

30 MeV 사이클로트론 기반 중성자원 및 중성자 영상화 기술 개발 현황

소형중성자원 개발과 이용(II)

주최: 방사선 이용 및 기기 연구부회, 양자공학 및 핵융합기술 연구부회 공동



한국원자력학회 2021 온라인 춘계학술발표회 워크숍

2021. 05. 12. (화상 워크숍)

이동원, 문명국, 정 봉 기

한국원자력연구원 핵물리응용연구부, 가속기개발연구부

CONTENTS



1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 현황
4. 활용 방안 및 기대효과

중성자 영상 검사 국내 공급 한계 극복 및 현장 수요 대응 필요

➤ 기존 **X선으로 탐지하기 어려운 폭발물, 탄약, 항공기 등 방위산업 분야**에 **중성자 영상기술** 활용 중

* 중성자는 X-선에 비해 낮은 원자번호의 물질과도 상대적으로 잘 반응하는 특성이 있어 폭발물, 탄약, 항공기 등의 비파괴 검사에 매우 효과적

✓ 국내에서는 열출력 30 MW **연구용원자로 하나로**를 활용한 고중성자속 (10^{18} n/s \rightarrow $\sim 10^{14}$ n/cm²·s) 영상기술이 **국방·자동차 산업 분야**에서 활용 중

✓ 그러나, **보안과 안전 규제**의 지속적인 강화에 따라 시험 대상물의 성격과 크기, 반출입 등 **접근성(accessibility)에 제한**을 받고 있는 상황

* 국방 분야 수요 중 시편 크기나 추가 냉각 등이 필요한 경우, 폭발 가능성 등 안전 문제로 반입이 어렵거나, 반출에 제약이 발생하는 경우 시험 불가

➤ 따라서, **수요 현장에서 활용**이 가능하고, 상대적으로 **저중성자속에서도 영상화**가 가능한 기술 개발을 통해 **접근성 제약 문제 해결**이 필요

✓ 사전 평가 결과, 열중성자 영상을 위해서는 **10^{12} n/s 수준의 중성자원** 필요

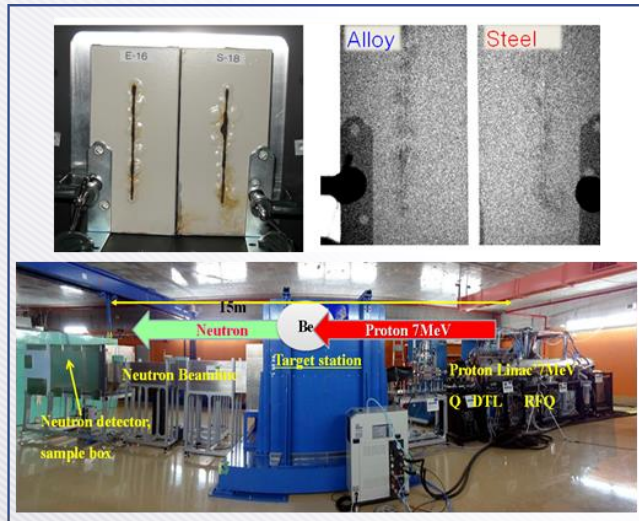


< X선 및 중성자 영상 >

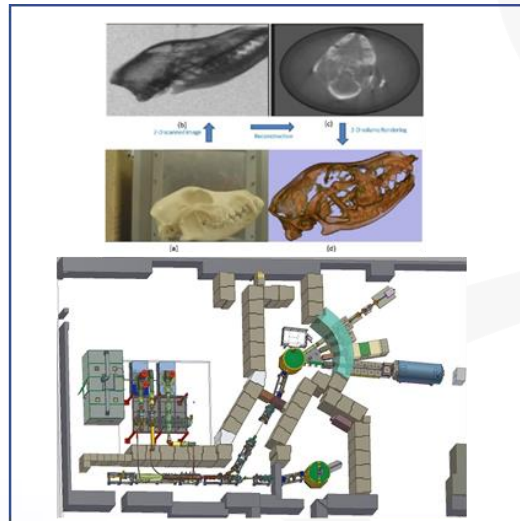
01 연구개발의 필요성

국외 현황 – 국내 개발 필요 시점

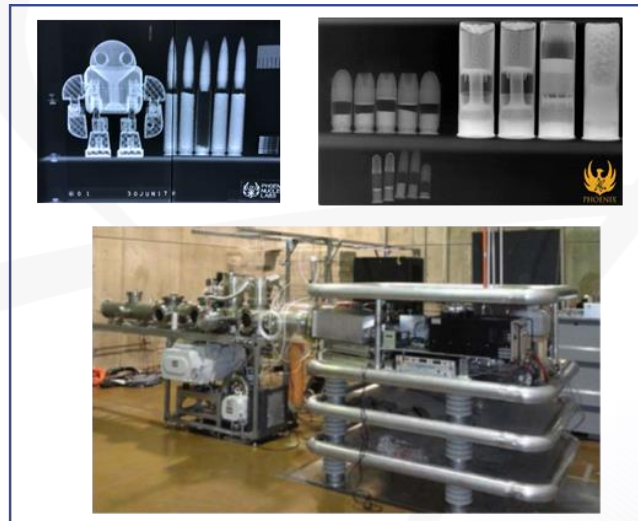
- 국외에서는 가속기 기반 중성자원 개발과 산업/의료/문화재 등 활용이 활발히 진행 중
 - ✓ 일본은 오랜 기간 **현장 활용형 중성자 영상기술** 개발 및 **가속기 소형화** 추진
 - ✓ 미국은 핵융합 DD/DT 선원을 활용한 **중성자 영상기술 산업화** 착수
 - ✓ 중국은 **국방 목적의 중성자 영상기술** 개발 진행, 최근 DD/DT 선원 활용 병행 중
 - ✓ 유럽은 **가속기 기반 중성자 선원 개발**과 **과학적 활용 및 영상화** 추진



