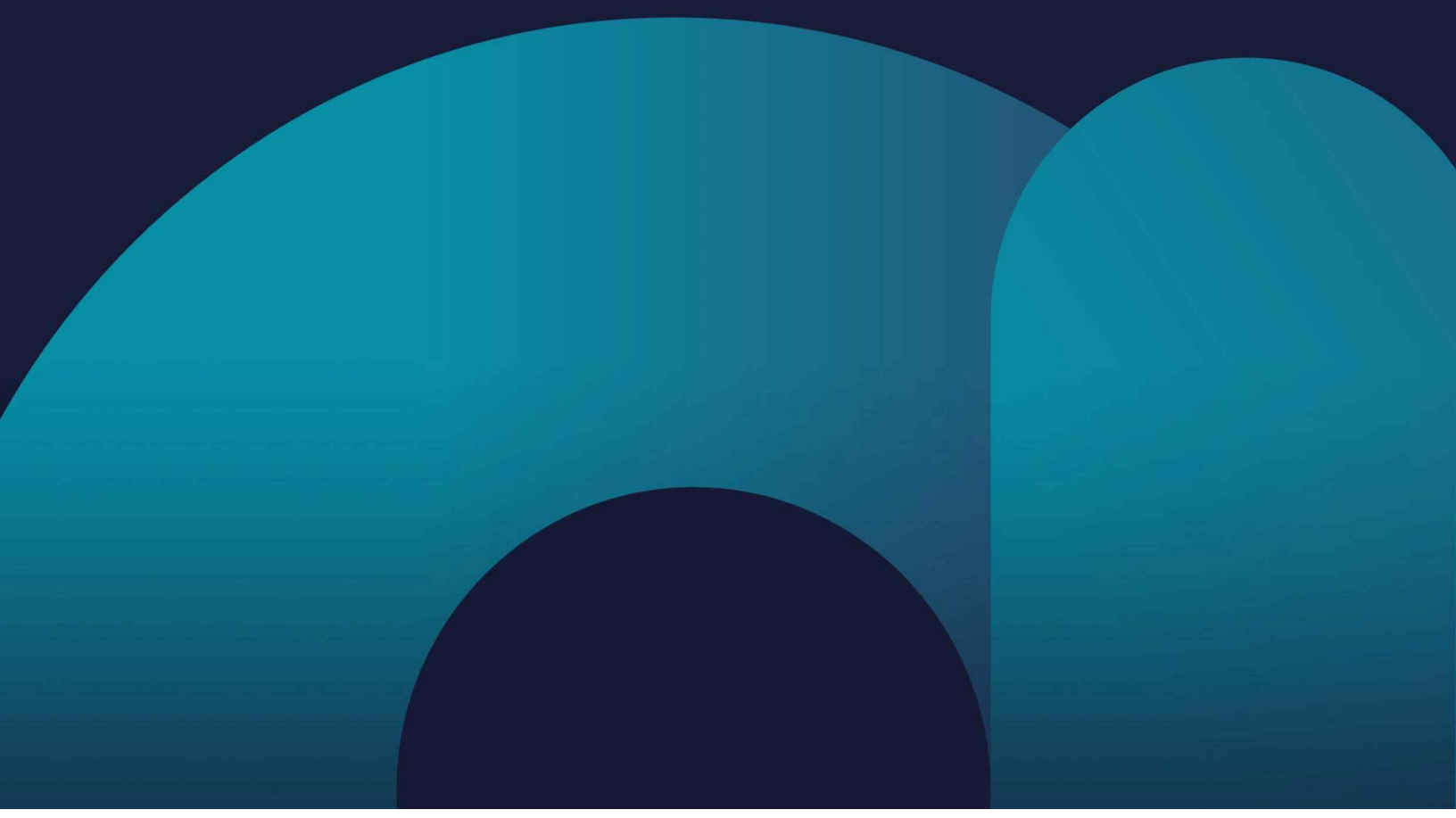

STI Brief

- 핵물리학(희귀동위원소) -



CONTENTS

I. 서론	3
1. 배경 및 필요성	3
2 기술의 정의 및 범위	5
II. 해외 동향	7
1. 정책 동향	7
2. 시장 · 산업 동향	11
3. 기술개발 동향	14
4. 국제협력 동향	17
III. 국내 동향	19
1. 정책 동향	19
2. 시장 · 산업 동향	20
3. 기술개발 동향	22
4. 국제협력 동향	24
IV. 결론	26
1. 시사점	26
참고 문헌	28

I. 서론

1 배경 및 필요성

□ 배경

- 희귀동위원소 연구는 세계최고 수준의 국제 협력을 통해 기초과학과 응용 연구 분야에서 큰 발전을 이루고 있음. 본 과제의 목적은 희귀동위원소 연구 분야 세계최고 기관인 RIKEN(일본 이화학연구소)과 연구 인적/물적 인프라를 공동 활용하여 국제협력 플랫폼을 구축하고, 지속 가능한 협력 체계로 발전시키는 데 있다. 연구시설의 공동 활용과 국제 협력플랫폼의 운영을 통해 세계 최초로 RAON(한국형중이온가속기)의 ISOL(저에너지 방식)+IF(고에너지 방식) 결합 방식을 이용한 극한 희귀동위원소 생성 능력을 극대화하고자 함. 이를 통해 원소의 기원과 우주의 진화에 대한 수수께끼를 해결하고, 새로운 연구 분야를 개척하여 기초과학 연구와 응용 기술 개발에 기여할 수 있는 발판을 마련하는 것임.

□ 필요성

RAON과 RIKEN간의 국제공동협력은 기술적 완성도와 연구 성과를 높이고, 한국을 희귀동위원소 과학의 선도 국가로 도약시키는 데 필수적일 것으로 예상됨. 이러한 협력은 RAON의 초기 운영 안정성을 보장하고, 과학적, 산업적, 경제적 성장에 중요한 기여를 하며, 글로벌 과학 네트워크의 중심 역할을 수행할 수 있도록 함. 이 국제공동협력의 필요성은 다음과 같은 기대효과를 통해 구체적으로 설명될 수 있음

- ISOL+IF 결합 방식 조기 완성을 통한 연구 성과 극대화
 - RAON은 세계 최초로 ISOL과 IF을 결합한 중이온가속기에서의 희귀동위원소(RI) 생성 기술을 개발하고 있음.
 - RIKEN의 RIBF(The RI Beam Factory)는 고강도 RI 빔 생성 및 활용에서 세계적 선도 연구소로, RAON의 ISOL+IF 결합 방식을 조기에 안정화하고 결합 방식의 완성도를 높이는 데 필수적인 협업 연구소일 것으로 판단됨.
 - RIKEN과의 협력은 실험 데이터와 기술적 노하우를 공유하여, ISOL+IF 기술을 빠르게 개발하고 ISOL+IF 기술을 활용한 핵물리학 연구 성과를 빠르게 창출할 수 있는 환경을 제공할 것으로 판단됨. 이를 통해 희귀동위원소 생성 효율과 실험 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 좋은 기회임.

○ 희귀동위원소 과학 분야에서 선도적 국가로 도약

- RAON은 RIKEN과의 협력을 통해 희귀동위원소 연구의 글로벌 선도 기관으로 자리 잡을 수 있는 좋은 기회이고 세계 최초의 ISOL+IF 결합 방식을 활용한 선행 R&D와 장치 설계 및 설치 그리고 차후 연구를 통해 핵물리학, 천체물리학 등 다양한 분야에서 국제적으로 인정받는 연구 결과를 창출하고 국제적 리더십을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.
- RIKEN과의 협력은 미국 FRIB(Facility for Rare Isotope Beams), 유럽 CERN(유럽 핵입자물리연구소) 등 다른 주요 연구소와의 다자간 협력을 촉진할 수 있는 기회가 될 것으로 판단되며, RAON이 국제 연구 네트워크의 중심이 될 수 있는 좋은 방법 중의 하나임.

