

한국원자력학회 2022 추계학술발표회
제4차 소형 중성자원 개발과 이용 워크숍

KOMAC 100-MeV Proton LINAC Status and Spallation Neutron Source

경주 양성자가속기 운영 현황과
성능 확장을 통한 파쇄중성자원 구축

2022.10.19

한국원자력연구원
이 필 수



한국원자력연구원
양성자과학연구단



목 차

- Ⅰ 양성자가속기 - 일반현황
- Ⅱ 기존 시설 - 대기방사선 영향평가
- Ⅲ 성능 확장 - 파쇄중성자원

I. 양성자가속기

- 일반현황

1 양성자가속기 개요

양성자가속기 - 일반현황

100 MeV

양성자
가속기

연혁 - '02년 착수, '12년 완공 (총 구축 예산: 3,143억 원, 부지: 180,000 m²)
(2002.7 ~ 2012.12 양성자기반공학기술개발사업)

제원 - 국내 유일 최대 전류 20 mA 대용량 양성자가속기

응용 - 우주/대기방사선 영향평가, 동위원소 생산, 생명공학, 기초과학, 이차입자 생산 등

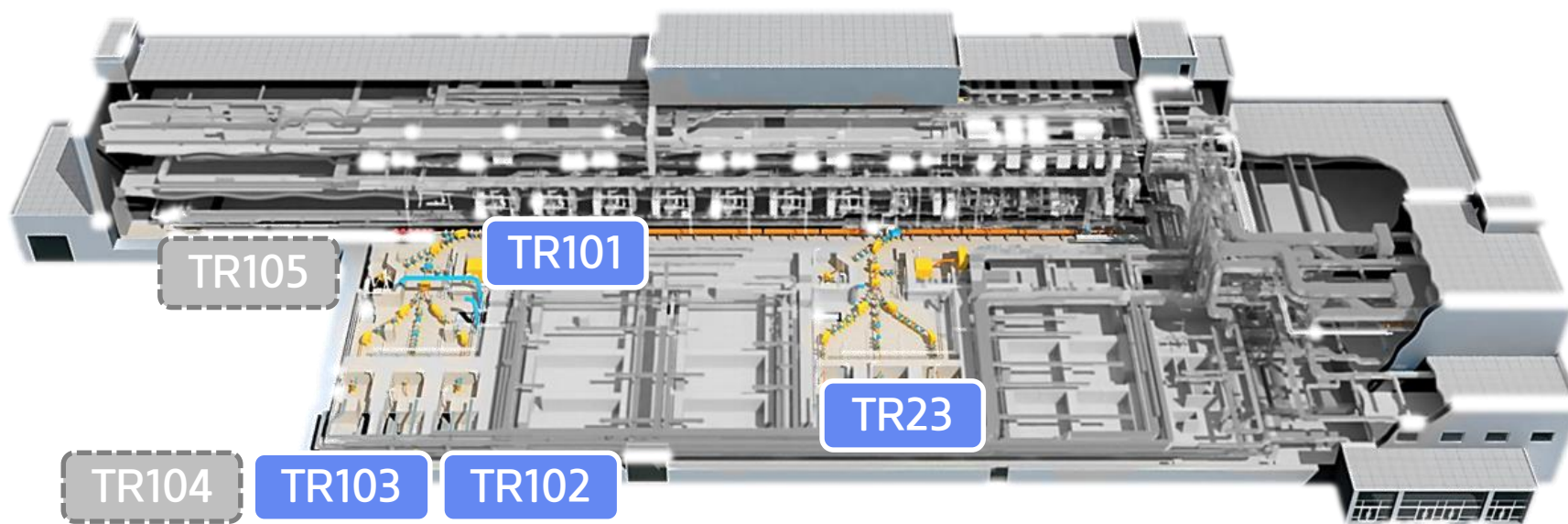
- 최근 5년간 총 누적 착수, 489개 연구과제, 188개 기관, 이용자 1,967 명, 13,459 공정 지원

경주 100 MeV 양성자가속기



1 양성자가속기 개요

양성자가속기 - 일반현황



TR23	20 MeV 범용 표적실
TR101	동위원소 생산용 표적실
TR102	저선량 표적실
TR103	100 MeV 범용 표적실
TR104	내부 활용
TR105	내부 활용

Extraction Energy	100 MeV
Max. Peak Beam Current	20 mA
Max. Beam Duty	8%
Avg. Beam Current	(max) 1.6 mA
Pulse Length	0.1 - 1.33 ms
Max. Repetition Rate	60 Hz
Max. Average Beam Power	160 kW

2 양성자가속기 운영 현황

양성자가속기 - 일반현황

양성자가속기 운영 현황 (2022.09.30. 기준)

