2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

D-D 중성자 발생장치 중성자 수율 계산

Calculation of Neutron Yield for a D-D Neutron Generator

김인중, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

D-D 중성자 발생장치에서의 Ti 표적에 대한 중성자 수율 계산을 수행하였다. Ti 표적 내 중수소의 깊이 분포에 의한 영향과 중수소 이온빔의 단일 원자빔 분율에 의한 영향을 고찰하였다.

Abstract

Calculation of neutron yield for Ti target of a D-D neutron generator is performed. The effects of deuterium depth profile in the Ti target and the fraction of monatomic ions in deuteron ion beam are investigated.

1. 서 론

본 연구진에서는 D-D 반응을 이용한 중성자 발생장치 개발을 수행하고 있다[1,2]. 장치의 목표 사양은 이온빔 가속전압 120 kV, 이온빔 전류 50 mA, 중성자 수율 10^8 n/s 이다. 중성자 발생장치는 D^+ 발생을 위한 플라즈마 이온원, 이온빔 수송 계통, 표적 및 계측 계통, 방사선 차폐계통으로 구성된다. 현재 인출전압 30 kV, 인출전류 10 mA의 helicon plasma 이온원이 완성되었고, 이온빔 수송 계통의 일부와 표적 및 계측 계통이 완성되었다.

중성자 발생장치에서의 중성자 수율은 중수소 이온빔의 에너지와 전류가 결정된 후에는 표적내 표적핵 - 중수소 또는 삼중수소의 양과 깊이 분포에 의해 결정된다. 그러나 중성자 발생장치 표적 내에서의 표적핵의 양 및 깊이 분포는 여러 그룹[3,4,5]에 의해 측정이 수행되었음에도 불구하고 보고된 내용간의 차이가 커서 예측이 어렵다. 또한, 중수소 이온빔 전류가 수 mA 이상이고 이온빔 면적이 수 cm^2 이상인 고수율 중성자 발생을 목적으로 하는 중성자 발생장치의 경우에는 neutron reaction analysis[3,4]와 같은 방법을 이용한 표적 내 표적핵 분포의 실시간 측정이 어렵다. 따라서 중성자 발생장치의 개발단계에서 측정한 중성자 발생률로부터 중성자 발생 표적에서의 표적핵의 분포 및 함량을 예상하고 표적의 냉각 개선이나 표적 물질 대체 등을 결정하기 위해서

는 중성자 발생 실험에 앞서 다양한 표적 조건에 대한 중성자 수율 계산을 수행하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 표적 내 다양한 표적핵 분포에 대한 중성자 수율 계산 방법론을 확립하고, 중수소 이온빔중 단일 원자빔의 분율에 의한 영향을 함께 고려하여 계산을 수행하고 영향을 평가하였다.

2. 중성자 수율 계산식

D^+ 이온빔의 에너지가 E_0, 전체 이온빔 전류가 I_0인 중수소 이온빔에 대한 중성자 수율 Y는,

$$Y = \frac{1}{eN_A}\sum_{i=1}\int_0^{R_i} I_i(x)\,\sigma_i(x)\,n(x)\,dx \tag{1}$$

이다. 여기서, e는 전자의 전하량, i는 D^+, D_2^+, D_3^+ 이온빔에 대한 색인이고, R_i는 i-th 이온빔의 range, $I_i(x)$는 깊이 x에서 i-th 이온빔의 전류, N_A는 Avogadro 수, $\sigma_i(x)$는 깊이 x에서 i-th 이온빔의 에너지 $E_i(x)$에 해당하는 중성자 발생 반응 단면적, n(x)는 깊이 x에서 표적핵의 수밀도이다. 수소 이온빔은 range이내 구간에서 이온빔의 flux가 거의 일정하므로 (1)식의 적분구간에서 $I_i(x)$는 상수로 볼 수 있다. 따라서 (1)식은

$$Y = \frac{I_0}{eN_A}\sum_{i=1} w_i \int_0^{R_i} \sigma_i(x)\,n(x)\,dx \tag{2}$$

과 같이 간략히 나타낼 수 있다. 여기서, w_i는 전체 이온빔 전류에 대한 i-th 이온빔의 분율이다.

