

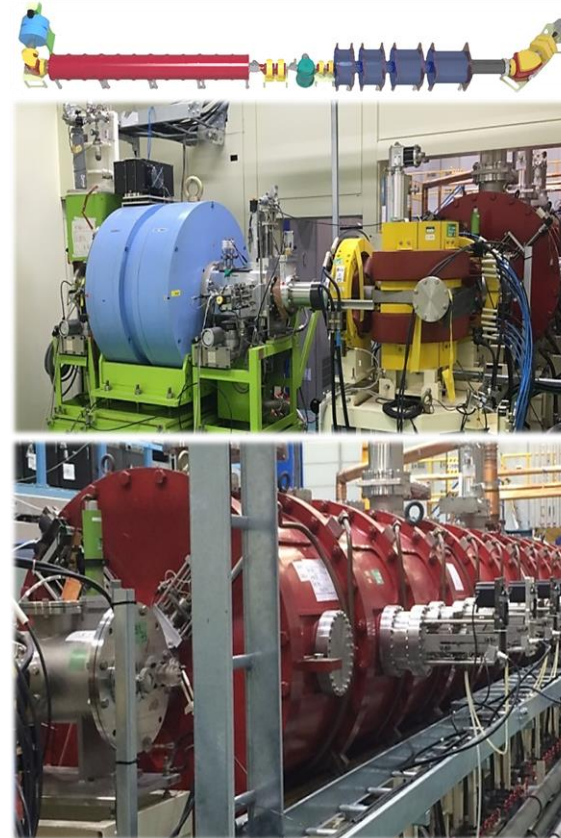
A nuclear research institute
reshaping the future
based on **peoples trust**



Recent progress on Fe ion beam production in KAHIF

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

2023/10/26



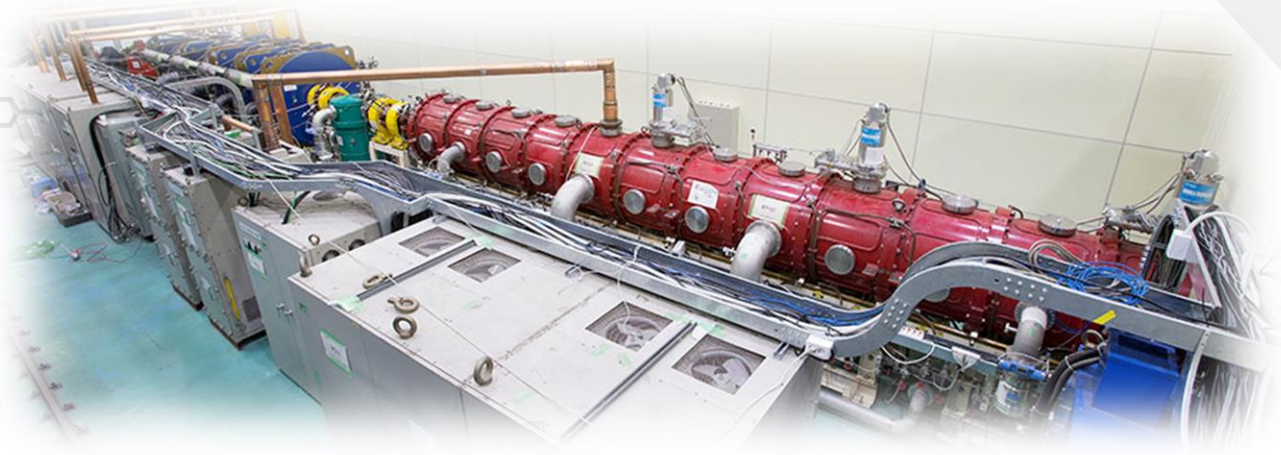
*A nuclear research institute
reshaping the future based on peoples trust*



Korea Atomic Energy
Research Institute

- 01** Introduction
- 02** Overview of a KAHIF
- 03** Fe ion beam preparation
- 04** Conclusion

CONTENTS



Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS fall

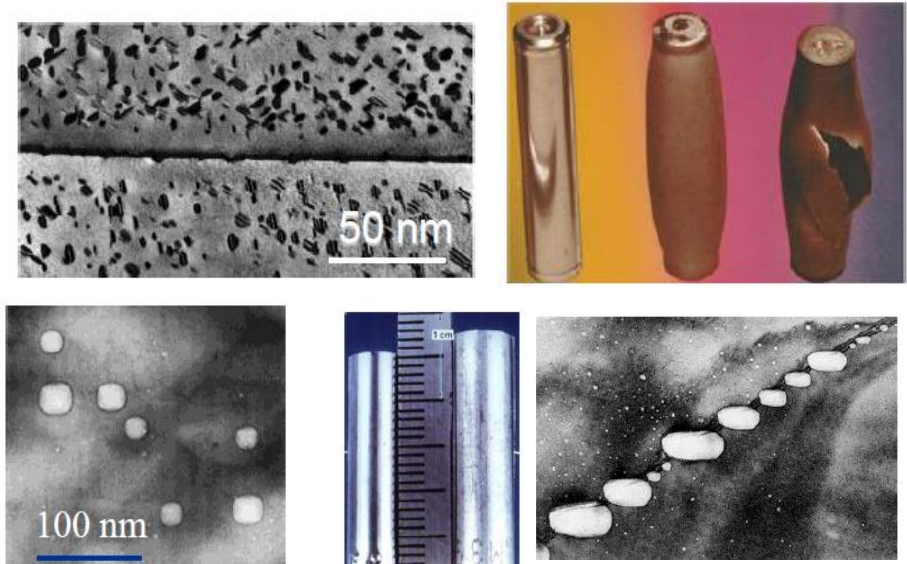
Introduction

01

01 Introduction

• 핵융합 재료 조사 영향 평가

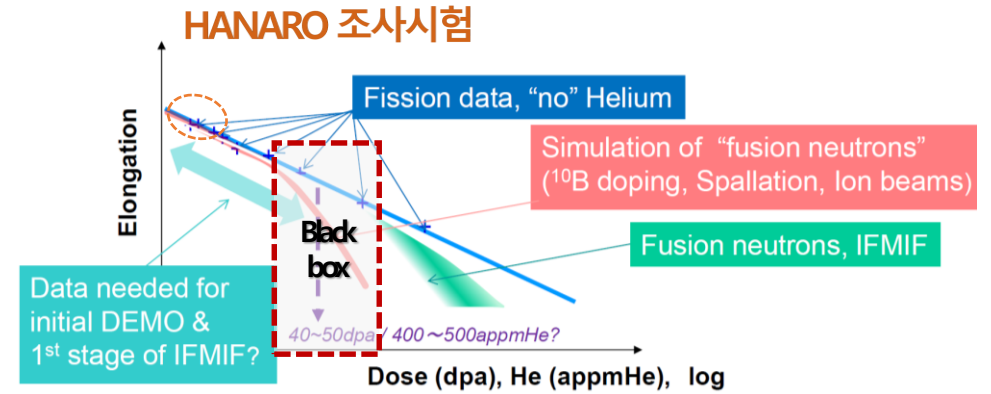
- ✓ 원자력 핵분열 및 핵융합 반응에서 다량 발생하는 중성자는 핵연료피복관, 구조재 및 구조부품의 건전성과 기능에 부정적 영향이 생김
- ✓ 핵융합은 경수로의 100배, Gen-IV (고속로) 수준 혹은 그 이상의 조사량 예상 (> 150 dpa)
- ✓ 핵융합 재료 요건 및 개발 방향
: 조사 저항성, 고온 운전온도, 냉각재와의 부합성
- ✓ 중이온가속기 이용, 중이온빔 조사를 통한
조사실험 연구 기간을 크게 단축할 수 있음



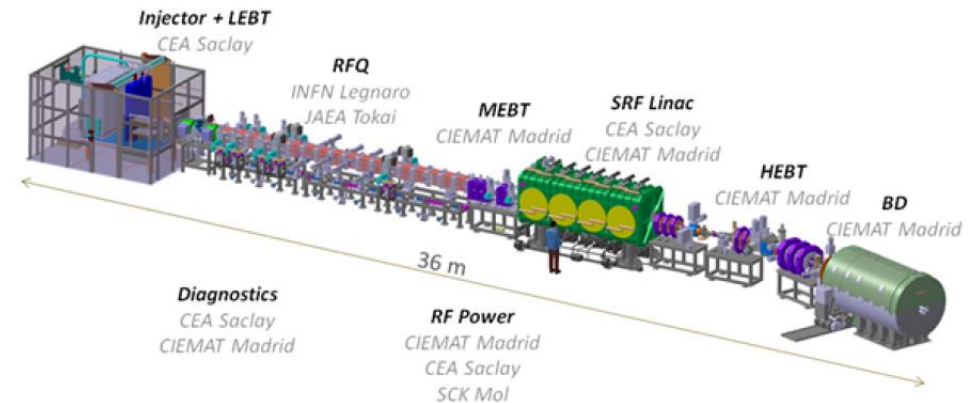
	Fission (Gen. I)	Fission (Gen. IV)	Fusion (DEMO-PROTO)	Spallation (MYRRHA)
Structural alloy T_{max}	<300°C	500-1000°C	550-1000°C	400-600°C
Max dose for core internal structures	~1 dpa	~30-150 dpa	~50-150 dpa	≤60 dpa/fpy
Max transmutation helium concentration	~0.1 appm	~3-10 appm	~500-1500 appm (~8 times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

