희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기

희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기 개발 현황

DOI: 10.3938/PhiT.24.046

이주한·신태수·정순찬

Current Status of the Rare Isotope Science Project (RISP)

Ju Hahn LEE, Taeksu SHIN and Sunchan JEONG

The Rare Isotope Science Project (RISP) of the Institute for Basic Science (IBS) has been initiated along with the construction of a heavy-ion linear accelerator and experimental facilities at Sindong in Dajeon. This superconducting Linac can accelerate beams from proton to uranium at 200 MeV/u, 400 kW (for the uranium beam). The development of the Linac is in-progress with the development of rare isotope production facilities, where two different production methods, an in-flight fragment (IF) method and an isotope separation on-line (ISOL) method, are employed. At present, major components for Linac, such as the superconducting cavities and the cryomodules have been fabricated and tested at both domestic test facilities and test facilities abroad. The RISP will provide high-intensity stable-ion and rare isotope (RI) beams for domestic and international users. For applications of the RI beams, the construction of low- and intermediate-energy nuclear science and applied science facilities is ongoing. This paper will present an overview of the progress with the construction of the RISP facilities.

저자약력

이주한 박사는 중앙대학에서 핵물리학실험으로 박사 학위(2005년)를 취득하였으며, 2012년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 통합사업조정부 연구위원으로 재직 중이다. (jhlee2@ibs.re.kr)

신태수 박사는 Massachusetts Institute of Technology에서 입자 및 원자핵 물리학 실험으로 박사 학위(2000년)를 취득하였으며, 2011년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 사업조정팀장으로 재직 중이다. (ts shin@ibs.re.kr)

정순찬 박사는 초쿠바대학에서 핵물리학실험으로 박사학위(1989년)를 취득하였으며, 2014년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단장으로 재직 중이다. (scjeong@ibs.re.kr)

서 론

물리학자들은 무거운 원자들을 가속으로 충돌시켜 결합되기 이전의 상태를 관측하고, 거대 가속장치를 이용하여 우주 초기의 빅뱅 당시 환경을 실험실에서 재현하고자 많은 노력을 하고 있다. 최근 유럽입자물리연구소(CERN)는 대형강입자가속기(LHC)를 재가동하면서 우주 시원의 비밀을 밝히려는 인류의 탐색이 다시 시작되었다고 선언하였다. 강입자가속기는 원자핵이나 미립자를 거의 빛의 속도로 충돌시킬 때 생기는 물리현상을 관찰하는 실험 장치다. 우주 탄생의 순간으로 알려진 '빅뱅'을 소규모로 실험실에서 재현하여, 극고온 상태에서 찰나에 이뤄진 물질의 생성 과정을 직접 들여다보려는 시도다. 또한 CERN의 입자가속기는 2012년 충돌 실험에서 만물에 질량이 부여되는 과정을 설명해 주는 '신의 입자'인 힉스 입자의 존재를 증명해 입자물리학의 신기원을 세우기도 했다.

우리나라도 이와 유사한 국제적 기초과학 연구를 진행할 수 있는 중이온가속기를 구축하고 있다. '신의 입자'를 찾아낸 CERN의 거대강입자가속기가 빅뱅(대폭발) 직후를 확인했다면, 한국형 중이온가속기는 빅뱅 이후 시점의 우주를 재현한다고 할 수 있다. 중이온 가속기를 활용하면 우주와 별의 과거를 밝혀내고, 새로운 원소를 발견하여 우주 원소지도도를 완성하고, 핵의 대칭에너지를 연구하며, 방사성 동위원소 등 기초연구에서 응용연구에 이르기까지 다양한 연구가 가능할 것으로 기대한다.

본 특집호에서는 현재 진행되는 프로젝트를 장치별로 세분화하여 독자의 이해를 도울 수 있도록 구성하였다. 우선 프로젝트의 개요를 시작으로 가속장치와 기반기술을 소개하고, 희귀동위원소를 발생 및 분리하는 방법을 설명한다. 끝으로 희귀동위원소를 활용하는 장치 개발과 응용 분야를 전망하고자 한다.

