



고리1호기 해체재료 활용 경년열화 실증연구 추진 현황 및 향후 계획

한수원중앙연구원

나 경 환

2019. 10. 23

목차

1. 연구 개요
2. 연구 추진 경과
3. 연구 주제 소개
4. 향후 계획

1.

연구 개요(1)

● 고리1호기 개요

- 노형 : 가압경수로 웨스팅하우스형 2-loop
- 용량(열출력/전기출력) : $1723.5 \text{ MW}_{\text{th}}/606 \text{ MW}_{\text{e}}$

● 고리1호기 주요 연혁

- 건설허가 및 운영허가 취득 : 1972.05.31
- 최초 임계 : 1977.06.19
- 최초 계통 병입 : 1977.06.27
- 상업운전 : 1978.04.29
- 증기발생기 교체 : 1998
- 30년 설계수명 종료 : 2007.06.30
- 1차 계속운전 착수 : 2008.01.17
- 원자로상부헤드 교체 : 2015
- 배플포머볼트 결함 지시 발견 : 2015.05
- 영구정지 : 2017.06.19(총 40년 운전 이력)
- 30.16 EFPY

1.

연구 개요(2)

● 연구 배경/필요성

- 고리1호기는 40년 상업운전 후 영구정지되어, 장기운전 원전의 다양한 재료열화기구를 분석/연구할 수 있는 시편 제공 가능
- 장기 운전 중인 국내 후속 호기들의 인허가 현안 발생시 주요 기기 구조 건전성 입증에 위한 경년열화 실증 데이터 필요
- 고리1호기처럼 장기 운전된 상업 원전에서 실제 시편을 절취, 경년열화 실증연구를 수행한 사례가 없어 여러 해외 기관에서 국제공동연구에 관심을 표명

● 최종 연구 목표

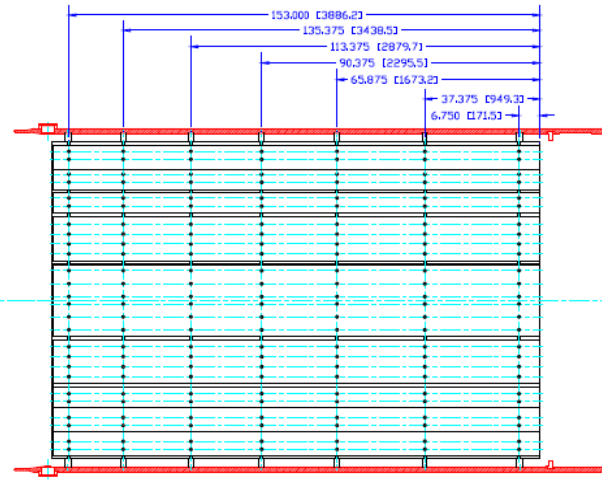
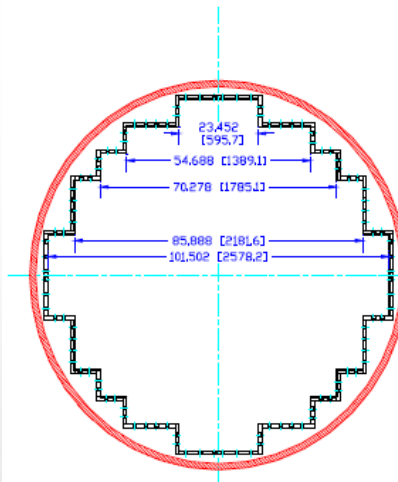
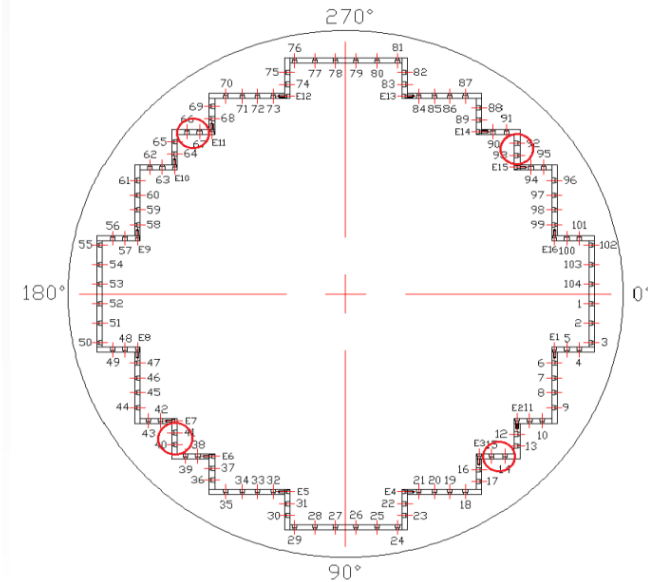
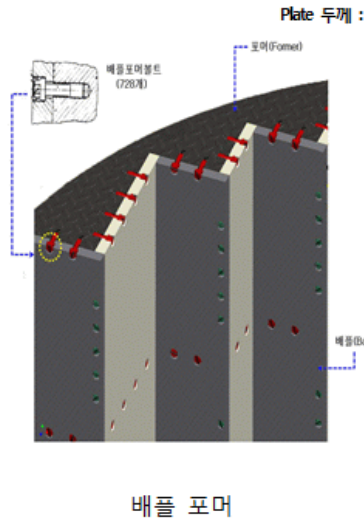
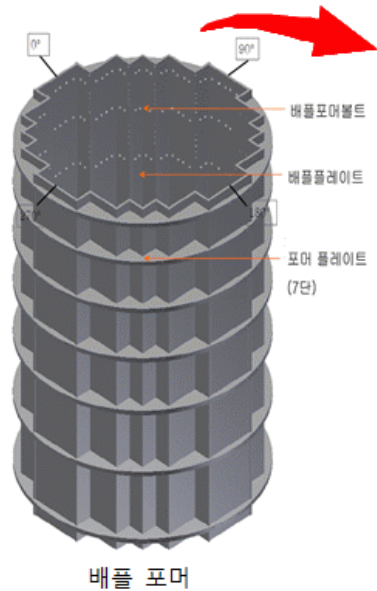
- 실증 연구 분야별 재료 시험/분석 수행 및 경년열화 실증 데이터 확보
- 원전 재료 경년열화 건전성 평가 모델 개발

