

# Improvement, operation and management status of the KOTRON-13 cyclotron

Hong Jin Lee<sup>1</sup>, Byung Seok Moon<sup>1</sup>, Byung Chul Lee<sup>1,2,\*</sup>, and Sang Eun Kim<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seongnam, Korea;

<sup>2</sup>Center for Nanomolecular Imaging and Innovative Drug Development, Advanced Institutes of Convergence Technology, Suwon, Korea;

<sup>3</sup>Department of Transdisciplinary Studies, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Suwon, Korea

## ABSTRACT

The KOTRON-13 cyclotron was manufactured by Samyoung Unitech as the second generation of the KIRAMS-13 cyclotron after its technology was transferred from the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences in South Korea. Its prototype was installed at Seoul National University Bundang Hospital as part of a distributed network of regional cyclotrons with the support of a grant from the National Research Foundation of Korea. However, its initial condition has limited capacity to extract a relatively low beam current and to produce carbon-11. In this review, we provide an introduction and overview of the current state of the KOTRON-13 cyclotron, which was successfully upgraded by carrying out various modifications and optimizing the carbon-11 target system. *J Radiopharm Mol Probes 1(2):88-94, 2015*

**Key Words:** Cyclotron, KOTRON-13, Regional cyclotron research center, Upgrade

## 서론

2002년에 한국원자력의학원에서 개발된 국산 사이클로트론, KIRAMS-13은 민간 기업인 삼영유니텍(주)으로 사이클로트론 국산화 기술이 이전되었고, 이전된 기술력을 바탕으로 삼영유니텍(주)의 자체 브랜드 KOTRON-13이 국산 사이클로트론이 기설치된 경북대학교병원, 조선대학교병원, 부산대학교에 이어 4번째로 2007년 분당서울대학교병원 경기권역사이클로트론센터에 설치되었다(Figure 1)(1-5). 그동안 미국, 캐나다, 일본, 벨기에 등 선진국들이 중심이 되어 공급해온 사이클로트론에 비해 국산 사이클로트론은 늦은 연구시작과 짧은 연구개발 기간임에도 불구하고 빠른 발전과 성능 개선을 이루었다.

하지만, 당시 설치된 국산 사이클로트론의 성능은 대표적 양전자방출단층촬영(positron emission tomography, PET)용

방사성동위원소인 불소-18의 생산량이 90분 빔 조사 조건에서 약 1.6 Ci였고 이를 이용하여 생산된 [<sup>18</sup>F]FDG (2-[<sup>18</sup>F]fluoro-2-deoxy-D-glucose)는 약 50%의 수율인 0.8 Ci 정도였다. 또한, 국내의 늘어난 PET 장비 보급과 방사성의약품 [<sup>18</sup>F]FDG를 이용한 환자 진료 수요가 빠르게 증가하였고, 특히나 국내 설치되어 운영되고 있는 외산 사이클로트론에 비해 상대적으로 적게 생산되는 불소-18의 양은 당시 권역 내 방사성의약품을 보급하고 관련 연구를 활성화시킨다는 센터 목표에는 부합되지 못하였다. 이러한 국산 사이클로트론의 낮은 불소-18 생산량의 가장 큰 원인으로는 외산 사이클로트론에 비해 낮은 빔 커런트(최대 35  $\mu$ A)로 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O가 채워진 타겟을 조사하고 있다는 것이었으며, 보다 높은 빔 커런트를 출력하기에는 장비 성능 면에서 다양한 한계가 있다는 것을 확인하였다. 이에 본 센터에서는 국산 사이클로트론 관련 기술을

Received: November 19, 2015 / Revised: December 16, 2015 / Accepted: December 18, 2015

**Corresponding Author:** Byung Chul Lee

Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine,  
82 Gumi-ro, 173 beon-gil, Bundang-gu, Seongnam 13620, Korea  
Tel: +82-31-787-2956, Fax: +82-31-787-4072, E-mail: leebc@snu.ac.kr

Copyright © 2015, The Korean Society of Radiopharmaceuticals and Molecular Probes



Figure 1. Profile and schematic of the KOTRON-13.

개발한 한국원자력의학원과 해당 기술을 이전 받은 삼영유니텍(주)과의 협조 및 공동 연구를 통해 국산 사이클로트론의 높은 빔 커런트 인출을 통한 불소-18 생산량 증가와 안정된 방사성동위원소 생산 시스템을 도입하기 위해 사이클로트론의 가장 핵심 부분이라 할 수 있는 ion source 업그레이드를 도모하였다(6). 또 한 가지 국산 사이클로트론의 단점은 13 MeV 에너지 출력에 비해 단 한 개의 빔 출력 포트만을 갖는 구조적 한계로 인해 대표적인 사이클로트론 생산 PET용 방사성동위원소인 탄소-11을 생산하지 못한다는 것이었다. 이를 위해 두 개의 타겟을 설치하고 필요에 따라 변경할 수 있는 슬라이딩식 타겟 교체 시스템과 국산 기술력으로 개발된 탄소-11 타겟 제작을 통해 국내 처음으로 실용적인 탄소-11 생산이 가능한 국산 사이클로트론 성능 개선을 성공리에 수행할 수 있었다(7-9).

