

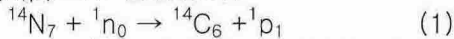
질화 알루미늄을 이용한 Carbon-14 생성량 평가

이준식, 최현순, 박상준, 김헌일, 한현수  
 한국원자력연구소  
 jlee15@kaeri.re.kr

1. 서론

이 연구는 '하나로'를 이용한 C-14 생산에 앞서 질소화합물 표적 (AlN, aluminum nitride)으로부터 C-14의 생산량을 예측하고자 수행되었다.

Carbon-14(C-14)는 낮은 beta 에너지 (156.478 keV)를 방출하는 방사핵종으로 생물학과 약리학 분야 등에서 추적자 (tracer)로 유기표지화합물 (Labled Compounds)의 합성에 이용되고 있다[1]. C-14는 원자로에서 아래와 같은 핵반응(n,p)으로 생성된다.



이 반응은  $^{14}\text{N}_7$ 의 반응 단면적이 작고 생성핵인 C-14의 반감기가 5730년으로 매우 길어 C-14의 생성에 장기간 조사가 필요하다.

따라서 이 연구에서는 C-14의 생산량을 MCNP (Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code System) [2] 계산을 통해 예측하고 최적의 생산 조건을 도출코자 하였다.

2. 계산 조건

현재 고려중인 C-14 생산 표적물질은 Aluminum nitride (AlN)이며 중성자 조사 후 고온에서 산화시켜 회수하는 건식방법 (Dry method)[3]을 이용할 계획에 있다.

식 1의 반응은 그림 1.에서 보는 바와 같이 일반적인 (n, p)반응과 달리 반응의 문턱에너지 (Threshold)가 없고 전 에너지 구간에서 중성자와 반응한다. 이 반응의 Maxwell 평균 단면적과 공명 적분이 각각 1.827 barns, 그리고 고속 핵분열 평균 단면적이 0.820 barns 이다[4].

AlN의 물리적 특성은 순도 99.9%, 밀도 2.0 g/cm<sup>3</sup>인 Pellet 형태이고, 조성비는 Al(65.8%), N(34.2%, natural N-14: 99.632%, N-15: 0.368%)이다.

C-14 생산을 위하여 CT, IR, OR 및 IP 등 네 곳의 조사위치에서 여유가 있는 공간을 순환하며 최고 10년까지의 장기 조사를 계획하고 있다. AlN 표적은 장기간 조사될 예정이므로 다른 표적과 함께 같은 조사공에서 조사될 확률이 높지만 최적의 조사조건 도출을 위하여 조사공 전체에 AlN Pellet 표적을 충전한 것으로 가정하여 계산 model을 설정하였다.

Pellet을 담은 capsule은 현재 다른 동위원소 생산에 사용되고 있는 이중 알루미늄 capsule을

이용하는 것으로 가정하였다. 이 capsule의 내부 용기에 지름 25 mm, 높이 23 mm의 원통형 AlN pellet을 3개씩 넣은 것으로 가정하였다. 따라서 각 캡슐 안에는 약 70그램의 AlN이 충전된다. 캡슐을 IR-rig 및 OR-rig에 각각 4개씩 넣은 후 IR1과 OR3 그리고 IP15에 모두 장전된 상태로 아래의 그림 2와 같이 계산 model을 설정하였다.

한편 제어봉의 높이는 350 mm, 그리고 rig를 장전하지 않은 반사체 영역의 모든 조사공은 시통으로 plugging되어있는 것으로 가정하였다.

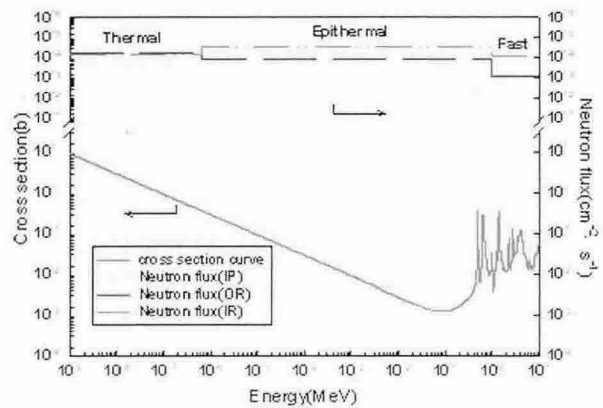


그림 1. N-14(n, p)C-14 반응 단면적[5]과 '하나로' 중성자 속

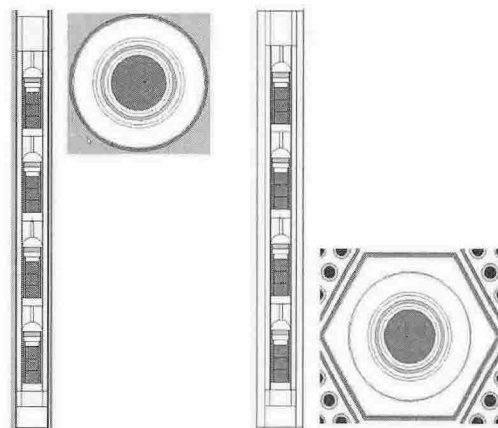


그림 2. 표적의 OR-rig(좌), IR-rig(우) 장전 model

3. 계산 결과

모든 계산 결과는 원자로 출력 30 MW에서 현 계산 노심의 유효증배계수와 연소 효과(20%)를 고려한 것이다. 또한 발열량은 중성자 및 감마에

의한 것을 합한 것으로 지발 감마 효과를 즉발 감마 효과의 50%로 가정하였다.

