

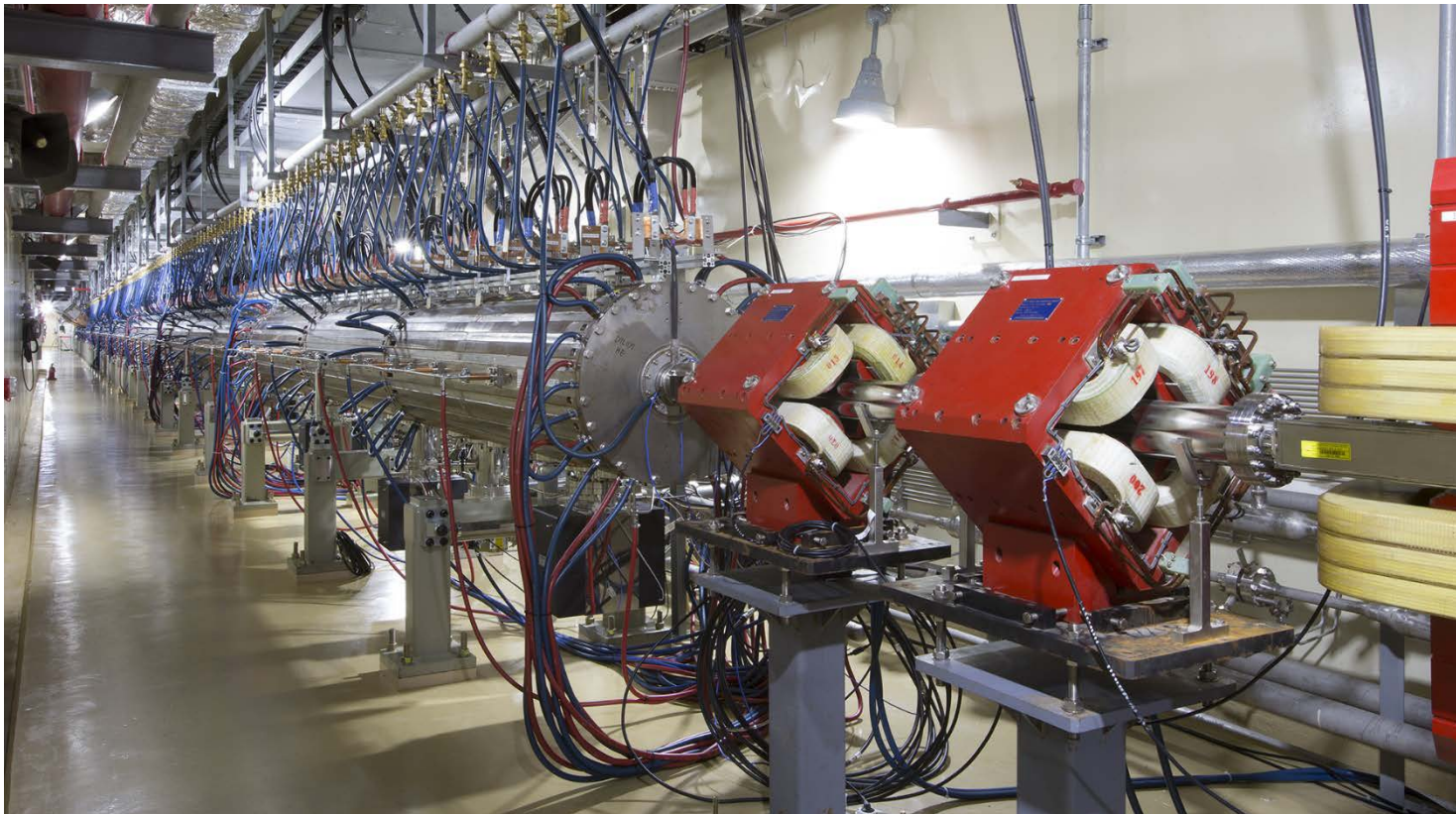
# KOMAC MV 급 입자빔 시설 현황 및 계획

2023. 5. 17  
제주 국제컨벤션센터

한국원자력연구원  
권 혁 중

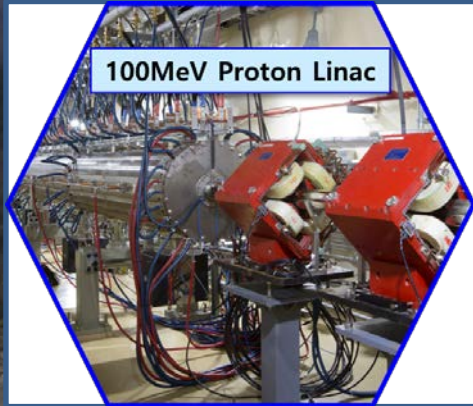
# 내 용

- 양성자과학연구단 시설 개요
- MV급 입자빔 장치 현황
- 요약



# 양성자과학연구단 시설 개요

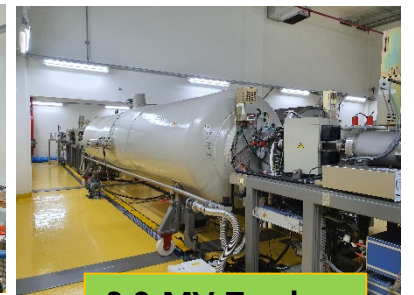
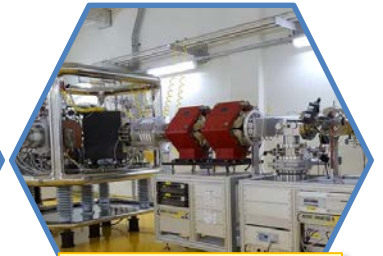
# 한국원자력연구원, 양성자과학연구단 (KAERI / KOMAC)



erator building

Main Hall

Main Gate

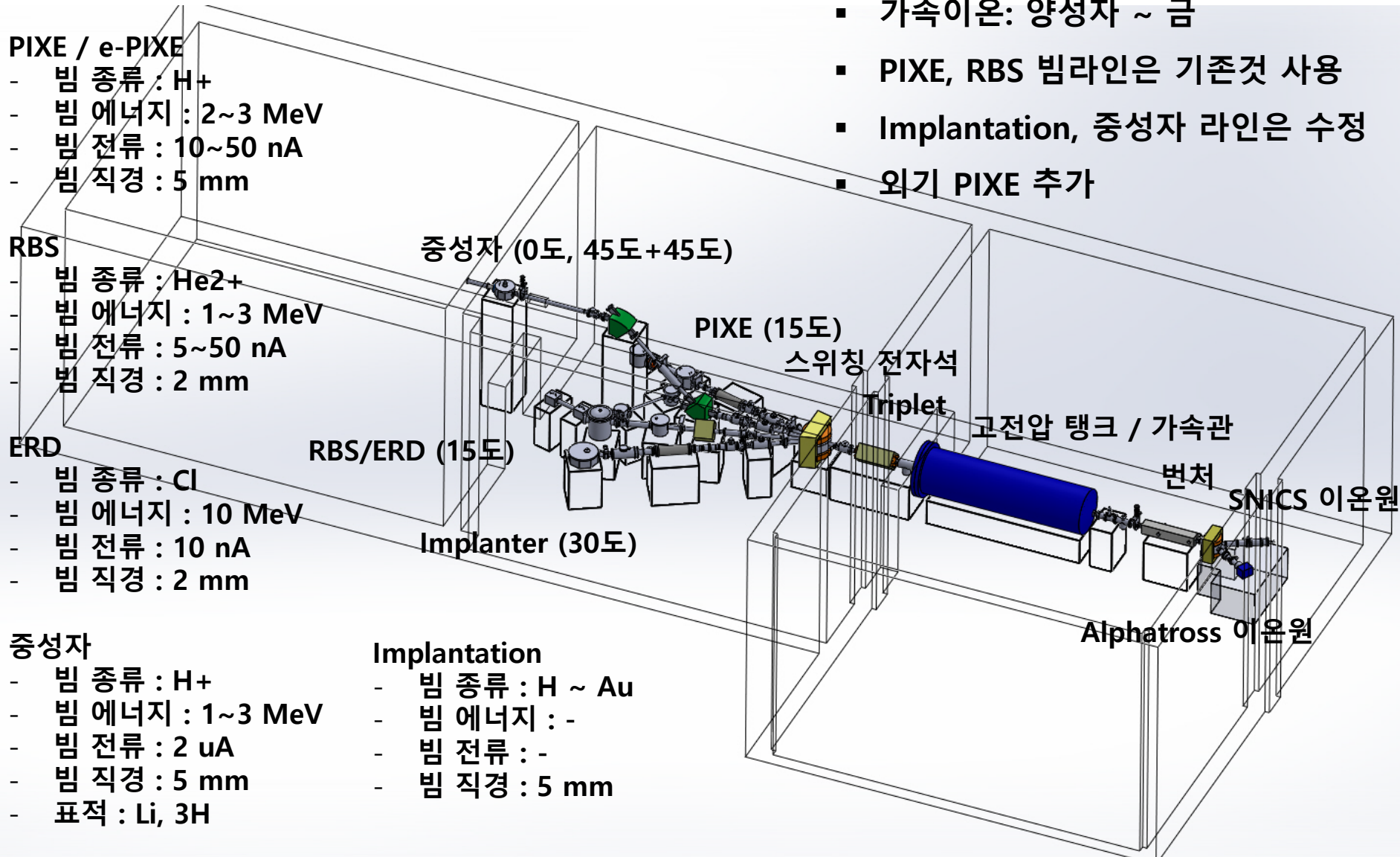


KOMAC: Korea Multi-purpose Accelerator Complex

# MV 급 입자빔 장치 현황 : 1.7 MV 탄뎀 가속기

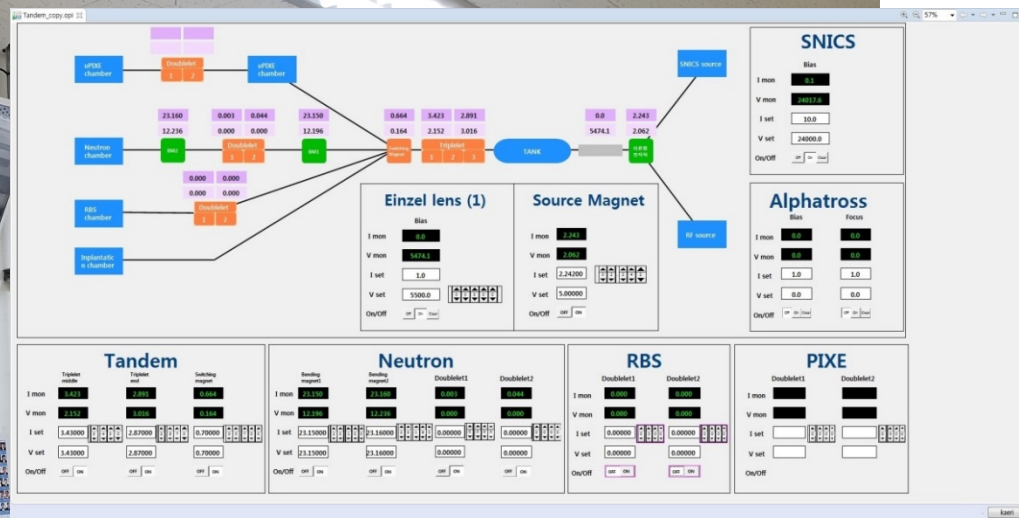
# 1.7 MV 탄뎀 가속기 개요

- 1988년 지질연 설치, 운영
- 2015년 양성자과학연구단 이전
- 가속이온: 양성자 ~ 금
- PIXE, RBS 빔라인은 기존것 사용
- Implantation, 중성자 라인은 수정
- 외기 PIXE 추가