01 Introduction

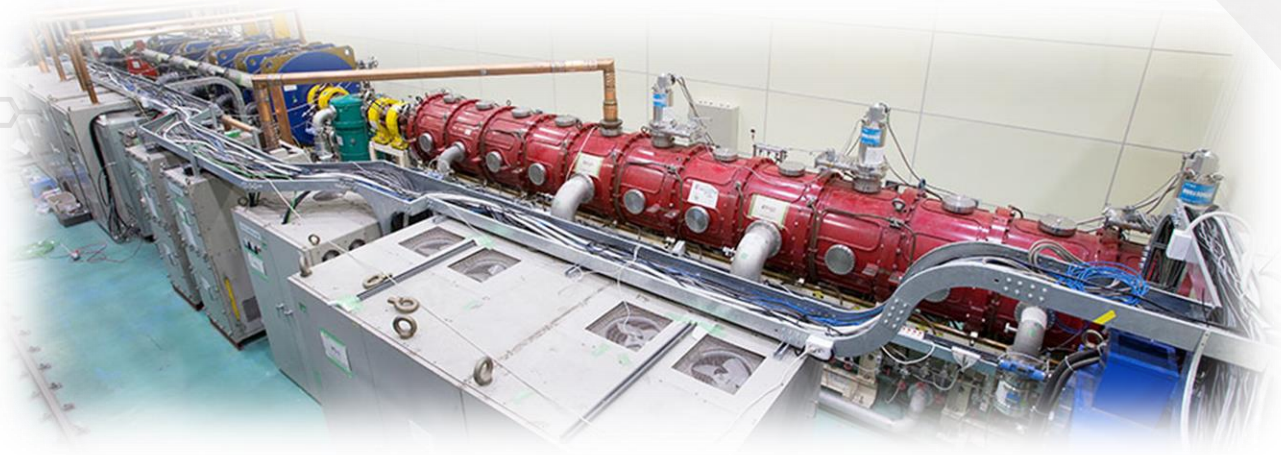
- 중성자조사손상 모사 실험시설
 - 원자로(연구로/경수로/고속로)활용 : He 영향 평가 불가
 - 14 MeV D-T 반응 대비, IFMIF 구축 (가속기 기반)
 - : 천문학적 구축 비용 소요
- 중이온가속기 활용 : 재료 및 구조재 개발/평가 단계에서 조사성능 검증/보완의 **가속 모사 연구 가능**
 - ✓ 해외 시설의 빔타임 제한, 시험비 등 국내 수요 대응 필요
 - ✓ 핵반응 없이, 별도의 방사능/방사선 관리 필요 없음
 - ✓ 다양한 이온종을 활용한 조사 손상 특성 평가 가능함



● 이온빔 조사손상 연구의 필요성



● IFMIF : 핵융합로 재료 연구를 위한 국제핵융합재료조사장치



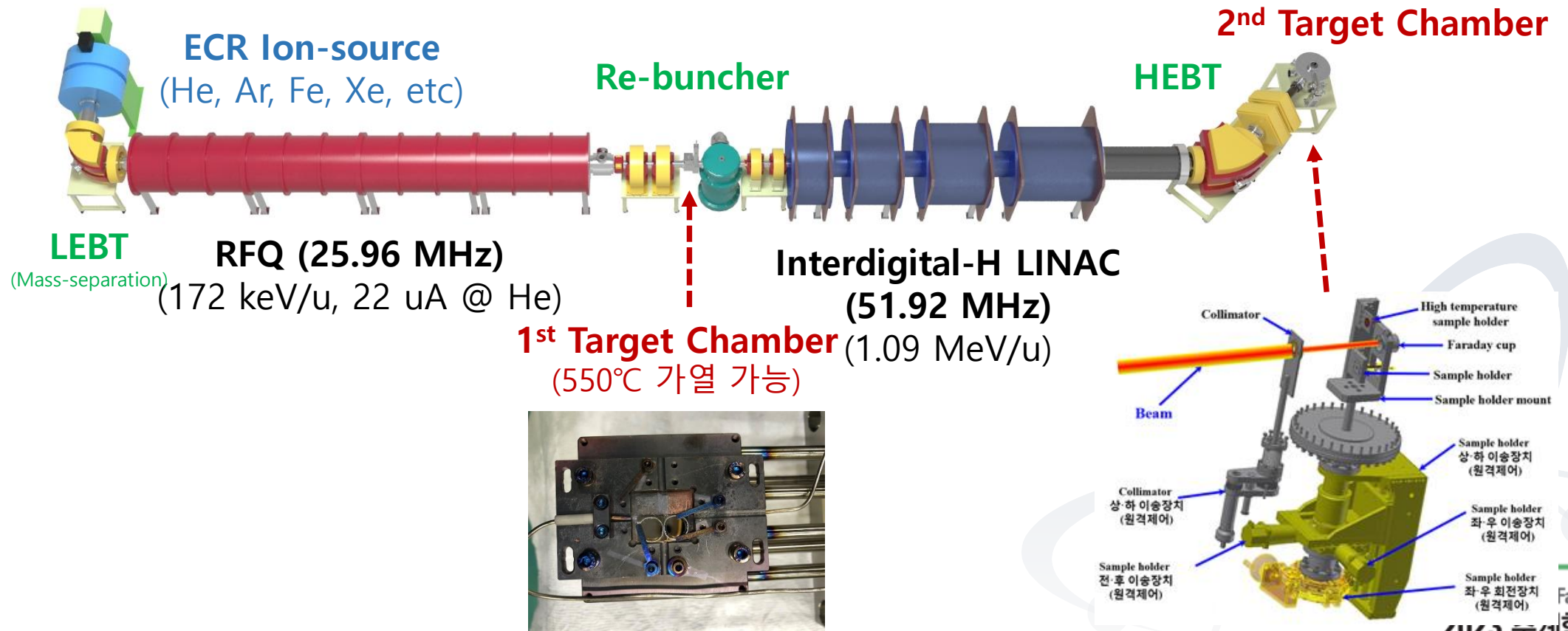
Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

Overview of a KAHIF

02

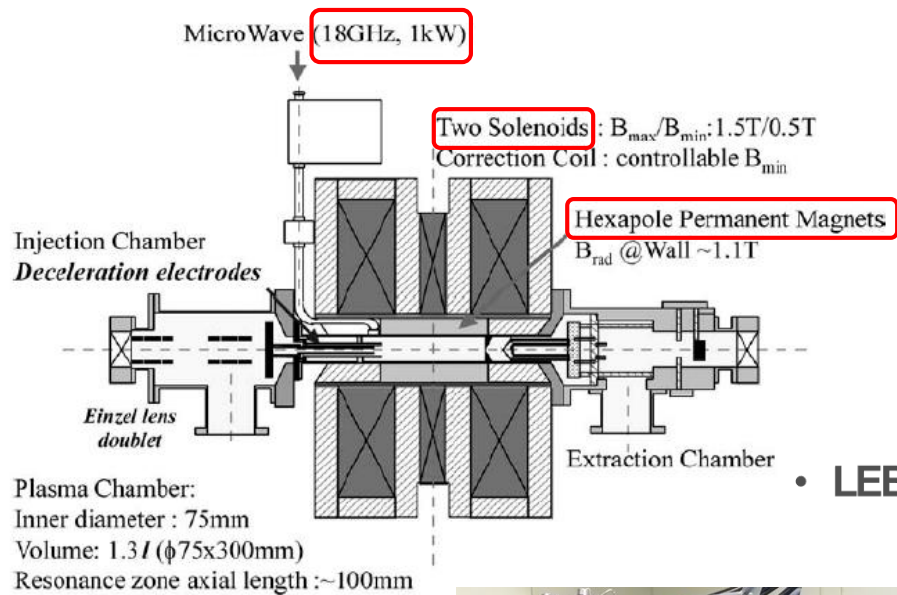
02 Overview of a KAHIF

- 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

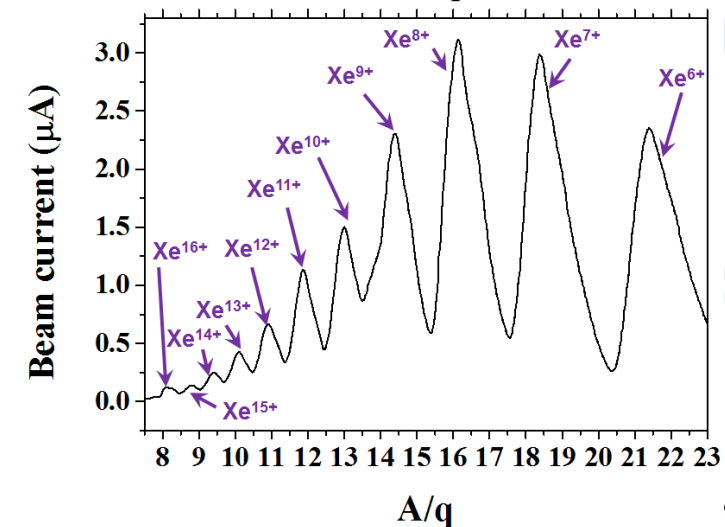
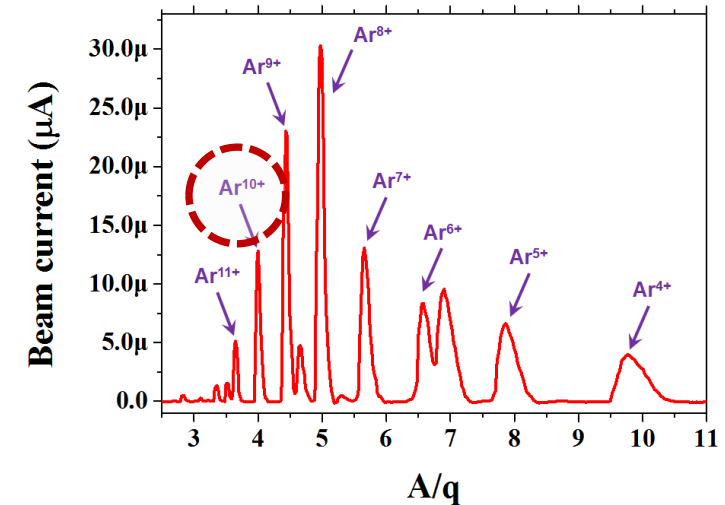
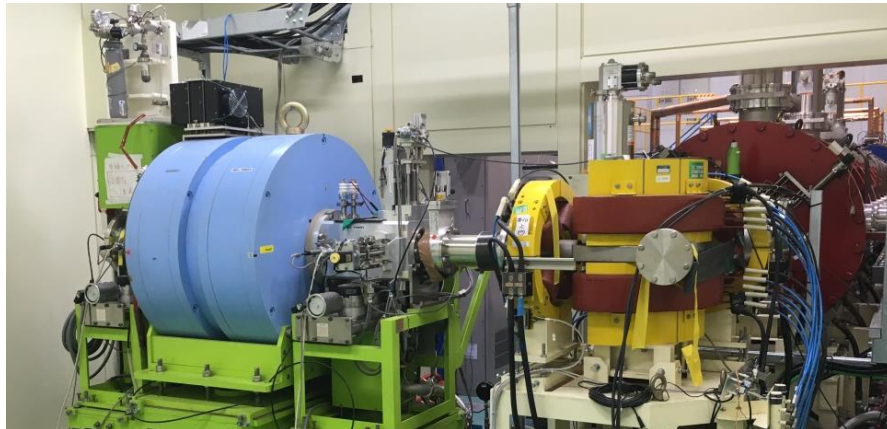


