

한 국 원 자 력 학 회 2018년 춘 계 학 술 대 회

사용후핵연료 특성평가 국내 인프라 현황 및 방안

안 상 복
한국원자력연구원

2018. 05. 16

목 차



01 서론

02 인프라 활용 미래수요 및 시설현황 비교

03 국내 특성평가인프라 운전 현황

04 사용후핵연료 평가인프라 확보 방안

05 결론

01 서론

» 사용후핵연료 검사 및 시험 활용 분야 현황

□ 개발 및 운전 중 검사 시험분야

- 개발핵연료 조사거동 검증(핫셀시험)
- 운전 중 핵연료 검사(Fuel Service)
- 운전 중 거동, 손상 및 성능검증 시험 (핫셀시험)

□ 운전후 관리 및 저장특성 평가시험분야 (핫셀시험)

- 임시저장 사용후핵연료 건전성유지 평가
- 중간/장기저장 거동 및 건전성 평가 시험

» 사용후핵연료 특성평가 인프라시설 기본요건

- 작업자 보호 방사선 차폐 : 수조, 핫셀설비 등
- 안전, 핵물질계량, 방재/방호 등 원자력안전법규 준수
- 고방사능물질 취급에 따른 주민수용성 확보

02 인프라 미래수요 및 시설현황 비교

» 국가 원자력정책에 따른 시험인프라 신규수요 증가

□ 고준위방사성폐기물(사용후핵연료) 안전관리계획 추진

○ 운반·저장기술 개발을 위한 특성평가 수요

- ✓ 결함, 고연소도, 저연소도 핵연료별 기본 특성자료 구축
- ✓ 고연소도 사용후핵연료 장기건전성 평가
- ✓ 저장용기 및 구조체 경년열화 안전성평가
- ✓ 운반취급 및 충돌사고 사용후핵연료 건정성 평가
- ✓ 운반 조건별 사용후핵연료 건전성상태 평가
- ✓ 저장기준 초과 사용후핵연료 건전성 평가
- ✓ 중간/임시저장 사용후핵연료 거동 및 안전성 평가

○ 영구처분기술개발을 위한 특성평가 수요

- ✓ 처분조건별 사용후핵연료 거동 기초자료 평가

□ 원자력시설(원전) 해체기술 개발 추진

- 원전보관 손상 사용후핵연료 임시 포장 및 운반기술개발
- 원전 보관핵연료/노심구조체 핵적특성 검증기본자료 생산
- 원전 노심 대형구조물 조사특성 DB 구축

» 사용후핵연료 특성평가 인프라(핫셀시설) 대내외 운영현황 비교

구분	초대형/대형핫셀 인프라	중형핫셀 인프라	소형핫셀 인프라
내부공간 (가로x세로, m)	(5~10) x (10~20)	(2~3) x (3~10)	(0.8~1) x (1~2)
차폐벽 두께 (m)	1.2~1.5/Heavy Concrete	0.8~1.5/Heavy Concrete	0.2~0.4/Lead, Steel
주요 용도	실크기 대형구조체 사용후핵연료 집합체 시험	단위부품, 연료봉, 캡슐시험 절단시험 실험	절편 조정밀 극한시험 미세조직, 거동/화학분석
해외 시설현황	일본:FMF(6 x 19.5 x 7 m) 미국:INL(9.1 x 21.3 x 7.6 m) 러시아:RIAR(6 x 6 x 8 m)	일본: JMTR H/L, RFEF, NFD 프랑스: LECA-STAR, LECI 미국: INL, ANL, PNL	일본: JMTR H/L, NFD 등 독일: ITU 벨기에: SCK-CEN 등
국내보유현황	부재	조사재시험시설 조사후연료시험시설	화학시험시설(1개) (구형 소규모: 조사후 부속)
국가별 핫셀시설 총내부순수면적(m ²)	한국: 170, 일본: 1,200 (처리연구 제외), 프랑스: 1,040 (처리연구 제외)		

03 국내 사용후핵연료 취급 및 시험시설 현황

» 조사재시험시설 (Irradiated Material Examinations Facility, IMEF)