총 누적 운전시간

29,054 시간

2022년 운전시간

2,134 시간

가동률

98.4 %

연간 운영 계획

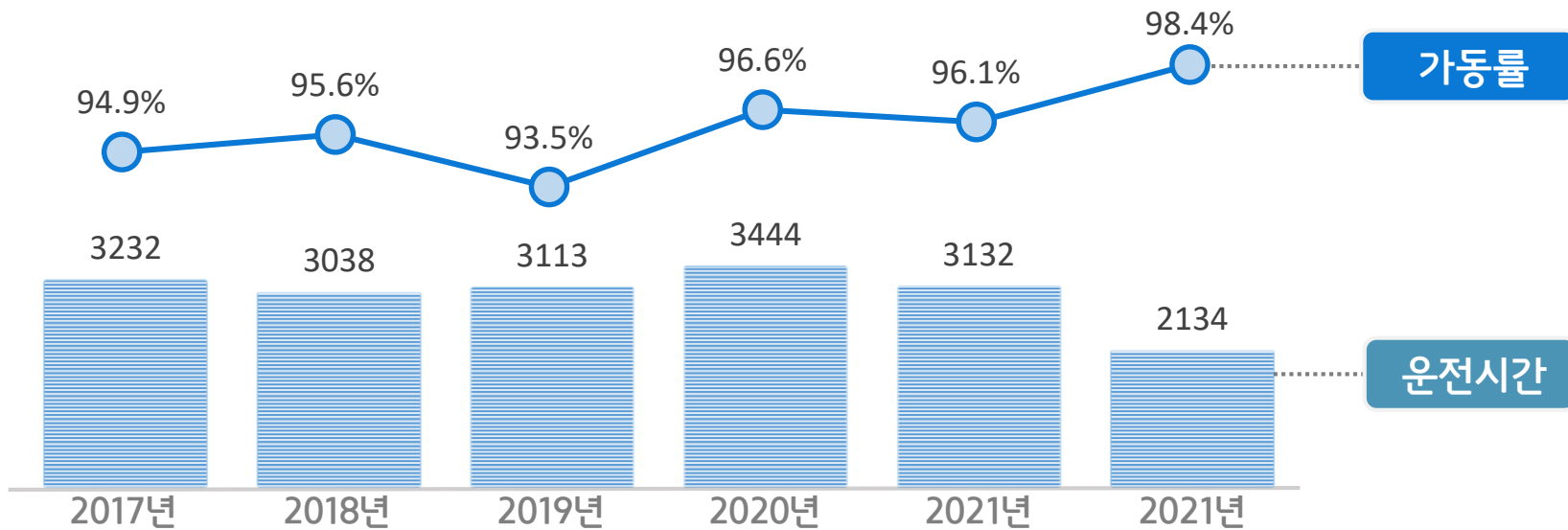
빔 서비스 25주

+

특성시험 8주

+

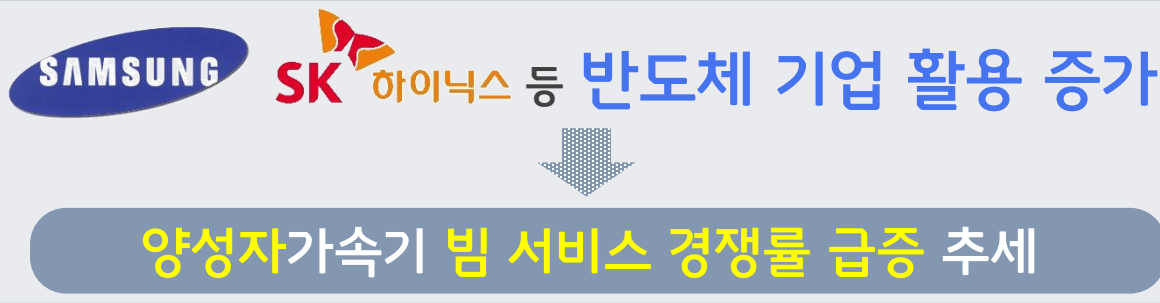
유지보수 19주



3 양성자가속기 빔 타임 경쟁률

양성자가속기 - 일반현황

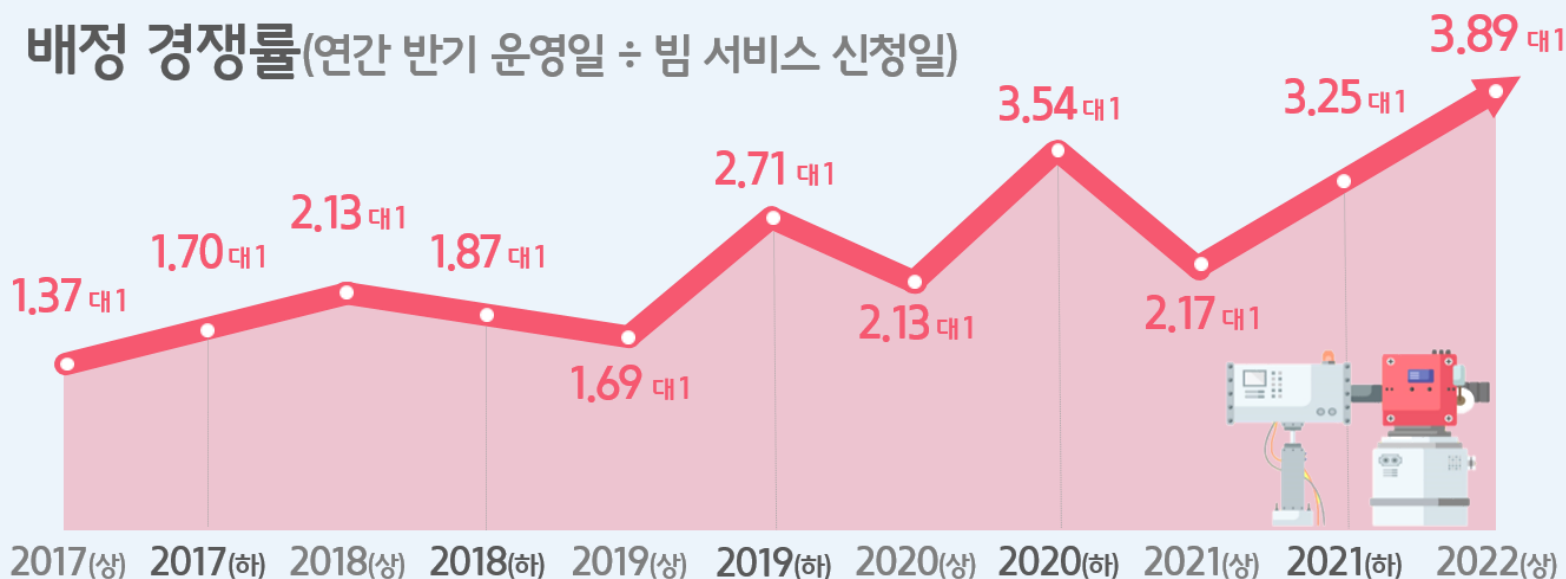
양성자가속기
빔 신청 현황



[국내 방사선 영향평가 수요를 위한 장기적 대책 필요]

빔 이용
신청
경쟁률

배정 경쟁률(연간 반기 운영일 ÷ 빔 서비스 신청일)