02 Overview of a KAHIF

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

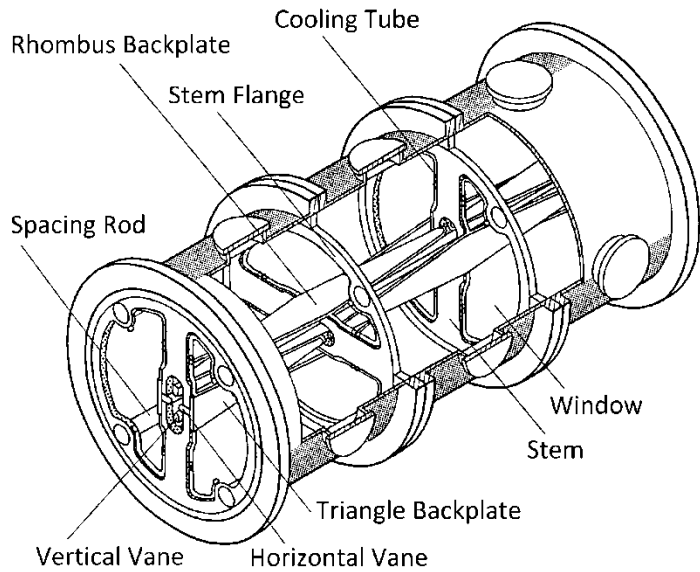


- LEBT bending magnet 이용 :
Mass separation

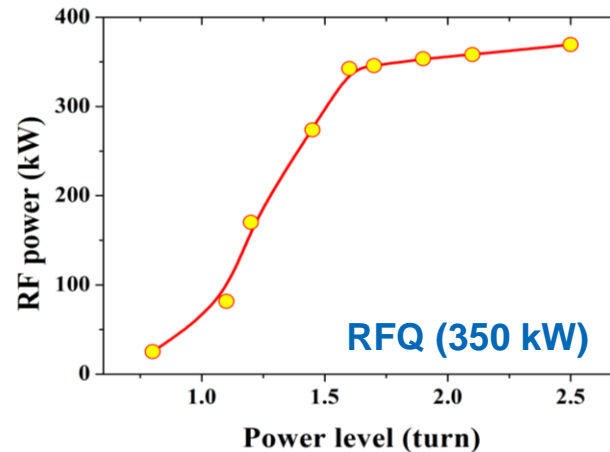
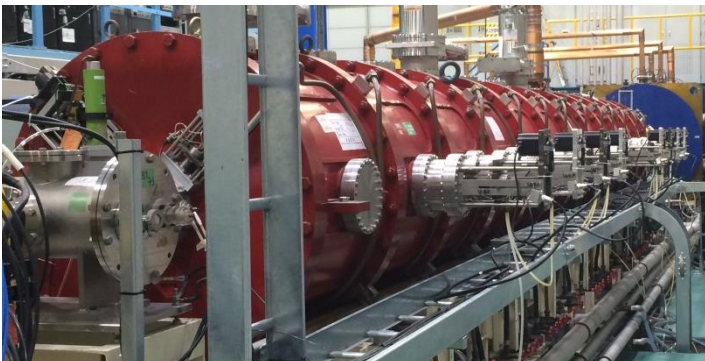
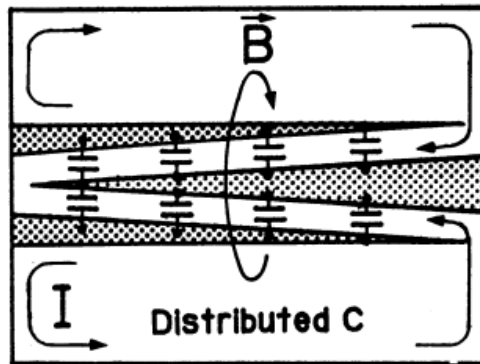


02 Overview of a KAHIF

• Split-coaxial (SC) RFQ 성능 검증



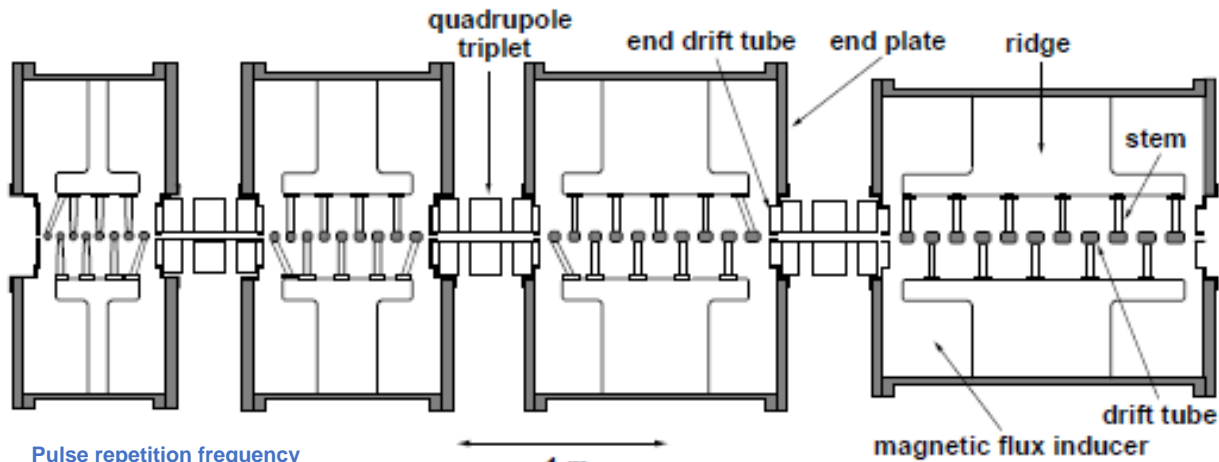
Split Coaxial Cavity



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

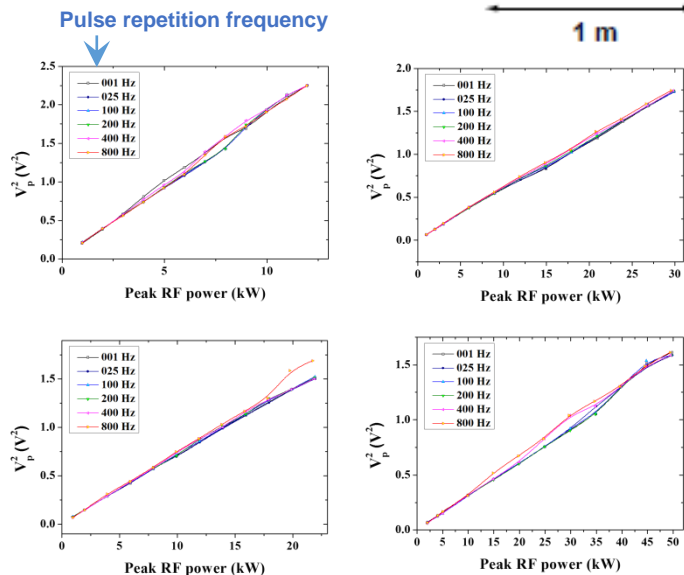
02 Overview of a KAHIF

• 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

- 방사선차폐 & 방사선인허가 (KINS)



차폐시설 실시간 모니터링 시스템 (Video & RMS)



Fe Target reaction products (by Geant4)								
number of event: 10000								
Incident particle	He	product	Ar	product	Fe	product	Ag	product
Energy	5 MeV	X	50 MeV	X	100 MeV	X	400 MeV	X
	10 MeV	X	100 MeV	X	200 MeV	X	450 MeV	X
	15 MeV	n: 1 γ: 2 Fe56: 1 Ni59: 1	150 MeV	e-: 10 n: 3 p: 2 γ: 9 Mo91: 1	250 MeV	e-: 16 n: 2 p: 2 γ: 13 α: 1 Cd104: 1	500 MeV	e-: 18 e+: 1 n: 3 p: 1 γ: 8 Fe56: 1 Hf160: 1

- 최소 방사화에너지: >5.0 MeV/n
- KAHIF 제한: ~ 1.02 MeV/n
- X-선 차폐만 고려하여도 충분함

e-: electron
e+: positron
n: neutron
p: proton
γ: gamma
α: alpha

발급번호 : 220501432
[발급]
제 21-005-85 호

방사선발생장치사용허가증
(한국원자력연구원)

- 상 소 : 한국동지화학주식회사
- 주 소 : 대전광역시 유성구 대덕대로 99번길 11(덕진동 150-1)
- 설비명 : 방사선 발생장치 사용허가증 314-08-008 3
- 방사선 발생장치의 종류, 대수 및 용량
상세내역 별첨
- 사용목적 : 방사선 발생장치 사용허가증 314-08-008 3
- 상세내역 별첨
- 위조조각 : 상세내역 별첨
- 허가일자 : 1999.04.22
허위 열이 '핵안전위원회, 제23호 및 같은 법 시행규칙 제30조제4항에 따라 방사선발생장치의 사용을 허가합니다.'