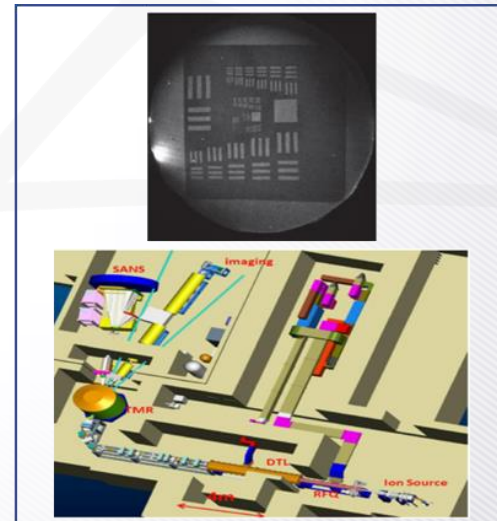
일본 RIKEN RANS 시설 및 중성자 영상



미국 인디애나대학 LENS 및 중성자 영상



미국 PNL사 DD선원 및 중성자 영상



중국 칭화대 CHPS 및 중성자 영상

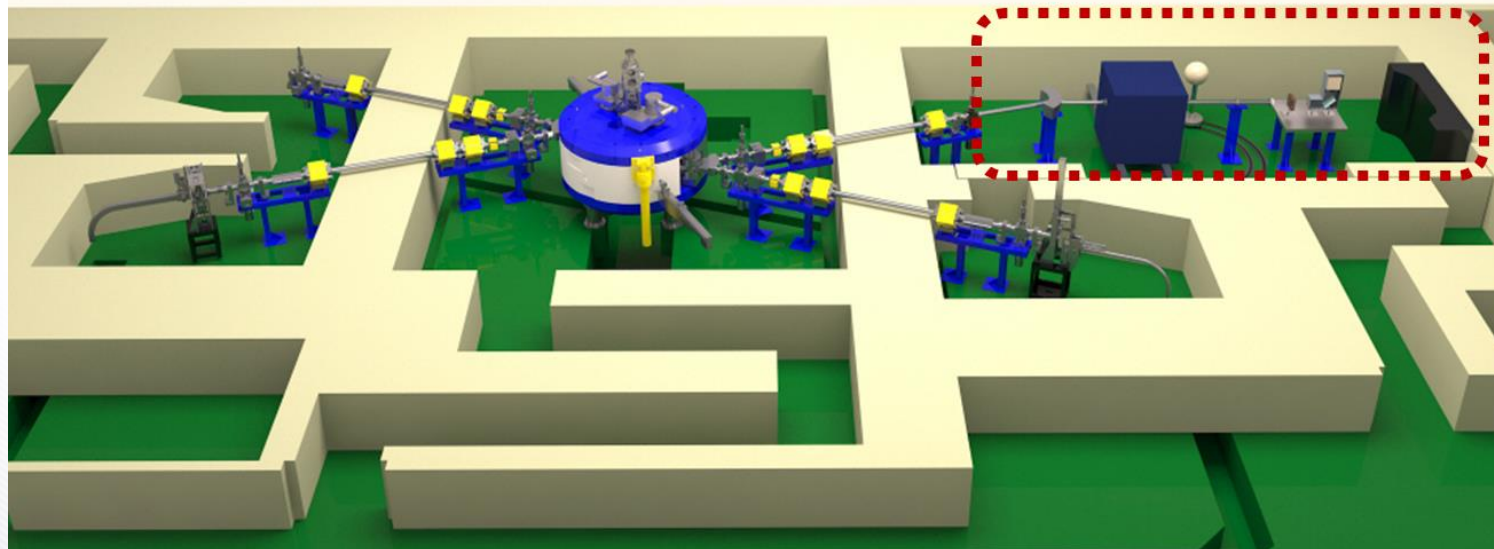
가속기 기반 국내 소형 중성자원 및 영상화 기술 개발 가능성

➤ 국내의 축적된 가속기 기술(LINAC, Cyclotron, Electro-static accelerator) 과 하나로 활용 중성자 영상기술을 접목해 빠른 기술 개발과 현장 적용이 기대

기 구축 사이클로트론 시설 활용 → 이용분야 확대

RFT30
정읍 30 MeV 사이클로트론

중성자원 & 이용시설 개발



CONTENTS



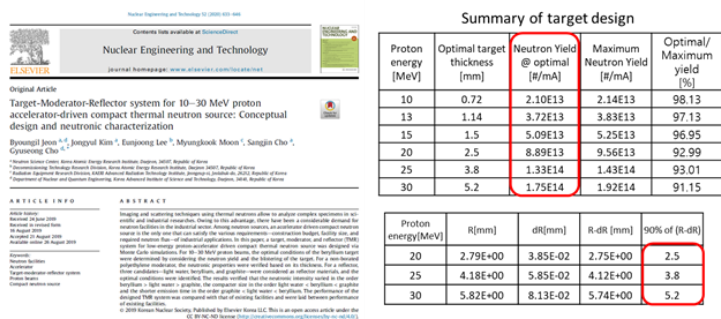
1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 현황
4. 활용 방안 및 기대효과

중성자 발생 수율 및 영상 요건 선행 연구 결과

- 30MeV 사이클로트론 제공 양성자빔을 고려한 적정 표적 두께 도출: 빔/핵해석 수행 및 결과 논문 발표
- 저선속 중성자영상 가능성 및 시설(정읍) 고려한 적정 영상 요건 도출

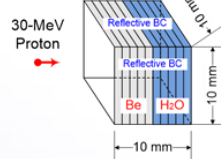
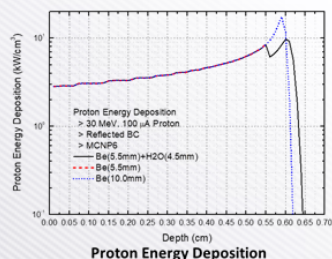
» 중성자 생산 선행 연구

- ◆ 양성자빔 에너지에 따른 중성자 생산량 계산
- ◆ Be 표적 최적 두께 계산 : 5.2 mm@ 30 MeV
- ◆ 5×10^9 flux 필요 100 sec 노출시간을 영상분해능 0.1mm 수준의 질적 영상 획득 가능 예상



