

제 4 장

원 자 로



월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	<u>페이지</u>
4. 원자로	4.1-1
4.1 개요	4.1-1
4.1.1 원자로 집합체	4.1-1
4.1.2 칼란드리아 집합체	4.1-2
4.1.2.1 칼란드리아	4.1-2
4.1.2.2 종단차폐체	4.1-3
4.1.2.3 종단차폐 지지대	4.1-3
4.1.2.4 매립링	4.1-3
4.1.3 반응도 제어기기	4.1-4
4.1.3.1 반응도 장치대	4.1-4
4.1.3.2 정지기기	4.1-5
4.1.3.3 액체영역제어기기	4.1-5
4.1.3.4 조절기기	4.1-6
4.1.3.5 제어흡수기기	4.1-6
4.1.3.6 수직 및 수평 중성자속 검출기	4.1-6
4.1.3.7 액체독물질 주입 정지기기	4.1-7
4.1.3.8 전리함기기	4.1-7
4.1.4 참고문헌	4.1-8

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	<u>페이지</u>
4.2	기계 설계 4.2-1
4.2.1	칼란드리아 집합체 4.2-1
4.2.1.1	설계 기준 4.2-1
4.2.1.1.1	설계 원리 4.2-1
4.2.1.1.2	코드 및 표준 4.2-1
4.2.1.1.3	품질 보증 4.2-2
4.2.1.1.4	재질 선정 4.2-2
4.2.1.2	설계 개요 4.2-4
4.2.1.2.1	설계 특징 4.2-4
4.2.1.2.1.1	칼란드리아 집합체 4.2-5
4.2.1.2.1.2	칼란드리아 4.2-5
4.2.1.2.1.3	칼란드리아 관 4.2-6
4.2.1.2.1.4	종단차폐체 4.2-7
4.2.1.2.1.5	종단차폐 지지대 4.2-8
4.2.1.2.1.6	매립링 4.2-8
4.2.1.3	하중 4.2-9
4.2.1.3.1	하중의 종류 및 하중조합 4.2-10
4.2.1.4	응력의 종류 4.2-11
4.2.1.4.1	여러 운전조건들에 대한 허용응력한계 4.2-11
4.2.1.4.2	레벨 A 운전 한계 4.2-12
4.2.1.4.3	레벨 B 운전 한계 4.2-12

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

목 차

	페이지
4.2.1.4.4 레벨 C 운전 한계	4.2-13
4.2.1.4.5 레벨 D 운전 한계	4.2-13 1
4.2.1.5 시험 조건	4.2-14
4.2.1.6 허용치침한계	4.2-14
4.2.1.7 설계 해석	4.2-14
4.2.2 반응도제어기기	4.2-16
4.2.2.1 설계 기준	4.2-16
4.2.2.1.1 설계 원리	4.2-16
4.2.2.1.2 코드 및 표준 문서	4.2-17
4.2.2.1.3 품질 보증	4.2-17
4.2.2.1.4 운전 조건	4.2-17
4.2.2.1.5 설계 해석	4.2-19
4.2.2.2 반응도장치대	4.2-20
4.2.2.2.1 기능	4.2-20
4.2.2.2.2 특징	4.2-21
4.2.2.2.3 운전조건	4.2-22 1
4.2.2.2.4 재질	4.2-24
4.2.2.3 안내관	4.2-24
4.2.2.3.1 기능	4.2-24
4.2.2.3.2 특징	4.2-24 1
4.2.2.4 텀블	4.2-25

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

목 차

	페이지
4.2.2.4.1 기능	4.2-25
4.2.2.4.2 특징	4.2-25
4.2.2.5 정지기기	4.2-27
4.2.2.5.1 기능	4.2-27
4.2.2.5.2 특징	4.2-27
4.2.2.5.3 기계적 하중	4.2-28
4.2.2.5.4 재질	4.2-30
4.2.2.6 액체영역제어기기	4.2-30
4.2.2.6.1 기능	4.2-31
4.2.2.6.2 특징	4.2-31
4.2.2.6.3 재질	4.2-32
4.2.2.7 조절기기	4.2-32
4.2.2.7.1 기능	4.2-32
4.2.2.7.2 특징	4.2-33
4.2.2.7.3 재질	4.2-34
4.2.2.8 기계적 제어흡수봉	4.2-34
4.2.2.8.1 기능	4.2-34
4.2.2.8.2 특징	4.2-34
4.2.2.8.3 재질	4.2-35
4.2.2.9 수직 중성자속 검출기	4.2-35
4.2.2.9.1 기능	4.2-35

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

목 차

	페이지
4.2.2.9.2	특징 4.2-36
4.2.2.9.3	재질 4.2-37
4.2.2.10	수평 중성자속 검출기 4.2-37
4.2.2.10.1	기능 4.2-37
4.2.2.10.2	특징 4.2-38
4.2.2.10.3	재질 4.2-39
4.2.2.11	액체독물질주입 정지기기 4.2-39
4.2.2.11.1	기능 4.2-39
4.2.2.11.2	특징 4.2-39
4.2.2.11.3	재질 4.2-41
4.2.2.12	전리함기기 4.2-41
4.2.2.12.1	기능 4.2-41
4.2.2.12.2	특징 4.2-41
4.2.2.12.3	재질 4.2-43
4.2.3	참고문헌 4.2-43
4.3	핵설계 4.3-1
4.3.1	설계 기준 4.3-1
4.3.1.1	중성자 경제 및 핵연료 연소도 4.3-1
4.3.1.2	중성자속 및 출력분포 조절 4.3-2
4.3.1.3	반응도 제환과 계수 4.3-3

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

		페이지
4.3.1.4	최대 조절된 반응도 삼입율	4.3-5
4.3.1.5	정지여유도	4.3-6
4.3.1.6	안정성	4.3-8
4.3.1.7	비정지 예상과도현상 (ATWT)	4.3-9
4.3.2	개요	4.3-9
4.3.2.1	핵설계 개요	4.3-9
4.3.2.2	출력분포	4.3-10
4.3.2.2.1	개요	4.3-11
4.3.2.2.2	총체적 출력분포	4.3-12
4.3.2.2.3	제한된 출력분포	4.3-15
4.3.2.2.4	핵연료다발 내에서의 출력분포	4.3-15
4.3.2.2.5	축방향 출력분포	4.3-16
4.3.2.2.6	출력분포에 있어서 불확실성	4.3-16
4.3.2.2.7	감시	4.3-16
4.3.2.3	반응도계수	4.3-17
4.3.2.3.1	핵연료온도	4.3-17
4.3.2.3.2	감속재온도 (밀도효과 포함)	4.3-17
4.3.2.3.3	냉각재온도 (밀도효과 포함)	4.3-18
4.3.2.3.4	냉각재밀도와 기포 함유	4.3-18
4.3.2.3.5	감속재독물질 농도	4.3-19
4.3.2.3.6	감속재 순도	4.3-19

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	<u>페이지</u>
4.3.2.3.7 냉각재 순도	4.3-20
4.3.2.3.8 원자로출력	4.3-20
4.3.2.4 지발중성자와 원자로 동특성	4.3-21
4.3.2.5 조절 요구조건과 반응도 값	4.3-22
4.3.2.6 정지계통	4.3-28
4.3.2.6.1 제 1 정지계통과 정적반응도값	4.3-29
4.3.2.6.2 제 2 정지계통과 정적반응도값	4.3-29
4.3.2.6.3 정지여유도	4.3-29
4.3.2.7 가동중 핵연료교체에 의한 반응도변화	4.3-31
4.3.2.8 원자로 동력학과 제어	4.3-31
4.3.2.8.1 공간 불안전성과 섭동의 원인	4.3-31
4.3.2.8.2 자동공간제어	4.3-32
4.3.2.8.3 온라인 중성자속 분포측정계통	4.3-33
4.3.2.8.4 정지복구	4.3-34
4.3.2.9 칼란드리아와 핵연료 채널조사	4.3-35
4.3.3 해석방법	4.3-35
4.3.3.1 격자계산	4.3-35
4.3.3.2 초격자 계산	4.3-36
4.3.3.3 중성자속과 출력분포계산	4.3-37
4.3.3.3.1 정상상태 원자로분석	4.3-37
4.3.3.3.2 공간-시간 동특성 계산	4.3-40

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	페이지
4.3.3.4 실험과의 비교	4.3-40
4.3.3.4.1 궤환반응도	4.3-44
4.3.3.4.2 반응도 기기값	4.3-45
4.3.3.4.3 중성자속 분포	4.3-47
4.3.3.4.4 냉각재 기포반응도	4.3-49
4.3.3.4.5 제논-의존 과도상태	4.3-50
4.3.3.4.6 공간/시간-의존 과도상태	4.3-51
4.3.4 참고문헌	4.3-53
4.4 노심열수력 설계	4.4-1
4.4.1 설계 기준	4.4-1
4.4.1.1 최소 임계출력비	4.4-1
4.4.1.2 수력적 안정성	4.4-2
4.4.1.3 연료채널유량	4.4-2
4.4.1.4 연료온도	4.4-2
4.4.2 열수력설계	4.4-2
4.4.2.1 요약	4.4-2
4.4.2.2 임계출력비	4.4-3
4.4.2.2.1 비등길이평균(Boiling-Length-Average) 임계열속 상관식	4.4-3
4.4.2.2.2 기포발생시작지점(Onset of SignificantVoid) 상관식	4.4-5
4.4.2.2.3 2상유동 압력강하 상관식	4.4-6
4.4.2.2.4 임계채널출력	4.4-7
4.4.2.3 선출력	4.4-7

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	페이지
4.4.2.4	채널유량분포 4.4-8
4.4.2.5	모관과 모관사이의 압력강하 4.4-9
4.4.2.6	상관식 및 물리적 자료 4.4-9
4.4.2.6.1	연료피복관 표면 열전달계수 4.4-9
4.4.2.6.2	모관과 모관사이의 압력강하 상관식 4.4-9
4.4.2.7	운전과도상태의 열적 효과 4.4-10
4.4.2.8	불확실도 4.4-11
4.4.2.8.1	2상유동 압력강하와 임계열속에 대한 편차 및 불확실도 4.4-11
4.4.2.8.2	냉각재계통 경계조건에 대한 불확실도 4.4-12
4.4.2.8.3	채널유량 불확실도 4.4-12
4.4.2.8.4	임계열속 실험 측정 불확실도 4.4-13
4.4.2.8.5	압력관 크립 예측 불확실도 4.4-13
4.4.2.8.6	연소이력에 따른 보정 4.4-14
4.4.2.8.7	출력 상승에 따른 냉각재 경계조건의 변화 4.4-14
4.4.2.8.8	중성자 속 형태에 따른 임계채널출력의 변화 4.4-14
4.4.2.9	중성자 속 편차 고려 4.4-14
4.4.3	냉각재계통의 열수력학적 설계 4.4-15
4.4.4	평가 4.4-15
4.4.4.1	임계열속 4.4-15
4.4.4.2	연료채널 수리학 4.4-15
4.4.4.3	출력분포의 영향 4.4-16
4.4.4.3.1	축방향 출력분포 4.4-16
4.4.4.3.2	반경방향 출력분포 4.4-16
4.4.4.4	해석방법 4.4-17
4.4.4.4.1	연료채널의 유량 결정 4.4-17
4.4.4.4.2	임계채널출력 4.4-18
4.4.4.4.3	계산수력학적 불안정도 분석 4.4-18

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

		페이지
4.4.5	시험 및 검증	4.4-19
4.4.6	계측 요건	4.4-19
4.4.7	참고문헌	4.4-20
4.5	핵연료	4.5-1
4.5.1	설계요건	4.5-1
4.5.1.1	핵연료다발 설계요건	4.5-1
4.5.1.2	핵연료봉 설계요건	4.5-3
4.5.1.2.1	정상운전	4.5-3
4.5.1.2.2	운전중 예상되는 과도상태	4.5-4
4.5.1.3	핵연료 연계계통에 대한 설계요건	4.5-5
4.5.2	설계 내용	4.5-6
4.5.2.1	개요	4.5-6
4.5.2.2	소결체 설계 개요	4.5-6
4.5.2.2.1	재질	4.5-6
4.5.2.2.2	소결체 양단	4.5-7
4.5.2.2.3	길이 대 직경비	4.5-7
4.5.2.2.4	챕퍼링 (chamfering)	4.5-7
4.5.2.2.5	테이퍼링 (tapering)	4.5-7
4.5.2.2.6	표면처리	4.5-8
4.5.2.3	핵연료봉 설계 개요	4.5-8

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

	<u>페이지</u>
4.5.2.3.1 재질	4.5-8
4.5.2.3.2 핵연료 피복관 제원	4.5-8
4.5.2.3.3 도포층 (CANLUB)	4.5-9
4.5.2.3.4 충전 기체 (filling gas)	4.5-9
4.5.2.3.5 봉단 마감	4.5-9
4.5.2.4 핵연료다발 설계 개요	4.5-9
4.5.2.4.1 봉단접합판	4.5-10
4.5.2.4.2 연료봉간 간격체	4.5-10
4.5.2.4.3 지지체	4.5-10
4.5.3 설계 분석	4.5-11
4.5.4 핵연료 성능분석	4.5-11
4.5.4.1 노내 실험	4.5-12
4.5.4.2 고밀화와 소결체 팽창	4.5-12
4.5.4.3 소결체-피복관 상호작용	4.5-14
4.5.4.4 피복관 밀착 거동	4.5-14
4.5.4.5 침식과 마모	4.5-14
4.5.4.6 봉단접합판의 피로강도	4.5-15
4.5.4.7 출력 사이클링	4.5-15
4.5.4.8 무결함 핵연료피복관에서의 수소화합물과 중수소화합물	4.5-15
4.5.4.9 정상운전시 봉단 중성자속 침투	4.5-16
4.5.4.10 출력 급상승과 출력 증감	4.5-17

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

목 차

		<u>페이지</u>
4.5.5	참고문헌	4.5-17



월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

표 목 차

	<u>페이지</u>
표 4.1-1 원자로집합체 주요설계 및 성능특성	4.1-9
표 4.2-1 여러 가동 조건에 대한 칼란드리아 집합체의 하중조합	4.2-48
표 4.2-2(A) 허용응력강도 한계치, 레벨 A 및 B 운전 조건-용기 및 부품	4.2-49
표 4.2-2(B) 허용응력강도 한계치, 레벨 C 운전 조건 - 용기 및 부품	4.2-50
표 4.2-3 반응도조절기기의 가동압력	4.2-51
표 4.3-1 노심 설계자료	4.3-56
표 4.3-2 핵연료채널 설계자료	4.3-58
표 4.3-3 핵연료 설계자료	4.3-59
표 4.3-4 월성 2호기에 대한 시간-평균분석의 결과(평균수위=50%)	4.3-60
표 4.3-5 반응도 출력계수 (평균된 조사량의 조성을 갖는 핵연료)	4.3-62
표 4.3-6 CANDU 6 원자로에 대한 중성자 동특성 자료지발 중성자 자료	4.3-63
표 4.3-7 Bruce 정지봉의 측정 및 계산 반응도값 30 및 28 정지봉의 붕소 증가	4.3-64
표 4.3-8 Pickering 'A' 정지봉의 측정 및 계산 반응도값	4.3-65
표 4.3-9 Pickering 정지봉값 - 계산치 대 실험치	4.3-66
표 4.3-10 개별 또는 소규모군 흡수체의 반응도값	4.3-68
표 4.3-11 Pickering 'A' 코발트 흡수봉의 측정 및 계산 반응도값	4.3-69

표 목 차

		페이지
표 4.3-12	RAPP 조절봉의 측정 및 계산값	4.3-70
표 4.3-13	Pickering A에서 영역제어기의 측정 및 계산 반응도 값	4.3-71
표 4.3-14	PPV 격자특성을 사용한 Pu 위치에서 냉각제/기포 효과의 FMDP 분석	4.3-72
표 4.4-1	노심열수력 변수	4.4-23
표 4.5-1	계통적 핵연료 파손방지를 위한 CANDU 6 연계계통의 설계요건 요약	4.5-20
표 4.5-2	정격 37-핵연료다발의 제원	4.5-23
표 4.5-3	정격 채널 제원 및 핵연료 운전조건	4.5-24
표 4.5-4	냉각제와 접촉한 CANDU 핵연료 다발 양단에서의 열중자속 침투인자	4.5-25
표 4.5-5	노내 하중조건에서 CANDU 6 핵연료 다발의 운전여유도	4.5-26

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

그림 목 차

그림 4.1-1	원자로 집합체
그림 4.1-2	원자로 집합체
그림 4.1-3	원자로 집합체 (단면)
그림 4.1-4	콘크리트 칼란드리아 볼트 및 칼란드리아 집합체
그림 4.1-5	원자로 배치 (정면도)
그림 4.1-6	원자로 집합체 (평면도)
그림 4.1-7	수평 반응도제어기기의 위치
그림 4.1-8	반응도장치대
그림 4.1-9	반응도장치대 (평면도)
그림 4.1-10	정지봉기기와 제어흡수봉기기
그림 4.1-11	영역위치
그림 4.1-12	영역제어기기 (2 영역 집합체)
그림 4.1-13	조절기기
그림 4.1-14	수직반응도제어기기의 일반적인 모양
그림 4.1-15	수직중성자속검출기
그림 4.1-16	수평중성자속검출기
그림 4.1-17	액체독물 질주입 정지기기
그림 4.1-18	일반적인 전리함기기의 배열
그림 4.2-1	칼란드리아용기의 압력경계

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

그 립 목 차

- 그림 4.2-2 칼란드리아환 설치시 구성도
- 그림 4.2-3 매립링 및 종단차폐지지
- 그림 4.2-4 반응도기기 텀블의 지진억제장치
- 그림 4.2-5 영역제어기기의 압력경계
- 그림 4.2-6 영역제어기기의 하중
- 그림 4.2-7 조절기기의 구동장치
- 그림 4.2-8 조절기기 구동장치의 압력경계
- 그림 4.3-1 핵연료 수명동안 격자 중성자 생산단면적의 변화
- 그림 4.3-2 주요 칼란드리아 치수, 핵연료채널과 내부핵연료 지역의 경계를 보여주는 원자로의 측면도
- 그림 4.3-3 37-핵연료봉 핵연료채널
- 그림 4.3-4 핵연료 조사영역 (평균방출 핵연료 조사를 n/kb로 표시)
- 그림 4.3-5 시간에 따른 대략적인 다발출력변화
- 그림 4.3-6 8-다발 이동 핵연료 교체방식에 대한 시간-평균 채널출력
- 그림 4.3-7 평면 1 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-8 평면 2 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-9 평면 3 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-10 평면 4 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-11 평면 5 에서의 시간-평균다발출력

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

그림 목 차

- 그림 4.3-12 평면 6 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-13 평면 7 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-14 평면 8 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-15 평면 9 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-16 평면 10 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-17 평면 11 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-18 평면 12 에서의 시간-평균다발출력
- 그림 4.3-19 주요 칼란드리아 치수와 반응도기기의 배치를 보여주는 평면도
- 그림 4.3-20 조절봉과 영역제어기기의 반응도기기 배치
- 그림 4.3-21 연소에 따른 최외곽 핵연료봉의 선출력
- 그림 4.3-22 핵연료 온도 반응도 계수
- 그림 4.3-23 핵연료 온도의 일시적 변화에 의한 반응도 변화
- 그림 4.3-24 전출력에서 감속재 온도계수
- 그림 4.3-25 감속재 온도의 일시적 변화에 의한 반응도 변화
- 그림 4.3-26 냉각재 온도계수
- 그림 4.3-27 밀도효과를 포함한 냉각재 온도의 변화에 의한 반응도 변화
- 그림 4.3-28 전출력에서 반응도의 냉각재 밀도계수
- 그림 4.3-29 전출력에서 냉각재 기포 반응도
- 그림 4.3-30 연소에 따른 붕소계수의 변화
- 그림 4.3-31 감속재 중수순도변화에 의한 반응도 변화, POWDERPUFS-V 계산

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

그 립 목 차

- 그림 4.3-32 냉각재 중수순도변화에 의한 반응도 변화, POWDERPUFS-V 계산
- 그림 4.3-33 원자로 정지후 수반되는 반응도 변화, POWDERPUFS-V 계산
- 그림 4.3-34 다양한 중성자 생성시간에 대한 원자로 주기와 반응도 사이의 관계
- 그림 4.3-35 CANDU 6 평형노심에서 중성자 균형
- 그림 4.3-36 시동후 다양한 출력 준위로의 제논 반응도 과도상태
- 그림 4.3-37 영역제어기기에서 평균수위에 대한 반응도 변화
- 그림 4.3-38 평형 전출력 조건으로부터 전출력의 0, 20, 40, 60 및 80% 에로의 단계출력 감소후 수반되는 제논부하의 변화
- 그림 4.3-39 수평 반응도조절집합체의 위치
- 그림 4.3-40 평형노심배열에 대한 채널반응도 증가
- 그림 4.3-41 전형적인 출력회복 과도상태
- 그림 4.3-42 Bruce A 2호기 초기가동, 냉각재계통 온도변화에 의한 측정 및 계산 반응도 변화
- 그림 4.3-43 Pickering 'A' 4호기 (신 연료)에서 핵연료와 냉각재 온도에 의한 측정 및 계산 반응도 변화의 비교
- 그림 4.3-44 Pickering 'A' 4호기 (사용후핵연료)에서 핵연료와 냉각재 온도에 의한 측정 및 계산 반응도 변화의 비교
- 그림 4.3-45 28개 정지봉이 삽입되었을때 Bruce A의 제 1번 수평 중성자속감시기에서 측정 및 계산된 중성자속 분포의 비교

