

2000 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

BNCT 여과기용 Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적 측정

Measurements of Neutron Cross-Sections of Si and Bi Crystals for BNCT Filter

김명섭 · 변수현* · 박상준 · 성백석 · 전병진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

*서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

하나로의 붕소 중성자 포획 치료 장치에서 고속 중성자와 감마선 여과기로 사용될 예정인 Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적을 측정하였다. 하나로의 CN 수평관에서 TOF 중성자 분광계를 이용하여 각 단결정을 투과하기 전, 후의 중성자 스펙트럼을 측정하였으며, 이 결과로부터 중성자 단면적을 구하였다. 단면적이 측정된 에너지 영역은 Si의 경우 1.5~570 meV, Bi의 경우 2~100 meV이며, 측정 오차는 10 % 이내이다. 측정된 중성자 단면적은 Si 단결정의 경우에는 반실험식을 바탕으로 한 계산 결과와 대부분의 에너지 영역에서 잘 일치하였으며, Bi 단결정의 경우에는 계산 결과보다 크게 나타났다.

Abstract

The neutron cross-sections of Si and Bi crystals which are used as fast neutron and gamma-ray filter in boron neutron capture therapy facility of HANARO. The neutron spectra before and after transmission to crystals are measured by using TOF spectrometer at CN horizontal beam tube of HANARO, and the neutron cross-sections are deduced from the measured spectrums. The energy ranges in which cross-sections are measured are 1.5~570 meV for Si and 2~100 meV for Bi, and detection errors are within 10 %. For Si crystal, the measured neutron cross-section shows the good agreement

with the calculated value based on the semi-empirical formula, but it is larger than the calculated result for Bi crystal.

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, 그 가능성을 확인하고 현재 중성자 조사 장치를 설치하고 있다[4]. BNCT에서 암 세포와 정상 세포 사이에 차별성을 갖는 것은 B-10과 반응하는 열중성자이다. 그러나 원자로에서 얻을 수 있는 중성자 빔에는 BNCT에 불리한 성분인 고속 중성자와 감마선이 상당히 포함되어 있다. 이러한 고속 중성자와 감마선을 최대한 차폐하고, 열중성자는 최대한 투과시키기 위해 하나로에서는 단결정 여과기를 사용하기로 하였다. 특히 단결정을 액체질소로 냉각시키면 열중성자 투과력이 더욱 좋아지므로 액체질소로 냉각하여 사용하는 방법을 고안하였고, 여과기에 사용될 단결정으로는 이론적인 단면적 검토를 통해 Si과 Bi 단결정을 선정하였다. BNCT 여과기 설계 과정에서는 반실험식에 기초한 계산을 통해 얻은 단면적 자료를 사용하였는데 Bi 단결정의 경우에는 다른 실험자들의 측정값도 측정값 자체의 편차가 크고 계산 결과와도 큰 차이를 나타냈다[5,6]. 또한, BNCT 여과기용으로 구매한 Si 단결정은 dopant가 없는 것이어야 하며, Bi 단결정은 일반적으로 매우 크기 때문에 특별하게 결정을 주문하여 성장시켰다. 따라서 본 논문에서는 이렇게 확보된 Si과 Bi 단결정의 결정 성장 상태를 확인하고 고속 중성자 및 감마선 여과기로서 우수한 성능을 나타낼 수 있는지의 여부를 확인하기 위해 중성자 투과를 통한 단면적 측정 실험을 수행하였다.

2. 실 험

Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적 측정을 위해서는 단결정에 중성자를 투과시키기 전, 후의 TOF(time of flight) 중성자 스펙트럼을 측정하여 두 스펙트럼의 비교를 통해 중성자 단면적을 결정하는 방법을 사용하였다. 측정 대상인 Si 단결정은 LG Siltron에서 dopant가 들어 있지 않은 단결정으로 특별 제작하였으며, 직경 20 cm, 길이 40 cm이다. Bi 단결정은 폴란드의 IAE(Institute of Atomic Energy)의 Crystal Growth Laboratory에 의뢰하여 제작하였으며, 직경 11 cm, 길이가 각각 5, 10 cm로서 현재 BNCT 장치에서 필요한 길이는 15 cm이지만 하나의 단결정으로 이 길이를 얻기가 어려워 두 개로 나누었다.

