

STI Brief

—
중이온 가속기

Top Premier international
Tier research Consortium

I 서 론

1

1. 배경 및 필요성	1
2. 기술의 정의 및 범위	3

II 해외 동향

6

1. 정책 동향	6
2. 시장·산업 동향	13
3. 기술개발 동향	17
4. 국제협력 동향	25

III 국내 동향

29

1. 정책 동향	29
2. 시장·산업 동향	30
3. 기술개발 동향	31
4. 국제협력 동향	33

IV 결 론

35

1. 시사점	35
--------------	----

■ 참고문헌

38

I 서 론

1. 배경 및 필요성

❖ 방사선 이온빔(RIB) 개발은 가속기 시설을 기반으로 핵물리학의 비약적 발전 기여

- 1951년 Copenhagen의 Bohr Institute에서 사이클로트론(가속기)을 이용하여 중성자가 풍부한 크립톤 동위원소 실험은 CERN 내 ISOLDE Collaboration* 설립에 중요한 계기로 작용
 - * CERN 국제 핵물리 연구협력체
 - 동 실험은 싱크로사이클로트론(SC)에서 나오는 양성자 빔을 이용¹⁾하여 루비듐 확인에 기여하며 1967년 CERN 내 ISOLDE Collaboration 설립 기반 역할
- 1973년 ISOLDE 시설은 업그레이드를 위해 가동이 일시 중단되었으며, 업그레이드 작업은 SC(Synchro-Cyclotron) 개선과 병행 수행
 - ISOLDE 업그레이드 및 개선 결과, 빔 세기가 $4\mu\text{A}$ 로 향상되었고 이를 통해 ISOLDE 시설의 역량은 대폭 강화
- 1999년 ISOLDE 시설은 1.4GeV Proton Synchrotron Booster로 이전되었고, RIB 실험 성공으로 인해 ISOL 시설 내 후가속기(post-accelerator)* 도입
 - * 1980년대말 후가속된 방사성 이온빔을 재가속할 수 있는 가능성이 벨기에 루뱅(뤼뱅) 연구소에서 입증
 - 후가속기는 쿨롱 장벽(Coulomb barrier) 근처에서의 핵천체물리학(nuclear astrophysics) 관련 반응 실험(reaction experiments)이 가능하게 되는 계기 마련
- 이후 다양한 이온원(Ion Source) 기술의 지속적 발전으로 인해 핵물리학 발전 토대 마련

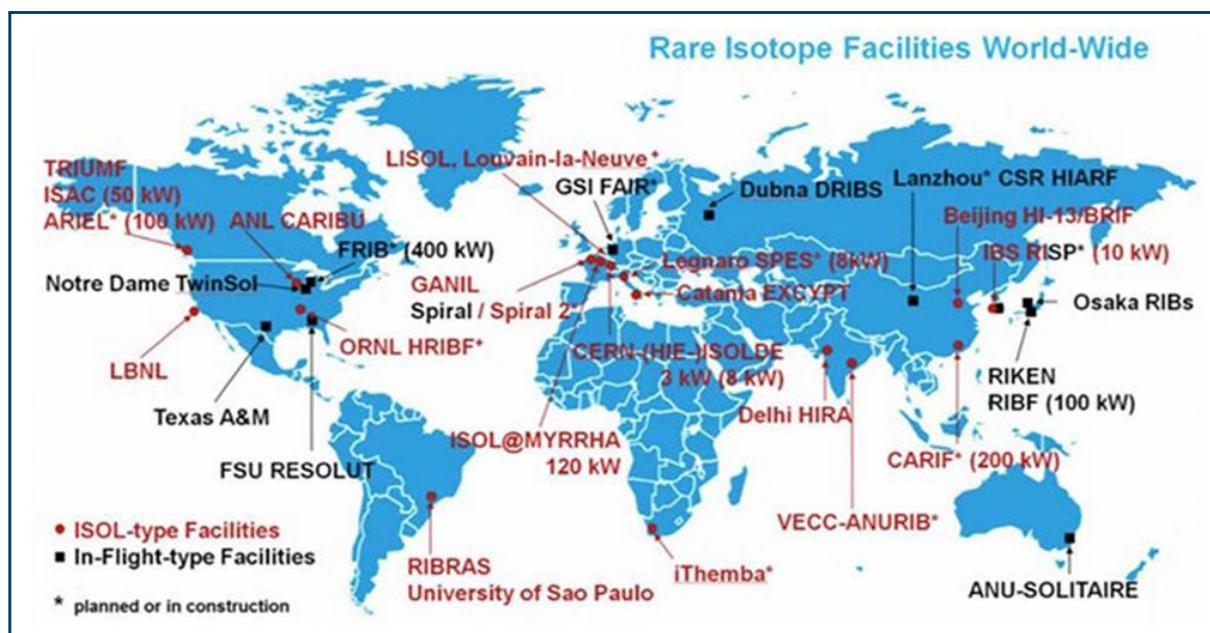
1) [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(79\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0370-1573(79)90045-0)



◆ 중이온 가속기에 대한 경쟁이 가속화되면서 주요국은 기존 중이온 가속기 시설 개선 및 신규 시설 구축을 통해 높은 강도의 방사성 이온빔(RIB) 생산

- 한국은 RAON, 미국 FRIB, 캐나다 TRIUMPF 등 주요국은 중이온 가속기 시설 구축에 박차를 가하며 기술경쟁력 확보 노력

※ 한국 RAON, 미국 FRIB, 캐나다 TRIUMPF, 스위스/프랑스(CERN) ISOLDE, 일본 RBIF, 중국 HIRFL 등이 대표적



| 전 세계적 방사성 연구빔(RIB) 연구시설 현황 및 계획(2025)²⁾ |

2) <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06586-5>

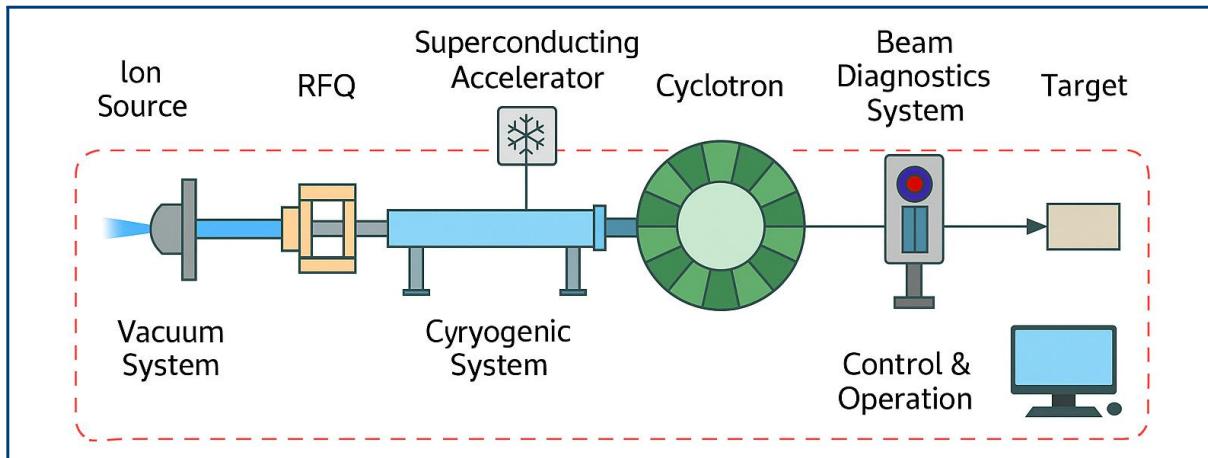
2. 기술의 정의 및 범위

◆ 중이온가속기 시설은 중이온 가속기와 ISOL/In-flight(IF) 시스템 포함

- 중이온가속기는 질량수가 큰 원자핵을 이온화하여 수 고에너지로 가속시킨 뒤 표적과 충돌시켜 희귀동위원소를 생성·분리하는 장치

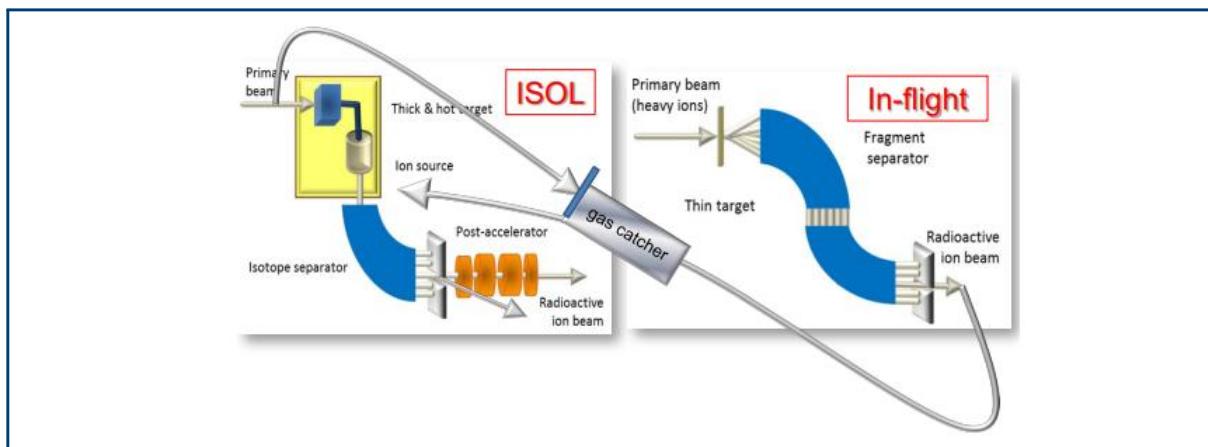
| 중이온가속기의 구성 및 역할 |

구성	역할
이온원 (Ion Source)	<ul style="list-style-type: none"> • 기체, 액체, 고체 상태의 원자 또는 분자를 이온화 • 원자 또는 분자의 전자를 제거(또는 첨가)하여 양이온(또는 음이온)을 생성 • 전자 사이클로트론 공명 이온원을 주로 사용 <ul style="list-style-type: none"> - 전자 사이클로트론 공명 이온원(Electron Cyclotron Resonance Ion Source, ECR_IS) 多價의 전하 상태를 가진 이온을 안정적으로 생성하는데 뛰어난 플라즈마 기반 이온원
고주파 사중극가속기 (RFQ)	<ul style="list-style-type: none"> • 고주파(Radio Frequency, RF) 기반 저에너지 가속기 • 네 개의 전극을 활용하여 저에너지 입자 빔의 집속, 가속, 번청 기능을 단일 구조 내에서 통합 구현
고주파 시스템 (RF System)	<ul style="list-style-type: none"> • 빔의 품질을 보장하기 위하여 가속관의 주파수, 위상, 출력을 정밀하게 제어하는 시스템 • 입자 가속기의 중심 기술 • 가속되는 입자에 필요한 에너지(고주파 전력)를 공급
전자석 시스템 (Magnet System)	<ul style="list-style-type: none"> • 자기장을 이용하여 하전 입자의 궤도를 변경·제어하고 집속하는 데 필수적인 구성 요소
진공 시스템 (Vacuum System)	<ul style="list-style-type: none"> • 내부에 매우 낮은 압력의 환경(진공)을 만들어, 가속 또는 전송되는 하전 입자(전자, 양성자, 중이온 등)가 공기나 기체 분자와 충돌하지 않고 원활히 이동할 수 있도록 해주는 시스템 <ul style="list-style-type: none"> - 터보분자펌프 : $10^7 \sim 10^9$ Torr 이하의 초고진공 환경을 위한 터보분자펌프 - 이온펌프, 및 비기화형 게터 펌프 : $10^7 \sim 10^{11}$ Torr 수준의 극초고진공을 위한 크라이오 펌프
초전도가속기 (Superconducting Accelerator)	<ul style="list-style-type: none"> • 입자를 가속시키는 고주파 가속 구조 또는 전자석 등에 초전도체 재료 사용 • 저항 손실 없이 강력한 전기·자기장을 생성할 수 있도록 설계된 가속기 • 초전도 가속관의 경우 극저온에서 초전도 특성을 갖는 순수 나이오븀(Nb)을 일반적으로 사용 • 액체 헬륨으로 감싼 초전도 가속관이 극저온으로 냉각[*]된 상태로 주변 장치들^{**}과 통합하여 운용될 수 있도록 저온유지모듈(Cryomodule)의 단위 구조 조합
극저온시스템 (Cryogenic System)	<ul style="list-style-type: none"> • 가속관 및 전자석 등을 초전도 상태로 유지하기 위해 극저온 환경을 생성하고 안정적으로 공급·제어하는 시스템
사이클로트론 (Cyclotron)	<ul style="list-style-type: none"> • 자기장과 고주파 전기장을 이용해 입자를 원형 궤도로 점진적으로 가속 • 중심에서 시작한 입자가 자기장에 의해 원형 궤도를 따라 회전하면서 동시에 두 반원 모양 (D 자형)의 전극 사이의 교류 전압에 의한 전기장으로 입자를 가속하는 방식 • 입자는 전극 사이를 지날 때마다 추가적으로 가속되면서 궤도 반지름이 점점 커지게 되며, 입자가 충분히 가속되면 궤도 가장자리에서 바깥으로 추출하는 방식을 사용
빔 진단시스템 (Beam Diagnostics System)	<ul style="list-style-type: none"> • 가속 또는 전송되는 입자 빔의 품질과 특성을 정밀 측정하고 분석하여, 가속기의 운전 상태를 유지·최적화하고 빔의 손실 최소화 • 위치 측정 장치, 프로파일 측정 장치, 전류/전하 측정 장치, 에미터스 측정 장치, 손실 모니터, 길이 측정기, 위상 측정 등으로 구성
제어 및 운영 시스템 (Control & Operation)	<ul style="list-style-type: none"> • 입자 빔의 안정적인 프로세스를 위해 가속기의 모든 구성 요소들을 정밀하게 제어, 상태를 실시간으로 모니터링 • 오픈소스 기반의 분산 제어 시스템인 EPICS는 뛰어난 확장성과 안정성을 갖춘 플랫폼



