

# 30 MeV 사이클로트론 기반 중성자원 및 중성자 영상화 기술 개발 현황



한국원자력학회 2022 추계학술발표회 워크숍

2022. 10. 19.

정 봉 기, 이동원, 문명국

한국원자력연구원 핵물리응용연구부, 가속기개발연구부

# CONTENTS



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



# 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 분야에**  
**중성자 영상기술 활용 중**

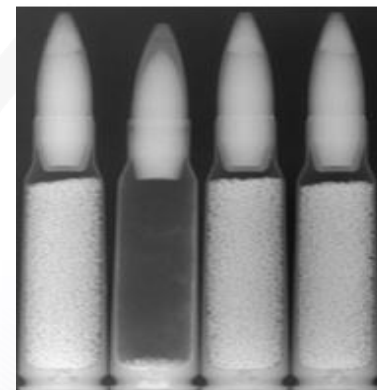
- ✓ 국내에서는 열출력 30 MW 연구용원자로 하나로를 활용한 고중성자속 ( $10^{18}$  n/s  
→  $\sim 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·s) 영상기술이 국방·자동차 산업 분야에서 활용 중
- ✓ 그러나, 보안과 안전 규제의 지속적인 강화에 따라 시험 대상물의 성격과 크기,  
반출입 등 **접근성(accessibility)에 제한**을 받고 있는 상황
- \* 국방 분야 수요 중 시편 크기나 추가 냉각 등이 필요한 경우, 폭발 가능성 등 안전 문제로 반입이  
어렵거나, 반출에 제약이 발생하는 경우 시험 불가

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

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



X-선



중성자

< X선 및 중성자 영상 비교 >

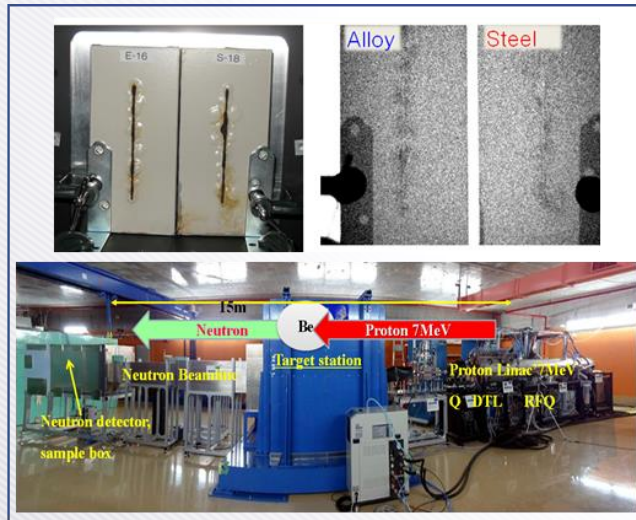


# 01 연구개발의 필요성

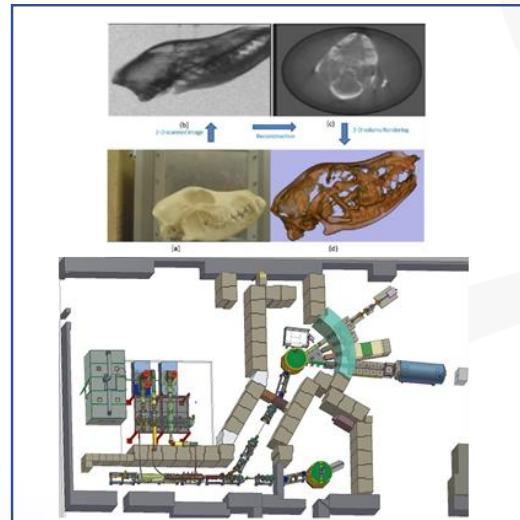
## 국외 현황 – 국내 개발 필요 시점

➤ 국외에서는 가속기 기반 **중성자원 개발**과 **산업/의료/문화재 등 활용**이 활발히 진행 중

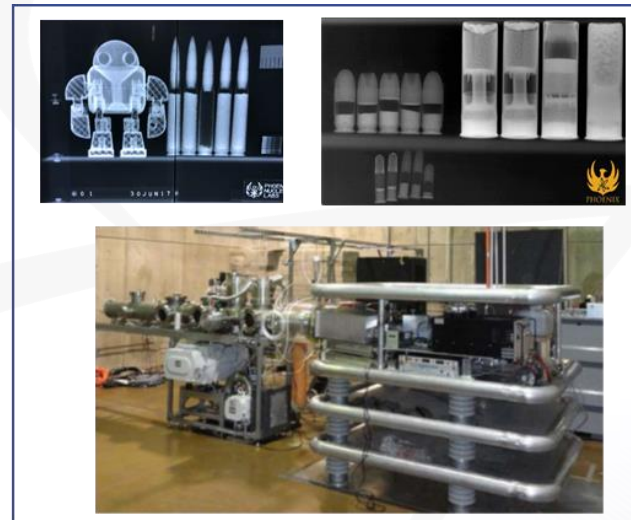
- ✓ 일본은 오랜 기간 **현장 활용형 중성자 영상기술** 개발 및 **가속기 소형화** 추진
- ✓ 미국은 핵융합 DD/DT 선원을 활용한 **중성자 영상기술 산업화** 착수
- ✓ 중국은 **국방 목적의 중성자 영상기술** 개발 진행, 최근 DD/DT 선원 활용 병행 중
- ✓ 유럽은 **가속기 기반 중성자 선원 개발**과 **과학적 활용 및 영상화** 추진



