

A Comparative Study of Branching Ratio of ^{167}Yb Radioactive Isotope from Gamma-ray Spectrum Produced by $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ Reaction with 100-MeV Proton Beam

Sam-Yol Lee^{1,2,*}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: December 19, 2022. Revised: December 22, 2022. Accepted: December 31, 2022.

ABSTRACT

The measurement of branching ratio of ^{167}Yb radioactive isotopes from gamma-ray spectrum of $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ reaction were performed by using a 100-MeV proton linear accelerator of the Korea Multi-purpose Accelerator Complex (KOMAC). The ^{167}Yb isotope has a half-life of 17.5 minutes and decays to ^{169}Tm . The gamma rays generated from the ^{167}Yb isotope were measured using an HPGe detector gamma ray spectroscopy system. The energy calibration of the detector and the efficiency measurement of the detector were determined using a standard source. The gamma rays of known main energy (62.9, 106.2, 113.3, 143.5 and 176.3 keV) were measured. On the other hand, information about the intensity of the generated gamma rays is very inaccurate. Therefore, in this study, the decay strength of the main gamma rays was accurately measured. Overall, it was different from the previously known results, and in particular, it was found that the intensity of the main decay gamma ray, such as the 113.3 and 106.2 keV gamma ray, was overestimated, and it was found that the gamma ray, such as 62.9, 116.7 and 143.5 keV was underestimated. The present results are considered to be important information in the fields of nuclear fusion, astrophysics and nuclear physics in the future.

Keywords: Thulium, Ytterbium, Nuclear Reaction, Proton Beam, Gamma ray Spectrum, HPGe detector, KAERI

I. INTRODUCTION

항공우주, 나노재료, 에너지, 생명공학, 암 치료 등 다양한 분야에서 양성자를 활용한 연구개발들은 활발히 진행되고 있다^[1]. 본 연구는 사용된 한국 원자력연구원 양성자과학연구단 (KOMAC: Korea Multi-purpose Accelerator Complex)의 가속기는 대한민국에서 유일하게 운영되고 있는 고에너지 가속기 시설이다. 본 실험은 최대 에너지 100 MeV 양성자 빔을 활용하였다. 100 MeV 양성자 빔이 물질 속에 입사되었을 때 일어나는 핵과의 상호작용에 대한 연구를 진행하였다.

수 MeV 이상의 양성자가 물질 속에 들어가면 양

성자 에너지에 따른 핵반응단면적의 확률만큼의 핵변환을 일으키고 그 물질의 조성과 성질을 변화시킨다. 이때 생성되는 물질들은 대부분이 양성자 과잉 방사성 핵종들로 β^+ 붕괴와 전자포획(EC: Electron Capture)를 일으킨 후 불안정한 에너지 여기 상태에서 안정한 동위원소로 붕괴하며 감마선을 방출하게 된다^[2]. 이런 감마선은 어미핵의 붕괴로 생성된 딸핵의 여기 상태에서 발생되고 발생된 감마선의 에너지에 대한 정보를 획득함으로써 딸핵의 물리적 정보를 얻을 수 있다. 한편, 양성자 핵반응에 의해서 생성된 양성자 과잉 방사성 핵종에 대한 정보 들은 그 결과들이 부정확한 경우가 많이 있다. 그 이유는 대부분 중성자 핵반응에 의해서

* Corresponding Author: Sam-Yol Lee

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

Tel: +82-51-320-2728

생성된 중성자 과잉 방사성핵종에 비하여 생성되는 핵종들의 반감기가 비교적 짧기 때문에 측정의 어려움을 많이 가지고 있기 때문이다. 본 연구실에서는 수년 동안 양성자 핵반응에 대한 다양한 연구를 수행하고 있으며 반감기가 짧은 핵종에 대한 연구를 수행해 오고 있다^[3].