- 1988 - 1993년 설계 및 건설
- 1994 - 현재 정상운전 실시 중 (24년 운전 중)
- 2003 - 2004년 사용후핵연료처리기술 개발용 핫셀 증설 (M8 핫셀)



□ 조사후연료시험시설 (Post Irradiation Examinations Facility, PIEF)

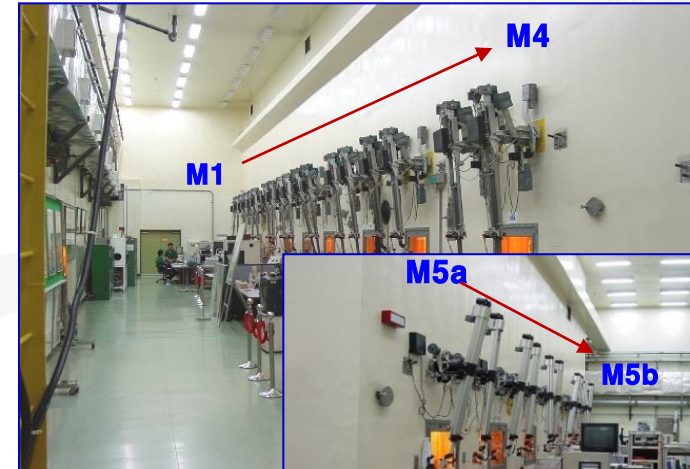
- 1981 - 1985년 설계 및 건설
- 1985 - 현재 운전개시 및 정상운전 실시 중 (33년 운전 중)

» 사용후핵연료 취급/시험 시설 사양 및 기능보유 현황

	조사재시험시설 (IMEF)	조사후연료시험시설(PIEF)
시설목적	연구개발 핵연료 및 노심구조재 하나로 조사후 거동 및 특성평가 시험실시	경수로 운전 및 개발 사용후핵연료 운전성능 및 저장건전성 평가 시험실시
시설사양	<ul style="list-style-type: none"> 지하1층, 지상3층 연면적 4,000 m² 중대형 핫셀 8개 (핫셀폭: 2~3 m) 소형수조 1개 	<ul style="list-style-type: none"> 지하 3층, 지상2층 연면적 8,250 m² 중소형 핫셀 6개 (핫셀폭: 1~2 m) 대형수조 3개 화학분석용 납핫셀, 철셀, 소형납셀 3개
주요기능	<ul style="list-style-type: none"> 개발핵연료 하나로 조사 특성평가 원전(PWR, CANDU) 노심구조재료 운전 건전성 평가 원전 사용후핵연료 처리기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> PWR 사용후핵연료 운전성능평가 PWR 핵연료 파손 및 손상원인 규명 PWR 핵연료 저장건전성 특성평가 사용후핵연료 정밀화학 분석평가
활용현황	<ul style="list-style-type: none"> 차세대 핵연료 조사후 성능검증 연구용 원자로 개발연료 특성평가 개발 노심구조재 조사후 성능검증 경수로 원자로, 중수로압력관 건전성평가 운전핵연료 CRUD 시험 등 	<ul style="list-style-type: none"> PWR 사용후핵연료 손상원인 규명 PWR 개발핵연료 운전성능 평가 장기저장 건전성 평가시험 사용후핵연료 정밀화학분석

