

KOTRON-13과 상용 PET 사이클로트론의 최근 기술 동향

원자력의학원 가속기 개발 및 RI 응용연구부
채 종 서

Recent Status of Commercial PET Cyclotron and KOTRON-13

Jong-Seo Chai, Ph.D.

Division of Accelerator Development and RI Applications, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences

This paper is described on the development of KOTRON-13 and recent status of PET cyclotron by commercial cyclotron companies.

KIRAMS has developed medical cyclotron which is KIRAMS-13. Samyoung Unitech produces KOTRON-13 with transferred technology by KIRAMS. As a part of Regional Cyclotron Installation Project, KOTRON-13 cyclotrons and $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ production modules are being installed at regional cyclotron centers in Korea.

The medical concern with radiation technology has been growing for the last several years. Early cancer diagnosis through the cyclotron and PET-CT have been brought to public attention by commercial cyclotron models in the world. The new commercial cyclotron models are introduced compact low energy cyclotrons developed by CTI, GE, Sumitomo in recent. It produces different short-lived radioisotopes, such as $[^{18}\text{F}]$, $[^{11}\text{C}]$, $[^{13}\text{N}]$ and $[^{15}\text{O}]$. For the better reliability acceleration particle is proton only. The characteristics of new model cyclotrons are changed to lower energy corresponding to less 13 MeV. New models have self-shielding and low power consumption.

Design criteria for the different types of commercial cyclotrons are described with reference to hospital demands.(Korean J Nucl Med 39(1):1-8, 2005)

Key Words: PET cyclotron, Short-lived Radioisotope, proton, deuteron

최근 PET와 CT의 융합 형태로 발전 된 PET CT는 PET가 지닌 기능적 영상 진단은 물론 영상의 분해능 향상으로 주목 할만한 성능이 도출 되어 핵의학 진단에 새로운 장을 열고 있다. 따라서 PET 및 PET CT의 핵의학 진단의 수요 급증으로 진단용 방사성 핵종은 양전자 방출 방사성 동위원소가 의료용 방사성 핵종을 중심으로 재편 되고 있어 PET용 사이클로트론의 수요도 급증하기 시작 하였다.

현재 세계적으로 사이클로트론의 제작 회사는 미국의 CTI사, GE사 캐나다의 EBCO사 벨기에의 IBA사 그리고 일본의 Sumitomo사가 있다. 한국에는 삼영유니텍사가 원자력의학원에서 사이클로트론의 기술을 이전 받아 지난 2004년 11월부터 KOTRON-13 사이클로트론을 제작 판매하기 시작

하였다. PET용 사이클로트론은 기기의 특성상 브랜드 이름 보다는 기기의 고장률과 유지 보수에 신속성의 중요성으로 미국과 유럽 그리고 아시아 시장으로 3 분할하여 제작 보급 하여 왔다. 미국에는 CTI, GE 제품을 중심으로 보급 되었으며 유럽은 IBA 제품이 그리고 일본은 Sumitomo 제품이 제작 보급 되었다.

기존의 사이클로트론 제작 회사들은 대부분 각국의 국립연구소와 대학에서 개발된 기술로 창업한 벤처 기업들이다. 소규모의 자본으로 설립된 회사들은 사이클로트론의 미미한 수요와 1000만불이상 소요되는 과도한 연구 개발비를 감당하기 어려워 새로운 모델을 개발하는데 인색하여 왔다. 여러 어려움으로 대규모 의료기기회사와 재벌기업에 흡수된 사이클로트론 회사들도 적지 않다. 최근 사이클로트론의 급속한 수요는 기기 회사들의 경쟁을 부추기기 시작하여 GE사, CTI사, Sumitomo사, EBCO사 등이 새로운 모델을 속속 소개하기 시작하였다.

본 종설에서는 한국의 KOTRON-13 사이클로트론과 최근 각 제작사에서 개발된 사이클로트론을 중심으로 각사 모델들의 특성을 분석 고찰하여 새로이 발전하고 있는 사이클로트론의 개발방향을 기술하였다.

• Received: 2005. 1. 31. • Accepted: 2005. 2. 5.