본 종설에서는 분당서울대학교병원 경기권역사이클로트론센터에서 수행하였던 국산 사이클로트론 성능 개선 작업과 함께, 8년 동안 운영경험을 살펴보고 앞으로의 국산 사이클로트론이 가져야 할 개선점 등을 기술하였다.

## 국산 사이클로트론의 ion source 업그레이드

일반적으로 의료용 방사성동위원소 생산에 사용되는 사이클로트론은 인출 빔 전류가 100  $\mu\text{A}$  이하의 전류로 충분하기 때문에 cold-cathode-type의 Penning Ion Gauge (PIG)

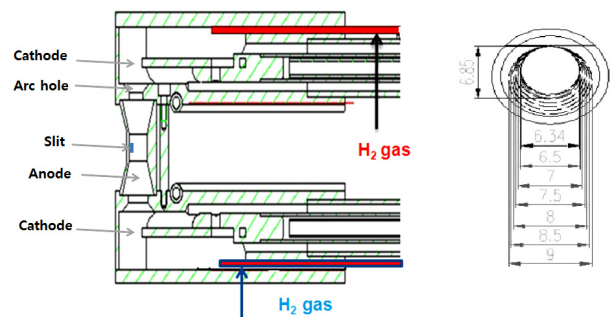
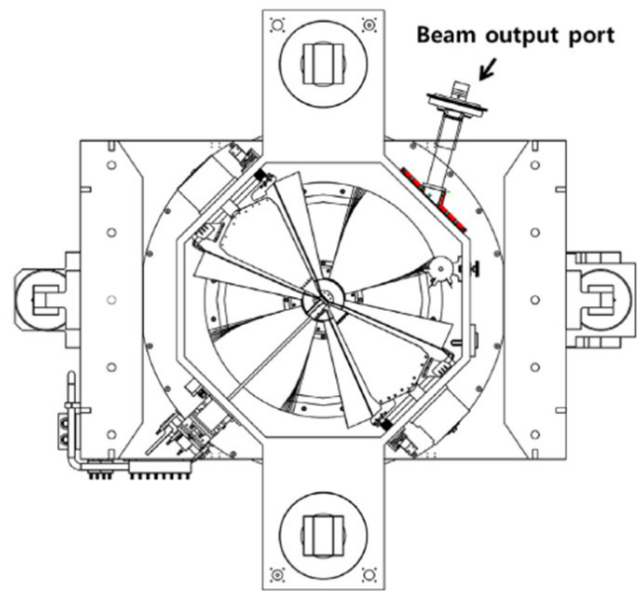


Figure 2. Schematic drawing of the PIG ion source (left) and the diameter of the anode (right).