1.

연구 개요(3)

● 고리1호기 배플포머볼트 결함 지시

Baffle Former Bolts

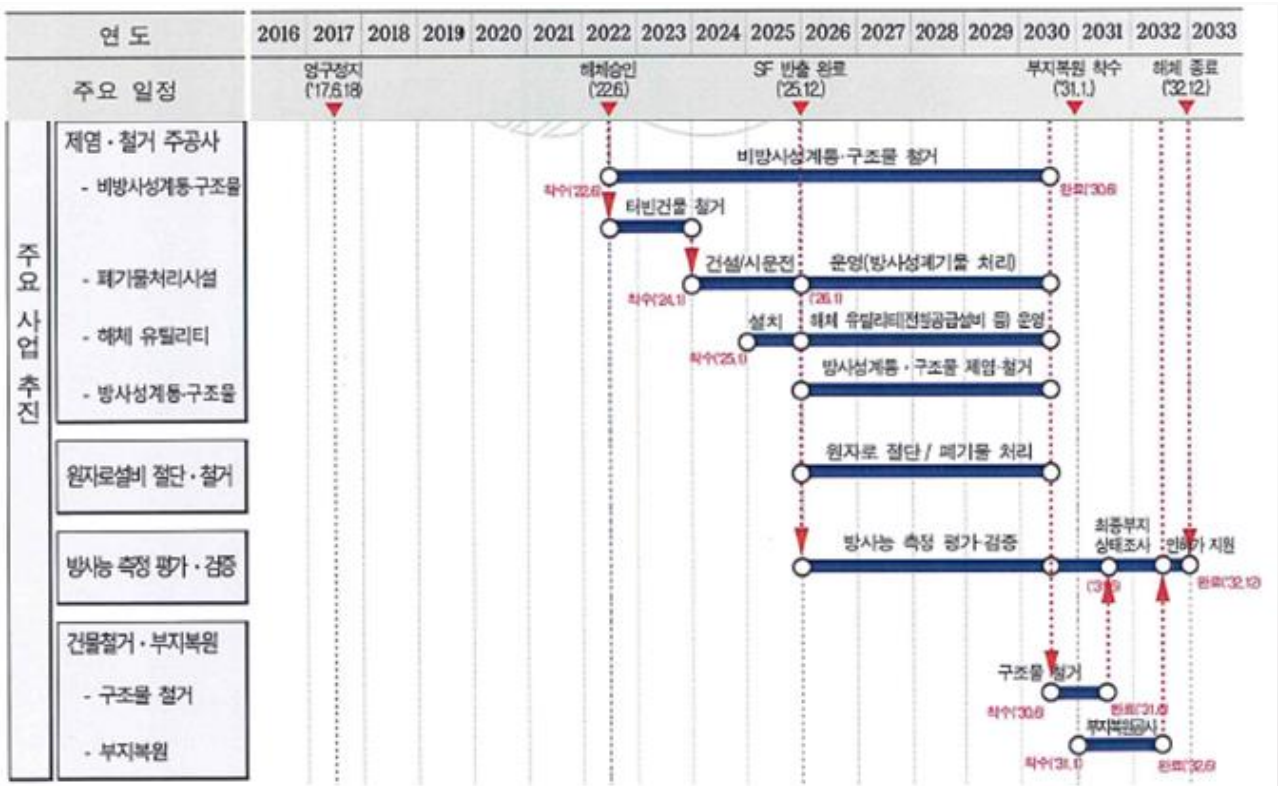


Crack like NDE indications in eight bolts at the bottom Elevation (May 2015)

1. 연구 개요(4)

● 고리1호기 해체 계획 로드맵

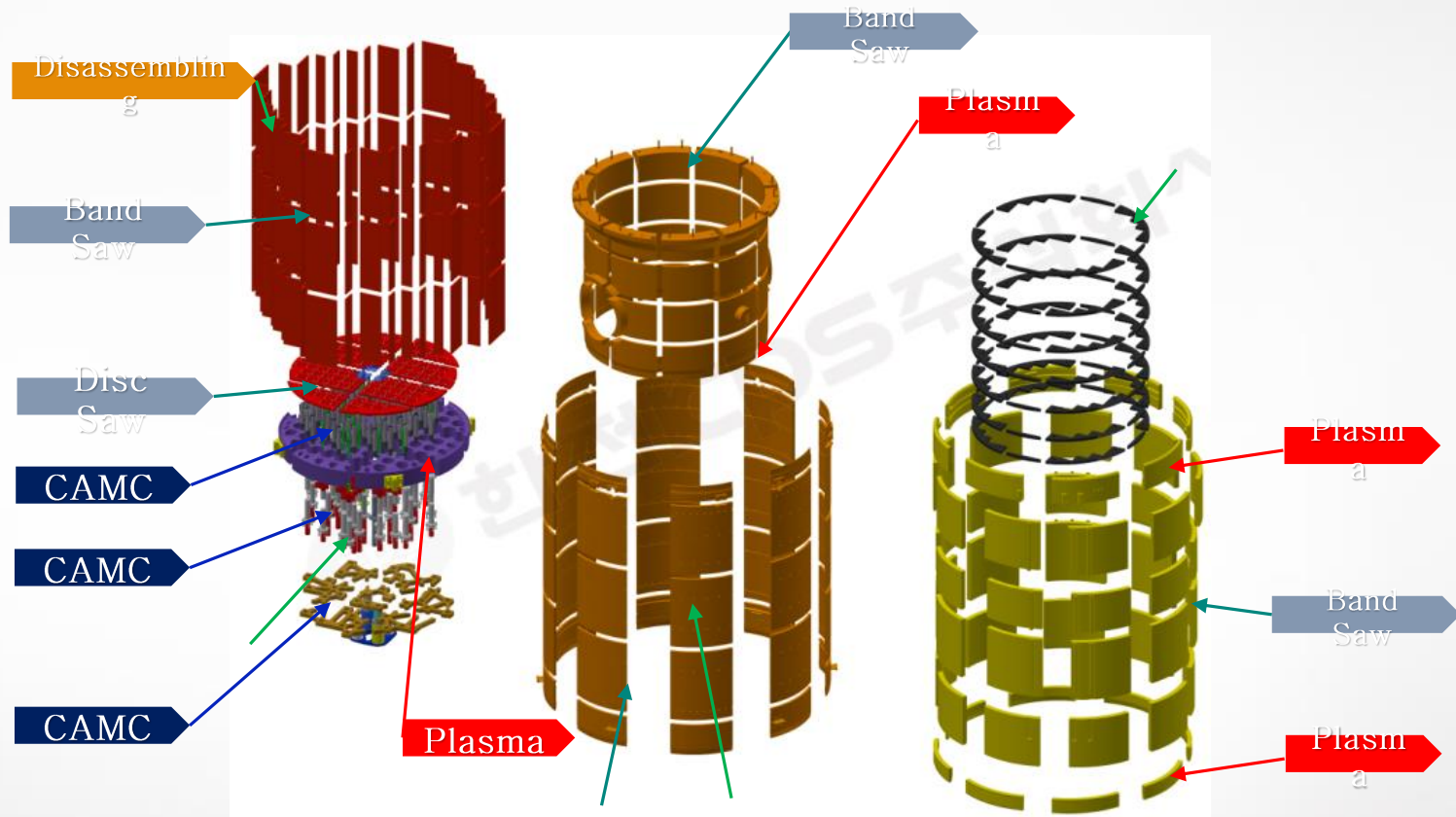
주요 일정	'17.6	'20.6	'22.6	'25.12	고리 2호기 안전운영과 연계 진행 ('31.1)	('32.12)
	영구정지	해체승인 신청	해체 승인	SF 반출 완료	부지복원 착수	해체종료
해체 공정	운영	• 영구정지 관리, SF 냉각/반출 • 해체 인허가 • 해체 사전준비		• 방사성계통/구조물철거 • 방사성폐기물 처리 • 폐기물처리시설 구축 • 비방사성계통/구조물 철거		• 부지복원
단계	I	II		III-1		IV



