

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



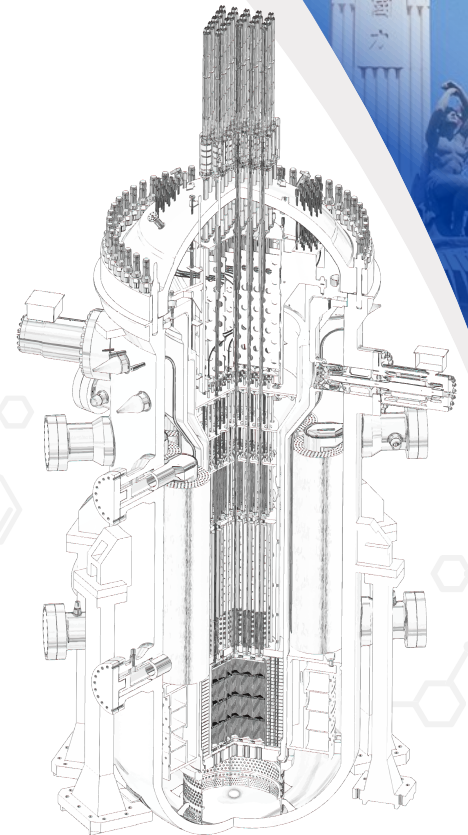
고강도 양전자분광시설 및 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축 계획

2025. 5. 21.

하나로이용부
이재기

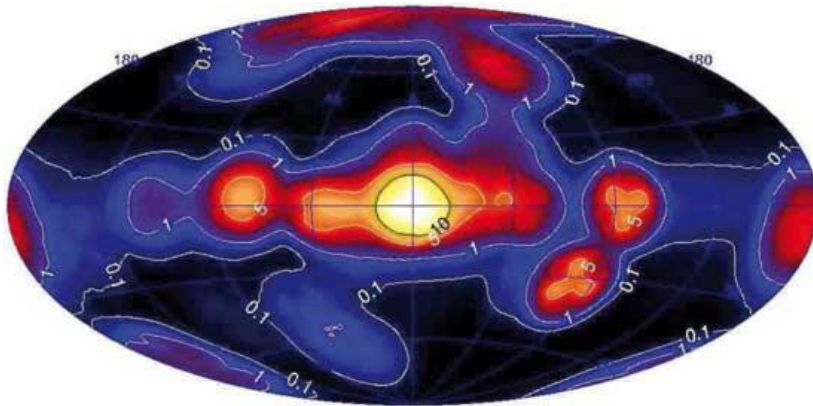


한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



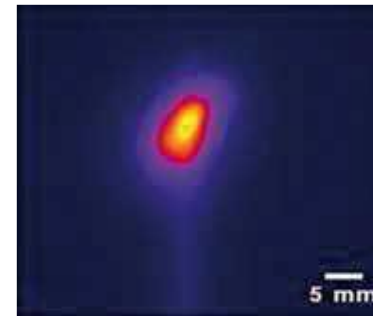
01 Introduction – Physics with many positrons

- ❑ 최근 수십 년간 다양한 저에너지 양전자 빔이 β^+ 소스를 기반으로 개발되었으나, 실험실용 빔의 최대 강도는 초당 약 10^7 개의 감속된 양전자로 제한됨.
- ❑ **연구용 원자로**와 전자 가속기 같은 대형 시설에서는 고에너지 감마선을 양전자-전자쌍으로 변환하여 **고강도 양전자 빔**을 생성하는 시스템 개발할 수 있음.
- ❑ 우리 은하 중심부는 초당 1.5×10^{43} 개의 양전자를 방출하며, 이는 매초 270억 톤의 물질-반물질 쌍소멸에 해당함.



우리 은하 중심부의 양전자 분포

Astron. Astrophys., 441 (2005) 513



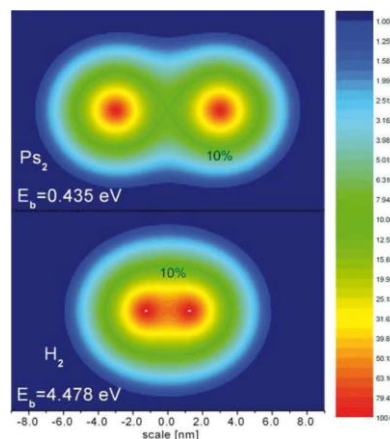
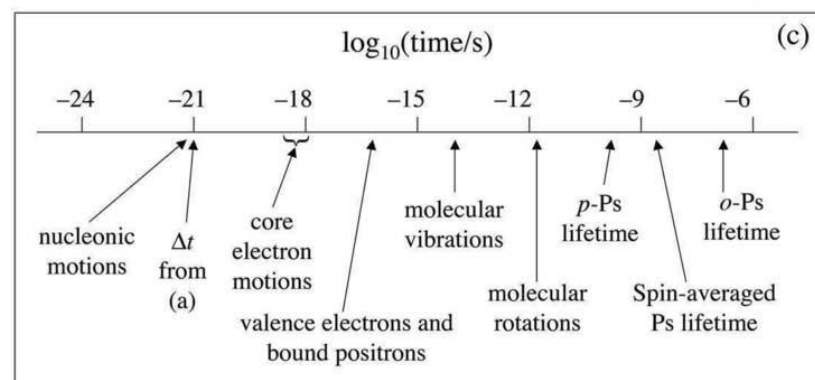
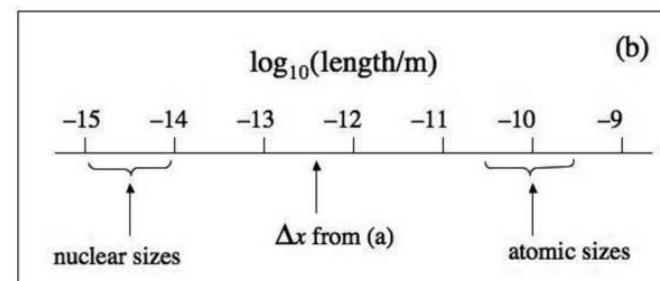
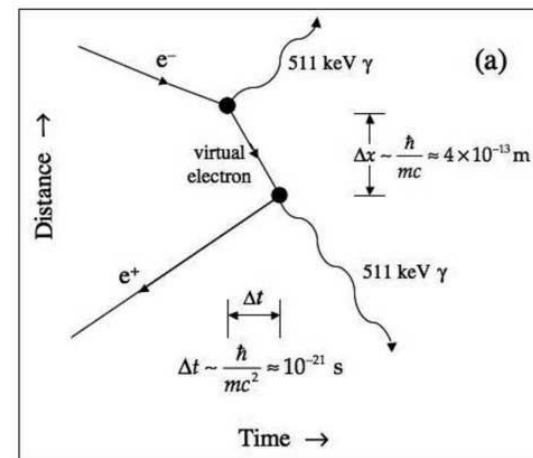
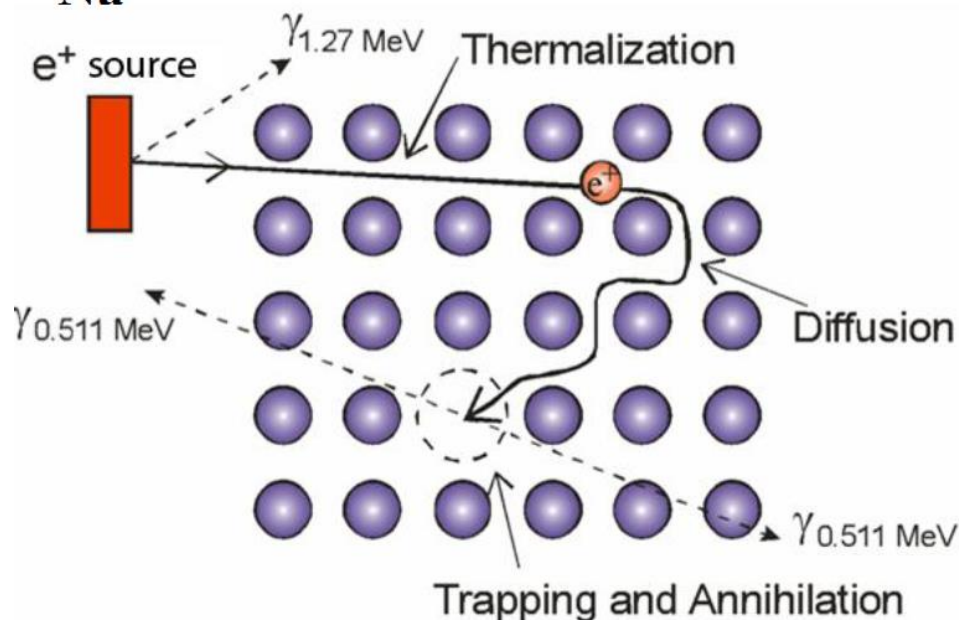
독일 FRM-II 양전자 빔

(9×10^8 moderated positrons/s)

Nucl. Instrum. Methods A, 593 (2008) 616

02 Positron Annihilation Spectroscopy

^{22}Na

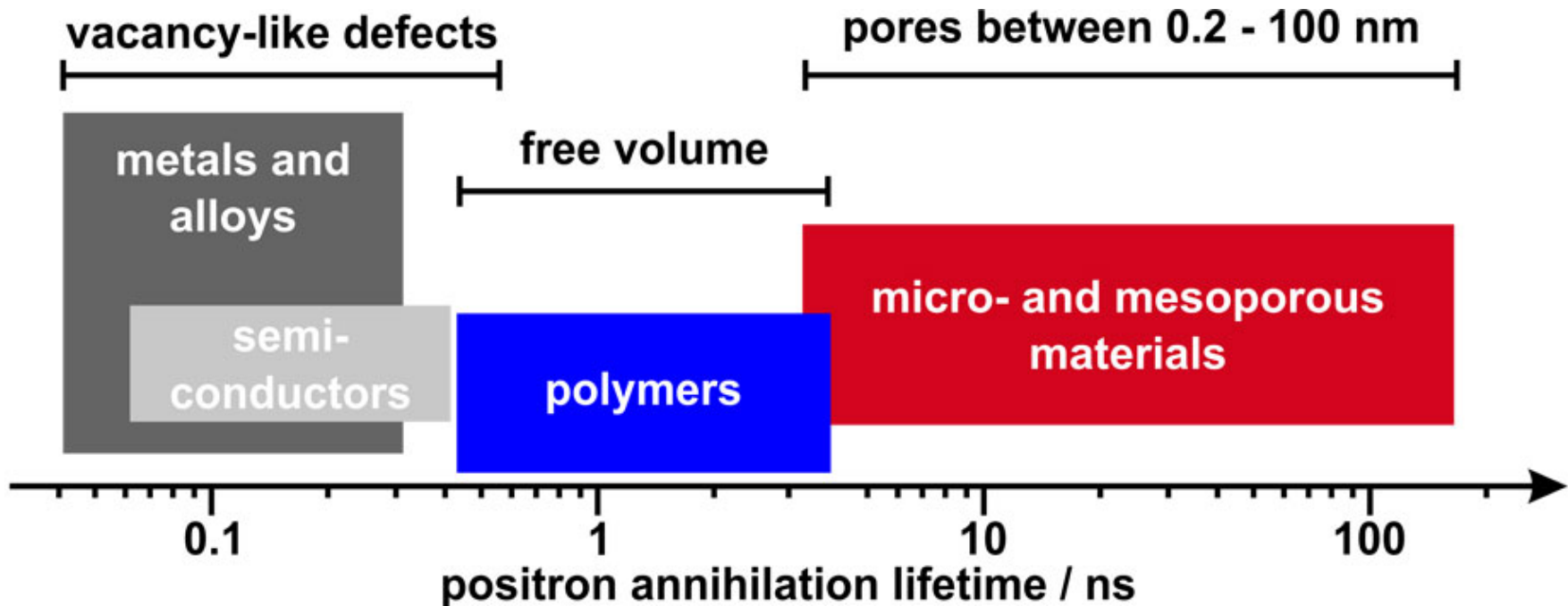


02 Positron Annihilation Spectroscopy

■ 재료별 양전자 수명

■ 다양한 첨단 소재들의 특성을 분석할 수 있음.

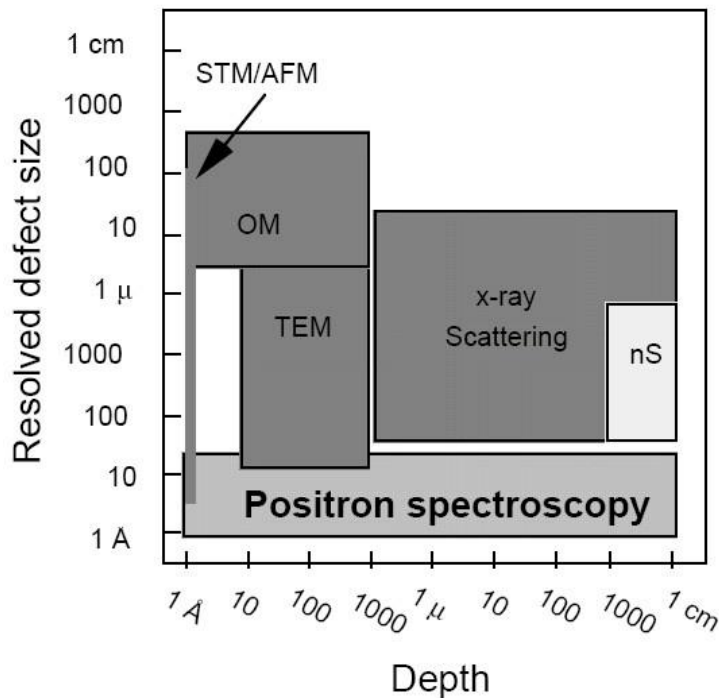
- 차세대 원전 구조재(금속), 반도체, 고분자/촉매, 양자, 배터리 소재 등



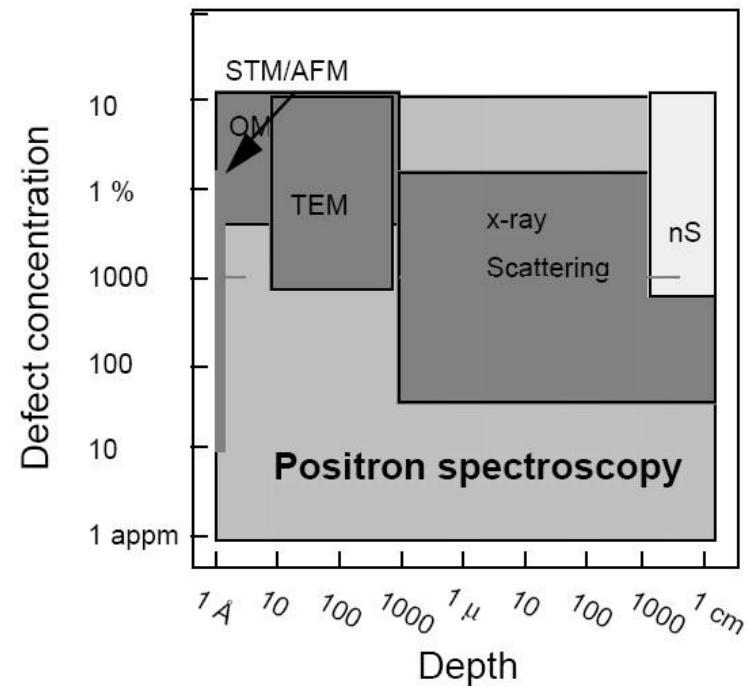
02 Positron Annihilation Spectroscopy

■ Sensitivity

- 매우 높음 (10^{-7} 수준)
- 분석 대상: mono-vacancy, cluster, closed voids, free volume



Available defect size



Available defect concentration

02 Positron Annihilation Spectroscopy

Defect/vacancy sensitivity

- 매우 높음 (10^{-7} 수준)
- 분석 대상: mono-vacancy, cluster, closed voids

| 기술 | 민감도 | 측정 대상 | 특징 | 제한점 |
|-----------|--------------------|--|-------------------------|----------------------|
| PAS | 매우 높음 | mono-vacancy, vacancy cluster, dislocation, closed voids | point defect 탐지 최상, 비파괴 | 해석 복잡, 물질 특이성 있음 |
| TEM | 중간 | vacancy, dislocation loop, nm 이상 결함 | 시각화 가능, 구조 정보 우수 | 대표성 낮고 시료 준비 어려움 |
| XRD | 낮음~중간 | dislocation, strain, stacking fault | bulk 평균 정보, 간접적 | point vacancy 탐지 어려움 |
| EPR (ESR) | 매우 높음 (비자기성 결함 제외) | unpaired electron defects | 자기성 결함에 민감, 고감도 | 전자 중성 결함은 탐지 불가 |
| APT | 매우 높음 (원자수준) | atom-level vacancy, segregation | 3D 원자 지도, 고해상도 | 고가, 분석 영역 매우 작음 |
| TDS* | 중간 | 기체 트랩, vacancy cluster | 온도 변화 따른 결함 해석 | 해석 조건 민감, 정량성 제한 |

*Thermal Desorption Spectroscopy

02 Positron Annihilation Spectroscopy

Free volume sensitivity

- 매우 높음 (\AA , 10^{-7} 수준)
- 분석 대상: free volume, closed voids

| 기술 | 민감도 | 측정 대상 | 특징 | 제한점 |
|-----------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| PAS | 매우 높음 | free volume, closed voids | 닫힌 공간도 측정 가능, 비파괴적 | 해석 복잡, 전자 밀도 영향 |
| BET* | 중간 | opened free volume (meso/macro pore) | 간편, 표면적과 기공 분포 정보 제공 | 닫힌 공간은 측정 불가 |
| 밀도 측정 (He-pycnometry) | 중간 | 전체 free volume의 총량 | 간접적 전체 부피 차이 추정 | 미세구조 정보 부족 |
| SAXS/SANS | 중간 | 나노 구조, 평균 기공 크기 | 구조 기반 추정, 비파괴 | 직접적인 free volume 측정은 아님 |
| NMR | 중간 | 분자 자유도 기반 micro void | 유동성 정보로 free volume 추정 | 해석이 간접적, 복잡함 |
| DSC/DMA/TMA** | 낮음 | 유리전이온도(T_g) 전/후의 free volume 변화 | 열적 거동으로 간접 추정 | 민감도 낮고 정량화 어려움 |
| TEM | 중간~높음 | 실제 물리적 void | 시각화 가능 | 시료 범위 좁고 대표성 부족 |