4 대기방사선 영향평가

양성자가속기 - 일반현황

대기방사선(고에너지 중성자 등) 영향평가

과학기술 선진국(미국, 유럽 등)에서 마련한 전자부품에 대한 대기 방사선 영향평가 표준/절차

대기권 내 중성자 스펙트럼(~ 1 GeV 영역) 내 테스트를 권장

JEDEC/JESD89B, JEDEC/JEP151A, MIL-STD-750 TM. 1017, IEC 62396-1

과학기술
선진국

표준/절차에 준하는 방사선 영향평가 가능
파쇄중성자원 시설 확보

국내
KOMAC

파쇄 중성자원을 이용한
대기방사선 영향평가 시설 미확보

100 MeV

500 MeV

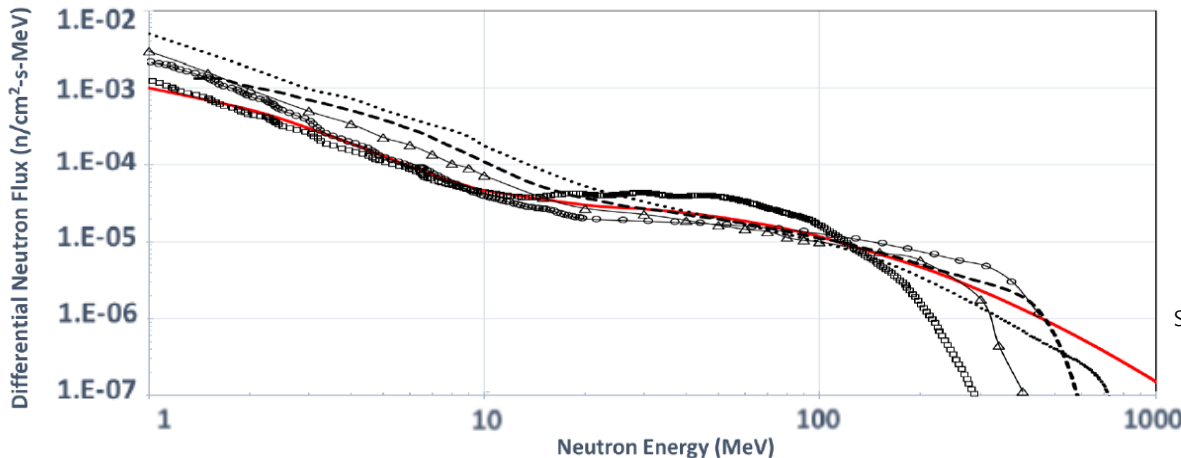
1 GeV

표준/절차 영역 내 파쇄중성자원 빔 서비스 수행 중

제한적으로 양성자빔을 이용한 Pre-Screen Test 중

실험불가

국내 파쇄 중성자원 부재로 해외 시설 이용



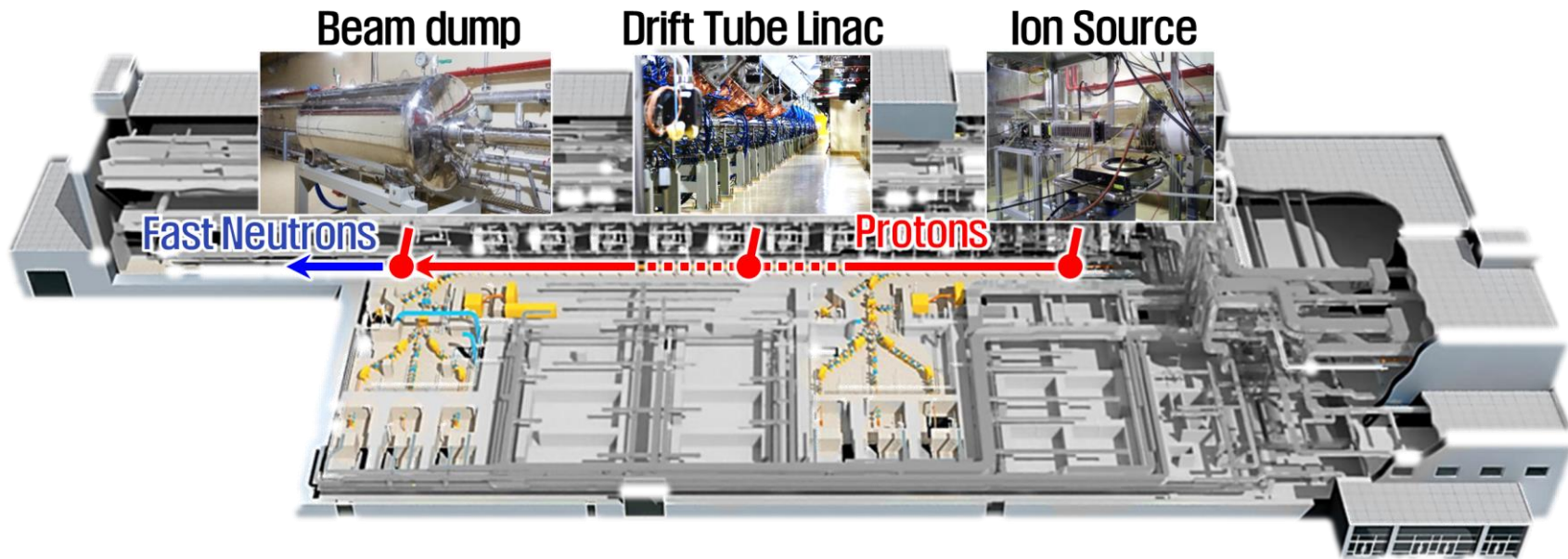
- Annex A, Eq A.1
- LANSCE ICE II/5.48e8
- ChipIR/1.54e9
- TRIUMF TNF/8.51e8
- TRIUMF BL1B/1.17e8
- △ RCNP/2.5e8

Source : JEDEC/JESD89B, Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices, 2021.

