

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

H₂¹⁸O 액체표적에서 양성자 빔의 영향에 관한 연구

The Study of Proton Beam Effect on H₂¹⁸O Water Target

허민구
오환섭

원자력의학원
서울시 노원구 공릉동 215-4
경희대학교
경기도 용인시 신갈읍

요 약

본 연구에서는 30MeV 음이온가속기의 양성자 빔을 사용하여 액체표적에서 ¹⁸F를 생산하는 과정 중의 표적내부의 변화를 관찰하고자 하였으며 이를 위하여 가시화 실험 표적의 제작하였고 실제 양성자 빔이 입사되는 과정 중의 변화를 관찰하였다. 실험을 통하여 기포의 발생과 유동을 관찰하였으며 압력 및 전류량과의 관계를 고찰하였다. 또한 표적은 핵반응을 위한 전류량에 대하여 임계점을 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

The aim of research is observed H₂¹⁸O change during the proton beam irradiation at the inside of water target. For this, make a target unit for visualization and proton beam irradiated using 30MeV cyclotron. The bubbles generation and movement were observed and the relation with current and pressure was considerate. The result of study, target has critical current value for nuclear reaction.

1. 서 론

H₂¹⁸O 액체표적은 싸이클로트론을 이용한 방사성동위원소인 F-18의 생산에 가장 널리

사용되는 표적이며 생산수율의 향상을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 생산수율의 향상을 위한 표적의 연구는 기본적으로 전류량을 높이는 방법과 에너지를 높이는 두 가지의 방향을 가지게 된다. 여기에 입사되는 에너지의 사용정도를 높일 수 있는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 표적의 내부 상태변화에 대한 관찰은 표적에 입사되는 빔에너지를 효과적으로 사용하기 위한 수율향상의 목적으로 시도되어 왔다. 이에 대한 기존의 연구 및 관찰은 Fig.1에서와 같이 표적을 대기압 하에서 개방형으로 하여 기포의 발생현상을 관찰하였고 이를 통하여 표적 설계에 가장 중요한 설계 인자인 에너지 감쇄 길이를 기포의 크기만큼 수정되어야 한다고 제시하고 있다. 그러나 실제 생산에 사용되는 표적은 방사선 오염 등의 이유로 대부분이 밀폐형으로 구성되어지며 보다 높은 전류량에서 사용되어진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 개방형의 실험결과가 실제 빔조사의 경우에서도 유효한지를 가시화 표적을 통하여 확인하였으며 전류량의 증가가 표적의 수율에 어떠한 방향으로 영향을 주는가에 대하여 확인하였다.

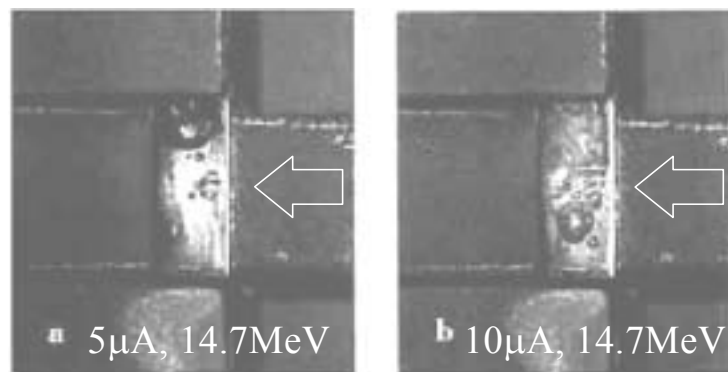


Fig 1. Photograph of water target during beam irradiation
(S. -J. Heselius at Truke PET center)

2. 실험방법

빔 조사 중의 내부 상태변화 관찰을 위한 target unit를 Fig. 2에 나타내었으며 Fig. 3은 제작 후 설치된 표적의 실제 모습이다. 원자력의학원에서 사용하는 표적과 동일한 재질과 형상을 가지도록 하였으며 내부관찰을 위하여 표적 후면의 액체 냉각을 제거하고 Quartz window를 설치하였다. Fig. 4는 양성자 빔이 $H_2^{18}O$ 에 도달할 때까지의 에너지 감쇄 물질의 배열을 도시한 그림이며 Table 1은 각 감쇄 물질에서의 에너지 감쇄 정도를 나타낸 표이다. Quartz window 후단에 Panasonic GP-KS162HD CCD camera를 설치하여 양성자 빔 조사중의 내부변화를 VCR을 사용하여 기록하였다. 표적의 밀봉과 표적물의 주입을 위하여 있는 두개의 tube에는

breaking pressure가 3000psi인 Swagelok SS41 ball valve를 설치하여 표적물을 주입한 후에 밀봉하였다. 내부압력의 측정을 위하여는 diaphragm 방식의 Sensotec type A-105 pressure sensor를 사용하였고 National Instrument DAQCard-AI-16XE PCMCIA card를 사용하여 압력변화 data를 획득하였다.