2023년 4월 25일
[인도인]
원자력안전위원회

발급번호 : 220600448
[발급]
제 21-005-85 호

방사선발생장치 상세내역
(한국원자력연구원)

사용장소	종류	방사선량	상호	대수
중성자 방사선 발생장치 200호	핵소분열방사선 발생장치	200 kV 20 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 201호	중성자 방사선 발생장치	5 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 202호	중성자 방사선 발생장치	10 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 203호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 204호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 205호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 206호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 207호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 208호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 209호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 210호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 211호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 212호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 213호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 214호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 215호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 216호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 217호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 218호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 219호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1
중성자 방사선 발생장치 220호	중성자 방사선 발생장치	100 kV 0.1 mA	상호	1

3. 사용목적 : 방사선 발생장치 사용허가증 314-08-008 3

4. 사용장소 : 방사선 발생장치 사용허가증 314-08-008 3

5. 허가일자 : 1999.04.22
허위 열이 '핵안전위원회, 제23호 및 같은 법 시행규칙 제30조제4항에 따라 방사선발생장치의 사용을 허가합니다.'

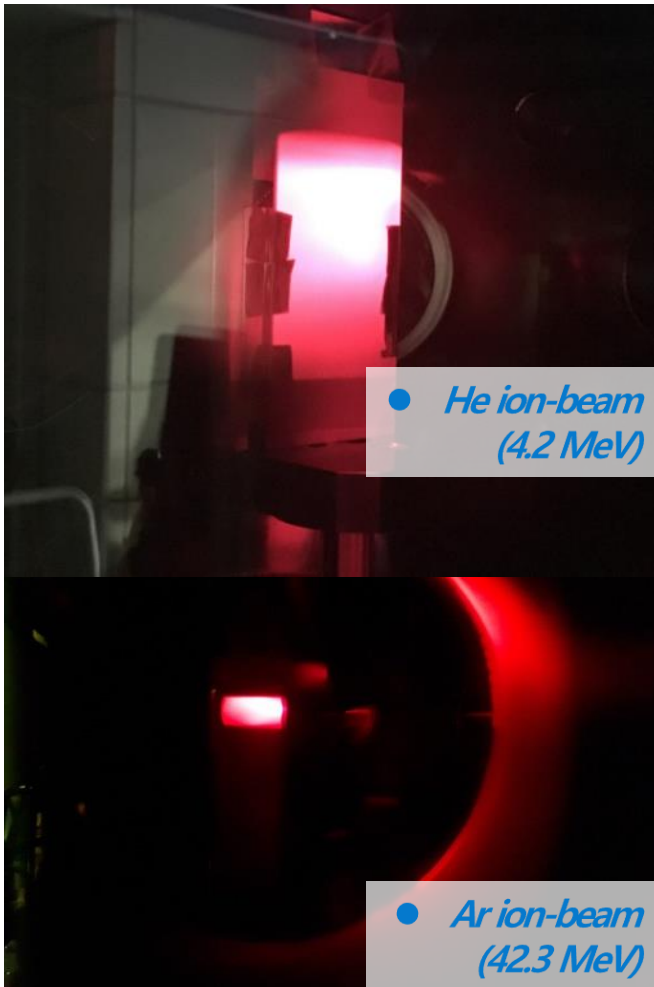
2023년 4월 25일
[인도인]
원자력안전위원회

원자력안전위원회

• KAHIF RG 사용허가증 (22년4월 갱신)

02 Overview of a KAHIF

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

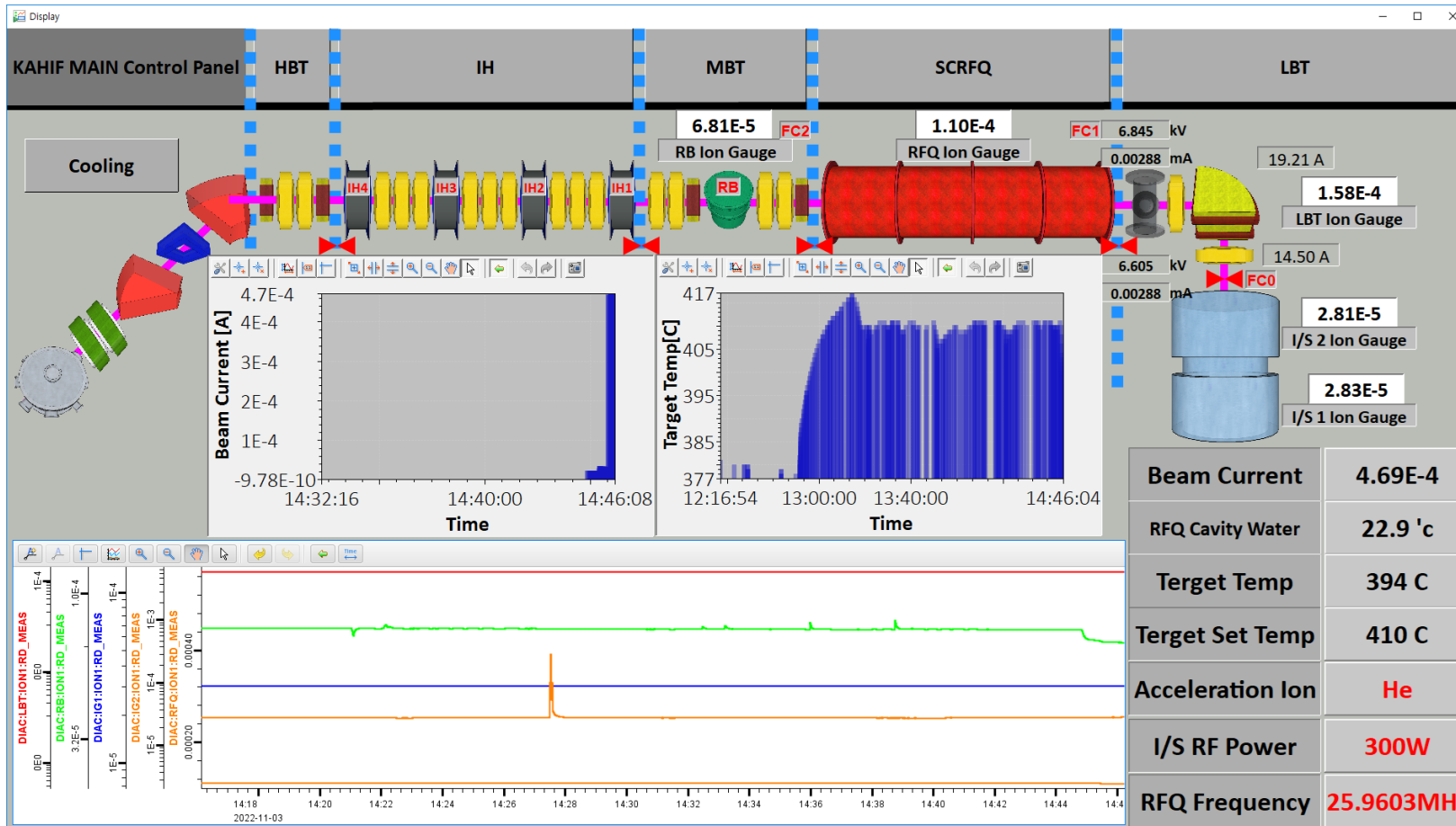


	SCRFAQ On	IH1 On	IH2 On	IH3 On	IH4 On	최종 빔에너지
SCRFAQ mode	O	X	X	X	X	172 keV/u
IH1 Mode	O	O	X	X	X	293 keV/u
IH2 Mode	O	O	O	X	X	476 keV/u
IH3 Mode	O	O	O	O	X	726 keV/u
IH4 Mode	O	O	O	O	O	1.06 MeV/u

	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	

02 Overview of a KAHIF

- 22년부터 내/외부 빔 서비스 수행 중



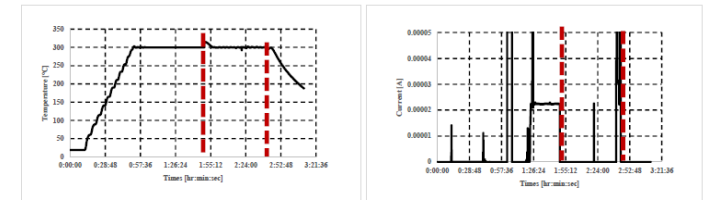
Korea Atomic Energy Research Insitutue Heavy Ion Irradiation Facility



