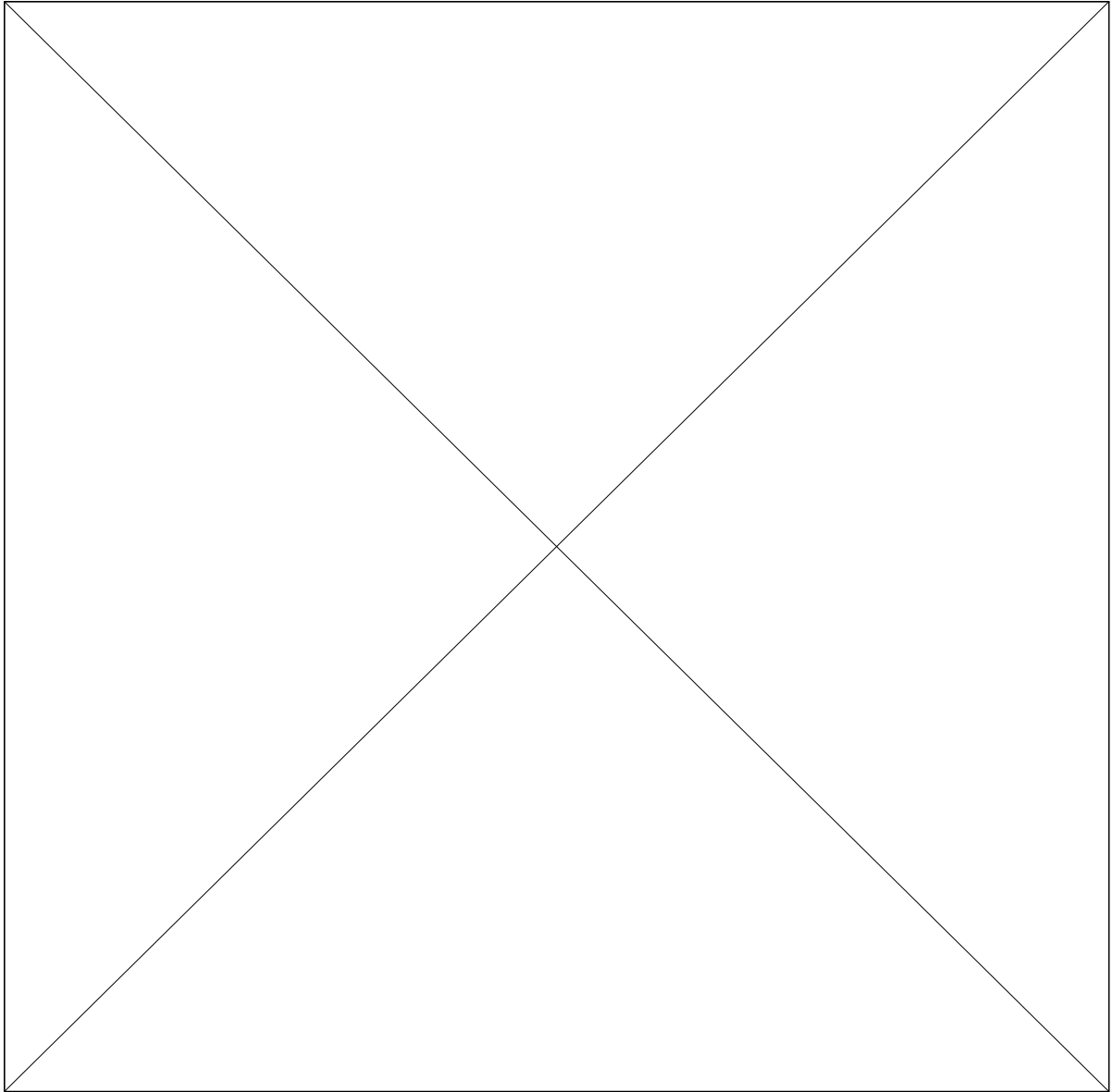


표 5-7 피동측매형수소재결합기 위치 및 용량

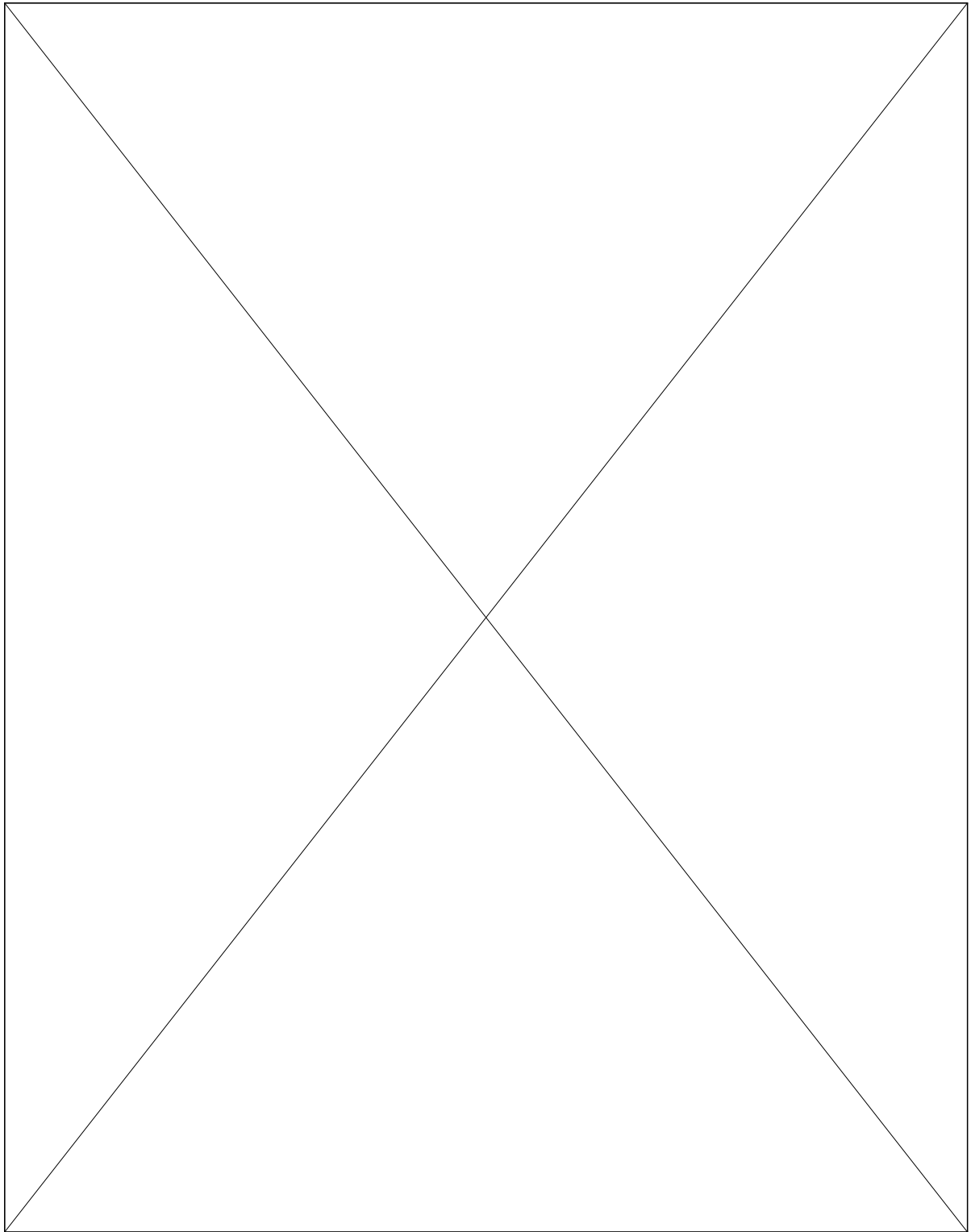


표 5-8 사용후연료저장조 운전 상태

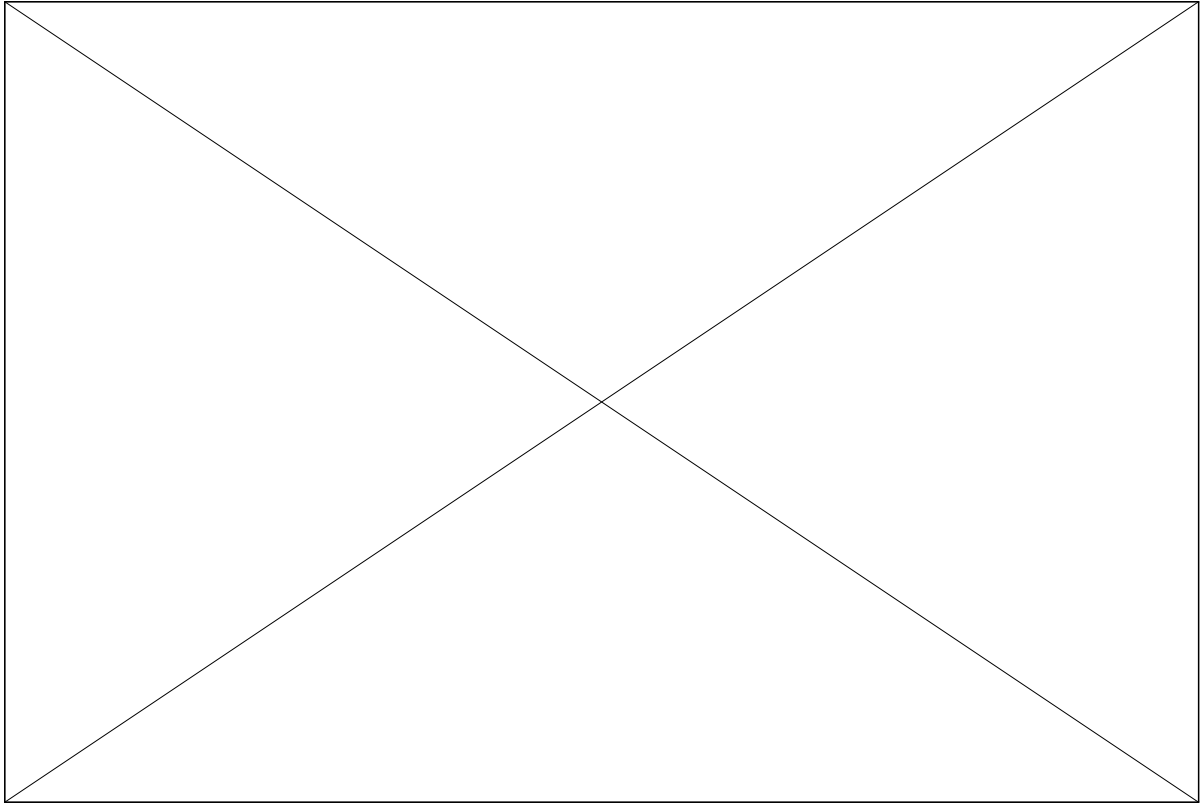


표 5-9 사용후연료저장조 냉각수 주입 수단

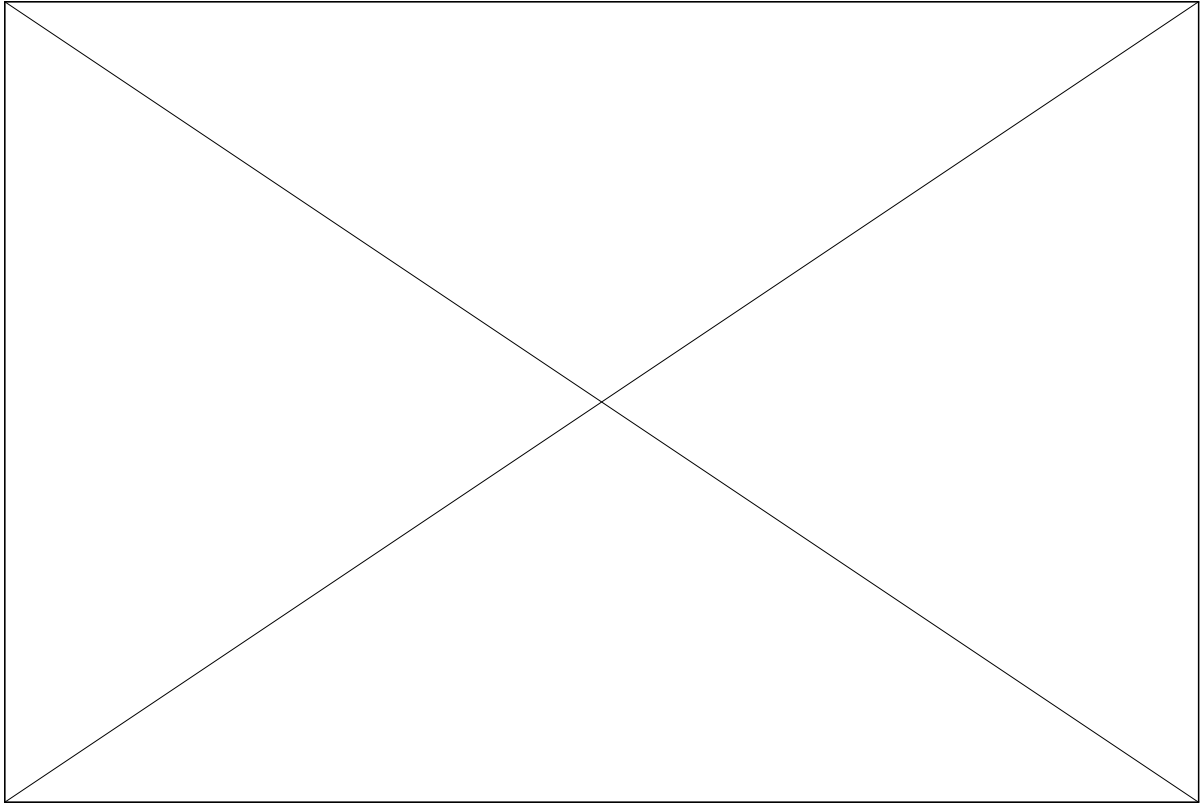


표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비 (1/3)

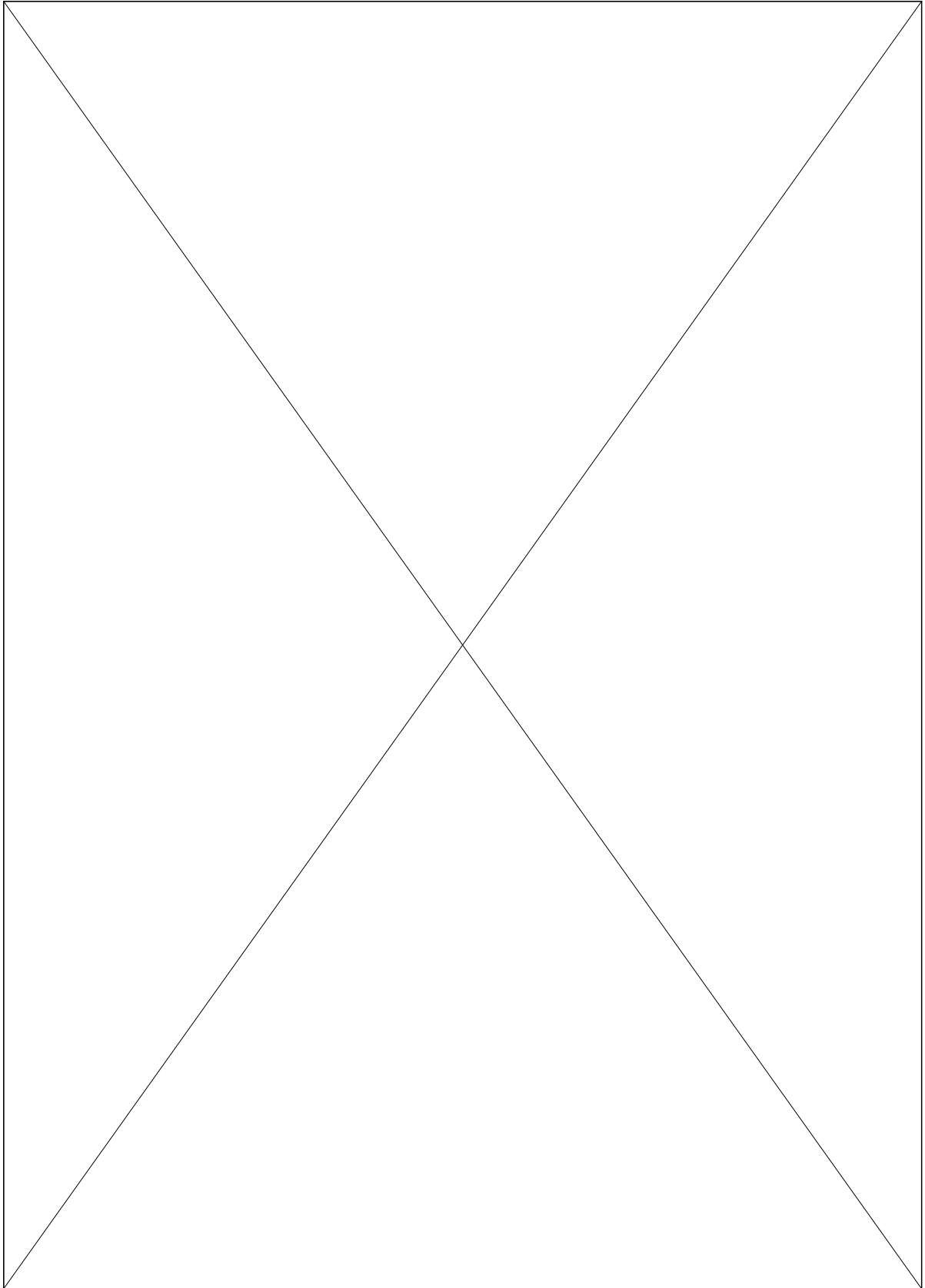


표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비 (2/3)

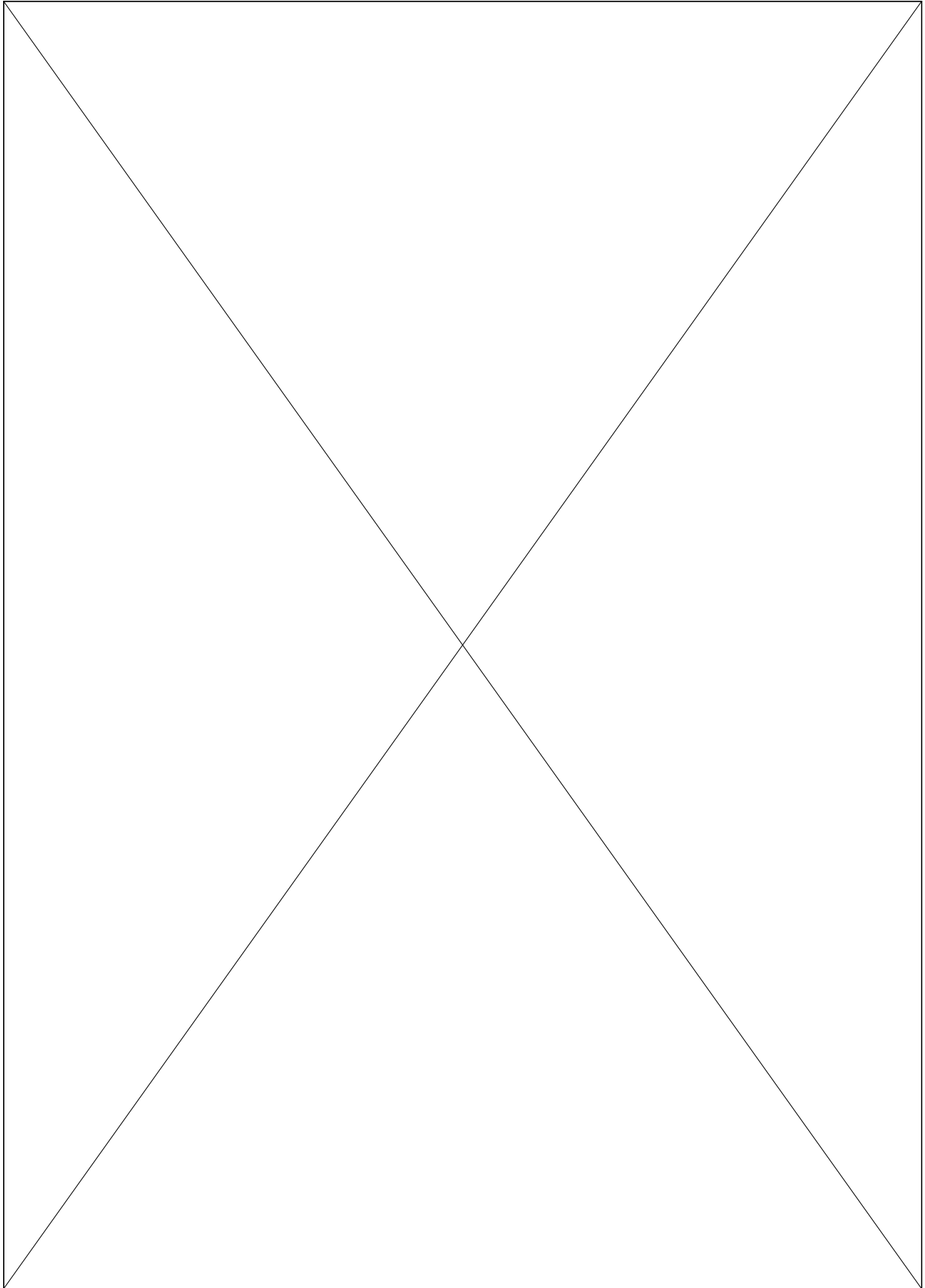


표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비 (3/3)

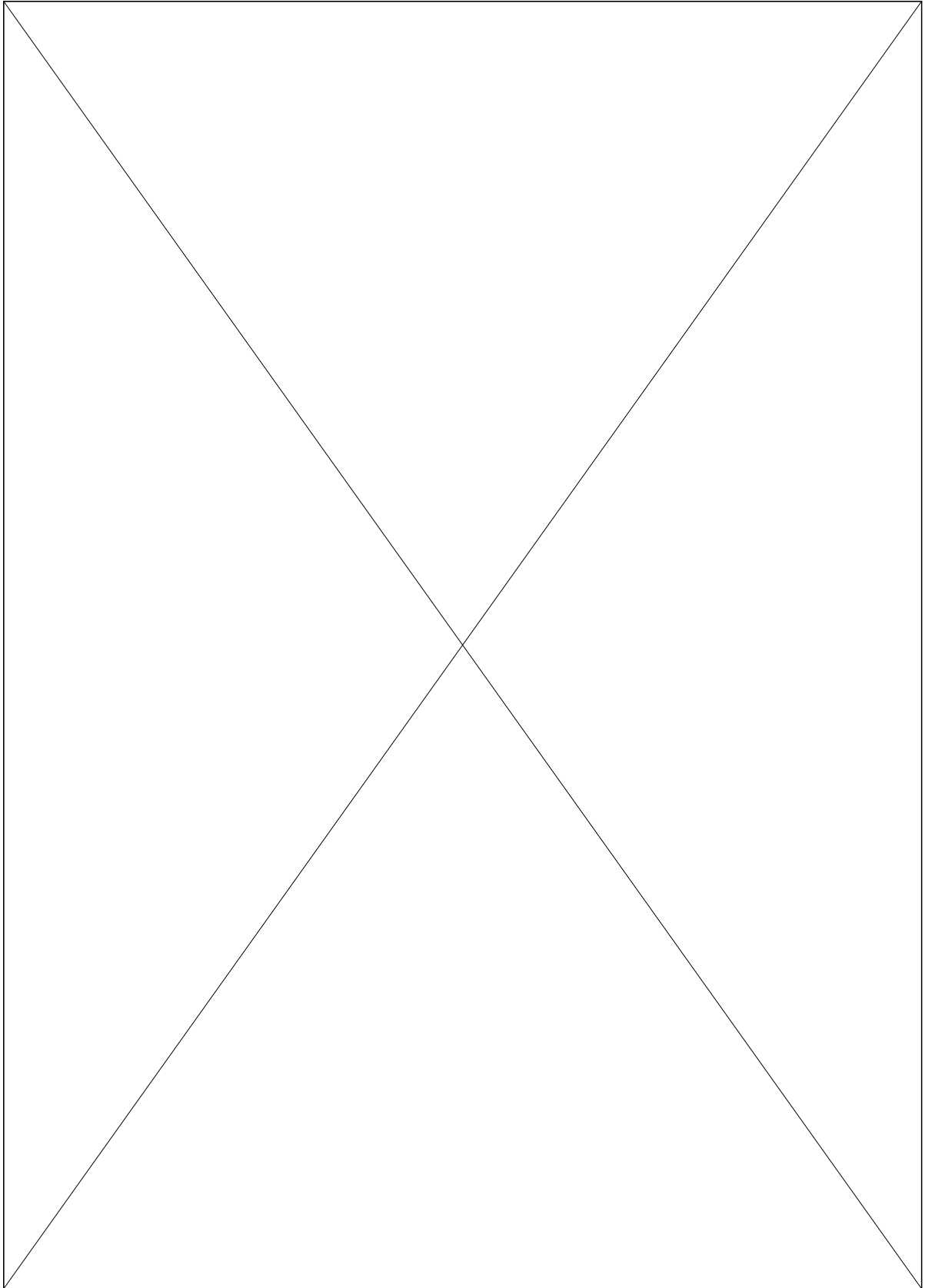


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (1/13)

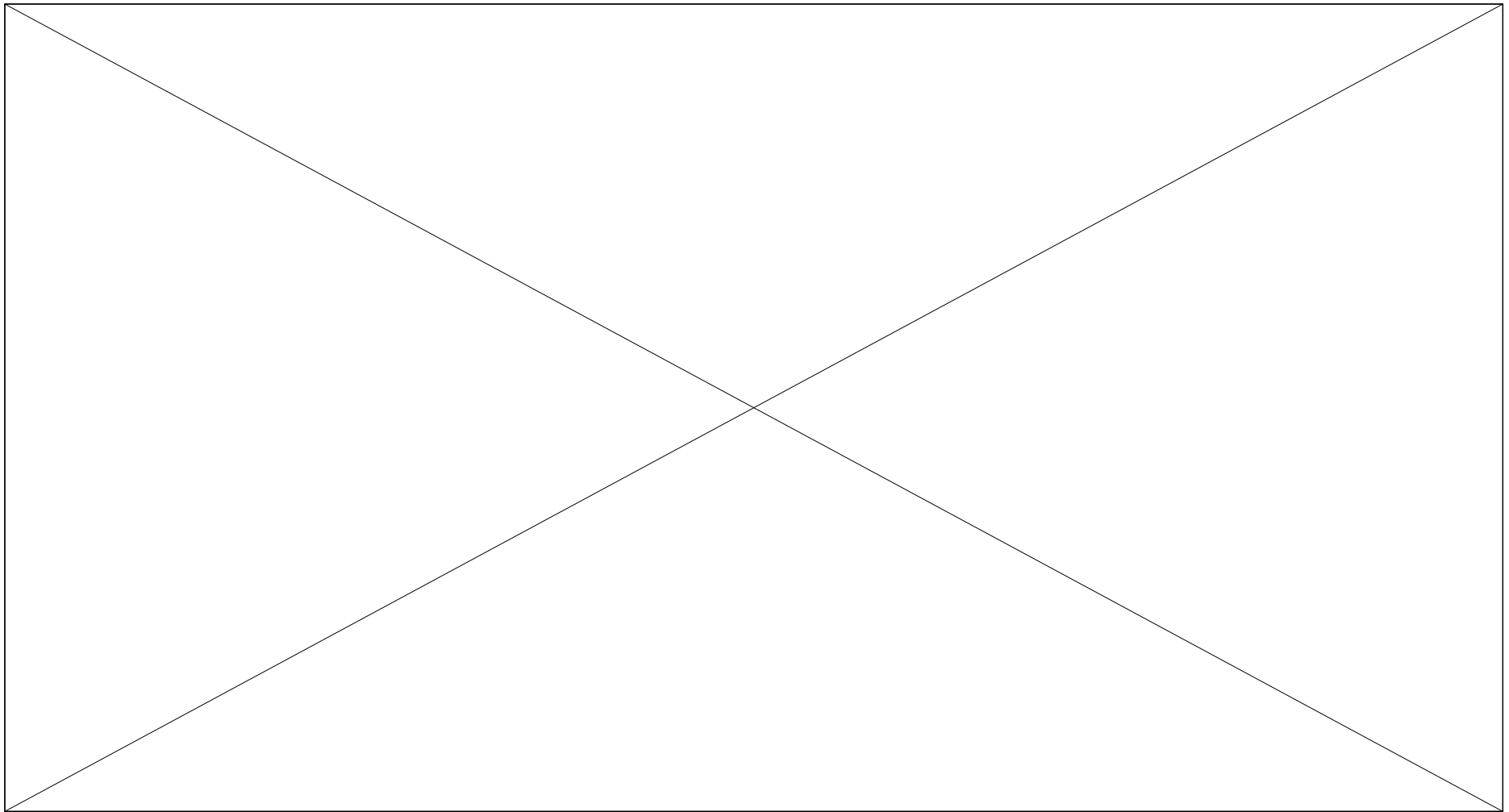


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (2/13)

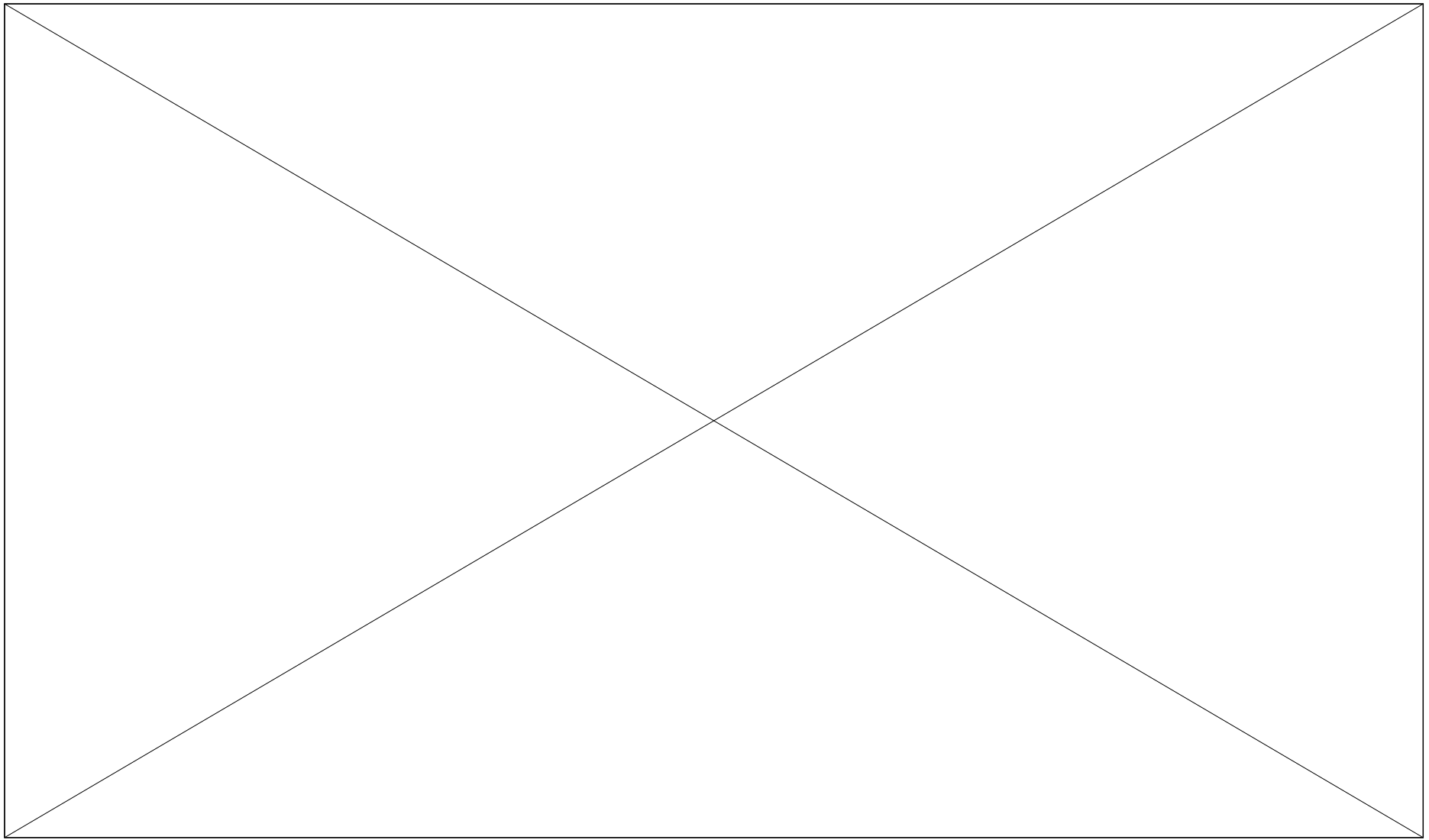


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (3/13)

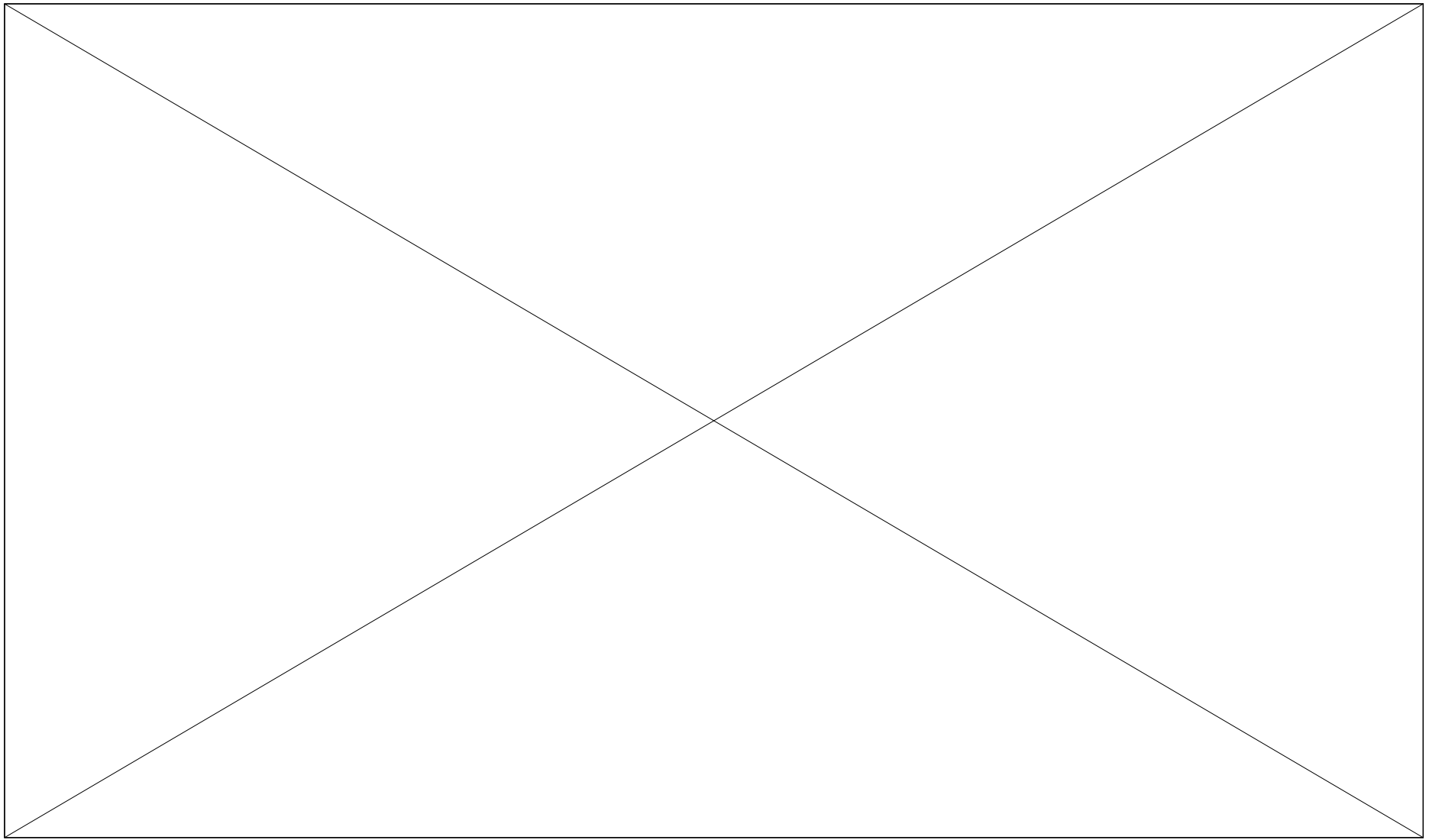


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (4/13)

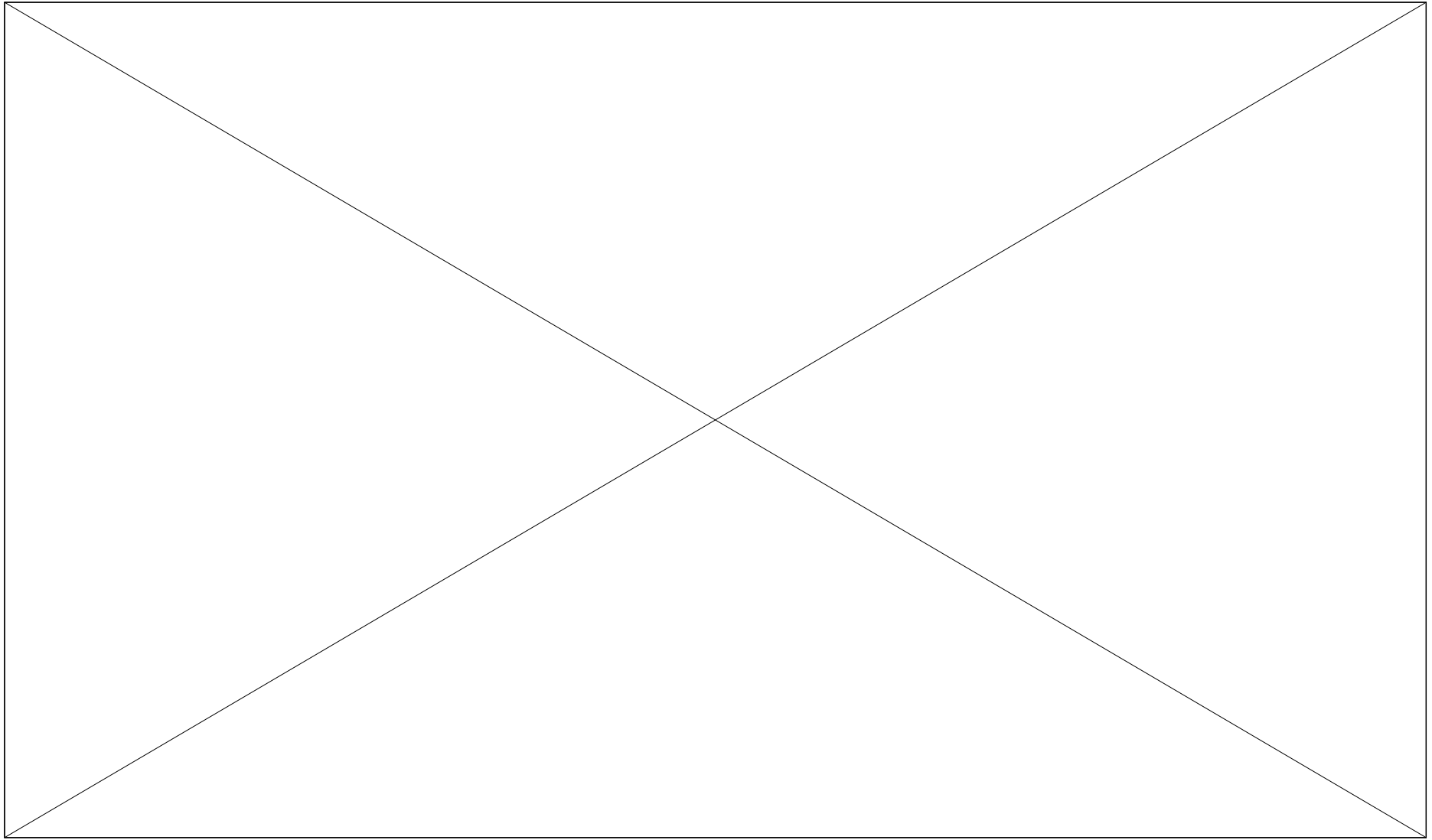


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (5/13)

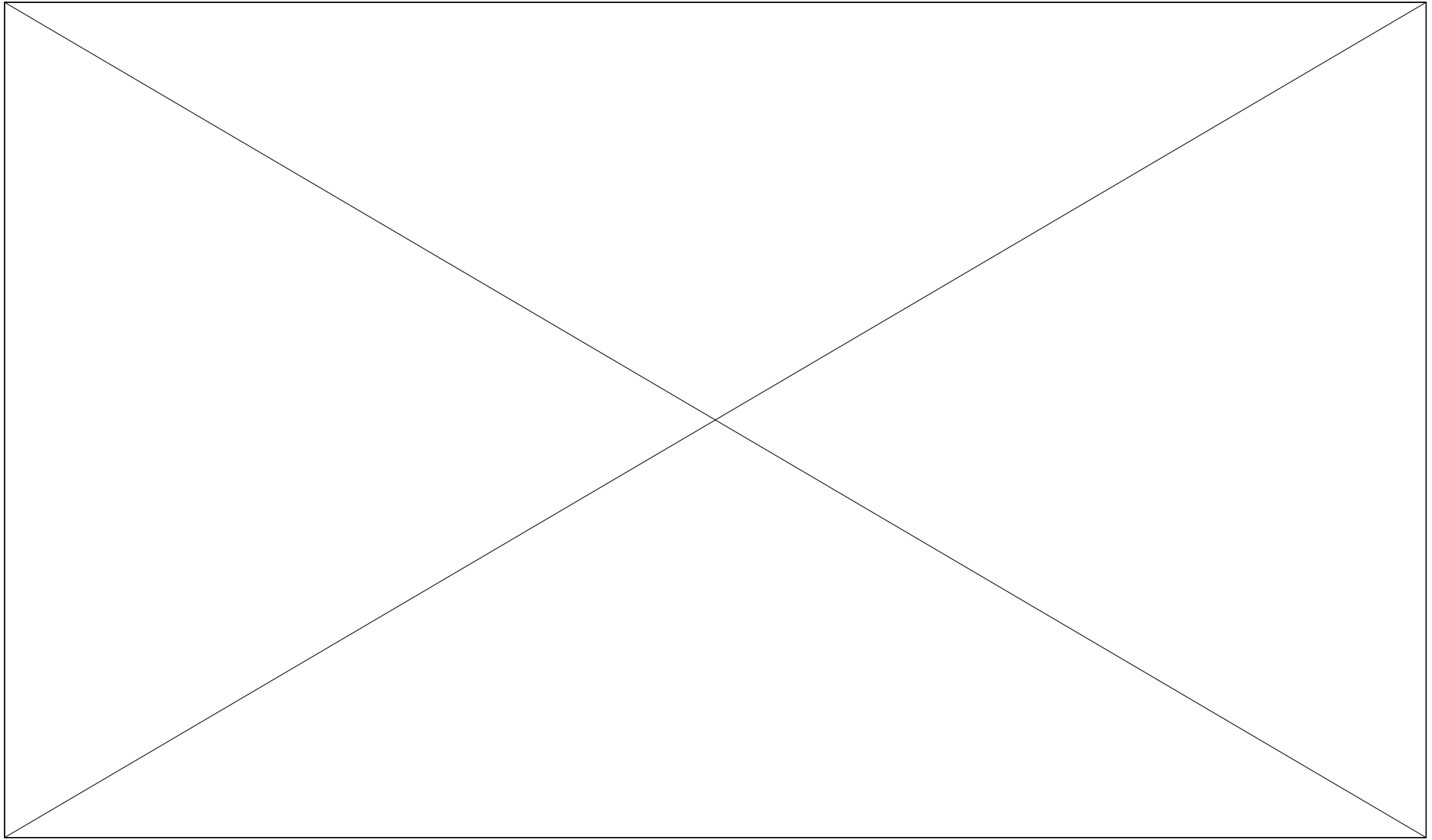


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (6/13)

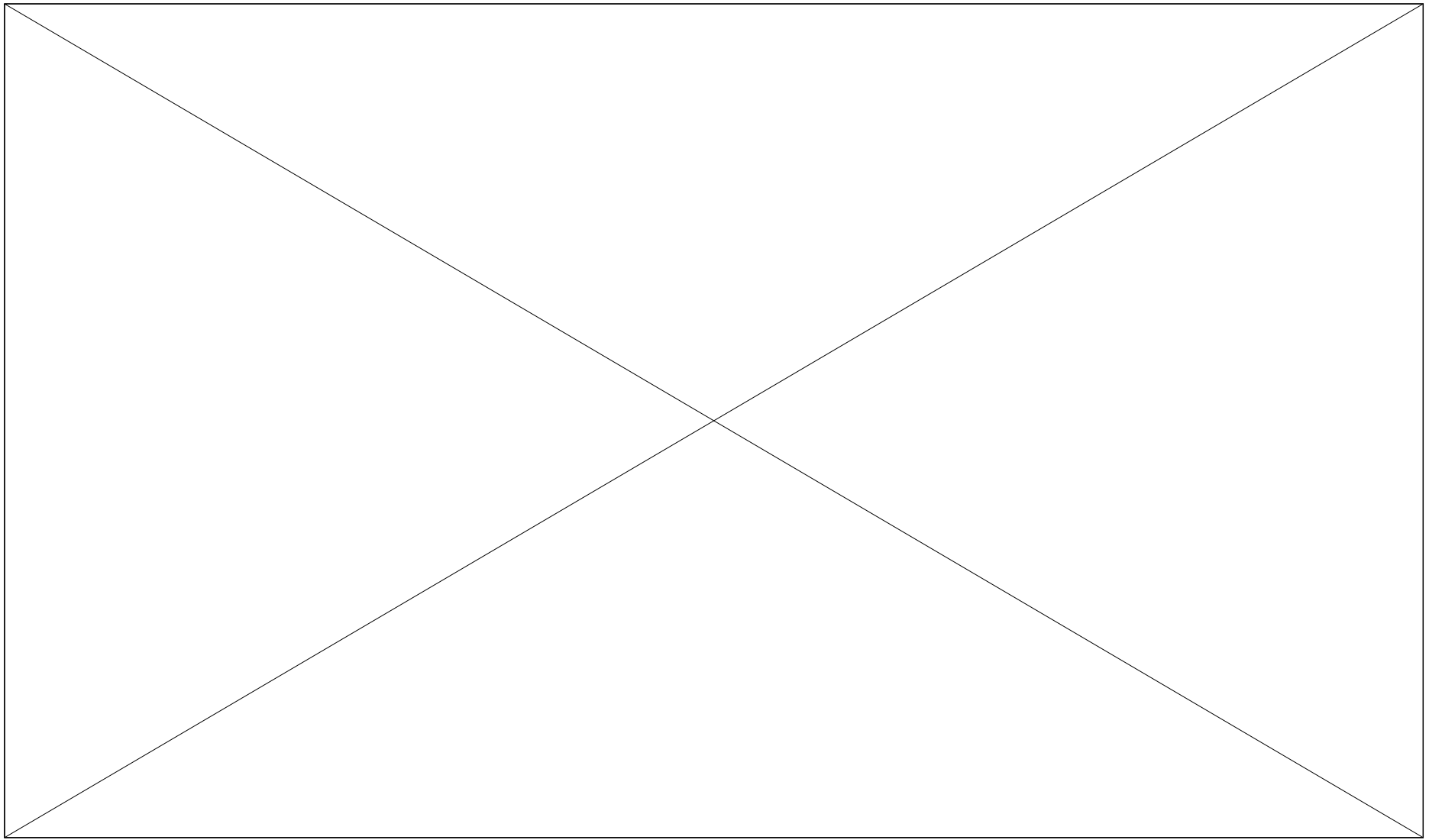


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (7/13)

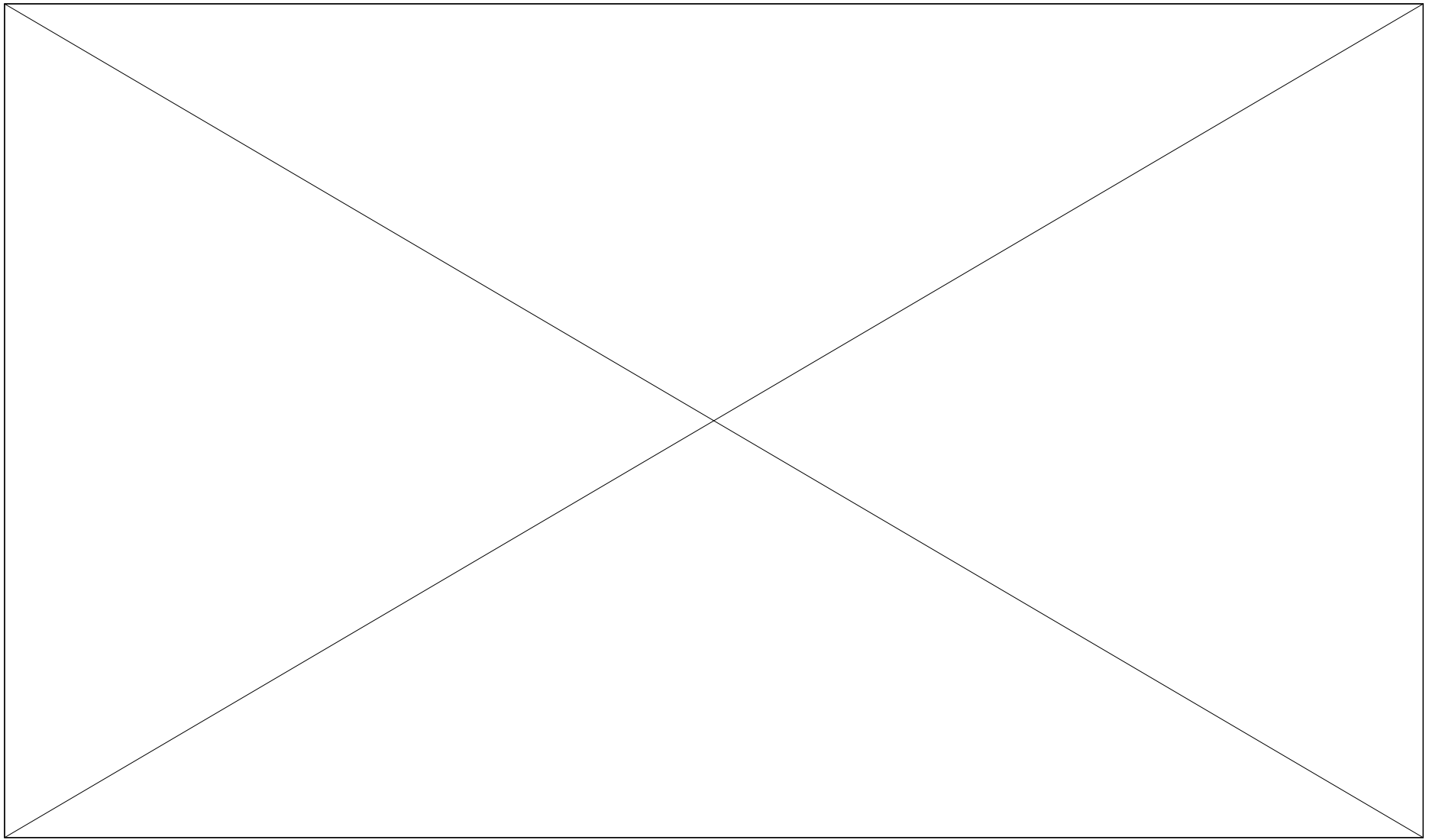


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (8/13)

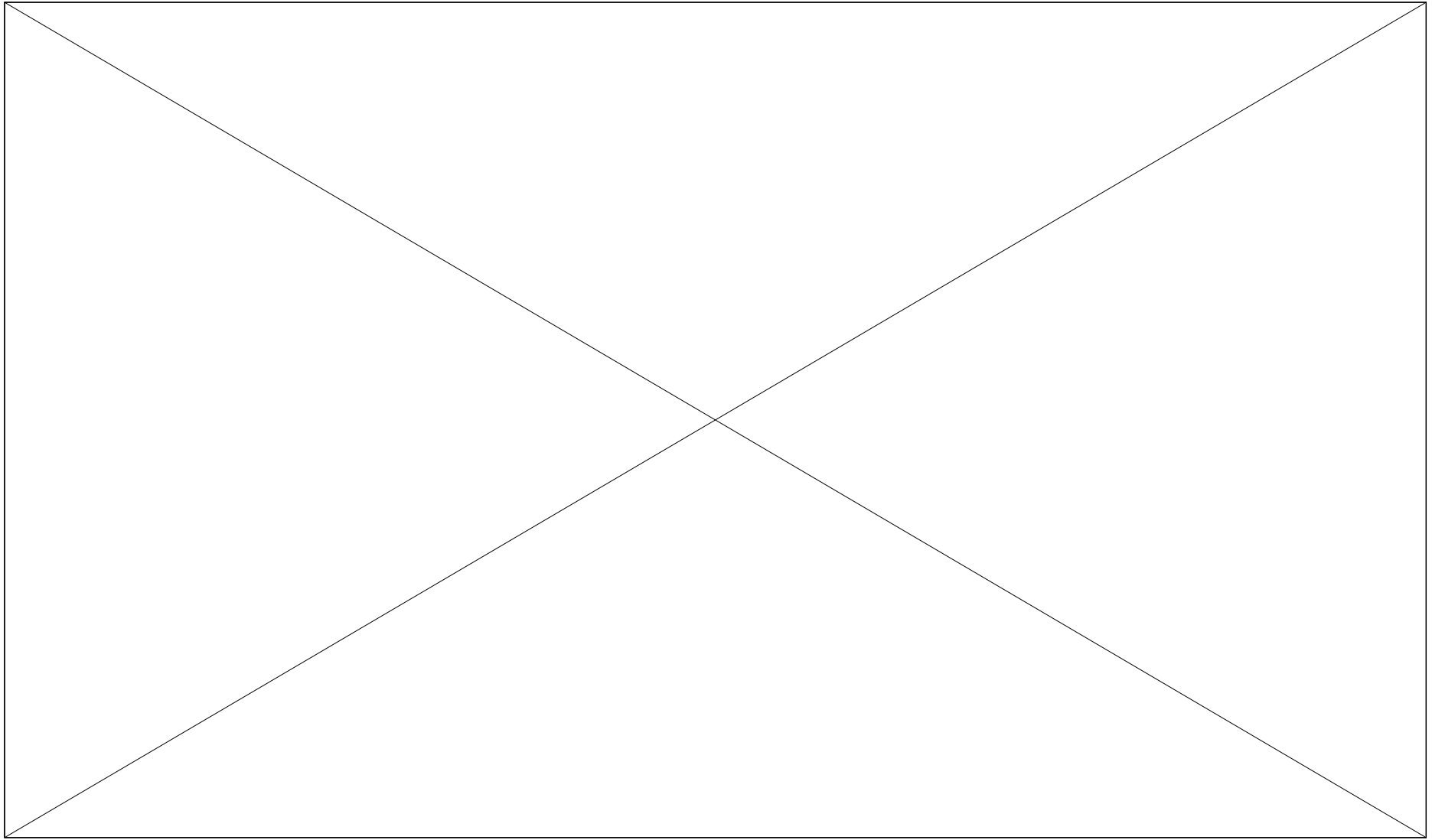


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (9/13)

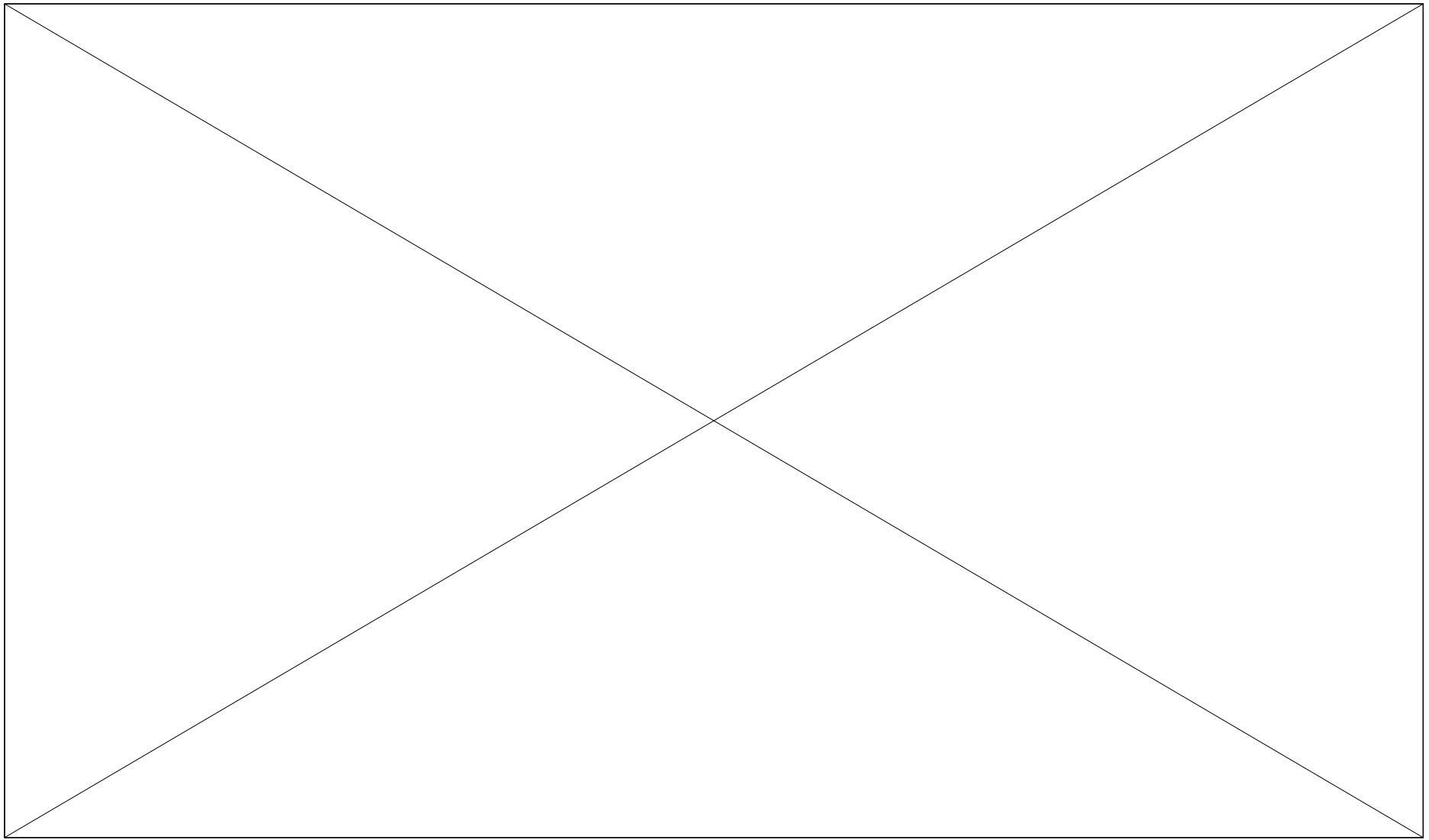


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (10/13)

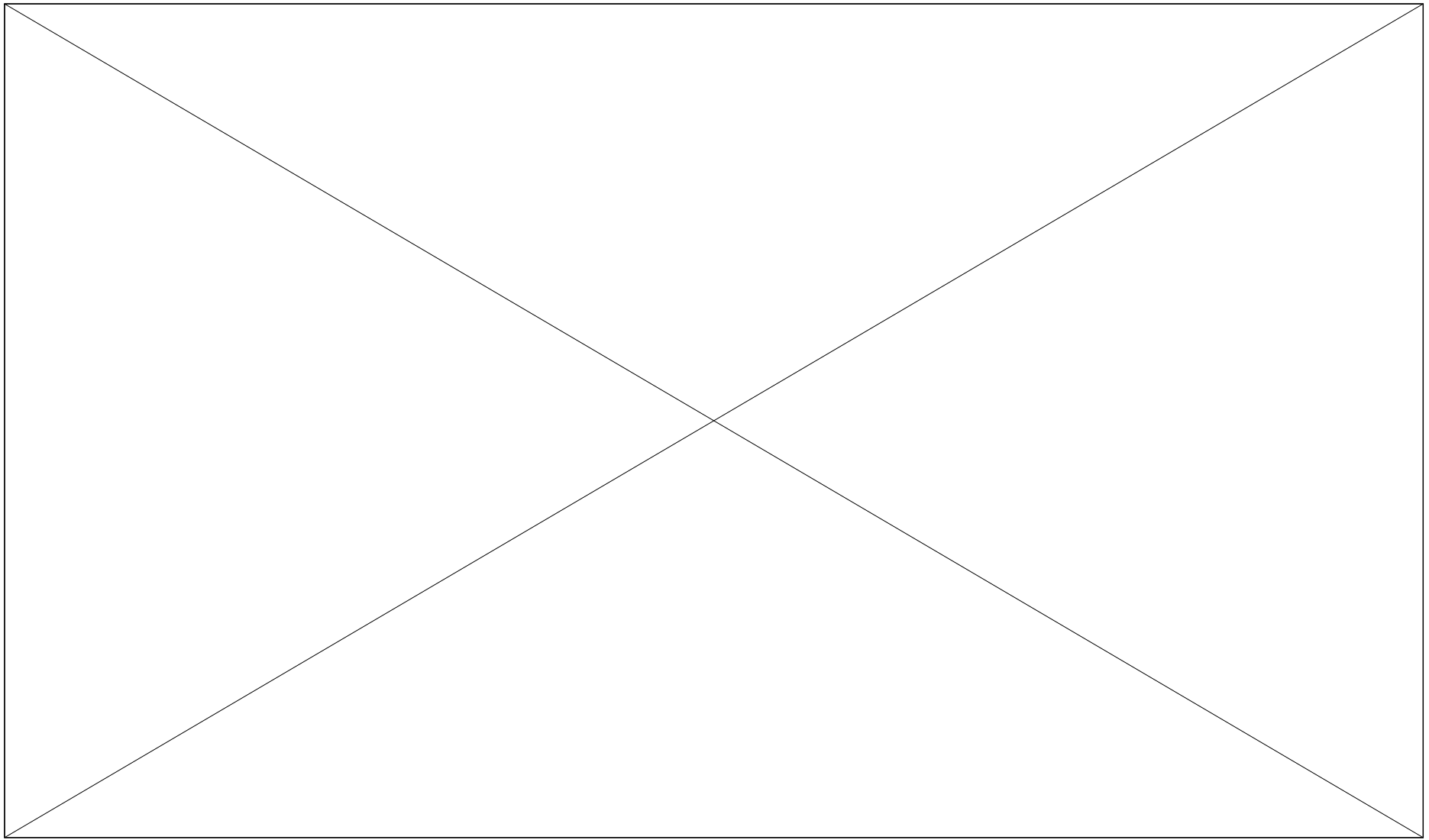


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (11/13)

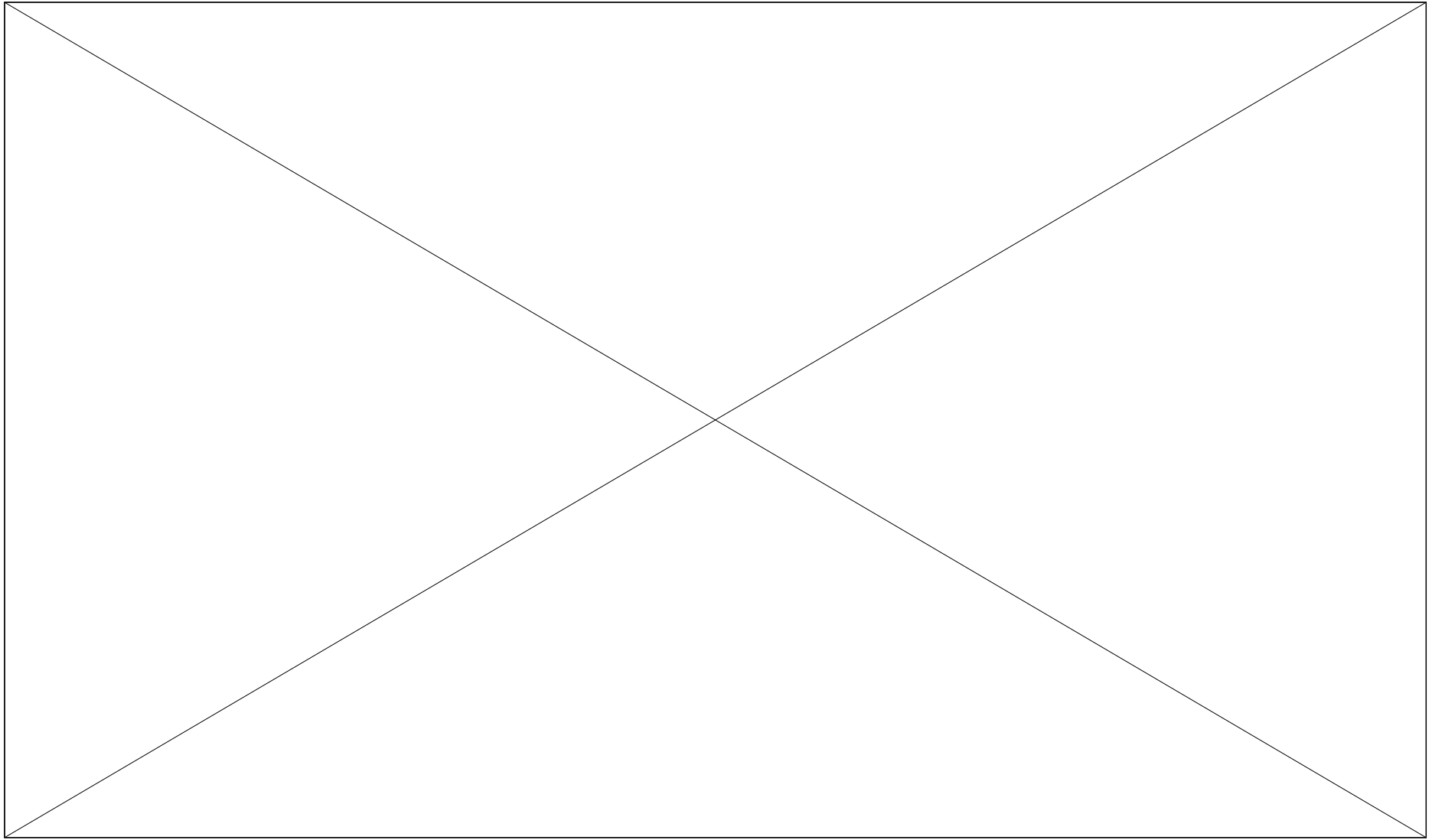


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (12/13)

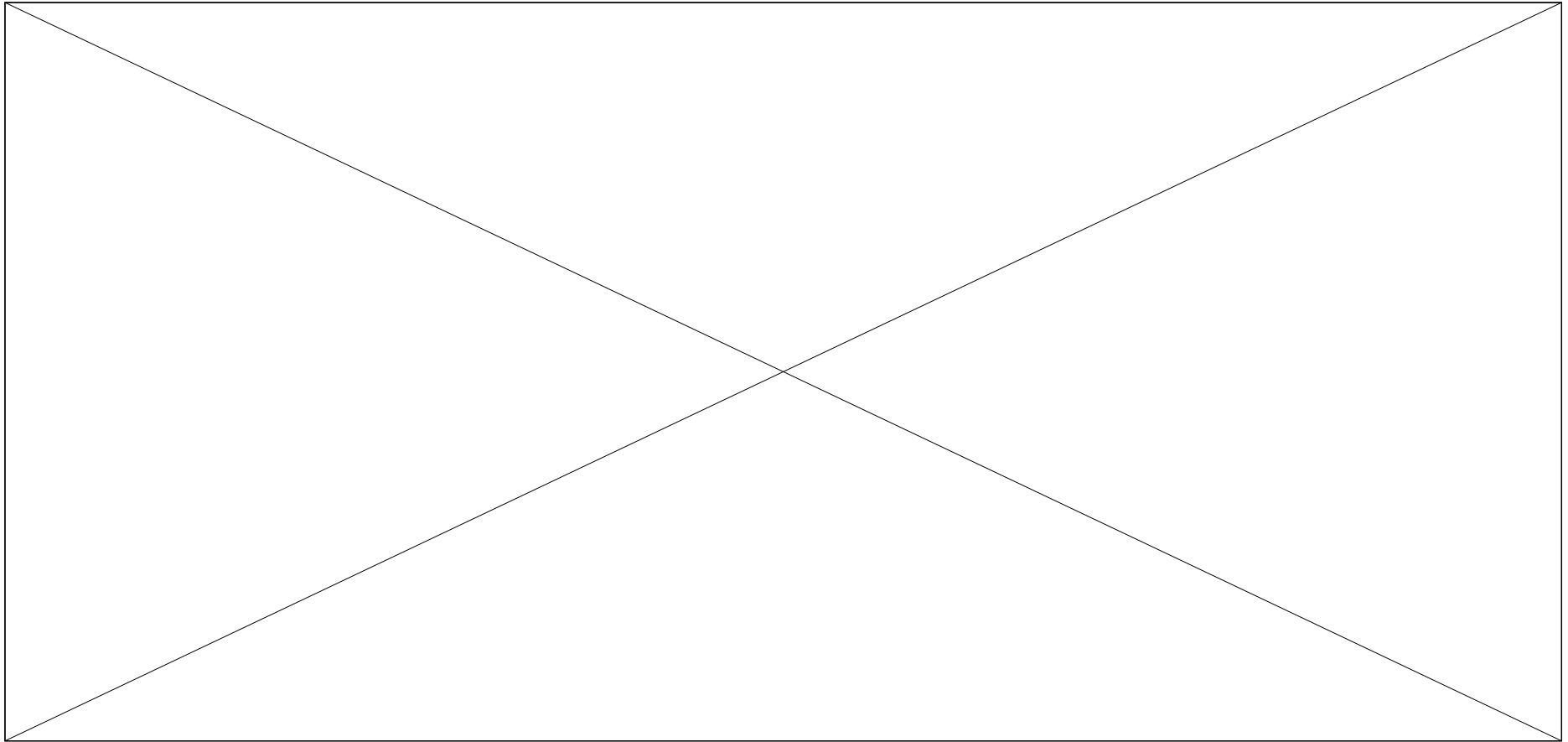


표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 (13/13)

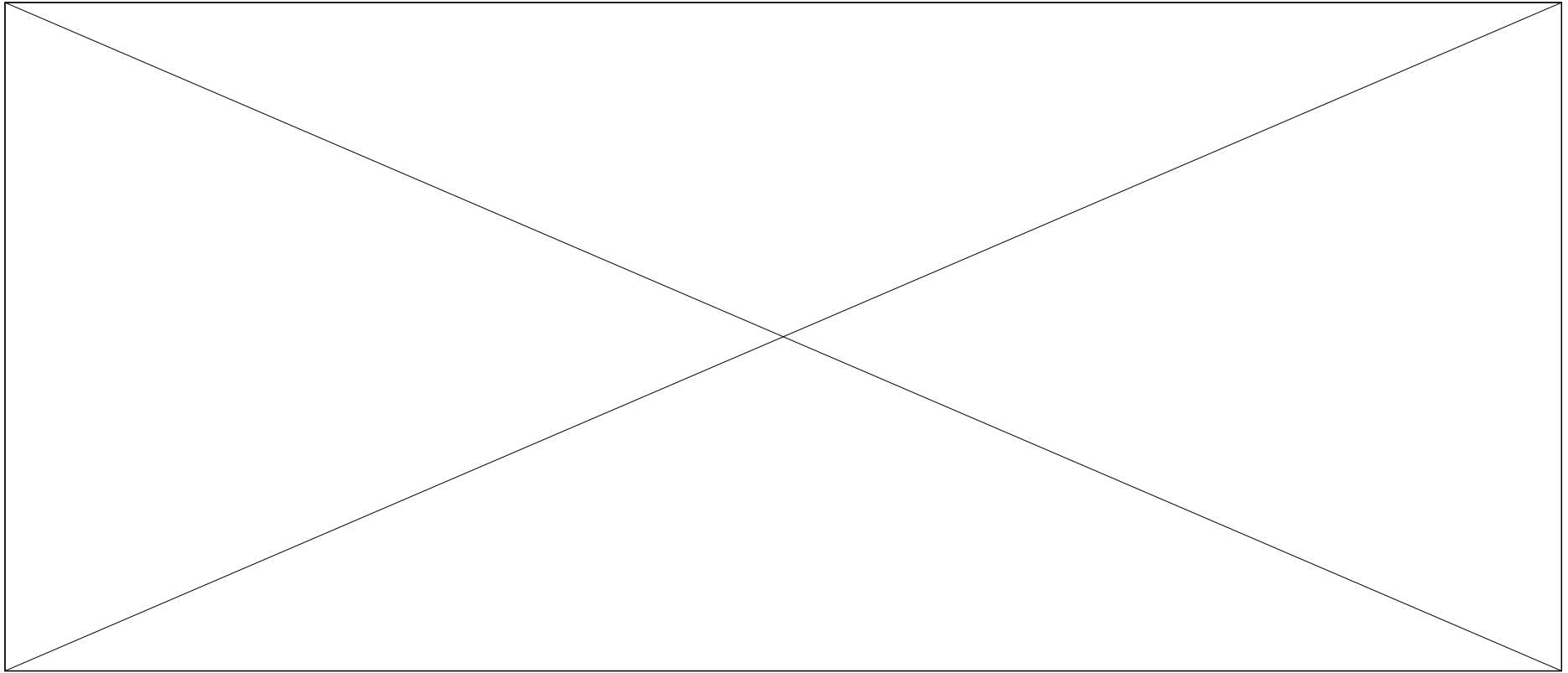


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (1/7)

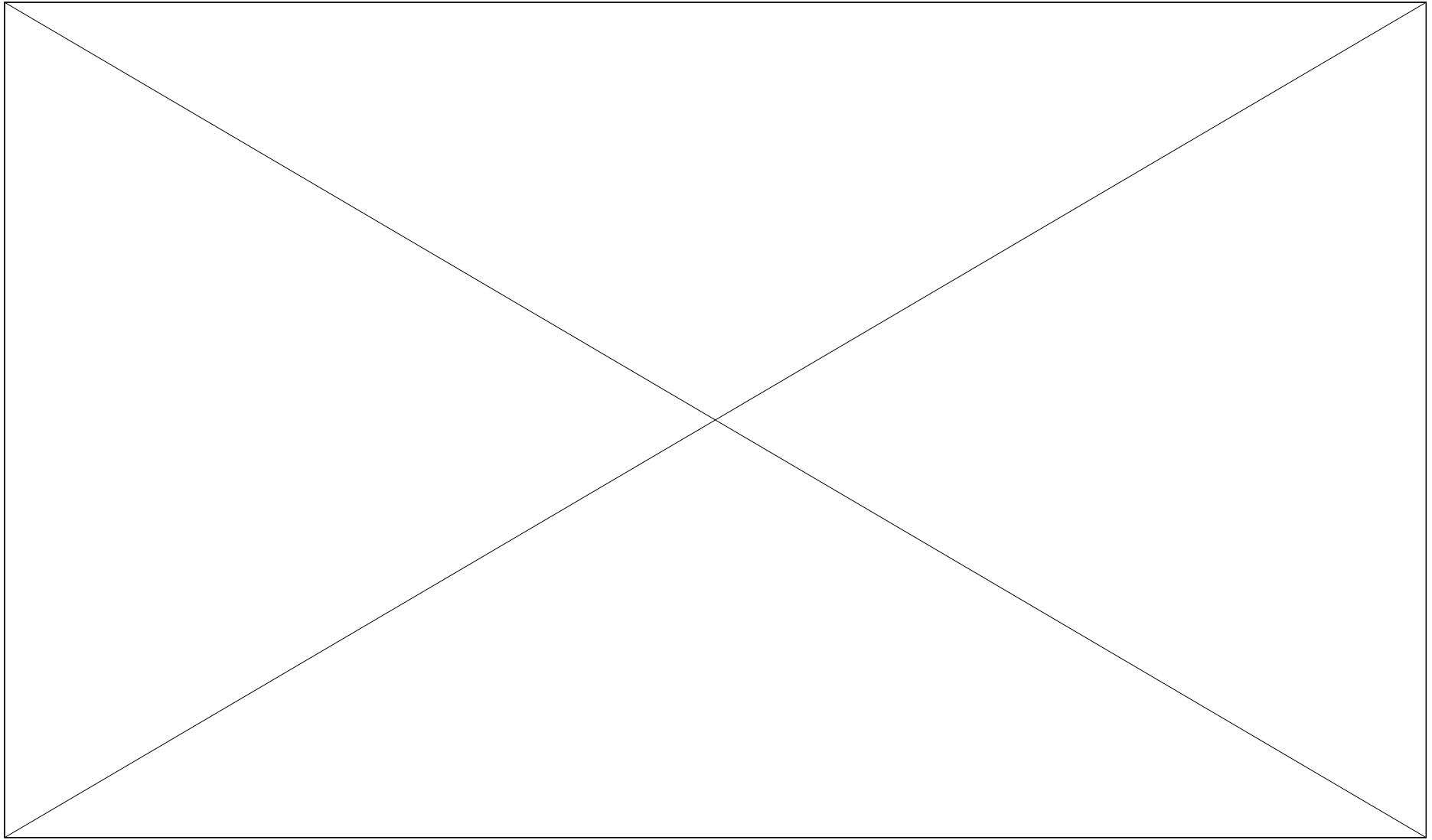


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (2/7)

