

FEM을 이용한 C-11 기체표적의 성능평가

허민구*(원자력의학원), 오환섭(경희대학교), 정효진(경희대학교), 박상필(경희대학교),
양승대(원자력의학원)

Application of C-11 Gas Target Using Finite Element Method

M. G. Hur(KIRAMS), H. S. Oh(Kyunghee Uni.), H. Y. Jung(Kyunghee Uni.), S. P. Park(Kyunghee Uni.),
S. D. Yang(KIRAMS)

ABSTRACT

In this research the energy degrader, which is the most fragile part of the security of a target, has been newly designed to improve the performance of the gas target. Also, the numerical analysis of the heat movement and mechanical movement during the operation of the target has been accomplished. The heat analysis and structure analysis which are using the cooling water flow and pressure in the energy degrader and the Nastran mediocrity finite element analysis program, has been considered with the heat movement and mechanical movement according to the current capacity of proton beam which determines the production yield of the radioactive isotope. Also the possible use range has been determined, and at the same time the most suitable running condition according to the current capacity of proton beam has been suggested.

Key Words : C-11, Gas target, energy degrader, PET

1. 서론

최근에 암의 조기진단과 치료 후 예후를 확인하기 위해서 이용되고 있는 양전자 단층촬영(PET: Positron Emission Tomography) 기술은 암의 진단 기술 중에서 수술을 하지 않고 인체영상을 얻어 진단하는 방법으로 양전자를 방출하는 방사성동위원소나 표지화합물을 생체에 투여한 후, 투여한 물질의 체내 분포를 영상화하는 기술이다.

PET용 동위원소로서 가장 많이 이용되는 원소는 F-18과 C-11이 많이 쓰이고 있으나 C-11은 양전자를 방출하는 동위원소로서 반감기가 약 20분으로 짧기 때문에 방사성의약품에 의한 대상 환자에 가해지는 피폭이 작다는 장점이 있으며, 탄소는 체내 주요 구성성분이므로 다른 동위원소에 비해 화학적 독성에 대한 염려도 적다. 또한, F-18과 같은 다른 동위원소와는 달리 화합물의 기본 구조를 크게 바꾸지 않아도 되므로 화합물 자체의 물리적 특성에 변화가 없으며 다양한 화합물의 합성이 매우 용이하다.

그러나 C-11은 짧은 반감기로 많은 양의 동위원소

의 생산이 되어지지 않으면 실제 임상에 적용가능한 충분한 양의 방사성의약품을 합성하는 것이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 방사선 동위원소인 C-11의 생산을 위해 사용되는 gas target의 성능과 수명향상을 위하여 유한요소법을 이용한 열해석과 구조해석을 방사성 동위원소의 생산 수율을 결정하는 양성자 빔의 전류량에 따라 열적 거동 및 기계적 거동에 대해 고찰하고 사용 가능한 사용범위를 결정함과 동시에 양성자 빔의 전류량에 따른 최적의 운전조건을 제안하고자 하였다.

2. Gas target의 유동해석 및 열해석

2.1 수치해석 모델 및 경계조건

본 논문의 연구 대상인 C-11 방사성동위원소 생산 전용 30MeV 대전류 음이온 가속기에 적용되는 gas target의 전체적인 형상을 Fig. 1에 나타내었고 본 연구의 대상인 Energy degrader의 외부 및 내부의 구체적인 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