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	5x10 ¹⁶ ions/cm ²	

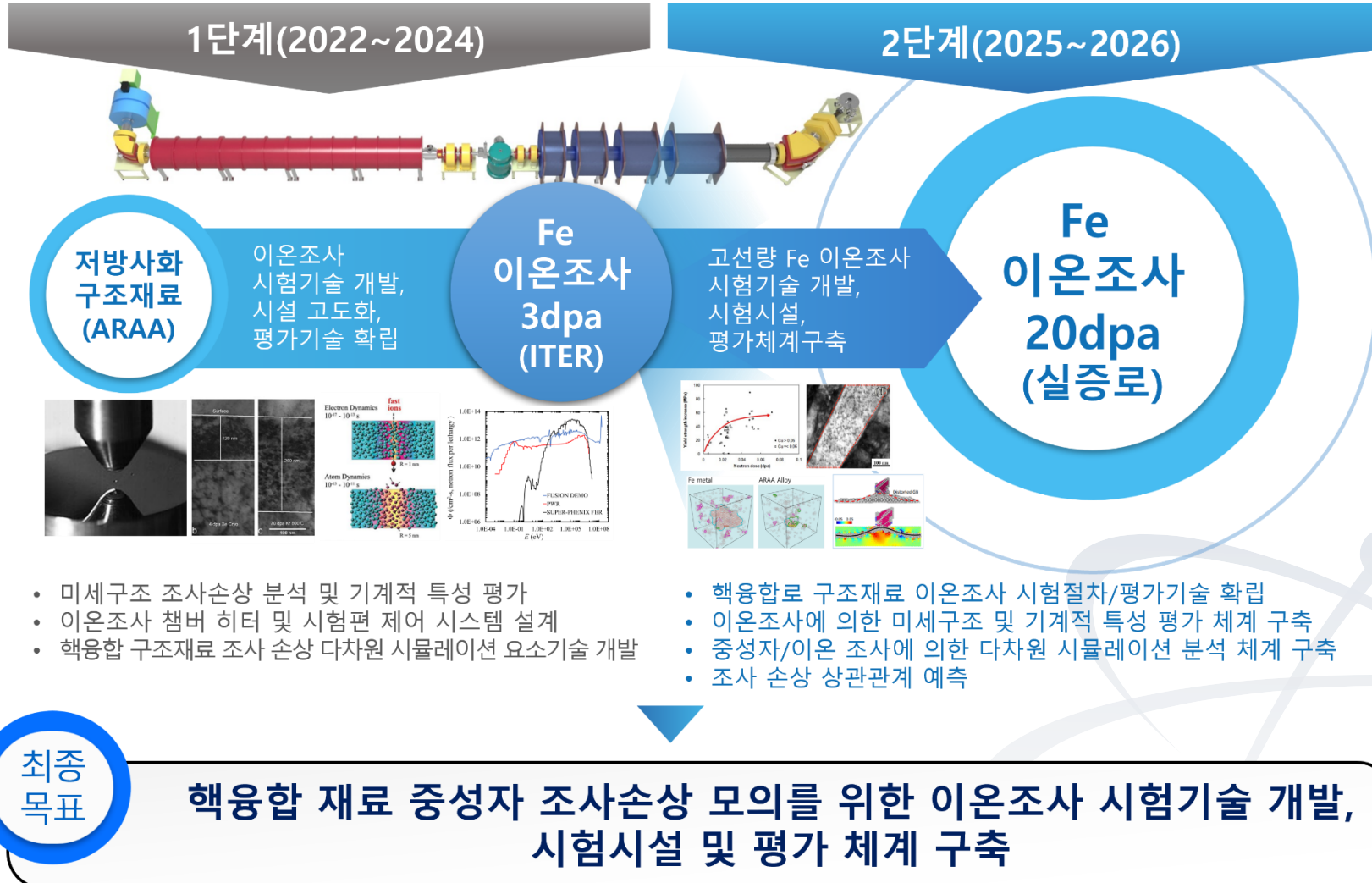
7 Results

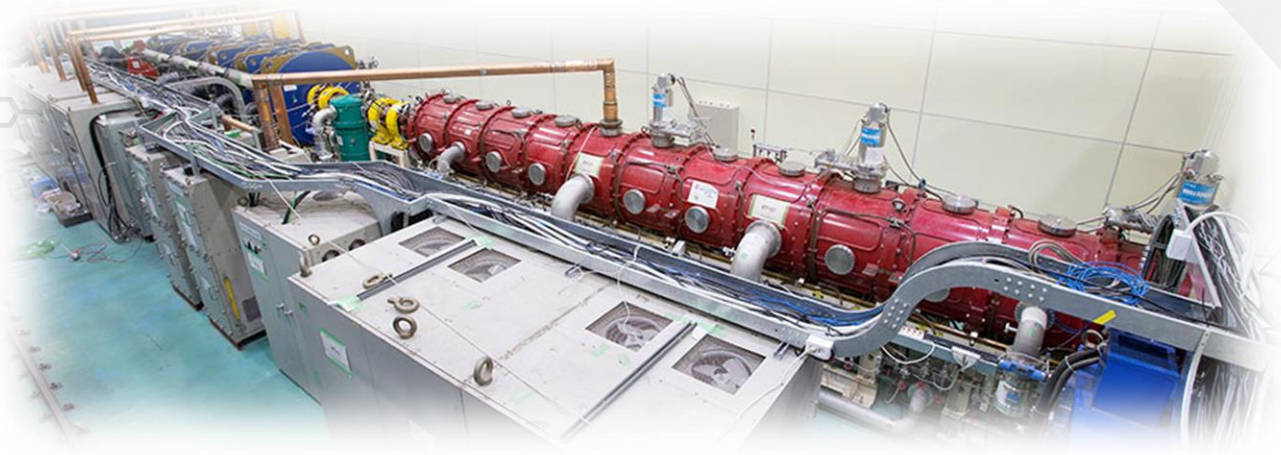


Report Date	2023-04-21	
Complied by	핵물리응용연구부 이상빈 (signature)	
Approved by	핵물리응용연구부 이승현 (signature)	
Testing Laboratory Name	하나로양자과학연구소 핵물리응용연구부	
Address	KAERI 중합ENG동 (C26) 104-1호 (사무실) KAERI 중합ENG동 (C26) 208호 (실험/제어실)	

02 Overview of a KAHIF

- 과기부 핵융합선도기술개발사업 (선도기술센터) 과제 수행중





Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

Preparation of Fe ion beam

03

03 Preparation of Fe ion beam

DPA & Concentration calculation : SRIM simulation

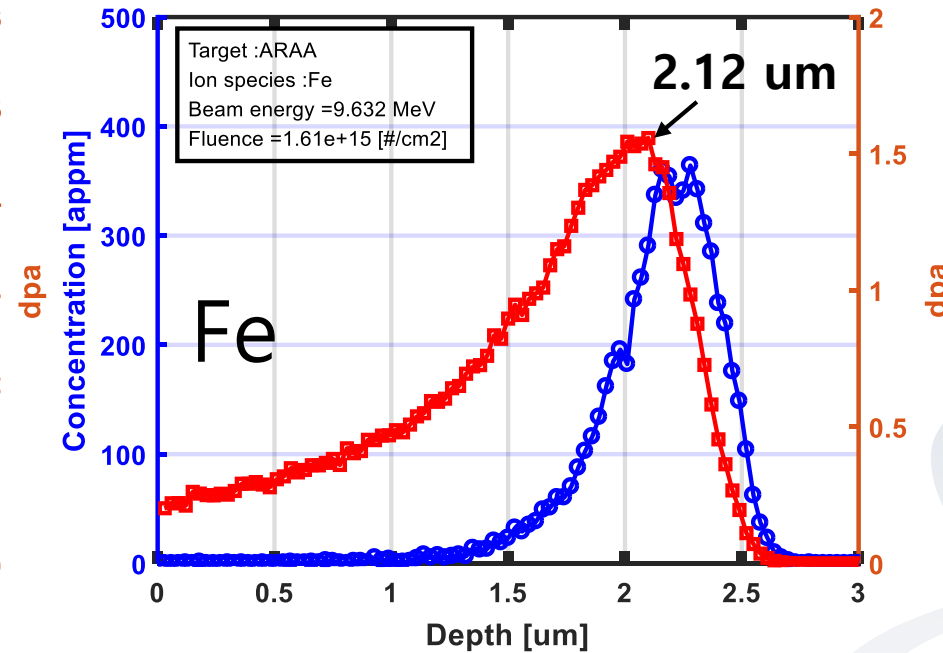
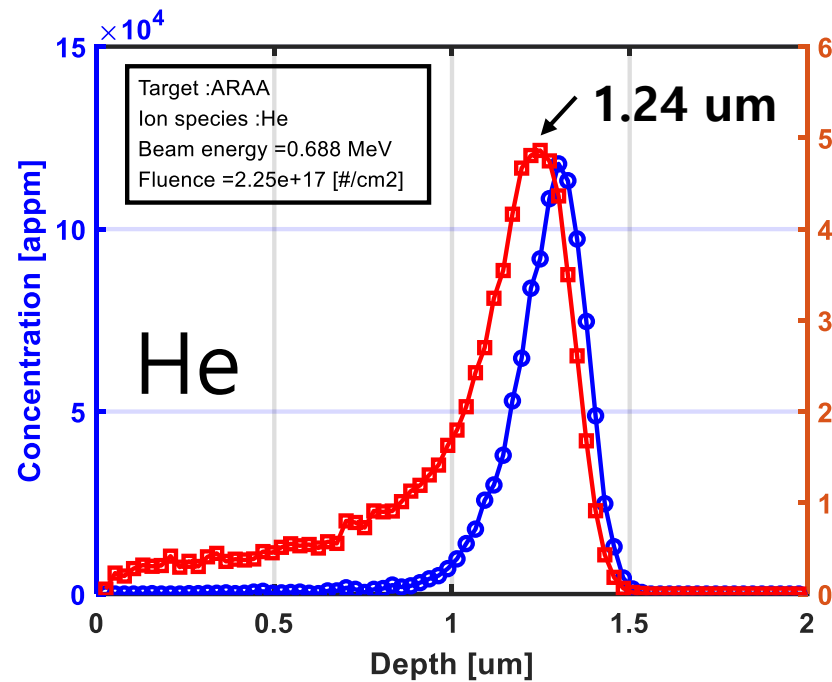
< ARAA 타겟에 대한 헬륨 및 철 이온빔 1시간 조사 시 계산결과 >

Beam condition

Parameters	He	Fe (Under preparing)
Mass	4	55.8
Charge	2	14
Energy	0.688 MeV	9.632 MeV
Current	20 μ A	1 μ A (expected)
Fluence(1hr)	$2.3 \times 10^{17} / \text{cm}^2$	$1.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$

Target condition

Component s	Wt.%	Fe (Under preparing)
Cr	9	40
W	1.2	90
Mn	0.45	40
V	0.2	25
C	0.1	28
Si	0.1	15
Ta	0.07	90
N	0.01	28
Ti	0.01	25
Zr	0.01	40
Fe	Balanced	40



