

이온 조사된 저방사화 강의 기계적 특성 및 헬륨 스웰링 평가

Mechanical properties and Helium Swelling Evaluation
of Ion Irradiated RAFM steels

김 상 은^a, 진 형 하^b, 이 창 훈^c, 신 찬 선^{a*}

^a Department of Materials Science & Engineering, Myongji University

^b Nuclear Materials Division, Korea Atomic Energy Research Institute

^c Ferrous Alloy Department, Korea Institute of Materials Science

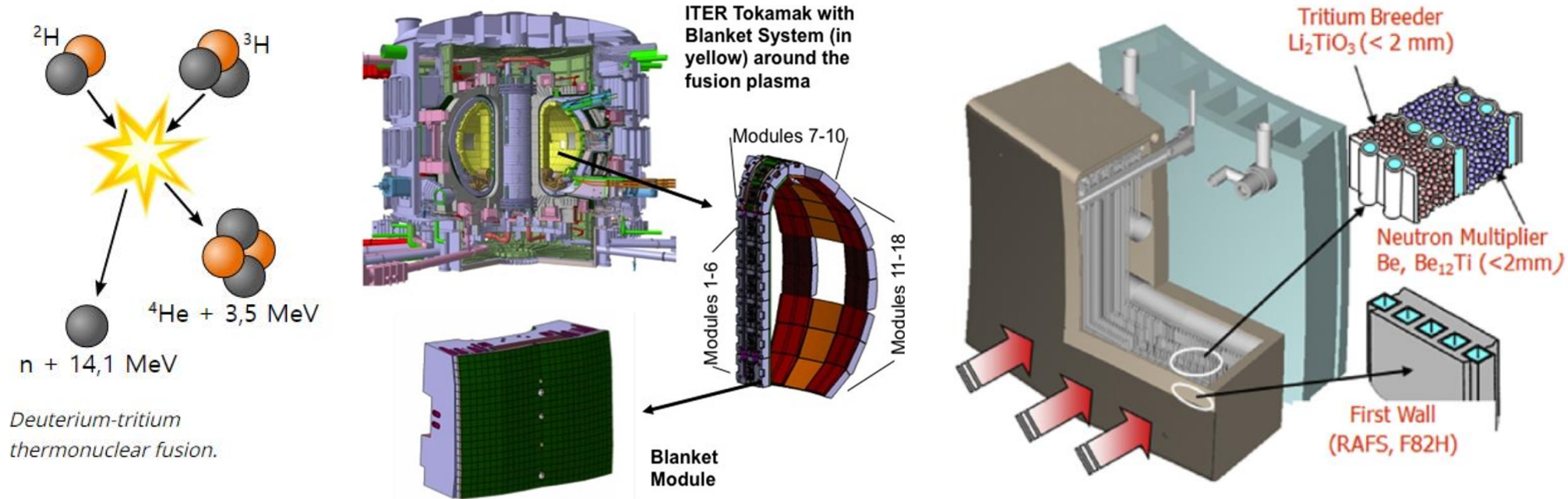


한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

KIMS 한국재료연구원

블랭킷 구조재 개발 배경

핵융합로의 블랭킷(blanket)의 주요 기능

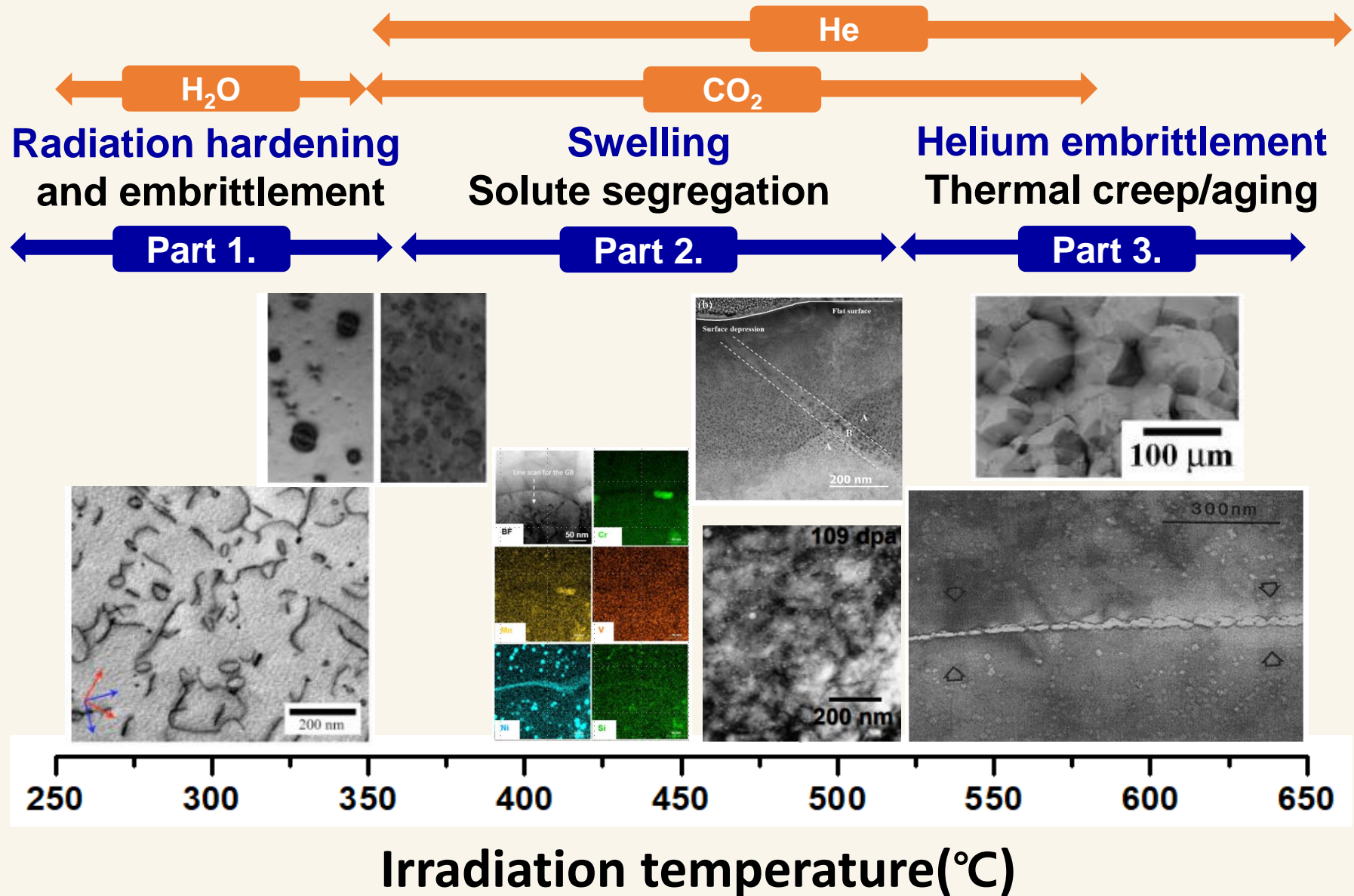


중수소 + 삼중수소
14.1 MeV 중성자 방출

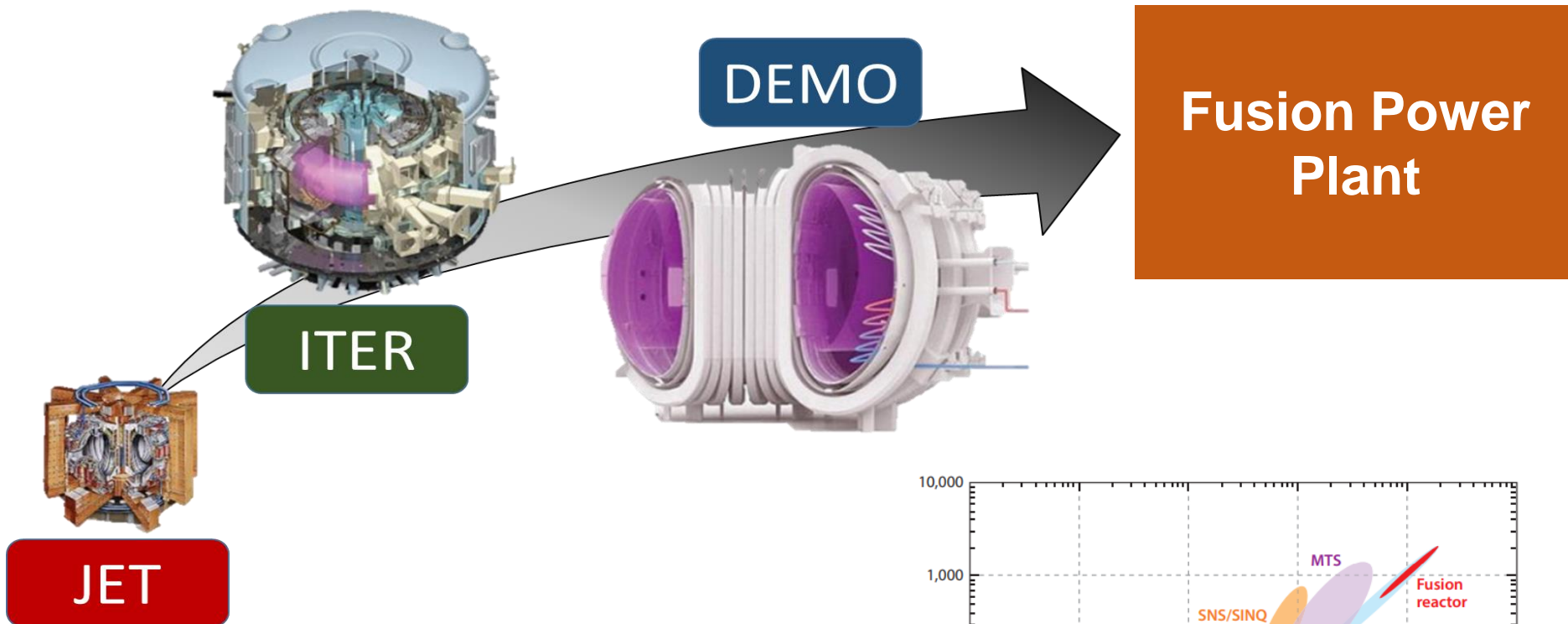
중성자 차폐
삼중수소 생산

중성자
운동 E → 열 E
Transition

냉각재 조건별 블랭킷 구조재 열화 메커니즘



핵융합로 개발 동향과 블랭킷 구조재 손상량 전망



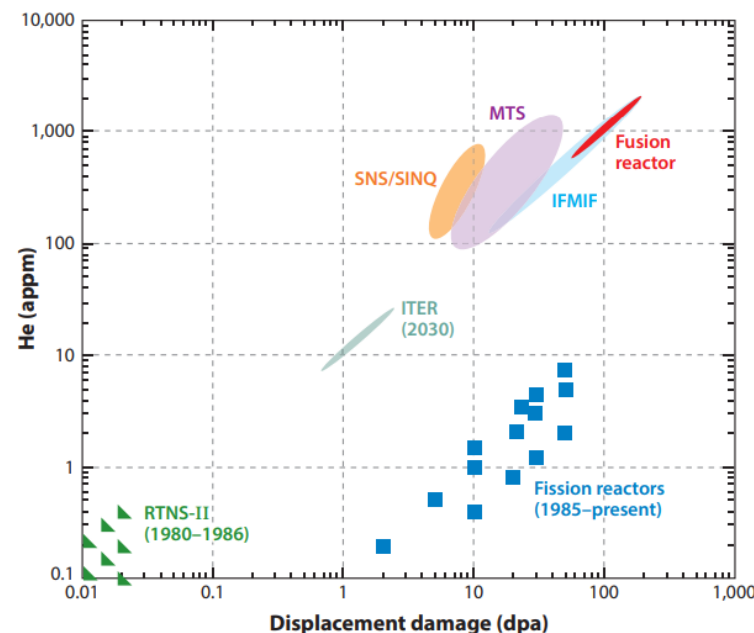
[중성자에 의한 블랭킷 조사 손상량]

