

STI Brief

중이온 가속기

T^{op}
ier Premier international
research Consortium

I 서론 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 결론 35

- 1. 시사점 35

참고문헌 38

I 서론

1. 배경 및 필요성

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

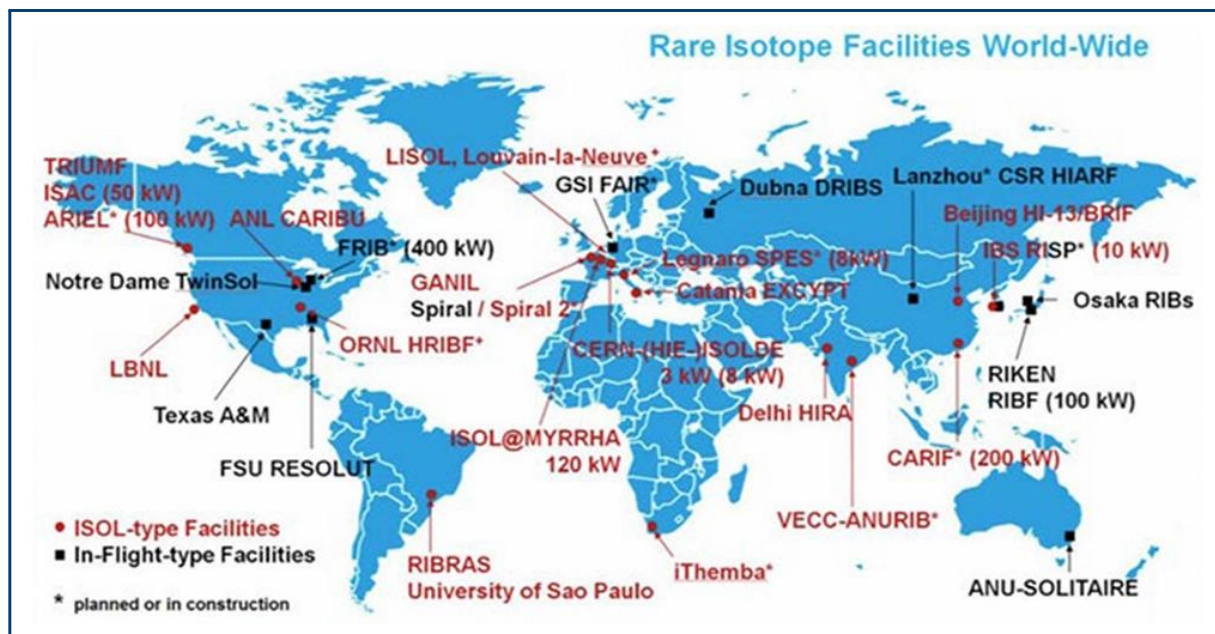
- 1951년 Copenhagen의 Bohr Institute에서 사이클로트론(가속기)을 이용하여 중성자가 풍부한 크립톤 동위원소 실험은 CERN 내 ISOLDE Collaboration* 설립에 중요한 계기로 작용
 - * CERN 국제 핵물리 연구협력체
 - 동 실험은 싱크로사이클로트론(SC)에서 나오는 양성자 빔을 이용¹⁾하여 루비듐 확인에 기여하며 1967년 CERN 내 ISOLDE Collaboration 설립 기반 역할
- 1973년 ISOLDE 시설은 업그레이드를 위해 가동이 일시 중단되었으며, 업그레이드 작업은 SC(Synchro-Cyclotron) 개선과 병행 수행
 - ISOLDE 업그레이드 및 개선 결과, 빔 세기가 $4\mu\text{A}$ 로 향상되었고 이를 통해 ISOLDE 시설의 역량은 대폭 강화
- 1999년 ISOLDE시설은 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>