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

그 립 목 차

- 그림 4.3-46 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 17일자 실험 6번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-47 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 18일 실험 10번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-48 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 17일 실험 5번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-49 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 17일 실험 5번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-50 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 18일 실험 10번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-51 Pickering 'A' 시운전시 1972년 9월 7일자 실험 6번으로부터의 계산 및 측정 중성자속 분포의 비교
- 그림 4.3-52 이동 핵분열함 자료와 분석의 비교 (Bruce A)
- 그림 4.3-53 기계적조절흡수봉이 부분 삽입된 경우 노심에 대한 수평 NFM1을 따른 열중성자속 분포 (Bruce A)
- 그림 4.3-54 15개 부스터 (booster) 사용시 노심에 대한 NFM1에서 열중성자속 분포 (Bruce A)
- 그림 4.3-55 3개 부스터 사용시 노심에 대한 NFM1에서 열중성자속 분포 (Bruce A)
- 그림 4.3-56 산화우라늄봉 격자, 간격대 재질 버클링

그 립 목 차

그림 4.3-57	측정 및 계산 중성자속 기울기의 비교	
그림 4.3-58	Bruce A, 1 호기에서 30개 정지봉에 의한 정지후 수반되는 측정 및 계산 과도상태	
그림 4.3-59	Bruce A, 1 호기에서 30개 정지봉에 의한 정지후 수반되는 측정 및 계산 과도상태	
그림 4.3-60	Bruce A, 1 호기에서 30개 정지봉에 의한 정지후 수반되는 측정 및 계산 과도상태	
그림 4.3-61	Bruce A, 1 호기에서 30개 정지봉에 의한 정지후 수반되는 측정 및 계산 과도상태	
그림 4.3-62	출력 분포와 불확실도 및 안전여유를 고려한 채널 출력 한계(kW)	202
그림 4.3-63	출력 분포와 불확실도 및 안전여유를 고려한 다발 출력 한계(kW)	
그림 4.4-1	연료채널 유량 분포	
그림 4.4-2	압력관 드라이아웃 건도에 대한 출력예측 오차(3.3% 크립)	
그림 4.4-3	공칭압력관 연료다발 출구 건도에 대한 드라이아웃 출력예측 오차	
그림 4.4-4	압력관 연료다발 출구 기포분율에 대한 드라이아웃 출력예측 오차(5.1% 크립)	
그림 4.4-5	드라이아웃 질량유속에 대한 드라이아웃 출력예측 오차(3.3% 크립)	206
그림 4.4-6	입구모관온도에 대한 드라이아웃 출력예측 오차(공칭압력관)	
그림 4.4-7	출구모관압력에 대한 드라이아웃 출력예측 오차(공칭압력관)	
그림 4.4-8	Stern Lab. 측정 질량유속에 대한 드라이아웃 출력예측 오차(3.3% 크립)	
그림 4.4-9	고출력 채널에 대한 안정도 특성	
그림 4.4-10	출력에 따른 대수감쇠율	
그림 4.5-1	37-연료봉 핵연료다발	
그림 4.5-2	935 kw 의 기준 과출력 다발출력에 대한 연소도에 따른 핵연료다 출력곡선	

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

그 립 목 차

- 그림 4.5-3 조사시 UO_2 체적변화 (Pickering 핵연료다발 09794)
- 그림 4.5-4 피복관의 소성변형도에 대한 최종값:측정치 대 ELESTRES 예측치
- 그림 4.5-5 핵분열 생성기체 누출 : 측정치 대 ELESTRES 예측치
- 그림 4.5-6 고온의 D_2O 냉각재내 체류기간에 따른 건전한 핵연료 피복관내 중 수소 농도측정치
- 그림 4.5-7 NRU (53)에서 출력이 급상승된 (ramped) 흑연 CANLUB이 있는 핵연료와 없는 핵연료에 대한 결함기준 곡선비교 : 급상승된 출력 (P_{\max}) 대 연소도
- 그림 4.5-8 NRU (53)에서 출력이 급상승된 (ramped) 흑연 CANLUB이 있는 핵연료와 없는 핵연료에 대한 결함기준 곡선비교 : 출력 상승 (ΔP) 대 연소도

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4 장 원자로

4.1 개 요

4.1.1 원자로 집합체

원자로 집합체는 경수로 채워지고 탄소강 철판으로 덮혀있는 콘크리트 구조물 (칼란드리아 격실)안의 원통형 구조물이며 핵연료채널 집합체 및 반응도 제어기기로 이루어져 있다. 원자로 집합체의 배치는 그림 4.1-1, 4.1-2 및 4.1-3에 제시되었다. 칼란드리아 집합체 및 반응도 제어기기는 본절에서 기술하며 핵연료채널 집합체는 5장에서 기술한다.

칼란드리아 격실은 보통의 콘크리트 구조물이며 경수로 채워진다. 이 경수는 열차폐와 냉각 매개체로서의 역할을 한다. 이 격실은 그림 4.1-3, 4.1-4 및 4.1-5에 제시되었다.

액체 및 고체로된 중성자 흡수기기는 모두 반응도를 조절한다. 운전중 반응도는 흡수봉 기기, 조절기기 및 액체 영역제어기에 의해서 제어된다. 비상상태 혹은 비정상상태에서, 원자로 운전 정지는 정지봉이 원자로 노심 속으로 급속히 낙하되거나 액체 독물질이 칼란드리아 내부의 중수 감속재로 주입되는 것에 의해 수행된다.

칼란드리아는 감속재 상충기체(cover gas) 계통의 일부분으로서 압력 방출장치가 설비되어 있다. 정상가동중 감속재 밀봉기체 계통의 과압력 보호를 위해 2개의 밸브를 사용한다.

칼란드리아는 가상된 압력관 및 칼란드리아 튜브의 동시 파열에 대비하여 설계된다. 이들 사고로 부터 야기되는 압력에 대비하기 위해 4개의 압력 방출 배관이 설치된다. 이 배관들은 칼란드리아 상부로 부터 나와서 칼란드리아

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

격실의 경수를 통과하여 반응도 기기대에 이웃한 칼란드리아 격실 상부에 위치한 파열판까지 연결된다. 압력방출 배관과 138 ± 7 kPa (20 ± 1 psig) 에서 열리는 파열판은 감속재 과유량의 통로를 제공한다. 표 4.1-1에 원자로 집합체의 주요 설계 및 성능 특성을 표시하였다.

4.1.2 칼란드리아 집합체

칼란드리아 집합체는 칼란드리아용기, 두개의 종단차폐체, 두개의 종단차폐 지지대 (supports), 두개의 매립링 및 종단차폐와 격실냉각을 위한 내부 배관들로써 구성된다. 이 집합체는 중수 감속재 및 반사체의 용기 역할을 하며 핵연료채널, 반응도 제어기기 및 원자로 차폐를 형성하고 다중격실로 되어있다.

4.1.2.1 칼란드리아

칼란드리아는 수평 원통형이며 계단이 진 셸 (Stepped Shell)로 구성되고 종단 차폐인 튜브시트에 의해서 단혀지며 380개의 칼란드리아 튜브가 수평으로 걸쳐 있다. 설계에 대한 상세내용은 4.2.1.2.1.1 및 4.2.1.2.1.2 절에 기술되어 있다.

칼란드리아의 기능은 다음과 같다.

- 가. 핵연료채널을 둘러싸고 있는 중수 감속재 및 반사체를 포함한다.
- 나. 반응도 제어 기기의 내부 부품을 지지한다.
- 다. 핵연료채널을 지지한다.
- 라. 칼란드리아에 부착된 중수 감속재 배관 및 다른 배관들을 지지한다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.1.2.2 종단차폐체

종단차폐체는 튜브시트에 의해 양쪽 끝이 막혀있는 짧은 원통형 구조물이며 380개의 격자튜브가 수평으로 걸쳐 있다. 종단차폐체는 순수 (경수) 및 탄소강 볼 형태로 생물학적 차폐를 위한 재질을 포함한다. 설계에 대한 상세 내용은 4.2.1.2.1.4 절에 기술되어있다.

종단차폐체의 기능은 다음과 같다.

- 가. 원자로 운전 및 정지기간중 원자로로부터 핵연료 교환기실을 차폐해준다.
- 나. 칼란드리아를 지지한다.
- 다. 핵연료채널을 지지하며 제 위치에 배열되게 한다.
- 라. 열손실을 최소화 하기 위해 고온의 종단이음과 격자튜브 사이에 가스로 채워진 환형의 공간을 제공한다.

4.1.2.3 종단차폐 지지대

두개의 종단차폐 지지대 집합체는 각각 수평지지 셀 및 환형 지지판으로 구성되어 있으며 유연성 있는 지지 구조물을 형성하기 위하여 서로 용접되어 있다. 이 구조물은 종단차폐와 매립링 (embedment rings) 사이의 연결을 제공하며 칼란드리아 격실의 경수와 종단차폐 외부 핵연료 교환기 격실의 공기 사이에 누수방지 역할을 한다. 이 설계의 세부 내용은 4.2.1.2.1.5에 기술되어있다.

4.1.2.4 매립링

두개의 매립링은 각각 환형링과 원통형 셀로 구성되며 원주둘레에 일정간격으로 보강재 덧붙임 판에 의해 강화된다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

매립링은 칼란드리아 격실의 끝벽 콘크리트에 매설되고 종단차폐 지지대와 격실과의 연결을 가능하게 한다. 상세내용은 4.2.1.2.1.6에 기술되어있다.

4.1.3 반응도 제어기기

반응도 제어기기의 위치는 그림 4.1-6 과 4.1-7에 표시하였다.

4.1.3.1 반응도 장치대

반응도 장치대는 격실 (Vault) 의 경수차폐체와 중수를 회수하는 증기발생기실 대기와의 경계면을 제공하기 위해 칼란드리아 격실 상부를 차단한다. 이것은 수직반응도제어기기의 받침대 역할과 보수 작업자에 대한 차폐역할을 한다.

반응도 장치대는 내부에 양쪽 방향의 웹 (webs) 로 보강하여 만들어진 밀폐된 상자형 강철구조물로서 콘크리트로 채워진다. 그리고 수직반응도 제어기기의 텀블 (thimble) 이 삼입관을 관통하게 된다. 제거 가능한 무거운 지지판 (tread plate) 이 케이블과 제어기기들의 보수를 위한 공간을 제공하도록 구조물 위에 설치되며 보수작업자가 통행할 수 있는 통로를 제공한다. 또한 지지판은 반응도 장치대 위의 작업자에 대해 차폐역할도 한다.

구조물은 하중을 전달하는 웹를 통하여 격실에 연결되고 정확한 위치를 유지하며, 차등 열팽창 (differential thermal expansion) 으로 인한 구속하중을 최소화시킨다.

2개의 관찰구 (viewing port) 가 반응도 장치대에 설치된다 (그림 4.1-6 과 4.1-8). 이것은 짧고 덮개가 닫힌 정지기기형 텀블 (thimble) 을 포함하고 있으며 노심내 검사 및 감시기기 와 가동용 계측기를 삼입할 수 있다.

그림 4.1-8 과 4.1-9에 반응도 장치대의 단면도, 평면도를 각각 나

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

타내었다. 그림 4.1-14에 수직 반응도 제어기기의 일반적인 형태를 나타내었다.

4.1.3.2 정지기기

수직으로 설치된 정지기기는 28개이며 이들 각각은 스테인레스강으로 피복된 카드뮴 흡수체, 수직 안내관, 구동기기로 구성된다.

정지기기는 비상조건하에서 원자로를 급속 정지시키는 안전장치이다. 노심내로 카드뮴 흡수봉을 신속히 삽입함으로써 원자로는 정지되고, 이것은 제 1 정지 계통의 논리회로에 의하여 작동된다. 중력과 강력한 스프링 작동의 조합이 정지봉의 신속한 삽입을 보장한다. “안전봉 준비 지시계”는 각 정지봉이 상부의 제 위치에서 지시에 따라 삽입될 준비가 되어 있는가를 운전원에게 보여준다.

그림 4.1-10에 정지기기를 표시하였다.

4.1.3.3 액체영역 제어기기

액체영역 제어기기는 반응도 장치대와 칼란드리아의 하부 사이의 수직 관형 부품이다. 원자로 노심내에서 액체영역 제어기기는 격실로 나누어져 있고 이들은 각각 요구되는 수위로 경수가 채워질 수 있도록 만들어졌다.

이 기기들은 원자로내 14개 영역의 중성자속 준위를 각각 조절하며, 이것은 국부적인 중성자 흡수를 제어하기 위해 격실의 경수 수위를 연속적으로 조절함으로써 이루어진다. 운전작동 신호는 원자로 제어계통 컴퓨터로부터 받아들인다.

원자로에는 수직방향의 6개의 영역제어기기가 설치되어 있다. 원자로 축방향의 중심선에 위치한 2개의 영역제어기기는 각각 3개의 격실로 구성되는 반면 원자로 중심선의 바깥쪽에 위치한 4개의 영역제어기기는 각각 2개의 격

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

실을 갖고 있다 (그림 4.1-5 와 4.1-11 참조). 각 격실은 4개의 관이 지나고 이 관은 영역제어기기의 상부에 있는 뚜껑에 연결되어 있다. 2개의 관은 물의 출입 경로이고 나머지 2개의 관은 헬륨 상층기체 (cover gas) 의 입구와 출구 경로이다. 그림 4.1-12에 영역제어기기를 표시하였다. 원자로 내에 있는 영역제어기기의 모든 부품은 지르칼로이로 제작된다.

4.1.3.4 조절기기

21개의 수직 조절기기가 있으며, 이들은 각각 관 모양의 흡수봉, 수직방향으로 인장을 받는 안내관, 그리고 윈치형 (winch-type) 구동장치로써 구성된다.

조절흡수체 (조절봉으로 부르기도 한다) 는 칼관드리아로 삼입시 최적 원자로 출력과 핵연료 연소를 유지하기 위해 중성자속을 조절하고 인출시 출력감소로 인한 제논 독물질이 많이 생성되는 것을 막기위해 잉여 반응도를 제공한다. 그림 4.1-13에 조절기기를 표시하였다.

4.1.3.5 제어 흡수기기

4개의 제어 흡수기기가 (기계적 제어 흡수봉 또는 주 제어봉 집합체 (MCA) 라고도함) 수직으로 설치되어 있고, 영역제어계통으로 제어하는것 보다 더 큰 반응율이 요구될 때 이 제어 흡수기기로 중성자 속을 조절한다. 가속 스프링과 “안전봉 준비 지시계”가 없는 것 외에는 기본적으로 정지기기의 설계와 같다. 제어 흡수기기에는 삼입속도를 제한하도록 오리피스가 설치되어 있다.

4.1.3.6 수직 및 수평 중성자속 검출기

원자로에는 26개의 수직 중성자속 검출기와 7개의 수평 중성자

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

속 검출기가 설치된다.

수직 검출기 (그림 4.1-6 와 그림 4.1-15) 의 백금피복 중성자속 검출기 신호는 제 1 정지계통의 입력으로 사용된다. 수직 검출기기의 다른 백금 피복 중성자속 검출기는 또한 14개 액체 영역을 제어하는 원자로 조절계통에 중성자속 데이터를 제공한다. 추가로 수직 검출기의 다수의 바나듐 중성자속 검출기들은 중성자속 분포도 루틴 (flux mapping routine) 에 입력을 제공한다.

수평 검출기 (그림 4.1-7 과 그림 4.1-16) 의 백금피복 중성자속 검출기 신호는 제 2 정지계통의 입력으로 사용된다.

4.1.3.7 액체 독물질주입 정지기기

이들 기기 (그림 4.1-17)는 원자로 가동을 신속히 정지 시킬수 있는 제 2 정지계통의 일부분이다. 이것은 칼란드리아의 중수 감속재에 중성자 흡수액체 (“독물질”)를 주입하여 수행된다. 감속재로의 독물질용액 주입은 제 2 정지계통의 제어논리에 의해 개시된다.

이 기기는 주입노즐, 텀블, 펠로우즈 집합체, 가돌리늄 압력용기 (독물질 탱크), 헬륨 공급 탱크, 독물질 혼합 탱크, 밸브 및 배관으로 구성된다.

4.1.3.8 전리함기기

납으로 차폐된 6개의 하우징 (housing) 은 칼란드리아 동체의 외부 양쪽에 각각 3개씩 수평으로 장착된다. 각 하우징에는 전리함과 시험셔터 (test shutter) 의 설치를 위한 3개의 공동 (cavities) 이 있다. 제 2정지계통 전리함 하우징은 가동용계측기를 임시로 설치할 수 있게 되어 있다. 그림 4.1-18은 전형적인 전리함 하우징과 3개의 관통관을 보여주고 있으며 그림 4.1-7은 평면도로 전리함의 위치를 보여준다. 제 2 정지계통에 입력을 제공하는 3개의 전리함

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

기기들은 원자로 D면에 있고 B면에는 제 1 정지계통과 원자로 조절계통에 입력을 제공하는 3개의 전리함 기기를 포함하는 하우징이 있다. 원자로 조절계통의 전리함기기는 제 1 정지계통의 전리함 기기와 같은 하우징에 설치되지만 분리되어있다. 3개의 가동용계측기는 D면에 설치되고 이것은 초기가동 이후 예비 전리함 기기와 교체 가능하다.

4.1.4 참고문헌

이 요약 서술에 대한 참고문헌은 기계적 설계를 상세히 다루는 4.2.3 절에 기술한다.



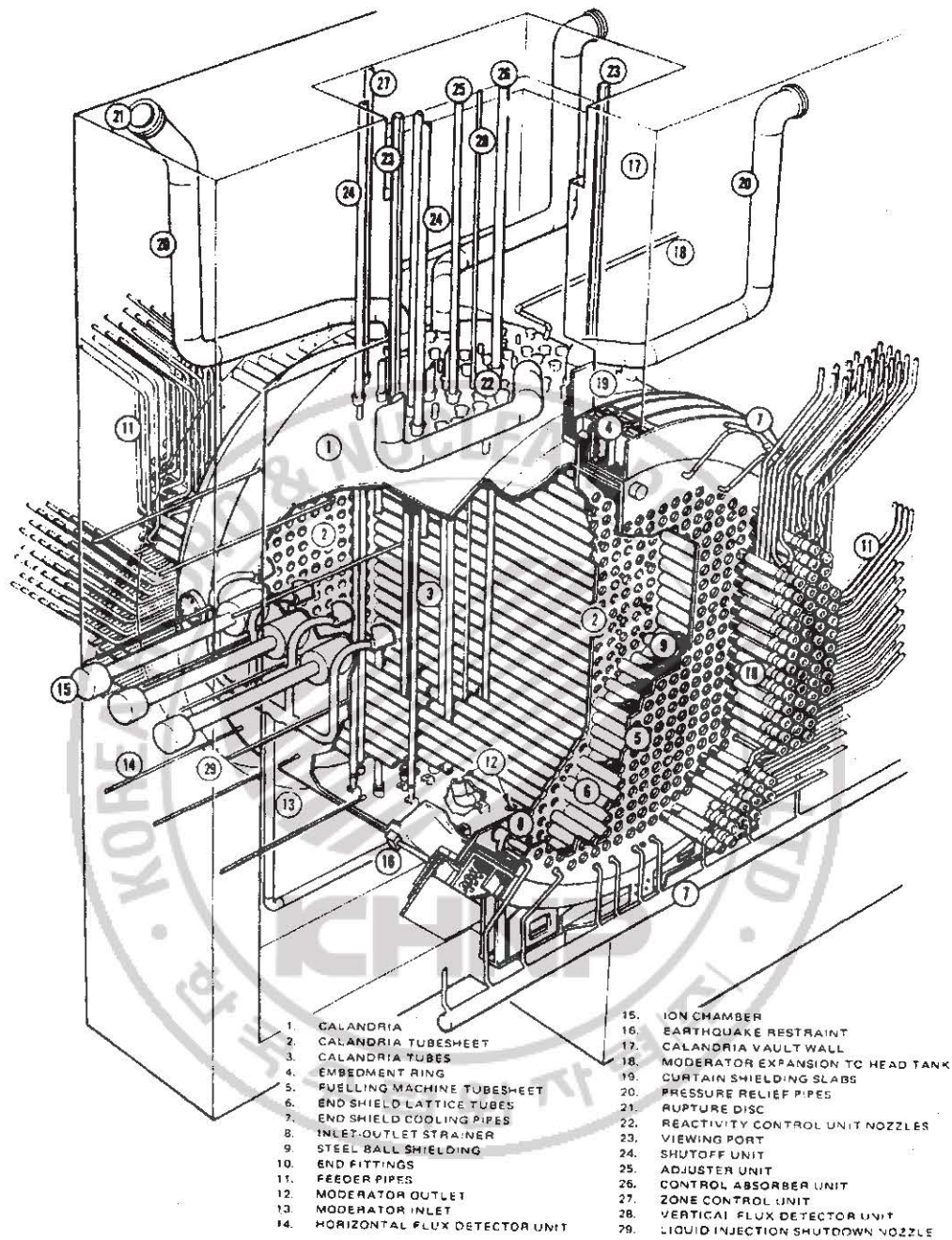
월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