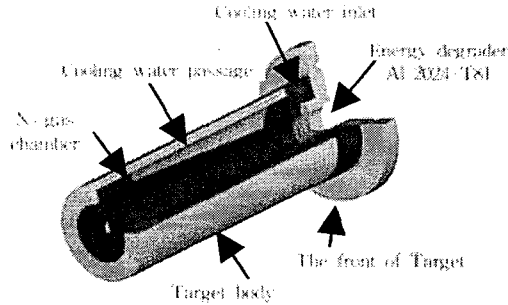


Fig. 1 Overview of gas target

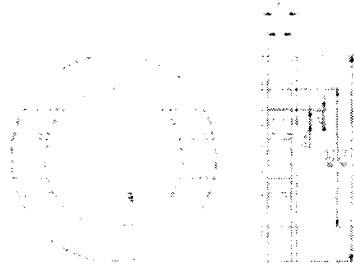


Fig. 2 Dimension of Energy degrader

가속된 양성자 빔은 두개의 알루미늄 박판과 냉각수를 거쳐 chamber의 N₂ gas에 도달하게 되는데 양성자 빔이 알루미늄 박판을 투과하며 분자들과의 충돌로 인해 열이 발생하게 되고 양성자 빔 에너지는 감소하게 된다. 에너지의 감쇄정도는 대상물에 입사되는 빔의 초기 입사에너지가 낮을수록 더 많은 에너지 감쇄가 발생하게 된다. 따라서 최초로 빔이 입사되는 알루미늄 박판보다 gas chamber의 마개 역할을 하는 박판의 온도가 상대적으로 더 높게 된다. 방사성 동위원소의 생산 수율은 빔 전류에 비례하므로 가능하면 빔 전류를 증가 시켜야 하며 따라서 본 연구에서도 30MeV에서 전류량을 각각 20, 40, 60, 80, 100 μ A로 변화시켜가며 열해석 및 구조해석을 하였다.

Williamson stopping power로 계산된 Energy degrader의 각 부분에서 양성자 빔의 에너지 감소량을 열 유속(heatflux)으로 계산하였고 빔은 입사면적에 대하여 균일하고 시간에 따라 일정하다고 가정하였다.

또, 각 전류에 따른 Energy degrader의 적정 냉각수의 유량을 결정하기 위해 현재 원자력의학원에서 가용한 10 l/min 내외의 유량을 냉각유량의 기본 범위로 정하였으며 1~14 l/min까지 냉각수의 속도 및 압력을 해석하였고 Energy degrader내의 냉각수의 평균속도로 레이놀드수를 계산하여 레이놀드수 2300을 기준으로 하여 층류유동과 난류유동을 구분하여 대류 열전도 계수를 산출하여 열해석에 적용하였다.

열해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 4와 같이

MSC. Patran을 사용하였으며 Solver로는 범용 유한요소해석 프로그램인 MSC. Nastran을 사용하였고 유체 유동해석은 Fig. 5와 같이 CFD-ACE를 사용하여 2D 해석하였다.

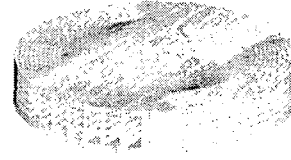


Fig. 4 FEA model of Energy degrader

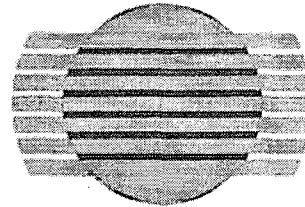


Fig. 5 FVM model of Energy degrader

Fig. 6은 Energy degrader를 chamber의 압력을 고려한 system 관점에서 본 하중 및 경계조건을 나타내는 그림이다. 양성자 빔이 Energy degrader를 투과하여 최종 N₂ gas에 도달하여 N₂ gas와 반응하게 되고 따라서 N₂ gas의 온도도 급격히 상승하게 되며 그에 따라 chamber내 압력도 급상승하게 된다. Table 2에 해석에 사용된 N₂의 최고압력과 물성치를 표시하였다.

Target의 N₂ gas chamber는 Energy degrader와 동종재인 Al 2024-T851로 설계 제작되었으며 N₂ gas chamber의 벽면 두께는 3mm로 Energy degrader의 알루미늄 박판의 두께(0.75mm)에 비해 약 4배 정도 두꺼우므로 N₂ gas의 온도상승으로 인한 압력증가로 야기되어지는 파손은 N₂ gas chamber의 벽면부가 아닌 상대적으로 두께가 얇고 다수의 응력 집중부를 포함하고 있는 Energy degrader의 알루미늄 박판이라고 판단되며 Target의 성능은 두개의 알루미늄 박판으로 이루어진 Energy degrader에 의해 결정되어지므로 N₂ gas chamber에 대한 구조해석은 해석대상에서 배제하였다.

