2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Li 표적을 이용한 가속기 BNCT용 중성자 선원의 측정 및 계산 결과 비교

Measurement and MCNPX Calculation Results of Neutron Spectrum Produced from Li Target for Accelerator-Based BNCT

이 덕 재, 한 치 영, 김 순 영*, 김 종 경
한양대학교
*방사선안전신기술연구센터
서울 성동구 행당동 17

채 종 서, 양 태 건
원자력의학원
서울 노원구 공릉동 215-4

김 용 균, 하 장 호
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요 약

Li 표적을 이용하여 가속기 BNCT용 중성자 선원의 스펙트럼을 측정하고 MCNPX를 이용하여 계산한 결과와 비교하였다. 실험을 위하여 원자력의학원의 MC50 사이클로트론을 사용하였으며 양성자를 Li 표적에 입사시켜 생성된 중성자를 He-3 검출기를 이용하여 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 또한 MCNPX 코드를 이용하여 실제 실험 환경과 동일하게 묘사하고, He-3 검출기에서의 중성자 에너지 스펙트럼을 계산하여 실험결과와 비교/평가하였다. 평가 결과, 중성자 계수값(count)에 대한 실험과 계산의 결과는 양성자빔 전류의 계측에 오차가 있어 다소 차이를 보이고 있으나 중성자 스펙트럼에 대해서는 매우 유사한 것으로 나타났다. 따라서 열외중성자빔 집합체 설계 시 MCNPX 코드를 이용하여 $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ 반응 적용 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

Energy spectrum of neutron source produced from Li target for Accelerator-based BNCT is measured and the result is compared to MCNPX calculation result. The neutron source measurement is performed with MC50 cyclotron at KIRAMS and counted by He-3 counter. In order to evaluate the results, the whole experimental environments were simulated by MCNPX code. Because of the intrinsic error in proton beam current measurement, neutron counts of measurement and MCNPX calculation are somewhat different, however, the results show the trends of neutron spectra are very similar. Therefore, it is expected that the ^{7}Li(p,n)^{7}Be reaction calculated by MCNPX code can be applied to the accelerator-based epithermal neutron beam design as a neutron source.

1. 서 론

가속기를 이용한 붕소중성자포획요법(BNCT, Boron Neutron Capture Therapy)에서 중성자빔 집합체의 설계 목표는 가속기 표적으로부터 생성되는 중성자를 BNCT에 적합한 열외중성자(4 eV ≤ E_n ≤ 40 keV) [1,2]로 감속시킴과 동시에 생성된 중성자의 이용을 극대화하는 것이다. 따라서 가속기 표적으로부터 생성되는 중성자 선원의 특성을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다.

현재 전 세계적으로 양성자 가속기로부터 (p,n)반응을 이용하여 BNCT용 중성자 선원을 생산하는 대표적인 표적으로서 Li과 Be이 있다[3,4]. 표 1[5]에서 보는 바와 같이 Be은 표적물질로서 Li보다 열적, 기계적 특성이 우수하다. 그러나 Li 표적만큼의 중성자 수율(yield rate)을 얻기 위해서는 4 MeV 이상의 높은 에너지를 갖는 양성자가 필요하며 이를 통해 생성되는 중성자의 에너지도 상대적으로 높다. 또한 저 에너지의 양성자가 Be 표적에 입사하는 경우 상당한 양의 불필요한 높은 에너지의 감마가 생성되는 단점이 있다. Li을 표적으로 이용하는 경우 Be 표적에 비하여 용융점과 열전도도의 낮음이 단점으로 지적되고 있지만, ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응에서 입사하는 양성자가 표적 물질과 반응하여 생성되는 중성자의 에너지가 비교적 낮아서 감속재의 양이 적게 쓰이며 생산되는 중성자의 양은 많아서 BNCT에 필요로 하는 열외중성자를 얻기에 용이하다는 장점이 있다. 이는 약 1.88 MeV의 문턱에너지(threshold energy) 근처에서 매우 큰 반응 단면적을 가지며 따라서 다른 핵반응에 비하여 상대적으로 낮은 에너지의 중성자 대량 생산에 유리하기 때문이다.