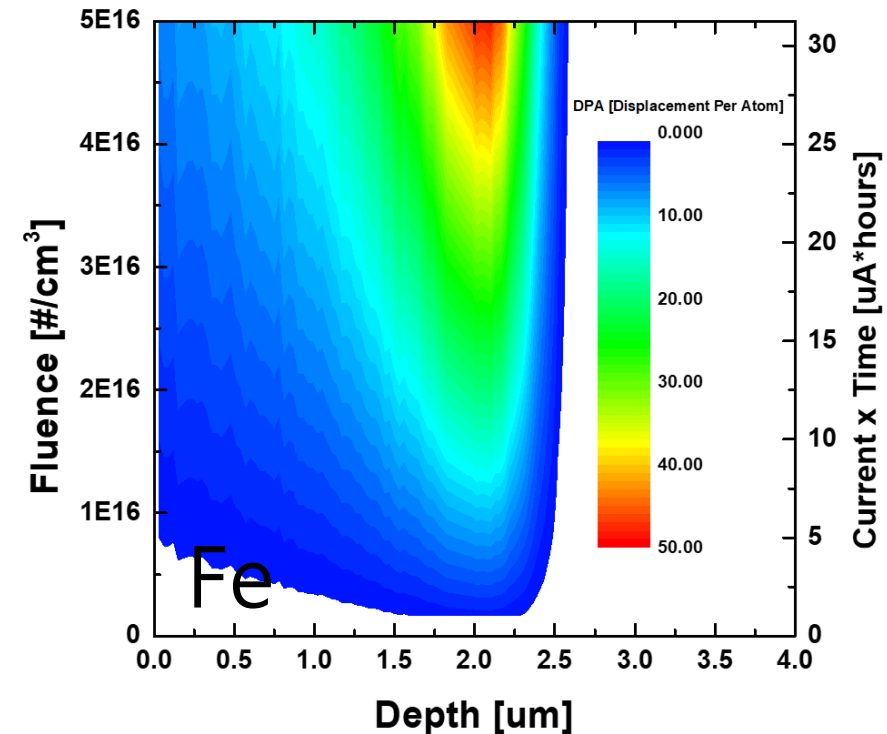
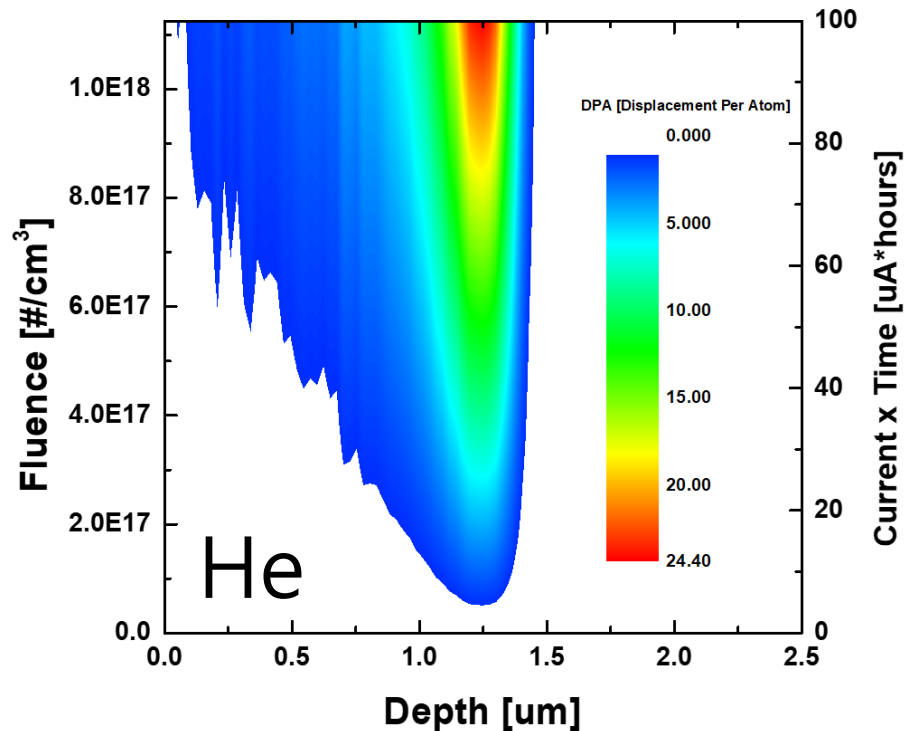
03 Preparation of Fe ion beam

DPA & Concentration calculation : SRIM simulation

< Ion beam irradiation experiment guidance (DPA contour plot)>

Beam Area : 1 cm^2 (Assumption)

$$\text{Fluence} = \frac{N}{A} = \frac{Nqt}{Aqt} = \frac{1}{Aq} It$$

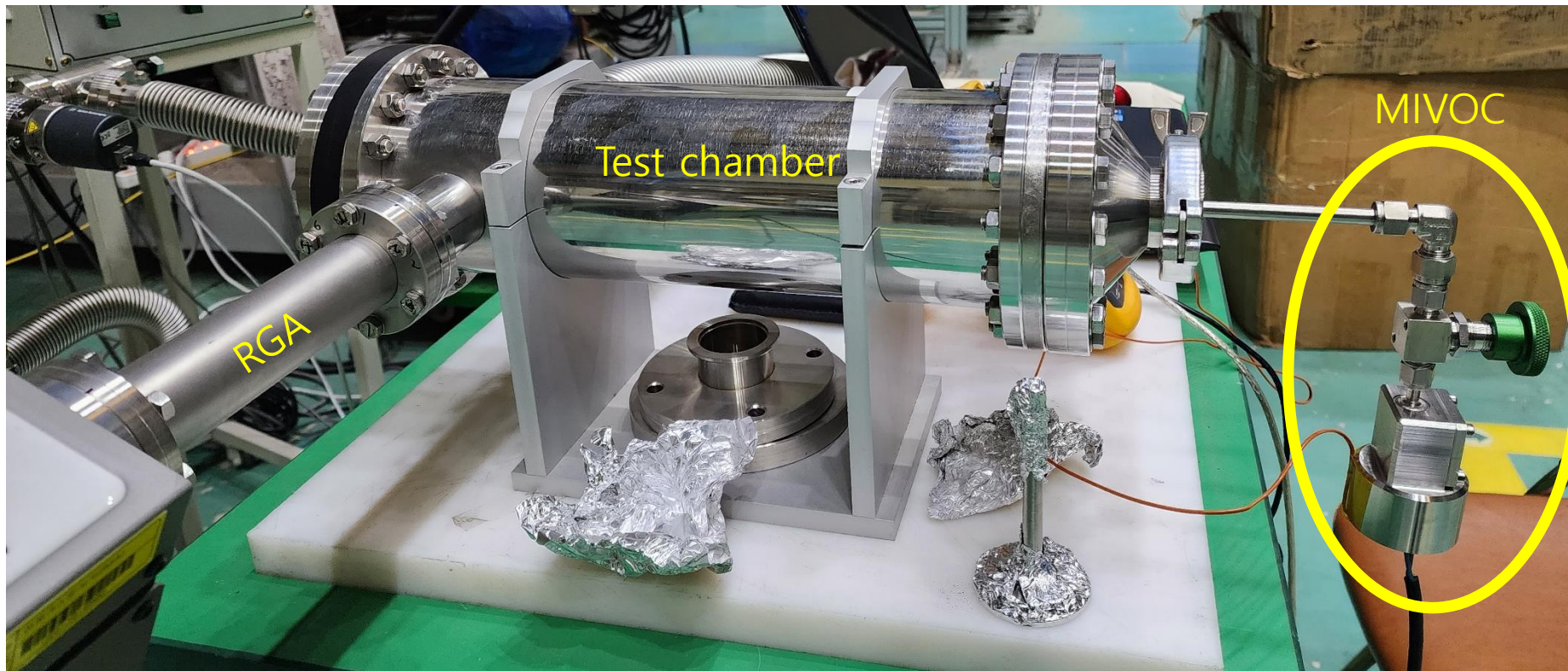


03 Preparation of Fe ion beam

Preliminary MIVOC system test : RGA measurement in test chamber

ECR Plasma chamber volume : 1.3liter (diameter : 75mm / length : 300 mm)

Test chamber volume : 3.2liter (diameter : 100 mm / length : 410 mm)

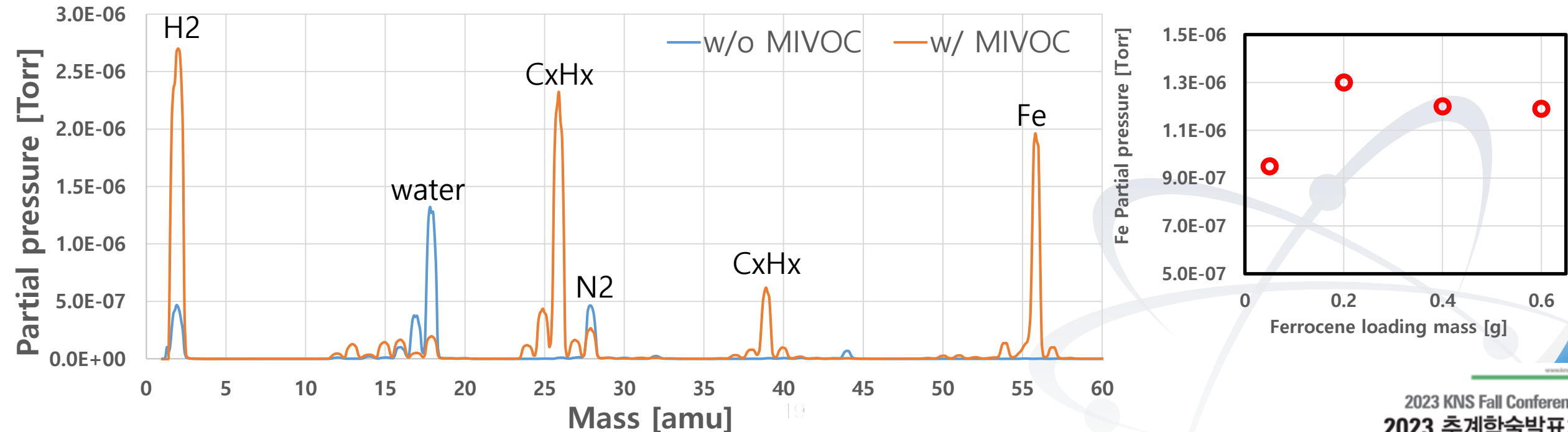


03 Preparation of Fe ion beam

Preliminary MIVOC system test : RGA measurement in test chamber

< Analog scan results >

- partial pressure of Fe (mass number : 56) = $2E-5$ Torr
- Total pressure (RGA measured) : $6.71E-5$ Torr
- ECR ion source operation pressure for Ar, He : $5E-6$ mbar (= $3.8E-6$ Torr)
- Ferrocene loading 양에 따른 철 분압 측정 결과 0.2g 이상에서 $1.2E-6$ Torr 수준으로 포화되어 일정하게 유지됨.