## 1.7 MV 탄뎀 가속기: 개선 및 추가 구축

- 빔라인, 조사챔버, 가속기 제어, 방사선 감시
- 고전압 터미널, 이온원 전원, 스티어러 전원 등은 기존 아날로그 제어 방식 사용
- 새로 설치한 장비 (전자석 전원 등) 은 EPICS 기반 제어 시스템 구축

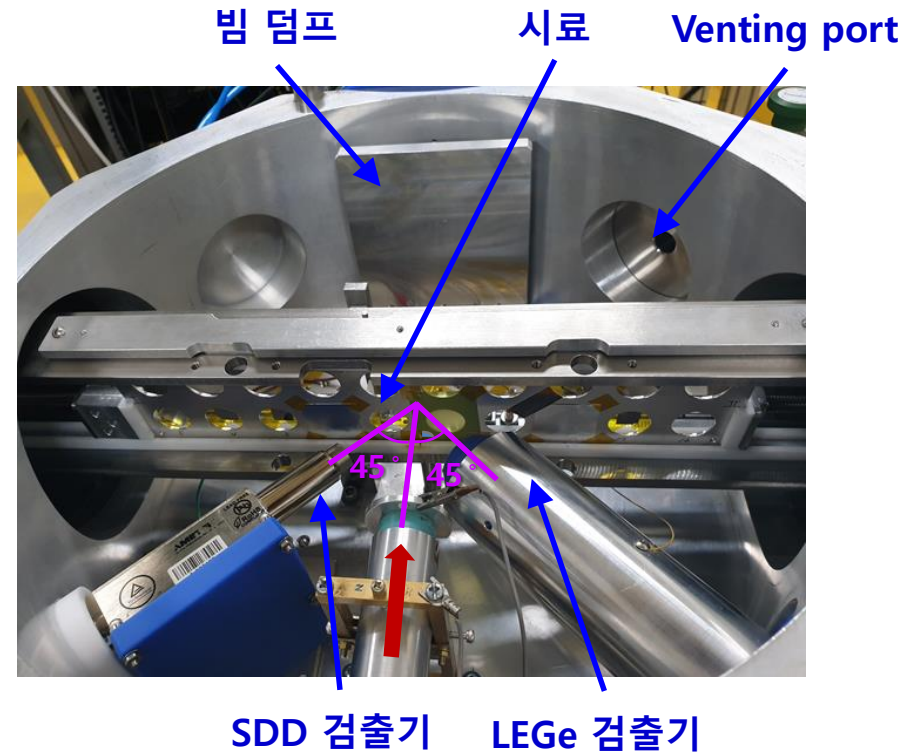
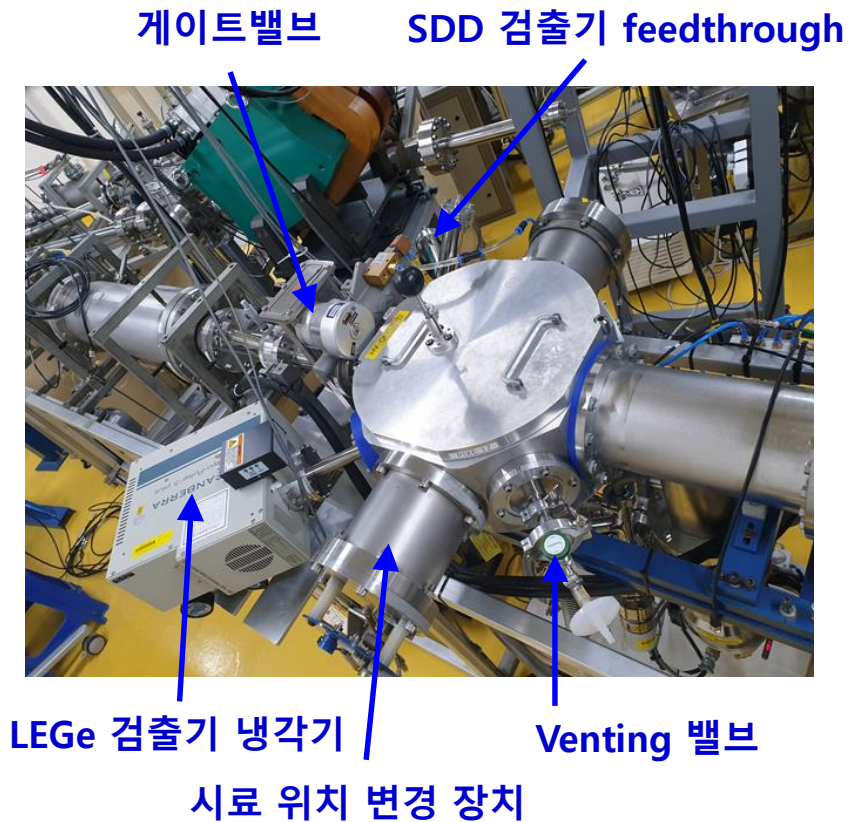


가속기동1층 | 가속기동2층 | 옥외감시기 | 이온빔이용연구동



# PIXE 빔라인

- 양성자 빔 이용
- 미량 원소 분석
- 검출기: SDD (Silicon Drift Detector), LEGe (Low Energy Germanium) Detector

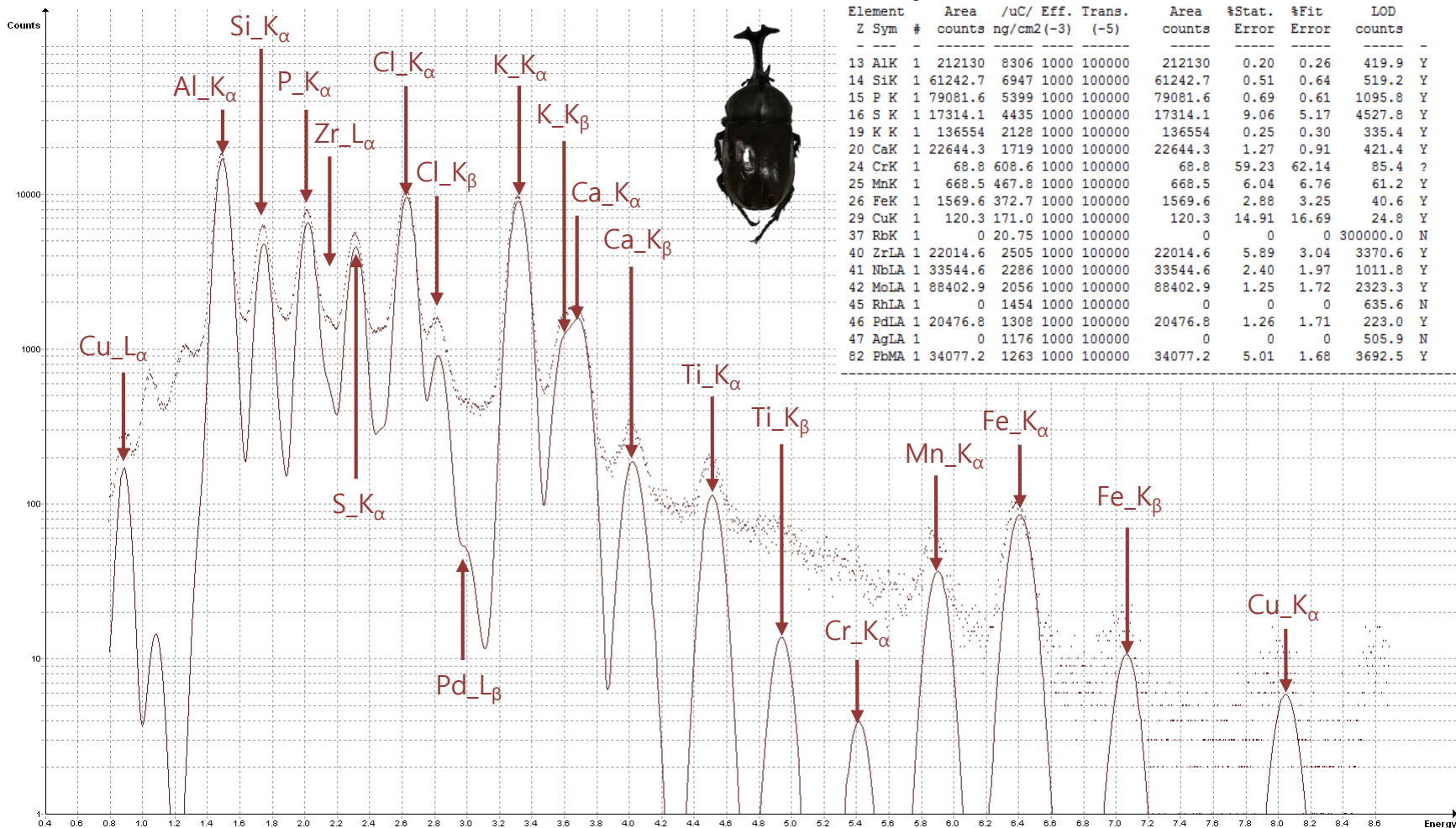


- SDD (Silicon Drift Detector) : 저에너지 X-선 측정
- LEGe (low Energy Germanium Detector) : 고에너지 X-선 측정