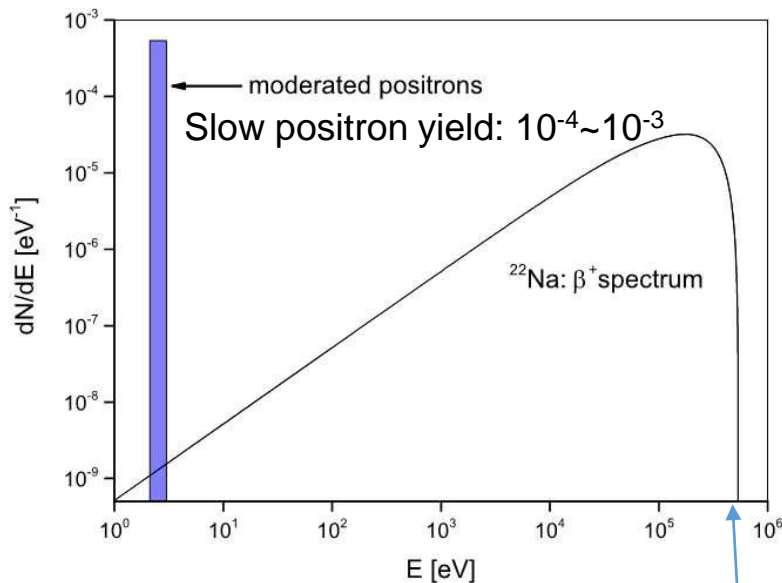
*Brunauer-Emmett-Teller

**Differential Scanning Calorimetry/Dynamic Mechanical Analysis/Thermomechanical Analysis

03 고강도 양전자분광시설의 필요성

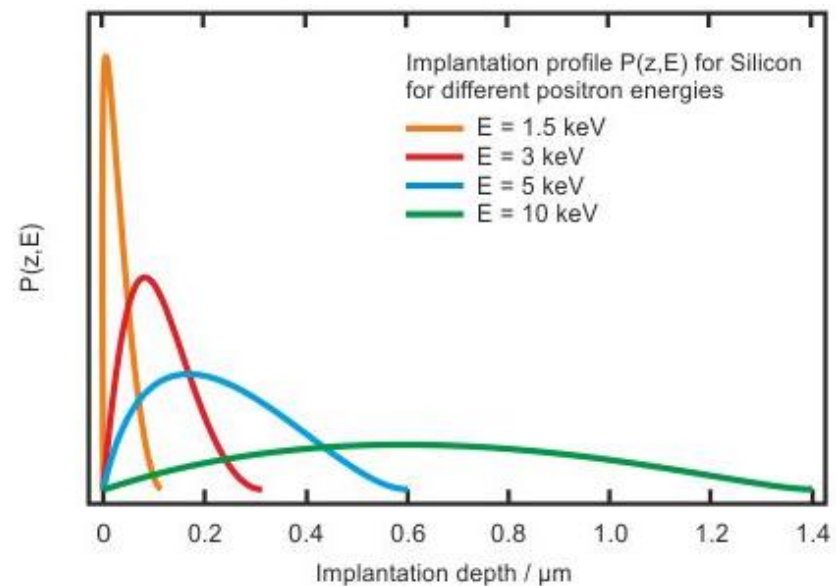
- 기존 동위원소(^{22}Na) 기반 양전자는 물리적 한계가 있음
 - 나노/마이크로 단위 박막 시료(반도체, polymer film 등)는 slow positron beam이 필요함
 - Slow positron 생성(moderation)을 위해서는 고강도의 양전자가 필요함
 - ^{22}Na : Self-absorption으로 인하여 최대 $\sim 10^7$ positrons/s 생성 가능 \rightarrow 분석 시간 한계

Positron energy spectrum (^{22}Na)



Peak energy: 545 keV

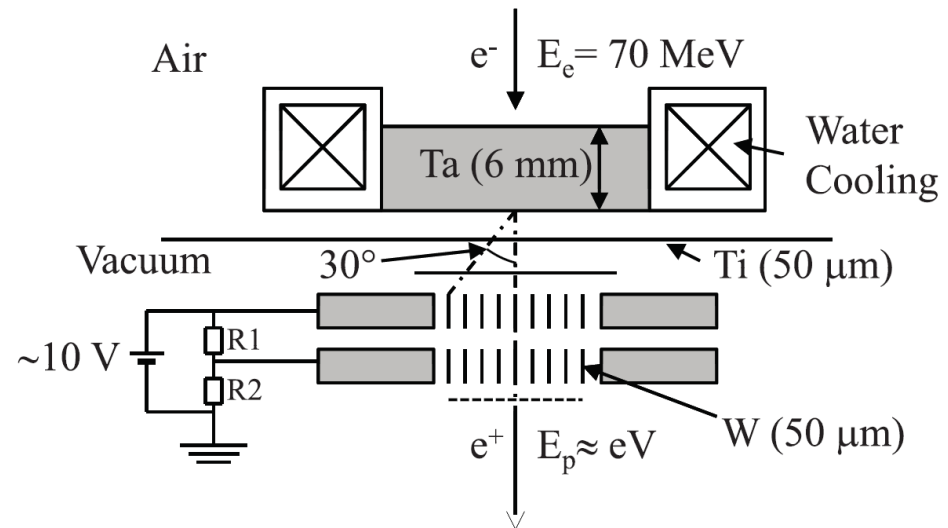
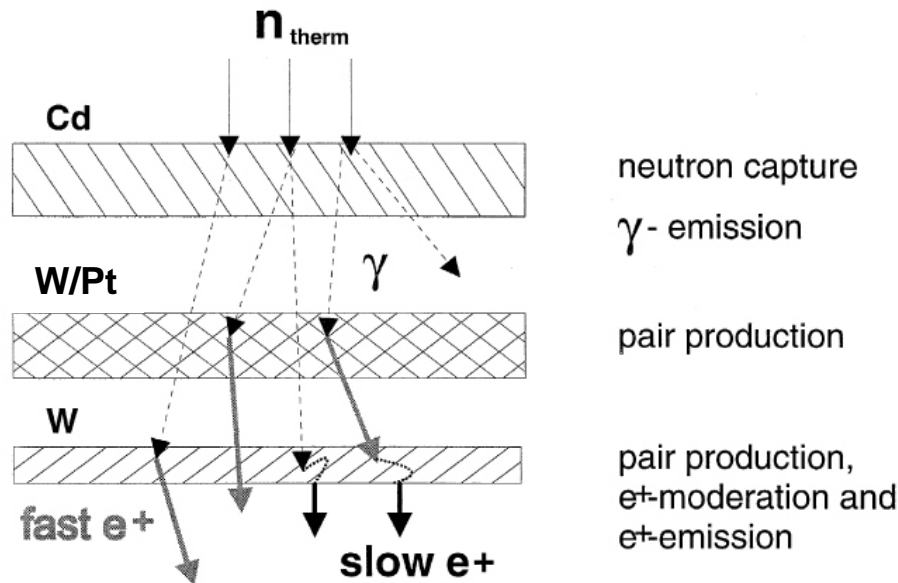
Positron implantation profile (Si)



04 고강도 양전자 생성

Pair production 기반 양전자 생성

- 연구용원자로: $\text{Cd-113}(n, \gamma)\text{Cd-114} \rightarrow \text{Pair production}$
 - 또는 fission γ -ray, neutron capture γ -ray $\rightarrow \text{Pair production}$
- 전자가속기: $e^- \rightarrow \text{Bremsstrahlung X-ray} \rightarrow \text{Pair production}$
- Pair production 단면적은 Z number에 비례하기 때문에 양전자 생성 target은 텅스텐(W), 백금(Pt), 탄탈륨(Ta) 등 높은 원자번호의 금속을 사용

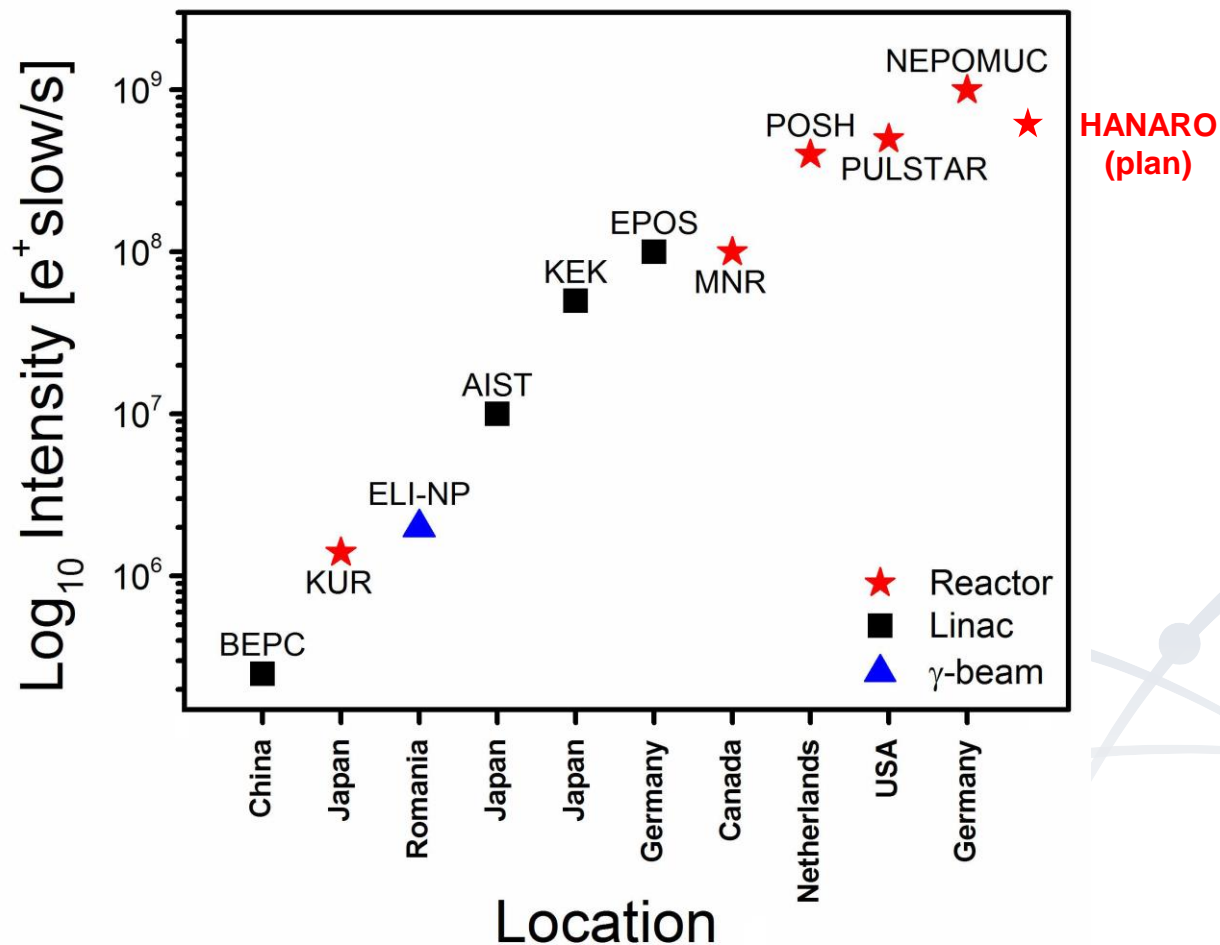


연구용 원자로 열중성자 기반 양전자 생성

전자가속기 기반 양전자 생성

04 고강도 양전자 생성

- 전 세계 고강도 양전자 연구 시설
 - 연구용원자로 중성자는 최고의 양전자 source



04 고강도 양전자 생성

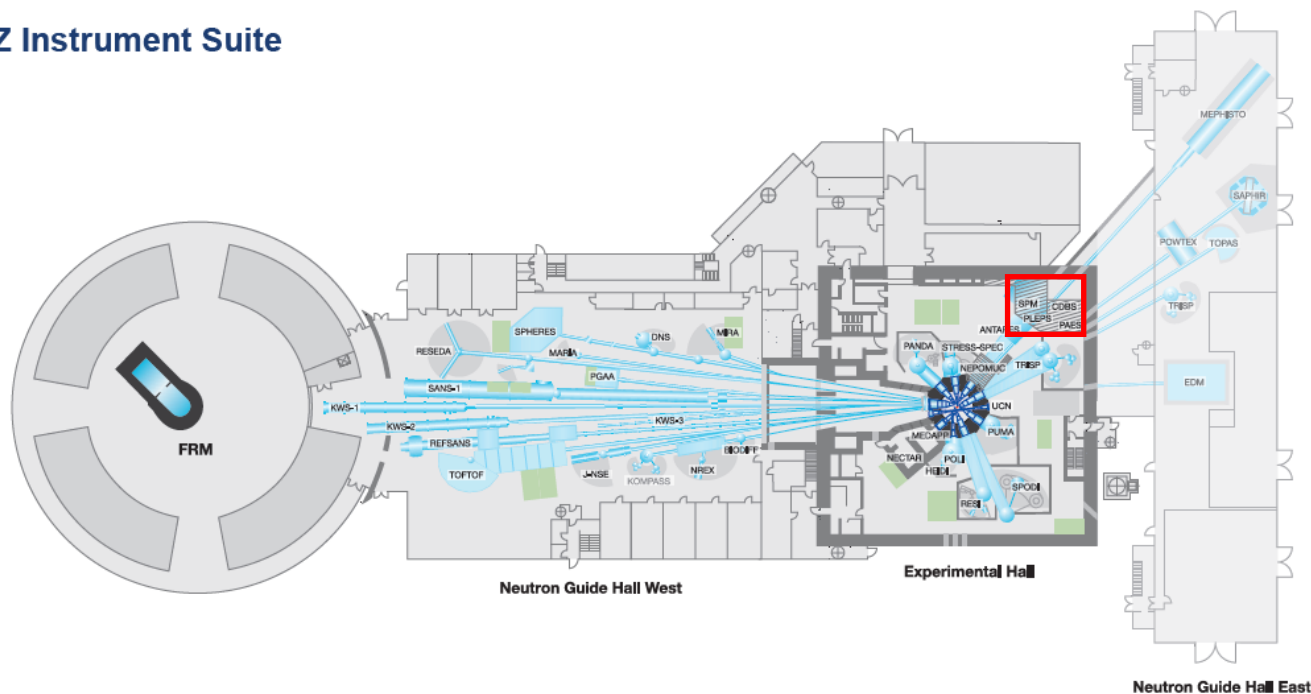
- 전 세계 연구용 원자로 기반 고강도 양전자 시설 현황
 - 하나로 중성자는 세계 최고 수준의 고강도 양전자 시설을 구축할 수 있음.

| | POSH | NEPOMUC | PULSTAR | HIPOS | KUR | MIPBF | HANARO |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| Nationality | Netherlands | Germany | USA | Netherlands | Japan | Canada | Korea |
| Institute | Delft Univ.. | TUM | NC State Univ. | JRC-IET | Kyoto Univ. | McMaster Univ. | KAERI |
| Reactor power | 2 MW | 20 MW | 1 MW | 45 MW | 5 MW (1 MW) | 3 MW | 30 MW (27 MW) |
| $\Phi_{th} (cm^{-2} s^{-1})$ | 3.5×10^{13} | 2.4×10^{14} | 2.5×10^{12} | 1.4×10^{14} | 1.5×10^{12} | $6-8 \times 10^{12}$ | $1.2-4.4 \times 10^{14}$ |
| Converter (moderator) materials | W | Cd/Pt | Cd/W | Cd/W | Cd/W | Pt | W or Hf/W |
| Positron intensity (e ⁺ /s) | 4×10^8 | 9×10^8 | 5×10^8 | 3×10^{13} (calculated) | 1.4×10^6 | $\sim 5 \times 10^8$ | $> 5 \times 10^8$ |
| Re-moderated positron intensity (e ⁺ /s) | $> 10^5$ | 5×10^7 | 5×10^6 | $\sim 10^{10}$ (expected) | - | - | (미정) |

프랑스 ILL의 High Flux Reactor와 미국 NIST의 연구용 원자로에는 양전자 시설 없음

05 독일 FRM-II NEPOMUC

MLZ Instrument Suite



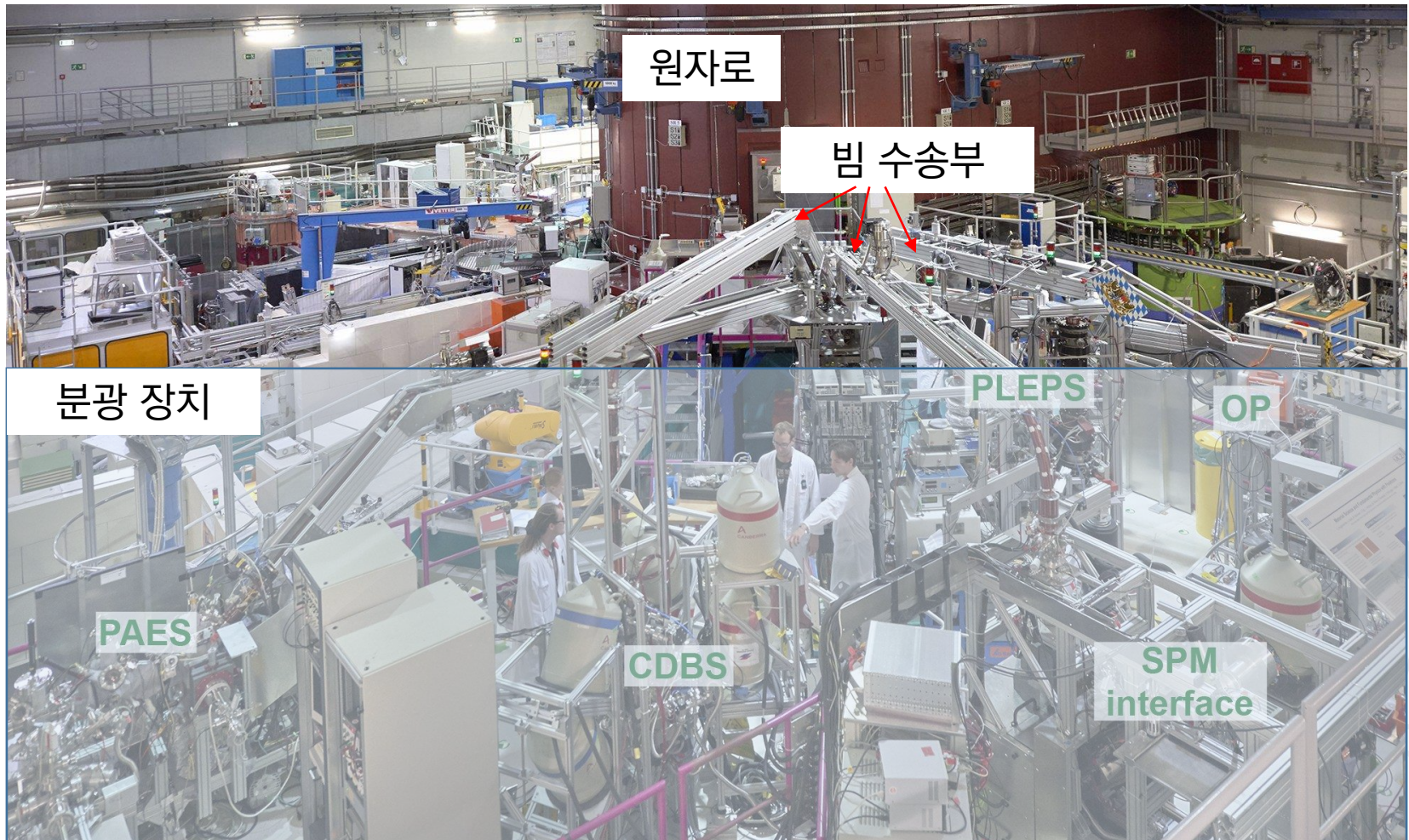
| Instrument | Description | Neutrons | Operated by | Funding | Instrument group at MLZ |
|------------|---|----------|--------------------|----------|-------------------------|
| ANTARES | Radiography and tomography | cold | TUM | TUM | FRM II |
| BIODIFF | Diffraction for large unit cells | cold | TUM, JCNS | TUM, FZJ | FRM II, JCNS |
| DNS | Diffuse scattering spectrometer | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| HEIDI | Single crystal diffractometer | hot | RWTH Aachen | FZJ | JCNS |
| J-NSE | Spin-echo spectrometer | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| KOMPASS* | Three axes spectrometer | cold | Uni Köln, TUM | VF | FRM II |
| KWS-1 | Small angle scattering | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| KWS-2 | Small angle scattering | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| KWS-3 | Very small angle scattering | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| MARIA | Magnetic reflectometer | cold | JCNS | FZJ | JCNS |
| MEPHISTO** | Instrument for particle physics, PERC | cold | TUM | TUM, DFG | FRM II |
| MIRA | Multipurpose instrument | cold | TUM | TUM | FRM II |
| MEDAPP | Medical irradiation treatment | fast | TUM | TUM | FRM II |
| NECTAR | Radiography and tomography | fast | TUM | TUM | FRM II |
| NEPOMUC | Positron source, CDBS, PAES, PLEPS, SPM | - | TUM, UniBw München | TUM | FRM II |
| NREX | Reflectometer with X-ray option | cold | MPI Stuttgart | MPG | MPI Stuttgart |
| PANDA | Three axes spectrometer | cold | JCNS | FZJ | JCNS |