중성자 스펙트럼을 측정하기 위한 TOF 분광계는 실험 당시 분광계 설치가 가능했던 하나로 CN 수평공에 설치하였으며, TOF 분광계의 계통도는 그림 1과 같다.

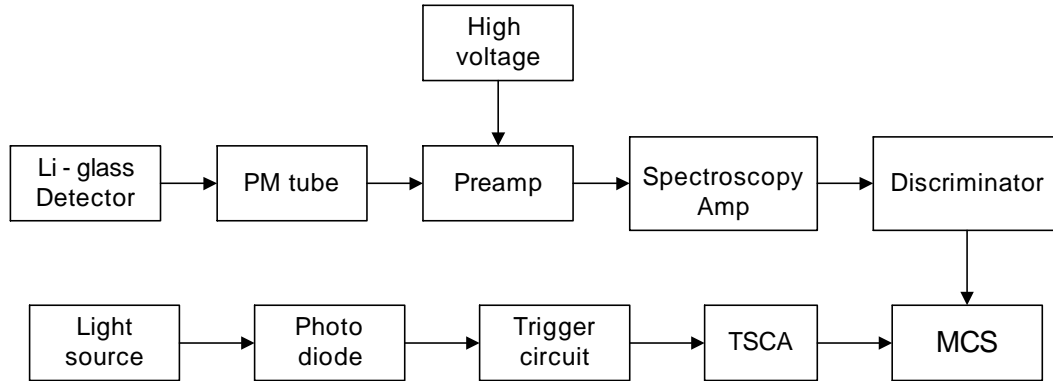


그림 1. Time-of-Flight 분광계 계통도.

CN 수평공의 빔 슬릿은 가로 6 cm, 세로 10 cm의 직사각형이며, 내부에는 감마선 차폐를 위해 길이 12 cm의 단결정과 길이 10 cm의 다결정(polycrystal)으로 이루어진 Bi 필터가 장착되어 있다. 이 Bi 필터 후단에 측정 대상인 Si 또는 Bi 단결정을 설치하였으며, 그 후단에 chopper 및 ^6Li -glass 섬광검출기(NE905)를 설치하였다. chopper에서 검출기까지의 거리는 289 cm이다. Chopper가 열리기 직전에 chopper와 동축으로 회전하고 있는 광 시준기가 열려 광다이오드가 광원으로부터 방출된 빛을 검출하면 MCS의 동작이 개시되며, 중성자가 검출기에 도달하여 측정된 시점별로 시간 스펙트럼이 형성된다. MCS의 channel간 시간 간격인 dwell time은 10 μsec 로 설정하였다. Chopper는 회전 속도를 3,000 rpm으로 설정하였다. Chopper의 단면은 두께 0.75 mm인 Al과 0.1 mm인 Cd이 연속적으로 배열된 상태이며 $\pm 0.796^\circ$ 범위에서 열중성자를 투과시킨다.

원자로의 출력은 22 MW에서 측정을 수행하였으며, 먼저 측정 대상 Si, Bi 단결정이 없는 상태에서 TOF 스펙트럼을 측정하고, 측정 대상 Si 단결정을 chopper 전단에 설치하여 TOF 스펙트럼을 측정 후 Si, Bi 단결정이 있는 상태에서 TOF 스펙트럼을 측정하였다. 또한 각 단계의 중간에 3 mm Cd판을 chopper 전단에 설치한 후 TOF 스펙트럼을 측정하여 고속 중성자 background의 영향을 확인하였다. 이렇게 얻은 TOF 중성자 스펙트럼은 그림 2, 3과 같다.

