

Radiation shielding strategy for material testing of PWR reactor internal components



Seong Sik Hwang , Sung Hwan Cho, Hyung-Ha Jin, Kwon Jae Choi, Sung Woo
Kim, Dong Jin Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

Korean Nuclear Society Spring Meeting

Virtual meeting, May 13-14, 2021



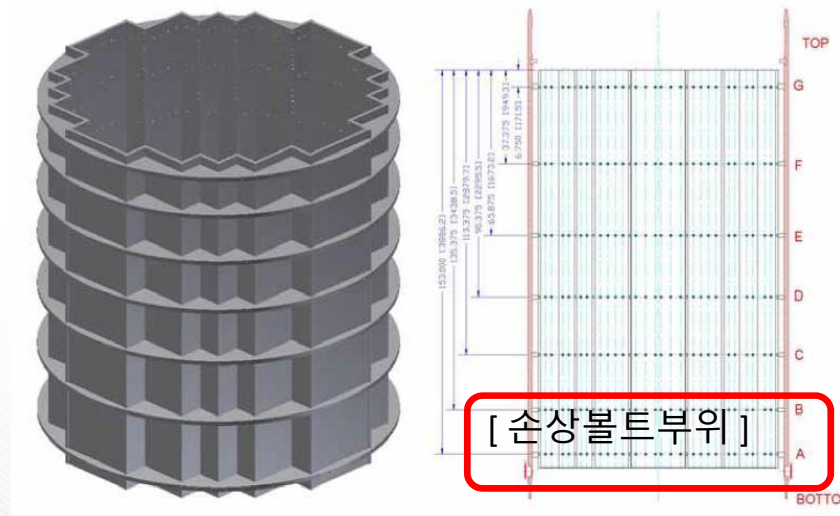
Korea Atomic Energy
Research Institute

Outline

1. 배경
2. 고리 1 내부구조물 채취 계획
3. 연구 수행 방안
4. 중저준위 방사성 재료 취급시설
5. 방사선 차폐 설계
6. 방사선안전보고서
7. 요약

1. 배경

- ❖ 고리1호기 폐로, 원전해체 준비(상업운전 1978.04.~ 2017.06.)
- ❖ 내부구조물 결함 발견(2015.05.)
 - Type 316 stainless steel 재질의 Baffle Former Bolt (BFB)에 균열성 결함 신호 (Defect Unknown Location, DUL) 발견
 - 해외 사례로부터 IASCC (조사유기 응력부식균열) 결함으로 추정, 균열 여부 및 발생 원인 규명 요청 사항 (규제기관)



[고리1 Baffle Former Assembly 단 구성도]