| 중이온 가속기 시스템 개요 |

- 고품질의 희귀동위원소를 만들기 위해 온라인생성분리방식(ISOL), ‘비행생성분리방식(IF), 또는 복합방식(ISOL+IF) 세가지 보완적인 방법 개발
 - (온라인 생성분리방식(ISOL)) ① 고에너지의 양성자 또는 중양자빔, ② 두꺼운 표적에 충돌, ③ 다양한 희귀동위원소를 생성, ④ 실시간으로 이온화 및 분리
 - (비행생성분리방식(IF)) ① 고속으로 가속한 중이온, ② 얇은 표적에 충돌, ③ 수많은 핵분열 생성물을 동시 생성, ④ 생성된 후보 핵종들을 자기장·전기장 등으로 즉시 분리·선별·확인
 - (복합방식(ISOL+IF)) 비행생성분리방식과 온라인 생성분리방식의 복합 방식



| ISOL과 In-flight 기반 생성 방식 개요 |

- 목표는 높은 세기와 순도를 가진 그리고 좋은 이온 품질을 가진 알맞은 타이밍의 알맞은 특성과 에너지*를 가진 희귀핵 빔 생성
 - * 정지 상태 : meV/u, 최고에너지 상태 : GeV/u
- 전 세계 주요 중이온가속기 시설들은 다양한 빔 에너지와 입자 조합을 활용해 연구 경쟁력 강화

| 희귀동위원소 생성·분리 관련 주요 중이온가속기 비교 |

시설명	생성방식	국가	가속기 종류	빔 종류	빔 에너지
CERN HIE-ISOLDE	ISOL	스위스	Synchrotron SC Linac	양성자 동위원소	1.4 GeV 최대 10 MeV/u
GANIL SPIRAL2	ISOL IF	프랑스	SC Linac	양성자 중이온	33 MeV(p) 14.5 MeV/u(U)
TRIUMF ISACII	ISOL	캐나다	Cyclotron SC Linac	양성자 동위원소	500 MeV 6.5 MeV/u
RIEKN RIBF	IF	일본	Cyclotron SC Linac	중이온 동위원소	345 MeV/u(U) 6~7 MeV/u
GSI FAIR	IF	독일	Synchrotron	양성자 중이온	29~30 MeV(p) 11 GeV/u(U)
IMP HIAF	IF	중국	Synchrotron	중이온	~800 MeV/u(U)
MSU FRIB	IF	미국	SC Linac	중이온	200 MeV/u(U)
IBS RAON	ISOL & IF	한국	Cyclotron SC Linac	양성자 중이온	70 MeV(p) 200 MeV/u(U)

◆ 중이온가속기 기술은 핵·천체물리 연구를 비롯하여 의학, 에너지, 재료과학, 산업 인프라 등 다양한 분야에서 핵심 기반기술로 활용

- (핵·천체물리학 연구) 안정핵 및 불안정 동위원소의 구조 연구, 초중원소 합성, 초신성/감마선 폭발, 중성자 별 물질 상태 탐구 등 핵·천체물리 실험 활용
- (의학 응용) 중입자를 이용한 암 치료, 방사성 동위원소 기반 암 치료 기술 개발, 방사선 동위원소 생성 및 특수 의약품 핵종 개발 등 활용
- (에너지 및 원자력 기술) 가속기 구동 핵변환 시스템(ADS) 및 핵연료 주기 연구
- (재료과학 및 산업) 반도체 소자의 방사선 내구성 시험, 초전도체/나노소재의 구조 결함 연구 및 신소재 개발, 핵융합 관련 재료 시험 등 활용
- (산업 및 사회 인프라) 첨단 가속기 기술(초전도 기술, 극저온 기술, 고주파(RF) 시스템, 진공 기술, 등)의 의료·산업 전반에 응용, 중성자 발생과 연계한 대형 구조물 또는 보안 검색 기술 등 활용



II

해외 동향

1. 정책 동향

- 통합형 R&D 인프라와 글로벌 네트워크를 기반으로 기술 리더십과 응용 분야를 확대하고, 지속적 정책 추진과 정부 지원을 통해 의학·산업 중심의 사회적 가치 창출 도모

| 중이온가속기 국가별 동향 |

구분	국가 전략 방향	핵심 프로그램	주요 인프라 구축 및 운영
미국	중이온가속기 기반 융합 인프라 구축	ARDAP	<ul style="list-style-type: none"> FRIB-BNL을 축으로 핵물리·의학 응용 및 차세대 총돌기 연구 추진
일본	중이온가속기 기반 융합 연구거점 지정	정부 주도 중이온 가속기 종합정책	<ul style="list-style-type: none"> RIBF-J-PARC-HIMAC을 중심으로 기초연구·고강도빔·의료응용 인프라 강화
중국	중이온가속기 기반 기술 리더십 확보	국가 중이온가속기 전략 프로젝트	<ul style="list-style-type: none"> HIAF-LEAF-CiADS-CEPC 연계로 차세대 핵·입자 융합 인프라 조성
캐나다	TRIUMF 중심의 국가 가속기 연구거점 육성	TRIUMF 기반 융합 연구·혁신체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> 520 MeV 사이클로트론 기반 융합 연구 인프라 구축
독일	GSI-FAIR 기반 국제 공동연구 인프라 강화	GSI 주도의 다국적 융합연구 플랫폼	<ul style="list-style-type: none"> CBM 실험 중심 극한물질 연구 인프라 구축
프랑스	중이온가속기 기반 융합·국제협력형 핵심 인프라 육성	GANIL-SPIRAL2 기반 고강도 빔·국제협력 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> GANIL-SPIRAL2 기반 희귀동위원소·응용 연구 인프라 구축
이탈리아	INFN 중심 중이온 가속기 기반 국제 협력형 혁신 인프라 육성	희귀동위원소 기반 핵·응용 연구 프로젝트	<ul style="list-style-type: none"> SPES-CNAO 연계 의학·기초과학 융합 인프라 구축

1 미국

■ 에너지부(DOE)를 중심으로 중이온가속기 관련 인프라를 체계적으로 구축하여, 기초 과학에서 의료·산업·국방 응용으로 확장되는 첨단 가속기 기술 생태계 강화

- (국가 전략 방향) 중이온가속기를 차세대 과학기술 경쟁력의 핵심 인프라로 지정하고, DOE 주도로 연구개발·인력양성·산업화를 연계한 통합 기술 생태계 구축³⁾
- (핵심 프로그램 추진) ARDAP 프로그램을 중심으로 한 첨단 가속기 기술의 R&D-산업화 및 가속기 기반 융합 혁신 생태계를 조성
 - ARDAP는 DOE 산하 프로그램으로, 중이온가속기를 포함한 첨단 가속기 기술의 연구개발 및 산업화를 종합 지원
 - 기초과학 성과를 의료, 산업, 국방 등 다양한 응용 분야로 확산시키기 위한 생태계 전반의 기술·인력·인프라 육성 체계 구축
- (주요 인프라 구축 및 운영) FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)⁴⁾와 BNL(Brookhaven National Laboratory) 운영
 - FRIB는 미국의 핵심중이온가속기 연구시설로 응용핵물리학 연구 및 국제화 추진
 - ※ 미시간주립대와 DOE가 공동 설립하였고 2022년 완공
 - ※ 핵물리·우주핵물리와 의학·산업 응용 연구를 병행하며 우라늄 빔 20 kW 달성을 함께 국제 연구 확대
 - BNL은 2025년까지 핵물질의 상전이·구조 연구 후 새로운 설비 구축하여 국제 연구 네트워크 확대
 - ※ 2025년까지 RHIC를 활용해 QGP와 핵자 구조 연구 선도
 - ※ 이후 차세대 전자-이온 충돌기(EIC) 구축으로 전환해 원자핵 구조 규명과 국제 공동연구 강화

3) 미국 DOE 홈페이지, <https://science.osti.gov/ARDAP/>

4) 미국 미시간주립대 FRIB 홈페이지, <https://frib.msu.edu/>



2 일본

■ 기초과학 연구 기반을 강화하고, 중이온가속기 기술의 의료·산업 응용을 확대하기 위해 국가 차원의 중이온가속기 인프라 확충 정책 추진

- (국가 전략 방향) MEXT-JST를 중심으로 중이온가속기를 연구·의료·산업을 아우르는 핵심 인프라로 육성하여 기술경쟁력과 사회적 파급력 확대
 - 문부과학성 및 JST를 중심으로 대형 연구시설 투자, 기술 고도화, 인력양성 등을 포함한 종합 정책 추진
- (기초과학 연구 인프라 확충) 일본은 RIKEN의 RIBF와 J-PARC를 중심으로 중이온가속기 성능 향상과 국제 공동연구 확대 추진
 - RIKEN의 RIBF는 일본 정부가 지원하는 핵심 중이온가속기 인프라로, 성능 향상과 국제 공동연구 확대를 통해 핵물리 및 희귀동위원소 연구 경쟁력 강화
 - ※ 국가 핵심 중이온가속기 연구시설로, 첨단 핵과학 연구 기반 유지를 위한 장기 성능 향상 및 시스템 업그레이드 추진
 - ※ RIBF를 통해 핵물리 및 희귀동위원소 연구의 국제 경쟁력 확보를 도모하고, 아시아·유럽 주요 연구기관과의 공동연구 네트워크 확대 지원
 - J-PARC는 국가 전략형 가속기 시설⁵⁾로, 중이온 빔 인젝터 확장을 통해 고강도·고에너지 빔 생산 역량을 강화하고 고에너지 핵물리 연구의 국제 공동 활용 체계 확대5)
 - * JAEA와 KEK가 공동 운영
- (의료 인프라 고도화) 국립방사선의학연구소(NIRS)는 세계 최초의 임상용 탄소 중이온 가속기를 구축하여 방사선 의료 인프라 확충 추진
 - 정부 주도의 세계 최초 임상용 탄소 중이온가속기 복합체 HIMAC을 구축하여 국가 방사선 의학 연구 및 중입자 치료 기술의 기반 마련
 - ※ 공공 의료 인프라의 첨단화 및 국민 건강 증진 정책 추진 및 중입자 치료 기술의 임상 적용과 지역 거점 병원 확산 지원
 - HIMAC 관련 기술개발 및 운영 성과는 향후 차세대 의료용 중입자 가속기 시스템 개발에 반영 예정

5) Masakiyo Kitazawa(Kyoto University), "Physics of J-PARC Heavy-Ion Project"