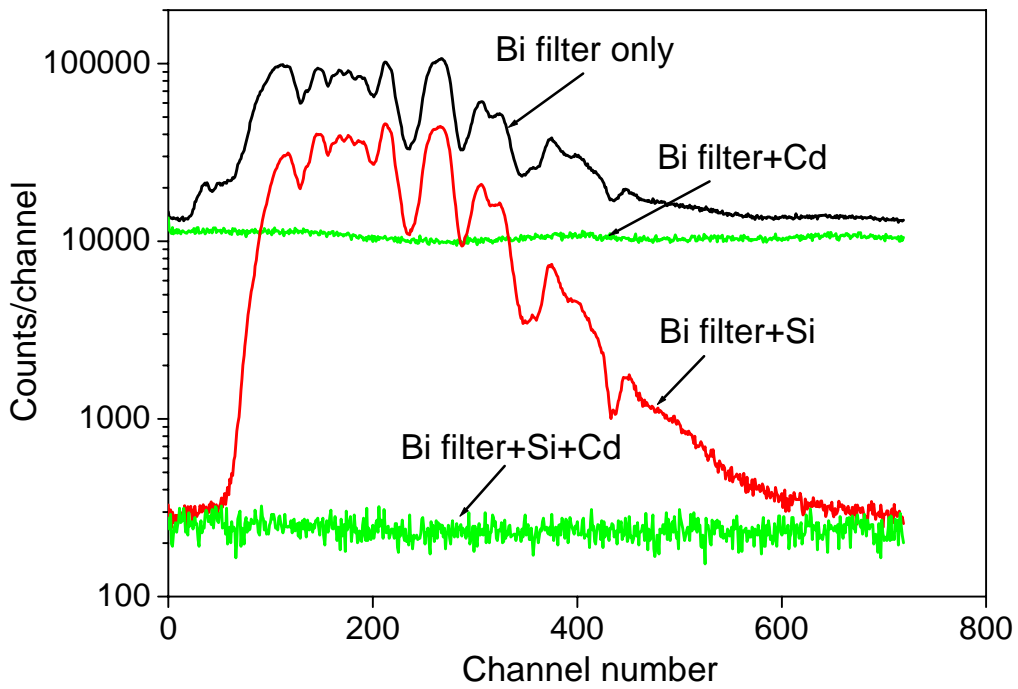


그림 2. 측정 대상 단결정이 없는 상태와 Si 단결정이 설치되었을 때의 TOF 중성자 스펙트럼.

