# 한빛 1,2호기
# 스트레스테스트 수행보고서

(공개용)

2018. 8.

친환경 에너지 기업

한국수력원자력(주)

# 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 ····· 19

제8절 그림 ····· 20

# 그림

그림 1-1 한빛 1,2호기 부지 배치도 ····· 20

# 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[1-1]. 또한, 원안위는 이와는 별도로 사고관리계획서 개발 및 제출 의무를 법제화함으로써 복수의 규제요건으로 다수 호기 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 한빛 1,2호기 스트레스테스트 평가를 수행하게 되었다.

또한, 원자력안전법 제20조(운영허가)에 따라 2019년 6월까지 원안위에 제출해야 하는 사고관리계획서와 병행하여 동시에 규제요건을 만족할 수 있도록, 본 평가에서는 사고관리계획서개발 과정에서 수립된(2017.4.) “다수호기 극한재해 사고관리전략(MACST : Multi-barrier Accident Coping Strategy)”을 적극 활용하였으며, 한빛 1,2호기 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 가정하에 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 가정하에 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.

한빛 1,2호기 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・소내정전・최종열제거원 상실조건에서의 사고 시나리오 및 예비전력공급원 지속시간 등 발전소 대응능력을 평가하였다.

중대사고 관리능력 평가분야에서는 노심냉각기능・격납건물 건전성・사용후연료저장조 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 한빛 1,2호기 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 안전개선사항을 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

발전소의 설계 및 건설, 시운전은 한국수력원자력(주)의 주관하에 수행되었으며 설계 및 구매, 시공관리 기술지원 용역은 미국의 벡텔사가 수행하였다. 핵증기공급계통은 미국의 웨스팅하우스사가 공급한 3개의 냉각재 유로를 갖춘 가압경수로형(PWR)이며 스틸라이너(steel liner)를 갖춘 프리스트레스트 콘크리트 구조물 내부에 수용되어 있다.

핵증기공급계통의 열출력은 2,912 MWth이며 이때의 터빈발전기 출력은 1,067 MWe이다. 터빈은 Simens AG and Alstom, 발전기는 두산중공업이 공급하였다.

한빛 1,2호기의 주요 연혁은 아래와 같다.

○ 1981.12.17 : 1,2호기 건설허가
○ 1982. 3. 5 : 1호기 격납건물 최초 콘크리트 타설
○ 1985.12.23 : 1호기 운영허가
○ 1986. 1.31 : 1호기 초임계도달
○ 1986. 8.25 : 1호기 상업운전
○ 1986. 9.12 : 2호기 운영허가
○ 1986.10.14 : 2호기 초임계도달
○ 1987. 6.10 : 2호기 상업운전

이외에 한빛 1,2호기에서는 다음과 같은 설비개선들이 수행되었다.

○ 1차기기냉각해수계통 여과기 신설(1992)
○ TMI 후속조치 관련 계측제어설비 설치(1992)

○ 증기발생기 신형 누설감시기 설치(1995)
○ 주제어실 경보계통 설비개선(1995)
○ 원자로냉각재펌프 내부 체결볼트(TVCS) 교체(1995)
○ 원자로 상부 내장물 제어봉 안내관 지지핀 재질변경(1999)
○ 주증기/주급수 격리밸브 제어회로 이중화(1999)
○ 비상디젤발전기 신뢰도 향상을 위한 예측정비시스템 설치(2002)
○ 연료건물 기중기 보조 호이스트 설치(2002)
○ 원자로냉각재 감시설비 교체(2002)
○ 원자로정지불능 예상과도상태(ATWS) 완화설비 신설(2003)
○ 한빛 1,2호기 저압터빈 교체(2007)
○ 한빛 1,2호기 일차기기냉각수열교환기 교체(2007)
○ 주보조변압기 교체(2007)
○ 한빛 1,2호기 주발전기 여자기 교체(2007)
○ 한빛 1,2호기 고압터빈 내장품 교체(2007)
○ 한빛 1,2호기 원자로 헤드 코노씰 설비개선(2008～2009)
○ 한빛 1,2호기 2차기기냉각수열교환기 교체(2009)
○ 한빛 1,2호기 비상디젤발전기 여자시스템 개선(2009)
○ 한빛 1호기 비상디젤발전기 여자시스템 교체(2010)
○ 저압터빈 교체(2013)
○ 지진원자로자동정지시스템(ASTS) 설치(2013)
○ 피동촉매형수소재결합기 설치(2013)
○ 원전 안전정지유지계통 내진성능 보강공사(2016)

## 제4절 부지특성

한빛 1,2호기는 행정구역상 전라남도 영광군 홍농읍 계마리 514(홍농로 846)에 소재하고 있다. 지정학적으로는 한반도의 남서해안에 위치하며 좌표는 북위 35°24.3′, 동경 126°24.6′이다[1-2].

발전소 부지는 광주광역시의 서북방의 한반도 남서해안에 위치하고 있다. 부지의 동쪽으로는 한빛3,4,5,6호기가 인접하여 위치하고 있으며, 부지 주변에는 큰 하천은 없다. 부지가 해안에 위치하기 때문에 파랑에 의한 해수위와 냉각수계통 설계를 고려하여 주요 안전관련 구조물이 위치한 본관건물 지역의 부지는 인천평균해수면 기준 EL.(+)10.0 m로 정지되었다.

한빛 1,2호기의 냉각수 취배수 방식은 순환수계통과 기기냉각해수계통 모두 표층 취수 및 배수 방식으로 설계되었다. 발전소 부지는 해안에 인접해 있으므로 부지의 수문학적 특성은 서해의 영향을 받으며 발전 냉각수원으로는 해수를 이용한다.

한빛 1,2호기의 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. 발전소 부근의 주요 교통로는 15번 서해안고속국도, 22번 국도 및 842번 지방도이다.

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

## 제5절 설계특성

한빛 1,2호기는 미국연방법 10CFR50 App. A(일반설계기준, GDC)에 따라 설계, 제작 및 건설되었다. 따라서 최근 가동중인 경수로형 원전과 비교할 때 세부적인 설계에서는 차이가 있으나 기본적인 설계개념은 동일하다. 한빛 1,2호기 FSAR 3장에서는 구조물・계통・기기의 설계특성을 기술하고 있으며 다음 11개 항목에 대하여 설명하고 있다.

○ 일반설계기준과의 일치성
○ 구조물·계통·기기의 분류
○ 풍하중 및 회오리바람하중
○ 수위(홍수)설계
○ 비산물 방호
○ 가상 배관 파단과 관련한 동적영향에 대한 방호
○ 내진설계
○ 내진등급 Ⅰ 구조물의 설계
○ 기계계통 및 기기
○ 내진등급 Ⅰ 계측기 및 전기기기의 내진검증
○ 기계 및 전기기기의 내환경설계

한빛 1,2호기 설계에 반영한 주요 내용은 다음과 같다.

○ 어떠한 상태의 부지조건 하에서도 가상 설계기준사고(DBA) 시 안전정지(저온정지) 상태를 유지하도록 설계되었음
○ 어떠한 경우에도 외부로의 방사성물질 방출이 원자력안전위원회 및 미국 원자력규제위원회의 규정에 의해 정해진 제한치를 초과하지 않음
○ 한빛 1,2호기는 한국과 미국의 적용 가능한 법규, 규제지침, 규격 및 표준에 따라 설계, 제작 및 건설되었음. 적용된 주요 규격 및 표준에는 미국기계학회

(ASME), 미국원자력학회(ANS), 미국재료시험협회(ASTM), 미국국립표준협회(ANSI), 미국전기전자기술자협회(IEEE), 미국용접학회(AWS) 등이 있음

한편 건설당시 설계에 적용된 주요 설계기준은 아래와 같다.

○ ASME Code Sec. Ⅲ(1977년판 부터 1979년 여름추록), Div. 1, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components (원자력관련 기기의 설계기준)
○ ASME Code Sec. Ⅱ, Material Specifications(1977년판 부터 1978년 겨울추록, ASME Code에서 적용하는 재료의 특성)
○ ASME B&PV Code Sec. Ⅷ, Division I (Rules for Construction of Pressure Vessels : 압력용기 설계 및 제작 관련 기술기준)
○ ASME Code Sec. Ⅴ, Nondestructive Examination
○ ASME Code Sec. Ⅸ, Welding and Brazing Qualification

## 제6절 주요 설비 및 계통

### 6.1 발전소 배치

한빛 1,2호기 발전소 본관건물은 격납건물, 터빈건물, 보조/제어건물, 비상디젤발전기건물, 기기냉각수건물, 핵연료취급건물 등으로 구성되어 있다. 보조/제어건물은 격납건물을 남쪽에서 둘러싸고 있으며 터빈건물이 격납건물 동쪽 측면으로 보조/제어건물과 인접해 위치해 있다. 1호기와 2호기는 동일한 건물배치로 평행이동형 배치 형태이다. 한빛 1,2호기 부지 배치도는 그림 1-1과 같다.

### 6.2 핵증기공급계통

핵증기공급계통은 원자로, 원자로냉각재계통 및 관련 보조계통으로 구성된다. 원자로냉각재계통은 유로당 각각 하나의 원자로냉각재펌프와 증기발생기가 설치된 3개의 냉각재 유로가 원자로압력용기에 연결되어 있으며 가압기는 원자로냉각재 유로의 고온관과 연결되어 있다. 고압의 원자로 냉각재는 노심에서 생성되는 열을 제거하기 위해 원자로 노심을 통과하여 순환한다.

가열된 원자로냉각재는 원자로압력용기에서 증기발생기로 이동하며 증기발생기는 터빈발전기에 필요한 증기를 생성한다. 원자로냉각재계통은 원자로냉각재가 압력경계 외부로 방출되지 않도록 설계되어 있다.

노심내의 연료는 다영역(multi-region)으로 구성되어 있다. 연료집합체는 연료의 농축도가 모든 집합체에서 같지는 않지만 기계적으로는 동일한 특성을 가진다. 초기 노심장전의 경우 농축도가 다른 3가지의 연료가 사용된다. 연료 교체의 경우는 대략적으로 연료의 1/3 이상이 인출되며 신규 연료와 나머지 재사용 연료는 최적의 출력 분포를 유지하도록 노심에 적절히 배치된다.

제어봉집합체는 원자로 제어를 위해 사용되며 원통형 제어봉 다발로 구성되어 있다. 제어봉은 정해진 연료집합체 내의 안내관(guide tube)을 따라 이동하며 제어봉 다발은 구동장치에 연결되어 노심출력을 조절한다. 원자로냉각재펌프는 웨스팅하우스형 수직 일단 축밀봉형 원심펌프이다.

증기발생기는 인코넬 전열관의 수직 U-튜브 형으로서 습분분리장치는 증기의 습분함량을 0.25% 이하로 유지하도록 되어 있다. 원자로내부구조물은 노심 지지 및 냉각재유로를 유지시키는 역할을 하며 주로 스테인리스강으로 제작되어 있다.

가압기는 정상운전 동안 원자로냉각재계통 압력을 유지하며 발전소 부하변동 동안에 압력변화를 억제하고 비정상 상태시에는 설계한도 이내로 계통압력을 유지한다. 계통 내의 보조계통 기기들은 원자로냉각재 정화 및 보충수 공급, 부식방지와 원자로 제어를 위한 화학제어, 주요 기기 냉각, 원자로 정지시 잔열제거, 비상안전주입 등의 기능을 수행한다.

### 6.2.1 원자로노심

원자로노심은 157개의 핵연료 집합체로 구성되며 핵증기공급계통 전체 열출력은 노심열출력 2,900 MWth와 원자로냉각재펌프열출력 12 MWth을 포함하여 2,912 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 3개의 폐쇄루프로 구성된

다. 각 루프는 고온관 1개, 증기발생기 1대, 저온관 1개 및 원자로냉각재펌프 1대로 구성된다. 가압기가 두 번째 루프의 고온관에 연결되어 있고 안전주입 배관들이 3개의 저온관 및 3개의 고온관 각각에 연결된다.

원자로에서 생성된 열은 1차냉각재에 의해 3대의 증기발생기로 전달되어 터빈발전기를 구동하는 증기를 생산한다. 증기발생기의 전열관(Tube)측으로는 원자로냉각재가 흐르고 쉘(Shell) 측으로는 2차 냉각재가 흐르는 일체형 이코노마이저(Economizer)가 장착된 수직 U-전열관을 갖는 열교환기이다.

## 6.3 공학적안전설비 및 비상계통

공학적안전설비는 원자로냉각재상실사고 등과 같이 예상치 못한 방사성 핵분열생성물질이 원자로계통으로부터 방출되는 가상사고가 발생하는 경우 그 기능이 발휘될 수 있도록 되어 있다. 이들 안전설비는 이러한 사고 시에 10CFR100의 제한치 이내로 유지시킬 수 있도록 사고의 극소화, 통제, 완화 또는 종결시키는 역할을 한다.

### 6.3.1 격납건물계통

#### 6.3.1.1 격납건물살수계통

격납건물살수계통은 설계기준사고 발생시 격납건물 대기로 살수용액을 공급하고 요오드와 같은 핵분열생성물을 제거하여 발전소 외부로의 방사선물질 누출을 최소화 시킨다. 그리고 안전주입모드와 재순환모드 동안 격납건물 대기의 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다.

격납건물살수계통은 100% 용량을 가진 2개의 계열로 이루어지며 각 계열은 각 한 대씩의 펌프 및 살수모관과 살수첨가노즐로 구성된다. 격납건물살수펌프의 취수원은 초기에는 연료재장전수탱크이고, 재순환모드에서는 재순환수조이다. 살수첨가노즐은 살수첨가탱크로부터 취수한다.

#### 6.3.1.2 격납건물

격납건물은 원통형 벽체와 반구형 돔 및 원형의 전면 기초로 구성되었다. 원통형 벽체와 반구형 돔은 수평방향(원환방향) 및 역 U자 형태의 수직방향 텐돈으로 구성되는 포스트텐션닝 시스템에 의해 양 방향으로 프리스트레싱된다. 격납건물 외벽의 내측면은 기밀성 유지를 위해 라이너 플레이트로 피복되어 있다. 기초의 상부에는 콘크리트 바닥 보호 슬래브(fill slab)를 기초 상부의 라이너 플레이트 위에 설치하였다. 격납건물의 외벽 콘크리트는 정상운전 및 사고시 생물학적 차폐역할

을 한다.

격납건물 내부에는 원자로 및 원자로냉각재계통이 설치되어 있으며 냉각재상실사고시에도 24시간 이내에는 주변 환경으로의 방사성물질 누출량이 격납건물 총 자유체적의 0.1%를 초과하지 않도록 설계되었다. 내부구조물은 기기비산물 방호역할을 하며 운전원에 대한 생물학적 차폐역할을 한다.

격납건물은 시험하중 조건, 정상하중 조건, 냉각재상실사고의 비정상하중 조건 및 기타 가혹한 환경조건을 포함하는 모든 가능한 하중조합의 경우에 대하여 건전성을 유지하도록 설계되었다.

격납건물의 설계압력은 4.2 kg/cm$^2$(60 psig)로서 배관 파단사고의 결과로 발생할 수 있는 첨두압력보다 높다. 격납건물의 설계압력은 잔열, 금속-물 반응, 피동형 열제거 등과 같은 열원 및 공학적안전설비의 복합적 효과에 의한 장기적인 압력 과도상태를 초과하지 않는다.

#### 6.3.1.3 격납건물공기냉각계통

격납건물공기냉각계통은 격납건물 대기를 냉각시키고 압력을 강하시키는 역할을 하며 50% 용량 4대의 냉각기가 설치되었다.

### 6.3.2 비상노심냉각계통

비상노심냉각계통은 냉각재상실사고가 발생할 경우에 노심에 비상냉각수를 공급하는 역할을 하며 안전주입탱크, 원심형 충전펌프(고압안전주입), 잔열제거펌프(저압안전주입), 관련 밸브 및 배관으로 구성되어 있다. 비상노심냉각계통은 원자로의 안전정지를 위하여 다음과 같은 조건하에서 작동한다.

○ 원자로냉각재배관 파단 등 냉각재상실사고
○ 제어봉구동장치의 파손으로 인한 제어봉 이탈 사고
○ 주급수 및 주증기계통 배관파단 사고
○ 증기발생기 전열관 파열

이러한 사고가 발생하였을 때 비상노심냉각계통이 그 기능을 확실하게 수행할 수 있도록 주입운전모드시의 단일능동고장이나 재순환운전모드 중의 단일능동고장 또는 수동고장에서도 기능 요건을 만족하도록 설계되어 있다.

### 6.3.3 비상전력계통

#### 6.3.3.1 보조전력계통

비상디젤발전기, 연료이송계통 및 연료저장계통은 2개의 공학적안전설비 계열로부터 보조전력을 공급받는다. 비상디젤발전기는 연속운전시 7,000 kW, 순간작동(2시간)시 7,700 kW의 출력을 낼 수 있다. 한빛 1,2호기에는 각 2대의 비상디젤발전기가 있다.

압축공기(200～250 psig)로 작동되는 2대의 독립된 다중의 공기기동기는 공학적안전설비의 기동신호를 감지하거나 발전기에 연결된 4.16 kV 1E급 모선에 저전압신호가 발생하면 디젤발전기를 자동으로 기동시킨다. 각 디젤발전기는 기동신호를 받은 후 약 10초 내에 정격전압 및 주파수에 도달할 수 있으며 60초 내에 모든 안전관련 설비를 위한 기동과정을 완료한다.

연료장치는 7일 동안 가동할 수 있는 연료를 각 디젤발전기에 공급한다. 연료는 이송펌프에 의해 지하 저장탱크로부터 일일연료탱크로 이송되며 초과된 연료는 저장탱크로 회수된다.

#### 6.3.3.2 비상조명계통

비상조명계통은 원자로의 운전정지나 비상 상황시 필요한 지역에 적절한 비상조명을 제공한다. 적용대상 지역은 주제어실, 보조정지제어반, 현장제어반 등으로 이들 지역은 고온정지 상태로 발전소를 유지하는데 필요한 지역이다.

다른 중요 지역과 긴급대피 통로에서는 안전을 위하여 최소한의 조명이 요구된다. 비상조명은 진동에 안전한 배터리팩이 설치되어 최소 8시간 이상 연속 사용이 가능하다.

### 6.3.4 화재방호계통

화재방호는 화재예방, 화재감지 및 소화의 과정으로 이루어진다. 발전소 건설시 화재발생의 잠재성을 감소시키고 화재시 화염강도를 제한하기 위하여 불연성 및 내열 재료가 사용되었다. 다중 안전계통의 기기들 사이는 발전소가 안전하게 정지될 수 있도록 충분히 격리되어 최소한 1개 계통의 건전성이 유지되도록 하였다. 기기들 사이를 충분하게 격리할 수 없는 경우에는 계통의 건전성을 유지하기 위하여 2개의 안전계통 사이에 방화벽이 사용되었다.

화재방호계통은 다음의 주요 설비를 포함한다.

○ 화재방호용 급수, 옥외배관, 소화전 및 밸브

○ 자동 습식 스프링클러
○ 물 분무계통
○ 자동 예비작동식 스프링클러
○ 급수탑 및 릴 호스
○ 휴대용 소화기

일부 화재방호계통은 내진범주Ⅰ 기준을 만족하도록 설계되었으며 안전정지에 필요한 기기가 위치한 발전소 구역 내에서의 수동 소화능력을 갖고 있다. 이 계통은 내진범주Ⅰ인 복수저장탱크로부터 2개 이상의 급수탑과 호스로 소화수를 공급받아 안전정지를 위해 필요한 장치에 소화수를 공급할 수 있도록 설계되었다. 화재와 연기의 감시, 감지 및 경보계통은 각 회로의 고장을 표시하는 기능이 있으며, 감시 및 경보신호는 현장제어반과 주제어실에서 확인이 가능하다.

### 6.3.5 주제어실 비상 공기조화계통

주제어실 비상 공기조화계통은 냉각재상실사고, 연료 취급사고 또는 주제어실 외기 흡입구에서 고준위 방사능이 감지되는 동안에 주제어실 관련지역의 거주성을 유지하도록 설계되었다.

주제어실 비상공기조화계통은 공급/재순환 공기조화기와 여과장치를 포함한 부속기기들로 이루어진 2개의 다중 계열로 구성되어 있다. 이 계통은 공학적안전설비 작동신호, 연료 취급사고, 주제어실 외기 흡입구에서의 고준위 방사능 신호 등이 발생하면 자동으로 가동되며 주제어실에서 수동으로 작동할 수도 있다.

### 6.3.6 격납건물격리계통

격납건물격리계통은 냉각재상실사고, 주증기배관 파단, 주급수배관 파단 및 격납건물 내의 방사성물질 사고 등이 발생할 때 격납건물을 차단하는 배관, 밸브 및 기기로 구성되어 있다.

### 6.3.7 가연성기체제어계통

가상 냉각재상실사고 후 격납용기 대기 속의 수소농도를 3.5% 미만으로 제어하기 위해 수소재결합기계통과 수소정화계통이 가동된다. 본 계통은 100% 용량의 2계열로 이루어지며 각 계열은 1대의 수소재결합기를 연결할 수 있는 흡입관 및 배출관으로 구성된다.

2대의 이동 수소재결합기가 고장 나면 수소정화계통이 수소재결합기 흡입관에 연결되어 23.6 L/s(50 cfm)의 유량을 공급하며 제습기, 가열 코일, 전단 고효율 여과

기, 활성탄 흡착기 그리고 후단 고효율 여과기를 통하여 기체를 대기로 방출한다.

격납건물 내부 수소농도가 수소 가연 농도 이상으로 축적되는 것을 방지하기 위해 GDC 41에 따라 설계된 이동형 격납건물 수소재결합기계통(CHRS)과 피동촉매형수소재결합기계통(PARS)에 의해 수소 농도가 제어된다.

격납건물 수소재결합기계통(CHRS)과 피동촉매형수소재결합기계통(PARS)은 Reg. Guide 1.7과 1.26에 따른 품질등급과 Reg. Guide 1.7과 1.29에 따른 내진등급으로 설계, 제작되어 있으며, 전원공급과 제어기능은 Reg. Guide 1.7과 1.32 요건에 따른다.

격납건물 수소재결합기 계통(CHRS)은 두 개의 루프로 이루어져 있으며 각 루프는 최소 70 scfm으로 작동하고 압력 10 psig에서도 작동이 가능하도록 설계되어 있다. CHRS는 수소 농도가 3.5 v/o에 도달되기 이전에 수동으로 작동된다.

피동촉매형수소재결합기계통(PARS) 가상 LOCA 시 격납건물 수소 농도를 제한치 이내로 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 모든 PAR는 중대 사고환경에서 사용할 수 있도록 설계되어 있으며 중대사고에 대해 최적 평가된 수소 생성량을 처리하여 격납건물 내 국부 수소농도가 격납건물의 건전성을 위협하고 필수기기를 손상시킬 수 있는 화염가속(FA)과 폭연-폭발 천이 현상을 일으킬 수 있는 정도로 상승하는 것을 방지하도록 설계되었다.

PAR는 수소 분자와 산소 기체를 결합시켜 수증기로 만들기 위하여 백금을 촉매제로 사용한다. 유입된 수소, 산소 및 증기를 함유한 격납건물 대기는 촉매제와의 접촉을 통하여 결합되며, 이때 발생하는 반응열은 PAR 내의 기체 온도를 증가시켜 대류 효과를 유발한다. 사고 시 격납건물 수소농도가 2.0 v/o 이하에서 초기 작동이 가능하고 작동 후에는 0.5 v/o 이하까지 연속적인 수소제어 기능을 수행한다.

### 6.3.8 보조급수계통

보조급수계통은 급수계통이 운전되지 않고 증기발생기 수위가 보조급수작동신호 설정치 이하로 낮아질 경우 증기발생기의 2차측에 급수를 공급한다. 이 계통은 2대의 전동기구동(1E급) 펌프와 1대의 터빈구동 펌프로 구성되어 있으며, 발전소 비상냉각 시 원자로냉각재계통으로부터 붕괴열과 현열을 제거하기 위해 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 설계되었다. 전동기 및 터빈구동 보조급수펌프는 보조급수작동신호 또는 원자로정지불능 완화설비로부터의 신호에 의해 해당 증기발생기에 급수가 자동 공급될 수 있도록 되어 있다.

## 6.4 계측제어 및 전력계통

### 6.4.1 계측제어계통

발전소보호계통은 원자로를 정지하고 공학적안전설비를 작동시키기 위하여 필요한 주요 변수를 감시한다. 발전소보호계통은 변수들이 설정된 안전 제한치에 도달하면 자동으로 보호조치를 취하도록 설계되었다. 이 계통은 IEEE 279에 따라 설계되었으며 계통 내의 어떠한 기기나 계통의 일부가 단일사고로 인해 보호계통의 동작이 방해받지 않도록 충분한 다중성을 가진다.

#### 6.4.1.1 원자로정지계통

원자로정지계통은 원자로보호계통(RPS)과 RPS 신호 또는 수동신호에 의해 작동하는 일련의 기기들을 포함한다. 원자로정지신호는 제어봉구동코일로 공급되는 전원을 차단시켜 제어봉집합체를 노심으로 낙하시킨다. 원자로정지계통의 계측제어설비는 하나의 회로가 운전중 시험(on-line test) 중에도 여타의 회로가 단일고장 기준을 만족하도록 특별히 설계되었다. 계측제어설비는 단일고장으로 인해 원자로정지가 일어나지 않도록 설계되었다.

#### 6.4.1.2 공학적안전설비의 계측설비

공학적안전설비는 공학적안전설비작동계통(ESFAS)과 ESFAS 신호 또는 수동신호에 따라 작동하는 일련의 기기들을 포함한다.

공학적안전설비의 계측제어설비는 계통의 보호기능 수행능력을 유지하면서 시험이 가능하도록 설계되었다. 계통 내의 단일고장이 발생하더라도 공학적안전설비 고유의 보호기능 수행능력이 유지되도록 다중 계측제어설비 간에 독립성이 부여되어 있다.

#### 6.4.1.3 안전정지에 필요한 계통의 계측설비

안전정지에 필요한 계통은 원자로를 정지시키고 안전정지 상태로 유지하는데 필요한 계통이다. 이 계통의 계측제어설비는 시험시에도 안전정지를 달성할 수 있으며 계통 내의 단일고장시에도 안전정지기능을 수행할 수 있도록 다중 계측제어설비 사이에 독립성이 부여되어 있다.

### 6.4.2 전력계통

#### 6.4.2.1 송전 및 발전계통

한빛 1,2호기 전력망은 2개의 독립적인 345 kV 선로로 구성되어 있다. 주 발전기는 1,800 rpm, 3상, 60 Hz, 동기 발전기이다. 발전기에서 생산되는 전력은 22 kV로 주변압기에서 345 kV로 승압되어 송전선을 통해 2개 호기가 공유하는 345 kV 옥외변전소에 송전된다. 옥외변전소에서는 345 kV 송전선 5회선으로 소외 송전망과 연결된다.

#### 6.4.2.2 배전계통

옥외변전소로부터 각 호기의 소내전력계통에 공급되는 전력은 2개의 독립적인 회로를 통해서 공급된다. 배전계통은 안전 1E급 및 비안전 1E급 교류와 직류계통으로 구성되었다. 안전 1E급 교류계통은 원자로 정지에 사용되는 기기에 전력을 공급한다. 각 호기의 안전 1E급 교류계통은 2개의 독립적이고 다중적인 부하 계열로 구성되며 계측 및 제어 전력 공급용의 독립적인 4개의 120 V 필수교류전력원이 있다. 부하계열은 4.16 kV 스위치기어, 480 V 로드센터 및 전동기제어반 등으로 구성되었다. 필수교류 계장 및 제어 전력공급계통은 인버터, 전압조정 변압기 및 분전반 등으로 구성되었다.

비상디젤발전기는 각각의 안전 1E급 교류계통에 비상전원을 공급한다. 각 디젤발전기는 설계기준사고시 필요한 모든 기기를 운용하기 위한 충분한 용량을 가지고 있다. 비안전 1E급 교류계통은 13.8 kV 및 4.16 kV 스위치기어, 480 V 로드센터, 전동기제어반 및 비안전 1E급 120 V 교류전력계통 등으로 구성되었다. 각 호기의 안전 1E급 직류계통은 4개의 독립적인 안전 1E급 125 V 축전지와 충전기에서 전력을 공급받으며 비안전 1E급 250 V와 125 V 축전지와 충전기는 비안전 1E급 직류계통 부하에 전력을 공급한다.

### 6.5 동력변환계통

터빈설비는 1개의 고압터빈과 3개의 저압터빈으로 구성되어 있으며 터빈발전기 정격출력은 1,067 MWe, 회전수는 1,800 rpm이다. 주발전기는 정격전압 22 kV, 주파수 60 Hz이며, 100% 정격전압에서 0.6 단락 비율 및 0.9 역률을 기준으로 할 때 용량은 1,163,330 kVA이다.

### 6.6 핵연료 취급 및 저장설비

핵연료취급계통은 격납건물 내 재장전수조 위의 재장전기중기, 사용후연료저장조 지역 내의 연료취급기중기, 연료 이송운반기, 연료 이송튜브와 원자로 압력용기 상부구조물 및 내부구조물의 취급시 사용되는 격납건물 천정기중기 등의 다양한 설비들로 구성되어 있다.

신연료와 사용후연료는 연료건물에 저장되며 신연료는 연료건물의 저장고 내의 수직형 저장대에 저장된다. 신연료 및 사용후연료저장대는 1,2호기 각 2,262개, 2,257개이다. 사용후연료저장조는 보랄(boral) 또는 스테인리스강 라이너플레이트로 피복된 콘크리트 구조물이다. 사용후연료 집합체는 붕소가 함유되지 않은 냉각수에서도 임계상태에 도달하지 않도록 설계된 수직형저장대에 보관된다.

## 6.7 냉각수 및 보조계통

### 6.7.1 냉각수계통

1차기기냉각수계통, 1차기기냉각해수계통, 연료재장전수계통, 필수냉각수계통, 복수저장계통은 설계기준사고시 발전소 안전정지 및 사고완화를 위하여 필요한 계통이다. 이러한 계통은 내진 Ⅰ등급 및 다중으로 설계된다.

1차기기냉각수계통은 원자로 보조계통에 냉각수를 공급하며 여러 기기로부터 열을 제거한다. 또한 1차기기냉각해수계통과 방사능에 오염될 수 있는 계통사이에 중간 방벽 역할을 함으로써 방사능에 오염된 물이 해수로 누출되는 것을 방지한다. 1차기기냉각수는 서로 교차되는 2개의 폐유로를 통하여 순환된다. 각 유로의 냉각수는 잔열제거열교환기, 격납건물살수펌프 윤활유냉각기, 잔열제거펌프 윤활유 냉각기, 충전펌프 윤활유냉각기, 격납건물 팬 냉각기로부터 열을 제거하며 비안전관련 보조기기를 냉각시킨다. 이러한 비안전관련 부하는 공학적안전설비 작동에 의해 자동적으로 안전관련 유로에서 분리된다.

1차기기냉각해수계통은 최종 열제거원으로부터 냉각수를 공급받아 기기냉각수열교환기, 디젤발전기냉각수 열교환기, 필수냉각수계통으로 공급한다. 이 계통은 2개의 독립된 계열로 구성되며 한 계열당 2대의 펌프가 있다.

연료재장전수계통은 냉각재상실사고시 격납건물살수계통 및 안전주입계통에 붕산수를 공급한다. 이 계통은 2041.2 $m^3$(540,000갤런)의 탱크와 배관으로 구성되어 있다.

필수냉각수계통은 운전시에 공학적안전설비실과 스위치기어실의 대기온도를 유지하도록 설계되어 있다. 이 계통을 구성하는 주요 기기에는 냉각기, 냉방수 펌프, 공기 분리기, 압축탱크 등이 있다.

복수저장계통은 급수계통을 사용할 수 없거나 운전 불가능일 때 보조급수계통으로 적합한 보충수를 공급한다. 각 호기의 복수저장 및 이송계통은 2대의 복수저장탱크와 관련 배관, 밸브, 펌프 및 계측제어기기 등으로 구성되었으며, 동파방지설비를 구비하고 있다.

### 6.7.2 기타 보조계통

보조계통에는 압축공기계통, 시료채취계통, 기기 및 바닥배수계통, 화학 및 체적제어계통(CVCS) 등이 있다.

압축공기계통은 여과 및 건조된 공기를 공기식 계기 및 제어기기에 연속적으로 공급한다. 본 계통은 또한 발전소 전반에 걸쳐 있는 공기식 작동기기 및 기타 작업용 공기를 필요로 하는 곳에 공기를 공급한다. 압축공기계통은 발전소 정상운전을 위한 계통이며 안전정지를 위한 계통은 아니다.

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

기기 및 바닥 배수계통은 각종 기기 및 바닥배수가 일정한 곳에 모이도록 설계되어 있다. 방사능 물질을 함유할 수 있는 배수는 액체폐기물처리계통에서 처리되며 예상치 않은 방사능의 방출을 예방할 수 있도록 감시설비에 의해 감시된다.

화학 및 체적제어계통은 가압기의 수위를 유지하기 위하여 원자로냉각재의 양을 자동으로 조절하며 원자로냉각재펌프에 밀봉수를 공급한다. 또한 원자로냉각재의 순도, 체적, 붕소농도 및 반응도를 조절하며 비상노심냉각에도 이용된다.

### 6.7.3 배기계통

배기계통은 발전소 정상운전 및 설계기준사고 하에서 작동한다. 제어건물, 터빈건물, 보조건물, 연료 취급건물, 비상디젤발전기건물, 방사성폐기물 처리건물, 기기냉각해수펌프실 및 격납건물의 배기계통은 공기조화계통으로 조절하며 기기 및 운전원을 위한 적절한 환경을 제공하도록 설계되었다. 배기계통은 건물내부의 공기가 완전히 배출될 때까지 깨끗한 지역에서 방사능 준위가 높은 지역으로 통과하도록 설계되었다

## 6.8 방사성폐기물처리계통

방사성폐기물처리계통은 모든 액체, 기체 및 고체폐기물 처리에 필요한 설비를 갖추고 있다. 액체폐기물처리계통은 방사성액체폐기물을 수집하여 정화 및 증발운전 등으로 방사성물질을 제거하며 운전과정의 생성물은 고화처리 한다. 기체폐기물처리계통은 원자로냉각재로부터 방사성기체를 수집하여 정화, 지연 등의 방법으로 방사성물질을 제거한다. 고체폐기물처리계통은 고체방사성폐기물을 수거, 운반, 저장하는 역할을 한다.

## 제7절 참고문헌

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

# 제8절 그림

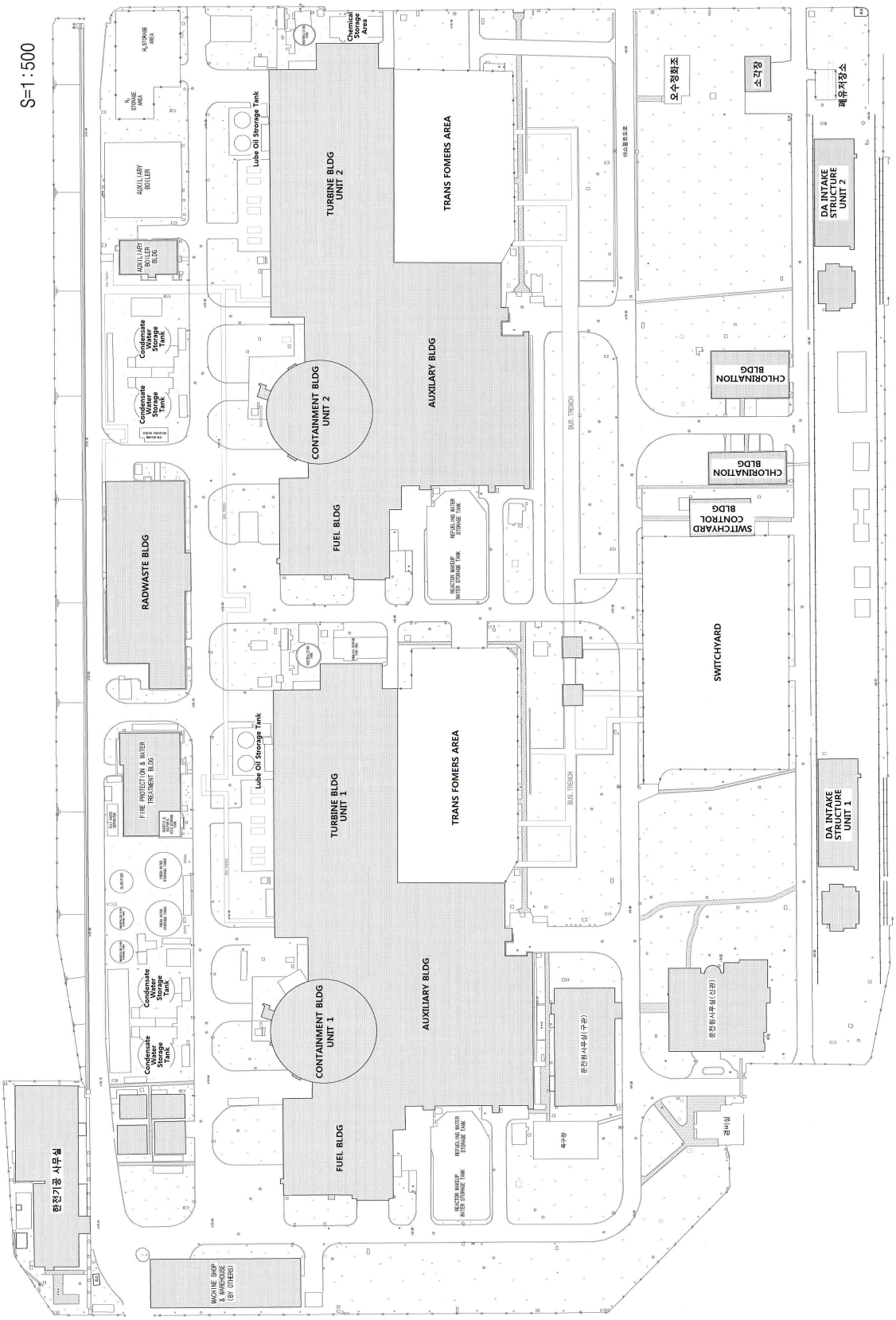



그림 1-1 한빛 1,2호기 부지 배치도

# 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 ····· 4
2.2 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 ····· 6
2.2.1 평가대상 자연재해 검토 ····· 6
2.2.2 설계기준 홍수 ····· 8
2.2.3 홍수를 제외한 설계기준 자연재해 ····· 14
2.2.4 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 설계기준초과 홍수 수준 ····· 16
2.2.5 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준의 홍수를 제외한 설계기준초과 자연재해 ····· 25

제3절 안전 개선사항 ····· 29
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 29
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ····· 29
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 30

제4절 결론 ····· 30

제5절 참고문헌 ····· 32

제6절 표, 그림 ····· 34

# 표, 그림

표 2-1 지체구조와 관련한 최대지진 ····· 34
표 2-2 최대지진에 의한 부지가속도 ····· 35
표 2-3 한빛부지의 가능최대강우량 비교 ····· 36
표 2-4 한빛1,2호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과 ····· 36
표 2-5 류큐 트렌치 과거 지진 목록 (NOAA, http://www.ngdc.noaa.gov) ····· 37
표 2-6 10,000년 빈도 지진 Mw 8.76의 단층 파라미터 CASE1 ~ 8 ····· 38
표 2-7 한빛 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 계산영역별 격자구성 및 계산조건 ····· 38
표 2-8 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 01, 5091) ····· 39
표 2-9 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 02, 19382) ····· 39
표 2-10 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 03, 19756) ····· 40
표 2-11 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 01, 18318) ····· 40
표 2-12 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 02, 19168) ····· 41
표 2-13 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 03, 27534) ····· 41
표 2-14 Track 별 1분 지속 평균 최대풍속 정보 ····· 42
표 2-15 한빛 원자력발전소 폭풍해일 수치모의를 위한 계산조건 ····· 42
표 2-16 모의된 태풍에 의한 In1 관측지점에서의 최대 폭풍해일고 ····· 42
표 2-17 한빛1호기 기기냉각해수 취수구조물 전면에서의 TRACK 별 최대 유의파고와 최대유의파 시점에서의 첨두주기 및 평균주기 ····· 43
표 2-18 한빛1호기 기기냉각해수 취수구조물 전면에서의 TRACK 별 폭풍해일고와 파고의 합산 최대값 ····· 43
표 2-19 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(광주) ····· 44
표 2-20 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(군산) ····· 45
표 2-21 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(목포) ····· 46
표 2-22 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인 ····· 47

그림 2-1 한빛1,2호기 부지반경 320km 내 지진지체구조구_진앙분포도 ····· 48
그림 2-2 타당성 분석을 위한 이상적인 가상 지진 자료 분포도 ····· 48
그림 2-3 가상 자료를 사용한 tapered G-R분포와 quadratic 분포의 비교 ····· 49
그림 2-4 류큐 트렌치에서 발생한 과거 지진 자료 분포도 ····· 49
그림 2-5 류큐 트렌치에 대한 10,000년 빈도 지진규모 결정 ····· 50
그림 2-6 단층 파라미터 개념도 ····· 50
그림 2-7 류큐 트렌치에서 지진규모에 따른 단층의 크기 및 위치 개념도 (일본 방재과학기술연구소, 2013) ····· 51
그림 2-8 류큐 트렌치에서 지진규모 Mw와 단층 크기의 관계 ····· 52

그림 2-9 류큐 트렌치 지진해일 초기수면변위 (Mw 8.76, case 1~case 4) ····· 53
그림 2-10 류큐 트렌치 지진해일 초기수면변위 (Mw 8.76, case 5~case 8) ····· 54
그림 2-11 한빛(영광) 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 광역 계산영역 및 수심 분포 ····· 55
그림 2-12 한빛 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 상세역 계산영역 및 수심 분포 ····· 55
그림 2-13 최상세역 계산영역 및 한빛 원자력발전소 주변 수심 분포 ····· 56
그림 2-14 재현기간(return period)에 따른 한빛 부지 주변 최대풍 풍속 ····· 57
그림 2-15 10,000년 빈도 최대풍 풍속을 제공하는 7개 태풍의 이동경로 ····· 57
그림 2-16 한빛 원자력발전소의 남서쪽에서 접근하는 3개 태풍의 이동경로 ····· 58
그림 2-17 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍 10개의 중심기압 분포 ····· 58
그림 2-18 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍 10개의 최대풍 반경 분포 ····· 59
그림 2-19 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍 10개의 풍속(1분 지속평균) 분포 ····· 59
그림 2-20 폭풍해일 수치모의를 위한 계산영역 및 수심 분포 ····· 60
그림 2-21 폭풍해일 수치모의를 위한 세부영역 및 수심 분포 ····· 60
그림 2-22 폭풍해일 수치모의를 위한 최상세역 수심 분포 ····· 61
그림 2-23 모의된 태풍 Track별 최대 수위 상승량 ····· 62
그림 2-24 최상세역 유의파고 분포도 및 파향벡터도 ····· 63

## 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 한빛1,2호기 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, 강우 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. 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE)은 광역 및 국지적인 지질 및 지진 그리고 부지하부 물질의 특성이 고려된 최대잠재지진에 근거하여 평가된 지진으로서 안전관련 구조물, 계통 및 기기가 기능을 유지할 수 있는 최대 지진동으로 정의된다. 또한 운전기준지진(Operating Basis Earthquake; OBE)은 광역 및 국지적인 지질 및 지진 그리고 부지하부 물질의 특성을 고려하여 발전소 운전기간 동안 부지에 영향을 미칠 것으로 예상되는 지진으로서 원자력발전소 시설을 지속적으로 운영하는데 필요한 설비들이 제 기능을 유지하도록 설계하는 지진이다.

한빛1,2호기 안전정지지진의 영주기 수평지반가속도는 0.2g, 영주기 수직지반가속도는 0.13g이다. 상기 안전정지지진은 부지반경 320km 내의 13개 지진지체구조구로부터(그림 2-1 참조) 잠재적인 최대지진을 평가하여 결정되며 잠재적인 최대지진은 계기지진자료의 신뢰성을 주의 깊게 판단하여 최대잠재지진을 선정하고, 보

수적인 방법으로 평가한다. 각 지진지체구조구의 최대지진은 각 구조구 내에서 부지와 가장 가까운 지점까지 이동되며 부지까지 감쇄된다. 이때, 부지가 포함된 지진지체구조구 내에서는 부지 하부에서 지진이 발생한 것으로 가정한다. 부지에서의 최대 가속도는 최근의 지진학 연구에 의해 평가하여 계산하였다.

한빛1,2호기 안전정지지진 평가를 위하여 최신의 평가결과인 신고리5,6호기 예비안전성분석보고서[2-2]와 한빛5,6호기 최종안전성분석보고서[2-3]를 참조하였으며, 각각의 최대지진에 대하여 1990년대 이후 국내에서 개발된 7개의 감쇄식을 사용하여 부지에서의 가속도를 산출하였다. 가속도 계산은 을 사용하였다.

각 지진지체구조구 별 최대지진의 지진요소 및 부지와의 최근거리를 표 2-1에 제시하였으며 이로부터 위의 감쇄식을 이용하여 부지에서의 최대지반가속도를 계산하여 표 2-2에 제시하였다.

표 2-2에 의하면 한빛부지가 포함된 옥천습곡대에서는 규모 5.2의 속리산지진에 의해 부지에서의 최대지반가속도가 구해진다. 속리산지진이 부지하부에서 발생하였다고 가정하고 규모 5.2를 7개의 감쇄식에 대입하여 최대지반가속도를 구하면 최대값은 0.1788g가 얻어진다. 한편, 부지가 포함된 지진지체구조구인 옥천습곡대는 경기육괴와 영남육괴 사이의 북동 방향 습곡-드러스트대 이다. 소규모의 구조분지들을 발달시키는 단층대로 경기육괴와 접하는 옥천대는 영남육괴와도 단층 혹은 강한 연성전단대의 경계를 수반한다. 옥천대가 경기육괴나 영남육괴와는 지진지체구조적으로 독립되어야 한다는 것에는 이견이 없다.

한편, 지진지체구조구의 경계가 부지의 안전정지지진을 결정하는데 있어서 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 목적으로, 부지가 속한 지진지체구조구와 바로 인접한 지진지체구조구와의 경계를 구분하지 않았을 경우를 가정하여 최대지반가속도를 산정하였다. 즉 옥천습곡대와 인접한 지진지체구조구인 경기육괴, 영남육괴, 푸키인레이난 육괴에서 발생한 지진이 부지에서 발생하였다고 가정할 경우 최대지반가속도를 산정하였다. 경기육괴, 영남육괴, 푸키인레이난 육괴의 최대지진은 각각 1978년 발생한 규모 5.0의 홍성지진과 1936년 발생한 규모 5.0의 지리산 지진, 2008년 발생한 규모 4.2의 지진이다. 따라서 인접한 지진지체구조구와의 경계를 구분하지 않았을 경우를 가정하더라도 최대지반가속도인 0.1788g를 초과하지 않는다.

또한 신월성1,2호기 부지의 안전정지지진 결정시 평가되었던 읍천단층과 Z단층에서 지진이 발생할 경우 한빛1,2호기 부지에서의 최대지반가속도를 구하였다. 읍천단층과 Z단층에서 발생한 계기지진기록은 없으나 구조지질학적 단층특성을 이용

하여 구조지질 전문가에 의해 평가된 최대잠재지진은 각각 규모 6.0과 규모 5.2이다[2-11, 2-12]. 이 두 단층으로부터 한빛1,2호기 부지까지의 최단거리는 각각 약 277.7km와 278.4km이며 7개 감쇄식에 대입하여 최대지반가속도를 계산한 결과 읍천단층에서 발생하는 최대잠재지진의 경우 0.0037g, Z단층에서 발생하는 최대잠재지진의 경우 0.0013g로 평가되었다. 따라서 이상의 검토사항을 기초로 할 때 부지에서의 최대 잠재 영주기 지반가속도를 0.2g로 설정하였다.

### 2.1.2 설계기준지진의 타당성

2.1.1의 결정론적 방법과는 별도로 한빛1,2호기 안전정지지진의 타당성을 검증하기 위하여 한빛 부지에 대한 면적지진원 및 선형지진원(읍천단층, Z단층, 9.12지진 및 포항지진 유발단층)을 고려한 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)을 수행하였다[2-13].

면적지진원 입력자료와 감쇄식 입력자료는 최신의 전문가 자문을 통해 제시받은 값을 적용하였으며, 선형지진원 입력자료 중 읍천단층 및 Z단층의 입력자료는 중저준위 방사성폐기물처분시설 부지의 PSHA 자료를 활용하였다[2-14]. 또한, 9.12지진 및 포항지진 유발단층 입력자료는 신고리3,4호기 지진안전성평가[2-15] 및 포항지진 지진안전성평가[2-16] 시 사용된 입력자료를 활용하여 적용하였다. 9.12지진 및 포항지진 유발단층에 대한 선형지진원 지진활동변수는 신고리3,4호기 PSHA[2-17] 시 3인의 지진전문가에 의해 제시된 값을 이용하여 계산을 수행하였다. 한편, 확률론적 지진재해도 보고서[2-13]의 입력자료 및 분석절차에 대해서는 국내 및 국외 전문가로부터 제3자 검토를 수행하여 적절성을 확인하였다.

면적지진원과 선형지진원(읍천단층, Z단층, 9.12지진 및 포항지진 유발단층)을 모두 고려한 한빛1,2호기의 안전정지지진(SSE) 0.2g에서의 연초과빈도는 평균값 수준에서 약 $2.01\times10^{-5}$/년으로 계산되었다. 이를 재현주기로 환산하면 약 49,800년으로 평가되었으며, 이는 규제지침서(KINS/RG-N01.07)에서 규정하는 $1.0\times10^{-3}$/년 기준을 만족한다. 또한 재현주기 10,000년에 해당하는 최대수평지반가속도 값은 0.11g로 평가되었으며, 안전정지지진의 지진동 크기(0.2g) 보다 작다.

한빛1,2호기 운영허가 이후 2017년까지 한반도에서 발생한 주요 지진은 1996년 영월지진(1996. 12. 13, 규모 4.5), 2004년 울진해역지진(2004. 5. 29, 규모 5.2), 2007년 오대산지진(2007. 1. 20, 규모 4.8), 2016년 9.12지진(2016. 9. 12, 규모 5.8) 및 2017년 포항지진(2017. 11. 15, 규모 5.4)이다. 이들 지진 중 부지에서 가까운 곳에서 발생했던 지진은 없다.

9.12지진의 경우 남한전역에서 감지되었으며, 진도 II~VI을 나타낼 정도로 감진구역이 넓었다. 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. 또한 한빛 원전부지에서 관측된 최대지반가속도는 0.0045g로 이 또한 설계지진 0.2g에 미치지 못하였다.

9.12지진 발생 후 국내 연구기관 및 대학 연구진 등에 의해 9.12 지진의 전진, 본진, 여진 분포에 따른 진원특성 연구가 이루어졌다. 현재까지 분석결과 9.12 지진의 전진, 본진, 여진은 지하 11~16km 지점에 판상형태로 분포하고 있으며, 9.12 지진을 유발한 지하단층을 확인하였다[2-18]. 또한, 지진 발생 이후 다양한 학계에서 수행된 현장조사 및 탄성파 탐사결과에서 9.12 지진과 관련된 지표단층운동 또는 지표파열 흔적은 나타나지 않은 것으로 보고되었다[2-19]. 9.12지진 및 포항지진에 대한 지진원 단층의 영향평가와 관련하여 한빛1,2호기 부지에 대한 평가를 수행하였다. 그 결과, 한빛1,2호기 부지에서 평가된 최대지반가속도는 9.12지진과 포항지진 모두 약 0.003g로 평가되어 한빛1,2호기 안전정지지진(SSE) 0.2g를 만족하는 것으로 평가되었다.

우리나라 인근에서 발생한 주요 국외지진인 2011년 발생한 동일본 대지진(2011년 3월 11일, 규모 9.0)은 한빛1,2호기 부지에서 약 1,500km 떨어진 곳에서 발생하였다. 지진 발생 당시, 한빛1,2호기 부지에 설치된 지진감시계통에서는 최대지반가속도값이 0.01g를 초과하지 않아 지진경보가 발효되지 않았다. 또한 한빛 원자력발전소 부지에서 한국수력원자력(주) 및 한국원자력안전기술원에서 운영 중인 지진관측소에서 기록된 최대지반가속도값은 각각 0.000464g, 0.000334g로 안전정지지진에 대해 1/100의 크기 미만으로 관측되어 안전정지지진에 미치는 영향은 없는 것으로 검토되었다.

결론적으로 운영허가 이후 현재까지 부지 부근에서 발생한 어떤 지진도 한빛1,2호기 안전정지지진의 최대 영주기 수평가속도(0.2g) 값을 초과하지 않았으며 최근까지 발생한 한반도에서의 주요 지진 등도 안전정지지진을 초과하지 않는다. 또한 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침 1.7항에서는 “재해도 곡선으로부터 안전정지지진 추정 값에 대한 연간 초과빈도의 평균값을 계산한다. 평균연초과빈도가 $1.0\times10^{-3}$/년을 초과할 경우, 초과하지 않도록 지진동 값을 상향 조정한다. 그러나 평균초과빈도가 $1.0\times10^{-3}$/년보다 작더라도 지진동 값을 하향 조정하지 않는다. 이러한 과정을 거쳐 선정된 지진동을 안전정지지진으로 결정한다.” 라고 기술하고 있다. 한빛1,2호기 안전정지지진에 대한 확률론적 지진재해도 평가결과는 이를 초과하지 않으므로 상향 조절할 필요가 없는 것으로 검토되었다.

### 2.1.3 지진발생시 지반변형에 의한 안전성 검토

### 2.1.3.1 지표단층 작용

부지 주변 지표단층 작용에 대한 검토결과, 부지반경 8km 이내에서 활동성 단층은 발견되지 않았다. 한편 인접 한빛5,6호기 부지에 조사된 파쇄대는 부지 내에서 연장성을 갖는 주요 선형구조의 N22°W 방향과 유사한 N10°∽25°W이다. 파쇄대는 좁은 간격으로 발달된 소규모 단층 및 파쇄대 등으로 구성되어 있다. 파쇄대는 백악기 화산암 퇴적이후 지각활동에 의해 형성된 전단지역(shear zone)으로서 소규모 단층, 슬리큰사이드(slickenside), 단층각력암, 관입암맥 등과 관련이 있으며 열수변질작용에 의해 형성된 방해석 및 카올리나이트 광물 등으로 충전된 연약대가 분포한다. 파쇄대의 형성 메카니즘과 활동성 여부를 파악하기 위해 항공사진 분석, 정밀지질조사, 실내실험, 트렌치 조사, 연대측정, 시추조사, 시추공에 대한 물리검층, 전문가 자문 등 구조지질학, 화산암석학, 퇴적학 분야의 조사, 검토를 통한 제4기 층과의 상관성 분석이 수행되었다. 주 파쇄대의 인접 지역에서 채취한 암석시료들에 대해 K-Ar 방법으로 연대측정 결과, 반상조직의 섬록암은 111.94±5.28Ma～101.52±8.48Ma, 반상조직의 안산암은 92.79±9.94Ma～85.03±1.3Ma의 범위로 나타났다.

파쇄대에서 채취한 점토광물을 dispersion법으로 농축된 견운모와 녹니석으로 된 시료의 K-Ar 방법을 통한 절대연령은 66±1.7ka～58±1.5ka이다. 파쇄대를 충전하고 있는 방해석 광물(calcite vein)을 이용한 U-Th 방법의 연대측정 결과에서 방해석 광물의 연대는 237±23ky～65±2ky의 범위로 나타났다. 제4기층의 토양층 변위조사를 통하여 지표단층작용에 의한 부지 안전성의 검토를 위한 수행한 지표지질조사 결과 파쇄대 지역을 통과하는 선구조 연장부에 나타난 토양층의 절토면에서 열수변질에 의해 생성된 kaolinite 등 점토광물의 세맥(vein) 위에 제4기에 생성된 토양층의 변위현상이 전혀 나타나지 않아 한빛 부지 내에서 제4기 이후의 변위 활동은 없는 것으로 평가하였다[2-3]. 또한, 한빛 부지를 포함하는 인접지역의 인공위성 Land Sat 사진에서도 제4기 이후의 단층작용은 인지되지 않았다. 결론적으로 한빛부지의 파쇄대는 최소한 제4기 이전에 활동한 비활동성단층으로 판단된다. 그러므로 한빛1,2호기 부지에서는 지표단층 작용으로 인한 변형은 발생하지 않을 것으로 검토되었다.

### 2.1.3.2 액상화 발생 여부 및 영구사면 안정성 평가

한빛1,2호기 안전관련 구조물들은 대부분이 보통 풍화된 암 상부 또는 암반위에 타설한 채움콘크리트 위에 설치되고 이 구조물에 대한 뒷채움은 배수가 잘 되는 조립상의 채움재(ASTM에 따라 분류된 골재)로 상대밀도 85%이상 다짐 시공을 했으므로(상대밀도가 80% 이상인 지반의 경우 액상화 평가가 생략됨)를 다져 시공하였으므로 지진에 의한 액상화현상은 일어나지 않는다.

한빛1,2호기 내 영구사면은 안전관련 구조물로부터 이격되어 있어 설계기준초과 지진시 사면 손상으로 안전관련 구조물이 받는 영향은 없다. 한편

#### 2.1.3.3 침하

한빛1,2호기 내진범주 I급 구조물은 보통 풍화된 암 상부, 또는 암반위에 타설한 빈배합 콘크리트(재령 28일 압축강도는 140kg/㎠ 이상)와 같은 견고한 채움재 상에 시공되었다. 따라서 부지에서의 10,000년 빈도 지진동(0.2g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서 내진범주 I급 구조물은 침하로 인한 영향을 받지 않는다. 한편 안전정지지진(0.2g) 수준을 초과하는 지진동에서도 암반 위에 구조물이 시공된 설계특성상 침하로 인한 영향은 없을 것으로 판단되나, 추가적으로 설계기준 초과 지진동(0.3g) 발생시 안전관련 구조물 하부 암반 지지력의 적절성을 평가하였다. 평가결과 구조물의 동적하중 대비 기초지반 허용지지력의 안전율이 8이상으로 확인되어 허용안전율인 3을 상회하므로 기초지반의 안정성은 충분히 확보되어 있는 것으로 검토되었다.

### 2.2 설계기준 홍수 및 기타 자연재해

한빛1,2호기 부지는 광주광역시 서북방의 한반도 남서 해변에 위치하고 있으며 행정구역상 전라남도 영광군 홍농읍 계마리에 소재하고 있다. 부지의 동쪽으로는 한빛3,4,5,6호기가 인접하여 위치하고 있으며, 부지 주변에는 큰 하천은 없다.

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

한빛1,2호기의 냉각수 취배수 방식은 순환수계통과 기기냉각해수계통 모두 표층취수 및 배수 방식으로 설계되었다. 발전소 부지는 해안에 인접해 있으므로 부지의 수문학적 특성은 서해의 영향을 받으며 발전 냉각수원으로는 해수를 이용한다.

#### 2.2.1 평가대상 자연재해 검토

지진 이외에 일반적으로 원자력 발전소 부지에 영향을 줄 수 있는 자연재해에는 다음과 같은 것들이 있다.

○ 해일(지진해일 및 태풍을 포함한 폭풍해일)에 의한 홍수
○ 가능최대강우에 의한 홍수
○ 강풍(최대풍속 및 최대순간풍속)
○ 토네이도
○ 폭설
○ 최종열제거원과 관련된 저수위 및 해수온도
○ 산불
○ 취수구에서의 해양생물/개펄 유입
○ 극한 기온
○ 황사
○ 화산 폭발

상기 자연재해 중 산불의 경우 지진이나 강우, 해일과는 달리 발전소 주변 산림의 크기, 이격거리에 따라 그 규모와 위해 영향이 결정된 자연재해이다. 또한 발전소에서는 산불이 발전소로 직접 전파되지 않도록 부지와 산지사이는 인공블럭 및 잔디로 된 사면이 형성되어 있어 산불차단막의 역할을 하고 있다. 만약 불씨가 강풍으로 비화되더라도 한빛1,2호기 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 양향을 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.

한편 기후변화에 의한 최고기온 상승의 경우 설계당시와 비교하여 기온이 수 ℃ 상승한다 하더라도 설계기준초과 자연재해로 소내정전 및 최종열제거원 상실 상황이 발생한 스트레스테스트의 기본 가정 사항에서 이동형설비 및 외부 주입유로 등을 사용한 발전소의 안전기능 복구 과정에 영향을 주지 않는다. 또한 기후변화로 인한 해수온도 상승은 최종열제거원과 관련한 평가대상 자연재해로 고려된다.

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 내부

에 있는 안전정지 및 노심냉각 관련 기기가 어떠한 물리적 영향도 받지 않으므로 평가대상 자연재해로 고려하지 않는다. 그리고 한빛 부지 주변에는 발전소에 직접 영향을 줄 수 있는 화산이 존재하지 않으므로 화산 폭발에 의한 영향 또한 제외된다.

결론적으로 한빛1,2호기의 부지특성 등을 고려할 때 지진 이외에 본 평가에서 검토되는 설계기준 및 설계기준초과 자연재해는 다음과 같다.

○ 지진해일에 의한 홍수
○ 폭풍해일에 의한 홍수
○ 가능최대강우에 의한 홍수
○ 강풍(최대풍속 및 최대순간풍속)
○ 토네이도
○ 최종열제거원과 관련된 저수위 및 해수온도

### 2.2.2 설계기준 홍수

한빛1,2호기의 안전관련 계통·기기를 수용하는 격납건물, 보조 및 제어건물 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, 기상해일 및 가능최대강우(Probable Maximum Precipitation, PMP)에 의한 설계기준 홍수 수준을 한빛1,2호기 FSAR[2-20], 한빛1,2호기 제2차 주기적 안전성평가(PSR) 보고서[2-21] 등에 근거하여 다음과 같이 검토하였다.

#### 2.2.2.1 지진해일 및 폭풍해일에 의한 설계기준 홍수

가. 지진해일

(1) 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR)

FSAR 2.4절에 의하면 한빛1,2호기 부지에서 쓰나미는 발생하지 않거나 발생하더라도 그 영향이 미미하므로 별도로 고려되지 않았다.

(2) 한빛1,2호기 2차 주기적 안전성평가

쓰나미는 해저화산의 폭발이나 해양의 대규모 지각운동에 의한 해저지진으로부터 발생한 장주기파로 주기는 수분에서 수십분까지의 범위를 갖는다. 쓰나미는 대부

분 규모(리히터 규모) 6.5 이상의 지진에 의해 발생하는데 서해안에서 발생한 최강지진은 1944.12.19의 규모 6.75의 지진이었으며 그 진앙은 부지로부터 약 450km 떨어진 좌표 39°N, 124°E의 수심 약 30m의 해저로 진원의 심도는 약 10km이었다.

그러나 상기 지진의 활동으로 인하여 쓰나미가 발생하였다는 기록이 없으므로 서해안에 예상되는 가능최대쓰나미 파고는 폭풍해일로 인해 발생되는 파고보다는 작으며 부지에서의 쓰나미에 의한 위험은 없는 것으로 검토되었다. 기왕의 쓰나미는 주로 환태평양 지진대가 자리하고 있는 일본열도를 따라 태평양에서 많이 발생하고 있으며, 한빛1,2호기 부지는 동해나 태평양 연안에서 발생한 쓰나미의 활동이 한반도 및 일본열도에 의해 차단되는 곳에 위치하고 있어 서해안의 쓰나미 기록자료는 전무하다.

또한 서해안의 역사지진인 1944.12.19 지진에 의한 부지에서의 예상지진해일 높이를 Iida식으로 계산해 보면 50cm 이하로 추정된다. 이 값은 가능최대폭풍해일에 의한 수위상승량에 비하여 상대적으로 작기 때문에 가능최고해수위 산정 시 홍수요인 조합에서 제외할 수 있다.

(3) 원전 설계기준 해수위 조사・연구 결과[2-22]

한빛부지를 포함한 우리나라 서남해안은 남해와 인접해 있어 류큐 트렌치(Ryukyu Trench) 및 난카이 트러프(Nankai Trough)에서 발생되는 지진으로 인한 지진해일의 영향을 받을 수 있다. 상기 연구에서는 류큐 트렌치 및 난카이 트러프에서의 지진해일로 인한 한빛1,2호기 전면 해역에서의 해수면 상승고 평가를 위하여 연동형 지진을 고려한 단층파라미터로부터 도출된 초기 수면변위를 적용하여 지진해일 전파 및 범람 수치모의를 수행하였다.

수치모의 결과 한빛1,2호기 취수로 내부 1차해수냉각수취수건물 전면에서 류큐 트렌치 및 난카이 트러프 지진해일로 인한 최대 수위상승량은 1.47m, 최대 수위하강량은 -0.66m로 평가되었다.

나. 폭풍해일

(1) 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR)

FSAR 2.4절에 의하면 한빛1,2호기 부지 호안 전면(방파제 외부)에서 폭풍해일에 의한 가능최고해수위는 처오름높이를 포함하여 EL.(+)8.3928m로 평가되었다.

(2) 한빛1,2호기 2차 주기적 안전성평가

부지에 영향을 미칠 것으로 예측되는 풍파를 발달시키는 기상현상은 적도부근에서 생성된 열대성 저기압이 성장하여 한반도 부근을 통과하는 태풍과 지속적인 북서계절풍의 두 가지로서 부지에 가장 불리한 수문기상조건이 될 것으로 예측되었다.

따라서 폭풍해일에 대한 수치해석을 위하여 1954~1995년까지 우리나라, 일본 및 중국에 큰 영향을 미친 24개 태풍에 대한 자료를 분석하여 가상태풍을 다음과 같이 결정하였으며 추가로 북서풍에 의한 폭풍도 고려하였다.

- 가상태풍 Ⅰ : Hydromet 태풍모형을 이용한 중심기압, 위치정보만을 이용한 태풍바람장에 의한 태풍수치모의로 1941. 8.23 통과태풍(태풍 5209호) 경로를 취한 태풍

- 가상태풍 Ⅱ : Hydromet 태풍모형을 이용한 중심기압 965mb 위치에 가상기압영향 반경(R≒400km, P=1013mb)을 설정하여 태풍 5209호의 경로를 취한 태풍

- 가상태풍 Ⅲ : 가상태풍 Ⅱ의 최저중심기압을 945mb로 감소시킨 태풍

- 가상 북서풍 폭풍 : 북서풍 15m/sec, 20m/sec, 25m/sec, 30m/sec, 35m/sec이 각각 3일 계속 불 때

부지가 위치한 해안은 만이나 항구가 아니라 개방된 해안지역으로 정진현상이 발생하지 않기 때문에 가능최고해수위 산정 시 고려하지 않았고 기상조에 의한 수위증가만을 고려하였다. 이를 위하여 WAM-CURRENT 모형을 이용하여 위에서 언급한 가상태풍에 대한 조석과 해일이 결합된 해일고를 구하였다. 평가결과 가능최대해일고는 35m/sec의 북서풍이 정상상태에서 3일간 연속적으로 불 때로 해일의 고수위는 1.73m로 계산되었다.

○ 파랑 활동

폭풍해일과 동시에 발생할 수 있는 파랑활동으로는 해저지진에 의한 쓰나미와 조석을 고려할 수 있으나 쓰나미에 의한 파고는 무시할 수 있기 때문에 가능최고해수위는 조석에 의한 수위상승인 최극고조위에 가능최대폭풍해일 및 파랑활동에 의한 처오름높이를 더하여 구하였다.

부지해역의 심해설계파를 산정하기 위한 파랑 및 바람자료는 한국해양개발연구원이 수행한 “어항설계 천해파 추정 보고서” 중 부지의 인근어항인 계마항에 적용한 심해설계파 제원을 부지의 심해설계파로 가정하였다. 그리고 서해는 남쪽방향의 파랑에 대해서는 지형적인 영향으로 차폐되어 있기 때문에 북서계열의 심해파

제원을 설계에 사용하였으며 계마항에 적용한 심해파의 파랑제원은 다음과 같았다.

- 심해설계파($H_o$) = 6.0m
- 심해설계파 주기($T_o$) = 9.0초
- 심해설계파 파향 = NW

이 값을 이용한 개방된 해안에 위치한 계마항의 천해설계파 제원은 다음과 같았다.

- 주기 = 9.0초
- 천해설계파고 = 4.5m(수심 8m)
  = 4.8m(수심 10m)

이 경우 수심 입력자료는 서해안의 조차를 감안하여 대조평균고조면을 기준해수면으로 하였으며 대조평균고조위는 육상표고로 EL.(+)2.55m이었다. 방파제 전면의 해저바닥 표고가 EL.(-)6.5m이므로 방파제 전면에서의 수심은 대조평균고조면 기준 9.05m가 되며 이 수심에 대응하는 천해설계파의 파고는 수심 10m의 4.8m이었다. 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서에 제시된 환산심해설계파고는 상기 평가의 최댓값인 4.8m보다 큰 5.7m이었다. 따라서 이 값을 이용하여 방파제 전단에서의 파랑의 처오름높이를 구하면 설계파에 의한 파랑의 처오름높이는 2.09m가 된다.

가능최고해수위 산정은 기준수위인 최극고조위에 가능최대폭풍해일에 의한 수위상승 및 한빛1,2호기에 적용한 설계파에 의한 처오름높이를 더하여 부지에서의 해수에 의한 가능최고해수위를 계산하였다.

가능최대폭풍해일에 의한 파고 + 설계파에 의한 파랑의 처오름높이 + 최극고조위
= 1.73m + 2.09m + 4.366m = EL.(+)8.19m

부지에서 발생 가능한 홍수사상을 위와 같이 조합하여 검토한 결과 부지에서 예상되는 방파제 외부의 가능최고해수위는 EL. (+)8.19m로 산정되었다.

(3) 원전 설계기준 해수위 조사・연구 결과[2-22]

폭풍해일에 대한 수치해석을 위하여 후쿠시마 후속조치로 수행된 “원전부지 설계기준 해수위 조사・연구 용역”에서는 태풍 Maemi(0314)의 파라미터를 보정하여 생성된 가능최대태풍(PMH)에 대해 총 3가지의 진로를 설정하여 수치모의 후 가능최고해수위를 산정하였다. 평가결과 방파제 내부에서의 가능최고해수위는 10% 초과고

조위(3.748m), 폭풍해일고(1.16m) 및 유의파고(0.13m)를 고려한 EL.(+)5.038m이다.

다. 기상해일(한빛1,2호기 2차 주기적 안전성평가 및 원전 설계기준 해수위 조사·연구 결과)

대기압의 급변 즉 대기압점프(pressure jump)는 해수면의 국부적인 상승 또는 하강을 발생시키며 대기압점프의 이동속도와 장파의 전파속도가 같아질 때 Proudman 공명(proudman resonance) 현상이 발생하여 파고가 크게 증가한다. 또한 이렇게 증폭된 장파가 해안에 도달하면 천수화와 포구 폭 축소에 의해 파고가 더욱 증대되어 해안을 내습하고 범람 피해를 발생시킬 수 있다. 2007년 3월 우리나라 서해안에서 발생한 기상해일로 인하여 한빛 원자력발전소에서 1명의 인명피해가 발생하였으며, 당시 서해안 여러 지역에서 범람 및 침수 피해가 발생하였다. 또한 2008년 5월에도 충남 보령에서 기상해일이 내습하여 9명의 인명피해가 있었다.

우리나라에서는 2007년과 2008년 발생된 단 2차례의 기상해일에 대하여 대기압점프 및 기상해일 자료가 수집되었을 뿐이며 더욱이 2008년 기상해일을 발생시킨 대기압 관측자료에서는 뚜렷하게 대기압점프가 파악되지 않았다. 결과적으로 우리나라 서해안을 내습한 기상해일에 대한 관측자료는 2007년 자료를 제외하면 거의 없는 실정이며 이로 인해 기상해일에 대한 다양한 연구는 어려운 실정이다. 이에 따라 본 평가에서는 기상해일 연구의 한계성을 반영하여 발생가능 최대 기상해일의 수치모의 대신 과거 한빛부지의 조위관측소 및 취수구 관측시설에서 관측된 2007년 3월 기상해일의 해수위 관측기록을 적용하고 이를 통해 기상해일 영향 평가를 수행하였다.

한빛부지 조위관측소에 도달한 기상해일을 발생시킨 대기압점프는 2007. 3.31 오전 1시 3분에 한빛부지에 도달한 것으로 파악되며, 조위관측소에서 최대수위 상승량 7.06m가 기록되었다. 또한 기상해일 내습 당시의 조위는 약최저저조위 기준면으로부터 5.5m 이었으며 고조위 시 기상해일이 내습하여 기상해일과 조위성분이 중첩되며 조위관측소에서 7.06m의 해수위가 관측된 것으로 파악되었다. 배수로의 조위관측소에서 관측된 최대 수면고 7.06m는 한빛부지의 평균해면을 기준면으로 변환하면 3.843m로 나타낼 수 있다.

한편 한빛부지 조위관측소 및 호기별 취수구에서 관측된 수면고를 비교해보면 5호기 취수구에서 관측된 5.69m가 최대 수위상승 이었으며, 최대 수위하강은 6호기 취수구에서(－)0.87m 이었다. 그러나 6호기 취수구에서는 관측장비의 한계를 넘는 수면고 상승이 발생된 점을 고려한다면 5호기 취수구의 결과보다 상대적으로 더 높은 수면고가 발생되었을 것으로 예상되나 구체적인 해수위 관측치가 존재하지 않기 때문에 본 평가에서는 5호기 취수구의 결과를 한빛부지에서

발생된 최대수면고로 제시하였다. 상기와 같이 2007년 3월 기상해일 당시의 해수위 관측자료를 토대로 한빛부지에 대한 기상해일 해수위 평가를 수행하였으며 그 결과 기상해일로 인한 한빛1,2호기에서의 가능최고해수위는 EL.(+)6.938m 이다.

#### 2.2.2.2 가능최대강우에 의한 설계기준 홍수

가. 가능최대강우량에 의한 안전관련 구조물의 홍수영향

(1) 한빛1,2호기 FSAR

FSAR 2.4절에 의하면 한빛 부지에서의 재현주기 50년 빈도 강우강도는 141.7mm/hr 이며, 구내배수계통의 설계유량은 50년 빈도 강우로 발생하는 유출량을 처리할 수 있다고 기술되어 있다.

(2) 한빛1,2호기 PSR

한빛1,2호기 안전관련 구조물의 침수영향을 평가하고자 수문기상학적 방법[가능최대강수량도(PMP도) 이용] 및 통계학적 방법으로 가능최대강수량을 평가하였다[2-21]. 평가결과 정읍관측소의 강우자료에 근거하여 통계학적 방법으로 산정된 지속시간 1시간 PMP 241.5mm의 강우가 가장 크게 평가되었으므로 이를 적용, 미육군공병단(USACE)의 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)를 이용하여 한빛부지에 예상되는 첨두유량(peak runoff)을 미국의 SCS(Soil Conservation Service, 현재는 NRCS, Natural Resources Conservation Service) 단위도법으로 산정하였다.

한빛부지의 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 한빛부지의 침수심은 최대 19.1cm로 평가되었다.

(3) 2차원 홍수영향 평가

한빛1,2호기 안전관련 구조물의 침수영향을 평가하고자 수문기상학적 방법[가능최대강우량도(PMP도) 이용] 및 통계학적 방법으로 가능최대강우량을 평가하였다[2-23]. 상기 평가결과 중 가장 큰 값(지속시간 1시간 PMP 240mm)을 이용하여(표 2-3 참조) 부지에 예상되는 가능최대홍수량(PMF)을 미육군공병단의 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형을 이용, Clark

방법으로 산정하였다. 최종적으로 부지의 각 지점별 최고수위를 XP-SWMM의 내부 2D 모형인 TUFLOW모형을 사용하여 2차원 수치모의를 수행하여 산정하였고, 이렇게 구한 각 지점별 최고수위와 안전관련 구조물의 1층 출입구 표고를 비교함으로써 안전관련 구조물의 침수 영향을 평가하였다. 또한 이 평가에서는 가능최대강우가 태풍으로 인해 발생하는 상황을 고려하여 해수위 상승 등으로 발전소의 우수배수계통으로는 강우가 배수되지 못하는 상황을 가정하였다. 평가 결과 일부 안전관련 출입구에서의 침수심이 출입구 표고보다 높아 침수가 발생하는 것으로 검토되었다(표 2-4).

상기와 같이 침수위가 구조물 출입구보다 높은 것으로 검토되어 침수 방지를 위하여 후쿠시마 후속조치로서 보조 및 제어건물 등 필수 안전관련 구조물의 출입구에는 2019년까지 방수문이 설치될 예정이다. 또한 방수문 설치 이전까지 극한 재해로부터의 안전성 확보를 위하여 물리적 방호조치를 수립할 예정이며, 제3장 보고서(2분야)에서 안전 개선사항으로 도출하였다.

나. 하천과 강의 가능최대홍수에 의한 홍수영향

한빛1,2호기는 부지특성상 해당 사항이 없다

다. 가상 댐파괴에 의한 홍수영향 평가

발전소에 용수를 공급하는 고창댐의 집수 및 유하 수계가 부지의 수계와 연결되지 않기 때문에 지진에 의한 댐파괴 가능성은 해당사항이 없다.

### 2.2.3 홍수를 제외한 설계기준 자연재해

가. 설계기준 강풍 및 토네이도

한빛1,2호기 안전관련 구조물의 설계풍속은 45m/s를 적용하였으며, 토네이도가 거의 발생하지 않는 부지특성을 고려하여 토네이도 설계는 별도로 고려하지 않았다[2-20].

한편 한빛1,2호기 비산물 설계에서는 상기 특성을 고려하여 토네이도의 회오리바람 압력은 태풍의 풍압을 초과하지 않는 것으로 검토하고, 태풍하중을 설계풍속으로 고려하였다. 그리고 토네이도 비산물 평가와 관련하여 가상 태풍에 의한 비산물로서 6“ Sch. 40 Pipe 등 6가지를 고려하였고[2-20], 이에 의한 비산물하중이 안전관련 구조물 설계에 반영되었다.

나. 저수위 및 해수온도

안전관련 냉각수원인 1차기기냉각해수계통의 냉각수는 서해의 해수를 취수하여 사용하므로 해수위의 저하에 의한 냉각수의 공급영향을 검토하여야 한다. 조석영향에 의한 부지의 최극저조위는 EL. (-)3.764m이며 가능최대폭풍해일에 의한 저수위는 고수위와 동일하게 강하된다고 가정하면 (-)1.73m가 된다. 따라서 부지해역에서의 가능최저해수위는 부지의 최극저조위 기준으로 폭풍해일에 의한 저수위를 감안하여 EL. (-)5.5m이다. 또한 "원전부지 설계기준 해수위 조사·연구 용역"에서 평가된 류큐 트렌치 및 난카이 트러프에서의 지진해일로 인한 한빛1,2호기 1차해수냉각수취수구조물에서의 가능최저해수위는 EL.(-)4.282m로 평가되었고, 가상 슈퍼태풍 발생 시 가능최저해수위는 EL.(-)5.402m로 평가되었다. 한편 기상해일에 의한 1차냉각해수취수구조물에서의 가능최저해수위는 EL.(-)4.772m이다. 따라서 1차냉각해수취수구조물에서의 가능최저해수위는 EL.(-)5.5m로 결정된다.

1차냉각해수취수구조물의 집수조 바닥표고는 EL.(-)7.07m이고, 1차기기냉각해수펌프의 흡입구 종단 표고는 EL.(-)6.59m로서 흡입구 종단과 가능최저수위인 EL.(-)5.50m 와는 약 1.09m(펌프의 최소 침수깊이)의 여유가 있다.

한빛1,2호기 1차기기냉각해수펌프의 가용유효흡입수두(NPSHa)와 필요유효흡입수두(NPSHr)는 각각 35′와 25′로서 이 값은 설계시 가능최저수위 EL. 53′-4″(-4.0m)를 기준으로 계산되었다. 따라서 설계시 최저수위는 현재 평가된 가능최저수위 EL. -5.5m와 비교하여 약 1.5m(약 5′)의 수위차이가 있고 결국 가능최저수위시에는 NPSHa가 35′에서 30′로 감소하게 된다. 그러나 이 값(30′)도 NPSHr(=25′)보다는 크므로 가능최저수위 발생시에도 펌프의 NPSHr은 확보되며 펌프의 Cavitation이 발생하지 않는다. 따라서 가능최저수위 발생시에도 1차기기냉각해수펌프의 필요유효흡입수두(NPSHr)가 확보되므로 펌프의 동작성능에는 이상이 없다.

해수온도의 상승이 최종열제거원에 영향을 줄 수 있는 지에 대하여 최근 10년간(2005~2016) 한빛1,2호기 취수구에서 관측된 해수온도 자료와 FSAR를 근거로 다음과 같이 평가하였다.

○ 지난 10년간 부지에서 관측된 최고 해수온도 : 33.3℃(2013년)
○ 한빛1,2호기 FSAR 에 기술된 NSCW 계통의 허용 최고 해수온도 :

상기 데이터에 근거했을 때 관측된 해수온도 33.3℃는 한빛 1~6호기의 재순환온도가 포함된 측정 자료이므로 FSAR의 제한온도 36℃에 비하여 약 2.7℃의 여유가 있는 것으로 검토되었다.

### 2.2.4 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 수준 또는 재현주기 10,000년 수준

의 설계기준초과 홍수 수준

### 2.2.4.1 지진해일에 의한 설계기준초과 홍수 수준

한빛 부지를 포함한 우리나라 서남해안은 남해와 인접해 있어 류큐 트렌치(Ryukyu Trench) 및 난카이 트러프(Nankai Trough)에서 발생되는 지진으로 인한 지진해일의 영향을 받을 수 있다.

고리1호기 스트레스테스트 평가에서는 류큐열도(Ryukyu Islands) 주변 류큐 트렌치 단층대와 일본 혼슈(Honshu)의 남측 난카이 트러프 단층대가 연동하여 발생되는 지진에 대한 10,000년 빈도 지진규모를 검토하였다. 이는 상대적으로 규모가 큰 지진의 경우 단일 단층대의 거동으로 발생되기 보다는 인접한 단층대들의 연동을 통해 발생되는 지진의 거동 특성을 고려한 것이다. 류큐 트렌치(Ryukyu Trench)의 경우, 과거 발생된 최대 규모의 지진은 Mw 8.0 지진이고 난카이 트러프(Nankai Trough)의 경우, 과거 발생된 최대 규모의 지진은 Mw 8.7 지진으로 류큐 트렌치 과거 지진 자료와 난카이 트러프 과거 지진 자료를 종합하여 지진 빈도분석을 수행한 결과 류큐 트렌치 및 난카이 트러프에서 연동형 지진으로 발생되는 10,000년 빈도 지진규모는 Mw 9.4로 평가되었다.

그러나 난카이 트러프에서 발생한 지진으로 인한 지진해일의 경우 일본열도에 가로막혀 우리나라에 큰 영향을 주지 못한 것으로 확인되었다. 이에 본 평가에서는 난카이 트러프 단층대를 제외한 류큐열도(Ryukyu Islands) 주변 류큐 트렌치 단층대에서 발생되는 지진만을 평가하였고, 이로부터 한빛 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 2-1과 같이 1981년부터 2016년까지의 35년간에 걸친 이상적인 가상 지진자료를 구성하였다. 이 지진자료를 이용하여 각 지진규모별 초과치의 연간누적횟수를 구하여 반대수지(Semi-log)에 도시하면 그림 2-2와 같이 $5.0 \leq M_w$(모멘트 규모) $\leq 7.5$ 구간은 직선으로, $M_w \geq 7.5$ 구간은 곡선으로 나타난다. G-R방법은 그림 2-2에 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 2-2에 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 2-2에 보인 바와 같이 $M_w \geq 7.5$의 곡선구간에 대한 2차 회귀식은 Tapered G-R기법에 의한 회귀식과 거의 일치하는 결과를 보인다. 따라서 그림 2-2에 나타낸 바와 같이 일정 규모 이상의 자료만을 사용하여 2차 회귀식의 적용을 통해 빈도 분석을 수행하는 것이 타당함을 확인할 수 있다.

나. 류큐 트렌치 지진 빈도분석

본 평가에서는 류큐열도(Ryukyu Islands) 주변 류큐 트렌치 단층대에서 발생되는 지진에 대한 10,000년 빈도 지진규모를 검토하였다.

표 2-5는 우리나라 서해안 및 남동해안에 영향을 미칠 것으로 파악되는 지진해일 파원역인 류큐 트렌치에서 발생된 과거 지진 자료를 보여주고 있으며 그림 2-3은 이를 발생 년도와 지진규모에 따라 도시한 자료이다. 특히, 류큐 트렌치 및 난카이 트러프 지역에서 발생된 과거 지진의 규모는 Ms와 Mw 등의 다양한 표기법이 혼용되어 기록되고 있어 본 연구에서는 이를 Mw로 일괄 환원하여 표 2-5에 제시하였다. 이 자료 중 1900년 이후의 지진기록은 계기지진이며, 그 이전 자료는 역사기록이나 지층탐사에 의한 추정치로서 중소 규모의 지진기록이 누락되어 있다고 판단된다. 그림 2-3을 보면 류큐 트렌치의 경우, 과거 발생된 최대 규모의 지진은 Mw 8.0 지진임을 확인할 수 있다. 이 자료 중 1900년 이후의 지진기록은 계기 지진이며, 그 이전 자료는 역사기록이나 지층탐사에 의한 추정치로서 중소 규모의 지진기록이 누락되어 있다.

류큐 트렌치에서 발생되는 재현주기 10,000년 빈도 지진 규모를 평가하기 위해서 본 평가에서는 표 2-5에 제시된 류큐 트렌치 과거 지진 자료를 종합하여 지진 빈도분석을 수행하였다.

상기 '가'에 제시된 지진 빈도분석 기법을 적용하여 도출된 류큐 트렌치 지역의 재현주기 10,000년 빈도 지진규모를 그림 2-4에 제시하였으며, 이로부터 10,000년 빈도의 지진 규모를 산정할 수 있는 바, 세로축의 연간 초과발생횟수(number/year)가 0.001에 해당하는 가로축의 지진규모를 독취하면 Mw 8.76이다. 따라서 류큐트렌치에서 발생하는 10,000년 빈도 지진의 규모는 Mw 8.76으로 결정하였다.

다. 재현주기 10,000년 빈도 지진해일의 단층 파라미터

해저 지진의 규모에 따른 단층의 제원은 지진해일의 초기 파형을 결정하는 데 있어

서 필수적인 요소이다. 단층 제원에 따른 지진해일의 초기수면분포는 Mansinha and Smylie(1971)의 해석해를 적용하여 구할 수 있다. 그림 2-5는 지진해일 초기수면형상을 산정하기 위한 단층 파라미터의 개념도를 보여준다. 그림에서 $H$는 단층면의 상연깊이, $\theta$는 진북과 이루는 단층면의 주향을 표시하며, $\delta$는 dip angle, $\lambda$는 slip angle, $W$는 단층의 폭, $L$은 단층의 길이, $D$는 단층의 변위를 나타낸다.

일본 방재과학기술연구소(NIED, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)의 확률론적 지진동 해저드의 평가조건 (2013年版の 確率論的地震動ハザードの評価條件について)[2-24]'에서는 그림 2-6에 제시된 바와 같이 류큐트렌치 영역에서 7.6 < Mw < 8.2 범위 내의 지진에 대하여는 단층의 크기를 $L$ 90km × $W$ 90km, 8.3 < Mw < 9.0 범위 내의 지진에 대하여는 $L$ 200km × $W$ 150km, Mw 9.1 이상의 지진에 대하여는 $L$ 500km × $W$ 200km로 설정하였다. 또한 트렌치를 따라 지진원의 위치를 이동시켜 다양한 지진원 위치에 대해 해안 도시의 해일 침수를 예측하여 방재대책을 수립할 것을 제시하고 있다.

본 평가에서는 그림 2-7에 제시한 바와 같이 일본 방재과학기술연구소에서 제안하는 몇 가지 지진규모에 대한 단층의 길이와 폭에 대한 회귀식을 유도하고, 이를 이용하여 류큐 트렌치에서의 10,000년 빈도 지진규모인 Mw 8.76에 대해 $L$ 236.80km × $W$ 157.94km를 설정하였다.

