희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기

RISP 희귀동위원소빔 활용 실험장치

DOI: 10.3938/PhiT.24.050

권영관·김기동·문준영·김영진

RISP Experimental System Using Rare Isotope Beams

Young Kwan KWON, Gi Dong KIM, Jun Young MOON and Young Jin KIM

The experimental system at the Rare Isotope Science Project (RISP) is designed to use stable heavy-ion beams and rare-isotope (RI) beams from the production and the separation systems (in-flight (IF) separator and isotope separation on-line (ISOL) systems) at the project's accelerator complex for research in pure and applied science. The facilities for pure sciences are being designed to carry out experiments in the beam energy range from a few keV to hundreds of MeV/nucleon for fundamental science research. The RISP will establish various spectrometers, such as a recoil spectrometer (KOBRA), a large acceptance spectrometer (LAMPS), a high-

resolution spectrometer (HRS), a zero-degree spectrometer (ZDS), and a high-precession mass measurement system (HPMMS) with a collinear laser spectroscopy system (CLS). For applied sciences, β -NMR and μ SR systems will be employed for material science. Bio-medical and neutron science facilities are also being considered.

서 론

1980년대 중반 희귀동위원소빔 생성·분리 및 이를 활용한 연구가 가능해지면서 핵물리학은 르네상스 시대를 맞이하게 된다. 핵도표(nuclear chart) 상 전인미답(前人未踏)의 영역을 개척하며 그동안 해결되지 않았던 많은 이론적 난제들이 그 해답을 찾았으며, 이는 새로운 실험 데이터에 대한 요구로 이어졌다. 이러한 요구에 부응하여 세계 유수의 연구기관들이 경쟁적으로 가능한 빔의 종류, 세기(intensity)와 순도(purity) 등의 측면에서 세계 최고 성능을 자처하는 희귀동위원소빔 연구시설을 구축하였다. 지금도 많은 선진국가에서 유사한 연구시설을 구축 중이거나 계획 단계에 있다. 특히 중이온가속기건설구축사업단(이하 RISP)에서는 다양한 이온을 가속할 수 있는 초전도 중이온 선형가속기 구축과 더불어 세계 최초로 ISOL과 IF를 결합한 방식으로 보다 불안정한 희귀동위원소빔을 생성할 수 있다는 독창성을 가진다. 다른 유사시설과 차별성을 갖는 희귀동위원소빔 생성·분리 및 활용 연구시설로써 그 성공적인 구축과 향후 활용연구를 통해 도출될 결과에 전 세계가 주목하고 있다.

중이온가속기건설사업의 최종 성패(成敗)는 RISP에 구축되는 연구시설을 이용한 성공적인 활용연구에 달려있기 때문에 최초 사업기획단계부터 이용자의 수요를 반영하여 시설의 활용도를 극대화하기 위한 노력이 있었다. 특히 희귀동위원소빔의 활용 분야가 핵물리학뿐 아니라 다양한 학문분야로 활용영역이 확장되고 있는 세계적인 추세를 고려하여 2009년 다양한 학문분야의 국내이용자를 대상으로 핵자당 200 MeV까지의 희귀동위원소빔을 이용하는 연구 프로그램에 대한 연구의향서를 접수한

저자약력

권영관 박사는 중앙대학교 물리학과에서 핵물리학실험으로 박사학위(2007)를 취득하였으며, 현재 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 실험장비팀장으로 재직 중이다. 일본의 CNS, RIKEN 연구소 등에서 핵물리학 연구를 수행하였다. (ykwon@ibs.re.kr)

김기동 박사는 부산대학교 물리학과에서 핵물리 실험으로 박사학위(1992)를 취득하였으며, 현재 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단의 연구위원으로 재직 중이다. 일본 동경 공업대 원자력공학 연구소 및 한국 지질자원연구원에서 고속 중성자 기반 핵자료 측정 연구를 수행하였다. (gdkim@ibs.re.kr)

문준영 박사는 중앙대학교 물리학과에서 핵물리학실험으로 박사학위(2009)를 취득하였으며, 현재 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 연구위원으로 재직 중이다. 일본의 도호쿠대, 큐슈대, CNS 연구소 등에서 핵물리학 연구를 수행하였다. (jymoon@ibs.re.kr)

