

# KOTRON-13 사이클로트론의 고효율C-11 가스 표적장치

분당서울대학교병원 핵의학과<sup>1</sup>, (주)삼영유니텍<sup>2</sup>

이흥진<sup>1</sup> · 이원경<sup>2</sup> · 박준형<sup>1</sup> · 문병석<sup>1</sup> · 이인원<sup>1</sup> · 채성기<sup>2</sup> · 이병철<sup>1</sup> · 김상은<sup>1</sup>

## Development and optimization of C-11 gas target system in KOTRON-13 cyclotron

Hong Jin Lee<sup>1</sup>, Won Kyeong Lee<sup>2</sup>, Jun Hyung Park<sup>1</sup>, Byung Seok Moon<sup>1</sup>, In Won Lee<sup>1</sup>, Sung Ki Chae<sup>2</sup>, Byung Chul Lee<sup>1</sup>, Sang Eun Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Bundang Hospital, Seongnam, 463-707, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute of Enterprise Attachment, Samyoung Unitech, Seoul 137-891, Republic of Korea

**Purpose:** The KOTRON-13 cyclotron was developed in South Korea and was introduced to regional cyclotron centers to produce short-lifetime medical radioisotopes. However, this cyclotron has limited capacity to produce carbon-11 isotope so far. We herein study how to develop and optimize an effective carbon-11 target system in the KOTRON-13 cyclotron by changing cooling system, combing with fluorine-18 target and evaluating beam currents. **Materials and Method:** To develop the optimal carbon-11 target and an effective cooling system, we designed the carbon-11 target system by Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) simulation program and considered the cavity pressure during irradiation at target grid. In this investigation, we evaluated the yield of carbon-11 production at different beam currents and the stability of the operation of the KOTRON-13 cyclotron. **Results:** The production of carbon-11 was enhanced from about 1,700 mCi (50  $\mu$  A) to 2,000 mCi (60  $\mu$  A) on the carbon-11 target which developed by seoul national university bundang hospital (SNUBH) and Samyoung Unitech. Additionally, the cooling condition was showed stable to produce carbon-11 under high beam current. **Conclude:** The carbon-11 target system of the KOTRON-13 cyclotron was successfully developed and improved carbon-11 production. Consequently, the operation of carbon-11 target system was highly effective and stable compare with other commercial cyclotrons. Our results are believed that this optimal carbon-11 target system will be helpful for the routine carbon-11 production in the KOTRON-13 cyclotron. (**Korean J Nucl Med Technol 2011;15(1):86-89**)

**Key Words:** carbon-11 target, KOTRON-13, cyclotron

## 서 론

양전자 방출 단층촬영(PET)을 이용한 사용 범위가 중앙 및 다양한 진단에 광범위하게 활용되고 있으며 이에 따라 다

양한 양전자 방출 동위원소가 표지 된 양전자 방출 방사성 의약품이 활발히 개발되고 임상진단에 사용되고 있다.

양전자 방출 단층촬영용 동위원소로는 <sup>18</sup>F, <sup>11</sup>C, <sup>15</sup>O 및 <sup>13</sup>N 등이 있고, 이러한 동위원소들 중 <sup>15</sup>O 및 <sup>13</sup>N는 반감기가 각각 2분, 9.9분 정도로 짧아서 임상진단에 제약이 있으나, <sup>18</sup>F 및 <sup>11</sup>C는 그 반감기가 각각 109.7분, 20.4분으로 <sup>15</sup>O 및 <sup>13</sup>N 보다 길어서 다양한 방사성의약품에 생산에 많이 사용되고 있다. 이러한 방사성 의약품 중에서 암의 진단을 위하여 사용되는 PET에는 일반적으로 포도당에 불소-18를 표지한 FDG 방사성의약품이 사용되지만, 뇌 또는 심장 등의 영

- Received: December 28, 2010. Accepted: March 7, 2011.
- Corresponding author: **Byung Chul Lee**  
Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Bundang Hospital, 166 Gumi-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-707, Korea  
Tel: +82-31-787-2956, Fax: +82-31-787-4072  
E-mail: leebc@snu.ac.kr

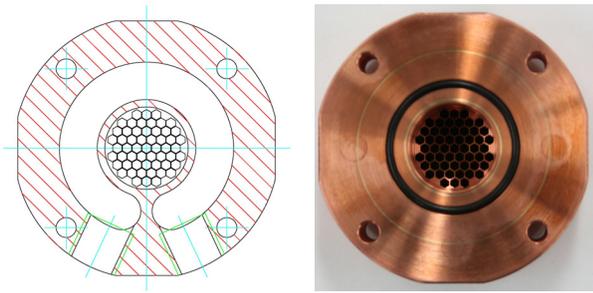


Fig. 1. The grid of C-11 gas target system

상 진단과 다양한 의약품에 탄소-11 이 표지 된 방사성의약품 및 방사성추적자가 이용되고 있다.