본 평가에서는 Case1의 단층파라미터를 기준으로 그림 2-6에 제시된 단층대를 따라 동측으로 단층의 절반이 겹쳐지도록 이동하며 Case2~Case8을 설정하였다. 본 평가를 통해 설정된 류큐 트렌치 영역 단층파라미터 Case1~Case8의 초기수면변위 분포는 Mansinha and Smylie(1971)의 해석해를 적용하여 작성되었다. 표 2-6은 각각의 단층 제원을 보여주며, 그림 2-8~그림 2-9는 표 2-6에 제시된 단층 제원에 대한 지진해일의 초기 파형을 제시하였다. Case1~Case8에서 최대 초기수면변위의 크기는 약 6.5m로 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 수치해석 시 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 분산보정계수가 포함된 선형 천수방정식에 Coiolis 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 얕은 해안 근처에서 지진해일의 거동은 분산효과보다 상대적으로 비선형 효과와 바닥마찰이 지배적으로 작용한다. 그러므로 수심이 얕고 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 동해중부 지진해일 및 1993년 북해도 남서외해 지진해일을 적용하여 수치모의를 수행하고, 이 결과와 묵호항, 포항항 및 울산항 조위관측소에서 당시 관측된 지진해일 성분을 비교하였다. 비교 결과 수치모의 결과치와 조위관측소의 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 2-10에 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(△Ψ)을 1min으로 정하고 격자위도 간격(△Φ=cosΦ△Ψ)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 한빛 부지 전면 상세역에 대해서는 상세격자 및 동적격자접속기법을 적용하여 격자 분해능을 유지하였다. 표 2-7은 지진해일 전파 및 범람 수치모의에 적용된 격자정보 및 계산조건을 보여주며 그림 2-11과 그림 2-12는 동적격자접속기법을 통해 그림 2-10에 제시된 광역 계산영역에 연결되는 상세역의 계산영역, 수심 분포를 보여준다.

(2) 수치모의 결과

류큐 트렌치에서의 지진해일로 인한 한빛1,2호기 해역에서의 해수면 상승고 평가를 위하여 앞에서 제시된 초기 수면변위를 적용하여 지진해일 전파 및 범람 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과 한빛 1,2호기 취수로 내부(기기냉각해수 취수구조물 전면)에서의 가장 큰 해수면 상승치는 류큐 트렌치에서의 지진해일시(Case 7) 최대 0.29m로 평가되었다. 결론적으로 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 다음과 같다. 한편 재현주기 10,000년 빈도의 폭풍해일시 취수로 내부(한빛1호기)에서 최대 1.968m의 파고(아래 2.2.4.2절에 제시)가 발생하는 것에 미루어보아 방파제 내부에 위치한 취수로의 특성상 재현주기 수년 이상의 파랑 처오름고는 이보다 훨씬 작을 것이므로 지진해일에 의한 가능최고해수위 평가결과에 큰 영향을 주지 않아 별도 고려하지 않았다.

가능최고해수위 = 10% 초과고조위 + 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 해수면상승고

= EL.(+)3.748m + 0.29m = EL.(+)4.038m

상기와 같이 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)4.038m로 평가되었다.

### 2.2.4.2 폭풍해일에 의한 설계기준초과 홍수 수준

한빛 부지가 위치한 우리나라의 서남해안은 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, 한빛 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

한빛 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)에서도 기술된 바 있는Kerry Emanuel 등(2006, 2008)이 제안한 방법을[2-25, 2-26] 적용하였다. 이 방법에서는 확률분석의 신뢰도를 향상시키기 위하여 부지 반경 100km를 통과하는 약 30,007개 인공태풍의 진로를 1980-2016년까지의 NCAR(National Centers for Atmospheric Research)/NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 재분석 자료를 이용하여 작성하였다.

상기 30,007개의 인공태풍을 바탕으로 그림 2-13과 같이 한빛 부지 주변에서의 최대풍(1분 평균 최대풍속)에 대한 빈도분석을 수행하였다. 그림 2-13에서 보듯이 한빛 부지 주변에서의 재현주기 10,000년 빈도의 1분 평균 최대풍속은 약 116knot(≒60m/sec)임을 확인할 수 있다. 이에 따라 본 평가에서는 한빛 부지 주변(반경 100km 범위)에서 재현주기 10,000년 빈도 최대풍 풍속(약 60m/sec)을 발생시키는 태풍을 선정하였다.

30,007개의 인공태풍 중 한빛 부지에서 최대풍속(116±6knot)을 발생시키는 태풍은 총 7개로 파악되었다. 또한 한빛 부지의 경우 중국을 경유하여 우리나라의 남서쪽에서 접근하는 태풍에 의해 큰 파랑이 발생할 수 있기 때문에 추가적으로 3개의 태풍을 추가하여 영향분석을 실시하였다. 총 10개 태풍의 이동경로 및 중심기압, 최대풍 반경, 최대풍속을 그림 2-14～그림 2-18에 각각 제시하였다. 10,000년 빈도 최대풍 풍속을 제공하는 태풍 중 가장 큰 유의파고를 일으키는 상위 3개 태풍과 남서쪽에서 접근하는 태풍 3개에 대해서 태풍의 중심 위치가 위도 30°N 이상일 때부터 40°N까지 위치하는 동안 2시간 간격으로 해당 태풍의 파라미터(태풍 중심의 이동경로, 중심기압, 최대풍 반경 및 최대풍속)를 표 2-8～표 2-13에 제시하였다. 앞서 언급된 7개의 태풍 중 10,000년 빈도 최대풍 풍속을 제공하는 태풍

은 05091번, 19382번과 19756번 태풍이며 이하 트랙번호의 오름차순으로 Track01, Track02, 그리고 Track03으로 지칭한다. 남서쪽으로 접근하는 태풍은 18318번, 19168번, 27534번이며, Track_SW01, Track_SW02, Track_SW03으로 칭하였다. 표 2-14에는 위도와 상관없이 발생 후 한빛 부지 주변을 지나 소멸되기까지 1분 평균 최대풍속 중 최대값을 별도로 표시하였다.

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 한빛 부지 주변을 지나 소멸되기까지 130knot를 초과하는 1분 평균 최대풍속이 존재하므로 슈퍼태풍으로 분류될 수 있다. 표 2-14에는 3개 태풍에 대해 발생부터 소멸까지 가장 큰 풍속이 발생한 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. 오유정 등 (2016)에서는 아래 식과 같이 1시간 지속 풍속을 기준으로 지속시간 변화에 따른 풍속을 계산할 수 있는 식을 제시하였다.

$$V_{600} = 0.7 \times V_{60} + 6.47 \quad (V_{60} > 21.65\,m/s)$$
$$V_{600} = V_{60} \quad (V_{60} \leq 21.65\,m/s)$$

이에 6개 인공태풍(Track01～Track_SW03)의 1분 평균 최대풍속을 상기 식에 따라 10분 평균 최대풍속으로 변환하였다. 상기 식에서 $V$의 아래첨자는 바람의 지속 시간(sec)을 나타낸다.

나. 폭풍해일 및 파랑 수치모형

(1) 폭풍해일 수치모형

폭풍해일은 주기가 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 식들은 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 선형천수방정석(Linear Shallow Water Equation, LSWE)에 아래 식과 같이 태풍의 바람을 고려하기 위한 항이 추가되어 적용되었다. 아울러 최상세역은 범람 수치모의를 위해 이동경계(Moving Boundary)를 도입한 비선형 천

수방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

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

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

2차원 비선형 천수방정식을 이용한 수치모의를 위하여 본 평가에서는 정방형 엇갈림 격자를 사용하였으며, 수치기법으로는 양해법인 Leap-frog 유한차분법을 적용하였다.

(2) 파랑 수치모형

본 평가에서는 네덜란드 델프트(Delft) 대학에서 개발된 SWAN(ver. 41.10) 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

한빛 부지에 대한 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일 수치모의를 위해 그림 2-19에 제시한 바와 같이 [redacted] 표 2-15는 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일 수치모의에 적용된 격자정보 및 계산조건을 보여준다. 표 2-15의 상세역의 계산격자 크기는 광역의 1/3로 설정되어 그림 2-19에 제시된 광역 A영역으로부터 그림 2-21의 최상세역 F영역 까지 총 6단계로 동적격자접속기법을 통해 연속적으로 연결되어 수치모의가 수행되도록 설정하였다.

(2) 폭풍해일 수치모의 결과

재현주기 10,000년 빈도 태풍 Track01～Track_SW03에 대한 폭풍해일 수치모의를 수행하였다. 표 2-8～표 2-13에 제시된 각 태풍별 파라미터가 입력 자료로 적용되었으며, 태풍의 풍속은 10분 평균 최대풍속으로 변환되어 입력되었다. 평가결과 그림 2-22와 같이 각 태풍 별로 한빛 부지 최상세역에서 계산된 최대폭풍해일고가 도출되었으며, 표 2-16에는 각 태풍 별 최대 폭풍해일고를 제시하였다.

라. 파랑 수치모의

재현주기 10,000년 빈도 태풍의 바람에 의해 생성되는 파랑이 한빛 부지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 SWAN 수치모형을 활용한 파랑수치모의를 수행하였다. 수치모의에는 상기 제시된 각 태풍별 파라미터가 입력 자료로 적용되었으며, 태풍의 풍속은 10분 평균 최대풍속으로 변환되어 입력되었다. 평가결과 그림 2-23에 보인 바와 같이 각 태풍 별로 한빛1호기 기기냉각해수 취수구조물 전면에서의 유의파고 분포와 파향벡터도가 도출되었으며, Track 02에서의 유의파고가 제일 큰 값을 나타내었다(표 2-17).

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

표 2-16에 보인 최대폭풍해일고와 표 2-17의 최대유의파고를 합산하면 [redacted]로 가장 높은 값을 보여주었다(표 2-18). 이 값은 최댓값의 합산이며, 실제 발생시간을 고려하면 표 2-18에 제시된 값보다 낮은 수위가 나타날 것으로 검토되었다.

바. 재현주기 10,000년 빈도 태풍에 의한 가능최고해수위

상기 평가결과와 같이 한빛1,2호기의 안전관련 구조물에 직접 영향을 주는 방파제

내부 한빛1호기 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 가능최고해수위는 다음과 같다. 이 수위는 설계기준 가능최고해수위로 제시된 방파제 외부에서의 가능최고해수위[EL.(+)8.3928m] 보다 작은데 이는 방파제 내부에서는 파의 처오름높이(약 2.0m)가 발생하지 않기 때문이다.

가능최고해수위 = 10% 초과고조위 + 폭풍해일고(Storm surge) + 취수로 내부 유의파고

#### 2.2.4.3 재현주기 10,000년을 초과하는 국지강우에 의한 홍수 수준

가능최대강우에 의한 한빛1,2호기 설계기준 홍수 수준 평가에서는 통계학적으로 약 10,000년 빈도를 초과하는 가능최대강우량(PMP)을 이미 적용하였다. 그러나 극한 자연재해에 대한 대응능력 확인 차원에서 규제기관 검증지침에서 요구하고 있는 가능최대강우의 1.5배 해당하는 국지강우가 부지에 발생할 경우 안전관련 구조물의 홍수영향을 추가적으로 검토하여 보고서에 반영할 예정이다.

### 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 한빛 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 남쪽인 광주 및 목포와 부지의 북쪽인 군산에서 기상관측 이후 2016년까지 관측된 풍속자료를 [2-27] 사용하였다. 최대풍속의 경우 광주 및 목포는 1940년에서 2016년까지, 군산은 1968년에서 2016년까지의 관측 자료를 사용하였다. 최대순간풍속의 경우에는 광주는 1964년에서 2016년까지, 목포는 1959년에서 2016년까지, 군산은 1968년에서 2016년까지의 관측 자료를 사용하였다(표 2-19. 표 2-20, 표 2-21).

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 평가에

서 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.

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

여기서,

$X_T$ : 재현기간 T에 해당하는 최대값

$\mu$ : 표본의 평균

$\sigma$ : 표본의 표준편차

평가결과 계산된 부지의 10,000년 빈도 최대풍속은 광주지방 38.17m/s, 목포지방 58.2m/s, 군산지방 53.13m/s, 10,000년 빈도 최대순간풍속은 광주지방 52.96m/s, 목포지방 58.5m/s, 군산지방 63.99m/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 등의 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 구분되며 풍속 범위는 다음과 같다.

○ F0 : 풍속이 33m/s 이하(light)
○ F1 : 풍속이 33～49m/s(moderate)
○ F2 : 풍속이 50～69m/s(considerable)
○ F3 : 풍속이 70～92m/s(severe)
○ F4 : 풍속이 93～116m/s(devastating)
○ F5 : 풍속이 117～140m/s(incredible)

한빛1,2호기 설계에서는[2-20] 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.

토네이도 관련 연구결과[2-28]에서는 우리나라의 경우 구조물에 피해를 입힐 정도로 큰 규모의 토네이도 발생사례 및 발생된 토네이도의 관측 자료가 매우 적어 우리나라 육지에서의 토네이도 발생빈도를 $1.6\times10^{-6}/km^2\cdot yr$로 산정한 바 있다. 또한 그 규모를 서울(1964년) 및 홍성(1989년)에서 발생한 토네이도에 대한 피해사진을 분석하여 Fujita 규모의 토네이도 등급 중 F0 내지 F1 급의 토네이도로 추정한 바 있다. 따라서 발전소의 북쪽이 산지에 막혀 있는 부지의 특성을 고려한다면 한빛 부지에서 F1 급의 토네이도는 발생가능성이 거의 없으며, 따라서 F1 급의 토네이도는 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있다. 그러나

자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 상황을 가정하여 3장 보고서에서 구조물・계통・기기의 건전성을 평가하였다.

### 2.2.5.2 설계기준초과 가능최저해수위 및 해수온도

가. 설계기준초과 가능최저해수위

한빛1,2호기 부지에서의 설계기준초과 가능최저해수위는 폭풍해일에 의한 해수위가 지배적이며, 앞서 평가된 재현주기 10,000년 빈도 설계기준초과 폭풍해일 수치모의 결과 취수로 내부에서의 가능최저해수위는 다음과 같다.

가능최저해수위 = 10% 초과저조위 + 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 해수위 하강

상기와 같이 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 가능최저해수위는 로 평가되었다.

나. 설계기준초과 해수온도

한빛1,2호기 FSAR 에 의하면 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도는 이다. 한편 2005년부터 2016년까지 최근 10년간 한빛1,2호기 취수구에서 관측된 최고 해수온도는 이다.

한편 지구 온난화에 따른 해수온도 상승이 전 세계적으로 문제가 되고 있으며 우리나라에서도 이와 관련한 조사 및 연구 활동이 보고되고 있다. 국립수산과학원에서는 1968년~2015년까지의 해수온도 관측치를 근거로 우리나라 연안에서의 수온상승에 대하여 조사하였고, 그 결과 표층 수온은 평균 1.11℃ 상승하였으며, 동해는 1.39℃, 남해는 0.91℃, 서해는 1.2℃ 상승하였다고 발표하였다. 그러므로 상기 연구에 근거하면 서해에서의 연간 수온상승은 0.026℃ 이므로 0.03℃로 가정할 경우, 한빛1,2호기 운영종료시까지 향후 약 10년을 고려하면 수온은 현재보다 약 0.3℃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 10년을 고려하면 0.25℃ 정도의 상승이 가능하다. 따라서 한빛1,2호기

운영종료시까지 향후 약 10년을 고려할 경우 설계기준초과 해수온도 산정에서 기후변화로 인한 수온 상승치는 최대 0.3℃로 가정함이 타당할 것이다. 이 경우 기관측된 [redacted]를 설계기준초과 해수온도로 볼 수 있다.

## 제3절 안전 개선사항

### 3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

설계기준초과 극한자연재해의 특성과 관련하여 한빛1,2호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행된 사항은 다음과 같다.

가. 지진 자동 정지설비 설치

일정규모([redacted]) 이상의 지진이 감지될 경우 원자로가 자동정지 되도록 지진원자로자동정지시스템을 설치하였다.

나. 원전부지 최대지진에 대한 조사・연구

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

다. 원전 설계기준 해수위 조사・연구

고리, 월성, 한빛, 한울 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 2-22에서 보듯이 “자연재해에 의한 월성부지 안전성 및 격납건물 건전성 확인”의 3가지 세부사항은 한빛1,2호기 평가에서 안전 개선사항으로 도출되었거나 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

해당사항 없음

### 3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

해당사항 없음

## 제4절 결론

한빛1,2호기 스트레스테스트 평가분야 중 “설계기준 초과 극한자연재해의 특성”을 평가하기 위하여 1) 설계기준지진의 수준, 2) 설계기준지진의 타당성, 3) 지진발생 시 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 또는 재현주기 10,000년 수준의 홍수를 제외한 설계기준초과 자연재해를 검토하였다. 상기 7개 항목에 대한 평가결과는 다음과 같다.

○ 한빛1,2호기 안전정지지진(0.2g)은 한빛 부지 반경 320km내 13개의 지진지체구조구와 읍천단층, Z단층, 9.12 지진 및 포항지진 유발단층으로부터 잠재적인 최대지진을 평가하여 최대지반가속도를 결정하였으며, 속리산지진이 부지하부에서 발생하였다고 가정하고 7개 감쇄식에 대입하여 최대지반가속도를 구하면 최대값은 0.1788g로 평가됨. 이러한 검토사항을 기초로 할 때, 부지에서의 최대 잠재 영주기 지반가속도 0.2g는 타당한 것으로 검토되었음. 한편 면적지진원과 선형지진원(읍천단층, Z단층, 9.12지진 및 포항지진 유발단층)을 모두 고려한 한빛1,2호기의 안전정지지진(SSE) 0.2g에서의 연초과빈도는 평균값 수준에서 약 2.01×10-5/년으로 계산되었으며, 이를 재현주기로 환산하면 약 49,800년으로 평가됨. 이는 규제지침서(KINS/RG-N01.07)에서 규정하는 1.0×10-3/년 기준을 만족하여 설계기준지진은 타당한 것으로 검토되었음. 또한 재현주기 10,000년에 해당하는 최대지반가속도의 평균값은 0.11g로 평가되었음. 스트레스테스트 수행지침에 따르면, 재현주기 10,000년 수준의 지진동과 0.3g 중 큰 값을 설계기준초과 지진동으로 정의하고 있음. 한빛1,2호기에서의 재현주기 10,000년 지진동인 0.11g는 0.3g보다 작으므로, 설계기준초과 지진동으로는 0.3g를 적용함

○ 지반변형에 의한 안전성 검토 결과 한빛1,2호기 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(0.11g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서는 영구사면 안정성을 유지할 수 있고 침하 영향도 없을 것으로 평가되었음

○ 한빛1,2호기 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일 등에 의한 설계기준해수위와 비교하여 안전여유도를 갖고 있음. 그러나 가능최대강우(PMP)에 의한 침수영향이 발생할 수 있어 물리적인 방호조치 및 방수문 설치를 진행중임

○ 한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 류큐트렌치의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 및 그로 인한 해수면 상승고를 평가한 결과, 해수면 상승고는 최대 0.29m로 평가되었음. 이 때 방파제 내부 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 가능최고해수위는 EL.(+)4.038m임

○ 한빛1,2호기의 안전관련 구조물에 직접 영향을 주는 방파제 내부 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)6.982m로 평가되었음

○ 가능최대강우 및 가능최대강우의 1.5배 강우 발생시 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였음

○ 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 최대순간풍속을 평가한 결과 부지의 최대풍속은 58.2m/s, 최대순간풍속은 63.99m/s임. 한빛1,2호기 부지에서 F1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있음. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 급의 토네이도를 설계기준초과 토네이도로 고려함

○ 한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 가능최저해수위 평가결과 해수위는 EL.(-)5.558m로 검토되었음. 한편 설계기준초과 해수온도는 발전소 운영종료시까지 향후 약 10년을 고려할 경우 기후변화로 인한 수온 상승치 최대 0.3℃를 포함하여 33.6℃로 평가되었음

상기와 같은 한빛1,2호기의 설계기준초과 극한자연재해의 평가결과에 근거하여 제3장 보고서(극한자연재해에 대한 구조물・계통・기기 건전성)에서는 극한자연재해에 대한 한빛1,2호기 구조물・계통・기기의 건전성을 평가하였다.

## 제5절 참고문헌


2-1. 원자력안전위원회, 스트레스테스트 수행지침(개정 1), 2016.

2-2. 한수원(주), 신고리5,6호기 예비안전성분석보고서(PSAR).

2-3. 한수원(주), 한빛5,6호기 최종안전성분석보고서(FSAR).

2-4. 노명현, 이기화, 한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(II): 예측 공식의 개발, 대한지질학회, 31, No. 3, pp. 175-187, 1995.

2-5. Baag, C.E., Seismic wave attenuation in the Korean Peninsula, International Workshop & Seminar on Probabilistic Hazard Analysis held at Daejon on Nov. 17-20, 1997.

2-6. 박동희, 이정모, 박창업, 김준경, 한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇄식, 지질학회지, 제37권, 제1호, pp. 21-30, 2001.

2-7. 박지억, 노명현, 이기화, 한반도 남부 지역의 지진동 감쇄식 개발, 한국지진공학 논문집, 제3권, 제1호, pp. 21-27, 1999.

2-8. 이정모, 한반도 강지진동 감쇠특성, KINS/HR-480, 한국원자력안전기술원, 2002.

2-9. Junn, J.-G., Jo, N.-D., and Baag, C.-E., Stochastic prediction of ground motions in southern Korea, Geosciences Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 203-214, 2002.

2-10 조남대, 박창업, 한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇄상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사, 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, pp. 59-70, 2003.

2-11. 한수원(주), 신월성 1,2호기 최종안전성분석보고서: 부록 E. 읍천단층 정밀조사결과, 2011.

2-12. 한국원자력환경공단, 중저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성분석보고서.

2-13. 한국전력기술(주), 한빛1,2호기 확률론적 지진재해도 분석 보고서, 2019.

2-14. 한수원(주), 중.저준위방사성폐기물처분시설 확률론적 지진재해도 분석 보고서, 2009.

2-15. 한국전력기술(주), 신고리3,4호기 부지 지진안정성 평가보고서, 2018.

2-16. 한국전력기술(주), 신고리3,4호기 부지 포항지진 지진안정성 평가보고서, 2018.

2-17. 한수원(주), 신고리3,4호기 확률론적 지진재해도 분석 보고서, 2018.

2-18. Son, M., Cho. C. S., Shin, J. S., Rhee, H.-M., and Sheen, D.-H., Spatiotemporal distribution of events during first three months of the 2016 Gyeongju, Korea, earthquake sequence, Vol 108, No. 1., pp. 210-217, 2018.

2-19. 한국지질자원연구원, 경주지진 중간 조사결과 발표자료, 동남권 지진·단층 연구사업 발표회, 2017.

2-20. 한수원(주), 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서(FSAR).

2-21. 한수원(주), 한빛1,2호기 제2차 주기적 안전성평가보고서(PSR), 2017.
2-22. 한수원(주), 원전부지 설계기준 해수위 조사・연구 용역 보고서, 2015.
2-23. 한수원(주), 한빛부지 2차원 침수심 평가 용역 보고서, 2018.
2-24. 일본 방재과학기술연구소, 확률론적 지진동 해저드의 평가조건 (2013年版の確率論的地震動ハザードの評価條件について).
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. 기상청, 기상관측 자료(1940～2016).
2-28. 한국강구조학회지 제5권 2호, p 247～260, 원자력 발전소 구조물의 건전성에 미치는 토네이도 영향 연구, 1993

## 제6절 표, 그림

표 2-1 지진지체구조와 관련한 최대지진

| Tectonic Province | Date of Maximum Earthquakes | | | Epicenter or Location of Maximum Intensity | | Focal Depth (If known) (km)[1] | Epicentral Distance to the Site (km) | Adjusted Distance to the Site (km) | | Library and Source | Magnitude |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Year | Month | Day | Latitude | Longitude | | | Epi.[2] | Hypo.[3] | | |

주1) 진원깊이가 알려지지 않은 경우 진원깊이를 10km로 가정하여 계산하였음

주2) Epicentral

주3) Hypocentral

표 2-2 최대지진에 의한 부지가속도

| Tectonic Province | Maximum Magnitude | Adjusted Distance to the Site(km)[1] | Horizontal Ground Acceleration (g)[2] | | | | | | | Maximum Potential Ground Acc. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | N&L | Baag | Park, D | Park et al. | Lee | Juun | J&B | |

주1) The closest distance from tectonic province to the site in km

N&L : Noh and Lee, 1995
Baag : Baag, 1997
Park, D : 박동희 외, 2000
Park et al. : 박지억 외, 1999
Lee : 이정모, 2002
Junn : Junn et al., 2002
J&B : 조남대와 박창업, 2003

주2) 진원깊이가 알려지지 않은 경우 진원깊이를 10km로 가정하여 계산하였음

표 2-3 한빛부지의 가능최대강우량 비교

| 구분 | 지속기간별 가능최대강우량(mm) | | | | | | 채택 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1hr | 2hr | 6hr | 12hr | 24hr | 48hr | |
| 수문기상학적 방법 (PMP도 방법) | 232 | 305 | 563 | 844 | 1,139 | 1,293 | |
| 포락선공식 방법 | 118.6 | 161.9 | 265.1 | 361.9 | 494.1 | 610.7 | |
| 통계학적 방법[1)] | 240 | 384 | 546 | 753 | 874 | - | ◎ |

주) 통계학적 방법 : 정읍기상관측소 45개년 시강우자료(1973~2017) 강우자료 반영

표 2-4 한빛1,2호기 안전관련 구조물 침수영향 검토 결과

| 건물명 | 출입문 문턱표고 (EL. m) | 최대수위(EL.m) | 침수심(m) |
|---|---|---|---|
| | | | |

표 2-5 류큐 트렌치 과거 지진 목록 (NOAA, http://www.ngdc.noaa.gov)

| Year | Month | Day | Location | Lat. (°N) | Long. (°E) | Mw |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1966 | 3 | 12 | TAIWAN | 24.100 | 122.600 | 8.0 |
| 1901 | 6 | 24 | JAPAN: RYUKYU ISLANDS | 27.000 | 130.000 | 7.9 |
| 1986 | 11 | 14 | TAIWAN: TAIPEI, HUALIEN | 23.901 | 121.574 | 7.8 |
| 1938 | 6 | 10 | JAPAN: SW RYUKYU ISLANDS | 25.208 | 125.115 | 7.6 |
| 1922 | 9 | 1 | TAIWAN | 24.500 | 122.000 | 7.6 |
| 1972 | 1 | 25 | TAIWAN | 22.500 | 122.300 | 7.5 |
| 1998 | 5 | 3 | TAIWAN | 22.306 | 125.308 | 7.5 |
| 1771 | 4 | 24 | JAPAN: RYUKYU ISLANDS | 24.000 | 124.300 | 7.4 |
| 1978 | 7 | 23 | TAIWAN | 22.282 | 121.512 | 7.4 |
| 1951 | 10 | 22 | TAIWAN | 23.800 | 121.700 | 7.3 |
| 1963 | 2 | 13 | TAIWAN: TAIPEI, HSINCH | 24.500 | 122.100 | 7.3 |
| 1914 | 1 | 12 | JAPAN: SAKURIJIMA | 31.580 | 130.670 | 7.1 |
| 1995 | 10 | 18 | JAPAN: RYUKU IS. | 27.929 | 130.175 | 7.1 |
| 2002 | 3 | 31 | TAIWAN: TAIPEI | 24.279 | 122.179 | 7.1 |
| 2010 | 2 | 26 | JAPAN: TORI SHIMA, OKINAWA | 25.930 | 128.425 | 7.0 |
| 2006 | 12 | 26 | TAIWAN: PINGTUNG | 21.799 | 120.547 | 7.0 |
| 1995 | 10 | 19 | JAPAN: RYUKU IS. | 28.094 | 130.148 | 6.8 |
| 1792 | 8 | 9 | TAIWAN: JIAYI, TAINAN | 23.600 | 120.500 | 6.8 |
| 2001 | 12 | 18 | TAIWAN | 23.954 | 122.734 | 6.8 |
| 1667 | | | MIYAKOJIMA, JAPAN | 25.000 | 125.500 | 6.7 |
| 1768 | 7 | 22 | RYUKYU TRENCH | 26.200 | 127.500 | 6.5 |
| 1994 | 5 | 24 | TAIWAN | 23.959 | 122.448 | 6.5 |
| 2002 | 3 | 26 | JAPAN: RYUKYU ISLANDS | 23.346 | 124.090 | 6.4 |
| 1661 | 1 | 8 | TAIWAN | 23.000 | 120.100 | 6.4 |
| 1882 | 12 | 9 | TAIWAN: ZHANGHUA | 23.800 | 120.500 | 6.3 |
| 1990 | 12 | 13 | TAIWAN: HUA-LIEN | 23.722 | 121.627 | 6.3 |
| 1661 | 2 | 15 | TAIWAN: TAINAN | 23.000 | 120.200 | 6.0 |
| 1867 | 12 | 18 | TAIWAN: CHILUNG (KEELUNG) | 25.500 | 121.700 | 6.0 |
| 1917 | 5 | 6 | TAIWAN | 23.200 | 121.600 | 5.8 |

표 2-6 10,000년 빈도 지진 Mw 8.76의 단층 파라미터 CASE1 ~ 8

| No. | Location | | $H$ (km) | Θ (°) | δ (°) | λ (°) | $L$ (km) | $W$ (km) | $D$ (m) | $M_W$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°E) | Long. (°N) | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

표 2-7 한빛 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 계산영역별 격자구성 및 계산조건

| Region | No. of Grids | Grid spacing $\Delta\psi$ | △t(sec) | Remarks |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 2-8 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 01, 5091)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-9 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 02, 19382)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-10 10,000년 빈도 태풍 파라미터(Track 03, 19756)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-11 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 01, 18318)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-12 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 02, 19168)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-13 남서쪽 접근 태풍 파라미터(Track_SW 03, 27534)

| No | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum circular wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) | Tran-slation speed (knot) | Maximum wind speed (knot) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | | | |
| | | | | | | | |

표 2-14 Track 별 1분 지속 평균 최대풍속 정보

| Track | Location | | Central Pressure (hPa) | Maximum wind speed (knot) | Radius of maximum circular wind(km) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Lat. (°N) | Long. (°E) | | | |
| | | | | | |

표 2-15 한빛 원자력발전소 폭풍해일 수치모의를 위한 계산조건

| Region | No. of Grids | Grid spacing $\Delta\psi$ | $\Delta$t(sec) | Remarks |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 2-16 모의된 태풍에 의한 In1 관측지점에서의 최대 폭풍해일고

| Track | Maximum surge height (m) |
|---|---|
| | |

표 2-17 한빛1호기 기기냉각해수 취수구조물 전면에서의 TRACK 별 최대 유의파고와 최대유의파 시점에서의 첨두주기 및 평균주기

| TRACK | Maximum Hsig (m) | Peak period (sec.) | Mean period (sec.) |
|---|---|---|---|
| | | | |

표 2-18 한빛1호기 기기냉각해수 취수구조물 전면에서의 TRACK 별 폭풍해일고와 파고의 합산 최대값

| TRACK | Tide (m) | Maximum surge height (m) | Maximum Hsig (m) | Total sum (m) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 2-19 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(광주, 단위 : m/s)

| 연 도 | 최대풍속 | 연 도 | 최대풍속 | 연 도 | 최대순간풍속 | 연 도 | 최대순간풍속 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1940 | 25.8 | 1991 | 13.3 | 1940 | | 1991 | 24.0 |
| 1941 | 18.2 | 1992 | 12.0 | 1941 | | 1992 | 18.7 |
| 1942 | 16.8 | 1993 | 13.5 | 1942 | | 1993 | 19.3 |
| 1943 | 15.7 | 1994 | 15.0 | 1943 | | 1994 | 19.7 |
| 1944 | 14.8 | 1995 | 17.7 | 1944 | | 1995 | 21.1 |
| 1945 | 26.3 | 1996 | 13.0 | 1945 | | 1996 | 18.2 |
| 1946 | 15.8 | 1997 | 15.3 | 1946 | | 1997 | 27.3 |
| 1947 | 15.0 | 1998 | 17.7 | 1947 | | 1998 | 25.4 |
| 1948 | 14.7 | 1999 | 23.8 | 1948 | | 1999 | 39.6 |
| 1949 | 13.0 | 2000 | 17.9 | 1949 | | 2000 | 29.0 |
| 1950 | 12.8 | 2001 | 12.2 | 1950 | | 2001 | 20.8 |
| 1951 | 13.5 | 2002 | 15.2 | 1951 | | 2002 | 24.8 |
| 1952 | 16.7 | 2003 | 13.7 | 1952 | | 2003 | 24.0 |
| 1953 | 11.7 | 2004 | 13.0 | 1953 | | 2004 | 21.2 |
| 1954 | 13.3 | 2005 | 11.7 | 1954 | | 2005 | 20.8 |
| 1955 | 12.2 | 2006 | 12 | 1955 | | 2006 | 28.8 |
| 1956 | 15.0 | 2007 | 11.2 | 1956 | | 2007 | 20.0 |
| 1957 | 14.3 | 2008 | 11.1 | 1957 | | 2008 | 18.0 |
| 1958 | 10.0 | 2009 | 14.2 | 1958 | | 2009 | 23.3 |
| 1959 | 15.5 | 2010 | 12.2 | 1959 | | 2010 | 20.0 |
| 1960 | 25.0 | 2011 | 14.0 | 1960 | | 2011 | 22.8 |
| 1961 | 20.8 | 2012 | 14.6 | 1961 | | 2012 | 25.0 |
| 1962 | 20.7 | 2013 | 10.5 | 1962 | | 2013 | 17.3 |
| 1963 | 20.3 | 2014 | 9.4 | 1963 | | 2014 | 18.6 |
| 1964 | 20.0 | 2015 | 12.8 | 1964 | 27.7 | 2015 | 19.2 |
| 1965 | 18.7 | 2016 | 12.4 | 1965 | 22.2 | 2016 | 20.5 |
| 1966 | 15.7 | | | 1966 | 23.4 | | |
| 1967 | 13.3 | | | 1967 | 25.0 | | |
| 1968 | 13.7 | | | 1968 | 22.8 | | |
| 1969 | 15.7 | | | 1969 | 22.1 | | |
| 1970 | 16.0 | | | 1970 | 30.0 | | |
| 1971 | 16.0 | | | 1971 | 21.3 | | |
| 1972 | 16.7 | | | 1972 | 32.0 | | |
| 1973 | 14.7 | | | 1973 | 25.2 | | |
| 1974 | 12.3 | | | 1974 | 23.2 | | |
| 1975 | 12.7 | | | 1975 | 26.7 | | |
| 1976 | 14.3 | | | 1976 | 23.5 | | |
| 1977 | 15.3 | | | 1977 | 31.0 | | |
| 1978 | 12.8 | | | 1978 | 26.7 | | |
| 1979 | 11.0 | | | 1979 | 25.1 | | |
| 1980 | 12.0 | | | 1980 | 22.2 | | |
| 1981 | 16.7 | | | 1981 | 31.6 | | |
| 1982 | 13.3 | | | 1982 | 22.6 | | |
| 1983 | 16.7 | | | 1983 | 25.0 | | |
| 1984 | 12.3 | | | 1984 | 21.8 | | |
| 1985 | 13.5 | | | 1985 | 24.4 | | |
| 1986 | 15.7 | | | 1986 | 28.2 | | |
| 1987 | 13.0 | | | 1987 | 24.2 | | |
| 1988 | 11.0 | | | 1988 | 24.7 | | |
| 1989 | 12.0 | | | 1989 | 19.3 | | |
| 1990 | 14.3 | | | 1990 | 29.9 | | |
| 재현주기 10,000년 빈도 | | 38.17m/s | | 재현주기 10,000년 빈도 | | 52.96m/s | |

표 2-20 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(군산, 단위 : m/s)

| 연 도 | 최대풍속 | 연 도 | 최대순간 풍속 |
|---|---|---|---|
| 1968 | 22.5 | 1968 | 34.0 |
| 1969 | 23.3 | 1969 | 36.4 |
| 1970 | 21.0 | 1970 | 29.5 |
| 1971 | 21.0 | 1971 | 29.6 |
| 1972 | 31.7 | 1972 | 34.8 |
| 1973 | 23.3 | 1973 | 31.8 |
| 1974 | 25.3 | 1974 | 30.2 |
| 1975 | 20.0 | 1975 | 28.5 |
| 1976 | 28.0 | 1976 | 41.3 |
| 1977 | 21.7 | 1977 | 27.0 |
| 1978 | 24.7 | 1978 | 38.1 |
| 1979 | 27.0 | 1979 | 29.3 |
| 1980 | 31.7 | 1980 | 37.8 |
| 1981 | 23.7 | 1981 | 27.0 |
| 1982 | 21.7 | 1982 | 27.1 |
| 1983 | 24.7 | 1983 | 28.3 |
| 1984 | 20.3 | 1984 | 25.2 |
| 1985 | 18.7 | 1985 | 28.2 |
| 1986 | 22.7 | 1986 | 29.8 |
| 1987 | 26.7 | 1987 | 30.2 |
| 1988 | 21.8 | 1988 | 29.5 |
| 1989 | 21.7 | 1989 | 27.7 |
| 1990 | 27.5 | 1990 | 35.3 |
| 1991 | 24.3 | 1991 | 30.1 |
| 1992 | 25.0 | 1992 | 31.0 |
| 1993 | 23.5 | 1993 | 32.2 |
| 1994 | 22.0 | 1994 | 29.6 |
| 1995 | 22.3 | 1995 | 28.1 |
| 1996 | 21.0 | 1996 | 31.3 |
| 1997 | 20.0 | 1997 | 32.4 |
| 1998 | 16.7 | 1998 | 31.0 |
| 1999 | 18.2 | 1999 | 29.0 |
| 2000 | 20.4 | 2000 | 27.9 |
| 2001 | 23.5 | 2001 | 30.3 |
| 2002 | 20.5 | 2002 | 36.7 |
| 2003 | 20.8 | 2003 | 26.6 |
| 2004 | 13.0 | 2004 | 21.6 |
| 2005 | 11.7 | 2005 | 20.9 |
| 2006 | 16.4 | 2006 | 25.9 |
| 2007 | 16.7 | 2007 | 25.5 |
| 2008 | 15.7 | 2008 | 22.3 |
| 2009 | 15.3 | 2009 | 22.2 |
| 2010 | 15.0 | 2010 | 24.9 |
| 2011 | 13.5 | 2011 | 22.0 |
| 2012 | 18.8 | 2012 | 39.7 |
| 2013 | 13.0 | 2013 | 18.9 |
| 2014 | 13.9 | 2014 | 22.9 |
| 2015 | 12.4 | 2015 | 19.7 |
| 2016 | 15.0 | 2016 | 22.3 |
| 재현주기 10,000년 빈도(최대) : 53.13m/s | | 재현주기 10,000년 빈도(최대순간) : 63.99m/s | |

표 2-21 10,000년 빈도 풍속 계산 입·출력자료(목포, 단위 : m/s)

| 연 도 | 최대풍속 | 연 도 | 최대풍속 | 연 도 | 최대순간풍속 | 연 도 | 최대순간풍속 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1940 | 39.5 | 1981 | 18.3 | 1940 | | 1981 | 26.0 |
| 1941 | 21.3 | 1982 | 18.3 | 1941 | | 1982 | 28.6 |
| 1942 | 22.5 | 1983 | 19.3 | 1942 | | 1983 | 27.5 |
| 1943 | 21.5 | 1984 | 15.2 | 1943 | | 1984 | 27.9 |
| 1944 | 24.7 | 1985 | 22.7 | 1944 | | 1985 | 31.9 |
| 1945 | 24.3 | 1986 | 25.7 | 1945 | | 1986 | 35.6 |
| 1946 | 27.8 | 1987 | 24.8 | 1946 | | 1987 | 30.3 |
| 1947 | 20.0 | 1988 | 20.0 | 1947 | | 1988 | 28.4 |
| 1948 | 25.7 | 1989 | 18.8 | 1948 | | 1989 | 25.2 |
| 1949 | 21.7 | 1990 | 21.3 | 1949 | | 1990 | 28.0 |
| 1950 | 19.7 | 1991 | 19.3 | 1950 | | 1991 | 29.3 |
| 1951 | 28.7 | 1992 | 17.3 | 1951 | | 1992 | 26.2 |
| 1952 | 37.5 | 1993 | 18.7 | 1952 | | 1993 | 28.0 |
| 1953 | 23.0 | 1994 | 20.0 | 1953 | | 1994 | 27.8 |
| 1954 | 28.3 | 1995 | 20.3 | 1954 | | 1995 | 27.6 |
| 1955 | 35.0 | 1996 | 18.5 | 1955 | | 1996 | 25.4 |
| 1956 | 31.7 | 1997 | 19.0 | 1956 | | 1997 | 26.1 |
| 1957 | 26.3 | 1998 | 18.7 | 1957 | | 1998 | 27.1 |
| 1958 | 33.3 | 1999 | 20.5 | 1958 | | 1999 | 35.0 |
| 1959 | 31.7 | 2000 | 21.4 | 1959 | 38.8 | 2000 | 30.0 |
| 1960 | 26.7 | 2001 | 17.2 | 1960 | 34.4 | 2001 | 24.0 |
| 1961 | 21.7 | 2002 | 29.1 | 1961 | 29.0 | 2002 | 37.8 |
| 1962 | 29.3 | 2003 | 20.8 | 1962 | 35.1 | 2003 | 28.9 |
| 1963 | 21.3 | 2004 | 17.2 | 1963 | 29.0 | 2004 | 25.3 |
| 1964 | 25.0 | 2005 | 19.3 | 1964 | 31.5 | 2005 | 26.8 |
| 1965 | 22.5 | 2006 | 17 | 1965 | 30.2 | 2006 | 27.1 |
| 1966 | 23.3 | 2007 | 16.6 | 1966 | 31.2 | 2007 | 24.0 |
| 1967 | 21.0 | 2008 | 15 | 1967 | 32.0 | 2008 | 24.0 |
| 1968 | 22.3 | 2009 | 15 | 1968 | 28.7 | 2009 | 26.5 |
| 1969 | 20.0 | 2010 | 16.7 | 1969 | 28.6 | 2010 | 27.4 |
| 1970 | 26.5 | 2011 | 16.6 | 1970 | 32.5 | 2011 | 30.1 |
| 1971 | 30.0 | 2012 | 24.2 | 1971 | 32.0 | 2012 | 33.7 |
| 1972 | 26.0 | 2013 | 14.8 | 1972 | 38.0 | 2013 | 21.1 |
| 1973 | 25.0 | 2014 | 14.8 | 1973 | 38.0 | 2014 | 21.7 |
| 1974 | 18.2 | 2015 | 14.2 | 1974 | 27.3 | 2015 | 20.5 |
| 1975 | 19.2 | 2016 | 15.8 | 1975 | 26.4 | 2016 | 22.3 |
| 1976 | 19.7 | | | 1976 | 28.5 | | |
| 1977 | 18.3 | | | 1977 | 26.1 | | |
| 1978 | 19.7 | | | 1978 | 28.2 | | |
| 1979 | 21.0 | | | 1979 | 30.0 | | |
| 1980 | 23.7 | | | 1980 | 39.2 | | |
| 재현주기 10,000년 빈도 | | 58.2m/s | | 재현주기 10,000년 빈도 | | 58.5m/s | |

표 2-22 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

| 제목 | 세부 내용 | 한빛 1,2호기 반영 | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |

그림 2-1 한빛1,2호기 부지반경 320km 내 지진지체구조구 진앙분포도

그림 2-2 타당성 분석을 위한 이상적인 가상 지진 자료 분포도

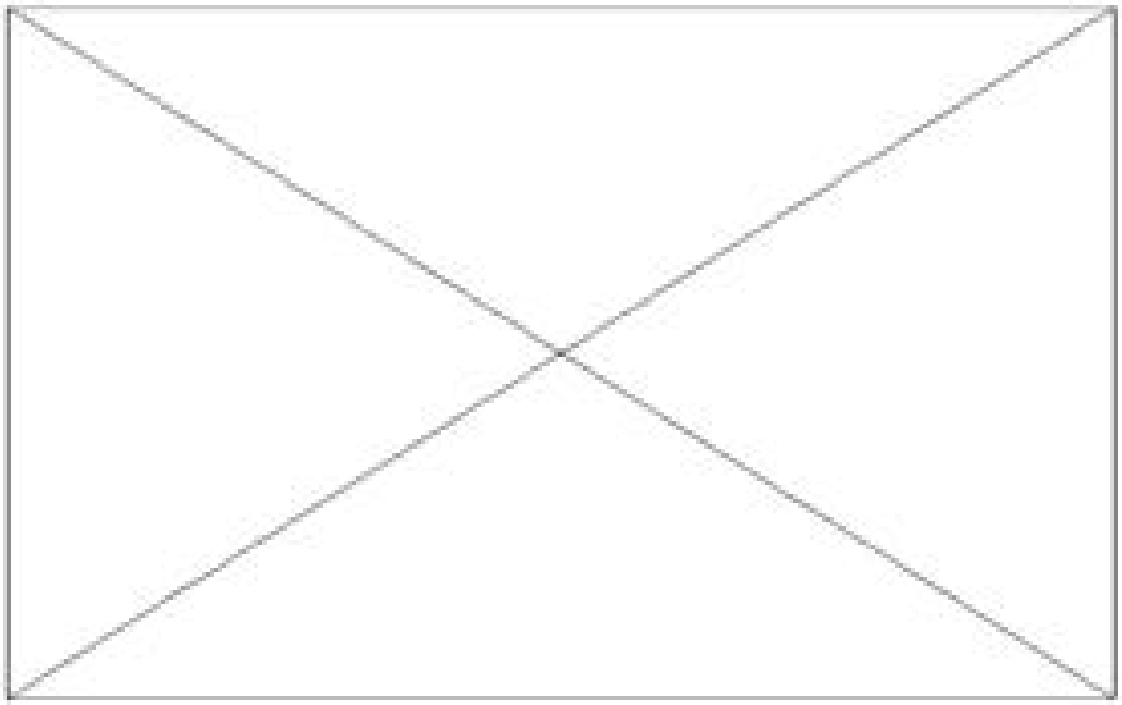


그림 2-3 가상 자료를 사용한 tapered G-R분포와 quadratic 분포의 비교

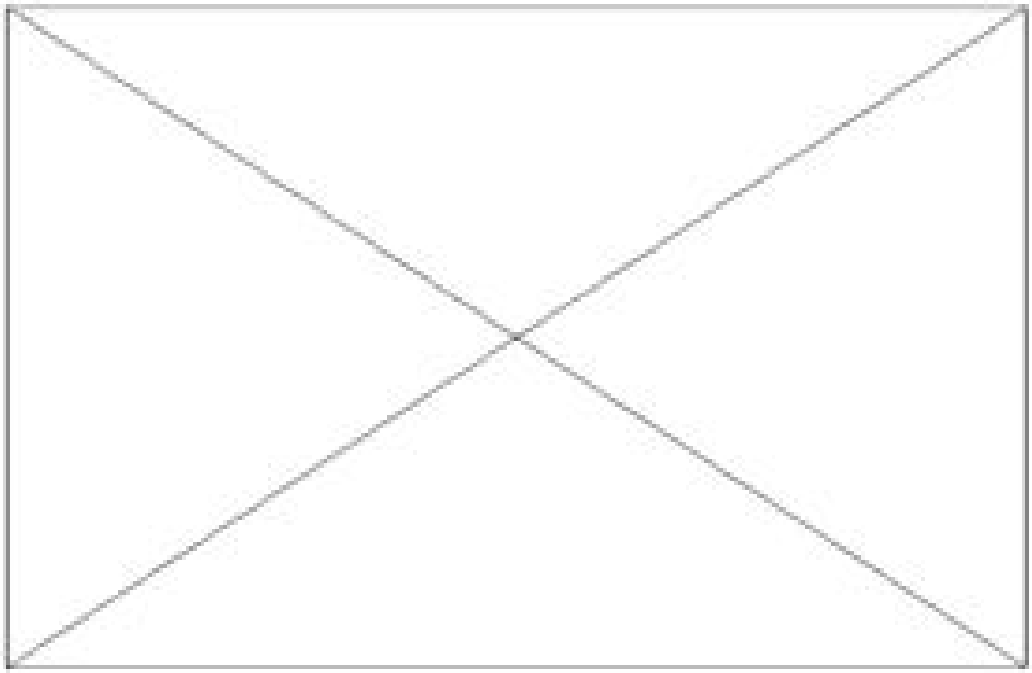


그림 2-4 류큐트렌치에서 발생한 과거 지진 자료 분포도

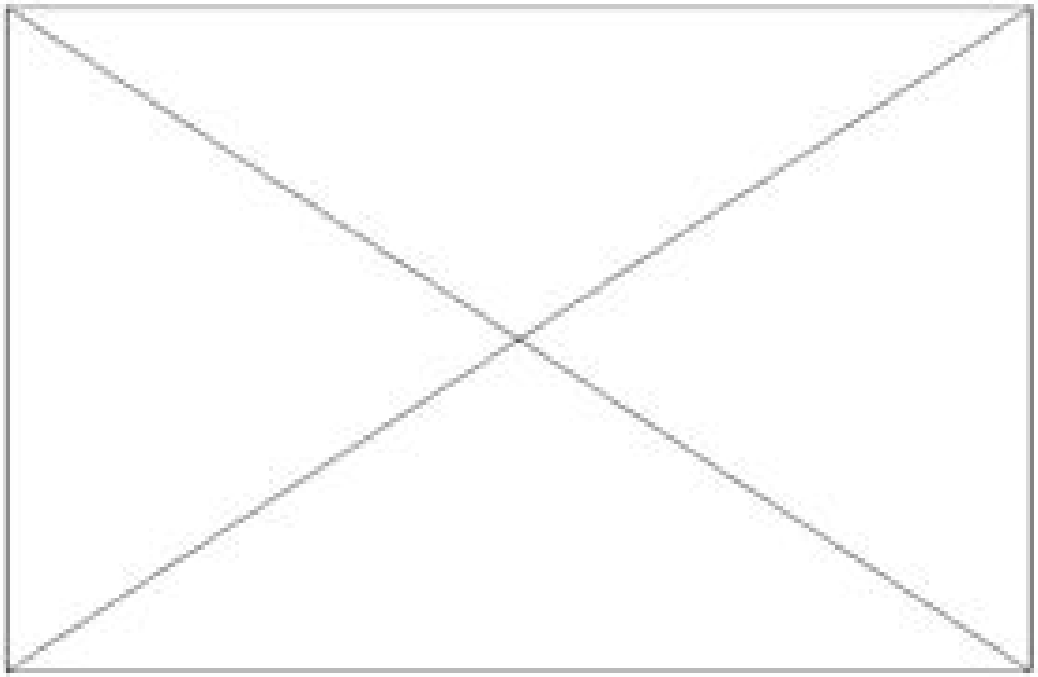


그림 2-5 류큐트렌치에 대한 10,000년 빈도 지진규모 결정

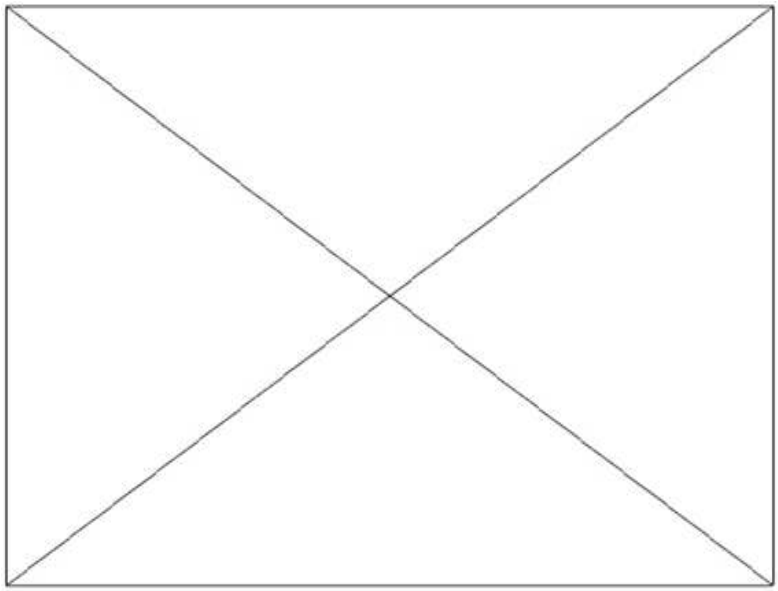


그림 2-6 단층 파라미터 개념도

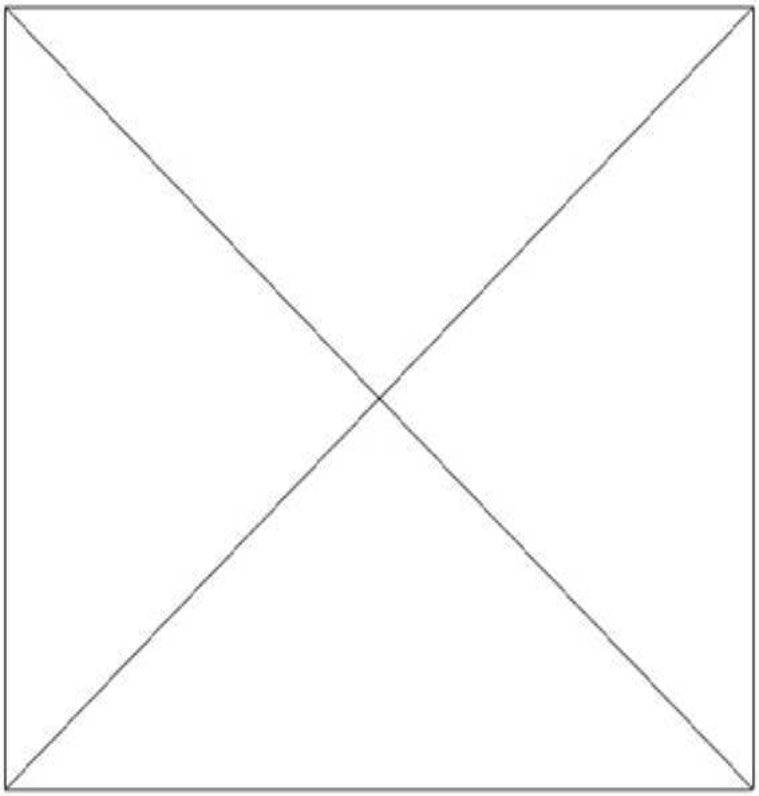


그림 2-7 류큐 트렌치에서 지진규모에 따른 단층의 크기 및 위치 개념도(일본 방재과학기술연구소, 2013)

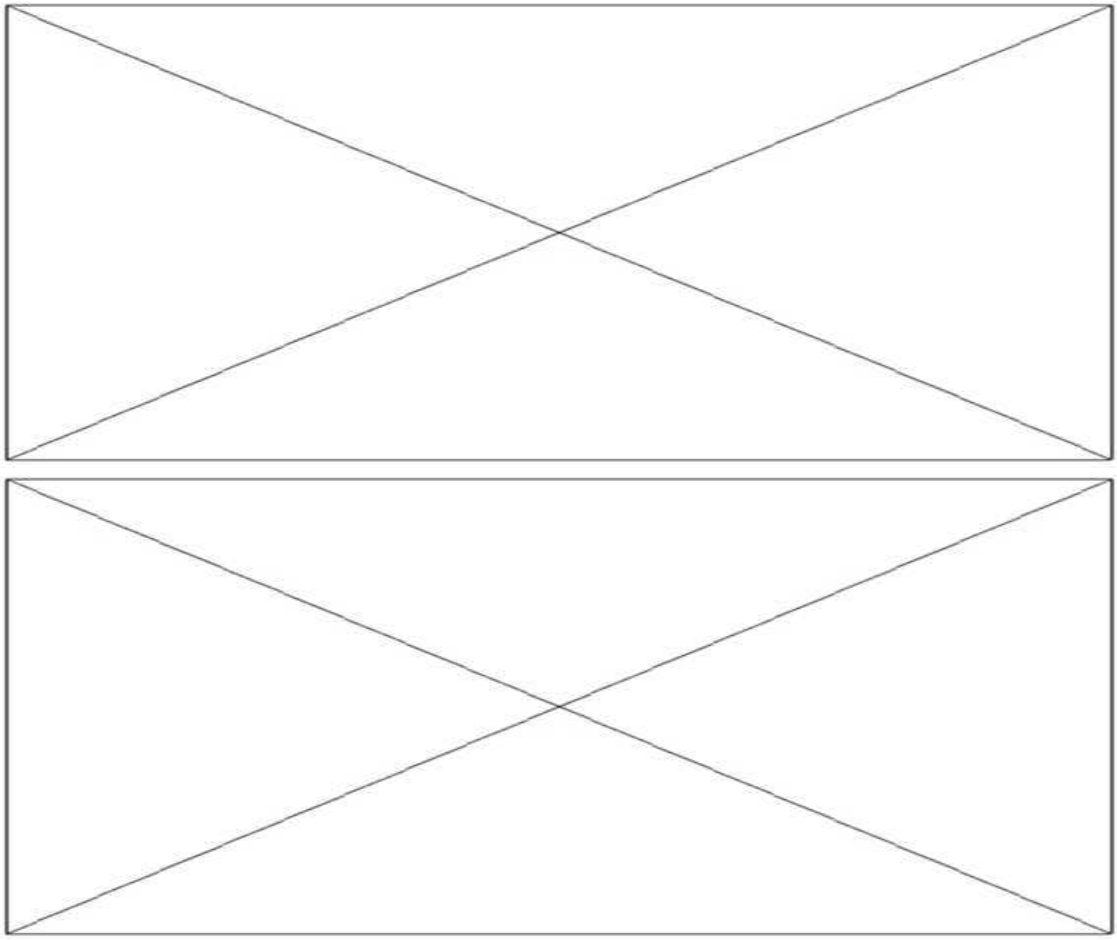


그림 2-8 류큐 트렌치에서 지진규모 Mw와 단층 크기의 관계:
(상) 단층 길이 $L$, (하) 단층 폭 $W$

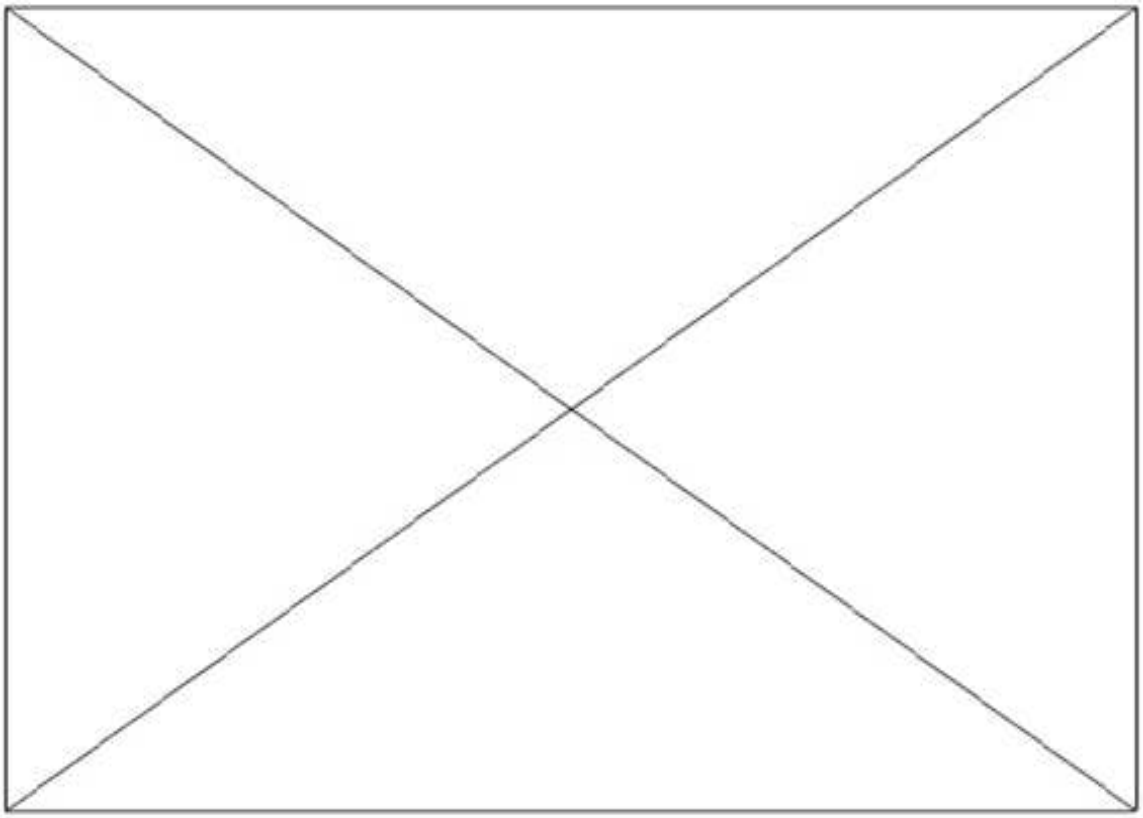


그림 2-9 류큐 트렌치 지진해일 초기수면변위 (Mw 8.76, case 1～case 4)

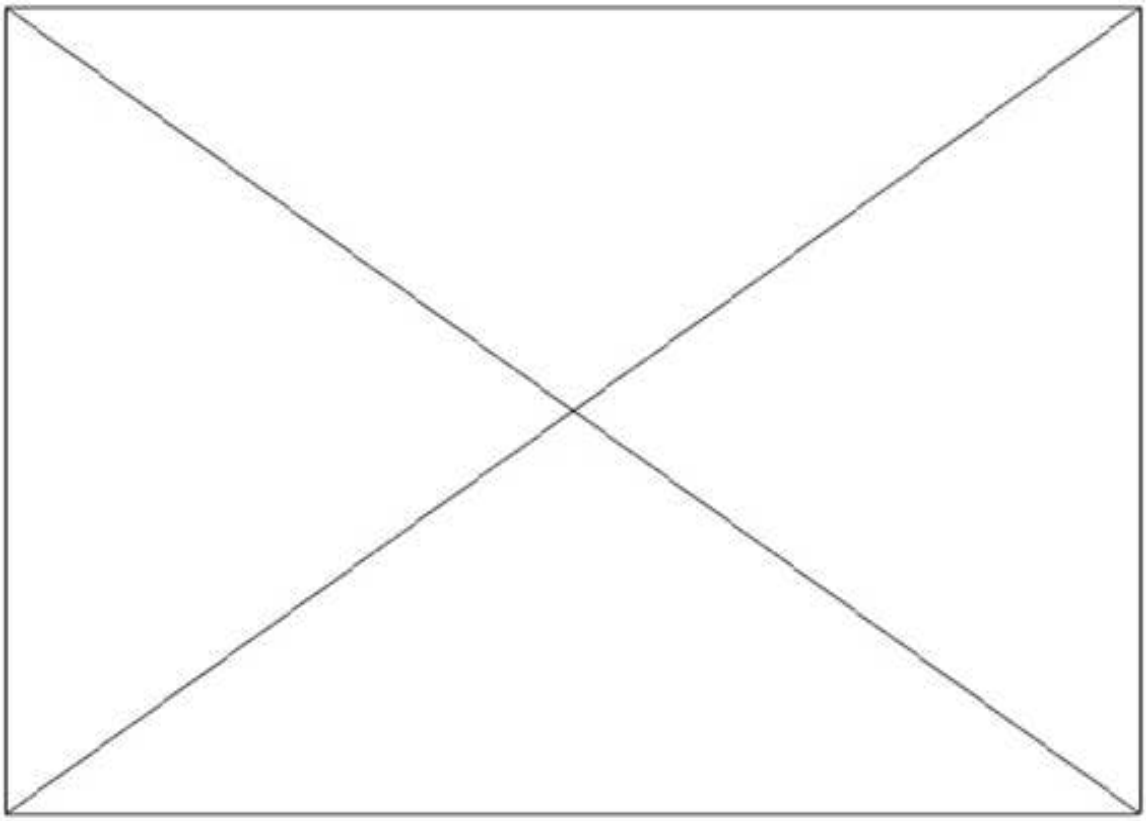


그림 2-10 류큐 트렌치 지진해일 초기수면변위 (Mw 8.76, case 5~case 8)

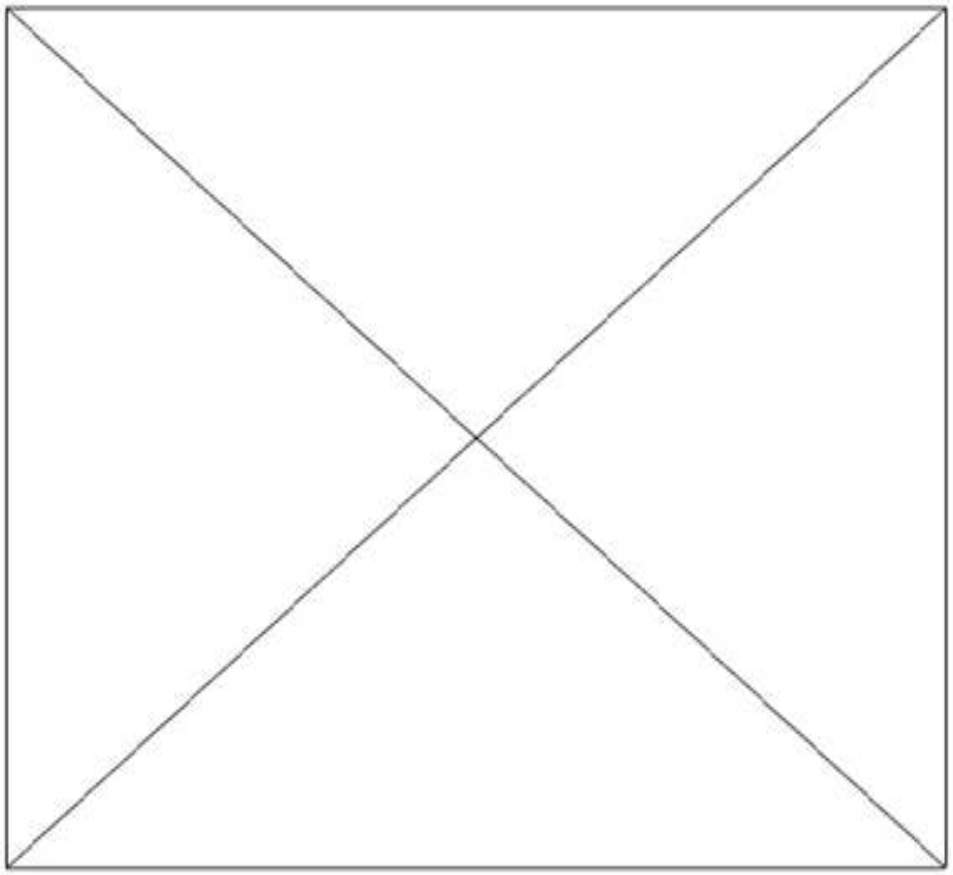


그림 2-11 한빛(영광) 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 광역 계산영역 및 수심 분포(Unit: m)

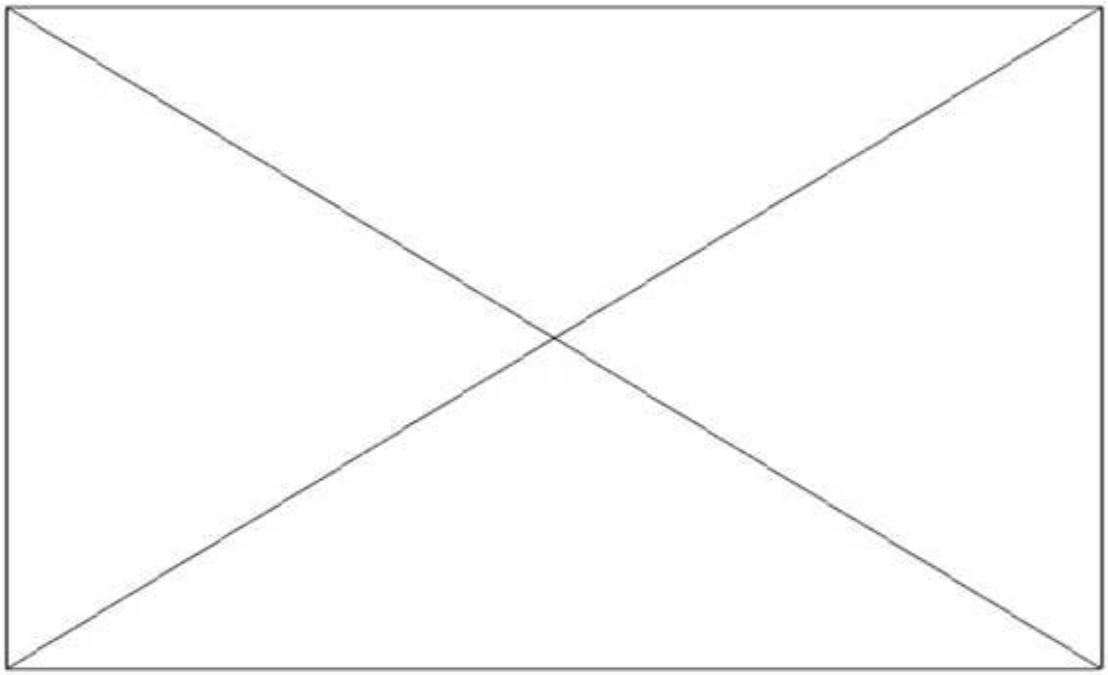


그림 2-12 한빛 원자력발전소 지진해일 수치모의를 위한 상세역 계산영역 및 수신 분포(Unit: m)

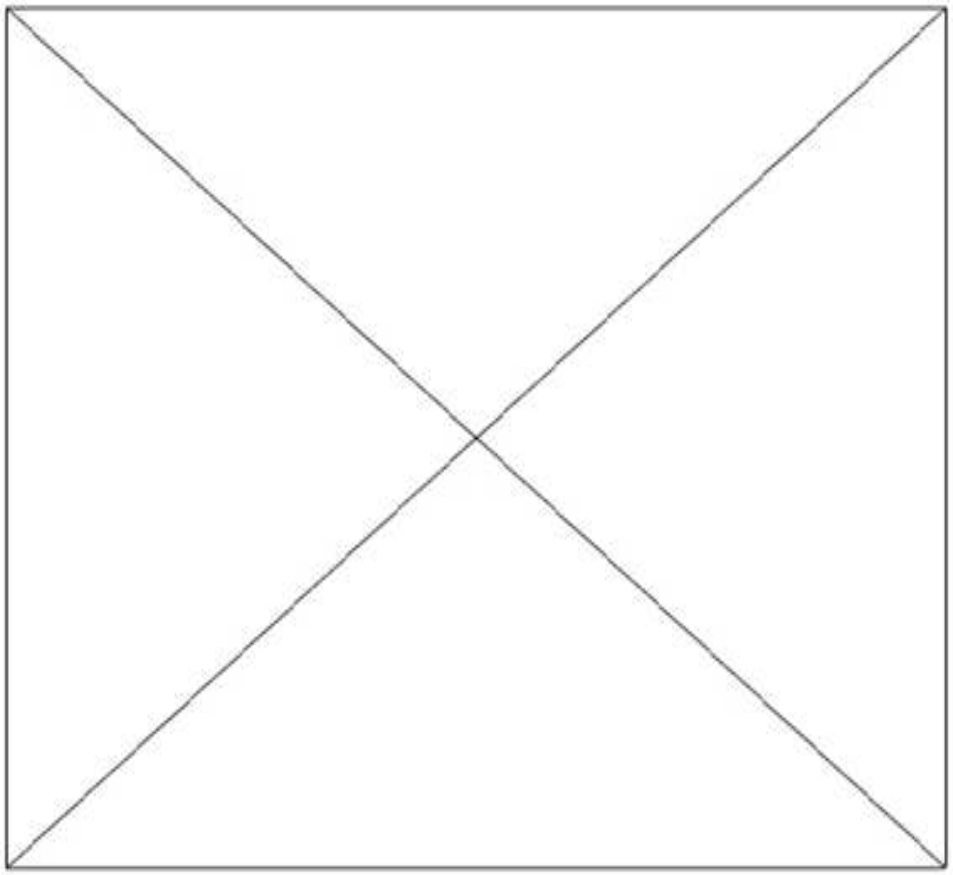


그림 2-13 최상세역 계산영역 및 한빛 원자력발전소 주변 수신 분포(Unit: m)

그림 2-14 재현기간(return period)에 따른 한빛 부지 주변 최대풍 풍속

그림 2-15 10,000년 빈도 최대풍 풍속을 제공하는 7개 태풍의 이동경로

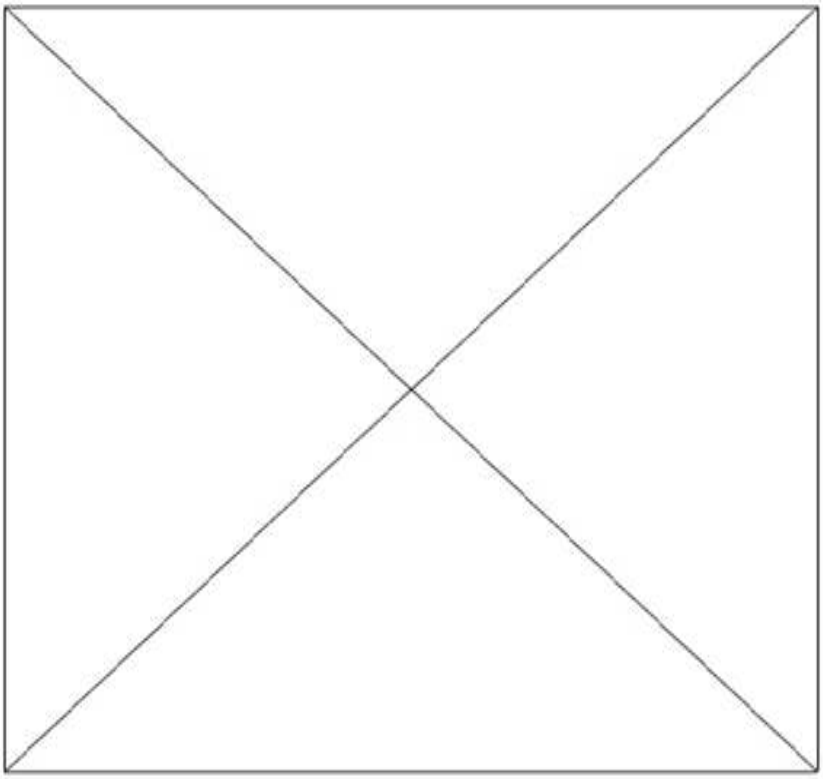


그림 2-16 한빛 원자력발전소의 남서쪽에서 접근하는
3개 태풍의 이동경로
(10,000년 빈도 풍속을 제공하지 않음)

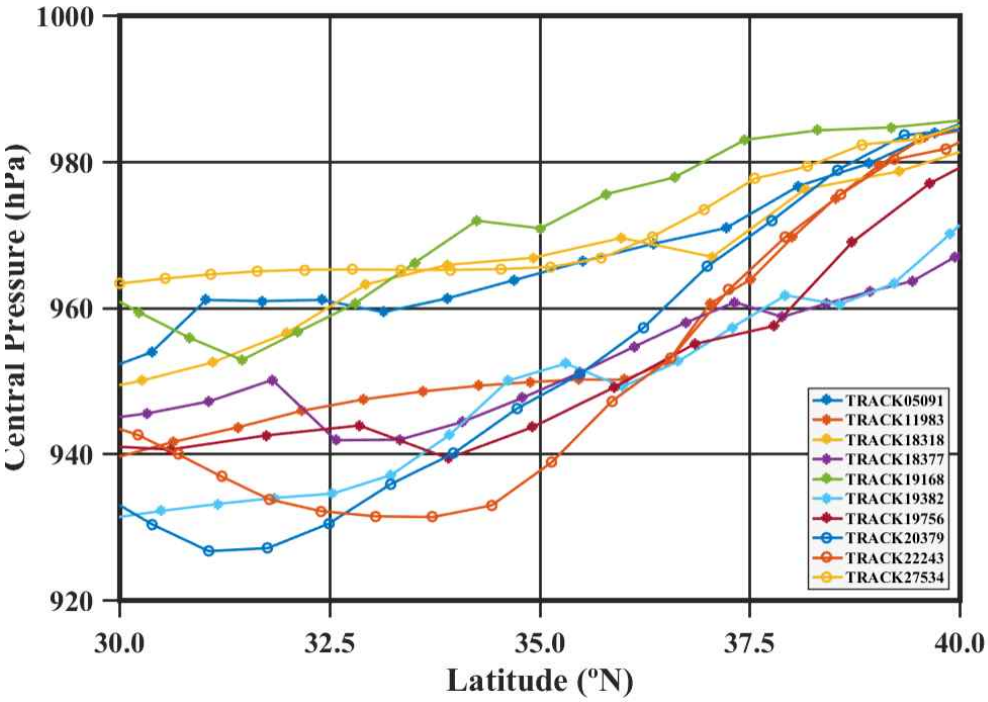



그림 2-17 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍
10개의 중심기압 분포

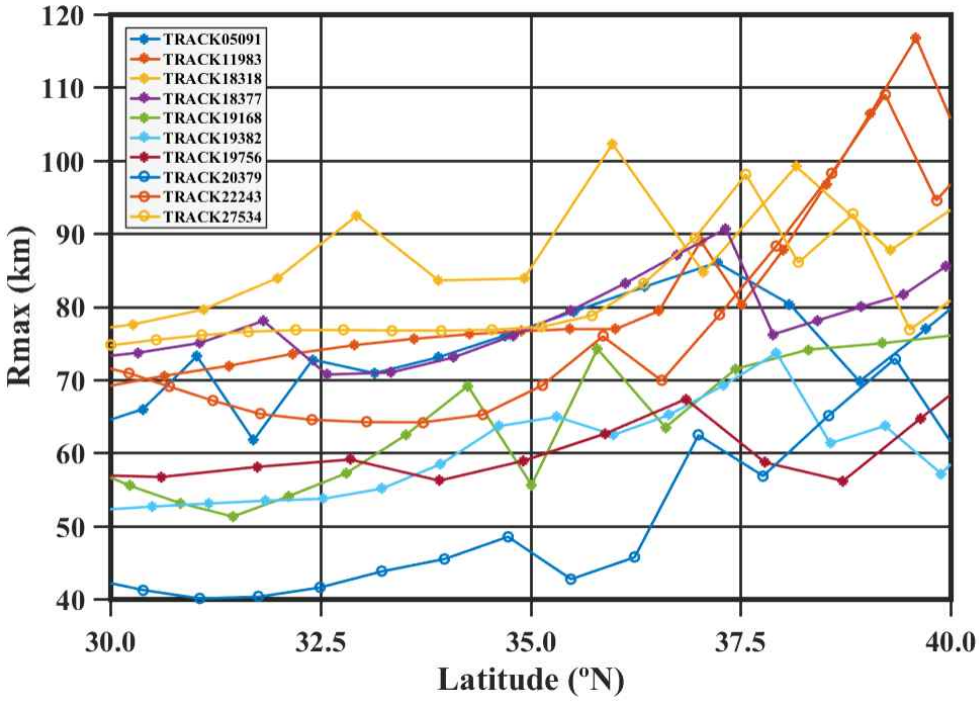



그림 2-18 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍 10개의 최대풍 반경 분포

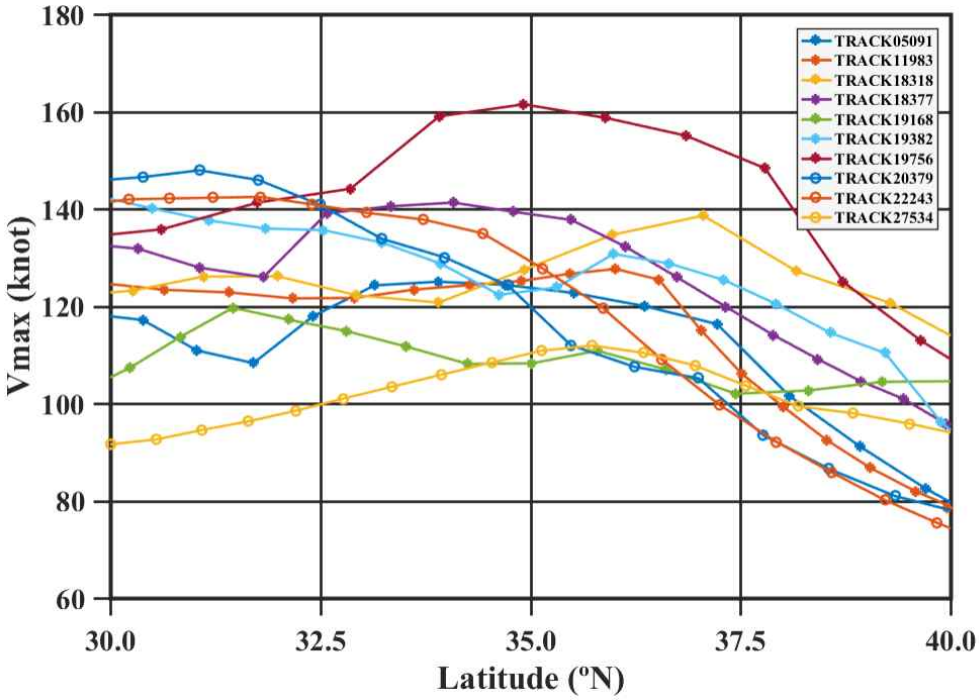



그림 2-19 10,000년 빈도 태풍 및 남서쪽에서 접근하는 인공태풍 10개의 풍속(1분 지속평균) 분포

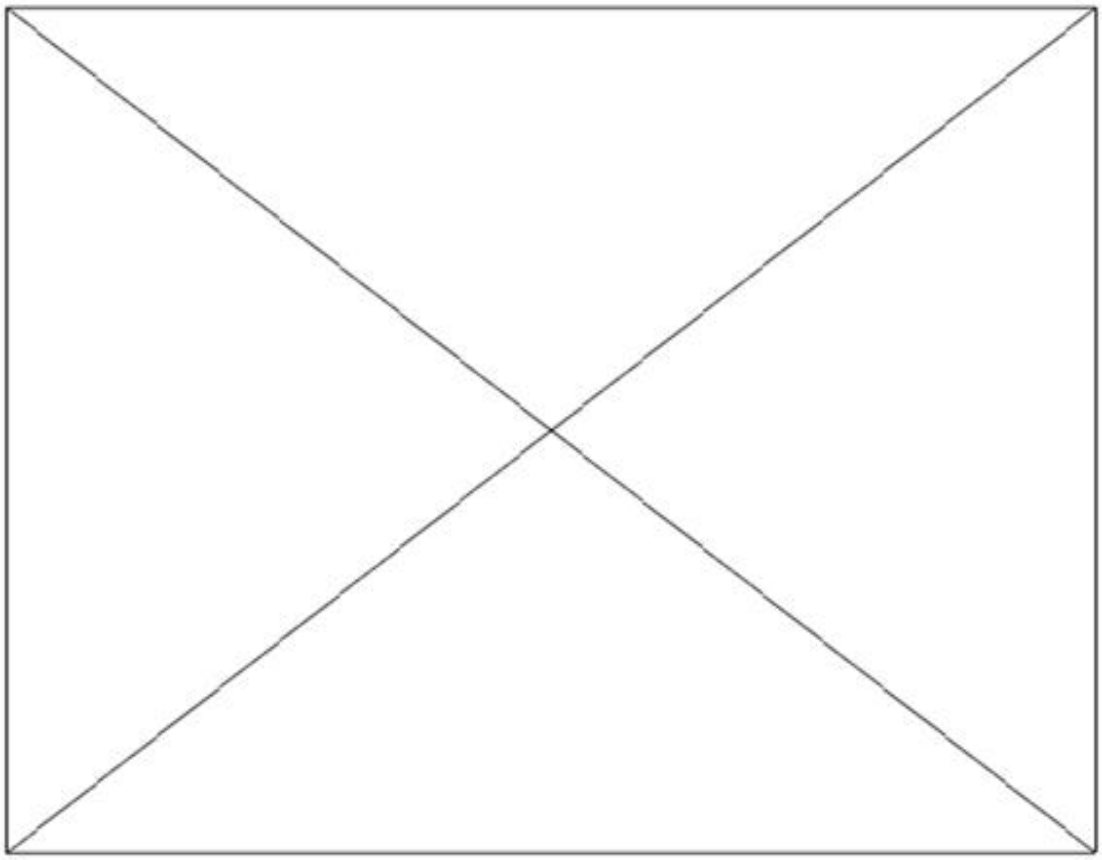


그림 2-20 폭풍해일 수치모의를 위한 계산영역 및 수신 분포 (m)

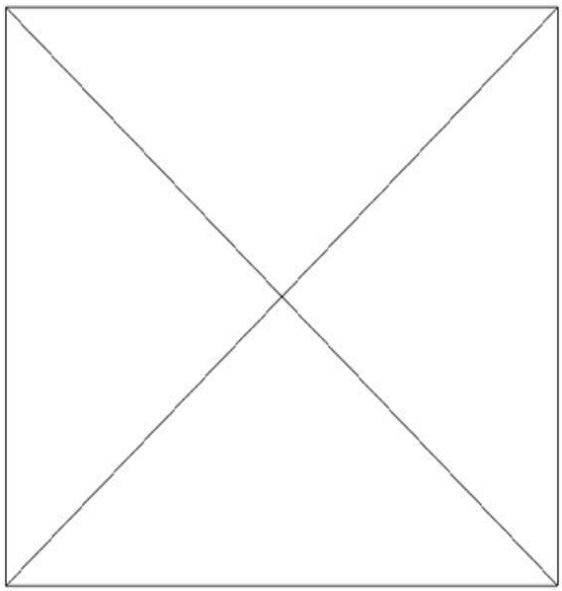


그림 2-21 폭풍해일 수치모의를 위한
세부영역 및 수신 분포(m)

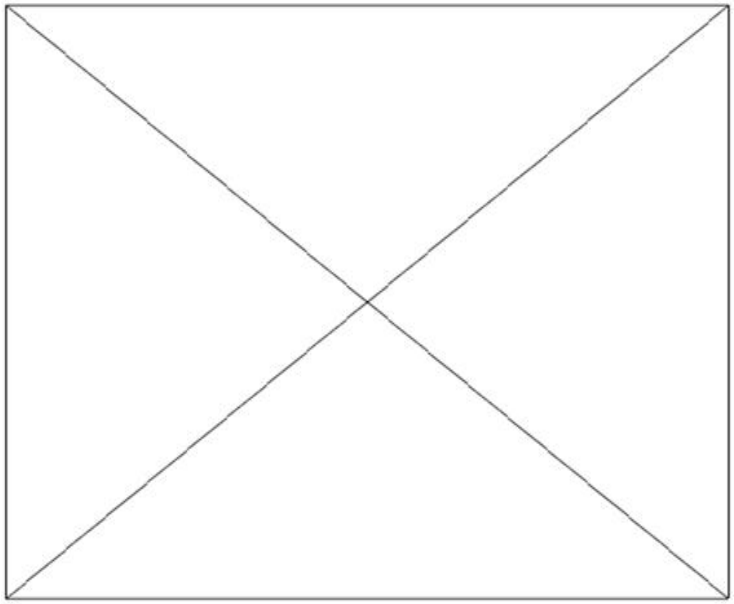


그림 2-22 폭풍해일 수치모의를 위한 최상세역
수신 분포 (m, MSL)

그림 2-23 모의된 태풍 Track별 최대 수위 상승량(m)

그림 2-24 최상세역 유의파고 분포도(m) 및 파향벡터도

# 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 ····· 9
2.1.3 주요 안전기능 상실/심각한 핵연료 손상 유발 가능 지진의 심각도 범위 ··· 10
2.1.4 격납건물 건전성을 손상시킬 수 있는 지진심각도 범위 ····· 15
2.2 지진에 의한 내부 침수에 대한 구조물·계통·기기의 건전성 ····· 15
2.2.1 격납건물 내부 침수 ····· 16
2.2.2 기타 안전관련 구조물에서의 내부 침수 ····· 16
2.3 지진에 의한 내부 화재에 대한 구조물·계통·기기의 건전성 ····· 17
2.3.1 화재방호계통 설명 ····· 17
2.3.2 지진화재 영향 평가 ····· 19
2.3.3 발전소 및 외부 소방대 수동진압능력 평가 ····· 41
2.3.4 화재인지방안, 인적오류・의사결정 오류 최소화 방안 ····· 44
2.3.5 평가 결과 ····· 46
2.4 홍수 및 기타 자연재해에 대한 구조물·계통·기기 건전성 ····· 47
2.4.1 설계기준 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호 조치 ····· 47
2.4.2 설계기준 초과 홍수 및 기타 자연재해 조건에서의 원전의 보호조치 ····· 48

제3절 안전 개선사항 ····· 51
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 51
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ····· 52
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 52

제4절 결론 ····· 53

제5절 참고문헌 ····· 56

제6절 표, 그림 ····· 58

# 표, 그림

표 3-1 한빛1,2호기 설계 감쇠비 ····· 58
표 3-2 내진성능 평가 대상계통 ····· 59
표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통) ····· 60
표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리계통) ····· 99
표 3-5 내진성능 평가 대상기기(사용후연료냉각계통) ····· 109
표 3-6 한빛1,2호기 최종 정비이력 분석 대상 ····· 110
표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 ····· 111
표 3-8 계통 및 기기 관련 계전기 목록 ····· 118
표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기 ····· 119
표 3-10 지진 CDF MCS 사건 해당 기기의 화재 안전정지기기 해당 여부 확인 ····· 126
표 3-11 지진화재 취약지역 ····· 127
표 3-12 대처방안 이행 소요시간 ····· 128
표 3-13 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간 ····· 131
표 3-14 SRP(NUREG-0800) 3.5.3에 제시된 최소 콘크리트 방호벽 두께 ····· 133
표 3-15 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영 여부 확인 ····· 134
표 3-16 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영 여부 확인 ····· 135

그림 3-1 한빛1,2호기 설계지반응답스펙트럼(최대가속도 1.0g) ····· 136
그림 3-2 한빛1,2호기 설계인공지진시간이력 ····· 137

## 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 한빛1,2호기의 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

한빛1,2호기의 FSAR 3.2절[3-2]에서는 NSSS와 BOP 기기를 분류하고 내진범주 Ⅰ급 기기를 정의하고 있으며, 구조물, 계통 및 기기들이 10CFR50의 부록 A 일반설계기준(GDC, General Design Criteria) 2의 요건을 만족하기 위해서 Reg. Guide 1.29에 따라 설계되었음을 명시하고 있다. Reg. Guide 1.29에서는 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)에서도 (1) 원자로냉각재 압력 경계의 건전성 확보, (2) 원자로의 안전가동정지 및 안전가동정지 조건의 유지능력, (3) 10CFR100 규제지침을 초과하는 잠재적 소외피폭을 초래할 수 있는 사고결과를 방지 또는 완화할 수 있는 능력 등을 확보해야 하는 기기를 내진범주Ⅰ급으로 분류하였으며, NSSS 기기의 경우 ANSI N18.2a-1975에 따라 선정된 안전등급 1, 2,

3의 모든 기기가 내진범주 I 급 기기로 분류되어 있다.

