

A nuclear research institute
reshaping the future
based on **peoples trust**



A KAHIF-upgrade project for fusion/fission material irradiation evaluation

Seunghyun Lee*, Dong Won Lee, Dae-sik Chang,
Sangbeen Lee, Kihyun Lee, Sunghwan Yun

2023/05/19



*A nuclear research institute
reshaping the future based on peoples trust*



Korea Atomic Energy
Research Institute

- 01 Introduction**
- 02 Overview of a KAHIF**
- 03 Current Status**
- 04 Upgrade Plans**
- 05 Conclusion**

CONTENTS



Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

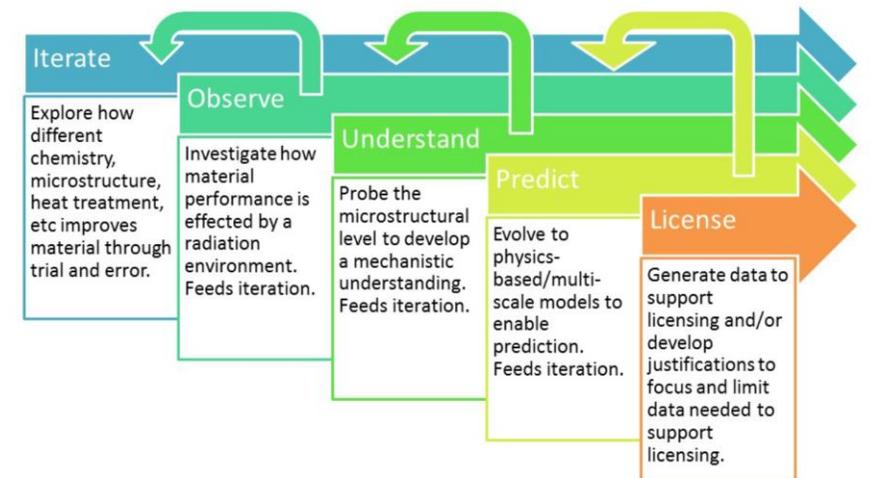
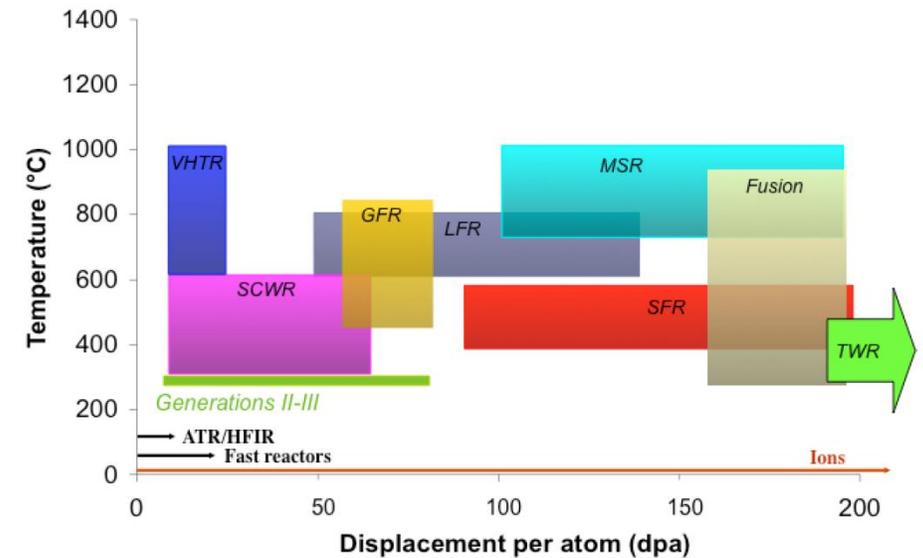
Introduction

01

01 Introduction

원자력재료 개발을 위한 이온빔 조사

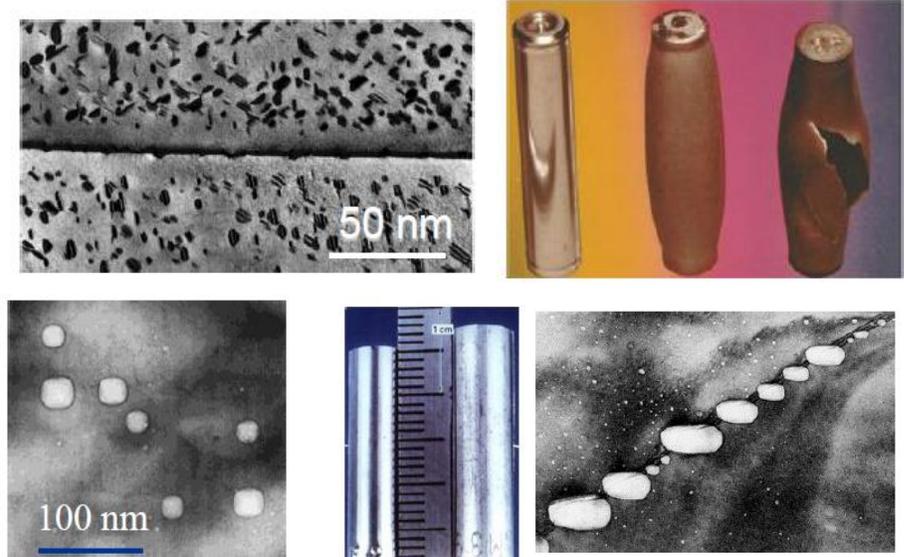
- 이온빔 이용 원자력발전 기술 로드맵 (2017)
 - ✓ Nuclear Science User Facility (NSUF)에서는 이온빔을 활용한 원자력에너지기술에 대한 로드맵을 제시함
 - ✓ 원자력 재료시험 평가시험에 이온빔 조사가 가장 효과적이며, 추후 상용화 제품에 사용 가능한 검증 기준으로서의 제시가 가능함을 확인함
 - ✓ SMR, MSR, 핵융합실증로 등 미래 원자력 시스템 개발의 국가 경쟁력 확보를 위하여 핵융합/원자력 재료의 평가/검증 기관이 절대적으로 필수적임



01 Introduction

핵융합 재료 조사 영향 평가

- ✓ 원자력 핵분열 및 핵융합 반응에서 다량 발생하는 중성자는 핵연료피복관, 구조재 및 구조부품의 건전성과 기능에 부정적 영향이 생김
- ✓ 핵융합은 경수로의 100배, Gen-IV (고속로) 수준 혹은 그 이상의 조사량 예상 (> 150 dpa)
- ✓ 핵융합 재료 요건 및 개발 방향
: 조사 저항성, 고온 운전온도, 냉각재와의 부합성
- ✓ 중이온가속기 이용, 중이온빔 조사를 통한 조사실험 연구 기간을 크게 단축할 수 있음

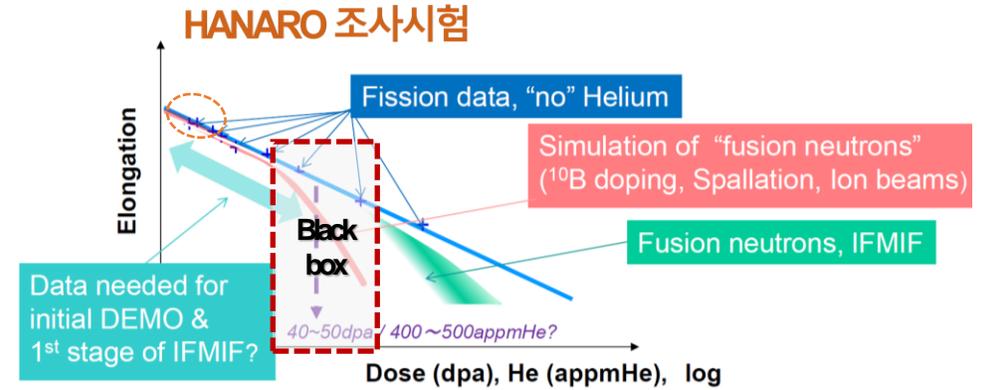


	Fission (Gen. I)	Fission (Gen. IV)	Fusion (DEMO-PROTO)	Spallation (MYRRHA)
Structural alloy T_{max}	<300°C	500-1000°C	550-1000°C	400-600°C
Max dose for core internal structures	~1 dpa	~30-150 dpa	~50-150 dpa	≤60 dpa/fpy
Max transmutation helium concentration	~0.1 appm	~3-10 appm	~500-1500 appm (~8 times more for SiC)	~2000 appm/fpy
Particle Energy E_{max}	<1-2 MeV	<1-3 MeV	<14 MeV	several hundred MeV

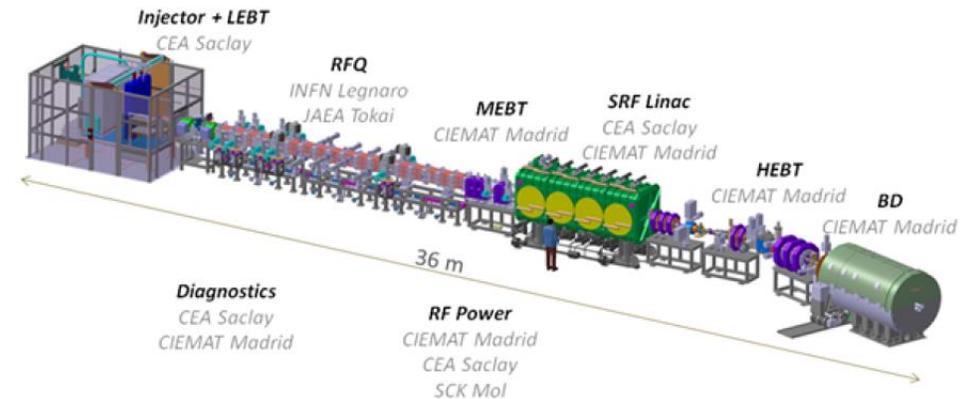
01 Introduction

중성자조사손상 모사 실험시설

- 원자로(연구로/경수로/고속로)활용 : He 영향 평가 불가
- 14 MeV D-T 반응 대비, IFMIF 구축 (가속기 기반)
: 천문학적 구축 비용 소요
- 중이온가속기 활용** : 재료 및 구조재 개발/평가 단계에서 조사성능 검증/보완의 **가속 모사 연구 가능**
 - ✓ 해외 시설의 빔타임 제한, 시험비 등 국내 수요 대응 필요
 - ✓ 핵반응 없이, 별도의 방사능/방사선 관리 필요 없음
 - ✓ 다양한 이온종을 활용한 조사 손상 특성 평가 가능함



이온빔 조사손상 연구의 필요성



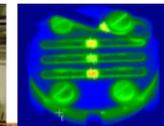
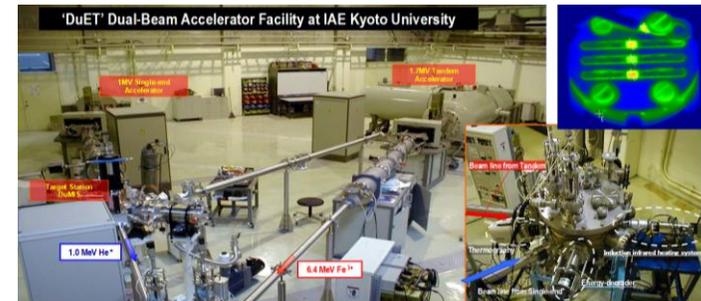
IFMIF : 핵융합로 재료 연구를 위한 국제핵융합재료조사장치

01 Introduction

해외 조사시험시설 현황

- 핵융합 재료 연구 목적으로 활용되는 해외 다중 이온빔 조사시험 시설
- 이온조사시험과 조사재료 평가절차가 체계적으로 확립
- 자국 핵융합/원자력 재료 개발 연구자들이 우선적으로 빔타임을 배정 → **국내시설의 필요성**

	DuET	HIT	TIARA	MIBL
소속/국가	Kyoto university (일본)	University of Tokyo (일본)	QST (일본)	University of Michigan (미국)
Ions	Fe, Si, He, Ar	Ni, He	Ni, Si, He, Ar	Ni, Fe, proton
Temp. range	4 – 1773K	293 – 1073K	573 – 1073K	473 – 873K
Environment	Vacuum, He, O ₂	Vacuum	Vacuum	Vacuum
1 st . Beam	6.8MeV Si 100μA 6.8MeV Fe 10μA	4MeV Ni 1μA	18MeV Si 10μA 18MeV Ni 6μA	3MeV proton 60μA
2 nd . Beam	1MeV He 100μA	1MeV He 10μA	3MeV He 50μA	5MeV Fe 10μA 5MeV Ni 10μA
3 rd . beam	5keV Ar 40μA	-	400keV Ar 50μA	-



- DuET, Japan
- MIBL, U.S.A.

