

Hydride Blister Analysis in Zr Cladding via Micro-Cantilever Testing and Post-Ion Irradiation Micro-Mechanical Assessment of SA508 Steel for SMR Pressure Vessel Integrity



Ho-A Kim, Sangtae Kim

Dept. of Nuclear Engineering, Hanyang university.

Post doctoral Researcher

CONTENTS

01 연구 배경 및 필요성

02 연구 내용 및 주요 결과

03 중이온빔 조사시험

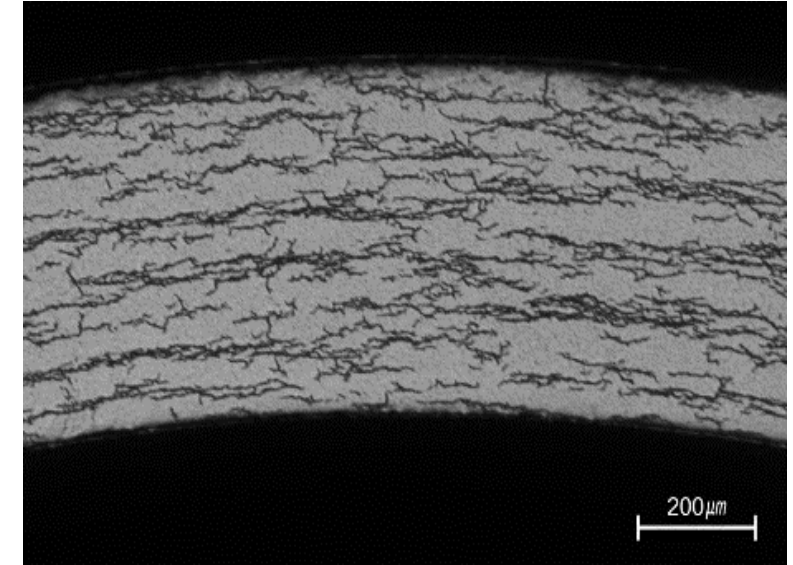
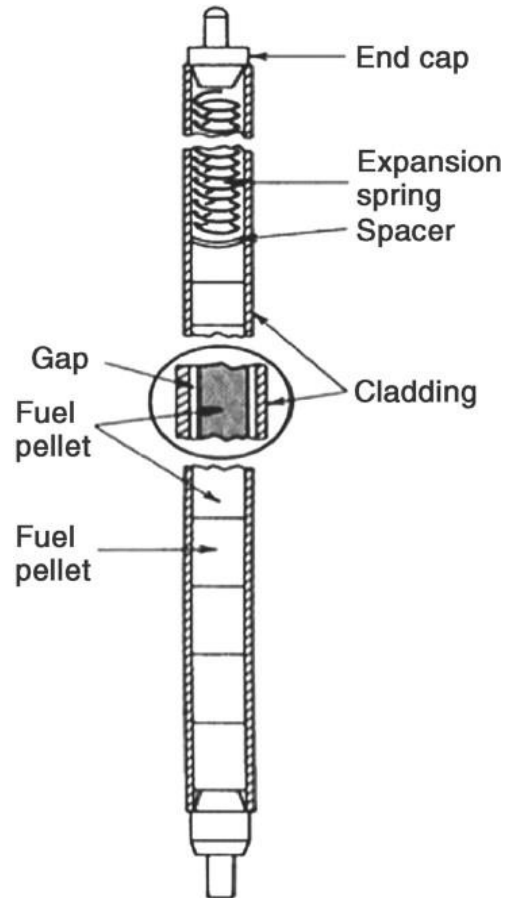
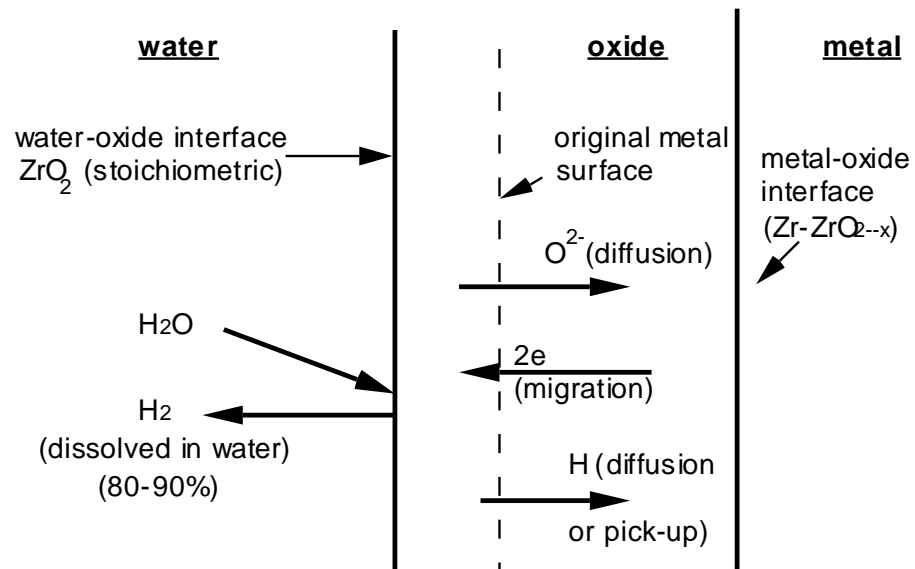
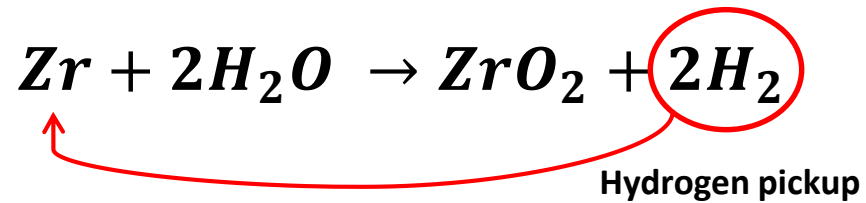
04 중이온빔 조사 후 micro-mechanical test 활용 계획

05 결론

01 연구 배경 및 필요성

지르코늄 수소화물 생성

Corrosion reaction

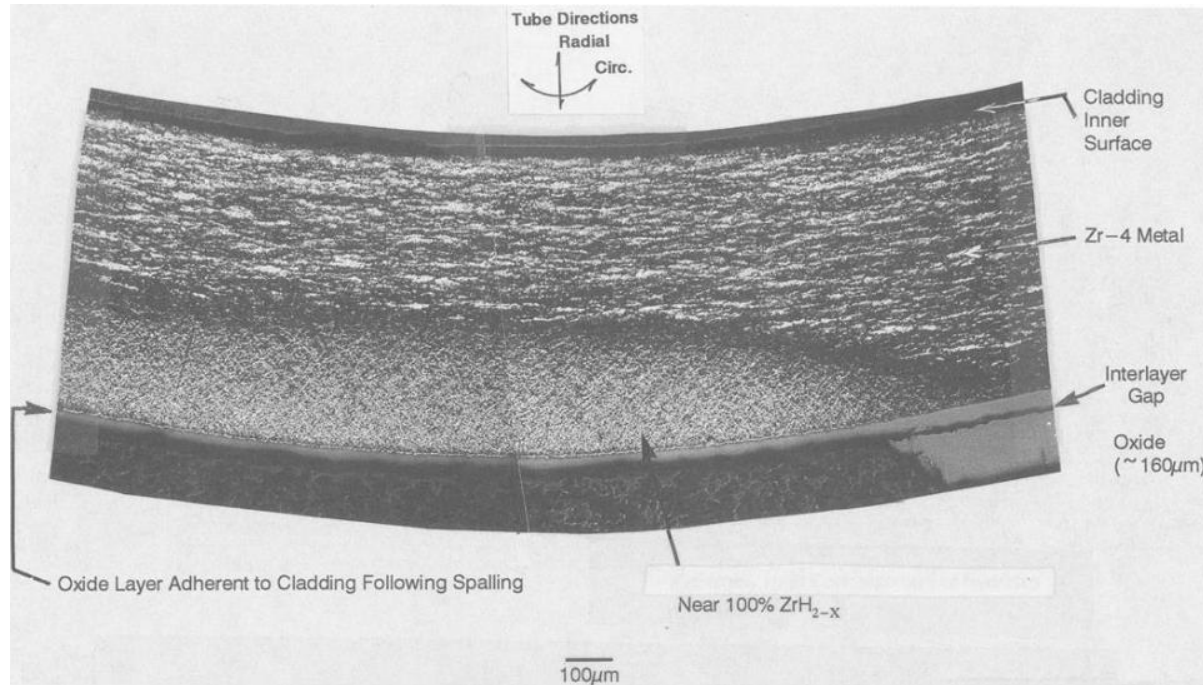


Phase	δ
H/Zr ratio (ZrH_x)	$1.30 \leq x \leq 1.66$
Stability	stable
Morphology	platelets
Crystal structure	FCC
Density (g/cm^3)	5.646
Volume change (%)	16.3~17.2
Nucleate at	slow cooling rate < 2 °C/min

