

몬테 칼로 전산코드 MCNPX를 이용한 I-123 생산량 예측

유재준* · 김계홍* · 김병일* · 이동훈*

*동명대학교 · *한국원자력의학원

Prediction of ^{123}I production using the monte Carlo code MCNPX

Jae jun Yoo* · Gyehong Kim* · Byung il Kim* · Donghoon Lee*

*Tongmyong University · *Kiram's Radiopharmaceuticals Prouction Center, Korea Institute of Radiological & Medical Sciences, 75 Nowon-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea,139-706

E-mail : onlyone01@kirams.re.kr

요 약

갑상선암 진단 방사성의약품인 ^{123}I 생산을 목적으로 한 가스타겟챔버를 개발하고 MCNPX를 이용해 30MeV 빔에너지가 가스타겟챔버에 어떻게 들어가는지와 들어갔을 경우의 ^{124}Xe 와 핵반응은 어떻게 발생하는지를 모델링하였다. 빔에너지가 확산되어 가스타겟챔버 내경에 맞아 에너지 손실이 생긴다. 그것은 즉 손실된 에너지가 열로 바뀌므로 타겟챔버가 변형이 일어나기 않게 냉각수를 이용한다. 쿨링시스템도 타겟챔버를 효율적으로 냉각하기 위해 냉각수라인을 나선형으로 설계하였다. KIRAMS에서 보유하고 있는 사이크로트론 C30을 이용하여 30MeV 에너지에 100A 빔을 조사해 $^{124}\text{Xe}(p,2n)$, $^{124}\text{Xe}(p,n)$, $^{124}\text{Xe}(p,pn)$ 각각의 핵반응이 일어나는걸 알 수 있었고 생산량을 예측 할 수 있었다.

ABSTRACT

Gas target chamber has been developed for producing ^{123}I which is radiopharmaceuticals for diagnosis of thyroid cancer, and modeled how to occur nuclear reaction between chamber and ^{124}Xe with energy 30MeV inside the gas target chamber by using the MCNPX. The beam energy was lost as the beam spread when beam hit inside the gas target chamber. The cooling water was used not to change the gas target chamber as loss of energy transfer to the thermal energy. Spiral cooling line was designed for cooling the target chamber efficiently. By using the c30 cyclotron, $^{124}\text{Xe}(p,2n)$, $^{124}\text{Xe}(p,n)$, $^{124}\text{Xe}(p,pn)$ nuclear reactions were studied. In this study, we predict the production yield.

keyword

Radiopharmaceuticals, ^{123}I , ^{124}Xe , cyclotron, nuclear reaction

1. 서 론

I-123은 핵의학 분야에서 이용되는 가장 유명한 의료용 방사성핵종 중 하나다. 현재까지, I-123 생산을 위한 다양한 핵반응 중에서

I-124와 I-125 불순물이 존재하지 않는 가장 유리한 핵반응은 고농축 ^{124}Xe 가스 타겟에 양성자를 조사하는 방법이며 생산 ^{123}I 이 생성되는 핵반응과 붕괴 방식은 다음과 같다:

$${}^{124}_{54}\text{Xe}(p, 2n){}^{123}_{55}\text{Cs} \xrightarrow{\beta^+} {}^{123}_{54}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^+} {}^{123}_{53}\text{I}$$

$${}^{124}_{54}\text{Xe}(p, pn){}^{123}_{54}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^+} {}^{123}_{53}\text{I}$$

입자 플루언스, 입자 에너지 분포와 양성자 속, 양성자의 흡수 에너지를 모사하기 위해 몬테카를로 전산코드 MCNPX[1]를 이용하였다. 본 연구에서는 30 MeV 양성자 빔을 이용한 123I 생산수율과 양성자 빔에 의해 타겟 구성품 별로 전달된 에너지를 이전에 평가된 핵반응단면적과 가스 타겟 내의 입자 에너지 분포를 이용하여 평가하였다.

II. 본 론

${}^{124}\text{Xe}(p,2n){}^{123}\text{Cs}$ 과 ${}^{124}\text{Xe}(p,pn){}^{123}\text{Xe}$ 핵반응에 대한 여기 함수는 그림 1과 같이 TENDL(TALYS-based evaluated nuclear data library)-2009를 사용하였다[2].