표 1에서 보는 바와 같이 0°에서의 평균 중성자 에너지를 비교하면 ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응의 중성자 에너지는 0.55 MeV이고 ^{9}Be(p,n)^{10}Be과 ^{9}Be(d,n)^{10}C 의 반응에서 중성자 에너지는 각각 1.06 MeV, 2.01 MeV로서 Li이 낮은 것을 알 수 있으며, 중성자 에너지의 최대값도 Li이 더 낮은 것을 알 수 있다. 그러므로 중성자빔의 선질과 세기를 고려하였을 때 가속기를 이용한 BNCT의 표적 물질로 Li 사용하는 ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응을 이용하는 것이 효과적이며, 많은 연구자들은 2.25 MeV에서의 580 mb의 넓은 공명(broad resonance)을 이용하고자 2.5 MeV 양성자를 Li 표적에 충돌시켜 이용하는 것에 관심을 가져왔다[5].

BNCT용 열외중성자빔 집합체는 몬테칼로 코드를 이용하여 모델링하며, 이 때 중성자 선원의 모사는 실험에 근거한 이론식[6,7]에 의해 분석(각도, 에너지)한 ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응의 중성자 스펙트럼을 이용하

거나 MCNPX 코드에서 하전입자를 수송하는 방법을 이용할 수 있다. 그러나 이론식에 의해 생산된 중성자 선원은 ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응에서 생성되는 감마선의 모사를 포함하고 있지 않으며, MCNPX[8] 코드는 Li에 대한 양성자의 평가핵자료가 제공되고 있지 않으므로 코드의 이론적 계산식에 의해서 제공되는 핵자료를 이용하여 하전입자를 수송해야한다. 또한 MCNPX 코드의 이론적 계산식의 경우 고 에너지의 양성자 수송 계산에는 그 신뢰성이 있으나 저 에너지 양성자 수송 계산에서의 신뢰성에 대한 논란이 있다. 따라서 두 가지 방법을 모두 사용하여 상호 보완할 수 있는 방안이 제시되고 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 MCNPX 코드를 이용하여 ^{7}Li(p,n)^{7}Be 반응을 계산하였으며 이를 실험 결과와 비교/분석하여 열외중성자빔 집합체 설계 시작 단계부터 MCNPX 코드 적용의 가능성을 연구하였다.

2. 중성자 선원 측정 실험

2.1 표적 장치

실험에서는 직경 30 mm, 두께 100 μm의 Li 표적을 사용하였다. 표적의 두께는 이론적 계산에 의해 결정된 크기로서, 이는 2.5 MeV의 양성자빔이 Li 표적에서 중성자를 생산하기에 충분히 두꺼운(thick) 값이다. Li 표적은 그림 1과 같은 설계를 바탕으로 그림 2와 같이 제작된 표적장치의 내부에 위치하게 된다. Al으로 제작된 표적장치는 표적의 직경 15 mm ~ 30 mm 사이의 면에서 냉각이 이루어지도록 하였으며, 냉각수가 표적의 앞 부분을 통해 환형으로 유동하면서 간접적으로 열을 제거하는 구조로 되어 있기 때문에 냉각수에 의해 중성자가 교란될 확률이 적다. 표적장치의 최대 냉각수 유량은 0.117 kg/sec 이다.

2.2 실험 장치 및 조건

일반적으로 중성자 에너지 분포 측정에는 TOF (Time Of Flight) 방법이 이용되지만 원자력의학원(KIRAMS, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences)의 MC50 사이클로트론의 경우 RF 주기가 매우 짧아(20 MHz 이상) 열외중성자 에너지 영역 이하의 중성자 측정에 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 He-3 검출기[9]를 이용하여 중성자 스펙트럼을 측정하였다. He-3 검출기에서 중성자의 반응은 다음과 같다.

$$n + {}^{3}He \rightarrow p + T + 765\ keV \qquad (1)$$

He-3 검출기는 높은 에너지 영역에 대해서는 낮은 측정 효율을 가지고 있어 표적에서 발생하는 높은 에너지 영역 대(수 MeV 이상)의 중성자 스펙트럼을 얻기는 힘들다. 그러나 2.5 MeV의 양성자빔에서 예상되는 중성자 선원의 에너지는 1 MeV 이하이므로 효과적으로 중성자 스펙트럼을 얻을 수 있다.

