2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

대전류 사이클로트론의 동위원소 생산 이용

The Utilization of High Current Cyclotron for the Mass Production of Radioisotopes

김재홍, 이동훈, 안광일, 이재용, 안순혁, 이지섭, 박현, 양승대, 최창운, 전권수
원자력의학원, 서울 노원구 공릉동 215-4

요 약

최근 원자력의학원에 도입된 대전류 사이클로트론 Cyclone30 은 동위원소 대량생산에 이용되고 있다. Cyclone30 은 일정 자기장과 고정 주파수(65.5MHz)로 수소 음이온을 30MeV 까지 가속할 수 있는 장치이다. 인출 가능한 빔의 에너지는 사이클로트론 내의 stripper 거리를 조절함으로 18MeV 에서 30MeV 까지 쉽게 가변 할 수 있다. 수소 음이온은 "MULTICUSP" 외부 이온 원에서 생성되어 수직 축 아래방향으로 전송되어 사이클로트론 내부로 주입된다. 정전기적 인플렉터는 수직방향의 빔을 수평으로 방향을 전환시켜 자석의 중심에서 가속되는 방향으로 emittance 를 줄이면서 빔을 주입한다. 전자석의 구조는 섹터 분리형으로 Hill 과 Valley 로 구분되어 있고 valley 에는 RF cavity 와 진공펌프의 연결부분으로 연결되어있다. 전자석의 자극 간격을 줄여 충분히 높은 자장 (1.7Tesla)을 형성하는데 전력소모는 7.2kW 정도로 아주 낮다. 두 개의 가속 디(Dee)전극들이 마주보고 위치하며 65.5MHz 의 주파수로 50kV 가 인가된다. 사이클로트론 내부에서 수소의 음이온은 원하는 에너지까지 가속되고 탄소 포일에서 두 개의 전자를 잃고 양 이온이 되어 외부로 인출되며 집속된 빔이 표적에 조사된다. 고체 표적에서는 250μA 까지 빔 조사가 가능하며 3000μAh 조사로 2.8Ci 정도의 Tl-201 을 생산하고 있다. $H_2{}^{18}O$ 액체 표적은 25μAh 조사로 1.6Ci F-18 이 생산되며, Xe 기체 표적은 300μAh 조사로 3Ci 의 I-123 동위원소를 생산 하고있다.

Abstracts

Recently the high current Cyclone30 was introduced at the KIRAMS and utilized for the mass production of Radioisotopes. The Cyclone 30 accelerator is employed a fixed field, fixed frequency, which accelerates negative ions (H-) up to 30MeV. The energy of the extracted beam can be varied between 18 and 30MeV by positioning of a stripper foil at the radius corresponding to the required energy. The negative ions are produced by an external “MULTICUSP” ion source and injected axially into the machine. An electrostatic inflector at the center deflects the injected beam onto its acceleration

course at the medium plane of the magnets. The four sector magnets are separated by hills and valleys that can accommodate the RF cavities and vacuum pumps. Due to the narrow gap of the magnetic poles, the power of 7.2kW is required to achieve 1.7Tesla. The Dees, located in two opposite valleys of the magnet, are applied by the 50kV of 65.5MHz RF field, which is isochronous with the accelerated particles rotation. The accelerated negative ions are intercepted by a carbon foil that stripes their electrons while heavier protons pass through the carbon. The positively charged beam is then naturally bent outwards by the magnetic field and transported onto the target. A proton beam can be irradiated as high as 250μA in the solid target, while 100μA for the Xe-gas target and 25μAh for the $H_2{}^{18}O$ liquid target.

1. 서론

사이클로트론을 이용하여 생산되는 진단용 또는 의료용 동위원소들은 안정한 표적물질에 높은 에너지의 양성자가 조사 될 때 핵반응에 의해서 생성된다. 양성자를 충분한 에너지로 가속하기 위해서 이용되는 사이클로트론의 주요 부분은 (1) 진공시스템, (2) 자석시스템, (3) RF 시스템, (4) 외부 이온원, (5) 수직 축 방향 빔의 수평방향 전환 시스템, 그리고 (6) 빔 인출 장치로 구성된다. 인출된 빔은 표적까지 손실 없이 전송 될 수 있도록 빔 라인에 설치된 광학적 요소에 의해 집속되어 전송된다. 원자력의학원에서 대전류 사이클로트론 Cyclone30(IBA, Belgium)을 이용하여 주로 생산하는 동위원소는 Tl-201, I-123 그리고 F-18 등이다. 본 논문에서는 Cyclone30 사이클로트론의 주요 부분의 특징과 현재 동위원소 생산 현황을 소개하고자 한다.

1.1 진공 장치

사이클로트론 내부에서 가속되는 불안정한 음이온 (두 번째 전자가 상대적으로 약하게 구속 된 상태)이 가속 공간 내에 존재하는 가스에 의한 (충돌에 의한 전자의 손실로 인한) 중성화를 피하기 위해 충분히 좋은 진공도 (~10^{-7}mbar)를 유지해야 한다. 사이클로트론의 진공 챔버는 하나의 mechanical 펌프와 두 개의 cryo 펌프로 구성되어 있다. 이온원 챔버와 각각의 빔라인들은 독립적인 oil diffusion 펌프와 mechanical 펌프로 구성되어 있다. 두 개의 stripper 의 airlock 시스템 (탄소 포일이 진공으로 인해 부서지는 것을 방지하는 장치)은 하나의 mechanical pump 를 공유한다. 사이클로트론 챔버의 운전 가능한 진공도인 $5x10^{-6}$mbar 는 대기압상태에서 두 시간 정도면 가능하다. 모든 펌프 운전은 진공게이지의 입력 값과 문턱 값을 이용하여 PLC 에서 조절한다. 진공 조절기는 압력의 표시장치를 포함하고 있다.

