희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기

희귀동위원소 발생 및 분리방법

DOI: 10.3938/PhiT.24.049

김종원·강병휘

Rare Isotope Beam Production and Separation Methods

Jongwon KIM and Byounghwi KANG

Next generation rare-isotope (RI) beam facilities plan to utilize high-power heavy-ion beams incident on thin production targets or light-ion beams incident on thick targets to produce rare-isotope beams. These two kinds of primary beams can be used for two methods of isotope production: namely, in-flight (IF) separation and isotope separation on-line (ISOL). They are complimentary in the aspects of their energy ranges and the qualities of the produced isotope beams. A hybrid method, in which an isotope beam produced by using the IF method is stopped in a gas cell and re-accelerated in the same way as in the ISOL, has also been developed. The major field of nuclear science has advanced with the development of these RI beam production methods. In the new facilities, more exotic and higher-current isotope beams will be available for the uses in diverse fields such as in nuclear medicine and material science as well as for high-precision studies in nuclear physics.

한 기초과학 연구뿐 아니고 핵의학 등 다양한 응용분야에서 활용되고 있다. 지난 수십 년 동안 개발된 동위원소 빔 생성 방법들은 이제 성숙기에 들었고 핵 차트의 가장자리에 있는 양성자과잉 또는 중성자과잉 동위원소를 선별하여 생성하고 원소의 특성을 연구할 수 있는 단계에 이르렀다.^[1]

가속기를 사용하는 기본적인 동위원소 빔 생성 방법은 In-flight Fragmentation(IF)와 Isotope On Line(ISOL) 두 가지가 있고 서로 보완적인 방법으로 동위원소를 생성할 수 있다. 그림 1은 두 방법 그리고 IF 방식으로 생성된 동위원소 빔을 가스 셀(Gas cell)을 사용하여 빔을 정지시킨 후 가속기를 사용하여 핵자 당 10 MeV 부근의 에너지로 빔을 재 가속함으로써 ISOL 방법으로 생성된 빔과 유사한 특성을 가지는 하이브리드 방식이 최근 개발되어 사용되고 있다.^[2]

IF와 ISOL 방식의 주요 차이점을 정리하면 표 1과 같다. 두 방법은 각각 높은 에너지 및 낮은 에너지 동위원소 빔을 생성하고, 빔의 순도 및 위상공간에서의 빔의 질이 낮거나 높은 빔을 만드는 장단점을 가지고 있다. 또한 앞서 설명한 하이브리드 방식이나 보다 정교한 분리장치를 사용함으로써 빔의 특성을 개선하는 기술들이 개발되고 있다. 중이온가속기사업단(RISP)에서는 ISOL과 IF 방법을 동시에 사용할 수 있는 국제적으로도 특징 있는 시설을 계획하고 있다.

서 론

입자가속기를 사용하여 생성된 동위원소 빔은 핵물리를 포함

ISOL 시스템

온라인동위원소분리(ISOL) 방식에 의해 희귀동위원소(RI)를 생성-분리하는 기술은 지난 50여 년 동안 지속적으로 발전해 왔다.^[3] 입자 빔 가속기에서 가속된 양성자 또는 가벼운 이온 빔을 두꺼운 표적에 충돌시켜 핵반응에 의해 RI를 생성하거나

저자약력

김종원 박사는 미국 미시간주립대학(MSU) 이학박사(1994)로서 미국 국립 알곤연구소(ANL), 일본 이화학연구소(RIKEN), 미국 국립초전도사이클로트론연구소(NSCL), 국립암센터(NCC)를 거쳐 2012년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 근무하였고 현재 장치구축부장으로 재직 중이다.(jwkim@ibs.re.kr)

강병휘 박사는 서울대학교에서 박사 학위(2004)를 핵물리실험으로 취득하였으며 INFN/LNL에서 연구원을 거쳐 2012년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단 연구원으로 재직 중이며 현재 ISOL 개발 그룹장을 맡고 있다.(madhya@ibs.re.kr)

REFERENCES

- [1] Y. Blumenfeld, T. Nilsson and P. Van Duppen, Phys. Scr. **T152**, 014023 (2013).
- [2] G. Savard, J. of Phys.: Conf. Series **312**, 052004 (2011).
- [3] P. Van Duppen, Lecture Notes in Phys. **700**, 37 (2006).