*Source: KINS/RR-1355

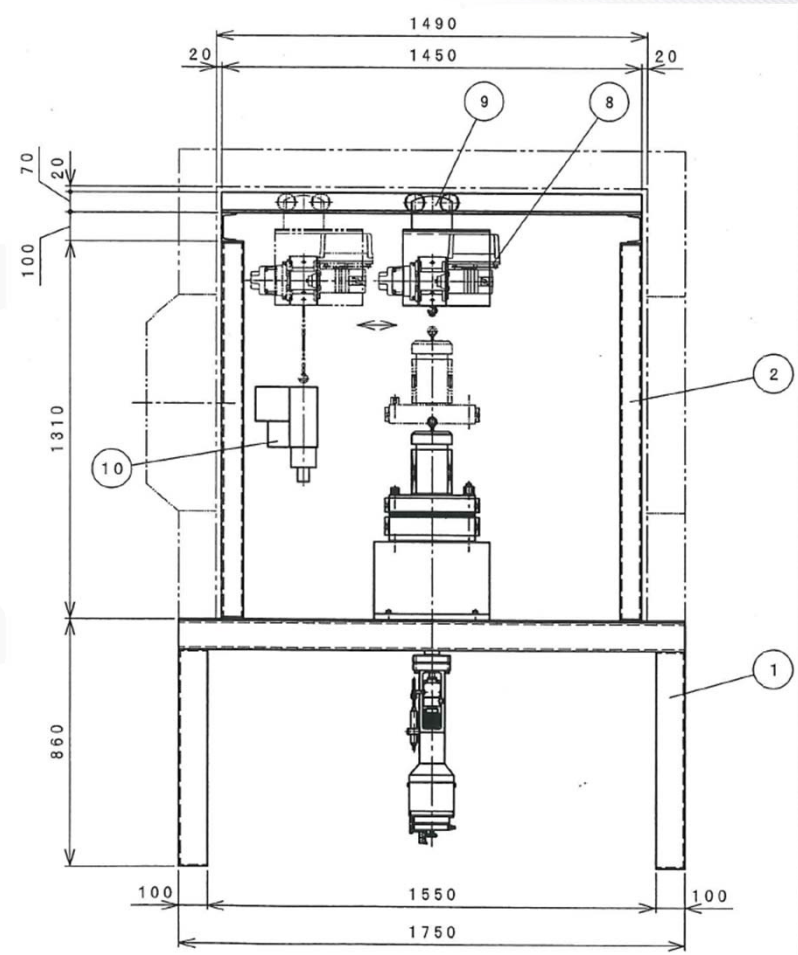
2. 고리 1 내부구조물 채취 계획

- 실험·검사 등 가용한 설비의 여건 하에 채취위치를 선정함
- 국외 선행연구(Zorita project)의 연구방향 참고
 - ✓ P-AS-14 (high): Fluence Impact on SCC of Stainless Steels (IASCC)
 - ✓ P-AS-15 (medium): Void Swelling of Stainless Steels
 - ✓ P-AS-38 (medium): Fluence Impact of Stainless Steel Mechanical Properties (Fracture Toughness and Tensile Strength)
- IASCC 등 열화현상의 원인을 밝히는 연구에 집중. 현재까지의 지식수준(current state of knowledge)을 고려하여 선정된 시편채취부위는 아래와 같음(한수원자료)
 - ✓ MRP-227 rev.1의 Primary Group 시편
 - ✓ 8개의 결함 지시볼트는 포머 1단(최하단)에 90° 간격으로 2개씩 4곳에 위치
 - ✓ 8개 BFB는 초음파 신호 분석 결과에서 결함 가능성은 거의 비슷한 것으로 평가되었으므로, 현장 상황을 고려하여 포머 1단 4곳 중 한 곳을 선정, 결함 지시 BFB 2개 및 이들과 축대칭으로 인접한 비결함(정상) BFB 2개 등 총 4개를 인출 예정

3. 연구 수행 방안

❖ IASCC 실증 시험설비 설계 및 핫셀 호환성 검토

- IASCC 실증 시험설비 설계사양 도출
 - 핫셀 환경 및 원격 조종기를 고려한 시험설비 설계(안)
 - ✓ 고온 고압 시험환경을 구현하고 방사성 시편이 위치하는 autoclave는 핫셀 내부에 설치
 - ✓ 시편에 하중을 인가하는 SSRT 및 전자/기계 장비는 유지보수/검교정 등 관리를 위해 핫셀 하부 외부에 배치하되, 하중 전달축은 핫셀 바닥을 관통.
 - ✓ 1차 계통수 수화학을 제어하고 계측하는 PW loop 및 열교환기는 핫셀 외부에 설치하되, 1차 고압의 1차 계통수를 autoclave 공급하고, 회수하는 라인은 핫셀 바닥을 관통.
 - ✓ PW loop 및 SSRT controller는 핫셀 외부에 배치함
 - ✓ 원격조정기 용량(5kg)을 고려하여 autoclave 등 중량물은 핫셀 내부 상부에 크레인으로 조작함



<IASCC 실증설비 측면 개략도>

3. 연구 수행 방안

❖ IASCC 시험 절차 개발

- IASCC 시험 절차를 고려한 작업 공정 및 동선 설계
 - 작업공정 설계 및 두중 핫셀 설계 입력 자료 제공
 - ✓ 시험장비 가동중 일상점검 공정, 기동운전 공정, 구동부 유지보수 공정, 고온부 유지보수 공정, 특히 작업 공정(고착 시편 탈거, 시편 수동 용접, 이탈 시편 위치 이동)을 포함함.
 - ✓ 참여기관2(두산중공업)에서 수행 중인 핫셀 작업자 피폭량 계산을 위한 공정별 작업 상세 절차 및 자료 제공.

공정명	시험장비 구동부 유지보수				
순번	작업자 자세 기술	작업시간	상세 설명	작업 자세	작업위치
작업순서	핫셀 하부의 장비 구동부 수리(핫셀 받침대 하부에서 앉아서 부품 탈착) Test 핫셀	30분	• 초기 위치에서 B 위치로 이동하여 공구 선택. • A 위치로 이동하여 하부 구동부 부품 탈착		A
	핫셀 하부의 장비 구동부 수리(부품 탈착 후 서서 부품 수리)	4시간	• 탈착된 부품을 B 위치로 가져와서 부품 수리		B
	핫셀 하부의 장비 구동부 수리(핫셀 받침대 하부에서 앉아서 부품 장착) Test 핫셀	30분	• 수리한 부품을 A 위치로 가져와 부품 장착 • B 위치로 이동하여 공구 재자리로 위치		A
작업 초기 위치로 이동					

비고

- 1 시험장비 구동부 유지보수 공정을 1년에 1회 수행 예정
- 2 핫셀의 하부 받침대 커버 제거 후 핫셀 받침대 하부에서 작업
- 3 1인 수행 작업

<핫셀 작업자 피폭량 계산을 위한 핫셀 작업 공정별 입력자료 및 동영상 예>

3. 연구 수행전략

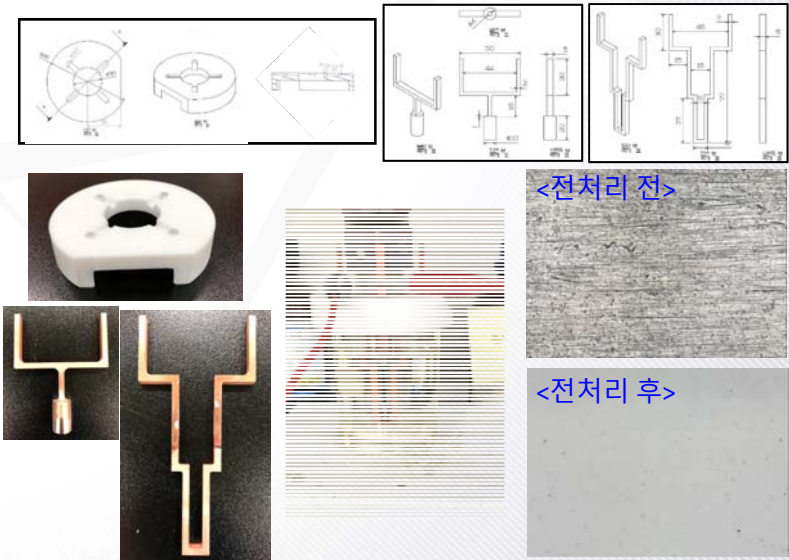
❖ IASCC 시험 품질보증 체계 개발

- 품질보증요건 의거한 표준 시험 절차 개발 및 시험절차서 작성/발행 완료
 - IASCC 실증시험설비 시험 운전 수행
 - IASCC 실증시험설비 운전절차서 개발 완료
 - ✓ IAC-OP-01(1) IASCC 실증시험설비 운전절차서
 - ✓ IAC-OP-01(2) 원자로 내부구조물 IASCC 실증설비 원격제어 운전절차서