1.

연구 개요(5)

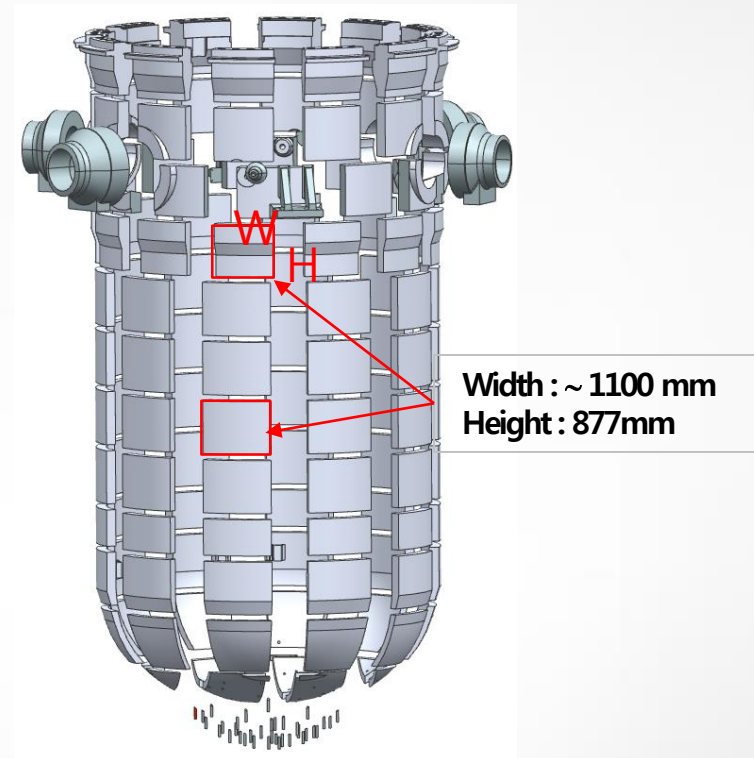
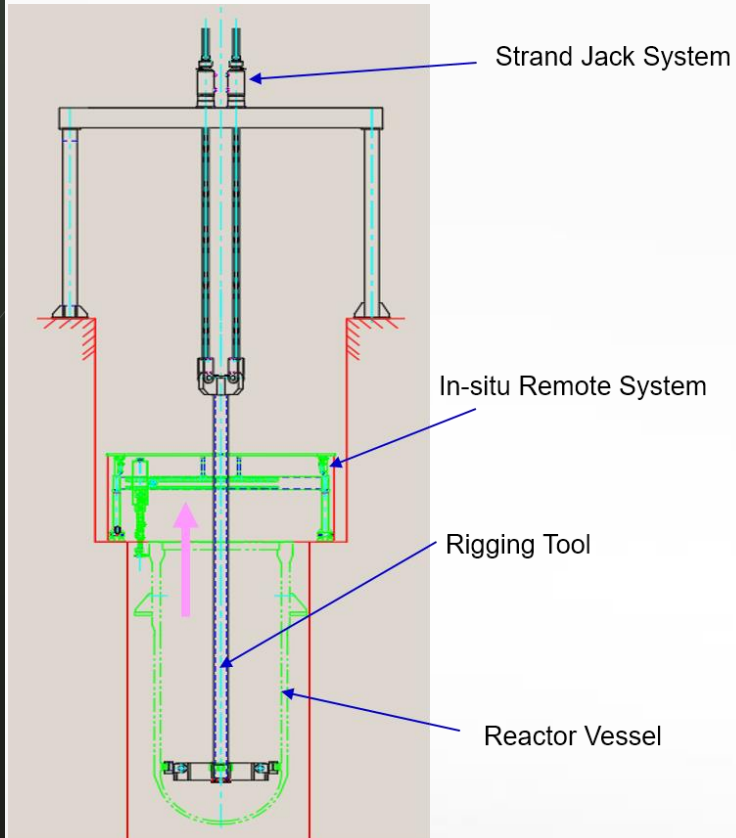
● 원자로내부구조물 절단 및 해체 개념도



1.

연구 개요(6)

● 원자로압력용기 절단 및 해체 개념도



2.

연구 추진경과(1)

● 고리1호기 해체 재료 활용 연구 관련 추진 경과

- 한수원 기획조사사업과제 수행(2016.01.04~2016.04.03(3개월))
 - 과제명 : 해체예정 고리1호기 재료열화 실증평가 대상 선정
및 확보방안 수립
 - 6개 분과 기획위원회에서 12개 재료열화 실증연구 항목 도출

활용기기	Task
원자로압력 용기	Task 1. 노심대 재료의 조사취화 실증시험 데이터 확보 및 예측 신뢰도 개선
	Task 2. 원자로 노즐부 재료의 조사취화 영향 검증 시험데이터 생산 및 평가방법 개발
원자로내부 구조물	Task 3. 원자로내부구조물 IASCC 메커니즘 규명
	Task 4. 원자로내부구조물 재료물성 열화 실증
Alloy 600 이중금속 용접노즐과 관통노즐	Task 5. Alloy 600 기기 잔류응력 및 PWSCC 실증 (교체 전 원자로상부헤드 포함)
	Task 6. 교체 후 상부헤드 UT 이상 지시 규명 및 잔류응력/ PWSCC 실증
증기발생기	Task 7. 증기발생기 열화 실증평가 (Alloy 690 전열관 부식 외)
열취화	Task 8. 주조/용접 스텐레스강 열취화 예측기법 검증 및 DB 구축
	Task 9. 열취화된 주조 스텐레스강 실배관 곡관 및 분기 노즐부 시험 및 해석 연구
	Task 10. 가압기 저합금강의 열취화 평가
이차 계통 배관과 매설 배관	Task 11. 유동가속부식과 침식 등 배관 감육기구 규명
	Task 12. 매설배관 열화 검사 및 실증

2.