Ⅱ. 기존 시설 - 대기방사선 영향평가

5 저출력 (1 kW) 중성자 발생 표적

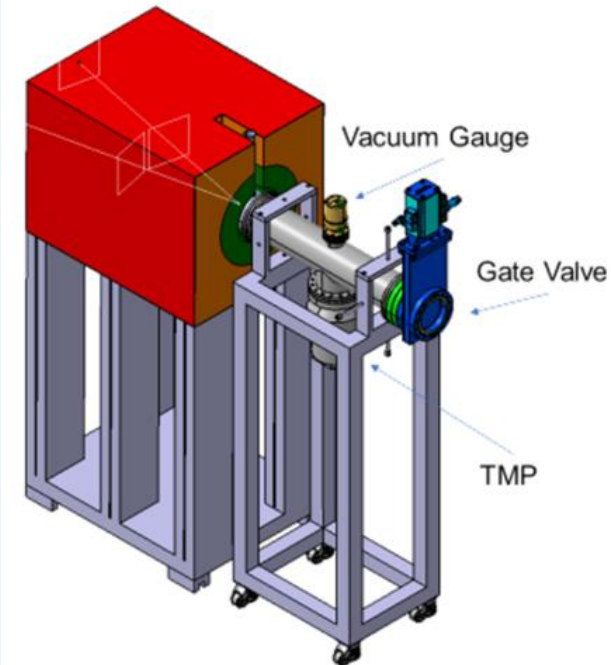
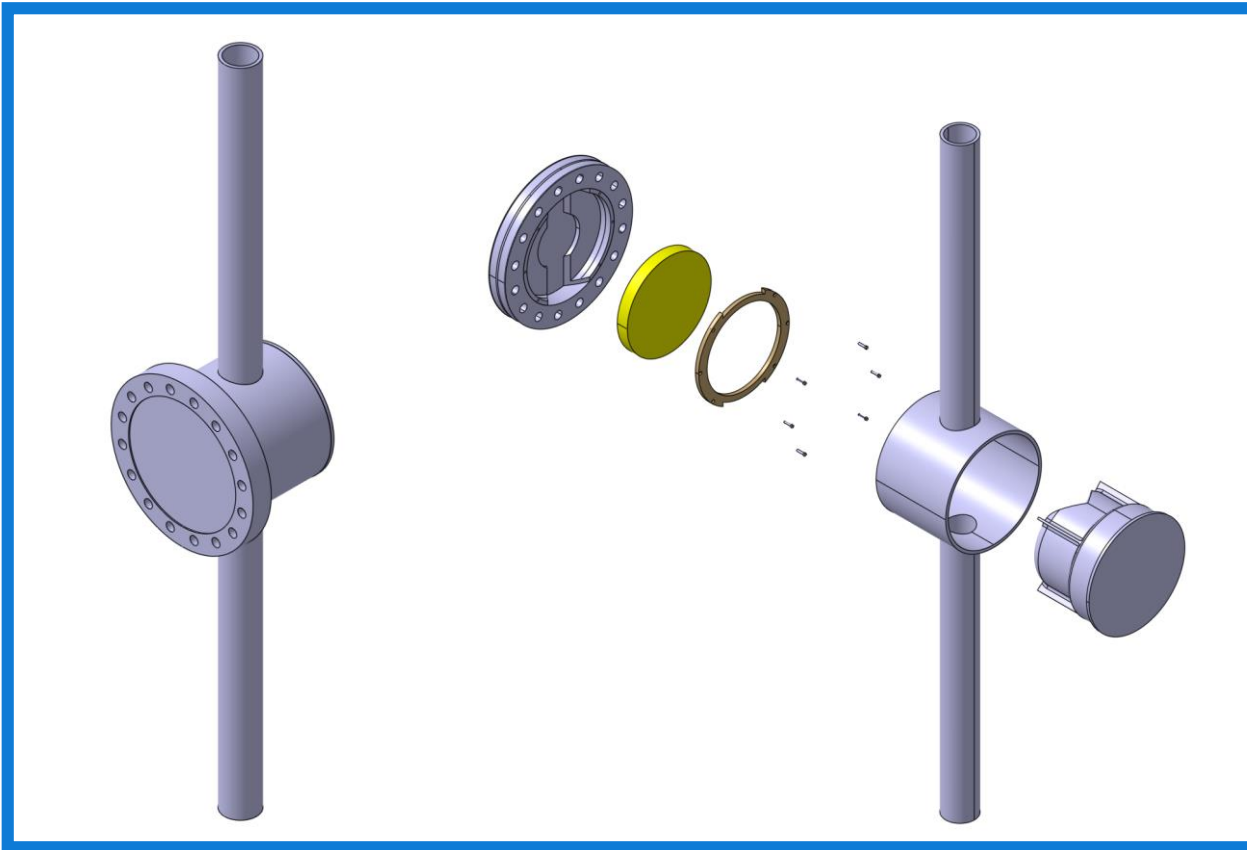
기존 시설 - 대기방사선 영향평가



- 대기방사선 영향평가 시험에 대한 국내 수요 증가 중
- 양성자빔을 빔덤프에 조사할 때 발생하는 백색중성자 이용 가능 (22.08.25 시설인허가 완료)
- 대기방사선 영향평가를 위한 백색중성자원 이용 실험 시설 구축 추진 중 (2023년까지)
- 양성자가속기 기반 파쇄중성자원 구축을 위한 고출력 표적 선행연구/기반기술 확보 필요