○ 초기 운영 단계 문제 해결 및 안정적 운영

- 대형 중이온가속기를 포함한 대형 실험은 언제나 초기 운영 단계에서 기술적, 운영적 문제를 경험할 수 있음. RIKEN의 운영 경험과 기술적 지원은 이러한 문제를 신속히 해결하는 데 중요한 역할을 담당할 것임. 그리고 RIBF의 성공적인 운영 노하우를 활용하여, RAON의 초기 운영 안정성을 확보할 수 있음.
- 국제 공동 실험 및 데이터 교환을 통해, RAON의 운영 모델을 최적화하고, ISOL+IF의 고성능 희귀핵종 생성 능력을 안정적으로 유지할 수 있는 체계를 구축할 수 있어 운영 효율성 향상을 기대할 수 있음.

○ 경제적 및 산업적 효과 창출

- RAON과 RIKEN의 협력은 방사성 동위원소 생산 및 응용 기술을 산업화하는 데 기여할 수 있고 한국의 가속기 관련산업의 성장 동력을 확보할 수 있음.
- 희귀동위원소 과학과 관련된 연구 및 산업 프로젝트를 확대함으로써, 고급 기술 인력을 포함한 일자리 창출 효과를 기대할 수 있음.
- 국제 협력을 통해 RAON의 기술적 성과를 효율적으로 지원하고, 국가적 연구 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 이로 인해, RAON의 운영 효율성을 높이고, 중복된 연구 개발을 피함으로써 자원 활용의 최적화를 도모할 수 있어 사회적 비용 절감을 기대할 수 있음.

2 기술의 정의 및 범위

□ 기술의 정의

○ 대형가속기의 역할

- 대형가속기는 기초과학 연구의 근간을 이루는 핵심 장비로, 핵물리학, 천체물리학, 신소재개발, 생명과학 등 다양한 연구 분야에서 필수적임.
- 국가경쟁력강화: 대형가속기는 과학기술 패권 시대에서 국가 전략 기술 확보의 기반이며, 노벨상 수상 연구의 약 25%가 대형가속기를 기반으로 이루어짐.
- 기초과학(우주의생성과기원탐구), 응용과학(신소재및반도체, 신약개발, 방사성의약품생산) 등 다양한 활용 분야를 가지고 있음.

○ 중이온가속기 개념

- 헬륨부터 우라늄까지 다양한 중이온을 생성 및 가속하여 표적에 충돌시켜 희귀동위원소를 생성
- 핵물리 연구/차세대 원자력 발전 기반연구, 신물질/신품종 개발에 활용하는 대형 연구시설

○ 중이온가속기 필요성

- 미국, EU 등 선진국은 대형연구시설 중 대형가속기가 큰 비중을 차지함. 특히 힉스 입자 발견으로 유명한 CERN의 대형강입자가속기(Large Hadron Collider, LHC)는 둘레 27km의 대형 가속기이고 미국 페르미국립연구소(Fermi National Accelerator Laboratory)는 둘레 6.3km의 테바트론 입자가속기로 우주/자연 원리를 연구함.
- 중이온가속기는 다른 가속기와는 다르게 가속된 중이온을 다른 물질에 충돌시켜 자연에 존재하지 않은 희귀한 원소를 생성함.
 - 이 원소를 이용해 물질의 성질을 연구하고 새로운 물질을 만드는 등 주용 선진국에서 중이온 가속기를 구축하여 활용 중임.
 - 현재 미발견된 희귀동위원소는 7천여종이며, 향후 발견될 희귀동위원소를 통한 과학적 파급력은 상당할 것으로 판단 됨. 특히, 노벨 물리학상이 제정된 이래 44명이 가속기 관련 연구를 통해 노벨상을 수상하였고 국가 이름이 들어간 원소 5개를 발견함[1].

○ 중이온가속기 활용 분야

- 미핵과학, 원자/분자과학 등 순수 기초 연구분야와 물성, 의·생명 등 응용 연구분야에서

다양하게 활용될 예정.

- 또한 12대 국가전략기술 육성 등 국정과제 성공을 위한 전략 기반 시설로 중이온가속기 활용 가능(우주항공/자율주행차용 반도체 개발 지원, 국방무기체계 개발지원과 바이오 물질 연구 지원, 공공주도 전략분야와 융합연구 추진).
- 국내 우주/군사용 반도체 시험에 중이온가속기를 활용해 해외 의존도 감소 및 기술안보 확보에 기여함.

○ 희귀동위원소의 개념

- 희귀동위원소는 자연계에서 거의 존재하지 않거나 매우 짧은 반감기를 가진 원소의 동위원소로, 실험적으로 생성하여 연구하는 핵종임.
- 원소는 양성자 수(원자번호)가 동일한 원자들의 집합으로, 중성자의 수에 따라 다양한 동위원소를 형성함.
- 동위원소는 동일한 원자번호를 가지지만, 중성자 수가 달라 원자핵의 질량이 다른 원소를 의미함.

○ 희귀동위원소의 과학적 중요성

- 희귀동위원소는 자연적으로 생성되지 않는 핵종을 실험적으로 생성하여 우주 생성, 원소 기원, 핵반응 연구를 위한 데이터를 제공함. 중성자 과잉 또는 중성자 부족 상태에서 발생하는 희귀동위원소는 핵물리학의 이론 검증 및 발전에 핵심적인 역할을 함.

□ 기술의 범위

○ 희귀동위원소 연구의 기초 범위

- (천체물리학 연구) 초신성 폭발, 중성자 별 충돌, 감마선 폭발 등 극한 환경에서 발생하는 원소 생성 메커니즘 연구하고 우주에 존재하는 안정 동위원소와 희귀동위원소의 비율 분석함.
- (핵물리학 연구) 중성자 과잉 상태의 핵반응 데이터 수집하고 동위원소 존재한계선(drip line) 확장을 통한 핵구조 연구.

○ 희귀동위원소의 응용 범위

- (의료) 방사성 동위원소 기반 암 치료 기술 개발. 신약 개발을 위한 방사성 표지 기술 활용.
- (에너지 및 환경) 차세대 핵융합 연료 개발, 방사능 탐지 및 환경 복원 기술.
- (신소재 개발) 초전도체 및 반도체 소재 연구, 방사선 검출기 및 차세대 정보저장 장치 개발

II. 해외 동향

1 정책 동향

□ 글로벌 트렌드

○ 국제 협력을 통한 핵물리학 연구 연대 기조

- 순수 및 응용물리학 국제연합(IUPAP, the International Union of Pure and Applied Physics)은 2003년 핵물리학 국제 협력 위원회(CICNP, Committee on International Cooperation in Nuclear Physics)를 설립하여 향후 10~20년간 핵물리학 연구의 핵심 이슈를 전망하고 국제 협력을 강화하는 정책적 기반을 마련함.
- CICNP는 전 세계 핵물리학 커뮤니티를 대상으로 대규모 핵물리학 시설의 신규 건설 계획과 기존 시설 운영 현황을 공유하며, 핵과학 연구의 국제적 협력을 추진함.
- CICNP의 정책적 목표
 - (핵물리 시설 매핑과 협력 강화) 고에너지 중이온 빔 시설을 포함한 기존/신규 핵물리학 시설의 현황과 계획을 공유하며, 중요한 과학적 질문에 대해 각 시설의 역량을 매핑하여 협력을 강화함.
 - (연구 조정 및 정책 자문) 국제 수준에서 핵과학 연구를 조정하고 미래 방향에 대해 전문가가 의견을 제시하며, 정부 조직에 정책적 권고와 제안을 수행[2]함.

