

KOTRON-13 사이클로트론의 고효율 ^{18}F 니오븀 표적 장치

이원경*·채성기·송재용·임기섭·조병욱
(주)삼영유니텍 기업부설 연구소*

E-mail: lwk75@naver.com

중심어 (keyword) : KOTRON-13, 사이클로트론, 표적 장치, 플루오린, 니오븀, ^{18}F , Cyclotron, Niobium, Nb

서론

현재 국내 의료용 진단 방사선 분야에서 암 진단을 목적으로 PET/CT의 활용이 크게 증가하고 있으며, 매년 PET/CT를 이용한 암 진단 건수가 기하 급수로 증가하고 있다. 국내의 경우 주로 ^{18}F 를 이용한 FDG 의료용 동위원소 의약품을 사용하여 진단 검사를 하고 있으나, 점차적으로 각 의료용 목적에 따라 다양한 의료용 방사성 동위원소의 필요성이 증대되고 있다 [1].

^{18}F 의 생산량은 양성자의 에너지와 빔 전류에 비례하고, 표적 장치의 경우 열 발생률과 상관관계를 가지게 되며 냉각 장치의 효율에 따라 표적 장치의 성능이 결정된다 [2].

현재 대부분의 ^{18}F 표적 장치의 경우 약 0.2~5ml의 ^{18}O 물에 빔 조사 시 약 600W이상의 높은 열량을 가하여야 하므로 단위 면적당 매우 높은 열량이 표적 장치에 조사되고 이에 따라 표적 장치가 쉽게 손상되어 빔 전류에 제한이 있다 [3]. 현재 상용 표적 장치의 경우 약 2,000W의 빔 전류가 최대치이고, 2009년 삼영유니텍에서 자체 개발한 기존 Nb 표적 장치의 경우 이론적으로 약 1,000W까지의 열용량을 견딜 수 있게 설계되었으나, 냉각 효율의 부족으로 실제로는 이보다 낮은 빔 전류만을 조사할 수 있다 [4],[5],[6].

일반적으로 표적 장치 물질의 열 발생 문제로 인하여 방사성 동위원소를 생산하기 위한 양성자 빔 전류는 현재 1.6mA의 충전된 표적 장치 물질에 대하여 50 μA (최대 60 μA)로 제한된다.

그러나 현재의 KOTRON-13 사이클로트론은 지속적인 개발에 의해 100 μA 에서 120 μA 의 높은 강도 범위를 가진 양성자 빔을 가속하는 것이 가능하다 [7]. 그러므로 현재 KOTRON-13 사이클로트론의 양성자 빔의 강도에 비해 충분한 성능이 나오지 않고 있다.

이에 대한 해결책은 방사성 동위원소 생산 장치 내 캐비티의 표적 장치 물질에 의한 열 냉각의 문제와 그에 대해 발생하는 압력 등 이 두 가지를 동시에 극복하여야만 한다 [8]. 특히, 표적 장치 물질을 효율적으로 냉각하기 위한 방법을 개발하고, 기존 표적 보다 더 높은 ^{18}F 생산량이 제공되어야 한다 [9].

표적 장치 설계

KOTRON-13 사이클로트론의 고효율 ^{18}F Niobium 표적 장치는 양성자 빔이 입사 시 ^{18}O 캐비티의 증가하는 압력

을 지지해주고 ^{18}O 캐비티 박막을 냉각시켜주는 역할을 하는 격자부와 ^{18}O 물을 저장하는 ^{18}O 캐비티부, 그리고 ^{18}O 물을 냉각할 수 있도록 하는 냉각수 캐비티부 등 3부분으로 구성된다.

우선 양성자 빔이 입사되어 처음으로 접하는 부분이 격자부 이고, 이 격자부는 2.8mm의 정육각형으로 구성되어 있으며, 정육각형의 개수는 55개로 구성되어 있고, 그 모양 또한 중심을 기준으로 정육각형으로 배치하였다. 정육각형과 정육각형의 간격은 0.2mm로 설계하였으며, 격자의 두께는 8mm로 설계하였다. 격자의 재질은 동으로 하였고, 내경은 18mm, 외경은 70mm로 설계 하였다.

