

Measurement of Energy Dependent Differential Neutron Capture Cross-section of Natural Sm by Using a Continuous Neutron Flux below

Jungran Yoon

Department of New Material Physics, Dong-A University

Received: July 01, 2016. Revised: August 22, 2016. Accepted: August 31, 2016.

ABSTRACT

We measured the neutron capture cross-section of natural $\text{Sm}(n, \gamma)$ reaction in the energy regions from 0.003 to 10 eV. The 46-MeV electron linear accelerator of Research Reactor Institute, Kyoto University was used for generating a continuous neutron source. The neutron time-of-flight method was adopted for energy measurement. An assembly of BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) scintillators composed of 12 pieces of BGO crystals measured prompt gamma rays from $\text{Sm}(n, \gamma)$ reaction. The BGO assembly was located at a distance of 12.7 ± 0.02 m from the neutron source. In order to determine the neutron flux impinging on the Sm, the $^{10}\text{B}(n, \alpha \gamma)^7\text{Li}$ standard cross-section were used. Natural $\text{Sm}(n, \gamma)$ reaction measurement result of the neutron capture cross-section was compared with the results of evaluation of the BROND-2.2 and the previous experimental data of J. C. Chou and V. N. Kononov.

Keywords: Neutron capture cross section, Sm, 46-MeV electron linear accelerator, BGO detector

I. INTRODUCTION

중성자 포획단면적은 원자핵물리, 원자로의 중성자 차폐 설계, 노심설계, 우주물리 등 다양한 분야에서 중요한 기초 데이터로 사용된다.^[1-6] 과거에는 주로 핵물리학 및 원자로의 노심설계를 위해 중성자포획 데이터들이 필요했으나 최근에는 우주에서의 (p,n)반응에 의해서 생성된 중성자 피폭에 대한 연구가 적극적으로 수행되고 있다. 한 예로 약자기장을 가진 달은 우주에서 발생하는 고속 양성자에 의해 생성된 중성자에 의한 물질의 변화들이 지표면에서 지속적으로 일어나고 있다. 아폴로 15호에서 채취한 달의 암석을 통해 달에서의 물질의 변화에 대한 연구도 최근 연구되고 있다.^[7] 이 연구에서는 Sm의 중성자 포획단면적에 대한 결과가 매우 중요한 인자로서 사용된다.

본 연구 그룹에서는 교토대학교 원자로실험소(KURRI: Kyoto University Research Reactor Institute)에서 46-MeV 전자선형가속기를 이용하여 다양한 핵종에 대한

중성자 포획단면적을 측정해 오고 있다.^[8-11] 본 연구에서는 중성자에너지 0.003 ~ 10 eV에 대한 천연 Sm(n, γ) 반응에 대한 측정을 수행하였다.

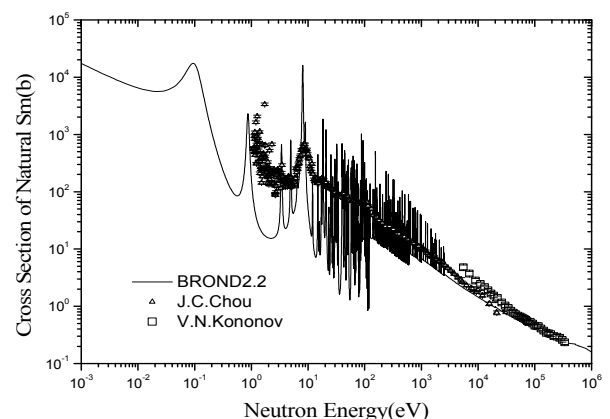


Fig. 1. The evaluated data of BROND 2.2 and the previous measurement data J. C. Chou and V. N. Kononov