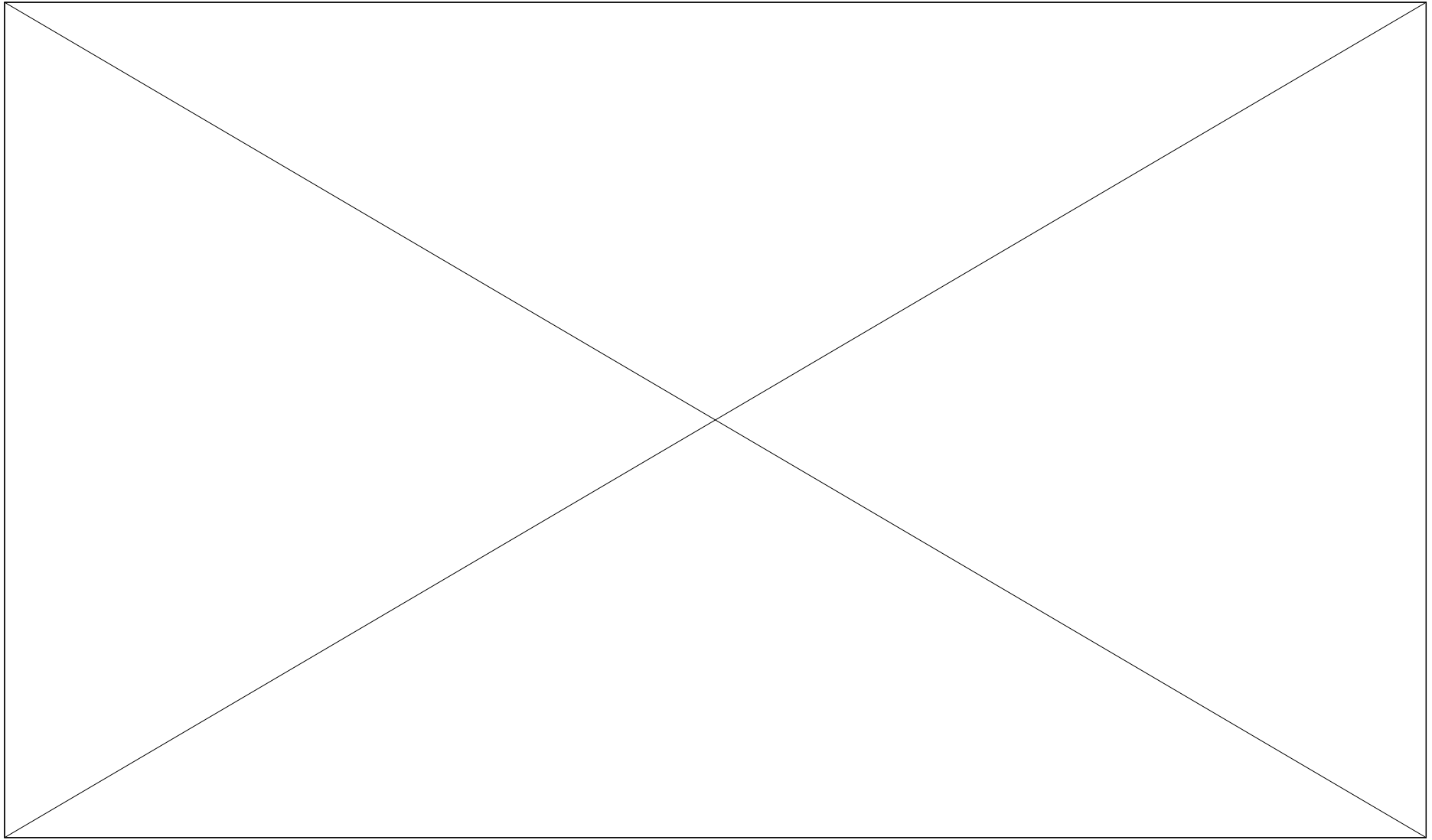


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (3/7)

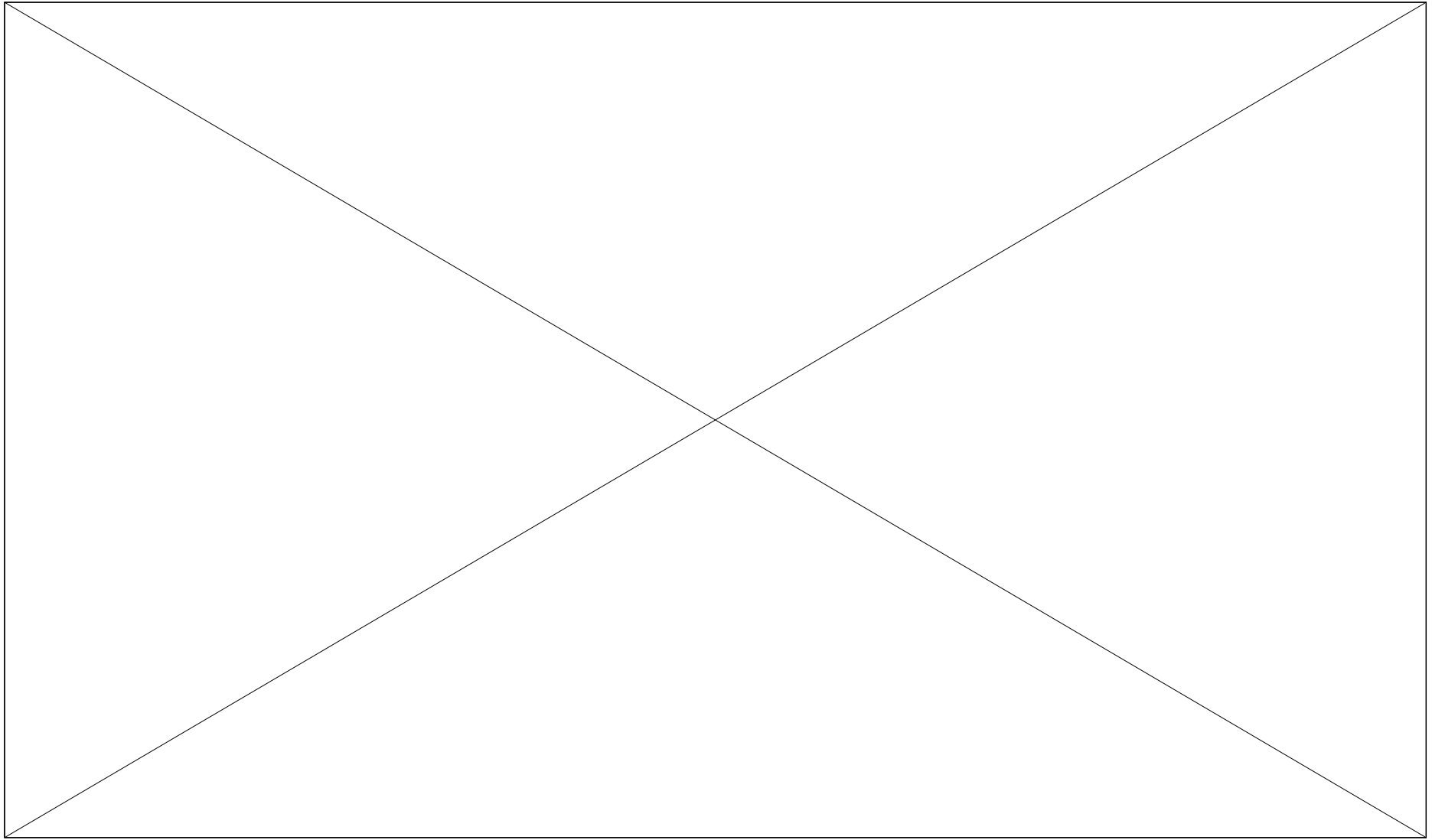


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (4/7)

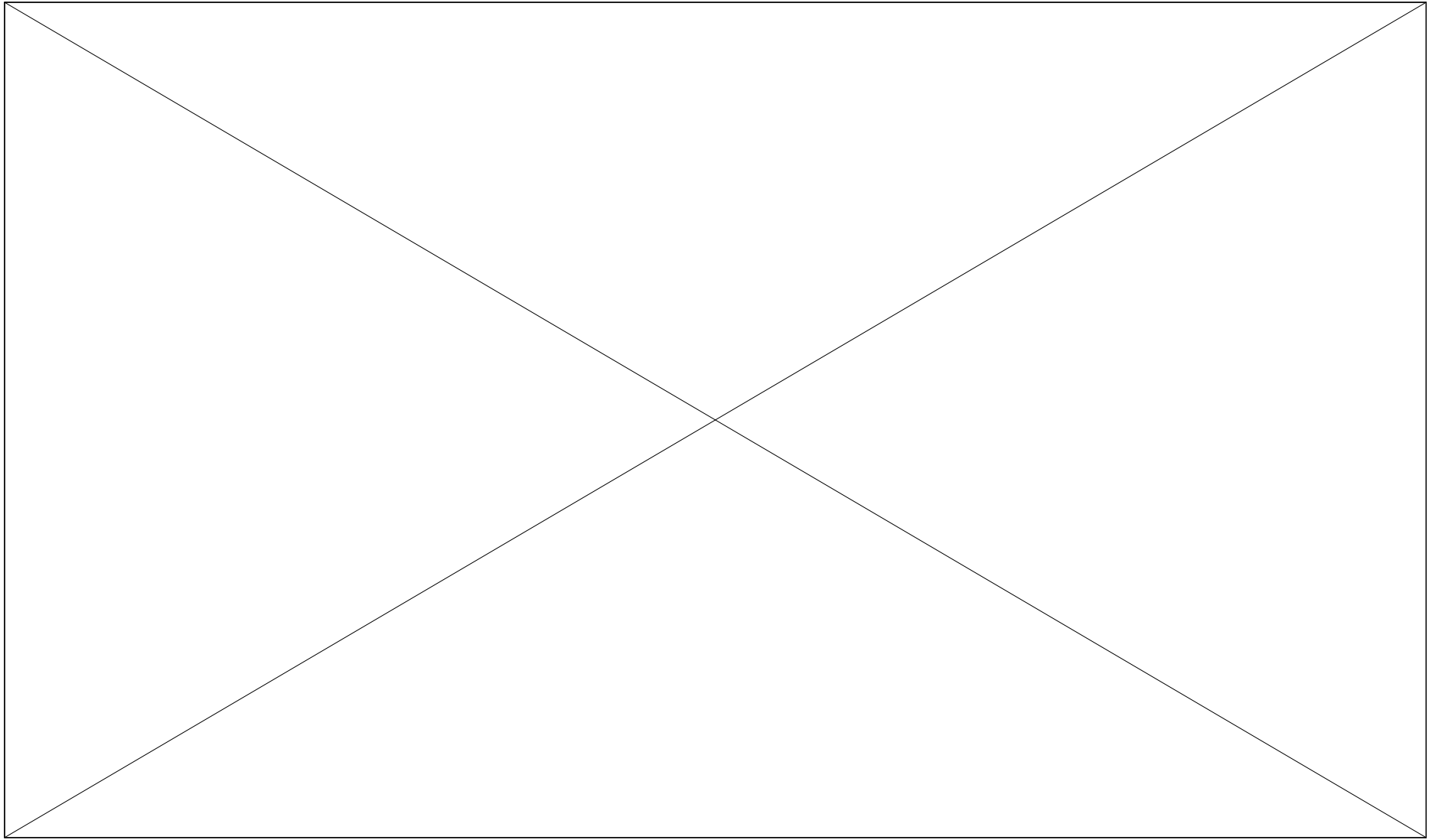


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (5/7)

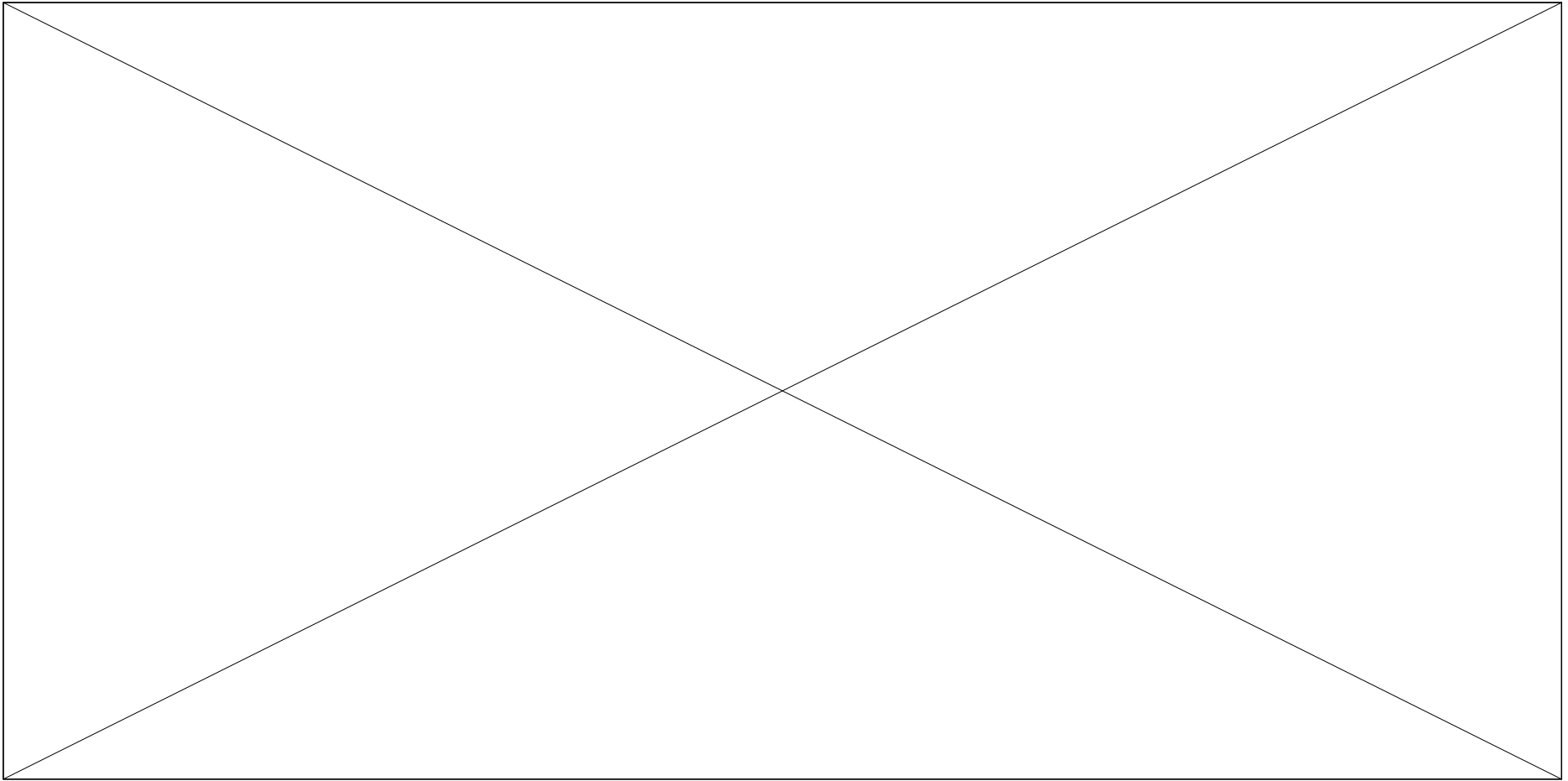


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (6/7)

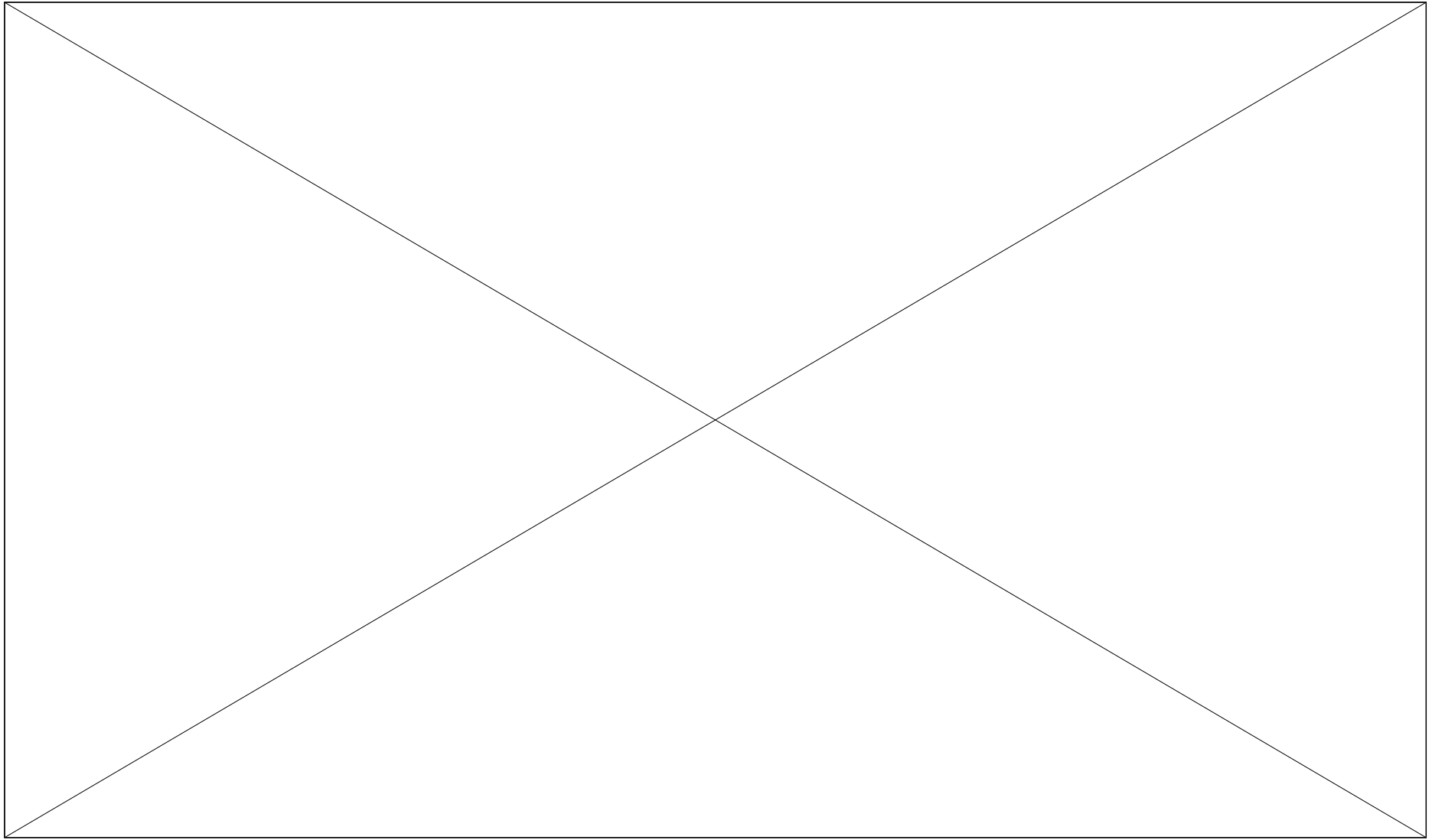


표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 (7/7)

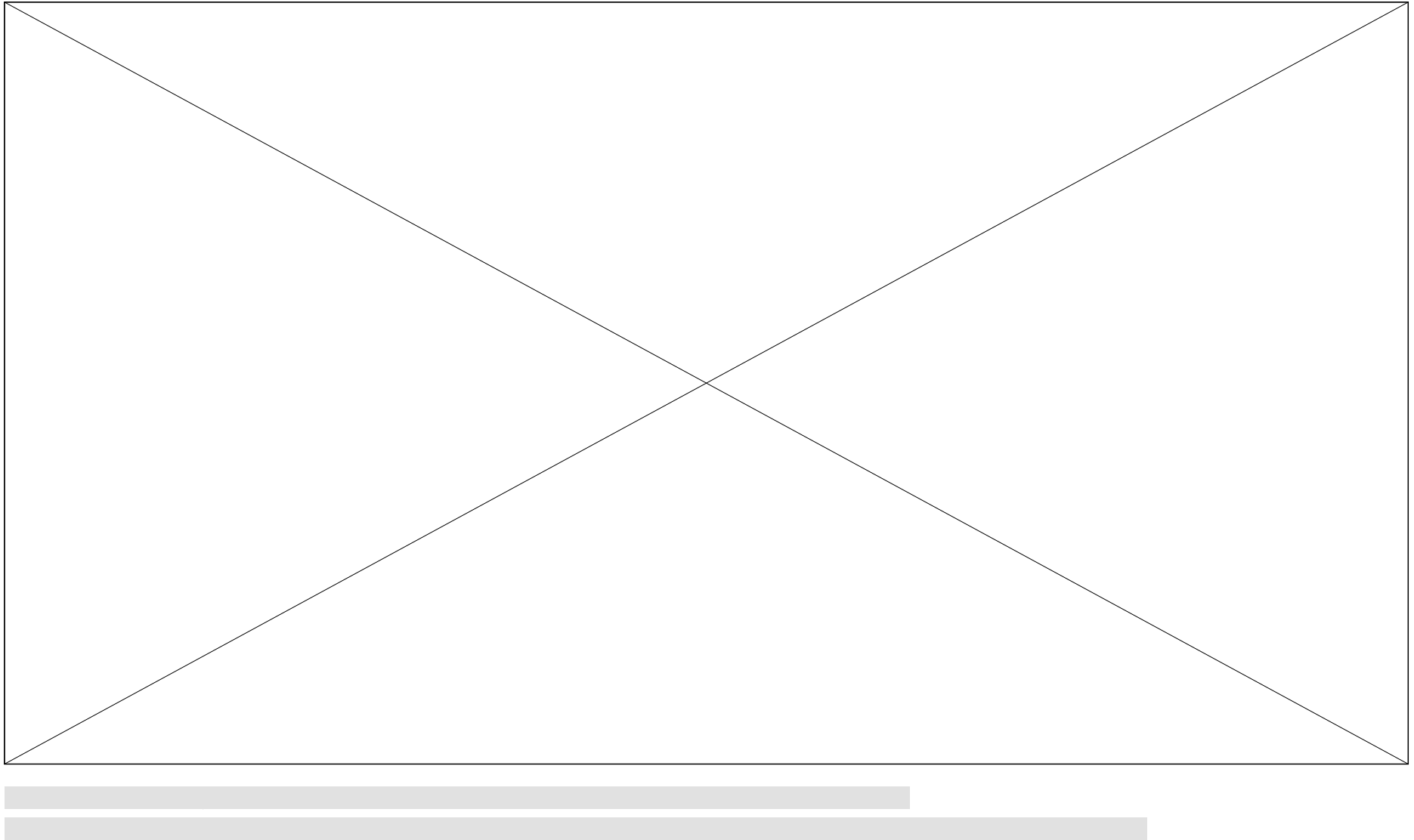


표 5-13 모든 전원 및 열제거원 상실 시 중대사고 진행과정

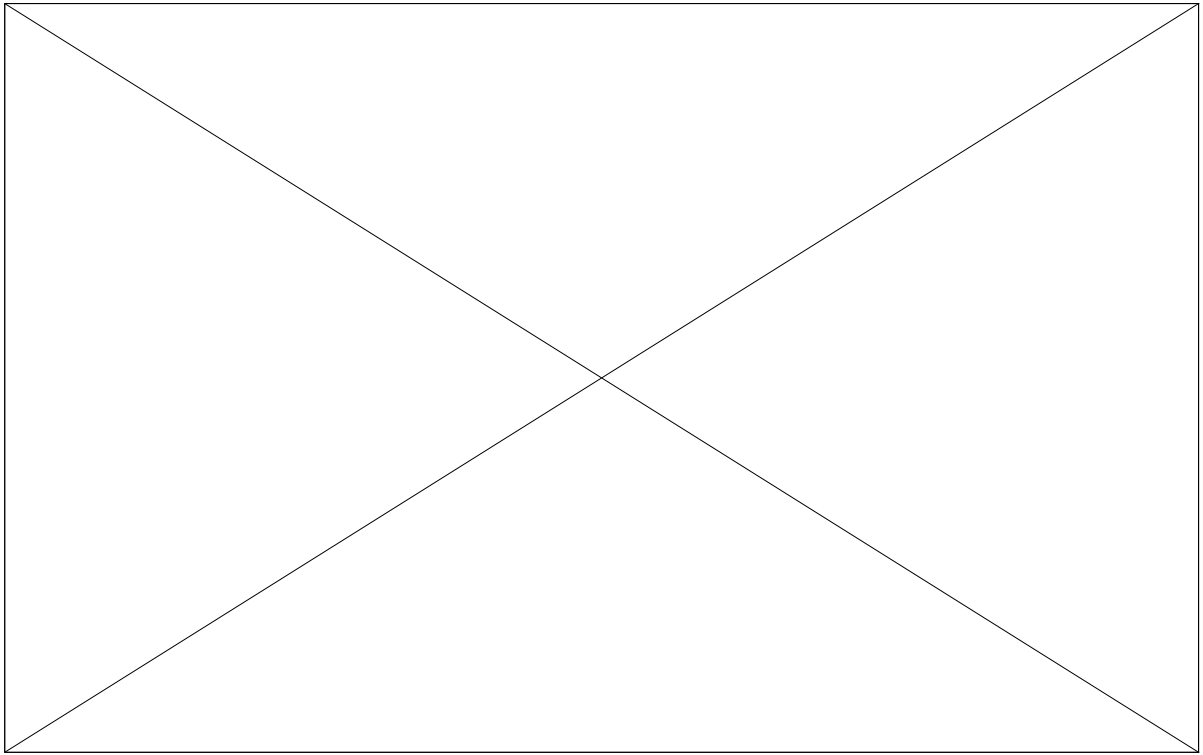


표 5-14 대응능력 한계상황에서의 중대사고 사건 전개

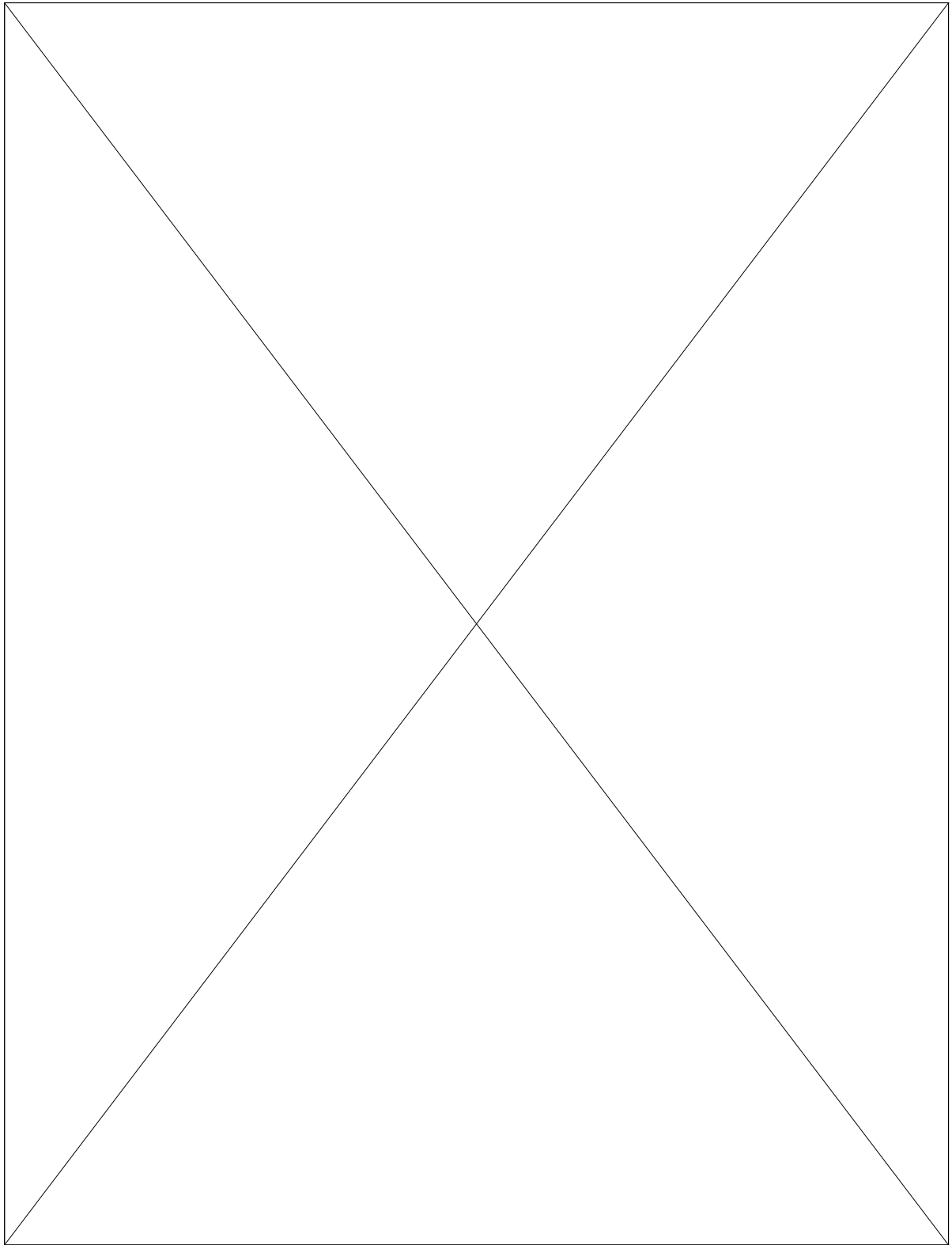


표 5-15 사용후연료저장조 비상충수 운전원 조치시간 평가결과

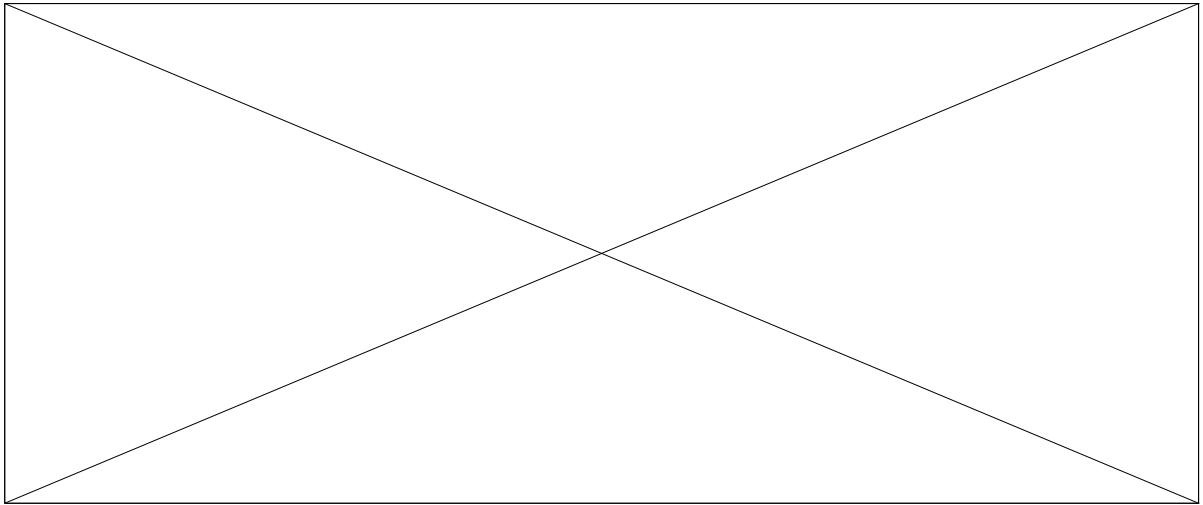


표 5-16 월성1호기 스트레스트 테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

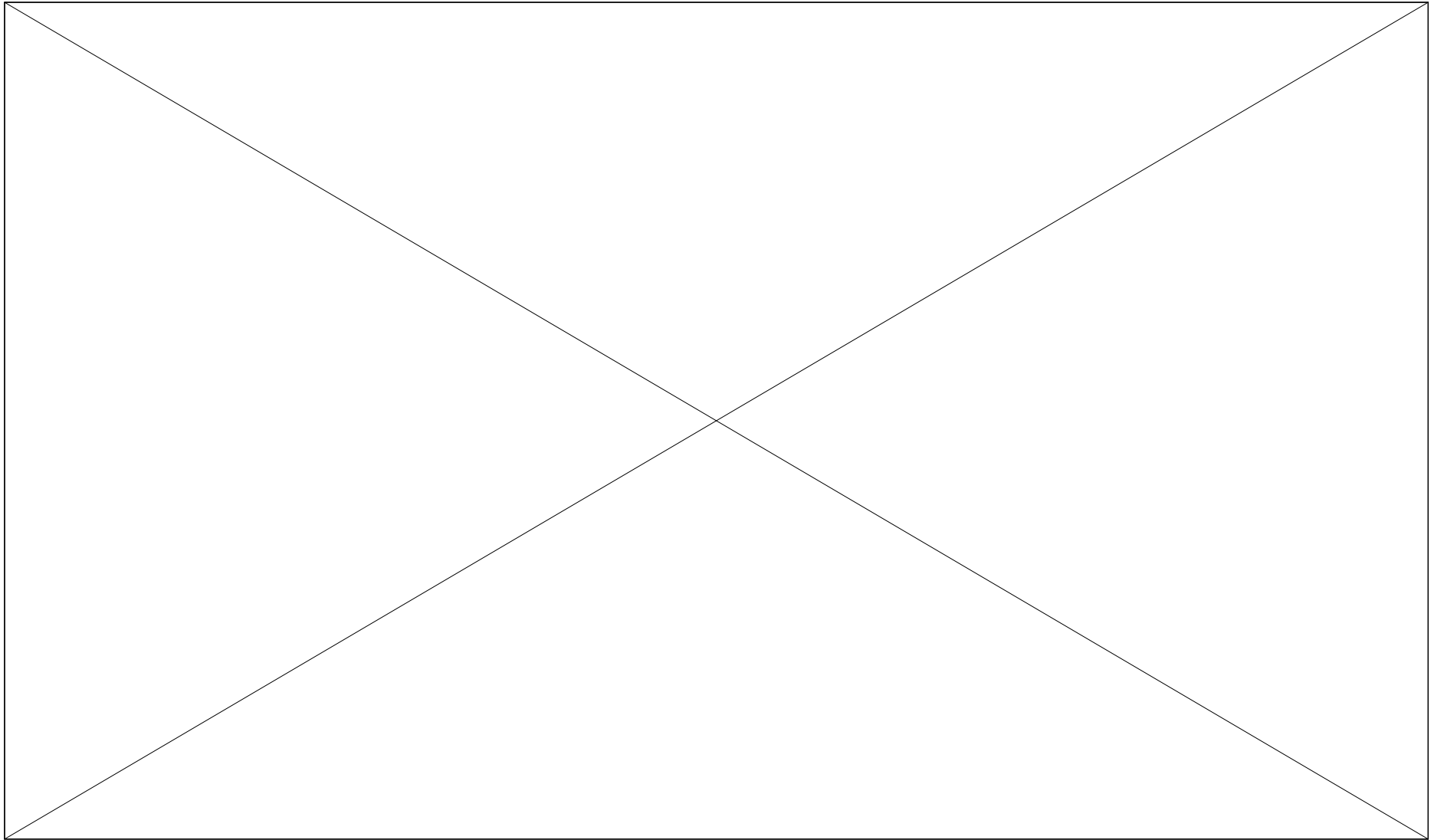
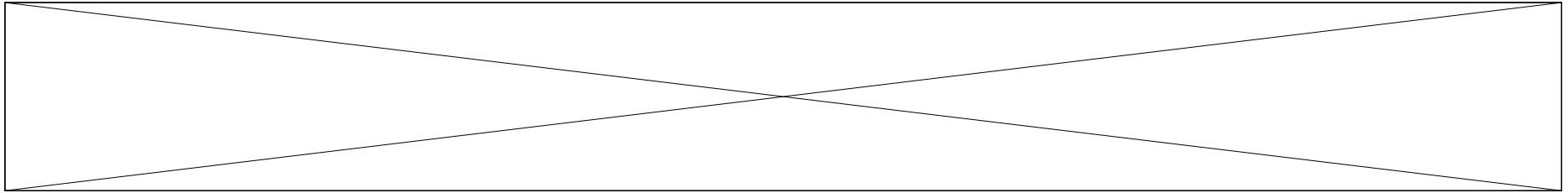


표 5-17 고리1호기 스트레스트 테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목



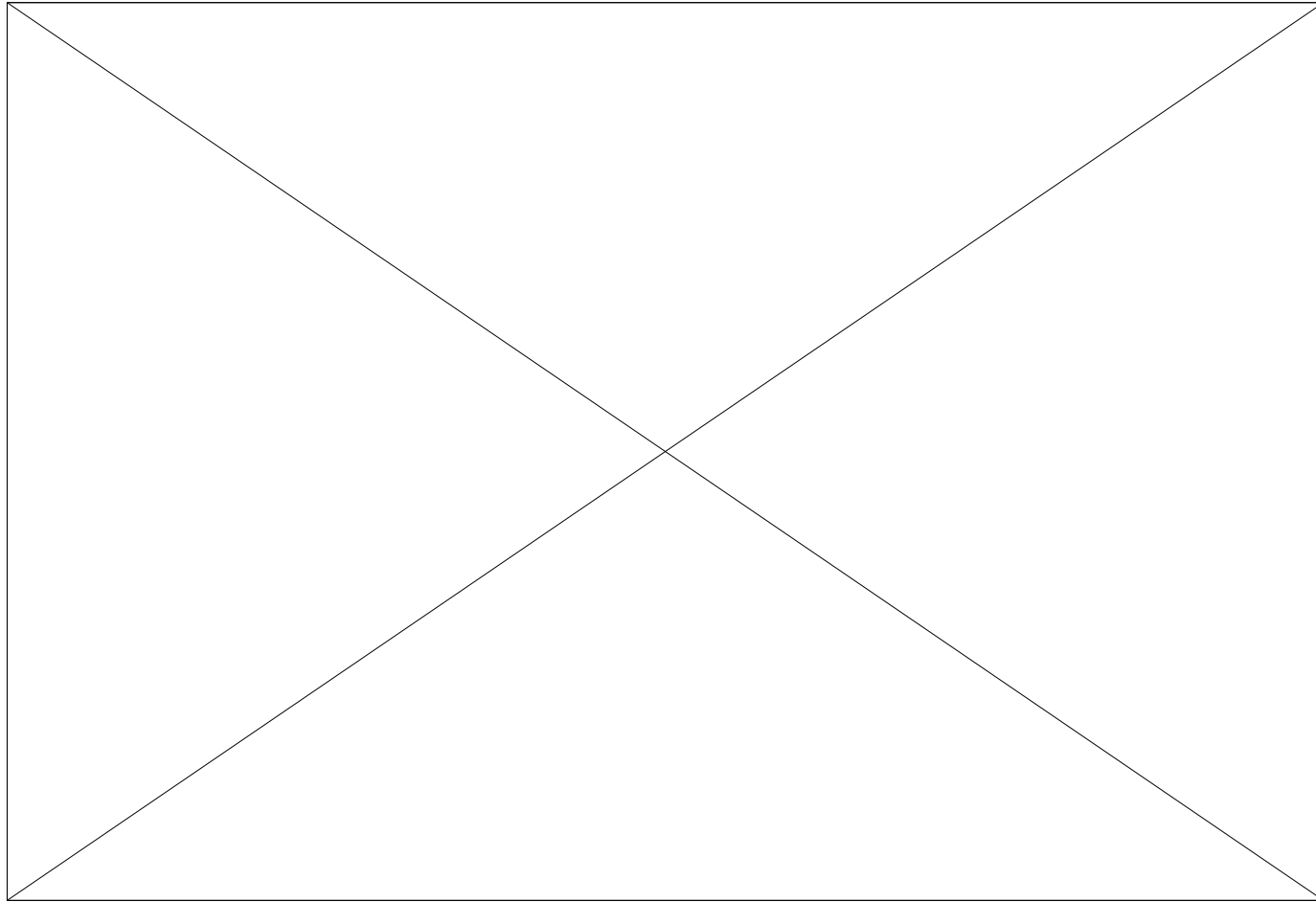


그림 5-1 사용후연료저장조 냉각 계통

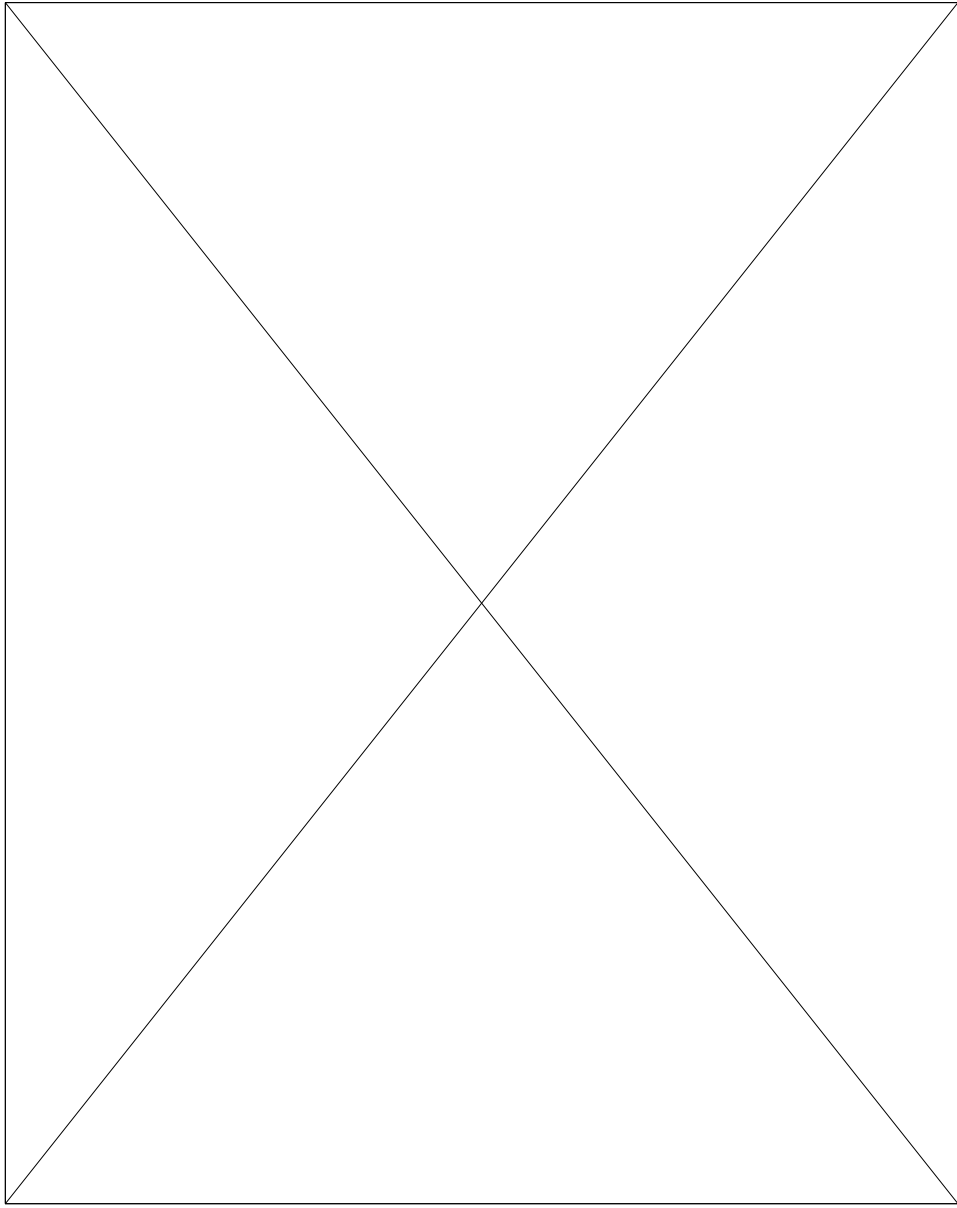


그림 5-2 사용후연료저장조 수위 및 사건전개 이력

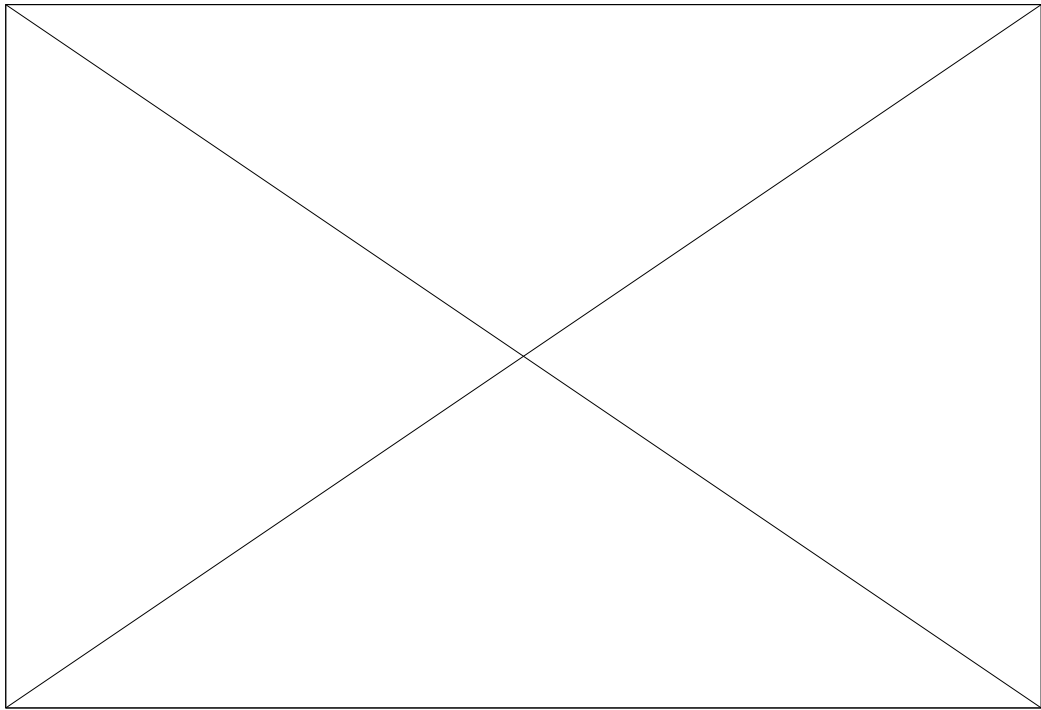


그림 5-3 비상냉각수 외부주입에 따른 노심출구온도 변화

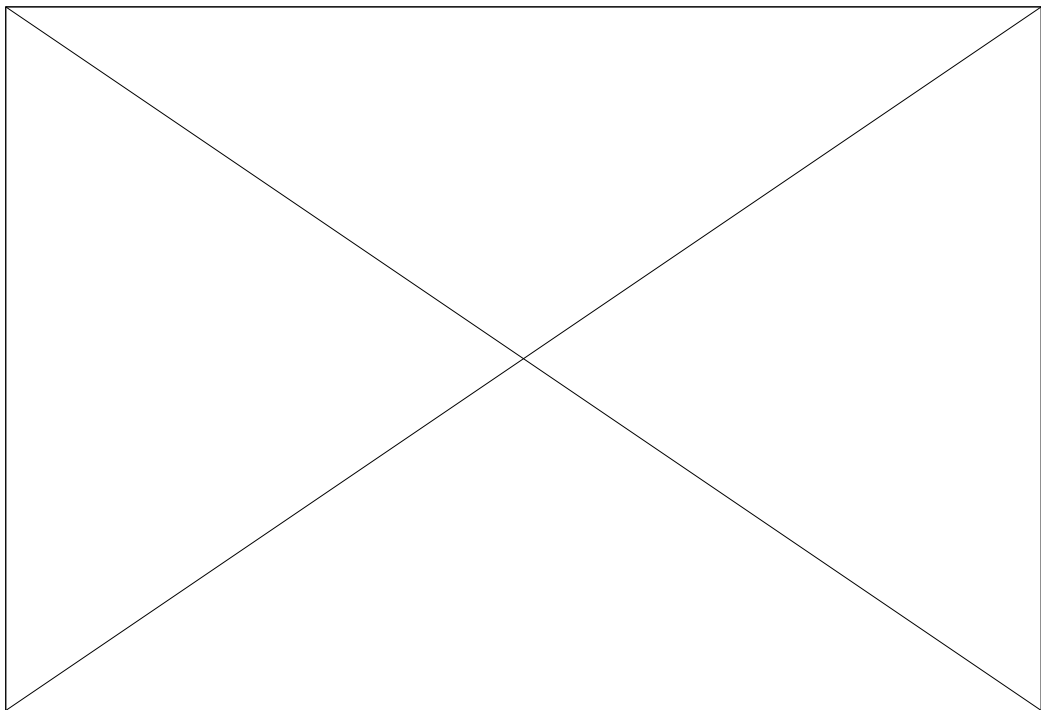


그림 5-4 비상냉각수 외부주입에 따른 격납건물 압력 변화

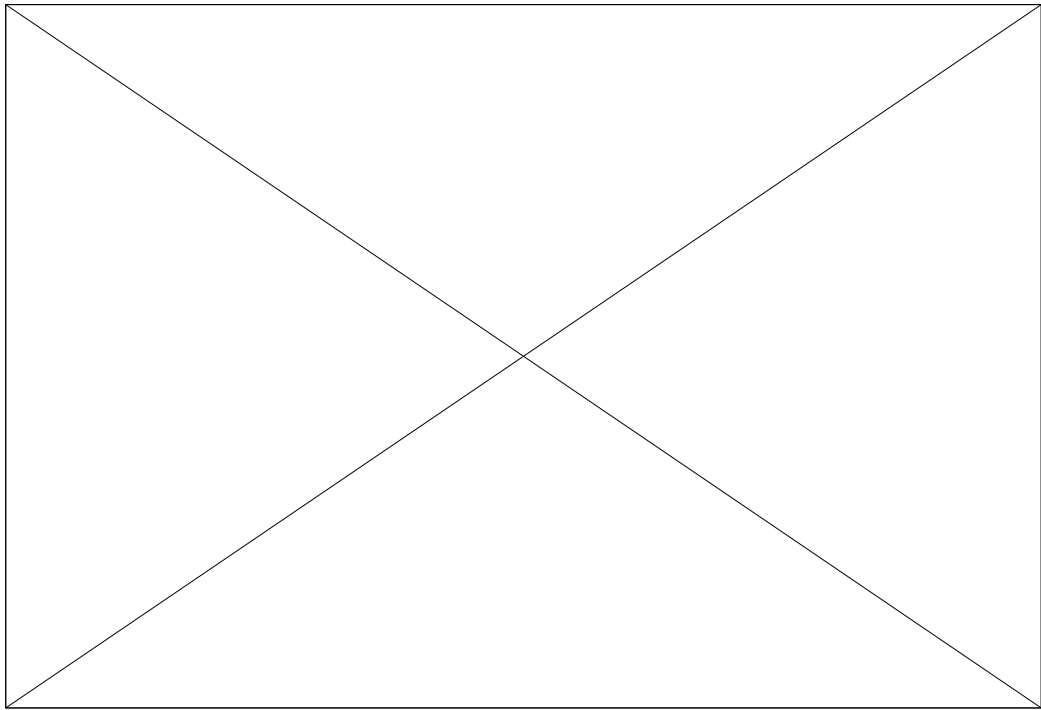


그림 5-5 비상냉각수 외부주입 누적 냉각수량

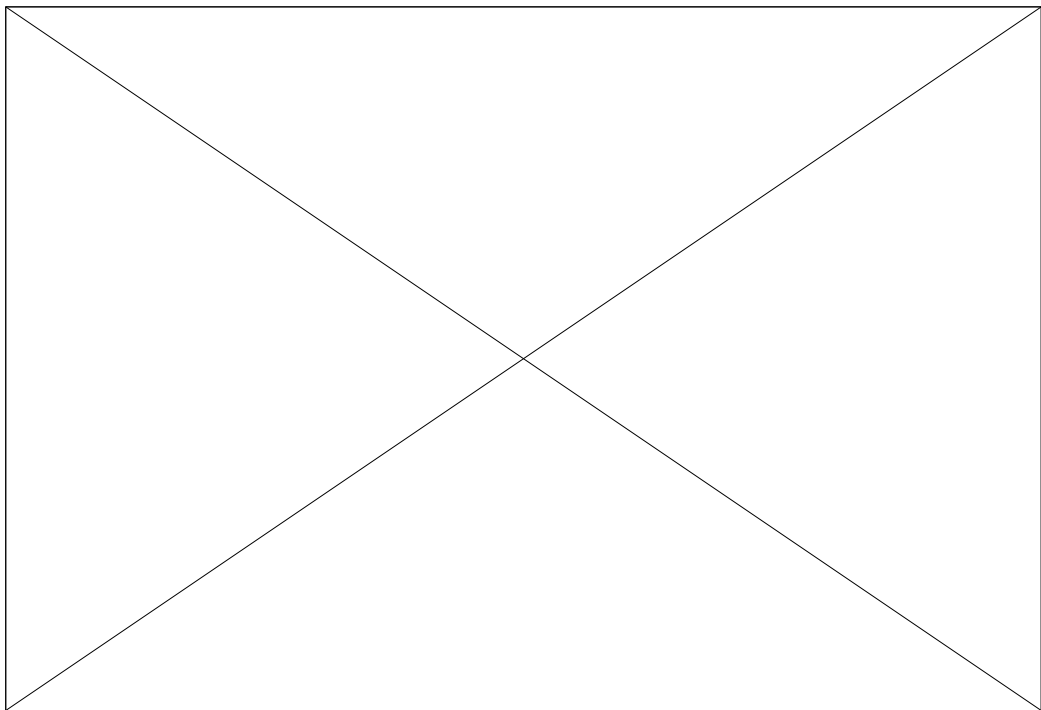


그림 5-6 이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 노심출구온도 변화

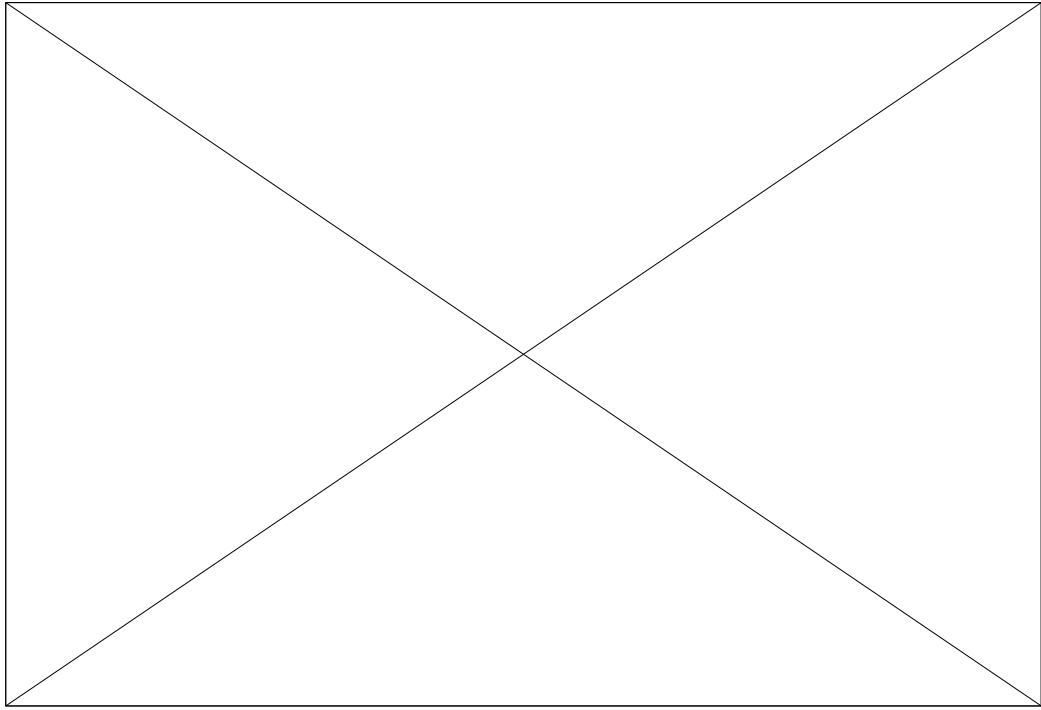


그림 5-7 이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 격납건물 압력 변화

제6장 방재 및 비상대응능력

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가 내용	1
2.1 비상대응능력	1
2.1.1 중대사고 선량평가 능력	1
2.1.2 자체 및 외부 인력 방호조치 및 장비 지원 가능성	4
2.1.3 타부지 지원 인력 및 장비를 통한 대응 능력	8
2.1.4 장기 소내정전사고를 고려한 통신체계 건전성	9
2.1.5 장기 소내정전사고를 고려한 원전정보 전송시스템 건전성	11
2.1.6 장기소내정전사고를 고려한 방사선비상발령기준 적절성	12
2.1.7 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시능력 적절성	15
2.2 의사결정 적절성	17
2.2.1 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무 적절성	17
2.2.2 다수호기 사고 시 비상조직, 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성	21
2.3 비상대응시설 거주성	23
2.3.1 거주성 확보를 위한 비상대응 시설 별 설비	23
2.3.2 비상대응시설 거주성 상실시 비상대응능력 유지 가능성	26
2.4 한울3,4호기 차이점	27
제3절 안전 개선사항	27
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	27
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인	29
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	29
제4절 결론	29
제5절 참고문헌	31
제6절 표, 그림	32

표, 그림

표 6-1 S-REDAP 메뉴 및 기능	32
표 6-2 출입통제소 운영 위치	33
표 6-3 한울본부 비상대응시설 방호용품 확보현황	34
표 6-4 한울본부 비상대응시설 방사선측정기 확보현황	35
표 6-5 월성본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황	36
표 6-6 고리본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황	37
표 6-7 한울본부 소내 비상통신설비	38
표 6-8 유관기관 비상통신설비	38
표 6-9 한울본부 고정형 환경방사선감시설비의 방사선검출기 모델 및 규격	39
표 6-10 환경방사선감시기(ERMS) 설치지점	39
표 6-11 이동형환경감시차량(EMV)의 구비 장비	40
표 6-12 한울3,4호기 비상대응 프로그램	41
표 6-13 월성1호기 스트레스트 테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	44
표 6-14 고리1호기 스트레스트 테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	45

그림 6-1 S-REDAP 프로그램 개략도	46
그림 6-2 한울3,4호기 백색비상발령 상황 7번	47
그림 6-3 한울3,4호기 백색비상발령 상황 8번	48
그림 6-4 한울3,4호기 청색비상발령 상황 5번	49
그림 6-5 한울3,4호기 청색비상발령 상황 6번	50
그림 6-6 한울3,4호기 적색비상발령 상황5D번	51
그림 6-7 한울3,4호기 청색비상발령 상황9번	52
그림 6-8 한울부지 내부 환경방사선 조사지점(ERMS)	53
그림 6-9 한울부지 외부 환경방사선 조사지점	54
그림 6-10 한울3,4호기 비상대응 프로그램의 연관성	55
그림 6-11 2개호기 동시 비상발령 시 비상조직	56
그림 6-12 3개호기 이상 동시 비상발령 시 비상조직	56

제1절 개요

방재 및 비상대응능력 평가는 한울3,4호기가 극한자연재해 등에 의한 단일호기 혹은 다수호기 사고 시 비상대응능력, 적절한 비상대응 판단 및 비상대응시설의 거주성 확보 측면에서 사고 대응조치 및 주민보호 능력 확보수준을 확인하고, 취약분야를 평가·보완하여 비상시 주민보호조치 능력을 개선하는 것을 목적으로 수행하였다.

이를 위해 본 장에서는 원자력안전위원회의 스트레스테스트 수행지침[6-1]에 따라 비상대응 능력, 의사결정 적절성, 비상대응 시설 거주성을 중점으로 평가하였다. 각 평가항목에 대한 세부평가 항목은 다음과 같다.

- 극한자연재해에 의한 단일호기 혹은 다수호기 동시사고 발생이나 사용후연료 저장조 내 핵연료 손상 등의 중대사고 발생 시 선량평가 능력
- 자체 인력 및 외부방재대책기관 인력 방호조치 및 장비지원 능력, 타부지 지원 인력 및 장비를 통한 대응능력 확보 가능성
- 장기 소내정전사고를 고려하여 통신체계의 건전성, 원전 정보전송 시스템의 건전성 및 방사선 비상발령기준의 적절성
- 극한자연재해에 의한 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시능력의 적절성
- AOP, EOP, EP 및 SAMG의 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성
- 다수호기사고 시 비상조직 및 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성
- 비상대응시설의 거주성 상실 시 비상대응 능력 유지 가능성

제2절 평가 내용

2.1 비상대응능력

2.1.1 중대사고 선량평가 능력

극한자연재해로 인하여 동일 부지 내의 다수호기가 동일한 원인 또는 서로 다른 원인에 의하여 사고가 발생할 수 있다는 가정 하에서 방사선비상계획구역 내 주민을 보호하기 위한 주민보호조치가 취해져야 한다. 주민보호조치를 권고하기 위하여 최근의 중대사고 방사선원향 평가나 규제기관에 의하여 인정된 중대사고 방사선원향 및 최신의 대기확산 모델을 사용하여 주민예상 피폭선량을 평가할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 본 절에서는 주민예상피폭선량을 예측하는 전산프로그램의 적절성과 이를 운영하는 비상요원의 전문성을 중심으로 주민예상피폭선량

평가 능력을 평가하였다.

2.1.1.1 주민예상피폭선량 평가 프로그램

한울본부는 방사선 비상대응 선량평가 통합시스템(S-REDAP, Smart Radiological Emergency Dose Assessment Program) 프로그램을 사용하여 방사능비상 사고 시 환경으로 방출되는 방사선원향을 평가하고 기상에 따라 확산되는 방사능농도 및 방사선량을 예측하여 주민보호조치 지역을 평가한다. 신속하고 정확한 평가를 위하여 기상청 및 발전소로부터 기상자료 및 환경방사능 감시자료(ERMS)를 자동 수집하고 이를 바탕으로 평가된 주민보호조치 지역 및 평가결과 정보를 비상기술 지원실(TSC), 비상대책실(Eof)등에 제공한다[6-2]. 극한자연재해로 인한 통신장애로 인하여 고정형 ERMS 자료를 ERMS 서버로부터 전송 받기 어려운 경우 이동형 ERMS에서 측정된 자료를 전달받아 S-REDAP에 입력할 수 있다[6-2].

S-REDAP은

구성된다. S-REDAP 시스템 구성도는 그림 6-1과 같다[6-2, 6-3].

S-REDAP 프로그램은 로그인을 하면 구축된 DB에서 발전소의 기본 데이터를 자동으로 불러오며 메뉴의 그룹은 홈, 현황, 평가, 결과 및 기능으로 구성되며 사용자가 시나리오를 생성하여 발전소 현황을 확인하여 사고를 평가하고 주민보호조치를 권고하기까지 필요한 정보를 순서대로 선택, 입력하여 평가하고 각 단계별 결과를 확인할 수 있도록 하여 사용자의 평가 효율성을 높였다. 각 그룹의 기능은 표 6-1과 같다.

S-REDAP의 주민보호조치 평가는 비상발령 상황에 따라 평가하는 방법, 방사성 물질의 방출 및 확산에 따라 선량을 예측하여 평가하는 방법으로 나뉜다. 발전소 별로 노심 재고량, 설계 누설률 등의 고유 데이터를 사용하거나 직접 방출량을 입력하는 등의 방법을 통하여 주민보호조치를 평가할 수 있다. 예상 피폭선량, 대피 및 소개 정보, 갑상선안정제 복용, 일시이주 및 영구이주 지역 등이 평가결과로 확인되며 이를 주민보호조치 권고에 활용한다.

S-REDAP은 중대사고 방사선원향으로 NUREG-1935 보고서와 NUREG/CR-7110 V-2을 참조하여 LTSBO(Long Term Station Black Out) 시나리오에 기초한 사고 방사선원향을 이용한다. LTSBO 시나리오는 발전소 내 및 소외 교류전원이 완전 상실되고 직류배터리 전원으로 비상조치 수행 중 직류배터리가 고갈되는 사고를 의미한다. S-REDAP은 사용후연료저장조 사고에 대하여 NUREG-1741에 기반

하여 사용후연료저장조의 핵연료가 노출된 후 2시간이 경과되면 피복관이 파손된다는 것을 가정하여 사용후연료저장조 방사선원향을 평가한다.

또한 S-REDAP은 다수호기 사고에 대해 발전소 현황자료를 이용하여 평가한다. 예를 들어, 두 개 이상의 발전소에 대해 사고가 발생할 경우 단일호기에 대해 각각 대기확산인자 평가, 방사선량 및 농도평가를 수행한 후 이를 합산하여 평가한다. 따라서 S-REDAP은 다수호기 동시사고 시에도 단일호기와 동일하게 주민보호조치평가를 수행할 수 있다.

2.1.1.2 평가 프로그램 운영 능력

방사선 비상시 주민예상피폭선량 전산프로그램의 운영은 한울본부 방사선비상계획수행절차서에 따라 운영된다. 전산프로그램의 수행 시기는 발전소에서 방사성물질이 누출되거나 누출될 우려가 있을 때 또는 청색비상 이상의 비상상황이 발령되었을 때이다. 비상대책본부 발족 전에는 비상기술지원실 방사선관리조가 프로그램 운영을 수행하며 비상대책본부 발족 후에는 비상대책본부 방사선평가조 및 비상기술지원실 방사선관리조가 동시에 평가하고 최종적으로 방사선평가조에서 주민보호조치 권고를 수행한다[6-3].

방사선 비상시 주민예상피폭선량 전산프로그램의 운영요원은 한수원(주) 자체의 교육/훈련 프로그램 운영을 통하여 그 전문성을 확보 및 유지하고 있다[6-4]. 전산프로그램 운영요원은 한수원(주) 인재개발원에서 주민예상피폭선량 평가 담당자를 대상으로 실시하는 “비상시 주민방사선량 평가” 정규 교육과정을 이수하거나, 필요시 한수원(주) 중앙연구원에서 연도별로 시행하는 수시교육을 받는다.

한편, 한울본부는 방사선 비상대응능력을 제고하기 위해 연합훈련, 합동훈련, 전체훈련, 부분훈련 등 4가지 종류의 방사능방재훈련을 주기적으로 실시하고 있다. 전체훈련, 합동훈련 및 연합훈련은 부지 외부로 방사능이 방출되는 것을 가상하여 방사선비상계획구역 내의 주민을 소개, 대피시키는 비상상황을 설정하여 실시한다[6-5]. 이때 전산프로그램의 운영요원은 주민예상피폭선량을 한울본부 방사선비상계획수행절차서에 따라 평가를 수행한다[6-3].

주민예상피폭선량 전산프로그램의 상세한 사용 절차와 계산 방법은 방사선비상계획수행절차서에 명시되어 있으며 전산프로그램 운영요원은 사용자 교육을 통하여 프로그램 사용방법을 습득한다[6-2]. 또한, 방사선비상계획서 및 방사선비상계획수행절차서에 주민예상피폭선량 전산프로그램 평가 운영요원의 담당 부서를 명시하고 있다[6-3, 6-5]. 한울본부는 이들 운영요원이 주민예상피폭선량 평가를 수행할 수 있도록 교육 및 훈련 계획에 따라 관리하고 있다.

상기와 같이 전산프로그램 운영요원은 비상시 주민방사선량 평가 및 방사능방재 훈련을 통해 주기적으로 임무수행능력을 제고하고 전문 교육과정을 통해 그 전문성을 강화하고 있다. 따라서 전산프로그램 운영요원은 주민예상피폭선량 평가역량 및 전문성을 충분히 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

2.1.1.3 다수호기 사고 시 선량평가 능력

한울본부는 S-REDAP을 이용하여 다수호기 사고 시 주민보호조치 평가를 수행한다. 전산프로그램 운영요원은 주기적인 교육훈련을 통하여 전문성을 확보하고 있다. 다수호기 사고 시에도 전산프로그램 운영요원의 임무는 단일호기나 다수호기에 대하여 차이가 없기 때문에 다수호기 동시사고에 대해서도 운영요원은 동일하게 임무를 수행할 수 있는 것으로 검토되었다.

극한자연재해에 의한 전원상실 등의 이유로 전산설비의 기능이 상실되어 프로그램 사용이 불가능할 경우에는 S-REDAP을 이용한 주민예상피폭선량을 계산할 수 없다. 이러한 경우를 대비하여 월성본부 방사선비상계획 수행절차서[6-6]에는 주민예상피폭선량을 수 계산으로 평가하는 절차가 제시되어 있다. 하지만 현재 한울본부 방사선비상계획수행절차서는 유효선량 수계산 절차를 제시하고 있지 않으므로 추후 월성본부 방사선비상계획 수행절차서를 참조하여 한울본부 방사선비상계획 수행절차서를 개정할 계획이다.

2.1.2 자체 및 외부 인력 방호조치 및 장비 지원 가능성

비상 대응에 필요한 내·외부 인력의 방호조치 능력 및 방호조치에 필요한 장비들이 극한자연재해에 견딜 수 있는지를 평가하였다.

2.1.2.1 방사선비상 발령 시 인력 방호조치

방사선비상 발령 시 한울본부는 방사선비상계획서 및 방사선비상계획 수행절차서에 따라 방사선 사고확대방지를 위한 비상조치 및 비상대응요원 등의 방사선피폭을 저감하기 위해 필요한 방사선방호조치를 수행한다[6-3]. 비상발령 시 수행하는 방사선방호조치는 다음과 같다.

○ 대피 및 소개

최초 백색비상발령 후 비상조직의 발전팀장은 즉시 소내방송망을 통하여 안내방송을 실시한다. 대피대상자는 본부 내 모든 종사자 및 방문자 또는 제한구역경계 내 외부작업자이며, 방송을 청취한 대상자는 1차 집결지로 대피한다. 청색비상 발령 시에는 비상기술지원실 기술지원반 공무조의 책임 하에 2차 집결지로 대피를

유도하며, 건설소 및 건설업체 종사자는 귀가 조치한다[6-3]. 적색비상이 발령되었을 때는 2차 집결지 대피인원을 모두 귀가 조치하고 지역방사능방재대책본부의 주민보호조치에 따른다. 이러한 일련의 조치를 통하여 비상대응인원 이외의 인원을 대피 및 소개시킴으로서 적절한 방호조치가 취해질 수 있다. 발전소 보전구역 외부로 이동하는 인원 및 차량에 대하여 오염검사를 실시하며, 오염된 인원 및 차량은 절차서에 따라 제염을 실시하거나 이동을 제한한다[6-3].

○ 출입통제

백색비상, 청색비상, 적색비상에 따라 인력방호를 위해 운영되는 출입통제소는 표 6-2에 제시되어 있다. 백색비상 시 청경대장(반장)은 소내 출입통제 지역 및 발전소 정문 및 본부 정·후문 지역에 청경근무자를 동원하여 차량과 사람의 출입을 통제한다. 청색비상 발령 시 비상대응 시설 입구 근무자는 실내로 이동 근무하고, 발전소 정문근무자는 본부 정·후문으로 철수하여 옥내대피하며 주민소개 조치 시는 모든 출입통제요원이 교통통제소로 이동한다.

○ 잔류자 수색 구조 및 의료활동

방사선대책조원은 인원점검 후 잔류자 발생이 파악되면 비상기술지원실 기술지원반 공무조 및 비상운영지원실 정비계획반 소화구조조에 보고한다. 소화구조조장은 수색 및 구조팀을 선정하며 방사선관리구역 수색 및 구조팀 수행절차를 수행한다[6-3]. 비상 발령 시 비상의료지원센터(REMC)를 “현장방사선비상진료소”로 전환하여 응급의료구조 업무를 수행하며, 의료반장 아래 의료조를 편성하여 운영한다. 적절한 응급조치 및 응급의료 수행 후 필요시 의료기관으로 이송한다[6-3].

○ 피폭관리

방사선 비상시 원전부지내(부지외부 환경방사선 탐사요원 포함) 비상 요원 및 지원요원들은 열형광선량계(TLD) 및 자동선량계(ADR)를 착용해야 한다. 긴급작업 종사자를 제외한 방사선비상요원 및 지원요원은 “방사선작업종사자” 선량한도를 초과하지 않도록 관리된다. 긴급작업 등을 위한 방사선관리구역 출입자는 긴급작업 동의 및 승인서를 작성하여 비상대책본부장이나 비상기술지원실장의 승인을 받는다[6-3].

○ 갑상선방호약품 관리

갑상선방호약품(옥소제)은 비상대응시설의 비상장구함에 갑상선방호약품 비축기준()에 따라 보관된다[6-3]. 옥소제의 복용은 선량측정결과나 예상 선량률에 따라 방사선평가반장이 복용을 권고하며 원전종사자는 비상대책본부장의 결

정에 따라 복용한다. 긴급작업자 등의 경우 갑상선흡수선량이 100 mGy 이상으로 예상될 때 비상기술지원실장의 결정에 따라 복용한다[6-3].

○ 소내 방사선·능 감시

방사선대책반 방사선방호조 및 방사선관리조는 백색, 청색, 적색 비상시 절차에 따라 소내 방사선감시계통 및 관리구역 내부의 방사선 준위 및 오염도를 측정하여 방사선대책반장에게 보고한다[6-3].

상기와 같은 인력방호조치를 통하여 방사선비상 후 비상대응요원 이외의 소내 인원을 대피시키고 출입을 통제함으로써 불필요한 피폭을 최소화할 수 있다.


2.1.2.2 방호장비 지원

한울본부는 다수호기 동시사고 등의 비상발령 시 자체 인력이외에 본사 비상대책지원본부, 타 원자력본부 및 특수사업소와 중앙방사능방재대책본부 및 지역방사능방재대책본부의 지원을 받는다[6-5]. 한울본부는 자체 비상요원 및 외부 지원인력에 대한 방사선방호장비를 비상대응시설별로 확보하여 지원하고 있다. 한울본부의 비상대응시설은 비상대책본부 내 비상대책실(EOF)과 발전소 별로 비상기술지원실(TSC), 비상운영지원실(OSC) 등이 설치·운영되고 있다[6-3]. 비상대응시설 이외에 출입통제소에 비상장구함이 설치되어 방호장비가 보관되어 있다. 시설별로 확보된 방호장비 현황 및 극한자연재해 시 장비 이용가능성은 다음과 같다.

○ 방호장비 현황

한울본부는 비상대응시설별 방호용품 및 방사선측정기의 정수를 설정하고 정수이상의 방호장비를 보관하고 있다. 비상대책실, 환경실험실 및 본부 정·후문의 출입통제소에 비치된 방호장비는 방재대책팀이 관리하고 있으며, 주 제어실, 비상기술지원실, 비상운영지원실에 비치된 방호장구는 각 발전소의 방사선안전팀이 유지관리하고 있다[6-3]. 한울본부는 후쿠시마 후속조치인 “장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보”에 따라 방호용품 및 방사선계측기의 추가구매를 완료하였다. 확보된 비상대응시설별 방호용품은 표 6-3에 방사선계측기는 표 6-4에 제시되어 있다. 따라서 한울 본부는 비상시 인력지원에 충분한 방호용품 및 방사선계측기를 확보하고 있다.

○ 장비 이용가능성

비상대응시설 중 비상대책실은 비상시 발전소 대응활동을 총괄하는 곳으로 에 위치하고 있으며, 구조물

은 국내 건축기준에 따라 설계되었다. 한울본부에 ■■■의 지진이 발생한다 하더라도 한울본부와의 거리를 감안하면 비상대책실의 방호장비는 건전할 것으로 평가된다. 또한 한울본부는 본부내에 극한재해에 견딜 수 있는 비상거점시설을 계획 중이며, 비상거점에 방호장비를 보관하는 것으로 설계기준을 초과하는 극한재해에 대처할 수 있다.

비상기술지원실은 비상대책실 발족 전까지 비상대책실의 기능을 수행하며, ■■■에 위치한다. 또한 ■■■의 내진성능은 ■■■ 이상이며, ■■■에 위치하므로 부지에 가능최대강우, 지진해일 및 태풍 발생 시에도 침수되지 않는다. 따라서 비상기술지원실에 보관된 방호용품 및 비상장구는 극한자연재해 시에도 이용가능하다.

비상운영지원실은 비상기술지원실 및 비상대책실과의 협조체제를 구축하고 비상대응활동을 지원하는 목적을 가지며, ■■■에 위치한다. 비상기술지원실과 같이 지진 및 홍수에 견딜 수 있으므로 비상운영지원실에 보관된 방호용품 및 비상장구는 극한자연재해 발생 시에도 이용가능하다.

주제어실은 발전소 운전상태를 감시하고 제어하며 사고를 완화시키는 비상조치를 수행하는 발전소의 가장 중요한 설비다. 주제어실은 ■■■에 위치하며, 내진성능은 ■■■ 이상이고 3층에 위치하므로 부지에 가능최대강우, 지진해일 및 태풍 발생 시에도 침수되지 않는다. 따라서 주제어실에 보관된 방호용품 및 비상장구는 극한자연재해 시에도 이용가능하다.

환경방사능실험실과 본부 정후문에 비치된 방호장구는 ■■■(표 6-3 참조)이므로 이들을 제외하더라도 한울본부에서 필요로 하는 방호장비 수량은 충족된다. 또한 정문과 후문에서 근무하는 종사자가 방호장비를 사용할 수 없을 경우에도 비상대책실에서 방호장비(예비용)를 수령하여 이용가능하다.