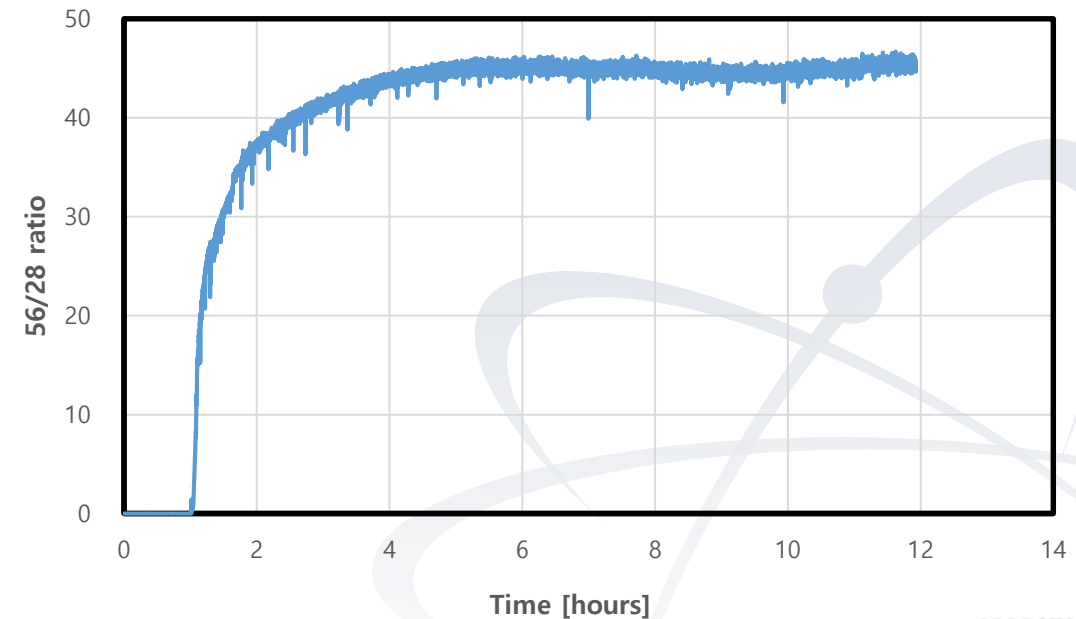
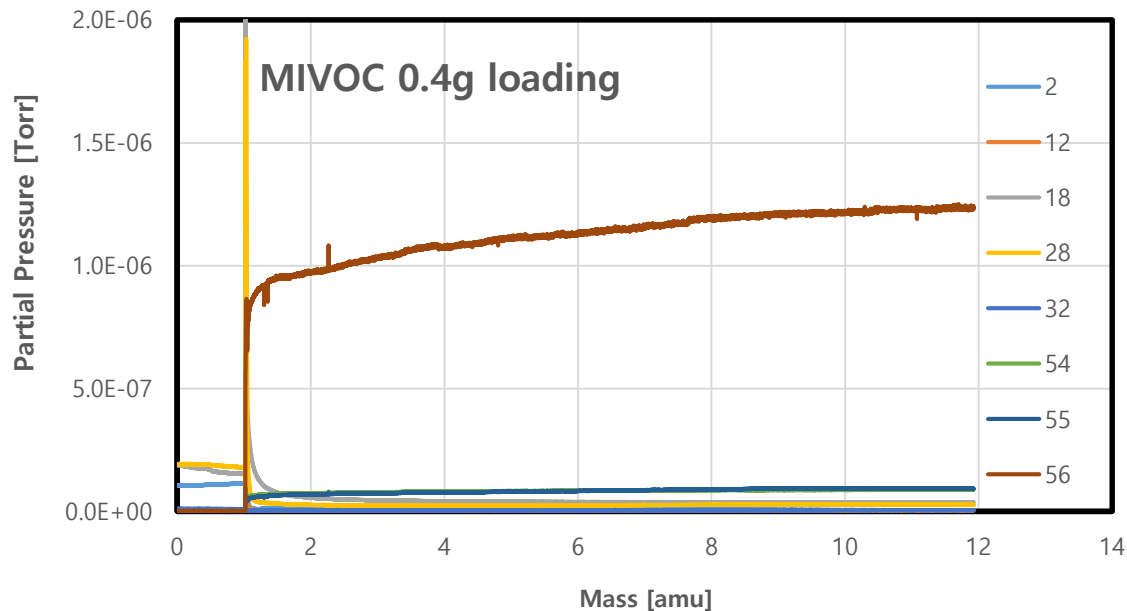


03 Preparation of Fe ion beam

Preliminary MIVOC system test : RGA measurement in test chamber

< Long time operation stability test of MIVOC system >

- 0.4g loading 후 시간에 따라 철분압 변화 측정시 10 시간 이상 분압 감소없이 잘 유지됨.
- 시간에 따라 오히려 증가하는 경향이 보이거나, 질소(mass 28) 대한 비율로 환산시 일정한 것으로 보아 온도 변화 혹은 RGA 감도에 의한 변화로 보임.



03 Preparation of Fe ion beam

Preliminary MIVOC system test : RGA measurement in test chamber

< Comparison of Ionization energy : Ar, Fe >

- KAHIF 선형가속기에서 가속을 위한 조건 : $A/q = 4$ ($A/q < 9$)
- ECR 이온원에서 플라즈마 발생 후 Bending magnet을 이용하여 He^+ , Ar^{9+} 선별적 추출 후 안정적으로 빔서비스 진행중.
- Fe(Atomic mass = 55.8)의 경우 Fe^{14+} 필요.
- Ar^{9+} 보다 낮은 이온화 에너지를 가지고 있으므로 충분한 Fe 중성입자만 공급된다면 Fe^{14+} 를 얻는 것은 가능할 것으로 예상

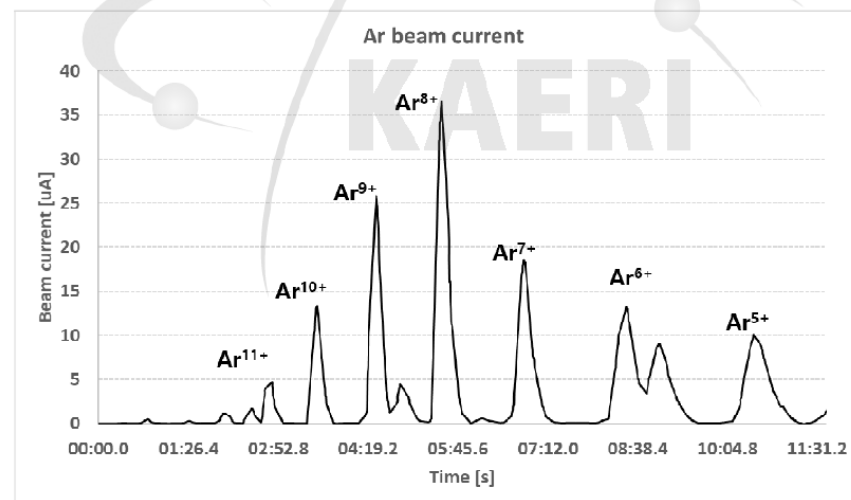
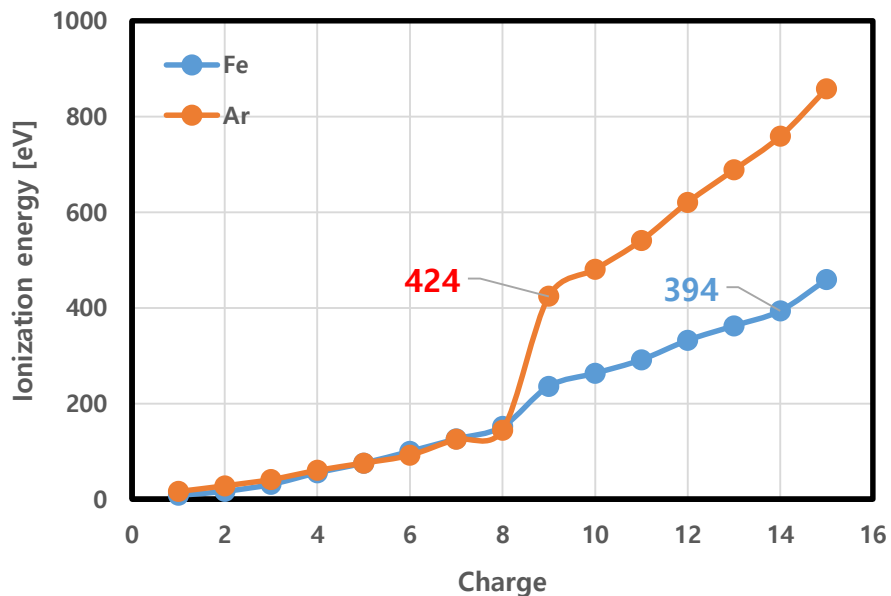
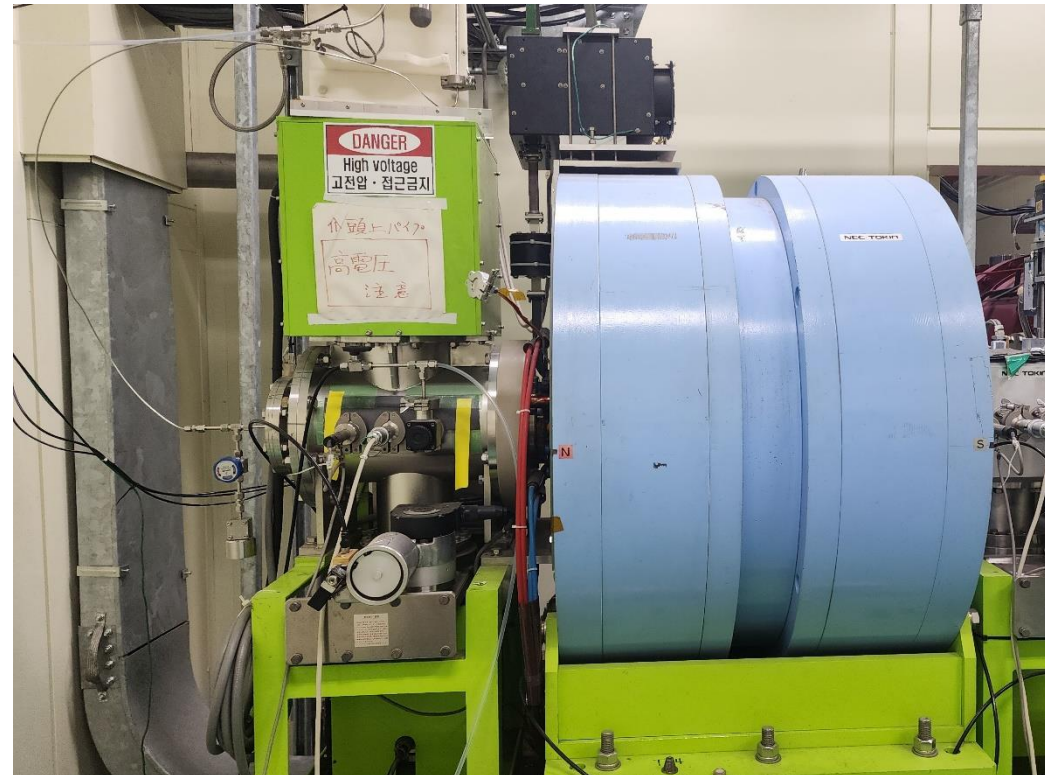