실험은 원자력의학원에 설치한 IBA사의 cyclo-30 싸이클로트론을 사용하였으며 표적에 조사되는 양성자 빔이 표적 중앙부 이외의 부분에 입사되지 않도록 표적 장치 선단에 collimator를 설치하여 target unit에 입사되는 양성자 빔의 크기를 직경 10mm로 제한하였다. 양성자 빔은 $1\mu\text{A}$ 에서부터 $23\mu\text{A}$ 까지 조사하였으며 1분 간격으로 $1\mu\text{A}$ 씩 상승시키면서 실험하였다. 표적 전면의 냉각은 수냉식으로 23°C , 5L/min의 조건에서 실험을 수행하였다.

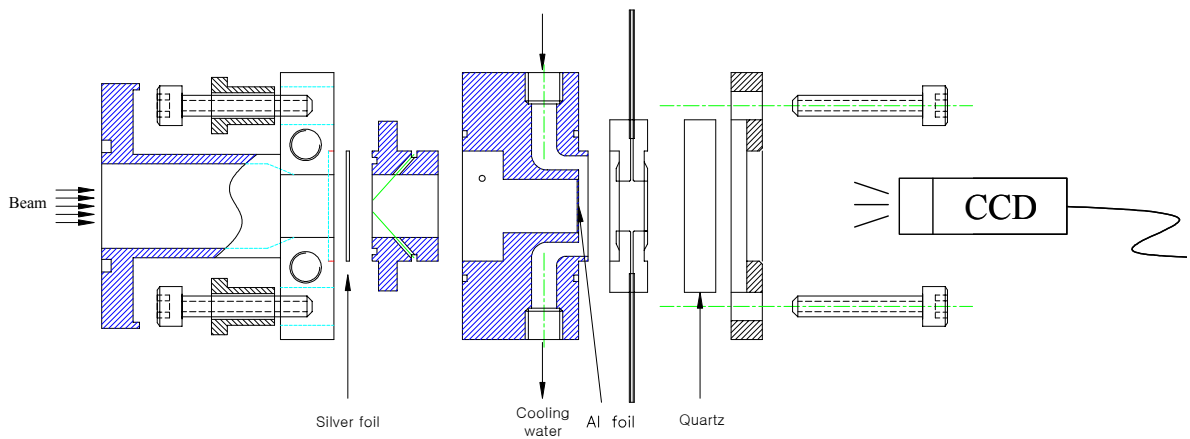


Fig. 2 Target unit for visualization

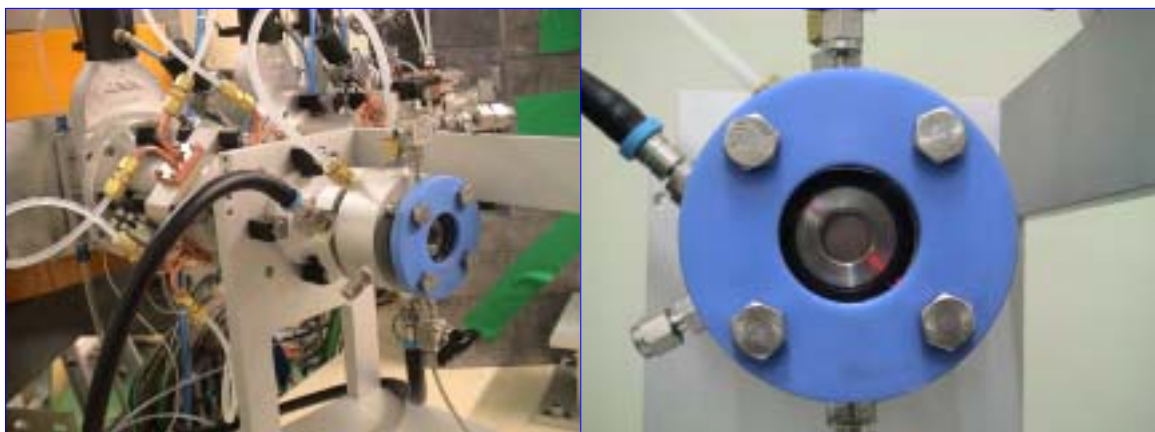


Fig. 3 Real view of target unit

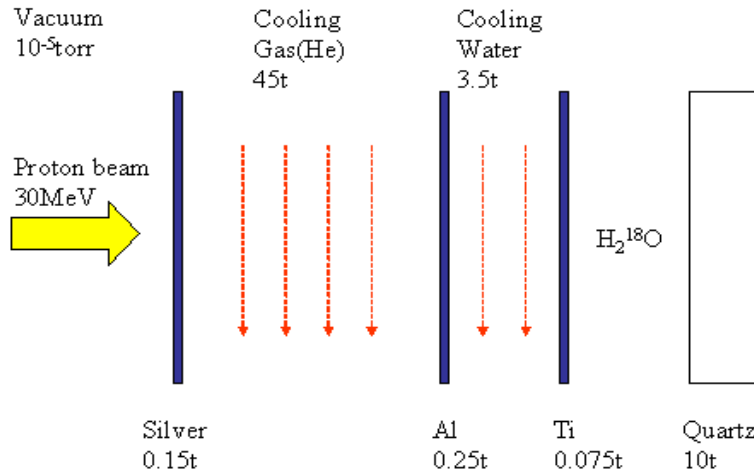


Fig. 4 Materials on beam path

Table. 1 Energy degradation on materials 1

Material	Thickness (mm)	Density (g/cm ³)	Incident energy (MeV)	Energy loss (MeV)	Final energy (MeV)
Silver(Ag)	0.150	10.49	30	1.648017	28.351983