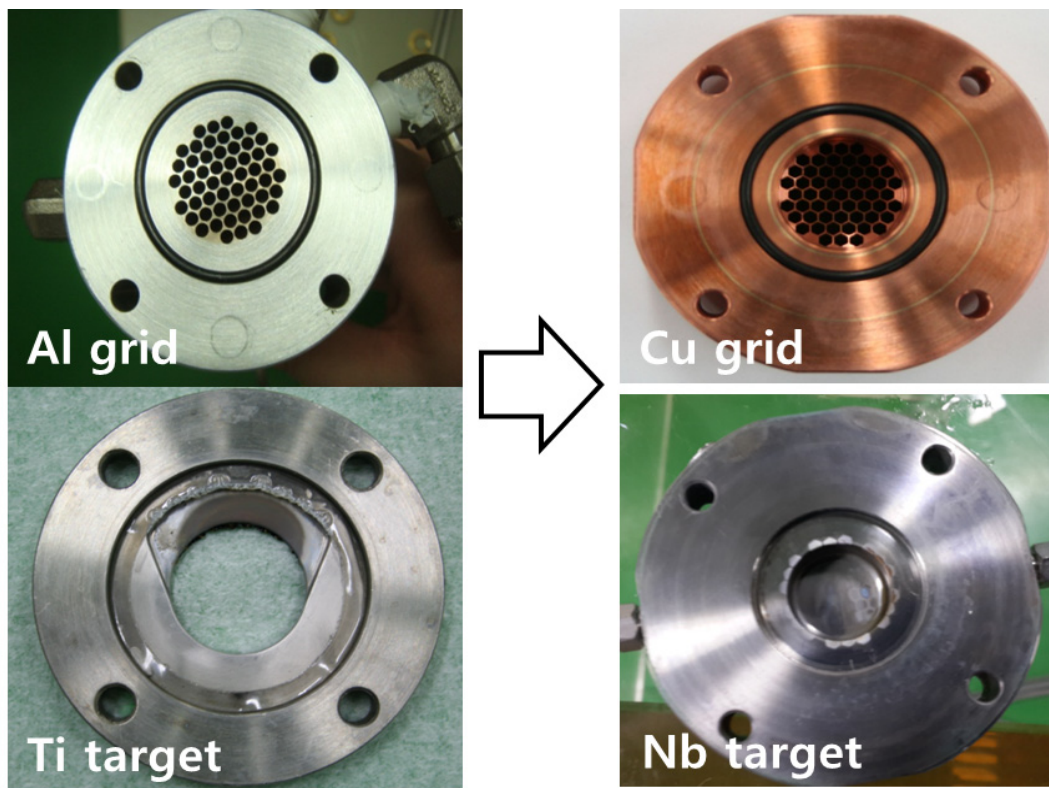
시스템이다. 따라서 국산 사이클로트론인 KOTRON-13 역시 cold-cathode-type PIG ion source를 채택하였다. 이를 간단히 설명하면, cold-cathode-type PIG ion source는 안쪽 공간이 비어 있는 anode (또는 chimney)와 자기장 축 내의 양쪽 끝에 위치한 두 개의 cathode로 구성되어 있고, 내부 안쪽에는 전자를 가두고 그것들의 진동을 유지할 수 있는 역할을 수행하며 최종적으로 플라즈마에서 생성된 수소 음이온이 anode의 작은 slit을 통해 빠져 나온다(Figure 2).

먼저 ion source 성능개선을 위하여 가장 핵심 부품인 anode의 최적화된 내경 길이를 찾고자 하였다. 이를 위해 다양한 내경(6.3-9.0 mm)을 갖는 anode를 제작하여 내경 변화에 따른 출력되는 빔 커런트 증진 평가 실험을 수행하였다. 동일한 실험조건에서 얻은 결과는 anode 내경 직

**Table 1.** Results of beam extraction experiments for various internal diameters of the anode<sup>a)</sup>

	A						
Chimney (Internal diameter, mm)	6.3	6.5	6.8	7.0	7.5	8.0	9.0
Beam current ( $\mu\text{A}$ )	38	40	42	42	45	50	49

<sup>a)</sup>The beam extraction was carried out on a dummy target with a RF power of 12 kW, a gas injection of 6 sccm, an arc voltage of -2.5 kV, and an arc current of 1.2 A.



Replaceable type for front and rear-foil

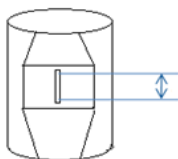
Replaceable type for front-foil

**Figure 3.** Improvement of fluorine-18 target.

**Table 2.** Results of beam extraction experiments for various slit length of the anode<sup>a)</sup>

Slit length, (mm)	3	4	5
Beam current ( $\mu\text{A}$ )	35	40	40

<sup>a)</sup>The beam extraction was carried out on a dummy target with a RF power of 12 kW, a gas injection of 6 sccm, an arc voltage of -2.5 kV, and an arc current of 1.2 A.



경이 8 mm일 경우가 가장 높은 빔 커런트인 50  $\mu\text{A}$ 를 유도함을 확인하였다(Figure 2, Table 1).

위와 같은 데이터를 기반으로 anode에 있는 slit 크기 (기존 4 mm)도 변경 제작하여 출력되는 빔 커런트를 평가하는 실험을 수행하였으며, 이때 slit의 크기는 3 mm 보다는 4 또는 5 mm에서 빔 커런트가 증가되고 안정됨을 확인하였다(Table 2).

또한, Figure 2에서 보여주는 ion source 내부에 공급되

는 위, 아래 두 방향의 수소 가스 주입 방향도 위 방향, 아래 방향 그리고 양 방향으로 세 가지 다른 방식의 수소 가스 주입방향에 따른 빔 커런트 변화 실험을 수행하였다. 미세한 변화이지만 세 가지 방식 중에서 위쪽으로 주입하는 방법이 보다 높은 빔 커런트가 출력되었으며, 소모품인 cathode의 수명을 다른 주입 방향에 비해 현저하게 증가된 90 $\pm$ 5회를 가짐을 확인할 수 있었다(기존 아래방향 주입 방식의 수명: 50 $\pm$ 5회).