1.2. 자석 시스템

주자석 장치는 철 요크와 이온이 가속되는 중심 면의 위와 아래에 대칭적으로 두 개의 코일로 구성된다. 자장의 대칭적 구조는 고순도 철의 single batch 로 자석을 제작하고 등시성은 움직일 수 있는 pole 의 가장자리를 사용하여 반복적으로 측정과 가공 과정을 통해 제작된다. 자석의 구조가 등시성을 가져 입자의 에너지와 무관하게 회전하는데 같은 시간이 소요되고 RF 의 진동수와 일치하게 되어 입자가 가속된다. 각각의 코일은 이중으로 감겨져 냉각수가 안으로 흐르게 된 구조이다. 두 개의 코일은 직렬로 연결되었고, 전류 정류 전원에 의해 전원(106A, 66V)이 공급된다. 직류 전류의 값은 PLC 를 통해 컨트롤실에 있는 encoder 로 조절이 가능하다. 코일 전류의 자동 감지 기능은 자석 코일의 전류의 미세한 조정으로 표적에 일정한 빔 전류를 자동으로 유지하게 할 수 있다.

1.3. RF 시스템

RF 시스템은 이온이 충분히 가속 될 때까지 가속 간격에서 이온들이 적절히 가속될 수 있도록 진동하는 전기장을 제공한다. 가속되는 동안에 사이클로트론 내에서 하전 입자들은 운동에너지가 커질수록 중심에서 멀어지는 나선형운동을 한다. 자장의 크기는 최대 에너지를 갖는 입자의 경로가 사이클로트론 안에 위치하도록 충분히 큰 값으로 정한다. 등시성을 갖는 사이클로트론에서, 자장이 일정하므로 입자들의 에너지 또는 중심으로부터의 거리와는 무관하게 각속도는 동일하다. 가속되는 입자들은 항상 가속 간격에서 가속되고 각속도가 일정하므로 반경방향으로 정렬된 상태로 가속된다. 입자들의 가속은 입자들이 가속전극 dee 와 counter-dee (항상 전기적으로 접지, 0V) 사이의 좁은 간격을 지날 때 가속된다. 진동자로부터 증폭된 sine 파의 출력(40KW)이 가속 전극 Dee 에 반복적으로 음(negative) 또는 양(positive) 전위로 전달 될 때 이온들도 같은 시간에 가속 간격에서 가속되는 등시성을 만족해야 된다. 등시성을 만족하기 위해서 진동수와 위상이 적절히 선택되어 가속 간극의 전압이 입자들이 통과 할 때 가속 될 수 있도록 조절된다. Cyclone30 은 low capacitance 의 Dee 와 진동자의 특별한 기하학적 구조로 cavity 하나에 5kW 의 적은 전력으로 Dee 에 50kV 의 전압이 인가된다.

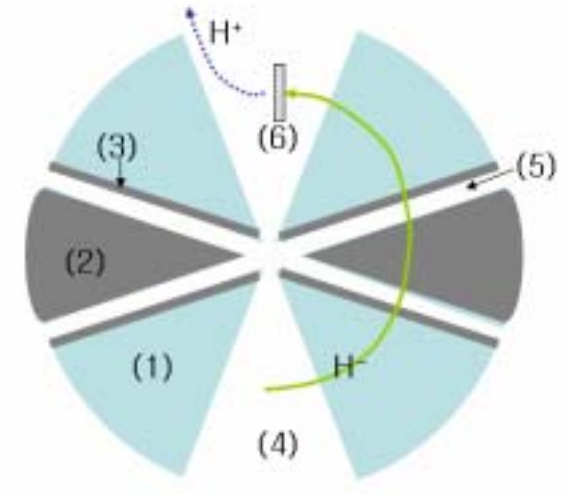

그림 1. 사이클로트론의 중심면에서의 단면도

(1) sectors, (2) 가속전극 (dees), (3) conuter-dees, (4) 두 개의 "valleys"들은 진공펌프 연결을 위해 사용되고, 나머지 두 개는 가속전극(2)들이 위치함, (5) 이온들이 가속되는 가속 간격, (6) stripper carbon foil. 실선은 H^-이온들의 진행 방향이고 점선은 H^+이온들의 진행 방향이다. 일정한 자기장에 대해 휘어지는 경로가 다름을 보여준다.

RF 시스템은 석영 진동자의 저출력 sine 파를 40kW 로 증폭하는 고 전력 증폭 시스템이다. RF 전력은 사이클로트론의 내부에 존재하는 두 개의 마주보고 있는 가속전극(Dee)에 전달된다. 각각의 가속전극은 4 분의 1 파장 모드에서 공진을 갖는 수직 stem 에 의해 고정되어 있다. 두 개의 30° dee 들은 입자의 회전수에 대해 4 차 조화수 모드로 매 회전마다 4 번씩 가속을 하게 된다. 위상의 불일치를 줄이고 RF 시스템의 단순화를 위해 dee 들은 중심에서 서로 연결되어 있다. 구리로 제작된 cavity 들은 전자석의 valley 에 위치한다. dee 에 인가되는 전압은 50kV 이다. Cyclon30 은 multipactor 효과로부터 damage 를 방지하기 위해 운전 초기의 RF 신호는 사각파 발생기에 의해 변조되어 낮은 출력에서 공진 조건을 찾은 후 최대 출력으로 전환하는 Low-Level RF 조절 기능이 있다.