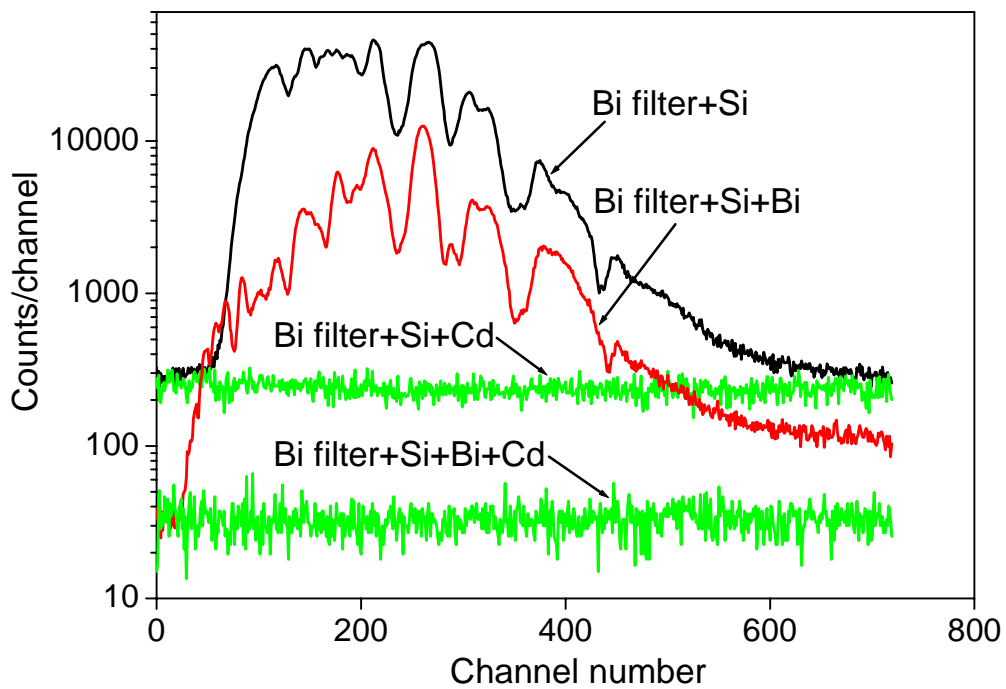


그림 3. Si 단결정이 설치되었을 때와 Si 및 Bi 단결정이 설치되었을 때의 TOF 중성자 스펙트럼.

3. 분석 및 결과

Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적은 그림 2, 3과 같은 TOF 스펙트럼에서 Cd를 설치하고 측정된 스펙트럼을 이용하여 고속 중성자 성분을 제거한 후 각 단결정 설치 전, 후의 스펙트럼 높이 비를 구하여 간단한 투과 방정식으로부터 구하였다. 이렇게 구한 Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적은 그림 4, 5와 같다. 채널-파장 검정은 동일한 TOF 계측 계통을 이용하여 수행한 PG(Pyrolytic Graphite) 단결정 반사 실험에서 구한 아래와 같은 식을 이용하였으며, 중성자의 파장-에너지 관계식을 이용하여 파장을 에너지로 전환하였다.

$$\lambda[\text{\AA}] = 0.01326 \times C - 0.324 \quad (1)$$

그림 4, 5에서 파선으로 나타낸 단면적 계산치는 물질 상수(material constant), 특성 Debye 온도(characteristic Debye temperature)를 fitting 변수로 실험 결과를 fitting한 반실험식(semi-empirical formula)를 이용하여 계산한 결과이다. 이 반실험식은 Bragg(elastic) 산란은 배제하고 흡수 단면적과 thermal diffuse 산란 단면적만을 포함하고 있다.