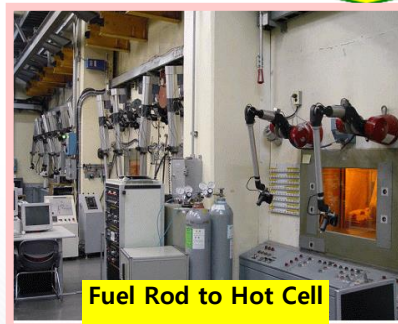
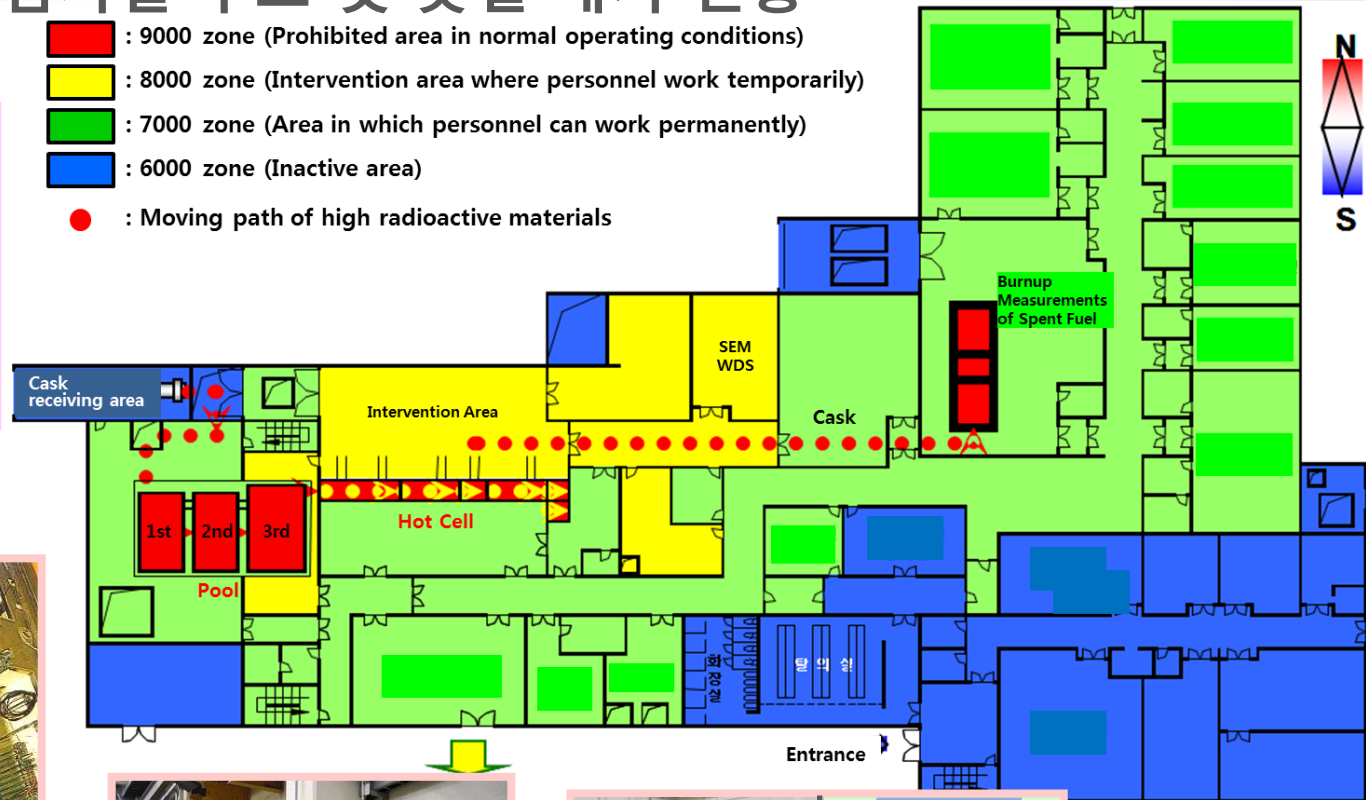
» 조사재시험시설 핫셀 및 설비 배치현황

- Construction: 1988 yr ~ 1993 yr (26.5M US \$)
- 3 stories and a basement (4,000 m²)
- 71 m in a total hot cell length, 8 hot cells with 31 working units



» 조사후연료시험시설 수조 및 핫셀 배치 현황

- : 9000 zone (Prohibited area in normal operating conditions)
- : 8000 zone (Intervention area where personnel work temporarily)
- : 7000 zone (Area in which personnel can work permanently)
- : 6000 zone (Inactive area)
- : Moving path of high radioactive materials