3 중국

■ 기초과학 연구 인프라의 전략적 확충을 통해 중이온가속기 분야의 국제 경쟁력과 기술 리더십 확보를 국가 핵심 목표로 설정

- (국가 전략 방향) 중이온가속기를 과학기술 경쟁력의 핵심 기반으로 육성하며, 기초·응용 연구 연계 강화
 - '추격형(Chaser)'에서 '선도형(Leader)'으로의 전환을 목표로, 차세대 대형 가속기 복합체 구축을 국가 전략 프로젝트 추진
 - 기초과학-핵물리-응용기술 간 연계를 강화하는 방향으로 중이온가속기 연구 인프라의 단계적 확충
- (핵심 인프라 구축) 고강도 중이온 가속기 시설(HIAF⁶⁾)과 저에너지 가속기 시설(LEAF^{**})을 핵심 축으로 중이온가속기 인프라를 구축하여 기초과학부터 응용연구까지 아우르는 연구 생태계 조성
 - * HIAF : High Intensity heavy-ion Accelerator Facility
 - ** LEAF : Low Energy heavy-ion Accelerator Facility
 - HIAF는 차세대 중이온가속기 복합체로, 2025년 시운전을 목표로 국제 수준의 연구 인프라 구축⁶⁾
 - ※ 중국과학원 현대물리연구소 주도 / 고강도·고에너지 빔 생산을 통해 다학제 연구 지원
 - LEAF는 세계 최고 수준의 저에너지 가속기^{*}로, 2024년 말 가동을 시작해 HIAF와 연계된 응용 연구 중심의 다학제 플랫폼으로 활용⁷⁾
 - * 45 GHz 초전도 ECR 이온원 기반 기술을 활용해 다양한 중이온을 고정밀로 가속 가능
- (향후 전략 시설 확대) HIAF-CiADS-CEPC 연계 구축을 통해 차세대 대형 핵물리·입자 물리 연구 인프라 생태계 조성 추진
 - CiADS(가속기 기반 구동 핵변환 시스템)은 방사성 폐기물 저감 및 에너지 응용 연구용 실험 시설로 개발
 - CEPC^{*}은 초대형 전자-양전자 충돌기 구축을 통해 기본입자 물리 연구의 글로벌 경쟁력 확보 목표
 - * CEPC : Circular Electron-Positron Collider

6) Ke Wang이외 다수, Accelerator Physics; arXiv:2506.08421 “High-precision Beam Optics Calculation of the HIAF-BRing Using Measured Fields”

7) 중국 CAS 홈페이지, <https://english.cas.cn/>



4 캐나다

▣ 국립 입자·핵물리연구소(TRIUMF)를 중심으로 가속기 기반 연구를 국가 전략시설로 육성 및 향후 5년간 약 4억 캐나다 달러를 투자해 사이클로트론 인프라 업그레이드 추진⁸⁾

- (국가 전략 방향) 중이온가속기 인프라를 과학기술 경쟁력의 핵심 기반으로 육성하며, TRIUMF를 중심으로 다학제적 허브를 구축해 과학 성과의 응용 확산과 기술 리더십 강화 추진
 - 중이온가속기를 포함한 대형 연구 인프라를 과학기술 경쟁력의 핵심 기반으로 규정하고, 정부 재정 지원과 공공 연구기관 중심의 장기 투자 계획 추진
 - 기초과학-의료-산업 응용을 연계한 다학제 연구 허브를 조성하여, 연구개발 성과가 산업·의료 분야로 확산되는 선순환 구조를 구축하는 것이 목표
 - 물리학 연구뿐 아니라 의료·바이오 응용 분야^{*}에서 캐나다의 기술적 리더십을 유지·강화하는 데 기여할 것으로 기대
 - * 암 치료, 신약 개발, 방사성 동위원소 활용 등
- (핵심 인프라 및 운영 전략) TRIUMF는 국가 과학기술 인프라의 실질적 집행 역할 수행
 - TRIUMF는 캐나다 정부와 NSERC의 장기 로드맵에 따라 운영
 - 520 MeV 사이클로트론 기반의 다학제 연구와 기술이전·산학협력·인력양성 역할

5 독일

▣ GSI의 FAIR 프로젝트를 중심으로 다학제적 국제 중이온가속기 인프라를 구축하며 첨단 과학 연구와 국제 공동연구 역량 강화⁹⁾

- (국가 전략 방향) FAIR^{*} 프로젝트를 국가 중점 사업으로 지정, 중이온가속기를 기초과학과 응용기술을 연계하는 전략 인프라로 육성하고 EU와 협력을 통해 국제 연구 역량 강화
 - * FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)
- (핵심 인프라 구축) GSI 헬륨홀츠 중이온연구센터를 중심으로 대형 국제 공동연구시설 FAIR^{*}프로젝트를 국가 중점 사업으로 추진
 - FAIR는 GSI가 주도하고 ‘독일 연방교육연구부’와 ‘헬륨홀츠협회’가 지원하는 국제 중이온 가속기 구축사업으로, 10여 개국이 참여하는 다국적 협력 프로젝트

8) 캐나다 TRIUMF 홈페이지, <https://triumf.ca/>

9) 독일 FAIR 홈페이지, <https://fair-center.eu/>

- FAIR는 핵물리, 입자물리, 플라즈마물리, 재료과학, 방사선 의학 등 다양한 분야의 실험을 지원하는 세계적 규모의 복합 연구시설로 개발
 - ※ 주요 연구 프로그램에는 CBM^{*}실험이 포함 및 중성자별 내부 환경과 같은 우주의 극한 상태를 실험실에서 재현·분석하여 물질의 기본 구조를 규명하는 것이 목표
 - * CBM(Compressed Baryonic Matter)
- FAIR는 2017년에 건설 착수 후 2025년 시운전을 목표로 했으나 2027년으로 연기될 가능성 존재
 - ※ 비용 상승 및 우크라이나 전쟁에 따른 공급망 차질 등의 외부 요인 영향

6 프랑스

▣ 기존 중이온가속기 인프라의 고도화와 다분야 융합연구, 국제 협력 확대를 중심으로 중이온가속기 정책 추진¹⁰⁾

- (국가 전략 방향) 중이온가속기를 기초-응용 융합 핵심 기반시설로 지정하고, 핵물리 인프라의 현대화, 융합연구 활성화, 국제 공동연구 확대를 중심으로 한 국가 전략 추진
- (핵심 인프라 구축 및 고도화) GANIL^{*}와 SPIRAL2^{**}를 중심으로 구축
 - * GANIL : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
 - ** SPIRAL2 : Facility for Production and Study of Radioactive Ions at GANIL
- GANIL은 CEA와 CNRS가 공동 운영하는 프랑스의 대표적 중이온 연구시설
 - ※ 1983년 가동 이후 5기 사이클로트론과 초전도 선형가속기를 갖추고 SPIRAL2와 연계한 연구 생태계 확장 추진
- SPIRAL2는 GANIL의 핵심 업그레이드 프로젝트
 - ※ 2019년 선형가속기 시운전 가동을 시작해 고강도 중이온 빔을 활용한 핵물리·재료과학 연구
 - ※ 기초연구와 산업·의료 응용을 연계하는 국가 과학기술 인프라로 육성

7 이탈리아

▣ SPES 프로젝트를 중심으로 중이온가속기 인프라를 고도화해 융합연구의 전략 거점을 구축하고, 국제 협력과 기술 경쟁력 강화 추진¹¹⁾

- (국가 전략 방향) INFN 중심의 중이온가속기 기반 융합 인프라 고도화 및 응용 확산 전략
 - INFN을 중심으로 SPES와 CNAO 등 국가 전략시설을 연계해 중이온가속기를 과학기술 경쟁력의 핵심 기반으로 육성
 - EU Horizon 2020 협력을 통해 연구 인프라 고도화와 의료·산업 응용 확산 병행

10) 프랑스 GANIL 홈페이지, <https://www.ganil-spiral2.eu/>

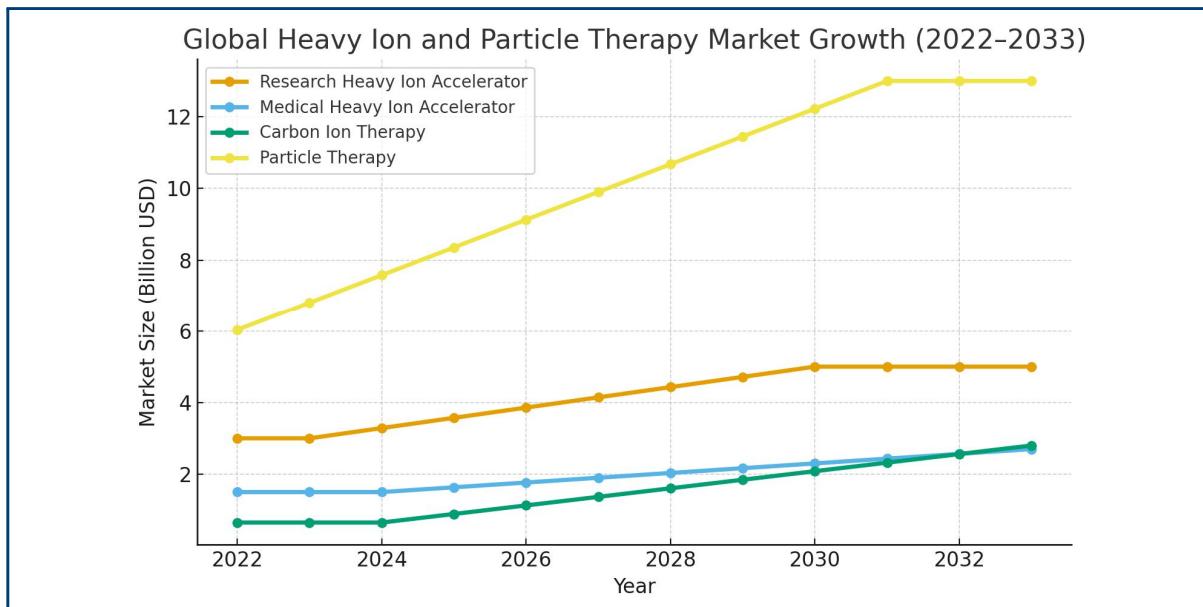
11) 이탈리아 INFN 홈페이지, <https://www.infn.it/en/>



- (핵심 인프라 구축) 'SPES' 프로젝트를 통한 희귀한 방사성 동위원소 생산 체계 구축
 - 'SPES'는 INFN이 주도하는 차세대 중이온가속기 구축 프로젝트
 - ※ 희귀 동위원소 생산을 기반으로 한 핵물리 및 응용물리 연구를 지원하는 국가 전략시설 건설
 - 시스템 업그레이드를 완료하여 안정적인 사이클로트론 가동과 동위원소 생산 체계 구축
 - ※ 2016년 신형 사이클로트론을 도입후 2024년까지 플라즈마 챔버 개선 및 RF 증폭기 교체
- (의료·응용 인프라 연계) SPES와 CNAO*를 통해 의료·기초과학·첨단기술의 융합 허브로 발전
 - * CNAO는 양성자와 탄소 이온 치료를 모두 제공

2. 시장·산업 동향

- ▣ 글로벌 중이온가속기 시장은 기초연구 중심에서 의료·산업 응용으로 확대, 2030년까지 전 분야에서 연 7~10% 성장 전망



| 글로벌 중이온가속기와 입자치료 시장동향(2022-2033) |

- 연구용 중이온가속기 (Research Heavy Ion Accelerator) 시장은 2023년 기준 약 30억 달러로 추정
- 2030년경*에는 연구 장비·운영비·관련 산업까지 연쇄 수요가 증가하여 시장 규모는 50억 달러 이상(연평균 성장률 약 7~8%)으로 확대예상
* 미국 FRIB, 한국 RAON, 독일 FAIR가 본격 가동
- 의료용 중이온가속기(Medical Heavy Ion Accelerator) 시장은 2024년 약 15억 달러 (USD 1.5 B) 수준, 2033년까지 27억 달러로 연평균 약 7.3 % 성장 예상¹²⁾
- 탄소이온 치료시장(Carbon ion therapy)은 2024년 약 6.50억 달러(USD 0.65 B) 수준, 2033년까지 28억 달러(USD 2.8 B)로 성장 예상¹³⁾
- 입자치료(Particle Therapy) 시장은 2022년 약 6.03억 달러 규모, 2031년까지 약 13억 달러(2023년부터 2031년까지 연평균성장률 8.6%)에 이를 것으로 전망¹⁴⁾

12) https://www.verifiedmarketreports.com/product/medical-heavy-ion-accelerator-market/?utm_source

13) https://marketintelo.com/report/carbon-ion-therapy-market?utm_source

14) https://www.transparencymarketresearch.com/particle-therapy-market.html?utm_source