- DEMO의 경우, 20-50dpa 손상

He : 124-320appm

H : 600-1240appm 발생 예상

- **실제 핵융합 발전소 경우 최대 100dpa 이상**



블랭킷용 구조재 후보 및 RAFM 강 개발 현황

- ✓ 열화 저항성이 우수한 재료 개발이 필수
- ✓ 열화 저항성 평가 필요

❖ 블랭킷 구조재 후보재

- ✓ RAFM강, ODS강, V alloy, W alloy, SiC_f/SiC 복합재 등

RAFM 강 (Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel)

- 기존 화력 발전소용 '9Cr-1Mo계' 기반
- 고방사형 합금 원소(Mo, Nb, Ni 등)
→ 저방사형 원소 (W, V, Ta 등) 로 대체
- 우수한 기계적/열적 물성 및 생산성으로
가장 유력한 핵융합로 구조용 후보재

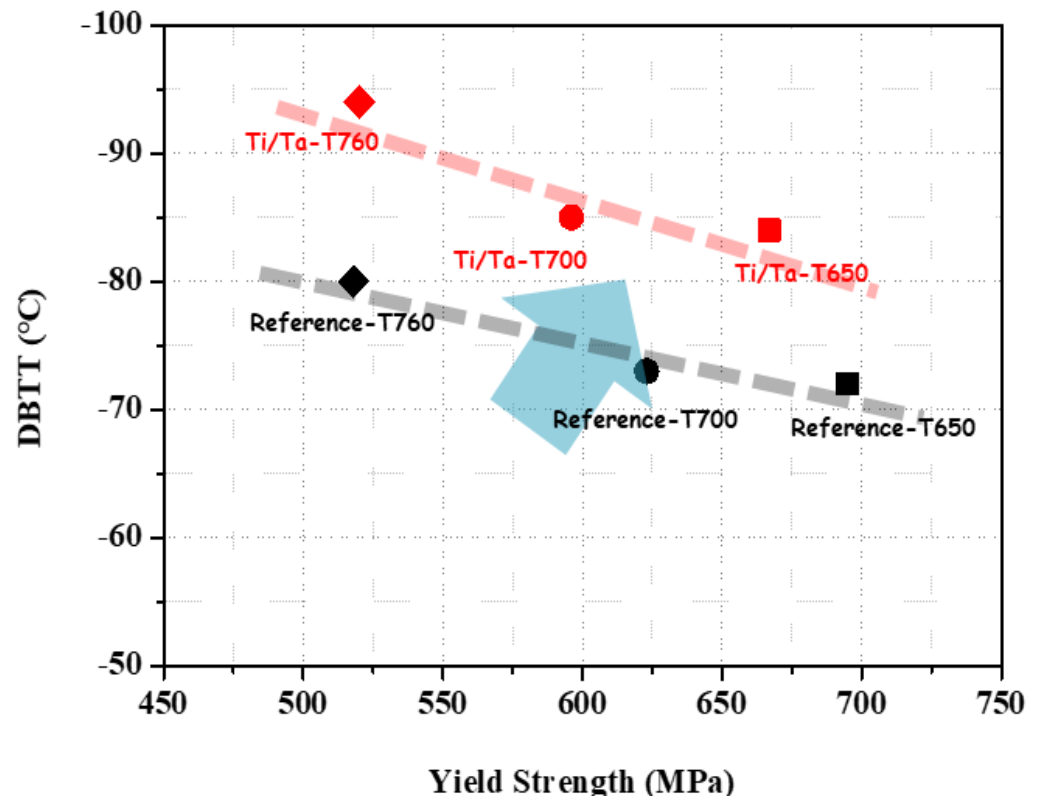
<각국의 RAFM강 개발 현황>

구분	국가	개발 강종	개발기관
국외	유럽	Eurofer 97	FZK 중심, EU
	일본	F82H	JAERI
	중국	CLAM	CAS
	인도	INRAFM	BARC
국내	한국	ARRA K-RAFM	KFE/KAERI KIMS

K-RAFM 강 개발 및 기계적 특성

- ✓ 열화 저항성이 우수한 재료 개발이 필수
- ✓ 열화 저항성 평가 필요

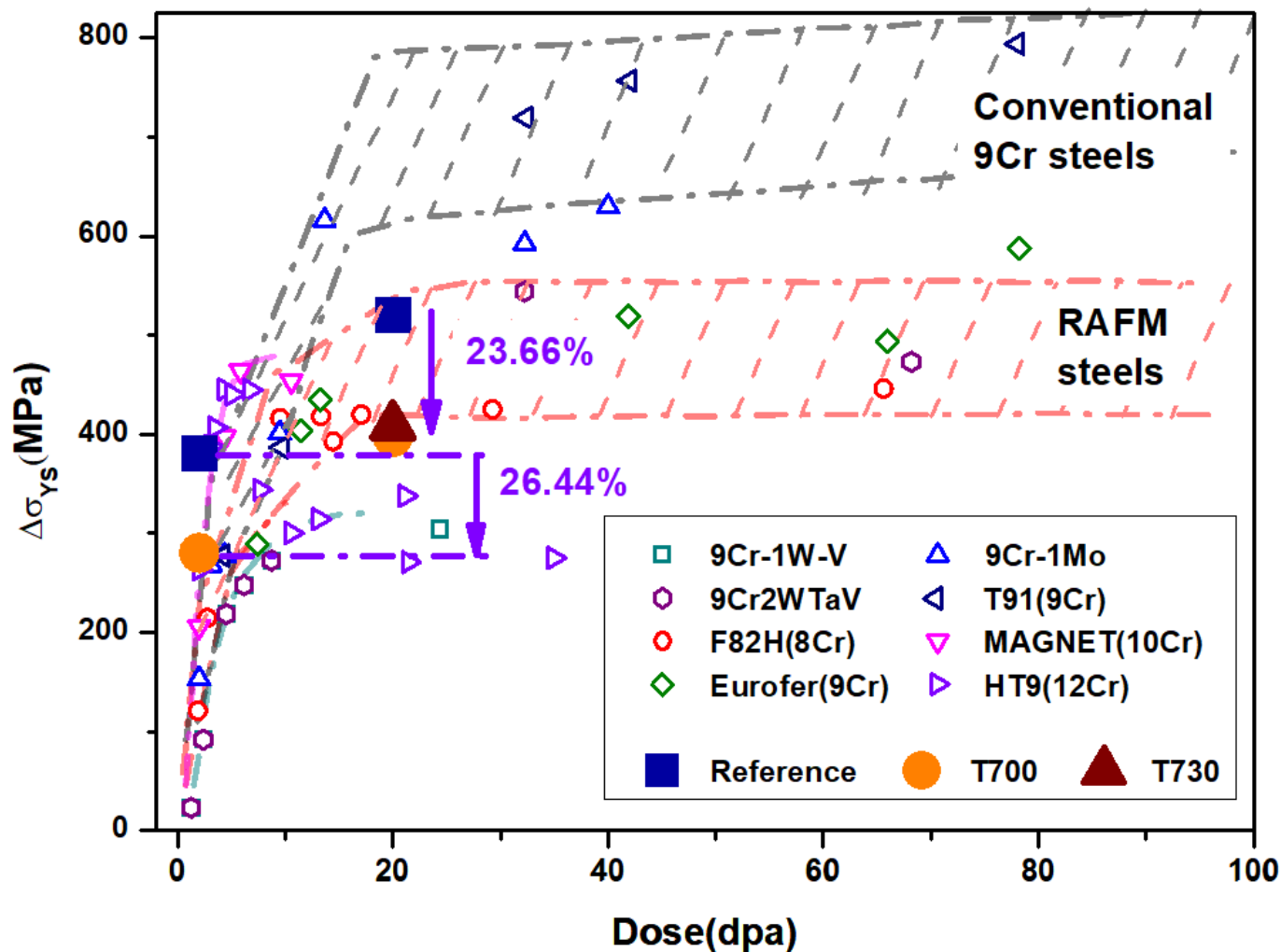
	C	Cr	W	V	Mn	Si	Ta	Ti	Fe
Reference	0.10	9.30	0.93	0.22	0.40	0.11	0.094	-	Bal.
K-RAFM	0.10	9.10	1.10	0.21	0.42	0.11	0.100	0.015	Bal.



