

더 나은 세상을 위한 원자력기술,
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



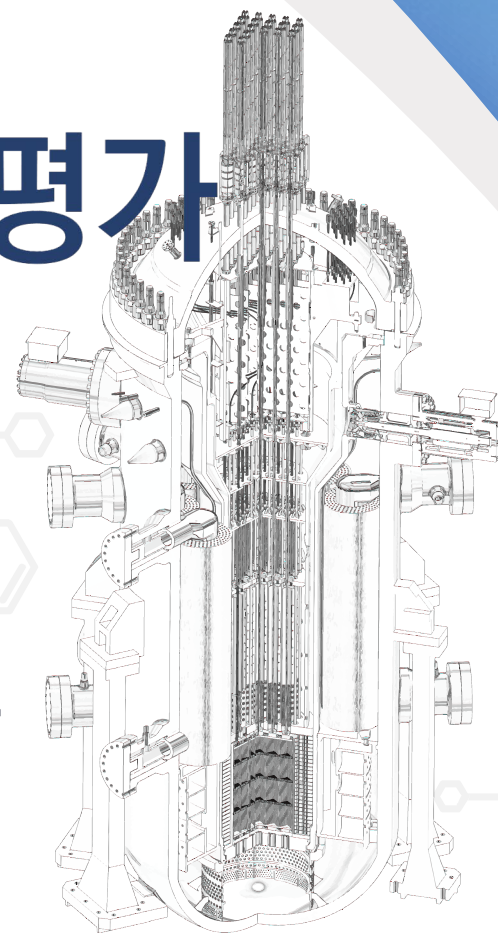
핵연료 조사후 성능시험평가 기술개발 현황

2025.05.21.

조사후시험평가부 김성근



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



01 시설 개요

02 기술 개발 현황

03 기술 확충

CONTENTS



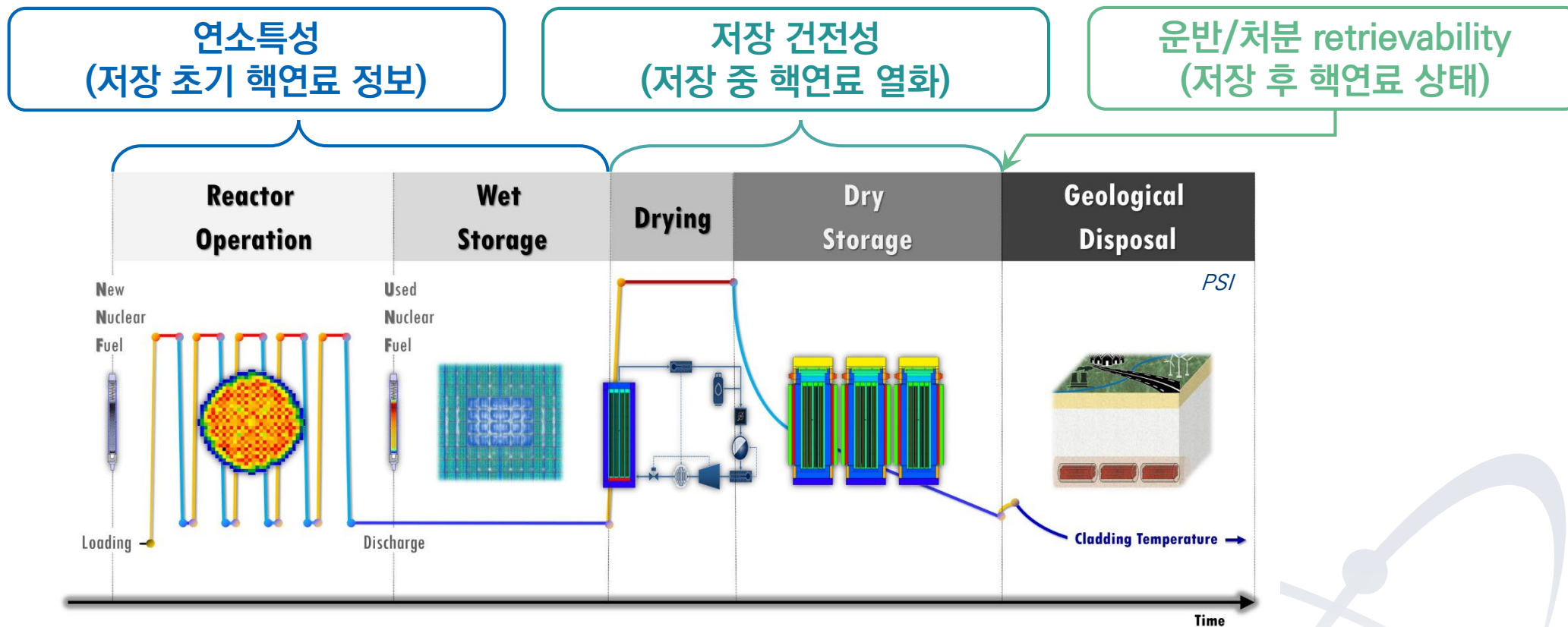
01

시설 개요



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

안전한 저장을 위한 조사후시험의 필요성



핵연료 안정성 입증
실증자료 확보

예측 모델링/코드 검증
신뢰성 확보

설계기준/규제/정책
근거 자료 제공

사용후핵연료
조사후시험

Reactor Operation

- Fission gas release
- Hydriding, Oxidation
- Corrosion, CRUD

Dry Storage

- Clad Temp. < 400 °C
- Min. 20 yrs

Thermal Creep & Rupture

- 고온상태/봉내압에 의한 변형
- creep strain $\leq 1\%$

Hydride Reorientation(HR)

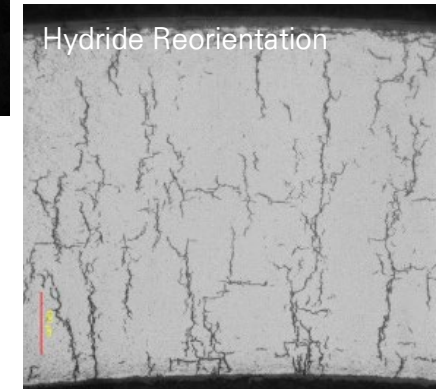
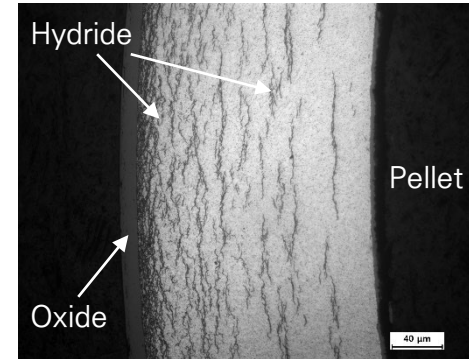
- 저장 초기 피복관 온도 상승 → 수소화물 용해 → 저장 중 피복관 냉각
→ 수소화물 재침전 & hoop stress → 수소화물 반경방향 재배열 → 취성 증가
- hoop stress ≤ 90 MPa, thermal cycling ≤ 10 회($\Delta 65$ °C)

Delayed Hydride Cracking(DHC)

- 피복관 균열선단 응력 작용 → 균열선단 수소화물 석출 → 균열 성장

Transportation

진동 및 충격하중으로 인한 Bending, Fatigue 등



조사후연료시험시설(Post Irradiation Examination Facility)

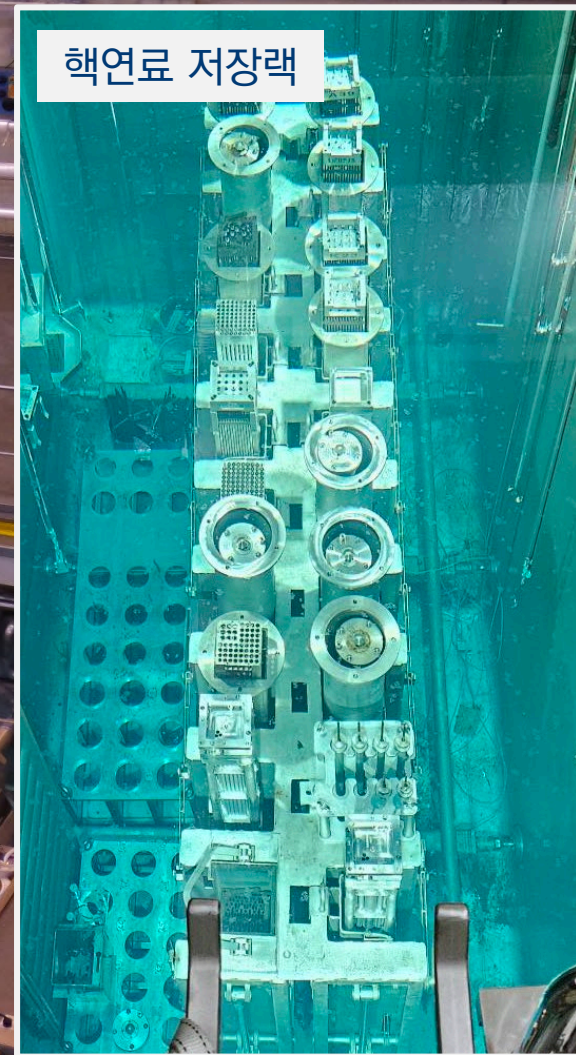
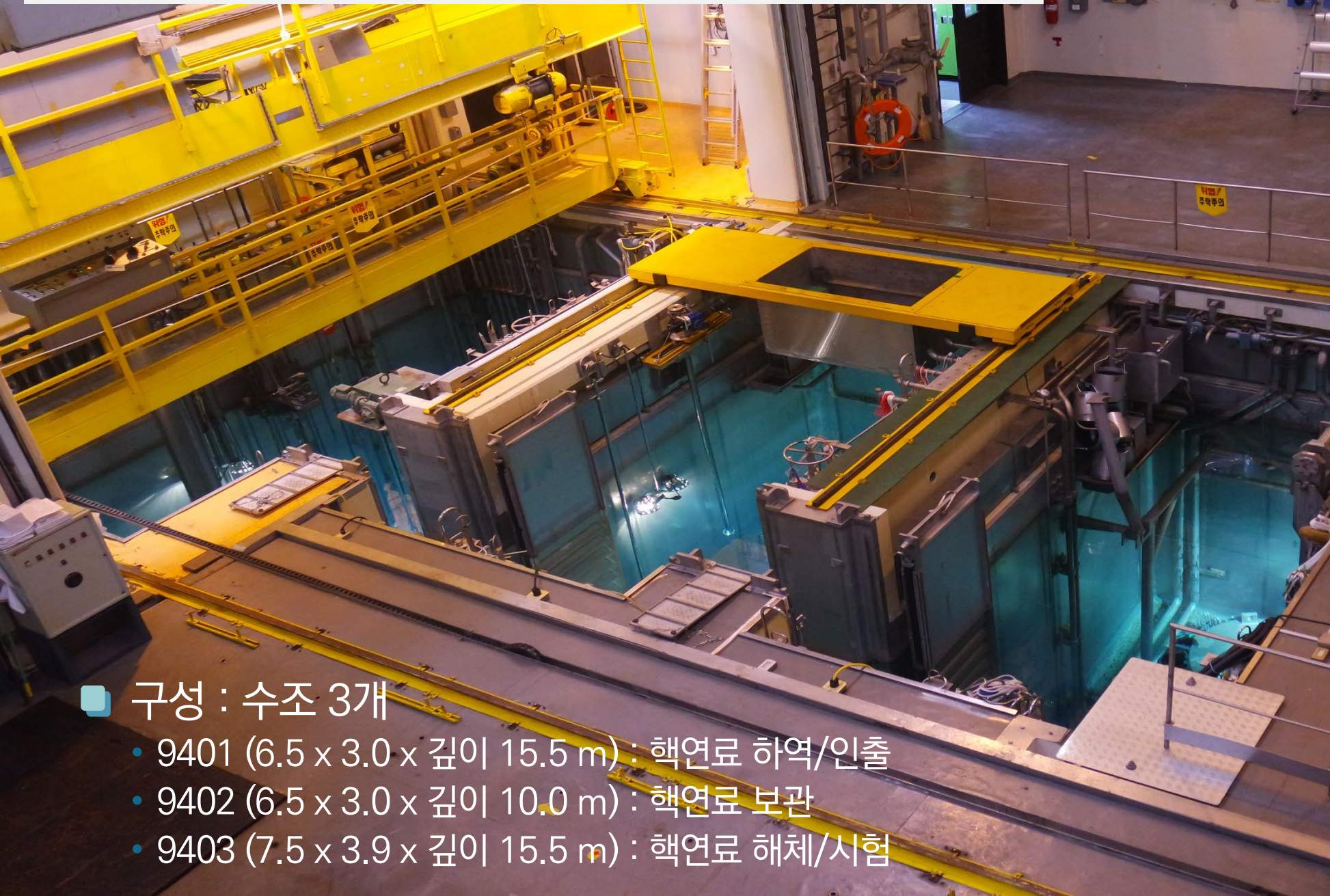
- ❏ 운영 이력 : '85년 준공, '91년 3월 운전 개시
- ❏ 시설 규모 : 지상 2층, 지하 3층 (2,500평)
- ❏ 주요 설비 : 수조 3개, 핫셀 6개, 핫랩