김영진 박사는 고려대학교 물리학과에서 핵물리학실험으로 박사학위(2004)를 취득하였으며, 현재 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 연구위원으로 재직 중이다. 독일 GSI의 박사후 연구원과 미국 일리노이 주립대(Urbana-Champaign)의 연구원을 거치면서 중이온 충돌실험, 편극 양성자 충돌실험을 통한 양성자 스핀구조 분석, 관련 검출기 연구개발을 수행하였다. (yjkim@ibs.re.kr)

희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기

Fig. 1. Strategy for development of experimental systems in RISP.

바 있다. 그 결과 총 83편의 의향서가 접수되었고 이를 바탕으로 연구분야를 핵과학, 원자 및 분자과학, 물성과학 그리고 의생명과학의 총 4개 분야로 분류하고 해당분야가 필요로 하는 시설 및 빔 제원을 결정하였다(그림 1). 이후 두 차례의 과학프로그램자문위원회(SPAC, 2013.10월과 2014.11월에 개최)와 내부검토 등을 거쳐 전체 개발전략을 수립하고 현재 각 장치별로 연구개발에 박차를 가하고 있다. 초전도선형가속기로부터 빔이 인출되는 2020년에 저에너지핵과학실험장치인 KOBRA를 이용, RAON에서의 첫 Day-1 실험이 계획되어 있으며 이후 순차적인 실험 수행 및 업그레이드와 확장을 계획하고 있다.

현재 개발 중인 활용연구시설들을 [표 1]에 나타내었으며, 이 중 KOBRA, LAMPS와 응용장치들에 대한 보다 자세한 내용을 이어지는 장에 설명한다.

KOBRA: 희귀동위원소 빔을 이용한 다목적, 저에너지핵과학실험장치

중이온가속기건설구축사업단에서는 핵의 다양한 성질들을 연구하기 위해서 초전도 가속장치와 동위원소 분리장치를 개발함과 동시에 희귀동위원소 빔 연구 시설을 설계 중에 있다. 실험장치 팀에서는 저에너지의 희귀동위원소 빔 생성 및 이를 이용한 핵구조, 핵반응 그리고 천체 핵물리 연구에 적합한, 다목적 스펙트로미터("KOBRA")를 설계 중에 있다.

인류학자의 말에 따르면, 특정 종족 또는 사회에 속한 남성 또는 여성의 비율이 매우 크면, 그 집단의 성향은 극단적으로 달라질 가능성이 높다고 한다. 이처럼 핵자 안에서도 양성자 혹은 중성자가 상대적으로 매우 많을 경우 그 집합체인 핵의 성격 역시 우리가 지금까지 알고 있는 것과는 매우 달라질 것이다. 많은 이론 핵물리학자들이 이의 매우 높은 가능성을 제시하고 있다.^[1]

Table1. List of experimental systems at RISP.

활용 분야	장치명	세부활용연구	빔에너지
핵물리학	KOBRA (Korea Broad acceptance Recoil spectrometer and Apparatus)	핵구조, 핵천체물리, 핵반응	저에너지
	LAMPS (Large Acceptance Multi-Purpose Spectrometer)	중이온 충돌 실험, 대칭에너지, 핵구조, 핵반응	고에너지
	ZDS (Zero Degree Spectrometer)	핵구조, 핵반응	고에너지
	CLS (Collinear Laser Spectroscopy system)	핵 기본 특성 (크기, 스핀 등)	초저에너지
	HPMMS (High Precision Mass Measurement System)	핵 질량 측정	초저에너지
핵자료	NSF (Neutron Science Facility)	고속중성자 기반 핵자료생산	저에너지
물성 과학	μ SR (muon Spin Resonance Facility)	뮤온빔을 이용한 물성연구	고에너지
의생명과학	BMF (Bio Medical Facility)	암치료법 개발, 생물학적 변이 연구	고에너지