K-RAFM 강의 조사 열화 거동 평가

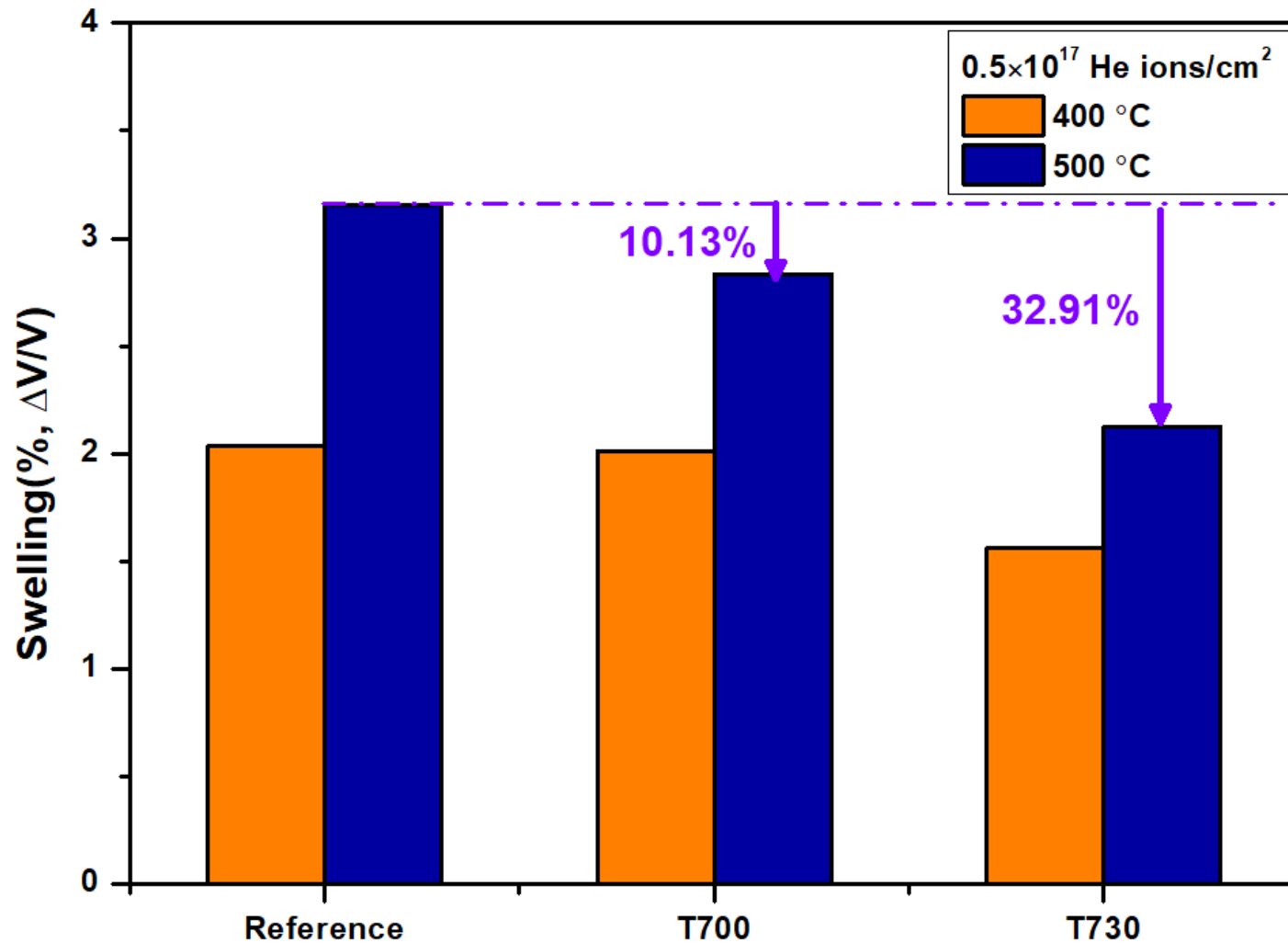
1. K-RAFM강의 300°C 조사경화 평가 (up to 20dpa)
2. K-RAMF강의 400-500°C 헬륨 스웰링 저항성 평가

K-RAFM 강들의 조사경화 평가 결과



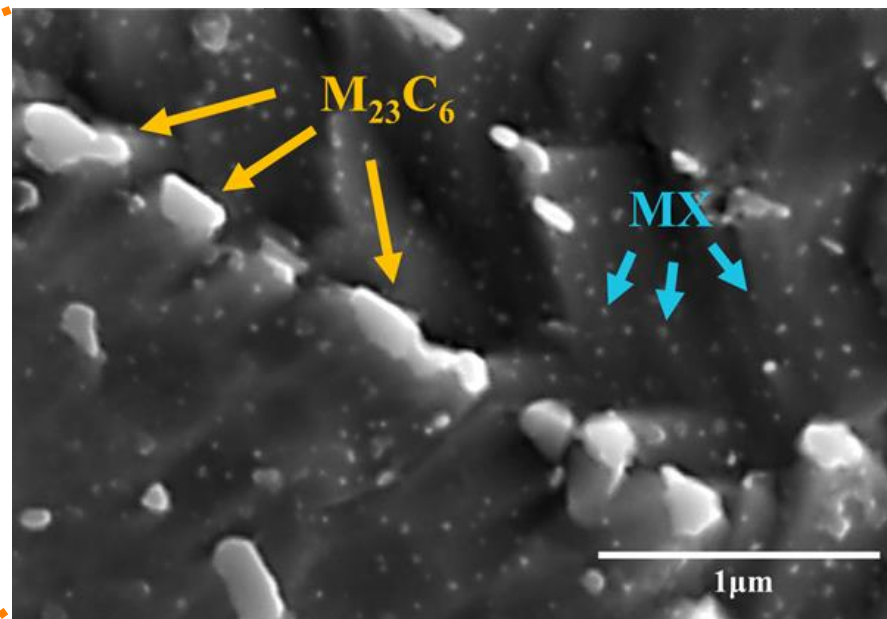
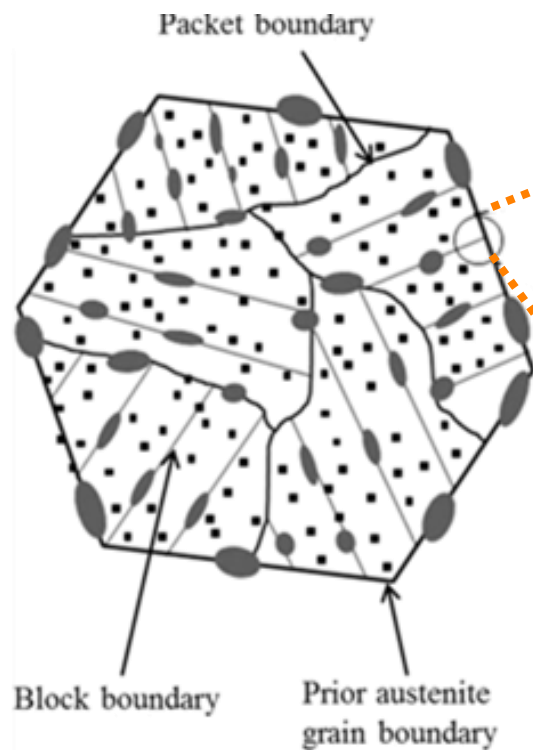
- 기존 RAFM 강재들의 조사경화 트렌드와 정합
- K-RAFM 강은 기존 Reference 강재 대비 우수한 조사 저항성을 보임

K-RAFM 강의 헬륨 스웰링 평가 결과

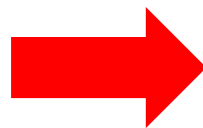


- K-RAFM 강은 기존 Reference 강재 대비 우수한 스웰링 저항성을 보임

RAFM 강의 계층적 미세조직



$M_{23}C_6$ 입계 석출
MX는 입내 석출

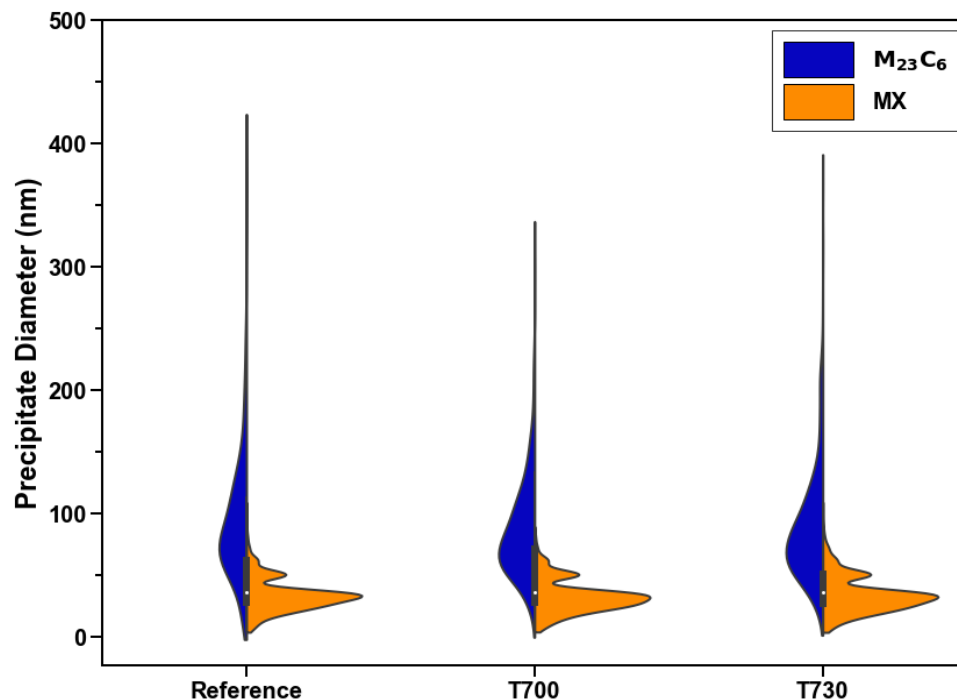


조사 결함의 Sink 역할

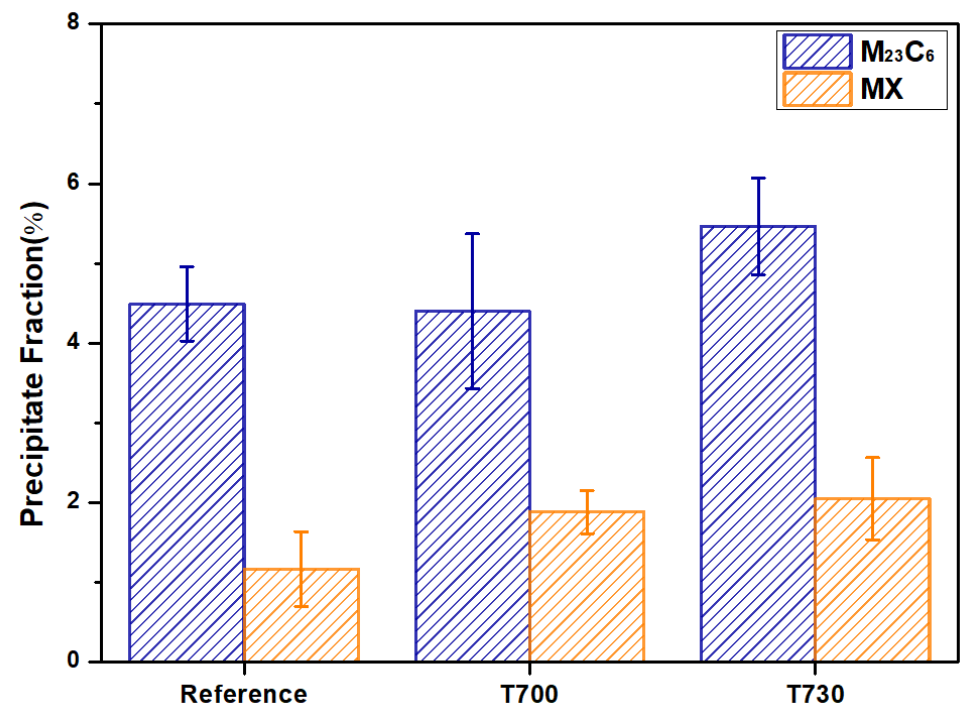
미세조직 비교 (K-RAFM vs Reference)

K-RAFM(Ti/Ta-RAFM) 강의 미세조직

- prior-austenite grains(PAGs) 약 10 μ m로 유사
- Block width- 약 200nm 유사
- Ti 첨가 시 Ti-rich, (Ta,Ti)-rich, Ta-rich 순으로 MX 석출물 석출 → $M_{23}C_6$ 크기 감소