He	45.000	0.00062	28.351983	0.002125	28.349858
Aluminium	0.250	2.699	28.349858	1.03158	27.318278
Cooling water	3.500	1.0	27.318278	8.79329	18.524988
Titanium	0.075	4.5	18.524988	0.624115	17.900873
H218O	5.000	1.0	17.900873	17.900873	0

3. 결과 및 고찰

3.1 압력 및 온도의 변화

Fig. 5은 가시화 표적에 실제로 입사된 빔의 전류량과 압력의 변화를 시간에 따라 나타낸 그림이며 Fig. 6은 압력과 전류량과의 관계로 도시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 표적의 내부 압력은 조사되는 빔의 전류량에 따라 증가하는 모습을 나타낸다.

Fig. 7은 H₂O의 증기압곡선에 따라 표적내부의 온도변화가 전류량의 증가에 따라 어떻게 변화할 것인가를 예측한 그림이다. 표적은 그 형태가 압력용기와 유사하므로 핵반응으로 인한 내부 발생열로 인하여 온도와 압력이 증가할 것이다. Fig. 6과 7을 비교하면 냉각의 영향으로 표적물이 끓는점까지 가열되지 않았을 것으로 생각되는 7μA 이하에서는

전류량의 변화에 대하여 압력의 변화가 미미하며 전류량이 증가하면서 핵반응으로 인한 온도의 상승은 전류량의 증가에 비례적으로 증가하며 이에 따라 표적의 내부압력이 급격히 증가하는 것으로 생각된다.