» 조사재시험시설 핫셀별 사양 및 특성평가 시험장치 운전현황

Pool/ Cell	Function	Internal Dim. (LxWxH, m)	Wall Thickness	Window (ea)	Equipment & Functions
Pool	Receiving Cask	6.0 x 3.0 x 10.0 (depth)	-	-	-Bucket Elevator
M1	NDT	7.0 x 3.0 x 6.0	Heavy Con. 1.2 m	3	- NDT bench (Gamma Scanning, Eddy Current , Dim. Measure) - 3-D X-ray System, 2-Dim. Measurement System
M2	Specimen Fabrication	7.0 x 3.0 x 6.0	"	3	- Capsule Cutting M/C, - Electric Discharge M/C - CNC Milling M/C, - Laser Fission Gas Collection
M3	Metallographic Sample prep.	4.7 x 3.0 x 6.0	"	2	- Low speed saw - Mounting Press - Grinder/Polisher - Periscope
M4	Sample Storage	2.3 x 3.0 x 6.0	"	1	- Specimen Storage Rack
M5a	Mechanical Test	7.1 x 2.0 x 4.0	Heavy Con. 0.8 m	3	- Impact Tester - Laser Specimen Cutting System - Precision dimension measuring m/c
M5b	Mechanical Test	4.8 x 2.0 x 4.0	"	2	- Hydraulic UTM (Dynamic) - Electric UTM (Static)
M7	Metallographic Observation	1.5 x2.6 x 4.65	Lead 0.2 m	2	- Optical Microscope (Telatom-III) - Micro Hardness Tester - SEM, - Micro balance, - Density measuring M/C
M6	Process Test	23.4 X 2.0 X 4.0	Heavy Con. 1.1 m	10	- Use by DDFD Project - OREOX Furnace, Mill, Roll Compactor, Mixer, Sintering Furnace, Center less Grinder, Off Gas Treatment
M8	Process Test	10.3 x 2.0 x 4.3	Heavy Con. 0.9 m	5	- Use by ACP Project - Slitting Machine, Vol-oxidizer, Metallizer, Smelter, Waste MS Treatment Device, Off Gas Treatment System
Hot Lab-I, II	Micro Analysis	5.8 x 7.5 x 8.4	Normal Con. (Shielded)	-	- TEM, EPMA, Low X-Ray System (TRISO), Thermal Diffusivity

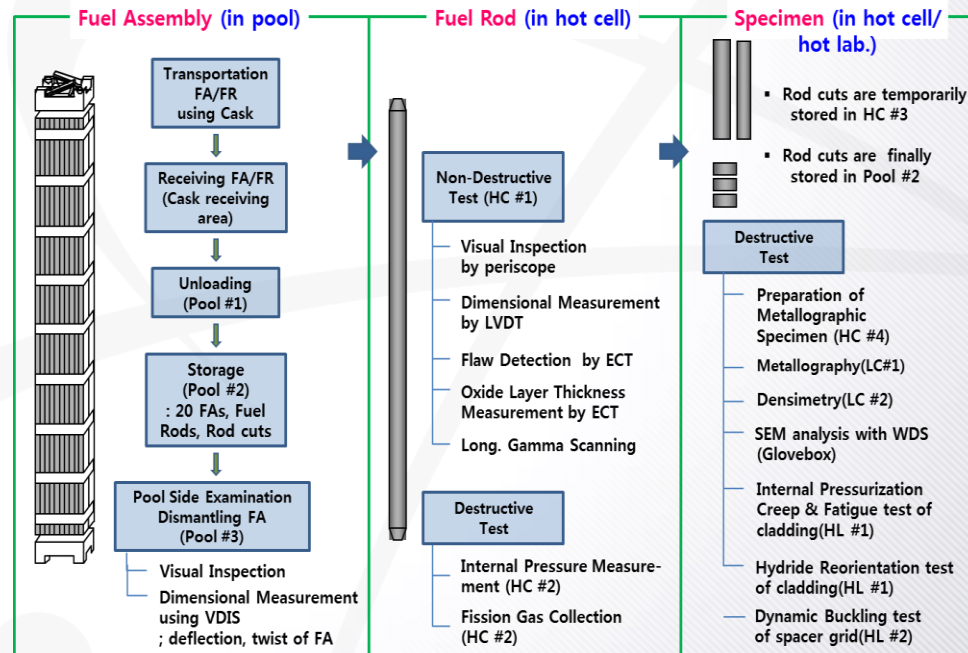
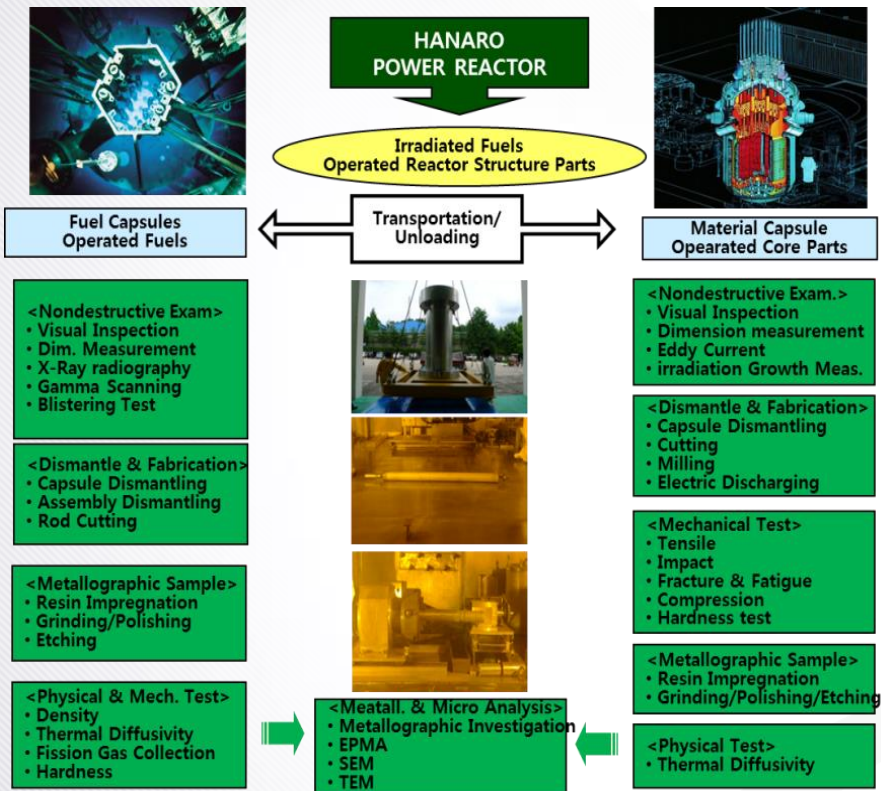
8 hot cells (length 72 m, 31 working units) , 1 pool, 2 hot lab's