◆ 계산 모델/결과

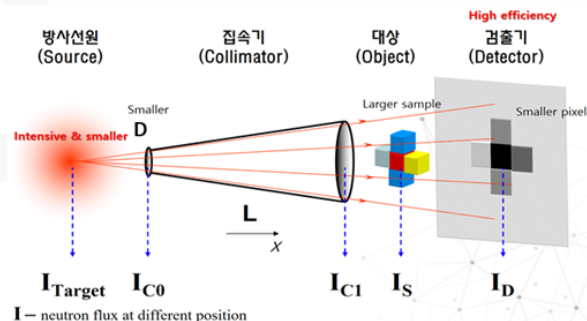
- ✓ Proton Beam: 100 μ A, 30 MeV Pencil Beam
- ✓ Model: 5.5mm Be target + 4.5mm H₂O coolant (box model with reflective BC)
- ✓ Proton energy deposition: Be 5.5mm 깊이에서 8.5 kW/cm³, 6mm 깊이(H₂O)에서 최대 9.7 kW/cm³ 에너지 축적
- ✓ 5.5mm Be target을 통과한 양성자는 H₂O 1.1mm 두께에서 모든 energy deposition 후 소멸
- ✓ 냉각수 두께는 1.1mm 이상이면 OK



Target	Neutron Yield	Photon Yield
Be(5.5mm)+H2O(4.5mm)	8.8160E+12	4.6499E+10
Be(5.5mm)	8.8043E+12	9.3622E+08
Be(10.0mm)	9.4111E+12	2.4966E+09

» 산업현장의 실용적 중성자 영상 획득 요건 (하나로 이용 중성자 영상화 기술 기반)

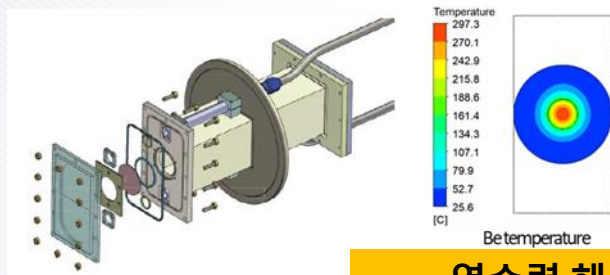
- ◆ L/D = 50~200 → 수평공 선단(port nose)에서 시료대(L)까지 현장 조건을 고려하여 2~5m를 고려하면 수평공 선단 크기(D)는 ~4 cm (L/D=50@2m), ~2.5 cm (L/D=200@5m)
- ◆ 시료위치 실험 열중성자속 $I_s \sim 10^5$ n/sec/cm² (brightness, 100-300 sec 노출시간, ~0.5mm(500 μ m) 분해능)
- ◆ FoV (Field of View) → 5×5 cm² ~ 10×10 cm², (+/-20% 빔분포) → 10^7 n/sec/sample_FoV
- ◆ 수평공 선단에서의 요구 중성자선속(flux)은 $I_{C0} \sim > 5 \times 10^9$ n/sec/cm² @nose D
- ◆ 수평공 선단(nose D) 전체에 고르게 $> 5 \times 10^9$ flux를 얻으려면 표적집합체(TMR Assembly)의 표적(T)부터 감속재를 거쳐 nose D (T-D 거리 10cm 가정)에 도달하는 열중성자(전체 중성자 스펙트럼의 20% 가정)의 고체각(solid angle) 성분이 $> 5 \times 10^9$ n/sec/cm² 이 되려면 표적에서 $I_{Target} \sim > 10^{12}$ n/sec 발생 필요
- ◆ 30 MeV/0.1mA 양성자빔은 ~3 KW@Target 열량을 생각시켜야 하고, $> \sim 300$ W/cm² 냉각 능력 요구



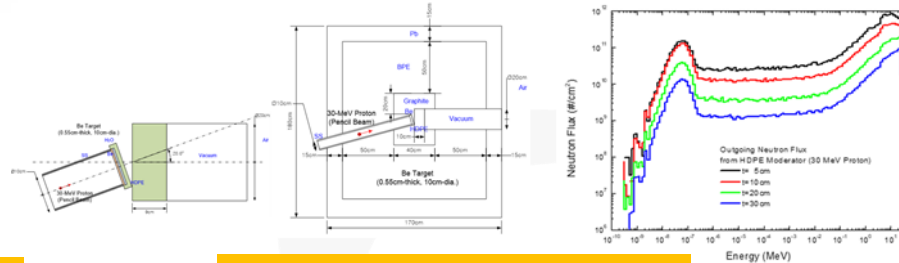
02 연구개발의 목표

세부 연구 개발 범위 및 최종 정량 목표

- 상기의 필요성에, **기존 장치**(사이클로트론)와 **축적 기술**(하나로 활용 중성자 영상기술)을 활용한 **수요 현장 설치형 중성자원 개발**과 **저선량 중성자 영상기술 개발**을 제시
- 최종 목표: **10^{12} n/s 중성자 발생 수율(선속 $>10^5$ n/cm²*s), 10×10 cm² Field of View, Frame 당 5분, >0.5 mm 분해능**



열수력 해석 기반
장수명 Be 타겟 제작



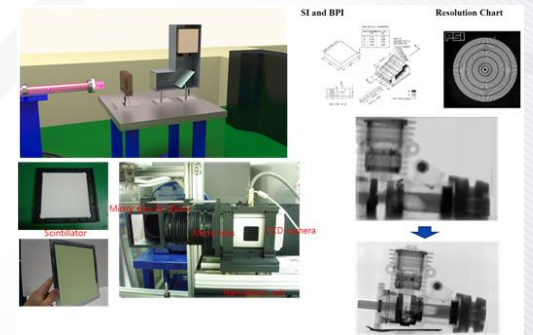
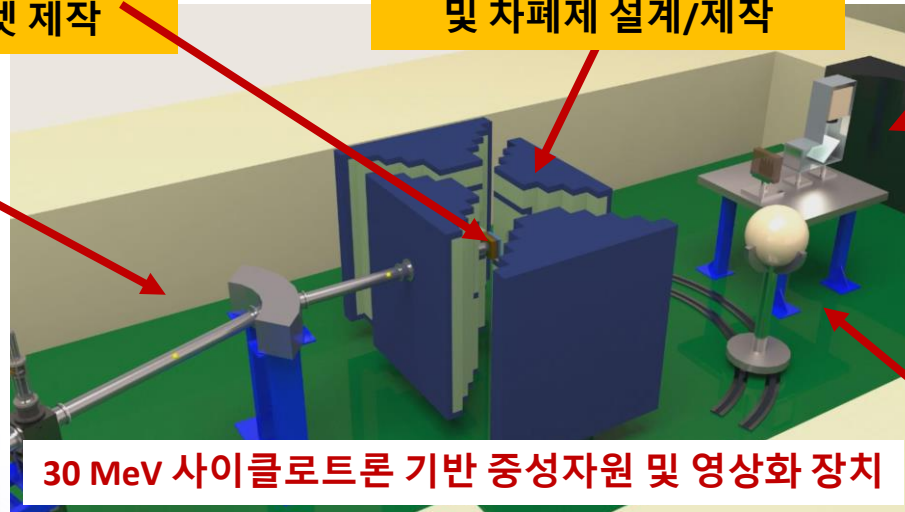
핵해석 기반 중성자 발생
및 차폐제 설계/제작