Fig. 1. Graphical descriptions of In-flight fragmentation (IF) and ISOL methods and a combined method using a gas-cell stopping system.

Table 1. Difference in characteristics between IF and ISOL methods.

	In-flight separation	ISOL
Primary Beam	Heavy	Light
Target	Low Z	High Z
Separation Time	Short	Long
RI beam energy	Relying on primary beam	Re-acceleration

1차 빔으로 생성된 중성자 또는 감마선의 유도분열에 의해 RI가 생성된다. 표적에서 대량의 동위원소가 생성되고 생성된 RI는 열에 의한 에너지를 가지며 표적 밖으로 확산되며 RI가 전하를 가지기 위해 이온 원으로 수송된 후 고전압으로 인출하여 이온빔을 생성하게 된다. 이 방법으로 특히 중성자과잉 희귀동위원소를 1차 빔과 우라늄과 같은 표적의 핵분열반응을 통해 얻을 수 있다. 표 1은 핵분열 표적을 이용하는 국외의 대표적인 ISOL 시설들이다.

ISOL 기반의 RI 빔 발생 및 분리장치 시스템은 1차 빔 가속기(driver accelerator), 표적계, 동위원소 분리계 및 후단가속기로 구분되며, 여기서 ISOL 시스템은 후단가속기를 제외한 시스템을 통칭한다. 그림 2는 중이온가속기사업단 ISOL 시스템의 배치도이다. 표적실은 대전류 양성자 빔을 번갈아 사용할 수 있도록 두 곳에 준비될 예정이다. RI 빔이 생성되는 표적실에는 높은 방사능이 발생하여 엄격한 차폐시설 및 유지보수를 위한 원격조작 장치가 요구된다.

대량의 희귀동위원소 발생과 최대 효율로 빔을 인출하기 위해서는 입사 빔 종류 및 에너지에 따라 최적화된 표적 물질, 표적계 설계 및 제어 기술 개발이 필요하다. 사업단의 표적 시스템은 양성자 빔을 직접 조사하기 위하여 여러 겹의 저밀도, 대면적의 디스크 형식의 UC_x 타겟을 사용할 예정으로 중성자과잉 희귀동위원소 생성에 적합한 방식이다. 이와 같이 1차 빔을 직접 입사하는 경우 두꺼운 표적에서의 에너지손실에 의해

Table 2. Worldwide ISOL facilities using fissile target.

Facility	incident beam	beam power (kW)	fission ratio	^{132}Sn expect yield @exp. hall (pps)
KEK TRIAC	p , 30 MeV, 3 μA	0.09	10^{11}	3×10^5
ORNL HRIBF	p , 40 MeV, 10 μA	0.4	4×10^{11}	2×10^5
CERN ISOLDE	p , 1.4 GeV,	3	4×10^{12}	10^7
LNL SPES	p , 40 MeV, 200 μA	8	10^{13}	3×10^8
TRIUMF ISAC	p , 500 MeV, 100 μA	5-20	5×10^{13}	10^8
RAON	p , 70 MeV, 0.5 mA	>10	10^{14} for >35 kW	$\sim 10^8$
GANIL SPIRAL2	d , 40 MeV, 5 mA	200	10^{14}	2×10^9

Fig. 2. A conceptual layout of ISOL system for Rare Isotope Science Project (RISP).