Reg. Guide 1.29와 ANSI N18.2a에 따라 한빛1,2호기 FSAR 3.2절에는 계통별 내진범주 I 급 기기의 명칭이 수록되어 있으며 대상 기기 및 계통의 코드요건도 명시되어 있다. 한빛1,2호기는 규제기준인 Reg. Guide 1.29(Rev. 3)에 따라 기기를 분류하였다. FSAR 3.10절 및 3.11절에는 한빛1,2호기 설계 당시의 내진검증 계획에 포함된 내진범주 I 급의 기기목록과, Reg. Guide 1.100 및 IEEE Std 323-1974와 IEEE Std 344-1975의 기준에 따라 수행된 내진검증 결과가 수록된 검증보고서 목록이 명시되어 있다. 또한 1차 주기적 안전성평가 이후 도출된 안전성 증진사항 해결을 위하여 내진검증 유지·관리 체계 수립과 관련된 용역을 수행하였으며, 이 결과 기존 기기와 교체 및 신규로 설치된 기기의 내진검증 문서까지 포함된 "내진검증 대상기기 유지관리 목록"이 작성되었다.

가. 입력지진동

한빛1,2호기의 FSAR 3.7절 및 3.10절에서 구조물의 내진해석 및 기기의 내진검증을 위한 지진입력은 설계응답스펙트럼과 가속도시간이력으로 규정하고 있다. 설계응답스펙트럼은 부지의 지표면에서 정의되는 표준응답스펙트럼으로서 구조물의 내진설계와 인공가속도시간이력의 목표응답스펙트럼을 정의하는데 사용되었다. 기기의 내진검증을 위해서는 기기 및 계통을 포함하고 있는 구조물 각 층에서의 층응답스펙트럼(FRS, Floor Response Spectrum)이 필요하므로 이를 얻기 위하여 인공가속도시간이력을 입력운동으로 한 시간이력해석(time history analysis)이 수행되었다.

한빛1,2호기의 설계지진은 두 가지 수준으로서 운전기준지진(OBE, Operating Basis Earthquake)과 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)으로 구분되며, 운전기준지진은 심한 환경조건에 안전정지지진은 극심한 환경조건에 해당한다. 운전기준지진의 크기는 안전정지지진의 1/2로 정의되었다. 설계지진의 형태는 지반응답스펙트럼으로 정의되었고 그림 3-1에 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 따른 것으로, 적용된 스펙트럼 형태는 84% 비초과확률(non-exceedance probability)을 갖는다.

설계응답스펙트럼의 형태는 Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 부지 특성에 무관한 표준응답스펙트럼과 동일하며, 자유장 부지의 기초저면 위치에서의 운동으로 정의하였다. 한빛1,2호기 지반응답스펙트럼의 형태는 그림 3-1(최대지반가속도 1.0g 정규화)에서 보는 바와 같으며, OBE 및 SSE 설계지반응답스펙트럼을 구하

기 위해서는 해당 지반최대가속도 값으로 비례 조정하여 구할 수 있다. 각종 구조물 및 설비별로 설계에 적용된 감쇠비는 표 3-1과 같다.

기기 내진검증을 위해 필요한 층응답스펙트럼을 생성하기 위하여 사용된 입력지반진동은 지속시간 24초의 인공지진시간이력으로 정의되었다(그림 3-2). 한편 한빛1,2호기에는 상기의 인공지진시간이력과는 별도로 NSSS 비선형 시간이력해석을 위한 목적으로 지속시간 15초 인공지진시간이력을 작성하여 사용하였으며, 이 시간이력은 동시에 세 방향 가진(NS, EW, Vertical) 입력을 사용하기 때문에 USNRC 상관관계 기준 요건은 예외이다. 작성된 15초 인공지진시간이력은 오직 NSSS의 조합된 Bechtel-Westinghouse 분석에만 사용한다.

나. 주요 구조물・계통・기기의 내진해석 및 내진검증

한빛1,2호기 내진설계에 사용된 최대 수평지반가속도는 안전정지지진의 경우 0.2g, 운전기준지진의 경우 0.1g이며, 최대 수직지반가속도는 안전정지지진의 경우 0.13g, 운전기준지진의 경우 0.067g이다. 내진검증에 포함된 기기가 설치된 위치에서의 진동수준과 특성을 결정하기 위해서는 구조물의 지진응답해석이 선행되어야 한다. 한빛1,2호기의 내진검증에 포함된 기기를 지지하는 안전관련 구조물의 내진해석 모델은 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) 또는 집중질량모델(LMM, Lumped Mass Model)로 이상화하였으며, 기초하부의 지반은 등가의 스프링 및 감쇠자로 나타내어 지반-구조물 상호작용(SSI, Soil-Structure Interaction) 효과도 고려하였다. 기기 내진검증에 사용된 층응답스펙트럼을 작성하기 위한 지진응답해석에는 선형시간이력해석법을 사용하였다.

구조물의 층응답시간이력은 지진의 세 방향성분 각각에 대한 시간이력해석을 수행하여 각 지진방향 성분별 동일방향응답을 산술합계로 조합하여 계산하였다. 이렇게 계산된 최종 층응답시간이력으로부터 각 층의 층응답스펙트럼을 작성하였다.

안전관련 기기를 수용하고 있는 구조물의 내진안전성은 기기는 물론 기기의 정착부 혹은 고정장치의 안전성에도 직접적인 영향을 미친다. 한빛1,2호기 안전관련 구조물의 내진설계를 위하여 수행한 지진응답해석에는 응답스펙트럼 해석방법이 사용되었다. 이때 개별 모드응답의 조합방법과 관련하여 한빛1,2호기 구조물의 내진설계에서는 SRSS 방법과 그룹핑방법을 적용하였으므로 이 요건을 만족한 것으로 확인되었다.

다. 기기 내진검증

한빛1,2호기의 검증계획에 포함된 기기의 내진검증은 IEEE Std 344-1975[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 한빛1,2호기는 내진검증 대상기기에 대해 당시 기준에 합당한 방법을 적용하여 내진검증을 수행한 것으로 확인되었다.

내진검증과 관련한 요건은 Reg. Guide 1.100[3-6]에 규정하고 있으며, 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. 한빛1,2호기에서도 IEEE Std 344-1975에 따라 이축 방향에 대한 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. IEEE Std 344-1975에서도 동일한 요건의 검증을 요구하고 있으므로 한빛1,2호기는 현행 기술기준을 만족하고 있다.

(3) 기능성 감시 방법
Class 1E 기기는 진동시험전, 시험중 그리고 시험후에도 지속적인 기능성 감시요건을 요구하고 있다. IEEE Std 344-1975에서도 동일한 요건의 검증을 요구하고 있으므로 한빛1,2호기는 현행 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. IEEE Std 344-1975에서도 동일한 요건의 검증을 요구하고 있으므로 한빛1,2호기는 현행 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

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 기본사건)
  - 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 선

별제거 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 사용하였으며 위 계통분석 결과에 누락된 기기는 지진 PSA 보고서[3-7]를 참조하여 스트레스테스트 대상기기에 추가하였다. 상기와 같은 검토과정을 거쳐 도출된 평가대상 계통은 표 3-2에 제시하였다. 또한 계통 내 평가대상 기기 중 안전정지유지계통 기기는 표 3-3, 격납건물 격리계통 기기는 표 3-4, 사용후연료냉각계통 기기는 표 3-5에 각각 제시하였다.

한편 현재 물리적 상태가 반영된 점검 및 평가를 위하여 원전 안전정지유지계통 내진성능평가 용역의 종료 시점인 2014년을 기점으로 발전소의 정비이력을 확인하였다. 표 3-6과 같이 잠재적으로 내진 성능에 영향을 줄 수 있는 작업을 분류하였으며 확인결과 상기 작업들은 내진성능에 영향을 주지 않을 것으로 검토되었다.

NUREG/CR-4334의 선별제거 기준에 따라 표 3-3, 표 3-4 및 표 3-5에 기술된 기기 중 내진성능이 우수한 기기들을 선별제거한 후, 한빛1,2호기 내진성능 분석을 위한 최종 대상 기기 목록을 표 3-7에 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 한빛1,2호기 지진 PSA 보고서[3-7]를 참조하였다. 지진 PSA 보고서를 바탕으로 계전기의 오작동으로 기기, 계통의 이용불능을 초래할 수 있는지를 파악하였으며, 관련 내용은 표 3-8에 제시하였다. 평가 결과계전기의 오동작이 반영된 초기사건은 없는 것으로 분석되었다. 본 평가에서는 최종 선별된 개별 계전기를 앞서 도출된 캐비닛 단위의 현장점검을 통해 내진성능을 최종 점검하였다.

나. 현장점검 결과

현장점검은 계통분석 담당자가 선정한 구조물 및 기기의 현장 가동 및 보존 상태

를 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
○ 상호 영향이 있을 것으로 판단되는 계통간의 관계를 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 대상기기와 선별제거 된 기기들이 적절히 시공되었는지, 시공 상태는 건전한지, 지진사건이 발생하였을 때 선정된 기기에 잠재적인 간섭 영향을 줄 수 있는 다른 요인이 있는지 등을 조사하였다.

한빛1,2호기 현장점검은 표 3-3, 표 3-4 및 표 3-5에 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

한빛1,2호기 평가대상 기기에 대한 내진 현장점검을 각 호기별로 2번에 나누어 수행하였으며, 1호기 1차 현장점검은 2018년 2월, 2차 현장점검(일부 고방사능구역과 격납건물 내부)은 계획예방정비기간을 이용하여 2018년 8월에 수행하였다. 2호

기의 경우, 1차 현장점검은 2018년 7월, 2차 현장점검(일부 고방사능구역과 격납건물 내부)은 계획예방정비 기간을 이용하여 2018년 8월에 완료하였다. 현장점검 대상기기는 표 3-3, 표 3-4 및 표 3-5에 제시된 안전정지유지계통, 격납건물 격리계통 그리고 사용후연료냉각계통 관련 1,434개의 기기이다.

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. 한빛1,2호기 현장점검 결과 대부분의 기기가 건전성에 이상이 없었으며, 1호기는 Easy Fix를 포함한 72건의 기기, 2호기는 41건의 기기가 조치 필요 기기로 도출되었다[3-13]. Easy Fix 사항에 해당하는 기기의 경우 적절한 조치를 수행중에 있다.

### 2.1.1.3 지진 발생에 따른 운전조치

한빛1,2호기 부지에서 운전기준지진(0.1g) 이상의 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 발전소의 대응능력을 제고하기 위하여 수평방향 0.19g 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 모든 격납건물제어 및 보호계통에 전원을 공급할 수 있다. 상기 축전지 랙(지진내력 0.5g 이상)과 축전지가 위치한 보조/제어건물은 0.5g 이상의 지진내력을 보유하고 있어 설계기준지진 발생시 사용이 가능하다.

한편 비상디젤발전기가 기동하게 되면 설계기준지진 이상의 지진내력을 보유하고 있는 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 등이 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 이용불가능한 경우가 발생하더라도 한빛원자력본부에 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.

격납건물 내부를 포함한 현장점검 결과 구속되지 않은 소화기, 경량부착물, 작업도구, 크레인 체인 등을 포함한 지진에 의한 상호작용과(지진에 의한 간접영향) 관련하여 조치 필요기기로 도출된 기기는 1호기 48개, 2호기 31개 기기로 확인되었다. 상세 현장점검 결과는 현장점검 보고서에 제시하였다.

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

#### 2.1.2.2 외부 지원인력(장비)의 접근성

한빛본부 정문부터 한빛1,2호기까지의 이동로 부지표고는 EL.(+) 10.0m로 동일하고, 이동로는 2곳이 있다. 제1이동로는 본부 정문부터 한빛본부 건물 앞 구내도로를 거쳐 교량을 지나 1,2호기로 진입하는 이동로이며, 다른 이동로(제2이동로)는 한빛 본부 정문에서 5,6호기로 진입하여 5,6호기 및 3,4호기 내부 구내도로를 거쳐 1,2호기로 들어가는 이동로이다. 따라서 극한 자연재해 발생시에는 제1이동로의 교량손상 여부를 검토 후, 제2이동로를 통하여 1,2호기로 진입할 수 있으며 이동로 상에는 영구사면이 존재하지 않는다.

한편 한빛1,2호기의 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 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 중장비를 이용하여 장애물을 치울 경우 차량통행이 가능하다.

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

제2장 보고서(설계기준초과 극한자연재해의 특성)에서 검토하였듯이 한빛1,2호기 부지에서의 PSHA 평가결과 재현주기 10,000년 빈도 수준 지진동은 영주기 수평지반가속도가 0.11g로 평가되었다. 한편 한빛1,2호기의 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 한빛1,2호기는 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 3-7

의 기기 및 안전관련 구조물이다. 도출된 구조물 및 기기에 대해 결정론적 파손내력평가방법(Conservative Deterministic Failure Margin, CDFM) 또는 변수분리법(Separation of Variables, SOV)을 적용하여 개별 설비의 고신뢰도저파손확률(HCLPF, High Confidence of Low Probability of Failure)을 구하였다. 내진성능의 세부 평가결과는 다음과 같다.

#### 2.1.3.1 내진성능 평가 가정 사항 및 분석방법

한빛1,2호기 내진성능 평가 대상 설비들의 HCLPF 값을 도출하는데 사용된 필수 가정 사항은 다음과 같다.

○ 한빛1,2호기 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 허용한 NUREG CR-0098[3-15] 평가지진 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 Mean 신뢰도로 나타낼 경우 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 그리고 결정론적 파손내력 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. 한빛1,2호기 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 수행하였다. 한빛1,2호기 내진성능 평가 대상기기 중 EPRI NP-6041의 선별제거 요건에 따라 선별한 대상 기기는 최종 내진성능 평가결과인 표 3-7에 기술하였으며, 선별제거 된 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 수용하는 안전관련 구조물 및 탱크에 대해 다음과 같이 분석하였다.

○ 격납건물 및 내부구조물 : 격납건물은 원자로 냉각재 계통을 보호하도록 설계되어 있으며, 원통형 벽체와 돔으로 구성된 철근과 포스트텐션의 텐돈으로 구성되어 있음.

○ 보조/제어 건물 : 보조/제어건물은 외부 및 내부 전단벽과 지지벽으로 구성된 여러 층의 철근콘크리트 상자형 구조물임. 이 건물은 사각형 형태이며 한쪽 면은 격납건물과 접하고 있음. 건물에는 설치되어 있음. 계산 결과는 에 있는 전단벽의 휨파괴가 지배 파손모드로 확인되었으며 임

○ 디젤발전기건물 : 디젤발전기건물은 위치해 있음. 디젤발전기 건물과 보조/제어건물은 지진에 의한 피해를 방지하기 위하여 최소간격 격리 되어있음. 이 건물의 기초매트의 디젤발전기 건물은 대기 디젤발전기, 일일연료저장탱크, 배기소음기, 배기 굴뚝 등을 포함하고 있음. 이 건물의 지배파손 모드는 도출되었으며, 파손모드는 벽체의 전단파괴로서 임

○ 기기냉각수건물 : 기기냉각수건물은 인접해 있음. 이 건물은 2층 구조물로 1층은 내진등급Ⅰ 콘크리트 구조물이며 2층은 내진등급Ⅱ의 강구조물로 구성되어 있음. 1층은 이며, 기초바닥의 이며, 기초에는 여러 개의 트렌치(Trench)와 썸프(Sump: 배수조)가 설치되어있음. 이 건물은 EW길이 방향으로 두께가 2ft인 두 개의 외부벽과 한 개의 내부벽으로 구성되어 있으며 이들 벽체 상단은 두께가 인 2층 바닥 강체 콘크리트에 연결되었음. 2층의 평면크기는 이며 위치해 있음. 2층은 벽체의 수평하중을 받쳐주는 기둥-보인 강구조 건물로 이루어져 있음. 에 위치한 지붕은 콘크리트 구조를 가지는 금속상판임. 건물의 내진성능 평가결과 지배파손모드는 도출되었음. 기기냉각수 건물의 로 도출되었음

○ 기기냉각해수취수건물 : 기기냉각해수취수건물은 냉각수를 공급하는 기능을 수행하며, 내진등급I급으로 설계되었음. 기기냉각해수취수건물은 3면이 지반아래에 매설되어있고 다른 한 면은 동해에 면하는 철근콘크리트 구조물임. 구성되어 있으며,
즉 하나의 외부벽체 만으로 구성되어 있음. 따라서 가 기기냉각해수취

수건물의 지배파손 모드로 도출되었으며, 이 벽체의 파손모드는 휨파손으로 도출되었음. 이 파손모드에 대한 [redacted]임

○ 복수저장탱크 : 이 구조물은 [redacted] 원통형 철판 탱크임. 쉘의 원통부분 [redacted]이며, 지붕의 [redacted]임. 이 탱크는 [redacted] 기초슬래브에 고정되어 있음. 평가 결과 복수저장탱크의 지배파손모드는 [redacted]굴이며, 이때 [redacted]임

○ 핵연료재장전수 탱크(RWST) : 탱크의 형상과 치수는 [redacted] 원통형 쉘이며 원통의 [redacted] 지붕[redacted]임. 사용재료는 [redacted]임. 이 탱크는 [redacted] 기초매트에 고정되어 있음. 기초매트는 암반위에 설치되어 있음. 탱크의 지배파손모드는 [redacted]로 지진 PSA 보고서에 기술되어 있으나 상세 계산 자료를 확인할 수 없어 정확한 내진성능을 검토한 결과 [redacted]임을 확인함.

○ 한빛본부 3.2Mw 이동형발전차 차고건물 : [redacted]

나. 기기 평가 결과

필수 안전정지 기능을 보증하는 안전정지경로 상 1,434개의 기계, 전기기기에 대하여 기존 PSA 분석보고서 결과 및 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 보고서를 참고하여 내진성능 값을 검토하였으며, 상세평가가 되지 않고 선별제거 된 기기 또는 일부 추가 분석이 필요한 기기에 대해서는 상세 분석 및 정착부 평가를 통해 내진성능을 최종 평가하였다. 평가결과 대부분의 기기의 HCLPF 내진성능이 0.3g 이상 확보하는 것으로 평가되었다. 밸브는 선별제거 요건 확인 및 EPRI NP-6041에 따른 현장점검을 수행을 통해 내진성능이 0.5g 이상임을 확인하였다. 이와 더불어 현장조사 중 구조적 건전성 확인이 필요한 대상에 대해서 추가 분석을 수행하였으며, 한빛1,2호기 구조물 및 기기의 내진성능 평가결과는 표 3-7에 제시하였다.

상기 평가결과와 같이 한빛1,2호기의 안전관련 구조물 및 필수 안전정지 기능을 보증하는 안전정지경로 상의 기기 모두 0.3g 이상의 HCLPF 내력을 보유하고 있는 것으로 분석되었다[핵연료재장전수탱크(RWST)의 경우 탱크 내부 저장용수가 지진시 흔들림으로써 탱크 상부 덮개에 충격을 주는 것으로 검토되어 추가 분석을 수행한 결과 0.35g로 확인됨]. 따라서 한빛1,2호기의 필수 안전정지 기능을 보증하는 구조물·계통·기기는 부지에서 설계기준초과 지진동(0.3g)이 발생하는 경우에도 해당 기

능을 유지할 수 있을 것으로 평가되었다.

### 2.1.4 격납건물 건전성을 손상시킬 수 있는 지진심각도 범위

제2장 보고서(설계기준초과 극한자연재해의 특성)에서 검토하였듯이 한빛1,2호기 부지에서의 PSHA 평가결과 재현주기 10,000년 빈도 수준의 지진동은 0.11g로 평가되었다. 한편 한빛1,2호기의 격납건물과 격납계통의 격리기능을 수행하는 기기들은 수평지반가속도 0.2g의 지진을 고려하여 설계되고, 내진검증 되었다. 스트레스테스트 수행지침에 따르면 한빛1,2호기는 지진 확률론적안전성분석(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 3-4에 제시한 바 있다. 격납건물 및 격납건물 격리밸브의 내진성능 분석결과는 다음과 같다.

○ 격납건물 및 내부구조물 : 격납건물은 원자로 냉각재 계통을 보호하도록 설계되어 있으며, 원통형 벽체와 돔으로 구성된 철근과 포스트텐션의 텐돈으로 구성되어 있음. 또한 내부 구조물은 구조물간의 상호작용을 방지하기 위해 외벽과 isolation gap으로 격리되어 있음.

○ 격납건물 격리밸브 : 격리밸브는 선별제거 요건 확인 및 EPRI NP-6041에 따른 현장점검 수행을 통해 내진성능이 0.5g 이상임을 확인하였음.

상기 평가결과와 같이 한빛1,2호기의 격납건물과 격납건물 격리밸브 내력을 보유하고 있는 것으로 분석되었다.

## 2.2 지진에 의한 내부 침수에 대한 구조물·계통·기기의 건전성

본 평가에서는 안전정지지진 또는 이를 초과하는 지진발생시 한빛1,2호기의 안전정지경로 상의 기기가 위치하는 격납건물, 보조건물 등 안전관련 구조물 내부에서 유체계통의 배관 파단으로 발생하는 내부 침수 및 이로 인한 영향을 평가하였다. 특히 격납건물을 제외한 안전관련 구조물 내부에서의 침수영향은 “한빛1,2호기 내환경검증 환경개선 설계용역[3-16]” 중 “침수분석” 평가결과를 활용하여 설계기준을 초과하는 0.3g 지진동 발생시 내진범주 I 또는 II로 설계되지 않은 배관의 손

상 등에 의한 침수 상황을 검토하였다.

### 2.2.1 격납건물 내부 침수

격납건물 내부의 유체계통 배관은 모두 내진범주 I 또는 II로 설계된 배관으로서 내진성능 값이 최소 0.3g 이상이므로 안전정지지진 및 설계기준초과 지진시 0.3g 지진동 수준까지는 파손되지 않는다. 따라서 설계기준초과 지진동(0.3g)에 의한 격납건물 내부 침수 영향은 발생하지 않는다.

### 2.2.2 기타 안전관련 구조물에서의 내부 침수

본 평가에서는 건물 내 배관 중 안전정지지진 등급으로 설계되지 않은 계통의 배관 손상으로 배관 내부의 유체가 건물 내부로 유출되는 것을 고려하였다. “한빛 1,2호기 내환경검증 환경개선 설계용역” 결과에 따르면 격납건물을 제외한 안전관련 구조물 내부에서 침수영향을 일으킬 수 있는 유체계통 배관은 1) 격납건물 살수계통(BK), 2) 잔열제거 및 안전주입계통(BC & BH), 3) 사용후연료저장조 냉각 및 정화계통(EC), 4) 기기냉각수계통(EG), 5) 필수 냉각계통(GJ), 6) 옥내 소화수계통(KC), 7) 보조급수계통(AL), 8) 주급수배관(AE), 9) 증기발생기 취출수계통(BM), 10) 화학 및 체적제어계통(BG), 11) 원수공급계통(AM), 12) 중앙냉방수계통(GB), 13) 탈염수 보충계통(AN), 14) 복수 이송 및 저장계통(AP)의 배관이다.

상기 계통 중 원수공급계통, 중앙냉방수계통의 2개 계통의 배관은 내진범주 I 또는 II로 설계되지 않은 비내진 등급의 배관으로서 설계기준초과 지진동(0.3g) 발생시 이들 계통의 배관 파단으로 발생할 수 있는 침수영향을 검토하였다.

원수공급계통 배관의 파손이 발생할 경우 순수저장탱크(Fresh Water Tank)의 수원이 보조건물로 지속 유입되어 보조건물 내에서 침수가 발생할 수 있으나 순수저장탱크는 비내진설계 탱크로서 설계기준초과 지진동(0.3g) 발생시 탱크 자체의 건전성이 확보되지 않으므로 탱크 내 물은 배관을 통해 보조건물 내로 유입되지 않고, 탱크 밖으로 유출되어 보조건물 내에서 침수영향을 일으키지 않는다.

중앙냉방수계통 배관의 경우 배관 파손이 발생할 경우 밀림탱크의 수위가 낮아져 충수 밸브가 자동 개방되면서 탈염수계통에서 수원이 공급되어 보조건물 및 제어건물에서 침수가 발생할 수 있다.

기기냉각수건물 상층부의 중앙냉각기실 내의 중앙냉방수계통 배관이 파손될 경우 유량을 건물 외부로 방출하기 위하여 비상배수구를 설치함으로써 최대 침수위를 6“로 결정하였다. 또한 보조건물에 침수원이 전파되지 않도록 보조건물과의 사이에 6” 연석을 설치하였다.

보조건물 148′지역에 위치한 격실에서 중앙냉방수계통 배관이 파손될 경우 이 격실은 상층부에 위치하므로 유입되는 유량이 아래층으로 충분히 배수 가능한 것으로 검토되었다.

한편 중앙냉방수계통 배관이 보조건물 최하층(74‘)에도 위치하며, 상층부에서 배관이 파단되는 경우에도 계통 내 대부분의 유체가 보조건물 최하층부로 모여 침수위를 형성하게 된다. 설계기준초과 지진 상황에서는 교류전원 상실로 펌프가 동작기능을 상실하므로 추가적인 수원 공급은 중단되며, 이 경우 중앙냉방수계통 배관 내부에 차있는 유체가 보조건물 최하층(74‘)에 모이게 된다. 이에 중앙냉방수계통 배관의 Line list, P&ID 및 Stress ISO 도면에 근거하여 안전관련 구조물 내부에 위치한 배관의 직경별 길이 및 총 유량을 평가하고, 보조건물 최하층(74‘) 바닥면적을 계산함으로써 최대가능침수위를 검토한 결과, 보조건물 74‘ 바닥으로부터 약 7.4cm의 침수위가 발생할 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 발전소 내 모든 기기는 바닥으로부터 최소 10cm 이상 상부에 위치하므로 중앙냉방수계통 배관 파단에 의하여 보조건물 내부 안전정지기기가 받는 침수영향은 없는 것으로 검토되었다.

## 2.3 지진에 의한 내부 화재에 대한 구조물·계통·기기의 건전성

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

### 2.3.1 화재방호계통 설명

한빛1,2호기 [redacted] 용량의 청수저장탱크(Fresh Water Storage Tank) 2대로부터 소화수를 소화수펌프로 공급한다. 각 청수저장탱크 저장용량 중 [redacted]은 발전용수(Service Water)로 사용하고 나머지 [redacted] 소화수로 사용하도록 설계되어 있다. 소화수펌프는 각 [redacted] 용량의 디젤엔진구동 펌프 2대와 전동구동 펌프 1대로 구성되어 있으며, [redacted] 용량의 충압(Jockey) 펌프가 계통 누설을 보충하고 계통 압력을 [redacted]로 유지시키고 있다. 소화수는 자동식 스프링클러설비(또는 물분무설비)의 최대 유량인 [redacted]과 소화전의 유량 [redacted]을 동시에 공급할 수 있는 용량으로 설계되어 있다.

옥외 소화수배관은 [redacted]으로 지하에 매설되어 있고 배관 분기점에는 배관을 구획화하기 위한 차단밸브(Sectional Valve)가 설치되어 있다. 소화수공급설비의 정비에 대비하여 한빛1,2호기 옥외소화수배관은 상호 연결되어 있고 정상 운전 시에는 차단밸브로 격리되어 있다.

한빛1,2호기에는 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake, SSE)에 대비한 내진등급 I 소화설비가 설치되어 있으며, 복수저장탱크(Condensate Storage Tank)의 저장용량 중 의 소화수를 안전정지 관련기기가 설치된 격납건물, 보조건물, 기기냉각수건물, 제어건물, 연료건물, 디젤발전기건물에 공급한다. 내진등급 I 소화수펌프는 각 100% 용량의 수동운전 전동구동 펌프 2대로 구성되어 있으며, 동안 공급할 수 있는 용량으로 설계되어 있다.

내진등급 I 소화수 배관은 4inch 탄소강관(Carbon Steel Pipe)으로 소화수를 공급하지 않을 때에는 배수하여 빈 배관으로 관리한다. 각 소화배관 끝단의 호스연결부를 마개 (Cap)과 체인(Chain)으로 막아두었다가 필요시 캡을 제거하고 옥내소화전함에 비치되어 있는 일반 소방호스를 연결하여 사용한다.

화재 발생을 신속하게 감지하고 경보를 발하기 위한 화재감지 및 경보설비가 발전소 전 지역에 설치되어 있다. 감지기에서 화재신호가 감지될 경우 현장 및 주제어실에 경보신호를 제공할 뿐만 아니라 각 회로나 감지기의 기능 상실 유무를 확인할 수 있는 감시기능도 현장 및 주제어실에 제공한다. 감지기는 회로별로 각 지역의 지역수신기(R형)에 연결되어 있고 이들 지역수신기는 주제어실의 화재감시패널에 연결되어 층별, 건물별 화재 및 고장신호를 송신한다.

한빛1,2호기의 격납건물에는 연기감지기, 열감지기 및 불꽃감지기가 설치되어 있고, 보조건물과 터빈건물 등 대부분의 건물에는 주로 연기감지기가 설치되어 있으나 일부 고온발생 지역이나 불꽃이 발생할 수 있는 지역에는 불꽃감지기 또는 열감지기가 설치되어 있다.

이동식 소화기는 소형화재 발생시 수동 화재진압을 위하여 발전소 전 지역에 걸쳐 바닥으로부터 1.5m 이하의 위치에 소화기 간 최대거리를 준수(소형소화기 20m, 대형소화기 30m)하여 비치되어 있다. 화재유형별(A급 : 일반화재, B급 : 유류화재, C급 : 전기화재)로 적응성이 있는 소화기가 비치되어 있으며 그 종류는 다음과 같다.

○ 분말 소화기(3.3kg, 6.5kg, 20kg) : A,B,C급 화재
○ 이산화탄소 소화기(4.6kg) : B,C급 화재
○ 청정소화약제 소화기(3.5kg) : A,B,C급 화재
○ 하론 소화기(68kg) : A,B,C급 화재

한빛1,2호기에 설치되어 있는 화재방호계통은 대부분이 비안전(Non-Nuclear Safety Class) 계통이므로 지진화재 발생시에는 사용할 수 없으나 내진등급 I 소화설비 계통은 내진설계가 되어있어 지진화재시 사용이 가능하다.

### 2.3.2 지진화재 영향 평가

#### 2.3.2.1 지진화재 발생가능 지역 선별

원자력발전소에서 지진이 발생했을 때 화재가 발생할 가능성이 있는 지역은 내진설계가 되어있지 않은 전기 캐비닛이 위치하거나, 용기나 배관 내 인화성 기체 또는 액체가 존재하는 지역이다. 한빛1,2호기에서 지진으로 인하여 화재 발생이 가능한 지역을 도출하기 위해 한빛1,2호기 화재위험도분석 적합성 재평가 보고서를 참조하였고 현장조사를 수행하였다.

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.

#### 2.3.2.2 지진화재 취약지역 도출

가. 지진화재 취약지역 도출 방법

지진화재 취약지역은 설계기준을 초과하는 지진에 의해 발생하는 화재로 인해 스트레스테스트에서의 필수 대처기능이 상실될 가능성이 있는 지역을 의미하며, 필수대처기능은 다음과 같다.

- ○ 원자로의 안전정지 및 노심냉각 기능
- ○ 사용후핵연료저장조 냉각 기능
- ○ 중대사고 완화 기능

지진화재 취약지역은 지진으로 화재가 유발될 경우 상기 필수대처기능을 수행하는 기기 및 케이블이 손상되어 그 기능을 상실할 수 있는 지역을 선정하였으며, 이를 위해 한빛1,2호기 화재위험도분석보고서[3-17]와 스트레스테스트 3분야 및 4분야 보고서를 참조하였다.

안전정지 및 노심냉각 기능은 원자로 고온정지 달성 및 유지에 필요한 계통 중 하나의 계열(Train)은 화재로 인한 영향이 없어야 하고 원자로 상온정지 달성 및 유지에 필요한 계통의 다중계열은 화재로 인해 동시에 기능이 상실되는 것을 허용하나, 적어도 하나의 계열은 72시간 이내에 복구가 가능해야함을 규정하고 있다. 또한, 발전소 고온정지 및 상온정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기능을 다음과 같다.

(1) 고온정지 기능

주제어실 또는 비상정지패널(Emergency Shutdown Panel)에서 고온정지 기능을 수행하는데 필요한 다중계열 또는 계통 중 최소한 하나의 계열 또는 계통은 노출화재를 포함한 단일화재에 의한 손상이 없어야 하며 이 때 요구되는 화재안전정지 기능은 다음과 같다.

○ 반응도 제어(Reactivity Control)
○ 원자로냉각재 보충(Reactor Coolant Makeup)
○ 원자로냉각재계통 압력 제어(Reactor Coolant System Pressure Control)
○ 붕괴열제거(Decay Heat Removal)
○ 공정감시(Process Monitoring)
○ 보조기능(Support) : 위의 기능들이 성공적으로 작동하는 것을 보조하기 위한 설비

(2) 상온정지 기능

상온정지를 달성하는데 필요한 계통의 다중경로는 노출화재를 포함한 단일화재에 의하여 동시에 손상될 수 있으나 최소한 하나의 경로는 72시간 내 복구되어야 하며, 상온정지를 달성하기 위하여 요구되는 화재안전정지 기능은 다음과 같다.

○ 원자로냉각재계통 냉각 및 감압(Reactor Coolant System Pressure Reduction to RHRS Capability)
○ 붕괴열제거(Decay Heat Removal)
○ 보조기능(Support) : 위의 기능들이 성공적으로 작동하는 것을 보조하기 위한 설비

한빛1,2호기의 화재안전정지 기능별 화재안전정지 계통은 다음과 같다.

○ 반응도 제어
  - 원자로보호계통(Reactor Trip System)
  - 화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System)의 붕산수 주입기능
○ 원자로냉각재 보충 및 원자로냉각재계통 압력 제어

- 화학 및 체적제어계통
- 연료재장전수저장계통(Refueling Water Storage System)
- 원자로냉각재계통 중 압력방출밸브(Pressure Operated Relief Valve) 및 격리밸브

○ 붕괴열제거
- 주증기계통(Main Steam Supply System)의 PORV 및 격리밸브
- 증기발생기 취출계통(Steam Generator Blowdown System)
- 보조급수계통(Auxiliary Feedwater System)
- 잔열제거계통(Residual Heat Removal System)

○ 공정감시
- 가압기(Pressurizer) 압력 및 수위계
- 원자로냉각재 저온관(Cold Leg) 및 고온관(Hot Leg) 온도계
- 증기발생기 압력 및 광역(Wide-Range) 수위계
- 핵계측계통의 선원영역 중성자속 감시계
- 안전정지에 필요한 모든 탱크의 수위 감시계
- 주제어실(Control Room) 및 보조정지패널실(Auxiliary Shutdown Panel Room) 에서의 제어및계측계통

○ 보조기능(Support)
- 전원공급계통(Electric Power Systems)
- 기기냉각수계통(Component Cooling Water System)
- 1차기기냉각해수계통(Nuclear Service Cooling Water System)
- 압축공기계통(Compressed Air System)
- HVAC계통(Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems)
- 필수냉각수계통(Essential Chilled Water Systems)

스트레스테스트에서는 사용후핵연료저장조의 냉각유지를 위해 외부주입유로를 이용하므로 사용후연료저장조의 수위 및 온도 계측기 및 케이블이 있는 지역을 고려하여야 한다. 또한 중대사고 완화에 사용되는 격납건물살수펌프 및 케이블이 있는 지역을 지진화재 취약지역 도출시 포함하여야 한다. 한빛1,2호기는 170개의 방화지역으로 구분되어 있으며 지진화재 취약지역을 도출하기 위해 각 방화지역에 대하여 성공경로 A 또는 성공경로 B에 해당하는 기기나 케이블의 존재여부와 다중의 성공경로 사이의 격리상태를 평가하였다.

한빛1,2호기의 경우 화재 후 안전정지 성공경로 A/B에 해당하는 계통 및 기기들은 내진설계가 되어 있으며 서로 격리되어 있다. 그러나 일부 지역에는 성공경로 A/B에 속하는 기기 및 케이블들이 공존하고 있기 때문에 지진화재가 발생할 경우 A/B계열의 기기 또는 케이블의 동시손상으로 필수대처 기능을 상실할 수 있어 이러한 지역은 지진화재 취약지역으로 도출하였다. 또한 A 또는 B 중 하나의 성공경로가 존재하는 지역이지만 지진화재로 인해 단일계통의 기기 또는 케이블

의 손상으로 필수대처 기능을 상실할 수 있는 지역도 지진화재 취약지역으로 도출하였다.

한편 한빛1,2호기의 지진화재를 평가하기 위해 한빛1,2호기 지진사건분석보고서 [3-7]에서 도출된 최소단절집합을 구성하는 설비가 위치한 지역에서의 지진화재발생 가능성을 검토하였다.

한빛1,2호기 지진사건분석보고서는 지진이 발전소의 안전성에 끼치는 영향을 분석하기 위해서 다음과 같은 요소들을 고려하였다.

- ○ 지진의 지반운동가속도에 따른 발생빈도 분석.
- ○ 특정한 지반운동가속도에 대한 구조물과 기기의 내진능력 분석.
- ○ 구조물과 기기의 고장으로 인해 계통에 미치는 영향 분석.
- ○ 체계적인 논리모델(지진사건수목과 고장수목)을 사용하여 위에서 얻은 결과를 종합 분석함으로서 지진에 기인한 노심 손상빈도를 평가.

한빛1,2호기 지진사건의 각 초기사건별 노심손상빈도 및 이에 대한 최소단절집합은 표 3-9와 같다.

한빛1,2호기 초기사건별 노심손상빈도 및 이에 대한 최소단절집합을 구성하는 설비들을 조사한 결과 표 3-9에 표시된 최소단절집합 기기들은 한빛1,2호기의 안전정지기기에 포함되어 있으며 A, B 계열로 각각 분리되어 3시간 내화방벽으로 구획된 방화지역 내에 위치하고 있다(표 3-10 참조). 다중경로의 케이블이 존재하는 지역은 화재방호체로 보호시 지진화재로 인해 동시에 손상되지 않는다.

나. 지진화재 취약지역 도출 결과

#### 2.3.2.3 지진에 의한 내부 광역화재 영향평가

앞에서 기술한 바와 같이 설계기준 초과지진이 발생하면 내진설계가 되어있는 성공경로 A/B 계열 안전정지기기 및 관련 케이블들의 건전성은 유지된다. 그러나 지진과 동시에 화재가 발생하여 성공경로 A/B 계열이 동시에 손상되는 경우와 하나의 성공경로(A 또는 B)가 존재하는 지역이지만 지진화재로 인해 단일계통의

기기 또는 케이블의 손상으로 안전정지를 달성할 수 없는 [redacted] 따라서 지진화재 취약지역에 있는 필수대처 기능 케이블을 화재로 부터 보호하여야 한다. 격납건물은 1시간 내화등급의 화재방호체로 보호하고, 나머지 지역은 3시간 내화등급의 화재방호체로 래핑하여 물리적으로 격리하여야 한다.

또한 이들 지역의 화재감지설비는 내진설계가 되어있지 않아 화재발생시 조기감지가 불가능하므로 자동화재탐지설비의 실제 내진성능 파악 및 보강이 필요하다.

[redacted]

한빛1,2호기에 설치된 옥내소화전, 스프링클러 등의 소화설비는 지진 발생시 사용할 수 없으므로 지진화재 취약지역에 지진화재가 발생할 경우에는 소화기, 자체소방대의 화학소방차, 외부소방대의 소방펌프차를 이용하여 진압하여야 한다. 만약 이들 지역에 연기 및 유독가스가 많아 소방대원이 진압활동을 할 수 없을 경우에는 휴대용 제연설비를 이용하여 연기를 제거한 후 화재를 진압할 수 있다. 지진화재 취약지역에 대한 개선사항은 아래와 같다.

○ 사용후연료저장조 수위계 및 온도계의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호
○ 지진화재 취약지역의 A 계열 또는 B 계열의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호(격납건물은 1시간 내화등급의 화재방호체로 격리)
○ 증기헤더실에 내진등급 I 옥내소화전 설치
○ 자동화재탐지설비의 실제 내진성능 파악 및 보강
○ 지진화재 취약지역 및 화재순찰 경로에 내진비상조명등 설치

### 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[3-17, 18, 19]

#### 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 대원으로 구성된다.

초동소방대에는 공기호흡기, 예비공기통, 방열복, 방열화, 방열장갑 등의 개인용 보호 장비가 구비되어 있다. 초동소방대원은 보호 장비를 착용 후 발전소 내 화재를 초기에 진압한다. 한빛1발전소 화재방호계획서에는 초동소방대원이 화재 진압 시 이용할 수 있도록 발전소 내 각 방화지역별 화재발생시 진압방법, 진압도면, 이용진압설비, 자동동작사항, 후속조치, 주의사항 등을 수록하고 있다.

나. 자체소방대

자체소방대는 발전소 내 화재를 예방하고 화재발생시 신속히 진압하여 인명과 재산을 최대한 보호하기 위하여 본부 내에 설치 운영된다. 자체소방대의 임무는 아래와 같다.

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

자체소방대 사무실에는 R형 복합수신기가 설치되어 있어 발전소 내에서 화재가 발생할 경우 어느 호기에서 화재가 발생했는지 즉시 인지할 수 있다.

자체소방대 건물은 화학소방차 및 화재진압장비를 보관하고 자체소방대원이 근무하는 장소이다. 자체소방대 건물은 0.17g로 내진설계가 되어있으나 설계기준초과 지진(0.3g) 발생시에도 사용가능한지 여부를 내진성능을 검토하여 확인하고, 결과에 따라 보강 등의 조치가 필요하다. 또한 자체소방대 건물은 설계기준 초과 해일이 발생하는 경우에도 침수영향을 받지 않는다. 자체소방대의 보유 장비는 다음과 같다.

다. 자위소방대

한빛본부의 자위소방대는 통합자위소방대, 처·소별 자위소방대(직할자위소방대, 한빛 1,2,3발전소 자위소방대)로 구성되어 있다. 한빛 1발전소의 자위소방대원은 발전운전에 영향을 받지 않는 종사원으로 구성되어 있다.

라. 소방계획서 평가

한빛본부는 후쿠시마 후속조치의 일환으로 지진화재에 대비하여 광역화재 발생시 적절한 대응체계를 구축하기 위해 한빛본부 소방계획서를 개정 완료하였다. 소방계획서에는 화재의 예방, 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.

한빛본부에서는 전 직원을 대상으로 연간 계획에 따라 소방훈련과 소방교육을 병행하여 실시하고 있다. 자체소방대는 월 1회의 소방훈련, 초동소방대(발전팀 각 근무조)의 소방훈련 주기는 매분기마다 1회 이상 실시하며 초동소방대원은 1년에 2회 이상 소방훈련에 참가하고 있다. 또한 초동소방대는 외부소방대와 상호 응원협정에 따라 영광소방서, 고창소방서와 년 2회의 합동훈련을 수행하고 있다.

### 2.3.3.2 외부소방대 수동진압능력 및 협력체계 평가

한빛1,2호기에서 지진화재가 발생하여 발전소 초동소방대 및 본부 자체소방대의 수동진압능력을 초과할 경우 화재진압은 발전소 외부소방대의 지원을 받아야 한다. 이를 위해

영광소방서 및 고창소방서는 한빛본부의 지원요청에 대비하여 원자력시설 및 방사능관련 교육을 실시하였고 방사선방호복 및 방사선량계(ADR)를 확보하고 있으며, 연 1회의 합동훈련을 실시하고 있다. 이와 같이 한빛1,2호기에서 발생하는 지진화재는 한빛본부 자체소방대 및 응원협조 기관인 외부소방대를 활용하여 효과적으로 진압할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.3.4 화재인지방안, 인적오류・의사결정 오류 최소화 방안

#### 2.3.4.1 화재인지방안

가. 지진발생시 화재인지

한빛1,2호기는 설계기준초과 지진에 의해 광역화재가 발생할 경우 화재감지기를 통한 화재의 조기감지가 불가능할 수 있다. 이에 지진발생시 화재인지를 위해 화재순찰조를 편성하여 지진 발생시 지진화재 취약지역을 순찰하여야 한다.

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 인지하여야한다. 즉 화재순찰조가 지진화재 취약지역을 돌아보고 화재상황을 파악해야 하기 때문에 인적오류가 발생할 수 있다.

이러한 인적오류를 최소화하기 위해서는 절차서 개정, 정기적인 소방교육 및 훈련을 실시하여야한다. 지진 발생 시 비정상운전절차서는 화재순찰조의 순찰경로, 화재시 행동요령 등을 보완하여 개정하여야 한다. 화재순찰조는 운전원, 초동소방대, 자체소방대 및 외부소방대와 정기적으로 소방교육 및 합동 소방훈련을 실시하여 신속하게 화재상황에 대처한다. 현재 초동소방대원들은 화재방호운영계획서에 의거 초동소방대 훈련일정에 따라 분기별 1회의 자체훈련을 실시하고 있고 외부소방대와는 년 1회의 합동 소방훈련을 실시하고 있다. 지진화재에 대비하여 소방훈련 시 화재순찰조를 반드시 참여시켜 훈련을 함으로서 인적오류를 최소화한다.

설계기준(안전정지지진) 초과 지진에 의한 광역화재가 발생했을 때 소규모는 초동소방대를 동원하여 진압할 수 있으나 대규모 화재의 경우에는 소내 자체소방대 및 외부소방대의 인원 및 장비가 화재진압에 동원된다. 이때 다량의 유독가스 및 연기로 인해 화재지역으로 진입이 어려운 경우에는 이동용 제연설비를 이용하여 유독가스 및 연기를 제거한 후 화재를 진압하여야 한다. 따라서 소방훈련시 이동용 제연설비를 이용한 연기제거 훈련을 병행하여 인적오류 발생을 방지한다.

나. 의사결정오류 최소화방안

화재순찰조는 지진화재가 발생하면 즉시 발전팀장에게 보고한다. 화재발생 상황을 보고받은 발전팀장은 화재의 진압을 위해 즉시 초동소방대와 자체소방대를 출동시켜야 한다. 설계기준 초과지진에 의한 광역화재가 발생했을 때 화재의 규모가

크지 않을 경우에는 초동소방대와 자체소방대를 동원하여 진압할 수 있으나 화재 규모가 클 경우에는 외부소방대의 인원 및 장비가 화재진압에 동원된다. 이 경우에는 시간적인 제약을 받지 않고 가용한 자원으로 순차적으로 화재진압을 수행하면 된다.

발전팀장의 의사결정이 화재진압 및 발전소의 안전정지에 많은 영향을 미치게 되기 때문에 발전팀장은 소방훈련에 함께 참여하여 각각의 화재 시나리오에 맞게 신속한 조치를 취함으로서 의사결정 오류가 발생하지 않도록 한다.

### 2.3.5 평가 결과

한빛1,2호기에서 설계기준 초과(안전정지지진) 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 지역이 도출되었다. 이들 지역에 대한 지진화재 영향 평가 결과는 아래와 같다.

지진화재 취약지역에서 발생하는 화재는 소화기, 자체소방대의 화학소방차, 외부소방대의 소방펌프차를 이용하여 수동으로 화재를 진압한다.

한빛1,2호기는 지진에 의한 내부 광역화재 영향평가에서 제시한 화재방호설비의 개선이 필요하며, 개선을 완료하고 자체소방대의 대응능력 개선 및 외부소방대와의 협력체계를 강화할 경우 설계기준 초과지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 발전소에서 발생할 수 있는 지진에 의한 광역화재를 보다 효과적으로 진압하기 위하여 아래와 같은 개선조치가 필요한 것으로 검토되었다.

○ 사용후연료저장조 수위계 및 온도계의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호
○ 지진화재 취약지역의 A 계열 또는 B 계열의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호(격납건물은 1시간 내화등급의 화재방호체로 격리)
○ 증기헤더실에 내진등급 I 옥내소화전 설치
○ 자동화재탐지설비의 실제 내진성능 파악 및 보강
○ 지진화재 취약지역 및 화재순찰 경로에 내진비상조명등 설치
○ 자체소방대 건물 내진성능 평가 및 후속조치
○ 지진화재 시 화재순찰조 편성 및 운영을 위한 절차서/지침서 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 한빛 1,2호기 주요 안전관련 구조물의 부지정지고는 지진해일 및 폭풍해일에 의한 가능 최고해수위 보다 높으나, 1층 출입구 문턱 표고는 가능최대강우에 의한 침수 수준 보다 낮으므로 홍수 영향이 발생할 수 있다. 이에 안전관련 구조물 출입구에 방수문 설치를 진행중(방수문 설치 이전에는 물리적 방호절차 수립 중)에 있다.

한편 한빛1,2호기에서는 기상청에서 조기에 경보되는 태풍, 호우, 강풍, 해일 관련 기상특보가 발령되는 경우 상기 지침서에 따라 각 상황에 따른 점검 및 관련 조치를 수행하고 있다. 또한 서해안에 지진해일이 발생하게 되면 기상청으로부터 발전소 주제어실로 지진해일 경보가 즉시 통보되므로 발전소에서는 상기 절차서에 따라 관련 조치를 수행할 수 있다. 이 점검에서는 건물 외부 출입문의 닫힘 상태와 기기냉각해수건물 및 기기냉각해수계통 기기들을 점검하고, 각 건물의 집수조 수위, 배수구 막힘 및 배수펌프의 운전상태를 점검한다. 또한 부지 내 배수로, 사면 상태와 주요 안전관련 구조물의 누수여부 등을 점검한다.

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

현장점검 결과 한빛1,2호기의 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 한빛1,2호기의 강풍방호 및 비산물 방호체는 안전관련 구조물의 외벽 자체이다. 이들 외벽은 안전관련 구조물의 일부로서 반기 주기의 일상점검과 5년 주기의 정밀점검을 통하여 구조물의 건전성을 관리하고 있으며 점검 결과에 따라 보수

등의 조치를 수행하고 있다. 그리고 안전관련 구조물 출입구에는 방수문을 설치중에 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 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)4.038m로 평가되었다. 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m 보다 낮으므로 한빛1,2호기의 모든 안전관련 구조물・계통・기기는 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 검토되었다. 또한 안전관련 구조물에 직접 영향을 주는 방파제 내부 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)6.982m로 평가되었다. 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m 보다 낮으므로 한빛1,2호기의 안전정지기능을 수행하는 구조물・계통・기기에는 침수영향이 발생하지 않는다. 또한 안전관련 구조물 출입구에는 후쿠시마 후속조치로 방수문이 설치중이므로 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, 관련 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 극한 자연재해에 대한 한빛1,2호기 대응능력 확인 차원에서 규제기관 검증지침에서 요구하고 있는 가능최대강우의 1.5배 해당하는 국지강우가 부지에 발생할 경우 안전관련 구조물의 홍수영향을 추가적으로 검토하고 있다(2018년 9월말까지 수행예정임).

한편 한빛1,2호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전정지기기를 수용하고 있는 보조건물 등의 안전관련 구조물 출입구에 홍수영향 방지를 위하여 방수문을 설치중이다. 단, 현재 방수문 설치중이므로 방수문 설치 완료 이전까지의 건전성 확보를 위하여 운영절차서에 의한 모래주머니 쌓기 등의 물리적 방호조치를 제3절(안전개선사항)에 제시하였다.

### 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 53.13m/s, 10,000년 빈도 최대순간풍속은 63.99m/s 이었다. 상기 평가결과에 따라 10,000년 빈도 최대풍속과 최대순간풍속에 의한 풍압을 도출하고 이를 한빛1,2호기 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 최대순간풍속을 설계에 적용하고 있다.

따라서 본 평가에서는 국내 건축법규[건축물 하중기준 및 해설(2000)]에 따른 10,000년 빈도 최대풍속(58.2m/s)을 적용한 풍압과 ASCE 7-98에 따른 10,000년 빈도 최대순간풍속(63.99m/s)을 적용한 풍압을 각각 평가하였다.

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

따라서 안전관련 구조물이 지진하중에 의해 설계되었음을 고려할 때 풍압이 미만이므로 풍속의 증가가 한빛1,2호기 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 $1.6\times10^{-6}/km^2\cdot yr$로 산정한 바 있다. 또한 발전소의 북쪽과 남쪽이 산지에 막혀 있고 평야면적이 작은 한빛1,2호기 부지의 특성을 고려한다면 토네이도의 발생 가능성은 거의 없다.

그럼에도 불구하고 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 상황을 가정하여 발전소의 대응능력을 아래와 같이 평가하였다. 부지에서 설계기준을 초과하는 F2급(풍속 50~69m/s)의 토네이도가 발생할 경우 비산물이 발생할 수 있다. 이에 대하여 [redacted] 으로서 토네이도 비산물의 영향이 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

#### 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 설계기준초과 폭풍해일 발생시의 EL.(-)5.558m 이다. [redacted] 여유가 있다.

한빛1,2호기 1차기기냉각해수펌프의 가용유효흡입수두(NPSHa)와 필요유효흡입수두(NPSHr)는 각각 35′와 25′로서 이 값은 설계시 가능최저수위 EL. 53′-4″(-4.0m)를 기준으로 계산되었다. 따라서 설계시 최저수위는 현재 평가된 가능최저수위 EL. -5.558m와 비교하여 약 1.5m(약 5′)의 수위차이가 있고 결국 가능최저수위시에는 NPSHa가 35′에서 30′로 감소하게 된다. 그러나 이 값(30′)도 NPSHr(=25′)보다는 크므로 가능최저수위 발생시에도 펌프의 NPSHr은 확보되며 펌프의 Cavitation이 발생하지 않는다. 따라서 가능최저수위 발생시에도 1차기기냉각해수펌프의 필요유효흡입수두(NPSHr)가 확보되므로 펌프의 동작성능에는 이상이 없다.

제2장 보고서에서 평가한 바와 같이 한빛1,2호기 운영종료시까지 향후 약 10년을 고려할 경우 설계기준초과 해수온도는 33.6℃이며, 이 온도는 FSAR [redacted] 에 기술된 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도 [redacted] 보다 낮으므로 해수온도 상승이 최종열제거원에 끼치는 영향은 없을 것으로 검토되었다.

## 제3절 안전 개선사항

### 3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

극한자연재해에 대한 구조물・계통・기기 건전성과 관련하여 한빛1,2호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행되었거나 이행중인 안전성 증진사항은 다음과 같다.

가. 지진 자동정지 설비 설치

지진에 의한 대응능력 향상을 위하여 지진 자동정지 설비 설치를 완료하였다.

나. 주제어실 지진발생 경보창 내진성능 개선

지진에 의한 대응능력 향상을 위하여 내진성능 개선 조치를 완료하였다.

다. 안전정지유지계통 내진성능 개선

원전 안전정지유지계통 내진성능 평가결과 조치가 필요한 것으로 도출된 예외기기들에 대하여 개선조치를 완료하였다.

라. 용수 공급관로 내진성능 평가

용수관로 내진성능평가 용역을 수행하여 내진보강을 완료하였다.

마. 방수문 설치

설계기준을 초과하는 해일 등으로부터의 침수에 대비하여 비상전력계통 등 주요 안전정지기기를 수용하는 구조물의 출입구에 방수문을 설치중이다.

바. 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 펌프 설치를 완료하였다.

사. 최종 열제거설비 침수방지 및 복구대책 마련

해일시 침수에 대비하여 기기냉각해수계통 펌프의 예비용 전동기를 구매하였으며

전동기 예비품 확보 및 기능상실 시 복구대책을 수립하였다.

아. 냉각해수 취수능력강화 및 해일대비 시설 개선

설계기준 해수위 조사·연구결과 냉각수펌프의 취수능력이 적절함을 확인하였다.

자. 소방차와 연계한 대체수원 확보

소방차와 연계한 대체수원을 설치완료 하였다.

### 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 3-15 서 보듯이 “비상급수저장조 불투수층 주기점검, 제2제어실 및 비상전력실 보강”등 2개 항목의 11개 세부사항들은 한빛1,2호기 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 3-16에서 보듯이 “SFP 냉각계통 기기 등에 내진성능 재검토 및 후속조치 수행” 등 3개 항목의 6개 세부사항들은 한빛1,2호기 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

한빛1,2호기의 내진 현장점검 결과에서 도출된 조치 필요 기기에 대한 내진 건전성 확보 조치를 수행할 예정이다.

나. ASME PRA Standard 2009를 활용한 SSC 내진성능 확인

가동원전 스트레스테스트 평가 대상 전체 발전소에 공통 적용되는 사항으로서 한빛1,2호기에서는 ASME PRA Standard 2009에 따라 필수 대처설비의 내진 현장점검

을 수행하였으며 차이분석 등의 추가 평가는 2019년까지 수행할 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 방수문 설치 완료 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 및 소내 수동진압능력 개선

한빛1,2호기 지진화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약지역으로 도출된 지역에 대하여 다음과 같은 개선조치를 수행할 예정이다.

○ 사용후연료저장조 수위계 및 온도계의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호
○ 지진화재 취약지역의 A 계열 또는 B 계열의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호(격납건물은 1시간 내화등급의 화재방호체로 격리)
○ 증기헤더실에 내진등급 I 옥내소화전 설치
○ 자동화재탐지설비의 실제 내진성능 파악 및 보강
○ 지진화재 취약지역 및 화재순찰 경로에 내진비상조명등 설치
○ 자체소방대 건물 내진성능 평가 및 후속조치
○ 지진화재 시 화재순찰조 편성 및 운영을 위한 절차서/지침서 개발

## 제4절 결론

한빛1,2호기 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.

○ 한빛1,2호기의 필수대처기능(안전정지, 노심냉각, 격납건물 격리, 사용후연료저장조 냉각 등)을 수행하는 기기에 대하여 ASME/ANS. Std. 2009에서 제시한 EPRI NP-6041 방법론을 이용하여 현장점검을 수행하였음. 현장점검 결과는 2018년 계획예방정비기간 중에 격납건물 내 기기 등을 추가 점검 후 도출예정임. 한편 한빛1,2호기에서는 절차서 비정상-3762(지진발생시 조치)에 따라 지

진발생시 적절한 운전조치를 취할 수 있으며, 안전정지지진 발생시 한빛1,2호기의 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. 현장점검 결과는 2018년 계획예방정비기간 중에 격납건물 내 기기 등을 추가 점검 후 도출예정임

○ 확률론적지진재해도 분석 결과 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 수준의 지진은 영주기 수평지반가속도가 0.11g인 지진으로 평가되어 설계기준지진인 0.2g 보다 작은 수준임. 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 0.5g 이상인 것으로 확인되었으며, 필수대처기능을 수행하는 기기들의 내진성능 평가결과 모든 기기의 HCLPF 내진성능이 0.3g 이상 확보하는 것으로 검토되었음. 대상기기 중 밸브, 계측기 등은 내진검증문서 등을 확인하여 내진성능이 0.5g 이상임을 추가로 분석하였음. 개별 기기들의 내진성능평가 결과는 본 보고서의 표에 상세 제시하였음

○ 설계기준 초과지진에 의해 발생하는 내부 광역화재 영향 평가 결과, 한빛1,2호기에서 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약지역은 28개 지역이 도출됨

○ 한빛1,2호기는 소내에 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 한빛1,2호기에서 발생하는 안전정지지진을 초과하는 지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가됨

○ 한빛1,2호기의 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준해수위 침수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있어 별도의 침수방지 설계와 설비는 요구되지 않음. 그러나 가능최대강우 발생시 침수가 발생할 수 있어 방수문을 설치중임. 한편 발전소는 태풍, 호우, 강풍, 지진해일 등의 상황시 자연재해 예방점검 절차에 따라 주요 구조물・계통・기기에서 안전기능의 저하가 발생하지 않도록 적절한 점검과 운전조치를 취하고 있음

○ 한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 류큐트렌치의 재현주기 10,000년 빈도

지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)4.038m로 검토되었으며 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)10.0m 보다 낮으므로 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었음. 한편 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 방파제 내부 취수로에서의 가능최고해수위는 EL.(+)6.982m로 평가되었으며, 이 값은 부지정지고 EL.(+)10.0m 보다 낮으므로 태풍(폭풍해일)에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었음

○ 재현주기 10,000년을 초과하는 홍수 수준평가에 적용된 가능최대강우량 및 이 강우의 1.5배인 국지강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였음. 평가결과 침수영향이 발생하나 한빛1,2호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전관련 구조물 출입구에 방수문을 설치중임. 현재 방수문 설치가 완료전이므로 추가적인 물리적 방호조치 등의 안전 개선사항을 수행중임

○ 한빛1,2호기 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 최대순간풍속을 평가하고, 이에 따른 풍압을 계산하여 안전관련 구조물의 안전성에 끼치는 영향을 검토한 결과 설계시 고려한 풍하중과 지진하중의 차이에 의해 구조물에 끼치는 영향은 없는 것으로 검토되었음.

○ 한빛1,2호기 부지는 발전소의 남쪽과 북쪽이 산지에 막혀 있는 특성을 고려한다면 부지에서 F1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있음. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 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

○ 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 폭풍해일 발생시의 EL.(-)5.558m임. 한편 부지의 설계기준초과 해수온도는 33.6℃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

한빛1,2호기 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, 스트레스테스트 수행지침(개정 1), 2016.

3-2. 한수원(주), 한빛1,2호기 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 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Rev. 1, March 2007.

3-5. IEEE Standard 344, IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1975

3-6. USNRC, Reg. Guide 1.100, Seismic Qualification of Electric Equipment for Nuclear Power Plants, Rev.1, 1977.

3-7. 한수원(주), 한빛1,2호기 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), 한빛1,2호기 내진성능 평가 관련 현장점검 보고서, 2018.

3-14. 한수원(주), 한빛1,2호기 절차서 비정상-3762(지진발생시 조치).

3-15. USNRC, NURE/CR-0098, Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plant.

3-16. 한수원(주), 한빛1,2호기 내환경검증 환경개선 설계용역

3-17. 한수원(주), 한빛1,2호기 화재위험도분석 적합성 재평가 보고서. 2017.

3-18. 한수원(주) 한빛원자력본부, 한빛1발전소 화재방호운영계획서. 2017.

3-19. 한수원(주) 한빛원자력본부, 2017년도 소방계획서.

3-20. 한수원(주) 한빛원자력본부, 방사선비상계획서.

3-21. 한국원자력안전기술원, 슈퍼태풍 발생관련 원자력시설의 안전성 검토 보고서, 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 한빛1,2호기 설계 감쇠비 (임계감쇠비, 단위 %)

| Structure or Component | 1/2 SSE | SSE |
|---|---|---|
| Equipment and large diameter piping systems, pipe diameter greater than 12 inches | 2.0 | 3.0 |
| Small diameter piping systems, diameter less than or equal to 12 inches | 1.0 | 2.0 |
| 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 |

[자료 : 한빛 1,2호기 FSAR]

표 3-2 내진성능 평가 대상계통

| 필수안전기능 | 계통 | 계통 설명 |
| --- | --- | --- |
| | | |

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 1/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 2/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 3/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 4/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room<br>No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 5/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room<br>No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 6/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 7/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room<br>No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 8/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 9/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 10/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 11/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 12/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 13/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 14/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 15/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 16/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 17/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 18/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 19/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 20/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 21/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 22/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 23/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 24/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 25/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 26/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 27/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 28/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 29/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 30/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 31/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 32/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 33/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 34/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 35/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 36/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 37/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 38/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-3 내진성능평가 대상기기(안전정지유지계통, 39/39)

| No | 계통 | 분류 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 위치<br>(건물) | Room No. | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상 시 영향) | 비고[1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

[1] 한빛 1,2호기 전출력 외부사건(지진) Level 1 PSA 보고서, 2015. [3-7]
[2] 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 최종보고서(2014) [3-9]
[3] Stress test 추가기기

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 1/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 2/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 3/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 4/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 5/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 6/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 7/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 8/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 9/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-4 내진성능 평가 대상기기(격납건물 격리 계통, 10/10)

| No | 계통 | 구조물/설비/기기 설명 | Equipment ID | 선정 사유<br>(지진에 의한 손상시 영향) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

*격납건물 격리 계통의 기기 선정은 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 최종보고서, 2014. [3-9]를 참조하였음.

표. 3-5 내진성능 평가 대상기기(사용후연료 냉각계통)

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

*사용후연료 냉각계통의 기기 선정은 원전 안전정지유지계통 내진성능 평가용역 최종보고서, 2014. [3-9]를 참조하였음.

표 3-6 한빛1,2호기 최종 정비이력 분석 대상

| No. | Equipment ID | Description | 추가평가 필요 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 구조물

| 번호. | 구조물 | 파손모드 | HCLPF(g) | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(1/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(2/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(3/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(4/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(5/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-7 한빛1,2호기 최종 지진취약도 분석 대상설비 - 기기(6/6)

| No | 분류 | 기기명 | 기기 ID | 위치 | 진동수 | 파손모드 | HCLPF (functional) | HCLPF (structural) | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

표 3-8 계통 및 기기 관련 계전기 목록

| 기 기 | 고장모드 | 계전기 명 | 계전기 오동작 영향 | 계전기 위치 |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(1/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(2/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(3/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(4/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(5/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(6/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|

표 3-9 한빛1,2호기 지진 CDF MCS 사건 해당 기기(7/7)

| No. | 빈도 | 사건1 | 사건2 | 사건3 | 사건4 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

㈜ 지진사건 CDF MCS의 각 사건 밑에 해당 기기를 표시하였으며(황색 셀) 기기번호가 없는 사건들은 초기사건, 특수사건, 회복조치 또는 운전원조치로써 기기고장과는 무관함. 상기 MCS에 포함된 기기들은 모두 화재안전정지 기기목록에 포함됨을 확인하였음 (단, 체크밸브는 화재에 의한 기능 영향을 받지 않으므로 화재안전정지 기기목록에 포함되지 않음)

표 3-10 지진 CDF MCS 사건 해당 기기의 화재 안전정지기기 해당 여부 확인

| 기기 번호 | 기기명 | 발생가능<br>방화지역 | 화재안전정지<br>기기 해당여부 |
|---|---|---|---|
| | | | |

표 3-11 지진화재 취약지역

| No. | 방화지역 번호 | 방화지역 명 | 안전정지관련 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 기기 | 케이블 |

표 3-12 대처방안 이행 소요시간(1/3)

| No. | F/A No | F/A No | 방사선 관리 구역 | 인적오류발생가능성 | | | 초동소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | 자체소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 방해 요소 | 취약 분야 | 대응 능력 확보 | 화재 인지 시간 | 대처 방안 결정 시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화 지역 도착 시간 | 한계 시간 | 화재 인지 시간 | 대처 방안 결정 시간 | 자체 소방 대발 전소 도착 시간 | 소방 대설 비설 치시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화 지역 도착 시간 | 한계 시간 |

표 3-12 대처방안 이행 소요시간(2/3)

| No. | F/A No | F/A Name | 방사선 관리구역 | 인적오류발생가능성 | | | 초동소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | 자체소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 방해요소 | 취약분야 | 대응능력확보 | 화재인지시간 | 대처방안결정시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화지역도착시간 | 한계시간 | 화재인지시간 | 대처방안결정시간 | 자체소방대발전소도착시간 | 소방대설비설치시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화지역도착시간 | 한계시간 |

표 3-12 대처방안 이행 소요시간(3/3)

| No. | F/A No | F/A Name | 방사선 관리구역 | 인적오류발생가능성 | | | 초동소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | 자체소방대 대처방안이행 소요시간(min) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 방해요소 | 취약분야 | 대응능력확보 | 화재인지시간 | 대처방안결정시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화지역도착시간 | 한계시간 | 화재인지시간 | 대처방안결정시간 | 자체소방대발전소도착시간 | 소방대설비설치시간 | 방사선방호장비착용시간 | 방화지역도착시간 | 한계시간 |

표 3-13 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간(1/3)

| No. | 출발지역 F/A No. | 방사선 관리 구역 | 중간 이동통로 | | | | | 도착지역 F/A No. | 이동 소요 시간 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| | | | | | | | | | |

표 3-13 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간(2/3)

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

표 3-13 화재순찰자의 이동경로 및 소요시간(3/3)

| No. | 출발지역<br>F/Z Name | 방사선<br>관리<br>구역 | 중간 이동통로 | | | | | 도착지역<br>F/N Name | 이동<br>소요<br>시간 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| | | | | | | | | | |

표 3-14 SRP(NUREG-0800) 3.5.3에 제시된 최소 콘크리트 방호벽 두께

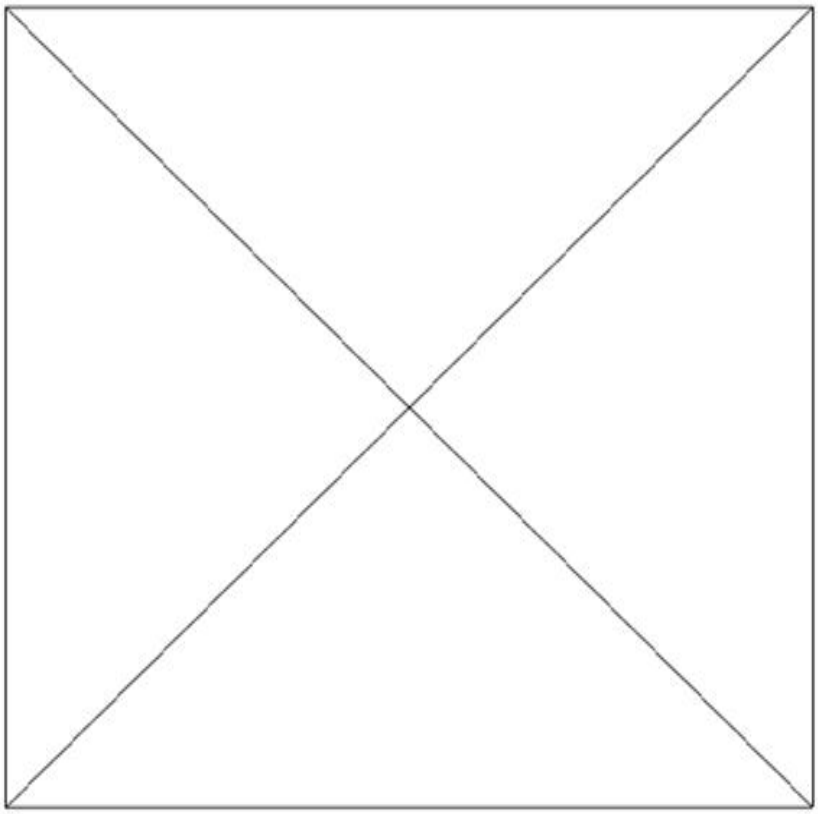
| Region | Concrete<br>Strength, psi | SRP 3.5.3 Table1<br>Thickness, inches | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Wall | | Roof | |
| | | Rev.1 | Rev.0 | Rev.1 | Rev.0 |
| | | | | | |

표 3-15 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영 여부 확인

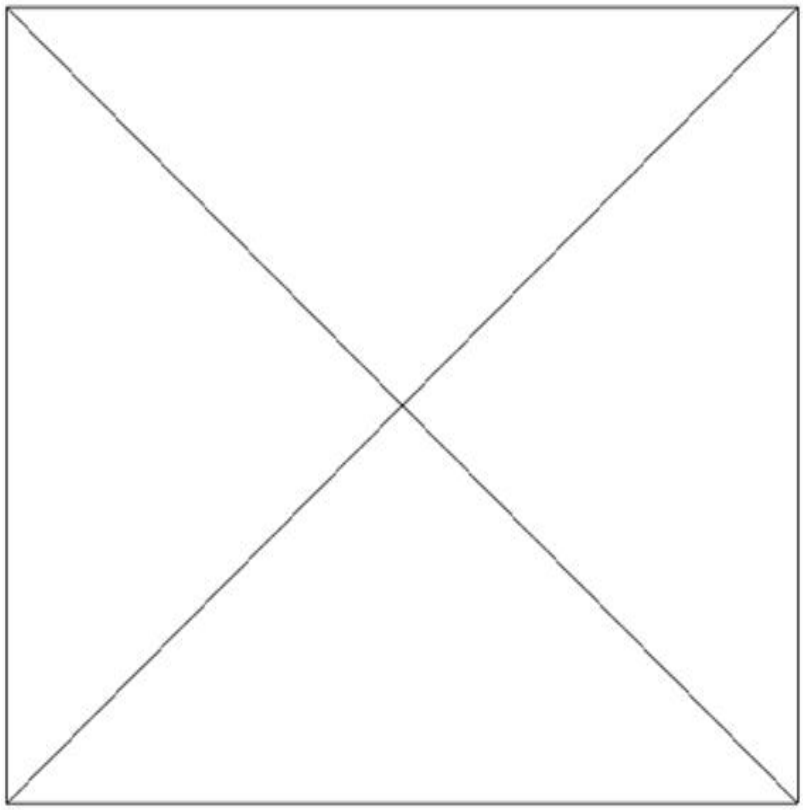
| 제목 | 세부 내용 | 한빛1,2호기 반영 | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |

표 3-16 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영 여부 확인

| 제목 | 세부 내용 | 한빛1,2호기 반영 | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |



(a) 수평방향



(b) 수직방향

그림 3-1 한빛1,2호기 설계지반응답스펙트럼(최대가속도 1.0g)

(a) 수평방향 성분 (최대가속도 1.0g)

(b) 수직방향 성분 (최대가속도 1.0g)

그림 3-2 한빛1,2호기 설계인공지진시간이력

# 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 ····· 3
2.2.2 필수대처기능 설비 ····· 6
2.2.3 계통별 기능유지를 위한 보조설비 ····· 24
2.2.4 도출된 설비들의 물리적 위치 및 안전/품질/전기/내진등급 ····· 32
2.2.5 소외전원상실 시 대처를 위해 설계된 소내 예비전력공급원 및 설계 시 고려된 사항 ····· 40
2.2.6 최종열제거원 상실시 대처를 위해 설계된 사항 ····· 45
2.3 전력상실, 최종열제거원상실시 발전소 대응능력 ····· 46
2.3.1 전력상실 조건 ····· 46
2.3.2 최종열제거원상실 조건 ····· 56
2.3.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6) ····· 60
2.4 극한 자연재해에 따른 안전기능 상실을 고려한 발전소 대응능력 ····· 65
2.4.1 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 지진해일(시나리오 7) ····· 66
2.4.2 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 해일 및 강우(시나리오 8) ····· 66
2.4.3 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) ····· 68
2.5 한빛1,2호기 차이점 ····· 68

제3절 안전 개선사항 ····· 68
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 68
3.2 월성 1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ··· 71
3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 72

제4절 결론 ····· 72

제5절 참고문헌 ····· 73

제6절 표, 그림 ····· 76

# 표, 그림

표 4-1 전력계통 모선별 부하목록 ····· 76
표 4-2 모선정전 시 영향 ····· 182
표 4-3 필수대처기능 유지를 위한 주요설비 및 보조설비 ····· 186
표 4-4 필수대처기능 상태 확인 ····· 201
표 4-5 소내 가용한 발전기의 사용가능 시간 ····· 202
표 4-6 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준 ····· 203
표 4-7 열제거원으로 가용한 수원 ····· 204
표 4-8 사고시나리오별 필수대처설비인 전력원 이용가능성 ····· 205
표 4-9 사고시나리오별 필수대처설비인 열제거원 이용가능성 ····· 206
표 4-10 소외전원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 1) ····· 207
표 4-11 소외전원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 1) ····· 208
표 4-12 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 2) ····· 209
표 4-13 소내정전 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 2) ····· 210
표 4-14 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 3) ····· 211
표 4-15 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 3) ····· 213
표 4-16 필수대처기능 확보 방안(시나리오 3) ····· 215
표 4-17 최종열제거원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 4) ····· 216
표 4-18 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 4) ····· 217
표 4-19 필수대처기능 확보 방안(시나리오 4) ····· 218
표 4-20 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건 평가 시 가정사항(시나리오 6) ····· 219
표 4-21 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6) ····· 220
표 4-22 필수대처기능 확보 방안(시나리오 6) ····· 222
표 4-23 절차서 및 지침서 개선항목 ····· 223
표 4-24 월성 1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인항목 ····· 223
표 4-25 고리 1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인항목 ····· 223

그림 4-1 소내 전력계통 단선도 ····· 224
그림 4-2 비상전원 전력모선도 ····· 225
그림 4-3 한빛1,2호기 비상냉각수 주입설비 단순계통도 ····· 226
그림 4-4 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 4, 5) ····· 227
그림 4-5 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 4, 5) ····· 227
그림 4-6 원자로냉각재계통 온도(시나리오 4, 5) ····· 228
그림 4-7 가압기 수위(시나리오 4, 5) ····· 228
그림 4-8 증기발생기 협역수위(시나리오 4, 5) ····· 229
그림 4-9 증기발생기 광역수위(시나리오 4, 5) ····· 229
그림 4-10 주증기 방출 유량(시나리오 4, 5) ····· 230
그림 4-11 누적 보조급수 사용량(시나리오 4, 5) ····· 230
그림 4-12 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량
(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 231
그림 4-13 가압기 및 증기발생기 압력
(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 231
그림 4-14 원자로냉각재계통 온도(시나리오 6,안전주입탱크 고갈) ····· 232
그림 4-15 원자로냉각재펌프 밀봉 누설 유량
(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 232
그림 4-16 안전주입탱크 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 233
그림 4-17 가압기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 233
그림 4-18 증기발생기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 234
그림 4-19 주증기 방출 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈) ····· 234
그림 4-20 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 3, 6 ,7, 8, 9) ····· 235
그림 4-21 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 235
그림 4-22 원자로냉각재계통 온도(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 236
그림 4-23 원자로냉각재펌프 밀봉 누설 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 236
그림 4-24 안전주입탱크 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 237
그림 4-25 충전/유출 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 237
그림 4-26 가압기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 238
그림 4-27 증기발생기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 238
그림 4-28 주증기 방출유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 239
그림 4-29 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 239
그림 4-30 보조급수 누적량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9) ····· 240

## 제1절 개요

한빛1,2호기에 대하여 후쿠시마 원전 사고와 같은 설계기준을 초과하는 극한자연재해로 인하여 전력계통과 최종열제거원이 상실되는 상황이 발생한다고 가정하여 한빛1,2호기가 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 발생되는 다음과 같은 사고시나리오에 대한 발전소 대응능력도 평가하였다.

○ 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 동반

한 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 한빛1,2호기가 안전성을 확보할 수 있는지를 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

한빛1,2호기 소내 전력공급 및 배전은 그림 4-1에 제시되어 있고, 비상전원 전력 모선도는 그림 4-2와 같다

#### 2.2.1.1 모선별 부하목록

한빛1,2호기 소외전력계통은 독립된 1루트 2회선 345 kV 송전선로 2개와 1루트 2회선 345 kV 연락선로 2개로 구성되어 있다. 발전소 기동 시 요구되는 소내전력은 345 kV 소외전력계통으로부터 기동용변압기를 통하여 공급되며, 첫 번째 우선전력(Preferred Power Supply)은 345 kV 계통으로부터 기동용변압기(  )를 통하여 공급되고 두 번째 우선전력은 345 kV 계통으로부터 기동용변압기(  )를 통하여 공급된다.

한빛1,2호기 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 충전펌프, 모터구동보조급수펌프, 1차측기기냉각수펌프(이하 기기냉각수펌프), 1차측 기기냉각해수펌프(이하 기기냉각해수펌프), 필수냉각기(Essential Chilled Water Chiller) 및 잔열제거펌프 등이 연결되어 있으며, 13.8 kV 비안전모선에는 원자로냉각재펌프, 복수펌프 및 순환수펌프 등이, 4.16 kV 비안전모선에는 2차측 기기냉각수펌프 및 중앙냉각수펌프(Central Chilled Water Pump) 등이 연결되어 있다.

480 V 안전모선에는 사용후연료저장조냉각펌프(Spent Fuel Pool Cooling Pump), 필수냉각수펌프(Essential Chilled Water Pump) 및 안전등급 충전기(Class 1E Battery Charger) 등이 연결되어 있으며 480 V 비안전모선에는 보조보일러급수펌프 및 복수기진공펌프 등이 연결되어있다.

125 VDC 안전모선에는 제어, 필수계측 및 인버터 등이, 125 VDC 비안전모선에는 제어, 경보, 터빈 보호 설비 등이, 250 VDC 비안전모선에는 직류윤활유펌프

(Emergency 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

모선정전 시 영향을 받는 기기 및 계통과 각 모선정전에 따른 발전소 영향을 표 4-2에 제시하였다. 모선별 전원상실에 따른 발전소 영향은 다음과 같이 분류하였다.

○ 소외전원상실
○ 소내정전
○ 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전

가. 소외전원상실

정상운전 중 주발전기가 상실되는 경우, 스위치야드 차단기의 개방에 의해 345 kV 소외전력이 공급되며, 주변압기 및 소내보조변압기와 연결된 345 kV 소외전력계통의 전원이 상실되는 경우 기동용변압기를 통하여 345 kV 소외전력이 소내로 공급된다.

소외전력이 모두 상실되면 원자로냉각재펌프 및 주급수펌프가 정지되어 냉각재 저유량 등으로 인하여 5초 이내에 원자로는 정지된다.

소외전원이 상실되면 4.16 kV 안전모선의 저전압 신호 발생 후 10초 이내(FSAR )에 1E급으로 내진 설계된 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)가 자동으로 작동하여 4.16 kV 안전모선을 가압, 공학적안전설비의 전체 부하에 전력을 공급하며, 공학적안전설비가 작동됨에 따라 원자로가 안전정지 상태로 유지된다.

공학적안전설비 부하는 4.16 kV 안전모선( )에 연결된 보조급수펌프, 기기냉각수펌프, 충전펌프, 기기냉각해수펌프 및 잔열제거펌프, 480

V 안전모선에 연결된 필수냉각수펌프, 사용후연료저장조냉각펌프, 125 VDC 안전모선 및 120 V 필수 패널모선에 연결된 계측제어 기기 등이다.

나. 소내정전

소외전원 상실시 비상디젤발전기가 자동으로 작동되지 않으면 비상디젤발전기를 수동으로 기동하여 4.16 kV 안전모선을 가압하여야 하며, 이러한 조치도 실패하면 비상디젤발전기를 포함한 소내의 모든 교류전원이 상실되는 소내정전이 발생한다.

소내정전 발생 후 10분 이내[4-3]에 주제어실에서 대체교류디젤발전기(Alternative AC DG)를 수동으로 기동한다. 대체교류디젤발전기는 4.16 kV 안전모선(  )을 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급하며, 운전원이 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 통합보관고에 보관되어 있다. 이동형발전차는 한빛 본부 공용으로 3.2 MW 정격용량을 가진 발전차 1대가 구비되어 있으며 한빛 본부 각 호기마다 1 MW 정격용량을 가진 발전차 1대가 추가로 구비될 예정이다.

모든 교류전원 상실이후 안전등급 필수 제어기기에 대한 전원은 안전등급 축전지로부터 연속적으로 2.2시간 동안 공급 가능하다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 상실사고를 확인한 후 최대 2시간 이내에 이동형발전차를 비상디젤발전기 건물 입구로 이동하여 수동으로 4.16 kV 안전모선(  )을 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급하며, 운전원이 사고 상황에 따른 완화조치단계에 따라 필요한 운전부하를 선택하여 원자로를 안전정지 상태로 유지한다. 다만 극한재해에 의한 부지 내 다수호기 동시 전원상실 시 8시간 이내에 1 MW 이동형 발전차로 각호기의 일부 저압 공학적안전설비에 전원을 우선 공급하며, 72시간 이후에는 3.2 MW 이동형발전차로 각 호기별 필수부하 전원을 공급한다.

이동형발전차를 사용하여 공학적안전설비에 부하를 공급하기 전까지 내진설계 되고 침수의 영향을 받지 않는 축전지에 의해 발전소 제어 및 보호 기능이 유지된다. 발전소 안전기능 유지를 위한 필수부하는 축전지의 부하차단(Load Shedding) 운전으로 최소 8시간 동안 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 변수 (출력영역 고 중성자속, 출력영역중성자속 고 증가율, 중간영역 고 중성자속, 선원영역 고 중성자속, 과온도 온도편차(OTΔT), 과출력 온도편차(OPΔT), 가압기 저압력, 가압기 고압력, 가압기 고수위, 원자로 냉각재 저유량, 원자로냉각재펌프 저전압, 원자로냉각재펌프 저주파수, 증기발생기 저-저수위, 터빈트립, 안전주입신호)에 의해 원자로 트립계통이 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.

원자로냉각재펌프 차단기트립, 원자로냉각재펌프 저전압 트립 및 저 주파수 트립 변수 감시를 통하여 원자로냉각재펌프 정지 시 원자로가 정지된다.

원자로냉각재펌프 차단기의 개방은 원자로정지를 일으키며 각각의 원자로냉각재펌프 차단기에 설치된 개별 보조 계전기 세트는 트립논리회로의 입력신호로 사용된다.

하나 이상의 원자로냉각재펌프 모터에서의 전원상실(예를 들어, 소외전원 상실이나 원자로냉각재펌프 차단기 개방)에 기인하여 발생될 수 있는 저유량 조건시에도 노심 핵연료를 보호하기 위하여 원자로가 정지된다. 이를 위하여 각각의 원자로냉각재펌프 차단기의 모터 측에는 각 펌프에 연결되는 개별 저전압 감지 계전

기가 설치되어 있으며 이러한 계전기는 펌프 전압이 정격 전압의 대략 이하로 내려가고 원자로출력이 P-7 허용치 값을 초과하는 경우 원자로정지신호를 제공한다. 저전압 감지 계전기에는 시간지연 회로가 내장되어 있으며 이러한 계전기 시간지연 회로의 채택은 단기 전압 급등락에 의한 원자로의 트립을 방지한다.

원자로 냉각재펌프 모터에는 저 주파수 감지 계전기가 두개씩 있으며 펌프 모터 중 2개에 연결된 계전기 출력이 저 주파수를 감지하고 출력이 P-7 허용치 값을 초과할 경우 원자로정지신호를 제공한다.

발전소보호계통 및 원자로정지차단기계통을 포함한 원자로정지 관련 응답시간(안전해석 요건)은 변수별로 차이가 있으며 원자로냉각재 관련 변수별 응답시간은 다음과 같다.

원자로냉각재 저유량은 이고, 원자로냉각재펌프 저전압은 , 원자로냉각재 저주파수는 내에 원자로정지차단기가 개방된다.

상기 이외에 원자로정지 변수에 대한 응답시간은 다음과 같다.

- 출력영역 중성자속:
- 출력영역 중성자속 고 증가율:
- 과온도 온도편차(OTΔT):
- 과출력 온도편차(OPΔT):
- 가압기 저압력:
- 가압기 고압력:
- 증기발생기 저-저수위:

원자로정지차단기가 개방되면 제어봉은 Stationary Gripper 코일 전압이 감쇠하는 시점부터 이내에 dashpot에 도달한다.

한빛1호기에 구비되어 있는 지진원자로자동정지설비(Automatic Seismic Trip System, ASTS)는 이상의 지진이 발생할 때 지진감지 신호로 원자로를 정지시킨다.

그리고 운전원은 제어봉위치 지시등의 제어봉 바닥 지시등의 점등, 원자로 정지차단기의 개방 및 중성자 준위 등의 상태를 파악하여 원자로정지를 확인하는데 만약 원자로가 정지되지 않았으면 운전원이 주제어실에서 원자로를 수동으로 정

지시킬 수 있다.