Molecular weight	18.015
Gas constant (kJ/kg · °C)	0.2968
Specific heat at static volume (kJ/kg · °C)	0.745
Mass (g)	1.33
Initial pressure (bar)	13

Table. 2 Properties of N₂ gas

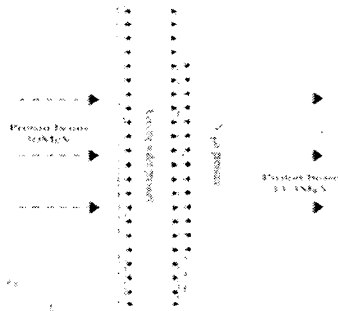


Fig. 6 Boundary condition of Energy degrader

2.2 유량변화에 따른 냉각수의 속도 및 압력 해석

2.2.1 유량 변화에 따른 냉각수의 속도 해석

각 전류에 따른 적정 냉각수의 유량을 결정하기 위해 체적 유량을 1~14 l/min까지 2 l 씩 증가시켜 가며 유동해석 하였고 유동 방향에 수직한 반지름 방향으로의 각 체적유량별 속도 분포와 유동방향을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

수치 해석상 결과는 알루미늄 박판을 지지하는 편 부분의 속도가 다소 낮게 나타났으며 중앙에서 가장 바깥쪽 가장자리 부분에서 와류현상이 나타나는 것을 알 수 있고 degrader의 중심의 속도보다 와류가 발생하는 경계면 부근의 속도가 다소 상승하는 것을 볼 수 있으나 대체로 균일한 속도분포를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 7의 평균속도를 바탕으로 산출한 레이놀드수는 Fig. 9와 같다

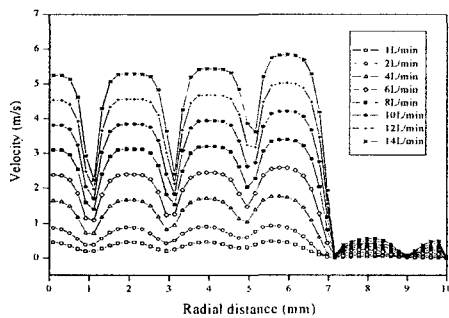


Fig. 7 Velocity distribution of radial direction by volume flow rate change of cooling water

2.2.2 유량 변화에 따른 냉각수의 압력 해석

Fig. 10과 Fig. 11은 유량 변화에 따른 냉각수의 압력에 대한 수치해석 결과이고 압력은 정압과 동압의 합인 전압으로 하였다. 1~14 l/min의 체적유량을 갖는 흐르는 유체의 압력은 냉각수의 속도의 영향이 지배적이므로 속도가 가장 낮은 와류발생 부분의 압력이 가장 낮고 속도가 가장 빠른 와류발생 경계면

부근의 압력이 가장 높게 나타났으나 속도 분포와 마찬가지로 대체적으로 균일한 분포를 가짐을 알 수 있었다.

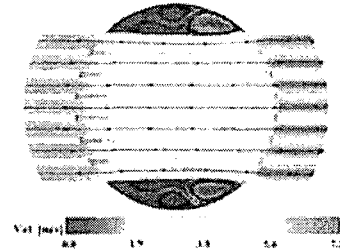


Fig. 8 Flow fields of cooling water in different flow rate (cooling water flow rate : 14 l/min)

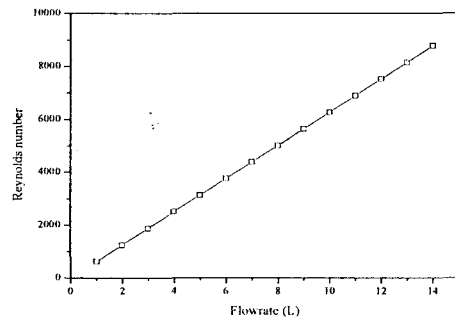


Fig. 9 Reynolds numbers in different flow rate

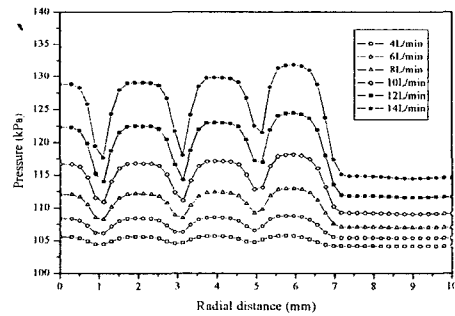


Fig. 10 Pressure change in the Energy degrader by volume flow rate change of cooling water

