

A Study on Measurement of Gamma-ray Spectrum for the Natural Tungsten nuclear reaction by using KOMAC proton Linear Accelerator

Samyol Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University

Received: January 23, 2018. Revised: April 15, 2018. Accepted: April 30, 2018

ABSTRACT

The measurement of gamma-ray spectrum of $^{nat}\text{W}(p,xn)$ reaction with natural tungsten were performed by using a high energy proton generated from a 100-MeV proton linear accelerator of the Korea Multi-purpose Accelerator Complex (KOMAC). Gamma rays generated by various nuclides generated through the nuclide were measured using a gamma-ray spectroscopy system composed of HPGe detector. A gamma-ray standard source was used for energy calibration and efficiency measurement of the detector. Analysis of the gamma rays observed in the measured spectra showed that the radionuclides produced were ^{167}Re , ^{178}Re , ^{179}Re , ^{180}Re , ^{181}Re , ^{182}Re , ^{184}Re , ^{172}Ta , ^{174}Ta , ^{178}Ta , ^{182}Ta , ^{184}Ta , ^{175}W , ^{176}W , ^{177}W and ^{179}W . Nuclides were generated. The results of this study will be applied to nuclear fusion, astrophysics, and nuclear medicine applications in the future.

Keywords: Tungsten, Nuclear reaction, Gamma-ray spectrum, Proton beam, KOMAC

I. INTRODUCTION

최근 양성자를 이용한 연구들이 우리나라의 양성자가속기연구센터(KOMAC : Korea Multi-purpose Accelerator Complex)가 구축된 이후 다양하게 수행되어오고 있다.^[1] 특히 고에너지 양성자를 이용해 우주항공, 나노/재료, 에너지/환경, 생명공학, 정보통신, 의료 보건 등 다양한 분야의 신기술 개발 연구들이 활발히 수행되어 오고 있다.^[2] 이 연구들은 최대 에너지 100-MeV를 가지는 KOMAC 양성자빔이 물질 속에 들어갔을 때 일어나는 핵과의 상호작용을 기초로 하고 있다. 고에너지 양성자가 물질 속에 들어가면 양성자의 에너지에 따라 물질과 다양한 핵반응을 통해 핵변환을 일으키고 물질의 조성과 성질을 변화시킨다. 이때 생성되는 물질들의 거의 대부분이 방사성 핵종들로 양성자과잉핵종들을 생성하게 되고 많은 핵종들이 베타 + 붕괴와 EC를 일으키며 안정한 동위원소로 붕괴하게 된다.^[3] 따라서 양성자를 이용한 핵종변환 연구에서

얻어진 결과들은 앞에서 기술한 다양한 분야를 연구하기 위한 기초 데이터로서 매우 중요하다. 특히 핵종변환과 관련하여 방사성 핵종 생산, 핵 데이터 생산 및 핵물질 개발 분야에서는 매우 중요한 정보 중의 하나로 이 분야에 대한 수준 높은 연구들이 수행되고 있다.^[4] 이런 핵종변환과 관련해 과거에는 원자력발전소의 원자로 개발을 위한 특정 방사성 핵종 연구를 위한 데이터 개발 연구가 대부분이었고 또한 대부분이 중성자 핵반응 데이터였다. 그러나 최근에 핵융합로의 개발, 천체 물리학의 p-process에 대한 연구, 항암치료를 위한 양성자 과잉방사성동위원소 생산 및 고에너지 양성자빔을 이용한 암치료 등을 위한 양성자 핵 데이터가 요구되어 왔으나, 수백 MeV의 에너지 영역에서 양성자 핵반응 데이터는 부족한 것이 현실이다. 따라서 양성자 핵반응관련 자료가 양적으로나 질적으로 부족한 것이 현실이다. 따라서 다양하고 정확한 양성자 핵반응 자료의 필요성이 증가되고 있다.^[5]