| Instrument | Description | Neutrons | Operated by | Funding | Instrument group at MLZ |
|-------------|--|------------|----------------------------------|----------|-------------------------|
| PGAA | Prompt gamma activation analysis | cold | Uni Köln | TUM | FRM II |
| PUMA | Three axes spectrometer | thermal | Uni Göttingen, TUM | VF, TUM | FRM II |
| POLI | Single-crystal diffractometer polarized neutrons | hot | RWTH Aachen | VF, FZJ | JCNS |
| POWTEX* | Time-of-flight diffractometer | thermal | RWTH Aachen, Uni Göttingen, JCNS | VF, FZJ | JCNS |
| REFSANS | Reflectometer | cold | GEMS | VF, HZG | GEMS |
| RESEDA | Resonance spin-echo spectrometer | cold | TUM | TUM | FRM II |
| RESI | Single crystal diffractometer | thermal | LMU | TUM | FRM II |
| SANS-1 | Small angle scattering | cold | TUM, GEMS | TUM, HZG | FRM II, GEMS |
| SAPHIR* | Six anvil press for radiography and diffraction | thermal | Uni Bayreuth | VF | FRM II |
| SPHERES | Backscattering spectrometer | cold | JCNS | VF, FZJ | JCNS |
| SPODI | Powder diffractometer | thermal | KIT | VF, TUM | FRM II |
| STRESS-SPEC | Materials science diffractometer | thermal | TUM, TU Clausthal, GEMS | TUM, HZG | FRM II, GEMS |
| TOFTOF | Time-of-flight spectrometer | cold | TUM | TUM | FRM II |
| TOPAS* | Time-of-flight spectrometer | thermal | JCNS | FZJ | JCNS |
| TRISP | Three axes spin-echo spectrometer | thermal | MPI Stuttgart | MPG | MPI Stuttgart |
| UCN* | Ultra cold neutron source, EDM | ultra-cold | TUM | TUM, DFG | FRM II |

*construction
**reconstruction
VF: instrument construction funded by "SMBF"-Verbundforschung (Collaborative Projects)

05 독일 FRM-II NEPOMUC

FRM-II 원자로실



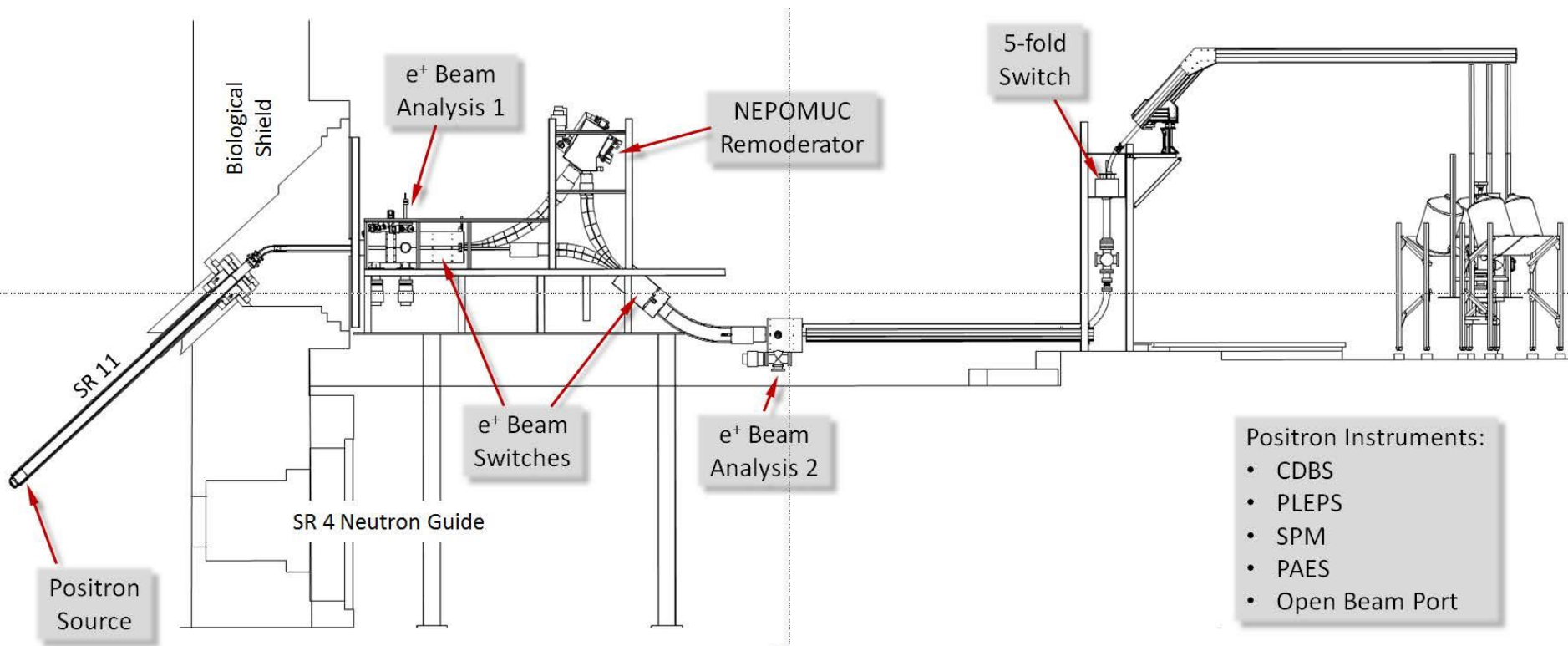
05 독일 FRM-II NEPOMUC

FRM-II 원자로실(반대 방향)



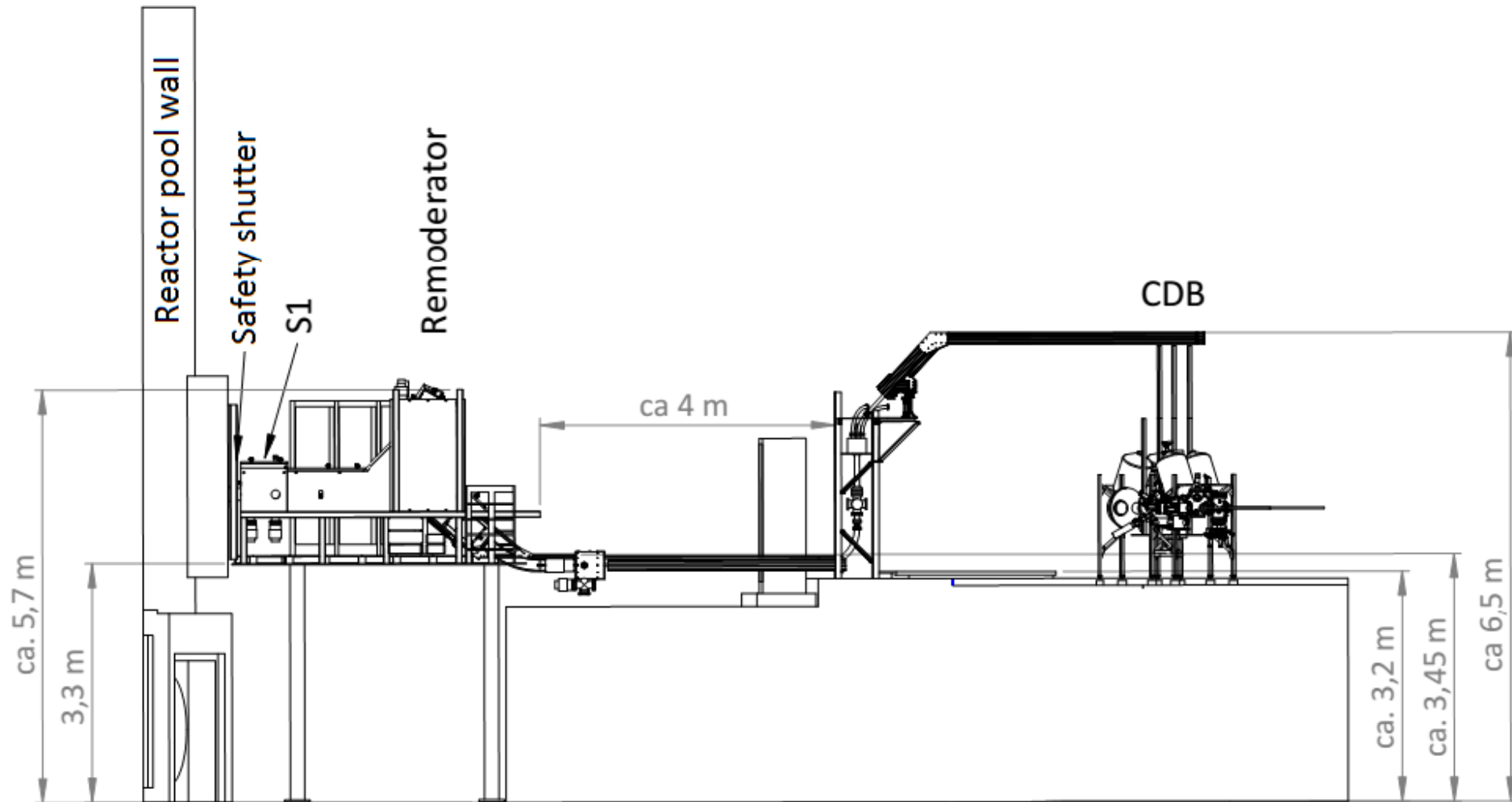
05 독일 FRM-II NEPOMUC

Positron beam 수송 schematic



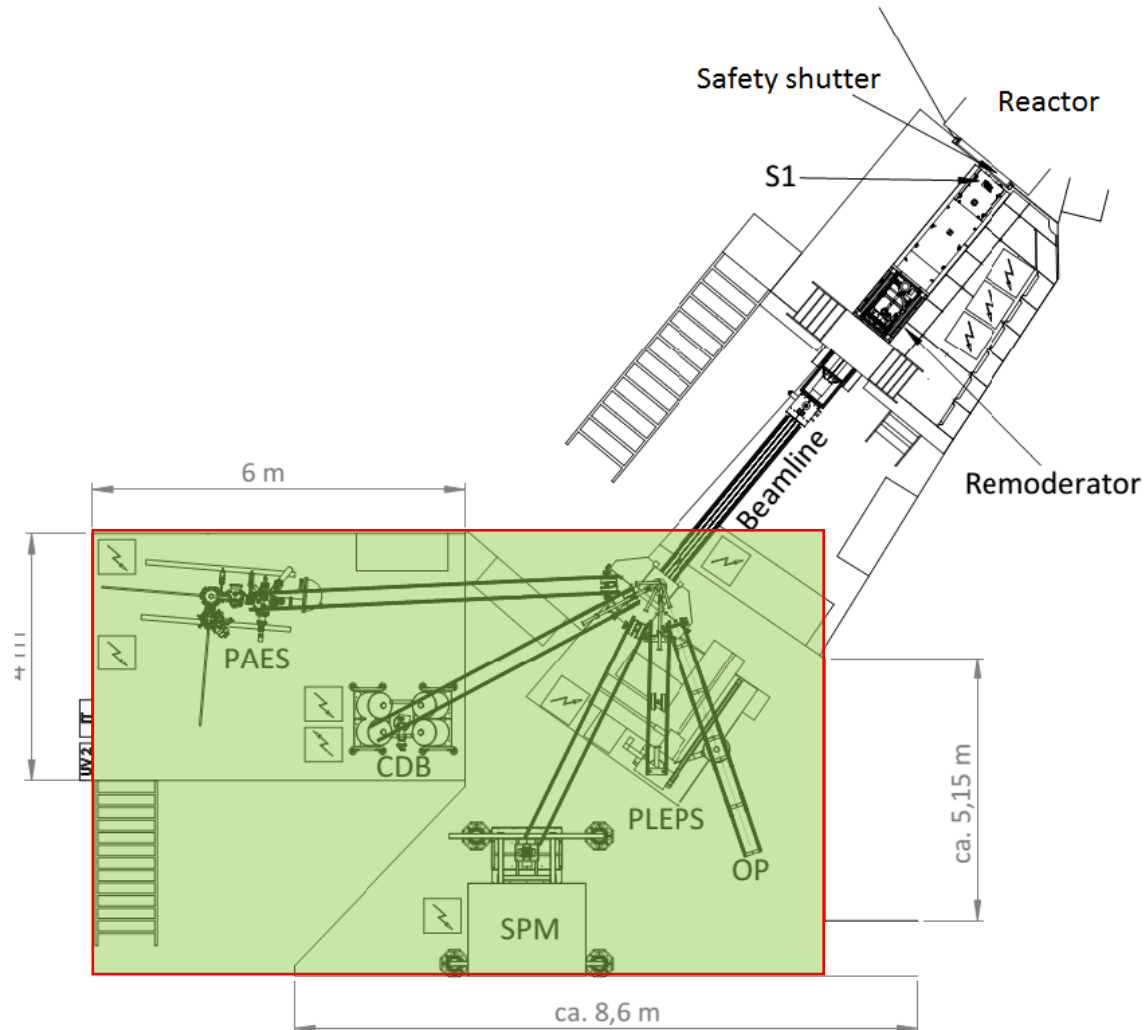
05 독일 FRM-II NEPOMUC

양전자 시설 높이: 6.5 m

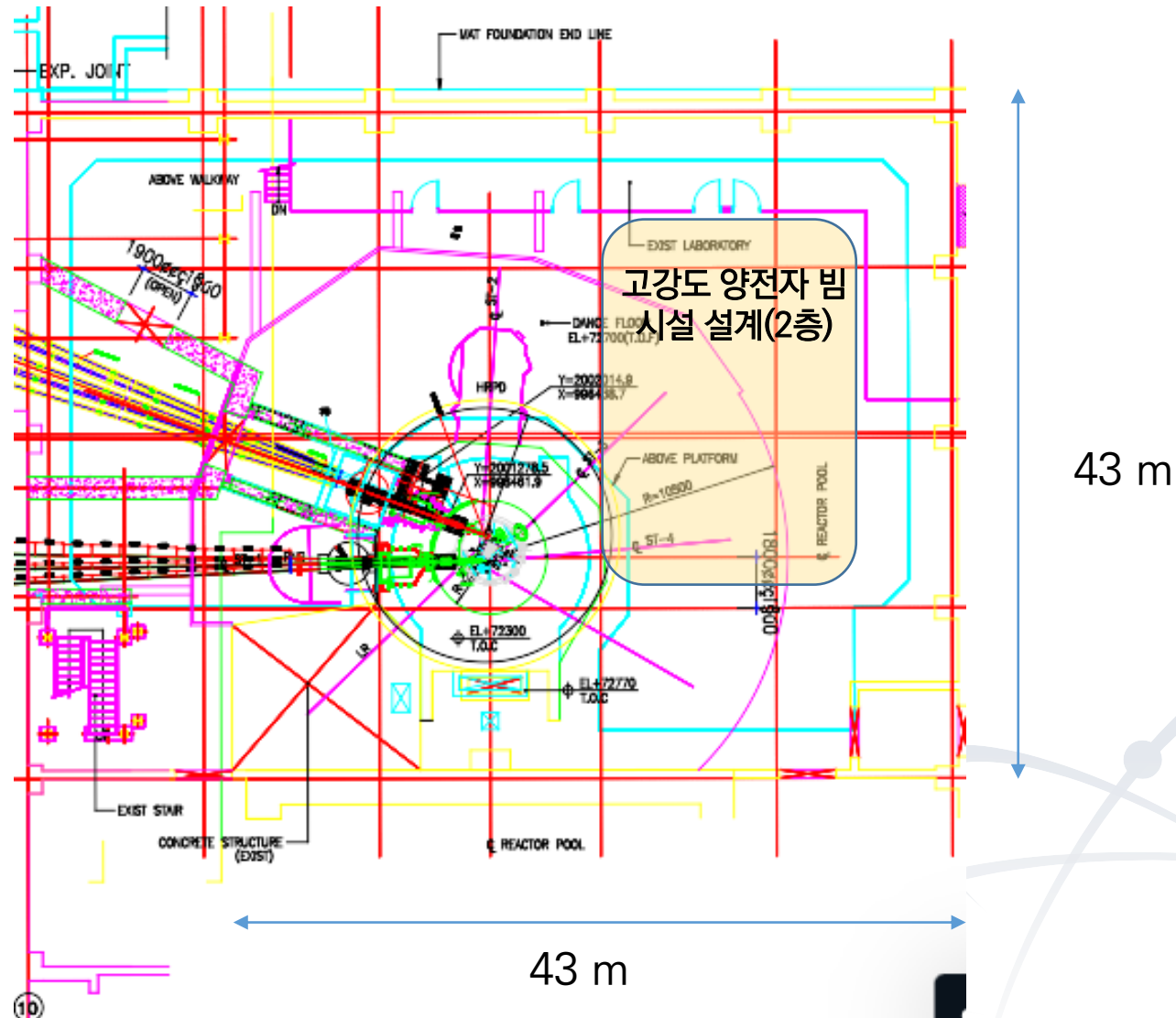


05 독일 FRM-II NEPOMUC

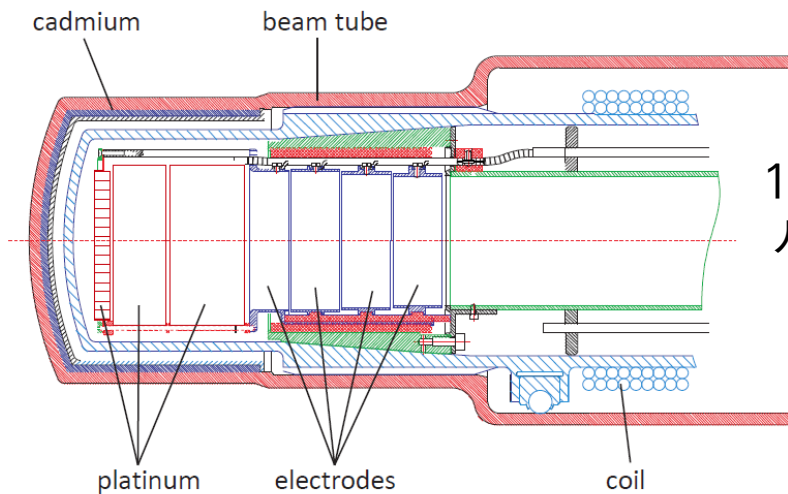
■ 양전자분광 시설 면적: $\sim 12\text{ m} \times 8\text{ m}$



