

STI Brief

2026 VOL.01

극한 희귀동위원소를 활용한
핵천체물리 연구 동향과 RAON 활용 방향



STI Brief

2026 VOL.01

극한 희귀동위원소를 활용한
핵천체물리 연구 동향과 RAON 활용 방향



극한 희귀동위원소를 활용한 핵천체·물리 연구 동향과 RAON 활용 방향

주저자 채경욱 교수 (성균관대학교)

I. 서론

II. 해외 동향

III. 국내 동향

IV. 결론

참고문헌

우주 원소 생성과 극한 천체환경 규명을 위한 희귀동위원소 기반 핵천체물리 연구가 핵심 기초과학 분야로 부상하며 글로벌 연구 패러다임이 실험데이터 중심으로 전환

주요국은 FRIB·RIBF·FAIR 등 희귀동위원소 연구시설을 국가 전략 인프라로 육성하고 개방형 사용자시설·국제공동연구 기반 연구 경쟁력을 강화하는 한편, 우리나라도 RAON을 중심으로 희귀동위원소 빔 생산·핵데이터 확보·개방형 운영체계 구축을 추진 중

글로벌 연구 경쟁 심화 속 RAON 기반 핵데이터 자립·개방형 운영체계 강화와 국제협력 허브 도약을 위한 전략적 연구역량 조기 확보 필요

1. 배경 및 필요성

핵천체물리 연구 중요성 확대

우주 원소 생성과 극한 천체환경 규명을 위해 희귀동위원소 기반 정밀 핵데이터 확보 중요성이 확대되며 핵천체물리 연구가 핵심 기초과학 분야로 부상

- ◎ (핵천체물리 연구의 전략적 중요성) 극한 희귀동위원소 기반 핵천체물리 연구는 우주 원소 생성 경로와 중성자별 병합초신성 폭발 등 극한 천체환경 규명을 위한 핵심 연구분야로 정착
 - r-process, rp-process, vp-process 등 주요 핵합성 과정은 안정핵에서 멀리 떨어진 불안정 핵종의 질량, 반감기, 붕괴양식 및 반응률 등 정밀 핵데이터에 크게 의존
 - 희귀동위원소 물성 차이는 핵합성 경로와 최종 원소 분포 예측에 직접적 영향을 미치므로 실험 기반 데이터 확보 필수
- ◎ (실험 기반 연구 패러다임 전환) 글로벌 연구 패러다임은 이론 모델 중심에서 희귀동위원소 빔 기반 실험 데이터 확보 및 이론·관측 연계 연구 중심으로 전환
 - 희귀동위원소 빔 생성 강도, 순도 및 도달 가능한 핵종 범위는 연구 가능한 핵천체물리 영역을 결정하는 핵심 요소로 작용
 - 검출기 해상도, 반응 측정 정밀도 및 배경 억제 기술 등 실험 장치 성능이 핵데이터 품질과 연구성과 수준을 좌우하는 주요 변수로 부상

희귀동위원소 연구환경 변화

주요국은 희귀동위원소 연구 시설을 국가 전략 연구인프라로 활용하여 개방형 사용자시설과 국제 공동연구 기반 운영체계 중심으로 연구 경쟁력 강화 추진

- ◎ (글로벌 연구시설 운영모델 전환) 주요국은 희귀동위원소 가속기 시설을 국가 과학기술 경쟁력 및 장기 연구역량을 뒷받침하는 핵심 연구 인프라로 인식
 - 미국 FRIB, 일본 RIBF, 유럽 FAIR 및 캐나다 TRIUMF 등은 장기 운영계획과 단계별 인프라 업그레이드, 안정적 예산 및 전문인력 확보를 병행 추진
 - 2023~2028년은 주요 가속기 시설의 운영 개시·업그레이드·재가동이 맞물리는 전환기로 향후 국제 연구시설 간 경쟁구조 재편 가능성 존재
- ◎ (개방형 사용자시설 운영체계 확산) 최근 연구시설 경쟁력은 시설 성능뿐 아니라 사용자 접근성, 빔타임 배분 및 국제공동연구 지원체계 완성도 중심으로 변화
 - FRIB, RIBF, FAIR, ISOLDE 및 TRIUMF 등은 공개 공모·동료평가·사용자조직 기반 개방형 사용자시설 운영체계 구축
 - 시설 개방성과 운영 효율성이 글로벌 연구자 유치 및 공동연구 확대 핵심 요소로 작용

|그림 1-1| FRIB 내부 시설



자료: Shutterstock, "Data Center Raised Floor / Server Room"

- ◎ (시설 간 기능 분화 및 국제협력 구조 변화) 최근 국제 연구 인프라는 시설별 특화 영역 중심 역할 분담 구조로 전환되어 국제 공동연구 기반 협력체계 확대
 - 시설별 강점 기반 기능 특화와 동일 핵종의 상호 검증·공동분석 체계를 연계한 글로벌 협력 연구환경 강화

연구생태계 정책 확대

주요국은 오픈사이언스 기반 연구환경 조성 및 의료·산업 연계 확대 및 국제협력 강화를 중심으로 연구정책 범위 확대 추진

- ◎ (오픈사이언스 확대) 최근 연구시설 경쟁력은 데이터 공개와 메타데이터 관리 및 오픈사이언스 정책 역량까지 확대 중
 - CERN ISOLDE·EURO-LABS 기반 오픈데이터 연구환경과 EXFOR·ENSDF 국제 핵데이터 협력체계를 연계한 글로벌 핵천체물리 공동연구 기반 강화
- ◎ (의료·산업 연계 중심 응용정책 확대) 주요국은 희귀동위원소 시설을 의료 및 산업 응용과 연계하는 방향으로 정책 범위 확대
 - 의료·반도체·핵변환 등 방사성동위원소 응용 분야 확대와 산업 파급효과·공급망 기여도를 반영한 연구시설 평가체계 구축
- ◎ (국제협력 및 인력양성 정책 강화) 주요 시설은 국제 사용자조직과 공동연구 프로그램을 기반으로 글로벌 연구자 네트워크 확대 추진
 - 국제 공동실험·연구자 교류·공동장비 활용과 Summer School·Fellowship 프로그램을 연계한 차세대 글로벌 연구자 네트워크 강화

연구역량 확보

글로벌 핵천체물리 연구는 희귀동위원소 빔 기반 실험 데이터 중심으로 재편되고 국제 공동연구 경쟁이 심화됨에 따라 RAON 기반 핵천체물리 연구역량과 글로벌 협력체계의 조기 확보 필요

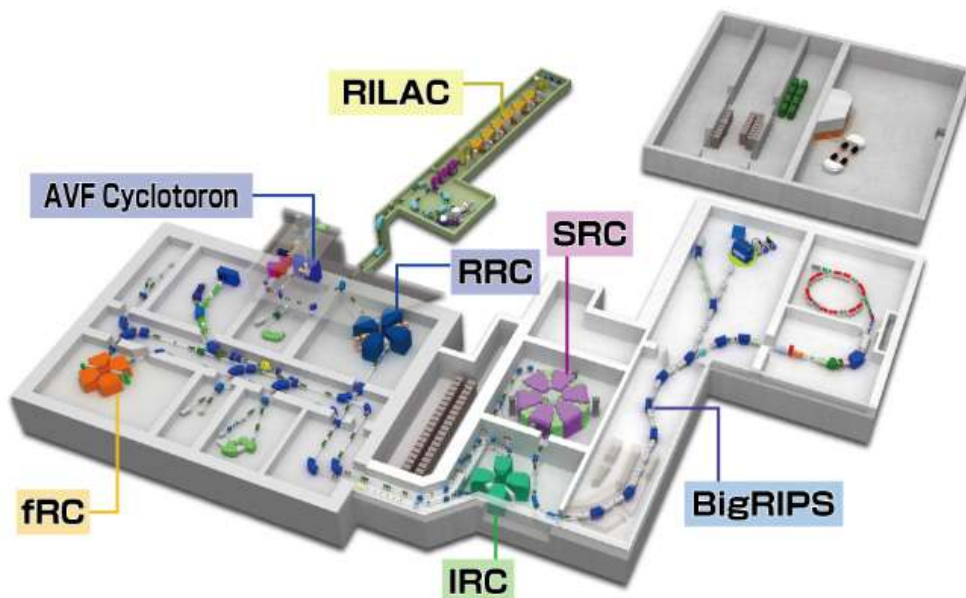
- ◎ (실험 기반 핵데이터 생산역량 확보) 핵천체물리 연구 패러다임은 이론모델 중심에서 실험 검증 중심으로 전환됨에 따라 RAON 기반 불안정 핵종 정밀 측정 및 핵데이터 생산역량 확보 필요

 - r-process·rp-process 등 우주 핵합성 경로 규명을 위한 희귀동위원소 핵데이터 확보와 검출·측정 정밀도 향상을 기반으로 한 고신뢰 핵데이터 생산체계 구축 필요
- ◎ (개방형 운영 체계) 주요국 연구시설은 개방형 사용자시설 및 국제 공동연구 중심으로 운영체계를 전환하고 있어, 우리나라는 RAON의 전략적 포지셔닝과 글로벌 연구자 참여기반을 조기 확립 필요

 - 공개 공모·동료평가 기반 빔타임 사용자 지원체계 구축과 해외 주요 시설 간 공동연구·데이터 검증 협력체계 마련요구
- ◎ (핵데이터 관리 및 응용 연계 전략 수립) 오픈사이언스 확대와 의료·산업 응용연계가 연구시설 경쟁력 평가 기준으로 부상함에 따라 핵데이터 공개·공유 체계와 방사성동위원소 응용 연구 기반 동시 구축 필요

 - EXFOR·ENSDF 기반 국제 핵데이터 협력 참여와 의료·반도체 분야 연계를 위한 메타데이터 관리 및 응용전략 확대

[그림 1-2] 日 RIKEN RIBF 시설 조감도



자료: RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. (2026). RIBF Accelerator Complex Diagram [Image]. RIKEN.