○ 중이온가속기의 글로벌 활용과 정책적 중요성 대두

- (국가 경쟁력과 연구성과) 중이온가속기는 세계적 수준의 연구성과를 창출하며, 국가 과학기술 경쟁력 제고를 위한 핵심 연구 시설로 인식함. 그리고 가속기 활용은 독창적이고 독보적인 연구 결과를 통해 과학계에서 혁신적인 발견을 이루는 데 기여한 바가 크다는 공감대가 형성되어 있음.
- (다양한 응용분야) 중이온가속기는 기초과학(우주 생성과 기원 탐색)에서부터 첨단산업(신소재 개발, 반도체 연구, 신약 개발)에 이르기까지 폭넓게 활용되며 주요 응용 예로서는 우주반도체 성능 시험과 방사성 의약품 개발 등이 있음.
- (초전도 가속 기술의 도입) 세계적인 추세는 중이온가속기의 성능과 효율성을 높이기 위해 초전도 가속 기술이 최근 주요 기술로 채택됨. 초전도 가속 기술은 상온 가속관 대비 고주파 손실이 적어 동일 에너지 수준에서 더 짧은 가속 구간을 구현 가능하며

니오비움(Nb) 소재로 제작된 초전도 가속관은 영하 269도(4K) 이하에서 고주파를 이용하여 높은 에너지 효율을 제공함. 정책적 시사점으로 초전도 기술은 장기적으로 에너지 효율과 연구 비용 절감을 가능하게 하며, 지속 가능한 연구 인프라로 발전 가능함.

□ 미국

○ 미국의 핵과학 연구의 전략적 로드맵

- 미국의 희귀핵 연구시설인 FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)은 미국 에너지부의 핵물리학 프로그램에서 전략적 우선순위를 차지하고 있다. 이에 미국은 FRIB를 통해 희귀동위원소 연구를 주도하고 있음. FRIB은 2022년 가동을 시작하여 희귀동위원소를 활용한 핵구조, 핵반응, 천체물리학 연구를 활발히 진행하고 있음. DOE는 FRIB연구 연구에 연간 7억 달러 이상의 예산을 투자하며 글로벌 협력 프로젝트를 확대하고 있음. 이 로드맵에 의해 아래의 정책 방향을 통해 미국은 희귀핵 연구 분야에서의 선도적인 위치를 유지하고, 과학기술 발전을 가속하고자 노력하고 있음. FRIB은 DOE의 핵물리학 연구 로드맵에서 핵심적인 역할을 하며, 기초과학의 발전과 응용 분야의 혁신에 기여하고 있다. 이 시설은 미국이 세계적인 희귀핵 분야의 연구 리더십을 유지하며, 학문적/산업적 발전을 선도할 수 있는 강력한 기반을 제공함[3].

○ 미국 정책 방향의 요약

- 미국의 정책은 핵물리학 및 희귀핵 연구에서 글로벌 리더십을 유지하며, 과학기술 혁신을 선도하는 기반을 제공하는 것임. FRIB를 중심으로 연구 인프라 확충과 기술 혁신하여 고성능 중이온가속기를 활용하여 희귀동위원소 연구 강화하고 국제 협력을 통한 글로벌 연구 네트워크 구축을 통한 데이터 표준화와 공동 실험 확대하는 것도 정책 방향임. 이를 바탕으로 연구 인재 양성과 의료, 신소재, 에너지 기술 개발에 희귀핵 연구 성과를 활용하는 것임.

□ 일본

- 일본은 핵물리학 분야에서 과학적 경쟁력 강화를 위해 다양한 정책을 추진하고 있음. 이러한 정책은 대형 연구시설의 전략적 지원, 신규 시설 구축, 산업과의 연계 강화 등을 포함함.
- (일본학술회의 ‘마스터 플랜’ 수립) 일본학술회(Science Council of Japan)는 과학적 관점에서 대형 연구시설과 연구 계획을 심사/평가하여 학술적 의의가 높은 계획을 선정하는 ‘마스터 플랜’을 주기적으로 수립함. 이러한 마스터 플랜을 2010/2013/2017/2020년에

발표하였으며, 이를 통해 일본의 과학 연구 방향과 우선순위를 설정함⁴⁾.

- (문부과학성의 ‘로드맵’ 수립) 문부과학성은 일본학술회에서 발표한 마스터 플랜을 기반으로 예산 배분의 우선순위를 정하는 ‘로드맵’을 수립함. 이를 통해 대형 연구시설과 연구 계획에 대한 전략적 지원을 강화하고, 장기적인 연구 개발을 촉진함.
- (연구집약형 연구단지 조성 및 산업 연계 강화) 일본은 기초과학 뿐만 아니라 산업적 활용도를 높이기 위해 연구집약형 연구단지 조성/산업체 전용 가속기 건설/산업체 이용 활성화 제도 마련 등 다양한 정책을 추진하고 있음.

○ 일본 RIKEN 연구 수행 방향

- RIKEN의 중이온 가속기 시설인 RIBF를 통해 희귀동위원소 연구를 선도하고 있음. RIKEN은 희귀동위원소를 활용한 핵구조와 핵반응 연구를 활발히 진행하고 있으며, 이를 통해 우주의 기원과 원소 생성 과정을 이해하는 데 기여하고 있어 일본 정부의 적극적인 지원 아래 희귀동위원소 연구를 선도하고 있음.

□ 중국

- 중국은 글로벌 기술 경쟁 심화와 미국의 견제에 대응하기 위해 기술 주권 확보를 목표로 하는 ‘제14차 5개년 계획(2021-2025)’과 ‘2035 중장기 계획’을 발표하였음⁵⁾. 이 계획의 핵심은 과학기술의 자립과 자강을 통해 글로벌 경쟁력을 강화하는 것임.
- 중국의 중이온가속기 및 핵물리학 관련 정책 방향은 과학기술 자립과 글로벌 기술 경쟁력 확보를 목표로 하는 국가적 전략에 기반함. 과학기술 자립과 자강이 핵심 목표이며 중이온가속기와 같은 대형 연구시설의 독자적 개발과 운영을 통해 과학기술의 자립 기반을 강화하고 희귀동위원소 생성 기술, 중이온 빔 연구 및 초고속 데이터 처리 기술에서 세계적 경쟁력 확보하는 것임.
- 중국은 중이온가속기와 같은 대형 핵물리학 연구시설(CIADS)을 구축하여 국내외 연구자들에게 최첨단 실험 환경을 제공하고 중국 중이온가속기 연구소(HIAF, High Intensity HEavy-Ion Accelerator Facility)는 희귀핵 생성 및 특성 분석에서 핵심적인 역할을 수행함. 이를 위한 기술 혁신으로 초전도 가속기술, 고강도 이온 빔 기술, 고정밀 검출기 개발에 투자하고 첨단 연구 장비와 데이터 분석 시스템 구축을 통해 연구 효율성 극대화하고 있음.