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



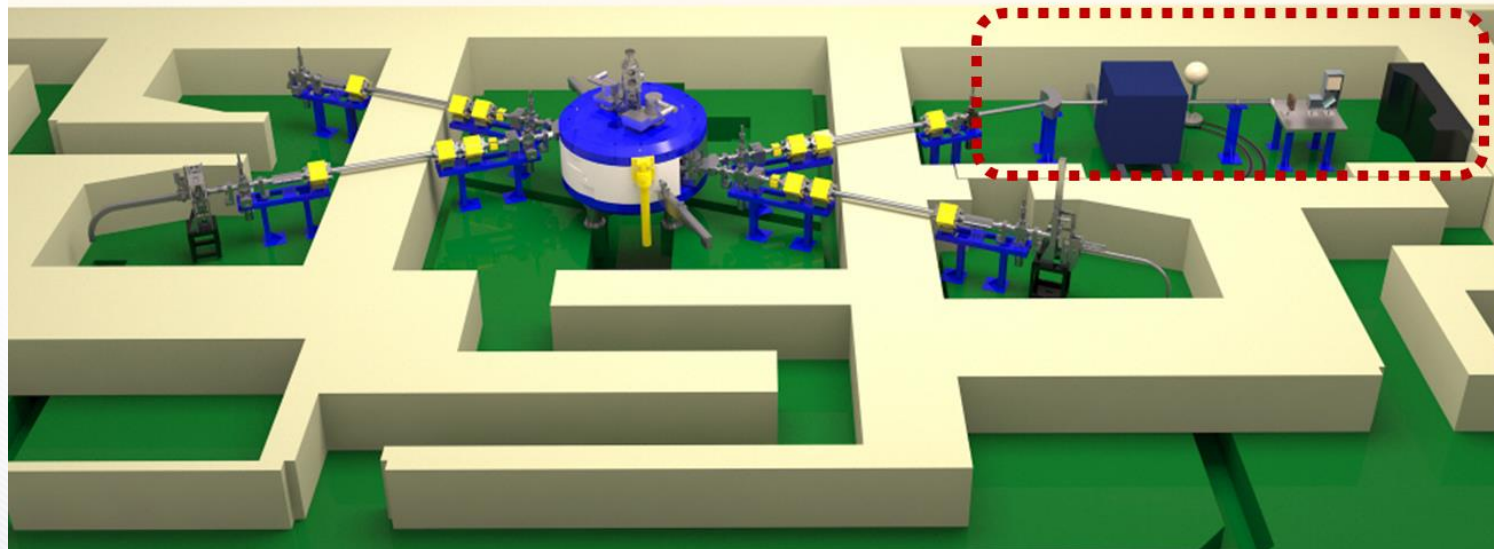
# 가속기 기반 국내 소형 중성자원 및 영상화 기술 개발 가능성

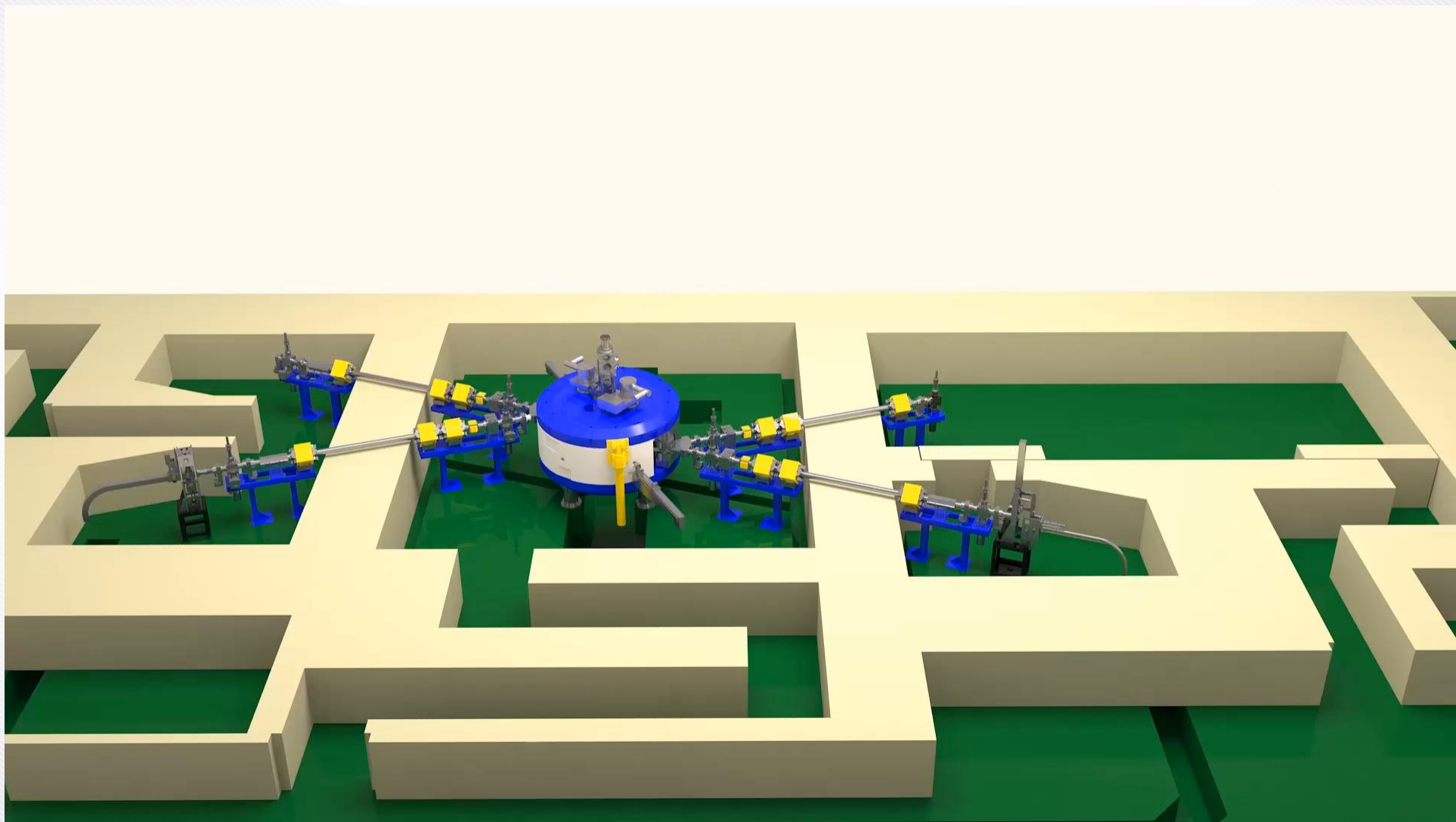
➤ 국내의 축적된 가속기 기술(LINAC, Cyclotron, Electro-static accelerator) 과 연구용 원자로(HANARO) 기반 중성자 영상기술을 접목해 빠른 기술 개발과 현장 적용이 기대