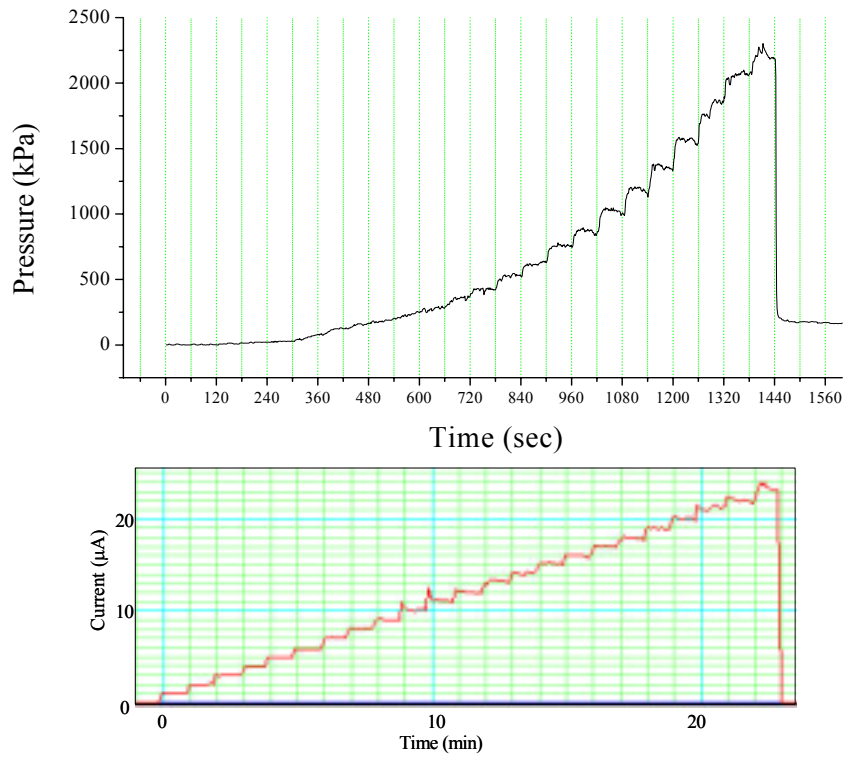


Fig. 5 Pressure and current on target

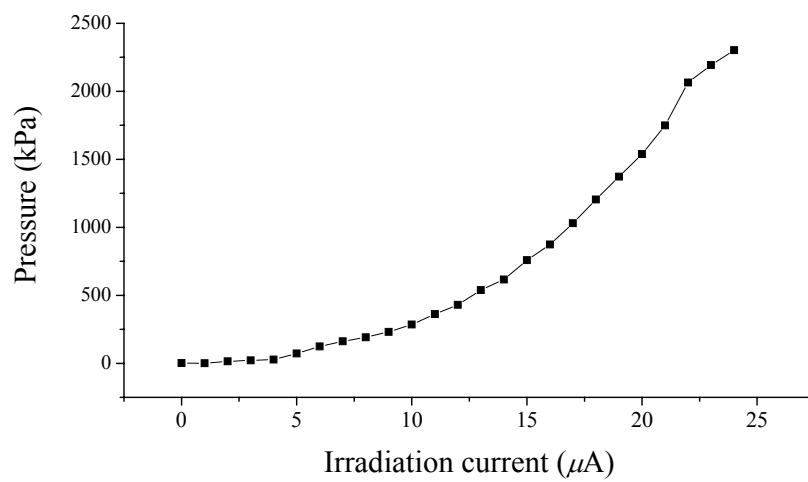


Fig. 6 Relation of current and pressure

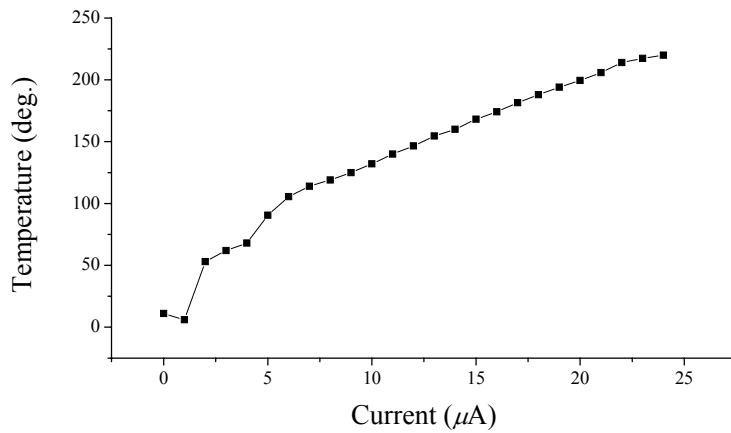


Fig. 7 Estimate of target water temperature

3.2 기포의 발생과 변화

Fig. 8과 9은 낮은 전류량에서의 기포의 발생과 유동을 관찰한 그림이며 Fig. 10은 높은 전류량에서의 기포의 발생과 유동을 관찰한 그림이다. 낮은 전류량에서는 전술한 개방형 표적의 경우와 같이 기포가 발생하는 것이 관찰되었으나 밀폐형 구조에서는 표적 상부에 기화로 인하여 발생한 기포가 핵반응으로 인하여 물리량의 변화가 예측되어지는 표적중심부로 이동되었다가 밀도차이에 의해서 상부로 다시 이동되어지는 현상이 발견되었다. 표적중심부로의 기포의 이동은 기포의 본래 크기를 유지하면서 이동하는 경우(Fig. 8)와 기포가 산포되어 이동하는 경우(Fig. 9)의 두 가지의 형태로 나타났으며 이러한 현상은 전류량이 증가함에 따라 후자의 발생빈도가 더욱 크게 나타났다. Fig. 10과 같이 높은 전류량의 경우에는 기체상과 액체상의 구분이 명확하게 나타났으며 기포의 이동현상보다는 두 개의 상 계면에서의 상변화 현상으로 예측되는 끓음 현상이 관측되었으며 이 경우에도 기포의 유동은 계속적으로 발생하고 있는 것으로 판단된다.



Fig. 8 Bubble float at 5μA proton beam irradiation (0.25sec interval)