MCNPX 인풋 파일에서는 그림 2와 같이 가스 타겟의 기하학적인 정보와 양성자 빔 형상을 포함한 전산모사에 필요한 정보를 모델링 하였다. 양성자 에너지 분포 함수 및 양성자 흡수 에너지를 평가하기 위하여 F4 tally(The Average Cell Flux Tally)와 F6 tally(The Energy Deposition Tally)를 이용하였다. EOB(end of bombardment)에서 방사성핵종의 방사능을 평가하기 위한 입자 에너지 분포 함수 $P(E)$ 는 F4 tally에 기록된 결과를 이용하였으며 반응단면적 $\sigma(E)$ 는 그림 1의 여기 함수를 내삽 한 값을 사용하였다. 생성된 방사성핵종의 방사능은 다음 미분방정식을 적분하여 평가할 수 있다.

$$A(t) = \int_0^{E_{\max}} P(E)\sigma(E)dE \frac{dN_p}{dt} N(1 - e^{-\lambda t})$$

여기서, $A(t)$ 는 방사성핵종의 방사능, dN_p/dt 는 조사되는 양성자 빔의 세기(number of proton-particle/cm²s), N 은 가스 타겟 ${}^{124}\text{Xe}$ 의 총 원자수, λ 는 방사성핵종 붕괴 상수이며 t 는 조사 시간이다.

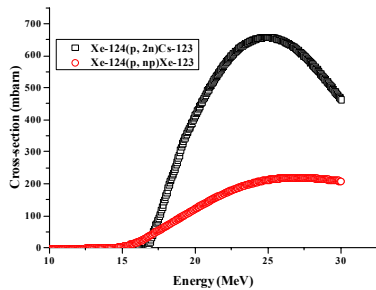


그림 1. Xe-124(p,2n)과 Xe-124(p,pn)에 대한 반응단면적.

그림 2은 MCNPX를 이용하여 획득한 원통형 ${}^{124}\text{Xe}$ 가스 타겟에서의 양성자 빔의 에너지분포 함수를 보여준다. 그림에서 보듯이 두 Havar 포일과 He 가스를 통과하는 동안 감쇠된 에너지는 아주 미미하며, ${}^{124}\text{Xe}$ 가스 타겟에서는 약 20 MeV에서 거의 30 MeV 까지 양성자 빔 에너지 영역이 넓게 분포함을 알 수 있다.

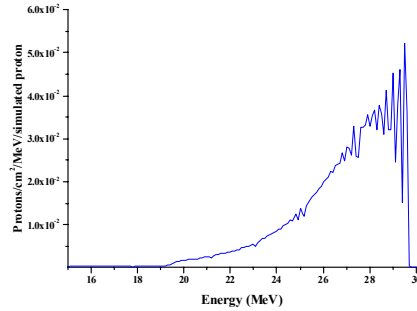


그림 2. MCNPX로 계산한 제논 가스 타겟에서의 양성자 빔의 에너지 분포 함수

Target 열해석

MCNPX로 시뮬레이션 한 결과에서 havar foil-1, havar foil-2, chamber inner well, chamber end 각각의 위치에 양성자 빔 100uA의 전류, 30MeV 에너지가 들어왔을때의 에너지 분포값을 얻어 Solidworks simulation과 FLOW simulation 를 이용하여 에너지에 따른 열해석을 한다.

표 1. 타겟 구성품 별 흡수 에너지 및 질량

Target	Absorption Energy (MeV/g)	Component Mass (g)
Havar foil-1	3.905	6.623×10 ⁻²
Havar foil-2	3.905	6.623×10 ⁻²
Chamber inner well	2.862×10 ⁻²	8.155×10 ²
Chamber end	4.3343×10 ⁻³	2.252×10 ²

표 1의 데이터를 각각 와트 값으로 환산한 결과 Havar foil-1 25W, Havar foli-2 25W, Chamber inner well 2336W, Chamber end 97W 값을 얻었다.ジオ메트리를 통해 모델링하고 Solidworks simulation으로 열원분포, 대류, 열 유속, 열량, 초기조건 등 환경을 설정하는 매개변수를 설정하고 각각의 모델 형상의 경계조건 재질을 지정해 Solver를 통해 온도분포에 대한 값을 얻어 Flow simulation 에 헬륨과 냉각수를 이용해 열 교환 시뮬레이션을 진행했다. Havar foil은

빔라인의 진공상태와 챔버안의 제논가스를 분리하기 위해 사용한다. 두께는 2.5um로 매우 얇기 때문에 두 개의 Havar foil이 받는 열 에너지(600K이상 올라간다.)는 그림 3과 같이 거의 동일하다. 그림 4에 전체 적인 온도가 낮아지는걸 볼 수 있으며, 이 양쪽에 있는 Havar foil를 쿨링하기 위해 갈라질 때 흐름이 그림상 왼쪽에 있는 Havar foil은 중심에서 왼쪽으로 헬륨이 밀집되는 현상을 볼 수가 있으나 그것은 300K의 온도 정도 밖에 되지 않아 빔 조사에 영향을 주지 않는다