## 기 구축 사이클로트론 시설 활용 → 이용분야 확대

RFT30  
정읍 30 MeV 사이클로트론

중성자원 & 이용시설 개발







# CONTENTS



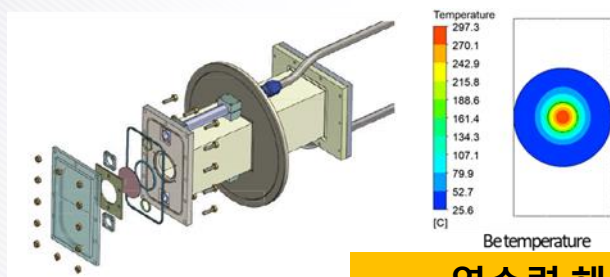
1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 현황
4. 활용 방안 및 기대효과



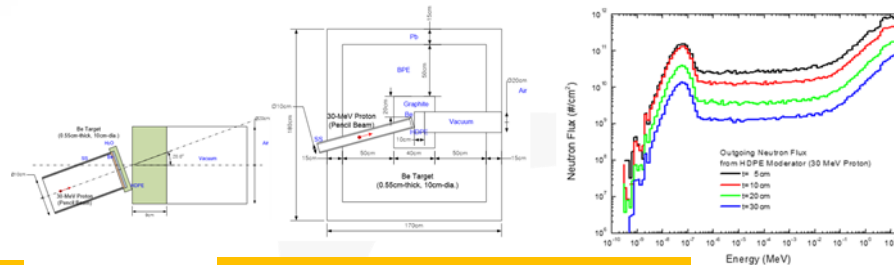
# 02 연구개발의 목표

## 세부 연구 개발 범위 및 최종 정량 목표

- 상기의 필요성에, **기존 장치**(사이클로트론)와 **축적 기술**(하나로 활용 중성자 영상기술)을 **활용**한 수요 **현장 설치형 중성자원** 개발과 **저선량 중성자 영상기술** 개발을 제시
- 최종 목표:  **$10^{12}$  n/s** 중성자 발생 수율(선속  $>10^5$  n/cm<sup>2</sup>\*s),  **$10 \times 10$  cm<sup>2</sup>** Field of View, Frame 당 **5분**,  **$>0.5$ mm** 분해능