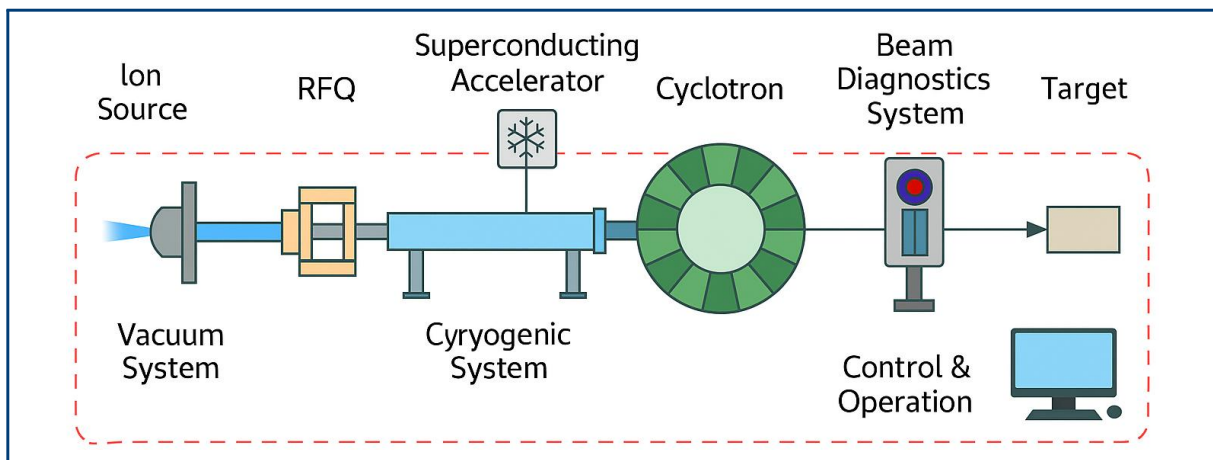
2. 기술의 정의 및 범위

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

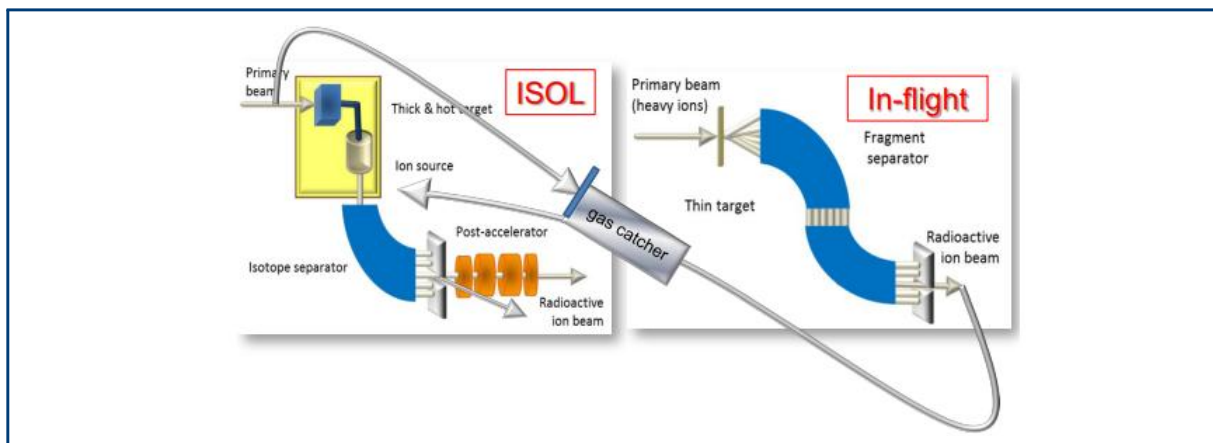
| 중이온가속기의 구성 및 역할 |

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 <div> - 전자 사이클로트론 공명 이온원(Electron Cyclotron Resonance Ion Source, ECR-IS) 多價의 전하 상태를 가진 이온을 안정적으로 생성하는데 뛰어난 플라즈마 기반 이온원 </div>
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, 번칭 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 <div> - 터보분자펌프 : $10^7 \sim 10^9$ Torr 이하의 초고진공 환경을 위한. - 이온펌프, 및 비기화형 게터 펌프 : $10^7 \sim 10^{11}$ Torr 수준의 극초고진공을 위한 크라이오 펌프 </div>
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 냉각된 상태로 주변 장치들과 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, 에미턴스 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, ④실시간으로 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
RIKEN 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 결합 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	• FRIB-BNL을 축으로 핵물리·의학 응용 및 차세대 충돌기 연구 추진