2. 기술의 정의 및 범위

기술정의

희귀동위원소 기반 핵천체 물리기술 불안정 핵의 생성·분리·측정을 통해 핵반응 및 핵구조 데이터를 확보하고 이를 천체물리 현상 규명에 활용하는 융합형 연구 기술

- ◎ 희귀동위원소 연구는 희귀동위원소의 생산·분리·측정과 핵데이터 해석·활용 기술을 유기적으로 결합하여 핵반응 및 핵구조를 규명하는 연구
- ◎ 희귀동위원소 기술 범위는 기초 핵물리 실험뿐만 아니라 데이터 생태계 구축, 천체물리 응용, 의료·산업 연계까지 확장되는 통합형 기술체계

기술의 범위

동 브리프에서는 희귀동위원소 기술의 범위를 단순 가속기 장치에 한정하지 않고 빔 생성·핵물성 측정·데이터 관리·응용 연계까지 포함하여 제시

- ◎ (기술범위 체계) 희귀동위원소 연구는 단순 가속기 장치에 한정되지 않으며 실험 데이터 생산부터 국제 협력 기반 활용까지 전주기 연구시스템을 범위로 설정
 - (1계층·빔 생성) 희귀핵 생산·분리·후가속 기반 실험 빔 생성
 - (2계층·정밀 측정) 질량·붕괴·반응 구조 데이터 측정
 - (3계층·데이터 생태계) 핵데이터 생산·관리
 - (4계층·응용 확장) 의료·산업 핵종 생산 및 공급망 구축
- ◎ (계층 간 유기적 연계 구조) 각 계층은 독립적으로 작동하지 않으며 빔 성능, 측정 정밀도, 데이터 품질, 응용 확대에 연결되는 통합 기술 체계 구성

표 1-1 | 희귀동위원소 기술 범위 및 주요 구성 요소

기술 계층	핵심 구성 요소	주요 내용
희귀핵 생성 및 빔 조제	• ISOL 방식, in-flight 방식, 복합형 플랫폼, 표적·이온원 시스템	• 고강도 희귀동위원소 생산, 빔 분리 및 정제, 후가속 기술
핵물성 측정 및 실험	• 질량 측정, 붕괴 연구, 핵반응 실험, 레이저 분광, 검출기 시스템	• 정밀 핵질량, 반감기, 핵반응 단면적, 핵구조 데이터 확보
핵데이터 생산·관리	• 핵데이터 라이브러리, 오픈데이터, 메타데이터, DMP, 소프트웨어 공유	• 핵반응·질량·붕괴 데이터 통합 관리, 오픈사이언스 기반 연구환경 구축
응용 및 확장	• 의료용 핵종 생산, 산업 조사, 안전관리, 방사선 규제, 공급체계	• 기초연구 기반 의료·산업 응용, 핵종 공급 안정성 확보

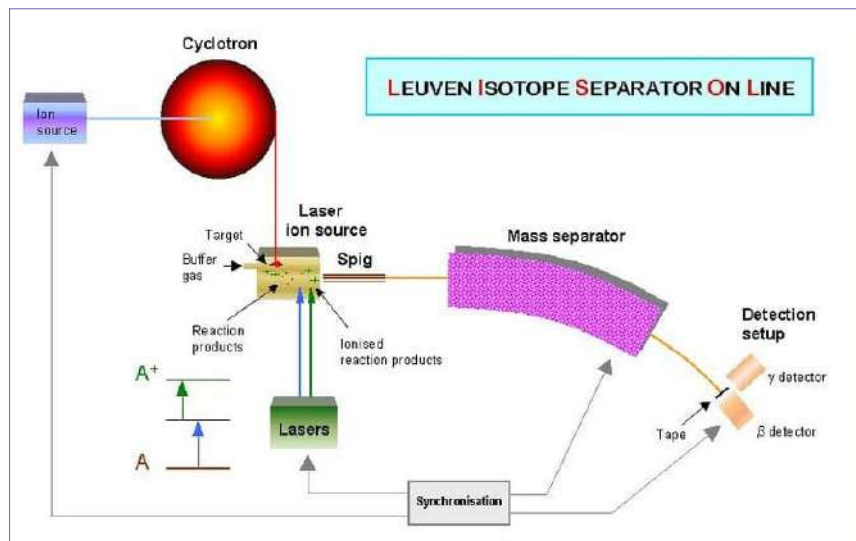
- ◎ (범위 확장의 전략적 의미) 기초 핵물리 실험 중심에서 데이터 생태계 구축, 천체물리 응용, 의료·산업 연계까지 기술 범위가 확장되며 연구시설 경쟁력 평가 기준 변화
 - 시설 성능뿐 아니라 데이터 공개·국제 협력·공급망 기여도까지 평가요소로 포함되는 추세

희귀동위원소 생산·정밀측정 기술

희귀동위원소 생산·정밀측정 기술은 불안정핵 생성·빔 조제·핵물성 측정 기술로 구성되며 기술 특성에 따라 접근 가능한 핵종 영역과 실험 범위 결정

- (희귀핵 생성 기술) 희귀동위원소 생성 기술은 ISOL 방식과 in-flight fragmentation 방식으로 구분되며 고순도 저에너지 빔 생산과 넓은 핵종 도달 영역 기반 희귀핵 생성 수행
 - SOL 방식은 고순도 저에너지 희귀동위원소 빔 생산에 활용되며, in-flight 방식은 고에너지 기반 희귀핵 생성 및 빠른 빔 분리에 활용
 - 복합형 플랫폼은 ISOL 기반 고순도 빔과 in-flight 기반 빠른 핵종 접근 기술을 결합한 방식으로 구성

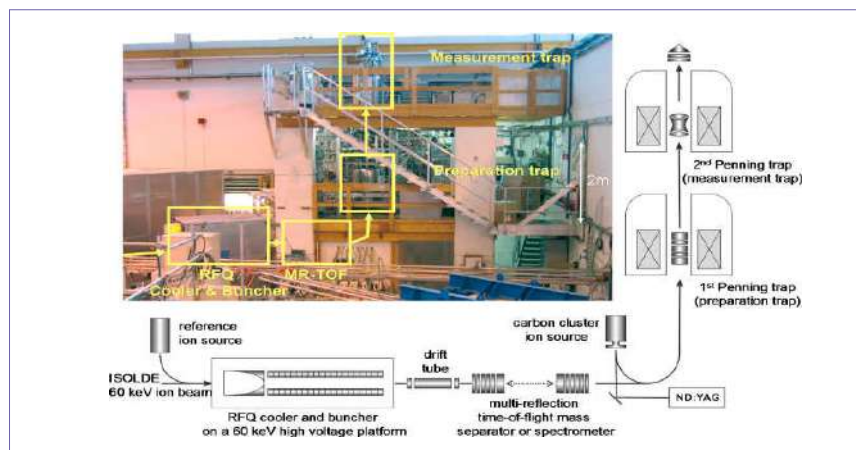
[그림 1-3]
ISOL 방식 개략도



자료: 벨기에 루벤 가톨릭 대학교(KU Leuven) 핵 및 방사선 물리학 연구소, LISOL

- (핵기초물성 측정 기술) 희귀동위원소 핵물성 측정 기술은 질량 측정·붕괴 연구·핵반응 실험·레이저분광 기술로 구성되며 상호보완적 핵데이터 생산 수행
 - 질량 측정·붕괴 연구·핵반응 실험·레이저분광 기술 기반 핵질량·반감기·핵구조·핵반응 데이터 측정 수행

[그림 1-4]
RFQ-MR-TOF-페닝트랩 구성도



자료: 유럽입자물리연구소(CERN) 공식 멀티미디어 데이터베이스, ISOLTRAP 실험 장치 자료

데이터 기반 연구환경 기술

희귀동위원소 기반 핵천체 물리기술 불안정 핵의 생성·분리·측정을 통해 핵반응 및 핵구조 데이터를 확보하고 이를 천체물리 현상 규명에 활용하는 융합형 연구 기술

- ◎ (핵데이터 라이브러리 기술) 핵데이터는 핵반응·핵질량·붕괴·핵구조 정보를 포함하며 국제 표준 기반 데이터 관리체계로 구성
 - 핵반응 데이터·핵구조 데이터·핵질량 데이터·평가 데이터 기반 핵데이터 관리 수행되며 EXFOR·ENSDF 등 국제 표준 기반 핵데이터 라이브러리 활용
- ◎ (오픈사이언스 기반 연구환경 기술) 데이터 공개·메타데이터 관리·데이터관리계획 (DMP)·소프트웨어 공유 기반 연구환경 기술을 포함

의료·산업 응용 기술

희귀동위원소 기술은 의료용 핵종 생산·산업 조사재료 분석 기반 응용 영역까지 확장

- ◎ (의료용 핵종 생산 기술) 의료용 방사성동위원소 생산 기술은 진단용·치료용 핵종 생산 및 고순도 정제 기술로 구성
- ◎ (산업 응용 기술) 희귀동위원소 기반 산업 응용 기술은 반도체 조사재료 분석·중성자 생성 기술 등에 활용정밀도, 데이터 품질, 응용 확대로 연결되는 통합 기술 체계 구성





1. 정책 동향

연구시설 운영 전략

주요국은 개방형 사용자 시설·국제협력·집중형 투자 기반 희귀동위원소 연구 운영 체계 구축

- (미국) DOE 사용자시설 정책(2020) 등을 통해 연방정부 사용자시설 지정을 통한 제도적 안정성 확보 및 글로벌 개방형 운영 중심 정책 추진
- (EU) FAIR Consortium 공동인프라 모델(2010) 을 통해 다국가 협력 거버넌스 기반 투자 위험 분산과 기술 상호보완을 동시에 달성
- (일본) RIKEN 집중형 국가 인프라 전략(2007) 을 통해 국가 주도 집중 투자를 통한 전략분야 특화 및 장기 연구 기반 확보 중심 전략 채택
- (캐나다) 대학 컨소시엄-국립연구소 협력 모델(2024) 를 통해 대학-정부 협력 거버넌스 기반 저에너지 ISOL 및 의료동위원소 생산-상용화 연계 전략 추진
- (국가별 운영 현황) 주요국은 연구 거버넌스와 전략적 우선순위에 따라 차별화된 운영전략 기반 연구체계 구축