6 저출력 (1 kW) 중성자 발생 표적

기존 시설 - 대기방사선 영향평가

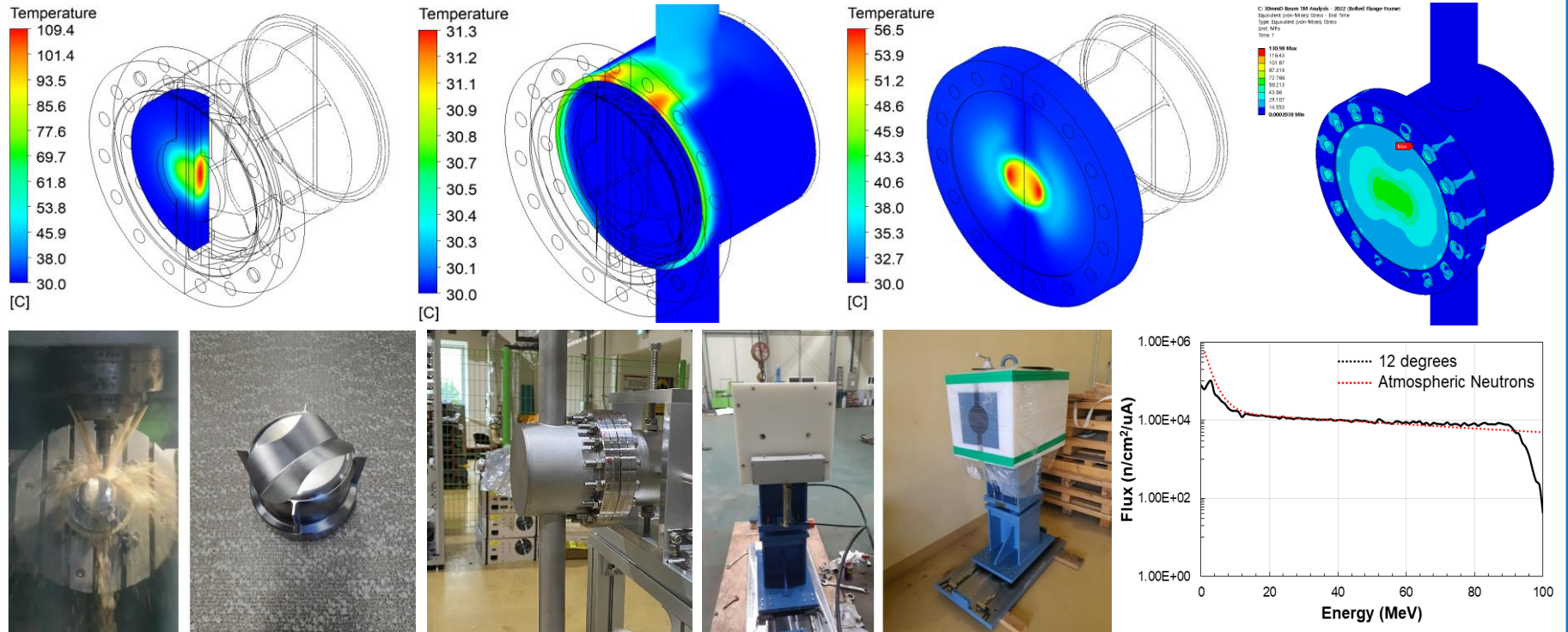


설계 목표

- 중성자 표적 계통 구축 및 운영이 기존 가속기 운영에 미치는 영향을 최소화
- 양성자가속기 빔튜닝에 빔덤프로 활용 가능하도록 설계
- 대기방사선 모사시험을 위한 중성자원 역할 수행 가능하도록 설계
- 빔조사 종료 후 표적방사화에 의한 방사선 피폭으로부터 인체 보호

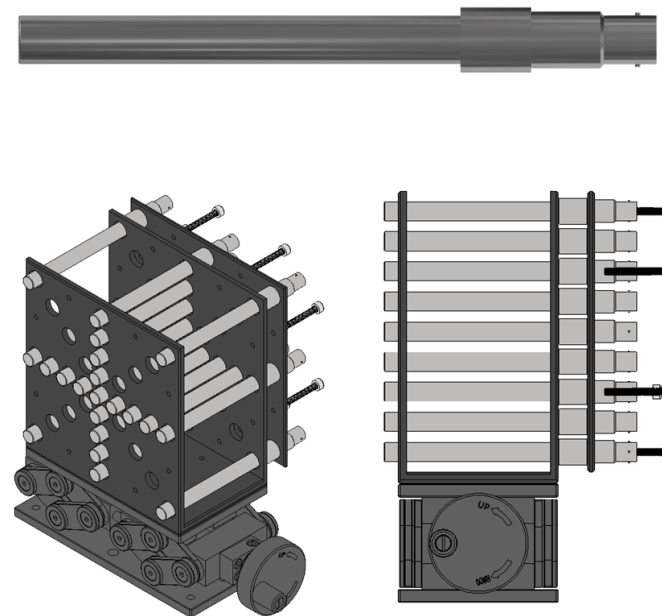
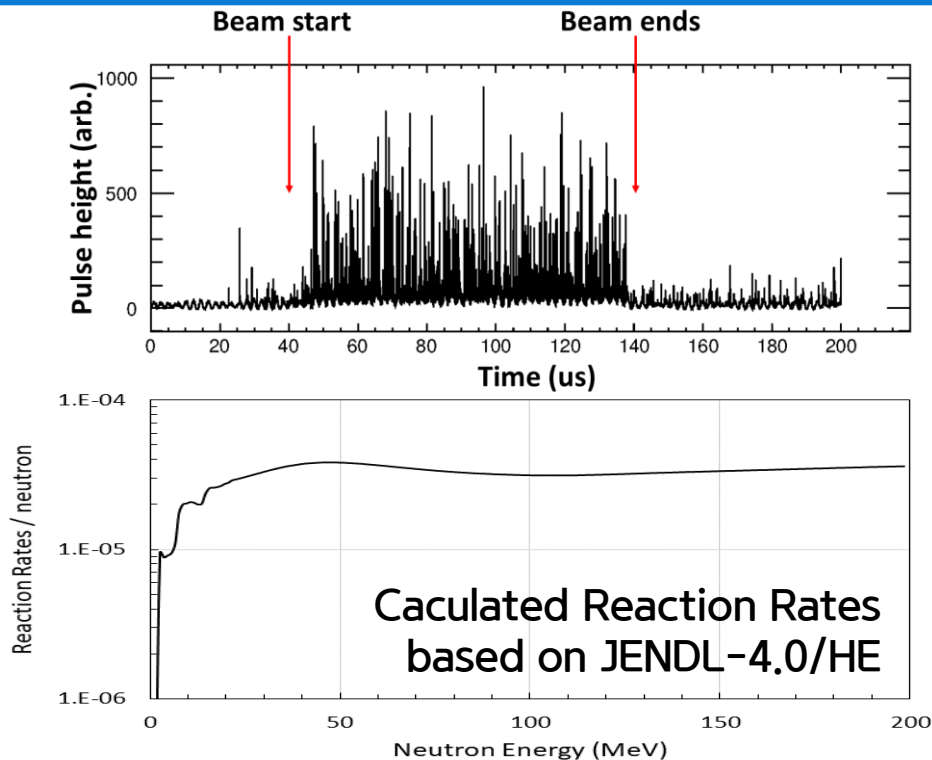
7 저출력 (1 kW) 중성자 발생 표적

기존 시설 - 대기방사선 영향평가



계산/
시제품
제작

- 방사선(중성자/감마선) 계산 및 결과 해석 (중성자 선속 $E > 10$ MeV, 약 10^6 n/cm²/uA)
- 열구조해석을 통한 냉각수 유동 및 설계 개선 (최대온도, 표적 109℃, 윈도우 56℃)
- 재료 (Body: SS316L, Frame: Al-6082-T6, Target: Tantalum)
- 표적 및 냉각수 유도판의 경우 5-축 MCT 가공 (접합: TIG 용접)



고에너지
고선속
중성자
계측

- 펄스 양성자빔에 의해 발생하는 고에너지 중성자는 펄스 중성자
- 순간선속이 높고 (10^9 n/cm²/s 이상) 에너지가 높은 (10 MeV 이상) 중성자 측정을 위해 U-238 핵분열 검출기 사용
- **10 MeV 이상** 고선속 중성자 선속 및 2차원 선속분포 측정을 위한 시스템 개발 추진 중

Ⅲ. 성능 확장 - 파쇄중성자원

9 파쇄중성자원이란?