06 고강도 양전자 시설 설계 위치 – 하나로실(ST4)

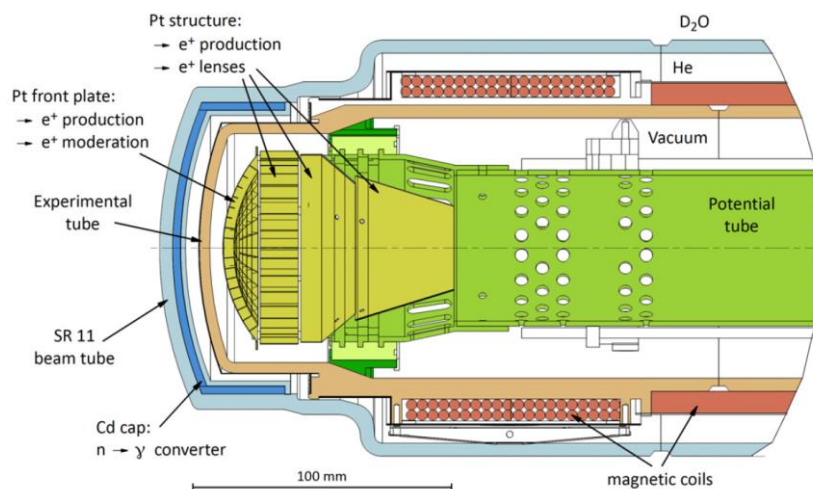


07 Positron Converter (FRM-II)

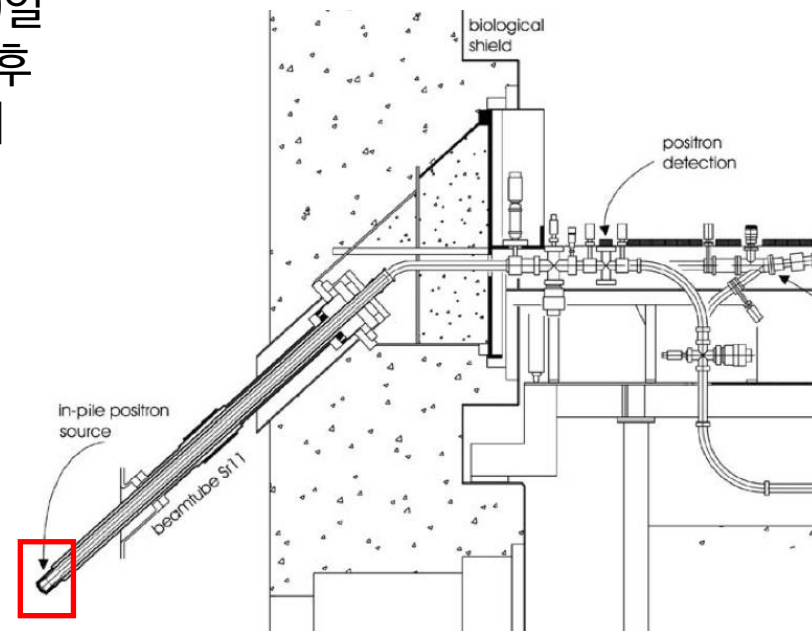


1,250일
사용 후
교체

초기 버전: natural Cd



현재 버전: Cd-113 enriched (80%)



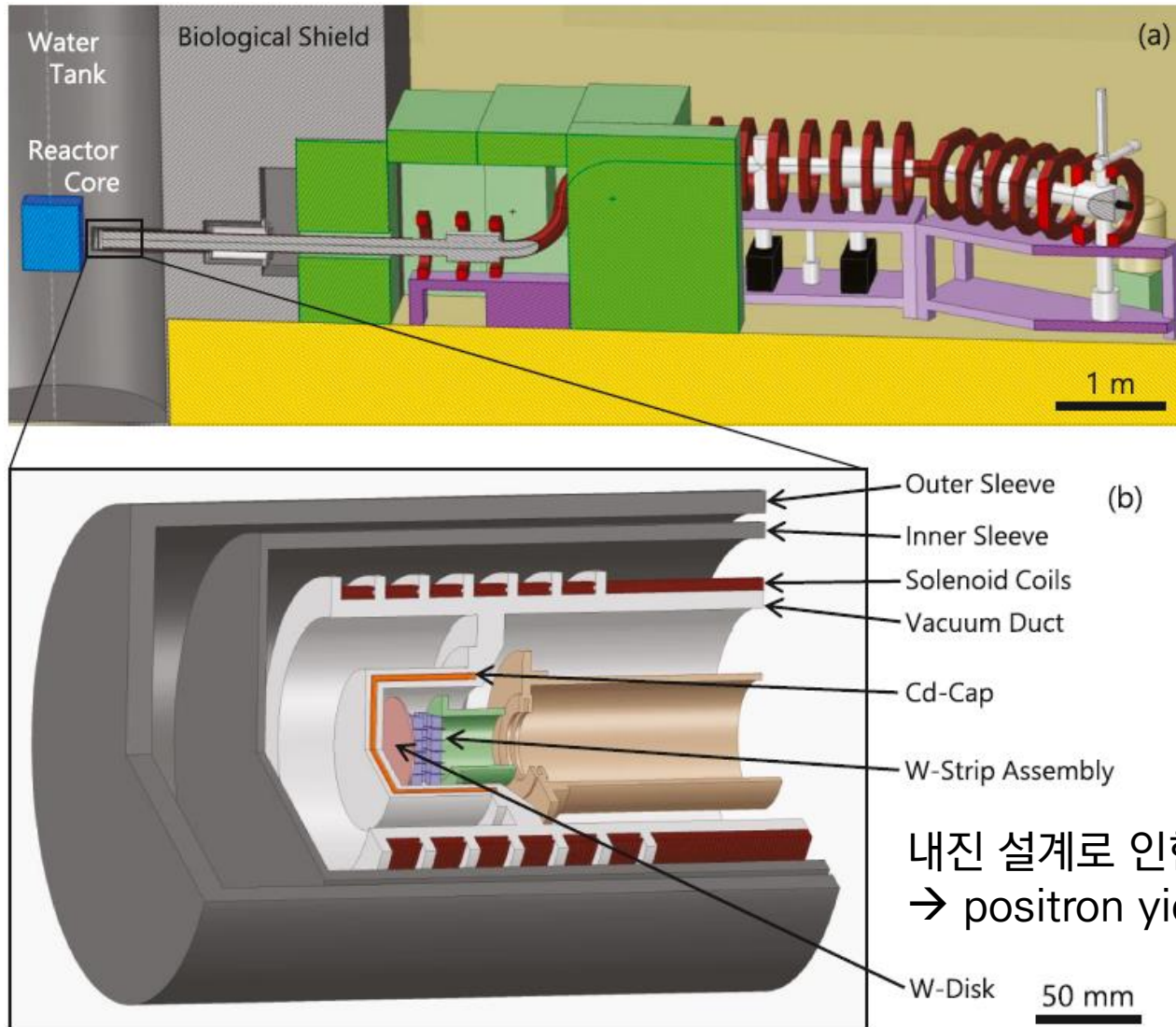
반사체

Biological shield

원자로실

Cd cap을 50 mm 가깝게 이동 →
중성자 포획률 20% 향상

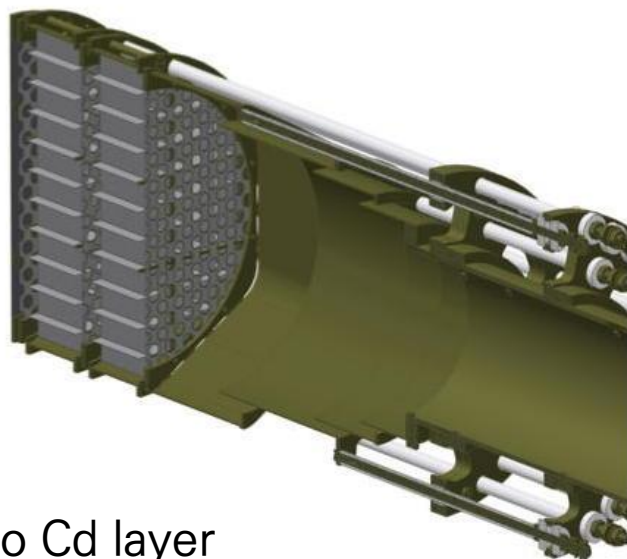
07 Positron Converter (KUR)



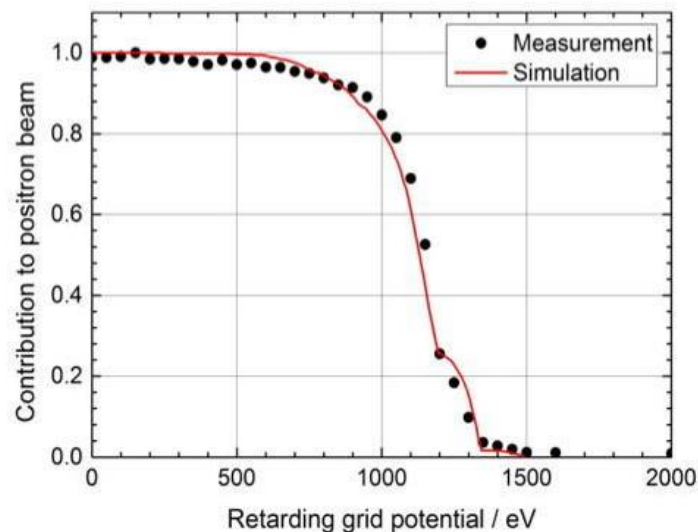
내진 설계로 인한 다중 구조
→ positron yield 감소

07 Positron Converter (POSH)

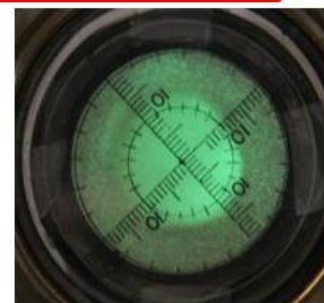
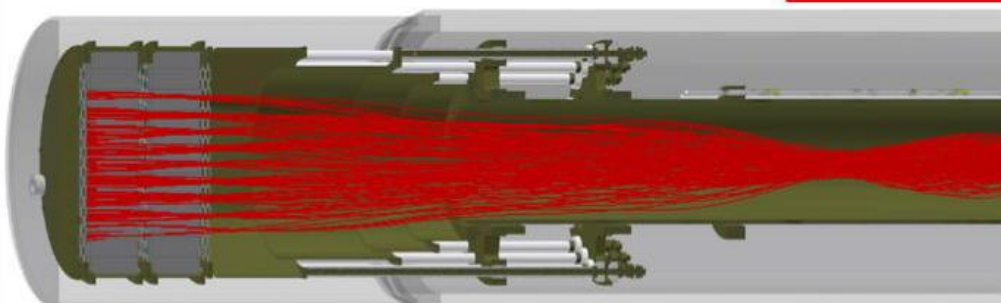
Positron generation and transport



No Cd layer



$$\langle E_{\text{pos}} \rangle = 1.16 \pm 0.20 \text{ keV}$$

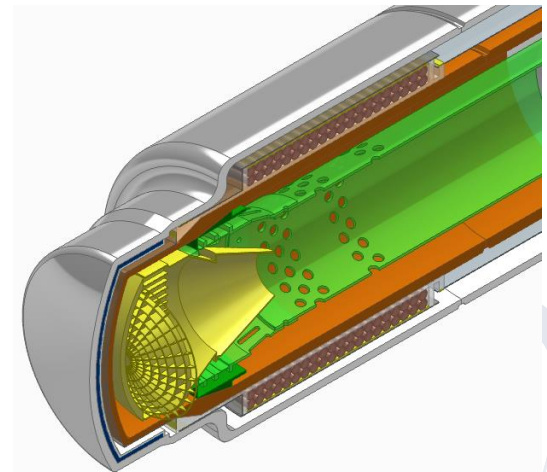
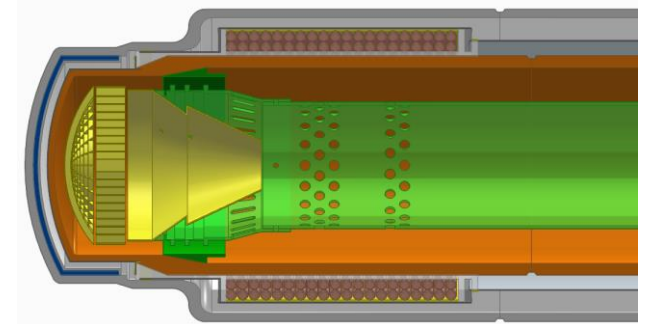
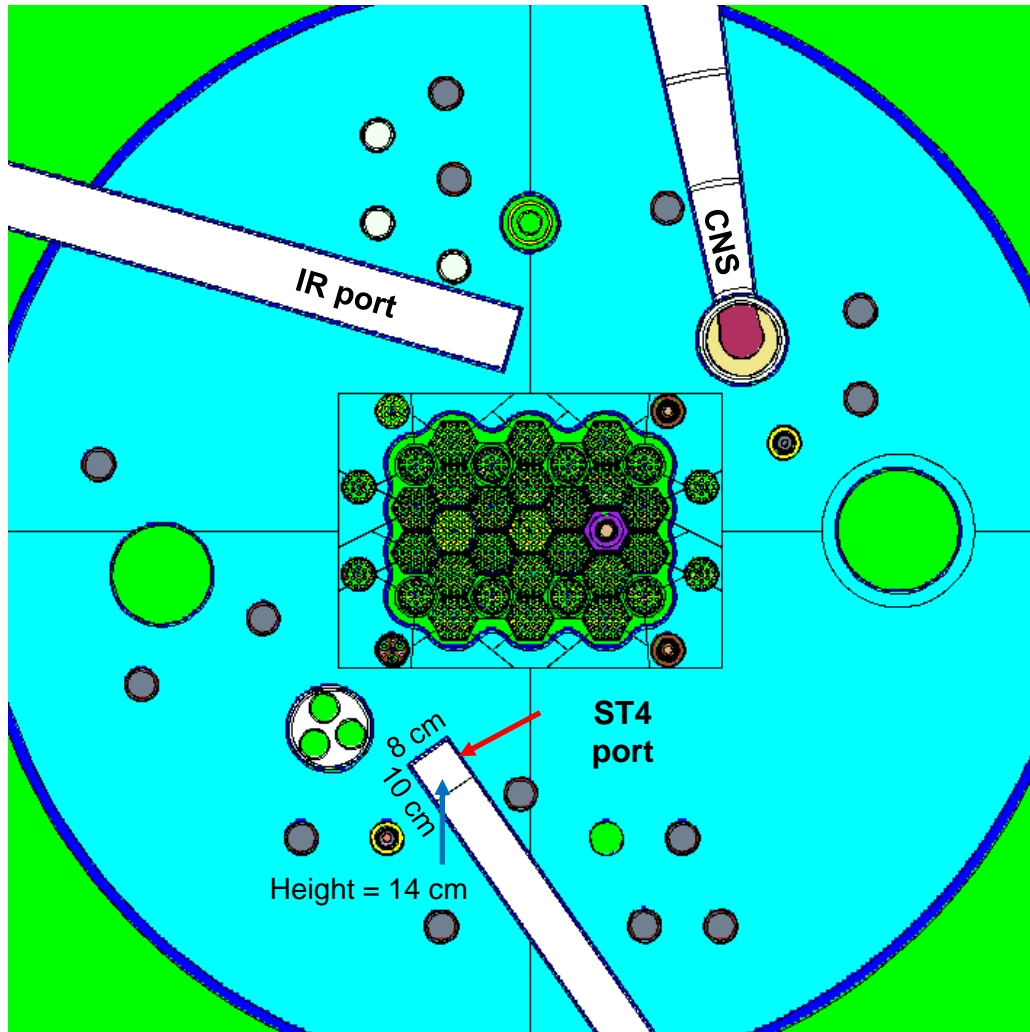


W-source disks

electrostatic lenses

transport tube with coils

07 Positron Converter 위치: 하나로 ST4



시설 인허가, 안전성 분석 등 필요

직경 75 mm 정도의 positron converter 삽입 필요

07 Positron Converter – (n, γ , e⁺) or (γ , e⁺)

■ Cd(n, γ) → pair production

- Cd 녹는점: 321°C
- X-section: 2,450 barn (Cd-113: 20,600 barn)

■ Hf(n, γ) → pair production

- Hf 녹는점: 2,233°C
- X-section: 104 barn (Cd의 1/24)