2.1.2.3 다수호기 동시 사고 시 인력 방호 능력

한울본부 방사선비상계획서에 따르면 극한자연재해 등에 의한 다수호기 동시 비상발령 시에도 선행호기(1, 3, 5 호기) 비상대응시설에서 비상업무를 수행하고 호기별 사고의 경중에 따라 비상기술지원실장이 비상업무를 호기별로 분담시킬 수 있다. 비상대책실 내 상황반 등 발전소별로 중복되는 조직은 선행발전소 조직 책임자가 비상대응업무를 총괄한다. 따라서 업무 분장이외에는 단일호기 사고와 동일한 절차로 인력방호를 위한 대피 및 소개, 출입통제, 구호활동, 피폭관리 등의 활동을 할 수 있다. 비상대응시설에 비치된 방호장비 및 방사선계측기는 표 6-3과 같이 확보되어 있어서 다수호기 동시 사고 시 대처하기에 충분한 수량이 확보되어 있다.

2.1.3 타부지 지원 인력 및 장비를 통한 대응 능력

극한자연재해로 인한 다수호기 동시사고 등의 상황에서는 타부지 및 외부기관으로부터 인력과 장비를 지원받는다. 극한자연재해 시 한울부지 내외부의 접근로 상실 가능성 등을 포함하여 타부지 지원 인력 및 장비를 통한 대응 능력의 실효성을 평가하였다.

2.1.3.1 타부지 지원 인력 및 장비

한울본부는 극한자연재해로 인하여 다수호기에서 동시에 사고가 발생하는 상황에서 타부지 및 외부지원 기관으로부터 아래와 같이 비상인력 및 비상장비 등을 갖추고 있다.

본사 비상대책지원본부는 방사전 비상사고 발생 시 사고수습 및 확대방지를 위한 지원과 비상상황의 종합관리를 수행한다[6-5]. 그리고 한울본부의 비상대책본부장은 필요 시 타 원자력본부, 방사전보건원에 비상인력, 비상장비 및 차량 등 물자, 의료지원인력 등의 지원을 요청한다[6-5].

비상대책실의 행정지원조장은 각 비상조직에서 요청한 물자의 명세 및 소요량을 바탕으로 물자조달계획을 수립한다. 비상물자조달 소요예산의 자체확보가 어렵거나 긴급재정지원이 필요할 경우는 비상대책보좌역 등과 협의를 거쳐 본사 비상대책지원본부에 긴급예산지원을 요청하도록 되어 있다[6-3].

한울본부는 타부지 중에서 가장 근거리에 위치한 월성본부로부터 비상인력 및 비상장비 지원을 최우선적으로 받을 수 있다. 월성본부 역시 후쿠시마 후속조치인 “장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보”의 이행결과에 따라 비상요원의 정수와 비교하여 충분한 방호용품을 확보하고 있기 때문에 한울본부로 지원이 가능하다. 월성본부에 확보된 비상대응시설별 방호용품은 표 6-5에 제시되어 있다. 또한, 월성본부는 이동형 환경방사전감시기(P-ERMS)와 이동형환경감시차량(EMV)을 이미 확보하여 운영하고 있으므로 비상시 한울본부를 지원할 수 있다. 월성본부 이외에 고리본부에서 비상인력 및 비상장비를 지원받을 수 있다. 고리본부의 비상대응시설별 방호용품은 표 6-6에 제시되어 있다.

한수원(주)은 중대사고, 극한 재해, 다수호기 동시사고 등 발생 시 이를 지원하기 위하여 중대사고 비상대응전문가팀(SAFE-T)을 운영하고 있다. 비상대응 전문가팀은 [REDACTED] 규모로 구성되며 평시에는 중앙연구원에 소속되어 있다가 사고 발생 후 현장 및 본사의 비상기술지원 요청 시 사고대응기술팀장에 의해 호출되어 [REDACTED] 내에 발전소 현장에 도착한다. SAFE-T 팀원들은 발전소의 사고관리 전략수행 지원, 비상대처설비 운영 및 대체계측 수행 등을 지원한다[6-7].

상기와 같이 한울본부는 다수호기 동시사고 등의 비상상황 시 타부지 및 본사로 부터 사고대처에 필요한 인력 및 장비를 지원받을 수 있다.

2.1.3.2 한울 부지로의 접근성 평가

타부지 및 외부지원 기관으로부터 한울부지로의 접근성은 다음과 같이 평가되었다.

설계기준 초과 지진이 발생할 경우, 7월 한울본부 정문으로의 교량 손상의 가능성이 있다. 이에 설계기준초과 지진발생 시 교량의 건전성여부 확인을 위하여 주통행로로 예상되는의 내진성능을 평가한 결과로 확인됨에 따라 한울부지로의 접근성이 확보되는 것으로 검토되었다.

소내 지역의 접근성은 한울본부가 자체적으로 확보할 계획이다. 한울본부 내에는 지게차, 포크레인 또는 휠로더와 같은 중장비와 운영인원을 확보할 예정으로 있어 소내 지역 접근성 확보가 용이하도록 할 예정이다.

상기와 같이 극한자연재해가 발생하더라도 한울3,4호기는 타부지 및 외부지원 기관으로부터 비상요원 및 비상장비를 지원받을 수 있다.

극한자연재해가 타부지 및 외부지원 기관에도 영향을 주어 한울부지에 대한 지원이 원활하지 못하게 될 수 있다. 이러한 경우에도 앞서 기술한 바와 같이 한울본부는 자체 보유한 방호장비의 수량이 충분하여 소내 인원에 대한 방호가 가능하다. 극한자연재해 발생시 한수원은 사고관리 대응전략(MACST)으로 72시간까지는 소내 설비를 이용하여 대응하는 전략[6-32]을 구축하고 있으므로 소외 인력과 장비의 접근로 확보 시간에는 충분한 것으로 평가되었다.

2.1.4 장기 소내정전사고를 고려한 통신체계 건전성

본 절에서는 비상통신설비의 현황을 확인하고 장기 소내정전사고 시 사용가능성을 확인 및 평가하였다.

2.1.4.1 비상통신설비 현황

한울3,4호기는 비상시에 비상연락, 비상정보교환, 비상활동 지휘 등을 신속하고 효과적으로 수행할 수 있도록 다음에 제시된 통신설비를 이용한다[6-5, 6-7].

○ 본부 구내설비

- 비상방송설비 : 방사선 비상 또는 각종 비상사태 발생 시 발전소 중시각의 대외 경로를 위해 사용되는 방송장치로서 국선전비는 방재방송 주선지, 신호부지선지, 정전선, 소피지 등이 있다[6-8].
- 비상전화 : 사선, 국선, 전용전화를 이용하여, 비상대응시설에 중류번호 설치되어 있다. 국공사가 동축조치로 2014년 3월에 전원선, 위성전화 설치지 완료되었다.
- 팩시밀리 : 사선 및 국선을 이용하는 비상용 팩스가 비상대응시설별로 설치되어 있다.
- 화상회의 설비 : 비상대응시설간 화상회의를 할 수 있도록 설치한다.

본부 내 비상통신설비 현황은 표 6-7에 제시되어 있다.

본부에서 본사 및 타 발전소와는 전용전화, 사선전화, 팩시밀리, 국선전화를 이용하여 통신한다. 본부에서 지역방사능방재대책본부 등의 대외기관과의 통신은 전용전화, 국선전화, 팩시밀리, 인터넷을 이용한다. 비상대응시설에는 인터넷이 연결되어 비상시 보고를 규제기관의 원자력비상대응정보교환시스템(ERIX, Emergency Response Information eXchange System)을 통하여 수행할 수 있다. 대외기관과의 통신설비는 표 6-8에 제시되어 있다.

발전소 전원이 정상적으로 공급되는 상태에서 비상이 발령되면 비상발령권자 또는 그가 지정한 자가 비상 전화 및 인터넷, 팩스 등을 이용하여 최초보고를 수행한다. 또한, 인근 주민에게 긴급히 통보하거나 긴박한 주민보호조치가 요구되는 돌발적인 방사성물질 유출사고가 발생한 때에는 비상경보 방송망을 이용하여 주민에게 주민보호조치 방송을 하고 지방자치단체(울진군)에 즉시 통보한다[6-5].

2.1.4.2 장기 소내정전사고 시 통신체계

소내정전(비상디젤발전기 정전포함) 발생 시에도 소내에 설치된 사선/국선 교환기와 인터넷 중계기는 충전기 또는 무정전전원공급장치(UPS)의 배터리를 이용하여 시간 이상 사용이 가능하다. 장기 소내정전시에는 배터리가 모두 방전되기 이전에 이동형발전차가 연결될 수 있으므로 이를 통한 전원 연결이 가능하여 지속적인 통신기기 사용이 가능하다.

비상대책실에는 UPS와 비상디젤발전기가 설치되어 있다. 장기 소내정전이 발생하고 비상대책실까지 정전되는 경우에도 비상대책실의 통신설비를 사용할 수는 있

다. 또한 소내와의 통신이 단절되는 경우를 대비하여 비상대책실에는 소내와의 통신을 위한 위성전화기 설치되어 있다.

한울본부는 비상통신체계를 구성하는 통신설비의 가용성 및 신뢰성을 높이기 위하여 후쿠시마 후속조치로 주제어실, 비상기술지원실, 비상운영지원실에 무정전전원공급장치로부터 전원을 공급받을 수 있는 위성전화기를 추가로 설치하였다[6-8].

상기와 같이 한울본부는 최악의 극한재해 상황에서 위성전화를 통하여 통신을 유지할 수 있다. 또한 주제어실과 현장 운전원들간의 소내 통신 방안을 확보하기 위하여 한수원(주)은 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항으로 비상대응 통신망 구축 컨설팅을 시행하였으며, 설계기준 초과 지진에 대한 소내 비상통신 대응방안을 계획 중이다[6-9].

2.1.5 장기 소내정전사고를 고려한 원전정보 전송시스템 건전성

장기 소내정전사고 시 발전소 정보 전송시스템의 건전성을 평가하기 위하여 관련 설계 및 절차서를 점검하였다.

2.1.5.1 원전정보 전송시스템 현황

필수안전기능감시계통(CFMS)은 발전소감시계통(PMS)의 일부로서 노심반응도제어, 노심열제거제어, 원자로냉각재계통 재고량 제어 등의 발전소 필수안전기능들을 직접 감시하여 주요안전변수들을 표시한다.

에도 데이터를 제공하고 있다[6-5].

필수안전기능감시계통(CFMS)에서 표시되는 안전성 관련 정보들은 각 계측기가 무정전전원장치와 배터리 등에서 전원을 공급받는다. 또한 한울본부는 비상대응시설에 비상요원들이 비상활동을 수행하기 위해 필요한 비상대응 데이터를 제공하는 PI시스템을 갖추고 있다. PI 시스템은

에 정보를 제공한다[6-5].

2.1.5.2 소내정전사고 시 원전정보 전송시스템

소내정전사고 시 초기 동안 무정전전원공급장치를 통하여 필수안전기능감

시계통(CFMS)의 기능을 수행할 수 있으며, 이후 480V 견인식디젤발전기 [6-11]와 4.16 kV 이동형발전차[6-12]가 연결되면 비상전원을 공급하여 필수안전 변수 계측 기능을 유지할 수 있다. 비상통신시설의 사용이 불가능할 경우 주제어실에서 취득된 정보를 위성전화를 통하여 다른 비상대응시설에 전달할 수 있다.

비상기술지원실에서는 정전사고 초기에는 자체 무정전전원공급장치를 통하여 필수안전기능감시계통(CFMS)을 구동할 수 있다. 그러나 소내정전이 장기간 계속되어 무정전전원공급장치가 고갈될 경우, 정보 전송을 주제어실로부터 위성전화를 통하여 필요정보를 전달받을 수 있다.

주민보호 조치에 필요한 발전소의 필수안전변수를 비상대응조직에 지속적으로 제공할 수 있도록 한울본부는 현재 480V 견인식 디젤발전기를 본부당 1대 씩 운영하고 있다.

2.1.6 장기소내정전사고를 고려한 방사선비상발령기준 적절성

장기 소내정전사고가 발생할 경우, 방사선 비상발령 조건에 해당하는 정보를 확인하기 어려울 수가 있다. 이 경우를 고려하여 1) 경보가 발생하지 않을 때 비상발령기준이 적절하게 설정되어 있는지, 2) 비상발령조건에 해당되는지 여부를 확인할 수 있는지, 3) 비상발령 조건 확인 후 비상발령권자와 의사소통이 가능한지를 평가하였다. 또한 사용후연료저장조의 냉각기능이 상실되었을 경우 비상발령기준이 적절하게 설정되었는지를 평가하였다.

2.1.6.1 경보 미 발생 시 방사선 비상발령기준 적절성

본 절에서는 장기 소내정전사고가 발생하여 방사선 비상발령 조건에 해당하는 정보를 확인하기 어려운 경우에 각 비상발령기준이 적절하게 설정되어 있는지를 평가하였다.

1) 백색비상

한울본부 방사선비상계획서[6-5]에 따르면, 전원 상실에 의한 한울3,4호기의 백색비상 발령은 다음과 같다.

- [] : []
- [] : []

소내정전사고 시 []에 의하여 즉시 백색비상이 발령되므로

한울3,4호기의 백색비상 발령 기준은 적절하다. []의 발생논리는 그림 6-2 및 그림 6-3과 같다.

2) 청색비상

전원상실 상태가 지속되면 다음과 같은 발령 상황에 의해 청색비상이 발령된다.

- [] : []
- [] : []

소내정전사고가 [] 이상 지속되면 []에 의해 청색비상이 발령되므로 한울3,4호기의 장기 소내정전사고 시 청색비상발령 기준은 적절하다. []의 발생논리는 그림 6-4 및 그림 6-5와 같다.

3) 적색비상

장기 소내정전사고와 관련된 한울3,4호기의 적색비상 발령 기준은 다음과 같다.

- [] : []
- [] : []

그림 6-6은 한울3,4호기 적색비상 발령 []의 발생논리를 보여준다.

상기와 같이 한울3,4호기는 소내정전사고가 발생하면 즉시 백색비상이 발령되며, 소내정전이 [] 지속되면 청색비상이 발령되고, 장기 소내정전사고 시 [] 확인하여 적색비상을 발령할 수 있다. 따라서 한울본부는 장기 소내정전사고 시에도 적절히 비상을 발령할 수 있다.

2.1.6.2 비상발령권자와의 의사소통 적절성

소내정전사고 시에도 비상대책실에는 무정전전원공급장치(UPS)와 비상디젤발전기가 설치되어 있어서 장기 소내정전 시 비상대책실의 통신설비를 사용할 수 있다. 필수안전기능감시계통(CFMS)의 안전성관련 정보는 주제어실에서 이동형발전차량의 전원을 공급받아 확인할 수 있으며 이를 위성전화로 비상대책실 및 비상기술지원실에 전달할 수 있다. 따라서 장기 소내정전사고 시에도 발전소 상황에 대한 정보 및 비상 발령에 필요한 필수 사항을 점검하고 이를 비상발령권자에게 위성전화 등을 이용하여 보고할 수 있으므로 비상발령권자와의 의사소통은 가능하다.

2.1.6.3 사용후연료저장조 냉각기능 상실 시 방사선 비상발령기준 적절성

장기 소내정전사고가 발생하여 사용후연료저장조 냉각기능이 상실되었을 경우 방사선비상 발령 기준의 적절성을 평가하였다.

백색비상은 []에서 사용후연료건물 내 핵연료취급사고 감시기의 지시치가 [] 이상이면 백색비상을 발령한다. []에서는 []

[]에서 고방사선 경보가 발생할 경우 백색비상을 발령한다. []에서는 []

방사성물질이 유출되었을 경우 백색비상을 발령한다.

사용후연료저장조의 백색비상 발령 기준은 사용후연료저장조의 냉각기능 상실과 무관하다. 그러나 소내정전이 발생하여 사용후연료저장조의 냉각기능이 상실될 경우 []에 의하여 백색비상이 발령된다. 따라서 장기소내정전사고 시 사용후연료저장조에 대한 백색비상 발령 기준은 적절하다.

또한 백색비상 발령 상황과 같이 소내정전이 [] 지속될 경우 []에 의하여 청색비상이 발령된다. 따라서 소내정전으로 사용후연료저장조의 냉각기능 상실 시 청색비상이 조기 발령되므로 장기소내정전사고 시 사용후연료저장조에 대한 청색비상 발령 기준은 적절하다.

청색비상은 []에서 사용후연료 낙하사고가 발생하거나 [] 발생할 때 청색비상이 발령된다. []의 발생논리는 그림 6-7에 제시된다.

청색비상 발령 기준은 []의 계측값이다. 사용후연료저장조의 수위는 냉각기능 상실의 지표가 될 수는 있으나 냉각기능 상실에 의하여 []보다 낮아지려면 상당한 시간이 필요하다. 사용후연료저장조의 수위가 낮아져서 연료가 노출되기까지는 정상 연료 장전상태 시 []시간, 재장전을 위해 전 노심이 인출된 상태에서는 []시간, 재장전 후 출력상승 중 비정상 상황이 발생하여 전 노심이 다시 인출되는 상황에서도 []시간이 소요되므로 수위를 회복하기 위한 운전원 조치시간은 충분한 것으로 평가되었다(4장 보고서 표 5-15 참조).

현재 사용후연료저장조에 대한 적색비상 발령 조건은 존재하지 않아 사용후연료저장조의 냉각기능이 장시간 상실되어 사용후연료저장조의 수위가 낮아져 연료봉



이 공기중에 노출될 경우 사용후연료 용융이 발생할 수 있으므로 장기소내정전사고 시 사용후연료저장조의 수위를 감시하여 적색비상을 발령할 수 있도록 방사선 비상계획서의 개정이 필요하다. 한수원(주)은 NEI 12-2에 제시된 사용후연료저장조 적색비상 발령 조건을 국내 원전에 적용하여 고리본부 방사선비상계획서의 2017년 7월에 변경승인을 신청하였으며 변경승인 후 전 원전의 방사선비상계획서 개정을 추진할 예정이다[6-9].

2.1.7 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시능력 적절성

다수호기에서 동시사고가 발생 하였을 때, 비상대응능력 확보를 위해서 환경방사선·능을 적절하게 감시할 수 있어야 한다. 본 절에서는 고정형 및 이동형 환경방사선 감시설비를 포함한 현재의 발전소 감시능력이 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시에 적절한지를 평가하였다.

2.1.7.1 환경방사선·능 감시능력 현황

1) 고정형 감시설비

한울본부의 환경방사선감시시스템(Environmental Radiation Monitoring System, 이하 ERMS)은 원전주변 및 주요 지점에 설치된 방사선검출기를 이용하여 환경방사선량을 측정하고 주변 기기들의 운전상태에 관한 데이터를 전송, 처리 및 저장하는 설비로 현장감시소와 ERMS 서버시스템으로 구성된다[6-13]. ERMS가 설치된 현장감시소는 환경방사선 준위를 감시하기 위해 방위 및 거리별로 총  이 지정되었으며[6-5], 방사선검출기를 통해 공간선량을 측정한다. 방사선검출기는 가압형 전리함 검출기(HPIC)와 섬광검출기를 사용하며 현장데이터 처리장치와 데이터 송수신 장치로 무선통신 모뎀을 사용한다. 수집된 데이터는 ERMS 서버로 전송되며 취득한 데이터를 저장, 관리, 감시하는 환경방사선 통합감시시스템(ERIMS)을 갖추고 있다. 전원상실에 대비한 무정전전원공급장치(UPS)를 갖추고 있으며, ERMS 현장감시소의 전원상실에 대비하여 환경실험실에는 비상발전기를 보유하고 있다[6-13]. 또한 한울본부는 부지주변  에 열형광선량계(TLD)를 설치하여 운영하고 있다. 열형광선량계를 이용하면 해당지점의 누적선량을 평가할 수 있다. 표 6-9에 환경방사선감시기(ERMS)의 모델 및 규격이 표 6-10에 환경방사선감시기 설치위치가 제시되어 있다. 그림 6-8 및 6-9는 열형광선량계를 포함한 부지 내 및 부지 외 한울본부 환경방사선 현장감시소를 보여준다.

2) 이동형 감시설비

한울본부는 고정형 환경방사선감시설비인 ERMS가 고장으로 인한 연속감시가 불


가능할 경우를 대비하여 이동형 환경방사선감시설비(Portable Environmental Radiation Monitoring System, 이하 P-ERMS)를 운영하고 있다[6-14]. P-ERMS는 GM-Tube 검출기를 사용하여 환경방사선선량률을 측정하고, 방사선정보 및 기기 운영정보를 수집하여 데이터 처리, 저장 및 전송을 담당하는 설비이며, 이동형 환경방사선감시기와 서버로 구성된다. 2개의 GM-Tube 검출기가 내장된 이동형 환경방사선감시기는 GPS 좌표 및 시간에 따라 공간감마선량률을 측정하며, 측정된 정보는 자체 메모리에 저장하거나 ERIMS 서버로 전송하도록 설계된 완전 독립형 환경방사선감시설비이다. 이동형 환경방사선감시기는 전원공급을 위한 태양전지판과 태양전지 사용이 불가할 때를 위한 납축전지를 내장하고 있다. 또한 환경방사선통합감시시스템(ERIMS)을 통하여 환경감시차량(EMV), ERMS, P-ERMS 및 부지내 기상관측탑에서 측정·관측된 정보를 통합하여 저장, 관리, 감시할 수 있다. P-ERMS는 분기별로 1회 점검하며 이동형방사선감시기의 교정은 연1회 실시한다.

한울본부는 방사선감시기 등의 장비를 갖추고 이동하면서 환경방사선 측정결과를 실시간으로 환경실험실로 전송하는 기능을 보유한 이동환경감시차량(EMV) 및 환경방사능 시료를 채취하거나 측정하기 위한 인력 및 장비를 탑재한 환경감시차를 운영하고 있다. 환경감시차는 고준위선량률 측정기, 중준위선량률 측정기, 표면오염 감시기 및 무선통신장치를 구비하고 있다. 이동환경감시차량은 방사선측정장비, 휴대용 감마핵종분석기, 표면오염도 측정기, 휴대용 계측기 등의 계측설비와 측정지역의 풍향, 풍속, 온도, 습도를 측정하는 휴대용 기상관측설비, 자료처리용 컴퓨터 및 무선통신장치 등을 구비하고 있다[6-3]. 이동환경감시차량은 이동환경감시차량의 방사선 검출기 및 장비 교정은 1년에 1회, 통신 점검을 포함한 설비 점검은 매월 1회 수행한다[6-15]. 이동환경차량의 구비 장비는 표 6-11에 제시되어 있다.

3) 환경실험실

환경방사선·능의 분석 및 측정은 환경실험실에서 수행한다. 환경실험실은 한울1호기로부터 [REDACTED]에 위치하며 국내 건축기준에 따라 설계, 건축된 콘크리트 건물이다[6-5]. 환경실험실에는 거주성 점검을 위한 휴대용 선량률측정기, 표면오염도측정기, 공기시료채집기가 설치되며 환경실험실의 통신체계 다중화를 위하여 이동위성전화 1대가 비치·운영된다. 방사능물질 유출 등으로 거주성이 상실되거나 분석에 지장이 우려되는 경우 예비환경방사능실험실인 경북대학교 방사선과학연구소로 이동하여 분석을 수행한다. 또한, 예비환경방사능 실험실로의 이동은 방사선비상계획 수행절차서에 따라 수행하며 방사능 방재훈련을 통해 교육훈련을 시행한다[6-3].

2.1.7.2 극한자연재해 시 환경방사선·능 감시능력 적절성

한울본부는 방사선비상계획수행절차서[6-3]에 방사선비상시 환경방사선·능 감시 및 평가계획을 제시하고 있다. 백색비상 발령 후 방사선평가반장은 예비환경방사능실험실에 비상상황 통보 및 준비 요청을 하고 타 원전에 환경감시차, 이동환경감시차량, 탐사인력 및 장비지원을 요청한다. 행정지원반장에게 무전기, 위성전화 등의 통신수단 지원요청을 한다. 환경감시조장은 육상탐사조를 2인/1조로 편성한다. 타 원전 지원인력, 차량 및 장비가 도착하면 탐사범위를 확대하여 탐사조를 재편성한다. 공간선량률은 ERMS를 이용하거나 휴대용 계측기를 이용하여 측정한다. 부지주변 에 설치된 열형광선량계(TLD)는 해당지점의 누적선량을 평가할 수 있는 자료이므로 주기적으로 수거 후 판독하여 보고한다. 이동환경감시차량(EMV)을 포함한 방재인력은 울진 현장방사능방재지휘센터의 합동방사선감시센터가 발족되면 합동방사선감시센터 발족 전까지의 상황에 대해 보고하고 합동방사선감시센터에 편입된다. 필요 시 합동방사선감시센터는 타 원전에 이동환경감시차량(EMV), 휴대용 선량률 측정기, 표면오염도 측정기 및 인력 지원을 요청한다.

후쿠시마 원전사고의 경우 원전 주변 모니터링 지점의 환경방사선감시설비와 전원 및 통신설비 등이 지진 및 해일로 인해 파괴되어 제 기능을 하지 못하였다. 또한 발전소 내·외부 기상 및 방사선검출기가 작동하지 않아 환경으로의 방사성 물질 누출량을 제대로 파악할 수 없었다. 극한자연재해 발생 시 한울본부의 고정형 감시설비인 ERMS와 부지주변에 설치된 열형광선량계(TLD) 및 부지 기상탑 등이 그 기능을 상실할 가능성이 있다.

그러나 한울본부는 방사선비상시 이동환경감시차량(EMV)을 운영함으로서 고정형 감시설비의 기능상실에 대처할 수 있다. 이동환경감시차량은 자체 통신설비를 갖추고 있으며 통신설비의 불능 시 무전기와 위성전화등을 사용하여 비상대응시설과 통신한다. 환경실험실도 극한자연재해 발생 시 거주성을 상실할 수 있으나, 거주성이 상실될 경우 방사선비상계획수행절차서에 따라 예비환경방사능 실험실인 경북대학교 방사선과학연구소로 이동하여 분석을 수행한다. 다수호기 동시사고가 발생하여 감시 인력이 부족할 경우 타 원전에 지원을 요청한다.

따라서 극한자연재해에 의한 다수호기 동시사고 발생 시에도 한울3,4호기의 환경방사선·능 감시능력은 적절한 것으로 평가되었다.

2.2 의사결정 적절성

2.2.1 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무 적절성

비정상운전절차서(AOP), 비상운전절차서(EOP), 비상계획서(EP) 및 중대사고관리

지침서(SAMG)의 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성을 평가하였다.

2.2.1.1 절차서간의 상호 연계성

한울3,4호기는 사고 발생 시 사고 영향을 완화하고 발전소를 안정된 상태로 유지하기 위한 비상대응 프로그램으로 초기 단계에 적용하는 비정상운전절차서(AOP)[6-16], 원자로 트립 이후 적용되는 비상운전절차서(EOP)[6-17], 중대사고에 적용하는 중대사고관리지침서(SAMG)[6-18]를 갖추고 있다. 전원상실이 발생하거나 완화설비가 작동하지 않을 때를 대비한 비상대체설비 운영절차서 및 방사선비상에 대처하기 위한 방사선비상계획서(EP)[6-5]를 갖추고 있다.

비정상운전절차서는 각 절차서에 정의된 원자로냉각재 누설 등과 관련된 경보 및 증상 발생 시 적용되며, 비상조치의 수행이 완료되거나 증상이 해제되면 정상운영절차서로 전환되며, 절차 수행 중 원자로 트립이 발생하였다면 비상운전절차서가 적용된다. 비정상운전절차 중 운전원은 비상상황을 확인하고 발생경보가 계통의 오작동이 아님을 확인하며, 필요시 원자로를 정지할 수 있다. 발전소 상황이 비상발령기준에 해당되는 경우 발전팀장은 비상을 발령할 수 있다. 사고완화를 위해 이용하는 설비는 본 보고서 4장 표 4-3에 정의된 설비를 이용한다.

한울3,4호기의 비상운전절차서는 다음의 두 사항을 우선적으로 실시하며 비상운전절차로 진입한다[6-17].

- 1개 이상의 원자로 트립 증상이 발생하였을 때 : [redacted]
- [redacted] 수행 이후 사고진단 혹은 고온대기 또는 고온정지 상태에서 사고진단 필요 : [redacted]

전원상실사고에 관련된 비상운전절차서는 “ [redacted] 및 [redacted] ”이다. 각 절차서는 절차서의 수행결과 안전기능 상태점검 판정기준(SFSC)이 만족되면 종료되며, 비상운전절차서에서 사용하는 사고완화 설비는 본 보고서 4장 표 4-3에 정의된 설비를 이용한다.

비상운전절차서에서 제시된 비상조치를 수행하였음에도 사고가 완화되지 않고 다음의 조건이 만족되면 중대사고관리지침서 단계로 진입한다.

- [redacted]
[redacted]
[redacted]

중대사고관리지침서 단계에서는 중대사고 관리전략으로 전원공급 불만족 시 비상 전원공급절차를 수행하며 노심의 냉각상태와 격납건물 압력/온도, 격납건물 수소 농도 등을 감시한다. 감시된 안전변수와 제어전략에 따라 해당 완화전략을 수행한다. 비상조치에는 증기발생기 급수주입, 원자로냉각재계통 감압, 핵분열생성물 방출 제어 등이 포함되며 각 완화조치에는 해당 전략 수행 여부를 결정하는 의사결정 과정이 포함된다. 사고완화설비는 안전/비안전등급의 모든 설비 중 가용한 모든 설비를 이용한다. 중대사고관리지침서는 다음의 모든 조건이 만족되면 사용이 종료된다.

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

비상대체설비운영절차서는 비상운전절차서를 이용한 사고관리를 수행하는 중 교류전원 완전상실(SBO) 발생과 동시에 대체교류 디젤발전기(AAC DG)의 이용이 불가능할 경우 적용한다. 비상대체설비는 견인식 디젤발전기와 4.16 kV 이동형발전차 및 외부 냉각수 주입을 위한 이동형펌프가 있다. 견인식 디젤발전기는 발전소 감시계통(PMS)에 별도 비상전원을 보장하기 위한 목적으로 사용되며, 4.16 kV 이동형발전차는 교류전원 완전상실(SBO)과 동시에 대체교류 디젤발전기(AAC DG)의 이용이 불가능할 경우 4.16 kV 안전모선에 전원을 공급하기 위한 목적으로 사용된다.

방사선비상계획서는 발전소의 방사능방재를 위한 제반 비상대응절차를 규정하고 있다. 방사선비상계획서에 의한 주요 비상조치는 단계별 방사선비상발령, 비상조직 운영, 대피와 소개를 포함한 종사자 및 주민 보호활동이다. 방사선 비상 최초 발령은 발전팀장에 의해 이루어지며, 비상대책본부가 발족된 이후에는 비상대책본부장이 비상대응조치의 모든 책임을 진다. 방사선비상계획서 및 관련 절차서의 이행은 방사선 비상사고가 종결되거나 이에 대비한 활동이 종결되는 경우에만 완료된다.

한울3,4호기의 사고관리는 사고의 진행에 따라 비정상운전절차서, 비상운전절차서, 중대사고관리지침서로 이어지며 관리된다. 각 절차서에서 조치내용이 불만족 시 타 절차서를 수행하기 때문에 절차서 간의 중복이나 불일치 사항은 없다. 방사선 비상 등의 방사선비상계획서와의 연계사항도 절차서에 명확히 명시되어 있다. 따라서 한울3,4호기 사고관리 관련 절차서에서 제시하는 비상조치·이행전략 간의 불

일치사항은 없으며 각 절차서는 적절히 연계되어 있다.

2.2.1.2 의사결정권자의 책임 및 임무 적절성

표 6-12에 한울3,4호기 비정상운전절차서(AOP), 비상운전절차서(EOP), 비상대체설비 운영지침서, 중대사고관리지침서(SAMG) 및 방사선비상계획서의 적용시점과 의사결정권자의 책임 및 임무가 정리되어 있다.

비정상운전절차서의 적용 및 수행은 발전팀장의 책임 하에 이루어지며, 비상운전절차서의 적용 및 수행에 대한 전반적인 책임 또한 발전팀장에게 있다[6-19]. 발전팀은 정기적인 교육 및 훈련을 통하여 비정상운전절차서 및 비상운전절차서에 대한 책임 및 임무를 습득한다.

중대사고관리지침서의 적용 및 수행에 관한 책임은 비상기술지원실이 발족되기 이전에는 발전팀장에게 책임이 있으며, 비상기술지원실이 발족한 이후에는 비상기술지원실장에게 책임이 있다. 결정권자의 책임인수 시기가 비상기술지원실 발족 이전 이후로 나뉘기 때문에 의사결정권자간의 의사결정 충돌은 일어나지 않는다.

방사선비상계획서에 따르면 최초 비상발령은 발전팀장이 행하며, 비상대책실이 발족하기 전에는 비상기술지원실장이 비상발령권을 가진다. 비상대책실이 발족한 이후에는 비상대책본부장이 비상발령권을 가진다. 백색비상은 비상기술지원실장이 예비현장방사능방재지휘센터와 협의 후 해제한다. 청색비상 이상의 비상은 비상대책본부장이 현장방사능방재지휘센터와 협의 후 해제한다. 비상조직은 백색비상 발령 후 비상기술지원실 및 비상운영지원실이 발족되며 비상기술지원실장이 총괄지휘한다. 청색·적색비상 발령 후 비상대책실이 발족되며 비상대책본부장이 본부 내의 모든 비상조직을 총괄한다. 비상대책본부장의 의사결정을 지원하기 위하여 ()의 비상대책보좌역()이 있으며 동 보좌역은 비상대책본부장 보좌, 필요 시 현장지휘센터 파견, 비상대책본부장 및 비상대책실장의 요청사항 등을 처리하는 임무를 수행한다. 비상대책간사는 비상대책본부장의 회의 주관시 회의 진행 등을 보좌한다. 따라서 의사결정권자의 책임 및 임무는 서로 상충되지 않는다.

비상대체설비 운영절차서에 따르면 4.16 kV 이동형 발전차에 관한 제반사항의 책임은 발전팀장에게 있다[6-12]. 견인식 디젤발전기[6-11]에 관한 제반사항의 책임은 비상기술지원실장에게 있다. 설비 운영의 책임자는 다르지만, 발전소 비상발령 상황에서 최종 의사결정권자는 비상기술지원실장이므로 비상대체설비의 의사결정권자는 비상기술지원실장이다. 따라서 의사결정권자의 책임 및 임무는 서로 상충되지 않는다.

상기한 바와 같이 각각의 절차서에는 비상조치, 사용설비, 이행조직, 의사결정권자 등이 기술되어 있다. 또한, 절차서별로 사용이 겹쳐지는 시기가 없기 때문에 의사결정의 충돌은 일어나지 않는다.

따라서 한울3,4호기의 사고대응 단계별 의사결정권자의 책임 및 임무는 상충 또는 모순되지 않고 적절한 것으로 판단된다(그림 6-10 참조).

2.2.2 다수호기 사고 시 비상조직, 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성

다수호기 동시사고를 고려하여, 비상조치가 이행될 수 있도록 책임 및 임무가 적절하게 수립되어 있는지를 평가하였다. 또한 운전원 및 비상대응조직 구성원의 운영기술능력을 확보하기 위한 교육 및 훈련계획의 적절성을 평가하였다.

2.2.2.1 다수호기 사고 시 비상조직 및 의사결정권자

원자력안전위원회고시 제2017-38호(원자력사업자의 방사선비상대책에 관한 규정) 제7조 제8항에 따르면 방사선비상발령권자의 판단권한은 방사선비상발령의 유보 또는 지연의 원인이 되지 않아야 한다[6-20]. 상기 규정에 따라 한울본부 주요 의사결정권자인 비상대책본부장, 비상기술지원실장, 비상운전반장의 책임 및 임무가 명확히 기술되어 있는지를 확인하였다.

사고 발생 시 비상기술지원실이 발족되기 전까지 비정상운전절차서(AOP), 비상운전절차서(EOP), 중대사고 관리지침서(SAMG)의 운영 및 비상발령 권한은 비상운전반장(발전팀장)에게 있다. 다수호기 동시 사고 시에도 사고초기에는 비상운전반장(발전팀장)은 비상기술지원실이 발족되기 전까지 최초 비상발령을 비롯한 비상대응조치를 수행하며 사고관리업무를 총괄한다.

극한자연재해 시 한울3,4호기는 다음과 같이 백색비상을 발령할 수 있다.

- **백색비상발령 상황(예) :** 심각한 자연재해가 발생했거나 예상된 때(다음 조건 중 하나 만족)
 - ① 지진 : 지진강도(지진)의 측정값이 운전기술지침서(수평 0.10g 또는 수직 0.05g)이상이고 해당호기 및 부지내의 타호기 지진감시계통 점검결과 전체 지진으로 확인된 때
 - ② 부지내 타호기에서 지진으로 비상발령
 - ③ 호내에서 평균 풍속 33 m/s 이상
 - ④ 홍수, 해일 등으로 중대한 안전성에 해를 끼칠 상황(명령 또는 지시)에 의해
 - ⑤ 최후구 해수 수위(0.7~1.07m) 확인

한울본부의 다수호기 동시 비상발령 시 비상조직은 초기에는 선행호기(한울 1, 3, 5호기)

발전소 별 비상대책실 근무요원은 비상대책실로 응소한다. 2개호기 동시 비상발령시 비상조직은 그림 6-11과 같고, 3개호기 이상 동시 비상발령 시 비상조직은 그림 6-12와 같다.

발전소별 중대사고관리의 최종 결정권자는 비상기술지원실장이다. 따라서 단일 발전소의 2개호기 동시사고의 경우에는 비상기술지원실장 1명이 책임과 권한을 수행하기 때문에 단일호기 사고와 동일하게 유지되어 의사결정에 있어 문제가 없다. 하지만 예를 들어 1호기와 3호기에서 동시에 중대사고가 발생하여 이동형발전차, 이동형펌프와 같은 공용설비의 사용이 필요할 경우 2명의 비상기술지원실장이 동시에 사용을 요구할 수 있다. 이 같은

상기와 같이 한울본부는 다수호기 동시 비상발령 시 비상대책본부, 비상기술지원실, 비상운전반으로 이어지는 사고관리체계를 가지고 있으며, 비상대책본부에서 방재상황을 총괄한다. 따라서 한울본부의 다수호기 동시사고 시 의사결정권자의 책임 및 임무는 적절한 것으로 판단되었다.

2.2.2.2 교육 및 훈련계획

한울3,4호기 비상운전절차서의 교육은 발전소의 운영실장이 전반적인 관리감독 책임을 지며, 교육담당 부서장이 비상운전절차서 교육훈련계획의 수립 및 시행과정에서 실무를 총괄한다. 교육시행 부서장은 교육훈련 계획의 수립 및 세부 시행계획을 수립하고, 이에 따른 운전원 교육과 평가를 실시하며 결과를 기록, 유지한다. 비상운전절차서(EOP) 교육은 EOP 초기교육, EOP 재교육, 개정 EOP 교육으로 구성되며 교육방법은 강의실 교육, 현장답사 교육, 시뮬레이터 교육, 자율학습으로 구성된다. EOP 초기 교육은 최초 핵연료 장전에 앞서 발전팀장을 포함한 운전원 전원이 대상이며, EOP 재교육은 1년 단위로 비상운전 수행능력을 향상시키도록 발전팀장을 포함한 전 운전원을 대상으로 시행된다. EOP 개정교육은 개정된 EOP의 내용에 대해 운전원이 숙지할 수 있도록 EOP의 개정 시 발전팀장을 포함

한 전 운전원을 대상으로 시행되며 교육훈련 결과는 개정 EOP에 반영된다. EOP 초기 교육과 개정 EOP 교육은 교육 평가를 거쳐 평가에 미달된 운전원에 재교육 및 재평가를 실시한다[6-21]. 따라서 비상운전절차서에 대한 교육 및 훈련계획은 적절한 것으로 판단된다.

중대사고관리지침서에 대한 교육훈련은 운영실장이 교육훈련 계획을 수립하여 시행하고 실적을 관리하며, 방재대책팀장이 방사능 방재요원에 대한 교육실적을 관리한다. 교육의 대상은 주제어실 운전원, 현장 운전원 및 방사능 방재요원(운전지원조, 안전분석조, 방사화학조)이다. 교육방법은 집합교육, 현장실습교육, 전파교육이며, 교육의 주기는 최초교육은 지침서 최초 승인 후 6개월 이내이고 재교육은 1년에 1회 실시한다. 중대사고관리지침서의 개정사항이 있을 경우 개정사항 교육은 수시로 수행된다[6-22]. 중대사고관리책임자인 발전소장(비상기술지원실장)에 대한 교육은 재임 시 필수교육과정으로 운영되며 재교육은 2년에 1회 실시한다[6-33].

방사능 방재교육은 비상대책본부장을 포함한 방사선비상요원을 대상으로 실시한다. 신입직원에 대한 신규교육은 18시간 이상 실시하며 보수교육은 매년 8시간 이상을 실시하되 3회 이상 보수교육을 이수한 경우는 매년 2시간 이상 보수교육을 실시한다[6-4]. 또한 외부 방사능방재요원에 대해서도 외부 유관기관에서 방사능 방재교육 요청 시 제반사항을 검토하여 지원하고 있다[6-4]. 방사능 방재훈련은 원자력안전위원회와 주관하여 중앙부처 및 지자체, 지역 군·경·소방기관이 함께 참여하는 연합훈련이 매년 행해지며, 방사선비상계획구역이 관할구역인 지역에 소재하는 지정기관 및 원자력사업자가 참여하는 합동훈련이 부지별로 2년에 1회, 발전소 내 전 비상조직이 참여하는 훈련이 1개 또는 2개 호기별로 1년에 1회, 부분훈련이 분기에 1회 이상 실시된다[6-5]. 따라서 방사능방재에 대한 교육 및 훈련계획은 적절한 것으로 판단된다.

상기와 같이 한울본부의 운전원 및 비상대응조직에 대한 교육 및 훈련계획은 적절한 것으로 평가되었다.

2.3 비상대응시설 거주성

본 절에서는 비상대응시설의 거주성 상실 시 거주성 재확보를 위한 방사선 영향 저감조치 수행 능력에 대하여 평가하고, 거주성 재확보가 불가능할 경우 대처할 수 있는 시설 이용가능성에 대하여 평가하였다. 거주성 상실 시 거주성 재확보를 위한 운전원 및 비상대응조직원의 교육 및 훈련계획의 적절성을 평가하였다.

2.3.1 거주성 확보를 위한 비상대응 시설 별 설비

비상대응시설과 관련한 기술요건은 다음과 같다.

- 원자력안전위원회고시 제2017-38호 원자력사업자의 방사선비상대책에 관한 규정. 제4장(방사능재난대응시설 등)[6-20]
 - 방사선비상상황 하에서도 충분한 거주성을 확보하도록 위치, 규모, 설비, 장비 및 자료 등을 구비
- 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제25조(원자로제어실 등)[6-23]
 - 주제어실은 사고기간 동안 받는 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 아니하고 사고 조건하에서 운전원이 출입하거나 거주할 수 있도록 방사선 및 유독가스와 같은 위험으로부터 운전원을 보호할 수 있는 방사선방호 및 환기설비를 설치
- 가압경수로형 원전 계속운전 심사지침서(KINS/GE-N8)[6-24]
 - 주제어실 거주성 상실 시 대피통로, 접근로 및 원격정지제어반은 화재와 화재진압의 영향으로부터 발전소 종사자 보호
 - 원격정지제어반 거주성 확보를 위해 공기의 급기, 배기 및 차단기능 유지

한울본부의 비상대응시설은 비상대책본부 내 비상대책실(EOF)과 발전소 별로 비상기술지원실(TSC), 비상운영지원실(OSC) 등이 설치·운영된다. 주제어실(MCR), 보건물리실, 환경실험실 등 기존시설도 비상발령 시 비상대응시설로 전환·운영된다[6-3]. 방사선비상 사고 시 비상대응시설의 거주성 및 방사성물질 오염 시 저감 능력은 다음과 같다.

비상대응시설 중 비상대책실은 비상시 발전소 대응활동을 총괄하는 곳으로 에 위치하고 있으며, 구조물은 국내 건축기준에 따라 설계되었다. 전원상실을 대비한 비상전원으로 무정전전원장치(UPS) 및 비상디젤발전기를 구비하고 있으며, 비상장구함, 제염 및 샤워설비를 갖추고 있다. 또한, 현재 비상대책실은 외부공기가 방사성물질로 오염되었을 경우 비상요원의 거주성확보를 위한 비상환기계통을 설치 중에 있다.

비상기술지원실(TSC)은 비상대책실(EOF) 발족 전까지 비상대책실의 기능을 수행한다. 또한 중대사고관리지침서 수행 시 요구되는 각종 주요변수를 제공하고 소내 유무선 통신, 방송 및 경보설비 유지 보수 업무 등을 수행한다. 비상기술지원실은 사고 시 전신피폭선량을 0.05 Sv 이하로 유지하도록 차폐설계 되어 있으며, 사고기간 중 비상요원의 공기흡입으로 인한 내부피폭을 방지하기 위해 고효율입자여과기를 포함한 비상환기설비를 갖추고 있다[6-5]. 그러나 비상기술지원실의 비상환기설비는 비안전등급으로 설계되어 극한자연재해 시 계통의 신뢰성 확보가 어렵다.

비상운영지원실(OSC)은 비상기술지원실 및 비상대책실과의 협조체제를 구축하고

비상대응활동을 지원하는 목적을 가지며, 한울3,4호기 [redacted]에 위치한다. 필요시 예비 비상운영지원실을 운영할 수 있으며, 예비 비상운영지원실은 한울3,4호기 [redacted] 앞에 위치한다. 그러나 비상운영지원실은 방사능 사고 시 운전원 거주성확보를 위한 비상환기계통이 없다.

주제어실은 발전소 운영에서 가장 중요한 설비로 사고 시 주제어실 공기조화계통의 일부인 주제어실 비상보충계통으로부터 외부공기를 공급받는다. 비상보충계통은 제어되지 않는 방사능 방출로부터 보호된 환경을 제공하여 운전원이 발전소를 제어할 수 있도록 한다. 주제어실 공기조화계통은 두개의 다중 계열로 구성되며, 각 계열은 주제어실 지역을 비상보충계통으로부터 추가된 외기량 [redacted]과 재순환 공기량 [redacted]을 합친 전체 용량을 100% 처리한다. 각 계열은 습분 분리기, 전기 가열 코일, 전단 여과기, 전단 고효율 입자 여과기, 공간 전기 가열 코일(공기조화기내의 습도제어), 활성탄 흡착기, 후단 고효율입자여과기, 송풍기 및 관련 덕트와 덕트 부속물로 구성된다. 안전주입작동신호 또는 주제어실 비상환기작동신호를 받는 즉시 운전중인 기기 계열에 속한 비상환기공기정화기는 자동으로 기동된다.

주제어실 공기조화계통은 설계기준사고 시 10 CFR 50 부록 A, 일반설계기준 19에 따라 사고 기간 동안 받는 전신선량 50 mSv(5 rem), 또는 신체의 어느 부분에 그에 상당하는 등가선량을 초과하지 않고 운전원이 거주할 수 있는 환경이 유지되도록 설계되어 있다. 주제어실 사고선량 분석에 의하면 가장 제한적인 냉각재 상실사고 시에도 주제어실 공기조화계통은 주제어실 운전원을 공기 중 방사능으로부터 방호수단을 제공한다[6-25].

주제어실 공기조화계통은 지진범주1의 요건에 따라 설계되었으며, 대기 중인 계통이 적절히 동작하는 것을 보장하기 위해 운영기술지침서상의 점검요구사항에 따라 주기적으로 점검한다.

한편, 주제어실이 외부와 격리되었을 경우 발전소를 안정한 상태로 유지하기 위한 조치를 수행하는 운전원에게 필요한 비상식량 및 비상용품(구급용구, 비상약품 및 위생용품) 관리에 대한 제반절차가 수립되어 있다[6-26]. 주제어실거주성계통은 모든 정상 및 사고 운전조건하에서 적어도 [redacted]일 동안 주제어실 구역내에서 최소한 [redacted]명의 운전요원을 지원하도록 설계된다. 또한 비상시 주제어실내 직원에게는 최소 [redacted]일 체류분의 음식이 제공되며, 식수공급 및 소내 응급구조 설비가 구비된다. 아울러, 다수호기 동시사고에 대비하여 주제어실, 비상기술지원실 등 비상대응시설마다 선량률 측정기, 오염도 측정기, 개인 선량계, 열형광선량계, 갑상선 방호약품을 구비하고 있다.

환경방사능실험실은 한울1호기로부터 [redacted]에 위치하

며 구조물은 국내 건축기준에 따라 설계되었으며, 별도의 비상환기계통은 갖추고 있지 않아 거주성 상실 시 예비환경방사능실험실인 경북대학교 방사선과학연구소로 이동하여 임무를 수행한다.

2.3.2 비상대응시설 거주성 상실시 비상대응능력 유지 가능성

각 비상대응시설 별로 거주성 상실 가능성을 평가하고 상실 시 비상대응능력 유지가능성 및 대처 설비 여부에 대하여 평가하였다.

주제어실은 외부의 극한자연재해에 대하여 거주성이 확보되며 외부 방사능에 대하여 운전원의 피폭선량을 0.05 Sv이하로 유지하도록 차폐 설계되어 있다. 방사성 물질의 유입에 대비하여 비상공기정화계통을 구비하고 있으며, 장기 소내정전사고 시에도 운전원의 거주성을 확보하기 위하여 비상공기정화계통에 이동형발전차로부터 전원을 공급받을 계획이다. 화재 등으로 주제어실의 거주성이 상실되는 상황에서는 비정상절차서에 따라 운전원들이 원격정지제어반(RSP)으로 이동하여 발전소 안전정지작업을 수행한다[6-27]. 원격정지제어반의 원격정지계통은 주제어실 이외의 다른 장소에서 발전소를 안전한 정지 상태로 만들고 유지할 수 있도록 운전원에게 충분한 계측설비와 제어를 제공한다.

환경방사능실험실은 방사성물질 오염 시 저감설비는 갖추고 있지 않으나, 방사선 비상계획수행절차서에 따라 시설 이용 불능 시 예비환경방사능실험실인 경북대학교 방사선과학연구소를 이용할 수 있다. 따라서 환경방사능실험실은 거주성 상실 시 대처 설비를 가지고 있는 것으로 평가된다.

한편, 한수원(주)은 월성1호기 스트레스테스트 후속조치 및 후쿠시마 추가 보완대책으로 비상대책실, 비상기술지원실, 비상운영지원실의 거주성 상실 대처와 중대사고 시 사고수습·총괄을 위해 원전본부 별 소내 비상대응거점시설을 건설할 계획이다. 한울본부는 []까지 비상대응거점 시설을 건설할 예정으로 있으며, 비상대응거점 시설에는 다음의 사항이 고려된다[6-28].

- 비상대응거점은 비상대책실, 비상운영지원실, 비상기술지원실 등을 포함하며 약 []의 인원을 수용할 수 있다.
- 비상대응거점은 면진시스템이 적용되며 설계기준지진 값으로 수평방향 []를 적용한다. 또한 침수를 예방하기 위하여 부지 내 [] 이상의 부지고에 건설된다.
- 비상디젤발전기를 이용하여 최대 [] 동안 전원공급이 가능하며 공기정화설비, 비상통신설비를 갖춘다.

따라서 비상대응거점이 완공되면 상기에 언급한 비상대책실, 비상기술지원실, 비

상운영지원실의 거주성상실에 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

2.4 한울3,4호기 차이점

한울3,4호기는 사고 대응조치, 주민보호 능력 확보수준 및 설계개념을 동일하게 고려하기 때문에 방재 및 비상대응능력 분야의 비상대응능력, 의사결정 적절성 및 비상대응시설 거주성 평가는 동일하게 평가되어 진다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

한울3,4호기 방재 및 비상대응 분야와 관련하여 후쿠시마 후속조치 사항 이행여부를 다음과 같이 확인하였다[6-29].

가. SFP 수위, 온도, 방사선계측기의 안전등급 적용

SFP의 냉각기능 상실을 감시할 수 있도록 SFP에 설치되는 수위, 온도, 방사선계측기를 안전등급으로 설치 완료하였다.

나. 중대사고 교육훈련 강화

중대사고 교육훈련에 관한 기본계획을 수립하였고, 중대사고 시나리오 개발을 완료하였다.

다. 사고관리전략 실효성 강화를 위한 중대사고관리지침서 개정

중대사고관리지침서 개정을 위한 평가용역을 수행 완료하였고, 중대사고 관리지침서를 개정하여 조치결과를 원자력안전위원회로 제출하였다.

라. 정지저출력 운전 중 중대사고관리지침서 개발

운전 중 중대사고관리지침서를 규제기관에 제출하였고, 정지저출력 중대사고관리지침을 반영한 중대사고관리지침서 또한 규제기관에 제출하였다.

마. 임시 비상운전 지침서 개발

임시 비상운전 지침서를 개발하여 결과를 규제기관에 제출하였다.

바. 주민보호용 방호장비 추가 확보

주민보호용 갑상선방호약품 및 호흡방호장비를 추가 확보하여 지자체로 배포하였다.

사. 다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상계획서 개정

극한자연재해 등에 의한 다수호기의 동시 비상상황에 적용 가능한 비상대응 조직의 구성 및 운영방안을 반영한 방사선비상계획서를 변경승인을 받았다.

아. 장기비상발령 대비 비상장비 추가 확보

방호용품 및 방사선계측기는 추가 구매하여 비치를 완료하였다.

자. 방사능방재훈련 강화

방사능방재 불시 전체훈련을 실시하였고, 다수호기 동시비상 시나리오를 개발 완료하였다.

차. 보수작업자 방호대책 확보

협력사 방재교육 및 훈련강화 방안을 수립 완료하였고, 사이버 방재교육시스템 또한 개발 완료하였다.

카. 비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가

사고 시 방사선량평가 통합시스템을 개발하는 연구 과제를 수행 완료하였다.

타. 비상 경보시설의 성능 강화

대량 문자알림 시스템인 **이츠세이프(its say)** 및 비상전원을 확보하였고, 울진부지 **외곽 5 km**까지 방송설비 보강 및 무정전전원장치(UPS)를 설치하였고, **ESB(Enterprise Service Bus)와 RAC(Real Application Cluster) 서버집합**을 보강 완료하였다.

파. 휴대용 무선전화기/위성전화 등 통신설비 확보

전 원전에 **고정용 3대와 휴대용 1대**의 위성전화기 확보하였으며 한울본부의 경우, **고정용 2대(한울3호기 3대와 휴대용 3대(한울본부 직원 2대, 환경안전직 1대))**

■를 구비하고 있다.

3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

가. 월성1호기 스트레스테스트

“방재 및 비상대응능력”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항[6-30]의 반영여부를 확인한 결과, 표 6-13에서와 같이 안전 개선사항 2건에 대한 5가지 세부사항은 한울3,4호기 평가에서 후쿠시마 후속조치 등으로 수행중이거나 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

“방재 및 비상대응능력”과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항[6-31]의 반영여부를 확인한 결과, 표 6-14에서와 같이 안전 개선사항 3건에 대해 안전 개선사항 및 후쿠시마 후속조치 등으로 수행 중인 것으로 검토되었다.

3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 방사선비상계획 수행절차서 개정

주민예상피폭선량평가 프로그램 사용 불능 시 주민예상피폭선량 수계산 절차를 수립하여 방사선비상계획 수행절차서에 반영하여 개정할 예정이다.

제4절 결론

한울3,4호기 스트레스테스트(Stress Test) 평가분야 중 “방재 및 비상대응능력”을 평가하기 위해 주민 보호조치를 위한 선량평가 및 환경방사선·능의 감시능력, 소내·외 인력과 장비를 통한 대응능력, 장기 정전사고 시 통신체계의 건전성 등을 평가하였다.

방재 및 비상대응능력 중 비상대응능력의 주요평가 결과는 다음과 같다.

- 단일호기 또는 다수호기 사고 시 S-REDAP을 이용하여 주민예상피폭선량을 평가함. S-REDAP의 사용이 불가할 시 수계산으로 대체할 수 있는 절차를 방사선비상계획수행절차서에 반영할 예정임. 전산프로그램 운영요원의 전문성을 확보하기 위한 교육과 훈련도 적절하게 이루어지고 있음
- 자체인력 및 외부방재대책기관의 인력에 대하여 다수호기 사고에 대비한 방호조치의 계획 및 절차가 적절하게 수립되었음. 이들을 위한 방호장비도 적절한

수량이 확보되어 있음

- 타 부지(월성 등)를 비롯한 외부기관의 지원인력 및 장비는 극한자연재해 시에도 필요한 시간 이내에 가용한 접근 방법을 통하여 한울부지에 지원 가능함
- 장기 소내정전사고 시 발전소 안전변수는 주제어실 및 비상기술지원실에서 필수안전기능감시계통(CFMS)을 통하여 확인됨. 비상통신설비는 전화, 팩스, 방송설비, 인터넷 등 다양한 수단으로 구성됨. 극한자연재해 시에도 발전소의 통신체계가 유지될 수 있도록 위성전화를 보장하였음
- 장기 소내정전사고 시 방사선 비상발령 조건에 해당하는 경보를 확인하기 어렵거나 사용후연료저장조 냉각기능이 상실되었을 경우에도 방사선 비상발령기준은 적절하게 설정되어 있음
- 환경방사선·능 감시는 기존에 설치되어 있던 고정형 환경방사선감시기를 통하여 수행하며, 극한자연재해 상황에서 고정형감시기의 사용이 불가능할 경우를 대비하여 이동형감시기 및 감시차량을 확보하고 있음

방재 및 비상대응능력 중 의사결정 적절성의 주요 평가결과는 다음과 같다.

- 비정상운전절차서, 비상운전절차서, 비상대체설비 운영지침서, 중대사고관리지침서, 그리고 방사선비상계획서와 같은 문서상에 기술된 의사결정권자의 책임 및 임무, 적용 시기 등은 상충하지 않고 적절하게 기술되어 있음
- 방사선비상계획서에 다수호기 동시사고 발생 시 조직 및 책임이 적절하게 기술되었으며 이동형발전차, 이동형펌프 등 비상대체설비의 사용 결정과 관련된 부분에서 의사결정권자의 권한 규정은 적절함

방재 및 비상대응능력 중 비상대응시설의 거주성과 관련해서는 다음과 같이 평가되었다.

- 장기 소내정전 시 주제어실의 거주성 확보를 위하여 비상공기정화계통은 이동형발전차 등으로부터 전원을 공급받을 계획임.
- 극한자연재해 혹은 방사능누출사고로 인하여 비상대책실, 비상기술지원실, 비상운영지원실의 거주성이 상실될 경우를 대비하여 한울본부에 소내비상대응거점 시설을 건설할 계획임.

상기와 같이 한울3,4호기는 후쿠시마 원전사고 이후 단일호기 또는 다수호기 동시사고 비상대응조직 및 의사결정권자의 체계화, 장기 비상상황 대비 비상장비의 추가 확보, 운전원의 중대사고 교육을 포함한 방사능방재훈련의 강화하였으며, 향후 비상대응거점 시설 건설 등으로 비상대응 관련 안전성을 더욱 향상시킬 예정이다. 따라서 한울3,4호기는 극한자연재해에 의한 단일호기 또는 다수호기 동시사고에도 충분한 방재 및 비상대응능력을 확보하고 있다.

제5절 참고문헌

- 6-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침 개정 1, 2016
- 6-2. 한국수력원자력(주), 방사선 비상대응 선량평가 통합시스템 사용자 설명서 [redacted]
- 6-3. 한국수력원자력(주), [redacted] 한울원자력본부 방사선비상계획 수행절차서
- 6-4. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-5. 한국수력원자력(주), 한울원자력본부 방사선비상계획서
- 6-6. 한국수력원자력(주), 월성원자력본부 방사선비상계획 수행절차서
- 6-7. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-8. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-9. 한국수력원자력(주). 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황
- 6-10. 한울3,4호기 최종안전성분석보고서 [redacted]
- 6-11. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-12. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-13. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-14. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-15. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-16. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-17. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-18. 한국수력원자력(주), 한울3,4호기 중대사고관리지침서(SAMG)
- 6-19. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-20. 원자력안전위원회고시 제2017-38호, 원자력사업자의 방사선비상대책에 관한 규정, 2017
- 6-21. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-22. [redacted]
- 6-23. 원자력안전위원회규칙 제3호, 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 2011
- 6-24. 한국원자력안전기술원, KINS/GE-N8, 가압경수로형 원전 계속운전 심사지침서, 2006
- 6-25. 한울3,4호기 최종안전성분석보고서 [redacted]
- 6-26. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-27. 한국수력원자력(주), [redacted]
- 6-28. 한국수력원자력(주), 원전본부별 소내비상대응거점 신축 기본계획(안)
- 6-29. 한국수력원자력(주), 한울본부 후쿠시마 후속조치 현황
- 6-30. 한국수력원자력(주), 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황
- 6-31. 한국수력원자력(주), 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황
- 6-32. 한국수력원자력(주), 다수호기 극한재해 사고관리전략 추진(안)
- 6-33. 한국수력원자력(주), 발전소 소·실장 중대사고 교육(안)

제6절 표, 그림

표 6-1 S-REDAP 메뉴 및 기능

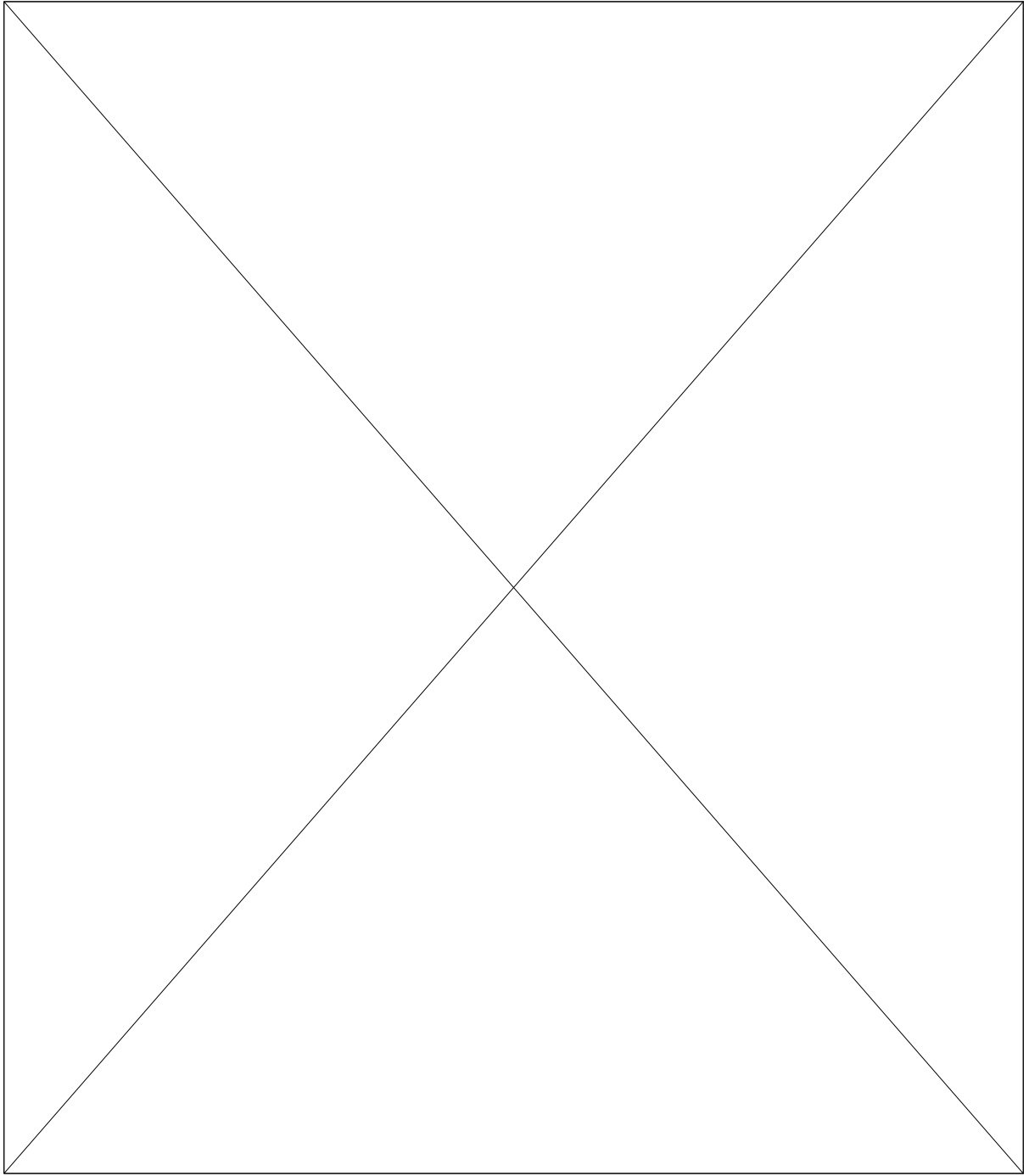


표 6-2 출입통제소 운영 위치

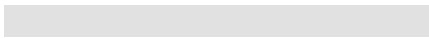
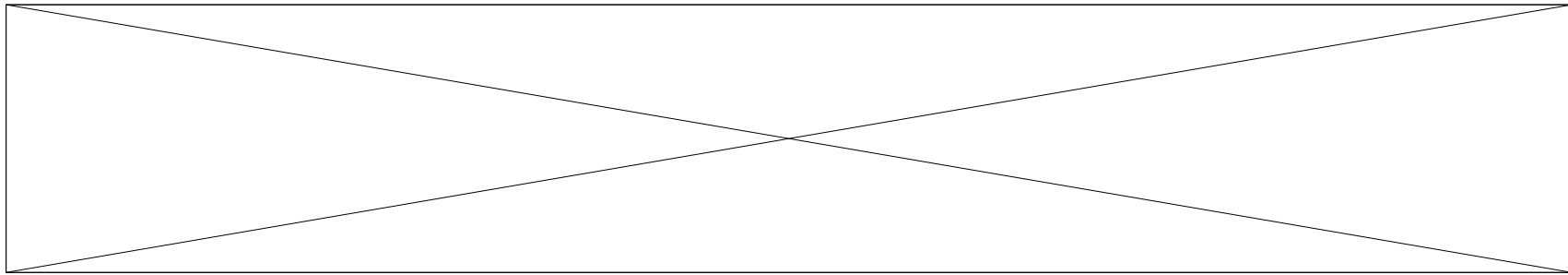


