

## A Study on Neutron Resonance Energy of Tantalum by 46-MeV Electron Linac TOF Method

Samyol Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University

### 46-MeV 전자선형가속기의 TOF 방법을 이용한 탄탈의 중성자 공명 에너지 분석에 관한 연구

이삼열

동서대학교 방사선학과

#### Abstract

Neutron sources from photonuclear reaction with 46-MeV electron linear accelerator at Research Reactor Institute, Kyoto University used for resonance energy measurement of natural tantalum. BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) scintillation detectors used for measurement of the prompt gamma ray from the natural tantalum sample. The BGO spectrometer was composed geometrically as total energy absorption detector. The electric signal from the spectrometer was analyzed for TOF(Time-of-Flight) spectrum which is used identification of neutron capture resonance energy. In this study, the neutron energy region is from 1 to 200 eV, because of strong X-ray effect produced photonuclear reaction in Ta target, the measurement was performed to below 1 keV energy region. The resonance energy was compared with the evaluated values(ENDF/B-VI, Mughabghab). All of the resonances from 4.28 ~ 200 eV were seen in the present measurement except 144.3 eV resonance.

Key words: neutron capture, resonance energy, Time-of-flight method, Tantalum

#### 요약

천연 탄탈의 중성자포획에 의한 공명에너지를 측정하기 위하여 교토대학의 원자로연구소의 46-MeV 전자선형가속기의 광핵반응에서 발생하는 중성자를 이용하였다. 중성자포획에서 발생하는 즉발감마선을 BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )섬광검출장치로 측정하였다. 검출장치는 탄탈 시료에서 발생하는 즉발감마선을 기하학적으로 모두 측정하도록 만들어져 있으며 측정되어진 전기적 신호를 탄탈의 중성자 공명에너지 동정하는 스펙트럼구성에 사용하였다. 연구에서 사용되어진 중성자의 에너지는 1 ~ 200 eV 영역에 대하여 각각의 공명에너지를 분석하였다. 중성자에너지 측정은 중성자 비행시간법(TOF: Time-of-Flight)을 통하여 측정하였다. 광핵반응을 통한 중성자발생에서는 고에너지영역에서 강한 제동복사선이 발생하므로 수 keV영역 이하 영역의 중성자에너지에 대해서만 중성자공명을 측정하였다. 얻어진 Ta에 대한 중성자 포획 공명에너지 측정결과는 이전의 실험에 의한 측정 결과들 및 ENDF/B-VI와 Mughabghab의 평가된 값들과 비교 및 검토를 하였다. 측정되어진 공명들은 4.28 eV에서 거대 공명들을 측정하였고 그 이상의 에너지 영역의 다른 공명들도 이론에 의해서 계산되어진 값들과 비교하였다. 144.3 eV를 제외한 공명들은 평가값들

과 거의 일치하는 경향을 보였다.