그렇다면, 이 예측이 옳은지는 직접 혹은 간접적으로 "실험"이라는 과정(방법)을 통해 확인해 볼 수 있을 것이다. 이를 위해서는 이처럼 양성자, 혹은 중성자가 매우 많은 희귀동위원소들을 빔으로 만들 필요가 있고, 이러한 목적을 위해 KOBRA라고 하는 장치가 설계되고 있다. KOBRA 시설에서는 비교적 낮은, 핵자당 20 MeV 이하의 희귀동위원소 빔을 이용한 핵물리 실험이 가능하다. 그림 1에서 보듯이 크게 stage 1과 stage 2로 이루어져 있고, 중간 중간 빔 이온들이 집중되는 곳들("Focal plane": F0, F1, F2, ...)이 존재하며 이곳에 빔 이온들의 상태를 모니터링할 수 있는 검출기(F1, F2, F3) 및 핵반응 연구를 할 수 있는 핵반응표적 및 관련 검출기들이 위치하게 된다(F3). Stage 1은 주로 희귀동위원소들을 생산하여 전송하는 역할을 하며, 반면 Stage 2는 고분해능의 스펙트로미터로서 핵반응 장소("F3")에서 발생하는 핵반응물들을 검출하여 고분해능 핵분광학이 가능하다. 아울러, 매우 낮은 반응단면적의

REFERENCES

- [1] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog. Part. Nucl. Phys. **61**, 602 (2008).
- [2] G. A. Souliotis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 022701 (2003).

Fig. 2. Layout of the KOBRA facility : F0, F1, F2, ... represent the focal planes, where the ionic particles are focused.

핵반응 연구시에는 stage 1과 stage 2를 모두 되튕 질량 분리기("Recoil mass separator")로 이용할 수 있어 높은 Background 억제율("Background suppression")을 제공한다.

희귀동위원소 빔을 만들기 위해서 현재 다양한 방식이 이용되고 있지만 주로 핵반응을 이용한다. 한편, KOBRA에서는 비행 방법(In-flight)을 이용하는데, 무거운 핵(빔)을 가벼운 핵(표적)과 충돌시켜 핵반응으로부터 만들어진 많은 희귀동위원소들이 빔과 같은 방향으로 진행하도록 하여 전자석을 이용, 이를 모아 원하는 지점까지 전달하는 방법이다. 이 방법은 희귀동위원소 빔을 만드는 또 다른 방법인 ISOL에 비해, 반감기가 매우 짧은 희귀동위원소빔을 만드는데 적합하다. 그림 2는 KOBRA에서 적용 예정인 희귀동위원소 빔 생성을 위한 핵반응인 다중 핵자 전이(Multinucleon transfer)를 통해 희귀동위원소들이 어떻게 만들어지는지 도식적으로 보여주고 있는데, 우선 빔과 표적이 중첩이 되면서 둘 사이에 핵자들의 교환이 일어난다. 이러한 핵자 교환 현상 후에 파편들이 들뜬 상태로 만들어지고, 안정화되기 위해서 몇 개의 핵자들을 내보낸 뒤("핵자 증발, evaporation")에 최종적으로 희귀 동위원소빔이 만들어진다.

이렇게 최종적으로 생성되는 2차 빔의 경우 우리가 원하는 핵종으로만 구성되어 있는 것이 아니라, 다양한 원자번호, 질량수 그리고 전하량을 가진 동위원소 이온들로 구성되어 있다. 따라서 우리가 원하는 핵종의 빔만 구분해 내기 위해서는 각각의 입자들에 대해 원자번호, 질량수와 전하량의 비에 대한 정보가 필요한데, 에너지 손실(원자번호/속도의 제곱에 비례), 단위 전하량 당의 운동량(이하 운동량, 질량*속도/전하량), 그리고 비행시간(Time of flight, 이동거리/속도)을 "측정"함으로써 가능하다. 입자들은 운동량에 따라서 F1에서 다른 경로를 지나가게 되는데, 위치 민감형 검출기 두 대를 설치함으로써 입자들의 경로(위치, 방향)를 알아으로써 운동량이 측정되고, F2의 얇은 검출기를 통해 에너지 손실에 대한 정보를, 마지막으로 F3에 설치한 검출기로부터 시간 정보(이는 비행시간을 결정하는데 이용)를 각각 얻음으로써 생성되어 F3까지 도달한

Fig. 3. Schematic description of the reaction mechanism used in the RI production at KOBRA.