원전재료/부품 건전성 실증평가기술 및 지식정보 체계 구축					원전재료/부품 건전성 실증평가기술 및 지식정보 체계 구축						
문서번호	IAC-OP-01	제정번호	1	제정일	79	문서번호	IAC-OP-02	제정번호	01	제정일	27
IASCC 실증시험설비 운전절차서						원자로 내부구조물 IASCC 실증설비 원격제어 운전절차서					
KAERI 한국원자력연구원						KAERI 한국원자력연구원					
구분	부서/과	담당	작성	승인	일자	구분	부서/과	담당	작성	승인	일자
작성	재료안전기술개발부/재료안전기술원	박정환	김민우	김민우	2012.12.27	작성	재료안전기술개발부/재료안전기술원	조영호	조영호	김민우	2012.12.27
검토	재료안전기술개발부/재료안전기술원	김영우	김민우	김민우	2012.12.27	검토	재료안전기술개발부/재료안전기술원	최원재	최원재	김민우	2012.12.27
승인	재료안전기술개발부/재료안전기술원	김영우	김민우	김민우	2012.12.27	승인	재료안전기술개발부/재료안전기술원	김영우	김영우	김민우	2012.12.27

❖ IASCC 시운전용 비방사화시편 제작

- SSRT 시험편의 제작 및 시편 전처리 조건 확립
 - SSRT 시험편 전처리용 전해연마 지그 설계, 제작
 - ✓ 시험편의 용이한 장착, 극간거리, 용액의 흐름, 전극의 연결 등을 고려한 설계
 - ✓ 실험 장치 제작 완료
 - 최적 전해연마 조건 확립 실험 수행 완료
 - ✓ 기계연마: #400 ~ #2000, 1 ~ 0.03 um
 - ✓ 전해연마: 온도 60 ~ 70°C, 전류밀도 0.2A/cm², 교반속도 250RPM, 시간 150 ~ 300 sec



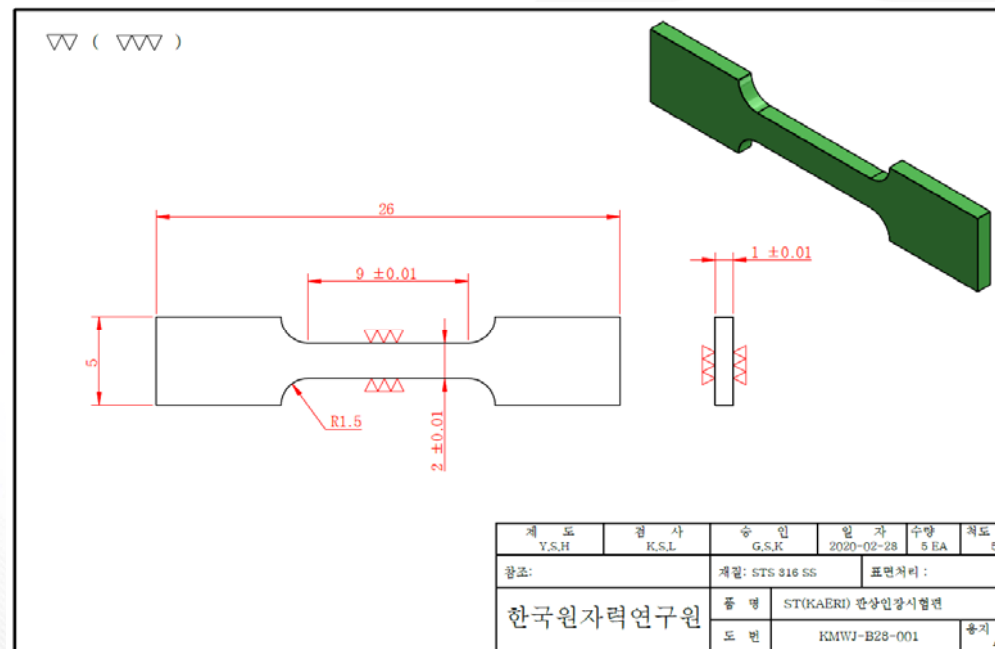
3. 연구 수행 방안

❖ 방사성 시편 기계적 물성평가용 최적 시편 규격 및 시험 조건 선정

▪ K1 BFB 크기를 고려한 인장시험편 설계

✓ 국내외 조사시험용 시험편 규격 검토: RT, PT, ST, SS-3, SS-J3

⇒ BFB 인장시험편은 KAERI에서 조사재 평가용으로 사용되는 소형판상시험편(ST)으로 선정(두께는 1mm)



