

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 BNCT 조사 장치에서 팬텀 내부 중성자속 분포 측정

**Measurements of In-phantom Neutron Flux Distribution
at the HANARO BNCT Facility**

김명섭 · 박상준 · 전병진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 BNCT 조사 장치에서 팬텀 내부의 중성자속 분포를 측정하였다. 측정은 고속중성자와 감마선 여과 장치로 사용하고 있는 Si 및 Bi 단결정이 상온일 때와 액체질소로 냉각되어 있을 때 Au 박막 및 wire를 이용하여 수행되었다. 측정된 중성자속은 팬텀 내부 3 mm 깊이에서 최대값을 나타낸 후 급격히 감소하였다. 최대 중성자속은 팬텀 표면에서의 값보다 약 25 % 컸으며, 22 mm 깊이에서는 최대값의 50 % 정도였다. 또한 중성자빔은 Li_2CO_3 중성자 collimator 크기 이내로 잘 제한되었다.

Abstract

In-phantom neutron flux distribution is measured at the HANARO BNCT irradiation facility. The measurements are performed with Au foil and wire when the Si and Bi single crystals used as fast neutron and gamma-ray filter are in room temperature or in cooling with liquid nitrogen. Measured neutron flux has the maximum value at depth in phantom of 3 mm and then decreases rapidly. The maximum flux is about 25 % bigger than that of phantom surface, and the measured value at depth in phantom of 22 mm is about a half of the maximum

value. Also, neutron beam is well limited within the aperture of Li_2CO_3 neutron collimator.

1. 서 론

붕소 중성자 포획 암 치료(BNCT: Boron Neutron Capture Therapy)는 암 세포에 선별적으로 모이는 붕소 화합물을 투여한 뒤에 중성자를 쏘여서 암 세포를 선별적으로 죽이는 원리적으로 매우 유망한 암 치료법이다[1,2,3]. 하나로에서는 수년 전부터 이러한 BNCT를 구현할 수 있는 중성자 조사 장치의 개발에 대해 연구해 왔으며, 2001년 중성자 조사 장치의 설치를 완료하였고[4,5], 성능 시험을 수행하여, 조사 장치 전면에서의 절대 중성자속 및 중성자속 분포, Cd 비 등을 측정하는 바 있다 [6]. 현재 전세계적으로 연구 또는 실제 치료에 이용되고 있는 BNCT 장치는 크게 유럽과 미국에서 채택하고 있는 열외중성자를 이용한 전뇌조사(whole brain irradiation) 장치와 일본에서 채택하고 있는 열중성자 국부 조사(local irradiation) 장치로 구분할 수 있다. 30 MW 연구용 원자로인 하나로(HANARO)에서는 열외중성자를 충분히 인출하기 어렵기 때문에 국부 조사 방법을 이용한 BNCT 조사 장치를 설계하여 설치하였다. 본 연구에서는 이러한 하나로 BNCT 조사 장치에서 인출되는 중성자 빔의 팬텀 내부에서의 분포를 측정하여 하나로 BNCT 장치의 중성자 빔 특성을 확인하였다.

2. 실 험

하나로 BNCT 조사 장치는 하나로의 IR 빔포트에 설치되었으며, 조사 장치 전단에는 빔을 개폐하는 물통 셔터가 설치되어 있다. 셔터 후단에 설치된 Si, Bi 단결정은 고속중성자와 감마선을 차폐하며, Si 단결정은 액체질소로 냉각하는 경우 열중성자 투과력이 향상되므로 조사 장치에 액체질소 냉각 계통과 진공 유지 계통이 설치되어 있다. 고속중성자, 감마선 여과 장치 후단에는 Li-6가 농축된 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 와 폴리에틸렌(PE)으로 제작된 빔 collimator가 설치되어 있으며[7], 이번 실험에 사용된 collimator의 직경은 146.7 mm이다.