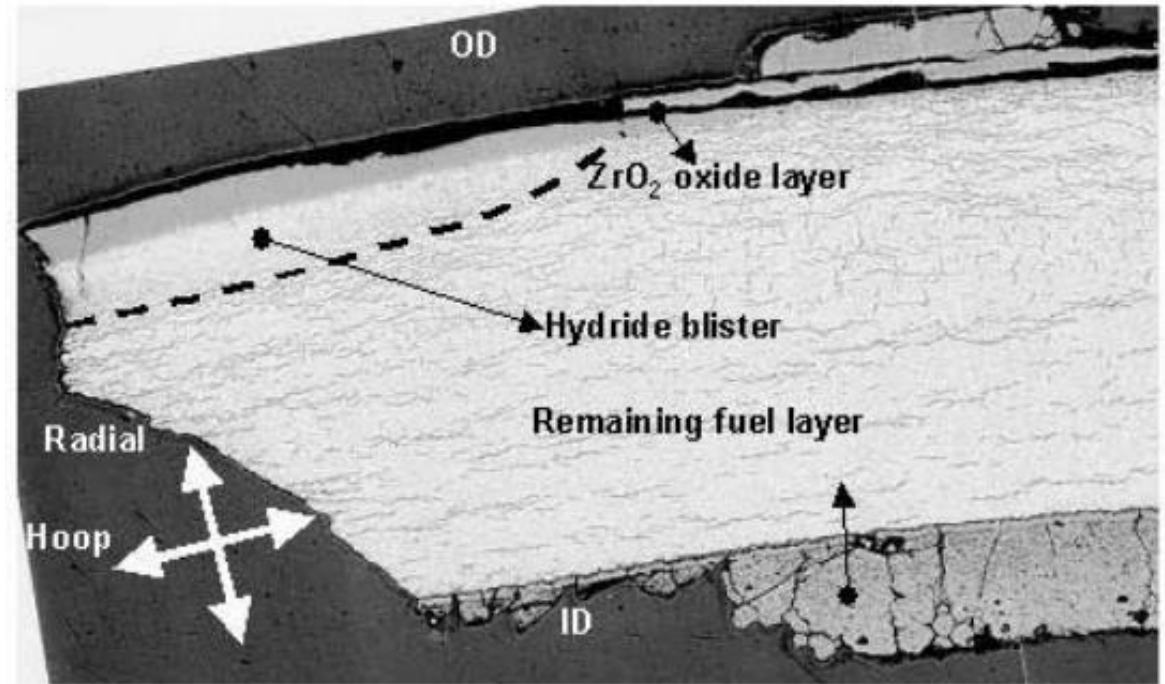
J.M. Lee et al., Korean J. Met. Mater., 56(2) (2018) 79-92

Hydride blister란?

In pressurized water reactor (PWR), **hydride blisters** can form due to **oxide spallation**, and generally, the region of the blister has a high hydrogen concentration.



A. M. Garde et al., ASTM STP 1295, 1996

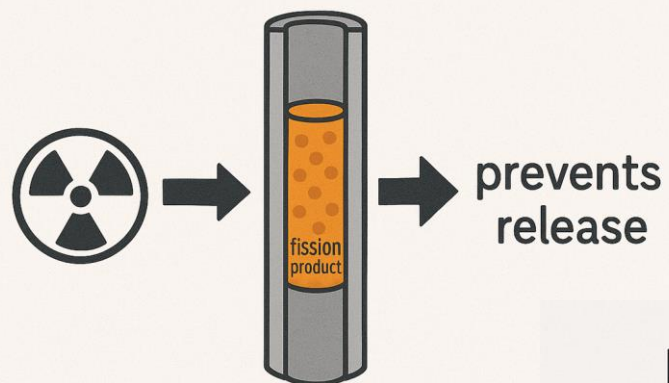


J. Desquines et al., ASTM STP 1295, 2005

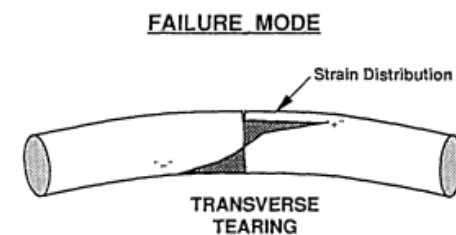
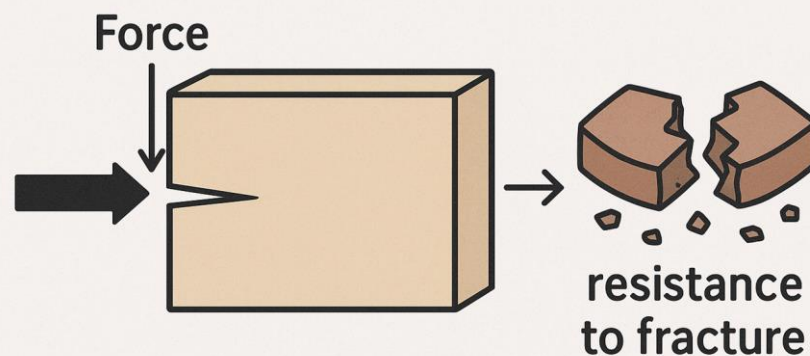
01 연구 배경 및 필요성

피복관의 파괴인성

CLADDING AS A BARRIER

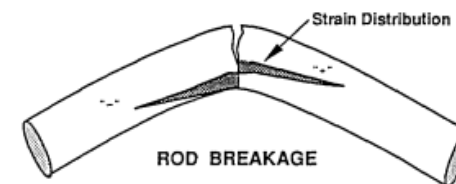


FRACTURE TOUGHNESS

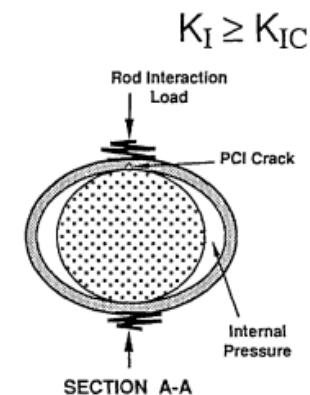
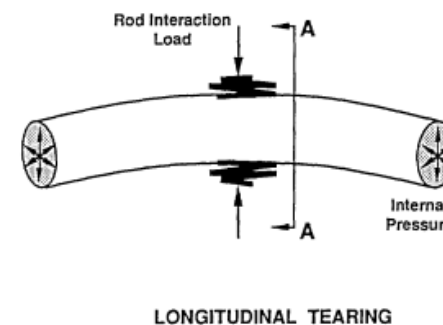