Table 3. Facilities attending the FY 2016 Ion Beam Investment Options Workshop.

Institution/Facilities	Accelerators	Capabilities
ANL/IVEM-TUF	2 MV Tandem 500 kV implanter	Up to 1573K, radioactive materials allowed, in situ TEM during irradiation
Idaho State University/Idaho Accelerator Laboratory	4.0 MV Tandem	Radioactive materials allowed
LANL/Ion Beam Materials Laboratory	6 MV Van de Graaff Vertical 9 MV Tandem	Up to 1473K, corrosion studies in liquid metal and molten salts, radioactive materials allowed
LLNL/Center for Accelerator Mass Spectrometry	FN 10 MV Tandem Van de Graaff 1 MV Tandem 1.7 MV Tandem	Up to 1023K, radioactive materials allowed
Ohio University/Edwards Accelerator Laboratory	4.5 MV Tandem Van de Graaff	
Sandia National Laboratories/In situ Ion Irradiation Transmission Electron Microscope (I3TEM)	6 MV Tandem 1 MV Tandem 3 MV Pelletron Implanter 100 kV Nanoimplanter 10 kV Colutron	Up to 1473K, in situ TEM during irradiation, radioactive materials allowed
TAMU/Accelerator Laboratory	10 kV Implanter 140 kV Accelerator 400 kV Van de Graaff 1.7 MV Tandem 3 MV Tandem	Up to 1273K, radioactive materials allowed, dual beam irradiation allowed, corrosion in high pressure high temperature water (planned)
University of Michigan/Ion Beam Laboratory	3 MV Tandem 1.7 MV Tandem 400 kV Implanter	Up to 1500K, corrosion testing in high pressure, high temperature water, radioactive materials allowed, dual beam and triple beam irradiation
University of Tennessee/Ion Beam Materials Laboratory	3.0 MV Tandem	Up to 1475K
University of Wisconsin/Tandem Accelerator Ion Beam Laboratory	1.7 MV Tandem	Up to 1073K, radioactive materials allowed, corrosion in molten salt (planned)

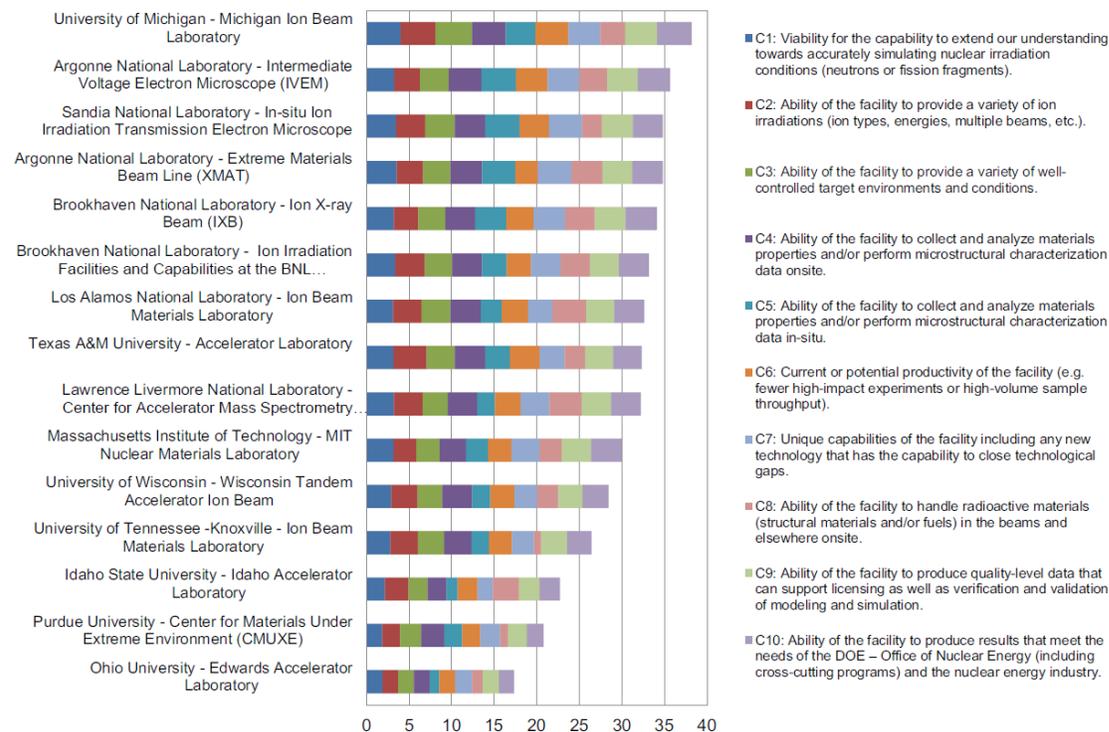


Figure 3. Overall score and ranking of the ion beam facilities.



Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

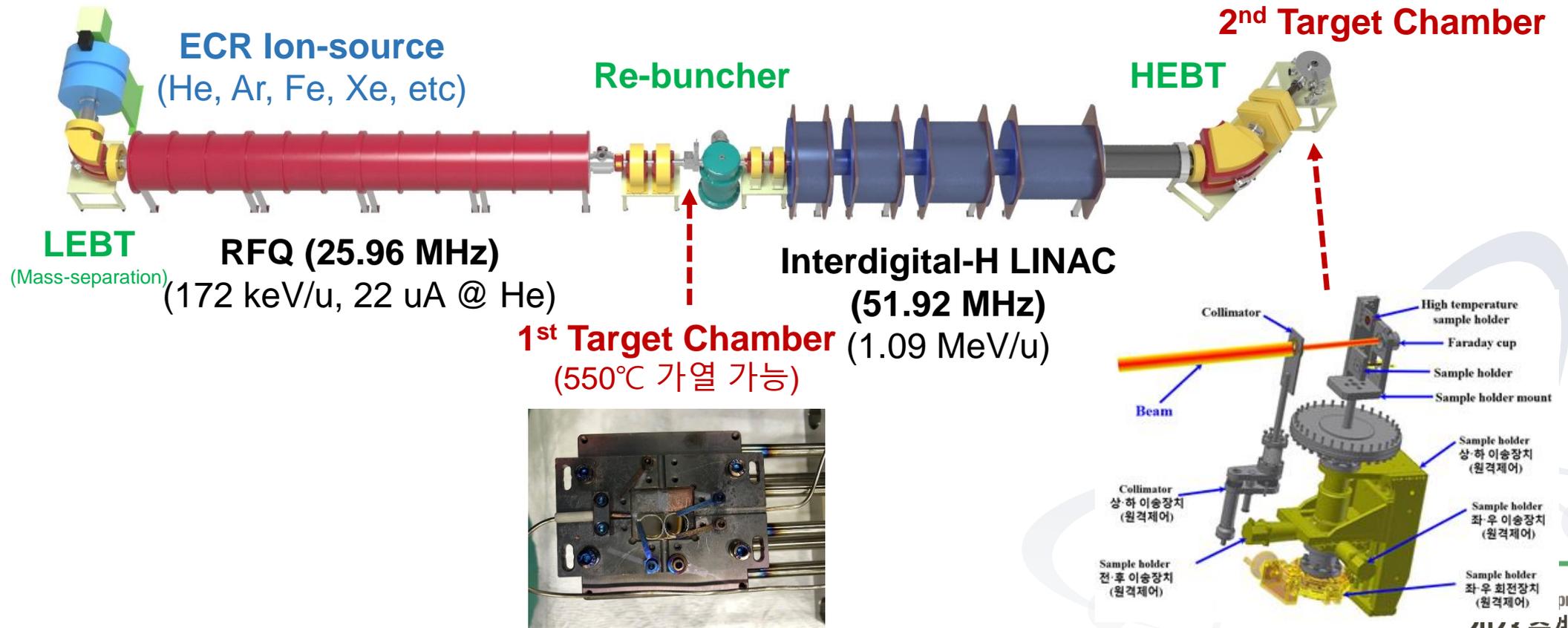
Overview of a KAHIF

02

02 Overview of a KAHIF

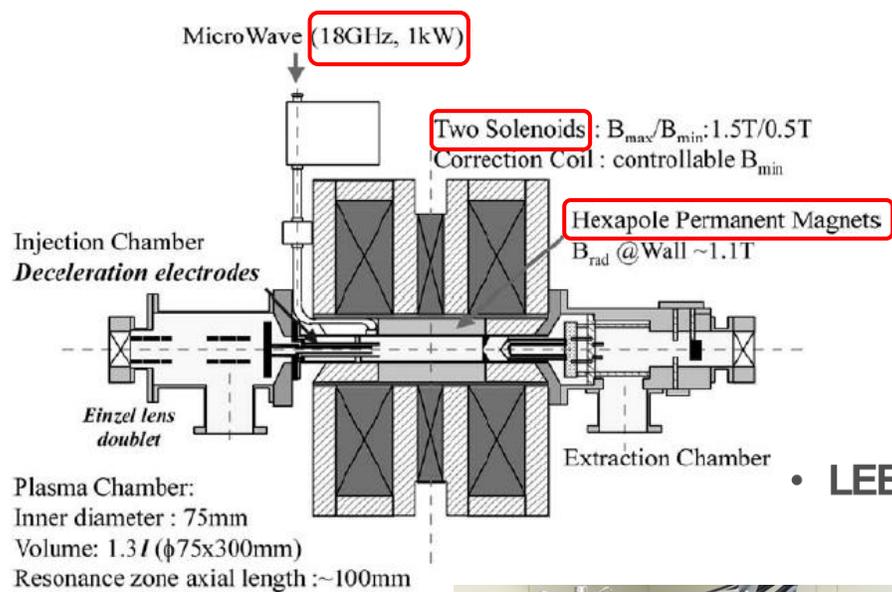
KAERI Heavy-ion Irradiation Facility (KAHIF) : 중이온빔 조사시험시설