표 6-3 한울본부 비상대응시설 방호용품 확보현황

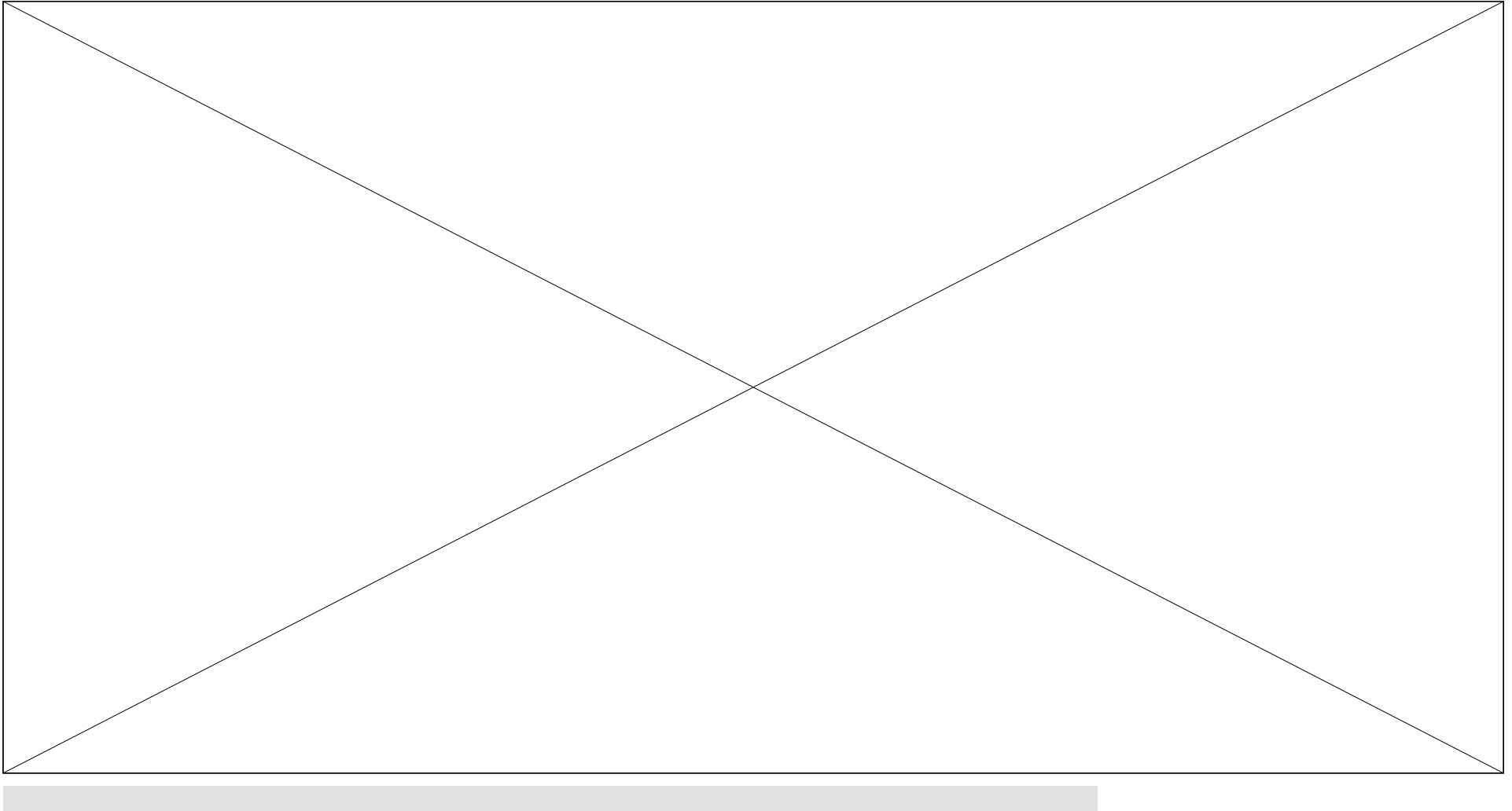


표 6-4 한울본부 비상대응시설 방사선측정기 확보현황

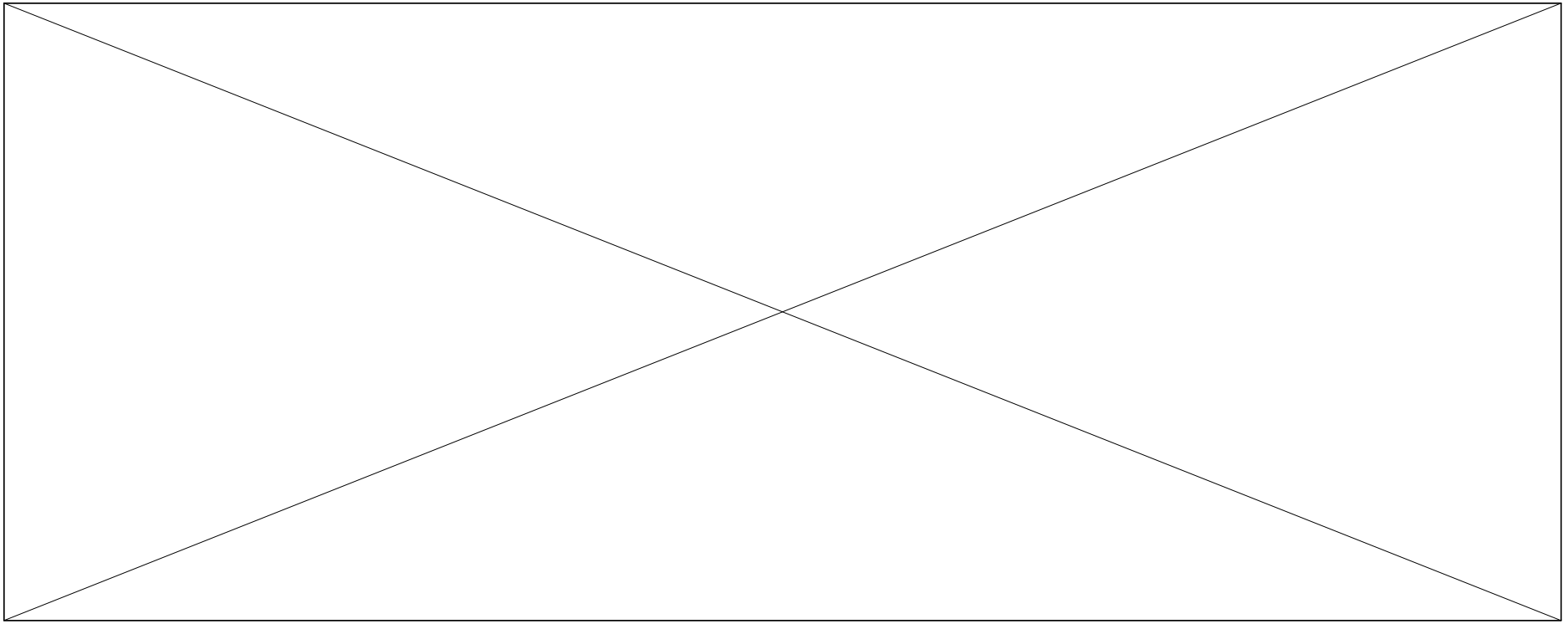


표 6-5 월성본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황

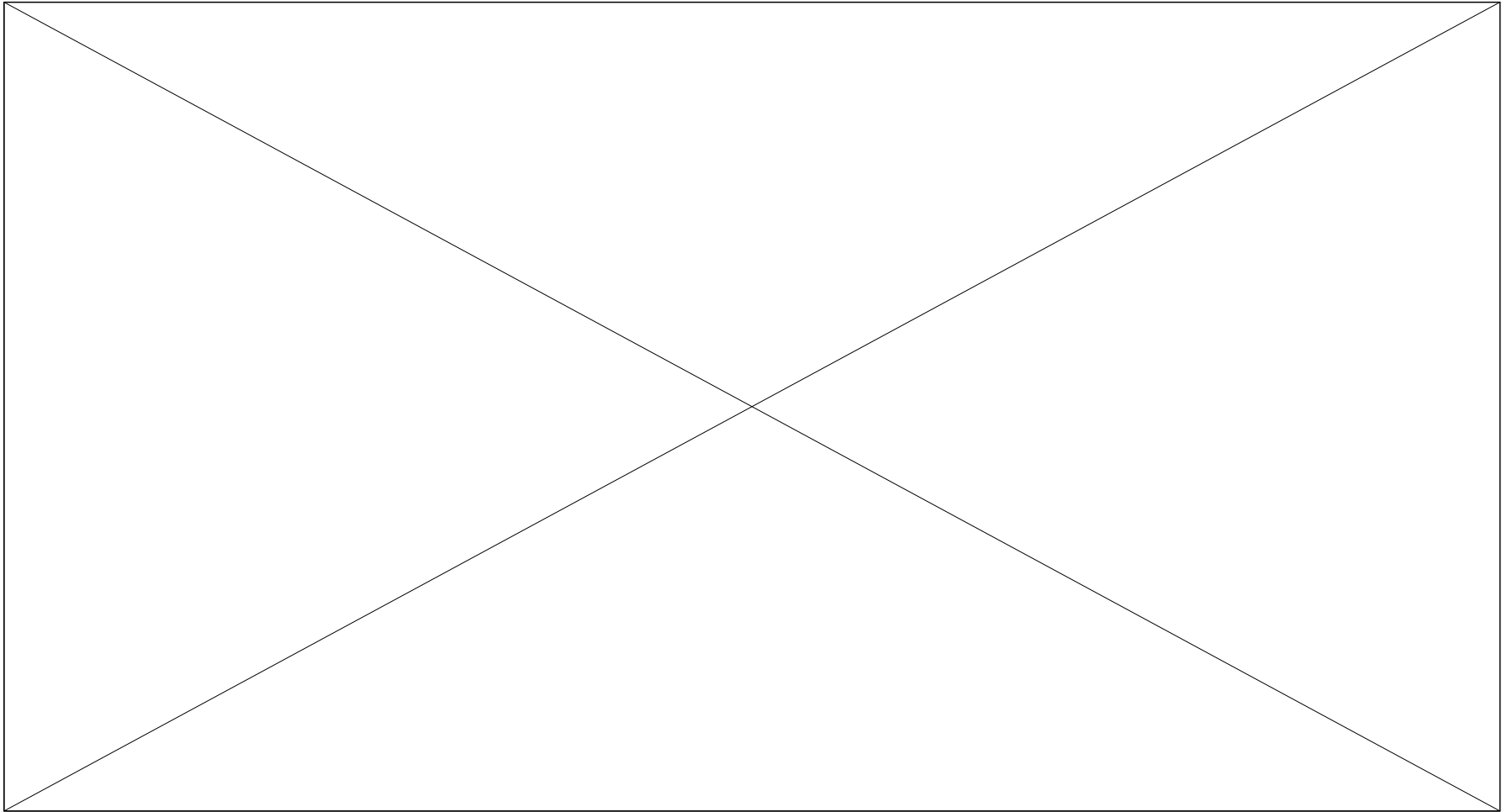


표 6-6 고리본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황

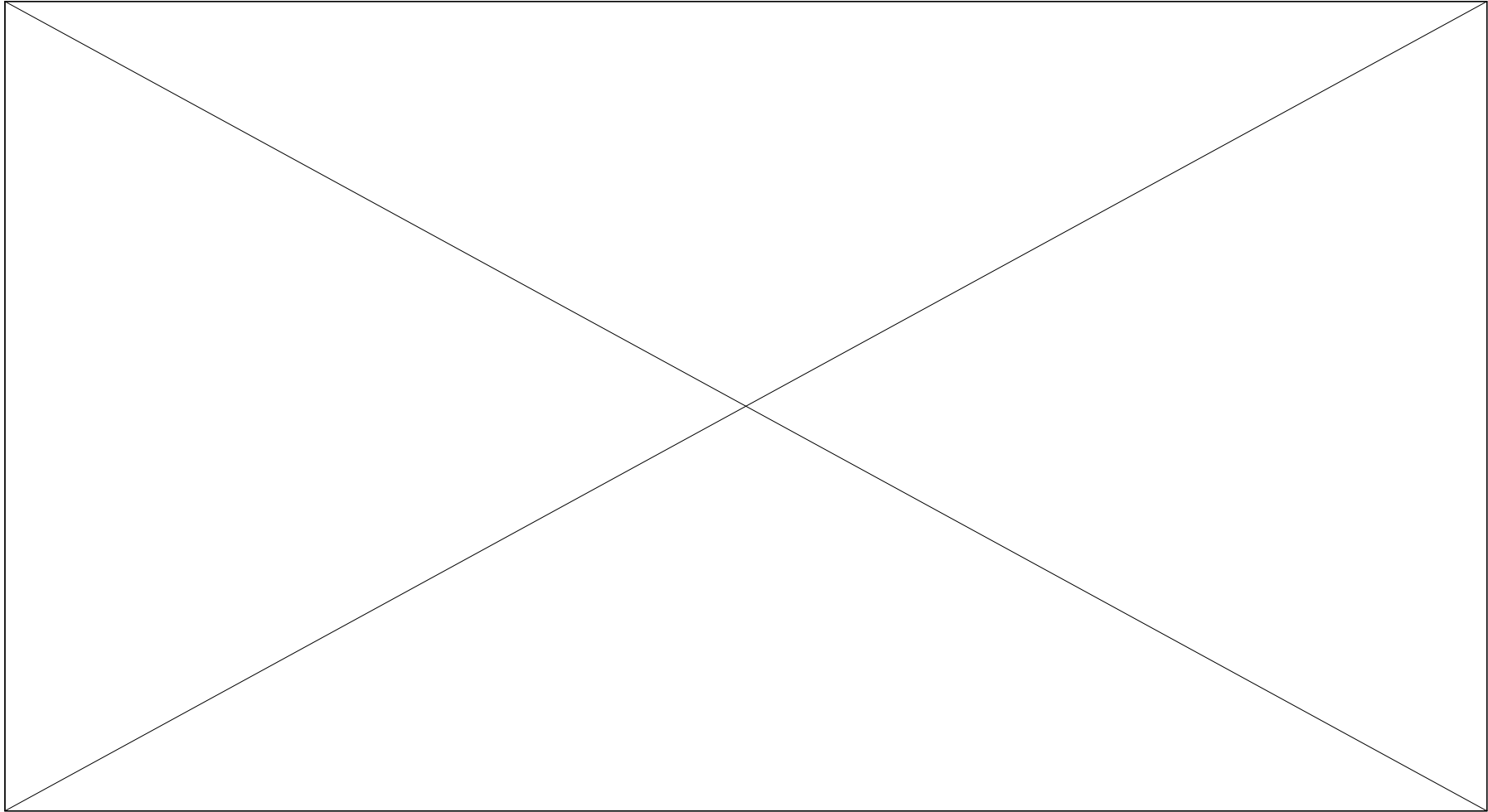


표 6-7 한울본부 소내 비상통신설비

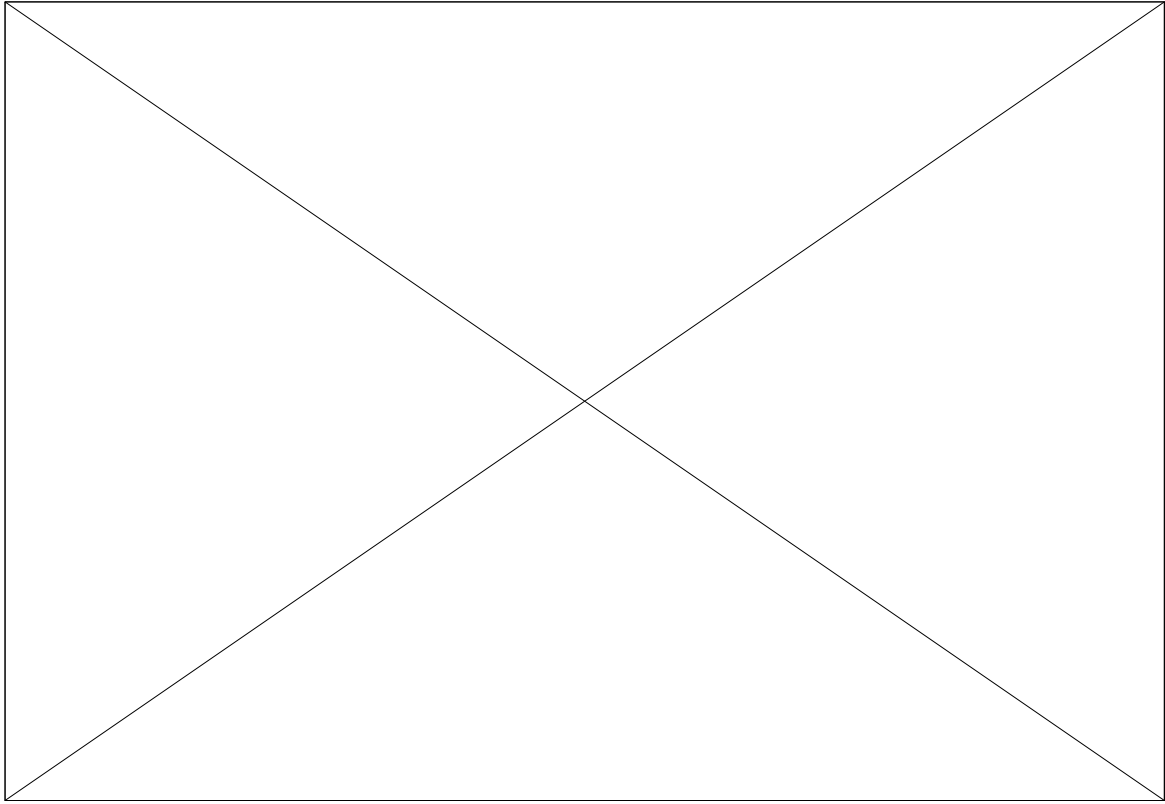


표 6-8 유관기관 비상통신설비

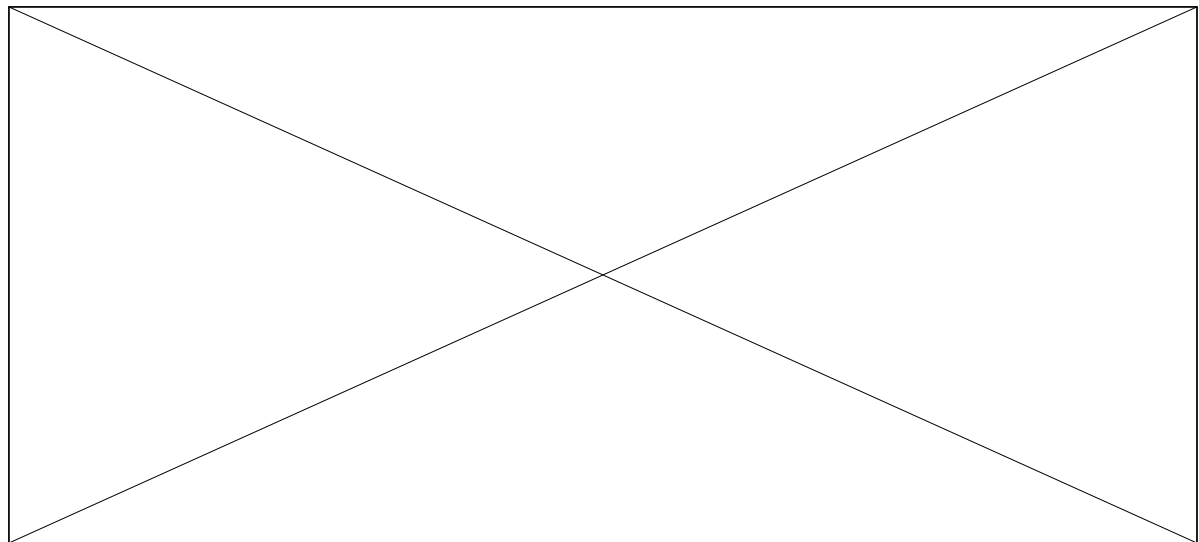


표 6-9 한울본부 고정형 환경방사선감시설비의 방사선검출기 모델 및 규격

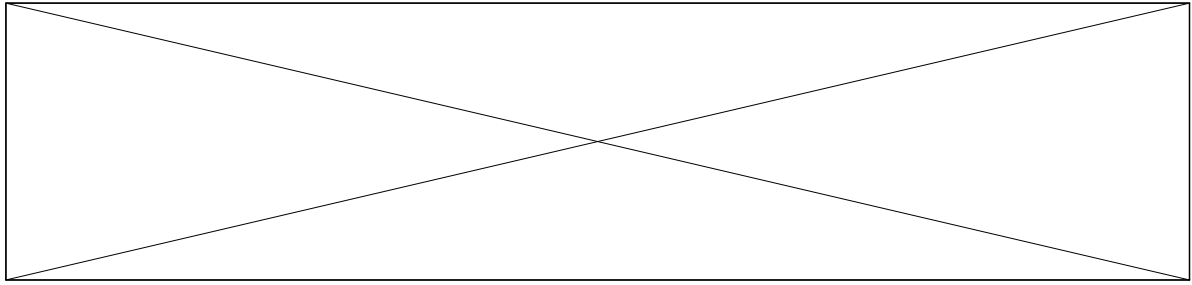


표 6-10 환경방사선감시기(ERMS) 설치지점

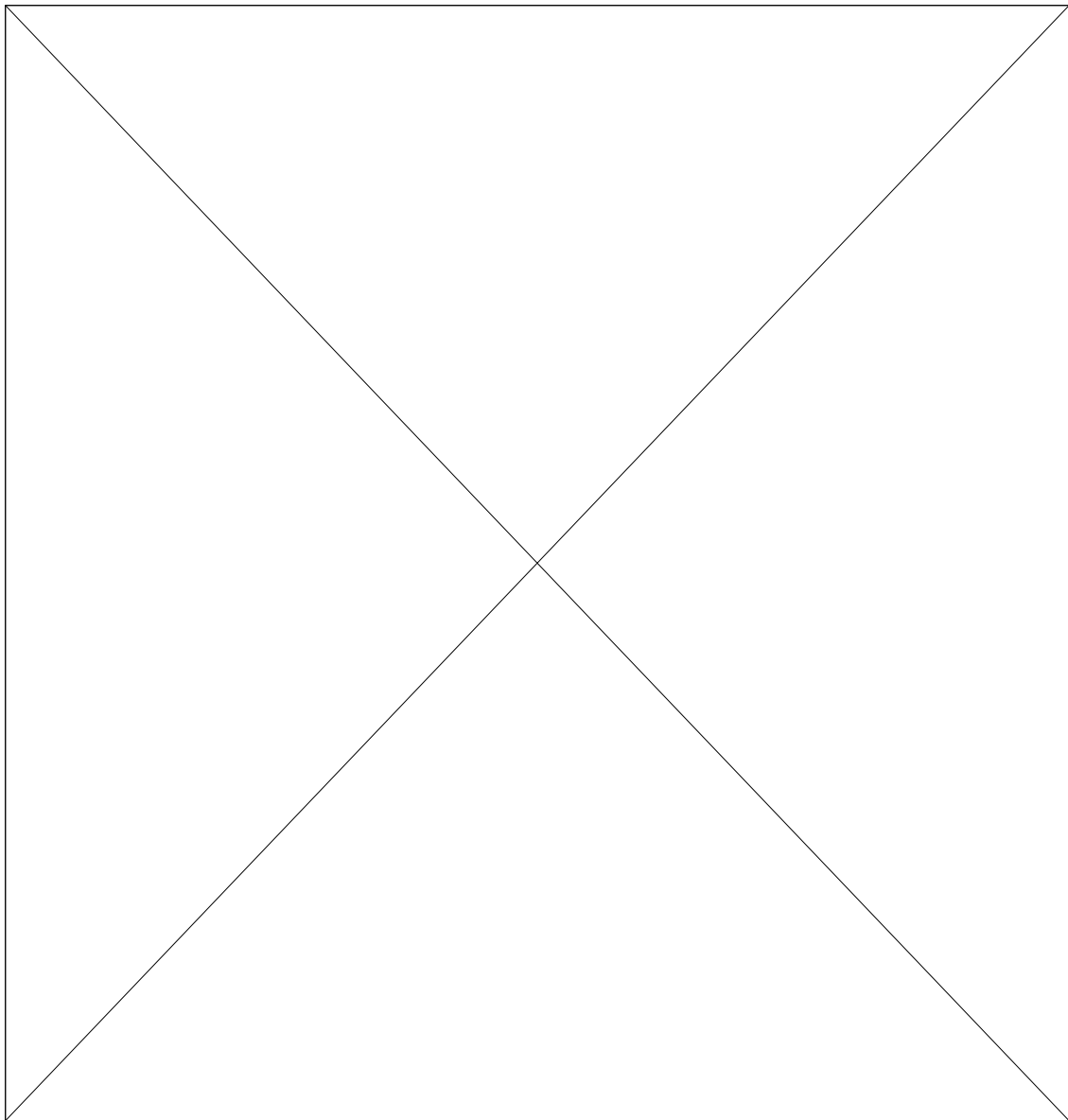


표 6-11 이동형환경감시차량(EMV)의 구비 장비

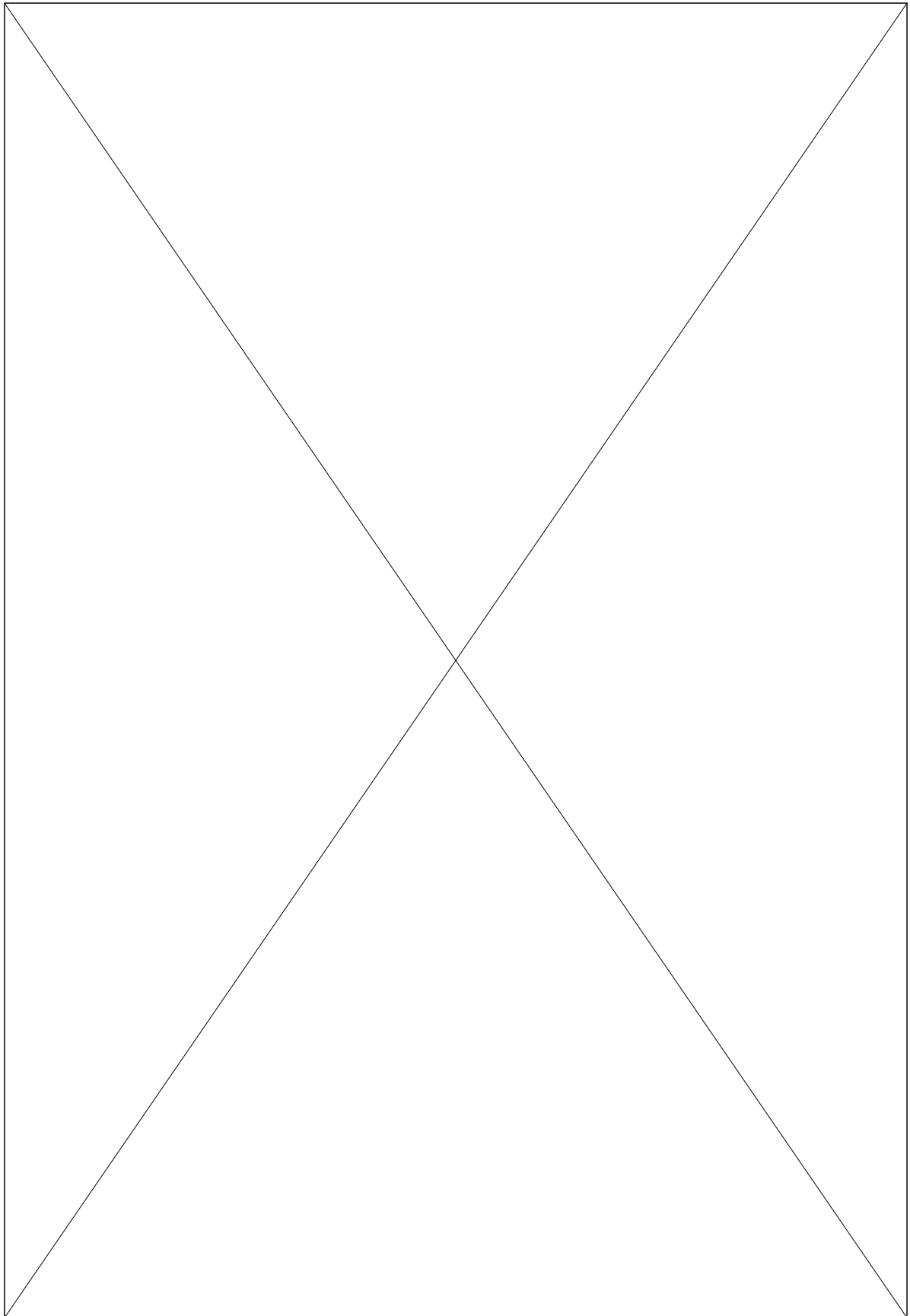


표 6-12 한울3,4호기 비상대응 프로그램(1/3)

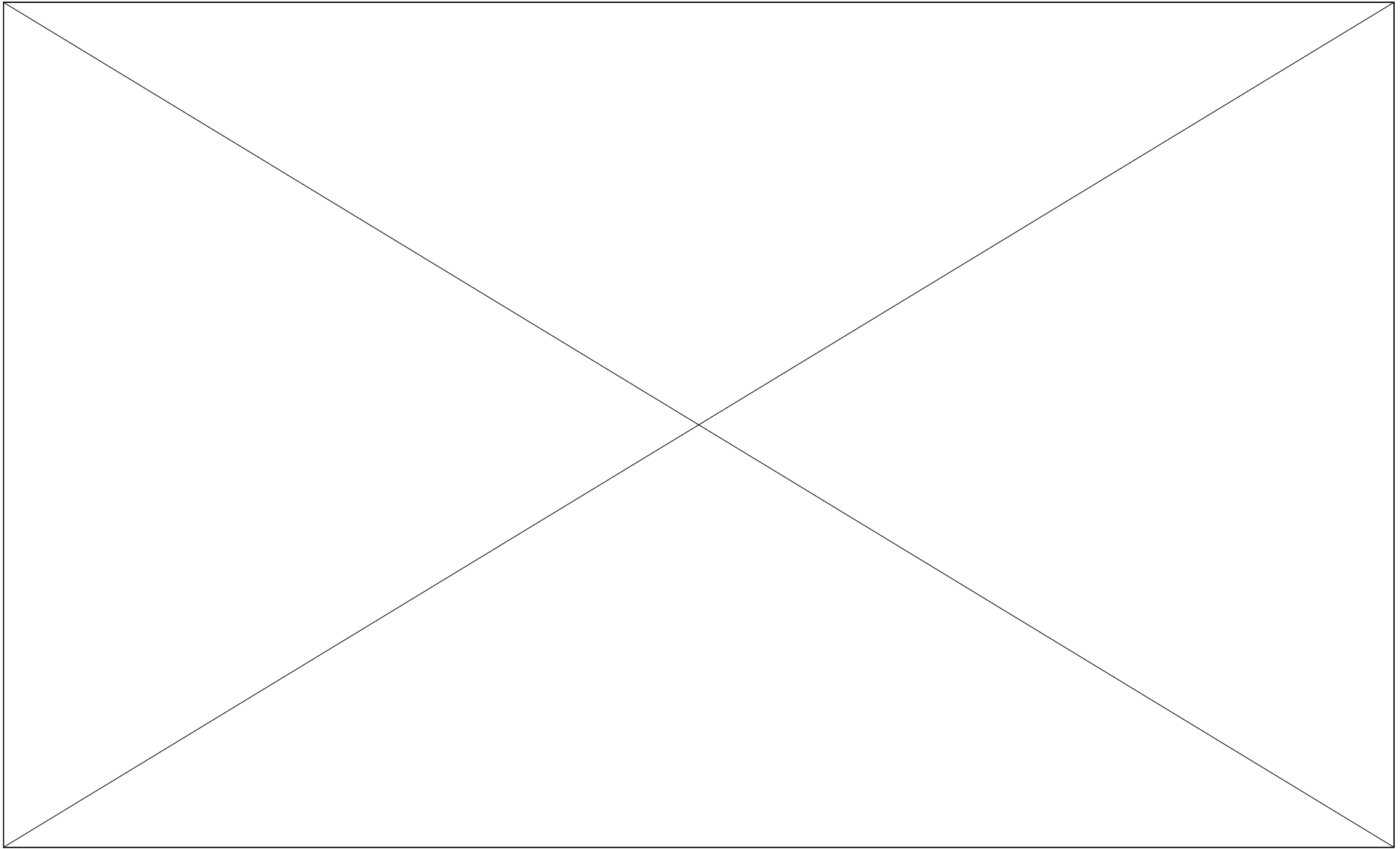


표 6-12 한울3,4호기 비상대응 프로그램(2/3)

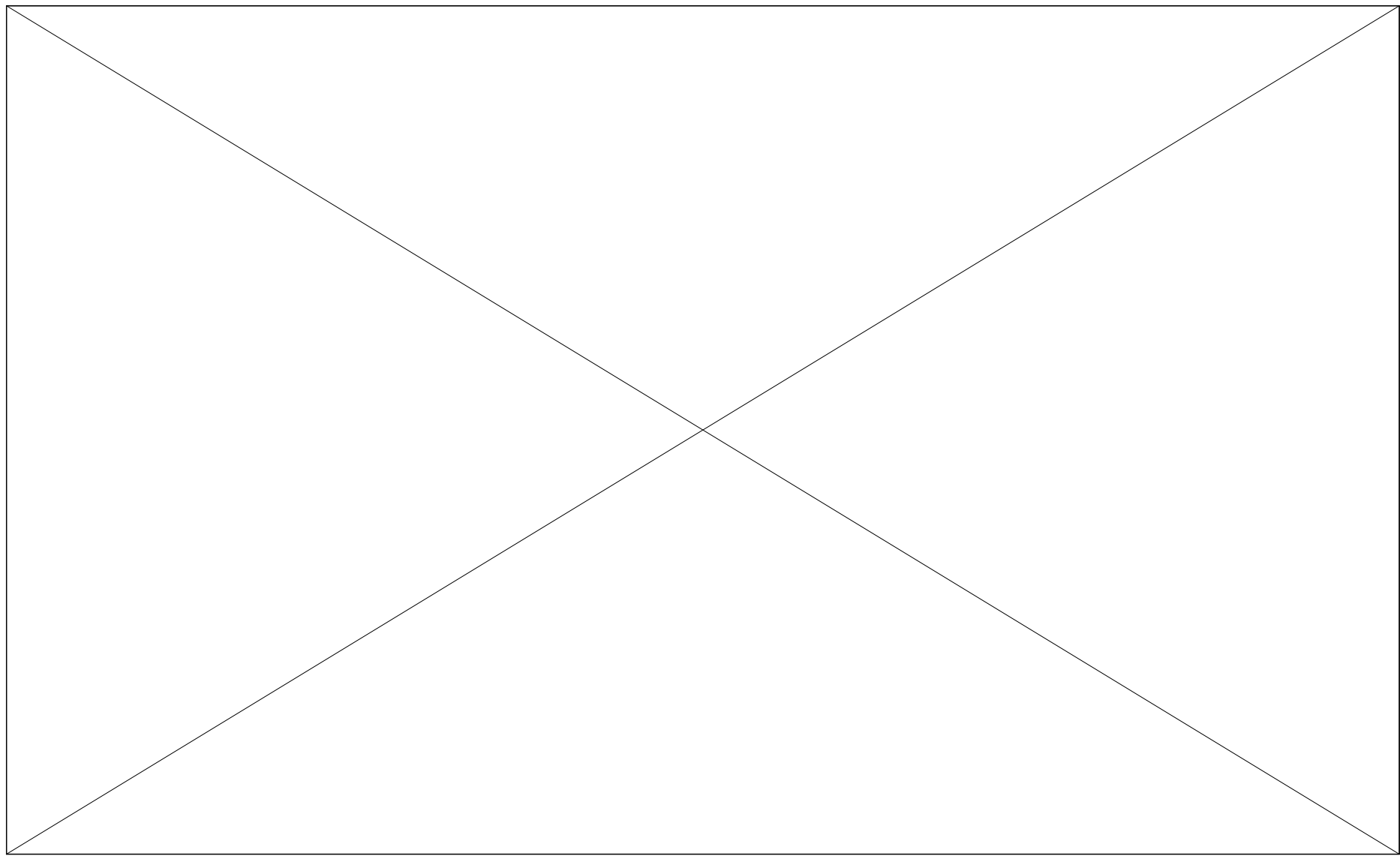


표 6-12 한울3,4호기 비상대응 프로그램(3/3)

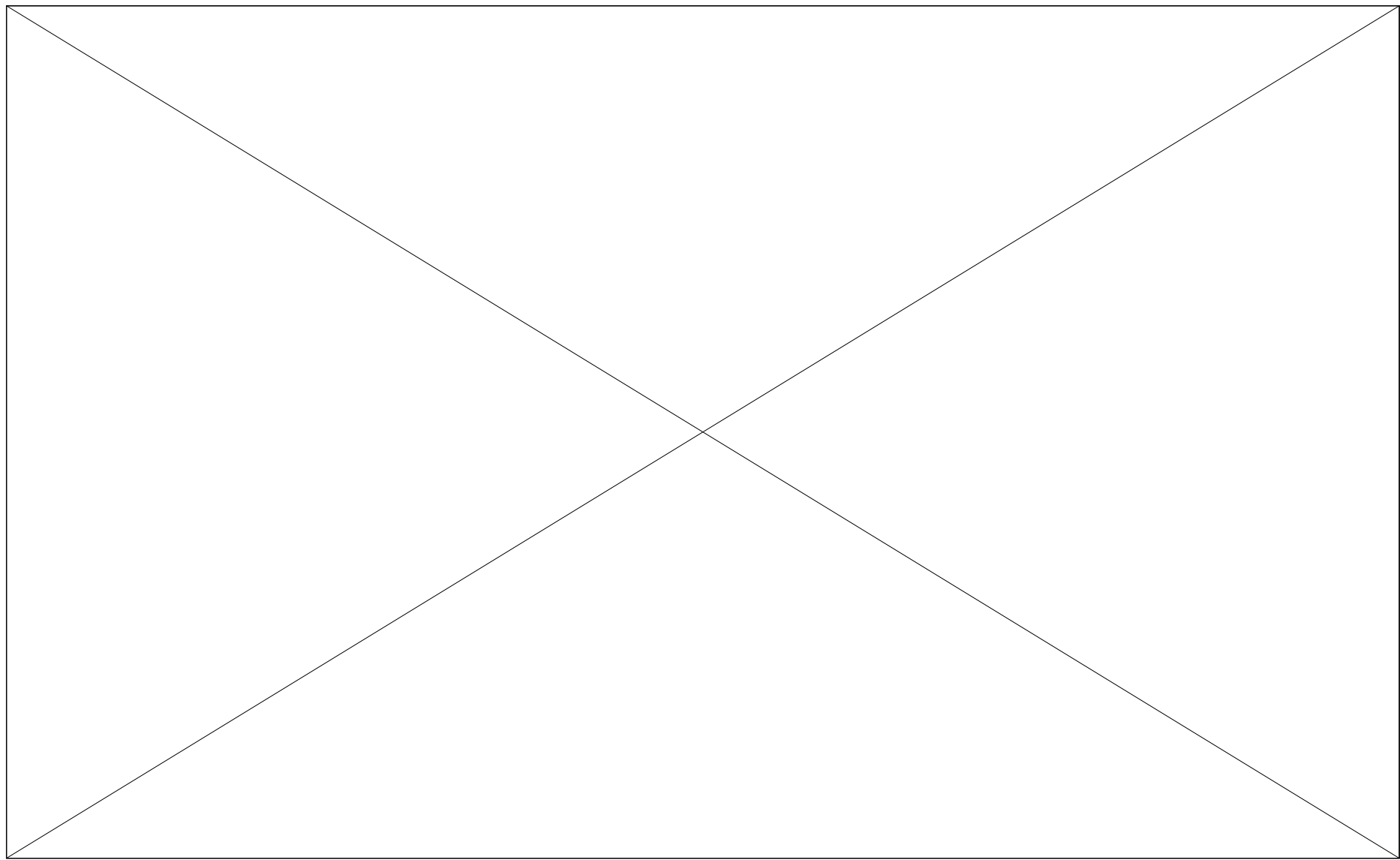


표 6-13 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

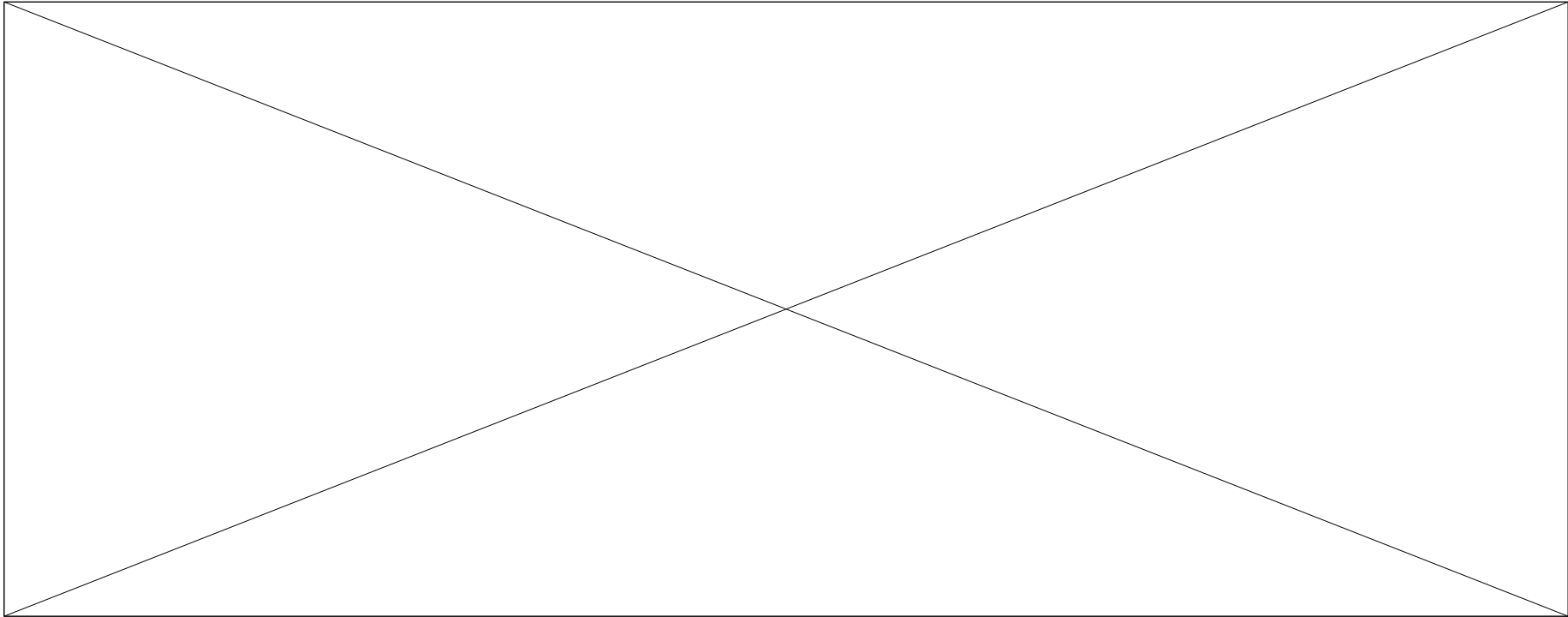
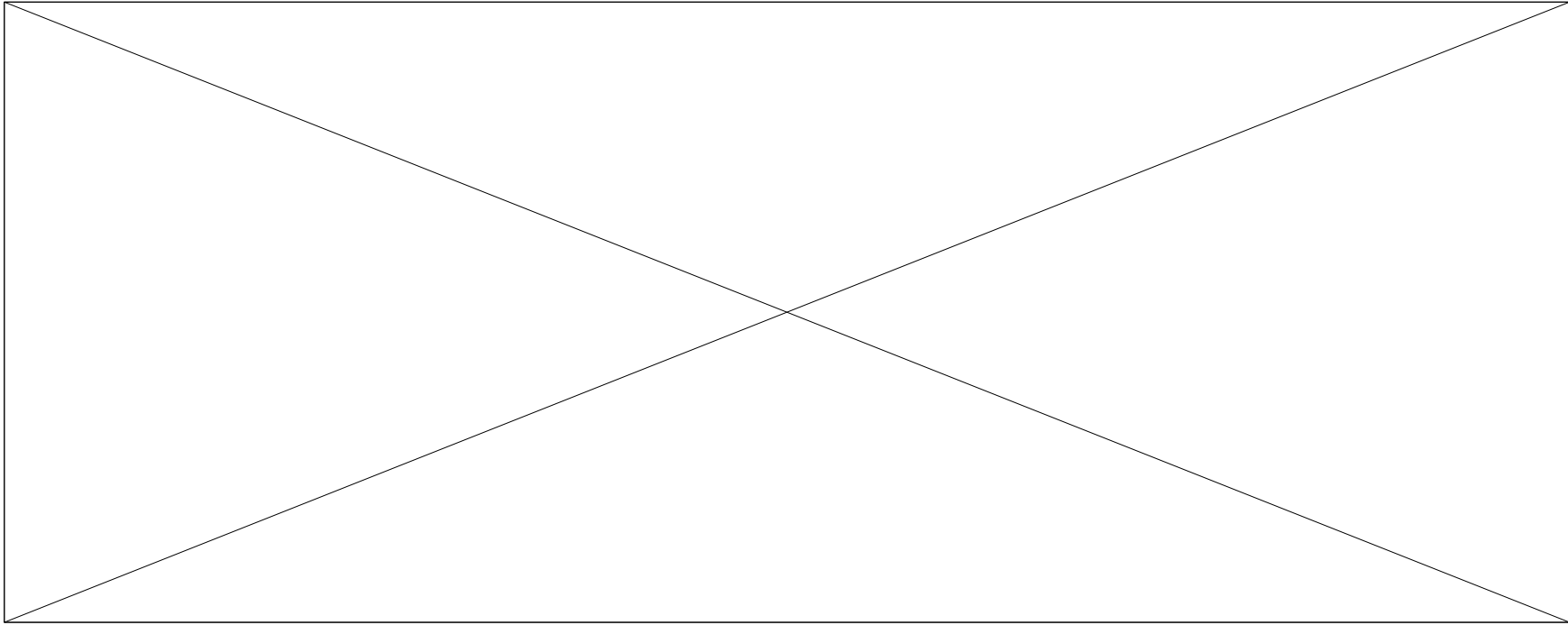


표 6-14 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인



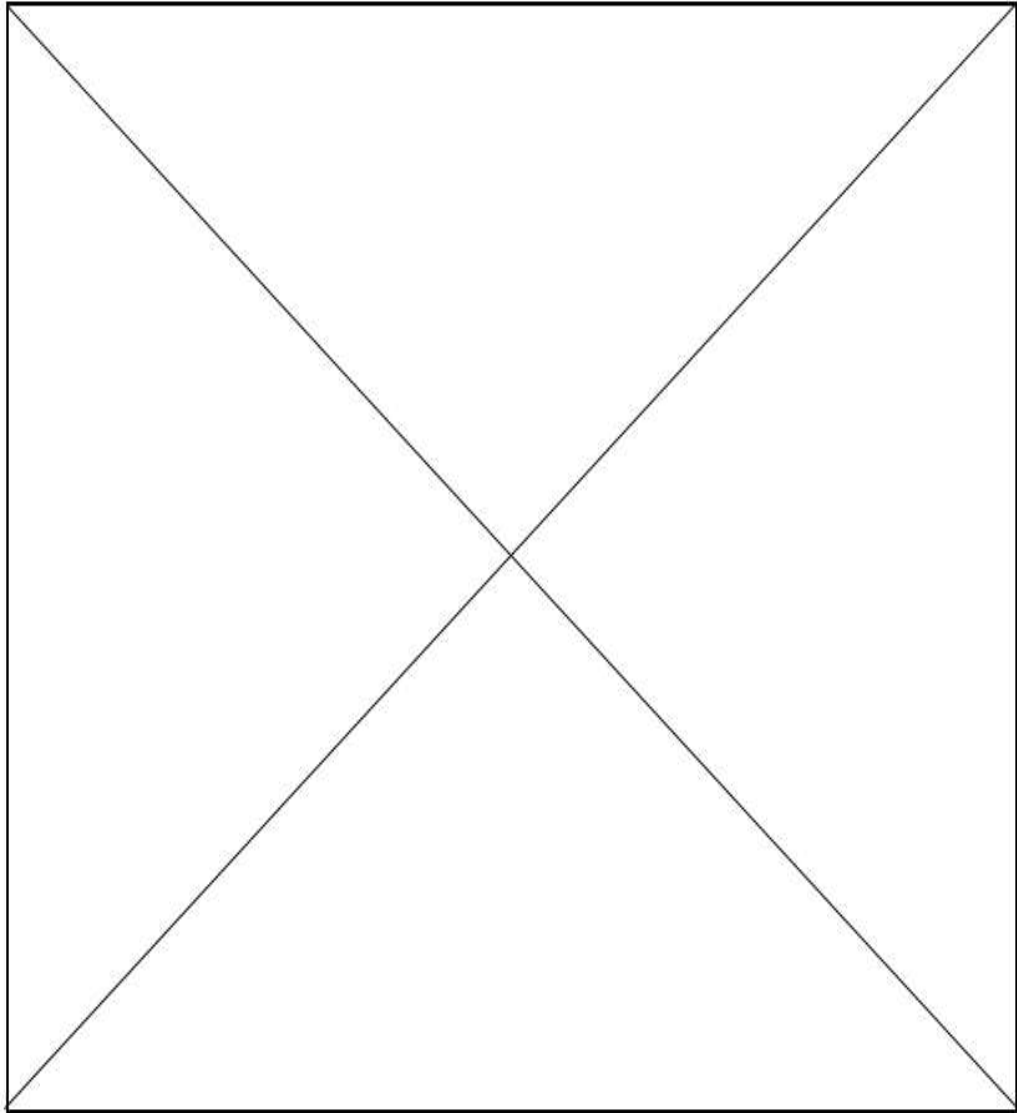


그림 6-1 S-REDAP 프로그램 개략도

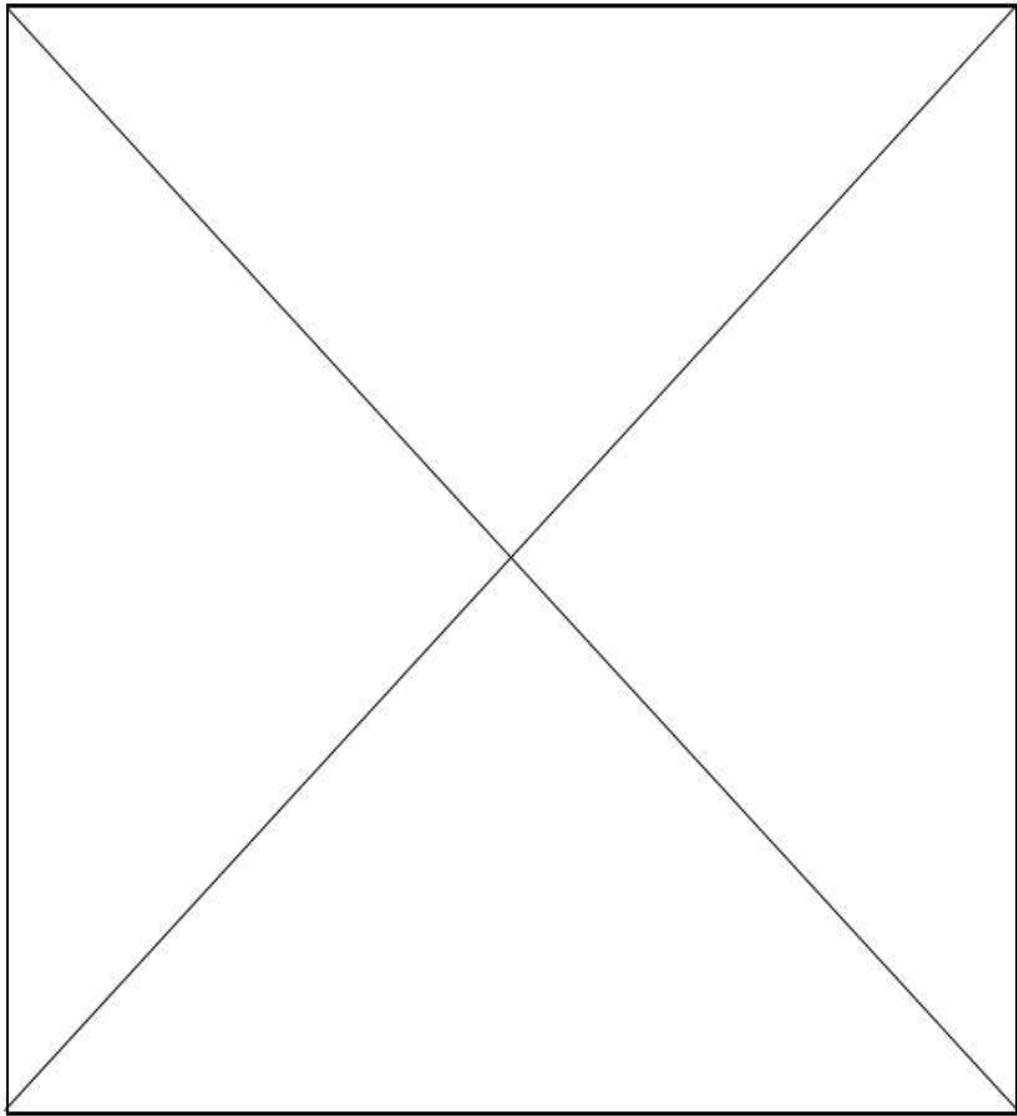


그림 6-2 한울3,4호기 백색비상탈령 상황 7번

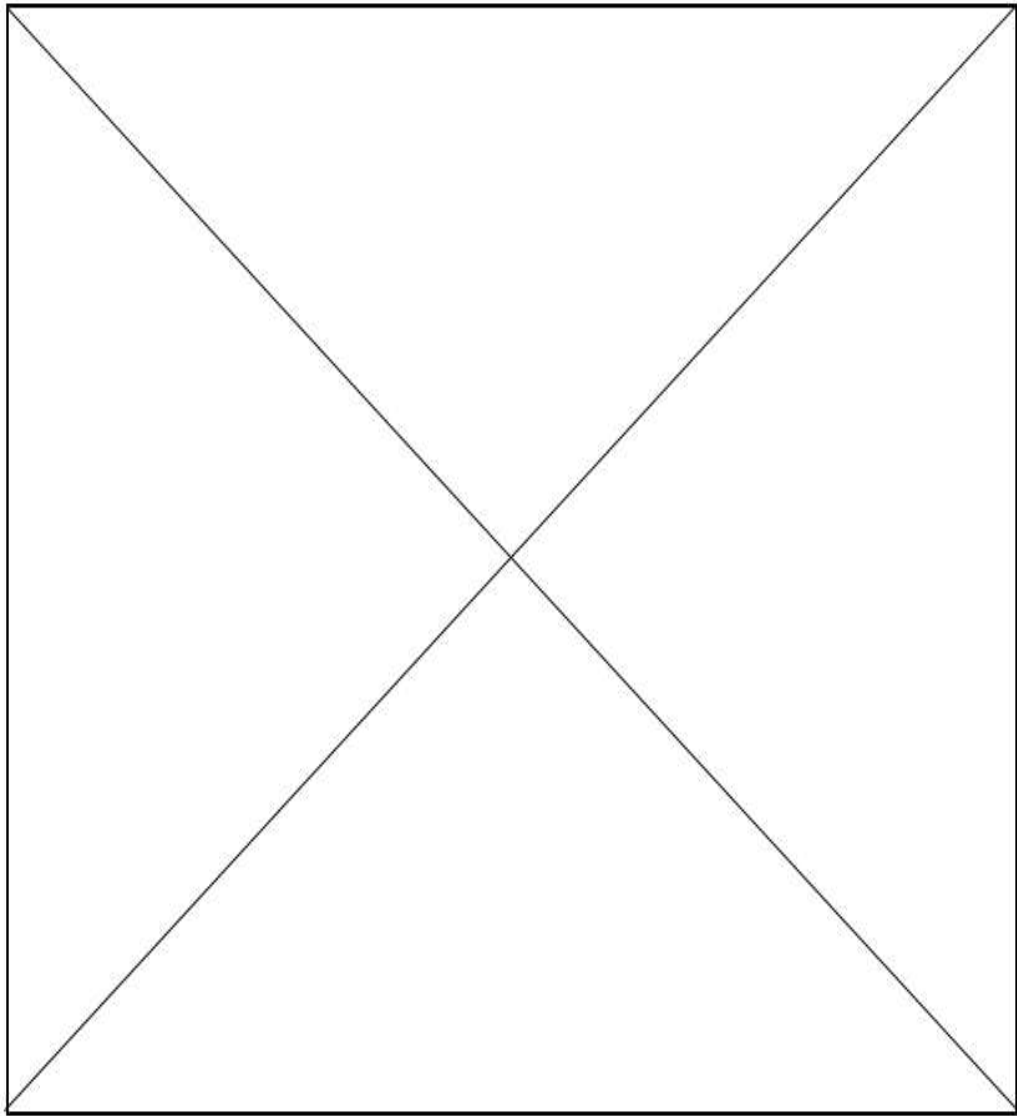


그림 6-3 한울3,4호기 백색비상탈령 상황 8번

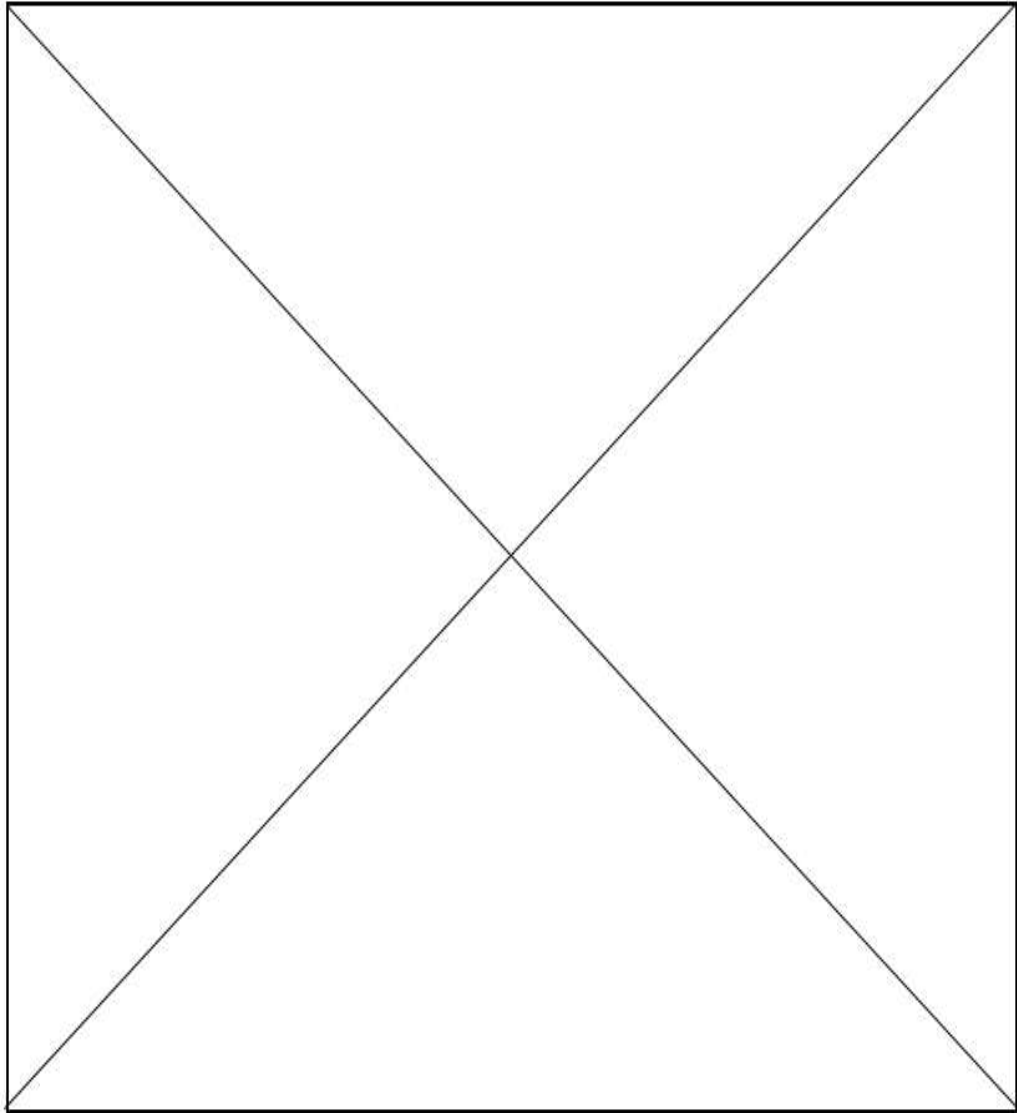


그림 6-4 한울3,4호기 청색비상발령 상황 5번

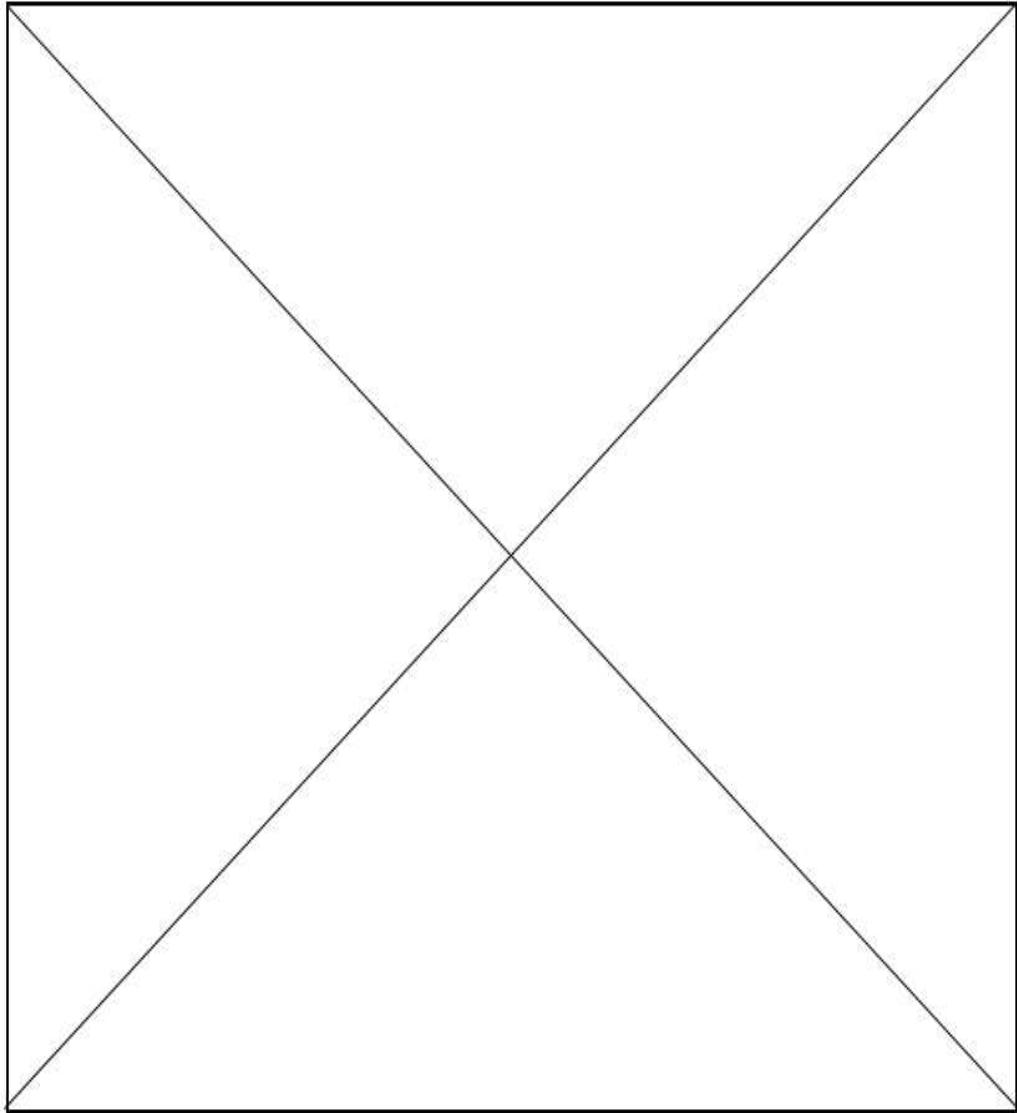


그림 6-5 한울3,4호기 청색비상발령 상황 6번

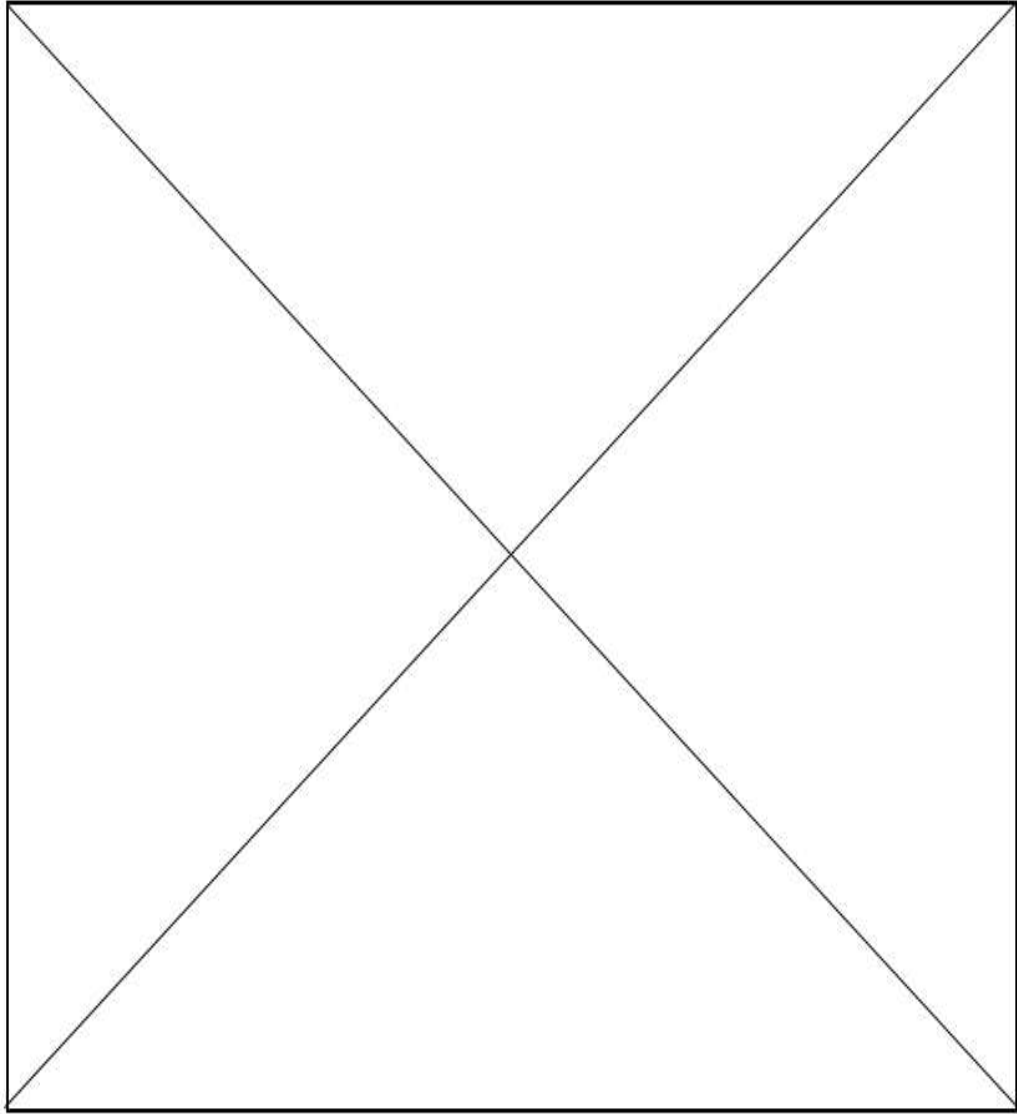


그림 6-6 한울3,4호기 적색비상발령 상황5D번

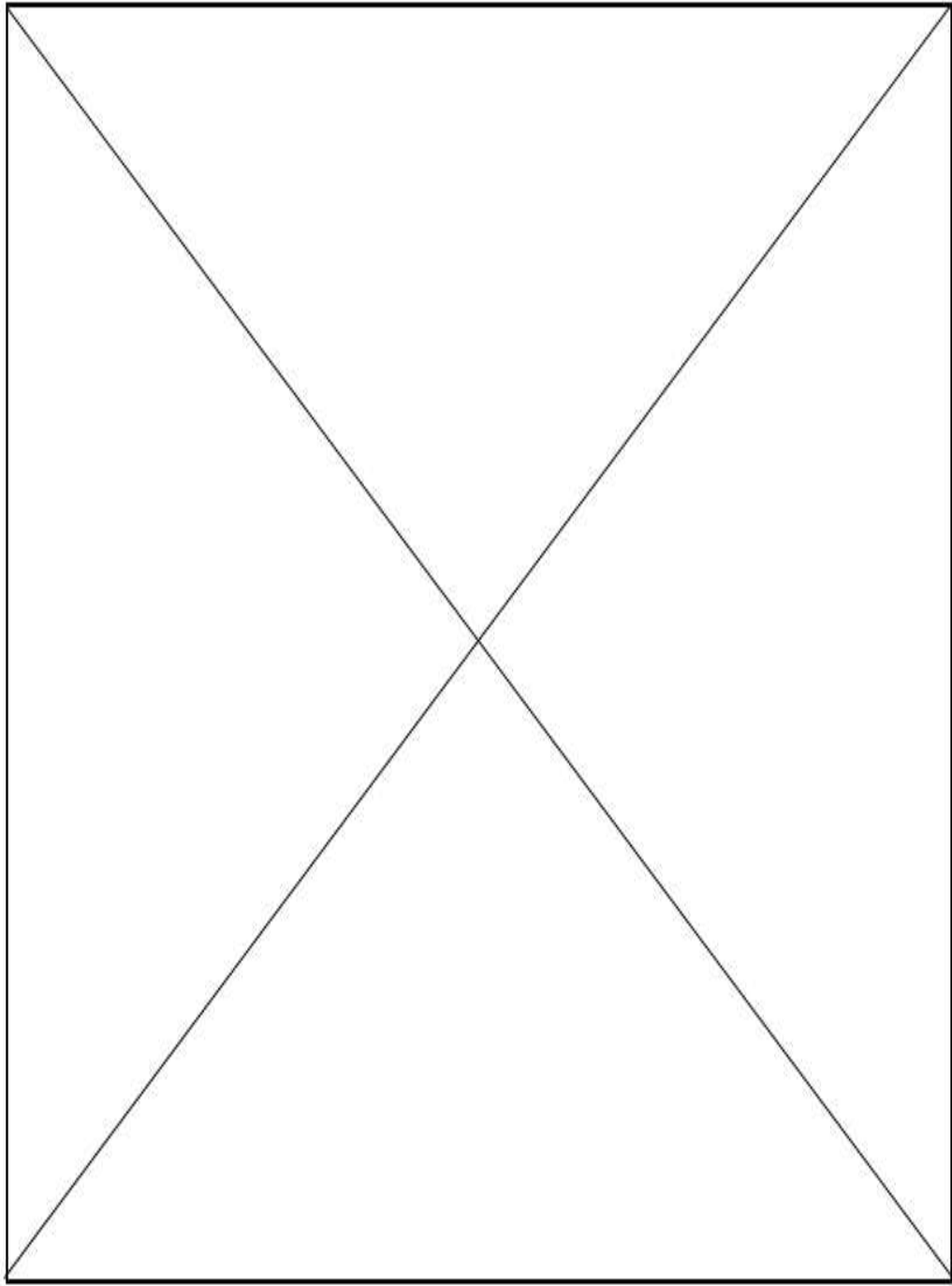


그림 6-7 한울3,4호기 청색비상발령 상황9번

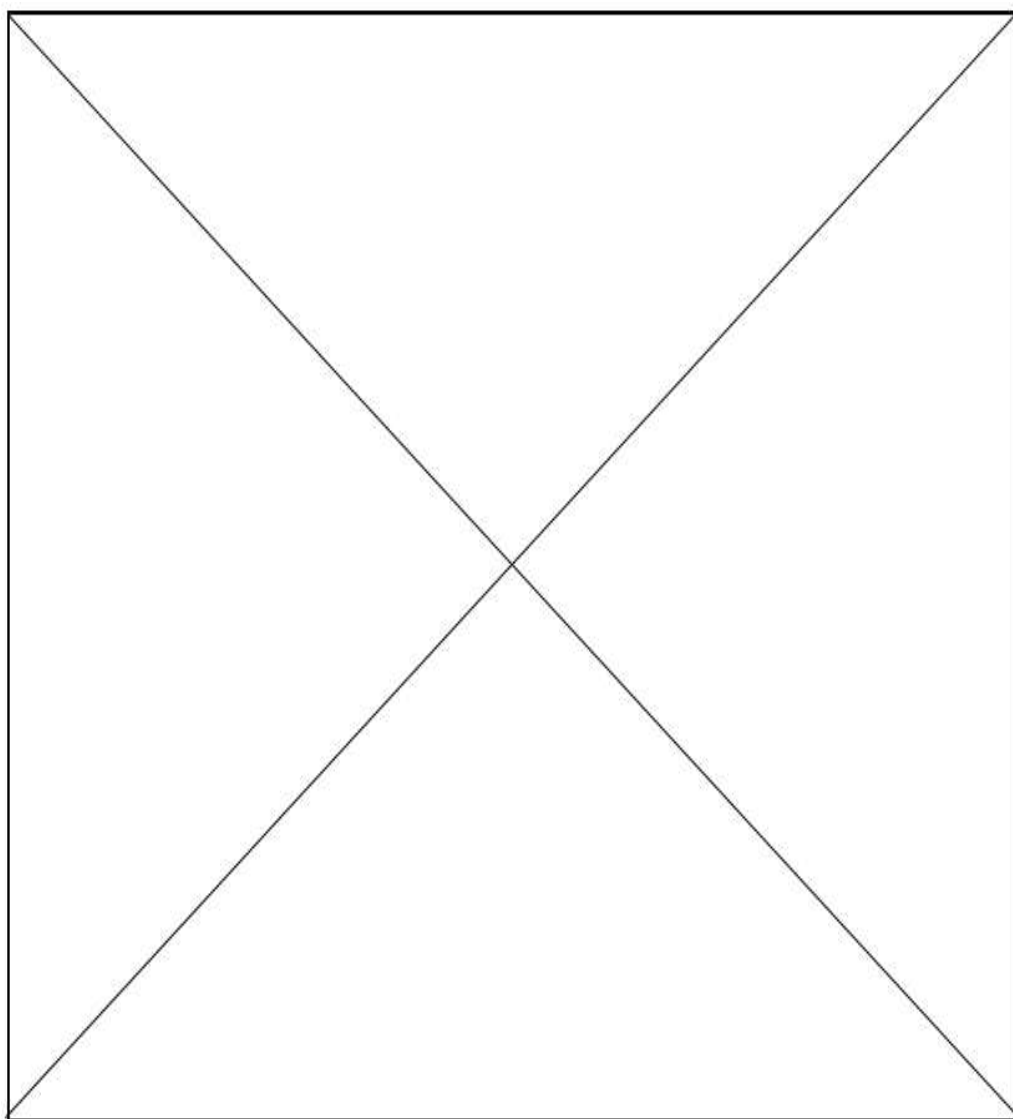


그림 6-8 한울부지 내부 환경방사선 조사지점(ERMS)

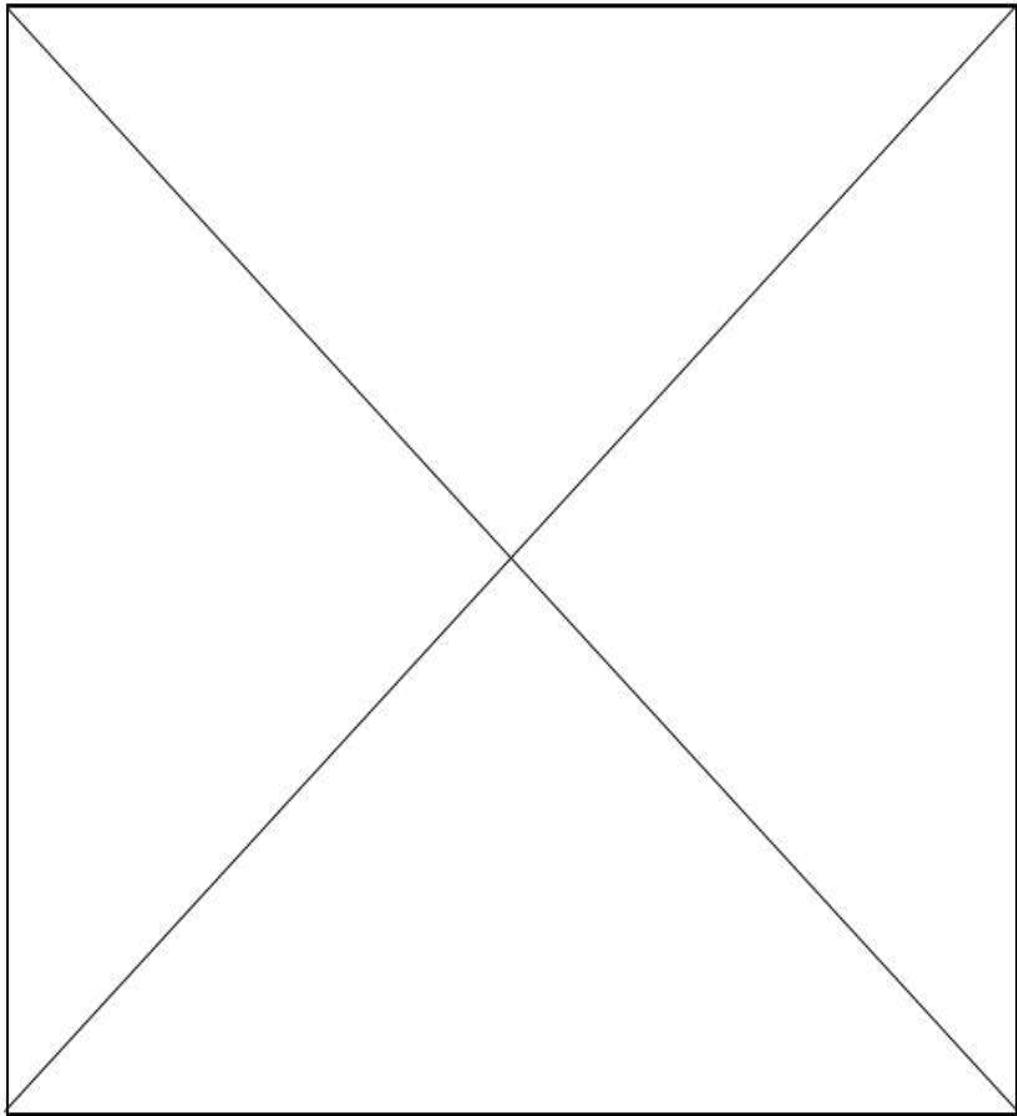


그림 6-9 한울부지 외부 환경방사선 조사지점

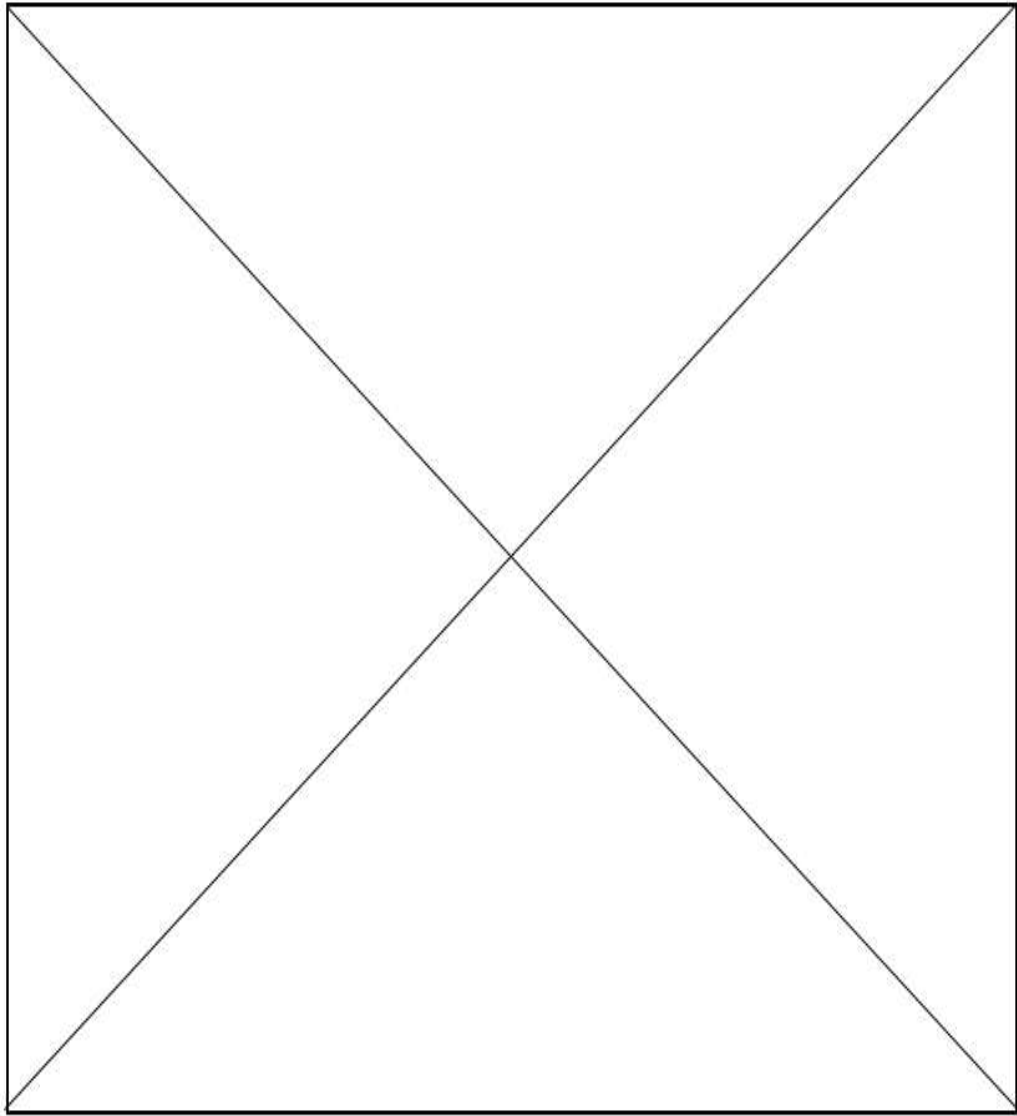


그림 6-10 한울3,4호기 비상대응 프로그램의 연관성

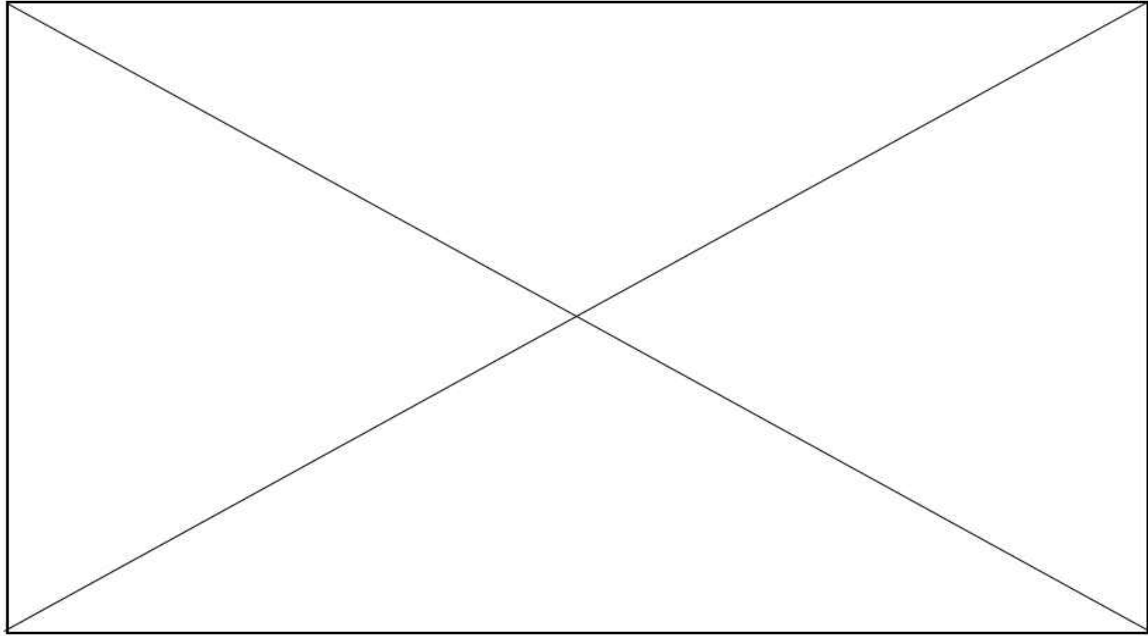


그림 6-11 2개호기 동시 비상발령시 비상조직

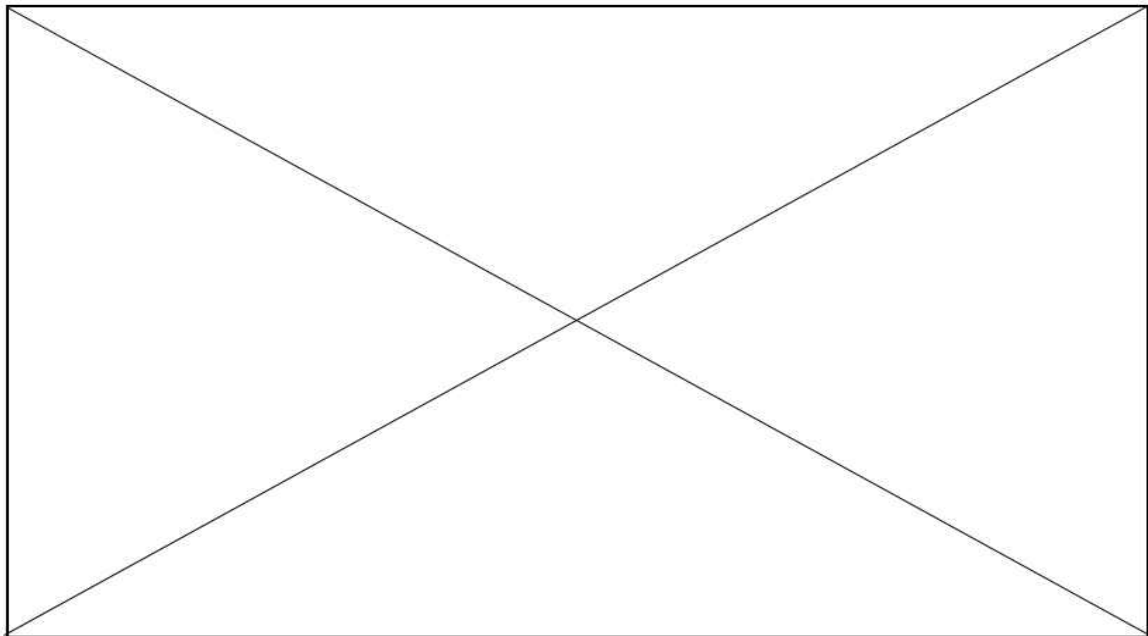


그림 6-12 3개호기 이상 동시 비상발령시 비상조직

제7장 운영기술 능력

목 차

제1절 개요	1
제2절 평가내용	2
2.1 사고대응전략 수립의 적절성	2
2.1.1 필수대처기능 상실을 고려하여 수립된 사고시나리오의 적절성	3
2.1.2 사고시나리오 대응전략의 이행가능성	11
2.1.3 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성	17
2.2 주요 운전원 조치의 적절성	21
2.2.1 주요 운전원 조치 적절성 평가	22
2.2.2 주요 운전원 조치 직무분석 및 이행가능성 평가	26
2.3 주요 자원의 적절성	32
2.3.1 인간-기계 연계설비 평가	32
2.3.2 소외자원 평가	34
2.3.3 절차서 평가	34
2.3.4 인력/조직 평가	38
2.3.5 교육 및 훈련 평가	41
2.4 인간공학 유효성 평가	47
2.4.1 사고 시나리오 가정사항 및 사고대응전략 평가	48
2.4.2 직무부하 분석 결과	54
2.4.3 상황인식 분석 결과	56
2.4.4 운전원 협업 분석 결과	59
2.4.5 인적오류 분석 결과	59
2.4.6 평가현안 설문 분석 결과	64
2.5 다수호기 동시사고 시 대응능력 평가	69
2.5.1 다수호기 동시사고 고려 시 수립된 사고대응전략의 적절성 평가	70
2.5.2 다수호기 동시사고 고려 시 주요 운전원 조치의 적절성 평가	74
2.5.3 다수호기 동시사고 고려 시 주요 자원의 적절성 평가	78
2.6 한울3,4호기 차이점	81
제3절 안전 개선사항	81
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인	81
3.2 월성1호기 및 고리2호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인	81
3.2.1. 월성1호기 스트레스테스트	81
3.2.2. 고리1호기 스트레스테스트	82
3.3 운영기술능력 개선사항 (자체도출)	82
3.3.1 사고대응전략 보완	82

3.3.2 설비 보완	82
3.3.3 절차서 보완.....	84
3.3.4 교육훈련 보완.....	88
3.3.5 조직/인력 보완.....	89
 제4절 결론	 90
제5절 참고문헌	91

표

표 7-1 SHERPA 직무형태 구분	93
표 7-2 직무형태별 위험도 단계	94
표 7-3 소외전원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과	95
표 7-4 소내정전 조건에 대한 소요시간 분석결과	96
표 7-5 최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과	97
표 7-6 최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 인적오류 분석결과 ..	98
표 7-7 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과	99
표 7-8 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과	100
표 7-9 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류	101
표 7-10 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과	102
표 7-11 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과	103
표 7-12 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류 ..	104
표 7-13 최종열제거원상실(시나리오 4) 주제어실 재고기기 목록	105
표 7-14 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 (시나리오 6) 조건 주제어실 재고기기 목록	106
표 7-15 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) 주제어실 재고기기 목록	107
표 7-16 중대사고(시나리오 10) 주제어실 재고기기 목록	108
표 7-17 현장 재고기기 목록	109
표 7-18 인력수준 분석 결과	110
표 7-19 이동형발전차 운전 절차에 따른 각 수행조의 역할()	111
표 7-20 방사능방재교육	112
표 7-21 방재요원 신규교육과정의 교육내용	112
표 7-22 방재요원 보수교육과정 중 사고대응관련 비상조직의 교육내용	113
표 7-23 운전원에 대한 비상운전절차서 교육	114
표 7-24 비상운전절차서 교육과정별 교육내용	115
표 7-25 발전주제어실실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간	116
표 7-26 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간	117
표 7-27 중대사고지침서 교육 과정	118

표 7-28 중대사고지침서 교육과정별 교육내용	119
표 7-29 발전주제어실/현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간	120
표 7-30 소외전원 상실 사고대응 전략 (시나리오 1)	121
표 7-31 소내정전 사고대응 전략 (시나리오 2)	122
표 7-32 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 사고대응 전략 (시나리오 3)	123
표 7-33 최종열제거원상실(시나리오 4) 주제어실 재고기기 목록	124
표 7-34 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 (시나리오 6) 조건 주제어실 재고기기 목록	125
표 7-35 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) 주제어실 재고기기 목록	126
표 7-36 중대사고(시나리오 10) 주제어실 재고기기 목록	127
표 7-37 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	128
표 7-38 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인	129

제1절 개요

OPR1000의 대표원전인 한울3,4호기에 대하여 후쿠시마 원전 사고와 같은 설계기준을 초과하는 극한자연재해로 인하여 전력계통과 최종열제거원이 상실되는 상황이 발생한다고 가정하여 한울3,4호기의 운영기술 능력 평가를 수행하였다.