FAILURE MEASURE

$$\epsilon \geq \epsilon_f$$



$$K_I \geq K_{IC}$$

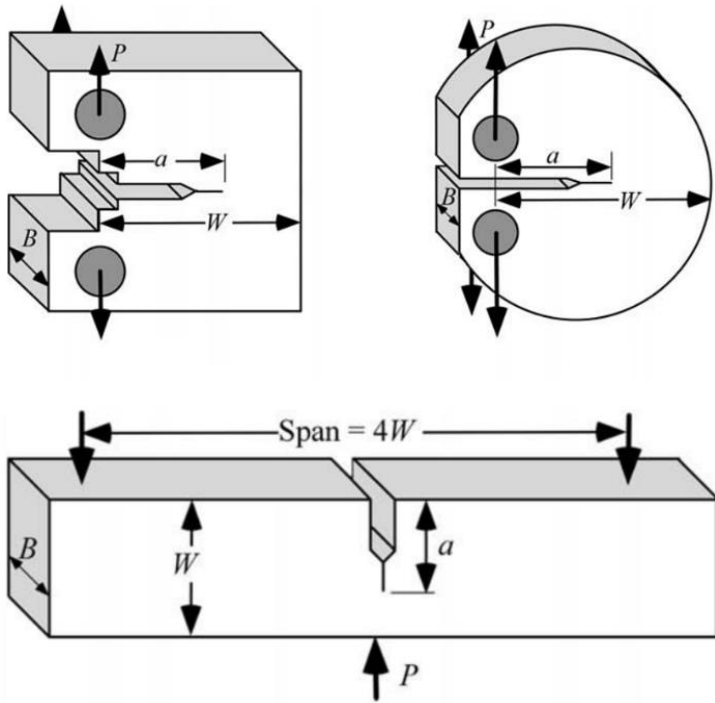


T. L. Sanders et al., SAND90-2406, 1992

01 연구 배경 및 필요성

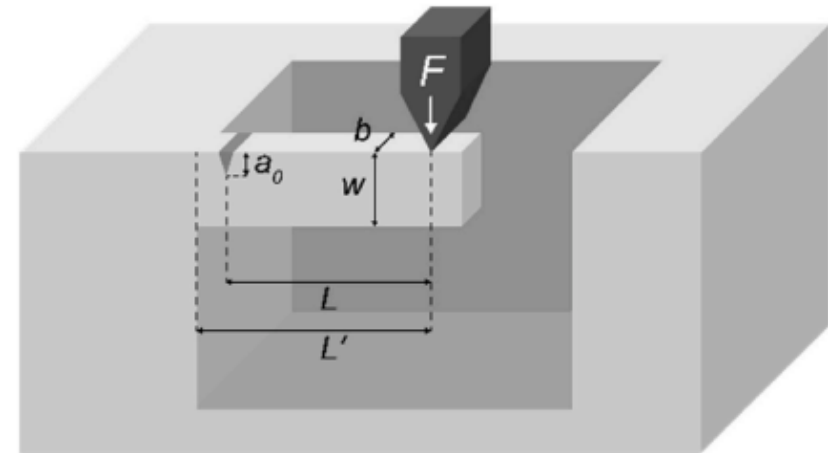
피복관의 파괴인성

Macro test



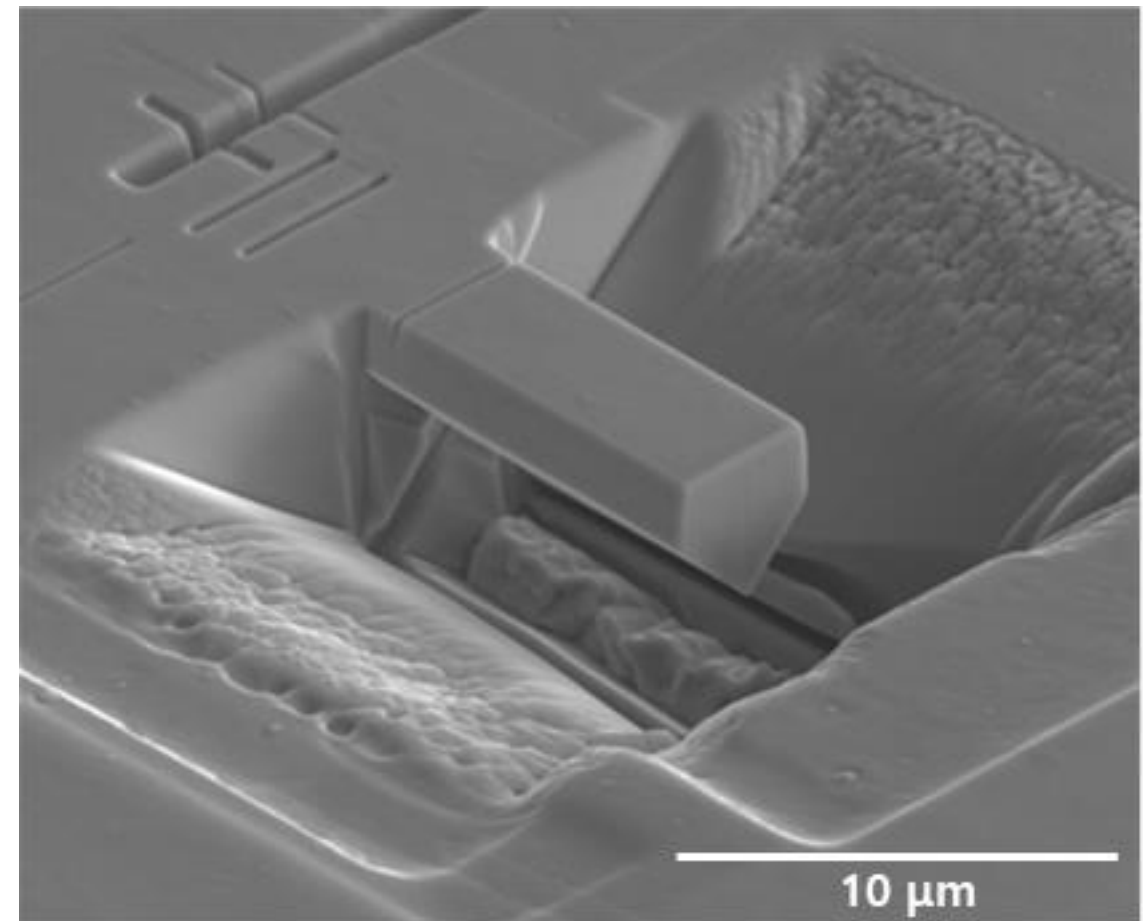
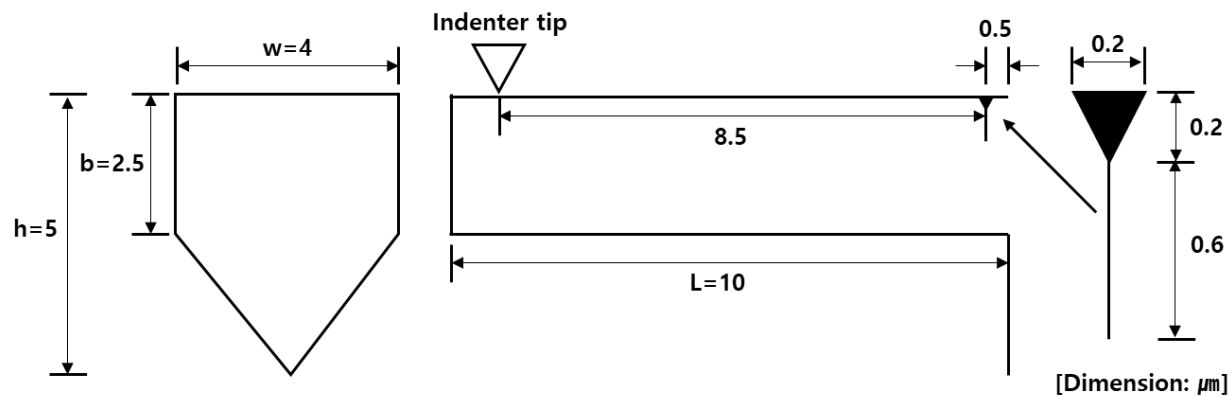
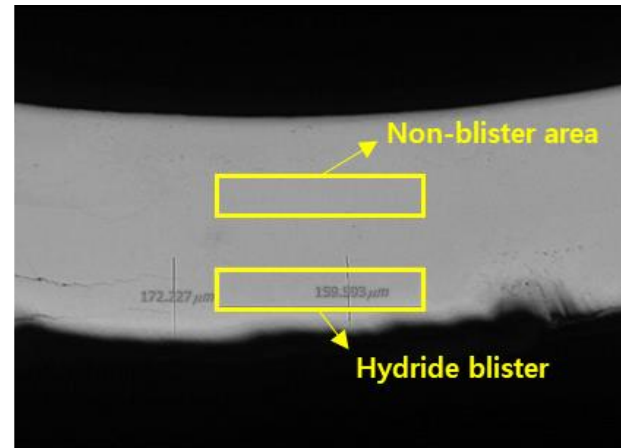
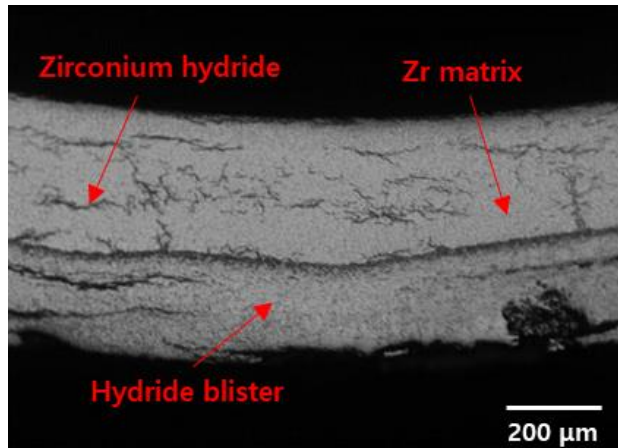
VS

Micro test



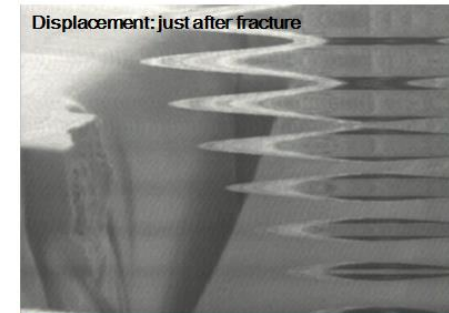
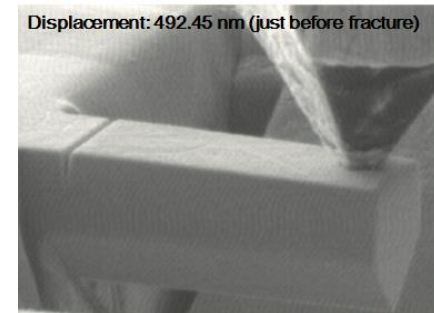
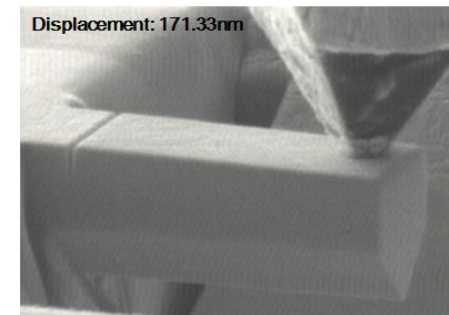
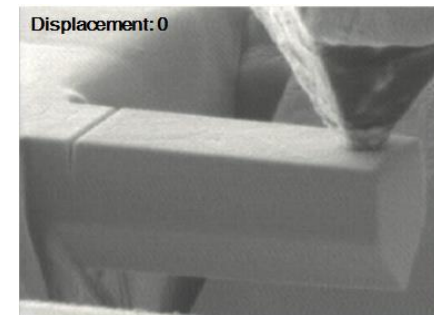
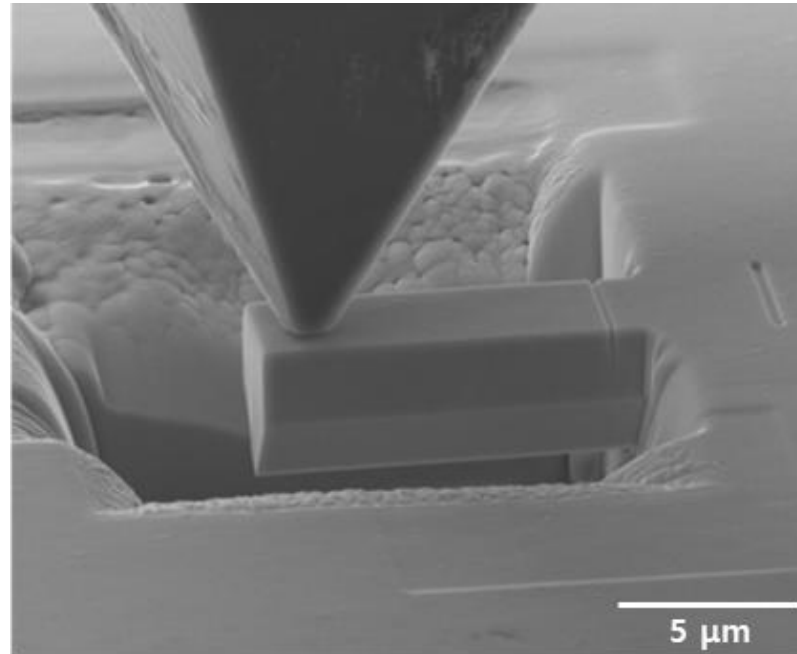
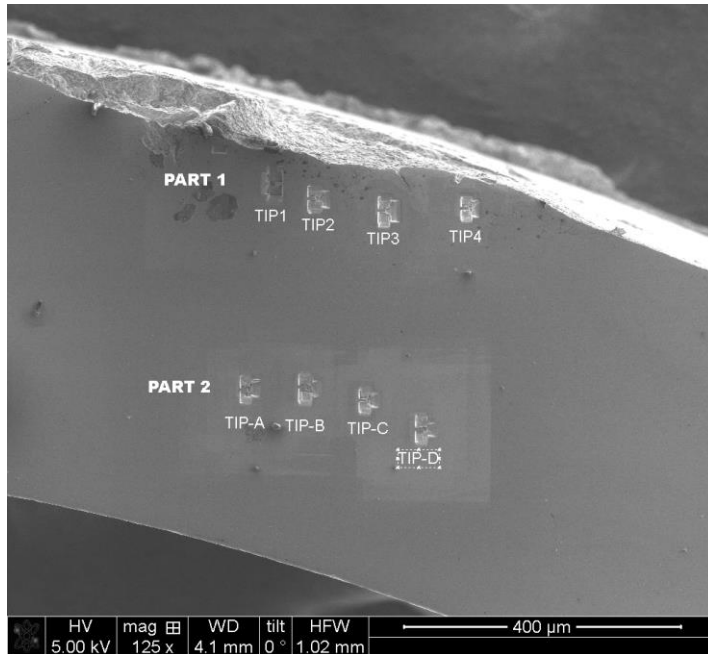
02 연구 내용 및 주요 결과