- 최대 1.09 MeV/nucleon stable ion beam 조사 가능 : He, Ar, Xe, Fe 등 4종 KINS 인허가 완료

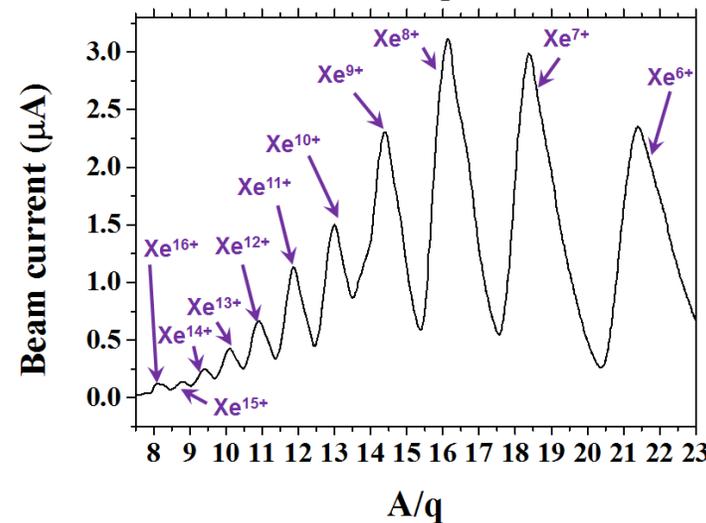
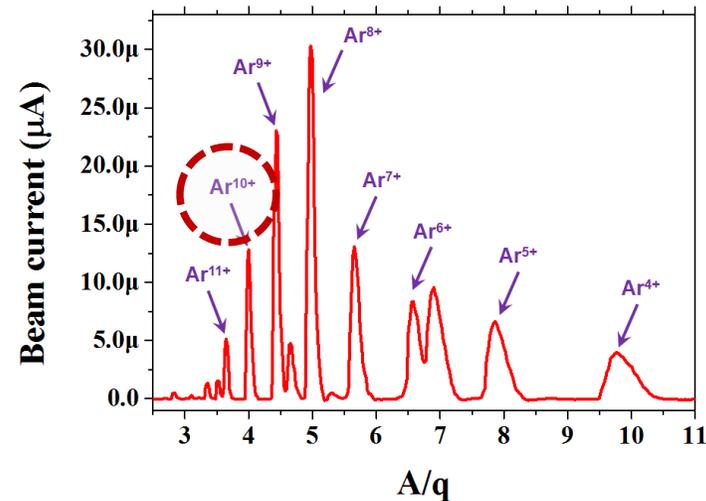
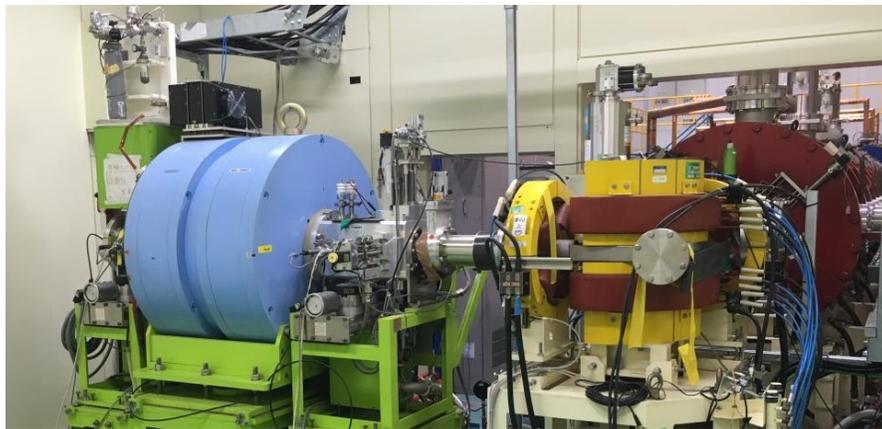


02 Overview of a KAHIF

ECR 이온원 (18 GHz) 및 Charge-state distribution 측정

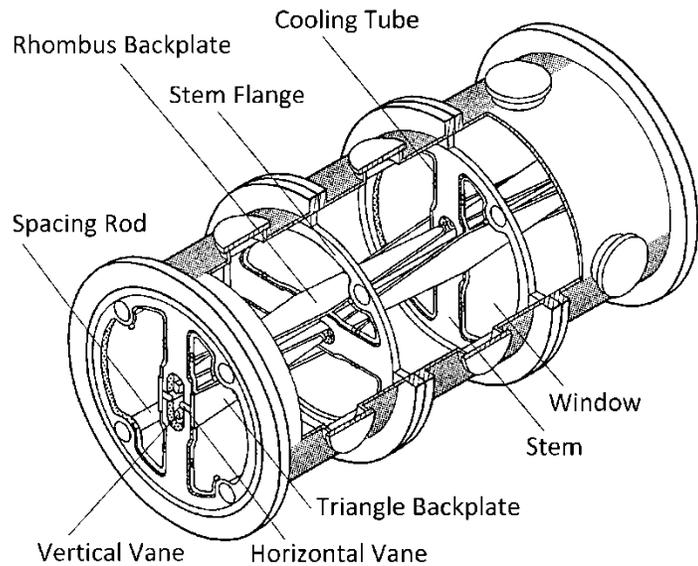


• LEBT bending magnet 이용 :
Mass separation

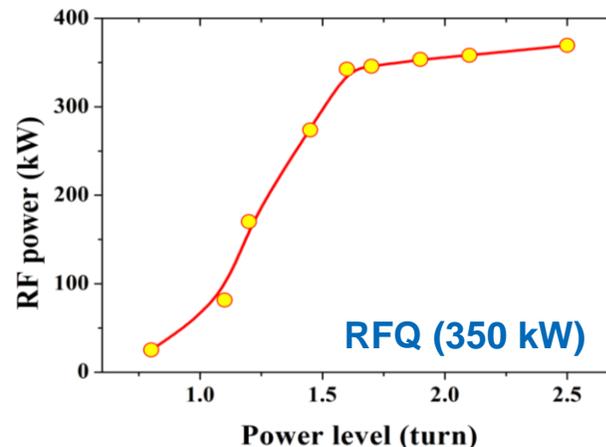
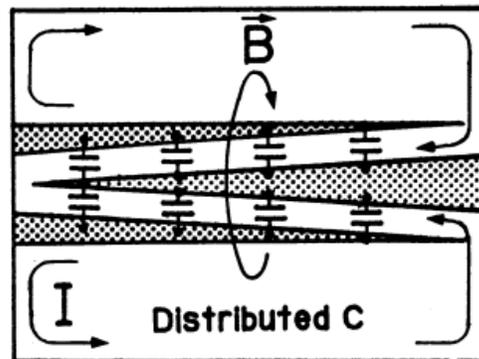


02 Overview of a KAHIF

Split-coaxial (SC) RFQ 성능 검증



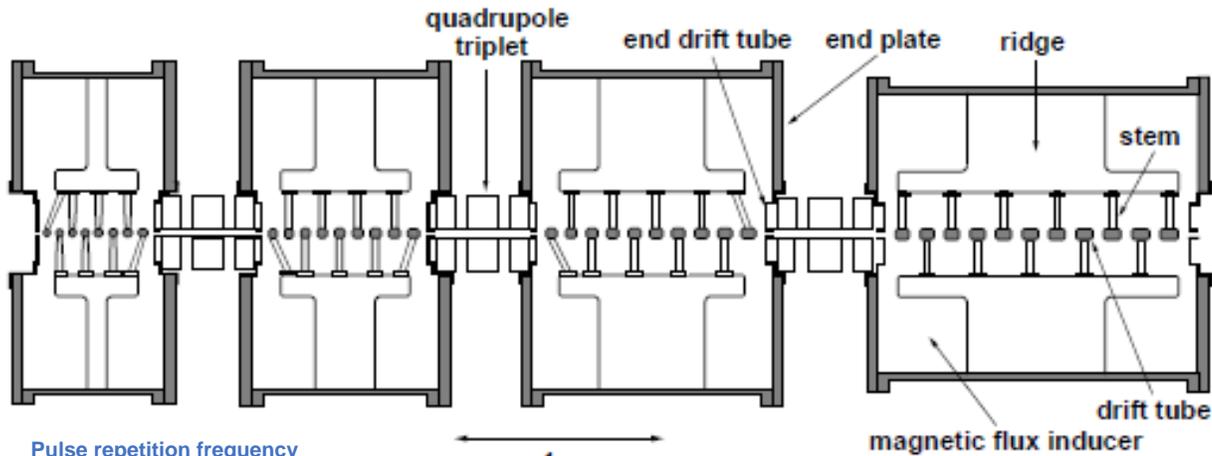
Split Coaxial Cavity



Parameters	RFQ
<i>Frequency</i>	25.96 MHz
<i>Synchronous phase</i>	- 30 deg.
<i>Charge-to-mass ratio</i>	$\geq 1/28$
<i>Input energy</i>	2.07 keV/u
<i>Output energy (MAX)</i>	178.4 keV/u
<i>Normalized emittance</i>	0.6π mm·mrad
<i>Energy spread</i>	1.03%
<i>Duty factor</i>	30 – 100%
<i>Repetition rate</i>	20 – 1000 Hz
<i>Total length</i>	8.6 m

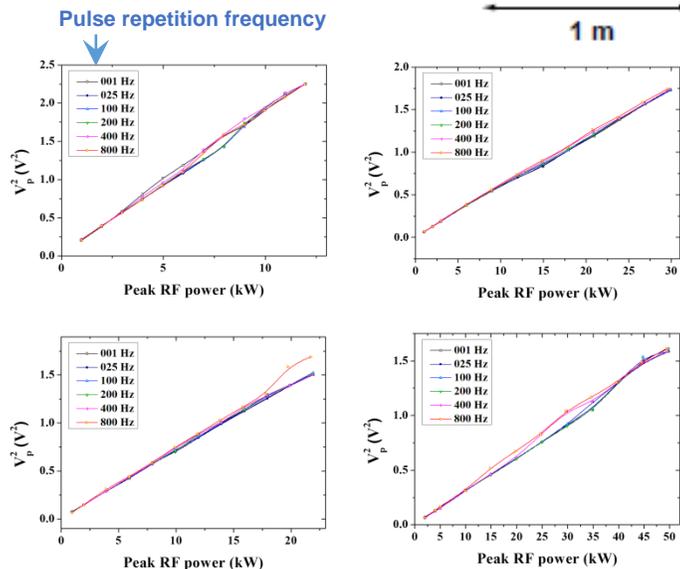
02 Overview of a KAHIF

Interdigital-H (IH) LINAC



$$U \propto E_0^2 \propto V_p^2$$

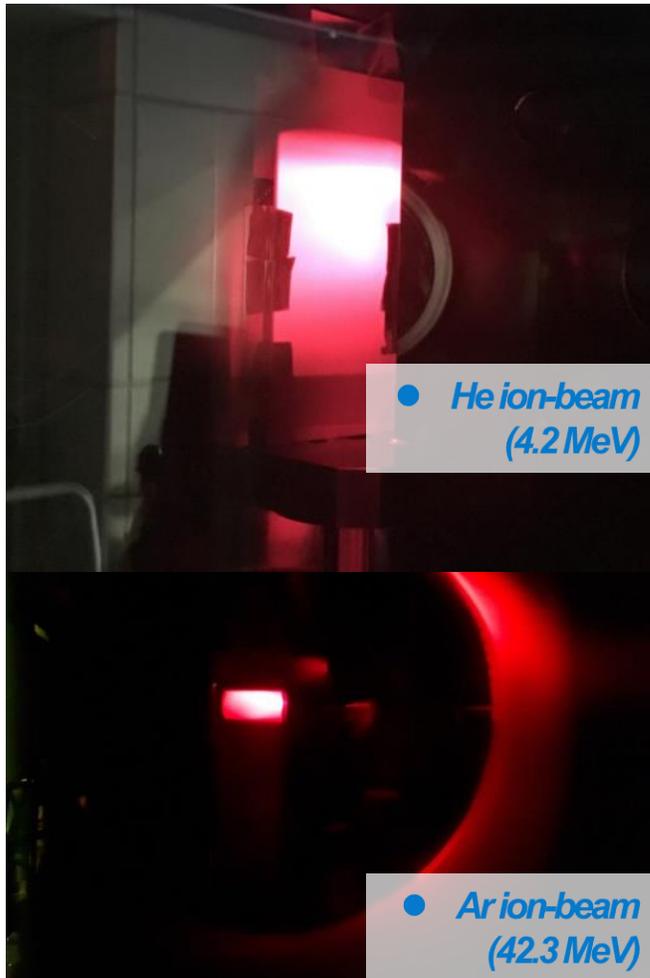
E_0 : average axial E-field amplitude ($E_0 = V_0/L$ where V_0 is the axial RF voltage)
 U : the total EM stored energy
 V_p : pickup voltage from RF pickup loop in the IH tank



