

¹²⁵I 생산을 위한 Xe 가스 조사 용기 제작 및 안전성 분석
Fabrication and Safety Analysis of Xenon Gas Target for Production of ¹²⁵I

남성수, 박울재, 손광재, 이준식, 신현영, 허종, 김현일, 한현수
 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150
 ex-ssnam@kaeri.re.kr

1. 개요

¹²⁵I는 방사면역학적 진단 시약 및 치료용 선원의 제조에 활용되며 ¹³¹I에 비해 반감기가 길어서 표지화합물의 저장 수명이 길고 β-선을 방출하지 않으며 전자포획(Electron Capture)으로 27 keV의 X-선 및 35 keV의 γ-선을 방출하는 특징을 가지고 있다.[1, 2] 조사 표적으로서는 주로 천연 Xe 가스나 ¹²⁴Xe가 농축된 가스를 사용하며, 그림 1과 같은 핵 반응을 통해 생성 및 소멸된다. 국내에서 사용량은 2003년 기준 2.5 Ci, 120억원 규모로 전량 수입되고 있으며[3], 국내 개발이 시급한 핵종이다. 본 연구에서는 Xe 가스 표적용 조사 용기를 제작하고 그 성능을 시험 평가하여 중성자 조사 안전성을 확보하고, 최종적으로 하나로를 이용한 ¹²⁵I 생산에 활용하고자 하였다.

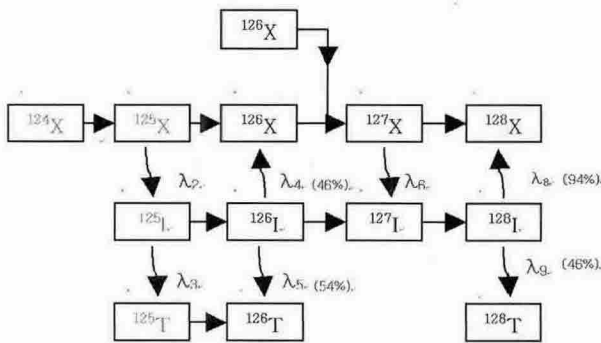


그림 1. Xe 가스의 중성자 조사에 의한 핵종생성 및 소멸사슬.

2. Xe 가스 조사 용기의 설계 및 제작

¹²⁵I 생산용 Xe 표적 용기는 내·외부 이중 용기로 구성되며, 고순도 알루미늄(Al-1050)을 사용하여 제작하였다. 상·하부 cap과 body가 TIG 용접으로 결합된 내부 용기는 총 길이가 95 mm, 외경이 31.5 mm인 실린더 형태이다. 상부 cap은 조사도중 body의 압접 부위에서 Xe의 누출이 있을 경우 외부 용기로의 누출을 방지하기 위하여 제작하였다. Body 상부는 Xe 가스를 주입하는 장비와의 연결을 위해 NPT female thread(1/8")로 가공하였고, Xe이 포집되는 챔버

의 두께는 2.0 mm로 가공하였다.

이중 밀봉을 위한 외부 용기는 현재 한국원자력 연구소에서 RI 생산에 사용되는 조사용기를 그대로 사용하였다.

3. Xe 표적의 안전성 분석 및 시험

3.1 표적의 안전성 분석

설계된 용기를 이용하여 열중성자 속이 1.66×10^{14} n/s.cm²인 조사 공에서 1 g의 Xe을 조사할 경우 예상되는 발열량을 MCNP 코드로 계산하고, 이 결과를 토대로 조사시 Xe 및 용기의 온도 분포를 실린더형 핵연료봉 온도해석에 사용되는 1차원 열전도 계산코드인 GENGTC를 사용하여 계산하였다.[4, 5] 또한 온도분포 해석 결과에서 제시된 온도와 압력을 이용하여 내부 용기의 변형 및 응력 등의 기계적 강도를 계산하였다. 계산은 기계 구조물의 구조해석에 널리 사용되는 상용 코드 ABAQUS를 사용하였다.

3.2 표적 제작

¹²⁵I 생산용 표적은 부피가 300 ml인 1차 저장 용기에 300 torr 내외의 Xe을 주입한 후 액체질소 하에서 내부 조사 용기로 충전 하고 주입 부분을 냉간 압접한 후 외부 용기에 장입, TIG 용접으로 밀봉하였다. Xe의 포집량은 이상기체상태 방정식을 이용하여 계산하였고, 포집 전후 표적의 전체 무게를 측정하여 확인하였다.