실험에 사용된 팬텀은 크기가 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 인 사각형 고체 판형 팬텀(solid slab phantom)으로 제원은 표 1과 같다.

팬텀 내부의 중성자속 분포 측정 실험을 하기 전에 Au 박막을 이용하여 액체질소 냉각, 팬텀의 유무 등 여러 실험 조건에 따라 collimator 후단에서의 free beam flux와 Cd 비를 먼저 측정하였다.

중성자속 분포 측정 실험은 여과 장치가 액체질소로 냉각되지 않은 상태와 냉각된 상태의 두 경우에 대해 각각 수행하였으며, Li_2CO_3 빔 collimator 직후단에 판형 팬텀을 설치하고, 각 판 내부에 중성자속 측정용 Au 박막이나 wire를 설치한 후 중성자 조사 실험을 수행하였다. 사용된 Au 박막의 두께는 0.02 mm, Au wire의 직경은 0.01 인치이다.

표 1. 고체 판형 팬텀의 제원.

Parameters	Figures
Name	Solid slab phantom Type-29672
Manufacturer	PTW-Freiburg
Radiation qualities	Photons ^{60}Co ... 20 MV Electron 4 MeV ... 25 MeV
Outer dimensions	300 mm×300 mm
Material	Polystyrene(C_8H_8) containing 2 % by mass TiO_2
Density	1.045 g/cm ³
Slab thickness	1 mm, 2 mm, 5 mm, 10mm
Tolerance of slab thickness	± 0.1 mm
Electron density	0.012 times higher than electron density of water
Mean Z/A value	0.536

여과 장치가 상온일 때 팬텀 내부에서의 중성자속 분포 측정 실험은 팬텀 중앙 위치(인출되는 빔의 중앙 위치)에 Au 박막 또는 wire를 설치하여 수행하였으며, 앞쪽에 설치된 Au 박막 또는 wire에 의한 차폐 효과를 제거하기 위해 Au 박막 또는 wire가 다음 팬텀 판에 설치되는 박막 또는 wire를 가리지 않도록 설치하였다. 여과 장치가 액체질소로 냉각되어 있는 경우에는 팬텀 중앙 위치뿐만 아니라 빔 진행 방향의 수직 방향으로 여러 개의 Au 박막 및 wire를 설치하여 팬텀 내부의 중성자속 등고선 지도를 작성할 수 있도록 하였다. 여과 장치가 액체질소로 냉각되어 있는 경우, 설치된 Au 박막 및 wire의 총수는 75개였다.

중성자 조사 실험은 원자로 출력 24 MW에서 수행하였으며, 조사 시간은 free beam flux 측정시는 30~40 분, 팬텀 내부 중성자속 분포 측정시에는 2~3 시간이었다.

방사화 시료의 감마선 측정에 사용한 HPGe 검출기는 상대 효율이 15 %인

closed-ended coaxial 형 검출기이며, 절대 방사능 측정은 상대적으로 간편한 방법인 표준 선원을 이용한 효율 검정 방법을 이용하였다. 효율 측정의 오차에 가장 큰 영향을 주는 것은 표준 선원의 초기 방사능의 오차로서 99 % 신뢰 구간에서 $\pm 3.19\%$ 이다.

3. 분석 및 결과

각 실험 조건에 따라 측정된 절대 중성자속 및 Cd 비는 표 2와 같다. 측정된 중성자속의 오차는 2 % 이하이며 오차에 가장 큰 영향을 주는 요인은 효율 검정에 사용된 표준선원의 초기 방사능 오차이다.

표 2. 각 실험 조건에 따른 조사 장치 빔 출구 위치에서의 중성자속 측정 결과.