Parameters	IH
Frequency	51.92 MHz
Synchronous phase	- 25 deg.
Charge-to-mass ratio	$\geq 1/9$
Input energy	178.4 keV/u
Output energy	178.4 – 1090 keV/u
Normalized emittance	0.6π mm·mrad
Energy spread	$\leq 2.8\%$
Duty factor	100%
Repetition rate	20 – 1000 Hz
Total length	5.6 m

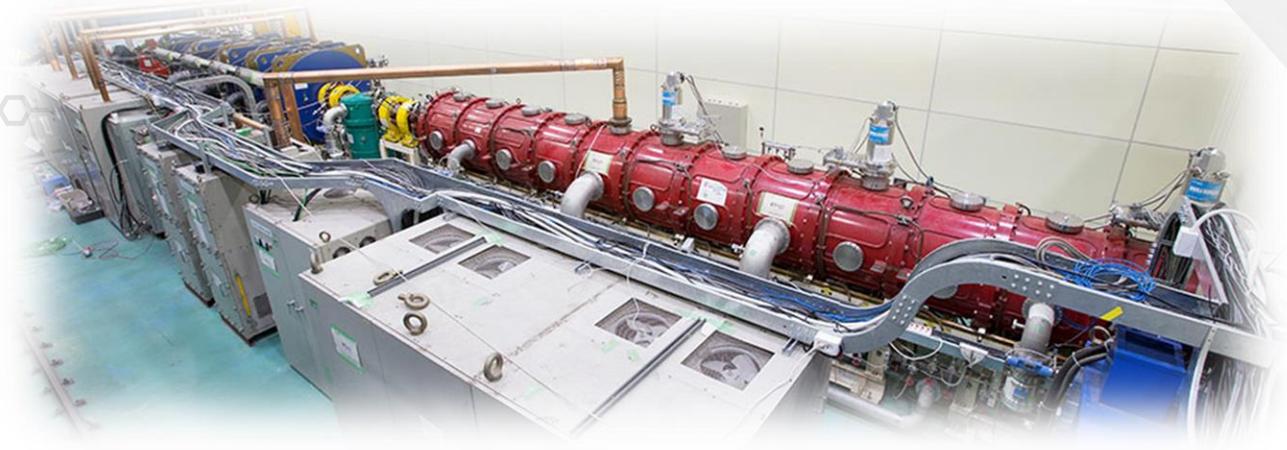
02 Overview of a KAHIF

국내 최초·유일 RF linac 이용 이온빔 조사시험시설 구축 완료 (18년 12월)



	SCRFAQ On	IH1 On	IH2 On	IH3 On	IH4 On	최종 빔에너지
SCRFAQ mode	O	X	X	X	X	172 keV/u
IH1 Mode	O	O	X	X	X	293 keV/u
IH2 Mode	O	O	O	X	X	476 keV/u
IH3 Mode	O	O	O	O	X	726 keV/u
IH4 Mode	O	O	O	O	O	1.06 MeV/u

	He ('18년 8월)	Ar ('19년 3월)
이온종	He ⁺	Ar ¹⁰⁺
이온빔 에너지 (MeV)	0.7, 1.2, 1.9, 2.9, 4.2	42.3
Peak-beam current (μA)	7.8 (@ 1.06 MeV/u)	0.8 (@ 1.06 MeV/u)
Duty cycle (%)	28.8	
Repetition rate (Hz)	120	
펄스 폭 (ms)	2.4	
평균 빔전류 (μA)	2.24 (23.2 @ RFQ)	0.23 (10.2 @ RFQ)
최대 빔 전력 (W)	33.0	34.3
빔 입사 조건	Horizontal / Vacuum	
Fluence (#/m ² ·s)	4.9 × 10 ¹⁷	5.1 × 10 ¹⁵
Beam size (mm ²)	20 × 10	



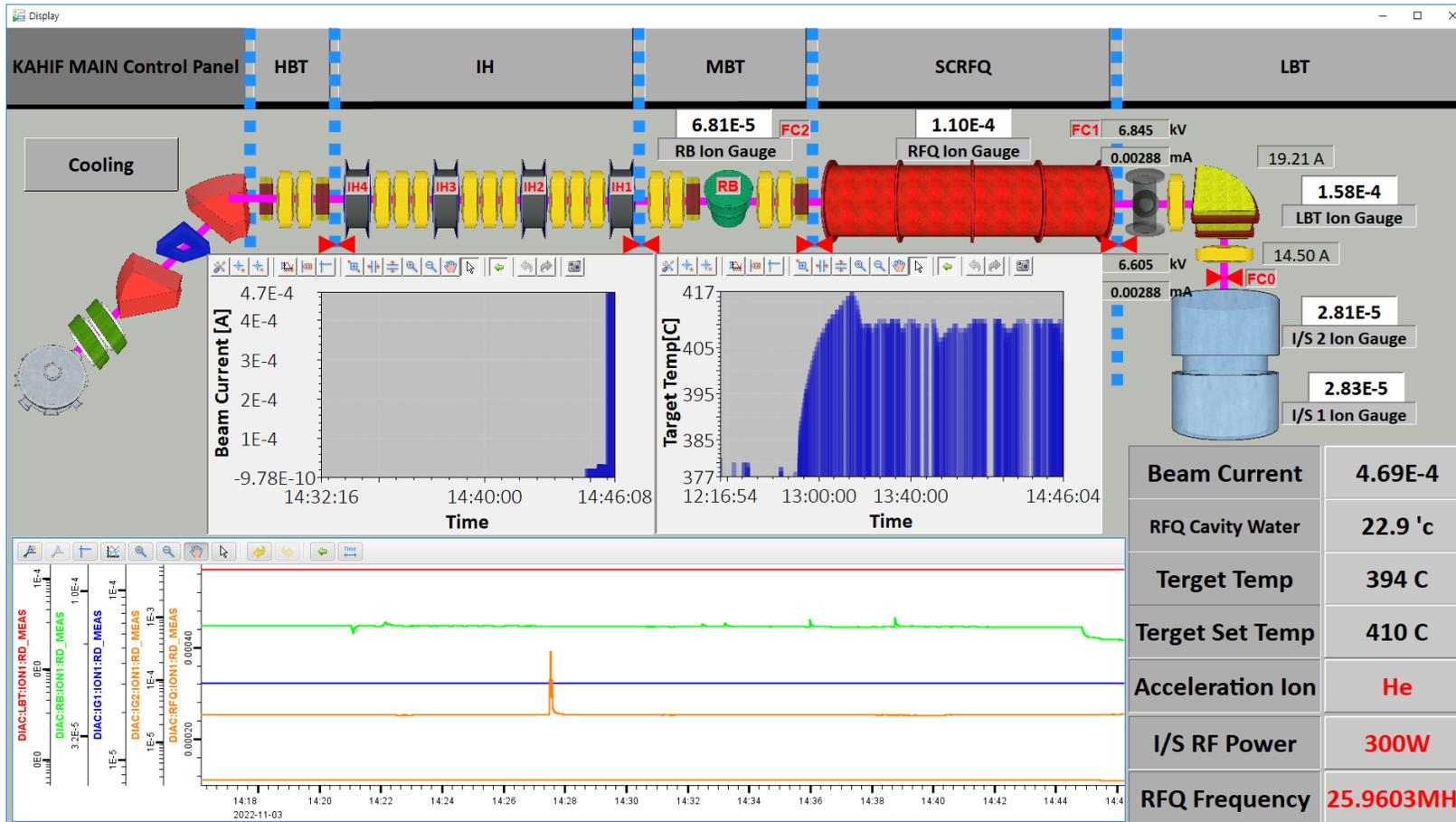
Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

Current Status

03

03 Current Status

22년부터 내/외부 빔 서비스 수행 중



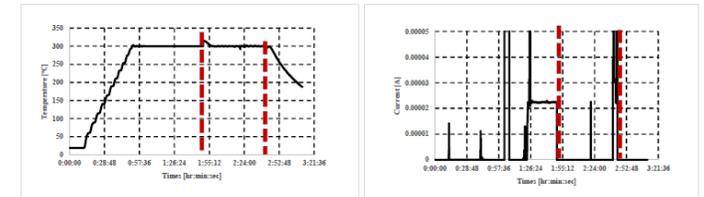
Korea Atomic Energy Research Insitutue Heavy Ion Irradiation Facility



TEST REPORT

- 1 Test Date: 2023-04-19
- 2 Client: 김정민 / 원내
Korea Atomic Energy Research Institute
- 3 Ion-beam Time on: 1:15 PM Time off: 2:05 PM
- 4 Heat on: 11:20 AM Heat off: 3:20 PM
- 5 Operators: 장대식, 이상빈
- 6 Experiment: 316L Stainless steel He irradiation
Beam energy (keV): 688.00
Sample current [uA]: 22.4 uA
Sample temperature [°C]: 300
Fluence: 5×10^{16} ions/cm²