Ion source의 최적화 작업에 이어 기존의 불소-18 타겟 grid와 타겟의 재질 그리고 타겟-foil을 변경하였다. 기존 30  $\mu\text{A}$ 의 빔 커런트에 맞게 제작된 불소-18 타겟 시스템은 업그레이드 된 사이클로트론(120  $\mu\text{A}$ )에는 비효율적이었다. 따라서, 증가된 빔 커런트를 대비하여 타겟의 열 내구성과 효과적인 냉각을 위해 타겟 grid의 모양을 빔의 투과 효율을 증진시킬 수 있는 6각형(벌집)으로 변경하



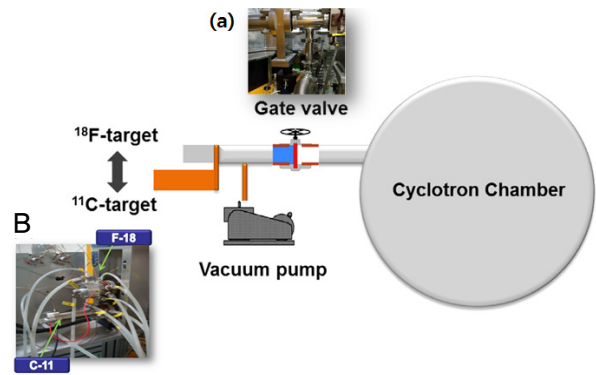
였으며, 타겟 grid의 재질은 알루미늄(Al)에서 구리(Cu)로 교체하였다. 기존의 불소-18 타겟 재질은 티타늄(Ti)에서 열 효율성이 높은 니오비움(Nb)으로 교체하였다. 타겟-foil은 앞, 뒤 양면 교체 형에서 앞면 교체 형으로 변경하였으며, 재질은 티타늄, 니오비움을 거쳐 최종적으로 HAVAR (19  $\mu\text{m}$ )에서 최적의 성능을 가짐을 확인하였다 (Figure 3).

국산 사이클로트론의 ion source 업그레이드와 타겟 최적화 작업을 통해 빔 커런트는 dummy 타겟에서 약 120  $\mu\text{A}$ 까지 높일 수 있음을 확인하였으며, 직접 불소-18 타겟을 장착하고 70  $\mu\text{A}$  하에서 90분 조사하였을 때, 불소-18의 생산량은 초기 1.6 Ci에서 2.3배가 향상된 3.6 Ci를 생산할 수 있었다.

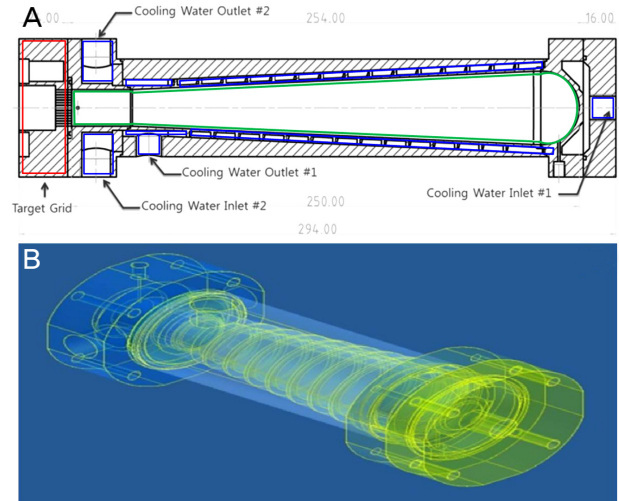
## 탄소-11 타겟 시스템

국산 사이클로트론의 구조적 최대 약점은 오직 한 개의 빔 출력 포트만 있다는 것이다(Figure 2). 기존의 불소-18 타겟 대신 다른 타겟을 도입할 추가적인 빔 출력 포트가 없다는 것은 여분의 불소-18 타겟뿐만 아니라 충분한 에너지인 13 MeV 사이클로트론이면서 탄소-11 타겟을 도입할 수 없음을 의미한다. 초기 설계에는 한 개의 빔 출력 포트 말단에 리볼버 형식의 다중 타겟 변환 시스템을 고안했지만, 실질적인 운영에서는 잦은 오작동과 고 진공 유지를 위한 낮은 안정성 그리고 정확한 빔 조사를 위해선 개선해야 할 점이 많아 사용이 어려웠다. 이러한 구조적 문제를 인식하고 신규 탄소-11 타겟 시스템 도입을 위한 연구개발을 시작하였다. 한 개의 빔 출력 포트를 가지면서도 불소-18뿐만 아니라 탄소-11 생산을 위해서 고안한 방법은 Figure 4와 같이 슬라이딩 방식의 위아래로 불소-18 타겟과 탄소-11 타겟을 이동시키는 방식과 타겟 교체 시 발생하는 사이클로트론의 고 진공 상태의 손실을 최소화하기 위해 중간에 gate 밸브와 추가적인 고 진공 펌프의 도입이었다.