중심단어: 중성자포획, 공명에너지, 비행시간법, 탄탈

## I. 서론

중성자포획반응에 대한 연구 중 공명에너지에 대한 연구는 수십년 전 부터 계속적으로 해오고 있지만 그 결과들의 대부분은 원자력발전 및 핵무기개발을 배경으로 필요한 원소들에 한하여 얻어지고 있다. 따라서 원자력발전과 핵무기 개발 분야에서 선도하고 있는 미국, 일본, 러시아, 프랑스 등의 선진국에서는 국가적 차원에서 중성자반응에 대한 데이터를 구축해 오고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 원자력발전과 핵무기개발과 관련성이 적은 핵종에 대해서는 그 데이터의 양 및 정확도가 부족한 것이 현실이다. 한편 최근의 미래형원자로 개발이나 우주물리, 우주개발에 따른 우주선의 방사선 피폭방지 설계 및 의료 방사선 치료·진단분야 등의 여러 분야의 방사선에 대한 응용이 확대됨에 따라서 그 연구의 중요성과 필요성이 커지고 있다. 특히 본 연구에서 측정되어진 중성자포획 공명에너지는 물질의 중성자 포획 후 만들어지는 여기상태의 핵준위의 에너지를 결정하는 것으로서 물질의 핵구조 연구와 차폐 설계 등에 중요하다<sup>[2]</sup>. 탄탈의 경우 열중성자포획단면적은 20.67 barn으로 비교적 큰 물질에 속한다. 따라서 원자로 노심속에서의 중성자속을 감속시키는 물질이기도 하다. 이와 같이 정확한 중성자 포획반응에 대한 정보는 중요하며 그 중에서도 중성자에 대한 정확한 공명에너지 측정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 천연 탄탈(Natural Tantalum)에 대한 중성자 공명에너지측정을 하였다. 탄탈의 경우 자연속에는 질량수가 Ta<sup>180</sup>과 Ta<sup>181</sup>의 2가지로 자연속에 존재하고 있으며 그 비율이 Ta<sup>181</sup>의 경우 99.988% 존재하며, 180의 경우 0.012% 존재하고 있다. Ta<sup>181</sup>의 경우 안정된 동위원소의 형태로 존재하고 있으나 Ta<sup>180</sup>의 경우는 양성자과잉핵종으로 전자포획(EC)의 확률이 86%를 가지며 반감기가 1.2×10<sup>15</sup>년이다.<sup>[3]</sup>

그러나 탄탈에 대한 중성자포획공명 데이터는 일부 있으나 공명에너지에 대한 정확한 결과는 부족한 현황이다<sup>[4]</sup>. 따라서 본 연구에서는 일본 교토대학 원자로 실험소(KURRI: Kyoto University, Research Reactor

Institute)가 보유하고 있는 46-MeV 전자선형가속기를 이용하여 광핵반응으로부터 발생된 연속에너지 중성자를 이용하여 중성자 공명에너지를 동정하였다.

## II. 측정

본 연구는 Ta의 중성자포획에 따른 공명에너지를 중성자 포획반응을 통하여 측정하였다. 사용되어진 중성자 에너지 측정법은 TOF(중성자비행시간법) 원리를 이용하였다. 사용되어진 중성자원은 일본 KURRI의 46-MeV 전자선형가속기로 가속된 고속의 전자선을 탄탈(Ta: Tantalum) 표적에 조사시켜 광핵반응( $\gamma, n$ )에 의해 발생된 중성자를 이용하였다. 전자선형 가속기의 운전조건으로는 가속전자의 에너지가 30 MeV이며 펄스폭이 0.1  $\mu$ sec, 전자선의 반복 발생수가 150 Hz의 전자빔을 이용하였다. 실험 장치에 대한 자세한 설명은 이전에 보고되었던 논문들에 자세히 설명되어 있다.<sup>[4]</sup>

사용되어진 시료로서는 금속판 형태로서 가로 세로가 각각 1.8 cm x 1.8 cm이며 두께는 0.1 mm (2.72 g, 2.82 atoms/kb)의 시료를 사용하였다. 이 두께는 공명들의 형태와 공명에너지를 고려하여 결정하였다. 시료의 두께가 너무 두꺼우면 공명이 포화되어 정확한 공명에너지를 알 수 없으며 너무 얇으면 공명포획이 잘 일어나지 않기 때문에 공명이 잘 일어나지 않아 검출기로부터 공명에 대한 전기적인 신호를 얻기 어렵게 된다. 탄탈 시료는 중성자원으로 부터 약 12.7 ± 0.02 m 떨어진 BGO검출장치의 중심에 설치하였다. 검출장치의 중앙부위 주위에는 전에너지 흡수형 감마선 검출기인 12의 BGO (Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>) 5 x 5 x 7.5 cm<sup>3</sup>로 조합되어진 감마선 검출장치를 설치하였다. 시료에 입사된 중성자의 산란을 줄이기 위하여 3 mm 두께의 <sup>6</sup>LiF 타일을 사용하여 산란 중성자를 차폐하였다. 검출기에서 발생된 신호들은 FAST Com Tec's MPA/PC를 사용하여 2차원으로 측정을 하였다.