• Address for reprints: Jong-Seo Chai, Ph. D., Division of Accelerator Development and RI applications, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, #215-4 Gangneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-706, Korea
Tel: 82-2-970-1331, Fax: 82-2-970-1332
E-mail: jschai@kcch.re.kr

Table 1. The existing models of commercial cyclotron

| Manufacturer | Sumitomo Heavy Industries, Ltd. Tokyo, Japan | GE Medical Systems, Wisconsin, USA | IBA (Ion Beam Applications) LOUVAIN-LA-NEUVE, BELGIUM | EBCO Technologies Inc, Richmond, Canada |
|----------------------|---|--|--|--|
| Model | HM-18 | PET trace | CYCLONE 18 | TR-18 |
| Particles and Energy | H- 18 MeV D- 10 MeV | H- 16.5 MeV D- 8.5 MeV | 18 MeV proton 9 MeV deuteron | 18 MeV proton 9 MeV deuteron |
| Beam Current | 70 μ A | 75 μ A | 70 μ A | 100 μ A |
| Characteristics | Two ports are available for proton and deuteron in a standard model | Six target proton and deuteron system with simultaneous dual target irradiation capability | Eight targets with 8 exit ports Simultaneous dual-target bombardment | External Multicusp Ion Source Dual ports (total 8 target) |

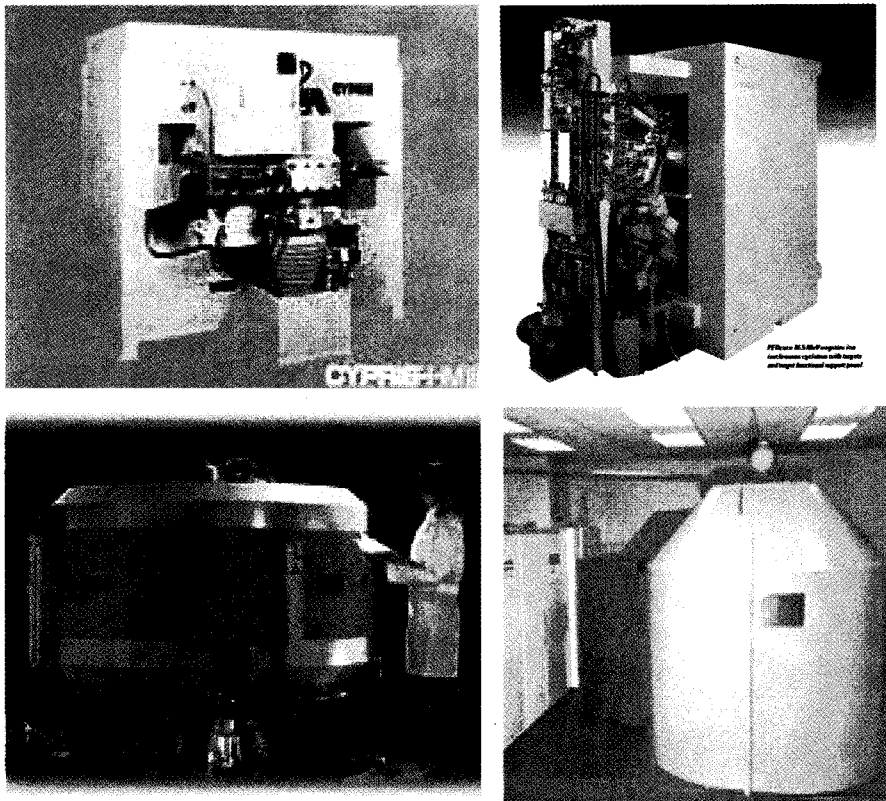


Fig. 1. Commercial cyclotrons; Sumitomo HM-18, GE PET Trace, IBA CYCLONE- 18, and EBCO TR-18.

기존의 PET용 사이클로트론의 특성

PET용 사이클로트론은 사이클로트론 가속기 본체와 PET용 RI생산 표적장치로 구성되어 있다. 1990년대 중반까지 PET사이클로트론 시장을 주도하던 사이클로트론 제작사는 IBA, EBCO, GE, Sumitomo사이다. 이 회사들이 제작했던 주력 사이클로트론 기종은 Table 1 과 같다.