대량의 열이 발생된다. 생성된 RI들은 그림 3과 같이 약 2000 $^{\circ}\text{C}$ 이상이 유지되는 표적 내부로부터 확산되어 방출된 후 수송관을 거쳐 이온원까지 이동하게 된다. 현재 10 kW급의 UC_2 표적제조기술을 개발 중으로 고다공성의 직경 50 mm, 1.3 mm 두께의 디스크로 이루어져 있다. 실제 UC_x 를 사용하기 위해서는 엄격한 인허가를 받아야 하기 때문에 실제 타겟 개발은 화학적, 열적 성질이 유사한 LaC_x 를 사용하여 이루어지고 있다.

다른 방식의 ISOL 타겟은 양성자나 중양자 빔을 1차 빔으로 사용하여 먼저 고출력의 중성자 빔을 발생하고 동위원소 생산 타겟은 중성자 빔과 반응하는 간접 방식으로 직접 타겟 방식과 비교하여 고열 발생 문제를 피할 수 있다. 이러한 방식으로 100 kW 이상 급의 타겟을 프랑스 GANIL 연구소 등지

Fig. 3. Layout of an ISOL target system of RISP.

에서 개발 중이다.

ISOL 표적/이온원에서 생성 및 인출된 1+ 전하상태의 RI 빔은 질량분리기로 보내져 원하는 이온 빔을 분리한다. 사용되는 질량분리기는 질량분해능($m/\Delta m$)이 10,000 이상인 고분해능 질량분리기(High Resolution Mass Separator, HRMS)와 중간분해능 분석기로 나눌 수 있다. 실제로 고분해능을 얻기 위해서는 장치 설계뿐 아니고 입사 빔의 에미턴스가 작아야 하기 때문에 HRMS에 입사 직전에 RFQ-cooler를 통해 에미턴스를 약 10분의 1 이하로 먼저 감축한다. 질량분석 후 10~60 keV, 1+ RI 빔은 저에너지실험실 또는 후단가속기로 전달된다. 후단가속기로 가속할 경우에는 EBIS(Electron Beam Ion Source)나 ECR(Electron Cyclotron Resonance) 형식의 전하증식기(charge breeder)를 사용하여 n+로 전하를 증식하여 가속기에 입사할 수 있는 A/q로 전하상태를 만든다. 전하증식 과정에서 발생하는 배경 이온으로부터 원하는 동위원소 빔을 선별하기 위해서 중간분해능을 가진 분리장치를 사용한 후 후단가속기에 입사하게 된다.

최종 실험실 표적에 공급되는 RI 빔 강도는 일차 빔의 전류 및 일련의 빔 라인 컴포넌트를 통과할 때의 빔 전송효율에 의해 결정된다. 특히 단 반감기 동위원소 빔을 생성할 경우 전송 시간을 줄여야 빔 손실을 최소화할 수 있고 이러한 관점에서의 시스템 최적화가 중요하다. 최적화 과정에는 분리를 원하는 동위원소나 표적계 구성물질의 제반 물리적 특성 즉 생성단면적, 반감기, 이온화, 확산 및 분산 그리고 분자형성 가능성, 휘발성 등 화학적 이해가 중요하다.

파쇄 핵 분리장치(IF) 방법

1970년대 Berkeley 연구소 BEVALAC 가속기를 사용하여 IF 분리 방법이 처음 연구되었고^[4] 당시 1 GeV/u Ne 빔을 사용하여 ^{11}B , ^{11}Li 동위원소들을 생성하여 중성자 과잉 핵자의 경우 neutron halo가 발생함이 처음으로 알려지게 되었다.^[5]