3. 표적 내 중수소 이온빔의 에너지 감쇠

(2)식의 반응 단면적 $\sigma_i(x)$를 결정하기 위해서는 표적 내 이온빔의 에너지 감쇠로부터 깊이 x에서 i-th 이온빔의 에너지 $E_i(x)$를 계산하여야 한다. $E_i(x)$는,

$$E_i(x) = E_0/i - \int_0^{x} (dE/dx)dx' \tag{3}$$

로 주어진다[6]. 여기에서 E_0는 D^+ 이온빔의 초기 입사에너지이고, (dE/dx)는 에너지 E의 중수소 이온빔에 대한 표적의 저지능이다. TiD_x의 저지능은, Bragg's rule[6]을 이용하여 Ti과 중수소 가스에서의 중수소 이온빔 저지능[7]으로부터 구하였다. 저지능 계산에서 TiD_x의 밀도는 TiH_x의 밀도가 수소의 용해도에 대해 선형적인 경우를 가정하고 추정한 TiH_x의 값으로 가정하였다. 균일한 TiD_x 표적에서 120 kV로 가속된 이온빔의 표적 깊이에 따른 에너지와 이에 해당하는 중성자 발

생 단면적은 각각 그림 1, 2와 같다.

4. 중성자 수율 계산

(2), (3)식으로부터 표적의 깊이에 따른 중성자 수율 분포와 중성자 총 수율을 계산하였다. 중수소 이온빔의 분자 이온은 그림 2로부터 D_3^+ 이온빔의 기여는 무시하고, D^+와 D_2^+ 이온빔만으로 구성된 경우를 가정하였다. 표적 내 중수소의 깊이 분포는 그림 3과 같은 경우를 가정하였다. 그림에서 profile 1은 pre-loaded titanium deuteride 표적 등을 새로 장착한 경우에 해당하고, profile 2는 D.F. Cowgill[3]의 실험 결과로 보고된 중수소의 깊이 분포를 단순화한 것이고, profile 3은 C.M. Bartle et al.[8]의 제안을 따랐다. 120 keV, 50 mA D^+ 이온빔에 대해 x_{max} = 2.0인 표적에서의 중수소 수율의 깊이 분포는 그림 4와 같다. 그림으로부터 표적 내 중수소의 분포가 profile 1인 경우 표적의 표면에서 0.2 μm 사이 영역에서 전체 중성자의 60%가 발생한다. 이것은 표적의 표면 쪽에서 이온빔의 에너지가 높기 때문에 높은 중성자 발생 반응 단면적을 갖기 때문이다. 따라서 표적 표면에서의 중수소 밀도가 낮은 profile 2, profile 3의 총 중성자 발생률은 profile 1의 71%, 58%로 크게 감소하였다. 표적 내 중수소의 깊이 분포와 중수소 이온빔의 단일 원자빔 분율에 따른 총 중성자 수율은 표 1과 같다.