표 4.1-1

원자로 집합체

주요 설계 및 성능 특성

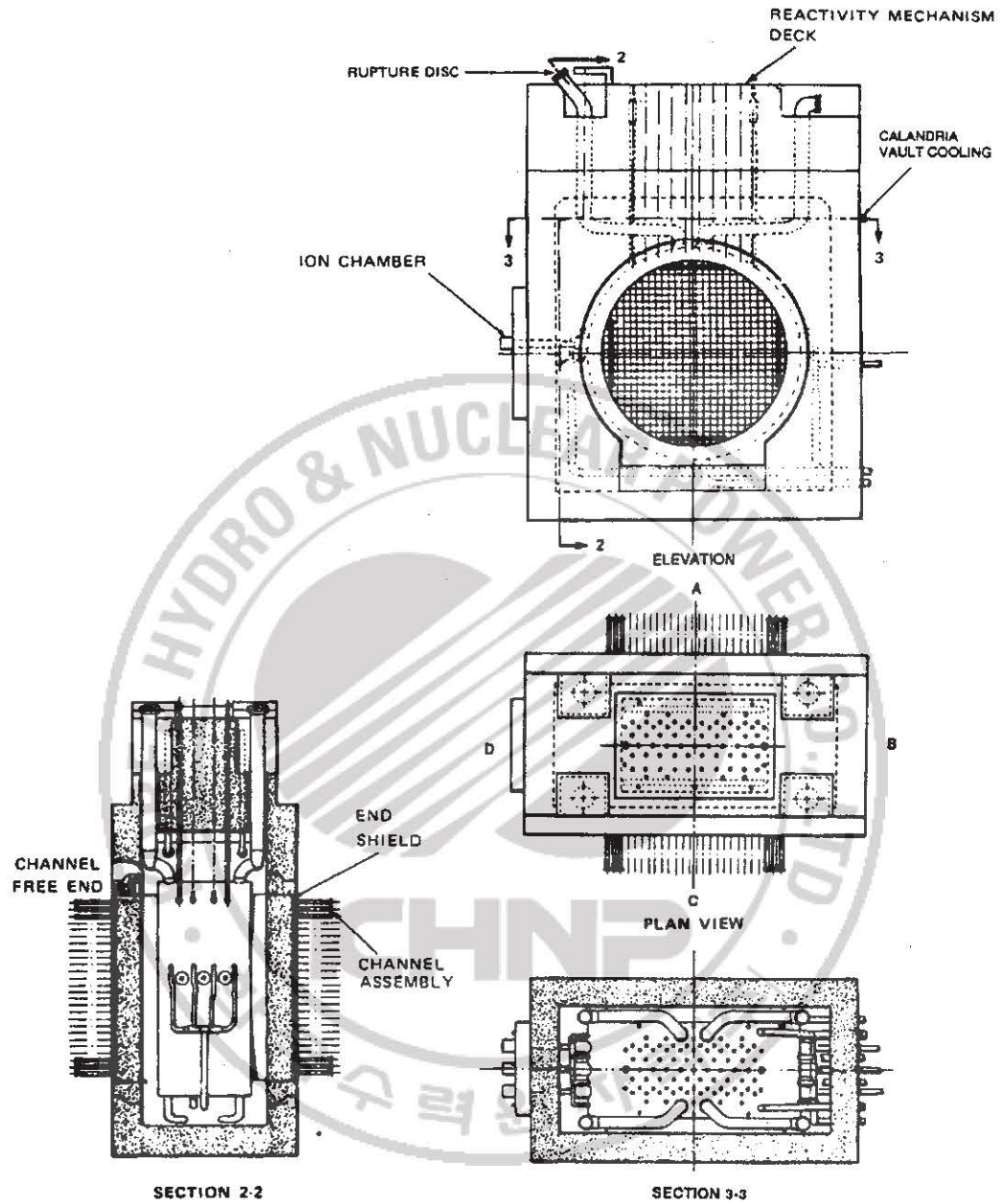
특 성	자 료
전체 열출력	2,061.4 MW _{th}
채널 수	380
최대 공칭 채널 출력	6.5 MW _{th}
채널당 핵연료 다발수	12
제1 정지계통	28개 정지봉
제2 정지계통	6개 노즐
압력관 재질	Zr-2.5 Nb
칼란드리아 집합체 재질	SS Type 304 L
칼란드리아관 재질	Zircaloy-2
노심 길이	5.94 m
칼란드리아 집합체 내경	7.595 m



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

원자로 집합체

그림 4.1-1

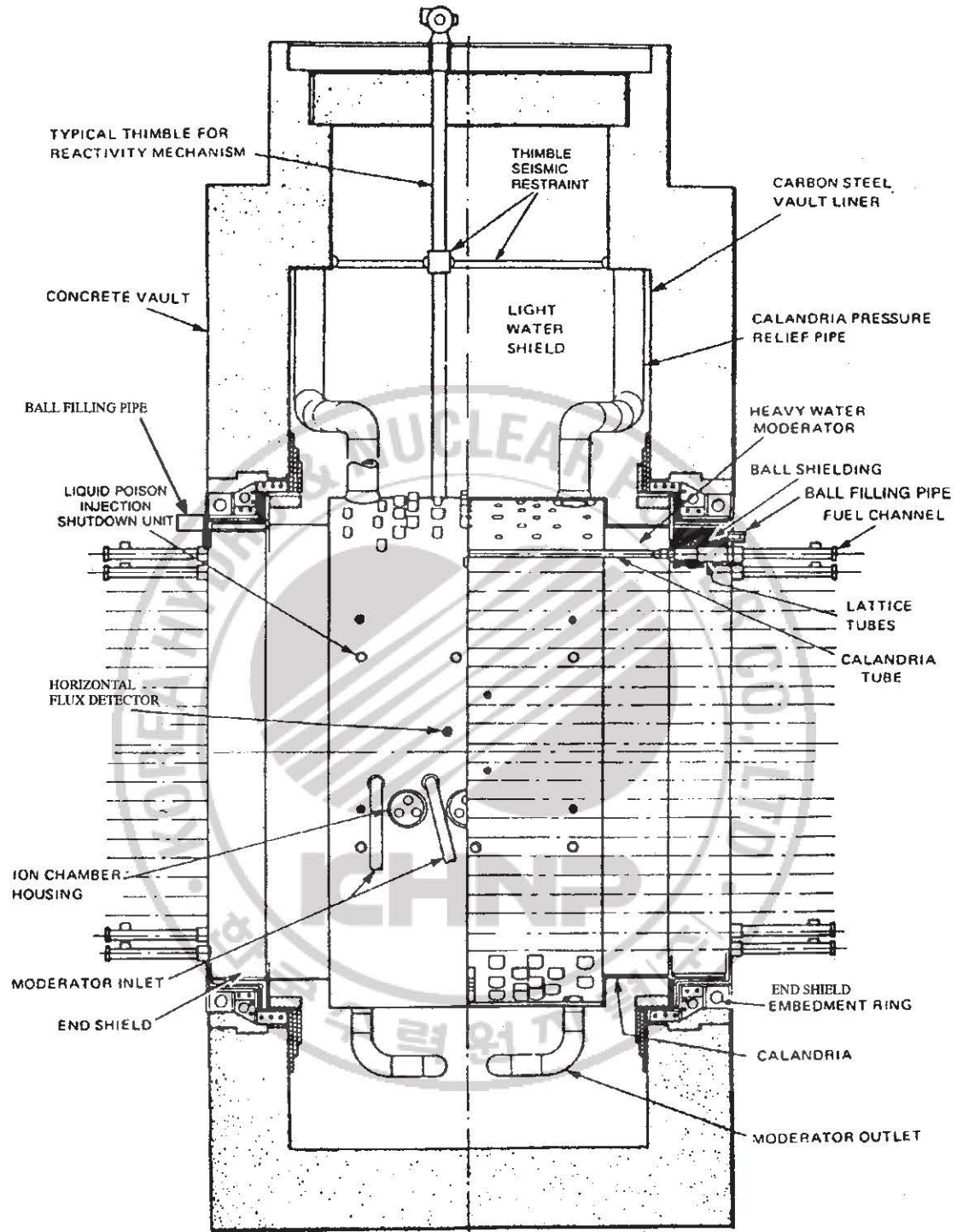


한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

원자로 집합체

그림 4.1-2

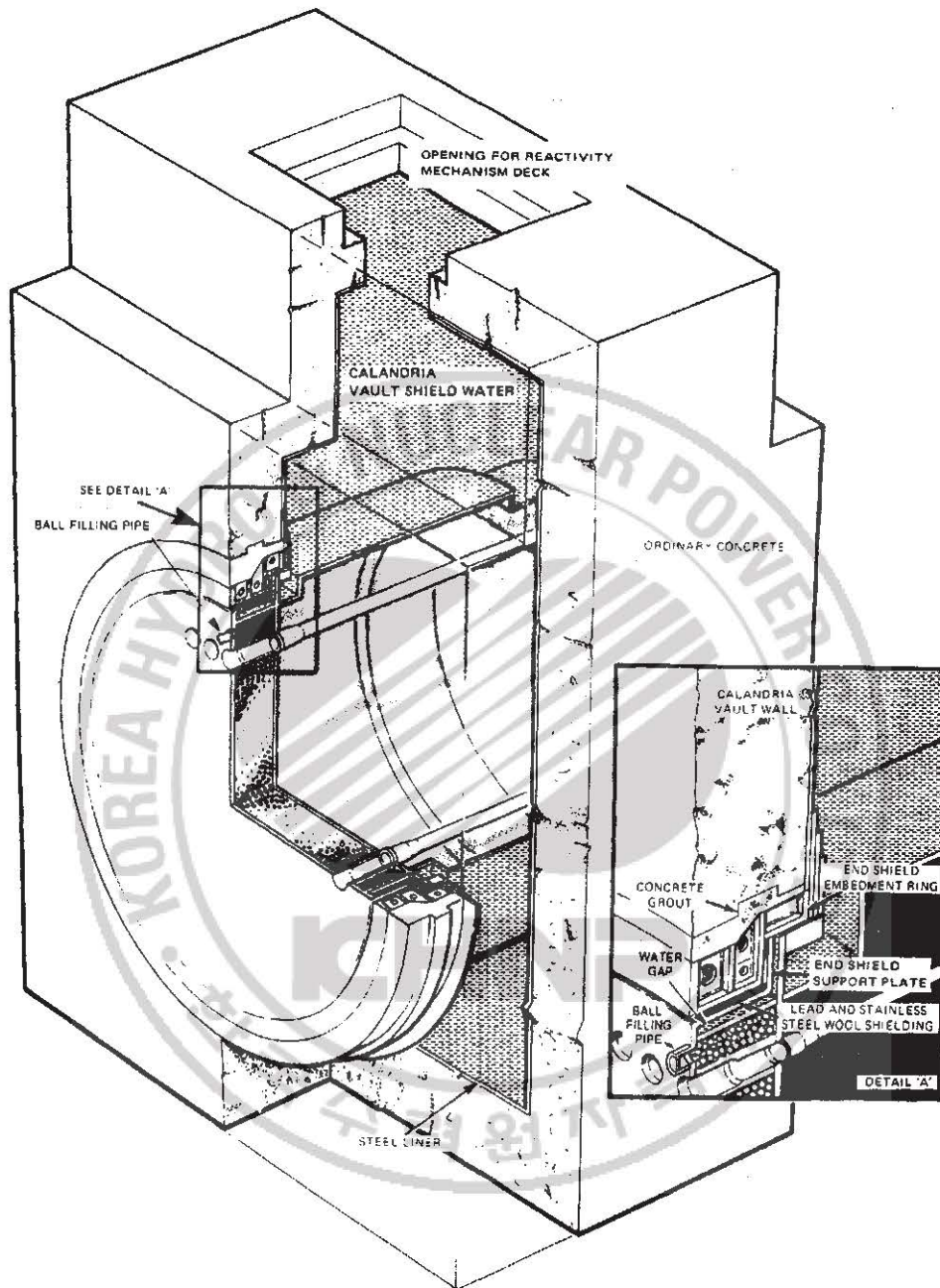
본 문서는 한국수력원자력(주)이 정보 공개용으로 작성한 문서입니다.



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

원자로 집합체 (단면)

그림 4.1-3



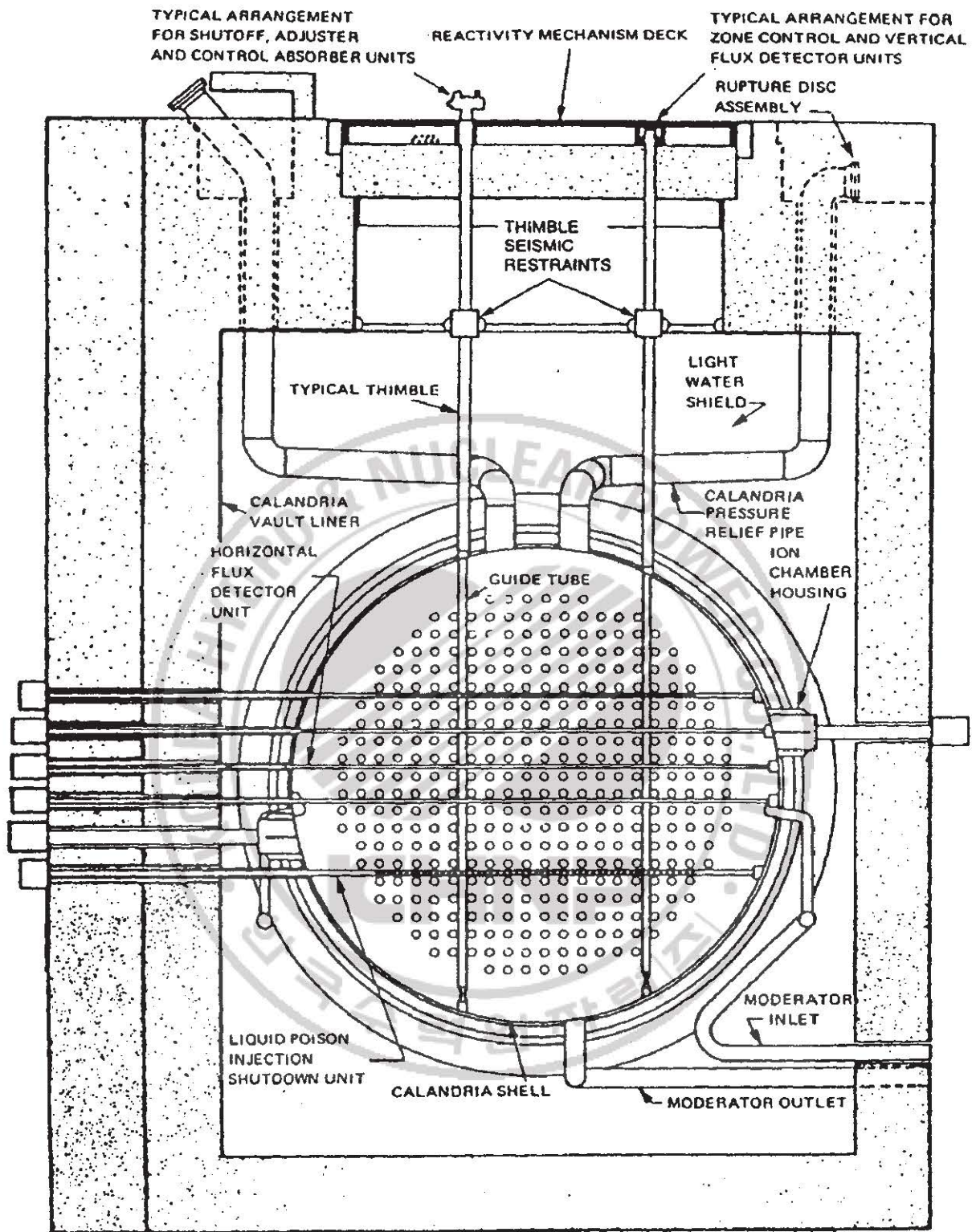
한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

콘크리트 칼란드리아 볼트 및 칼란드리아

집합체

그림 4.1-4

본 문서는 한국수력원자력(주)이 정보 공개용으로 작성한 문서입니다.



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

원자로 배치 (정면도)

그림 4.1-5



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

원자로 집합체 (평면도)

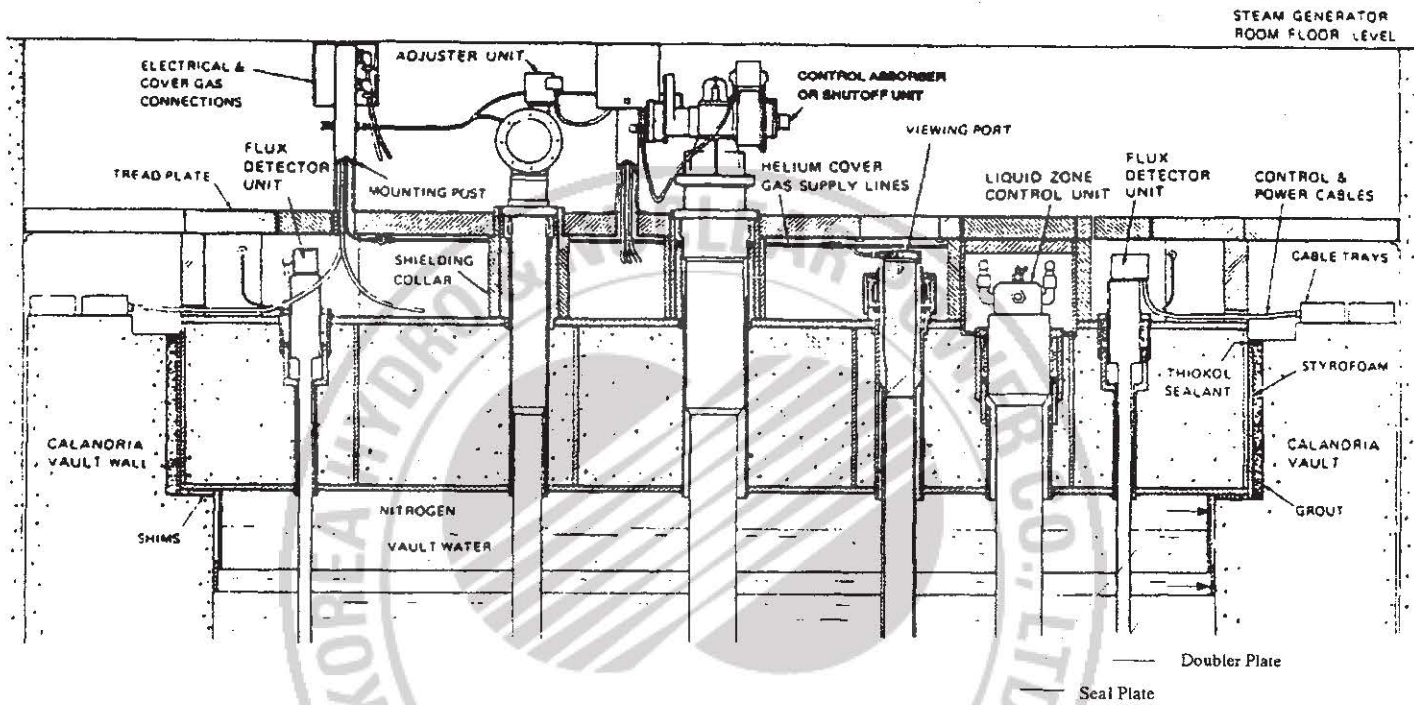
그림 4.1-6



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

수평 반응도제어기기의 위치

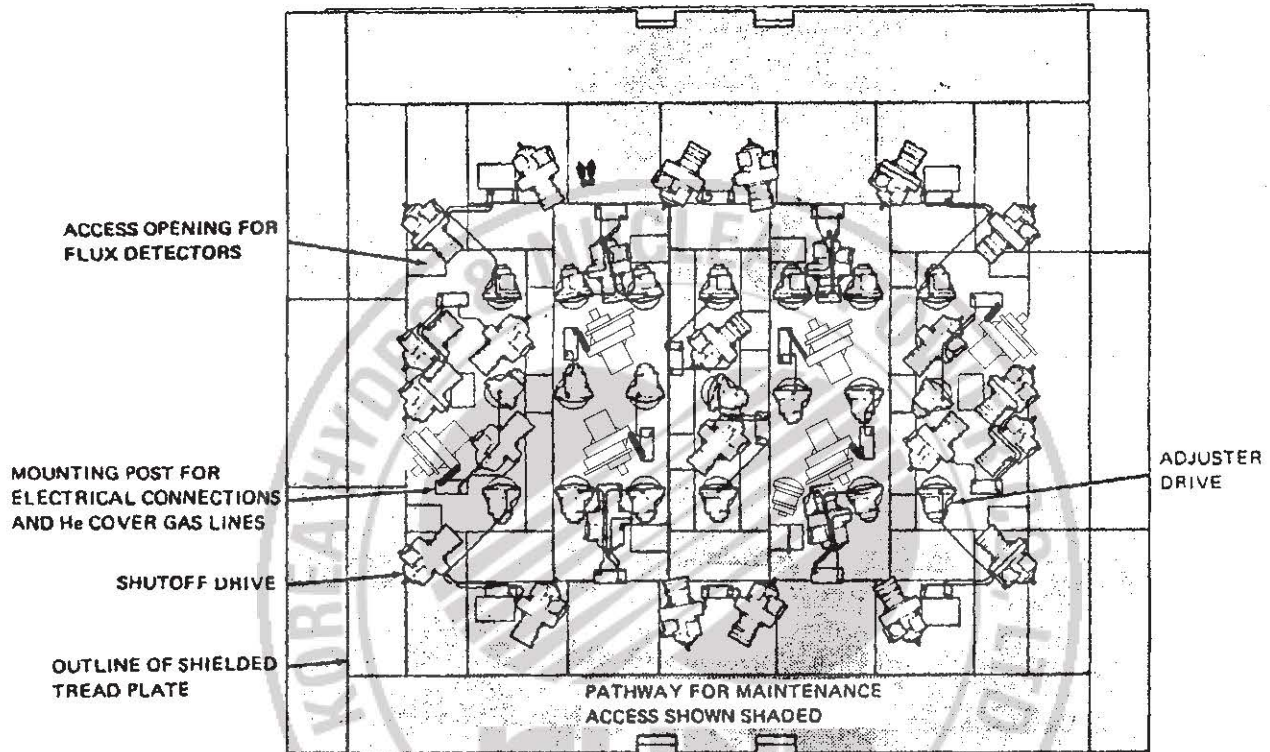
그림 4.1-7



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

반응도 장치대

그림 4.1-8



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

반응도장치대 (평면도)

그림 4.1-9



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

정지봉기기와 제어흡수봉기기

그림 4.1-10



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

영역위치

그림 4.1-11



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

영역제어기기 (2 영역 집합체)

그림 4.1-12

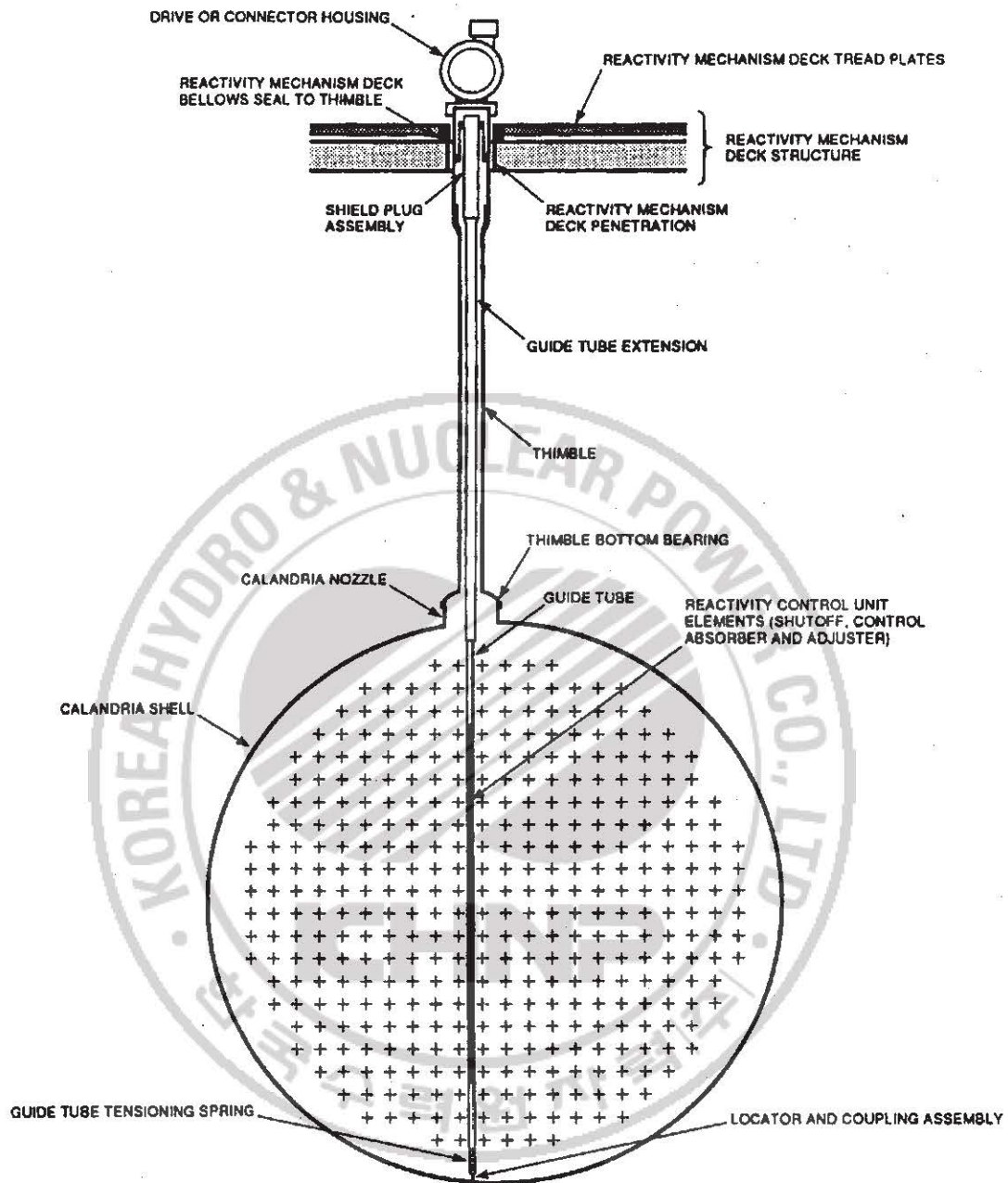


한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

조절기기

그림 4.1-13

본 문서는 한국수력원자력(주)이 정보 공개용으로 작성한 문서입니다.



