

제2차 핵융합/원자력 재료 이온빔 조사 시험 및 평가 워크숍,
2025년 5월 21일(수), 제주 국제컨벤션센터

KOREA
ATOMIC
ENERGY
RESEARCH
INSTITUTE



연구로를 활용한 재료 조사시험 및 이온빔과의 통합 연구 방안

한국원자력연구원 하나로이용연구단 하나로이용부
양성우 (swyang@kaeri.re.kr), 나예은



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는

한국원자력연구원

- 01 연구로를 활용한 노내 조사시험
- 02 이온빔과의 차별성
- 03 연구로/이온빔을 활용한 통합 연구 방안
- 04 결 언

2024년 이온빔/연구로 조사시험 관련 교육 개최

하나로-IMEF 및 KAHIF를 활용한 조사(후)시험 교육

2024년 8월 28일(수)~29일(목), 교육생 51명 참석

2024년 하나로-IMEF 및 KAHIF를 활용한
조사(후)시험 교육 프로그램(안)



날 짜	시 간	강 사	주 제
8월 28일 (수)	9:30 ~ 10:00		등 록
	10:00 ~ 10:10		인사말
	10:10 ~ 11:00	류호진 (KAIST)	조사시험 연구 동향 및 발전방향
	11:00 ~ 11:40	양성우 (KAERI)	하나로 조사시험 시설 소개 및 시험 절차
	11:40 ~ 13:00		중 식
	13:00 ~ 13:40	진영관 (KAERI)	조사재시험시설(IMEF) 소개 및 시험 절차
	13:40 ~ 14:20	이승현 (KAERI)	KAHIF 소개 및 시험 절차
	14:30 ~ 18:00		시설방문: (1) KAHIF, (2) IMEF, (3) 하나로
8월 29일 (목)	18:00 ~ 20:00		석 식
	09:30 ~ 10:00	김종민 (KAERI)	하나로-IMEF 조사시험 활용 사례 : 원자로 용기
	10:00 ~ 10:30	탁영욱 (KAERI)	하나로-IMEF 조사시험 활용 사례 : 연구로핵연료
	10:30 ~ 11:00	류호진 (KAIST)	KAHIF 이온빔 시험 사례 : 가돌리니아
	11:00 ~ 12:00		주제 토론: 재료 조사시설을 활용한 연구 활성화를 위해 필요한 것은?

- 상기 교육 프로그램(안)의 일정 및 교육내용은 사정에 따라 변경될 수 있음



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

KOREA
ATOMIC
ENERGY
RESEARCH
INSTITUTE

01

연구로를 활용한
노내 조사시험

하나로 노내 조사시험 개요(1)



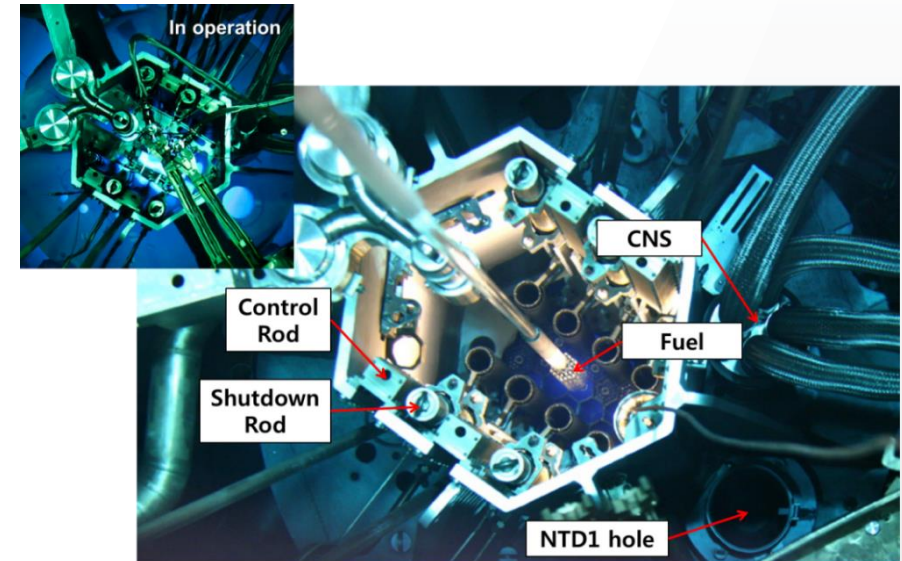
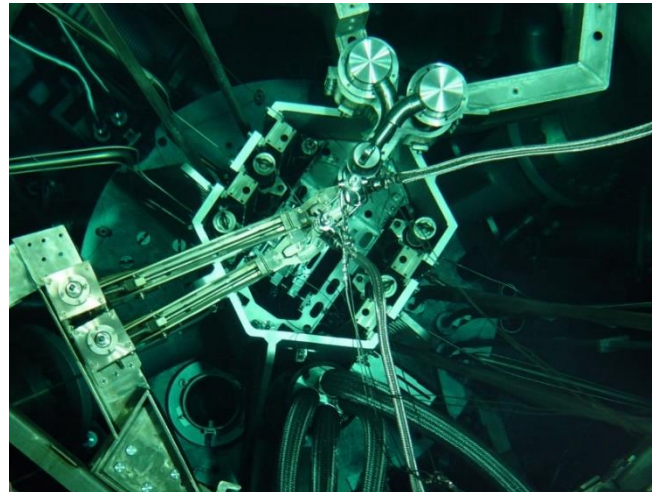
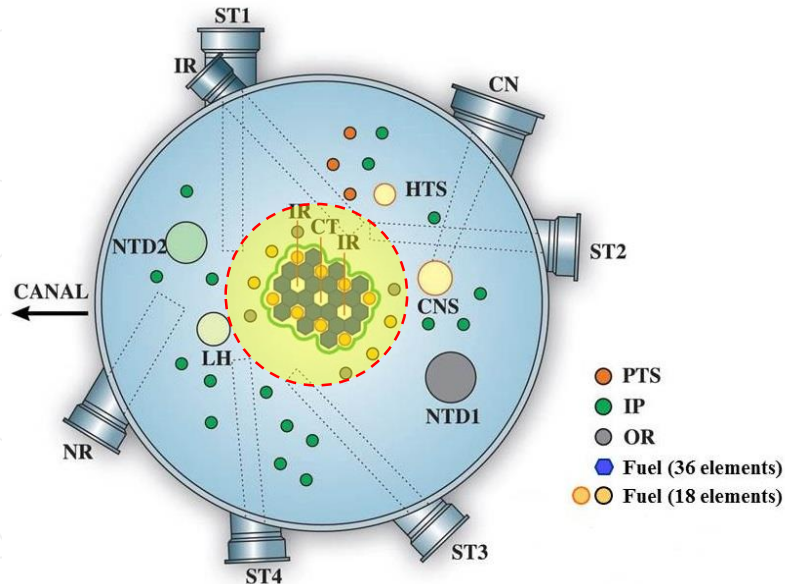
‘노내시험’이란?

■ 노내시험: In-pile test

- 주로 **원자로 재료**에 미치는 중성자 선이나 γ 선의 영향을 연구하기 위해 **원자로 안**에 시료나 시작품을 넣어서 수행하는 조사실험[†]

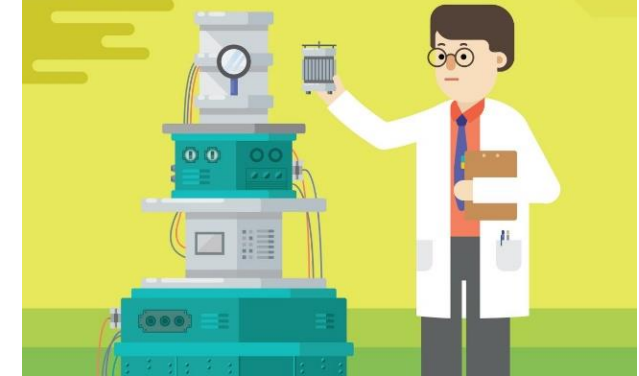
[†] 원자력용어사전, 한국원자력산업회의, 2001

- 하나로 노심 내 시험공(irradiation hole)에서 수행됨
→ 국내 최고 수준의 양자빔속밀도 (prompt : 7.6×10^{14} n/cm²-s, 8.6×10^{14} γ /cm²-s)