Li 표적에서 발생되는 중성자 선원을 측정하기 위하여 R&S (Reuter-Stokes Inc.)사의 He-3 검출기를 사용하였다. 검출기는 그림 3에서 보는 바와 같이 활성영역 길이(sensitive length)는 10 인치이고, 직경은 1 인치이다. 또한 He-3 검출기는 스테인리스 강으로 되어있고 작동전압은 1200 V이며, 검출기 내의

He-3의 압력은 4 atm이다.

표적장치의 측정시스템 배치는 그림 4에서와 같다. 입사 양성자빔은 KIRAMS의 MC50 사이클로트론에서 가속된 양성자빔을 이용하였다. KIRAMS의 MC50 사이클로트론의 경우 인출할 수 있는 양성자빔의 최저 에너지가 18 MeV이므로 직접 Li 표적에 2.5 MeV 정도의 낮은 양성자를 입사시키기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 양성자빔을 다른 감속재(degrader)에 먼저 통과시켜 에너지를 감속시킨 후 Li 표적에 도달하도록 하였다. 이 경우 표적 앞의 감속재와 양성자빔의 상호작용으로 Li 표적에 입사되는 양성자빔 에너지의 분산이 발생하게 된다. 이 때 감속재의 두께나 에너지 분산 등과 관련된 정보는 SRIM(The Stopping and Range of Ions in Matter)[10]같은 하전입자 수송 코드를 활용해서 평가하였다.

가속기에서 20 MeV의 양성자빔을 인출하여 먼저 Al에 입사시켜 2.5 MeV 대의 에너지로 감속한 후 Li 표적에 입사하도록 하였다. 실험에 사용된 양성자빔의 전류(current)는 약 1 nA 정도로 측정되었으나, 양성자빔 전류가 5 nA 이하인 경우에는 계측에 다소 오차가 있다. 또한 측정시간은 1200 초였다. 입사 양성자빔의 감속재로서 사용된 Al의 두께는 SRIM 코드를 이용하여 계산하였으며 그 결과는 그림 5와 표 2에서와 같다. 표 2에서 보는 바와 같이 Al의 두께가 약 2.05 mm일 때 Al을 통과한 양성자의 평균 에너지는 약 2.68 MeV 임을 알 수 있다.

또한 Li 표적에서 생산되는 중성자에 의하여 발생할 수 있는 He-3 검출기의 손상을 방지하기 위하여 MC50 사이클로트론의 양성자빔 전류의 크기를 최대한 작게 하였으며 표적장치와 계측기 사이에 두께 5 cm의 Pb 차폐체를 설치하였다.

2.3 중성자 선원 측정 실험 결과

중성자 선원의 측정 실험은 Al 감속재와 Li 표적이 함께 있는 경우와 Li 표적이 없는 경우에 대해서 수행되었으며, He-3 검출기에서 측정된 결과는 그림 6에서 보는 바와 같다. 그림에서 가장 아래 채널(channel)의 피크(peak)는 감마선이나 측정 장비의 노이즈(noise)에 해당하는 신호로서 검출기 내에 전달된 에너지가 없을 때의 신호이고, 채널 490 영역의 피크는 열중성자가 He-3 검출기 내에 들어왔을 때 ^{3}He(n,p)T 반응에 의해 검출기에 전달된 에너지를 나타낸다. ^{3}He(n,p)T 반응의 Q 값이 765 keV이므로 열중성자는 He-3 검출기에 765 keV의 에너지를 전달하게 되며 이 에너지 값과 두 피크 사이의 채널 차를 통하여 채널에 대응하는 중성자의 에너지를 계산하였다. 따라서 두 가지 경우에 대한 측정결과와 위와 같은 He-3 검출기의 특성 함수를 이용하여 Li 표적에서 발생되는 중성자의 에너지 스펙트럼을 그림 7과 같이 구하였다.

3. 중성자 선원 계산 및 측정 결과 비교

3.1 MCNPX 코드를 이용한 표적장치 및 검출기 모델링

표적장치의 사양에 근거하여 그림 8과 같이 동일하게 표적장치를 모델링하였다. 또한 그림 9에서

보는 바와 같이 중성자 선원 측정 실험환경과 동일한 조건으로 MCNPX 코드를 이용하여 He-3 검출기를 포함하는 모든 실험 환경을 모사하였으며 He-3 검출기에서 나타내는 펄스(pulse)의 에너지 분포를 제공하는 F8 카드를 이용하여 중성자의 에너지 스펙트럼을 계측하였다.