1 미국

■ 중이온가속기 시장이 탄소이온 치료 중심으로 전환되며, 연관 산업 전반으로 확산예상¹⁵⁾

- 미국의 중이온가속기 시장은 메이오 클리닉의 탄소치료센터 개소를 통해 기존 양성자 치료 중심 구조에서 탄소이온 치료로 전환, 상용화를 계기로 의료용 가속기 산업 본격화
 - 메이오 클리닉은 2025년 6월 미국 최초의 탄소이온 치료센터 공식 개소 예정
 - 양성자 치료는 2027년, 탄소이온 치료는 FDA 승인 이후 2028년경 본격적인 환자 치료 개시
 - 2028년 탄소이온 치료 상용화를 계기로 의료·산업 전반의 고에너지 가속기 및 정밀 빔 제어 기술 시장 본격 확대 전망

2 일본

■ 중이온가속기 생태계를 구축하여, 산업적 확장과 해외 협력 강화¹⁶⁾

- RIKEN의 RIBF와 QST-HIMAC을 중심으로 기초연구-탄소이온 치료 연계 생태계 구축
 - RIKEN의 RIBF는 세계 최고 성능의 중이온가속기 시설로 연구 인프라, 기초과학, 의료 응용, 기술혁신 측면에서 세계 선도적 위치 선점
 - ※ 1994년부터 세계 최초의 탄소이온 치료용 중이온가속기 'HIMAC(QST)'을 구축·임상 운영
 - ※ 현재 야마가타대, 군마대, 가나가와 암센터, 효고, 규슈 등 전국으로 탄소이온 치료 네트워크 확산
- 세계 선도적 연구 인프라와 의료 응용 시장을 기반으로 산업적 확장과 해외 협력 강화
 - 의료용 중이온가속기 시장이 성숙 단계이며 해외 기술 수출 및 공동개발 수요 증가
- 일본의 중이온가속기 산업은 주요 기업을 중심으로 장비 제조·공급, 기술 혁신, 시스템 개발이 이루어지며, 첨단 기술을 통해 산업 경쟁력 강화
 - 스미토모 중공업(SHI)은 핵심기술*을 개발·공급하며, 일본 내 기초·응용 중이온가속기 기반 확충에 기여
 - * 중이온 실험 및 방사성 동위원소 생산용 사이클로트론, ECR 이온 소스, 입사기 장치 등
 - Toshiba, Hitachi, Sumitomo Heavy Industries는 병원용 가속기 및 치료 장비 시장을 이끌며, 중이온치료 장비의 회전 간트리 경량화, 소형 초전도 싱크로트론 등 기술혁신 선도

15) <https://medicaltravelmarket.com/news/mayo-clinic-opens-first-carbon-ion-therapy-center-in-america>

16) <https://www.riken.jp/en/collab/resources/ribf/>

3 중국

◆ 탄소이온 치료를 중심으로 다학제적 중이온가속기 생태계구축 및 산업 확장, 기술 자립·가격 경쟁력으로 시장 우위 확보

- 탄소 이온 치료 시스템의 국산화, 소형화 및 기술 효율화와 의료 인프라 확충, 기초 핵 과학 R&D 역량 강화로 의료·과학·산업 융합 혁신 협력으로 도약
 - 의료 응용 시장에서 세계에서 네 번째로 탄소이온 치료 시스템을 독자 개발, 임상 적용 및 주요 도시^{*}에 치료센터가 가동
 - * 간쑤성, 란저우, 항저우, 우한, 난징, 창춘 등
 - ※ 향후 5년간 약 20여 개의 탄소이온 치료센터 신설 계획이 추진
 - 치료용 중이온가속기 및 장비의 국산화·저비용 제작으로 경쟁력 확보 및 중이온가속기, 빔 전송장치, 제어 시스템 등 국내 산학연 공동 개발
 - ※ HIT(Huazhong Ion Therapy Co.), Lanzhou Institute of Modern Physics(IMP) 등이 산업화 주도

4 캐나다

◆ TRIUMF와 Fedoruk은 산업 파트너십과 산학연 협력 기반 기술이전·상용화 추진 및 중이온가속기 산업 생태계 주도

- TRIUMF와 Fedoruk이 산업 파트너십·산학연 협력의 거점 역할 수행
 - 기초과학과 실용화 연구를 통해 방사성 동위원소 생산, 진단 및 치료용 핵의약품 시장을 중심으로 실질적 산업 가치 증대
 - 중이온가속기 기반 응용 시장 성장에 따른 성장 동력 및 글로벌 파트너십 확대
- TRIUMF 주도로 기술이전·상용화를 추진
 - TRIUMF는 520 MeV 양성자 사이클로트론을 기반으로 다양한 분야^{*}의 연구 및 기술개발 주도
 - * 핵물리, 입자물리, 물질과학, 핵의학, 가속기 및 검출기 기술 등
 - ※ 응용 기술이 TRIUMF의 산업 파트너와 연계되어 기술이전 및 상용화 활발
- Fedoruk 센터는 방사성 동위원소 생산과 함께 의료·재료·핵에너지 시스템 연구 지원을 통해 의료 기반 확대 및 핵의학 관련 산업의 기반 강화



5 독일

▣ 기초연구와 의료응용의 연계를 통한 연구-산업 선순환 생태계 구축

- GSI/FAIR의 기초과학 인프라와 HIT·MIT의 의료용 중입자 치료를 양축으로 중이온 가속기 시장 형성, 연구·임상 응용을 동시선도
 - FAIR는 고부가가치 부품·장치^{*}의 민간 수요를 견인하며 원천기술·연구지원·산업 파급력의 생태계 구축
 - * 초전도 자석, 진공·극저온, RF, 제어·계측 등
 - ※ 독일 주요 기술기업이 FAIR의 가속기 구성요소·초전도 장비 공급^{*}에 참여하며, 기초연구 인프라와 산업기술이 동반 성장
 - * Siemens, Pfeiffer Vacuum, CryoVac, Research Instruments 등
 - 의료 분야에서는 HIT와 MIT 운영 경험을 토대로 탄소이온 치료장비·빔 제어 기술의 유럽 표준화·산업화 추진

6 프랑스

▣ GANIL/SPIRAL2를 중심으로 기초연구와 의료응용이 병행되는 중이온가속기 시장을 형성, 연구 인프라 고도화와 의료용 가속기 장비 국산화 동시 추진

- 중이온가속기 시장은 GANIL/SPIRAL2를 중심으로 형성, 연구용·의료용 가속기 활용 병행
 - SPIRAL2는 GANIL의 핵심 업그레이드 시설^{*}로, 기초과학을 넘어 산업 응용·국제 공동연구·기술이전까지 확장된 다기능 플랫폼
 - * 2020년대 초중반부터 본격 운영
 - 의료용 시장에서는 프랑스 내 3곳(오르세, 니스, 칸)의 양성자 치료센터 운영, 2027년 임상 적용을 목표의 사이클로트론 기반 탄소이온 치료시설 구축
- 산업체와 연구기관의 협력 구조를 통해 가속기 장비를 국산화·수출 경쟁력 확보
 - SPIRAL2 프로젝트는 진공 시스템·초전도 RF·극저온 장비·제어 계측 등 고부가가치 핵심 장비 분야 국내 기업 참여 확대
 - 의료용 탄소이온 치료 장비 개발 기반 산학연 협력 강화, 향후 유럽 내 치료장비 표준화·산업화 추진

3. 기술개발 동향

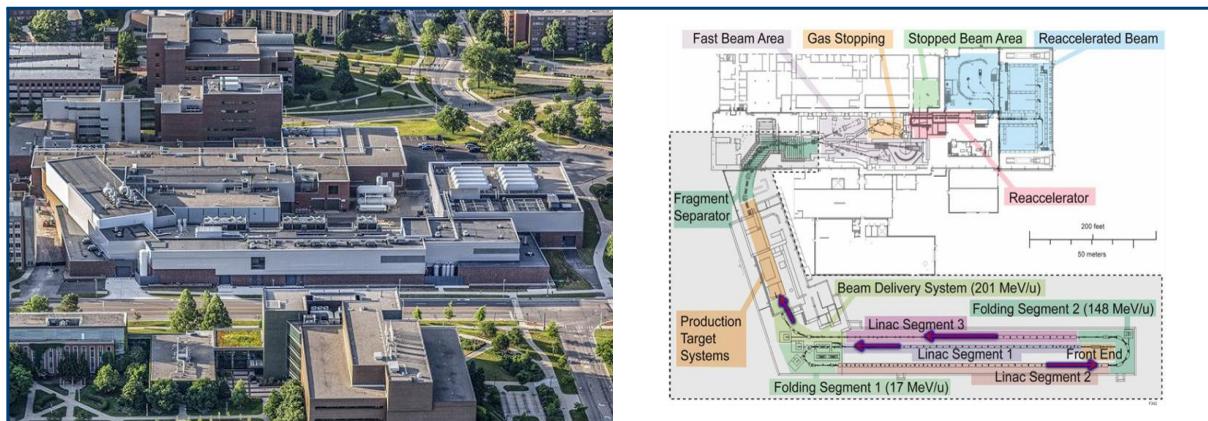
◆ 중이온가속기 기술은 FRIB·FAIR·HIAF·RIBF·RAON·SPIRAL2 등 대형 기초과학 인프라와 의료용 탄소이온 치료의 상용화를 중심으로 혁신 가속화

- 핵심 기술 방향은 초전도화·고성능화·자동화·비접촉화이며, 향후에는 AI 통합운영, 저비용 의료화, 고온초전도 기술의 실용화가 성장의 핵심이 될 전망
- 국제 대형시설의 공통 연구 트렌드는 ▲초전도 가속관 고성능화 ▲고전하 ECR 이온소스 ▲AI 기반 자동운전 ▲비접촉식 모니터링으로 분류

1 미국

◆ 대형 가속기 프로젝트 기반 기술 고도화·응용 확장 및 융합 생태계 구축

- (기초연구 인프라 기반 구축) 미시건주립대 FRIB은 다각적 기술 업그레이드 추진
 - 2025년 3월 우라늄 빔 가속으로 20 kW 출력 달성을 성공 후 400 kW 출력 달성을 목표로 추가 예비 가속모듈(cryomodule) 도입
 - 표적 및 charge stripper/selector 개선, 빔 손실 제어, ML 기반 자동화 제어 시스템 등 기술 개발 실시하고 빔 에너지는 200 MeV/u에서 400 MeV/u까지 향상하는 업그레이드 추진
 - 초전도가속관* 55개 및 가속모듈 11개(설치공간 80m) 필요 예상
 - * 644 MHz, β 0.65, 5-cell



| FRIB 시설(가속기) 조감도 |

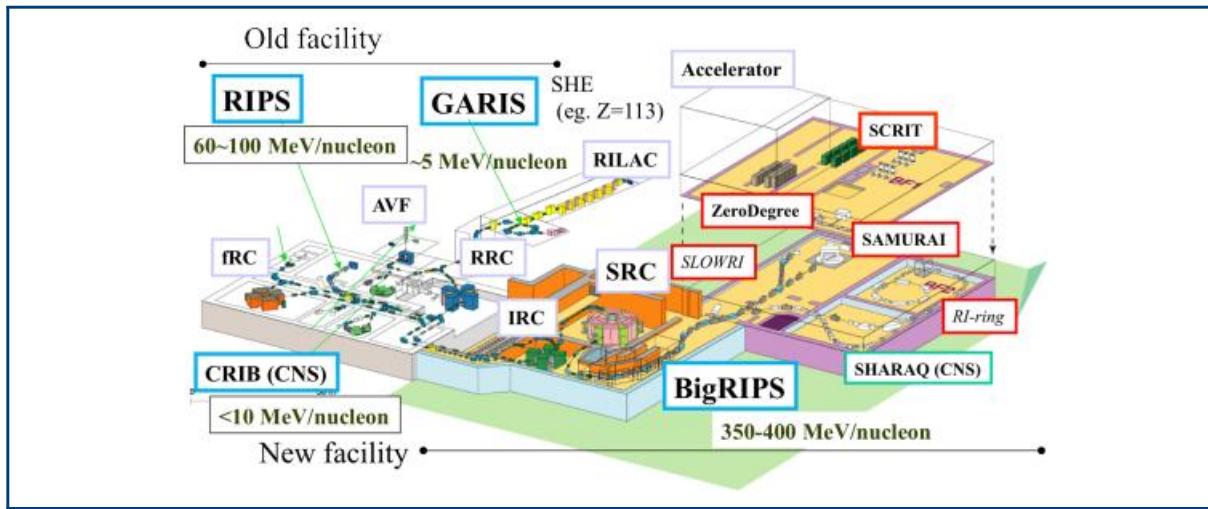


- (DOE 주도 기술개발 투자) HRS사업 승인 및 사업 성공 시 분리기술의 비약적 향상 기대
 - 2025년 2월 HRS 사업의 HTBL 구성요소에 대해 CD-2/3 승인 발표
 - 총 4,970만 달러 규모의 투자를 통해 성공 시 중성자-파인 희귀동위원소 분리 효율을 최대 100배 개선 기대
- (응용 가속기 확장) EIC사업승인 하여 기존 시설을 재사용한 핵심 가속기 연구개발 착수
 - 2024년 DOE는 BNL의 EIC에 CD-3A 승인
 - ※ RHIC 인프라를 재활용하며 Crab Cavity(197/394MHz), SRF 가속관, 하드론 냉각등 핵심 가속기 기술 개발 단계 진입
- (ML/AL 기반 운전 고도화) FRIB와 RHIC 모두 빔 튜닝, 이상감지, 빔손실 최소화, 빠른 운전모드 전환, 고출력 가용시간 확대를 위한 ML/AL 기반 운전 최적화 등 실제 적용
- (산업·의료 응용 확장) 메이요클리닉 탄소이온 치료센터는 2025년 개관, 2027년 양성자 치료, 2028년 탄소이온 치료를 목표로 임상 단계 진입