□ 유럽

- 유럽의 핵물리 분야의 정책 방향은 유럽전략포럼(ESFRI) 로드맵을 통하여 구체화 됨[6]. 정책 기조는 유럽의 핵물리 연구 경쟁력을 강화하고, 데이터 공유, 디지털 혁신, 국제 협력을 기반으로 다양한 과학적 도전에 대응하기 위한 기반을 제공함. 핵물리 특징으로는 핵물리학은 물질의 구조, 별에서의 원소 생성, 초기 우주의 상태 및 과정에 대한 근본적인 질문을 해결하는 과학적 화두에 답하고 응용 분야는 탄소 없는 에너지 생산, 환경 모니터링, 그리고 첨단 의료 기술과 같은 사회적 과제 해결에 기여함.
- 유럽의 핵물리 연구와 관련된 주요 프로젝트는 HIE-ISOLDE(CERN), SPIRAL2(프랑스 GANIL), FAIR(독일 GSI)로 명시되어 있음[6].
 - HIE-ISOLDE
 - (중점 분야) CERN에서 운영하는 ISOLDE 시설을 업그레이드하여 방사성 이온 빔의 강도와 에너지를 향상 후 업그레이드된 방사성 이온 빔을 활용한 핵물리학 및 융합 연구(재료 과학, 생물물리학 등)
 - (응용 분야) 방사성 동위원소의 의학적 및 산업적 활용에 대한 독창적인 통찰 제공
 - (정책 방향) CERN의 글로벌 네트워크와 통합하여 연구 영향 극대화
 - (FAIR) 독일 다름슈타트에 위치한 GSI 헬름홀츠 중이온 연구소에서 FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research) 프로젝트를 진행하고 있음. FAIR는 희귀동위원소 연구를 위한 대형 가속기 시설.
 - (중점 분야) 고에너지 반양성자 및 이온 연구를 통해 강한 상호작용 물질, 무거운 이온 충돌, 천체물리학적 과정 이해
 - (응용 분야) 초중원소와 희귀 동위원소의 특성 연구, 천체물리학적 핵합성 과정 탐구.
 - (정책 방향) 독일 및 유럽의 과학적 경쟁력을 강화하고 천문물리학 및 우주과학 연구와의 연결, 그리고 대규모 자원 공유를 위한 국제 협력과 의학 및 환경 연구에 응용 가능한 첨단 검출 기술 개발.
 - (SPIRAL2) 프랑스는 GANIL(Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) 연구소를 통해 희귀동위원소 연구를 수행하고 있음. SPIRAL2 프로젝트를 통해 중이온 가속기 시설을 확장하고 있으며, 이를 통해 핵물리학 및 응용 연구를 강화
 - (중점 분야) 희귀 동위원소의 생산 및 연구
 - (응용 분야) 반응 메커니즘 이해 및 불안정 핵의 합성.
 - (정책 방향) 학술 및 산업 연구 지원과 지역적 및 국제적 협력 촉진. 그리고 재료 과학 및 핵의학에서 학술적 및 산업적 연구 협력 촉진.

2 시장 · 산업 동향

중이온가속기와 핵물리학은 각국에서 첨단 산업과의 연계를 통해 의료, 에너지, 신소재 분야에서 다양한 응용 가능성을 제공함. 미국은 민간 협력을 통해 상업화를 촉진하며, 중국은 정부 주도로 산업화를 가속화하고 있음. 일본은 지역 산업과의 연계를 강조하고, 유럽은 범유럽적 협력을 통해 지속 가능한 기술 개발과 산업화를 추진하고 있음. 이러한 차이점은 각국의 경제적, 과학적 우선순위를 반영하고 있음.

〈 국가별 중이온가속기 및 핵물리의 산업 동향 비교〉

항목	미국	중국	일본	유럽
의료 응용	암 치료 및 방사성 의약품	방사선 치료 및 진단 기술 개발	방사성 약물 및 치료 기술 개발	진단 및 치료 기술 협력
신소재 개발	합금 및 에너지 소재 연구	희토류 기반 첨단 소재 개발	반도체 및 전자기기 소재 연구	첨단 재료 및 반도체 개발
에너지 기술	방사성 폐기물 관리와 핵융합	탄소 포집 및 재생 에너지 기술	재생 가능 에너지 소재 연구	탄소 중립 기술 및 재생 에너지
산업화 접근	민간 기업과 연계	정부 주도 산업화	지역 산업과 연구소 연계	범유럽 협력으로 산업화 촉진
특징	민간 협력 중심	정부와 자원 기반	체계적 산업 연계	지속 가능성과 글로벌 협력 강조

□ 미국

- (의료 분야) 방사성 동위원소를 활용한 암 치료(양성자 치료, 중입자 치료)와 진단(핵의학 영상 기술) 시장이 급성장하고 있으며 FRIB의 희귀동위원소 연구 성과를 상용화하여 의료 기술 발전에 기여.
- (에너지 기술) 핵연료 재처리와 방사성 폐기물 관리에서 중이온가속기를 활용하고 핵분열/핵융합 에너지 연구와 신소재 개발 지원.
- (기술 기업 연계) GE Healthcare, Varian 등 글로벌 의료기기 기업과 협력하여 방사성 의약품 개발.
- (산업적 활용 전략) 산업체와 공동 프로젝트를 통해 기초연구를 응용 연구로 전환.
- (특징) 산업적 응용 분야에서 민간 기업과의 연계가 활발하며 기술 혁신과 산업화를 병행하여 시장의 신속한 성장 추구.

□ 중국

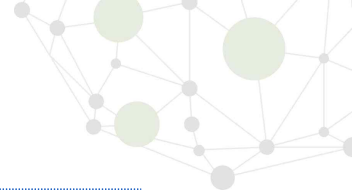
- 특징으로는 정부의 강력한 지원으로 산업화가 빠르게 진행하고 자국 내 희토류 자원을 활용한 신소재 개발을 중이온가속기의 신소재 개발과 연계하여 진행함.
 - (의료 및 방사선 치료) HIAF를 통한 방사성 동위원소 대량 생산으로 암 치료 기술을 확대하고자 하며 방사성 의약품 시장에서 빠른 성장을 기대하고 있음.
 - (신소재 개발) 중이온 빔을 활용한 고성능 합금과 반도체 연구할 예정이며 원자 수준에서 재료의 특성을 제어하는 연구를 계획 중임
 - (에너지 기술) 중이온가속기를 사용한 탄소 포집 및 변환 기술(중이온 빔을 사용하여 금속유기골격체의 물리적/화학적 특성을 분석 및 개선하고 탄소 전환 효율을 높이는 촉매의 원자 수준 특성을 연구)과 재생에너지 소재 연구에 활용할 예정
 - (정부 주도 산업화) 국가 차원에서 중이온가속기 기술을 활용한 산업화 추진하며 지역 특화 산업 단지와의 연결 강화하는 전략을 사용.

□ 일본

- 특징으로는 산업화에 대한 체계적 접근하고 지역 산업과 과학기술의 연계를 통해 응용 연구 활성화.
 - (의료와 바이오 분야) RIBF를 활용한 방사성 동위원소를 암 치료와 진단 기술에 적용하고 방사성 약물 개발과 병원에서의 상용화 지원.
 - (신소재와 첨단 산업) 중이온가속기와 분리기를 통해 고순도 소재 개발과 반도체 및 전자 기기 소재의 개선 연구.
 - (산업체 전용 가속기) 효고현 Spring-8에서 산업체 전용 중이온가속기 운영하여 로컬 기업과 연계성을 강화하고 신소재 및 에너지 산업 기업과의 협력 프로젝트 진행.
 - (산업 연계 프로그램) RIKEN 이노베이션의 Baton Zone 프로그램으로 연구 성과를 산업계로 이전.

□ 유럽

- 특징으로는 범유럽적 협력으로 산업체와의 긴밀한 연계를 강화하고 지속 가능한 기술 개발과 환경 문제 해결에 중점.
 - (의료와 방사선 치료) HIE-ISOLDE와 FAIR에서 방사성 동위원소를 의료 진단 및 치료에



활용하려고 하며 유럽의 다양한 의료 기업과 협력하여 방사선 치료 기술 개발.