AIN pellet을 IP15, OR3 및 IR1에서 각각 조사할 경우에 예상되는 각 조사공의 평균 N-14(n, p)C-14 반응을 (Reaction Yield)은 그림 3. 과 같다.

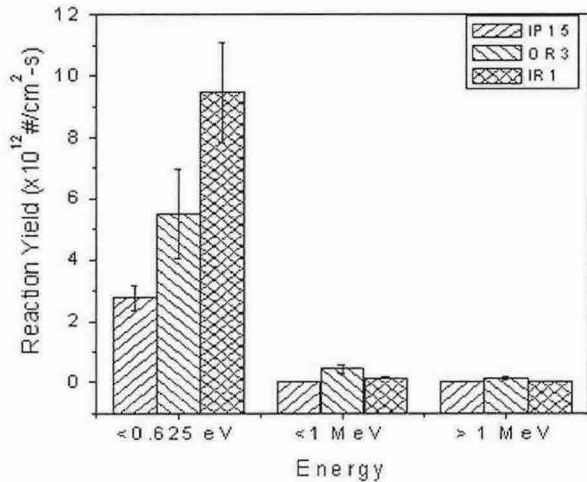


그림 3. IP15, OR3 및 IR1 조사공에서의 N-14(n, p)C-14 반응율

반응율은 단위 무게당 (면적당) 총 예상 반응율로서 총 포화 방사능에 해당한다. Rig 전체에 AIN pellet을 담은 동일한 capsule을 장착하였기 때문에 실제 조사 과정에서 축 방향으로 주변 capsule에 이리듐 (Ir) 표적 등과 같은 중성자 흡수 효과가 큰 표적들과 인접하여 장착될 경우에는 반응율이 이보다 훨씬 작아질 수 있을 것으로 예상된다.

또한 에너지 대비 반응단면적과 하나로의 중성자속 분포도를 이용하여 예측한 바와 같이 모든 조사공에서 반응은 거의 대부분 열중성자에 의해 발생하는 것으로 나타났다.

그림 4.는 동일한 조사공에서 연속 조사되었을 때를 가정하여 조사 시간에 따른 C-14 방사능을 AIN 단위 무게당의 비방사능으로 나타낸 것이다.

그림에서 평균 및 최대값은 각 rig에 장착된 12개의 AIN pellet에 대한 평균 비방사능과 최대 비방사능의 변화를 나타낸 것이다.

AIN pellet에서의 발열량은 capsule의 위치에 따라 IP5 조사공에서는 0.26~0.38 W/g, OR3 조사공에서는 0.87~2.03 W/g, IR1 조사공에서는 2.73~5.86 W/g로 나타났다. 따라서 '하나로'에서 생산 중인 다른 동위원소의 표적에서 중성자 및 감마로 인하여 발생하는 열과 큰 차이를 보이지 않아 열로 인한 캡슐의 손상은 가능성이 희박할 것으로 보인다. 단, 장기간 조사에 따른 캡슐의 이상 여부는 더 검토가 되어야 할 것으로 생각된다.

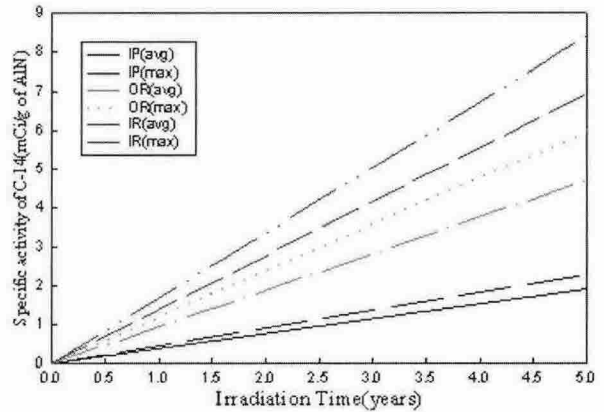


그림 4. 각 조사공에서의 C-14 비방사능

#### 4. 고찰

C-14가 생성되는 N-14(n, p)C-14 반응은 일반적인 (n, p)반응에서와 같은 문턱에너지가 존재하지 않고 전체 에너지 영역에 걸쳐 1/v 특성을 보인다. 계산 결과에 따르면, 3년 연속 조사할 경우 AIN 1g 당 IR1에서는 평균 47 mCi/g, 최대 57 mCi/g, OR3 조사공에서는 평균 32 mCi/g, 최대 39 mCi/g, IP15 조사공에서는 평균 14 mCi/g, 최대 16 mCi/g의 C-14가 생성될 것으로 예상된다.

이 계산 결과에 의하면, C-14의 생성량이 많지 않음으로 실제 대량 생산을 위해서는 장기간에 걸친 중성자 조사가 필요하다. 따라서 사용치 않는 조사공 위치의 활용이 절대적으로 필요하다. 장기간 조사에 따른 조사캡슐의 건전성 평가가 선행되어야 하며 또한 안전성을 고려하여 외장캡슐의 교체와 같은 방법도 강구되어야 할 것으로 생각된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Vernon F. Raaen, Gus A. Ropp, Helen P. Raaen, Carbon-14, McGraw-Hill series in advanced chemistry
- [2] Table of simple integral neutron cross section data from JEF-2.2, ENDF/B-1/I, JENDL-3.2, BROND-2 and CENDL-2, JEF Report 14 AEN/NEA, France, 1994
- [3] T. Moriya, S. Motoishi, JAERI-M-92-028, 367-374
- [4] J. F. Briesmeister(Editor), "MCNP-A general Monte Carlo N-Particle Transport Code", LA-12625-M, Los Alamos National Lab, 1993
- [5] P. Young, G. Hale, M. Chadwick, 7-N-14 LANL EVAL, Pendfb6/N-14:103, 1990