이를 위해 본 장에서는 스트레스트 테스트 수행지침[개정 1]에 따라 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원조치의 적절성, 주요 자원의 적절성, 인간공학 유효성 평가, 다수호기 동시사고 시 대응능력에 대한 평가를 수행하였다.

사고대응전략 및 주요 운전원조치 그리고 주요 자원의 적절성 평가에서는 스트레스트 테스트 평가분야 중 2분야 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성, 3분야 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력, 4분야 중대사고 관리능력, 5분야 방재 및 비상대응능력에서 수립된 사고시나리오, 주요 운전원 조치, 주요 자원(조직/인력, 절차서, 설비 등)에 대한 검토 및 평가를 수행하였으며, 각 사고에 대한 운영기술 능력의 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

인간공학 유효성 평가에서는 설계기준을 초과하는 극한자연재해(지진 및 해일 등)에 대한 원전의 대응능력을 인간공학 관점에서 종합적으로 평가하였다. 즉, 발전소 조직내의 인원들(주제어실 운전원 포함)이 설계기준을 초과하는 사고가 발생할 경우, 발전소의 설비 및 절차서 등을 활용하여 적절하게 대처할 수 있는지 실험을 통해 확인하였다. 또한, 전력상실과 최종열제거원상실 그리고 중대사고 조건에서의 발전소 운영기술능력을 평가하기 위하여 아래와 같은 사고시나리오를 고려하였으며, 각 사고에 대한 운영기술능력 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

- 최종열제거원상실(Loss Of Ultimate Heat Sink, LOUHS) 조건(시나리오 4)
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)
- 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 사고를 동반한 0.3g 지진(시나리오 9)
- 중대사고 조건(시나리오 10)

다수호기 동시사고 시 대응능력에 대한 평가에서는 본 스트레스트 테스트 보고서에서 가정한 다수호기 동시사고에 대한 가정사항이 한울본부에 귀속된 한울 1~6호기에 동시에 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한울3,4호기 사고 대응전략 및 주요 운전원조치 그리고 주요 자원의 실효성을 평가하였으며, 다수호기 동시사고 조건에서의 한울3,4호기 운영기술 능력의 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

제2절 평가내용

원자력발전소 운영 목표는 정상운전 및 사고조건에서도 원자력발전소를 안정시키고 원전 종사자 뿐 만 아니라 일반 대중의 안전을 위해 방사성물질 누출로 인한 피해를 최소화하는 것이다. 본 스트레스테스트에서는 극한자연재해 상황에서 한울3,4호기의 운영기술 능력이 안전성을 확보할 수 있는 지를 평가하였다. 상기 운영기술 능력 평가를 위하여 스트레스테스트 각 분야에서 도출된 사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원을 평가하고, 인간공학 유효성 평가를 통해 운영기술능력에 대한 유효성을 평가하였으며, 다수호기 동시사고 시 한울3,4호기 운영기술능력과 관련된 사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원을 평가하였다.

단, 한울3,4호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서는 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서의 안전성 확보를 위해 추가 예정인 설비 및 절차서를 활용한 평가를 수행하였으며, 해당 내용은 추후 한울3,4호기에 반영될 예정이므로 이에 대한 설비 및 절차서를 반영한 평가를 진행하였다. 한울3,4호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서 평가 시 고려한 설비 및 절차서는 다음과 같다.

가. 설비

- 3.2 MW 이동형발전차
- 1 MW 이동형발전차
- 이동형저압펌프
- 이동형고유량펌프

나. 절차서

- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]
- [Redacted]

2.1 사고대응전략 수립의 적절성

사고대응전략 수립의 적절성 평가는 본 스트레스테스트 보고서 제4장 전력계통

등 안전기능 상실에 대한 대응능력 및 제5장 중대사고 관리능력에서 수립된 사고 시나리오에 대한 대응전략을 운영기술능력 측면에서 평가하기 위함이다.

사고대응전략 수립의 적절성 평가를 위해 제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 및 제5장 중대사고 관리능력에서 사용된 10개의 시나리오를 검토 하였다.

사고대응전략 수립의 적절성 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

- 수립된 사고시나리오가 각 필수대처기능 상실을 고려하고 이를 복구하기 위한 전략이 적절하게 수립되어 있는지 평가
- 수립된 사고시나리오에 대응하기 위해 필수대처기능을 유지하고 복구하기 위한 전략의 이행가능성을 평가
- 수립된 사고시나리오의 대응 전략을 이행하기 위한 각 분야별 설비-설비, 설비-절차서, 절차서-절차서(지침서), 설비-조직/인력 등 연계 항목의 적절성을 평가

2.1.1 필수대처기능 상실을 고려하여 수립된 사고시나리오의 적절성

극한자연재해 시 원자력발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능이란 발전소를 안전하게 정지시키고 원전 종사자와 일반대중의 안전을 확보하기 위한 기능을 말한다. 본 스트레스테스트 보고서 제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가에서는 이러한 안전성을 확보하기 위해 다음과 같이 3가지 안전기능의 필수대처기능 확보여부를 평가하였다. 따라서 본 절에서는 각 시나리오에 대한 필수대처기능과 관련한 한울3,4호기 운영기술 측면에서의 적절성을 검토하였다.

- 원자로 정지 및 미임계 유지
- 노심 냉각 및 재고량 유지
- 격납건물 건전성 유지

2.1.1.1 소외전원상실 (시나리오 1)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트(Motor Generator Set : M-G Set) 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 추가적으로 충전펌프를 이용하여 노심으로 고농도 봉산수주입이 가능함으로, 원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System : RCS) 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상하여 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

소외전원 상실 시 ■■■ 이내에 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator : EDG)가 기동되어 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전원을 공급한다. 따라서 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump : RCP) 운전이 불가능하지만 증기발생기(Steam Generator : SG) 급수공급 및 증기방출에 의한 자연순환으로 노심냉각이 가능하다. 또한, 충전펌프에 의한 1차측 냉각수 재고량 유지가 가능하며, 전동기구동 보조급수펌프(Motor Driven Auxiliary Feedwater Pump : MD AFP) 및 터빈구동 보조급수펌프(Turbine Driven Auxiliary Feedwater Pump : TD AFP)가 운전 가능하여 2차측 냉각수 재고량 유지가 가능하다.

다. 격납건물 건전성 유지

비상디젤발전기가 기동되어 1차측기기냉각수(Component Cooling Water : CCW) 펌프 및 충전펌프에 전원을 공급하므로, 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각이 유지되어 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상으로 인한 냉각재의 격납건물 내 누설은 발생하지 않으므로 격납건물의 건전성은 유지된다.

2.1.1.2 소내정전 (시나리오 2)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 대체교류 디젤발전기(Alternate Ac Diesel Generator : AAC DG) 기동을 통해 추가적으로 충전펌프를 기동할 수 있어 노심으로 고농도 붕산수주입이 가능함으로 원자로 냉각재 계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상하여 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

소외전원 상실 시 수동으로 대체교류 디젤발전기를 기동하여 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전원을 공급할 수 있다. 따라서, 원자로 냉각재 펌프 운전이 불가능하지만 증기발생기 급수공급 및 증기방출에 의한 자연순환으로 노심냉각이 가능하다. 또한, 충전펌프에 의한 1차측 냉각수 재고량 유지가 가능하며, 전동기구동 보조급수펌프 및 터빈구동 보조급수펌프가 운전 가능하여 2차측 냉각수 재고량 유지가 가능하다.

다. 격납건물 건전성 유지

대체교류 디젤발전기를 기동하여 1차측기기냉각수 펌프 및 충전펌프에 전원을 공급하므로, 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각이 유지되어 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각이 유지되어 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상으로 인한 냉각재의 격납건물 내 누설은 발생하지 않으므로 격납건물의 건전성은 유지된다.

2.1.1.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크(Safety Injection Tank : SIT) 자동주입으로 원자로 냉각재 계통 냉각에 따른 정반응도를 삽입을 보상할 수 있으며, 1 MW 이동형 발전차 연결 후에는 충전펌프를 기동하여 고농도 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 노심냉각은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브(Main Steam Atmospheric Dump Valve : MSADV) 수동개방에 따라 자연순환이 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에는 필요한 직류 전원은 비필수부하 차단으로 [] 까지 사용이 가능하며, 1 MW 이동형발전차 연결 시에는 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 자동주입으로 [] 동안은 재고량 유지가 가능하다. 또한, 1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉상실에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident : LOCA)에 비해 아주 작다.

3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되어도 격납건물 냉방기(Containment Chiller) 및 공기조화(Heating, Ventilating and Air Conditioning : HVAC)계통이 비1E급 설비인 관계로 격납건물 온도상승은 불가피하지만, 도입 예정인 이동형펌프를 이용하여 격납건물 대체살수가 가능하므로 건전성이 유지될 수 있다.

2.1.1.4 최종열제거원 상실사고 (시나리오 4)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

최종열제거원이 상실되어도 제어봉삽입에 의한 부반응도와 함께 충전펌프를 이용하여 노심으로 재장전수탱크(Refueling Water Tank : RWT)의 고농도붕산수를 주입할 수 있다. 따라서 사고기간 원자로 냉각재 계통 냉각 및 제논 붕괴(Xenon Decay)에 따른 정반응도 삽입을 충분히 보상하여 미임계 유지가 가능하다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

1차측기기냉각수 기능상실로 원자로 냉각재 펌프 운전이 불가능하지만 증기발생기 급수공급 및 증기방출에 의한 자연순환으로 노심열제거가 가능하다. 충전펌프에 의한 1차측 냉각수 재고량 유지가 가능하며, 2차측기기냉각수계통(Turbine Building Closed Cooling Water System : TBCCW) 기능상실로 주급수 펌프(Main Feedwater Pump : MFWP) 및 기동용 급수펌프(Start-Up Feedwater Pump : SUFWP)의 운전이 불가능하지만, 전동기구동 보조급수펌프 및 터빈구동 보조급수펌프가 운전 가능하여 2차측 냉각수 재고량 유지가 가능하다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수계통 기능이 상실되어도 충전펌프에 의해 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각이 유지되므로 원자로 냉각재 펌프 밀봉을 통한 격납건물 내 누설은 발생하지 않는다. 다만, 1차측기기냉각수 온도 상승으로 냉방기 운전이 불가능하여 격납건물 온도가 어느 정도 상승할 수 있지만 건전성 유지에는 문제가 없다.

2.1.1.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한울3,4호기는 대체열제거원이 구비되어 있지 않기 때문에 본 시나리오에 대한 원자로 미임계 유지, 노심냉각 및 재고량 유지, 격납건물 건전성 유지와 같이 3가지 안전기능의 필수대처기능 확보여부 평가결과는 시나리오 4와 동일하다.

2.1.1.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 자동주입으로 원자로 냉각재 계통 냉각에 따른 정반응도를 삽입을 보상할 수 있다. 또한, 1 MW 이동형발전차 연결 후에는 충전펌프를 기동하여 고농도 봉산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 노심냉각은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방에 의한 자연순환에 의해 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에 필요한 직류 전원은 비필수부하 차단으로 [] 사용이 가능하며, 1 MW 이동형발전차 연결 시에는 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 자동주입으로 [] 동안은 재고량 유지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉 상실에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 아주 작다.

3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되어도 격납건물 냉방기 및 공기조화(Heating, Ventilating and Air Conditioning : HVAC)계통이 비IE급 설비인 관계로 격납건물 온도상승은 불가피하지만, 도입 예정인 이동형저압펌프를 이용하여 격납건물 대체살수가 가능하므로 건전성이 유지될 수 있다.

2.1.1.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 자동주입으로 원자로 냉각재 계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있으며, 1 MW 이동형발전차 연결 후에는 충전펌프를 기동하여 고농도 봉산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 노심냉각은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방에 의한 자연순환에 의해 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에 필요한 직류 전원은 비필수부하 차단으로 [REDACTED] 동안 사용이 가능하며, 1 MW 이동형발전차 연결 시에는 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 자동주입으로 [REDACTED] 동안은 재고량 유지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉 상실에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 아주 작다.

3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되어도 격납건물 냉방기 및 공기조화(Heating, Ventilating and Air Conditioning : HVAC)계통이 비IE급 설비인 관계로 격납건물 온도상승은 불가피하지만, 도입 예정인 이동형펌프를 이용하여 격납건물 대체살수가 가능하므로 건전성이 유지될 수 있다.

2.1.1.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 자동주입으로 원자로 냉각재 계통 냉각에 따른 정반응도를 삽입을 보상할 수 있으며, 1 MW 이동형발전차 연결 후에는 충전펌프를 기동하여 고농도 봉산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 노심냉각은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방에 의한 자연순환에 의해 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에 필요한 직류 전원은 비필수부하 차단으로 [REDACTED] 동안 사용이 가능하며, 1 MW 이동형발전차 연결 시에는 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 자동주입으로 [REDACTED] 동안은 재고량 유지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉 상실에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 아주 작다.

3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되어도 격납건물 냉방기 및 공기조화(Heating, Ventilating and Air Conditioning : HVAC)계통이 비IE급 설비인 관계로 격납건물 온도상승은 불가피하지만, 도입 예정인 이동형펌프를 이용하여 격납건물 대체살수가 가능하므로 건전성이 유지될 수 있다.

2.1.1.9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원공급이 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 자동주입으로 고농도붕산수 주입이 가능하다. 또한, 1 MW 이동형발전차 연결 후에는 충전펌프를 기동하여 고농도붕산수 주입이 가능함에 따라, 원자로 냉각재 계통 냉각 및 제논붕괴에 따른 정반응도 삽입을 충분히 보상하여 미임계 유지가 가능하다. 단, 안전주입탱크 주입을 위한 원자로 냉각재 계통 냉각과정에서는 일시적으로 정지여유도 감소가 불가피한 바 비상운전 절차서에서 요구하는 최소 정지여유도 [] 이상 유지될 수 있는지 보수적 가정하에 계산이 필요하다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

장기교류전원상실 상황에서 노심냉각은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방을 통한 자연순환에 의해 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에는 필요한 직류 전원은 비필수부하 차단으로 [] 사용이 가능하며, 1 MW 이동형발전차 연결 시에는 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 자동주입으로 [] 동안은 재고량 유지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉 상실에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 아주 작다.

3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되어도 격납건물 냉방기 및 공기조화(Heating, Ventilating and Air Conditioning : HVAC)계통이 비IE급 설비인 관계

로 격납건물 온도상승은 불가피하지만, 도입 예정인 이동형펌프를 이용하여 격납 건물 대체살수가 가능하므로 건전성이 유지될 수 있다.

2.1.1.10 중대사고 (시나리오 10)

가. 3.2 MW 이동형발전차 및 소내 고정형 안전설비를 이용한 대응전략

본 스트레스테스트 중대사고와 관련된 대응전략은 3.2 MW 이동형발전차가 중대 사고 관리 진입 이전에 4.16 kV 안전모선에 연결되어 전원공급이 가능해야 한다. 따라서 제5장 중대사고 관리능력 평가분야에서는 대응조치가 없는 발전소 상태에서 중대사고 진입시간을 최초 사고 이후 [] 경과후로 분석하였으므로, 한울본부가 보유하고 있는 3.2 MW 이동형발전차의 이동 및 연결은 중대사고 진입 이전까지 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차가 연결되어 전원이 공급되면, 고압안전주입펌프(High Pressure Safety Injection Pump : HPSIP) 또는 격납건물살수펌프(Containment Spray Pump : CSP)를 통해 원자로 냉각재 계통으로 냉각수 주입이 가능하며, 전동기구동 보조급수펌프를 이용하여 증기발생기 급수가 가능하며, 안전감압계통(Safety Depressurization System : SDS) 밸브 1개열 개방 시 원자로 냉각재 계통이 고압안전주입펌프 토출압력 이하로 감압되어 냉각수 주입이 가능하다.

나. 이동형저압펌프를 이용한 대응전략

외부주입유로를 이용한 증기발생기 냉각수 주입과 관련하여, 주증기 대기방출밸브를 수동 개방하여 증기발생기를 [] 이하로 감압하면 이동형저압펌프를 이용하여 []의 냉각수 주입이 가능하다고 분석되어 있다. 주증기 대기방출밸브는 수동개방이 가능하므로 전원공급 여부에 관계없이 증기발생기 감압은 가능하다. 이동형저압펌프를 이용한 증기발생기 외부주입 시 급수의 증기화로 증기발생기 압력이 다시 상승하고 급수유량이 감소하는 현상이 발생하나 주증기 대기방출밸브 개방으로 압력감소가 가능하므로 해당 전략은 수행이 가능하다.

2.1.2 사고시나리오 대응전략의 이행가능성

본 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 수립된 한울3,4호기 사고시나리오와 관련한 필수대처기능 유지 및 복구를 위한 사고관리전략의 이행가능성 평가를 위해 10개 시나리오에 대한 운영기술 측면에서의 예상 최적 운전경로에 대한 검토를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

2.1.2.1 소외전원상실 (시나리오 1)

소외전원상실과 관련된 사고 시나리오는 비상디젤발전기 기동으로 안전정지에 요구되는 필수기기가 모두 가용하며, 주제어실 및 현장 운전원은 [redacted]에 따라 주기적으로 교육/실습을 시행하는 사고 시나리오이므로 대응전략 이행이 가능한 것으로 평가되었다.

2.1.2.2 소내정전 (시나리오 2)

소내정전과 관련된 사고 시나리오는 대체교류 디젤발전기 기동으로 안전정지에 요구되는 최소한의 필수기기가 가용하며, 주제어실 및 현장 운전원은 [redacted]의 사고완화절차에 따라 주기적으로 교육/실습을 시행하는 사고 시나리오이므로 대응전략 이행이 가능한 것으로 평가되었다.

2.1.2.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건과 관련된 사고 시나리오는 사고대응전략 및 가용 자원이 이동형펌프 설치 및 운전을 제외하면, 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고(시나리오 6)와 같아 예상 최적 운전경로가 동일하므로 대응전략 이행이 가능한 것으로 평가되었다.

2.1.2.4 최종열제거원 상실사고 (시나리오 4)

최종열제거원 상실사고를 위해 극한자연재해로 인해 펌프실이 침수되어 모든 순환수펌프, 1차기냉각해수펌프, 2차기냉각해수펌프가 트립되며, 순환수 상실로 인한 복수기 저-진공으로 터빈이 트립되지만 원자로출력감발계통 동작 및 원자로출력제어계통에 의해 원자로출력은 15%에서 안정된다는 가정을 하였다.

1차기냉각해수 상실로 1차측기냉각수 온도가 상승하여 원자로 냉각재 펌프 운전이 어려울 경우 운전원은 원자로 냉각재 펌프를 수동으로 정지가 가능하다. 또한, 원자로 냉각재 펌프 정지로 원자로가 트립되면 운전조는 즉시 [redacted] 진입하여 비상운전에 착수한다.

[redacted]

[redacted] 진입한다. 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수와 주 증기 대기방출밸브를 이용한 증기방출을 통해 노심 및 원자로 냉각재 계통 열제거기능을 유지하고, 밀봉수 주입으로 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상을 방지하기 위해 충전펌프 운전이 가능하다.

원자로 차장은 1차측기기냉각수 온도상승으로 충전펌프실 온도증가가 예상되면 모터보호를 위해 현장운전원에게 격실문 개방을 지시하며, 현장운전원은 현장으로 이동하여 격실문을 개방 할 수 있다.

운전조는 취수구점검을 통해 최종열제거원 상실이 확인되자 발전팀장은 청색비상을 발령하고 이동형펌프 연결을 요청한 후 자연순환냉각을 이용한 원자로 냉각재 계통 냉각운전에 착수한다.

원자로 냉각재 계통 온도, 압력이 최종열제거원상실 운전조건에 도달하고 비상기술지원실(Technical Support Center : TSC)에서는 이동형펌프를 연결하여 1차측기기냉각수계통이 정상화되면 운전조는 1계열의 최종열제거원상실을 원자로 냉각재 계통에 연결하여 냉각운전을 계속 수행이 가능하다.

2.1.2.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한울3,4호기는 대체열제거원이 구비되어 있지 않기 때문에 본 시나리오의 이행 가능성 평가 결과는 시나리오 4와 동일하다.

2.1.2.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고를 위해 극한자연재해로 광역정전이 발생하고 원자로가 정지되며, 펌프실 침수로 모든 순환수펌프, 1차기기냉각해수펌프 및 2차기기냉각해수펌프가 정지된다는 가정을 한다.

운전조는 즉시 [REDACTED] 비상운전에 착수한다. 4.16 kV 교류안전모선의 저전압 신호에 의해 비상디젤발전기 자동기동 신호가 발생하였으나, 비상디젤발전기 A/B 모두 미상의 원인으로 기동에 실패하고 소내정전(Station BlackOut : SBO)이 발생된다는 가정을 한다.

운전조의 발전팀장은 [REDACTED] 진입, 백색비상을 발령한다. 방사선비상은 소내정전 상황이 지속되어 15분 후에 청색비상으로 상향 발령된다.

운전조는 주증기 대기방출밸브 현장 수동개방을 통한 증기방출과 터빈구동 보조급수펌프를 이용한 증기발생기 급수공급으로 자연순환냉각을 유지하면서 전원복

구를 위한 조치를 하지만, 대체교류 디젤발전기 까지 기동에 실패하자 발전팀장은 장기교류전원상실(대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건)을 선언하고 1 MW 이동형발전차 연결을 요청한다.

동시에 축전지 수명연장을 위해 비필수 직류부하 차단을 현장운전원에게 요청한다. 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 상황이 장기화됨에 따라 운전조는 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상에 의한 냉각재 상실을 최소화하기 위해 자연순환에 의한 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압에 착수한다.

지속적으로 노심냉각을 유지하던 중 1 MW 이동형발전차를 4.16 kV A계열 안전모선에 연결하여 발전소의 일부 전원이 복구되자 운전조는 1E급 충전기를 기동하여 축전지의 추가 방전을 막을 수 있다. 또한, 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉누설에 따른 냉각재상실을 보충하면서 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각을 복구하여 장기전원상실에 대비할 수 있다.

상황의 장기화가 예상됨에 따라 최종열제거원상실 운전을 위한 이동형펌프 및 3.2 MW 이동형발전차의 연결을 요청할 수 있다. 3.2 MW 이동형발전차가 도착하여 1 MW 이동형발전차를 대체하여 설치되고 이동형펌프가 기동되면 운전조는 1차 측 기기냉각수계통을 정상화하고 1계열의 최종열제거원상실을 원자로 냉각재 계통에 연결하여 냉각운전을 계속 수행이 가능하다.

2.1.2.7 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

예상 최적 운전경로가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고(시나리오 6)와 같으므로 최적 운전경로 수행을 통한 대응전략 이행이 가능하다.

2.1.2.8 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

예상 최적 운전경로가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고(시나리오 6)와 같으므로 최적 운전경로 수행을 통한 대응전략 이행이 가능하다.

2.1.2.9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

극한자연재해로 한울3,4호기 부지에 0.3g 지진동이 발생하여 지진원자로자동정지

시스템(Automatic Seismic Trip System : ASTS)에 의해 원자로 및 터빈이 정지된다. 동시에 [REDACTED]로 모든 소외전원이 상실되고 발전소소내의 비내진 설계 설비가 광범위한 손상을 입는다. 또한 취수구는 극한자연재해에 의한 펌프실 범람으로 모든 펌프모터가 침수되는 손상을 입는다는 가정을 한다.

주제어실 지진경광등 및 건물 흔들림으로 지진상황임을 인지한 발전팀장은 취약 지역에 대한 화재순찰을 지시하고 즉시 [REDACTED] 비상운전에 착수한다.

발전소내 교류안전모선의 저전압 신호에 의해 비상디젤발전기 자동기동 신호가 발생하였으나 비상디젤발전기 A/B 모두 미상의 원인으로 기동에 실패하고 발전소내의 모든 교류전원이 상실되는 소내정전 상태가 발생된다.

운전조의 발전팀장은 [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] 진입, 백색비상을 발령한다. 방사선비상은 소내정전 상황이 지속되어 [REDACTED] 후에 청색비상으로 상향 발령된다.

운전조는 [REDACTED]를 이용하여 발전소 상태 감시가 가능하며, 터빈구동 보조급수펌프를 이용한 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방을 통한 증기방출로 자연순환 냉각 유지가 가능하다.

또한, 대체교류 디젤발전기가 기동에 실패하자 운전조의 발전팀장은 1 MW 이동형발전차의 이동 및 연결을 요청함과 동시에 1E급 축전지 수명연장을 위해 비필수 직류부하 차단을 현장운전원에게 요청하여 수행이 가능하다.

소내정전 상황이 장기화됨에 따라 운전조는 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상에 의한 냉각재 상실을 최소화하기 위해 주증기 대기방출밸브를 현장에서 현장운전원을 통해 수동으로 개방하여 원자로 냉각재 계통의 냉각 및 감압이 가능하다.

원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압을 통해 안전주입탱크의 주입이 가능해지며, 노심냉각을 유지하던 중 1 MW 이동형발전차가 A계열 안전모선에 연결이 가능하다. 4.16kV A계열의 전원이 복구되자 운전조는 1E급 충전기를 기동하여 축전지의 추가 방전을 막고 충전펌프를 기동하여 냉각재상실을 보충하면서 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각을 복구하여 장기전원상실 대비가 가능하다.

비상기술지원실은 다중방어운영지침서에 따라 현장 점검을 수행하여 취수구 펌프

설비가 침수로 복구불능 상황임을 인지가 가능하며, 최종열제거원상실 운전을 위한 이동형펌프 및 3.2 MW 이동형발전차를 이동하여 설치가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차가 1 MW 이동형발전차를 대체하여 설치되고 이동형펌프가 기동되자 운전조는 1차측기기냉각수계통을 정상화하고 1계열의 정지냉각계통을 원자로 냉각재 계통에 연결하여 냉각운전 계속 수행이 가능하다.

2.1.2.10 중대사고 (시나리오 10)

극한자연재해로 부지에 0.3g 지진동이 발생하여 지진원자로자동정지시스템에 의해 원자로 및 터빈이 정지된다. 동시에 [] 로 모든 소외전원이 상실되고 발전소 소내의 비내진설계 설비가 광범위한 손상을 입는다. 취수구 또한 극한자연재해에 의한 펌프실 범람으로 모든 펌프모터가 침수되는 손상을 입는다는 가정을 한다.

그리고 운전조는 비상운전에 돌입하여 증기발생기를 통한 원자로 냉각재 계통 감압으로 원자로 냉각재 펌프 밀봉누설에 의한 냉각재 상실을 최소화하기 위한 조치를 수행하였으나 터빈구동보조급수펌프가 손상을 입어 실패한다는 가정을 한다.

사고 초기 방사선 백색 및 청색비상이 발령되고 비상기술지원실에 의해 설치가 요청된 1 MW 이동형발전차가 4.16 kV 안전모선에 연결되어 충전펌프를 이용한 원자로 냉각재 계통 냉각재주입이 시도되었으나, 냉각재주입이 실패하고 노심출구 온도는 [] 를 초과하여 중대사고로 진입하게 된다는 가정을 한다.

비상대책실에 의해 방사선비상은 적색비상으로 상향 발령되고 운전조와 비상기술지원실은 []

[] 를 수행하여 방사성물질의 잠재적인 방출경로, 계기응답, 발전소 기기배열, 샘플결과, 가용한 수원 등의 정보를 비상기술지원실에 제공하고 비상기술지원실은 이들 정보를 근거로 이동형펌프를 이용한 비상냉각수 외부주입 결정이 가능하다.

중대사고 진입 [] 경과 후부터 운전조는 비상기술지원실의 지시에 따라 []

[] 수행을 위해 증기발생기 및 원자로 냉각재 계통 감압에 착수하고, 운영지원실은 이동형펌프의 이동설치, 운전조는 주입에 필요한 기기배열 실시가 가능하다.

원자로 냉각재 계통 및 증기발생기 압력이 외부주입 가능압력 이하로 감소하자

중대사고 진입 시점에 외부주입 운전이 개시되고 노심이 냉각되기 시작한다. 외부주입 운전이 진행되는 동안에는 하고 격납용기 압력, 수소농도 및 부지경계에서의 선량이 기준치 이하로 안정되면 의 수행이 가능하다.

2.1.3 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성

본 스트레스트에서 수립된 한울3,4호기 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성을 평가하기 위해 본 스트레스트 보고서 제4장 및 제5장을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

2.1.3.1 소외전원상실 조건 (시나리오 1)

소외전원상실 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 원자로는 제어봉 자유낙하에 의해서 정지되고 2대의 비상디젤발전기가 자동 기동되어 4.16 kV 안전모선을 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전원들은 으로 진입하게 되므로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한 뒤, 최종열제거원상실을 운전하여 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

따라서 본 스트레스트 보고서 제4장의 표 4-11 (소외전원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 1))에 제시된 대응능력 및 한계상황에 대한 평가 결과는 적절한 것으로 판단되며, 소외전원상실 조건 상황에 대하여 사고대응전략의 연계항목은 적절한 것으로 평가된다.

2.1.3.2 소내정전 조건 (시나리오 2)

소내정전 조건 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 원자로는 제어봉 자유낙하에 의해서 정지되고, 비상디젤발전기가 가동되지 않음에 따라서 대체교류디젤발전기를 기동하여 1개 계열의 4.16 kV 안전모선을 가압하여 해당 계열의 공학적안전설비에 전력을 공급하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전원들은 로 진입하게 되고, 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한 뒤, 최종열제거원상실을 운전하여 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

2.1.3.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 원자로는 제어봉 자유낙하에 의해서 정지되고, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기가 기동되지 않음에 따라

원자로냉각재계에 대한 냉각 및 감압을 수행할 수 있어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전조는

로 진입하게 되고, 경우에는 1 MW 이동형발전차의 이동을 지시하게 되며, 를 참조하여 이동형 장비들을 배치하게 된다.

필요시 3.2 MW 이동형 발전차를 적절한 위치에 배치할 것을 제시하고 있다.

그리고 1 MW 이동형발전차가 적절한 위치에 배치되어 가용하게 된 경우,

를 참조하여 1개의 1E급 4.16kV 안전모선을 복구한 뒤 최종열제거원상실 운전 진입조건까지 발전소에 대한 냉각 및 감압을 수행하게 되며, 이후 3.2 MW 이동형발전차의 연결 등을 통하여 기기냉각수계통 운전을 위한 충분한 전원이 확보되면 최종열제거원상실의 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지되어 적절한 것으로 평가된다.

이러한 사고대응전략의 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되나, 다음과 같은 설비와 절차서간 연계사항에 대한 개선이 필요한 사항들이 도출되었다.

본 스트레스테스트 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 제시된 바와 같이, 1 MW 이동형발전차는

에 대한 전원만을 공급이 가능함을 분석하였지만, 는 3.2 MW 이동형발전차에 대한 부하목록을 제시하고 있으므로, 향후 1 MW 이동형발전차 도입 과정에서 1 MW 이동형발전차를 위한 별도의 절차서가 구비되어야 할 것으로 평가되었다.

2.1.3.4 최종열제거원상실 조건 (시나리오 4)

최종열제거원상실 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 점진적인 복수기 진공상실이 발생하여 일정 시간 이후에는 터빈 정지가 발생하게 되고, []의 동작에 따라서 원자로는 일정 출력에서 안정된 상태를 유지하게 된다. 또한, 기기냉각수계통에 대한 열제거원이 상실되므로 1차측 기기냉각수계통의 냉각수 온도는 점진적으로 상승하게 되고, 이에 따라서 원자로냉각재펌프 베어링 온도와 밀봉수 온도가 점진적으로 상승하게 되며 경보설정치에 도달하게 되면 경보가 발생된다. 그리고 기기냉각수 상실 상태로 10분이 경과한 경우 운전변수를 확인하여 감시변수가 트립 권고치에 도달하게 되면 차례대로 원자로냉각재펌프들을 수동으로 정지하게 되며, 이는 []을 통해 원자로 정지를 발생시키게 된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전원조는 []

[] 진입하게 되고, []에서 모든 1차측 기기냉각해수펌프 상실에 따라 이동형펌프 이동을 지시하고, 발전소를 냉각 및 감압한 이후에 이동형펌프가 가용하게 될 경우 정지냉각계통 운전을 통하여 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 된다. 이러한 상황에 대하여 사고대응전략의 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되나, 다음과 같은 인간공학 유효성 평가가 필요한 사항들이 도출되었다.

최종열제거원상실 상황이 즉각적인 원자로 자동 정지를 유발하지는 않고, 최종열제거원상실에 대한 사고 확인 이후에 운전원에 의해서 원자로가 수동으로 정지되어야 한다는 점에서 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-18 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 4)에서 원자로 정지에 대한 인적오류 발생 가능성과 소요시간에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.1.3.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한울3,4호기는 대체열제거원이 없으므로 최종열제거원상실 조건(시나리오 4)과 동일하다.

2.1.3.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 사고대응전략은 전반적으로 시나리오 3에 대한 사고대응전

략에서 이동형펌프의 이용이 추가되었으므로 설비 연계는 적절한 것으로 평가되었다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전조는 소내정전 발생에 따라

로 진입하게 된다. 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기가 가동되지 않음에 따라서 안전등급 축전지 및 터빈구동보조급수펌프를 이용하여 발전소의 냉각 및 감압을 수행하게 되고, 1E급 축전지가 방전되기 전에 1 MW 이동형발전차를 연결하여 정지냉각계통 운전조건까지 발전소의 냉각 및 감압을 수행한 이후에 3.2 MW 이동형발전차와 이동형펌프를 연결하여 정지냉각계통 운전을 통하여 발전소를 안전정지상태로 유지하게 된다. 이러한 상황에 대하여 사고대응전략의 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되나, 다음과 같은 인간공학 유효성 평가가 필요한 사항들이 도출되었다.

그리고 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-21 (대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6))에서 최종열제거원상실 사고확인까지 소요시간 및 비필수 직류부하차단 요청까지의 소요시간 그리고 인적오류 발생 가능성에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.1.3.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

한울3,4호기 스트레스테스트 보고서 제2장의 결과에 따라 10,000년 빈도 지진해일을 고려하였을 때, 0.2g의 지진동을 가정할 경우 해일에 의한 외부침수는 없는 것으로 가정하며, 사고대응전략 및 연계항목의 적절성은 시나리오 6과 동일한 것으로 평가되었다.

2.1.3.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

한울3,4호기 스트레스테스트 보고서 제2장의 결과에 따라 한울 부지에서 해일에 의한 외부침수는 없는 것으로 가정되며, 강우에 의한 침수 가능성에 대비하기 위하여 방수문을 설치할 예정이므로, 방수문이 설치된 것으로 가정할 경우 사고대응전략 및 연계항목의 적절성은 시나리오 6과 동일한 것으로 평가되었다.

2.1.3.9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

사고대응전략 및 연계항목의 적절성은 시나리오 6과 대체로 유사할 것으로 판단되나, 0.3g 지진에 의한 발전소 조명 상실, 발전소 통신 설비 영향, 화재 등 발전소의 직간접적인 영향을 가정하여 주요 운전원 조치의 수행에 보다 많은 시간이 소요가 예상되므로 인적오류 발생 가능성 및 소요시간에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.1.3.10 중대사고 (시나리오 10)

사고대응전략 및 연계항목의 적절성은 시나리오 6과 대체로 유사할 것으로 판단되나, [REDACTED] 가정하여 주요 운전원 조치의 수행에 보다 많은 시간이 소요가 예상되므로 인적오류 발생 가능성 및 소요시간에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.2 주요 운전원 조치의 적절성

주요 운전원 조치의 적절성 평가는 2.1절 사고대응전략 수립의 적절성 및 제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 그리고 제5장 중대사고에서 도출된 주요 운전원 조치의 적절성 및 이행가능성을 평가하기 위함이다.

주요 운전원 조치의 적절성 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

- 가정한 사고시나리오 상황에서 [REDACTED]
- 사고시나리오를 포함한 극한상황(지진, 화재 등)에서도 대응전략 수행을 위해 필요한 직무에 대한 주요 운전원조치의 이행가능성을 평가
- 주요 운전원 조치를 수행하기 위한 가용 시간은 분석되고 충분히 확보되어야 하며, 인적오류 발생으로 주요 운전원조치가 실패할 경우를 가정하여 대체 이행방안 수립
- 사고시나리오 수행 중 설비, 절차서 등의 활용 시 발생 가능한 인적오류 혹은 의사결정오류를 확인하여 최소화 방안을 수립하고 대응능력 확보방안 제시

주요 운전원 조치의 적절성 평가의 범위는 다음과 같다.

- 사고시나리오 분석을 통해 도출된 주요 운전원조치의 적절성 평가

- 사고시나리오를 포함한 극한상황에서 주요 운전원조치의 이행가능성 평가
- 수립된 사고대응전략을 성공적으로 이행하기 위한 과정에서 발생 가능한 인적 오류 혹은 의사결정오류 확인 및 평가

2.2.1 주요 운전원 조치 적절성 평가

본 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장의 분석 결과를 바탕으로 다음의 주요 운전원 조치들을 도출 할 수 있으며, 주요 운전원 조치들에 대한 적절성 평가는 최적운전경로에 따른 절차서 수행 및 운전원 조치 가능성에 대한 평가이며, 결과는 다음과 같다.

가. 원자로트립 후 조치 및 사고진단

나 1 MW 이동형발전차 연결

다. 비필수 직류부하 차단

라. 격실 출입문 개방

마. 안전주입탱크 격리

바. 3.2 MW 이동형발전차 연결

사. 이동형고유량펌프 연결

아. 원자로냉각재계통 냉각 감압

자. 충전펌프 기동

차. 소형이동형발전기 연결

2.2.1.1 원자로트립 후 조치 및 사고진단

원자로 정지 후 조치 및 사고진단을 통하여 시나리오 1, 4, 5는 소외전원상실로 진단을 하여

진입을 한다.

시나리오 1의 경우에는 소외전원상실 상황이므로

진입하는 것이 적절하고, 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10의 경우에는 발전소정전사고이므로 진입하는 것은 적절하다.

시나리오 4, 5의 경우 최종열제거원상실 상황이지만, 최종열제거원상실로 인하여 기기냉각수계통이 이용불능 상태가 되는 시점에서 모든 원자로냉각재펌프의 수동 정지에 의한 강제순환상실(Loss of Forced Circulation : LOFC)이 발생하므로

진입은 적절하다.

2.2.1.2 1 MW 이동형발전차 연결

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 [redacted] 1 MW 이동형발전차 이동을 지시한 이후, 1 MW 이동형발전차 연결이 완료되면 [redacted] 1계열의 안전등급 1E급 4.16 kV 모선에 전원을 공급하도록 하고 있다. 안전등급 축전지와 터빈구동보조급수펌프를 이용하여 [redacted] 원자로냉각재계에 대한 냉각 및 감압을 수행할 수 있다. 또한, 극한자연재해에 따라서 다수의 호기가 사고상황인 경우에는 각 호기별로 1 MW 이동형발전차를 연결하여 정지냉각계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계에 대한 냉각 및 감압을 수행하는 운전원 조치는 적절한 것으로 판단된다.

2.2.1.3 비필수 직류부하 차단

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 안전등급 축전지와 터빈구동보조급수펌프를 이용하여 원자로냉각재계에 대한 냉각 및 감압을 [redacted] 연장하기 위하여 [redacted]에 따라서 비필수 직류부하 차단을 수행한다.

그리고 한수원의 사고대응전략에 따르면 초기 [redacted]까지 발전소 고정형 설비를 이용한 초기 대응(Phase 1)하도록 사고대응전략이 갖추어져 있으므로 비필수 직류부하 차단은 적절한 운전원 조치인 것으로 검토되었다.

2.2.1.4 격실 출입문 개방

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 1 MW 이동형발전차가 연결된 경우 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 가동에 필요한 환기 및 냉각을 제공하기 위하여 [redacted]의 격실문 개방을 수행하도록 하고 있다. 격실 출입문 개방은 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 냉각을 위해 수행할 수 있는 유일한 방법이라는 측면에서 적절한 운전원 조치로 판단된다.

시나리오 4, 5에서 최종열제거원이 상실된 경우 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 가동에 필요한 환기 및 냉각을 제공하기 위하여 [redacted]운전 중인 [redacted]을 수행하도록 하고 있다. [redacted]은 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 냉각을 위해 수행할 수 있는 유일한 방법이라는 측면에서 적절한 운

전원 조치로 판단된다.

2.2.1.5 안전주입탱크 격리

시나리오 1, 4, 5에서 운전원들은 [] 안전주입탱크 감압 및 격리를 수행한다. 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9에서 운전원들은 []에서 안전주입탱크 감압 및 격리를 수행한다. 안전주입탱크 감압 및 격리는 원자로냉각재계통으로 질소 가스가 유입되는 것을 방지하기 위하여 수행하는 운전원 조치로 적절한 것으로 판단된다.

2.2.1.6 3.2 MW 이동형발전차 연결

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서 기기냉각수계통에 대한 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 1개 계열의 []을 가압한다. 한수원의 사고대응전략 보고서에 따르면 사고발생 [] 이후에는 발전소 고정형 설비, 소내 이동형 설비 및 소외자원을 이용한 대응(Phase 3)을 하도록 사고대응전략이 갖추어질 예정이다. 3.2 MW 이동형발전차 연결을 통하여 1차측기기 냉각수펌프 및 1차측기기 냉각해수펌프를 가동함으로써 정지냉각계통 운전을 가능하게 하여 발전소를 안전정지상태로 유지할 수 있도록 하므로 적절한 조치로 판단된다. 또한, 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 제시된 바와 같이, 3.2 MW 이동형발전차가 연결될 경우 []

2.2.1.7 이동형고유량펌프 운전

시나리오 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10에서 최종열제거원 상실 이후 기기냉각수계통에 대한 운전을 위하여 이동형고유량펌프를 설치 및 운전한다. 원자로냉각재계통에 전달된 붕괴열은 정지냉각계통의 운전에 의해 기기냉각수계통으로 전달되고, 이 열은 최종열제거원이 상실된 상황에서 이동형고유량펌프의 운전을 통하여 제거될 수 있게 되므로 적절한 운전원 조치로 판단된다.

2.2.1.8 원자로냉각재계통 냉각 감압

시나리오 1, 2에서는 소외전원상실의 장기화에 대비하고, 시나리오 4, 5에서는 최

중열제거원상실의 장기화에 대비하여 안전정지상태를 유지하기 위해 정지냉각계통 운전조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한다. 시나리오 1, 4, 5는

에서 보조급수펌프에 의한 급수와 MSADV 개방에 의한 증기방출로 냉각 및 감압에 착수한다. 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 밀봉냉각상실에 의한 원자로냉각재펌프 축 누설량을 감소시키고 안전주입탱크의 주입을 유도하기 위해 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한다. 냉각 및 감압은

터빈구동보조급수펌프에 의한 급수와 MSADV의 현장수동개방에 의해 착수되며, 추가감압이 요구되는 경우는 가압기 및 원자로용기헤드 배기밸브를 이용한다. 발전소 안전정지상태를 유지하며, 원자로냉각재펌프 축 누설을 감소시키고 안전주입탱크 주입을 유도하기 위한 원자로냉각재계통 냉각 및 감압조치는 적절한 것으로 평가된다.

2.2.1.9 충전펌프 기동

시나리오 1, 2에서는 원자로냉각재펌프 밀봉냉각을 확보하고 원자로냉각재계통 냉각에 따른 추가적인 정지여유도 확보를 위해 충전펌프를 기동한다. 시나리오 1에서는 에서 원자로냉각재펌프 밀봉주입수를 복구하기 위해 충전펌프를 기동한다. 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 원자로냉각재펌프 밀봉냉각 상실로 축 누설이 발생하는 것으로 가정하기 때문에 원자로냉각재계통 재고량 복구를 위해 충전펌프를 기동한다.

가압기 수위가 유지되지 않음을 확인하고, 에 따라 1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동한다. 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크에 의해 노심냉각 및 재고량 유지가 가능한 것으로 분석되었으므로, 이 시간 이내에 1 MW 이동형발전차를 연결하고 충전펌프를 기동하는 운전원조치는 적절한 것으로 평가된다.

2.2.1.10 소형이동형발전기 연결

시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 안전주입탱크가 주입된 후 질소가스가 원자로냉각재계통으로 유입되는 것을 방지하기 위해 안전주입탱크 격리를 수행한다.

미만으로 확인되면, 에 따라 소형이동형발전기를 연결하여 출구 격리밸브를 닫도록 하고 있다. 1 MW 이동형발전차는 한 계열의 안전모선에만 연결이 가능하므로 4개의 안전주입탱크 중 다른 계열의 전원을 수전하는 두 개의 안전주입탱크는 이와 같이 소형이동형발전기를 연결하여 격리하는 운전조치는 적절한 것으로 평가된다. 단, 이 경우에도 안전계통 125VDC 축전지 전원을 공급받는 솔레노이드구동 배기밸브를 개방하여 안전주입탱크를 배기하면 원자로냉각재계통으로 질소유입을 방지할 수 있어 격리하는 것과 같은 효과

가 있다. 소형이동형발전기는 안전주입탱크 격리 외에 사고완화전략 수행 중 전원이 상실된 격납건물 내의 MOV를 외부에서 신속히 조작하는데 사용할 수 있어 적절한 운전조치 수단으로 평가된다.

2.2.2 주요 운전원 조치 직무분석 및 이행가능성 평가

설계기준초과 및 극한재해 사고시나리오 상황에서 대응전략 이행에 요구되는 주요 운전원조치의 직무분석을 통해 이들 조치의 이행가능성을 평가하였다.

먼저 인간공학 유효성 평가를 통해 도출된 실제 소요시간을 통해 스트레스테스트 보고서에서 가정한 한계시간 대비 여유시간을 평가하였다. 실제 소요시간은 설계기준초과 및 극한재해상황에서 주요 운전원조치가 주제어실을 가정한 시뮬레이터 및 한울3호기 현장에서 수행되는 관계로 인간공학 유효성 평가 기간 중 3개조의 수행 소요시간을 평균하여 산정하였으며 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다.

단, 3일 이후에 수행이 요구되는 소외자원에 대한 운전원 조치에 대해서는 인간공학 유효성 평가 시간의 제한으로 인해 별도의 가정으로 수행하였으나 이번 평가에서 확인된 주요 운전원조치의 여유시간으로 미루어 충분한 시간의 확보가 예상된다.

직무분석시 인적오류를 분석을 수행하기 위해 표 7-1과 같이 [redacted]에 따라 직무형태를 구분하고, 표 7-2와 같이 각 직무형태별로 가장 가능성 있는 인적오류 형태와 발생가능성을 결정하였다. 인적오류 모드와 발생 가능성을 결정하기 위해 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서의 직무공간, 가용통신, 직무공간의 조명, 방사선, 안전위험요소 등의 직무환경과 조치 대상기기의 MMI 가용성 및 대체방안 유무 등을 검토하였다.

또한, 인적오류 가능성은 [redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted] 분류하였다. 인적오류의 가능성 및 심각도를 조합하여 위험도(Risk Level)를 결정하였으며, 위험도가 높은 직무에 대해서는 예상 오류형태, 오류발생 시 예상 결과 및 개선안을 제시하였다.

2.2.2.1 소외전원상실 조건 (시나리오 1)

소외전원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-3과 같으며, 가용자원이 충분히 확보된 상태에서 수행하게 되므로 충분한 여유시간이 확보될 수 있음으로 평가되었다. 또한, 직무분석을 통한 인적오류 발생 가능성은 시나리오 4, 6, 9와 동일하다.

2.2.2.2 소내정전 조건 (시나리오 2)

소내정전 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-4와 같으며, 가용자원이 충분히 확보된 상태에서 수행하게 되므로 충분한 여유시간이 확보될 수 있음으로 평가되었다. 또한, 직무분석을 통한 인적오류 발생 가능성은 시나리오 4, 6, 9와 동일하다.

2.2.2.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건은 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 가정한 시나리오 6과 이동형펌프 이동 및 설치를 제외하고는 주요 운전원조치가 동일하고, 예상 소요시간, 한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과는 시나리오 6과 동일하며, 직무분석을 통한 인적오류 발생 가능성 또한 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.4 최종열제거원상실 조건 (시나리오 4)

최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-5와 같으며, 주요 운전원조치에 대한 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였으나, 운전조의 취수구상태 확인에 시간 초과에 대한 가능성이 있는 것으로 평가되었으며, 취수구상태 확인 시간의 단축을 위해 주제어실의 고수위 경보신설이 필요하다.

최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 인적오류 분석결과는 표 7-6과 같으며, 별도의 개선이 요구되는 인적오류는 확인되지 않았다.

2.2.2.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한울 3,4호기는 대체열제거원이 없으므로 최종열제거원상실 조건 (시나리오 4)와 동일하다.

2.2.2.6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건

(시나리오 6)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-7과 같으며, 주요 운전원조치에 대한 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였으나, 운전조의 취수구상태 확인에 시간 초과 가능성이 있는 것으로 평가되었으며, 취수구상태 확인 시간의 단축을 위해 주제어실의 고수위 경보 신설이 필요하다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과는 표 7-8과 같으며, 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 표 7-9와 같다.

시나리오 6에서의 예상 인적오류는 표 7-9에서와 같이 설비 또는 절차서 개선을 통해 방지가 가능하지만 인적오류에 의해 주요 운전원조치의 실패를 가정하였을 경우에도 다음과 같이 대체 이행방안은 가능하다.

축전지 비필수부하 차단 시 예상되는 인적오류는 ■■■■ 이내에 차단이 불가하여 축전지수명을 ■■■■ 이상으로 연장할 수 없거나, 실수로 차단해서는 안되는 필수부하를 차단하는 것이다. 비필수부하 차단에 ■■■■이 초과되어도 충전기 가압이 가능한 1 MW 이동형발전차가 ■■■■ 이내에 연결이 가능하고, 또한 축전지 충전을 목적으로 주제어실에서 기동이 가능한 중형발전기를 발전소별로 추가 설치할 예정이므로 축전지가 방전되는 상황은 방지할 수 있다. 또한 비필수부하 차단 시 인적오류로 잘못 차단하여도 ■■■■에서는 비필수부하 차단 후 필수부하의 투입여부를 확인하는 단계가 있어 실수로 차단한 필수부하를 다시 투입할 수 있다.

1 MW 이동형발전차 연결준비 과정에서 예상되는 인적오류는 ■■■■ 이내에 교류전원 복구가 가능한지 여부를 결정하는데 시간이 지체되어 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되고 축전지 수명을 ■■■■ 이상으로 연장할 수 없는 것이다. 비필수부하 차단이 ■■■■을 초과하여도 앞서 언급한 바와 같이 1 MW 이동형발전차 및 중형발전기를 연결하여 축전지 방전 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결함으로써 가압에 실패하여 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전되는 것이다. 이 경우에도 ■■■■ 이내에 1 MW 이동형발전차를 건전한 안전모선으로 이동설치가 가능하며 중형발전기를 기동하여 충전기를 가압할 수 있으므로 축전지 방전은 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 예상되는 인적오류는 사전에 모선부하차

단기를 개방하지 않거나 대용량부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되고 축전지 복구가 지연되는 경우이다. 이 경우에 이동형발전차에는 과부하보호계전기가 자동으로 작동하여 발전차를 보호하므로 즉시 재기동이 가능하다.

충전펌프 기동과정에서 예상되는 인적오류는 흡입측을 재장전수탱크로 전환하지 않고 기동하여 체적제어탱크의 질소가 펌프로 유입, 충전펌프가 손상되는 경우이다. 이 경우에도 한 계열에 2대의 충전펌프가 있어 대처가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결함으로서 가압에 실패하여 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기 작동으로 발전차는 손상되지 않으므로 건전한 모선측으로 이동설치가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 예상되는 인적오류는 사전에 모선부하 차단기를 개방하지 않거나 발전차 용량을 초과하는 부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되므로 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기에 의해 발전차가 손상되지 않으므로 즉시 재기동이 가능하다.

2.2.2.7 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건을 동반한 지진해일 조건은 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 가정한 시나리오 6과 주요 운전원조치가 동일하고, 예상 소요시간, 한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과 및 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.8 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건을 동반한 해일 및 강우 조건은 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 가정한 시나리오 6과 주요 운전원조치가 동일하고, 예상 소요시간, 한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과 및 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.9 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-10과 같으며, 주요 운전원조치에 대한 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다.

그러나, 취수구상태 확인시간 및 비필수부하 차단 시간에서 시간 초과에 대한 가능성이 있는 것으로 평가되었으며, 취수구상태 확인 시간의 단축을 위해 주제어실의 고수위 경보 신설 및 비필수부하 차단과 관련한 교육 및 훈련이 필요한 것으로 평가되었다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과는 표 7-11과 같으며, 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 표 7-12와 같다.

시나리오 9 에서의 예상 인적오류는 표 7-12와 같이 교육훈련, 설비 또는 절차서 개선을 통해 방지가 가능하지만 인적오류에 의해 주요 운전원조치의 실패를 가정하였을 경우에도 다음과 같이 대체 이행방안은 가능하다.

원자로정지 확인 시 예상되는 인적오류는 제어봉위치지시계 상실로 모든 제어봉의 삽입여부를 확인할 수 없어 후속 냉각과정에서 정확한 정지여유도를 확인할 수 없는 것이다. 냉각과정에서 핵계측기 감시를 통해 노심의 미임계 여부 감시가 가능하고 미임계가 위협받을 시 냉각을 중단하면 미임계 확보가 가능하다.

축전지 비필수부하 차단 시 예상되는 인적오류는 ■분 이내에 차단이 불가하여 축전지수명을 ■ 이상으로 연장할 수 없거나, 실수로 차단해서는 안되는 필수부하를 차단하는 것이다. 비필수부하 차단에 ■이 초과되어도 충전기 가압이 가능한 1 MW 이동형발전차가 ■ 이내에 연결이 가능하고, 또한 축전지 충전을 목적으로 주제어실에서 기동이 가능한 중형발전기를 발전소별로 추가 설치할 예정이므로 축전지가 방전되는 상황은 방지할 수 있다. 또한 비필수부하 차단 시 인적오류로 잘못 차단하여도 ■에서는 비필수부하 차단 후 필수부하의 투입여부를 확인하는 단계가 있어 실수로 차단한 필수부하를 다시 투입할 수 있다.

1 MW 이동형발전차 연결준비 과정에서 예상되는 인적오류는 ■ 이내에 교류전원 복구가 가능한지 여부를 결정하는데 시간이 지체되어 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되고 축전지 수명을 ■ 이상으로 연장할 수 없는 것이다. 비필수부하 차단이 ■을 초과하여도 앞서 언급한 바와 같이 1 MW 이동형발전차 및 중형발전기를 연결하여 축전지 방전 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전

차를 연결하르로서 가압에 실패하여 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전되는 것이다. 이 경우에도 [] 이내에 1 MW 이동형발전차를 건전한 안전모선으로 이동설치가 가능하며 중형발전기를 기동하여 충전기를 가압할 수 있으므로 축전지 방전은 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 예상되는 인적오류는 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 대용량부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되고 축전지 복구가 지연되는 경우이다. 이 경우에 이동형발전차에는 과부하보호계전기가 자동으로 작동하여 발전차를 보호하르로 즉시 재기동이 가능하다.

충전펌프 기동과정에서 예상되는 인적오류는 흡입측을 재장전수탱크로 전환하지 않고 기동하여 체적제어탱크의 질소가 펌프로 유입, 충전펌프가 손상되는 경우이다. 이 경우에도 한 계열에 2대의 충전펌프가 있어 대처가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결하르로서 가압에 실패하여 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기 작동으로 발전차는 손상되지 않으르로 건전한 모선측으로 이동설치가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 예상되는 인적오류는 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 발전차 용량을 초과하는 부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되르로서 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기에 의해 발전차가 손상되지 않으르로 즉시 재기동이 가능하다.

2.2.2.10 중대사고 (시나리오 10)

한울3,4호기 스트레스테스트 보고서에서는 설계기준초과 및 극한재해 사고상황 발생 후 [] 동안 증기발생기 급수가 가능한 것으로 가정하여 최초 사고 이후 중대사고 진입까지 [] 이 소요되며, 발전소 안정화에 걸리는 시간이 [] 이상 소요되는 것으로 분석하였다. 그러나, 수행 시간 산출을 위해 수행되는 인간공학 유효성 평가에서는 시나리오 평가시간을 고려하여 터빈구동 보조급수펌프가 즉시 상실되는 것을 가정하여 평가를 진행 한 관계로 시간관측 결과에 대한 비교가 어려워 소요시간 분석을 수행하지 않았다. 단, 주요 단계별 소요시간 및 운전조 평가결과는 부록 1 인간공학 유효성 평가 보고서에 기술하였으며, 비상기술지원실에서 결정된 지침에 따라 현장 밸브조작에 의한 외부주입을 수행하는 관계로 인적오류 및 의사결정오류와 관련된 분석은 수행하지 않았다.

2.3 주요 자원의 적절성

주요 운전원 조치의 적절성 평가는 2.1절 사고대응전략 수립의 적절성 및 2.2절 주요 운전원조치의 적절성에서 도출된 주요 운전원 조치를 수행하기 위한

적절성 및 설계기준을 초과하는 극한재해시 주요 자원의 활용 가능성을 평가하기 위함이다.

주요 자원의 적절성 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

- 주요 운전원조치를 수행하기 위한 인간-시스템연계 설비는 가정한 사고시나리오를 포함한 극한상황(지진, 화재 등)에서도 가용해야 하며, 이용이 불가능할 경우에는 대체 방안 제시
- 주요 운전원 조치를 수행하기 위한 절차는 명확하게 수립되어야 하며, 각 절차서-지침서간 연계성 확보
- 제4장에서 도출된 주요 운전원 조치를 수행하기 위하여 충분한 조직 및 인력 확보
- 운전원 및 소내·외 비상대응조직원의 수행 능력을 포함한 사고 특성, 대응전략, 설비 및 절차 이행 능력은 구성원 각자의 책임과 권한에 상응하는 주기적인 교육 및 훈련 프로그램(구체화된 시나리오, 주기, 방법, 결과 등 포함)을 통해 확인
- 의사결정에 필요한 조직 및 인력의 적절성, 책임 및 권한, 수행내용 등의 분석 및 절차 확립
- 극한상황에서 소내뿐만 아니라 소외의 자원 활용 전략도 수립하여 적절성을 확인해야 하며, 소내·외 대응 전략 실행에 필요한 능력 확보

주요 자원의 적절성 평가의 범위는 다음과 같다.

- 주요 운전원 조치를 수행하기 위한 인간-시스템연계 설비, 절차서, 조직 및 인력, 작업도구 등의 적절성 평가
- 주요 운전원 조치의 유효성을 확보하기 위한 교육 및 훈련의 적절성 평가
- 소내·외 자원활용 전략, 실행에 필요한 능력 확보에 대한 평가

2.3.1 인간-기계 연계설비 평가

2.3.1.1 주제어실 인간-기계 연계설비 평가

주제어실 인간-기계 연계설비 평가를 위해 총 10개 시나리오 중 인간공학 유효성 평가를 수행한 대표 시나리오 4개(시나리오 4, 6, 9, 10)에서 필수적으로 사용해야

하는 주제어실 채고기기 목록은 표 7-13 ~ 표 7-16과 같으며, 평가 결과는 다음과 같다.

최종열제거원 상실 또는/그리고 장기소외전원상실 사고 상황 시 [redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted] 개선이 필요하다.

[redacted] 지진으로 인해 [redacted] 이 상실되면 주제어실의 [redacted]
[redacted] 계기가 상실되어 EOP 수행시 필수안전기능 상태확인이 불가능하여 EOP 수행에 지장을 초래하므로 내진 및 1E급 전원으로 설비개선이 요구되었다.

2.3.1.2. 현장 인간-기계 연계설비 평가

현장 인간-기계 연계설비 평가를 위해 총 10개 시나리오 중 인간공학 유효성평가를 수행한 대표 시나리오 4개(시나리오 4, 6, 9, 10)에서 필수적으로 수행해야하는 현장 채고기기 목록은 표 7-17과 같으며, 평가 결과는 다음과 같다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 상황 시 1E급 125V 축전지의 [redacted]
[redacted] 이상 수명연장을 위해 [redacted] 에 따라 사고발생 후 [redacted] 이내에 비 필수부하 차단이 요구되나, 조명 및 통신이 제한적인 극한재해 상황에서는 그 이상 시간초과가 예상됨에 따라 인간공학 유효성 평가를 통해 확인이 필요하다.

후쿠시마 후속조치로 인해 발전소에 위성통신장비를 설치하였으나, 1차측 현장운전원의 경우 소내 통신장비 불능인 상태에서 1차측 현장에 투입될 경우 주제어실 또는 비상기술지원실과의 통신이 어려워짐에 따라 1차측 현장운전원의 현장출입 시 주제어실 및 비상기술지원실과 통신이 가능토록 별도의 통신장비 설치가 요구되었다.

다중방어운영지침서에서 활용하는 소내 장비들은 평상시 활용도가 거의 없으므로 관련 장비나 보관함에 다중방어운영지침서에 활용되는 장비임을 식별 가능하도록 별도의 표기가 요구되었다.

격실문 개방과 관련한 고정장치가 없어 격실문 개방 수행의 어려움이 발생할 가능성이 있으므로 별도의 격실문 개방 고정 장치 도입이 요구되었으며, 실제 사고 상황 발생시 격실문 개방 이후에 다른 현장운전원 또는 비상인력에 의해 고정장치가 해제 될 가능성이 있으므로 격실문 고정장치에 다중방어운영지침서에 의한

격실문 개방을 식별 할 수 있도록 별도의 표기가 필요하다.

2.3.1.3. 이동형설비 인간-기계 연계설비 평가

이동형발전차와 발전소를 연결하는 [redacted] 하고 있으나, 이동형 발전차의 연결부에는 색상표기가 되어 있지 않아 연결시 인적오류 가능성이 있다. 따라서 이동형 발전차 케이블 설치시 사용되는 3상 케이블 연결 색상의 표시가 요구되었다.

이동형발전차의 케이블 포설과정에서 케이블 포설요원이 이동형발전차 아래로 들어가 케이블을 설치하는 작업이 관찰되어 이동형발전차 케이블 설치의 간소화를 위한 설비개선이 요구되었다.

이동형발전차의 경우 케이블 포설을 위해 케이블 포설 요원이 케이블 단자대를 손으로 들고 [redacted] 가량을 이동하여 소내 단자함에 연결해야 한다. 이는 이동과정에서 케이블 및 단자대의 손상을 일으킬 수 있으며, 케이블 및 단자대의 손상을 방지하기 위해 발전소 외에 별도의 단자함을 영구 설치하여 케이블 설치를 위한 이동거리의 최소화가 요구되었다.

2.3.2 소외자원 평가

한울3,4호기 스트레스테스트의 대응전략에 필요한 소외자원은 다수호기 동시사고 시 3.2 MW 이동형발전차를 타 부지에서 이동하는 것으로 검토되었다. 하지만 3.2 MW 이동형발전차는 상기 2.3.1.3절의 이동형설비 인간-기계 연계설비 평가와 동일한 것으로 평가되었다.

2.3.3 절차서 평가

한울3,4호기 스트레스테스트를 위한 절차서 평가를 위해 설계기준초과 및 극한자연재해 상황 발생시 활용하는 비상, 비정상, 계통 절차서 및 다중방어운영지침서와 중대사고관리지침서를 평가하였으며, 각 절차서 및 지침서의 평가결과는 다음과 같다.

2.3.3.1 비상운전절차서

[redacted] 이나 소외전원이 정상인 상태에서 모든 원자로 냉각재 펌프 정지에 따른 자연순환냉각 시에도 이 절차서를 사용하므로 모순된 점이 있어 [redacted] 수정하는 것이 요구되었다.

최종열제거원 상실이나 장기교류전원상실 상황시 충전펌프를 이용하여 원자로 냉각재 계통 재고량을 유지하도록 하고 있으나, 정지냉각계통(Shutdown Cooling System : 정지냉각계통) 진입조건을 위한 원자로 냉각재 계통 감압시

수정이 요구되었다.

에서 정지냉각운전 진입조건 중 항목이 있으나, 3.2 MW 이동형발전차 연결방식(1 MW 이동형발전차를 철거하고 3.2 MW 이동형발전차를 연결하는 방안, 3.2 MW 이동형발전차를 B계열 안전모선에 연결하는 방안)이 확정되지 않아 추후 확정 후 수정이 요구되었다.

에서 1 MW 이동형발전차가 연결되어도 을 거치지 않고 으로 건너뛰도록 되어있으므로, 가 소외전원 또는 비상디젤발전기에 의한 것이라면 표현에 대한 절차서 수정이 요구되었다.

에서 운전원이 주증기 대기방출밸브를 모두 닫아 원자로 냉각재 계통 온도가 다시 상승하거나, 터빈구동 보조급수펌프를 정지하는 경우가 있으므로,

이라면, 냉각을 중지한다는 표현보다는

등의 표현으로 변경하고,

절차서에 명기하는 수정이 요구되었다. 또한, 증기발생기 압력단위는 절대압력인 $\text{kg/cm}^2 \text{ A}$ 로 표기하여 운전원에게 혼란을 주지 않게끔 절차서 수정이 요구되었다.

하도록 되어있으나 다른 을 수행하도록 되어 있으므로, 비상운전 절차서의 일관성을 위해 수행하도록 절차서의 수정이 요구되었다.

극한재해상황에서 원자로 냉각재 펌프 밀봉 상실을 가정할 경우, 필수안전기능 불만족이나 냉각재상실사고와 소내정전의 복합사고로 진단되어 회복절차서로 운전원이 진입하게 되며, 이 경우 극한재해상황에 대비한 를 수행할

수 없으므로, 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서는 전원이 복구될 때까지 []을 계속 수행하고, 필수안전기능 상태점검결과는 참고용으로만 사용하도록 하는 주의사항 반영이 요구되었다.

[]는 증기발생기 재고량방출 격리단계이나 주증기 격리밸브(Main Steam Isolation Valve : MSIV)를 격리하는 내용이 누락됨에 따라 계기용 공기 상실로 고장열림 상태가 되는 2차측배수밸브 등으로 과도한 증기가 방출됨으로써 증기발생기 고갈이 촉진될 가능성이 있다. 따라서 []의 증기발생기 재고량방출 격리단계에서 주증기 격리밸브도 닫도록 절차서 수정이 요구되었다.

[] 이상이나, [] 기술되어 차이가 있으므로, []으로 수정이 요구되었다.

2.3.3.2 비정상운전절차서

[] 따른다고 되어있으나, []에는 동 조항이 없음. 단 펌프 정지에 따른 온도상승 시 조치가 기술되어 있으므로, []에 2차측 기기냉각해수 상실 시 조치내용 추가가 요구되었다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 []
[]
[]
[] 반영 및 추가적인 교육이 요구되었다.

2.3.3.3 계통운전절차서

이동형발전차 연결을 대비하여 [] 따라 []
[]를 개방하도록 하고 있으나 개방의 의미가 명확하지 않은 것으로 관찰되었다. 즉, 단순히 Open 상태만을 유지한다면 불시 자동 기동신호에 의해 대용량부하가 기동될 수 있으며, []
[] 추가로 확보되는 1 MW이동형발전차 절차서

에도 같은 내용이 추가될 수 있도록 요구되었다.

에 부하별 용량표가 없어 따라서 이동형발전차 설계에 반영된 부하로서 기동이 가능한 부하 및 부하 별 용량이 절차서에 기술되어야 하며, 또한, 추가로 확보되는 1 MW이동형발전차 절차서에도 같은 내용이 추가될 수 있도록 요구되었다.

따라 모든 운전조가 이동형발전차의 연결을 지시하였다.

따라서 이동형발전차 이동 중 아래의 사항을 점검하여 연결할 계열을 정하도록 및 향후 도입될 1 MW이동형발전차 운전절차서에 명시할 수 있도록 요구되었다.

- 충전펌프 등의 정비작업 여부
- 기동 예정 충전펌프, 관련 밸브 및 배관 등의 손상여부
- 이동형발전차 이동경로, 설치 및 연결 지점의 피해 상황
- 비상디젤발전기, 대체교류 디젤발전기, 소외전원 등의 복구계획

2.3.3.4 중대사고관리지침서

의 급수유량 단위가 LPM/GPM으로 되어있으나, 주제어실 보조급수유량 지시계 단위는 LPS로 지시되고 있다. 따라서 의 증기발생기 급수유량 단위를 LPS로 변경 또는 병기하도록 요구되었다.

2.3.3.5 다중방어운영지침서

1 MW 이동형발전차에 의해 1계열의 1E급 4.16 kV 모선이 복구되면 [redacted]
[redacted] 따라 충전펌프를 기동하도록 하고 있지만, [redacted]

따라서, [redacted] 따라 충전펌프 기동 시 펌프 손상방지를 위해 흡입측 배열을 [redacted]로 하고 체적제어 탱크 측은 차단하도록 상세지침서 개발 시 반영이 요구되었다.

안전주입탱크 수위가 [redacted] 미만으로 감소 시 [redacted]에 따라 필요한 설비 [redacted]를 설치하여 단도록 하고 있으나, 이를 대신하여 해당 안전주입탱크의 질소를 배기하는 것으로 격리효과를 얻을 수 있으므로, [redacted]에서 [redacted]를 격리수단으로 병기하도록 지침서 보완이 요구되었다.

[redacted]을 수행하도록 하고 있다. 하지만, [redacted]

으로 되어있으나 냉각재재고량 복구의 목적도 있으므로, [redacted]으
로 수정하도록 요구되었다.

[redacted]를 수행하여 [redacted]하는 내용이나 지침서를 전환해야 하고 [redacted]의 의미와도 혼동되어 운전원이 매우 혼란스러워 함을 관찰하였다. 따라서 [redacted]를 하나의 지침서로 통합하고 의미가 명확해지도록 용어 수정이 요구되었다.

2.3.4 인력/조직 평가

한울3,4호기에 설계기준을 초과하는 극한재해 사고상황에서 가용한 인력수준 분석으로 도출된 종합 결과는 표 7-18과 같다. 본 인력/조직 평가 결과는 한울3,4호기 운전조(주제어실 및 현장 운전원), 비상기술지원실, 초동소방대, 이동형발전차 운용(발전차 운전원, 트럭 운전원, 지게차 운전원, 케이블 포설요원 등)과 관련된 인원 및 조직에 대한 평가결과는 다음과 같다.

2.3.4.1 주제어실 운전원

주제어실 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같다. 현재 한울3호기 [redacted]

되어 있다. 발전소 조직 및 인원 중에서 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서 필요한 이다.

하지만 새벽 시간대의 극한자연재해 상황에서 발전소는 비상발령으로 인한 소집 이전의 시간까지 최소의 인력으로 안정화를 진행해야 한다. 특히 주제어실은 사고 상황 발생시 운영지원실 및 비상기술지원실의 발족이전 까지는 상황 파악, 사고 상황 보고, 비상발령, 안정화 운전, 발전소 안전변수 확인 등 많은 높은 직무부하가 예상되므로, 발전소 안전조치를 위한 인원이 필요하다.

현재 한울3,4호기 으로 구성되어 있으나, 일부 운전조를 제외한 나머지 운영되고 있다. 따라서 발전소에 기 확보된 인력인 이 전체 운전조에 충원될 수 있도록 요구되었다.

2.3.4.2 현장 운전원

현장 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같다. 현재 한울3호기 현장 운전원은 1차측

수로 인해 직무수행 지연이 발생하거나, 직무수행의 어려움이 발생하는 가능성은 없는 것으로 판단되며, 이에 대해 현장 운전원으로부터 제기된 의견도 없었다.

2.3.4.3 비상기술지원실 요원

비상기술지원실의 인력은 발전소별 기준으로 표 7-18과 같다. 따라서 이 한울2발전소의 기준인원이다. 비상기술지원실은 설계기준초과 및 극한자연재해 상황 발생시 주제어실과의 협업을 통해 발전소의 안정화를 시키는데 목적이 있다. 비상기술지원실의 인력수준은 적절한 것으로 검토되었으며, 비상기술지원실 요원으로부터 제기된 의견도 없었다.

2.3.4.4 초동소방대

한울3호기 초동소방대 조직은 으로 구성되어 있으며, 초동소방대의 역할은 발전소 화재시 화재구역 확인 및 자체소방대와 협력하여 초기진압을 수행해야 한다. 초동소방대의 인력수준은 적절한 것으로 검토되었으며, 으로 부터 제기된 의견도 없었다.

2.3.4.5 이동형발전차 운전원

이동형발전차 운전원은 한울원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 한울원자력본부는 현재 3.2 MW 이동형발전차를 1대 보유하고 있으며, 이를 운전할 수 있는 [REDACTED]이다. 또한 현재의 [REDACTED]인 것으로 확인되었다. [REDACTED]이내에만 도착하면 문제없는 것으로 분석되었다. [REDACTED]에 한울원자력본부에 도착해야 하는 이유는 다음과 같다.

한울3호기 안전등급 축전지 가용시간은 [REDACTED]이고, 비필수 직류부하 차단시 [REDACTED] 동안 사용이 가능하다. 특히, 한울3호기 인간공학 유효성 평가를 통해 총 2차례의 이동형발전차의 실증시험을 통해 확인해 본 결과, 이동형 발전차가 출동 연락을 받고, 발전소의 안전계통에 가압되는 시간은 [REDACTED]으로 추정되었다. 그러므로, 운전원은 최소한 [REDACTED] 이내에 이동형 발전차가 주차되어 있는 장소까지는 도달해야 한다.

그러나 이동형발전차 운영 조직과 관련한 평가에서는 [REDACTED]에는 표 7-19와 같이 [REDACTED] 따라서 극한재해 상황에서 [REDACTED]가 부재중 이거나 이동형발전차를 운영할 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로 [REDACTED]

2.3.4.6 지게차 운전원

지게차 운전원 기준은 한울원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 지게차는 이동형 발전차와 발전소를 연결하는 전력케이블, 이동형 발전차에 연료를 주입하기 위해 발전소 연료저장탱크와 연결이 필요한 [REDACTED]하다. [REDACTED]이 수행하고 있으며, 이동형발전차 운전원과 동일하게 [REDACTED]이내에 한울원자력본부에 도착하면 문제가 없을 것으로 평가되었다.

2.3.4.7 트럭 운전원

트럭 운전원 기준은 한울원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 트럭은 전력케이블과 연료이송펌프 그리고 연료이송케이블을 발전소까지 운반하는데 필요하다. [REDACTED]에 의해서 운영되고 있으며, 1종 보통 운전면허 소지자가 운전 가능하므로 충분한 인력이 가용할 것으로 평가되었다.