소형판상인장시험편 도면

3. 연구 수행 방안

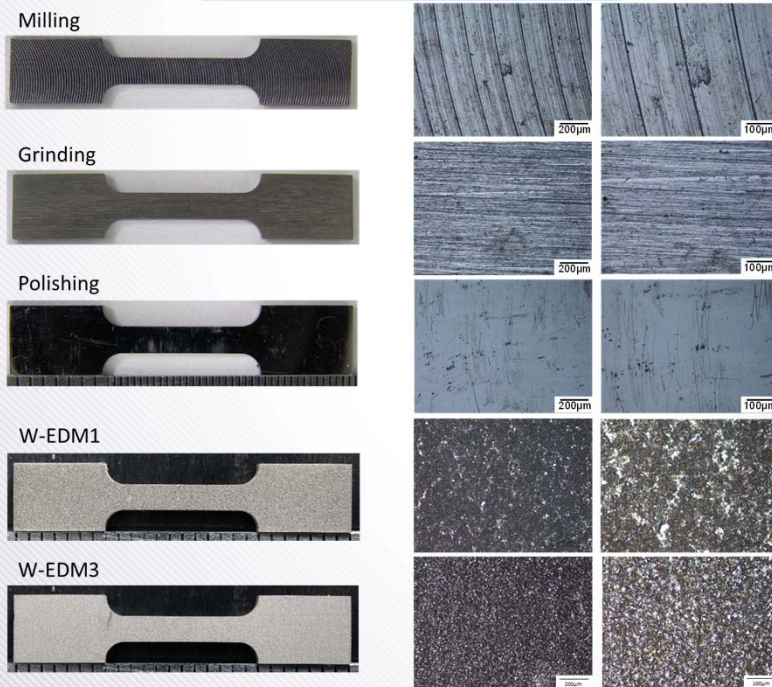
✓ 소형 판상시험편 표면 가공방법(밀링, 연삭, 미세연마, W-EDM)에 따른 인장특성 변화 평가

⇒ As-received 소재에서는 밀링 가공시 표면경도 및 강도가 상대적으로 높게 나오며, W-EDM 시편이 미세연마 시편과 유사한 값을 나타냄.

35% CW 소재에서는 뚜렷한 경향성을 보이지 않음.

-> W-EDM으로 시편가공 후 밀링을 하지 않고 사용하는 것도 고려

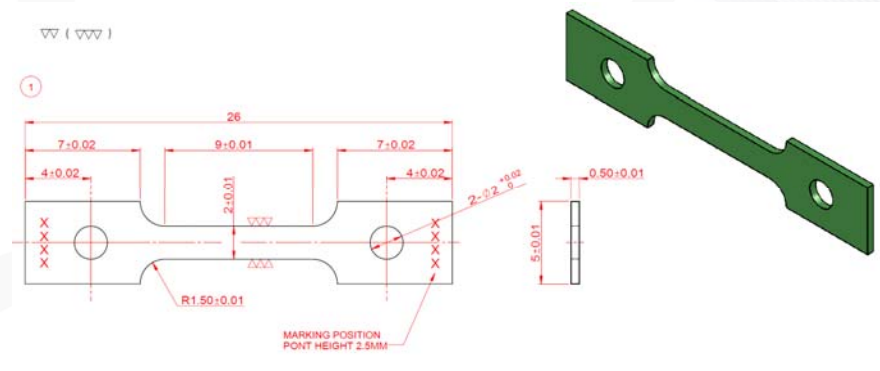
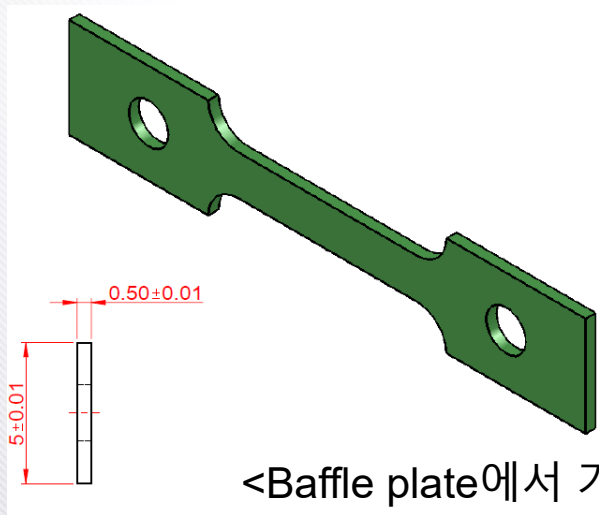
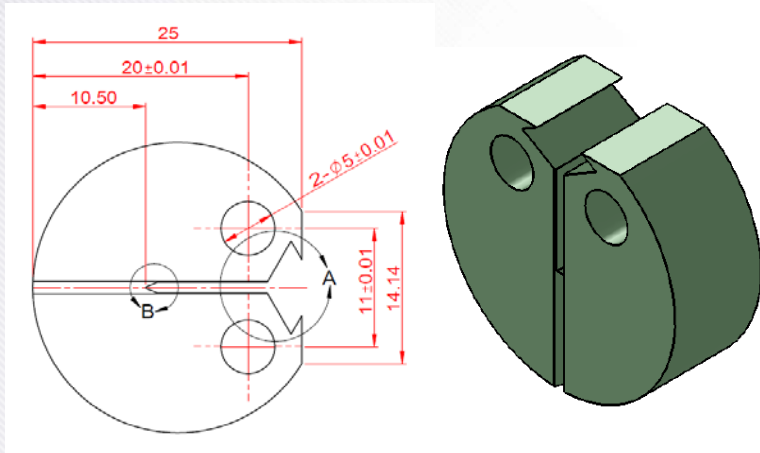
가공방법별 시험편 표면 비교