현재까지 보고되어진 중성자 포획단면적을 Fig. 1에 나타내었다. BROND 2.2의 경우는 평가된 값이며 J. C. Chou는 중성자에너지 분해능이 낮은 Slowing-Down Time Spectrometer 법에 의해 측정된 값이고, V. N. Kononov는 TOF(Time-of-Flight)법에 의해 측정된 값이다.^[12-14] 그림에서 보는 바와 같이 측정된 결과는 양적으로 미흡한 상황이며 평가된 BROND 2.2의 값과 실험에 의해 측정된 J. C. Chou와 V. N. Kononov의 값은 서로 상당 부분 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 측정값의 정밀도도 만족스럽지 않으며 측정되지 않은 에너지 영역도 많이 있다. 따라서 낮은 에너지 영역에 있어서의 천연 Sm(n,γ) 중성자 포획단면적 측정은 절실히 요구되고 있는 상황이다.

본 연구는 강력한 펄스빔 형태의 46-MeV 전자 선형 가속기로 가속된 전자를 Ta 표적과의 광핵반응을 통해 생성된 연속분포의 중성자(0.003 ~ 10 eV)를 이용하였고, 중성자에너지 측정을 위해서는 TOF법을 사용하였고, 즉발감마선 측정을 위해 전에너지 흡수형인 12개의 BGO(Bi₄Ge₃O₁₂)섬광검출기를 사용하여 천연 Sm의 중성자 포획단면적을 측정하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 기존의 측정결과 및 평가값과 비교하였다. 얻어진 결과는 위에서 언급된 다양한 분야에서 유용하게 사용되어질 것으로 기대되며, 특히 중성자 포획단면적을 측정하는 기술과 해석 방법은 핵물리학, 천체물리학과 원자력공학 분야의 포획단면적 측정에 요긴하게 이용될 것으로 기대된다.

II. EXPERIMENT AND MEASUREMENT

본 실험에서는 46-MeV 전자 선형가속기와 12개로 구성된 BGO 섬광검출기를 이용하여 중성자 TOF 방법으로 실험하였다. 발생된 중성자선 빔은 표적으로부터 12.7 ± 0.02 m 떨어진 위치에 설치되어 있는 시료에 입사하게 된다. BGO 검출기는 Hitachi Chemical Industry사에 의해서 제작된 5 × 5 × 7.5 cm³크기의 BGO 12개로 구성되어 있다. 시료에 입사되는 중성자 선속을 구하기 위해 ¹⁰B시료의 ¹⁰B(n,αγ)⁷Li 반응을 이용하였고, 중성자 선속의 변화를 모니터링하기 위해 중성자 선속 중간에 BF₃ 검출기를 설치했다. 실험장치 및 실험방법에 대한 자세한 내용은 본 연구에서 앞서 발표한 논문^[8,9]에 보고되어 있다.

본 연구에 사용된 시료의 제원을 Table 1에 나타내었다. Sm 시료는 두께 0.05 mm의 두께의 금속박막으로 제작하여 중성자를 조사하였다. ¹⁰B 시료는 금속분말 형태로 되어 있으며 에너지의존 중성자 선속을 측정하기 위해서 사용되었고 두께 0.1 mm의 Al 금속판으로 만들어진 케이스에 넣어 사용하였다.

Table 1. Physical parameters of the samples used in the current experiment

Sample	Sm	
	¹⁰ B*	
Physical form	Metal plate	Metal powder
Chemical purity(%)	99.8	99.999
Isotopic composition (%)	Natural	96.98
Weight of sample(g)	1.25	2.92
Thickness of sample(cm)	0.05	0.8
(Atoms/kb)	1.81	52.42
Size of sample (cm ²)	1.8×1.8	1.8×1.8

* ¹⁰B: 96.98%, ¹¹B: 3.02%

시료에 입사되는 중성자 선속을 구하기 위해서 ¹⁰B(n,αγ)⁷Li 반응을 이용하였고 본 연구에서 사용되어진 BGO 검출장치는 12개의 검출기로 이루어져 전에너지 흡수 검출장치이므로 감마선 검출효율은 1이 된다. 중성자 에너지에 따른 입사중성자선속 $\phi(E)$ 및 포획율 $C_B(E)$, 중성자 포획수 $Y_S(E)$ 는 앞서 연구한 논문^[11]에서와 같이 각각 아래 식으로 표현된다.

$$\phi(E) = C_B(E) \quad (1)$$

$$C_S(E) = \epsilon_S Y_S(E) \phi(E) \quad (2)$$

$$Y_S(E) = C_S(E) Y_B(E) / C_B(E) \quad (3)$$

여기서, 첨자 S는 Sm을 의미하며, 첨자 B는 ¹⁰B를 의미한다.