# PIXE 빔라인을 이용한 분석에

- 경주국립박물관 요청 분석

## 장수풍뎅이 날개 시료 분석 결과



# 외기 PIXE 빔라인

- 빔창: Kapton film (FCV 설치)
- 빔창과 공기층의 영향: XRF 표준시료를 이용한 분석 비교
- X-y-z 3축 스테이지

PIXE Chamber

Gate Valve

Si(Li) Detector

Sample Holder

X-Y-Z Motion Stage

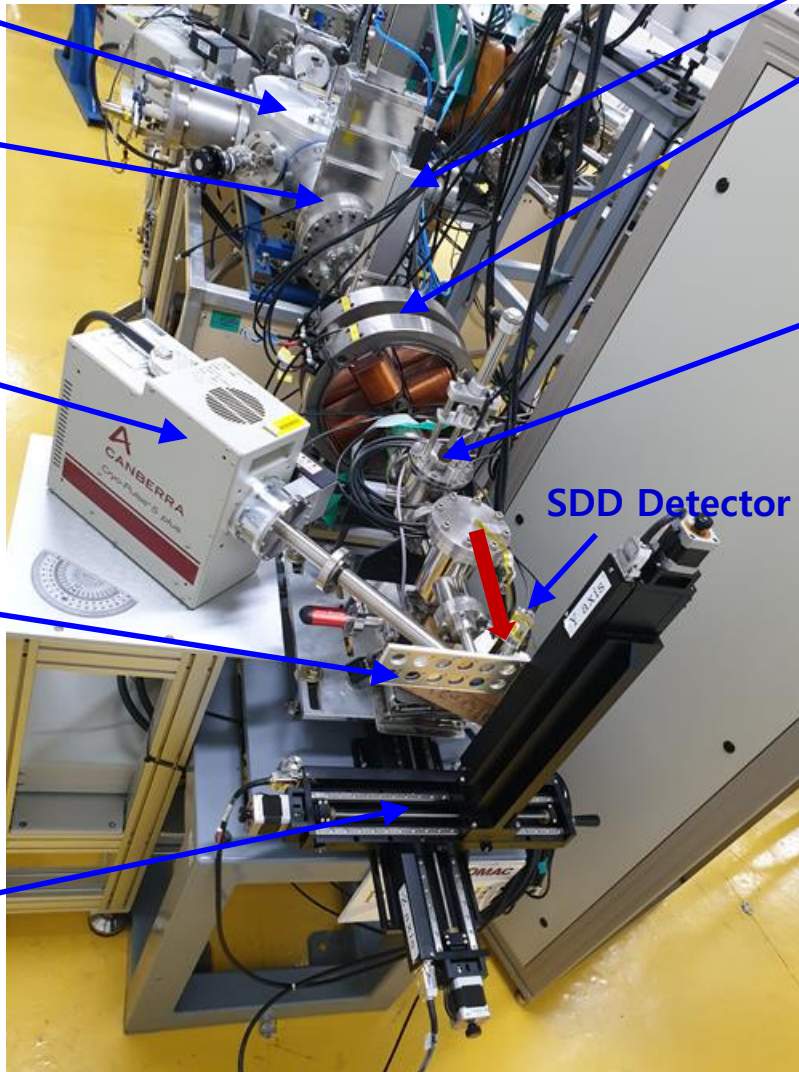
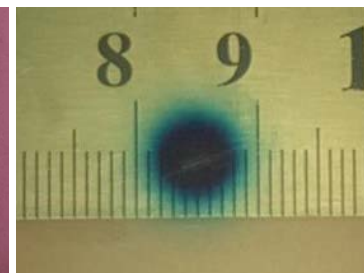
Fast Closing Valve

MQD

Quartz Beam Monitor

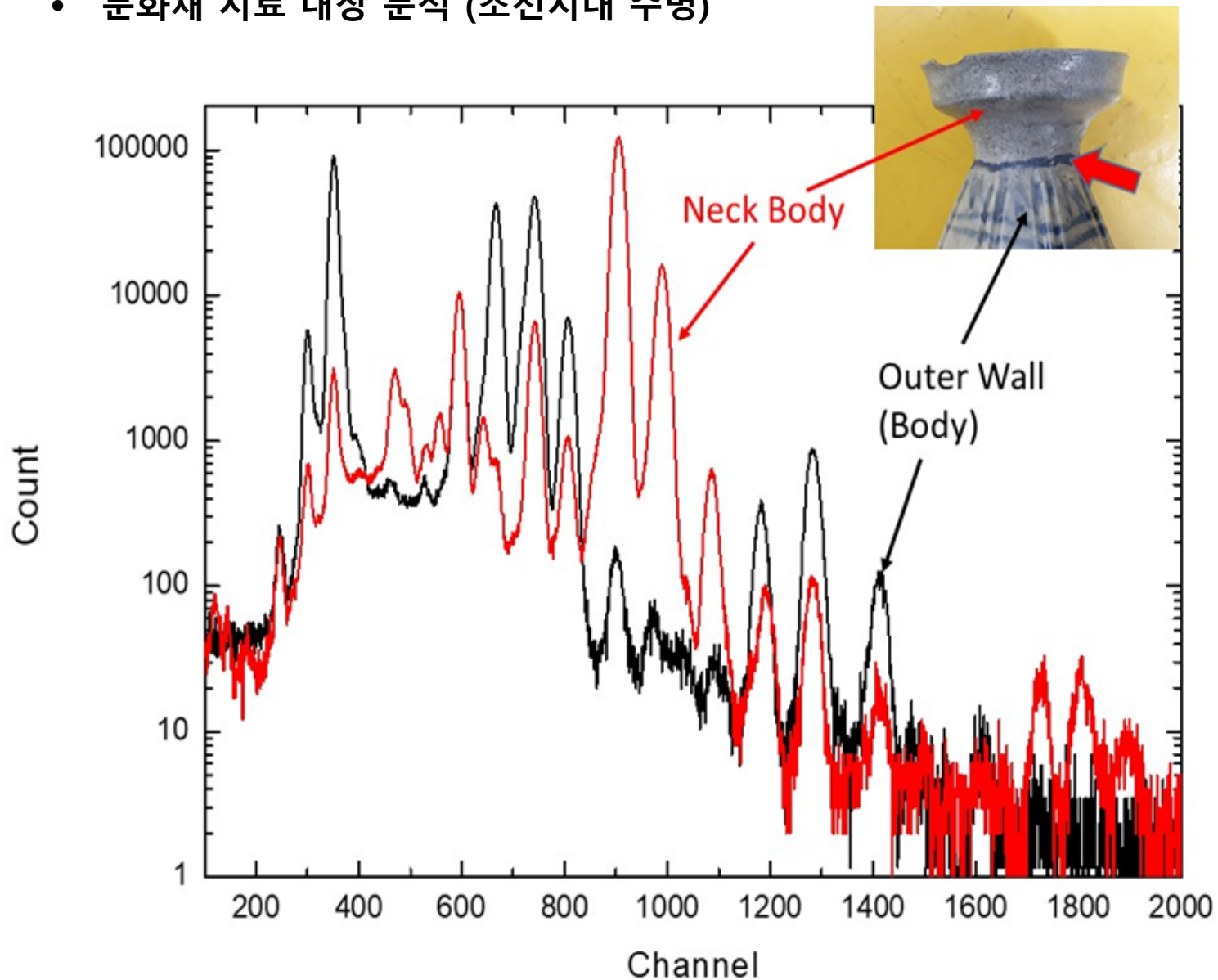
SDD Detector

Beam Window



# 외기 PIXE 빔라인을 이용한 분석예

- 문화재 시료 대상 분석 (조선시대 주병)



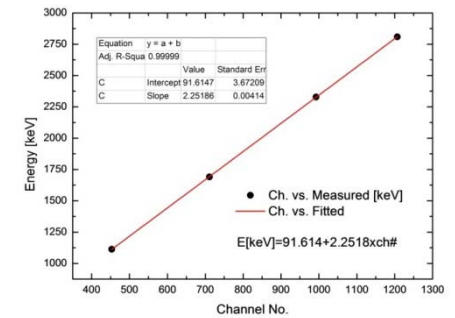
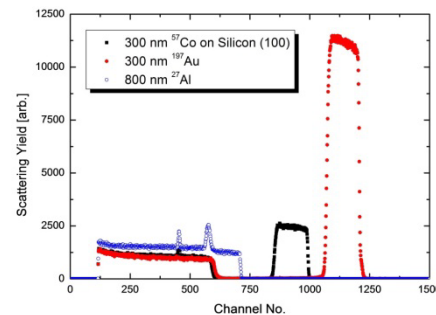
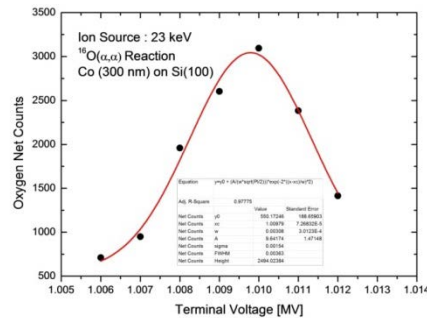
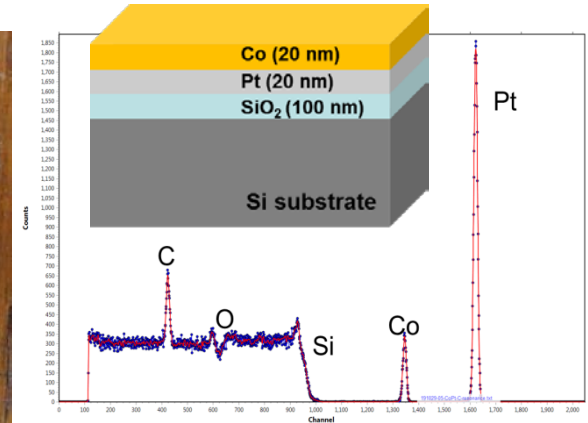
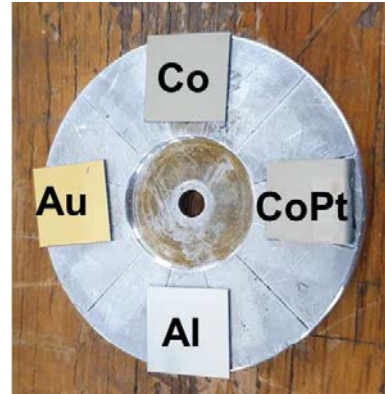
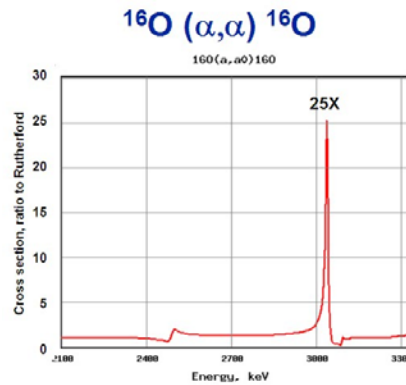
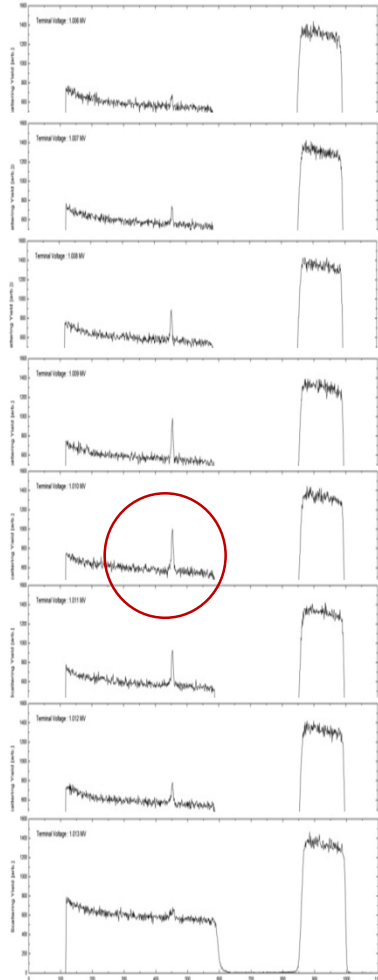
# RBS 빔라인

- 1~3 MeV 헬륨빔 이용
- 깊이에 따른 성분 분석이 장점
- 검출기: SSB (Silicon Surface Barrier) Detector