PET에 사용되는 기체상태의 방사성동위원소인 탄소-11 은 사이클로트론에서 생성된 양성자를 안정동위원소인 N<sub>2</sub> 에 조사하여 핵반응(<sup>14</sup>N(p,α)<sup>11</sup>C)을 통해 생산한다.<sup>1)</sup>

## 실험 재료 및 방법

### KOTRON-13 고효율 탄소-11 표적장치 설계

KOTRON-13 사이클로트론의 고효율 탄소-11 표적 장치는 양성자 빔이 입사 시 탄소-11캐비티에 증가되는 압력을 지지해주고 탄소-11 캐비티 박막을 냉각시켜주는 역할을 하는 격자부와 탄소-11 가스를 저장하는 탄소-11 캐비티부, 그리고 핵반응을 통한 고효율을 냉각하기 위한 냉각수 캐비티부로 구성된다.

#### 1) 고효율 탄소-11표적 장치의 격자부 설계

탄소-11 표적장치는 양성자 빔이 입사되어 처음으로 접하는 부분이 격자부 이고, 이 격자부분은 2.8 mm의 정육각형으로 구성되어 있으며, 정육각형의 개수는 55개로 구성되어 있고, 정육각형으로 배치하였다. 각 정육각형간의 간격은 0.2 mm로 설계하였으며, 격자 두께는 8 mm로 설계하였다. 격자 재질은 기존의 알루미늄에서 열전도율과 끓는점이 우수한 동으로 변경하였고, 내경은 20 mm에서 18 mm로, 외경은 70 mm로 설계 제작하였다.

설계된 격자 빔 입사 효율은 약 84%에서 85%로 증가가 예상되고, 입사된 양성자 빔에 의해 가열된 격자부 및 격자에 접촉된 N<sub>2</sub> 캐비티 박막의 냉각을 위하여 격자 주변부에 냉각수가 흐르게 설계하였다.<sup>2)</sup> 아래 Fig.1은 고효율 탄소-11 표적 장치의 격자 부 설계 및 실제 제작된 격자부 사진이다.

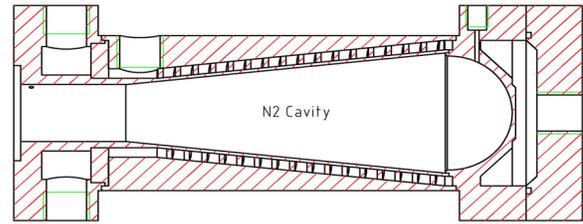


Fig. 2. The N2 cavity of C-11 gas target system

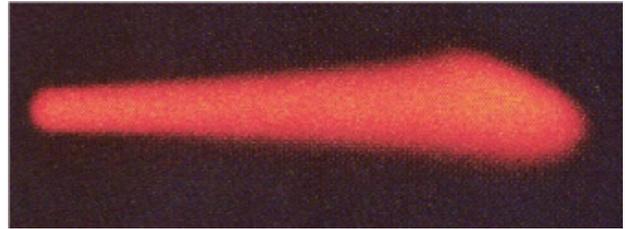


Fig. 3. Proton beam

#### 2) 고효율 C-11 표적 장치의 N2 캐비티 설계

N<sub>2</sub> 캐비티 부분은 앞면에 75 μm의 Nb (Niobium) 박막이 위치하고 N<sub>2</sub> 가스를 가둬두는 부분은 18 mm의 넓이에 140 mm의 깊이로 설계하였다. 이때 내부 용적은 약 72 mL이다. 입사되는 양성자 빔 에너지가 N<sub>2</sub> 가스를 반응시키고 남아 있을 수 있으므로, KOTRON-13 사이클로트론의 빔 에너지가 모두 소멸하는 두께를 고려하면 뒤 부분의 두께는 순수하게 1.0 mm가 되도록 설계하였다.