본 연구는 천연에 100% 존재하며 에너지적으로도 안정한 ¹⁶⁹Tm 시료에 고에너지 양성자를 조사시킴으로써 ¹⁶⁹Tm(p,3n)¹⁶⁷Yb 핵반응을 발생시켜 비교적 짧은 반감기(17.5 분)를 가지는 여기 상태의 ¹⁶⁷Yb 방사성핵종을 생성하였다^[4]. 이런 핵종들은 반감기가 짧기 때문에 표준선원으로 제작하기도 어려울 뿐만 아니라 단일 핵종으로 만들기도 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서와 같이 고에너지 양성자 빔을 이용한 핵반응에서만 생성이 가능한 핵종이다. 따라서 ¹⁶⁷Yb 방사성핵종에 대한 정보가 부족한 것이 현실이다. Table 1에서 보는 것과 같이 ¹⁶⁷Yb 방사성핵종에 대한 현재까지 보고된 결과의 경우도 붕괴에서 발생하는 감마선의 분기비의 총합이 116.3%로 100%를 초과하는 경우도 있어 보고된 수치들에 대한 신뢰성에 문제가 있는 실정이다^[5].

특히 105.2와 106.2 keV 및 176.3과 177.3 keV의 경우는 에너지적으로 매우 근접해 있어서 HPGe(고순도 Ge) 검출기의 에너지 분해능으로 구분하기가 어렵고 각각의 에너지들에 대한 정확한 감마선 붕괴 강도에 대한 정보도 신뢰하기가 어려운 것이 현실이다.

Table 1. Currently reported decay ratio (Table of Isotopes) of main gamma rays from ¹⁶⁷Yb isotope

Gamma ray Energy (keV)	Relative Intensity (%)
62.9	4.9
105.2	0.6
106.2	22.6
113.3	55.4
143.5	2.1
176.3	20.0
177.3	2.7
Others small peaks	8.0
Sum	116.3

따라서 본 연구는 희토류 원소 중의 하나이며 란타나이드 계열 원소 중의 하나인 천연 ¹⁶⁹Tm(thulium, Z: 69, A: 169)과 KOMAC에서 발생하는 100 MeV 양성자와의 ¹⁶⁹Tm(p,3n)¹⁶⁷Yb 핵반응을 시도하였다. 연구에 사용되어진 천연 ¹⁶⁹Tm은 100% 동위원소 비율로 자연계에 존재하고 있다^[6]. 양성자핵반응의 결과로 만들어진 ¹⁶⁷Yb 방사성핵종에서 발생하는 지발 감마선을 HPGe 검출기를 이용하여 측정하여 검출기의 검출효율을 고려한 감마선 발생 강도를 측정하였다. 이 결과를 Table 1에 제시한 Table of Isotopes의 결과와 비교분석 하였다^[5].

II. MATERIAL AND METHODS

1. 100 MeV 양성자 빔의 발생

본 실험은 KOMAC에 설치되어 있는 양성자선형 가속기에서 발생하는 100 MeV 에너지의 양성자를 사용하였다. 핵반응 실험은 빔조사실 TR103을 사용하였다. 양성자 빔은 1 Hz의 펄스형태로 공급되며 ¹⁶⁹Tm 시료가 충분히 방사성물질로 변환되는 방사화에 필요한 양성자수가 만족할 때까지 반복 조사되었다. 이때 발생하는 양성자 빔의 강도를 Fig. 1에 나타내었고 빔의 중앙에 시료가 위치되도록 ¹⁶⁹Tm 시료를 설치하였다.

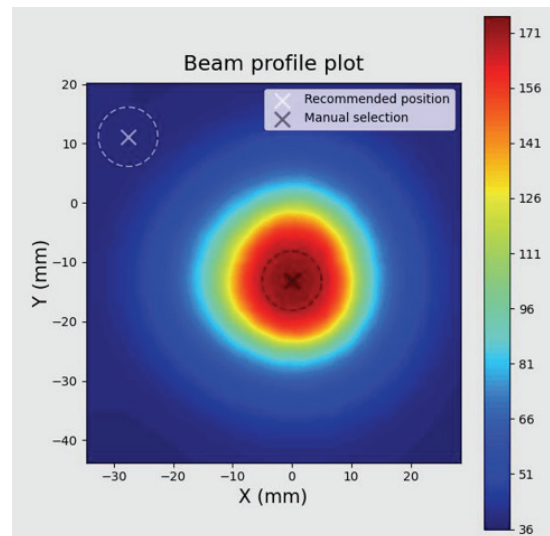


Fig. 1. The profile plot of the proton beam generated from the proton accelerator is shown. The ¹⁶⁹Tm sample was positioned so that it was sufficiently included in the center of the proton beam.