Micro-cantilever test



Micro-cantilever test

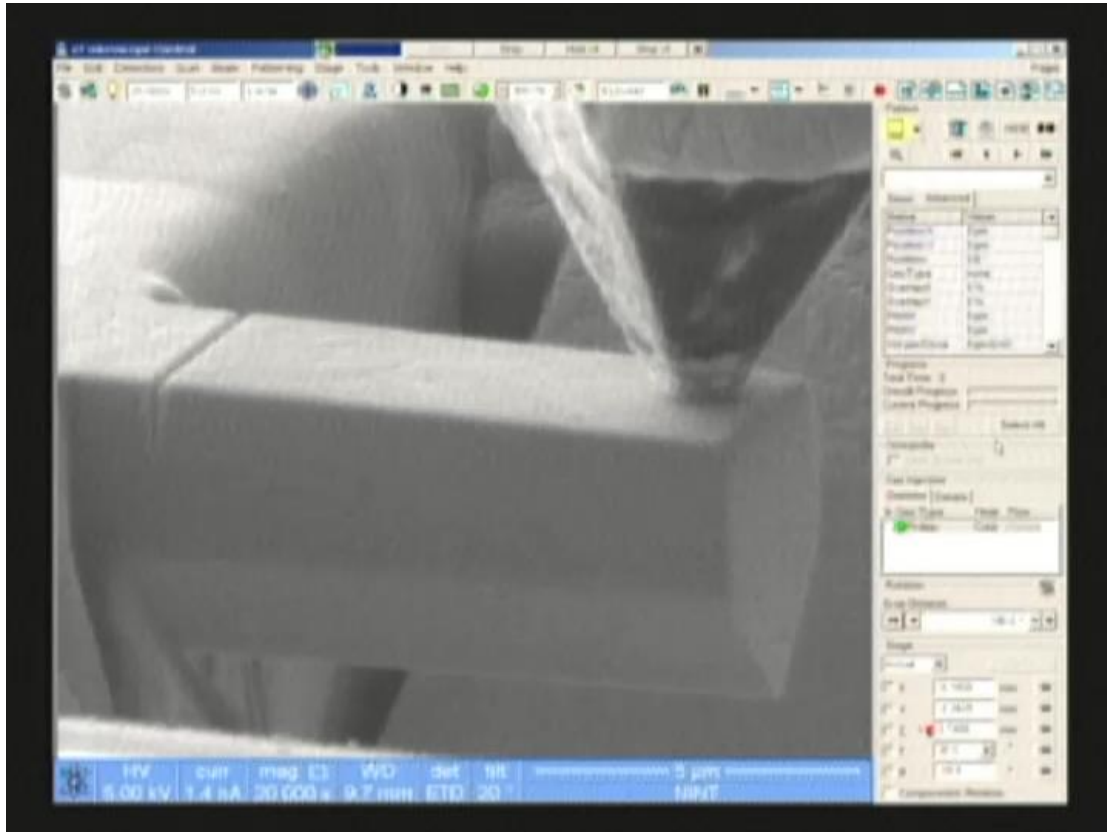
- ✓ Micro-cantilevers and pre-cracks were ion-milled with Ga^+ ion beam of FEI Helios 600 at 30kV acceleration voltage.
- ✓ Micro-cantilever tests were conducted using PI 85 pico-indenter (HYSTRON) with for sided conductive diamond flat tip ($1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$) at a speed of 5 nm/sec.