나. 미임계 유지

노외핵계측계통에서 원자로 저출력을 감시할 수 있는 수단은 1E급 전원을 받는 중간영역채널 대수출력신호와 선원영역채널 중성자속계수율신호이다. 노외핵계측계통 중간영역채널은 핵분열함 검출기를 사용하여 $1 \times 10^{-6}$ ~ 100% 출력의 범위를 감시한다. 또한 노외핵계측계통 선원영역채널은 핵분열함 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

가. 잔열제거계통

잔열제거계통은 주증기계통과 주급수 또는 보조급수계통과 함께 운전정지 후 원자로냉각재계통의 온도를 정상 운전온도에서부터 재장전 온도까지 낮추는 기능을 수행한다.

잔열제거계통은 기기냉각수를 사용하므로 동 계통의 기능이 유지되려면 기기냉각해수계통과 기기냉각수계통이 정상 작동되어야 한다.

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

잔열제거계통의 이용도를 보장하기 위하여 다중의 기기와 전원을 사용한다. 두 계열의 잔열제거계통 중 한 개 계열을 이용하여 원자로냉각재계통을 재장전온도까지 냉각시킬 수 있다.

잔열제거계통은 원자로냉각재계통의 압력 및 온도가 [redacted]와 [redacted]부터 재장전조건인 대기압과 [redacted]까지 원자로냉각재를 냉각시킨다. 잔열제거계통 흡입부 및 토출부의 설계압력은 [redacted]로 설정되었다.

잔열제거계통 한 계열에서 제한된 누설의 수동고장이 발생하더라도 독립적으로 설계한 다른 계열의 잔열제거계통이 계속적인 노심냉각을 보장한다.

잔열제거계통 기기들의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 잔열제거펌프의 밀봉 냉각기와 전동기 냉각기에 1차기기 냉각수가 공급된다면 동 계통을 사용한 노심냉각 기능은 유지가 가능하다.

또한 장기교류전원상실(ELAP, Extended Loss of all AC Power) 상황에서 동 계통의 기기에 이동형발전차를 사용한 전원과 기기냉각수가 공급 가능하다면 노심냉각 기능을 수행할 수 있다.

다만 최종열제거원상실시 잔열제거열교환기 및 잔열제거펌프에 기기냉각수 공급이 상실되므로 잔열제거계통의 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 원자로냉각재계통에 붕산수를 주입하는 기능도 담당한다. 또한 증기발생기전열관 파단사고나 제어봉집합체 인출사고와 같은 사고에서도 안전주입이 이루어진다. 이러한 안전주입계통은 자동적으로 작동한다.

안전주입계통은 네 개의 작동신호로 개시된다. 가압기 저압력, 격납건물 고압력 및 주증기관 저압력 신호가 동시논리 조건을 만족할 때 발생되며 또한 수동으로 작동된다.

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

안전주입계통의 기기들의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 전동기

냉각기와 윤활유 냉각기에 1차기기 냉각수가 공급된다면 동 계통을 사용한 노심냉각 기능은 유지가 가능하다.

또한 ELAP 상황에서 동 계통의 기기에 이동형발전차를 사용한 전원과 기기냉각수 공급이 가능하다면 노심냉각 기능을 수행할 수 있다.

안전주입탱크는 3대로 구성되며 냉각재상실사고의 결과로써 감압된 원자로냉각재계통에 저장된 붕산수를 주입한다. 각각의 탱크는 원자로냉각재계통 저온관에 연결되어 있다. 정상운전중 각각의 안전주입탱크는 직렬로 연결된 두 개의 체크밸브에 의해 원자로냉각재계통과 격리되어 있다. 원자로 운전중 원자로냉각재계통 압력이 안전주입탱크 압력이하로 감압되면 안전주입탱크 붕산수는 자동적으로 원자로냉각재계통에 주입되므로 전원상실과 최종열제거원상실시에도 안전주입탱크의 붕산수 주입기능은 유지된다.

다. 보조급수계통

보조급수계통은 잔열제거계통(Residual Heat Removal)이 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 100% × 2대의 전동기구동 보조급수펌프(  )와 200% 용량의 터빈구동 보조급수펌프(  )로 구성된다. 각각의 펌프는 3대의 증기발생기로 급수를 공급할 수 있으며, 분리요건(Separation Criteria)을 만족하도록 전동기구동 보조급수펌프 와 터빈구동 보조급수펌프는 각 각 분리된 펌프 배출모관을 갖도록 되어 있다. 모든 펌프는 복수저장탱크로의 최소유량 재순환 유로가 있다. 보조급수펌프로 공급되는 냉각수원은 복수저장탱크(  ) 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 보조급수신호에 의해 자동 기동되며, 수동 작동 수단도 구비되어 있다. 전동기구동 보조급수신호(  )는 모든 주급수펌프 상실, 증기발생기 저수위(증기발생기 3대중 1대), 안전주입신호(  ), 4.16kV 모선 저전압 신호 또는 ATWS 완화계통 작동신호에 의해 발생되며, 터빈구동 보조급수신호(  )는 증기발생기 저수위(증기발생기 3대중 2대), 4.16kV 버스 저전압 신호 또는 ATWS 완화계통 작동신호에 의해 발생되며, 신호 발생시 각 펌프는 증기발생기로 보조급수를 공급한다. 증기발생기에서 급수를 비등시키고, 발생된 증기를 증기발생기 압력방출밸브를 통하여 대기로 방출시킴으로써 원자로에서의 열을 제거시킨다. 주복수기가 이용 가능한 경우 증기를 터빈우회계통에 의하여 복수기로 방출시킬 수도 있다.

보조급수는 각 증기발생기와 연결되는 각각의 급수배관을 통해 공급되며, 터빈구동 보조급수펌프는 3대의 증기발생기중 2대의 증기발생기(  )의 주증기배관 가지배관 내 터빈구동 보조급수펌프 증기공급밸브(  )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 통해복수기로 배출된다. 추가적인 배수가 필요한 경우를 대비하여 각 배수 오리피스에 우회배관 및 밸브(  )가 설치된다.

보조급수조절밸브(  )는 증기발생기의 수위를 유지하기 위해 자동 조절되며 손상된 증기발생기를 차단하는 기능도 한다. 보조급수조절밸브는 전원 상실 시 고장 열림으로 설계되어 있으며, 전동기구동 보조급수펌프의 보조급수조절밸브(  )는 압축공기계통으로부터 안전등급 공기를 제공받으며 이는 사고시 12시간 운전이 가능하도록 설계되어 있으며, 터빈구동 보조급수펌프의 보조급수조절밸브(  )는 사고시 최소 밸브를 두 번 동작시킬 수 있는 공기 축압탱크(Air Accumulator)가 설치되어 있다. 보조급수조절밸브는 필요시 수동조작을 위한 핸드휠을 구비하고 있다.

보조급수계통의 각 펌프는 2대의 복수저장탱크로부터 냉각수를 공급받을 수 있도록 상시 열림 자물쇠잠금 수동밸브(  )와 상시 닫힘 자물쇠잠금 수동밸브(  )가 있는 복수저장탱크 간의 교차연결배관이 각 보조급수펌프 흡입 배관에 각각 설치되어 있다. 만약 보조급수펌프 운전 동안 복수저장탱크의 냉각수가 고갈되면 탈염수저장탱크로부터의 대체냉각수 공급배관 상에 있는 자물쇠 잠금 수동밸브(  )및 공기구동밸브(  )를 열어 탈염수저장탱크로부터 대체냉각수를 받거나 원수저장탱크

로부터의 대체냉각수 공급배관 상에 있는 Removable Spool을 연결 후 자물쇠 잠금 수동밸브(  ) 및 자물쇠 잠금 수동밸브(  )를 열어 원수저장탱크로부터 대체냉각수를 공급받을 수 있다.

아래 밸브들은 증기발생기 격리를 위한 밸브들이다.

○ 주증기차단밸브(  )
○ 주증기차단밸브 우회밸브(  )
○ 주급수차단밸브(  )
○ 주급수화학약품주입밸브(  )
○ 증기발생기 취출격리밸브(  )
○ 증기발생기 시료채취 격리밸브(  )

여기서 주증기차단밸브, 주급수차단밸브 및 주증기차단밸브 우회밸브는 가스유압식 구동밸브이며 고장 닫힘으로 설계되어 있다. 주급수화학약품주입밸브, 증기발생기 취출격리밸브 및 증기발생기 시료채취 격리밸브는 공기구동밸브이며 고장 닫힘으로 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, 1차 계통 온도변화로 인한 원자로냉각재의 수축 및 팽창 그리고 운영기술지침서에서 제한하는 최대허용 원자로냉각재계통의 누설수를 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 체적제어계통 중 3대의 원심형 충전펌프는 비상노심냉각계통과 공유한다. 정상운전중 충전펌프는 화학 및 체적제어계통의 고유기능을 수행하나, 냉각재상실사고와 같은 사고 발생시 안전주입작동신호는 충전펌프의 유로를 비상노심냉각계통으로 우회시킨다.

화학 및 체적제어계통은 4~4.4 wt% 붕산을 함유한 2대의 붕산탱크와 원자로보

충수저장탱크로부터 수원을 받을 수 있으며 사고 시 본 계통이 가용하다면 사고 완화를 위한 기능 수행은 유용하다.

화학 및 체적제어계통에는 3대의 원심형 충전펌프가 설치되어 있으며, 이들 원심형 충전펌프는 안전주입기능을 겸하고 있다. 원심형 충전펌프의 설계용량은 [redacted]이며, 1대의 원심형 충전펌프를 사용하여 원자로냉각재펌프의 밀봉주입수를 제외한 최대 충전계통 유량 [redacted] 공급이 가능하다. 충전펌프 후단에서 배관이 분지되어 원자로냉각재펌프의 밀봉수를 공급한다. 원자로냉각재펌프의 밀봉주입유량은 각 원자로냉각재펌프 당 [redacted] 씩 총 [redacted] 이며, 이중 펌프당 [redacted]은 원자로냉각재계통으로 유입되며, [redacted]은 체적제어탱크로 회수된다.

충전펌프는 정상운전, 발전소 기동 및 정지운전 동안 소외전원 뿐만 아니라 소내 비상디젤발전기로부터 전원을 공급받는다.

정상운전, 발전소 기동 및 정지운전 동안 충전펌프의 수원은 체적제어탱크이다. 체적제어탱크에는 2개의 수위지시계가 독립적으로 설치되어 있으며, 체적제어탱크의 수위가 저-저 수위에 도달하면 충전펌프의 수원은 저-저 수위 연동로직에 따라 자동으로 연료재장전수저장탱크로 전환된다. 체적제어탱크에서 충전펌프로의 유로에는 2대의 모터구동밸브([redacted])가 설치되어 있고, 연료재장전수저장탱크에서 충전펌프로의 유로에도 2대의 모터구동밸브([redacted])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 밀봉누설이 발생할 수 있다. 충전펌프 및 관련 기기들의 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받을 수 있으므로 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 충전펌프 전동기 냉각기와 윤활유 냉각기에 1차기기 냉각수가 공급된다면 동 계통을 사용한 충전 및 밀봉주입 기능은 유지가 가능하다.

또한 ELAP 상황에서 동 계통의 기기에 이동형발전차를 사용한 전원과 기기냉각수 공급이 가능하다면 충전 및 밀봉주입 기능을 수행할 수 있다.

마. 기기냉각수계통과 기기냉각해수(원자력냉각용수)계통

기기냉각수계통은 정상운전, 잔열제거운전 및 사고시 안전성 및 비안전성관련 기기로부터 발생되는 열부하를 제거하기 위해 냉각수를 공급하며, 기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하여 전달된 열부하를 최종열제거원인 바다로 방출한다.

기기냉각수계통은 사고시 안전성에 중요한 기기에 냉각수를 공급하는 안전기능을 수행한다.

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

정상운전시 기기냉각수계통은 한(1)계열의 펌프 1대와 열교환기 1대가 운전되며 안전성관련 기기인 잔열제거펌프밀봉냉각기, 격납건물살수펌프밀봉냉각기, 원자로건물 팬 냉각기, 사용후연료저장조 냉각열교환기, 충전펌프베어링냉각기와 내진범주 I 기기인 원자로냉각재펌프/전동기 냉각기, 유출열교환기, 잉여유출열교환기, 밀봉수열교환기, 원자로냉각재배수탱크열교환기, 그리고, 비내진범주 기기인 액체폐기물계통 증발기, 붕소재생계통 증발기, 복수이송펌프베어링냉각기, 복수방사선감시열교환기, 손상연료검출기, 가압기액체시료냉각기, 가압기기체시료냉각기, 잔열제거시료냉각기, 유출냉각기에 냉각수를 공급한다. 잔열제거운전에는 정상운전대비 잔열제거열교환기에 추가적인 냉각수 공급이 요구되기 때문에 계열당 1대 펌프가 운전된다. 사고시 안전주입신호가 발생될 경우 비안전성 관련기기 냉각수 공급모관이 자동 격리된다. 또한 격납건물격리신호가 발생할 경우 내진범주 I 기기 공통유로는 자동 격리된다.

기기냉각해수계통은 계열 당 1대씩 운전되는 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기에서 발생되는 열부하를 제거하여 최종열제거원인 바다로 방출한다. 기기냉각해수계통은 기기냉각수계통, 필수냉각수계통 및 대기 디젤발전기에 냉각해수를 공급함으로써 공학적안전시설(ESF)의 안전기능을 지원한다.

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

모든 운전모드에서 기기냉각해수계통은 계열당 펌프 1대가 운전되며 기기냉각수

열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기 각각 1대에 냉각해수를 공급한다. 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 안전성 관련 기기에 냉각수 공급을 위한 열제거 기능을 수행하며, 기기냉각수계통의 운전성을 결정하는 필수 기기이다. 또한 비내진범주 냉각수 공급 및 회수배관 격리밸브(  ), 원자로냉각재펌프/전동기 냉각기 냉각수 공급 및 회수배관 격리밸브(  )는 안전성기기로의 냉각수 유량확보를 위해 자동 닫힘이 요구되고, 계열간 공통모관격리밸브(  )는 계열간 독립성을 위해 자동 닫힘이 요구된다. 따라서 동 밸브들 또한 기기냉각수계통의 주요설비로 선정하였다. 기기냉각수 재고량 상실시 복수저장탱크로부터 완충탱크(  )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 완충탱크는 주요기기 평가에서는 제외하였다. 또한 화학약품주입탱크(  )는 안전기능이 없는 비안전성기기로 평가가 불필요하다.

기기냉각해수계통의 주요설비로 기기냉각해수펌프(  )를 선정하였다. 동 설비들은 계통내 유체이송 및 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기에 냉각수를 공급하는 기능을 수행하며, 기기냉각해수계통의 운전성을 결정하는 필수 기기이다. 또한 기기냉각해수 방출배관 유량조절밸브(  )는 해수위 변동에 의해 기기냉각해수펌프의 운전유량이 변경될 경우 펌프 정격유량을 확보하기 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 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 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 있다. 또한 대체교류디젤발전기까지 사용이 불가한 극한 재해에서도 3.2 MW 이동형 발전차를 이용해 전원공급이 가능하여 안전기능 설비 등에 냉각수를 공급할 수 있으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 동 펌프들의 기능은 유지된다.

최종열제거원 상실은 기기냉각해수계통 기능상실에 의한 기기냉각수계통으로 전달되는 열부하를 제거할 수 없음을 의미한다. 따라서 잔열제거펌프밀봉냉각기, 격납건물살수펌프밀봉냉각기, 격납건물살수펌프모터냉각기, 원자로건물팬냉각기기, 잔열제거열교환기 등의 운전이 불가하므로 2.1항에서 정의한 필수대처기능 중 노심으로부터 발생하는 열부하 제거 및 격납건물 건전성 확보 기능이 상실된다.

기기냉각해수펌프의 전원상실 뿐만 아니라 극한 자연재해로 인한 계통 취수기능 상실과 같은 사고 발생시에도 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기 냉각해수 공급유로가 차단되어 최종열제거원의 기능이 상실될 수 있다. 단순 교류전원의 상실로 유발된 최종열제거원 기능상실은 이동형 발전차를 이용하여 기기냉각해수펌프에 전원을 공급함으로써 복구가 가능하나, 취수 구조물이 상실될 경우 기기냉각해수펌프의 기동만으로는 냉각해수의 공급이 불가하나 고유량이동형펌프를 연결하여 기기냉각수열교환기에 냉각해수를 공급할 수 있다.

바. 원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통(원자로냉각재계통 격리)

원자로냉각재계통으로부터 화학 및 체적제어계통을 격리하는 밸브와 이들 밸브의 작동 신호는 다음과 같다.

- 유출수 격리밸브 (  ) : 가압기 저수위에서 자동 닫힘.
- 유출수 오리피스 격리밸브 (  ) : 가압기 저수위에서 자동 닫힘.
- 유출수 원자로건물 격리밸브 (  ) : 원자로건물격리신호에 자동 닫힘.
- 밀봉수 회수 원자로건물 격리밸브 (  ) : 원자로건물격리신호에 자동 닫힘.
- 충전관 원자로건물 격리밸브 (  ) : 안전주입작동신호에 자동

닫힘.

- 충전관 격리밸브 (  ) : 수동작동
- 대체 충전관 격리밸브 (  ) : 수동작동
- 가압기 보조살수 격리밸브 (  ) : 수동작동
- 원자로냉각재펌프 밀봉수 차단밸브 (  ) : 수동작동
- 잉여 유출수 격리밸브 (  ) : 수동작동
- 잉여 유출수 원자로건물 격리밸브 (  ) : 원자로건물격리신호에 자동 닫힘.

이들 밸브들은 모두 모터구동밸브로 전원상실시 열림 상태를 유지한다. 상기 중에 충전관과 원자로냉각재펌프 밀봉주입관에는 원자로건물 내부에 역지밸브가 설치되어 있어 원자로냉각재의 방출을 차단할 수 있으나. 유출관과 밀봉수 회수관은 모터구동밸브의 전원상실시 자동격리가 안되며, 운전원에 의해 수동차단이 필요하다.

원자로냉각재 밀봉수 회수관에는 격납건물내, 외부에 각각의 격리밸브가 설치되어 격납건물격리신호에 닫힌다.

따라서 원자로냉각재계통 격리기능은 소외전원상실, 소내정전 조건뿐만 아니라 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서도 기능을 유지할 수 있다.

원자로냉각재계통 격리기능을 수행하는 밸브들은 기기냉각수를 사용하지 않으므로 최종열제거원상실시에도 동 밸브의 기능은 유지된다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로 냉각재 계통은 기본적으로 열원, 열제거원, 순환계통 등으로 구성되고, 3개의 폐회로가 원자로에 연결된다. 각 폐회로는 하나의 29인치 내경 출구관(고온관), 하나의 증기발생기, 한 개의 27.5인치 내경 입구관(저온관) 및 한 대의 원자로냉각재펌프로 구성되고, 한 개의 폐회로 고온관에 가압기가 연결되었다. 다만, 증기발생기와 원자로냉각재펌프 입구관 사이는 31인치로 확관되어 압력 손실을 줄여준다. 모든 원자로냉각재계통 기기는 격납건물 내에 위치한다.

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 원자로

와 증기발생기를 통과하도록 연속 순환된다. 원자로냉각재는 중성자 감속재의 역할도 하고, 반응도 제어를 위해 붕산을 함유하며, 고온 노심유로에서의 일부 국부비등을 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 2912 MWt를 전달한다.

원자로냉각재계통 압력경계의 과압보호는 가압기의 상부에 설치된 3개의 스프링 장착 안전밸브에 의해 이루어진다. 안전밸브의 개방 설정치는 175 $kg/cm^2$ (2485 psig)이며 이 밸브를 통해 방출된 증기는 압력방출탱크의 물속으로 배출되어 응축 및 냉각된다. 증기 방출량이 압력방출탱크 용량을 초과하면, 증기는 탱크에 설치된 파열판을 통하여 격납건물 내의 대기로 방출된다.

1·2차측 출력의 커다란 불일치가 발생하는 경우에 일차계통의 압력을 제한하기 위해 자동 및 수동 운전이 가능한 가압기 압력 방출밸브 (PORV)가 가압기 상부에 설치되어 있다.

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

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

가압기 압력 방출밸브와 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 증기발생기 압력방출밸브(  )가 사용된다.

증기발생기 압력방출밸브는 공기구동식 밸브이며 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에서 구동 전원을 공급받는다. 증기발생기 압력방출밸브는 압축공기계통으로부터 안전등급 공기를 제공받으며 이는 사고시 12시간 운전이 가능하도록 설계되어 있으며, 필요 시 수동조작을 위한 장치인 핸드휠을 구비하고 있다. 따라서, 증기발생기 압력방출밸브는 소외전원 상실, 소내정전 조건 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 기능이 유지된다.

증기발생기 과압을 방지하는데는 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 붕산수를 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, 1개의 독립된 주살수 및 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.

격납건물살수계통의 주요설비로서 격납건물살수펌프, 격납건물 재순환집수조 출구밸브, 재장전수탱크 출구밸브, 살수약품첨가탱크 출구밸브 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, 격납건물재순환집수조 출구밸브, 재장전수탱크 출구밸브, 살수약품첨가탱크 출구밸브 및 살수노즐 차단밸브는 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 불가한 극한 재해에서는 살수운전이 불가하므로 2.1 항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보기능이 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 공급 받을 수 있고, 비상디젤발전기를 사용할 수 없는 경우에서도 대체교류디젤발전기를 사용할 수 있으나, 대체교류디젤발전기까지 사용이 불가한 극한 재해에서는 격납건물 격리가 불가하므로 2.1 항에서 정의한 필수대처기능 중 격납건물 건전성 확보기능이 상실된다.

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

다. 격납건물 수소제어계통

격납건물수소제어계통은 사고시 노심 및 원자로건물에서 발생되는 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 수소재결합기로 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 발생되는 수소를 지속적으로 제거한다. 동 설비는 별도의 전원 공급이 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. 제어건물 공기조화계통

제어건물 공기조화계통(Control Building HVAC System)의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치(Control Room Emergency Supply/Recirculation AHU)는 3가지 필수대처기능을 수행하기 위해 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 관련 기기 등에 적합한 온도를 제공하는 안전기능을 수행한다.

제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치(  )는 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 기기 등에 적합한 온도를 제공하기 위한 설비이므로 주요설비로 선정된다.

제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상여과계열(  )는 주제어실 외기 흡입구 고방사선 신호에 의해 자동으로 기동되는 기기로 주제어실 운전원 및 주제어실 운전에 필요한 전기/계측 관련 기기 등에 적합한 온도를 제공하는 기기가 아니므로 주요설비 평가에서 제외하였다.

제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치와 관련된 계기용 공기를 공급받는 격리제어댐퍼의 공기상실로 인한 고장시 열림 또는 고장시 닫힘에서 주제어실의 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.

제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치는 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 1차기기냉각해수계통을 사용하는 필수냉각기(  )의 기능은 상실되며, 필수냉각기에서 필수냉각수를 공급받는 제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치 또한 기능이 상실되므로 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치의 안전기능은 상실된다.

나. 필수냉각수계통

필수냉각수계통(Essential Chilled Water System)은 3가지 필수대처기능을 수행하기 위한 제어건물 공기조화계통(Control Building HVAC System)의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치(Control Room Emergency Supply/Recirculation AHU,  )에 필수냉각수를 제공하는 안전기능을 수행한다.

필수냉각기(  ) 및 필수냉각수펌프(  )는 제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치에 냉각수를 제공하기 위한 설비이므로 주요설비로 선정된다.

필수냉각기 응축기 1차기기냉각해수 제어밸브(  )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.

필수냉각수계통의 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. 이 모든 설비들을 사용할 수 없는 경우에는 제어건물 공기조화계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치에 필수냉각수를 제공하는 안전기능을 수행할 수 없다.

필수냉각기(  )는 1차기기냉각해수계통을 사용하여 필수냉각기 응축기의 잠열을 제거하므로 최종열제거원 상실시 필수냉각수계통의 안전기능은 상실된다.

다. 원자로건물 팬 냉각기 계통

원자로건물 팬 냉각기 계통(Containment Fan Cooler System)은 3가지 필수대처기능을 수행하기 위해 냉각재  상실사고 또는 주증기관 파열사고 후 원자로건물 내 증가하는 온도/압력을 설계치 이내로 유지하는 안전기능을 수행한다.

원자로건물 팬 냉각기 계통은 냉각재  상실사고 또는 주증기관 파열사고 후 원자로건물 내 증가하는 온도/ 및 압력을 설계치 이내로 유지하는 설비이므로 주요설비로 선정된다.

원자로건물 팬 냉각기 계통의 원자로건물 팬 냉각기(  ) 관련 계기용 공기를 공급받는 격리제어댐퍼 및 수동댐퍼는 없으므로 주요기기 평가를 수행하지 않았다.

원자로건물 팬 냉각기 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.

원자로건물 팬 냉각기(  )는 1차 기기냉각수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 원자로건물 팬 냉각기 계통의 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, 잔열제거계통, 보조급수계통, 주증기격리계통, 격납건물 살수계통 및 격납건물 격리계통 등이 있다.  1차 및 2차계통의 감시변수가 보호동작을 요구하는 상태에 도달하면 격납건물격리작동신호, 격납건물살수작동신호, 주증기관격리작동신호, 안전주입작동신호, 주급수관격리작동신호 및 보조급수작동신호들을 발생시켜 이와 연동된 공학적안전설비를 작동시킨다.

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

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.

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

2.2.3.2 노심냉각 및 재고량 유지

가. 잔열제거계통

잔열제거계통의 주요설비는 잔열제거펌프, 잔열제거열교환기 및 관련 밸브들이며, 상세 내역은 표 4-3에 열거하였다.

잔열제거계통의 주요설비 작동을 위해 구동/제어전원과 기기냉각수계통 및 기기냉각해수계통의 운전이 필요하다.

즉, 잔열제거 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 원심충전펌프, 잔열제거펌프, 잔열제거열교환기 및 관련 밸브들이며, 상세 내역은 표 4-3에 열거하였다.

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

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

급받아야 한다.

안전주입계통에는 3대의 안전주입탱크가 설치되어 있으며, 이들 탱크는 붕산수로 채워져 있고, 질소가스로 [redacted]로 상태로 가압되어 있다. 냉각재 상실과 같은 사고 조건에서 원자로냉각재계통이 감압되면 저장된 붕산수를 원자로냉각재계통으로 방출한다. 이들 탱크의 후단 모터구동격리밸브는 정상운전 중 항상 개방되어 있다. 따라서 안전주입탱크의 원자로냉각재계통의 붕산수 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, 유압식 조속기를 이용하여 증기유량을 조절함으로써 터빈의 속도를 제어한다. 조속기 제어전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 공급받는다. 터빈구동 보조급수펌프를 작동시키기 위해서는 제어전원 상실 시 고장 열림으로 설계된 터빈구동 보조급수펌프 증기공급밸브 ([redacted]) 및 증기차단밸브([redacted])가 개방되어야 한다. 보조급수펌프터빈 증기공급배관 응축수의 추가 배수를 위한 응축수 배수밸브([redacted])는 제어전원 상실 시 고장 열림으로 설계된다. 따라서 소외전원 상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 터빈구동보조급수펌프 관련 보조설비 기능은 유지된다. 터빈구동보조급수펌프 관련 주요설비는 기기냉각수를 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 기능이 유지된다.

전동기구동 보조급수펌프는 펌프 흡입측의 보조급수를 이용하여 모터 냉각 등을 위한 냉각수를 자체 공급하여 냉각하도록 설계되어 있어 외부의 기기냉각수 공급이 불필요하다. 전동기구동 보조급수펌프 구동 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 공급받는다. 따라서 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 전동기구동 보조급수펌프 관련 주요설비의 기능이 유지된다.

보조급수조절밸브([redacted])는 증기발생기의 수위를 유지하기 위해 자동 조절된다. 공기구동밸브인 보조급수조절밸브는 전원 상실 시 고장 열림으로 설계되어 있으며, 터빈구동 보조급수펌프용 조절밸브는 전용의 공기축압탱크가

설치되어, 공기 상실시 공기축압탱크로부터 밸브를 2번 동작시킬수 있는 공기를 제공받는다. 또한 핸드휠을 통한 수동 개폐도 가능하다.

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 3대의 원심형 충전펌프와 4대의 모터구동밸브( )이다. 이들 기기의 작동을 위한 보조설비는 표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 구동전원, 충전펌프와 충전펌프 격실 냉각을 위한 기기냉각계통이며, 충전펌프의 수원은 연료재장전수저장탱크이다.

연료재장전수저장탱크로부터 충전펌프로 유로를 확보하기 위하여 연료재장전수저장탱크 중력급수배관의 차단밸브( )를 개방하기 위한 제어 및 구동전원이 필요하지만 전원이 상실된다 하더라도 이들 밸브를 수동으로 개방하면 연료재장전수저장탱크와 충전펌프의 유로는 확보된다. 다만, 연료재장전수저장탱크 중력급수배관의 차단밸브( )를 개방 한 후에 체적제어탱크에서 충전펌프 유로에 있는 는 차단되어야 한다.

원심형 충전펌프의 작동 기능을 유지하기 위해서는 제어/구동전원 및 모터 냉각을 위한 기기냉각수가 필요하고, 또한 원심형 충전펌프를 지속적으로 작동하기 위해서는 격실 냉각이 필요하다. 구동/제어를 위한 전원은 1E급 전원 또는 비상디젤발전기로 부터 공급받으므로, 소외전원 상실, 소내정전 조건에서 충전펌프의 제어기능은 유지된다. 또한 ELAP 상황에서는 이동형발전차로부터 전원과 기기냉각수를 공급받을 경우 동 기능의 유지는 가능하다.

마. 기기냉각해수계통과 기기냉각수계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 기기냉각수계통의 보조설비는 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 1E

급 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. 기기냉각해수펌프의 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 가압기 압력방출밸브( )와 원자로냉각재계통으로부터 화학 및 체적제어계통을 격리하는 다음의 밸브들이다.

- 유출수 격리밸브 ( )
- 유출수 오리피스 격리밸브 ( )
- 유출수 원자로건물 격리밸브 ( )
- 밀봉수 회수 원자로건물 격리밸브 ( )
- 충전관 원자로건물 격리밸브 ( )
- 충전관 격리밸브 ( )
- 대체 충전관 격리밸브 ( )
- 가압기 보조살수 격리밸브 ( )
- 원자로냉각재펌프 밀봉수 차단밸브 ( )
- 잉여 유출수 격리밸브 ( )
- 잉여 유출수 원자로건물 격리밸브 ( )

상기의 밸브들의 작동을 위해서는 전원이 필요하다. 제어 및 구동을 위한 전원은 1E급 전원 및 비상디젤발전기의 전원을 공급받으며, ELAP 상황에서는 이동형발전차에 의해 전원 공급이 필요하다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)의 주요설비는 표 4-3에 나타나 있는

바와 같이 가압기 압력방출밸브(  )와 원자로냉각재 배기밸브(  )이다.

가압기 압력방출밸브와 원자로냉각재 배기밸브를 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 증기발생기 압력방출밸브 구동을 위한 제어전원 및 공기공급원이다. 증기발생기 압력방출밸브 제어 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 공급받지만, 계기용공기 계통의 불능 시에는 현장에서의 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.

격납건물살수펌프, 격납건물 재순환집수조 출구밸브, 재장전수탱크 출구밸브, 살수약품첨가탱크 출구밸브 및 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 기기냉각수계통으로부터 펌프밀봉냉각기 및 모터냉각기에 기기냉각수를 공급받아야 성능이 보장될 수 있으며, 또한 기기냉각수계통에서 냉각수를 공급하는 필수냉각기를 통해 격실냉각이 수행되어야 성능이 보장될 수 있다.

나. 격납건물 격리계통

격납건물 격리기능을 수행하는 격리밸브의 보조설비들은 계기용 공기와 제어전원

이다. 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. 제어건물 공기조화계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 제어건물 공기조화계통(Control Building HVAC System)의 보조설비는 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치( )의 냉각수코일에 사용되는 안전성관련 필수냉각수계통과 1차기기냉각해수계통의 제어 및 구동 전원이다.

동 계통의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치 팬은 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. 필수냉각수계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 필수냉각수계통의 보조설비는 필수냉각기( )에 사용되는 1차기기냉각해수계통 그리고 필수냉각기와, 필수냉각수펌프( )의 제어 및 구동 전원이다.

필수냉각수펌프와 필수냉각기 제어 및 구동을 위한 전원은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 또는 이동형발전차에 의해 공급받으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건에서도 제어 및 구동 기능은 유지된다.

필수냉각기(  )는 1차기기냉각해수계통을 사용하여 필수냉각기 응축기의 잠열을 제거하므로 최종열제거원 상실시 필수냉각수계통의 안전기능은 상실된다.

다. 원자로건물 팬 냉각기 계통

표 4-3에 나타나 있는 바와 같이 원자로건물 팬 냉각기 계통(Containment Fan Cooler System)의 보조설비는 원자로건물 팬 냉각기(  ) 냉각수코일에 사용되는 안전성관련 1차기기냉각수계통의 제어 및 구동 전원이다.

원자로건물 팬 냉각기의 팬은 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.

원자로건물 팬 냉각기(  )는 1차기기냉각수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다.

라. 공학적안전설비 작동계통

공학적안전설비 작동계통을 위한 계측기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 제어전원을 공급받는다.

마. 필수안전기능 상태추적

필수안전기능 상태추적을 위한 계측기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지, 또는 이동형발전차에 의해 제어전원을 공급받는다.

바. 안전등급 계측용 공기계통

안전등급 계측용 공기계통은 독립된 2개의 계열별로 구성되어 있으며 각 계열별 비안전등급 부스터 공기압축기 및 후단 냉각기, 안전등급인 5개의 공기저장탱크와 배관, 튜브 및 밸브로 구성되어 있다. 각 계열별에 있는 안전등급 공기저장탱크들은 사고시 안전 정지를 위해 필요한 아래 밸브들에게 계측용 공기를 12시간동안 공급한다.

- 전동기구동 보조급수펌프용 보조급수조절밸브(  )
- 증기발생기 압력방출밸브(  )
- 수소 재결합 밸브(  )
- 잔열제거열교환기 유량조절밸브(  )

### 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  방수문이 설치될 예정이다. 또한 방수문 설치 이전에는 침수영향을 받지 않도록 추가적인 물리적 방호조치를 수행할 예정이다. 따라서 필수대처기능 설비들은 해일 및 강우로 인한 침수 영향이 없다.

#### 2.2.4.1 원자로 트립계통

원자로트립계통은 안전등급으로 설계되어 있고  로 내진설계 되어 있으며 지진취약도 평가결과 최소  이상 지진의 극한재해 상황에서도 기능은 유지된다. 원자로트립계통의 기기는  내에 있다. 지진원자로자동정지설비(ASTS)는 비안전등급이며, 품질등급은  등급,  g로 내진설계되어 있다. 지진원자로자동정지설비 측정 센서 및 캐비닛은 제어건물에 있다.

제어봉구동장치에 전원을 공급하는 전동기-발전기 세트는 비안전1E급 전원에 의해 동작하므로 비안전1E급 전원이 상실되면 제어봉구동장치에 공급되는 전원이 차단되어 제어봉이 노심으로 자유낙하되어 원자로가 정지되거나, 원자로정지 설정치에 따라 원자로트립계통이 동작하여 원자로가 정지되거나, 또는  (수평/수직)이상의 지진이 발생하는 경우에는 지진원자로자동정지설비(ASTS) 트립신호에 의해 원자로가 정지된다.

#### 2.2.4.2 노심냉각 및 재고량 유지

가. 잔열제거계통

잔열제거계통은 안전관련 계통으로, 품질등급은 이며 로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 잔열제거계통의 기기들은 내에 있다.

잔열제거계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기에 의해 제어 및 구동 전원을 공급받을 수 있으므로, 소외전원상실 및 소내정전 조건에서 잔열제거펌프의 밀봉 냉각기와 전동기 냉각기에 1차기기 냉각수가 가용한 경우 잔열제거계통의 기능은 유지된다. 잔열제거열교환기는 기기냉각수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 잔열제거계통의 기능은 상실된다.

따라서 ELAP 상황에서 이동형발전차로부터 제어 및 구동전원을 받고, 기기냉각수가 가용한 경우 잔열제거 기능은 유지 가능하다.

잔열제거펌프 격실 냉각은 기기냉각수계통을 통해 수행된다.

나. 안전주입계통

안전주입계통은 안전관련 계통이고 품질등급은 이며 로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 안전주입계통의 기기들은 내에 있다.

안전주입계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받으므로, 소외전원상실 및 소내정전 조건에서 기기냉각수가 가용하다면 안전주입계통의 기능은 유지된다. 그러나 대체교류디젤발전기 및 최종열제거원 상실시 안전주입계통의 기능은 상실된다.

다만 격납건물 내에 있는 안전주입탱크의 내진성능 값(HCLPF)은 이고, 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 원자로냉각재계통으로의 붕산수 주입기능은 까지의 지진동 하에서 유지된다.

안전주입계통의 펌프 격실 냉각은 기기냉각수계통을 통해 수행된다.

다. 보조급수계통

보조급수계통은 안전관련 계통이고 품질등급은 이며 로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 이상 지진에서 기능은 유지된다.

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 조건에서 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, 대체교류디젤발전기에 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( )시 터빈구동 보조급수펌프의 기능은 유지된다.

라. 화학 및 체적제어계통

3대의 원심형 충전펌프는 안전관련 기기이고 품질등급은 이며, 로 설계되었다. 충전펌프의 수원을 제공하는 체적제어탱크와 연료

재장전수탱크 연결 배관에 설치된 관련 밸브들(  ) 도  등급으로 설계되었으며, 충전펌프와 관련 밸브들을 포함한 동 계통은  로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 0.3g 이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 동 계통의 기기들은 보조건물 내에 설치되어 있다.

원심형 충전펌프 및 관련 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받으므로, 소외전원상실 및 소내정전 조건에서 기기냉각수가 가용하다면 충전계통의 기능은 유지된다. 그러나 대체교류디젤발전기 및 최종열제거원 상실시 충전계통의 기능은 상실된다.

마. 기기냉각해수계통과 기기냉각수계통

기기냉각수계통은 안전관련 계통으로 품질등급은  이며  로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소  이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 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, 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 응축기 및 대기디젤발전기 냉각수 열교환기가 기기냉각해수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 기기냉각수계통, 필수냉각계통 및 디젤발전기의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해(  )시 기기냉각수계통, 필수냉각계통 및 디젤발전기의 기능은 상실된다.

바. 원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통(원자로냉각재계통 격리)

원자로냉각재계통과 화학 및 체적제어계통의 격리 설비는 품질등급은  이며  로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소  이상 지진 조건하에서 기능은 유지된다. 동 계통의 기기들은  내에 있다.

원자로냉각재계통으로부터 화학 및 체적제어계통의 격리는 유출수 격리밸브 (  ), 유출수 격납건물 격리밸브(  ), 충전관 원자로건물 격리밸브(  ), 원자로냉각재펌프 밀봉수 차단밸브 (  ) 및 밀봉수 회수 원자로건물 격리밸브 (  )을 통해 이루어진

다. 이들 밸브는 모두 [redacted] 등급밸브로 설계되었으며, 이들 중 원자로냉각재계통과 직접 연결된 유출배관의 차단밸브([redacted])는 [redacted] 설계되었고, 그 외의 밸브들은 안전등급 [redacted]로 설계되었다. 이들 밸브 모두는 [redacted]로 내진설계 되어 있고 최대 [redacted]지진동에서 기능은 유지된다.

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([redacted])시 동 계통의 기능은 유지된다.

사. 원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)

원자로냉각재계통(원자로냉각재계통 감압)은 안전관련 계통으로 품질등급은 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고, 지진취약도 평가결과 최소 [redacted] 이상 지진 조건하에서 기능은 유지된다. 동 계통의 기기들은 [redacted] 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([redacted])시 동 계통의 기능은 유지된다.

자연순환 냉각시 원자로냉각재계통의 감압 및 비응축성기체 배기기능을 수행하는 원자로냉각재 배기밸브([redacted])들은 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동계통의 기능은 유지된다. 따라서 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([redacted])시 동 계통의 기능은 유지된다.

아. 주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)

주증기계통(증기발생기 감압 및 과압방지)은 안전관련 계통으로 품질등급은 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [redacted] 이상 지진 조건에

서 기능은 유지된다. 증기발생기 감압 및 과압방지를 위한 동 계통의 기기들은 [redacted] 내에 있다.

증기발생기 감압에 사용되는 증기발생기 압력방출밸브는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기, 축전지 또는 이동형발전차에 의해 구동 전원을 공급받으므로 소외전원상실, 소내정전 조건에서는 기능이 유지되나, 계기용공기계통 상실시에는 현장에서 수동 조작이 요구된다.

증기발생기 감압에 사용되는 증기발생기 압력방출밸브와 과압방지에 사용되는 주증기안전밸브는 기기냉각수계통을 사용하지 않으므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 유지된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([redacted])시 동 계통의 기능은 유지된다.

2.2.4.3 격납건물 건전성 유지

가. 격납건물 살수계통

격납건물살수계통은 안전관련 계통으로 품질등급은 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [redacted] 이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 격납건물살수계통의 기기들은 [redacted] 내에 있다. 격납건물살수계통의 기기는 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기 또는 이동형발전차에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받을 수 있으므로 소외전원상실, 소내정전 및 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건에서 격납건물살수계통의 기능은 유지되지만, 격납건물살수펌프는 기기냉각수계통으로부터 냉각수를 공급받기 때문에 최종열제거원 상실시 격납건물살수계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([redacted])시 격납건물살수계통의 기능은 상실된다.

나. 격납건물 격리계통

격납건물 격리계통은 안전관련 계통으로 품질등급은 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 [redacted] 이상 지진 조건에서 기능은 유지된다. 격납건물 격리계통의 기기들은 [redacted] 내에 있다.

다. 격납건물 수소제어계통

격납건물 수소제어계통의 피동촉매형수소재결합기(PAR)는 [redacted]내에 있으며 [redacted]로 내진 설계되어 있고 침수에 견딜 수 있다.

2.2.4.4 안전기능 유지를 위한 설비

가. 제어건물 공기조화계통

제어건물 공기조화계통(Control Building HVAC System)의 주제어실 비상공기공급/재순환 공기조절장치(Control Room Emergency Supply/Recirculation AHU)는 안전성관련 계통이고 품질등급은 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고 최소 [redacted] 이상 지진에서 기능은 유지된다. 동 계통의 기기들은 [redacted] 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 비상공기공급/재순환 공기조절장치([redacted])는 필수냉각수계통 및 1차기기냉각해수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([redacted]) 시 동 계통의 기능은 상실된다.

나. 필수냉각수계통

필수냉각수계통은 안전성관련 계통이고 품질등급 [redacted]이며 [redacted]로 내진설계 되어 있고 최소 [redacted] 이상 지진에서 기능은 유지된다. 동 계통의 기기들은 [redacted]내에 설치되어 있다. 동 계통의 기기들은 1E급 전원, 비상디젤발전기, 대체교류디젤발전기에 의해 구동 및 제어 전원을 공급받을 수 있으므로 소외전원상실, 소내정전에서 동 계통의 기능은 유지된다.

필수냉각기([redacted])는 1차기기냉각해수계통을 사용하므로 최종열제거원 상실시 동 계통의 기능은 상실된다. 따라서 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 포함한 극한재해([redacted])시 동 계통의 기능은 상실된다.

다. 원자로건물 팬 냉각기 계통

원자로건물 팬 냉각기 계통의 원자로건물 팬 냉각기([redacted]

)는 안전성관련 계통이고 품질등급은 이며 로 내진설계 되어 있고 최소 이상 지진에서 기능은 유지된다. 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. 원자로건물 팬 냉각기( )는 1차기기냉각수계통을 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 이며 로 내진설계 되어 있고 지진취약도 평가결과 최소 이상 지진에서 기능은 유지된다. 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 안전관련이며 로 내진설계 되어 있고 최소 이상 지진에서 기능이 유지되며, 격납건물 방사선준위 계측설비(품질등급: )를 제외한 필수대처기능 상태확인 감시 계측설비들의 품질등급은 이다. 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

한빛1,2호기의 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 한빛1,2호기 공용으로 사용되는 1대의 대체교류디젤발전기 및 관련 설비가 본관 건물로부터 분리되어 있는 독립적인 대체교류디젤발전기 건물(한빛1발 부지)에 설치되어 있어 소내정전시 대체교류전력을 공급한다.

또한 후쿠시마 원전사고 후속 대책으로 소외전원상실, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기의 기동실패 시 최대한 빠른 시간 내에 전원공급이 가능하도록 이동형발전차를 1대 구비하였다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 상실사고를 확인한 후 최대 2시간 이내에 1 MW 이동형발전차를 비상디젤발전기 건물 입구로 이동하여 수동으로 4.16 kV 안전모선(  )을 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급하며, 운전원이 사고 상황에 따른 완화조치단계에 따라 필요한 운전부하를 선택하여 원자로를 안전정지 상태로 유지한다. 다만 극한재해에 의한 부지 내 다수호기 동시 전원상실 시 8시간 이내에 1 MW 이동형 발전차로 각호기의 일부 저압 공학적안전설비에 전원을 우선 공급하며, 72시간 이후에는 3.2 MW 이동형발전차로 각 호기별 필수부하 전원을 공급한다.

표 4-5는 발전소 내 가용한 발전기의 사용 가능시간을 산정한 것이다. 1대의 비상디젤발전기가 자체연료를 모두 사용할 경우 약 7일, 대체교류디젤발전기는 자체연료로 약 1일, 이동형발전차는 자체연료로 약 1시간 동안 연속운전이 가능하다

#### 2.2.5.1 축전지

가. 한빛1,2호기 축전지 용량

[redacted] 용량을 가진 4개의 1E급 축전지들은 소외전원상실 시 소외전원이 복구되거나 비상디젤발전기가 이용 가능할 때까지 125 VDC 안전 모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있다. 또한 이들 축전지는 비상디젤발전기의 자동작동에 필요한 전력을 공급한다.

안전등급 축전지의 주요 부하는 밸브, 인버터, Reactor Trip 차단기반, 디젤발전기 제어 판넬, 4.16 kV 고압차단기반 제어전원 및 480 V 차단기반 제어전원 등이다. 축전지 용량은 [redacted]시간 동안 주요부하에 전원이 공급이 가능하다.

이러한 축전지들은 최소 [redacted] 시간 동안 축전지 단자전압이 105 V 이하로 떨어지지 않는 상태에서 각각 발전소 정지와 모든 교류전원 상실에 따른 예상정지부하에 전력을 공급하며, 제어건물의 축전지 격실에 설치되어 있다.

4개의 축전지 충전기들은 각각 위와 같이 부분적으로 방전(108 V～125 V)된 축전지들이 정상부하에 전력을 공급하는 동안 [redacted]시간 이내에 재충전(129 V～135 V)되도록 한다.

나. 한빛1,2호기 8 시간 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 설계기준을 초과하는 외부재해에 따라 외부 소외전원 공급이 물리적으로 불가할 경우, 축전지 부하 선정시 ELAP을 고려하여야 한다.

설계기준을 초과하는 외부재해 시, 기존[redacted]시간용량 축전지를 8시간 운전성을 확보하기 위해서는 발전소 건전성을 유지하기 위한 최소 부하를 제외한 모든 부하를 차단 시켜야한다[4-7]. 부하차단은 ELAP 발생후 [redacted]분 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.

상기부하를 기준으로 축전지 용량을 IEEE 485에 따라 평가한 결과, 안전등급 축전지 [redacted]운전이 가능한 것으로 평가되었다. 부하차단 후 축전지 운전부하 목록은 아래표와 같다.

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 A)

| 기기번호 | 부하명 | 부하용량(A) | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 B)

| 기기번호 | 부하명 | 부하용량(A) | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 C)

| 기기번호 | 부하명 | 부하용량(A) | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

부하차단후 축전지 운전부하 목록(채널 D)

| 기기번호 | 부하명 | 부하용량(A) | 비고 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |

2.2.5.2 비상디젤발전기

소외전원이 상실되는 경우 4.16 kV 안전모선의 저전압 신호 발생 후 10초 이내에

125V 축전지로부터 전력을 공급받아 비상디젤발전기가 자동으로 작동되어 4.16 kV 안전모선(  )을 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급한다.

1E급, 연속 정격용량  kW인 2대의 비상디젤발전기가 4.16 kV 안전모선에 각각 연결되어 있으며, 한 계열의 공학적안전설비 부하 전체에 전력을 공급할 수 있다.

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.

각 비상디젤발전기 건물에는  의 연료를 보유하고 있는 일일연료탱크가 설치되어 있다. 일일연료탱크는 1대의 비상디젤발전기가 100% 지속 정격부하에서 최소한  분 동안 운전할 수 있는 용량을 제공한다. 1개의 연료저장탱크에는 용량 기준  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  일 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 한빛1발 부지의 독립적인 대체교류디젤발전기 건물에 설치되어 있다.

비안전 1E급, 연속 정격용량  kW인 1대의 대체교류디젤발전기는 한빛1,2호기 공용으로 각 호기의 주제어실에서 수동으로 기동하여 소내정전 시작  분 이내에 4.16 kV 안전모선(  )에 전력을 공급하도록 설계되어 있으며, 표 4-5에서 보는 바와 같이 대체교류디젤발전기 연료저장탱크의 연료

들을 사용하면 약 일 동안 연속운전이 가능하다.

대체교류디젤발전기의 소내정전사고 부하목록(소모부하 포함)은 FSAR 표 에 제시되어 있고 순차부하는 대체교류디젤발전기 운전절차서에 기술되어 있다.

2.2.5.4 이동형발전차

한빛1,2호기에는 한빛부지에서 공용으로 사용하는 이동형발전차 1대가 구비되어 있다. 이동형발전차는 해일 및 강우에 의한 침수에 대비하여 내진설계된 차고건물( )에 있다. 이동형발전차의 이동경로는 인간공학 유효성 평가보고서에 나타나 있으며, 이동형발전차는 까지 이동한다. 또한 대체 이동로로는 까지 이동하는 경로가 있다

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 10.8일 동안 운전이 가능하다.

표 4-6은 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 사고 시 노심 자연순환냉각 후 잔열제거 운전을 위해 필요한 부하 용량을 산출한 것으로 이동형발전차는 한빛1,2호기에 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 목표신뢰도(최소 0.95) 설정 및 유지를 위한 관리방안을 마련할 예정이다. 또한, 각 호기마다 추가로 구비될 예정인 1 MW 이동형발전차도 동일한 기준으로 관리할 예정이다.

### 2.2.6 최종열제거원 상실시 대처를 위해 설계된 사항

최종열제거원상실은 기기냉각해수계통의 기능 상실을 의미한다. 한빛1,2호기의 기기냉각해수계통은 두 계열이 독립적으로 설계되어 있어 설계기준사고에서는 기기냉각해수계통 양 계열의 완전 상실을 가정하지 않으므로 한빛1,2호기에서 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 한빛1,2호기에서 열제거원으로 가용한 1차계통 및 2차계통의 수원을 제시하였다.

#### 2.2.6.1 외부주입유로 및 이동형펌프

한빛1,2호기에는 전원상실과 관계없이 그림 4-3에서 보는 바와 같이 외부주입 유로와 이동형펌프를 이용하여 원자로냉각재계통과 증기발생기에 열제거원을 공급할 수 있는 설비들의 설계가 진행 중이지만 신설 예정인 고유량이동형펌프를 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 한빛1,2호기에서 발생할 경우 현재의 설계 및 운영조건에서 발전소의 대응능력을 평가한다.

전원과 열제거원의 단계적 상실을 가정하여 수립한 9개의 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 [redacted]으로 가정한다.
○ 증기발생기 압력방출밸브 개방을 통한 원자로냉각재계통 냉각 시 냉각률은 [redacted]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 노심으

로 자유낙하되어 원자로가 정지되거나, 또는 원자로냉각재펌프가 정지하여 관성서행함에 따라 노심을 통과하는 원자로냉각재 유량이 감소하여 발생되는 원자로냉각재저유량 신호에 의해 원자로는 정지된다. 원자로트립계통의 모든 지시 및 논리회로의 전원은 안전등급 축전지로부터 공급되므로, 소외전원이 상실되더라도 원자로정지가 보장된다.

본 시나리오에서는 충전펌프를 통한 원자로냉각재계통으로의 붕산수 주입이 가능하므로, 정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도와 더불어 붕산수 주입에 따른 추가적인 부 반응도를 통해, 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 궤환효과로 인해 발생되는 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 [redacted] 이내에 자동으로 기동되어 부하가 순차적으로 투입된다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 증기발생기 압력방출밸브 개방설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 소외전원상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심열제거는 자연순환 냉각 현상에 의해 이루어진다.

소외전원상실로 인해 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동 설정치에 도달하면 모터구동보조급수펌프 및 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환 냉각이 가능하다.

소외전원상실로 인해 충전펌프가 정지되면 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생할 수 있으나, 비상디젤발전기가 자동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 충전펌프가 가용해지므로 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 없고 노심의 재고량이 적절히 유지된다.

증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 [redacted]의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 증기발생기 압력방출밸브를 통한 대기로의 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통의 온도 및 압력

이 감소하고 주증기 안전밸브는 닫히게 된다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재계통 배기밸브의 개방으로 원자로냉각재계통의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계통을 잔열제거계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

비상디젤발전기가 자동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 및 잔열제거계통이 가용해지므로, 잔열제거계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압이 완료된 후, 잔열제거계통 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 발생 가능성을 사건발생, 사고확인 및 조치, 발전소 안전상태 유지의 순서로 기술한다.

한계사항 평가는 수행조치와 관련된 상황인지, 대처방안의 결정 및 이행, 여유시간을 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 [redacted] 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 [redacted]일까지 가용한 것으로 예상되며, [redacted]일 내에 소외로부터 연료를 추가 공급할 수 있을 것으로 예상되므로 결과적으로 전원에 의한 한계시간은 없어진다.

노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환 냉각 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]시간 동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

그러나 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 통해 동 한계시간 내에 잔열제거계통 진입조건에 도달할 수 있을 것으로 예상되고, 잔열제거계통 운전 이후에는 더 이

상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

소외전원상실 사고가 발생하면 제어봉 구동장치(CRDM)는 비여자되고, 원자로냉각재펌프가 정지하며, 원자로는 정지된 후 원자로 출력은 감소된다. 원자로 정지에 따라 운전원은 비상운전절차서 을 수행하고, 비상디젤발전기 자동 기동으로 적어도 하나의 AC 안전모선이 가압되어 있고 안전주입이 요구되지 않으므로 비상운전절차서로 진입한다. 원자로 정지시 조치 비상운전절차서에 따라 원자로냉각재계통 온도를 점검하고 2차측으로 급수가 공급됨을 확인한다. 이후 제어봉의 낙하, 가압기 수위와 압력, 증기발생기 수위, 2차측 증기 덤프 가능성, 충전/유출 유량, 미임계 유지 등을 점검하고 충전펌프 기동하며 발전소를 안정한 상태로 유지한다. 이후 비상운전절차서를 이용하여 발전소를 냉각 및 감압시킨 뒤 잔열제거계통( ) 운전을 이용하여 발전소를 저온정지까지 냉각시켜 안전한 상태로 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 잔열제거계통 운전 시에 모두 해소된다. 그리고 잔열제거계통의 운전 착수 또한 대체교류디젤발전기 상실을 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 분 이내에 수동으로 기동하여 교류전원이 복구되면, 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전력을 공급할 수 있다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 증기발생기 압력방출밸브 개방 설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 소내정전으로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환 냉각 현상에 의해 이루어진다.

소내정전으로 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 안전등급 축전지가 시간 동안 125VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있으므로, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동 설정치에 도달하면 터빈구동보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환 냉각이 가능하다. 대체교류디젤발전기 기동 후에는 모터구동보조급수펌프도 사용 가능하다.

소내정전으로 충전펌프가 정지되면 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생할 수 있으나, 대체교류디젤발전기가 수동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 충전펌프가 가용해지므로 원자로냉각재펌프의 밀봉누설이 없고 노심의 재고량이 적절히 유지된다.

증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 증기발생기 압력방출밸브를 통한 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통의 온도 및 압력이 감소한다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재계통 배기밸브의 개방으로 원자로냉각재계통의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계통을 잔열제거계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

대체교류디젤발전기가 수동으로 기동되어 교류전원이 복구되면 기기냉각수계통, 기기냉각해수계통 및 잔열제거계통이 가용해지므로, 잔열제거계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압이 완료된 후, 잔열제거계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 교류전원이 상실된 약 동안 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실이 발생하지만, 이로 인한 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생하

지 않는다.

(3) 격납건물 건전성 유지
본 시나리오에서는 기기냉각수계통의 기능 상실 및 충전펌프 상실에 의한 원자로 냉각재펌프의 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 [redacted] 이내에 운전원이 수동으로 대체교류디젤발전기를 기동하여 부하가 순차적으로 투입되므로 전원에 대한 한계사항은 존재하지 않지만, 대체교류디젤발전기 연료의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-5에서 대체교류디젤발전기 자체의 연료는 [redacted]일의 한계시간을 가지지만, EDG 연료저장탱크로부터 연료를 고려하면 사고 후 [redacted]까지 한계시간이 확보된다. 따라서 대체교류디젤발전기 연료는 사고발생 후 약 [redacted]까지 가용한 것으로 예상되며, 3일 내에 소외로부터 연료를 추가 공급할 수 있을 것으로 예상되므로 결과적으로 전원에 의한 한계시간은 없어진다.

노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환 냉각 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 잔열제거계통 진입조건에 도달할 수 있을 것으로 예상되고, 잔열제거계통 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 [redacted] 비상운전절차서에 따라 원자로 정지와 터빈 정지를 확인하고 교류 안전모선의 전원상태를 확인한 후, 안전모선의 전원이 가압되어 있지 않으므로 [redacted] 비상운전절차서로 진입한다. 모든 교류전원 상실 비상운전절차서에 따라 원자로 정지와 터빈정지를 재확인하고 원자로냉각재계통의 격리와 터빈구동보조급수펌프에 의한 급수공급을 확인한다. 소외전원 및 비상디젤발전기상실에 대비해 구비된 대체교류전원 디젤발전기의 기동을 위해 관련 절차서([redacted])에 진입하여 안전모선을 가압한다. 이후 [redacted] 비상운전절차서로 진입하여 절차에 따라 원자로냉각재계통 온도를 점검하고 2차측으로 급수가 공급됨을 확인한다. 이후 제어봉의 낙하, 가압기 수위와 압력, 증기발생기 수위, 2차측 증기 덤프 가능성, 충전/유출 유량, 미임계 유지 등을 점검하고 충전펌프 기동하며 발전소를 안정한 상태로 유지한다.  발전소가 안정한 상태를 유지한다면 [redacted] 비상운전절차서에 따라 발전소를 냉각 및 감압하고 잔열제거계통 운전절차서([redacted])에 따라 발전소를 저온정지까지 냉각시켜 안전한 상태로 만든다.

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 잔열제거계통 운전 시에 모두 해소된다. 그리고 잔열제거계통의 운전 착수 또한 대체교류디젤발전기 상실을 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 자동주입을 통해 원자로냉각재계통으로의 붕산수 주입이 가능하므로, 정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도와 더불어 붕산수 주입에 따른 추가적인 부 반응도를 통해, 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 궤환효과로 인해 발생되는 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 시간 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 동안 사용이 가능하다.

원자로정지 및 터빈정지 직후 증기발생기 압력이 증기발생기 압력방출밸브 개방설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 모든 교류전원 상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환 냉각 현상에 의해 이루어진다.

모든 교류전원 상실로 인해 주급수펌프가 정지되면 증기발생기로의 급수공급이 상실되지만, 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동설정치에 도달하면 터빈구동 보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환 냉각이 가능하다.

모든 교류전원 상실로 인해 기기냉각수계통의 기능이 상실되고 충전펌프가 작동하지 않으므로 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생될 것으로 예상된다.

하지만 증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 증기발생기 압력방출밸브를 통한 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통 압력 및 온도가 감소하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설도 감소하게 된다.

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6)

의 한계사항 평가에 기술된 바와 같이 원자로냉각재펌프 1대 당 [redacted] 의 누설을 고려하여 발전소 냉각을 수행할 경우 약 [redacted] 동안 안전주입탱크의 자동주입에 의해 노심냉각 및 재고량 유지가 가능한 것으로 평가되었다. 따라서 [redacted] 이전에 1MW 이동형발전차를 연결하고, 중압이동형펌프를 기동하면 원자로냉각재계통의 재고량은 유지된다.

1 MW 이동형발전차의 연결 후 교류전원이 복구되지만, 1 MW 이동형발전차만으로는 기기냉각수계통 운전을 위한 충분한 전원을 공급할 수 없다. 따라서 잔열제거계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 잔열제거계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서 계속 유지해야한다. 만약 잔열제거계통 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, 잔열제거계통 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 포함한 모든 교류전원 완전상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 운전원은 [redacted] 비상운전절차서를

수행하여, 원자로 정지와 터빈 정지를 확인하고 교류 안전모선의 전원상태를 확인한 후 안전모선의 전원이 가압되어 있지 않으므로 비상운전절차서로 진입한다. 모든 교류전원 상실 운전절차서에 따라 운전원은 원자로 정지와 터빈정지를 재확인하고 원자로냉각재계통의 격리와 터빈구동보조급수펌프에 의한 급수공급을 확인한다.

비상운전절차서에 따라 최소한 1계열의 안전등급 교류 모선을 복구하기 위한 조치를 수행한다. 만약 최소한 1계열의 안전등급 교류 모선 복구가 불가능할 경우 모든 교류전원 완전상실을 선언한 후, 1 MW 이동형 발전차 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 이동형 발전차가 연결된 이후, 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 노심냉각 및 원자로냉각재계통 냉각재 재고량을 유지하기 위해 중압이동형펌프 운전을 시행한다. 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 잔열제거계통 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차 이동을 지시, 배치한 후 3.2 MW 이동형발전차를 연결한다. 잔열제거계통 진입을 위한 조건이 만족되면 최종적으로 잔열제거계통 운전절차서에 따라 발전소를 저온정지까지 냉각시키고 안전한 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. 따라서 본 시나리오에서 원심형 충전펌프는 대체기기냉각수단의 기동시간 전까지 상실되지 않는다고 가정한다.

(1) 원자로 미임계 유지
최종열제거원이 상실될 경우 복수기 작동 불능에 따라 터빈이 정지되므로 터빈정지에 의한 원자로 자동정지 또는 운전원에 의한 수동정지로 원자로가 정지된다. 또한 원심형 충전펌프의 운전으로 냉각 운전 중 원자로냉각재계통 붕소 농도 제어가 가능하여 과도상태 동안 미임계를 유지한다.

정지제어봉 삽입에 의한 부 반응도를 통해 원자로냉각재계통의 냉각 시 부의 감속재온도계수 궤환효과로 인해 발생되는 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 증기발생기 압력방출밸브 개방설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 최종열제거원상실사고 대처를 위해 운전원에 의해 원자로냉각재펌프가 수동정지 되므로 노심 열제거는 자연순환 냉각 현상에 의해 이루어진다.

최종열제거원상실에 의한 순환수계통의 정지로 인해 복수기진공상실사고가 발생하고 터빈이 정지한다. 터빈정지에 따라 주급수펌프도 정지되어 증기발생기로의 급수공급이 상실된다. 그리고 증기발생기 수위가 보조급수펌프의 작동설정치에 도달하면 보조급수펌프가 자동으로 기동하여 증기발생기에 급수공급이 재개되어 자연순환 냉각이 가능하다.

최종열제거원상실에 의한 기기냉각해수계통의 기능이 상실되어 기기냉각수계통의 온도가 상승하고 원심형 충전펌프의 냉각이 점차 느려진다. 한빛1,2호기의 원심형 충전펌프는 대체기기냉각수단이 존재하므로 운전원은 대체기기냉각수단 연결을 통해 기기냉각 방식을 변경한다. 원심형 충전펌프의 기기냉각 기능은 대체기기냉

각수단의 기동시점 전까지 기능 상실이 발생하지 않는다고 가정하였으므로 사고 후 시간이 지나면 운전원은 원심형 충전펌프의 냉각을 대체기기냉각수단을 통해 실시한다. 그리고 충전 유량을 조절하여 가압기 만수위를 방지한다. 한편 유출수 격리밸브는 운전원이 사고 후 경 유출수 격리밸브를 주제어실에서 수동으로 잠근다.

운전원은 증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 증기발생기 압력방출밸브를 통한 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통의 온도 및 압력이 감소한다. 필요시 가압기 측 원자로냉각재계통 배기밸브의 개방으로 원자로냉각재계통의 추가적인 감압이 가능하며, 이를 통해 원자로냉각재계통을 잔열제거계통 운전 진입조건까지 냉각 및 감압할 수 있다.

최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 잔열제거계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 잔열제거계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서 계속 유지해야한다.

하지만 고유량이동형펌프를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 최종열제거원이 확보되면, 잔열제거계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있다.

본 시나리오에서는 최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실이 발생되지만, 원심형 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

<u>2차계통 급수의 한계사항</u>

본 시나리오에서는 최종열제거원상실에 의한 기기냉각수계통의 기능 상실에 의해

잔열제거계통의 운전이 불가능하여 발전소를 고온정지상태에서 유지해야 한다. 이 기간 동안 노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환 냉각 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, 탈염수저장탱크 및 순수저장탱크이며, 해당 급수원의 재고량으로 [redacted] 동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

따라서 [redacted] 이전에 고유량이동형펌프를 연결하여 동 한계시간 이전에 최종열제거원이 복구되면, 잔열제거계통 운전이 가능하여 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

<u>1차계통 충전수의 한계사항</u>

사고 후 1시간이 지나면 운전원은 대체기기냉각수를 사용하여 원심형 충전펌프의 냉각을 대체하고 원심형 충전펌프를 지속운전시킨다. 이 때 1차측 충전수원의 재고량에 대한 한계사항이 발생한다.

표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 사용 가능한 1차측 충전수원은 연료재장전수저장탱크, 체적제어탱크이며, 해당 수원의 재고량으로 약 [redacted]시간동안 충전 공급이 가능한 것으로 평가된다.

따라서 [redacted] 이전에 고유량이동형펌프를 연결하여 동 한계시간 이전에 최종열제거원이 복구되면, 잔열제거계통 운전이 가능하여 더 이상 1차측 충전수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

최종열제거원상실 사고가 발생하면 운전원은 우선 [redacted] 비상운전절차서에 따라 원자로 정지와 터빈 정지를 확인하고 교류 안전모선의 전원상태를 확인한다. 이후 [redacted] 비상운전절차서로 진입하여 원자로냉각재계통 온도를 점검하고 2차측으로 급수가 공급됨을 확인한다. 이후 제어봉의 낙하, 가압기 수위와 압력, 증기발생기 수위, 2차측 증기 덤프 가능성, 충전/유출 유량, 미임계 유지 등을 점검하고 발전소를 안정한 상태로 유지한다. 또한, 최소한 1대 이상의 1차 기기냉각해수펌프가 운전중인지 확인하여 모든 1차 기기냉각해수펌프가 상실되었을 경우 운전중인 충전펌프 격실문을 개방하고 고유량이동형펌프 이동을 지시한다. 다음 [redacted] 비상운전절차

서로 진입하여 자연순환 냉각을 계속 유지하면서 잔열제거계통 진입조건까지 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행한다. 이후 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 고유량이동형펌프를 운전하여 최종열제거원을 복구하고 잔열제거계통 운전절차서(  )를 이용하여 발전소를 저온정지까지 냉각시켜 안전한 상태로 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 ~ 4-11는 본 시나리오에서 잔열제거계통 운전 진입조건에 도달할 때까지 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압하고, 이후 사고발생 후  까지 고온정지 상태를 유지할 때의 발전소의 열수력 거동을 보여준다.  간 이후로는 고온정지 상태가  시간까지 지속되고  시간에는 고유량이동형펌프가 연결되어 잔열제거계통 운전을 시작할 수 있는 충분한 시간이다.

#### 2.3.2.2 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건(시나리오 5)

한빛1,2호기는 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  시간 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원

자로제어 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 증기발생기 압력방출밸브 개방설정치까지 도달하여 발전소는 고온대기상태에서 안정된다.

원자로가 정지된 후 노심 붕괴열이 증기발생기 전열관을 통해 증기발생기 2차측으로 전달되며, 모든 교류전원 상실로 원자로냉각재펌프가 작동하지 않는 상황에서 노심 열제거는 자연순환 냉각 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 자연순환 냉각이 가능하다.

모든 교류전원 및 기기냉각수계통의 기능 상실로 인해 충전펌프가 작동하지 않으므로 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생될 것으로 예상된다.

하지만 증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 [redacted]의 냉각률 이내로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 증기발생기 압력방출밸브를 통한 증기 방출에 따라 증기발생기 압력과 원자로냉각재계통 압력 및 온도가 감소하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설도 감소하게 된다.

한빛1,2호기 원자로냉각재펌프의 밀봉누설량은 최근 웨스팅하우스형 원전에 대한 밀봉누설평가 결과를 참고하여 보수적으로 펌프 1대당 [redacted]으로 가정하였다.

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 1MW 이동형발전차를 연결하고, 중압이동형펌프를 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 잔열제거계통 운전 진입조건까지 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 완료된 후에도 잔열제거계통의 운전은 불가능하므로, 발전소를 고온정지상태에서

계속 유지해야한다. 만약 잔열제거계통 운전 진입조건에 도달하기 이전에, 터빈구동보조급수펌프의 운전을 위한 최소 증기발생기 압력에 도달하면 원자로냉각재계통의 냉각을 중단하고 발전소를 고온대기상태에서 계속 유지해야한다.

하지만 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 기기냉각수계통 및 모터구동보조급수펌프의 운전을 위한 충분한 전원을 확보하고, 고유량이동형펌프를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 최종열제거원이 확보되면, 잔열제거계통 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 연료재장전수저장탱크의 가용시간, 발전소를 고온대기상태 또는 고온정지상태에서 유지할 때의 2차측 급수원의 가용시간 등을 종합적으로 검토하여 다음과 같이 결정된다.

<u>축전지 가용시간에 의한 한계시간</u>

2.2.5.1절에 기술된 바와 같이 안전등급 축전지가 2시간 동안 125 VDC 안전모선에 연결된 원자로제어 및 보호계통에 전력을 공급할 수 있고, 비필수 부하차단 시약 [redacted] 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.

<u>안전주입탱크 격리시간</u>

한빛 1,2호기 비상운전절차서 부수-0.0 (모든 교류전원 상실)에 따르면 안전주입탱크는 질소 유입을 방지하기 위해 증기발생기 압력 11 kg/cm$^2$ 미만으로 감소될 때 수동으로 격리한다. 위 기준에 따라 시나리오 6의 분석에서 안전주입탱크의 격리 시점을 도출한 결과 사고 후 약 5시간 12분 후로 평가되었다.

<u>안전주입탱크 및 재장전수탱크 재고량에 의한 한계시간</u>

본 시나리오에서는 모든 교류전원 상실로 인해 기기냉각수계통 및 충전펌프가 작동하지 않아 원자로냉각재펌프 밀봉누설이 발생되고, 이로 인해 원자로냉각재계통의 재고량은 감소하게 된다. 하지만 사고발생 후 2시간에 증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압하면, 원자로냉각재펌프의 밀봉누설량이 감소하고, 총 3대의 안전주입탱크로부터 원자로냉각재계통으로 자동으로 붕산수가 주입되어 원자로냉각재계통의 재고량은 일정수준 회복된다.

그림 4-12 ~ 4-19은 터빈구동보조급수펌프가 정상적으로 작동하여 2차측에 급수가 공급되고, 사고발생 후 2시간에 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 시작하여 잔열제거계통 진입조건인 350°F에서 냉각을 중단하고 고온정지상태를 계속 유지하는 동안, 원자로냉각재계통의 재고량을 복구하기 위한 아무런 수동조치를 취하지 않은 경우의 발전소의 열수력 거동을 보여준다. 이 경우 원자로냉각재펌프의 밀봉누설과 증기발생기 압력방출밸브의 제어운전을 통해 원자로냉각재계통의 압력이 감소하고, 그로 인해 안전주입수는 안전주입탱크로부터 원자로냉각재계통으로 자동 주입된다. 충전펌프를 통한 주입은 노심 한계시간 평가를 위해 복구되지 않는다고 가정하였으므로 안전주입탱크의 안전주입수 공급에도 불구하고 사고발생 후 약 9일 18시간에 노심노출이 발생될 것으로 평가된다.

따라서 운전원은 사고 후 [redacted]시간 경 1 MW 이동형발전차를 연결하고 중압이동형펌프를 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 3대의 안전주입탱크 중 일부에 대해서만 안전주입탱크 격리밸브를 닫아 격리할 수 있다. 나머지 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 1대의 안전주입탱크 격리밸브의 제어가 가능해지므로, 결과적으로 모든 안전주입탱크를 격리하여 원자로냉각재계통으로의 질소가스 유입을 방지할 수 있다.

중압이동형펌프가 기동되면, 원자로냉각재계통은 1차측 붕산수원으로부터 붕산수를 공급받아 재고량을 유지할 수 있다. 표 4-9에 기술된 바와 같이 본 시나리오에서 중압이동형펌프의 수원으로 사용 가능한 1차측 붕산수원은 체적제어탱크 및 연료재장전수저장탱크이다. 평가에는 보수적으로 연료재장전수저장탱크의 재고량만을 고려하였으며, 연료재장전수저장탱크의 재고량으로 약 5일 20시간 동안 원자로냉각재계통에 붕산수를 공급할 수 있는 것으로 평가되었다.

<u>잔열제거계통 운전 불가능 시 2차측 급수원 재고량에 의한 한계시간</u>

본 시나리오에서는 모든 교류전원 및 최종열제거원상실로 인해 기기냉각수계통의 기능 상실이 발생되어 잔열제거계통의 운전이 불가능하여 발전소를 고온대기상태 또는 고온정지상태에서 계속 유지해야 한다. 이 기간 동안 노심의 잔열을 제거하기 위한 자연순환 냉각 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 9일 4시간동안 증기발생기로의 급수공급이 가능한 것으로 평가된다.

따라서 운전원은 동 한계시간 이전에 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 충분한 전원을 확보하고, 고유량이동형펌프를 연결하여 최종열제거원이 복구되어 기기냉각수계통이 가용해지면, 잔열제거계통 운전이 가능하여 더 이상 2차측 급수원이 요구되지 않으므로 결과적으로 수원에 의한 한계시간은 없어진다.

(2) 대응능력 평가

대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 완전상실 및 최종열제거원상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 운전원은 우선 [redacted] 비상운전절차서를 수행하여 원자로 정지와 터빈 정지를 확인하고 교류 안전모선의 전원상태를 확인한 후 안전모선의 전원이 가압되어 있지 않으므로 [redacted] 비상운전절차서로 진입한다. 모든 교류전원 상실 운전절차서에 따라 운전원은 원자로 정지와 터빈정지를 재확인하고 원자로냉각재계통의 격리와 터빈구동보조급수펌프에 의한 급수공급을 확인한다.

[redacted] 비상운전절차서에 따라 최소한 1계열의 안전등급 교류 모선을 복구하기 위한 조치를 수행한다. 만약 최소한 1계열의 안전등급 교류 모선 복구가 불가능할 경우 모든 교류전원 완전상실을 선언한 후, 1 MW 이동형

발전차 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 이동형 발전차가 연결된 이후, 다중방어운영지침서(MOG)에 따라 노심냉각 및 원자로냉각재계통 냉각재 재고량을 유지하기 위해 중압이동형펌프를 기동한다. 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 잔열제거계통 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차 이동을 지시, 배치한 후 3.2 MW 이동형발전차를 연결한다. 잔열제거계통 진입을 위한 조건이 만족되면 최종적으로 잔열제거계통 운전절차서 (  )에 따라 발전소를 저온정지까지 냉각시키고 안전한 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 4-20 ~ 4-30은 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 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되어 잔열제거계통 운전을 시작할 수 있는 충분한 시간이고, 잔열제거계통 운전 이후에는 더 이상의 한계사항이 없으므로 잔열제거계통 운전 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 한빛1,2호기의 대응능력을 평가하였다.

○ 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 년 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 한빛1,2호기 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 의 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.

일부 원수저장탱크가 비내진으로 설계되었으나, 후쿠시마 사고후 내진 보강공사가 완료되어 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 한빛1,2호기 부지에서 10,000년 빈도의 지진해일 또는 폭풍해일 발생 시 가능 최고 해수위는 부지정지고보다 낮은 것으로 평가된다.

따라서 한빛1,2호기 부지에 해일 및 최대강우 발생 시 해일에 의한 외부침수는 없을 것으로 예상되나, 강우에 의해 필수대처설비를 수용하고 있는 보조건물 및 기기냉각해수건물 등에 외부침수가 발생될 수 있다.

이를 방지하기 위해 한빛1,2호기 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 잔열제거펌프, 중압안전주입펌프, 모터구동보조급수펌프, 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 한빛1,2호기에서는 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 6와 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 6와 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.

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 한빛1,2호기 차이점

한빛1,2 호기에 대한 발전소 안전성 확보를 위한 필수대처 기능은 동일한 설계개념을 적용하였음으로 원자로 정지 및 미임계유지, 노심 냉각(열제거)능력 확보 및 격납건물 건전성 유지에 필요한 설비는 동일하다.

# 제3절 안전 개선사항

## 3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

안전기능 유지 및 확보와 관련하여 한빛1,2호기에서 후쿠시마 후속조치로서 이행중인 안전 개선사항은 다음과 같다.

가. 한빛1,2호기 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 한빛1,2호기의 경우 대체비상디젤발전기의 연료공급용량은 약 1.3일 사용 가능 용량으로 별도의 설계기준 개선은 불필요하다.

○ 예비변압기 앵커볼트 체결

한빛1,2호기는 해당 사항이 없음으로 개선은 불필요하다.

○ 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 복구절차 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, 한빛본부와 한빛소방서는 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 한빛1,2호기 계속운전 관련 경년열화관리 및 안전성 증진항목을 추가하여 이행 중으로 조치 완료되었다.

○ 주요 기기 및 배관의 가동중검사 강화

원자로용기 노심대 용접부 검사 주기를 기존 [redacted]으로 단축하고, 안전1등급 배관의 가동중검사 범위를 기존[redacted] 확대하여 적용 중으로 조치 완료되었다.

○ 경년열화 관리계획 통합관리방안 수립・이행

계속운전 요건에 따라 작성된 한빛1,2호기 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 분석결과를 예방정비 프로그램에 반영하는 조치를 완료하였고, 협력-용역업체의 인적오류 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 “내진축전지 설치(최소 8시간 용량)”외 2건 중 한빛1,2호기에 해당하는 사안은 조치완료 하였다. 상세내용은 제8장(결론) 표

8.1에 기술되어 있다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

안전기능상실과 관련된 고리1호기 스트레스테스트 “안전 개선사항”의 반영 여부를 확인한 결과 표 4-25에서 보듯이 “축전지 전원공급시간 상향”외 4건은 한빛1,2호기 평가에 따라 만족한 것으로 확인되었으며 일부 사항은 향후 조치예정인 것으로 확인 하였다. 상세내용은 제8장(결론) 표 8.2에 기술되어 있다.

### 3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 고유량이동형펌프 확보

최종열제거원상실에 대처할 수 있는 고유량이동형펌프를 확보할 예정이다.

나. 축전지 비상충전 수단 확보

축전지 기능상실을 대비하여 소내 선배치된 비상충전용 중형 이동형 발전기 확보 예정이다.

다. 480V 소형 이동형 발전기 확보

총 3대의 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.

## 제4절 결론

본 장에서는 한빛1,2호기 스트레스 테스트(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 한빛1,2호기의 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, 한빛1,2호기는 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. 원자력안전기술원, 스트레스테스트 수행지침[개정1]

4-2. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서.

4-3. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 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

4-7. NEI 12-06/Rev4, “Diverse and Flexible Coping Strategies(FLEX) Implementation Guide”

## 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 4-1 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<br>(발전소영향) |
|---|---|---|---|
| 13.8kV<br>비안전 | | 345kV 소외전력이 모두 상실되면<br>원자로가 정지됨<br><br>소외전원 상실 시<br><br>전력이 공급됨<br><br>비상디젤발전기가<br>연결된<br>모든 부하는 기능을 상실함 | 4.16kV 안전모선의 저전압 신호 발생 후<br>비상디젤발전기가<br><br>원자로를 안전정지 상태로 유지함<br><br>비상디젤발전기가<br>수동으로 기동함 |
| 4.16kV<br>비안전 | | | |
| 480V비안전 | | | |
| 120V비필수 | | | |
| 250VDC<br>비안전 | | | |
| 125VDC<br>비안전 | | | |

표 4-2 모선정전 시 영향(계속)

가) 소외전원상실(계속)

| 모선정전 | 주요기기 | 계통영향 | 발전소 대처기능<br>(발전소영향) |
|---|---|---|---|
| 13.8kV<br>안전 | | 비상디젤발전기가 기동하여 각 안전 모선에 전력이 공급되면 다음과 같은 공학적안전설비에 전력이 공급되어 공학적안전설비가 작동함에 따라 원자로를 안전정지 상태로 유지함 | |
| 4.16kV<br>안전 | | | |
| 480V<br>안전 | | | |
| 120V<br>필수 | | | |
| 125VDC<br>안전 | | | |

표 4-2 모선정전 시 영향(계속)

나) 소내정전

| 모선정전 | 주요기기 | 계통영향 | 발전소 대처기능<br>(발전소영향) |
|---|---|---|---|
| 가)항과 동일 | 가)항과 동일 | 소내정전이 발생하면 원자로가 정지됨.<br><br>소외전원 상실시 전력을 공급함. | 소내정전 원자로를 안전정지 상태로 유지함 |

표 4-2 모선정전 시 영향(계속)

다) 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전

| 모선정전 | 주요기기 | 계통영향 | 발전소 대처기능<br>(발전소영향) |
|---|---|---|---|
| 가)항과 동일 | 가)항과 동일 | 대체교류디젤발전기 기동 실패에 따른 사고 진단 2시간 이내에 [redacted] 가압하여 공학적안전설비에 전력을 공급함<br><br>이동형발전차가 [redacted] 의해 발전소 감시, 제어 및 보호 기능이 유지됨<br><br>대체교류디젤발전기를 [redacted] 냉각수를 공급함 | 대체교류디젤발전기 기동 실패에 따른 사고 진단 2시간 이내에 [redacted] 원자로를 안전정지 상태로 유지함 |

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 4-3 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 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준

표 4-7 열제거원으로 가용한 수원

표 4-8 사고시나리오별 필수대처설비인 전력원 이용가능성

표 4-9 사고시나리오별 필수대처설비인 열제거원 이용가능성

표 4-10 소외전원상실 조건 평가 시 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)

표 4-14 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 평가 시 가정사항(시나리오 3)

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)

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)

표 4-21 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6) (계속)

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

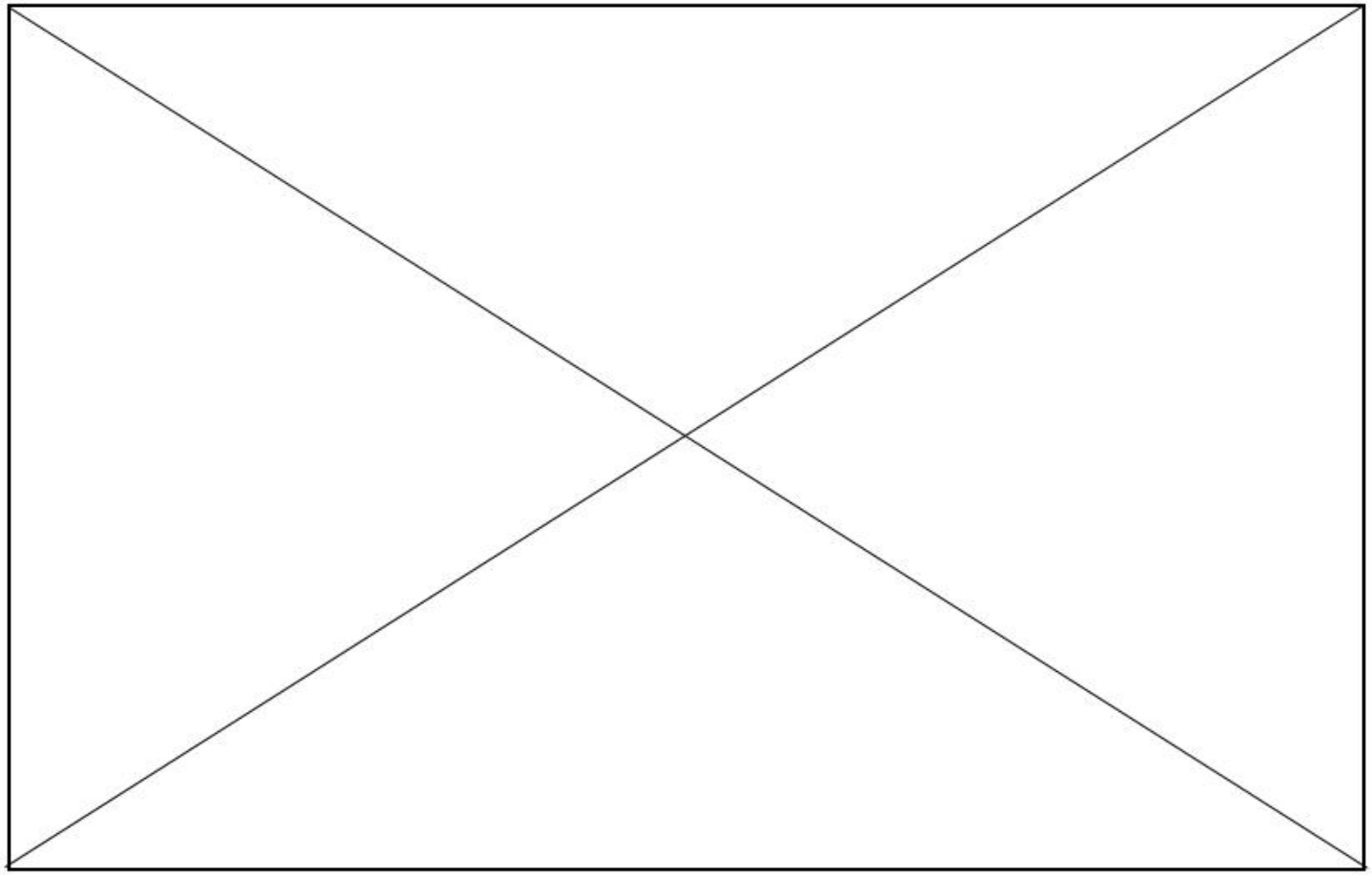


그림 4-1 소내 전력계통 단선도

그림 4-2 비상전원 전력모선도

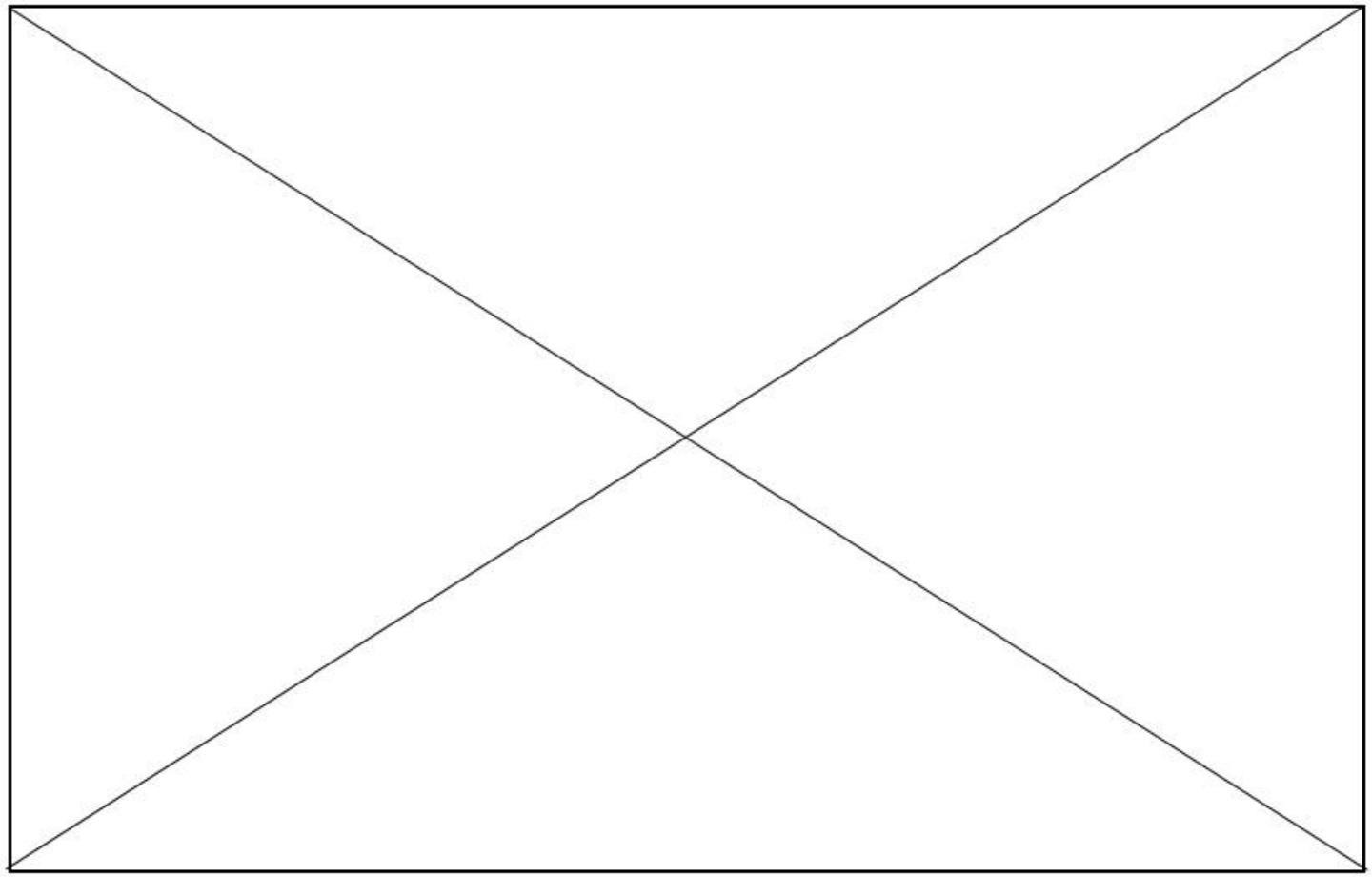


그림 4-3 한빛1,2호기 비상냉각수 주입설비 단순계통도

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 가압기 수위(시나리오 4, 5)

그림 4-8 증기발생기 협역수위(시나리오 4, 5)

그림 4-9 증기발생기 광역수위(시나리오 4, 5)

그림 4-10 주증기 방출 유량(시나리오 4, 5)

그림 4-11 누적 보조급수 사용량(시나리오 4, 5)

그림 4-12 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-13 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-14 원자로냉각재계통 온도(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-15 원자로냉각재펌프 밀봉 누설 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-16 안전주입탱크 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-17 가압기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-18 증기발생기 수위(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-19 주증기 방출 유량(시나리오 6, 안전주입탱크 고갈)

그림 4-20 원자로 출력 및 원자로냉각재 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-21 가압기 및 증기발생기 압력(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-22 원자로냉각재계통 온도(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-23 원자로냉각재펌프 밀봉 누설 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-24 안전주입탱크 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-25 충전/유출 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-26 가압기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-27 증기발생기 수위(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-28 주증기 방출 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

그림 4-29 보조급수 유량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

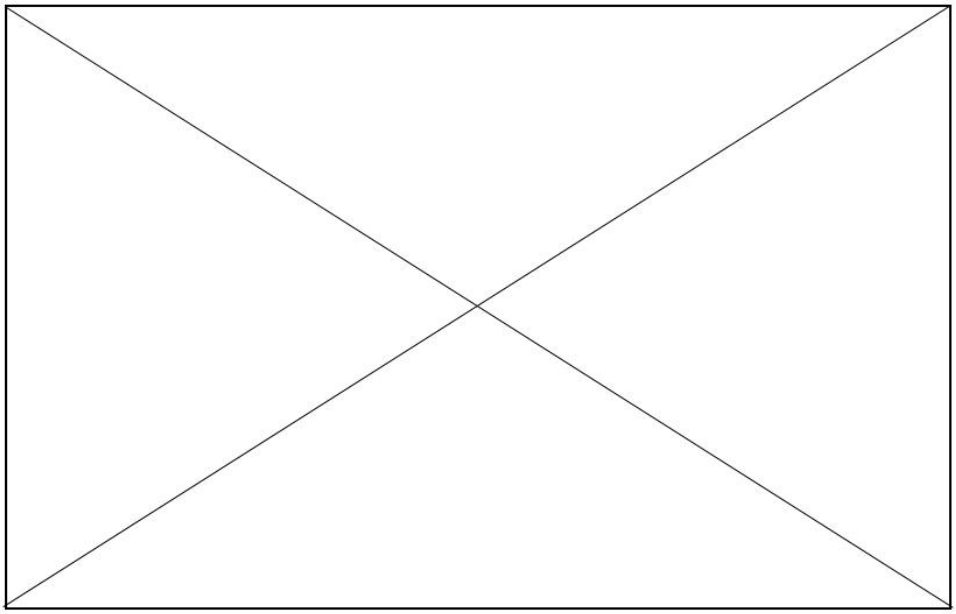


그림 4-30 보조급수 누적량(시나리오 3, 6, 7, 8, 9)

# 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
2.2 격납건물 건전성 확보 방안 ····· 8
2.2.1 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지 ····· 8
2.2.2 수소폭발 방지 ····· 9
2.2.3 격납건물 과압방지 ····· 11
2.2.4 재임계 방지 ····· 12
2.2.5 격납건물 바닥 용융관통 방지 ····· 13
2.2.6 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램 ····· 14
2.3 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안 ····· 14
2.3.1 방사선 차폐기능 ····· 16
2.3.2 사용후연료 냉각기능 ····· 20
2.3.3 연료 손상 ····· 21
2.3.4 사용후연료저장조 냉각기능 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램 ····· 21
2.4 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비 ····· 22
2.4.1 중대사고 관리방안별 이행 설비 ····· 22
2.4.2 전략이행 보조설비 ····· 25
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 ····· 32

제3절 안전 개선사항 ····· 36
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 36
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ·· 37
3.3 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 37

제4절 결론 ····· 39

제5절 참고문헌 ····· 42

제6절 표, 그림 ····· 44

# 표, 그림

표 5-1 비상운전절차서 구성 ····· 44
표 5-2 중대사고관리지침서의 증기발생기 냉각수 주입 수단 ····· 46
표 5-3 중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 감압 수단 ····· 47
표 5-4 중대사고관리지침서의 원자로냉각재계통 냉각수 주입 수단 ····· 48
표 5-5 중대사고관리지침서의 격납건물 냉각수 주입 수단 ····· 49
표 5-6 격납건물 격리상태 점검표 ····· 50
표 5-7 피동촉매형수소재결합기 위치 및 용량 ····· 51
표 5-8 사용후연료저장조 운전 상태 ····· 52
표 5-9 사용후연료저장조 냉각수 주입 수단 ····· 53
표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비 ····· 54
표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비 ····· 57
표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성 ····· 70
표 5-13 모든 전원 및 열제거원 상실 시 중대사고 진행과정 ····· 77
표 5-14 대응능력 한계상황에서의 중대사고 사건 전개 ····· 78
표 5-15 사용후연료저장조 비상충수 운전원 조치시간 평가결과 ····· 79
표 5-16 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목 ····· 80
표 5-17 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목 ····· 81

그림 5-1 사용후연료저장조 냉각 계통 ····· 82
그림 5-2 사용후연료저장조 수위 및 사건전개 이력 ····· 83
그림 5-3 비상냉각수 외부주입에 따른 노심출구온도 변화 ····· 84
그림 5-4 비상냉각수 외부주입에 따른 격납건물 압력 변화 ····· 84
그림 5-5 비상냉각수 외부주입 누적 냉각수량 ····· 85
그림 5-6 이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 노심출구온도 변화 ·· 85
그림 5-7 이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 격납건물압력 변화 ·· 86

## 제1절 개요

중대사고 관리능력 평가의 목적은 극한자연재해 시 중대사고 진입을 예방하기 위한 여러 설비들이 의도된 기능을 발휘하지 못하여 중대사고가 발생하는 상황을 상정하고 하드웨어, 절차 및 운영 측면을 확인하여 이에 대한 대처 가능 여부를 평가하고 한빛1,2호기의 안전성을 증진하는데 있다.