 일본	중이온가속기 기반 융합 연구거점 지정	정부 주도 중이온 가속기 종합정책	• RIBF-J-PARC-HIMAC을 중심으로 기초연구·고강도빔·의료응용 인프라 강화
 중국	중이온가속기 기반 기술 리더십 확보	국가 중이온가속기 전략 프로젝트	• HIAF-LEAF-CiADS-CEPC 연계로 차세대 핵·입자 융합 인프라 조성
 캐나다	TRIUMF 중심의 국가 가속기 연구거점 육성	TRIUMF 기반 융합 연구·혁신체계 구축	• 520 MeV 사이클로트론 기반 융합 연구 인프라 구축
 독일	GSI-FAIR 기반 국제 공동연구 인프라 강화	GSI 주도의 다국적 융합연구 플랫폼	• CBM 실험 중심 극한물질 연구 인프라 구축
 프랑스	중이온가속기 기반 융합·국제협력형 핵심 인프라 육성	GANIL-SPIRAL2 기반 고강도 빔·국제협력 프로그램	• 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	• 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 달성과 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(HIAF^{*})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 분야에서 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 헬름홀츠 중이온연구센터를 중심으로 대형 국제 공동연구시설 FAIR* 프로젝트를 국가 중점 사업으로 추진
 - FAIR는 GSI가 주도하고 '독일 연방교육연구부'와 '헬름홀츠협회'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, 플라스마물리, 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

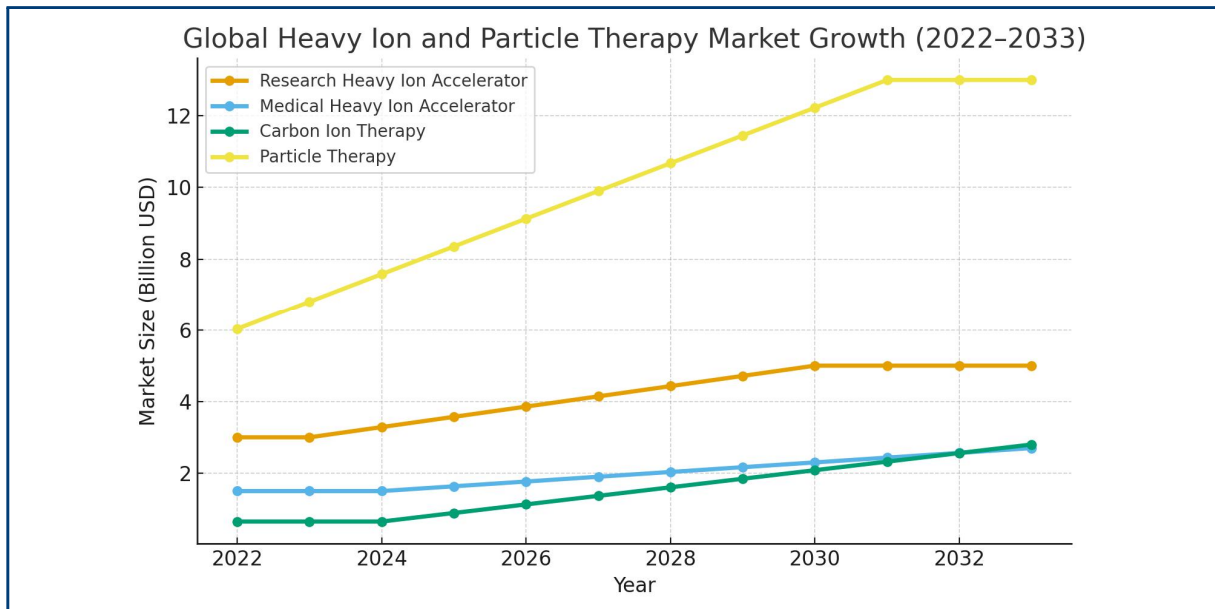
- ※ 2016년 신형 사이클로트론을 도입후 2024년까지 플라즈마 챔버 개선 및 RF 증폭기 교체