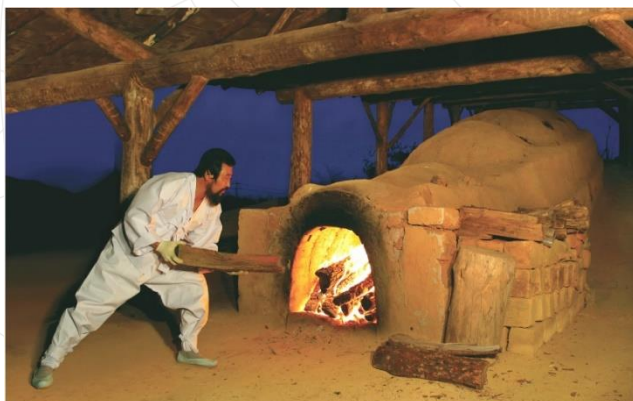
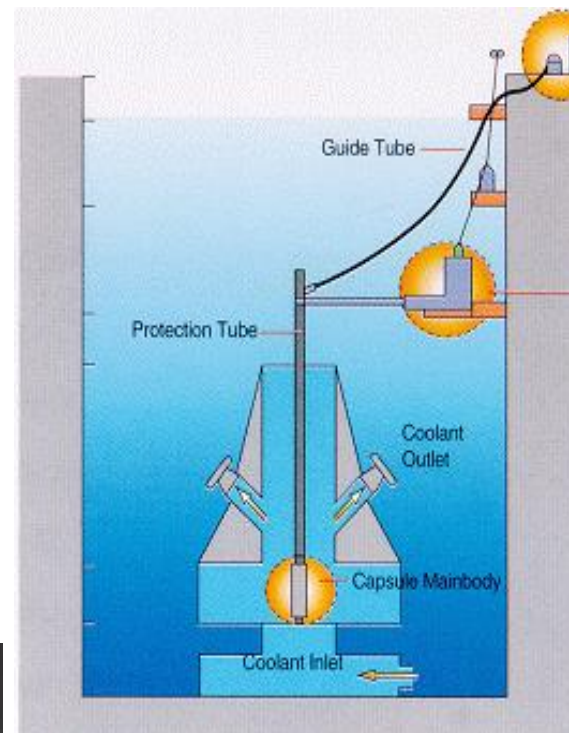
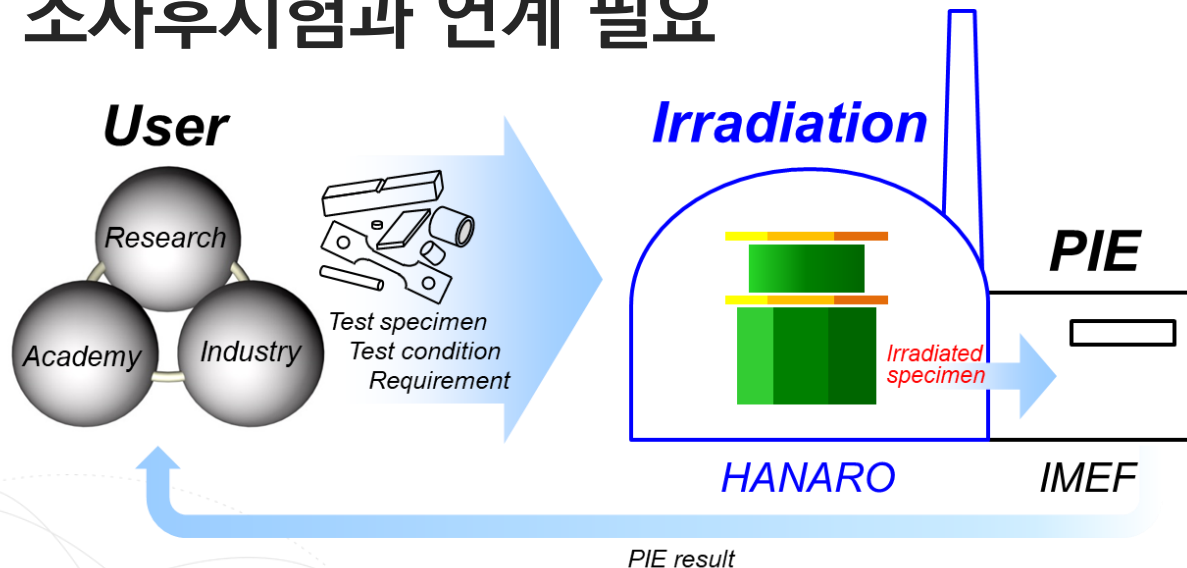
재료 및 핵연료 조사시험으로

핵연료나 원자로 부품을 사전에 확인하거나 새로운 재료를 개발할 수 있습니다.



하나로 노내 조사시험 개요(2)

조사후시험과 연계 필요

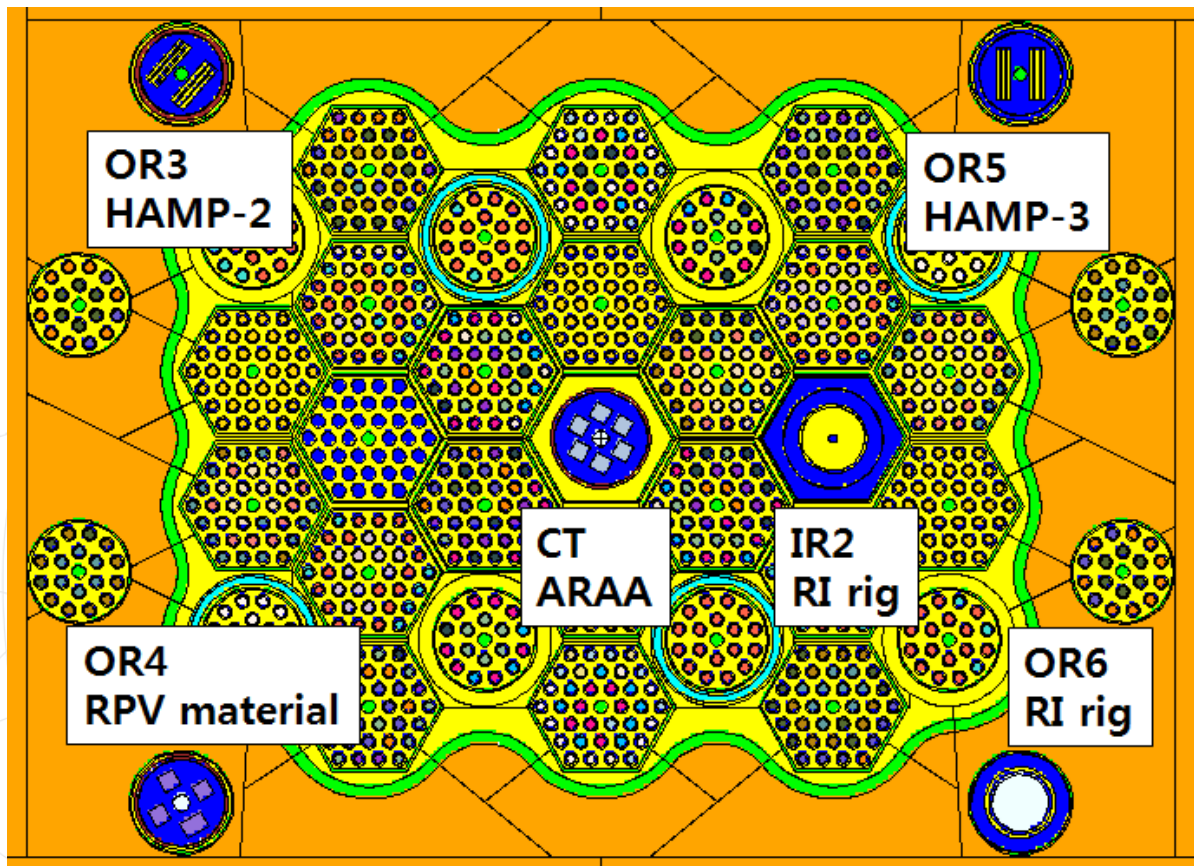


시험 목표 : 실험 목적(중성자속, 조사온도, 조사량)에 부합하는
조사시험 환경 구현

예) 원자로 압력용기 : $\sim 10^{20}$ n/cm²(1 MeV), $\sim 290^{\circ}\text{C}$

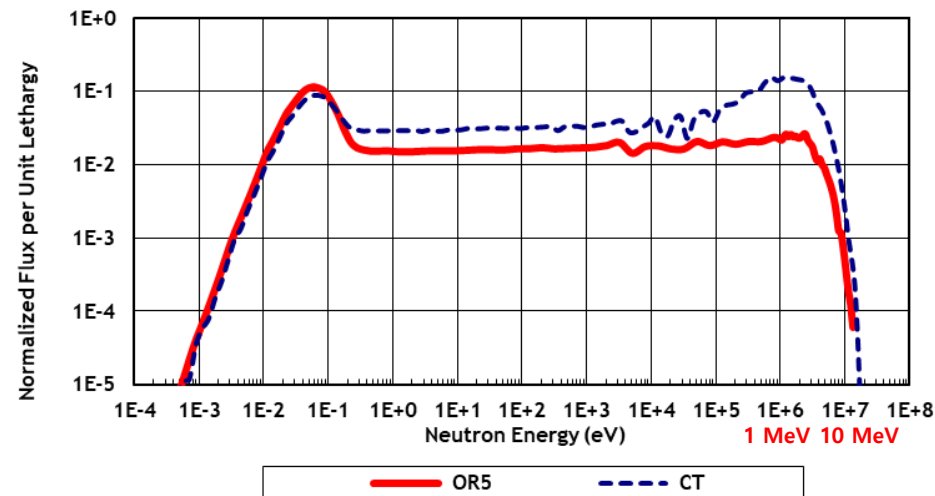
하나로 노심

노내 조사시험 활용 조사공



하나로 98-1주기(2018. 7)의 MCNP 노심 해석 모델

Neutron Spectrum in Inconel 690 Specimens (CAR=450 mm)



