고에너지 양성자가속기를 이용한 방사성동위원소 생산

DOI: 10.3938/PhiT.25.003

김 계 령

RI Production Using a High-energy Proton Accelerator, the KOMAC

Kye-Ryung KIM

The demands for radioisotopes (RIs) have been increasing continuously in the world and Korea. To meet present and expected domestic users' demands, the suppliers have made and reviewed many plans for RI production and supply at existing facilities, such as HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor), 30-MeV cyclotrons of KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) and KIRAMS (Korea Institute of Radiological and Medical Sciences). In addition, construction plans for new facilities were suggested and reviewed during the last several years. A new facility the KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex), an 100-MeV proton linear accelerator, was built in 2012, and proton-beam user service started with two beam lines in 2013. With this high-energy and large-current proton accelerator, new isotopes can be produced that could not be produced using existing domestic facilities. For this purpose, a RI production facility was installed in a specific beam line for the 100 MeV proton beam in 2015. The KOMAC has a plan to produce and supply various valuable new RIs, such as Sr-82, Cu-67, Ge-68, Ra-225, and Ac-223 to support user's R&D work in the field of medical applications. In this article, we report the status of the RI production facility and future plan for RI production using the 100-MeV proton accelerator at the KOMAC.

저자약력

김계령 박사는 1998년 경북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고 한국원자력연구원 핵융합연구팀에서 박사후연구원으로 근무하였으며, 2000년부터 현재까지 한국원자력연구원에서 양성자가속기공학기술개발사업단을 거쳐 양성자가속기연구센터에서 책임연구원으로 근무 중이다.(kimkr@kaeri.re.kr)

서 론

방사성동위원소의 수요는 전 세계적으로 꾸준히 증가하고 있으며 국내에서는 이러한 수요 증가를 고려하여 방사성동위원소의 생산 및 공급에 대해 다양한 검토가 이루어지고 있다. 방사성동위원소의 생산은 크게 원자로를 이용하는 경우와 가속기를 이용하는 경우로 나누어진다. 국내 관련 시설을 살펴보면, 원자로를 기반으로 한 방사성동위원소 생산시설로는 한국원자력연구원의 하나로와 2019년 완공을 목표로 건설 중인 기장연구용 원자로가 있으며, 가속기를 기반으로 한 방사성동위원소 생산시설로는 표 1에서 보여지는 바와 같이 PET용 방사성동위원소 생산을 위해 국내 여러 병원 등에서 운영 중인 약 40여대의 11~13 MeV 사이클로트론과 한국원자력의학원의 30 MeV 사이클로트론과 MC-50 사이클로트론, 한국원자력연구원 첨단방사선연구소(정읍)에서 운영 중인 30 MeV 사이클로트론이 있다. 현재까지 국내에서 운영되어 온 방사성동위원소 생산을 위한 가속기의 경우, 최대 양성자빔의 에너지가 45 MeV로 고에너지(> 50 MeV) 양성자빔을 이용해서만 생산이 가능한 희귀 방사성동위원소의 생산이 어렵다는 문제점이 있었다. 이러한 국내 방사성동위원소의 공급현황을 고려하여 한국원자력연구원 양성자가속기연구센터(경주)에서는 방사성동위원소 생산을 위한 전용 빔라인과 표적 조사시설을 2015년 말 구축 완료하였다. 또한, 조사된 표적으로부터 방사성동위원소를 소량 분리정제할 수 있는 표적 조사 후 공정시설을 2016년에 구축하여 소량의 방사성동위원소 시험생산을 실시할 예정이다. 방사성동위원소의 특성을 시험하고 분석하며 이의 이용 기술을 개발하기 위한 동위원소 이용 연구시설도 2015년 내 구축 완료하였다.

양성자가속기연구센터의 동위원소 생산시설

1. 100 MeV 양성자가속기

2012년 말 구축을 완료하고 2013년 상반기 시험운전 후 동년 하반기부터 본격적인 빔 서비스를 시작한 100 MeV 양성자

Table 1. Accelerator-based RI production facility in Korea.