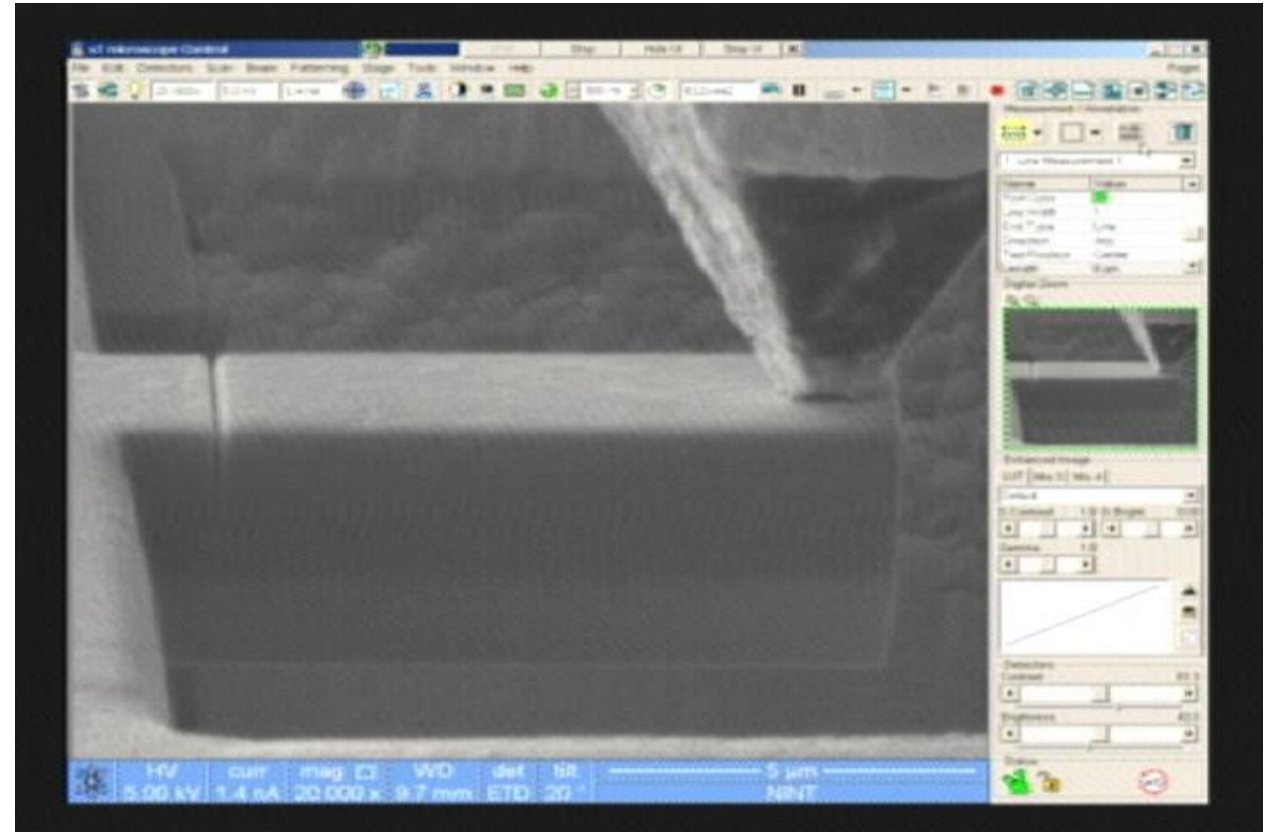
02 연구 내용 및 주요 결과

Micro-cantilever test

Hydride blister

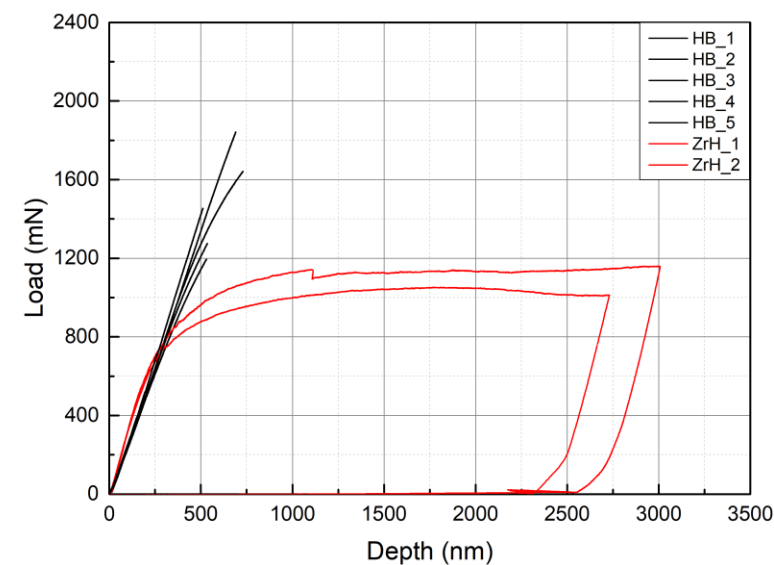
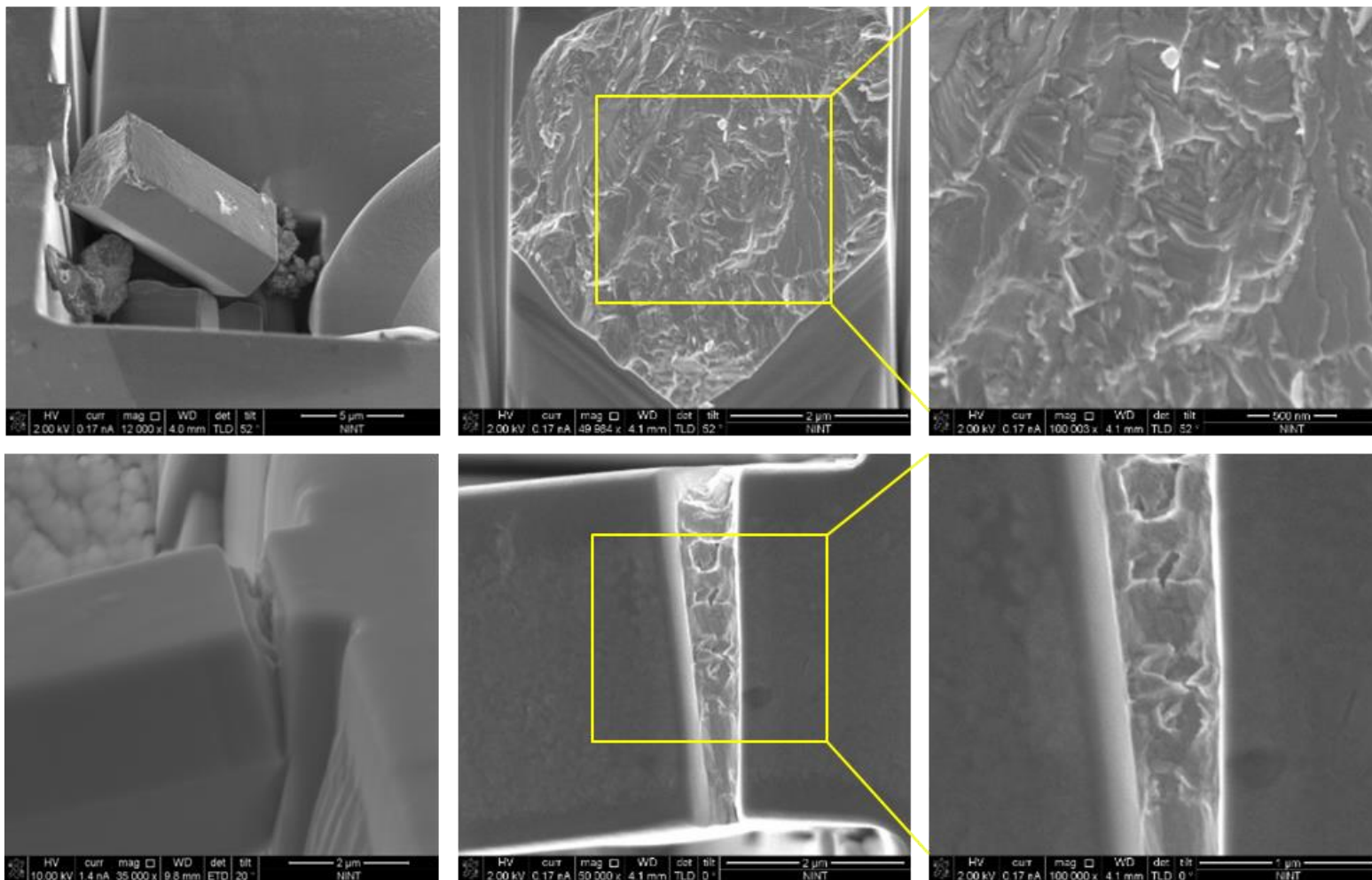


Non-blister area



02 연구 내용 및 주요 결과

Micro-cantilever test



Specimen	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
HB_1	1.58
HB_2	1.57
HB_3	2.04
HB_4	2.11
HB_5	1.76
Avg.	1.81

03 중이온빔 조사시험

혁신형 SMR 계통설계 과제 수행

연구개발계획서				[] 신청용 [✓] 협약용				보안등급	
								일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명		산업통상자원부		사업명	사업명		혁신형 소형모듈원자로 기술개발 사업		
전문기관명		혁신형 소형모듈원자로 기술개발 사업단			내역사업명		설계		
공고번호		제2024-064호		총괄연구개발 식별번호		-			
				연구개발과제번호		RS-2024-00405419			
선정방식		품목공모							
기술분류	국가과학기술표준분류		핵심기기 설계기술 (EG0203)	70%	유체계통 설계기술 (EG0201)	20%	계통 설계 검증/성능 평가기술 (EG0206)	10%	
	부처기술분류		-	%	-	%	-	%	
총괄연구개발명		국문	(해당사항 없음)						
연구개발과제명		국문	혁신형 SMR 계통설계						
		영문	System Design for innovative SMR						

소형모듈원자로

Small Modular Reactor

SMR

가압기

원자로 내부를 순환하는 냉각재(물)는 증기로 바뀌지 않고 물 상태를 유지해야 한다. 이를 위해 냉각재의 물이 높은 온도에서도 끓지 않도록 압력을 높여주는 역할을 하는 것이 가압기다.

냉각재 펌프

원자로 노심 연으로 전달되는 냉각재의 흐름을 도와주기 위해 노심과 전동부에 설치된 대용량펌프

증기발생기

노심에서 발생한 열을 이용해 증기를 만드는 장비로, 여기서 만들어진 증기의 힘으로 터빈을 돌려 전기를 생산하게 된다.

노심

원자로 핵연료인 연료를 대량으로 의미하는 것으로, 핵연료채로부터 방출되는 고속중성자를 열원성자로 가속시키기 위한 감속재와 방열판 열을 제거하는 냉각재 등으로 구성된다.

터빈발전기

대형크레인

SMR#1

SMR#2

SMR#3

SMR#4

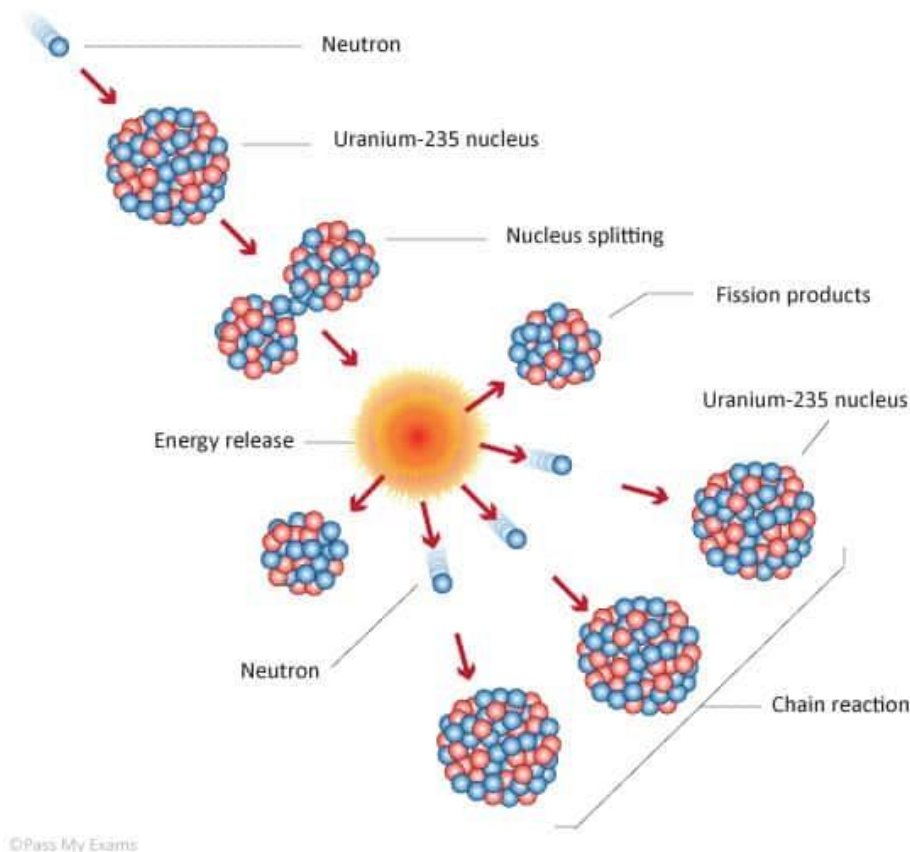
냉각수조

기계설비신문

03 중이온빔 조사시험

혁신형 소형모듈원자로 (i-SMR)