기존 모델들의 특징을 보면 O-15의 생산을 위하여 8

MeV이상의 중양자를 가속 할 수 있도록 설계되어있다. 1990년대에 PET의 유용성은 중양 보다 뇌 연구에 더 높아 O-15의 생산이 필요하다. 사이클로트론은 O-15의 생산은 (d, n) 핵반응을 이용하여 생산하므로 중양자 빔의 가속은 필수적인 요건이다. 따라서 중양자 빔의 인출이 설계 시에 중양자의 가속을 위하여 RF와 이온원의 구조가 결정 되어야 한다. RF의 고조파 모드는 제 2 고조파와 제 4 고조파를 사용하고 양성자와 중양자를 가속하기 위하여 2개의 이온원

을 장착 하여야 한다. 또한 모든 음이온을 가속 하므로 사이클로트론들은 양이온 전환 막 장치의 위치를 이용하여 2중 빔 인출이 가능하다. 1990년대에 새로이 등장한 IBA사는 자기장의 효율을 높이고 자기 저항을 최소화 시키도록 전자석의 모양을 H 형태에서 원형으로 바꾸었다. 또한 자석 내부도 hill과 valley의 깊이를 기존의 사이클로트론의 5배 이상 차이로 전자적으로 사이클로트론 빔의 가속 및 인출 효율을 대폭 상승 시켰다. EBCO사는 TR 시리즈 모델을 출시하면서 자체 차폐 기능을 갖는 사이클로트론을 개발 하였다. 자체 차폐기능은 전자석을 수평으로 놓는 IBA 제품이나, Sumitomo 제품은 개조하기가 용이하지 않으나 전자석을 수직으로 세워 놓은 EBCO 제품은 자체 차폐를 보완하기가 용이하다.

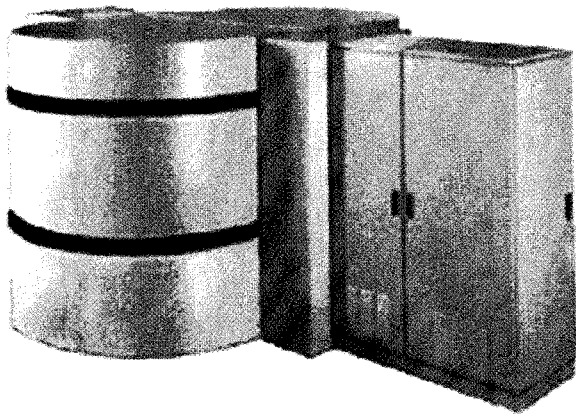


Fig. 2. CTI RDS 111 Cyclotron and Electronics.

CTI 사이클로트론

CTI사의 사이클로트론은 세계 최초로 H-이온 사이클로트론을 실현화한 미국의 TCC (The Cyclotron Corporation) 기술을 승계한 회사로 최초의 음이온 PIG 이온원을 개발하였다. 그 후 CTI에 흡수되어 CTI 모델로 제작 판매 되고 있다. CTI사는 PET 전용 사이클로트론으로 10 MeV의 RDS111과 RDS112 모델을 개발하였다. RDS 모델은 수직형 모델이지만 자체 차폐가 가능하고 양성자 빔만 인출하는 시스템이며 에너지가 10 ~ 11 MeV로 전자석이 기존의 사이클로트론보다 작고 가벼워 병원에 설치가 용이하도록 설계되었다. 또한 빔 전류 세기나 입자, 에너지 등도 PET에만 이용 되도록 설계되어 시스템이 간결하여 고장률을 줄일 수 있도록 하였다. CTI 사이클로트론의 개발 개념은 다른 사이클로트론 회사의 제품에도 많은 영향을 끼치고 있다.

KOTRON-13 사이클로트론

2004년 원자력의학원으로부터 기술 이전을 받은 삼영유니텍은 원자력의학원의 KIRAMS-13 사이클로트론을 KOTRON-13으로 상용화한 사이클로트론의 생산을 시작하였다.

KOTRON-13 사이클로트론의 기술적 특징은 크게 3가지로 요약 된다. 첫째 KOTRON-13은 PET 전용 사이클로트론으로 양성자 빔 에너지는 13 MeV 이며 선택 사양으로 중양자를 6.5 MeV 가속 할 수 있도록 하였다.