- (에너지와 환경) 중이온가속기를 활용하여 탄소 중립 기술(예: 탄소 포집 및 저장)과 재생 에너지 연구에 기여.
- (신소재와 반도체) SPIRAL2를 통해 첨단 재료 연구와 반도체 산업에 활용하고 고성능 합금과 나노재료 개발.
- (산업체 지원 정책) EU 차원에서 ESFRI 로드맵 기반으로 산업과 연구소 간 협력 강화하고 중소기업 지원 프로그램을 통해 과학기술 성과를 상업화.

3 기술개발 동향

희귀 동위원소 빔 시설은 핵물리학, 천체물리학 및 재료과학과 의학 응용 분야의 연구를 위해 각 국가별로 독특한 기술 사양과 특성을 보유하고 있음. 가속기 유형은 각 시설별로 초전도 선형 가속기, 싱크로트론, 사이클로트론을 활용하여 목표에 맞는 기술을 채택하고 있음. 에너지 범위는 10 MeV/u(HIE-ISOLDE)에서 최대 2000 MeV/u(FAIR)까지 다양한 연구 목표에 대응함. 생산 방식은 ISOL과 IF의 각각의 방식을 이용하거나, 이중 방식(ISOL + IF) 등으로 희귀 동위원소를 생성함. 특화된 연구로는 FAIR는 반양성자 물리학과 희귀 동위원소 연구를 통합하고 있고 HIE-ISOLDE는 ISOL 빔의 후가속(Post-Acceleration)에 중점을 두고 있으며 SPIRAL2는 ISOL과 IF 방식을 결합하여 다목적 연구를 지원하고 있음.

〈 국가별 중이온가속기 및 핵물리의 산업 동향 비교〉

설명	국가	가속기 유형	최대 에너지 (MeV/u)	생산 방식	특징적인 기술	주요 검출기
FRIB	미국	초전도 선형 가속기	200	비행 중 파쇄	중성자 과잉 희귀 동위원소 고강도 생산	GRETA, S800 스펙트로미터
FAIR	독일	싱크로트론 (SIS100, SIS300)	1000-2000	비행 중 파쇄, 반양성자 생성	희귀 동위원소 및 반양성자 연구 통합	CBM, HADES, R3B
SPIRAL2	프랑스	초전도 선형 가속기	14.5 (중이온)	ISOL + 비행 중 파쇄	중성자 및 초무거운 원소 연구 지원	NFS, S3
HIE-ISOLDE	스위스	초전도 선형 가속기 업그레이드	10	ISOL	ISOL 빔의 후가속(Post-Acceleration) 지원	MINIBALL, T-REX
RIBF	일본	사이클로트론	345	비행 중 파쇄, 핵분열	중성자 과잉 희귀 동위원소 고강도 생산	SAMURAI, SHARAQ
HIAF	중국	싱크로트론 + 선형 가속기	1000	고강도 ECR 이온 소스	다분야 연구 응용	고급 입자 추적 및 열량계 시스템

□ (미국) FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)

- (기술 사양) 초전도 선형 가속기(Linac)로 무거운 이온(예: 우라늄)을 최대 200 MeV/u까지 가속하며 생산 방식은 비행 중 파쇄(in-flight fragmentation)[7].
- 초전도 라디오 주파수(SRF) 캐비티를 사용하여 효율적으로 가속하고 중성자 과잉 희귀 동위원소의 고강도 빔을 제공.

- (기술 개발 동향) 광범위한 동위원소를 생성하여 핵구조 및 천체물리학 연구에 활용하고 첨단 검출기 시스템 통합으로 실험 능력 향상. [Facility for Rare Isotope Beams (FRIB)]
- (독일) FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)
 - (기술 사양) 싱크로트론 기반 시스템으로 무거운 이온을 최대 1-2 GeV/u까지 가속하며 핵 생산방식은 비행 중 파쇄 및 반양성자 생성. SIS100 및 SIS300 싱크로트론으로 초고강도 빔 생성하고 희귀 동위원소 및 반양성자 연구를 통합[8].
 - (기술 개발 동향) 극한 조건에서 물질의 특성을 탐구하며 희귀 이벤트 식별을 위한 첨단 검출 시스템 개발.
- (프랑스) SPIRAL2
 - (기술 사양) 초전도 선형 가속기러 에너지는 중수소는 최대 40 MeV, 중이온은 최대 14.5 MeV/u까지 가속함. 생산 방식은 ISOL과 IF 방식 병합함. 고강도 초전도 캐비티 활용하고 중성자 생성 및 초중량 원소 연구 지원[9].
 - (기술 개발 동향) 동위원소 가용성을 높이기 위해 이중 생산 방식 통합하고 중성자 과학 및 초중량 원소 탐구에 대한 기술 향상. [SPIRAL2 Project, NFS Facility]
- (CERN) HIE-ISOLDE(High Intensity and Energy ISOLDE)
 - (기술 사양) 기존 ISOLDE 시설의 초전도 선형 가속기로 업그레이드하고 에너지는 후가속 빔 에너지를 최대 10 MeV/u로 향상시킴. 생산 방식은 ISOL 방식 후가속. 특징 기술로는 초전도 쿼터 웨이브 공진기 사용하고 ISOLDE에서 생성된 희귀핵 빔의 후가속 지원[10].
 - (기술 개발 동향) 빔 에너지와 강도를 향상시켜 연구 범위를 확장하고 초전도 기술을 활용하여 성능을 개선하고 있음 [HIE-ISOLDE Project]
- (일본) RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory)
 - (기술 사양) 사이클로트론 기반 시설로 무거운 이온을 최대 345 MeV/u까지 가속하며 생산 방식은 IF 및 핵분열. 핵심 기술은 초전도 링 사이클로트론(SRC)을 사용하여 고에너지 빔을 제공하는 것이고 극도로 중성자가 풍부한 동위원소 연구가 가능함[11].

- (기술 개발 동향) 안정성을 벗어난 핵의 생성 및 연구에 집중하고 반응 생성물의 정밀 측정을 위한 고급 스펙트로미터 개발.

□ (중국) HIAF(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility)

- (기술 사양) 싱크로트론 및 선형 가속기 복합 시스템으로 에너지는 무거운 이온을 최대 1 GeV/u까지 가속하며 빔 생산 방식은 고강도 ECR(Electron Cyclotron Resonance) 이온 소스 활용. 기본 기술로 선형 가속기(LINAC)/ 고에너지 싱크로트론 및 저장 링 결합이며, 융합-증발과 IF 방식을 복합 활용함. 다분야 연구(핵물리, 재료과학, 의학 응용)를 목표로 설계함[12].
- (기술 개발 동향) 핵물리 연구와 더불어 산업 및 의학 응용 확장 등 다분야 응용에 초점이 맞추어져 있으며 글로벌 연구 네트워크를 통해 기술 혁신을 꾀함.

4 국제협력 동향

국제 협력은 희귀 동위원소 빔에 특화된 가속기 시설의 건설, 연구 및 개발을 진전시키는데 있어 중요한 역할을 해왔음. 이러한 협력은 전문 지식, 기술, 과학적 발견을 공유함으로써 국제 희귀핵 연구와 그 시설들의 역량을 가장 크게 견인하였음. 그러나, 각 시설은 고유한 과학적 목표, 지역적 특성, 기술적 요구 사항을 반영하여 국제 협력에 대한 전략과 접근 방식에서 차이를 보임.