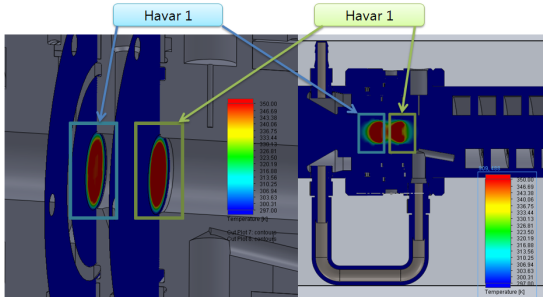


그림 3. Havar foil 1,2, 열 분포(범위 290~350K)

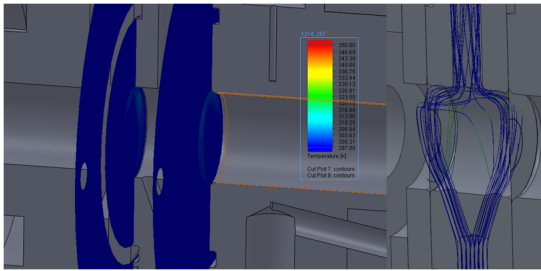


그림 4. Havar foil 1,2 헬륨 쿨링 했을 때 열 분포(범위290~350K)

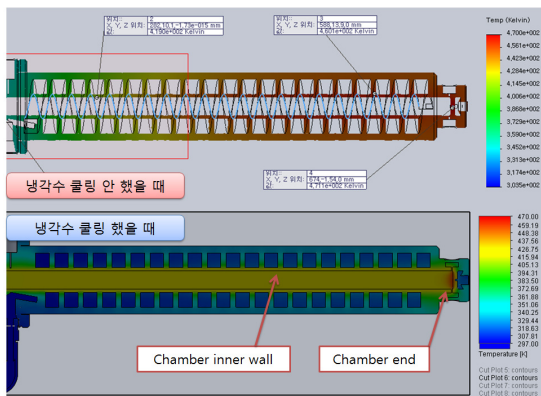


그림 5. Chamber inner well & end (냉각수 쿨링 했을 때 와 안했을 때, 범위 290~470K)

가스타겟챔버 내부와 챔버 끝단으로 두 부분으로 나뉜 것은 양성자 빔이 챔버 안으로 들어왔을 때 내부 벽과 끝단이 에너지가 받는 양이 많이 차이

가 나기 때문이다. 이유는 양성자 빔이 타겟 안으로 들어올 때의 크기는 지름 10mm보다 작은 크기로 들어온다. 그것은 빔 에너지를 최대한 ^{124}Xe 와 반응시키기 위함이며, 빔이 진행할 때 퍼지는 현상이 있기 때문에 이다. 그림 5와 같이 냉각수를 이용하지 않을 경우에는 Chamber inner shell 평균은 425K, 끝단의 Chamber end 460K 정도이다. 면적이나 밀도를 적용 시켰을 때 Chamber end는 많은 에너지를 받는 것을 알 수가 있다. 냉각수를 이용한 열 교환 하기위해 나선형으로 설계하였다. 그것은 면적과 냉각수가 순환할 때 와류 현상을 최소화하기 위함이다. 그 결과 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

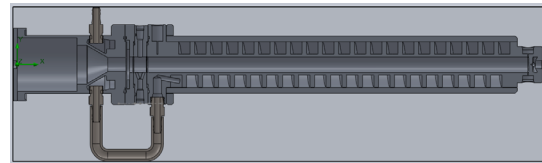


그림 6. 가스타겟 3D 모델링 형상

III. 결 론

I-123 생산용 가스타겟챔버 시뮬레이션 결과 $^{124}\text{Xe}(p,2n)$ 반응이 가장 많이 발생하며, 29MeV에 많은 반응이 이어난다

$$^{124}_{54}\text{Xe}(p,2n)^{123}_{55}\text{Cs} : 141.3m\text{Ci/uAh},$$

$$^{124}_{54}\text{Xe}(p,pn)^{123}_{54}\text{Xe} : 6.2m\text{Ci/uAh}$$

양성자 에너지는 챔버 내부 모든 벽에 맞고 있었으며, 챔버의 끝단에는 많은 에너지가 충돌한다. 빔은 충돌할 때 가장 많은 열을 발생하기 때문에 챔버 끝단에 냉각수를 이용해 열 교환이 되도록 설계 하였다. 또한 챔버의 전체 열 교환이 잘 일어나도록 최대한은 면적과 냉각수의 와류 현상을 줄이기 위해 나선형 열 교환 방법으로 설계 되었다. 100uA가 아닌 더 높은 전류 값으로 적은 시간 안에 많은 약을 생산할 수 있다고 본다.

참고문헌

- [1] Waters L S, Hendricks J and McKinney G 2005 MCNPX version 2.5.0 (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos)
- [2] A.J. Konigng and D. Rochman, TALYS-based evaluated nuclear data library (TENDL-2009, Available from: <<http://www.talys.eu/tendl-2009/>>.