RF 주파수가 73.3 MHz로 동급 가속기 중 가장 높아 입자

Table 2. Specification of KOTRON-13 cyclotron

| Characteristic Beams | ions | proton, deuteron |
|-----------------------|---|------------------------------|
| | Energy / Current | 13 MeV / 80 μ A (proton) |
| Magent | Type | Compact - H |
| | Number of sectors | 4 |
| | Pole diameter | 0.96m |
| | Hill / Valley gap | 4cm / 12cm |
| | V_r/V_z | 1.022 / 0.25~0.3 |
| | $B_{max}(hill) / B_{max}(valley)$ | 1.99 T / 0.9 T |
| | Coil current | 147A |
| Power | 12kW | |
| RF | Frequency | 77.3MHz |
| | Harmonic number | 4 |
| | Number of dees | 2 |
| | dee angular width | 39 deg |
| | dee voltage | 45kV |
| Extraction Ion Source | Carbon stripper foil Internal Cold Cathode PIG | |

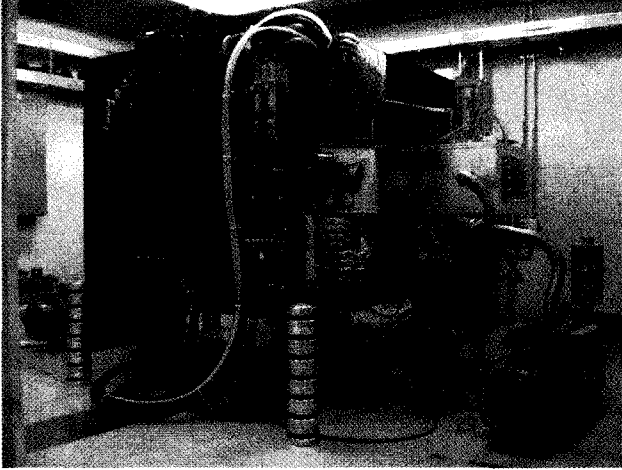


Fig. 3. KOTRON-13 Cyclotron installed at Kyungpook National University Hospital.

의 가속 속도가 빨라 빔 선질이 좋으며 하드웨어 면에서 볼 때도 공동 공진기의 크기가 작아져 공간 활용에 장점이 있다. KOTRON-13은 효율적인 RF 장치로 Dee 전압이 45 kV로 매우 높아 안정된 가속이 가능하여 에너지 균질도가 매우 높다. 전자석은 H형으로 원형 전자석에 비하여 자기저항 등에 불리한 점이 있으나 유지보수가 간단하여 신뢰성 있는 가동이 가능하다.

표적장치는 4개의 표적 부착이 가능하며 빔 수송 단 연결이 가능하여 사용자의 목적에 따라 외부 빔 수송 단과 빔 진

단장치 등과 연결 하여 의료적인 목적 이외에도 사용 가능하도록 설계 되어 있다.

최근 사이클로트론의 기술 동향

최근의 사이클로트론 기술은 기존의 사이클로트론에 비하여 물리적 이용 개념에서 벗어나 의료장비 개념으로 방향 전환이 이루어지고 있다. 따라서 PET 사이클로트론의 경우 PET에 필요한 최적의 에너지와 가속 입자가 고려되어 개발하고 있다. 또한 사이클로트론은 병원에 설치되어 의료적으로 이용하므로 운전 신뢰도 및 크기와 무게 그리고 전력 소모량 등을 고려하고 있다.

가속 입자 및 에너지

지난 2002년부터 사이클로트론 제작사들은 새로운 모델을 출시하기 시작하였다. GE사는 MiniTrace를 CTI사는 RDS Eclipse를 Sumitomo사는 HM-12 모델이다. 새로이 개발된 사이클로트론은 몇 가지 공통된 특징이 있다.

GE의 Minitrace와 CTI RDS Eclipse는 양성자만을 가속하고 에너지도 10 MeV 내외이다. 또한 Sumitomo의 HM-12도 양성자 가속을 중심으로 개발되었고 중양자는 선택 사양이다. HM-12의 6 MeV 중양자는 실제로 에너지가 작아 O-15 생산에 충분하지 않아 주로 양성자를 가속 한다.