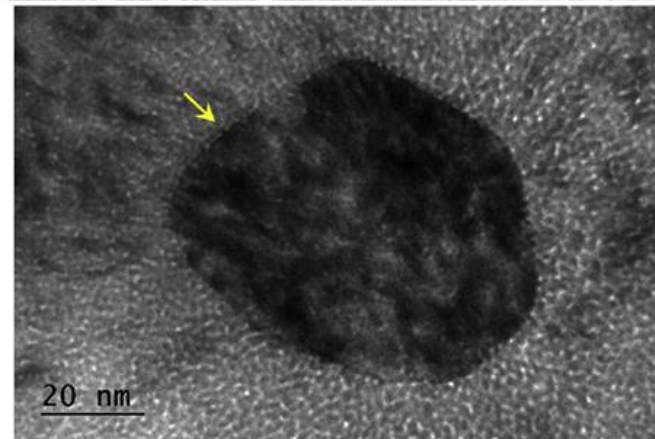
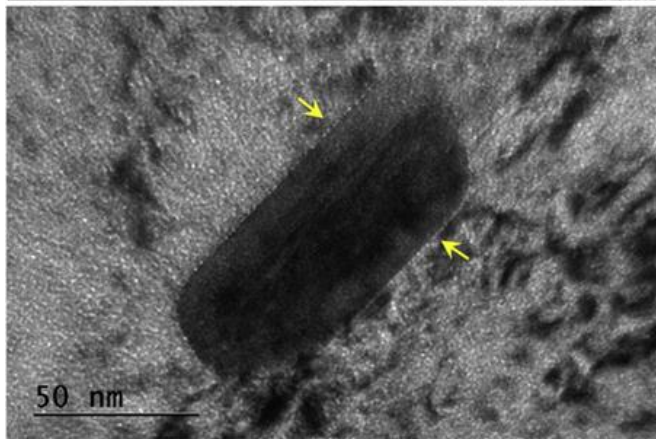
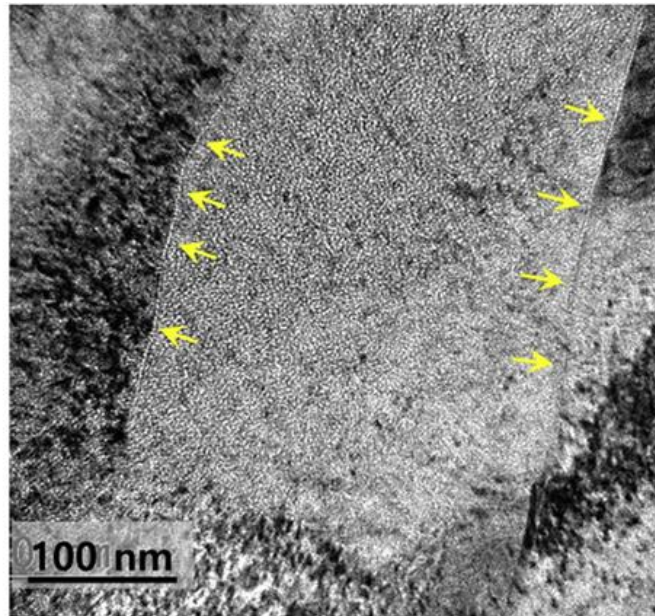
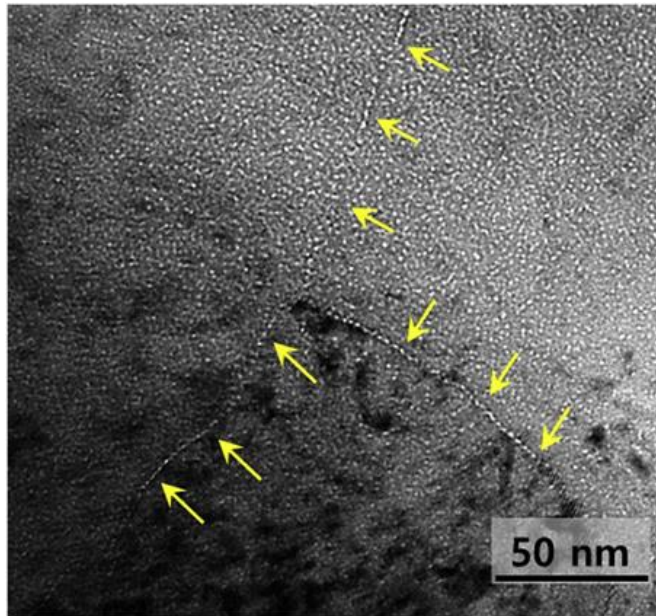
[석출물 크기]



[석출물 분율]

헬륨 주입 후 내부 계면의 결함 흡수 거동

헬륨 주입 후 TEM image



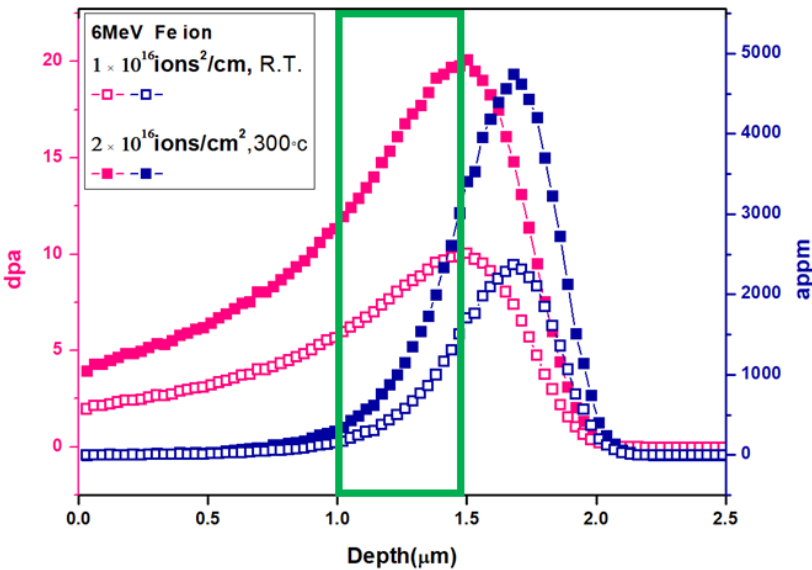
실험 방법

1. 조사경화 평가: Fe 이온 조사 및 마이크로필러 압축 시험
2. 헬륨 스웰링 평가: He 이온 주입 및 표면 단차 측정

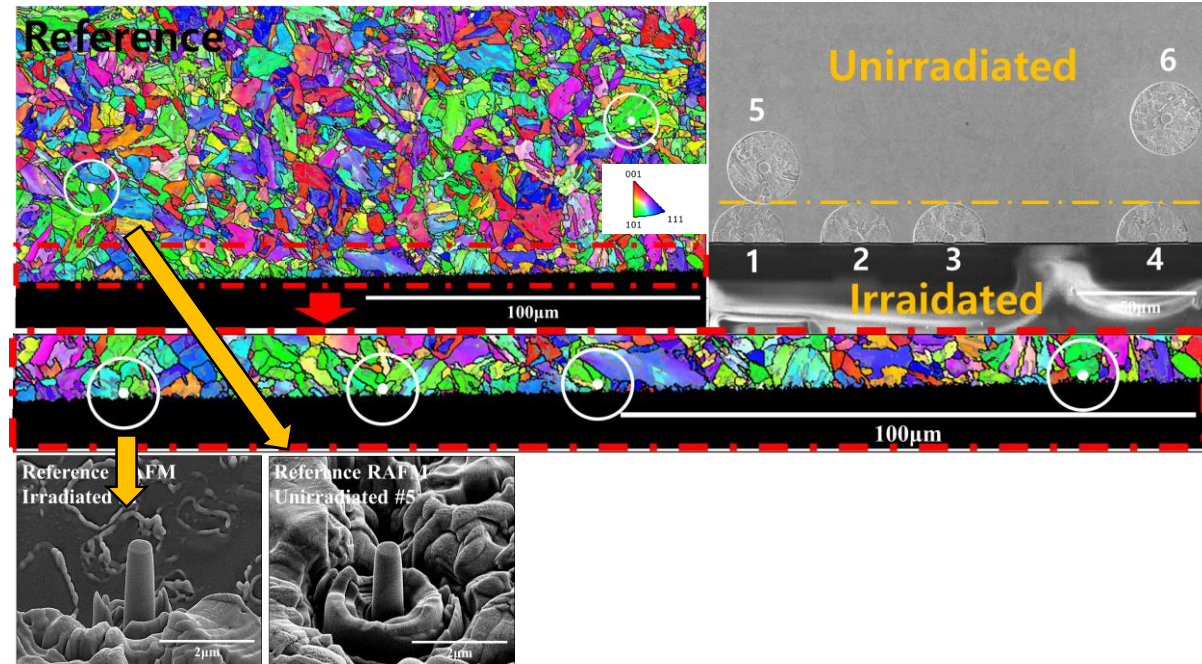
조사경화 평가: 이온 조사 및 마이크로필러 제작

- Reference(Eufoer97과 유사), K-RAFM (T700,T730) 세 강종에 대한 평가 진행

	C	Cr	W	V	Mn	Si	Ta	Ti	Fe
Reference	0.10	9.30	0.93	0.22	0.40	0.11	0.094	-	Bal.
K-RAFM	0.10	9.10	1.10	0.21	0.42	0.11	0.100	0.015	Bal.