3.2 계산 결과 비교

MCNPX로 계산한 He-3 검출기에서 중성자 계수(count) 및 스펙트럼을 측정치와 비교하여 그림 10 및 표 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 중성자 계수값에 대한 두 결과는 다소 차이를 보이고 있으나 중성자 스펙트럼에 대해서는 두 결과가 매우 유사한 것으로 나타났다. 계수값의 차이는 검출기의 효율, KIRAMS의 MC50 사이클로트론에서 인출하는 양성자빔의 전류가 매우 낮음으로 인한 양성자빔 전류 계측의 오차 등을 포함하여 몇 가지 원인이 있을 수 있다. 그러나 중성자 스펙트럼 형태는 계수값과 독립적인 관계이므로 이러한 원인을 적절히 보상한다면 두 결과는 더욱 유사하게 될 것으로 기대된다.

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 Li 표적을 이용하여 가속기 이용 BNCT용 중성자 선원의 측정 및 계산 결과를 비교하였다. 이는 열외중성자빔의 설계에 있어 중성자 선원 모사를 MCNPX 코드의 직접 적용의 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 실험용 중성자 선원의 측정 실험을 수행하였고, He-3 검출기를 포함한 모든 실험 환경을 MCNPX 코드를 이용하여 모사하여 그 결과를 비교/평가하였다. 평가 결과, 중성자 계수값에 대한 두 결과는 다소 차이를 보이고 있으나 중성자 스펙트럼에 대해서는 두 결과가 매우 유사한 것으로 나타났다. 따라서 MCNPX 코드를 이용하여 열외중성자빔 집합체 설계 시작 단계부터 $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ 반응 적용 가능성을 확인하였다. 또한 실험상의 불확실성을 줄이기 위하여 차후 여러 차례의 실험을 통하여 결과의 신뢰성을 높여야 하며 또한 He-3 검출기의 특성분석 결과를 MCNPX 코드 계산 결과에 반영하여 더욱 정확한 중성자 선원의 묘사를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업과 방사선안전신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

1. Chi Young HAN, Jong Kyung KIM, and Kyu Sun CHUNG, “An Epithermal Neutron Beam Design for BNCT Using 2H(d,n)3He Reaction,” Journal of the Korean Nuclear Society, **31**, 5, p. 512-521, 1999.

2. Mi Young PAEK, Chi Young HAN, and Jong Kyung KIM, “A Characteristic Analysis of an Accelerator-Based Epithermal Neutron Beam for Boron Neutron Capture Therapy,” The First iTRS International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-1), 2001.
3. X.-L. Zhou, and C. LEE, “Lithium Compounds as Target for (p,n) Reaction,” The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, **48**, 10-12, p 1493-1496, 1997.
4. C. L. Lee and X. –L. Zhou, “Thick Target Neutron Yields for the ^{7}Li(p,n)^{7}Be Reaction Near Threshold,” Nuclear Instrument and Method in Physics Research B 152, p 1-11, 1999.
5. T. E. Blue and J. C. Yanch, “Accelerator-Based Epithermal Neutron Sources for Boron Neutron Capture Therapy of Brain Tumors,” Journal of Neuro-Oncology, **62**, p.19-31, 2003
6. H. Liskien and A. Paulsen, “Neutron Production Cross Section and Energies for the Reactions ^{7}Li(p,n)^{7}Be and ^{7}Li(p,n)^{7}Be *,” Atomic Data and Nuclear Data Tables **15**, p. 57-84, 1975.
7. 김종경 외, “가속기를 이용한 BNCT 용 열외중성자빔의 개발,” 과학기술부, 한양대학교, 1998.
8. L. S. Waters, ed., “MCNPX-Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications,” LA-UR-02-2607, Los Alamos National Laboratory, 2002.
9. J. B. Marion and J. L. Fowler, ed., “Fast Neutron Physics, Part I: Techniques”, Interscience Publishers, Inc., New York, p. 413-439, 1960.
10. http://www.srim.org.