저선속 중성자 / X-선 영상화
시스템 개발 및 구축

30 MeV 양성자 빔 수송 및
조사 시스템 구축



30 MeV 사이클로트론 기반 중성자원 및 영상화 장치



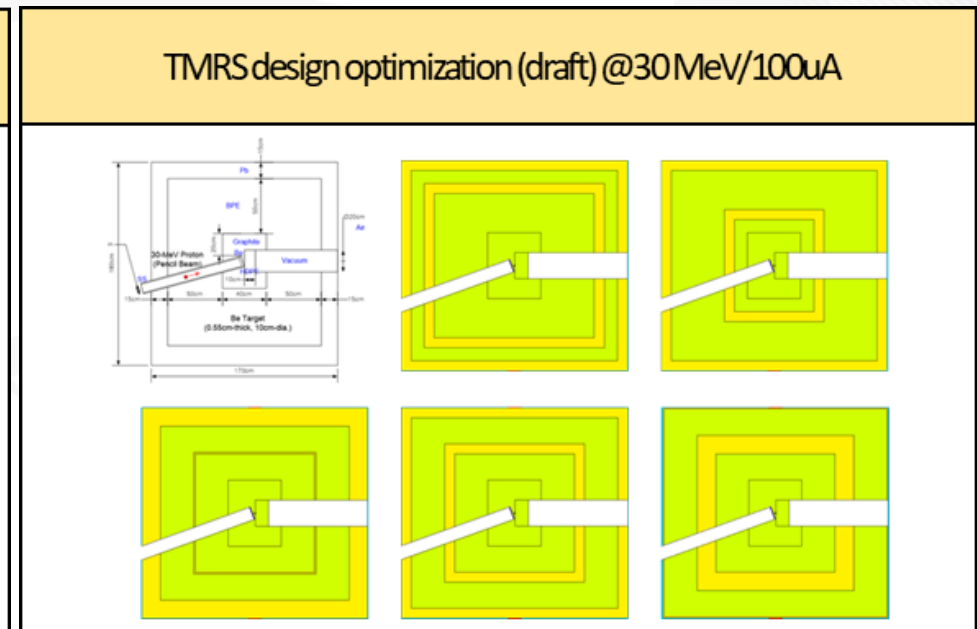
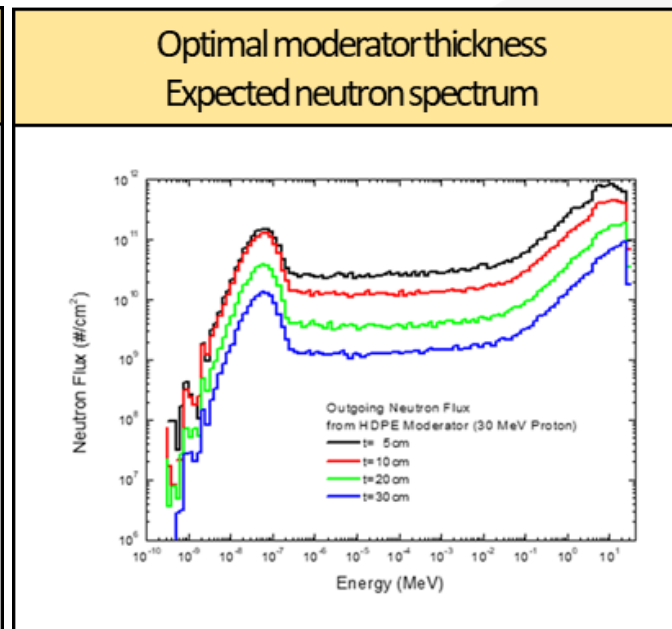
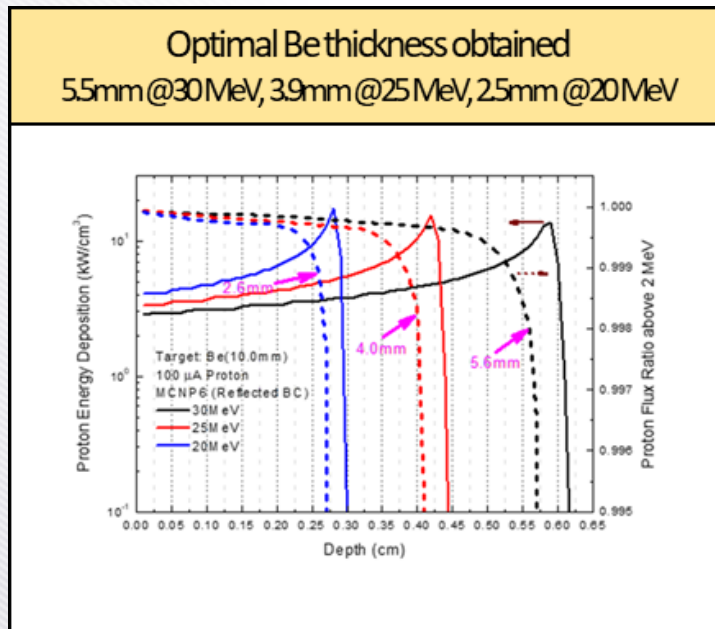
광대역 중성자 측정
시스템 개발