■ Fission γ -ray 이용

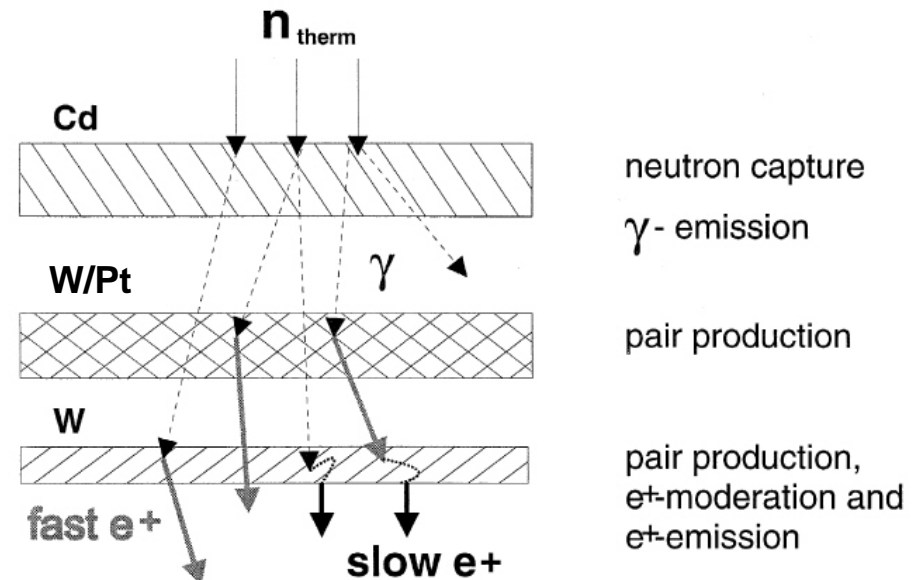
- Sr-90/Y-90: 1.761 MeV (0.0138%)
- Ce-144/Pr-144: 2.185 MeV (0.7%), 1.489 MeV (0.3%)
- I-131: 1.077, 1.257, 1.378 MeV
- Ru-103/Rh-103: max. 2.44 MeV
- Ba-140/La-140: 1.596 MeV (95.4%)
- Cs-134: 1.365 MeV (3.0%), 1.168 MeV (1.8%)
- Ru-106/Rh-106: max. 3.54 MeV
- Xe-138: 2.015 MeV

■ Neutron Capture γ -ray 이용

- $^2\text{H} + n \rightarrow ^3\text{H} + \gamma$
- γ -ray energy: 6.257 MeV
- W or Pt 사용
- 녹는점이 높아 안정적 운영 가능

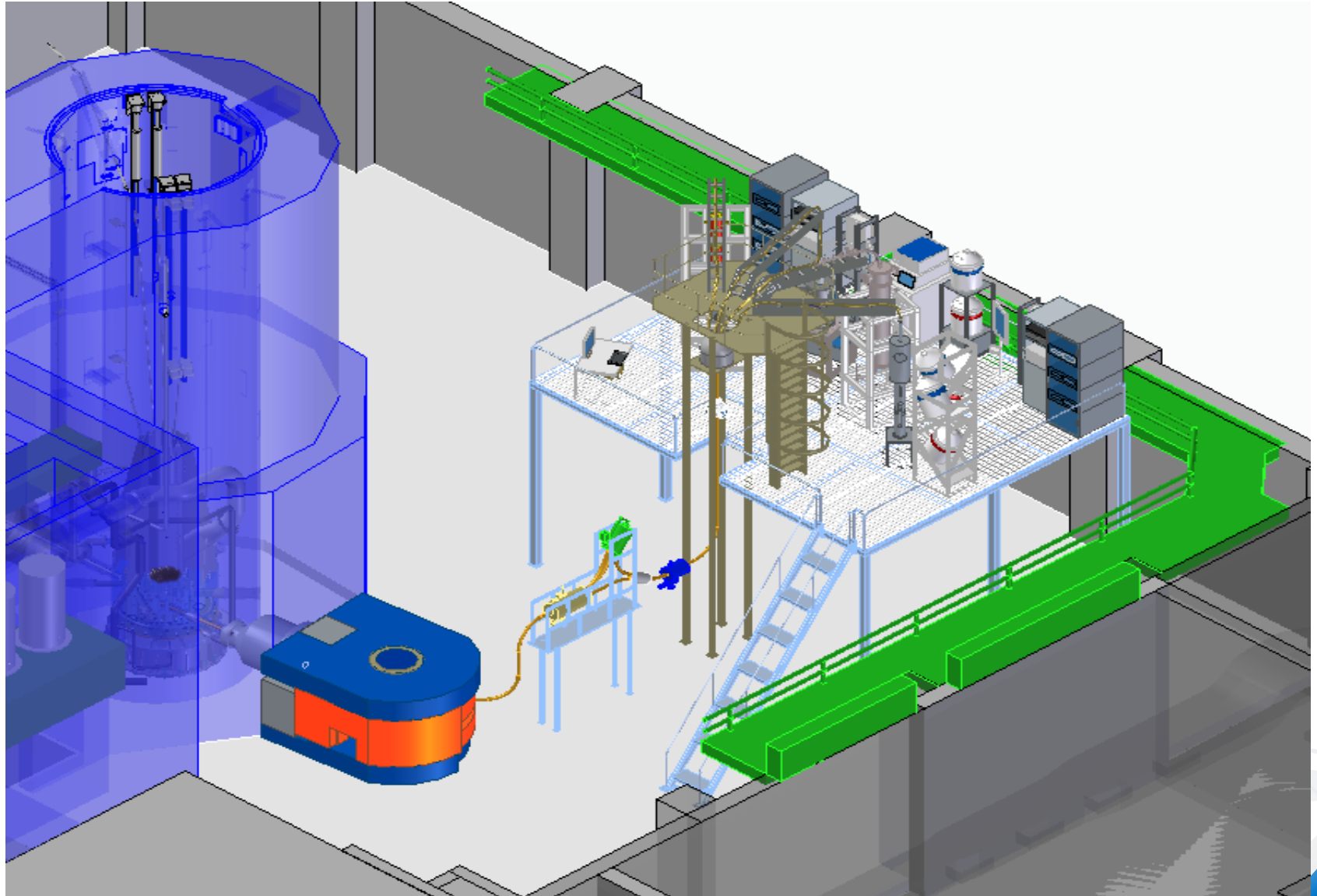
■ $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ 발열(FRM-II)

- Al/Cd/Al 구조: 1.35 kW
- 내부 부품: 0.6 kW
- 총: 약 2 kW
- 유한요소 계산 결과 150°C 미만 유지 (녹는점의 1/2)
- 실제 측정 온도: 약 90°C(D₂O에 의한 방출)

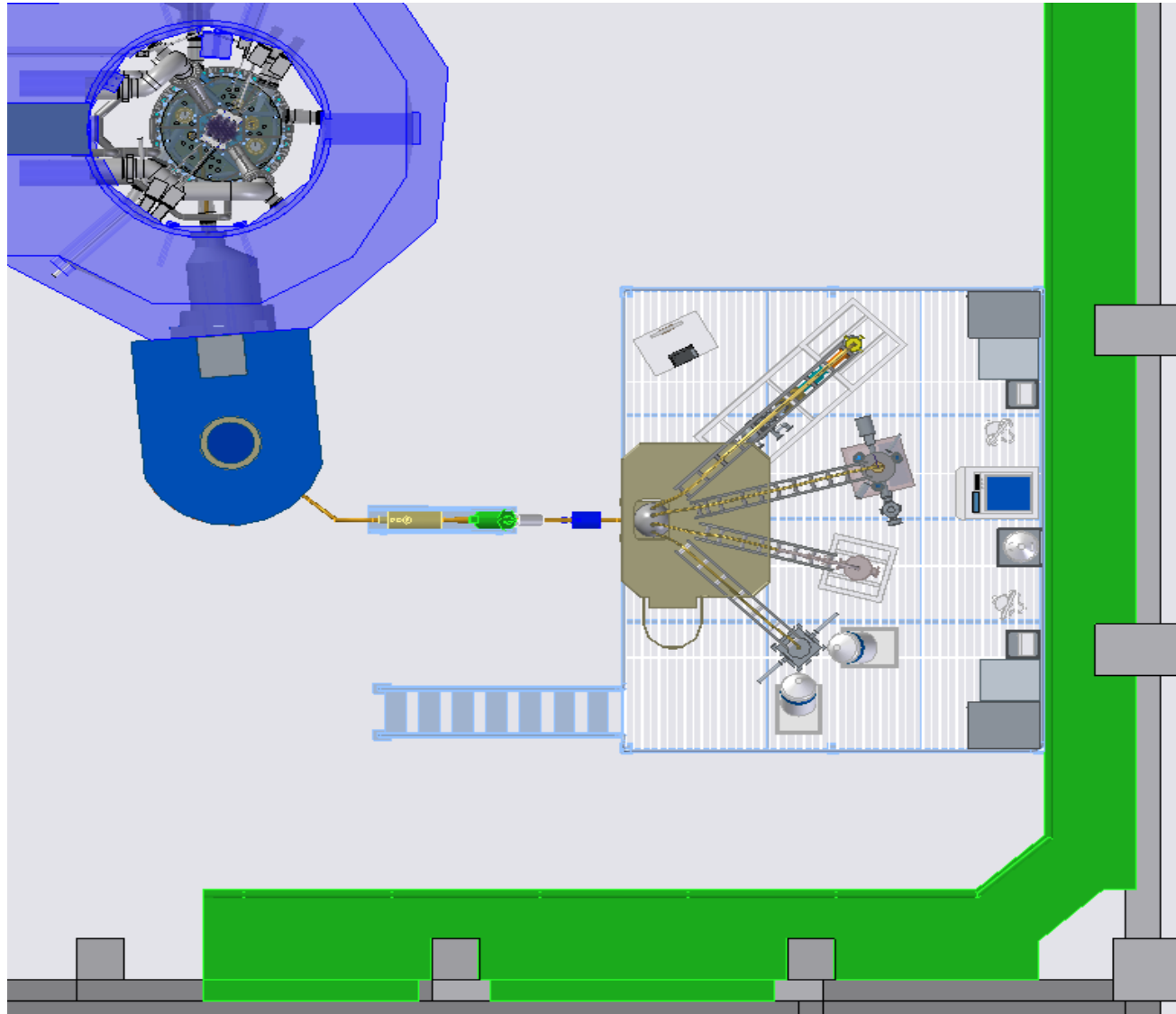


→ Cd 대신 Hf 사용 또는 W/Pt만 사용

08 하나로 양전자 시설 설계 안(ST4)



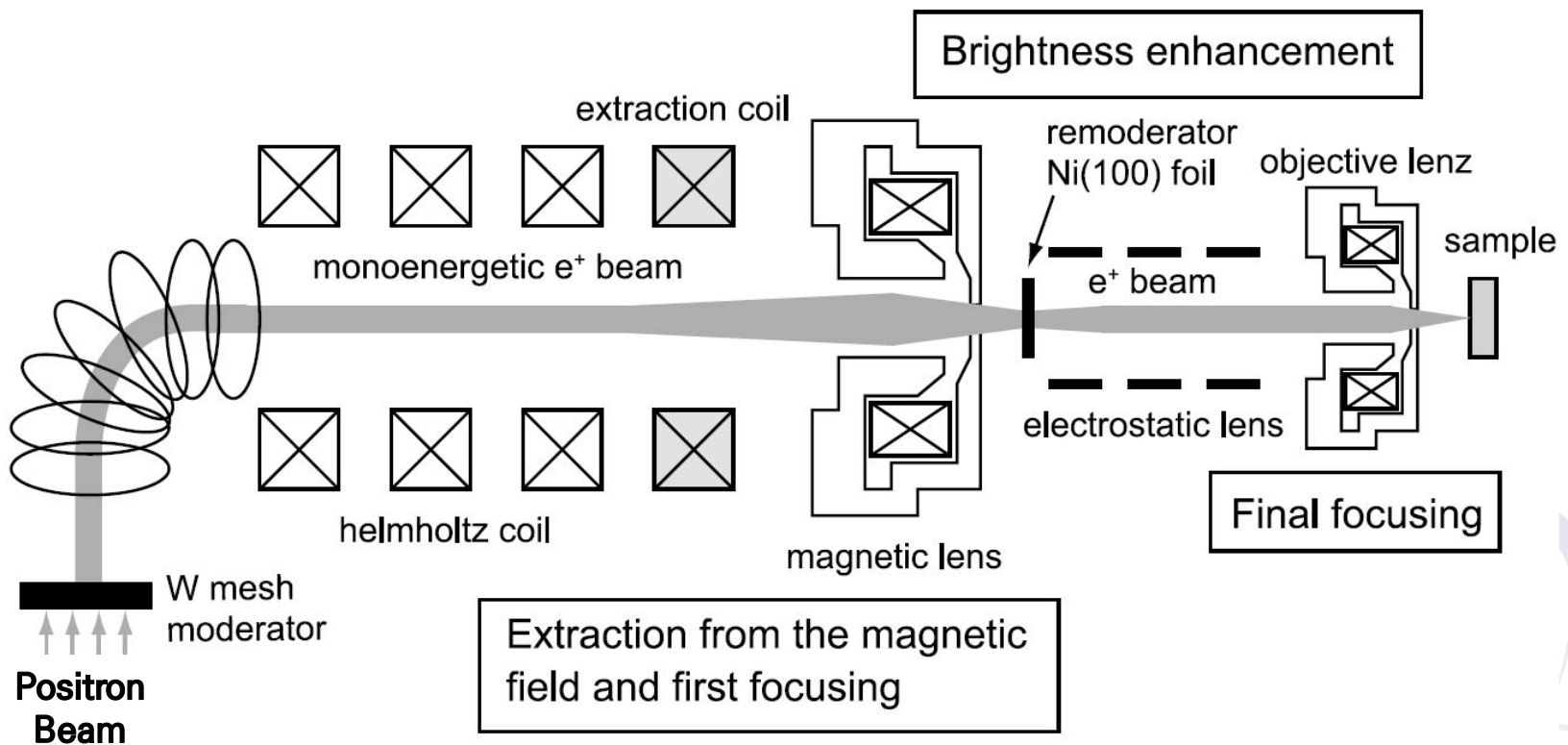
08 하나로 양전자 시설 설계 안(ST4)