Projectile fragmentation은 높은 에너지의 빔 입자가 얇은 타겟과 충돌하여 작은 입자로 쪼개지는 과정으로 이때 다양한

동위원소가 빔으로 생성되는데 특히 중성자 부족 동위원소들이 많이 생성된다. 이 과정에서 벡터 운동량은 보존되어 빔과 같은 방향으로 동위원소 빔이 움직인다. 빔 충돌에는 다양한 핵반응이 연루되어 RI 빔이 생성되는데 특히 Projectile fission으로 중성자 과잉 핵자들이 주요하게 생산된다. 이때 fission을 하는 핵자는 정지좌표에서 대략 1 MeV/u의 운동에너지를 가지고 각 분포는 균일하다. 이러한 특성으로 fission으로 생성되는 동위원소 빔의 운동량 및 각도 분산이 크기 때문에 동위원소 분리장치의 acceptance가 충분히 크게 설계되어야 분리과정에서 빔 손실을 최소화할 수 있다.

파쇄 핵 분리장치의 기본 형태는 그림 4와 같이 두 개의 2극자석과 집속을 위한 4극자석들로 이루어져 있고 중간지점을 중심으로 거울 대칭을 이룬다.^[6] 1차 빔이 타겟에 입사한 후 첫 번째 2극 자석에서 빔이 운동량에 따라 분산된다. 분산된 빔이 대칭평면에 설치된 손실판(degrader)을 통과할 때 에너지 손실이 발생하고 두 번째 2극전자석에서 빔의 운동량 분산을 제거한 후 최종 평면에서 원자번호에 따르는 빔의 분산이 발생한다. 이러한 분리장치는 Energy-loss achromatic 조건을 만족하는 Bp- ΔE -Bp 방식의 질량분석장치이다(B는 자기장선속 밀도, ρ 는 2극전자석의 굴절반경).^[7] 이때 에너지 손실은 $A^{2.5}/Z^{1.5}$ 에 비례하고 운동량의 분해능은 $D/2Mx_0$ 이다(D는 분산, M은 시스템의 확대율, x_0 는 타겟에서 빔의 반경). 차세대 분리장치는 RISP에서 설계한 그림 5와 같이 단위 분리장치를 여러 개 결합하여 생성된 동위원소 빔을 원하지 않는 빔으로부터 분리하는 전단분리장치, 선택된 빔을 식별(Particle Identification)하는 주분리장치로 기능을 분리하여 사용한다.^[8] 특히 TOF 방법을 사용하여 빔을 식별할 경우 장치 길이를 최대한 이용하고 장치 끝에서 이성체(Isomer) 빔의 특성감마선을 측정하여 식별함으로써 극소량으로 분리되는 희귀 동위원소의 경우 원자번호 및 질량을 정확히 식별하는데 사용할 수 있다.^[9]

1차 빔의 강도를 높여 높은 전류의 동위원소 빔을 생성하더라도 빔을 식별하기 위한 검출기의 counting rate이 낮을 경우 귀중한 동위원소 빔을 활용할 수 없다. 특히 일반적인 가스 이온화 방식을 사용하는 검출기 시스템에서의 느린 검출속도 한계를 극복하기 위한 빠른 측정이 가능한 검출기 개발이 IF

REFERENCES

- [4] Y. Viyogi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **42**, 33 (1979).
- [5] I. Tanihata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**, 2676 (1985).
- [6] D. Morrissey and B. Sherrill, Lecture Notes in Physics **651**, 113 (2004).
- [7] H. Geissel *et al.*, Nucl Instru. Meths. **A282**, 247 (1989).
- [8] J. Y. Kim, J. W. Kim and W. Wan, Rev. of Sci. Instru. **86**, 073302 (2015).
- [9] D. Kameda *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 054319 (2012).

Fig. 4. Principle of a unit of IF separator composed of two dipole magnets.

Fig. 5. A layout of the IF separator for RISP. The separator is divided into pre- and main stages.

분리장치 활용에 주요 관건이 되고 있다.

