

국산 30MeV 사이클로트론 (RFT-30)

연구 개발 현황과 전망

허민구

한국원자력연구원 첨단방사선연구소 방사선기기연구부 책임연구원



경희대 기계공학 석사, 박사

한국원자력의학원 선임연구원
한국원자력연구원 책임연구원 (2006~)
사이클로트론 종합연구시설 운영
과제책임자

개요

입자가속기는 전자 등의 하전 입자에 전기 에너지를 인가하여 가속하는 장치를 말한다. 입자가속기는 가속시키는 힘의 종류에 따라 정전형, 전압정류형, 고주파 가속기, 사이클로트론 싱크로트론으로 분류되며, 가속되는 입자의 종류에 따라 충돌형 가속기, 양이온/중이온 가속기 및 방사광 가속기 등으로 분류된다.

이러한 가속기는 물질의 기본 입자 연구뿐 아니라 의학 분야에서 방사선 진단과 치료, 생물학적 연구, 방사성동위원소 개발에 이용되고 있고, 산업적으로는 이온 주입과 표면 처리, 내방사성 시험 등 다양한 분야에서 이용되고 있다.






1932년 미국 버클리 캘리포니아 주립대의 어니스트 로렌츠(Ernest Lawrence)가 고주파의 전극과 자기장을 사용하여 입자를 나선형으로 가속시키는 입자가속기를 개발함으로써 최초의 사이클로트론이 탄생하였다.

다양한 가속기 중에서도 사이클로트론은 의료용 방사성동위원소를 생산하는데 가장 실용적이고 적합한 장치로 평가받고 있으며, 30MeV 급의 사이클로트론은 양전자 방출 단층 촬영(PET ; Positron Emission Tomography)과 단일 광자 단층 촬영(SPECT ; Single Photon Emission Computed Tomography)에 사용하는 양성자 과잉 핵종의 방사성동위원소와 방사성의약품의 개발/생산에 최적화된 장치이다. 여기서는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에 설치된 RFT-30 30 MeV 사이클로트론(이하 RFT-30)과 관련 시설, 그리고 연구개발 현황과 전망을 소개하고자 한다.

RFT-30 사이클로트론과 관련 시설

RFT-30은 한국원자력의학원에서 13MeV 사이클로트론을 국산화하여 기술 이전이 이루어진 이후 2003년에 중형가속기 개발을 목표로 시

<표 1> 주요 안전성 증진 이행 실적

입자에너지	그림 설명	기본반응	활용 분야
~ 1KeV		Sputtering 물질표면의 원자를 날개로 분리	박막가공 나노가공
~ 10KeV		Implantation 물질 속에 투여하여 물질구조와 성질변화	표면 개질 나노결정 반도체 도핑
~ 100MeV		Nuclear Reaction 물질의 원자핵과 반응 새로운 원소 생성	신중 유전자원 RI 생산 방사선 치료기기
~ 10GeV		Spallation 무거운 원자핵을 쪼개서 가벼운 원자 또는 중성자 생성	중성자원 신중 RI 생산
~ 100GeV		소립자 연구 원자핵 속의 양성자 중성자를 쪼개 소립자 생성	신중 소립자 탐색 핵 및 고에너지 물리