- **(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 입자가속기 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 허브로 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
- 산업계와 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

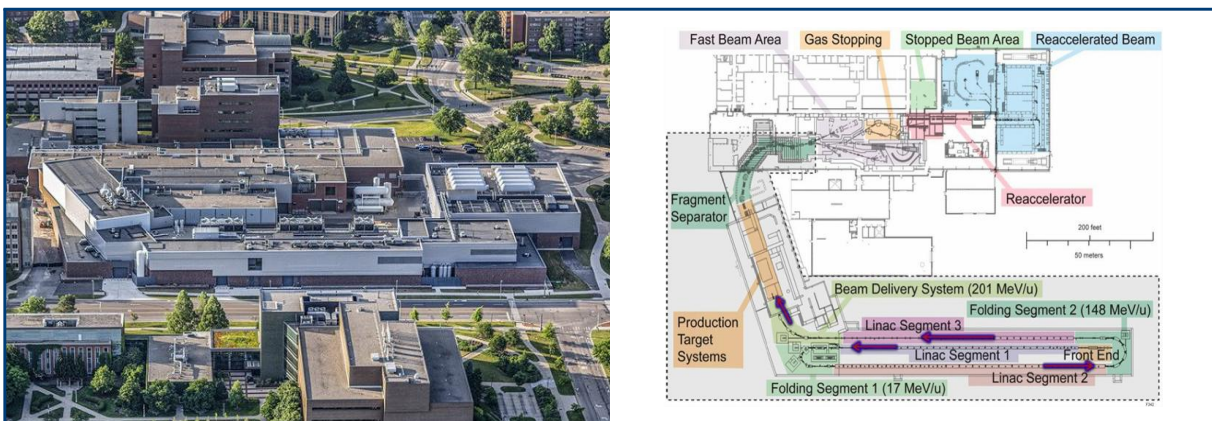
❖ 중이온가속기 기술은 FRIB·FAIR·HIAF·RIBF·RAON·SPIRAL2 등 대형 기초과학 인프라와 의료용 탄소이온 치료의 상용화를 중심으로 혁신 가속화

- 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 달성에 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, $\beta 0.65$, 5-cell



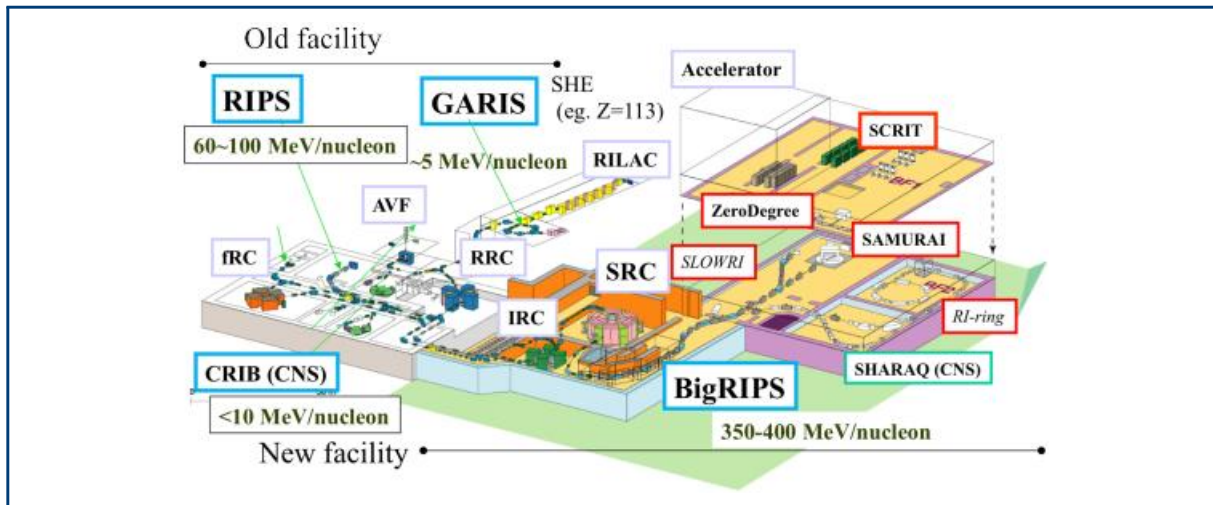
| FRIB 시설(가속기) 조감도 |

- **(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-과잉 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 49Bi35+이온을 350 μ 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 $B\rho \approx 25$ Tm의 고정밀 질량 스펙트로미터 시스템, 둘레 약 277 m의 Spectrometer Ring으로 구성