또한, 중성자 포획단면적은 시료 내에서 포획되는 중성자 포획수에 의해 계산될 수 있으며, 중성자 포획수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[11]

$$Y_s(E) = (1 - \exp(-N\sigma_t(E)t))\sigma_c(E)f_c/\sigma_t(E) \quad (4)$$

여기서 N은 시료의 원자밀도, $\sigma_t(E)$ 는 중성자 전단면적, t는 시료의 두께, $\sigma_c(E)$ 는 중성자 포획단면적, f_c 는 시료 내에서의 중성자산란효과와 시료의 두께가 증가하면서 발생하는 중성자 자기차폐효과를 보정하는 보정계수로서 MCNP 계산코드를 이용해 얻는다.^[15] 이 보정계수로 보정되기 전의 중성자 에너지에 따른 중성자 포획단면적을 Fig. 2에 나타내었고 MCNP 계산코드로 계산한 중성자 에너지에 따른 보정계수를 Fig. 3에 나타내었다. 이 코드에 사용한 단면적은 JEF-3.1의 평균치를 이용하였다.

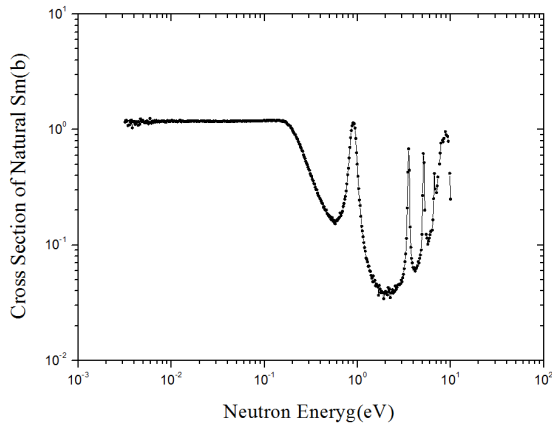


Fig. 2. Current cross section before the correction function for the neutron self-shielding and neutron scattering effects

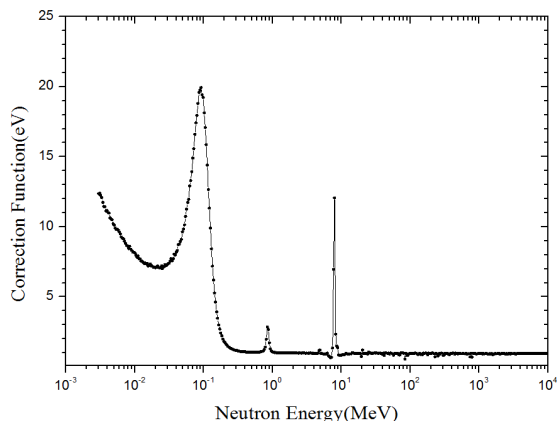


Fig. 3. The correction function for the neutron self-shielding and neutron scattering effects in the current cross section measurement

III. RESULT

고토대학 원자로실험소의 선형가속기와 전에너지흡수형 BGO 검출장비를 이용하여 TOF법으로 0.003 ~ 10 eV영역의 Sm(n,γ) 반응에 대한 중성자 포획단면적을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 평가된 값인 BROND 2.2와 실험에 의해 측정된 J. C. Chou와 V. N. Kononov의 값을 함께 나타내었는데 두 측정값의 결과는 1 eV 이하의 측정치는 없었으며 평가값과의 차이도 많이 나고 공명영역에서는 정확한 값을 표현하지 못함을 볼 수 있다. 본 연구에서의 결과는 처음으로 열중성자 에너지를 제외한 1 eV 이하의 영역에서 측정되었으며 평가값의 포획단면적 양상과 높은 일치도를 보인다. 특히 다른 측정자들과 달리 본 연구에서의 결과는 전체적인 공명의 형태들을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