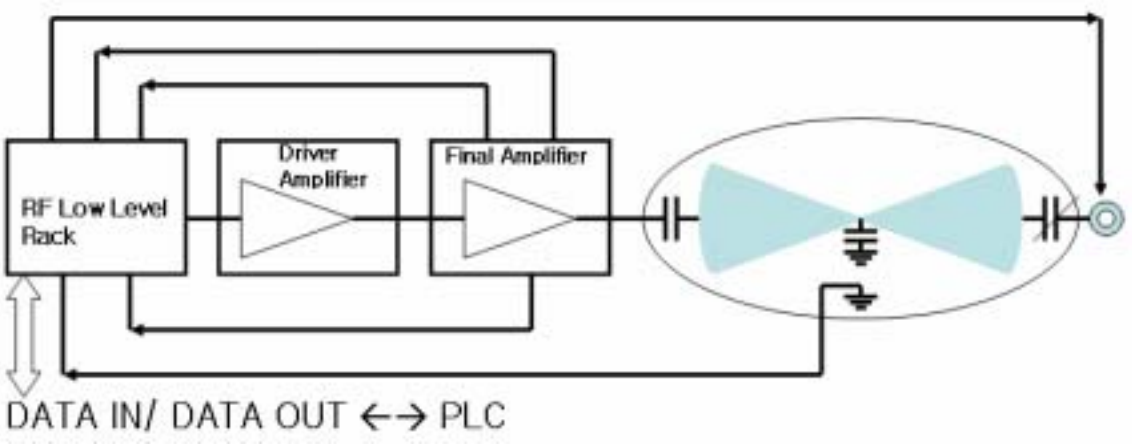

그림 2. RF 시스템의 개략도 [1]

Cyclone30 사이클로트론의 RF 시스템은 다음 요소로 구성되어 있다. (1) RF low level (RFLL) 시스템은 초기의 석영 진동자 (65-66MHz)로부터 미세 신호의 발생과 진동신호 증폭을 중간단계 증폭기(driver amplifier)에 전달하는 시작 단계를 조절하는 전기적 회로를 포함하는 첫 단계이다. 또한 공진 조건에서의 안정한 dee 전압 조절과 cavity/dee 공진 시스템을 검출하고 조절하는 기능을 함축하고 있다. (2) driver amplifier 는 RFLL 시스템의 신호를 3kW 까지 증폭한다. (3) final stage 증폭기는 driver amplifier 의 출력을 40kW 로 증폭하여 RF cavity 의 일부분인 dee 에 전달한다. RF 출력의 final stage 증폭기는 사이클로트론 vault 안에 위치하여 불필요하게 긴 RF cable 의 사용을 피하였다. final stage 의 증폭기는 dee 에 capacitively 연결되어 있다.

1.4. Ion injector

S4/3N 인젝터는 수소나 중수소가 30kV 로 가속 할 수 있는 이온의 발생장치이다. 수소 음이온을 7mA 까지 집속된 빔으로 발생할 수 있다. S4/3N 인젝터는 3 개의 필라멘트 카트리지가 설치되어 있고, 여러 개의 영구자석의 조합으로 플라즈마를 넓은 체적에 형성 할 수 있는 고효율의 이온원이다. 세 개의 그리드로 구성된 가속장치는 두 개의 유전체가 사이에 삽입되어 전기적으로 전열 된 구조이다. 첫 번째 그리드는 플라즈마 그리드이고, 운전 중에는 주위의 그리드 보다 양 전위로 음이온을 가속하여 인출구로 전송한다. 두 번째 그리드는 전자 포획을 위한 전극으로 음 이온과 동시에 인출되는 전자를 빔의 방향으로부터 굴절시킨다. 세 번째 그리드는 인출되는 빔에 등전위면을 제공한다.

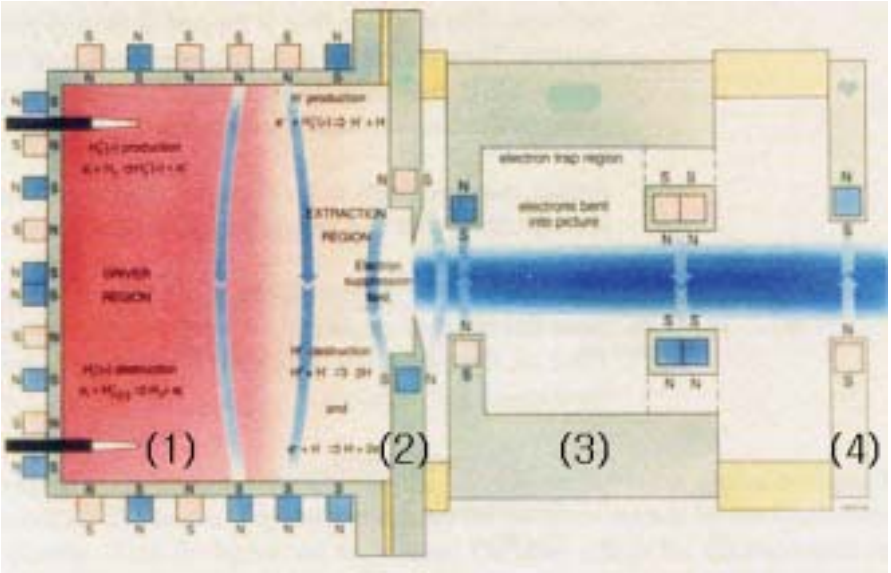

그림 3. 이온 인젝터의 단면도 (1) 필라멘트, (2) 플라즈마 그리드, (3) 전자 억제 그리드, (4) 그리드 (접지) [1].