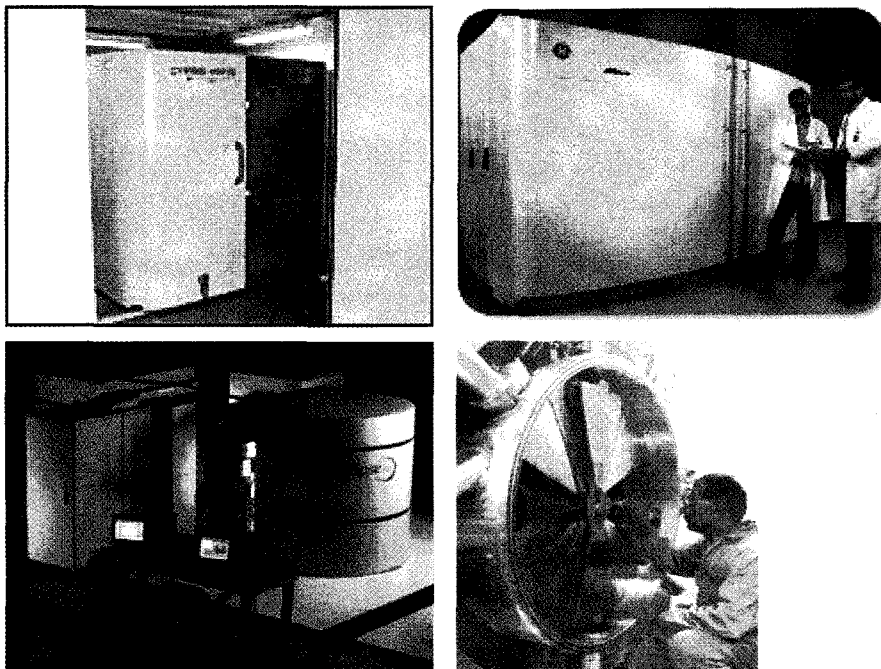


Fig. 4. New Model of Commercial cyclotron ; Sumitomo HM-12, GE Minitrace, CTI Eclipse, EBCO TR-19.

새로이 개발된 PET사이클로트론들의 특징은 양성자만을 가속하며 에너지는 10 MeV 내외로 한정되어 있다. Sumitomo의 주력 기종이던 HM-18은 18 MeV 이나 신 모델인 HM-12는 12 MeV 이다. GE도 PET Trace는 16.5 MeV의 양성자 에너지 가속이 가능하나 신 모델인 Mini trace는 9.6 MeV의 양성자만을 인출 시키도록 하였다. CTI 제품은 이미 구모델에서도 가속 에너지가 11~12 MeV 내외였기 때문에 에너지 변화 없이 10 MeV 내외로 가속 하도록 개발 되었다.

가속장치 조건 및 이온원

가속 입자가 양성자로 한정되고 가속 에너지가 10 MeV

내외로 결정됨에 따라 가속장치 내의 인출 반경이 기존 모델보다 짧다. 전자석은 크기와 무게가 구 모델에 비하여 월등히 작아져 전력 소모량도 20~30%의 절감이 가능하다.

RF 장치의 공진 주파수는 빔의 선질을 높이고 공동공진기의 크기를 줄이며 공진 값의 효율을 증대 시키도록 대폭 상승 되었다. GE의 경우 PET trace는 45 MHz이나 Minitrace는 63 MHz 이다.

대부분의 사이클로트론은 이온원은 주로 냉음극 PIG 이온원을 사용한다. 그러나 EBCO의 사이클로트론은 외부에서 이온을 공급하도록 설계되어 있으며 이온원은 Multicusp형을 사용한다. 이것은 고전압을 요구하고 이온원에서 사이클로트론까지 이온을 수송하는데에 정밀한 수송 장치가 필요하다. 또한 사이클로트론에 입사시 inflector라는 입사기의

Table 3. Acceleration energy and particles for new models

| Model | KOTRON 13 | HM-12 | PET trace | Minitrace | RDS ECLIPSE | RDS 111 | Cyclone 18/9 | TR19 |
|----------------|-------------|----------------|-----------|-----------|-------------|---------|--------------|------|
| Proton (MeV) | 13 | 12 | 16.4 | 9.6 | 11.2 | 11 | 18 | 19 |
| Current (μA) | 80 | 2×45 (2 ports) | 0-75 | 0-50 | 2×60 | 2×40 | 80 | 150 |
| | 80 (1 port) | 60 (1 port) | | | 60 | 50 | | |
| Deuteron (MeV) | 7 | 6 | 8.4 | NA | NA | NA | 9 | 9 |
| Current (μA) | 40 | 2×20 (2 ports) | 0-60 | NA | NA | NA | 40 | |
| | 40 (1 port) | 40 (1 port) | | | | | | |