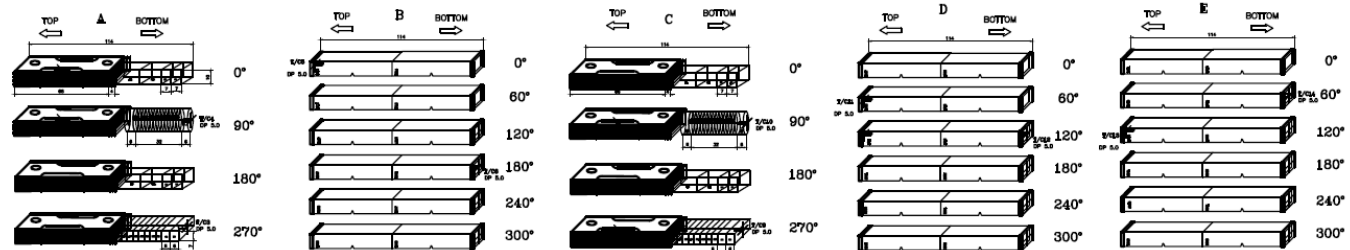
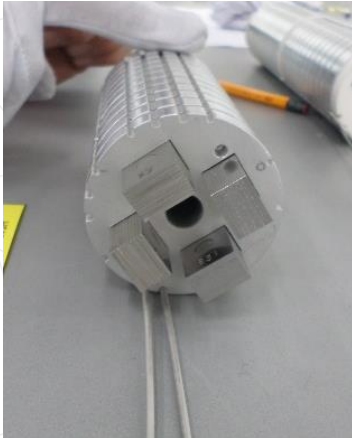
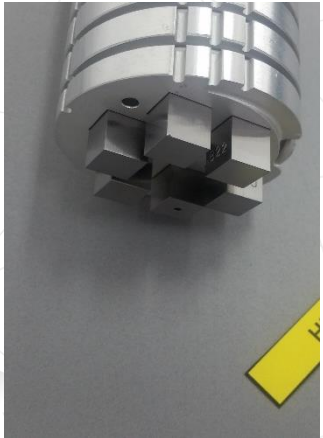
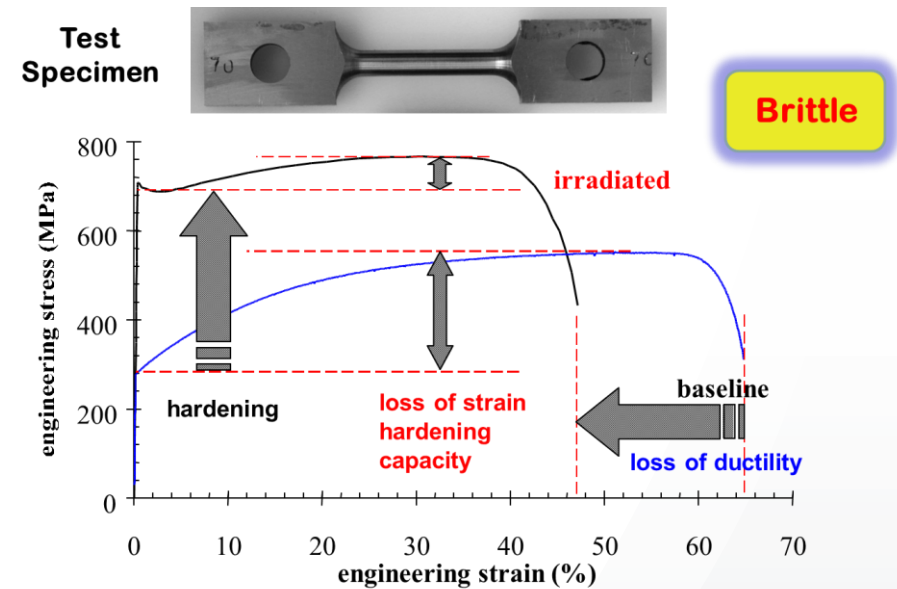
CT, OR 조사공의 중성자 스펙트럼

Location	Hole		Inside Dia. (cm)	Neutron Flux (n/cm ² . sec)		Remarks
	Name	No.		Fast Neutron (E>1.0 Mev)	Thermal Neutron (<0.625 eV)	
Core	CT	1	7.44	1.54×10^{14}	4.39×10^{14}	Fuel/material isotope production
	IR	2	7.44	1.50×10^{14}	3.93×10^{14}	
	OR	4	6.00	2.07×10^{13}	3.36×10^{14}	
Reflector	LH	1	15.0	6.62×10^{11}	9.77×10^{13}	Fuel/material isotope, semi-conductors
	HTS	1	10.0	9.44×10^{10}	47.97×10^{13}	
	IP	17	6.0	$1.45 \times 10^9 - 2.20 \times 10^{12}$	$2.40 \times 10^{13} - 1.95 \times 10^{14}$	

재료(비핵물질) 조사 시험

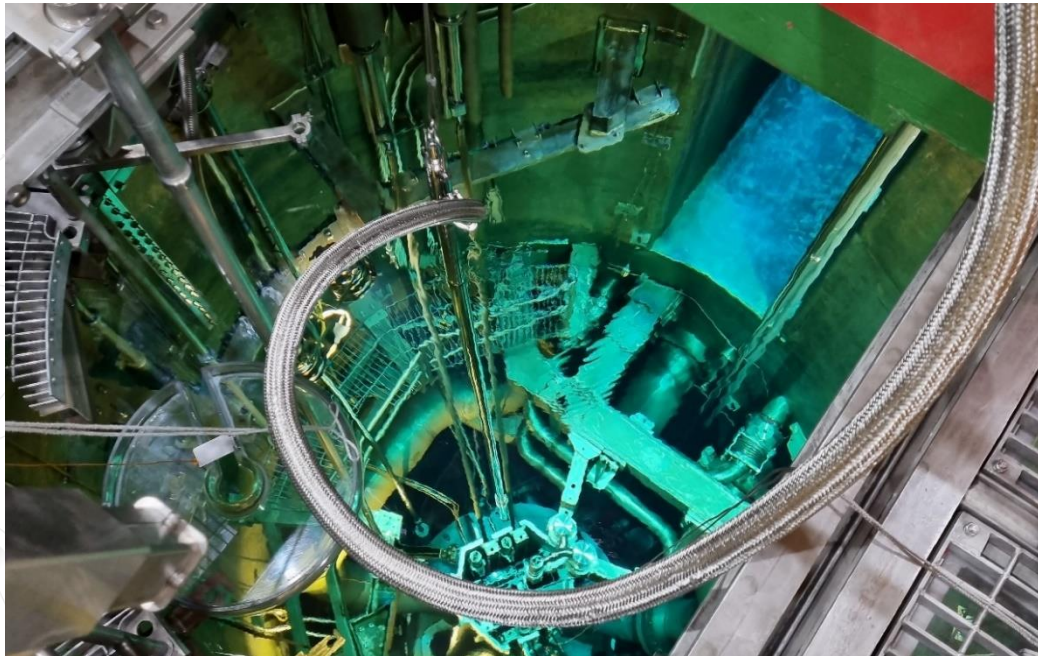
■ 비핵물질 금속 재료의 중성자 조사에 따른 취화 특성 등의 성능 실증

- 주요 관심 대상 재료의 조사량에 따른 영향 관찰
- 조사 온도가 미치는 영향이 중요하므로 조사온도를 일정하게 유지시키는 것이 중요함
 - 원자로 압력용기 재료의 경우, $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 시험 목표
- 조사된 재료의 핫셀 내 조사후시험을 통한 정량화