가공방법별 경도 및 인장특성 비교

Type	As-Received				CW 35%			
	Hv	YS (MPa)	TS (MPa)	EL. (%)	Hv	YS (MPa)	TS (MPa)	EL. (%)
Milling	229	280	629	85.2	326	814	903	27.3
Grinding	187	241	622	91.0	329	860	922	20.5
Polishing	142	237	609	92.7	317	804	880	28.0
W-EDM 1	203	223	576	90.2	295	786	847	24.2
W-EDM 3	166	226	607	91.9	312	830	893	22.8

3. 연구 수행 방안



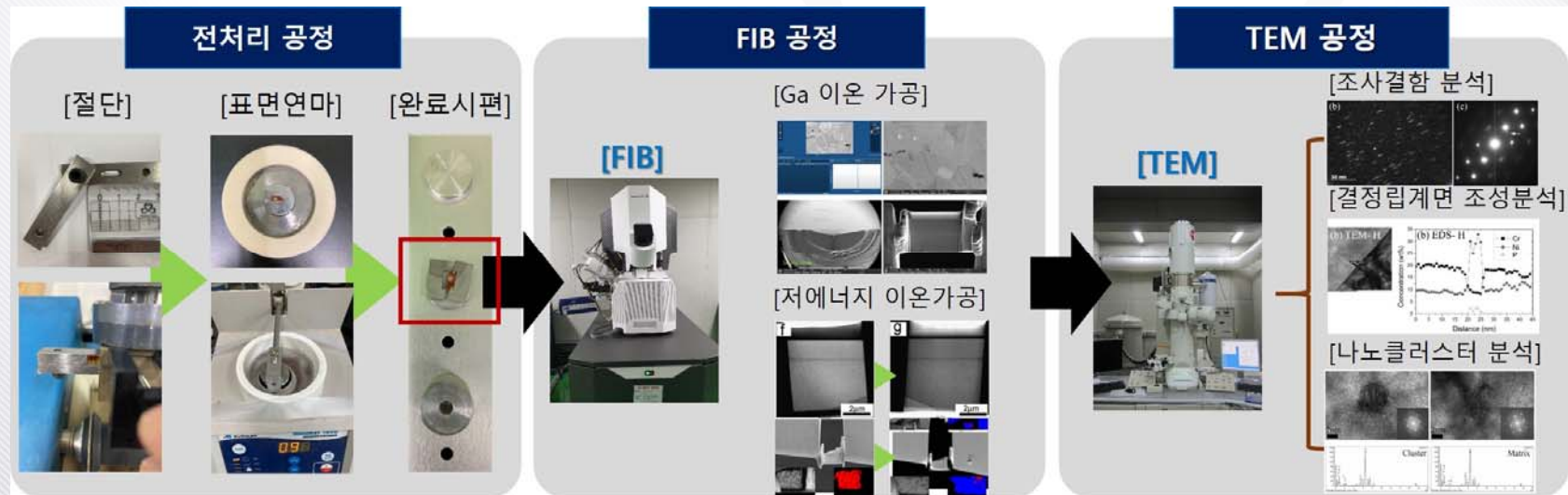
<Baffle plate에서 가공할 기계적성질 및 균열성장 평가용 시편의 형상>

3. 연구 수행 방안

❖ 중성자 조사재 미세조직 정밀 분석 기술 개발

- 조사재 분석 방사선 작업별 절차서 작성
 - 마이크로 조직 분석용 시편 제작 공정 개발
 - ✓ 소형 방사화 소재 가공 전처리 공정 수립
 - ✓ FIB 활용 TEM 분석시편 제작 공정 검증 후 전체 공정 완성
 - FIB 활용 미세조직 분석 및 TEM 시편 제작 공정 개발
 - ✓ FIB 활용 시 마이크로 시편 조직상 변화 (오스테나이트 상이 페라이트상으로 변태)
 - ✓ 인위적 상변화층을 제거하는 공정 (저에너지 이온밀링) 추가