2 일본

◆ 중이온가속기 성능과 응용 범위를 단계적으로 개발

- (기초연구 기반 강화) RIKEN의 RIBF는 빔 출력과 안정성 향상을 목표로 성능 개선 진행
 - 세계 최고 성능의 중이온가속기 RIBF는 최근 빔 출력범위 10–20 kW에 도달
 - 빔 세기를 20배 향상시키는 성능개선 프로젝트를 추진 중이며 스트리핑 효율(기존 5%) 한계를 극복하기 위한 CSR(Charge Stripper Ring) 개발을 병행
 - 자석 전원, 진공 장비, 빔 진단장치 증가로 복잡해진 운전 환경에 대응하기 위해 제어 시스템 개선 및 빔 모니터링 고도화가 추진
- (의료응용 고도화 및 기술 확장) 국립방사선의학연구소의 HIMAC은 탄소이온 치료 시스템의 소형화와 정밀화를 중심으로 의료용 중이온가속기 고도화를 추진
 - 800 MeV/u 탄소이온 싱크로트론, 3D 스캐닝, 초전도 회전 간트리를 갖춘 차세대 치료 시스템을 운영
 - 최근에는 장비의 소형화·정밀화를 목표로 한 차세대 치료 시스템 기술개발이 진행



| RIBF 시설(가속기) 조감도 |

3 중국

◆ 중이온가속기는 의료용 탄소이온 상용화, HIRFL 성능 강화, LEAF 운전 개시, HIAF 시운전 예정 순서로 개발

- (의료 상용화) 2020년대 초 중국은 자국 기술로 개발한 첫 탄소이온 치료 시스템(중이온 싱크로트론, 둘레 56.2m)을 임상 적용 및 미국·독일·일본에 이어 세계 4번째로 관련 기술 상용화
- (기존 연구시설 고도화) HIRFL*은 수소부터 우라늄까지 모든 이온의 가속이 가능한 시설로, 지속적인 기술 업그레이드로 안정적인 실험연구 기능을 강화
 - * HIRFL: Heavy Ion Research Facility in Lanzhou
 - 신규 입사기 추가, 스토리지 링의 냉각기술 고도화를 통한 잠재 역량 강화
- (신규 연구시설 착수) 2024년 12월 운전을 개시한 LEAF(Low Energy Accelerator Facility) 란 저에너지*·고강도** 중이온가속기로 핵반응 연구와 방사능 소재 평가에 사용 예정
 - * RFQ 기반 mA급 고전하 이온 연속빔 운전
 - ** 45GHz 초전도 ECR 이온원을 활용하여 $^{49}\text{Bi}^{35+}$ 이온을 $350 \mu\text{A}$ 출력까지 인출
- (차세대 대형시설 완성) 2025년 말 시운전 예정인 HIAF는 중국 내에서 가장 높은 에너지를 갖는 중이온가속기 시설로 현재 구축 중이며 여러 장치로 구성
 - 45 GHz 초전도 ECR 이온원, 우라늄을 17 MeV/u까지 가속하는 초전도선형가속기
 - 이 시설은 우라늄을 최대 800 MeV/u까지 가속하는 Booster 싱크로트론, 자기강도 $B\rho \approx 25 \text{ Tm}$ 의 고정밀 질량 스펙트로미터 시스템, 둘레 약 277 m의 Spectrometer Ring으로 구성

- 기초과학 연구 및 다양한 응용 분야에서 활용 확대 전망



| HIAF 종이온 가속기 건설현장 |

4 캐나다

◆ TRIUMF 사이클로트론을 기반으로 가속기 기술 및 희귀동위원소 연구 역량 단계적 고도화

- (TRIUMF 사이클로트론 구축 및 운영) TRIUMF는 세계 최대 규모의 520 MeV 양성자 사이클로트론을 보유 중이며 핵물리, 핵의학*, 재료과학, 대체물질 연구 등 여러 분야 활용

* 의료용 동위원소 생산



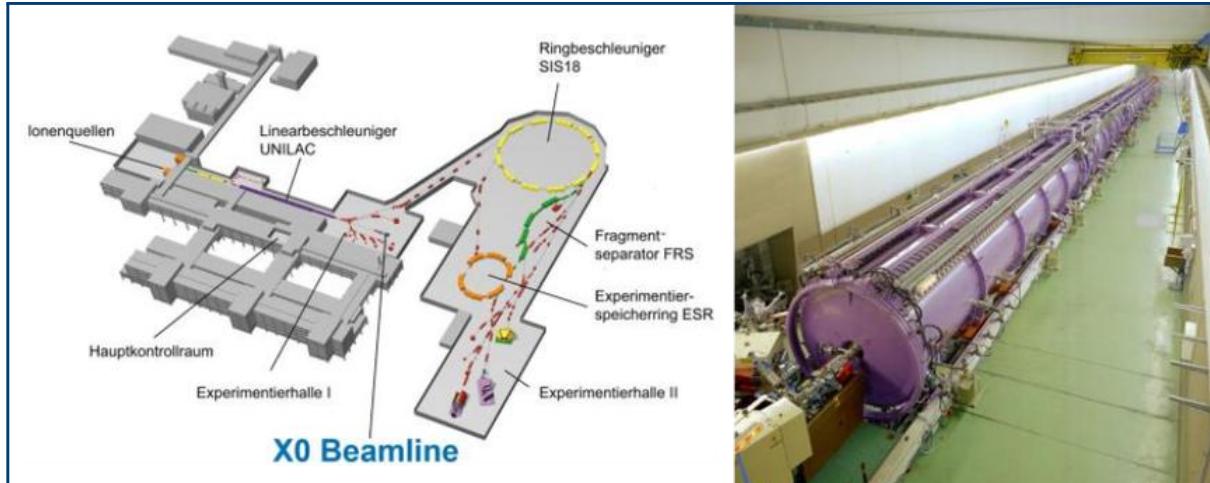
| RIBF 시설(가속기) 조감도 |

- (ISAC-II 초전도 선형가속기 구축) 8기의 초전도가속모듈과 40기의 QWR 가속관을 포함한 ISAC-II 초전도 리니악을 완공하고 희귀동위원소 실험 및 핵구조 연구 성능 확장
- (ARIEL* 프로젝트 추진) 3기의 초전도가속모듈과 5기의 9-cell 초전도가속관을 갖춘 전자 초전도 선형가속기 구축을 통한 동위원소 생산 및 가속기 기반 연구 확장과 연구·교육 협력화
* ARIEL: Advanced Rare Isotope Laboratory
- (CANREB¹⁷) 시스템 가동) ARIEL 프로젝트의 일환으로 도입된 전하 증식 시스템
 - 동위원소 빔을 높은 전하 상태로 변환한 뒤 ISAC에서 재가속할 수 있도록 효율 향상

5 독일

■ GSI·FAIR를 중심으로 중이온가속기 연구의 범위를 과학·의료·산업 전반으로 확장

- (GSI 및 FAIR 중심 인프라 확충) 독일은 GSI*와 차세대 대형 연구시설 FAIR**를 중심으로 중이온가속기 기술 개발 추진
 - * GSI(Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung)
 - ** FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)



| GSI 가속기 시설(左) / 범용 선형가속기(右) |

- (SIS100 및 Super-FRS용 초전도 자석 고도화·양산) 초전도 자석 고도화 및 양산, GSI 인프라 업그레이드, 첨단 검출·레이저 가속 기술 연구 등 다층적 기술개발 통합 추진
 - FAIR 프로젝트의 핵심인 SIS100 싱크로트론과 Super-FRS 운영을 위해 초전도 자석의 성능 향상 및 대량 생산 진행
 - 기존 GSI 인프라 업그레이드, 첨단 검출·레이저 가속 기술 연구 등 다층적 기술개발 병행

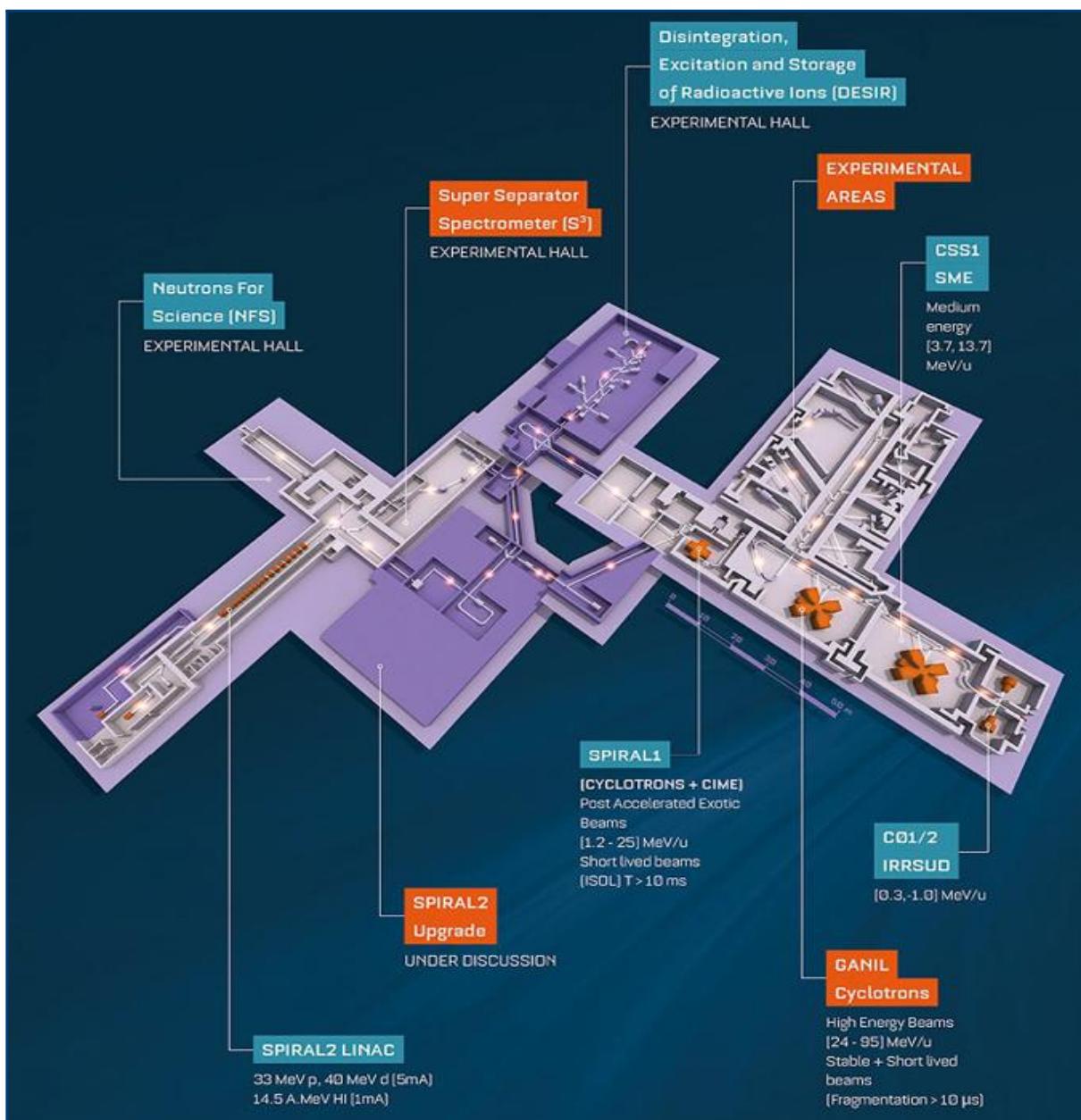


- (Super-FRS용 고성능 입자 검출기 개발) GEM-TPC 기반 입자검출기 개발을 통한 Super-FRS 시스템의 정밀도 및 데이터 신뢰성 향상
 - GEM-TPC 기반 입자검출기개발, 고강도·다핵종 빔 환경에서 안정적 입자 궤적 추적·입자 식별 구현
 - ※ 이는 Super-FRS 시스템의 정밀도와 데이터 신뢰성 향상에 크게 기여
- (첨단 응용기술 확장) 펠스형 전자렌즈 및 전자-이온 분광기술 도입을 통한 의료·재료·핵반응 등 응용 연구 영역 확대
 - 탄소보다 무거운 이온에 FLASH 효과를 적용하는 세계 유일의 연구 수행
 - 빔의 집속·안정성을 정밀 제어할 수 있는 펠스형 전자렌즈 기술과 전자-이온 충돌 분광 기술 도입 및 의료·재료·핵반응 실험 등 응용 연구 영역을 폭넓게 확장