탄소-11 타겟의 구성은 질소 가스와 생성되는 탄소-11 가스를 저장하는 질소 캐비티와 양성자 빔이 입사 시 전해지는 탄소-11 캐비티의 증가하는 압력을 지지해주면서 캐비티 박막을 냉각시켜주는 역할을 하는 타겟 grid 그리고 내부의 열을 냉각할 수 있도록 하는 냉각수 캐비티 세 부분으로 나뉜다(Figure 5). 질소 캐비티 부분은 앞면에 75  $\mu\text{m}$ 의 Nb 박막이 위치하고 질소 가스를 가둬두는 부분은 18 mm의 넓이에 254 mm의 깊이로 설계하였다.



**Figure 4.** Layout of a switchable target system: (A) installed gate valve, (B) installed fluorine-18 (upper) and carbon-11 (bottom) target into sliding-type equipment.



**Figure 5.** Layout of (A) carbon-11 gas target (red: target grid, green: nitrogen cavity, blue: coolant cavity) and (B) water flowing on main body of target.

이때의 내부 용적은 약 143 mL이다. 또한 입사되는 양성자 빔의 에너지가 질소 가스를 반응시키고 남아 있을 수 있으므로, 13 MeV에 대한 빔 에너지가 모두 소멸하는 두께를 고려하여 뒤 부분의 두께를 1.0 mm로 하였다. 양성자 빔은 기체 타겟 내부에서 후반부로 갈수록 산란(scattering)되어 단면적이 커지고 전체적인 양성자 빔의 모양이 후반부로 갈수록 점차 커지는 원뿔 형상을 가지게 되기 때문에, 질소 캐비티 모양은 이 현상을 그대로 반영하여 설계하였고, 후반부분에서는 2차 내부 산란을 대비하여 최대한 내구성을 유지하기 위하여 반원 모양으로 설계하였다. 사용된 캐비티의 재료는 티타늄(Ti)이며 외경은 70 mm이다(Figure 5A, green).

타겟 grid는 양성자 빔이 입사되어 처음으로 접하는 부분

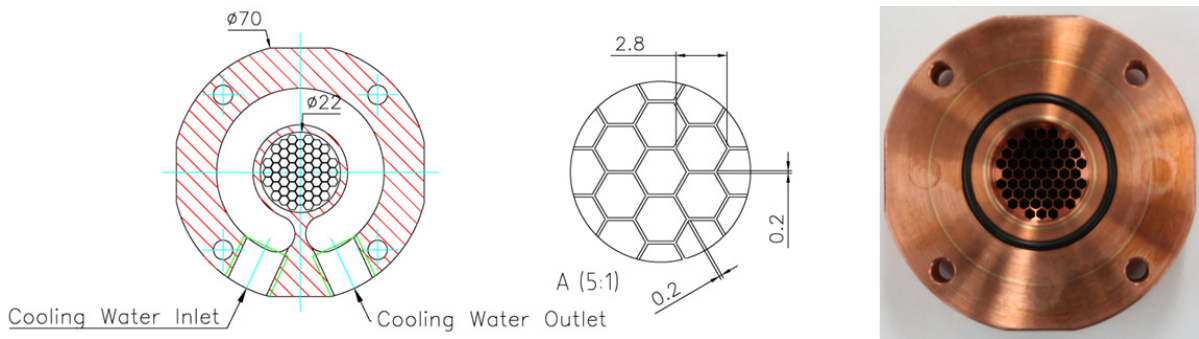


Figure 6. Schematics of target grid in the carbon-11 gas target.

으로 재질은 동으로 하였고, 내경은 18 mm, 외경은 70 mm로 설계하였다. 양성자 빔을 접하는 면은 내구성 및 입사효율을 증대하기 위해 2.8 mm의 정육각형으로 구성되어 있으며, 전체 55개의 정육각형과 정육각형의 간격은 0.2 mm이다. 이렇게 설계된 격자의 빔 입사 효율은 약 85%였고 입사된 양성자 빔에 의해 가열된 타겟 grid와 맞닿아 있는 질소 캐비티 바닥의 냉각을 위하여 타겟 grid 주변부에 냉각수로 냉각이 가능하게 설계하였다(Figure 5A, red; Figure 6).