- 기초과학 연구 및 다양한 응용 분야에서 활용 확대 전망



| HIAF 중이온 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 허브화
* 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

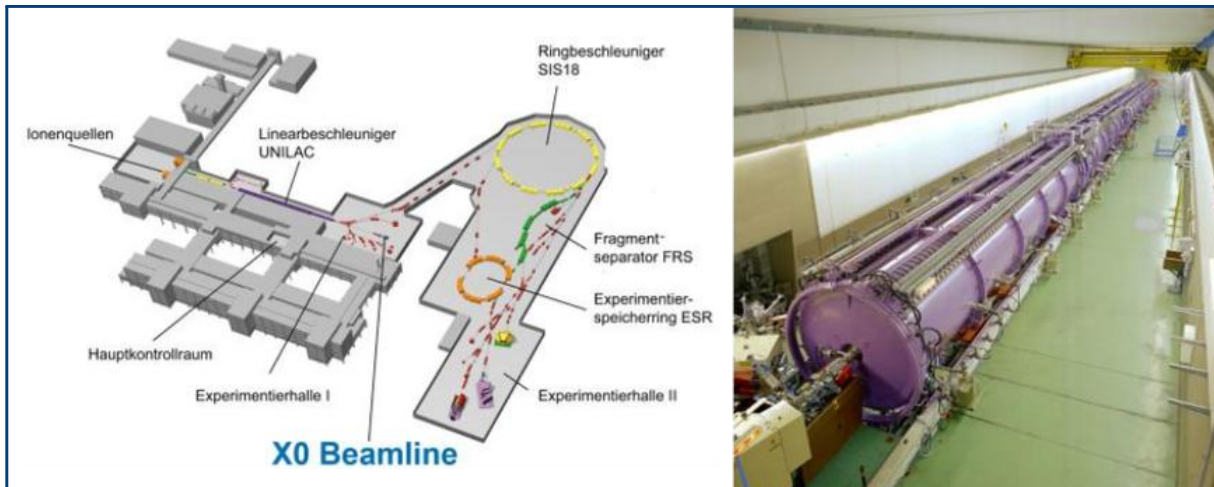
5 독일

❖ 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

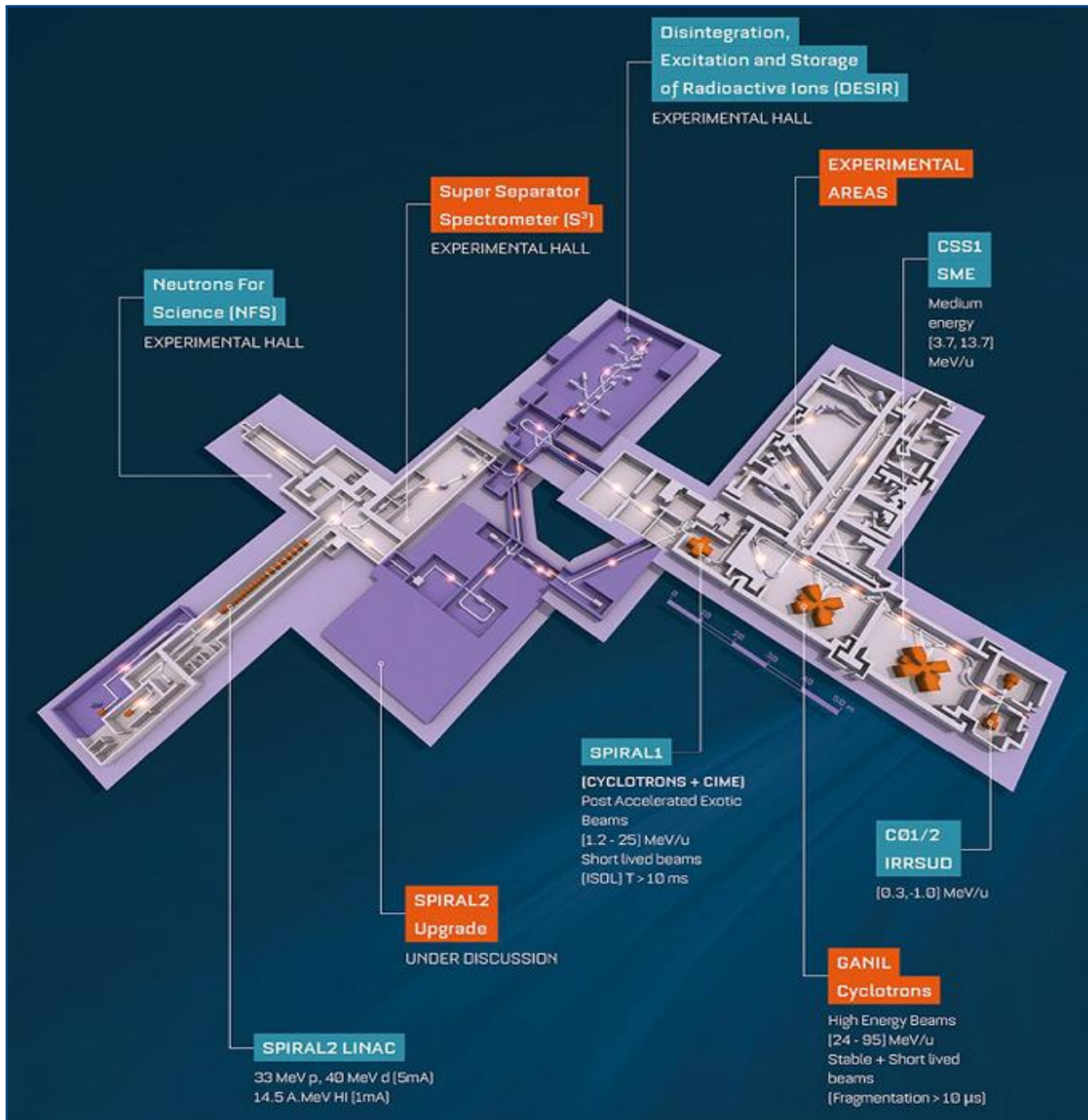
17) Canadian Rare-isotope Beam

- **(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)** 펄스형 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 펄스형 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 중이온 가속 성능 고도화

- **(SPIRAL2 구축)** 초전도 선형가속기 기반 중이온가속기 구축을 통한 고강도 빔 구현 및 고에너지 입자 가속 기반 확립
 - 26기의 QWR 가속관으로 구성된 초전도 선형가속기 기반 중이온가속기
 - ※ 기존 사이클로트론보다 높은 빔* 강도 구현
 - * 양성자·중양자 빔은 최대 33(20) MeV/u, $A/Q \leq 3$, 중이온은 최대 14.5 MeV/u까지 가속할 수 있도록 설계
- **(시운전 및 빔 성능 검증)** H^+ , He^{2+} , D^+ 빔 시운전을 통해 $A/Q=3$ 중이온을 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