Fig. 9 Bubble float at $6\mu\text{A}$ proton beam irradiation (0.25sec interval)



Fig. 10 Bubble float at $20\mu\text{A}$ proton beam irradiation (0.25sec interval)

3.3 형상변화와 전류량

전류량의 증가에 따른 압력의 상승은 표적의 형상변화를 발생시키고 이러한 이유로 표적내부에는 기체상으로 존재하는 영역이 증가하는 것으로 판단된다. 방사성동위원소의 생산에서 생산수율은 발생하는 핵반응의 빈도수에 비례하며 따라서 기체상에서는 액체상태에서의 경우보다 핵반응이 매우 미미하여 생성되는 방사성 동위원소의 양이 매우 적을 것으로 생각된다. Fig. 11은 표적에서 기체상으로 판단되는 영역의 면적을 표적 전체 단면적과 비교하여 도식한 그림이며 Fig. 12는 각각 액체상과 기체상으로 입사되는 전류량을 예측한 그림이다. 여기서 양성자 빔이 에너지 감쇄재를 통과하면서 일정부분 회절되는 것으로 하여 표적 window 전면에 양성자 빔이 등분포 하는 것으로 가정하였다. 그림에서 액상에 입사되는 양성자 빔의 최대 전류량은 $12\mu\text{A}$ 이고 이를 위한 최소 입사 전류량은 $17\sim 8\mu\text{A}$ 이었다. 또한 전절의 Fig. 6과 비교하여 보면 표적물에 입사되는 최대전류량 부근에서 압력의 변화가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 보아 표적에 입사되며 핵반응에 유효하게 사용되는 양성자 빔의 크기는 입사되는 에너지보다 작으며 그 한계값을 가지는 것으로 생각된다. 또한 압력의 상승이 온도에 비례하므로 보다 높은 전류량의 조사를 위해서는 냉각의 개선이 우선되어야 한다고 판단된다.