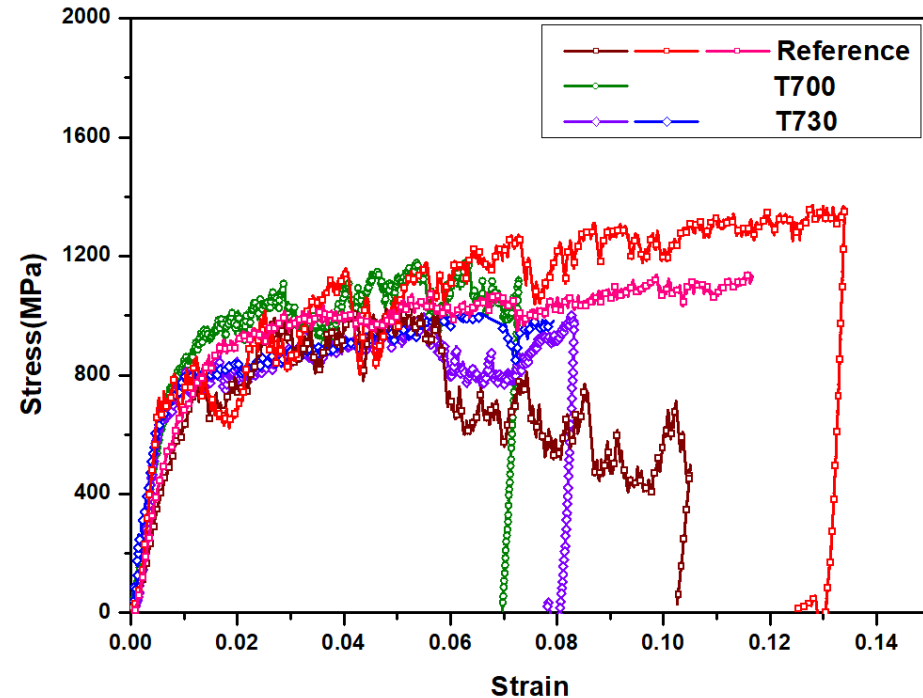
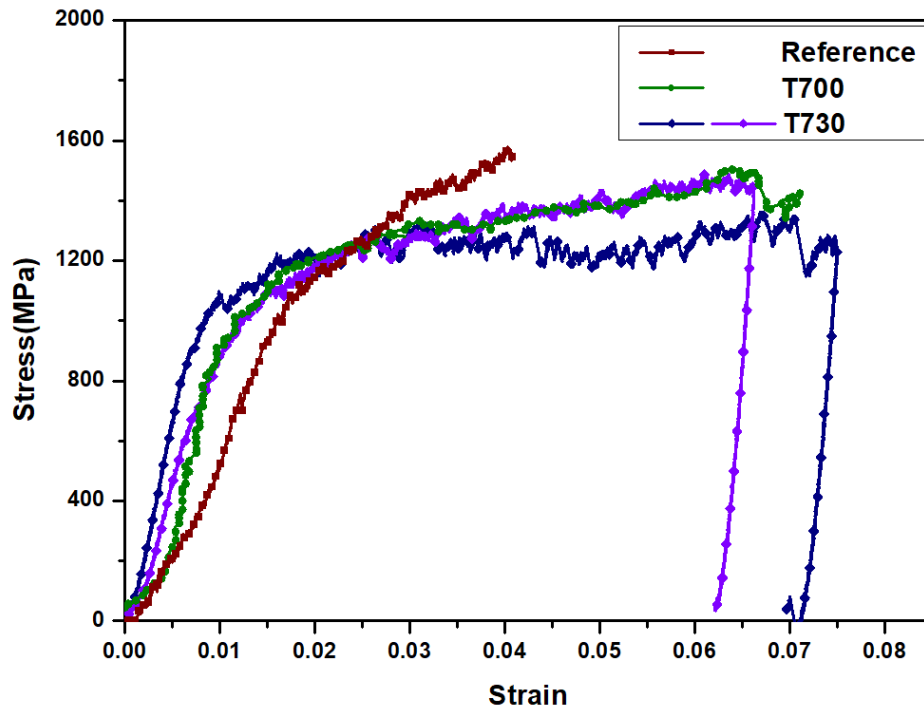
- 6 MeV-Fe²⁺ ion
- 1×10¹⁶, 2×10¹⁶ ions/cm²
- RT, 300°C



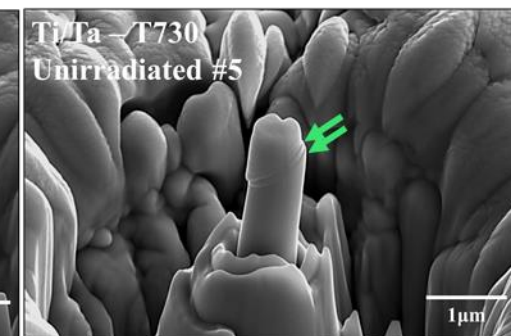
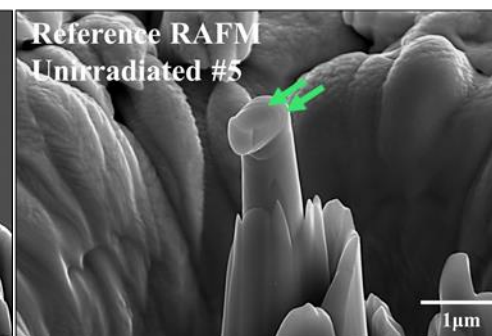
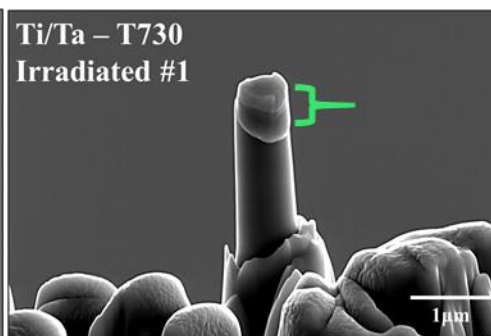
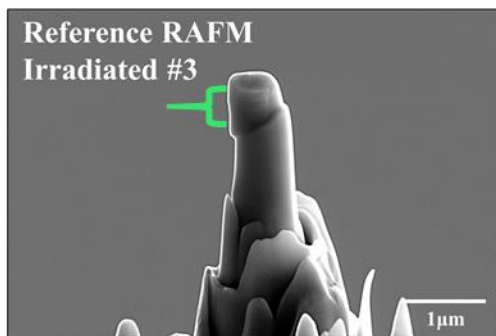
- 이온 조사재 표면으로부터 1μm 깊이(조사 영역)와 3μm이상 깊이에서 micro-pillar 제작
- Orientation의 영향 최소화, (101) 방향 제작

조사경화 평가: 마이크로필러 압축 시험

➤ 압축 시험 Strain-Stress curve (20dpa)

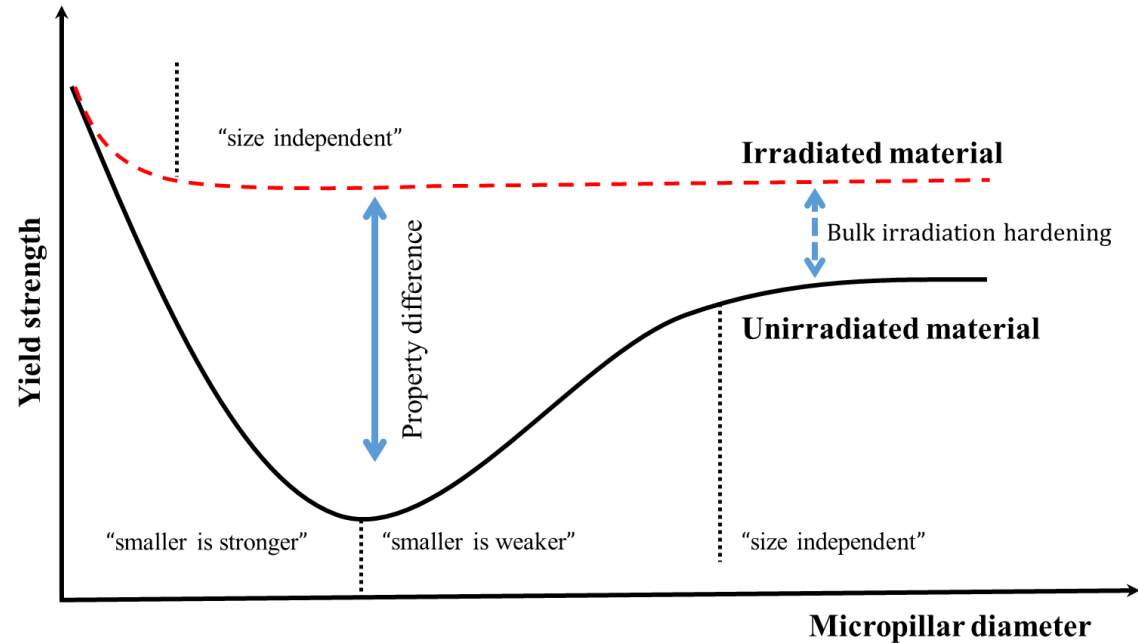
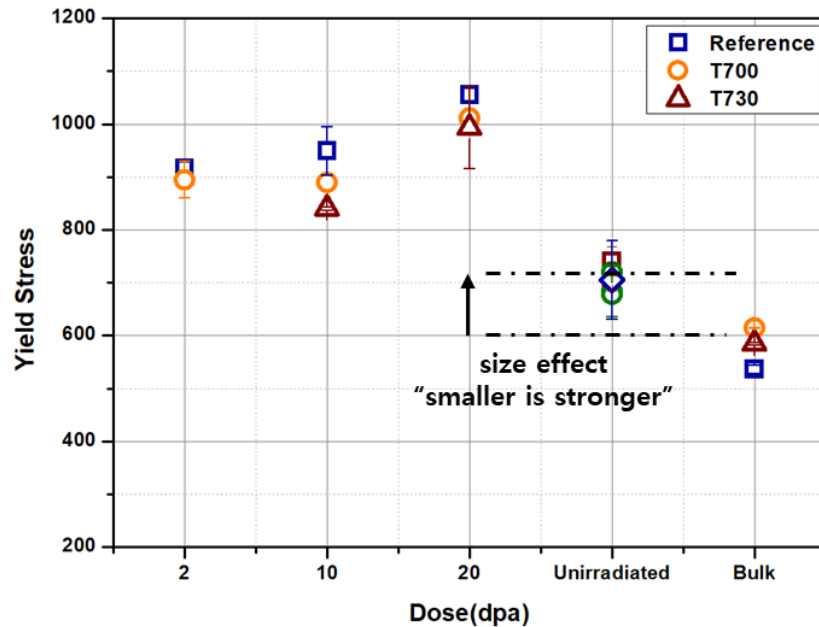