7 Results



Report Date: 2023-04-21

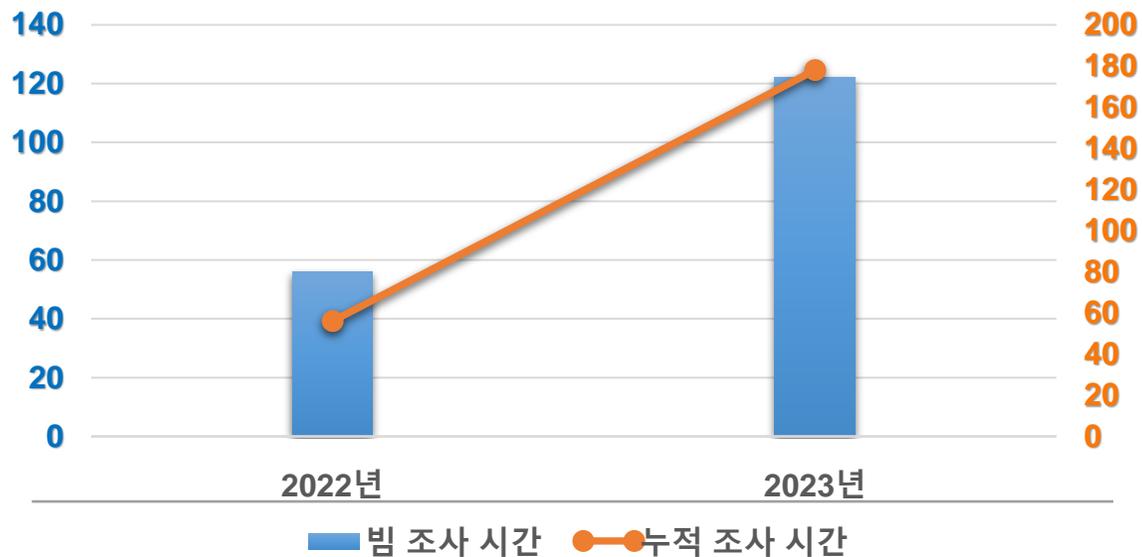
Complied by: 핵물리응용연구부 이상빈 (signature)

Approved by: 핵물리응용연구부 이승현 (signature)

Testing Laboratory Name: 하나로양자과학연구소 핵물리응용연구부
Address: KAERI 중합ENG동 (C26) 104-1호 (사무실)
KAERI 중합ENG동 (C26) 208호 (실험/제어실)

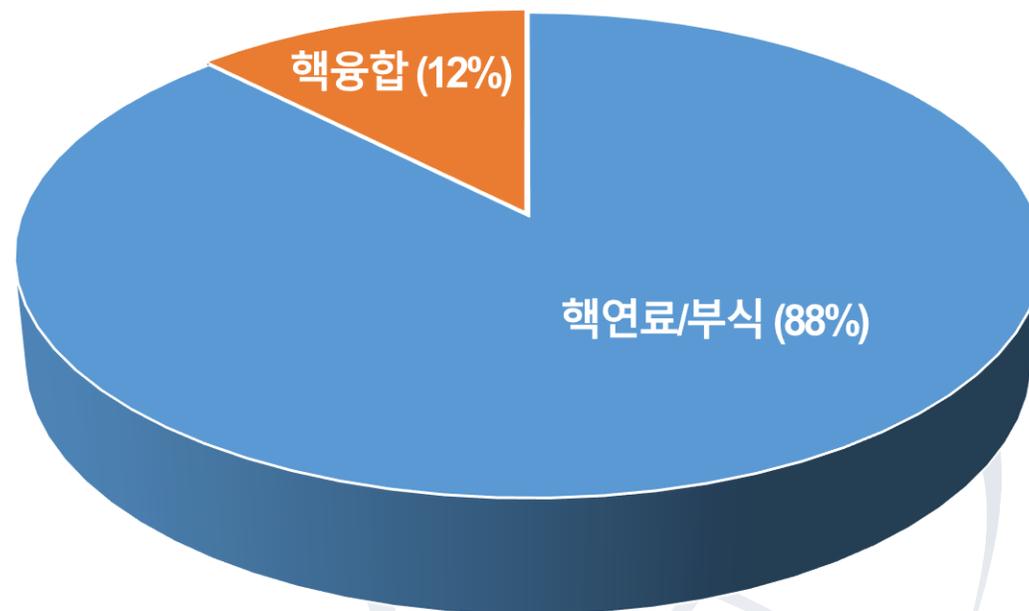
KAHIF 빔 이용자 통계 (2022~2023년)

KAHIF 빔 운전시간

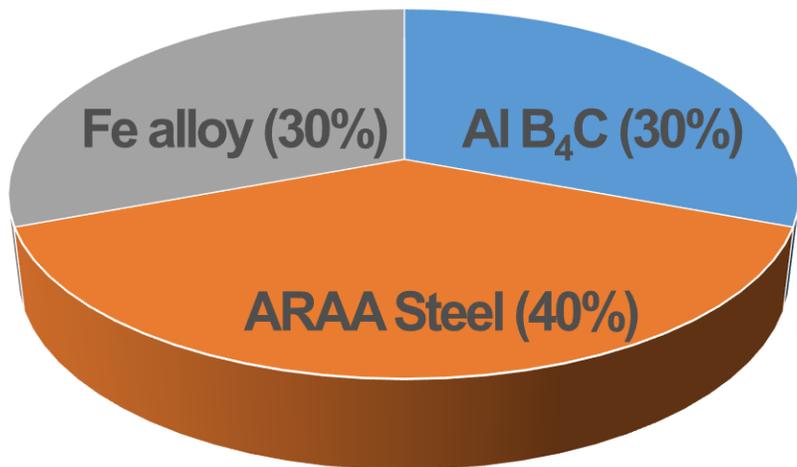


KAHIF	2022년	2023년
빔 조사 시간	56 시간	122 시간
누적 조사 시간	56 시간	178 시간

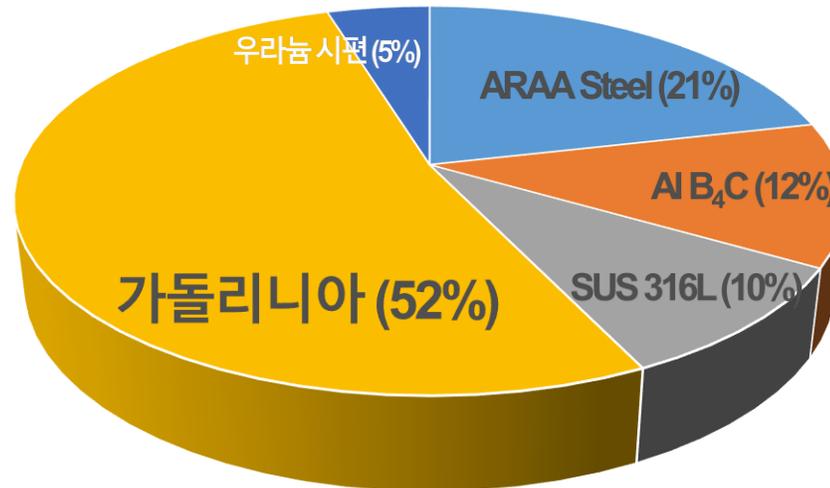
KAHIF 이용 분야별 빔 이용 비중



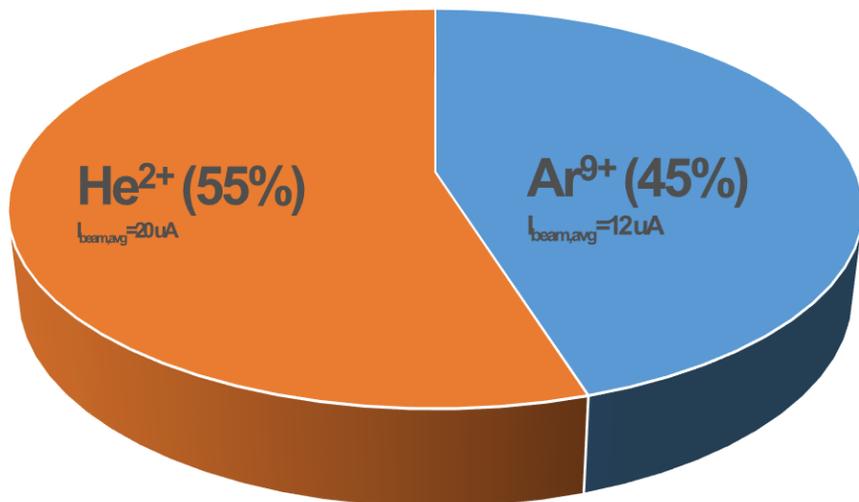
조사 시편 종류(2022년)



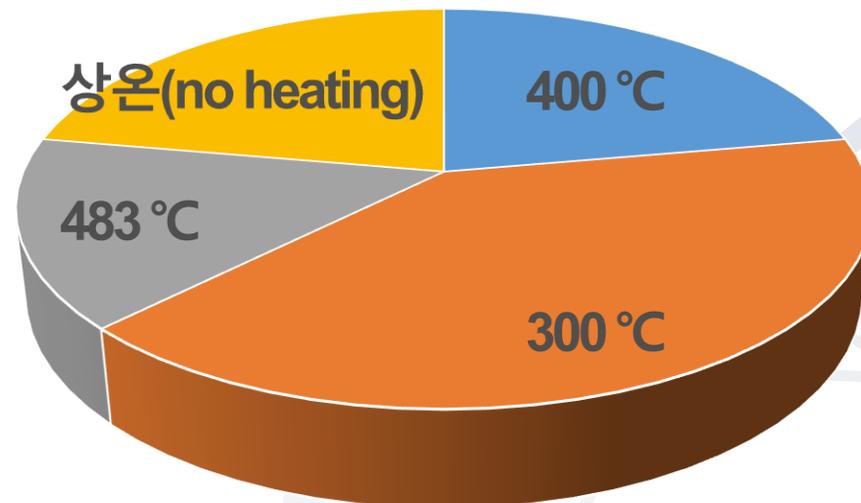
조사 시편 종류(2023년)



