

Measurement of Gamma ray Spectrum for the $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ Nuclear Reaction by using 100 MeV Proton Acceleration System

Samyol Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University

100 MeV 양성자가속기를 이용한 $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ 핵반응에 대한 감마선 스펙트럼 측정

이삼열

동서대학교 방사선학과

Abstract

Research about the proton nuclear reaction is actively achieving on the proton therapy including material development of fusion reactor. The proton induced gamma ray energy(2754, 1386 keV) spectrum of $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ reaction was measured with 100 MeV high energy proton beam. The proton beam in the experiment was derived from 100 MeV proton linear accelerator in the KOMAC. We measured the gamma ray intensity ratio of the decay level from the energy spectrum. The previous results have been compared with the current result. Strength of measured gamma rays will provide very important information though decide high energy gamma radiation detection efficiency.

Keyword : Al, Proton, HPGe, Energy spectrum

요 약

양성자핵반응에 대한 연구는 현재 핵융합로의 재료 개발을 비롯하여 양성자치료 분야 등을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구는 100 MeV 양성자 빔을 이용한 $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ 반응을 통하여 발생하는 지발 감마선(2754, 1386 keV) 스펙트럼을 고순도 HPGe 검출기를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용되어진 양성자 빔은 양성자가속기연구센터(KOMAC)에 설치되어 있는 100 MeV 양성자선형가속기를 사용하였다. 측정된 감마선은 기존에 알려진 결과들과 비교분석하였다. 측정된 감마선의 강도는 고에너지 감마선 검출효율을 결정하는데 매우 중요한 정보를 제공할 것으로 생각되어 진다.

중심단어: 알루미늄, 양성자, 고순도 게르마늄, 에너지스펙트럼

I. INTRODUCTION

최근 양성자 핵반응에 대한 연구가 보다 활발하게

연구되어지고 있다. 특히 과거부터 인류의 꿈이었던 인공 태양을 만드는 핵융합연구에 대한 기대와 꿈은 현재까지 지속되어 오고 있다^[1]. 특히, 핵융합로 기술

이 비약적으로 발전하여 핵융합 설계, 플라즈마 연구 및 핵융합로 소재에 대한 연구 등 여러 가지 기술들이 복합적으로 발전하고 있다. 이러한 핵융합로는 양성자 플라즈마를 융합로 속에 가두어서 고온/고압으로 압축시켜 무거운 원소들을 만드는 과정에서 발생하는 에너지를 이용하여 전기를 발전하는 장치이다. 이때 핵융합로 내부에서는 고에너지의 양성자가 발생해 핵융합로 주위의 물질과 핵반응을 일으켜 다양한 방사성 물질을 생성하게 된다. 양성자와의 물질과의 핵반응 정보는 핵융합로에서 발생하는 방사선에 대한 차폐연구 및 핵융합로의 소재개발 및 수명계산에 매우 요긴하게 사용되어 질 수 있다^[2]. 뿐만 아니라, 양성자 핵반응 정보는 원자핵구조 연구 분야의 다양한 핵모형에 대한 타당성 검토에 필요한 자료를 제공하며 핵반응 후 만들어지는 핵종들의 여기상태로부터 발생하는 감마선의 측정을 통하여 핵준위 연구에 대한 중요한 자료를 제공한다^[3]. 우주물리 분야에 있어서도 우주 진화 및 별들의 원소합성 과정에 관여하고 있는 p-process의 모델 계산에 고에너지 양성자 핵반응 자료는 중요한 요소로써 사용되어진다^[4]. 고에너지 양성자를 이용한 뇌종양 치료 분야에서도 매우 활발하게 연구되어 지고 있다. 이 때 발생하는 양성자와 물질과의 상호작용에 대한 정보도 현재 미흡한 수준에 있다^[5]. 그러나 양성자 핵반응 자료 측정은 시설의 희소성 때문에 매우 부족한 실정에 있다. 특히 세계적으로 100 MeV 이상의 양성자 빔에 의한 핵반응 연구에 대한 자료는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 100 MeV 이상의 양성자 빔에 의한 핵반응 연구가 절실히 필요하다^[6].