그림 2-17. Ar 이온 charge state distribution (ECR 300 W 기준)

03 Preparation of Fe ion beam

Fe ion beam extraction experiment

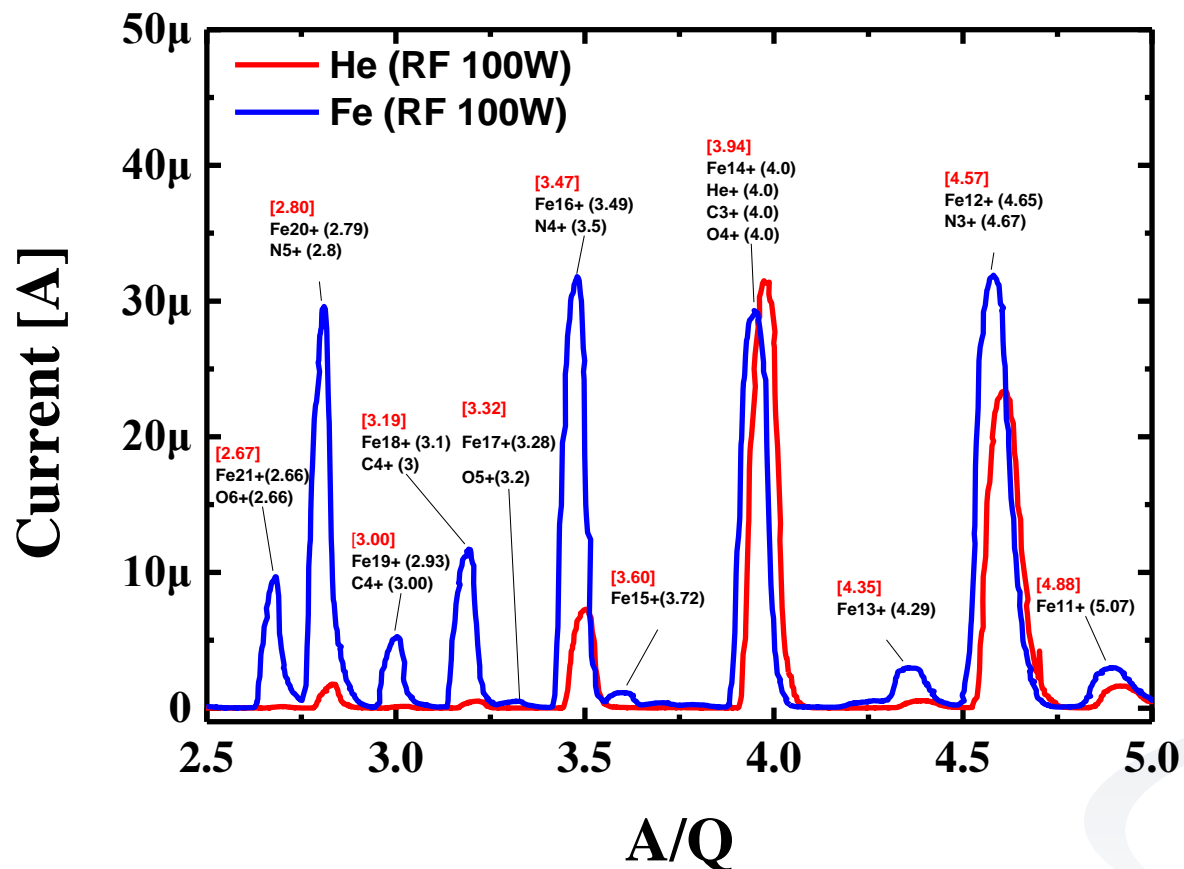
< Installation of MIVOC system in KAHIF ECR ion source >

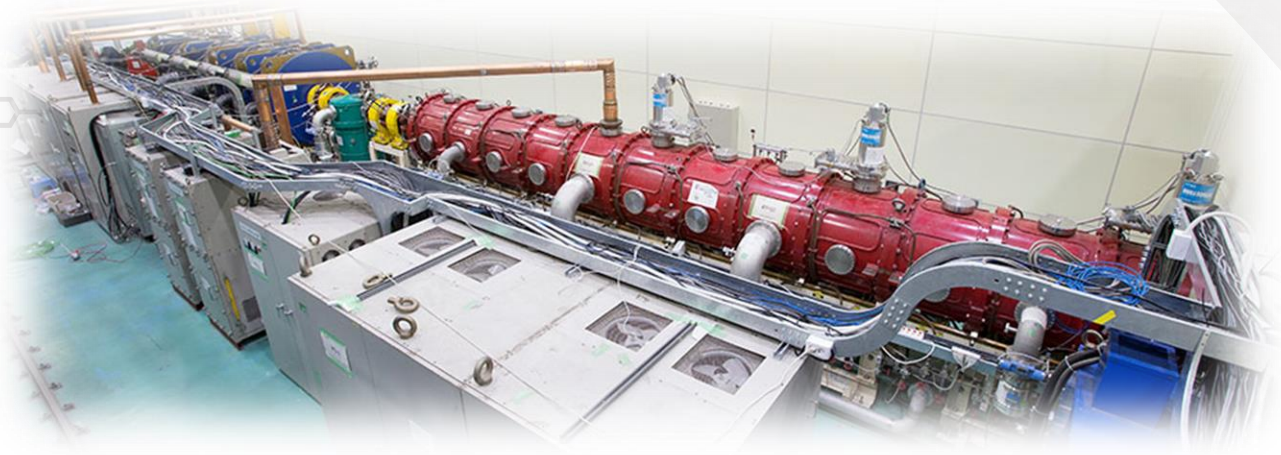


03 Preparation of Fe ion beam

Fe ion beam extraction experiment

< Mass spectroscopy using bending magnet >





Quantum Engineering and Nuclear Fusion, 2023 KNS

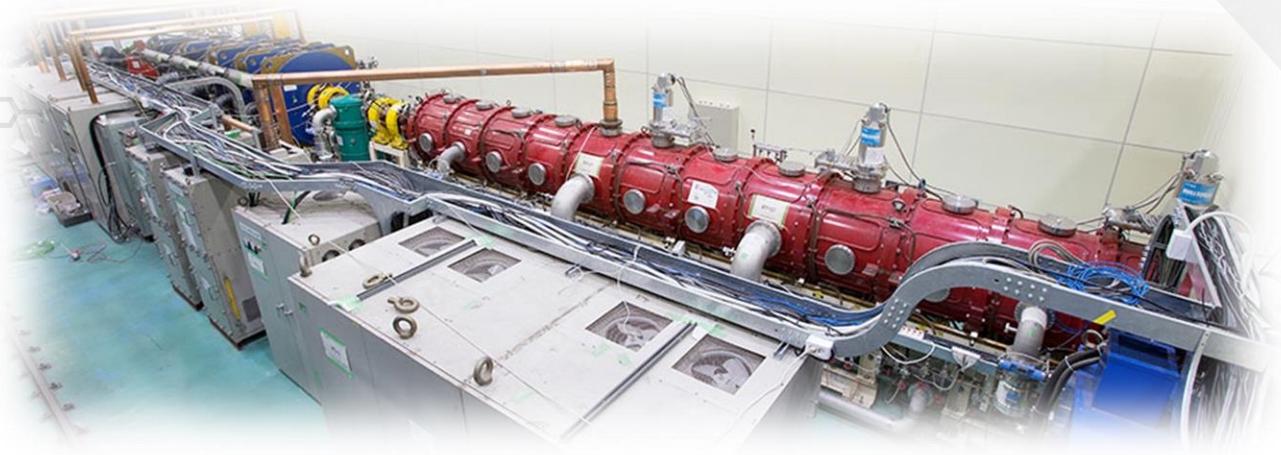
Conclusion

05

04

Conclusion : Final goal





THANK YOU