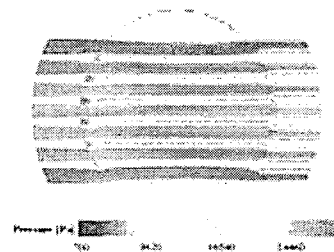


Fig. 11 Pressure distribution of cooling water in different flow rate (cooling water flow rate : 14 l/min)

2.3 양성자 빔의 전류량 변화 및 냉각수 유량 변화에 따른 열해석

두 개의 알루미늄 박판을 양성자 빔이 각 부분을 투과하면서 양성자 빔의 속도가 변하게 되어 최초 양성자 빔이 조사되는 박판보다 chamber쪽의 막개 역할을 하는 박판에서 에너지 손실이 크게 되어 상대적으로 더 높은 열을 발생시키게 되는 서로 다른 열적 환경에 놓이게 된다. 따라서 C-11의 반감기를 고려하여 약 30분간 빔이 조사되는 것으로 하고 유동해석 결과를 바탕으로 각각의 전류량에 대해 체적유량을 변화시켜가며 비정상 열전도 해석 하였다. 해석에 사용된 알루미늄 박판의 재료는 알루미늄 2024-T851을 채택 하였으며 냉각수로는 상온에서의 물(4℃)을 적용하였다. 알루미늄 2024-T851의 물성치는 Table 3에 나타내었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 Energy degrader에서 각각 20 μ A와 60 μ A일 때의 전류별 체적유량 대해 시간에 따른 최고 온도분포를 보여주는 그림으로서 빔 조사 후 수초 이내에 Energy degrader의 온도는 급상승하며 시간이 지남에 따라 일정온도로 수렴하는 것으로 나타났다. 예상했던 대로 와류가 발생하는 부분에서 온도가 가장 높은 것으로 나타났으며 두 개의 알루미늄 박판의 온도는 전류량이 높을수록 체적유량이 낮을수록 온도차가 큰 것으로 나타났으며, 반지를 방향으로 역시 전류량이 높을수록 냉각수 유량이 낮을수록 온도차가 커지는 것으로 나타났다.

Density (kg/m ³)	2780
Thermal conductivity (W/m · °C)	121
Specific heat (J/kg · °C)	963
Melting point (K)	775
Reference temperature (K)	293

Table. 3 Thermal properties of Al 2024-T81 at normal temperature

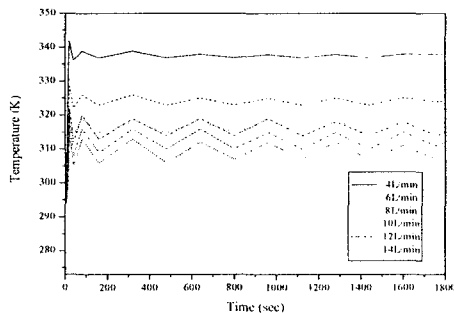


Fig. 12 Maximum temperature distribution in the Energy degrader according to time variance (Proton beam current : 20 μ A)

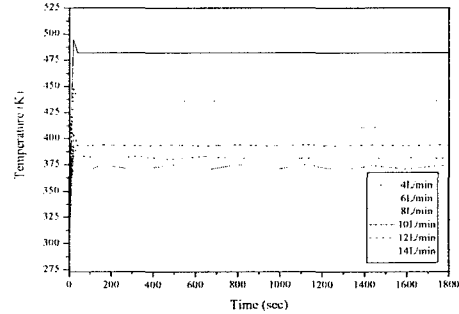


Fig. 13 Maximum temperature distribution in the Energy degrader according to time variance (Proton beam current : 60 μ A)