CONTENTS



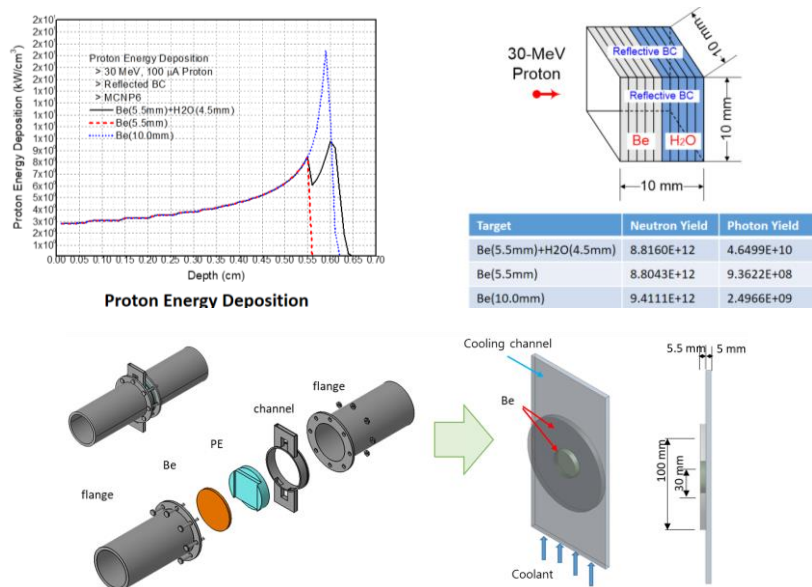
1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 현황
4. 활용 방안 및 기대효과

- 양성자빔에너지에 따른 투과 깊이 고려한 Beryllium 타겟 두께 선정(Blistering 방지 등)
- 차폐 구조체 형상 및 재료에 따른 성능 평가 완료
- 빔파워에 해당하는 열속 조건에서 허용온도를 만족하는 빔 사이즈 및 중성자 수율 평가 완료
- 유지보수/교체 및 냉각능을 고려한 표적 집합체 설계 및 도면 생산



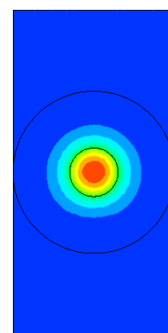
- 양성자빔에너지에 따른 투과 깊이 고려한 Beryllium 타겟 두께 선정(Blistering 방지 등)
- 차폐 구조체 형상 및 재료에 따른 성능 평가 완료
- 빔파워에 해당하는 열속 조건에서 허용온도를 만족하는 빔 사이즈 및 중성자 수율 평가 완료
- 유지보수/교체 및 냉각능을 고려한 표적 집합체 설계 및 도면 생산

Proton energy deposition: 8.5 kW/cm³ (@5.5mm-Be), 9.7 kW/cm³ (@6mm-water):
below 1.1mm-water, whole energy deposited

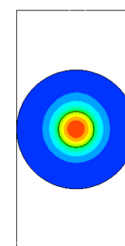


Evaluation of TH performance with D=30mm of Proton Beam: (1) Be temperature 297 °C < 700 °C & cooling channel 46 °C (no boiling)
(2) Heat flux 2.5 MW/m² (@ 0.1 kg/sec, 20 °C) < CHF 6 MW/m² (2) Beam diameter effect (max. beam intensity considered)

Wall Heat Flux
[W m⁻²]

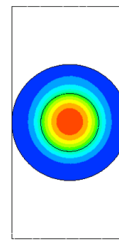


Temperature
[°C]



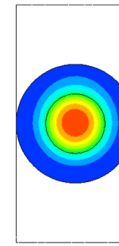
[30 mmD, 3 kW]

Temperature
[°C]



[50 mmD, 3 kW]

Temperature
[°C]

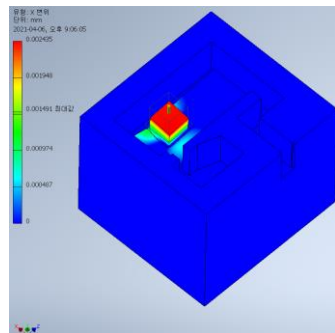
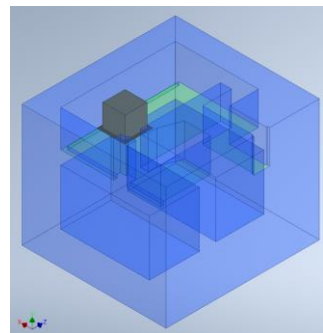
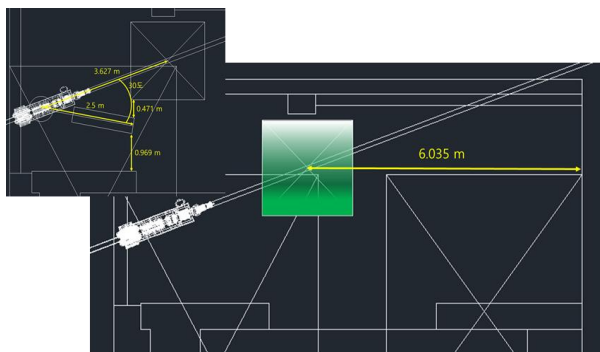


[50 mmD, 13 kW]

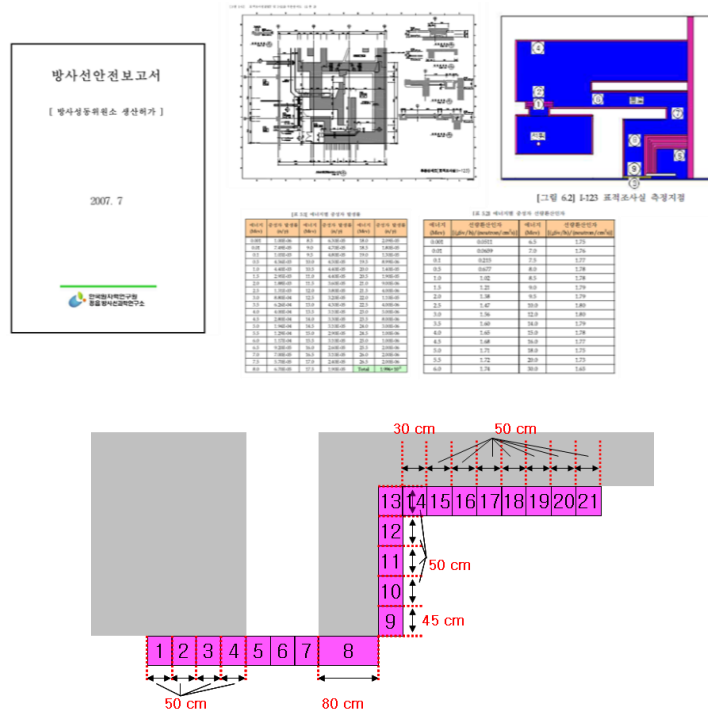
	D=30 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=13 kW
Be temperature (max.) [°C]	297	166	652
Channel temperature (max.) [°C]	46	36	88
Heat flux [MW/m ²]	2.47	1.27	5.49