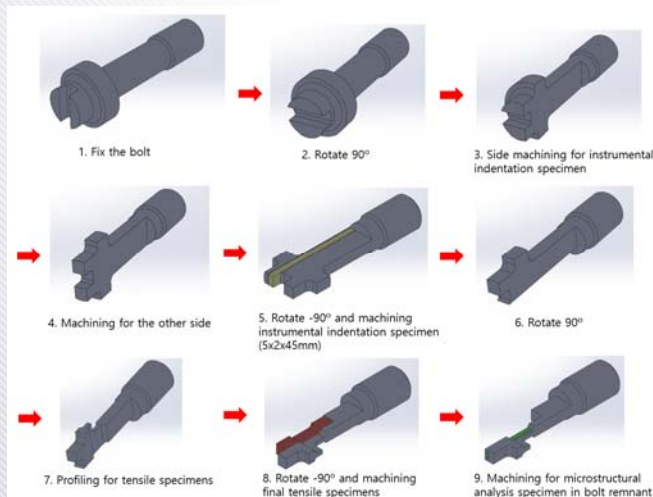
<마이크로 조직 분석용 TEM 시편 제작 공정>



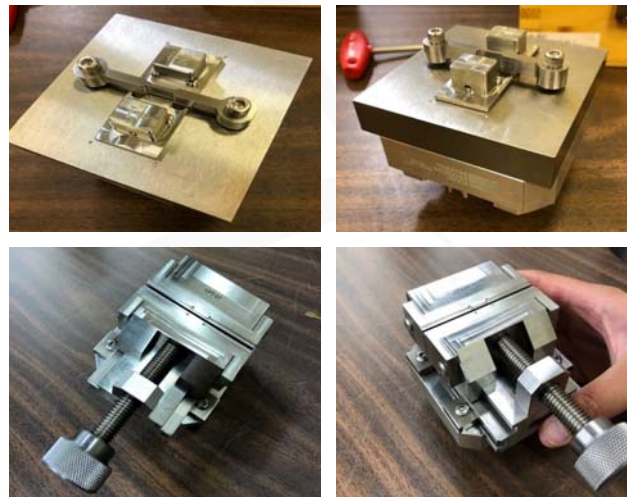
3. 연구 수행 방안

❖ 중준위급 방사성부품 원격 정밀 시편가공 기술 개발

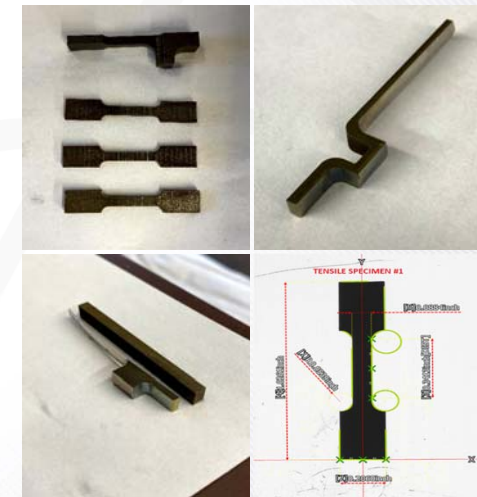
- 핫셀용 시편가공장비 설계/제작 및 가공 기술 개발
 - K-1 BFB 원격 정밀 시편가공 기술 개발을 위한 국외기술자문
 - ✓ BFB 시편 가공을 위한 가공 공정 개발
 - ✓ BFB 인장 시편 가공을 위한 W-EDM 치구 제작
 - ✓ BFB 인장 시편 가공을 위한 CNC 밀링 치구 제작
 - ✓ BFB 인장 시편 가공을 위한 W-EDM 프로그램 개발
 - ✓ BFB 인장 시편 가공을 위한 W-EDM 가공 테스트