# RBS 빔라인을 이용한 분석예

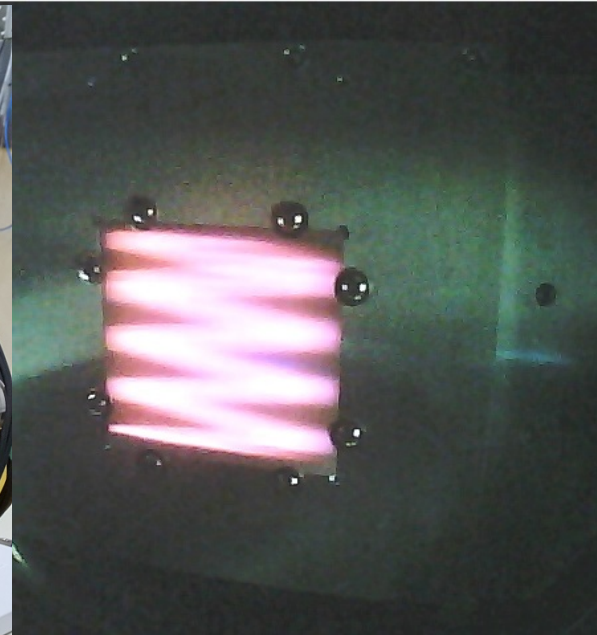
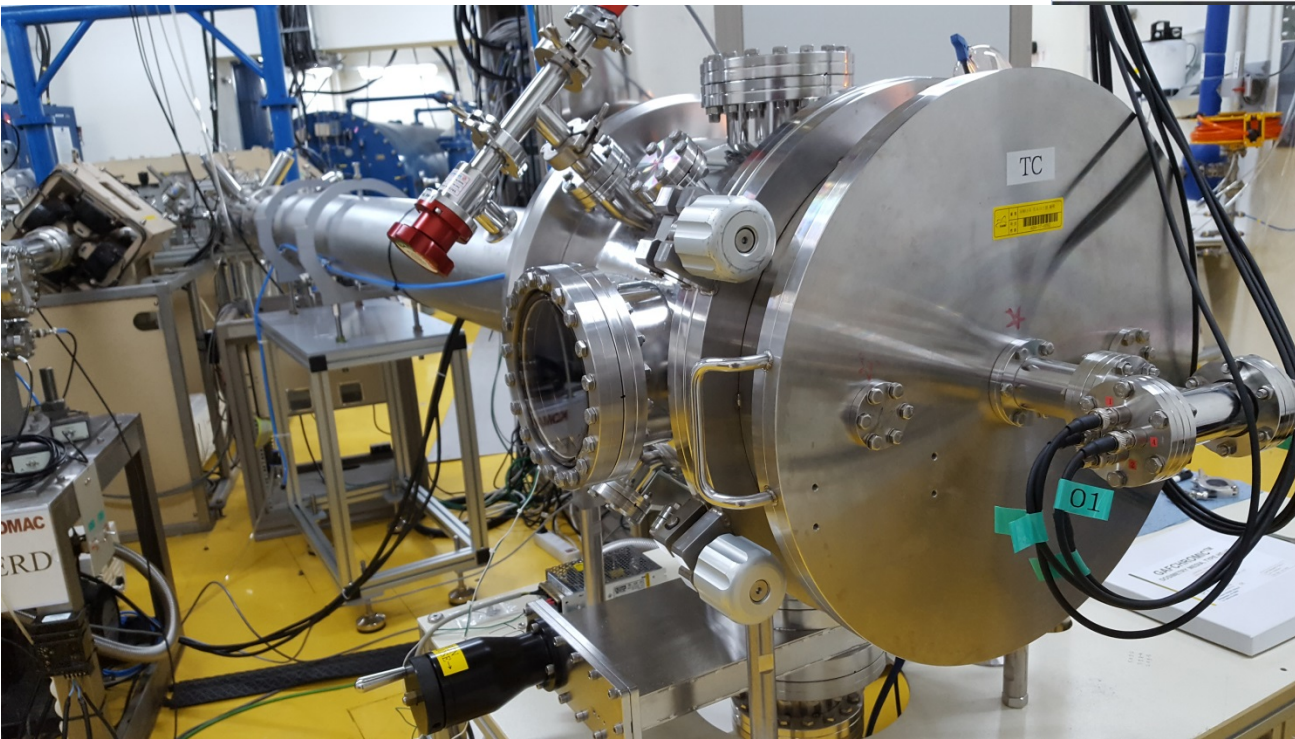
- 교정용 시료를 이용한 터미널 전압 교정 및 분석 (mono-isotopic metal film, KIST 제공)



- Tandem 가속기 GVM calibration
- Mono-isotopic film 이용한 RBS energy calibration

# Implantation 빔라인

- 다양한 종류의 이온빔
- 6" 웨이퍼 기준, 조사 선량 uniformity: < 10%
- 조사 선량:  $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$  / 4시간
- Raster scanner 이용 (517 Hz, 64 Hz)
- 여러 개의 Faraday cup을 이용한 실시간 uniformity 측정



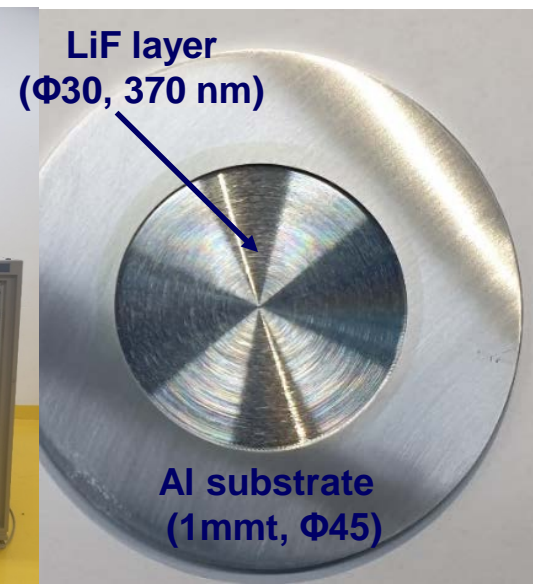
# 중성자 빔라인

## □ Neutron target room

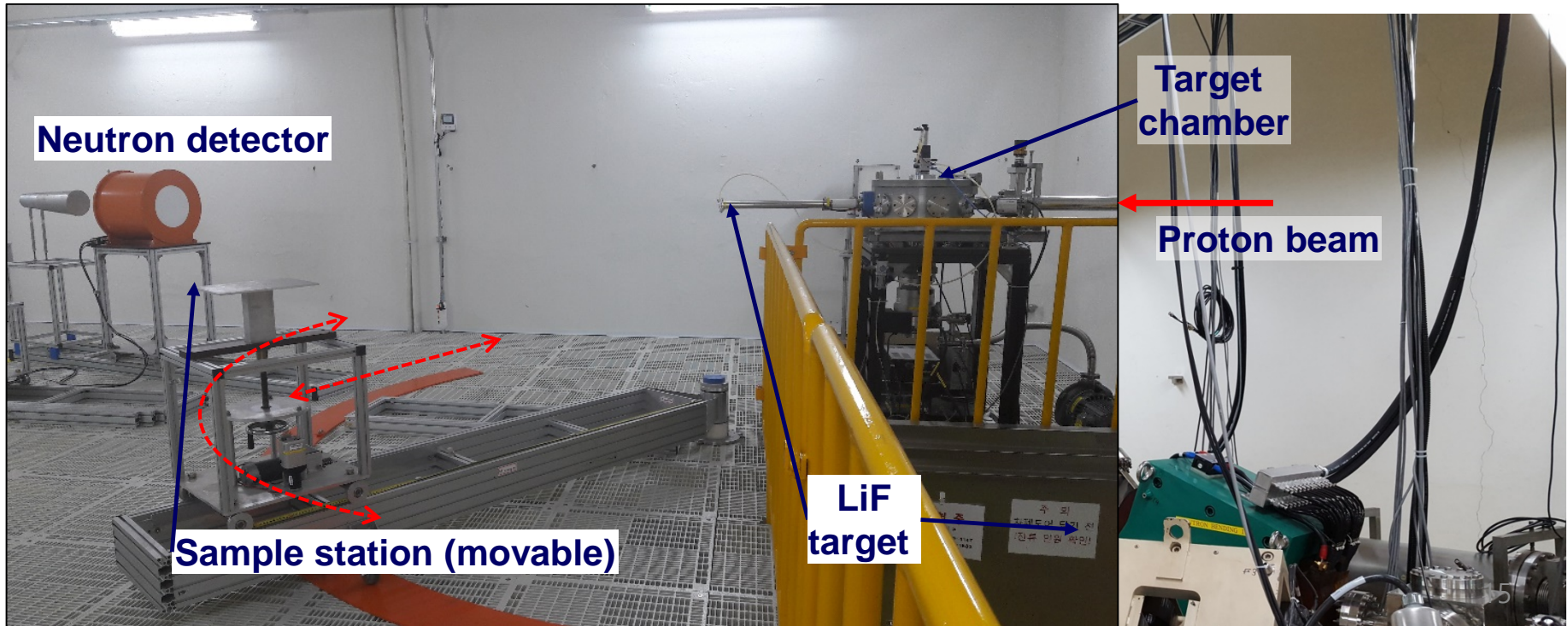
- Neutron production target: LiF
- ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  reaction
- ( $E_{\text{th}} = 1.881 \text{ MeV}$ ,  $Q = -1.644 \text{ MeV}$ )
- Detector: Plastic scintillator, CLYC, He3
- Under pilot operation for users



LiF Coater



중성자 발생 표적



Neutron detector

Sample station (movable)