형태	에너지 [MeV]	이온	최대 빔전류 [μ A]	활용목적	기관
사이클로트론	11~13	H^{**}	< 100	PET용 RI 생산용	병원 및 대학교
	30	H^+	300	RI 생산 전용	한국원자력연구원
	50	H^+ , He	60	다목적, RI 생산	
	30	H^+	500	RI 생산 전용	한국원자력연구원 첨단방사선연구소
선형 양성자가속기	~100	H^+	600	다목적, RI 생산	한국원자력연구원 양성자가속기연구센터

*) PET용 방사성동위원소 생산용 시설로서 권역별 사이클로트론 7대를 포함하여 국내에서 약 40여 대가 운영 중임.

Table 2. Beam line specifications of 100 MeV proton accelerator.

구분	표적실	이용분야	반복률	최대 평균 빔전류	조사조건	비고
20 MeV 빔라인	TR21	열(외)중성자원	60Hz	0.6 mA	수평 외기	구축 완료 (2012) 운영중
	TR22	반도체	15Hz	60 mA	수평(수직) 외기	
	TR23	기초연구	30Hz	0.6 mA	수평 외기	
	TR24	생명공학/의료	15Hz	60 mA	수평 외기+진공	
	TR25	원자력재료	60Hz	1.2 mA	수평 진공	
100 MeV 빔라인	TR101	동위원소	60Hz	0.6 mA	수평 진공	구축 완료 시험중 (2015)
	TR102	저선속 실시간	7.5Hz	10 mA	수평 외기	구축 중 (2016)
	TR103	기초연구	15Hz	300 mA	수평 외기	구축 완료 (2012) 운영 중
	TR104	기초과학 (물리, 화학)	7.5Hz	10 mA	수평 외기+진공	
	TR105	2차입자원 (HE 중성자원 등)	60Hz	1.6 mA	수직 외기+진공

Fig. 1. 100 MeV proton accelerator and beam lines.

가속기에는 그림 1에서와 같이 총 10개의 빔라인들이 있으며, 각 빔라인은 표 2에 정리된 바와 같이 다양한 양성자빔 이용 연구에 적합하도록 개발 중에 있다. 방사성동위원소 생산용 표적 조사시설은 100 MeV 양성자빔 이용 연구를 위한 5개의

빔라인 중 1개의 빔라인에 구축하였다. 2015년도에 방사성동위원소 생산용 빔라인과 표적실을 구축하였으며, 2016년도에는 저선속 실시간 실험을 위한 빔라인을 구축할 예정이다. 매년 1개씩의 빔라인을 이용자 수요와 활용도 예측을 통해 정해진 우선순위에 따라 구축해나갈 예정이다.

2. 방사성동위원소 생산 시설

전 세계적으로 미국, 러시아, 남아프리카공화국 등의 국가에서 선형 양성자가속기를 이용한 방사성동위원소 생산시설을 구축하여 운영하고 있으며, 이들 시설들과 양성자가속기연구센터의 시설을 비교한 결과는 표 3에 나타내었다.

Table 3. Comparison with other foreign RI production facilities.^[1]

Parameter	LANL	BNL	INR	iThemba	KOMAC
Beam energy (MeV)	100	200	160	66	103
Beam current (μ A)	250	120	100	120	300 (600)
Beam spot (mm)	20 swept	19×2.5	8-10	5 swept	50×50
Beam Time Structure	13.3 mA 625 μ s 30 Hz	40 mA 430 μ s 6.67 Hz	27 mA 74 μ s 50 Hz	DC	20 mA 500 μ s 60 Hz
Peak power density (W/cm ²)	80 26 swept	64	127 56 slanted	509 48 swept	60
Target diameter (mm)	50	75	25 at 26	20	50
Cooling Channel width (mm)	5	0.9-4.3	3	1	5
Cooling water velocity (m/s)	2	1.5	high	20	3

Fig. 2. Beam line and target irradiation facility for RI production.

된 표적을 취급하고 이송하기 위한 핫셀과 이송용기 등이 필요하고 빔 조사후 표적으로부터 방사성동위원소만을 추출하기 위한 분리정제시설과 제조된 방사성동위원소의 분석 및 시험을 위한 기기들이 필요하다. 양성자가속기연구센터의 빔라인과 표적조사시설은 그림 2에서 보여지는 바와 같다.

그림 3은 양성자가속기연구센터에서 개발한 방사성동위원소 생산용 표적 조사시스템의 개념도와 제작된 장치 사진이다. 처리실의 핫셀로부터 표적실의 조사 위치까지 표적을 이송할 수 있도록 제작된 이송관은 중성자 차폐 등을 위해 물을 채운 상태에서 운전이 되도록 설계·제작되었으며 표적 이송을 위해서는 AC 모터와 체인을 이용하는 방법을 선택하였다.