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

수직반응도제어기기의 일반적인 모양

그림 4.1-14



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

수직중성자속검출기

그림 4.1-15



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

수평중성자속검출기

그림 4.1-16



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

액체독물질주입 정지기기

그림 4.1-17



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

일반적인 전리함기기의 배열

그림 4.1-18

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2 기계 설계

4.2.1 칼란드리아 집합체

4.2.1.1 설계 기준

4.2.1.1.1 설계 원리

중수 감속재 및 천연우라늄 연료를 사용하는 가압형 중수로인 CANDU는 압력관 개념을 사용한다. 이것은 중수 감속재 (moderator) 및 반사체 (reflector) 를 포함하는 큰 원통형 용기 (칼란드리아) 를 통해 지나가고 핵연료를 장전할 수 있는 압력관들로 구성된다.

가압 중수의 냉각재는 펌프에 의해 압력관을 통과하면서 핵연료를 냉각하여 핵연료로부터 출구 모관 (outlet headers) 및 증기 발생기까지 열을 수송한다.

감속재 회로와 일차 냉각재계통 회로는 서로 분리되어 있기 때문에 감속재 회로 영역의 어떤 국부적 손상도 냉각재계통에 손상을 초래하지 않는다.

칼란드리아 집합체 설계 요구조건은 설계 시방서 86-31200-DS-001 (참고문헌 4.2-17) 에 상세히 기술된다.

4.2.1.1.2 코드 및 표준

칼란드리아 용기 및 종단차폐체는 CSA표준 CAN3-N285.0-M81, CAN3-N285.1-M81, CAN/CSA-N285.2-M89 및 ASME 보일러 및 압력용기 코드 제 3권, 부권 NC (참고문헌 4.2-1 ~ 4.2-4) 의 요구조건에 따라 설계, 조립 그리고 등록된다

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

중단차폐 지지대는 등급1 주평판 및 셸형 지지대 (class 1 primary plate and shell type supports) 로 ASME 코드 제 3권, 부권 NF의 요구조건으로 설계 및 제작된다. 중단차폐 지지대는 또한 중단차폐체와 칼란드리아 격실 벽사이의 간격을 봉하여 격실안의 차폐 냉각계통의 누수를 방지한다. 그러나, 격실은 내부압력이 낮기 때문에 압력용기로 분류되지 않는다. 그러므로, 중단차폐 지지대는 압력용기 코드를 만족시키도록 요구되지 않는다.

칼란드리아의 내진 구속봉 (4.2.1.2.1.2 절 참조) 은 또한 부품지지물 (component supports) 이며 ASME 코드 제 3권, 부권 NF 의 요구조건에 따라 설계되고 조립된다.

매립링은 CSA 표준 (standard) W59에 따라 설계, 제작 및 시험되는 구조부품으로서 압력유지 부품 또는 부품지지물이 아니다.

4.2.3절의 참고문헌 4.2-1에서 4.2-21까지는 칼란드리아 집합체에 적용가능한표준들이다. 이 표준들은 AECL에 의해 생산된 기술문서 및 안전설계 지침 뿐만 아니라 ASME 코드 및 여러가지 CSA 표준들을 포함한다.

4.2.1.1.3 품질 보증

칼란드리아 집합체의 제작자는 CSA 표준 Z299.1에 따라 품질보증 계획을 수립하도록 요구된다. 칼란드리아 집합체는 보수작업을 위한 접근이 어렵기 때문에 최고 수준의 품질보증이 요구되어 왔다.

4.2.1.1.4 재질 선정

칼란드리아 집합체에 사용된 모든 재질은 환경의 다변화 (a variety of environments) 에 대한 장기간 노출에 적합하도록 주의깊게 선정되어 왔다. 이 환경들은 방사선, 고순도의 중수 감속재, 헬륨 상충기체 (cover gas), 이산화탄소

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

환형가스, 순수 경수, 원자로 격실 대기 및 앞에서 나열한 여러 조합을 포함한다.

재질은 사용 및 위치에 따라 다르지만 일반적으로 다음 요구사항을 만족해야 한다.

- 가. 재질의 취성에 대한 방사선의 최소 영향 즉, 누적된 중성자 피폭으로 인한 불연성 전이온도의 최소변화
 - 나. 일반적인 부식 저항 그리고 특히 중수 감속재에 섞여있는 산소 및 붕소 무수물 및 질산 가돌리늄에 대한 부식저항
 - 다. 용접으로 인한 열영향을 받은 부위에서 입계부식(intergranular corrosion)에 대한 면역
 - 라. 제작 및 검사에 대한 인정된 기술
- 저탄소 오스테나이트 스테인레스강 304L은 상기 요구사항을 만족시키며 칼란드리아관, 칼란드리아 격실벽에 묻혀있는 종단차폐 매립링 그리고 극소수 부분을 제외한 모든 칼란드리아 집합체부품(노즐 및 배관부속품 포함)으로 사용된다. 칼란드리아관의 재질은 또한 위에 기술된 요구사항을 만족해야 함은 물론 다음 사항도 만족해야 한다.
- 원자로내 사용시 필요한 낮은 중성자 흡수 특성
 - 감속재 및 채널 환형기체 대기에 대한 부식저항

지르칼로이-2는 칼란드리아관의 재질로 선정된다. 이 재질은 ASTM B350 주괴 (ingot) (원자로 등급 R60802 재질) 로 만들어지나 AECL 제작시방서에 의해 요구되는 더 높은 수준의 기계적 성질을 따라야 한다.

종단 차폐 매립링의 재질은 CSA G40.21 탄소강이다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.1.2 설계 개요

4.2.1.2.1 설계 특징

380개 압력관은 각각 칼란드리아관에 의하여 중수 감속재와 격리된다. 각 칼란드리아 튜브는 칼란드리아 튜브시트 양쪽 끝에 확장 압연되며 그것에 의해서 칼란드리아 용기의 '압력경계' (그림 4.2-1) 를 이룬다.

이와 같은 구성은 압력관에서의 고온, 고압의 원자로 냉각재와 독립적인 감속재 계통을 만들고 칼란드리아를 저온, 저압으로 설계 가능하게 하며 다음과 같은 부수적인 장점이 있다.

- 가. 높은 강도의 압력용기가 필요하지 않게 칼란드리아는 거의 대기압에서 운전된다.
- 나. 저온의 감속재는 사고조절 하에서 열 제거원 (heat sink) 으로서의 역할을 할 수 있다.
- 다. 반응도 조절기기는 냉각재를 통과하지 않고 감속재를 통과하므로 노심 으로부터 냉각재 압력의 영향을 받지 않는다.

각각의 압력관은 칼란드리아관에 의해 둘러싸여 있고 종단차폐 격자튜브의 양끝에서 베어링에 의해 동심원으로 구속되며 길이방향으로 1m 간격으로 위치한 4개의 환형 스페이서 (garter spring) 에 의해서 지지된다. 관사이의 공간은 고온의 압력관으로부터 열을 차단하는 환형기체 (이산화탄소)로 채워지고, 이로써 열효율을 향상시킨다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.1.2.1.1 칼란드리아 집합체

칼란드리아 집합체는 칼란드리아, 두개의 종단차폐체 (end shields), 종단차폐 지지대 및 두개의 종단차폐체 매립링으로 구성된다. 매립링은 칼란드리아 격실의 콘크리트벽에 매설된다.

4.2.1.2.1.2 칼란드리아

칼란드리아의 일반적인 구성과 기능은 4.1.2.1 절에 요약 기술된다.

칼란드리아 동체는 양끝에 더 작은 지름을 가진 부 동체 (sub shell) 와 주 동체 (main shell) 로 구성된다. 주 동체와 부 동체사이에서 용접된 휘기 쉬운 환형평판은 칼란드리아관과 칼란드리아 동체 사이의 차등 열팽창 (differential thermal expansion) 을 수용한다.

칼란드리아 튜브시트는 칼란드리아와 종단차폐체의 공유 부분이며 칼란드리아 동체와 칼란드리아관과 아울러 칼란드리아 용기의 압력경계 (그림 4.2-1) 를 형성한다.

칼란드리아의 고정단으로 설계된 한쪽 끝에서 칼란드리아 주 동체는 지진 반응을 제한하기 위해 주동체의 원주둘레에 설치된 일련의 구속봉들에 의하여 이웃한 매립링과 연결된다.

감속재 중수와 상충기체 (cover gas) 로부터 격실 경수를 분리하는 텀블 (thimbles) 은 칼란드리아에 삽입되는 반응도 제어기기에 통로를 제공한다.

수평반응도 제어기기의 경우, 텀블은 격실벽을 통과하여 칼란드리아에 가장 가까운 벽을 관통한다. 수직반응도 제어기기의 경우 텀블은 반응도 기기대로부터 칼란드리아 상부까지 연결된다. 각 반응도 제어기기의 무게는 텀블을 통하여 칼란드리아까지 전달된다. 그림 4.1-5는 칼란드리아에 설치된 수평 및 수직반응도 제어기기를 예시하고 있다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

반응도 제어기기의 안내관은 칼란드리아관들 사이를 지나고 칼란드리아 동체의 하부에 위치한 고정자 (locator) 에 고정되면서 칼란드리아를 관통한다.

저온의 중수 감속재는 칼란드리아 동체의 벽을 관통하는 노즐을 통하여 칼란드리아에 공급되고, 더워진 감속재는 칼란드리아 동체의 하부에있는 관을 경유하여 감속재 열교환기로 되돌아간다 (그림 4.1-3). 감속재 입구 노즐은 칼란드리아의 전 영역으로 감속재가 원활하게 흐르도록 설계 및 설치되었다.

파열판 (rupture disc) 은 압력관 및 칼란드리아관이 동시에 파단되었을 때 중수를 적절한 영역으로 방출하기 위해 칼란드리아의 상부에 있는 4개의 압력방출관 상단에 설치된다 (그림 4.1-2 참조). 감속재 상충기체 계통은 칼란드리아를 정상 압력으로 조절하고 칼란드리아 압력방출관의 중수소 농도를 제한하기 위해 감속재 계통 상부에 위치한 압력방출관으로 제공된다.

4.2.1.2.1.3 칼란드리아관

총 380개의 칼란드리아관은 정방피치 (square pitch) 로 원형 격자 배열을 형성하며 수평으로 칼란드리아 동체에 걸쳐 있다. 칼란드리아관은 노내 부품이며, 칼란드리아 용기 압력경계의 일부분을 형성한다 (그림 4.2-1).

칼란드리아관은 핵연료를 장전한 380개의 핵연료채널 집합체가 칼란드리아를 통과할 수 있도록 통로를 제공한다. 또한 그것은 고온의 압력관을 상대적으로 저온인 감속재로부터 열차폐 역할을 하며 감속재의 내부압력에 대해 칼란드리아 양쪽에 위치한 종단차폐체를 지탱하기 위한 축방향 버팀줄 역할을 한다.

칼란드리아관의 끝은 스테인레스 삼입관과 함께 칼란드리아 튜브시

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

트 (tubesheets) 에 압연 연결되어 고밀봉 (high-integrity leak tight) '샌드위치' ('sandwich') 연결부를 형성한다 (그림 4.2-2).

칼란드리아관은 이음매 용접과 열처리 및 잔류응력이 제거된 지르 칼로이-2로 만들어지며 특히 우수한 기계적 성질, 부식과 방사선에 대한 저항 및 낮은 중성자 흡수 단면적을 갖는 재질이기 때문에 노내 부품용으로 개발되었다.

4.2.1.2.1.4 종단차폐체 (End Shields)

종단차폐체의 구성 및 기능은 4.1.2.2절에 간략히 기술된다.

두개의 종단차폐체는 칼란드리아 집합체의 일부분이며 칼란드리아의 양쪽끝에 용접된다. 각 종단차폐체의 바깥쪽은 칼란드리아 격실벽에 매설된 매립링이다. 각 종단차폐체는 유연성 있는 종단차폐 지지구조물에 의해 매립링에 연결되고 지지된다.

칼란드리아 튜브시트는 종단차폐체와 칼란드리아의 공유 부분이다. 그것은 칼란드리아측 중수 감속재와 종단차폐체측의 냉각경수에 노출된다. 종단차폐체의 나머지 380개의 격자튜브, 핵연료교환기 격실쪽에 있는 핵연료 교환기측 튜브시트로 구성된다. 종단차폐체 내에서 튜브시트와 격자튜브가 이루는 공간은 탄소강 볼로 채워져 있다. 이 볼과 냉각용 경수는 원자로정지 중 필요한 생물학적 차폐 (biological shielding) 를 제공한다. 방사선, 튜브시트를 통한 열전도 그리고 핵연료채널내 냉각재로 부터 열대류에 의해 발생된 열을 제거하기 위해 종단차폐체를 통하여 경수가 순환된다. 종단차폐체의 경수냉각은 칼란드리아 격실을 통하여 물을 순환시키는 차폐 냉각계통의 일부분이다 (종단차폐체와 격실의 냉각 회로는 병렬이다).

짧은 격자튜브는 칼란드리아관과 동심원을 이루며 핵연료채널의 종단이음 집합체를 지지한다. 격자튜브의 끝은 압연 및 용접에 의하여 튜브시트에

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

고정된다. 격자튜브와 튜브시트 결합은 종단차폐체의 오스테나이트 스텐레스강 부품들 사이에서 균열 부식을 야기시킬 수 있는 어떠한 기하학적 모양도 제거하도록 설계된다.

4.2.1.2.1.5 종단차폐 지지대

각 종단차폐 지지 집합체는 수평 지지셀과 환형 지지판으로 구성되며 유연성있는 지지구조물을 형성하기 위해 같이 용접된다. 지지셀의 외부 끝은 종단차폐체 핵연료 교환기측 튜브시트의 원주 부분에 용접된다. 지지판의 외부 가장자리는 매립링에 용접된다.

종단차폐 지지집합체는 칼란드리아 집합체와 칼란드리아 격실 사이의 반경 방향과 축방향 운동을 수용한다. 또한 칼란드리아 격실의 경수와 종단차폐 바깥 쪽 핵연료교환실의 공기 사이에 밀봉을 제공한다.

지지판중 한쪽 (칼란드리아의 고정부분)의 축방향 유연성은 지진 상태에서 원자로 집합체의 축방향 운동을 제한하기 위해 구속된다. 이 구속은 판을 매립링에 단단히 결합시키는 분포된 구속 볼트에 의해 이루어진다.

종단차폐 지지대는 그림 4.1-4 와 4.2-3에 예시되어 있다.

4.2.1.2.1.6 매립링

각 매립링은 원주형 셀과 원주둘레에 일정간격으로 반경 방향의 덧볼힘판에 의해 강화된 환형링 요소로 구성된다. 각 매립링의 아래부분은 평평한 기초판의 상자형 안장면 (box saddle section)으로 되어 있다.

매립링은 칼란드리아 격실의 끝벽 콘크리트속에 매설된다.

매립링 속의 냉각수 배관들이 종단차폐 근처의 콘크리트 과열을 방지하기 위해 설치된다. 콘크리트 가열에 대한 부가적 보호를 위해 강 차폐판의

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

두 셋트 (커튼(curtain) 및 지지링 슬라브)가 각 매립링 집합체의 칼란드리아측에 직접 볼트로 체결된다.

각 매립링과 종단차폐 지지대 사이의 공간은 반경 및 환형 공기 공간 (air gap) 으로 되어있다. 이 공기 공간을 통한 핵연료 교환실로의 과도한 방사선 흐름을 방지하기 위해 반경 간격은 납과 스테인레스강 섬유 (wool) 로 채워져 있다. 반경 간격에 물이 고이는 것을 방지하기 위해 집합체의 양끝 아래부분에 배수관이 설치된다.

그림 4.1-4 와 4.2-3에 매립링을 표시하였다.

4.2.1.3 하중

칼란드리아 집합체 부품의 설계는 온도, 압력 및 기계적 하중의 특정한 조합으로 인한 적절한 하중의 조합 (동시에 일어난다고 가정) 에 근거를 둔다. 설계에 고려되는 하중은 다음 내용을 포함하나 반드시 국한되는 것은 아니다.

가. 외부 및 내부 압력 (설계는 유체의 동적, 정적 수두로 (dynamic and static heads) 로 인한 부가 압력을 포함하여 서로 다른 운전 조건 아래에서 부품에 작용하는 최대 차등압력을 고려한다.)

나. 운전상태에서 정상 내용물을 가진 부품들의 무게를 포함한 무게

다. 부력

라. 부착된 부품들의 중첩 하중 (자관, 감속재 입/ 출구 배관, 압력 방출배관, 반응도 기기등) 및 운전 장비 (핵연료 교환기 등)

마. 국부 하중 즉, 압연연결의 열간접 하중, 격자튜브 하중, 환형스페이

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

- 서 하중 및 베어링 접촉 하중, 베어링에서의 마찰, 벨로즈 하중등
- 바. 지지점에서의 반력 및 변위
- 사. 핵연료채널의 축방향 신장으로 인한 크립 하중 및 가터 스프링 (garter spring)하중
- 아. 설계기준 지진 (DBE) 으로 인한 지진 하중
- 자. (1) 전체 및 국부 열조건에 따른 하중
- (2) 전체 및 국부 온도구배에 따른 하중

부품설계에 사용된 설계온도는 ASME 코드에 정의된 것으로 한다. 설계온도는 레벨 A 운전한계 (service limits) 로 명시된 조건동안, 고려되는 부품의 두께에 대하여 예상되는 평균 금속온도보다 낮지 않다. 운전시 용기의 다른 부위에서 금속의 온도가 분명히 다르게 예측될 때, 다른 부위나 부품의 설계는 예측된 온도로서 수행한다.

설계압력은 ASME 코드에 따라서 결정된다. 규정된 내부 및 외부 설계압력은 부품의 안쪽과 바깥쪽 사이의 혹은 다격실 용기인 경우는 어떤 두 방 사이의 최대 압력차보다 작지 않아야 하며 그 설계압력은 레벨 A 운전한계로 규정된 가장 심한 하중하에 있다. 운전시, 다른 압력이 용기의 다른 영역에서 예측될 때 다른 영역 혹은 부품의 설계 압력은 예측된 압력으로 한다.

기계적 설계하중 (design mechanical loads) 은 ASME 코드에 따르며 이러한 기계적 하중은 레벨 A 운전한계가 규정하는 어떤 하중 조합 중에서도 가장 큰 1차 응력이다.

4.2.1.3.1 하중의 범주 및 하중조합

다른 운전조건에 대한 하중조합은 표 4.2-1에 제시하였다. 이것

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

은 완전한 것이 아니며 기계적 하중으로 인한 다른 상호영향은 설계 보고서 86-31200-SR-001 (참고문헌 4.2-19)의 세부적 응력해석에서 설명된다.

국부하중의 경우, 1차응력을 유발하는 국부하중은 설계조건에 고려되는 반면 전체구조 불연속에서의 2차 응력을 유발하는 국부하중은 피로해석 계산을 위해 사용된다.