6 프랑스

■ 초전도 선형가속기 구축 및 시운전 완료, ML 기반 제어기술 연계 확장, SPIRAL1 업그레이드와 NEWGAIN 프로젝트를 통한 종이온 가속 성능 고도화

- (SPIRAL2 구축) 초전도 선형가속기 기반 종이온가속기 구축을 통한 고강도 빔 구현 및 고에너지 입자 가속 기반 확립
 - 26기의 QWR 가속관으로 구성된 초전도 선형가속기 기반 종이온가속기
 - ※ 기존 사이클로트론보다 높은 빔* 강도 구현
 - * 양성자·중성자 빔은 최대 33(20) MeV/u, A/Q ≤ 3, 종이온은 최대 14.5 MeV/u까지 가속할 수 있도록 설계
- (시운전 및 빔 성능 검증) H^+ , He^{2+} , D^+ 빔 시운전을 통해 $A/Q=3$ 종이온을 14.5 MeV/u (약 2 kW)까지 안정적으로 가속, 99% 이상의 빔 전송률로 고출력 운전 안정성 입증
- (운전 제어 및 자동화 기술 고도화) 극저온 시스템 제어에 머신러닝 기반 모델링을 도입하여 자동 열 부하 보상, 안정적 RF/빔 작동 유지, 실시간 열 부하 관측 기능 확보
- (연계 실험시설 확장 및 활용) SPIRAL2는 NFS, S³, DESIR 등 다수의 실험시설과 연계되어 핵물리, 응용물리, 중성자 과학, 핵의학 등 연구 활용 확대
- (후속 업그레이드 및 신기술 개발) SPIRAL1 업그레이드 및 NEWGAIN 프로젝트를 통한 금속·희귀 핵종 공급 능력 향상과 무거운 이온 가속 성능 고도화 추진
 - SPIRAL1 업그레이드와 NEWGAIN 프로젝트를 통해 FEBIAD 이온 소스·ECR 전하증식기·초전도 ECR 이온 소스·RFQ를 도입
 - 다양한 금속 및 희귀 핵종의 공급 능력을 향상하고 $A/q=7$ 수준의 무거운 이온까지 가속할 수 있도록 성능 고도화

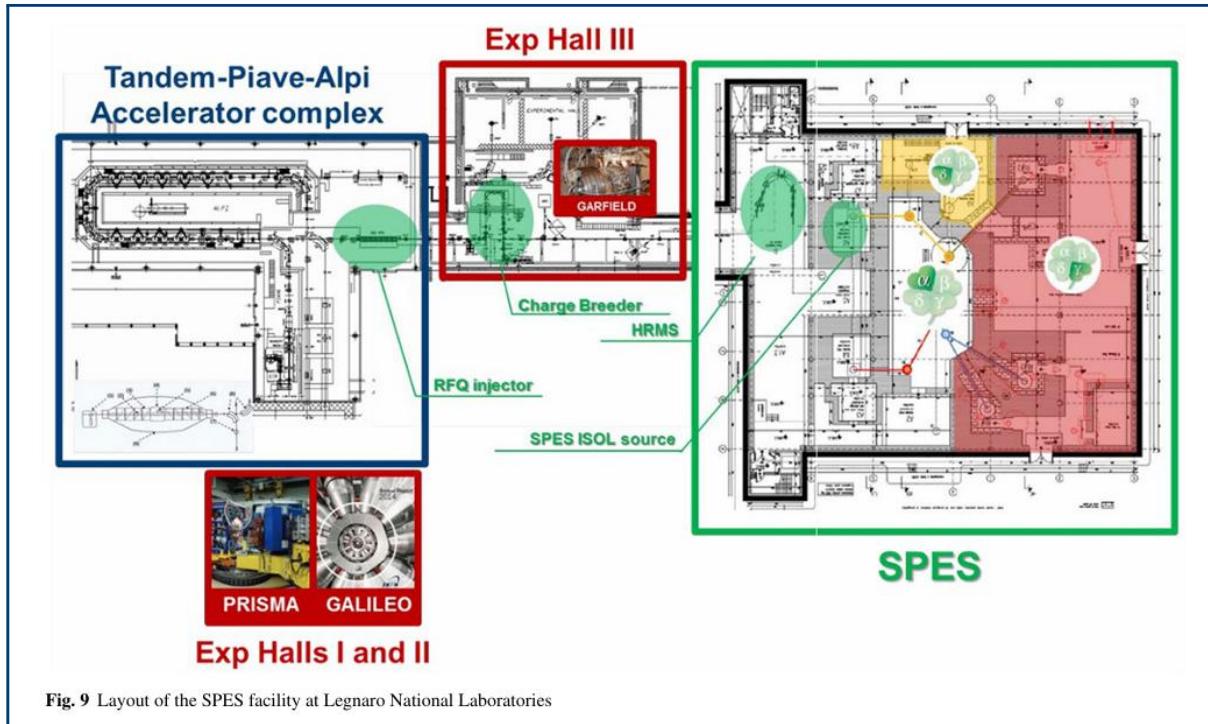


| SPIRAL 가속기 시설 |

7 이탈리아

■ 기초연구-의료응용 연계 중이온가속기 기술 생태계 고도화

- (SPES 구축 및 초기 운) P70 사이클로트론 설치 및 UCx 표적 조사에 따른 희귀 동위원소 생산 성공을 통한 RIB 생산 기술 확보와 SPES 프로젝트 본격화
 - INFN-LNL은 2016~2017년 P70 사이클로트론을 설치하고 H^- 이온 빔(35~70 MeV, 최대 750 μ A)을 UCx 표적에 조사해 희귀 동위원소 생산에 성공



| SPES 가속기 시설 |

- (ISOL 방식 기반 희귀동위원소 생산 및 재가속) 가속 성능 향상과 동위원소 빔 품질 개선 추진
 - SPES는 ISOL방식으로 생산된 희귀동위원소를 ALPI 초전도 선형가속기를 통해 재가속*하는 Phase 2진행
 - * 재가속 조건 : $\geq 10 \text{ AMeV}$, A130 영역
 - 이후 Phase 3~5 단계로 업그레이드를 추진, 가속 성능 향상과 동위원소 빔 품질 개선
- (핵물리 실험 장치 확장) 핵물리·핵반응 연구를 통한 SPES 후속 정밀분석 및 핵구조 연구 기반 강화
 - 카타니아 연구소(이하 INFN-LNS)는 K800 초전도 사이클로트론과 MAGNEX 대수용성 자기 스펙트로미터를 핵심 장비로 활용하여 고정밀 핵물리 실험과 핵반응 연구 수행
- (의료 응용 확장) 과학 연구-기술 개발-의료 응용으로 이어지는 중이온가속기 기술 응용 생태계 조성
 - 국가암입자치료센터(CNAO¹⁸)는 양성자와 탄소이온 치료를 통합 운영하는 의료용 가속기 시설

18) SPES 및 INFN의 연구성과를 임상·의료 분야로 연계하는 허브 역할

4. 국제협력 동향

❖ 미국은 FRIB와 EIC를 중심으로 중이온 및 전자이온가속기 분야의 국제 공동연구와 글로벌 협력 플랫폼 구축 선도

- (미시간주립대학 FRIB) 국제 공동실험 참여를 통한 협력 기반 구축 및 중이온가속기 운영·성능개선 기술 협력 강화
 - 2021년 첫 사용자 실험 제안에 30개국 130개 기관, 1,500여 명의 연구자가 참여하며 국제 협력 기반 구축
 - 프랑스, 이탈리아·일본·캐나다·중국·한국 등과 중이온가속기 운영·성능개선 기술 협력강화



| 美 FRIB과 佛 CNRS간 협력 MOU 체결식 |

- (브룩헤븐연구소 EIC) 다국적 연구기관 참여를 통한 미국 중심 글로벌 협력 플랫폼 조성
 - EIC의 설계와 제작에는 전 세계 20여개 기관이 참여, 이용자 그룹은 40개국 297개 기관, 약 1,500명 규모

❖ 일본은 RIBF 기반 국제 공동연구 및 IFMIF 프로젝트 협력을 통한 중이온가속기 기반 핵융합 재료시험시설 구축 추진

- (이화학연구소 RIBF) RIBF는 국제 공동연구 플랫폼, ECR 이온 소스·Charge Stripper·초전도가속기 등 성능 향상을 위한 공동기술협력 추진



- (국제 핵융합 협력, IFMIF) 일본과 유럽이 함께 추진하는 대규모 협력 프로젝트, 종이온 가속기를 이용한 핵융합용 재료 시험시설 개발



| RIKEN-BNL 협력 MOU 연장 체결식 |

❖ 중국은 IMP 중심의 HIAF 핵심 장치 공동개발과 SRC 기반 국제 공동연구 플랫폼 고도화

- (HIAF 중심 국제협력 기반 구축) IMP는 해외 관련 기관과의 협업을 통해 핵심 가속기 장치의 R&D, 시제품 설계/제작, 실험 방법 개발 공동연구 추진 및 HIAF를 국제 연구 플랫폼 조성
- (국내 네트워크 통합 강화 및 국제 비교연구 확대) 자국 내 종이온가속기* 네트워크를 연계하고, 해외 연구기관**과 협력하여 핵자 단거리 상관 반응 실험과 데이터 비교연구 수행

* IMP-HIRFL-LEAF-HIAF 등

** 미국 JLab과 일본 RIKEN 등

❖ 캐나다는 TRIUMF를 기반으로 국제 공동연구, 기술교류, 인력양성, 기술이전 등을 통해 글로벌 협력 강화

- TRIUMF는 국제 연구 네트워크의 중심 역할을 수행하며 다양한 선진 시설을 기반으로 기술 교류, 공동연구, 데이터 인프라 구축, 인력 양성
 - 매년 40여 개국 1,000여 명의 연구자와 협력 ALC 가속기 물리, 핵의학, 재료과학 분야에서 국제 인력 교류와 공동 교육 프로그램을 운영*함으로써 체계적인 인재 양성 네트워크 구축
 - * University of British Columbia, University of Victoria, CERN Summer Student Program, RIKEN International Program등이 해당
 - 초전도 가속기 기술 분야에서 독일 DESY와 미국 Fermilab과 협력해 9-cell 초전도 가속관 제작 기술을 공동 개발, 국제 협력 기반 기술 고도화 추진



| 加 TRIUF와 佛 CNRS간 협력 MOU 체결식 |

▣ 독일은 FAIR 국제 컨소시엄을 기반으로 한 중이온 과학 연구 협력 네트워크 조성

- 2010년 뷔스바덴 협약을 통해 핀란드, 프랑스, 인도, 폴란드, 루마니아, 러시아, 슬로베니아, 스웨덴 등과 함께 국제 컨소시엄 형태로 구축
- 장비 제작, 실험 프로그램 운영, 정밀 측정 기술, 레이저 기반 가속 연구 등 다양한 국제 협력 활동으로 중이온 과학 분야의 핵심 허브 역할 수행