LiF target

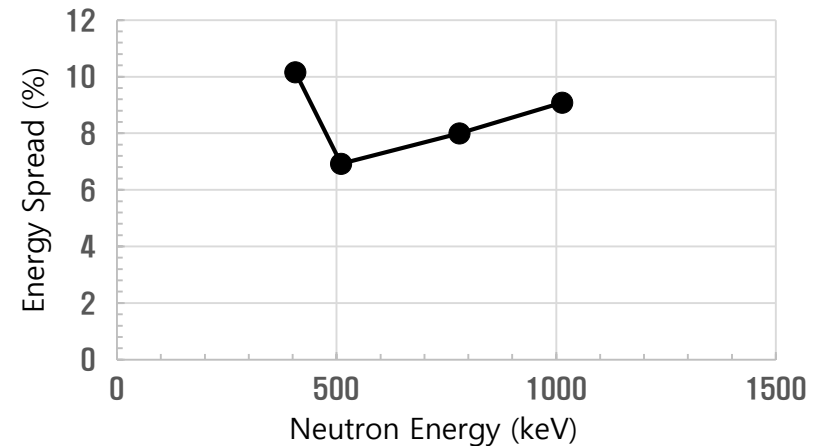
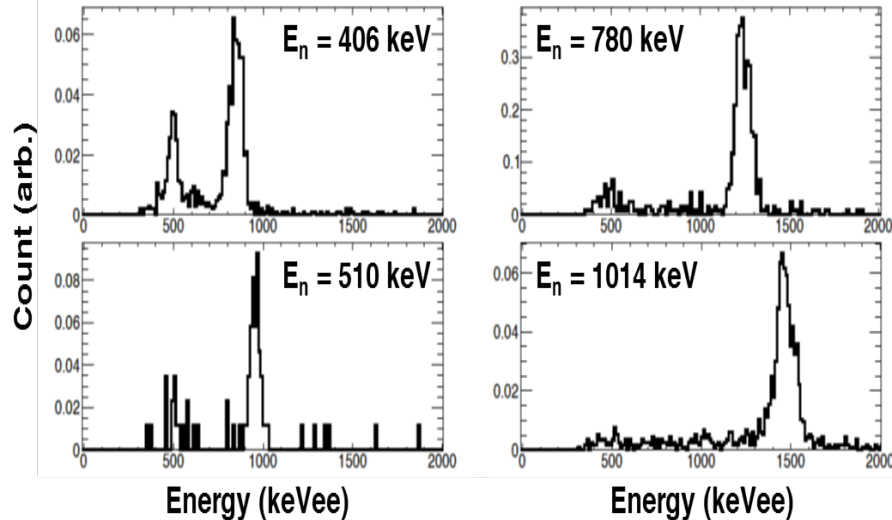
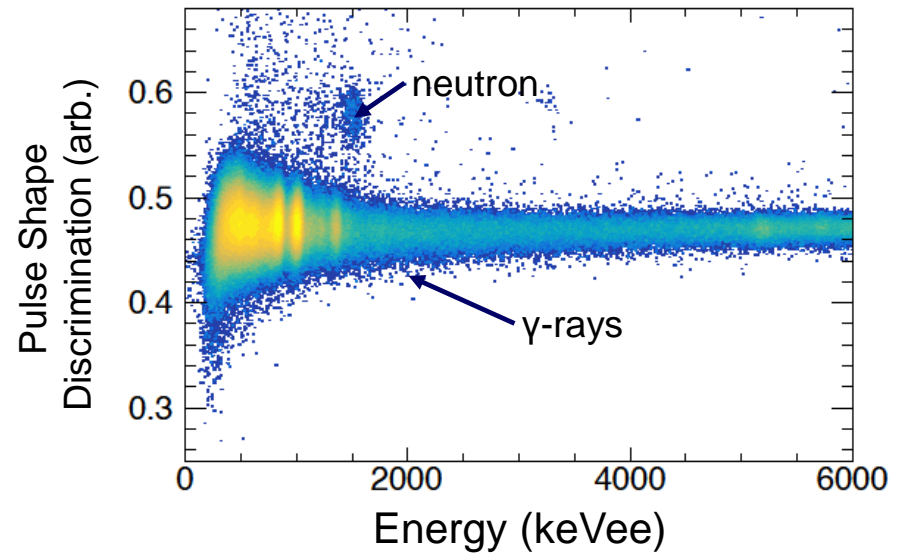
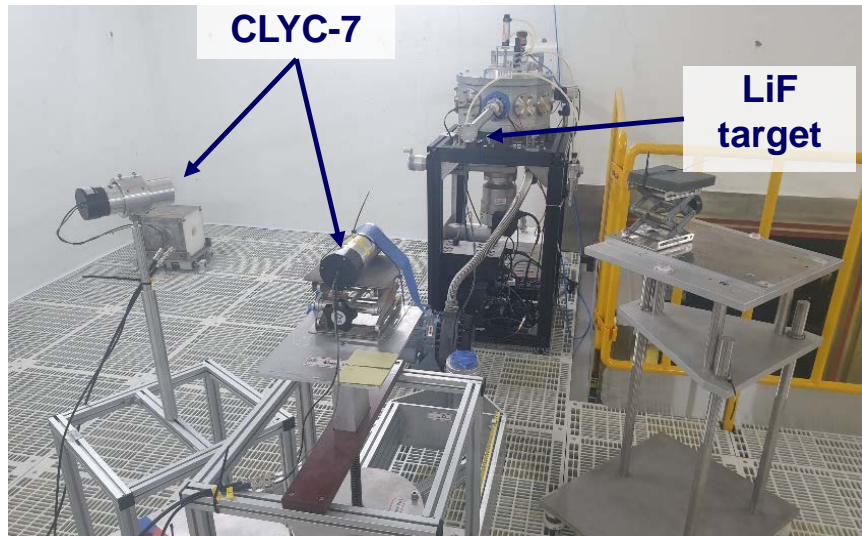
Target chamber

Proton beam

# 중성자 측정

## □ Mono-energetic Neutron Measurement

- Detector : Li-7 enriched  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$  (CLYC-7)



# **MV 급 입자빔 장치 현황**

## **:1 MV Single ended 정전형 가속기**

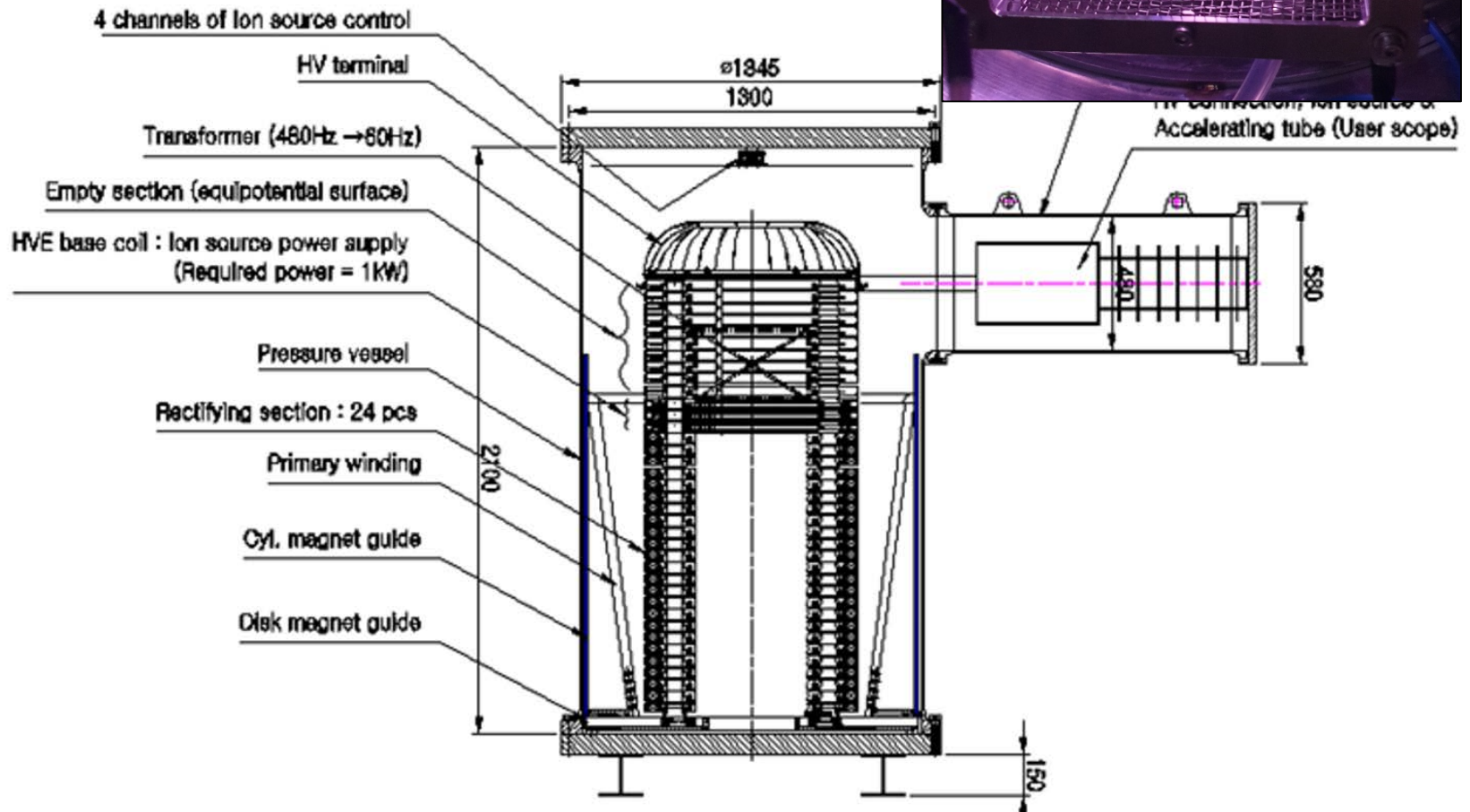
# 1 MV Single ended 정전형 가속기 개요

- 최대 전압: 1 MV
- 핵심기술: 1 MV 전원, 소형 이온원, 이온원 전원
- 구성: 이온원, 가속관, triplet, 스위칭 전자석, raster scanner, 조사 챔버
- Raster scanner 이용 (517 Hz, 64 Hz)
- 여러 개의 Faraday cup을 이용한 실시간 uniformity 측정
- 반도체 웨이퍼 조사용 load lock 챔버 설치