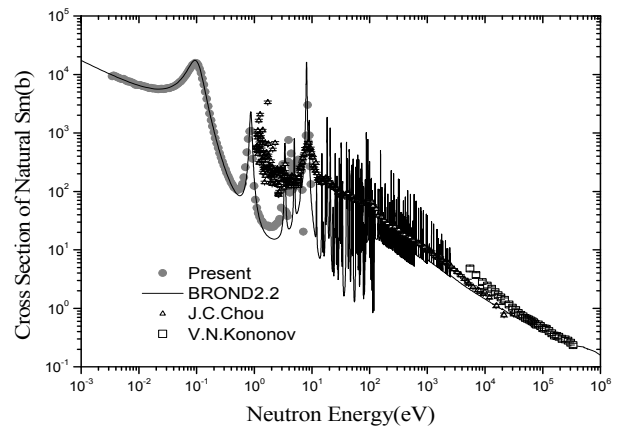


Fig. 4. Comparison of the previous experimental cross sections and the evaluated cross sections for the Sm(n,g) reaction with the present measurement.

IV. DISCUSSION

Sm에 대한 중성자 포획단면적은 열중성자에너지에서의 포획단면적을 제외하면 10 eV 이하에서의 측정값은 없는 상황이며 10 eV 이상의 영역에서도 측정값은 J. C. Chou와 V. N. Kononov의 값 정도가 있을 뿐이다. 이 두 사람의 측정값은 1970년대에 측정된 값이며 두 측정값 사이에 일치도는 비교적 높으나 공명영역에서의 재현성은 상당히 떨어짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 중성자 에너지 10 eV 이하에서의 포획 단면적을 처음으로 측정하였으며 공명영역에서의 재현성도 평가값인 BROND 2.2와 잘 일치함을 알 수 있다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 전에너지 흡수형 BGO 검출장비를 이용하여 TOF법으로 Sm(n, γ) 반응에 대한 중성자 포획단면적을 측정하여 계산에 의한 평가값과 잘 일치하는 결과를 얻었다. 특히 1 eV 근처에 존재하는 큰 S-wave 공명은 본 연구에서 매우 잘 재현되었다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 열중성자 영역에서부터 10 eV 까지의 중성자에 대한 포획단면적을 측정하였는데 앞으로 10 eV 이상의 계속되는 공명 피크들과 연속부분에서의 중성자 포획단면적 측정을 위해 10 eV 이상의 에너지 영역에서의 측정이 요구된다.