열수력 해석 기반  
장수명 Be 타겟 제작

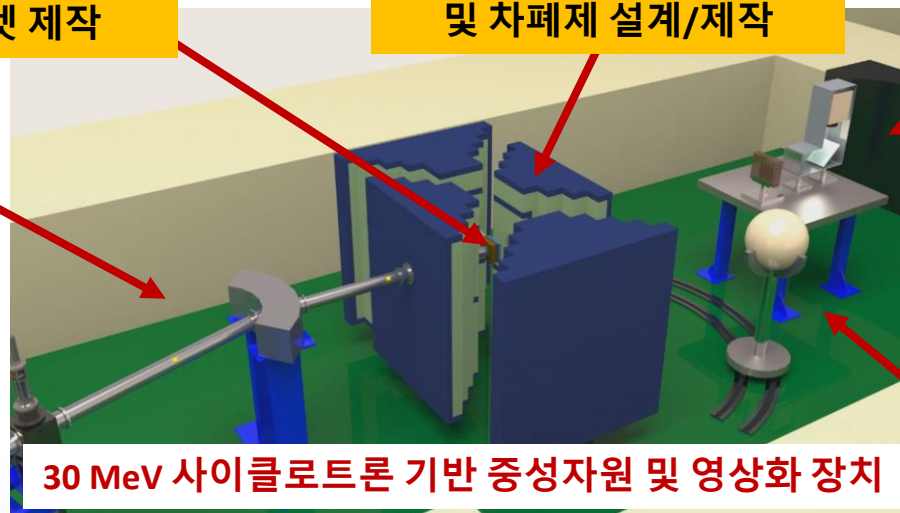


핵해석 기반 중성자 발생  
및 차폐제 설계/제작

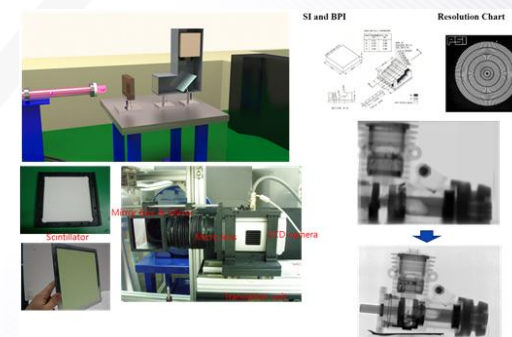
저선속 중성자 / X-선 영상화  
시스템 개발 및 구축



30 MeV 양성자 빔 수송 및  
조사 시스템 구축



30 MeV 사이클로트론 기반 중성자원 및 영상화 장치



광대역 중성자 측정  
시스템 개발

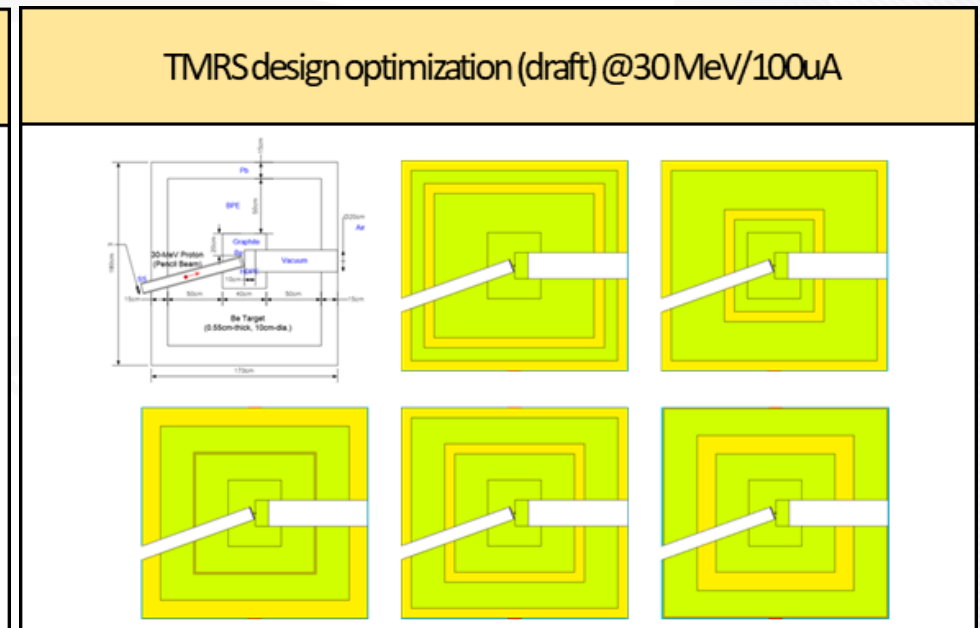
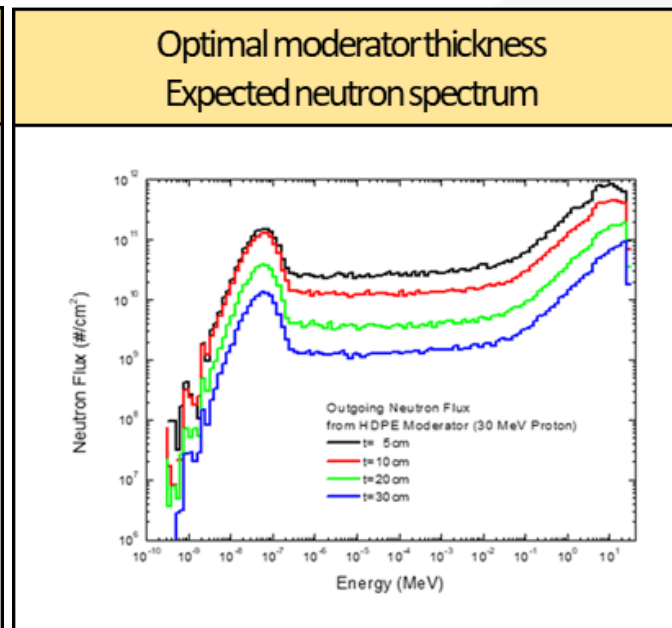
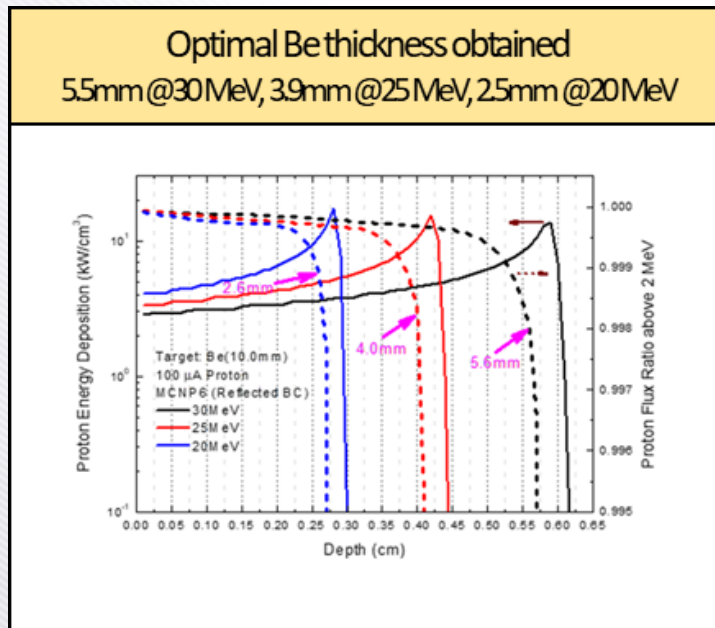
# CONTENTS