표 II-1 | 주요국 희귀동위원소 가속기 운영 정책 현황

국가	주요 정책 및 운영 전략
 미국	<ul style="list-style-type: none"> • (DOE 사용자시설 정책, 2020) FRIB을 DOE Office of Science 산하 공식 사용자시설(User Facility)로 지정하고 연방정부 차원의 개방형 연구시설 운영체계 제도화 - 제안서 기반 동료평가(peer-reviewed proposal)를 통해 빔타임을 배정하고 국제 연구자 접근성 확대 중심 운영모델 구축 - FRIB 홈페이지 및 DOE 문서를 통해 사용자 제안서 평가 절차와 시설 접근 정책 공개 - DOE 예산 승인 및 시설 확장 투자 추진을 기반으로 장기 운영 안정성과 국제 공동활용 기반 강화 추진
 유럽	<ul style="list-style-type: none"> • (FAIR Consortium 공동인프라 모델, 2010) 독일 GSI를 중심으로 프랑스·영국 등 11개 회원국이 참여하는 다국가 공동분담형 연구 인프라 구축 - 참여국 간 비용 및 기술 분담 기반 공동운영 협약 체계를 통해 연구 인프라 투자 부담 분산 - 회원국별 지분을 기반 의사결정 구조와 공동 투자 체계 운영 - 단일 국가 중심이 아닌 다국가 협력 기반 연구체계를 통해 유럽 내 연구역량 통합 추진
 일본	<ul style="list-style-type: none"> • (RIKEN 집중형 국가 인프라 전략, 2007) 문부과학성(MEXT) 주도로 RIKEN RIBF를 국가 핵심 연구시설로 지정하고 집중 투자 기반 연구 경쟁력 강화 추진 - 안정적 장기 예산 지원 체계를 기반으로 천체물리학적 r-process 등 핵심 분야 선도적 연구역량 확보 - 제한적이지만 전략적 국제협력 기반 NP-PAC 등 국제 심사위원 참여 체계 운영
 캐나다	<ul style="list-style-type: none"> • (대학 컨소시엄-국립연구소 협력 모델, 2024) TRIUMF는 19개 회원 대학 컨소시엄과 연방정부가 공동 운영하는 협력 기반 연구 인프라 체계 구축 - 2024년 연방정부 역대 최대 규모 투자(CAD \$399.8M, ~2030년) 승인을 통해 장기 안정적 연구 기반 확보 - 저에너지 ISOL 방식 특화와 의료용 방사성동위원소(Actinium-225, Tc-99m) 생산-상용화 중심 연구전략 추진 - ARIEL(Advanced Rare Isotope Laboratory) 구축을 통해 희귀동위원소 생산능력 확대와 기초연구응용연계 강화 추진

자료: (미국) <https://frib.msu.edu/news/2020/designation-event.html>, (EU):<https://fair-center.eu/about/partners>
 (일본) <https://www.nishina.riken.jp/researcher>, (캐나다):<https://budget.canada.ca/2024/report-rapport/chap4-en.html>

기능 분화 기반 글로벌 협력 확대

주요 연구시설은 에너지 영역 및 실험 기법 중심 기능 특화 기반으로 상호보완형 글로벌 연구협력 체계 확대

- ◎ (기능 특화) 주요국은 중복 투자 최소화와 연구 효율성 강화를 위해 시설별 특화 전략 중심 연구 인프라 정책 추진
 - FRIB은 광범위한 희귀동위원소 생산과 사용자 실험, RIBF는 극한 핵종 접근 및 질량측정, FAIR는 저장링 기반 실험환경 구축에 강점 보유
- ◎ (글로벌 네트워크) CERN ISOLDE와 같은 저에너지 ISOL 기반 시설이 이를 보완하면서 다양한 에너지 영역을 포괄하는 글로벌 연구 인프라 구조 형성
 - 동일 핵종에 대해 여러 시설에서 서로 다른 방식으로 측정·검증하는 연구 방식 확대

개방형 사용자시설 기반 연구체계 확대

주요국은 국제 공동연구와 전략적 자원배분 중심 개방형 사용자시설 운영체계 강화 추진

- ◎ (자원 배분 전략) 희귀동위원소 빔 수요 증가에 따라 장기 연구 프로그램 및 대형 공동실험 중심 자원 배분 전략 강화
 - 제한된 빔타임 자원의 효율적 운영을 위한 국제 공동연구 기반 운영체계 확대
- ◎ (국제협력·인력양성) 주요국은 박사후연구원 프로그램, 연구자 교류 및 다자 협력 프로그램 기반 글로벌 연구 네트워크 확대 추진
 - IAEA, OECD/NEA 및 EU 프로그램 기반 공동 실험과 데이터 공유 체계 확대

핵데이터· 디지털환경 확대

주요국은 핵데이터 공유와 디지털 기반 연구환경 구축을 통해 데이터 중심 연구 체계 전환 가속

- ◎ (핵데이터 공유) IAEA와 OECD·NEA를 중심으로 핵반응 및 붕괴 데이터 국제협력 체계 구축 확대
 - EXFOR·ENSDF 기반 데이터 공유 확대와 연구결과 재현성·국제 활용도 제고를 위한 핵데이터 협력체계 강화
- ◎ (디지털 연구환경 구축) 최근에는 실험 데이터와 이론 모델을 통합하는 디지털 기반 연구환경 구축 확대
 - AI·시뮬레이션 기반 데이터 분석·연구 자동화 확대와 데이터 중심 연구환경 기반 연구시설 경쟁력 고도화

2. 시장·산업 동향

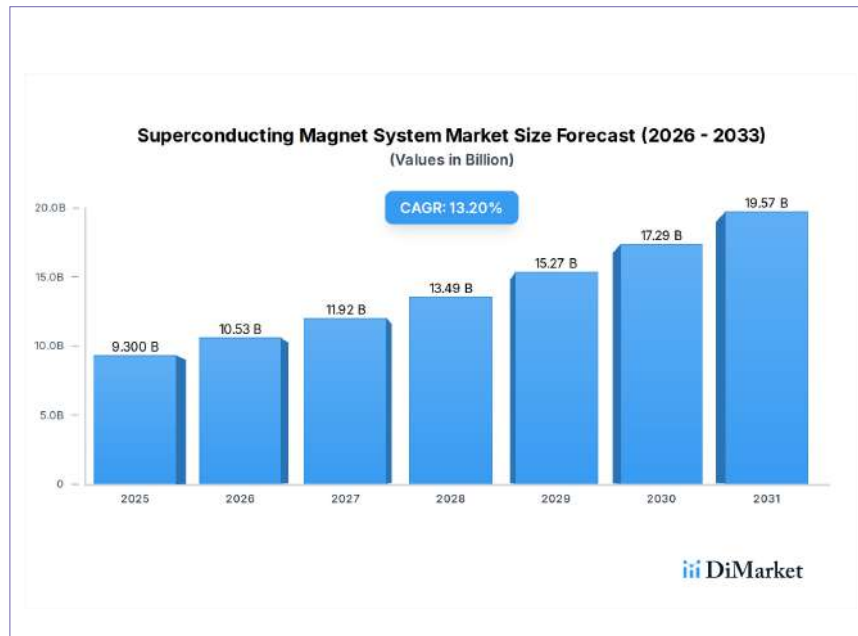
연구 인프라 기반 산업 구조

희귀동위원소 기반 핵천체물리 분야는 대형 연구 인프라 구축 확대와 함께 가속기·검출기·기반 엔지니어링 중심의 고부가가치 산업 생태계 형성

- (가속기 산업 수요 확대) 주요국은 희귀동위원소 가속기 구축 과정에서 초전도 RF 시스템, 빔 전송 장치, 전자석 및 고출력 RF 증폭기 등 핵심 장비 산업 수요 확대
 - 해당 장비는 의료용 가속기, 방사선 치료 장비 및 산업용 조사 시스템 등으로 응용 범위 확대
 - 특히 초전도 가속기(SRF) 기술은 차세대 가속기 및 다양한 응용 산업의 핵심 기반기술로 부상하며 관련 기업 참여 확대

|그림 II-1|

초전도 자석 시스템 시장
규모 전망(2025~2031)



자료: DiMarket, "Superconducting Magnet System Market Size Forecast (2026-2033)." DiMarket, 2026

- (검출기·계측 기술 고도화) 핵천체물리 실험에서는 고정밀 검출기 및 실시간 신호처리 기술 중요성 증가
 - 고정밀 검출기와 대면적 배열·고속 디지털 신호처리 기술 결합을 통한 검출 효율·해상도 고도화 확대
- (극저온·진공 기술 산업 확대) 희귀동위원소 가속기 및 검출기 시스템은 cryogenic 시스템 및 초고진공 기술 기반 엔지니어링 산업과의 연계 확대
 - 극저온·진공 기반 안정적 빔 전송 기술 수요 증가와 반도체·양자우주산업 분야로의 활용 확산

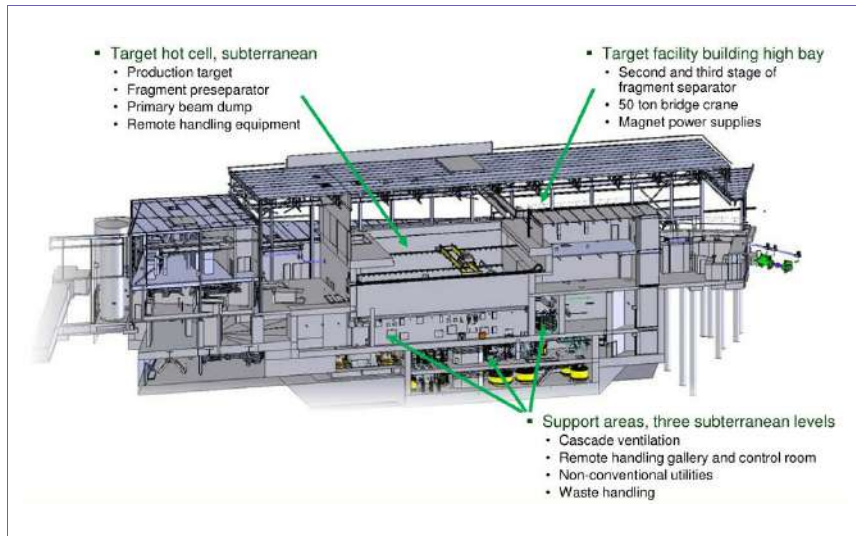
**응용·서비스
시장 확대**

희귀동위원소 기반 연구시설은 핵종 생산·방사선 시험·데이터 융합 기반 응용 서비스 영역 중심으로 활용 범위 다변화

- (핵종 생산 및 의료 응용) 미국 FRIB은 isotope harvesting 기반 고순도 방사성핵종 공급 역량을 연구·의학·재료 분야까지 확장
 - 가속기 운전 과정에서 생성되는 희귀핵종을 회수·정제하여 방사성의약품·재료과학·환경 추적 분야 등에 활용