사업단의 발자취

중이온가속기는 기초과학 및 다양한 응용과학기술의 새로운 텃밭인 희귀동위원소 과학을 위한 핵심 도구이다. 과학 선진국

Fig. 1. Footprint of Rare Isotope Science Project (RISP).

들은 21세기 초반부터 초전도 가속관 개발의 성공에 힘입어 희귀동위원소 과학의 주도권을 선점하기 위한 중이온가속기 개발에 착수하고 있다. 거대과학시설이 부족한 우리나라에서 첨단기술의 집합체인 중이온가속기는 우리 과학계의 근간이 될 수 있고 우리의 기술력을 전 세계에 뽐낼 수 있는 맞춤형 아이템이라 할 수 있다. 우리도 이러한 꿈을 이루기 위해 2011년 12월, 세계를 선도할 기초과학연구의 집약체인 기초과학연구원 내에 희귀동위원소과학을 위한 한국형 중이온가속기의 구축을 목표로 ‘중이온가속기건설구축사업단’을 출범하고 본격적인 개발경쟁에 뛰어들었다(그림 1 참조).

한국형 중이온가속기는 2011년 초에 완성된 개념설계보고서(CDR: Conceptual Design Report of Korea Rare Isotope Accelerator)^[1]를 바탕으로 추진되었다. 그런데 왜 ‘한국형’이라는 형용사가 붙었을까? 그 이유는 개념설계보고서에서 제안하고 있는 희귀동위원소 생산시설이 순수 한국과학자들의 아이디어로 탄생하였기 때문이다. 보고서에서는 희귀동위원소 생성을 위해 활용되고 있는 ISOL(Isotope Separation On-Line) 방식과 IF(In-flight Fragmentation) 방식을 결합한 독창적인 희귀동위원소 생성방식을 세계 최초로 제안하고 있으며, 이에 적합한 가속기 구조와 생성 가능한 희귀동위원소를 이용하여 수행할 수 있는 다양한 활용연구 분야 및 해당 시설을 소개하고 있다. 사업단은 총괄자문위원회(International Advisory Committee)와 기술자문위원회(Technical Advisory Committee), 그리고 활용자문위원회(Scientific Program Advisory Committee) 등 국제자문위원회를 구성하여 개념설계보고서에 대한 상세 검토를 정기적으로 수행하였다. 다양한 위원회 운영을 통해 중이온가속기 및 실험장치의 독창성과 세계 최고의 성능을 구현하기 위한 현실적인 장치설계 및 각종 설계변수들을 검증받았다. 전문가의 의견을 토대로 집중적인 설계과정을 통해 2013년 6월에는 상세설계보고서(TDR: Technical Design Report)^[2]를 완료하였다. 상세설계보고서를 바탕으로 구축일정표 및 공정관

리절차서 등을 마련하여 2021년 세계 최고 수준의 희귀동위원소 과학을 위한 한국형 중이온가속기 구축을 목표로 매진하고 있다.

한국형 중이온가속기는 과학기술적 중요도 이외에 단순히 물리적 규모만 비교해도 단일시설로는 국내 최대이며, 더불어 세계의 어떤 과학시설과 견주어도 뒤처지지 않는 대규모 시설이다. 축구장 수백 개가 들어설 수 있다는 대형 입자가속기의 경우에도 실제 장치가 차지하는 면적은 극히 일부에 지나지 않는다. 반면, 총 세 대의 선형가속기와 한 대의 사이클로트론, 그리고 두 종류의 희귀동위원소 생산시설 및 각종 활용연구시설로 구성되는 한국형 중이온가속기는 장치 종류의 다양성과 각 장치의 규모로 볼 때 가히 세계적 규모라 할 수 있다. 그렇다면 이러한 대규모 시설이 어디에 위치하는 걸까? 과학비즈니스벨트의 핵심 대형 기초연구 시설로서 적합한 부지를 선정하는 것은 쉬운 일이 아님이 자명하지만 부지 선정의 지연은 사업추진 계획의 전면적 변화를 가져올 수 있는 주요 사안이므로 사업단원들도 마음 졸이며 기다렸었다. 다행히 2014년 말, ‘국제과학비즈니스벨트 거점지구 실시계획’이 승인되면서 지리적으로 대한민국의 중심이자 국제과학비즈니스벨트 거점지구 중 하나인 신동지구(세종시와 대전시의 경계에 위치하며 행정구역 상 대전시에 포함)에 총 부지면적 952,066 m²로 추진되는 것이 확정됨으로써 명실상부 시설 건설사업과 장치 구축사업이 통합된 진정한 중이온가속기 건설 구축사업이 추진되게 되었다. 2014년에 기본 설계가 시작되어 2016년 말 착공을 목표로 한국형 중이온가속기는 성장 중에 있다.