공명에 의한 중성자 포획 에너지는 중성자비행시간법(TOF: Time-of-Flight)을 이용하여 결정하였다. 이때 결정되어지는 포획중성자의 에너지는 다음 식(1)에 나

타내었다. 여기에서  $L$ 은 중성자발생원에서부터 검출기까지의 거리이며  $t$ 는 중성자의 비행시간을 의미한다.

$$E(t) = \left( \frac{72.3 \times L}{t} \right)^2 (MeV) \dots\dots\dots (1)$$

중성자 비행시간은 측정 장치의 채널수에 각 채널당 시간을 곱하여 중성자의 에너지가 결정되어 질 수 있다. 본 실험에서는 중성자에너지 분해능을 고려하여 0.25  $\mu$ sec의 채널당 시간( $Ch_t$ )을 결정하였다. 총 채널수(D)는 8192를 선택하여 되도록 중성자에너지 분해능을 최대한 높였다. 중성자 비행 거리의 경우 본 실험에서는  $12.7 \pm 0.02$  m 이다.

### III. 해석

중성자포획 실험을 통하여 측정되어진 TOF 에너지 스펙트럼을 에너지 구간에 따라서 Fig. 1 (0 ~ 40 eV), Fig. 2 (40 ~ 100 eV), Fig. 3(100 ~ 200 eV)에 나타내었고 각각의 공명에너지를 표1에 기술하였다. 각 구간에 나타내어진 공명의 결과는 Mugabghab<sup>[5]</sup>의 이론 결과와 ENDF/B-VI<sup>[6]</sup>의 계산 결과와 비교하였다. Ta의 경우 열중성자 부근의 낮은 에너지 영역에서는 전형적인  $1/v$  형태의 단면적을 보이다가 S-wave 공명을 가지게 된다.<sup>[6]</sup> Fig. 1에서 나타난 에너지가 가장 낮은 첫 번째 공명은 4.28 eV의 공명으로 매우 잘 알려진 공명이며 본 실험에서도 관측이 되었다. 4.28 eV부터 30.02 eV 까지의 공명들은 본 실험에서 측정된 것과 같이 계산값들에서도 예측되어진 값들이다. 34.19 eV의 경우 매우 작은 공명을 가지고 있어서 계산상으로는 나타나지만 측정에서는 약간의 공명의 비대칭성만을 보였다. 39.5 eV에서 63.11 eV 까지의 공명들은 계산값들에서 예측된 값들과 오차범위 내에서 매우 잘 일치함을 보였다. 70 keV이상의 에너지 영역에서는 본 시스템의 에너지 분해능의 한계로 공명의 분리가 명확히 일어나지는 않았지만 200 eV 영역까지 조사한 결과 거의 대부분의 계산에 의해서 얻어진 공명에너지들이 확인되었다.

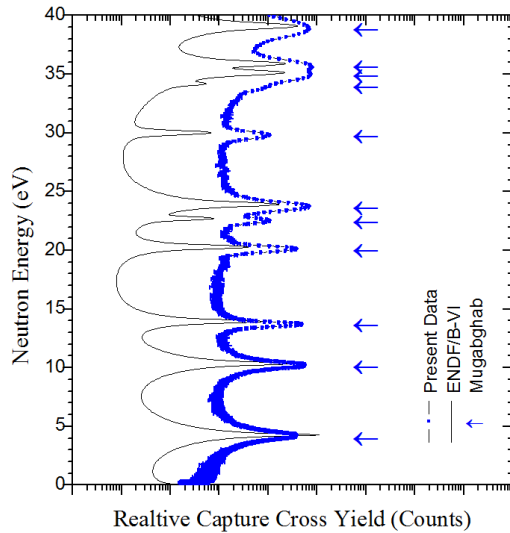


Fig. 1. Neutron TOF spectrum of Tantalum (Neutron Energy: 1~40 eV)