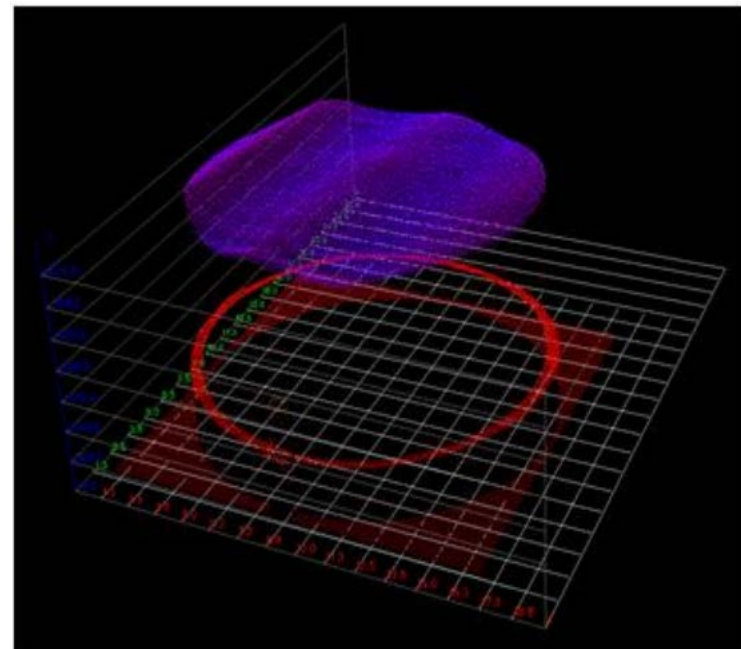
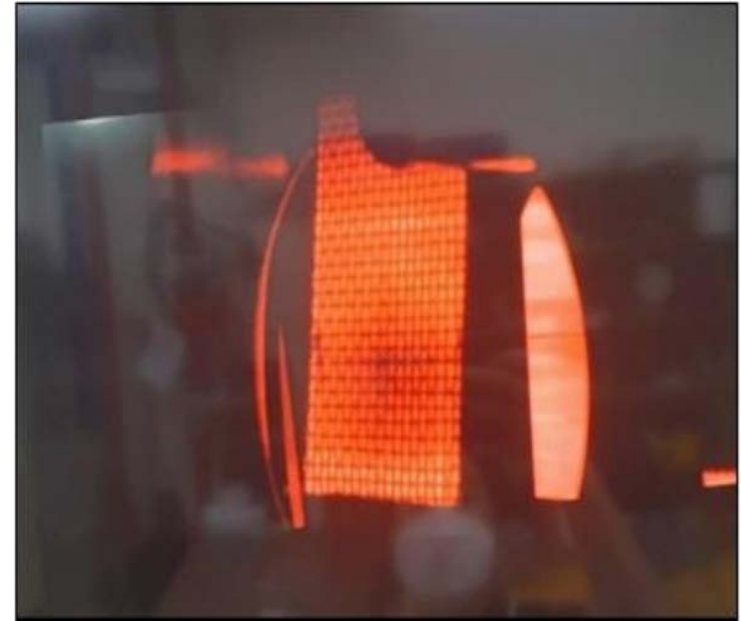
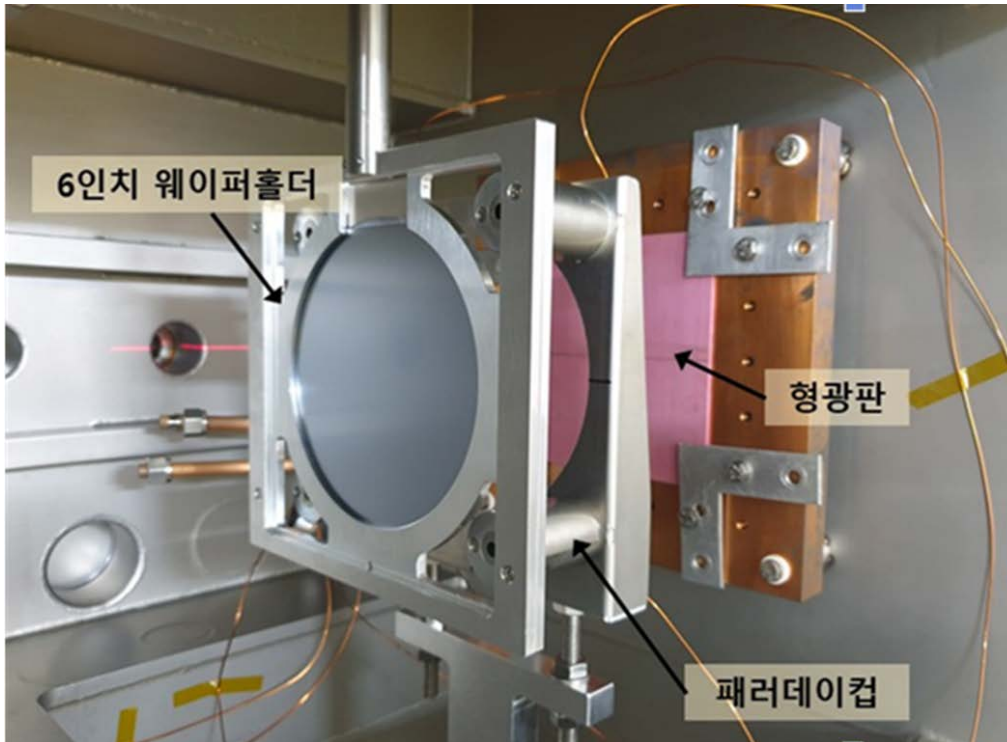
# 핵심기술: 1 MV 전원, 이온원, 이온원 전원

- 1 MV 전원: 전자빔 조사용 전원 사용 (ELV 형)
- 소형 이온원: 200 MHz 고주파 이온원  
: 1 turn loop + air variable capacitor
- 이온원 전원: 전원 코일 + LC 공진 회로 + 정류기



# 1 MV 가속기를 이용한 반도체 웨이퍼 조사에

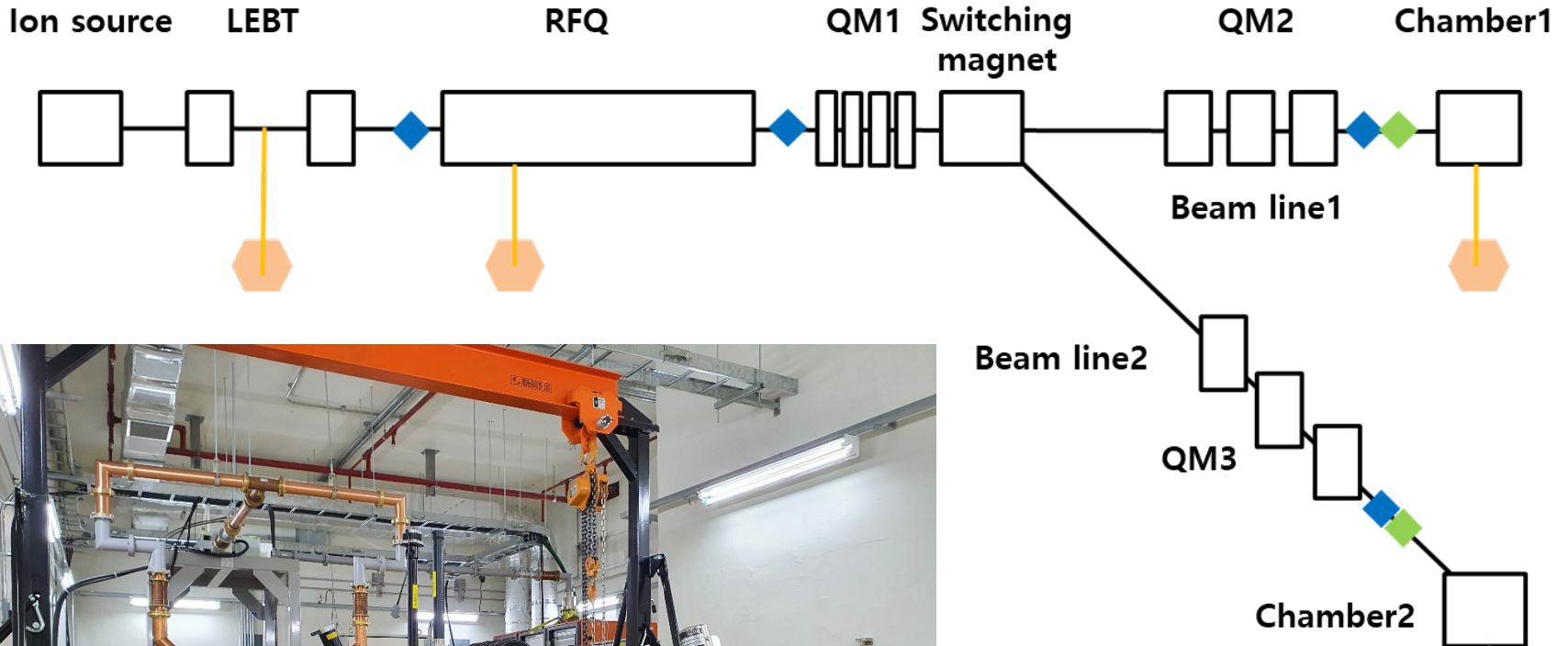
- 반도체 웨어퍼 조사용 Load lock 챔버 설치
  - : 6인치 웨이퍼
  - : 빔 스캐닝 electrostatic raster scanner
  - : 빔 조사 균일도 < 10%



**MV 급 입자빔 장치 현황**  
**:1 MeV/u RFQ 기반 가속기**  
**- Beam Test Stand: BTS**

# BTS 개요

- 1 MeV/n RFQ 기반 테스트 스탠트를 통한 기술 개발 (입사기, RFQ, 빔라인)

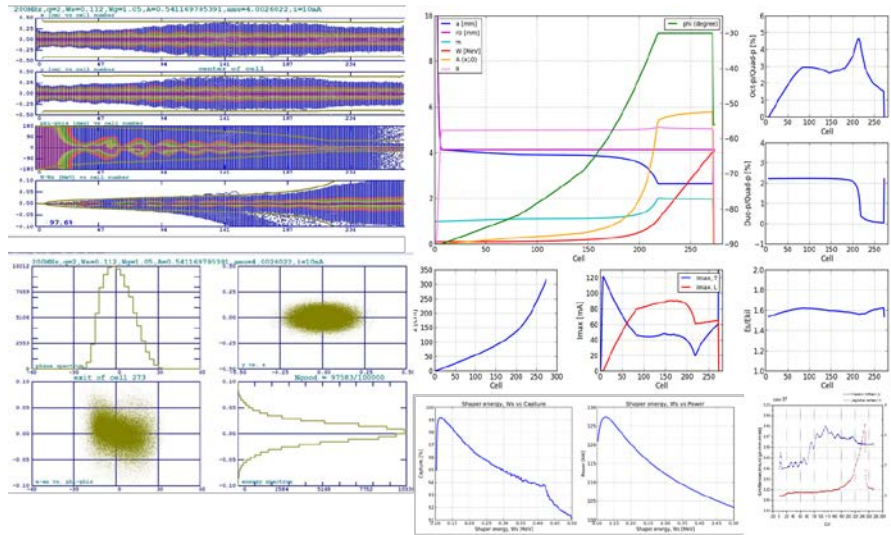


- 한국 원자력연구원 RFQ 개발 이력
  - 국내 최초 개발 (2002)
  - 국내 최근 개발 (2022)
- 기술개발을 위한 시험시설
  - 장치기술, 운영기술, 빔물리
- 빔 이용