계장캡슐을 활용한 시험

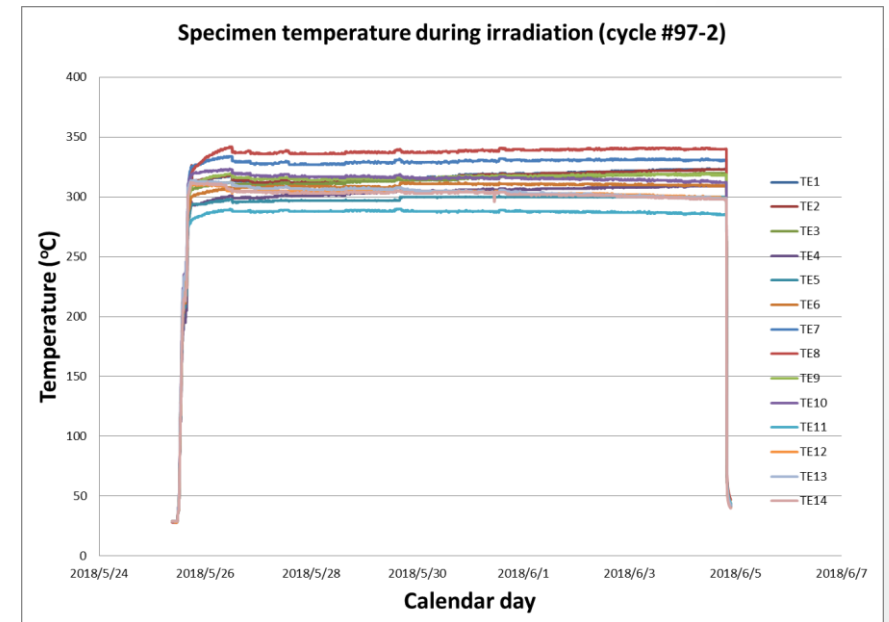
- Irradiated materials: reactor pressure vessel, SMR steam generator tube, reactor internals, test blanket modules for fusion reactor, research reactor materials,...
- Temperature control: He gas loop and wire heater control system ($\sim 1,000^{\circ}\text{C}$)
- Neutron fluence: max. > 2.5 dpa per year for Fe base materials
- Fast neutron fluence dosimetry: good agreement with $\pm 10\%$ (calculated/measured value)



Instrumented capsule loading in HANARO



Test specimen



Temperature control result (target: $300\sim 340^{\circ}\text{C}$)

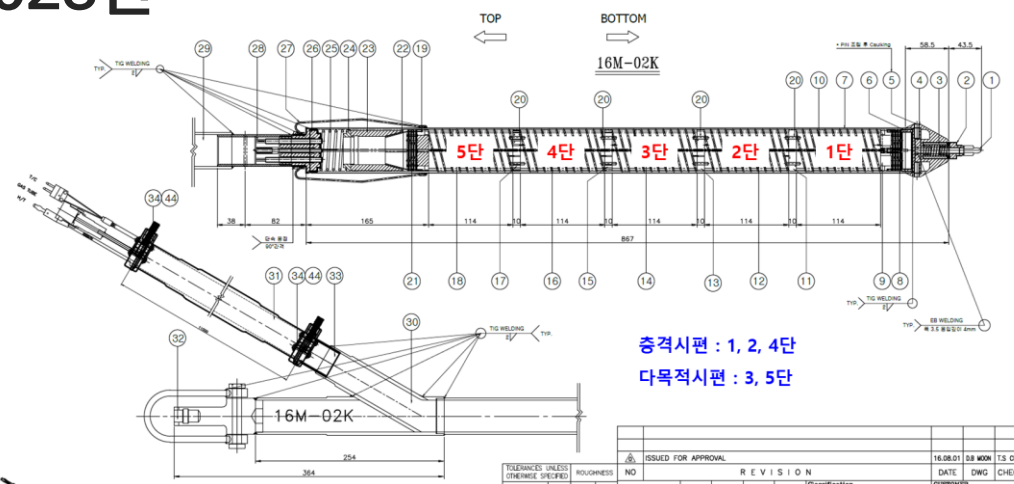
조사시험 대표 사례

ITER TBM 소재(ARAA)의 시험 경험: 2018년 ~ 2023년

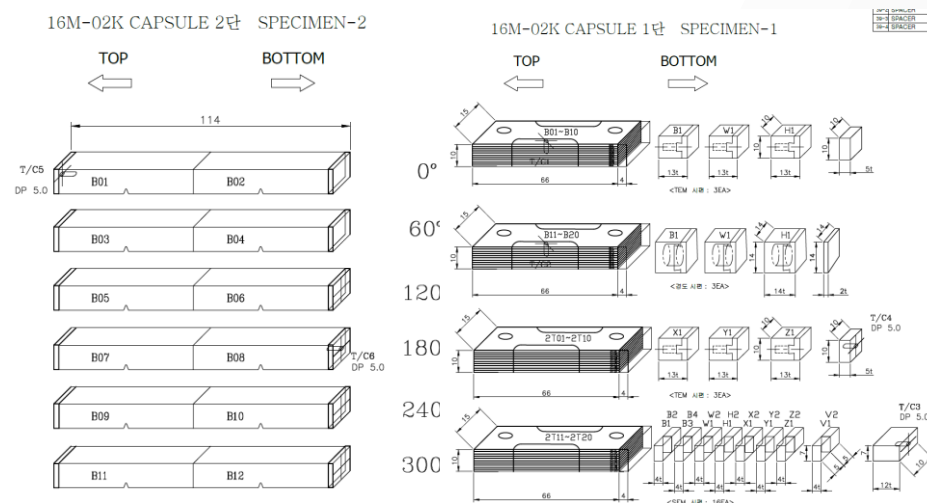
- 기계 시험 시편에 의한 영향 관찰 (핫셀 내에서 시험)
- 최대 조사량 3.392 dpa

Position	Specimen	ID	dpa	Position	Specimen	ID	dpa	Position	Specimen	ID	dpa
Top (5)	Tensile	#1	1.742	Center (3)	Tensile	#1	3.296	Bottom (1)	charpy impact	#1	2.669
		#2	1.756			#2	3.323			#2	2.687
		#3	1.745			#3	3.302			#3	2.671
		#4	1.756			#4	3.315			#4	2.673
	Multi	#1	2.051		Multi	#1	3.355			#5	2.683
		#2	2.076			#2	3.392			#6	2.667
		#3	2.055			#3	3.361			#1	2.200
		#4	2.042			#4	3.343			#2	2.211
Top-Center (4)	charpy impact	#1	2.600	Center-Bottom (2)	charpy impact	#1	3.354		charpy impact	#3	2.204
		#2	2.610			#2	3.380			#4	2.202
		#3	2.616			#3	3.361			#5	2.209
		#4	2.604			#4	3.361			#6	2.202
		#5	2.607			#5	3.382				
		#6	2.613			#6	3.362				
	charpy impact	#1	2.867		charpy impact	#1	3.215				
		#2	2.882			#2	3.239				
		#3	2.886			#3	3.224				
		#4	2.870			#4	3.221				
		#5	2.879			#5	3.234				
		#6	2.880			#6	3.217				

Evaluated neutron damage

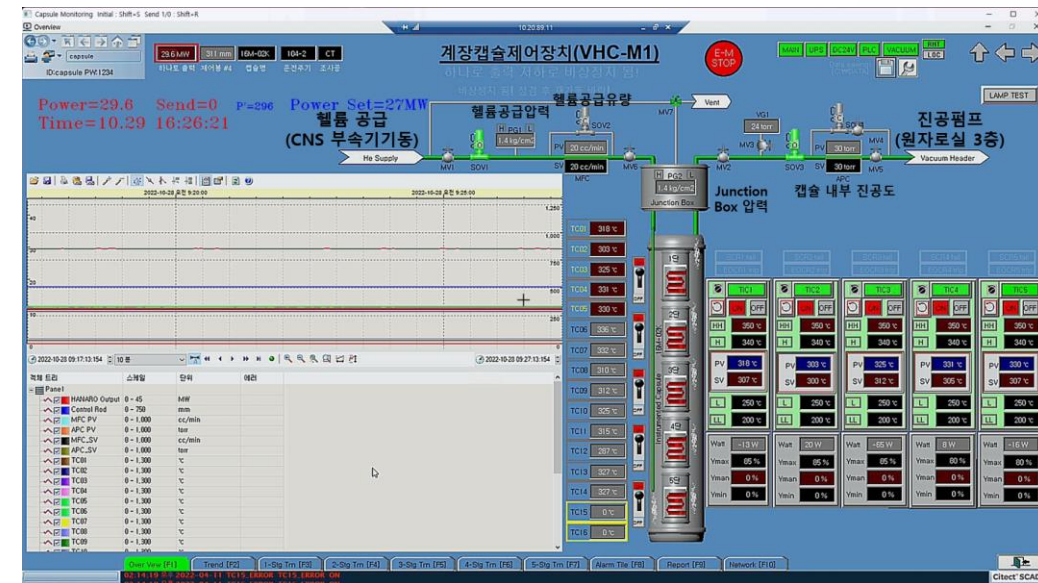
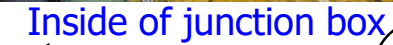