❏ 취급 핵연료

구분	농축도	연소도(MWd/MTU)	냉각기간
PWR(경수로)	최대 5%	70,000 이하	6개월 이상
PHWR(중수로)	천연 우라늄	17,000 이하	6년 이상



수조 설비 : 핵연료 인출/보관/해체/시험 수행



■ 구성 : 수조 3개

- 9401 (6.5 x 3.0 x 깊이 15.5 m) : 핵연료 하역/인출
- 9402 (6.5 x 3.0 x 깊이 10.0 m) : 핵연료 보관
- 9403 (7.5 x 3.9 x 깊이 15.5 m) : 핵연료 해체/시험

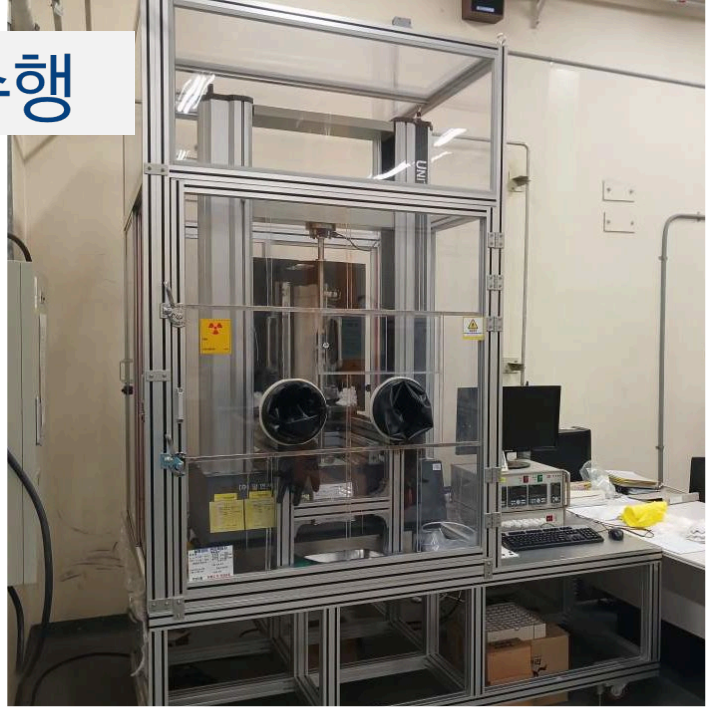
핫셀 설비 : 핵연료봉 비파괴/파괴 시험 수행



- 구성 : 콘크리트셀 4개, 납셀 2개
- 9404(1) : 핵연료 비파괴시험(외관검사, 결함검사 등)
- 9405~7(3) : 핵연료 파괴시험(봉내압측정, 시편정밀제작 등)
- 9408~9(2) : 핵연료 조직시험



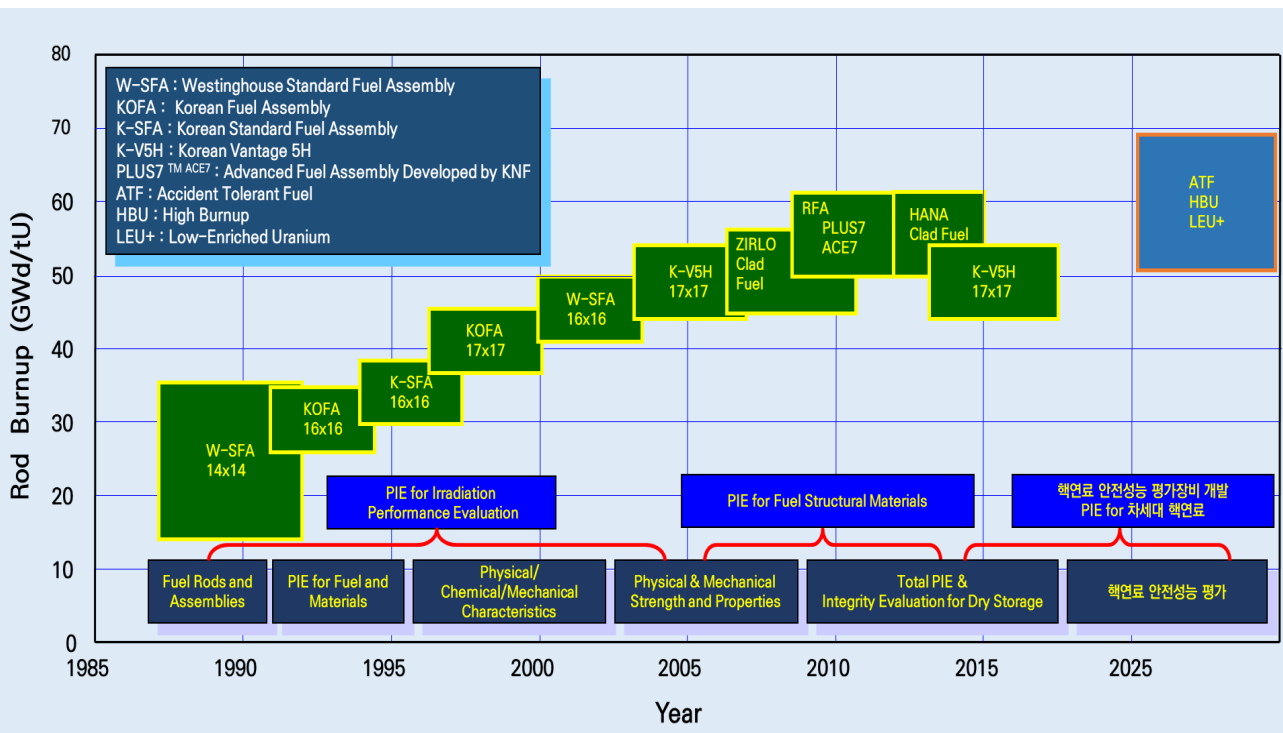
핫랩 : 핵연료 및 구조부품(피복관/지지격자) 시편 시험 수행



01 시설 개요

시설 이력

연구 내역



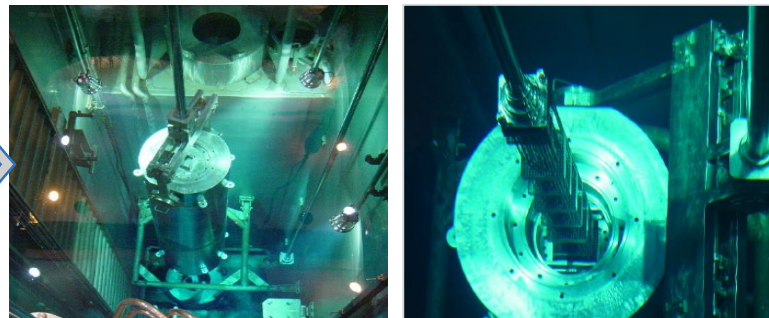
- 1991~1995 • 사용후핵연료 수증 및 핫셀시험 기반 기술 개발
- 1996~2011 • 상용 원전 운전 연료 손상 원인 규명 핫셀시험
- 2005~2008 • 상용 원전 운전 연료 연소성능 핫셀시험
- 2007~2013 • 개량 핵연료 골격체/연료봉 노내 연소성능 및 건전성 평가
- 2010~현재 • 사용후핵연료 손상원인 규명 핫셀시험
 • 고연소도 연료봉의 노내 성능 핫셀시험
- 2011~2016 • 사용후핵연료 건식저장 장기건전성 평가기술 개발
 (저연소도 사용후핵연료 건식저장 조건 하의 건전성 평가 핫셀시험)
- 2011 • 개량 핵연료(PLUS7) 프레팅마모 평가 핫셀시험
- 2013~2014 • 개량 핵연료(16ACE7) 프레팅마모 평가 핫셀시험
- 2017~현재 • 사용후핵연료 안전 운반 기술개발
 - 손상 집합체 운반 기술 개발
 - 손상 연료봉 및 절편 운반 기술개발
- 2028 이후 • ATF/LEU+/고연소도 핵연료 노내 연소성능 검증기술개발
 - 연료봉 정상 및 과도/사고조건 성능 평가 핫셀시험

사용후핵연료 운반 및 시험 절차

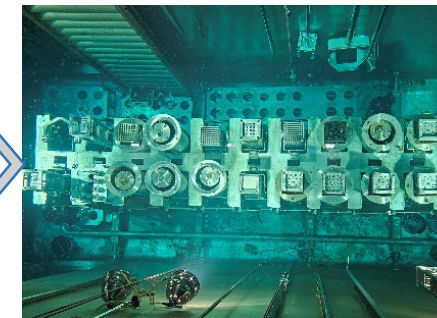
① Fuel transportation(NPP→PIEF)



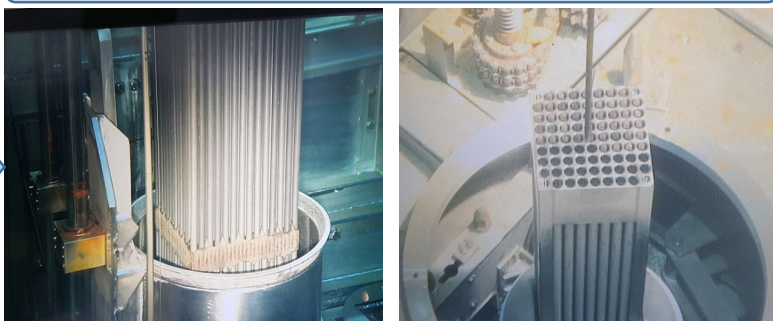
② Fuel unloading(Pool area)



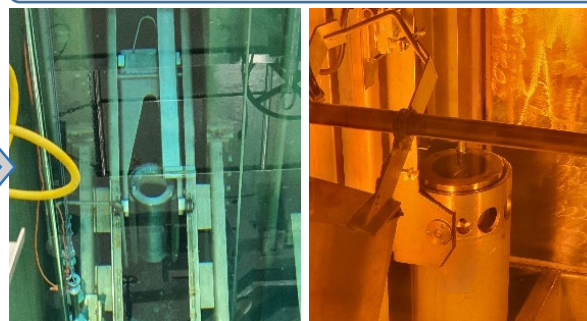
③ Fuel Storage rack



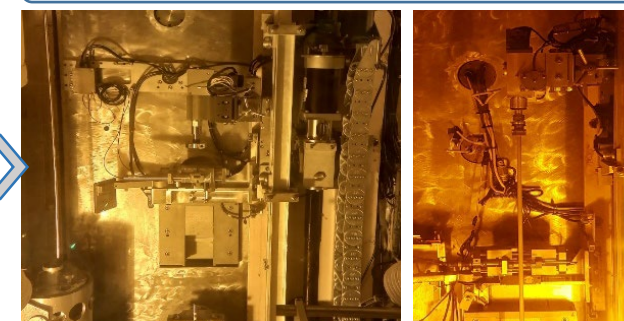
④ PSE and Fuel rod extraction



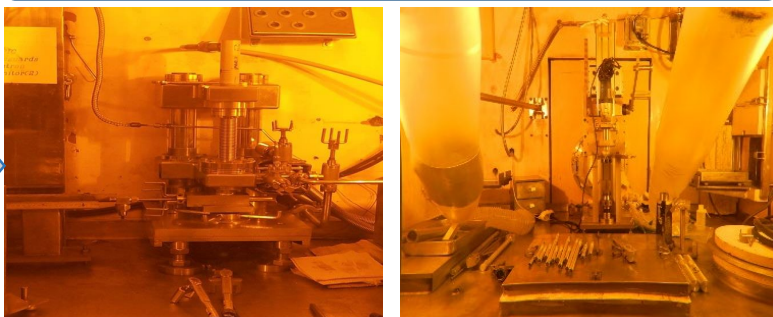
⑤ Elevating system(Pool↔Hot cell)



⑥ Non-destructive tests(Hot cell)



⑦ Destructive tests/Sampling(Hot cell)



⑧ Mechanical tests and Analysis(Hot Lab.)