최근 차세대 핵물리 연구를 위한 대전류 중이온 가속기 개발이 추진되고 있고 IF 방식을 사용하여 대전류 동위원소 빔을 생성하여 생성 핵반응 단면적이 작고 짧은 반감기를 가진 RI 빔 생성 및 특성 연구가 가능해졌다. IF 방식은 특히 짧은 시간 내 동위원소 빔 생성 및 분리가 가능하고 빔의 화학적 특성에 영향을 받지 않는 장점으로 ISOL 방법과 비교하여 핵 차트의 모든 동위원소 빔 생성이 가능하나 1차 빔 에너지가 낮고 IF 분리장치의 빔 분해능이 높지 않을 경우 배경 빔들로부터 깨끗한 분리의 어려움으로 빔의 질이 낮을 수 있다.

현재 가동 중인 대표적인 IF 시설은 RIKEN의 BigRIPS 장치로 U 빔의 경우 전류가 약 20 pA 정도이나 많은 새로운 동위원소를 발견하였고 핵 특성들을 밝혀내고 있다.^[10] 현재 가동 중이거나 계획 중인 국내외 IF 분리장치의 주요 빔 광학적인 특성은 표 3과 같다. 독일 GSI 연구소의 기존 FRS 분리장치는 상전도 전자석을 사용하여 동위원소 빔의 acceptance가 작는데 비해 FAIR 프로젝트에서 계획하는 대 구경 초전도전자

Table 3. Optical parameters of existing and future in-flight separators.

	RISP	BigRIPS	Super-FRS
Angular acceptance	± 40 mrad (h) ± 50 mrad (v)	± 40 mrad (h) ± 50 mrad (v)	± 40 mrad (h) ± 20 mrad (v)
Momentum acceptance	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2.5\%$
Maximum magnetic rigidity	9.6 Tm	9.5 Tm	20 Tm
Momentum resolution (x=1 mm)	pre-separator: 1100, 2600 main separator: 2300	pre-separator: 1260 main separator: 3420	pre-separator: 750 main separator: 1500

석들을 사용하는 Super-FRS는 타겟에서 생성되는 동위원소 빔을 손실 없이 분리할 수 있다. 또한 싱크로트론을 사용하여 1 GeV 이상의 U 빔을 사용함으로써 생성되는 동위원소 빔의 각 분포가 작고, 제거해야 하는 핵반응을 하지 않은 U 빔의 전하상태가 하나로 빔 분산이 적어 빔 덤프장치로 1차 빔 제거가 쉬운 장점이 있다. 한편 RISP의 IF 분리장치는 1차 빔의 에너지가 BigRIPS 경우와 비슷하여 빔 광학적인 측면에서는 유사한 점이 있으나 400 kW의 대전류 빔 사용을 위한 설계 측면에서 차이점이 있다.

맺음말

동위원소 빔 연구는 관련 장치 개발과 더불어 핵 과학 연구의 주요 주제로 핵 반응 및 구조 연구뿐 아니고 핵 천체물리 연구에서도 중요한 부분이 되었다.^[11] 특히 핵 차트 영역을 지속적으로 넓혀 왔는데 이러한 결과는 동위원소 빔 생성기술 발전과 밀접하게 연관되어 있다. 다양한 동위원소 빔들이 핵 과학뿐 아니고 생명과학, 원자물리, 고체물리에도 활용되어 사용되고 있고 차세대 시설이 완성되면 보다 다양하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어 새로운 동위원소의 핵의 학 분야에서의 활용으로 핵 영상 및 방사선 치료 범위를 확대할 수 있을 것이다. 국내에서의 차세대 대전류 중이온가속기 및 RI 빔 생성장치 시설의 건설은 국제적으로도 앞서가는 첨단 과학기술 시설을 젊은 과학자들이 쉽게 접할 수 있음으로 관련 연구를 선도할 수 있도록 하는 것이 주요 목표 중 하나이다.

REFERENCES

- [10] T. Ohnishi *et al.*, J. of Phys. Soc. of Japan **79**, 073201 (2010).
- [11] M. Thoennessen and B. Sherrill, Nature **473**, 25 (2011).