냉각수 캐비티는 내부의 질소 캐비티를 냉각하기 위한 것으로 열이 가장 많이 발생하는 후면부분을 냉각시키기 위해 순환되는 냉각수의 입사 방향을 후면 중앙에서 일직선으로 하고 질소 캐비티 본체를 나선형으로 회전하면서 냉각을 시킨 후 캐비티 전면 상부로 인출되도록 설계하였다. 이와 같은 고효율 탄소-11 타겟 장치는 타겟의 중간부분부터 발생하는 열 적체 현상을 강제적으로 냉각되도록 하고 냉각수가 회전하도록 하여 기존의 방식보다 열효율을 개선하도록 설계하였다(Figure 5B). 설계한 고효율 탄소-11 타겟 장치의 냉각 열 용량은 최대 1,000 W이며 이론적으로는 KOTRON-13에서는 양성자 빔 80  $\mu$ A 까지 조사가 가능하다. 사용된 냉각수 캐비티의 재료는 티타늄, 알루미늄이고, 외경은 70 mm로 설계하였다. 세 부분이 결합되어 제작된 탄소-11 타겟의 실물 사진은 다음 Figure 7과 같다.

성공적으로 국산 사이클로트론에 신규 탄소-11 타겟을 도입 후에, [ $^{11}\text{C}$ ]CO<sub>2</sub>의 생산량 증대와 안정적 생산을 위하여, 타겟의 재질 및 두께, 질소함유량, 빔 커런트 그리고 타겟에 주입되는 질소가스 압력 변화에 따른 [ $^{11}\text{C}$ ]CO<sub>2</sub> 생산량을 비교 검토하였다. 먼저 탄소-11 타겟-foil의 재질로 기존에 쓰던 티타늄과 함께 니오비움 그리고 HAVAR를 사용하였고, 타겟의 두께는 티타늄-foil은 50  $\mu$ m, 니오비움-foil은 50  $\mu$ m와 25  $\mu$ m 그리고 마지막으로 HAVAR-foil은

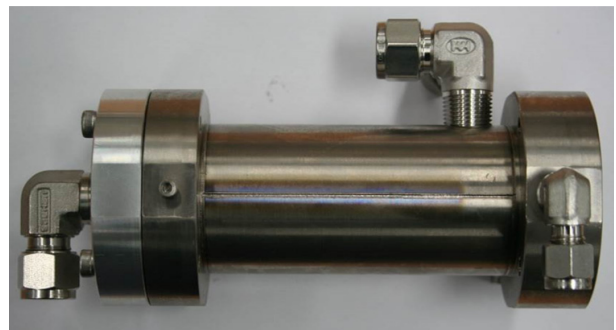
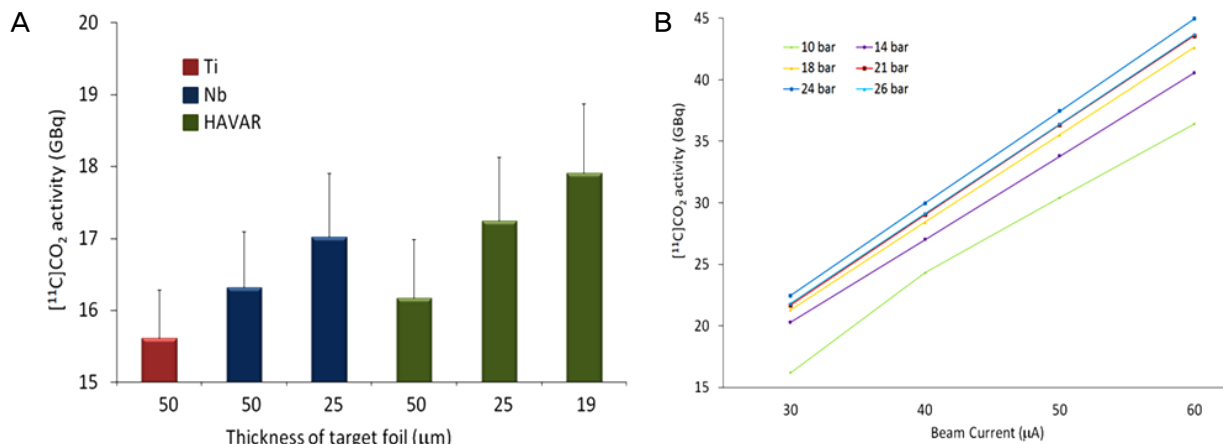


Figure 7. Tailor-made carbon-11 gas target.