» 조사후연료시험시설 수조, 핫셀사양 및 시험장치 운전현황

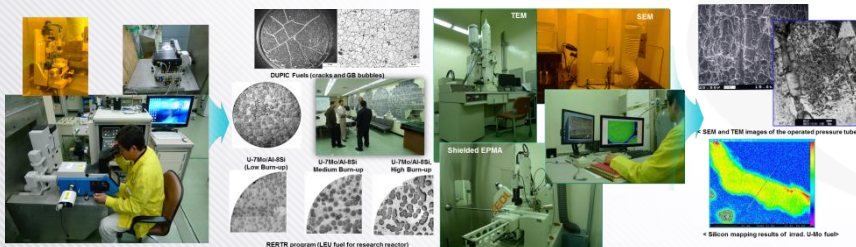
Pool/Cell		Internal Dim. (L×W×H, m)	Wall Thk (m)	Window (ea)	Allowable radiation (Ci)	Functions
Pool	No.1 (9401)	6.5×3.0×15.5	1.1	0	2×10 ⁶	- Unloading of Transportation Cask
	No.2 (9402)	6.5×3.0×10.0	1.1	0	4×10 ⁷	- Storage of Fuel Assembly (FA), Fuel Rod and Fuel Rod Cuts
	No.3 (9403)	7.5×3.9×15.5	1.1	1	2×10 ⁶	- Pool Side Examination of FA - Dismantling of FA
Concrete Hot Cell	No.1 (9404)	6.5×1.5×3.5	0.85	3	5×10 ⁴	- Non-Destructive Test of Fuel Rod
	No.2 (9405)	4.0×1.5×3.5	0.85	2	5×10 ⁴	- Internal Pressure Measurement of Fuel Rod - Fission Gas Collection of Fuel Rod - Macro-Cutting of Fuel Rod
	No.3 (9406)	2.0×1.5×3.5	0.85	1	5×10 ⁴	- Temporary Storage of Fuel Rod Cuts - Defueling of Fuel Rod
	No.4 (9407)	3.0×1.5×3.5	0.85	2	5×10 ⁴	- Preparation of Metallography and Density Specimen : mounting, grinding and polishing
Lead Hot Cell	No.1 (9408)	1.2×1.0×2.5	0.15	2	100	- Metallography
	No.2 (9409)	1.2×1.8×1.5	0.15	1	100	- Densimetry
Glove box shielded by Carbon Steel		2.0×2.0×2.5	0.17	1	1.2	- SEM/WDS Observation & Composition Analysis - Surface Coating of Specimen
Hot Lab 1		10.8×10.8×5.25	-	-	-	- Mechanical Test of Cladding : creep, fatigue, hydride reorientation
Hot Lab 2		8.1×8.1×5.25	-	-	-	- Mechanical Test of Grid, Specimen Preparation