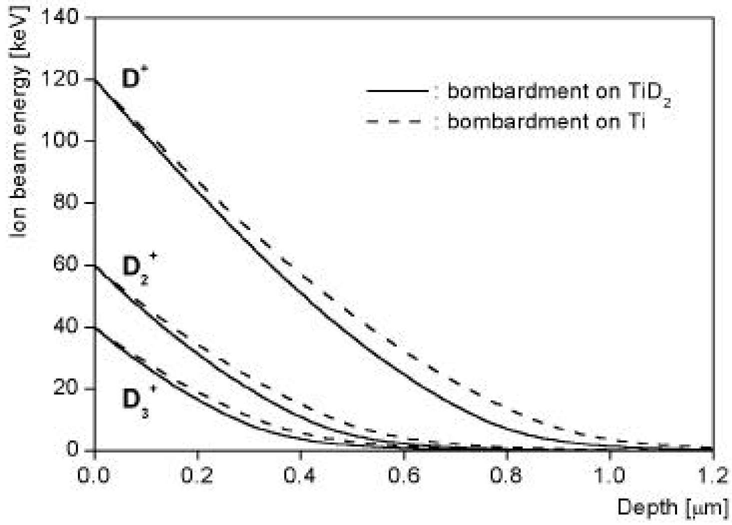
5. 결 론

중성자 발생장치의 Ti 표적에서 다양한 중수소 깊이분포와 중성자 이온빔의 단일 원자빔 분율에 따른 중성자 수율 계산 방법론을 확립하고, 몇몇 대표적인 경우에 대해 계산을 수행하였다. 본 계산 결과와 방법론은 중성자 발생장치의 개발 단계에서 중성자 발생 및 측정을 수행하는 단계에서 이온빔과 표적 특성을 간접적으로 예측함으로써 중성자 수율 증대 방안 모색에 기여할 수 있다.

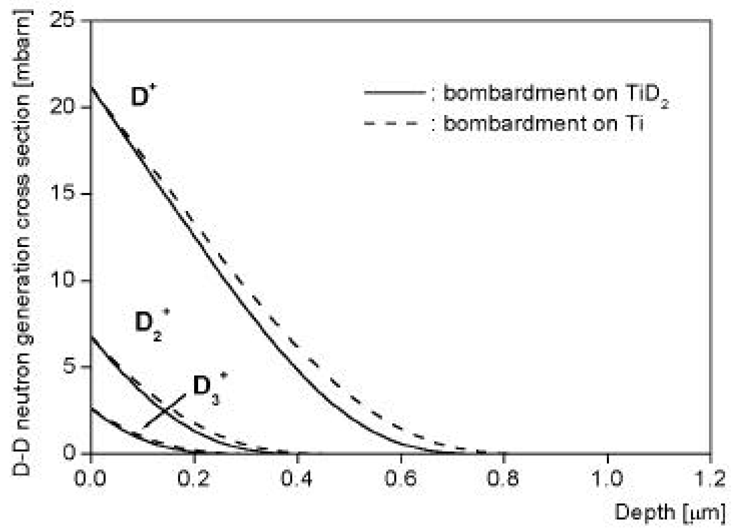
참고문헌

1. 김인중, 최희동, "D-D 중성자 발생장치 개념설계", 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
2. 김인중, 김선호, 최희동, "D-D 중성자 발생장치 시작품 설계 및 차폐계산", 2003 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
3. D.F. Cowgill, Nucl. Instr. and Meth. 145 (1977) 507.
4. H. Kudo, Y. Kosaku, Y. Ando, M. Hiraga and T. Sekine, J. Nucl. Mater. 258-263 (1988) 622.
5. N. Kawachi, T. Katabuchi, M. Yamaguchi and Y. Tagishi, Nucl. Instr. and Meth. B 190 (2002) 195.

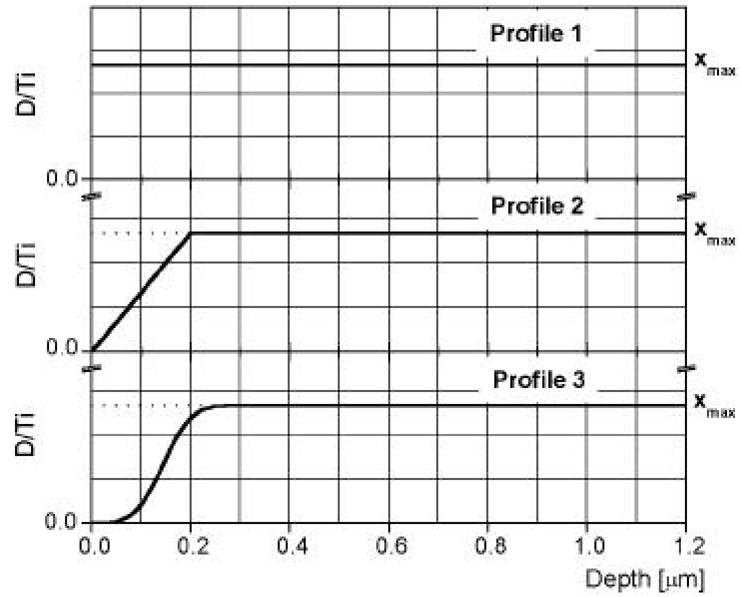
6. W.K Chu, J.W. Mayer and M.A. Nicolet, "Backscattering Spectrometry", 32 45, Academic Press, 1978.
7. "http://www.srim.org", The stopping and range of ions in matter(Srim-2003), J.F. Ziegler, 1201 Dixona Drive, Edgewater, MD, 21037, USA.
8. C.M. Bartle, N.G. Chapman and P.B. Johnson, Nucl. Instr. and Meth. 95 (1971) 221.