고효율 탄소-11 표적장치의 N<sub>2</sub> 캐비티 모양은 양성자 빔이 기체표적 내부에서 후반부로 갈수록 산란(scattering)되어 단면적이 커지고 전체적인 양성자 빔의 모양이 후반부로 갈수록 점차 커지는 원뿔 형상을 가지게 되기 때문에 이 현상을 그대로 반영하여 설계하였고, 내부 산란에 대한 영향으로 N<sub>2</sub> 캐비티 후반부분에서 2차 산란이 발생하기 때문에 핵 반응을 최대한 유지 하기 위하여 반원 모양으로 설계 하였다.

사용된 탄소-11 캐비티의 재료는 Titanium (Ti)이며 외경은 70 mm로 설계하였다.

#### 3) 냉각수 캐비티 설계

냉각수 캐비티는 고효율의 N<sub>2</sub> 캐비티를 냉각하기 위한 것으로 순환하는 물로 냉각을 하며 냉각수의 입사 방향은 후면 중앙에서 일직선으로 입사되어 열이 가장 많이 발생하는 후면부분을 냉각시키고, 다음으로 N<sub>2</sub>캐비티 본체를 나선형으로 회전하면서 냉각을 시킨 후 N<sub>2</sub>캐비티 전면 상부로 인출 되도록 설계하였다.

고효율 탄소-11 표적 장치는 표적 장치의 중간부분에서

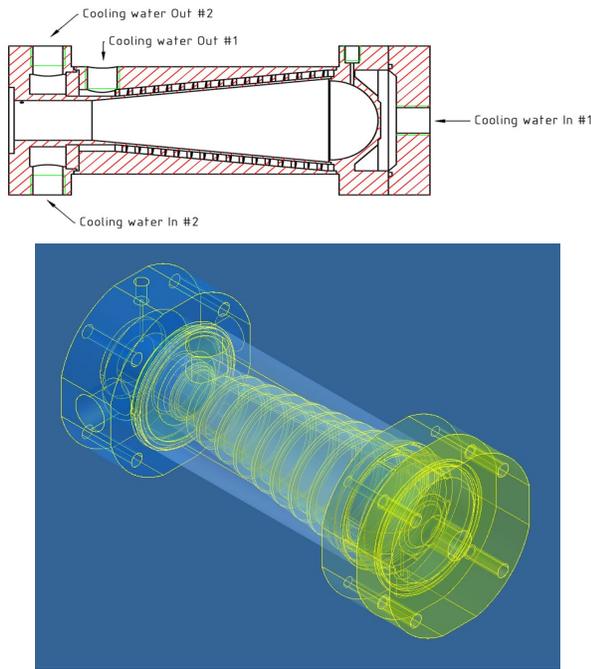


Fig. 4. The cooling water cavity of C-11 gas target system.

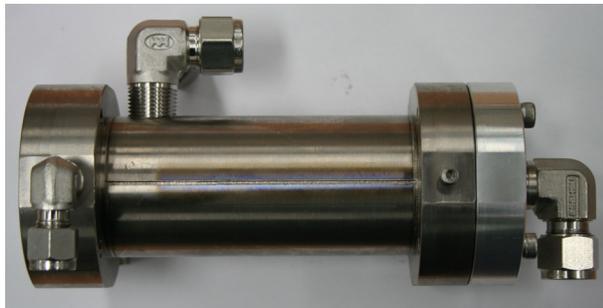


Fig. 5. The C-11 gas target system.

열 발산에 의한 열 적체 현상을 강제적으로 냉각되도록 하고 이때 냉각수가 회전하도록 하여 기존의 방식보다 열효율을 개선하도록 설계하였다. 설계한 고효율 C-11표적장치의 냉각 열 용량은 최대 1,000 W이며 KOTRON-13에서는 양성자 빔 80  $\mu$ A까지 조사가 가능하다. 사용된 냉각수 캐비티의 재료는 티타늄과 알루미늄이고, 외경은 70 mm로 설계하였다.