실험에서 사용되어진 양성자 가속기의 조건을 Table 2에 나타내었다. 양성자 빔의 평균 전류는 0.1 mA로 조사하여 충분히 ^{169}Tm 시료에 방사화가 일어나도록 양성자 빔 조사시간을 조절하였다. 조사되는 양성자 빔 양을 적분하여 빔 조사량 ($2.0 \times 10^{12} \text{ \#/cm}^2$)을 결정하였다.

양성자 빔의 물리적 크기는 Fig. 1에 보는 것과 같이 최대 직경이 20 mm로 빔의 중앙에 시료를 위치해 시료 면적을 충분히 포함할 수 있도록 해서 방사화가 일어나도록 양성자 빔을 조절하였다. 보다 자세한 실험방법과 기술에 관해서는 본 연구실에서 발표한 이전 논문에 상세히 기술하였다^[7].

Table 2. Specifications of the proton accelerator condition parameters in the present measurement

Beam Parameter (Unit)	Value
Proton beam energy (MeV)	98.57 ± 1.66
Average beam current (mA)	0.1
Repetition rate (Hz)	1
size (mm dia)	20

2. ^{169}Tm 시료의 제작

다량의 양성자 빔을 조사하기 위해서는 시료의 크기가 크면 유리하지만 양성자 조사 후 발생하는 지발 감마선의 측정을 이상적인 기하학적 조건을 고려한다면 시료를 되도록 점선원에 가깝게 제작하는 것이 기하학적인 오차를 줄일 수 있다.

그러나 현실적으로 어려움이 있기 때문에 발생하는 양성자 빔의 직경의 크기가 20 mm인 점과 양성자 조사 후 시료 내에서의 감마선의 감쇄 및 양성자 빔의 시료 내에서의 감쇄를 통한 에너지 감소 등을 고려하여 시료를 제작하였다.

시료의 크기는 $5.0 \times 5.0 \text{ mm}^2$ 이고 두께는 1.0 mm의 금속판 형태로 제작하였다. 시료에 대한 물리 화학적인 특징은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Specifications of the sample for natural thulium(monoisotopic ^{169}Tm) metal plate

Parameter (Unit)	Value
Chemical form	Metal
Chemical purity (%)	^{169}Tm (100.0)
Size (mm^2)	5.0×5.0
Thickness (mm)	1.0

3. HPGe 검출기

양성자 빔과 ^{169}Tm 시료의 $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ 핵반응에 의해서 ^{167}Yb 방사성동위원소를 생성하게 되고 이 때 발생하는 지발 감마선은 다양한 에너지를 가지게 된다. 이 지발 감마선을 측정하기 위하여 HPGe 검출기(GC3018, Canberra, 미국)를 사용하여 으며, 사용한 검출기의 모양과 상세한 재원을 Fig. 2와 Table 4에 각각 나타내었다.



Fig. 2. HPGe gamma-ray detection system for measurement of delayed gamma-ray from the ^{167}Yb radioactive isotope sample.

이 검출기는 낮은 에너지의 감마선 측정에 특화되어 있으면 약 40 keV부터 10 MeV의 감마선 에너지 영역까지 측정할 수 있다. 본 실험에서 만들어진 사용되는 ^{167}Yb 방사성동위원소와 같은 핵자수가 많은 핵종에서 발생하는 낮은 에너지 측정에 매우 적합한 검출기라고 할 수 있다^[8].

HPGe 검출기는 자연방사선에 의한 영향을 줄이기 위해 Fig. 2에서 보는 것과 같이 가로 세로 높이가 $5 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ 납 블록으로 차폐하였다.