02

기술 개발 현황



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

사용후핵연료 조사후시험 보유 기술

집합체/골격체 시험

- ✓ 외관 검사
- ✓ 제원 측정
- ✓ 조사지지격자 충격 강도 평가
- ✓ 안내관 특성 평가

연료봉 시험

- ✓ 외관 검사
- ✓ 제원 측정
- ✓ 결함 검사
- ✓ 산화막두께 측정
- ✓ 감마스캐닝
- ✓ 봉내압 측정
- ✓ 핵분열 기체 분석

시편 시험

소결체

- ✓ 조직 관찰
- ✓ 성분 분석
- ✓ 미세 감마스캐닝
- ✓ 밀도측정
- ✓ 나노 압입

피복관

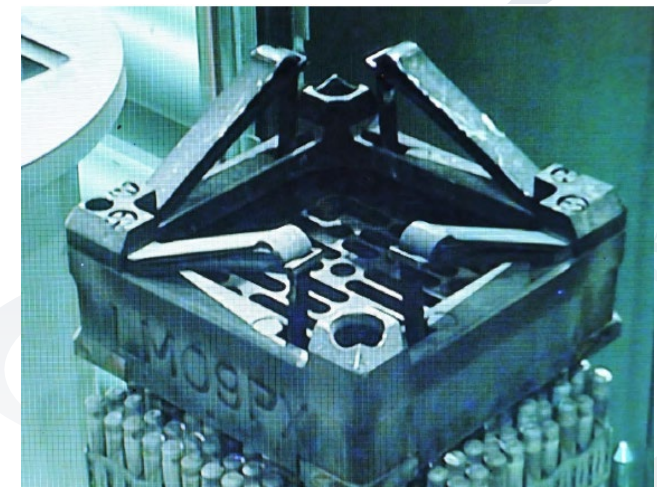
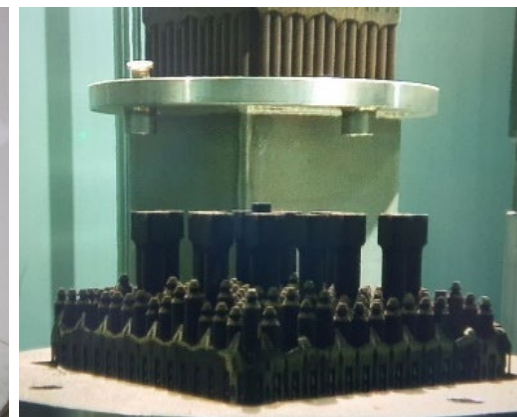
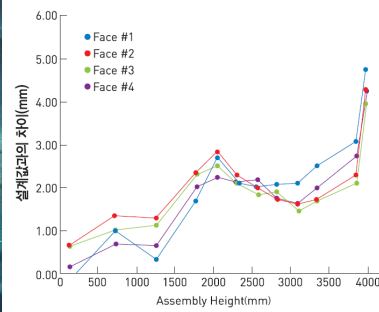
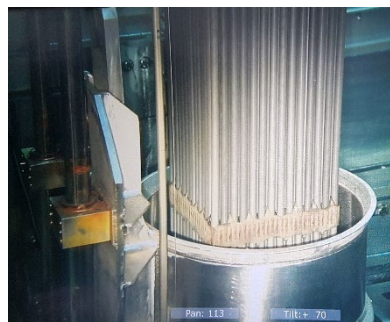
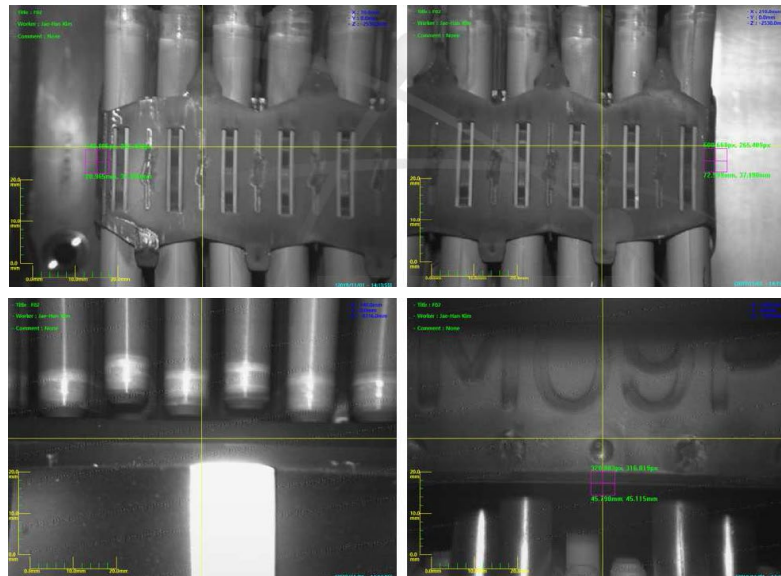
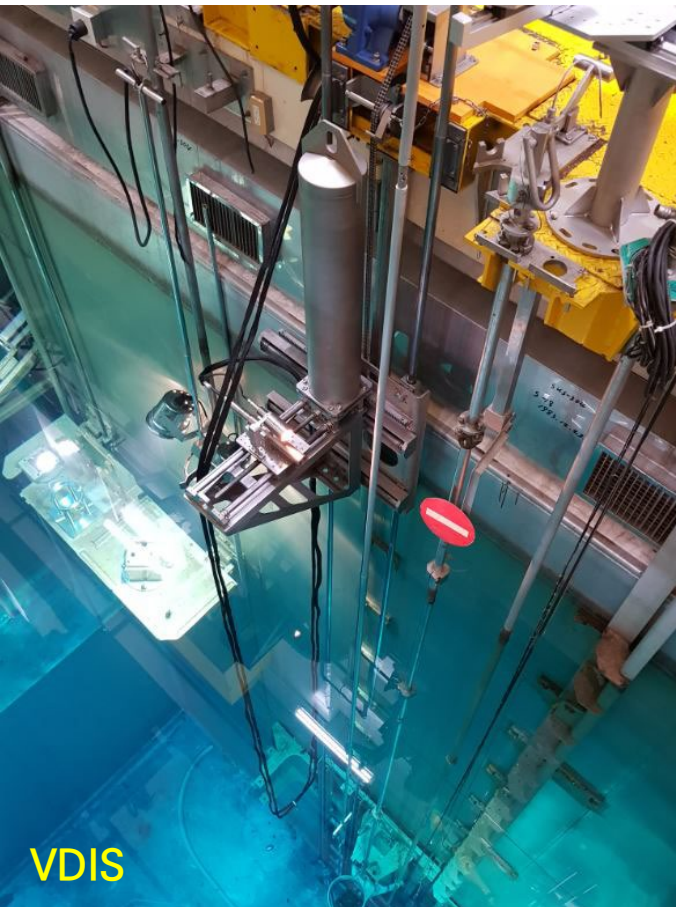
- ✓ 내압 크립
- ✓ 자연수소화균열
- ✓ 수소화물재배열
- ✓ 내압 피로
- ✓ 인장/압축
- ✓ 마이크로/나노 압입
- ✓ 안전성능평가(LOCA/RIA/PCI)
- ✓ 조직 관찰
- ✓ 성분 분석
- ✓ 수소함량 분석
- ✓ 열중량 분석

집합체/골격체 시험

■ 사용후핵연료 집합체 수중 시험

■ 집합체 외관 검사 및 제원 측정

- Visual and Dimensional Inspection Stand (VDIS) (Ranges: 350 mm(x, y), 16,000 mm(z))



집합체/골격체 시험

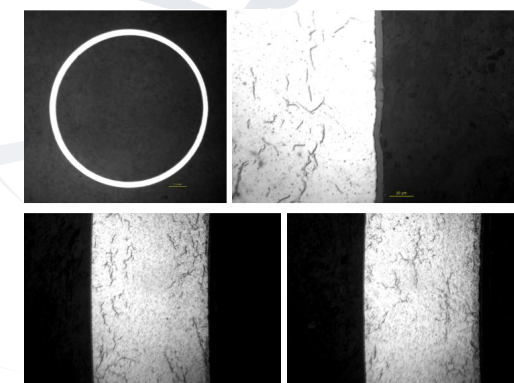
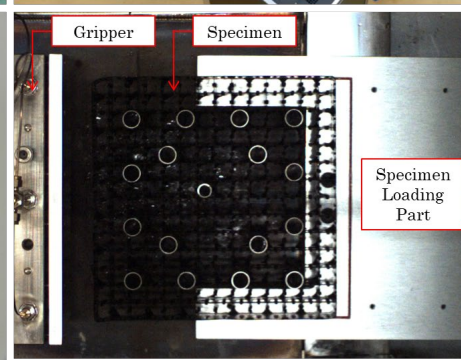
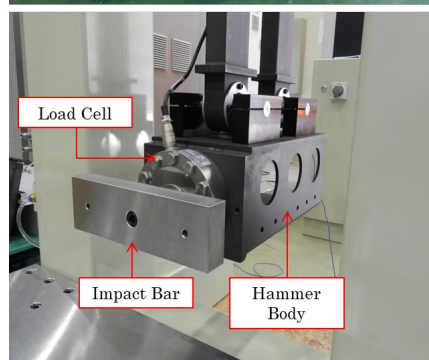
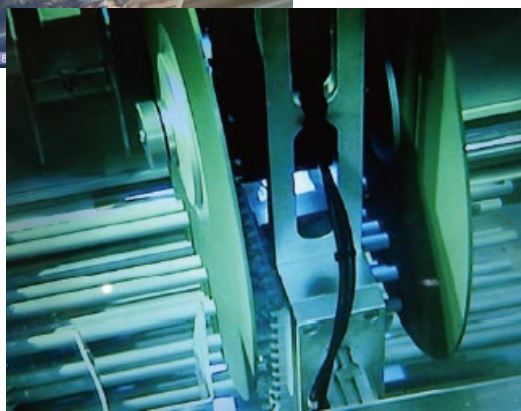
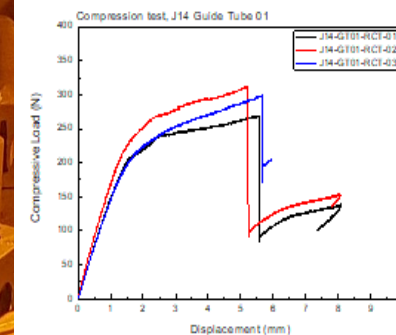
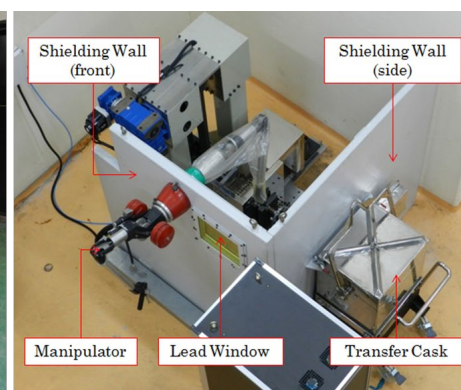
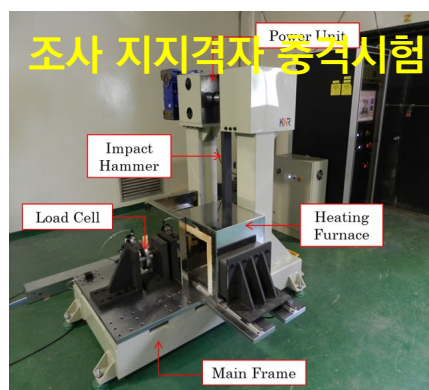
골격체 해체 및 시험

조사 지지격자 충격시험

- 상온/고온(~500 °C) 조사 지지격자 임계 충격력 및 좌굴 거동 평가

안내관 특성 평가

- 기계물성, 수소함량, 미세구조 등 평가



연료봉 시험

■ 비파괴 시험 (연료봉 전장)

■ 외관 검사 (Periscope)

- 표면 손상, 부식상태, 원주/축 방향 검사

■ 제원 측정 (LVDT)

- 직경변화, 축방향 힘, 길이 측정

■ 결함 검사 (ECT)

- 결함 형태, 크기, 방향 등 평가

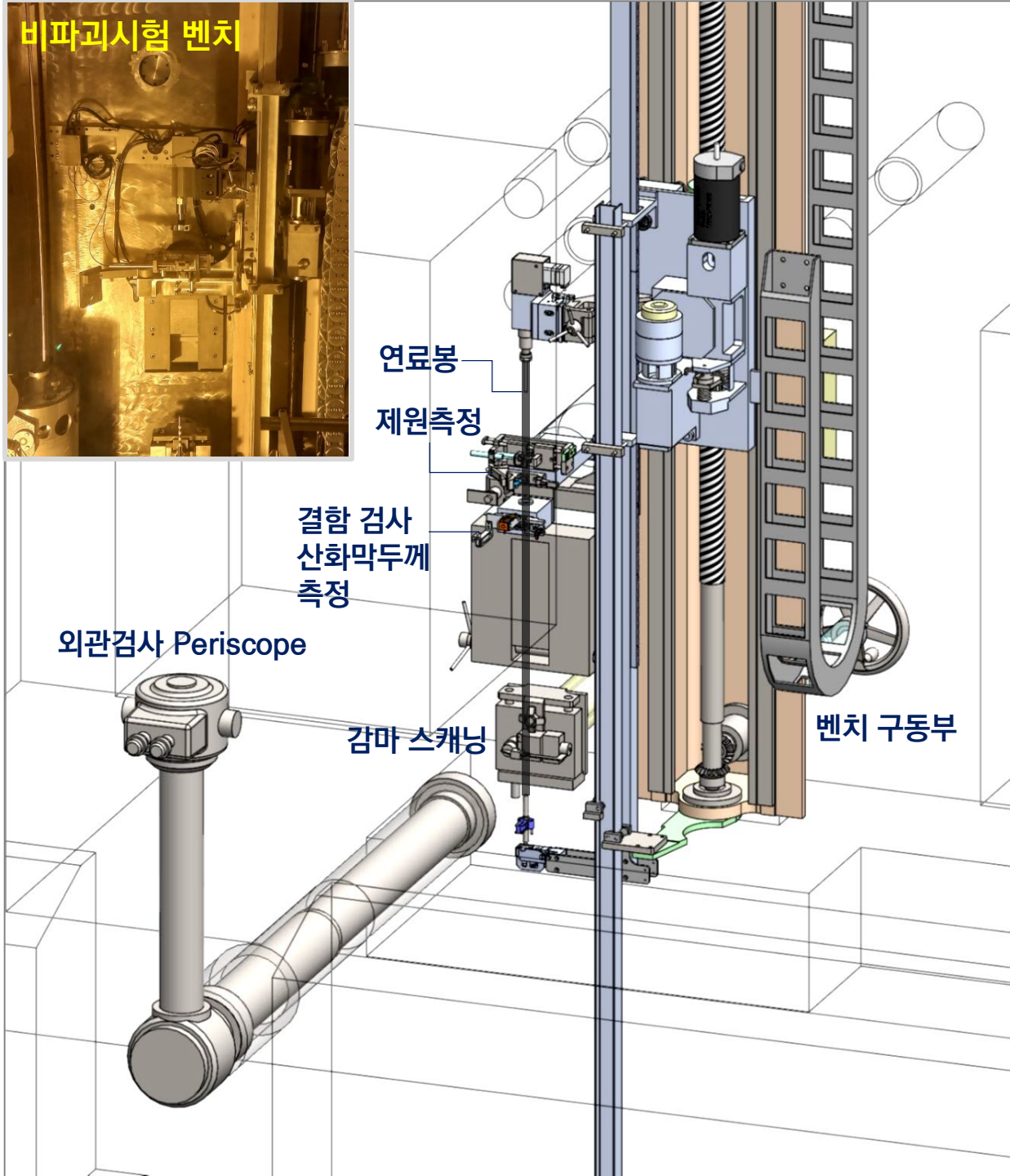
■ 산화막두께 측정 (ECT)