방사성동위원소 생산 계획

양성자가속기연구센터는 표 4에서와 같이 국내 가용 가속기로는 생산이 어려운 희귀 방사성동위원소들로 국내외적으로 현재 수요가 있거나 증가가 예상되는 방사성동위원소들을 주요 생산 대상으로 선정하였다. Cu-67은 한국원자력연구원에서 수행 중인 “방사성동위원소 이용 신개념치료기술개발 플랫폼 구축 사업”^[2]

Fig. 3. Target irradiation system; (a) Design, (b) Photos.

방사성동위원소 생산을 위해서는 양성자가속기 이외에도 표적실까지의 빔 수송을 위한 빔라인과 표적실, 표적실 내부에 방사성동위원소 생산용 표적을 조사하기 위한 표적 조사시설, 표적의 냉각을 위한 냉각시설, 빔 조사 후 높은 준위로 방사화

REFERENCES

- [1] K. R. Kim, “The Status and RI Production Plan of KOMAC”, the 8th International Conference (ICI) on Isotopes and Expo, Chicago, IL, USA, August 27, 2014.
- [2] Kook-Hyun Yu, “Construction Project of Korea Drug Development Platform using radio-isotope”, Technology Workshop on the Status of Proton/Ion Beam Utilization in the field of Nuclear Engineering, 2014 Spring Conference of the Korean Nuclear Society, Jeju, 2014.5.23.

Table 4. Planned principal RIs of KOMAC.

방사성 동위원소	반감기 [d]	핵반응	활용
^{67}Cu	2.6 d	$^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$	베타선 방출, 치료용
^{82}Sr	25.5 d	$^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$	$^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ Generator
^{68}Ge	270.8 d	$^{\text{nat}}\text{Zn}(\alpha,x)^{68}\text{Ge}$	PET 교정용 선원
^{22}Na	2.6 y	$^{\text{nat}}\text{Mg}(p,x)^{22}\text{Na}$	교정용 양전자 선원
^{223}Ra	11.4 d	$^{232}\text{Th}(p,x)^{223}\text{Ra}$	알파선 방출핵종, 치료용
^{225}Ac	9.95 d	$^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ac}$	알파선 방출핵종, 치료용

Fig. 4. Estimation of worldwide demand and supply of Sr-82.^[3]

에서 개발하고자 하는 간암 등의 암치료용 방사성동위원소 의약품 개발을 위한 것으로 플랫폼구축사업단이 의약품 개발에 성공할 경우, 급격한 수요의 증가가 기대된다. Sr-82의 경우에는 그림 4에서 보여지는 바와 같이 미국 DOE의 NSAC 보고서에서 Bracco사의 A. Nunn의 자료를 이용해 전망한 바에 따르면 향후 세계적인 수요의 지속적 증가가 예상되고 새로운 생산시설이 구축되지 않는다면, 이러한 증가된 수요를 충족하기 어려울 것으로 전망되고 있다.^[3] 특히, 최근 들어 치료용 알파선 방출 방사성동위원소의 생산에 대한 연구가 국외에서 증가하고 있는 점을 고려하여 양성자가속기로 생산가능한 Ra-223과 Ac-225의 생산 기술개발 계획도 함께 수립하였다.^[4]

고에너지 양성자가속기를 이용한 방사성동위원소 생산의 경우, 100 MeV까지의 영역에서 가능한 핵반응을 조합하여 여러 표적을 순차적으로 설치하고 빔을 조사함으로써 최대 3종류의 핵종을 동시에 생산할 수 있다는 장점이 있다. 양성자가속기연구센터에서는 동위원소 생산용 표적을 적층하여 설치할 수 있도록 제작하여 각각의 에너지 영역에 따라 Sr-82, Cu-67, Ge-68을 동시에 생산할 수 있도록 할 예정이다. 이러한 방사성동위원소 표적조사방식은 미국의 LANL(Los Alamos National Laboratory)의 IPF(Isotope Production Facility)와 BNL(Brookhaven National Laboratory)의 BLIP(Brookhaven Linac Isotope Producer)에

Table 5. Calculation results of RI production yields (100 MeV, 95 hours irradiation).