이렇게 설계된 격자의 빔 입사 효율은 약 85%이고 입사된 양성자 빔에 의해 가열된 격자부 및 격자에 접촉된 ^{18}O 캐비티 박막의 냉각을 위하여 격자 주변부에 냉각수로 냉각이 가능하게 설계하였다 [10]. 그림 1의 왼쪽은 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 격자 부를 나타낸 것이다.



그림 1. 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 격자부와 ^{18}O 캐비티

^{18}O 캐비티 부분은 앞면에 50 μm 의 Nb(Niobium) 박막이 위치하고 ^{18}O 물을 가둬두는 부분은 18mm의 넓이에 5.9mm의 깊이로 설계하였다. 이때의 내부 용적은 1.8ml이다. 그리고, 입사되는 양성자 빔의 에너지가 ^{18}O 을 반응시키고 남아 있을 수 있으므로, 13MeV에 대한 빔 에너지가 모두 소멸하는 두께를 고려하면 뒤 부분의 두께는 순수하게 1.0mm가 되어야 한다.

^{18}O 캐비티의 전면부에는 두께가 50 μm 인 Niobium 박막이 위치하고 있고, 그 이후 부분에는 ^{18}O 물이 채워져 있게 되면 양성자 빔의 에너지는 ^{18}O 을 반응시키게 되고 남은 양성자 빔의 에너지는 ^{18}O 캐비티 뒷면의 격벽에서 소멸하게 되지만, ^{18}O 물이 채워져 있지 않은 상태로 양성자 빔 에너지를 입사시키면 캐비티가 빈 공간이므로 양성자 빔 에너지가 뒷면의 격벽을 통과하여 ^{18}O 캐비티 후면부 냉각을 하는 냉각수를 방사화 시키게 된다. 이를 방지하기 위하여 ^{18}O 캐비티 뒷면의 벽면 두께를 최소 1mm이상으로 설계하였다.

그리고 기존의 ^{18}O 표적 장치들은 ^{18}O 캐비티 주변부를 냉각해 주지 못하여 $50\mu\text{A}$ 이상의 양성자 빔 입사에 대한 누적 열 상승으로 인한 ^{18}F 생산량 저하 및 압력 상승으로 인한 ^{18}F 표적 장치의 손실을 가져왔다. 그래서 고효율 ^{18}F 표적 장치는 열효율을 개선하기 위하여 ^{18}O 캐비티 주변부에 냉각을 하도록 설계하여 열효율을 개선하도록 설계하였다. 사용된 ^{18}O 캐비티의 재료는 Niobium(Nb)이며 외경은 70mm로 설계하였다. 그림 1의 오른쪽은 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 ^{18}O 캐비티를 나타낸 것이다.

냉각수 캐비티는 ^{18}O 캐비티를 냉각하기 위한 것으로 순환하는 물로 냉각을 하며 냉각수의 입사 방향은 후면 중앙 정면에서 일직선으로 입사되어 열이 가장 많이 발생하는 중앙부를 냉각시키고, 상승된 냉각수는 상부로 인출되도록 설계하였다. 사용된 냉각수 캐비티의 재료는 알루미늄이고, 외경은 70mm로 설계하였다. 그림 2는 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 냉각수 캐비티를 나타낸 것이다.



그림 2. 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 냉각수 캐비티

결과 및 고찰

KOTRON-13 사이클로트론에서의 실험에서 양성자 빔을 평균 전류 $80\mu\text{A}$ (최대 $90\mu\text{A}$)로 120분 동안 조사하였다. 그림 3은 기존의 ^{18}F Nb 표적 장치와 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치를 KOTRON-13 사이클로트론에 장착하여 총 20회에 걸쳐 실험 한 결과이다.

기존의 ^{18}F Nb 표적 장치는 양성자 빔이 $50\mu\text{A}$ 입사 될 때 최대 3,000mCi 정도를 생산할 수 있지만, 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치는 동일한 양의 양성자 빔이 입사될 때 최대 3,400mCi를 생산하였고, 양성자 빔이 $80\mu\text{A}$ 입사될 때에는 기존의 ^{18}F Nb 표적 장치는 박막이 손상되어 사용하지 못하였다.