그림 3 과 같이 영구자석들의 정렬된 배열은 빔의 방향으로는 단거리 자력선 그리고 이온원의 횡단면으로는 장거리 자력선의 모양을 갖는 filter field 를 형성하여 음이온의 생성에 효과적인 플라즈마 조건을 만족하는 기본적인 구조이다. 플라즈마 그리드 전극의 구조는 이온의 출구를 포함하고 있으므로 다른 두 개의 전극보다 다소 복잡한 두 개의 부분으로 구성된다. 영구자석을 포함하는 외부와 출구를 포함하는 내부로 구성되어 있다. 안쪽은 mica gasket 을 사용하여 전기적으로 절연되어 있다. 이러한 배열은 안쪽면에 주위의 그리드보다 양 전위를 인가 할 수 있어 수소의 음이온과 동시에 인출되는 전자를 억제 할 수 있게 된다. 두 번째 그리드는 길이 20mm 이며 음이온과 동시에 인출되는 전자의 억제를 목적으로 한다. 접지되어 있는 세 번째 전극에서의 자장은 빔의 진행

방향으로 평행하게 진행 할 수 있도록 음이온의 경로를 교정 해 준다. 플라즈마 방전의 특성과 수소의 음이온 생성과정 때문에 인젝터의 성능은 많은 변수에 영향을 받는다. 일반적으로 5 개의 조절변수로 4/3N 인젝터 계열의 출력의 조절로 빔을 최적화한다. (1) Arc 전류 (필라멘트 전류), (2) Arc 전압, (3) 가스 유량, (4) 전자억제 전압, (5) 인출 그리드 전압 등이다.

1.4.1 Arc 전류

Arc 전류는 이온원의 플라즈마 밀도를 조절하는 주된 변수이다. 필라멘트에서의 열전자 방출의 양은 필리멘트 전류와 아크 전압에 의해서 조절된다. 일정 Arc 전압에서 필라멘트 전류의 상승으로 아크 전류는 높아지고 플라즈마 밀도도 증가된다. 필라멘트는 45A 보다 낮은 전류에서는 열전자가 충분히 방출하지 않기 때문에 Arc 전류는 영이다. 수소의 음이온은 초기에 Arc 전류에 선형적으로 증가하여 플라즈마 밀도도 증가하나 결국에는 일정 값에 포화된다. 포화되는 이유는 플라즈마 안에서 H_2^* 생성과 손실의 평형 때문이다. 진동적으로 여기된 일정률의 분자들은 증가되는 밀도에 대해 포화되는 경향을 갖지만, 이 효과는 인출되는 영역에서의 양 이온 밀도와 음 이온 밀도 사이에 선형적인 관계가 상쇄된다. 그래서, 이온원의 특징은 filter field 횡단면의 수송 물리에 의존한다.

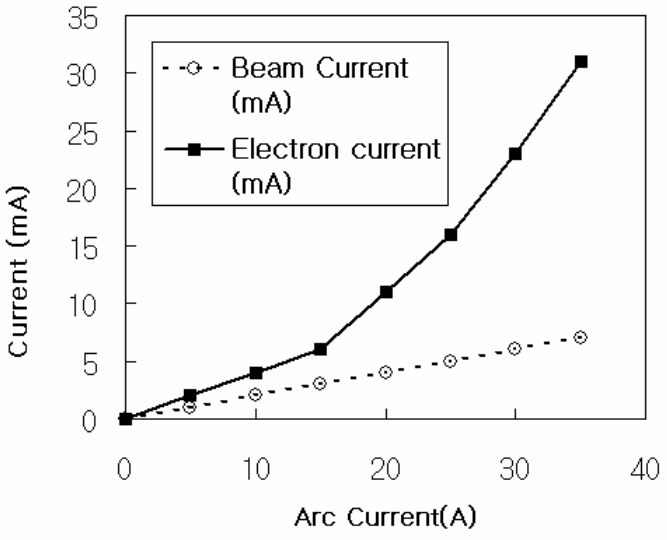

그림. 4. Arc 전류에 따른 빔 전류와 전자 전류 [1].

1.4.2 아크전압

아크 전압의 효과가 [그림 5]에 보여 진다. 아크 전압은 필라멘트와 이온원 챔버 사이에 인가되는 전압이다. 필라멘트에서 발생된 전자를 플라즈마 영역으로 가속한다. 높은 아크 전압은 전자가 많이 가속되어 높은 에너지를 가지고 전자온도가 상승하게 된다,

가속되는 영역에서 진동적으로 여기되는 분자의 수가 증가하게 되고. 증가된 전자온도는 아크 전류와 같이 전자의 밀도를 증가시킨다. 하지만 일정 이상의 아크 전압은 전자온도의 상승 때문에 수소의 음이온 생성이 포화되거나 감소하게 된다.