09 양전자 빔 수송

Positron Beam Transport & focusing

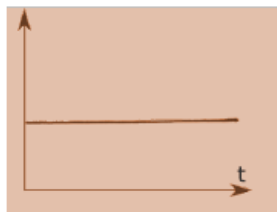
자기장을 이용한 빔 수송 및 집속



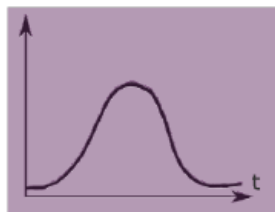
09 양전자 빔 수송

Positron Beam Pulsing

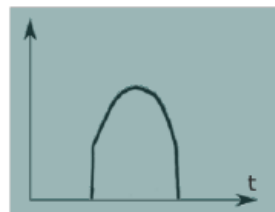
전기장, 가속기를 이용한 beam dynamics



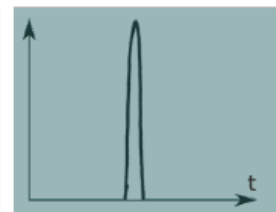
(a) Source



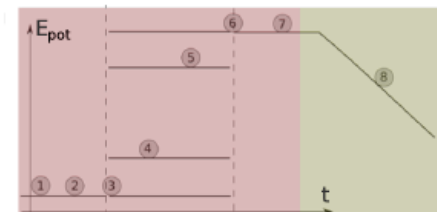
(b) Pre-buncher



(c) Chopper

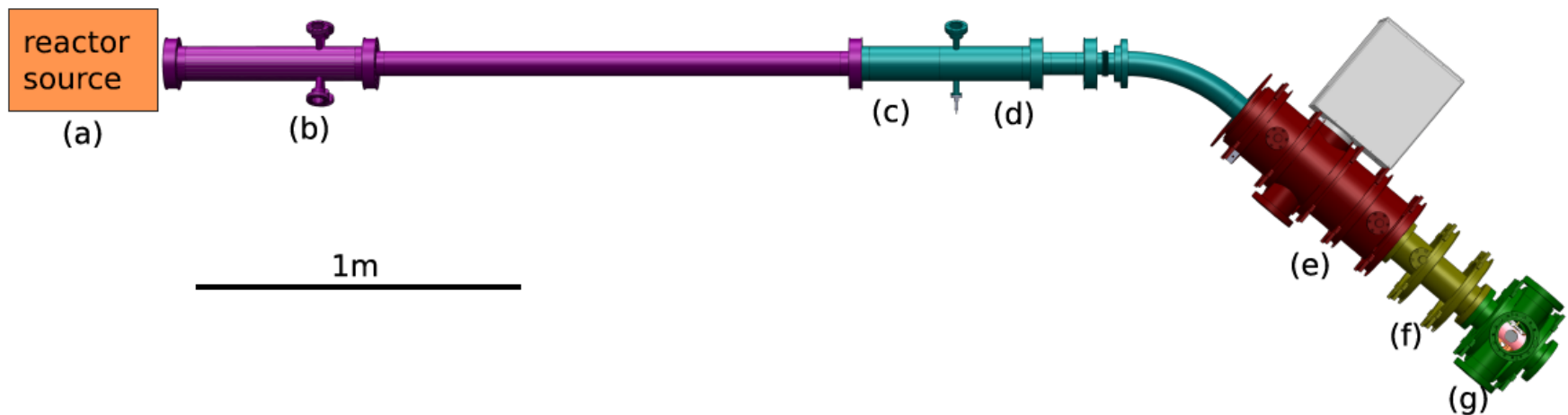


(d) Main-buncher



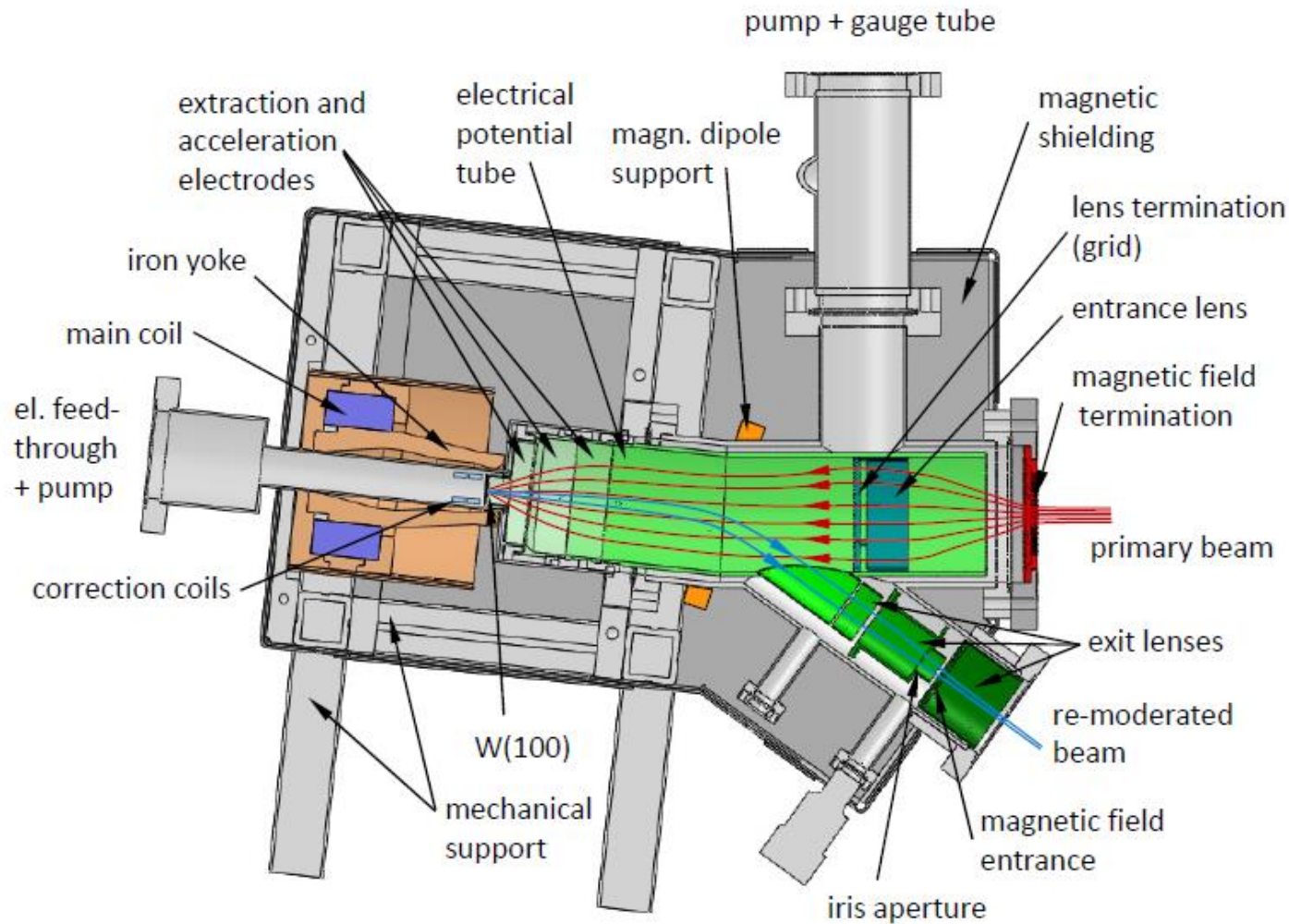
(e) Elevator

(f) Accelerator



09 양전자 빔 수송

Positron re-moderator



09 양전자 빔 수송

Pre-buncher Sawtooth wave

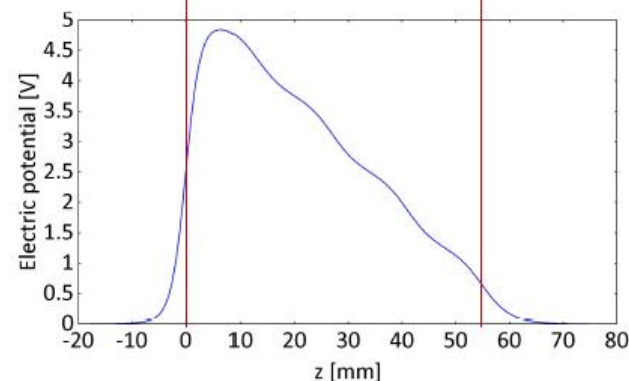
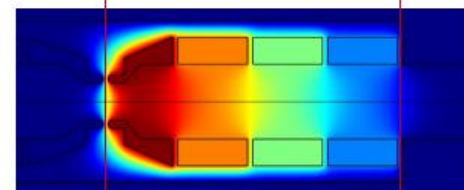
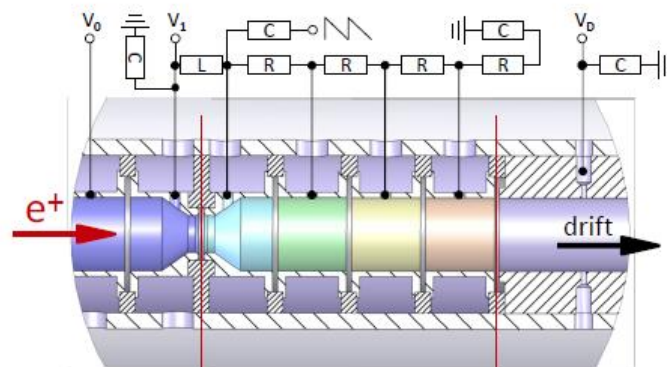
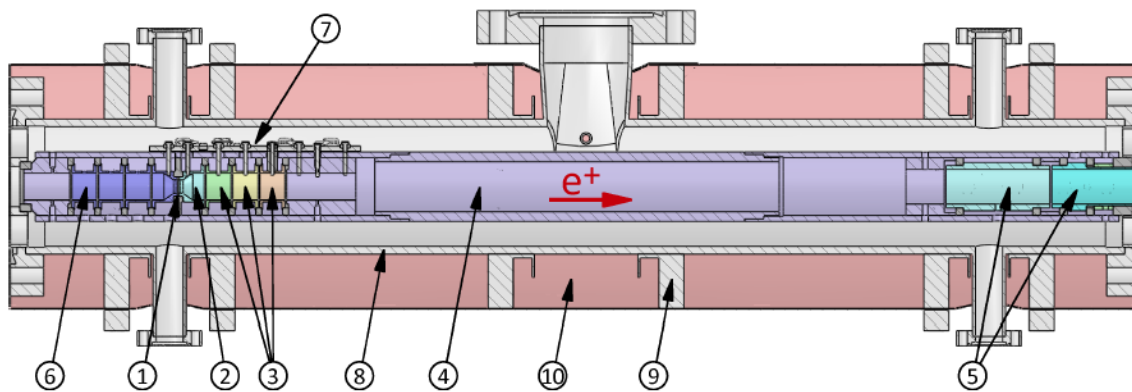
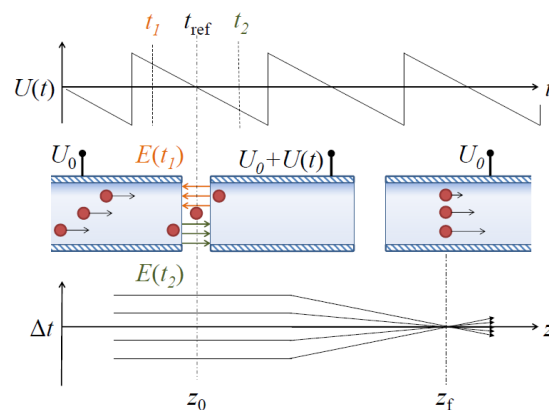
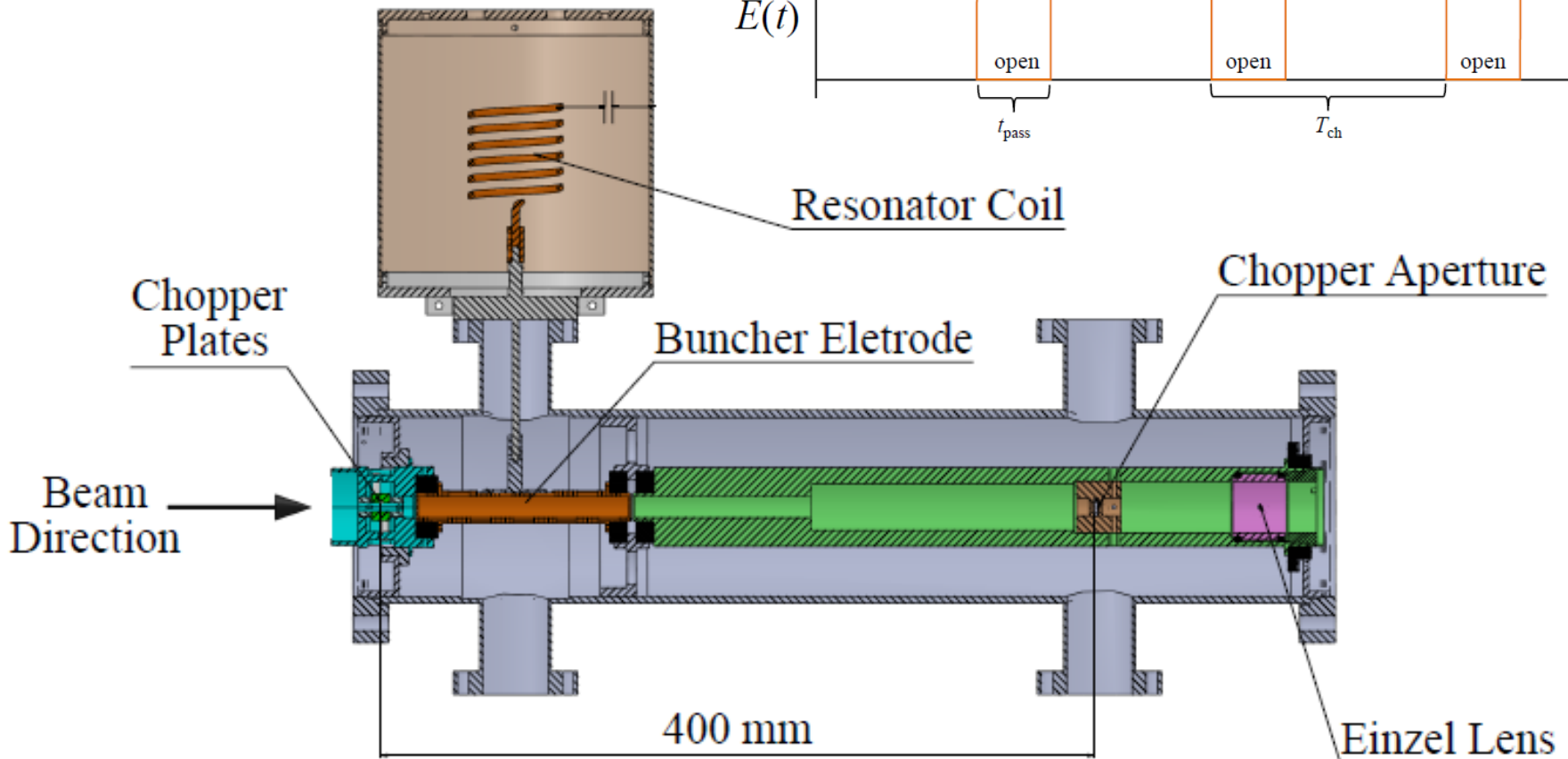
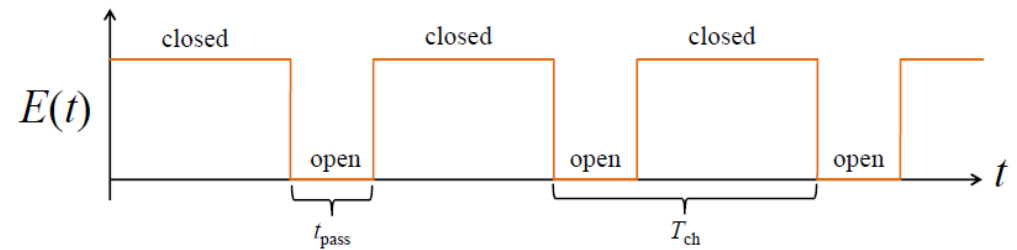
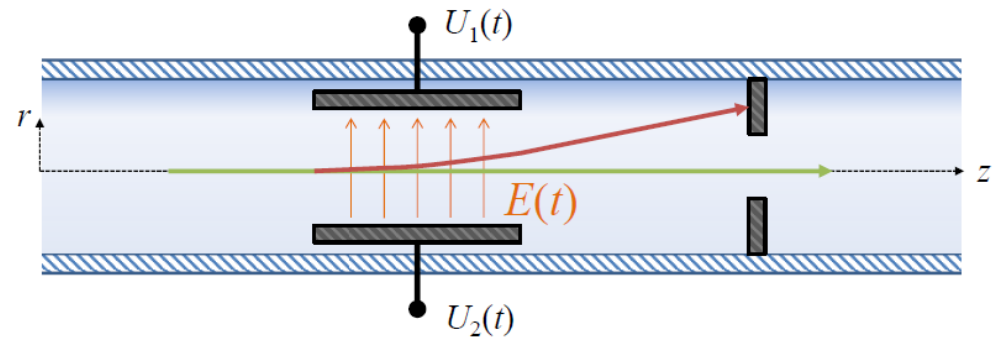


Figure 4.23: Cross section of the pre-buncher: ① is the active buncher gap, where the energy modulation occurs. The additional electrodes ③ are used to spread the potential difference between the first buncher electrode ② and the drift tube ④. Further electrodes ⑤ are used to accelerate the positrons to an appropriate energy for the following buncher. The electrodes ⑥ in front of the buncher gap can be used to decelerate the incident beam in several steps to the low energy which is necessary for the pre-bunching. To ensure that the sawtooth function is as less perturbed as possible the resistors, capacitors, and inductors which are used to couple the dc voltage and rf signals into the electrodes are placed as near as possible to the electrodes onto a vacuum compliant board ⑦. ⑧ is the vacuum chamber on which the support ⑨ for the magnetic shielding ⑩ is mounted.

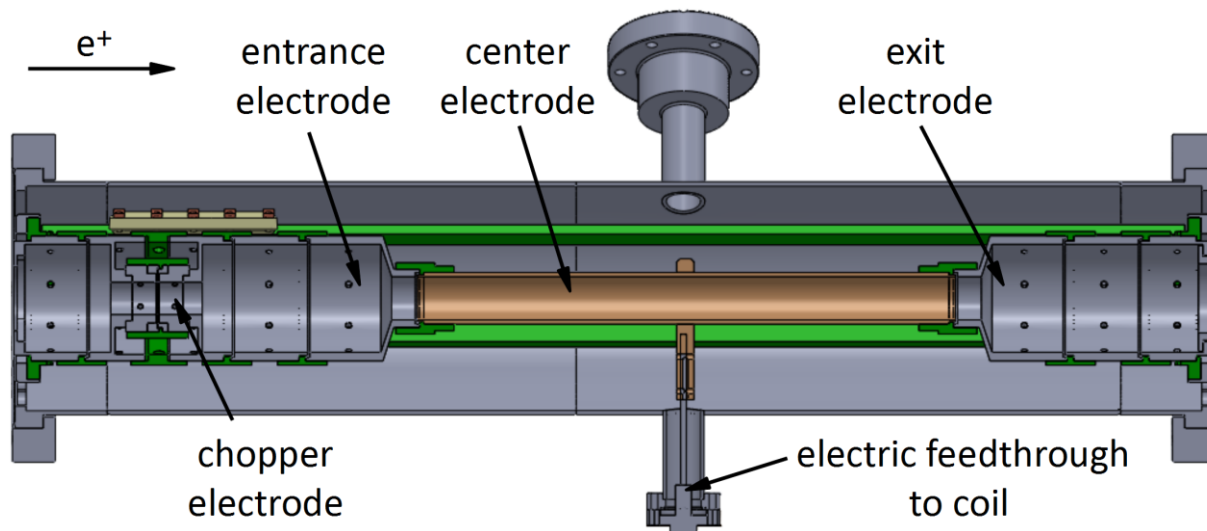
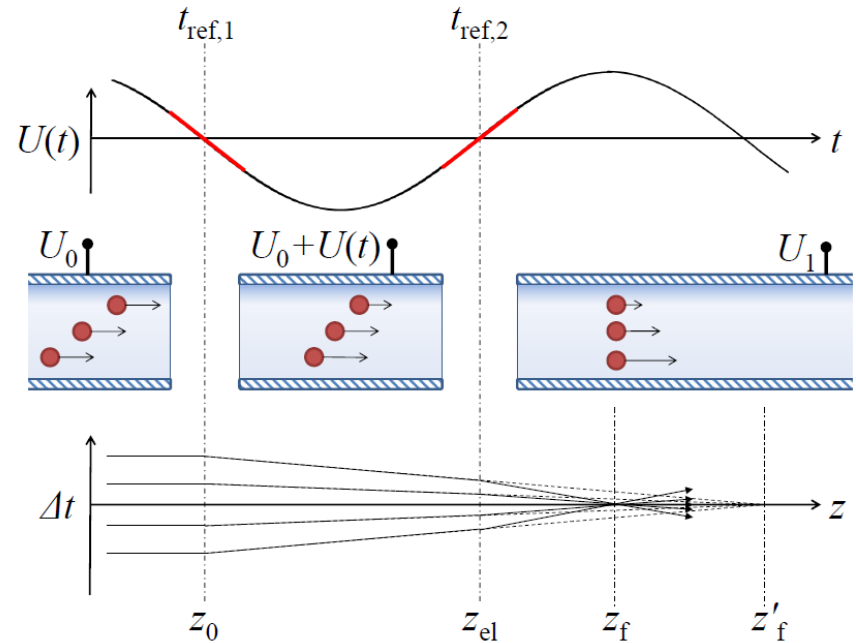
09 양전자 빔 수송

Chopper



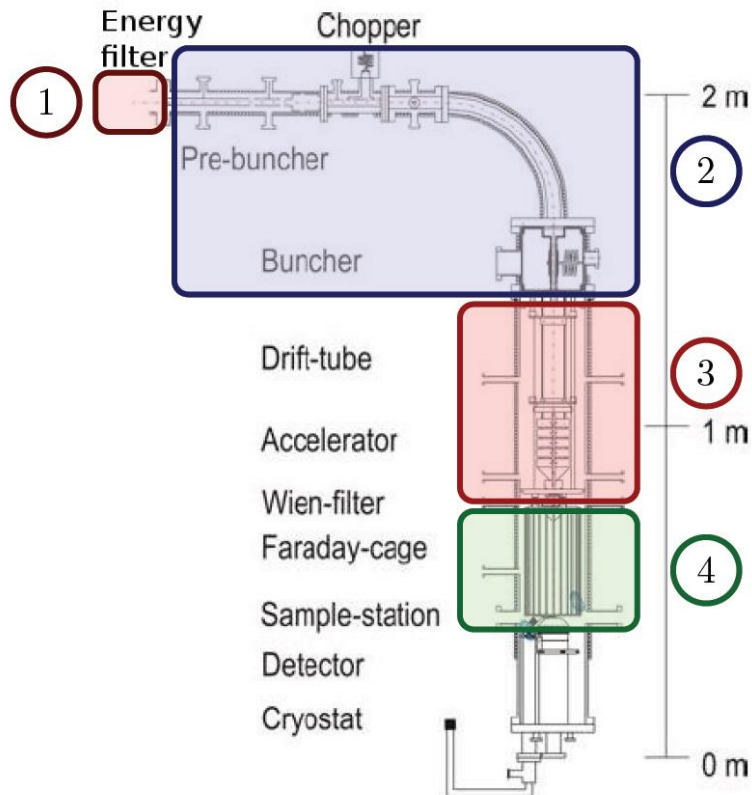
09 양전자 빔 수송

- Main buncher
 - Sine wave, double gap



10 분광 장치

❏ PALS/PLEPS – Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy



Sawtooth pre-buncher (50% intensity in 2 ns)
Double gap buncher (200 ps FWHM)
Accelerator (0.1–22 keV)
Faraday cage with a 5 mm hole