□ (미국) FRIB

- (국제협력) 일본 KEK와의 초전도 라디오 주파수(SRF) 기술 협력, 러시아 Budker 연구소와의 진단 기술 협력 등 주요 국제 파트너십을 체결하고 있으며 글로벌 연구자 네트워크에 참여하여 연구 시설에 대한 접근성을 확대하고 있음.
- (특성) 가속기 설계에서 기술 이전을 중점적으로 추진하며 최첨단 성능을 보장함. 미국 중심의 리더십을 기반으로 유럽 연구기관과의 협력 프로젝트를 통해 오론 연구와 실험 연구의 국제 협력을 강화하고 있는 중임.

□ (독일) FAIR

- (국제협력) 10개 이상의 국가가 참여하는 다국적 프로젝트로 파트너 국가들이 기술적 구성 요소를 제공하는 현물 기여 모델을 채택하고 있음. 헬름홀츠 센터 및 대학들과의 오랜 협력을 통해 교육 및 연구개발 노력을 공유하고 있음.
- (특성) 글로벌 파트너십을 통해 전문성을 다양화하며, 시설의 공동 소유권이 특징이며 강입자 물리학과 반물질 연구에 중점을 두어 산업 및 과학적 관심을 이끌고 있음. 특히 국제적 기여를 기반으로 확장이 가능한 모듈형 구조의 협력 모델에 기반한 시스템이 특징적임.

□ (프랑스) SPIRAL2

- (국제협력) 유럽 연구 지역 내에서의 지역적 협력을 강화하는 추세이다. 주요 EU 연구기관 및 대학과의 협력을 통해 실험 설비의 공동 사용을 추진하여 지역적 협력 모델을 구현하고 있으며 EURISOL 및 FAIR 프로젝트와의 연계를 통해 동위원소 생산 및 학제 간 연구를 지원함.
- (특성) 양성자 과잉 동위원소 연구 및 천체물리학 연구를 중점으로 하고 있음. 다중 사용자 실험 플랫폼을 제공하는 게 특징적이며 유럽 전역의 연구팀에 폭넓은 접근성을 제공함.

□ (CERN) HIE-ISOLDE

- (국제협력) CERN 회원국 및 관련 국가들과 협력하며, CERN의 광범위한 인프라를 활용함.

ISOLDE는 방사성 이온 빔 시설을 CERN의 양성자 싱크로트론 기반의 독창적인 동위원소 생산 시스템과 그 돋보이는 지위를 활용해 글로벌 연구자들을 유치하고 있음.

- (특성) 핵천체물리학 및 의생물학과 같은 특정 연구 프로그램을 중심으로 한 국제 협력을 강조하며 개발도상국 연구자를 대상으로 한 훈련 및 지식 공유에 중점을 둠.

□ (일본) RIBF

- (국제협력) 전 세계 특히 동아시아 기관들과 좋은 협력 기관으로서의 역할을 하고 있음. 특히 한국의 RAON과 중국 IMP와 같은 기관들과 공동 연구 이니셔티브를 진행하며, 희귀핵 연구 및 가속기 기술 개발에 집중하고 있음.
- (특성) 고에너지 희귀 동위원소 생산 및 이론 모델링에 강점을 가지고 있으며 가속기 물리학 분야의 기술 교류 및 인력 양성을 위한 글로벌 위커숍과 교환 프로그램에 주력하고 있음. 또한 희귀 동위원소 생산을 위한 세계에서 가장 강력한 사이클로트론을 보유하고 있어 희귀 동위원소 생성에 대해서 독창적인 기술을 가지고 있음.

□ (중국) HIAF

- (국제협력) 중국에서 건설중인 HIAF는 유럽, 일본, 미국의 기관들과 공식적인 협약을 맺고 국제 협력을 강화하고 있으며, FAIR 및 SPIRAL2와 같은 국가와의 협력 허브 역할을 추진하고 있음.
- (특성) 중이온 과학의 지역 리더십 구축에 초점을 맞추고 있으며 고강도 빔 기술 개발에 적극적으로 참여하며 국제 협력의 가치를 높이고 있음.

□ 국제협력 특성

- (국제협력 참여 범위) FRIB와 RIBF는 주요 글로벌 파트너와의 양자 협력을 강조하며, 특정 기술 공유에 집중하는 편이며 FAIR와 SPIRAL2는 다국적 파트너십을 활용하여 더 광범위한 글로벌 프로임워크에 국제협력 포커스를 맞추고 있음.
- (지역 중심vs글로벌 리더십) FAIR와 SPIRAL2는 유럽 내 통합을 목표로 하는 반면, FRIB와 RIBF는 각국에서의 리더십 구축에 중점을 둠.
- (지식 이전) HIE-ISOLDE와 HIAF는 교육 프로그램과 개발도상국 지원에 주력하여 인력 양성 및 역량 강화를 목표로 하고 있음.
- (연구 전문화) FAIR과 RIBF는 고에너지 물리학 응용에 중점을 두는 반면, SPIRAL2와 HIE-ISOLDE는 학제간 연구에 초점을 맞추고 있음.

III. 국내 동향

1 정책 동향

한국은 희귀 동위원소 빔 시설과 핵물리학 연구개발(R&D) 분야에서 지속적인 정책적 노력을 기울여 왔음. 특히, 중이온 가속기 RAON의 건설과 운영은 이러한 노력의 핵심이라고 할 수 있음. RAON은 한국의 중이온 가속기 시설로, 희귀 동위원소를 생산하여 핵물리학, 천체물리학, 재료과학 등 다양한 분야의 연구를 지원하는 국가 대형 연구시설임. 한국 정부는 RAON 프로젝트를 통해 기초 과학 연구 역량을 강화하고, 국제 과학기술 경쟁력을 높이기 위한 정책을 추진하고 있음은 지난 10년간의 노력을 보아 알 수 있음.

□ 기본 정책 방향

- (기초과학 연구 강화) RAON을 통해 희귀 동위원소를 활용한 첨단 연구를 촉진하여, 핵물리학 및 관련 분야의 기초과학 연구를 활성화함.
- (국제 협력 증진) RAON은 국제적인 연구 협력을 위한 플랫폼으로 활용되며, 해외 연구기관과의 공동 연구 및 기술 교류를 통해 글로벌 과학 네트워크를 강화함
- (산업 응용 확대) RAON에서 개발된 기술과 연구 성과를 의료, 재료, 에너지 등 산업 분야에 응용하여, 국가 산업 경쟁력을 높임.
- (인재 양성) RAON을 중심으로 차세대 과학기술 인재를 양성하고, 연구 환경을 개선하여 우수한 인재들이 연구에 몰두할 수 있도록 지원함.

□ 국내 정책의 한계점

- 활동도를 고려한 대형가속기 운영 및 구축 체계에 적합하게 유연하고 효과성이 반영된 정책 수립은 가속기 운용을 최근 시작한 입장에서 아직 미흡함.
- 정부 차원에서 대형가속기 기술경쟁력을 높일 수 있도록 체계적인 중장기 기술로드맵 수립과 이에 따른 전략적인 R&D 투자, 전문인력 양성, 산학연 협력체계강화, 효과적인 기술이전사업화 지원체계 등을 설계할 중심 체계와 전략이 아직은 발전 중임.

2 시장 · 산업 동향

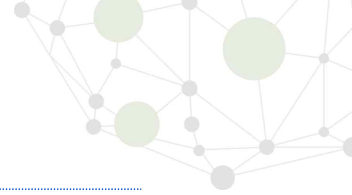
중이온가속기와 희귀동위원소(RI) 빔은 기초과학 연구뿐만 아니라 다양한 산업 분야에서 활용될 수 있는 잠재력을 지니고 있음. 한국의 중이온가속기 시설인 RAON은 이러한 가능성을 현실화하기 위한 핵심 인프라로 주목받고 있음.