Table 4. Specifications of HPGe gamma-ray detection System

Parameter (Unit)	Value
Size (mm dia \times mm)	62.0×41.2
Window thickness (mm)	1.5
Applied voltage (Volt)	+ 3,900
Peak Compton Ratio	66.1:1
Energy resolution (keV)	1.72 at 1.333 MeV
Relative efficiency (%)	33.9

감마선 측정시 HPGe 검출기에서 발생하는 열잡음 및 기타잡음을 줄이기 위하여 iPA-10 전치증폭기를 사용하여 낮은 형태의 잡음을 제거한 후 고급

디지털 신호 처리 기술(DSP: Digital Signal Processing)을 기반으로 하는 Canberra 회사의 디지털신호분석기(DSA: Digital Signal Analyzer) 다중 채널 분석기에 입력하여 감마선 에너지에 대한 스펙트럼을 측정하였다. 감마선 에너지에 포함되어 있는 잡음을 제거하기 위하여 약 50 keV 이하의 감마선 신호는 차단하였다.

III. GAMMA-RAY MEASUREMENT

1. HPGe 검출기의 효율 및 에너지 교정

^{167}Yb 방사성동위원소의 주요 감마선이 대부분 Table 1에서 보는 것과 같이 200 keV 이하의 에너지를 가진다. 따라서 일반적인 검출기의 감마선 검출효율과 에너지 교정에서 사용되는 표준선원으로는 정확한 정보를 얻기가 힘들다.

따라서 본 연구는 $^{241}\text{Am}(T_{1/2} : 432.2\text{년})$ 에서 방출되는 59.54 keV, $^{133}\text{Ba}(T_{1/2} : 10.5\text{년})$ 에서 발생하는 81.00, 276.40, 302.85, 356.01 및 384.85 keV 감마선들과 $^{57}\text{Co}(T_{1/2} : 271.8\text{일})$ 에서 방출되는 122.06과 136.47 keV의 총 8개의 감마선 에너지를 사용하여 HPGe 검출기의 효율 및 에너지 교정을 하였다.

사용된 각각의 감마선 에너지를 Table 5에 나타내었다. 얻어진 검출효율 결과와 검출기의 에너지 교정 함수를 Fig. 3에 나타내었다. 100 keV 이하의 영역에서의 검출효율의 감소는 전형적인 HPGe 검출기의 특징을 보여주고 있다.

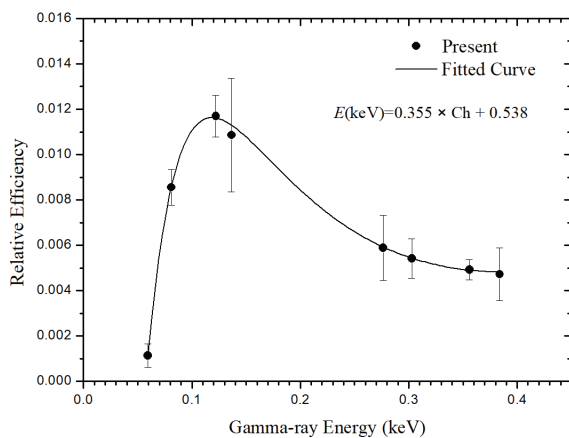


Fig. 3. Gamma-ray detection efficiency and Energy Calibration curve function of HPGe detector.

Table 5. Specifications of the standard gamma-ray sources for obtaining HPGe detector energy calibration and detection efficiency

Gamma-ray sources	Half-life	Gamma-ray energy (keV)
^{241}Am	432.2 year	59.54
^{57}Co	10.5 year	122.06, 136.47
^{133}Ba	271.8 day	81.00, 276.40, 302.85, 356.01, 384.85

2. ^{167}Yb 방사성동위원소의 감마선 스펙트럼 측정

100 MeV 정도의 양성자가 입사되었을 경우 핵반응 후 생성된 방사성동위원소들 대부분이 중성자가 적은 양성자 과잉 핵종들을 생성하게 되고 이들은 β^+ 붕괴 후 감마선을 방출하게 된다. $^{169}\text{Tm}(p,xn)$ 의 핵반응에 의해서 생성되는 다양한 동위원소들로부터 발생하는 지발 감마선에 대한 에너지 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다.