중대사고 관리능력 평가에서는 노심냉각기능 확보능력, 격납건물 손상방지 관리능력 및 사용후연료저장조(Spent Fuel Pool, SFP) 냉각기능 상실 시 차폐기능 및 냉각기능 회복능력을 평가하여 방사성물질이 환경으로 누출되어 일반인에게 피해를 입히는 사고를 막을 수 있는지를 평가하였다.

한빛1,2호기의 현 상태를 확인하고 추가적으로 요구되는 안전성 확보방안을 수립하기 위해 원자력안전위원회가 제시한 스트레스테스트 수행지침에 따라 다음과 같은 세부 항목을 평가하였다.

○ 노심냉각기능 확보 방안
○ 격납건물 건전성 확보 방안
○ 사용후연료저장조 냉각기능 상실에서의 관리방안
○ 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비
○ 극한자연재해를 고려한 중대사고 완화조치 저해요소

## 제2절 평가내용

### 2.1 노심냉각기능 확보 방안

한빛1,2호기는 에 의거하여 연료손상 발생 전·후 그리고 원자로용기 손상 이후 등 사고 전 과정에 걸쳐 노심냉각전략을 수행하도록 절차를 수립하고 있다. 그리고 노심냉각전략을 이행하기 위한 각종 예방 및 완화를 위한 설비들이 설치되어 있다.

연료손상 발생 전 사고관리 대응은 에 따라 연료손상을 방지하기 위해 수행된다.

연료손상 이전 상황에서 비상운전절차서에 따른 조치에도 노심냉각기능을 유지하지 못할 경우 중대사고로 진입하게 된다. 중대사고관리는 사고시 가용한 수단을 통해 노심냉각기능을 회복하여 사고 발생 후 핵연료의 용융 등으로 인해 사고가 악화되지 않도록 안전기능을 유지하기 위해 수행된다. 이러한 사고관리의 최종 목표는 환경으로 방사성물질이 유출되는 것을 방지하거나 그 유출량이 제한치 이내가 되도록 하고 노심과 격납건물을 안전하게 제어하는데 있다.

한빛1,2호기 중대사고관리지침서는 후쿠시마 원전 사고 이후의 국내안전점검 후속조치 사항들을 반영하여 전략수행의 실효성이 강화되도록 개정되었다[5-3].

### 2.1.1 원자로용기 내의 연료손상 전

한빛1,2호기의 비상운전절차서는 발전소 운전변수가 원자로보호계통이나 공학적 안전설비 작동 설정치를 초과하는 과도상태 또는 사고 발생시, 이의 결과를 완화하고 필수안전기능을 회복하기 위해 작동이 요구되는 기기 및 계통과 운전원의 조치사항을 기술한 절차서로 표 5-1과 같이 다음 3가지 종류의 절차서로 구성된다.

는 중요 위험요소로 정의된 사건시나리오로부터 진단과 복구를 위한 지침이다. 이 지침은 비상과도상태의 대응을 위해 미리 정의된 사건회복전략을 제공한다. 복구전략은 발전소를 정상운전 상태나 복구 작업이 수행될 수 있는 안전한 상태로의 복구지침을 제공한다. 일차적인 운전 개념으로서 은 원자로 보호계통 제한치나 안전계통 작동 설정치를 초과하는지에 대한 진단으로 시작된다.

는 운전원에게 비상과도상태의 증상을 확인하기 위한 적절한 지침단계를 알려주는 논리적 구조로 기술되어 있다. 이 형식은 서로 연관된 지침서들이 제공되는 증상중심 복구전략을 가능하게 한다. 여기에는 다른 절차로의 이동 시점과 이동을 위한 증상을 나타낸다.

는 사건 시나리오와 무관하게 발전소 안전상태의 회복을 위한 지침서들로 구성되어 있으며 비상과도상태에 대한 조치를 위하여 미리 정의된 증상중심 기능회복 전략이 세워져 있다. 은 최적복구가 시작될 수 있는 조건

으로 필수 안전기능을 회복시키기 위하여 적절한 발전소 기기를 활용한다.

[redacted]는 발전소 필수 안전기능을 이용한 증상 중심 기능회복 전략을 통해 핵연료/피복재, 원자로냉각재계통 압력경계 및 격납건물의 건전성을 유지할 수 있도록 개발되었다. [redacted]는 다음과 같은 범주로 분류된다[5-4].

○ 미임계 (Subcriticality) - S : 비상정지가 없는 예상과도상태, 출력조건으로의 복귀 및 노심 정지조건의 상실 등과 관련한 증상
○ 노심냉각 (Core Cooling) - C : 원자로냉각재계통의 냉각수 고갈로 인해 생기는 부적절하고, 부적절한 포화상태의 노심냉각 조건과 관련한 증상
○ 열제거원 (Heat Sink) - H : 모든 증기발생기내의 냉각수의 고갈로 인하여 발생하는 부적절한 이차측 열제거와 관련한 증상. 어떤 증기발생기에서든지 다음의 조건에 대한 조치를 포함함 :
(1) 고수위, (2) 저수위, (3) 과압, (4) 정상적인 증기방출능력의 상실
○ 원자로냉각재계통 건전성 (RCS Integrity) - P : 긴박하거나 예상된 가압기 열충격조건 및 저온과압조건과 관련한 증상
○ 격납건물 건전성 (CV Integrity) - Z : 잠재적인 격납용기 과압(수소포함), 충수 및 고방사선 등과 관련한 증상
○ 재고량 (RC Inventory) - I : 가압기 고압력, 가압기 저수위 및 원자로용기 내의 기포와 관련한 증상

[redacted]는 필수 안전기능의 상태를 평가하고, 필수 안전기능의 회복을 위해 사용하여야 할 [redacted]를 쉽게 찾을 수 있도록 수목도 형식으로 작성된 도표이다. [redacted]는 발전소 안전상태를 정의한 필수안전기능 각각에 대해 존재하며 [redacted]의 각 수목도는 하나의 진입시점과 필수안전기능 상태에 정의된 변수에 따라 몇 개의 종료시점을 갖는다. 수목도의 각 경로는 상태 수목내의 변수값에 따라 해당하는 기능회복 절차서로 연결된다.

한빛1,2호기에서 사고 시 노심냉각기능과 관련된 주요 안전계통은 다음과 같다.

○ 잔열제거계통 : 원자로로부터 잔열을 제거하여 원자로냉각재계통의 온도를 감소시킨다. 이 계통은 비상노심냉각과 연료재장전운전을 위하여 사용된다.
○ 안전주입계통 : 원자로냉각재 상실, 증기발생기 세관 파단, 이차 측 냉각 상실 등의 사고 시 비상노심냉각과 정지 여유반응도를 제공한다. 또한 재순환모드에서도 격납건물 집수조에서 원자로냉각재계통으로 붕산수를 공급하여 사고 후

장기간 동안 노심냉각을 제공한다.

○ 보조급수계통 : 주급수계통의 정상운전 불능 시 기기를 보호하고 발전소의 안전을 보증하기 위한 대체 급수계통으로 사용되며 소형냉각재 파단사고 시 노심 잔열제거 수단을 제공한다.

○ 원자로정지계통 및 공학적 안전설비계통 : 설계기준 사고 시 사고완화 및 사고영향의 확산 억제를 통해 부적절한 결과를 초래하지 않도록 하는 역할을 한다. 이 계통은 복수의 계열 또는 하부계통을 갖춰 설계기준사고 시에 작동성을 보장한다.

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 다음의 [redacted]할 경우 이후의 사고 관리 즉, 중대사고 진입 후 사고 관리는 중대사고관리지침서에 따라 발전소의 상태를 감시하고 사고 완화 전략을 수행하도록 되어있다.

[redacted]

원자로용기내의 연료손상 이후의 중대사고 관리전략은 노심 냉각 기능을 유지하고 1차 측 과압을 방지하기 위한 전략으로 구성되어 있다. 한빛1,2호기는 원자로

용기 내의 연료손상 이후의 사고완화를 위해 다음과 같은 전략을 가지고 있다.

중대사고관리지침서 전략은 중대사고가 진행되는 동안 증기발생기에 급수를 주입함으로써 사고를 완화하는 전략이다. 중대사고시 증기발생기에 급수를 주입하면 다음과 같은 사고완화 기능을 수행할 수 있다.

한빛1,2호기 중대사고관리지침서에서는 노심 냉각 기능을 유지하고 원자로냉각재계통 과압을 방지하기 위해 표 5-2와 같이 증기발생기에 냉각수를 주입하는 수단을 제공하고 있다.

중대사고관리지침서 전략은 중대사고가 진행되는 동안 원자로냉각재계통의 압력을 낮춤으로써 사고를 완화할 수 있다. 중대사고 진행 기간 동안 원자로냉각재계통 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 전략은 중대사고가 진행되는 동안 원자로냉각재계통 즉 노심에 냉각수를 주입함으로써 사고를 완화

할 수 있다. 중대사고 진행 기간 동안 노심에 충분한 유량이 공급되면 다음과 같은 사고 완화 기능을 수행할 수 있다.

원자로냉각재계통 냉각수 주입 전략을 수행하기 위해 중대사고관리지침서는 표 5-4와 같은 다양한 냉각수 주입 수단을 제공하고 있다.

한빛1,2호기는 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 있으며, 극한자연재해 사고 시 대응능력은 본 보고서 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 에 따라 원자로냉각재계통으로 냉각수를 주입함으로써 냉각이 가능하다.

원자로용기 손상 이후, 파손부를 통해 방출된 노심용융물은 원자로공동에 재배치된다. 원자로공동 바닥은 노심용융물의 퍼짐과 냉각을 위해 으로 설계되어 있다[5-5]. 원자로용기 손상 이후 노외 용융물에 의한 중대사고 현상을 완화하기 위해 한빛1,2호기 중대사고관리지침서 전략을 이용하여 냉각수 주입이 가능하며, 격납건물로 냉각수를 충

수하면 다음과 같은 긍정적인 사고 완화 효과를 얻을 수 있다.

한빛1,2호기 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 흘러 들어가게 되면 격납건물 수위는 상승하게 된다. 이 때 냉각수가 과도하게 주입되면 격납건물 내부의 안전관련 기기가 침수될 수 있다. 이러한 침수를 방지하기 위하여 는 유입되는 냉각수량에 따른 격납건물 수위 정보를 제공하고 있다. 격납건물 냉각수 주입 전략 수행 시 주입원에 따른 침수위를 고려하여 안전관련 기기가 침수되지 않도록 전략을 수행한다.

또한, 전략에 따라 사용 가능한 설비를 이용하여 함으로써 노외 용융물 냉각에 긍정적인 효과를 얻을 수 있다.

한편, 원자로용기 손상 시점에 원자로냉각재계통의 압력이 높을 경우, 고압용융물분출(High Pressure Melt Ejection, HPME) 및 격납건물 직접가열(Direct Containment Heating, DCH) 현상으로 격납건물 건전성이 위협 받을 수 있다. 한빛1,2호기는 중대사고관리지침서 전략을 통하여 원자로용기가 손상되는 시점에서의 원자로냉각재계통 압력을 낮춤으로써 고압용융물분출 및 격납건물직접가열을 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 중대사고관리 전반의 중요사항을 최종 결정

하게 된다. 다수호기 동시사고 시에는 [redacted]에 따라 발전소별 비상기술지원실이 구성되며, 하부 비상 조직으로 호기별 비상운전반이 구성되어 비상기술지원실의 지시에 따라 사고관리전략을 수행하게 된다.

노심냉각기능 확보를 위한 사고관리 전략 수행은 중대사고관리지침서 [redacted]에 따라 이루어진다. 해당 전략의 수행에는 고정형 설비와 이동형 설비를 포함하고 있다. 전략 수행을 위한 운전원과 방사능 방재요원의 중대사고관리 교육훈련은 [redacted]에 따라 정기적으로 이루어진다.

## 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 한빛1,2호기 격납건물의 건전성을 확보하는 방안을 평가하였다.

[redacted]

### 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 자동 닫힘 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, 격납건물 자동격리가 실패하더라도 주제어실(Main Control Room, MCR)에서 각 격납건물 격리밸브들의 상태(표 5-6 참조)를 파악하고 격납건물을 수동으로 격리시킬 수 있다[5-2]. 따라서 한빛1,2호기는 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 저압경계부냉각재상실(Interfacing System LOCA, ISLOCA) 사고가 대표적인 경우이다. 증기발생기세관파단사고 시에는 격납건물이 파손되지 않더라도 핵분열생성물이 파손된 증기발생기 세관을 통하여 격납건물 외부로 방출될 수 있고, 저압경계부냉각재상실사고 시에는 원자로냉각재계통과 저압안전주입계통 배관을 통과하여 보조건물로 연결됨으로서 격납건물 외부로 방출될 수 있다. 한빛1,2호기 확률론적안전성평가 보고서[5-5]에 따르면, 격납건물 우회사고의 발생빈도는 이고, 이 중 대부분의 경우 우회는 증기발생기세관파단사고에 의해 발생하는 것으로 발생빈도는 으로 평가되었다.

한빛1,2호기는 중대사고 동안 증기발생기세관파단이 발생하여 일부 핵분열생성물이 증기발생기로 이동하더라도 에 따라 할 수 있다. 따라서 한빛1,2호기에서는 중대사고 시 격납건물 우회사고가 발생하더라도 핵분열생성물 방출을 최소화할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다.

### 2.2.2 수소폭발 방지

한빛1,2호기는 중대사고시 수소연소가 발생하더라도 격납건물 건전성이 유지되도록 국내 계속운전 고시[5-8]에 따른 중대사고 연소안전성평가 결과에 의거하여 전원공급이 필요 없는 피동촉매형수소재결합기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)로 구성되어 있으며, 가연한계 미만의 낮은 농도에서 수소를 자동적으로 제거함으로써 중대사고 시 수소폭발에 의한 격납건물 손상을 예방한다.

한빛1,2호기 피동촉매형수소재결합기는 규제기준에 따른 연소안전성 평가와 연계하여 격납건물 내 격실 구조 분석 및 실사 결과를 반영하여 설계되어 있다. 특히, 후쿠시마 후속조치로 수행한 피동촉매형수소재결합기 보강 설계시 을 고려하여, 규제기준

에서 요구하는 [redacted] 요건보다 더욱 보수적인 분석을 수행함으로 원자로건물 건전성을 입증하였다. 피동촉매형수소재결합기는 21대의 중대사고 전용 기기와 2대의 설계기준사고 및 중대사고 겸용 기기로 구성되며, 설치위치 및 사양은 표 5-7에 요약되어 있다.

한빛1,2호기 피동촉매형수소재결합기의 위치는 규제기준에 따른 연소안전성 평가와 연계하여 격납건물 내 격실 구조 분석 및 실사 결과를 반영하여 사고 시 비산물 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].

한빛1,2호기 피동촉매형수소재결합기의 성능은 확률론적 및 결정론적 관점에서 선정된 주요 사고경위를 [redacted] 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 [redacted] 수소연소 안전성을 평가하였다. 분석결과, 한빛1,2호기 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, 한빛1,2호기 중대사고관리지침서에서는 피동설비인 피동촉매형수소재결합기에 의한 수소제어 방법뿐만 아니라, 비상조치에 의한 능동적인 완화전략을 제공한다. 한빛1,2호기 중대사고관리지침서 [redacted]에서는 수소폭발을 방지하기 위한 인위적인 수소연소, 수소재결합기 운전, 수소 연소 예방 전략 및 각각의 전략이행을 위한 수단을 기술함으로써 수소폭발을 방지하기 위한 대응방안을 제공하고 있다[5-2].

중대사고 시 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 피동촉매형수소재결합기에 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, 한빛1,2호기는 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 한빛1,2호기에는 격납건물 살수계통과 격납건물 팬냉각기가 설치되어 있다.

첫째, 한빛1,2호기 격납건물 살수계통은 냉각재상실사고에 따른 격납건물 가압 시 격납건물 내의 온도와 압력을 감소시키고, 핵분열생성물을 제거하는 기능을 수행한다. 동 계통은 격납건물 압력이 [redacted]를 초과하면 자동으로 작동하며 운전원에 의해서 수동으로도 작동이 가능하다. 동 계통은 안전등급으로서 두 계열로 되어 있으며, 비상전원 모선으로부터 전원을 공급받는다. 격납건물 살수계통은 [redacted]로 구성되어 있으며, 각 계열은 펌프, 살수헤더와 노즐, 살수첨가 에덕터, 밸브 및 배관 등으로 구성되어 [redacted]으로 독립적인 기능을 수행할 수 있다. 격납건물 살수펌프는 [redacted]에서 취수하여 살수모관 및 각 살수 노즐을 통하여 격납건물 상부대기로 붕산수를 살수함으로써 격납건물의 과압을 방지한다[5-2, 5-5, 5-7].

둘째, 한빛1,2호기 격납건물 팬냉각기는 격납건물 내 습도, 온도 및 압력이 높아질 경우 냉각코일을 통해 격납건물 대기에 있는 수증기를 응축시킴으로써 격납건물을 냉각하는 기능을 수행한다. 본 계통은 안전등급으로서 [redacted]로 되어 있으며, [redacted] 모선으로부터 전원을 공급받으며, [redacted] 의해 냉각이 된다. [5-2, 5-7].

격납건물 팬냉각기는 [redacted]되어 있으며, 안전주입신호를 받을 경우 자동으로 기동 된다. 발전소 정상운전시에는 3개의 고속 팬이 격납건물 내 대기를 냉각 및 순환시켜 [redacted] 유지 하도록 설계되어 있으며, 사고운전시에는 계열 당 1대의 팬이 격납건물 내부를 냉각 및 순환시킨다. 정상전원이 차단되고 원자로가 고온 대기상태를 유지하고 있는 상황에서도 [redacted]으로부터 동력을 공급받아 운전할 수 있는 장치를 갖추고 있다[5-5].

또한 한빛1,2호기 중대사고관리지침서 [redacted]에서는 격납건물의 건전성을 유지하기 위한 종합적인 격납건물 과압방지 전략을 제공한다. 동 지침서에서는 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, 한빛1,2호기는 중대사고시 격납건물 과압방지를 위한 설비를 갖추고 있으며, 또한 중대사고관리지침서를 통해 체계적인 완화전략 및 수단을 제공하고 있으므로 격납건물 과압 방지를 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. 한빛1,2호기의 경우 상기 상황에서 안전주입탱크 및 연료재장전수저장탱크 그리고 붕산주입탱크의 고농도 붕산수가 사고 완화를 위해 주입된다. 한빛1,2호기의 초기 최대 임계붕산 농도는 [redacted]이며, 1차 측으로 [redacted] 최대 임계붕산 농도 이상이므로 재임계 가능성은 없다.

상기한 바와 같이 한빛1,2호기는 핵연료는 건전하나 제어봉이 부분적으로 혹은 완전히 파손된 상황에서 노심 재충수(Re-flooding)를 시도할 경우에도 일정 농도 이

상의 붕산수가 주입되므로 재임계 가능성은 없다. 또한 노심이 손상되어 용융물이 하부로 재배치되거나 원자로용기 외부로 방출되는 사고 진행과정에서는 비붕산수가 주입되는 보수적인 상황에서도 재임계 가능성은 없다.

한빛1,2호기는 중대사고관리지침서 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, 노외로 분출된 노심용융물은 원자로공동 바닥에 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 반응에 의한 원자로공동 바닥 침식을 완화할 수 있다.

원자로용기 파손 후 원자로공동으로 노심용융물이 방출될 경우 노심용융물이 퍼질 수 있는 원자로공동 바닥면적은 이다[5-5]. 해당 면적은 EPRI URD(Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document)[5-12]에 기술된 노외 용융물의 냉각을 보장하기 위한 열출력 당 공동 바닥면적 요건인 0.02 $m^2$/MWt을 만족하고 있다. 또한, 한빛1,2호기 원자로공동은 격납건물 살수 혹은 RCS 파단 등에 의해 격납건물로 냉각수가 유입되면 중력에 의해 원자로공동으로 자연적으로 충수되는 구조로 되어 있다.

한빛1,2호기 중대사고관리지침서 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 연료재장전수저장탱크(Refueling Water Storage Tank, RWST) 중력배수를 통하여 격납건물 격실의 노외 노심용융물을 냉각시키기 위한 냉각수를 주입할 수 있다. 그 밖에 대처방안의 하나로 설치가 완료된 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 한빛 1,2호기에는 보조건물 에 격납건물 설치되어 사고시 RWST의 붕산수가 살수펌프를 거쳐 살수노즐에 분무되는 동안 이 첨가되어 격납건물 재순환 저수조 내로 유지시켜 줌으로써 수용성 유기 요오드의 휘발을 억제할 수 있다 [5-13].

한빛1,2호기 원자로공동은 노외로 방출된 노심용융물 냉각을 보장하기 위한 원자로공동 바닥 면적이 확보되어 있고, 격납건물 내 냉각수에 의해 침수되는 구조이며, 노외 용융물의 냉각을 위한 사고완화 전략 및 수단을 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 노심용융물-콘크리트 반응에 의한 격납건물 바닥 용융관통을 완화하기 위한 능력을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

### 2.2.6 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 운영 프로그램

중대사고시 격납건물 건전성 확보를 위한 최종 의사결정은 중대사고 대처에 대한 모든 책임과 권한을 가진 비상기술지원실장에 의해 이루어진다. 비상기술지원실장은 비상운전반, 기술지원반, 방사선대책반의 의견을 참고하여 중대사고관리 전반의 중요사항을 최종 결정하게 된다. 다수호기 동시사고 시에는 방사선비상계획에 따라 발전소별 비상기술지원실이 구성되며, 하부 비상 조직으로 호기별 비상운전반이 구성되어 비상기술지원실의 지시에 따라 사고관리전략을 수행한다.

중대사고 시 격납건물 건전성 확보를 위한 사고관리 전략의 수행은 중대사고관리 지침서에 따라 이루어진다. 해당 전략의 수행에는 고정형 설비와 후쿠시마 후속조치로 설치된 설비를 포함하고 있다. 전략 수행을 위한 운전원과 방사능 방재요원의 중대사고관리 교육훈련은 에 따라 정기적으로 이루어진다.

## 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. 1호기 구성된 영역 I 저장대와 II 영역 저장대로 구성된다. 영역 I 저장대는 할 수 있고 영역 II 저장대는 할 수 있으며, 영역 I 및 II 저장대는

가 포함되어 있다. 1호기 사용후연료저장대는 핵연료 재료성분 및 저장조의 붕산수 환경에 맞도록 제작되었으며, 의 핵연료집합체를 저장할 수 있고, 내진범주 I급으로 분류된다[5-7].

원자로에서 인출된 사용후연료는 사용후연료저장조로 이송되어 수면 아래에 저장된다. 사용후연료저장조의 물은 사용후연료에서 방출되는 방사선을 차폐하고 사용후연료에서 발생하는 붕괴열을 제거한다.

사용후연료저장조 냉각계통은 안전등급 3 및 내진범주 I급으로 설계되었으며, 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료의 붕괴열을 제거하는 기능을 수행한다. 사용후연료저장조 냉각계통 배관은 파단시 사이펀 현상에 의한 수위 감소로 저장조에 저장되어 있는 사용후연료가 대기에 노출되는 것을 방지하기 위해 사이펀 방지를 위한 구멍이 에 제공되며, 1호기의 경우 저장조로 냉각수를 방출하는 배관의 끝단은 위치한다. 사용후연료저장조 냉각계통 기기는 등으로 구성되어 있으며 계통의 개략도는 그림 5-1에 제시되어 있다[5-7]. 사용후연료저장조 운전상태는 표 5-8에 제시되어 있다[5-14].

핵연료건물 내 사용후연료저장조 구역에는 방사능 위험에 대한 경고 수단을 현장제어반과 주제어실에 제공한다. 사용후연료저장조의 수위 정보는 주제어실에, 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[5-15].

사용후연료저장조 지역에는 연료건물 냉각 및 환기계통이 설치되어 있어 연료건물 정상 배기팬을 통해 지속적으로 배기가 이루어지며, 사용후연료저장조 차폐 수위 상실에 따른 연료건물 비상환기신호 발생시 비상패기팬을 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. 연료건물 비상환기신호 발생 시 비상배기팬이 운전되어 흡입측 연료건물 정상 배기팬, 배기측 덕트 내에 위치한 안전성 관련 격리댐퍼를 자동으로 차단시키고 건물을 부압으로 유지시킨다. 비상배기팬 및 연료건물 정상 배기팬의 용량은 이다[5-7].

설계기준을 초과하는 사고에 대비한 사용후연료저장조의 방사선 차폐 및 냉각기능에 대한 평가결과는 다음의 세부 절에 제시되어 있다.

### 2.3.1 방사선 차폐기능

방사선 차폐기능은 사용후연료저장조 내의 선량률을 차폐설계기준 이내로 유지함으로써 확보된다. 절차서에 따라 저장조 수위를 일정하게 유지함으로써 과도사건을 포함한 정상운전 상태에서의 방사선 차폐기능이 유지된다. 한빛원자력 제1발전소 운영절차서 에 의하면, 사용후연료저장조 냉각기능의 완전 상실 등으로 인하여 사용후연료저장조 수위가 감소할 경우에는 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)[5-14].

에 따르면, 교류전원 완전상실로 인한 사용후연료저장조 냉각기능 상실시 비등온도 도달시간은 사용후연료저장조에 저장된 연료의 상태에 따라

또한, 저장조 저수위 경보 발생 수위 도달시간은 다음과 같이 계산된다.

상기와 같이 저장조 저수위 경보 발생 도달시간은 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 시간으로 예상된다. 저수위 경보 발생 수위에서의 별도 조치에 대한 요구사항은 없다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실로 수위가 지속적으로 감소하여 사용후연료저장조 수위가 에 도달하면 비정상운전절차서 에 따라 사용후연료저장조 비상충수를 수행한다(절차서에 따르면 비상충수 수위 도달 전이라도 저장조 온도증가가 지속적으로 진행될 경우 비등온도에 도달하기 전에 비상보충수를 공급해야함.). 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 아래와 같이 계산된다.

상기와 같이 비상충수 착수 수위 도달시간은 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 시간으로 예상되며, 비정상운전절차서에 따른 사용후연료저장조의 충수는 다음과 같은 두 가지 방법에 의하여 이루어진다.

수위가 지속적으로 감소하여 사용후연료저장조 수위가 조치를 수행하게 된다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 아래와 같이 계산된다.

상기와 같이 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 도달시간은 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 미만으로 감소하면 방사선 차폐에 요구되는 최소수위를 상실하게 된다. 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 도달시간은 아래와 같이 계산된다.

상기와 같이 사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 저장조 수위의 도달시간은 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 [redacted] 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

[redacted] 이용하여 사용후연료저장조에 비상보충수를 공급한다.

○ 중대사고 관리조치 이후

[redacted] 실시하여 사용후연료저장조 수위를 회복한다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실 후 중대사고 관리조치가 필요하기까지의 소요시간은 사용후연료저장조에 저장된 사용후연료 상태에 따라 [redacted]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 5-14에 기술된 바와 같이 사용후연료저장조에 저장된 연료 상태에 따라 [redacted]이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 소요시간은 중대사고 관리조치에 따라 [redacted]

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 일 이상이 소요된다[5-14]. 이러한 소요시간은 을 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 핵연료건물 문 개방, 개구부 형성 및 핵연료건물 배기계통을 통해 핵연료건물내 수소제어 전략을 수행할 수 있다.

사용후연료 미임계 유지 측면에서 한빛 1호기 사용후연료저장대는 정상운전시 사용후연료저장조 붕소농도를 고려하지 않아도 사용후연료 유효증배계수($K_{eff}$)가 를 초과하지 않도록 설계되었으며, 단일 핵연료집합체 낙하시에도 미임계를 유지한다[5-7]. 실제 저장조내 붕소농도는 이상으로 유지되고[5-16], 사용후연료저장조의 물이 비등에 의해 일부 손실되더라도 붕소의 손실은 미미하므로 의 붕소농도 유지가 가능하며, 보충수가 주입되더라도 이상의 붕소농도가 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 비정상운전절차서의 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 중대사고관리지침서 에 따라 이루어지며, 중대사고관리지침서에 대한 교육훈련은 정기적인 운전원 교육훈련을 통해 이루어진다[5-6].

## 2.4 중대사고 관리방안 이행을 위한 설비

본 절에서는 한빛1,2호기 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

한빛1,2호기 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. 한빛1,2호기 중대사고관리지침서[5-2]에 제시된 중대사고 완화전략은 다음과 같다.

#### 2.4.1.1 노심냉각기능 확보를 위한 중대사고 완화전략

#### 2.4.1.2 격납건물 건전성 확보를 위한 중대사고 완화전략

#### 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 이용하여 수행 가능하다. 이동형발전차는 소내 전원이 상실되었을 때 에 전원을 공급하고, 견인식 디젤발전기는 에 비상전원을 공급하는 역할을 한다[5-19, 5-20].

### 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. 한빛1,2호기 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[5-21] 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[5-22] 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

한빛1,2호기 중대사고 관리능력을 평가하기 위한 사고 시나리오는 한빛 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 [redacted] 지진이 발생하고 발전소 전력공급이 장기간 상실되는 상황으로 설정하였다. 이러한 극한자연재해 상황에서도 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)는 사용 가능하며 소내 정전사고에 대응하기 위한 대체교류디젤발전기(Alternative Alternating Current Diesel Generator, AAC D/G)도 구비되어 있으나 발전소 대응능력을 보수적으로 평가하기 위해 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기도 상실된 것으로 가정하였다.

극한자연재해로 인하여 소외 전력상실이 지속되는 기간은 최대 3일로 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 한빛1,2호기의 사고 진행추이를 분석하였다. 중대사고 시나리오 분석은 를 이용하였으며, 격납건물 파손 압력은 한빛1,2호기 확률론적안전성분석보고서[5-5]에 제시된 로 설정하였다.

분석 결과는 표 5-13에 제시되어 있는데, 중대사고로 진입하였다. 에는 노심이 용융되어 원자로용기 하부로 노심용융물이 재배치되기 시작하였다. 그리고 에 원자로용기 하부가 파손되어 노심용융물이 원자로공동으로 방출된다. 열제거원의 상실로 인해 격납건물 압력은 지속적으로 상승하여 사고 후 에 격납건물 파손압력인 에 도달한다. 이와 같은 극한자연재해로 인한 중대사고 발생 시 아무런 대응조치를 하지 않는 경우에도 한빛1,2호기 격납건물의 건전성은 동안 확보되는 것으로 평가되었다.

사용후연료저장조의 경우, 규모의 지진이 발생하더라도 사용후연료저장조 구조물 자체의 건전성뿐만 아니라 사용후연료저장조 냉각계통 배관의 건전성도 유지된다. 따라서 극한자연재해로 인한 사용후연료저장조의 누설은 발생하지 않는다. 이에 따라 극한자연재해 시는 2.3절의 사고 사나리오와 동일한 사건 전개를 보인다.

2.3절에 기술된 바와 같이, 사용후연료저장조의 연료 저장상태가 정상상태인 경우 저장조 냉각기능 상실 후 중대사고 예방조치 진입 수위 도달시간은 시간, 방사선 차폐기능 상실 수위 도달시간은 시간, 저장대 상단 도달시간은 시간으로 평가되었다. 따라서, 사용후연료저장조의 연료 저장상태가 정상상태인 경우 시간 이내 사용후연료가 대기에 노출되지 않는다.

사용후연료저장조의 연료 저장상태가 재장전상태인 경우 저장조 냉각기능 상실

후 중대사고 예방조치 진입 수위 도달시간은 시간, 방사선 차폐기능 상실 수위 도달시간은 시간, 저장대 상단 도달시간은 시간으로 평가되었다. 이 경우 운전원이 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 비상충수를 수행하는데 시간이 충분하다.

사용후연료저장조의 연료 저장상태가 비정상상태인 경우 저장조 냉각기능 상실 후 중대사고 예방조치 진입 수위 도달시간은 시간, 방사선 차폐기능 상실 수위 도달시간은 시간, 저장대 상단 도달시간은 시간으로 평가되었다. 이 경우 운전원이 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 비상충수를 수행하는데 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.

따라서 극한자연재해가 발생하더라도 한빛1,2호기는 타부지 및 외부지원 기관으로부터 비상요원 및 비상장비의 지원이 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 전원 접속함을 연결해야 한다. 전원 접속함은 에 연결해야 한다[5-19]. 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.

한빛1,2호기는 추가적인 중대사고 완화조치의 하나로 원자로냉각재계통 및 증기발생기 2차 측에 이동형펌프를 이용하여 비상냉각수를 주입하는 외부주입유로 설치가 완료 되었다. 원자로 비상냉각수 외부주입 지점은 작업자의 예상피폭방사선량이 높지 않을 것으로 예상된다. 원자로냉각재계통의 외부주입유로 확보를 위해 극한자연재해 사고 시에도 격납건물 격리 기능이 보장되므로 동 상황에서도 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

한빛1,2호기의 비상대응시설 중 하나인 주제어실은 제어건물에 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 이하로 유지하도록 차폐 설계되어 있으며 공조계통을 통한 외부 방사선물질 유입에 대비하여 비상공기정화계통을 구비고 있다. 주제어실 사고선량 분석에 의하면 비상공기정화계통은 가장 제한적인 냉각재 상실사고 시에도 주제어실 운전원을 공기 중 방사능으로부터 보호할 수 있는 방호수단을 제공한다[5-7]. 주제어실 비상공기정화계통은 장기 소내정전사고 시에도 이동형발전차에서 전원을 공급받아 운전 및 제어가 가능하다.

주제어실 내의 운전원에게 필요한 비상식량 및 비상용품(구급용구, 비상약품 및 위생용품) 관리에 대한 제반절차가 수립되어 있다[5-28]. 운전원들이 원격정지제어반(Remote Shutdown Panel, RSP)으로 이동하여 필요한 조치를 수행한다[5-29]. 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 소내 정전사고 시 사용가능성을 확인하였다. 한빛1,2호기는 비상시에 비상연락, 비상정보교환, 비상활동 지휘 등을 수행하도록 다음과 같은 소내·외 통신설비를 이용한다.

○ 본부 구내설비:

○ 외부 통신설비:

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 완료되었다. 또한, 격납건물의 건전성과 관련하여 격납건물 수소농도의 경우, 발전소 전원상실 시에도 작동성이 보장된 피동촉매형수소재결합기에 의해 제어될 수 있다. 따라서 상기 극한자연재해로 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 이행방법 등 시나리오 전개과정을 가상적으로 상정하여 평가하였다. 또한, 사고대응에 요구되는 설비는 본 보고서 2.4절 평가에서 극한자연재해 시 가용한 것으로 평가된 설비로 한정하였다.

이동형발전차와 견인식디젤발전기는 전원을 공급하기 위한 설비이다. 두 설비는 이내에 전원을 공급하도록 하고 있다. 이동형발전차의 연료탱크 저장량은 공급량이며, 이후분의 연료는 이동형발전차에 탑재되어 있는 연료이송설비(펌프, 케이블, 호스 등)를 통해 현장 도착 후, 수급이 가능하다. 견인식디젤발전기는 보조연료탱크에 운전용량의 연료를 저장하고 있다[5-19 및 5-20]. 또한, 이동형 발전차는 지진이 발생할 때나 지진이 발생하지 않을 때에 비상디젤발전기용 연료를 추가로 사용하여 안전모선에 전원을 공급할 경우 사고발생 시점부터 약 동안 운전이 가능하다. 이동형 발전차의 가용시간에 대한 상세사항은 본 보고서 제 4장 2.2.5절에 기술되어 있다.

확보된 이동형발전차로 전원을 공급하여 통해 원자로냉각재계통으로 냉각수 주입이 가능하며, 통해 증기발생기로 냉각수 주입이 가능하다.

설치가 완료된 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 2차 측의 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

표 5-12에 제시된 바와 같이 극한자연재해 사고환경에서도 다양한 고정형 설비들이 가용하나 이들 중 핵심 대응전략에 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 추진 중인 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.

○ 비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 원자로냉각재계통 1·2차 측 냉각수 주입
○ 이동형발전차를 이용한 냉각수 주입
○ 비상보충수 외부주입설비를 이용한 사용후연료저장조 보충수 주입

#### 2.5.3.1 비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 냉각수 주입

비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 시나리오에 대한 분석 시에도 중대사고관리 진입 후 에 조치가 시작되는 것으로 가정하였

다. [redacted] 동 설비의 성능을 반영하여 분석을 수행하였다. 비상냉각수는 주입 가능 압력까지 감압되는 시점부터 주입되도록 하였다.

[redacted]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 진입온도인 [redacted]에 도달한다. 중대사고관리 진입 후 [redacted]을 통해 1차 측 및 2차 측의 압력을 감압하고, 계통 감압이 수행되는 동안 원자로 비상냉각수 외부주입을 위한 밸브 배열 등을 수행하여 중대사고관리 진입 후 [redacted]에 1차 측 및 2차 측으로 냉각수 주입이 개시된다.

주입된 냉각수에 의해 노심의 열이 제거됨으로써 그림 5-3에서와 같이 노심출구온도가 감소하여 [redacted] 이하로 유지됨을 확인할 수 있다. 그리고 비상냉각수 외부주입이 수행되는 동안에 격납건물 압력은 지속적으로 상승하지만, 증기발생기를 통한 열제거가 적절히 수행되어 그림 5-4에서와 같이 [redacted] 이내에는 격납건물 압력이 [redacted]를 초과하지 않음을 확인할 수 있다.

[redacted] 동안 터빈구동 보조급수펌프 및 비상냉각수 외부주입을 위해 요구되는 냉각수의 양은 그림 5-5에서 제시한 바와 같이 [redacted]으로 평가되었다.

비상냉각수 외부주입 수원은 [redacted]이며, 주입 수원이 고갈되기 전에 [redacted]로 해당 탱크들을 충수한다. 각 수원의 용량은 다음과 같다. 한빛1,2호기 가용수원 용량에 대한 상세사항은 본 보고서 제 4장 표 4-7에 제시되어 있다.

[redacted]

* 물의 밀도 = 0.998207 g/mL (1 atm, 20℃)

비상냉각수 수원으로 사용되는 저장용량이 외부주입을 위한 냉각수 소요량 보다 적으나, 가 고갈될 경우에도 또는 한빛본부 부지 내 를 통해 재충수가 가능하다.

후쿠시마사고 후속조치 일환으로 원자로 비상냉각수 외부 주입유로를 17년 3월에 설치 완료하였으나, 현재 어려움에 따라 이를 개선하기 위하여 MACST(Multi-barrier Accident Coping STrategy) 설계 용역이 진행 중에 있다.

### 2.5.3.2 이동형발전차를 이용한 냉각수 주입

이동형발전차 전원을 이용한 소내 고정형 설비 사용 시나리오에 대한 분석 시 중대사고관리 진입 후 에 조치가 시작되는 것으로 가정하였다. 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입하고, 를 이용하여 격납건물 재순환배수조의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입하는 것이다. 이때 사용되는 이동형발전차는 부지 공용으로 구비되어있는 발전차량으로 한다.

를 이용한 동 분석 결과도 표 5-14에 제시하였다. 노심출구온도가 상승하여 중대사고 진입온도인 에 도달한 후 개방을 통해 원자로냉각재계통의 압력을 감압하고, 중대사고 진입 후 시점에 원자로냉각재계통으로 냉각수 주입이 개시된다.

주입된 냉각수에 의해 노심의 열이 제거됨으로써 그림 5-8에서와 같이 노심출구온도가 감소하여 이하로 유지됨을 확인할 수 있다. 그리고

붕괴열 제거가 이뤄져 그림 5-4에서와 같이 72시간 이내에는 격납건물 파손 압력 를 초과하지 않음을 확인할 수 있다.

#### 2.5.3.3 비상보충수 외부주입설비를 이용한 사용후연료저장조 보충수 주입

본 절에서는 한빛 1호기 사용후연료저장조 비상보충수 신설에 대한 설계변경서[5-30]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 후 사용후연료저장조 온도상승시간 및 수위감소시간을 확인하여 표 5-15에 제시하였다[5-30]. 평가결과, 운전원이 이동형펌프를 이용하여 사용후연료저장조에 비상충수를 수행할 시간이 충분함을 확인하였다.

## 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. 한빛1,2호기의 경우 의 축전지 전원을 사용할 수 있도록 설계되어 있으며, 현재 비필수부하 차단조치로 까지 연장하는 전략을 추진 중에 있다.

○ 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 중대사고 전용 피동촉매형수소재결합기와 설계기준사고 및 중대사고 겸용 피동촉매형수소재결합기를 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 한빛1,2호기의 경우 현재 미 설치되어 있으나 설치를 완료할 계획이다.

○ 원자로 비상냉각수 외부주입유로 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, 현재 한빛1,2호기 모두 원자로 외부 비상주입유로 설치 완료 하였다.

○ 중대사고 교육훈련 강화(4-4)
운전원의 중대사고 관리 능력향상을 위해 호기별 중대사고 특성을 반영한 교육훈련에 대한 기본계획이 수립되어 각 사업소에 통보되었으며, 에 따라 정기적으로 이루어진다.

○ 중대사고 관리지침서 개정(4-5)
사고관리전략 실효성 강화를 위해 원자로공동을 냉각시키기 위한 충수유로 가

용성 및 냉각성능을 평가하여 중대사고 관리지침서에 반영하였고 소외 전원상실 시 중대사고 대응설비들의 생존성을 평가하고 전원 공급을 위한 절차를 반영하여 중대사고 관리지침서를 개정완료 하였다.

○ 정지저출력 중대사고 관리지침서 개발(4-6)

정지저출력 중대사고 관리지침서를 반영한 통합 중대사고 관리지침서(ISAMG)의 개발이 완료 되었으며, 현재 한빛 1,2호기 발전소에서 운영 중에 있다.

○ 중대사고 시 사고대응 및 수습관리를 위한 비상대응거점 확보(추가-2)

중대사고 교육훈련 강화를 바탕으로 사고 시 비상대응거점 확보를 위한 신축공사가 종합설계 진행중에 있으며, 준공될 예정이다.

○ 이동형 디젤구동펌프 확보(4-A1)

이동형 디젤구동펌프는 원자로 비상냉각수 공급, 사용후연료저장조 비상보충수 주입 및 침수지역 배수를 위한 기기로서 한빛본부에 되었다.

○ 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, 대 확보하였다.

## 3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

○ 월성1호기 스트레스테스트

"중대사고 관리능력"과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항[5-32]의 반영여부를 확인한 결과, 표 5-15에서와 같이 안전 개선사항 7건에 대한 8가지 세부사항은 한빛1,2호기 평가에서 자체 안전 개선사항으로 도출되었거나 후쿠시마 후속조치 등으로 수행중인 것으로 검토되었다.

○ 고리1호기 스트레스테스트

"중대사고 관리능력"과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황[5-33]의 반영여부를 확인한 결과, 표 5-17에서와 같이 안전 개선사항 1건에 대한 사항은 한빛1,2호기 평가에서 자체 안전 개선사항으로 도출되어 비상대응 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 이동형펌프를 통해 비상보충수를 충수함으로써 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 중대사고시 격납건물 건전성은 확보되는 것으로 평가되었으나, 추가로 이동형 고유량 펌프를 이용하여 전원상실시 격납건물 내부 살수 기능 및 핵분열생성물 방출제어 기능을 확보할 계획이다. 이는 대형 이동형 발전차를 이용한 살수기능 회복과 더불어 추가로 살수 설비를 확보할 수 있으며, 이를 통한 격납건물 감압 기능을 강화할 수 있다. 해당 이동형 고유량 펌프는 4장의 최종열제거원 복구전략에 사용되는 이동형 고유량 펌프를 공용으로 사용할 예정이다.

다. 원자로공동 중력 충수 유로 확보

격납건물로 주입된 냉각수를 이용한 원자로공동 충수의 유효성을 향상시키기 위하여 기존에 확인된 격납건물 환형구역과 원자로공동 간 덕트 개구부 외에 추가적인 원자로공동 중력 충수 유로를 확보할 계획이다.

## 제4절 결론

한빛1,2호기 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 [redacted] 전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다. 원자로용기 손상 이후에는 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다.

○ 격납건물 건전성 확보 방안

중대사고시 격납건물 건전성 확보를 위해 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지, 수소폭발방지, 격납건물 과압방지, 재임계 방지 및 격납건물 바닥 용융관통 방지 방안을 평가하였다. 격납건물 격리기능은 격리밸브의 고장닫힘(Fail Closed) 설계와 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통해 확보되는 것으로 평가되었다. 격납건물 우회사고의 경우 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통해 격납건물 외부로의 핵분열생성물 방출을 최소화 할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다. 한빛1,2호기는 중대사고에 대처가능한 피동촉매형수소재결합기를 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통한 추가적인 수소폭발 방지 대응능력을 갖추고 있는 것으로 평가되었다. 격납건물 과압방지

의 경우 중대사고관리지침서 에 따라 격납건물 팬 냉각기 및 격납건물 살수계통 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 붕산 희석감시 및 붕산수 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 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 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, 한정하였을 때의 발전소 대응능력을 평가하였다. 평가결과 극한자연재해 및 소내전력이 장기간 상실되어 중대사고가 발생하였을 경우에도

이동형발전차를 통한 소내 전원공급, 그리고 이동형펌프를 이용한 1·2차 측 비상냉각수 주입 전략을 이행함으로써 사고관리 저해요소로 인한 대응능력 한계상황에서도 충분히 대응할 수 있는 것으로 평가되었다.

이상과 같이 한빛1,2호기에 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. 한빛1,2호기 후쿠시마 후속조치 이행사항

5-4. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 주기적안전성평가 보고서

5-5. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 확률론적안전성평가보고서, 2015

5-6. 한국수력원자력(주), [redacted]

5-7. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서

5-8. 원자력안전위원회, 고시 제2017-29호, 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침

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), 한빛1,2호기 중대사고 수소분석 보고서

5-11. IAEA, Safety Reports Series No. 56, “Approaches and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants”, 2008.

5-12. EPRI, TR-016780-V2R8, ‘Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Volume 2, Revision 8: ALWR Evolutionary Plant’, 1999.

5-13. 한국수력원자력(주), [redacted]

5-14. 한국전력기술(주), [redacted]

5-15. 한국수력원자력(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. NRC, SECY-93-087, Policy, “Technical, and licensing Issues Pertaining to Evolutionary and Advanced Light-Water Reactor Designs”, 1993.
5-24. ENSREG, “EU Stress Test Specification”, 2011
5-25. 한국수력원자력(주), “고리1호기 원전 스트레스테스트 수행보고서”, 2013.12.
5-26. EPRI, “Modular Accident Analysis Program (MAAP5.03),” Fauske & Associate, Inc., Vol. 1-4, 2014.
5-27. 한국수력원자력(주), 한빛 1,2호기 정지・저출력 모의용 중대사고해석코드 모델 개발보고서, Rev. 1, 2015.12.
5-28. 한국수력원자력(주),
5-29. 한국수력원자력(주),
5-30. 한국수력원자력(주),
5-31. 한국수력원자력(주), 국내원전 안전점검 개선대책 추진현황 및 관리방안, 2017.09.
5-32. 한국수력원자력(주), 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황, 2017.07
5-33. 한국수력원자력(주), 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황, 2017.07

## 제6절 표, 그림

표 5-1 비상운전절차서 구성

표 5-1 비상운전절차서 구성(계속)

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 피동촉매형수소재결합기 위치 및 용량

표 5-8 사용후연료저장조 운전 상태

표 5-9 사용후연료저장조 냉각수 주입 수단

표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비

표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비(계속)

표 5-10 중대사고 관리전략 이행 설비(계속)

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-11 중대사고 관리전략 이행 보조 설비(계속)

| |
|---|
| |

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

표 5-12 중대사고 관리전략 이행 설비의 위치 및 설계특성(계속)

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 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

표 5-17 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

| |
|---|
| |

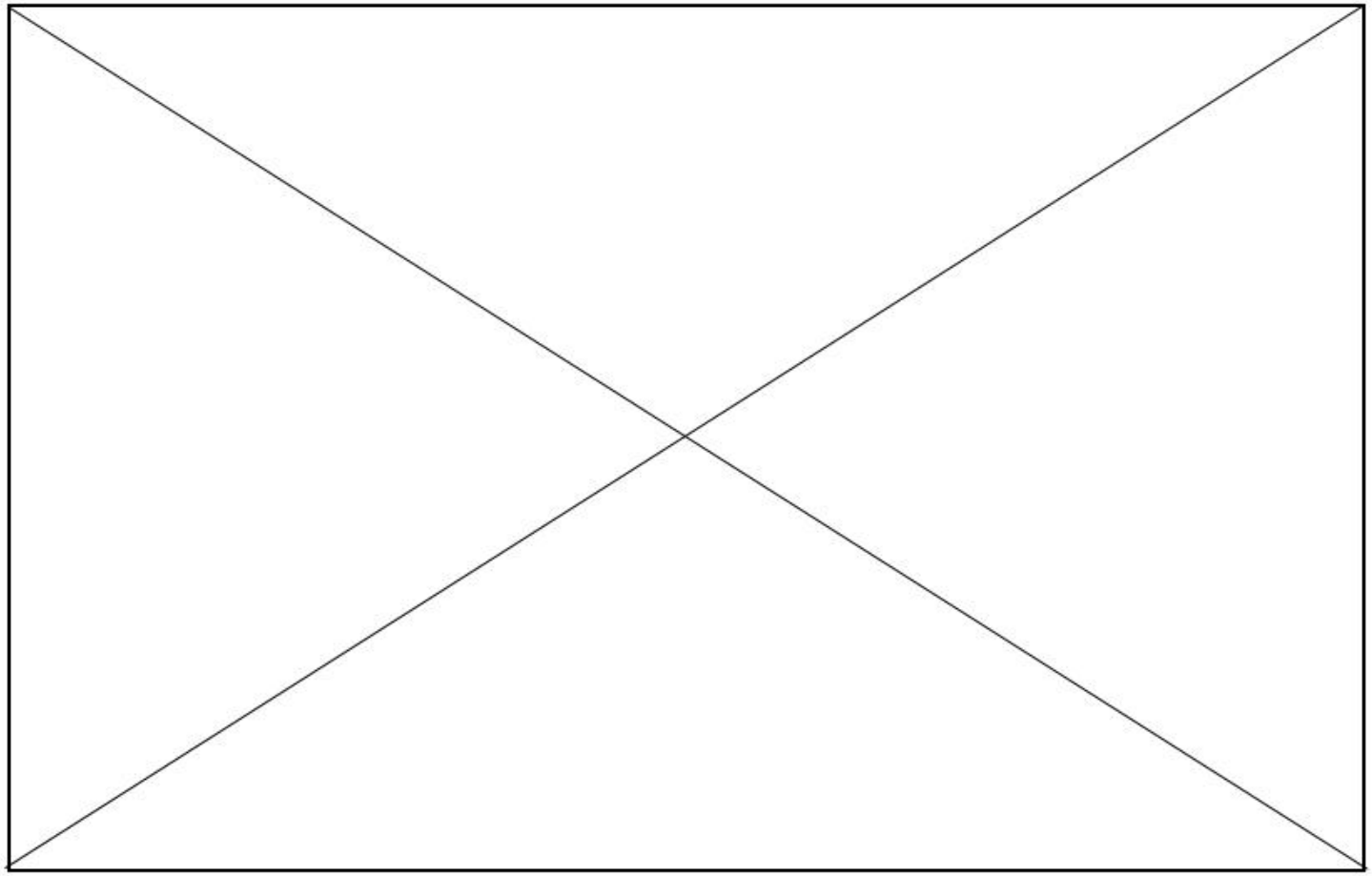


그림 5-1 사용후연료저장조 냉각 계통

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

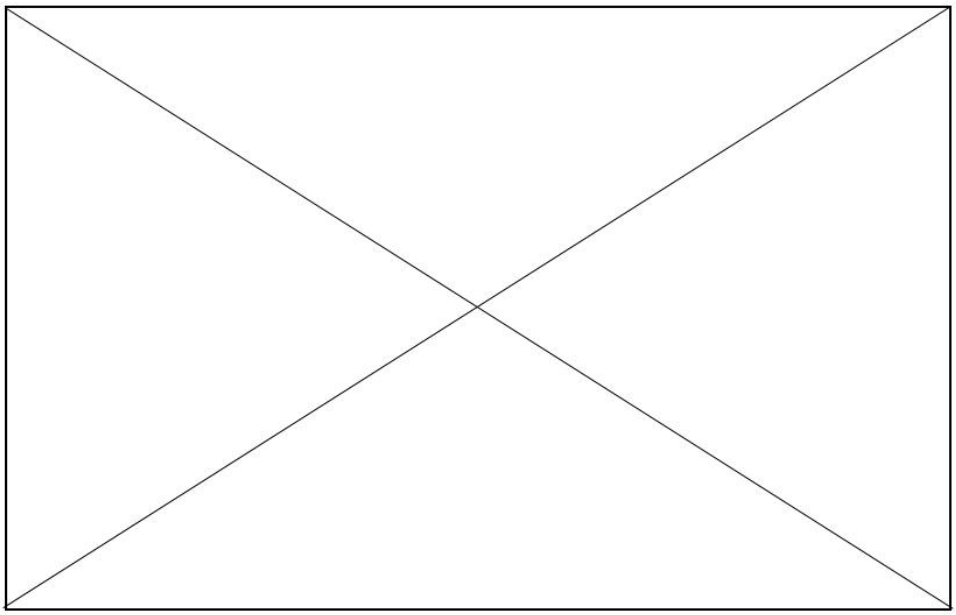


그림 5-7 이동형발전차를 이용한 안전주입계통 작동에 따른 격납건물 압력 변화

# 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 소내정전 사고를 고려한 통신체계 건전성 ····· 10
2.1.5 장기 소내정전사고를 고려한 원전정보 전송시스템 건전성 ····· 12
2.1.6 장기 소내정전 사고를 고려한 방사선비상발령기준 적절성 ····· 13
2.1.7 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시능력 적절성 ····· 15
2.2 의사결정 적절성 ····· 18
2.2.1 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무 적절성 ····· 18
2.2.2 다수호기 사고 시 비상조직, 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성 ····· 22
2.3 비상대응시설 거주성 ····· 25
2.3.1 거주성 확보를 위한 비상대응 시설 별 설비 ····· 25
2.3.2 비상대응시설 거주성 상실시 비상대응능력 유지 가능성 ····· 28
2.4 한빛1,2호기 차이점 ····· 29

제3절 안전 개선사항 ····· 29
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 29
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인 ····· 30
3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 31

제4절 결론 ····· 31

제5절 참고문헌 ····· 33

제6절 표, 그림 ····· 35

# 표, 그림

표 6-1 S-REDAP 메뉴 및 기능 ····· 35
표 6-2 출입통제소 운영 위치 ····· 36
표 6-3 한빛본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황 ····· 37
표 6-4 한빛본부 비상대응시설 방사선측정기 확보현황 ····· 38
표 6-5 고리본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황 ····· 39
표 6-6 한빛본부 소내 비상통신설비 ····· 40
표 6-7 유관기관 비상통신설비 ····· 40
표 6-8 한빛본부 고정형 환경방사선감시설비의 방사선검출기 모델 및 규격 ····· 41
표 6-9 환경방사선감시기(ERMS) 설치지점 ····· 42
표 6-10 이동형환경감시차량(EMV)의 구비 장비 ····· 43
표 6-11 한빛1,2호기 비상대응 프로그램 ····· 44
표 6-12 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인 ····· 47
표 6-13 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인 ····· 48

그림 6-1 S-REDAP 프로그램 개략도 ····· 49
그림 6-2 한빛1,2호기 백색비상 발령 상황 7번 ····· 50
그림 6-3 한빛1,2호기 백색비상 발령 상황 8번 ····· 51
그림 6-4 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 5번 ····· 52
그림 6-5 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 6번 ····· 53
그림 6-6 한빛1,2호기 적색비상 발령 상황 5D번 ····· 54
그림 6-7 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 9번 ····· 55
그림 6-8 한빛본부 환경방사선감시기(ERMS) 설치 위치도 ····· 56
그림 6-9 한빛본부 환경감시용 열형광선량계(TLD) 설치 위치도 ····· 57
그림 6-10 한빛1,2호기 비상대응 프로그램의 연관성 ····· 58
그림 6-11 2개호기 동시 비상발령 시 비상조직 ····· 59
그림 6-12 3개호기 이상 동시 비상발령 시 비상조직 ····· 59

## 제1절 개요

방재 및 비상대응능력 평가는 한빛1,2호기가 극한 자연재해 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.

○ 극한 자연재해에 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 소내정전 사고를 고려하여 통신체계의 건전성, 원전 정보전송 시스템의 건전성 및 방사선 비상발령기준의 적절성
○ 극한 자연재해에 의한 다수호기 동시 중대사고 발생 시 환경방사선·능 감시능력의 적절성
○ AOP, EOP, EP 및 SAMG의 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성
○ 다수호기 사고 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

극한 자연재해로 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 최신기술이 반영된 중대사고 선원항 및 대기확산 모델을 사용하여 주민예상

피폭선량을 평가할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 본 절에서는 주민예상피폭선량을 예측하는 전산프로그램의 적절성과 이를 운영하는 비상요원의 전문성을 중심으로 주민예상피폭선량평가 능력을 평가하였다.

#### 2.1.1.1 주민예상피폭선량 평가 프로그램

한빛본부는 방사선 비상대응 선량평가 통합시스템(S-REDAP, Smart Radiological Emergency Dose Assessment Program) 프로그램을 사용하여 방사능비상 사고 시 환경으로 방출되는 방사선원항을 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 비상기술지원실(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 [redacted] 구성된다. S-REDAP 시스템 구성도는 그림 6-1과 같다[6-2].

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, 방사성물질의 방출 및 확산에 따라 선량을 예측하여 평가하는 방법으로 나뉜다. 발전소별로 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 냉각재상실사고 등의 사고 시 노심재고량과 노심손상유형별 손상도, 공학적안전설비 저감화율, 방출률 등을 고려하여 방사선원항을 평가한다. S-REDAP은 중대사고 방사선원항으로 NUREG-1935 보고서와 NUREG/CR-7110 V-2을 참조하여 LTSBO(Long Term Station Black Out) 시나리오에 기초한 사고 방사선원항을 이용한다. LTSBO 시나리오는 발전소 내 및 소외 교류전원이 완전 상실되고 직류배터리 전원으로 비상조치 수행 중 직류배터리가 고갈되는 사고를 의미한다. S-REDAP은 사용후연료저장조 사고시 NUREG-1741에 기반하여 사용후연료저장조의 핵연료가 노출된 후 2시간이 경과되면 피복관이 파손된다는 것을 가정하여 사용후연료저장조 방사선원항을 평가한다.

또한 S-REDAP은 다수호기 사고에 대해 발전소 현황자료를 이용하여 평가한다. 예를 들어, 2개호기 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 한빛본부 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 방사선평가조가 평가를 수행한다[6-5, 2.2절].

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, 한빛본부는 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, 8.4절]. 이때 전산프로그램의 운영요원은 주민예상피폭선량을 한빛본부 방사

선비상계획 수행절차서에 따라 평가를 수행한다[6-3, 6.18절].

주민예상피폭선량 전산프로그램의 상세한 사용 절차와 계산 방법은 방사선비상계획 수행절차서에 명시되어 있으며 전산프로그램 운영요원은 사용자 교육을 통하여 프로그램 사용방법을 습득한다[6-2]. 또한, 방사선비상계획 수행절차서에 주민예상피폭선량 전산프로그램 평가 운영요원의 담당 부서를 명시하고 있다[6-3, 6.4절]. 한빛본부는 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

한빛본부는 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 한빛본부 방사선비상계획 수행절차서는 유효선량 수계산 절차를 제시하고 있지 않으므로 추후 월성본부 방사선비상계획 수행절차서를 참조하여 한빛본부 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 한빛본부는 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 주제어실 안전차장, 상황조장은 대피범위와 장소가 결정되는 즉시 소내방송망을 통하여 안내방송을 실시한다. 일시출입자 및 방문자는 귀가하며 근무자는 각 사무실로 집결한다. 청색비상 발령 시에는 상황반 운영조장(비상대책실 발족 전 기술지원반 상황조장)은 비상방송망을 통해 대피 안내방송을 한다. 적색비상이 발령되었을 때는 상황반 운영조장(비상대책실 발족 전 기술지원반 상황조장)은 대피 혹은 소개 안내방송을 실시하며 비상대책실장은 지역방사능방재대책본부 또는 현장지휘센터와 협조하여 소개/대피 계획을 수립하여 비상대책본부장의 승인을 받는다[6-3, 6-10절]. 이러한 일련의 조치를 통하여 비상대응인원 이외의 인원을 대피 및 소개시킴으로서 적절한 방호조치가 취해질 수 있다.

○ 출입통제

백색비상, 청색비상, 적색비상에 따라 인력방호를 위해 운영되는 출입통제소는 표 6-2에 제시되어 있다. 백색비상 시 청경대장(반장)은 사고호기 주제어실, 비상기술지원실, 비상운영지원실 입구에, 청색·적색 비상시에는 비상대책실(환경실험실 포함) 입구에 청경 1명씩을 배치하고 발전소 정문 및 본부 정·후문 지역 근무자는 차량과 사람의 출입을 통제한다. 적색비상 발령 시 발전소 정문근무자는 본부 정·후문으로 철수하여 옥내대피하며 주민소개 조치 시는 청경대장의 지시에 따라 교통통제소로 이동하며 나머지 근무자는 지역방사능방재대책본부 사고수습인력 숙영지(영광군/고창군 지정 발전소 종사자 대기 장소)로 이동한다[6-3, 6.8절].

○ 잔류자 수색 구조 및 의료활동

초기비상조직 방사선대책조원은 인원점검 후 잔류자 발생이 파악되면 비상운영지원실 소화구호조에 보고한다. 소화구호조장은 수색 및 구조팀을 선정하며 방사선관리구역 수색 및 구조팀 수행절차를 수행한다[6-3, 6.10절]. 비상 발령 시 비상의료지원센터(REMC)를 “현장방사선비상진료소”로 전환하여 응급의료구호 업무를 수행하며, 의료반장 아래 의료조를 편성하여 운영한다. 적절한 응급조치 및 응급의료 수행 후 필요시 의료기관으로 이송한다[6-3, 6.11절].

○ 피폭관리

방사선 비상시 원전부지내(부지외부 환경방사선 탐사요원 포함) 비상 요원 및 지원요원들은 열형광선량계(TLD) 및 자동선량계(ADR)를 착용해야 한다. 긴급작업종사자를 제외한 방사선비상요원 및 지원요원은 “방사선작업종사자” 선량한도를 초과하지 않도록 관리된다. 긴급작업 등을 위한 방사선관리구역 출입자는 긴급작업 동의 및 승인서를 작성하여 비상기술지원실장 또는 대리자의 승인을 받는다[6-3, 6.6절].

○ 갑상선방호약품 관리

갑상선방호약품(옥소제)은 비상대응시설의 비상장구함에 갑상선방호약품 비축기준(  )에 따라 보관된다. 옥소제의 복용은 선량측정결과나 예상 선량률에 따라 방사선평가반장이 복용을 권고하며 원전종사자는 비상대책본부장의 결정에 따라 복용한다. 긴급작업자 등의 경우 갑상선흡수선량이 100 mGy 이상으로 예상될 때 비상기술지원실장의 결정에 따라 복용한다[6-3, 6.12절].

○ 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. 6.14절].

상기와 같은 인력방호조치를 통하여 방사선비상 후 비상대응요원 이외의 소내 인원을 대피시키고 출입을 통제함으로써 불필요한 피폭을 최소화할 수 있다.

### 2.1.2.2 방호장비 지원

한빛본부는 다수호기 동시사고 등의 비상발령 시 자체 인력이외에 본사 비상대책지원본부, 타 원자력본부 및 특수사업소와 중앙방사능방재대책본부 및 지역방사능방재대책본부의 지원을 받는다[6-5, 2.3절, 2.5절]. 한빛본부는 자체 비상요원 및 외부 지원인력에 대한 방사선방호장비를 비상대응시설별로 확보하여 지원하고 있다. 한빛본부의 비상대응시설은 비상대책본부 내 비상대책실(EOF)과 발전소 별로 비상기술지원실(TSC), 비상운영지원실(OSC) 등이 설치·운영되고 있다[6-3, 6.23절]. 비상대응시설 이외에 출입통제소에 비상장구함이 설치되어 방호장비가 보관되어 있다. 시설별로 확보된 방호장비 현황 및 극한 자연재해 시 장비 이용가능성

은 다음과 같다.

○ 방호장비 현황

한빛본부는 비상대응시설별 방호용품 및 방사선측정기의 정수를 설정하고 정수이상의 방호장비를 보관하고 있다. 비상대책실, 환경실험실에 비치된 방호장비는 방재대책팀, 본부 정·후문의 출입통제소의 방호장비는 방호보안팀이 관리하고 있으며, 주제어실, 비상기술지원실, 비상운영지원실에 비치된 방호장구는 각 발전소의 방사선안전팀이 유지관리하고 있다[6-3, 6.23절]. 한빛본부는 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 한빛본부는 비상시 인력지원에 충분한 방호용품 및 방사선계측기를 확보하고 있다.

○ 장비 이용가능성

비상대응시설 중 비상대책실은 비상시 발전소 대응활동을 총괄하는 곳으로 한 침수영향을 받지 않는다. 또한 한빛본부는 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, 한빛 1,2호기 위치한다. 비상기술지원실이 있는 제어건물은 내진성능 로서 지진, 태풍, 홍수 등을 발전소 수명기간 동안 견딜 수 있는 구조로 설계되었다. 따라서 비상기술지원실에 보관된 방호용품 및 비상장구는 극한자연재해 시에도 이용가능하다.

비상운영지원실은 비상기술지원실 및 비상대책실과의 협조체제를 구축하고 비상대응활동을 지원하는 목적을 가진다. 한빛1,2호기의 비상운영지원실은 1,2호기 위치하며, 구조물은 국내 건축기준에 따라 태풍, 홍수 등에 견딜 수 있는 구조로 설계되었다.

주제어실은 발전소 운전상태를 감시하고 제어하며 사고를 완화시키는 비상조치를 수행하는 발전소의 가장 중요한 설비다. 주제어실은 위치하며, 내진성능은 이상이고 에 위치하므로 부지에 가능한 최대

강우, 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 한빛본부에서 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 동시사고 시 인력 방호 능력

한빛본부 방사선비상계획서[6-5, 6.4절]에 따르면 극한 자연재해 등에 의한 다수호기 동시 비상발령 시에도 선행호기(한빛1,3,5호기) 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 분장 이외에는 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 동시사고 시 대처하기에 충분한 수량이 확보되어 있다.

### 2.1.3 타부지 지원 인력 및 장비를 통한 대응 능력

극한 자연재해로 인한 다수호기 동시사고 등의 상황에서는 타부지 및 외부기관으로부터 인력과 장비를 지원받는다. 극한자연재해 시 한빛부지 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

한빛본부는 극한 자연재해로 인하여 다수호기에서 동시에 사고가 발생하는 상황에서 타부지 및 외부지원 기관으로부터 아래와 같이 비상인력 및 비상장비 등을 갖추고 있다.

본사 비상대책지원본부는 방사선비상 사고 발생 시 사고수습 및 확대방지를 위한 지원과 비상상황의 종합관리를 수행한다[6-5, 2.3절]. 그리고 한빛본부의 비상대책본부장은 필요 시 타 원자력본부, 방사선보건원에 비상인력, 비상장비 및 차량 등

물자, 의료지원인력 등의 지원을 요청한다[6-5, 2.3절].

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, 6.13절].

한빛본부는 타부지 중에서 가장 근거리에 위치한 고리본부로부터 비상인력 및 비상장비 지원을 최우선적으로 받을 수 있다. 고리본부 역시 후쿠시마 후속조치인 "장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보"의 이행결과에 따라 비상요원의 정수와 비교하여 충분한 방호용품을 확보하고 있기 때문에 한빛본부로 지원이 가능하다. 고리본부에 확보된 비상대응시설별 방호용품은 표 6-5에 제시되어 있다. 또한, 고리본부는 이동형 환경방사선감시기(P-ERMS)와 이동형환경감시차량(EMV)을 이미 확보하여 운영하고 있으므로 비상시 한빛본부를 지원할 수 있다.

한수원(주)은 중대사고, 극한 재해, 다수호기 동시사고 등 발생 시 이를 지원하기 위하여 중대사고 비상대응전문가팀(SAFE-T)을 운영하고 있다. 비상대응 전문가팀은 규모로 구성되며 평시에는 중앙연구원에 소속되어 있다가 사고 발생 후 현장 및 본사의 비상기술지원 요청 시 사고대응기술팀장에 의해 호출되어 내에 발전소 현장에 도착한다. SAFE-T 팀원들은 발전소의 사고관리 전략수행 지원, 비상대처설비 운영 및 대체계측 수행 등을 지원한다[6-7].

상기와 같이 한빛본부는 다수호기 동시사고 등의 비상상황 시 타부지 및 본사로부터 사고대처에 필요한 인력 및 장비를 지원받을 수 있다.

### 2.1.3.2 한빛 부지로의 접근성 평가

타부지 및 외부지원 기관으로부터 한빛부지로의 접근성은 다음과 같이 평가되었다.

설계기준 초과 지진이 발생하더라도 교량과 사면 등이 존재하지 않아 한빛 발전소로의 접근성은 확보된다. 단, 지진 등으로 인한 부분적인 도로 파손이 발생할 경우 해당 도로의 관리주체인 국가 또는 지자체가 복구한다.

소내 지역의 접근성은 한빛본부가 자체적으로 확보할 계획이다. 한빛본부는

년까지 포크레인 또는 대형 트랙터와 같은 중장비와 운영인원을 확보할 예정으로 있어 소내 지역 접근성 확보가 용이하도록 할 예정이다.

상기와 같이 극한자연재해가 발생하더라도 한빛1,2호기는 타부지 및 외부지원 기관으로부터 비상요원 및 비상장비를 지원받을 수 있다.

극한자연재해가 타부지 및 외부지원 기관에도 영향을 주어 한빛부지에 대한 지원이 원활하지 못하게 될 수 있다. 이러한 경우에도 앞서 기술한 바와 같이 한빛본부는 자체 보유한 방호장비의 수량이 충분하여 소내 인원에 대한 방호가 가능하다. 극한자연재해 발생시 한수원은 사고관리 대응전략(MACST)으로 [redacted]까지는 소내 설비를 이용하여 대응하는 전략[6-30]을 구축하고 있으므로 소외 인력과 장비의 접근로 확보 시간에는 충분한 것으로 평가되었다.

### 2.1.4 장기 소내정전 사고를 고려한 통신체계 건전성

본 절에서는 비상통신설비의 현황을 확인하고 장기 소내정전 사고 시 사용가능성을 확인 및 평가하였다.

#### 2.1.4.1 비상통신설비 현황

한빛1,2호기는 비상시에 비상연락, 비상정보교환, 비상활동 지휘 등을 신속하고 효과적으로 수행할 수 있도록 다음에 제시된 통신설비를 이용한다[6-5, 7.5절, 6-8].

○ 본부 구내설비

- [redacted] :

- [redacted] :

- 팩시밀리 : [redacted]

- [redacted] : [redacted]

본부 내 비상통신설비 현황은 표 6-6에 제시되어 있다.

본부에서 본사 및 타발전소와는 직통(HL), 사선, 국선전화, 팩시밀리, 인터넷을 이용하여 통신한다. 본부에서 지역방사능방재대책본부 등의 대외기관과의 통신은 전용전화, 국선전화, 위성전화, 팩시밀리, 인터넷을 이용한다. 비상대응시설에는 인터넷이 연결되어 비상시 보고를 규제기관의 원자력비상대응정보교환시스템(ERIX, Emergency Response Information eXchange System)을 통하여 수행할 수 있다. 대외기관과의 통신설비는 표 6-7에 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 원전 주변 [redacted]이내 주민에게 주민보호조치 방송을 하고 지방자치단체(영광군, 고창군)에 즉시 통보한다[6-5, 5.2절].

### 2.1.4.2 장기 소내정전사고 시 통신체계

소내정전(비상디젤발전기 정전포함) 발생 시에도 소내에 설치된 사선/국선 교환기와 인터넷 중계기는 무정전전원공급장치(UPS)의 배터리를 이용하여 [redacted] 동안 사용이 가능하다.

비상대책실에는 UPS와 비상디젤발전기가 설치되어 있어서 장기 소내정전이 발생하고 비상대책실까지 정전되는 경우에도 비상대책실의 통신설비를 사용할 수 있다. 또한 소내와의 통신이 단절되는 경우를 대비하여 비상대책실에는 소내와의 통신을 위한 위성전화가 설치되어 있다.

한빛본부는 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 한빛본부는 최악의 극한 재해 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 대응 방안을 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

한빛1,2호기는 소내전산기 설비에 안전정보표시계통(SPDS)의 기능을 포함한다. 안전정보표시계통(SPDS)은 소내전산기의 기능 중 하나이며, 비상대응시설에서 비상요원들이 비상활동을 수행하기 위해 필요한 에도 데이터를 제공하고 있다[6-5, 7.1절].

#### 2.1.5.2 소내정전사고 시 원전정보 전송시스템

소내정전사고 시 초기 동안 무정전전원공급장치를 통하여 안전정보표시계통(SPDS)의 기능을 수행할 수 있으며, 이후 120/208V 견인식디젤발전기[6-10]와 4.16 kV 이동형발전차[6-11]가 연결되면 비상전원을 공급하여 필수안전변수 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 안전정보표시계통(SPDS)을 구동할 수 있다. 그러나 소내정전이 장기간 계속되어 무정전전원공급장치가 고갈될 경우, 주제어실로부터 위성전화를 통하여 필요한 정보를 전달받을 수 있다.

주민보호 조치에 필요한 발전소의 필수안전변수를 비상대응조직에 지속적으로 제공할 수 있도록 한빛본부는 현재 120/208V 견인식디젤발전기를 본부당 씩 운영하고 있다.

### 2.1.6 장기 소내정전 사고를 고려한 방사선비상발령기준 적절성

장기 소내정전 사고가 발생할 경우, 방사선비상 발령 조건에 해당하는 경보를 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 소내정전 사고가 발생하여 방사선 비상발령 조건에 해당하는 경보를 확인하기 어려운 경우에 각 비상발령기준이 적절하게 설정되어 있는지를 평가하였다.

1) 백색비상
한빛본부 방사선비상계획서[6-5, 4.2.2절]에 따르면, 전원 상실에 의한 한빛1,2호기의 백색비상 발령은 다음과 같다.

○ : 
○ :

소내정전 사고 시 에 의하여 즉시 백색비상이 발령되므로 한빛1,2호기의 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.

○ :
○ :

소내정전 사고가 이상 지속되면 에 의해 청색비상이 발령되므로 한빛1,2호기의 장기 소내정전 사고 시 청색비상발령 기준은 적절하다. 의 발생논리는 그림 6-4 및 그림 6-5와 같다.

3) 적색비상

장기 소내정전 사고와 관련된 한빛1,2호기의 적색비상 발령 기준은 다음과 같다.

○ [redacted] :

[redacted] :

그림 6-6은 한빛1,2호기 [redacted]의 발생논리를 보여준다.

상기와 같이 한빛1,2호기는 소내정전 사고가 발생하면 즉시 백색비상이 발령되며, 소내정전이 [redacted]이상 지속되면 청색비상이 발령되고, 장기 소내정전 사고 시 [redacted]를 확인하여 적색비상을 발령할 수 있다. 따라서 한빛본부는 장기 소내정전 사고 시에도 적절히 비상을 발령할 수 있다.

### 2.1.6.2 비상발령권자와의 의사소통 적절성

비상대책실에는 무정전전원공급장치(UPS)와 비상디젤발전기가 설치되어 있어서 장기 정전 시 비상대책실의 통신설비를 사용할 수 있다. 안전정보표시계통(SPDS)의 안전성관련 정보는 주제어실에서 이동형발전차량의 전원을 공급받아 확인할 수 있으며 이를 위성전화로 비상대책실 및 비상기술지원실에 전달할 수 있다. 따라서 장기 소내정전 사고 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 [redacted]에서 사용후 연료저장조에 대한 방사선 감시기(GG-RE-113)의 지시치가 [redacted] 이상이면 백색비상을 발령한다. [redacted]에서 사용후연료 집합체의 낙하사고 이후 연료취급건물 에서 사용후연료저장조 감시기(GG-RE-113)나 연료건물 배기 감시기(GG-RE-213)에서 [redacted] 경우 백색비상을 발령한다. [redacted]에서는 연료건물 배기

감시기(GG-RE-213)가 [redacted]간 방사성물질이 유출되었을 경우 백색비상을 발령한다.

사용후연료저장조의 백색비상은 소내정전이 발생할 경우 [redacted]에 의하여 백색비상이 발령된다. 따라서 장기 소내정전 사고 시 사용후연료저장조에 대한 백색비상 발령 기준은 적절하다.

또한 백색비상 발령 상황과 같이 소내정전이 [redacted] 이상 지속될 경우 [redacted]에 의하여 청색비상이 발령된다. 따라서 소내정전으로 사용후연료저장조의 냉각기능 상실 시 청색비상이 조기 발령되므로 장기 소내정전 사고 시 사용후연료저장조에 대한 청색비상 발령 기준은 적절하다.

청색비상은 [redacted]에서 사용후연료 낙하사고가 발생하거나 [redacted] 청색비상이 발령된다. [redacted]의 발생논리는 그림 6-7에 제시된다.

청색비상 발령 기준은 [redacted]의 계측값이다. 사용후연료저장조의 수위는 냉각기능 상실의 지표가 될 수는 있으나 냉각기능 상실에 의하여 [redacted]보다 낮아지려면 상당한 시간이 필요하다. 사용후연료저장조의 수위가 낮아져서 연료가 노출되기까지는 정상 연료 장전상태 시 [redacted]시간, 재장전을 위해 전 노심이 인출된 상태에서는 [redacted]시간, 재장전 후 출력상승 중 비정상 상황이 발생하여 전 노심이 다시 인출되는 상황에서도 [redacted] 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 연료봉이 공기중에 노출될 경우 사용후연료 용융이 발생할 수 있으므로 장기 소내정전 사고 시 사용후연료저장조의 수위를 감시하여 적색비상을 발령할 수 있도록 방사선비상계획서의 개정이 필요하다. 한수원(주)은 NEI 12-02에 제시된 사용후연료저장조 적색비상 발령 조건을 국내 원전에 적용하여 2017년 7월에 고리본부 방사선비상계획서의 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

한빛본부의 환경방사선감시시스템(Environmental Radiation Monitoring System, 이하 ERMS)은 원전주변 및 주요 지점에 설치된 방사선검출기를 이용하여 환경방사선량률을 측정하고 주변 기기들의 운전상태에 관한 데이터를 전송, 처리 및 저장하는 설비로 현장감시소와 ERMS 서버시스템으로 구성된다[6-12]. ERMS가 설치된 현장감시소는 환경방사선 준위를 감시하기 위해 방위 및 거리별로 이 지정되었으며[6-5, 그림 2.1], 방사선검출기를 통해 공간선량률을 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[6-12]. 또한 한빛본부는 부지주변 에 열형광선량계(TLD)를 설치하여 운영하고 있다. 열형광선량계를 이용하면 해당지점의 누적선량을 평가할 수 있다. 표 6-8에 환경방사선감시기(ERMS)의 모델 및 규격이 표 6-9에 환경방사선감시기 설치위치가 제시되어 있다. 그림 6-8에 환경방사선감시기 설치위치가 6-9에 환경감시용 열형광선량계(TLD) 설치위치가 제시되어 있다.

2) 이동형 감시설비

한빛본부는 고정형 환경방사선감시설비인 ERMS가 고장으로 인한 연속감시가 불가능할 경우를 대비하여 이동형 환경방사선감시설비(Portable Environmental Radiation Monitoring System, 이하 P-ERMS)를 운영하고 있다[6-13]. 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, 측

정된 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 이동형환경감시차량(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.

한빛본부는 방사선감시기 등의 장비를 갖추고 이동하면서 환경방사선 측정결과를 실시간으로 환경실험실로 전송하는 기능을 보유한 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. EMV는 방사선측정장비, 휴대용 감마핵종분석기, 표면오염도 측정기, 휴대용 계측기 등의 계측설비와 측정지역의 풍향, 풍속, 온도, 습도를 측정하는 휴대용 기상관측설비, 자료처리용 컴퓨터 및 무선통신장치 등을 구비하고 있다[6-14]. EMV의 방사선 검출기 및 장비 교정은 1년에 1회, 통신 점검을 포함한 설비 점검은 매월 1회 수행한다[6-14]. EMV는 구비 장비는 표 6-10에 제시되어 있다.

3) 환경방사능실험실

환경방사선·능의 분석 및 측정은 환경방사능실험실에서 수행한다. 환경방사능실험실은 국내 건축기준에 따라 설계, 건축된 콘크리트 건물이다[6-5, 7.1절]. 환경방사능실험실에는 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 조선대학교로 이동하여 분석을 수행한다. 또한, 예비환경방사능실험실로의 이동은 방사선비상계획 수행절차서에 따라 수행하며 방사능 방재훈련을 통해 교육훈련을 시행한다[6-3, 6.21절].