- 피복관 산화, 산화층 두께 분포 측정

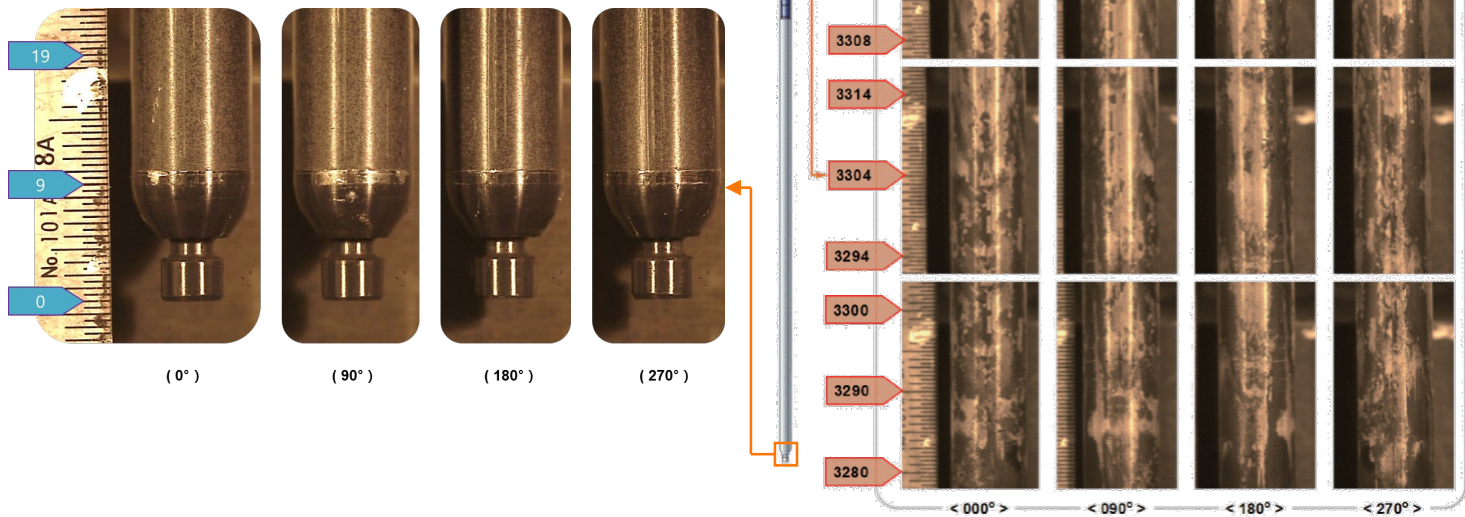
■ 감마스캐닝

- 연소상태, 활성길이(active length), 축방향 연소도 분포 등 평가

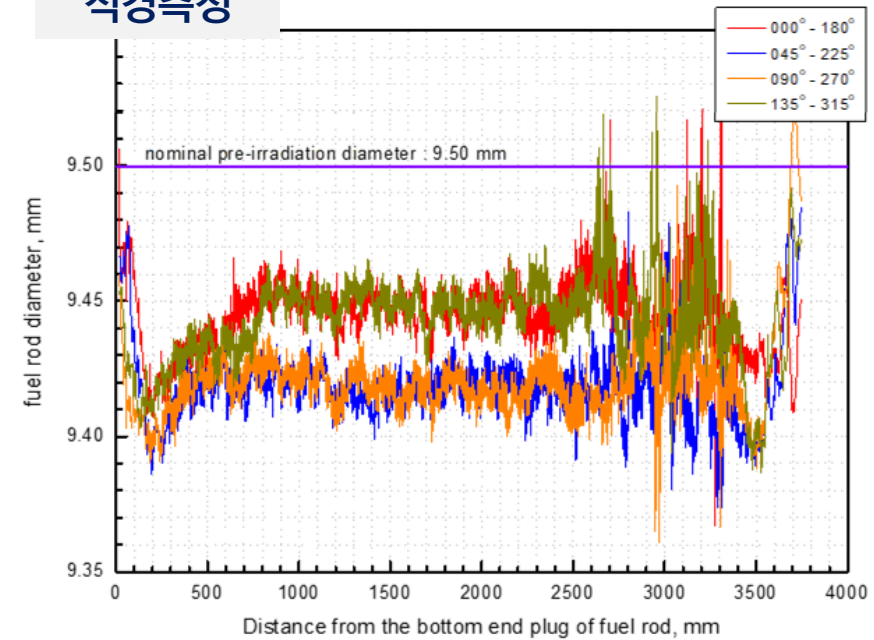
비파괴시험 벤치



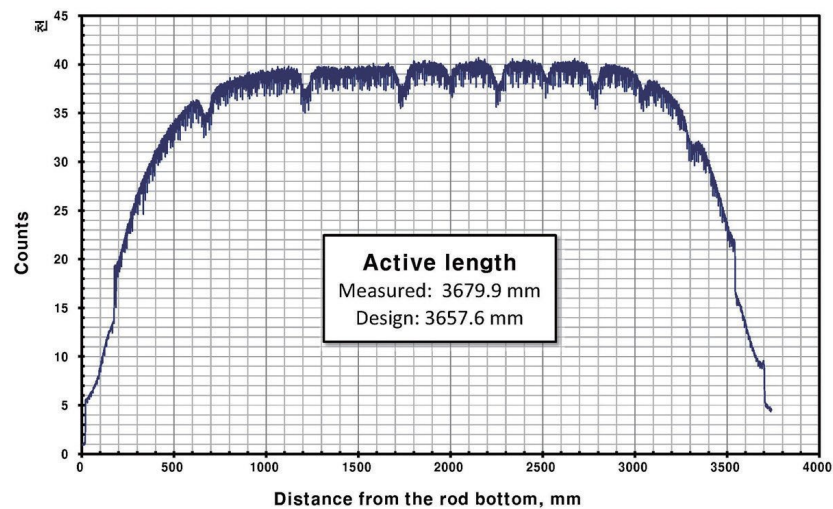
외관검사



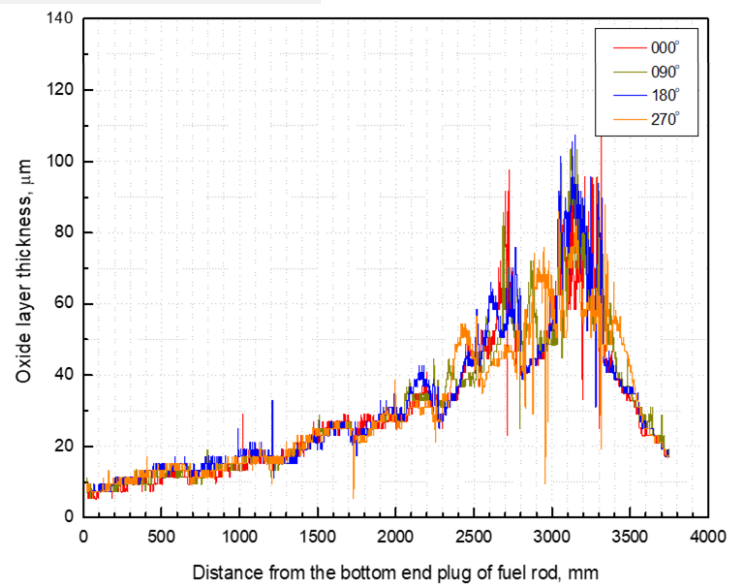
직경측정



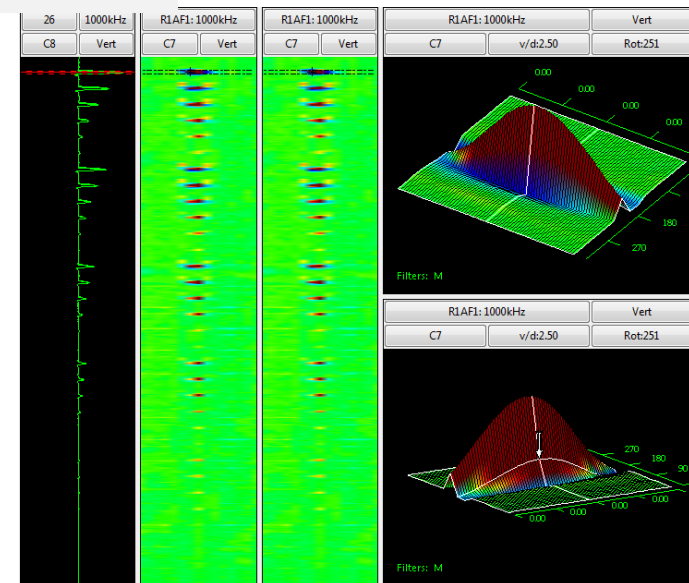
감마스캐닝



산화막두께측정



결함검사



파괴 시험

■ 봉내압 측정 및 핵분열 기체 방출량 평가

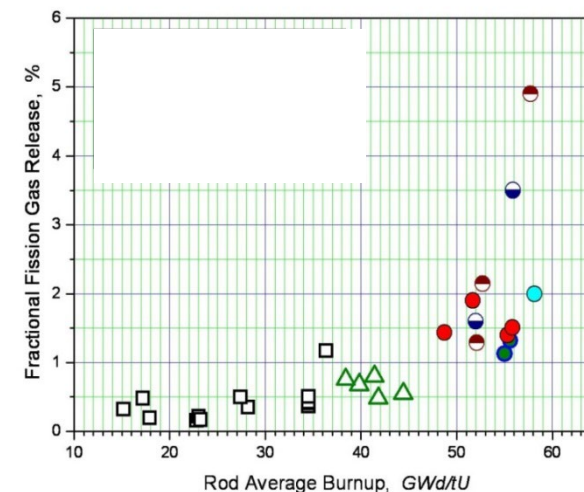
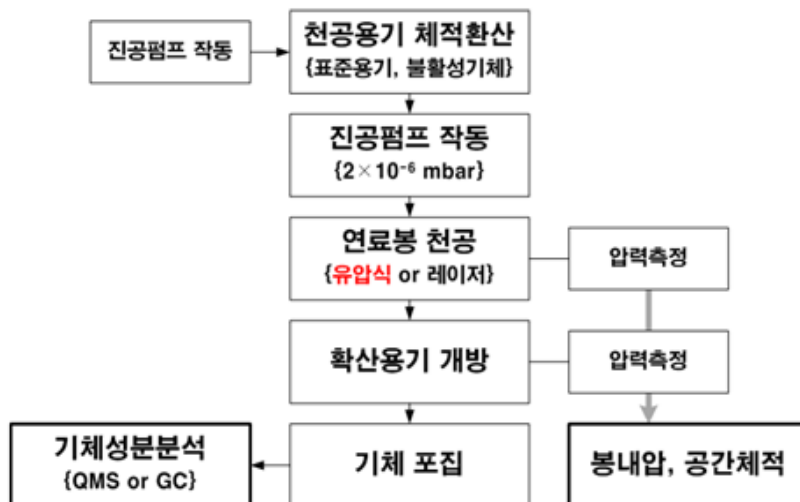
- 연료봉 천공, 봉내압 및 핵분열 기체량, 공간체적 평가

■ 핵분열 기체 성분 분석

- 핵분열 기체 성분, 핵종별 방출비 분석



핵분열 기체 분석 절차



Fission gas ratio as a function of burn-up

연료봉 시험 : 시편 제작

조직/성분분석
시편 제작

거시절단

미세절단 (~ 5 mm)

핫 마운팅

연마/폴리싱/에칭

소결체 제거 (~ 300 mm)