Test capsule



Irradiated specimen

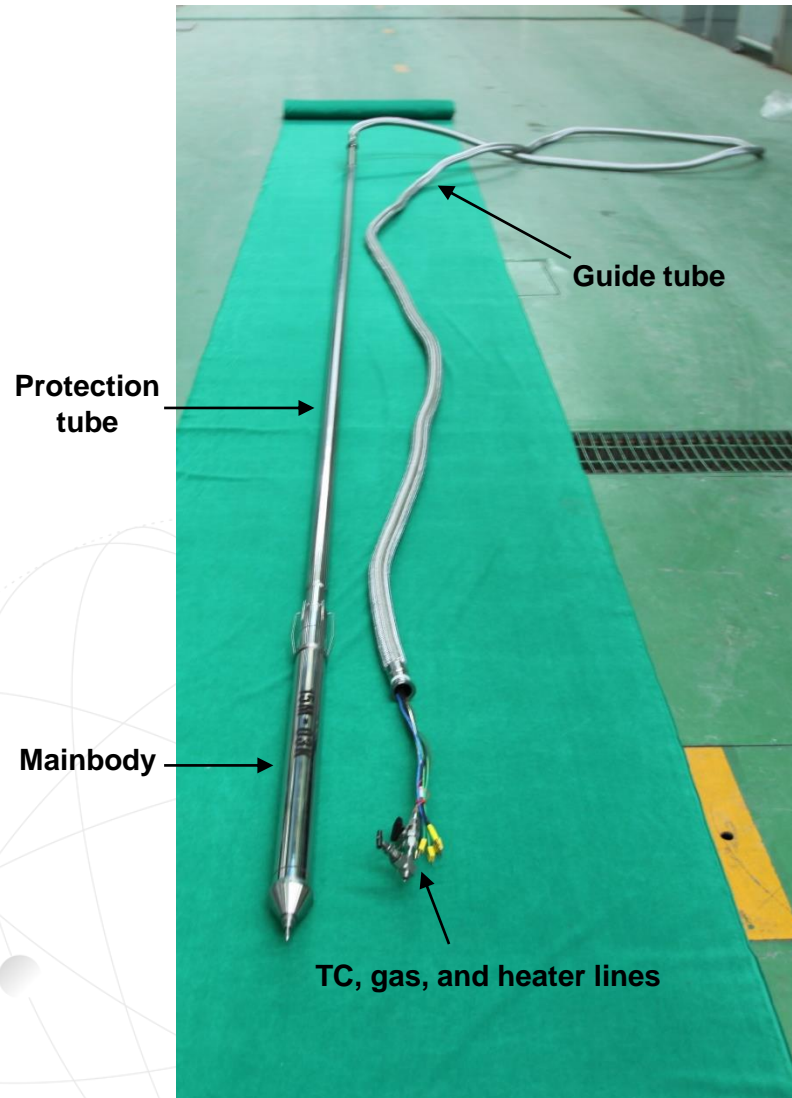
He gas pressure control



Test control system

Wire heater

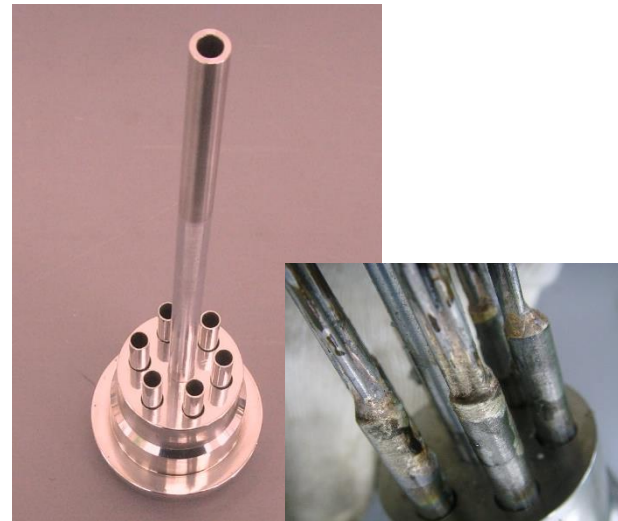
계장캡슐 구조 및 부품



Instrumented capsule



Inside of mainbody (5 stages)



Top end plug & brazing for isolation



Detailed components

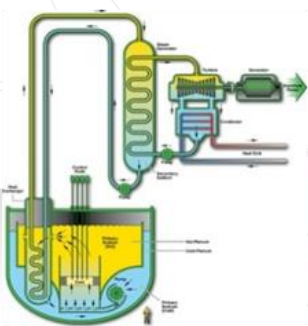
핵연료 조사시험

Irradiation test history and plan for **nuclear fuel** at HANARO

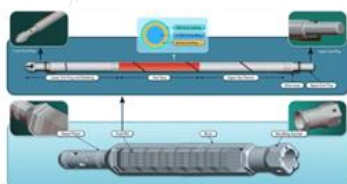
Research Reactor



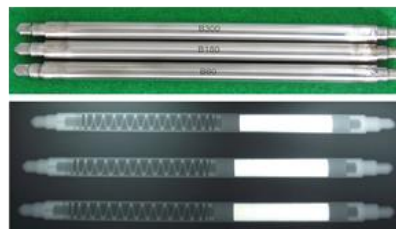
- U-Mo / U-Si : KOMO series
- U-7Mo/Al-5Si for KJRR : **HAMP series**
- **HAMP-1, 2, 3** / Advanced coating



- U-Zr-Re // FM steel
- 1st irradiation : ~3at%
- 2nd irradiation : ~6at%



Sodium-cooled Fast Reactor

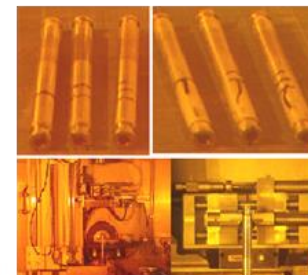


Fuel Irradiation
at HANARO

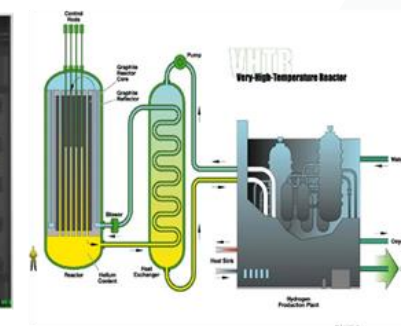
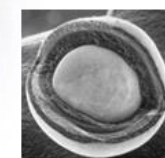


- Coated Particle Fuel
- CPF in graphite compact

Commercial Reactor (PWR)

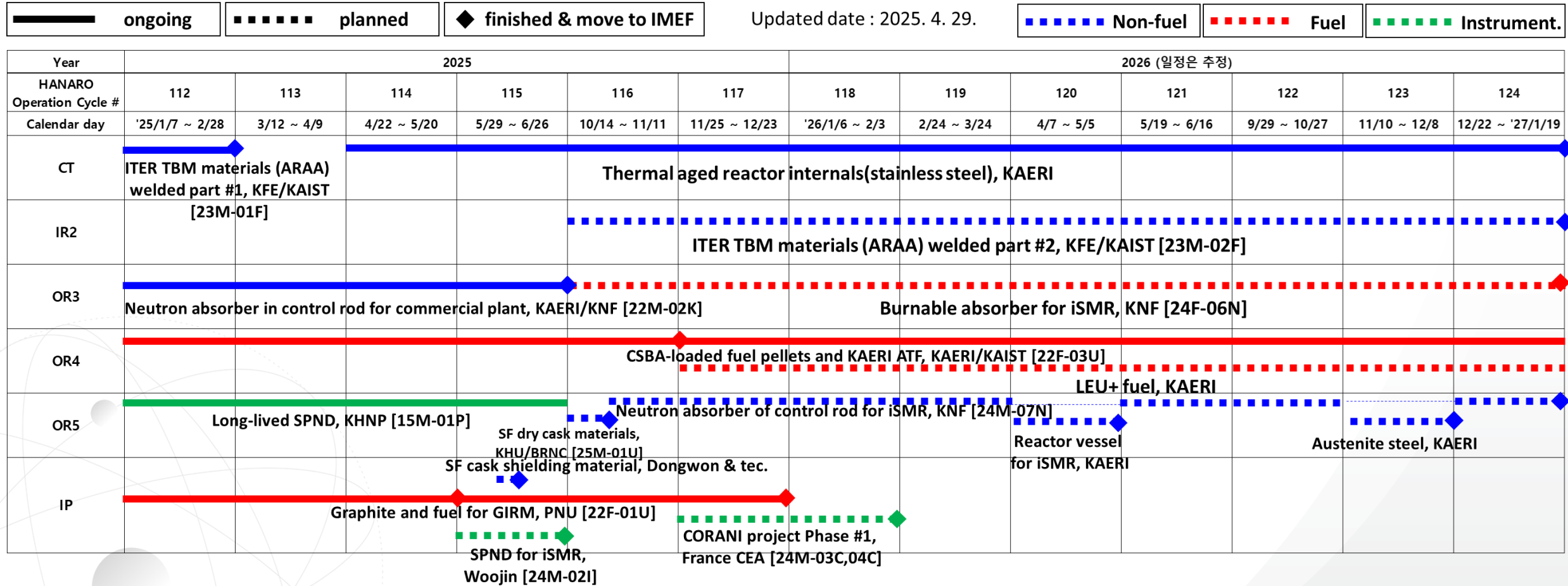


- UO₂ pellet in Zircaloy cladding
- Advanced fuel pellet : Dual cooled...
- MCP, BBP pellet irradiation