Table 4. Acceleration specification of commercial cyclotrons

| Model | KOTRON13 | HM-12 | PETtrace | MINItrace | RDS ECLIPSE | RDS 111 | Cyclone 18/9 | TR19 |
|----------------------------------|----------|-------------|----------|-----------|-------------|---------|--------------|------------|
| Power(Kwh) | 18 | 16 | 34 | TBA | 30 | 30 | 24 | 19 |
| Extraction Radius(m) | 0.39 | 0.34 | 0.32 | 0.28 | 0.43 | 0.4 | 0.45-0.47 | 0.45-0.52 |
| Cavity resonance frequency (MHz) | 73.3 | 45 | 45 | 63 | 72.2 | 72.2 | 41.8 | 73 |
| harmonic no. | 4 | 2(H-) 4(D-) | 1 and 2 | | 4 | 4 | 2 and 4 | |
| Nominal dee voltage (KV) | 45 | 34 | 35 | 35 | 35 | 30-80 | 32 | 50 |
| Source type | PIG | PIG | PIG | PIG | PIG | PIG | PIG | Multi cusp |

Table 5. Characteristics of Selfshielding and targertry systems

| | KOTRON 13 | HM-12 | PETtrace | MINItrace | RDS ECLIPSE | RDS111 | Cyclone 18/9 | TR19 |
|--|--------------|--------------|-------------------|--------------|-------------|--------|-----------------|------|
| Self-Shielding | yes (option) | yes (option) | Additional Option | yes (always) | yes | yes | Not Recommended | yes |
| weight of Cyclotron(ton) | 20 | 12 | 20 | 13 | 12.45 | 12.45 | 24 | 22 |
| weight of Self-Shielding(ton) | 80 | 60 | 40 | 37.3 | 35.55 | 24.55 | 90 | 56 |
| Orientation (H:Horizontal, V:Vertical) | H | V | V | V | H | H | H | V |
| Dual Partical Acceleration | yes | yes | yes | yes | no | no | yes | yes |
| Number of Target | 4 | 2×4 | 6 | 6 | 2×4 | 8(16) | 8 | 8 |
| Simultaneous Extracted Beams | yes | yes | yes | yes | yes | yes | yes | yes |

Table 6. Characteristics of FDG modules

| Model | KOTRON | HM-12 | PETtrace | Minitrace | RDS ECLIPSE | RDS 111 | Cyclone 18/9 | TR19 |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------|---------|-----------------|------|
| FDG Synthesizer | Photox& Evaporation | Photox& Evaporation | TracerLab MX | TracerLab MX | (a) | | Hamacher method | |
| 180 Water Purifier | yes | yes | minimum 95% | Minimum 95% | built-in | ? | automatic | |

높은 정밀도가 요구되어 고장률이 높지만 대전류 사이클로트론에는 다른 선택이 없어 이러한 이온원을 사용한다. 그러나 PET 사이클로트론 같이 인출 빔전류가 100 μA 이내의 전류로 충분한 가속기에서는 사용하지 않는다.

자체 차폐 및 표적장치

신형 모델의 특징은 PET 사이클로트론의 사용이 병원에서 이루어지는 점을 고려하여 병원의 특성에 맞도록 설치가 가능하도록 하였다. PET와 사이클로트론의 설치시 기존의 건물 공간을 이용 할 경우에 사이클로트론의 방사선 차폐 공사가 복잡해지는 경우가 있어 이를 고려하여 자체 차폐 사이클로트론을 기본으로 하고 있다. 자체 차폐는 EBCO의 TR 시리즈와 CTI사의 RDS 시리즈 사이클로트론이 처음으로 시작하여 현재는 GE, Sumitomo 등도 새로운 모델은 자체 차폐가 기본 사양이다. 그러나 유지보수 측면에서 자체 차폐는 예방점검 절차의 복잡성 문제가 있다. 이러한 이유로 IBA와 삼영유니텍은 사용자가 원하는 경우에 선택사양으로 공급하고 있다.

현재 생산 되고 있는 모든 PET 사이클로트론은 음이온을 가속 하므로 양쪽에서 동시에 빔을 인출 할 수 있다. 이러한 사양은 모든 사이클로트론이 기능을 가지고 있으나 PET 방사성 동위원소의 생산 수율이 매우 높고 운전 측면에서 전환막의 파손에 대한 위험성 등이 있다.

PET RI 생산 및 합성

PET용 RI는 주로 양전자 방출 방사성 핵종인 F-18, C-11, N-13, O-15등을 생산 한다. F-18 대부분 핵종의 반감기가 2분에서 20분 내외이므로 대부분 빔 조사와 RI 생산 및 합성 그리고 PET 촬영이 동시에 이루어진다.