Fig. 14는 양성자 빔의 각 전류량별 체적 유량에 따른 Energy degrader의 최고온도를 나타내는 그래프이다. 유동해석으로부터 냉각수의 유동이 층류유동으로 구분되었던 4 l/min 이하의 경우에는 모두 알루미늄의 melting point를 넘는 것으로 나타났으며 따라서 각 전류별 Energy degrader의 적정유량은 최소 4 l/min 이상이어야 한다는 결과를 얻었다.

또한 Fig. 15는 전류량이 100 μ A일때 냉각수 유량에 대한 Energy Degrader의 온도 분포 해석한 결과이다.

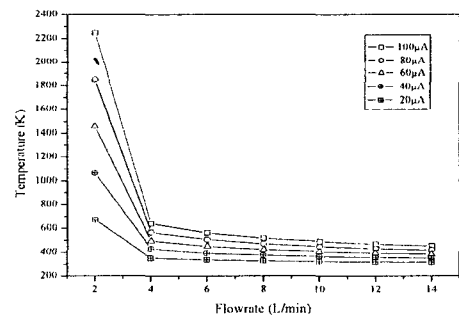


Fig. 14 Maximum temperature of Aluminum foil by volume flow rate change of cooling water

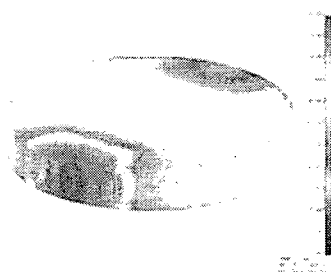


Fig. 15 Temperature map of the energy degrader by volume flow rate change of cooling water (Proton beam current : 100 μ A)

3. Target의 구조해석 및 성능평가

3.1 양성자 빔의 전류량에 따른 Target의 성능 및 최적운전 조건

Energy degrader의 두개의 박판 중 양성자 빔이 최초 입사되는 박판에 대하여 열응력을 고찰하였으나 냉각수의 유량에 따라 압력이 증가하게 되므로 알루미늄 박판에 발생하는 응력은 더 커질 것이므로 냉각수의 유량에 따른 압력을 고려하여 Energy degrader를 system 관점에서 해석하였고 해석결과 열응력만 고려하였을 때보다 응력의 증가폭이 크지는 않으나 약 5%~20% 정도 상승하는 것으로 나타났으며 응력의 분포는 열응력의 분포와 비슷한 경향을 가지나 박판의 가장자리에서는 열응력의 경우와는 달리 응력 값이 다소 감소하는 경향을 보였고 박판의 평균 응력 값은 높아지나 최고 응력 값은 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 16은 von-Mises 응력분포를 도식화한 것이다.

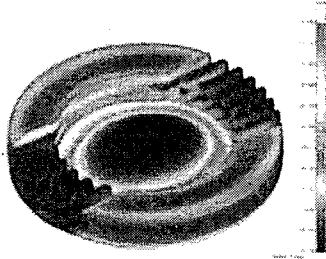


Fig. 16 Example of Von-Mises stress map (proton beam : 40 μ A, cooling water flow rate : 4 l/min, N₂ gas pressure : 21bar)

Fig. 17은 N₂ gas chamber의 압력변화에 따른 알루미늄 박판에서의 응력의 변화를 나타낸 것이다. Chamber의 N₂ gas는 최초 13bar의 압력으로 충전되며 전술한 바와 같이 양성자 빔이 각 부분을 투과한 후 마지막으로 N₂ gas와 반응하여 온도가 상승하게 되고 그에 따라 압력이 상승하게 된다. Fig. 18과 Fig. 19에서 보이는 바와 같이 N₂ gas chamber의 압력변화에 따른 알루미늄 박판에서의 응력의 변화는 거의 동일한 기울기를 가지며 양성자 빔의 전류량이 80 μ A, 100 μ A인 경우에는 냉각수의 유량에 상관없이 N₂ gas chamber의 초기압력에서 알루미늄 박판의 항복 응력을 초과하는 것으로 나타났다. 양성자 빔의 전류량이 60 μ A의 경우 냉각수 유량 10 l/min미만에서 80 μ A의 경우 냉각수 유량 14 l/min에서 N₂ gas chamber의 초기 압력 13bar일 때만 알루미늄 박판의 응력이 항복응력 이하인 것으로 나타났다. 따라서 양성자 빔의 전류량이 80 μ A, 100 μ A인 경우까지는 본 논문의 해석 모델이었던 Energy degrader의 성능이 미치지 못하거나 별도의 조치가 필요할 것으로 사료