본 연구에서는 비중이 비교적 가벼워 각종 구조물의 합금 형태로 사용되어지고 있는 알루미늄(순재비: 100 %)의 양성자 핵종변환에 의해서 만들어지는 ^{24}Na 동위원소에서 발생하는 지발 감마선 스펙트럼을 측정하여 에너지 및 천이 강도를 측정하고 기존의 결과들과 비교 분석하였다^[7]. 본 연구는 한국 경주에 소재하고 있는 양성자가속기연구센터 (KOMAC: Korea Multi-Purpose Accelerator Complex)의 100 MeV 양성자선형 가속기에서 발생된 펄스형 양성자빔을 사용하여 실험을 수행하였다.

II. EXPERIMENT AND METHOD

1. 양성자 가속장치

본 실험은 양성자 가속기 연구센터의 펄스형 100 MeV 양성자 가속기를 이용하여 실험하였다. 양성자조사는 100 MeV 전용 조사실 TR 103을 사용하였다. 조사실에서 발생하는 양성자 빔은 15 Hz의 반복횟수로 조사되며, 평균 빔전류는 0.3 mA의 조건에서 조사되었다^[8]. 빔의 물리적 크기는 최대 직경이 300 mm 이다. 빔의 중앙에 표적 시료를 설치하고 충분히 방사화가 일어나도록 양성자를 조사하였다. 가속장치에서 양성자가 방출되는 부분과 시료에 입사되는 부분을 Fig. 1에 나타내었다. 왼쪽은 양성자가 방출되는 출구를 나타내며 양성자조사에 의해서 발생하는 열을 냉각시키기 위한 장치들이 설치되어 있다. 오른쪽은 고에너지 양성자 빔이 시료에 입사되도록 빔 중앙에 Al시료를 설치한 모습을 나타내었다.



Fig. 1. Proton beam out port and sample stand.

2. 방사화 시료 제작

양성자 방사화에 사용한 표적시료의 크기는 가로 x 세로 10.0 mm 두께는 1.0 mm이며, 금속편 형태를 지닌다. 양성자빔 조사 후 검출기를 통한 측정시 시료의 크기가 너무 큰 경우 발생될 검출효율 오차, 방사화후 감마선의 방사능 감쇄 및 양성자 빔의 시료 내에서의 감쇄 등을 고려하여 제작하였다.

3. 양성자빔을 통한 ^{27}Al 의 방사화

가속기에서 발생된 양성자 빔은 15 Hz의 주기로 반복적으로 ^{27}Al 시료에 조사되었다. 일회 양성자 빔의 조사시 약 0.07 초 동안 빔이 시료에 조사된다. 실험에서는 총 2.7 초 동안 양성자 빔을 조사하였다. 이것은 시

료의 방사화로 인한 강한 방사능이 발생하여 측정시 검출기의 불감시간 등을 고려하여 시료의 양과 양성자 빔 강도를 결정하였다.

4. 감마선 검출 장치 및 회로

양성자 핵반응에서 만들어진 ^{24}Na 동위원소에서 발생하는 지발 감마선을 고순도 HPGe검출기를 통하여 측정을 하였고 Fig. 2에 나타내었다. 감마선 측정에 사용되어진 HPGe검출기는 Canberra사의 검출기로 직경이 47.5 mm이며, 길이가 46 mm로 자세한 검출기의 특징은 Table 1에 나타내었다. 이 검출기는 HPGe검출기 중에서도 낮은 에너지의 감마선에 대해서도 측정 효율이 상대적으로 높게 설계되어져 있는 GMX 형식의 검출기를 사용하였다. 본 검출기는 시료에서 발생하는 감마선외의 자연방사선에 의한 측정을 최대한 줄이기 위하여 검출기 부분을 제외하고는 두께 5 cm 정도의 납으로 차폐되어 있다. 검출기의 효율을 최대로 하기 위해 -3,500 Volt의 전압을 인가하였다.