본 연구에서는 용융점, 강도 및 원자번호가 상대

* Corresponding Author: Samyol Lee

E-mail: samuel@gdsu.dongseo.ac.kr

Tel: +82-51-320-2728

적으로 높은 원소인 천연 텅스텐(W, tungsten, Z: 74)과 KOMAC에서 발생하는 고에너지 양성자와의 핵반응($^{nat}W(p,nx)$)을 시도하였다. 연구에 사용되어진 천연 텅스텐은 ^{180}W , ^{182}W , ^{183}W , ^{184}W , ^{186}W 의 5종류의 동위원소를 포함하고 있으며, 각각 0.13%, 26.3%, 14.3%, 30.6%, 28.6%의 비율로 자연계에 존재하고 있다.^[6] 본 연구에서는 고에너지 양성자 선형가속기에서 발생된 100-MeV 에너지 양성자를 천연 텅스텐 핵에 입사시켜 핵반응을 시켰고 그 결과로 만들어지는 다양한 핵종변환에 의해 발생하는 지발 감마선을 고순도 HPGe검출기를 이용하여 측정해 이때 발생할 수 있는 다양한 핵종들을 측정하고 Table of Isotopes의 결과와 비교하였다.^[6]

II. MATERIAL AND METHODS

1. 100-MeV 고에너지 양성자 가속장치

본 실험은 최고 100-MeV의 에너지를 발생시킬 수 있는 KOMAC의 양성자 선형가속기를 이용하여 방사화 실험을 하였다. 가속된 양성자와 시료의 반응을 일으키기 위해 양성자 빔조사실 TR 103을 사용하였다. 양성자 가속기에서 발생하는 빔은 펄스 형태로 공급되며 1 Hz의 반복횟수로 조사되었다. 이때 평균 빔전류는 0.1 mA의 조건에서 조사되었다. 빔조사 조건을 Table 1에 나타내었다. 빔의 물리적 크기는 최대 직경이 300 mm 으로 빔의 중앙에 표적을 설치해 충분히 방사화가 일어나도록 양성자 빔을 조절하였다. 자세한 실험방법에 대해서는 이전에 발표한 논문에서 상세히 기술하였다.^[4]

Table 1. Specifications of the irradiation condition parameters in the present measurement.

Beam Parameter	Unit
Proton beam energy (MeV)	94
Average current (mA)	0.1
Repetition rate (Hz)	1
Beam size (mm dia)	300

2. ^{nat}W 시료의 방사화

방사화를 위한 표적시료의 넓이는 10.0×10.0

mm^2 이고 두께는 0.1 mm의 금속편 형태이다. 양성자빔 조사 후 검출기를 통한 지발 감마선의 측정 시 시료의 크기가 너무 큰 경우 발생할 기학적 검출효율의 오차, 방사화 후 감마선의 방사능 감쇄 및 양성자 빔의 시료 내에서의 감쇄 등을 고려하여 제작하였다. 시료에 대한 자세한 사항은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Specifications of the sample for natural tungsten.

Sample	^{nat}W
Chemical form	Metal
Chemical purity (%)	^{180}W (0.13)
	^{182}W (26.3)
	^{183}W (14.3)
	^{184}W (30.6)
	^{186}W (28.6)
Size (mm^2)	10.0×10.0
Thickness (mm)	0.1

가속기에서 발생된 고에너지 양성자 빔은 1 Hz의 주기로 반복적으로 ^{nat}W 시료에 조사하여 원하는 양성자 양을 적분하여 빔 조사량($2.8 \times 10^{11} \# / cm^2$)을 결정하였다. 양성자빔의 조사량은 시료가 조사된 후 다양한 핵종으로 핵종변환을 일으켜 강한 지발 감마선이 발생하므로 측정 시 검출기의 검출효율과 불감시간(10% 이하)을 고려하여 결정하였다.

3. 지발 감마선 측정

고에너지 양성자빔이 ^{nat}W 에 입사하게 되면 $^{nat}W(p,xn)$ 핵반응에 의해서 다양한 동위원소를 생성하게 되고 이 동위원소에서 발생하는 지발 감마선은 다양한 에너지를 가지게 된다. 본 연구에서는 이 지발 감마선을 고순도 게르마늄(HPGe)검출기를 통하여 측정하였고 Fig. 1에 나타내었다. HPGe검출기는 Canberra사에서 제작된 것으로서 원통형(직경: 47.5 mm dia, 길이: 46 mm)이다. 자세한 검출기의 특성을 Table 3에 나타내었다. 이 검출기의 특징은 HPGe검출기 중에서도 낮은 에너지의 감마선에 대한 측정 효율이 상대적으로 높게 설계되어져 있는 GMX 형식의 검출기여서 핵자수가 많은 핵종들로부터 발생할 수 있는 낮은 에너지의 감마선 검출에 매우 용이한 특징을 가지고 있다.^[7]

Table 3. Specifications of the sample for ^{nat}W .