표적구조	$^{67}\text{Cu}/^{82}\text{Sr}/^{68}\text{Ge}$			$^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Sr}/^{68}\text{Ge}$		
방사성동위원소	^{67}Cu	^{82}Sr	^{68}Ge	^{82}Sr	^{82}Sr	^{68}Ge
양성자에너지 [MeV]	95~70	60~43	28~	95~73	64~48	35~
생산수율 @ EOB [$\mu\text{Ci}/\mu\text{Ah}$]	144.6	97.9	33.1	77.9	107.7	45.2

(a) Cu-67/Sr-82/Ge-68

(b) Sr-82/Sr-82/Ge-68

Fig. 5. Calculation results of energy loss and activation of multi-stacked RI targets.

서도 사용되고 있는 방법이며, 이때 생산가능한 방사성동위원소 양을 추산하기 위하여 MCNPX 코드를 이용하여 방사성동위원소 발생량을 계산하였다. 입사 양성자빔의 에너지는 100 MeV로 가정하고 빔전류는 300 μA , 조사시간은 95시간으로 가정하여 계산을 수행하였으며, 계산 결과는 표 5에 정리하였으며, 계산 시 사용한 표적의 조건과 조사된 표적의 방사화 정도와 시간에 따른 변화는 그림 5에 나타내었다. 이때 사용된 각 표적물질과 양성자와의 핵반응단면적은 그림 6과 같다.

REFERENCES

- [3] NSAC final report, MEETING ISOTOPE NEEDS AND CAPTURING OPPORTUNITIES FOR THE FUTURE: THE 2015 LONG RANGE PLAN FOR THE DOE-NP ISOTOPE PROGRAM, NSAC Isotope Subcommittee, 2015. 7.
- [4] J. W. Weidner, *et al.*, Proton-induced cross sections relevant to production of ^{225}Ac and ^{223}Ra in natural thorium targets below 200 MeV, LA-UR-12-01344.

Fig. 6. Nuclear reactions for RI production.^[5,6]

Fig. 7. Target fabrication process for Sr-82 production.

방사성동위원소 생산용 표적 제조 기술

양성자가속기연구센터에서는 방사성동위원소 생산을 위한 표적 제작에 필요한 인프라를 구축하였다. 이를 이용해서 Sr-82 생산을 위한 RbCl 표적을 제작하였으며 그 과정은 그림 7과 같다. 생산하고자 하는 방사성동위원소의 종류에 따라 적합한 핵반응이 정해지고 사용가능한 양성자빔의 에너지 영역이 결정되면 그에 따라 표적의 두께를 결정하고 표적물질에 따라 각각 최적화된 순차적인 제작 방법에 따라 표적을 제작하게 된다.

맺음말

한국원자력연구원 양성자가속기연구센터에서는 100 MeV 고에너지 양성자가속기를 이용하여 희귀방사성동위원소를 생산하기 위한 빔라인과 표적조사시설을 2015년 말 구축 완료하고 현재 이의 성능 시험을 수행 중이다. 구축된 시설은 국내에서 운전 중인 가속기 기반 방사성동위원소 생산시설보다 높은 에너지의 양성자빔의 발생이 가능하고 빔 전류도 최대 600 μA 로

매우 높아 미국의 국가 대형연구시설에서 생산하고 있는 수준의 방사성동위원소의 생산이 가능해지게 된다. 다만, 연간 최대생산가능량은 빔조사조건과 시간뿐만 아니라 빔조사 후 방사성동위원소의 분리정제시설의 규모에 따라 달라지게 되므로 향후 이에 대한 고찰이 필요하다. 방사성동위원소의 생산 및 공급계획은 국내의 수요에 따라 조절이 가능하며 주기적인 이용자의 요구량을 파악하고 새로운 희귀 방사성동위원소 생산의 필요성을 반영하여 방사성동위원소의 개발 및 생산계획을 세우고 추진해나가야 할 것이다. 이러한 노력을 통해 양성자가속기연구센터의 방사성동위원소 생산시설이 2016년에 시험가동 후 정상 가동을 시작하고 2017년 소량의 방사성동위원소 생산이 가능해지게 되면 국내 방사성동위원소 이용 연구자들에게 보다 다양한 종류의 방사성동위원소의 공급이 가능해지게 되어 국내 방사성동위원소 이용 연구활성화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [5] "Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods", IAEA TRS-468 (2009).
- [6] C. Deptula, *et al.*, Nucleonika 35, 3 (1990).