4.2.1.4 응력의 종류

칼란드리야 집합체는 표 4.2-2 (A) 및 4.2-2 (B)에 언급한 응력과 이에 상응하는 치짐이 여러 운전조건에 대하여 한계를 초과하지 않도록 설계된다. 표에서 응력의 종류에 대하여 사용된 항목은 아래와 같이 정의된다.

P_m = 일반 일차 막응력

P_L = 국부 일차 막응력

P_b = 일차 굽힘응력

Q = 이차 응력

Q' = 일차 및 이차 응력 ($P_L + P_b + Q$) 혹은 ($P_m + P_b + Q$)

S = 응력강도 범위 (절대값)

P' = 일차응력 ($P_L + P_b$) 또는 ($P_m + P_b$)

S_m = 설계 응력강도

S_y = 항복 강도

4.2.1.4.1 여러 운전 조건들에 대한 허용응력 한계

운전조건들은 다음 절에서 정의되며 허용응력 한계는 표 4.2-2 (A) 및 4.2-2 (B)에 제시된다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.1.4.2 레벨 A 운전한계

이 절 및 다음 절의 관련 운전한계 정의는 ASME 코드의 일부분인 NCA- 2142로부터 발췌되었다. 레벨 A 운전한계는 부품 또는 지지물이 지정된 운전기능을 할 때 받게 되는, 설계 시방서에 나타난 모든 레벨 A 운전하중에 대해 만족해야 하는 것들이다.

레벨 A 운전 조건의 예는 비정상상태, 비상, 고장 혹은 시험조건을 제외한 계통의 기동, 출력범위에서의 운전, 고온 대기 및 계통운전 정지중에 있는 조건들이다.

4.2.1.4.3 레벨 B 운전한계

레벨 B 운전한계는 이 한계로 지명된 것에 대하여 설계 시방서에 제시된 모든 레벨 B 운전 하중을 만족해야 하는 한계들이다. 부품 또는 지지물은 보수를 요하는 손상없이 이 하중들을 견디어야 한다.

레벨 B 운전조건의 예는 운전 손상없이 조건들을 견딜 수 있도록 충분히 설계되며 자주 일어나는 것이 예상되는 정상조건으로 부터 편차를 포함한다. 레벨 B 조건은 운전원의 단일 실수 혹은 제어기능 오동작 결과로부터의 과도상태, 계통으로부터 격리가 요구되는 계통 기기의 고장에 의한 과도상태 및 부하 또는 출력 상실로 인한 과도상태를 포함한다. 레벨 B 조건은 강제 운전정지 및 고장시 조치를 위한 기계적 손상의 보수를 요하지않고 강제 운전정지를 초래하지 않는 어떤 비정상 사고를 포함한다. 칼란드리아 집합체 설계의 레벨 B 운전조건은 종단차폐체 냉각 상실, 감속재 펌프 상실 및 감속재 열교환기의 냉각수 상실에 해당한다.

칼란드리아 집합체의 재질에 대한 허용응력한계는 표 4.2-2(A)에 제시하였다. 만약 레벨 B 조건하에서의 압력이 설계 압력을 초과한다면 이 표

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

의 응력한계는 레벨 A 조건 응력 강도의 110%가 될 것이다.

4.2.1.4.4 레벨 C 운전한계

레벨 C 운전한계는 이 한계로 지명된 것에 대하여 설계 시방서에 제시된 모든 레벨 C 운전하중을 만족해야 하는 한계들이다. 이 한계들은 기기 또는 지지물에 대한 손상 보수 혹은 검사를 위하여 부품의 제거가 필요한 구조적 불연속 영역에서 큰 변형을 허용한다. 그러므로, 이 한계의 선정은 인정된 계통안전 기준 (NCA-2141) 과의 양립성을 위해 원전 소유자에 의해서 검토 될 것이다

레벨 C 운전조건의 한 예는 한개의 압력관/칼란드리아관의 동시 파단이다.

칼란드리아 집합체는 구조적 건전성의 큰 상실없이 이 조건들을 견디게 설계되며 높은 응력한계가 허용된다 (표 4.2-2 (B) 참조).

4.2.1.4.5 레벨 D 운전한계

레벨 D 운전한계는 이 한계로 지정된 것에 대하여 설계 시방서에 제시된 모든 레벨 D 운전하중을 만족해야 하는 한계들이다. 이 한계들은 보수가 요구되는 손상 및 치수 복원성 (dimensional stability) 의 상실로 인한 일반적인 큰 변형을 허용하며 운전으로부터 부품의 제거가 요구될 수 있다. 그러므로, 이 한계의 선정은 인정된 계통 안전 기준 (NCA-2141)과의 양립성을 위해 원전 소유자에 의해 검토되어야 한다.

레벨 D 운전조건의 한 예는 압력관/칼란드리아관의 파단을 초래하는 유동차단 (flow blockage) 이다.

레벨 D 운전조건의 붕괴하중은 유동차단의 경우로서 ASME 코드

1

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

부록 F 규정으로부터 얻어진다. 레벨 D 운전인 유동차단의 경우 허용응력 한계는 아래와 같다.

- F-1322.3에 따라 재료 성질과 허용성은 ASME 코드의 부록 I로부터 구해져야 한다.
- F-1322.4에 따라 하중계산과 부품의 허용평가를 위한 해석은 기가학적 비선형성과 구조물 부품사이의 간격을 고려하여야 한다 (적용 가능하다면).
- F-1341.3에 따라 정적하중 또는 등가정적하중에 대하여 계산된 붕괴하중은 $2.3 S_m$ 과 $0.7 S_u$ 또는 소성해석 붕괴 하중의 100% 또는 F-1321.6에 주어진 시험붕괴하중과 비교해서 작은 값인 항복응력을 사용한 한계해석붕괴하중의 90%를 초과하지 말아야 한다.

1

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.1.5 시험 조건

칼란드리아 용기는 내부 공기압 시험 및 외부 수압 시험을 받으며 중단차폐체는 내부 수압 시험을 받는다. 모든 시험은 NCA-2142의 요구조건을 만족 한다.

4.2.1.6 허용 처짐한계

원자로의 적절한 기능을 위해 변형을 및 처짐에 대한 한계가 필요하다. 부품의 지나친 처짐 및 변형은 그것에 부착된 부품에 대하여 상호작용 하중 (interaction loads)을 유발시킨다. 또한, 기하학적 변화는 부품들사이의 간섭, 기능의 손상으로 결국 원자로의 손상을 유발한다.

처짐한계는 일반적으로 아래에 기술된 것을 제외하고는 허용응력이 탄성한계내에 있도록 설정된다.

기능적 요구조건과 양립하면서 영구변형 허용이 필요한 곳에서 영구변형을 한계는 고합금강에서 영구변형을 제한하기 위해 인자 (factor) 를 사용하여 정할 수 있다. 재료의 강도값에 선정된 인자를 곱하는 것은 영구변형율의 예정된 값에 상응하는 낮은 항복 강도 값을 초래한다.

4.2.1.7 설계 해석

칼란드리아 해석은 칼란드리아 집합체 응력 및 변형에 대하여 모델링, 점검 및 해결을 위해 현재 사용되고 있는 기술을 사용하여 행하여졌다. PATRAN, ANSYS, STARDYNE 코드에 있는 그래픽 기능이 유한요소모델을 만드는데 사용되었다. 5개의 모델이 만들어졌고 각 모델의 복잡성은 모델이 적용되는 유형에 따라 다르다. 이 모델들은 다음과 같다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

- 가. 모든 기하학적 및 경계조건이 포함된 반쪽 칼란드리아 모델, 칼란드리아 관은 보요소 (beam element) 로 모델링되었고 압력, 자체 하중, 외부에 적용된 하중 및 수압 하중이 적용되었다.
- 나. 축대칭 모델 (월성 1호기와 동일) 은 열응력 및 격실 상호작용 응력을 계산하기 위해 사용되었다.
- 다. 부채꼴 모델 (sector model) 은 레벨 D 조건에 대하여 ASME 코드 제 3권, 부록 F에 따라 유동 차단 (flow blockage) 하중에 대한 비선형 좌굴해석을 위해 만들어졌다.
- 라. 격자피치의 전체 칼란드리아 유한요소모델은 4개의 튜브시트, 2개의 격자 튜브 및 하나의 칼란드리아 관을 포함한다. 이 모델은 칼란드리아 관의 응력 및 각각 다른 위치에서 튜브시트의 국부 응력해석을 위해 사용되었다.
- 마. 약 4000개의 쉘요소를 가진 또 하나의 전체 칼란드리아 유한요소 모델은 지진해석을 위해 사용되었다. 이 모델은 모델의 고유값 (eigenvalue) 뿐만 아니라 지진 응력 해석을 위해 사용되었다. 동적 응축 (dynamic condensation) 기법이 (STARDYNE 코드에 주어진 Guyan의 자유도 감소기법) 고유값 및 고유 벡터를 계산하는데 사용되었다. 발전소 건물의 높이 100m에서 총응답 스펙트럼이 변위, 힘, 모멘트 및 응력과 같은 칼란드리아 구조응답을 계산하기 위해 사용되었다.

최종 응력 요약을 취득하고 ASME 코드의 요건을 만족시키기 위해 하중결합이 이루어졌고, 해석결과는 다른 레벨 조건에 대하여 ASME 코드와 비교하였을 때 허용될 수 있음을 보였다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2 반응도 제어기기

4.2.2.1 설계기준

4.2.2.1.1 설계원리

CANDU 원자로의 반응도제어기기는 2가지 범주로 분류된다.

- 가. 반응도를 변화시켜 원자로 출력을 변화시킬수 있는 구동체나 액체 제어 집합체
- 나. 원자로의 제어 및 지시계측기를 지지하는 구조물로써 사용되는 집합체

모든 기기의 가장 중요하게 고려되는 면은 기기의 신뢰성이며 재질의 선정, 구동 부품의 설계, 실험실 시험계획수립 및 최종현장설치에 이르기까지 신중하게 고려되어야 한다.

각 집합체의 설계는 원자로 외부 부품들이 요건대로 안전하게 부착되고 유지되도록 하기 위해 방사선차폐 및 방사선 누출에 대하여 주의깊게 검토되어야 한다.

온도변화, 지진등으로 인한 응력은 적절한 설계에 의하여 모든 조건하에 안전한 수준에서 유지되어야 한다.

균열부식을 포함한 모든 종류의 부식을 방지하기 위하여 재질의 사용 및 설계에 특별한 주의가 요구된다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.1.2 코드 및 표준 문서

칼란드리아 용기 압력경계를 형성하는 반응도 제어기기의 설계, 제작 설치 및 검사는 CAN3-N285.0-M81을 따라야 한다.

경수를 포함하는 칼란드리아 격실의 부품을 형성하는 다른 구성품들은 CSA-B51-M1986에 따라 설계, 제작, 검사된다.

반응도 제어기기의 압연연결 (rolled joint) 된 부분은 압력경계를 이루지 않는다. 따라서 이에 대한 ASME 또는 CSA 코드는 없으며, 압연연결 요건은 일반적으로 각 특성에 대해 개별적으로 상술된다.

4.2-3절에 있는 참고문헌 4.2-1에서 4.2-15 그리고 4.2-22에서 4.2-38은 반응도 제어기기에 적용가능한 표준문서들이다. 이문서들은 AECL에서 생산된 안전설계지침서와 기술보고서 뿐만 아니라 ASME 코드 및 여러종류의 CSA 표준문서들을 포함한다.

4.2.2.1.3 품질보증

제어기기의 신뢰성은 매우 중요하기 때문에 높은 수준의 품질관리가 보장된다. 반응도 제어기기는 약간의 부품이 교체될 수는 있지만 고도의 품질보증을 규정하고 기기의 수명을 연장하는 것에 대한 보장이 훨씬 경제적이다.

4.2.2.1.4 운전조건

레벨 A 운전조건 :

칼란드리아는 중수 감속재로 채워지고 텀블은 헬리움 감속재 상층 기체 (cover gas) 로 채워진다. 칼란드리아 내부 감속재의 운전온도는 69℃ (156.2°F) 이고 칼란드리아 동체의 상부압력은 34.5 kPa (5 psig) 이다. (다른 운

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

전조건 (레벨) 의 압력은 표 4.2-3에 있다). 칼란드리아 격실은 57℃ (135°F) 의 경수로 차 있다. 반응도 장치대 위의 상태는 38℃ (100°F) 의 대기압 건조기체 이다.

칼란드리아 내에 있는 중성자속 검출기 캡슐, 액체영역 제어기기, 액체주입 정지기기의 노즐의 압력은 감속재와 동일하며 온도는 감속재와 유사하게 된다. 수평으로 설치되어 있는 팀블 역시 이런 조건에 노출되어 있다. 수직으로 설치된 팀블은 감속재 밀봉기체의 압력을 받고있고 온도는 칼란드리아 격실의 경수 온도에 가깝다. 증기발생기실 지역인 반응도 장치대 상부에 위치하고 있는 구동장치, 수직중성자속 검출기의 연결함 (connector housing) 과 액체 독물질 주입정지계통의 접속단자는 원자로 건물 대기압 건조기체에 노출된다.

레벨 B 운전조건 :

제 2 정지계통은 감속재에 독물질용액을 주입함으로써 가동된다. 이것은 칼란드리아에서 75.2 kPa (10.9 psig) 까지 칼란드리아 격실에서는 20.7 kPa (3psig) 까지의 계산된 압력천이를 일으킨다. 천이시간은 몇초 정도이다.

레벨C 운전조건 :

압력관/칼란드리아 튜브의 동시파단시 1차 냉각재가 감속재로 방출되고 이때 칼란드리아 주 동체 (main shell)의 상부압력은 405.4 kPa (58.8 psig) 의 피이크 (peak) 압력이 발생된다. 반응도 제어기기의 팀블, 구동장치에서 도르레 구성품, 중성자속 검출기의 캡슐 그리고 영역제어기기의 집합체들에 이런 압력파로 인하여 응력이 걸린다.

설계기준지진이 반응도제어기기의 지진해석에서 고려된다. 지진관성력과 내진 고정장치의 이동효과 또한 고려된다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

원자로 모관 파손이나 주증기관 파단이 격납 건물내의 습도와 압력 상승을 초래할 것이다. 반응도 장치대 위의 구동장치와 중성자속 검출기 연결함은 이런 사고를 경험할 것이다.

냉각재 유량이 자관 (feeder) 의 입구와 출구사이 어디에선가 차단 된다면 영향받는 핵연료채널에서 핵연료가 용융될 것이다. 고온의 용융된 핵연료는 핵연료채널을 파열시키고 감속재 속으로 방출된다. 이것은 동시파단과는 달리 칼란드리아 내부에 동수력학적 천이를 발생시킨다. 그러나 이 사고시 반응도 제어기기 지역과 같이 827.4 kPa (120psig) 의 압력 스파이크 (spike) (칼란드리아 동체 상부에서) 가 발생된다. 구동장치의 내부는 차폐마개가 압력상승을 제한하기 때문에 413.7 kPa (60 psig) 의 압력만 받는다.

이런 사고의 동시 발생은 고려하지 않는다.

레벨 D 운전조건 :

유동차단의 경우 칼란드리아에서는 레벨 D 운전조건으로 간주하는데 반해 노내 반응도 제어기기는 레벨 C 운전조건으로 취급된다. 따라서 반응도 제어기기의 고장은 레벨 D 운전조건으로 고려하지 않는다.

4.2.2.1.5 설계해석

반응도 제어기기는 ASME 코드, 부 절 ND에 따라 등급 3 부품 (class 3 components) 으로 구분된다. 등급 3 부품에 대한 ASME 코드, 부 절 ND의 요구조건을 만족시키기 위해 고전적인 해석과 유한요소 해석을 병행한다.

고전적인 해석방법은 플랜지와 국부 불연속에 대하여 ASME 코드 부록에 제시된다. 이 해석방법은 반응도제어기기 하우징과 플랜지연결부에서 사용되고 설계시방서 (참고문헌 4.2-39에서 45까지) 에서 주어진 여러 운전레벨

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

(A, B, C, D) 의 1차 하중을 사용한다.

STARDYNE 코드를 사용한 유한요소 해석은 한개 절점 (node) 당 6개의 자유도를 가진 보요소로 반응도 제어기기를 모델링한다. 모든 기계적 하중, 벨로우즈의 강성도, 열 및 내진 앵커 (anchor) 의 움직임이 모델에 입력된다. 안내관의 해석에서는 예비 인장 (pre-tensioning) 효과를 고려한다.

지진해석에도 같은 보 모델이 사용되고 이 모델의 입력으로 칼란드리아와 반응도 장치대에 대한 포괄적인 층 응답 스펙트럼이 사용된다. DYNRE 4 (STARDYNE 코드의 모듈) 를 사용하여 계산된 지진응력은 정상운전시의 응력에 더해진다. 볼트의 응력해석은 고전적인 방법이 사용된다.

반응도 제어기기의 해석에 사용된 해석방법에 관한 상세한 내용은 응력보고서 (참고문헌은 4.2-46에서 52까지) 에 기술되어 있다.

4.2.2.2 반응도 장치대

4.2.2.2.1 기능

반응도 장치대는 칼란드리아 격실 본체의 일부분이다. 이것은 칼란드리아 격실 윗부분에 설치되어 격실과 증기발생기실 대기사이의 경계면을 형성하는 동시에 반응도 제어기기의 지지면을 만들어주고 기기들의 유지보수 및 교체를 위한 작업공간을 제공한다. 반응도장치대는 그림 4.1-8과 4.1-9에도 제시하였다.

반응도 장치대는 다음과 같은 기능을 수행하도록 설계된다.

가. 수직 반응도제어기기에 대한 측면을 지지한다.

나. 수직 반응도제어기기의 유지보수를 위한 작업공간을 제공한다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

- 다. 칼란드리아 격실을 막고 따라서 격실에 있는 경수와 증기 발생기실 대기 사이에 경계면을 형성한다.
- 라. 장치대 위의 장비와 서비스에 요구되는 차폐를 제공한다.
- 마. 유지 및 보수를 위하여 생물학적 차폐를 제공한다.
- 바. 제거용 플라스크와 필요에 따라 다른 플라스크 기기를 지지한다.
- 사. 칼란드리아에 있는 구성품들의 제한된 검사를 위한 통로를 제공한다.
- 아. 기동 계측장비를 칼란드리아 내부로 설치하기 위한 통로를 제공한다.
- 자. 수직 반응도제어기기에 공급되는 전선과 배관의 기계적 손상을 입지않도록 보호하고 이들을 지지 할 수 있게 설계된다.

4.2.2.2 특징

장치대 구조물은 설치시 칼란드리아 기준점에 기기를 맞추어 정렬하도록 정확하게 제 위치에 설치된 관통관과 조립된다. 이렇게 함으로 모든 반응도 제어기기들은 칼란드리아 관에 대하여 상대적으로 정확한 위치에 설치된다.

위에서 기술된 기능 외에도, 반응도 장치대는 20.41 Mg (45,000 lb) 의 반응도 장치 유지보수를 위해 필요한 플라스크 취급 하중을 견딜수 있어야 하며 이 플라스크는 오버헤드 크레인에 매달려 기동하면서 반응도 제어기기 위에 위치한다. 크레인의 정상적인 취급으로 프라스크가 장치대 위에 놓일 때 충격 하중은 3.34 g에 상당하는 충격하중을 초래한다. 이 충격하중은 영향받는 장치대 관통부로 전달되며 RCU 팀블에는 전달되지 않는다.

설치된 반응도 장치대의 구조적 건전성은 원자로 건물과 칼란드리아 격실의 압력시험에 의하여 입증될 것이다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.2.3 운전조건

가. 반응도 장치대 상부

정상조건 :

- 대 기 : 건조 공기
- 온 도 : 38℃ (100°F)
- 압 력 : 대기압
- 방사선 : 0.25 mSv/h (25 mr/h)

원자로 정지 24시간 후 :

- 방사선 : < 0.01 mSv/h (< 1 mr/h)
- 대 기 : 건조 공기
- 온 도 : 38℃ (100°F)
- 압 력 : 대기압
- 하 중 : 75.75 Mg (83.5 short tons) (하역시 작은 충격을 포함한
플라스크와 차폐체 하중)

사고조건 :

사고 시나리오에 의한 압력과 온도는 다음과 같다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

시 나 리 오	압 력 kPa(psi)	온 도 ℃(°F)
대형 LOCA	125(18.1)	125(257)
주증기관 파단 (살수 상실 포함)	400(58)	150(302)
소형 LOCA	50(7.25)	100(212)

- 대 기 : 수분 포화 공기 (Water-Saturated air)
- 기계적 하중 : 114Mg (125 short ton) 1mm (0.04 인치)에서 플라스틱의 낙하 하중이며 사고압력은 누적되지 않음.
- 범람 (flooding) : 살수계통이 작동될 때 기기대는 0.3~0.6m (1~2 feet) 깊이의 경수로 범람될 수 있다.

나. 반응도 기기대 하부

정상조건 :

- 대 기 : 질소 (N₂)
- 온 도 : 57℃ (135°F)
- 압 력 : 10.34 ± 1.38 kPa (1.5 ± 0.2 psig)
- 수 위 : 기기대 하부 0.3 m (12 in)
- 칼란드리아 격실 경수는 산소 함량을 조절하도록 처리되고 대략 pH가 약 10이 유지 되도록 한다.

사고조건 :

다음은 가상 채널 유동차단 사고시의 수치이다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

- 압력 : 138 kPa(g) (20 psig)
- 온도 : 66 °C (150 °F)
- 대기 : 습증기로 혼합된 질소

4.2.2.2.4 재질

반응도 장치대의 재질은 구조물 등급의 탄소강이다. 내부의 많은 공동이 방사선 차폐를 목적으로 콘크리트가 채워져 있고 이는 구조물의 보 (beam) 에 강도를 강화시키나 이런 조건은 보수적인 해석을 위해 설계해석시 고려되지 않는다.