Reference

- [1] J. R. Yoon and S. Y. Lee, "A Study on the Energy-dependent Neutron-capture Cross-section of Natural Cesium(^{133}Cs) by Using a Continuous Neutron Flux" *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 61, pp. 7-15, 2011.
- [2] S. Y. Lee, J. Hori, and M. Igashira, "Measurements of Capture Gamma Rays from the Broad 27-, 49-, and 97-keV Neutron Resonances and the Narrow " *Journal of Nuclear Science and Technology*, 36, 9, 719, 1999.
- [3] J. L. Kloosterman and J. M. Li, *ibid.*, *Commissariat a l'Energie Atomique*, p.1106, 1995.
- [4] J. Tommasi, *Proc. of Int. Conf. on Future Nuclear System: Global '97*, Yokohama, Japan, Oct.5-10, 1997, Vol.1, p.224, 1997.
- [5] S. Y. Lee, "A Study on the Energy Dependent Neutron Capture Cross-Section and Their Capture Resonances for ^{169}Tm by Continuum Neutron Flux from the 46-MeV Linac" *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 60, p. 338, 2010.
- [6] J. R. D. Lepine and R. A. Douglas, "Fast neutron capture cross-section measurements of rare-earth nuclei" *Nuclear Physics*, A196, p. 83, 1972.
- [7] Hidaka, M. Enihara, S. Yoneda, "Neutron capture effects on samarium, europium, and gadolinium in Apollo 15 deep drill-core samples" *Meteoritics and Planetary Science*, Vol. 35, P. 581, 2000.
- [8] J. R. Yoon, T. I. Ro, S. Y. Lee, "Measurement of the Energy-Dependent Neutron Capture Cross-Section of ^{127}I " *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 50, p. 224, 2005.
- [9] S. Y. Lee, S. B. Lee, J. H. Lee, J. M. Lee, J. R. Yoon, Y. G. Min, S. C. Jung, T. I. Ro, G. N. Kim, Jun-ichi Hori, Shuji Yamamoto, Katsuei Kobayashi, "Measurement of the Neutron Capture Cross-Section of Tantalum by Using the Neutron Time-of-Flight Method" *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 49, p. 241, 2004.
- [10] J. H. Lee, S. Y. Lee, "Energy Calibration for Neutron Capture Resonance of Natural Sm by Using 46-MeV Electron Linear Accelerator " *The Korean Society of Radiology*, Vol. 1, No.2, p. 31, 2007.
- [11] S. Y. Lee, "Measurement of Branching Ratio for broad 27-keV Resonance of $^{19}\text{F}(n, \gamma)^{20}\text{F}$ Reaction by using Time-of-flight Method with Anti-Compton NaI(Tl) Spectrometer" *The Korean Society of Radiology*, Vol. 2, No.3, p. 33, 2008.
- [12] BROND, *USSR evaluated neutron data library*.
- [13] J. C. Chou, H. Werle, "(n, γ)-Cross-section measurements of ^{99}Tc , Eu, Sm and Fe in the energy range 1 eV to 50 keV with a slowing-down time spectrometer " *Journal of Nuclear Energy*, Vol.27, p.811, 1973.
- [14] V. N. Kononov, B. D. Jurlov, G. N. Manturov, E. D. Poletaev, V. M. Timokhov, V. S. Shorin, "Average neutron radiative capture cross-section in the energy range 5-30 keV for in, Ta, Au and Nd, Sm, Eu, Gd, Er isotopes" *Yadernye Konstanty*, No.22, p.29, 1977.
- [15] F. J. Briesmeister (Ed.), *MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport*, Version 4B, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.

연속에너지 중성자에 대한 천연 Sm의 중성자 포획단면적 측정

윤정란

동아대학교 신소재물리학과

요 약

중성자에너지 영역 0.003 eV에서 10 eV에 대해 천연 Sm의 $\text{Sm}(n,\gamma)$ 반응에 대한 중성자 포획단면적을 측정하였다. 교토대학교 원자로실험소의 46-MeV 전자선형가속기에서 발생하는 전자의 광핵반응에 의한 중성자를 사용하였고 TOF 방법으로 측정하였다. 사용한 검출기는 12개의 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 섬광체로 구성되었고 이 검출장치로 $\text{Sm}(n,\gamma)$ 반응으로부터 나오는 즉발감마선을 측정하였다. 검출장치는 중성자 생성 위치로부터 12.7 ± 0.02 m 위치에 설치되었으며 $^{10}\text{B}(n,\alpha\gamma)^7\text{Li}$ 반응을 이용해 Sm 시료에 입사되는 중성자 선속을 구하였다. 또한 중성자 선속의 변화를 확인하기 위해 BF_3 검출기로 모니터링 하였다. $\text{Sm}(n,\gamma)$ 반응단면적 측정결과는 BROND 2.2에 의한 평가결과와 J. C. Chou 및 V. N. Kononov 의 측정값과 비교하였다.

중심단어: 중성자 포획단면적, Sm, 46-MeV 선형가속기, BGO 검출기