### 2.1.7.2 극한자연재해 시 환경방사선·능 감시능력 적절성

한빛본부는 방사선비상계획수행절차서[6-3, 6.15절]에 방사선비상시 환경방사선·능 감시 및 평가계획을 제시하고 있다. 백색비상 발령 후 환경방사능파트장(환경감시조장)은 합동방사선감시센터가 정상적인 비상활동을 수행하기 전까지 환경감시조

를 편성하여 한시적으로 운영하며 비상확대 및 장기화에 대비하여 타 원전에 환경탐사조원 및 장비지원을 요청한다. 공간선량률은 ERMS를 이용하거나 휴대용 계측기를 이용하여 측정한다. 청색·적색 비상발령으로 현장지휘센터가 발족되면 EMV를 포함한 방재인력은 합동방사선감시센터 발족 전까지의 상황에 대해 보고하고 합동방사선감시센터에 편입된다. 필요 시 합동방사선감시센터는 타 원전에 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 방사성물질 누출량을 제대로 파악할 수 없었다. 극한자연재해 발생 시 한빛본부의 고정형 감시설비인 ERMS와 부지주변에 설치된 열형광선량계(TLD) 및 부지 기상탑 등이 그 기능을 상실할 가능성이 있다.

그러나 한빛본부는 방사선비상시 EMV를 운영함으로서 고정형 감시설비의 기능 상실에 대처할 수 있다. 이동환경감시차량은 자체 통신설비를 갖추고 있으며 통신설비의 불능 시 무전기와 위성전화등을 사용하여 비상대응시설과 통신한다. 환경방사능실험실도 극한 자연재해 발생 시 거주성을 상실할 수 있으나, 거주성이 상실될 경우 방사선비상계획수행절차서에 따라 예비환경방사능 실험실인 조선대학교로 이동하여 분석을 수행한다. 다수호기 동시사고가 발생하여 감시 인력이 부족할 경우 타 원전에 지원을 요청한다.

따라서 극한 자연재해에 의한 다수호기 동시사고 발생 시에도 한빛1,2호기의 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 중대사고관리지침서(SAMG)의 상호연계성을 고려한 의사결정권자의 책임 및 임무의 적절성을 평가하였다.

#### 2.2.1.1 절차서간의 상호 연계성

한빛1,2호기는 사고 발생 시 사고 영향을 완화하고 발전소를 안정된 상태로 유지하기 위한 비상대응 프로그램으로 초기 단계에 적용하는 비정상운전절차서(AOP)[6-15], 원자로 트립 이후 적용되는 비상운전절차서(EOP)[6-16], 중대사고에 적용하는 중대사고관지리지침서(SAMG)[6-17]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.

한빛1,2호기의 비상운전절차서는 다음과 같은 두 가지 조건 중 어느 하나에 해당할 경우에 진입한다[6-16].

○

○

비상운전절차서는 발전소 상태의 안정에 따라 비상운전절차서가 아닌 발전소 운전절차서로 전환하거나, 혹은 잔열제거계통에 의해 저온정지 상태를 유지하거나, 저온관 또는 고온관 재순환에 의한 장기냉각운전을 통하여 수행이 종료된다. 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.

○

중대사고관리지침서 단계에서는 중대사고 관리전략으로 전원공급 불만족 시 비상전원공급절차를 수행하며 노심의 냉각상태와 격납건물 압력/온도, 격납건물 수소농도 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.

○

○

○

○

○

비상대체설비운영절차서는 비상운전절차서를 이용한 사고관리를 수행하는 중 교류전원 완전상실(SBO) 발생과 동시에 대체교류 디젤발전기(AAC DG)의 이용이 불가능할 경우 적용한다. 비상대체설비는 견인식디젤발전기와 4.16 kV 이동형발전차 및 외부 냉각수 주입을 위한 이동형펌프가 있다. 견인식디젤발전기는 발전소감시계통(PMS)에 별도 비상전원을 보강하기 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 비상의 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.

한빛1,2호기의 사고관리는 사고의 진행에 따라 비정상운전절차서, 비상운전절차서, 중대사고관리지침서로 이어지며 관리된다. 각 절차서에서 조치내용이 불만족 시 타 절차서를 수행하기 때문에 절차서 간의 중복이나 불일치 사항은 없다. 방사선비상 등의 방사선비상계획서와의 연계사항도 절차서에 명확히 명시되어 있다. 따라서 한빛1,2호기 사고관리 관련 절차서에서 제시하는 비상조치·이행전략 간의 불일치사항은 없으며 각 절차서는 적절히 연계되어 있다.

### 2.2.1.2 의사결정권자의 책임 및 임무 적절성

표 6-11에 한빛1,2호기 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[6-18]. 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[6-5, 6.1절]. 비상대책본부장의 의사결정을 지원하기 위하여 의 비상대책보좌역( )이[6-3, 6.4절] 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 발전차 및 견인식디젤발전기[6-11]에 관한 제반사항의 책임은 발전팀장에게 있다[6-12]. 그러나 비상대체설비의 경우 비상 시 운영의 책임은 최종의사결정권자에게 있으므로 백색비상 이전에는 발전팀장이 백색비상 이후에는 비상기술지원실장이 모든 비상대체설비의 최종의사결정권자가된다.

상기한 바와 같이 각각의 절차서에는 비상조치, 사용설비, 이행조직, 의사결정권자 등이 기술되어 있다. 또한, 절차서별로 사용이 겹쳐지는 시기가 없기 때문에 의사결정의 충돌은 일어나지 않는다.

따라서 한빛1,2호기의 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[6-19]. 상기 규정에 따라 한빛본부 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 동시사고 시에도 사고초기에는 비상운전반장(발전팀장)은 비상기술지원실이 발족되기 전까지 최초 비상발령을 비롯한 비상대응조치를 수행하며 사고관리업무를 총괄한다.

극한자연재해 시 한빛1,2호기는 다음과 같이 백색 또는 청색비상을 발령할 수 있다.

○ [redacted] : [redacted]

○ [redacted] : [redacted]

한빛본부의 다수호기 동시 비상발령 시 비상조직은 초기에는 선행호기(한빛1,3,5호기) [redacted]

비상대응시설에서 임무를 수행한다. 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 한빛본부는 다수호기 동시 비상발령 시 비상대책본부, 비상기술지원실, 비상운전반으로 이어지는 사고관리체계를 가지고 있으며, 비상대책본부에서 방재상황을 총괄한다. 따라서 한빛본부의 다수호기 동시사고 시 의사결정권자의 책임 및 임무는 적절한 것으로 판단되었다.

#### 2.2.2.2 교육 및 훈련계획

한빛1,2호기 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 포함한 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[6-20]. 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[6-21]. 중대사고 관리책임자인 발전소장(비상기술지원실장)에 대한 교육은 재임 시 필수교육과정으로 운영되며 재교육은 2년에 1회 실시한다[6-31].

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, 8.4절]. 따라서 방사능방재에 대한 교육 및 훈련 계획은 적절한 것으로 판단된다.

상기와 같이 한빛본부의 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)[6-19]
  - 방사선비상상황 하에서도 충분한 거주성을 확보하도록 위치, 규모, 설비, 장비 및 자료 등을 구비
○ 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제25조(원자로제어실 등)[6-22]
  - 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)[6-23]
  - 주제어실 거주성 상실 시 대피통로, 접근로 및 원격정지제어반은 화재와 화재진압의 영향으로부터 발전소 종사자 보호
  - 원격정지제어반 거주성 확보를 위해 공기의 급기, 배기 및 차단기능 유지

한빛본부의 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[6-5, 7.1절]. 방사선비상 사고 시 비상대응시설의 거주성 및 방사성물질 오염 시 저감능력은 다음과 같다.

비상대응시설 중 비상대책실은 비상시 발전소 대응활동을 총괄하는 곳으로 한 에 위치하고 있으며, 구조물은 국내 건축기준에 따라 설계되었다. 전원상실을 대비한 비상전원으로 무정전전원장치(UPS) 및 비상디젤발전기를 구비하고 있으며, 비상장구함, 제염 및 샤워설비를 갖추고 있다. 비상대책실은 외부공기가 방사성물질로 오염되었을 경우 비상요원의 거주성확보를 위한 비상환기계통을 설치하였다.

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 50 mSv 이하로 유지하도록 차폐설계 되어 있으며, 사고기간 중 비상요원의 공기흡입으로 인한 내부피폭을 방지하기 위해 고효율입자여과기를 포함한 비상환기설비를 갖추고 있다[6-5, 7.1절].

비상운영지원실(OSC)은 비상기술지원실 및 비상대책실과의 협조체제를 구축하고 비상대응활동을 지원하는 목적을 가지며, 한빛1,2호기는 후쿠시마 후속조치로 14년 말에 신축 시공되었다.

주제어실은 발전소 운영에서 가장 중요한 설비로 사고 시 제어건물 공기조화계통의 일부인 주제어실 비상여과계열로부터 외부공기를 공급받는다. 주제어실 비상여과계열(GK-A-F023, GK-B-F024, 100% 용량 2대)은 주제어실 외기 흡입구 고방사선 신호에 의해 자동으로 기동되며, 제어되지 않는 방사능 방출로부터 보호된 환경을 제공하여 운전원이 발전소를 제어할 수 있도록 한다. 주제어실 비상여과계열은 두개의 다중 계열로 구성되며, 각 계열은 비상 시 2,000 cfm을 처리하도록 설계되어 있다. 각 계열의 활성탄 흡착기는 원소형 및 유기형 요오드에 대하여 99.5%의 여과효율을 가지고 있다.

제어건물 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[6-24].

제어건물 공기조화계통은 내진범주 I의 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[6-25]. 비상시 주제어실내 직원에게는 최소 [redacted] 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 폭풍 및 홍수에 견딜 수 있도록 국내 건축기준에 따라 설계되었으며. 거주성 상실 시 예비환경방사능실험실인 조선대학교로 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 50 mSv이하로 유지하도록 차폐 설계되어 있다. 방사성물질의 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[6-26]. 원격정지제어반의 원격정지계통은 주제어실 이외의 다른 장소에서 발전소를 안전한 정지 상태로 만들고 유지할 수 있도록 운전원에게 충분한 계측설비와 제어기를 제공한다.

환경방사능실험실은 방사성물질 오염 시 저감설비는 갖추고 있지 않으나, 방사선비상계획수행절차서에 따라 시설 이용 불능 시 예비환경방사능실험실인 조선대학교를 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. 한빛본부는 [redacted] 말까지 비상대응거점 시설을 건설할 예정으로 있으며, 비상대응거점 시설에는 다음의 사항이 고려된다[6-27].

○ 비상대응거점은 비상대책실, 비상운영지원실, 비상기술지원실 등을 포함하며 약 [redacted]의 인원을 수용할 수 있다.
○ 비상대응거점은 면진시스템이 적용되며 설계기준지진 값으로 수평방향 [redacted], 수직방향 [redacted]를 적용한다. 또한 침수를 예방하기 위하여 부지 내 [redacted] 이상의 부지고에 건설된다.
○ 비상디젤발전기를 이용하여 최대 [redacted] 동안 전원공급이 가능하며 공기정화설비, 비상통신설비를 갖춘다.
○ 사고 시 [redacted]동안 피폭선량이 유효선량 50 mSv 이하가 되도록 차폐설계된다.

따라서 비상대응거점이 완공되면 상기에 언급한 비상대책실, 비상기술지원실, 비

상운영지원실의 거주성상실에 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.4 한빛1,2호기 차이점

한빛1,2호기는 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

한빛1,2호기 방재 및 비상대응 분야와 관련하여 후쿠시마 후속조치 사항 이행여부를 다음과 같이 확인하였다[6-28].

가. 주민보호용 방호장비 추가확보

주민보호용 갑상선방호약품 및 호흡방호장비를 추가 확보하여 지자체로 배포하였다.

나. 다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상계획서 개정

극한 자연재해 등에 의한 다수호기의 동시 비상상황에 적용 가능한 비상대응 조직의 구성 및 운영방안을 반영한 방사선비상계획서를 변경승인을 받았다.

다. 장기비상발령 대비 비상장비 추가확보

방호용품 및 방사선계측기는 추가 구매하여 비치를 완료하였다.

라. 방사선 비상훈련 강화

방사능방재 불시 전체훈련을 실시하였고, 다수호기 동시비상 시나리오를 개발 완료하였다.

마. 장기전원상실시 필수 정보의 확보방안 강구

인허가 심사(‘14.09) 후 한빛1발 케이블 시공이 완료되었고, 이동형발전차가 입고(’15.03) 후, 1호기 실증시험(‘15.05), 2호기 실증시험(’14.10)을 수행 완료하였다.

바. 보수작업자 방호대책 확보

협력사 방재교육 및 훈련강화 방안을 수립 완료하였고, 사이버 방재교육시스템 또한 개발 완료하였다.

사. 비상대응시설 개선

설계변경을 승인(‘14.04)하여 1,2호기 비상운영지원실(OSC)을 신축 시공(‘13.10 ~ ’14.10)을 완료하였다.

아. 방사선비상시 정보공개 절차 개정
방사선비상시 언론, 국민, 지역민에게 제공되어야 할 정보의 종류, 정보공개 주기 등이 포함되도록 절차를 개정 완료하였다.

자. 비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가

사고 시 방사선량평가 통합시스템을 개발하는 연구 과제를 수행 완료하였다.

차. 비상 경보시설의 성능 강화

자동동보장치(ACS) 및 비상전원을 확보하였고, 한빛본부 [redacted]까지 방송설비 보강 및 무정전전원장치(UPS)를 설치하였다.

카. 장기 전원상실 대비 비상통신설비 확보

전원전에 [redacted]의 위성전화기 확보하였으며 한빛1발전소의 경우, [redacted]를 보유하고 있다.

### 3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항 반영여부 확인

가. 월성1호기 스트레스테스트

“방재 및 비상대응능력”과 관련한 월성1호기 스트레스테스트 안전 개선사항[6-29]

의 반영여부를 확인한 결과, 표 6-12에서와 같이 안전 개선사항 2건에 대한 5가지 세부사항은 한빛1,2호기 평가에서 후쿠시마 후속조치 등으로 수행중이거나 해당사항이 없는 것으로 검토되었다.

나. 고리1호기 스트레스테스트

“방재 및 비상대응능력”과 관련한 고리1호기 스트레스테스트 안전 개선사항[6-9]의 반영여부를 확인한 결과, 표 6-13에서와 같이 안전 개선사항 3건에 대해 안전 개선사항 및 후쿠시마 후속조치 등으로 수행 중인 것으로 검토되었다.

### 3.3 극한 자연재해 대응을 위한 안전 개선사항

가. 방사선비상계획 수행절차서 개정

주민예상피폭선량평가 프로그램 사용 불능 시 주민예상피폭선량 수계산 절차를 수립하여 방사선비상계획 수행절차서에 반영하여 개정할 예정이다.

## 제4절 결론

한빛1,2호기 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(고리 등)를 비롯한 외부기관의 지원인력 및 장비는 극한자연재해 시에도 필요한 시간 이내에 가용한 접근 방법을 통하여 한빛부지에 지원 가능함
○ 장기 소내정전 사고 시 발전소 안전변수는 주제어실 및 비상기술지원실에서

소내단말기에 포함된 안전정보표시계통(SPDS)을 통하여 확인됨. 비상통신설비는 전화, 팩스, 방송설비, 인터넷 등 다양한 수단으로 구성됨. 극한 자연재해 시에도 발전소의 통신체계가 유지될 수 있도록 위성전화를 보강하였음

○ 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, 극한 자연재해 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 한빛본부에 소내비상대응거점 시설을 건설할 계획임.

상기와 같이 한빛1,2호기는 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 한빛1,2호기는 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
6-3. 한국수력원자력(주),
6-4. 한국수력원자력(주),
6-5. 한국수력원자력(주), 한빛원자력본부 방사선비상계획서
6-6. 한국수력원자력(주), 월성원자력본부 방사선비상계획 수행절차서
6-7. 한국수력원자력(주),
6-8. 한국수력원자력(주),
6-9. 한국수력원자력(주). 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황
6-10. 한국수력원자력(주),
6-11. 한국수력원자력(주),
6-12. 한국수력원자력(주),
6-13. 한국수력원자력(주),
6-14. 한국수력원자력(주),
6-15. 한국수력원자력(주),
6-16. 한국수력원자력(주),
6-17. 한국수력원자력(주),
6-18. 한국수력원자력(주),
6-19. 원자력안전위원회고시 제2017-38호, 원자력사업자의 방사선비상대책에 관한 규정, 2017
6-20. 한국수력원자력(주),
6-21.
6-22. 원자력안전위원회규칙 제3호, 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 2011
6-23. 한국원자력안전기술원, KINS/GE-N8, 가압경수로형 원전 계속운전 심사지침서, 2006
6-24. 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서
6-25. 한국수력원자력(주),
6-26. 한국수력원자력(주),
6-27. 한국수력원자력(주), 원전본부별 소내비상대응거점 신축 기본계획(안)
6-28. 한국수력원자력(주), 한빛본부 후쿠시마 후속조치 현황
6-29. 한국수력원자력(주), 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 이행현황
6-30. 한국수력원자력(주), 다수호기 극한재해 사고관리전략 추진(안)

6-31. 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 한빛본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황

표 6-4 한빛본부 비상대응시설 방사선측정기 확보현황

표 6-5 고리본부 비상대응시설 방호용품 및 개인 선량계 확보현황

표 6-6 한빛본부 소내 비상통신설비

표 6-7 유관기관 비상통신설비

표 6-8 한빛본부 고정형 환경방사선감시설비의 방사선검출기 모델 및 규격

| |
|---|
| |

표 6-9 환경방사선감시기(ERMS) 설치지점

표 6-10 이동형환경감시차량(EMV)의 구비 장비

표 6-11 한빛1,2호기 비상대응 프로그램(1/3)

표 6-11 한빛1,2호기 비상대응 프로그램(2/3)

표 6-11 한빛1,2호기 비상대응 프로그램(3/3)

표 6-12 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

| |
|---|
| |

표 6-13 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

| |
|---|
| |

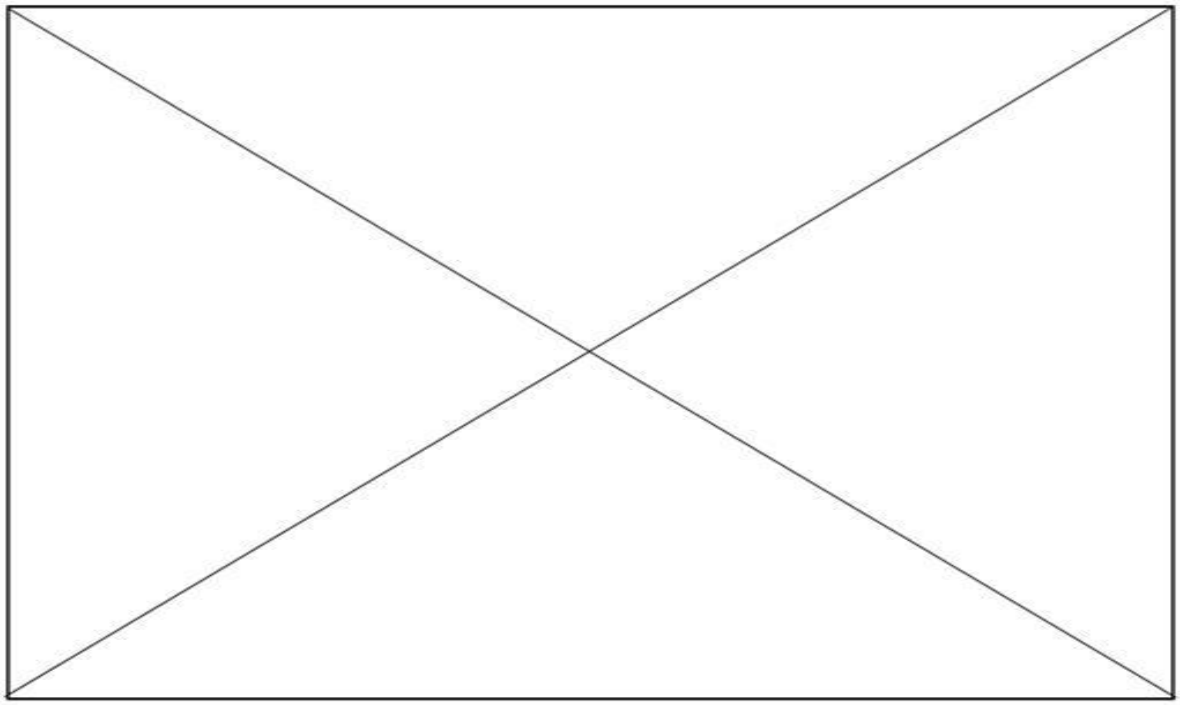


그림 6-1 S-REDAP 프로그램 개략도

그림 6-2 한빛1,2호기 백색비상 발령 상황 7번

그림 6-3 한빛1,2호기 백색비상 발령 상황 8번

그림 6-4 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 5번

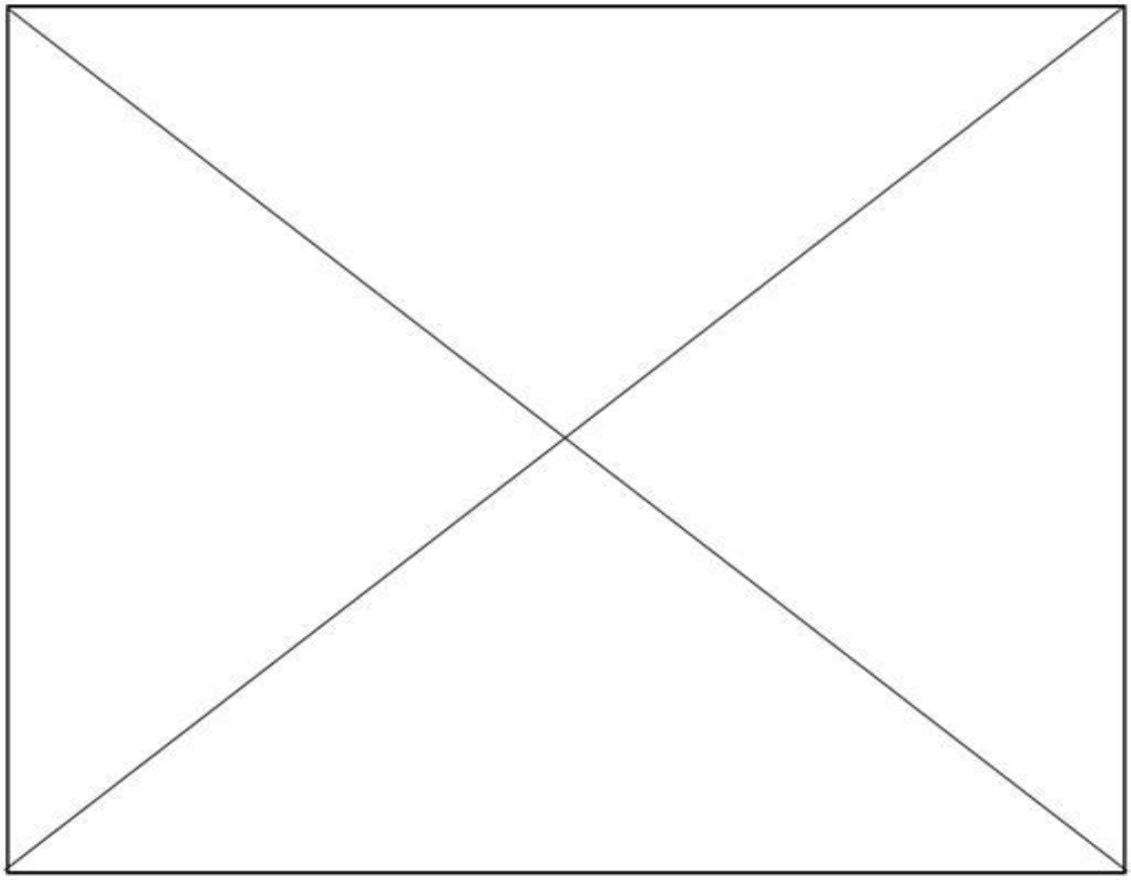


그림 6-5 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 6번

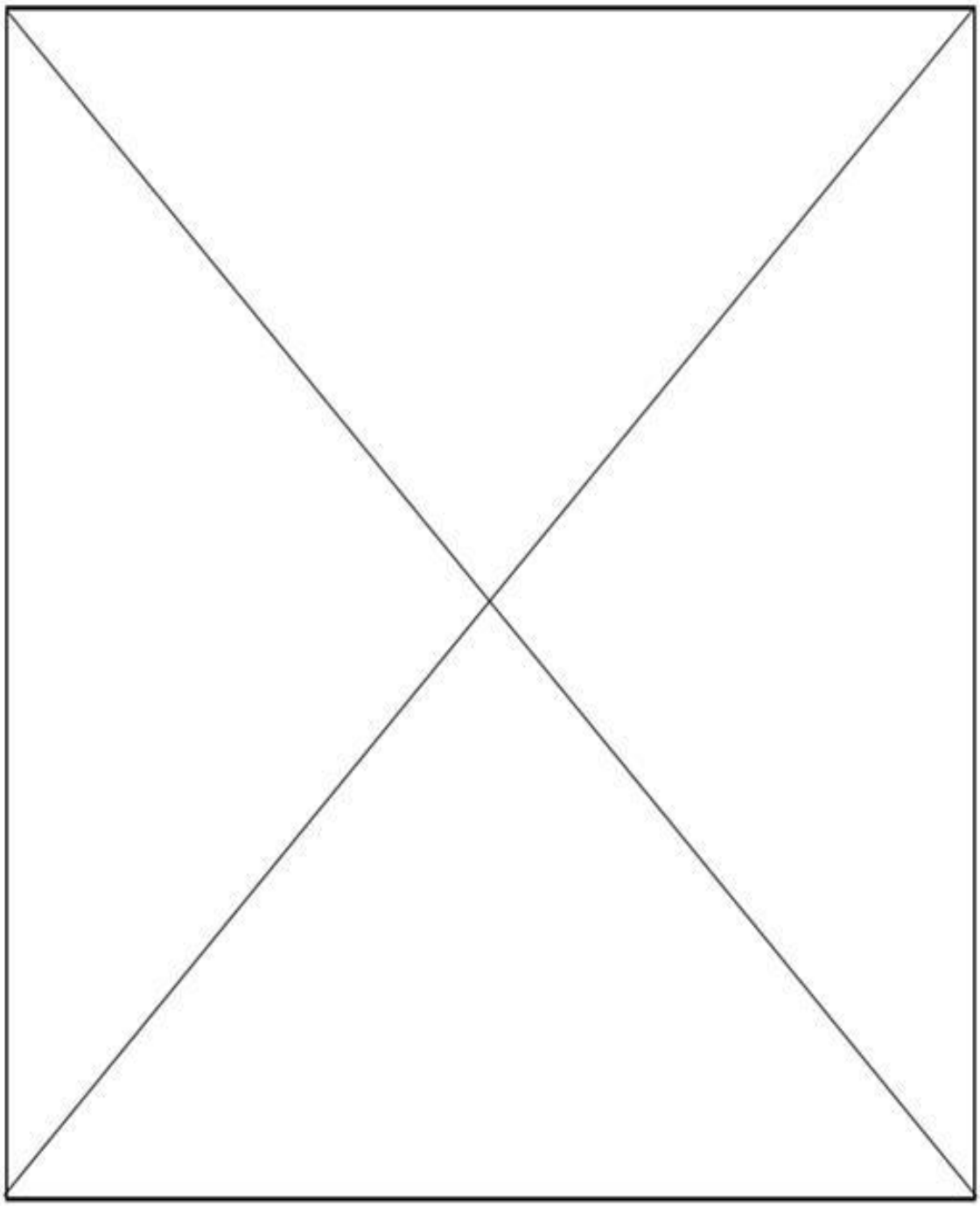


그림 6-6 한빛1,2호기 적색비상 발령 상황 5D번

그림 6-7 한빛1,2호기 청색비상 발령 상황 9번

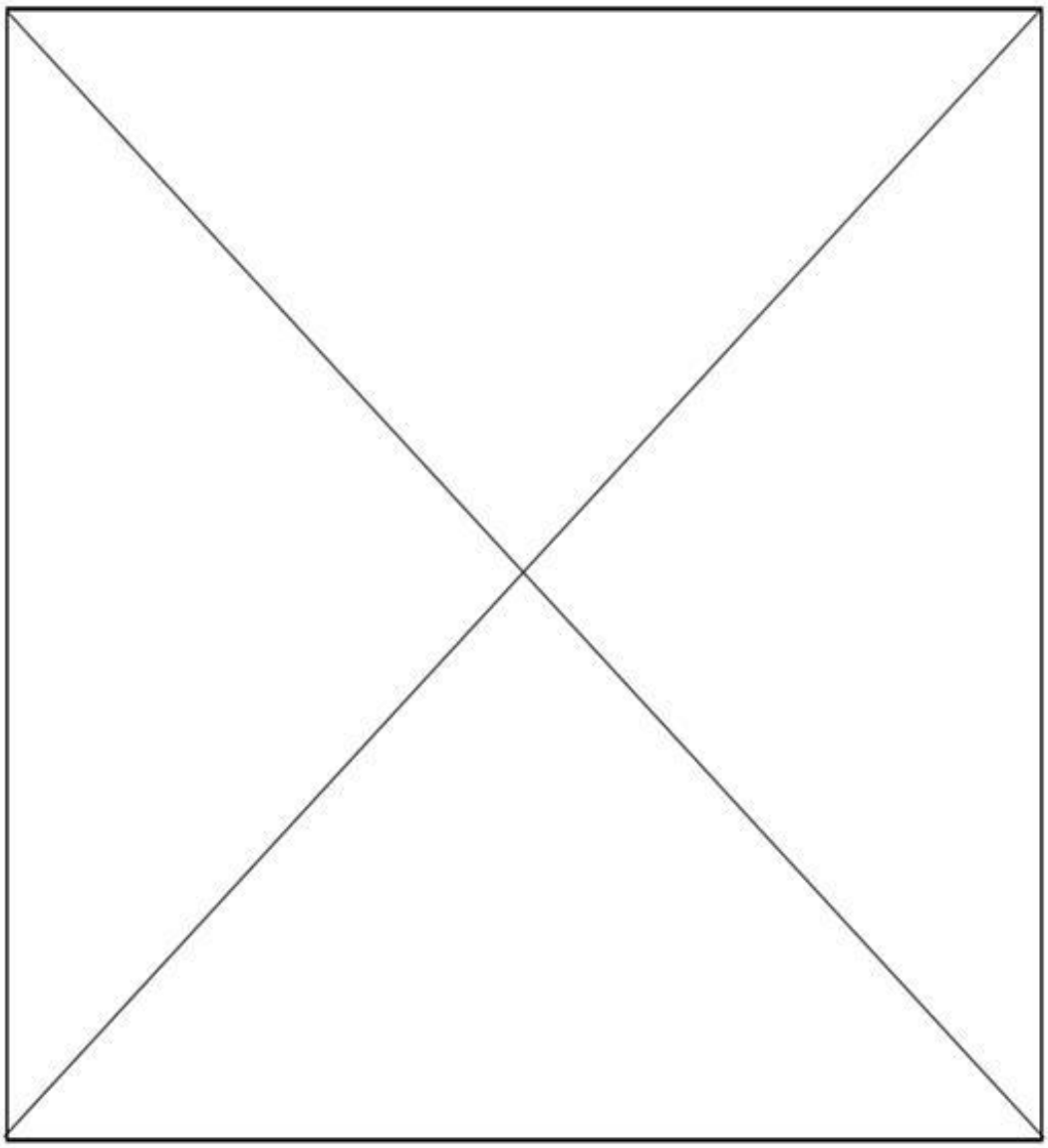


그림 6-8 한빛본부 환경방사선감시기(ERMS) 설치 위치도

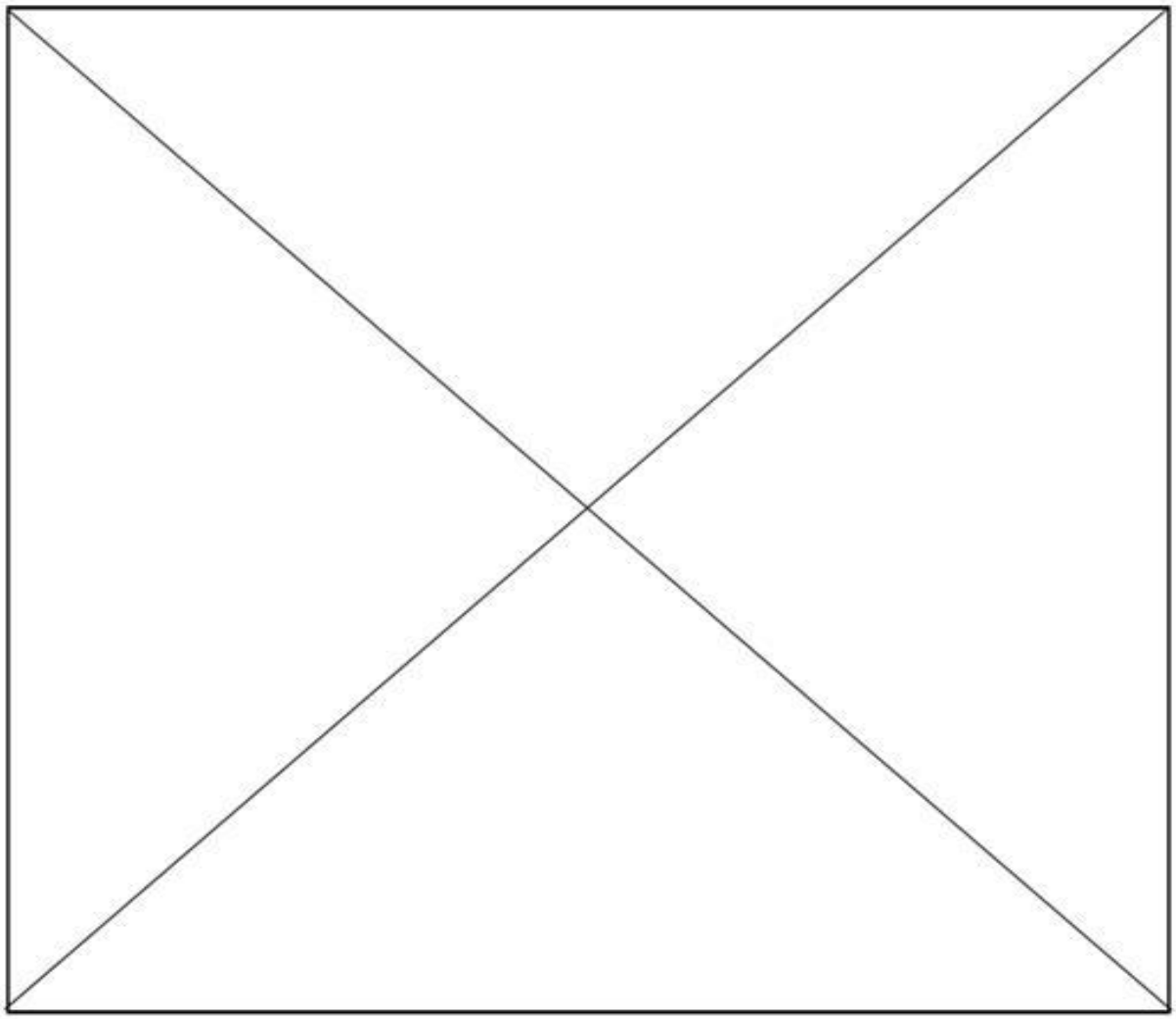


그림 6-9 한빛본부 환경감시용 열형광선량계(TLD) 설치 위치도

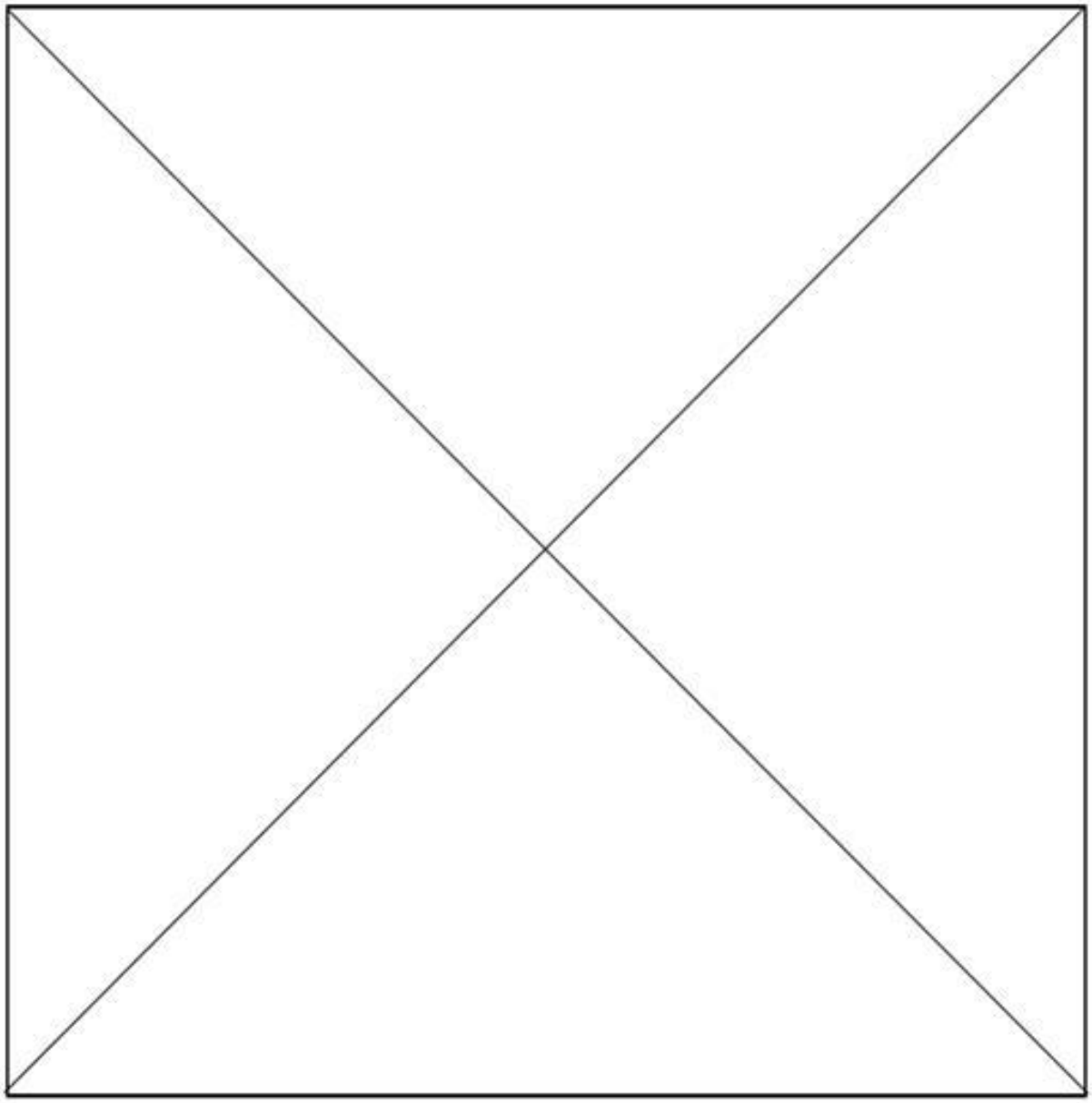


그림 6-10 한빛1,2호기 비상대응 프로그램의 연관성

그림 6-11 2개호기 동시 비상발령 시 비상조직

그림 6-12  3개호기 이상 동시 비상발령 시 비상조직

그림 6-11 2개호기 동시 비상발령 시 비상조직

그림 6-12  3개호기 이상 동시 비상발령 시 비상조직

# 제7장 운영기술 능력

# 목 차

제1절 개요 ····· 1

제2절 평가내용 ····· 3
2.1 사고대응전략 수립의 적절성 ····· 4
2.1.1 필수대처기능 상실을 고려하여 수립된 사고시나리오의 적절성 ····· 4
2.1.2 사고시나리오 대응전략의 이행가능성 ····· 13
2.1.3 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성 ····· 17
2.2 주요 운전원 조치의 적절성 ····· 24
2.2.1 주요 운전원 조치 적절성 평가 ····· 25
2.2.2 주요 운전원 조치 직무분석 및 이행가능성 평가 ····· 31
2.3 주요 자원의 적절성 ····· 37
2.3.1 인간-기계 연계설비 평가 ····· 38
2.3.2 소외자원 평가 ····· 40
2.3.3 절차서 평가 ····· 40
2.3.4 인력/조직 평가 ····· 44
2.3.5 교육 및 훈련 평가 ····· 47
2.3.6 소내·외 자원활용 전략 및 실행능력 평가 ····· 51
2.4 인간공학 유효성 평가 ····· 53
2.4.1 최종열제거원 상실(시나리오 4) ····· 54
2.4.2 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실(시나리오 6) ·· 56
2.4.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3G 지진(시나리오 9) ····· 61
2.4.4 중대사고(시나리오 10) ····· 69
2.4.5 인간공학 유효성 평가 설문결과 종합 ····· 69
2.4.6 평가현안 설문 분석 결과 ····· 73
2.5 다수호기 동시사고 시 대응능력 평가 ····· 79
2.5.1 다수호기 동시사고 고려 시 수립된 사고대응전략의 적절성 평가 ····· 79
2.5.2 다수호기 동시사고 고려 시 주요 운전원 조치의 적절성 평가 ····· 84
2.5.3 다수호기 동시사고 고려 시 주요 자원의 적절성 평가 ····· 93

제3절 안전 개선사항 ····· 96
3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인 ····· 96
3.2 월성1호기 및 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영여부 확인 ····· 97
3.2.1. 월성1호기 스트레스테스트 ····· 97

3.2.2. 고리1호기 스트레스테스트 ····· 97
3.3 운영기술능력 개선사항 (자체도출) ····· 97
3.3.1 사고대응전략 보완 ····· 97
3.3.2 설비 보완 ····· 97
3.3.3 절차서 보완 ····· 100
3.3.4 교육훈련 보완 ····· 104
3.3.5 조직/인력 보완 ····· 105

제4절 결론 ····· 106

제5절 참고문헌 ····· 106

제6절 표 ····· 108

# 표

표 7-1 SHERPA 직무형태 구분 ····· 108
표 7-2 직무형태별 위험도 단계 ····· 109
표 7-3 소외전원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과 ····· 110
표 7-4 소내정전 조건에 대한 소요시간 분석결과 ····· 111
표 7-5 최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과 ····· 112
표 7-6 최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 인적오류 분석결과 ····· 113
표 7-7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과 ····· 114
표 7-8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과 ····· 115
표 7-9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류 ····· 116
표 7-10 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과 ····· 117
표 7-11 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과 ····· 118
표 7-12 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류 ····· 119
표 7-13 중대사고에 대한 소요시간 분석결과 ····· 120
표 7-14 중대사고에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과 ····· 121
표 7-15 최종열제거원상실(시나리오 4) 주제어실 재고기기 목록 ····· 122
표 7-16 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6) 주제어실 재고기기 목록 ····· 123
표 7-17 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) 주제어실 재고기기 목록 ····· 124
표 7-18 중대사고(시나리오 10) 주제어실 재고기기 목록 ····· 125
표 7-19 현장 재고기기 목록 ····· 126
표 7-20 인력수준 분석 결과 ····· 127
표 7-21 이동형발전차 운전 절차에 따른 각 수행조의 역할(계통2-3592B) ····· 128
표 7-22 방사능방재교육 ····· 129
표 7-23 방재요원 신규교육과정의 교육내용 ····· 129
표 7-24 방재요원 보수교육과정 중 사고대응관련 비상조직의 교육내용 ····· 130

표 7-25 운전원에 대한 비상운전절차서 교육 ····· 131
표 7-26 비상운전절차서 교육과정별 교육내용 ····· 132
표 7-27 발전주제어실실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간 ····· 133
표 7-28 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간 ····· 134
표 7-29 중대사고관리지침서 교육 과정 ····· 135
표 7-30 중대사고관리지침서 교육과정별 교육내용 ····· 136
표 7-31 주제어실/현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간 ····· 137
표 7-32 소외전원 상실 사고대응 전략 (시나리오 1) ····· 138
표 7-33 소내정전 사고대응 전략 (시나리오 2) ····· 139
표 7-34 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 사고대응 전략 (시나리오 3) ····· 140
표 7-35 최종열제거원 상실 사고대응 전략 (시나리오 4) ····· 141
표 7-36 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 사고대응 전략 (시나리오 6) ····· 142
표 7-37 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 사고대응 전략 (시나리오 9) ····· 143
표 7-38 중대사고 사고대응 전략 (시나리오 10) ····· 144
표 7-39 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인 ····· 145
표 7-40 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인 ····· 146

## 제1절 개요

Westinghouse형 한빛1,2호기에 후쿠시마 원전 사고와 같은 설계기준을 초과하는 극한자연재해로 인한 전력계통과 최종열제거원이 상실되는 상황이 발생한다고 가정하여 한빛1,2호기의 운영기술 능력 평가를 수행하였다.

이를 위해 본 장에서는 스트레스테스트 수행지침[개정 1]에 따라 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원 조치의 적절성, 주요 자원의 적절성, 인간공학 유효성 평가, 다수호기 동시사고 시 대응능력에 대한 평가를 수행하였다.

사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원의 적절성 평가에서는 스트레스테스트 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, 설계기준을 초과하는 사고가 발생할 경우 발전소 조직 내의 인원들(주제어실 운전원 포함)이 발전소의 설비 및 절차서 등을 활용하여 적절하게 대처할 수 있는지 실험을 통해 확인하였다. 또한, 전력상실과 최종열제거원 상실 그리고 중대사고 조건에서의 발전소 운영기술능력을 평가하기 위하여 아래와 같은 사고시나리오를 고려하였으며, 각 사고에 대한 운영기술능력 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

○ 최종열제거원 상실(Loss of Ultimate Heat Sink, LUHS) 조건(시나리오 4)
○ 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건(시나리오 6)
○ 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 사고를 동반한 0.3g 지진(시나리오 9)
○ 중대사고 조건(시나리오 10)

다수호기 동시사고 시 대응능력에 대한 평가에서는 본 스트레스테스트 보고서에서 가정한 다수호기 동시사고에 대한 가정사항이 한빛본부에 귀속된 한빛 1~6호기에 동시에 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한빛1,2호기 사고

대응전략 및 주요 운전원 조치 그리고 주요 자원의 실효성을 평가였으며, 다수호기 동시사고 조건에서의 한빛1,2호기 운영기술 능력의 한계사항과 이에 대처할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 제2절 평가내용

원자력발전소 운영 목표는 정상운전 및 사고조건에서도 원자력발전소를 안정시키고 원전 종사자와 일반 대중의 안전을 위해 방사성물질 누출로 인한 피해를 최소화하는 것이다. 본 스트레스테스트에서는 극한자연재해 상황에서 한빛1,2호기의 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 한빛1,2호기 운영기술능력과 관련된 사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원을 평가하였다.

단, 한빛1,2호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서는 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서의 안전성 확보를 위해 추가 예정인 설비 및 절차서를 활용한 평가를 수행하였으며, 해당 내용은 추후 한빛1,2호기에 반영될 예정이므로 이에 대한 설비 및 절차서를 반영한 평가를 진행하였다. 한빛1,2호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서 평가 시 고려한 설비 및 절차서는 다음과 같다.

가. 설비

○ 3.2 MW 이동형발전차
○ 1 MW 이동형발전차
○ 중압이동형펌프[2)]
○ 저압이동형펌프
○ 고유량이동형펌프

나. 절차서

2) 중압이동형펌프는 사고관리계획서에 따라 명칭을 "저압이동형펌프" 로 변경하여 도입 예정임. 기존 저압이동형펌프는 발전소에서는 두 종류의 저압이동형펌프를 운영 예정임.

## 2.1 사고대응전략 수립의 적절성

사고대응전략 수립의 적절성 평가는 본 스트레스테스트 보고서 제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 및 제5장 중대사고 관리능력에서 수립된 사고시나리오에 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 한빛1,2호기 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

소외전원이 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트(Motor Generator Set : M-G Set) 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하다. 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator : EDG) 기동으로 교류안전모선이 가압되면 추가적으로 충전펌프를 기동할 수 있어 노심으로 고농도 붕산수주입이 가능하고, 이에 따라 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System : RCS) 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상하여 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

소외전원 상실 시 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator : EDG)가 기동되어 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전원을 공급함에 따라 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump : RCP) 운전이 불가능하지만 증기발생기(Steam Generator : SG) 급수공급 및 증기방출에 의한 자연순환냉각으로 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 기기냉각수(Component Cooling Water : CCW) 펌프 및 충전펌프에 전원을 공급하므로, 원자로냉각재펌프 밀봉냉각이 유지되어 원자로냉각재펌프 밀봉손상으로 인한 냉각재의 격납건물 내 누설은 발생하지 않는다. 따라서 격납건물 온도 및 압력은 상승하지 않아 격납건물 건전성은 유지된다.

2.1.1.2 소내정전 (시나리오 2)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실 시 제어봉구동 전력원인 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 대체교류 디젤발전기(Alternate AC Diesel Generator : AAC DG) 기동을 통해 추가적으로 충전펌프를

기동할 수 있어 노심으로 붕산수주입이 가능함으로 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상하여 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

소외전원 상실 시 수동으로 대체교류 디젤발전기를 기동하여 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전원을 공급할 수 있다. 따라서 원자로냉각재펌프 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 기기냉각수 펌프 및 충전펌프에 전원을 공급하므로, 원자로냉각재펌프 밀봉냉각이 유지되어 원자로냉각재펌프 밀봉손상으로 인한 냉각재의 격납건물 내로 누설은 발생하지 않는다. 따라서 격납건물 온도 및 압력은 상승하지 않아 격납건물 건전성은 유지된다.

2.1.1.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원이 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 삽입되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크(Safety Injection Tank : SIT) 붕산수가 자동주입되어 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있으며, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 상황에서 노심은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출밸브의 개방에 의한 증기방출로 자연순환 냉각이 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 운전에 필요한 직류 전원은 비필수부하를 차단으로 [redacted] 사용이 가능하며, 1 MW 이

동형발전차가 연결되면 축전지 충전이 가능하여 계속 사용이 가능하다.

기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크 붕산수가 주입되어 9일 18시간 동안은 재고량 유지가 가능하다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 원자로냉각재펌프 밀봉 누설에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉이 손상되고 축을 따라 격납건물 내로 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량 및 온도가 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승은 설계기준사고인 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident : LOCA)에 비해 미미하다. 또한, 3.2 MW 이동형발전차가 연결되면 격납건물 팬냉각기에 전원 및 기기냉각수 공급이 가능하여 온도 및 압력을 제어할 수 있으므로 격납건물의 건전성은 유지될 수 있다.

2.1.1.4 최종열제거원 상실사고 (시나리오 4)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

최종열제거원이 상실되어도 제어봉삽입에 의한 부반응도와 함께 대체 기기냉각수 공급이 가능한 충전펌프를 이용하여 노심으로 재장전수탱크(Refueling Water Storage Tank : RWST)의 붕산수를 주입할 수 있다. 따라서 사고기간 원자로냉각재계통 냉각 및 제논 붕괴(Xenon Decay)에 따른 정반응도 삽입을 충분히 보상하여 미임계 유지가 가능하다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

기기냉각수 기능상실로 원자로냉각재펌프 운전이 불가능하지만 증기발생기 급수 공급 및 증기방출에 의한 자연순환으로 노심 열제거가 가능하다. 충전펌프에 의한 1차측 냉각수 재고량 유지가 가능하며, 2차기기 냉각해수계통과 순환수계통의 기능상실로 주급수펌프(Main Feedwater Pump : MFWP)는 운전할 수 없지만 전동기구동 보조급수펌프 및 터빈구동 보조급수펌프가 운전 가능하여 2차측 냉각수 재고량 유지가 가능하다.

다. 격납건물 건전성 유지

1차기기 냉각수계통 기능이 상실되어도 충전펌프에 의해 원자로냉각재펌프 밀봉 냉각이 유지되므로 원자로냉각재펌프 밀봉을 통한 격납건물 내 누설은 발생하지 않는다. 다만, 기기냉각수 온도 상승으로 격납건물 온도가 상승할 수 있지만 3일 이내에 고유량이동형펌프 연결로 기기냉각수계통이 정상화되면 팬냉각기 운전이 가능하여 격납건물 건전성 유지에는 문제가 없다.

2.1.1.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 (시나리오 5)

한빛1,2호기는 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 (시나리오 6)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 낙하되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 붕산수가 주입되어 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 상황에서 노심은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출 밸브의 수동개방에 의한 증기방출로 자연순환 냉각이 가능하다.

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수와 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크의 붕산수 주입으로 냉각재 재고량 유지가 가능하다. 또한, 8시간 이후에는 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 원자로냉각재펌프 밀봉 누설에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 인해 격납건물 내로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 누설량이 적고 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량이 점차 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력 상승의 정도는 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 미미하다. 또한, 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되면 격납건물 팬냉각기에 전원 및 1차기기 냉각수 공급이 가능하여 온도 및 압력을 제어할 수 있으므로 격납건물의 건전성은 유지될 수 있다.

2.1.1.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원이 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 낙하되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 붕산수가 주입되어 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 지진해일 상황에서 노심은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출밸브의 수동개방에 의한 증기방출로 자연순환 냉각이 가능하다.

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수와 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크의 붕산수 주입으로 냉각재 재고량 유지가 가능하다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 원자로냉각재펌프 밀봉 누설에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 인해 격납건물 내로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 누설량이 적고 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량이 점차 감소하므로 격납건물의 온도 및 압력

상승 정도는 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 미미하다. 또한, 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되면 격납건물 팬냉각기에 전원 및 기기냉각수 공급이 가능하여 온도 및 압력을 제어할 수 있으므로 격납건물의 건전성은 유지될 수 있다.

2.1.1.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 낙하되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 붕산수가 주입되어 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있다. 또한, 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다.

나. 노심 냉각 및 재고량 유지

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 해일 및 강우 상황에서 노심은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출 밸브의 수동개방에 의한 증기방출로 자연순환 냉각이 가능하다.

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수와 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크의 붕산수 주입으로 냉각재 재고량 유지가 가능하다. 또한, 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 원자로냉각재펌프 밀봉 누설에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 누설량이 적고 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량이 감소하므로 격납건물의 온도와 압력 상승 정도는 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 미미하다. 또한, 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌

프가 연결되면 격납건물 팬냉각기에 전원 및 기기냉각수 공급이 가능하여 온도 및 압력을 제어할 수 있으므로 격납건물의 건전성은 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 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 낙하되어 미임계 유지가 가능하고, 원자로냉각재계통 냉각 및 감압 시 안전주입탱크 붕산수가 주입되어 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 붕산수를 추가로 노심에 주입할 수 있어 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다. 다만, 제어봉 위치계기 상실로 제어봉삽입 여부를 확인할 수 없어 정지여유도를 정확히 계산하기 어려우므로 원자로출력 및 기동률 추이를 밀착하여 감시토록 하는 교육훈련이 필요하다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 상황에서 노심은 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출 밸브의 수동개방에 의한 증기방출로 자연순환 냉각이 가능하다.

원자로냉각재펌프에 공급되는 1차측기기냉각수와 밀봉주입수 상실로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량은 감소하고 안전주입탱크의 붕산수 주입으로 냉각재 재고량 유지가 가능하다. 또한, [redacted] 중압이동형펌프를 외부주입유로에 연결하여 원자로냉각재펌프 밀봉 누설에 따른 재고량 상실을 추가로 복구할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

원자로냉각재계통에 공급되는 1차측기기냉각수 및 밀봉주입수 상실로 인해 격납건물 내로 원자로냉각재펌프 밀봉 누설이 발생하지만 누설량이 적고 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 따라 누설량이 점차 감소하므로 격납건물의 온도와 압력 상승 정도는 설계기준사고인 냉각재상실사고에 비해 미미하다. 또한, 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되면 격납건물 팬냉각기에 전원 및 기기

냉각수 공급이 가능하여 온도 및 압력을 제어할 수 있으므로 격납건물의 건전성은 유지될 수 있다.

2.1.1.10 중대사고 (시나리오 10)

가. 원자로 정지 및 미임계 유지

소외전원이 상실되면 제어봉에 구동전원을 공급하는 전동발전기세트 전원도 동시에 상실되므로 제어봉은 중력으로 낙하되어 미임계 유지가 가능하다. 중대사고 진입 후에는 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 감압하고, 충전펌프를 기동하거나, 저압이동형펌프를 기동하여 노심에 붕산수를 주입할 수 있으므로 원자로냉각재계통 냉각에 따른 정반응도 삽입을 보상할 수 있다. 또한 원자로냉각재계통을 감압하는 과정에서 안전주입탱크의 붕산수가 추가로 주입되므로 충분한 정지여유도가 확보되어 미임계 유지가 가능하다. 다만, 지진에 의해 제어봉 위치계기가 상실되면 제어봉삽입 여부를 확인할 수 없어 정지여유도를 정확히 계산하기 어려우므로 원자로출력 및 기동률 추이를 밀착하여 감시토록 하는 교육훈련이 필요하다.

나. 노심 냉각(열제거)능력 확보

보고서 제5장(중대사고 관리능력)에는 지진발생 시 터빈구동 보조급수펌프가 계속 운전되는 상황을 가정하여 증기발생기가 고갈되는 증기발생기를 통한 노심냉각기능이 유지되는 것으로 평가하였다. 그러나 중대사고에 대한 유효성 평가 시나리오 10에서는 평가시간을 고려하여 지진과 동시에 터빈구동 보조급수펌프가 정지되는 것으로 가정하였다. 급수상실과 주증기안전밸브를 통한 증기방출로 증기발생기는 고갈되고 원자로냉각재펌프 밀봉을 통한 냉각재 누설로 노심은 계속 가열되어 결국 중대사고 조건에 진입한다. 중대사고 진입 후 압력방출밸브를 개방하여 증기발생기를 감압한 후 저압이동형펌프를 기동하여 외부주입을 수행하고 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 감압한 후에 저압이동형펌프를 기동하여 냉각수 외부주입이 가능하므로 노심냉각 기능은 확보될 수 있다. 또한, 중대사고 진입 후 3.2 MW 이동형발전차를 연결이 가능할 경우 모터구동 보조급수펌프를 기동하여 증기발생기에 급수를 주입하고, 에 따라 가압기 압력방출밸브를 개방한 후 에 따라 충전펌프를 기동하여 냉각수를 주입하므로서 노심냉각기능을 확보할 수 있다. 연료재장전수저장탱크가 고갈되는 시점에는 충전펌프를 정지하고 열교환기의 지원을 받

는 잔열제거펌프 1대를 이용하여 격납건물 재순환배수조의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입함으로써 붕괴열을 지속적으로 제거하여 노심냉각 기능을 유지할 수 있다.

다. 격납건물 건전성 유지

중대사고 진행 중 원자로냉각재펌프의 밀봉누설 및 가압기 압력방출밸브를 통한 증기배출로 격납건물의 압력은 지속적으로 상승하지만 노심 및 증기발생기로 비상냉각수가 주입되어 노심출구 온도가 감소하고 격납건물 재순환배수조의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입함으로써 붕괴열을 지속적으로 제거하게 되면 격납건물은 설계압력 이하로 건전성이 유지될 수 있다.

### 2.1.2 사고시나리오 대응전략의 이행가능성

본 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 수립된 한빛1,2호기 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 자동기동으로 안전정지에 요구되는 필수기기가 모두 가용하며, 운전원이 에 따라 주기적으로 시뮬레이터 실습훈련을 시행하는 시나리오이므로 대응전략 이행이 가능하다.

2.1.2.2 소내정전 (시나리오 2)

소내정전과 관련된 사고 시나리오는 대체교류 디젤발전기 기동으로 안전정지에 요구되는 최소한의 필수기기가 가용하며, 운전원이 따라 주기적으로 시뮬레이터 실습훈련을 시행하는 시나리오이므로 대응전략 이행이 가능하다.

2.1.2.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

본 시나리오는 사고대응전략 및 가용 자원(고유량이동형펌프 설치 및 운전을 제외)이 인간공학 유효성 평가를 실시한 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실사고(시나리오 6)와 같아 예상 최적 운전경로가 동일하므

로 대응전략 이행이 가능하다.

2.1.2.4 최종열제거원 상실사고 (시나리오 4)

순환수펌프가 모두 정지되어 복수기 저-진공으로 터빈이 자동 정지되고, 터빈 정지에 의해 원자로도 자동으로 정지된다. 원자로 정지에 따라 단순 원자로 정지임을 확인한 후 전환이 가능하다.

발전소 안정화 조치를 수행하면서, 1차기기냉각해수 상실로 인한 기기냉각수 온도증가 상태와 원자로냉각재펌프의 베어링 온도 등 운전변수의 수동정지 설정치 도달 여부를 계속 감시하고, 수동정지 설정치 도달 전에 원자로냉각재펌프 정지가 가능하다.

발전팀은 기기냉각해수펌프가 모두 정지되었음을 확인 후 고유량이동형펌프 배치를 요청하고, 원자로냉각재펌프 정지에 따라 원자로냉각재계통을 잔열제거계통 운전 진입조건까지 자연순환 냉각 및 감압 수행이 가능하다.

발전팀은 잔열제거계통 운전 진입조건에 도달하고, 고유량이동형펌프를 기동하여 기기냉각수계통이 정상화되면 잔열제거계통 운전이 가능하다.

2.1.2.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한빛1,2호기는 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)

발전팀은 소외전원이 상실되면서 원자로가 자동으로 정지되면 전원상실 사고를 진단한 후 정상 진입이 가능하다.

비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기 기동이 실패한 후 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황을 확인하여 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고,

축전지 비필수부하 차단을 수행한다.

터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수를 공급하면서 증기발생기 압력방출 밸브를 수동 개방하여 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압할 수 있다. 이를 통해 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량상실을 감소시키고, 안전주입탱크의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입할 수 있으며, 잔열제거계통 운전조건 진입을 위한 추가 냉각운전 수행이 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 축전지 충전이 재개되어 직류전원이 계속 가용하게 되며, 중압이동형펌프가 외부주입유로에 연결되면 펌프를 기동하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재 상실을 보충할 수 있다.

잔열제거계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차와 고유량이동형펌프가 준비되면 1차기기냉각수계통을 정상 복구하고 계통절차서 잔열제거계통 운전이 가능하다.

2.1.2.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 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 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 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)

발전팀은 지진원자로자동정지시스템(Automatic Seismic Trip System : ASTS)에 의해 원자로가 정지되면 전원상실 사고를 진단한 후 진입이 가능하다.

비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기 기동이 실패한 후 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황을 확인하여 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, 축전지 비필수부하 차단을 수행한다.

발전팀은 주제어실의 가용한 필수안전계기들을 이용하여 발전소 상태를 감시하면서, 터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수를 공급하고 증기발생기 압력방출 밸브를 수동 개방하여 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압할 수 있다. 이를 통해 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량상실을 감소시키고, 안전주입탱크의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입할 수 있으며, 잔열제거계통 운전조건 진입을 위한 추가 냉각운전 수행이 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 축전지 충전이 재개되어 직류전원이 계속 가용하게 되며, 중압이동형펌프가 외부주입유로에 연결되면 펌프를 기동하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재 상실을 보충할 수 있다.

잔열제거계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차와 고유량이동형펌프가 준비되면 1차기기냉각수계통을 정상 복구하고 계통절차서 잔열제거계통 운전이 가능하다.

단, 극한자연재해를 동반한 장기교류전원 상실 상황 시 안전주입탱크 격리 밸브 등 격납건물 내부에 위치한 전동기 구동밸브들을 수동으로 열고 닫는 조치를 해야 하나, 내부의 상태를 정확히 파악하지 못한 상태에서 현장 운전원의 격납건물 출입은 매우 위험할 수 있다. 따라서 전동기제어반(Motor Control Center : MCC)에서 소형이동형발전기를 이용한 밸브 조작 방안 등에 대한 구체적인 전략수립이 필요한 것으로 평가되었다.

2.1.2.10 중대사고 (시나리오 10)

발전팀은 지진원자로자동정지시스템에 의해 원자로가 정지되면 비상-0 “원자로 정지 또는 SI”를 수행하여 전원상실 사고를 진단한 후 정상 진입이 가능하다.

비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기 기동이 실패한 후 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황을 확인하여 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, 축전지 비필수부하 차단을 수행한다.

원자로냉각재펌프 밀봉냉각 상실로 인한 원자로냉각재 누설과 터빈구동 보조급수펌프 고장에 의한 증기발생기 수위 고갈로 노심냉각기능이 상실되고 노심출구열전대 온도가 초과하면 가능하다.

증기발생기 압력방출밸브를 수동으로 개방하여 저압이동형펌프로 급수주입이 가능한 압력까지 감압한 후 비상급수 외부주입유로를 통해 증기발생기에 급수공급이 가능하다.

가압기 압력방출밸브를 개방하면 원자로냉각재계통을 외부주입이 가능한 압력 이하로 감압할 수 있으며, 저압이동형펌프를 이용하여 비상냉각수주입이 가능하다. 비상냉각수가 주입되면 노심출구온도가 감소하고 격납건물 압력을 설계압력 이하로 유지가 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차를 이용하는 경우에는 충전펌프를 기동하여 연료재장전수저장탱크의 냉각수를 노심으로 주입할 수 있다.

### 2.1.3 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성

본 스트레스테스트에서 수립된 한빛1,2호기 사고시나리오에 대한 각 분야별 연계 항목의 적절성을 평가하기 위해 본 스트레스테스트 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 비상디젤발전기가 자동 기동되어 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전력을 공급하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전원들은 비상운전절차서 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행한 뒤, 잔열제거계통을 운전하여 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련

설비 등에 대해서는 표 7-30에 제시하였으며, 다수의 전략이 동일시간대에 수행되거나 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우는 없는 것으로 평가되었다.

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 교류전원이 복구되면, 발전소 안전정지에 필요한 설비에 전력을 공급하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전원들은 [redacted] 진입하게 되고, 대체교류디젤발전기 운전을 위해 [redacted] 발전소의 냉각을 수행한 뒤, 잔열제거계통을 운전하여 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 되어 적절한 것으로 평가된다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련 설비 등에 대해서는 표 7-31에 제시하였으며, 다수의 전략이 동일시간대에 수행되거나 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우는 없는 것으로 평가되었다.

2.1.3.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 원자로는 제어봉 자유낙하에 의해서 정지되고, 비상디젤발전기 및 대체교류디젤발전기가 기동되지 않음에 따라 모든 교류전원이 상실되나, 안전등급 축전지가 [redacted](비필수부하 차단 시 [redacted]) 125V DC 안전모선에 연결된 원자로보호 및 필수 계측제어계통에 전력을 공급할 수 있다. 또한 증기발생기 압력방출밸브를 개방하여 최대 냉각률 이내로 원자로냉각재계통에 대한 냉각 및 감압을 수행할 수 있어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 운전조는 비상운전절차서 [redacted] 진입하게 되고, [redacted] 교류전원 복구가 불가능할 것으로 예상되는 경우에는 [redacted] 통해 안전등급 축전지의 비필수부하를 차단하고, [redacted]

참조하여 이동형 장비들을 배치하게 된다.

1 MW 이동형발전차 및 중압이동형펌프를 요청하고 필요시 3.2 MW 이동형발전차를 적절한 위치에 배치할 것을 제시하고 있다.

그리고 중압이동형펌프가 적절한 위치에 배치되어 가용하게 된 경우, 기동하여 원자로냉각재계통에 붕산수를 주입하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설로 인한 냉각재 상실을 복구하도록 하고 있다.

잔열제거계통 운전조건 진입을 위한 원자로냉각재계통 추가 냉각을 수행하고, 1개의 4.16 kV 안전모선을 복구하여 기기냉각수계통 운전을 위한 충분한 전원이 확보되면, 잔열제거계통 운전으로 발전소를 안전정지상태에서 유지할 수 있어 적절한 것으로 평가된다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련설비 등에 대해서는 표 7-32에 제시하였다. 1 MW 이동형발전차 및 중압이동형펌프가 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 (Phase-2)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족으로 비상대응 인력이 확보가 예상되므로 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우도 없는 것으로 평가되었다.

이러한 사고대응전략의 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되나, 다음과 같은 설비와 절차서간 연계사항에 대한 개선이 필요한 사항들이 도출되었다.

본 스트레스테스트 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 1 MW 이동형발전차 부하로서 480V 전동기제어반(MCC) 부하 301 kW, 이동형발전차 자체부하 10 kW 등을 제시하였으나, 향후 1 MW 이동형발전차 도입 과정에서 1 MW 이동형발전차를 위한 별도의 절차서가 구비되어야 하며, 과부하 트립 방지를 위해 투입이 가능한 부하 및 부하용량과 대용량 부하의 불시기동을 방지하기 위한 대책이 명시되어야 할 것으로 평가되었다.

2.1.3.4 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 4)

최종열제거원 상실 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 기기냉각해수계통과 순환수계통의 기능상실로 점진적인 복수기 진공상실이 발생하여 일정 시간 이후에는 터빈 및 주급수펌프가 정지되고 원자로 정지가 발생하게 된다. 1차측기기냉각수 온도 상승으로 원자로냉각재펌프의 계속 운전은 불가능하지만, 터빈구동 및 전동기구동 보조급수펌프가 모두 운전 가능하여 노심의 자연순환 냉각이 가능하다. 충전펌프는 대체냉각수단이 존재하여 1차측기기냉각수의 온도상승에도 불구하고 계속 운전이 가능하여 원자로냉각재펌프 밀봉냉각을 유지할 수 있다. 또한 고유량이동형펌프를 연결하여 기기냉각수계통의 운전을 위한 최종열제거원이 확보되면, 잔열제거계통 운전을 수행할 수 있어 적절한 것으로 평가된다.

절차서 연계 항목과 관련하여 최종열제거원 상실 사고가 발생하면 발전팀은 우선 원자로 정지와 터빈 정지를 확인하고 교류 안전모선의 전원상태를 확인한다. 이후 원자로냉각재계통 온도를 점검하고 2차측으로 급수가 공급됨을 확인한다.

또한, 최소한 1대 이상의 기기냉각해수펌프가 운전중인지 확인하여 모든 1차 기기냉각해수펌프가 상실되었을 경우 고유량이동형펌프 배치를 요청하고, 1차기기냉각해수 및 1차기기냉각수를 공급받는 기기의 운전상태를 점검하고 필요시 기기정지 등의 조치를 요구한다.

최종열제거원 상실이 장기화되면, 진입하여 자연순환 냉각으로 잔열제거계통 진입조건까지 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행한다. 이후 고유량이동형펌프를 운전하여 최종열제거원을 복구하고 계통운전절차서 이용하여 발전소를 저온정지까지 냉각시켜 안전한 상태로 유지한다. 이러한 상황에 대하여 사고대응전략의 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되었다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련 설비 등에 대해서는 표 7-33에 제시하였으며, 다수의 전략이 동일시간대에 수행되거나 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우는 없는 것으로 평가되었다.

스트레스테스트 보고서 제4장 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력에서 분석한 소외전원상실 조건(시나리오 1), 소내정전 조건(시나리오 2), 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건(시나리오 5)의 발전소 열수력 거동이 최종열제거원 상실 조건(시나리오 4)과 유사하므로 해당 조건의 발전소 대응 관련 인적오류 발생

가능성과 소요시간에 대한 평가를 위해 최종열제거원 상실 조건에 대한 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.1.3.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한빛1,2호기는 대체열제거원이 없으므로 최종열제거원 상실 조건(시나리오 4)과 동일하다.

2.1.3.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 상황에서 설비 연계 항목과 관련하여 사고대응전략은 전반적으로 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건(시나리오 3)에 대한 사고대응전략에서 고유량이동형펌프의 이용이 추가되었으므로 설비 연계는 적절한 것으로 평가되었다.

절차서 연계 항목과 관련하여 발전팀은 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 모든 교류전원 완전상실 및 최종열제거원 상실 사고가 발생하면 원자로 정지에 따라 우선 [redacted] 최소한 1계열의 안전등급 교류 모선을 복구하기 위한 조치가 실패한 후 발전팀은 장기교류전원 상실을 선언하고 [redacted] 축전지 수명을 연장하기 위해 비필수부하 차단을 수행하고, [redacted] 1 MW 이동형발전차 및 중압이동형펌프의 배치를 요청한다.

이후 원자로냉각재펌프 밀봉누설로 인한 냉각재 재고량 상실을 완화하고 안전주입탱크의 냉각수 주입을 유도하기 위해 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행한다. 1 MW 이동형발전차가 연결되면 축전지 충전을 재개하고, 중압이동형펌프가 배치되면 [redacted] 기동하여 냉각재재고량을 복구한다.

잔열제거계통 운전을 위하여 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프를 배치 요청한 후 연결이 완료되고, 잔열제거계통 진입을 위한 원자로냉각재계통의 조건이 만족되면 최종적으로 계통절차서 [redacted] 발전소를 저온정지까지 냉각시키고 안전한 상태를 유지한다. 이 사고 상황에서 절차

서 연계항목은 전반적으로 적절한 것으로 평가되었다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련 설비 등에 대해서는 표 7-34에 제시하였다. 1 MW 이동형발전차 및 중압이동형 펌프가 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 8시간 이내(Phase-2)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족으로 비상대응 인력이 확보가 예상되므로 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프 또한 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 3일 이내(Phase-3)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족 및 소외 인력 투입으로 충분한 인력이 확보되어 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우도 없는 것으로 평가되었다.

스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-21 (대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건의 대응능력 및 한계사항 평가(시나리오 6))에서 최종열제거원 상실 사고확인, 축전지 비필수부하 차단 요청 및 차단까지의 소요시간 그리고 사고 상황에서의 발전팀 대응관련 인적오류 발생 가능성에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

2.1.3.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

한빛1,2호기 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. 단, 0.2g의 지진동을 가정할 경우 발전소 통신설비 가용성에 영향이 있을 수 있으므로 위성통신 설비(위성전화)를 활용한 주요 운전원 조치의 수행이 가능한 것으로 평가되었다.

2.1.3.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서 제2장의 결과에 따라 한빛 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 최종열제거원 상실을 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 직·간접적인 영향을 가정하여 주요 운전원 조치의 수행에 보다 많은 시간이 소요가 예상되므로 인적오류 발생 가능성 및 소요시간에 대한 평가를 위해 인간공학 유효성 평가가 필요하다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련 설비 등에 대해서는 표 7-35에 제시하였다. 1 MW 이동형발전차 및 중압이동형펌프가 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 (Phase-2)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족으로 비상대응 인력이 확보가 예상되므로 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 3.2MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프 또한 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 (Phase-3)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족 및 소외 인력 투입으로 충분한 인력이 확보되어 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우도 없는 것으로 평가되었다.

2.1.3.10 중대사고 (시나리오 10)

중대사고 상황에서 설비연계항목과 관련하여 외부주입설비를 이용한 비상냉각수주입은 4.16 kV 안전모선의 전원이 복구되지 않은 상황에서 저압이동형펌프를 이용하여 노심 및 증기발생기에 냉각수를 주입할 수 있으며, 3.2 MW 이동형발전차가 안전모선에 연결되면 내진설계된 소내 고정형 안전주입펌프를 이용하여 노심에 냉각수를 주입할 수 있으므로 설비연계는 적절한 것으로 평가된다.

중대사고 상황에서 절차서 연계 항목과 관련하여 외부주입설비를 이용한 비상냉각수주입은 압력방출밸브를 개방하여 저압이동형펌프로 주입이 가능한 압력까지 증기발생기를 감압하여 급수를 공급할 수 있다. 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 감압하고 저압이동형펌프를 연결하여 노심에 냉각수를 주입할 수 있으므로 외부주입설비를 이용한 비상냉각수주입과 관련된 절차서 연계는 적절한 것으로 평가된다.

중대사고 상황에서 절차서 연계 항목과 관련하여 이동형발전차를 이용한 비상냉

각수주입은 [redacted] 소내 고정형 전동기구동 보조급수펌프를 기동하여 증기발생기에 급수를 공급할 수 있다. [redacted] 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재계통을 감압하고 [redacted] 소내 고정형 고압안전주입펌프를 기동하여 노심에 냉각수를 주입할 수 있으므로 이동형발전차를 이용한 비상냉각수주입과 관련된 절차서 연계는 적절한 것으로 평가된다.

사고대응전략에 따른 세부 운전조치별 진입절차서, 의사결정조직, 수행조직, 관련 설비 등에 대해서는 표 7-36에 제시하였다. 1 MW 이동형발전차 및 저압이동형 펌프가 동일시간대에 설치될 가능성이 있으나 모두 8시간 이내(Phase-2)에 설치되는 설비로 시간적으로 여유가 있으며, 기술지원실의 발족으로 비상대응 인력이 확보가 예상되므로 이행에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 또한 동일시간대에 수행되는 다수의 전략이 동일한 설비를 이용하는 경우도 없는 것으로 평가되었다.

중대사고 상황에서 0.3g 지진에 의한 발전소 조명 상실, 발전소 통신 설비 영향, 화재 등 발전소의 직·간접적인 영향을 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, 한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서 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 대응전략 이행에 필요한 직무를 분석하여 정의하고, 정의된 직무를 수행하기 위해 필요한 주요 운전원 조치의 적절성을 평가
○ 사고시나리오를 포함한 극한상황(지진, 화재 등)에서도 대응전략 수행을 위해 필요한 직무에 대한 주요 운전원 조치의 이행가능성을 평가
○ 주요 운전원 조치를 수행하기 위한 가용 시간은 분석되고 충분히 확보되어야 하며, 인적오류 발생으로 주요 운전원 조치가 실패할 경우를 가정하여 대체 이행방안 수립
○ 사고시나리오 수행 중 설비, 절차서 등의 활용 시 발생 가능한 인적오류 혹은

의사결정오류를 확인하여 최소화 방안을 수립하고 대응능력 확보방안을 제시

주요 운전원 조치의 적절성 평가의 범위는 다음과 같다.

○ 사고시나리오 분석을 통해 도출된 주요 운전원 조치의 적절성 평가
○ 사고시나리오를 포함한 극한상황에서 주요 운전원 조치의 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 성공여부에 따라 사고 상황에 영향을 끼칠 수 있는 주요 운전원 조치들을 도출하였으며 도출된 주요 운전원 조치는 다음과 같다.

(1) 원자로 정지 후 조치 및 사고진단
(2) 대체교류디젤발전기 기동
(3) 충전펌프 재기동
(4) 충전펌프 대체기기냉각수 연결 및 기동
(5) 축전지 비필수부하 차단
(6) 유출수 격리밸브 잠금
(7) 증기발생기 압력방출밸브를 통한 발전소 냉각
(8) 가압기 압력방출밸브를 통한 1차계통 감압 착수
(9) 안전주입탱크 주입
(10) 안전주입탱크 수동 격리
(11) 1 MW 이동형발전차 연결
(12) 중압이동형펌프 기동
(13) 3.2 MW 이동형발전차 연결
(14) 고유량이동형펌프 연결
(15) 잔열제거계통 운전
(16) 저압이동형펌프 연결

주요 운전원 조치들에 대한 적절성 평가는 최적운전경로에 따른 절차서 수행 및 운전원 조치 가능성에 대한 평가이며, 결과는 다음과 같다.

#### 2.2.1.1 원자로 정지 후 조치 및 사고진단

원자로 정지 후 조치 및 사고진단을 통하여 소외전원상실(시나리오 1) 및 최종열제거원 상실(시나리오 4) 조건에서는 원자로 정지에 따라 추가 진단을 하여 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10은 모든 교류전원 상실로 진단을 하여

시나리오 1의 경우에는 소외전원상실 상황이므로 비상운전절차서 비상-0 “원자로 트립 또는 SI”을 거쳐 사고진단 이후 것이 적절하고, 시나리오 4는 순환수펌프가 모두 트립되어 복수기 저-진공으로 터빈이 자동 정지되고, 터빈 정지에 의해 원자로가 자동 정지됨에 따라 진입하는 것은 적절하다.

시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10의 경우에는 발전소 정전사고이므로 진입하는 것은 적절하다.

2.2.1.2 대체교류디젤발전기 기동

소내정전 조건에서 발전팀은 원자로 정지 후 조치 및 사고진단 이후 수행한다. 비상디젤발전기를 기동하여 하나의 비상 교류모선을 가압하는데 실패하면 대체교류디젤발전기 기동이 요구된다. 이 상황에서 대체교류디젤발전기 기동은 대체교류전력을 공급하기 위한 수단이며, 이를 통해 1차기기냉각수계통, 1차기기냉각해수계통 및 잔열제거계통의 운전이 가능하게 되므로 소내정전 조건에서의 대체교류디젤발전기 수동 기동은 적절하다.

2.2.1.3 충전펌프 재기동

전력상실 조건 중 소외전원상실 조건(시나리오 1)에서는 비상디젤발전기의 기동으로 충전펌프의 재기동이 가능하며, 소내정전 조건(시나리오 2)에서는 대체교류디젤발전기를 주제어실에서 수동으로 기동하여 교류전원을 복구하고 충전유량 확보를 위해 충전펌프의 재기동이 가능하다. 충전유량을 확보하여 냉각재 재고량을 유지하고 원자로냉각재펌프의 밀봉냉각을 회복할 수 있으므로 충전펌프의 재기동은 적절하다.

2.2.1.4 충전펌프 대체기기냉각수 연결 및 기동

최종열제거원 상실 조건(시나리오 4)에서 최종열제거원 상실로 기기냉각수계통의 기능은 운전원 조치가능시간까지 유지되는 것을 가정하여 운전원은 수동으로 사고발생 이후 1시간 이내에 대기 중인 충전펌프의 대체기기냉각수를 연결하여 기동하고 운전중인 충전펌프를 정지하는 것이 가능하다고 분석되었다. 발전팀은 모든 1차기기냉각해수펌프가 정지된 것을 확인하고 대기 중인 충전펌프에 대체냉각수를 공급한 후 교체운전을 실시할 수 있다. 1차측기기냉각수 온도상승으로 원자로냉각재펌프 밀봉냉각이 상실되면 축을 통해 냉각재누설이 발생할 수 있는 상황에서 대체냉각수를 공급하여 충전펌프를 계속 운전하는 것은 밀봉주입수 공급을 통해 밀봉냉각을 유지할 수 있으므로 적절한 운전원 조치이다.

2.2.1.5 축전지 비필수부하 차단

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 안전등급 축전지와 터빈구동 보조급수펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압운전이 가능한 시간을 연장하기 위하여 축전지 비필수부하를 차단한다. 발전팀은 교류전원을 복구할 수 없다고 판단되면 비필수부하를 차단한다. 1 MW 이동형발전차가 연결되어 축전지가 복구되기 전까지 발전소 상태 감시를 위한 필수계측기 및 노심냉각을 위한 터빈구동 보조급수펌프에 제어전원을 공급하기 위해 축전지 비필수부하를 차단하는 운전원 조치는 적절하다. 단, 고정형 교류전원 공급장치가 복구될 수 있을지 주제어실 운전원이 판단하기 어렵고, 조치시간의 지연을 야기할 수 있기 때문에 절차서의 라는 문구를 삭제할 예정이므로 적절한 것으로 분석되었다.

2.2.1.6 유출수 격리밸브 잠금

시나리오 4에서는 최종열제거원 상실 사고발생 유출수 격리밸브를 닫도록 하고 있다. 발전팀은 모든 1차기기냉각해수펌프가 정지 중임을 확인하고 비 1차측기기냉각수 열부하 감소를 위해 유출수 격리밸브를 차단해야 한다. 유출수 격리밸브 잠금은 최종열제거원 상실 상황에서 1차측기기냉각수 열부하 감소를 위해 적절한 조치이며, 소내전원이 가용하므로 주제어실에서 차단이 가능하다.

시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 RCS 차단점검 수행 중 유출수 격리밸브 닫힘을 확인하고 만약 닫히지 않았으면, 격납건물 외측 유출격리밸브 를 사고발생 1시간 이내 현장 운전원을 통해 수동으로 닫아야 한다. 유출수 격리밸브 차단은 소내정전 시 원자로냉각재 재고량을 보전하기 위해 적절한 운전원 조치이며 전동기 구동밸브로서 주제어실에서 조작이 불가능하므로 현장에서 수동으로 닫아야 한다.

2.2.1.7 증기발생기 압력방출밸브를 통한 발전소 냉각

모든 시나리오에서 조치가 필요한 증기발생기 압력방출밸브를 통한 발전소 냉각은 복수기가 운전 불가능한 상황에서 선택할 수 있는 유일한 발전소 냉각 수단이므로 이 운전원 조치는 적절하다. 증기발생기 압력방출밸브는 축전지 전원이 가용하고 안전관련 계기용공기가 공급 가능하므로 주제어실에서 조작이 가능하고 필요시에는 현장에서 수동조작도 가능하다.

2.2.1.8 가압기 압력방출밸브를 통한 1차계통 감압 착수

시나리오 4에서 발전팀은 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재 계통을 감압하게 된다. 최종열제거원 상실로 원자로냉각재펌프가 정지되어 가압기 살수가 불가능하고, 유출유로가 차단되어 보조살수가 어려운 상황에서 가압기 압력방출밸브를 이용한 운전원의 원자로냉각재계통 감압조치는 적절하다. 축전지 전원이 가용하므로 가압기 압력방출밸브는 주제어실에서 조작이 가능하다.

2.2.1.9 안전주입탱크 주입

시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서 발전팀은 수행하는 증기발생기 압력방출밸브 개방에 의한 증기방출로 원자로냉각재 계통의 냉각 및 감압을 수행하여 안전주입탱크의 냉각수를 노심으로 주입한다. 원자로냉각재펌프 밀봉누설로 재고량이 상실되는 상황에서 증기발생기 증기방출로 원자로냉각재계통을 냉각, 감압하여 밀봉누설량을 감소시키고 안전주입탱크의 주입을 유도하는 운전원 조치는 적절하다. 증기발생기 압력방출밸브는 축전지 전원 및 안전관련 계기용공기가 가용하여 주제어실에서 조작이 가능하다.

2.2.1.10 안전주입탱크 수동 격리

시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서 발전팀은

따라서 안전주입탱크를 격리한다. 상부의 질소가 원자로냉각재계통으로 주입되는 것을 방지하기 위해 안전주입탱크를 격리하는 운전원 조치는 적절하다. 1 MW 이동형발전차에 의해 출구격리밸브의 전원이 복구되지 않은 안전주입탱크는 질소를 배기하게 된다.

시나리오 4에서 발전팀은 안전주입탱크를 격리한다. 불필요하게 안전주입탱크의 냉각수가 노심으로 주입되는 것을 방지하기 위한 운전원 조치는 적절하다. 소내전원이 가용한 상태이므로 주제어실에서 안전주입탱크의 격리가 가능하다.

2.2.1.11 1 MW 이동형발전차 연결

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 비상운전절차서 1 MW 이동형발전차를 이동 배치하여 한 계열의 4.16 kV 안전모선에 전원을 공급하도록 하고 있다. 안전등급 축전지의 비필수부하를 차단하면 터빈구동 보조급수펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 이내에 1 MW 이동형발전차를 하나의 안전모선에 연결하는 운전원 조치는 적절하다. 1 MW 이동형발전차를 연결하여 축전지 충전이 재개되면 잔열제거계통 진입 조건까지 원자로냉각재계통을 계속 냉각 및 감압할 수 있다.

2.2.1.12 중압이동형펌프 기동

시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서 발전팀은 중압이동형펌프의 이동 배치를 요청하고 이 펌프를 기동하도록 하고 있다. 1 MW 이동형발전차가 연결된 후에도 용량문제로 충전펌프를 기동할 수 없으므로 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량 상실을 복구하기 위해 중압이동형펌프를 기동하는 운전원 조치는 적절하다.

중압이동형펌프를 이용하는 사고완화전략은 수립되었으나 이 펌프를 연결할 외부 주입유로는 설치되어 있지 않은 관계로 펌프 도입 단계에서 설치 예정이며, 중압이동형펌프의 발전소 배치시 펌프 기동과 관련된 절차서의 개발이 요구되었다.

2.2.1.13 3.2 MW 이동형발전차 연결

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 가정한 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 사고발생 [redacted] 3.2 MW 이동형발전차를 연결하여 한 계열의 4.16 kV 안전모선을 가압한다. 3.2 MW 이동형발전차 연결을 통하여 시나리오 3에서는 1차기기냉각수펌프 및 1차기기냉각해수펌프 기동이 가능하여 잔열제거계통을 운전할 수 있고, 시나리오 6, 7, 8, 9에서는 1차기기냉각수펌프 기동이 가능하여 고유량이동형펌프와 함께 잔열제거계통 운전이 가능하여 발전소를 안전정지 상태로 유지할 수 있으므로 적절한 조치로 판단된다. 또한, 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 제시된 바와 같이, 3.2 MW 이동형발전차가 연결될 경우 잔열제거펌프, 충전펌프, 격납건물 냉각팬, 필수냉각기 등의 기기를 각 1개 또는 1개 계열을 동시에 가동할 수 있다.

2.2.1.14 고유량이동형펌프 연결

시나리오 4, 5, 6, 7, 8, 9에서는 최종열제거원 상실 이후 잔열제거계통을 운전하기 위해 고유량이동형펌프를 연결하여 운전한다. 잔열제거계통을 운전하기 위해서는 잔열제거열교환기에 1차측기기냉각수가 공급되어야 하고 1차측기기냉각수에 전달된 잔열은 최종열제거원이 상실된 상황에서 고유량이동형펌프의 운전으로 제거될 수 있으므로 고유량이동형펌프의 연결은 적절한 운전원 조치이다.