- ▶ 양성자 빔 경로, 중성자 영상화 시스템 위치 및 차폐룸 구조를 고려한 표적 시스템(TMRS, Target-Moderator-Reflector Shield) 위치 선정 완료
- ▶ 목표 중성자 수율 조건에서의 차폐 및 인허가 조건 확인 완료, 조사실 내부 주요 위치별 환경선량 계산 진행 중

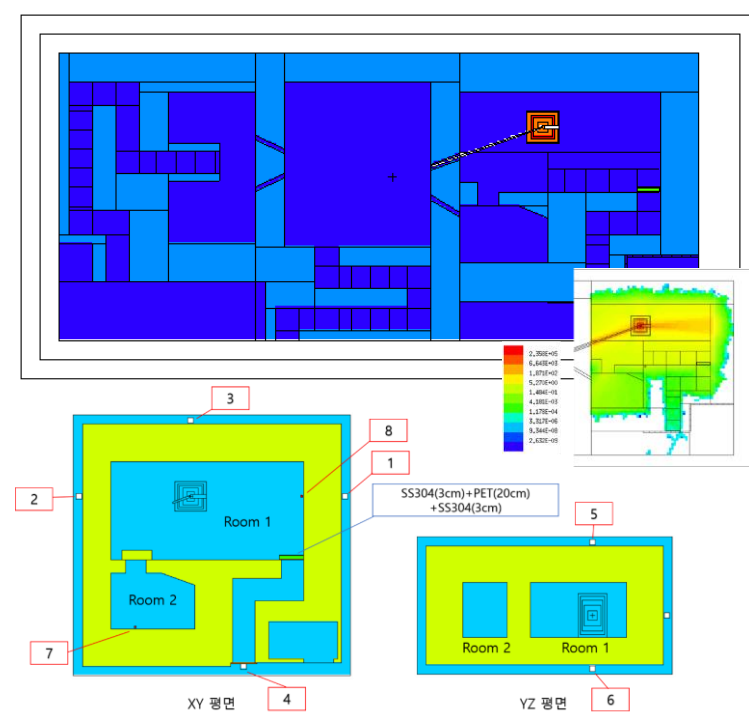
표적시험시설 내부구조물(공조/냉각수 등 유틸리티)과
하부지지구조를 고려한 TMRS 위치 선정



정읍 시설/안전부서와의 협의를 통해 RFT-30 종합시험동 표적
조사실 인허가자료, 절차, 향후 필요 입력자료 등 논의



TMRS design (draft) @30 MeV/100uA – analysis model

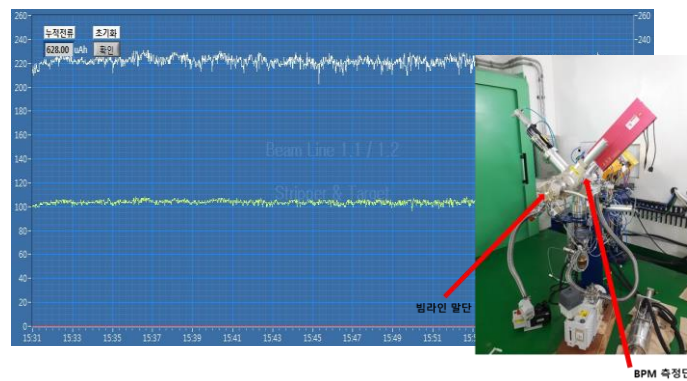


- 양성자빔 안정적 인출 조건 도출 (현재 ~19MeV, 100uA(최대 125uA) 8시간 확인)
- 빔 광학 제어용 전자석 설계 및 제작 착수, 장치설치 공간 정비 및 재배치 진행 중

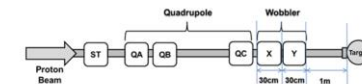
양성자빔 연속운전 및 전류 측정 결과



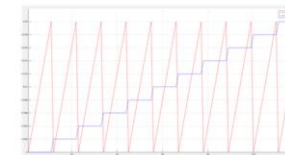
설계값 (MeV)	28.4	20	18	16
검정값 (MeV)	29.4	21.8	20.7	17.7



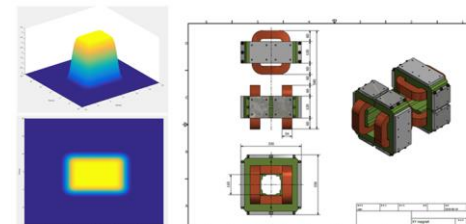
빔 광학제어용 전자석 설계 및 제작



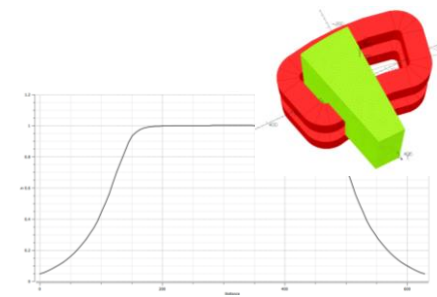
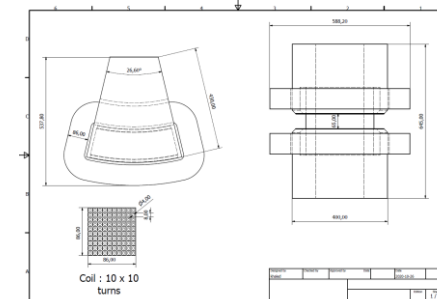
사이클로트론 빔라인 구성요소 배치도