▣ 프랑스는 SPIRAL2와 IN2P3를 중심으로 국제 협력과 응용연계를 강화하며 중이온 가속기 분야의 글로벌 허브로 역할

- GANIL의 SPIRAL2를 중심으로 중이온가속기 분야의 국제화를 추진하며 다수의 국가 및 연구기관과 기술·실험 협력을 확대
- IN2P3는 핵·입자물리 연구 조정과 국제협력 강화를 통한 과학기술 발전 촉진
 - IN2P3는 1971년 설립된 CNRS 산하 연구소로 프랑스 핵·입자물리 연구의 조정 기관이자 국제협력 거점
- 기초과학부터 의료·에너지 응용까지 연계해 과학기술 발전에 기여



▣ 이탈리아는 SPES 중심의 중이온가속기 연구를 통한 다면적 협력 구조 구축 및 유럽·글로벌 희귀동위원소 연구 허브 조성

- 세계 유수 연구기관^{*}과의 협력을 통해 첨단 가속기 및 방사성 이온 빔 기술을 공동 개발
 - * 라피에르 에너지 연구소(LEA), 유럽 원자핵 공동연구소(CERN), 미국 오크리지 국립연구소(ORNL), 일본 고에너지 가속기연구기구 (KEK) 등
- KEK와는 핵공진기술용 RF 공동 개발, CERN과는 고강도 프로톤 빔과 ISOL 기술의 기술 협력
- 유럽 원자핵물리학 평가 기구인 NuPECC는 SPES가 유럽 내 중이온 가속기 및 희귀동위원소 연구의 핵심시설로서 기능하도록 지원

III

국내 동향

1. 정책 동향

우리나라를 중이온가속기 RAON을 국가 전략 인프라로 구축하고, 단계적 성능 고도화와 국제 연구 협력화, 산업·의료 응용 확대, 핵심 기술 자립을 통해 세계적 경쟁력 강화

- (국가 전략 인프라) 중이온가속기 RAON은 연구시설을 넘어 국가 과학기술정책의 핵심 인프라이자 산업·의료 응용 및 국제 협력까지 포괄하는 종합 대형 국책시설로 구축·운영
 - (단계적 구축 및 성능 고도화) 2022년 1단계 구축으로 기초연구 기반을 마련하고, 2단계 구축^{*}을 통해 세계 최고 성능의 가속 시스템^{**}을 완성할 예정
- * 2단계 : 고에너지 가속 구간
** 시스템 스펙 : 200 MeV/u, 400 kW급
- (희귀동위원소 과학의 국제 협력 조성) ISOL+IF 결합 시스템을 기반으로 새로운 연구 영역을 개척 및 개방형 이용자 프로그램 확대를 통해 해외 연구자 유입과 국제 공동연구 활성화
 - (산업·의료 응용 확대) 가속기 기술을 활용한 첨단소재 연구, 방사선 의학, 동위원소 생산 등 응용 분야를 적극 발굴하여 산업 혁신과 국민 삶의 질 향상에 기여
 - (기술 자립 및 국제 경쟁력 강화) RAON 구축·운영 과정에서 확보한 핵심기술^{*}의 국산화 성과를 바탕으로 글로벌 기술 경쟁력과 관련 산업 생태계 강화

* 초전도가속기, 빔 제어, 고진공, 전자석 등



2. 시장·산업 동향

▣ RAON 구축을 통해 가속기 산업 생태계를 조성하고, 기술 자립과 해외 진출 기반을 확보하며, 종이온 빔의 산업·의료 응용 확장과 인력 양성 강화를 통해 신산업 성장 동력 마련

- (산업 생태계 조성) RAON이 단순한 연구시설을 넘어 국내 산업체가 참여하며 종이온 가속기 관련 생태계 형성
 - 종이온가속기 RAON 구축 과정에서 초전도가속기를 비롯한 주요 핵심 장치를 국내 산업체가 직접 제작, 가속기 관련 산업 생태계의 성장과 기술 내재화 기반을 견인
- (기술 자립 및 해외 진출) 산업체가 기술을 내재화하고, 국제 수준의 제작 역량 확보하여 수출 기반 형성
 - 국내 기업이 해외 연구기관과 공동으로 초전도 가속관·전자석을 개발·제작해 국제 수준의 기술 경쟁력과 해외 진출 기반 확보
- (응용 확장 및 신산업 창출) 확보된 기술을 활용해 핵·재료·의료 등 신산업으로 확장
 - 종이온 빔 기술은 핵·천체물리 연구뿐 아니라 재료과학, 의학용 동위원소 개발, 방사선 응용 산업 등 다양한 분야에서 신산업 육성의 기반 기술로 활용
- (인력 양성 및 협력 강화) 지속적 발전을 위해 전문 인력과 협력 네트워크 구축
 - 첨단 가속기 기반교육 및 연구 협력 체계를 통해 전문 인력 양성과 혁신 역량 강화를 지속 추진

▣ 종이온가속기 기술은 의료용 동위원소 개발에서 시작해 반도체·소재 산업, 에너지·환경, 우주·국방 분야로 확장되며 국가 전략산업 전반에 걸쳐 파급력 발휘

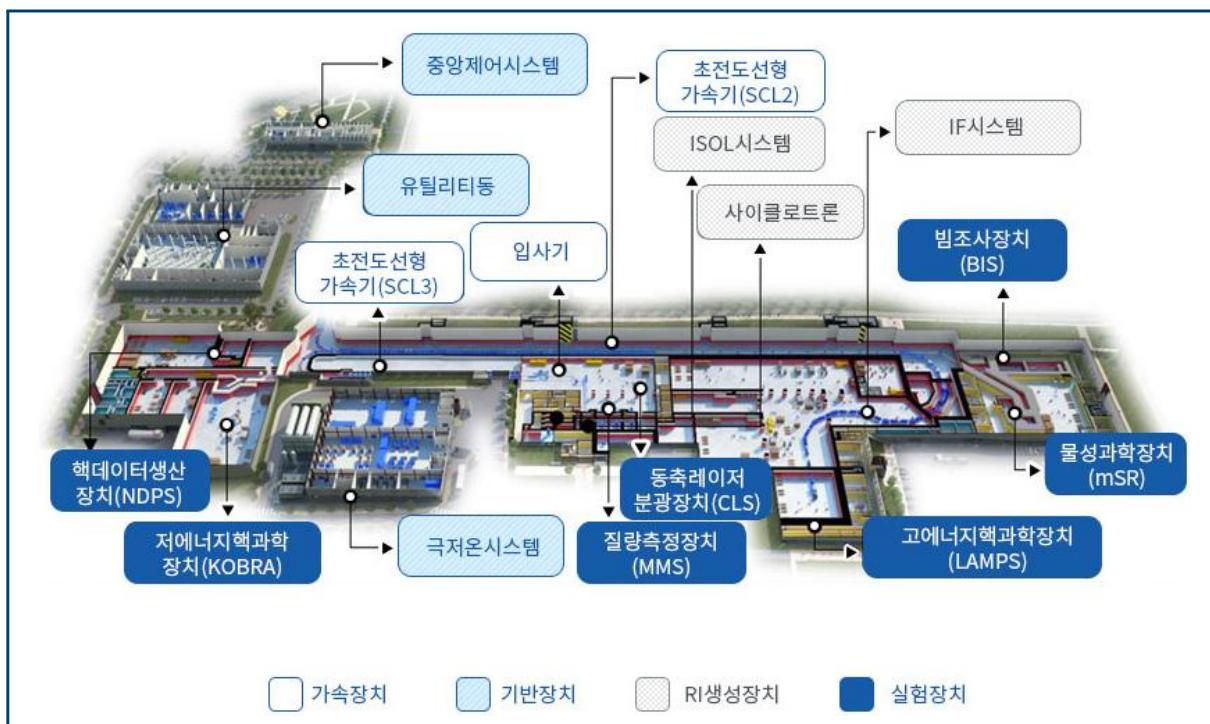
- (의료 분야) 희귀동위원소·치료용 동위원소 개발은 가속기 연구의 1차 산업화 성과이자 가장 직접적인 응용 분야
 - 희귀동위원소 기반 핵의학용·치료용 동위원소 개발 및 생산을 통해 정밀·표적 암 치료 기술과 차세대 방사선 의약품 개발 고도화
 - * ^{211}At , ^{225}Ac , ^{213}Bi 등
- (소재·반도체 분야) 의료 응용에서 발전한 가속기 빔 활용 기술이 반도체·소재 분야로 확장되어 국가 산업 경쟁력과 직결되는 상업·산업 분야에 활용
 - 종이온 빔을 이용한 이온빔 분석(IBA)을 통해 나노·반도체 소재의 미세 구조 특성 평가 및 신소재 합성 연구 수행 가능
 - 우주 방사선 환경 모사 실험으로 반도체·항공우주 부품의 신뢰성·내성 평가 수행

- (에너지·환경 분야) 중성자 반응 데이터와 폐기물 동위원소 기술은 에너지 및 환경 문제 해결 핵심 정책으로 추진
 - 양성자 및 중이온 빔을 활용한 중성자 반응 단면적 측정으로 차세대 원자로·핵융합로 설계에 필요한 핵 데이터 확보
 - 폐기물 처리용 동위원소 개발 등 친환경·에너지 융합 연구 분야로 응용 확대
- (우주·국방 분야) 가속기 기술이 고성능 신소재, 차폐 기술, 방사선 내성 설계로 응용되어 국가 전략기술·안보 분야로 파급
 - 중이온 빔 기술을 활용한 고성능 차폐·레이더·센서용 신소재 개발 등 우주·국방 분야의 첨단 소재 연구와 시스템 신뢰성 향상에 활용

3. 기술개발 동향

- ◆ 한국은 RAON을 구축하고, 저에너지 구간의 실험 운영성과를 기반으로 고에너지 구간 초전도가속기 개발 및 국제협력을 통해 기술 고도화 추진
- (RAON의 기술 개요) RAON은 ISOL방식과 IF방식을 결합한 세계 최초의 복합형 희귀 동위원소 가속기로, 기초 핵물리 연구와 산업·의료 응용 연구를 동시에 수행
 - IF 시스템은 고에너지 중이온을 표적에 충돌시켜 희귀동위원소를 생성하는 방식
 - ※ 양성자부터 우라늄^{*}까지 폭넓은 범위의 입자를 가속할 수 있는 고에너지 구간 초전도 선형가속기(SCL2) 기반 시스템
 - * 우라늄 빔은 200 MeV/u, 400 kW까지 가속이 가능
 - ISOL 시스템은 사이클로트론을 이용해 고전류^{*} 양성자 빔을 무거운 표적에 조사하여 희귀 동위원소를 생성·분리, 이를 초전도선형가속기^{**}로 재가속하여 희귀동위원소 빔 생산
 - * 70 MeV, 700 μ A
 - ** SCL3·SCL2
- (RAON의 구축 및 운영 성과) 희귀동위원소 전주기 실험체계 완성과 개방형 이용자 프로그램 운영을 통한 국가 전략형 연구 인프라 전환
 - 2023년 5월 저에너지 선형가속기에서 첫 빔 인출 성공
 - 현재는 저에너지 초전도선형가속기(SCL3)를 중심으로 저에너지 실험시설(KoBRA, NDPS)에 빔을 제공하며 단계적 성능 고도화를 추진
 - 2024년 제1차 활용프로그램위원회(PAC)를 개최해 5건의 이용자 빔 실험을 시범 운영
 - 2025~2026년 제2차 PAC을 통해 정규 유저 서비스 모드로 전환

- 2024년 5월에는 ISOL에서 생성·분리한 반감기 59.1초의 희귀동위원소 ^{25}Na 를 초전도가속기 SCL3으로 16.4 MeV/u까지 가속하고, 분광장치로 전송하는 데 성공
- 2025년에는 사이클로트론 양성자 빔 직접 조사 실험을 포함한 다양한 이용자 실험을 계획하고 있으며, Na, Mg, Al 등 희귀동위원소 빔 제공 시스템 구축을 완료
- (SCL2 개발 및 국제 협력) 초전도가속기 기술 실증 및 국제 공동개발을 통한 기술 표준화와 검증·확산 기반의 기술 자립 전환점 마련
 - SCL2는 RAON의 핵심 구성요소로, 희귀동위원소 과학 연구의 고에너지 실험을 담당
 - SCL2는 현재 2단계 사업*으로 초전 가속모듈 시제품 개발을 위한 선행 연구 진행
 - * 2022~2027
 - 국제 기술협력을 통해 고에너지 가속 구간의 설계·제작·검증 역량을 강화하고, 향후 400 kW급 고출력 중이온가속기 시스템 완성을 목표로 기술 고도화 추진
 - ※ 미국 미시간주립대 FRIB과 기술협력을 통해 $\text{High-}\beta$ (=0.29) HWR 가속관 및 튜너·커플러 제작 공동 수행
 - ※ 이를 기반으로 가속관 성능 검증과 선행 R&D(SSR1) 결과 비교·분석을 진행