50  $\mu$ m, 25  $\mu$ m, 19  $\mu$ m로 총 6개를 사용하여 빔 커런트 30  $\mu$ A로 10분 동안 조사하는 방식으로 각 5회씩 테스트하였다. 다음과 같은 동일 조건(빔 커런트 = 30  $\mu$ A, 조사 시간 = 10 min)에서 가장 높은 [ $^{11}\text{C}$ ]CO<sub>2</sub> 생산을 보여준 재질과 두께는 다음 Figure 8A와 같이 HAVAR- foil 19  $\mu$ m였다. 이와 같은 결과는 이론적으로 재질과 두께에 따른 에너지 손실을 감안했을 때 나온 수치와도 일치되는 결과로서, 가장 최적화된 탄소-11 타겟 재질과 두께를 결정하였다. 또 하나의 고효율 [ $^{11}\text{C}$ ]CO<sub>2</sub>를 생산하기 위해서 고려해야 할 것은 타겟 내부의 질소 캐비티에 충전하는 질소 가스이다. 국내에 공급 가능한 질소가스 중에서 정확한 잔존 산소 함량을 알 수 있는 세 가지의 질소가스 [95% (질소 95%, 산소 5%), 97.5% (질소 97.4%, 산소 2.5%), 99.99995%(질소 99.99995%, 산소 0.00003%)]를 준비하여 동일 조건 하에서 30  $\mu$ A로 10분 동안 조사하는 방식으로 각각 각 5회씩 테스트하였다. 그 결과 미세한 차이기는 하지만 가장 질소 순도가 높고 산소 함량이 적은 가스(질소 99.99995%, 산소 0.00003%)가 높고 안정된 수율을 보여주었으며, 이때 주입되는 가스의 압력에 따른 [ $^{11}\text{C}$ ]CO<sub>2</sub> 생산변화율 또한 주입되는 질소가스의 압력을 10, 14, 18, 21, 24, 26 bar로 변화를 주어 50  $\mu$ A로 10



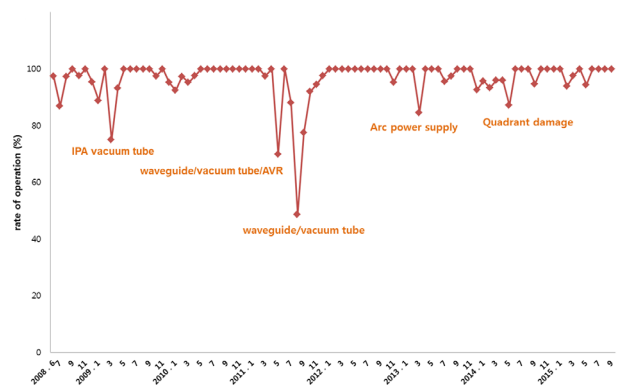
**Figure 8.** Optimization of [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub> production by varying the following conditions: (A) thickness of target foil (5% oxygen content in nitrogen gas, 30 μA, 10 min), (B) target loading pressure and beam current (0.0003% oxygen content in nitrogen gas, 10 min).

분 동안 조사하여 각 5회씩 테스트 하였을 때 24 bar 조건에서 가장 높은 수율을 확인하였다(Figure 8B).

최종적으로 성능 개선 실험을 통해서 최적화 된 [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub> 생산조건은 재질은 HAVAR-foil이고 타겟의 두께는 19 μm이다. 또한 탄소-11 타겟 내 질소함유량은 99.99995%의 질소를 사용할 때였고, 탄소-11 타겟에 주입되는 질소가스 압력은 24 bar일 때, 빔 커런트 60 μA로 [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub>를 생산하였을 때 최대 생산량을 보였다. 최대 생산된 [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub>는 30분 조사 후 약 2.3 Ci(86.6 ± 1.7 GBq)로 초기 조건의 1.8 Ci보다 증진된 생산 결과를 보였다.

## 국산 사이클로트론 운행과 관리

경기권역사이클로트론센터의 국산 사이클로트론 운영을 2008년 7월부터 2015년 9월까지 7년 동안의 가동률을 검토해본 결과, Figure 9와 같은 평균 가동률 96.5% 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 국내에 들어와서 운영하고 있는 외산 사이클로트론과 견주어보아도 국산 사이클로트론이 높은 안정성을 보여주고 있음을 의미한다. 초기의 산발적으로 발생했던 대부분의 국산 사이클로트론 운영 정지는 RF 부분의 문제로 이는 국산 사이클로트론에 도입된 대부분의 RF 관련 장비가 사이클로트론에 전문화된 장비가 아닌 다른 용도의 장비를 대체하여 사용했기 때문이었다. 또한 해당 부속장비의 국내 활용도가 급격히 적어졌고, 어쩔 수 없이 외국의 고가 부속장비를 주문 후에 한두 달을 기다려야 하는 어려움이 있었다. 하지만 RF 관련 부품을 교체 후 약 2년가량 문제가 나타나지 않고 있으며, 후반기의 운영 정지에 대한 문제는 부품 수



**Figure 9.** The rate of operation of the KOTRON-13 cyclotron.

급에 따른 지연이 문제였다. 본 경기권역 사이클로트론센터의 가동률 그래프를 보면 알 수 있듯이, 국내 산업체를 통한 각 부품이 원활한 조달과, 정기적인 소모품 교체와 운영 점검을 수행한다면 국산 사이클로트론의 운영 안정성은 상당히 보장될 수 있을 것이다.