Fig 2. HPGe detector for measurement of delayed gamma ray from the Al sample.

Table 1. Characteristics of HPGe detector system for measurement of gamma ray from the Al sample

	Unit	Characteristic
Size	∅ x mm	47.5 x 46
Window thickness	mm	5
Applied voltage	Volt	-3,500
Peak Compton Ratio	-	46:1
Energy resolution	keV	1.8 at 1.333 MeV 8.25 at 122 keV
Relative efficiency	%	15

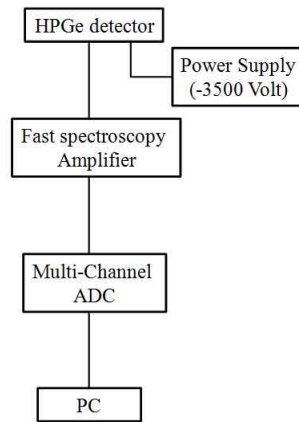


Fig 3. Block diagram for measurement of delayed gamma ray with HPGe detector system.

검출기는 전치증폭기가 부착된 형태로 이므로 출력 신호를 Fast spectroscopy Amplifier에 입력하여 선형증폭을 하였다. 증폭된 신호는 Multi-Channel Analyser에 입력하여 파고에 따른 에너지 분석을 실시하여 결과를 PC에 저장하였다.

III. DATA ANALYSIS

1. HPGe 검출기의 에너지 교정

HPGe 검출기의 에너지 교정을 위하여 ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs 의 표준선원을 사용하였다. 표준선원 에너지에 따른

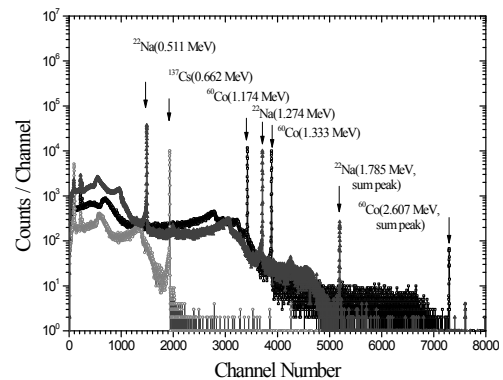


Fig 4. Gamma ray energy spectrum from the standard sources.

검출기의 파고의 비례성을 이용하여 HPGe 검출기에서 발생한 파고 감마선 에너지에 따른 상관관계를 구하였다. 각각의 표준선원에서 방출되는 감마선의 에너지를 Table 2에 나타내었다. Fig. 4의 에너지 스펙트럼에는 각각의 선원에서 방출되는 감마선원이 2개 이상일 경우 검출기에 의해서 동시에 측정되는 Sum peak를 찾아 볼 수 있다.

Table 2. Gamma ray energy of the standard sources

Gamma ray sources	Emitted gamma ray energy(keV)
^{22}Na	511, 1274, 1785(sum peak)
^{137}Cs	662
^{60}Co	1174, 1333, 2507(sum peak)

2. 감마선 에너지 스펙트럼의 분석

100 MeV 양성자빔을 이용하여 $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ 반응으로 발생 ^{24}Na 동위원소의 지발 감마선 에너지 스펙트럼을 아래 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 그리고 이론적으로 알려진 ^{24}Na 동위원소의 여기에너지 준위를 Fig. 6에 나타내었다^[9]. ^{24}Na 동위원소의 경우 99.9% 이상이 4123 keV 에너지 준위로 붕괴하고 2754 keV의 감마선은 100%가 1368 keV 여기 준위로 천이된다. 2754 keV 감마선은 에너지가 전자쌍생성이 가능한 1022 keV 보다 비교적 높으므로 전자쌍생성에 의해서 만들어진 양전자의 쌍소멸에 의한 단일일탈감마선(S.E.: Single escape peak) 2243 keV와 복수일탈감마선(D.E.: Double escape peak) 1732 keV가 측정되었다.