2.3.4.8 전력케이블 포설 및 연료유 공급배관 포설/설치 요원

전력케이블 포설 및 연료유 공급배관 포설/설치 요원 기준은 발전소별 기준으로 표 7-18과 같다. 이동형 발전차와 관련하여 전력케이블 포설과 연료유 공급배관 포설 및 설치 비상대기요원은 모두 []으로 구성되어 있다. 전력케이블 포설요원은 모두 []이고, [] 이들은 야간 및 주말(휴일 포함)에 발전소 복귀가 가능한 지역내 유선상으로 대기하고 있으며, []로 운영되고 있어 충분한 인력이 가용할 것으로 평가되었다.

2.3.5 교육 및 훈련 평가

설계기준초과 및 극한자연재해 상황에 대한 운전원 및 소내·외 비상대응조직원의 수행 능력을 포함한 사고특성, 대응전략, 설비 및 절차 이행 등 운영기술능력은 구성원 각자의 책임과 권한에 상응하는 주기적인 교육 및 훈련프로그램을 통해 그 유효성을 확보할 수 있다. 따라서 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에 대응하기 위한 한울3,4호기 운전원 및 소내·외 비상대응조직원의 교육훈련 계획을 다음과 같이 평가하였다.

2.3.5.1 방사능방재교육

한울3,4호기 운전원을 포함한 비상대응요원에 대한 방사능방재 교육은 한수원 전사 []에 따라 교육계획을 수립, 시행하고 교육이력을 관리한다. 신입직원에 대한 교육은 인재개발원(사업소 채용 신입직원은 사업소)에서 주관하며, 발전 교대근무자에 대한 보수교육은 본부 훈련센터(필요 시 발전소운영실)에서, 기타 요원은 사업소 방재부서에서 담당한다. 교육과정은 표 7-20과 같이 신규교육 과정과 보수교육 과정으로 구성된다.

방재요원에 대한 신규교육은 총18시간 중 6시간 이상을 직무와 관련된 내용으로 실시하고, 교육시간의 60%까지 원격교육을 실시할 수 있으며, 8시간의 보수교육을 3회 이상 이수 후 시행하는 보수교육은 100% 원격교육으로 실시할 수 있다. 각 교육과정에 대한 평가결과 100점 만점에 70점 이상의 점수를 얻으면 이수한 것으로 보며, 신규교육과정의 교육내용은 표 7-21, 방재요원 보수교육과정에서 사고대응관련 비상조직의 교육내용은 표 7-22와 같다.

한울본부 방사능방재 보수교육 중 사고완화 및 평가 담당직무와 관련해서 발전 교대근무자는 본부 훈련센터에서 교육을 실시하나, 비상기술지원실장에 대한 중대 사고 교육은 연간 2시간 이상을 방사능방재 사이버교육시스템을 이용하도록 하고 있다.

2.3.5.2 방사능방재훈련

방사선비상계획 및 수행절차서의 적합성과 비상장비 및 통신망, 주민홍보 체제 및 대·내외 비상요원의 임무숙지상태를 점검하고 비상교육 시 습득한 지식을 실질적 대응능력을 제고하기 위해 주기적으로 방사능 방재훈련을 실시하고 있으며, 그 목적은 다음과 같다.

- 발전소 방사선사고시 비상대응능력 제고
- 소외 방재관련 유관기관과의 유기적인 협조체제 강화
- 훈련을 통한 방사선비상계획 보완 및 발전
- 비상요원의 임무 숙지

방사능방재훈련의 종류는 다음과 같다.

- 연합훈련: 원자력안전위원회위원장의 방사능방재훈련계획에 의거 관련 중앙행정기관이 함께 참여하는 훈련으로 법에서 정하는 주기에 따라 실시한다.
- 합동훈련: 방사선비상계획구역의 전부 또는 일부를 관할구역으로 하는 시·도지사 및 시장·군수·구청장 등 관할구역에 소재하는 지정기관 및 원자력사업자가 참여하는 훈련으로 부지별로 2년에 1회 이상 실시한다.
- 전체훈련: 발전소내의 전 비상조직이 참여하는 훈련으로 1개 또는 2개 호기별로 1년에 1회 이상 실시한다.
- 부분훈련: 발전소내의 비상조직별로 참여하는 훈련으로 1개 또는 2개 호기별로 분기에 1회 이상 실시한다.
- 최초훈련: 기존 부지에 원자력시설을 건설하는 경우 최초 정격열출력 5 % 이전에 전체 또는 합동훈련을 실시한다.

방사능방재훈련은 방사능 방출로 인하여 방사선비상계획구역내의 주민을 소개, 대피시킬 수 있을 정도의 사전 구성된 사고상황을 가정하여 방재활동을 주 목적으로 실시하고 있으므로, 스트레스테스트에서 가정한 안전기능상실 및 극한자연재해 사고상황에서 운전원 및 비상대응조직이 소내·외 가용자원을 활용하여 수립된 사고대응전략을 이행함으로써 중대사고 진행 및 방사능방출을 방지하기 위한 훈련과는 그 성격이 다르다.

2.3.5.3 비상운전절차서 교육

한울3,4호기 운전원이 비상운전절차서의 구성, 사고완화전략 및 기술적 배경을 이해하고 비상운전절차서를 수행하는데 필요한 실무지식을 갖추도록 한울2발전소에 따라 교육계획을 수립, 시행하고 교육

이력을 관리한다. 운전원에 대한 비상운전절차서 교육은 표 7-23과 같이 비상운전절차서 초기교육, 비상운전절차서 재교육 및 개정 비상운전절차서 교육으로 구성된다.

비상운전절차서에 대한 교육방법은 강의실 교육, 현장답사 교육, 시뮬레이터 교육 및 자율학습으로 구성되며, 현장답사 교육을 제외한 교육에 대해서는 평가를 실시하여 70점 이상을 합격기준으로 한다. 교육과정별 교육내용은 표 7-24와 같다.

의 지침에 따라 수립된 운전원에 대한 비상운전절차서 교육계획은 2017년도 한울본부 교육계획서의 한울3,4호기 발전주제어실실무반 과정과 한울3,4호기 발전현장실무반 과정에 기술되어 있으며, 모든 교과목이 2년 주기로 반복되도록 다음과 같이 편성되어 있다. 발전주제어실실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간은 표 7-25, 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간은 표 7-26과 같다.

교육내용 검토 결과 현행 비상운전절차서 교육훈련 내용은 을 모두 만족하고 있고, 실습은 모든 비상운전절차서 사용이 가능하도록 다양한 사고상황을 가정하였으나, 스트레스테스트에서 가정한 장기 전원상실 또는/그리고 최종 열제거원 상실 등의 안전기능상실과 지진, 해일 등의 극한재해상황을 훈련 시나리오로 고려하지는 않았다. 이는 현행 성공기준 비상운전절차서로는 사고완화를 위한 전략수행이 불가능하며 이동형 설비를 가정한 다중방어운영지침서의 개발 및 비상운전절차서와의 연계가 완성되지 않았기 때문이다.

따라서, 이동형 설비 도입과 다중방어운영지침서의 개발에 맞춰 비상운전절차서가 개정되어야 하며, 스트레스테스트에서 가정한 극한재해 사고시나리오도 훈련내용에 포함시켜 운전원의 대응능력을 제고할 수 있도록 운전원 교육훈련프로그램의 수정이 요구된다.

현장운전원은 비상운전절차서에 대한 강의교육과 별도로 주제어실운전원의 비상운전 시뮬레이터 실습에 같이 참여하여 비상운전에 따른 현장조작 사항을 실습하고 있으나, 시뮬레이터실에서 수행하는 관계로 호출, 의사전달, 기기위치, 이동경로, 이동시간, 기기조작, 주변상황 등에 대한 현실감이 저하될 것으로 판단된다. 따라서 연간 1회 주기로 주제어실운전원의 실습에 맞추어 발전소 현장에서 비상운전을 수행하도록 훈련방법의 개선이 요구된다.

2.3.5.4 중대사고관리지침서 교육

한울3,4호기는 중대사고발생에 대비하여, 운전원과 방사능 방재요원이 중대사고관리지침서의 구성 및 기술적 배경을 이해하고 사고완화전략을 원활히 수행할 수

있는 능력을 배양하도록 전사 []에 따라 관련 교육훈련을 시행하고 있다. 중대사고관리지침서 교육훈련은 필요 시 발전소 []에 따른 교육훈련과 연계하여 수행하도록 되어 있다. []

[] 중대사고관리지침서 교육 대상이며, 중대사고관리지침서 교육과정은 표 7-27과 같이 중대사고관리지침서 최초교육, 중대사고관리지침서 재교육 및 중대사고관리지침서 개정사항 교육으로 구성된다.

중대사고관리지침서에 대한 교육방법은 집합교육, 현장실습교육 및 전파교육으로 구성되며, 교육시행 부서의 평가기준에 따른다. 교육과정별 교육내용은 표 7-28과 같다.

[]에 따라 수립된 운전원에 대한 중대사고관리지침서 교육계획은 2017년도 한울본부 교육계획서의 한울3,4호기 발전주제어실실무반 과정과 한울3,4호기 발전현장실무반 과정에 기술되어 있으며, 모든 교과목이 2년주기로 반복되도록 다음과 같이 편성되어 있다. 발전주제어실실무반과 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간은 표 7-29와 같다.

[] 검토결과, 3회를 초과하는 방사능방재교육(8시간/년)을 이수한 방재요원은 재교육 대상이 아니고 []에 따라 연간 2시간 이상의 사이버교육만 받도록 되어있는 바, 이 사이버교육 프로그램에 중대사고 관련 교육내용이 포함되어 있는지 확인이 필요하며, []이 말도록 되어있는데 중대사고 교육을 어떤 교육과정에 통해 이수하는지 확인이 필요하다.

한울3,4호기의 운전원에 대한 중대사고 교육훈련 검토결과, []

[] 다행히 한울3호기 시뮬레이터가 성능개선을 통해 중대사고 모의능력을 갖추었고, 스트레스트 테스트 후속조치로 극한재해 사고상황에 대비하여 이동형 설비 및 비상외부주입 설비가 구비될 예정이므로, 이를 반영하여 중대사고관리지침서를 개정하고 스트레스트 테스트에서 가정한 사고시나리오에 대해 교육 및 시뮬레이터훈련이 요구된다. 그리고, 교과목에 사고교훈으로 편성된 TMI 대신 스트레스트 테스트 현안인 극한자연재해에 대비하는 차원에서 후쿠시마사고의 교훈으로 대체하는 것이 요구된다.

2.3.5.5 이동형 설비의 이동, 설치, 및 운전 교육

한울3,4호기에 배치된 이동형 설비는 본부 공용의 3.2 MW이동형발전차 및 3,4호기 공용의 30kW 견인식발전기가 있으며, []

에 이동, 설치 및 운전에 대한 절차가 업무분장과 함께 기술되어 있다. 한편 이동형 교류전원 설비의 사고대응전략 이행에 관한 훈련 및 실증시험은 스트레스테스트 수행지침에 각 호기별로 최대 5년을 초과하지 않는 시험주기로 수행하도록 하고 있으나, 이에 대한 시행근거 및 실적을 확인하지 못하였다. 따라서, 이들 이동형 교류전원 설비와 함께 앞으로 구비 예정인 이동형 설비의 사고대응전략 이행에 관한 훈련 및 실증시험 근거를 마련하고 이에 따른 이동, 설치 및 운전 담당자의 훈련을 통해 운영기술능력을 확보하도록 해야 한다.

2.3.6 소내·외 자원활용 전략 및 실행 능력 평가

소내·외 자원활용 전략 및 실행 능력 평가를 위해 한울3,4호기 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 고려하고 있는 10가지의 조건에 대해 각 운전조치에 따른 안전조치 수행내용, 관련 절차서, 절차서 수행단계, 대응전략, 대응설비, 대응조직을 표 7-30 ~ 표 7-36과 같이 정리하였다. 단 시나리오 5는 시나리오 4와 운전조치사항이 동일하고, 시나리오 7, 8은 시나리오 6과 운전 조치사항이 동일하여 이를 제외한 7개의 시나리오에 대해 시나리오별 사고대응 전략 표를 작성하였다. 한울3,4호기 발전소 비상운전을 위한 의사결정에 필요한 자원, 책임 및 권한의 적절성, 소내외 자원활용 전략에 대한 분석결과는 다음과 같다.

2.3.6.1 의사결정에 필요한 자원(조직 및 인력)

한울3,4호기 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 고려하고 있는 10가지의 조건에서 의사결정에 필요한 조직은 한울3,4호기 발전팀과 비상기술지원실로 구성된다. 발전팀은

구성되며, 방사선비상 발령이후 비상기술지원실이 발족되면 비상운전반으로 비상기술지원실 조직으로 귀속된다. 비상기술지원실은

발전팀 주제어실 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같이 구성되어 있다. 현장 운전원의 인력은 호기별 기준으로 발전팀 현장 운전원은 되어 있다. 그리고 방사선비상발령 이후 비상기술지원실의 발족과 함께 발전팀은 비상운전반으로 전환되며, 비상기술지원실 운전지원반과 함께 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상기술지원실의 인력은

구성되며, 비상기술지원실 조직의 역할은 한울본부 방사선비상계획서에 따라 노심상태 평가, 사고상황 분석, 보호대책 수립 및 상황전파 등 비상대책실 발족 이전까지 전반적인 발전소 사고상황에 대응하게 된다. 따라서 스트레스테스트에서 가정하는 보수적인 사고조건에서 설계기준을 초과하는 극한자연재해가 발생하더라도 발전소 대응을 위한 의사결정에 필요한 조직 및 인력은 적절한 것으로 평가되었다.

2.3.6.2 책임 및 권한의 적절성

비상운전절차서의 적용 및 수행에 대한 전반적인 책임 또한 발전팀장에게 있다. 한울3,4호기 발전팀은 정기적인 교육 및 훈련을 통하여 비상운전절차서에 대한 책임 및 임무를 습득하므로 적절한 것으로 평가되었다.

중대사고관리지침서의 적용 및 수행에 관한 책임은 비상기술지원실이 발족되기 이전에는 발전팀장에게 책임이 있으며, 비상기술지원실이 발족한 이후에는 비상기술지원실장에게 책임 및 권한이 있다. 결정권자의 책임인수 시기가 비상기술지원실 발족 이전 이후로 나뉘기 때문에 의사결정권자간의 의사결정 충돌은 일어나지 않으므로 적절한 것으로 평가되었다.

방사선비상계획서에 따르면 최초 비상발령 권한은

비상발령 권한을 가진다.

권한을 가진다. 비상조직은 백색비상

발령 후 비상기술지원실 및 비상운영지원실이 발족되며

지휘한다. 청색·적색비상 발령 후 비상대책실이 발족되며 비상대책본부장이 본부 내의 모든 비상조직을 총괄한다. 비상대책본부장의 의사결정을 지원하기위하여

있으며 동 보좌역은

요청사항 등을 처리하는 임무를 수행한

다. 따라서 의사결정권자의 책임 및 권한은 적절한 것으로 평가되었다.

2.3.6.3 소내외 자원활용 전략

한울3,4호기 운영기술능력 평가를 위한 설계기준초과 및 극한자연재해 사고 상황 발생시 고정형 설비를 이용한 초기대응(1단계), 발전소 고정형 설비와 소내 이동형 설비를 이용한 대처(2단계), 발전소 고정형 설비, 소내 이동형 설비 및 소외자원을 이용한 대응(3단계) 전략으로 구성되며, 이동형설비는 한울본부내 이동형설비 차고지에 배치되어 있는 3.2 MW 이동형발전차, 이동형저압펌프 및 추후 배치 예정인 1 MW 이동형발전차, 이동형고유량펌프를 활용하여 사고대응을 수행한다.

소내외 자원활용 전략에 대해 평가한 결과 현재 한울3,4호기에 배치되어 있는 3.2 MW 이동형발전차 운영절차서에 따르면 [REDACTED], 발전소 사고 발생이후 긴급한 조치를 수행해야 하는 [REDACTED] 평가되었다. 따라서 운영 기술능력 평가에서 고려하고 있는 극한자연재해 극복을 위한 [REDACTED] 한 것으로 평가되었다.

2.4 인간공학 유효성 평가

인간공학 유효성 평가는 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원 조치 및 주요 자원 적절성 평가결과를 토대로 실제 한울3호기 이행가능성을 포함한 운영기술능력을 종합 평가하기 위함이다.

인간공학 유효성 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

- 각 사고시나리오의 가정 사항 및 수립된 사고대응전략에 대한 적절성을 평가하고 실제 이행가능성 여부 확인
- 사고시나리오 사고대응전략을 수행하기 위한 설비의 조작가능 여부, 현장 접근성, 환경조건, 거주성 등의 적절성 확인
- 수립된 사고대응전략을 수행하기 위한 각 분야별 연계항목(설비, 절차서, 조직/인력 등)의 적절성 확인
- 인간공학 유효성 평가의 수행 결과는 인간공학적으로 분석 및 평가되고 개선 사항 도출

한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 위해 10개의 사고시나리오 중 평가기간, 수행 절차서의 중복성, 시뮬레이터 활용도 및 현장조작 검증 필요성 등을 종합적으로 검토한 결과, 대표성을 가지고 있는 4개 시나리오를 선정하였다.

한울3,4호기 스트레스테스트 보고서에 따라 시나리오 1, 2, 5는 발전소의 열수력 거동이 시나리오 4와 유사하며, 시나리오 3, 7, 8은 발전소의 열수력 거동이 6과 유사함에 따라 시나리오 4와 6을 평가하고, 한울3호기의 극한자연재해와 관련된 시나리오 9 및 중대사고와 관련된 시나리오 10에 대해서 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 수행하는 것으로 결정하였다. 따라서 한울3호기 ST 인간공학 유효성 평가는 시나리오 4, 6, 9, 10에 따라 평가하는 것으로 결정하였다.

본 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가의 세부 평가범위, 평가 및 분석 방법,

평가 결과는 부록 1 인간공학 평가보고서에 제시하였다.

2.4.1 사고 시나리오 가정사항 및 사고대응전략 평가

사고 시나리오 가정사항 및 사고대응전략 평가를 위해 인간공학 유효성 평가에서 개발된 4개 시나리오에 대해 3개 운전조를 통한 인간공학 유효성 평가를 수행하였으며, 4개 시나리오와 관련한 가정사항은 다음과 같다.

2.4.1.1 최종열제거원 상실(시나리오 4)

최종열제거원 상실과 관련한 가정사항은 다음과 같다.



최종열제거원 상실과 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

순환수 상실에 의한 복수기 저-진공으로 터빈이 정지 되지만, 동작 및 에 의해 원자로는 출력에서 안정되는 시나리오였으나, 1개 운전조에서 복수기진공 저하에 따른 조치로 터빈출력을 급히 감발하는 과정에서 가압기 고-압력에 의해 원자로가 자동 정지되었고, 하지만 순환수 상실 시 운전절차에 따라 취할 수 있는 통상적인 운전형태로 발전소 안전에 미치는 영향은 없다.

원자로 정지 후에

단, 1개 운전조는 1차측 기기냉각수 온도가 에 도달하자 정비부서에서 원자로 냉각재 펌프 보호차원에서 정지를 권고하여 수동으로 정지하였으며, 원자로 냉각재 펌프 정지와 관련되어 발전소 안전에 미치는 영향은 없었다.

을 통해 로 진입하는 시나리오였으나, 1/3조는 원자로 냉각재 펌프 수동정지가 늦어짐에 따라 절차에 따라 냉각운전을 수행하던 중 원자로 냉각재 펌프를 정지하고 사고 재진단을 수행하여 으로 진입하였으며 정상적인 절차서 운영이었다.

모든 운전조는 원자로 냉각재 펌프 정지 후에 시나리오대로 에 따라 정지냉각계통 진입조건까지 자연순환냉각에 의해 원자로 냉각재 계통 냉각 및 감압을 수행하였다.

이를 해결하여 3개 운전조 모두 정지냉각계통 진입조건 도달에 성공하였다.

정지냉각계통 진입조건에 도달하고 이동형펌프가 연결되자 모든 운전조는 시나리오대로 에 따라 정지냉각계통 운전에 착수하였다.

그리고

는

인간공학 유효성 평가시 주증기 대기방출밸브를 이용하여 원자로 냉각재 계통 냉각 중 2번

비상디젤발전기 A/B가 자동 기동되었으나, 동 조항으로 인해 1차측 기기냉각수가 상실된 상태에서 동안 비상디젤발전기 운전을 수행하였으며,

따라서 1차측 기기냉각수 계통이 비정상인 상태에서는 이 주의사항을 적용하지 않고 즉시 정지하도록 절차서 개정이 요구되었다.

2.4.1.2 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건과 관련한 가정사항은 다음과 같다.



대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건과 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

모든 운전조가 소외전원 상실로 원자로가 자동 정지되자 비상운전에 진입하였으며, [redacted] 을 수행하여 [redacted] 로 정상 진입하였다.

모든 운전조가 비상디젤발전기와 대체교류 디젤발전기의 기동실패로 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 상황이 확인되자 [redacted] 에 따라 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, [redacted]

대체교류 디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실을 동반한 0.3g 지진과 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

모든 운전조가 지진으로 원자로가 자동 정지되자 비상운전에 진입하였으며, 을 수행하여 절차를 정상 진입하였다.

연료건물에서 화재경보가 발생하자 초동소방대에 초기진화를 지시하고 본부소방대에 출동을 요청하여 화재를 진압하였다.

모든 운전조가 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, 에 따라 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, 를 수행하여 비필수 직류부하를 차단하였다.

모든 운전조는 하여 발전소 상태를 감시하면서, 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 주증기 대기방출밸브 수동개방으로 신속하게 원자로 냉각재 계통 자연순환 냉각 및 감압을 수행하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉손상으로 인한 냉각재상실을 감소하고, 정지냉각계통 운전조건 진입을 위한 운전에 착수하였다.

모든 운전조는 1 MW 이동형발전차가 연결되자 에 따라 충전펌프를 기동하여 원자로 냉각재 펌프 밀봉을 통한 냉각재상실을 복구하였다.

모든 운전조는 정지냉각계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차 및 이동형펌프가 연결되자 정상적으로 정지냉각운전에 착수하였다.

2.4.1.4 중대사고(시나리오 10) 가정사항

중대사고와 관련한 가정사항은 다음과 같다.

중대사고와 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

모든 운전조가 지진으로 원자로가 자동 정지되자 비상운전에 진입하였으며, [redacted]을 수행하여 [redacted]로 정상 진입하였다.

모든 운전조가 [redacted]에 따라 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, [redacted]를 수행하여 비필수 직류부하를 차단하였다.

모든 운전조는 [redacted]에 따라 주증기 대기방출밸브를 수동으로 개방하여 신속냉각에 착수하였으나, 곧 증기발생기 재고량이 고갈되고 원자로 냉각재 계통 온도는 상승하기 시작하였다.

1 MW 이동형발전차가 연결되자

, 노심 열제거원 및 재고량 상실이 지속됨에 따라 노심 출구 열전대의 온도는 계속 상승하였다. 노심 출구 열전대 온도가 초과하자 모든 운전조는 중대사고지침서로 정상 진입하였다.

비상기술지원실의 따라 이동형펌프가 설치되어 외부주입유로에 연결되자 증기발생기에 급수공급을 시작하였다. 단, 주입을 위한 증기발생기 감압은 중대사고 진입 전 모든 운전조에서 원자로 냉각재 계통 냉각을 위해 주증기 대기방출밸브를 개방함으로써 이미 완료된 상태였다.

증기발생기 급수주입과 동시에 비상기술지원실의

에 따라 안전감압계통 1계열의 밸브를 개방, 원자로 냉각재 계통을 감압하여 안전주입탱크 주입에는 성공하였으나 이동형펌프를 이용한 비상외부주입이 가능한

2개 운전조는

안전주입탱크 주입압력 이하로 원자로 냉각재 계통이 감압되면 노심으로 냉각수가 주입 되면서 노심 출구 열전대가 급감하고 다시 원자로 냉각재 계통 압력이 상승하는 현상이 반복되어 장시간 운전 시에는 감압이 가능할 것으로 검토되었다.

2.4.2 직무부하 분석 결과

한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에서는 직무부하를 측정하기 위해 직무부하 설문지(NASA-TLX)를 이용하였다. 직무부하 설문지는 주관적 평가 방법이며, 각 요인에 대해 운전원이 느끼는 부하 정도에 따라 표시한 값을 취합하여 총합을 구한 뒤 총 직무부하를 측정하였다. 또한, 전체 운전원의 직무부하 값을 기준으로 하여, 각 운전원별, 시나리오별로 직무부하를 분석한 결과는 다음과 같으며, 상세한 직무부하 분석 결과는 부록 1. 인간공학 유효성 평가보고서에 기술하였다.

가. 직무부하 설문 문항별 분석 결과

한울3,4호기

되었다. 이와 같은 분석은 한울3,4호기 ST와 관련된 시나리오 가정사항 (수행시간 등) 및 진행 과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었다. 따라서 추후 한울3,4호기 훈련프로그램 상에 한울3,4호기 스트레스트테스트와 관련된 가정사항 및 시나리오에 대한 교육 및 실습을 추가하여, 운전원이 적절하게 대응할 수 있도록 함으로써, 운전원의 직무부하를 적절하게 유지할 수 있도록 보완할 필요가 있다.

나. 운전원별 직무부하 분석 결과

전체 운전원 구성은 주제어실

분석되었다.

주제어실에서는 발전팀장이 절차서에 따라 운영하고,

다. 시나리오별 직무부하 분석 결과

시나리오의 사고 경중에 따라 그리고 운전원의 훈련 정도에 따라 직무부하에 변화가 있는 것으로 판단된다. []에 대한 직무부하는 차이가 거의 없지만 []은 가용한 MMI 설비가 많아 여러 가지 시도를 할 수 있으며, 처음 접해본 상황 이므로 교육훈련 또는 친숙도가 낮을 수밖에 없다. 따라서 추후 한울3,4호기 훈련프로그램 상에 한울3,4호기 스트레스테스트와 관련된 가정사항 및 시나리오에 대한 교육 및 실습을 추가하여, 운전원이 적절하게 대응할 수 있도록 함으로써, 운전원의 직무부하를 적절하게 유지할 수 있도록 보완할 필요성이 존재한다.

실제 시나리오를 운영하면서, 발전소에 가장 심각한 사고를 가정한 것은 중대사고이다. 그러나, 직무부하의 평균값으로 한 결과, []이 가장 낮은 직무부하를 주는 것으로 나타났다.

본 평가에서 운전원들이 시나리오 4, 6, 9와 시나리오 10을 수행할 때 운전관점에서 차이점이 발견되었다. 시나리오 4, 6, 9에서는 시나리오가 종료할 때까지 주 제어실의 운전원이 주도적으로 의사결정을 내리고, 이에 따라 운전직무를 수행하였다. 하지만 시나리오 10에서는 노심출구온도가 []를 초과하여, 중대사고로 진입하였고, 이에 따라 의사결정 권한이 주 제어실에서 비상기술지원실로 이관되었으며, [] 중대사고에 대처하였다. 즉, 의사결정 주도 여부에 따라 직무부하에 대한 차이가 발생한 것으로 나타난 것으로 분석되었다.

2.4.3 상황인식 분석 결과

운전원은 발전소 상황인식에 어려움이 있거나 실패를 할 경우에 발전소를 적절하게 관리하지 못하여 중대한 문제가 발생할 수 있으므로, 본 평가에서는 운전원의 상황인식을 측정하였다. 따라서 본 인간공학 유효성 평가에서는 상황인식을 측정하기 위해 상황인식 설문지를 이용하였다. 상황인식 설문지는 주관적 평가 방법이며, 각 요인에 대해 운전원이 느끼는 정도에 따라 표시한 값을 취합하여 일련의 공식($\text{Understanding} = (\text{Demand} - \text{Supply})$)에 따라 총 상황인식을 측정하였다. 또한, 전체 운전원의 상황인식 값을 기준으로 하여, 각 운전원별, 시나리오별로 상황인식을 분석한 결과는 다음과 같으며, 상세한 직무부하 분석 결과는 부록 1. 인간공학 유효성 평가보고서에 기술하였다.

2.4.3.1 상황인식 문항별 분석 결과

분석 결과 전체 SART 항목 중에서 특이한 점은 ‘상황의 불안정성’, ‘상황의 변동성’, ‘상황의 복잡성’과 ‘정보의 양’, ‘상황의 친숙도’ 부분이다.

한울3,4호기 스트레스테스트 사고시나리오는 발전소의 설계기준초과 및 극한자연재해로 인해 발전소가 안전에 위협을 받는 상태이므로, ‘상황의 복잡성 (발전소 계통간에 서로 연관된 많은 요소들이 복잡하게 연결)’과 ‘상황의 변동성 (감시해야 할 변수의 수량)’이 크게 작용하여 Demand 범주의 다른 요소에 비해서 ‘상황의 불안정성’이 낮게 측정된 것으로 분석되었다.

또한 ‘정보의 양’ 측면에서 한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에서 사용된 시나리오 중에 사고가 발생하더라도 주제어실의 모든 정보가 가용한 사고 상황은 [redacted]은 지진을 가정하고 있으므로, 주제어실과 현장의 비내진으로 설계된 비안전 기기 고장으로 인해 많은 정보가 가용하지 않다. 따라서 [redacted]되었다.

한울3,4호기 스트레스테스트 사고 시나리오 중에서 한울3,4호기 훈련교육 과정에 실제 시뮬레이터를 이용하여 한울3,4호기 스트레스테스트 사고 시나리오를 처음으로 평가한 것이고, 관련 훈련을 거의 받아 본 적이 없다. 따라서 ‘상황의 친숙도’가 Understanding의 다른 요소에 비해 낮게 분석되었다.

SART의 상황인식은 ‘Understanding - (demand - supply)’ 공식에 의해서 결정된다. 즉 요구값이 낮을수록, 공급값이 높을수록 이해도는 높아짐을 알 수 있다.

한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에 사용한 시나리오는 극한 극한자연재해와 관련되어 있고, 발전소에 가용한 자원이 한정되어 있으므로, 요구값(demand)은 기본적으로 높고, 공급값(supply)은 낮을 수밖에 없다. 그러므로 측정된 값을 비교했을 때, 기본적으로 demand (‘상황의 변동성’, ‘상황의 복잡성’, ‘상황의 친숙도’)을 적절하게 낮추기 위한 방안은 해당 시나리오에 대한 ‘교육/훈련’과 ‘절차서’의 적절한 수정을 통해 주제어실 운전원간 협업 그리고 주제어실 운전원과 현장운전원간의 협업이 적절하게 이루어질 수 있도록 하는 것이다.

그리고 요구값(Demand)를 줄이기 위한 방법에 더하여, 공급값(Supply)을 높이기 위한 방안이 요구된다. 이를 위해 인력을 추가함으로써, 다른 주제어실 운전원간의 적절한 협업을 지원 할 수 있도록 하여, 주제어실 운전원들의 ‘정신적 여유’, ‘집중도 향상’, ‘주의자원분할’을 지원할 필요성이 존재한다.

또한, 이해력(Understanding) 향상을 위해 ‘정보의 양’ 부분과 ‘상황의 친숙도’ 부분을 보완할 필요성이 존재한다. 이를 보완하기 위해, 먼저 ‘정보의 양’을 강화하

기 위한 방편으로, 전원상실시 주제어실 계기전원이 일부 상실되는 기기에 대한 개선이 필요하다. 그리고 '상황의 친숙도' 문제는 교육/훈련에 대한 문제이므로, 교육/훈련과 관련된 개선이 필요하다.

2.4.3.2 운전원별 상황인식 분석 결과

분석 결과 주제어실의 경우 발전팀장을 제외하면, 거의 모든 주제어실 운전원들이 상황인식 기준값에 비해서 낮은 것으로 나타났다.

주제어실의 정보가용성에 비추어 보면, 정보의 양이나 질적인 측면에서 상당히 높은 수준임에도 불구하고, [redacted] 이와 같은 이유는 [redacted]

이와 같은 문제점을 보완하기 위해, [redacted]

2.4.3.3 운전조별 상황인식 분석 결과

분석 결과 각 운전조별로 상황인식 분석결과 값에는 약간의 차이 [redacted] 가 있으나, 운전조의 직무경험에 따라 약간의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

2.4.3.4 시나리오별 상황인식 분석 결과

총 [redacted] 을 기준으로 시나리오별 상황인식에 따른 주제어실 및 현장의 평균값으로는 차이가 존재하는 것으로 분석되었다.

하지만, 시나리오별 상황인식은 4개 시나리오 중에서 비교적 가용한 MMI 설비가 많으며, 발전소의 안전기능 상실이 다른 시나리오에 비해 적은 [redacted] 과 같이 발전소 안전기능이 상실됨에 따라 상황인식에 가용한 정보의 양의 급격하게 줄어들음에 따라 [redacted] 대비 상황인식이 낮은 것으로 분석되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 근본원인은 상기에 언급한 바와 같이 발전소 안전기능 상실로 인해 가용한 '정보의 양'의 차이에 대한 것이므로, 근본적으로 해

결하기 위해서는 안전기능 상실을 보완해야 하나, 현실적으로 가능하지 않다. 따라서 이를 보완하기 위한 최소한의 수단으로 2.4.3.1절 상황인식 항목별 분석에서 제시한 개선사항을 충실히 이행하는 것만을 제시하였다.

2.4.4 운전원 협업 분석 결과

인간공학 유효성 평가에서는 운전원 협업을 측정하기 위해 운전전문가 및 인간공학전문가 평가 기반 설문지(BARS)를 이용하였다. BARS의 주요 평가항목으로는 팀의 임무 집중도 및 단체의사 결정 효율, 의견에 대한 조율, 의사소통의 효율, 개방성, 팀 융화 등 5개 부문으로 나누어져 있다.

BARS 평가값은 운전전문가가 평가한 개별 항목을 기준으로 전체 운전조의 운전원협업과 개별 운전조의 운전원 협업 그리고 평가자간의 일치성을 확인하기 위한 분석을 수행하였다.

2.4.4.1 운전원 협업 문항별 분석 결과

2.4.4.2 운전조별 운전원 협업 분석 결과

모든 운전조는 본 평가에서 원활한 운전원간의 협업을 수행하였고, 전반적으로 운전원 협업이 높은 것으로 나타났다. 평가의

운전원 협업과 관련한 분석은 인간공학 유효성 평가가 시뮬레이터에서 수행한 내용이고, 실제적으로 과도한 시간적 혹은 정신적 압박을 받는 실제 상황이 아니며, 전체 운전조 모두 긍정적인 평가를 받은 것으로 추가적인 상세 분석은 불필요한 것으로 평가되었다.

2.4.5 인적오류 분석 결과

한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에서는 기본적으로 절차서에 명시되지 않는 사항에 대해서는 운전원이 임의로 직무를 수행할 수 없으므로, 운전원이 절차서를 수행하면서 발생하였거나, 발생 가능한 인적오류를 평가하였다.

이를 위해 절차서에 대한 사전검토를 통해 인적오류가 발생할 수 있는 부분을 검토하였으며, 실제 인간공학 유효성 평가시에 이와 같은 인적오류가 실제로 발생하

였는지 확인하였다. 또한 사전검토에서 발견되지 않았지만, 평가시에 발생한 인적 오류도 평가하였다.

2.4.5.1 시나리오 4 인적오류 분석 결과

최종열제거원상실 사고가 즉각적인 원자로 정지를 유발하지는 않으므로, 사고 이후 발생할 발전소 상태에 대한 예측을 바탕으로 원자로를 수동 정지를 한 이후에 원자로냉각재펌프를 수동 정지 하지 않는다면 [REDACTED] 진입할 가능성이 있다. (오류유형: EOC, 의사결정오류)

[REDACTED]

총 3개 운전조 중 1개 운전조가 [REDACTED]으로 진입 하였으나, 최종열 제거원 상실사고 확인까지 이행시간이 [REDACTED] 이내로 조치되어 문제가 없음을 확인 하였다.

2.4.5.2 시나리오 6 인적오류 분석 결과

[REDACTED] 이후에 소내정전은 사고확인이 가능하다고 할 수 있으나, 최종열제거원상실 상황에 대한 사고확인은 [REDACTED] 이후 장기교류전원상실 상황 이므로 [REDACTED]를 수행하는 과정 중 [REDACTED]에 따라서 현장점검을 [REDACTED]을 확인한 이후에 최종열제거원상실 상황을 인지할 가능성이 높다. (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 사고확인 시간을 3개 운전조에서 [REDACTED]을 초과하였으나, 취수구 상태확인 요청 시 강사조작반에서는 일괄로 [REDACTED] 이후 침수상태를 통보하였으며, 이후 주요 운전원조치에서 큰 여유시간을 가지게 되므로 사고 대응전략 수행에 미치는 영향은 없을 것으로 검토되었다.

1MW 이동형발전차의 운영은 [REDACTED]를 참조하도록 하고 있으나, [REDACTED]

(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 모든 운전조가

1 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 사전에

(오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 투입이 불가능한 대용량 부하를 투입하거나 투입가능 여부를 비상기술지원실에 문의하는 사례가 다수 확인되어 이동형발전차 운전절차서 개선사항으로 도출되었다.

1 MW 이동형발전차 연결 후 충전펌프 기동과정에서

(오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 1개 운전조는 충전펌프 흡입측을 재장전수탱크로 전환하였으나 2개조는 유출유로가 차단된 체적제어탱크측으로 계속 유지하여 충전펌프 손상가능성이 확인되었으며 절차서 개선사항으로 도출되었다.

3.2 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결할 경우 기동실패로 안전모선 정전이 장기화되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다.(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 3.2 MW 이동형발전차는 1 MW 이동형발전차를 대체하여 질의응답을 통해 이동형발전차를 연결하기 전에 안전모선의 고장여부를 점검할 필요가 있는 것으로 확인되어 이동형발전차 운전절차서 개선사항으로 도출되었다.

3.2 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 발전차 용량을 초과하는 부하를 투입하여 과부하로 발전차가 트립되므로서 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 3.2 MW 이동형발전차는 1 MW 이동형발전차를 대체하여 안전모션 A계열에 연결하였으며, 질의응답을 통해 과부하로 이동형발전차가 트립될 수 있는 것으로 확인되어 이동형발전차 운전절차서 개선사항으로 도출되었다.

2.4.5.3 시나리오 9 인적오류 분석 결과

후쿠시마 사고의 경험에서 알 수 있듯이 지진을 동반하는 경우 발전소 내 구조물 파손, 여진 가능성, 높은 방사선 준위 등으로 인하여 이동에 제약이 발생하며, 지진, 해일 등으로 인한 도로 파손, 발전소 구조물의 이동에 의한 통행 제약 등이 발생할 수 있으며, 이에 따라 특히 현장운전원에 의한 운전원 조치 이행 및 이동형 설비의 이동에 보다 많은 시간이 소요되어 성공기준 이내에 수행을 완료하지 못할 수 있다. (오류유형: EOO, 수행오류)

설계기준초과 및 극한자연재해에 대한 교육/훈련 개선안 도출을 통해 인적오류의 최소화 방안을 마련하였다.

외부주입유로를 이용한 비상냉각수 주입을 수행하는데 있어서 원자로냉각재계통 냉각수 외부주입 취수원에 대하여 혼선이 있고 운전원들 역시 이를 명확하게 파악하고 있지 않으므로 관련 밸브 정렬 수행에 인적오류 발생 가능성이 있음. (오류유형: EOO 또는 EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가에서는 추후 반영예정인 외부주입유로를 활용한 비상냉각수 주입을 수행하였으며, 해당 내용은 운전원들이 교육/훈련을 받은 사례가 없다. 따라서 추후 도입되는 외부주입유로를 이용한 비상냉각수 주입과 관련하여 교육/훈련 개선안 도출을 통해 인적오류 최소화 방안을 마련하였다.

제어봉삽입 여부로 원자로정지를 확인하는 과정에서 지진으로 제어봉위치지시계가 상실되어 모든 제어봉의 삽입여부를 확인할 수 없으며, 후속 냉각과정에서 정확한 정지여유도를 확인할 수 없는 것으로 평가되었다. (오류유형: EOO 또는 EOC, 수행오류)

인간공학유효성 평가에서는 모든 운전조가 제어봉 삽입여부를 확인할 수 없어 핵계측기로 원자로정지를 확인하였으나, 후속 냉각과정에서 정확한 정지여유도를 계산할 수 없어 핵계측기를 이용하여 미임계 여부를 밀착 감시하도록 교육/훈련 개선안으로 도출하였다.

2.4.6 평가현안 설문 분석 결과

본 인간공학 유효성 평가에서는 설정된 인간공학 평가현안을 종합적으로 평가하기 위해 평가에 참여한 운전원을 대상으로 설문조사(통신 및 조명설비, 절차서, 지원설비)를 실시하였다. 평가 현안은 모두 11개 항목이며, 이들에 대한 평가를 수행하여, 해당 항목에서 문제점이 발견될 경우, 잠재적 개선사항으로 도출하였다. 평가 현안은 주제어실과 현장 모두에 동일하게 해당되지만, 주제어실에서 사용되는 절차서, 통신, 소음, 조명 설비와 현장에서 사용되는 설비는 전혀 다를 수 있다. 따라서 평가 현안 분석은 주제어실과 현장으로 구분하여 분석을 수행하였다.

2.4.6.1 주제어실 평가 현안 분석

가. 절차서 존재에 따른 운전성

본 항목에 대한 평가는 발전소에서 절차서가 구비되어 있더라도 내용이 부족하여 운전직무를 수행함에 있어서의 어려움을 측정한 것이다. 그 평가 결과로써, [] 기준보다 낮게 평가되었다. 하지만, 인간공학 유효성 평가에 활용된 절차서는 개정 또는 신규 추가 예정인 임시절차서를 활용하였으므로, 추후 개정 또는 신규 추가 예정인 절차서 내용과 관련하여 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

나. 절차서간의 연계

한울3,4호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 수행하기 전에 사전검사를 통해 발전소의 비상대체설비 사용 관점에서 절차서간의 연계성 측정한 것이다. 그 평가 결과로써, [] 기준 값 보다는 높은 점수로 평가되었으며, 절차서간의 연계와 관련한 운전원 의견은 별도로 없는 것으로 평가되었다.

다. 절차서내 판단절차

본 항목은 절차서 진입조건에 대한 만족 여부를 판단하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 즉, 절차서내에서 판단 절차가 누락되어 절차서 진입에 문제가 발생했는지에 대한 것이다. 평가 결과, [] 기준 값 보다는 높은 점수로 평가되었으며, 절차서내 판단절차서와 관련한 운전원 의견은 별도로 없는 것으로 평가되었다.

라. 수행인력

본 항목은 현재의 한울3,4호기 주제어실 인원으로 주어진 임무를 수행하면서 발생하는 어려움을 평가한 것이다.

수행인력에 대한 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

마. 필요정보 및 지원설비

본 항목은 발전소 절차서에 따라 운전직무를 수행할 때 발전소에 필요한 정보나 설비가 부족하여 주어진 임무를 수행하면서 나타나는 어려움을 평가한 것이다. 본 항목의 평가 결과로써, 조금 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 운전원 의견 및 운전전문가 의견으로 일부 주제어실 인간-기계 연계 설비(제어기 및 지시계) 추가 배치가 도출되었다. 따라서 필요정보 및 지원설비 대한 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

바. 훈련정도

본 항목은 시나리오의 주어진 임무를 수행하는 동안 어느 정도 친숙도를 가지고 운전하고 있는지에 대한 것이다. 평가 결과로써, 기준값에 비해 약간 낮게 나타났다. 그리고 따라서 훈련에 대한 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

사. 직무수행시간

본 항목은 운전원이 시나리오의 주어진 임무를 수행하는 동안 시간적 압박으로 인해 운전직무 수행에 어려움이 있었는지에 대한 평가이다. 그 평가 결과로써, 로 기준 값에 비해 조금 높게 나타났다. 그러나, 이에 대한 종합적인 검토의견은 ‘2.4.1 사고 시나리오 가정사항 및 사고대응전략 평가’ 내에 시나리오 별로 운전원의 수행시간을 분석하였고, 이와 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

아. 통신, 소음

본 항목은 시나리오의 주어진 임무를 수행하는 동안, 통신 및 소음으로 다른 운전

원들과 혹은 발전소 조직내의 인력들과 의사소통을 함에 있어서의 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로써, [] 과 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 0.3g 지진을 고려한 시나리오(시나리오 9, 10)에서 []

[] 하여 관련 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

자. 조명설비

본 항목은 조명설비가 없거나 부족하여 시나리오의 주어진 임무를 수행하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로써, [] 로 기준값에 대비해 조금 높게 나타났다. 본 평가에서는 소내정전 및 지진 발생시 조명의 가용성을 보장할 수 없으므로, 주제어실 조명이 모두 꺼지는 것을 가정하였다. 따라서 휴대용 조명설비(휴대용 랜턴 등)가 요구되었으며, 이와 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

차. 작업장 위해요소 확인

본 항목은 조명설비가 없거나 부족하여 시나리오의 주어진 임무를 수행하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로써, [] 로 기준값에 대비해 조금 높게 나타났다. 주제어실에서는 [] 을 시뮬레이터에서 구현하였으며, 주제어실에 비치되어 있는 손전등을 활용하여 평가를 진행하였다. 또한, 주제어실 조명설비와 관련하여 별도의 운전원 추가의견은 없는 것으로 평가되었다.

카. 이동경로 위해요소 확인

본 항목은 시나리오에서 주어진 임무를 수행하는 동안 특정한 장소로 이동하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 그 평가 결과로써, [] 로 기준값에 대비해 높게 나타났다. 또한 주제어실과 관련된 이동경로 위해요소와 관련하여 별도의 운전원 추가의견은 없는 것으로 평가되었다.

2.4.6.2 현장 평가 현안 분석

가. 절차서 존재에 따른 운전성

현장운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로, 운전 절차서 사용이 적다. 현장운전원을 대상으로 평가한 결과로써, [] 로 기준값에 대비

해 높은 것으로 나타났다. 하지만 현장 운전원이 사용한 절차서 중 한울3,4호기에 추후 추가예정인 다중방어운영지침서 절차서와 관련된 일부 개선사항이 도출되어 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

나. 절차서간의 연계

현장운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로, 운전 절차서 사용이 적다. 현장운전원을 대상으로 평가한 결과로써, []으로 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 운전원 설문 결과 추가적인 문제점은 발견되지 않았다.

다. 절차서내 판단절차

현장운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로, 운전 절차서 사용이 적다. 현장운전원을 대상으로 평가한 결과로써, []로 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 운전원 설문 결과 추가적인 문제점은 발견되지 않았다.

라. 수행인력

[]으로 나뉜다. 현장 운전원의 수행인력에 대한 평가 결과로써, []로 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 운전원 설문 결과 추가적인 문제점은 발견되지 않았다.

마. 필요정보 및 지원설비

현장운전원은 현장에서 밸브 수동조작 등과 같은 수동 운전직무를 수행하였다. 이에 대한 평가 결과로써, [] 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났다. 그러나, 현장운전원과 함께 동행한 평가자들에 의해서 인간공학 관련 개선사항이 도출되어 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

바. 훈련정도

현장운전원은 주제어실의 지시에 따라 현장 직무를 수행하므로, 주제어실에서 요구하는 정확한 장소 및 기기 조작 행위 등을 숙지하고 있어야 한다. 본 항목에 대한 평가 결과로써, []로 기준값에 대비해 높게 나타났지만, 개정 또는 추가 예정인 절차서(또는 지침서)에 대한 현장운전원 훈련과 관련된 개선사항이

차. 작업장 위해요소 확인

본 항목에 대한 평가 결과로써, []로 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 운전원 설문 결과 추가적인 문제점은 발견되지 않았다.

카. 이동경로 위해요소 확인

본 항목에 대한 평가 결과로써, []으로 기준값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 운전원 설문 결과 추가적인 문제점은 발견되지 않았다.

그러나, 본 평가에서는 []

[]

[]

[]

[]

분석되었다.

2.5 다수호기 동시사고 시 대응능력 평가

다수호기 동시사고 시 대응능력 평가는 본 스트레스테스트 보고서에서 가정한 다수호기 동시사고에 대한 가정사항이 한울본부에 귀속된 한울 1~6호기에 동시에 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한울3,4호기 비상대응방안의 실현가능성을 평가하기 위함이다.

다수호기 동시사고 시 대응능력 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

- 극한상황을 동반한 다수호기 동시사고 상황에서도 수립된 사고대응전략은 이행이 가능해야 함
- 다수호기 동시사고 상황 시 사고대응전략이 변경되는 경우에는 주요 운전원 조치, 자원, 인적오류 가능성 등을 재평가
- 다수호기 동시사고 상황에서는 사고대응 조직 간 책임 및 권한이 충돌 할 수 있으므로 이에 대한 적절성 평가

다수호기 동시사고 시 대응능력 평가의 범위는 다음과 같다.

- 다수호기 동시사고 고려 시 수립된 사고대응전략의 적절성 평가
- 다수호기 동시사고 고려 시 주요 운전원 조치의 적절성 평가

○ 다수호기 동시사고 고려 시 가용한 자원의 적절성 평가

2.5.1 다수호기 동시사고 고려 시 수립된 사고대응전략의 적절성 평가

다수호기 동시사고를 고려한 사고대응전략의 적절성 평가를 위해 운영기술능력 평가에 활용된 총 10개의 시나리오를 검토하였으며, 사고대응전략의 적절성 평가는 다음과 같다.

2.5.1.1 소외전원상실 (시나리오 1)

호기별로 비상디젤발전기 등 사고대응전략 수행에 요구되는 소내설비가 가용하므로, 다수호기 동시사고 시에도 현재 확보된 설비를 활용하여 사고대응전략 이행이 가능하다. 한울3,4호기의 경우 비상디젤발전기 연료는 사고발생 후 ■■■까지 가용하며, ■■■이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에는 영향이 없다.

2.5.1.2 소내정전 (시나리오 2)

한울3,4호기의 경우 대체교류 디젤발전기는 1개 호기에만 전력공급이 가능함으로, 다수호기 동시사고 발생시 나머지 호기에는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건상황이 발생한다. 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 나머지 호기인 3호기 또는 4호기에 연결하여 사고상황에 대한 대처가 가능하다. 하지만 한울본부의 한울1,2호기 및 한울5,6호기에는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 ■■■이내에 이동 및 연결하면 사고 대처가 가능하나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 ■■■이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 따라서 추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 보유하게 되므로 시나리오-3과 같은 사고대응전략을 이행할 수 있어 다수호기 동시사고 시에도 사고대응전략 이행은 가능하다. 또한, 대체교류 디젤발전기 연료는 사고발생 후 ■■■까지, 1 MW 이동형발전차 연료는 그 이상 가용하고 ■■■이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에는 영향이 없다.

2.5.1.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 (시나리오 3)

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기 각각 사고대응전략 수행에 요구되는 소내 설비가 가용하므로, 다수호기 동시사고 시에도 사고대응전략 이행은 가능하다. 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 3.2 MW 이동형발전차를 한울 3호기에 연결하여 전원 가압이 가능하다. 또한 한울1,2,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 ■■■이내에 이동 및 연결하면 사고 대처가 가능하나 현실적으로 극한자연

재해 상황에서 ■■■ 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 따라서 추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 ■■■까지 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 또한, ■■■ 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.4 최종열제거원상실 조건 (시나리오 4)

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4 호기에서는 MSADV를 활용하여 발전소 냉각을 수행하며, ■■■

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 한울본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 ■■■ 이후에 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, ■■■ 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한울 3,4호기는 대체열제거원이 없으므로 최종열제거원상실 조건과 동일하다.

2.5.1.6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건 (시나리오 6)

다수호기 동시사고 발생시 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 3.2 MW 이동형발전차를 한울 3호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 추가적으로 한울1,2,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 ■■■ 이내에 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다. 그러나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 ■■■ 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 또한, 다수호기 동시 최종열제거원 상실 발생시 한울3,4 호기에서는 MSADV를 활용하여 발전소 냉각을 수행하며, ■■■

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 ■■■까지 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 그리고 한울본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 ■■■ 이후에 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다.

또한, ■ 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.7 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 3.2 MW 이동형발전차를 한울 3호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 추가적으로 한울1,2,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 ■ 이내에 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다. 그러나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 ■ 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 또한, 다수호기 동시 최종열제거원 상실 발생시 한울3,4 호기에서는 MSADV를 활용하여 발전소 냉각을 수행하며, ■

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 ■까지 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 그리고 한울본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 ■ 이후에 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, ■ 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.8 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 3.2 MW 이동형발전차를 한울 3호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 추가적으로 한울1,2,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 ■ 이내에 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다. 그러나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 ■ 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 또한, 다수호기 동시 최종열제거원 상실 발생시 한울3,4 호기에서는 MSADV를 활용하여 발전소 냉각을 수행하며, ■

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 ■까지 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 그리고 한울본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 ■ 이후에 요구되

므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [] 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.9 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 3.2 MW 이동형발전차를 한울 3호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 추가적으로 한울1,2,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차를 [] 이내에 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다. 그러나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 [] 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 또한, 다수호기 동시 최종열제거원 상실 발생시 한울3,4 호기에서는 MSADV를 활용하여 발전소 냉각을 수행하며, []

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 [] 까지 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 그리고 한울본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 [] 이후에 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [] 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.10 중대사고 (시나리오 10)

중대사고가 다수호기에 발생시 현재 한울본부에 확보된 설비인 3.2 MW 이동형발전차는 1대가 가용하므로 다수호기 동시사고 시에는 한울3호기에 연결이 가능하다. 이 경우 3.2 MW 이동형발전차 사용이 불가능한 나머지 한울1,2,4,5,6호기는 타부지의 3.2 MW 이동형발전차를 [] 이내 이동 및 연결하여 전원공급이 가능하다. []

[] 그러나 현실적으로 극한자연재해 상황에서 [] 이내 타부지 이동형발전차의 이동 및 설치가 어려울 것으로 검토되어 1 MW 이동형발전차 도입이 요구되었다. 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 전원 공급이후 중대사고로 진입하더라도 외부주입유로를 이용한 SG 냉각수 주입 및 RCS 냉각수 주입은 현재 한울본부에 이동형저압펌프는 6대가 배치되어 있으므로 타부지로부터 6대를 추가 지원을 받아 이동 및 설치하면 사고대응이 가능하다.

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 한울부지 각호기에 중대사고 진입 시점 이전까지 전원연

결이 가능하며, 비상외부주입을 위한 이동형저압펌프도 호기당 2대씩 배치 예정이므로 중대사고 관련 다수호기 동시사고 사고대응전략 이행은 가능하다.

2.5.2 다수호기 동시사고 고려 시 주요 운전원 조치의 적절성 평가

본 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장의 분석 결과를 바탕으로 주요 운전원 조치들이 도출되었으며, 다수호기 동시사고 발생시 주요 운전원 조치의 변경사항은 없는 것으로 검토되었으며, 발생 가능한 인적오류 및 의사결정오류는 다음과 같다.

2.5.2.1 원자로트립 후 조치 및 사고진단

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 원자로 정지 후 조치 및 사고진단을 통하여 시나리오 1, 4, 5는 소외전원상실로 진단을 하여 비상운전절차서 [redacted] [redacted] 진입을 하고, 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10은 발전소 정전사고로 진단을 하여 [redacted]로 진입을 한다.

시나리오 1의 경우에는 소외전원상실 상황이므로 비상운전절차서 [redacted]로 진입하는 것이 적절하고, 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10의 경우에는 발전소정전사고이므로 [redacted]로 진입하는 것은 적절하다.

시나리오 4, 5의 경우 최종열제거원상실 상황이지만, 최종열제거원상실로 인하여 기기냉각수계통이 이용불능 상태가 되는 시점에서 모든 원자로냉각재펌프의 수동 정지에 의한 강제순환상실(Loss of Forced Circulation : LOFC)이 발생하므로 [redacted]
[redacted]

2.5.2.2 1 MW 이동형발전차 연결

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내 정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 비상운전절차서 [redacted] [redacted]에서 1 MW 이동형발전차 이동을 지시한 이후, 1 MW 이동형발전차 연결이 완료되면 [redacted] 전원을 공급하도록 하고 있다. 안전등급 축전지와 터빈구동보조급수펌프를 이용하여 [redacted] 원자로냉각재계통에 대한 냉각 및 감압을 수행할 수 있다. 또한, 극한자연재해에 따라서 다수호기 동시사고 상황인 경우에는 추후 배치 예정인 각 호기별 1 MW 이동형발전차를 연결하여 정지냉각계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통에 대한 냉각 및 감압을 수행하는 운전원 조치는 적절한 것으로 판단된다.

하지만 1 MW 이동형발전차의 동시 케이블 포설을 위해 현재 한울본부의 이동형 발전차 케이블포설조 인력의 충원이 필요할 것으로 검토되었으나, 1 MW 이동형 발전차의 케이블은 발전소 연결지점에 상시포설하여 1 MW 이동형발전차가 도착 하면 케이블 연결을 수행하면 케이블포설인력에 대한 인력 충원은 불필요 한 것으로 검토되었다.

2.5.2.3 비필수 직류부하 차단

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내 정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 안전등급 축전지와 터빈구동보조 급수펌프를 이용하여 원자로냉각재계통에 대한 냉각 및 감압을 [redacted] 따라서 비필수 직류부하 차단을 수행한다.

그리고 한수원의 사고대응전략에 따르면 초기 [redacted] 까지 발전소 고정형 설비를 이용한 초기 대응(Phase 1)하도록 사고대응전략이 갖추어져 있으므로 비필수 직류부하 차단은 적절한 운전원 조치인 것으로 검토되었다.

2.5.2.4 격실 출입문 개방

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내 정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 추후 배치 예정인 1 MW 이동형 발전차가 연결된 경우 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 가동에 필요한 환기 및 냉각을 제공하기 위하여 비상운전절차서 [redacted] [redacted] 수행하도록 하고 있다. [redacted] 은 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 냉각을 위해 수행할 수 있는 유일한 방법이라는 측면에서 적절한 운전원 조치로 검토되었다.

시나리오 4, 5에서 최종열제거원이 상실된 경우 기기냉각계통을 운전할 수 없는 상황에서 필수대처설비들의 가동에 필요한 환기 및 냉각을 제공하기 위하여 [redacted]

2.5.2.5 안전주입탱크 격리

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 시나리오 1, 4, 5에서 운전원들은 비상운

전절차서 []에 따라서 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행하는 중 []에서 안전주입탱크 감압 및 격리를 수행한다. 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9에서 운전원들은 []

[] 안전주입탱크 감압 및 격리를 수행한다. 안전주입탱크 감압 및 격리는 원자로냉각재계통으로 질소 가스가 유입되는 것을 방지하기 위하여 수행하는 운전원 조치로 적절한 것으로 검토되었다.

2.5.2.6 3.2 MW 이동형발전차 연결

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내 정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서 기기냉각수계통에 대한 운전을 위하여 각 호기당 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 []

[]가압한다. 한수원의 사고대응전략 보고서에 따르면 사고발생 [] 이후에는 발전소 고정형 설비, 소내 이동형 설비 및 소외자원을 이용한 대응(Phase 3)을 하도록 사고대응전략이 갖추어질 예정이다. 3.2 MW 이동형발전차 연결을 통하여 1차측기기 냉각수펌프 및 1차측기기 냉각해수펌프를 가동함으로써 정지냉각계통 운전을 가능하게 하여 발전소를 안전정지상태로 유지할 수 있도록 하므로 적절한 조치로 판단된다. 또한, 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 제시된 바와 같이, 3.2 MW 이동형발전차가 연결될 경우 []

2.5.2.7 이동형고유량펌프 운전

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 시나리오 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10에서 최종열 제거원 상실 이후 기기냉각수계통에 대한 운전을 위하여 추후 배치 예정인 이동형고유량펌프를 설치 및 운전한다. 원자로냉각재계통에 전달된 붕괴열은 정지냉각계통의 운전에 의해 기기냉각수계통으로 전달되고, 이 열은 최종열제거원이 상실된 상황에서 이동형고유량펌프의 운전을 통하여 제거될 수 있게 되므로 적절한 운전원 조치로 검토되었다.

2.5.2.8 원자로냉각재계통 냉각 감압

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 시나리오 1, 2에서는 소외전원상실의 장기화에 대비하고, 시나리오 4, 5에서는 최종열제거원상실의 장기화에 대비하여 안전정지상태를 유지하기 위해 정지냉각계통 운전조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한다. 시나리오 1, 4, 5는 []

[]에서 보조급수펌프에 의

한 급수와 MSADV 개방에 의한 증기방출로 냉각 및 감압에 착수한다. 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 밀봉냉각상실에 의한 원자로냉각재펌프 축 누설량을 감소시키고 안전주입탱크의 주입을 유도하기 위해 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한다. 냉각 및 감압은 []에서 터빈구동보조급수펌프에 의한 급수와 MSADV의 현장 수동개방에 의해 착수되며, 추가감압이 요구되는 경우는 가압기 및 원자로용기헤드 배기밸브를 이용한다. 발전소 안전정지상태를 유지하며, 원자로냉각재펌프 축 누설을 감소시키고 안전주입탱크 주입을 유도하기 위한 원자로냉각재계통 냉각 및 감압조치는 적절한 것으로 평가된다.

2.5.2.9 충전펌프 기동

시나리오 1, 2에서는 원자로냉각재펌프 밀봉냉각을 확보하고 원자로냉각재계통 냉각에 따른 추가적인 정지여유도 확보를 위해 충전펌프를 기동한다. 시나리오 1에서는 []에서 원자로냉각재펌프 밀봉주입수를 복구하기 위해 충전펌프를 기동한다. 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 원자로냉각재펌프 밀봉냉각 상실로 축 누설이 발생하는 것으로 가정하기 때문에 원자로냉각재계통 재고량 복구를 위해 충전펌프를 기동한다. []에서 가압기 수위가 [] 이상 유지되지 않음을 확인하고, []에 따라 1 MW 이동형발전차가 연결되면 충전펌프를 기동한다. 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 약 []만 안전주입탱크에 의해 노심냉각 및 재고량 유지가 가능한 것으로 분석되었으므로, 이 시간 이내에 1 MW 이동형발전차를 연결하고 충전펌프를 기동하는 운전원조치는 적절한 것으로 평가된다.

2.5.2.10 소형이동형발전기 연결

다수호기 동시사고 발생시 한울3,4호기는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 안전주입탱크가 주입된 후 질소가스가 원자로냉각재계통으로 유입되는 것을 방지하기 위해 안전주입탱크 격리를 수행한다. []에서 안전주입탱크 수위가 [] 미만으로 확인되면, []에 따라 소형이동형발전기를 연결하여 출구 격리밸브를 닫도록 하고 있다. 1 MW 이동형발전차는 한 계열의 안전모션에만 연결이 가능하므로 [] 안전주입탱크 중 다른 계열의 전원을 수전하는 [] 안전주입탱크는 이와 같이 소형이동형발전기를 연결하여 격리하는 운전조치는 적절한 것으로 평가된다. 단, 이 경우에도 안전계통 125VDC 축전지 전원을 공급받는 솔레노이드구동 배기밸브를 개방하여 안전주입탱크를 배기하면 원자로냉각재계통으로 질소유입을 방지할 수 있어 격리하는 것과 같은 효과가 있다. 소형이동형발전기는 안전주입탱크 격리 외에 사고완화전략 수행 중 전원이 상실된 격납건물 내의 MOV를 외부에서 신속히 조작하는데 사용할 수 있어 적절한 운전조치 수단으로 평가되었다.

2.5.3 다수호기 동시사고 고려 시 주요 자원의 적절성 평가

2.5.3.1 다수호기 동시사고 고려 시 조직간의 의사소통 체계 및 설비의 적절성

한울본부의 다수호기 동시 비상발령 시 비상조직은 초기에는 선행호기(한울 1, 3, 5호기) 비상대응시설에서 비상업무를 수행하고 호기별 사고의 경중에 따라 [redacted] 이 변경가능하다. [redacted]

[redacted]은 비상등급이 백색등급인 경우 선행발전소 [redacted] 비상대책실을 조기 발족시킨다. 비상대책실 내 상황반 등 발전소 별로 중복되는 조직은 선행발전소 조직 책임자가 비상대응업무를 총괄한다. [redacted]

발전소별 중대사고관리의 [redacted]이다. 따라서 단일 발전소의 2개호기 동시사고의 경우에는 [redacted] 책임과 권한을 수행하기 때문에 단일호기 사고와 동일하게 유지되어 의사결정에 있어 문제가 없다. 하지만 예를 들어 1호기와 3호기에서 동시에 중대사고가 발생하여 이동형설비와 같은 공용설비의 사용이 필요할 경우 [redacted] 동시에 사용을 요구할 수 있다. 이 같은 다수호기 사고에 대하여 방사선비상계획서에 따르면 백색비상하에서는 선행호기(한울 1, 3, 5호기) [redacted] 청색비상이후에는 [redacted] 이 각 호기별 상황을 종합적으로 확인하고 사고의 경중을 판단하여 비상대체설비 사용의 우선순위에 대한 최종 의사결정을 할 수 있다.

상기와 같이 한울본부는 다수호기 동시 비상발령 시 비상대책본부, 비상기술지원실, 비상운전반으로 이어지는 의사소통 관리체계를 가지고 있으며, 비상대책본부에서 방재상황을 총괄한다. 따라서 한울본부의 다수호기 동시사고 시 의사소통 체계는 적절한 것으로 평가되었다.

한울부지내 다수호기 동시사고 발생시 비상조직간 의사소통을 위한 설비는 통신설비가 대표적이며, 비상조직의 통신 적합성 검토결과는 다음과 같다.

가. 주제어실 통신 적합성

한울본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 위성전화를 활용한 주제어실의 주요 통신업무는 사고 발생이후 약 1시간 내외로 많은 사용이 발생할 것으로 예측되었다. 그 사유는 비상기술지원실 발족(사고발생 후 1시간 이내 발족)이전에 발전소의 상태를 파악하고 안전조치를 취해야 함에 따라 1) 방사선 비상발령 및 대외기관 보고, 2) 화재 발생시 자체소방대 출동, 3) 주증기대기방출밸브 조작, 4)

이동형 설비 설치 요청 등 현장과 긴밀한 업무의 수행이 요구되었다. 주제어실의 통신 적합성 검토 결과 현재 한울3,4호기에는 고정형 위성전화가 각 2대씩 설치되어있으므로 비상시 연락이 충분할 것으로 평가되었음.

나. 현장 조작 통신 적합성

한울본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 한울본부에 구비되어 있는 이동형 위성전화를 호기별 보급을 하여 현장 조작과 관련된 통신이 가능해야 한다. 하지만 호기당 휴대용 위성전화 보급을 위해 휴대용 위성전화 설치가 필요하며, 2019년 상반기까지 본부에 휴대용 위성전화를 추가하여 호기당 휴대용 위성전화를 확보 예정이다. 그리고 발전소내 이동형 위성전화 통신 음영지역의 비상통신을 위해 이동형위성중계차량 구축 및 운영을 2019년 까지 도입하여 다수호기 동시사고 대응이 가능하도록 수립 예정이므로 다수호기 동시사고시 현장 조작과 관련된 통신은 적합한 것으로 평가되었다.

다. 이동형 설비 통신 적합성

한울본부에는 3.2 MW 이동형발전차, 1 MW 이동형발전차, 이동형펌프 3종이 배치가 되었거나 추후 배치가 될 예정이다. 이동형 설비는 이동형 설비 차고지에 대기중이며, 비상상황 발생시 발전소 비상요원에 의해 이동, 설치됨. 이동형 설비의 이동 및 설치 상황과 관련된 현황을 주제어실 또는 비상기술지원실에서 지속적으로 확인되어야 이동형 설비 관련 발전소 차단기 조작, 배관 유로 설정을 상황에 따라 발전소 운전원이 수행 가능하므로 이동형설비 운전원을 위한 이동형 위성전화를 2019년 상반기까지 확보 예정이므로 적절한 것으로 평가되었다.

라. 지진화재 관련 통신 적합성

한울본부는 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항으로 발전소내 화재감시설비를 0.3g 지진에도 가용할 수 있도록 추진중에 있다.

마. 비상기술지원실 관련 통신 적합성

한울본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 3호기 및 4호기 비상기술지원실

은 발전소 비상상황시 주제어실의 기술지원 및 외부자원 확보를 위해 필요하다. 한울본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 비상기술지원실은 주제어실 및 비상대책본부와의 지속적인 통신이 필요하므로 현재 호기당 [redacted] 고정형 위성전화로 지속 통신이 어려운 점을 감안하였을 때 [redacted] 추가적인 고정형 위성전화가 필요할 것으로 검토되어 2020년까지 추가 배치 예정이므로 적절한 것으로 평가되었다.

바. 비상대책실 관련 통신 적합성

한울본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상대책실은 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 협조체계를 구축하고 비상대응활동 총괄을 위해 비상통신 설비가 필요함. 현재 비상대책실에는 [redacted] 고정형 위성전화가 설치되어 있으며, 한울본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 비상대책실은 각 호기별 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 지속적인 통신에 어려움이 없을 것으로 평가되었다.

2.5.3.2 다수호기 동시사고 고려 시 의사결정 조직 및 인력 적합성

한울본부 부지내 다수호기 동시사고 고려 시 의사결정에 필요한 조직은 한울 1,2,3,4,5,6호기 발전팀과 비상기술지원실로 구성된다. [redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

비상기술지원실의 인력은 한울1,2,3발전소 기준으로 [redacted] 구성되며, 비상기술지원실 조직의 역할은 한울본부 방사선비상계획서에 따라 노심상태 평가, 사고상황 분석, 보호대책 수립 및 상황전파 등 비상대책실 발족 이전까지 전반적인 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상운영지원실의 인력은 한울1,2,3발전소 기준으로 [redacted]

구성되며, 긴급정비 및 복구방안 수립, 정비 인력 및 장비 동원 방안 수립, 긴급정비 및 비상활동에 필요한 물자 확보, 소방대 안내 등 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상대책실의 인력은

으로 구성되며, 방재대책기관과 협조체제 유지, 비상상황 파악 및 대책 수립, 행정지원, 발전소 및 비상대응시설 보안/경비, 비상대책본부 방송 및 통신망 운영 등 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

스트레스테스트에서 가정하는 보수적인 사고가 다수호기에 동시에 발생하더라도 발전소 대응을 위한 의사결정에 필요한 조직 및 인력은 적절한 것으로 평가되었다.

2.6 한울3,4호기 차이점

한울3,4호기에 대한 발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능은 한울3호기와 4호기가 동일한 설계개념을 적용하였으므로 사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원은 동일하다.

제3절 안전 개선사항

3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

운영기술능력과 관련하여 후쿠시마 후속조치를 검토한 결과 사고전략수립, 주요 운전원조치, 주요 자원의 적절성 검토 및 인간공학 유효성평가와 관련된 사항은 없는 것으로 검토되었다.

3.2 월성1호기 및 고리2호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인

3.2.1. 월성1호기 스트레스테스트

“운영기술능력”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항의 반영여부를 확인한 결과, 표 7-37에서와 같이 안전 개선사항 2건에 대한 5가지 세부사항은 한울3,4호기 평가에서 반영이 완료되었거나 반영중인 것으로 검토되었다.

3.2.2. 고리1호기 스트레스테스트

“운영기술능력”과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항의 반영여부를 확인한 결과, 표 7-38에서와 같이 안전 개선사항 3건에 대한 7가지 세부사항은 한울3,4호기 평가에서 반영이 완료되었거나 반영중인 것으로 검토되었다.

3.3 운영기술능력 개선사항 (자체도출)

3.3.1 사고대응전략 보완

1 MW 이동형발전차 연결 후 ■■ 이내에 정지냉각계통 운전을 위해 3.2 MW 이동형발전차를 연결하도록 사고대응전략이 수립되었으나, 어느 모선에 어떤 방식으로 연결할 것인지에 대한 방안이 수립되어 있지 않다.

3.3.2 설비 보완

3.3.2.1 주제어실 설비 보완

가.

나.

3.3.2.2 현장 설비 보완

가. [Redacted text block]

나. [Redacted text block]

다. [Redacted text block]

라. [Redacted text block]

마. [Redacted text block]

3.3.2.3 이동형 설비 보완

가. [Redacted text block]

나. [Redacted text block]

3.3.2.4 비상기술지원실 설비 보완

비상기술지원실은 발전소의 상태를 주제어실과의 의사소통을 통해 주기적으로 업데이트 하여야 하며, 비상기술지원실의 정확한 발전소 상태 파악은 상황인식과 사고대응에 중요한 역할을 한다. 하지만, 현재 발전소 상태를 체계적으로 정리할 수 있는 Worksheet가 비상기술지원실에 비치되어 있지 않으므로 시간, 원자로 출력, 원자력 수위, 가압기 압력, 가압기 수위, 증기발생기 수위 등 중요한 발전소 변수를 시간대 별로 기록할 수 있는 Worksheet 도입이 필요하다.

3.3.2.5 통신 설비 보완

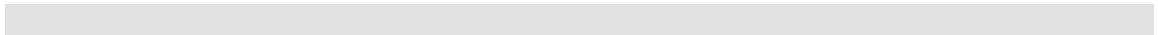
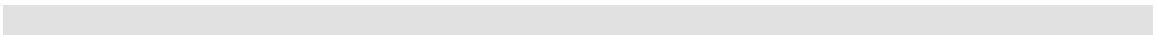
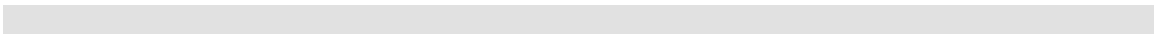


3.3.3 절차서 보완

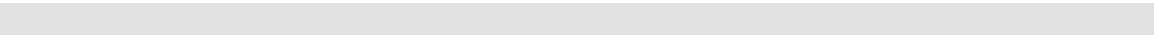
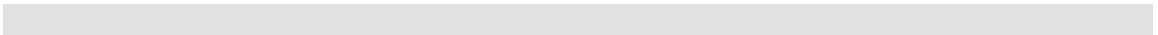
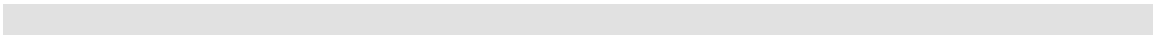
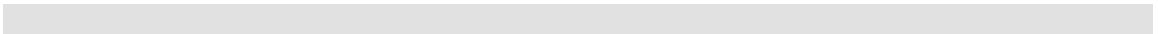
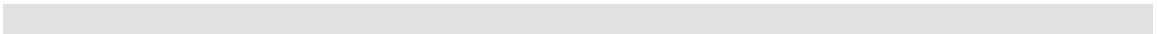
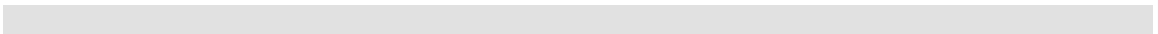




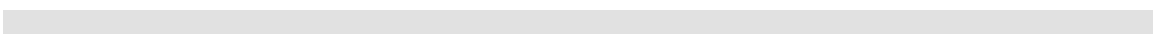

3.3.3.1 비상운전절차서



가.


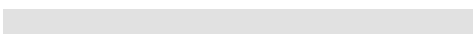
나.

다.

라. 





마. 














바. 


사. 






아. 






자. [Redacted text block]

차. [Redacted text block]

3.3.3.2 비정상운전절차서

가. [Redacted text block]

나. [Redacted text block]

3.3.3.3 계통운전절차서

가. [Redacted text block]

나. [Redacted text block]

[Redacted text block]

다. [Redacted text block]

라. [Redacted text block]

[Redacted text block]

3.3.3.4 중대사고관리지침서

[Redacted text block]

3.3.3.5 다중방어운영지침서

가. [Redacted text block]

[Redacted text block]

나. [Redacted text block]

다. [Redacted text block]

라. [Redacted text block]

3.3.4 교육훈련 보완

스트레스테스트에서 가정한 안전기능상실 및 극한자연재해 사고상황에서 운전원 및 소내·외 비상대응조직원이 수립된 사고대응전략의 이행능력을 확보하고 유지하기 위한 한울3호기의 교육훈련프로그램을 평가하였다. 평가는 1) 방사능방재교육, 2) 방사능방재훈련, 3) 비상운전절차서 교육, 4) 중대사고관리지침서 교육, 5) 이동형 설비의 이동, 설치 및 운전 교육에 대해 실시하였다. 방사능방재 교육훈련은 방재요원을 대상으로 하여 방사선비상계획서 수행을 위한 방재활동 위주로 시행되고 있어 스트레스테스트에서 요구하는 교육훈련 내용과는 성격이 다르다.

비상운전절차서로 대응이 가능한 범주의 사고에 대해서는 비상운전 교육 및 시뮬레이터실습이 시행되고 있으며, 중대사고 현상 및 완화 전략에 대해 운전원 및 일부 방재요원을 대상으로 이론교육이 시행되고 있으나, 스트레스테스트와 같이 설

계기준초과 및 극한자연재해 사고상황에 대응하기 위해 도입되는 다양한 이동형 설비를 활용한 사고대응 전략을 이행하기 위한 교육훈련 프로그램은 시행되고 있지 않다.

따라서 교육훈련프로그램의 평가 및 스트레스테스트 유효성평가를 통해 확인한 교육훈련 측면의 개선 필요사항 및 개선방안은 다음과 같다.

가. 현재 운전원 및 비상대응요원에 대한 교육훈련에는 스트레스테스트에서 안전기능 상실과 극한자연재해 사고상황에 대비하여 수립된 사고대응전략의 이행능력을 확보하기 위한 교육훈련 내용이 포함되어 있지 않다. 따라서 안전기능 상실과 극한자연재해 사고상황에 대비하기 위해 아래와 같은 교육훈련 추가 시행 하고 극한자연재해 사고상황을 가정한 시뮬레이터 실습 시나리오 개발 및 시행이 필요하다.