되며 본 연구를 위해 설계·제작된 Energy degrader의 성능은 최고 60 μ A까지인 것으로 나타났다. Fig. 20의 결과로 보면 양성자 빔의 전류량이 20 μ A인 경우 냉각수 유량 10 l/min 이상인 경우 Energy degrader와 동종재인 Al 2024-T851 이루어진 N₂ gas chamber의 melting point를 넘어서는 범위에 있으므로 전류량 20 μ A에서 Energy degrader의 적절한 냉각수 유량은 4 l/min~6 l/min까지이며 전류량 40 μ A, 60 μ A에서는 각각 8 l/min~10 l/min, 10 l/min~14 l/min 범위임을 알 수 있었다.

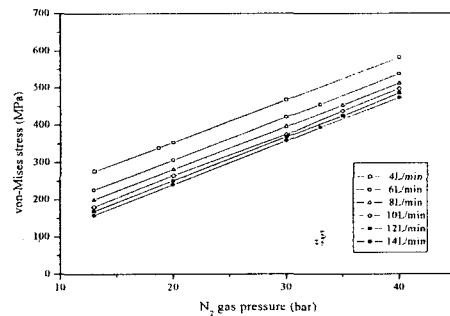


Fig. 17 Maximum stress change of aluminum foil on the gas chamber side by pressure change of N₂ gas (Proton beam current : 20 μ A)

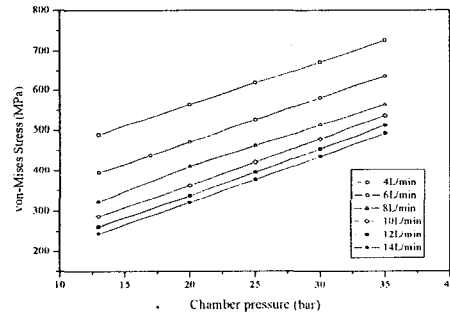


Fig. 18 Maximum stress change of aluminum foil on the gas chamber side by pressure change of N₂ gas (Proton beam current : 40 μ A)

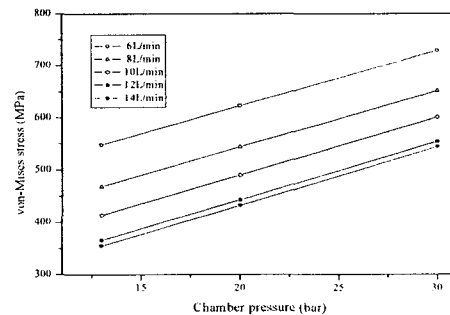


Fig. 19 Maximum stress change of aluminum foil on the gas chamber side by pressure change of N₂ gas (Proton beam current : 60 μ A)

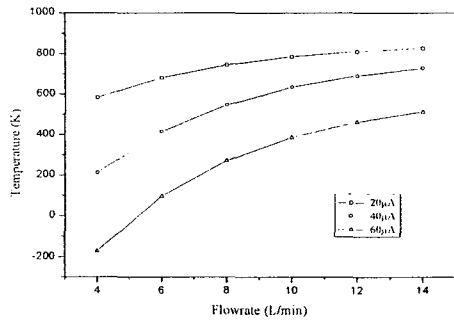


Fig. 20 Temperature Requirement of N₂ gas chamber by current change of proton beam

5. 결론

본 연구는 30MeV 가속기 Target의 성능평가 및 최적운전조건을 찾아낼 목적으로 양성자 빔의 전류량의 변화 및 냉각수 유량변화에 따른 수치해석 결과는 다음과 같다.