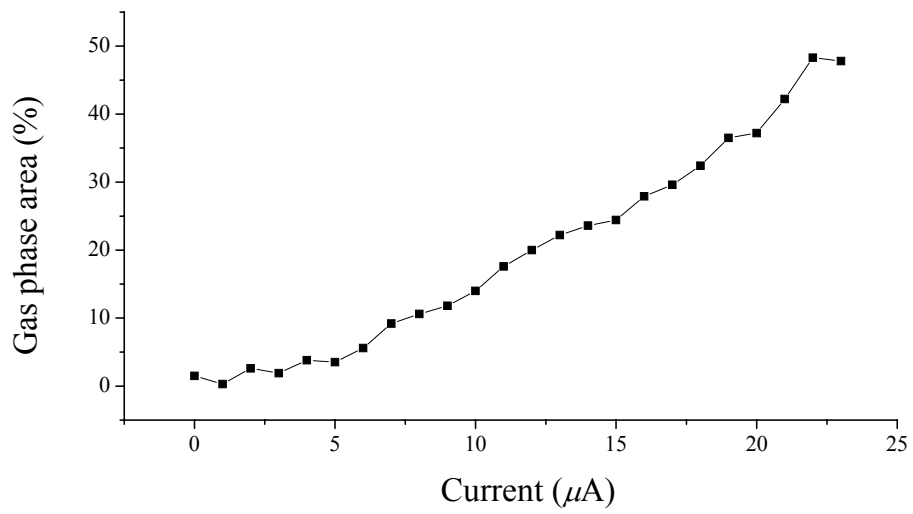


Fig. 11 Gas phase area ratio versus total window area

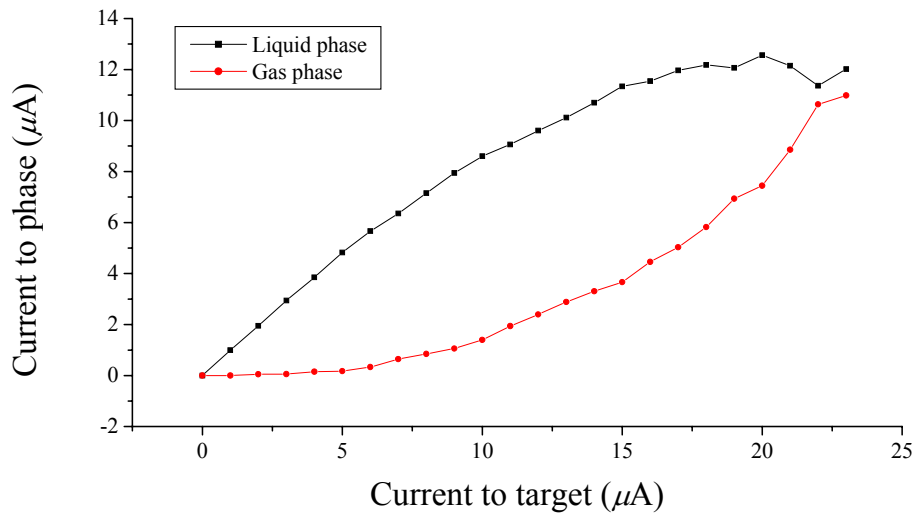


Fig. 12 Irradiation current at each phase

4. 결론

본 연구에서는 양성자 빔이 조사되는 과정중의 표적내부의 변화와 기포의 발생과 이동을 관찰하기 위하여 가시화 표적을 제작 실험하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 표적에서의 압력 및 온도의 상승은 입사되는 양성자 빔의 전류량에 비례한다.
- 2) 양성자 빔의 조사로 인하여 표적내부에 기포가 발생하지만 전류량의 증가에 따른 압력의 증가로 높은 전류의 빔 조사시에 액상에서 발생하는 기포의 크기는 매우 작으므로 표적물에서의 감쇄길이를 크게 하는 것이 무의미하다고 판단된다.
- 3) 밀폐형 구조인 표적에서 기포의 유동은 표적 상부의 기체가 액상 내부로 이동 혹은 산포되었다가 밀도차이에 의하여 다시 상부로 이동하며 전류량의 증가에 따라 산포 후 이동 현상이 심화된다.
- 4) 압력의 상승으로 표적의 변형이 발생하며 이로 인하여 표적의 기체상이 증가하게 이것은 표적에서 핵반응에 사용되는 빔전류에 임계값을 가지게 한다.
- 5) 표적의 생산수율은 핵반응에 사용되는 빔전류의 양에 비례하므로 표적은 형상에 따라서 허용전류량에 임계값을 가지는 것으로 예측된다.
- 6) 표적의 냉각효율 향상과 형상변화 제한을 통하여 표적의 수율을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. S. J. Heselius, "Particle Beam Penetration in Nitrogen Gas and Water Targets", WTTC, 1997
2. S.-J. Heselius, D. J. Schlyer and Alfred P. Wolf, A Diagnostic Study of Proton-beam Irradiated Water Targets, Appl. Radiat. Isot. 40 p663~669., 1989
3. Stocklin G. and Pike V. W., "Radiopharmaceuticals for Positron Emission Tomography", Kluwer Academic Publishers , 1993.
4. Ter-Pogossian M. M., Phelps M. E., Hoffman E. J. and Mullania A., "Radiology", 1975.
5. R. J. Nickles, M. E. Daube and T. J. Ruth, "An $^{18}\text{O}_2$ target for the Production of $^{18}\text{F}\text{F}_2$.", Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 35, No .2, p 117~122, 1984
6. E. Hess, G. Blessing, H. H. Coenen and S. M. Qaim., "Improved target system for production of high purity ^{18}F fluorine via the $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ reaction.", Applied Radiation and Isotopes, 52 p1431~1440, 2000
7. 허민구, 정순호, 오환섭, " ^{18}O water target의 구조해석 및 설계", 한국원자력학회 추계논문집, 2003