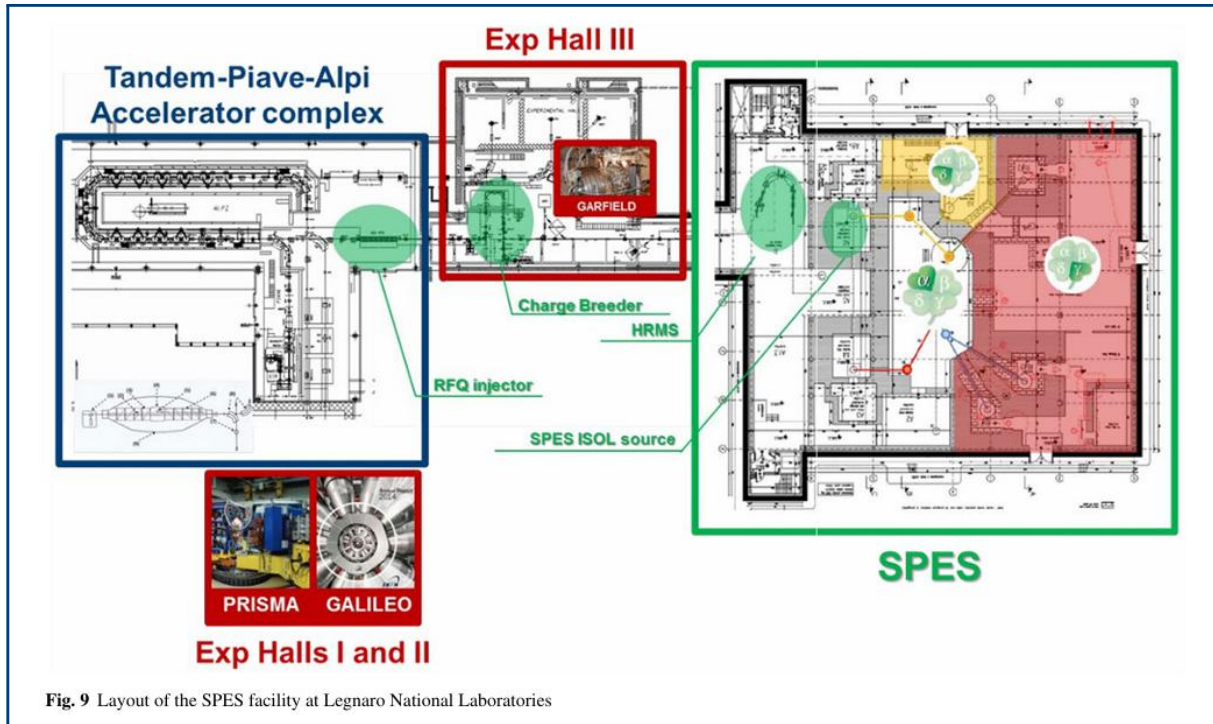


| SPIRAL 가속기 시설 |

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 μA)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 : ≥ 10 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, 중이온 가속기를 이용한 핵융합용 재료 시험시설 개발



| RIKEN-BNL 협력 MOU 연창 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 중이온가속기* 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 TRIUMF와 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 우수 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 희귀 동위원소 연구의 핵심시설로서 기능하도록 지원

Ⅲ

국내 동향

1. 정책 동향

✚ 우리나라는 중이온가속기 RAON을 국가 전략 인프라로 구축하고, 단계적 성능 고도화와 국제 연구 허브화, 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 허브 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, 중이온 빔의 산업·의료 응용 확장과 인력 양성 강화를 통해 신산업 성장 동력 마련

- (산업 생태계 조성) RAON이 단순한 연구시설을 넘어 국내 산업계가 참여하며 중이온 가속기 관련 생태계 형성
 - 중이온가속기 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
 - 중이온 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

❖ 중이온가속기 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 및생산을 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
 - 중이온 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