<표 2> 국내 주요 입자가속기 현황

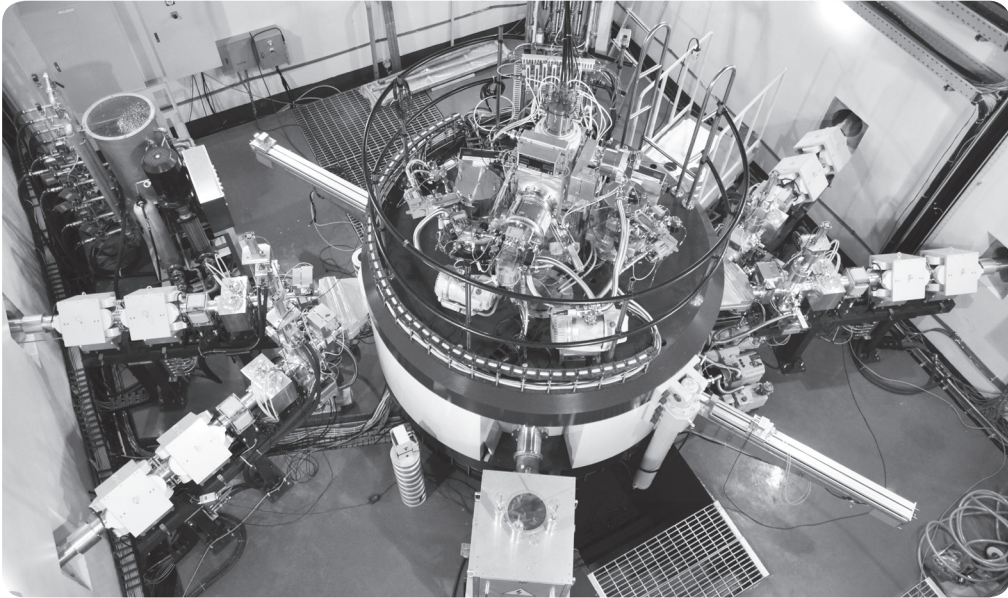
주관기관	가속기 종류	에너지 범위	가속입자	주 사용 목적
포항가속기연구소	방사광가속기 3세대 (선형가속기 및 저장링)	3 GeV	전자	방사광 발생
	방사광가속기 4세대	10 GeV	전자	방사광 발생
한국원자력의학원 (KIRAMS)	조선도사이클로트론	430 MeV/u	탄소	암치료 및 의학연구
	MC-50	~50 MeV	알파, 양성자	핵종개발, 기초연구
기초과학연구원 (IBS)	Cyclon-30	18~30 MeV	양성자	등위원소 생산
	200 MeV/u 조선도선형가속기	200 MeV/u	양성자 ~ 우라늄	핵물리 연구
한국원자력연구원 (KAERI)	경주 양성자가속기	100 MeV	양성자	기초과학 및 산업 기술 개발
	RFT-30	15~30 MeV	양성자	핵종개발 및 생산연구

◆ 전 자 : $9.10938291 \times 10^{-31}$ kg	◆ 수소 : 1g/mol (양성자 1개 + 전자 1개)
◆ 양성자: $1.67262171 \times 10^{-27}$ kg	◆ 탄소 : 12g/mol
◆ 중성자: $1.67492729 \times 10^{-27}$ kg	◆ 우라늄: 238g/mol
◆ 알 파: 6.644656×10^{-27} kg	

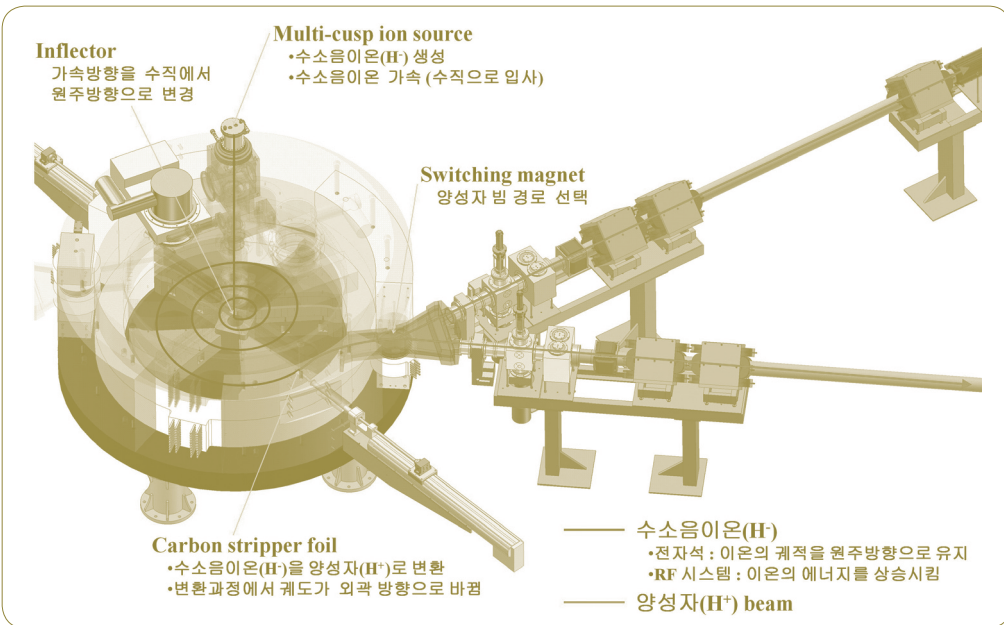
작되었으며, 2005년부터 2007년까지 한국원자력연구원과 한국원자력의학원이 공동으로 개발한 국내 최초의 30MeV급 사이클로트론이다.