6 hot cells (17.9 m, 11 working units), 3 pools, 2 hot laboratories

» 사용후핵연료 특성평가시설 시험공정 절차 현황



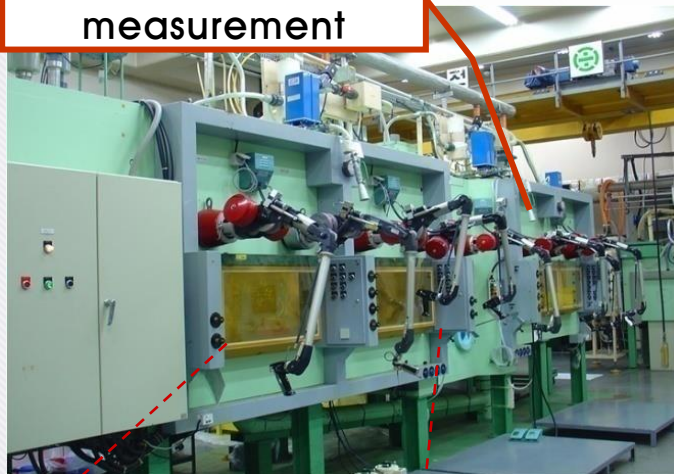
* FA : Fuel assembly, FR : Fuel Rod, HC : Hot cell, LC : Lead cell, HL : Hot lab.



» 사용후핵연료 화학특성평가 현황

화학핫셀

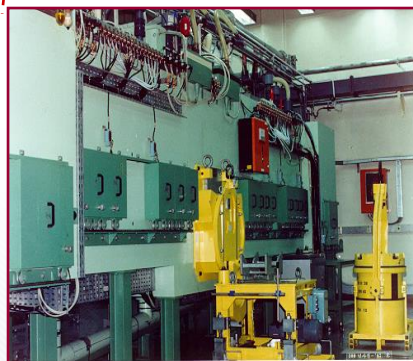
Burn up
measurement



Lead Shielded Line /Front Side View



Lead Shielded Line /Back Side View



TRU

Pu
(0.9%)

MA (0.1%)

I, Tc (0.1%)

Cs, Sr
(0.3%)

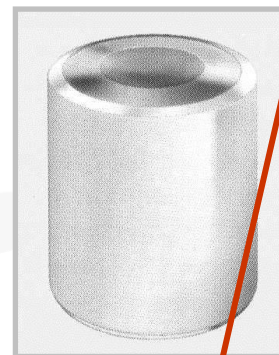
FP

FP
(3%)

U
(95.6%)