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

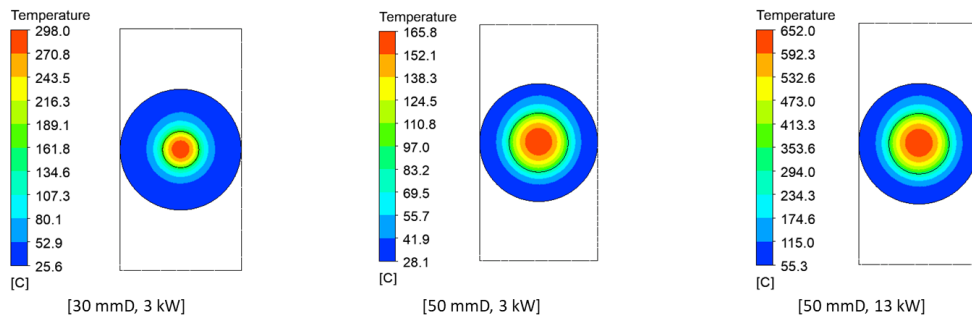


- 양성자빔에너지에 따른 투과 깊이 고려한 Beryllium 타겟 두께 선정(Blistering 방지 등)
- 차폐 구조체 형상 및 재료에 따른 성능 평가 완료
- 빔파워에 해당하는 열속 조건에서 허용온도를 만족하는 빔 사이즈 및 중성자 수율 평가 완료
- 유지보수/교체 및 냉각능을 고려한 표적 집합체 설계 및 도면 생산



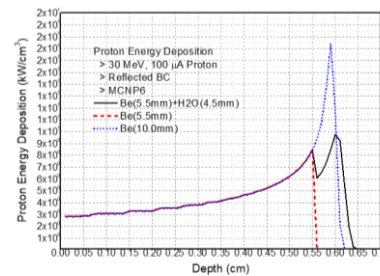
- 양성자빔에너지에 따른 투과 깊이 고려한 Beryllium 타겟 두께 선정(Blistering 방지 등)
- 차폐 구조체 형상 및 재료에 따른 성능 평가 완료
- 빔파워에 해당하는 열속 조건에서 허용온도를 만족하는 빔 사이즈 및 중성자 수율 평가 완료
- 유지보수/교체 및 냉각능을 고려한 표적 집합체 설계 및 제작 완료

Evaluation of TH performance with D=30mm of Proton Beam:  
Be temperature 297 °C < 700 °C & cooling channel 46 °C (no boiling)

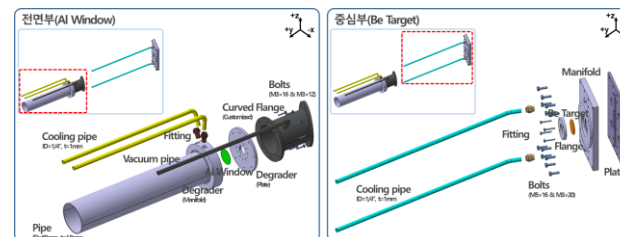
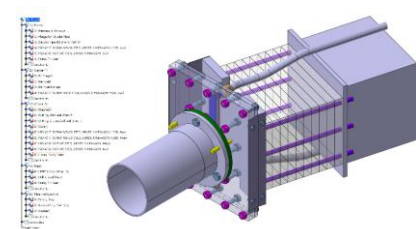
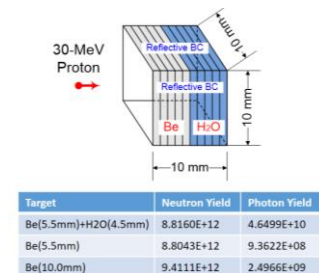


	D=30 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=13 kW
Be temperature (max.) [C]	297	166	652
Channel temperature (max.) [C]	46	36	88
Heat flux [MW/m <sup>2</sup> ]	2.47	1.27	5.49

Proton energy deposition: 8.5 kW/cm<sup>3</sup> (@5.5mm-Be), 9.7 kW/cm<sup>3</sup> (@6mm-water):  
below 1.1mm-water, whole energy deposited



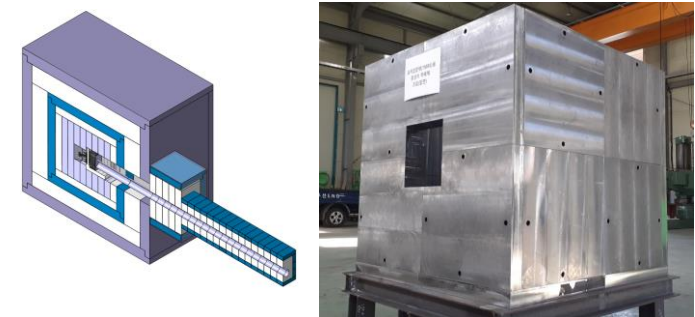
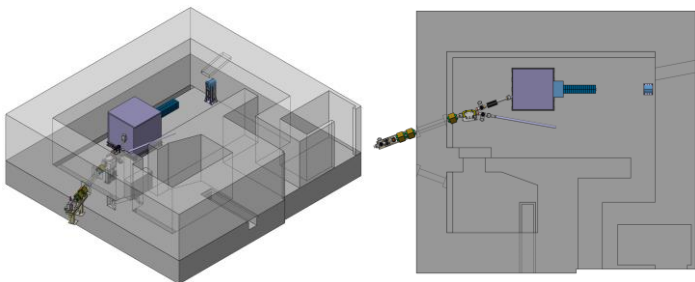
Proton Energy Deposition