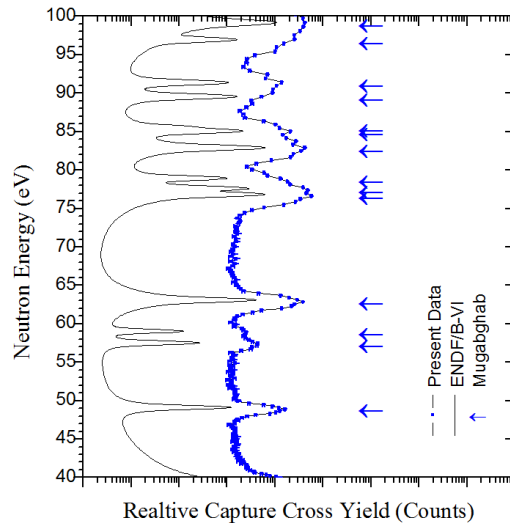


Fig. 2. Neutron TOF spectrum of Tantalum (Neutron Energy: 40~100 eV)

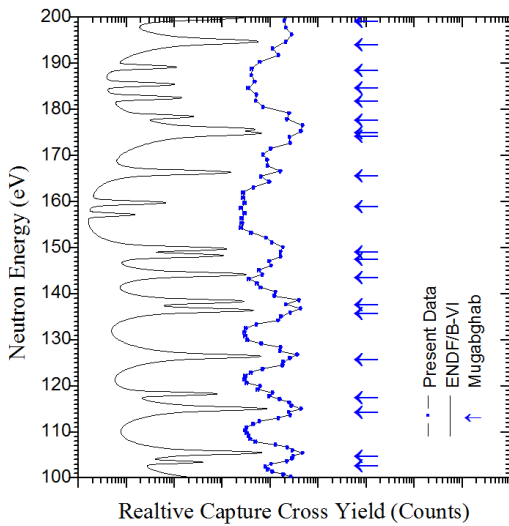


Fig. 3. Neutron TOF spectrum of Tantalum (Neutron Energy: : 100~200 eV)

그리고 70 eV 이상의 에너지 영역에서는 Mughabghab와 ENDF/B-VI의 공명에너지 값들이 서로 상이한 결과들을 보였다. 이 부분의 에너지 동정에 대해서는 중성자 비행거리가 더 긴 새로운 시스템을 이용한 더 자세한 실험이 필요하다. 85.6 eV 공명에 대해서는 Mughabghab의 계산 결과에는 예측이 되었고 ENDF/B-VI의 계산 결과에서도 예측되었지만 그 공명의 크기가 매우 작아 본 실험에서는 확인되지 못하였다. 70 eV에서 100 eV 이하의 에너지 영역에서는 거의 대부분의 공명들이 관찰되었다. 100 eV 이상에서 200 eV이하의 영역에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 거의 대부분의 공명들이 발견되었으나 150 eV이상의 영역에서는 본 측정 장치의 구조적 한계에 의해서 분해능이 작아 인접한 공명의 경우 각각의 공명에너지를 확인하지는 못했지만 144.3 eV의 경우 Mughabghab의 계산 결과에는 예측이 되었고 ENDF/B-VI의 계산 결과에도 예측되었지만 본 실험 결과 주위의 공명들의 중성자포획단면적의 크기를 비교한 결과 공명이 없는 것으로 관측되었다. 그 외에

157.2 eV 공명의 경우에는 Mughabghab의 계산 결과에는 없으나 ENDF/B-VI의 계산 결과에는 예측되었던 공명은 본 실험에서는 에너지 분해능의 한계로 판별이 불가능 했다. 그 외에도 159.9 eV의 공명과 182.7, 185.6, 189.3 eV 공명의 경우에는 S/N 값이 작아 공명유무의 판별과 에너지 판별이 어려웠다. 199.47 eV공명의 경우에는 주위의 공명들을 종합적으로 분석한 결과 존재유무를 확실하게 알았으나 공명 에너지 측정에는 어려움이 있었다. 본 연구에서 측정되었던 공명에너지의 값은 표1에 기술되었다. 측정 장치의 에너지 분해능의 한계로 인하여 구분되기 어려운 공명들에 대하여는 전체적인 공명의 크기와 폭을 고려하여 존재유무를 확인하여 존재하는 경우 (O)로 표시하였고, 없는 경우 (X)로 표현하였다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 중성자비행시간법을 통하여 얻어진 Ta의 중성자포획에 공명에너지를 측정하였다. 중성자원으로는 일본 KURRI의 46-MeV 전자선형가속기의 광핵반응을 통하여 얻었고, 얻어진 공명에너지의 결과는 이론 계산 결과인 ENDF/B-VI와 Mughabghab의 결과들과 비교분석하였다. 200 eV 이하의 에너지 영역에 대하여 총 46개의 공명이 보고되고 있으나 본 실험에서는 39개의 공명이 확인 되었다. 에너지가 높은 영역의 일부는 에너지 분해능의 한계로 존재여부를 확인하지 못하였다. 144.3 eV의 경우는 본 연구에서 확실하게 존재하지 않는 공명임을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 공명에 대한 정보는 향후 핵구조를 결정하는 이론 연구에 중요한 정보를 제공한다.