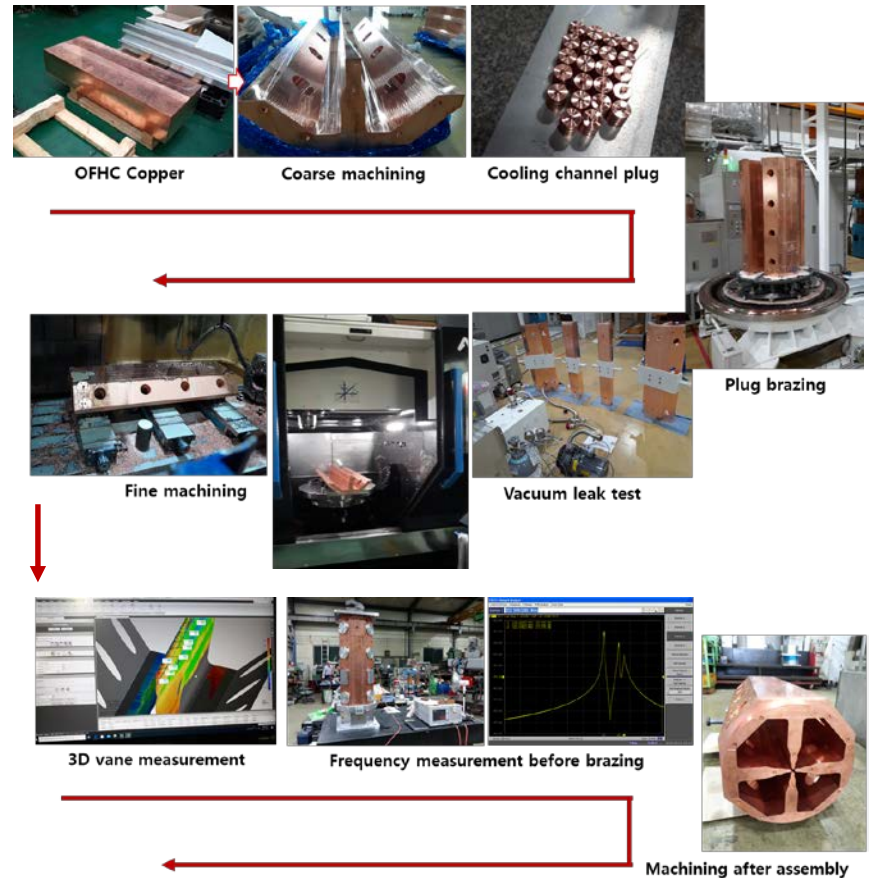
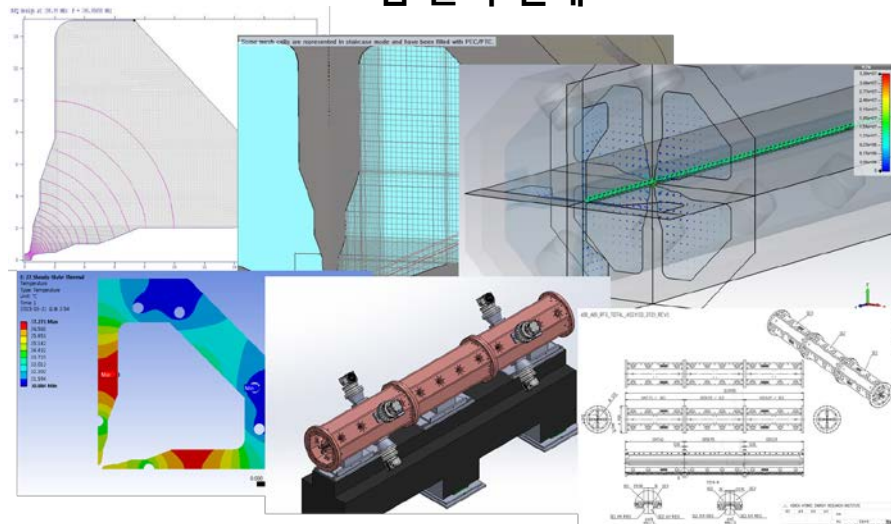
# BTS 핵심기술: 1 MeV/u RFQ 설계, 제작 기술

## • 설계, 제작 (정밀가공, 브레이징 접합)

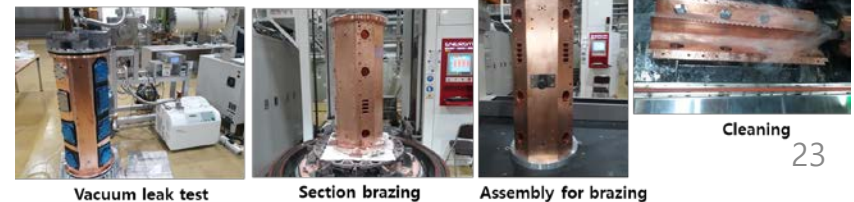
– 일반 정밀가공 업체, 자체 브레이징로 이용 (제작시 업체 선택 다변화)



빔 물리 설계

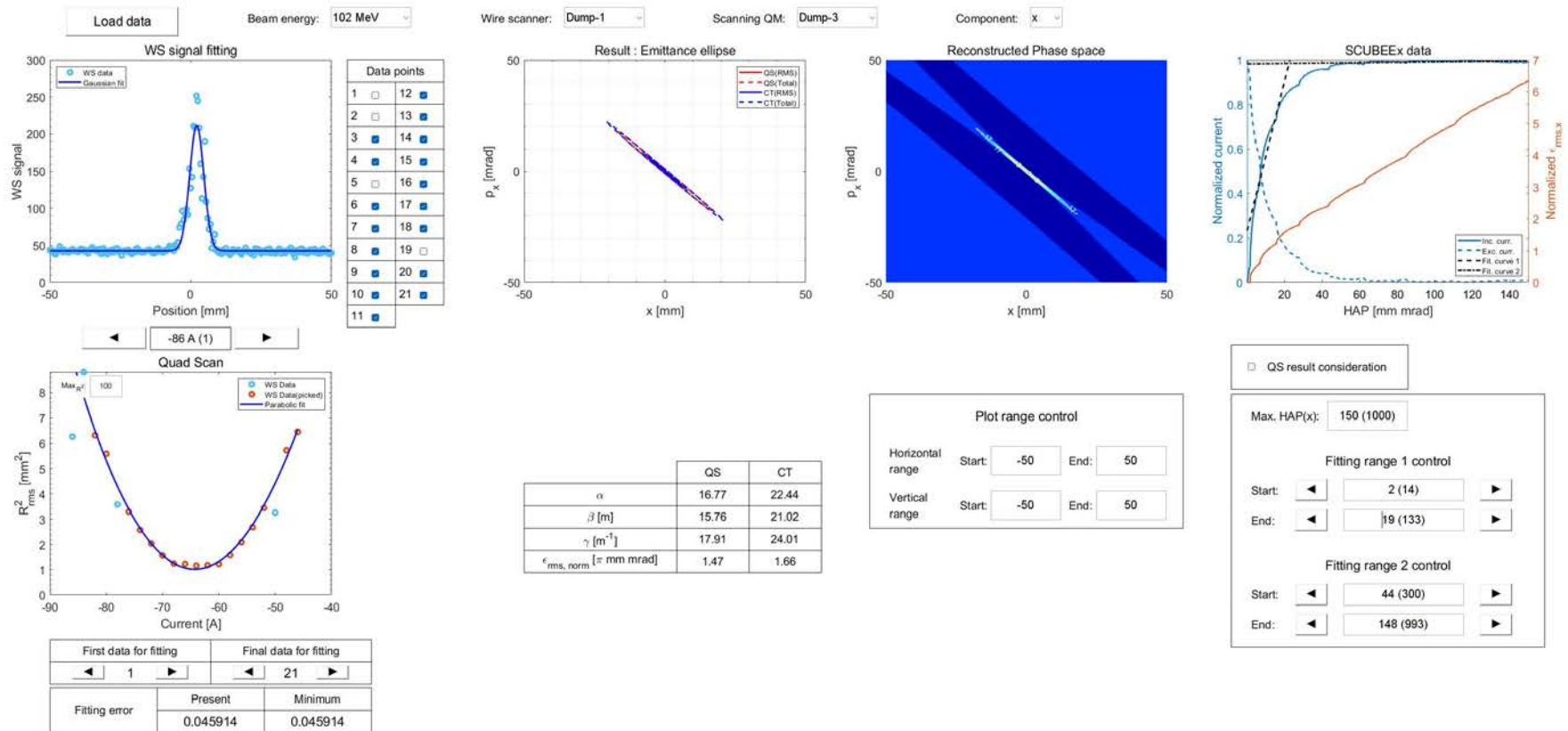


## RFQ 제작 과정



# BTS를 이용한 빔물리, 빔진단 기법 개발: CT 기반 다차원 빔 공간분포측정

- 기존 방법의 경우 빔물리 변수 측정은 가능하나, 다차원 빔 분포를 측정하는 것은 어려움
- 최근 주목받고 있는 대용량 양성자가속기 빔물리 주제: 4차원, 6차원 빔 분포 측정
- 100 MeV 가속기를 이용하는 경우, 실험 시간의 제한 및 일관성 있는 데이터 획득의 한계로 기술 적 용의 어려움
- 1 MeV/n RFQ를 이용한 빔 위상공간 분포 측정기술 개발

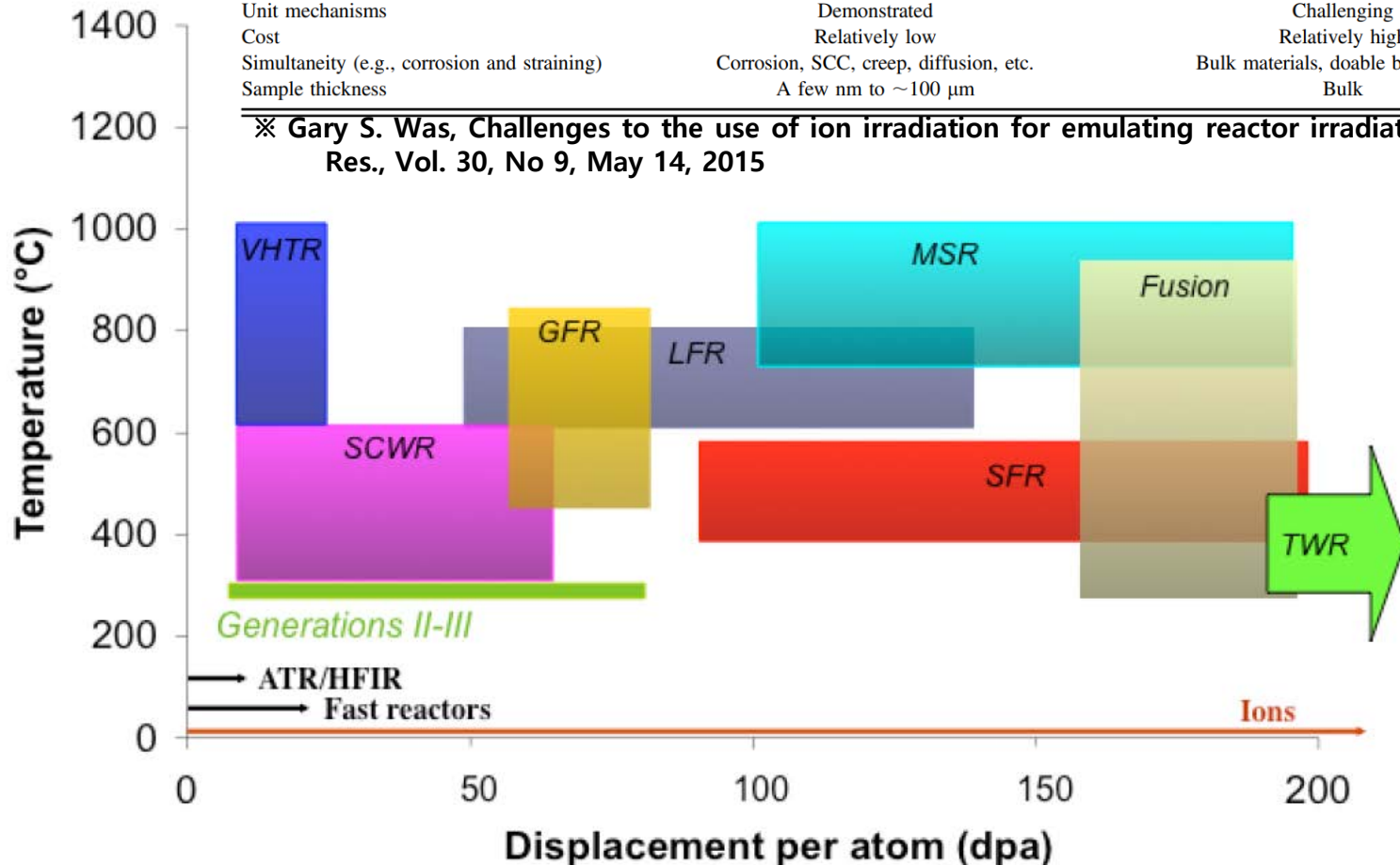


# MV 급 입자빔 장치 활용 계획

# MV 급 이온빔 가속기 종합 활용계획: 원자력 재료 시험

Variable	Ion beams	Test reactors
Dose	>500 dpa	10–20 dpa max
Dose rate	100 - 10000 × reactor rates	Few × reactor rates
Energy	Controlled by ion type (a few keV to ~100 MeV)	Neutron spectrum (up to 14 MeV)
Transmutants/fission products	Separable	Controlled by nuclear physics
Temperature	Better than $\pm 10$ °C	Variable –10 s of °C
Residual activity	Low to none	High
In situ observation	TEM, RS, GC, etc.	Some T and displacement, generally PIE only
Unit mechanisms	Demonstrated	Challenging
Cost	Relatively low	Relatively high
Simultaneity (e.g., corrosion and straining)	Corrosion, SCC, creep, diffusion, etc.	Bulk materials, doable but difficult
Sample thickness	A few nm to ~100 $\mu$ m	Bulk