<K-1 BFB 가공 공정 개발>



<핫셀용 시편 가공 치구>



<W-EDM 가공 테스트>

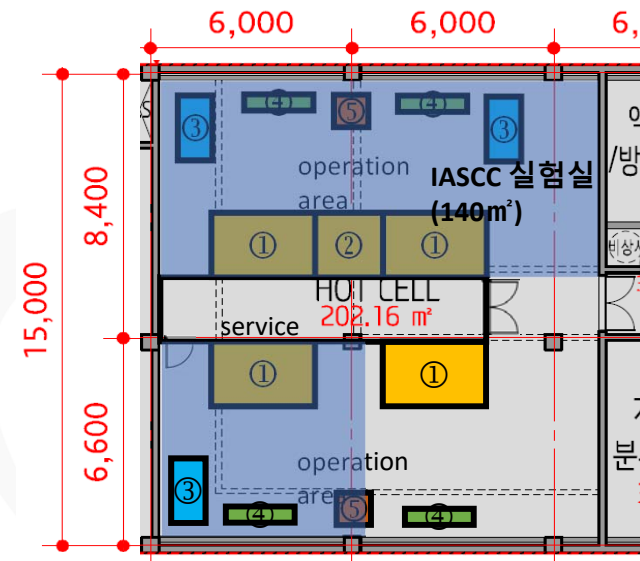
4. 중저준위 방사성 재료 취급시설

❖ New building for radioactive materials testing



▪ Building construction : June 2019 ~ Sept. 2020

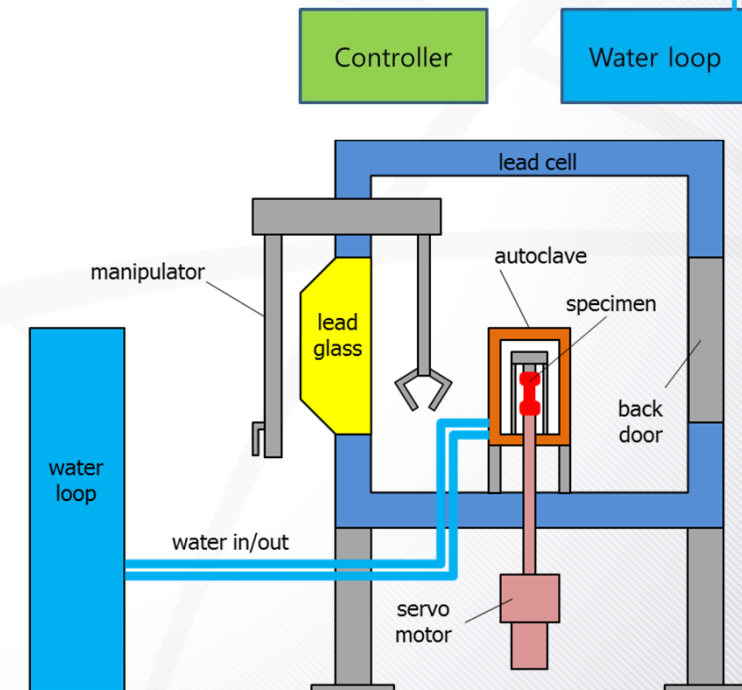
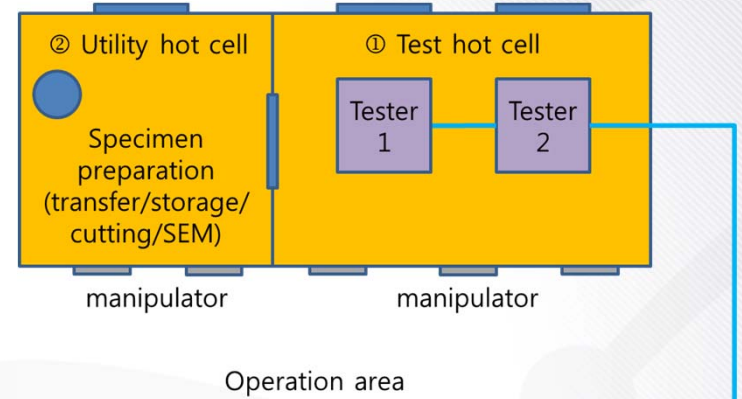
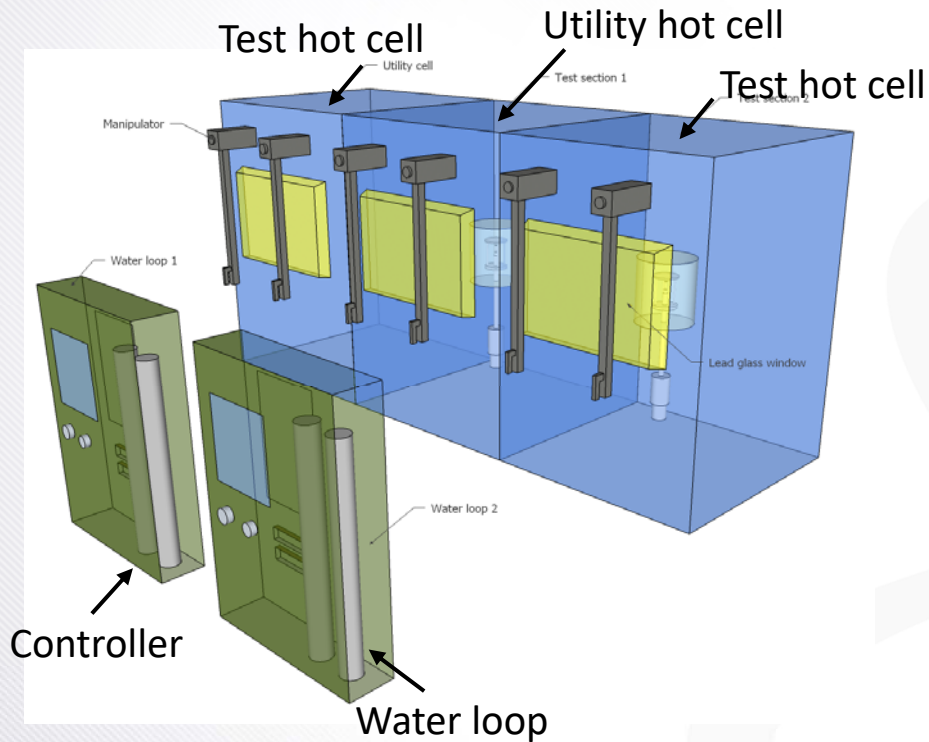
● Design of Test hot cell



- Area: 140m²
 - 3 hot cells, 4 units of IASCC demonstration facilities
- Key components
 - 1) Test hot cell (IASCC, 2m x 3m)
 - 2) Utility hot cell (2m x 2m)
 - 3) Water loop (2m x 1m)
 - 4) Controller (2m x 0.5m)
 - 5) Recirculation chiller (1m x 1m)

4. 중저준위 방사성 재료 취급시설

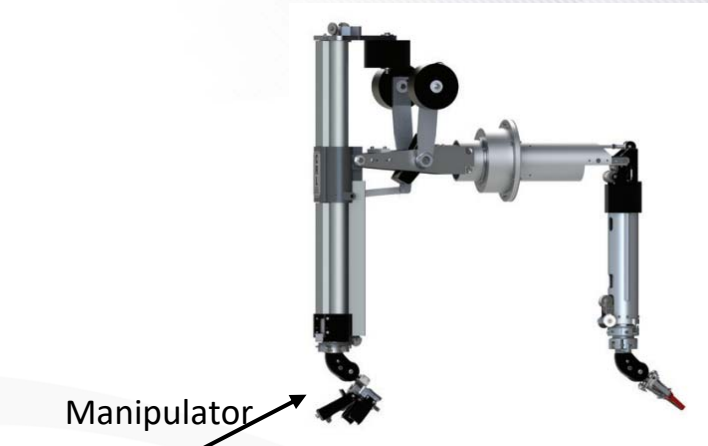
❖ IASCC* demonstration facilities



*IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking

4. 중저준위 방사성 재료 취급시설

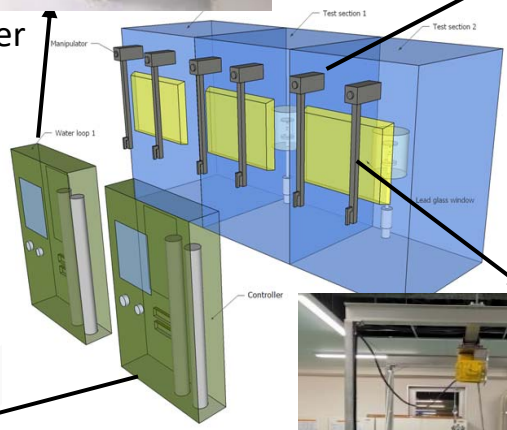
- ❖ Evaluation for radioactive materials
 - IASCC demonstration facilities
 - SSRT*: 360°C/20MPa
 - PWR primary water simulation loop