Design Information	i-SMR	APR-1400
Electrical Output	170 MWe/Module	1400 MWe
Total Electrical Output	680 MWe	1400 MWe
Number of Modules	4	1
Fuel	UO ₂ (5-7% U235)	UO ₂ (<5% U235)
Number of FA	69 FAs	236 FAs
Active Core Height	2.4 m	4 m
Refueling Cycle	24 months	18 months
Coolant	Light Water	Light Water
Plant Design Life	80-100 yrs	60 yrs

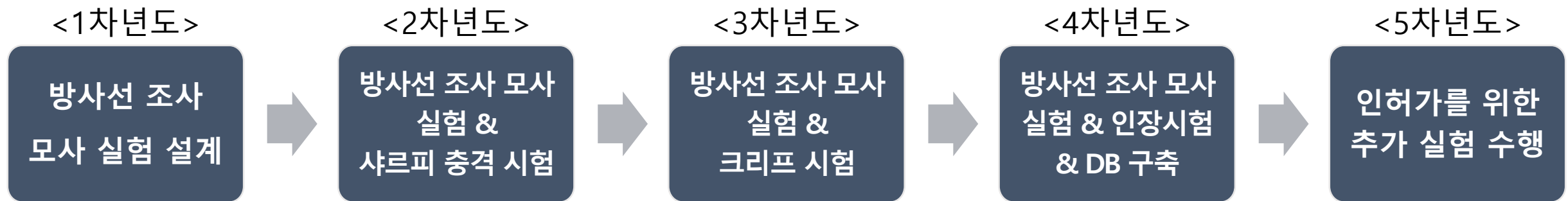


Y. Hosik et al., Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2023

03 중이온빔 조사시험

혁신형 SMR 원자로압력용기 조사취화

최종목표	○ 모듈형원자로 원자로용기/내부구조물 및 지지대 표준설계 개발 (원자로용기 재료 기계적 건전성 평가)
1단계 (연차별) 목표	○ 1차년도 : 원자로용기 재료에 대한 방사선 조사 모사 실험 설계 ○ 2차년도 : 방사선 조사 모사 실험/기계적 물성 시험 수행
2단계 (연차별) 목표	○ 3차년도 : 방사선 조사 모사 실험/기계적 물성 시험 수행 ○ 4차년도 : 방사선 조사 모사 실험/기계적 물성 시험 수행 및 실험 결과 DB 구축 ○ 5차년도 : 인허가를 위해 필요한 추가 실험 수행



03 중이온빔 조사시험

이온 조사 시설



MC-50



- 조사 가능 입자: 양성자, 중양자, 알파
- 에너지 범위: 18~45 MeV



MEIS



Implanter



- 조사 가능 입자: Li ~ U
- 에너지 범위: 50~400 keV



KAHIF



- 조사 가능 입자: He, Ar, Fe, Xe
- 에너지 범위: 172/293/476/726 keV, 1.06 MeV

03 중이온빔 조사시험

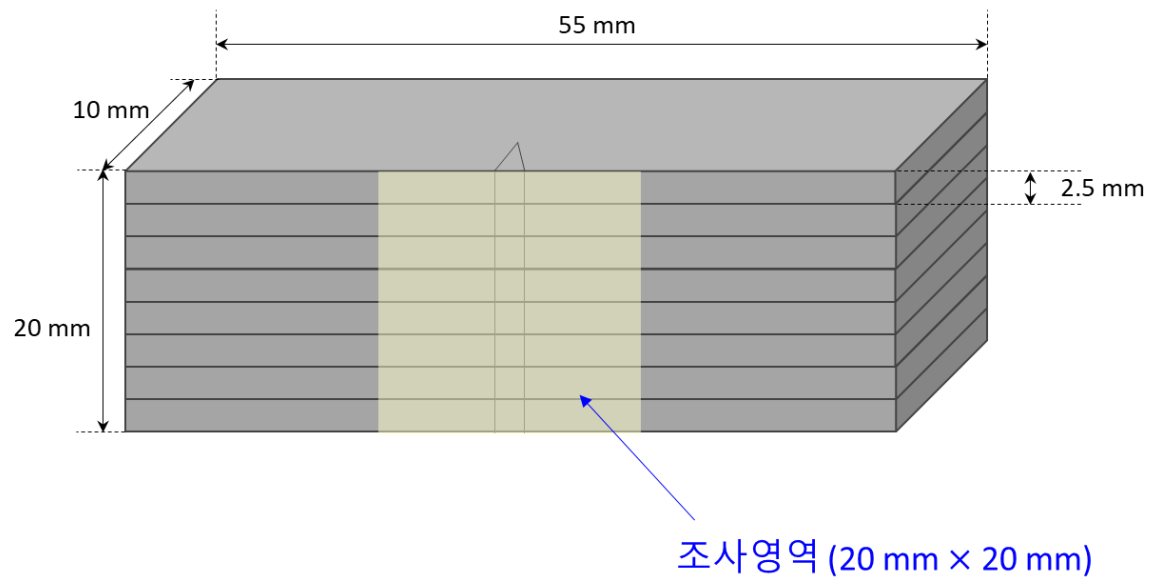
한국원자력연구원 중이온빔조사시험시설 (KAHIF)



KAHIF 조사 사양	중이온빔			
	He	0.688 MeV	15.0 μ A ($\pm 5\%$)	Fluence : 3.98×10^{13} ions/cm ² /sec
	Ar	6.871 MeV	15.0 μ A ($\pm 5\%$)	Fluence : 3.30×10^{12} ions/cm ² /sec
	Fe	9.605 MeV	0.5 μ A ($\pm 10\%$)	Fluence : 1.53×10^{11} ions/cm ² /sec
	가열 온도	450°C (Max)	빔 사이즈	20 x 20 mm ²