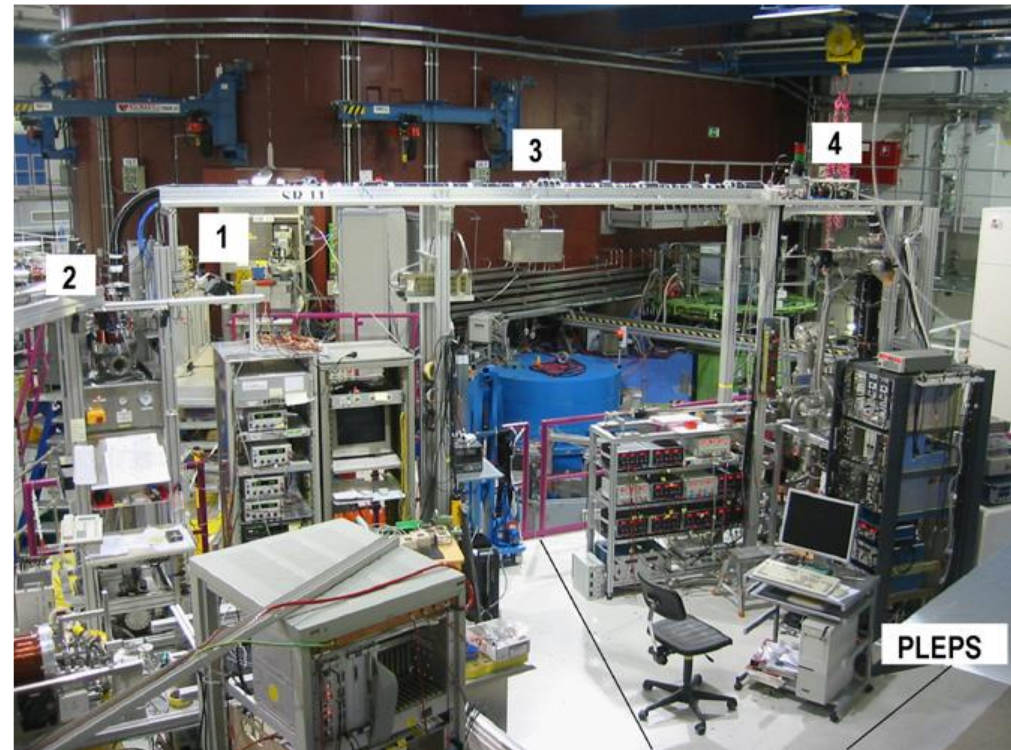
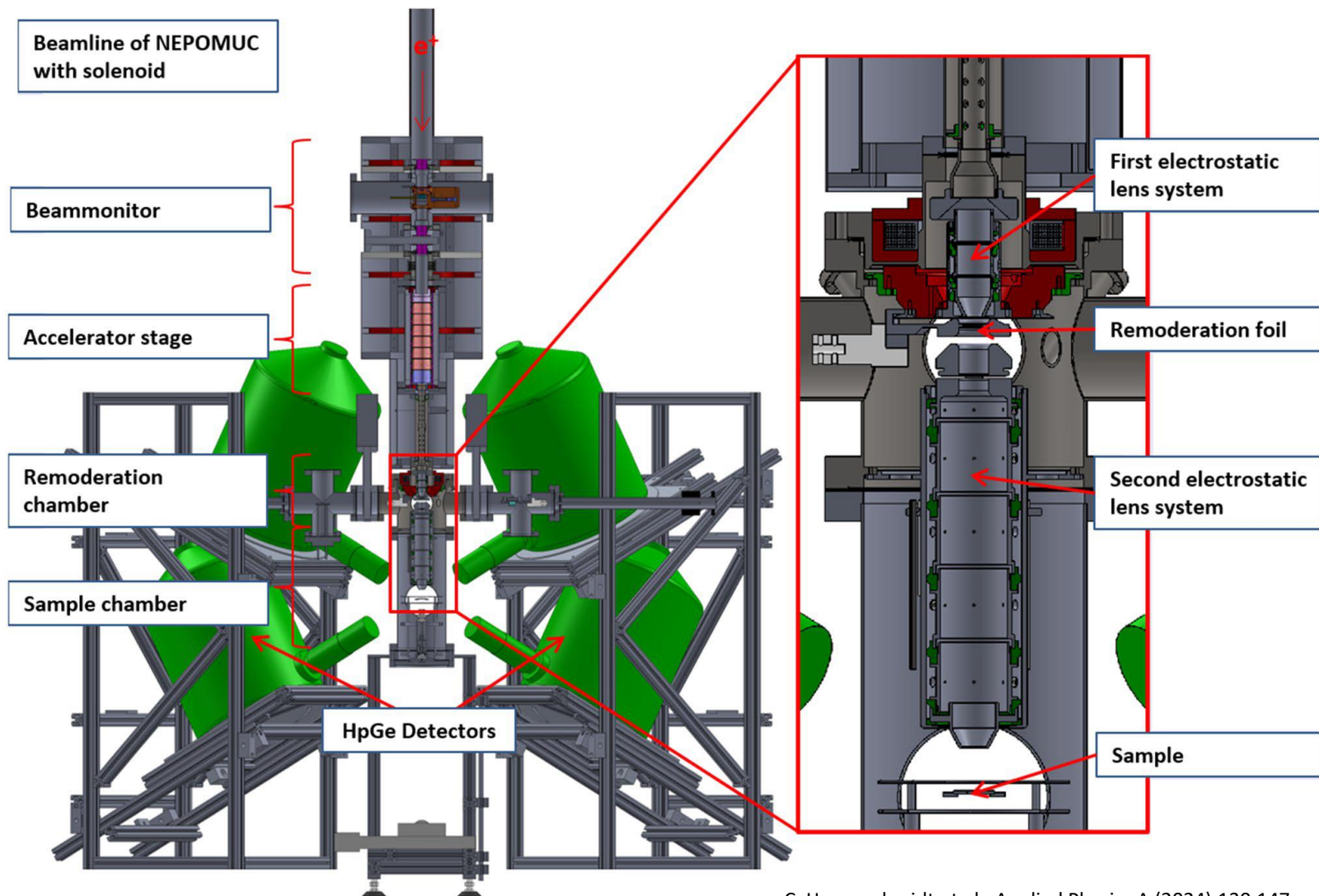


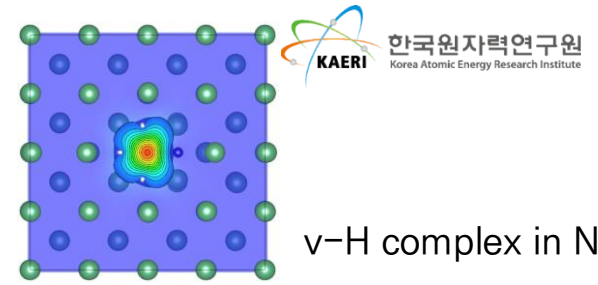
Fig. 2. Location of PLEPS in the reactor hall of the FRM-II. (1) Primary positron source NEPOMUC [8] and remoderator [9], (2) beam switch, (3) beam line to PLEPS, (4) pre-buncher and chopper.

10 분광 장치

CDBS – Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy



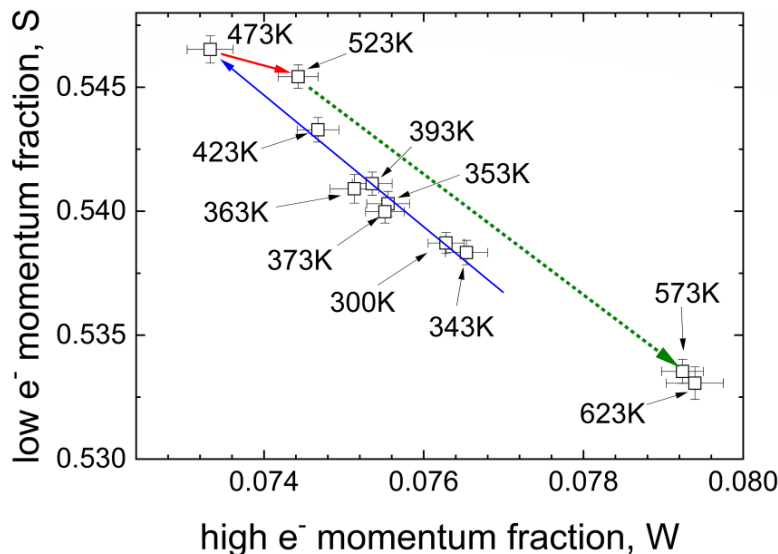
11 Applications – 양자 소재



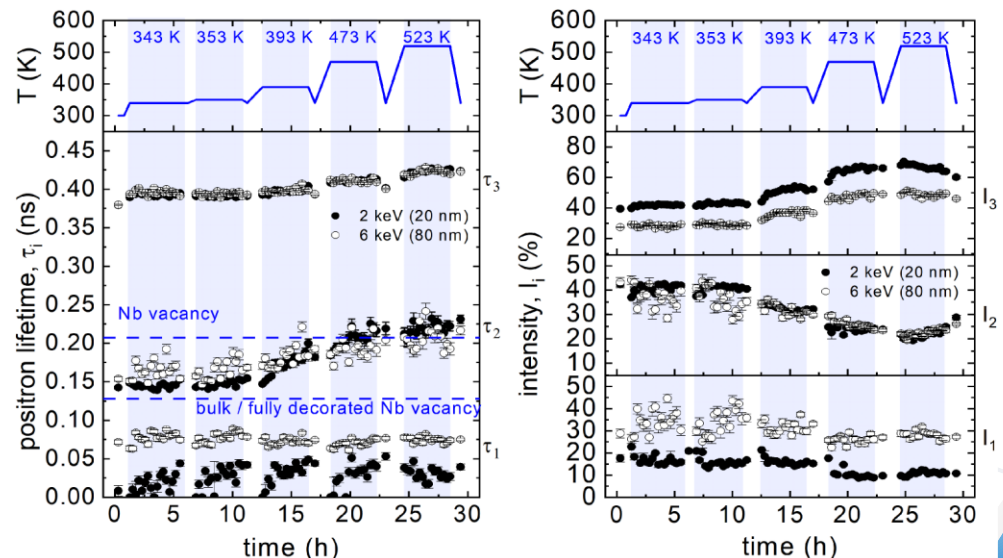
니오븀(Nb)과 산화물의 vacancy dynamics 연구

v-H complex in Nb

- 573-673K 온도 범위에서 니오븀(Nb) 초전도 고주파(SRF) cavity의 온도 처리가 잔류 표면 저항을 전례 없는 수준으로 감소시키는 메커니즘을 연구
- 양전자 분광: 니오븀 내 vacancy dynamics 조사
 - In-situ DBS: 10분 단위로 온도 증가(343-523K)에 따른 결함 변화 측정
 - VE-PALS: 393K 이상에서 수소 방출, 523K에서 양전자 수명 감소(Nb_2O_5 층 용해)
 - $v\text{-nH}(T \leq 420\text{K}) \rightarrow v(420\text{K} < T \leq 470\text{K}) \rightarrow v\text{-O}(T \geq 520\text{K})$



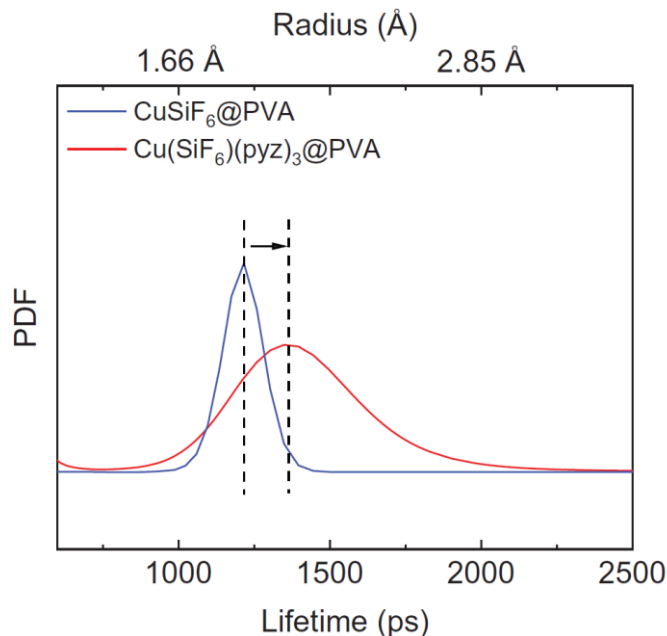
1.5 keV 양전자 빔 이용 S-W plane (DBS) 결과



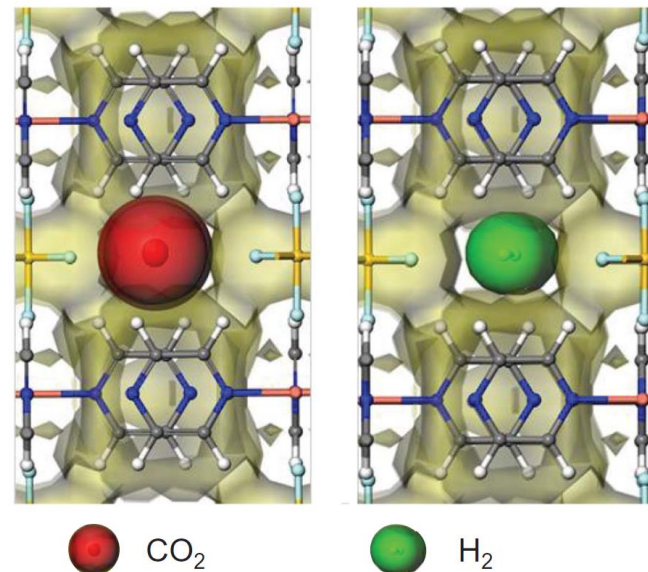
양전자 수명(왼쪽)과 intensity(오른쪽) 결과

1 Applications – 가스 분리 촉매

- Gas separation에 사용되는 초박형(100 nm 미만) mixed-matrix membrane (MMM)을 제조하는 새로운 방법 개발
 - H₂와 CO₂를 분리하는 MOF (Metal-Organic Framework) 촉매 개발
 - 블루 수소 생산: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$, $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
 - CuSiF₆@PVA 전구체(원래 상태)와 Cu(SiF₆)(pyz)₃@PVA MMM(변환 후)의 양전자 수명 측정
 - 금속염이 MOF로 변환되면서 sub-nanometer 크기의 공극이 상당히 증가



양전자 수명 분포

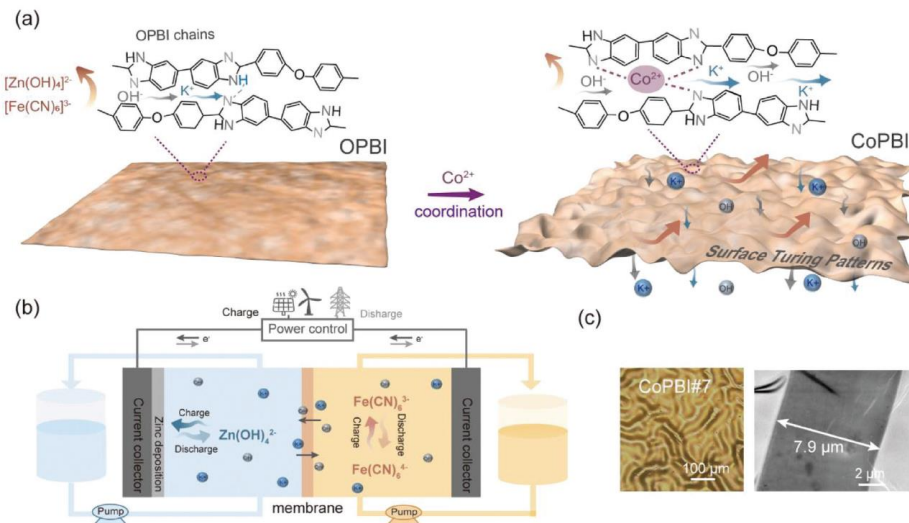


MOF에서의 분자 크기 비교

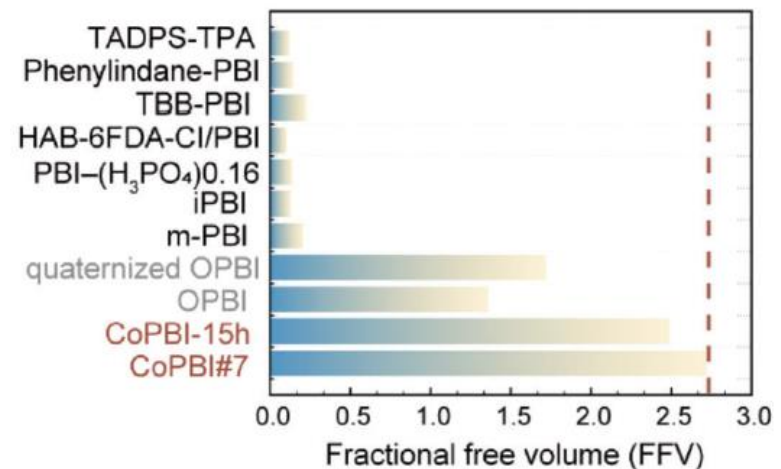
11 Applications – 차세대 배터리 소재

고출력 밀도 아연 기반 플로우 배터리를 위한 7.9 μm 두께의 turing membrane 개발

- Polybenzimidazole (OPBI)을 Co^{2+} 이온으로 배위결합시켜 고전도성 얇은 turing membrane을 설계하고, 이를 알칼리성 아연-철 플로우 배터리(AZIFB)에 적용
- 양전자 분석(PALS): 멤브레인의 공극 구조와 자유 부피 특성을 분석
 - Co^{2+} 배위결합이 OPBI 멤브레인의 자유 부피 분율(FFV)에 미치는 영향을 확인
 - 측정된 직경 0.59 nm의 공극은 수화된 K^+ 와 OH^- 이온(직경 6-7Å)은 통과시키면서도 $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ 와 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ 같은 더 큰 활성종(직경 9.5Å 이상)은 효과적으로 차단할 수 있는 크기



Alkaline zinc-iron flow battery (AZIFB)