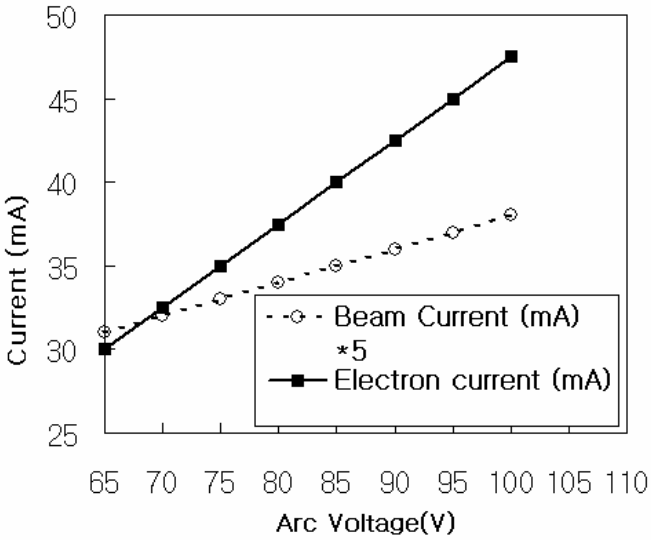

그림 5. 아크 전압에 대한 빔 전류와 전자 전류. [1]

1.4.3 가스 유량

가스유량은 이온원의 압력에 영향을 주고, 수소 음이온과 전자의 생성에 큰 영향을 준다 (그림 6 참조). 이온원 안에 있는 가스의 수 %만이 이온화되고 대부분의 충돌과정을 통해 중성 원자로 변환된다. 이러한 과정 등을 통해 가스 유량은 수소의 음이온 생성과 전자의 생성에 영향을 미친다. 가스 유량을 증가 하면 수소 음이온도 증가하고 가스의 밀도가 증가함에 최고치로 상승하고 여기된 분자율의 증가와 전자의 충돌에 의한 cooling 효과도 증가한다. 두 가지 모두가 수소의 음이온 증가를 향상시킨다. 궁극적으로, 인출영역에서의 빠른 전자들의 cooling 은 전자들을 수소 음이온의 전자 이탈을 증가 시켜 여기된 전자들의 생성이 감소되어 수소 음이온 생성을 저하한다.

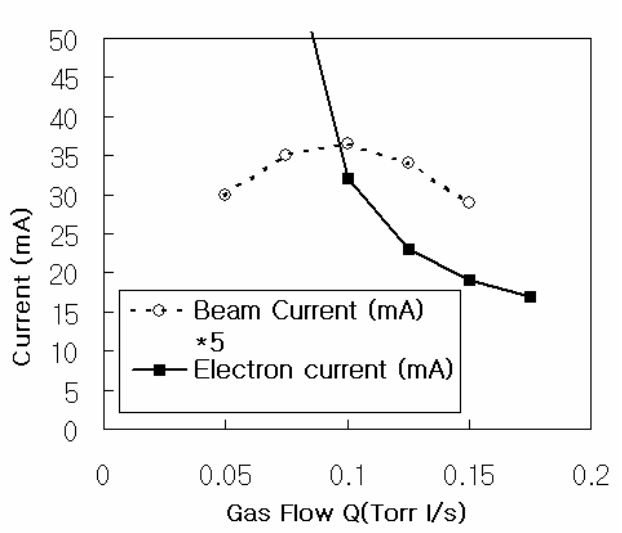

그림 6. 가스 유량에 따른 빔전류와 전자 전류 [1].

1.4.4. 전자 억제 전압

전자억제 전압의 목적은 수소 음이온과 동시에 생성되는 전자의 흐름을 억제하고 이온을 효과적으로 전송하기 위함이다. 전자 흐름의 양은 인가되는 전압에 지수함수적으로 의존한다. 영구자석에 의해 형성되는 자기장은 수소 음이온의 생성을 향상시키므로 작은 전압으로 수소 음이온의 전송을 최적화 할 수 있다. 그림 7 은 전자억제 전압에 따른 빔 전류와 전자 전류의 영향을 보여준다. 전자 전류의 경우가 빔의 전류보다 억제전압에 큰 변화를 갖는다.

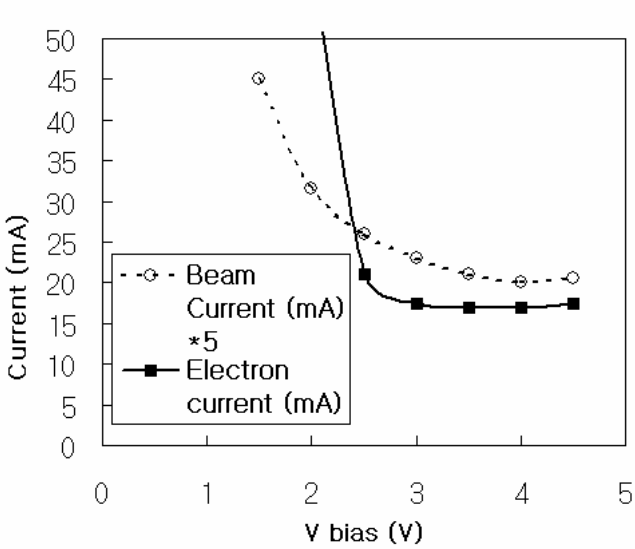

그림 7. 전자억제 전압에 따른 빔 전류와 전자 전류의 변화 [1].