3.3 표적의 밀봉 시험

압접이 완료된 내부 표적은 1차적으로 기포누출 시험법으로 밀봉 여부를 확인하였다.[5] 또한 열적 안전성을 시험하기 위해 기포누출시험을 통과한 8 개의 내부 표적을 이용하여 300, 400℃에서 8시간 가열 후 표적의 무게 변화 및 외형적인 변화가 일어나는지를 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

¹²⁵I의 생산을 위해 Xe 가스 조사용 표적을 설계, 제작하고 표적 용기의 중성자 조사 안전성을 평가하였다. 1 g의 Xe에 대한 발열량 계산 결과

Xe에서 1.13 W/g, Al 용기에서 0.4 W/g 이었으며, 조사시 Xe의 온도 분포는 100 - 500 °C, 평균 온도는 300 °C이며, Al 용기는 40 - 80 °C 이었다.

내부 용기의 기계적 강도 평가를 위해 상온에서 1 g의 충전 압인 6기압과 3배인 18기압에 대해 응력분포 및 변형양상을 계산하였으며 결과를 그림 2에 나타내었다. 캡슐내부에 최대 von-Mises 응력은 각각 7.02 Mpa, 21.085 Mpa로 용기의 하단부에 작용하며, 78 °C에서 Al 재료의 허용 응력인 31.0 Mpa의 22.6%, 68%로 구조에 문제가 없을 것으로 판단되었다.[6] 변형은 축방향 및 반경 방향 모두 0.5 mm 미만으로 거의 변형이 없을 것으로 나타났다.

이 결과를 토대로 0.6 - 0.9 g의 Xe을 충전한 8개의 표적을 제작하여 기포 누출시험 및 300 °C 및 400 °C에서의 열적 안전성을 시험한 결과 모두 시험 기준을 통과하였다. 상기 결과를 토대로 이번에 제작한 batch 형 Xe 가스 표적 용기는 1 g 이하의 Xe 조사시 원자로에서 안전하게 조사할 수 있음을 입증할 수 있었다.

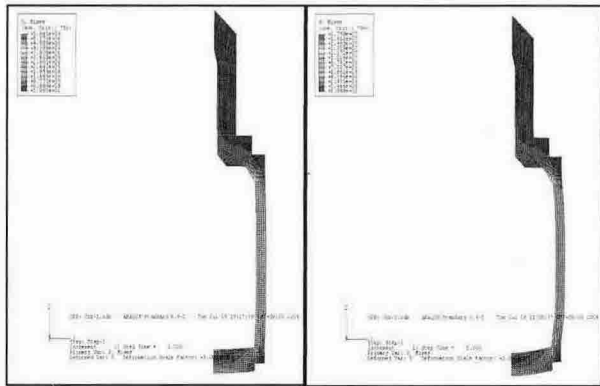


그림 2. 내부 용기의 응력분포 및 변형 양상 (좌: 6 atm, 우: 18 atm)

5. 결론

¹²⁵I의 생산에 사용될 Xe 가스 표적의 조사 안전성 평가를 통해 수십 mCi의 ¹²⁵I를 생산하는데 문제가 없음을 확인하였다. 1 g의 Xe을 1.66×10^{14} n/s.cm²인 조사 공에서 18시간 조사할 경우 조사 직후 8 mCi의 ¹²⁵I이 생성되며, ¹²⁵Xe의 붕괴에 의해 102시간 후 최대 28 mCi의 ¹²⁵I(¹²⁶I < 0.3%)이 생산될 것으로 계산되었다. 향후 생산된 ¹²⁵I는 품질분석을 수행한 후 진단 시약 개발 및 치료용 seed 개발의 원료 물질로 활용될 계획이다.

REFERENCES

- [1] P.V. Harper, W.D. Siemets, K.A. Lathrop, and H. Endlich, Production and Use of Iodine-125, Journal of Nuclear Medicine, Vol. 4, P. 277, 1963.
- [2] J.M. Lee, K.B. Lee, M.K. Lee, P.J. Oh, T.S. Park, and H.Y. Hwang, Standardization of ¹²⁵I and ²³⁸P, Applied Radiation and Isotope, Vol. 60, p. 397, 2004.
- [3] Korea Radioisotope Association, Statistics on Radiation Practices in Korea, p. 58, 2004.
- [4] J.P. Holman, Heat Transfer, 7th ed., McGraw Hill Book Co., 1992.
- [5] A. Bejan, Convection Heat Transfer, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [6] ASM International, Metals Handbook, 9th Ed., Gulf Publishing, 1998