➤ 압축 실험 후 micro-pillar 형태 비교



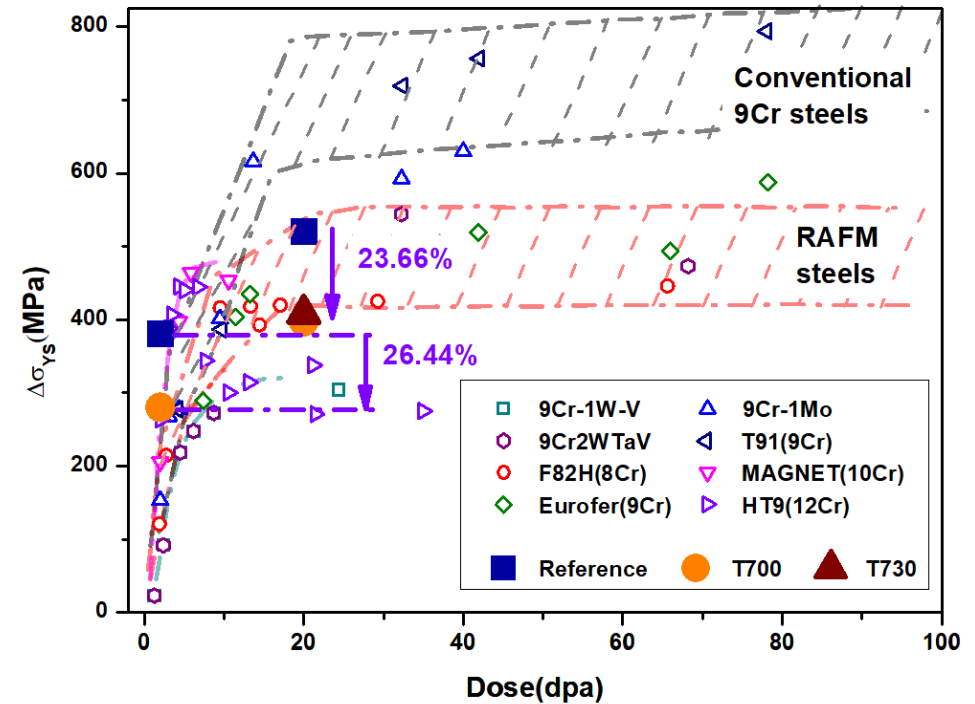
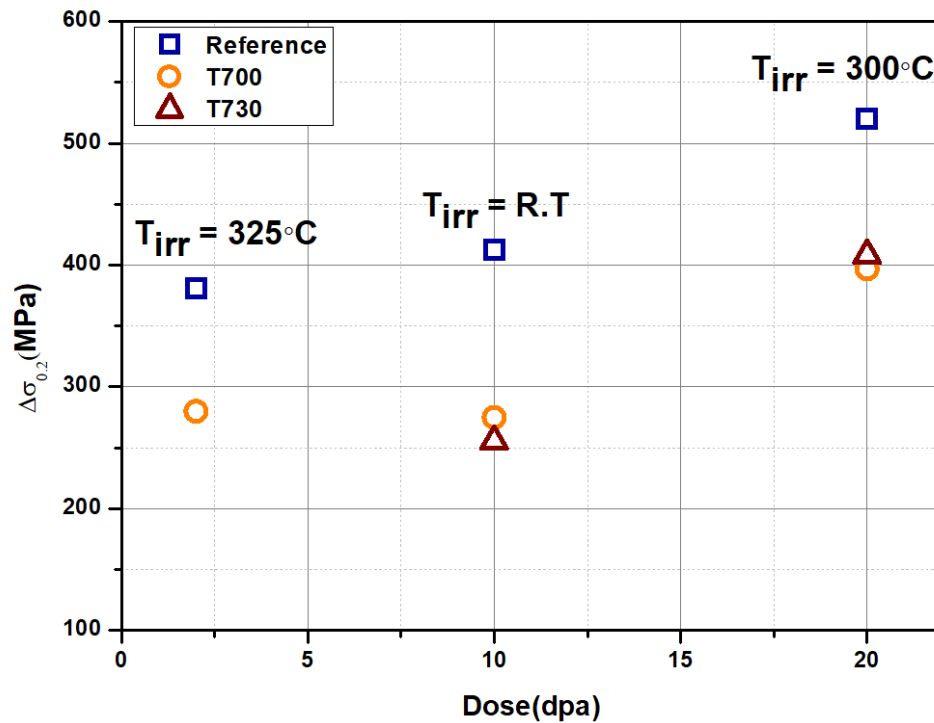
조사 경화 평가

크기 효과(Size effect) 고려 조사 경화 평가

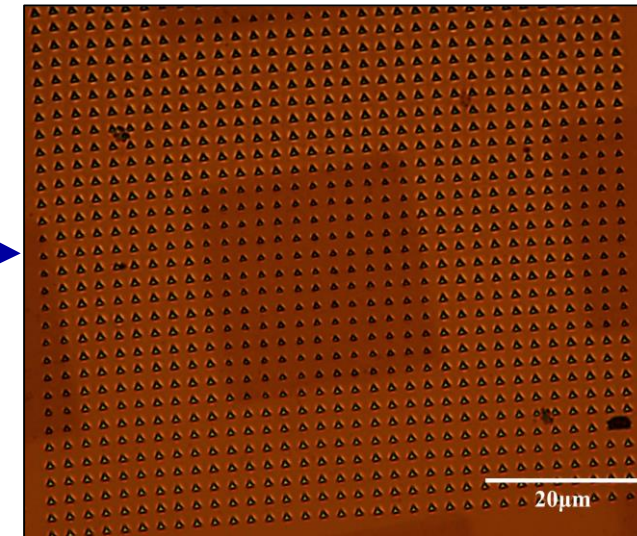
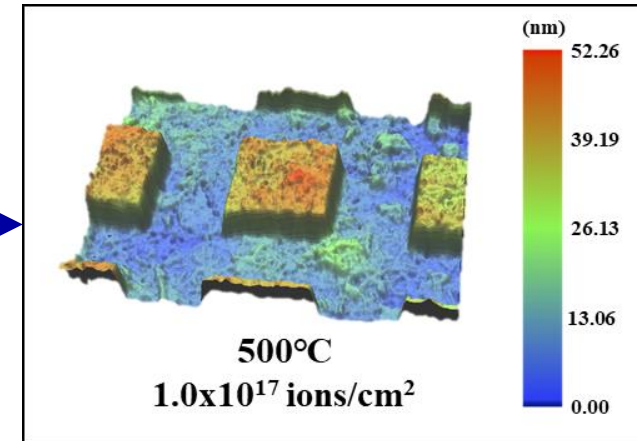
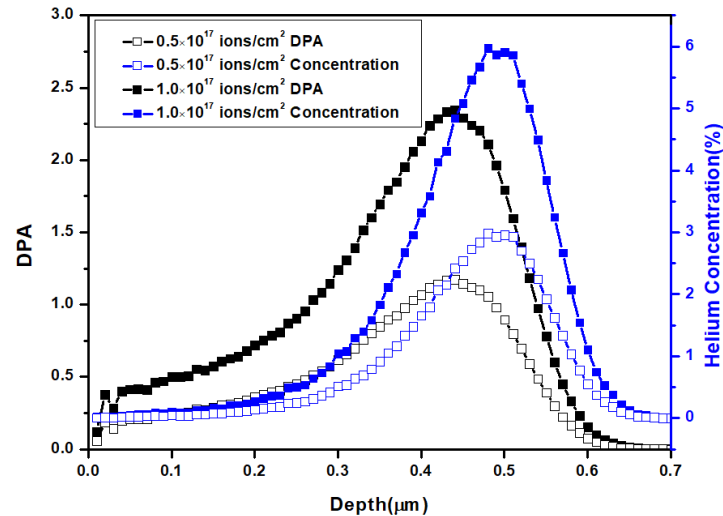
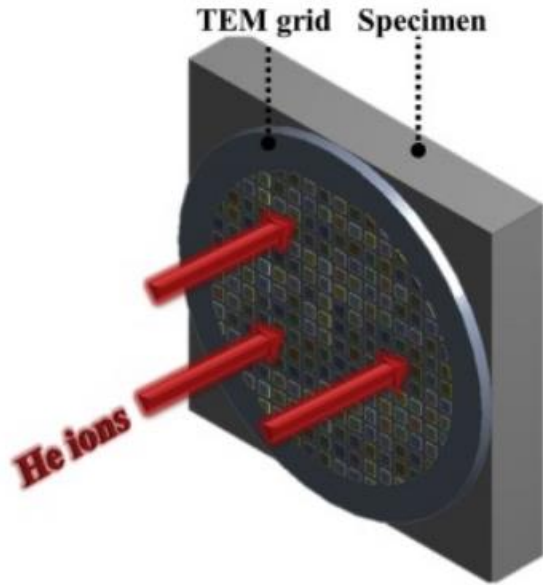


조사 경화 평가

크기 효과(Size effect) 고려 조사 경화 평가



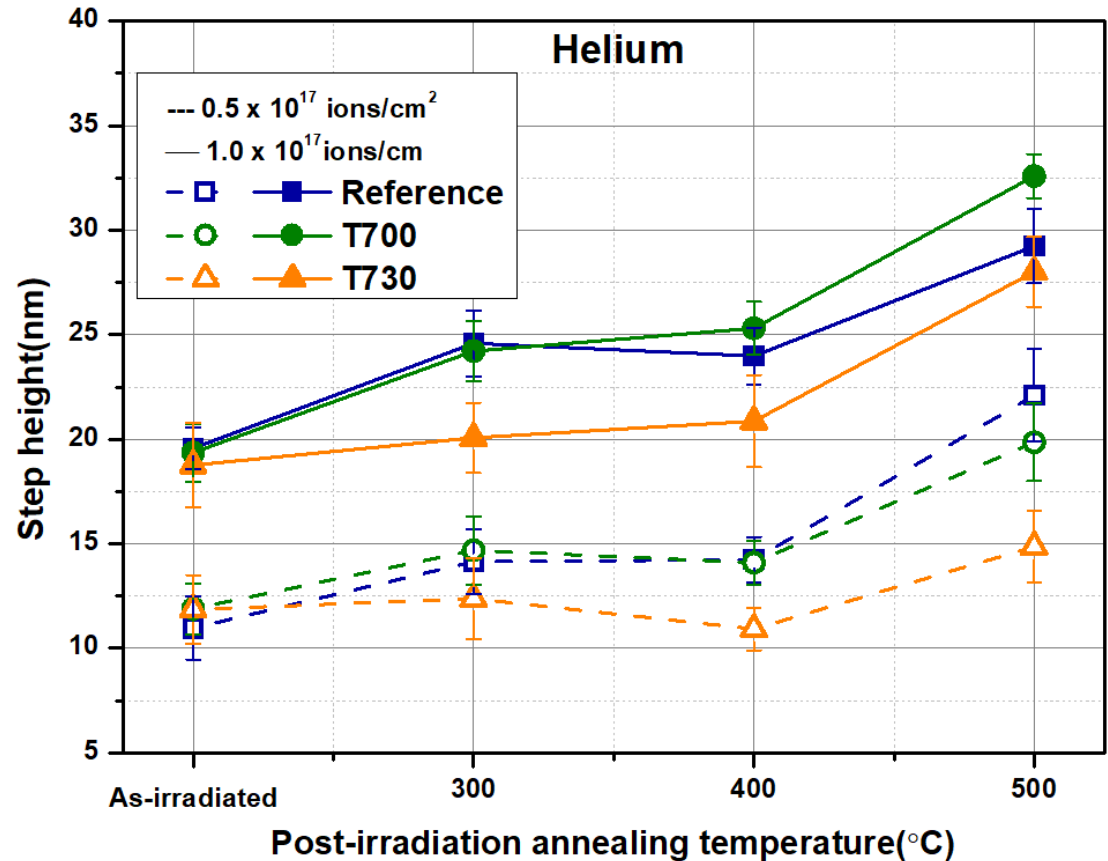
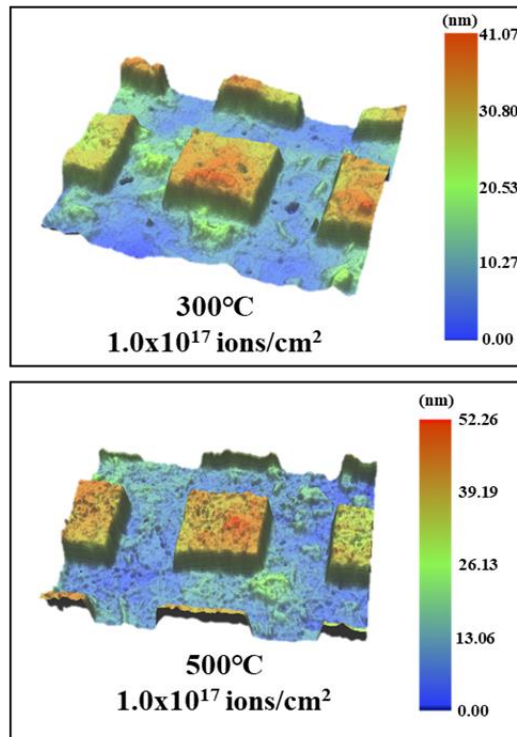
헬륨 스웰링 평가: He 이온 주입 및 단차 측정