1.4.5. 축 방향 주입 시스템

축 방향 주입 시스템은 이온원으로부터 생성된 이온들을 집속하여 사이클로트론의 중심면에 주입하는 장치이다. Steering magnet 는 빔의 진행 축에 수직인 두 방향으로 이동이 가능하여 축의 중심에 정렬할 수 있다. 정전기적 Einzel 렌즈는 빔의 진행 방향으로 약한 집속 효과가 있고 솔레노이드 (Glazer) 렌즈는 자장으로 진행하는 이온들을 집속하여 인플렉터로 전송한다. 이온원에서 연속적으로 생성된 빔은 사이클로트론의 회전 특성으로 인하여 주입되는 입자의 10% 정도만 가속된다. buncher 는 입자들의 속도를 변화시켜 가속에 적절한 위상변화로 많은 양의 입자들이 가속 될 수 있도록 역할을 한다. 번쳐의 사용으로 주입된 빔의 가속률은 10%에서 30%로 향상된다. 번쳐는 두 개의 홑(single) 그리드와 RF 신호가 전달되는 한 개의 겹(double) 그리드로 2 중 간격의 구조를 갖는다. 두 간격의 거리는 RF 의 반주기 동안 30keV 입자가 진행하는 거리이다. 입자들이 첫 번째 간격을 통과 할 때 양 전압으로 가속을 시키고, 두 번째 간격을 통과 할 때 음 전압으로 감속을 시켜 빔의 밀도를 증가시킨다. 정전기적 인플렉터는 수직으로 가속된 빔을 사이클로트론의 자장 안으로 가속평면에 평행하게 방향을 전환하여 주입하는 장치이다. 꼬여진 모양의 정전기적 channel 은 이온들을 자장의 중앙에 적절한 위상으로 전송한다.

1.5 인출장치

외부이온원에서 발생되어 가속 된 음 이온은 탄소 박막(1μm)을 투과할 때 가지고 있던 두 개의 전자를 상실하고 양 이온으로 전환된다. 양 이온은 자기장안에서 전하가 반대로 되어 궤도가 바뀌어 밖으로 인출 되게 된다(그림 1 참조). 탄소 포일은 알루미늄 포크에 부착되어 이동이 가능하며 반경 방향으로의 위치 조정은 빔의 에너지를 선택 할 수 있고, 방위각으로의 조절은 빔의 궤도를 switching magnet 의 중심에 조정할 수 있다. Cyclone30 은 두 개의 인출 장치가 마주 보고 있어 동일한 또는 유사한 에너지의 빔을 동시에 인출 할 수 있다. 조사 도중 포일의 교체는 air-lock system 을 통해 자동적으로 가능하며 12 개까지 교체가 가능하여 연속적인 빔 조사가 가능하다.

2. 빔 라인

원자력의학원은 4 개의 빔라인이 설치되어 있고, 고체 표적, 액체 및 기체 표적에 양성자 빔을 조사 할 수 있다. 각각의 빔라인은 빔을 집속하거나 수평 이동 할 수 있는 조절요소와 빔의 모양과 전류를 측정 할 수 있는 측정요소로 구성되어있다. 탄소 포일에서 인출 되는 빔은 switching-magnet (1)의 중앙을 향하도록 한다. 스위칭 마그넷은 빔을 수평방향으로 경로를 변화시켜 두 개의 빔 라인 중 원하는 빔라인에 정열이 되도록 한다. 콜리메이터는 빔의 가장자리를 잘라 빔의 크기를 조절한다. 15kW 파라데이 cup(3)은 빔의 진단과 stopper 요소로 사용된다. 파라데이 컵의 빔에 노출 되는 공동은 탄탈륨 디스크로 밀봉이 되어있다. 탄탈륨 디스크와 공동은 고압의 물 흐름으로 냉각시키고, 빔은 탄탈륨을 투과 하여 물에서 멈춘다. 파라데이 컵은 절연되어 있어 전류를 측정 할 수 있다. 두 번째

동일한 파라데이 컵이 빔 라인의 끝에 설치되어 있다. quadrupole magnet(8)은 빔을 표적에 집속하는데 사용한다. 각각의 quadrupole magnet 은 자기장의 구배가 없는 빔 축으로부터 증가 해 가는 4 중극 모양의 자기장을 형성한다. 일반적으로 3 개의 연속적인 배열에서, 처음과 세 번째는 수평 방향으로 집속을 하고, 중간은 수직방향으로 집속을 한다. 각각의 quadrupole magnet 의 간격은 계산에 의해 결정 되었다. AC magnet 은 (12) 은 가변의 자장(3000G-m)으로 빔의 초점을 회전시켜 표적에서의 hot spot 을 피하고 조사된 면적을 균일하게 넓여 주는 효과로 동위원소 생산효율을 증가한다. AC magnet 는 빔의 축 방향으로 120° 도 각으로 코일이 감겨져있다. Faraday viewer(10)은 알루미늄부분에 빔을 조사 하여 45 도 각으로 빔의 모양을 영상화한다. viewer 은 물로 냉각되며 2kW 까지 조사 할 수 있다. gate 진공 밸브(11)가 각각 사이클로트론과 빔라인 그리고 표적 장치 사이에 설치되어 있다. 각각의 빔라인은 오일 확산 펌프와 mechanical 펌프로 구성되어있다. 모든 밸브는 압축된 공기의 압력으로 동작이 가능하다.