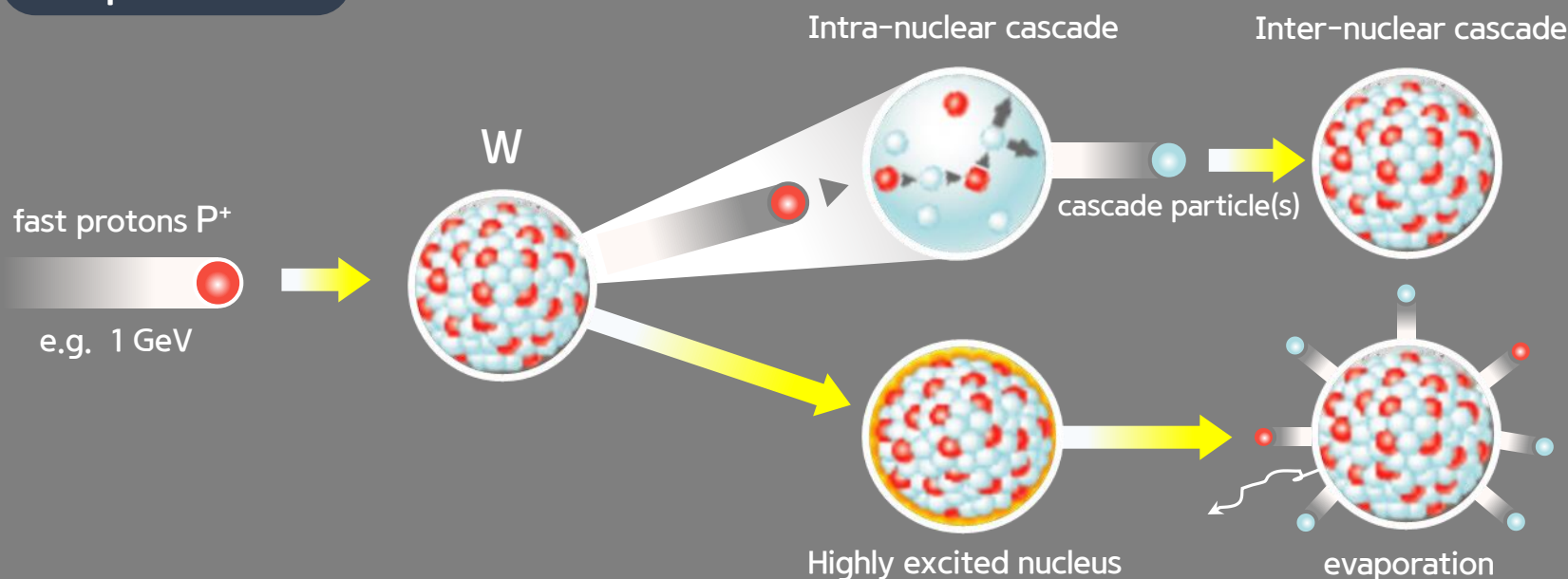
성능 확장 - 파쇄중성자원

가속기 기반 파쇄 중성자원

(Spallation Neutron Source)

GeV급 양성자속기를 이용하여 양성자빔을 빛의 속도에 가깝게 가속시킨 후 (≥ 1 GeV), 고출력 양성자빔을 표적(텅스텐, 납 등)에 충돌시켜 표적 물질의 원자핵을 쪼개는 방법으로 가벼운 입자들과 중성자를 생성하는 기술 (양성자당 20 ~ 40개 중성자 발생)










Spallation



10 세계의 양성자가속기

성능 확장 - 파쇄중성자원

세계적 시설 대비 저 사양, 파쇄 중성자원 등 이용시설 미비

국가, 연구소	 LANSCE	 SNS	 TRIUMF	 ESS	 ISIS	 SINQ	 J-PARC	 CSNS	 KOMAC
기관	LANL	ORNL	UBC	ERIC	RAL	PSI	JAEA KEK	IHEP	KAERI
최종 가속기 타입	선형	선형	원형	선형	원형 Synchrotron	원형 Cyclotron	원형 RCS	원형 RCS	선형
완공 연도	1997	2006 (2025)	1974	2023	1985	1978	2008	2016 (미정)	2012
최종 에너지 (GeV)	0.8	1.0 (1.3)	0.52	2.0	0.8	0.59	3.0	1.6	0.1
평균 빔 전류 (mA)	1.0	1.4 (2.2)	0.1~0.15	2.5	0.23	1.8	0.33	0.62 (0.31)	0.1~1.6
평균 빔 파워 (MW)	0.8	1.4 (2.8)	0.05~0.07	5.0	0.18	1.0	1.0	0.1 (0.5)	0.16
파쇄 중성자원 구축 여부	O	O	X	O	O	O	O	O	X
열중성자 Flux (n/sec)	$> 10^{15}$	$> 10^{17}$	5×10^{18}	$> 10^{18}$	$> 10^{16}$	$> 10^{14}$	$> 10^{17}$	$> 10^{16}$	-

- 해외 양성자가속기의 경우 대부분 800 MeV 이상 고에너지 양성자빔 인출 가능
- 대용량 양성자가속기의 경우 이차입자 생성이나 파쇄중성자원 구축 후 중성자 과학에 활용

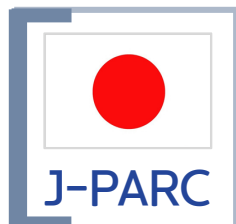
11 해외 구축 사례 - 미국, 일본, 중국

성능 확장 - 파쇄중성자원

파쇄 중성자원(Spallation Neutron Source) 해외 구축 사례



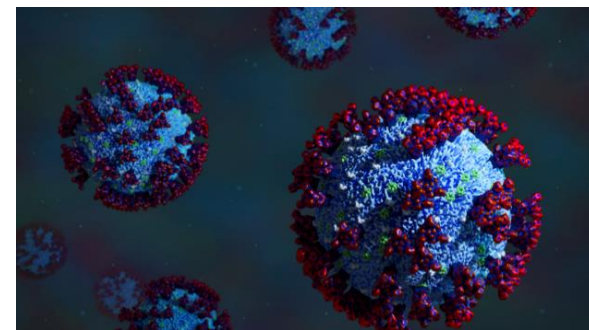
약 2.5조 원 예산으로 2 MW급 중성자빔 이용 시설을 '06년에 구축을 완료하여, '07년부터 이용자 빔 서비스를 시작함. 2020년 기준 611명의 이용자들이 SNS의 중성자빔을 이용하여 첨단 실험을 수행 중