고유량이동형펌프를 이용하는 사고완화전략은 수립되었으나 이 펌프를 연결할 외부 주입유로는 설치되어 있지 않은 관계로 펌프 도입 단계에서 설치 예정이며, 고유량이동형펌프의 발전소 배치 시 펌프 기동과 관련된 절차서의 개발이 요구되었다.

2.2.1.15 잔열제거계통 운전

모든 시나리오에서 조치가 필요한 잔열제거계통 운전은 2차냉각수 재고량에 영향을 받지 않고 장기적으로 발전소를 저온정지의 안전정지 상태로 유지하기 위해 요구되는 적절한 운전원 조치이다. 시나리오 3에서는 3.2 MW 이동형발전차, 시나리오 4에서는 고유량이동형펌프, 시나리오 6, 7, 8, 9에서는 두 개 모두가 연결되면 한 계열의 잔열제거계통 운전이 가능하다.

2.2.1.16 저압이동형펌프 연결

대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 비상운전절차서 [redacted] 증기발생기를 이용한 냉각 및 감압 운전 중 증기발생기 압력이 9 ㎏/㎠ 미만으로 감소하여 터빈구동보조급수펌프 운전이 불가능하게 될 경우, [redacted] 이동형저압급수펌프 및 외부주입유로를 이용하여 증기발생기에 급수를 공급하도록 하고 있다.

중대사고 상황인 시나리오 10에서는 소내 고정형 설비 고장으로 증기발생기 또는 원자로냉각재계통에 급수공급이 불가능할 경우 [redacted] 외부주입유로에 저압이동형펌프를 이용하여 냉각수를 공급하도록 하고 있다.

소내전원상실이 장기화되고 붕괴열 감소로 터빈구동보조급수펌프가 운전될 수 없는 상황 또는 중대사고 상황에서 저압이동형펌프 및 외부주입유로를 이용하여 증기발생기 및 노심에 냉각수를 공급하는 조치는 적절하다. 현재 한빛1,2호기는 증기발생기 및 원자로냉각재계통에 외부주입유로가 설치되어 있어 저압이동형펌프를 이용한 급수공급이 가능하다.

### 2.2.2 주요 운전원 조치 직무분석 및 이행가능성 평가

설계기준초과 및 극한재해 사고시나리오 상황에서 대응전략 이행에 요구되는 주요 운전원 조치의 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 운전원 조치가 주제어실을 가정한 시뮬레이터 및 한빛1,2호기 현장에서 수행되는 관계로 인간공학 유효성 평가 기간 중 3개조의 수행 소요시간을 평균하여 산정하였으며 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다.

단, 한빛1,2호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서는 잔열제거계통 운전(안전정지상태 유지)에 [redacted] 한계시간이 모두 무한대로 변경되므로 이번 평가에서 확인된 주요 운전원 조치의 여유시간으로 미루어 충분한 시간의 확보가 예상된다.

직무분석 시 인적오류 분석을 수행하기 위해 표 7-1과 같이 SHERPA

(Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) 방식에 따라 직무형태를 구분하고, 표 7-2와 같이 각 직무형태별로 가장 가능성 있는 인적오류 형태와 발생가능성을 결정하였다. 인적오류 형태와 발생 가능성을 결정하기 위해 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서의 직무공간, 가용통신, 직무공간의 조명, 방사선, 안전위협요소 등의 직무환경과 조치 대상기기의 인간-기계 연계설비 가용성 및 대체방안 유무 등을 검토하였다.

또한, 인적오류 가능성은 SHERPA 기준에 따라 1) Frequent(자주 발생 가능한 인적오류), 2) Probable(발생 가능한 인적오류), 3) Occasional(가끔 발생 가능한 인적오류), 4) Remote(거의 일어나지 않는 인적오류), 5) Improbable(일어날 확률이 매우 적은 인적오류)와 같이 5단계로 분류하였으며, 운전전문가그룹의 판단으로 인적오류의 심각도를 1) Catastrophic(매우 심각한), 2) Critical(심각한), 3) Marginal(심각하지 않은), 4) Insignificant(매우 심각하지 않은)의 4단계로 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. 단, 대체교류디젤발전기 기동은 예상 소요시간 [redacted] 기동이 어려워 관련 절차서의 개선이 요구된다. 또한, 직무분석을 통한 인적오류 발생 가능성은 시나리오 4, 6, 9와 동일하다.

2.2.2.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건은 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 가정한 시나리오 6과 고유량이동형 펌프 이동 및 설치를 제외하고는 주요 운전원 조치가 동일하고, 예상 소요시간,

한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과는 시나리오 6과 동일하며, 직무분석을 통한 인적오류 발생 가능성 또한 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.4 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 4)

최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-5와 같으며, 주요 운전원 조치에 대해 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다.

최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 인적오류 분석결과는 표 7-6과 같으며, 별도의 개선이 요구되는 인적오류는 확인되지 않았다.

2.2.2.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한빛1,2호기는 대체열제거원이 없으므로 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 4)와 동일하다.

2.2.2.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-7과 같으며, 주요 운전원 조치에 대해 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다. AC 전원을 복구할 수 있는지 여부를 사고 발생 후 확인하고, 불만족 시 조치로 다중방어지침서 현장 운전원이 축전지 비필수부하 차단을 사고 발생 후 30분 이내에 수행해야 하지만 조작대상 차단기 수량 및 조명 등을 고려할 때 초과 가능성이 있어 개선이 필요한 것으로 분석되었다. 또한, 고정형 교류전원 공급장치가 복구될 수 있을지 주제어실 운전원이 판단하기 어렵고, 조치시간의 지연을 야기할 수 있기 때문에 절차서의 라는 문구를 삭제할 것으로 확인하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 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.

소내정전이 진행 중일 경우 [redacted] 비상디젤발전기 기동이 실패하면 [redacted] 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 4.16kV 교류안전모선을 가압하도록 하고 있다. 그러나 한빛 1,2호기 모두 소내정전인 상황에서는 주제어실에서 대체교류디젤발전기를 즉시 기동할 수 없어 [redacted] 안전모선을 가압할 수 없는 것으로 분석되었다. [redacted] 기동되면 축전지 충전이 가능하며, 실패하여도 축전지 비필수부하 차단을 통해 축전지 수명을 [redacted] 연장할 수 있고, 1 MW 이동형발전차를 연결하면 축전지 연속 충전이 가능하다.

축전지 비필수부하 차단 시 예상되는 인적오류는 [redacted]차단이 불가하여 축전지수명을[redacted] 연장할 수 없거나, 실수로 차단해서는 안되는 필수부하를 차단하는 것이다. 비필수부하 차단에[redacted]충전기 가압이 가능한 1 MW 이동형발전차가 [redacted]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 [redacted] 비필수부하 차단 후 필수부하의 투입여부를 확인하는 단계가 있어 실수로 차단한 필수부하를 다시 투입할 수 있다.

1 MW 이동형발전차 연결준비 과정에서 예상되는 인적오류는 2시간 이내에 교류전원 복구가 가능한지 여부를 결정하는데 시간이 지체되어 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되고 축전지 수명을 [redacted] 연장할 수 없는 것이다. 비필수부하 차단이[redacted] 초과하여도 앞서 언급한 바와 같이 1 MW 이동형발전차 및 중형발전기를 연결하여 축전지 방전 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결함으로서 가압에 실패하여 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전되는 것이다. 이 경우에도 [redacted] 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 보호하므로 즉시 재기동이 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 트립되므로서 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기에 의해 발전차가 손상되지 않으므로 즉시 재기동이 가능하다.

2.2.2.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건을 동반한 지진해일 조건은 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 가정한 시나리오 6과 주요 운전원 조치가 동일하고, 예상 소요시간, 한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과 및 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 조건을 동반한 해일 및 강우 조건은 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 가정한 시나리오 6과 주요 운전원 조치가 동일하고, 예상 소요시간, 한계시간이 동일하므로 소요시간 분석결과 및 개선이 요구되는 직무 및 인적오류는 시나리오 6과 동일하다.

2.2.2.9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과는 표 7-10과 같으며, 주요 운전원 조치에 대해 설계기준초과 사고 상황에서 충분한 여유시간이 확보될 수 있음을 확인하였다.

그러나 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건(시나리오 6)과 같이 사고 발생 후 축전지 비필수부하 차단까지 [redacted] 초과할 수 있는 가능성이 있어 개선이 필요한 것으로 분석되었다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원 조치의 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.

소내정전이 진행 중일 경우 비상디젤발전기 기동이 실패하면 계통-3593 절차서에 따라 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 4.16kV 교류안전모선을 가압하도록 하고 있다. 그러나 한빛 1,2호기 모두 소내정전인 상황에서는 주제어실에서 대체교류디젤발전기를 즉시 기동할 수 없어 안전모선을 가압할 수 없는 것으로 분석되었다. 기동되면 축전지 충전이 가능하며, 실패하여도 축전지 비필수부하 차단을 통해 축전지 수명을 연장할 수 있고, 1 MW 이동형발전차를 연결하면 축전지 연속 충전이 가능하다.

축전지 비필수부하 차단 시 예상되는 인적오류는 차단이 불가하여 축전지수명을 연장할 수 없거나, 실수로 차단해서는 안되는 필수부하를 차단하는 것이다. 비필수부하 차단에 초과되어도 충전기 가압이 가능한 1 MW 이동형발전차가 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 비필수부하 차단 후 필수부하의 투입여부를 확인하는 단계가 있어 실수로 차단한 필수부하를 다시 투입할 수 있다.

1 MW 이동형발전차 연결준비 과정에서 예상되는 인적오류는 교류전원 복구가 가능한지 여부를 결정하는데 시간이 지체되어 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되고 축전지 수명을 연장할 수 없는 것이다. 비필수부하 차단이 초과하여도 앞서 언급한 바와 같이 1 MW 이동형발전차 및 중형발전기를 연결하여 축전지 방전 방지가 가능하다.

1 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결하므로서 가압에 실패하여 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전되는 것이다. 이 경우에도 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 보호하므로 즉시 재기동이 가능하다.

3.2 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결하므로서 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 모선부하차단기를 개방하지 않거나 발전차 용량을 초과하는 부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되므로서 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기에 의해 발전차가 손상되지 않으므로 즉시 재기동이 가능하다.

2.2.2.10 중대사고 (시나리오 10)

한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서에서는 설계기준 초과 및 극한자연재해 사고 상황 발생 후 터빈구동 보조급수펌프에 의해 SG에 급수공급이 가능한 것으로 가정하여 최초 사고 이후 중대사고 진입까지 걸리는 것으로 분석하였다. 반면에 시나리오-10 유효성평가에서는 평가시간을 고려하여 터빈구동 보조급수펌프가 즉시 상실되는 것을 가정하여 평가를 진행하였으며, 시뮬레이터에 중대사고가 모델링되어 있지 않은 관계로 강사의 메시지 부여에 의해 중대사고 진입을 통보하고 이후에는 모의 조작에 의해 실습을 진행하였다. 따라서 단순 소요시간 비교가 어려워 중대사고 진입 이후의 주요 운전조치 소요시간을 비교하여 여유시간을 산정하였으며 그 결과는 표 7-13과 같다. 또한 중대사고지침서 수행에 따른 운전원 조치 및 비상기술지원실의 의사결정 과정에 대한 직무 및 인적오류 분석결과는 표 7-14와 같으며, 별도로 개선이 요구되는 인적오류는 확인되지 않았다.

## 2.3 주요 자원의 적절성

주요 자원의 적절성 평가는 2.1절 사고대응전략 수립의 적절성 및 2.2절 주요 운전원 조치의 적절성에서 도출된 주요 운전원 조치를 수행하기 위한 주요 자원(고정형 설비, 이동형 설비, 절차서/지침서, 인력(소·내외 조직 포함), 교육훈련 프로그램 등)의 적절성과 설계기준을 초과하는 극한재해 시 주요 자원의 활용가능성을 평가하기 위함이다.

주요 자원의 적절성 평가를 위해 고려된 사항은 다음과 같다.

○ 주요 운전원 조치를 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 소내·외의 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

한빛1,2호기는 극한자연재해를 동반한 모든 설계기준초과 및 극한자연재해 조건에서 현재의 인간-기계 연계설비를 이용하여 적절하게 사고대응조치를 수행하였고, 평가과정에서 아래와 같은 개선 사항이 도출되었다.

#### 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 재고기기 목록은 표 7-13 ~ 표 7-16과 같으며, 평가 결과는 다음과 같다.

주제어실의 사용후연료저장조 온도 및 수위 지시계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 감시가 불가능한 것으로 평가되었으나, 후쿠시마 후속조치로 현재 개선이 진행중인 것으로 확인되었다.

주제어실의 증기발생기 광역수위지시계는 협역수위지시계와 달리 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 협역수위 이하의 수위감시가 불가능하여 사고완화전략 수립 및 이행에 어려움이 있을 것으로 평가되었다.

장기교류전원 상실 상황에서 안전등급 축전지의 수명은 사고완화전략을 수행하는데 핵심적인 요소이며, 축전지의 잔여수명은 전압을 통해 확인이 가능하나 주제어실의 안전등급 125 V 직류모선의 전압계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 감시가 불가능한 것으로 평가되었다.

냉각재가 노심으로 주입되고 있음을 보여주는 고압 및 저압 안전주입 유량지시계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고상황에서는 확인이 불가능한 것으로 평가되었다.

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 재고기기 목록은 표 7-22과 같으며, 평가 결과는 다음과 같다.

최종열제거원 상실 상황에서 충전펌프 대체냉각수 공급을 위해 조작이 요구되는 배수밸브(가 철판으로 된 PIT Cover 하부에 있어, 볼트로 체결된 이 철판을 운전원이 인력으로 인양하고 밸브를 조작하기가 불가능한 것으로 평가되었다.

장기교류전원 상실 상황에서 차단해야 할 안전관련 비필수 직류부하가 많고(총 32개 차단기), 분전반 내에 필수부하와 비필수부하 차단기가 혼재되어 있어 차단기 목록과 일일이 대조하며 차단하는데 시간이 많이 소요될 가능성이 있고, 필수부하를 잘못 차단하는 오류도 발생할 수 있는 것으로 평가되었다.

2.3.1.3. 이동형설비 인간-기계 연계설비 평가

이동형발전차에 연료를 보충하기 위해 비상디젤발전기의 연료유저장탱크에 유류관을 연결하여 연료를 공급받아야 한다. 그러나 지하에 설치된 비상디젤발전기 연료유저장탱크의 출입구가 밀봉되어 있지 않아 극한자연재해 상황에서 침수될 가능성이 있으므로 개선이 요구된다.

이동형발전차활용 시점에서 안전 가동에 영향을 미칠 수 있는 자연현상(예, 악천우 또는 태양광에 의한 반사 등)에 대비하여 이동형 발전차량의 설계/운전조건은 옥외형으로 방수형으로 설계, 제작되어 있어 우천시에도 운용이 가능한 것으로 검토되었고 태양광에 의한 반사에 대비하여 LED 창 위에 햇빛 가리개가 착탈식으로 설치되어 있어 적절한 것으로 평가되었다.

### 2.3.2 소외자원 평가

한빛1,2호기 스트레스테스트의 대응전략에 필요한 소외자원은 다수호기 사고발생시 한빛부지 내 발전소에 추가로 투입이 가능한 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프이며, 3.2 MW 이동형발전차는 상기 2.3.1.3절의 이동형설비 인간-기계 연계설비 평가와 동일한 것으로 평가되었으며, 고유량이동형펌프는 현재 현장에 배치되지 않아 평가가 불가능하였다.

### 2.3.3 절차서 평가

2.3.3.1

장기교류전원 상실시 이동형발전차에 의해 임시적으로 가압되어 있는 경우는 이에 해당되지 않으나 가압된 것으로 판단하여 단계 적용에 혼동이 유발되므로 개선이 필요한 것으로 평가되었다.

따라 축전지 비필수부하를 차단하도록 되어 있으나, 1, 2차 대용량 비필수부하 및 추가적인 비필수부하 차단을 수행하도록 되어있다. 따른 축전지 비필수부하 차단은 장기교류전원 상실 상황에서만 수행하도록 절차서 보완이 필요한 것으

로 평가되었다.

장기교류전원 상실이 진행 중일 경우, 모든 조건 만족 시 비상기술지원실의 권고에 따라 적절한 절차서로 진입하도록 하고 있고 적절한 절차서는 내용 상 잔열제거계통 운전절차서를 의미한다고 판단된다. 이 경우 다음 두 가지 조건은 한빛1,2호기 잔열제거계통운전 진입조건에 해당되지 않는 것으로 검토되었다.

모든 교류전원상실 상황에서 비상디젤발전기 기동에 실패하면, 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 안전모선을 가압하도록 하고 있으나, 붙임-8 절차가 계 주제어실 비상기동 절차와 일치하지 않는 것으로 분석되었다.

회복조치 내용과 맞지 않다. 스트레스 테스트 유효성평가를 위한 단계 번호에 맞게 해당 주의사항을 수정할 필요가 있다.

장기교류전원 상실이 진행 중인 상황에서 필수계기들의 가용 여부를 확인하도록 되어 있다. 0.3g 이상의 지진을 동반하는 사고 상황에서는 비안전등급 인버터의 상실과 안전등급 축전지 비필수부하 차단으로 주제어실의 다수 계기들이 가용하지 못하게 될 수 있으나, 계기번호 없이 계기명만 기술되어 있어 해당 필수계기를 명확히 구별하기 어려운 것으로 평가되었다.

2.3.3.2

한빛1,2호기 주제어실 지진경광

등을 리셋하는 절차가 없어 여진 또는 후속 지진 발생 시 이를 인지하지 못할 수 있는 것으로 분석되었다.

이런 내용이 기술되어 있지 않다. 따라서 최종열제거원 상실로 1차측기기냉각수 온도가 상승해도 다른 운전변수가 제한치를 초과하지 않으면 원자로냉각재펌프를 계속 운전할 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

1차기기냉각해수계통 두 계열 모두 상실 시 비상디젤발전기가 기동되지 못하도록 하는 내용이 비정상운전절차서

2.3.3.3 계

이동형발전차 연결을 대비하여 전원을 공급할 안전등급 4.16 kV SWGR 차단기를 개방상태로 배열하도록 하고 있으나, 개방의 의미가 명확하지 않은 것으로 검토되었다. 즉, 단순히 Open 상태만을 유지한다면 불시 자동 기동신호에 의해 대용량부하가 기동될 수 있으며, 이 경우 운전 중인 이동형발전차가 과부하에 의한 저-속도 신호로 정지될 수 있는 것으로 평가되었다.

이동형발전차 연결을 대비하여 전원을 공급할 안전등급 4.16 kV SWGR 차단기 개방상태를 확인하도록 되어 있으나, 기동용변압기 측 정상 및 대체 인입차단기가 누락되어 있어 차단기 배열 오류 시 345 kV 기동용변압기가 역가압될 수 있는 위험이 있는 것으로 분석되었다.

도입 예정인 1 MW 이동형발전차가 4.16 kV 안전모선에 연결된 상태에서 운전원이 과부하 트립을 우려하여 기동 가능한 부하와 기동할 수 없는 부하를 쉽게 결정하지 못할 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

연료이송펌프, 전원케이블, 연료이송호스가 이동형발전차에 탑재되어 있는 것으로 기술되어 있으나, 실제 이송트럭에 실려서 이송되고 있어 관련 절차서 내용 수정이 필요하다.

2.3.3.4

중대사고 진입 시 첫 단계로 수소분석기를 운전하도록 되어 있으나, 절차는 주제어실에서 즉시 운전이 가능한 절차가 아니고, 현장 밸브 및 전원 조작 등이 포함된 초기 기동절차이므로 개정이 필요한 것으로 평가되었다.

2.3.3.5

자연재해 발생 시 백색비상 발령상황 기준이 모호하여 청색비상 발령이 지연되거나 누락될 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

설계기준을 초과하는 지진발생 시 비상발령 및 비상요원 소집과 관련한 본사요청 절차가 상세하지 않은 것으로 평가되었다. 방사선비상 발령상황이 되면, 비상방송, 전화, ACS 사용이 불가한 경우에 본사 어느 조직 또는 경로를 통해 요청하는지 구체적으로 기술되어 있지 않다.

비상 상황 시 사고대처의 신속성을 고려한 발전소 시설보안 및 출입 절차는 중요하다. 이를 위하여 비상요원 및 비상대응설비의 출입절차의 최적화가 필요하다. 출입인원과 장비 등 이동의 편의를 최대한 고려하여 비상요원 및 비상대응설비의 출입절차의 최적화 및 비상시 출입가이드라인 정립이 필요하다.

2.3.3.6

제시된 부하목록에는 차단기 번호, 기기번호, 기기명만 있고 상세부하를 알 수 없어 차단기를 개방할 경우 주제어실에 나타나는 영향(또는 증상)을 예상할 수 없는 것으로 평가되었다.

필요한 중압이동형펌프가 포함되어 있지 않다. MACST 펌프는 포함되어 있으나 통상 운전원이 이를 중압이동형펌프로 인식하지 못할 가능성이 있어 개선이 필요한 것으로 분석되었다.

### 2.3.4 인력/조직 평가

한빛1,2호기에 설계기준을 초과하는 극한재해 사고 상황에서 가용한 인력수준 분석으로 도출된 종합 결과는 표 7-18과 같다. 본 인력/조직 평가는 한빛1,2호기 운전조, 비상기술지원실, 초동소방대, 이동형발전차 운용과 관련된 인원 및 조직에 대해 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 단, 평가 시 2.1절 및 2.2절에서 분석된 일부 장비 (1 MW 이동형 발전차, 저압이동형펌프, 고유량이동형펌프)는 상세 수행절차 및 사고관리계획서 상세내용이 확정되지 않아 본 평가에서는 제외하였다.

2.3.4.1 주제어실 운전원

주제어실 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같다. 현재 한빛1,2호기 주제어실 운전원은 [redacted] 있다. 발전소 조직 및 인원 중에서 설계기준초과 및 극한자연재해 상황에서 필요한 [redacted]

새벽 시간대의 극한자연재해 상황에서 발전소는 비상발령으로 인한 소집 이전의 시간까지 최소의 인력으로 발전소의 안정화를 진행해야 한다. 특히 주제어실은 사고 상황 발생 시 운영지원실 및 비상기술지원실의 발족이전 까지는 상황 파악, 사고 상황 보고, 비상발령, 안정화 운전, 발전소 안전변수 확인 등 발전소 안전조치를 위한 인원이 필요하다.

한빛1,2호기 주제어실 발전팀은 직제상 6명으로 구성되어 있으나, 일부 운전조를 제외한 나머지 운전조는 [redacted] 5명으로 운영되고 있어 인간공학 유효성 평가에서는 [redacted] 5명의 주제어실 운전원을 대상으로 평가를 진행하였으나 4개 시나리오에서 인력부족과 관련된 문제는 발생되지 않았다. 그러나 주제어실은 사고상황 발생 시 운영지원실 및 비상기술지원실의 발족이전까지는 상황 파악, 사고 상황 보고, 비상발령, 안정화 운전조치, 발전소 안전변수 확인 등 [redacted] 많은 직무가 예상되므로 상대적으로 직무의 양과 부하가 낮은 전력설비운전원이 극한 상황에서 다른 주제어실 운전원을 지원할 수 있는 훈련을 지속적으로 수행하여, 극한자연재해 상황에서의 직무를 적절히 분배할 필요가 있다.

2.3.4.2 현장 운전원

현장 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같다. 현재 한빛1,2호기 현장 운전원은 [redacted] 있다. 현장 운전원 수로 인해 직무수행 지연이 발생하거나, 직무수행의 어려움이 발생되는 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 [redacted] 한빛1발전소의 기준인원이다. 비상기술지원실은 설계기준초과 및 극한자연재해 상황 발생 시 주제어실과의 협업을 통해 발전소의 안정화를 시키는데 목적이 있다. 비상기술지원실의 인력수준은 적절한 것으로 검토되었으며, 비상기술지원실 요원으로부터 제기된 의견도 없었다.

2.3.4.4 초동소방대

한빛1,2호기 초동소방대 조직(총5인)은 초동소방대장 )과 초동소방대원( )으로 구성되어 있으며, 초동소방대의 역할은 발전소 화재시 화재구역 확인 및 자체소방대와 협력하여 화재 초기진압을 수행해야 한다. 지진화재 발생 시 발전팀은 지진으로 인한 발전소 상태 감시 및 긴급조치를 수행해야 한다.

한빛1,2호기 인간공학 유효성 평가시 0.3g 지진으로 인한 화재 상황을 동반하는 조건에 대한 대응능력을 평가하였으며, 초동소방대 출동으로 인한 직무수행 지연이나 직무수행의 어려움이 발생되는 일은 없는 것으로 평가되었다.

2.3.4.5 이동형발전차 운전원

이동형발전차 운전원은 한빛원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 한빛원자력본부는 현재 3.2 MW 이동형발전차를 보유하고 있으며, 이를 운전할 수 있는 운전면허 소지자는 이다. 또한 현재의 거주지는 모두 한빛원자력본부 인근인 것으로 확인되었다. 인원은 새벽시간 거주지에서 극한자연재해 발생 시 도로 상황이나, 기타 다른 문제점들을 고려해도 한빛원자력본부까지 도착하면 문제없는 것으로 분석되었다. 이동형 발전차 운전원이 한빛원자력본부에 도착해야 하는 이유는 다음과 같다.

한빛1,2호기 안전등급 축전지 가용시간은 최대 간이고, 비필수 직류부하 차단시 사용이 가능하다. 특히, 한빛1,2호기 인간공학 유효성 평가를 통해 총 2차례 확인해 본 결과, 이동형발전차가 출동 연락을 받고, 발전소의 안전계통에 가압되는 시간은 측정되었다. 그러므로 운전원은 최소한 이동형발전차가 주차되어 있는 장소까지는 도달해야 한다.

2.3.4.6 지게차 운전원

지게차 운전원 기준은 한빛원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 지게차는 이동형발전차와 4.16kV 안전모선을 연결하는 전력케이블, 이동형발전차에 연료를 주입하기 위해 비상디젤발전기 연료저장탱크와 연결이 필요한 연료이송케이블 및 연료이송펌프를 트럭에 실어야 하는 경우에 필요하다. 지게차 운전은 현재 한빛본부 KPS 직원이 수행하고 있으며, 이동형발전차 운전원과 동일하게 한빛원자력본부에 도착하면 문제가 없을 것으로 평가되었다.

2.3.4.7 트럭 운전원

트럭 운전원 기준은 한빛원자력본부 기준으로 표 7-18과 같다. 트럭은 전력케이블과 연료이송펌프 그리고 연료이송케이블을 설치지점까지 운반하는데 필요하다. 트럭 운전원은 현재 한빛원자력본부 [redacted] 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. 이동형발전차와 관련하여 전력케이블 포설과 연료유 공급배관 포설 및 설치 비상대기요원은 [redacted] 구성되어 있다. 전력케이블 포설요원은 모두 [redacted]이고, 연료유 공급배관 포설 및 설치 요원은 모두 [redacted]이다. 이들은 야간 및 주말(휴일 포함)에 발전소 복귀가 가능한 지역 내 유선상으로 대기하고 있으며, 모두 3개조로 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 한빛1,2호기 운전원 및 소내·외 비상대응조직원의 교육훈련 계획을 다음과 같이 평가하였다.

2.3.5.1 방사능방재교육

한빛1,2호기 운전원을 포함한 비상대응요원에 대한 방사능방재 교육은 한수원 전사 [redacted] 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 7-20와 같이 신규교육 과정과 보수교육 과정으로 구성된다.

한빛본부 방사능방재 보수교육 중 사고완화 및 평가 담당직무와 관련해서 발전 교대근무자는 본부 훈련센터에서 교육을 실시하나, 비상기술지원실장에 대한 중대사고 교육은 연간 [redacted]한빛본부 훈련센터에서 실시하고 있다.

방재요원에 대한 신규교육은 총 [redacted] 직무와 관련된 내용으로 실시하고, 교육시간의 60%까지 원격교육을 실시할 수 있으며, [redacted] 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.

2.3.5.2 방사능방재훈련

방사선비상계획 및 수행절차서의 적합성과 비상장비 및 통신망, 주민홍보 체제 및 대내·외 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 원자력본부 별로 5년에 1회 실시한다.
○ 합동훈련: 방사선비상계획구역의 전부 또는 일부를 관할구역으로 하는 시·도지사 및 시장·군수·구청장 등 관할구역에 소재하는 지정기관 및 원자력사업자가 참여하는 훈련으로 원자력본부 별로 2년에 1회 이상 실시한다.
○ 전체훈련: 발전소내의 전 비상조직이 참여하는 훈련으로 제1, 2, 3발전소 별로 1년에 1회 이상 실시한다.
○ 부분훈련: 발전소내의 비상조직별로 참여하는 훈련으로 제1, 2, 3발전소 별로 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 사고 상황을 가정하여 방재활동을 주목적으

로 실시하고 있다.

2.3.5.3 비상운전절차서 교육

한빛1,2호기 운전원이 비상운전절차서의 구성, 사고완화전략 및 기술적 배경을 이해하고 비상운전절차서를 수행하는데 필요한 실무지식을 갖추도록 한빛1발전소 교육계획을 수립, 시행하고 교육이력을 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.

따라 수립된 운전원에 대한 비상운전절차서 교육계획은 2018년도 한빛본부 교육계획서의 한빛1,2호기 발전주제어실실무반 과정과 한빛1,2호기 발전현장실무반 과정에 기술되어 있으며, 모든 교과목이 2년 주기로 반복되도록 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 모두 만족하고 있고, 실습은 모든 비상운전절차서 사용이 가능하도록 다양한 사고상황을 가정하였으나, 스트레스테스트에서 가정한 장기 전원상실 또는/그리고 최종열제거원 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, 극한자연재해 사고 상황을 가정하여 다중방어운영지침서와 비상운전절차서가 연계된 훈련프로그램을 시행하여 운전원의 사고대응능력을 제고할 수 있도록 운전원 교육훈련프로그램의 수정이 요구된다.

현장 운전원은 비상운전절차서에 대한 강의실 교육은 시행하고 있으나 시뮬레이터실습은 시행하고 있지 않다. 극한자연재해 사고 상황에서 사고대응전략 수행을 위해서는 주제어실 운전원과의 협업이 중요하고 많은 현장기기의 조작이 요구되

는 반면, 통신부재 및 조명상실로 기기조작환경은 악화된다. 따라서 주제어실 운전원의 비상운전실습에 동참하여 발전소 현장에서 사고대응전략 수행에 요구되는 기기확인이 가능하도록 개선이 요구된다.

2.3.5.4 중대사고관리지침서 교육

한빛1,2호기는 중대사고 발생에 대비하여, 운전원과 방사능 방재요원이 중대사고관리지침서의 구성 및 기술적 배경을 이해하고 사고완화전략을 원활히 수행할 수 있는 능력을 배양하도록 전사 따라 관련 교육훈련을 시행하고 있다. 중대사고관리지침서 교육훈련은 필요 시 발전소 교육훈련과 연계하여 수행하도록 되어 있다. 방재요원은 운전지원조, 안전분석조 및 방사화학조가 중대사고관리지침서 교육 대상이며, 중대사고관리지침서 교육은 표 7-27와 같이 중대사고관리지침서 최초교육, 중대사고관리지침서 재교육 및 중대사고관리지침서 개정사항 교육으로 구성된다.

중대사고관리지침서에 대한 교육방법은 집합교육, 현장실습교육 및 전파교육으로 구성되며, 평가는 교육시행 부서의 평가기준에 따른다. 교육과정별 교육내용은 표 7-28과 같다.

따라 수립된 운전원에 대한 중대사고관리지침서 교육계획은 2018년도 한빛본부 교육계획서의 한빛1,2호기 발전주제어실실무반 과정과 한빛1,2호기 발전현장실무반 과정에 기술되어 있으며, 모든 교과목이 반복되도록 편성되어 있다. 발전주제어실실무반과 발전현장실무반 과정의 중대사고 관련 교육훈련 내용 및 시간은 표 7-29와 같다.

한빛1,2호기의 운전원에 대한 중대사고 교육훈련 검토결과, 중대사고지침서 교육은 강의실 이론교육과 MAAP코드 실습을 시행하고 있으나, 중대사고가 모델링되어 있지 않아 시뮬레이터 실습은 시행하지 않고 있다. 스트레스테스트 후속조치로 극한재해 사고 상황에 대비하여 MACST 설비 및 비상외부주입 설비가 구비될 예정이므로, 이를 반영하여 중대사고관리지침서를 개정하고 스트레스테스트에서 가정한 사고시나리오에 대해 교육 및 시뮬레이터훈련이 요구된다. 이를 위해서는 중대사고 및 MACST 설비가 모사되도록 한빛1,2호기 시뮬레이터의 개선이 요구된다.

2.3.5.5 교육훈련용 설비

한빛1,2호기 교육훈련용 시뮬레이터는 중대사고 열수력 모델이 구현되지 않아 스트레스테스트의 중대사고 구현이 불가능하다. 따라서 중대사고 열수력 모델 구현이 필요하며, 동시에 극한자연재해 사고 상황에 대비하여 도입예정인 이동형설비들을 시뮬레이터에 반영하여 구현이 필요한 것으로 평가되었다.

2.3.5.6 이동형 설비에 대한 교육

한빛1,2호기에는 4.16kV 이동형발전차, 견인식 이동형발전기 및 저압이동형펌프 등 이동형설비가 도입되어 운용되고 있으나, 이들 설비를 운용하는 담당자에 대한 교육훈련프로그램이 마련되어 있지 않다. 향후 극한 자연재해 사고 상황에 대비하여 도입 예정인 1MW 이동형발전차, 이동형 중압펌프, 고유량이동형펌프 등 다수의 이동형 설비를 운용하게 될 담당자에 대해 이들 이동형 설비의 이동, 설치 및 운전 방법에 관한 체계적인 교육훈련프로그램이 요구된다.

### 2.3.6 소내·외 자원활용 전략 및 실행 능력 평가

소내·외 자원활용 전략 및 실행 능력 평가를 위해 한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 고려하고 있는 10가지의 조건에 대해 각 운전조치에 따른 안전조치 수행내용, 관련 절차서, 절차서 수행단계, 절차서간 전환단계, 대응단계, 대응설비, 의사결정조직, 수행조직 및 동시수행/동일설비 여부를 을 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. 한빛1,2호기 발전소 비상운영을 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)

한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서 제4장 및 제5장에서 고려하고 있는 10가지의 조건에서 의사결정에 필요한 조직은 한빛1,2호기 발전팀과 비상기술지원실로 구성된다. 발전팀은 주제어실 운전원( )과 현장운전원( )으로 구성되며, 방사선비상 발령이후 비상기술지원실이 발족되면 비상운전반으로 비상기술지원실 조직으로 귀속된다. 비상기술지원실은 비상운영지원실( ), 기술지원반, 방사선대책반, 비상운전반, 운전지원반으로 구성된다.

발전팀 주제어실 운전원의 인력은 호기별 기준으로 표 7-18과 같이 [redacted] 구성되어 있다. 현장 운전원의 인력은 호기별 기준으로 한빛1호기 발전팀 현장 운전원은 1차측 3[redacted]), 2차측 [redacted]으로 구성되어 있으며, 한빛2호기 현장 운전원은 1차측 [redacted], 2차측 [redacted]으로 구성되어 있다. 그리고 방사선비상발령 이후 비상기술지원실의 발족과 함께 발전팀은 비상운전반으로 전환되며, 비상기술지원실 운전지원반과 함께 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상기술지원실의 인력은 기[redacted]구성되며, 비상기술지원실 조직의 역할은 한빛본부 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. 한빛1,2호기 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.

2.3.6.2 소내외 자원활용 전략

한빛1,2호기 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 한빛본부내 이동형설비 차고지에 배치되어 있는 3.2 MW 이동형발전차, 저압이동형펌프 및 추후 배치 예정인 1 MW 이동형발전차, 고유량이동형펌프를 활용하여 사고대응을 수행한다.

소내외 자원활용 전략에 대해 평가한 결과 현재 한빛1,2호기에 배치되어 있는 3.2 MW 이동형발전차 운영절차서에 따르면 4.16 kV 이동형 발전차에 관한 제반사항의 책임은 발전팀장에게 있으며, 중대사고관리지침서에서는 저압이동형펌프에 관한 제반사항의 책임은 비상기술지원실장에게 있다. 극한자연재해 상황에서의 이동형설비의 운영의 책임 및 권한이 다르며, 발전소 사고 발생이후 발전소 안전 조치를 수행해야 하는 4.16 kV 이동형발전차에 대한 전반적인 운영은 부적절한 것으로 평가되었다. 따라서 운영기술능력 평가에서 고려하고 있는 극한자연재해 극복을 위한 이동형설비와 관련된 자원활용 전략은 비상기술지원실장으로 이관하는 것이 적절한 것으로 평가되었다.

## 2.4 인간공학 유효성 평가

인간공학 유효성 평가는 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원 조치 및 주요 자원 적절성 평가결과를 토대로 실제 한빛1,2호기 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 개선사항 도출

한빛1,2호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 위해 10개의 사고시나리오 중 평가기간, 수행 절차서의 중복, 시뮬레이터 활용도 및 현장조작 검증 필요성 등을 종합적으로 검토한 결과, 대표성을 가지고 있는 4개 시나리오를 선정하였다.

한빛1,2호기 스트레스테스트 보고서에 따라 시나리오 1, 2, 5는 발전소의 열수력 거동이 시나리오 4와 유사하며, 시나리오 3, 7, 8은 발전소의 열수력 거동이 시나리오 6과 유사함에 따라 시나리오 4와 6을 평가하고, 한빛1,2호기의 극한자연재해와 관련된 시나리오 9 및 중대사고와 관련된 시나리오 10에 대해서 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 수행하는 것으로 결정하였다. 따라서 한빛1,2호기 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 최종열제거원 상실(시나리오 4 )

#### 2.4.1.1 가정사항 및 사고대응전략 평가

최종열제거원 상실과 관련한 가정사항은 다음과 같다.

최종열제거원 상실과 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

취수구 침수로 순환수펌프가 정지되고 복수기 저-진공 신호에 의해 터빈이 자동 정지되었으며, 터빈정지 신호에 의해 원자로가 자동 정지되었다. 원자로가 정지되

자 모든 운전조는 [redacted] 정상 진입하였다.

안전주입이 발생하지 않아 [redacted] 수행 중 1차기기냉각해수 상실로 1차측기기냉각수 온도가 상승하여 원자로냉각재펌프 정지권고치인 [redacted] 도달이 임박하자 발전팀장 지시로 모든 원자로냉각재펌프를 수동으로 정지하였다. 운전 2조의 경우 운전변수를 감시하면서 원자로냉각재펌프를 계속 운전하였으나 1차측기기냉각수 온도가 [redacted] 도달하자 발전소장의 권고로 정지하였다.

취수구설비 침수가 확인되자 운전조는 원자로냉각재펌프 밀봉냉각을 확보하기 위해 [redacted] 기기냉각수를 차단하고 탈염수의 Feed & Bleed를 통한 대체냉각을 수행하여 충전펌프를 계속 운전하였다.

취수구설비 손상복구에 시간이 소요될 것으로 확인되자 운전조는 보조-0.2에 따라 증기발생기 압력방출밸브 및 가압기 압력방출밸브를 이용하여 잔열제거계통 진입조건까지 원자로냉각재계통 냉각 및 감압을 수행하였다.

고유량이동형펌프가 연결되어 1차기기냉각수계통이 정상화되고 운전조건이 만족되자 모든 운전조는 [redacted] 잔열제거계통을 운전하여 원자로냉각재계통 냉각운전을 재개하였다.

2.4.1.2 직무부하 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 최종열제거원 상실 조건에서의 직무부하 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

최종열제거원 상실 조건의 직무부하 분석 결과로서, 전체 시나리오의 직무부하 평균(10.66) 보다 높은 값은 '정신적 및 신체적 노력정도 (Effort: 15.48)' 한 개의 항목인 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 시나리오 가정사항 (수행시간 등) 및 진행과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었다.

2.4.1.3 상황인식 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 최종열제거원 상실 조건에서의 상황인식 설문 문

항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

최종열제거원 상실 조건의 상황인식 결과로서, 전체 시나리오의 문항별 상황인식 평균(4.44) 보다 낮은 값은 '상황의 불안전성: 3.59', '상황의 변동성: 3.56', '상황의 복잡성: 3.85', '상황의 친숙도: 4.07'과 같이 4개 항목인 것으로 분석되었다. 4개 항목은 상황인식의 요구자원의 부족과 발생된 상황에 대한 친숙도 부족으로 나타난 것으로 분석되었으며, 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 임시 절차서 및 이동형설비에 대한 지식이 부족하거나 실제 교육을 받지 못한 자원을 활용하여 발전소 현상에 대응을 위한 것으로 분석되었다.

2.4.1.4 인적오류 분석 결과

모든 운전조는 인간공학 유효성 평가용 임시 운전절차서를 사용하여 대부분의 운전직무를 성공적으로 수행하였다. 운전원의 의사결정에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 주요 항목과 인간공학 유효성 평가 결과 인적오류에 유발할 사항은 없는 것으로 검토되었다.

### 2.4.2 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

2.4.2.1 가정사항 및 사고대응전력 평가

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.

소외전원 상실로 원자로가 자동으로 정지되고 교류안전모선이 가압되지 않았음을 확인한 후 모든 운전조는 정상 진입하였다.

모든 운전조는 절차서에 따라 냉각재 재고량 보전을 위해 원자로냉각재계통 격리 조치를 취하고 비상디젤발전기 및 대체교류 디젤발전기의 기동을 시도하였다. 비상디젤발전기 기동실패로 장기교류전원 상실 상황이 확인되자 축전지 비필수부하 차단을 수행하고, 1 MW 이동형발전차, 중압이동형펌프 등 MACST 설비를 설치하도록 요청하였다.

모든 운전조는 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량 상실을 감소시키고, 안전주입탱크를 주입하기 위해 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 모든 증기발생기 압력방출밸브 개방으로 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 착수하였다.

1 MW 이동형발전차가 안전모선 A 계열에 연결되자 축전지 충전이 재개되었으며, 중압이동형펌프가 설치되자 펌프를 기동하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재상실을 복구하였다.

모든 운전조는 잔열제거계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되자, 1차측기기냉각수계통을 정상화하고 잔열제거계통을 운전하여 원자로냉각재계통 냉각운전을 재개하였다. 운전 3조는 시뮬레이터 멈춤현상으로 고유량이동형펌프 연결 이후 단계부터 모의조작을 수행하였다.

2.4.2.2 직무부하 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에서의 직무부하 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건의 직무부하 분석 결과로서, 전체 시나리오의 직무부하 평균(10.66) 보다 높은 값은 '시간적 압박감 Temporal Demand: 10.78)', '정신적 및 신체적 노력정도 (Effort: 14.93)'과 같이 2개 항목인 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 시나리오 가정사항 (수행시간 등) 및 진행과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었다.

2.4.2.3 상황인식 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에서의 상황인식 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건의 상황인식 결과로서, 전체 시나리오의 문항별 상황인식 평균(4.44)보다 낮은 값은 '상황의 불안전성: 3.63', '상황의 변동성: 3.22', '상황의 복잡성: 4.19', '주의자원 분할: 4.30', '정보의 양: 4.33', '상황의 친숙도: 3.59'와 같이 6개 항목인 것으로 분석되었다. 이 항목들은 상황인식의 요구자원의 부족과 사고 시나리오에 대한 경험 부족으로 나타난 것으로 분석되었으며, 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 임시절차서 및 이동형설비에 대한 지식이 부족하거나 실제 교육을 받지 못한 자원을 활용하여 발전소 현상에 대응을 위한 것으로 분석되었다.

2.4.2.4 인적오류 분석 결과

모든 운전조는 인간공학 유효성 평가용 임시 운전절차서를 사용하여 대부분의 운전직무를 성공적으로 수행하였다. 다음은 운전원의 의사결정에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 주요 항목과 인간공학 유효성 평가에서 검토된 결과이다.

증기발생기 압력을 지속적으로 확인해야 하므로 계속적 수행단계로 표시될 필요가 있으나 절차서에는 일반 단계로 표시되어 있어 운전원들이 가압기 압력에 대한 지속적인 확인이 어려울 수 있다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공

통 적용) (오류유형: EOO, 수행오류)

인간공학 유효성 평가 시 해당 내용에 대한 확인 결과 모든 운전조는 잔열제거계통을 위한 추가 냉각과정에서 절차서에 따라 증기발생기 압력이 지를 감시하게 되며, 잔열제거계통을 운전하게 되면 터빈구동보조급수펌프를 정지하게 되므로 계속수행단계 표시는 불필요한 것으로 확인되었다.

복구될 수 있는지 확인 후 다중방어지침서를 수행하도록 지시하고 있다. 하지만 시나리오 가정상황(야간, 제한적 정보, 제한된 인력 등)에서 복구가능성을 판단한다는 것은 어려우며, 판단을 위한 기준 또한 제시되지 않아 사고 초기 발전팀 인력 운영에 어려움을 겪고 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되어 초과할 수 있는 것으로 분석되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가 후 질의응답시간을 통해 모든 운전조가 통신, 조명 및 정비부서 지원이 불가능한 상황에서 교류전원 복구 가능성을 판단하는 것은 불가능하고, 판단한다고 해도 결과를 확신할 수 없다고 의견을 제시하여 절차서 개선사항으로 도출하였다.

소내정전이 진행 중일 경우 비상디젤발전기 기동이 실패하면 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 4.16kV 교류안전모선을 가압하도록 하고 있다. 그러나 한빛 1,2호기 모두 소내정전인 상황에서는 주제어실에서 대체교류디젤발전기를 즉시 기동할 수 없어 가압할 수 없는 것으로 분석되었다. (오류유형: EOO, 수행오류)

인간공학 유효성 평가 시 대체교류디젤발전기를 기동하여 4.16kV 안전모선을 가압하는 운전을 수행하지는 않았으나, 운전원 면담결과 한빛 1,2호기가 모두 소내정전인 경우 대체교류디젤발전기 기동을 위해서는 현장에서 추가적인 차단기배열이 요구되어 안전모선 가압에 초과할 수 있음을 확인하였다. 따라서 소내정전 시 주제어실에서 대체교류디젤발전기 즉시 기동이 가능한 차단기 배열이 유지되도록 관련 절차서를 개정하도록 절차서 개정사항으로 도출하였다.

축전지 비필수부하 차단 시 대상 부하가 다수이고 조명이 저하된 상태에서 수행하는 관계로 차단이 어렵고 오조작의 우려가 있는 것으로 평가되었다.(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 발전소가 운전 중에 있어 비필수부하 차단을 가상으로 수행함으로써 오조작 여부는 확인할 수 없었으며, 정상조명하에서 수행하였음에도 대상 차단기 표식 개선사항으로 도출되었다.

1 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결함으로서 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 모든 운전조가 해당 안전모선이나 관련 기기의 점검 없이 A계열 안전모선에 1 MW 이동형발전차를 연결하도록 요청하였다. 따라서 향후 1 MW 이동형발전차 운전절차서 작성시 이동형발전차를 연결 할 모선을 선정하기 위한 기준 및 모선점검 등 기기점검 목록을 반영하도록 절차서 개선사항으로 도출되었다.

1 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 대용량부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되고 축전지 복구가 지연될 수 있는 것으로 평가되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 1 MW 이동형발전차 용량에 비해 대용량 부하를 투입하거나 투입가능 여부를 비상기술지원실에 문의하는 사례가 다수 확인되어 향후 1 MW 이동형발전차 운전절차서 작성시 투입가능한 부하 및 용량을 절차서에 반영하도록 절차서 개선사항으로 도출되었다.

3.2 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결함으로서 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다.(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 3.2 MW 이동형발전차는 1 MW 이동형발전차를 대체하여 설치한 관계로 고장이 발생한 안전모선에 연결할 가능성은 없었으나, 초기 3.2 MW 이동형발전차가 먼저 연결되는 경우에는 같은 문제점이 발생할 수 있었다. 따라서 3.2 MW 이동형발전차를 연결 할 모선을 선정하기 위한 기준 및 모선점검 등 기기점검 목록을 운전절차서에 반영하도록 절차서 개선사항으로 도출되었다.

3.2 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않

거나 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 안전모선 A계열에 연결하였으며, 이동형발전차 운전절차서에 부하의 투입순서, 기기용량 및 소요부하 등이 기술되어 있어 부하투입 시 과부하로 인한 트립가능성은 없는 것으로 확인되었다. 단, 차단기 초기배열표에 차단기 개방의 의미가 불명확하고 기동용변압기 인입차단기가 누락되어 있어 기기 오동작에 의한 이동형발전차 과부하 가능성이 존재하여 이동형발전차 운전절차서 개선사항으로 도출되었다.

### 2.4.3 대체교류 디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

2.4.3.1 가정사항 및 사고대응전력 평가

대체교류 디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진과 관련한 가정사항은 다음과 같다.

대체교류 디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진과 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

지진으로 원자로가 자동 정지되고 모든 교류안전모선의 전원상실이 확인되자 운전조는 [redacted] 정상 진입하여 비상운전에 착수하였다.

지진경광등으로 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE) 이상의 지진발생이 확인되자 발전팀장은 화재순찰조에 취약구역에 대한 화재 순찰을 지시하였으며, 순찰조의 제어건물 케이블실의 화재발생 통보에 따라 초동소방대를 출동시키고 본부소방대에 출동을 요청하여 화재를 진압하였다.

비상디젤발전기 기동실패로 장기교류전원 상실 상황이 확인되자 [redacted] 축전지 비필수부하 차단을 수행하고, [redacted] 1 MW 이동형발전차, 중압이동형펌프 등 MACST 설비를 설치하도록 요청하였다.

원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량 상실을 감소시키고, 안전주입탱크를 주입하기 위해 모든 운전조는 터빈구동 보조급수펌프에 의한 증기발생기 급수공급과 증기발생기 압력방출밸브 개방으로 원자로냉각재계통 냉각 및 감압에 착수하였다.
1 MW 이동형발전차가 안전모선 A 계열에 연결되자 축전지 충전이 재개되었으며, 중압이동형펌프가 설치되자 [redacted] 펌프를 기동하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재상실을 복구하였다.

모든 운전조는 잔열제거계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차 및 고유량이동형펌프가 연결되자, 1차측기기냉각수계통을 정상화하고 잔열제거계통을 운전하여 원자로냉각재계통 냉각운전을 재개하였다. 운전 3조는 시뮬레이터 고장으로 고유량이동형펌프 연결 이후 단계부터 모의조작을 수행하였다.

2.4.3.2 직무부하 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건에서의 직무부하 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건의 직무부하 분석 결과로서, 전체 시나리오의 직무부하 평균(10.66) 보다 높은 값은 '육체적 활동량 (Physical Demand: 10.81)', '정신적 및 신체적 노력정도 (Effort: 15.2)'과 같이 2개 항목인 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 시나리오 가정사항 (수행시간 등) 및 진행과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었다.

2.4.3.3 상황인식 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건에서의 상황인식 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건의 상황인식 결과로서, 전체 시나리오의 문항별 상황인식 평균(4.44) 보다 낮은 값은 '상황의 불안전성: 3.6', '상황의 변동성: 3.44', '상황의 복잡성: 3.74' 및 '상황의 친숙도: 4.15'과 같이 4개 항목인 것으로 분석되었다. 상황인식의 요구자원의 부족과 상황에 대한 교육 부족으로 해당 결과가 나타난 것으로 분석되었으며, 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 임시절차서 및 이동형설비에 대한 교육이 부족하거나 실제 교육을 받지 못한 자원을 활용하여 발전소 현상에 대응을 위한 것으로 분석되었다.

2.4.3.4 인적오류 분석 결과

모든 운전조는 인간공학 유효성 평가용 임시 운전절차서를 사용하여 대부분의 운전직무를 성공적으로 수행하였다. 다음은 운전원의 의사결정에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 주요 항목과 인간공학 유효성 평가에서 검토된 결과이다.

전원이 복구될 수 있는지 확인 후 다중방어운영지침서를 수행하도록 지시하고 있다. 하지만 극한자연재해 상황(양간, 제한적 정보, 제한된 인력 등)에서 복구가능성을 판단한다는 것은 사실상 불가능하며, 판단을 위한 기준 또한 제시되고 있지 않아 새벽 시간대 제한된 인력을 무리하게 현장에 투입하여 긴급한 업무를 수행하지 못하고 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되어 초과할 수 있는 것으로 분석되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가 후 질의응답시간을 통해 모든 운전조가 통신, 조명 및 정비부서 지원이 불가능한 상황에서 [redacted] 교류전원 복구 가능성을 판단하는 것은 불가능하고, 판단한다고 해도 결과를 확신할 수 없다고 의견을 제시하여 절차서 개선사항으로 도출하였다.

소내정전이 진행 중일 경우 [redacted] 비상디젤발전기 기동이 실패하면 [redacted] 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 4.16kV 교류안전모선을 가압하도록 하고 있다. 그러나 한빛 1,2호기 모두 소내정전인 상황에서는 주제어실에서 대체교류디젤발전기를 즉시 기동할 수 없어 [redacted] 안전모선을 가압할 수 없는 것으로 분석되었다. (오류유형: EOO, 수행오류)

인간공학 유효성 평가 시 대체교류디젤발전기를 기동하여 4.16kV 안전모선을 가압하는 운전을 수행하지는 않았으나, 운전원 면담결과 한빛 1,2호기가 모두 소내정전인 경우 대체교류디젤발전기 기동을 위해서는 현장에서 추가적인 차단기배열이 요구되어 안전모선 가압에 [redacted] 초과할 수 있음을 확인하였다. 따라서 소내정전 시 주제어실에서 대체교류디젤발전기 즉시 기동이 가능한 차단기 배열이 유지되도록 관련 절차서를 개정하도록 절차서 개정사항으로 도출하였다.

[redacted] 축전지 비필수부하 차단 시 대상 부하가 다수이고 조명이 저하된 상태에서 수행하는 관계로 [redacted] 차단이 어렵고 오조작의 우려가 있는 것으로 평가되었다.(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 발전소가 운전 중에 있어 비필수부하 차단을 가상으로 수행함으로써 오조작 여부는 확인할 수 없었으며, 정상조명하에서 수행하였음에도 2개의 운전조에서[redacted]초과하여 대상 차단기 표식 개선사항으로 도출되었다.

1 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결함으로서 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 모든 운전조가 해당 안전모선이나 관련 기기의 점검 없이 A계열 안전모선에 1 MW 이동형발전차를 연결하도록 요청하였다. 따라서 향후 1 MW 이동형발전차 운전절차서 작성시 이동형발전차를 연결 할 모선을 선정하기 위한 기준 및 모선점검 등 기기점검 목록을 반영하도록 절차서 개선사항으로 도출되었다.

1 MW 이동형발전차 부하투입 과정에서 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 대용량부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되고 축전지 복구가 지연될 수 있는 것으로 평가되었다. (시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 수행오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 1 MW 이동형발전차 용량에 비해 대용량 부하를 투입하거나 투입가능 여부를 비상기술지원실에 문의하는 사례가 다수 확인되어 향후 1 MW 이동형발전차 운전절차서 작성시 투입가능한 부하 및 용량을 절차서에 반영하도록 절차서 개선사항으로 도출되었다.

3.2 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결함으로서 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다.(시나리오 3, 7, 8, 9 공통 적용) (오류유형: EOC, 의사결정오류)

인간공학 유효성 평가시 해당 내용에 대한 확인결과 3.2 MW 이동형발전차는 1 MW 이동형발전차를 대체하여 설치한 관계로 고장이 발생한 안전모선에 연결할 가능성은 없었으나, 초기 3.2 MW 이동형발전차가 먼저 연결되는 경우에는 같은 문제점이 발생할 수 있었다. 따라서 3.2 MW 이동형발전차를 연결 할 모선을 선정하기 위한 기준 및 모선점검 등 기기점검 목록을 운전절차서에 반영하도록 절차서 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 안전모선 A계열에 연결하였으며, 이동형발전차 운전절차서에 부하의 투입순서, 기기용량 및 소요부하 등이 기술되어 있어 부하투입 시 과부하로 인한 트립가능성은 없는 것으로 확인되었다. 단, 차단기 초기배열표에 차단기 개방의 의미가 불명확하고 기동용변압기 인입차단기가 누락되어 있어 기기 오동작에 의한 이동형발전차 과부하 가능성이 존재하여 이동형발전차 운전절차서 개선사항으로 도출되었다.

후쿠시마 사고의 경험에서 알 수 있듯이 설계기준을 초과하는 지진을 동반하는 경우 발전소 조명상실, 발전소 통신설비 영향, 화재 등과 같은 운전에 악영향을 끼칠

수 있는 요소들이 다수 존재 할 수 있다. 따라서 본 시나리오의 인간공학 유효성평가 에서는 발전소 통신설비 영향에 따라 위성전화(고정형 및 이동형)를 제외한 모든 통신설비의 사용에 제한을 두었으며, 화재 취약구역 중 제어건물 케이블실 화재 상황을 모의하여 화재순찰조 및 초동 소방대의 이동 및 소화조치를 평가하였다. 그리고 설계기준 초과 지진에 따른 발전소 조명상실에 따라 한빛1호기 주제어실로 모의한 시뮬레이터실의 모든 조명을 소등하고 유효성 평가를 진행하였다. 하지만 본 유효성평가에서 물리적인 모의가 불가능한 발전소 내 구조물파손, 여진 가능성, 높은 방사선 준위, 지진, 해일 등으로 인한 도로 파손, 발전소 구조물의 이동에 의한 통행 제약 등으로 발생할 수 있는 현장 운전원에 대한 운전원 조치 및 이동형 설비의 이동시간에 대한 평가는 불가능 하였으나 설계기준 초과 및 극한자연재해에 대한 교육/훈련 개선안 도출을 통해 인적오류의 최소화방안을 마련하였다.

### 2.4.4 중대사고(시나리오 10)

#### 2.4.4.1 가정사항 및 사고대응전력 평가

중대사고와 관련한 가정사항은 다음과 같다.

중대사고와 관련한 가정사항에 따른 시나리오 평가결과는 다음과 같다.

지진에 의한 소외전원 상실로 원자로가 정지되고, 모든 교류안전모선 전원상실이 확인되자 운전조는 [redacted] 정상 진입하여 비상운전에 착수하였다.

[redacted] 터빈구동 보조급수펌프 고장에 의한 급수상실로 증기발생기가 고갈되고, 원자로냉각재펌프 밀봉손상에 의한 냉각재상실로 노심냉각기능이 상실되어 [redacted]은 중대사고 진입을 선언하고, [redacted] 수행하였다. 단, 한빛1,2호기 시뮬레이터는 중대사고가 모델링 되어 있지 않아 증기발생기 3대가 모두 고갈되고 30분이 경과한 시점을 중대사고 진입조건인 노심출구온도 [redacted] 도달시점으로 가정하여 운전조에 메시지를 부여하였으며, 운전조는 운전변수 값에 무관하게 중대사고지침서 및 비상기술지원실의 지시에 따라 기기조작을 수행하였다.

비상기술지원실의 [redacted] 수행전략에 따라 압력방출밸브를 개방하여 증기발생기를 MACST 펌프 토출압력 이하로 감압하고 펌프를 기동하여 증기발생기 급수주입을 수행하였다. 단, 운전 1, 3조는 중대사고 진입 전 원자로냉각재계통 냉각을 위해 증기발생기 감압을 사전에 수행하였다.

비상기술지원실의 [redacted] 수행전략에 따라 모든 운전조는 가압기 압력방출밸브를 수동으로 개방하여 MACST 펌프를 이용한 비상외부주입이 가능하도록 원자로냉각재계통을 감압하였다.

비상기술지원실의 [redacted] 수행전략에 따라, 원자로냉각재계통이 비상외부주입이 가능한 압력까지 감압되자 MACST 펌프를 기동하여 외부주입운전에 착수하였으며, 노심출구온도가 [redacted] 감소하자 평가를 종료하였다. 단 운전 2, 3조는 외부주입 단계에서 시뮬레이터가 정지되어 가상조작으로 평가를 진행하였다.

2.4.4.2 직무부하 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 중대사고 조건에서의 직무부하 설문 문항별 분석 결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

중대사고 조건의 직무부하 분석 결과로서, 전체 시나리오의 직무부하 평균(10.66)

보다 높은 값은 ‘정신적 및 지각적 활동량 (Mental Demand: 10.67)’, ‘육체적 활동량 (Physical Demand: 11.22)’, ‘정신적 및 신체적 노력정도 (Effort: 13.1)’, ‘좌절, 실패, 낙담 정도 (Frustration: 11.63)’과 같이 2개 항목인 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 시나리오 가정사항 (수행시간 등) 및 진행과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었으며, 중대사고 조건에서의 인간공학 유효성평가는 사고초기 조건인 0.3g 지진에 의한 발전소 현상에 중대사고 진입 그리고 중대사고 종료절차까지 수행하는 평가를 수행하여 운전원들이 시간적 압박감을 많이 느낀 것으로 분석되었다.

2.4.4.3 상황인식 분석 결과

한빛1호기 인간공학 유효성평가 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건에서의 상황인식 설문 문항별 분석결과는 다음과 같으며, 전체 시나리오에 대한 직무부하 분석 결과는 2.4.5절 인간공학 유효성평가 설문결과 종합에 기술하였다.

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건의 상황인식 결과로서, 전체 시나리오의 문항별 상황인식 평균(4.44) 보다 낮은 값은 ‘상황의 불안전성: 3.6’, ‘상황의 변동성: 3.4’, ‘정보의 양: 4.07’, ‘상황의 친숙도: 3.63’과 같이 4개 항목인 것으로 분석되었다. 상황인식의 요구자원의 부족과 상황에 대한 교육의 부족으로 해당 결과가 나타난 것으로 분석되었으며, 이와 같은 분석은 한빛1호기 스트레스테스트와 관련된 임시절차서 및 이동형설비에 대한 교육이 부족하거나 실제 교육을 받지 못한 자원을 활용하여 발전소 현상에 대응을 위한 것으로 분석되었다.

2.4.4.4 인적오류 분석 결과

모든 운전조는 인간공학 유효성 평가용 임시 운전절차서를 사용하여 대부분의 운전직무를 성공적으로 수행하였다. 다음은 운전원의 의사결정에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 주요 항목과 인간공학 유효성 평가에서 검토된 결과이다.

인간공학 유효성 평가에서는 추후 반영예정인 외부주입유로를 활용한 비상냉각수 주입을 수행하였으며, 해당 내용은 운전원들이 교육/훈련을 받은 사례가 없다. 따라서 외부주입유로를 이용한 비상냉각수 주입과 관련하여 교육/훈련 개선안 도출을 통해 인적오류 최소화 방안을 마련하였다.

### 2.4.5 인간공학 유효성 평가 설문결과 종합

#### 2.4.5.1 직무부하 분석 결과

한빛1,2호기 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

한빛1,2호기 업무량 분석(직무부하 포함) 결과 중 총 부하 값보다 평균적으로 높은 값은 '정신적 및 신체적 노력정도 (Effort: 14.97)' 1개 항목인 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석은 한빛1,2호기 스트레스테스트와 관련된 시나리오 가정 사항(수행시간 등) 및 진행과정에 대한 교육 및 훈련이 없었거나, 경험해 보지 못한 발전소 현상에 대응하기 위한 것으로 분석되었다. 따라서 추후 한빛1,2호기 훈련 프로그램 상에 한빛1,2호기 스트레스테스트와 관련된 가정 사항 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 운전원( 으로 나뉜다. 본 평가 결과

가장 높은 직무부하를 보이는 이유는 극한자연재해가 발생한 상황에서는 주제어실에서는 발전팀장의 절차서 수행 및 결정에 따라 발전소를 운영하고,

발전팀장의 지시에 의해 다른 운전원은 발전소를 감시하거나 제어 직무를 수행하므로 직무부하가 가장 높았던 것으로 판단된다. 그러므로 이와 같은 운전원간의 직무수행 격차와 부하를 적절하게 조절하기 위해서, 상대적으로 직무의 양과 부하가 낮은 전력설비운전원 등이 극한 상황에서 다른 주제어실 운전원을 지원함으로서, 직무를 적절하게 분배할 필요성이 존재한다.

다. 시나리오별 직무부하 분석 결과

시나리오별로 주제어실의 직무부하가 현장보다 높게 나타났으며, 시나리오의 직무부하는 시나리오 10 > 시나리오 6 > 시나리오 9 > 시나리오 4의 순이다.

시나리오의 사고 경중에 따라 그리고 운전원의 훈련 정도에 따라 직무부하에 변화가 있는 것으로 판단된다. 시나리오 10은 노심출구온도가 649℃를 초과하여, 중대사고로 진입한 운전원들이 처음 접해본 상황이므로 교육훈련 또는 친숙도가 낮을 수밖에 없다. 따라서 추후 한빛1,2호기 훈련프로그램 상에 한빛1,2호기 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.

2.4.5.2 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(Understanding - (Demand - 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.

가. 상황인식 문항별 분석 결과

분석 결과 전체 SART 항목 중에서 특이한 점은 ‘상황의 불안정성’, ‘상황의 변동성’, ‘상황의 복잡성’과 ‘정보의 양’, ‘상황의 친숙도’ 부분이다.

한빛1,2호기 스트레스테스트 사고시나리오는 발전소의 설계기준초과 및 극한자연재해로 인해 발전소가 안전에 위협을 받는 상태이므로, '상황의 복잡성 (발전소 계통간에 서로 연관된 많은 요소들이 복잡하게 연결)'이 Demand 범주의 다른 요소에 비해서 상대적으로 높게 측정된 것으로 분석되었다.

또한, '정보의 양' 측면에서 한빛1,2호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에서 사용된 시나리오 중에 사고가 발생하더라도 주제어실의 모든 정보가 가용한 사고 상황은 시나리오 4와 시나리오 6이며, 시나리오 9와 시나리오 10은 지진을 가정하고 있으므로, 주제어실과 현장의 비내진으로 설계된 비안전 기기 고장으로 인해 많은 정보가 가용하지 않다. 따라서 발전소에서 운전원이 사용할 수 있는 '정보의 양'이 부족한 것으로 분석되었다.

한빛1,2호기 훈련교육 과정에 실제 시뮬레이터를 이용하여 한빛1,2호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에서 사용된 시나리오를 처음으로 평가한 것이고, 관련 훈련을 거의 받아 본 적이 없다. 따라서 발생된 상황이 운전원들이 훈련 시 경험해 보지 못한 새로운 상황이기 때문에 '상황의 친숙도'가 Understanding의 다른 요소에 비해 낮게 분석되었다.

SART 상황인식 값은 'Understanding - (Demand - Supply)' 공식에 의해서 결정된다. 즉, 요구값이 낮을수록 공급값이 높을수록 상황인식 값은 높아짐을 알 수 있다.

한빛1,2호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가에 사용한 시나리오는 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 불안정성', '상황의 변동성', '상황의 복잡성')를 적절하게 낮추기 위한 방안은 해당 시나리오에 대한 '교육/훈련'과 '절차서'의 적절한 수정을 통해 주제어실 운전원간 협업 그리고 주제어실 운전원과 현장 운전원간의 협업이 적절하게 이루어질 수 있도록 하는 것이다.

그리고 공급값(Supply)을 높이기 위해 극한자연재해 시나리오에 대한 교육/훈련을 실시하고 사고 상황 시 주제어실 운전원간의 적절한 상황 공유 및 주의 환기를 통해 사고 상황에 집중하여 '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, 해당 사고 상황에 대한 교육/훈련 프로그램 개선이 필요하다.

나. 운전원별 상황인식 분석 결과

분석 결과 주제어실의 경우 터빈차장을 제외하면, 모든 주제어실 운전원들의 SART 상황인식 값이 기준 값에 비해서 낮은 것으로 나타났고 발전팀장과 원자로차장의 값이 타 주제어실 운전원에 비해 낮게 나타났다.

주제어실의 정보가용성에 비추어 보면, 정보의 양이나 질적인 측면에서 높은 수준이나 요구값(Demand)이 높게 측정되어 SART 상황인식 값이 낮은 것으로 분석되었다. 이와 같은 이유는 발전팀장과 원자로차장은 주제어실에서 발전소의 운영과 관련된 전반적인 발전소 정보를 감시 및 보고를 받고 운전에 대한 결정을 하는 업무를 수행하여 발전팀장과 원자로차장이 받은 상황적 요소에 대한 불확실성이 상당히 크기 때문인 것으로 분석되었다.

이와 같은 문제점을 보완하기 위해, 전체 발전팀은 운전원들과의 상황공유 측면에서 발전소 사고 수습 및 절차서 적용의 적절성을 토의하는 등과 같은 상황인식 공유 훈련에 대한 필요성이 존재한다.

다. 운전조별 상황인식 분석 결과

분석 결과 각 운전조별로 상황인식 분석결과 값에는 약간의 차이(가 있으나, 운전조의 직무경험에 따라 약간의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

라. 시나리오별 상황인식 분석 결과

총 상황인식의 평균값(21.79)을 기준으로 시나리오별 상황인식에 따른 주제어실 운전원 및 현장 운전원의 평균값으로는 차이가 존재하는 것으로 분석되었다.

이는 현장 운전원의 경우 주제어실 운전원의 지시에 따라 업무를 수행하며 주제어실 운전원의 경우 기존 발전팀의 교육훈련과는 다른 사고 상황을 부여받아 상황인식에 대한 점수가 낮은 것으로 분석되었다.

그리고 주제어실 운전원의 경우 시나리오 9에 대한 상황인식이 기준 값 대비 약간

높게 평가 되었으며, 나머지 시나리오는 기준 값 대비 낮게 평가되었으나, 인간공학 유효성 평가에서 사용된 시나리오는 현재 발전팀 교육에는 포함되어 있지 않은 사고 상황이므로 주제어실 운전원들의 상황인식에 기인한 것으로 분석되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 근본원인은 발전팀의 교육훈련과 관련된 것이므로, 근본적으로 해결하기 위해서는 스트레스테스트 사고 시나리오에 대한 교육훈련을 충실히 이행하는 것을 제시하였다.

2.4.5.3 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. 운전전문가 및 인간공학전문가는 운전행위를 관찰하여 그 결과를 BARS 평가지에 작성하였다. BARS 평가값은 운전전문가가 평가한 개별 항목을 기준으로 전체 운전조의 운전원협업과 개별 운전조의 운전원 협업 그리고 평가자간의 일치성을 확인하기 위한 분석을 수행하였다.

가. 운전원 협업 문항별 분석 결과

운전전문가 및 인간공학전문가 평가를 기반으로 운전원 협업을 분석한 결과, 운전 3개조의 전체 운전원협업 정도는 평균값을 기준으로 5.53점이었으며, 모든 문항에서 기준 값이 4점 대비 높은 것으로 나타났다.

나. 운전조별 운전원 협업 분석 결과

모든 운전조는 본 평가에서 원활한 운전원간의 협업을 수행하였고, 전반적으로 운전원 협업이 높은 것으로 나타났다. 평가의 중간값인 4점에 비해서 높게 나타났으며, 특히 운전B조가 운전A조 및 운전C조에 비해서 높게 나왔다. 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.

### 2.4.6 평가현안 설문 분석 결과

2.4.6.1 주제어실 평가 현안 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 이를 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.

가. 절차서 존재에 따른 운전성

본 항목에 대한 평가는 발전소에서 절차서가 구비되어 있더라도 내용이 부족하여 운전직무를 수행함에 있어서의 어려움을 측정한 것이다. 그 평가 결과로서, 평균값은 4.60로 기준 값 보다 높게 평가되었다. 인간공학 유효성 평가에 활용된 절차서는 개정 또는 신규 추가 예정인 임시절차서를 활용한 것이 평가결과에 기인한 것으로 분석되었다. 추후 개정 또는 신규 추가 예정인 절차서 내용과 관련하여 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

나. 절차서간의 연계

한빛1,2호기 스트레스테스트 인간공학 유효성 평가를 수행하기 전에 사전검사를 통해 발전소의 비상대체설비 사용 관점에서 절차서간의 연계를 점검 후 수정을 통해 임시절차서로 등록하였으며, 수정된 임시절차서를 활용하여 유효성평가를 진행하였다. 그 평가 결과로서, 평균값은 4.82로 기준 값 보다는 높은 점수로 평가되었으며 추후 개정 또는 신규 추가 예정인 절차서 연계와 관련하여 개선이 필요한 내용은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

다. 절차서 내 판단절차

본 항목은 절차서 진입조건에 대한 만족 여부를 판단하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 즉, 절차서 내에서 판단 절차가 누락되어 절차서 진입에 문제가 발생했는지에 대한 것이다. 평가 결과, 평균값은 4.98로 기준 값 보다는 높은 점수로 평가되었으며 절차서 내 판단절차서와 관련한 문제점은 없는 것으로 평가되었다.

라. 수행인력

본 항목은 현재의 한빛1,2호기 주제어실 인원으로 주어진 임무를 수행하면서 발생하는 어려움을 평가한 것이다. 발전팀을 대상으로 평가를 수행한 결과, 평균값은

3.07로 기준값보다 낮게 평가되었다. 그러나 본 인간공학 유효성 평가에서 활용된 시나리오는 발전팀의 훈련정도가 매우 낮고 경험해 보지 못한 시나리오를 활용하여 발전팀의 업무 분장이 정확하게 이루어지지 않아 나타난 현상으로 분석되었으다. 또한, 인간공학 유효성 평가 시 모든 운전조는 주요 운전원 조치를 시간 내에 모든 조치를 완료하였고 발전소의 안정화 상태로 진입하였으므로 인원 부족으로 인한 문제는 발생하지 않은 것을 평가되었다.

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 결과로서, 평균값은 3.90로 기준 값 대비 낮은 것으로 나타났다. 사고 상황에서 가용한 정보 및 지원설비에 대한 개선사항은 운전원 의견 및 운전전문가 의견으로 도출되었으며, 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 있는 지에 대한 것이다. 평가 결과로서, 평균값은 3.95로 기준 값에 비해 낮게 나타났다. 그리고 운전원의 의견 또한 인간공학 유효성 평가 시나리오 모두 경험해 본 바가 없다고 응답하였다. 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 결과로서, 평균값은 4.05로 기준 값에 비해 조금 높게 나타났다. 직무수행시간은 통신 체계, 절차서, 발전소 인력 등과 같이 실제 발전소의 설계와 다르게 평가된 부분에 의해서 영향을 받고 있으므로, 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 운전원

들과 혹은 발전소 조직 내의 인력들과 의사소통을 함에 있어서의 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로서, 평균값은 3.68로 기준 값 대비 낮은 것으로 나타났다. 0.3g 지진을 고려한 시나리오(시나리오 9, 10)에서 주제어실의 고정용 위성전화 1대로 발전소 초기대응이 어려울 것으로 인간공학 전문가에 의해 평가되었으며 1차측 현장 조치와 관련하여 1차측 현장 운전원이 방사선 관리구역 내에 위치할 경우 주제어실과의 통신이 이루어지지 않아 추가적인 업무 부여에 어려움을 주제어실 운전원들이 문제점으로 제기하여 관련 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

자. 조명설비

본 항목은 조명설비가 없거나 부족하여 시나리오의 주어진 임무를 수행하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로서, 평균값은 4.22로 기준 값에 대비해 높게 나타났다. 본 평가의 사고 상황에서는 소내정전 및 지진 발생 시 조명의 가용성을 보장할 수 없으므로, 발전소의 비상조명을 제외한 모든 조명이 모두 상실될 가능성이 있다. 따라서 휴대용 조명설비(휴대용 랜턴 등)가 요구되었으며, 이와 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

차. 작업장 위해요소 확인

본 항목은 주제어실내 위해요소에 따라 주어진 임무를 수행하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 평가 결과로서, 평균값은 4.97로 기준 값에 대비해 높게 나타났다. 하지만 교육훈련 시뮬레이터에서는 지진상황에 따른 위해요소(작업물 낙하 또는 캐비넷 전도 등)의 사실 확인 및 구현이 불가능하다. 따라서 주제어실 작업장 위해요소와 관련하여 평가는 불가능하다.

카. 이동경로 위해요소 확인

본 항목은 시나리오에서 주어진 임무를 수행하는 동안 특정한 장소로 이동하는데 드는 어려움을 평가한 것이다. 그 평가 결과로서, 평균값은 5.13으로 기준 값에 대비해 높게 나타났다. 또한 주제어실 운전원들은 주제어실에서 사고대응을 진행하므로 관련된 이동경로 위해요소는 없는 것으로 평가되었다.

2.4.6.2 현장 평가 현안 분석 결과

가. 절차서 존재에 따른 운전성

현장 운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로, 운전 절차서 사용

이 적다. 현장 운전원을 대상으로 평가한 결과로서 평균값은 5.15로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났다. 하지만 현장 운전원이 사용한 절차서 중 한빛1,2호기에 추후 추가예정인 다중방어운영지침서와 관련된 일부 개선사항이 도출되어 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

나. 절차서간의 연계

현장 운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로, 운전 절차서 사용이 적다. 현장 운전원을 대상으로 평가한 결과로서, 평균값은 5.23으로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으며 현장 운전원의 활용 절차서에 대한 연계사항에 대한 문제점은 없는 것으로 평가되었다.

다. 절차서 내 판단절차

현장 운전원은 주제어실의 지시에 따라 운전직무를 수행하므로 운전 절차서 사용이 적다. 현장 운전원을 대상으로 평가한 결과로서, 평균값은 5.19로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으며 현장 운전원의 활용 절차서에 대한 판단절차에 대한 문제점은 없는 것으로 평가되었다.

라. 수행인력

현장 운전원은 구성되고 1차측 현장 운전원)과 2차측 현장 운전원(으로 나뉜다. 현장 운전원의 수행인력에 대한 평가 결과로서, 평균값은 4.35로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으며 현장 운전원의 수행인력에 대한 문제점은 없는 것으로 평가되었다.

마. 필요정보 및 지원설비

현장 운전원은 현장에서 밸브 수동조작 등과 같은 수동 운전직무를 수행하였다. 이에 대한 평가 결과로서, 평균값은 4.79로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 현장 운전원의 필요정보 및 지원설비에 대한 문제점은 없는 것으로 평가되었다. 그러나 현장 운전원과 함께 동행한 평가자들에 의해서 인간공학 관련 개선사항이 도출되어 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

바. 훈련정도

현장 운전원은 주제어실의 지시에 따라 현장 직무를 수행하므로, 주제어실에서 요

구하는 정확한 장소 및 기기 조작 행위 등을 숙지하고 있어야 한다. 본 항목에 대한 평가 결과로서, 평균값은 4.67로 기준 값에 대비해 높게 나타났지만 개정 또는 추가 예정인 절차서(또는 지침서)에 대한 현장 운전원 훈련과 관련된 개선사항이 도출되어 이를 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

사. 직무수행시간

현장 운전원의 직무수행시간은 주제어실의 지시 이후 현장까지 이동하여 운전직무를 수행한 후에 다시 주제어실 보고까지의 시간이다. 본 항목의 평가 결과로서, 평균값은 4.71로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으며, 현장 운전원의 직무수행시간 대한 문제점은 없는 것으로 평가되었다.

아. 통신, 소음

현장에는 다수의 회전기기(팬, 펌프 등)로 인해 소음이 발생하고, 주제어실의 운전원 혹은 다른 발전소 조직과 의사소통을 위한 통신 설비가 제공되고 있다. 본 항목에 대한 평가 결과로서, 평균값은 4.58로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났다.

그러나 0.3g 지진을 고려한 시나리오(시나리오 9, 10)에서 1차측 현장 조치와 관련하여 1차측 현장 운전원이 방사선 관리구역 내에 위치할 경우 주제어실과의 통신이 원활하지 않아 주제어실과의 의사소통에 어려움을 현장 운전원들이 문제점으로 제기하여 관련된 개선필요 사항은 제3절 안전 개선사항에 기술하였다.

자. 조명설비

현장의 비내진 조명설비는 지진 발생 시 그 성능을 보장할 수 없다. 본 항목에 대한 평가 결과로서, 평균값은 5.06으로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났다.

그러나 본 평가에서는 실제 가동 중인 발전소에서 인간공학 유효성 평가를 진행하여 소내정전 및 지진 발생 시 현장 조명의 상실상황을 구현하지 못하였으나, 조명 상실에 따른 이동형설비 설치 및 현장운전원 수동조작에 대한 평가를 2018년 12월 12일 야간에 수행하였다. 조명 상실로 인한 이동형발전차 차고지내 비상조명이 설치되어 있지 않아 휴대용 조명만으로 이동형설비의 이동준비에 어려움이 평가되었으나, 추후 이동형설비 통합보관고에 비상조명 설치를 통해 조명문제는 해결될 것으로 평가되었다. 그리고 이동형발전차 이동 이후 발전소내 설치 작업시 차량조명 및 휴대용 조명의 사용으로 조명상실에 따른 이동형설비 설치 문제는 없는 것으로 분석되었다.

차. 작업장 위해요소 확인

본 항목에 대한 평가 결과로서, 평균값은 5.10로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났으나, 현재 발전소가 정상운전 상태임에 따라 지진상황에 따른 위해요소(작업물 낙하 또는 지잡물 전도 등)의 사실 확인 및 구현이 불가능하다. 따라서 현장의 작업장 위해요소와 관련하여 평가는 불가능하다.

카. 이동경로 위해요소 확인

본 항목에 대한 평가 결과로서, 평균값은 5.13로 기준 값에 대비해 높은 것으로 나타났다. 그러나 본 평가에서는 실제 가동 중인 발전소에서 인간공학 유효성 평가를 진행하여 소내정전 및 지진 발생 시 현장 조명의 상실상황을 구현하지 못하였으나, 조명 상실에 따른 이동형설비 설치 및 현장운전원 수동조작에 대한 평가를 2018년 12월 12일 야간에 수행하였다. 이동경로 위해요소 확인 결과 발전소내 현장운전원 이동 및 조작은 자체 축전지 전원을 사용하는 비상조명 및 휴대용 조명(손전등)을 활용하여 소내 이동 및 현장조작에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

## 2.5 다수호기 동시사고 시 대응능력 평가

다수호기 동시사고 시 대응능력 평가는 본 스트레스테스트 보고서에서 가정한 가정사항이 한빛본부에 귀속된 한빛 1~6호기에 동시에 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한빛1,2호기 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)

소외전원상실과 관련된 다수호기 동시사고 발생시 한빛1,2호기 소외전원상실 조건에서는 비상디젤발전기 자동기동으로 안전정지에 요구되는 필수기기가 모두 가용하며, 호기 별로 비상디젤발전기 등 사고대응전략 수행에 요구되는 소내설비가 가용하므로, 다수호기 동시사고 시에도 사고대응전략 이행은 가능할 것으로 평가되었다. 또한, 비상디젤발전기 연료는 사고발생 후 에는 외부지원이 가능하므로 다수호기 동시사고가 발생하더라도 전략수행에는 영향이 없는 것으로 평가되었다.

2.5.1.2 소내정전 (시나리오 2)

소내정전과 관련된 다수호기 동시사고 발생시 한빛1,2호기 소내정전 조건에서는 대체교류 디젤발전기 기동으로 안전정지에 요구되는 최소한의 필수기기가 가용하다.

단, 한빛1,2호기의 경우 대체교류 디젤발전기는 1개 호기에만 전력공급이 가능함으로, 다수호기 동시사고 발생시 나머지 호기에는 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건상황이 발생한다. 현재 한빛본부에 확보 또는 확보 예정인 설비 1 MW 이동형발전차 및 3.2 MW 이동형발전차를 활용하여 나머지 호기인 1호기 또는 2호기에 연결하여 사고상황에 대한 대처가 가능하다. 그리고 한빛본부내 타 발전소도 동일한 상황이므로 한빛본부내 배치 예정인 1 MW 이동형발전차와 타 부지의 3.2 MW 이동형발전차를 이동 및 연결하면 사고 대처가 가능하다.

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 1 MW 이동형발전차를 한빛본부의 각 호기별로 보유하게 되므로 대체교류 디젤발전기의 전력공급을 받지 못하는 발전소는 다음의 시나리오 3과 같은 사고대응전략을 이행할 수 있어 다수호기 동시사고 시에도 사고대응전략 이행은 가능하다. 또한, 대체교류 디젤발전기 연료는 사고발생 후 9일까지, 1 MW 이동형발전차 연료는 그 이상 가용하고 외부지원이 가능하므로 전략수행에는 영향이 없다.

2.5.1.3 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 (시나리오 3)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 관련된 다수호기 동시사고 발생시 한빛1,2호기 각각 사고대응전략 수행에 요구되는 소내설비가 가용하므로, 다수호기 동시사고 시에도 사고대응전략 이행은 가능하다. 또한, 한빛본부에 호기별로확보예정 설비인 1 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 1 MW 이동형발전차를 한빛1호기에 연결하여 전원 가압이 가능하며, 한빛2,3,4,5,6호기도 호기별 확보 예정인 1 MW 이동형발전차를 이동 및 연결하면 사고 대처가 가능하다.

또한, 사고관리전략에 따라 3일 이내에는 3.2 MW 이동형발전차를 타부지에서 이동하여 한빛본부에 귀속되어 있는 각 발전소에 연결하고 외부자원의 지원을 통해 전원공급이 지속적으로 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.4 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 4)

최종열제거원 상실과 관련된 다수호기 동시사고 발생시 한빛1,2호기는 순환수펌프가 모두 정지되어 복수기 저-진공으로 터빈이 자동 정지되고, 터빈 정지에 의해 원자로도 자동으로 정지된다. 원자로 정지에 따라

발전소 안정화 조치를 수행하면서, 1차기기냉각해수 상실로 인한 기기냉각수 온도증가 상태와 원자로냉각재펌프의 베어링 온도 등 운전변수의 수동정지 설정치 도달 여부를 계속 감시하고, 수동정지 설정치 도달 전에 원자로냉각재펌프 정지가 가능하다.

한빛1,2호기 발전팀은 기기냉각해수펌프가 모두 정지되었음을 확인 후 고유량이동형펌프 배치를 요청하고, 원자로냉각재펌프 정지에 따라 원자로냉각재계통을 잔열제거계통 운전 진입조건까지 자연순환냉각 및 감압 수행이 가능하다.

발전팀은 잔열제거계통 운전 진입조건에 도달하고, 고유량이동형펌프를 기동하여 기기냉각수계통이 정상화되면 계통절차서 잔열제거계통 운전이 가능하다.

추후 사고관리전략에 따라 구비예정인 설비가 확보된 이후 한빛본부의 고유량이동형펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 고유량이동형펌프는

요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.5 최종열제거원과 대체열제거원 상실 조건 (시나리오 5)

한빛1,2호기는 대체열제거원이 구비되어 있지 않기 때문에 최종열제거원 상실 조건과 동일하다.

2.5.1.6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 (시나리오 6)

대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건의 다수호기 동시사고 발생시 한빛1,2호기 발전팀은 소외전원이 상실되면서 원자로가 자동으로 정지되면

비상디젤발전기와 대체교류디젤발전기 기동이 실패한 후 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 상황을 확인하여 각 호기별로 1 MW 이동형발전차 연결을 요청하고, 축전지 비필수부하 차단을 수행한다.

터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수를 공급하면서 증기발생기 압력방출밸브를 수동 개방하여 원자로냉각재계통을 냉각 및 감압할 수 있다. 이를 통해 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량상실을 감소시키고, 안전주입탱크의 냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입할 수 있으며, 잔열제거계통 운전조건 진입을 위한 추가 냉각운전 수행이 가능하다.

1 MW 이동형발전차가 연결되면 축전지 충전이 재개되어 직류전원이 계속 가용하게 되며, 이동형고압펌프가 외부주입유로에 연결되면 펌프를 기동하여 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 냉각재상실을 보충할 수 있다.

잔열제거계통 진입조건이 만족되고 3.2 MW 이동형발전차와 이동형고유량펌프가 준비되면 1차기기냉각수계통을 정상 복구하고 계통절차에 따라 잔열제거계통 운전이 가능하다.

사고관리전략에 따라 [redacted] 3.2 MW 이동형발전차를 타부지에서 이동하여 한빛본부에 귀속되어 있는 각 발전소에 연결하고 외부자원의 지원을 통해 전원공급이 지속적으로 가능하다. 그리고 한빛본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 [redacted] 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [redacted] 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 지진해일 (시나리오 7)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한빛본부에 확보된 설비인 1 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 1 MW 이동형발전차를 한빛1호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 또한 한빛2,3,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 1 MW 이동형발전차를 [redacted] 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다.

사고관리전략에 따라 3일 이내에는 3.2 MW 이동형발전차를 타부지에서 이동하여 한빛본부에 귀속되어 있는 각 발전소에 연결하고 외부자원의 지원을 통해 전원공급이 지속적으로 가능하다. 그리고 한빛본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 [redacted] 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [redacted] 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 해일 및 강우 (시나리오 8)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한빛본부에 확보된 설비인 1 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 1 MW 이동형발전차를 한빛1호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 또한 한빛2,3,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 1 MW 이동형발전차를 [redacted] 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다.