Used fuel

Irradiated fuel



Core to Rim
Local Chemical
Properties

Lattice Changes

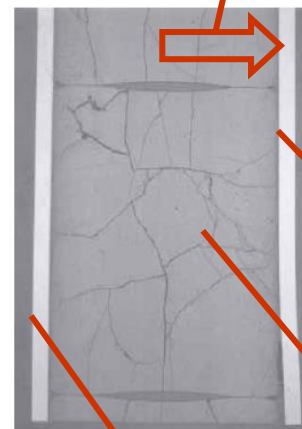
Isotope Distribution

FG Distribution

Fuel/Clad
Chemical
Interaction

An Source Term

Clad oxidation



04 국내 사용후핵연료 평가인프라 확보 방안

» 특성평가 인프라 보유능력 및 미래대책 분석

업무분야	평가목적/대상	보유능력 현황	미래대책
원전 운전 및 핵연료 개량	핵연료 손상/성능검증	집합체단위 비파괴시험, 봉단위시험 (연소도, 파괴시험, 미세관찰, EPMA)	기존인프라 활용 수행 (IMEF, PIEF)
		집합체구조체 기계특성(충격, 변형, 낙하 등), 핵연료(열팽창, 고온가스방출, TEM)	
	원자로 노심부품 구조부품	부품단위 기계시험, PWR 원자로감시시편 인장, 충격, 파괴인성시험, 성분분석	
		CANDU 압력관 시편가공시험, 인장, 수소지연, 파괴인성, 조직, SEM, EPMA 실험대형구조체 취급시험(낙하, 변형시험 등), 실험 압력관 파열, 변형 시험	
원자력시설 해체	대형노심재 특성평가	소형시편 기계적 특성평가(인장, 파괴인성, 성분분석, 대형 노심구조재 취급, 벌크가공 및 평가용 대형핫셀 기술	추가 인프라구축 수행
	사용후핵연료이동	손상핵연료 취급, 이송 건전성유지 실증 평가기술	
사용후핵연료 임시/중간/장기 저장	저장, 운반중 건전성예측평가	집합체 비파괴검사시험, 봉단위시험(연소도, 파괴시험, 미세관찰/분석)	
		PWR/CANDU 집합체단위 저장거동평가, 저장용기 열화평가, 운반안전성 등	
핵연료/원자로 연구개발	개발핵연료 SFR, VHTR, 기장연구로, JRTR 용 핵연료 조사성능	봉단위시험 연소도, 비파괴, 파괴시험, EPMA, 기계시험, SEM, EPMA	
		Micro X-Ray, Micro Scanning, KUPA, 열팽창률, 고온가스 방출, TEM, XRD	
		분위기조절 시험, 실크기 실험, 초소형/극한환경 취급 및 시험	
	원자로 및 부품	개발 구조재료의 캡슐조사 기계시험, 조사성장, 열확산도, 경도, 조직시험	
정밀 화학분석기술	사용후핵연료 화학적거동	연소도 화학분석, 악티나이드 source term, 국부연소 특성 (micro-XRD)	
		국부연소특성 (LA-ICP-MS), 핵분열기체분석, EPMA	

기존 인프라 수행가능 항목

기존 인프라 수행불가능 분야

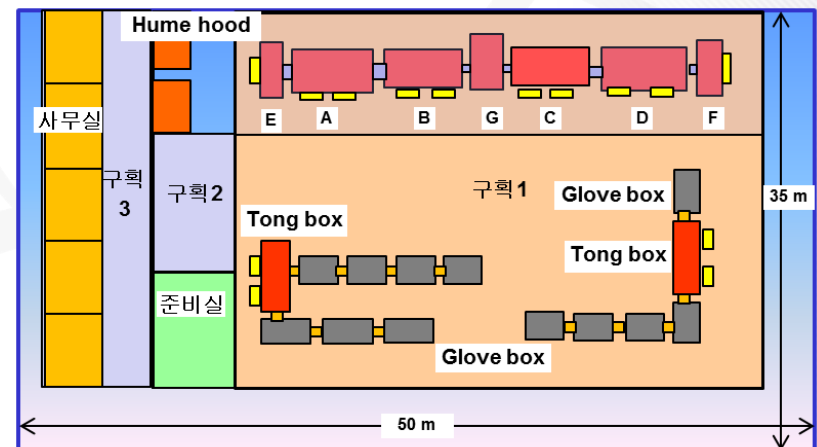
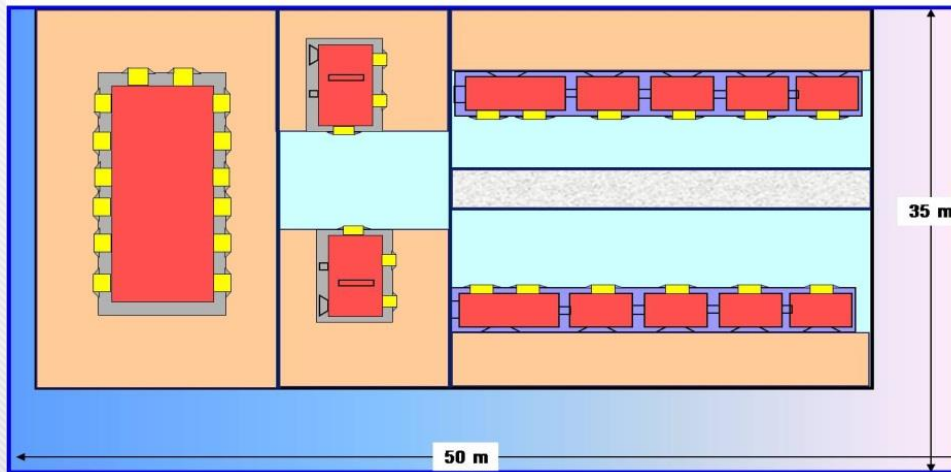
» 국내 인프라 확보방안(방안-1): 신규 종합인프라시설 구축