F-18의 경우 반감기가 110분이므로 사이클로트론이 없는 다른 PET 센터에 F-18이나 FDG의 공급이 가능하다. RI 조사되는 양성자의 에너지와 빔 전류세기에 비례한다. 따라서 빔 에너지가 낮을 경우 빔전류 세기를 크게하여 조사하여 같은 양의 RI를 생산 할 수 있다. 이는 빔 전력의 크기로 요약되어 표적 장치의 열 발생률과 상관관계를 가지게 되어 표적 장치는 냉각장치가 필수적이다. 따라서 표적 장치는 냉각 효

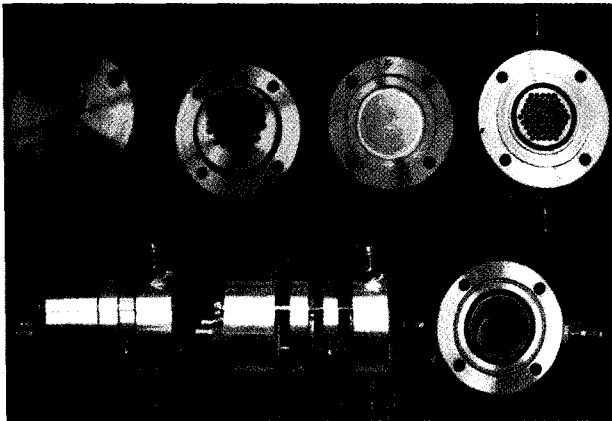
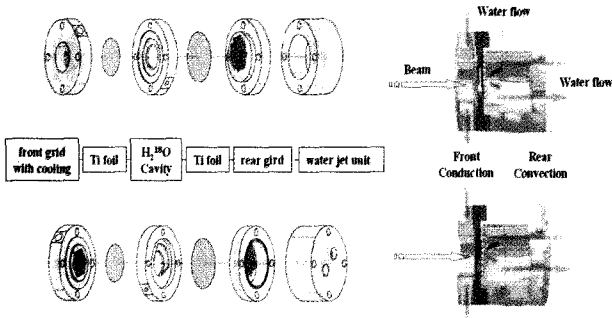


Fig. 5. Double-grid (^{18}O) water target developed by KIRAMS.

올에 따라 장치의 성능이 판가름 된다. F-18의 생산의 경우 1.5 ml의 O-18 액체에 빔 조사 시 약 300 W의 높은 열량을 가하여야 한다. 단위 면적당 매우 높은 열량을 표적 장치에 조사 하므로 표적물은 쉽게 녹아 파손이 되어 빔 전류 세기에 제한이 있다. 현재 상용 표적장치의 경우 약 700 W가 최대치이다. 따라서 F-18의 보급을 위하여 단일 표적에서 많은 양이 생산 될 수 있는 표적 개발에 힘을 기울이고 있다. 원자력의학원은 지난 2004년 세계 최고의 열량에 견딜 수 있는 새로운 형태의 이중 그물 형태의 표적장치 개발에 성공하여 1000 W까지 견딜 수 있어 KOTRON-13 사이클로트론에 장착하여 사용하고 있다.

산소-15 생산

산소-15를 생산하기 위해 사용되는 핵반응에는 $^{16}\text{O}(p,d)^{15}\text{O}$, $^{16}\text{O}(p,pn)^{15}\text{O}$, $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$, $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$ 등이 있다. 이들 핵반응 중 $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$, $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$ 핵반응이 일반적으로 이용되며 중양자 빔이 가능한 경우 $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ 핵반응을 이용하고 PET 동위원소 생산 전용 양성자 가속기의 경우 양성자 빔을 이용한 $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$ 핵반응을 사용한다. 질소기체를 이용한 두 핵반응은 산소기체를 이용한 앞의 두 핵반응에 비해

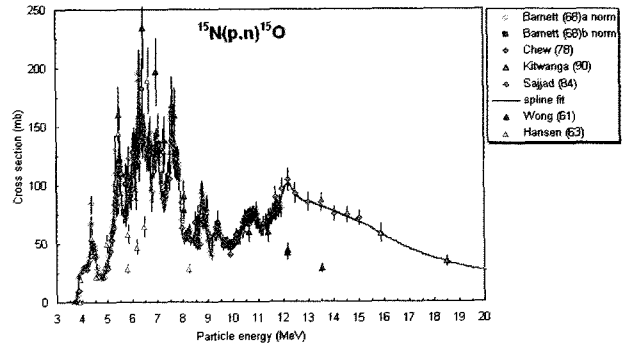


Fig. 6. Cross section for $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$ nuclear reaction.