사고관리전략에 따라 [redacted] 3.2 MW 이동형발전차를 타부지에서 이동하여 한빛본부에 귀속되어 있는 각 발전소에 연결하고 외부자원의 지원을 통해 전원공급이 지속적으로 가능하다. 그리고 한빛본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 3일 이내에 요구되므로 타부지에

서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, 3일 이후에는 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진 (시나리오 9)

시나리오 6과 동일하게 다수호기 동시사고 발생시 현재 한빛본부에 확보된 설비인 1 MW 이동형발전차를 활용하여 축전지 충전 및 충전펌프 운전에 필요한 1 MW 이동형발전차를 한빛1호기에 연결하여 전원 공급이 가능하다. 또한 한빛 2,3,4,5,6호기는 타부지에 보유중인 1 MW 이동형발전차를 [redacted] 이동 및 연결하면 전원 공급이 가능하다.

사고관리전략에 따라 [redacted] 3.2 MW 이동형발전차를 타부지에서 이동하여 한빛본부에 귀속되어 있는 각 발전소에 연결하고 외부자원의 지원을 통해 전원공급이 지속적으로 가능하다. 그리고 한빛본부의 고유량이동형펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는 [redacted] 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [redacted] 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

2.5.1.10 중대사고 (시나리오 10)

중대사고가 다수호기에 발생시 비상냉각수 외부주입 설비를 이용한 냉각수 주입 전략을 활용하여 현재 한빛본부에 호기별 2대 확보중 설비인 저압이동형펌프와 호기별 확보예정인 1 MW 이동형발전차를 활용하여 다수호기 동시사고 시에 한빛본부 모든 호기에 원자로 및 증기발생기 비상냉각수 외부주입이 가능하다.

추후 사고관리전략에 따라 설비가 확보된 이후 호기 별로 1 MW 이동형발전차를 활용하여 3.2 MW 이동형발전차 연결시점인 [redacted] 전원공급이 가능하여 사고대응전략 이행은 가능하다. 그리고 한빛본부의 이동형고유량펌프를 활용하여 정지냉각계통 운전을 수행하며, 이동형고유량펌프는[redacted] 요구되므로 타부지에서 이동하여 설치하면 다수호기 동시사고에 대한 대응이 가능하다. 또한, [redacted] 외부지원이 가능하므로 전략수행에 영향이 없다.

### 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 검토되었다. 발생 가능한 인적오류 및 의사결정오류도 단일호기 사고시와 동일하며, 표 7-9와 표 7-12에서와 같이 설비 또는 절차서 개선을 통해 방지가 가능하지만 인적오류에 의해 주요 운전원조치의 실패를 가정하였을 경우에도 단일호기 사고시와 같이 대체 이행방안은 가능하다.

2.5.2.1 원자로 정지 후 조치 및 사고진단

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 원자로 정지 후 조치 및 사고진단을 통하여 소외전원상실(시나리오 1) 및 최종열제거원 상실(시나리오 4) 조건에서는 원자로 정지에 따라 추가 진단을 하여 시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10은 모든 교류전원 상실로 진단을 하여 진입을 한다.

시나리오 1의 경우에는 소외전원상실 상황이므로 비상운전절차서 사고진단 이후 진입하는 것이 적절하고, 시나리오 4는 순환수펌프가 모두 트립되어 복수기 저-진공으로 터빈이 자동 정지되고, 터빈 정지에 의해 원자로가 자동 정지됨에 따라 적절하다.

시나리오 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10의 경우에는 발전소 정전사고이므로 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 원자로 정지 후 조치 및 사고진단 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.2 대체교류디젤발전기 기동

다수호기 동시사고 발생 시 한빛 1,2호기는 소내정전 조건에서 발전팀은 원자로 정지 후 조치 및 사고진단 이후 . 단계 5.0에서 비상디젤발전기를 기동하여 하나의 비상 교류모선을 가압하는데 실패하면 대체교류디젤발전기 기동이 요구된다. 이 상황에서 대체교류디젤발전기는 공용설비로써 대체교류디젤발전기 기동은 한빛1,2호기 중 선행호기 즉 한빛1호기에 대체교류전력을 공급하기 위한 수단이며, 이를 통해 1차기기냉각수계통, 1차기기냉각해수계통 및 잔열제거계통의 운전이 가능하게 되므로 소내정전 조건에서의 대체

교류디젤발전기 수동 기동은 적절하다. 그리고 한빛2호기는 대체교류디젤발전기로부터 대체교류전력을 수전 받을 수 없으나, 한빛본부에 배치 예정인 1 MW 이동형발전차 및 한빛본부에 보유중인 3.2 MW 이동형발전차의 교류전원을 수전받아 소내정전 조건에서의 운전이 가능하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 한빛1,2호기는 소내정전인 상황에서는 주제어실에서 대체교류디젤발전기를 즉시 기동할 수 없어 안전모선을 가압할 수 없는 것으로 분석되었다. 기동되면 축전지 충전이 가능하며, 실패하여도 축전지 비필수부하 차단을 통해 축전지 수명을 연장할 수 있고, 1 MW 이동형발전차를 연결하면 축전지 연속 충전이 가능하다.

2.5.2.3 충전펌프 재기동

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 전력상실 조건 중 소외전원상실 조건(시나리오 1)에서는 비상디젤발전기의 기동으로 충전유량 확보를 위해 충전펌프의 재기동이 가능하며, 소내정전 조건(시나리오 2)에서는 대체교류디젤발전기를 주제어실에서 수동으로 기동하여 교류전원을 복구하고 충전유량 확보를 위해 충전펌프의 재기동이 가능하다. 충전유량을 확보하여 냉각재 재고량을 유지하고 원자로냉각재펌프의 밀봉냉각을 회복할 수 있으므로 충전펌프의 재기동은 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 충전펌프 재기동 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.4 충전펌프 대체기기냉각수 연결 및 기동

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 최종열제거원 상실 조건(시나리오 4)에서 최종열제거원 상실로 기기냉각수계통의 기능은 운전원 조치가능시간까지 유지되는 것을 가정하여 운전원은 수동으로 사고발생 이후 대기중인 충전펌프의 대체기기냉각수를 연결하여 기동하고 운전중인 충전펌프를 정지하는 것이 가능하다고 분석되었다. 발전팀은 모든 1차기기냉각해수펌프가 정지된 것을 확인하고 대

기 중인 충전펌프에 대체냉각수를 공급한 후 교체운전을 실시할 수 있다. 1차측 기기냉각수 온도상승으로 원자로냉각재펌프 밀봉냉각이 상실되면 축을 통해 냉각재누설이 발생할 수 있는 상황에서 대체냉각수를 공급하여 충전펌프를 계속 운전하는 것은 밀봉주입수 공급을 통해 밀봉냉각을 유지할 수 있으므로 적절한 운전원 조치이다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 충전펌프 대체기기냉각수 연결 및 기동 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.5 축전지 비필수부하 차단

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서 안전등급 축전지와 터빈구동 보조급수펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압운전이 가능한 시간을 [redacted] 연장하기 위하여 축전지 비필수부하를 차단한다. 발전팀은 [redacted] 교류전원을 복구할 수 없다고 판단되면 [redacted] 비필수부하를 차단한다. 1 MW 이동형발전차가 연결되어 축전지가 복구되기 전까지 발전소 상태 감시를 위한 필수계측기 및 노심냉각을 위한 터빈구동 보조급수펌프에 전원을 공급하기 위해 축전지 비필수부하를 차단하는 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 축전지 비필수부하 차단 시 예상되는 인적오류는 [redacted] 차단이 불가하여 축전지수명을 [redacted] 연장할 수 없거나, 실수로 차단해서는 안되는 필수부하를 차단하는 것이다. 비필수부하 차단에 [redacted] 초과되어도 충전기 가압이 가능한 1 MW 이동형발전차가 [redacted] 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 [redacted] 비필수부하 차단 후 필수부하의 투입여부를 확인하는 단계가 있어 실수로 차단한 필수부하를 다시 투입할 수 있다.

2.5.2.6 유출수 격리밸브 잠금

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 최종열제거원 상실 사고(시나리오 4)발

생 30분 이내에 유출수 격리밸브를 닫도록 하고 있다. 발전팀은 1차기기냉각해수펌프가 정지 중임을 확인하고 1차측기기냉각수 열부하 감소를 위해 유출수 격리밸브를 차단해야 한다. 유출수 격리밸브 잠금은 최종열제거원 상실 상황에서 1차측기기냉각수 열부하 감소를 위해 적절한 조치이며, 소내전원이 가용하므로 주제어실에서 차단이 가능하다.

그리고, 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 서 RCS 차단점검 수행 중 유출수 격리밸브 닫힘을 확인하고 만약 닫히지 않았으면, 격납건물 외측 유출격리밸브를 사고발생 1시간 이내 현장 운전원을 통해 수동으로 닫아야 한다. 유출수 격리밸브 차단은 소내정전 시 원자로냉각재 재고량을 보전하기 위해 적절한 운전원 조치이며 전동기구동밸브로서 주제어실에서 조작이 불가능하지만 현장에서 수동조작이 가능하므로 해당 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 유출수격리밸브를 닫는 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.7 증기발생기 압력방출밸브를 통한 발전소 냉각

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 모든 시나리오에서 조치가 필요한 증기발생기 압력방출밸브를 통한 발전소 냉각은 복수기가 운전 불가능한 상황에서 선택할 수 있는 유일한 발전소 냉각 수단이므로 이 운전원 조치는 적절하다. 증기발생기 압력방출밸브는 축전지 전원이 가용하고 안전관련 계기용공기가 공급 가능하므로 주제어실에서 조작이 가능하고 필요시에는 현장에서 수동조작도 가능하므로 해당 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 증기발생기 압력방출밸브를 사용하여 원자로냉각재계통을 냉각하는 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.8 가압기 압력방출밸브를 통한 1차계통 감압 착수

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 최종열제거원 상실 조건에서 발전팀은 가압기 압력방출밸브를 개방하여 원자로냉각재 계통을 감압하게 된다. 최종열제거원 상실로 원자로냉각재펌프가

정지되어 가압기 살수가 불가능하고, 유출유로가 차단되어 보조살수가 어려운 상황에서 가압기 압력방출밸브를 이용한 운전원의 원자로냉각재계통 감압조치는 적절하다. 축전지 전원이 가용하므로 가압기 압력방출밸브는 주제어실에서 조작이 가능하므로 해당 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 가압기 압력방출밸브를 통한 1차계통 감압 과정에서 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.9 안전주입탱크 주입

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9 조건에서 발전팀은 증기발생기 압력방출밸브 개방에 의한 증기방출로 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압을 수행하여 안전주입탱크의 냉각수를 노심으로 주입한다. 원자로냉각재펌프 밀봉누설로 재고량이 상실되는 상황에서 증기발생기 증기방출로 원자로냉각재계통을 냉각, 감압하여 밀봉누설량을 감소시키고 안전주입탱크의 주입을 유도하는 운전원 조치는 적절하다. 증기발생기 압력방출밸브는 축전지 전원 및 안전관련 계기용공기가 가용하여 주제어실에서 조작이 가능하므로 해당 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 안전주입탱크 주입과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.10 안전주입탱크 수동 격리

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9 조건에서 발전팀은 상부의 질소가 원자로냉각재계통으로 주입되는 것을 방지하기 위해 안전주입탱크를 격리하는 운전원 조치는 적절하다. 그리고 한빛본부에 배치예정인 1 MW 이동형발전차의 전원으로 출구격리밸브의 전원이 복구되지 않은 안전주입탱크는 질소를 배기하게 된다.

시나리오 4에서 발전팀은 안전주입탱크를 격리한다. 불필요하게 안전주입탱크의 냉각수가 노심으로 주입되는 것을 방지하기 위한 운전원 조치는 적절하다. 소내전원이 가용한 상태임에 따라 주제어실에서 안전주입탱크의 격리가 가능하므로 해당 운전원 조치는 적절하

다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 안전주입탱크 수동 격리 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.11 1 MW 이동형발전차 연결

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 포함하는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9, 10에서는 비상운전절차서 한빛본부에 배치 예정인 1 MW 이동형발전차를 호기별로 이동 배치하여 한 계열의 4.16 kV 안전모선에 전원을 공급하도록 하고 있다. 안전등급 축전지의 비필수부하를 차단하면 터빈구동 보조급수펌프를 이용하여 약 원자로냉각재계통의 냉각 및 감압이 가능하므로, 내에 1 MW 이동형발전차를 하나의 안전모선에 연결하는 운전원 조치는 적절하다. 1 MW 이동형발전차를 연결하여 축전지 충전이 재개되면 잔열제거계통 진입조건까지 원자로냉각재계통을 계속 냉각 및 감압할 수 있다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 1 MW 이동형발전차 연결준비 과정에서 예상되는 인적오류는 교류전원 복구가 가능한지 여부를 결정하는데 시간이 지체되어 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되고 축전지 수명을 연장할 수 없는 것이다. 비필수부하 차단이 초과하여도 앞서 언급한 바와 같이 1 MW 이동형발전차 및 중형발전기를 연결하여 축전지 방전 방지가 가능하다. 또한 고장난 안전모선에 발전차를 연결하므로서 가압에 실패하여 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전되는 것이다. 이 경우에도 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 보호하므로 즉시 재기동이 가능하다.

2.5.2.12 중압이동형펌프 기동

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 시나리오 3, 6, 7, 8, 9 조건에서 각 호

기 발전팀은 [redacted] 중압이동형펌프의 이동 배치를 요청하고 [redacted] 이 펌프를 기동하도록 하고 있다. 1 MW 이동형발전차가 연결된 후에도 용량문제로 충전펌프를 기동할 수 없으므로 원자로냉각재펌프 밀봉누설에 의한 재고량 상실을 복구하기 위해 [redacted] 한빛본부에 배치 예정인 중압이동형펌프를 기동하는 운전원 조치는 적절하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 중압이동형펌프 연결 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.13 3.2 MW 이동형발전차 연결

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전을 가정한 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 사고발생 72시간 이내에 3.2 MW 이동형발전차를 호기별로 연결하여 한 계열의 4.16 kV 안전모선을 가압한다. 3.2 MW 이동형발전차 연결을 통하여 시나리오 3에서는 1차기기냉각수펌프 및 1차기기냉각해수펌프 기동이 가능하여 잔열제거계통을 운전할 수 있고, 시나리오 6, 7, 8, 9에서는 1차기기냉각수펌프 기동이 가능하여 고유량이동형펌프와 함께 잔열제거계통 운전이 가능하여 발전소를 안전정지 상태로 유지할 수 있으므로 적절한 조치로 판단된다. 또한, 스트레스테스트 보고서 제4장 표 4-6 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전 사고 시 요구되는 이동형발전차 부하 산정 기준에서 제시된 바와 같이, 3.2 MW 이동형발전차가 연결될 경우 잔열제거펌프, 충전펌프, 격납건물 냉각팬, 필수냉각기 등의 기기를 각 1개 또는 1개 계열을 동시에 가동할 수 있다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 3.2 MW 이동형발전차 연결과정에서 예상되는 인적오류는 고장난 안전모선에 발전차를 연결하므로서 가압에 실패하여 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기 작동으로 발전차는 손상되지 않으므로 건전한 모선측으로 이동설치가 가능하다. 또한 부하투입 과정에서 예상되는 인적오류는 사전에 모선부하차단기를 개방하지 않거나 발전차 용량을 초과하는 부하를 투입하여 과부하에 의해 발전차가 트립되므로서 안전모선의 정전이 장기화되고 축전지 수명이 단축되는 것이다. 이 경우에도 보호계전기에 의해 발전차가 손상되지 않으므로 즉시 재기동이 가능하다.

2.5.2.14 고유량이동형펌프 연결

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기는 시나리오 4, 5, 6, 7, 8, 9 조건에서 최종열제거원 상실 이후 잔열제거계통을 운전하기 위해 고유량이동형펌프를 각 호기별로 연결하여 운전한다. 잔열제거계통을 운전하기 위해서는 잔열제거열교환기에 1차측기기냉각수가 공급되어야 하고 1차측기기냉각수에 전달된 잔열은 최종열제거원이 상실된 상황에서 고유량이동형펌프의 운전으로 제거될 수 있으므로 고유량이동형펌프의 연결은 적절한 운전원 조치이다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 고유량이동형펌프 연결 과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.15 잔열제거계통 운전

다수호기 동시사고 발생 시 한빛1,2호기 스트레스테스트 사고 시나리오에서 조치가 필요한 잔열제거계통 운전은 2차냉각수 재고량에 영향을 받지 않고 장기적으로 발전소를 저온정지의 안전정지 상태로 유지하기 위해 요구되는 적절한 운전원 조치이다. 시나리오 3에서는 3.2 MW 이동형발전차, 시나리오 4에서는 고유량이동형펌프, 시나리오 6, 7, 8, 9에서는 두 개 모두가 각 호기별로 연결되면 한 계열의 잔열제거계통 운전이 가능하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 잔열제거계통 운전과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

2.5.2.16 저압이동형펌프 연결

다수호기 동시사고 발생 시 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전을 포함하는 한빛1,2호기 스트레스테스트 사고 시나리오 3, 6, 7, 8, 9에서는 증기발생기를 이용한 냉각 및 감압 운전 중 증기발생기 압력이 감소하여 터빈구동보조급수펌프 운전이 불가능하게 될 경우, 이동형저압급수펌프 및 외부주입유로를 이용하여 증기발생기에 급수를 공급하도록 하고 있다.

다수호기 동시사고 발생 시 중대사고 상황인 시나리오 10에서는 소내 고정형 설비 고장으로 증기발생기 또는 원자로냉각재계통에 급수공급이 불가능할 경우

외부주입유로에 저압이동형펌프를 이용하여 냉각수를 공급하도록 하고 있다.

다수호기 동시사고 발생 시 소내전원상실이 장기화되고 붕괴열 감소로 터빈구동 보조급수펌프가 운전될 수 없는 상황 또는 중대사고 상황에서 저압이동형펌프 및 외부주입유로를 이용하여 증기발생기 및 노심에 냉각수를 공급하는 조치는 적절하다. 현재 한빛1,2호기는 증기발생기 및 원자로냉각재계통에 외부주입유로가 설치되어 있어 저압이동형펌프를 이용한 급수공급이 가능하다.

다수호기 동시사고 발생시에도 단일호기 사고발생시와 동일하게 저압이동형펌프 연결과정에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정 오류는 없다.

### 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

상기와 같이 한빛본부는 다수호기 동시 비상발령 시 비상대책본부, 비상기술지원실, 비상운전반으로 이어지는 의사소통 관리체계를 가지고 있으며, 비상대책본부에서 방재상황을 총괄한다. 따라서 한빛본부의 다수호기 동시사고 시 의사소통 체계는 적절한 것으로 평가되었다.

한빛본부 부지내 다수호기 동시사고 발생시 비상조직간 의사소통을 위한 설비는 통신설비가 대표적이며, 비상조직의 통신 적합성 검토결과는 다음과 같다.

가. 주제어실 통신 적합성

한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 위성전화를 활용한 주제어실의 주요 통신업무는 사고 발생이후 약 1시간 내외로 많은 사용이 발생할 것으로 예측되었다. 그 사유는 비상기술지원실 발족(  )이전에 발전소의 상태를 파악하고 안전조치를 취해야 함에 따라 1) 방사선 비상발령 및 대외기관 보고, 2) 화재 발생시 자체소방대 출동, 3) 현장수동 조작, 4) 이동형 설비 설치 요청 등 발전소 내·외부와의 긴밀한 업무의 수행이 요구되었다. 주제어실의 통신 적합성 검토 결과 현재 한빛1,2호기에는 고정형 위성전화가 각 1대씩 설치되어있으므로 비상시 통신수단이 부족한 것으로 평가되었으며, 안전개선사항으로 1대의 위성 통신설비 증설이 요구되었다.

나. 현장 조작 통신 적합성

한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 한빛본부에 구비되어 있는 총 5대의 이동형 위성전화를 호기별 2대씩 보급을 하여 현장 조작과 관련된 현장운전원과 주제어실 운전원의 통신이 가능해야 한다. 하지만 호기당  휴대용 위성전화 보급을 위해 총 7대의 휴대용 위성전화 추가배치가 요구되었다. 그리고 발전소 내 이동형 위성전화 통신 음영지역의 비상통신을 위해 이동형위성중계차량 구축 및 운영을 예정하고 있으며, 다수호기 동시사고 대응이 가능하도록 수립 예정이다.

다. 이동형 설비 통신 적합성

한빛본부에는 3.2 MW 이동형발전차, 1 MW 이동형발전차, 이동형펌프 3종이 배치가 되었거나 추후 배치가 될 예정이다. 이동형 설비는 이동형 설비 차고지에 대기 중이며, 비상상황 발생 시 발전소 비상요원에 의해 이동 및 설치가 된다. 이동형설비의 이동 및 설치 상황과 관련된 현황을 주제어실 또는 비상기술지원실에서

지속적으로 확인되어야 이동형설비 관련 발전소 차단기 조작, 배관 유로 설정을 상황에 따라 발전소 운전원이 수행 가능하므로 이동형 설비 차고지에 고정형 이동전화 이동형설비 운전원을 위한 이동형 위성전화 확보가 필요하다.

라. 지진화재 관련 통신 적합성

한빛본부는 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항으로 발전소내 화재감시설비를 0.3g 지진에도 가용할 수 있도록 추진 중에 있다. 하지만 운전용 및 비상 통신설비가 가용하지 못한 상황에서 자체소방대에 화재상황 전파가 어려우며, 소방대원이 발전소로 이동할 경우 화재에 대한 추가 정보습득이 어려워 화재관리에 어려움을 격을 수 있어 자체소방대에 고정형 위성전화 1대 및 소방차 운전원을 위한 이동형 위성전화 1대 확보가 필요한 것으로 검토되었다.

마. 비상기술지원실 관련 통신 적합성

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상기술지원실은 발전소 비상상황시 주제어실의 기술지원 및 외부자원 확보를 위해 비상통신 수단이 필요하다. 한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 비상기술지원실은 비상대책본부 및 외부 기관과의 지속적인 통신이 필요하므로 현재 각호기의 비상기술지원실에 설치되어 있는 1대의 고정형 위성전화로 지속 통신이 어려운 점을 감안하였을 때 1대의 추가적인 고정형 위성전화가 필요한 것으로 검토되었다.

바. 비상대책실 관련 통신 적합성

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상대책실은 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 협조체계를 구축하고 비상대응활동 총괄을 위해 비상통신설비가 필요함. 현재 비상대책실에는 고정형 위성전화가 설치되어 있어 한빛 본부 부지 전체 설계 기준초과사고 발생 시 각 발전소 별 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 지속적인 통신이 어려운 점을 감안하여 고정형 위성전화가 필요하다.

2.5.3.2 다수호기 동시사고 고려 시 의사결정 조직 및 인력 적합성

한빛본부 부지내 다수호기 동시사고 고려 시 의사결정에 필요한 조직은 한빛 1,2,3,4,5,6호기 발전팀과 비상기술지원실로 구성된다. 발전팀은 주제어실 운전원( )과 현장운전원(

)으로 구성되며, 방사선비상 발령이후 비상기술지원실이 발족되면 비상운전반으로 비상기술지원실 조직으로 귀속된다. 비상기술지원실은 비상운영지원실(), 기술지원반, 방사선대책반, 비상운전반, 운전지원반으로 구성된다.

발전팀 주제어실 운전원의 인력은 호기별 기준으로 구성되어 있다. 현장 운전원의 인력은 호기별 기준으로 발전팀 현장 운전원은 구성되어 있다. 그리고 방사선비상발령 이후 비상기술지원실의 발족과 함께 발전팀은 비상운전반으로 전환되며, 비상기술지원실 운전지원반과 함께 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상기술지원실의 인력은 한빛1,2,3발전소 기준으로 구성되며, 비상기술지원실 조직의 역할은 한빛본부 방사선비상계획서에 따라 노심상태 평가, 사고상황 분석, 보호대책 수립 및 상황전파 등 비상대책실 발족 이전까지 전반적인 발전소 사고상황에 대응하게 된다.

비상운영지원실의 인력은 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 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.

따라서 스트레스테스트에서 가정하는 보수적인 사고가 다수호기에 동시에 발생하더라도 발전소 대응을 위한 의사결정에 필요한 조직 및 인력은 적절한 것으로 평가되었다.

## 제3절 안전 개선사항

### 3.1 후쿠시마 후속조치 사항 이행 확인

운영기술능력과 관련하여 후쿠시마 후속조치를 검토한 결과 사고전략수립, 주요 운전원 조치, 주요 자원의 적절성 검토 및 인간공학 유효성평가와 관련된 사항은 없는 것으로 검토되었다.

## 3.2 월성1호기 및 고리1호기 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 한빛1,2호기 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 한빛1,2호기 평가에서 반영이 완료되었거나 반영중인 것으로 검토되었다.

## 3.3 운영기술능력 개선사항 (자체도출)

### 3.3.1 사고대응전략 보완

극한자연재해를 동반한 장기교류전원 상실 상황 시 격납건물 내부에 위치한 전동기 구동밸브들을 수동으로 열고 닫는 조치를 해야 하나, 격납건물 내부의 상태를 정확히 파악하지 못한 상태에서 현장 운전원의 격납건물 출입은 매우 위험할 수 있다. 따라서 전동기제어반(Motor Control Center : MCC)에서 소형이동형발전기를 이용한 밸브 조작 방안 등에 대한 전략수립 보완이 필요하다.

### 3.3.2 설비 보완

3.3.2.1 주제어실 설비 보완

주제어실의 증기발생기 광역수위지시계는 협역수위지시계와 달리 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 협역수위 이

하의 수위감시가 불가능하여 사고완화전략 수립 및 이행에 어려움이 있을 것으로 평가되어 해당 지시계의 내진성능 보완이 필요하다.

장기교류전원 상실 상황에서 안전등급 축전지의 수명은 사고완화전략을 수행하는데 핵심적인 요소이며, 축전지의 잔여수명은 전압을 통해 확인이 가능하나 주제어실의 안전등급 125 V 직류모선의 전압계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 감시가 불가능한 것으로 평가되어 안전등급으로의 보완이 필요하다.

냉각재가 노심으로 주입되고 있음을 보여주는 고압 및 저압 안전주입 유량지시계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고상황에서는 확인이 불가능한 것으로 평가되어 내진성능 보완이 필요하다.

3.3.2.2 현장 설비 보완

최종열제거원 상실 상황에서 충전펌프 대체냉각수 공급을 위해 조작이 요구되는 배수밸브(HG-V211)가 철판으로 된 PIT Cover 하부에 있어, 볼트로 체결된 이 철판을 운전원이 인력으로 인양하고 밸브를 조작하기가 불가능한 것으로 평가되어 배수밸브로의 접근성 확보와 관련된 보완이 필요하다.

AC 전원을 2시간 이내에 복구할 수 있는지 여부를 사고 발생 후 15분 이내 확인하고, 불만족 시 조치로 다중방어지침서 현장 운전원이 축전지 비필수부하 차단을 사고 발생 후 행해야 하지만 조명 등 운전환경을 고려할 때 초과 가능성이 있어 비필수 부하 차단기에 별도의 차단대상 표식을 통해 현장운전원의 차단기 조작 시간을 줄일 수 있도록 보완이 필요하다.

중압이동형펌프를 이용하는 사고완화전략은 수립되었으나 이 펌프를 연결할 외부 주입유로는 설치되어 있지 않으므로 설치가 요구된다.

3.3.2.3 이동형 설비 보완

이동형발전차에 연료를 보충하기 위해 비상디젤발전기의 연료유저장탱크에 유류관을 연결하여 연료를 공급받아야 한다. 그러나 지하에 설치된 비상디젤발전기 연료유저장탱크의 출입구가 밀봉되어 있지 않아 극한자연재해 상황에서 침수될 가능성이 있으므로 연료유이송관 연결지점에 대한 보완이 필요하다.

3.3.2.4 통신 설비 보완

설계기준초과 조건의 경우에서 활용하는 비상 통신수단인 위성전화로 대내외 상황전파, 현장조치 지시 등이 이루어져야 하나 현재 보유하고 있는 위성전화가 부족하여 비상운전 초기에 신속히 수행해야 할 중요 조치들이 지연될 가능성이 있으므로 주제어실에 고정형 위성전화 추가가 필요하다.

설계기준초과 조건에 대비해 발전소에 위성통신장비를 설치하였으나, 현장운전원의 경우 소내 통신장비 불능인 상태에서 발전소 현장조작에 투입될 경우 주제어실과의 통신이 어려워짐에 따라 현장운전원의 현장출입시 주제어실과 통신이 가능토록 별도의 통신장비 설치가 필요하다.

한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 한빛본부에 구비되어 있는 총 이동형 위성전화를 호기별 보급을 하여 현장 조작과 관련된 현장운전원과 주제어실 운전원의 통신이 가능해야 한다. 하지만 호기당 휴대용 위성전화 보급을 위해 휴대용 위성전화 추가배치가 요구되었다.

한빛본부에는 3.2 MW 이동형발전차, 1 MW 이동형발전차, 이동형펌프 3종이 배치가 되었거나 추후 배치가 될 예정이다. 이동형 설비는 이동형 설비 차고지에 대기 중이며, 비상상황 발생 시 발전소 비상요원에 의해 이동 및 설치가 된다. 이동형설비의 이동 및 설치 상황과 관련된 현황을 주제어실 또는 비상기술지원실에서 지속적으로 확인되어야 이동형설비 관련 발전소 차단기 조작, 배관 유로 설정을 상황에 따라 발전소 운전원이 수행 가능하므로 이동형 설비 차고지에 고정형 이동전화 이동형설비 운전원을 위한 이동형 위성전화 확보가 필요하다.

한빛본부는 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항으로 발전소내 화재감시설비를 지진에도 가용할 수 있도록 추진 중에 있다. 하지만 운전용 및 비상 통신설비가 가용하지 못한 상황에서 자체소방대에 화재상황 전파가 어려우며, 소방대원이 발전소로 이동할 경우 화재에 대한 추가 정보습득이 어려워 화재관리에 어려움을 격을 수 있어 자체소방대에 고정형 위성전화 및 소방차 운전원을 위한 이동형 위성전화 확보가 필요하다.

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상기술지원실은 발전소 비상상황시 주제어실의 기술지원 및 외부자원 확보를 위해 비상통신 수단이 필요하다. 한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 비상기술지원실은 비상대책본부 및 외부 기관과의 지속적인 통신이 필요하므로 현재 각호기의 비상기술지원실에 설

치되어 있는 [redacted] 고정형 위성전화로 지속 통신이 어려운 점을 감안하였을 때 [redacted] 추가적인 고정형 위성전화가 필요하다.

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상대책실은 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 협조체계를 구축하고 비상대응활동 총괄을 위해 비상통신 설비가 필요함. 현재 비상대책실에는 [redacted] 고정형 위성전화가 설치되어 있어 한빛 본부 부지 전체 설계 기준초과사고 발생 시 각 발전소 별 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 지속적인 통신이 어려운 점을 감안하여 [redacted] 고정형 위성전화가 필요하다.

### 3.3.3 절차서 보완

3.3.3.1 비상운전절차서

장기교류전원 상실시 [redacted] 이동형발전차에 의해 임시적으로 가압되어 있는 경우는 이에 해당되지 않으나 가압된 것으로 판단하여 단계 적용에 혼동이 유발되므로 개선이 필요한 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

[redacted] 축전지 비필수부하를 차단하도록 되어 있으나, [redacted] 1, 2차 대용량 비필수부하 및 추가적인 비필수부하 차단을 수행하도록 되어있다. [redacted] 축전지 비필수부하 차단은 장기교류전원 상실 상황에서만 수행하도록 절차서 보완이 필요한 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

[redacted] 전원이 2시간 이내에 복구될 수 있는지 확인 후 다중방어운영지침서를 수행하도록 지시하고 있다. 하지만 통신, 조명 및 인력이 제한적인 극한자연재해 상황에서 2시간 이내 복구가능성을 판단한다는 것은 사실상 불가능하며, 판단을 위한 기준 또한 제시되고 있지 않다. 판단 지연 시 후속 축전지 비필수부하 차단이 지연되어 30분을 초과할 수 있는 것으로 평가되었다. 따라서 전원 복구가능성 판단이 지연되지 않도록 주제어실에서 AAC DG 기동 실패 시 즉시 ELAP을 선언하고 [redacted]

장기교류전원 상실이 진행 중일 경우, [redacted] 모든 조건 만족 시

비상기술지원실의 권고에 따라 적절한 절차서로 진입하도록 하고 있고 적절한 절차서는 내용 상 잔열제거계통 운전절차서를 의미한다고 판단된다. 이 경우 다음 두 가지 조건은 한빛1,2호기 비상운전절차서의 잔열제거계통운전 진입조건에 해당되지 않는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

모든 교류전원상실 상황에서 비상디젤발전기 기동에 실패하면,

한빛1,2호기 비정상절차서 주제어실 지진경광등을 리셋하는 절차가 없어 여진 또는 후속 지진 발생 시 이를 인지하지 못할 수 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

계통운전절차서 원자로냉각재펌프 정지 되어 있으나, 이런 내용이 기술되어 있지 않다. 따라서 최종열제거원 상실로 1차측기기냉각수 온도가 상승해도 다른 운전변수가 제한치를 초과하지 않으면 원자로냉각재펌프를 계속 운전할 가능성이 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

1차기기냉각해수계통 두 계열 모두 상실 시 비상디젤발전기가 기동되지 못하도록 하는 내용이 비정상운전절차서 비상디젤발전기 불시 자동기동 시 냉각수 상실로 엔진이 손상될 수 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

3.3.3.3 계통운전절차서

이동형발전차 연결을 대비하여 따라 전원을 공급할 안전등급 4.16 kV SWGR 차단기를 개방상태로 배열하도록 하고 있으나, 개방의 의미가 명확하지 않은 것으로 검토되었다. 즉, 단순히 Open 상태만을 유지한다면 불시 자동 기동신호에 의해 대용량부하가 기동될 수 있으며, 이 경우 운전 중인 이동형발전차가 과부하에 의한 저-속도 신호로 정지될 수 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

이동형발전차 연결을 대비하여 따라 전원을 공급할 안전등급 4.16 kV SWGR 차단기 개방상태를 확인하도록 되어 있으나, 붙임-7.1 목록에 기동용변압기 측 정상 및 대체 인입차단기가 누락되어 있어 차단기 배열 오류 시 345 kV 기동용변압기가 역가압될 수 있는 위험이 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

향후 1 MW 이동형발전차 도입 과정에서 1 MW 이동형발전차를 위한 별도의 운전절차서가 구비되어야 하며, 절차서에는 과부하 트립 방지를 위해 투입이 가능한 부하 및 부하용량과 대용량 부하의 불시기동을 방지하기 위한 대책이 포함되도록 요구되었다. 또한 1 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결하지 않도록 연결 할 모선을 선정하기 위한 기준 및 사전점검 목록을 절차서에 반영하도록 요구되었다.

3.2 MW 이동형발전차를 지진 등 자연재해에 의해 고장이 발생한 안전모선에 연결함으로서 충전기 복구가 지연되고 축전지가 방전될 수 있는 것으로 평가되었다. 따라서 절차서에 이동형발전차를 연결할 모선을 선정하기 위한 기준 및 모선점검 등 기기점검 목록을 반영하도록 절차서 보완이 요구된다.

소내정전이 진행 중일 경우 따라 대체교류디젤발전기를 기동하여 하나의 4.16 kV 교류안전모선을 가압하도록 하고 있다. 그러나 해당 절차서의 비상기동 절차는 대체교류디젤발전기 보조기기 모선이 한빛1,2호기 모두 소내정전으로 가압되지 않을 경우, 현장에서 추가적인 차단기조작이 필요하여 주제어실에서 즉시 기동이 불가능하다. 주제어실에서 즉시 기동이 가능하도록 해당 절차서 수정이 요구된다.

연료이송펌프, 전원케이블, 연료이송호스가 이동형발전차에 탑재되어 있는 것으로 기술되어 있으나, 실제 이송트럭에 실려서 이송되고 있어 관련 절차서 내용 수정이 필요하다.

중압이동형펌프를 이용하는 사고완화전략은 수립되었으나 이 펌프가 도입되지 않은 관계로 펌프 도입 단계에서 중압이동형펌프의 기동과 관련된 절차서의 개발이 요구되었다.

3.3.3.4 중대사고관리지침서

중대사고 진입 시 첫 단계로 수소분석기를 참조하여 운전하도록 되어 있으나, 주제어실에서 즉시 운전이 가능한 절차가 아니고, 현장 밸브 및 전원 조작 등이 포함된 초기 기동절차이므로 개정이 필요한 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

3.3.3.5 방사선비상계획서

자연재해 발생 시 백색비상 발령상황 기준이 모호하여 청색비상 발령이 지연되거나 누락될 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 기준으로 하여 기기냉각해수건물 침수를 확인하고 백색비상을 발령 하였으나, 고온정지 이

상에서는 청색비상 발령조건에도 해당되므로 뒤늦게 인지하거나 누락할 가능성이 있는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

설계기준을 초과하는 지진발생 시 비상발령 및 비상요원 소집과 관련한 본사요청 절차가 상세하지 않은 것으로 평가되었다. 방사선비상 발령상황이 되면, 비상방송, 전화, ACS 사용이 불가한 경우에 , 본사 어느 조직 또는 경로를 통해 요청하는지 구체적으로 기술되어 있지 않은 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.
비상 상황 시 사고대처의 신속성을 고려한 발전소 시설보안 및 출입 절차는 중요하다. 이를 위하여 비상요원 및 비상대응설비의 출입절차의 최적화가 필요하다. 출입인원과 장비 등 이동의 편의를 최대한 고려하여 비상요원 및 비상대응설비의 출입절차의 최적화 및 비상시 출입가이드라인 정립이 필요하다.

3.3.3.6 다중방어운영지침서

제시된 부하목록에는 차단기 번호, 기기번호, 기기명만 있고 상세부하를 알 수 없어 차단기를 개방할 경우 주제어실에 나타나는 영향(또는 증상)을 예상할 수 없는 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

에 만약 장기교류전원 상실 사고가 진행 중일 경우 배치해야 하는 이동형설비 중 한 중압이동형펌프가 포함되어 있지 않다. MACST 펌프는 포함되어 있으나 통상 운전원이 이를 중압이동형펌프로 인식하지 못할 가능성이 있어 개선이 필요한 것으로 평가되어 해당 내용에 대한 보완이 필요하다.

### 3.3.4 교육훈련 보완

지진에 의해 제어봉 위치지시계기가 상실되면 모든 제어봉 삽입 여부를 확인할 수 없어 정지여유도를 정확히 계산하기 어려우므로 후속 냉각과정에서 원자로출력 및 기동률 추이를 밀착하여 감시토록 함으로서 혹시 있을지도 모르는 미임계 상실에 대비하도록 하는 시뮬레이터 실습 교육훈련이 요구된다.

극한자연재해 사고시나리오를 가정하여 이미 설치되었거나 설치 예정인 외부주입

유로, 이미 도입되었거나 도입 예정인 이동형 설비와 신규로 개발되는 다중방어운영지침서 및 비상운전절차서, 중대사고지침서가 연계된 시뮬레이터 실습을 시행하므로서 운전원의 사고대응능력을 제고할 수 있도록 극한자연재해에 대비한 교육훈련프로그램의 개발 및 시행이 요구된다.

극한자연재해 사고상황을 가정한 운전원의 비상운전 또는 중대사고 시뮤레이터 실습 시 현장운전원도 실습에 동참하여 통신수단 부재 및 조명 상실 등 악화된 운전 환경에서 주제어실 운전원과 협업을 통해 사고대응전략 수행에 요구되는 현장기기 조작을 훈련할 수 있도록 교육훈련 프로그램 개선이 요구된다.

한빛본부 방사능방재 보수교육 중 사고완화 및 평가 담당직무와 관련해서 발전교대근무자는 본부 훈련센터에서 교육을 실시하나, 비상기술지원실장에 대한 중대사고 교육은 연간 [redacted] 방사능방재 사이버교육시스템을 이용하도록 하고 있다. 하지만 본 시스템에 중대사고 완화전략 수행에 관한 교육내용이 포함되어 있지 않는 것으로 평가되어 교육내용에 대한 보완이 필요하다.

중대사고 및 도입 예정인 각종 이동형 설비가 모의되어 극한자연재해 사고상황에 따른 중대사고 실습이 가능하도록 한빛1,2호기 시뮬레이터 모델의 성능개선이 요구된다.

시뮬레이터 실습 중 전체 발전팀은 운전원들과의 상황공유 측면에서 발전소 사고수습 및 절차서 적용의 적절성을 토의하는 등과 같은 상황인식 공유 훈련에 대한 보완이 필요하다.

이미 도입되었거나 향후 도입 예정인 이동형 설비의 운용 담당자에 대해 이들 설비의 이동, 설치 및 운전 방법에 대한 체계적인 교육훈련프로그램 수립 및 이행이 요구된다.

AC 전원을 [redacted] 복구할 수 있는지 여부를 사고 발생 후 [redacted] 확인하고, 불만족 시 조치로 현장 운전원이 축전지 비필수부하 차단을 사고 발생 후 [redacted] 수행해야 하지만 조명 등 운전환경을 고려할 때 초과 가능성이 있어 현장운전원 교육을 통해 현장운전원의 차단기 조작 시간을 줄일 수 있도록 보완이 필요하다.

### 3.3.5 조직/인력 보완

사고 초기에 설치가 요구되는 1 MW 이동형발전차의 경우, 한빛 1~6 호기에 동

시에 이동 및 설치가 이루어져야 하지만 현재 한빛본부는 3.2 MW 이동형발전차 1대를 기동할 수 있는 인력만 구성되어 있다. 따라서 1 MW 이동형발전차 배치 시 관련 조직/인원에 대한 추가 확보가 필요하며, 사고 시 담당 인력의 발전소 귀소 가능 방안 확보가 필요하다.

## 제4절 결론

본 장에서는 한빛1,2호기 스트레스테스트(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 사고 상황에서의 사고대응전략, 주요 운전원 조치 및 주요 자원에 대한 스트레스테스트 각 분야별 시나리오에 대하여 한빛1,2호기의 운영기술능력을 평가하였다.

사고대응전략, 주요 운전원 조치, 주요 자원의 적절성 평가를 위해 한빛1,2호기 스트레스테스트 제4장 및 제5장에서 수립된 사고시나리오에 대한 사고대응전략을 평가한 결과 모두 적절한 대응전략을 수립한 것으로 평가되었다. 그리고 해당 사고대응전략, 주요 운전원 조치, 주요 자원을 활용하여 인간공학 유효성 평가를 수행한 결과 모두 가용한 것으로 평가되어 한빛1,2호기는 극한자연재해를 동반한 모든 설계기준초과 및 극한자연재해 조건에서도 발전소의 자체 대응능력과 운전원의 적절한 대응조치를 통해 안전하게 정지될 수 있음을 확인하였다.

평가에서 도출된 사고대응전략, 주요 운전원 조치, 주요 자원에 대한 개선사항은 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

7-2. 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 최종안전성분석보고서.

7-3 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 비상운전절차서

7-4 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 비정상운전절차서

7-5 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 계통운전절차서

7-6 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 중대사고관리지침서

7-7 한국수력원자력(주), 한빛1,2호기 인간공학 유효성 평가용 임시절차서

7-8 한국수력원자력(주), 한빛원자력본부 방사선비상계획서 및 방사선비상계획 수행절차

7-9 한국수력원자력(주), Westinghouse형 극한재해 대응전략 보고서

7-10 한국전력기술(주), 한빛1,2호기 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 | Erroe Code | Remarks |
|---|---|---|---|
| Action | Operation too long/short | A1 | Action: pulling a switch or pressing a button to open a door<br>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.;<br>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;<br>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 |
| | Wrong selection made | S2 | |

| Error Category | Error Mode | Erroe Code | Remarks |
|---|---|---|---|
| | | | the system. |
| Commu-nication | 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

| Possibility \ Risk | | 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 |

○ 음영은 위험도 수준을 나타내며 농도가 짙을수록 위험도 수준이 높다.
○ 최상위 수준인 A1, A2, A3, B1, B2, C1에 대해서는 개선 대책이 요구된다.

표 7-3 소외전원상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

표 7-4 소내정전 조건에 대한 소요시간 분석결과

표 7-5 최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

표 7-6 최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 인적오류 분석결과

표 7-7 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 소요시간 분석결과

표 7-8 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과

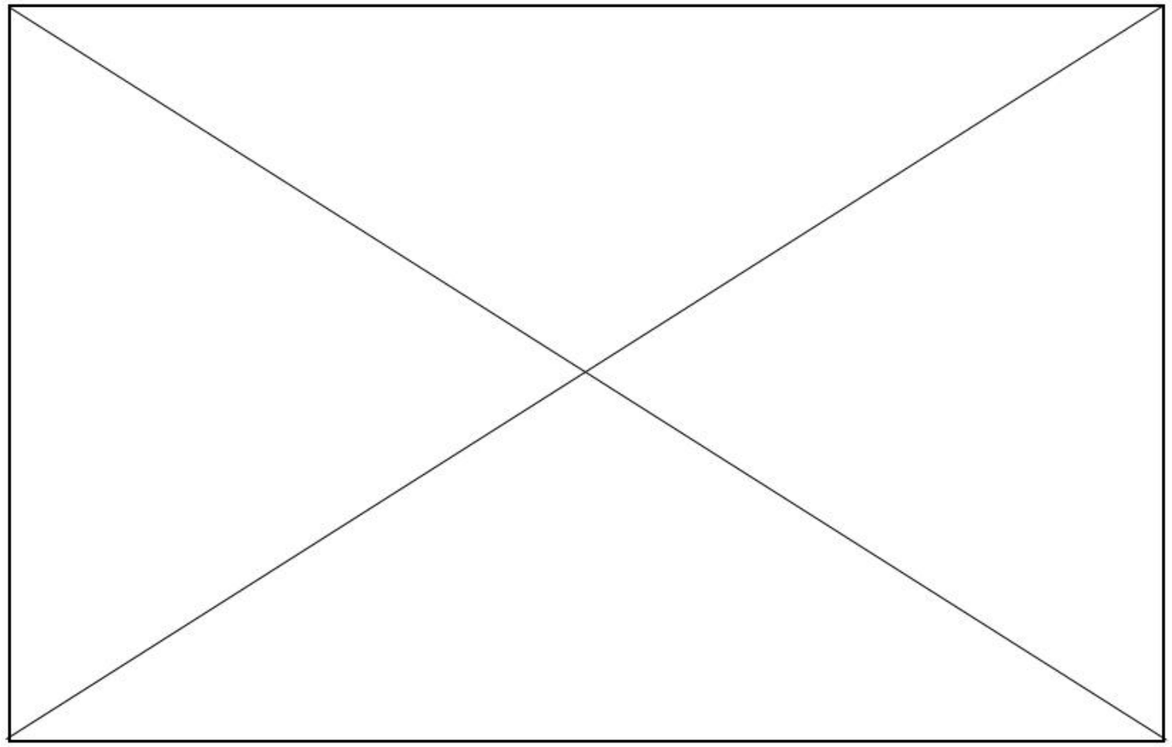


표 7-9 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류

표 7-10 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 소요시간 분석결과

표 7-11 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과

표 7-12 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건을 동반한 0.3g 지진에 대한 개선이 요구되는 직무 및 인적오류

표 7-13 중대사고에 대한 소요시간 분석결과

표 7-14 중대사고에 대한 주요 운전원 조치의 직무 및 인적오류 분석결과

표 7-15 최종열제거원상실(시나리오 4) 주제어실 재고기기 목록

표 7-16 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건(시나리오 6) 주제어실 재고기기 목록

표 7-17 대체교류디젤발전기 상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원상실 조건을 동반한 0.3g 지진(시나리오 9) 주제어실 재고기기 목록

표 7-18 중대사고(시나리오 10) 주제어실 재고기기 목록

표 7-19 현장 재고기기 목록

표 7-20 인력수준 분석 결과

| 검토 항목 | 기준 | 기존 인원 | 시나리오 인원 | 적절/ 부적절 | 개선 필요 인원 |
|---|---|---|---|---|---|
| 주제어실 운전원 | 호기 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 현장 운전원 (1차 및 2차측) | 호기 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 비상기술지원실 운영 인력 | 발전소 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 초동소방대 | 호기 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 이동형 발전차 운전원 | 본부 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 지게차 운전원 | 호기 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 트럭 운전원 | 호기 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 케이블 포설 요원 | 발전소 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |
| 연료유 포설 요원 | 발전소 | [redacted] | [redacted] | 적절 | - |

표 7-21 이동형발전차 운전 절차에 따른 각 수행조의 역할(계통-3592B)

| 구분 | 수행 조직 | 업무 내용 |
|---|---|---|
| 발전차 이동조 | 중기원 | 보관 장소로부터 현장까지 이동형발전차 및 케이블/연료 이송설비 이동 |
| 케이블 포설조 | 전기원 | 이동형 발전기와 단자함 연결용 케이블 포설 |
| 케이블 결선조 | 전기원 | 케이블 및 접지 결선<br>(이동형 발전기 측, 전원 접속함 측) |
| 연료 공급조 | 기계원 | 연료 이송펌프 및 전원 케이블, 호스 설치 |
| 발전기 조작조 | 발전팀 | 이동형 발전기 운전 |
| 차단기 조작조 | 발전팀 | 관련 차단기 및 기기 배열 |

표 7-22 방사능방재교육

| 교육과정 | 교육대상 | 교육시기 | 교육시간 |
|---|---|---|---|
| 방재요원 신규교육 | 신입직원 | 입사 후 6개월 이내 | |
| | 사업소채용 신입직원 | 방재요원 지정 후 6개월 이내 | |
| 방재요원 보수교육(I) | 방재요원 신규교육 이수자 | - 사이버 교육 (본사 방재교육계획에 따름)<br>- 집합교육 (사업소 방재교육계획에 따름) | |
| 방재요원 보수교육(II) | 보수교육(I) 3회 이상 이수자 | | |

표 7-23 방재요원 신규교육과정의 교육내용

| 구분 | 교육내용 | |
|---|---|---|
| | 원자력직군 | 기타 직군 |
| 공통교육 | - 방사선이론<br>- 방사선(능) 계측기<br>- 체내외 방사선방호<br>- 방사성 오염관리<br>- 방사선의 생물학적 영향<br>- 방사성폐기물 관리 및 환경방사선 감시<br>- 피폭평가 및 작업계획<br>- 방사능방재 일반<br>- 방사능방재 관계법령 | - 방사선이론<br>- 방사성폐기물 관리<br>- 방사선방호<br>- 발전 기본원리<br>- 원자력이론<br>- 발전소안전관리<br>- 원자로안전설비<br>- 방사능방재 일반<br>- 방사능방재 관계법령 |
| 직무교육 | - 화재진압 및 긴급구조<br>- 방사능 재난관리<br>- 사고완화 및 평가<br>- 방사선관리 및 주민보호<br>- 방사선 비상진료<br>- 비상대응활동 지원 | - 화재진압 및 긴급구조<br>- 방사능 재난관리<br>- 사고완화 및 평가<br>- 방사선관리 및 주민보호<br>- 방사선 비상진료<br>- 비상대응활동 지원 |

표 7-24 방재요원 보수교육과정 중 사고대응관련 비상조직의 교육내용

| 구분 | | 교육내용 |
|---|---|---|
| 공통 | 모든 비상조직 | - 방사능방재 일반<br>- 방사선 방호 |

| 담당직무 | 교육내용 | 해당 비상조직 | |
|---|---|---|---|
| | | 실 | 반/조 |
| 사고완화 및 평가 | - 중대사고 | TSC | 비상기술지원실장 |
| | - 사고분석 및 평가<br>- 노심손상 평가 | | 기술지원반 안전분석조 |
| | | | 방사선대책반 방사화학조 |
| | - 방사선사고 확대방지를 위한 응급조치<br>· 비정상운전절차서<br>· 비상운전절차(EOP)<br>· 중대사고 | | 운전지원반 운전지원조 |
| | | | 비상운전반 비상운전조 |
| | | | 운전지원반<br>비상기술지원실 파견조 |
| | - 보수 및 복구조직의 운영<br>- 긴급정비 | OSC | 정비계획반장 |
| | | | 정비계획반 정비계획조 |
| | | | 기계반 |
| | | | 전기반 |
| | | | 계측제어반 |
| | | | 정비지원반 |

표 7-25 운전원에 대한 비상운전절차서 교육

| 교육과정 | 교육시기 | 교육시간 | 교육시행부서 |
|---|---|---|---|
| EOP 초기교육 | 최초 핵연료장전 이전 | 충분히 교육하는데 소요되는 기간 | - 발전운영팀<br>- 인재개발원<br>- 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 7-26 비상운전절차서 교육과정별 교육내용

<table>
<tr><th colspan="2">교육과정</th><th>교육내용</th><th>교육방법</th></tr>
<tr><td rowspan="2">EOP<br>초기교육</td><td>MCR<br>운전원</td><td>- EOP 개발과정<br>- EOP 구성 및 체계<br>- EOP 사용<br>- FSAR 15장 사고분석<br>- 각(변경된) EOP의 사고완화 전략 및 기술배경<br>- 각(변경된) EOP의 단계별 조치사항 및 기술배경<br>- 발생 가능한 유형별 사고 및 다중사고 시 비상운전 수행능력</td><td rowspan="5">- 강의실 교육<br>- 현장답사 교육<br>- 시뮬레이터 교육</td></tr>
<tr><td>현장<br>운전원</td><td>- EOP 구성 및 체계<br>- 기본적이 사고완화 개념<br>- 현장답사 교육을 통한 비상운전 관련 기기의 위치확인 및 조작법</td></tr>
<tr><td rowspan="2">EOP<br>재교육</td><td>MCR<br>운전원</td><td>- 초기교육 내용(EOP개발과정 제외)<br>- 국내외 운전경험 사례<br>- 주요 EOP 개정사항<br>- 실제 운전과정에서 나타난 운전원 취약분야</td></tr>
<tr><td>현장<br>운전원</td><td>- 초기교육과 동일</td></tr>
<tr><td>개정<br>EOP<br>교육</td><td>전<br>운전원</td><td>- EOP 개정 내용 및 사유<br>- 변경된 사고완화 전략 및 기술배경<br>- 변경된 EOP 단계별 조치사항 및 기술배경<br>- 변경된 EOP에 따른 비상운전 수행능력</td><td>공람문서에 의한 자율 학습 우선 실시 후, 중요 사항에 대해서는<br>- 강의실 교육<br>- 현장답사 교육<br>- 시뮬레이터 교육</td></tr>
</table>

표 7-27 발전주제어실실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

| 교과목 명 | 교육훈련 내용 | 교육시간 | | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ-상 | Ⅰ-하 | Ⅱ-상 | Ⅱ-하 | |
| EOP<br>(토의평가) | | 2 | 3 | 2 | 3 | 토의 |
| 출력변동<br>및<br>사고분석 | | - | 2 | - | 2 | 강의 |
| 비상운전<br>실습 | | 11 | 11 | 15 | 15 | 실습 |

표 7-28 발전현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

| 교과목 명 | 교육훈련 내용 | 교육시간 | | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ-상 | Ⅰ-하 | Ⅱ-상 | Ⅱ-하 | |
| 비상운전 절차서 | | 4 | 4 | - | - | 토의 |
| 출력변동 및 사고분석 | | - | 2 | - | 2 | 강의 |

표 7-29 중대사고지침서 교육 과정

| 구분 | 최초교육 | 재교육 | | | 개정사항 교육 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 교육대상 | 운전원 및 방재요원 | 운전원 | 운전원 현장 OJT교육 | 방재요원* | 운전원 | 방재요원 |
| 계획수립 | 발전운영팀 | 훈련센터 | 발전운영팀 | 방재대책팀 | 발전운영팀 | |
| 교육시행 | 발전운영팀 | 훈련센터 | 발전팀 | 훈련센터 | 발전운영팀 | |
| 교육방법 | 집합교육 | 집합교육 | 집합 및 현장실습 교육 | 집합교육 | 전파교육 | |
| 교육주기 | 중대사고관리지침서 최초 승인 후 6개월 이내 | 6시간/년 | 4시간/년 | 6시간/년 | 수시 | |

* : 3회 이하의 방사능방재교육(8시간/년) 이수자

표 7-30 중대사고지침서 교육과정별 교육내용

<table>
<tr><th colspan="2">교육과정</th><th>교육내용</th><th>교육방법</th></tr>
<tr><td rowspan="2">중대사고관리지침서 최초 교육</td><td>MCR 운전원</td><td>- 중대사고관리지침서 개발과정<br>- 중대사고관리지침서 구성 및 체계<br>- 중대사고관리지침서 사용자 지침<br>- 중대사고관리지침서의 사고완화 전략 및 기술배경<br>- 중대사고관리지침서의 단계별 조치사항 및 기술배경</td><td rowspan="6">- 집합교육<br>- 현장실습교육<br>- 공람을 통한 전파교육</td></tr>
<tr><td>현장 운전원</td><td>- 중대사고관리지침서 구성 및 체계<br>- 기본적인 사고완화 개념<br>- 중대사고 완화운전 관련기기의 위치확인 및 조작법</td></tr>
<tr><td rowspan="3">중대사고관리지침서 재교육</td><td>MCR 운전원</td><td>- 초기교육 내용(중대사고관리지침서개발과정 제외)<br>- 국내외 운전경험 사례<br>- 주요 중대사고관리지침서 개정사항<br>- 실제 운전과정에서 나타난 운전원 취약분야 등</td></tr>
<tr><td>운전원 현장 OJT 교육</td><td>- 보직별 해당 중대사고관리지침서 Review<br>- 보직별 현장 기기위치 확인 및 조작법 습득</td></tr>
<tr><td>현장 운전원</td><td>- 중대사고관리지침서 구성 및 체계<br>- 기본적이 사고완화 개념<br>- 주요 중대사고관리지침서 개정사항</td></tr>
<tr><td>중대사고관리지침서 개정사항 교육</td><td>전 운전원</td><td>- 중대사고관리지침서 개정내용 및 사유<br>- 변경된 사고완화 전략 및 기술배경<br>- 변경된 중대사고관리지침서 단계별 조치사항 및 기술배경<br>- 변경된 중대사고관리지침서에 따른 중대사고 완화운전 수행방법</td></tr>
</table>

표 7-31 발전주제어실/현장실무반 과정의 교육훈련 내용 및 시간

| 교과목 명 | 교육훈련 내용 | 교육시간 | | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ-상 | Ⅰ-하 | Ⅱ-상 | Ⅱ-하 | |
| 노심손상 완화 (중대사고) | | 2 | 2 | 2 | 2 | 강의 |
| | | | 2 | | 2 | 실습 |

표 7-32 소외전원 상실 조건 사고대응 전략 (시나리오 1)

표 7-33 소내정전 조건 사고대응 전략 (시나리오 2)

표 7-34 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전 조건 사고대응 전략 (시나리오 3)

표 7-35 최종열제거원 상실 조건 사고대응 전략 (시나리오 4)

표 7-36 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실 조건 사고대응 전략 (시나리오 6)

표 7-37 대체교류디젤발전기상실을 포함한 소내정전과 최종열제거원 상실을 동반한 0.3g 지진 조건 사고대응 전략 (시나리오 9)

표 7-38 중대사고 조건 사고대응 전략 (시나리오 10)

표 7-39 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

| 안전개선사항 | 세부내용 | 한빛1,2호기 반영 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 극한 재해 대응을 위한 인력 및 조직 확보 | 필수업무와 필요인력 평가 | 가동원전 사고관리계획서 개발 시 추가 도입되는 설비의 운영 전략에 따른 사고관리 인력 직무 및 책임분석을 수행중 | |
| | 방재유관 기관 지원의 실효성 확보 | 한빛1,2호기 방재훈련 시 유관기관(소방서, 경찰서, 군부대 등)과 방사능방재훈련을 실시함 | |
| | 전담지원조직 신설 | 중대사고 비상대응 전문가팀 구축 및 운영중 | |
| 훈련을 통한 사고 대응능력 강화 | 시뮬레이터 훈련을 통한 사고 대응능력 강화 | 중대사고 기능을 포함한 훈련용 시뮬레이터로 운전원 교육 예정임 | |
| | 주기적 훈련을 통한 사고대응능력 강화 | 방사능 방재훈련 주기를 개선하여 수행중 | |

표 7-40 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인

| 안전개선사항 | 세부내용 | 한빛1,2호기 반영 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 이동형발전기 운영능력 개선 | 이동형발전기 운영 및 인력의 소집 능력에 대한 재평가 | 사고관리계획서 개발시 운영전략을 수립하여 이동형 발전기 운영능력 개선중 | |
| | 내진 설계된 차고 확보 | 이동형발전기 지원설비 대기를 위한 내진 설계된 차고를 확보 예정임 | |
| | 이동형발전기 절차서 구체화 | 이동형발전기의 이동과 관련된 상세 절차를 반영하여 운전 절차서 개정 | |
| | 중장비 보강 | 휠로더(또는 트랙터) 등의 중장비 보유 및 운용 방안 수립 및 장비구입 예정임 | |
| PORV 이용한 2차측 증기 방출시 운전원의 대응능력 평가 필요 | PORV 이용한 2차측 증기 방출시 운전원의 대응능력 평가 필요 | 이미지 트레이닝 카드 작성 및 현장비치 완료<br>PORV 조작절차 교육(이론 및 현장확인) 완료 | |
| 정상운전 외 환경에서 운영대응능력 평가 필요 | 정상운전 외 환경에서 운영대응능력 및 인적수행도 재평가 | 해당사항 없음 | 타분야 분석내용에 근거한 운영기술능력 평가 수행 |

# 제8장 종합 결론

# 목 차

제1절 종합 결론 ····· 1

제2절 후쿠시마 후속대책 사항 ····· 11

제3절 극한자연재해 대응을 위한 안전 개선사항 ····· 16

## 제1절 종합 결론

한빛1,2호기 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

한빛1,2호기 스트레스테스트의 분야별 주요 평가결과는 다음과 같다.

### 1.1 설계기준 초과 극한자연재해의 특성

스트레스테스트 수행지침에 따라 한빛1,2호기 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.

한빛1,2호기 안전정지지진(0.2g)은 부지 반경 [redacted]내 [redacted]개의 지진지체구조구와 읍천단층 및 Z단층으로부터 잠재적인 최대지진을 평가하여 최대지반가속도를 결정하였으며, 속리산지진이 부지 하부에서 발생하였다고 가정하고 [redacted]개 감쇄식에 대입하여 최대지반가속도를 구하면 최대값은 [redacted]로 평가된다. 이러한 검토사항을 기초로 할 때, 부지에서의 최대 잠재 영주기 지반

가속도 0.2g는 타당한 것으로 검토되었다. 한편 면적지진원과 선형지진원(읍천단층, Z단층, 9.12지진 및 포항지진 유발단층)을 모두 고려한 안전정지지진(SSE) 0.2g에서의 연초과빈도는 평균값 수준에서 약 으로 계산되었으며, 이를 재현주기로 환산하면 약 년으로 평가되었다. 이는 규제지침서(KINS/RG-N01.07)에서 규정하는 년 기준을 만족하여 설계기준지진은 타당한 것으로 검토되었다. 또한 재현주기 10,000년에 해당하는 최대지반가속도의 평균값은 g로 평가되었다.

지반변형에 의한 안전성 검토 결과 한빛1,2호기 부지 반경 km 내에서는 활동성 단층이 확인되지 않아 지표단층 작용으로 인한 변형은 발생하지 않을 것으로 검토되었다. 또한 안전관련 구조물 하부 지반에서는 액상화현상이 일어나지 않으며, 10,000년 빈도 지진동(0.11g) 및 안전정지지진(0.2g) 수준에서는 영구사면 안정성을 유지할 수 있고 침하 영향도 없을 것으로 평가되었다.

한빛1,2호기 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일 등에 의한 설계기준해수위와 비교하여 안전여유도를 갖고 있다. 그러나 가능최대강우(PMP)에 의한 침수영향이 발생할 수 있어 물리적인 방호조치 및 방수문 설치를 진행중이다.

한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 류큐트렌치의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일 및 그로 인한 해수면 상승고를 평가한 결과, 해수면 상승고는 최대 m로 평가되었다. 이 때 방파제 내부 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 가능최고해수위는 EL.(+) 이다.

한빛1,2호기의 안전관련 구조물에 직접 영향을 주는 방파제 내부 기기냉각해수취수구조물 전면에서의 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 가능최고해수위는 EL.(+) 로 평가되었다.

가능최대강우 및 가능최대강우의 1.5배 강우 발생시 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였다.

부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 최대순간풍속을 평가한 결과 부지의 최대풍속은 m/s, 최대순간풍속은 m/s 이다. 한빛1,2호기 부지에서 F1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수

있다. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 급의 토네이도를 설계기준초과 토네이도로 고려한다.

한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 재현주기 10,000년 빈도 폭풍해일에 의한 가능최저해수위 평가결과 해수위는 EL.(-)  m로 검토되었다. 한편 설계기준초과 해수온도는 발전소 운영종료시까지 향후 약 10년을 고려할 경우 기후변화로 인한 수온 상승치 최대  ℃를 포함하여  ℃로 평가되었다.

## 1.2 극한자연재해에 대한 구조물・계통・기기 건전성

설계기준지진 조건에서의 한빛1,2호기의 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.

한빛1,2호기의 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 결과는 현장점검 보고서에 상세히 제시하였다. 한편 한빛1,2호기에서는 절차서 에 따라 지진발생시 적절한 운전조치를 취할 수 있으며, 안전정지지진 발생시 발전소의 대응능력을 확인한 결과, 노심 및 사용후연료의 냉각기능 유지에는 문제가 없다.

인접한 비내진 구조물・계통・기기(SSC)로 인하여 발전소의 필수대처기능을 수행하는 기기가 손상 받을 가능성을 확인하기

위하여 현장점검을 수행하였다. 현장점검 결과는 현장점검 보고서에 상세히 제시하였다.

확률론적지진재해도 분석 결과 한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도 수준의 지진은 영주기 수평지반가속도가 g인 지진으로 평가되어 설계기준지진인 0.2g와 동일한 수준이다. 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 활용하여 평가를 수행하였다.

내진성능 평가결과 모든 안전관련 구조물의 HCLPF 내진성능은 g 이상인 것으로 확인되었으며, 필수대처기능을 수행하는 기기들의 내진성능 평가결과 모든 기기의 HCLPF 내진성능이 0.3g 이상 확보하는 것으로 검토되었다. 대상기기 중 밸브, 계측기 등은 내진검증문서 등을 확인하여 내진성능이 0.5g 이상임을 추가로 분석하였다. 개별 기기들의 내진성능평가 결과는 제3장 보고서에 상세 제시하였다.

설계기준 초과지진에 의해 발생하는 내부 광역화재 영향 평가 결과, 한빛1,2호기에서 지진에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 지역 중에서 화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약지역은 개 지역이 도출되었다.

한빛1,2호기는 소내에 초동소방대, 자체소방대, 자위소방대가 조직되어 발전소 내 화재진압에 대비하고 있고, 외부소방대와 응원협정을 통하여 발전소 내 화재 확대에 대비하고 있다. 이러한 소내・외 소방대의 화재에 대비한 역량과 추가적인 소내 수동진압능력 개선 사항이 완료될 경우 한빛1,2호기에서 발생하는 안전정지지진을 초과하는 지진에 의한 내부 광역화재를 효과적으로 진압할 수 있는 것으로 평가되었다.

한빛1,2호기의 안전관련 구조물은 폭풍해일 및 지진해일에 의한 설계기준해수위 침수 수준과 비교하여 안전여유도를 갖고 있어 별도의 침수방지 설계와 설비는 요구되지 않는다. 그러나 가능최대강우 발생시 침수가 발생할 수 있어 방수문을 설치중이

다. 한편 발전소는 태풍, 호우, 강풍, 지진해일 등의 상황시 자연재해 예방점검 절차에 따라 주요 구조물・계통・기기에서 안전기능의 저하가 발생하지 않도록 적절한 점검과 운전조치를 취하고 있다.

한빛1,2호기 부지에 영향을 줄 수 있는 류큐트렌치의 재현주기 10,000년 빈도 지진해일에 의한 가능최고해수위는 EL.(+)  로 검토되었으며 이 값은 안전관련 구조물이 위치한 본관의 부지정지고 EL.(+)  m 보다 낮으므로 지진해일에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었다. 한편 재현주기 10,000년 빈도 태풍(폭풍해일)에 의한 방파제 내부 취수로에서의 가능최고해수위는 EL.(+)  m로 평가되었으며, 이 값은 부지정지고 EL.(+)  m 보다 낮으므로 태풍(폭풍해일)에 의한 침수영향이 없는 것으로 평가되었다.

재현주기 10,000년을 초과하는 홍수 수준평가에 적용된 가능최대강우량 및 이 강우의 1.5배인 국지강우 발생시 발전소 안전관련 구조물 출입구에서의 침수심을 2차원 수치모의로 평가하여 침수영향을 검토하였다. 평가결과 침수영향이 발생하나 한빛1,2호기에서는 후쿠시마 후속조치로서 안전관련 구조물 출입구에 방수문을 설치중이다. 현재 방수문 설치가 완료전이므로 추가적인 물리적 방호조치 등의 안전 개선사항을 수행중이다.

한빛1,2호기 부지에서 발생 가능한 재현주기 10,000년 빈도의 최대풍속과 최대순간풍속을 평가하고, 이에 따른 풍압을 계산하여 안전관련 구조물의 안전성에 끼치는 영향을 검토한 결과 설계시 고려한 풍하중과 지진하중의 차이에 의해 구조물에 끼치는 영향은 없는 것으로 검토되었다.

한빛1,2호기 부지는 발전소의 남쪽과 북쪽이 산지에 막혀 있는 특성을 고려한다면 부지에서 F1 급의 토네이도 발생은 재현주기 10,000년을 초과하는 자연재해로 볼 수 있다. 그러나 자연재해의 심각도를 단계적으로 상승시켜 발전소의 대응능력을 평가하는 본 평가의 목적상 F2 급의 토네이도가 부지에서 발생하는 것을 가정하여 구조물・계통・기기의 안전성을 평가하였다. 평가결과 토네이도 비산물이 안전정지기기를 수용하고 있는 구조물에 충돌해도 구조물의 외부 콘크리트 벽체에는 비산물 영향이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

한빛1,2호기 부지에서 재현주기 10,000년 빈도의 가능최저해수위는 폭풍해일 발생시의 EL.(-)  m 이다. 한편 부지의 설계기

준초과 해수온도는 ℃로 평가되었으나(기후변화 영향 포함), 이 온도는 FSAR에 기술된 최종 열제거원의 최고 설계 해수온도인 보다 낮으므로 해수온도 상승이 최종열제거원에 끼치는 영향은 없을 것으로 검토되었다.

### 1.3 전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력

한빛1,2호기 스트레스 테스트(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 한빛1,2호기의 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, 한빛1,2호기는 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.

### 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 [redacted]전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다. 원자로용기 손상 이후에는 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통해 노심냉각기능 확보 및 사고완화 조치를 수행하도록 하고 있다.

중대사고시 격납건물 건전성 확보를 위해 격납건물 격리기능 확보 및 우회방지, 수소폭발방지, 격납건물 과압방지, 재임계 방지 및 격납건물 바닥 용융관통 방지 방안을 평가하였다. 격납건물 격리기능은 격리밸브의 고장잠김(Fail Closed) 설계와 중대사고관리지침서 [redacted]전략을 통해 확보되는 것으로 평가되었다.

격납건물 우회사고의 경우 중대사고관리지침서 [redacted]전략을 통해 격납건물 외부로의 핵분열생성물 방출을 최소화 할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 평가되었다. 한빛1,2호기는 중대사고에 대처가능한 피동촉매형수소재결합기를 갖추고 있으며, 중대사고관리지침서 [redacted] 전략을 통한 추가적인 수소폭발 방지 대응능력을 갖추고 있는 것으로 평가되었다.

격납건물 과압방지의 경우 중대사고관리지침서 [redacted]에 따라 격납건물 팬냉각기 및 격납건물 살수계통 등을 이용한 격납건물 과압을 방지할 수 있는 것으로 평가되었다. 노심 재임계 방지의 경우 사고 진행과정에서 보충수가 주입

되는 상황에서도 재임계 가능성은 없으며, 중대사고관리지침서 [redacted]의 장기 관심사항으로 냉각수 주입으로 인한 붕산 희석감시 및 붕산수 주입전략을 제공하여 재임계 방지능력을 확보하는 것으로 평가되었다.

바닥 용융관통 방지의 경우 원자로공동이 노외로 방출된 노심용융물 냉각을 보장하기 위한 바닥면적을 확보하고 있고, 중대사고관리지침서 [redacted]전략 및 중대사고관리지침서 [redacted]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 이동형디젤구동펌프를 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, 가용 장비를 감압설비(가압기 압력방출밸브 및 증기발생기 압력방출밸브), 안전주입계통, 잔열제거계통, 보조급수계통, 이동형펌프, 이동형발전차 및 비상냉각수 외부주입설비로 한정하였을 때의 발전소 대응능력을 평가하였다. 평가결과 극한자연재해 및 소내전력이 장기간 상실되어 중대사고가 발생하였을 경우에도 이동형발전차를 통한 소내 전원공급, 그리고 이동형펌프를 이용한 1·2차 측 비상냉각수 주입 전략을 이행함으로써 사고관리 저해요소로 인한 대응능력 한계상황에서도 충분히 대응할 수 있는 것으로 평가되었다.

## 1.5 방재 및 비상대응능력

한빛1,2호기 스트레스테스트(Stress Test) 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.

단일호기 또는 다수호기 사고 시 S-REDAP을 이용하여 주민예상피폭선량을 평가함. S-REDAP의 사용이 불가할 시 수계산으로 대체할 수 있는 절차를 방사선비상계획수행절차서에 반영할 예정이다. 전산프로그램 운영요원의 전문성을 확보하기 위한 교육과 훈련도 적절하게 이루어지고 있었으며 자체인력 및 외부방재대책기관의 인력에 대하여 다수호기 사고에 대비한 방호조치의 계획 및 절차가 적절하게 수립되었고, 이들을 위한 방호장비도 적절한 수량이 확보되어 있다. 또한 타 부지를 비롯한 외부기관의 지원인력 및 장비는 극한자연재해 시에도 필요한 시간 이내에 가용한 접근 방법을 통하여 한빛부지에 지원 가능한 것으로 검토 되었다

장기 소내정전 사고 시 발전소 안전변수는 주제어실 및 비상기술지원실에서 소내단말기에 포함된 안전정보표시계통(SPDS)을 통하여 확인한다. 비상통신설비는 전화, 팩스, 방송설비, 인터넷 등 다양한 수단으로 구성됨. 극한 자연재해 시에도 발전소의 통신체계가 유지될 수 있도록 위성전화를 보강하였다.

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, 극한 자연재해 상황에서 고정형감시기의 사용이 불가능할 경우를 대비하여 이동형 감시기 및 감시차량을 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

의사결정 적절성과 관련하여 비정상운전절차서, 비상운전절차서, 비상대체설비 운영지침서, 중대사고관리지침서, 그리고 방사선비상계획서와 같은 문서상에 기술된 의사결정권자의 책임 및 임무, 적용 시기 등은 상충하지 않고 적절하게 기술되어 있는 것으로 평가되었다. 또한 방사선비상계획서에 다수호기 동시사고 발생 시 조직 및 책임이 적절하게 기술되었으며 이동형발전

차, 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 극한자연재해 혹은 방사능누출사고로 인하여 비상대책실, 비상기술지원실, 비상운영지원실의 거주성이 상실될 경우를 대비하여 한빛본부에 소내비상대응거점 시설을 건설할 계획이다.

한빛1,2호기는 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 한빛1,2호기는 극한자연재해에 의한 단일호기 또는 다수호기 동시사고에도 충분한 방재 및 비상대응능력을 확보한 것으로 평가 되었다.

### 1.6 운영기술 능력

한빛1,2호기의 스트레스테스트에서 평가결과의 일환인 사고대응전략 및 주요 운전원조치 그리고 주요 자원(조직/인력, 절차서, 설비 등)에 대해 적절성을 확인하고, 인간공학 유효성평가를 통해 한빛1,2호기가 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 한빛1,2호기 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.

주요 운전원조치의 적절성은 본 스트레스테스트 6분야 사고대응전략 수립의 적절성 및 2분야 극한자연재해에 대한 구조물·계

통·기기 건전성에서 도출된 주요 운전원조치 및 이행가능성이 가능한 것으로 평가되었다. 그리고 주요 운전원 조치 행위에 대한 직무분석 결과 사고상황에서 운전직무의 부담은 크지 않은 것으로 평가되었으나, 비필수부하 차단 관련 운전원 행위의 경우 30분을 초과할 가능성이 있는 것으로 평가되어 비필수부하 차단기에 별도 표식 및 운전원 교육훈련이 필요한 것으로 평가되었다.

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.

인간공학 유효성 평가는 사고대응전략 수립의 적절성, 주요 운전원 조치 및 주요 자원 적절성 평가결과를 토대로 실제 한빛1,2호기 이행가능성을 포함한 운영기술능력을 종합 평가하기 위해 한빛1호기 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 한빛1,2호기는 설계기준초과 및 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 한빛본부에 귀속된 한빛 1~6호기에 동시 영향을 주는 다수호기 동시사고를 고려할 경우에도 한빛1,2호기 비상대응방안의 실현가능성을 평가하였다. 다수호기 동시사고를 고려한 사고대응전략의 적절성 평가를 위해 운영기술능력 평가에 활용된 총 10개의 시나리오를 검토하였으며, 다수호기 동시사고에도 한빛1,2호기 비상대응방안의 실현은 가능한 것으로 평가되었으나, 사고초기 대응에서 이동형발전차의 운영과 관련된 조직 및 인력의 안전개선사항을 도출하였다.

## 제2절 후쿠시마 후속대책 사항

국내 전 원전을 대상으로 안전점검을 수행한 결과 정부의 추가항목 3건을 포함하여 총 59개 안전개선사항이 도출되었다. 이중 한빛1,2호기와 관련된 후쿠시마 후속대책 추진현황은 다음과 같다.

## 2.1 정부 도출 안전개선사항

○ 지진 자동정지설비 설치(관리번호 1-1)
일정규모(0.19g) 이상 지진 감지 시 원자로를 자동정지 시킬 수 있도록 지진원자로자동정지시스템 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 [redacted]개 기기 평가, [redacted]는 내진성능 입증시험 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) 평가결과 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

○ 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
○ 소방계획서 개선 및 협력체계 강화(3-9)
소방계획서 개정 및 지역 소방서와 신속대응 협력체계 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 피동촉매형수소재결합기(PAR) 추가 설치 완료
○ 격납건물 배기 또는 감압설비 설치(4-2)
중대사고시 격납건물 내 과도한 압력상승을 방지하기 위한 여과/배기 설비로 한빛 1,2호기는 [redacted]까지 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 표준[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(방사선비상계획 수행절차서) 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(방사선비상계획 수행절차서)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 방사선량평가통합시스템(S-REDAP) 개발 완료

○ 비상 경보시설의 성능강화(5-11)

크로샷 비상전원 확보 및 UPS 설치를 통해 방송설비 보강

○ 정기검사 등 안전검사 대폭강화(6-1))
경년열화 완화대책 및 관리계획을 수립하여 이행하고 적합성을 정기검사에 입증
○ 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 정비 아차사례집 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 추가 도출 안전개선사항

○ 극한재해에 대비 설비보강(추가-1)
전 가동원전 스트레스테스트 수행과 연계하여 추진할 예정이며, 스트레스테스트 결과로 도출된 안전개선사항에 대해 설비보강 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 자체 도출 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 [redacted]개 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, 한빛본부 비상경보 방송용 장비에 무정전설비(UPS) 추가 설치 완료

## 제3절 극한자연재해 대응을 위한 안전개선사항

후쿠시마 후속대책 외에도 한빛1,2호기 스트레스테스트를 통해 검토된 극한자연재해에 대한 발전소 대응능력을 더욱 강화하기 위해 아래와 같이 안전개선사항을 추가로 도출하였다.

극한자연재해에 대한 구조물・계통・기기 건전성 평가와 관련하여 한빛1,2호기 스트레스테스트에서 검토된 안전개선사항은 다음과 같다.

○ 내진 현장점검 결과 도출된 예외기기에 대한 후속조치
한빛 1,2호기의 내진 현장점검 결과에서 도출된 조치 필요 기기에 대한 내진 건전성 확보 조치를 수행할 예정임
○ ASME PRA Standard 2009를 활용한 내진성능 평가

가동원전 스트레스테스트 평가 대상 전체 발전소에 공통 적용되는 사항으로서 한빛1,2호기에서는 ASME PRA Standard 2009에 따라 필수 대처설비의 내진 현장점검을 수행하였으며 차이분석 등 추가 평가는 ____년까지 수행할 예정임

○ 가능최대강우 시 구조물의 홍수 방호조치

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

○ 필수대처기능 상실 가능지역 화재방호설비 개선 및 소내 수동진압능력 개선

지진화재 발생시 필수 대처기능의 상실을 초래할 수 있는 취약지역으로 도출된 지역에 대하여 다음과 같은 개선조치를 수행할 예정임

- 사용후연료저장조 수위계 및 온도계의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호
- 지진화재 취약지역의 A 계열 또는 B 계열의 케이블을 3시간 내화등급의 화재방호체로 보호(격납건물은 1시간 내화등급의 화재방호체로 격리)
- 증기헤더실에 내진등급 I 옥내소화전 설치
- 자동화재탐지설비의 실제 내진성능 파악 및 보강
- 지진화재 취약지역 및 화재순찰 경로에 내진비상조명등 설치
- 자체소방대 건물 내진성능 평가 및 후속조치
- 지진화재 시 화재순찰조 편성 및 운영을 위한 절차서/지침서 개발

전력계통 등 안전기능 상실에 대한 대응능력 평가와 관련하여 한빛1,2호기 스트레스테스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

○ 최종열제거원 복구를 위한 이동형고유량펌프 확보

**최종열제거원상실에 대처할 수 있는 이동형고유량펌프 확보**

○ 축전지 비상충전 확보

축전지 기능상실을 대비하여 소내 선배치된 비상충전용 중형 이동형 발전기 확보

○ 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

중대사고 관리능력 평가와 관련하여 한빛1,2호기 스트레스테스트에서 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 전원 상실 시 격납건물 내부 살수기능 및 핵분열생성물 방출제어 기능 강화 예정(이동형 고유량펌프는 4장의 최종열제거원 복구 전략에 사용되는 이동형 고유량 펌프를 공용으로 사용 예정)

방재 및 비상대응능력 평가와 관련하여 한빛1,2호기 스트레스테스트에서 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 한빛1,2호기 스트레스테스트에서 검토된 안전 개선사항은 다음과 같다.

○ 사고대응전략 보완
극한자연재해를 동반한 장기교류전원 상실 상황 시 격납건물 내부에 위치한 전동기 구동밸브들을 수동으로 열고 닫는 조

치를 해야 하나, 격납건물 내부의 상태를 정확히 파악하지 못한 상태에서 현장 운전원의 격납건물 출입은 매우 위험할 수 있다. 따라서 전동기제어반(Motor Control Center : MCC)에서 소형이동형발전기를 이용한 밸브 조작 방안 등에 대한 사고대응전략 보완 예정

○ 설비 보완

주제어실의 증기발생기 광역수위지시계는 협역수위지시계와 달리 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 협역수위 이하의 수위감시가 불가능하여 사고완화전략 수립 및 이행에 어려움이 있을 것으로 평가되어 해당 지시계의 내진성능 보완 예정

장기교류전원 상실 상황에서 안전등급 축전지의 수명은 사고완화전략을 수행하는데 핵심적인 요소이며, 축전지의 잔여수명은 전압을 통해 확인이 가능하나 주제어실의 안전등급 125 V 직류모선의 전압계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고 상황에서는 감시가 불가능한 것으로 평가되어 안전등급으로의 보완 예정

냉각재가 노심으로 주입되고 있음을 보여주는 고압 및 저압 안전주입 유량지시계가 비안전등급으로 설계되어 있어 0.3g 지진을 동반하는 극한자연재해 사고상황에서는 확인이 불가능한 것으로 평가되어 내진성능 보완 예정

**단계 6에서 AC 전원을 시간 이내에 복구할 수 있는지 여부를 사고 발생 후 분 이내 확인하고, 불만족 시 조치로 다중방어지침서 에 따라 현장 운전원이 축전지 비필수부하 차단을 사고 발생 후 분 이내에 수행해야 하지만 조명 등 운전환경을 고려할 때 초과 가능성이 있어 비필수 부하 차단기에 별도의 차단대상 표식을 통해 현장운전원의 차단기 조작 시간을 줄일 수 있도록 보완 예정**

최종열제거원 상실 상황에서 충전펌프 대체냉각수 공급을 위해 조작이 요구되는 배수밸브( 가 철판으로 된 PIT Cover 하부에 있어, 볼트로 체결된 이 철판을 운전원이 인력으로 인양하고 밸브를 조작하기가 불가능한 것으로 평가되어 배수밸브로의 접근성 확보와 관련된 보완 예정

이동형발전차에 연료를 보충하기 위해 비상디젤발전기의 연료유저장탱크에 유류관을 연결하여 연료를 공급받아야 한다. 그러나 지하에 설치된 비상디젤발전기 연료유저장탱크의 출입구가 밀봉되어 있지 않아 극한자연재해 상황에서 침수될 가능성이 있으므로 연료유이송관 연결지점에 대한 보완 예정

설계기준초과 조건의 경우에서 활용하는 비상 통신수단인 위성전화로 대내외 상황전파, 현장조치 지시 등이 이루어져야 하나 현재 보유하고 있는 위성전화(  )가 부족하여 비상운전 초기에 신속히 수행해야 할 중요 조치들이 지연될 가능성이 있으므로 주제어실에 1대의 고정형 위성전화 추가예정

설계기준초과 조건에 대비해 발전소에 위성통신장비를 설치하였으나, 현장운전원의 경우 소내 통신장비 불능인 상태에서 현장에 투입될 경우 주제어실과의 통신이 어려워짐에 따라 현장운전원의 현장출입시 주제어실과 통신이 가능토록 소내 통신장비 개발 예정

한빛본부 부지 전체 설계기준초과사고 발생시 호기당 2대의 휴대용 위성전화 보급을 위해 총 7대의 휴대용 위성전화 추가 배치 예정

한빛본부에는 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 발전소 비상요원에 의해 이동 및 설치를 위해 이동형 설비 차고지에 고정형 이동전화 1대 이동형설비 운전원을 위한 이동형 위성전화 6대 추가 배치 예정

한빛본부는 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 자체소방대에 고정형 위성전화 1대 및 소방차 운전원을 위한 이동형 위성전화 1대 추가 배치 예정

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상기술지원실은 발전소 비상상황시 주제어실의 기술지원 및 외부자원 확보를 위한 비상통신이 필요하며 이를 위해 1대의 고정형 위성전화 추가 배치 예정

한빛본부 부지 전체에 설계기준초과 상황 발생시 비상대책실은 비상기술지원실 및 비상운영지원실과 협조체계를 구축하고

비상대응활동 총괄을 위한 비상통신 설비가 필요하며 이를 위해 1대의 고정형 위성전화 추가 배치 예정

○ 절차서 보완

안전 개선사항에 따라 보완이 필요한 절차서 및 지침서의 건수는 아래와 같으며, 추후 발전소 설비 및 이동형 설비의 개선에 따라 보완 예정임.

- 비상운전절차서 : 9건
- 비정상운전절차서 : 3건
- 계통운전절차서 : 5건
- 중대사고관리지침서 : 1건
- 방사선비상계획서 : 2건
- 다중방어운영지침서 : 2건

○ 교육/훈련 보완

설계기준초과 및 극한자연재해 사고 상황에 대응하기 위해 도입되는 다양한 이동형 설비를 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 예정임.

○ 조직/인력 보완

설계기준초과 및 극한자연재해 사고 상황에 대응하기 위해 이동형 설비에 대한 운영인력 및 조직 구성을 보완 예정임.

안전개선사항들의 이행 완료 시, 극한자연재해 상황에서 한빛1,2호기의 사고대응능력은 더욱 강화될 것이다.

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-1 월성1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-2 고리1호기 스트레스테스트 안전개선사항 반영 여부 확인항목(계속)

표 8-3 한빛1호기 안전개선사항 이행계획

| 관리번호 | 제목 | 이행계획 |
|---|---|---|
| Hb1-2-1 | | |
| Hb1-2-2 | | |
| Hb1-2-3 | | |
| Hb1-2-4 | | |
| Hb1-3-1 | | |
| Hb1-3-2 | | |
| Hb1-3-3 | | |
| Hb1-4-1 | | |
| Hb1-4-2 | | |
| Hb1-5-1 | | |
| Hb1-6-1 | | |
| Hb1-6-2 | | |
| Hb1-6-3 | | |
| Hb1-6-4 | | |
| Hb1-6-5 | | |