워블러 전자석 전류 파형

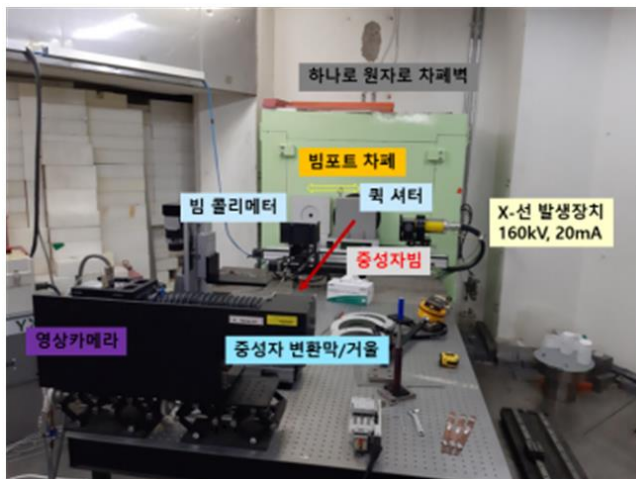
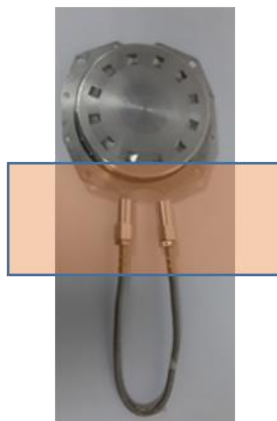
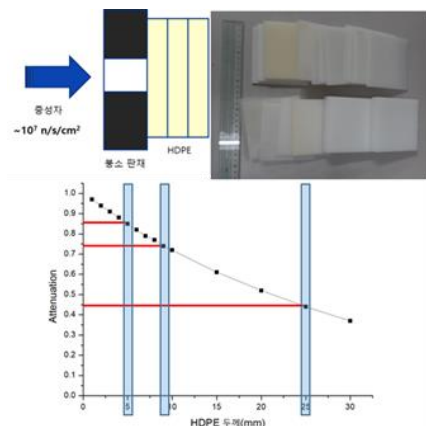
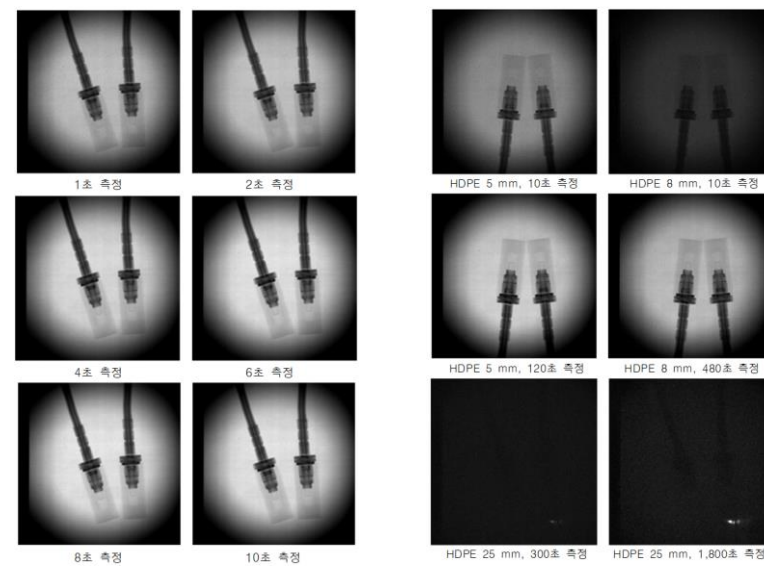


빔조사 시뮬레이션 결과 및 워블러 설계도



- 하나로원자로 중성자빔을 이용한 저선속 중성자빔 환경 구축
- HDPE를 이용한 중성자빔 감쇄기 제작 및 현장 설치 (촬영된 저선속 영상에 대한 평가 진행 중)
- 중성자영상시스템 설계 및 FOV 20x20 cm² 중성자 카메라와 현장 설치용 차폐 구조물 제작
- X-선 분석을 위한 시스템 구축 및 시료 선별/조사 : 산업적으로 유용한 시료 선별

하나로 ENF 중성자영상 시설: 장치 재배치

저선량 중성자영상 확인을 위한 HDPE 준비/사전해석
영상대상 선정(오일필터-군용)저선량 중성자영상 획득
(평가추가진행중)

- 하나로원자로 중성자빔을 이용한 저선속 중성자빔 환경 구축
- HDPE를 이용한 중성자빔 감쇄기 제작 및 현장 설치 (촬영된 저선속 영상에 대한 평가 진행 중)
- 중성자영상시스템 설계 및 FOV 20x20 cm² 중성자 카메라와 현장 설치용 차폐 구조물 제작
- X-선 분석을 위한 시스템 구축 및 시료 선별/조사 : 산업적으로 유용한 시료 선별

FOV 20x20 cm² 중성자카메라 및 현장 설치용 차폐 구조물 제작



[중성자영상시스템]

- FOV 20x20 cm²
- Li6F/ZnS 섬광체 (400um)
- 공간분해능 200um
- 전면반사거울
- 렌즈 및 CC 카메라 등



[중성자전환막]

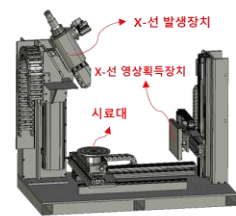
- 영국 Scintacor사
- LiF/ZnS 화합물
(검출효율 80%)



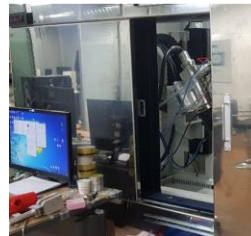
[중성자영상시스템 차폐구조물]

- 봉소함유 고밀도폴리에틸렌 판재
- 고에너지 X-선/감마선 차폐용 납 판재

X-선 분석을 위한 시스템 구축 및 시료 선별



X-선 발생장치
X-선 영상획득장치
시료대



[X-선 발생장치]

- Type : Open Type
- Energy : Max. 240kV
- Focus Size : 4um
- Min. Resolution: 2um



[X-선 영상획득장치]

- Type : Digital FPD
- Size : 430 X 430mm
- Pixel Size : 140um
- Resolution : 3072 X 3072