핵반응으로부터 발생된 전체 감마선들을 0 ~ 2,600 keV의 에너지 영역으로 나타내었다. Fig. 4에서 고에너지 양성자를 이용한 $^{169}\text{Tm}(p,xn)$ 반응이므로 다양한 방사성핵종들이 생성되어 이들로부터 감마선들이 방출된다는 것을 알 수 있다. 이 감마선들 중에서 $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ 핵반응에서 발생하는 주요 감마선들은 에너지가 Table 1에서 보는 것과 같이 대부분 200 keV 이하의 에너지를 가지고 있다. 따라서 Fig. 5에 50 ~ 180 keV 사이의 스펙트럼을 상세하게 나타내었다.

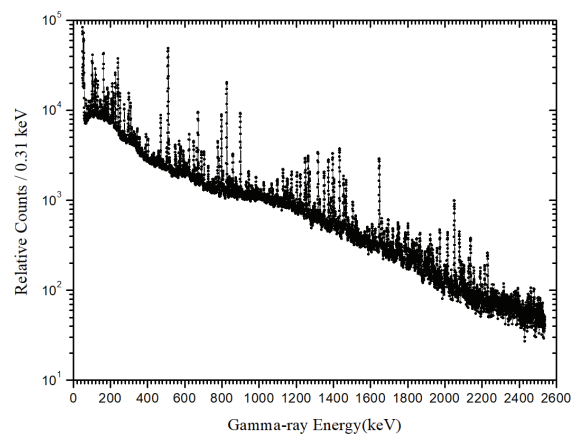


Fig. 4. Gamma-ray energy spectrum from $^{169}\text{Tm}(p,xn)$ nuclear reaction

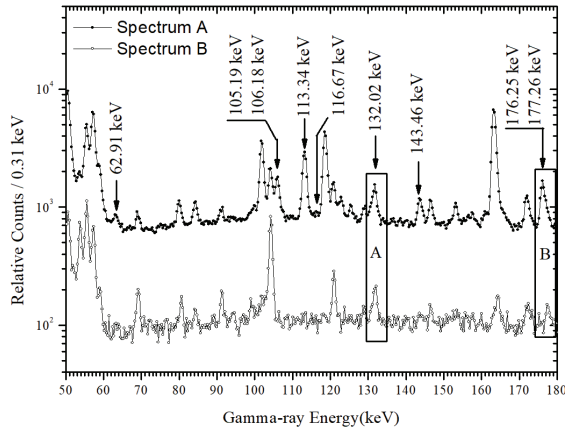


Fig. 5. Gamma-ray energy spectrum was generated in association with $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ are shown as a spectrum.

IV. DATA ANALYSIS

Fig. 5에서 스펙트럼(A)과 스펙트럼(B)은 각각 양성자 조사 후 초기측정 스펙트럼과 약 2시간 30분 후의 스펙트럼을 나타내었다. 스펙트럼(B)는 ^{167}Yb 의 반감기가 17.5분임을 고려할 때 약 8반 감기가 지난 후의 스펙트럼으로 ^{167}Yb 에서 발생하는 감마선의 강도가 거의 영에 수렴하였을 때의 스펙트럼으로 ^{167}Yb 에서 발생하는 감마선이 거의 측정되지 않았다. 이것은 113.34 keV의 감마선이 스펙트럼(A)에는 선명하게 표시되는 반면 스펙트럼(B)에서는 거의 영으로 수렴하였다는 것을 통하여 알 수 있다.

한편, Fig. 5의 132.02 keV(사각형 A)와 176.25 및 177.26 keV 감마선(사각형 B)의 경우 충분히 시간이 지났음에 불구하고 스펙트럼(B)에는 초기 측정 스펙트럼(A)과 거의 비슷한 강도의 감마선이 측정되었다. 따라서 이것은 ^{167}Yb 에서 발생하는 감마선 보다는 핵반응으로 생성된 다른 방사성동위원소에 의해서 발생하는 감마선임을 알 수 있다.

따라서 본 연구의 해석에서는 사각형 A와 B 두 영역의 감마선에 대해서는 Table 1에 제시된 데이터를 인용하여 상대 강도를 계산하였다^[5]. 또한 169.04 keV 감마선에 대해서는 본 실험에서는 확인되지 않았다. 보고된 값들의 강도가 낮아 본 연구는 측정이

되지 않았을 가능성도 있어 보인다. 또한 Table 6에 제시한 주요 감마선 외의 다른 감마선들의 효과는 약 2% 이하로 본 연구 결과에 큰 영향을 미치지 않았다.