□ 시장(핵물리 커뮤니티) 동향

- 현재 라온은 저에너지 구간의 빔 시운전에 성공하여 본격적인 운영을 준비하고 있음. 이러한 성과는 국내 산업계와 연구기관의 관심을 끌고 있으며, 다양한 분야에서의 협업과 연구 제안이 활발히 이루어지고 있음. 특히, 의료용 방사성 동위원소의 국내 생산이 가능해짐에 따라 관련 산업의 성장과 수입 대체 효과가 기대되고 있음.
- 초신성 폭발과 같은 극한 환경에서 생성되는 핵반응 데이터를 분석하여 우주의 기원과 원소 생성 과정을 이해할 수 있음.
- 중이온가속기를 통해 발견한 희귀동위원소는 핵물리학의 껍질 모형, 중성자별 상태방정식 등 기초과학적 이론의 검증과 발전에 기여함.
- RAON의 ISOL+IF(IF는 SCL2 건설 이후) 기술은 희귀동위원소 생성 능력을 극대화하여 세계적인 연구 경쟁력을 제공함.
- 중성자 과잉 상태의 핵반응 데이터를 축적하여 핵물리학의 미해결 문제를 해결함.

□ 산업적 활용 분야

- (의료 분야) 방사성 동위원소 생산: 라온을 통해 생성된 희귀동위원소는 의료 영상 진단과 암 치료에 사용되는 방사성 의약품의 원료로 활용될 수 있음. 이를 통해 국내 의료 산업의 자급률을 높이고, 환자들에게 더 나은 치료 옵션을 제공할 수 있음.
- (반도체 및 전자 산업) 중이온가속기를 활용하여 반도체 재료의 특성을 분석하고, 새로운 소재 개발에 기여할 수 있음. 이는 반도체 소자의 성능 향상과 신뢰성 증대에 도움이 됨.
- (에너지 분야) 희귀동위원소를 활용한 연구는 차세대 원자로 개발과 방사성 폐기물 처리 기술 향상에 기여할 수 있음. 이를 통해 에너지 산업의 안전성과 효율성을 높일 수 있음.



□ 향후 전망

- 라온의 완전한 운영이 시작되면, 국내 산업계는 중이온가속기를 활용한 다양한 응용 연구와 제품 개발을 추진할 것으로 예상됨. 이를 통해 고부가가치 산업의 육성과 기술 경쟁력 강화가 이루어질 것임. 또한, 국제적인 연구 협력과 기술 교류를 통해 글로벌 시장에서의 입지를 확대할 수 있는 기회가 마련될 것임.
- 이러한 흐름은 한국이 중이온가속기와 화귀동위원소 빔을 활용하여 산업 전반의 혁신과 발전을 이루는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대됨.

3 기술개발 동향

□ RAON 구축 개요

- 세계 최고 수준의 중이온가속기를 구축, 핵물리·원자력·소재·바이오 등 가속기 기반 기초 과학 분야에서 리더 국가로 도약
 - RAON은 방사광, 중입자 등 다른 가속기와 달리 우라늄 같은 무거운 동위원소를 광속의 1/2 수준까지 가속해야 하는 극한 기술의 집약체. 극한 기술은 초전도 가속관, 초전도 냉각설비(-271°C), 고주파 전원장치 등을 포함함.
 - RAON은 목표 성능 면에서 세계 최고 수준이며, 중이온가속기의 성능이 결정되는 희귀 동위원소 생성장치가 세계 최초로 두 가지 방식(ISOL+IF)을 결합한 방식.
 - RRAON과 견줄 수 있는 성능의 중이온가속기는 미국 미시건주립대 FRIB에서 보유한 가속기가 유일하며, 2004년 R&D를 시작으로 2022년 구축 완료함.

□ RAON의 기술 특징

- RAON은 ISOL(대전류 저에너지 방식)과 IF(소전류 고에너지 방식)을 결합하여 희귀동위원소 생성 기술을 확장함.
 - (ISOL 방식) 대전류 빔을 이용해 희귀동위원소를 생성
 - (IF 방식) 고에너지 입자를 통해 핵반응을 유도

□ RAON 현황

- RAON 장치는 저에너지구간 중심의 1단계, 고에너지 구간 중심의 선행R&D의 2단계로 구분하여 추진 중이며 현재 본과제를 통해 달성하고자 하는 바는 국제공동협력 연구를 통한 1단계 구간의 운용 안정성 증대와 2단계 선행 R&D의 조기 달성과 중이온 가속기의 목적에 가장 필요한 고에너지 구간 설치를 착수하는 것임.
- 저에너지 가속 구간은 시설건설과 저에너지 장치 구축이 2021년 말 완료되었고 극저온 플랜트, 입사기, 중앙제어장치 등 기반장치 구축 및 성능 시험은 2022년 8월에 완료되었다고 보고 됨.
- 가속구간 전단부는 두 차례 빔 시운전 성공이 보고 되었고 전체 가속구간 빔 시운전 성공도 2023년 보고되었음. 그리고 2024년 하반기 저에너지 구간 빔 서비스가 제공됨.

□ 고에너지 가속 구간(SCL2)

- 고에너지 가속 구간(SCL2)은 RAON의 핵심 구성 요소로, 희귀동위원소 생성 및 활용을 위해 가장 필수적인 역할을 수행함. 현재 RAON은 SCL2 구간 설치를 위한 선행 R&D를 진행 중이며 국제공동협업을 통해 이 업적을 조기 달성할 것으로 전망하고 있음.
- SCL2의 주요 기능은 RAON에서 생성된 입자를 추가로 가속하여 고에너지 상태로 증폭함. 이 고에너지 빔은 핵반응 실험과 희귀동위원소 생성에 필요한 충분한 에너지를 제공할 것으로 기대됨. 또한, SCL2는 다양한 입자(양성자, 중이온 등)를 높은 에너지로 가속할 수 있어 실험의 범위를 본래의 목적에 맞게 넓힐 것으로 예상됨.
- SCL2의 역할은 RAON이 세계 최초로 ISOL(저에너지 방식)과 IF(고에너지 방식)를 결합한 기술을 활용하며, SCL2는 이 결합 시스템의 고에너지 파트를 담당하기 때문에 RAON 본연의 기능을 발휘하기 위해서는 SCL2 구간이 꼭 필요한 상황임. 그리고 중성자 과잉 상태의 핵종을 생성하는 데 필요한 높은 충돌 에너지를 제공하여 희귀동위원소 생성 효율을 극대화할 것으로 기대됨. 또한, 초신성 폭발과 같은 극한 환경에서 발생하는 핵반응 경로를 재현하기 위해 높은 에너지의 이온빔이 필요하며 SCL2는 이러한 실험에 필요한 충분한 에너지 수준을 제공할 수 있는 가속기임.
- SCL2 가속 구간 필요성으로 저에너지 빔으로는 수행할 수 없는 고정밀 핵반응 실험과 새로운 핵종 발견을 가능하게 하고 고에너지 입자를 이용한 실험을 가능하게 하여 우주의 기원, 원소 생성 메커니즘과 같은 기초과학의 미해결 문제를 연구할 수 있도록 RAON의 본래의 연구 범위를 복원할 수 있도록 함. 미국의 FRIB, 일본의 RIKEN, 유럽의 CERN 등은 모두 고에너지 가속 구간을 갖추고 있으며 RAON의 SCL2 구간의 IF 방식을 이용한 희귀핵 생성은 이들과의 경쟁에서 기술적 우위를 제공할 것으로 예상됨.
- SCL2 가속 구간의 기술적 특성은 높은 가속 효율을 제공해야 하며 성능은 RAON의 입자빔을 최대 200MeV/u의 에너지에 도달하는 것이며 이러한 에너지 수준이 다양한 핵반응 실험과 응용 연구를 가능하게 하는 최소 마지노선으로 특정됨.