RFT-30은 IBA(벨기에)와 TRIUMF(캐나다) 30MeV 사이클로트론 모델의 장점을 최대한 수용한 4-섹터 집중형 모델로서 이온원(Ion Source), 전자석(Magnet), 고주파(RF: Radio Frequency), 빔인출(Extraction), 그리고 진공(Vacuum) 시스템 등으로 구성되어 있다.

이온원으로부터 생성된 입자는 Multi-cusp 형식의 이온원으로부터 인출한 수소음이온(H⁻: 양성자 1개와 전자 2개)을 63.96MHz(메가헤르츠)의 고주파(RF)를 이용하여 최대 30MeV의 에너지로 가속시키며 양성자빔 인출 장치에 설치되어 있는 탄소 스트리퍼 박막(carbon stripper foil)을 사용하여 2개의 전자를 탈락시켜 양성자로 변환시키고 입자의 궤도를 사이클로트론 내부에서 외부 양성자 빔 수송 라인으로 유도하여



RFT-30 사이클로트론. RFT-30은 IBA(벨기에)와 TRIUMF(캐나다) 30MeV 사이클로트론 모델의 장점을 최대한 수용한 4-섹터 집중형 모델로서 이온원(Ion Source), 전자석(Magnet), 고주파(RF : Radio Frequency), 빔인출(Extraction), 그리고 진공(Vacuum)시스템 등으로 구성되어 있다.



사이클로트론 양성자 빔 인출 과정

〈표 3〉 RFT-30 사이클로트론 구성 및 제원

이온원	이온원 형식	Multicusp type
	최대 이온원 빔 전류	10 mA
	생성 이온	Negative Hydrogen ion (H ⁻)
인출빔	양성자 빔 인출 물질	Carbon stripper foil
	인출빔 형태	Proton (H ⁺)
	최대 인출빔 전류 (예상)	Max. 500 μ A
	인출빔 에너지	15 MeV~30 MeV
RF 시스템	RF 주파수	64.05 MHz
	하모닉스 No. (Harmonic number)	4
전자석 시스템	자기장 세기	10.50 kG (킬로가우스)

양성자 빔을 인출하도록 구성된다.

RFT-30에서 양성자 빔은 본체 양 방향으로 동시에 인출이 가능하고, 총 4개의 인출 빔 라인은 사용 목적에 따라 구분된 4개의 표적조사실로 연결된다. 이때, 인출한 양성자 빔은 극성이 인 하전입자들의 모임이므로 빔 전송 라인을 이동하면서 퍼짐 현상이 발생하는데, 이러한 현상을 방지하고 표적(양성자 빔과의 충돌을 통하여 방사성동위원소의 생성을 유도하는 기구)으로의 양성자 빔 균일도를 높이기 위하여 빔 집속용 마그넷이 설치되어 있다.