4.2.2.3 안내관

4.2.2.3.1 기능

정지봉, 조절봉, 흡수봉에 대한 안내관의 기능은 텀블을 통해서 기기를 원자로 노심속으로 안내하는 것이다.

4.2.2.3.2 특징

안내관의 노심내의 부분은 지르칼로이로 만들어졌으며 상부의 노외는 (연장 안내관 (guide tube extension)이라고 부른다) 스테인레스강으로 만들어진다. 이 구성품은 반응도 기기대에서 칼란드리아 밑바닥 부분까지 연장된다. 노심내의 안내관은 감속재가 자유 유동 (free flow) 하도록 수많은 구멍이 뚫려져있다 (그림 4.1-10, 4.1-13 및 4.1-14 참조). 안내관이 칼란드리아관들 사이를 지나면서 적절한 간격을 유지하기 위해 안내관의 직진도 (straightness) 및 잔류응력을 제작의 모든 단계에서 주의깊게 검사한다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

안내관은 칼란드리아의 밑바닥에 위치한 고정자에 의해 고정되고 이 고정자는 칼란드리아 동체에 용접된 브라켓 (bracket) 안에서 자체 정렬된다. 인장하중은 안내관의 곡률을 줄이고 진동이 있는 부분의 진폭을 최소화하기 위해 가해진다. 이 인장하중은 안내관 밑부분의 압축 스프링에 의해서 가해진다.

중성자속 검출기와 액체영역제어기기는 이 형태의 안내관을 사용하지 않는다.

4.2.2.4 팀블

4.2.2.4.1 기능

팀블은 반응도제어기기를 칼란드리아로 삼입시키는 통로역할을 한다.

4.2.2.4.2 특징

수직으로 설치되는 팀블은 칼란드리아 격실을 통해서 반응도 기기대에서 칼란드리아 상부까지 연장된다. 수평으로 설치되는 팀블은 칼란드리아 격실을 통해서 차폐벽에서 부터 칼란드리아의 측면까지 연장되어 있다.

팀블이 감속재 계통 압력 경계면을 형성하고 있기 때문에 CAN3-N285.0-M81,등급 3의 요구조건을 만족하도록 설계된다.

수직 팀블의 내부 대기 (internal atmosphere) 는 감속재 밀봉기체로서 69℃ (156.2°F) 의 운전온도에서 약간의 질소, 삼중수소, 그리고 최고 50 mg/kg의 오존과 중수증기로 포화된 헬륨기체로 구성된다. 팀블의 외부는 순수 경수에 의해 차폐된다.

수평팀블의 내부는 중수로 차있다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

고준위 방사선 구역에서의 팀블 수명은 30년으로 설계된다. 사용된 재질은 이러한 외부환경에 적절한 코드 재질인 열처리된 ASME SA312 304L의 오스테나이트 스테인레스강이다. 이 관은 여러곳에 용접되므로 탄소함유량이 적은 304L 형을 선정하였다.

팀블에 가해지는 하중은 중량 혹은 여러 구성품의 자중 또는 힘, 내부 및 외부압력, 열응력, 지진하중, 그리고 원자로 구조물의 변형으로부터 발생한다. 팀블의 이 하중들에 대한 설명이 설계시방서 86-31700-DS-001, 참고문헌 4.2-39에 상세히 기술된다. 이 하중으로 인한 응력은 상세응력해석에서 설명되고 설계보고서 86-31700-SR-001, 참고문헌 4.2-46에 기술하였다. 이 문서에 기술된 설계는 등록이 수락되었다. 보수적 설계가 모든 응력이 작은것을 보증한다.

지진하중을 수용하기 위해, 허용 가능한 수준으로 수직 팀블의 처짐을 줄이도록 지진구속계통이 추가된다. 구속계통은 팀블중간 높이의 칼란드리아 격실 벽과 벽사이에서 잡아당기고 있는 격자케이블로 구성된다. 팀블은 고유진동수를 지진 주파수보다 높게하기 위해 격자로된 교차케이블로 견고하게 고정된다. 구속장치는 그림 4.2-4에 제시하였다.

칼란드리아 노즐의 특이한 이음매모양은 설치시 팀블의 정확한 정렬을 하게한다. 이것은 칼란드리아 튜브사이에 안내관이 최적위치에 설치 되도록 한다. 장치대에 유연성이 있는 벨로우즈가 팀블과 장치대 사이에서 일어나는 축방향의 열팽창을 수용할 수 있게 한다. 칼란드리아 연결부분은 CAN3 -N285.0 -M81, 등급 3의 요건에 만족하도록 설계되고, 벨로우즈 (bellows) 연결부분은 CSA-B51-M1986에 충족하도록 설계된다.

반응도 장치대 영역은 제한된 접근지역이므로 팀블의 위로 누출되는 방사선을 차폐하기 위해서 각각의 기기내부에 차폐마개 및 슬리브를 사용한다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.5 정지 기기 (Shutoff Unit)

4.2.2.5.1 기능

정지 기기의 형상, 기능 설명은 4.1.3-2절에 간략히 기술하였다. 정지기기는 그림 4.1-10에 제시하였다. 이 기기들의 위치는 그림 4.1-6에서 제시하였다.

4.2.2.5.2 특징

정지기기의 흡수체는 구동장치의 도르레에 감겨 있는 스테인레스강 케이블에 연결되어 있다. 구동장치는 수직안내관 바로 위의 반응도 장치대 상부에 설치된다.

도르레는 전자기 마찰클러치에 의해 연결된 기어가 물려있는 기어 열을 통하여 전동기에 의하여 구동된다. 클러치가 원자로정지 트립신호의 응답으로 전원이 차단되면 도르레는 풀리고 흡수체는 중력에 의해 아래로 낙하한다. 초기에 도르레가 풀릴때 흡수체 위에 있는 압축된 스프링 힘으로 흡수체가 낙하하는 순간에 가속력으로 밀어준다. 구동장치내의 회전식 오일 스너버 (snubbers)에 의해 낙하하는 흡수봉이 정지된다. 트립해제 신호를 받아 클러치에 다시 전원이 공급되면 흡수봉은 전동기의 구동에 의하여 다시 올려진다. 흡수봉의 종방향 위치는 도르레 축에 설치된 전기식 감지소자에 의하여 측정된다. 낙하 봉의 유효도는 이 감지소자 (sensors) 와 안전봉 준비지시계로 알려진 독립 소자 (independent sensor) 에 의해서 제어실에 지시된다. 이 안전봉 준비 지시계는 차폐마개를 뚫고 건정관 (dry well tube) 안에 설치된 자석화살 스위치로 구성된다. 이동 흡수체 지지봉내에 있는 자석은 안전봉이 지정된 위치에 있을때 화살 스위치를 작동시킨다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

흡수봉은 칼란드리아 내부에서 낙하하고, 내려가고 올라갈때 수직으로 설치된 구멍이 뚫린 지르코늄 합금관에 의해 안내되어 움직인다. 이 안내관은 칼란드리아 동체의 상부 주변 텀블의 밑부분에 자리잡고 있으며 칼란드리아 동체 하부의 위치 고정자에 의해 그 반대편에서 당겨져 고정된다. 칼란드리아 노즐 윗부분의 흡수체 이동은 스테인레스강으로 만들어진 연장안내관에 의해 안내된다. 연장 안내관은 칼란드리아 노즐에 용접되고 구동기기에 연결되는 텀블에 쌓여있다.

도르레와 텀블을 둘러싸고 있는 구동기기함은 중수 압력경계를 이루는 부분이고 CAN3-N285.0-M81, 등급 3에 따라 설계된다. 이들은 정상, 비상, 그리고 유동차단 조건에서 기밀을 유지하고 적절히 운전되도록 칼란드리아 내부조건을 유지하도록 요구된다. 흡수봉은 정상적인 감속제 순환상태에서 그리고 제2 정지계통의 작동으로 인한 천이 유동조건에서 자유롭게 낙하되도록 요구된다.

정지기기 구동장치 하중은 설계 시방서 86-31730-DS-001, 참고문헌 4.2-40에 구체적으로 기술된다. 이 하중으로 발생하는 응력은 설계보고서 86-31730-SR-001, 참고문헌 4.2-47의 상세 응력해석에 설명하고 있다. 이 설계 문서에 의한 설계 등록이 수락되었다.

4.2.2.5.3 기계적 하중

구동장치는 케이블로 흡수체를 지지한다. 흡수체가 상부로 이동하면서 450 N (100 lbf) 의 힘으로 스프링을 압축한다. 흡수체의 자중을 고려하면 케이블에는 약 900 N (200 lbf) 이 정상 고정위치에 작용한다. 흡수체가 고정 위치까지 끌어 올려질때 전동기 출력을 정지시키는 전기식 위치 감지소자에 의해 흡수체는 정상적으로 멈춘다. 이 기능이 제대로 수행되지 않으면 구동장치 집

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

합체내에 있는 상실 작동기계 (lost motion mechanism) 가 도르레축을 정지시킨다. 모든 구동기기에 있는 부품은 전동기 정지 토크를 견딜수 있게 되어 있다. 도르레가 풀렸을 때 흡수봉의 낙하는 스프링에 의해 가속되고, 케이블에 가해지는 장력은 케이블이 내려가는데 요구되는 작은 힘이다. 흡수체가 밑에까지 내려갔을때 도르레는 정지할 수 있도록 브레이크가 걸리고 케이블이 받는 감속하중은 약 454 kg (1000 lb) 정도이다. 흡수체는 감속재 수위가 정상수위보다 0.6 m (2 ft) 낮을 경우 칼란드리아 내부로 낙하되어서는 안된다. 왜냐하면 흡수봉, 케이블, 구동기기에 손상을 입힐 수 있기 때문이다. 다시 흡수봉을 감아 올릴 때는 저속으로 하며 이때 구동기기에 걸리는 동하중은 고려하지 않는다. 원자로 수명기간동안 총 주기수는 약 2000회이다.

텅 비어 있는 칼란드리아에 흡수봉이 낙하하면 과도한 감속하중이 발생할 수 있다. 칼란드리아가 부분적으로 비어 있을때 케이블하중은 635 kg (1400 lb) 정도이다. 새 케이블의 파단강도는 1678 kg (3700 lb) 이다. 따라서 흡수체가 부분적으로 빈 칼란드리아에서 낙하할때 케이블 파단을 방지하기 위하여 케이블 강도에 여유가 있어야 한다. 그러나 이러한 사고시 흡수체, 케이블 및 구동장치에 파손이 있는지 완전히 검사해야 한다.

중량 (Weight)

구동기기의 중량은 131.5 kg (290 lb) 이다. 중량은 지진하중으로 인한 압축, 전단, 굽힘하중과 함께 팀블 플랜지위에 걸린다.

외부하중 (External Loads)

구동기기는 팀블 플랜지에 의해 지지되고 다른 기기에는 연결되지

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

않는다. 전선 (electrical cable) 또는 6 mm (0.25 인치) 직경의 환기배관으로 인한 하중들은 무시 될수 있다.

4.2.2.5.4 재질

주조물에 대한 코드재질은 오스테나이트 스테인레스 강이다. 물속에 잠기는 다른 부품은 300 및 400 계열의 스테인레스강이다. 300 계열 강철은 열풀림 처리하여 사용하고 400 계열은 응력부식을 제거하기 위해 경도를 낮게 유지한다. 축 밀봉의 얇은 단면은 부식방지를 위하여 열풀림 처리한 (annealed) 하스텔로이 C (Hastelloy C) 를 사용하였다. 코드 조임쇠는 카드뮴으로 도금된 합금강이다.

스테인레스강 부품은 부식저항을 높이기 위하여 기계적인 표면 가공이후 부동태(Passivated) 가 된다.

정지봉은 2개의 스테인레스강관 사이에 카드뮴을 넣고 시임 용접 (seam welding)으로 봉인되어 있다. 이것은 카드뮴의 물리적 성질이 부식에 취약하기 때문이다. 카드뮴은 적절한 비용의 높은 중성자 흡수체이다. 카드뮴 두께는 중성자를 완전히 흡수할 수 있는 두께의 3배 정도이다. 그리고 이것은 가공과정 동안 쉽게 취급할 수 있고 원자로 수명동안 흡수체를 다시 교환시킬 필요가 없도록 연소도를 허용하는 두께이다.

4.2.2.6 액체 영역 제어기기

4.2.2.6.1 기능

액체 영역 제어기기는 원자로의 14개 영역중의 어떤 한개의 영역에서 중성자속 준위를 조절하는데 사용된다. 이것은 국부적인 중성자 흡수를

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

제어하기 위해 한 영역에서 경수의 일정한 흐름을 막고 유입량을 조절함으로써 이루어진다. 작동 명령 신호는 반응도 장치대 주위에 위치하고 있는 밸브제어실의 한 제어용 컴퓨터에서 받아들여진다. 액체 영역 제어기기는 피커링, 부루스, 달링톤 및 월성 1호기 발전소의 것과 유사하다.

4.2.2.6.2 특징

원자로에는 수직방향으로 설치된 6개의 영역 제어기기가 있다. 원자로 축방향의 중심선을 따라 위치한 2개의 영역 제어기들은 각각 3개의 격실로 구성되는 반면 이 중심선의 양쪽으로 설치된 4개의 영역 제어기들은 각각 2개의 격실로 구성된다 (그림 4.1-6과 그림 4.1-11). 각 격실은 4개의 관으로 되어 있다. 2개의 관은 물의 유입과 유출의 통로로 사용되고, 1개의 관은 헬륨 기체의 유입/유출용으로 그리고 다른 1개의 관은 버블러 (bubbler) 형으로 영역 수준 측정을 하는데 사용된다.

영역 제어기의 구조 설계에 사용된 기준은 다음과 같다.

- 가. 등급 3 용기에 대한 설계 요구조건은 CAN3-N285.0-M81에 주어진다.
- 나. 설계에 사용된 온도는 운전조건하에서 고려되어야 할 부분의 예상되는 평균금속 온도 (두께를 통한) 보다 낮아서는 안된다.
- 다. 용기는 정상운전에서 기대되는, 적어도 가장 나쁜 조건의 온도와 압력으로 설계 되어야 한다. 이러한 조건을 위하여 용기의 내부 및 외부의 최대 압력차이를 고려해야 한다.

설계 조건에서의 모든 응력은 비교적 낮다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

액체 영역 제어기기는 그림 4.1-12에 제시하였다. 압력경계는 그림 4.2-5에 제시하였다. 그림 4.2-6은 영역 제어기기에 작용하는 여러 형태의 하중들을 보여준다. 이 하중은 설계시방서 86-31751-DS-001, 참고문헌 4.2-43에서 상세히 기술된다. 이 기계적 하중으로 발생하는 응력은 상세 응력해석에서 계산되고 설계보고서 86-31751-SR-001, 참고문헌 4.2-50에 기술되었다. 이 설계 문서에 의해 기술된 설계는 등록이 수락되었다.

4.2.2.6.3 재질

원자로내 영역제어기기의 모든 구성품들은 지르코늄 합금강으로 만들어진다.

4.2.2.7 조절 기기 (Ajuster Units)

4.2.2.7.1 기능

조절 기기는 원자로의 조절계통 (regulating system)의 일부분이다. 조절 기기의 목적은 원자로 출력과 핵연료 연소도를 최적화하기 위해 중성자속의 분포모양을 조절한다. 원자로 속으로 모든 조절 기기가 완전히 삽입될때 전출력을 낼 수 있도록 원자로가 설계된다. 조절 기기 구성요소는 스테인레스강 케이블에 매달려 있고 구동 기기를 사용하여 원자로 노심안으로 강하, 상승 또는 정지시킬 수 있다.

조절 기기는 그림 4.2-7에 제시하였다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.7.2 특징

조절 기기의 흡수체는 중심부에 스테인레스강 흡수봉을 가진 얇은 벽면 스테인레스강관으로 구성되어 있다. 각 흡수체는 최적의 중성자흡수 특성을 제공하기 위하여 길이에 따라 유효두께가 다르다.

칼란드리아 내부에서 상하로 움직이는 흡수체의 이동은 구멍이 뚫려있는 안내관내에서 이루어진다. 안내관은 안내관 고정자 스프링에 의하여 인장력을 받는다. 칼란드리아 외부에서의 흡수체의 이동은 스테인레스강으로 만들어진 안내관 연장부분에서 이루어진다.

흡수체는 구동 기기의 도르래에 감겨져 있는 스테인레스강 케이블에 매달려 있다. 칼란드리아 압력용기의 경계면을 형성하기 위하여 축 밀봉은 케이블 도르래함을 분리시킨다.

흡수체는 제어컴퓨터 또는 주제어반 수동제어지시에 따라서 전동기 힘으로 작동되는 구동 기기에 의하여 위치가 결정된다. 흡수체의 수직위치는 구동 기기의 도르래축에 있는 전기식 감지 소자에 의하여 계측된다. 이동거리는 구동 기기내에 있는 기계적인 축 정지 기기 (mechanical shaft-stop) 로 제한된다. 구동 기기는 팀블의 상단부에서는 볼트로 고정되어 있고 팀블의 하단부는 칼란드리아 노즐에 용접되어 있다.

팀블과 도르래함은 감속제 헬륨 밀봉기체로 채워져있고 따라서 칼란드리아 압력경계 부분이다. 이들은 정상 및 비 정상압력에서 누설되지 않도록 하고 적절히 운전되도록 칼란드리아 내부조건을 유지하도록 요구된다. 압력 경계면은 그림 4.2-8에 제시하였다.

증기발생기실의 반응도 장치대 위에 설치된 구동장치는 건조한 공기이며 대기압 상태이다.

조절 기기의 구동장치 하중은 설계 시방서 86-31782-DS-001, 참고

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

문헌 4.2-45에서 상세히 기술된다. 이 하중으로 인한 응력은 설계보고서 86-31782-SR-001, 참고문헌 4.2-52의 상세 설계해석에 기술된다. 이러한 설계문서에 의해 기술된 설계가 등록이 수락되었다.

4.2.2.7.3 재질

압력경계면을 형성하는 구조물은 고 순도의 오스테나이트 스테인레스강의 구조이다. 물에 잠기는 칼관드리아 부분과 접촉하지 않는 다른 구조물은 회색 주철이다. 코드 조임쇠는 카드늄으로 도금된 합금강이다. 안내관은 지르칼로이-2이다.

기계적인 축밀봉은 도르래함과 기어함을 분리시킨다. 얇은 벨로우즈 부분은 부식 저항을 위하여 열처리된 하스텔로이 C로 만들어졌다.

열처리된 모든 부품들은 방사선 및 염색침투시험된다. 집합체는 제조, 출하전에 유동차단압의 1.25배의 공기압으로 시험된다.

4.2.2.8 기계적 제어흡수봉 (Mechanical Control Absorbers)

4.2.2.8.1 기능

제어흡수봉기기는 영역제어기기의 반응도율보다 더 큰 제어를 요구할 때에만 원자로내로 삽입된다. 예를 들어 원자로 출력 준위를 신속하게 줄이고자 할때 이 기기는 전동기 구동기기에 의해서 또는 클러치를 풀어서 중력낙하에 의해 삽입될 수 있다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.8.2 특징

제어흡수봉 기기의 설계는 흡수봉기기에 봉 준비지시계와 가속 스프링이 없는 것을 제외하고 정지기기 (4.2.2.5절을 참고) 와 동일하며 흡수봉 밑에 한개의 오리피스스가 있다.

이 기기의 운전은 정지기기의 작동과 유사하다. 흡수봉이 반응도의 신속한 변화를 요구할 때 부분적으로 또는 완전히 낙하시킬 수 있지만 정상적으로는 전동기에 의해 강하한다. 전동기에는 가변주파수가 공급되어 흡수봉을 여러 속도로 구동할 수 있다. 흡수봉을 최대속도로 운전할 수 있게 우회보조공급 (bypass backup supply) 을 할 수 있게 되어있다. 낙하할때 흡수봉제어기기의 삽입속도는 가속 스프링이 없고 밑부분에 오리피스판이 있어서 정지봉기기의 삽입속도보다 느리다.

제어흡수봉기기의 구동장치는 정지기기의 구동장치와 동일하기 때문에 이 장치에 작용하는 하중은 정지기기의 설계시방서 86-31730-DS-001, 참고 문헌 4.2-40에서 상세히 설명된다. 이 하중으로 인한 응력은 설계보고서 86-31730-SR-001, 참고문헌 4.2-47의 상세응력해석에 기술한다. 이러한 문서에 의해 기술된 설계는 등록이 수락되었다.

4.2.2.8.3 재질

정지봉기기와 제어흡수봉기기의 설계가 근본적으로 같기 때문에 운전조건, 제작시 사용한 재질, 설계 및 운전하중은 정지기기와 유사하다.

4.2.2.9 수직 중성자속 검출기

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

4.2.2.9.1 기능

수직 중성자속 검출기기는 원자로의 반응도 제어계통과 제1 정지계통에 신호를 제공한다. 이것은 원자로내에 중성자속과 비례하는 전류를 자체 발생시키는 힐본 (Hilborn)형 검출기를 사용한다. 이 전류신호는 원자로제어 또는 제 1정지계통의 증폭기에 전달되어지고 그 다음에 원자로제어 컴퓨터 또는 정지계통 트립기기에 전달된다.

4.2.2.9.2 특징

이 검출기는 26개가 있으며 각 기기는 기본적으로 중성자속 검출기 집합체, 안내관 집합체 (안내관에 장력을 가해주는 기기포함) 텀블 그리고 반응도 기기대 관통부품을 포함한다. 수직 중성자속 검출기는 HESIR (hybrid encapsulated straight individually replaceable)형이다. 그림 4.1-15는 중요한 특징을 보여준다.

검출기가 손상되거나 성능이 떨어지면 출력을 감소시킨 상태에서 연결함 덮개를 열고 예비용 검출기를 비어 있는 관 속으로 신속히 넣어 손상된 검출기 자리에 연결될 수 있다. 덮개를 교환하고 나서 밸브를 통해 제공되는 휴대용 헬륨으로 집합체를 청소한다. 손상된 검출기는 원자로 정지때까지 남겨 두었다가 나중에 측정기기 집합체가 다시 재개봉될때 차폐된 플라스크로 떨어져 제거된다. 그 다음에 집합체를 닫고 청소한다.