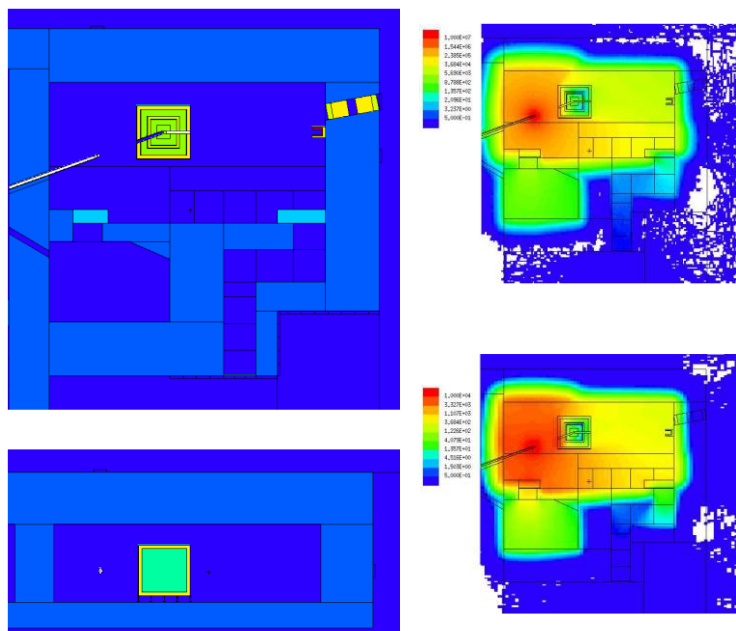


- 양성자 빔 경로, 중성자 영상화 시스템 위치 및 차폐룸 구조를 고려한 표적 시스템(TMRS, Target-Moderator-Reflector Shield) 1차 차폐체 (Inner layer) 제작 완료, 최종 제작 및 설치 11월 완료 예정
- 목표 중성자 수율 조건에서의 차폐 및 인허가 조건 기반 방사선 안전 인허가 획득, 12월내 시설 검사 및 중성자 발생 목표

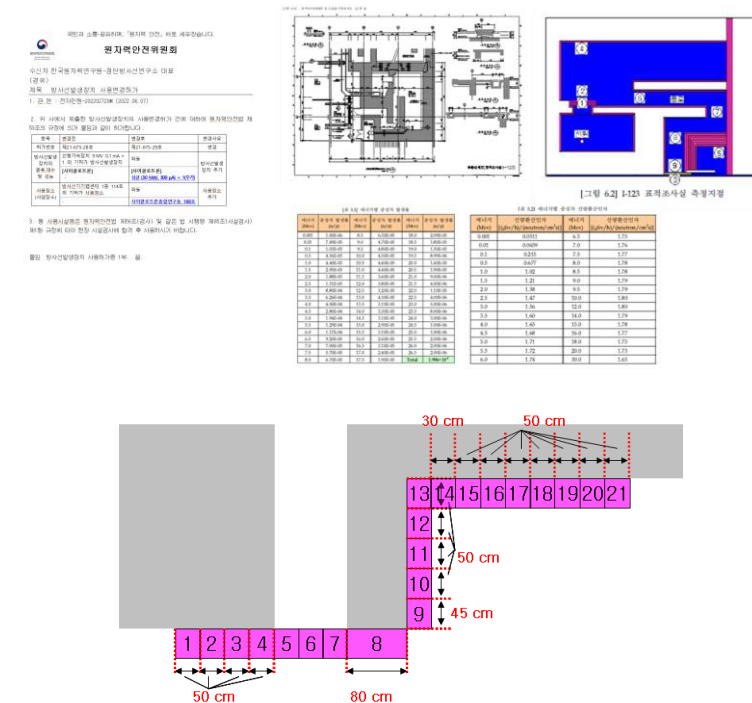
표적시험시설 내부 구조물(공조/냉각수 등 유틸리티)를  
고려한 표적 시스템 설계 및 제작