- 160 keV, RT, 0.5×10^{17} ion/cm², 1.0×10^{17} ion/cm²
- TEM grid 시편 표면에 부착 → He 이온 주입
→ 열처리 2h
- 3D profiler 활용 표면 단차 변화 분석
- 나노인덴테이션 맵핑을 통한 경도 변화 분석

헬륨 스웰링 평가: PIA 온도에 따른 단차 분석

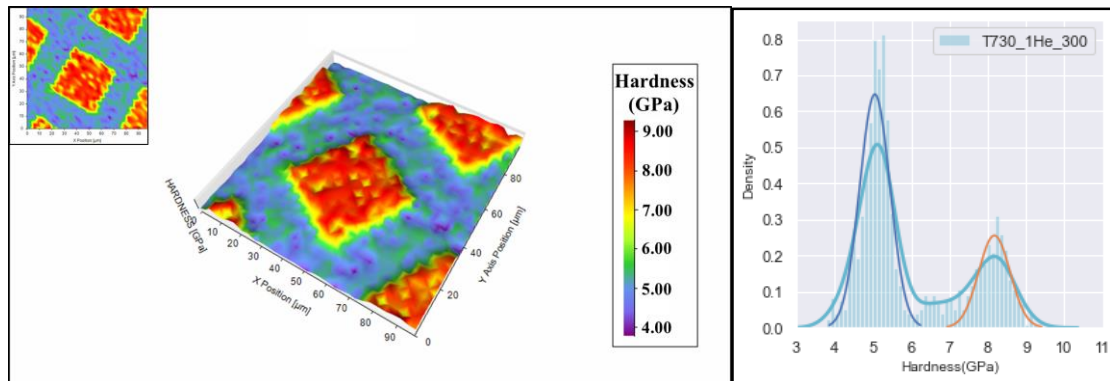
➤ 헬륨 버블 스웰링에 의한 표면 단차 분석



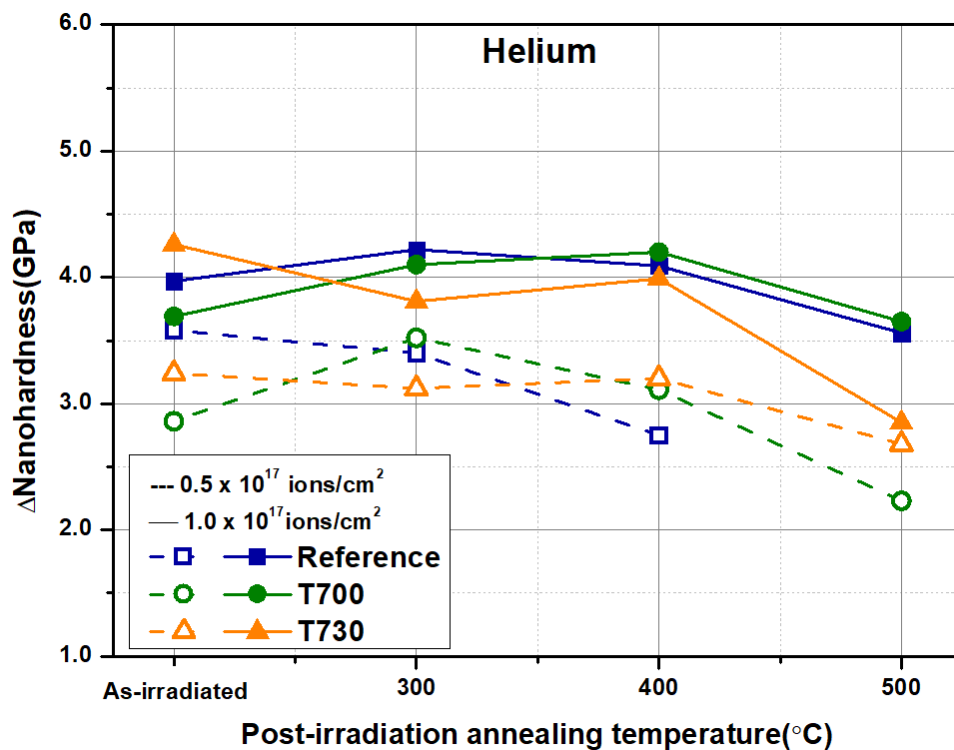
- 300 - 400°C 헬륨 버블 생성 단계, 400 - 500°C 헬륨 버블 성장 단계
- T730이 뛰어난 스웰링 저항성을 보임

헬륨 스웰링 평가: PIA 온도에 따른 경도 분석

➤ 헬륨 버블 스웰링에 의한 경도 변화



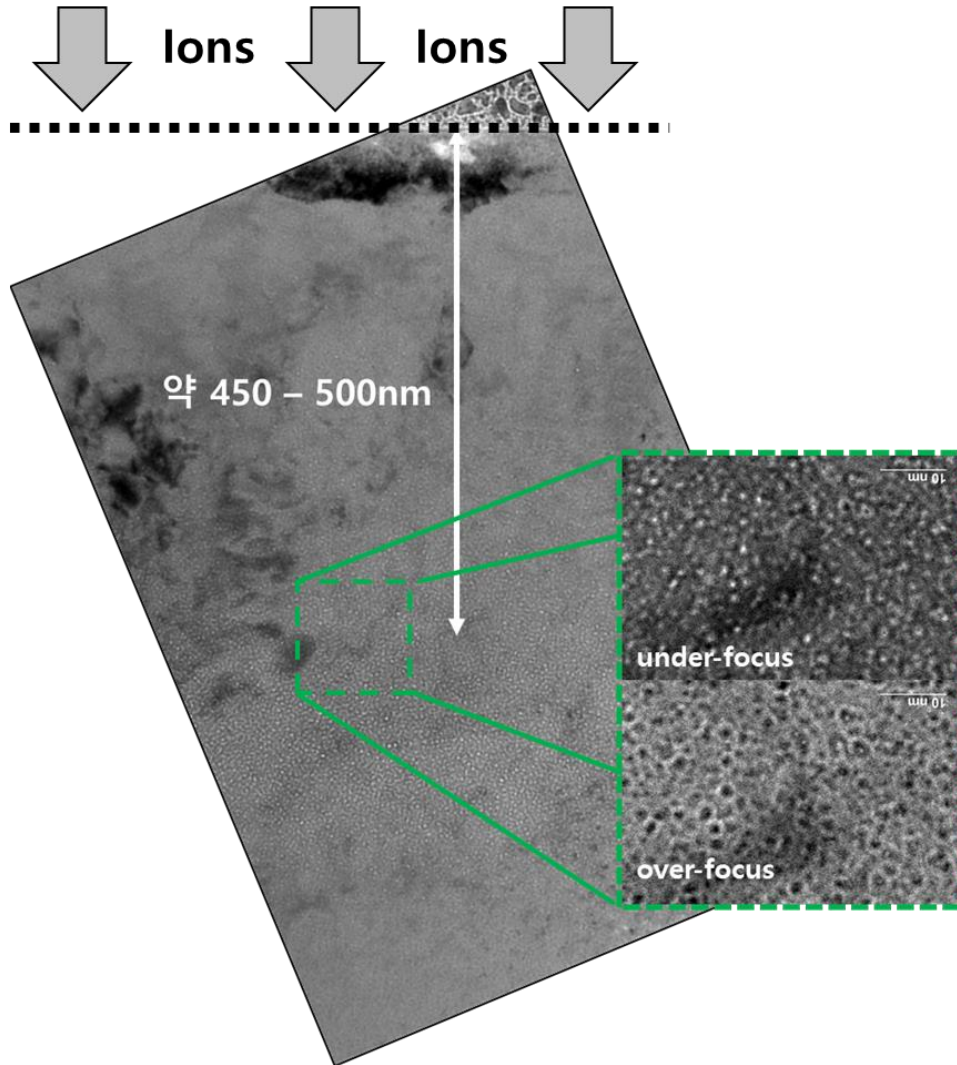
- 헬륨 주입 영역에서 더 높은 경도 나타남 → 헬륨 버블의 전위 운동 방해



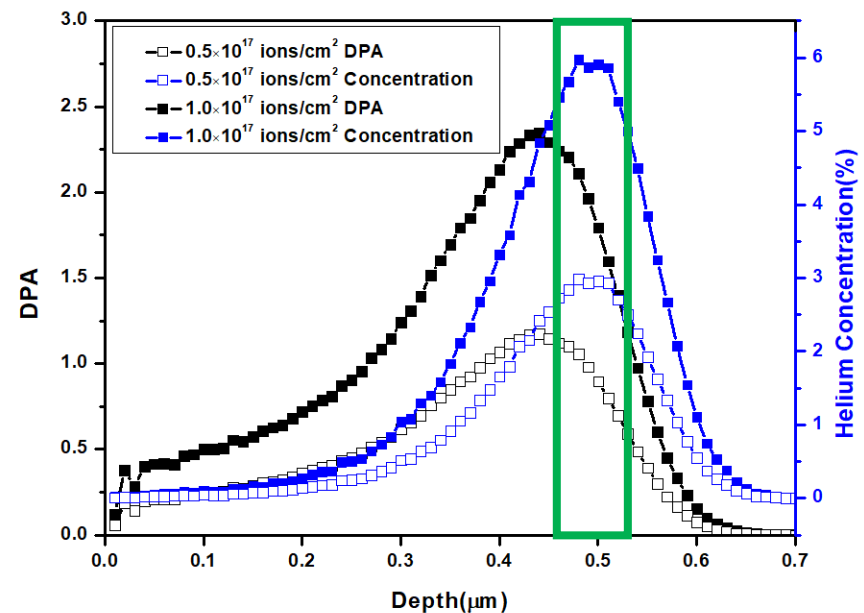
- 어닐링 온도 증가 함에 따라 경도 차이 감소
- 헬륨 버블 성장에 따른 버블 사이 거리 증가 = 밀도 감소
- 헬륨 버블에 의한 경도 증가는 헬륨 밀도가 큰 영향을 미침