Unit	Characteristic
Size (mm dia × mm)	47.5 × 46
Window thickness (cm)	5
Applied voltage (Volt)	-3,500
Peak Compton Ratio	46:1
Energy resolution (keV)	1.8 at 1.333 MeV
Relative efficiency (%)	15

실험에 사용된 검출기는 자연방사선에 의한 영향을 최대한 줄이기 위하여 검출기 방향을 제외한 나머지 부분을 두께 5 cm 납으로 차폐하였다. 검출기의 측정 효율을 최대로 얻기 위해 반도체 검출기의 최대 공핍층을 얻을 수 있는 -3,500 Volt의 전압을 검출기에 인가하였다. 사용한 검출기를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1. HPGe detector for measurement of delayed gamma-ray from the ^{nat}W sample.

HPGe 검출기는 전치증폭기를 통하여 낮은 형태의 잡음을 제거한 후 출력신호를 Fast spectroscopy Amplifier에 입력하여 선형증폭 하였다. 잡음제거를 위하여 약 50 keV 에너지 영역 이하의 감마선은 차단하였다. 선형 증폭된 신호는 Multi-Channel Analyser에 입력하여 파고에 따른 에너지 분석을 하고 그 결과를 PC에 저장하였다.

III. DATA ANALYSIS

1. HPGe 검출기의 에너지 교정

감마선 검출에서 검출기의 에너지 교정은 그 결과의 신뢰성을 인정하기 위한 매우 중요한 작업 중의 하나이다. 본 연구에서 HPGe 검출기의 에너지 교정을 위해서 사용한 표준선원을 Table 4에 나타내었다. 또한 각각의 감마선에서 얻어진 상대 효율을 Fig. 2에 나타내었다.

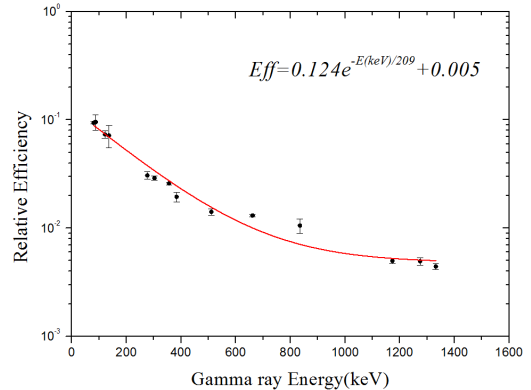


Fig. 2. Gamma-ray detection efficiency of HPGe detector for standard gamma-ray.

Table 4. Specifications of the standard gamma-ray sources.

Gamma-ray sources	Emitted gamma-ray energy (keV)
^{22}Na	511, 1274
^{54}Mn	835
^{57}Co	122, 136
^{60}Co	1174, 1333
^{109}Cd	88
^{133}Ba	81, 276, 303, 356, 384
^{137}Cs	662

2. 감마선 스펙트럼

일반적으로 고에너지의 하전입자가 물질 속에 입사하게 되면 다양한 형태의 핵반응을 일으키게 되고 그 결과 핵종변환을 일으키게 된다. 본 연구에서는 100-MeV 양성자 빔을 이용하여 $^{nat}W(p,xn)$ 반응으로 생성되는 동위원소의 지발 감마선 에너지 스펙트럼을 얻었고 그 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (A)는 감마선에너지 0 ~ 1,000 keV 영역에 대하여 표현하였고, (B)는 감마선에너지 1,000 ~ 2,000 keV영역에 대하여 표현하였다.

IV. RESULT

스펙트럼 분석을 통하여 얻어진 에너지를 Table of Isotopes에 결과들과 비교분석한 후 생성핵종들을 확정하였다. 생성되는 방사성핵종들은 ^{177}Re , ^{178}Re , ^{179}Re , ^{180}Re , ^{181}Re , ^{182}Re , ^{184}Re , ^{172}Ta , ^{174}Ta , ^{178}Ta , ^{182}Ta , ^{184}Ta , ^{175}W , ^{176}W , ^{177}W 및 ^{179}W 으로 16개의 핵종들이 생성됨을 알 수 있었다.

Table 5. Specifications of the standard gamma-ray sources.