연구 추진경과(2)

- **고리1호기 해체 재료 활용 연구 관련 추진 경과(계속)**
 - '고리1호기 주기기 재료 활용 연구 워크숍'(경주 HICO, 2016.10.26)
 - 한국원자력학회 핵연료 및 원자력재료연구부회 주관
 - 'Ex-Plant Materials Harvesting Workshop'(미국 NRC, 2017.3.7~8)
 - 상업운전 실적이 좋은 고리1호기를 이용한 연구계획에 지대한 관심 표명
 - EPRI와 실증연구기획(안) 협의(미국 EPRI Palo Alto, 2018.1.11)
 - '고리1호기 재료 활용 연구 국제 워크숍'(대전 KHNP CRI, 2018.11.14~15)

3.

연구 주제 소개(1)

- 원자로압력용기 노심대(belt line) 재료의 조사 취화 실증시험 데이터 확보 및 예측 신뢰도 개선
 - 내용
 - 노심대 SA508 단조강의 조사취화 특성 실증시험 및 예측기술 개선
 - 장기 가동 원자로 용기 모재/용접부/클래딩의 결함 건전성 평가
 - EPRI 의견
 - Oak Ridge National Lab.에서 Zion 원자로압력용기에 대해서 노심대 재료의 시험 및 회복에 대한 연구를 수행 중
 - 고리1호기 재료에 대해서 유사한 시험을 통해 얻게 될 데이터로부터 추가적인 정보를 얻을 수 있을 것으로 보지 않음

3.

연구 주제 소개(2)

- 원자로압력용기 노즐부 재료의 조사취화 영향 검증 시험 데이터 생산 및 평가방법 개발
 - 내용
 - 고응력 노즐부의 중성자 조사 취화 건전성 영향 실증 시험 데이터 및 평가방법 개발
 - 원자로용기 노즐부 3차원 중성자속 분포 해석 및 방사화 예측기술 개발
 - EPRI 의견
 - 원자로 노즐부 재료의 특성에 대하여 연구한 사례가 없기 때문에 본 연구를 통해 얻게 될 데이터가 노심대 영역의 조사 취화에 대한 이해도를 높일 수 있음
 - 조사 및 취화 측정은 압력-온도(P-T) 제한 곡선 개발 시 본질적으로 결함이 전제되는 부위인 노즐 코너에서 아랫방향으로 45도 지점에서 이루어져야 함

3.

연구 주제 소개(3)

● 원자로내부구조물 IASCC 메커니즘 연구

■ 내용

- 결함 지시가 발견된 배플포머(BF) 볼트 인출 및 미세조직 평가에 의한 열화 평가
- 1차수 환경에서 균열 개시 및 성장률 데이터 취득

■ EPRI 의견

- Indian Point 2 와 Salem 1를 비롯한 미국 원전에서 많은 BF 볼트들이 검사 중이며 결함 지시가 발견되고 있기 때문에 연구 필요성 있음
- WH 4 loop down flow 발전소의 type 347 볼트에 대한 검사는 방대하게 이루어진 반면에 고리1호기 BF 볼트 처럼 316CW 볼트 손상에 대한 정보는 제한적임

3.

연구 주제 소개(4)

● 원자로내부구조물 재료물성 열화 실증

■ 내용

- 항복응력/최대인장응력/연신률/파괴인성값 측정
- 조사집적량과 열화에 의한 치수 변화량 측정

■ EPRI 의견

- 현재 코어 재료에 대하여 다양한 플루언스 level에서 파괴인성 데이터가 필요하다는 것에 전문가들이 동의하고 있음
- 조사된 기기들의 파괴인성 데이터를 얻기 위하여 기계적 실험을 수행하는 것을 최우선으로 추천하며 특히 코어 배럴 용접부에서 파괴인성 데이터를 취득하는 것에 관심이 있음
- 미세구조 분석은 측정한 기계적 특성 및 파괴 특성을 지원하기 위해서 수행될 수 있으나 단독 수행은 비추천

3.