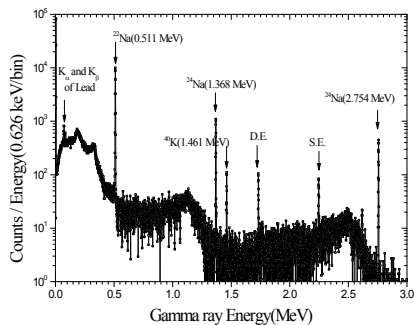


Fig 5. Gamma ray energy spectrum from the proton induced ^{27}Al sample by using 100 MeV proton beam.

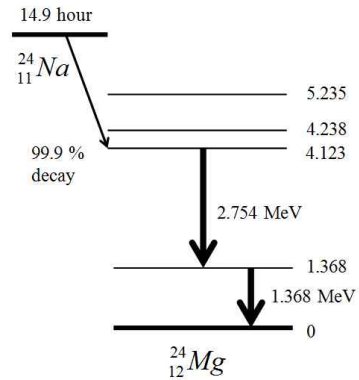


Fig 6. Energy level scheme of ^{24}Na isotopes

본 연구에서는 2757 keV로 측정되었으며 이론값보다는 3 keV정도 높은 값을 나타내었다. 뿐만 아니라 1368 keV의 감마선이 검출 되었으며 이것은 ^{24}Na 의 제 1여기 에너지 준위인 1368 keV에서 안정 상태로 붕괴되면서 발생하는 감마선이다. 본 연구에서 측정되어진 1368 keV와 오차 범위내에서 매우 일치함을 보였다. 측정시 자연방사선(^{40}K : 1460 keV)과 주위 물질들의 상호작용(511 keV, K α : 72와, 75 keV)에 의한 방사선들이 측정되었다^[10]. 1368과 2754 keV감마선의 경우 본 연구에서 측정된 값과 비교할 경우 1368 keV는 오차 범위내에서 일치함을 보였으나 2754 keV의 경우 실험치가 약 3 keV 더 높은 값을 보였다. 이것은 본 실험의 에너지 교정에 있어서 약 0.1%의 불일치를 보여주고 있다. 이것은 에너지 교정시 표준선원을 이용한 에너지 교정의 한계점을 보여주고 있으며 보다 정확한 에너지 교정을 위해서는 본 연구에서 시행한 핵반응을 통한 에너지 교정이 필요함을 보여주고 있다.

3. ^{24}Na 동위원소에서의 감마선 강도

Fig. 6에 보는 것과 같이 4123 keV 여기 준위에서 천이되는 2754 keV 감마선의 양과 1368 keV 여기 준위에서 발생하는 감마선은 그 양이 이론적으로 같아야 한다. 따라서 본 실험에서도 측정된 감마선의 실제 양과 그 결과를 측정하여 Table 3에 나타내었다. 그 결과들은 비율은 2.06 ± 0.03 으로 약2배의 차이를 보였다. 이것은 검출기의 효율에 의한 차이로 각각의 에너지에서 약 2.06배 정도 차이를 보이는 것으로 측정되었다. 따라서 2754 keV 에너지의 경우 1368 keV에너지보

다 방사선 검출 효율이 48.5 % 낮게 측정됨을 알 수 있다.