Nuclei	half life Decay mode	Table of Isotopes		
		Present Energy (keV)	Energy (keV)	Decay Ratio (%)
^{177}Re	14 m, EC	196.7±3.6	196.8	8
		78.9±3.6	79.6	7.1
^{178}Re	13.2 m, EC	236.7±4.0	237.3	45
		105.6±3.1	105.9	23
		936.6±5.8	939.1	8.9
^{179}Re	19.5 m, EC	429.9±4.4	430.2	28
		289.5±4.4	289.9	26.9
		1680.2±5.3	1680.2	13
		415.3±6.2	415.4	10.6
		477.0±4.4	477.3	9.2
		296.2±4.0	296.3	8.9
		188.7±3.1	189.1	7.5
^{180}Re	2.44 m, EC	824.9±1.3	825.3	9.9
^{181}Re	19.9 h, EC	365.5±3.1	365.5	56
^{182}Re	12.7 h, EC	1222.1±3.1	1221.4	24.8
		1190.1±4.4	1189.1	15
		99.8±4.4	100.1	14.3
		1222.1±3.1	1221.4	17.4
		99.8±4.4	100.1	16.4
		351.3±3.1	351.1	10.3
		1190.1±4.0	1189.1	9
		221.5±5.3	222.1	8.5
^{184}Re	38.0 d, EC	792.0±0.9	792.1	37.5
^{172}Ta	36.8 m, EC	213.6±4.0	214.0	46
		94.5±4.0	95.2	17.5
		1110.1±4.4	1109.2	12.4
^{174}Ta	1.05 h, EC	206.0±3.6	206.5	58
^{178}Ta	2.36 h, EC	426.4±3.1	426.3	97
		213.6±4.0	213.4	81.4
^{182}Ta	114.43 d, β -Decay	1221.1±3.1	1221.4	26.98
		1190.1±4.0	1189.1	16.23
		99.8±4.4	100.1	14.1
		221.5±3	222.1	7.49
^{184}Ta	8.7 h, β -Decay	415.5±4.4	414.0	72
		792.0±0.9	792.1	14.5
		213.6±4.0	215.3	11.4
^{175}W	35.2 m, EC	270.0±4.0	270.2	12.6
		166.0±7.1	166.6	9
^{176}W	2.5 h, EC	99.8±4.4	100.2	82
^{177}W	135 m, EC	114.9±4.9	115.6	51
		426.4±3.1	426.9	13.2
		1036.8±4.0	1036.4	10.3
		185.6±4.0	186.2	8.5
^{179}W	6.40 m, IT	221.5±5.3	221.9	96

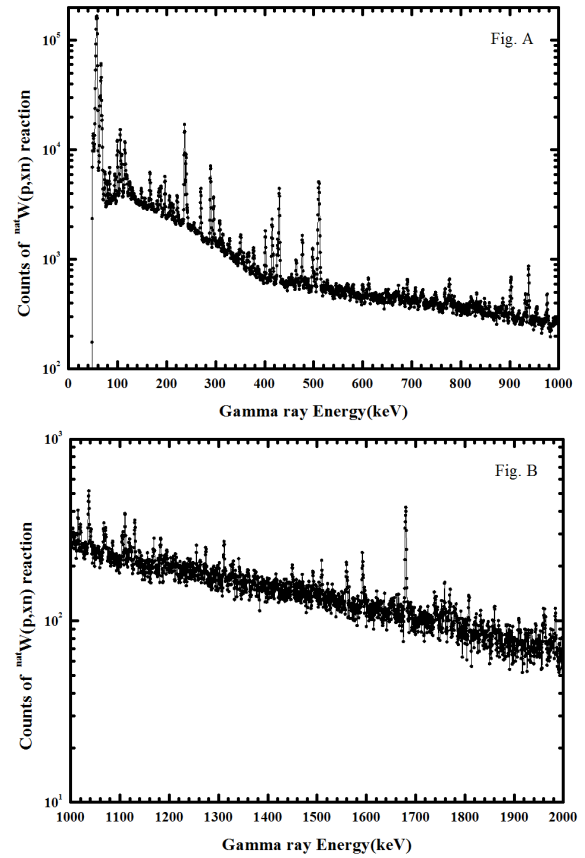


Fig. 3. Gamma-ray energy spectrum from the proton induced ^{nat}W sample by using 100-MeV proton beam.