Manipulator

SSRT*: Slow strain rate tester

PWR primary water simulation loop



Slow strain rate tester



1차계통 제어설비



5. 방사선 차폐 설계

❖ Calculation of storage capacity:

Representative radioisotope: Co-60

:Gamma ray constant: 13.2 rem.cm².mCi-1.hr-1,

:Half value layer of lead for Co-60: 12 mm,

:Dose limit at the surface of the container: 0.0025 rem/h (X) (Sources are supposed to be in contact with the inner wall of the storage box.)

$$X = (\Gamma * S) / (r^2) * (1/2)^n$$

Storage capacity (S, mCi):

$$S = (X * r^2) / \Gamma * (2)^n$$

Where,

S : Storage capacity (mCi)

X : Dose limit at the surface of the container (0.0025 rem/hr)

r : Thickness of the container(cm)

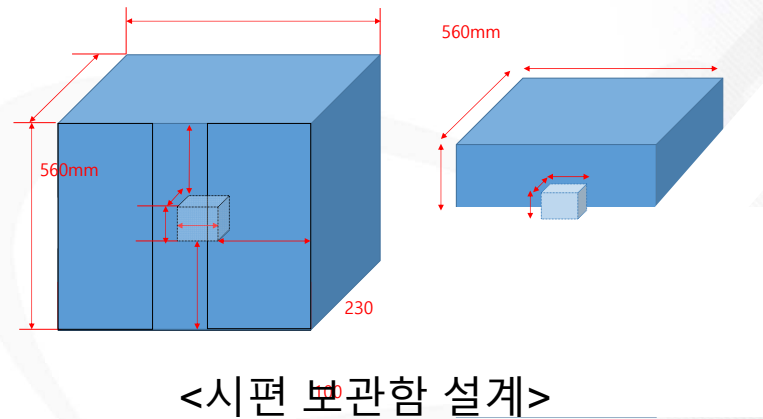
Γ : Gamma ray constant of Co-60 (13.2 rem.cm².mCi-1.hr-1)

n : number of Half value layer of Co-60

S (Lead cask cabinet type)

$$= (0.0025 * 23^2) / 13.2 * 2^{19.16} = 58,961 \text{ mCi} = 2.18 \times 10^6 \text{ MBq}$$

-> 허가 신청한 연간사용 허가량(1.86×10⁶ MBq)을 보관할 수 있는 차폐 보관함을 설계하여 보고서에 반영함.



6. 방사선 안전보고서

❖ 과기부 고시 1998-9호 '방사선안전보고서 작성지침'

○과학기술부고시 제1998-9호

원자력법시행규칙 제77조제2항, 제77조의2제2항, 제77조의3제2항의 규정에 의한 "방사선 안전보고서 작성지침"을 다음과 같이 고시한다.

1998년 6월 29일
과 학 기 술 부 장 관

방사선 안전보고서 작성 지침

제 1조(목적)

이 지침은 원자력법시행규칙 제77조 제2항, 제77조의2 제2항 및 제77조의3 제2항의 규정에 의한 방사선안전보고서(이하 "보고서"라 한다) 작성에 관한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제 2조(적용범위)

이 지침은 방사성동위원소 및 방사선발생장치의 사용허가와 방사성동위원소 판매허가신청에 따른 허가신청자의 보고서 작성에 적용한다.

제 3조(정의)

이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

1. "사업소"라 함은 방사성동위원소 또는 방사선발생장치의 사용 또는 판매를 위하여 등기부등본 또는 사업자등록증에 등재된 주소지에 설치한 사용시설, 분배시설, 저장시설 또는 폐기시설이 위치한 건물과 그 건물의 부속건물 및 토지를 말한다.
2. "대단위사업"이라 함은 다음 각 목에 해당하는 사업을 말한다.
 - 가. 방사성동위원소등의 이동사용을 전문으로 하는 사업
 - 나. 식품 등에 방사선을 조사하는 것을 전문으로 하는 사업
 - 다. 단위시설당 밀봉된 방사성동위원소 111테라베크렐(3,000큐리)이상 사용하는 사업
 - 라. 단위시설당 1기가 전자볼트 이상의 방사선발생장치를 사용하는 사업

6. 방사선 안전보고서

❖ 보고서의 내용

- 시설총괄
 - 시설주변의 환경
 - 운영계획 개요
 - 방사선원의 특성 및 제원
 - 안전시설 및 계통 개요
 - 방사선 취급방법 및
 - 방사선안전관리 계획
 - **예상 피폭방사선량의 평가**
 - 주변환경에 대한 방사선영향
 - 방사성폐기물 발생 및 처리
 - 종합결론
-
- 1차 질의에 답변서 제출(2021.05.10)
 - 2021. 8월 이전 시설사용허가 완료 목표

KAERI/RI허가/(시설코드)

방사선안전보고서

시 설 명	방사성동위원소 실험동(제2연구동)
허가구분	비밀봉

한국원자력연구원

7. 요약

- ❖ 2015년 고리 1호기 원자로 내부구조물 볼트(BFB)에서 결함 발생
- ❖ BFB 손상원인 분석 필요
- ❖ 고 방사선 손상시편 인출/운송계획 수립
- ❖ 방사성동위원소 시험동 구축(Hot cell 포함) (KAERI)
- ❖ 방사선 안전보고서 작성 제출
- ❖ 방사선 차폐 설계 완료
- ❖ 가동원전 운영 안전성 향상에 기여

감사합니다