[그림 II-2]

Facility for Rare Isotope Beams
- FRIB Strategic Partnership

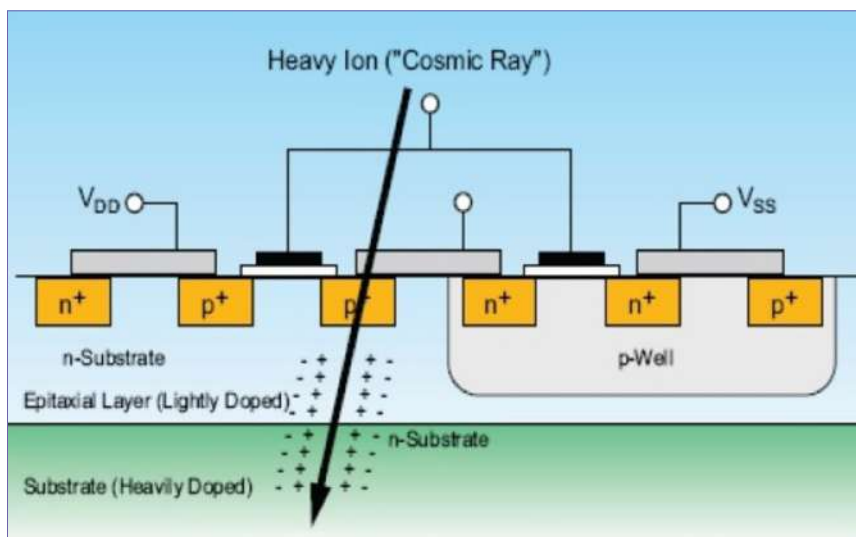


자료: Georg Bollen, FRIB/MSU (2014)

- (방사선 시험 서비스) 중이온 기반 시험시설은 우주·항공·첨단 반도체 분야 방사선 영향 평가와 소자 신뢰성 검증 중심 시험 서비스 제공
 - 우주·항공전자 반도체 소자의 방사선 내성 평가와 SEE·TID 기반 신뢰성 검증 서비스 체계 구축 확대

[그림 II-3]

ESA - Radiation-driven Single Event Effect



- (데이터·소프트웨어 융합) 핵천체물리 연구는 대규모 실험 데이터와 시뮬레이션 기반 분석 수요 증가에 따라 ICT·AI 산업과의 융합 가속
- 핵반응률·질량·붕괴 데이터는 원자력 시스템 설계·방사성동위원소 생산·우주 방사선 환경 평가 분야 등에 적용
- (응용산업 연계 강화) 희귀동위원소 기반 연구시설은 의료·우주·반도체·ICT 산업과 연계되는 응용 플랫폼 형태로 기능 다변화
- 방사선 내성 반도체·우주전자·핵의학 원료 생산 분야 연계 확대와 연구시설의 시험·데이터·응용자원 기반 플랫폼화 진전

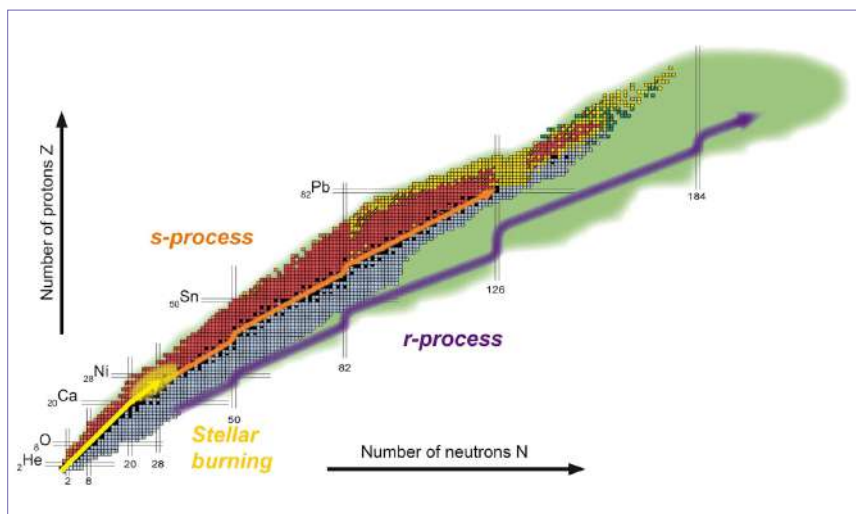
3. 기술개발 동향

희귀동위원소 생산·반응기술 확대

주요국은 고강도 희귀핵 생산과 천체핵반응 실험 기반 핵천체 물리 연구기술 고도화 추진

- (희귀동위원소 생산기술 고도화) 미국 FRIB, 일본 RIKEN RIBF, 유럽 FAIR 등 주요 시설은 고강도 중이온 빔과 첨단 분리기 기술 기반 희귀동위원소 생산 능력 확대
 - fragmentation 및 ISOL 방식 병행 활용과 고분해능 separator 기술 발전을 통해 희귀핵 생산 효율 및 순도 향상
- (희귀핵 반응 실험기술 발전) 천체핵반응 연구에서는 inverse kinematics 기반 실험이 주요 접근법으로 자리매김
 - 불안정 핵종 반응에서는 빔·표적 역전 방식 활용을 통해 낮은 단면적 환경에서도 반응 신호 확보 가능
 - recoil separator 기반 반응 생성물 분리 기술은 정밀 반응률 측정의 핵심 요소로 작용

|그림 II-4|
s-process / r-process
핵합성 경로

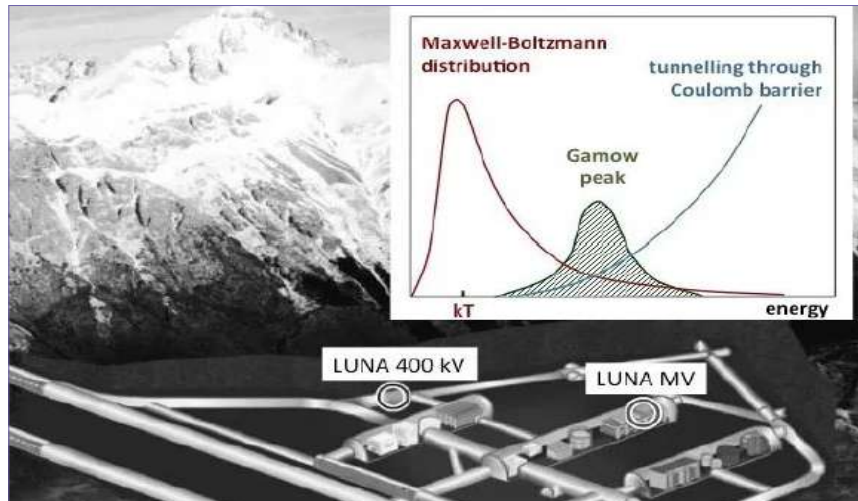


자료: |Nuclear Astrophysics Group. (n.d.). Explosive nucleosynthesis and the nuclear chart paths (Stellar burning, s-process, and r-process). Institute for Nuclear Physics (IKP), TU Darmstadt. Retrieved from TU Darmstadt Theory Website

- ◎ (저에너지 지하가속기 기술) TRIUMF DRAGON¹⁾ 및 이탈리아 LUNA²⁾ 등은 저에너지 핵반응 직접 측정 기술을 선도
 - 지하가속기 기반 실험은 우주선 유도 배경을 최소화하며 극저에너지 영역 핵반응 연구 핵심 인프라로 발전
 - 천체 환경에 근접한 조건에서 핵반응 단면적 직접 측정 가능성 확대

| 그림 II-5 |

LUNA 실험실이 위치한 지하 시설



자료: 이탈리아 국립핵물리연구소(INFN) 그란사소 국립연구소(LNGS), LUNA Collaboration 공식 미디어 데이터베이스

간접반응· 핵데이터 기술

핵천체물리 연구는 간접 반응법과 고정밀 핵물성 측정 기술 발전을 기반으로 핵반응률 및 핵합성 경로 해석 정확도 향상

- ◎ (간접 반응법 정교화) Coulomb dissociation, transfer reaction, ANC³⁾, Trojan Horse Method 등 간접 반응법 활용 확대
 - 희귀핵의 낮은 생산률·반응 단면적 한계 극복과 간접실험·이론모델 연계를 통한 천체핵반응률 정밀 제약기술 발전
- ◎ (질량·붕괴 특성 측정 확대) Penning trap, MR-TOF 및 storage ring 기반 질량 분석 기술 활용 확대
 - 희귀핵 질량· β 붕괴 데이터 확보 확대와 neutron separation energy 기반 r-process-nucleosynthesis 모델 정밀도 향상
- ◎ (중성자 반응 및 핵데이터 확보) CERN n_TOF⁴⁾ 등 중성자 시설 중심 중성자-핵 반응 연구 확대
 - s-process 관련 핵데이터 확보 활발히 진행되고 있으며 희귀동위원소 빔 시설과 중성자 시설 간 역할 분담 구조 형성

1) Detector of Recoils And Gammas Of Nuclear reactions

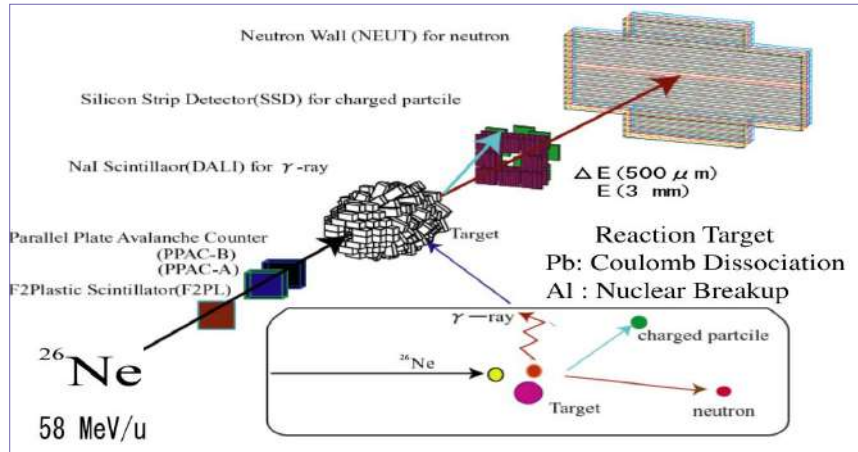
2) Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics

3) Asymptotic Normalization Coefficient

4) Multi-Reflection Time-Of-Flight mass spectrometer

[그림 II-6]

쿨롱 분리 실험 장치 구성도



자료: 일본 이화학연구소(RIKEN) 니시나 가속기 과학 연구 센터, 쿨롱 해리 실험 장치 모식도

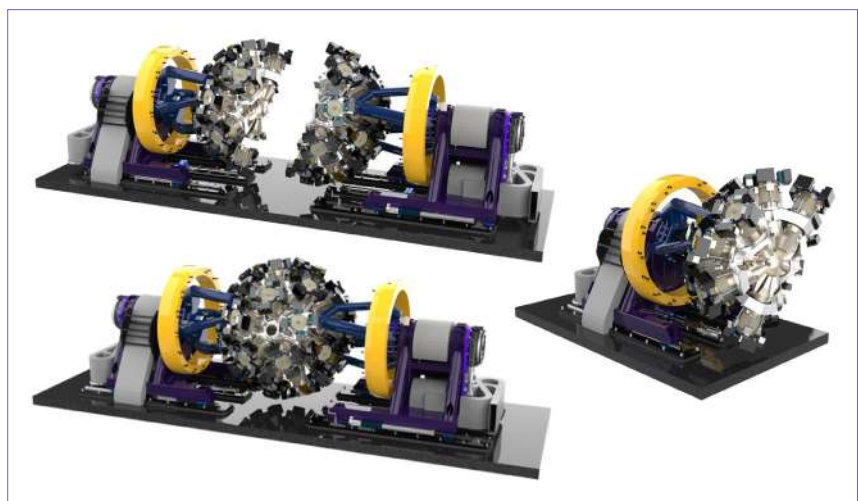
고정밀 검출· 실험장치 기술 확대

희귀핵 실험의 정밀도 향상을 위한 고정밀 검출기와 차세대 실험 장치 기반 측정기술 발전 확대

- (고정밀 검출기 기술 발전) gamma-ray detector array, neutron detector, silicon tracking detector 등 고정밀 검출기 기술 지속 발전
 - 대면적 검출기 배열·디지털 신호처리 기반 검출 효율·해상도 향상과 희귀핵 저신호 정밀 검출기술 고도화
- (차세대 실험 장치 도입) active target detector, TPC⁵⁾, storage ring 기반 실험 장치 도입 확대
 - 실험 효율·측정 정밀도 향상과 희귀핵 반응·핵물성 분석 기반 연구 활용범위 확대

[그림 II-7]

GRETA-Gamma-Ray Energy Tracking Array



자료: 미국 로런스 버클리 국립연구소(LBNL) 뉴스센터, 차세대 3차원 감마선 에너지 추적 검출기 배열(GRETA) 시스템의 3D 설계 렌더링 그래픽

5) Time Projection Chamber

데이터 통합 기반 기술

핵천체물리 연구는 실험·이론·데이터 평가를 통합하여 데이터 기반 디지털 연구환경 구축 확대 중

- ◎ (실험-이론 통합 연구 확대) 최근 핵천체물리 연구는 실험 데이터와 이론 모델, 데이터 평가를 통합하는 방향으로 발전
 - R-matrix·Monte Carlo 기반 불확실성 평가 활용 확대와 천체물리 모델 정확도 중심 핵데이터 분석체계 고도화
- ◎ (핵데이터 활용 및 공유 확대) 데이터 기반 연구환경 확대와 함께 reaction rate library 구축 및 글로벌 데이터 공유 체계 강화
 - 핵반응률·핵물성 데이터 국제 공동활용 확대와 실험·해석·활용 연계형 통합 연구체계 중심 기술개발 전환

4. 국제협력 동향

시설기반협력

희귀동위원소 기반 핵천체물리 연구는 단일 국가·시설 중심 수행이 어려운 특성을 가지며 대형 연구시설 간 글로벌 협력체계로 발전

- ◎ (대형 가속기 협력체계) 미국 FRIB, 일본 RIKEN RIBF, 유럽 FAIR 등 주요 시설은 서로 다른 에너지 영역과 실험 기법 중심 상호보완적 협력체계 구축
 - FRIB은 고풍력 fast-beam 기반 핵반응·정밀질량 연구와 isotope harvesting 역량 강화
 - RIBF는 우라늄(U) 빔 기반 고강도 희귀핵 생산 및 BigRIPS·SAMURAI 기반 극한 핵종 연구 수행
 - ISOLDE는 저에너지 ISOL 및 HIE 후가속 기반 질량·레이저분광·붕괴 정밀측정 연구 수행
- ◎ (시설 간 공동연구 확대) 동일 핵종에 대해 여러 시설에서 서로 다른 방식으로 측정·검증하는 연구 방식 확대
 - FRIB-RIKEN 협력 기반 극한 핵종 생산·정밀측정 연계와 시설 간 공동실험·상호검증 연구체계 강화

[그림 II-8]

RIKEN RIBF 가속기



자료: 일본 이화학연구소(RIKEN) 니시나 가속기 과학 연구 센터, 방사성 이온빔 팩토리(RIBF) 초전도 링 사이클로트론(SRC) 설비 전경

[표 II-2] 주요 중이온가속기 시설 비교

시설	운영주체·운영모델	주요강점	국제협력 포인트
FRIB	<ul style="list-style-type: none"> 미국 DOE 사용자 시설 운영 FRIBUO, PAC, 교육 프로그램 병행 	<ul style="list-style-type: none"> 고출력 fast-beam HRS/HTBL, isotope harvesting 핵천체물리, 반응, 정밀질량 연구 모두 가능 	<ul style="list-style-type: none"> FRIBUO와 bridge/fellowship 프로그램 운영
RIBF	<ul style="list-style-type: none"> 일본 국가핵심 인프라 NP-PAC, ML-PAC, Users Group 기반 공개 공모 및 실험 선정 국제 심사위원 참여 구조 	<ul style="list-style-type: none"> U 빔 기반 고강도 희귀핵 생산 BigRIPS, SAMURAI 	<ul style="list-style-type: none"> 2025 NP-PAC에 FRIB, GSI, GANIL, SUSTech 등 참여 IBS와 10년 Top-Tier 공동연구 운영
ISOLDE	<ul style="list-style-type: none"> ISOLDE MoU 회원기관 중심 준회원형 개방모델 	<ul style="list-style-type: none"> 저에너지 ISOL, HIE 후가속 질량·레이저 분광·붕괴 정밀측정 	<ul style="list-style-type: none"> EURO-LABS TNA와 연동된 공동운영 체계 보유
HIAF	<ul style="list-style-type: none"> 중국 국가대형연구인프라 CAS/IMP 주도 	<ul style="list-style-type: none"> 초강도 펄스 heavy-ion 고정밀 핵질량 분석기 	<ul style="list-style-type: none"> 지역·국제 공동연구 잠재력 보유

데이터·표준화 협력

핵반응 및 붕괴 데이터는 국제 공동 활용 기반 표준화 체계 아래 공유·평가 협력 확대

- ◎ (국제 핵데이터 협력체계) IAEA와 OECD/NEA를 중심으로 핵반응 및 붕괴 데이터 국제협력 체계 구축

 - EXFOR·ENSDF 기반 연구결과 공유 확대와 국제 표준 포맷 기반 핵천체물리 핵데이터 관리체계 강화
- ◎ (핵데이터 평가·표준화 확대) OECD/NEA WPEC 프로그램은 핵데이터 불확실성 평가와 우선 측정 대상 선정 수행

 - 데이터 신뢰성 향상과 국제 공동 활용 기반 구축 중심 협력 강화

공동연구 네트워크

핵천체물리 연구는 다국가 공동 실험과 글로벌 연구 네트워크 기반 협력 중심으로 확대되어 실험·이론 연계형 연구체계 강화

- ◎ (국제 공동 실험 확대) 최근 핵천체물리 연구는 다수 국가 연구진이 참여하는 공동 실험 형태 중심으로 수행 확대

 - 희귀핵의 낮은 생성 확률로 인해 동일 실험을 여러 시설에서 반복 수행하고 데이터를 결합하는 방식 확대
- ◎ (글로벌 연구 네트워크 강화) JINA⁶⁾ 등 국제 연구 네트워크는 실험·이론 연계 협력 플랫폼 역할 수행

 - 핵반응률 계산 및 천체물리 모델 검증 연구 중심 글로벌 협력체계 강화

6) Joint Institute for Nuclear Astrophysics

공급망·연구자 협력

희귀동위원소 및 관련 핵종 활용 확대와 함께 동위원소 공급망 협력과 연구 인력 교류 기반 협력체계 강화

- ◎ (동위원소 공급망 협력) 희귀동위원소 및 관련 핵종은 연구뿐 아니라 의료·산업 분야까지 활용 범위 확대
 - EU-OECD/NEA 중심 동위원소 생산·공급망 협력 확대와 안정적 핵종 생산 기반 국제협력체계 강화
- ◎ (연구자·장비 공동 활용 확대) 주요 가속기 시설은 국제 사용자 프로그램 기반 연구자 파견 및 장기 방문 연구 프로그램 운영
 - 검출기·실험장비 공동개발·공동활용 확대와 글로벌 연구인력 네트워크 및 차세대 연구자 양성체계 강화



국내 동향

1. 정책 동향

국가 전략 인프라 구축

이재명 정부는 기초과학 연구역량 강화와 국가 대형연구시설 육성 정책 기반 RAON 중심 희귀동위원소 연구 인프라 구축 확대 추진

- (국내 정책 방향) 국내 정책은 RAON 기반 희귀핵 생산·핵반응 실험·핵데이터 확보와 글로벌 공동실험 확대 중심으로 연구체계 전환 추진

[표 III-1] 국내 희귀동위원소 연구 관련 주요 정책·전략 현황

구분	주요 내용
제5차 과학기술기본계획 (2023~2027)	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 기초과학 연구역량 강화와 대형연구시설 기반 연구경쟁력 확보를 위한 국가 최상위 과학기술 계획 - RAON 기반 희귀동위원소 연구와 글로벌 공동연구 확대 및 국가 연구 인프라 활용체계 강화
국가 대형연구 시설 구축·운영 정책 (2021.01)	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 전략 연구인프라 공동 활용과 사용자 중심 운영체계 구축을 위한 연구시설 정책 - RAON 기반 사용자시설 운영체계와 국가 가속기 인프라 연계 확대 추진
국가연구데이터 플랫폼·오픈사이언스정책 (2020.01)	<ul style="list-style-type: none"> • 연구데이터 공유·활용·메타데이터 기반 디지털 연구환경 구축 정책 - 핵데이터·시뮬레이션·연구데이터 공유 기반 오픈사이언스 연구환경 확대 추진
IBS 기초과학 연구 육성 정책 (2011.11)	<ul style="list-style-type: none"> • 장기·대형 기초과학 연구와 글로벌 수준 연구단 운영을 위한 국가 기초과학 육성 정책 - 핵천체물리·희귀동위원소·핵데이터 분야 연구역량 및 국제공동연구 확대 추진
국제과학비즈니스벨트 조성사업 (2011.01)	<ul style="list-style-type: none"> • 기초과학 중심 국제 연구거점 조성 및 세계적 수준 대형연구시설 구축을 목표로 추진 - 희귀동위원소 가속기 RAON 구축과 기초과학 연구클러스터 조성