각각의 입자들을 판별해 낼 수 있다. 하지만 어떤 이온에 대해서는 분리가 불가능한데, 이러한 한계는 사용되는 각 검출기들의 위치, 시간, 에너지 정확도(분해능), 그리고 빔 입자들의 비행 경로에 대한 정확성(F1에서의 "운동량 분해능")에 의해 결정된다. 현재의 설계 수준에서 KOBRA 시설은 질량수가 80 이하를 갖는 희귀동위원소 빔 판별이 가능하고 이렇게 판별된 입자들은 최종 지점(F3 혹은 F5)에서 빔으로 이용될 수 있다. 앞으로 KOBRA 시설이 완성이 되면, 많은 핵물리 연구자들이 관심 있어 하는 불안정한 핵종들에 대한 핵구조, 핵변형, 핵전체 물리 관련 연구 활성화에 많은 기여를 할 것으로 기대한다.

LAMPS: 중이온충돌실험을 이용한 고에너지핵과학실험장치

희귀동위원소들은 같은 양성자 수를 가지고 있어도 다른 중성자 수를 가진 원소들이다. 한국의 중이온 가속기에서 생성된 희귀동위원소 빔을 이용하여 중이온 충돌 실험을 할 경우 충돌시스템의 중성자와 양성자의 비를 조절할 수 있으며 이를 통해 핵물질의 상태방정식 안의 중성자와 양성자의 비에 의존하는 대칭에너지를 깊이 있게 연구할 수 있다.^[3,4] 이러한 연구를 위해 중이온 가속기 건설구축 사업단에서는 고에너지 실험설비 중의 하나로 그림 4와 같은 Large Acceptance Multi-Purpose Spectrometer(LAMPS)를 현재 연구개발 중이다.

LAMPS 실험설비는 크게 솔레노이드 스펙트로미터와 전방 중성자 검출기 어레이로 구성되어 있다. 솔레노이드 스펙트로미터는 자기장이 0.5 Tesla인 솔레노이드 전자석 안에 이 전자석의 중심으로부터 빔이 오는 방향으로 30 cm 떨어진 곳에 안정 핵 표적을 두고 이 주위를 시간투영검출기를 설치하여 중이온 충돌에서부터 나오는 하전입자들의 궤적을 추적하게 된다. 중이온 충돌에서부터 나온 하전입자들은 자기장 안에서 힘

REFERENCES

- [3] A. W. Steiner, M. Parakash, J. M. Lattimer and P. J. Ellis, Physics Report **411**, 325 (2005).
- [4] C. Xu and B.-A. Li, Physics Review C **81**, 044603 (2010).

Fig. 4. Large Acceptance Multi-Purpose Spectrometer (LAMPS) for heavy-ion collision experiment to study nuclear symmetry energy.