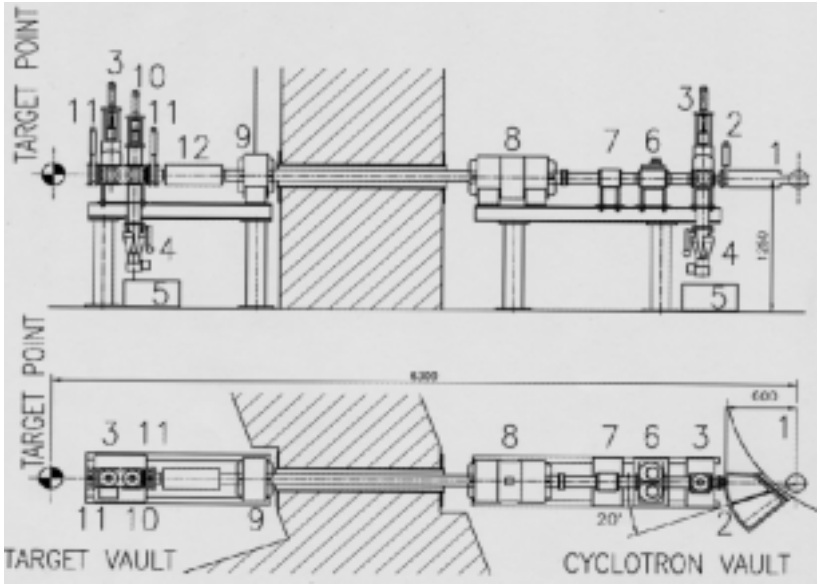

그림 8. 빔라인의 구성요소들. 빔의 방향은 우편에서 좌편으로 이동된다. (1) 스위칭 마그넷, (2) vacuum valve, (3) faraday cup, (4) diffusion pump, (6) collimator (7) 중성자 차폐기, (8) quadrupole magnet (x,y), (9) quadrupole magnet (x), (10) Beam viewer, (11) vacuum valve, (12) AC magnet. [1]

4. 제어 시스템

Cyclone30 에 사용되는 제어시스템은 Programmable Logic Controller (PLC, SIEMENS SIMATIC S7-400)이다. 사이클로트론과 빔라인의 모든 동작은 PLC 에 의해 조절이 가능하며 STEP 7 언어로 구성되었다. 사용자와 PC 는 Wonderware InTouch 프로그램을 통해서 인터페이스가 가능하고, PC 는 모뎀으로 PLC 에 연결되어있다.

5. Target systems

5.1. 고체 표적 시스템

고체 표적은 빔 축에 대해 6° 정도 기울어져 빔의 조사면적이 9.6 배 증가하게 된다. 빔의 크기가 6mm 정도의 Gaussian 분포이고 AC magnet 을 이용하여 반경 3mm 로 50Hz 주기로 회전함으로 조사 면적은 10mm 정도의 균일한 분포를 보여준다. 고체 표적에서는 250μA 까지 빔 조사가 가능하며 3000μAh 조사로 2.8Ci 정도의 Tl-201 을 생산하고 있다. 그림 9 는 Tl 을 구리 위에 전기 도금법으로 얇게 타원형의 모양으로 10mm x 100mm 도금한 후 28MeV 의 220μA 양성자로 12 시간 조사 후 취한 사진이다.

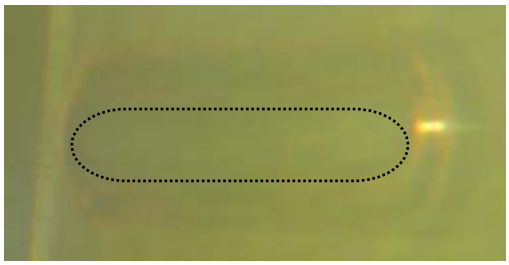

그림 9. 28MeV 의 200μA 양성자로 12 시간 조사 후 고체 표적. 점선의 안쪽이 빔이 조사된 영역이다.

5. 2. 기체표적 시스템

30MeV 사이클로트론을 이용하여 고순도 I-123 을 생산하고 있으며 수율은 10mCi/uAh ± 10% 정도이다. 30MeV 의 양성자가 조사될 때 Xe-124 기체 표적 시스템(그림 10)에서 가능한 핵반응들은 다음과 같다.

$$^{124}Xe(p,pn)^{123}Xe(T_{1/2}=2.1hr) \rightarrow {}^{123}I \quad (1)$$

$$(p,2n)^{123}Cs(T_{1/2}=6min.) \rightarrow {}^{123}Xe \rightarrow {}^{123}I \quad (2)$$

$$(p,2p)^{123}I \quad (3)$$

I-123 의 주된 생성은 핵반응 (1) 과 (2) 에 의하며 (3) 의 핵반응 단면적은 무시 될 수 있다. 생산된 고순도 I-123 의 품질관리를 위하여 방사화학적 순도와 방사핵적 순도를 확인한다. 방사화학적 순도는 TLC(Thin layer chromatography)를 수행하여 $I^{-}(R_f=0.7)$과 $IO_3^{-}(R_f=origin)$의 량을 그림 11 과 같이 확인하였다. 이동상은 70% EtOH/water, 고정상은 iTLC 를 사용하였다. TLC 결과 I^{-} 화학형이 99% 이상이었다. 방사핵적 순도는 High Purity Germanium 검출기와 multichannel analyzer 를 이용하여 $^{121}I(\gamma=212keV)$과 $^{123}I(\gamma=159keV)$를 확인하였다. 예상되는 주 불순핵종은 ^{121}I 과 ^{125}I 이다. ^{121}I 는 $^{124}Xe(p,4n)^{121}Cs(T_{1/2}=136s)\rightarrow^{121}Xe(T_{1/2}=39min)\rightarrow^{121}I(T_{1/2}=2.12hr)$ 핵반응으로 생성되며 최종적으로 ^{121}Te 로 붕괴되고 반감기가 2.1 시간이므로 그 양은 calibration date(2 일

후)를 기준으로 $1x10^{-7}$%이하이다. ^{125}I 는 $^{126}Xe(p,2n)^{125}I$ 핵반응으로 생성되고 반감기가 59.9 일이므로 농축표적 기체의 Xe-126 함량은 0.02%이하야 한다.