- (RAON 구축 및 연구 활용 확대) 국제과학비즈니스벨트 조성사업(2011)과 제5차 과학기술기본계획(2023~2027)에 따라 RAON은 ISOL-in-flight 방식을 동시 구현하는 희귀동위원소 가속기로 구축
 - 핵물리·핵천체물리·핵데이터·방사성동위원소 응용을 포괄하는 통합 연구플랫폼 역할
- (단계적 연구역량 확장) 정부는 초기 빔 제공 이후 빔 성능·연구 활용 범위를 단계적으로 확대하는 장기 구축 전략 추진

|그림 III-1|
RIKEN RIBF 가속기



자료: 과학기술정보통신부 및 기초과학연구원(IBS) 중이온가속기연구소,
대전 신동지구 중이온가속기 라온(RAON) 시설 전체 조감도.

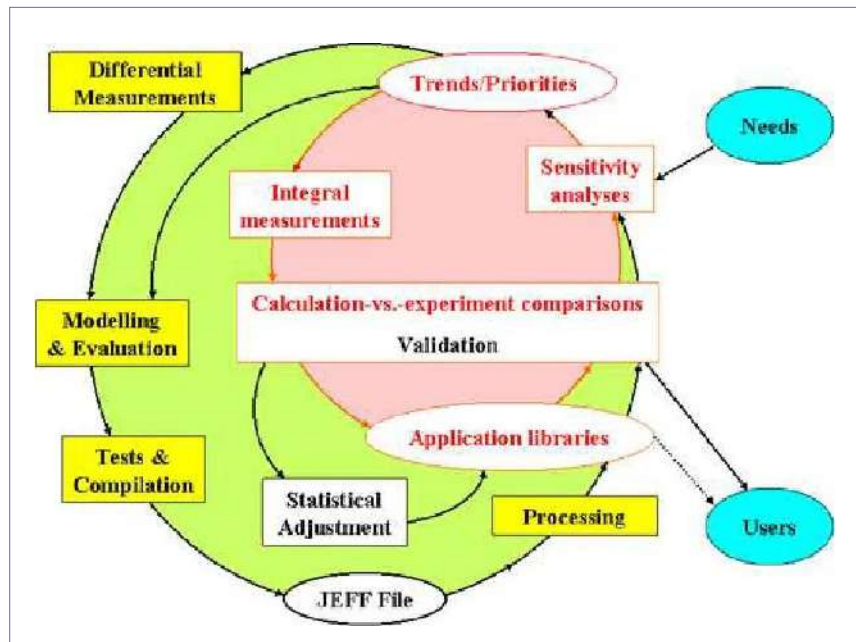
- ◎ (개방형 사용자시설 운영체계 구축) 국가 대형연구시설 구축·운영 정책(2021)은 사용자 중심 운영체계와 국가 연구인프라 공동 활용을 명시
 - 연구자 제안 기반 빔타임 운영 확대와 국제 사용자시설(User Facility) 체계 구축을 통한 개방형 연구환경 강화
- ◎ (국가 연구인프라 연계체계 확대) 정부는 RAON·양성자가속기·방사광가속기 등 국가 대형연구시설 간 연계 기반 네트워크형 연구체계 확대

핵데이터·데이터 기반 연구체계 강화

국가연구데이터 플랫폼·오픈사이언스정책(2020)과 제5차 과학기술기본계획은 핵데이터 생산과 데이터 공유·활용 기반 연구환경 구축 명시

- ◎ (핵데이터 생산역량 확대) 제5차 과학기술기본계획은 RAON 기반 희귀핵 반응 데이터 생산을 국내 핵데이터 자립과 국제 공동 활용 핵심 기반으로 명시
- ◎ (실험·이론·데이터 통합 연구 확대) 핵천체물리 분야는 실험·이론·데이터를 통합하는 융합형 연구체계 중심으로 확대
- ◎ (데이터 기반 연구환경 구축 확대) 국가연구데이터 플랫폼 정책(2020)에 따라 핵반응·핵물성·시뮬레이션 데이터 통합 관리 및 오픈사이언스 기반 디지털 연구환경 구축 추진
 - 핵반응·핵물성·시뮬레이션 데이터 통합 관리 중요성 확대되어 데이터 기반 핵데이터 활용 역량이 연구시설 경쟁력 핵심 요소로 부상

|그림 Ⅲ-2|
 핵데이터 개발
 통합 연구체계 순환 구조



자료: 경제협력개발기구 산하 원자력기구(OECD NEA) JEFF 프로젝트, 핵자료 생산 및 검증 프로세스의 수명 주기 순환 모식도

연구 인력· 국제협력 확대

IBS 기초과학 연구 육성 정책(2011)과 제5차 과학기술기본 계획은 글로벌 공동연구 확대와 국제협력 기반 연구인력 양성 명시

- ◎ (국제공동연구 프로그램 확대) IBS 육성 정책에 따라 IBS-RIKEN 협력 및 Top-Tier 프로그램 기반 글로벌 공동연구 확대
- ◎ (글로벌 연구허브 구축 확대) RAON은 미국 FRIB·유럽 FAIR 등과 연계되는 국제공동연구 허브로 육성
- ◎ (전문 연구인력 양성 확대) 희귀동위원소 기반 연구 분야는 대학·연구소·국제협력 연계 기반 장기 연구인력 양성체계 확대

|그림 Ⅲ-3|
 IBS-RIKEN 핵물리 분야
 국제 공동연구 협력



자료: 기초과학연구원(IBS) 제공, 'IBS-RIKEN 핵물리 공동연구 본격 개막' 보도자료

2. 시장·산업 동향

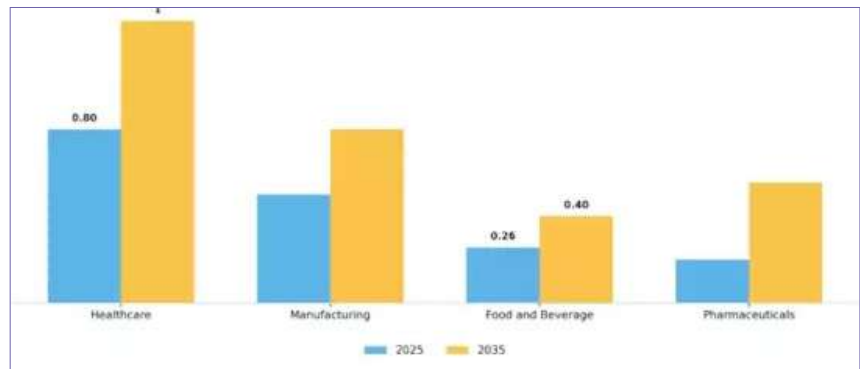
가속기·검출기 산업 확대

RAON 구축과 희귀동위원소 연구 확대에 따라 가속기·검출기·기반 엔지니어링 분야 산업 수요 증가 전망

- (가속기·핵심 부품 산업 수요 확대) RAON 구축 및 운영 과정에서는 초전도 공동(SRF cavity), 고출력 RF 시스템, 빔 전송 장치 및 극저온 시스템 등 핵심 장비 수요 증가
 - 의료·산업용 가속기 응용 확대와 유지보수·성능개선 기반 장기 운영·서비스 시장 성장 가능성 증대
- (검출기·계측 장비 산업 성장) 국내 핵천체물리 연구에서는 gamma-ray detector, neutron detector 및 silicon detector 등 고정밀 검출기 개발·활용 확대
 - RAON 실험장치 구축 확대에 따른 검출기·데이터수집·신호처리 장비 수요 증가와 방사선 계측·의료영상·국방감시 분야 기술 확산 기대
- (기반 엔지니어링 산업 연계) RAON과 같은 초전도 가속기 시설은 cryogenic system, 초고진공 기술 및 정밀 정렬 기술 기반 엔지니어링 역량 요구
 - 반도체·디스플레이·정밀기계 산업 연계 국내 기업 참여 확대와 초고진공·극저온·고안정 전원 기반 핵심장비 산업 성장 기대

[그림 III-4]

산업용 선형 가속기 응용 분야별
시장 규모 전망(2025~2035)



자료: Market Research Future. (2026). Industrial Linear Accelerator Market Size, Growth Report 2035

의료·응용산업 연계

희귀동위원소 기반 연구는 의료용 방사성동위원소 생산과 방사성의약품 중심 응용시장 확대 기대

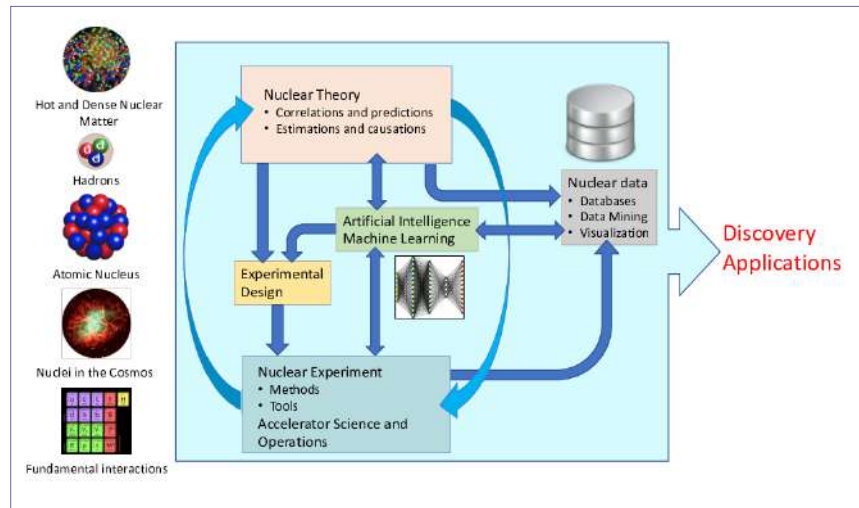
- (의료용 방사성동위원소 생산) 국내 의료용 동위원소 상당수는 수입 의존도가 높아 안정적인 공급 기반 확보 중요성 증가
 - 향후 RAON 및 국내 가속기 시설 기반 의료용 동위원소 생산 역량 확보 중요성 확대
- (차세대 응용시장 확대) 치료용 방사성동위원소, 알파핵종 치료제 및 맞춤형 방사성의약품 분야 성장 전망
 - 희귀동위원소 기반 핵종 생산기술의 의료·방사선 산업 연계 확대와 우주방사선·반도체 신뢰성 평가 분야 응용 확산 기대