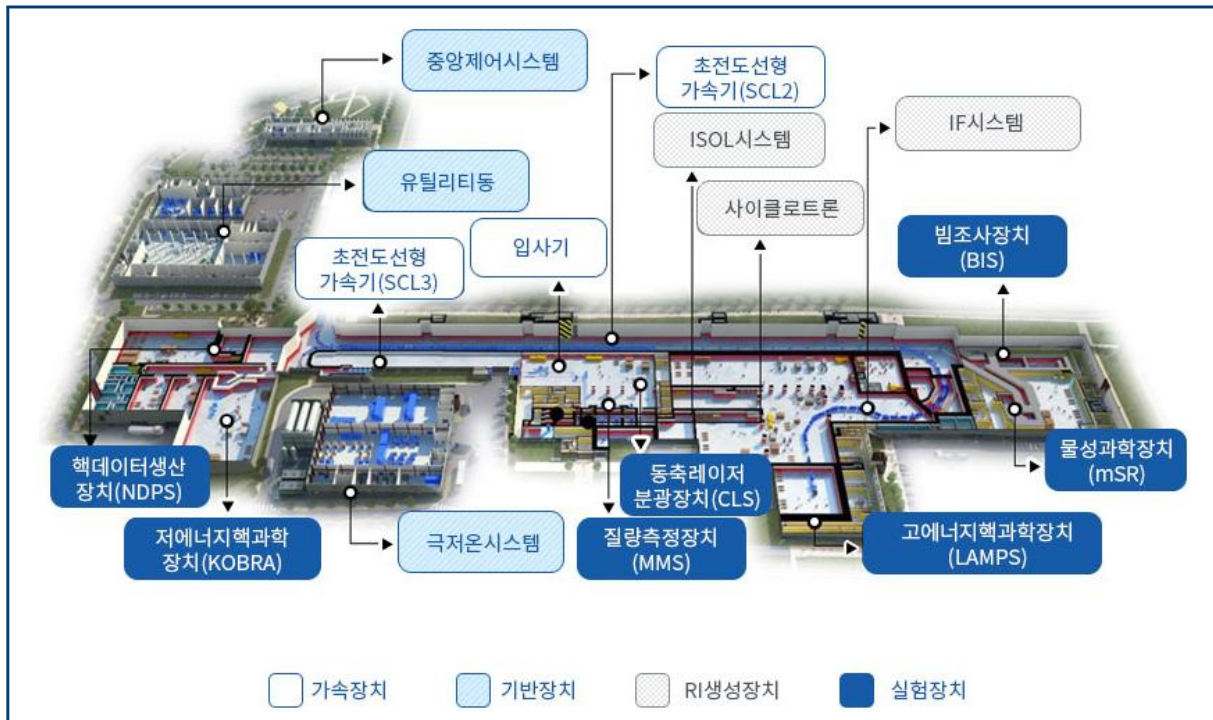
- **(에너지·환경 분야)** 중성자 반응 데이터와 폐기물 동위원소 기술은 에너지 및 환경 문제 해결 핵심 정책으로 추진
 - 양성자 및 중이온 빔을 활용한 중성자 반응 단면적 측정으로 차세대 원자로·핵융합로 설계에 필요한 핵 데이터 확보
 - 폐기물 처리용 동위원소 개발 등 친환경·에너지 융합 연구 분야로 응용 확대
- **(우주·국방 분야)** 가속기 기술이 고성능 신소재, 차폐 기술, 방사선 내성 설계로 응용되어 국가 전략기술·안보 분야로 파급
 - 중이온 빔 기술을 활용한 고성능 차폐·레이더·센서용 신소재 개발 등 우주·국방 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 High- β (=0.29) HWR 가속관 및 튜너·커플러 제작 공동 수행
 - ※ 이를 기반으로 가속관 성능 검증과 선행 R&D(SSR1) 결과 비교·분석을 진행



| RAON 시설 구축 개요 |

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 희귀동위원소 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

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

- 중이온 가속기 시설은 다양한 분야에서 활용이 확대, 동위원소 생산과 첨단 소재 개발 등 국가 기술 경쟁력 강화를 견인하는 핵심 인프라로 부상
 - 중이온가속기의 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

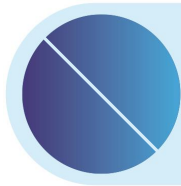
- 국산 가속기 부품 상용화 및 국제 협력 강화를 위한 대형 가속기 시설 개방·활용 고도화
 - 가속기 기술과 장비의 산업적 활용이 늘면서, 국산 가속기 부품의 상용화 및 국제 진출을 위한 전략적 접근 필요
 - RAON 등 국가 R&D 기반 대형 가속기 시설을 산업·국제 공동연구용 테스트베드로 개방 필요
 - 가속기 관련 산업의 산업화·상용화·국제화 전략 수립 및 지속가능한 공공-산업 연계 지원 체계 마련 필요

❖ 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 미시간주립대 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/>