조사 빔 종류

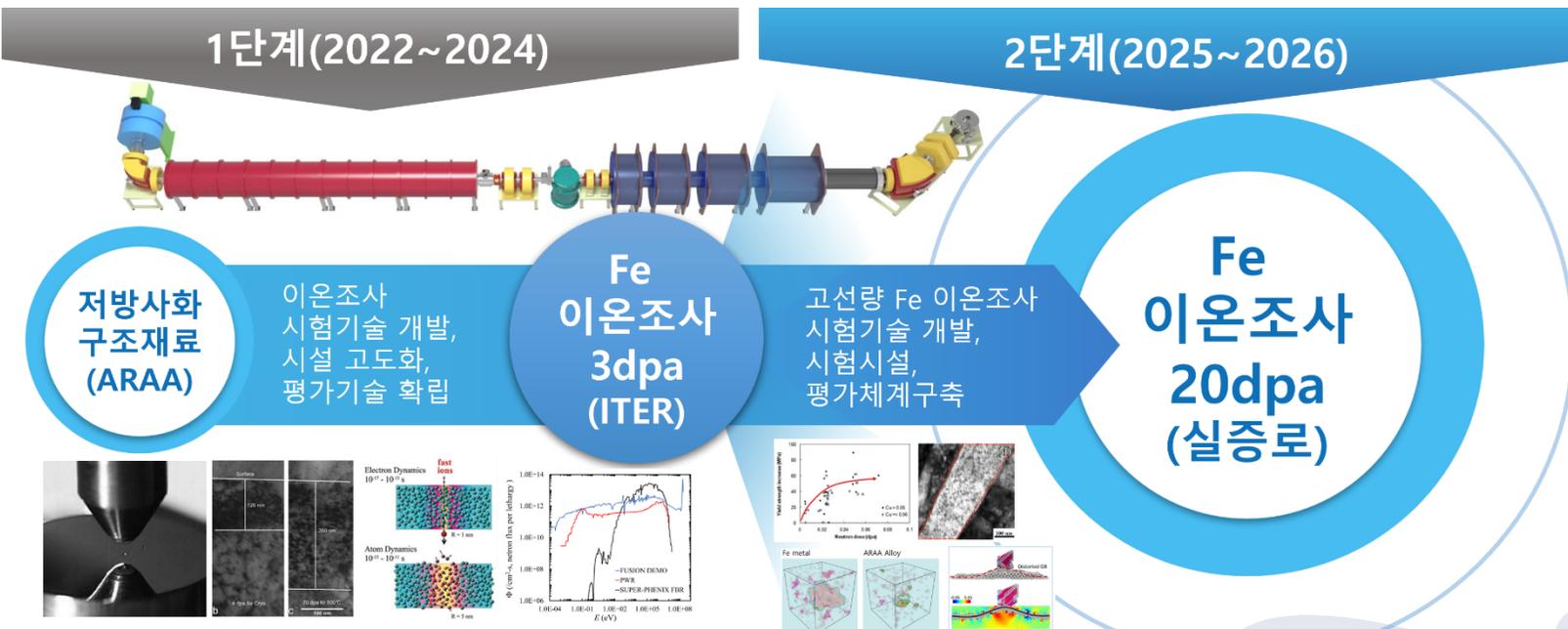


시편 온도 조건



03 Current Status

과기부 핵융합선도기술개발사업 (선도기술센터) 과제 수행중

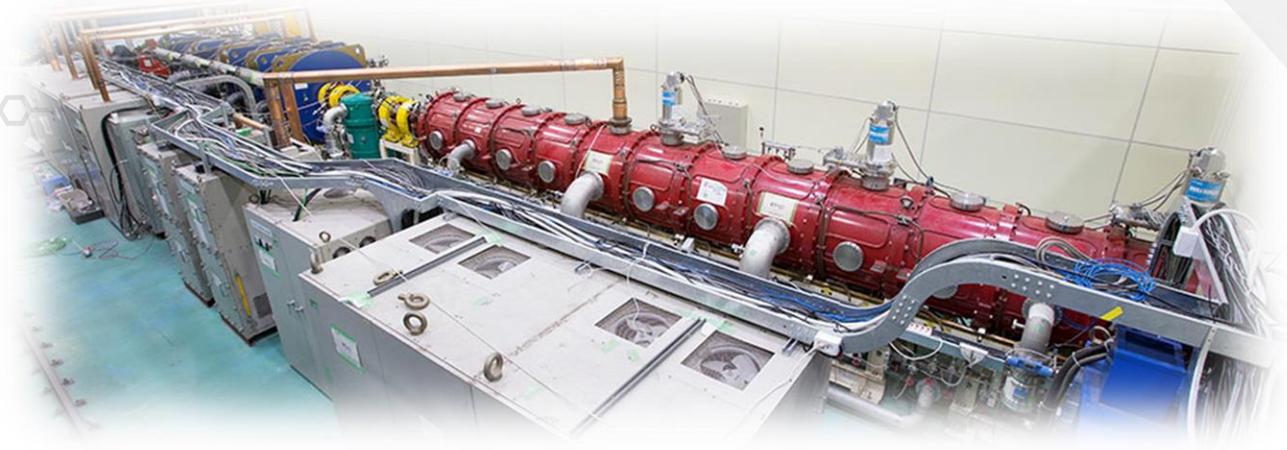


- 미세구조 조사손상 분석 및 기계적 특성 평가
- 이온조사 챔버 히터 및 시험편 제어 시스템 설계
- 핵융합 구조재료 조사 손상 다차원 시뮬레이션 요소기술 개발

- 핵융합로 구조재료 이온조사 시험절차/평가기술 확립
- 이온조사에 의한 미세구조 및 기계적 특성 평가 체계 구축
- 중성자/이온 조사에 의한 다차원 시뮬레이션 분석 체계 구축
- 조사 손상 상관관계 예측

최종 목표

핵융합 재료 중성자 조사손상 모의를 위한 이온조사 시험기술 개발, 시험시설 및 평가 체계 구축



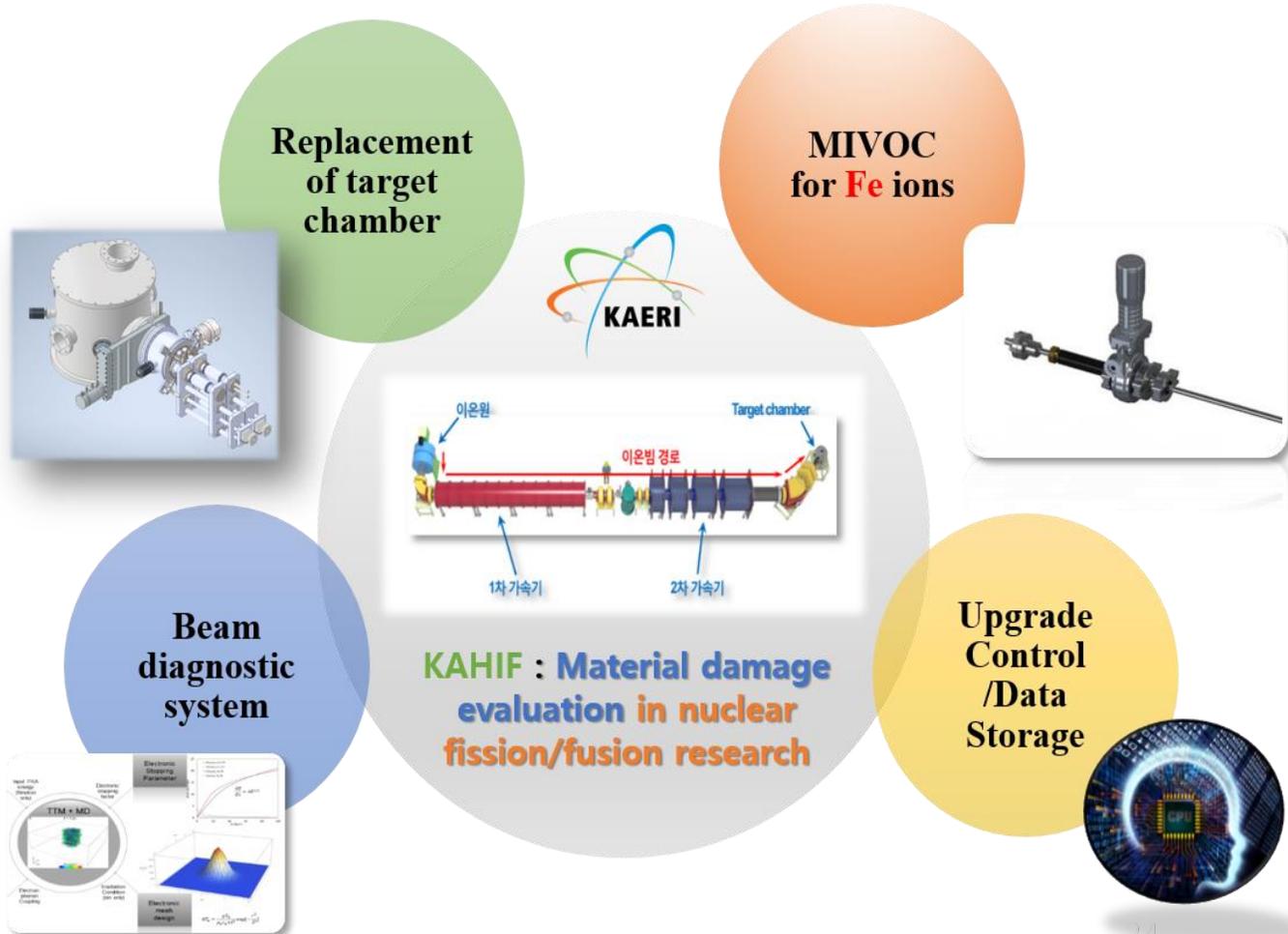
Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

Upgrade Plans

04

04 Upgrade Plans

이용자 친화적 원자력/핵융합 재료 전용 이온빔 조사시설



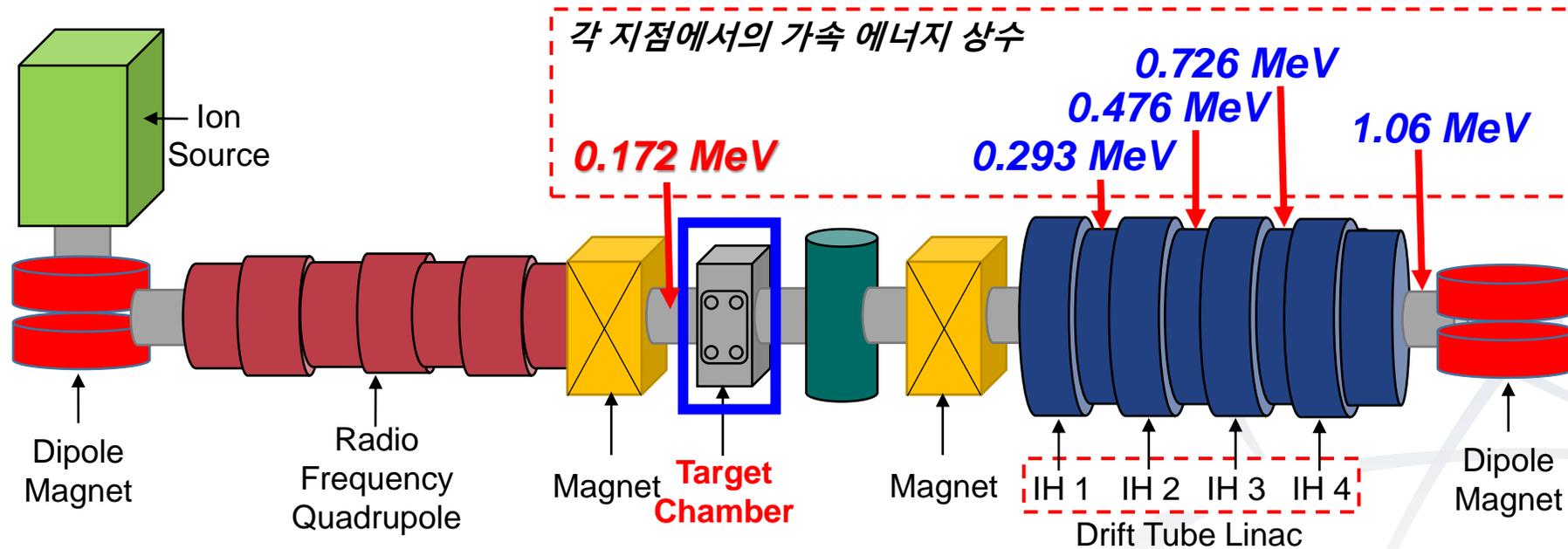
분과	Action Item	연구 내용	진행 방법	소요 기간	소요 비용	진행 연차
가속기	1) 이온원 업그레이드	철 이온발생 MIVOC 적용 가스 조절장치 적용 이온원-가스 자동 조절/제어	장비구매 부품개선	1.5년	9억원대	1,2차 년도
	2) 빔라인 개선	이온빔 A ₀ 전산모사 최적화 LEBT Dipole/PS 개선 LEBT 빔라인(QD Chamber) 개선	전산모사 부품구매	2년	9억원대	2,3차 년도
	3) 진공시스템 개선	진공펌프 (Rotray, TMP) 구매 컨트롤러, 진공게이지 개선	장비구매	2년	9억원대	2,3차 년도
	4) RF 부품 교체/확보	Vacuum Tube 구매 마그네톨론 구매 전송라인, 측정장비 개선	부품구매	1년	9억원대	4차 년도
	5) LLRF 시스템 개발	RF Signal Generator 구매 RFQ-LLRF 개발	장비구매 시스템개발	1.5년	9억원대	4,5차 년도
타겟	1) Sample Plate 개선	Sample Plate 챔버 개선	3D설계 제작/개발	2년	1.5억원 이내	3,4차 년도
	2) 타겟 챔버 업그레이드	로드락 (Loadlock) 시스템 적용 개별 진공시스템 구축	3D설계 제작/개발			
	3) 히팅/쿨링 시스템	승온/정온 히팅/쿨링시스템 적용	부품구매			
관리/제어	1) 빔 진단시스템	CT/CT 시스템 적용 및 모니터링 Wire-Scanner 적용 Beam Energy 측정장치 적용	장비구매	1년	2억원 이내	3차 년도
	2) KAHIF 운영솔루션	이용자 예약이력/빔데이터 관리 빔 데이터 (Log) 시스템 빔 결과 (appm, dpa) 추산	프로그램설계/ 적용	1.5년	2억원 이내	4,5차 년도
	3) 통합 제어시스템	가속기 모듈 제어화 타겟 모듈 제어화 모니터링/인터락 모듈 제어화 통합 EPICS 제어시스템 개발	프로그램설계/ 적용 서버구매			