Table 3. Result of the decay gamma ray intensity of each energy levels from ^{24}Na isotopes

Calculated gamma ray energy(keV)	Measured gamma ray energy(keV)	Gamma ray yield
2754	2757 ± 1	2381 ± 19
1368	1369 ± 1	4911 ± 70
Ratio		2.06 ± 0.03

4. 핵반응을 이용한 검출기 효율과 에너지교정

일반적으로 검출기의 효율을 결정함에 있어서 1333 keV 이하의 에너지에 대해서는 잘 알려진 표준선원을 이용하여 상대/절대 효율을 결정한다. 그러나 그 이상의 에너지에 대해서는 적절한 표준선원이 없어 검출기의 효율을 구할 수 가 없다. 따라서 본 실험에서 얻어진 결과는 HPGe검출기의 약 1.3 ~ 3 MeV 사이의 에너지 교정과 효율을 결정함에 있어 중요한 정보를 제공 할 것으로 생각되어 진다.

IV. CONCLUSION

본 연구는 100 MeV 양성자 가속기를 이용하여 $^{27}\text{Al}(p,3p+n)^{24}\text{Na}$ 핵 반응을 일으켜 ^{24}Na 동위원소에서 발생하는 지발 감마선을 HPGe 검출기를 사용하여 2754와 1368 keV 두 감마선을 측정하였다. 이것들의 에너지는 기존에 알려진 결과 값들과 잘 일치 하였으며, 본 연구에서 얻어진 결과들은 향후 양성자 핵반응 연구의 검출기 에너지 및 효율 교정에서 중요한 정보임을 확인하였다. 특히 1.3에서 3 MeV 사이의 에너지에 대한 HPGe 검출기의 효율 및 교정에 대한 정보를 얻을 수 있어 향후 높은 에너지 감마선 검출의 정확도를 높이는데 매우 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

Reference

- [1] B. Naranjo, J. K. Gimzewski and S. Putterman, "Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal" *Nature*, 434, pp.1115-1117, 2005.
- [2] Steve Fetter, E. T. Cheng, and F. M. Mann, "Long-term

radioactive waste from fusion reactors: Part II" *Fusion Engineering and Design*, Vol. 13, Issue 2, pp.239-246, 1990.

- [3] M. Al-Abyad, I. Spahn, B. Scholten, S. Spellerberg, S. M. Qaim and H. H. Coenen, M. N. H. Comsan, "Cross Section Measurements of Proton Induced Reactions on ^{55}Mn and Comparison of Experimental Results with Different Nuclear Model Calculation" *Journal of Korean physical Society*, Vol. 59, No. 2, pp.1888-1891, 2011.
- [4] A. Lancon, B. Rocca Volmerange, "Star formation in starburst galaxies from near-IR spectroscopy and evolutionary population synthesis", *Astrophysics and Space Science*, Vol. 217, issue 1-2, pp.271-272, 1994.
- [5] Lomax AJ, Pedroni E, Rutz H and Goitein G, "The clinical potential of intensity modulated proton therapy" *Zeitschrift fur Medizinische Physik*, Vol. 14, No. 3, pp.147-152, 2004.
- [6] Hiromi Hirabayashi, Hirokazu Ikeda, Harumi Ishii, Kazuaki Katoh, "Measurement of a Cross Section for the $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ Reactions at 12 GeV" *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 51, No. 10, pp.3098-3101, 1982.
- [7] M. U. Khandaker, K. Kim, M. W. Lee, K. S. Kim and G. N. Kim, "Excitation Functions for the $^{27}\text{Al}(p,x)^{22,24}\text{Na}$ Nuclear Reactions up to 40 MeV" *Journal of Korean physical Society*, Vol. 59, No. 2, pp.1821-1824, 2011.
- [8] Kye-Ryung Kim, Myung-Hwan Jung, Sunmog Yeo, Chan-Yeong Lee, Jae-Sang Lee and Bum-Sok Kim, "Establishment of Multi-purpose Target Rooms at KOMAC" *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, 2013.
- [9] Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley, "Table of Isotopes", Wiley-Interscience. USA, pp.485, 1996.
- [10] V. A. Sole, E. Papillon, M. Cotte, Ph. Walter and J Susini, "A multiplatform code for the analysis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectra" *Atomic Spectroscopy*, Vol. 62, Issue 1, pp.63-68, 2007.