을 받아 휘어지게 되며 이 휘어짐의 정도는 하전입자가 가진 전하와 속도에 비례하기 때문에 시간투영검출기를 이용한 정확한 하전입자의 궤적 추적에 의해 어떤 하전입자가 어떤 운동량을 가지고 중이온 충돌에서부터 생성되었는지의 정보를 알아낼 수 있다. 이에 덧붙여 시간투영검출기와 솔레노이드 전자석 사이에 플라스틱 섬광체를 둘러싸서 중이온 충돌 사건이 일어났을 때의 중심도 정도 및 하전입자의 비행시간 정보를 얻어 보다 자세한 하전입자의 구분에 도움이 되는 검출기를 설치할 예정이다. 전방 중성자 검출기 어레이는 중성자에 민감하게 반응하는 플라스틱 섬광물질을 이용하여 중이온 충돌 실험으로부터 나오는 중성자 측정용 검출장비이다. 단일 중성자 검출기는 단면적 10 cm^2 , 길이 2 m의 플라스틱 섬광체 양끝단에 광전증폭관을 이용하여 중성자가 섬광물질을 지날 때 생성된 감마선을 수집하여 중성자의 비행시간으로부터 중성자의 에너지 정보를 얻을 수 있다. 20개씩의 단일 검출기를 수평과 수직으로 쌓아 하나의 층을 이루고 이러한 층 4개를 일정 간격으로 위치시켜 중성자 측정의 효율을 높일 수 있다. 이 중성자 검출기 어레이는 표적으로부터 8 ~ 15 m 되는 곳에 실험목적에 맞게 자유롭게 이동시킬 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 LAMPS 실험설비를 이용 중이온 충돌에서 생성되는 하전입자들, 중성자를 동시에 측정하여 수집된 데이터를 중심도, 횡방향 대비 종방향의 운동량 비율 등에 따른 각 입자들의 생성량, 분포, 유체 역학적 흐름 등의 실험정보를 얻어내고 중성자와 양성자 비에 따른 정보를 종합, 이론과 비교하여 핵물질의 대칭에너지의 값을 얻어낼 수 있다.^[5-7]

응용과학장치

Rare Isotope science project(RISP)가 세계적인 연구시설이 되기 위해서는 그 활용도가 높은 다양한 분야의 최첨단 응용장치가 준비되어야 한다. RISP에서 개발 중인 응용장치로는 물성연구장치(beta-Nuclear magnetic resonance: β -NMR/ μ spin rotation: μ SR), 의생명연구장치(균일빔 조사 장치) 및 중

성자 과학장치(고속중성자 기반 핵자료 측정장치) 등이 있다.^[8] 물성연구 장치는 편극화된 양전자붕괴 방사성동위원소(^8Li , ^9Li , ^{11}Li 등)나 편극화된 뮤온빔을 이용하여 물질내부의 국소 전자 자기장 변화를 측정함^[9,10]으로써 원자배열 및 그들의 동적 정보를 얻는 응용장치의 하나로, 자성반도체, 나노물질, 스핀유리, 산화물기반의 전자소자, 이차전지물질, 위상절연체, 유/무기 하이브리드 물질, 액체 결정, 폴리머, 자유라디칼 화합물 등 개발에 이용할 수 있다. 물성연구장치는 캐나다의 TRIUMF(β -NMR)와 스위스의 PSI(μ SR), 일본의 JPARC(μ SR) 등에서 보유하고 있으며 새로운 자성물질개발 및 다양한 물성연구를 수행하고 있다.

의생명 연구장치는 RI 빔이나 중이온 빔이 물질에 조사하여 주어지는 조사에너지(energy transfer: LET)로 세포변이 현상을 유도함으로써 암치료법개발 및 품종개량 연구 등에 활용할 수 있는 장치이다.^[11] RISP 의생명 연구장치는 다양한 중이온빔 및 RI빔을 모두 사용할 수 있다는 장점을 지니고 있어 세계적으로 우수하며, 특히 RI빔의 경우는 빔이 조사되는 동안에 RI빔으로부터 붕괴하는 양전자로 조사깊이를 정확하게 알 수 있다(positron emission tomograph)는 장점도 있다. 비슷한 장치는 일본의 HIMAC 및 독일의 GSI에서 보유하고 있으며, 중이온빔을 이용한 암치료 및 의학분야 기초연구를 진행하고 있고, 일본의 RIKEN에서는 다양한 중이온빔을 이용한 육종연구도 이루어지고 있다.

또한 중성자과학 장치는 차세대에너지원인 고속중성자로 개발에 필요한 핵자료(특히 핵 분열단면적) 생성 및 연구를 수행할 수 있는 장치^[12]로, 꼭 필요하지만 실험적으로 흔치 않은 핵자료를 국산화할 수 있다는 이점을 가지고 있으며, 현재 프