04 Upgrade Plans

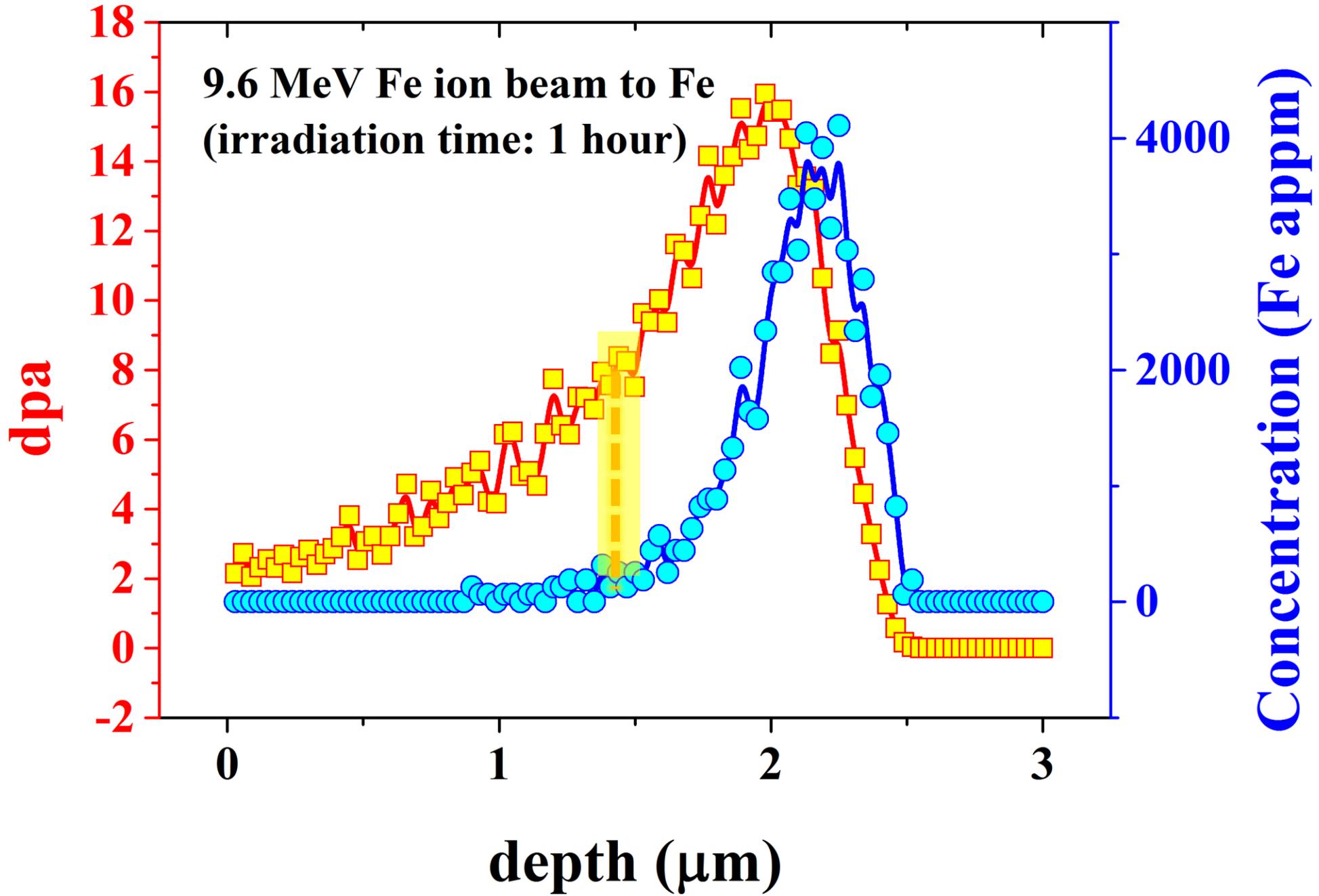
SRIM 시뮬레이션을 이용한 재료손상 평가에서의 Fe 이온 평가

KAHIF 이온 가속 에너지 계산

핵자 한 개의 가속 에너지 상수(MeV) × 가속할 이온의 핵자 수(개) = 이온 입자의 가속 에너지(MeV)

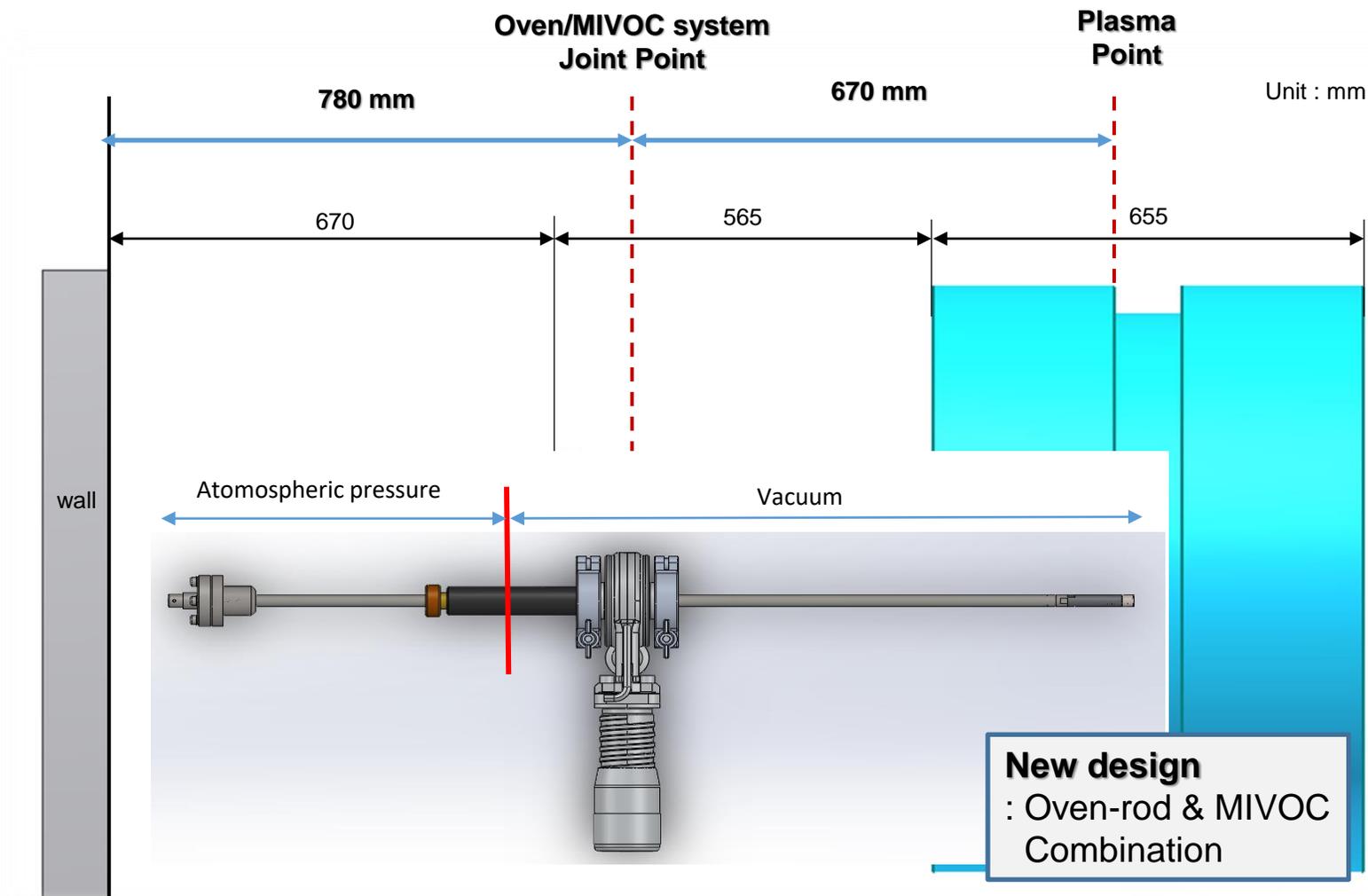


- KAHIF의 주요 구성 개요 및 가속구간별 핵자 한개의 가속 에너지 상수 .