차 수	실험 조건				중성자속 [n/cm^2s]	Cd 비
	여과 장치 냉각		팬텀			
	유	무	유	무		
1		○		○	8.34×10^8	104
2		○		○	8.77×10^8	
		○	○		1.82×10^9	
3	○			○	1.04×10^9	
	○		○		2.23×10^9	
4	○			○	1.12×10^9	
5	○			○	1.19×10^9	
6	○			○	1.15×10^9	
7		○		○	8.13×10^9	
8		○	○		1.74×10^9	
9	○			○	9.69×10^8	152
	○		○		2.08×10^9	
10	○			○	1.06×10^9	145

표에서 알 수 있는 바와 같이 여과 장치를 액체질소로 냉각하면 중성자속은 약 30 % 증가하였으며, 팬텀이 설치되면 팬텀 표면에서의 중성자속은 팬텀이 설치되지 않았을 때보다 2배 가량 증가하였다. Cd 비는 여과 장치가 액체질소로 냉각되면 50 % 정도 증가하였다. 또한, 여과 장치 냉각 및 팬텀 유무 등의 실험 조건이 동일하더라도 측정값의 차이가 최대 20 %까지도 발생하였는데 그것은 여과 장치의 냉각 상태나 원자로 노심 조건이 동일하지 않기 때문이라고 생각된다.

이러한 측정 결과로부터 하나로 BNCT 조사 장치에서 얻을 수 있는 중성자속 및 Cd 비는 원자로 출력이 24 MW일 때 각각 1.19×10^9 n/cm²s, 152임을 알 수 있다.

여과 장치가 상온일 경우와 액체질소로 냉각된 경우에 대해 팬텀 중앙 위치(인출되는 빔의 중앙 위치)에서 팬텀 깊이 방향으로 측정된 중성자속 분포는 그림 1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 여과 장치가 액체질소로 냉각되어 있는 경우와 상온인 경우 팬텀 내부에서의 중성자속 변화 경향은 유사하였으며, 여과 장치를 냉각하면 중성자속이 약 30 % 증가하였다.

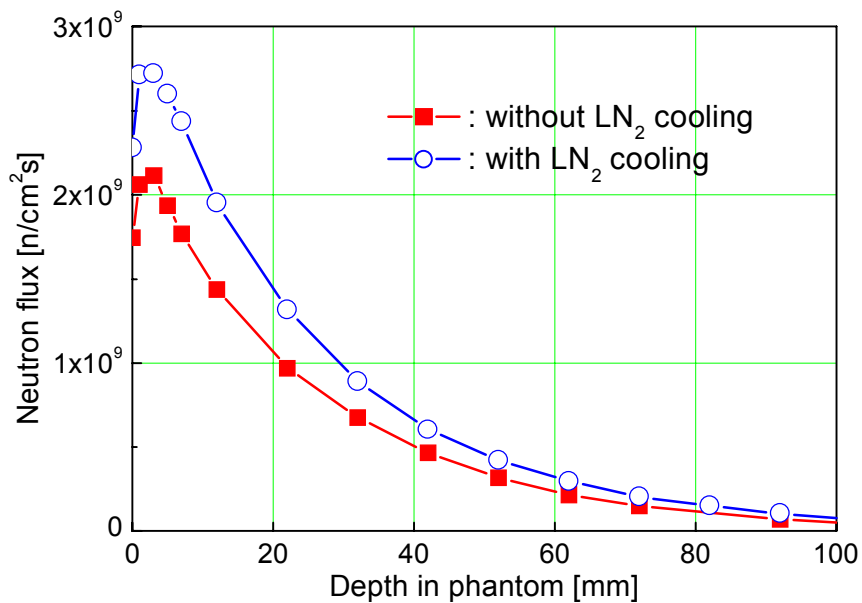


그림 1. 팬텀 중앙 위치에서 팬텀 깊이에 따라 측정된 중성자속 분포.