고효율 ^{18}F Nb 표적 장치는 동일한 양의 양성자 빔이 입사 될 때에는 최대 5,500mCi를 생산하여 기존 ^{18}F 표적 장치 보다 생산 성능이 보다 월등하게 우수한 결과를 보였다. 그림 4는 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치이다. 표 1은 기존 ^{18}F Nb 표적 장치와 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 생산량 및 수율을 비교하여 나타낸 것이다.

결론

고효율 ^{18}F Nb 표적 장치는 본 실험 결과에서와 같이 KOTRON-13 사이클로트론에서 기존의 ^{18}F Nb 표적 장치에 비하여 냉각 성능과 생산량에서 우수성을 보이고 있다. 현재는 박막의 수명을 시험하고 있는 중이며, 향후 설계가 최적화 되면 표적 장치의 생산량이 현저하게 증가될 것으로 예상된다.

* 본 논문의 고효율 Nb 표적 장치에 대한 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업 고유장점기술육성 과제

진행되어 수행되었다.

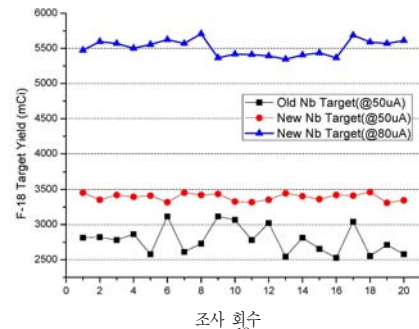


그림 3. KOTRON-13의 기존 ^{18}F Nb 표적 장치와 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 성능 비교

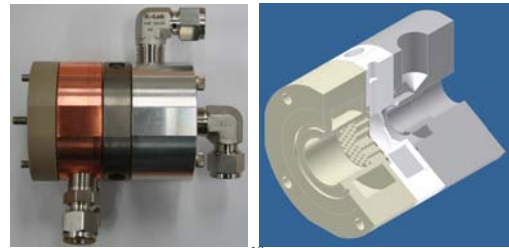


그림 4. 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치

표 1. 기존 ^{18}F Nb 표적장치와 고효율 ^{18}F Nb 표적 장치의 생산량 및 수율 비교

	기존 Nb 표적 장치	고효율 Nb 표적 장치
내경(Ø)	20	18
양성자 빔 (50uA) 생산량 (EOB)	2.8 Ci	3.3 Ci
양성자 빔 (80uA) 생산량 (EOB)	X(사용불가)	5.5 Ci
포화 수율 (mCi/uA/h)(SAT)	109±11	133±4

참고 문헌

- A.D. Robert, L.C. Daniel, R.J. Nickles, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 99 (1995) 797-799.
- Carlos E. Gonzalez Lepera, Barrt Dembowski, Appl. Tadiat. Isot, Vol. 48, No. 5 (1997) 613-617.
- E. Hess, G. Blessing, H.H. Coenen, S.M. Qaim, Appl. Radiate. Isot. 52 (2000) 1431.
- Bong Hwan Hong, Min Goo Hur, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 241, Issues 1-4, December 2005, p. 732-734.
- Marc S. Berridge, Rolf Kjellström, Applied Radiation and Isotopes 50(1999) 699-705.
- Min Goo Hur, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 241, Issues 1-4, December 2005, p. 735-737.
- N. Satyamurthy, Bernard Amarasekera, C. William Alvord, Jorge R. Barrio, Michael E. Phelps, Molecular Imaging and Biology, Vol. 4, No. 1, (2002) 65-70.
- N. Satyamurthy, B. Amarasekera, C.W. Alvord, J.R. Barrio, M.E. Phelps, Mol. Imaging Biol. 4 (2002) 65.
- S.K. Zeisler, D.W. Becker, R.A. Pavan, R. Moschel, H. Rühle, Applied Radiation and Isotopes 53 (2000) 449-453.
- T.E. Rramhart, A.K. Converse, K.A. Dabbs, R.J. Nickles, K. Buckley, S. Jivan, T.J. Ruth, A.D. Roberts, A.N. Other, Applied Radiation and Isotopes 58 (2003) 21-26.