Table 5에는 본 연구에서 측정되어진 감마선의 에너지와 Table of Isotopes의 제시된 에너지와 붕괴비율을 표시하였다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 고에너지 양성자 선형가속기에서 발생된 100-MeV에너지 양성자를 천연 텅스텐 핵에 입사시켜 $^{nat}\text{W}(p,nx)$ 핵반응을 만들었다. 그 결과 발생된 다양한 핵종에 의해 발생된 지발감마선을 고순도 HPGc검출기를 이용하여 측정하였고 그 결과를 Table of Isotopes의 데이터와 비교하였다. 결과적으로, 생성되는 방사성핵종들은 7개의 Re(^{177}Re , ^{178}Re , ^{179}Re , ^{180}Re , ^{181}Re , ^{182}Re , ^{184}Re) 동위원소와 5개의 Ta(^{172}Ta , ^{174}Ta , ^{178}Ta , ^{182}Ta , ^{184}Ta) 동위원소 및 4개의 W(^{175}W , ^{176}W , ^{177}W , ^{179}W) 동위원소로 총 16개의 핵종들이 생성됨을 알 수 있었다.

Acknowledgement

이 논문은 2016년도 동서대학교 "Dongseo Frontier Project" 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

Reference

- [1] YongHo Jung, YongSup Choi, KyuSun Chung, "Development of a Beam Current and Position Measurement System for the Korea Multipurpose Accelerator (KOMAC)" *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 44, No. 5, pp. 1067-1070, 2004.
- [2] Hyeok-Jung Kwon, "Design Study on the Beam Line for Radioisotope Production at KOMAC", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 67, No. 8, pp. 1387-1392, 2015.
- [3] A. K. Lavrukhina, L. D. Revina, V. V. Malyshev, L. M. Satarova, "Reactions of Deep Spallation of Fe Nuclei By 150-MeV Protons", *Journal of Experiment Theoret. Physics*, Vol. 44, pp. 1429-1436, 1963.
- [4] Jieun Lee, Jungran Yoon, Taeik Ro, Samyol Lee, "Measurement of the Relative Cross-section of the $^{208}\text{Pb}(p,x)\text{Bi}$ Reaction by Using a 100 MeV Proton Beam", *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 65, No. 9, pp. 883-887, 2015.
- [5] A. J. Koning, E. Bauge, C. J. Dean, E. Dupont, U. Fischer, R. A. Forrest, R. Jacqmin, H. Leeb, M. A. Kellett, R. W. Mills, C. Nordborg, M. Pescarini, Y. Ruggama, P. Rullhusen, "Status of the JEFF Nuclear Data Library", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 59, No. 2, pp. 1057-1062, 2011.
- [6] <https://application.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/toi.htm>
- [7] Mayeen Uddin Khandaker, "High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry", *IJFPS*, Vol.1, No.2, pp. 42- 46, 2011.

KOMAC 양성자 선형가속기를 이용한 천연 텅스텐 핵반응에 대한 감마선 스펙트럼 측정에 대한 연구

이삼열

동서대학교 방사선학과

요 약

양성자가속기연구센터(KOMAC)의 100-MeV 양성자 선형가속기에서 생성된 고에너지 양성자를 사용하여 천연 텅스텐과 핵반응을 일으켰다. 핵반응을 통해 생성된 다양한 핵종으로 부터의 감마선은 HPGe 검출기 감마선 분광시스템을 사용하여 측정하였다. 감마선 표준선원은 에너지 교정 및 검출기의 효율 측정에 사용되었다. 측정된 스펙트럼에서 관찰된 감마선을 분석한 결과 방사성 핵종은 ^{167}Re , ^{178}Re , ^{179}Re , ^{180}Re , ^{181}Re , ^{182}Re , ^{184}Re , ^{172}Ta , ^{174}Ta , ^{178}Ta , ^{182}Ta , ^{184}Ta , ^{175}W , ^{176}W , ^{177}W 및 ^{179}W 으로 총 16 종류의 핵종이 생성되었다. 이 연구의 결과는 미래의 핵융합, 천체 물리학 및 핵의학 응용 분야에 적용될 것으로 생각된다.

중심단어: 텅스텐, 핵반응, 감마선 스펙트럼, 양성자빔, 양성자가속기연구센터