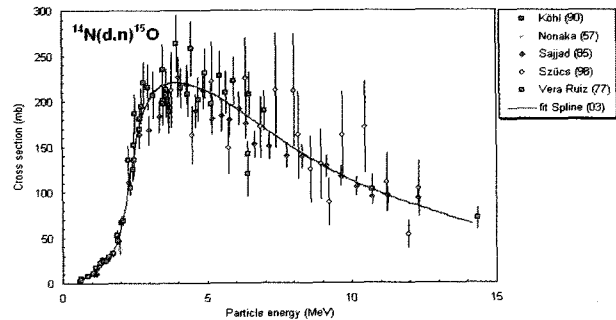


Fig. 7. Cross section for $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ nuclear reaction.

불순핵종의 생성이 적은 이유로 선호되고 있다. Fig. 6과 7에 질소기체를 이용한 핵반응 여기함수를 나타내었다.

8 MeV의 중성자를 사용하는 $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ 핵반응의 산소-15 이론적 생산 수율은 64 mCi/mAh 이며 10 MeV의 양성자를 사용하는 $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$ 핵반응의 경우는 60 mCi/mAh 이다.

요 약

상용 PET 사이클로트론의 기술적인 변화는 PET의 수요와 밀접한 관계가 있다. PET 활용이 일반화 되어 미국을 중심으로 PET의 수요가 급증하게 됨에 따라 사이클로트론의 수요도 증가 하였다. 기존의 사이클로트론은 크기와 무게로 병원에 설치에 공간과 전원 공급 등 여러 문제가 있어 각 사이클로트론 제작사들은 새로운 모델을 출시하게 되었다.

새로운 모델의 특징은 다음과 같다.

첫째 기존의 모델이 양성자와 중양자 등의 2가지 이온을 인출 하였으나 시스템의 복잡성 등의 문제와 양성자로 O-15 생산이 가능하여 양성자 빔만을 인출 하거나 중양자는 선택 사양으로 전환 하였다.

둘째 기존 모델의 경우 양성자의 빔 에너지는 약 16 MeV

이상 가속 시킬 수 있으나 신 모델은 13 MeV 이내로 대폭 낮추어 PET 용 RI생산에 최적화하였다.

셋째 전자석, RF 장치등의 최적화를 이룩하여 전력소모를 대폭 개선하였으며 외양도 대폭 작아져 무게를 20톤 이내로 대폭 낮추었다

넷째 새로운 모델 사이클로트론들은 자체 차폐기능이 일반화 되었으나 IBA제품이나 삼영유니텍 제품은 사용자의 견지에 따라 선택 사양이 가능하다.

Reference

1. Oh SW, Chai JS Cyclotrons for nuclear medicine *Korean J Nucl Med* 1995;29:1-8.
2. *General Electric Cyclotron Brochure, 2004.*
3. *IBA Cyclotron Brochure, 2004.*
4. *CTI Cyclotron Brochure, 2004*
5. *Sumitomo Cyclotron Brochure, 2004*
6. *EBCO Cyclotron Brochure, 2004*
7. Chai JS, et al. Development and status report of medical cyclotron at KIRAMS *Proceeding of 18th International conference on cyclotron and their applications* 2004;512-5.
8. Chai JS, Kim YS, Hong SS, Lee MY. *Design of magnet for medical PET cyclotron Proceeding of 16th International conference on cyclotron and their applications* 1998;632-635.
9. Rrarnhart TE, Converse AK, Dabbs KA, Nickles RJ, Buckley K, Jivan S, Ruth TJ, Roberts AD, *Water-cooled grid support for high-power irradiation with thin target windows Applied Radiation and Isotopes* 2003;58:21-6.
10. Stoecklin G, and Pike VW, *Radiopharmaceutical for positron emission tomography methodological aspects, Kluwer Academic Publishers*, 1993, pp 1-2, pp 121-32
11. International Atomic Energy Agency (IAEA) web site, http://www-nds.iaea.or.at/medical/positron_emitters.html.