정밀가공

피복관 시험
시편 제작

내부 결함검사

02

기술 개발 현황

시편 시험

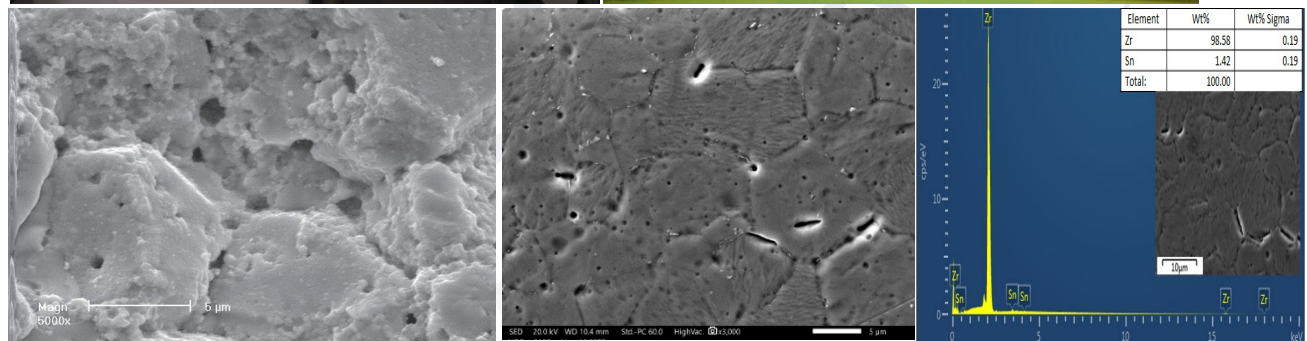
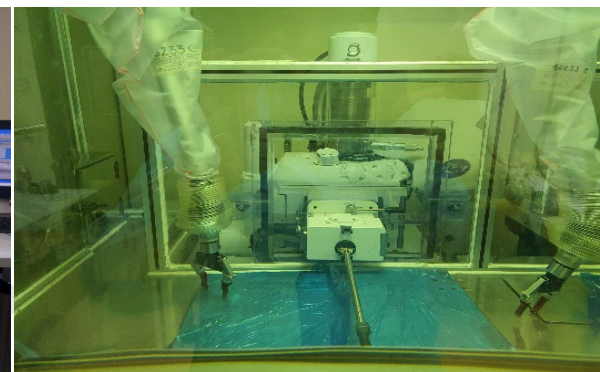
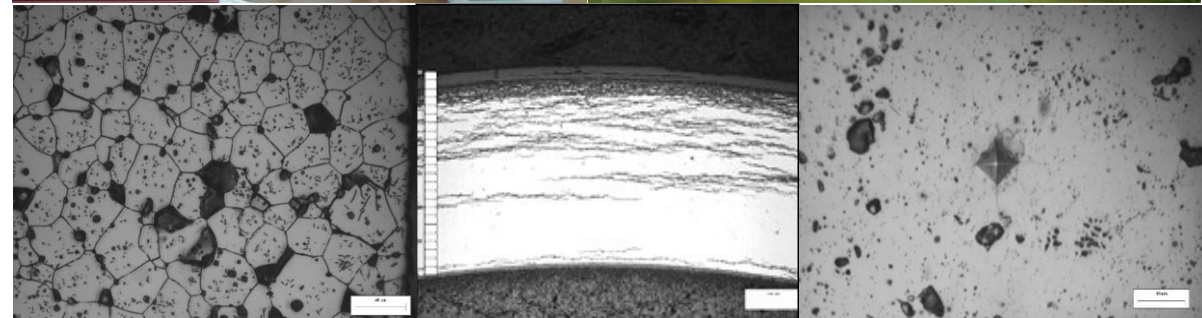
■ 미세조직 관찰 및 성분 분석

■ 광학현미경

- 소결체/피복관 조직관찰, 경도 측정
- 조사피복관 수소화 평가
- 배율 : x50 ~ 900

■ 주사전자현미경 (SEM, JEOL社)

- 소결체/피복관 미세조직 및 성분 분석
- 배율 : x5 ~ 300,000
- WDS/EDS : Chemical composition (ex. 소결체 내 핵분열생성물 평가)
- EBSD : Crystal structure



02

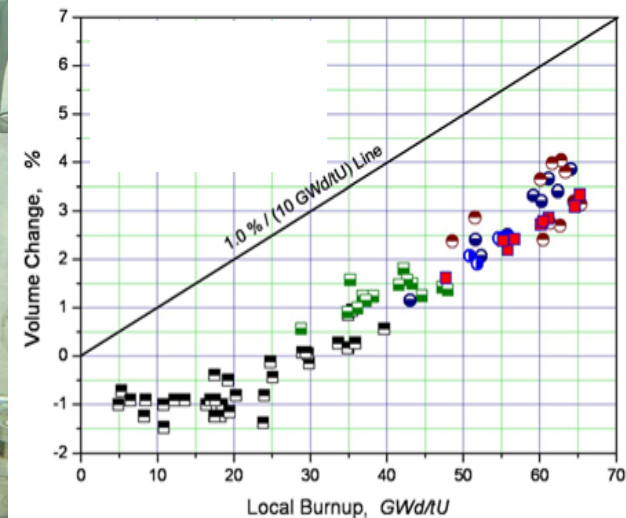
기술 개발 현황

시편 시험

소결체 특성 분석

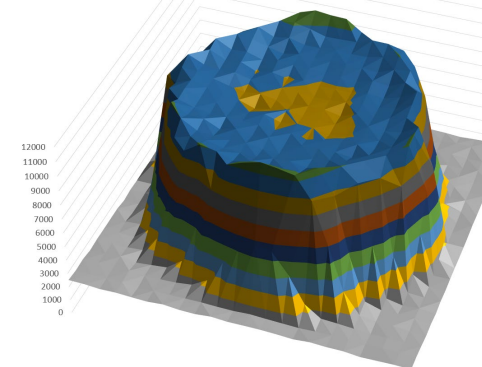
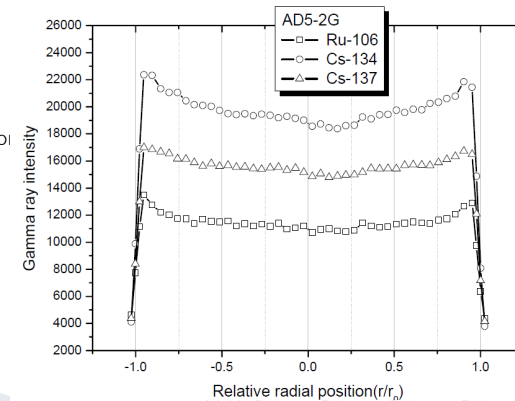
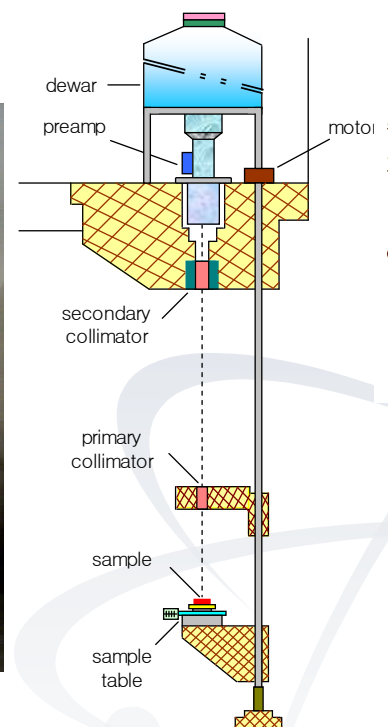
밀도측정

- 소결체 연소거동(densification, swelling)
- 부피변화 특성 평가



미세 감마스캐닝

- 소결체 반경방향 핵종 분석
- Cs-137, Cs-134 핵종 migration 확인

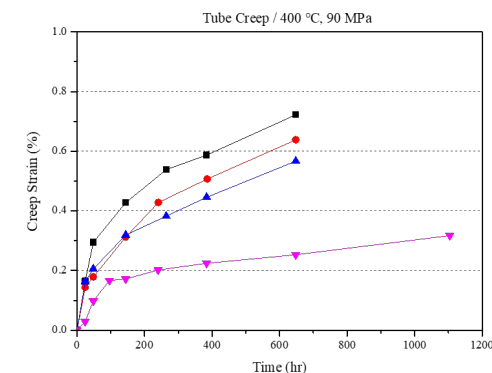
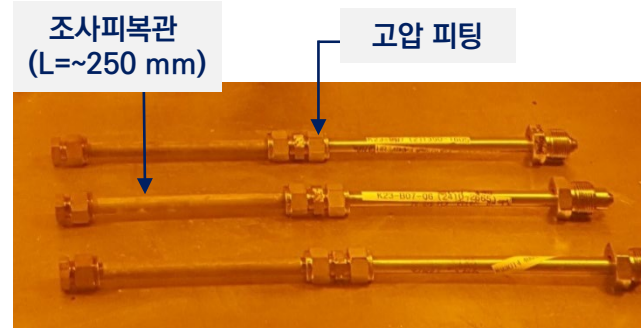


시편 시험

■ 피복관 기계시험

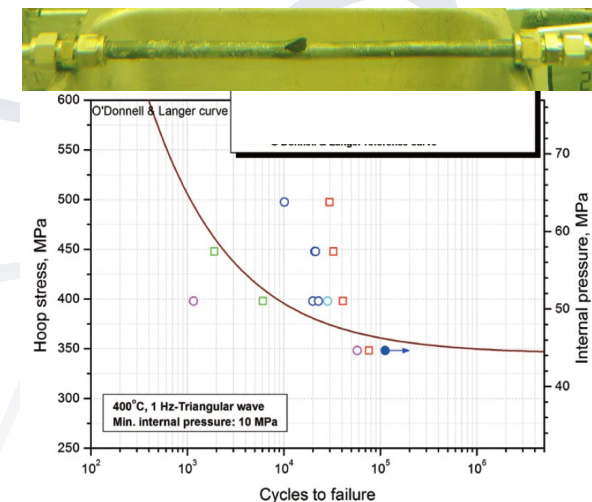
■ 내압 크립시험

- 저장 조건 조사피복관 고온 크립거동 평가
- 장비 구성 및 특징
 - 가열로 : 최대 600 °C
 - 가압부 : Ar 가스, 최대 130 MPa
 - 직경변형 측정부 : Laser extensometer
 - 납차폐 글로브박스



■ 내압 피로시험

- 조사피복관 피로특성 평가
- 장비 구성 및 특징
 - 가열로 : 최대 600 °C
 - 가압부 : Si oil, 최대 80 MPa
 - 부하 주기 : 0.5-2 Hz
 - 납차폐체



■ 피복관 기계시험

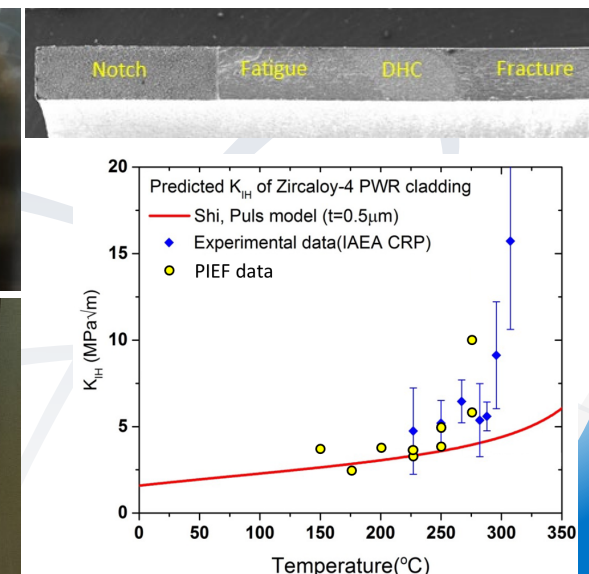
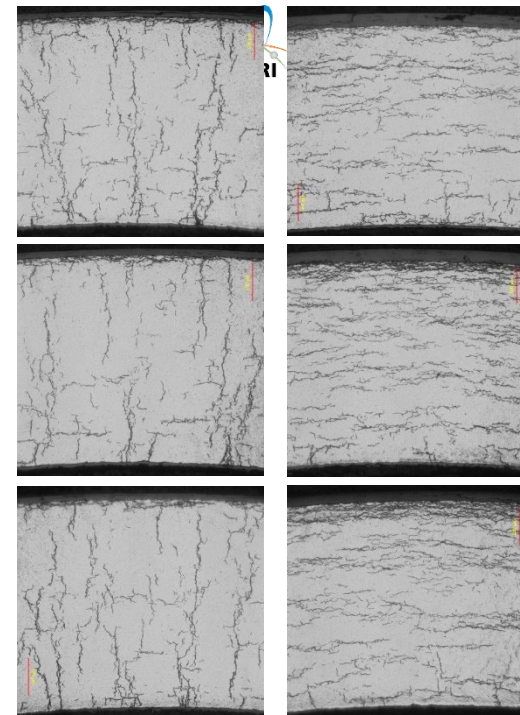
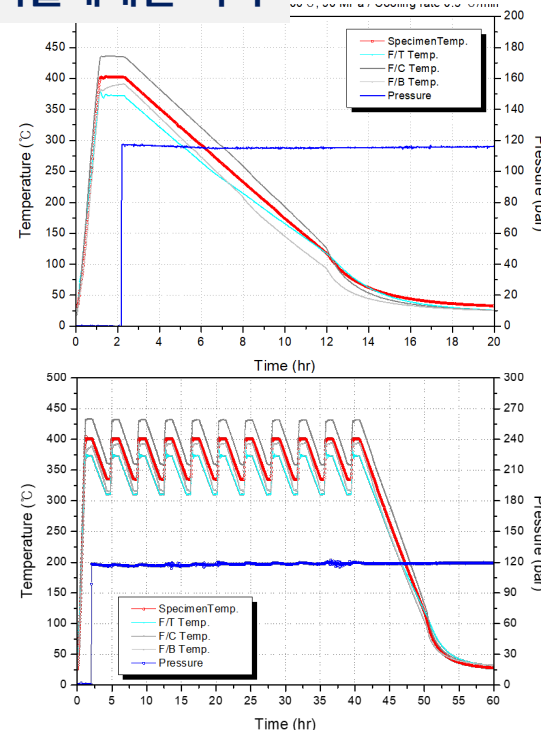
■ 수소화물재배열 처리(HRT)