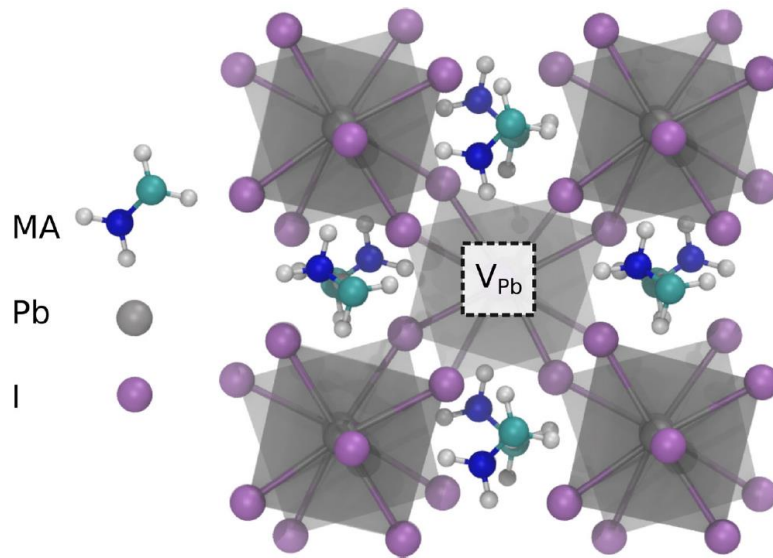


양전자로 검증한 다공성 분리막 성능

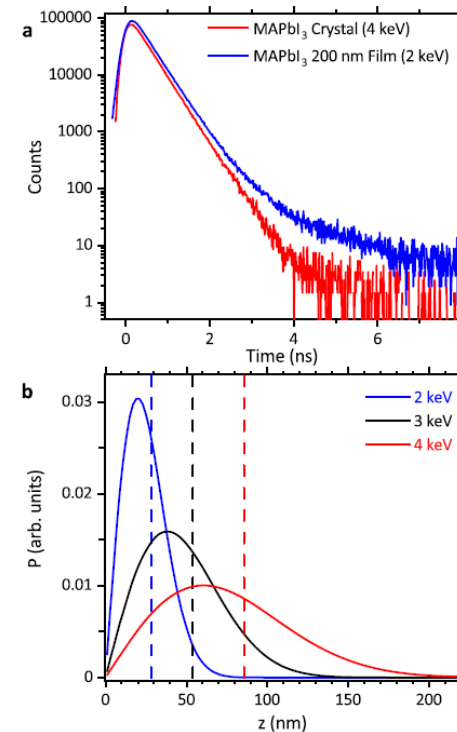
11 Applications – 페로브스카이트 소재

Lead-halide perovskites에서 lead vacancy defects를 식별

- 캐리어 재결합을 돕는 결함(defects)이 태양광 장치의 변환 효율을 제한할 수 있음
- MAPbI₃(Methylammonium lead iodide) 박막 및 단결정 시료에 대해 납 단일공공(lead monovacancy, V_{Pb}) 결함을 식별
 - 양전자 수명: 평균 수명 370 ps, 92%이상의 intensity 측정됨(lead vacancy), DFT 계산 값=369 ps



B-site polyhedra (gray) + Pb vacancy



MAPbI₃의 양전자 수명 스펙트럼

12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

■ 인빔 뢰스바우어 분광(In-beam Mossbauer spectroscopy)

- 일반적인 뢰스바우어 분광법은 방사성 동위원소를 선원으로 사용하여 흡수 스펙트럼을 측정하지만, 인빔 뢰스바우어 분광법은 뢰스바우어 핵 자체를 대상으로 하는 발광 뢰스바우어 분광법
- 주로 짧은 반감기를 가진 핵종을 대상으로 하며, 중성자 빔을 조사하면서 측정함

■ 목적:

- 양자 및 첨단소재 분석을 위한 하나로 중성자 빔 활용 한국형 인빔 뢰스바우어분광계 (Korea In-Beam Mössbauer spectrometer, K-IBM) 개발
 - 전 세계적으로 희토류(rare-earth)기반 양자 및 첨단소재 개발 경쟁이 심화되고 있으며, 희토류 자성, 야금, 배터리, 촉매 등의 획기적 성능향상을 위해서 물질 내 희토류와 이웃 원소의 분포(배열), 전자-스핀(Spin)결합 등의 규명이 필요.
 - 다양한 희토류 화합물의 분석을 위하여 희토류 원소와 감마선공명이 가능한 온라인 선원을 개발하고 이를 적용할 수 있는 인빔 뢰스바우어분광시설 구축이 필요함.

■ 장점:

- 인빔 뢰스바우어 분광법을 통해 비파괴적으로 실시간 측정이 가능해짐
- Hot atom*의 초기 반응 생성물을 직접 관찰할 수 있음
- 온도에 따른 화학종 분포 변화를 관찰할 수 있음

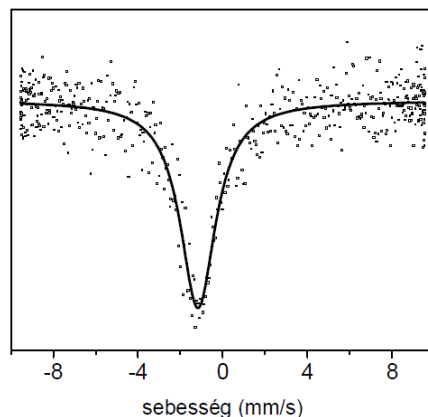
*일반적인 열평형 상태의 원자(수 eV)보다 훨씬 높은 에너지(수 MeV)를 가진 원자로 과잉 에너지로 인해 격자 내에서 벗어나 다른 위치로 이동 가능

12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

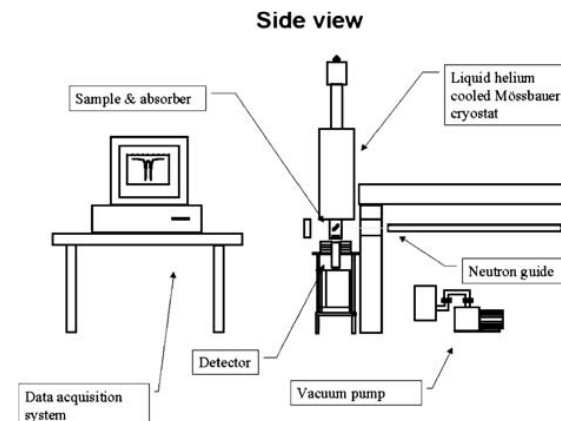
- 헝가리 부다페스트 원자로(BRR) 기반 뢰스바우어 분석 장치(IBMS)
 - Cold neutron (22K) 사용, 중성자속 $1.52 \times 10^9 \text{ n/cm}^2\text{s}$, 저온 측정(80K) 가능
 - $^{196}\text{Pt}(n, \gamma)^{197}\text{Pt} \rightarrow ^{197}\text{Au} + \gamma\text{-ray (77.3 keV, } t_{1/2}=19.9 \text{ hr)}$ 이용한 금 나노 입자 분석 가능



헝가리 BRR



^{197}Au 뢰스바우어 스펙트럼 at 80K

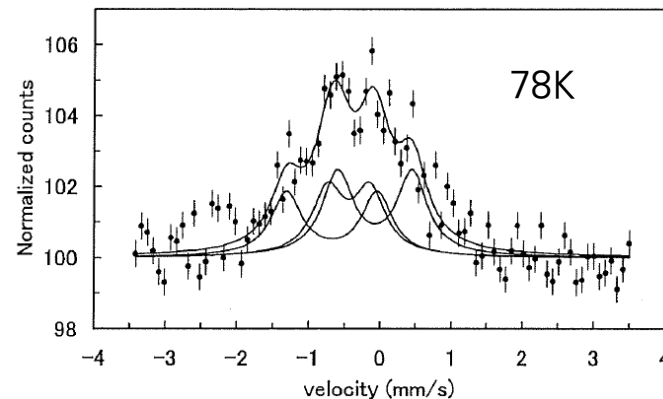
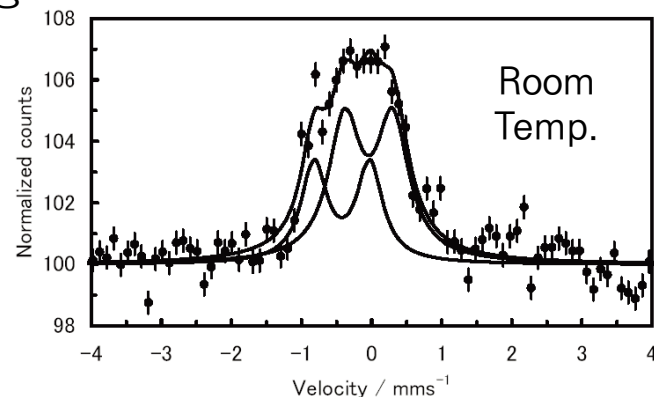
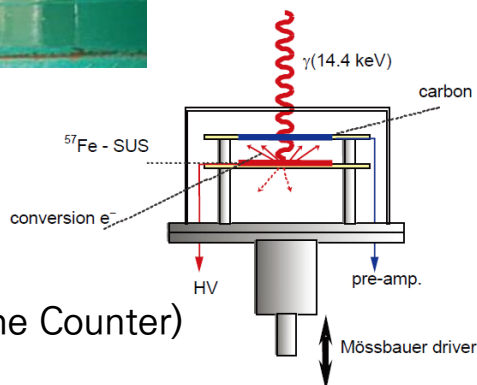
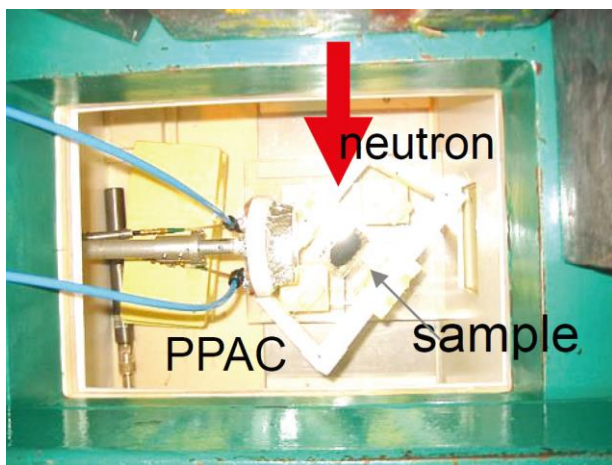


헝가리 부다페스트 원자로 인빔 뢰스바우어 분석 장치

12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

일본 JRR-3 기반 뢰스바우어 분석 장치

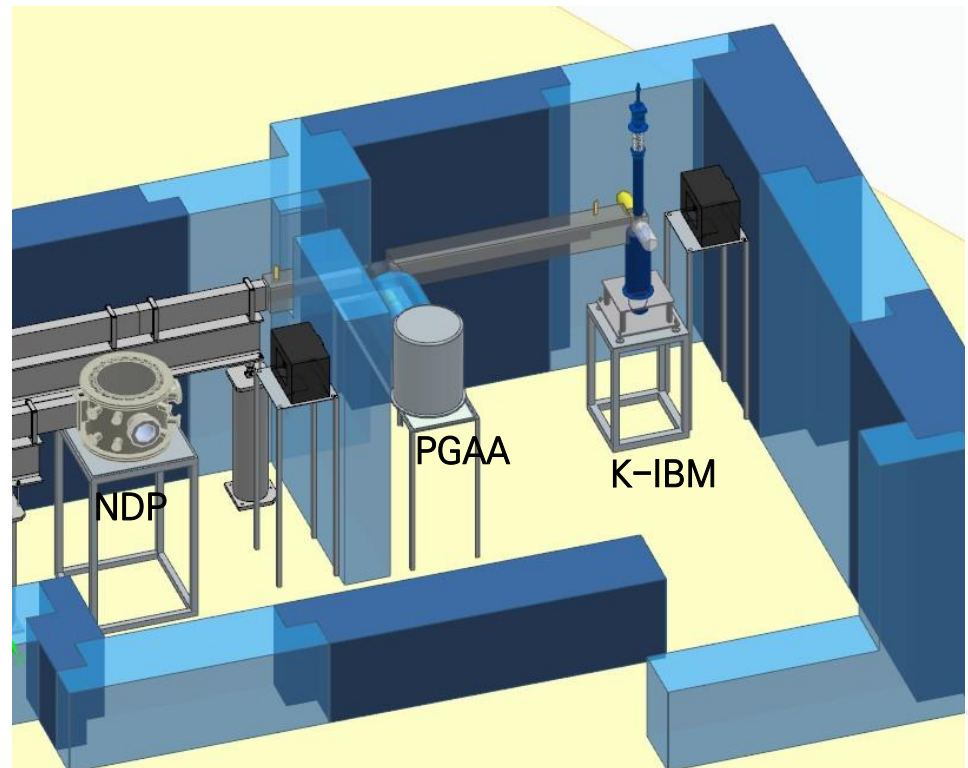
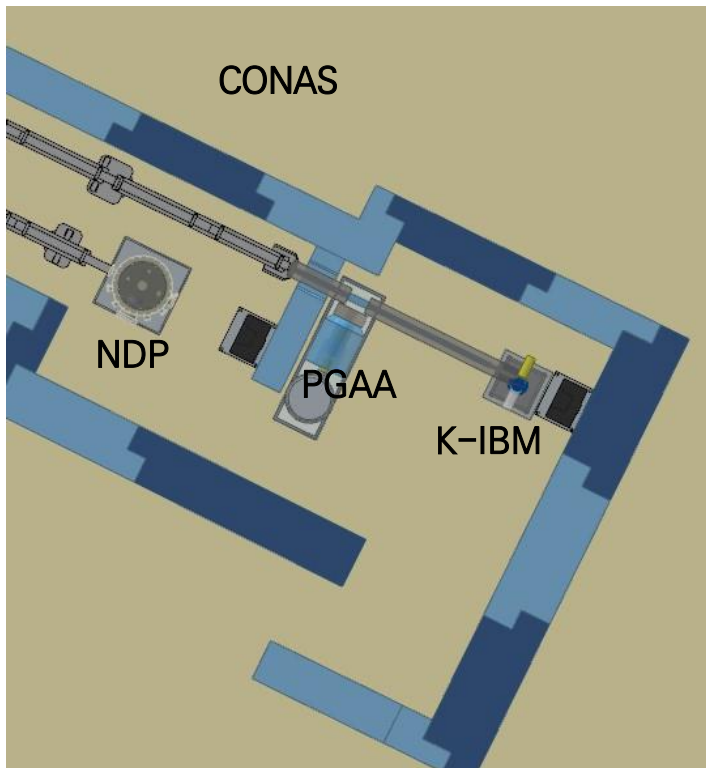
- $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)^{57}\text{Fe}$ 반응을 통해 생성된 ^{57}Fe 의 뢰스바우어 스펙트럼 측정
- 차폐체 내에 시료와 검출기 외 물체를 최소화하고, 리튬 금속으로 중성자 차폐
- FeS_2 (황철석, pyrite) 결과
 - 상온: 2개의 doublet (^{57}Fe + 중성자 포획 반응 후 감마선 반동으로 Fe 위치에서 S_2 에 둘러싸인 사이트로 이동한 Fe(II)에 해당, hot atom), 78K: 3종류의 화학종



PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter)
detector

12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

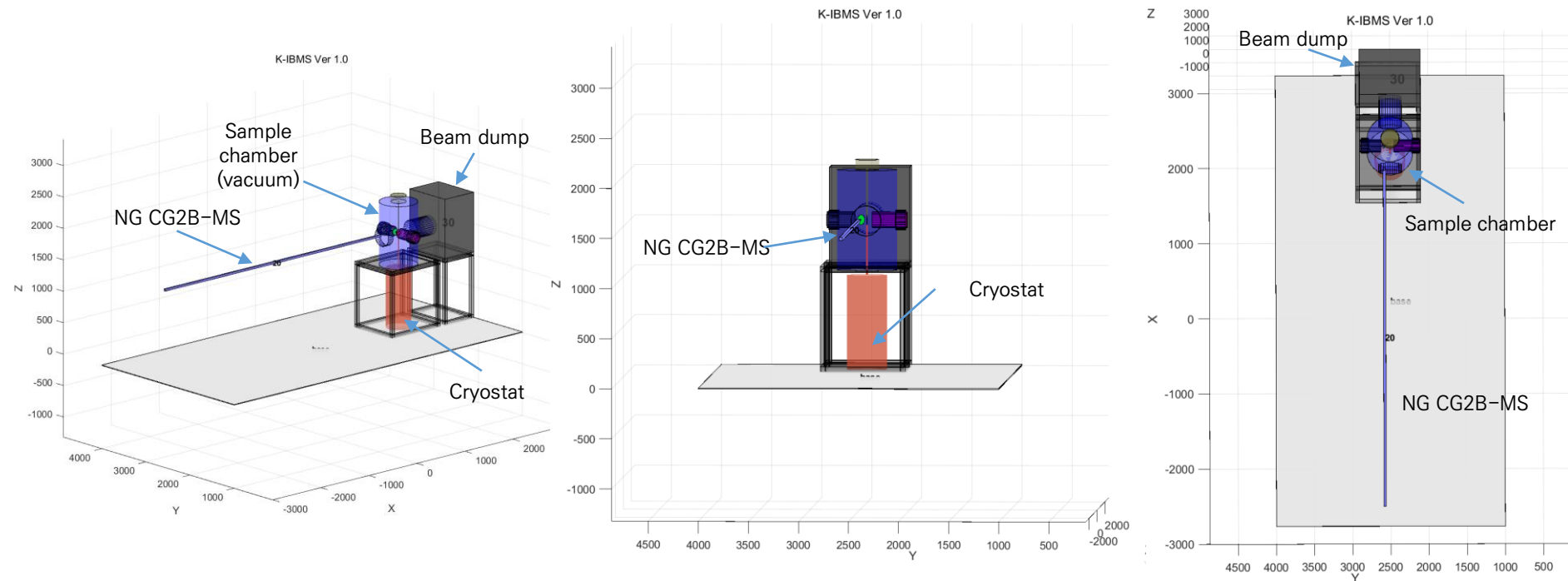
- 하나로 냉중성자 기반 인빔 뢰스바우어 분광시설(K-IBM)
- CG2B 빔 라인 계획



12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

■ 하나로 냉중성자 기반 인빔 뢰스바우어 분광시설(K-IBM)

■ Sample chamber 등 상세 설계



12 인빔 뢰스바우어 분광시설 구축

뢰스바우어 선원별 분석 비교

| Source | 주요 특징 | 분석 가능 원소 | 장점 | 한계점 |
|-------------|----------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|
| Fe-57 동위원소 | 방사성 동위원소 선원 사용(Fe-57), 에너지 영역 측정 | 주로 ^{57}Fe , ^{119}Sn , ^{151}Eu , ^{121}Sb | 비교적 간단한 장비, 실험실 수준 설치 가능 | 제한된 원소, 긴 측정 시간, 상대적으로 많은 시료량 필요 |
| 연구용 원자로 | 중성자 포획을 통한 즉시 핵 여기, 실시간 측정 | Fe, Au, Gd, Er, Dy, Hf, Yb, W, Zn, K 등* | 희토류 분석 가능, 높은 감도, 비파괴적 | 원자로 시설 필요, 복잡한 설정, 방사선 안전 문제 |
| Synchrotron | 시간 영역 측정, 펄스 구조 활용 | 이론상 대부분의 뢰스바우어 활성 핵종 | 극미량 시료 분석, 고압/고온 실험 가능, 시공간 분해능 우수 | 대형 시설 필요, 빔타임 제한, 복잡한 데이터 해석 |

- ^{197}Au , ^{157}Gd , ^{155}Gd , ^{167}Er , ^{161}Dy , ^{177}Hf , ^{163}Dy , ^{179}Hf , ^{171}Yb , ^{154}Gd , ^{173}Yb , ^{160}Dy , ^{182}W , ^{160}Dy , ^{56}Fe , ^{66}Zn , ^{39}K
- Prompt γ -ray: ^{40}K , ^{66}Zn , Gd, Er, Dy, Yb, Hf
- Short half-life: ^{153}Er , ^{166}Er , ^{175}Lu , ^{186}Os , $^{191,192}\text{Ir}$, ^{195}Pt , ^{197}Au
- Long half-life: ^{141}Pr , ^{127}I , ^{129}I , ^{181}Ta , ^{182}W



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

감사합니다.