**데이터·
소프트웨어
산업 확대**

핵천체물리 연구는 대량의 실험 데이터와 시뮬레이션 기반 분석 수요 증가에 따라 데이터·AI 기반 연구환경 중심으로 발전

- ◎ (데이터 기반 연구 확대) 핵천체물리 실험은 데이터 저장, 고성능 컴퓨팅(HPC), 시뮬레이션 및 핵반응 모델링 수요 확대
 - 반응을 계산·R-matrix·몬테카를로 기반 데이터 분석 확대와 실험·해석·활용 연계형 데이터 중심 연구환경 중요성 증대
- ◎ (AI·ICT 융합 확대) 국내 연구팀에도 인공지능 및 머신러닝 기반 분석 기법 도입 확대
 - 핵데이터·AI 기반 분석 융합 확대와 의료영상·방사선 신호처리 분야 중심 ICT 연계 활용 확산

[그림 Ⅲ-5]
인공지능·머신러닝 기반
핵물리 데이터 분석



자료: Bedaque, P. et al. (2021). "A.I. for nuclear physics." The European Physical Journal A, 57(3), 100. Fig. 1.

3. 기술개발 동향

초기 실험· 핵데이터 연구 확대

RAON 구축과 희귀동위원소 연구 확대에 따라 가속기·검출기·기반 엔지니어링 분야 산업 수요 증가 전망

- ◎ (초기 실험 포트폴리오 구성) 국내 기술개발은 RAON 초기 제공 빔과 실험 장치를 활용하여 단기간 내 대표 성과를 도출할 수 있는 실험 포트폴리오 구성 중심으로 추진
 - 초기 운영 단계에서는 대규모 발견형 실험보다 장치 성능 검증과 과학적 성과를 동시에 달성할 수 있는 실험 중심 접근 확대
 - 사용자시설 신뢰성 확보와 장치 안정화, 후속 대형 실험 기획을 위한 기준 데이터 축적 중요성 증대
- ◎ (초기 대표 실험 활용 확대) 2026년 기준 안정빔과 일부 희귀동위원소빔 제공 가능성을 고려할 때 실현 가능성과 파급효과가 높은 대표 실험 중심 전략이 적절한 방향으로 제시
 - 제한된 빔 조건 기반 장치 검증·분석체계 정립과 초기 운영성과 확보를 통한 국제 공동연구 신뢰기반 강화
- ◎ (안정빔 기반 핵데이터·표적 검증 연구) 안정빔 기반 핵데이터 생산과 표적 검증 연구는 초기 기술개발의 핵심 축으로 제시
 - 안정빔 기반 실험계 응답·반응단면적·배경특성 검증과 희귀동위원소빔 실험 이전 기준데이터 확보를 통한 장치 성능 평가체계 구축
 - 초기 축적 데이터 기반 재가속 희귀동위원소빔 실험 해석 정확도 및 후속 실험 신뢰성 향상 기대

희귀동위원소 생산· 반응 실험 기술

우리나라는 희귀동위원소 생산과 천체핵반응 실험 기반 핵천체물리 연구기술 확보 추진

- ◎ (희귀동위원소 빔 생산기술 구축) RAON은 ISOL 방식과 in-flight fragmentation 방식을 동시에 구현하는 이중 생산 체계 기반 구축 추진
 - ISOL·fragmentation 기반 희귀핵 생산 고도화와 저에너지 반응·극한 핵종 연구 확대를 바탕으로 고강도 1차 빔 안정화, 희귀핵 생산률 향상, 분리기 성능 개선 등 가속기 핵심기술 고도화 추진
- ◎ (천체핵반응 실험기술 확보) inverse kinematics 기반 반응 실험과 recoil separator 기반 생성물 분리 기술 구축 추진
 - (p, x) · (α, x) · (α, n) 기반 천체핵반응 실험 확대와 transfer reaction·Coulomb dissociation·ANC·Trojan Horse Method 등 간접반응 기법 고도화를 바탕으로 방사성 핵종 붕괴채널 분석 및 반응 메커니즘 해석 중심 데이터 분석 역량 강화 추진

정밀측정· 검출 기술 발전

우리나라는 질량 측정과 고정밀 검출기 및 차세대 실험 장치 구축 중심으로 정밀 핵데이터 생산 역량 확대

- ◎ (MRTOF-MS 기반 질량 측정 연구 확대) 초기 실험 포트폴리오에서는 MRTOF-MS 기반 질량 측정 연구가 대표 성과 창출 가능성이 높은 분야로 평가
 - 질량데이터 기반 핵천체물리 반응경로·붕괴특성 분석과 빔전송·이온포집·질량분해능 검증 연계 실험 확대

[그림 Ⅲ-6]

(좌) 질량분석기 외관
(우) 질량분석기 내부 설계도



자료: 한국기초과학지원연구원(KBSI) 제공 자료, 「15T FT-ICR 질량분석장치 외관 및 내부 구조 개요도」

- ◎ (검출기·실험 장치 기술 확대) 우리나라에서도 gamma-ray detector, neutron detector 및 silicon detector 등 고정밀 검출기 기술 개발 진행
 - 희귀핵 저신호 검출 효율 향상과 active target detector-TPC 기반 반응 위치·운동학 동시측정 기술 고도화 추진

핵데이터·이론· SI 기반 연구

핵데이터 생산·평가와 이론·계산 핵천체물리 기반 연구 역량 확대 추진

- ◎ (핵데이터 생산·평가 기술 강화) 질량, 반감기, 분리에너지 및 반응 단면적 등 핵데이터 생산과 이론적 평가 연구 병행 수행
 - neutron separation energy· β 붕괴· β -delayed neutron emission 기반 r-process·rp-process 핵반응 데이터 확보와 R-matrix·불확실성 평가 중심 핵데이터 분석역량 강화
- ◎ (이론·계산 핵천체물리 연구 발전) r-process, rp-process 및 stellar evolution 관련 계산 연구와 핵구조·반응 모델 개발 병행 추진
 - Bayesian inference·머신러닝 기반 핵데이터 해석 확대와 미측정 핵종 예측·불확실성 저감 중심 모델 정확도 고도화

4. 국제협력 동향

글로벌 연구시설 협력 확대

국내 핵천체물리 분야는 희귀동위원소 연구 특성상 국제 공동연구 중심 협력 구조가 확대되어 글로벌 대형 가속기 시설과의 연계 강화

- ◎ (RIKEN 중심 전략적 협력 강화) 국내 연구진은 IBS-RIKEN 협력을 기반으로 희귀동위원소 연구에 참여하고 있으며 이는 우리나라 국제협력의 핵심 축으로 기능
 - Top-Tier 프로그램 기반 공동연구·연구자 교류·실험 참여 확대와 시설-시설 연계형 공동기획 협력체계 구축을 통해 RIBF 활용 기반 극한 핵종 접근 및 정밀 측정 중심 연구역량 보완 추진
- ◎ (글로벌 대형 가속기 협력 확대) 국내 연구진은 미국 FRIB 및 유럽 GANIL 등과의 공동 연구와 실험 참여를 통해 글로벌 연구 네트워크 연계 확대
 - 다양한 에너지 영역과 실험기법 기반 연구 수행과 향후 RAON 가동 연계 상호보완적 국제공동연구 체계 구축 가능성 확대

| 그림 III-기

IBS-RIKEN 핵물리분야
공동연구 업무협약 체결식



자료: 기초과학연구원. (2024년 1월 25일). IBS-RIKEN, IBS 뉴스룸. ibs.re.kr

연구자· 공동연구 네트워크

국제 공동연구와 연구자 교류 확대를 기반으로 글로벌 연구 네트워크 중심 협력 체계 강화

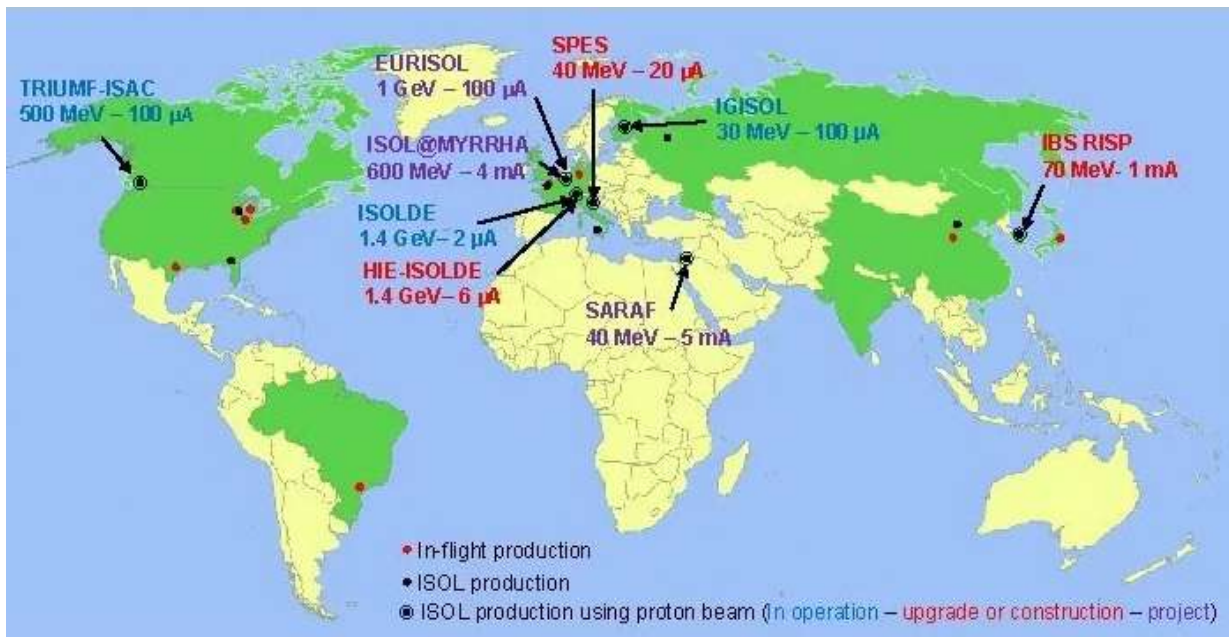
- ◎ (연구 인력·교육 기반 국제협력 확대) 국제 공동연구 및 워크숍 등을 통해 연구 인력 교류 확대
 - 박사후연구원 파견 및 장기 방문연구 프로그램 활성화를 기반으로 차세대 연구자 양성 및 글로벌 연구역량 확대 추진
- ◎ (공동연구 기반 협력체계 강화) 국제 공동실험 수행과 연구데이터 공유 기반 협력구조 강화를 통해 국내 연구역량의 글로벌 수준 확장 기반 마련