Target의 Energy degrader에 흐르는 냉각수에 대해 유체유동 해석한 결과 Energy degrader의 형상에 기인한 알루미늄 박판의 가장자리 부근에서 와류현상이 발생하며 체적유량이 4 l/min이상에서는 난류유동, 4 l/min미만에서는 층류유동임을 알 수 있었고 체적유량이 4 l/min 미만 경우, Energy degrader의 melting point를 초과하므로 표적에서의 최소 냉각수 유량은 4 l/min 이상이다.

와류가 발생하는 알루미늄 박판의 가장자리 부분에서 온도가 가장 높으며 이 부분에서 열응력 및 열변형이 최대이고 알루미늄 박판의 중앙부분과 가장자리 부분의 온도구배가 클수록 응력의 구배도 커짐을 알 수 있다. 특히 형상에 기인한 이음부의 응력집중부에서 von-Mises응력이 최대이므로 이 부분에서 파손이 예상되며 응력집중을 저감시킬 수 있는 형상의 변화가 요구되어 진다는 것을 알 수 있었다.

또한, N₂ gas chamber의 압력상승을 고려한 해석결과 양성자 빔의 전류량에 따른 Energy degrader의 성능한계는 60μA 이내이다.

끝으로, 양성자 빔의 전류량 변화에 따른 Energy degrader의 적정 냉각수 유량을 제시하였고 Energy degrader의 성능한계 내에서의 N₂ gas chamber 허용 온도 범위를 제시하였다.

참고문헌

(1) Eyal Mishani "Novel carbon-11 labeled 4-dimethylamino-but-2-enoic acid [4-(phenylamino)-quinazolin-6-yl]-amides: potential PET bioprobes for molecular imaging of EGFR-positive tumors" Nuclear Medicine and Biology, Vol. 31, pp 469-476, 2004

(2) Leonard I. Wiebe "PET radiopharmaceuticals for metabolic imaging in oncology" International Congress Series, Vol. 1264, pp 53-76, 2004

(3) Stephen M. Moerlein "Robotic preparation of Sodium Acetate C-11 Injection for use in clinical PET" Nuclear Medicine and Biology, Vol. 29, pp 613-621, 2002

(4) E. Mishani "Improved method for the quality assurance of (C-11)choline" Nuclear Medicine and Biology, Vol. 29, pp 359-362, 2002

(5) E. Mishani "Radiation levels in cyclotron-radiochemistry facility measured by a novel comprehensive-computerized monitoring system" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 425, pp 332-342, 1999

(6) J. R. Grierson "Radiosynthesis Of 6-[C-11]-D-glucose" Applied Radiation and Isotopes, Vol. 44, pp 1449-1458, 1993

(7) P. Kelderman "Sediment-water exchange in Lake Grevelingen under different environmental conditions" Netherlands Journal of Sea Research, Vol. 18, pp 286-311, 1984

(8) M. B. Chohen "Acute distribution of various C-14 compounds in mice as determined by whole-body autoradiography: Adjunct for radiopharmaceutical synthesis" The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, Vol. 28, pp 286-311, 1977

(9) A. G. Perris, R. O. Lane "The production of carbon-11 for medical uses by a Tandem Van de Graaff accelerator by the reaction $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ " The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, Vol. 25, pp 19-23, 1974

(10) M. B. Winstead "The use of sodium ^{11}C -benzoate in renal visualization" The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, Vol. 20, pp 859-862, 1969

(11) 오환섭, 김성재, 김도형, 박래신, 이종재 브레이징 접합부에서의 중간재 두께에 따른 열응력 해석 및 고찰? 대한용접공학회춘계학술대회 논문집 pp. 219-221, 2003

(12) 양승대 "암영상용 ^{18}F Fluorocholine 유도체의 합성과 체내분포에 관한 연구" 동국대학교 대학원 박사학위논문, 2001