Very High Temperature Reactor

하나로 조사시험 계획(~2026년)



➡ i-SMR 관련 시험 수요 급증에 따른 가용 조사공 부족, 시험 기간이 장기간 소요되는 시험 수요 증가

2025년 하나로 운전 계획

HANARO POWER OPERATION SCHEDULE

2025.03.05

HANARO Management Division

Blue : Operation Day								1/2				
Year 2025	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Schedule	Cycle	Power (MW)	MWD	Day
JANUARY				1	2	3	4					
	5	6	7	8	9	10	11	Start-up (1/7, 08:00)				
	12	13	14	15	16	17	18	Operation				
	19	20	21	22	23	24	25	Shutdown (1/24, 13:00)	112-1	17	289.0	17.0
FEBRUARY	26	27	28	29	30	31	1	* New Year Holiday(1/27 ~ 1/30)				
	2	3	4	5	6	7	8	* Institute Anniversary(2/4)				
	9	10	11	12	13	14	15	Start-up (2/11, 08:00)				
	16	17	18	19	20	21	22	Operation				
MARCH	23	24	25	26	27	28	1	Shutdown (2/28, 13:00)	112-2	27	459.0	17.0
	2	3	4	5	6	7	8	* Fuel Shuffling(3/4~3/11)				
	9	10	11	12	13	14	15	Start-up (3/12, 08:00)				
	16	17	18	19	20	21	22	Operation				
	23	24	25	26	27	28	29					
APRIL	30	31	1	2	3	4	5	Shutdown (4/9, 13:00)	113	27	756.0	28.0
	6	7	8	9	10	11	12					
	13	14	15	16	17	18	19	* Fuel Shuffling(4/14~4/22)				
	20	21	22	23	24	25	26	Start-up (4/23, 08:00)				
MAY	27	28	29	30	1	2	3	Operation				
	4	5	6	7	8	9	10					
	11	12	13	14	15	16	17	Shutdown (5/21, 13:00)	114	27	756.0	28.0
	18	19	20	21	22	23	24	* Fuel Shuffling(5/22~5/29)				
JUNE	25	26	27	28	29	30	31	Start-up (5/30, 08:00)				
	1	2	3	4	5	6	7	Operation				
	8	9	10	11	12	13	14					
	15	16	17	18	19	20	21	Shutdown (6/27, 13:00)	115	27	756.0	28.0
	22	23	24	25	26	27	28	* Fuel Shuffling(6/30~7/4)				
JULY	29	30	1	2	3	4	5	* Maintenance of Rx building (6/30~10/10)				
								2025 Total (1st half)		3016.0	118.0	

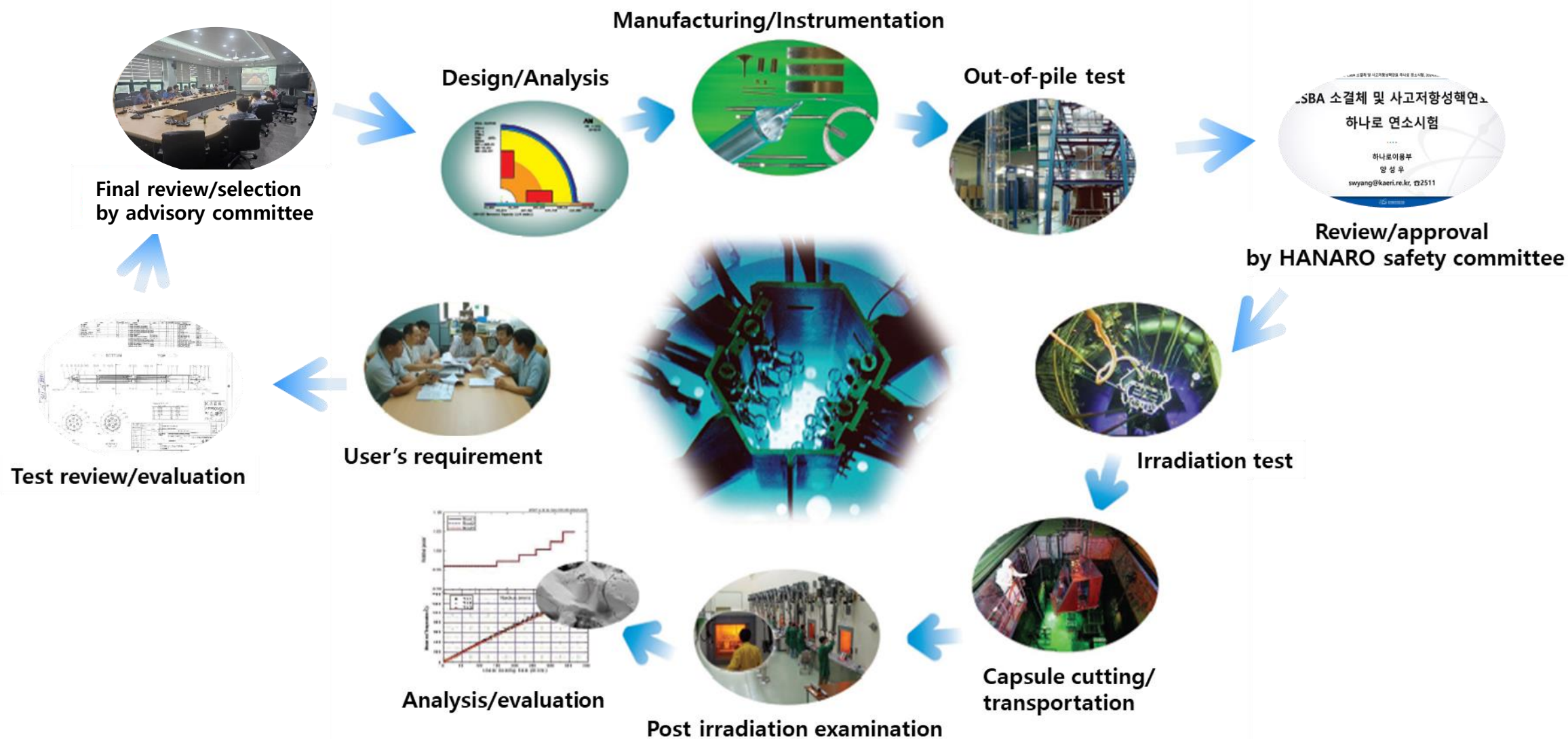
HANARO POWER OPERATION SCHEDULE

Blue : Operation Day

2/2

Year	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Schedule	Cycle	Power (MW)	MWD	Day
2025												
JULY	6	7	8	9	10	11	12					
	13	14	15	16	17	18	19					
	20	21	22	23	24	25	26	* KINS Periodic Inspection				
AUGUST	27	28	29	30	31	1	2	Reactor Shutdown (6/27~10/13)				
	3	4	5	6	7	8	9					
	10	11	12	13	14	15	16					
	17	18	19	20	21	22	23					
	24	25	26	27	28	29	30					
SEPTEMBER	31	1	2	3	4	5	6					
	7	8	9	10	11	12	13					
	14	15	16	17	18	19	20					
	21	22	23	24	25	26	27					
OCTOBER	28	29	30	1	2	3	4	* The harvest moon day (10/5~10/7)				
	5	6	7	8	9	10	11					
	12	13	14	15	16	17	18	Start-up (10/14, 08:00)				
	19	20	21	22	23	24	25	Operation				
NOVEMBER	26	27	28	29	30	31	1	Shutdown (11/11, 13:00)	116	27	756.0	28.0
	2	3	4	5	6	7	8					
	9	10	11	12	13	14	15	* Fuel Shuffling(11/17~11/21)				
	16	17	18	19	20	21	22					
	23	24	25	26	27	28	29	Start-up (11/25, 08:00)				
DECEMBER	30	1	2	3	4	5	6	Operation				
	7	8	9	10	11	12	13					
	14	15	16	17	18	19	20	Shutdown (12/23, 13:00)	117	27	756.0	28.0
	21	22	23	24	25	26	27	* Fuel Shuffling(12/24~12/31)				
	28	29	30	31								
2025 Total										4528.0	174.0	

하나로 조사시험 절차





한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

KOREA
ATOMIC
ENERGY
RESEARCH
INSTITUTE

02

이온빔 시험과의 차별성

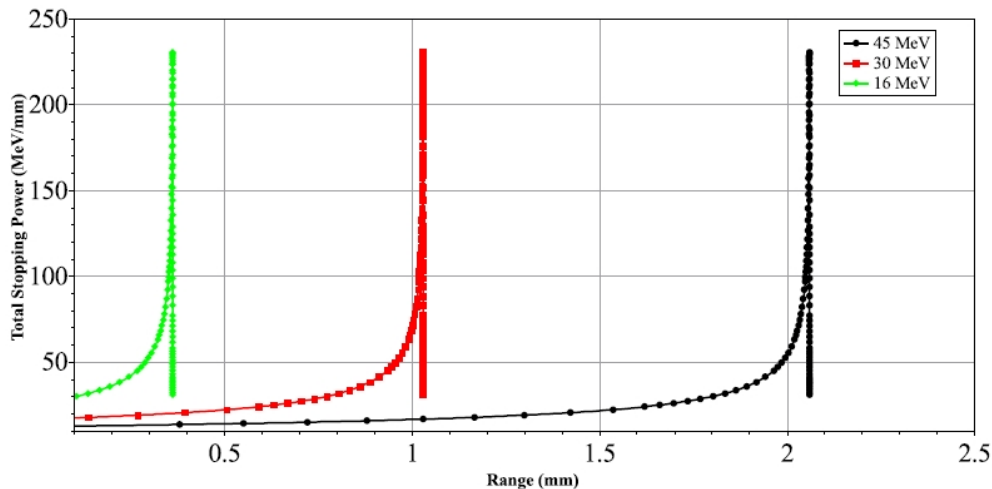
연구로 조사시험 vs 이온빔 조사시험

조사시험에 따른 영향 비교

Comparison of major factors relating to tungsten irradiation facilities.