MCNP 기반 TMRS 설계 완료 @30 MeV/100uA-analysis model



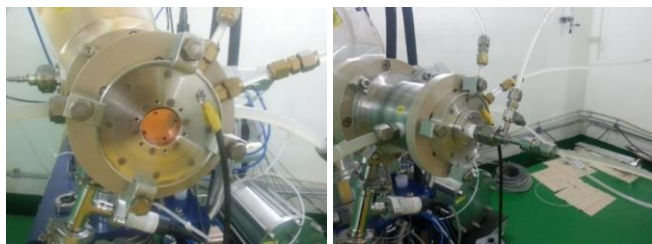
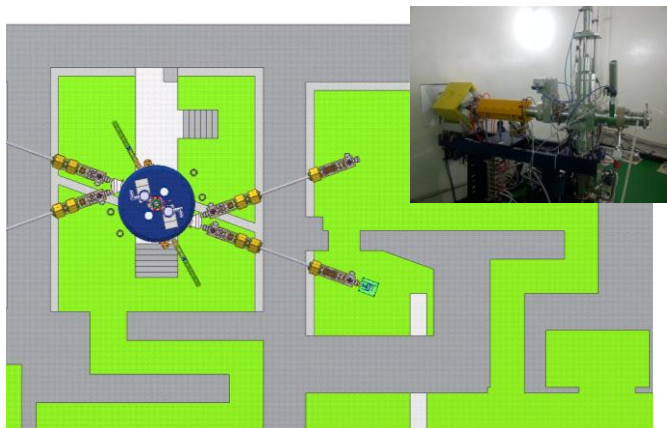
정읍 시설/안전부서와의 협의를 통한 RFT-30 종합시험동 표적 조사실 인허가 절차 수행 및 방사선 발생장치 인허가 획득



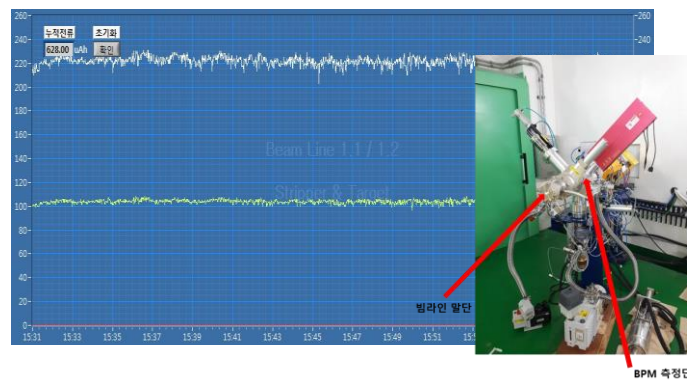


- 양성자빔 안정적 인출 조건 도출 (현재 30MeV, 100uA(최대 125uA) >36시간 확인)
- 기존 Al window를 사용한 빔 광학 정렬 및 Be 타겟 위치 지점에서 75%이상의 양성자 빔 투과 확인 완료
- 직경이 증가된 TMR5용 Al window 설계 반영 및 제작, >90% 빔 투과율 예상 및 검증 실험 진행 예정

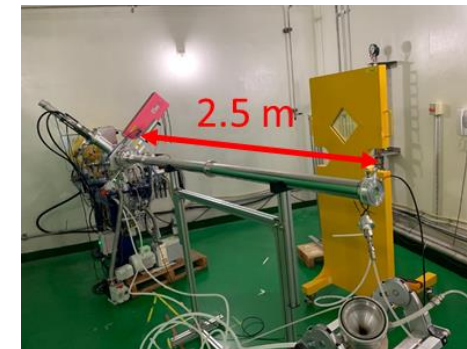
양성자빔 연속운전 및 전류 측정 결과



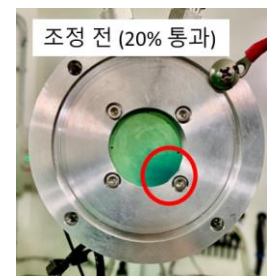
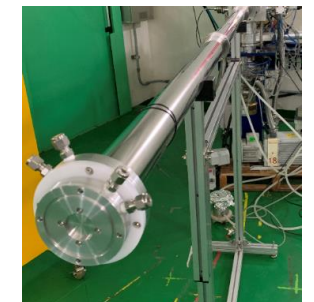
설계값 (MeV)	28.4	20	18	16
검정값 (MeV)	29.4	21.8	20.7	17.7



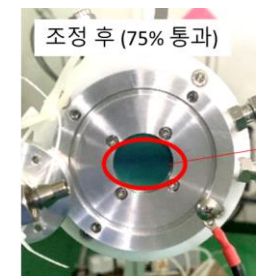
빔 광학제어를 통한 빔라인 정렬 실험 결과



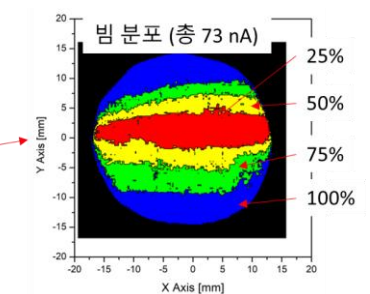
콜리메이터 &amp; 윈도우 설치



조정 전 (20% 통과)