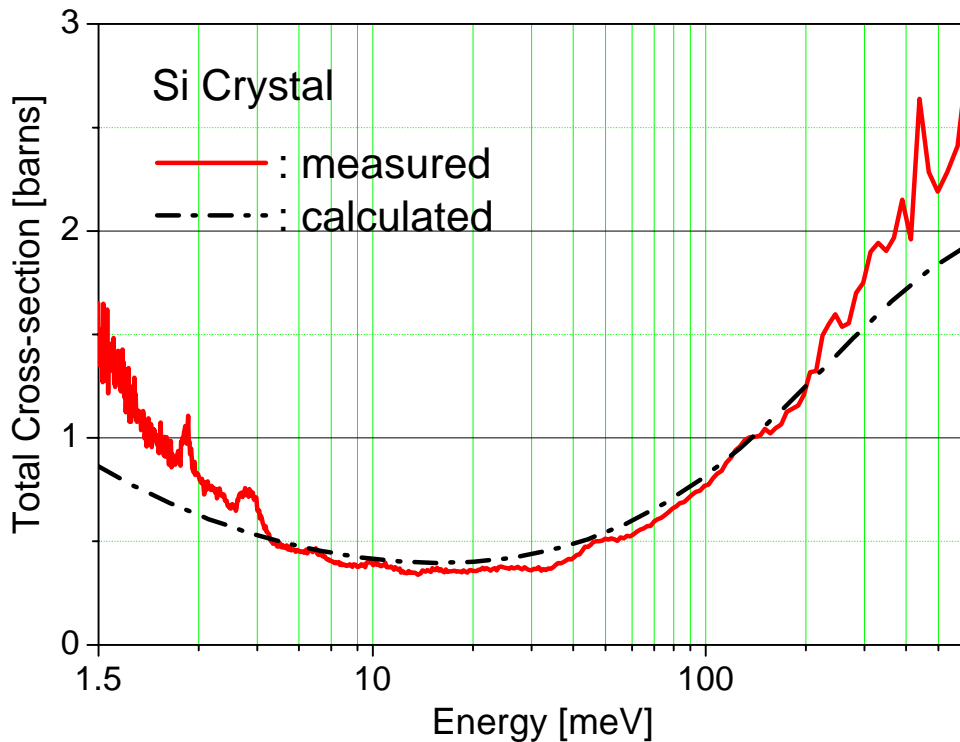


그림 4. Si 단결정에 대한 중성자 단면적 측정 결과.

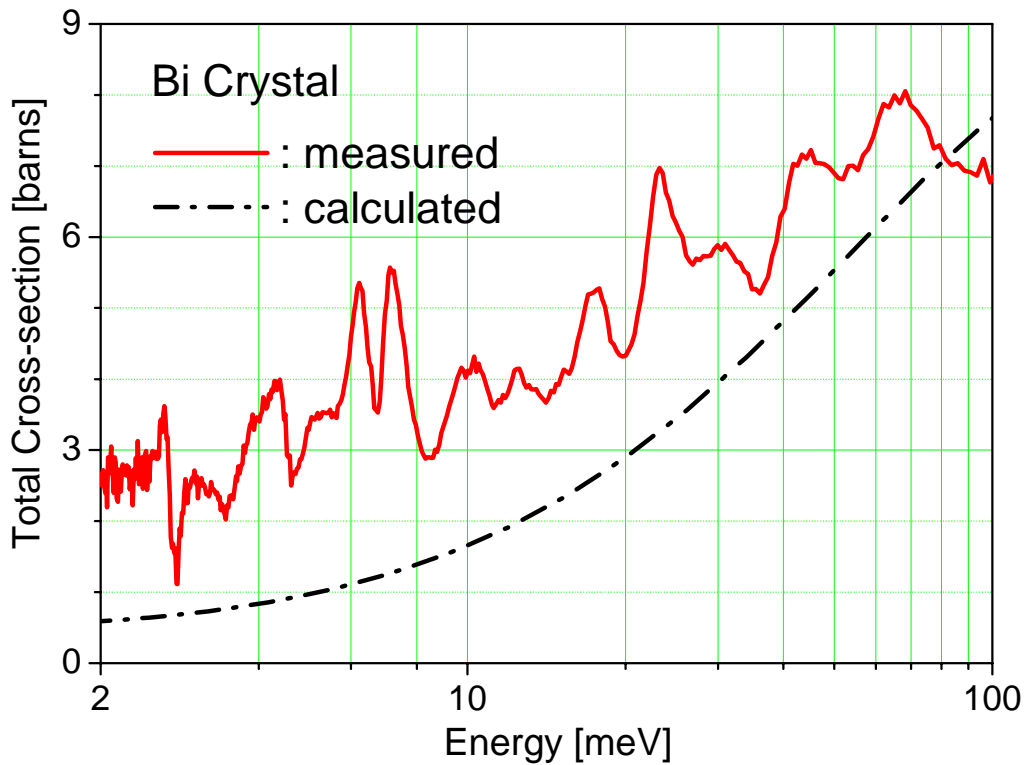


그림 5. Bi 단결정에 대한 중성자 단면적 측정 결과.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 Si 단면적의 경우에는 대부분의 에너지 영역에서 계산 결과와 측정값이 10 % 이내로 잘 일치한다. 이번 측정에서 사용된 시료와 같이 두꺼운 Si 완전 단결정(perfect single crystal)에 대해서는 Bragg 산란은 무시할 수 있다. 따라서 다른 실험자들의 단면적 측정 결과도 측정 대상 단결정이 완전 단결정인 경우에는 그림에 나타난 계산 결과가 측정 결과와 매우 잘 일치한다. 즉 이번 측정에 사용된 Si 단결정은 완전한 단결정으로서 BNCT 중성자 여과기 용도로 사용하기에 적합하다.