Table 6. Energy and decay ratio of major gamma rays generated from ^{167}Yb radioactive isotope

Gamma-ray Energy (keV)	Present Intensity(a) (%)	Modified Intensity(b) (%)	Difference Ratio (a) - (b) (%)
62.91	10.7 ± 6.5	4.2	+ 6.5 ↑
105.19	14.3 ± 2.8	0.5	- 5.6 ↓
106.18		19.4	
113.34	41.0 ± 1.6	47.6	- 6.6 ↓
116.67	4.5 ± 4.9	2.4	+ 2.1 ↑
132.02	1.9*	2.4	-
143.46	10.3 ± 3.3	1.8	+ 8.5 ↑
169.04	-	0.1	-
176.25	13.9*	17.2	-
177.26	1.9*	2.4	-
Others	1.5	2.0	- 0.5 ↓

* is quoted from the value of Table of Isotopes^[5].
(b) is modified intensity of gamma ray from Table of Isotopes.

V. RESULT AND DISCUSSION

본 연구에서 $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ 핵반응에서 발생된 5개의 감마선 피크들이 측정되었다. 본 연구를 통하여 ^{167}Yb 방사성동위원소로부터 발생하는 감마선의 강도를 측정하였고 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 61.91 keV의 경우 10.7 ± 6.5%로 기존의 4.2%보다 6.5% 많은 결과를 보였고, 105.19 keV 및 106.18 keV의 경우 14.3 ± 2.8%로 19.9%보다 5.6% 작은 값을 나타내었다. 113.34 keV의 경우 41.0 ± 1.6%로 기존의 47.6%보다 6.6% 작은 결과 값을 보였고 116.67 과 143.46 keV의 경우도 각각 4.5 ± 4.9%와 10.3 ± 3.3%로 2.1 및 8.5%의 증가를 보였다. 이 결과를 Fig. 6에 막대그래프로 전체적으로 나타내었다.

그래프 속의 Table of Isotopes는 Table 1에 제시한 값들이며 Normalized Value 값은 이 값들의 발생 강도를 100%로 규격화한 값들이다.

Fig. 6에서 Present Result의 의미는 본 연구를 통하여 얻어진 최종 결과이다.

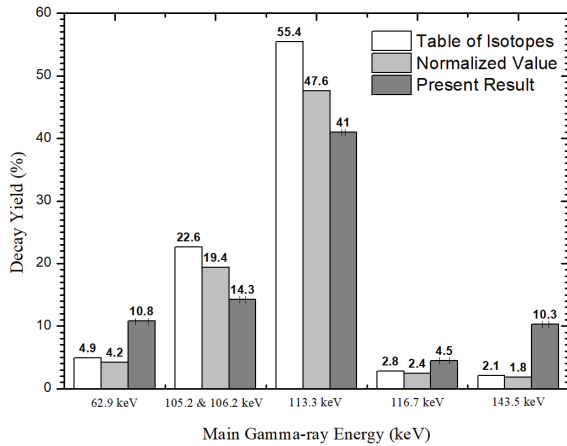


Fig. 6. The intensity of the main gamma rays generated from ^{167}Yb is shown. The “Table of Isotopes” is the reported values of the “Table of Isotopes” as shown in Table 1, and the “Normalized Value” are the normalized values of the reported intensity of the Table of Isotopes. “Present Result” is the result obtained from the present study.

VI. CONCLUSION

본 연구는 양성자선형가속기에서 발생된 100 MeV 에너지의 양성자를 ^{169}Tm 에 입사시켜 $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ 핵반응을 일으켰다. 그 결과 ^{167}Yb 방사성동위원소에서 발생된 지발 감마선을 HPGe 검출기를 이용하여 측정하여 감마선 붕괴 강도를 측정하였다.

기존의 총감마선 붕괴 강도가 100%가 넘어 신뢰성이 부족한 Table 1의 데이터에 대하여 본 연구는 실험을 통하여 주요 감마선들에 대하여 오차를 포함한 실험값들을 얻게 되었다. 그 결과 비교적 감마선 붕괴 강도가 큰 감마선은 과대평가 되고 낮은 감마선들이 과소평가되었음을 알게 되었다.