'01년부터 약 2조 원을 투자하여 도쿄에서 130 Km 떨어진 도카이에 '09년에 건설이 완료된 양성자가속기와 실험 시설의 복합 시설, 설계 출력은 1 MW급



약 4,400억 원 예산으로 '08년부터 약 6년에 걸쳐 완성하였고, '17년 중성자빔 생성에 성공, 최종 출력은 0.5 MW급



[SNS를 이용 구현한 코로나 바이러스 구조]

12 해외 구축 사례 - 유럽 연합

성능 확장 - 파쇄중성자원

파쇄 중성자원(Spallation Neutron Source) 해외 구축 사례



ESS

스웨덴 4세대 원형 방사광가속기인 MAX IV가 있는 lund시에 약 4조 원 예산으로 '14년부터 구축을 시작하여 '23년까지 구축을 완료하는 5 MW급 중성자빔 이용시설



MAX IV
(방사광가속기)

ESS
(파쇄중성자원)



[ESS 구축 현장]

13 양성자가속기 성능 확장 개요

성능 확장 - 파쇄중성자원

사업명 GeV급 양성자가속기 기반 한국 파쇄중성자원 구축

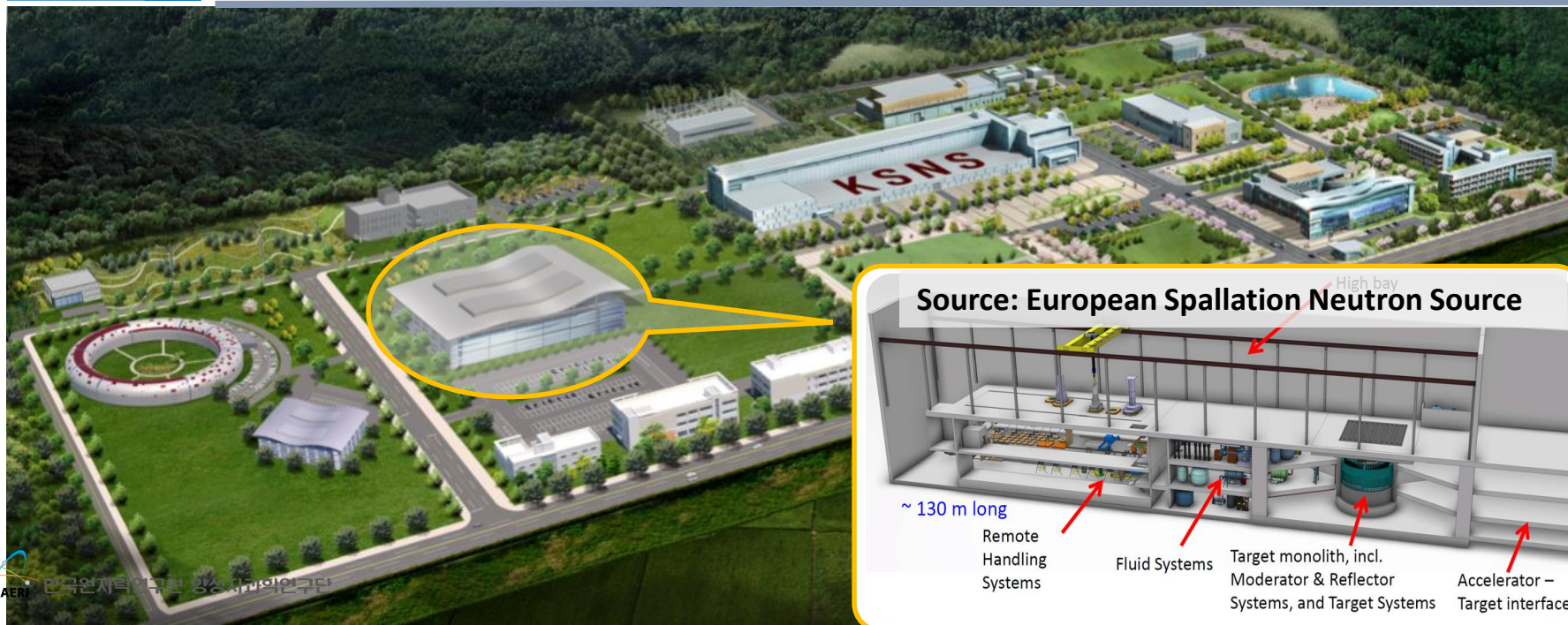
사업목적 세계 수준의 양성자/중성자 시설 구축 극한환경/에너지 소재, 바이오, 신약/백신 등

① 반도체/우주 부품 방사선 영향 평가 만족도 지원

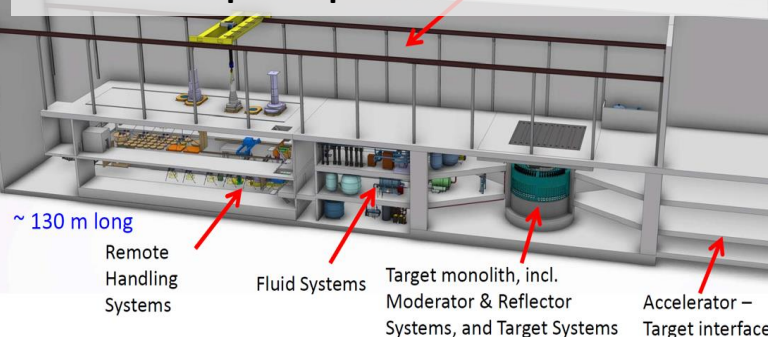
② 대부분의 양성자빔/중성자빔 이용분야 지원 만족

파급
효과

6세대 이동통신, 미래자동차, 우주 발사체 등에 필요한 **반도체**의 **대기·우주방사선 영향평가**
자국 이익 우선주의 시대에 **첨단과학기술개발에 필수적인 GeV급 양성자가속기 기반의**
파쇄중성자원 확보를 통한 **차세대 중성자빔 이용시설 구축**



Source: European Spallation Neutron Source



성능 확장 - 파쇄중성자원

- 자율 주행차, AI 등 핵심 전자기기·부품 신뢰성 평가용 200 MeV급 대기 방사선 영향 시험 플랫폼 구축 → 시급성 등을 고려 예비타당성 조사를 거쳐 구축 추진

국가연구시설 중기('22~ '24) 확충·고도화 방향(안) (국가과학기술자문회의, 2020.12. 9.)