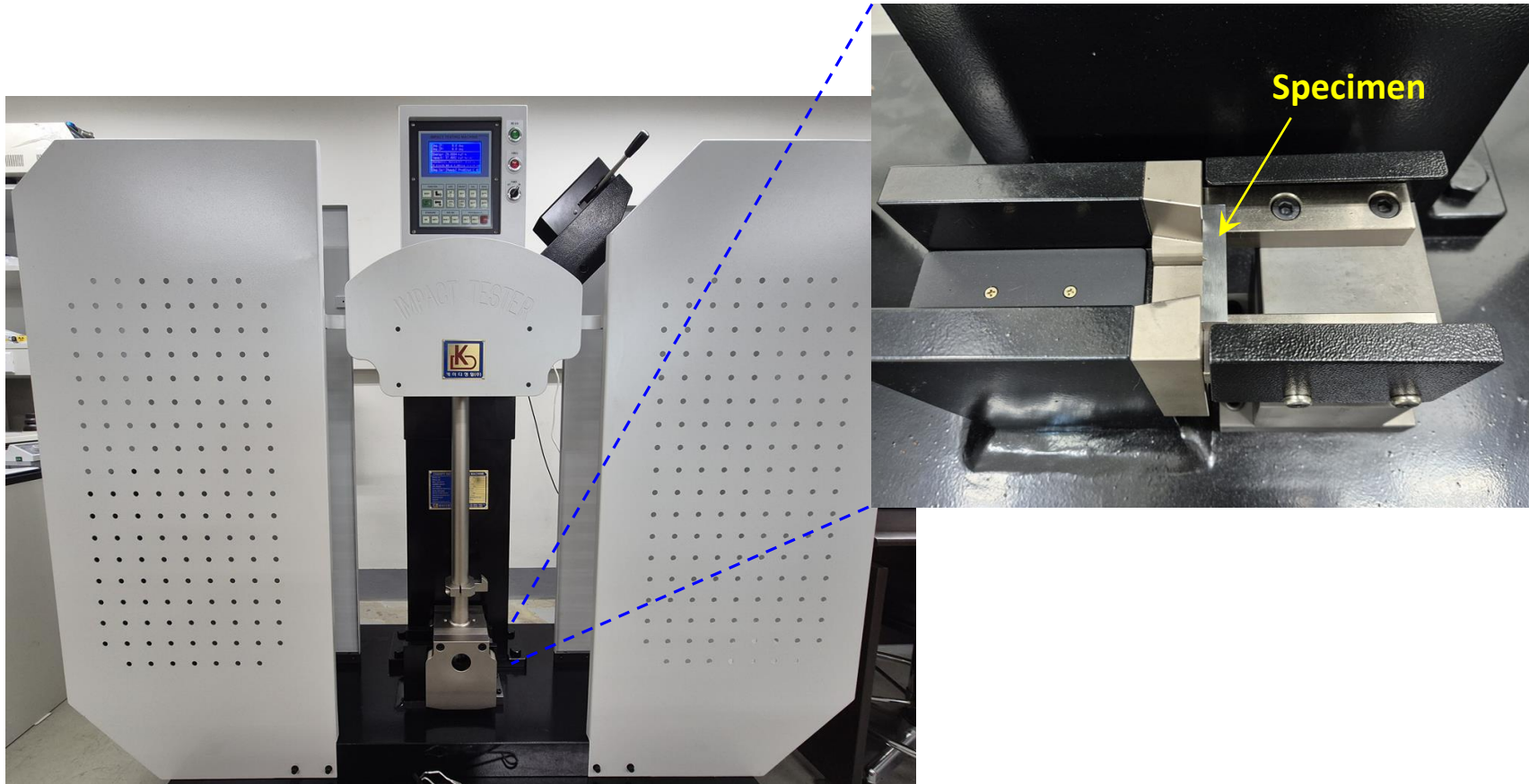
03 중이온빔 조사시험

Ar, Fe 이온 조사 시험



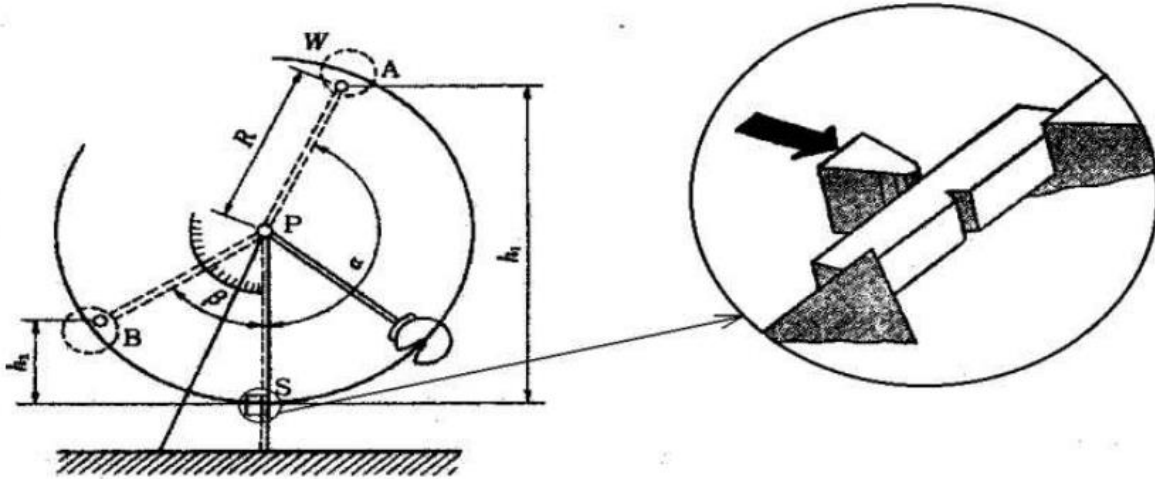
03 종이온빔 조사시험

샤르피 충격 시험



03 종이온빔 조사시험

샤르피 충격 시험



W : pendulum의 무게
 α : pendulum을 들어올렸을 때 초기 각도
 β : 시편을 절단하고 상승했을 때의 각도
R : 축 중심으로부터 pendulum 중심까지의 거리
A : 노치 부분 단면적
 h_1 : 끌어올린 위치
 h_2 : pendulum이 시편을 통과한 위치

낙하높이, $h_1 = R(1 - \cos \alpha)$

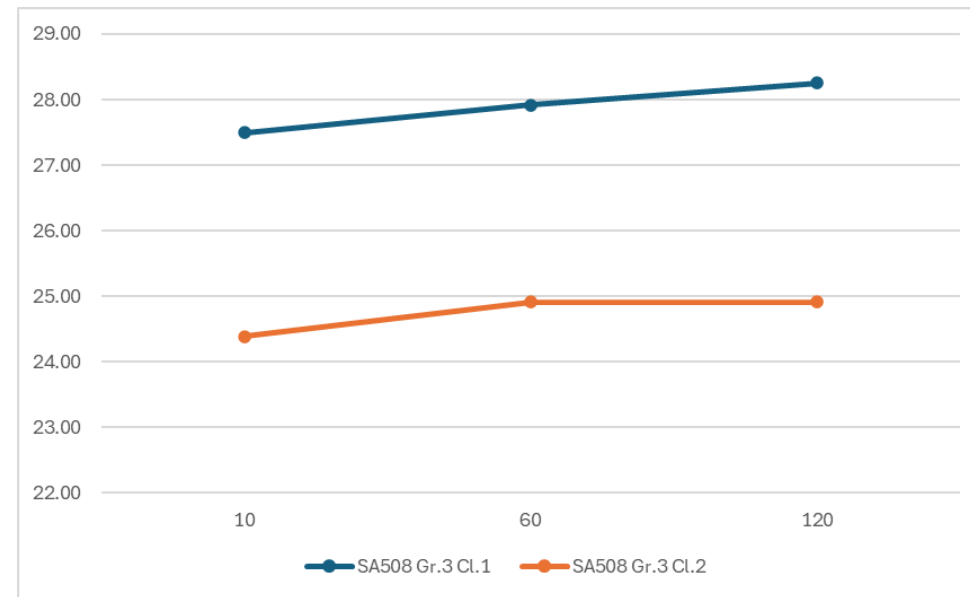
상승높이, $h_2 = R(1 - \cos \beta)$

$$E = Wh_1 - Wh_2 = WR(\cos \beta - \cos \alpha)$$

03 중이온빔 조사시험

샤르피 충격 시험

Specimen	Irradiation time (min)	ENERGY_#1 (J)	ENERGY_#2 (J)	ENERGY_#3 (J)	AVERAGE ENERGY (J)
SA508 Gr.3 Cl.1	10	28.25	27.49	26.74	27.50
	60	28.00	28.25	27.49	27.91
	120	27.24	29.77	27.75	28.25
SA508 Gr.3 Cl.2	10	22.274	26.49		24.38
	60	23.999	24.495	26.24	24.91
	120	23.999	24.743	25.99	24.91



03 중이온빔 조사시험

SRIM/TRIM simulation

TRIM Setup Window

TRIM (Setup Window)

Type of TRIM Calculation: **DAMAGE** Ion Distribution and Quick Calculation of Damage

Basic Plots: Ion Distribution with Recoils projected on Y-Plane

ION DATA

Symbol: **PT** Fe Name of Element: **Iron** Atomic Number: **26** Mass (amu): **55.935** Energy (keV): **1000** Angle of Incidence: **0**

TARGET DATA

Target Layers

Add New Layer

Layer Name	Width	Density (g/cm3)	Compound	Corr	Gas
SA508 Gr.3 Cl.2	8000 um	7.8411	1		

Input Elements to Layer

Add New Element to Layer

Symbol	Name	Atomic Number	Weight (amu)	Atom Stoich or %	Damage (eV) Disp	Latt	Surf
PT C	Carbon	6	12.01	0.25	00.2	28	3
PT Mn	Manganese	25	54.93	1.5	01.5	25	3
PT P	Phosphorus	15	30.97	1.025	00.0	25	3
PT S	Sulfur	16	32.06	1.025	00.0	25	3
PT Si	Silicon	14	28.08	0.4	00.4	15	2
PT Ni	Nickel	28	58.69	1	01.0	25	3
PT Cr	Chromium	24	51.99	0.25	00.2	25	3
PT Mo	Molybdenum	42	95.94	0.6	00.6	25	3

Special Parameters

Name of Calculation: Fe (10) into SA508 Gr.3 Cl.2

Stopping Power Version: SRIM-2008

AutoSave at Ion #: 10000

Total Number of Ions: 99999

Random Number Seed:

Plotting Window Depths: Min: 0 Max: 80000000

Output Disk Files

☐ Ion Ranges

☐ Backscattered Ions

☐ Transmitted Ions/Recoils

☐ Sputtered Atoms

☐ Collision Details

Special "XYZ File" Increment (eV): 0

Resume saved TRIM calc.

Save Input & Run TRIM

Clear All

Calculate Quick Range Table

Main Menu

Problem Solving

Quit

<SA508 Gr.3 Cl.2>

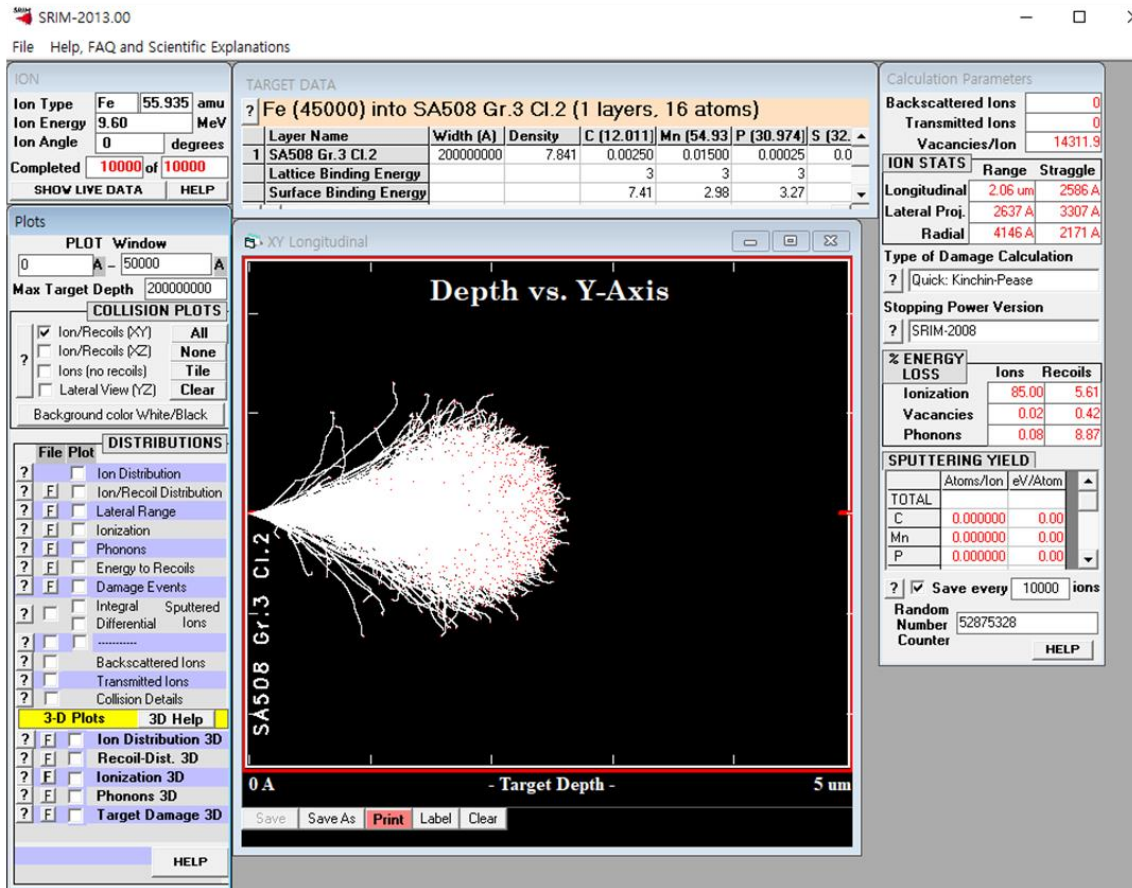
Chemical composition (%)	Carbon (C)	0.25 max
	Manganese (Mn)	1.20~1.50
	Phosphorus (P)	0.025 max
	Sulfur (S)	0.025 max
	Silicon (Si)	0.40 max
	Nickel (Ni)	0.40~1.00
	Chromium (Cr)	0.25 max
	Molybdenum (Mo)	0.45~0.60
	Vanadium (V)	0.05 max
	Columbium (Cb)	0.01 max
	Copper (Cu)	0.20 max
	Calcium (Ca)	0.015 max
	Boron (B)	0.003 max