Simulation of neutron irradiation damage in tungsten using higher energy protons, R. Rayaprolu et al., Nuclear Materials and Energy, vol. 9, 2016

Description (for 1 dpa in W)	30 MeV H ⁺ (445 μ A/cm ²)	Heavy Ions	Fission (HFR) [2]	Spallation (expected) [29]	DEMO FW [1]
Maximum PKA Energy (keV)	646	$\gg 1000$	100	–	303
Time taken	14 h	Hours	1 year		2 months
Thickness Range (μ m)	500	1–10	200–4000	200–4000	–
'H' Production (appm)	29	0	0	1	1
'He' Production (appm)	7.2	0	0.01	0.1–0.01	0.5
'Re' Production (appm)	401	0	50,000	300–500	700



Bragg peak for 16, 30, 45 MeV proton irradiation

▶ 양성자, 이온빔에 의한 재료 연구

- 주로 기초 연구에 활용
- 낮은 비용, 고 dpa, 짧은 조사시간, 낮은 방사화 영향 등의 장점

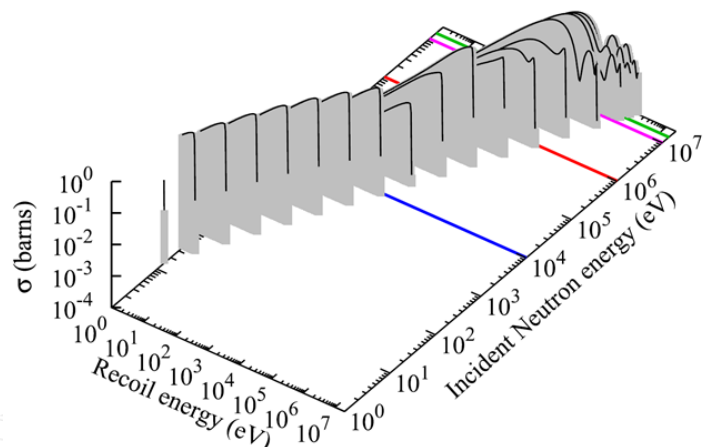
▶ 연구로 노내시험에 의한 재료 연구

- 실제 운전환경과 가장 유사한 조건, 국부적인 영향 배제
- 적용성 평가, 인허가 대응

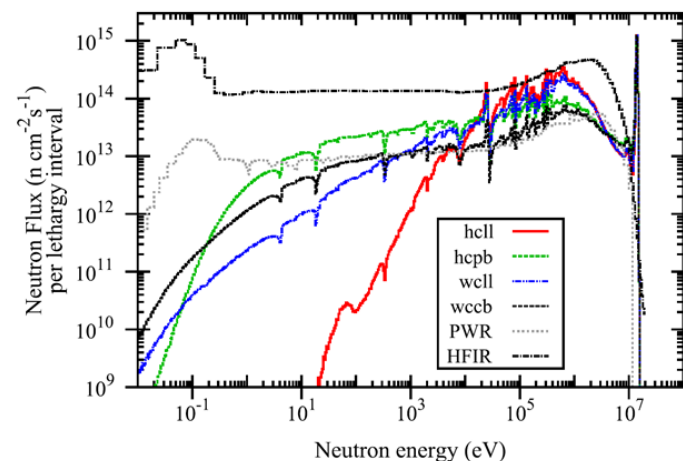
가속기, 연구로 인프라를 적절히 활용해야 함! (특히, 고속로 소재)

PKA energy

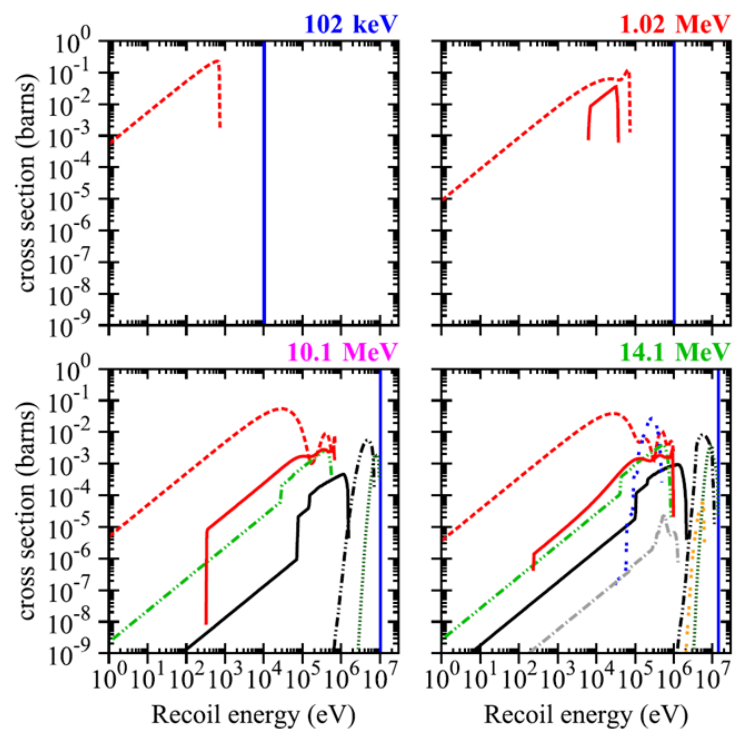
이온빔의 경우 단일에너지 조사, 연구로의 경우 spectrum 조사



Recoil cross-section matrix for elastic scattering of neutrons on ^{56}Fe



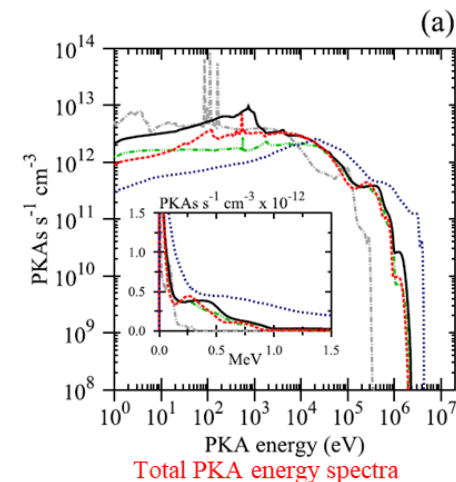
Neutron irradiation spectra (DEMO concepts)



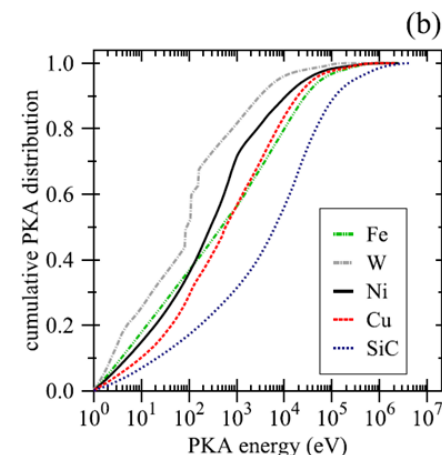
reaction channels					
—	$(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$	—	$(n,p)^{56}\text{Mn}$	—	$(n,\alpha)^4\text{He}$
- - -	$(n,n)^{56}\text{Fe}$	- - -	$(n,n\alpha)^{52}\text{Cr}$	- - -	$(n,n\alpha)^4\text{He}$
· · ·	$(n,2n)^{55}\text{Fe}$	—	$(n,n')^{56}\text{Fe}$	- - -	$(n,p)^1\text{H}$

Incident energy-group snapshots

Energy spectra of primary knock-on atom under neutron irradiation.
 M.R. Gilbert et al., Journal of Nuclear Materials 467, 2015.