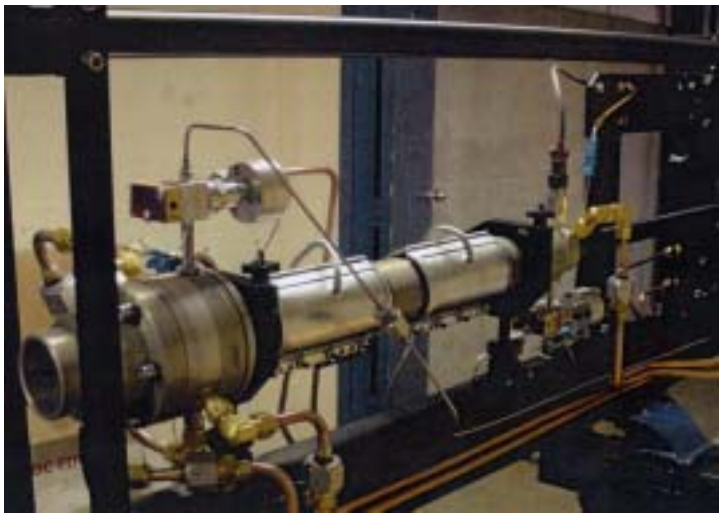

그림.10. Xe-target 가스 표적 장치

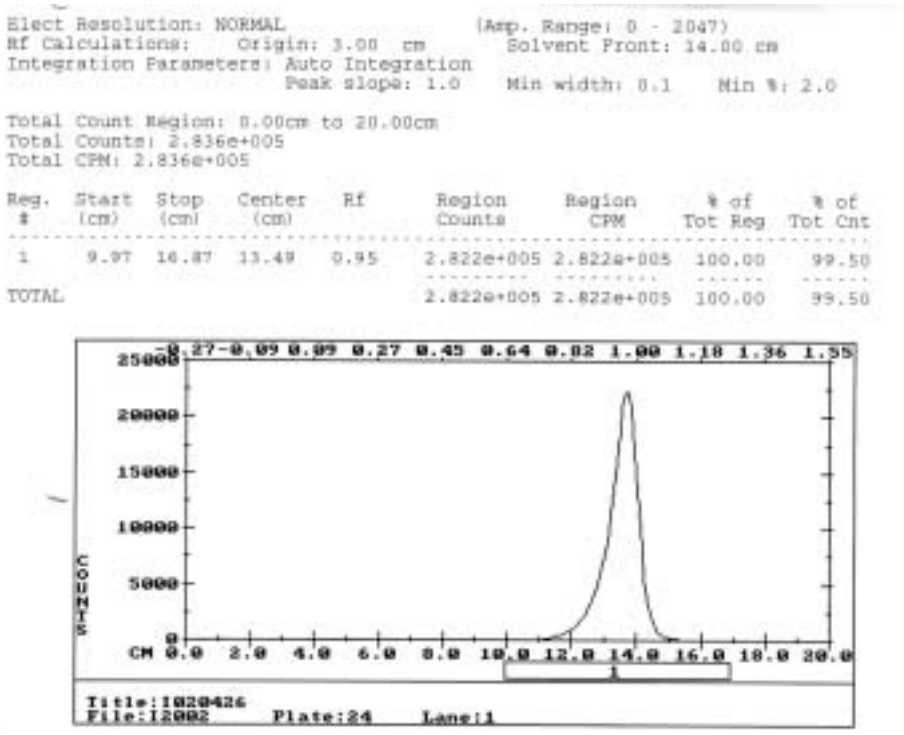

그림. 11. 방사화학적 순도 측정을 위한 TLC(Thin layer chromatography)의 스펙트럼.

5.3. H_2 ^{18}O water target

^{18}F-fluoride 은 $^{18}O(p,n)^{18}F$ 핵반응으로부터 생성된다. 30MeV 의 양성자를 25μA 의 전류로 1 시간 조사하여 1.6 Ci F-18 이 생산 가능하다. $H_2{}^{18}O$ 액체 표적은 25μA 이상 조사 가능하도록 연구가 진행 중이며, F_2 가스 표적의 연구도 진행 중이다.

결론

대전류 사이클로트론이 동위원소 생산에 활발히 응용되고 있다. 수소 음이온은 효율이 좋은 외부이온 원으로부터 인출하여, 번쳐의 사용으로 효과적으로 가속시켜, 탄소 포일에서 양이온으로 전환되어 빔 라인으로 전송된다. 각각의 빔라인은 빔을 조절하는 장치와 진단하는 요소가 설치되어있다. 현재 생산하는 핵 종은 F-18 (액체표적), I-123(기체표적), Tl-201(고체표적) 등 이나, 앞으로 F_2 가스 표적 등 여러 표적시스템을 증설 할 계획이며 표적들의 효율향상에도 연구 계획 중이다. 수행한 연구는 과학기술부 원자력 중장기과제 (一 2-0307)로 수행되었다.

참고문헌

[1] Operation manual for Cyclon30, IBA, Belgium (2002).