- 저장 조건 수소화물 재배열 현상 모사
- 영향 인자
 - 피복관 온도, 냉각속도
 - 원환응력(hoop stress)
 - Thermal cycling($\Delta 65^\circ\text{C}$)

■ 자연수소화균열(DHC) 시험

- 저장 조건 자연수소화물균열 특성 평가
- 장비 구성 및 특징
 - 용량 : 최대 2 kN(dynamic : 3 kN)
 - 가열로 : 최대 350°C
 - 균열 진전 측정 : COD 게이지, DCPD
 - 임계응력확대계수 K_{IH} 도출

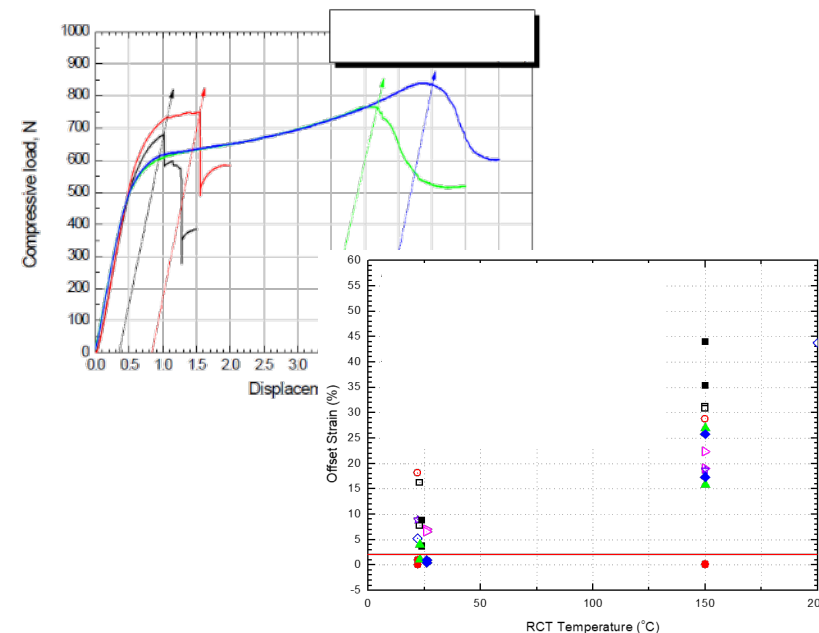
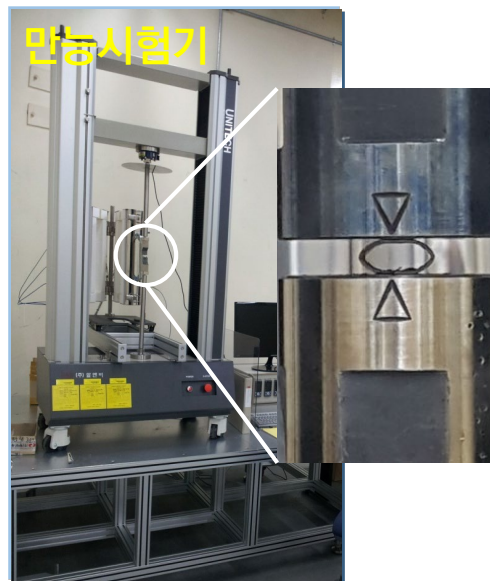
수소화물재배열 처리



■ 피복관 기계시험

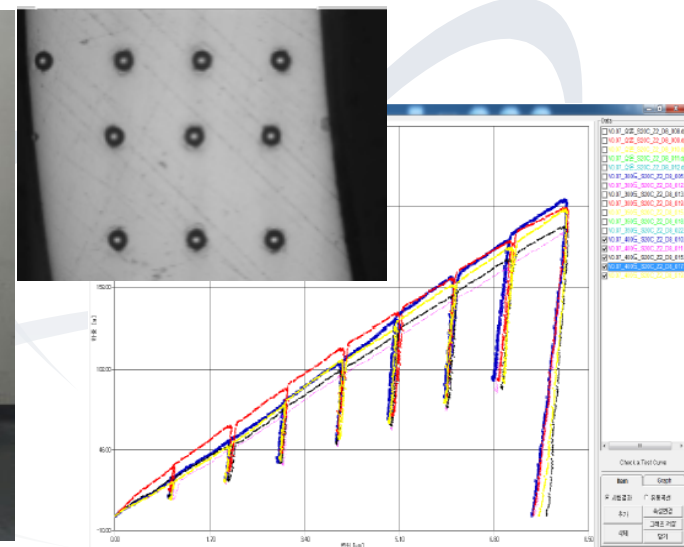
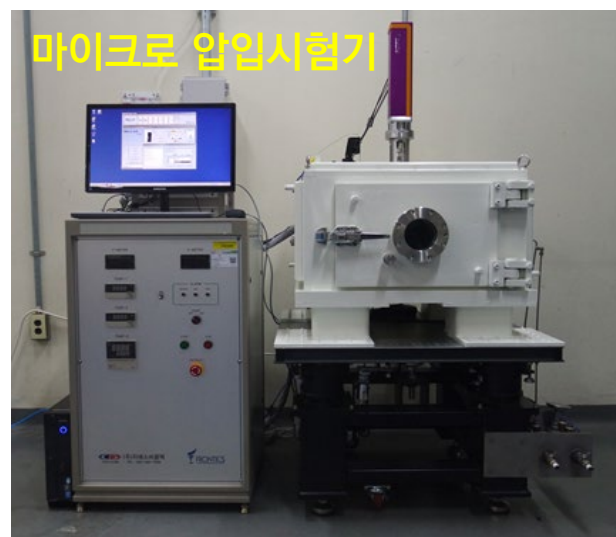
■ 강도 평가

- 수소화물재배열 피복관 연성 저하 평가
- 운반 조건 피복관 건전성 평가
- 링 압축/인장, 축방향 인장 강도 평가
- 장비 구성 및 특징
 - 용량 : 최대 20 kN
 - 가열로 : 최대 1000 °C



■ 마이크로/나노 압입시험

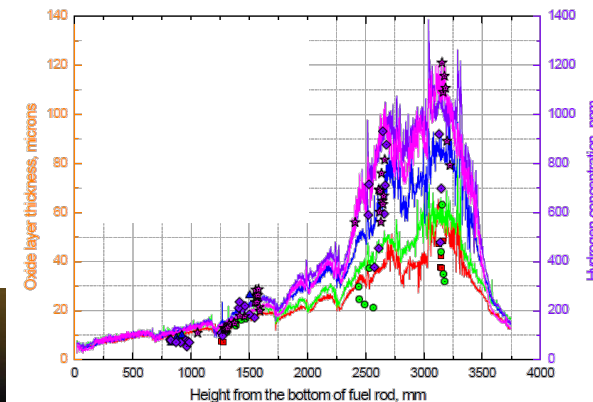
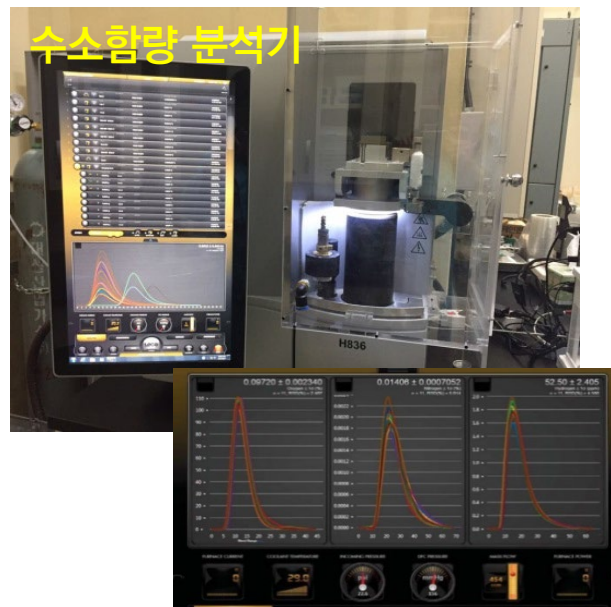
- 조사피복관 국소부위 물성 평가
 - 인장, 경도, 잔류응력
- 나노 압입시험 (+ SEM, EBSD)
 - 코팅층(ex. ATF Cr) 물성 평가
 - 압입 부위 imaging, 결정 구조 평가



■ 피복관 분석시험

■ 수소함량 분석

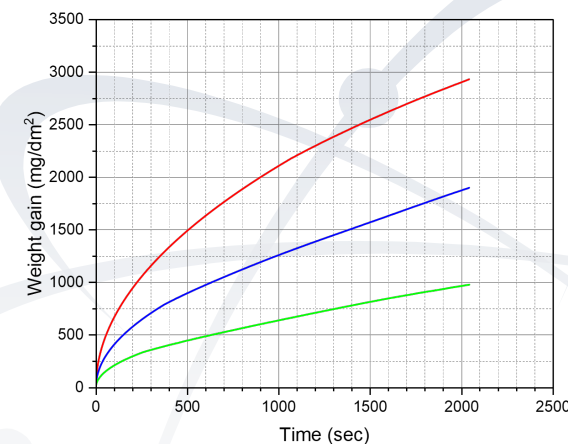
- 조사피복관 내 수소 농도 측정
- 수소 흡수율 도출
- 장비 특징
 - 측정범위 : 0.1~2500 ppm(1g)
 - 정확도 : 0.05 ppm
 - 가열로 : 최대 3000 °C



■ 열중량 분석

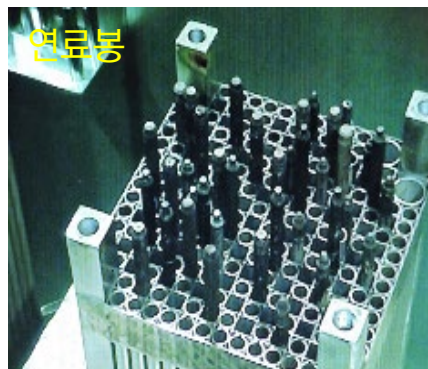
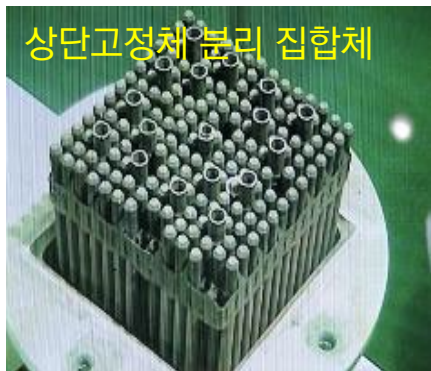
- 조사피복관 열무게/비열 측정
- 고온 산화특성 분석
- 장비 특징
 - 온도범위 : 상온 ~ 1,600°C
 - 가열속도 : 0.01 ~ 100 °C/min
 - 증기공급 및 TGA/DSC 동시분석