중성자속검출기 집합체는 캡슐관을 포함하며 순수 헬륨으로 채우고 밀봉할 수 있도록 공장에서 조립된다. 이렇게 함으로써 오염으로 인한 가능한 부식을 최대한 방지할 수 있다.

칼란드리아 내부의 운전온도와 압력은 칼란드리아 상부에서 각각 69 °C(156.2°F) 및 34.5 kPa (5 psig) 이다.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

정상운전 조건의 칼란드리아 외부 즉 반응도기기대 위의 상태는 38℃ (100 °F)의 건조한 공기이며 대기압 이다.

팀블, 캡슐, 연결함 (connector housing) 은 칼란드리아 압력경계를 형성하는 부품들이고 CAN3-N285.0-M81, 등급 3 에 따라서 설계, 제작, 등록된 다.

모든 압력 유지부품들은 모든조건하에 칼란드리아 격실과 칼란드리아 압력에 견디게 설계되고 시험된다. 압력, 온도, 팽창주기등 실제값은 관련 설계문서에 상술된다. 이 검출기의 운전온도는 대략 180℃ (356°F) 이다. 검출기 캡슐관 외부는 헬륨 기체와 접하고 내부 또한 99%의 순수 헬륨기체로 채워져 있다.

수직중성자속 검출기에 작용하는 하중은 설계시방서 86-31743-DS-001, 참고문헌 4.2-41에 상세히 기술된다. 이런 하중으로 발생된 응력은 설계보고서 86-31743-SR-001, 참고문헌 4.2-48의 상세응력해석에 기술된다. 이러한 문서에 의해 기술된 설계는 등록이 수락되었다.

4.2.2.9.3 재 질

중수 감속재와 접하고 있는 모든 재질은 지르칼로이-2이다.

4.2.2.10 수평중성자속 검출기 (Horizontal Flux Detector Units)

4.2.2.10.1 기 능

7개의 수평중성자속 검출기는 제2정지 계통의 일부분을 이룬다. 그들은 원자로 안에 중성자속과 비례하는 전류를 자체 발생시키는 힐본 (Hilbon) 형 검출기를 사용한다. 이 전류신호는 제2정지계통의 증폭기에 전달되

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

고 거기서 이 신호는 3개의 전기채널중 2개가 고중성자 트립 설정점을 초과하는 출력을 감지하면 원자로를 정지시키기 위해 고준위 트립 설정점 (high level trip setpoint) 과 비교되고 조절된다.

4.2.2.10.2 특 징

수평 중성자속 검출기는 그림 4.1.-16에서 보여주며 그들의 위치는 그림 4.1.7에 있다. 수평 중성자속 검출기는 다음과 같은 주요 부품으로 이루어진다.

- 가. 팀블집합체 ; 안내관의 통로로 제공하기 위해 칼란드리아 격실과 차폐벽을 통하여 칼란드리아 노즐에 용접된 관
- 나. 격실 밀봉 ; 격실벽 슬리브와 차폐벽 사이를 밀봉한다.
- 다. 보호덮개 ; 손상을 방지하기 위해 차폐벽 외부의 부품을 둘러싸고 있다.
- 라. 안내관 집합체 ; 중성자속 검출기 집합체에 건조한 공간을 제공하기 위해 칼란드리아 동체 옆면에 고정시키고 팀블을 통해 지나간다 안내관, 집합체는 스테인레스강으로 만들어진 부분과 지르칼로이로 만들어진 부분의 압연 연결된 비압력 경계를 포함한다.
- 마. 위치 고정자 ; 안내관의 교체를 용이하게 하기 위해 깔대기가 붙어있고 칼란드리아 동체에 안내관을 고정시킨다.
- 바. 중성자속 검출기 집합체 ; 연결함에 의해 단혀있는 밀봉된 캡슐에 둘러싸인 검출기로 11개의 세관 뭉치(small tubes)를 갖고 있다. 12번째 세관은 이동용 중성자속 검출기를 위한 것이다.

팀블, 캡슐 그리고 연결함과 중수 벨로우즈는 칼란드리아 압력용

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

기 경계이고 CAN3-N28.50-M81, 등급 3에 따라서 설계, 제작, 등록된다.

설계시방서 86-31747-DS-001, 참고문헌 4.2-42는 수평중성자속 검출기에 작용하는 하중을 기술한다. 이것은 설계보고서 86-31747-SR-001, 참고문헌 4.2-49의 상세 응력해석에 보고된다. 이러한 문서에 의해 기술된 설계는 등록이 수락되었다.

4.2.2.10.3 재 질

캡슐, 검출관 (detector well) 안내관은 지르칼로이-2로 만들어지고 다른 주요 구성품들은 스테인레스강으로 만들어진다.

4.2.2.11 액체 독물질 주입 정지기기 (Liquid Injection Shutdown Units)

4.2.2.11.1 기 능

액체 독물질 주입 정지기기는 원자로를 정지시키기 위해 칼란드리아 중수 감속재에 중성자를 흡수하는 질산 가돌리늄 용액을 직접 주입하는 제2 정지계통의 한 부분이다. 이 용액의 주입은 제 2정지계통에 의해서만 작동된다. 이 계통은 제 1정지계통과 비교할 만한 원자로 정지능력을 가지고 있지만 트립 설정점이 정상적으로 제 1정지계통이 먼저 작동하도록 되어있다. 독물질 주입 정지기기의 위치는 그림 4.1-7에서 보여주고 있고, 전형적인 기기의 단면도는 그림 4.1-7에 제시되었다.

4.2.2.11.2 특 징

독물질 주입 정지계통은 6개의 노심내 주입 노즐관을 포함하고 텀블과 격실벽 관통집합체를 각각 포함한다. 각 노즐관은 질산 가돌리늄을 저장한

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

분리되어 있는 압력용기와 연결된다. 이 6개의 압력용기 (독물질 탱크) 는 원자로 격실 바깥쪽의 출입허용지역에 위치하고 있으며 CAN3-N285.0-M81, 등급 1에 따라 설계, 제작 된다.

일정한 압력하에 있는 헬륨은 3쌍의 채널로 구성된 급속개방 밸브 (quick-opening valve) 에 의해 독물질 탱크와 분리시킨 단일 압력용기에 저장되어있다. 밸브가 정지신호에 의하여 개방될때 헬륨은 독물질 탱크를 가압시키고 그리고 독물질은 주입노즐에 보내져 중수 감속재 속으로 주입된다. 각 독물질 탱크내에 있는 고체 폴리에틸렌 불은 독물질이 탱크로 부터 빠져 나왔을때 역지밸브 (check valve)로 작용하고 따라서 이것은 칼란드리아 내부의 압력상승이 칼란드리아 과압보호판의 방출압력을 초과하지 않도록 보장해 준다. 각 독물질 탱크는 한개의 노즐에 연결되어 독물질을 공급한다.

벨로우즈 집합체는 중수 감속재와 칼란드리아 격실의 경수를 유연성있게 밀봉한다. 또한 이것은 처짐을 줄이기 위하여 주입 노즐관에 인장력을 가해 잡고 있다. 프리즈 재킷 (freeze jacket) 은 벨로우즈 집합체의 구성요소이며 벨로우즈, 전도도 탐지기, 고립 불 밸브의 수리를 용이하게 한다.

주입 노즐관은 입구 주입관과 나사식으로 연결되어 있으며 칼란드리아의 반대편에 있는 위치고정자에 연결된다. 각 노즐에는 지름 3.175 mm (1/8 inch) 의 336개 구멍이 있다. 이 구멍들은 4열 (Four rows) 로 되어있고 보다 빠른 제트분사를 하기 위해 칼란드리아 관을 지나서 제트가 방향을 갖도록 무리를 이루고 있다. 이 노즐은 부 반응도의 변화율이 최대가 되도록 하기 위해 구멍의 열이 방향을 갖도록 설치한다.

액체 독물질 주입 정지기기에 작용하는 하중은 설계시방서 86-31760-DS-001, 참고문헌 4.2-44에서 기술된다. 설계보고서 86-31760-SR-001, 참고문헌 4.2-51에서는 이런 하중으로 발생한 응력에 대하여 기술된다. 이러한 문서에

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

의해 기술된 설계는 등록이 수락되었다.

4.2.2.11.3 재 질

벨로우즈 재질은 인코넬 600 또는 T321 스테인레스강이고 텀블과 벨로우즈 집합체의 다른 부품의 재질은 304L형 스테인레스강이다. 주입 노즐관은 지르칼로이-2로 만들어진다.

4.2.2.12 전리함 기기 (Ion Chamber Units)

4.2.2.12.1 기 능

전리함 기기는 칼란드리아 동체의 바깥에 장착되어 있는 납으로 차폐된 하우징으로 구성 되어있고 이 하우징안에 전리함 기기와 교정 서터가 설치되어 있다. 전리함이 중성자속을 본래대로 측정할 수 있도록 납이 감마 방사선을 약화시킨다. 독립된 전리함 기기로 부터 출력으로 나온 전류는 원자로 조절계통과 정지계통에 증폭되어 입력으로 제공된다 (그림4.1-7과 4.1-18 참조).

4.2.2.12.2 특 징

6개의 하우징이 각 옆면에 3개씩 칼란드리아 동체의 외부에 수평으로 장착된다. 각 하우징은 하나 또는 두개의 전리함기기, 시험서터, 기동계측기를 수용하는 3개의 공동을 포함한다.

원자로의 접근 가능한 "D" 방향 (원자로 건물 출입문과 근접한)에 설치된 전리함은 제 2정지 계통에 신호를 제공하는 반면 접근할 수 없는 "B" 방향쪽에 설치된 전리함은 원자로 조절계통에 신호를 제공하고, 그 쪽에 다른 계측기들은 제 1정지계통에 입력을 제공한다. 통로관은 격실벽 외부의 연결함에 계

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

측기들을 연결하기 위해 격실 벽의 관통부를 통과한다.

칼란드리아 격실의 경수와 대기에서 압력경계면을 형성하는 모든 부품들은 CSA-B51-1986의 요구를 만족시키도록 설계, 제조, 검사된다. 압력, 온도, 팽창주기등에 대한 실제적인 값은 관련 설계 문서에 상술된다.

마운팅 (mounting) 은 2세트로 되어있는 세개의 부집합체와 관련된 하드웨어, 하우징, 통로관, 그리고 벽 관통 부품으로 구성된다. 이것은 용축된 습기가 하우징에서 배출되도록 약간 경사지게 설치하였다.

계측기들이 감마선속에 비해 중성자속을 많이 측정하게 하고 이 중성자속이 외부의 영향에 의하지 않고 정확하게 원자로 출력을 반영하도록 하는것이 중요한 요구조건이다. 따라서 다음과 같은 요구조건이 고려된다.

- 가. 하우징내의 납의 기하학적인 배열
- 나. 납을 주입할때 비틀림을 최소화하기 위해 좋은 고정체로써 작은 체적의 스테인레스강을 사용
- 다. 칼란드리아 동체와 하우징 사이에 최소의 물 간격 (water gap), 반면에 적절한 냉각을 제공
- 라. 2차적인 감마선 방출을 줄이기 위해 화학적으로 고순도의 납과 알루미늄 사용
- 마. 열팽창을 수용하고 또한 경수의 밀봉을 위해 집합체간에 적당한 유연성 고려
- 바. 칼란드리아 격실을 배수시키지 않고 벨로우즈에 용접 보수하는 방법을 고려
- 사. 지진하중을 견디도록 전체의 설치과정에 신축성 고려
- 아. 기계적인 손상을 방지하기 위해 칼란드리아 격실 관통부 주위에 적절한 보호기기를 설치

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

차폐벽 관통부의 누출물 수리를 위하여 얼음 마개(ice plug)가 형성 되도록 액체질소를 냉동코일속으로 주입한다. 그 다음 용접에 의해서 누출이 수리될 수 있다. $110 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($6.7 \text{ in}^3/\text{s}$)의 누출이 시험기 작동중 40분 이내에 얼음 마개에 의해 정지되었다.

전리함은 원자로 정지 1주일 후 양옆면에 차폐벽 밖으로 안전하게 뽑아낼 수 있다. 이것은 이 기기의 제작 및 설치 과정동안 큰 문제가 없음을 보여준다.

하나의 원통을 제외하고 전리함 하우징 집합체의 내부부품은 움직이는 부품이 없고, 물이 새지 않도록 보장하는것 이외에는 보수유지할 필요가 없다. 그리고 시운전이나 사전 가동시험이 요구되지 않는다.

4.2.2.12.3 재 질

전리함의 제작에 여러종류의 재질이 사용되어 각각의 특정한 요구조건에 따라 최적화 시켰다. 주요 하우징은 ASTM B240에 따른 304L형 스테인레스강을 사용하였고 통로관은 ASTM B241과 B209를 적용한 알루미늄을 사용하고 차폐 마개도 알루미늄이다. 하우징 내부는 제조과정 중에 납을 채워 만든다.

이동 형 서터는 A.R Brooks와 Perkins사에 의해 제작된 보랄(boral) 특허 합금으로 만든다. 이것은 알루미늄이 모재료이고 여기에 붕소 탄화물을 분산시켜 만들고 알루미늄으로 피복을 입혔다.

4.2.3 참고 문헌

- 4.2-1. American Society of Mechanical Engineers (ASME), Boiler and Pressure Vessel Code, 1989 Edition with 1989 Addenda.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

- 4.2-2. CAN3-N285.0-M81, General Requirements for Pressure-Retaining Systems and Components in CANDU Nuclear Power Plants, 1981.
- 4.2-3. CAN3-N285.1-M81, Requirements for Class 1, 2 and 3 Pressure Retaining Systems and Components in CANDU Nuclear Power Plants, 1981.
- 4.2-4. CAN/CSA-N285.2-M89 Requirements for Class 1C, 2C and 3C Pressure Retaining Components and Supports in CANDU Nuclear Power Plants, 1989.
- 4.2-5. CAN/CSA-N285.6, Series-88, Materials Standards for Reactor Components for CANDU Nuclear Power Plants, 1988.
- 4.2-6. CAN3-N286.0-82, Quality Assurance Program Requirements for Nuclear Power Plants, 1982.
- 4.2-7. CAN3-N286.1-84, Procurement Quality Assurance for Nuclear Power Plants, 1984.
- 4.2-8. CAN3-N286.2-86, Design Quality Assurance for Nuclear Power Plants, 1986.
- 4.2-9. CAN3-N286.3-83, Construction Quality Assurance for Nuclear Power Plants, 1983.
- 4.2-10. CAN3-Z299.1-85, Quality Assurance Program, Category 1, 1985.
- 4.2-11. 86-03650-SDG-001, Safety Related Systems, Rev. 2.
- 4.2-12. 86-03650-SDG-002, Seismic Qualification, Rev. 2.
- 4.2-13. 86-03650-SDG-006, Containment Extension, Rev. 2.
- 4.2-14. Design Guide 86-01041-DG-0001, Design Earthquakes, Rev. 2.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

개정 1

1996. 7

- 4.2-15. 86-03640-PIP-001, Wolsong 2 Periodic Inspection Program, Rev. 3.
- 4.2-16. AECL Specification 86-31200-TS-006, Fabrication of the Calandria Assembly, Rev. 2.
- 4.2-17. 86-31200-DS-001, Design Specification for Calandria Assembly, Wolsong 2,3 & 4, Rev. 1.
- 4.2-18. Design Report for Calandria Vessel, Project 79, Generating Station, Unit 1, Report No. 79-31200-130.
- 4.2-19. 86-31200-SR-001, Design Report for Calandria Assembly, Wolsong 2,3 & 4, Rev.1.
- 4.2-20. 86-31231-TS-001, Calandria and End Shields, Calandria Tube Assemblies, Calandria Tube Manufacture, Rev. 0.
- 4.2-21. 86-31281-TS-001, Fabrication of the Calandria Rupture Disc Assemblies, Rev. 0.
- 4.2-22. XX-31700-TS-010, Bellows for Horizontal Flux Detector Units, Liquid Injection SDS and Horiz Ion Chambers, Rev. 6.
- 4.2-23. XX-31700-TS-005, Stainless Steel Tubing for Thimble Construction, Rev. 6.
- 4.2-24. XX-31700-TS-007, Thimbles and Associated Components, Rev. 4.
- 4.2-25. XX-31700-TS-008, Guide Tube Assemblies and Components, Rev. 3.
- 4.2-26. XX-31700-TS-009, Vertical Reactivity Control Unit Bellows, Rev. 4.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

- 4.2-27. XX-31700-TS-014, Seam Welded Zircaloy-2 Tubes for Control Rods, Rev. 2.
- 4.2-28. XX-31710-TS-001, Reactivity Mechanism Deck, Rev. 5.
- 4.2-29. XX-31731-TS-002, Shut-off Absorber Rod and Control Absorber Rod, Rev. 3.
- 4.2-30. XX-31732-TS-003, Reactivity Mechanisms Shut-off Unit Drive Mechanism, Rev. 4.
- 4.2-31. XX-31732-TS-004, Acceptance Testing for Shut-off Mechanism, Rev. 4.
- 4.2-32. XX-31740-TS-003, Hybrid Encapsulated Straight Individually Replaceable (HESIR) Flux Detector Assembly, Rev. 1.
- 4.2-33. XX-31751-TS-001, Liquid Zone Control Assemblies, Rev. 6.
- 4.2-34. XX-31761-TS-005, Annealed Zircaloy-2 Seamless Tubing for Liquid Injection Nozzle Assembly, Rev. 2.
- 4.2-35. XX-31761-TS-006, Liquid Injection Shutdown System Injection Nozzles, Rev. 1.
- 4.2-36. XX-31782-TS-003, Adjuster Drive Mechanism, Rev. 6.
- 4.2-37. XX-31782-TS-004, Adjuster Drive Mechanism Acceptance Test Specification, Rev. 3.
- 4.2-38. XX-31791-TS-001, Ion Chamber Housing, Mountings and Internal Parts, Rev. 3.
- 4.2-39. 86-31700-DS-001, Reactivity Mechanisms Thimbles, Rev. 1, Sept. 93.
- 4.2-40. 86-31730-DS-001, Design Specification for Shut off and Control

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

- Absorber Drive Mechanisms and Rod Ready Indicator, Rev.O,
April 94.
- 4.2-41. 86-31743-DS-001, Design Specification for Vertical Flux Detector Assemblies (HESIR), Rev. 1, sept. 93
- 4.2-42. 86-31747-DS-001, Design Specification for Horizontal Flux Detector Assemblies (HESIR) and Guide Tube Outer End Fitting, Rev. 1, Sept. 93.
- 4.2-43. 86-31751-DS-001, Zone Control Assemblies, Rev. 2, June 94.
- 4.2-44. 86-31760-DS-001, Liquid Injection Shutdown Units, Rev. 1, Jan. 94.
- 4.2-45. 86-31782-DS-001, Design Specification for Adjuster Drive Mechanism, Rev. 1, May 94.
- 4.2-46. 86-31700-SR-001, Reactivity Control Unit thimbles, Rev. 1, March 1994.
- 4.2-47. 86-31730-SR-001, Shutoff and Control Absorber Drive Mechanism and Rod Ready Indicator, Rev. 0, April 1994.
- 4.2-48. 86-31743-SR-001, Vertical Flux Detector Assemblies, Rev. 1, March 1994.
- 4.2-49. 86-31747-SR-001, Horizontal Flux Detector Assemblies and Guide Tube Outer End Fitting, Rev. 1, November 1993.
- 4.2-50. 86-31751-SR-001, Zone Control Assemblies, Rev. 3, June 1994.
- 4.2-51. 86-31760-SR-001, Liquid Injection Shutdown Units, Rev. 1, March 1994.
- 4.2-52. 86-31782-SR-001, Adjuster Drive Mechanisms, Rev. 1, May 1994.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

표 4.2-1

여러가동 조건에 대한 칼란드리아 집합체의 하중조합

하 중	설 계 및 가 동 조 건					
	설 계	레 벨A	레 벨B	레 벨C	레 벨D*	시 험
I. 압력						
가. 칼란드리아	X	X	X	X	X	X
나. 격실	X	X	X	X		X
다. 종단차폐체	X	X	X	X	X	X
II. 온도						
열하중		X	X			
III. 기계적 하중						
1. 첨가 하중	X	X	X	X		X
가. 반응도 제어기기	X	X	X	X		X
나. 핵연료채널	X	X	X	X		X
다. 종단이음	X	X	X	X		X
라. 배관	X	X	X	X		X
마. 핵연료교환기	X	X	X	X		
2. 자중	X	X	X	X		X
3. 가터 스프링하중	X	X	X	X		X
4. 부력	X	X	X	X		X
5. 지지대 반력	X	X	X	X		X
6. 국부하중		X	X	X		X
가. 응력집중		X	X	X		X
나. 간섭		X	X	X		X
다. 정렬 결함		X	X	X		X
IV. 지진				X		

* 비선형 해석이 레벨 D 붕괴하중을 확인하기 위해 수행되었다.

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

표 4.2-2(A)

허용 응력강도 한계치, 레벨 A 및 B 운전조건**-용기 및 부품

응력범주*	기초응력 강도한계	허 용 응 력 강 도 (psi)				
		오스테 나이트강 304L(149℃ (300°F)까지)	지 르 칼 로 이 -2			
			20℃ (68°F)	93℃ (200°F)	107℃ (225°F)	127℃ (260°F)
P_m	S_m	115.14(16,700)	137.89 (20,000)	111.69 (16,200)	109.62 (15,900)	103.42 (15,000)
P_L	$1.5 S_m$	172.71(25,050)	206.84 (30,000)	167.54 (24,300)	164.44 (23,850)	155.13 (22,500)
$P' = P_L + P_b$ or $P_m + P_b$	$1.5 S_m$	172.71(25,050)	206.84 (30,000)	167.54 (24,300)	164.44 (23,850)	155.13 (22,500)
S	$3 S_m$	345.43(50,100)	413.68 (60,000)	335.08 (48,600)	328.87 (47,700)	310.26 (45,000)
Q'	$3 S_m$	345.43(50,100)	413.68 (60,000)	335.08 (48,600)	328.87 (47,700)	310.26 (45,000)

레벨 A 및 B 운전 조건**-지지대

응력 범주	오스테나이트 스테인레스강 304L(149℃ 까지(300°F))	
	응력강도식	응력강도 MPa (psi)
P_m	S_m	115.14(16,700)
$P_m + P_b$	$1.5S_m$	172.71(25,050)

* 4.2.1.4 절 참조.