	Titanium (Ti)	0.015 max
	Aluminum (Al)	0.025 max

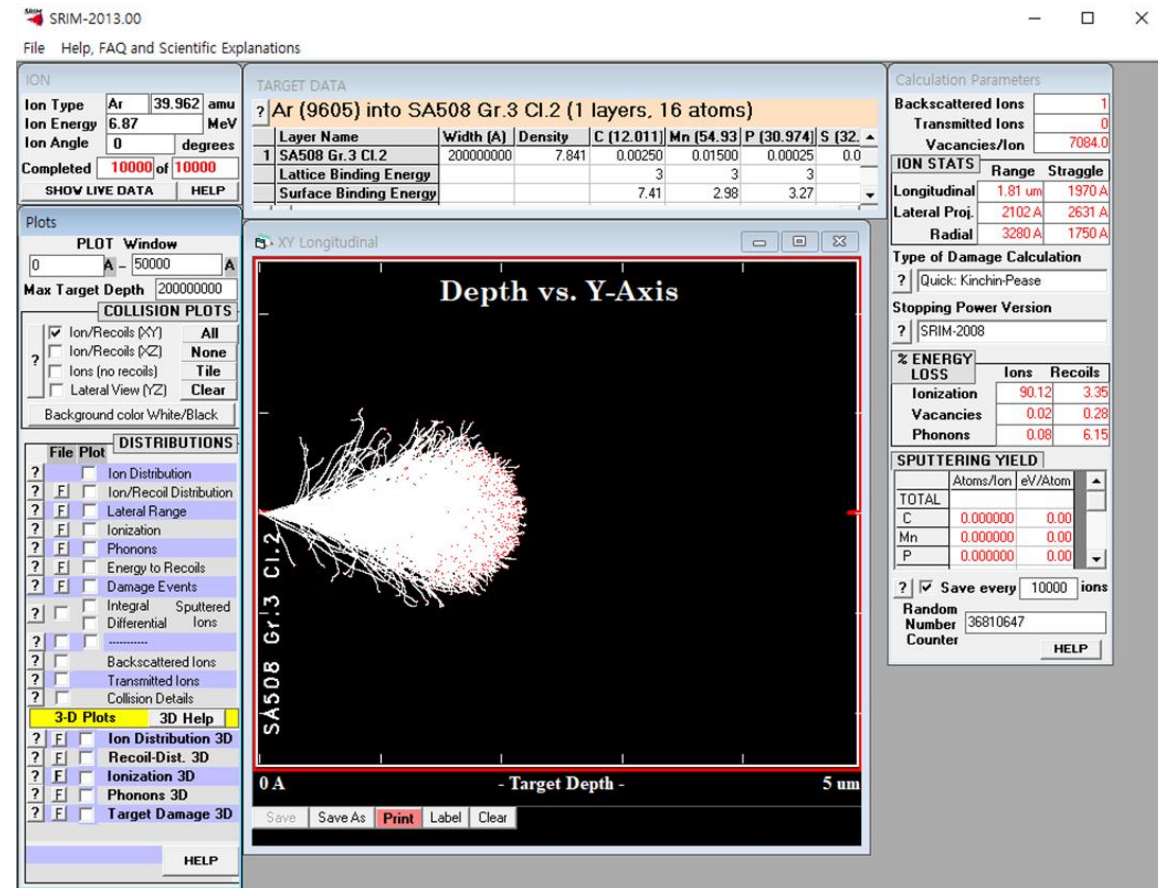
03 중이온빔 조사시험

SRIM/TRIM simulation

Fe ion, 9.605 MeV, #10,000



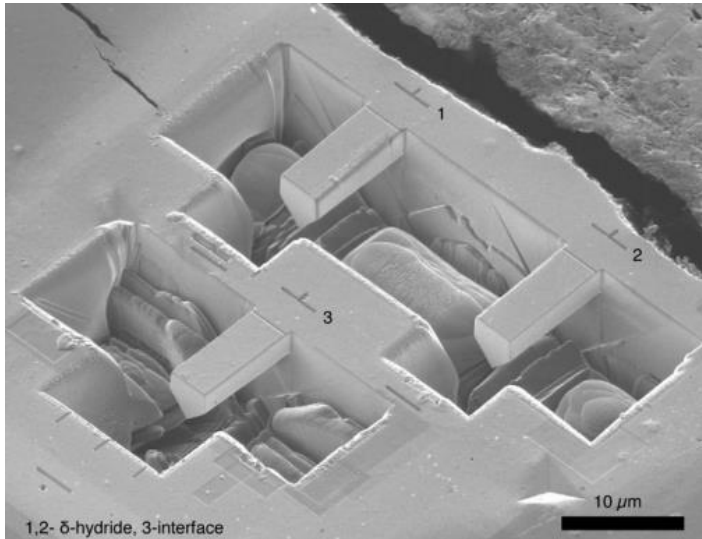
Ar ion, 6.871 MeV, #10,000



04 중이온빔 조사 후 micro-mechanical test 활용 계획

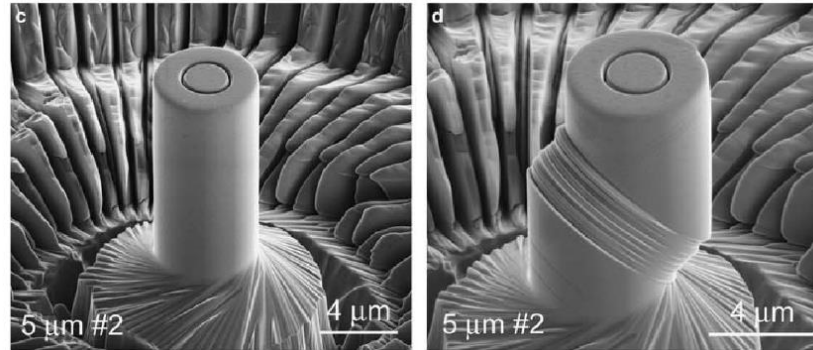
Micro-mechanical test

✓ Micro-cantilever test



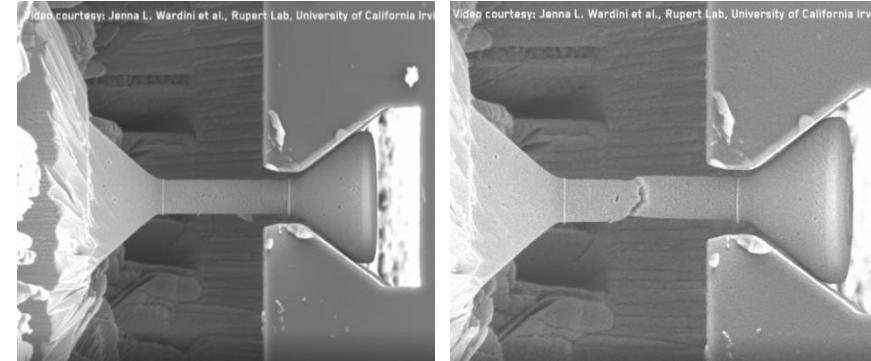
H. Chan et al., J. Nucl. Mater 475 (2016) 105-112

✓ Micro-pillar compression test



D. E. Hurtado., Dissertation (Ph. D), California Institute of Technology, 2011

✓ Micro-tensile test



Z. Fu et al., Sci. Adv. 12;4(10), 2018

- Hydride blister와 같은 매우 국부적인 영역에서도 micro-cantilever test를 통해 기계적 물성 (파괴인성) 측정이 가능함을 확인.
- 최근 수행중인 조사취화 연구에서 중이온 조사 시험의 경우 이온의 penetration depth가 매우 얇음. (Fe ion : $2.5 \mu\text{m}$, Ar ion : $2.2 \mu\text{m}$)
- 중이온 조사 후 이온의 얇은 penetration depth 보완을 위해 micro-cantilever test를 포함한 다양한 micro-mechanical test 기법을 활용한다면 기계적 물성 측정이 가능할 것으로 예상됨.

Thank You

감사합니다