Au 박막 및 wire를 이용하여 측정된 팬텀 내부 중성자속 분포는 그림 2와 같다. 그림으로부터 Li₂CO₃ 중성자 collimator를 이용하여 팬텀 내부의 중성자속이 잘 제한됨을 알 수 있으며, 대부분의 중성자 조사가 팬텀 표면 2 cm 이내에서 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 3은 팬텀 표면에서 반경 방향으로 측정된 중성자속이며,

위 그림들로부터 적절한 크기의 Li_2CO_3 중성자 collimator를 사용하면 국부 조사 BNCT에 적당한 중성자빔을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

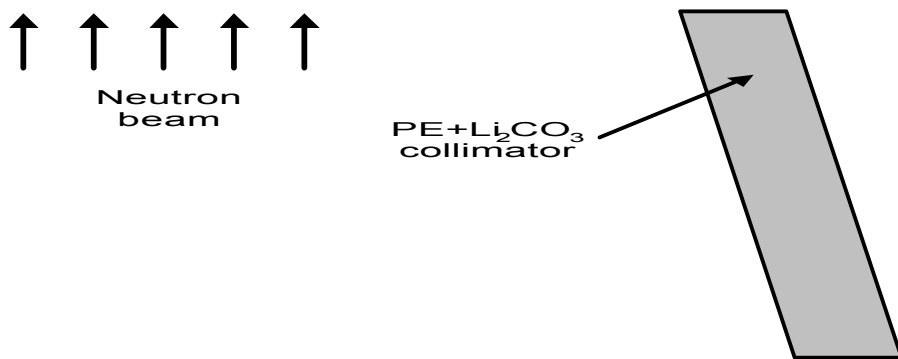
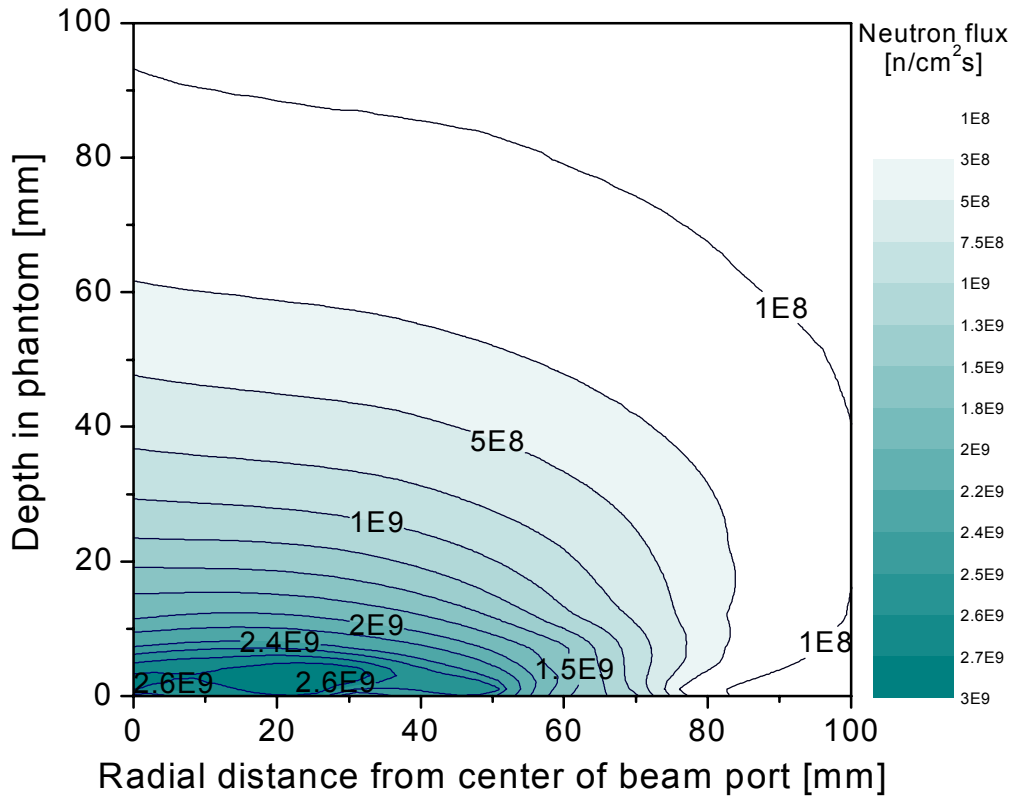


그림 2. 측정된 팬텀 내부 중성자속 분포.