열중량 분석기

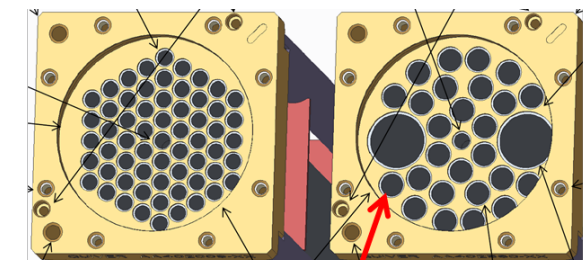


피복관 산화특성 분석

집합체, 연료봉, 시편/절편 단위 핵연료 운반 기술 개발

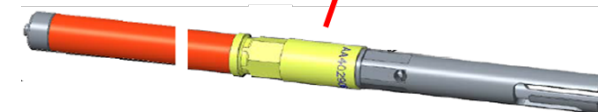


〈밀봉용기, Westinghouse社〉



〈Quiver Type 1〉
연료봉용

〈Quiver Type 2〉
시편/절편용



〈Specimen container〉



연료봉 밀봉용기 장입



03

기술 확충



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

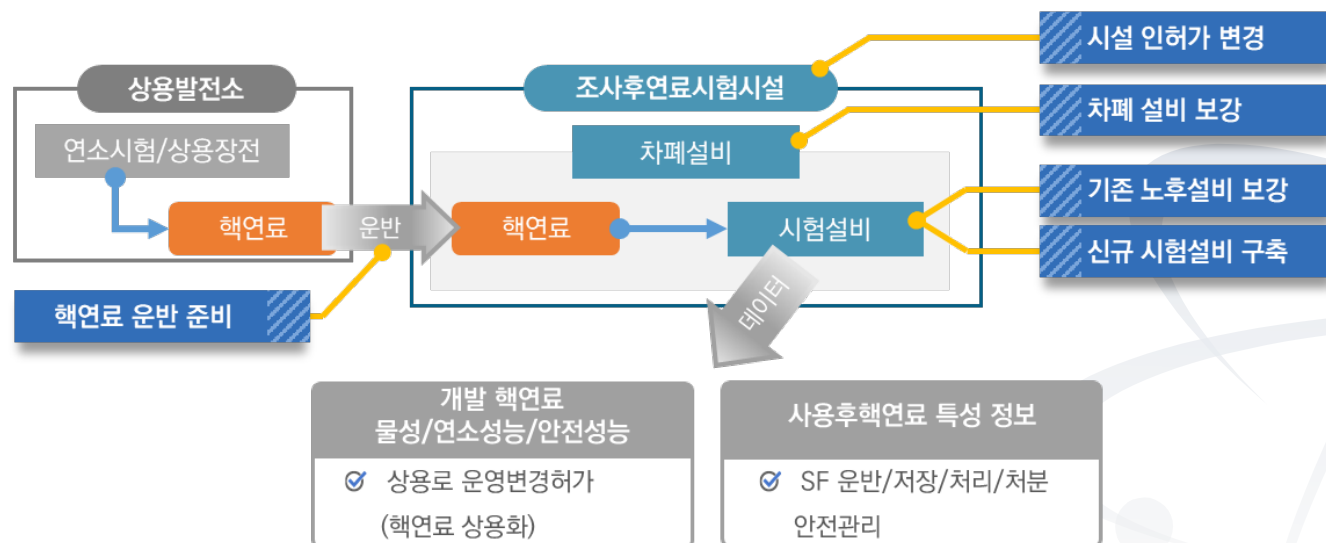
핵연료 조사후시험 기반 확충

■ 핵연료 조사후 성능시험·평가 시설 확충('25년~'28년)

■ 목적 : 신규개발 핵연료(ATF, LEU+ 등) 필수 성능시험 및 SF 평가를 위한 PIE 시설 확보

• 개발 내용

- 핵연료 과도/사고조건 안전성능 평가를 위한 신규 조사후시험 설비 구축
- 핵연료 연소성능 및 특성 평가를 위한 기존 조사후시험 설비 성능 개선
- 핵연료 조사후시험 수행을 위한 신규 차폐설비(차폐셀, 용기) 구축
- 신규 핵연료 및 신규 조사후시험을 위한 시설 운영 인허가 개정



■ 핵연료 안전성능 평가 시험장비 구축

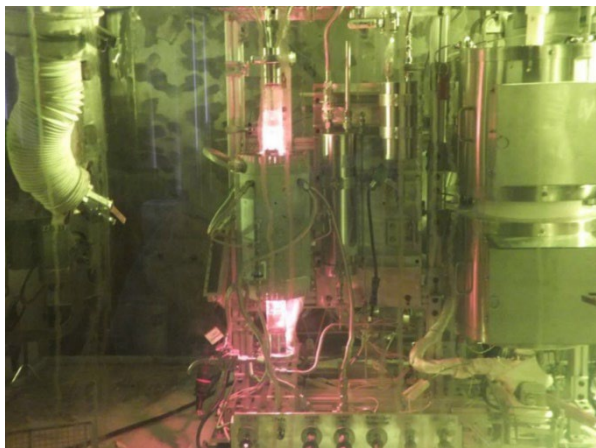
- 핵연료 과도/사고조건 모사한 조사후시험 장비 구축을 통해 시험 가능분야 확충
- Separate effect & integral 시험을 통한 성능 평가 데이터 생산, 핵연료 성능 코드 입력/검증 데이터 제공, 연료허용손상기준 근거자료 활용 가능

No.	시험항목	주요 목적
1	Semi-Integral LOCA test	LOCA 모사 조건 피복관 평가(heating, burst, oxidation, quenching)
2	PCI Mandrel test	탄력운전 등 노심 출력 변화에 따른 PCI 현상 모사
3	MBT(Modified Burst test)	소결체 급속 팽창이 기인하는 피복관 파열평가
4	EDC/EDCT	소결체 팽창이 기인하는 피복관의 이방성 변형 거동 모사
5	FFRD(Integral LOCA 방식)	연소도 상향 대비 소결체 FFRD 거동 평가
6	FFRD(Heating test 방식)	연소도 상향 대비 소결체 FFRD 거동 평가
7	핵연료 절편 PQD(4 point-bending test)	핵연료 절편 대상 잔존 연성 평가

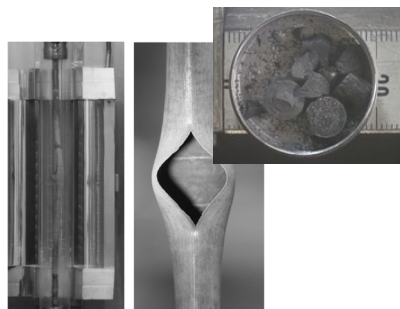
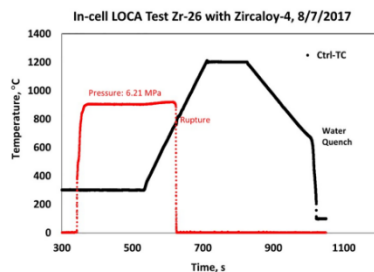
Semi-Integral LOCA test

LOCA 시나리오 환경 모사(피복관 고온 산화, 파열, 소결체 파편화, 급랭 후 취화) 및 후속 분석을 위한 시험편 확보

- 핵연료 절편을 Ar으로 가압하고 가열 속도 5°C/s로 1,200°C 이상 가열(파열온도, ballooning 형상 측정) 후 최고온도에서 800°C까지 1차 냉각 및 챔버 내로 물을 투입하여 급랭

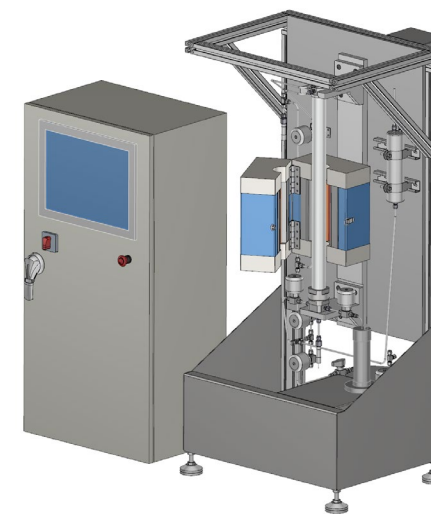


〈ORNL LOCA〉

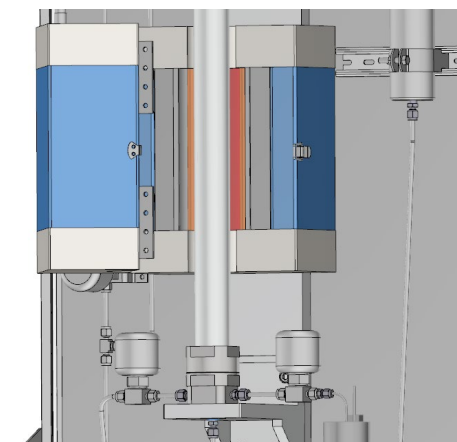


Lab	Heating Method	Temperature Control	Temperature Measurement	Out of Cell	In Cell	Fuel	Target Maximum Temperature (°C)
ORNL SATS	Radiant + (resistance)	Computer	Thermocouples	Yes	Yes	Yes	1,200 (1,700)
ANL	Radiant	Computer	Thermocouples	Yes	Yes	No	1,200
CEA-Saclay	Resistance	Manual	Pre-set	Yes	No	No	1,200
Halden	Reactor + heaters	Pre-set	Thermocouples	No	No	Yes	1,200
JAEA	Radiant	Computer	Thermocouples	Yes	Yes	No	1,200
Studsvik	Radiant	Computer	Thermocouples	No	Yes	Yes	1,200

〈국외시설 LOCA 장비 현황〉



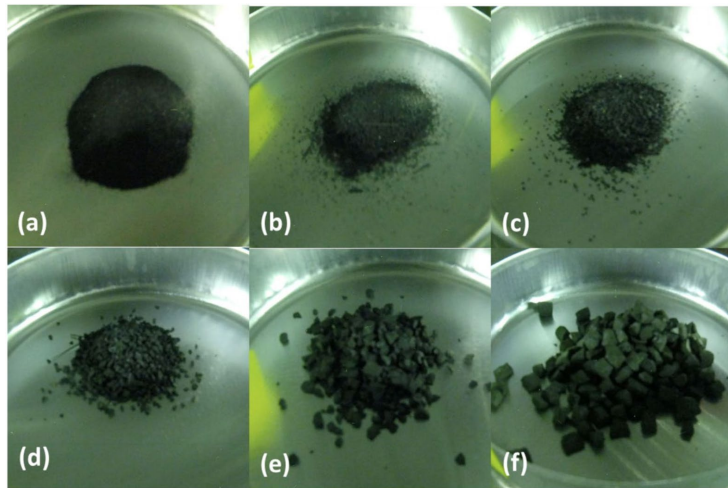
〈LOCA 장비 기본설계〉



FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, Dispersal)

LOCA 조건에서 소결체의 파편화, 이동/재배치, 파열 된 피복재를 통해 외부로 분산되는 현상 모사

- LOCA test, heating test 를 통해 파편화된 소결체를 체로 걸러(sieving) 파편 크기 분포 데이터 획득, 핵연료 분산, 재배치 및 그에 따른 영향 등 데이터 생산

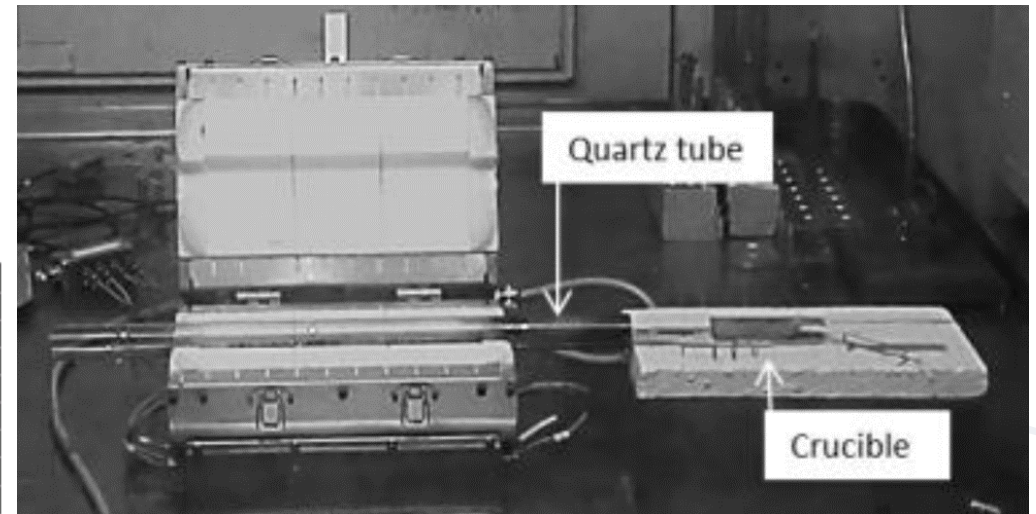


Images of fragmented fuel particles collected from LOCA fragmentation test

N. Capps, Integral LOCA fragmentation test on high-burnup fuel, Nuclear Engineering and Design 367 (2020)



Size	Weight fuel (g)	% of total
< 0.125 mm	9.2	18%
0.125 - 0.25	6.3	12%
0.25 - 0.5 mm	8.2	16%
0.5 - 1 mm	10.9	21%
1 - 2 mm	9.9	19%
2 - 4 mm	6.3	12%
> 4 mm	0	0%
Sum:	50.8	100%



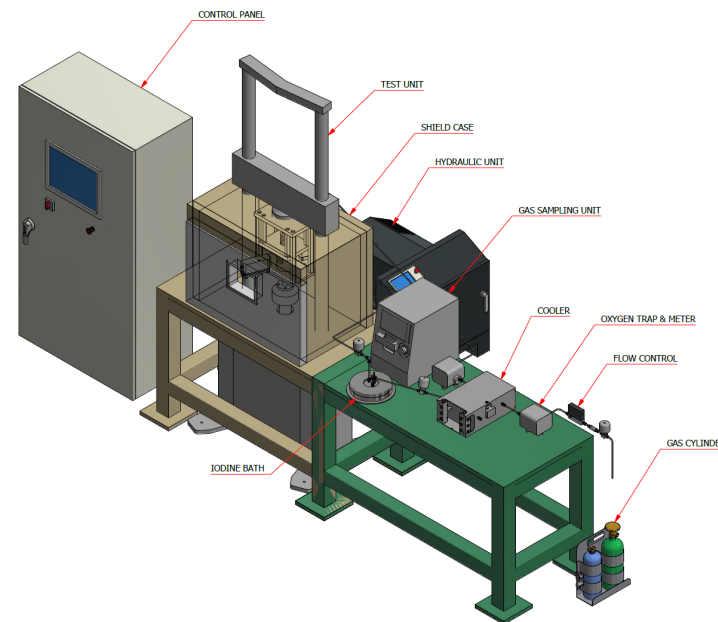
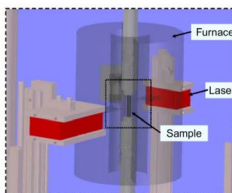
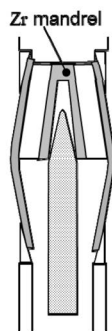
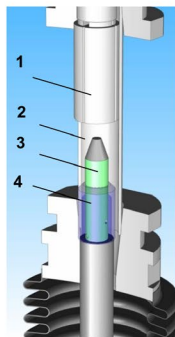
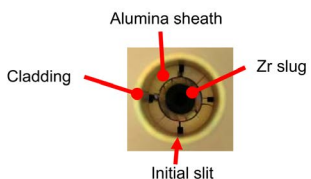
NUREG-2160, Post-Test Examination Results from Integral, High-Burnup, Fueled LOCA Tests at Studsvik Nuclear Laboratory (2013)
 Report on Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal, NEA/CSNI/R(2016)16