앞서 언급했듯이 첨단 기술의 집합체인 중이온가속기의 개발을 위해서는 관련 기술 분야의 풍부한 경험과 참신한 아이디어 그리고 할 수 있다는 자신감과 부단한 노력이 요구된다. 비록 다른 종류의 가속기이지만 이미 우리나라는 포항 방사광 가속기와 경주 양성자가속기 등 두 번의 선형가속기 개발 경험과 의료용 동위원소 생산을 목적으로 한 30 MeV 사이클로트론을 개발하여 보급한 경험도 가지고 있다. 사업단은 이러한 경험과 중이온가속기와 그 활용분야에서 활발한 연구개발 활동을 진행하고 있던 국내외 우수인력들의 결집을 바탕으로 한 부단한 노력과 성실한 연구결과 도출을 통해 우려와 의문의 시선을 보내던 학계와 국민들의 마음에 확신과 신뢰의 싹을 틔워가고 있다.

REFERENCES

- [1] “Conceptual Design Report: Korea Rare Isotope Accelerator”, KoRIA Conceptual Design Project, Ministry of Education, Science and Technology, Korea (2011).
- [2] “Technical Design Report”, Rare Isotope Science Project (RISP), Institute for Basic Science (IBS) (2013).

Fig. 2. Two different methods for Rare-Isotope productions.

한국형 중이온가속기의 독창성

희귀동위원소는 자연계에 아주 짧은 순간 존재하는 원소와 물질의 기원 탐색, 우주에서 별의 생성과정 규명 및 물질의 특이구조 탐색 등의 기초과학 연구부터 세포의 특이형질 발현 및 초기 암 진단 등의 의생명과학, 2차전지 특성 연구 등의 신에너지 개발 등 다양한 분야에서 그 활용성이 증대되고 있다. 다양한 희귀동위원소의 활용성은 다량의 희귀동위원소 생산방법인 ISOL(Isotope Separation On-Line)과 IF(In-flight Fragmentation) 시설의 개발에 있다. ISOL은 1960년대 유럽 핵과학연구소 CERN에서 시작된 희귀동위원소 생산 방법으로서 가벼운 원소이온(양성자 등)을 가속하여 무거운 원소로 된 표적(우라늄 등)에 충돌시켜 표적을 쪼개고, 그 쪼개진 파편 중에서 목표로 하는 희귀동위원소를 추출하는 기술이다.^[3] 목표로 하는 희귀동위원소를 추출하는 과정이 여러 단계로 구성되어 있어 추출된 희귀동위원소의 순도가 매우 높은 것(90% 이상)이 장점이지만 추출 과정에 많은 시간이 소요되므로 수명이 긴(0.001초 이상) 희귀동위원소만 생산할 수 있다.(그림 2, 왼쪽 위 그림 참고). 이와는 반대로 IF는 무거운 원소이온(우라늄 이온 등)을 가속하여 가벼운 원소로 된 표적(탄소 등)과 충돌시킨 후, 이로 인해 쪼개진 빔의 파편 중 목표로 하는 희귀동위원소만을 추출해내는 방법이다.^[4] 부서진 빔의 파편이 매우 다양하고 초기의 빔 이온처럼 고속으로 날아가는 희귀동위원소들을 자석을 이용하여 짧은 시간 내에 분리하므로 짧은 수명($\sim 10^{-5}$ 초)의 희귀동위원소도 얻을 수 있으나 순도가 낮은 것($\sim$ 수%)이 단점이다.(그림 2, 오른쪽 위 그림 참고). 그러므로 배경 오염원의 영향이 큰 희귀동위원소의 핵 특성 및 정밀 질량측정이나 2차 상호작용을 이용하는 응용 분야에서는 고순도의 희귀동위원소를 공급할 수 있는 ISOL 방법을 활용하고 새로운 희귀동위원소의 탐색 등과 같이 순도보다는 종류의 다양성에 초점을 둔 연구에서는 IF 방법이 주로 사용된다. 중이온가속기