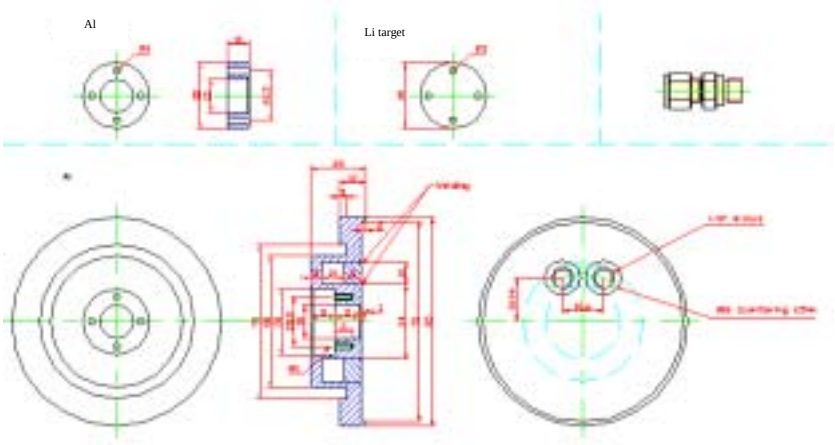

그림 1. 표적장치 설계안

그림 2. 표적장치

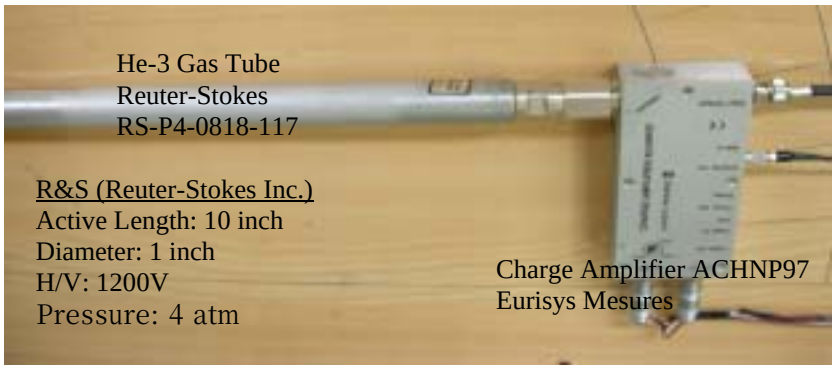

그림 3. 표적 발생 중성자 선원 측정을 위해 사용된 He-3 검출기

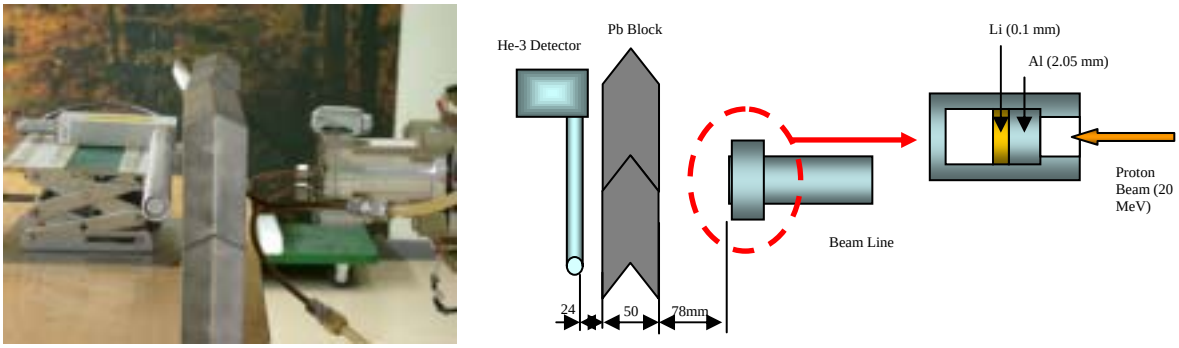

그림 4. 표적장치와 측정시스템의 배치도

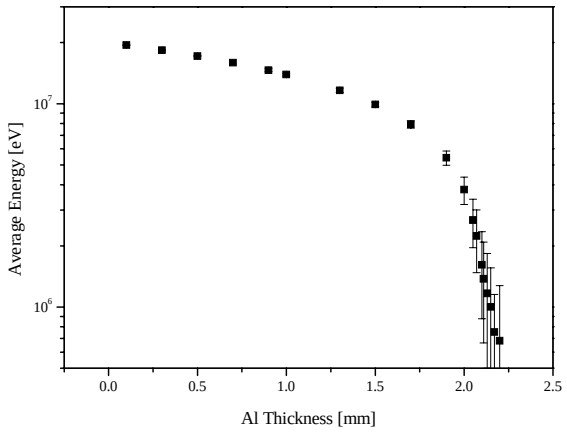

그림 5. Al 감속재에 의한 20 MeV 양성자빔의 에너지 손실

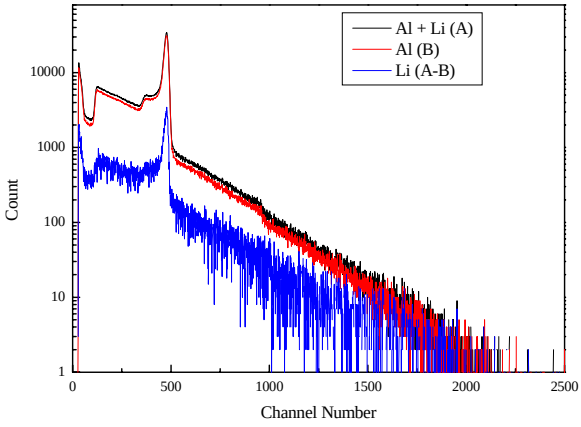

그림 6. He-3 검출기로 측정된 결과

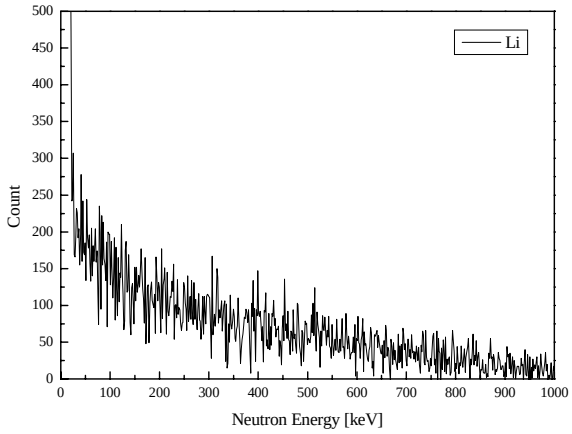

그림 7. Li 표적 발생 중성자 스펙트럼

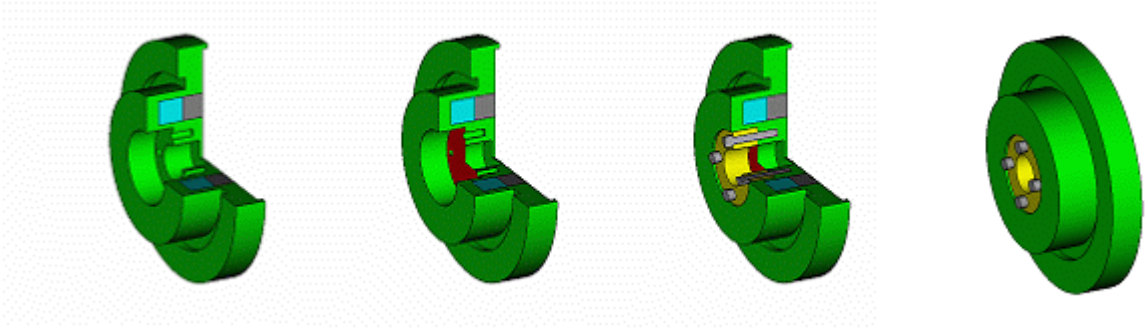

그림 8. 표적장치의 MCNPX 모델링

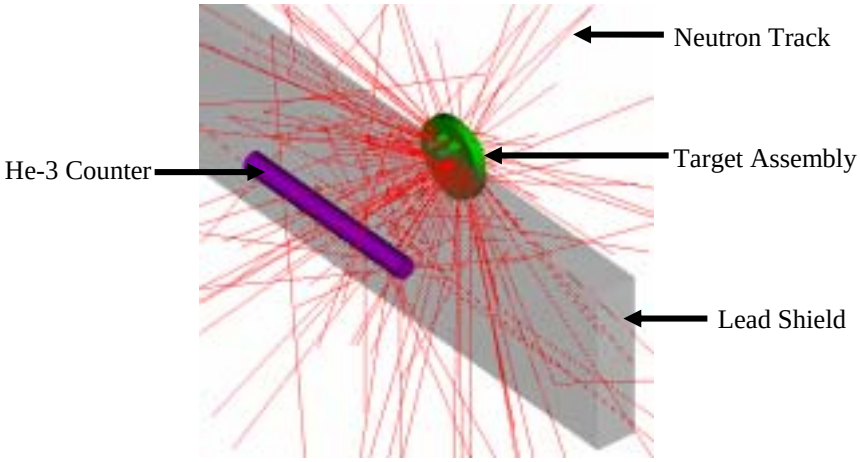

그림 9. 표적장치를 포함한 실험 환경의 MCNPX 모델링

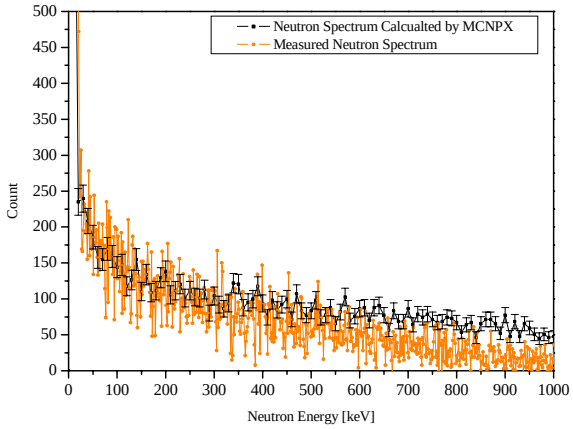

그림 10. 표적 발생 선원의 MCNPX 계산 결과 및 측정치 결과 비교