4 국제협력 동향

□ 국제 공동 협력의 중요성

- (데이터 표준화) RAON의 연구 결과를 국제적으로 통용되는 데이터베이스와 연동하여 글로벌 협력 기반을 강화할 수 있음.
- (연구시설의 상호 활용) RAON과 해외 주요 연구소 간 실험 장비 및 시설 공동 활용을 통해 연구 효율성을 극대화 할 수 있음.
- (연구자 교류 및 교육) 국제 연구자 초청과 국내 연구자의 해외 파견을 통해 연구 역량을 강화하고 글로벌 네트워크를 구축할 수 있음.

□ RAON의 국제협력

- RAON ISOL(대전류저에너지)과 IF(소전류고에너지) 기술을 결합하여 희귀동위원소 연구의 세계 최고의 최첨단 플랫폼을 제공하는게 최고의 국제협력 전략임. 이를 위해 RAON은 SCL2 선행 R&D를 조기에 완료하고 설치하여 설계 목적에 맞는 고에너지 희귀핵 빔을 제공해야 함.
- 해결책으로 RAON(한국형중이온가속기)과 RIKEN 간의 국제공동협력으로 SCL2와 IF 기술의 완성도를 시급하게 높일 필요가 있음. 이러한 협력을 통한 RAON의 운영 목적에 맞는 고에너지 희귀핵 빔 제공은 국제 희귀핵연구 분야의 학문적 산업적 그리고 이에 기반한 국제공동협력 연구에 직결됨.
- RAON의 SCL2 조기 완성을 위해 일본 이화학연구소(RIKEN)의 중이온가속기 RIBF와의 협력 방안을 다음과 같이 제안할 수 있음.
 - (기술 및 운영 노하우 공유) RIKEN RIBF는 다양한 중이온을 가속하여 약 1,500개의 희귀동위원소를 생성하는 등 세계 최고 수준의 성과를 보유하고 있음. 이러한 경험을 바탕으로 SCL2의 설계, 제작, 조립, 시험 및 운영 과정에서 발생할 수 있는 기술적 도전과 해결 방안에 대한 정보를 공유받을 수 있음.
 - (인력 교류 및 교육 프로그램) RAON의 엔지니어와 과학자들이 RIKEN에서 연수를 받거나, RIKEN의 전문가를 RAON에 초청하여 현장 교육을 실시함으로써 SCL2의 조기 완성에 필요한 기술 역량을 강화할 수 있음.
 - (공동 연구 및 개발 프로젝트 추진) 공동 워크숍 및 세미나 개최를 통하여 양 기관이 정기적으로 워크숍과 세미나를 개최하여 최신 기술 동향과 연구 결과를 공유하고,

SCL2의 개발에 필요한 지식을 습득할 수 있음.

- RIKEN과의 공동 연구를 통해 SCL2의 성능 향상과 안정성 확보를 위한 새로운 기술과 방법을 개발하고 장비 및 부품 공동 개발을 통해 SCL2에 필요한 핵심 부품과 장비를 공동으로 개발하여 품질을 높이고 개발 기간을 단축할 수 있음.
- (운영 및 유지보수 경험 공유) RIKEN의 가속기 운영 경험을 바탕으로 SCL3 및 SCL2의 안정적인 운영을 위한 절차와 노하우를 습득할 수 있음. 또한 RIKEN의 유지보수 경험을 통해 현재의 SCL2의 잠재적 문제를 사전에 파악하고, 효율적인 유지보수 전략을 수립할 수 있을 것으로 판단됨.

IV. 결론

1 시사점

□ 기술/연구/운영적 시사점

- (RIKEN의 세계적 기술 활용) RIKEN RIBF는 초전도 가속기 및 희귀동위원소 생성 분야에서 세계적으로 인정받는 연구소임. RAON은 RIKEN의 기술적 노하우를 통해 SCL2의 설계, 제작, 조립, 운영까지의 전 과정을 효율화할 수 있음. 이를 통해 고에너지 희귀핵 빔 생성 기술의 완성도를 차후 높이고 운영 초기의 문제를 최소화할 수 있음
- (ISOL+IF 방식의 조기 안정화) RAON은 세계 최초로 ISOL(저에너지 방식)과 IF(고에너지 방식)을 결합한 중이온가속기임. RIKEN과의 협력을 통해 이 시스템의 개발과 안정적 운영이 가능하며, SCL2의 성능은 RAON의 핵심 기술력으로 작용할 것임. 이는 RAON이 미국 FRIB, 일본 RIKEN, 유럽 CERN 등 주요 연구소와 경쟁력을 갖추는 데 기여할 것으로 예측됨.
- RIKEN과의 인력 교류는 RAON의 연구자들이 초전도 가속기 및 희귀동위원소 연구에 대한 실질적 경험을 습득할 수 있도록 지원함. 또한, 양 기관이 정기적으로 공동 워크숍과 세미나를 개최하면 최신 기술 동향 및 문제 해결 방안을 공유할 수 있음.

□ 경제적 및 산업적 시사점

- (희귀동위원소 산업화 촉진) RAON의 희귀핵 빔은 방사성 의약품, 반도체 소재 연구, 차세대 에너지 개발 등 응용 연구의 확대를 가능하게 함. 이는 국내 의료 및 소재 산업의 경쟁력 강화로 이어질 것으로 판단됨.
- (산업 생태계 강화) 국제 협력을 통해 RAON이 기술 이전 및 상용화를 적극적으로 추진하면, 국가 연구 비용 절감 및 산업화 기반 구축이 가능해짐. RAON은 이 과정에서 한국의 기술력을 글로벌 수준으로 끌어올리는 허브 역할을 수행할 것으로 기대됨.

□ 글로벌 협력 강화

- (국제 연구 네트워크의 중심 역할) RAON과 RIKEN의 협력은 미국 FRIB, 유럽 CERN과 같은 다른 주요 연구소와의 다자간 협력을 촉진할 수 있는 발판이 될 것임. 이는 한국이

희귀동위원소 연구의 글로벌 리더로 자리매김하는 데 중요한 역할을 할 것으로 예상됨.

- (데이터 표준화 및 연구 통합) RIKEN의 데이터와 연구 결과를 공유하고 RAON의 연구 성과를 국제 데이터베이스에 통합하면, 글로벌 협력 기반이 강화되고 연구 효율성이 높아질 것임.

□ 결론

- RAON의 SCL2 조기 완성을 위해 RIKEN RIBF와의 협력은 기술적, 연구적, 경제적, 국제적 측면에서 다각적인 이점을 제공함. 이러한 협력은 RAON이 세계적 수준의 중이온 가속기로 자리 잡을 수 있는 기반을 마련하며, 한국이 희귀동위원소 연구 및 관련 산업에서 선도 국가로 도약할 수 있도록 하는 중요한 전략적 선택임.

참고 문헌

- [1] IBS, 중이온가속기연구소 홈페이지
- [2] IUPAP Report 41(2023)
- [3] The 2023 Long Range Plan For Nuclear Physics, DOE, 2023
- [4] 일본학술회의 공식홈페이지
- [5] 중국 제 14차 5개년 계획(비공식 번역문), 2022
- [6] ESFRI, ROADMAP 2021 공식 홈페이지
- [7] FRIB: Opening New Frontiers in Nuclear Science, 2012
- [8] GSI FAIR 공식 홈페이지
- [9] GANIL SPIRAL2 공식 홈페이지
- [10] CERN HIE-ISOLDE 공식 홈페이지
- [11] RIKEN RIBF 공식 홈페이지
- [12] HIAF 공식 홈페이지