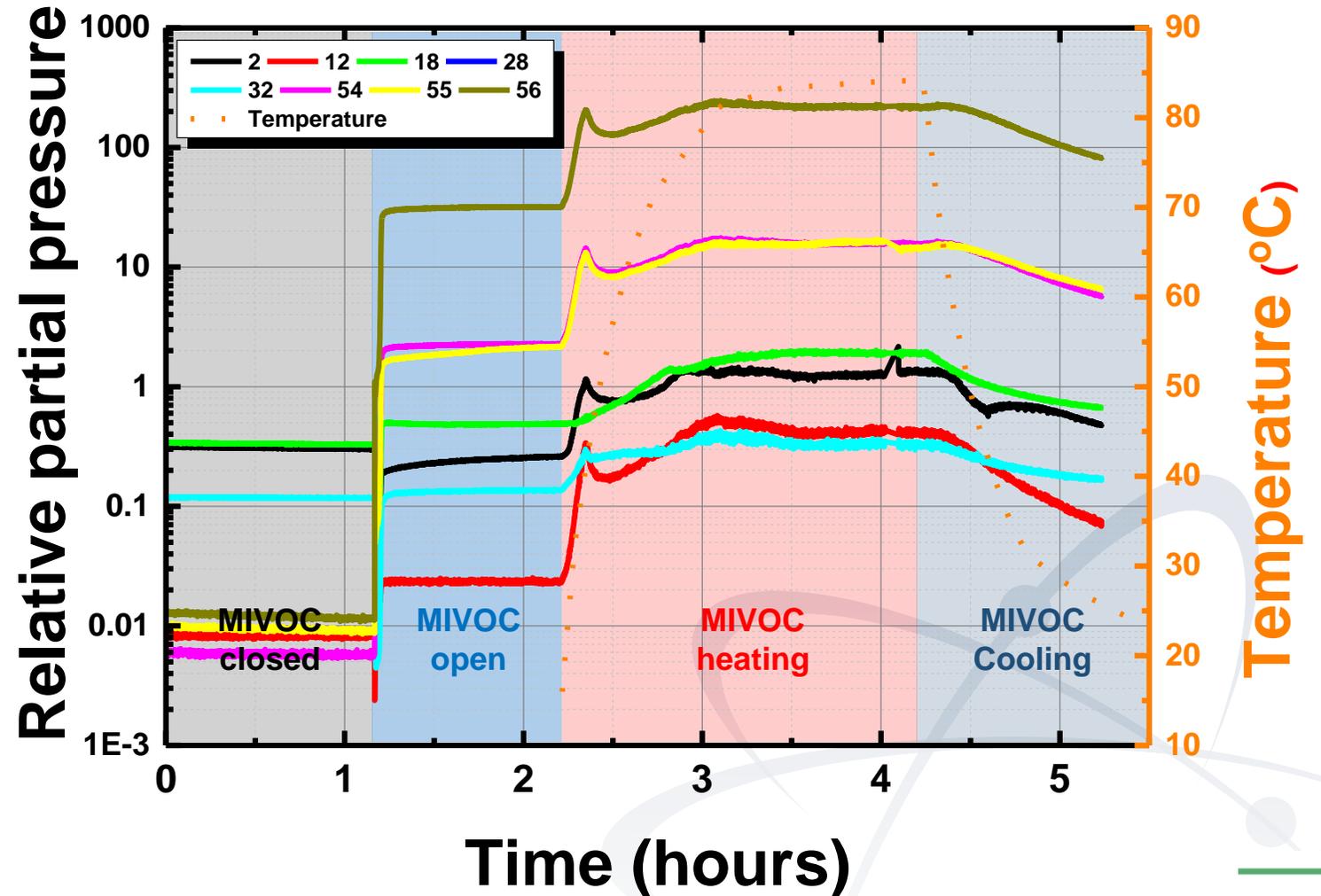
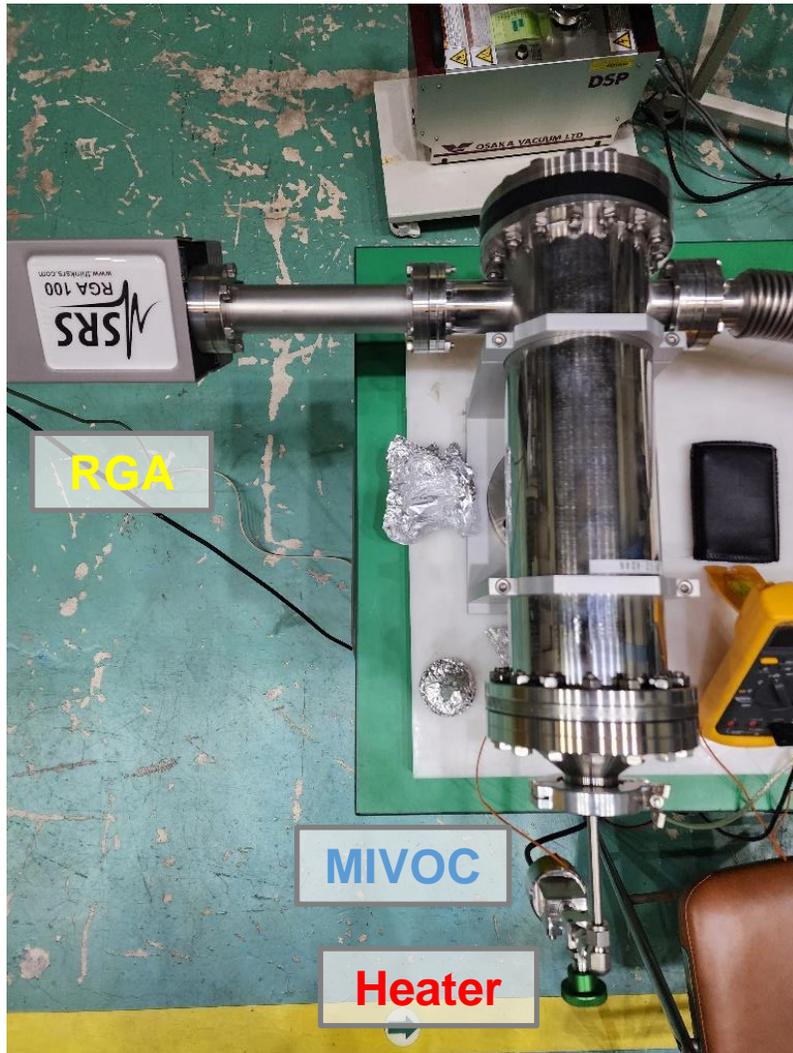


04 Upgrade Plans

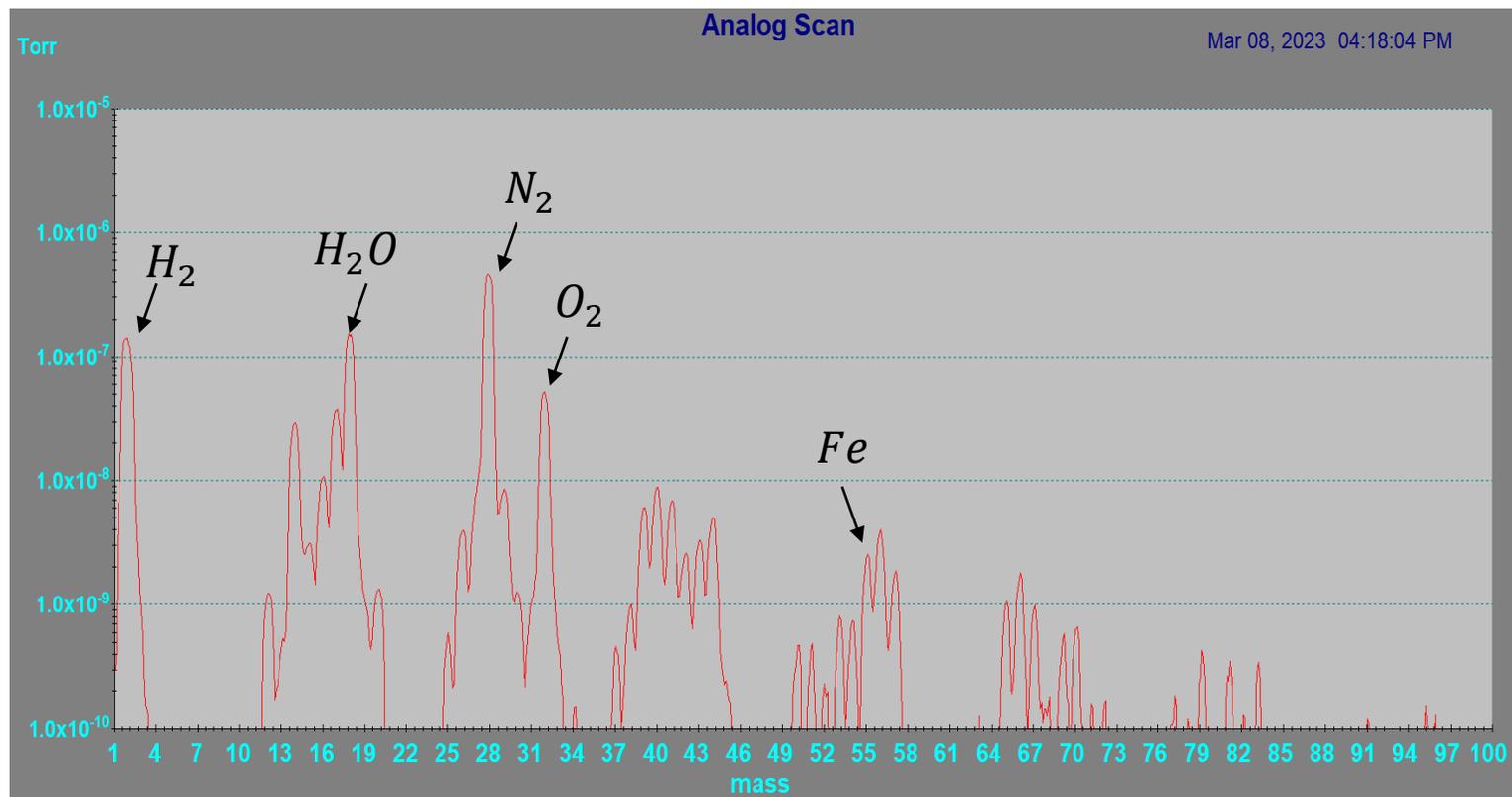
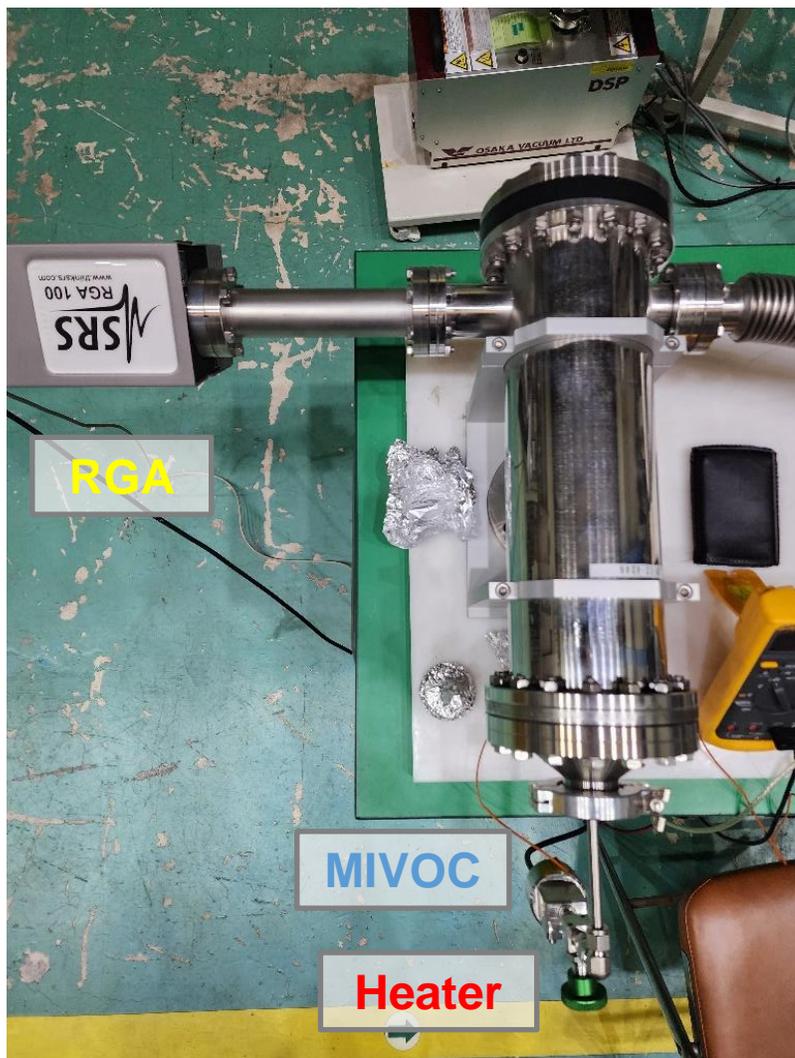
Fe 이온 발생용 MIVOC (Metal Ions from Volatile Compound method) 시스템



Fe 이온 MIVOC Local-test (23.03~23.05.)



Fe 이온 MIVOC Local-test (23.03~23.05.)





Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

Conclusion

05

04 Conclusion : Final goal



THANK YOU