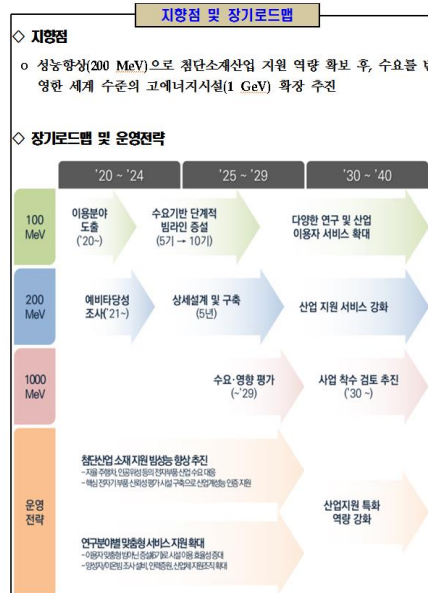
- **현 시설 보완 → 양성자가속기 성능 향상**(장기적 구축기획: 우주입자연구지원, 국제초거대입자가속기)

의안번호	제 호	심 의 사 랑
심 의 연 월 일	2020. 3. 12. (제 회)	

대형가속기 장기로드맵
및 운영전략(안)

국가과학기술자문회의
삼의회의 운영위원회

제 출 자	과학기술정보통신부장관 제 기 영
제출 연월일	2020. 3. 12.









의안번호	제 6 호	보 고 사 항
보 고 연 월 일	2020. 12. 09. (제 26회)	

국가연구시설 중기('22~'24)
확충·고도화 방향(안)

국가과학기술자문회의
심의회의 운영위원회

제 출 자	과학기술정보통신부장관 최기영
제출 연월일	2020. 12. 09.

시설유형	대행청(보영청)	연구장비접입성	과학·교과관련성	데이터관리현황	관측 측정항목	
기술분야	우주항공	유지	유지	-	확대	유지
 연구자  시설  연구장비	스마트센서·고통과 관련한 실험-평가 및 다제량등의의 확대를 위해 연구장비정착 및 관측/측정법, 데이터관리등의 확보가 필요					
	신규 확충 자속송출 테스트 장치, 노동 SDCN 시스템 검증 지원, 과학탐험 도구실험, 탐침 데이터 저장 유지 보강 스마트화실내환경, 스마트센서의 활용 증가, 대형·국립·연구소, 공간정보 빅데이터 플랫폼, 특수수거장치 등 용기외 구축/개선 건설합탈방해비용증, 스마트도로 자율주행 실험, 스마트물류지원					
기술분야	우주항공	확대	확대	유지	유지	유지
 연구자  시설  연구장비	도전적인 연구를 촉진하기 위하여 운영자가 원하는 초저대 대행청(보영청)시설의 안정적 구축·활용을 제하면 될 개선안(연구)을 위한 공동연구시설 추진 필요					
	신규 확충 신기술대소형배터, 연구자료(데이터), 분석자료시스템 고해상도 활용 유지 보강 혁신산업지원, 국가중요한연구 분야 연구공급원료, 광전자기술이 접는 특성 용기외 구축/개선 중앙데이터센터, 시각·공간영상 User Facility, 통신망 국가연구데이터 센터, 통합 중대사업, 우주공간연구시설, 우주통신·데이터처리·지구					

※ 신규 확충 : 향후 3년 이내에 구축을 위한 재정 투입 검토와 필요한 분야
 및 시설 보완 : 향후 3년 동안 기 구축시설의 보완 및 지원 검토와 필요한 분야
 장기적 구축 계획 : 향후 10년 이내에 구축의 필요성이 인정되어 기획이 필요한 분야

국가대형연구시설 구축 지도

(국가과학기술위원회, NFEC, NFRM 2013, P. 92-93)

● 경주 양성자가속기 업그레이드를 통한 2 MW급 강력 펄스 중성자원 구축



1GeV, 2MW 대용량 양성자가속기

- 양성자빔의 최대 가속에너지 1GeV, 빔 파워 2MW인 선형가속기
- '12년 국내 독자기술로 개발하여 구축한 경주 양성자가속기연구센터의 100MeV 대용량 양성자가속기를 확장하여 구축

강력 펄스 중성자원(업그레이드)

Strong Pulsed Neutron Source(Upgrade)

시설 개요

강력 펄스 중성자원이란 기존의 연구시설(방사광, 전자현미경, NMR 등)로 접근이 불가능한 시공간영역에서 물질의 구조와 기능을 원자 수준에서 탐구하는 시설

- 1GeV로 가속한 양성자를 무거운 원자핵(납, 수은 등) 표적과 충돌시켜 핵 파쇄반응으로 대량의 중성자를 생산하여 이용
- 중성자와 물질을 구성하는 원자의 핵 또는 전자와의 상호작용(산란, 흡수, 핵반응, Spin-Echo 등)을 이용하여 물질을 구성하는 원자의 위치 및 기능을 분석하는 연구시설
- 연구용 원자로 대비 1,000배 이상의 고 선속(High Flux) 펄스 중성자 빔을 제공할 수 있고, 부수적으로 뮤온(Muon), 중성미자(Neutrino) 등 소립자를 생성하여 연구개발에 활용

강력 펄스 중성자원은 1GeV, 2MW급 양성자가속기, 장펄스(~ms) 중성자원, 단펄스(~μs) 중성자원 등으로 구성

- 1GeV, 2MW급 대용량 선형 양성자가속기
- 장펄스(~ms) 중성자원 및 중성자 이용시설
- 단펄스(~μs) 중성자원 및 중성자 이용시설
- 뮤온(Muon) 및 중성미자(Neutrino)원과 이용시설 추가 가능

목표사항

핵심장치	목표사항
대용량 양성자가속기	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지 : 1GeV • 빔파워 : 2MW
장펄스 중성자원	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자 선속(flux) : $\sim 10^{17}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ @ 표적 • 공간 분석영역 : 0.9μm~10nm • 시간 분석영역 : 수 μs~수 ns
단펄스 중성자원	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자 선속(flux) : $\sim 10^{17}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ @ 표적 • 공간 분석영역 : 0.01nm~10nm • 시간 분석영역 : 수 ns~수 fs



감사합니다.



한국원자력연구원 양성자과학연구단
Korea Atomic Energy Research Institute Korea Multi-purpose Accelerator Complex