Fig. 3. Conceptual design of superconducting heavy-ion accelerator facilities.

설계구축사업단에서는 차별성을 확보하고 희귀동위원소 과학의 적용범위를 극대화하고자 ISOL과 IF의 두 가지 희귀동위원소 발생방법을 융합하였다. 또한 ISOL에서 생성된 희귀동위원소를 이온화하고 재가속한 후 IF 방법을 적용하는 방식인 ISOL-IF 결합형 희귀동위원소 생산 방식을 세계 최초로 구현하고자 하였다.(그림 2, 아래 그림 참고)

중이온가속기건설구축사업단에서는 한국형 중이온가속기의 독창성을 구현하기 위해 ISOL 표적에 양성자 빔을 전송하는 70 MeV 사이클로트론과 ISOL에서 생성된 희귀동위원소 이온을 가속하기 위한 18 MeV/u 초전도 선형가속기(Post Accelerator), 그리고 IF에 200 MeV/u의 우라늄 이온빔을 전송하는 두 대의 초전도 선형가속기(18 MeV/u 초전도 선형가속기 + 200 MeV/u 초전도 선형가속기, 통칭 Driver LINAC)로 구성하였으며, ISOL에서 생산된 희귀동위원소 이온빔을 재가속하여 IF에 전송할 수 있도록 Post Accelerator와 200 MeV/u 초전도 선형가속기를 연결하는 구조를 채택하였다(그림 3 참고). 이를 통해 ISOL과 IF를 독립적으로 또는 동시에 운영이 가능하게 하였으며, 또한 ISOL과 IF를 결합한 극도로 희귀한 동위원소의 생성실험을 수행할 때에도 18 MeV/u 초전도 가속기에서 전송되는 안정원소 빔을 이용한 실험이 가능하도록 함으로써 가속기의 활용도를 극대화하였다. 또한 희귀동위원소 활용분야의 국내외 전문가의 자문을 통해 각 가속기의 끝단에서 획득 가능한 빔의 종류와 에너지를 고려한 활용연구 분야를 발굴하고 이를 위한 실험장치 개발을 추진하고 있다.

현재 ISOL 방식은 유럽 CERN(ISOLDE), 프랑스 GANIL (SPIRAL II), 캐나다 TRIUMF(ISAC I, II) 등에서 활발히 활용

REFERENCES

- [3] "Electromagnetic Separation of Radioactive Isotopes", Proceedings of the International Symposium, Vienna (1960).
- [4] "In-Flight Separation of Projectile Fragments", David J. Morrissey and Brad M. Sherrill, Lect. Notes Phys. 651 (2004).

Fig. 4. Capabilities of RISP accelerator.