연구 주제 소개(5)

- Alloy 600 기기 잔류응력 및 PWSCC 실증/Alloy 690 CRDM 관통부의 잔류응력 및 PWSCC 실증
 - 내용
 - Alloy 600기기 잔류응력 해석·실증 평가, 용접부 재료 물성 실증 평가자료 생산
 - Alloy 600기기 PWSCC 실증 평가자료 생산
 - Alloy 690 CRDM 관통부 UT 이상지시 원인 규명
 - EPRI 의견
 - BMI 노즐처럼 PWSCC에 낮은 민감도를 가지고 있는 Alloy 600 용접부 및 관통부의 장기 운전 성능에 관심을 가지고 있음
 - Alloy 690 CRDM 노즐에 대한 파괴검사를 수행하여 field UT 신호를 검증하는 것은 가치 있는 일임. 실험실이나 mockup을 통하여 취득한 PWSCC 생성 및 성장에 대한 데이터는 많이 있지만 발전소 열화 재료에 대한 데이터는 거의 없음

3.

연구 주제 소개(6)

● 증기발생기 열화 실증 평가

■ 내용

- Alloy 690TT 전열관의 외경 및 내경 표면의 부식층 연구
- 증기발생기 bottom head divider plate 용접부의 건전성 연구
- 증기발생기 내부구조물의 유동가속부식 연구
- 전열관 마모 부위의 균열에 대한 민감도 연구
- Top of tubesheet 위치에서의 전열관 덴팅 연구
- Alloy 690TT 전열관에서의 LRO 현상 타당성 연구

■ EPRI 의견

- 고리1호기가 Alloy 690TT 재질의 전열관을 가지고 있는 증기 발생기로부터 연구를 위해 재료를 절취하는 첫 사례이며 KHNP-CRI에서 제안한 상기의 연구 항목 모두에 대하여 지지를 표명함

3.

연구 주제 소개(7)

- 주조/용접 스텐레스강 열취화 예측기법 검증 및 DB 구축
 - 내용
 - 주조 오스테나이트 스테인리스강(CASS) 및 오스테나이트 스테인리스강 용접부(ASSW) 재질/온도별 열취화 실증 평가
 - 열취화 특성 평가 DB 구축
 - 추가 열화 시험 수행 및 열취화 특성 평가
 - EPRI 의견
 - CASS와 ASSW의 열취화는 중성자 조사에 의한 시너지 효과 없이 단독으로는 현안이 될 수 없다는 많은 연구 데이터 베이스를 가지고 있기 때문에 EPRI는 본 연구항목에 관심이 없음

3.

연구 주제 소개(8)

- 열취화된 주조 스텐레스강 실배관 곡관 및 분기 노즐부 시험 및 해석 연구
 - 내용
 - 열취화된 CASS 곡관과 분기 노즐부의 실배관 실험
 - 열취화된 CASS 곡관과 분기 노즐부의 3차원 유한요소 파괴 해석
 - 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통한 3차원 유한요소 파괴 해석방법론의 정확성/보수성 평가 및 신뢰성 향상
 - EPRI 의견
 - 그 동안 열취화된 CASS 재료에 대한 많은 데이터가 축적되어 있으므로 EPRI는 완전한 구조물에 대한 파괴 시험만 가치가 있다고 생각됨

3.

연구 주제 소개(9)

● 가압기 저합금강의 열취화 평가

- 내용
 - 저합금강인 가압기 모재 및 용접부의 열취화 손상정도 평가
- EPRI 의견
 - 가압경수로 운전 조건에서 저합금강과 탄소강의 열취화는 현안이 아니라는 것은 널리 알려진 사실임. 스웨덴에서 수행된 가압기 재료에 대한 최근 시험 결과, 오직 니켈과 망간 함량이 높은 용접부에서 열취화에 관련된 영향을 받는 것으로 확인됨

3.

연구 주제 소개(10)

● 유동가속부식과 침식 등 배관 감육기구 규명

■ 내용

- 감육 원인 분석 및 DB 구축
- 감육 기구에 따른 예측 정확성 검증
- 난검사부위 건전성 검증 및 관리기술 개발

■ EPRI 의견

- EPRI 회원사는 열화기구를 확인하기 위하여 유동가속부식과 침식 손상에 대한 파괴검사를 수행하고 그 결과를 서로 공유하고 있으며, 고리1호기 재료에서 추가 검사가 필요할 정도로 유일한 특성이 있을 것이라고 생각되지 않기 때문에 EPRI는 본 연구에 관심 없음

3.