4. 국제협력 동향

▣ RAON은 해외 유사시설과의 공동개발 및 운영 협력을 강화하고 있으며, 이를 통해 국제 공동연구 네트워크를 확장하고 세계 중이온가속기 연구 생태계의 핵심 파트너로 도약

- 중이온가속기는 첨단 융합기술 기반의 대형 연구시설로, 안정적인 구축과 운영을 위해 해외 기관과의 협력이 필수
- 초기 운전 단계의 RAON은 가속기의 안정적인 운영과 빔 성능 향상을 위해 해외 전문가와의 공동 기술검증 및 운영 노하우 공유가 필요
 - 미·일·중·캐나다 등은 축적된 기술력을 보유하고 있어, 교류를 통한 RAON의 성능 향상과 안정화에 기여할 것으로 기대
 - ※ 미국 미시간주립대 FRIB과 초전도가속관 및 주변 장치 공동개발 협력은 향후 SCL2의 핵심 요소기술 확보와 한·미 초전도가속기 공동연구의 기반이 될 전망

▣ RAON의 국제협력은 단순한 기술 도입 단계를 넘어, 공동개발과 국제 개방을 통해 한국이 중이온가속기 기술의 생산자이자 글로벌 연구 생태계의 핵심 파트너 전환 전략 제시

| RAON과 해외기관간 MOU체결 현황 |

국가	기관명	체결 일자	목적 및 협력 분야
미국	페르미연구소 (Fermilab)	'12.06.14 ~'25.12.17	가속기 분야 공동연구, 인력 교류 등
일본	이화학연구소 (RIKEN RNC)	'12.10.16 ~'29.12.04	가속기 분야 공동연구, 실험장치 검증 등 희귀 핵과학 분야 공동 연구 과제 수행
중국	현대물리연구소 (IMP)	'12.11.27 ~'29.4.22	가속기 분야 공동연구, 인력 교류 등
일본	고에너지 가속기연구기구 (KEK)	'13.03.28 ~'30.1.29	가속기 분야 공동연구, 인력 교류 등
일본	동경대부설 핵과학연구소 (CNS)	'13.10.01 ~'29.1.17	실험장치 분야 저에너지 핵과학 실험용 분광장치
중국	고에너지물리연구소 (IHEP)	'14.01.06 ~'29.8.26	가속장치 RF커플러, ECR이온원, RF시스템 등
유럽	핵입자연구소 (CERN)	'14.05.12 ~영구	ISOL표적 및 이온원, EBIS 전하증식기 등
이탈리아	국립핵물리학연구소 (INFN)	'14.06.02 ~'28.11.07	제어시스템, 표적 및 이온원, 원격조정시스템, 가속관 개발 등
독일	TESLA Technology Collaboration (TTC)	'16.02.11 ~탈퇴 시까지	회원기관간 초전도가속기 관련 기술 공유



| RAON 시설을 활용한 IBS-RIKEN간 협력사례 |

IV 결 론

1. 시사점

- ❖ RAON의 구축과 운영 경험은 향후 추진할 대형 연구시설의 기술 안정화, 이용자 중심 운영체계 확립, 핵심기술 내재화로 이어지는 선순환 구조를 정립하기 위한 정책적 방향성 제시
 - 대형 연구시설의 초기 기술 검증과 안정화 과정을 체계적으로 관리하기 위한 국가 차원의 단계적 시운전 및 품질보증 체계(QA) 구축의 필요성
 - RAON은 2023년 5월 저에너지 선형가속기에서 첫 빔 인출에 성공함으로써 기술 실증 단계 통과
 - 현재는 저에너지 초전도 선형가속기(SCL3)를 중심으로 유저 서비스 체계로 전환
 - 이는 한국이 희귀동위원소 연구 인프라를 자립적으로 운용할 수 있는 기반을 확보했다는 점에서 중대한 기술적 의미를 가짐
 - 이 성과가 일회성 실증에 머물지 않기 위해서는, 정부 차원에서 ‘단계적 시운전-성능 검증-품질 보증(QA)’ 체계의 제도화 필요
 - 특히 RAON처럼 복합 시스템을 포함한 대형 시설은 기술 완성보다 운영 신뢰성(Operational Reliability)이 핵심
 - 국가 차원의 표준화된 안정화 절차 및 검증 체계 확립 필요
 - 연구시설의 안정화·운영단계별 전문 인력양성 로드맵 마련 및 정기점검·예방정비 중심의 유지보수 체계 확립의 필요성
 - RAON의 운영 경험 부족으로 초전도가속기·극저온·진공 시스템의 안정화 과정에서 기술 조정 단계가 존재했으며 지속적인 유지보수·운영기술 표준화 · 전문인력 확보가 요구
 - 향후 대형 과학기술 시설의 안정적 운영을 위해 “단계적 시운전과 체계적 유지관리”가 핵심 요소임을 제시
 - 연구시설의 안정화·운영단계별 전문 인력양성 로드맵 마련 및 정기점검·예방정비 중심의 유지보수 체계 확립이 시급



- 이용자 피드백 기반의 성능개선 및 품질관리 시스템 도입과 국제 수준의 운영 안정성 평가체계 구축의 중요성
 - 2024년 시범 빔 운영을 통해 제기된 이용자 요구사항^{*}은, RAON이 기술 중심의 시설에서 이용자 중심 개방형 연구 인프라로의 전환을 추진해야 함을 시사
 - * 빔 전류 최적화, 에너지·전류 정확도 향상, 24시간 안정적 빔 제공 등
- 고에너지 가속구간(SCL2) 기술 확보 및 산업 연계 강화의 필요성
 - 고에너지 가속구간(SCL2)은 RAON 핵융합위원회 연구의 핵심 구성요소
 - 현재 진행 중인 선행 연구를 통해 초전도가속모듈 등 핵심 요소기술 확보 시 향후 2단계 구축사업의 기술 기반이 마련
 - RAON의 기술개발 경험을 토대로, 가속기 관련 핵심요소기술의 산업화 전략과 민·관 기술 협력 모델(산학연 공동개발체계) 구축이 필요
- 'RAON의 구축 및 운영 경험'은 향후 추진할 대형 과학기술시설의 '기술 안정화-이용자 중심 운영-핵심기술 내재화'로 이어지는 선순환 구조를 정립하는데 정책적 교훈을 제공
- 특히, RAON의 기술개발은 단순한 실험시설의 구축을 넘어 국가 가속기 산업 생태계 성장의 방향성과 기술 자립의 필요성을 동시에 시사
- 정부는 이를 기반으로 운영 안정화 체계 확립, 기술 표준화, 산업 확산 전략을 종합적으로 추진할 필요성 존재

◆ 종이온가속기 시설은 국가 전략 산업의 혁신을 견인하는 핵심 인프라로, 민관협력 강화와 산업화·국제화 전략을 통해 과학기술과 산업의 균형성장을 촉진할 정책적 접근 요구

- 종이온 가속기 시설은 다양한 분야에서 활용이 확대, 동위원소 생산과 첨단 소재 개발 등 국가 기술 경쟁력 강화를 견인하는 핵심 인프라로 부상
 - 종이온가속기의 산업적 확장 잠재력을 국가 혁신성장 전략에 연계하고, 의료·소재·에너지 융합 산업의 거점으로 기능할 수 있도록 제도적 지원체계 강화가 필요
- 민간 투자 한계에 따른 산업 생태계 불안정과 유지보수 체계 미흡에 대한 민관 협력 기반 지속화 및 정착이 과제
 - 정부 주도의 대형 가속기 구축 사업은 국내 가속기 장비·시설 산업 생태계 조성의 기반 마련
 - 참여 기업의 지속적 투자 한계로 인해 예비품 제작, 장비 업그레이드, 소프트웨어 유지보수 등이 원활히 이루어지지 못하는 상황
 - 대형 연구시설 운영과 연계된 민간 참여 확대 및 상시 유지보수 지원체계 구축이 필요하고, 정부·연구소·산업체 간의 공동 R&D·기술이전·인력 순환 협력 모델 정착이 요구

- 국산 가속기 부품 상용화 및 국제 협력 강화를 위한 대형 가속기 시설 개방·활용 고도화
 - 가속기 기술과 장비의 산업적 활용이 늘면서, 국산 가속기 부품의 상용화 및 국제 진출을 위한 전략적 접근 필요
 - RAON 등 국가 R&D 기반 대형 가속기 시설을 산업·국제 공동연구용 테스트베드로 개방 필요
 - 가속기 관련 산업의 산업화·상용화·국제화 전략 수립 및 지속가능한 공공-산업 연계 지원 체계 마련 필요

◆ 전략적 기술협력 및 공동운영 모델 구축을 통한 국제 공동연구·운영 표준화와 글로벌 연구 경쟁력 제고

- 대형 가속기의 안정적 운전과 성능 향상은 장기간의 운전 경험과 기술 축적을 전제로 하는 국제 협력 구조가 필수적
- RAON이 본격적인 이용자 서비스 체계로 전환하기 위해서는 운전 경험이 풍부한 해외 전문가와의 지속적 기술교류 및 공동 운영체계 구축이 필요
 - 이를 통해 가속기 운영 안정성 강화와 빔 성능 고도화를 동시에 달성 가능
- 선진 연구기관과의 협력을 통해 운영 노하우와 품질관리 체계 도입, 이용자 요구를 반영한 실험 환경 개선 및 공동연구 체계 구축 병행으로 RAON의 국제적 신뢰성과 연구 경쟁력 상승 가능
- 해외 선진 연구기관과의 전략적 기술협력 및 공동운영 모델 구축이 핵심 과제로, 국제 공동연구·운영 표준화·전문인력 교류를 병행하는 다층적 협력체계 확립 가능

◆ RAON 구축·운영 경험을 기반으로 한 기술 안정화·국제협력·산업화 추진을 통해 국가 과학기술 경쟁력과 전략 산업 혁신 강화 시사

- RAON의 구축과 운영 경험은 향후 대형 연구시설의 기술 안정화, 이용자 중심 운영체계 확립, 핵심기술 내재화로 이어지는 선순환 구조 정립을 위한 정책적 방향 제시
- 중이온가속기는 국가 전략산업 혁신을 견인하는 핵심 인프라로, 민관협력 강화와 산업화·국제화 전략 추진을 통한 과학기술-산업 균형성장 촉진 필요성
- RAON의 본격적 운영을 통한 세계 희귀동위원소 과학연구 중심국 도약 기반 마련 및 산업화·국제화 전략 추진을 통한 과학기술-산업 균형성장 촉진 필요성
- RAON의 본격적 운영을 통한 세계 희귀동위원소 과학연구 중심국 도약 기반 마련



참고문헌

1. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(79\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0370-1573(79)90045-0)
2. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06586-5>
3. 미국 DOE 홈페이지, <https://science.osti.gov/ARDAP/>
4. 미국 미시건주립대 FRIB 홈페이지, <https://frib.msu.edu/>
5. Masakiyo Kitazawa(Kyoto University), “Physics of J-PARC Heavy-Ion Project
6. Ke Wang이외 다수, Accelerator Physics; arXiv:2506.08421 “High-precision Beam Optics Calculation of the HIAF-BRing Using Measured Fields”
7. 중국 CAS 홈페이지, <https://english.cas.cn/>
8. 캐나다 TRIUMF 홈페이지, <https://triumf.ca/>
9. 독일 FAIR 홈페이지, <https://fair-center.eu/>
10. 프랑스 GANIL 홈페이지, <https://www.ganil-spiral2.eu/>
11. 이탈리아 INFN 홈페이지, <https://www.infn.it/en/>
12. https://www.verifiedmarketreports.com/product/medical-heavy-ion-accelerator-market/?utm_source
13. https://marketintelo.com/report/carbon-ion-therapy-market?utm_source
14. https://www.transparencymarketresearch.com/particle-therapy-market.html?utm_source
15. <https://medicaltravelmarket.com/news/mayo-clinic-opens-first-carbon-ion-therapy-center-in-america>
16. <https://www.riken.jp/en/collab/resources/ribf/>