되고 있으며, 생산된 희귀동위원소의 활용도를 높이기 위한 재가속 시설의 개발 등의 성능 향상 작업이 진행되고 있다. IF 방식은 일본 RIKEN(RIBF)과 중국 IMP(HIRFL)에서 운영 중에 있으며 미국 MSU(FRIB), 독일 GSI(FAIR) 등에서 가속기 및 IF 장치 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. IF 방식은 초기 빔의 에너지에 의해 희귀동위원소 빔의 에너지가 결정되므로 재가속 시설이 필요하지 않으며, 오히려 빔 에너지를 줄이기 위한 장치(Gas cell 등)가 요구된다. 한국형 중이온가속기는 앞서 언급했듯이 ISOL에서 생산된 희귀동위원소를 18 MeV/u까지 재가속 가능하고, 최대 출력 400 kW 우라늄 이온빔(200 MeV, 8.3 pmA)을 이용한 IF 방식을 채택하고 있으므로 현재 운영 중이거나 계획 중인 전 세계 어떤 희귀동위원소 시설과 견주어도 절대 뒤지지 않는 활용 범위를 가지고 있다.(그림 4 왼쪽 그림) 더불어 한국형 중이온가속기만의 특징인 ISOL과 IF를 결합한 방식을 통해서 생산할 수 있는 희귀동위원소의 희귀도(원자번호와 질량의 비율로 나타냄)는 타시설로는 접근할 수 없는 범위에 위치할 수 있으므로(그림 4 오른쪽 그림) 한국형 중이온가속기는 새로운 희귀동위원소의 발견 및 그로부터 파생되는 새로운 현상들을 연구할 수 있는 유일한 시설이 될 것이다.

개발현황 및 주요 추진일정

중이온가속기건설구축사업단은 한국형 중이온가속기가 들어설 건물 및 부대시설을 구축하는 시설 건설사업과 중이온가속기 및 각종 실험장치를 구축하는 장치 구축사업 등 두 가지 사업으로 구성되어 추진되고 있다. 현재 시설 건설사업은 앞서 언급한 것처럼 기본설계가 한창 진행 중으로, 이 과정을 통해 전체 건물의 배치와 세부 도면, 각종 유틸리티 정보, 추정 공사비용 등이 결정되게 된다. 이와 더불어 시설 건설사업의 주요 업무인 방사선 인허가 관련 방사선안전보고서 준비가 한창이다. 이 때까지 국내에 중이온가속기와 같은 대형의 고출력 방사선 발생시설이 건설된 바 없기 때문에 방사선 인허가 담당 기관인 한국원자력안전기술원에서도 큰 관심을 가지고 인허가

Fig. 5. Development of major accelerator components.

심사에 대비하고 있으며, 사업단에서도 방사선 안전 관련 분야에 경험이 풍부한 국내 대학 및 연구소와의 협력을 통해 방사선 안전보고서 준비에 만전을 기하고 있다.

장치 구축은 시작품 제작, 본제품 제작 및 설치 운영의 3단계로 구분된다. 2013년 6월 기술설계보고서 작성 후, 장치 구축사업은 가속장치와 실험장치의 핵심 부품에 대한 시작품 제작에 착수하여 각종 설계 변수의 검토와 확정 작업을 진행하였으며, 일부 부품은 본제품을 제작하기 시작하였다.(그림 5 참고) 특히, 가속기장치에 중이온을 공급하는 이온원의 경우 28 GHz 초전도 전자공명(Electron Cyclotron Resonance, ECR) 장치를 자체 제작하였다. 14년 말에는 산소빔을 성공적으로 인출하였으며, 현재는 인출 빔 세기의 향상 및 안정화를 위해 각종 변수의 최적화 작업을 수행 중에 있다. ECR 이온원에서 발생한 중이온의 가속은 총 4종류의 초전도 가속관을 활용할 계획이며, 가속장치 앞단에 설치되는 Quarter Wave Resonator (QWR) 가속관의 시작품은 국내 기술로 제작에 성공하였으며, 캐나다 TRIUMF 연구소에서의 1차 저온 성능시험을 성공적으로 수행하고 2차 저온 시험을 진행 중이다. 제작된 가속관은 국내로 회수하여 문지동 실험실에 설치될 예정이다. 문지동 실험실에는 본제품 가속관의 표면 처리 공정과 조립/설치에 앞서 성능 검증 시험을 수행할 초전도 가속관 시험 시설 설치 공사가 16년 초에 완공을 목표로 진행 중이다. 16년 하반기에는 본 시설 내에 한국형 중이온가속기의 전단부가 설치될 예정이다.

희귀동위원소 빔 발생 시설의 경우, ISOL 표적 시험 시설이 성공적으로 구축되어 표면 이온원을 이용한 이온빔 인출에 성공하였으며, 또한 레이저를 이용한 중성원소의 이온화 실험도 성공적으로 수행하였다. 또한 우라늄 카바이드 표적의 제작 공정 확립을 위해 우라늄 카바이드와 화학적 성질이 유사한 란

Fig. 6. Progress of experimental facilities.