- 기존인프라 접근성, 지역수용성을 고려하여 별도의 지역에 국가차원 신규인프라 구축
- 국가에너지전환에 부합한 사용후핵연료저장, 원전해체분야의 시험기능을 강화한 대규모 인프라 구축을 추진
- 원자력(연)은 신규 종합조사후시험시설 인프라 구축에 지속적인 관심 및 방안을 검토한 바 있음.

건물구성	규모 (바닥면적 m ²)	인프라기능	추정소요예산 (기존시설대비 단순비교, 억원)	비고
종합조사후시험동	12,000	<ul style="list-style-type: none"> • SF 임시/중간/장기저장 안전연구 • 원자력시설해체 구조체 특성연구 • 연구개발 핵연료/재료 연구 • 첨단 정밀/극한 환경시험연구 • 대형 방사화학 연구 	사전연구/설계: 1,200 건설/시운전/인허가: 4,200	
유틸리티 설비동	3,600	<ul style="list-style-type: none"> • 시설별 공조, 전기공급 등 	설계/건설: 800	
SF 안전시험동	1,200	<ul style="list-style-type: none"> • SF, SF저장용기 건전성시험 	설계/건설/인허가: 1,200	
연구동	1,200	<ul style="list-style-type: none"> • 시험기술/장치 개발 • 연구실/사무실 	건설: 600	
방사성폐기물 저장시설	—	<ul style="list-style-type: none"> • 종합시험동에 포함 	—	
총 면적	18,000		8,000	

» 국내 인프라 확보방안(방안-2): 기존 인프라 확장

- 기존 인프라 지역에 상호보완기능을 보유한 중소규모 인프라 구축 추진
- 단면 35 x 50 m² [530평], 지하 1층 지상 2층의 총 3층[건평 1590평] 규모
- 각 층별 기능을 구분하여 핫셀공간을 구축함.
 - 지상 1층: 8 x 18 m² 초대형 알파-감마 핫셀 1개, 중형 콘크리트 핫셀 2개, 소형핫셀 10기 설치
 - 지상 2층: 다양용도의 소형 납핫셀 시설
 - 지하 1층: 건식 반입설비, 시설유틸리티설비, 핫셀 분위기가스 공급장치 설치



< 시설 1층: 집합체단위, 봉단위 시험 중대형 핫셀 > < 2층: 정밀극한환경 및 정밀화학분석 시험 소형정밀 핫셀 >

05 결론

- » 에너지전환정책의 효율적 지원을 위한 사용후핵연료 취급, 특성 평가를 위한 인프라시설의 신규구축 이나 기존시설의 확장이 시급히 요구됨.
 - 개발 및 원전운전에 특화된 기존 인프라시설을 사용후핵연료 저장, 원자력시설(원전) 해체분야로 확장이 필요
 - 기존 인프라의 노후화, 접근성을 고려하여 신규 종합인프라 구축도 필요함
- » 사용후핵연료를 전문적으로 취급하는 인프라시설은 지역주민 수용성을 함께 고려하여 증설, 신규구축이 결정되어야 함.



THANK YOU