- 발전소 고정설비, 소내 이동형 설비, 소외자원을 활용한 단계별 사고대응전략
- 주요 운전원 조치 이행시간
- 후쿠시마원전 경험사례

나. 극한자연재해 사고상황에서는 조명, 통신 및 일부 MMI 상실이 가능하고, 현장운전원의 잦은 수동조작이 예상되는 바, 이에 대한 훈련이 가능하도록 시뮬레이터 실습 방법의 개선이 요구된다. 따라서 재해상황에 부합한 시뮬레이터 실 환경조성 및 현장운전원 발전소현장 실습이 필요하다.

다. 극한자연재해 사고대응전략 이행을 위해 도입되었거나 도입 예정인 이동형 설비의 이동, 설치 및 운전에 대해 실증시험을 통한 담당자 훈련이 요구된다. 따라서 이동형 설비 운영절차서 개발 및 실증시험을 통해 담당자 훈련 시행이 필요하다.

라. 사고관리계획서 작성에 따라 신규 개발되는 다중방어운영지침서에 대한 교육 및 비상운전절차서 연계훈련이 요구된다. 따라서 비상운전절차서 교육에 포함하여 다중방어운영지침서 교육을 시행하고 다중방어운영지침서가 연계되도록 비상운전절차서 실습시나리오 개발 및 시뮬레이터 실습이 필요하다.

마.

3.3.5 조직/인력 보완



제4절 결론

본 장에서는 한울3,4호기 스트레스트테스트(Stress Test) 평가분야 중 운영기술능력을 평가하기 위하여 극한자연재해에 대한 구조물 계통, 기기, 건전성 평가결과, 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가 결과, 중대사고 관리능력 평가 결과, 방재 및 비상대응능력 평가결과를 검토하였다. 또한, 설계기준초과 및 극한재해와 관련한 사고상황에서의 사고대응전략, 주요 운전원조치 및 주요 자원에 대한 스트레스트테스트 각 분야별 시나리오에 대하여 한울3,4호기의 운영기술능력을 평가하였다.

사고대응전략, 주요 운전원 조치, 주요 자원의 적절성 평가를 위해 제4장 및 제5장에서 수립된 사고시나리오에 대한 사고대응전략을 평가한 결과 모두 적절한 대응전략을 수립한 것으로 평가 되었다. 그리고 해당 사고대응전략, 주요 운전원 조

치, 주요 자원을 활용하여 인간공학 유효성 평가를 수행한 결과 모두 가용한 것으로 평가되어, 한울3,4호기는 극한자연재해를 동반한 모든 설계기준초과 및 극한자연재해 조건에서도 발전소의 자체 대응능력과 운전원의 적절한 대응조치를 통해 안전하게 정지될 수 있음을 확인하였다.

일부 평가결과에서 도출된 사고대응전략, 주요 운전원 조치, 주요 자원에 대한 개선사항에 대해 보완할 예정이며, 이를 바탕으로 발전소 관련 인원들의 훈련을 수행하면 인적오류와 의사결정오류 발생 가능성은 줄어들 수 있을 것으로 예상된다.

제5절 참고문헌

7-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침[개정1], 2016



7-10 한국전력기술(주), 한울3,4호기 스트레스테스트 보고서

7-11 Sandra G. Hart, Lowell E. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,” NASA/CR-1997-205754, 1988.

7-12 NEI 12-01 On-Shift Staffing Analysis Phase 1: Calvert Cliffs Nuclear Power Plant.

- 7-13 Taylor, R.M., "Situational Awareness Rating Technique (SART): The Development of a Tool for Aircrew Systems Design," in Situational Awareness in Aerospace Operations (AGARD-CP-478) (pp. 3/1 ~3/17), 1990.
- 7-14 Paul Salmon, Neville Stanton, Guy Walker & Damian Green, "Situation Awareness Measurement: A Review of Applicability for C4i Environments." Journal of Applied Ergonomics," Vol.37, No.2, pp. 225-238, 2007.
- 7-15 Sebok, A., "Team Performance in Process Control: Influences of Interface Design and Staffing Level, Ergonomics," Vol. 43, pp. 1210-1236, 1988.

제6절 표

표 7-1 SHERPA 직무형태 구분

Error Category	Error Mode	Error Code	Remarks
Action	Operation too long/short	A1	Action: pulling a switch or pressing a button to open a door This error is in fact related to the actions of individuals, i.e., the individuals do not do their task appropriately or promptly;
	Operation mistimed	A2	
	Operation in wrong direction	A3	
	Too little/much operation	A4	
	Misalignment	A5	
	Right operation on wrong object	A6	
	Wrong operation on right object	A7	
	Operation omitted	A8	
	Operation incomplete	A9	
	Wrong operation on wrong object	A10	
Retrieval	Information not obtained	R1	Retrieval: receiving information from a monitor or guideline, etc.; The immediate action after an error to return the system to its original state;
	Wrong information obtained	R2	
	Information retrieval incomplete	R3	
Checking	Check omitted	C1	Checking: leading and managing a checking process; An error in which individuals do not do the checking timely or properly;
	Check incomplete	C2	
	Right check on wrong object	C3	
	Wrong check on right object	C4	
	Check mistimed	C5	
	Wrong check on wrong object	C6	
Selection	Selection omitted	S1	Selection: selecting another strategy on the basis of orders from higher authorities; The operator selects the wrong choice or forgets to select a step in the process of controlling the system.
	Wrong selection made	S2	

Error Category	Error Mode	Error Code	Remarks
Communication	Information not communicated	I1	Information communication: talking to other departments or groups. An error in the process of communicating with other sections, i.e., wrong information is received;
	Wrong information communicated	I2	
	Information communication incomplete	I3	

표 7-2 직무형태별 위험도 단계

Risk Possibility		Catastrophic	Critical	Marginal	Insignificant
		1	2	3	4
Frequent	A	A1	A2	A3	A4
Probable	B	B1	B2	B3	B4
Occasional	C	C1	C2	C3	C4
Remote	D	D1	D2	D3	D4
Improbable	E	E1	E2	E3	E4

표 7-3 소외전원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

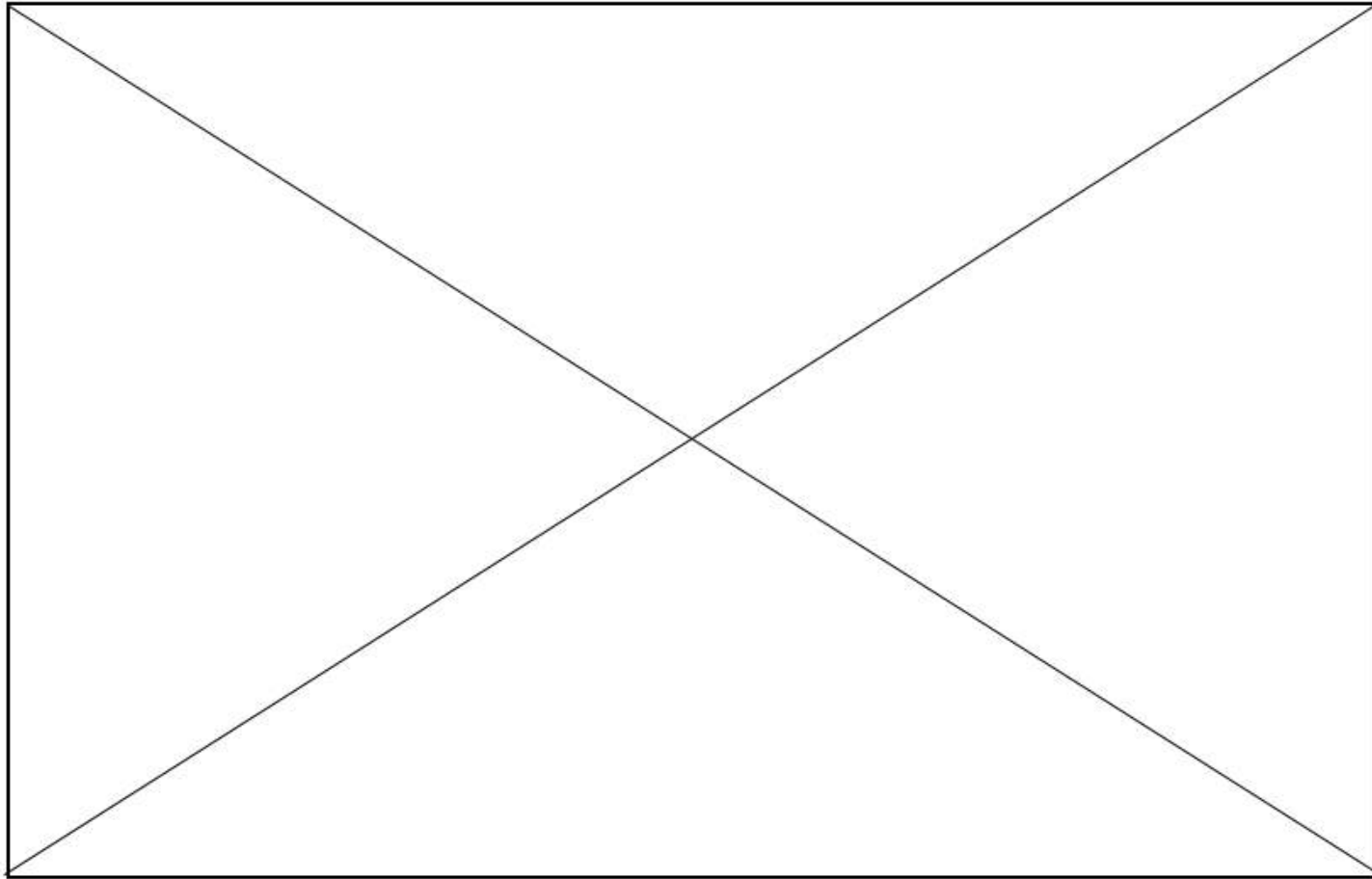


표 7-4 소내정전 조건에 대한 소요시간 분석결과

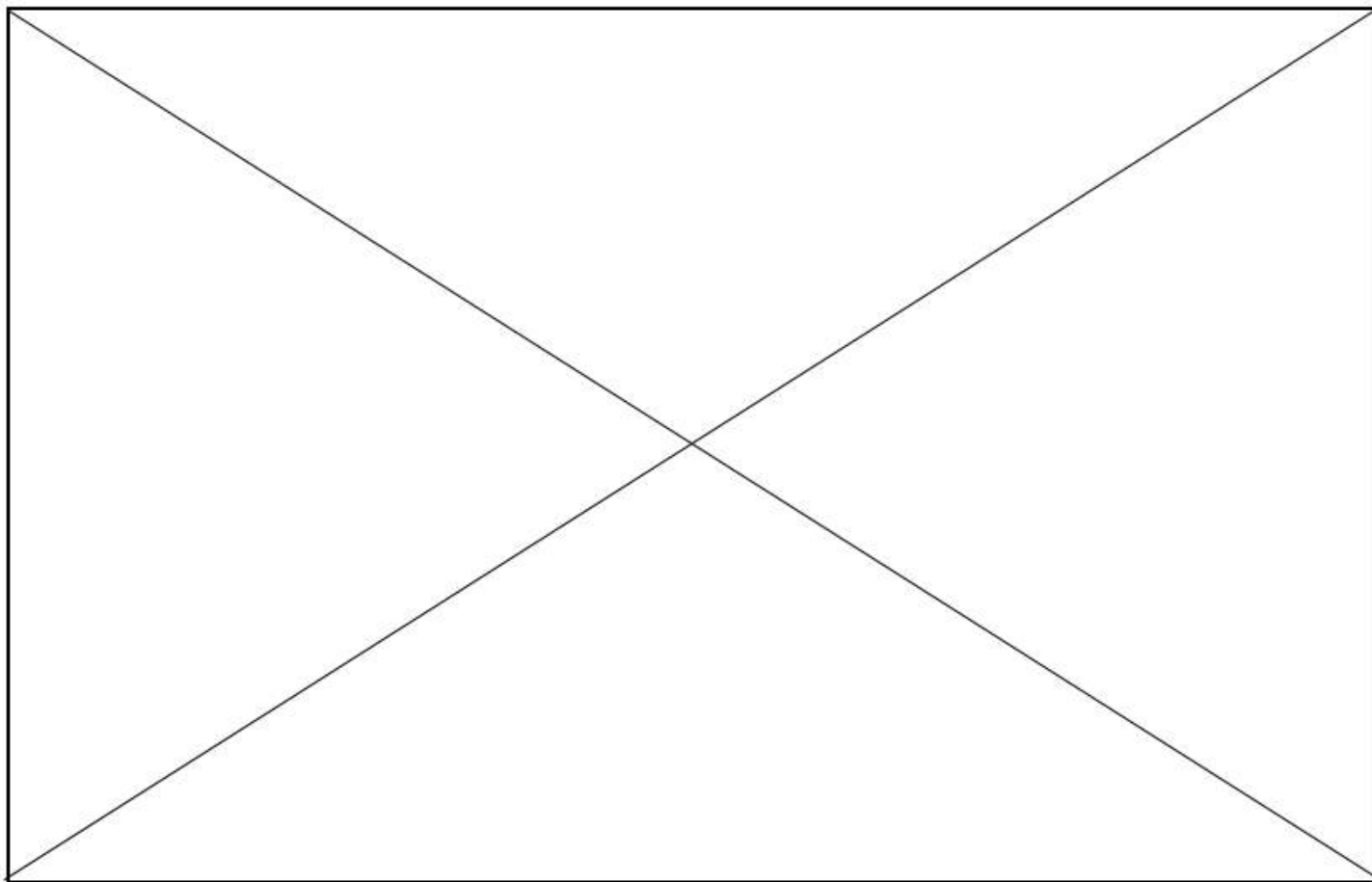


표 7-5 최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

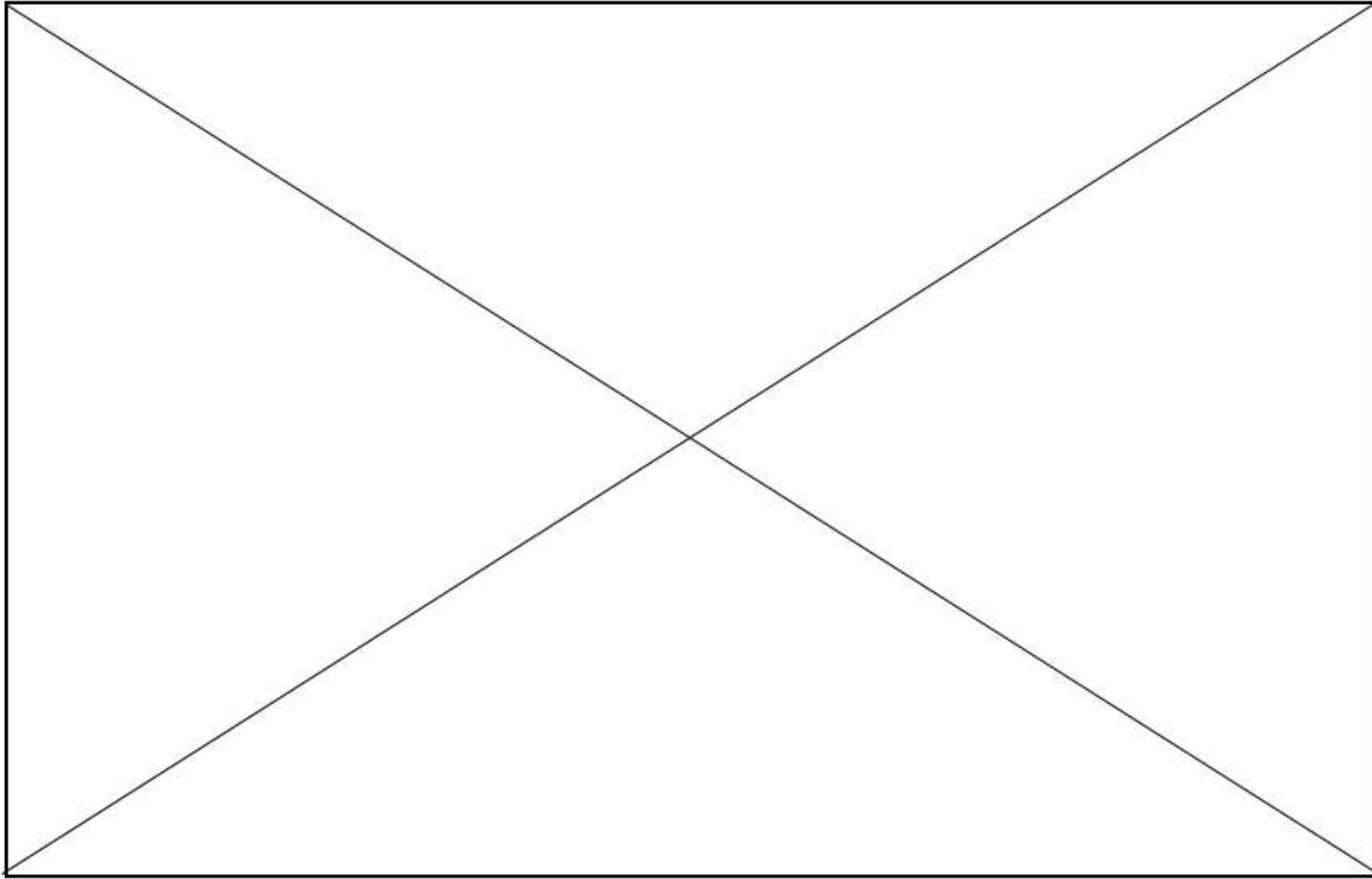


표 7-6 최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 인적오류 분석결과

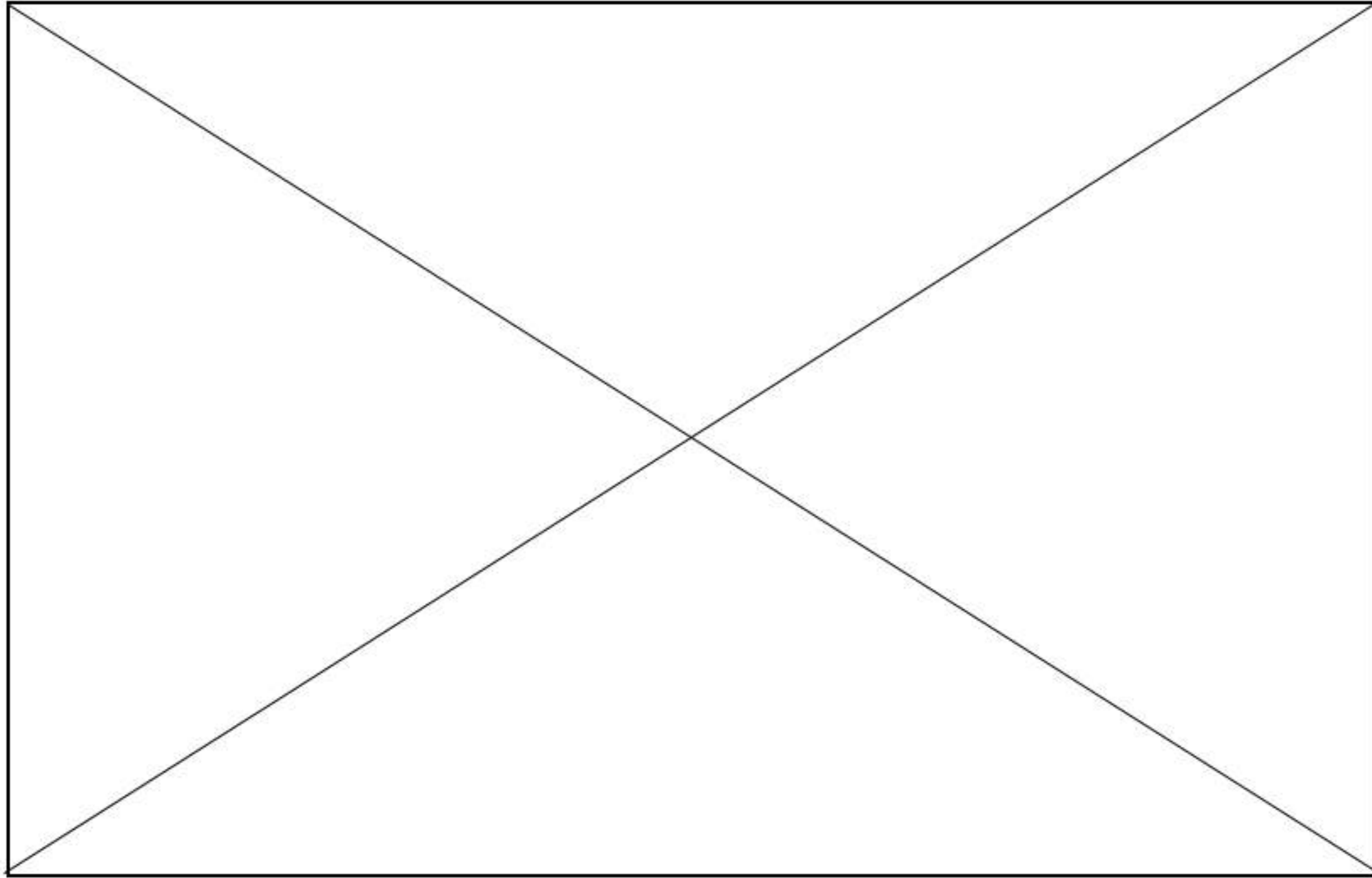


표 7-7 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

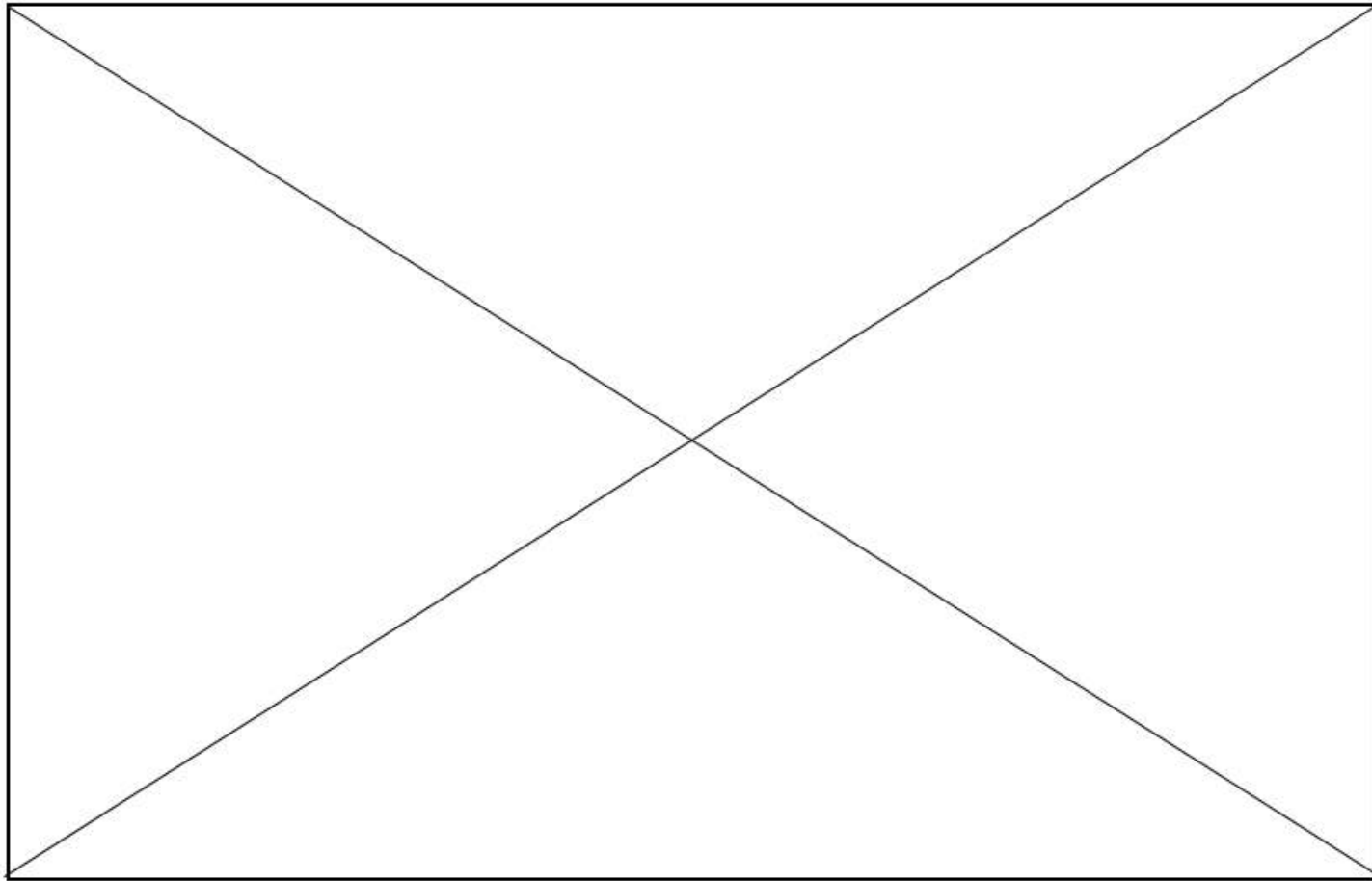


표 7-8 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과

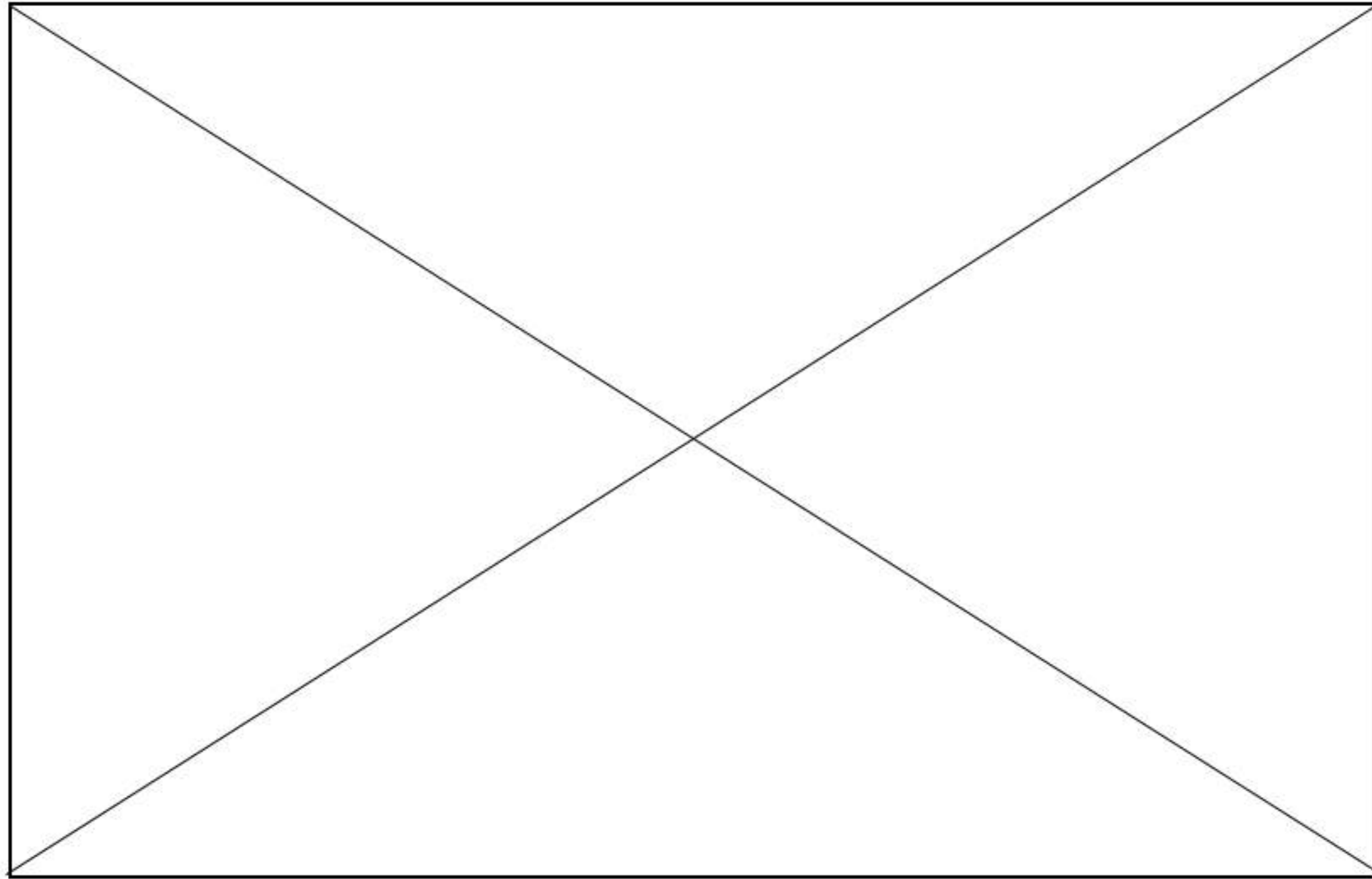


표 7-9 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류

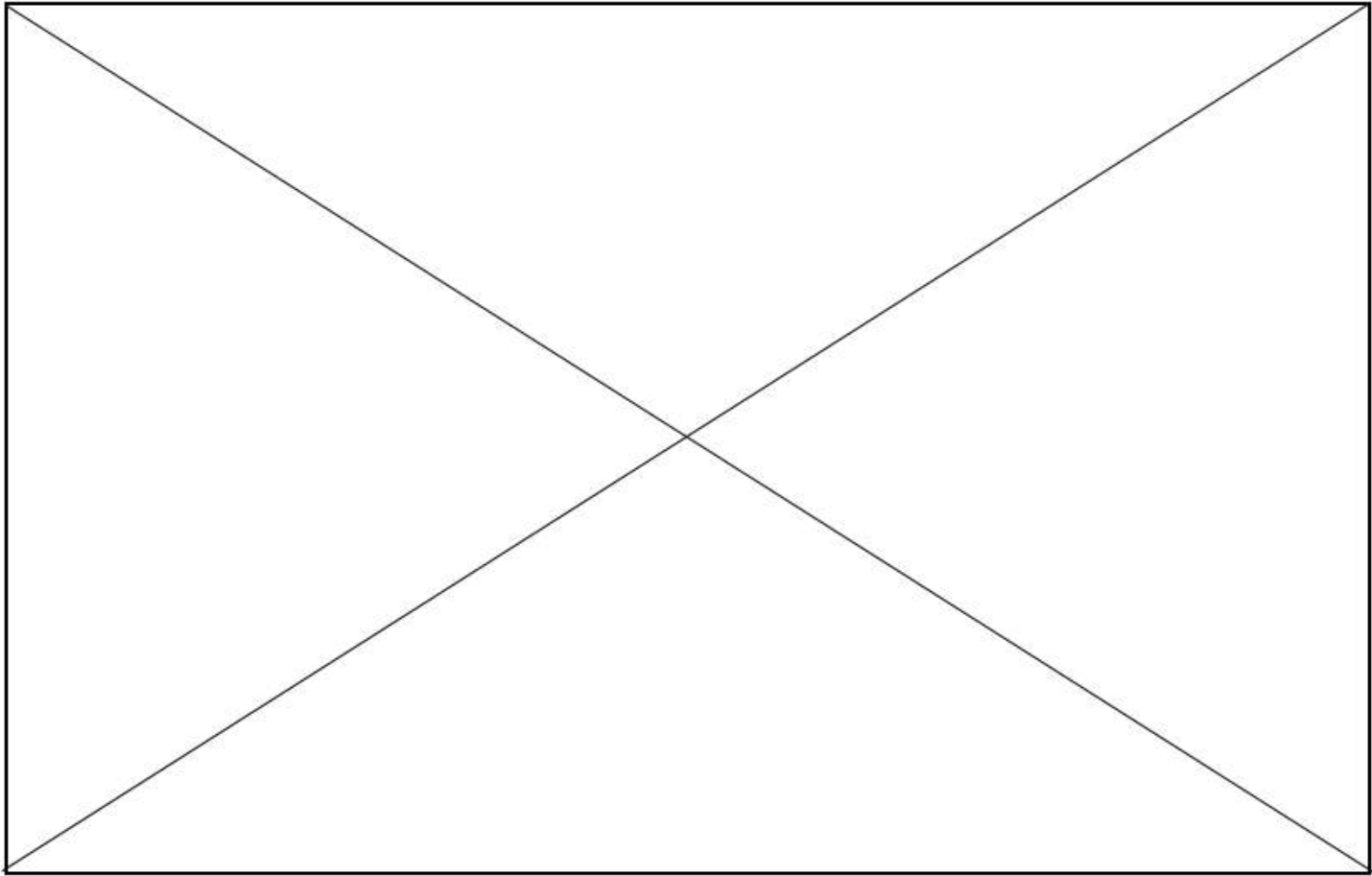


표 7-10 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과

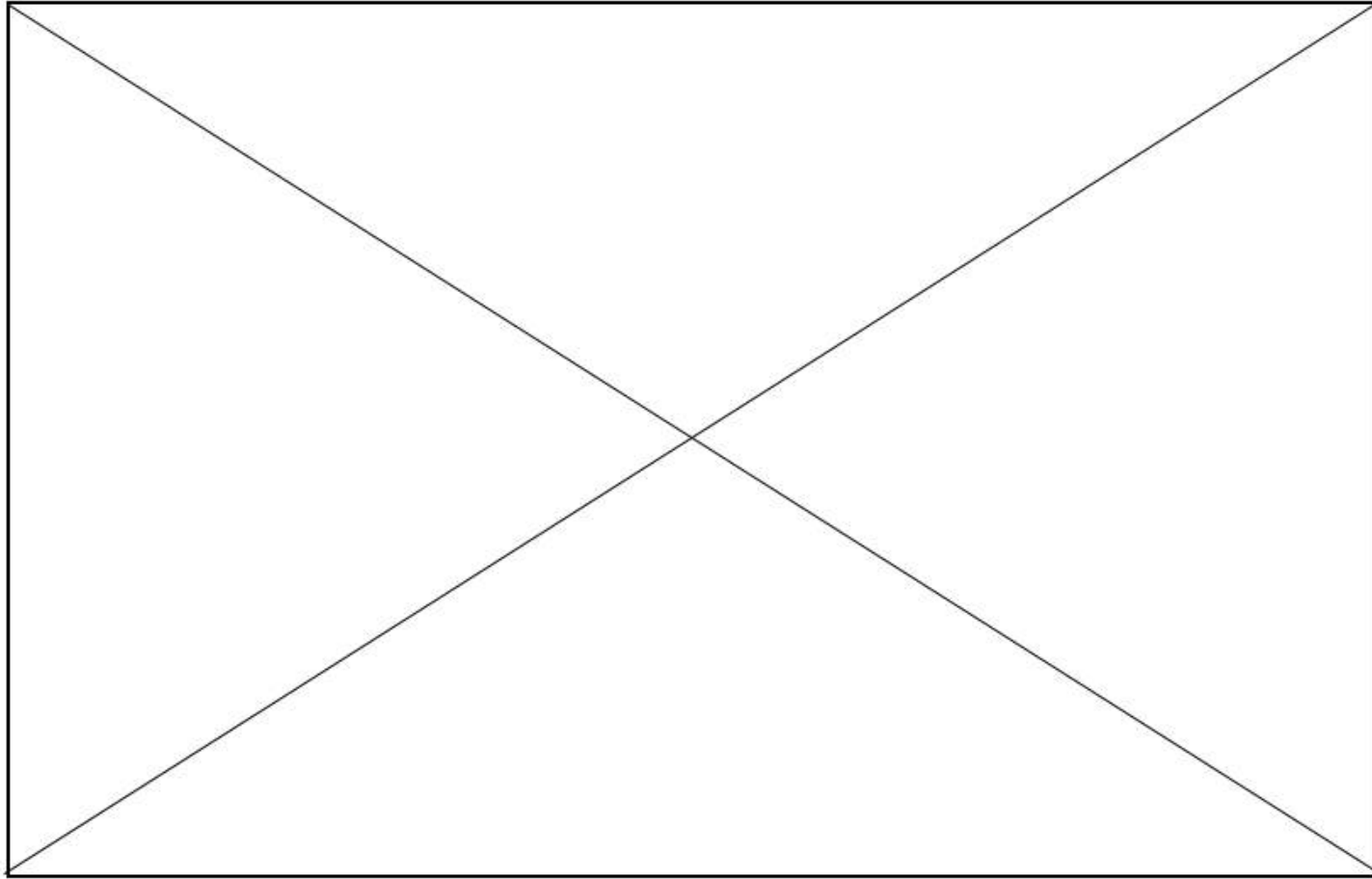


표 7-11 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원조치의 직무 및 인적오류 분석결과

A square with its two diagonals drawn, forming an 'X' shape. The diagonals intersect at the center of the square.

표 7-12 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 개선이 요구되는
직무 및 인적오류

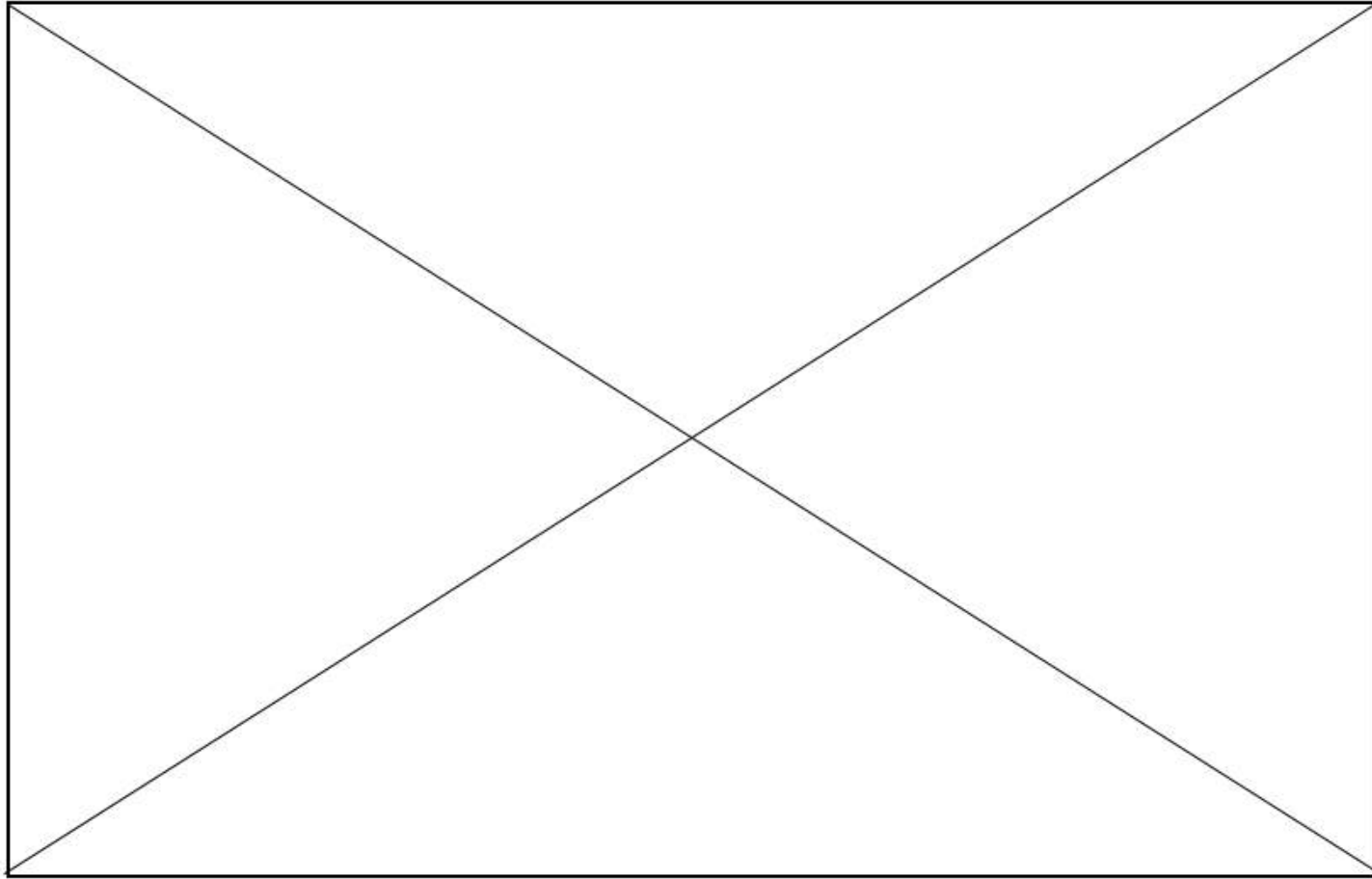


표 7-13 최종열제거원상실(시나리오 4) 주제어실 재고기기 목록

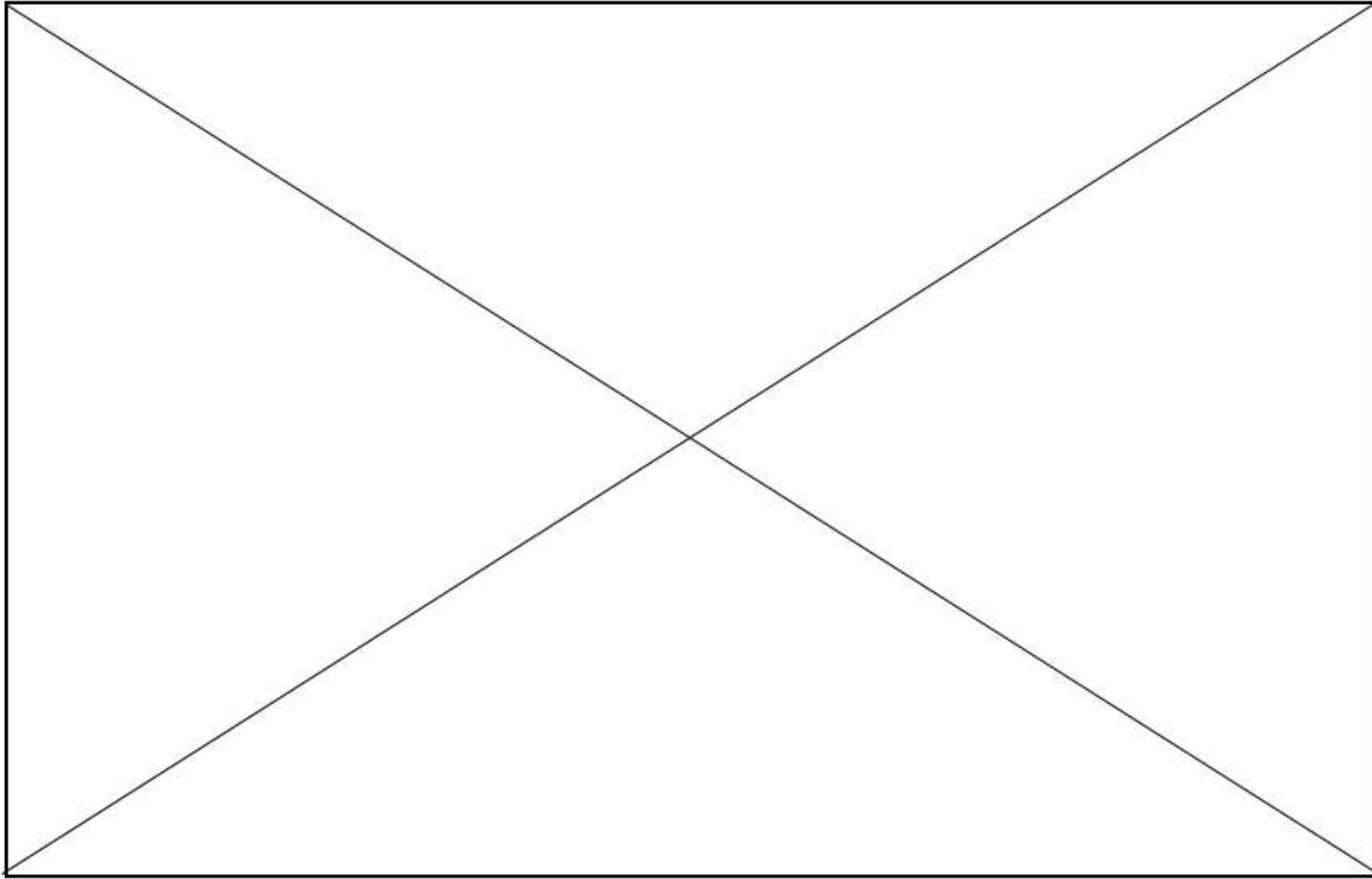


표 7-14 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6) 주제어실 재고기기 목록

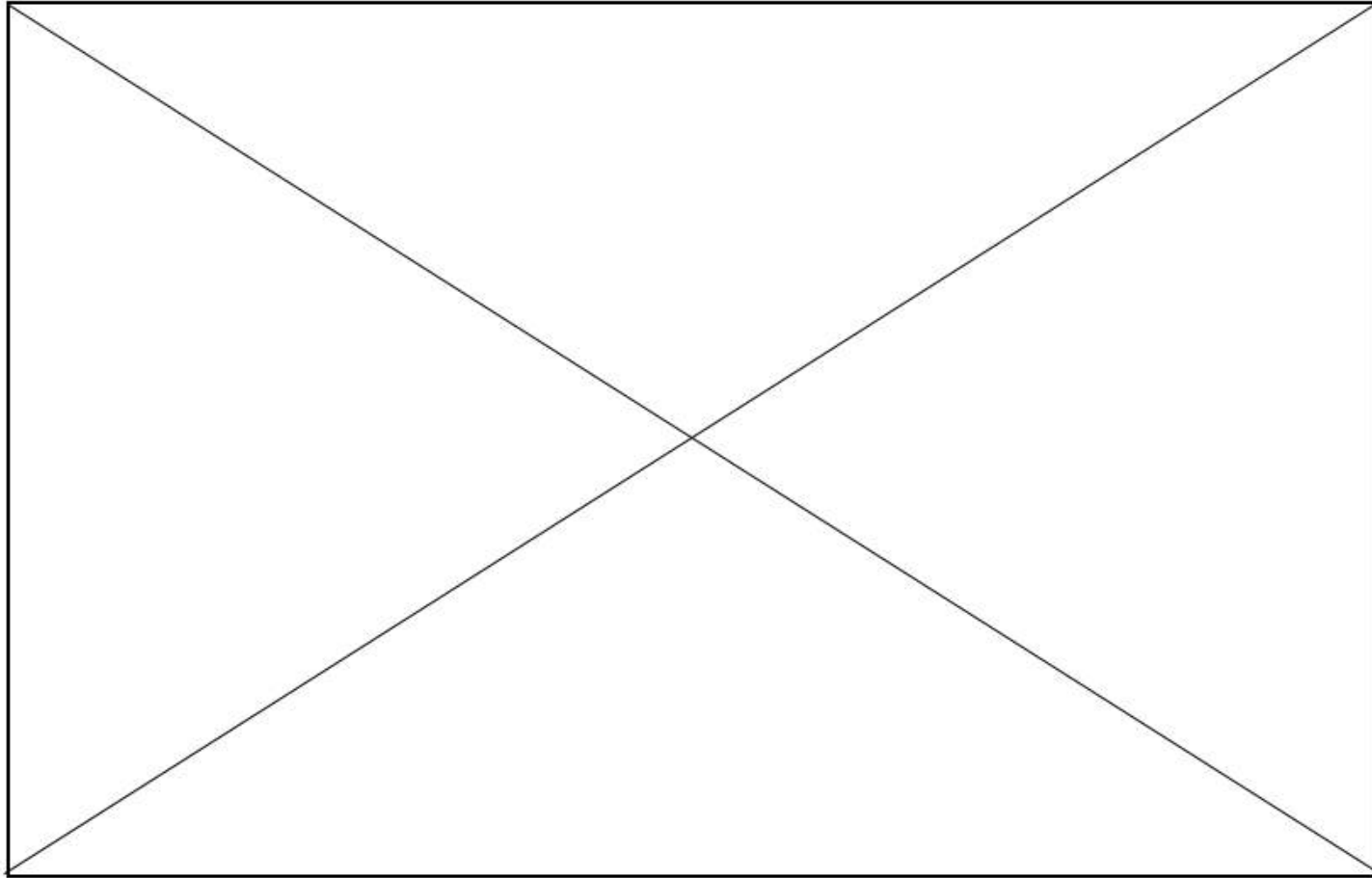


표 7-15 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) 주 제어실 채고기기
목록

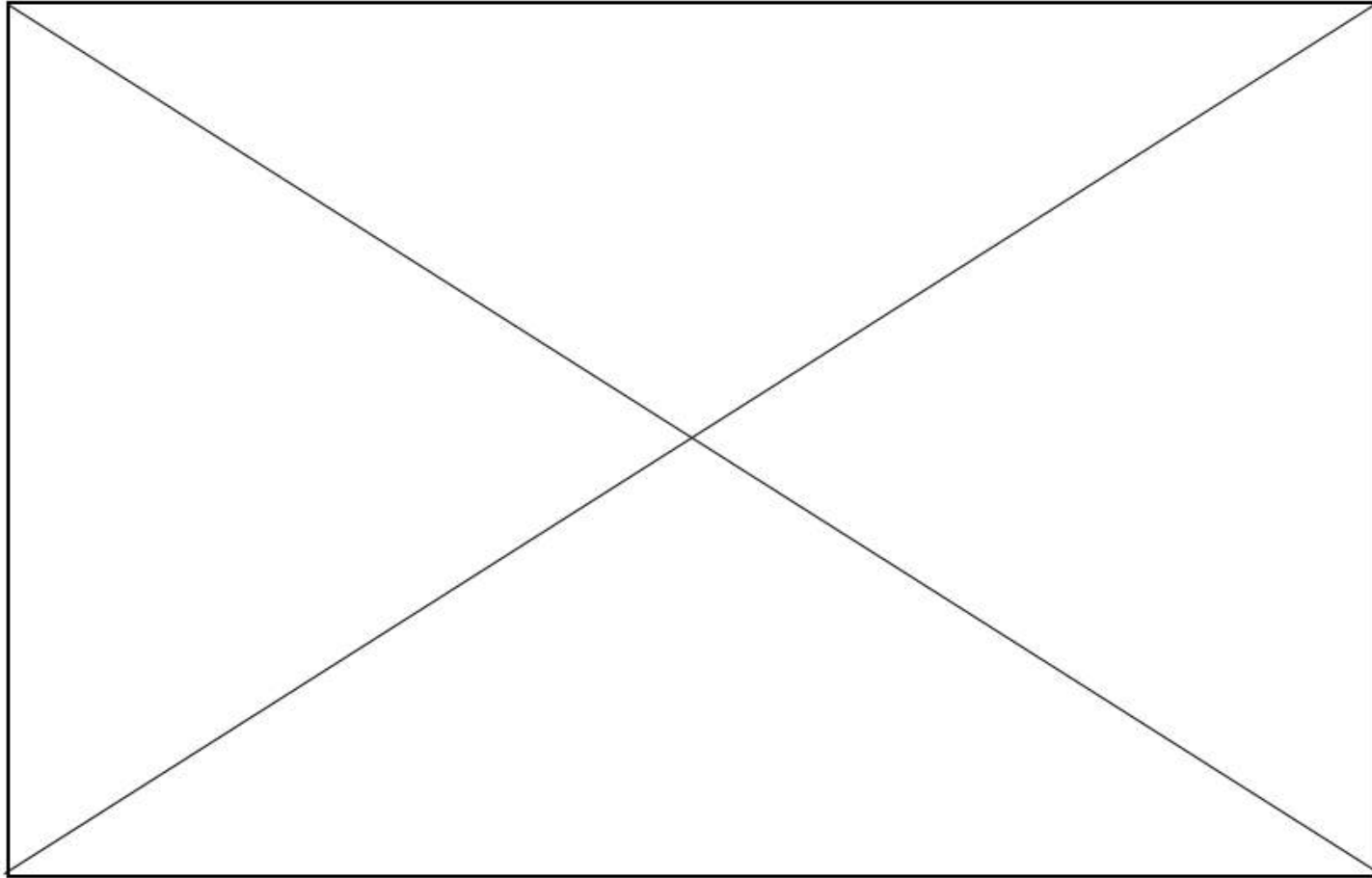


표 7-16 중대사고(시나리오 10) 주제어실 재고기기 목록

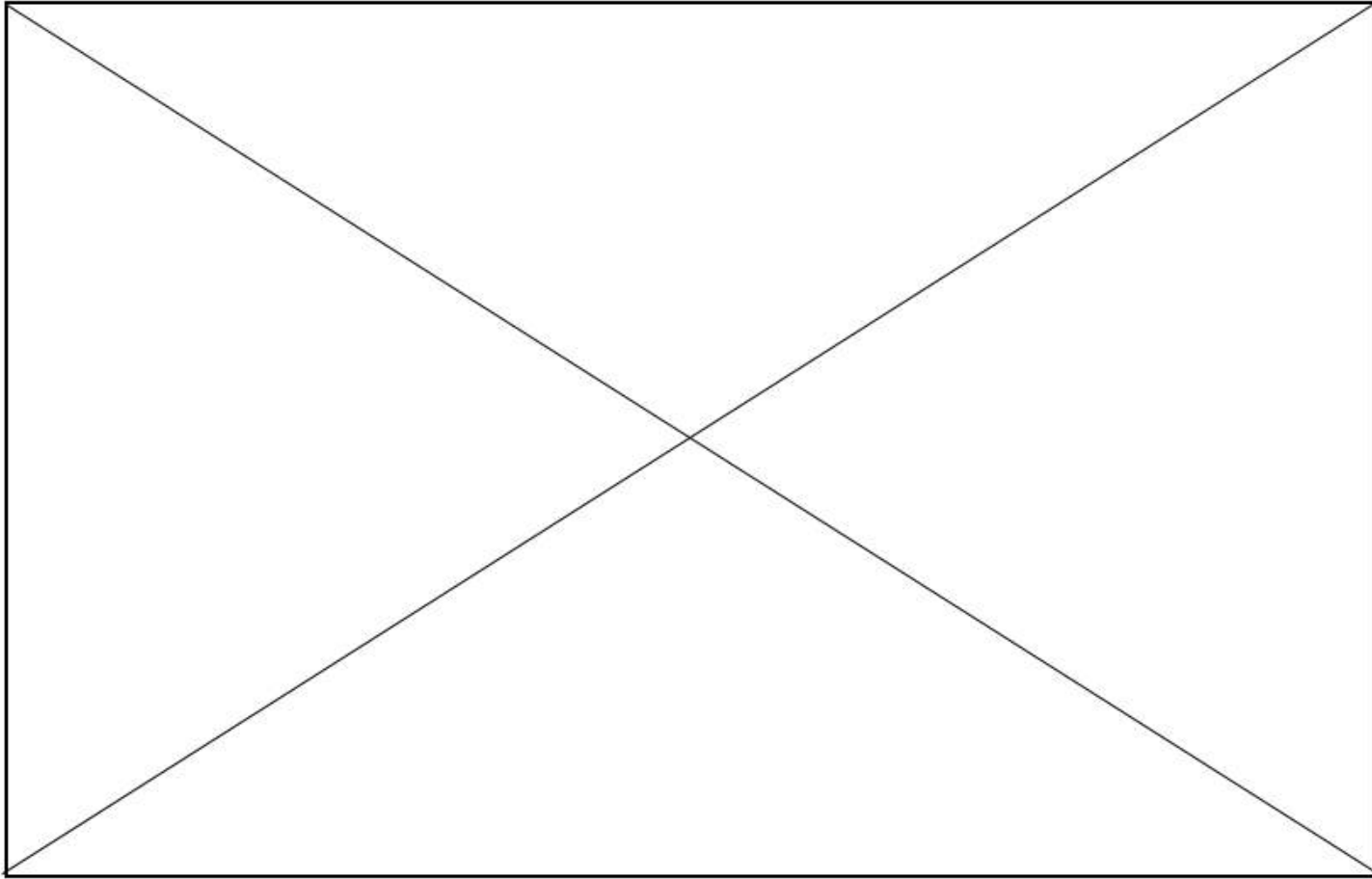


표 7-17 현장 재고기기 목록

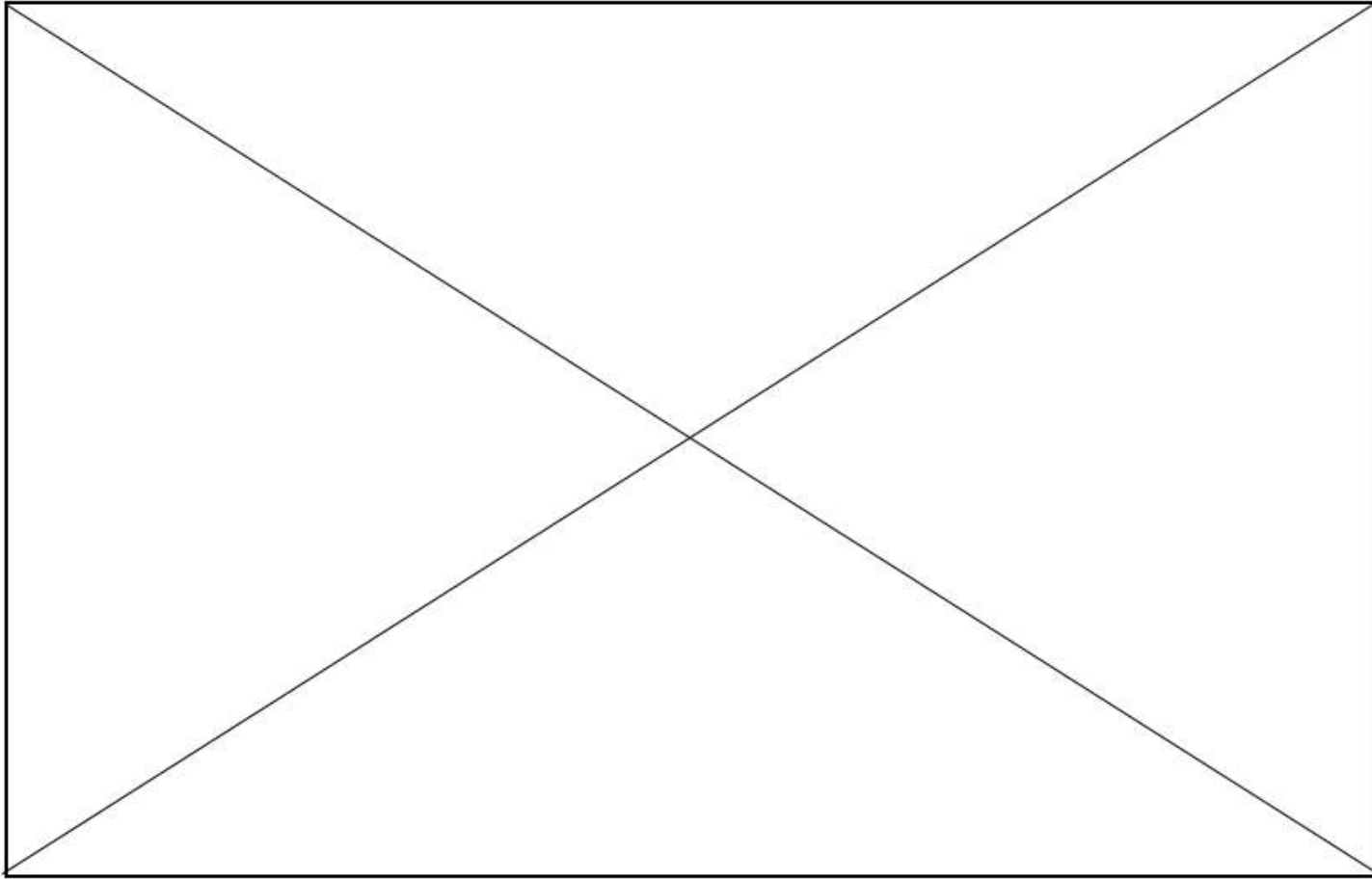


표 7-18 입력수준 분석 결과

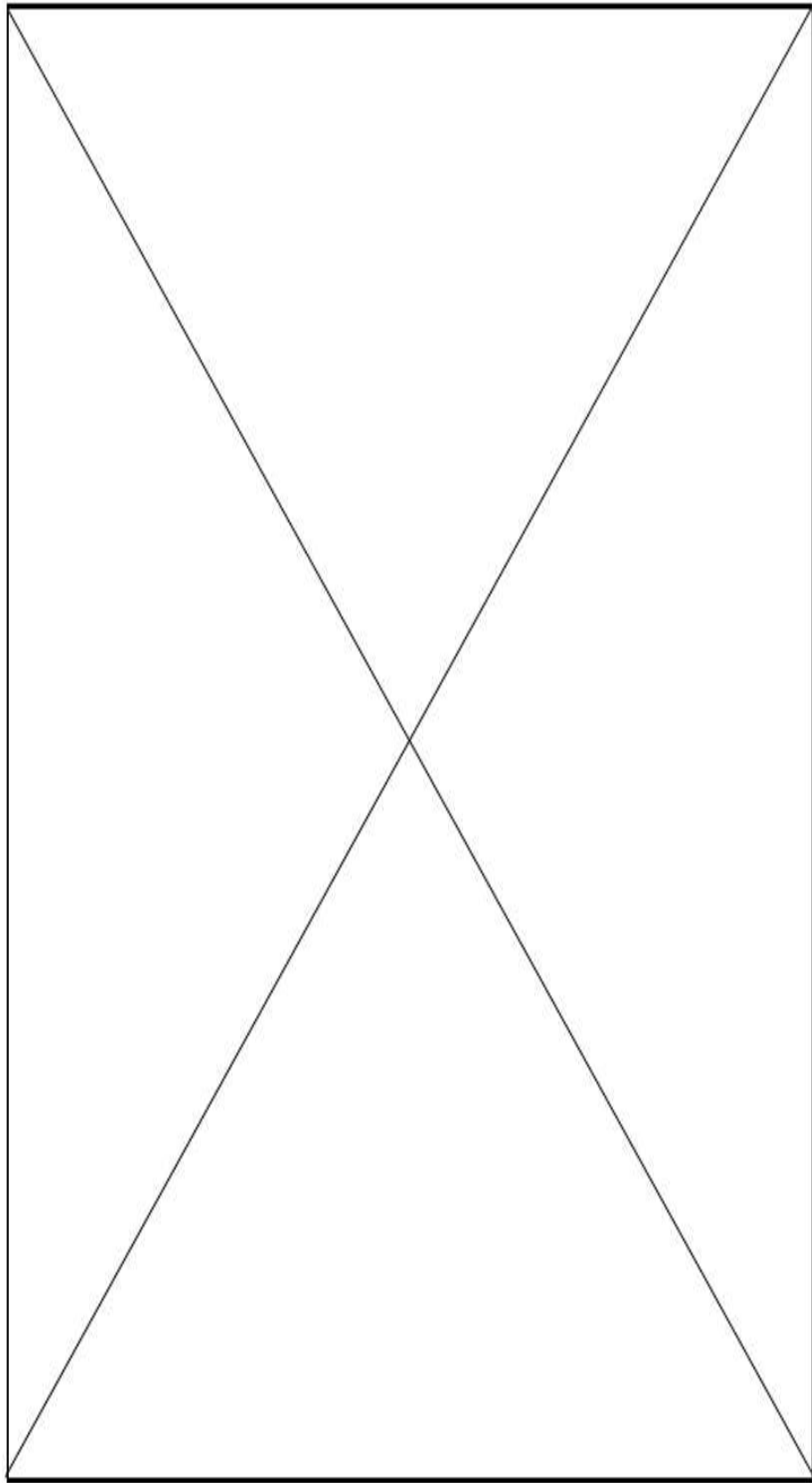


표 7-19 이동형발전차 운전 절차에 따른 각 수행조의 역할()

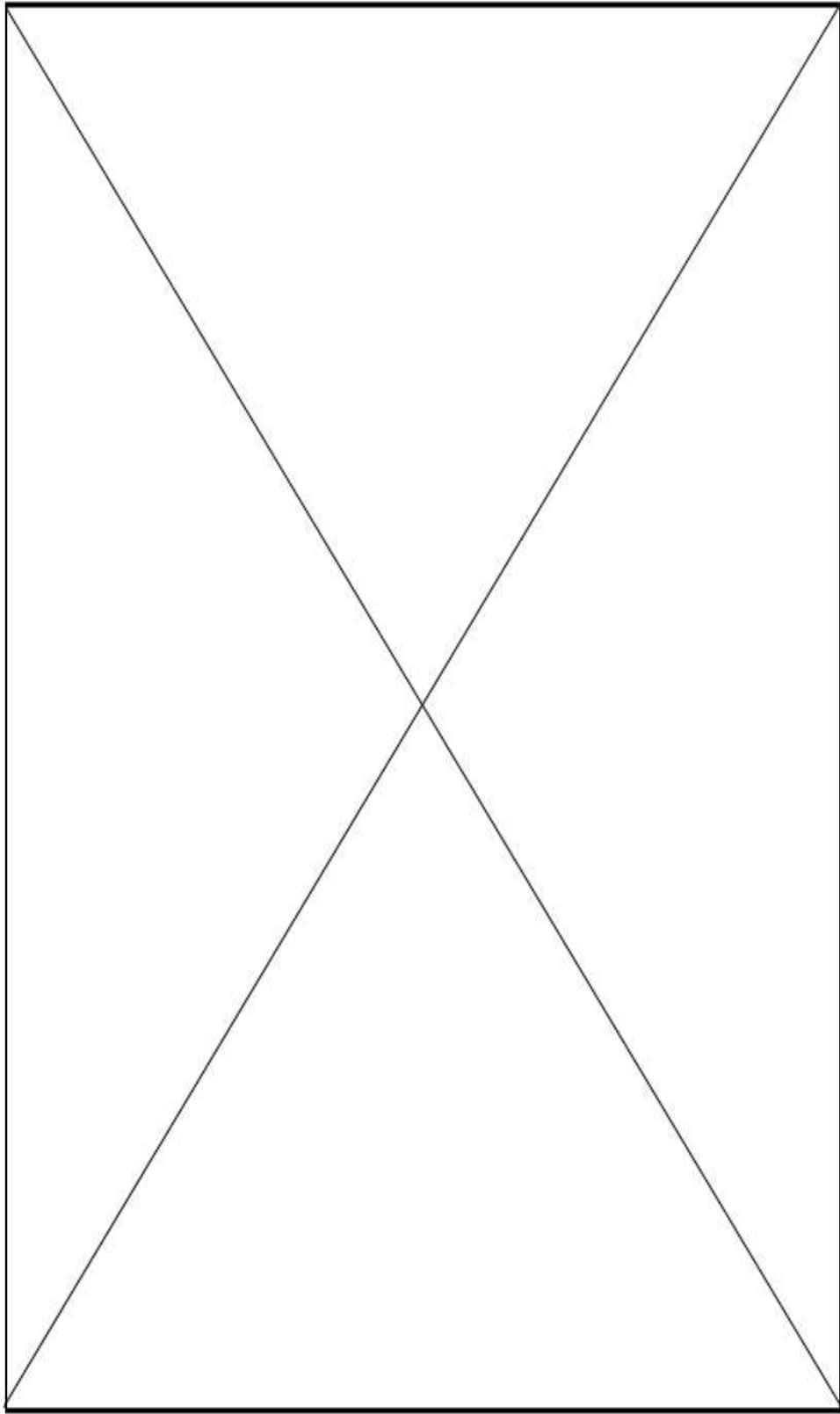


표 7-20 방사능방재교육

교육과정	교육대상	교육시기	교육시간
방재요원 신규교육	신입직원	입사 후 6개월 이내	18시간
	사업소채용 신입직원	방재요원 지정 후 6개월 이내	
방재요원 보수교육(I)	방재요원 신규교육 이수자	- 사이버 교육 (본사 방재교육계획에 따름) - 집합교육 (사업소 방재교육계획에 따름)	8시간/년
방재요원 보수교육(II)	보수교육(I) 3회 이상 이수자		2시간/년

표 7-21 방재요원 신규교육과정의 교육내용

구분	교육내용	
	원자력직군	기타 직군
공통교육	<ul style="list-style-type: none"> - 방사선이론 - 방사선(능) 측정기 - 체내외 방사선방호 - 방사성 오염관리 - 방사선의 생물학적 영향 - 방사성폐기물 관리 및 환경방사선 감시 - 피폭평가 및 작업계획 - 방사능방재 일반 - 방사능방재 관계법령 	<ul style="list-style-type: none"> - 방사선이론 - 방사성폐기물 관리 - 방사선방호 - 발전 기본원리 - 원자력이론 - 발전소안전관리 - 원자로안전설비 - 방사능방재 일반 - 방사능방재 관계법령
직무교육	<ul style="list-style-type: none"> - 화재진압 및 긴급구조 - 방사능 재난관리 - 사고완화 및 평가 - 방사선관리 및 주민보호 - 방사선 비상진료 - 비상대응활동 지원 	<ul style="list-style-type: none"> - 화재진압 및 긴급구조 - 방사능 재난관리 - 사고완화 및 평가 - 방사선관리 및 주민보호 - 방사선 비상진료 - 비상대응활동 지원

표 7-22 방재요원 보수교육과정 중 사고대응관련 비상조직의 교육내용

구분		교육내용
공통	모든 비상조직	<ul style="list-style-type: none"> - 방사능방재 일반 - 방사선 방호

담당직무	교육내용	해당 비상조직	
		실	반/조
사고완화 및 평가	- 중대사고	비 상 기 술 지 원 실	비상기술지원실장
	- 사고분석 및 평가 - 노심손상 평가		기술지원반 안전분석조
			방사선대책반 방사화학조
	- 방사선사고 확대방지를 위한 응급조치 • 비정상운전절차서 • 비상운전절차(EOP) • 중대사고		운전지원반 운전지원조
			비상운전반 비상운전조
			운전지원반 비상기술지원실 파견조
	- 보수 및 복구조직의 운영 - 긴급정비	OSC	정비계획반장
			정비계획반 정비계획조
			기계반
			전기반
계측제어반			
		정비지원반	



표 7-23 운전원에 대한 비상운전절차서 교육

교육과정	교육시기	교육시간	교육시행부서
EOP 초기교육	최초 핵연료장전 이전	충분히 교육하는데 소요되는 기간	<ul style="list-style-type: none"> - 발전운영팀 - 인재개발원 - 본부 훈련센터
EOP 재교육	년 2회 운전원 재교육 기간중		
개정 EOP 교육	PNSC 승인 후 3주 이내 중요 개정사항은 즉시 교육계획 수립 및 시행		

표 7-24 비상운전절차서 교육과정별 교육내용

교육과정		교육내용	교육방법
EOP 초기교육	MCR 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - EOP 개발과정 - EOP 구성 및 체계 - EOP 사용 - FSAR 15장 사고분석 - 각(변경된) EOP의 사고완화 전략 및 기술배경 - 각(변경된) EOP의 단계별 조치사항 및 기술배경 - 발생 가능한 유형별 사고 및 다중사고 시 비상운전 수행능력 	<ul style="list-style-type: none"> - 강의실 교육 - 현장답사 교육 - 시뮬레이터 교육
	현장운 전원	<ul style="list-style-type: none"> - EOP 구성 및 체계 - 기본적인 사고완화 개념 - 현장답사 교육을 통한 비상운전 관련 기기의 위치확인 및 조작법 	
EOP 재교육	MCR 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 초기교육 내용(EOP개발과정 제외) - 국내외 운전경험 사례 - 주요 EOP 개정사항 - 실제 운전과정에서 나타난 운전원 취약분야 	
	현장운 전원	<ul style="list-style-type: none"> - 초기교육과 동일 	
개정 EOP 교육	전 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - EOP 개정 내용 및 사유 - 변경된 사고완화 전략 및 기술배경 - 변경된 EOP 단계별 조치사항 및 기술배경 - 변경된 EOP에 따른 비상운전 수행능력 	<p>공람문서에 의한 자율 학습 우선 실시 후, 중요 사항에 대해서는</p> <ul style="list-style-type: none"> - 강의실 교육 - 현장답사 교육 - 시뮬레이터 교육

표 7-25 발전주제어실실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

교과목 명	교육훈련 내용	교육시간				비고
		I-상	I-하	II-상	II-하	
EOP, 경험사례, SOER사례 (토의평가)	 - 경험사례-2(국내외 증기발생기 TR 사례) - 경험사례-3 - 경험사례-4(국내외 증기발생기 TR 사례) · 연속감시 불능상태 · N16 미감지 증기발생기 튜브누설 가능성	2	3	2	3	토의
출력변동 및 사고분석	- 2차계통에 의한 열제거 증가/감소 - 원자로냉각재 유량 감소 - 반응도 및 출력분포 이상 - 원자로냉각재 재고량 증가/감소 - 부계통 또는 기기로부터 방사성 물질의 방출	2	-	2	-	강의
비상운전 실습		14	14	14	14	실습

	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>					
실습평가	- 평가시나리오(GOP+AOP+EOP)	3	3	3	3	실습

표 7-26 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

교과목 명	교육훈련 내용	교육시간				비고
		I-상	I-하	II-상	II-하	
비상운전 절차서	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>	2	2	2	2	강의
출력변동 및 사고분석	<ul style="list-style-type: none"> - 구성 및 방법론 - 2차계통에 의한 열제거 증가/감소 - 원자로냉각재 유량 감소 - 반응도 및 출력분포 이상 - 원자로냉각재 재고량 증가/감소 - 부계통 또는 기기로부터 방사성물질의 방출 	2	-	2	-	강의
비상운전 실습 참관 및 토의	- 비상운전 참관 및 토의	2	2	2	2	실습

표 7-27 중대사고지침서 교육 과정

구분	최초교육	재교육			개정사항 교육	
교육대상	운전원 및 방재요원	운전원	운전원 현장 OJT교육	방재요원*	운전원	방재요원
계획수립	발전운영팀	훈련센터	발전운영 팀	방재대책 팀	발전운영팀	
교육시행	발전운영팀	훈련센터	발전팀	훈련센터	발전운영팀	
교육방법	집합교육	집합교육	집합 및 현장실습 교육	집합교육	전과교육	
교육주기	중대사고관 리지침서 최초 승인 후 6개월 이내	6시간/년	4시간/년	6시간/년	수시	

* : 3회 이하의 방사능방재교육(8시간/년) 이수자

표 7-28 중대사고관리지침서 교육과정별 교육내용

교육과정		교육내용	교육방법
중대사고관리지침서 최초 교육	MCR 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 중대사고관리지침서 개발과정 - 중대사고관리지침서 구성 및 체계 - 중대사고관리지침서 사용자 지침 - 중대사고관리지침서의 사고완화 전략 및 기술배경 - 중대사고관리지침서의 단계별 조치사항 및 기술배경 	<ul style="list-style-type: none"> - 집합교육 - 현장실습교육 - 공람을 통한 전과교육
	현장 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 중대사고관리지침서 구성 및 체계 - 기본적인 사고완화 개념 - 중대사고 완화운전 관련기기의 위치확인 및 조작법 	
중대사고관리지침서 재교육	MCR 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 초기교육 내용(중대사고관리지침서개발과정 제외) - 국내외 운전경험 사례 - 주요 중대사고관리지침서 개정사항 - 실제 운전과정에서 나타난 운전원 취약분야 등 	
	운전원 현장 OJT 교육	<ul style="list-style-type: none"> - 보직별 해당 중대사고관리지침서 Review - 보직별 현장 기기위치 확인 및 조작법 습득 	
	현장 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 중대사고관리지침서 구성 및 체계 - 기본적인 사고완화 개념 - 주요 중대사고관리지침서 개정사항 	
중대사고관리지침서 개정 사항 교육	전 운전원	<ul style="list-style-type: none"> - 중대사고관리지침서 개정내용 및 사유 - 변경된 사고완화 전략 및 기술배경 - 변경된 중대사고관리지침서 단계별 조치사항 및 기술배경 - 변경된 중대사고관리지침서에 따른 중대사고 완화운전 수행방법 	

표 7-29 발전주제어실/현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

교과목 명	교육훈련 내용	교육시간				비고
		I-상	I-하	II-상	II-하	
노심손상 완화 (중대사고)	<ul style="list-style-type: none"> - 노심손상완화(MCD) 전망 - 노심수위저하 감시기 - 노심용융현상, 노심손상 감시 - TMI 교훈 - 중대사고관리지침서 개요 및 중대사고 현상 - 국내외 운전경험 사례 - 중대사고관리지침서 및 기술배경(개정내용) - 응급, 제어, 완화, 감시, 종료, 계산표 - 시나리오 교육 및 시뮬레이터 실습 	5	3 2	5	3 2	강의 실습

표 7-30 소외전원 상실 사고대응 전략 (시나리오 1)