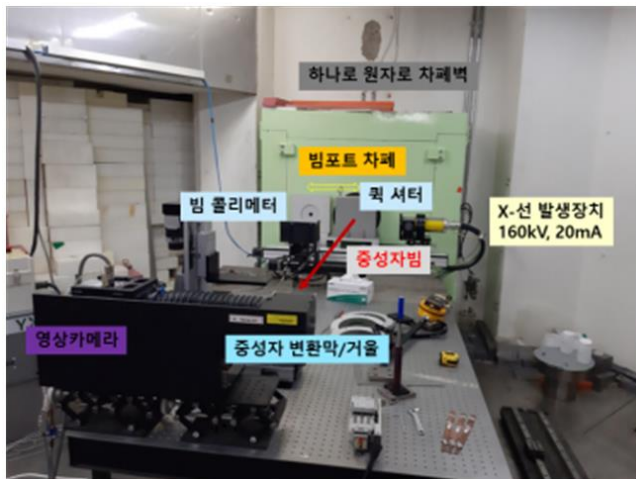
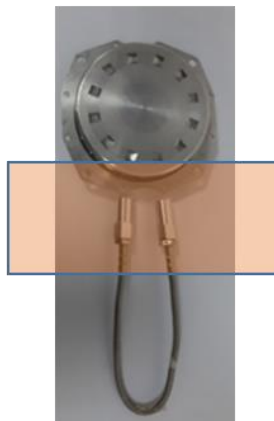
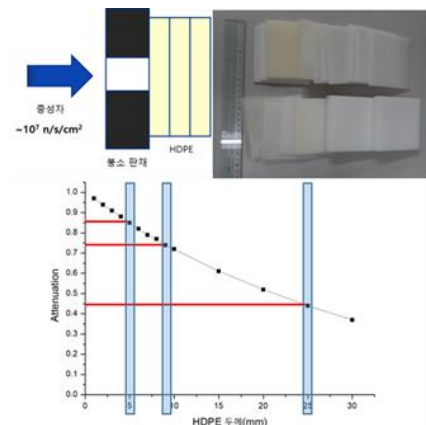
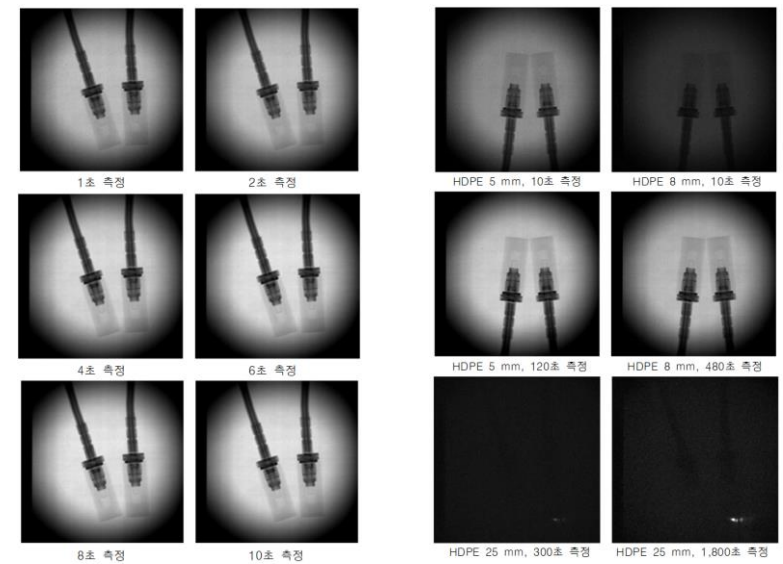
조정 후 (75% 통과)





- 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 cm<sup>2</sup> 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 cm<sup>2</sup> 중성자 카메라와 현장 설치용 차폐 구조물 제작
- X-선 분석을 위한 시스템 구축 및 시료 선별/조사 : 산업적으로 유용한 시료 선별

### FOV 20x20 cm<sup>2</sup> 중성자카메라 및 현장 설치용 차폐 구조물 제작



[중성자영상시스템]

- FOV 20x20 cm<sup>2</sup>
- Li6F/ZnS 섬광체 (400um)
- 공간분해능 200um
- 전면반사거울
- 렌즈 및 CC 카메라 등



[중성자전환막]

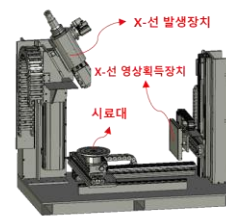
- 영국 Scintacor사
- LiF/ZnS 화합물  
(검출효율 80%)



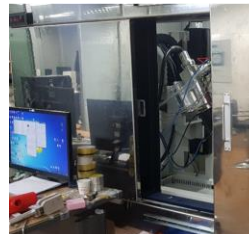
[중성자영상시스템 차폐구조물]

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

### X-선 분석을 위한 시스템구축 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



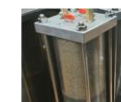
[X-선 영상획득장치]

- 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

## 중성자 영상화 기술 연구 개발 결과의 활용 방안 및 기대효과

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

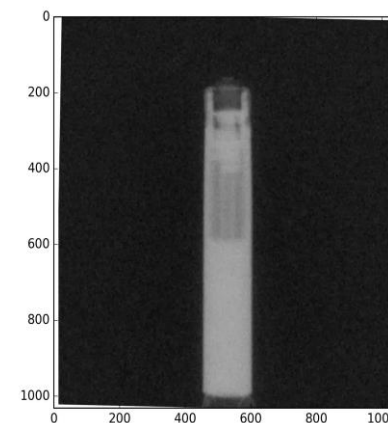
- ✓ 중성자원 국산화에 따른 국방관련 부품의 유지보수 비용 절감
- ✓ 고집적도 다양한 반도체, 특히 메모리 소자 SEE 검사 등 대형 기간산업 발전에 기여
- ✓ 문화재 및 산업용 중성자 비파괴검사 이용 분야 확대

## ➤ 확보 기술의 활용 : 적용분야에 따라 필요한 신규 중성자원 개발

- ✓ 표적집합체(Target-Moderator-Reflector), 표적시스템(TMR+Shielding) 설계/해석/제작/열부하 검증 기술 등 핵심역량 활용
- ✓ 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



&lt;중성자 영상 기술을 활용 비파괴 검사 사진 및 동영상&gt;



# 04 연구 개발 활용 및 기대 효과 중성자 응용 기술의 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