### 실험 결과

KOTRON-13 사이클로트론에 도입된 탄소-11 표적 장치의 성능 평가시험에서 양성자 빔을 평균 전류 50  $\mu$ A와 60  $\mu$ A 로 총 30분 동안 조사하였다. 그림 6은 탄소-11 표적 장치를 KOTRON-13 사이클로트론에 장착하여 총 20회에 걸쳐

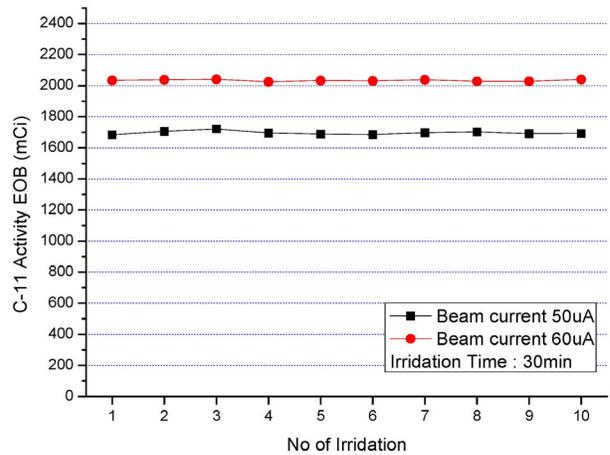


Fig.6. Result of produced carbon-11 activity.

실험 한 결과이다.

KOTRON-13 사이클로트론에서 양성자 빔의 평균전류가 50  $\mu$ A 일 때에는 625 W의 열 용량이고, 양성자 빔의 평균전류가 60  $\mu$ A 일 때에는 750 W가 발생된다. 설계 시 고려한 열 용량은 최대 1,000 W이다.

고효율 탄소-11 표적 장치는 평균 50  $\mu$ A 양성자 빔이 입사 될 때에는 최대 1,700 mCi를 생산하였고, 60  $\mu$ A 양성자 빔을 입사시에는 최대 2,000 mCi를 생산하여 기존의 700~800 mCi 보다 2배 이상의 생산량을 얻었다. 이와 같이 고효율 탄소-11 표적 장치는 빔 전류에 대한 열 효율과 생산량에 있어서 기존 외산 사이클로트론 탄소-11 생산량과 유사하고 안정된 성능을 가짐을 확인하였다.

### 결 론

고효율 탄소-11 표적장치는 본 실험 결과에서와 같이 KOTRON-13 사이클로트론에서 냉각성능과 생산량에서 우수성을 보이고 있다. 현재는 Nb 박막의 수명을 실험하고 있는 중이며, 향후 설계가 최적화되면 표적장치의 생산량이 현저하게 증가될 것으로 예상된다.

### 요 약

최근 들어 양전자방출단층촬영(positron emission tomography, PET) 대표적인 진단검사인 FDG (2-[<sup>18</sup>F]fluoro-2-deoxy-D-glucose)를 이용한 전신암 및 장기별 대사 검사뿐만 아니라 또 다른 양전자 방출 동위원소 탄소-11로 표지된 다양한 방사성의약품 사용이 증가될 예정이다.

본 논문에서는 현재 국내에 설치 보급되어있는 국산 KOTRON-13 사이클로트론에 냉각 성능이 개선된 탄소-11 표적 장치를 설계, 제작하고, 다양한 생산시험을 통하여 탄소-11의 생산량 증대를 입증 하였다. 성공적으로 기존의 불소-18 타겟과 새로운 탄소-11 타겟 호환장치를 도입하였고, 실험 결과 고효율 탄소-11 표적 장치가 내수성이 우수하고, 30분 조사 시 최대 2,000 mCi를 생산하였다. 본 시험결과를 통해 향후 불소-18만이 생산 가능했던 국산 KOTRON-13 사이클로트론에 효율적이고 안정적으로 탄소-11 생산 시스템을 도입할 수 있음을 증빙하였다.

## REFERENCES

1. R. D. Smith, R. H. Mach, T. E. Morton, B. S. Dembowski and R. L. Ehrenkauf, "Optimization of  $[^{11}\text{C}]\text{CO}_2$  trapping efficiencies from nitrogen gas streams." Cerebrovascular Research Center, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, U.S.A. Received 25 January 1991.
2. B. W. Blackburn, "Characterization of a High-Current Tandem Accelerator and the Associated Development of a Water-Cooled Beryllium Target for the Production of Intense Neutron Beams", M. S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1997.