※ Gary S. Was, Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation, J. Mater. Res., Vol. 30, No 9, May 14, 2015



※ Heidrich, B. , Pimblott, S. M., Was, G. S. Zinkle, S. "Roadmap for the application of ion beam technologies to the challenges of nuclear energy technologies", Nucl. Instrum, Methods Phys, Res., Sect. B 441, 41-45 (2019)

# MV 급 이온빔 가속기 종합 활용계획: 원자력재료 시험 기관 보유 장비

## • 대표적인 원자력재료 시험 이온빔 이용 시설 및 보유장비

국가 기관	미국 Univ. of Michigan	일본 Kyoto univ.	프랑스 CEA등	대한민국, KAERI
시설	MIBL	DuET	JANNuS	KOMAC
장치	400 keV 정전형 1.7 MV 탄뎀 3 MV 탄뎀	1.7 MV 탄뎀 1 MV 정전형	3 MV 탄뎀 2.5 MV 탄뎀 2 MV 탄뎀	1 MeV/n 고주파 1 MV 정전형 1.7 MV 탄뎀 3 MV 탄뎀
비고	TEM in-situ	-	TEM in-situ	복합빔시설 없음

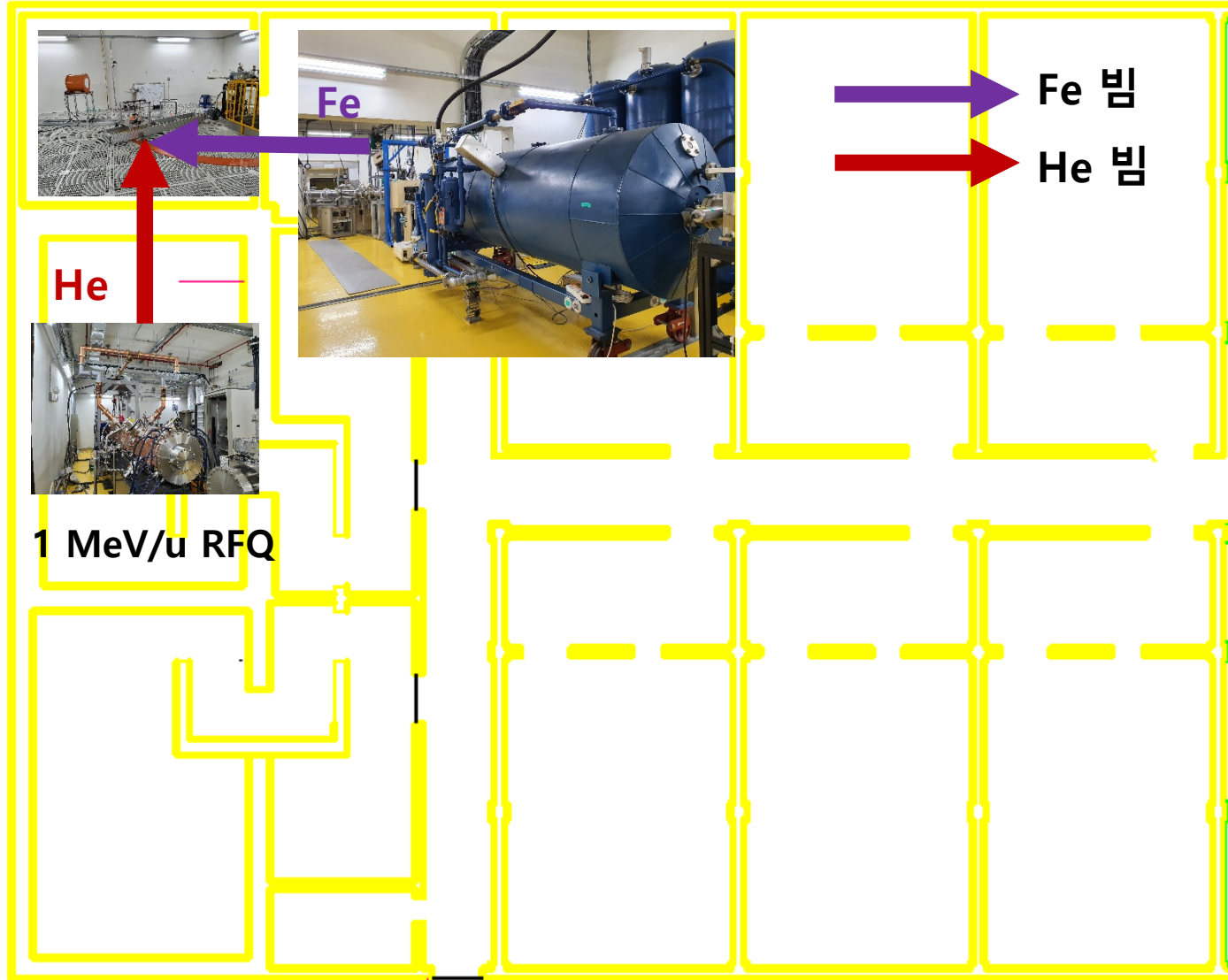
- 최근 dual beam, triple beam 조사 시험 수행
- 실시간 분석 장치 이용

# MV 급 이온빔 가속기 종합 활용계획:

- 원자력재료시험을 위한 복합빔 조사장치: Dual beam

복합빔 조사 챔버

1.7 MV 탄데믹

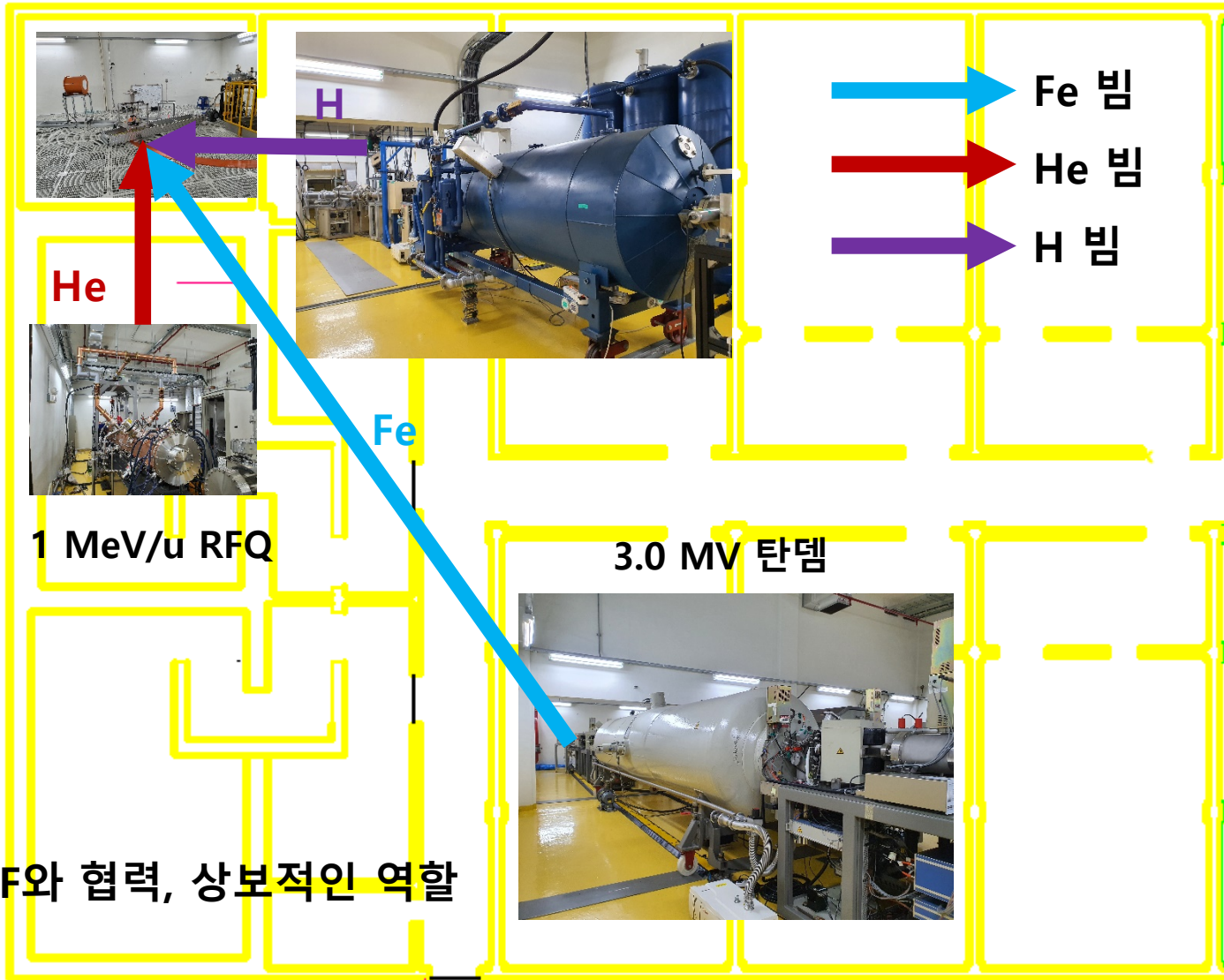


# MV 급 이온빔 가속기 종합 활용계획:

- 원자력재료시험을 위한 복합빔 조사장치: Triple beam

복합빔 조사 챔버

1.7 MV 탄뎀



- KAHIF와 협력, 상보적인 역할

❖ 양성자과학연구단 MV 이온빔 장치

- 1.7 MV 탄뎀 가속기
- 1 MV Single ended 정전형 가속기
- 1 MeV/u RFQ 가속기: BTS

❖ 양성자과학연구단 MV 이온빔 장치 활용

- 분석: PIXE, 외기 PIXE, RBS, (ERD)
- 중성자 원
- 이온빔 조사: 반도체 웨이퍼 조사
- 복합빔 조사 시설

**활용과 관련한 소중한 의견 부탁드립니다.**

**감사합니다**