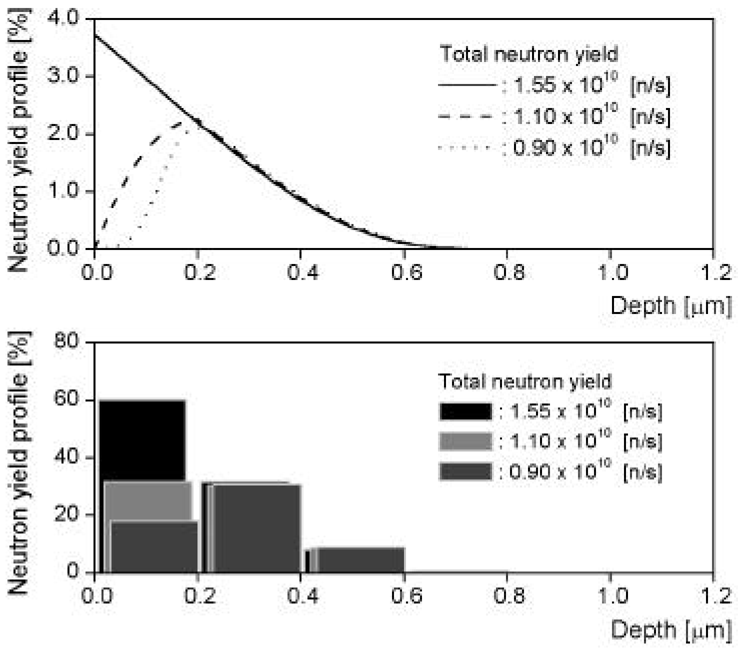
D_3^+ ion beam in uniform TiD_x target.



accelerated D^+, D_2^+, D_3^+ ion beam in uniform TiD_x target.



generator target.



50 mA D^+ ion beam according to various deuterium depth profile models.

Table 1. Calculated neutron yield with various condition - target deuterium depth profile, monatomic fraction in deuteron beam.

x_{max}	D^+ ion beam fraction [%]	Profile 1 [n/sec] (%)	Profile 2 [n/sec] (%)	Profile 3 [n/sec] (%)
2.0	100	1.55×10^{10} (100.0)	1.10×10^{10} (70.9)	8.98×10^{9} (58.0)
	50	8.91×10^{9} (57.6)	6.07×10^{9} (39.2)	4.86×10^{9} (31.4)
	30	6.29×10^{9} (40.6)	4.12×10^{9} (26.6)	3.21×10^{9} (20.7)
1.0	100	9.15×10^{9} (59.0)	6.40×10^{9} (41.3)	5.26×10^{9} (33.9)
	50	5.28×10^{9} (34.1)	3.54×10^{9} (22.8)	2.84×10^{9} (18.3)
	30	3.73×10^{9} (24.1)	2.40×10^{9} (15.5)	1.88×10^{9} (12.1)
0.8	100	7.60×10^{9} (49.0)	5.30×10^{9} (34.2)	4.36×10^{9} (28.1)
	50	4.39×10^{9} (28.3)	2.93×10^{9} (18.9)	2.36×10^{9} (15.2)
	30	3.10×10^{9} (20.0)	1.98×10^{9} (12.8)	1.55×10^{9} (10.0)
0.2	100	2.15×10^{9} (13.9)	1.48×10^{9} (9.5)	1.22×10^{9} (7.9)
	50	1.24×10^{9} (8.0)	0.82×10^{9} (5.3)	0.66×10^{9} (4.3)
	30	0.88×10^{9} (5.7)	0.55×10^{9} (3.5)	0.44×10^{9} (2.8)