REFERENCES

- [5] Z. Xiao, B.-A. Li, L.-W. Chen, G.-C. Yang and M. Zhang, Physics Review Letters **102**, 062502 (2009).
- [6] S. Kumar, Y. G. Ma, G. Q. Zhang and C. L. Zhou, Physics Review C **85**, 024620 (2012).
- [7] P. Russotto, M. D. Cozma, A. Le Fevre, Y. Leifels, R. Lemmon, Q. Li, J. Lukasik and W. Trautmann, European Physical Journal A **50**, 38 (2014).
- [8] RISP, "RAON Accelerator and Experimental system Technical Design Report", Vol. 4 (2013).
- [9] RISP, "Progress report of experimental facilities (β -NMR & μ SR) for applied sciences at RISP" RAON-353-AS-RD-001 (2014).
- [10] Birn Jonson, H. L. Ravn and G. Walter, "ISOLDE PS booster facility at CERN: Experiments with slow radioactive beams" Nuclear Physics News 3.2 (1993), pp. 5-16.
- [11] E. Fokas, G. Kraft, H. An and R. Emgenhart-Cabilic, Biochim Biophys Acta **1796**, 216 (2009).
- [12] D. W. Muir and M. Herman, "Long term needs for nuclear data development", Summary report of the advisory group meeting Technical report, IAEA (2001).

Table 2. Specifications of RISP applied science facilities.

장치	주요 자원	세부 장치
μ SR	1. Measurable magnetic field : > 0.1 gauss	1. 뮤온표적 2. 뮤온빔 수송시스템 3. μ SR spectrometer
의생명 연구장치	1. Accessible biological dose : > 2 Gy/min 2. Accessible LET : > 10 keV/ μ m 3. 조사면적: 지름 20 cm 이상, 4. 균일도 : 5 % 이내	1. 균일빔 조사장치 2. 빔 모니터 시스템
중성자 과학장치	20 MeV 이상의 고속중성자에 대한 수 % 미만의 핵분열 단면적	1. 중성자 발생표적 2. Fast Ionization chamber 3. n-TOF 시스템

랑스 GANIL SPARAL-2에 유사장치가 설치되고 있다.

물성 연구장치 중의 하나인 β -NMR 장치는 ISOL 뒷단에, μ SR과 의생명연구용 빔 조사장치는 SCL2 뒷단에, 중성자 과학장치는 SCL1의 후미에 설치될 예정이나, RI 빔 개발 일정(현재는 Sn-132 RI빔 개발에 주력)에 따라 β -NMR 장치개발은 RISP 이후에 진행될 예정이다. 현재 주 가속장치 및 핵물리 실험 장치와 더불어 이들 장치들은 상세설계가 완료되어, 공학설계나 시제품 제작 및 원리 검증 등이 수행되고 있다. 그림 5는 RISP에서 개발 중에 있는 응용장치의 장치도를 보여주고 있으며, 표 2는 각 장치의 주요 재원을 나타내고 있다.

결론

중이온가속기건설구축사업단은 단순한 중이온가속기가 아니라 초전도 중이온가속기, 희귀동위원소빔 생성·분리장치 그리고 다양한 활용연구장치로 구성된 세계최고수준의 희귀동위원소빔 연구시설 구축을 최종 목표로 하고 있다. 목표를 달성하기 위해서는 기반이 되는 가속기와 희귀동위원소빔 생성·분리장치의 중요성은 새삼 강조할 필요도 없지만 특히 활용장치는 RISP에

Fig. 5. RISP applied science facilities : a) μ SR, b) Neutron science facility, c) Bio-medical facility d) β -NMR.

화룡점정(畫龍點睛)을 찍게 될 핵심 구성요소이다. 구축 후 얻어질 각 학문분야에서의 양질(良質)의 연구결과들은 국내 기초과학 수준을 극적으로 끌어올리는 견인차 역할을 할 것이며 나아가 국민의 삶의 질 향상에 촉매제 역할을 할 것이라 확신한다. 활용장치를 포함한 중이온가속기의 성공적인 구축을 위해 무엇보다 중요한 것은 국내에 있는 잠재적인 사용자그룹의 적극적인 관심과 참여라고 생각한다. 모든 학계가 일심단결하여 중이온가속기구축사업을 성공리에 마무리하고 보다 나은 기초과학강국으로써의 미래를 설계할 수 있도록 힘을 모아주길 바래본다.