#### 감사의 글

저자는 본 연구를 함에 있어서 도움을 주신 일본교토대학교의 원자로연구소의 직원들의 도움을 감사함을 드립니다. 그리고 본 연구는 2012년 동서대학교 프런티어연구에 의해서 지원되었습니다.

Table 1. Compare the present neutron resonance energy with Mughabghab and ENDF/B-VI (O: confirmation, X: Unconfirmed)

	Present (eV)	Mughabghab (eV)	ENDF/B-VI (eV)		Present (eV)	Mughabghab (eV)	ENDF/B-VI (eV)
1	4.25 ± 0.09	4.28	4.28	24	0	96.98	96.98
2	10.18 ± 0.2	10.36	10.36	25	0	99.2	99.2
3	13.7 ± 0.27	13.95	13.95	26	0	103.57	103.48
4	20.12 ± 0.4	20.29	20.29	27	0	105.57	105.52
5	22.51 ± 0.45	22.72	22.72	28	0	115.14	115.07
6	23.73 ± 0.47	23.92	23.92	29	0	118.36	118.3
7	29.82 ± 0.6	30.02	30.02	30	0	126.5	126.46
8	0	34.19	34.2	31	0	136.51	136.46
9	35.00 ± 0.7	35.14	35.14	32	0	138.44	138.38
10	35.58 ± 0.71	35.9	35.9	33	X	144.3	144.24
11	38.85 ± 0.78	39.12	39.12	34	0	148.41	148.35
12	48.89 ± 0.98	49.13	49.13	35	0	149.88	149.8
13	57.43 ± 1.15	57.53	57.53	36	X	X	157.2
14	58.9 ± 1.18	59.05	59.05	37	X	159.86	159.8
15	62.84 ± 1.26	63.11	63.11	38	0	166.47	166.4
16	0	76.85	76.85	39	0	174.98	174.9
17	0	77.61	77.61	40	0	175.81	175.71
18	0	78.89	78.95	41	0	178.62	178.5
19	0	82.92	82.92	42	X	182.65	182.6
20	0	85.1	85.1	43	X	185.58	185.5
21	X	85.6	85.1	44	X	189.33	189.25
22	0	89.58	89.58	45	0	194.86	194.8
23	0	91.4	91.4	46	0	200.07	200

### 참고문헌

- [1] S. Harnood, M. Igashira, T. Matsumoto, S. Mizuno, and T. Ohsaki, J. Nucl. Sci. Tech. 37 (2000) 740.
- [2] Mukaiyama, T., et al.: Conceptual study of actinide burner reactors, Proc. of 1988 Int Reactor Phys. Conf., Jackson Hale, Vol. IV, p.369, 1988.
- [3] "Chart of the Nuclides 1996", Takayoshi Horiguchi et al, Department of Physics, Faculty of Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739, Japan.
- [4] J. Yoon, T. Ro, S. Lee, S. Yamamoto, and K. Kobayashi, Ann. Nucl. Energy 29 (2002) 1157.
- [5] S. F. Mughabghab, M. Divadeenam and N. E. Holden, Neutron Cross Sections, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Vol. 1, part A: Z=1-60(Academic Press, New York, 1981.
- [6] "ENDF-201, Summary Documentation", BNL-NCS- 17541, MOD1 New Evaluation (ENDF/B-VI) 4th ed., P. F. ROSE, Ed., Brookhaven National Laboratory (1991).