** 4.2.1.4.2 및 4.2.1.4.3 절 참조.

월성 3.4 호기 최종안전성분석보고서

표 4.2-2 (B)

허용응력강도 한계치, 레벨 C 운전조건**-용기 및 부품

응력범주*	기 초 응 력 강 도 한 계	허 용 응 력 강 도 MPa (psi)	
		오스테나이트강 304L 149℃(300. F)까지	지르칼로이-2 127℃ (260. F)에서
P_m	1.2 S_m 또는 S_y	1.2 S_m = 138.17 (20,040)	S_y = 237.86 (34,500)
P_L	1.8 S_m 또는 1.5 S_y	1.8 S_m = 207.25 (30,060)	1.5 S_y = 356.45 (51,700)
P'	1.8 S_m 또는 1.5 S_y	1.8 S_m = 207.25 (30,060)	1.5 S_y = 356.45 (51,700)

레벨 C 운전조건**-지지대

응력범주*	오스테나이트 스테인레스강 304L(149℃ (300°F) 까지)	
	응력강도식	응력강도 MPa(psi)
P_m	1.5 S_m or 0.7 S_u ***	172.71(25,050)
$P_m + P_b$	2.25 S_m or 0.7 S_u ***	259.06(37,575)

* 4.2.1.4 절 참조.

** 4.2.1.4.4 절 참조.

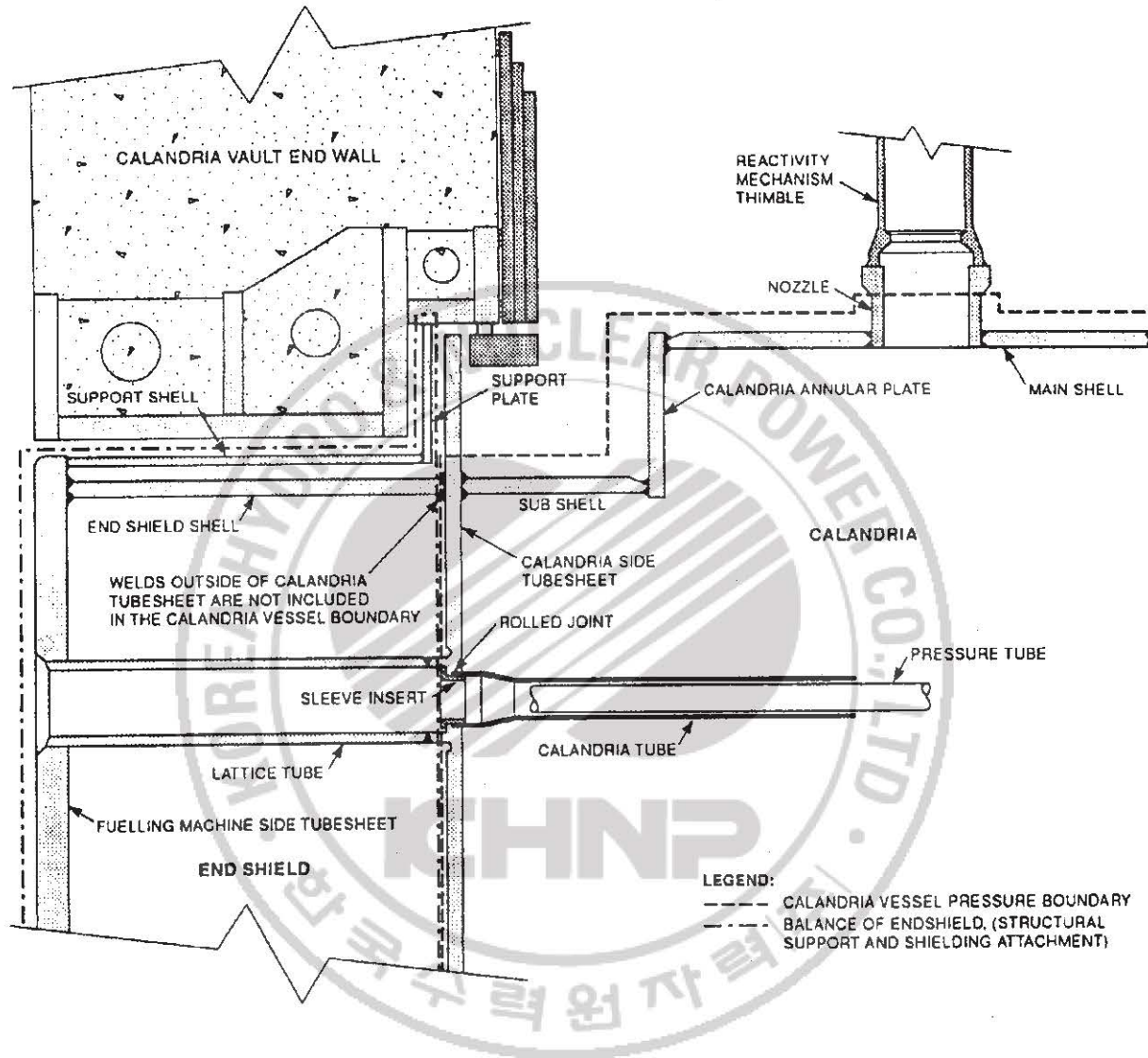
*** 낮은값 선택

월성 3,4 호기 최종안전성분석보고서

표 4.2-3

반응도 조절기기의 가동압력

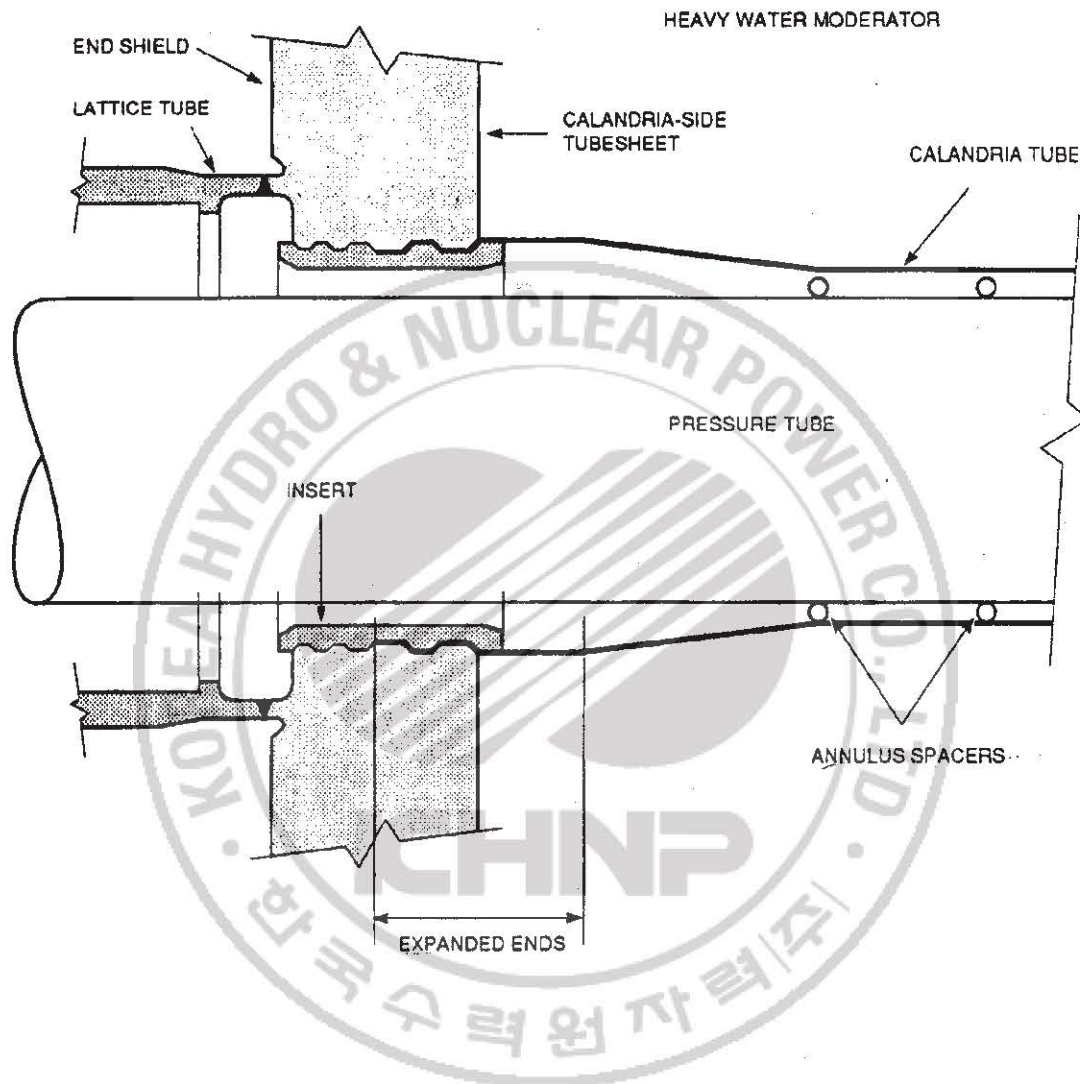
위 치	계 기 압 력 - kPa (psi)				
	레벨 A	레벨 B (독물질 주입)	시험	레벨 C 칼란드리아관 과 압력관 동시 파단	레벨 C 유동차단 사고
칼란드리아 상부	34.5(5.0)	75.2(10.9)	220.6(32)	405.4(58.8)	827.4(120)
하부	114.5(16.6)	155.1(22.5)	220.6(32)	485.4(70.4)	907.3(131.6)
칼란드리아 볼트: 반응도장치대 밑	13.8(2.0)	20.7 (3.0)	55.8(8.1)	68.9(10.0)	
칼란드리아 위	66.2(9.6)	73.1(10.6)	108.3(15.7)	121.4(17.6)	



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

칼란드리아용기의 압력경계

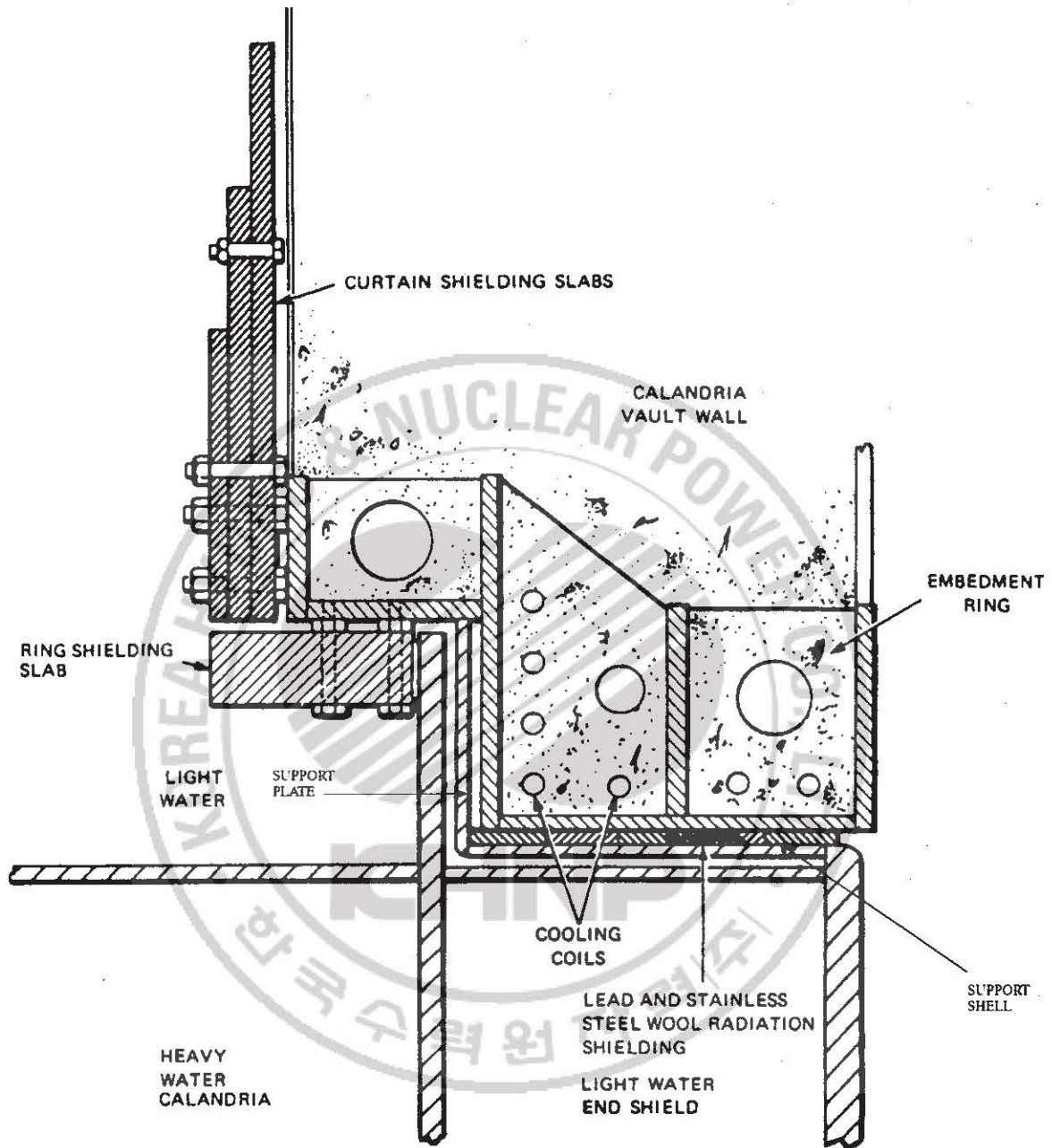
그림 4.2-1



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

칼란드리아관 설치시 구성도

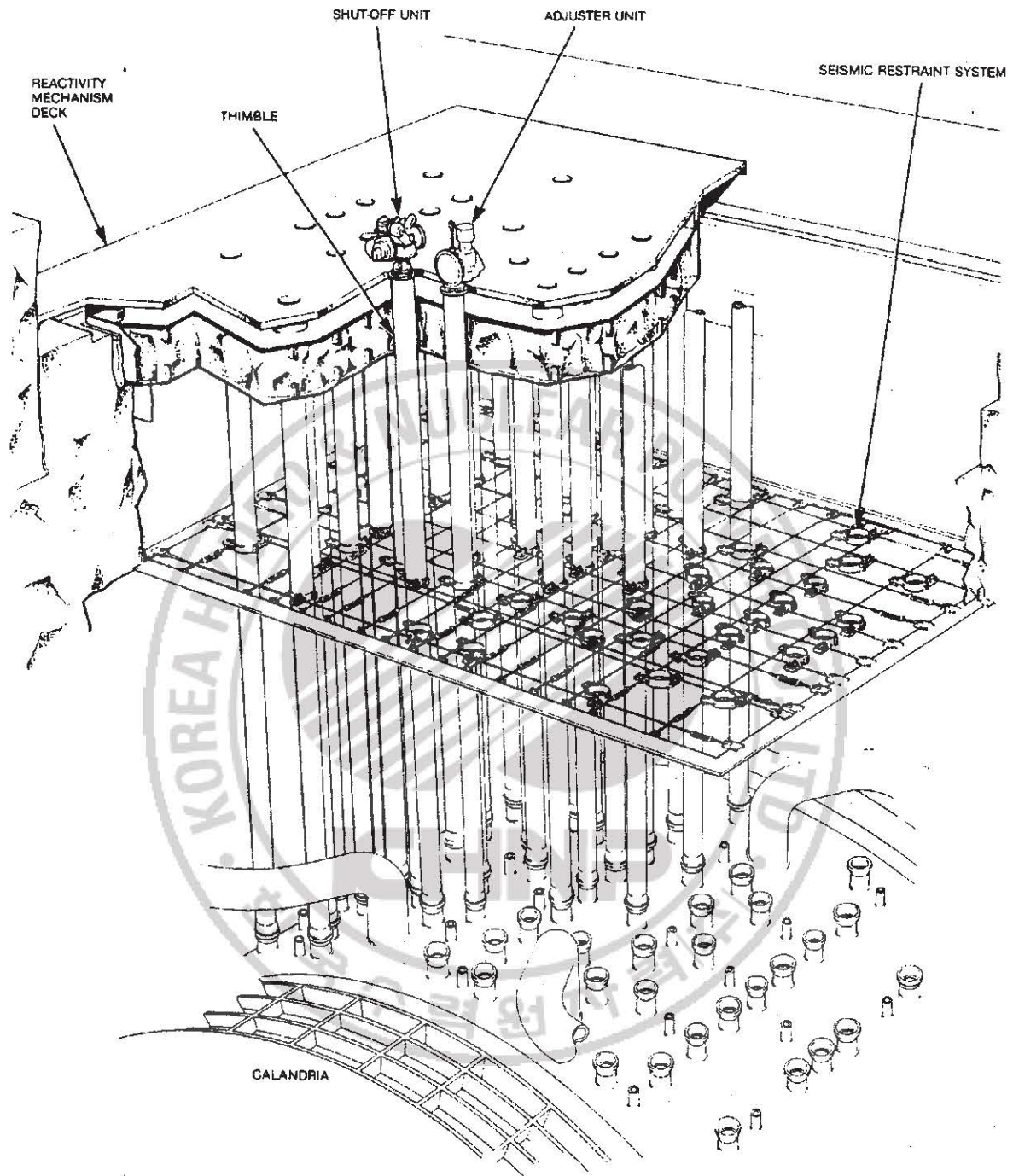
그림 4.2-2



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

매립링 및 종단차폐지지

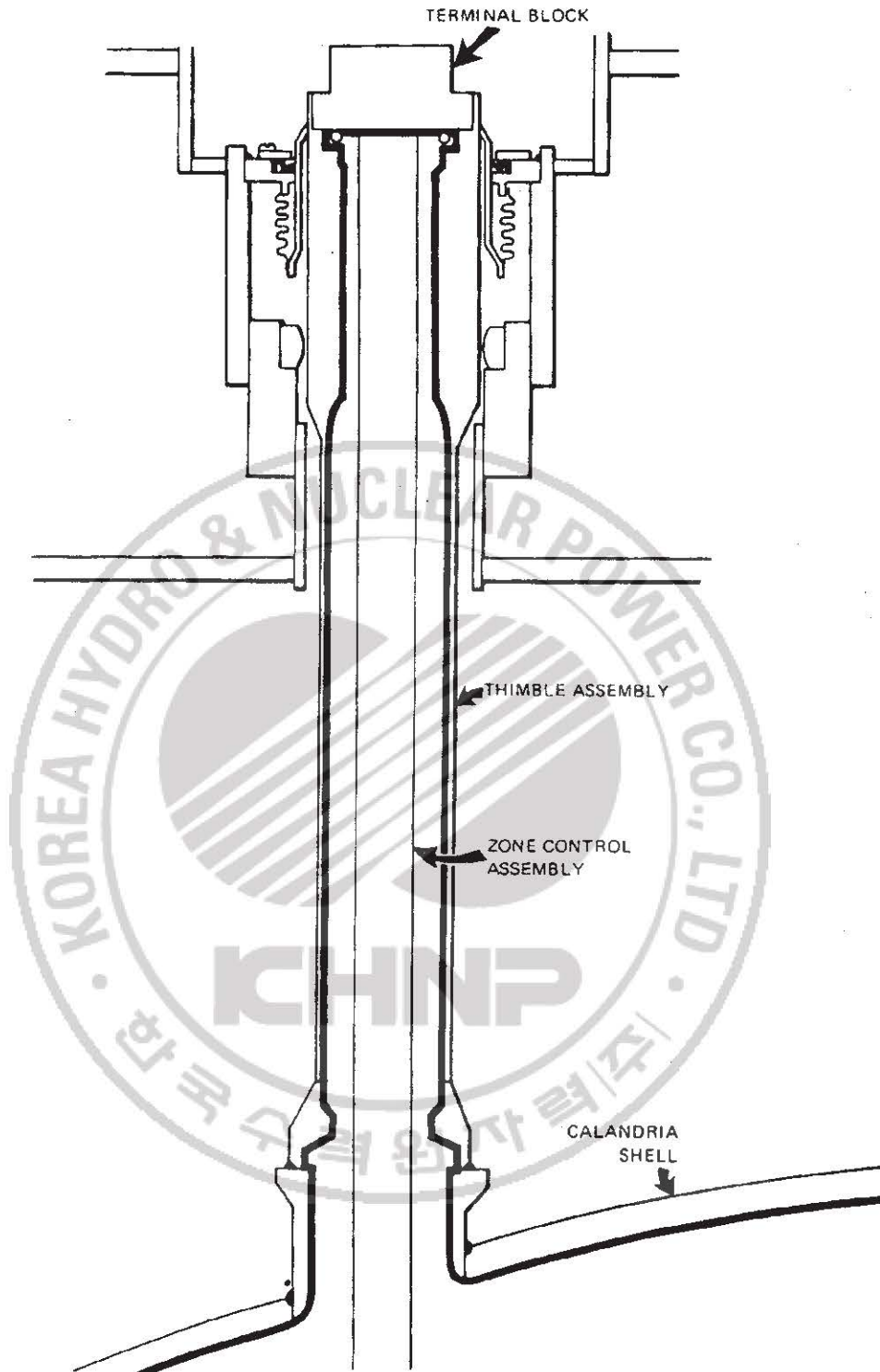
그림 4.2-3



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

반응도기기 텀블의 지진억제장치

그림 4.2-4



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

영역제어기기의 압력경계

그림 4.2-5



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

영역제어기기의 하중

그림 4.2-6



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

조절기기의 구동장치

그림 4.2-7



한국전력공사
월성원자력 2,3,4호기
최종 안전성 분석 보고서

조절기기 구동장치의 압력경계

그림 4.2-8