표 1. 가속기 이용 BNCT용 중성자 선원으로서 고려되는 (p,n) 반응 표적의 특성

Reaction	$^{7}Li(p,n)^{7}Be$	$^{9}Be(p,n)^{9}B$	$^{9}Be(d,n)^{10}C$
Bombarding Energy [MeV]	2.5	4.0	1.5
Neutron Production Rate [n/mA]	9.0E11	1.0E12	2.2E11
Calculated Average Neutron Energy at 0^{o} [MeV]	0.55	1.06	2.01
Calculated Maximum Neutron Energy [MeV]	0.79	2.12	5.81
Target Melting Point [^{o}C]	181	1287	1287
Target Thermal Conductivity [W/m-K]	85	201	201

표 2. Al 감속재에 의한 20 MeV 양성자빔의 에너지 손실

Al Thickness [mm]	E [MeV]	dE [MeV]	N_tr(?)	Al Thickness [mm]	E [MeV]	dE [MeV]	N_tr
0.10	19.461	0.047	1000	2.00	3.778	0.578	995
0.30	18.344	0.093	1000	**2.05**	**2.679**	0.719	993
0.50	17.182	0.111	1000	2.07	2.240	0.764	953
0.70	15.939	0.273	1000	2.10	1.612	0.738	755
0.90	14.626	0.247	999	2.11	1.378	0.712	618
1.00	13.930	0.221	1000	2.13	1.168	0.669	364
1.30	11.650	0.282	999	2.15	1.000	0.560	139
1.50	9.933	0.264	1000	2.17	0.754	0.401	36
1.70	7.928	0.331	1000	2.20	0.682	0.592	7
1.90	5.425	0.443	999	-	-	-	-

표 3. 표적 발생 선원의 MCNPX 계산 결과 및 측정치 결과 비교

Energy [keV]	Count	
	MCNPX	측정값
~ 100	6.00824E+03	1.57370E+04
~ 200	1.27781E+03	7.81500E+03
~ 300	1.05170E+03	6.28500E+03
~ 400	1.00856E+03	4.86600E+03
~ 500	8.71707E+02	4.09900E+03
~ 600	8.19643E+02	3.46400E+03
~ 700	7.76504E+02	2.62300E+03
~ 800	7.17002E+02	2.05400E+03
~ 900	6.33699E+02	1.42100E+03
~ 1000	5.28082E+02	9.60000E+02
Total	1.36929E+04	4.93240E+04