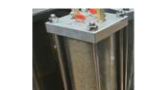
[임플란트 용기 - 부식방지액]



[배터리 전해액]



[PCB 류 - 납 투과 한계]



[건축자재(시멘트) 코아]

CONTENTS



1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 현황
4. 활용 방안 및 기대효과

04 연구개발 결과의 활용 방안 및 기대효과

➤ 개발 장치의 활용: 기존 수요의 현장 적용을 통해 보완과 분산, 활용 확대

- ✓ 중성자원 국산화에 따른 국방관련 부품의 유지보수 비용 절감
- ✓ 고집적도 다양한 반도체, 특히 메모리 소자 SEE 검사 등 대형 기간산업 발전에 기여
- ✓ 비파괴검사, 반도체 소자 검사 등 중성자 이용분야 확대

➤ 확보 기술의 활용 : 적용분야에 따라 필요한 신규 중성자원 개발

- ✓ 표적집합체(Target-Moderator-Reflector), 표적시스템(TMR+Shielding) 설계/해석/제작/열부하검증 기술 등 핵심역량 활용
- ✓ 비가동 사이클로트론 재활용에 따른 신규 연구 분야 개척
- ✓ 폭발물, 탄약, 항공기 등 군수기지 직접 적용 중성자원 공급
- ✓ 산업 및 의료용 동위원소 생산 및 활용연구를 위한 고속중성자원 공급

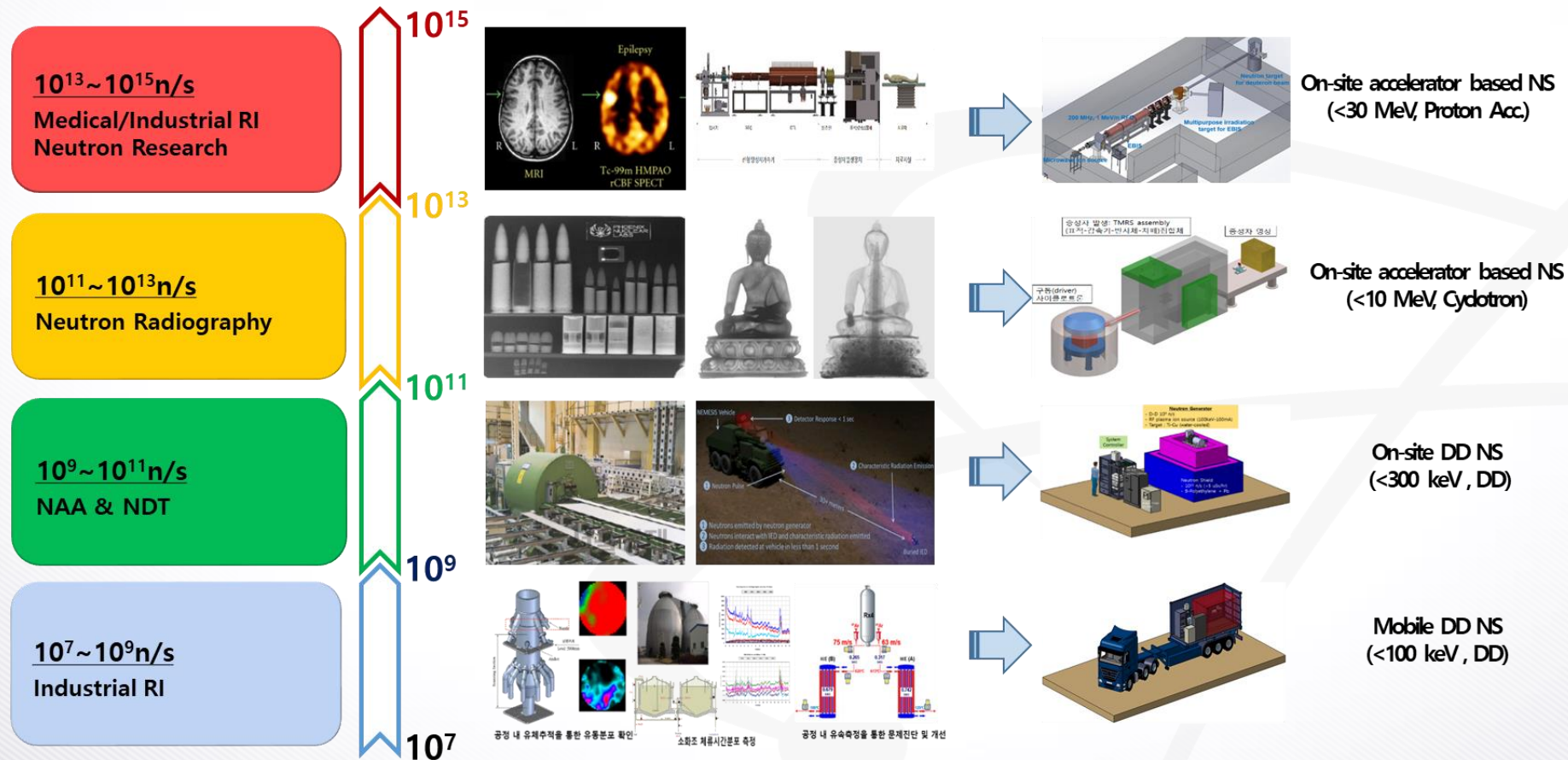
➤ 기대 효과

- ✓ 중성자 영상 기술의 고도화 → 국가 비파괴검사기술 등 전략사업 이용기술 향상
- ✓ 쉽게 접근 가능한 중성자선원 공급을 통한 인력양성, 다양한 산업 적용 확대 기대
- ✓ 현장설치 및 직접적인 산업분야 이용이 가능하므로, 산업화 및 기술이전 적극 추진 예정

04 연구개발 결과의 활용 방안 및 기대효과

➤ 중성자 수율/에너지에 따른 중성자원 확보와 현장 활용 확대

- ✓ 특히, 연구로(하나로)를 통해 축적된 다양한 중성자 활용 기술의 산업/수요 현장 적용 기대
- ✓ 제약성 극복에 따른 기존 시장 확대와 신시장 개척이 기대



05 참고자료: 중성자원 및 중성자영상장치 개발 과정