연구 주제 소개(11)

● 매설배관 열화 검사 및 실증

- 내용
 - 손상 메커니즘 별 DB 구축 및 검증
 - 매설배관 직/간접적 검사방법 적용 가능성 및 해당 검사 기술 신뢰성 검증
 - 매설배관 Risk Ranking 기법 검증 및 개선
- EPRI 의견
 - 본 연구가 필요한 지 현재로써는 자세한 정보가 없어 의견 제시 유보

3.

연구 주제 소개(12)

● 고리1호기 재료 활용 연구 국제 워크샵 검토 결과 종합

Task	EPRI's comment
Irradiation Embrittlement of the Reactor Pressure Vessel Beltline Material	Duplicated ORNL program
Irradiation Embrittlement of RPV Nozzle steel	<u>Top priority but not in Korea</u>
Investigation of the IASCC mechanism	<u>Top priority (BFB issues)</u>
Material properties of aged RVI components	High priority
Residual stress and susceptibility to PWSCC of Alloy 600 welds and penetrations	BMI at low temperature
Residual stress and susceptibility to PWSCC of Alloy 690 CRDM penetration nozzles	LRO of Alloy 690 is a concern
Degradations of steam generator	Alloy 690TT tubes
Thermal embrittlement in cast and weld austenitic stainless steel	negative
FEM integrity assessment and actual test of a bend portion in an aged real plant pipe	negative
Thermal embrittlement of low alloy steel and its weld exposed to PZR temperature	negative
FAC and erosion in CS piping in the secondary system and BOP	negative
Degradations in buried pipes and inspection performance demonstration	To be reviewed later

4.

향후 계획(1)

● Hot Cell 구축

- 원전해체연구소에 Hot Cell 구축 추진
- Hot Cell 구축을 위한 과제 추진을 위하여 과기부-산자부 공동 예타 추진중

● 관련 연구과제 추진을 통한 분석 인프라/기술 사전 확보

- 과제명 : 해체원전 원자로내부구조물 배플포머볼트 조사유기 응력부식균열 열화 특성 분석 기술 개발
- 연구기간 : 2019.10.01~2024.09.30(60개월)
- 참여기관 : KAERI, KHNP, 두중, 경희대, 한국원자로감시기술
- 내용
 - 중준위급 방사성 부품 시편 원격 정밀 가공기술 개발
 - 방사성 부품 IASCC 실증시험기술 개발
 - 원자로내부구조물 배플포머볼트 파괴분석 및 균열 지시 원인 규명

4. 향후 계획(2)

- **고리1호기 활용연구 추진 회의체 구성**
 - KHNP CRI 중심으로 관련 국내 전문가들로 회의체 구성
 - 고리1호기 재료활용 경년열화 실증연구에 대한 세부 연구전략 수립
- **관련 국제 협의체 참가**
 - International Materials Harvesting Workshop 참가
 - 미국 NRC 주관
 - 2020년 1월 20일~21일 프랑스 파리에서 개최 예정
 - IAC-IASCC(The International Advisory Committee on Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) 가입 추진

4. 향후 계획(3)

● 고리1호기 재료 활용 연구 제안 및 본격 추진

- 1단계 과제(2022년~2025년, 4년)
 - 실증 연구를 위한 기반 시설 및 장비 구축
 - 연구를 위해 절취할 재료와 제작할 시편의 목록과 도면 작성
 - 재료 운송, 취급 및 시험 후 처분 관련 행정(인허가) 절차 검토
 - 재료 운송에 필요한 운반용기 준비
 - 필요시 실증시험 사전 해석 연구 수행
- 2단계 과제(2026년~2030년, 5년)
 - 절취한 재료를 제염, 이송, 보관, 시편 가공
 - 실증 연구 분야 별 재료 시험 수행 및 최종 보고서 작성

Thank you!