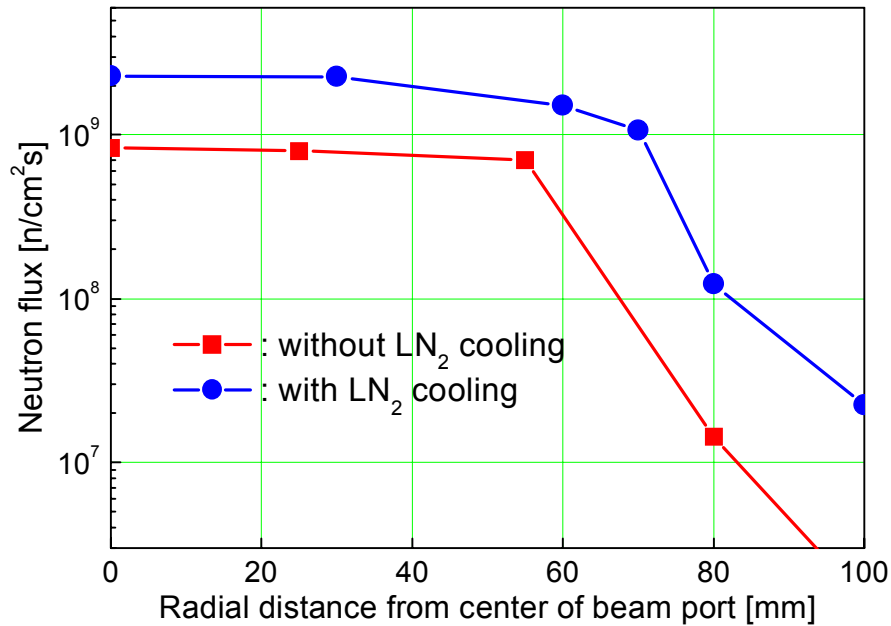


그림 3. 팬텀 표면에서 반경 방향으로 측정된 중성자속 분포.

4. 결 론

하나로 BNCT 조사 장치에서 팬텀 내부의 중성자속 분포를 측정하였다. 측정된 중성자속은 팬텀 내부 3 mm 깊이에서 최대값을 나타낸 후 급격히 감소하였으며, L₂CO₃ 중성자 collimator 크기 이내로 잘 제한되었다. 이로써 하나로 BNCT 조사 장치가 국부 조사 BNCT에 적합함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. 전병진, “중성자 포획 암 치료”, 기술현황분석보고서-KAERI/AR-517/98, 한국원자력연구소, 1998.
2. D.N. Slatkin, “A History of Boron Neutron Capture Therapy of Brain Tumors”, *Brain*, 114, 1991, p.1609.

3. "Boron-Neutron Capture Therapy for Tumors", edited by H. Hatanaka, Nishimura Co. Ltd., 1986.
4. 전병진 외, "하나로를 이용한 암 치료 장치 개발", KAERI/RR-2018/99, 한국원자력연구소, 2000.
5. 황승렬 외, "BNCT 조사장치의 설치 및 중성자, 감마 누설 측정", 2001춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2001. 5.
6. 김명섭 외, "BNCT 중성자 여과기가 상온일 때 조사 장치의 중성자속 측정", 2002춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2002. 5.
7. 이관엽, 황승렬, 전병진, "하나로 BNCT 장치의 Beam Collimator용 Li-6 농축 Lithium Carbonate와 HDPE 혼합 차폐물 개발", 2001추계학술발표회논문집, 대한방사선방어학회, 2001. 11.