헬륨 스웰링 평가: 헬륨 버블 TEM 분석

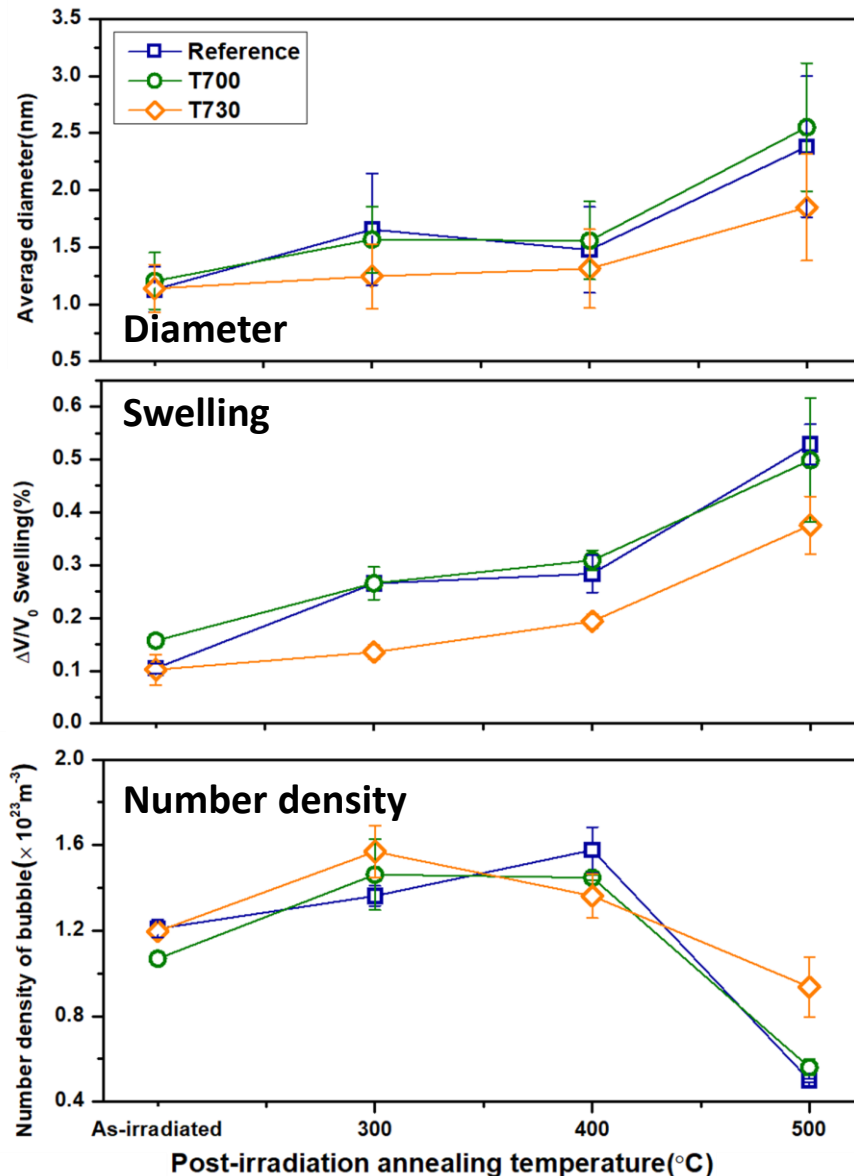
➤ 헬륨 버블 정량 분석



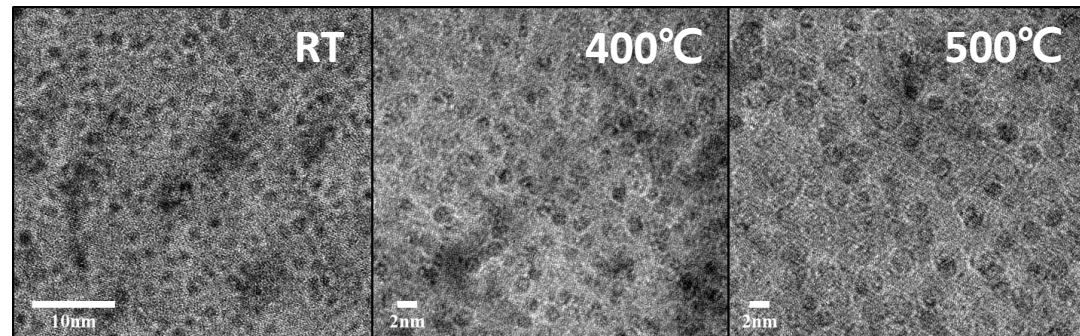
- 0.5×10^{17} He ions/cm² 모든 조건
- Under/Over focus - ± 500 nm
- 약 500nm 주입 깊이에서 헬륨 버블 평가 진행(SRIM 계산시 최대 깊이)



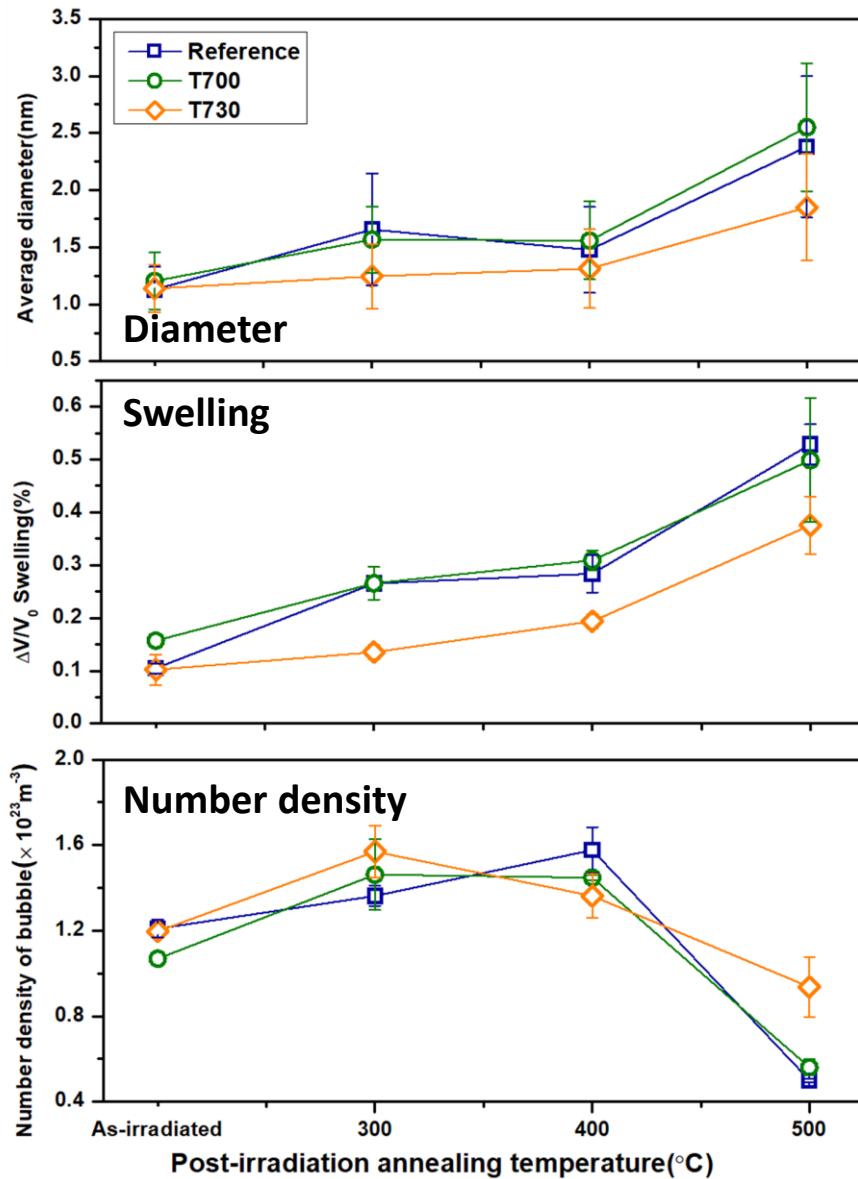
헬륨 스웰링 평가: 헬륨 버블 TEM 분석



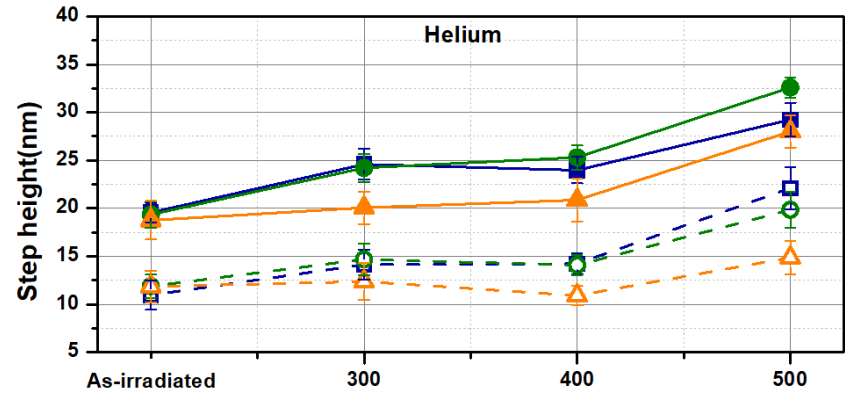
- 온도 증가에 따른 헬륨 버블 크기 증가
- 300-400°C 범위 버블 생성 영역
-. 상온 대비 크기, 스웰링, 밀도 증가
- 500°C 버블 성장에 의한 밀도 감소, 스웰링 증가
-. 버블 성장에 의한 감소
- T730 경우 밀도는 비슷하나 크기 ↓, 스웰링 ↓



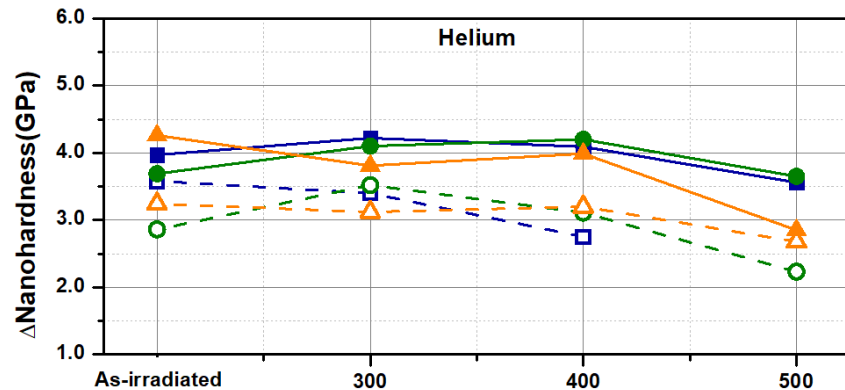
헬륨 스웰링 평가



<표면 단차>



<경도>



결론

- 중이온 및 헬륨 가속기를 활용하여 조사 경화 (마이크로필러 압축시험) 와 헬륨 스웰링 평가 (표면단차 및 나노경도 맵핑)를 수행하였음.
- 두 평가 모두에서 K-RAFM 강은 Reference 대비 우수한 조사 열화 저항성을 나타냄.
- 이는 Ti 첨가에 따른 석출물($M_{23}C_6$, MX)의 크기 및 분율 변화가 조사결함에 대한 Sink 역할 향상시킨 결과로 판단됨.
- 향후 최대 100 dpa 까지의 조사경화 거동 평가를 진행할 예정이며,
- 조사결함과 핵변환 수소가 헬륨 스웰링이 미치는 시너지 효과에 대해서도 후속 연구를 계획하고 있음.