RFT-30의 개발 초기에 LEBT(Low Energy Beam Transport)가속 실험에서 1.5MeV, 600 μ A 까지 가속에 성공하였으나, 30MeV까지 가속하는 과정에서 양성자 빔의 소실과 시스템의 불안정성을 확인하였으며, 이의 해결을 위하여 미래창조과학부(당시 교육과학기술부)의 지원 아래 성균관대학교 채종서 교수를 중심으로 하는 정상화위원회(Task Force Team)를 구성하여 문제를 해결하였다. 정상화위원회를 통하여 LEBT, 고주파 시스템과 빔 인출 장치를 개선하여 최종적으로 최대 300 μ A의 양성자 빔 인출과 200 μ A 2시간 이상의 안정적인 양성자 빔 인출 시험을 수행함으로써 RFT-30이 상용 가속기 수준의 성능을 보이는 것을 확인하였다.

한국원자력연구원은 성능이 확인된 사이클로트론의 활용과 연구 지원을 위하여 7기의 SPECT동위원소 취급용 핫셀과 4기의 PET동위원소 취급용 핫셀, 그리고 승화성이 있는 I-123동위원소 취급용 핫셀 2기를 설치하였으며, 동위원소 생산 및 표지에 관련된 실험실 및 연구 장비를 구비하고 있다. 또한 동위원소 생산 연구가 아닌 양성자 빔을 이용하는 연구를 위한 양성자 빔

조사실과 연구 공간을 확보하고 있다.

연구 개발 현황 및 전망

연구팀은 RFT-30 사이클로트론을 활용하여 ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga 발생장치 및 ⁴⁴Ti/⁴⁴Sc 발생장치 개발 연구를 수행하고 있다. 발생 장치는 사이클로트론 없이 모핵종(⁶⁸Ge, ⁴⁴Ti)으로부터 생성되는 딸핵종(⁶⁸Ga, ⁴⁴Sc)을 사용할 수 있다. 발생 장치에 사용되는 모핵종은 낮은 생산수율로 인하여 높은 에너지와 전류량, 그리고 오랜 기간의 양성자 빔 조사를 필요로 한다.

RFT-30 사이클로트론을 이용하여 생산된 모핵종을 흡착체에 고정시키면, 발생 장치 사용자는 이 흡착체로부터 생성된 딸핵종만을 간단한 화학 반응을 이용하여 용출시켜 방사성의약품 개발 연구 등에 활용할 수 있게 된다. 발생장치는 적은 투자 비용으로 방사성동위원소 관련 연구를 수행할 수 있어 최근 그 수요가 증가하고 있는 추세이다.

이외에도 동위원소를 이용하여 표지 화합물을 합성하는 자동 합성 장치의 개발, 동위원소 생산 설비 자동화 등 다양한 자동화 연구를 수행중이며 사이클로트론의 성능 향상을 위한 연구도 함께 하고 있다.

30MeV 사이클로트론은 핵반응을 통하여 원자보다 높은 에너지의 중성자 생성이 가능한 장비이다. 일반적으로 원자로에서 생성되는 중성자 에너지는 수 MeV인 반면, RFT-30을 이용해서는 약 28MeV의 중성자 생성이 가능하다. 가속기를 이용하여 생성되는 중성자는 방사광과 유사하게 물질 내부 탐색에 사용될 수 있으며, 이는 고속중성자 연구에도 큰 도움이 될 것이다.

한국원자력연구원은 RFT-30 사이클로트론을 이용하여 다양한 방사성동위원소의 개발과 이용 연구, 그리고 방사성의약품 관련 연구에 사용할 뿐만 아니라 핵구조 및 핵반응 측정 연구, 방사선 생물학, 공업, 농업, 환경, 식품 등 양성자 빔 이용 연구에 활용할 계획이며, 또한 우주선과 관련한 태양전지 결합, 반도체 결합 및 각종 회로의 방사저항 연구, 금속재료공학, 중이온 가속에 의한 반도체 도핑, 속중성자 등의 연구에도 시설을 개방하여 산-학-연의 연구 활성화에 기여할 계획이다. 