## 결론

성공적인 업그레이드를 거친 국산 사이클로트론의 성능을 비슷한 수준의 에너지를 갖는 외산 사이클로트론과 비교해보면 크게 뒤지지 않는 성능을 가진다. 앞으로 국산 사이클로트론을 제공하는 회사가 체계적인 소모품 교체와 정기 점검을 수행하는 회사로서 거듭난다면, 향후 국산 사이클로트론의 보다 많은 해외 수출을 도모할 수 있는 밑거름이 될 것이라 본다. 서두에서 언급했듯이 외국에 비해 늦게 뛰어든 사이클로트론 연구개발이 이

렇게 세계에 내세울 만한 성과를 빠른 시일 안에 이루었다는 점과 국가 연구비 지원(권역별 사이클로트론센터 사업을 통한 국산 사이클로트론의 운행 성과를 보았을 때, 빠른 미래에 널리 세계에 수출되는 국산 사이클로트론을 볼 수 있으리라 기대해 본다.

## Acknowledgements

이 연구는 보건복지부 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원(HI14C1072 and HI12C-0035-030015)과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A2A2A01007980)을 받아 수행된 연구임.

## References

1. 정준기. 국산사이클로트론 발전 방안에 관한 연구. 미래창조과학부 동향/연구보고서 (2007).
2. Kim YS, An DH, Chai JS, Chang HS, Hong BH, Hong SS, Hur MG, Hwang WT, Jung IS, Kang JS, Kim JH, Kim SW, Lee MY, Lim KE, Park CS, Shim HH, So WY, Suk JY, Yang TK, Yun YK, Kim CK, Park KY, Yoon MH, Shin SH, Sekiguchi M. New design of the KIRAMS-13 cyclotron for regional cyclotron center. *Proceeding of 3<sup>rd</sup> Asian Particle accelerator conference* 2004;338-340.
3. Chang HS, An, DH, Chai JS, Hong BH, Hong SS, Hur MG, Hwang WT, Jung IS, Kang JS, Kim YS, Kim JH, Kim SW, Lee MY, Lim KE, Park CS, Shim HH, So WY, Suk JY, Yang TK, Yun YK, Park KH. Control system design of KIRAMS-13 cyclotron. *Proceeding of 3<sup>rd</sup> Asian Particle accelerator conference* 2004;326-328.
4. Chai JS, Kim YS, Yang TK, An DH, Jung IS, Chang HS, Kim GB, Kang JS, Park CS, Hur MG, Hong BH, Hong SS, Kim SW, Lee MY, Hwang WT, Kim JH, Shim HH, So WY, Sekiguchi M, Yoon MH, Shin SH, Kim CK, Park KH, Sigg P. *Proceeding of 18<sup>th</sup> International conference on cyclotron and their application* 2004; 512-515.
5. An DH, Jung IS, Kang J, Chang HS, Hong BH, Hong S, Lee MY, Kim Y, Yang TK, Chai JS. The negative hydrogen penning ion gauge ion source for KIRAMS-13 cyclotron. *Rev Sci Instrum* 2008;79:02A520.
6. Lee BC, Lee HJ, Lee WK, Park JH, Moon BS, Kim JH, Jung KI, Chae SK, Kim SE. Intensification of the KOTRON-13 cyclotron by optimizing the ion source. *J Korean Phy Soc* 2010;57:1376-1380.
7. Moon BS, Lee HJ, Lee WK, Hur MG, Yang SD, Lee BC, Kim SE. Development of additive [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub> target system in the KOTRON-13 cyclotron and its application for [<sup>11</sup>C]radiopharmaceutical production. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2015;356-357:1-7.
8. Lee HJ, Lee WK, Park JH, Moon BS, Lee IW, Chae SK, Lee BC, Kim SE. Development and optimization of C-11 gas target system in KOTRON-13 cyclotron. *Korean J Nucl Med Technol* 2011;15:86-89.
9. Lee HJ, Park JH, Moon BS, Lee IW, Lee BC, Kim SE. Production of <sup>11</sup>C labeled radiopharmaceuticals using [<sup>11</sup>C]CO<sub>2</sub> produced in the KOTRON-13. *Korean J Nucl Med Technol* 2012;16:106-109.