PCI(Pellet Cladding Interaction) Mandrel test

■ 탄력운전 등 노심 출력이 변하는 조건에서 소결체 팽창으로 인한 PCMI와 핵분열 기체 영향이 결합된 ISCC(Iodine-induced Stress Corrosion Cracking) 평가

- 핵연료 출력이 높아지는 경우 소결체 내 핵분열성 기체의 생성 및 gap으로의 방출량이 증가하며, 아이오딘은 소결체와 피복관 사이의 기계적 상호작용 중 피복관 내벽 ISCC를 가속

- 1 – Alumina case
- 2 – Specimen (Cladding tube)
- 3 – Plunger
- 4 – Channel from pure Zr

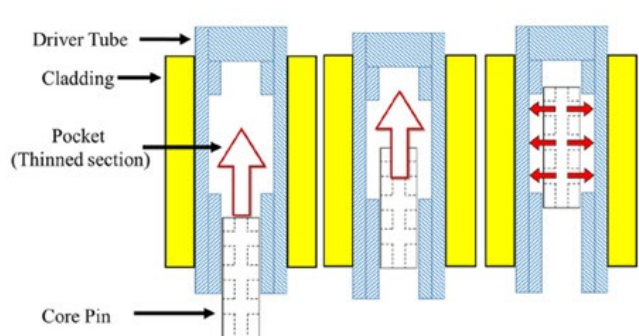


〈PCI Mandrel 장비 기본설계〉

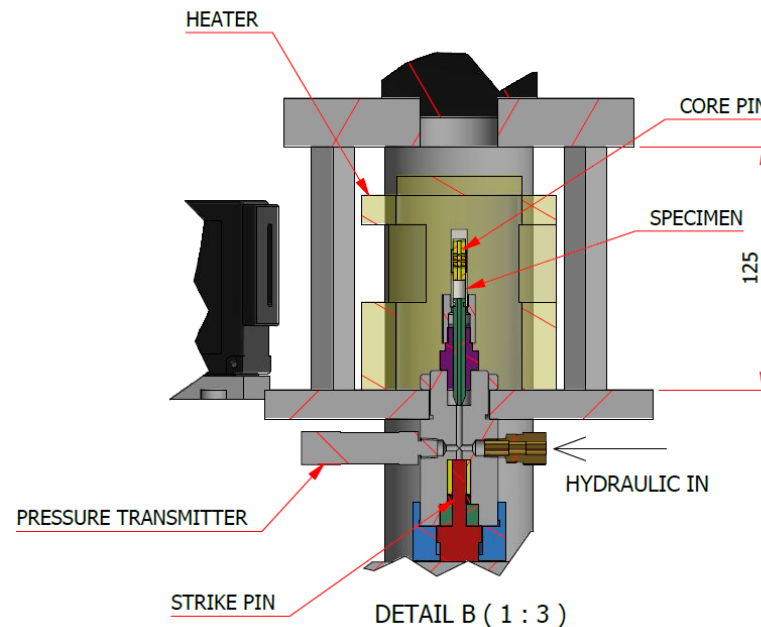
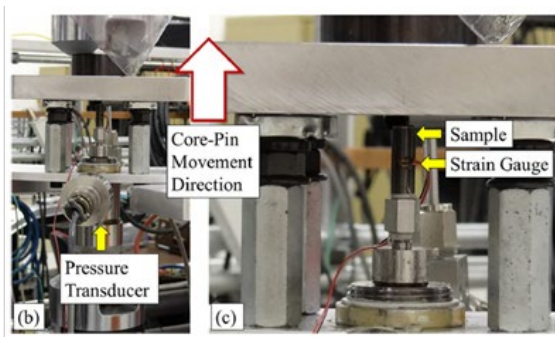
■ MBT(Modified Burst Test)

■ 반응도사고에서 급격한 소결체 팽창(수~수십 밀리초 이내) 에 의한 피복관 파열 모사

- 코어-핀 내부에 가압된 오일을 채운 상태에서 피복관 내에 삽입하고, 이후 핀 수직 이동을 통해 빠른 속도로 내부 압력을 증가시켜 피복관 내부에서 팽창시키는 원리를 이용



Annals of Nuclear Energy 109 (2017) 396–404



〈MBT 장비 기본설계〉

EDC(Expansion Due to Compression) test

반응도사고 등에서 소결체 팽창이 피복관에 기인하는 다축 변형 및 파열 모사

- 피복관 내부에 설치한 소결체 모사 물질(테프론 등) 압축을 통해 모사

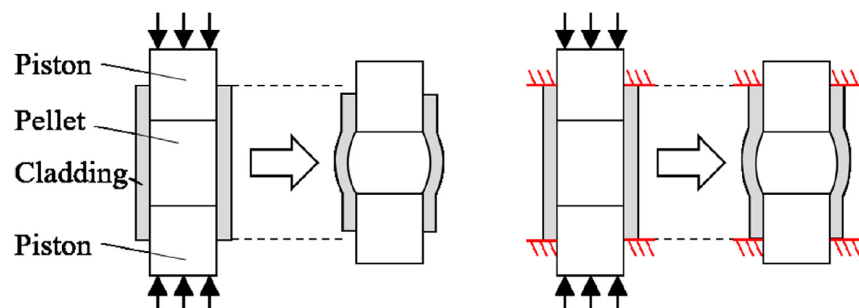
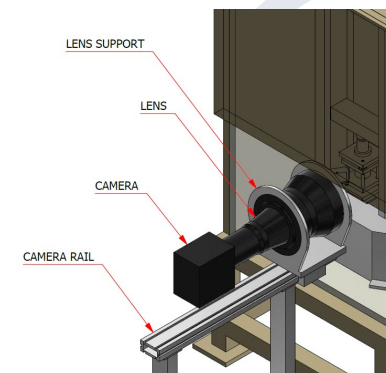
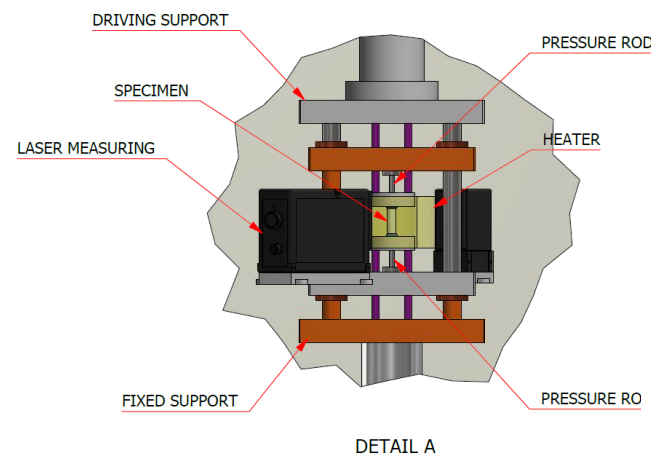
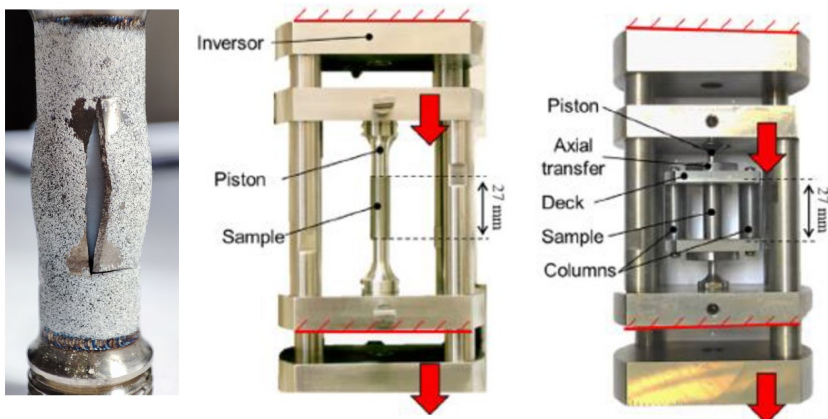


Fig. 1. EDC test configuration, (a) free-end EDC test, (b) fixed-end EDC test.



〈EDC 장비 기본설계〉

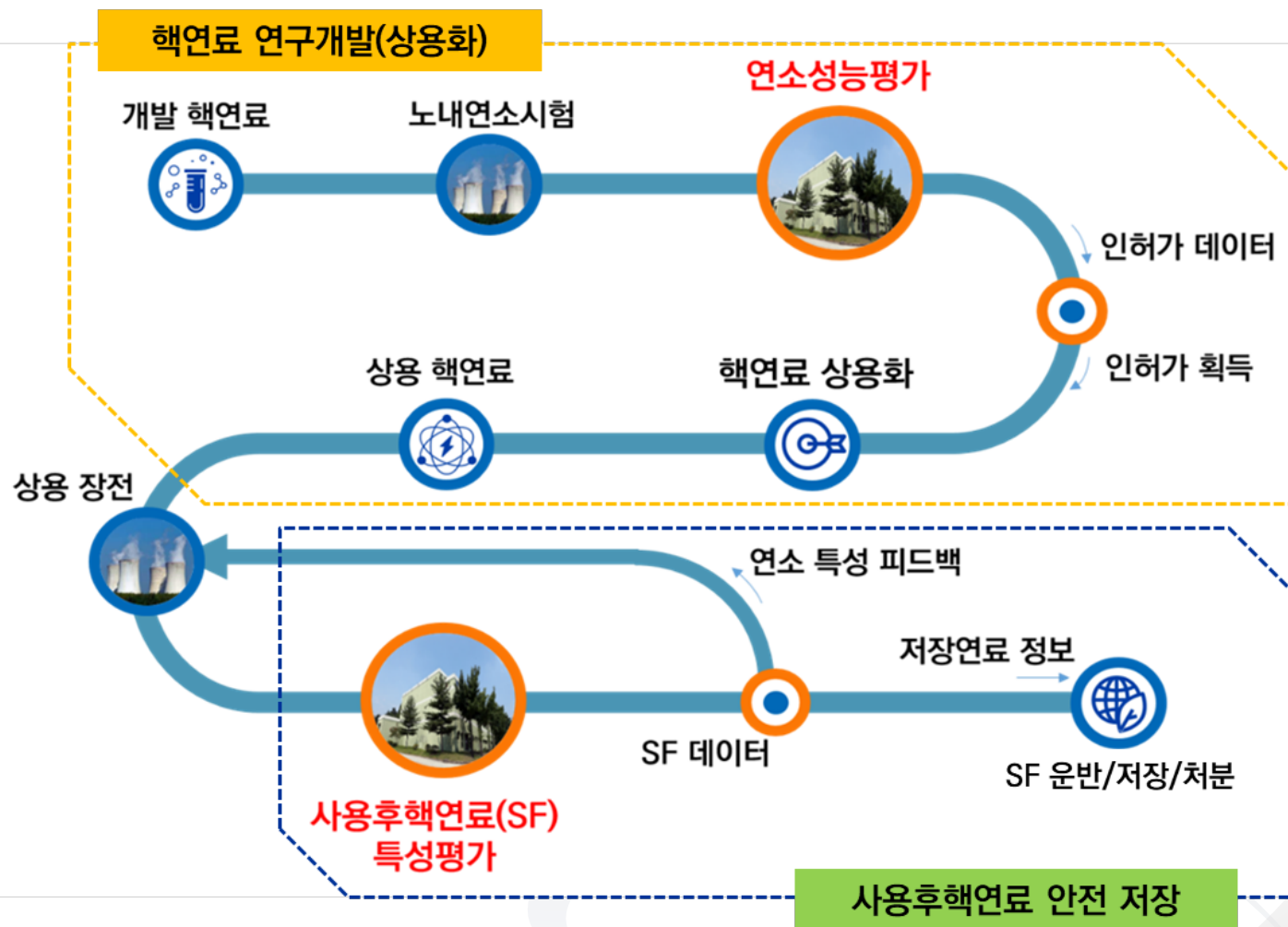
원전 사용후핵연료 보관 수조 포화
중간저장시설 핵연료 안전저장 확보 필요

사용후핵연료 절대 발생량 감축
신형 핵연료(LEU+) 개발 필요

사고저항성핵연료(ATF) 및 차세대 원전 핵연료
개발을 통한 원전 산업 글로벌 경쟁력 확보 필요



사용후핵연료 안전관리 및
신규 핵연료 개발을 위한
조사후시험평가 수행



감사합니다.