이런 결과는 핵물리 분야의 핵구조를 연구 시 각각의 여기 에너지의 수명 등을 연구하는 분야와 핵

공학에서의 감마선 강도에 대한 핵데이터로서 매우 중요한 정보로 제공될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 동서대학교 “Dongseo Cluster Project” 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU- 20220004). 실험을 위해서 양질의 양성자 빔을 제공해 주신 한국원자력연구원 양성자과학연구단의 연구원들에게 감사를 드립니다.

Reference

- [1] H. J. 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. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.67.1387>
- [2] J. Giovinazzo, P. Ascher, L. Audirac, B. Blank. C. Borcea, G. Canchel, C. E. Demonchy, C. Dossat, S. Grvy, S. Leblanc, I. Matea, F. de Oliveira-Santos, J. L. Pedroza, L. Perrot, J. Pibernat, L. Serani, C. Stodel, J. C. Thomas, "Two-proton radioactivity: 10 years of experimental progresses", Journal of Physics, Conference Series, pp. 436-437, 2013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/436/1/012057>
- [3] S. Y. Lee, "A Study on the Measurement of Half-life for the ^{179}Re Isotope Produced by a 100 MeV Proton Nuclear Reaction", Journal of Korean Society of Radiology, Vol. 14, No. 4, pp. 447-453, 2020. <https://doi.org/10.7742/jksr.2020.14.4.447>
- [4] T. H. Handley, E. L. Olson, "Ytterbium-167", Physical Review, Vol. 94, pp. 968-971, 1954. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.968>
- [5] R. B. Firestone, V. S. Shirley, *Table of Isotopes*, 8th edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 6797-6798, 1996.
- [6] F. Tárkányi, A. Hermanne, S. Takács, F. Ditrói, I. Spahn, A. V. Ignatyuk, "Activation cross-sections of proton induced nuclear reactions on thulium in the 20-45 MeV energy range", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 70, pp. 309-314, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.08.020>

- [7] J. E. Lee, J. R. Yoon, T. I. Ro, S. Y. 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. <https://doi.org/10.3938/NPSM.65.883>

100-MeV 양성자 빔을 이용하여 $^{169}\text{Tm}(p,3n)^{167}\text{Yb}$ 반응에 의해 생성된 ^{167}Yb 방사성동위원소에서 방출되는 감마선 스펙트럼 비교 연구

이삼열^{1,2,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구소

요 약

양성자과학연구단의 100-MeV 양성자선형가속기의 양성자를 사용하여 천연 ^{169}Tm 과 핵반응을 일으켜 ^{167}Yb 방사성동위원소를 생성하였다. 생성된 동위원소는 17.5분의 반감기를 가지며 ^{167}Tm 로 붕괴한다. 이때 발생하는 감마선을 HPGe 검출시스템을 사용하여 측정하였다. 검출기의 에너지 교정 및 검출기의 효율 측정은 표준선원을 사용하여 결정하였다. 기존에 알려진 Table of Isotopes의 주요 감마선 에너지는 모두 측정되었다. 한편, 현재까지 알려진 발생하는 감마선의 강도에 대한 정보는 매우 부정확한 상황이다. 따라서 본 연구를 통하여 주요 감마선에 대한 붕괴 강도를 정확하게 측정하였다. 전체적으로 기존에 알려져 있던 결과들과 상이한 차이를 보였으며 특히 113.3 및 106.2 keV 감마선 같은 주 붕괴 감마선의 강도들이 과대평가 되었다는 사실을 알게 되었고 62.9, 116.7 및 143.56 keV의 감마선 들은 과소평가 된 감마선들임을 알게 되었다. 본 연구의 결과는 핵융합 연구, 천체 물리학 및 핵물리 분야에 있어서 중요한 정보가 될 것으로 생각 된다.

중심단어: 톨륨, 이터븀, 핵반응, HPGe 검출기, 감마선스펙트럼, 양성자 빔, 양성자과학연구단

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이삼열	동서대학교 방사선학과	교수