Fig. 8. Bird view of the accelerator complex.

Fig. 7. Major schedule of RISP.

타늄 카바이드를 이용하여 직경 13 mm의 표적제작을 성공적으로 수행하였다. IF 시설에 대해서는 다중구조의 흑연 표적 시스템의 공학 설계를 마치고 성능 검증을 위한 시작품 제작을 진행 중에 있으며, 동위원소 분리기의 핵심 장치인 초전도 전자석의 시제품 제작과 성능 검증 시험을 수행 중에 있다.

활용 연구시설은 저에너지 핵과학 시설, 중간에너지 핵과학 시설, 그리고 응용과학 시설 등 크게 세 가지로 나뉘어 개발 중에 있다. 저에너지 핵과학 시설로는 되튕 질량분리기를 중심으로 하여 다양한 핵반응 표적과 각종 검출기 시스템으로 구성된 실험장치, KOREA Broad-acceptance Recoil spectrometer and Apparatus(KOBRA)가 있으며, 현재 되튕 질량분리기의 주요 요소 장치에 대한 공학 설계와 배열형 감마선 검출 시스템 및 빔 추적용 검출기인 PPAC이 개발 마무리 단계에 있다. 중간에너지 핵과학 시설로는 희귀동위원소 중입자 충돌 실험을 수행하기 위한 대수용 다목적 분광기, Large Acceptance Multi-Purpose Spectrometer(LAMPS)가 있으며, 그 핵심 장치인 시간투영검출기(Time Projection Chamber, TPC)의 시작품을 완성하고 성능 시험을 진행 중에 있다. 응용과학 시설은 다중반사 비행시간 분광기인, Multi-Reflection Time-of-Flight

Mass Spectrometer(MR-TOF-MS)를 중심으로 하는 질량측정 시설과 μ SR 및 β -NMR로 구성된 물성과학 시설 및 각종 중이온 빔을 생성 조직 또는 세포에 조사하기 위한 의생명과학 시설, 그리고 고속 중성자에 대한 반응단면적 측정을 위한 중성자과학 시설 등으로 구성되어 있으며, 현재 핵심 장치에 대한 공학 설계가 진행 중에 있다.

한국형 중이온가속기의 구축기간은 2011년 12월부터 2021년 12월까지 총 10년 1개월이다. 이미 달성하였지만 올해 말 ECR 이온원과 ISOL에서의 빔 인출을 시작으로 하여, 2017년 후반에는 한국형 중이온가속기의 전단부에서의 빔 인출, 2018년 말 가속기 시설에 유틸리티 공급, 2019년 말에는 저에너지 실험실에 안정동위원소 빔 공급, 2020년 초 한국형 중이온가속기 최초 실험 수행, 2021년 말 한국형 중이온가속기 완공 등, 설 틈 없는 숨 가쁜 여정이 기다리고 있다.(그림 7 참조)

맺음말

세계 최고 수준의 희귀동위원소과학 연구를 위한 한국형 중이온가속기 구축을 목표로 출범한 중이온가속기건설구축사업은 여러 어려움을 극복하고 지속적인 진척을 통해 어느덧 전체기간의 반환점을 목전에 두게 되었다. 그 절반의 시간을 미래의 성공을 위한 준비의 기간이었다고 본다면 앞으로 남은 절반의 시간은 그동안 갖고 닦은 기술과 경험을 바탕으로 우리의 목표인 세계 최고 수준의 한국형 중이온가속기를 국민들과 세계의 연구자들에게 선물하는 과정이라 생각한다. 지난 시간 동안 축적된 경험과 기술력, 학계와 정부의 든든한 믿음과 지원, 그리고 국민의 든든한 성원에 힘입어 중이온가속기건설구축사업단 120여 명의 구성원들은 오늘도 세계의 타 경쟁 그룹보다 더 멀리, 더 힘찬 비상을 위한 준비에 매진하고 있다.