Bi 단결정의 경우에는 본 에너지 영역에서 중성자 단면적이 에너지에 따라 증가하는 경향은 측정치와 계산 결과가 유사하지만 측정치와 계산 결과와의 절대값은 차이가 크게 나타났다. 일반적으로 Bi 단결정의 경우에는 unit cell의 크기가 커서 역격자점(reciprocal lattice point)의 밀도가 높고 mosaic spread도 크다. 따라서 Bragg 절단 에너지(cut-off energy, Bi의 경우 1.7 meV) 이상에서는 elastic scattering을 피할 수 없기 때문에 다른 실험 결과에서도 계산 결과보다 측정치들이 크게 나타나며[7], 본 실험에서도 마찬가지로 측정치가 크게 나타나는 것이라 생각된다. 그러나 본 측정 에너지 영역이 Bragg 절단 에너지 보다 큰 에너지 영역임에도 에너지에 따라 단면적이 증가하는 경향을 나타내어 단결정으로서의 특성을 나타내므로 측정 대상 Bi를 BNCT 여과기로 사용할 수 있을 것으로 예상되며, 여과기가 완성되면 액체질소 온도에서의 각종 실험을 통해 보다 유

용한 자료를 기대할 수 있다.

측정값의 오차는 측정 대상 단결정이 없을 때의 스펙트럼 높이가 H_0 이고, 측정 대상 단결정이 있을 때의 스펙트럼 높이가 H_1 일 때 아래 식과 같이 표시되며, 측정 에너지 영역에 걸쳐 10 % 이내였다.

$$\frac{\varepsilon_\sigma}{\sigma} = \frac{\sqrt{\frac{H_0 + H_{0Cd}}{(H_0 - H_{0Cd})^2} + \frac{H_1 + H_{1Cd}}{(H_1 - H_{1Cd})^2}}}{\ln\left[\frac{H_1 - H_{1Cd}}{H_0 - H_{0Cd}}\right]} \quad (2)$$

4. 결 론

하나로의 붕소 중성자 포획 치료 장치에서 고속 중성자와 감마선 여과기로 사용될 예정인 Si 및 Bi 단결정의 중성자 단면적을 측정하였다. 각 단결정을 투과하기 전,후의 TOF 중성자 스펙트럼을 측정하였으며, 이 결과로부터 중성자 단면적을 구하였다. 단면적이 측정된 에너지 영역은 Si의 경우 1.5~570 meV, Bi의 경우 2~100 meV이며, 측정 오차는 10 % 이내이다. 측정한 중성자 단면적은 Si 단결정의 경우에는 반 실험식을 바탕으로 한 계산 결과와 대부분의 에너지 영역에서 잘 일치하였으며, Bi 단결정의 경우에는 계산 결과보다 크게 나타났지만 BNCT 여과기에 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 여과기가 완성되면 액체질소 온도에서의 각종 실험을 통해 보다 유용한 자료를 기대할 수 있다.

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. 장중화, 전병진, 길충섭, “Si, Bi 단결정의 단면적”, 기술보고서-NDL-NDE-01/96, 한국원자력연구소, 1996. 7.
6. A.K. Freund, “Cross-Sections of Materials Used as Neutron Monochromators

- and Filters”, *Nucl. Instr. and Meth.*, **213**, 1983, p.495.
7. B.M. Rustad, et al., “Single-Crystal Filters for Attenuating Epithermal Neutrons and Gamma Rays in Reactor Beams”, *Rev. Sci. Instr.*, **36**, 1965, p.48.