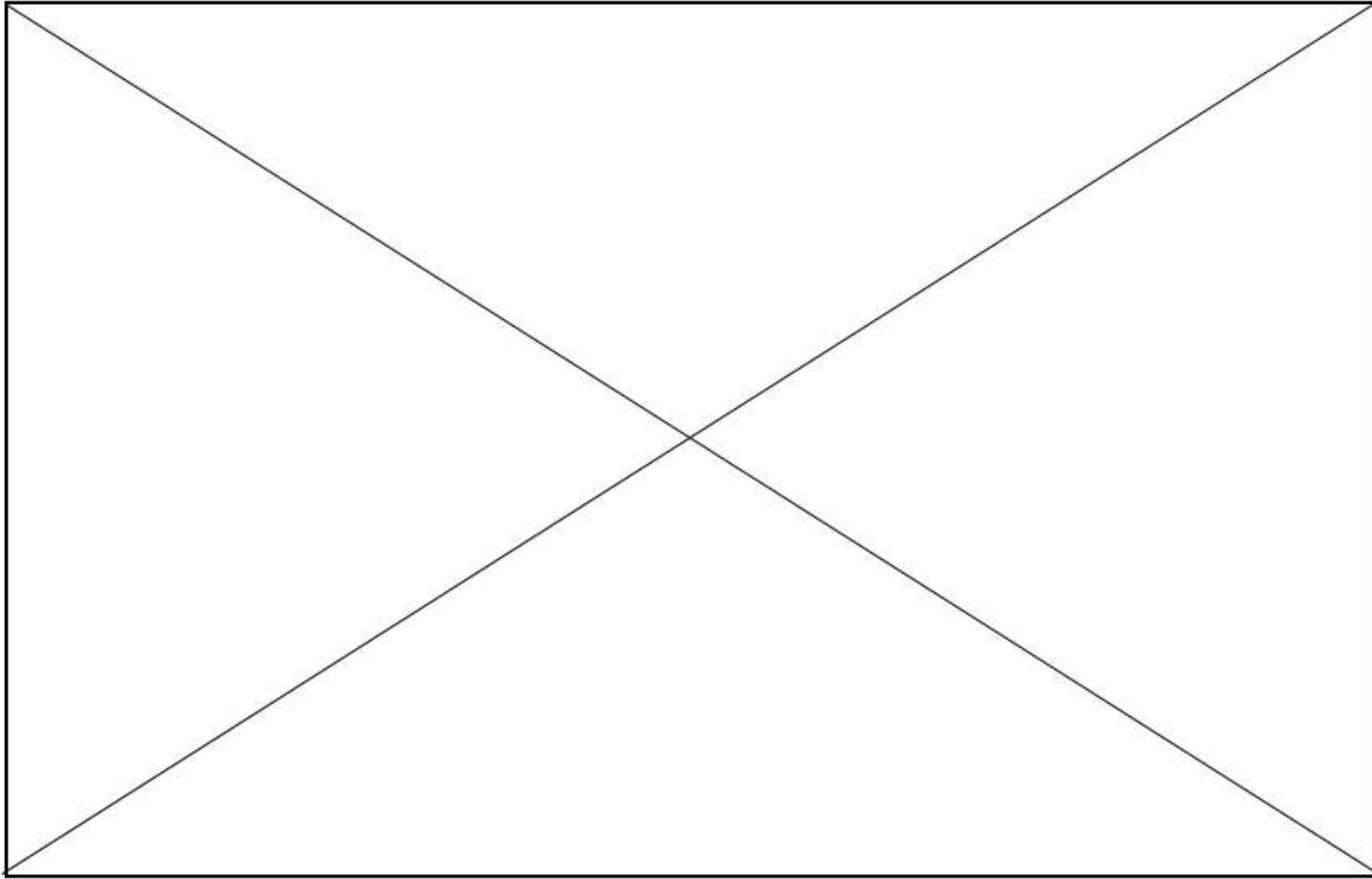


표 7-31 소내정전 사고대응 전략 (시나리오 2)

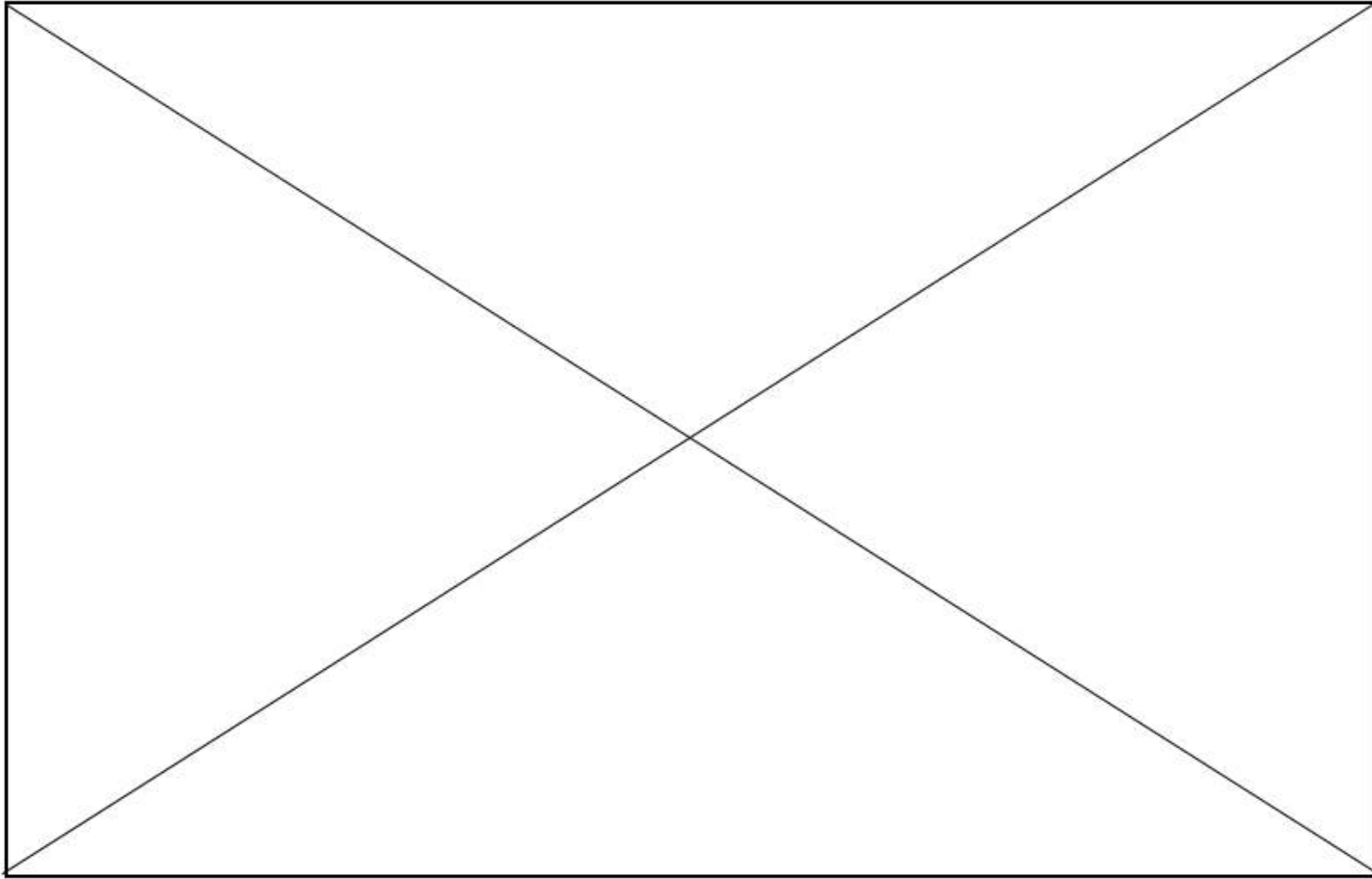


표 7-32 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 사고대응 전략 (시나리오 3)

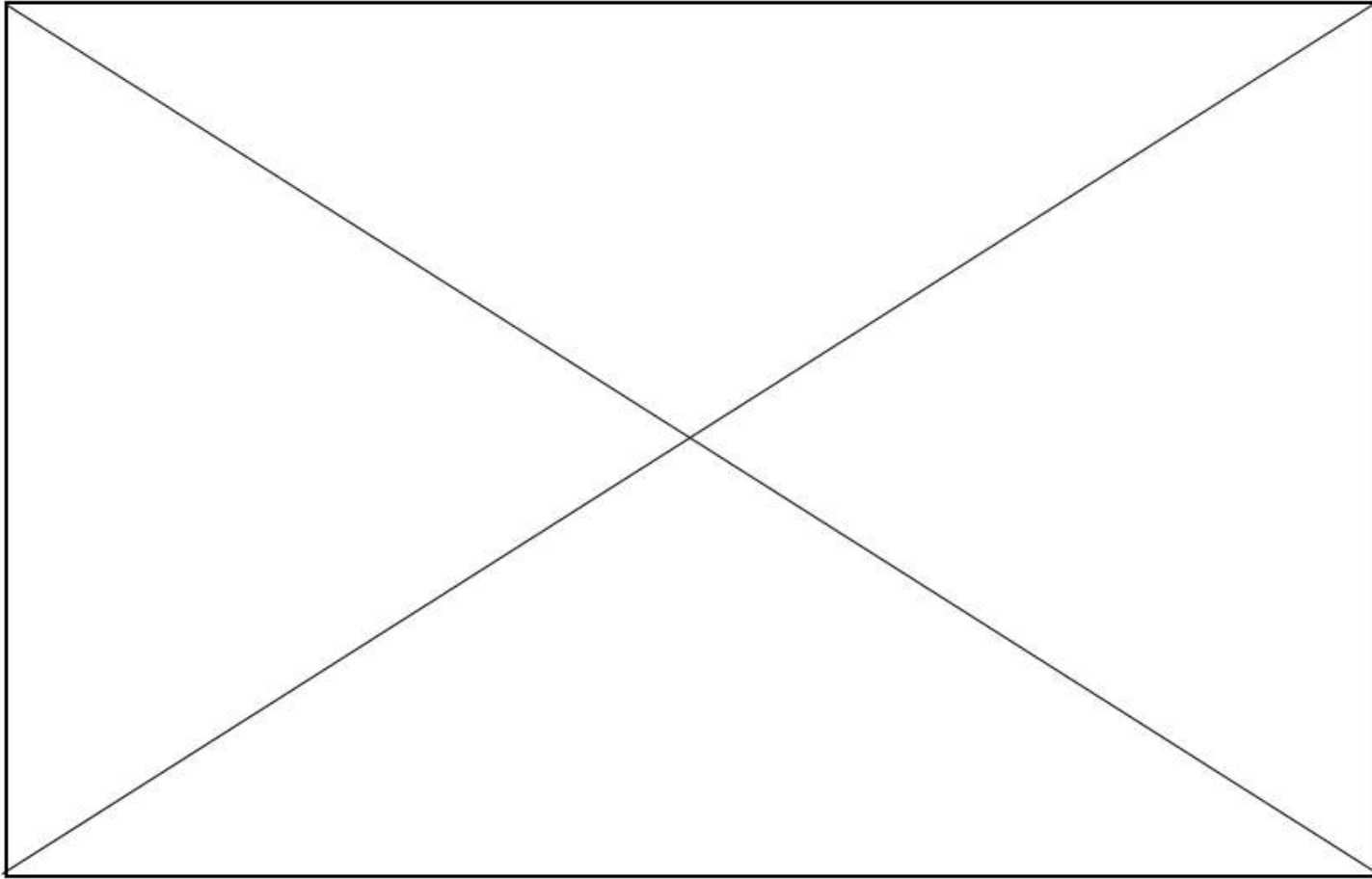


표 7-33 최종열제거원 상실 사고대응 전략 (시나리오 4)

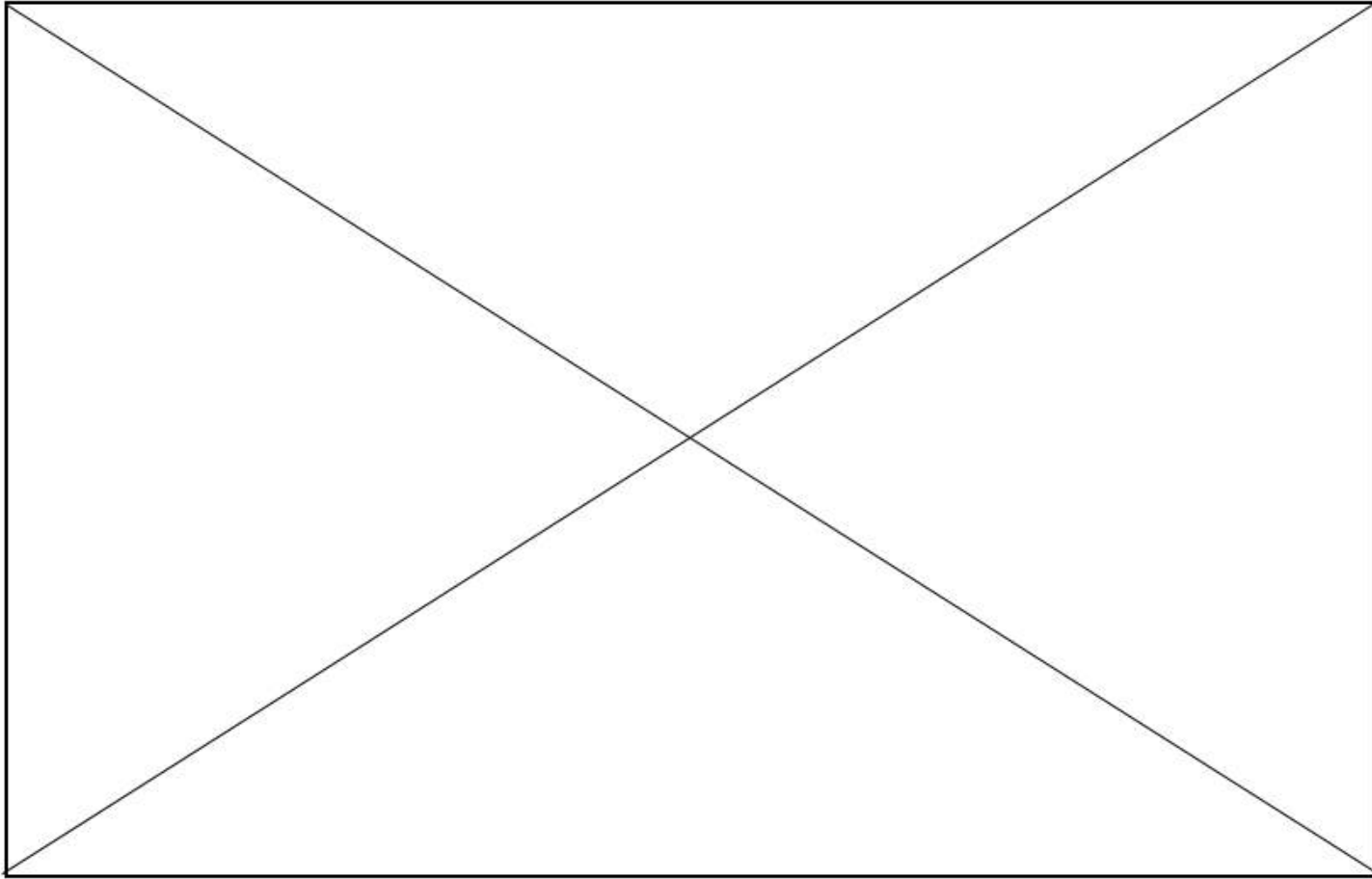


표 7-34 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 사고대응 전략 (시나리오 6)

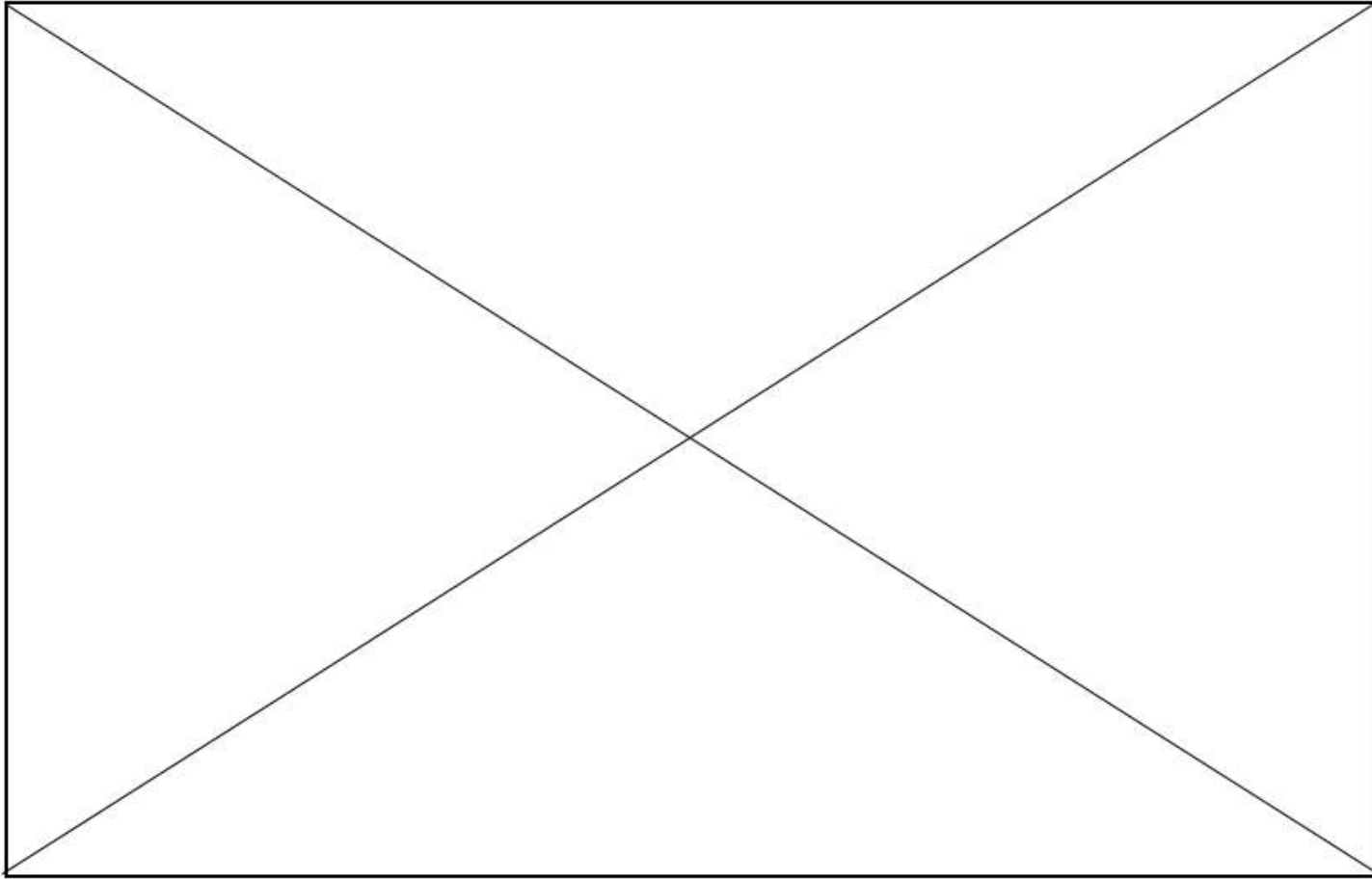


표 7-35 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 사고대응 전략 (시나리오 9)

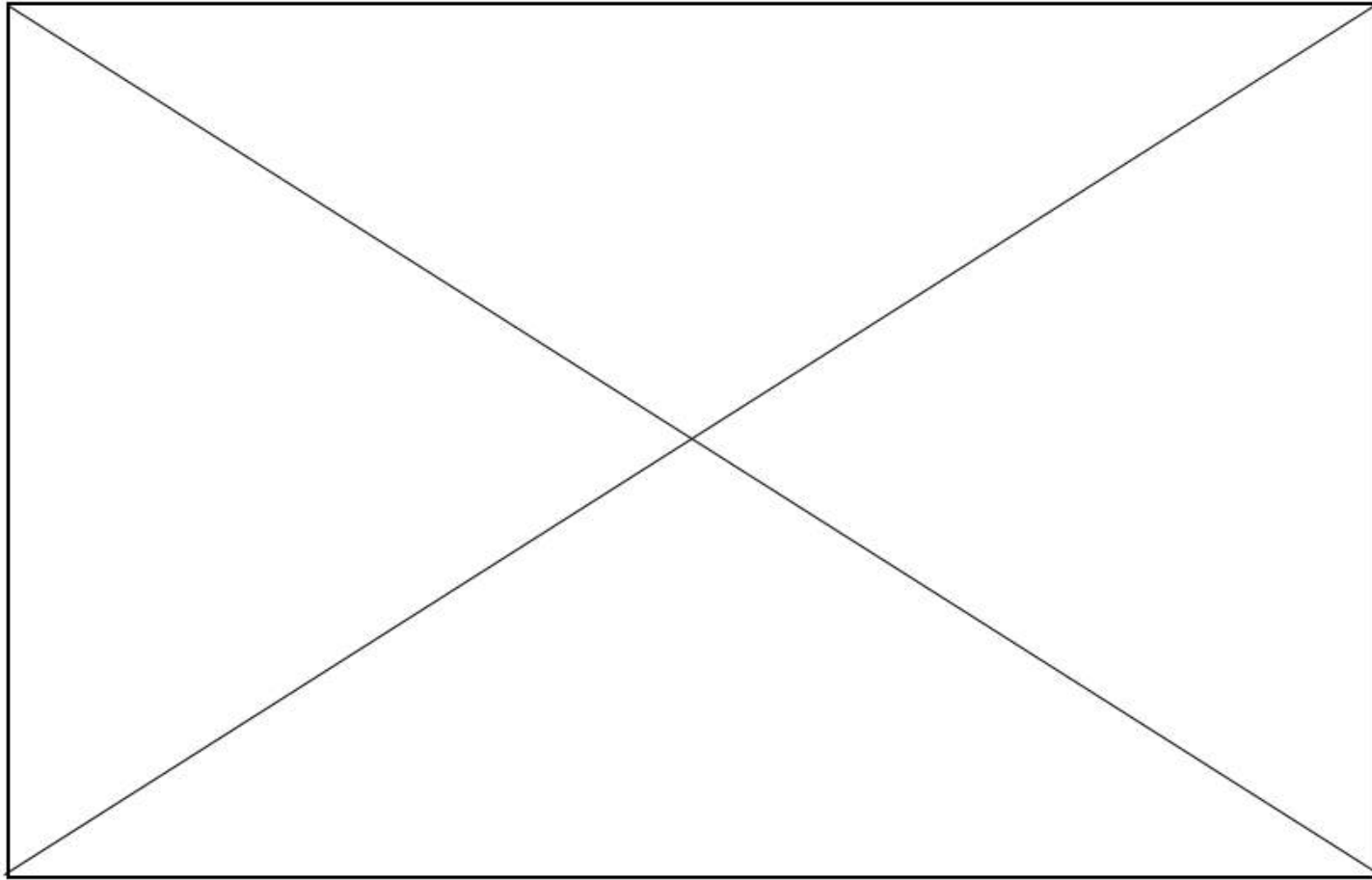


표 7-36 중대사고 사고대응 전략 (시나리오 10)

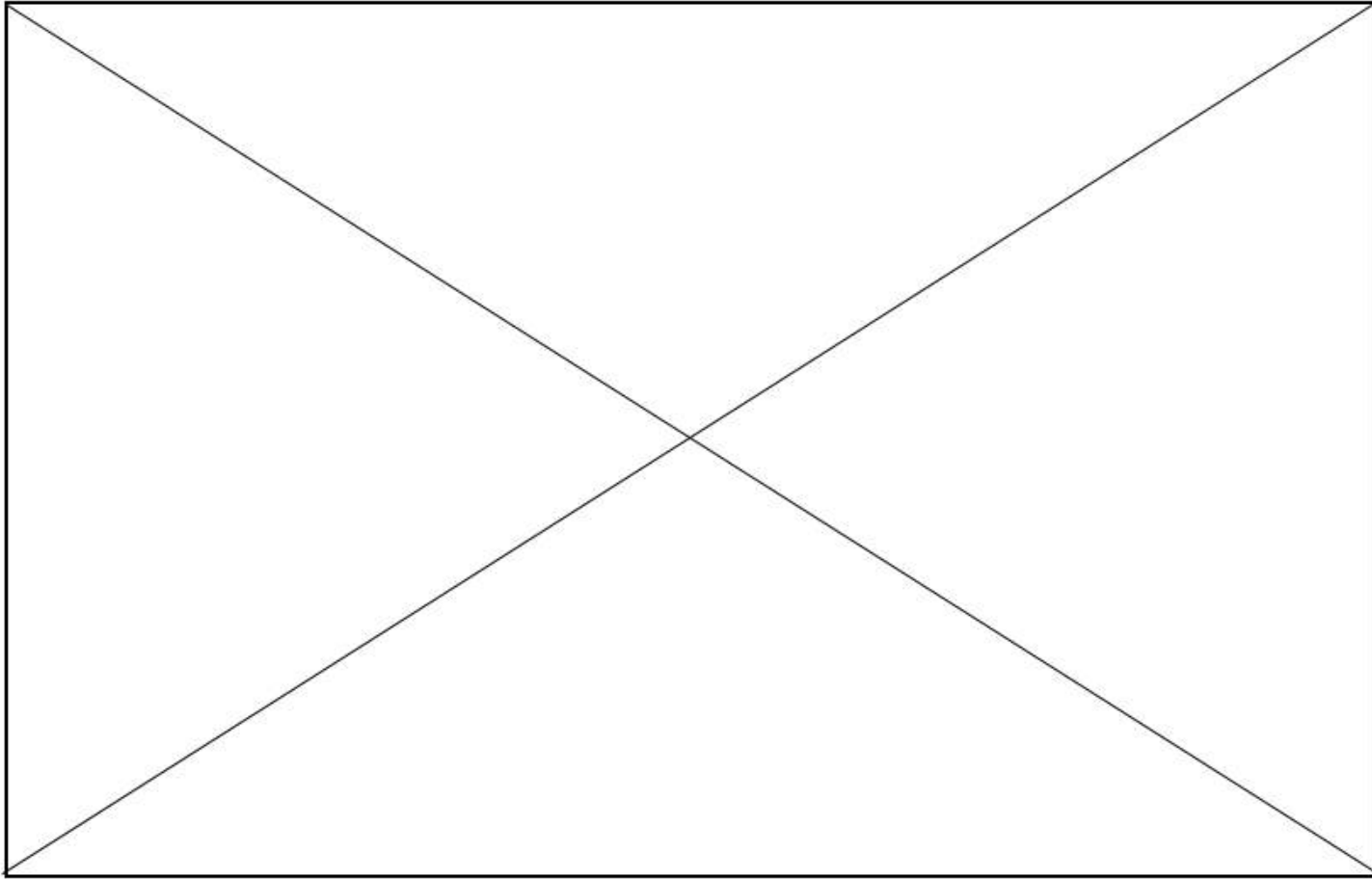


표 7-37 월성1호기 스트레스트 테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

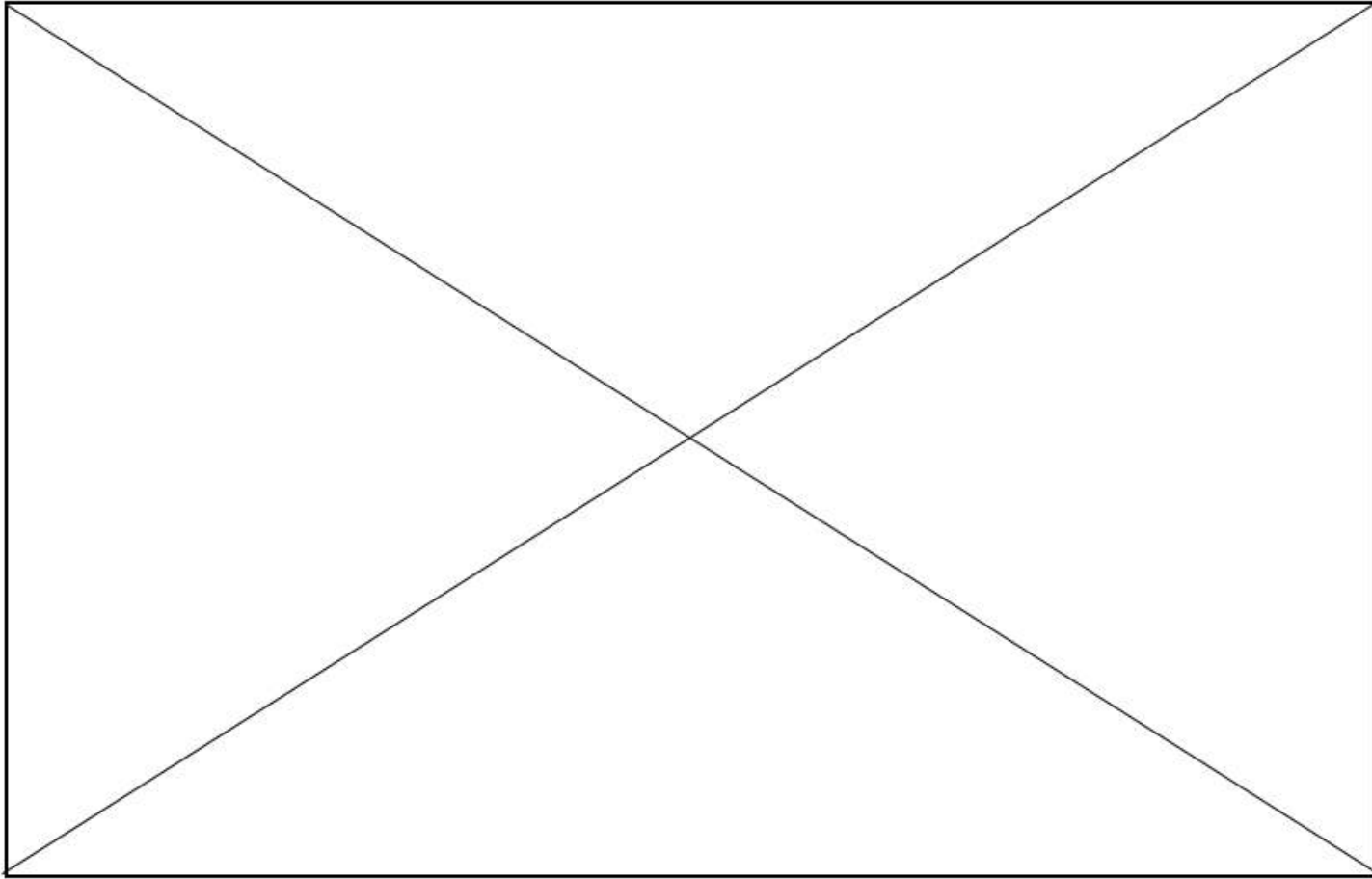
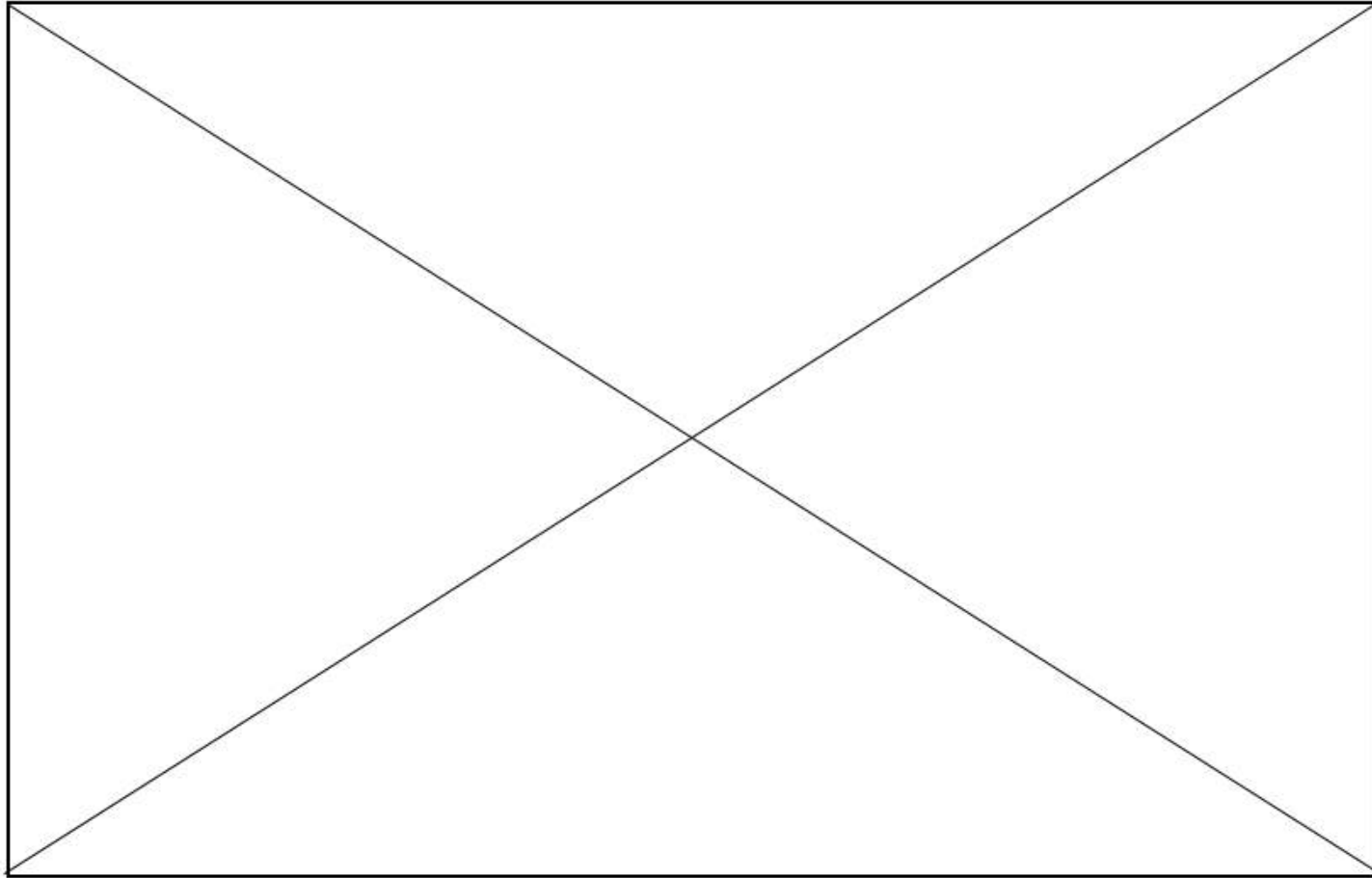


표 7-38 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인



제8장 종합 결론

목 차

제1절 종합 결론	1
제2절 후쿠시마 후속대책 사항	10
제3절 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항	14

제1절 종합 결론

한울 3,4호기 스트레스테스트는 원자력안전위원회의 “원전 스트레스테스트 수행지침 (개정1, ‘16.10.)”에 따라 다음과 같이 6개 분야로 평가하였다.

- 설계기준 초과 극한자연재해의 특성
- 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성
- 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력
- 중대사고 관리능력
- 방재 및 비상대응능력
- 운영기술 능력

한울 3,4호기 스트레스테스트의 분야별 주요 평가결과는 다음과 같다.

1.1 설계기준 초과 극한자연재해의 특성

스트레스테스트 수행지침에 따라 한울 3,4호기 설계기준지진의 수준과 타당성을 평가하고, 설계기준 초과 지진과 관련하여 발전소의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준까지 평가하였다. 또한 지진과 수반되는 지표단층 작용, 사면붕괴 등의 지반변형 가능성도 함께 검토하였다. 그리고 지진 이외의 홍수(지진해일, 폭풍해일, 강수 등), 강풍, 저수위, 수온상승 등에 대하여 설계기준 자연재해의 수준 및 타당성을 평가하고, 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준까지 설계기준 초과 자연재해의 수준을 평가하였다.

한울 3,4호기 안전정지지진(0.2g)은 한울부지 반경 320 km내 11개의 지진지체구조구와 읍천단층 및 방사성폐기물처분장 부지단층으로부터 잠재적인 최대지진을 평가하여 결정하였으며, 울진해역지진 및 확률론적지진재해도(PSHA) 평가결과 등에 근거했을 때 설계기준지진은 타당한 것으로 검토되었다.

지반변형에 의한 안전성 검토 결과 한울 3,4호기 부지 반경 8 km 내에서는 활동성 단층이 확인되지 않아 지표단층 작용으로 인한 변형은 발생하지 않을 것으로 검토되었다. 또한 안전관련 구조물 하부 지반에서는 액상화현상이 일어나지 않으며, 재현주기 10,000년 빈도 지진동(0.18g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서는 영구사면 안정성을 유지할 수 있고 침하 영향도 없을 것으로 평가되었다.

한울 3,4호기 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준해수위와 가능최대강우에 의한 침수 등 설계기준 홍수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있다. 또한 상기 설계기준 홍수 수준은 후쿠시마 후속조치로 수행된 ‘원전부지 설계기준 해수위 조사·연구’ 용역 결과 및 주기적안전성평가 결과 등과 비교했을 때

유사하거나 보수적으로 검토되어 설계기준으로서 타당하다.

한울3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 및 그로 인한 해수면 상승고를 평가한 결과, 부지 전면 해역에서의 가능최고해수위는 최대 EL.(+)7.781 m이며, 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)8.729 m로 평가되었다.

재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수수준 평가에 적용된 지속시간 1시간의 가능최대강수량 162 mm는 재현주기가 약 90만년에 해당하는 것으로 평가되었다. 상기 강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였다.

부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 순간최대풍속을 평가한 결과 부지의 최대풍속은 62.36 m/s, 최대순간풍속은 84.51 m/s 이다. 한울 3,4호기 부지에서 EF1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있으나 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도를 설계기준초과 토네이도로 고려하였다.

한울 3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최저해수위 평가결과 해수위는 EL.(-)3.65 m로 검토되었다. 한편 설계기준초과 해수온도는 발전소 운영종료 시까지 향후 약 20년을 고려할 경우 기후변화로 인한 수온 상승치 최대 0.8℃를 고려하여, 29.7℃로 예상되었다.

1.2 극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성

설계기준지진 조건에서의 한울 3,4호기의 보호 조치를 검토하고 현장점검 등을 통하여 지진에 의한 간접영향을 확인하였다. 또한 설계기준초과 지진 발생과 관련하여 주요 안전기능의 상실, 핵연료(노심 및 사용후연료) 손상 및 격납기능 관련 설비 건전성 손상을 유발시킬 수 있는 지진의 규모를 평가하고 이에 대한 건전성 평가결과를 제시하였다. 그리고 재현주기 10,000년 수준의 설계기준 초과 지진에 따른 내부홍수에 의한 주요 설비의 침수 발생 가능성을 평가하고 그 결과를 제시하였다.

마지막으로 설계기준 초과 지진 발생에 따른 내부 광역 화재 발생 가능성을 평가하고 이에 따른 필수 대처설비의 건전성을 검토하였다. 한편, 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호 조치를 확인하고, 제2장 보고서에서 평가된 설계기준 초과 홍수 및 자연재해 발생과 관련하여 구조물·계통·기기의 건전성을 평가하였다.

한울 3,4호기의 필수대처기능(안전정지, 노심냉각, 격납건물 격리, 사용후연료저장조 냉각 등)을 수행하는 기기에 대하여 ASME/ANS. Std. 2009에서 제시한 EPRI NP-6041 방법론을 이용하여 현장점검을 수행하였다.

현장점검 결과 대부분의 기기가 건전성에 이상이 없었으며, 도출된 Easy Fix 사항들은 2018년 계획예방정비기간 중에 조치 완료하였으며, 일부 추가 검토나 보강 필요 사항에 대해서도 적절한 조치를 수행중에 있다. 4호기는 2018년 계획예방정비기간 중에 현장점검을 수행하였다. 한편 한울3,4호기에서는 절차서 []에 따라 지진발생시 적절한 운전조치를 취할 수 있으며, 안전정지지진 발생시 한울3,4호기의 대응능력을 확인한 결과, 노심 및 사용후연료의 냉각기능 유지에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

인접한 비내진 구조물·계통·기기(SSC)로 인하여 발전소의 필수대처기능을 수행하는 기기가 손상 받을 가능성을 확인하기 위하여 현장점검을 수행하였다. 점검 결과 구속되지 않은 소화기, 경량부착물, 작업도구, 크레인 체인 등 일부 경미한 사항이 발견된 것 이외에, 다른 모든 필수대처기능 수행 기기는 인접 비내진 구조물·계통·기기로부터의 영향은 없는 것으로 확인되었다.

확률론적지진재해도 분석 결과 한울 3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 수준의 지진은 영주기 수평지반가속도가 0.18g인 지진으로 평가되어 설계기준지진인 0.2g에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 본 평가에서는 설계기준지진을 초과하는 지진동에서의 발전소 대응능력을 평가하므로 설계기준 지진동을 초과하는 구조물 및 기기의 고유 내진성능을 분석하였다.

내진성능은 결정론적 파손내력평가방법 또는 변수분리법을 적용하여 개별 설비의 고신뢰도저파손확률(HCLPF)을 평가하였으며, 기존 지진 PSA 결과 값과 후쿠시마 후속조치로 수행된 “원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역”의 내진성능 값을 활용하였다. 또한 추가 분석이 필요한 기기는 발전소 고유 지진으로 ASME/ANS Std. 2009에서 제시한 NUREG CR-0098 및 방법론을 활용한 평가를 수행하였다.

내진성능 평가결과 모든 안전관련 구조물의 HCLPF 내진성능은 0.5g 이상인 것으로 확인되었으며, 필수대처기능을 수행하는 기기들의 내진성능 평가결과 대부분 기기의 HCLPF 내진성능이 0.3g 이상 확보하는 것으로 검토되었다. 대상기기 중 밸브, 계측기 등은 내진검증문서 등을 확인하여 내진성능이 0.5g 이상임을 추가로 확인하였으며, 개별 기기들의 내진성능평가 결과를 2분야 보고서의 표에 상세 제시하였다.

설계기준 초과지진에 의해 발생하는 내부 광역화재 영향 평가 결과, 한울 3,4호기에서 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생 시 필수대처기능의 상실을 초래할 수 있는 5개의 취약지역을 도출하였다.

한울본부는 초동소방대, 자체소방대, 자위소방대가 조직되어 발전소 내 화재진압에 대비하고 있고, 외부소방대와 응원협정을 통하여 발전소 내 화재 확대에 대응한다. 이러한 소내·외 소방대의 화재에 대비한 역량과 추가적인 소내 수동진압능력 개선 사항이 완료될 경우 한울 3,4호기에서 발생하는 안전정지지진을 초과하는 지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가되었다.

한울 3,4호기 내부 침수 방호 설계에서 고려된 격납건물 내부 침수 수준(대형 냉각재 상실사고 고려 등)은 실제 설계기준초과 지진발생 시에 격납건물 내부에서 발생할 수 있는 침수 수준보다 크므로 지진에 의한 격납건물 내부 침수 영향은 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 안전관련 구조물에서의 내부 침수 방호 설계 중 유체이송계통 배관 파손 가정시에 대부분의 내진설계 된 배관들이 0.5g 이상의 내진성능 값을 가짐에도 불구하고 완전 파단 및 관통 균열 등으로 인한 파손을 가정하였으므로 설계에서 고려된 내부 침수 수준은 실제 설계기준초과 지진발생 시에 안전관련 구조물 내부에서 발생할 수 있는 침수 수준보다 크며, 지진에 의한 내부 침수 영향은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

한울 3,4호기의 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준 해수위와 가능최대강우에 의한 침수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있어 별도의 침수 방지 설계와 설비는 요구되지 않는다. 그럼에도 불구하고 발전소는 태풍, 호우, 강풍, 지진해일 등의 상황시 자연재해 예방점검 절차에 따라 주요 구조물·계통·기기에서 안전기능의 저하가 발생하지 않도록 적절한 점검과 운전조치를 취하고 있는 것으로 나타났다.

한울 3,4호기 부지에 영향을 줄 수 있는 동해 동연부(일본 서쪽 해안 지역)의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 및 그로 인한 해수면 상승고를 평가한 결과, 가능최고 해수위는 EL.(+)7.781 m로 검토되었으며, 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0 m보다 낮으므로 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었다. 한편 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)8.729 m로 평가되었고, 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0 m보다 낮으므로 태풍(폭풍해일)에 의한 침수영향이 없는 것으로 나타났다.

재현주기 10,000년을 초과하는 가능최대강수에 의한 홍수 수준평가에 적용된 지속시간 1시간의 가능최대강수량 162 mm는 재현주기가 약 90만년에 해당하는 것으로 나타났다. 상기 강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였다. 한울 3,4호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전관련 구조물 출입구에 2019년까지 방수문을 설치할 예정이므로 침수를 방지할 수 있으나 현재 방수문 설치를 위한 조치가 진행 중이므로 추가적인 물리적 방호조치 등의 안전개선사항을 수행할 예정이다.

한울 3,4호기 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 순간 최대풍속을 평가하고, 이에 따른 풍압을 계산하여 안전관련 구조물의 안전성에 미치는 영향을 검토한 결과 설계 시 고려한 풍하중과 지진하중의 차이에 의해 구조물에 미치는 영향은 없는 것으로 검토되었다.

한울 3,4호기 부지는 발전소의 서쪽이 산지에 막혀 있는 특성을 고려한다면 부지에서 EF1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있다. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 EF2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 것을 가정하여 구조물·계통·기기의 안전성을 평가하였고, 평가결과 토네이도 비산물이 안전정지 기기를 수용하고 있는 구조물에 충돌해도 구조물의 외부 콘크리트 벽체에는 관통이 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

한울 3,4호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 동해동연부(일본 서해안)에서 지진해일 발생 시의 EL.(-)3.65 m이다. 한울 3,4호기의 1차 기기 냉각해수펌프는 펌프의 최소 잠김요건(EL.(-)3.632 m)을 만족하도록 설계되어 있어, 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 이보다 약 2 cm가 더 낮으므로 해수 취수가 불가하여 최종열제거원이 상실될 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 경우에도 발전소는 안전정지 및 유지가 가능하고 노심 냉각 기능을 확보할 수 있으며, 관련한 발전소의 대응능력은 스트레스테스트 보고서 제4장(전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력)에 상세히 기술되어 있다. 한편 부지의 설계기준초과 해수온도는 29.7℃로 평가되었으며(기후변화 영향 포함), 이 온도는 FSAR의 최종열제거원의 최고 설계 해수온도인 88.8°F(31.5℃) 보다 낮으므로 해수온도 상승이 최종열제거원에 미치는 영향은 없을 것으로 검토되었다.

1.3 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력

한울 3,4호기 스트레스테스트 평가분야 중 전력계통 등 필수대처기능 상실에 대한 대응능력을 평가하기 위하여 필수대처기능 유지 및 복구를 위한 설비를 조사하고, 소외전원상실·소내정전·최종열제거원상실 조건에서의 6개 시나리오와 여기에 지진해일·해일 및 강우·10,000년 빈도를 초과하는 지진의 극한자연재해를 동반한 3개 시나리오를 추가로 고려하여, 총 9개 시나리오에 대하여 한울 3,4호기의 대응능력을 평가하였다.

소외전원상실·소내정전·최종열제거원상실 조건에서의 6개 시나리오 중 가장 제한적인 시나리오는 모든 교류전원 및 최종열제거원이 동시에 상실되는 경우(시나리오 6)이다. 해당 조건에서의 필수대처기능 유지를 위해 필요한 주요설비 및 이를 지원하는 보조설비들을 도출하여 발전소의 대응능력을 평가하였고, 소내 고정형설비, 이동형설비 및 소외자원을 활용하여 발전소를 안전하게 정지할 수 있음을 확인하였다.

그리고 해당 설비들의 극한자연재해 조건에서의 가용성을 확인한 결과 모두 가용한 것으로 평가되어, 한울 3,4호기는 극한자연재해를 동반한 모든 교류전원 및 최종열제거원의 동시 상실 조건에서도 발전소의 자체 대응능력과 운전원의 적절한 대응조치를 통해 안전하게 정지될 수 있음을 확인하였다.

운전원 대응조치 사항을 절차화하기 위해 설계기준사고, 설계기준초과사고 및 중대사고와의 유기적인 연계지침서를 개발하고 비상운전절차서 등을 보완할 예정이며, 이를 바탕으로 훈련을 수행하면 인적오류와 의사결정오류 발생 가능성을 배제할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 각 시나리오에 대한 필수대처설비, 절차서 및 운영사항에 대한 적절성을 확인하기 위해, 세부 수행 시나리오를 개발하여 인간공학 유효성 평가를 수행할 예정이다.

1.4 중대사고 관리능력

극한자연재해 시 중대사고 진입을 예방하기 위한 여러 설비들이 의도된 기능을 발휘하지 못하여 중대사고가 발생했다고 가정하고, 중대사고 발생 시 대처 능력이 가능한지 여부를 확인하였다. 이를 위해 본 평가에서는 노심냉각기능·원자로건물 건전성·사용후연료저장조 냉각기능의 확보방안 및 동 기능 상실시 중대사고 관리방안에 대해 평가하였다.

중대사고 시 연료손상 전·후 및 원자로용기 손상 이후 사고완화를 위한 노심냉각기능 확보 방안을 평가하였다. 중대사고 시 노심냉각기능 확보는 비상운전절차서 및 중대사고지침서의 절차에 따라 이루어진다.

연료손상 발생 전 사고관리 대응은 비상운전절차서에 규정된 절차 및 수단에 따라 이루어지며, 사고의 징후 및 유형별로 대응함으로써 노심냉각기능을 확보하도록 하고 있다. 연료손상 이후는 중대사고관리지침서

전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다. 원자로용기 손상 이후에는 중대사고관리지침서 전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다.

중대사고 시 격납건물 건전성 확보를 위해 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지, 수소폭발방지, 격납건물 과압방지, 재임계 방지 및 격납건물 바닥 용융관통 방지방안을 평가하였다. 격납건물 격리기능은 전원상실시 고장 닫힘(Fail Closed) 기능을 갖춘 자동잠김 밸브 혹은 체크밸브(Check Valve) 등을 통해 이중 격리 기능을 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서 전략을 통해 확보되는 것으로 평가되었다.

격납건물 우회사고의 경우 중대사고관리지침서 [] 전략을 통해 격납건물 외부로의 핵분열생성물 방출을 최소화 할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다. 한울 3,4호기는 중대사고에 대처 가능한 피동축매형수소 재결합기를 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서 [] 전략을 통한 추가적인 수소폭발 방지 대응능력을 갖추고 있는 것으로 평가되었다.

격납건물 과압방지의 경우 중대사고관리지침서 []에 따라 격납건물살수계통 및 팬냉각기 등을 이용한 격납건물 과압을 방지할 수 있는 것으로 평가되었다. 노심 재임계 방지의 경우 사고 진행과정에서 보충수가 주입되는 상황에서도 재임계 가능성은 없으며, 중대사고관리지침서 []의 장기 관심사항으로 냉각수 주입으로 인한 봉산 희석감시 및 봉산수 주입전략을 제공하여 재임계 방지능력을 확보하는 것으로 평가되었다.

바닥 용융관통 방지의 경우 원자로공동이 노외로 방출된 노심용융물 냉각을 보장하기 위한 바닥면적을 확보하고 있고, 중대사고관리지침서 [] 전략 및 중대사고관리지침서 [] 전략을 통해 원자로 공동으로 냉각수를 주입할 수 있도록 되어 있어 격납건물 바닥 용융관통을 완화하기 위한 능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

사용후연료저장조 냉각기능 평가에서는 사용후연료저장조의 냉각 기능이 상실되는 경우에 대한 사고 시나리오를 평가하였다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 사고는 방사선 차폐기능 상실, 연료 냉각기능 상실, 연료 손상 전·후 등의 사고 진행에 따라 비정상운전절차서 및 중대사고관리지침서 전략을 수행하여 냉각수를 주입함으로써 완화가 가능한 것으로 평가되었다. 특히 극한자연재해 시 방사선 차폐기능이 상실되기 전에 이동형펌프를 통해 비상보충수 충수를 함으로써 사용후연료저장조의 냉각기능을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

중대사고 관리방안에 따라 중대사고 관리전략이행에 필수설비와 해당 설비의 기능유지를 위해 필요한 보조설비를 제시하고 사고 시나리오에 따른 필수 설비들의 신뢰성 및 가용성을 파악하기 위해 세부 설계사항을 제시하였다.

극한자연재해에 의한 중대사고 시 사고관리 저해요소를 발전소 접근성, 운전원 거주성, 사고환경에서의 작업장애, 통신설비 및 체계 건전성 측면에서 평가하였다.

사고관리 저해요소를 고려한 중대사고 대응능력 평가를 위해, 감압설비(가압기 안전감압밸브(SDS밸브) 및 증기발생기 압력방출밸브), 안전주입계통, 정지냉각계통, 보조급수계통, 이동형펌프, 이동형발전차 및 비상냉각수 외부주입설비 등을 고려하여 발전소 대응능력을 평가하였다. 평가결과 극한자연재해 및 소내전력이 장기간 상실되어 중대사고가 발생하였을 경우에도 이동형발전차를 통한 소내전원공급, 그리고

이동형펌프를 이용한 1·2차측 비상냉각수 주입 전략을 이행함으로써 사고관리 저해 요소로 인한 대응능력 한계상황에서도 충분히 대응할 수 있는 것으로 평가되었다.

1.5 방재 및 비상대응능력

한울 3,4호기 스트레스트스트 평가분야 중 “방재 및 비상대응능력”을 평가하기 위해 주민 보호조치를 위한 선량평가 및 환경방사선·능의 감시능력, 소 내·외 인력과 장비를 통한 대응능력, 장기 정전사고 시 통신체계의 건전성 등을 평가하였다.

비상대응능력과 관련하여 단일호기 또는 다수호기 사고 시 S-REDAP을 이용하여 주민예상피폭선량을 평가한다. S-REDAP의 사용불능 시 수계산으로 대체할 수 있는 절차를 방사선비상계획수행절차서에 반영할 예정이다. 전산프로그램 운영요원의 전문성을 확보하기 위한 교육과 훈련도 적절하게 이루어지고 있으며, 자체인력 및 외부 방재대책 기관의 인력에 대하여 다수호기 사고에 대비한 방호조치의 계획 및 절차가 적절하게 수립되었고, 이들을 위한 방호장비도 적절한 수량이 확보되어 있다. 또한 타 부지(월성 등)를 비롯한 외부기관의 지원인력 및 장비는 극한자연재해 시에도 필요한 시간 이내에 가용한 접근 방법을 통하여 한울부지에 지원이 가능한 것으로 검토되었다.

장기 소내정전사고 시 발전소 안전변수는 주제어실 및 비상기술지원실에서 필수 안전기능감시계통(CFMS)을 통하여 확인된다. 비상통신설비는 전화, 팩스, 방송설비, 인터넷 등 다양한 수단으로 구성되며, 극한자연재해 시에도 발전소의 통신체계가 유지될 수 있도록 위성전화를 보장하였다.

장기 소내정전사고 시 방사선 비상발령 조건에 해당하는 경보를 확인하기 어렵거나 사용후연료저장조 냉각기능이 상실되었을 경우에도 방사선 비상발령기준은 적절하게 설정되어 있는 것으로 평가되었다. 환경방사선·능 감시는 기존에 설치되어 있던 고정형 환경방사선감시기를 통하여 수행하며, 극한자연재해 상황에서 고정형감시기의 사용이 불가능할 경우를 대비하여 이동형감시기 및 감시차량을 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

의사결정 적절성과 관련하여 비정상운전절차서, 비상운전절차서, 비상대체설비 운영절차서, 중대사고관리지침서, 그리고 방사선비상계획서에 수립된 의사결정권자의 책임 및 임무, 적용 시기 등은 서로 상충하지 않고 적절하게 기술된 것으로 평가되었다. 또한 방사선비상계획서에 다수호기 동시사고 발생 시 조직 및 책임이 적절하게 수립되었으며 이동형발전차, 이동형펌프 등 비상대체설비의 사용 결정과 관련된 부분에서 의사결정권자의 권한 규정은 적절한 것으로 평가되었다.

비상대응시설의 거주성과 관련해서는 장기 소내정전 시 주제어실의 거주성 확보를

위하여 비상공기정화계통은 이동형발전차 등으로부터 전원을 공급받을 계획이며, 극한자연재해나 방사능 누출사고 인하여 비상대책실, 비상기술지원실, 비상운영지원실의 거주성이 상실될 경우를 대비하여 후쿠시마 후속조치로 한울본부에 소내 비상대응거점 시설을 건설할 계획이다.

한울 3,4호기는 후쿠시마 원전사고 이후 단일호기 또는 다수호기 동시사고 비상대응조직 및 의사결정권자의 체계화, 장기 비상상황 대비 비상장비의 추가 확보, 운전원의 중대사고 교육을 포함한 방사능방재훈련의 강화, 비상대응시설 개선 등으로 비상대응 관련 안전성을 더욱 향상시켰다. 따라서 한울3,4호기는 극한자연재해에 의한 단일호기 또는 다수호기 동시사고에도 충분한 방재 및 비상대응능력을 확보한 것으로 평가되었다.

1.6 운영기술 능력

한울3,4호기의 스트레스테스트에서 평가결과의 일환인 사고대응전략 및 주요 운전원조치 그리고 주요 자원(조직/인력, 절차서, 설비 등)에 대해 적절성을 확인하고, 인간공학 유효성평가를 통해 한울3,4호기가 스트레스테스트에서 고려한 사고 시나리오에 대해 대응이 가능한지와 인적오류 유발가능성에 대해 인간공학 관점에서 종합적으로 평가하였다. 또한 다수호기 동시사고와 관련하여 사고대응전략, 주요 운전원조치, 주요 자원에 대한 적절성 확인을 수행하였다.

사고대응전략 수립의 적절성은 한울3,4호기 스트레스테스트 3분야 및 4분야에서 수립된 사고 시나리오가 각 필수대처기능 상실을 고려하고 이를 복구하기 위한 수단 및 전략이 적절한 것으로 평가되었다. 그리고 필수대처기능은 비상운전절차(EOP) 및 중대사고관리지침(SAMG)에서 고려하고 있는 안전관련 기능이 근거이며, 수립된 사고시나리오의 대응전략을 이행하기 위한 연계사항(설비-설비, 설비-절차서, 설비-조직/인력 등)의 연계 항목은 적절한 것으로 평가되었다.

본 스트레스테스트에서 도출된 주요 운전원조치는 이행 가능한 것으로 평가되었다. 그리고 주요 운전원 조치 행위에 대한 직무분석 결과 사고상황에서 운전직무의 부담은 크지 않은 것으로 평가되었으나, 운전원의 취수구 상태 확인의 시간 초과에 대한 가능성이 있어 안전 개선사항을 도출하였다.

주요 자원의 적절성은 본 스트레스테스트 6분야 사고대응전략 수립의 적절성 및 주요 운전원조치의 적절성에서 도출된 주요 운전원조치를 수행하기 위한 주요 자원(고정형 설비, 이동형 설비, 절차서/지침서, 인력(소·내외 조직 포함), 교육훈련 프로그램 등)에 대한 평가를 수행하여 주요 자원의 활용이 가능함을 평가하였으나, 일부 인간-기계 연계설비, 절차서, 주제어실 인력, 교육 및 훈련 분야에서 안전 개선사항을 도출하였다. 하지만 일부 도입 예정인 극한자연재해 사고대응을 위

한 설비(이동형 설비)에 대해서는 가동원전 스트레스테스트 2단계에서 추가 검토할 예정이다.

인간공학 유효성 평가는 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원 조치 및 주요 자원 적절성 평가결과를 토대로 실제 한울3호기 이행가능성을 포함한 운영기술능력을 종합 평가하기 위해 한울3호기 3개 발전팀의 인간공학 실증 실험을 수행하였다. 또한, 발전팀의 인간공학 실증 실험과 함께 사고 시나리오 가정사항 및 사고대응전략, 직무부하, 상황인식, 운전원 협업, 인적오류, 평가현안 설문에 대한 분석 및 평가를 수행하였다. 인간공학 유효성 평가 결과 한울3,4호기는 극한자연재해에 대한 사고대응이 가능한 것으로 평가 되었으나, 일부 인간-기계 연계설비, 절차서, 주제어실 인력, 교육 및 훈련 분야에서 안전 개선사항을 도출하였다.

다수호기 동시사고 시 대응능력 평가는 한울본부에 귀속된 한울 1~6호기에 동시 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한울3,4호기 비상대응방안의 실현가능성을 평가하였다. 다수호기 동시사고를 고려한 사고대응전략의 적절성 평가를 위해 운영기술능력 평가에 활용된 총 10개의 시나리오를 검토하였으며, 다수호기 동시사고에도 한울3,4호기 비상대응방안의 실현은 가능한 것으로 평가되었으나, 사고초기 대응에서 이동형발전차의 운영과 관련된 문제점이 발생하여 안전개선사항을 도출하였다.

제2절 후쿠시마 후속대책 사항

국내 전 원전을 대상으로 안전점검을 수행한 결과 정부의 추가항목 3건을 포함하여 총 59개 안전개선사항이 도출되었다. 이중 한울3,4호기와 관련된 후쿠시마 후속대책 추진현황은 다음과 같다.

2.1 정부 발굴 안전개선사항

- 지진 자동정지설비 설치(관리번호 1-1)
일정규모(0.17g) 이상 지진 감지 시 원자로를 자동정지 시킬 수 있도록 지진원자로 자동정지시스템 설치 완료
- 안전정지 유지계통 내진성능 개선(관리번호 1-2)
안전정지유지기능에 필요한 기기에 대한 내진성능 평가 및 내진성능 값 0.3g 미만 기기 보강 조치
 - 총 1,765개 기기 평가, CVCS VCT는 내진보강 및 DC MCC는 내진성능 입증 시험 수행
- 원전부지 최대지진에 대한 조사, 연구(관리번호 1-3)

- 원전 부지에 대한 최대지진 조사·연구 수행 완료
- 주제어실 지진발생 경보창의 내진성능 개선지(1-4)
지진발생 시 주제어실 운전원에게 알릴 수 있도록 내진등급 경광등 설치 완료
- 방수문 및 방수형 배수펌프 설치(2-2)
설계기준 초과 대형 해일 발생 시 비상전력계통 등 주요 안전설비 침수 방지를 위한 설비개선 중
- 원전부지 설계기준 해수위 조사연구(2-3)
부지에 대한 설계기준 해수위 조사·연구 수행 완료
- 냉각해수 취수능력 강화 및 해일대비 시설 개선(2-4)
원전부지 설계기준 해수위 조사연구(관리번호 2-3) 결과 후속조치 개선사항으로 평가결과 한울 3,4호기에 대한 추가 개선사항 없음
- 이동형 발전차량 및 축전지 등 확보(3-1)
소외전원을 포함한 모든 교류전원이 상실되는 경우 필수부하에 전원을 공급하기 위한 이동형발전차 구비 및 이동형발전차 이용에 필요한 전원 연결점 설치 완료
- 대체비상발전기 설계기준 개선(3-2)
AAC DG 용량에 대한 적절성 평가 수행
- 예비변압기 앵커볼트 체결(3-3)
예비변압기 앵커볼트 체결 완료
- 스위치야드 설비관리 주체 개선(3-4)
한국전력공사와 비상연락체계, 업무분장 및 긴급 자재조달 등에 대한 전원복구 절차 수립 완료
- 사용후연료저장조 냉각기능 상실시 대책확보(3-5)
냉각기능 상실 시 SFP 충수 수단 및 방법을 절차화 및 외부로부터 충수할 수 있는 배관 설치 완료
- 최종 열제거설비 침수방지 및 복구대책 마련(3-6)
침수 방지와 복구에 대한 절차 수립 및 인허가 승인 완료
- 옥외 설치 탱크 방호벽 설치(3-7)
원전부지 설계기준 해수위 조사연구(관리번호 2-3) 결과 후속조치로 완료
- 주증기안전밸브실 및 비상급수펌프실의 침수방지 대책 마련(3-8)
방수문 및 방수형 배수펌프 설치(2-2)에 포함되어 진행 중
- 소방계획서 개선 및 협력체계 강화(3-9)
소방계획서 개정 및 지역 소방서와 연 1회 이상 합동훈련을 실시하는 등 협력 체계 강화
- 화재방호설비 및 자체소방대 대응능력 개선(3-10)
대응인력 증원 등 조치 완료
- 원전 성능위주 소방설계 도입(3-11)
소방방재청-원자력안전위원회 원전특성을 고려한 별도 화재안전기준 제정 합의
- 피동형수소제거 설비 설치(수소감시설비 포함)(4-1)
수소감시설비 기 설치 및 피동축매형수소재결합기(PAR) 추가 설치 완료

- 격납건물 배기 또는 감압설비 설치(4-2)
중대사고시 격납건물 내 과도한 압력상승을 방지하기 위한 여과/배기 설비로 한울 3,4호기는 2020년 12월까지 설치 완료 예정
- 원자로 비상냉각수 외부 주입유로 설치(4-3)
원자로 냉각기능 상실시, 1,2차 측에 외부주입유로를 설치하여 비상냉각수를 주입하는 설비로, 설계개선 추진 중
- 중대사고 교육훈련 강화(4-4)
교육훈련에 대한 기본계획 수립 및 각 사업소 통보, 교육훈련은 절차서 [redacted]에 따라 정기적으로 수행
- 중대사고 관리지침서 개정(4-5)
중대사고 관리지침서 개정 완료
- 정지저출력 중대사고 관리지침서 개발(4-6)
정지저출력 중대사고관리지침서를 반영한 통합 중대사고관리지침서(ISAMG) 개발 완료
- 원전인근 주민보호용 방사선방호 장비 추가 확보(5-1)
주민보호용 방호용품, 갑상선 약품, 방호호흡장구 등 추가 확보 완료
- 다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상계획서 개정(5-2)
원전 방사선비상계획서에 반영 및 개정승인 완료
- 장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보(5-3)
방호용품 및 방사선 계측기 등 추가 확보 완료
- 방사선 비상훈련 강화(5-5)
방사선 비상대응능력을 제고하기 위해 연합훈련, 합동훈련, 전체훈련, 부분훈련 등 4가지 종류 방사능 방재훈련 절차화([redacted]) 및 주기적 실시
- 장기전원상실시 필수 정보의 확보방안 강구(5-6)
이동식 발전기를 통한 전원 연결을 위해 연결점 설치 완료 및 견인식 발전기에 대한 실증시험 완료
- 보수작업자 방호대책 확보(5-7)
보수 협력사 종사자도 절차서([redacted])에 따라 방호관리가 될 수 있도록 절차화 및 보수 협력사 방재교육 및 훈련강화 방안 수립
- 비상대응시설개선(5-8)
비상기술지원실 및 비상운영지원실 비상전원 확보 완료
- 방사선 비상시 정보공개 절차 개정(5-9)
방사선비상계획서 및 방사선비상계획서 수행절차서 개정 완료
- 비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가(5-10)
비상계획구역 밖 주민보호조치를 위해 다수호기 동시사고를 고려한 방사선량평가 통합시스템(S-REDAP) 개발 완료
- 비상 경보시설의 성능강화(5-11)
크로샷 비상전원 확보 및 UPS 설치를 통해 방송설비 보강
- 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진(6-7)

과거 고장사례 및 발전정지 유발 사례를 분석하여 관련 절차서 개정 완료, 협력업체 인적오류 예방 및 정비용역 품질 확보를 위한 종사자 교육훈련용 정비아차사례집 발간 및 보급

○ 구매 품질보증 체계 점검강화(6-10)

원자로 정지를 유발할 수 있는 기기에 대해 결함부품 사용방지를 위한 구매시방서 품질요건 및 설계변경사항 피드백 조항 반영

2.2 정부 추가발굴 안전개선사항

○ 극한재해에 대비 설비보강(추가-1)

전 가동원전 스트레스테스트 수행과 연계하여 추진할 예정이며, 스트레스테스트 결과로 도출된 안전개선사항에 대해 설비 보강 예정

○ 중대사고 시 사고대응 및 수습관리를 위한 비상대응조직 운영(추가-2)

중대사고 교육훈련 강화를 바탕으로 사고 시 전문적으로 기술지원을 할 수 있는 조직(SAFE-T) 운영 중

○ 사고대응 요원보호 및 지휘·통제에 필요한 비상대응거점 확보(추가-3)

사고 수습 및 총괄을 위한 원전 부지별 면진기능을 갖춘 소내 비상대응거점 설치 완료할 예정(2021.12.)

2.3 한수원 자체발굴 안전개선사항

○ 용수 공급관로 내진성능 평가(1-A1)

원수조로부터 물처리실까지의 용수관로에 대한 내진성능 평가 완료

○ SFP 수위, 온도, 방사선 계측기의 안전등급 적용(3-A1)

SFP 수위, 온도, 방사선 계측기 내진설계 된 안전등급으로 교체

○ SFP 비상전원 확보관련 기술지침서 개정(3-A2)

가동원전 운영기술지침서 개정 및 인허가 승인 완료

○ 이동형 디젤구동펌프 확보(4-A1)

이동형 디젤구동펌프 확보 및 본부 내 배치 완료

○ 비상 충수용 장거리 호스 확보(4-A2)

직경 65mm(2.5inch) 15m x 70개, 직경 100mm(4inch) 15m x 123개 배치 완료

○ 광역재해완화지침서(EDMG) 개발(4-A3)

발전소 고유 EDMG 개발 완료

○ EOP-SAMG 연계지침서 개발(4-A4)

비상운전절차서(EOP) 수행 후 중대사고관리지침서(SAMG) 진입 전 조치할 수 있는 지침서 개발 완료

○ 장기 전원상실 대비 비상 통신설비 확보(5-A1)

전 가동원전에 위성전화기가 설치되었으며, 한울본부 비상경보 방송용 장비에 무정전설비(UPS) 추가 설치 완료

제3절 극한자연재해 대응을 위한 안전개선사항

후쿠시마 후속대책 외에도 한울 3,4호기 스트레스트스트를 통해 검토된 극한자연재해에 대한 발전소 대응능력을 더욱 강화하기 위해 아래와 같이 안전개선사항을 추가로 도출하였다.

설계기준 초과 극한자연재해의 특성 평가와 관련하여 한울 3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전개선사항은 다음과 같다.

- 9.12지진을 반영한 확률론적지진재해도 분석(PSHA) 추가 수행
2016년 발생한 9.12지진을 반영하여 2018년 10월까지 PSHA를 추가로 수행하고, 기존 분석 결과와 비교 예정
- 설계기준초과 지진 발생시 영구사면 안정성 평가 및 침하 안전성 평가
설계기준지진인 0.2g를 초과하는 지진동 발생 시 한울 3,4호기 영구사면의 안정성을 평가하고, 침하 안전성과 관련하여 설계기준초과 지진동 발생 시에 안전관련 구조물 기초 하부 암반 지지력의 적절성을 검토함

극한자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성 평가와 관련하여 한울 3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전개선사항은 다음과 같다.

- 내진 현장점검 결과 도출된 예외기기에 대한 후속조치
한울 3호기 및 한울 4호기(2018년) 내진 현장점검 결과 도출되는 조치 필요 기기에 대하여는 내진 건전성 확보를 위한 적절한 조치 수행 예정
- ASME PRA Standard 2009를 활용한 SSC 내진성능 평가
한울 3,4호기는 ASME PRA Standard 2009에 따라 필수 대처설비에 대한 내진 현장점검을 수행하였으며, 추가 평가는 2019년까지 수행 예정
- 가능최대강우 시 구조물의 홍수 방호조치
가능최대강수량에 의한 안전관련 구조물의 침수영향 평가결과 구조물의 출입구에서 침수심이 출입구 표고보다 높아 침수가 발생할 수 있는 것으로 검토됨
 - 방수문 설치(2019년) 이전에 침수 발생 가능 출입구에 대하여 물리적인 침수 방호조치 및 발전소 절차서 반영 등을 통해 침수영향이 발생하지 않도록 조치 예정
- 필수대처기능 상실 가능지역 화재방호설비 개선
지진화재 발생 시 필수 대처기능 상실 초래가 가능한 취약지역으로 도출된 5개 지역에 대하여 다음과 같은 개선조치 수행 예정
 - 취약지역 내진비상조명등 설치
 - 화재순찰자, 운전원, 자체소방대원의 이동경로에 내진비상조명등 설치
 - 취약지역의 화재발생시 조기감지를 위한 내진화재감지설비 설치
 - 화재발생시 대응 관련 절차서 개발
- 소내 수동진압능력 개선

- 광역화재에 대비한 소내 수동진압능력 증진과 관련하여 다음의 개선조치 수행 예정
- 자체소방대 건물 내진 보강 시 내진 화재경보시스템 구축
 - 자체소방대 건물 내진 보강
 - 화재순찰조 편성 운영

전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가와 관련하여 한울 3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

- 최종열제거원 복구를 위한 이동형고유량펌프 확보
최종열제거원상실에 대처할 수 있는 이동형고유량펌프 확보
- 사고대응 절차서 및 지침서 보완
모든 교류전원 완전상실과 최종열제거원 상실을 고려한 비상운전절차서 보완
- 480 V 소형 이동형 발전기 확보
480 V 소형 이동형 발전기를 확보하여, 필요시 소용량 이동형발전차에 연결되지 않은 안전모선 계열에 교류전원을 공급하여 모든 안전주입탱크 격리밸브를 제어할 수 있도록 설비보강 예정
- 원자로냉각재펌프 밀봉회수배관 냉각재 누설 방지 설계개선
모든 교류전원 상실시 원자로냉각재펌프 밀봉회수배관 후단에 설치된 방출밸브 격리밸브는 고장 열림(Fail Open)으로 지속적인 냉각재 누설을 초래할 수 있으므로 원자로냉각재 누설을 최소화하기 위한 개선대책 마련 예정

중대사고 관리능력 평가와 관련하여 한울 3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

- 사용후연료저장조 추가 비상살수수단 확보
극한자연재해 시 방사선 차폐기능이 상실되기 전 이동형펌프를 통해 비상보충수를 충수함으로써 사용후연료저장조 냉각기능을 확보할 수 있는 것으로 평가되었으나, 추가로 이동형 고압살수차를 확보하여 사용후연료저장조 상부에 살수함으로써 사용후연료저장조 냉각수 손실로 인한 연료손상 예방능력 강화 예정
 - 격납건물 대체 살수수단 확보
극한자연재해로 인한 중대사고 시 격납건물 건전성은 확보되는 것으로 평가되었으나, 추가로 이동형 고유량펌프를 확보하여 전원상실 시 격납건물 내부 살수기능 및 핵분열생성물 방출제어 기능 강화 예정
 - 대형 이동형발전차를 이용한 살수 기능 회복, 추가로 살수설비 확보 및 이를 통한 격납건물 감압기능 강화 가능
 - 또한, 살수 된 냉각수는 중력에 의해 원자로공동으로 자연충수되므로 중대사고 진입(표 5-13 분석결과 참조) 전 원자로 공동을 침수시켜 노심용융물-콘크리트 반응(MCCI)을 완화할 수 있음
- ※ 해당 이동형 고유량펌프는 4장의 최종열제거원 복구전략에 사용되는 이동형

고유량 펌프를 공용으로 사용 예정

방재 및 비상대응능력 평가와 관련하여 한울 3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

○ 방사선비상계획서 및 방사선비상계획 수행절차서 개정

주민예상피폭선량평가 프로그램 사용 불능 시 주민예상피폭선량 수계산 절차 및 사용후연료저장조 수위변화에 따른 적색비상 발령조건을 추가한 방사선비상계획서 및 방사선비상계획 수행절차서 개정 예정

운영기술 능력 평가와 관련하여 한울3,4호기 스트레스트스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

○ 사고대응전략 보완

인간공학 유효성 평가시 1 MW 이동형발전차 A계열 안전모선에서 분리한 다음 3.2 MW 이동형발전차를 다시 A계열 안전모선에 연결하는 과정에서 이동형발전차가 교체설치되는 기간 동안 발전소 정전상황이 발생하여 1 MW 이동형발전차 연결 이후 3.2 MW 이동형발전차 연결을 위한 전략을 수정할 예정이다.

○ 설비 보완

취수구 수위 증가 상황인지를 위한 주제어실 고-수위 경보 설치와 주제어실의 격납건물 온도 지시계()의 내진보강 및 1E급 전원수전이 가능한 설비개선을 수행 예정이다.

원자로 냉각재 펌프 제어누출 헤더밸브()의 밸브형식 변경 및 전동기구동 밸브에 변환기 전원 수전이 가능하도록 개선예정이며, 이동형발전차의 케이블 및 단자대 손상방지를 위한 단자함 영구설치, 그리고 다중방어운영지침서와 관련된 소내 장비들의 별도 표식 등의 개선 예정이다.

이동형설비 보완은 케이블 설치 간소화 및 인적오류 방지를 위한 케이블 전극 표시 방법에 대한 개선 예정이다.

비상기술지원실 설비 보완은 발전소의 상태를 지속적으로 파악하기 위해 발전소의 상태를 체계적으로 정리할 수 있도록 비상기술지원실의 화이트보드를 이용하여 주요 발전소 변수를 시간대 별로 기록할 수 있도록 개선 예정이다.

1차측 현장운전원의 경우 방사선관리구역 내로 진입할 경우 주제어실과의 통신이 어려워짐에 따라 1차측 현장운전원의 방사선관리구역에서도 통신이 가능

하도록 통신 설비를 개선 예정입니다.

○ 절차서 보완

안전 개선사항에 따라 보완이 필요한 절차서 및 지침서의 건수는 아래와 같으며, 추후 발전소 설비 및 이동형 설비의 개선에 따라 보완 예정입니다.

- 비상운전절차서 : 9건
- 비정상운전절차서 : 2건
- 계통운전절차서 : 4건
- 중대사고관리지침서 : 1건
- 다중방어운영지침서 : 4건

○ 교육/훈련 보완

설계기준초과 및 극한자연재해 사고 상황에 대응하기 위해 도입되는 다양한 이동형 설비 활용 사고대응 전략 이행 교육훈련 프로그램은 현재 계획 수립 중에 있으며, 본 스트레스테스트의 교육훈련프로그램 평가 및 인간공학 유효성 평가를 통해 확인된 교육훈련 개선 필요사항을 반영할 예정입니다.

○ 조직/인력 보완

설계기준초과 및 극한자연재해 사고 상황에 대응하기 위해 주제어실 발전과장 충원을 예정하고 있으며, 이동형 설비에 대한 운영조직 구성보완 및 다수호기 동시사고의 초기대응을 위한 조직 구성을 보완 예정입니다.

안전개선사항들의 이행 완료 시, 극한자연재해 상황에서 한울 3,4호기의 사고대응 능력은 더욱 강화될 것이다.