국제협력· 전략거점 확대

RAON은 글로벌 희귀동위원소 연구시설과의 협력 확대를 기반으로 국제 공동연구 거점 역할 강화 추진

- ◎ (아시아 협력축 확대) RAON-RIBF 간 공동실험 및 인력교류 중심 협력은 아시아 지역 핵심 국제협력 축으로 발전 가능
 - RIBF의 고강도 희귀핵 빔 생산 및 축적된 실험경험과 RAON의 ISOL+IF 결합 기반 상보적 실험환경을 바탕으로 공동실험·연구자 교류·장기 체류 프로그램 확대 중심 아시아 지역 연구허브 구축 가능
- ◎ (미국·유럽 협력축 확대) FRIB의 고에너지 fragmentation 기반 희귀핵 생산 및 정지빔 활용 질량측정 연구역량과 RAON의 저에너지 후가속 빔 기반 정밀 반응 연구 특성을 기반으로 FAIR-ISOLDE와의 데이터 공유, 공동실험, 검출기 개발 및 연구자 교류 중심 협력 확대 가능
- ◎ (RAON 전략적 역할 강화) 향후 RAON은 전 영역 독자 수행보다 특정 핵종 영역 및 측정 기법 중심 차별화 전략 추진 필요
 - 특정 질량 영역 희귀핵 생산과 특정 반응 채널 측정, 고정밀 검출기 기반 실험 등 핵심 분야 집중 필요
 - 글로벌 희귀동위원소 연구 네트워크 내 국제 공동실험 수행 핵심 인프라 역할 확보를 바탕으로 국내 연구자의 국제 연구주도권 확대 및 연구성과 창출 기반 강화 가능

|그림 III-8| 전 세계 희귀동위원소 연구시설 분포



자료: 기초과학연구원 중이온가속기사업단. (2014). 중이온가속기구축사업 안내서

IV

결론

**정책
운영체계 강화**

RAON 기반 핵천체물리 연구 경쟁력 확보를 위해 장기 운영체계와 개방형 사용자시설 중심 정책 기반 강화 필요

- ⊙ (장기 운영 정책 강화) RAON을 단순 연구시설이 아닌 국가 전략 기초과학 인프라로 인식하고 장기적·안정적 운영 정책 확보
- ⊙ (개방형 연구체계 구축) 사용자 중심 개방형 운영체계를 조기에 정착시켜 국제 연구자 참여 및 연구 활용도 확대
- ⊙ (연구거점 운영체계 강화) 글로벌 연구시설 수준의 사용자 지원·실험 운영·데이터 관리 기반 통합 운영체계 구축 필요
 - 사용자시설 신뢰성 확보와 국제 공동연구 확대를 위한 운영체계 고도화 중요

**핵데이터
기술 자립 강화**

핵데이터 생산과 정밀 핵반응 연구 기반 기술 자립 역량 확보를 통해 핵천체물리 연구 경쟁력 강화 필요

- ⊙ (RAON 기반 연구 경쟁력 확보) RAON은 ISOL 및 fragmentation 방식을 동시에 구현하는 이중 생산 체계를 기반으로 다양한 핵종 접근이 가능한 연구 환경 제공 가능
 - r-process 경로 핵종 및 proton-rich 핵종 등 핵천체물리학적 영향력이 높은 영역 연구 수행 가능
- ⊙ (핵심 연구 분야 집중 전략) 천체물리학적 핵반응을 측정과 핵물성 데이터 확보 중심 연구 경쟁력 제고 요구 확대
 - 검출기 및 실험장치 개발 연계 기술자립 기반 구축을 통해 추적형 연구를 넘어선 선도형 연구 수행 기반 확보 필요
- ⊙ (핵데이터 기술 자립 강화) 핵데이터 생산·평가 체계 고도화와 국제 데이터베이스 기여 확대 중심 기술자립 기반 확충 요구 증대

**국제협력
연구허브 강화**

글로벌 연구시설과의 협력 확대와 국제 공동연구 기반 연구거점 역할 강화를 통해 아시아 지역 핵심 연구허브도약 필요

- ⊙ (국제협력 허브 역할 강화) RAON은 RIKEN, FRIB 및 FAIR 등과 상호보완적 협력 관계를 구축하며 글로벌 연구 네트워크 핵심 거점으로 발전 가능
 - 국제 공동실험 및 사용자 프로그램 확대와 데이터 공유·공동분석 체계 구축을 기반으로 참여형 연구를 넘어선 주도형 국제공동연구 체계 전환 필요
- ⊙ (국제협력 확대 및 허브화 추진) 국제 공동연구 프로그램 확대를 통해 글로벌 연구 네트워크 내 역할을 강화하고 아시아 지역 연구 허브로의 도약 추진

참고 문헌

- 1 RIKEN, Nishina Center Advisory Committee Report, 2023
 - 2 Y. Leifels, *Il Nuovo Cimento* 48 C, 59 (2025)
 - 3 CERN, ISOLDE Open Data Policy, 2023
 - 4 E.P. Abel et al, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 46, 100501 (2019)
 - 5 https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/radiological-and-nuclear-technology-health/samira-action-plan_en
 - 6 M.S. Smith, *Front. Astron. Space Sci.* 10:1243615 (2023)
 - 7 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_59270/nuclear-data-evaluation-co-operation
 - 8 <https://research.tamu.edu/facility/radiation-effects-facility/>
 - 9 M.S. Smith et al., *Front. Astron. Space Sci.* 10:1228901 (2023)
 - 10 C.J. Horowitz et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 46, 083001 (2019)
 - 11 [2020, 과기정통부] 대형가속기 장기로드맵 및 운영전략
 - 12 https://www.ibs.re.kr/cop/bbs/BBSMSTR_000000000736/selectBoardArticle.do?nttId=24633&pageIndex=1&searchCnd=0&searchWrd=riken
 - 13 미국: FRIB (2020), U.S. Department of Energy designates FRIB as DOE Office of Science user facility, <https://frib.msu.edu/news/2020/designation-event.html>
 - 14 EU: FAIR (2010), Partner countries of the FAIR GmbH, <https://fair-center.eu/about/partners>
 - 15 일본: RIKEN Nishina Center (2023), RIBF Facility Upgrade Project, https://www.nishina.riken.jp/researcher/RIBFupgrade/RIBF_Upgrade_NCAC.pdf
 - 16 캐나다: Government of Canada (2024), Budget 2024 - Chapter 4, <https://budget.canada.ca/2024/report-rapport/chap4-en.html>
- 그림1 CERN Multimedia Archive. “ISOLDE Experimental Facility.”
- 그림2 RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. (2026). RIBF Accelerator Complex Diagram. RIKEN.
- 그림3 KU Leuven Institute for Nuclear and Radiation Physics. LISOL Facility Overview.
- 그림4 CERN Multimedia Database. ISOLTRAP Experimental Apparatus.
- 그림5 DiMarket. (2026). Superconducting Magnet System Market Size Forecast (2026-2033).

- 그림6 Georg Bollen, FRIB/MSU. (2014). Facility for Rare Isotope Beams - FRIB Strategic Partnership.
- 그림7 European Space Agency (ESA). Radiation-driven Single Event Effect.
- 그림8 Nuclear Astrophysics Group, Institute for Nuclear Physics (IKP), TU Darmstadt. Explosive nucleosynthesis and the nuclear chart paths (stellar burning, s-process, and r-process).
- 그림9 INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), LUNA Collaboration Multimedia Database. LUNA Underground Experimental Facility.
- 그림10 RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. Coulomb Dissociation Experimental Setup.
- 그림11 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) News Center. GRETA - Gamma-Ray Energy Tracking Array.
- 그림12 RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. RIBF Superconducting Ring Cyclotron (SRC) Facility.
- 그림13 과학기술정보통신부·기초과학연구원(IBS) 중이온가속기연구소. RAON 희귀동위원소 과학 연구단지 조감도.
- 그림14 OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). Nuclear Data Evaluation and Validation Process.
- 그림15 기초과학연구원(IBS). 「IBS-RIKEN 핵물리 공동연구 본격 개막」 보도자료.
- 그림16 Market Research Future. (2026). Industrial Linear Accelerator Market Size, Growth Report 2035.
- 그림17 Bedaque, P., et al. (2021). "A.I. for Nuclear Physics." The European Physical Journal A, 57(3), 100.
- 그림18 한국기초과학지원연구원(KBSI). 「15T FT-ICR 질량분석장치 외관 및 내부 구조 개요도」 제공자료.
- 그림19 RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. RIKEN RIBF Accelerator Facility Overview.
- 그림20 OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). JEFF Nuclear Data Lifecycle and Validation Framework.

STI Brief

발행일 2026년 6월 19일

발행처 (주)이니씽크(INITHiNK)

서울특별시 송파구 법원로 11길 7

T. 02-468-4137

inithink.co.kr

출 갈 Top-Tier 사업 촉발지원단

STI Brief

STI 브리프는 연구단별 핵심분야에 대한 글로벌 정책·기술·산업 등 최신 동향 및 트렌드 정보와 더불어 다양한 시각과 심층분석을 제공하기 위해 발간하고 있습니다. 동 브리프는 저자의 개인적 견해이며 (주)이니씽크의 공식 견해가 아님을 알려드립니다.