Total PKA energy spectra



Cumulative PKA distributions



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

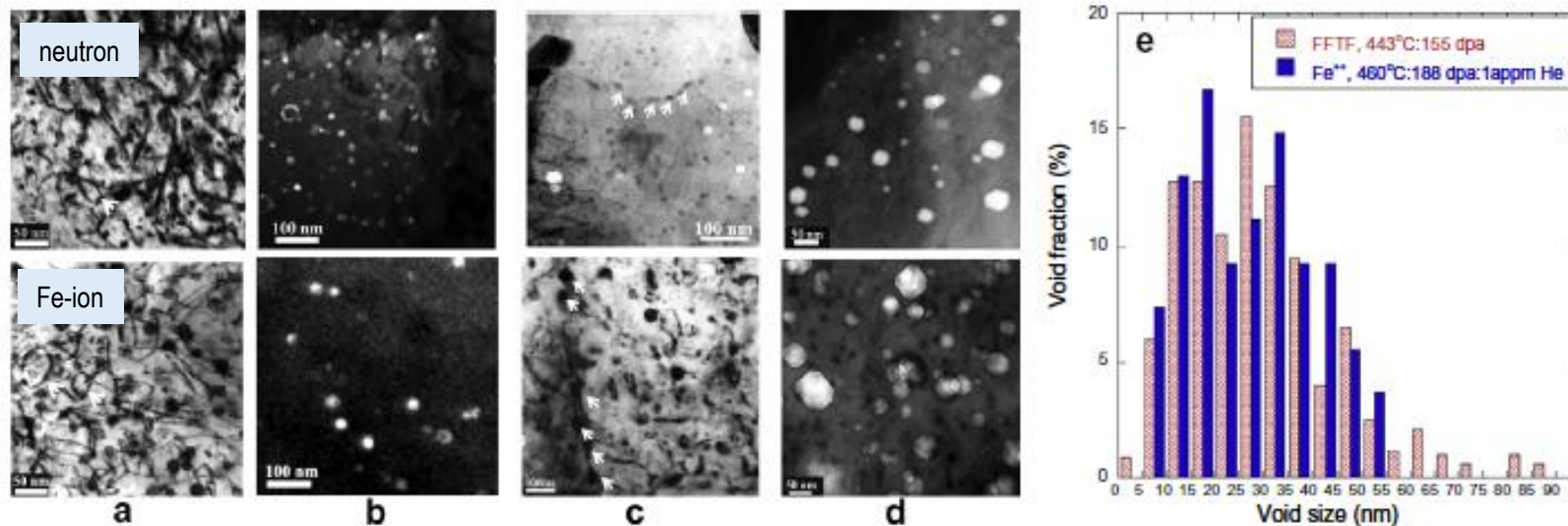
KOREA
ATOMIC
ENERGY
RESEARCH
INSTITUTE

03

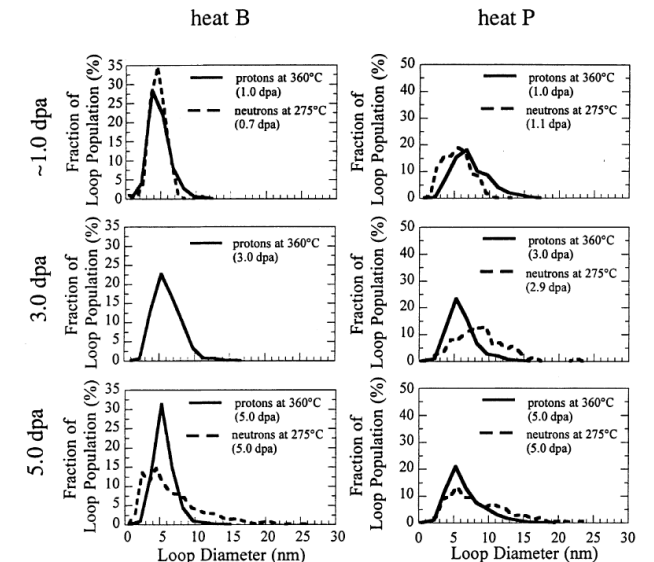
연구로/이온빔을 활용한
통합 연구 방안

동일한 소재를 대상으로 중성자/이온빔 시험 결과 비교 평가

- 최근 KAHIF의 Fe 이온빔 조사 역량 확보를 통해 양 시설을 활용하여 동일한 소재의 시험 자료를 확보할 수 있음 → 관련 재료 연구자들을 중심으로 조사 효과 비교/평가가 필요함
 - 원자로 압력용기(SA508)
 - 핵융합로용 TBM 저방사화강 소재(ARAA)
 - 기타 소재(가돌리니아 등)
- 국외 선진국에서는 중성자/양성자/이온빔 간의 교차 시험 분석 경험을 보유하고 있음

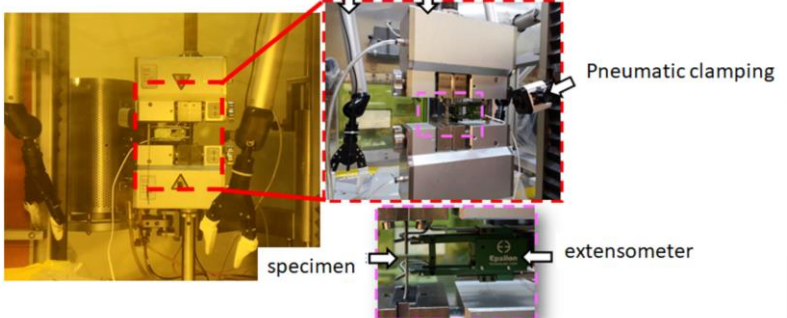
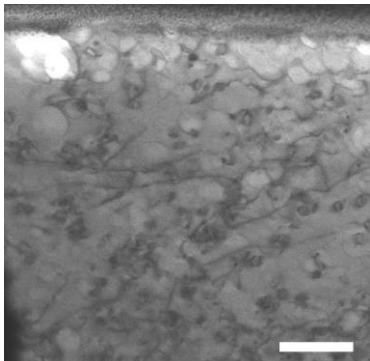
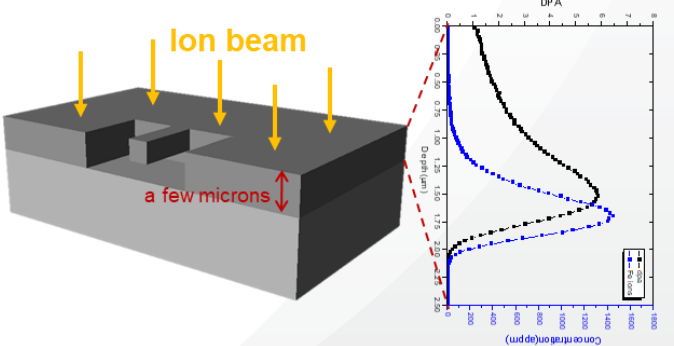


G. Was et al., Emulation of reactor irradiation damage using ion beams. *Scri. mater.* 88, 33-36 (2014)



G. Was et al., Emulation of neutron irradiation effects with protons: validation of principle, *J. Nuc. Mat.*, 300, 198-216 (2002)

통합 연구를 수행하기 위한 시험 장비 필요

	Microstructure analysis	Mechanical test
Neutron irradiated sample	<p><i>관련 장비 부재로 인하여 관찰이 어려움</i></p> <p>(방사화된 시편을 대상으로 시편 제조와 취급 등이 어려움)</p> <p>> IMEF에서 FIB 확보를 위해 노력 중</p>	<p>- Tensile tests in hotcell @IMEF</p>  <p>manipulator Pneumatic clamping</p> <p>Pneumatic clamping</p> <p>specimen extensometer</p>
Ion-beam irradiated sample	<p>- TEM sampling on the surface</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ FIB (Focused ion beam) ▪ Jet-polishing 	<p>- Micro-pillar tests using pico-indenter</p>  <p>Ion beam</p> <p>a few microns</p> <p>DPA</p> <p>Depth (nm)</p> <p>Conc (at.%)</p>



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

KOREA
ATOMIC
ENERGY
RESEARCH
INSTITUTE

04

결언

- **하나로를 활용하여 다양한 원자력 소재를 대상으로 중성자 조사를 수행 중**
 - 최근 원자력 연구개발 활성화에 따라 인허가 자료 획득이 요구
 - 단, 연구로에서의 시험은 비교적 고비용/장기간이 소요되므로, 연구기관 및 산업체를 중심으로 수행
- **하나로의 가동 정상화, 이온빔 시설의 조사 역량 확보로 다양한 자료를 확보할 수 있는 기반이 마련됨**
 - 특히 KAHIF의 Fe 이온 조사 역량 확보를 통해 철강 소재의 조사영향을 종합적으로 관찰 가능
 - 상호 효과를 종합적으로 비교/평가하기 위해 빈약한 부분을 보완해야 함
 - 연구로 시험의 경우 미세조직 관찰 역량 확보 필요
- **국가 원자력 산업 뿐만 아니라 학술적인 기여를 위한 하나로 조사시험의 역할을 고민 중임**
 - 2028년 기장연구로 운영 착수 이후 물리적인 역량 확대 가능
 - 관련 연구의 활성화가 필요함 → 미국의 NSUF와 유사한 연구자 지원 기능이 필요