

M20709000108-08B0900-10810

원자력 연구개발 중장기 계획사업

중성자 및 감마선 방사화 단면적 측정

Activation Cross-section Measurement
with Neutron and Gamma-Ray

경북대학교

교육과학기술부

제 출 문

교육과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “중성자 및 감마선 방사화 단면적 측정”과제 의 보고서로 제출합니다.

2009. 5.

주관연구기관명 : 경 북 대 학 교

주관연구책임자 : 김 귀 년

연 구 원 : 노 태 익 (동아대학교)

” : 이 만 우 (경북대학교)

” : 김 경 숙 (경북대학교)

보고서 초록

과제관리번호	M20709000108-08B0900-10810	해당단계 연구기간	2007.04-2009.03	단계 구분	(1) / (1)
연구사업명	중 사업명	원자력연구개발사업			
	세부사업명	원자력연구개발중·장기계획사업			
연구과제명	대 과제명				
	세부과제명	중성자 및 감마선 방사화 단면적 측정			
연구책임자	김 귀 년	해당단계 참여연구원 수	총 : 명 내부 : 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 100,000 천원 기업: 천원 계: 100,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	경북대학교 물리 및 에너지학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	49
<p>1. 制動輻射감마선을 이용한 실험</p> <p>가. 감마-핵반응의 核異性體 단면적比 측정</p> <p>(1) 65 MeV 制動輻射감마선으로 $^{44m,g}\text{Sc}$, $^{99m,g}\text{Rh}$, $^{52m,g}\text{Mn}$의 核異性體 단면적比 측정</p> <p>(2) 2.5 GeV 전자가속기에서 $^{44m,g}\text{Sc}$의 核異性體 단면적比 측정</p> <p>(3) 50, 60, 70 MeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{89}Zr, $^{86,87}\text{Y}$의 核異性體 단면적比 측정</p> <p>(4) 50, 60, 70 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{52}Mn의 核異性體 단면적比를 측정</p> <p>나. 감마-핵반응 실험으로 核分裂 반응 收得率(Yield) 및 감마-중성자 반응 단면적 측정</p> <p>(1) 50, 65 MeV 制動輻射감마선으로 ^{209}Bi의 감마-核分裂 반응 收得率 및 감마-중성자 반응 단면적 측정</p> <p>(2) 2.5 GeV 制動輻射감마선으로 ^{209}Bi의 감마-核分裂 반응에서 생성되는 핵 질량-收得率 분포 측정</p> <p>2. 중성자를 이용한 실험</p> <p>가. 飛行時間法으로 중성자 全단면적 측정 결과</p> <p>(1) Mo의 중성자 全단면적 측정 및 共鳴 상수 측정</p> <p>(2) 飛行時間법으로 Pd의 중성자 全단면적 측정</p> <p>나. 放射化 방법으로 熱중성자 捕獲단면적 측정 및 共鳴積分 상수 측정</p> <p>(1) 放射化방법으로 Hf의 熱중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分 상수 측정</p> <p>(2) 放射化방법으로 W의 熱중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分 상수 측정</p> <p>다. 일본 동경공대 펠레트론 가속기 이용 keV 중성자 捕獲단면적 측정 방법</p> <p>(1) 2007년도 측정된 ^{105}Pd 시료의 keV 중성자 捕獲단면적 측정</p> <p>(2) 2007년도 측정된 $^{117,119}\text{Sn}$ 시료의 keV 중성자 捕獲단면적 데이터 분석 및 결과 발표</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	制動輻射감마선, 감마-핵반응, 核異性體 단면적比, 감마-중성자 반응단면적, 飛行時間法, 중성자 全단면적, 熱중성자 捕獲단면적			
	영 어	Bremsstrahlung photon, phot-nuclear reaction, Isomeric cross section ratio, photo-neutron reaction cross section, time-of-flight, Neutron total cross section, thermal neutron capture cross section			

요 약 문

I. 제 목

중성자 및 감마선 방사화 단면적 측정

II. 연구개발의 목적 및 필요성

원자력발전소 건설 분야의 선진국인 우리나라가 향후 방사선이용 기술 분야에서 선진국의 대열에 들어가기 위해서는 방사선을 이용하는 연구를 수행할 기반설비 구축과 인력 양성이 필요하다. 이를 위하여 국내에서 활용가능한 포항가속기연구소의 65-MeV 및 2.5-GeV 전자가속기 설비에서 생성되는 감마선과 중성자를 이용하는 연구를 수행하는 것이 목적이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

포항 가속기연구소의 65-MeV 및 2.5-GeV 전자가속기의 전자빔을 얇은 텅스텐 표적에 입사하여 생성된 制動輻射감마선을 다양한 시료에 조사하여 光-핵반응단면적, isomeric cross-section 比 및 光破碎 (photospallation) yield를 측정한다.

제동 복사감마선을 이용하여 수행한 연구 내용 및 범위는 아래와 같다.

- (1) 65 MeV 制動輻射감마선을 이용하여 $^{44m,g}\text{Sc}$, $^{99m,g}\text{Rh}$, $^{52m,g}\text{Mn}$ 의 核異性體 단면적比 측정
- (2) 2.5 GeV 制動輻射 감마선을 이용하여 $^{44m,g}\text{Sc}$ 의 核異性體 단면적比 측정
- (3) 50, 60, 70 MeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{89}Zr , $^{86,87}\text{Y}$ 의 核異性體 단면적比 측정
- (4) 50, 60, 70 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{52}Mn 의 核異性體 단면적比를 측정
- (5) 50, 65 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{209}Bi 의 감마-核分裂 반응 收得率 및 감마-중성자 반응 단면적을 측정하였다.

65-MeV 전자가속기에서 생성된 전자빔을 두꺼운 Ta 표적에 입사하여 생성된 중성자를 이용하여 실험을 수행하였다.

- (1) 중성자 飛行時間法으로 Mo과 Pd 시료에 대한 중성자 全단면적을 측정하고 측정 결과를 SAMMY fitting 코드를 이용하여 共鳴 상수도 측정하였다.
- (2) 중성자 放射化방법으로 $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180m}\text{Hf}$, $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$, $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$, 및 $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ 감마-중성자 반응의 熱중성자 捕獲단면적과 共鳴積分 상수를 측정하였다.

일본 동경공대 펠레트론 가속기를 이용한 keV 중성자 설비에서 ^{105}Pd 시료와 $^{117,119}\text{Sn}$ 시료에 대한 keV 중성자 捕獲단면적을 측정하였다.

IV. 연구개발결과

1. 制動輻射감마선을 이용한 실험 결과

- (1) 65-MeV 制動輻射감마선을 이용하여 $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, x)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{103}\text{Rh}(\gamma, 4n)^{99\text{m},\text{g}}\text{Rh}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, x)^{52\text{m},\text{g}}\text{Mn}$ 의 감마-핵반응으로부터 생성되는 核異性體의 核異性體 단면적비를 측정 한 결과를 학술지에 발표하였다 [J. Korean Phys. Soc. **50** (2007) 417].
- (2) 2.5 GeV 전자가속기에서 생성된 制動輻射감마선을 이용하여 $^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 의 核異性體 단면적비를 $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, xn1p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, xn5p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 및 $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma, xn8p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 감마-핵반응 으로 측정한 결과를 학술지에 발표하였다 [Nucl. Instr. Meth. **B 266** (2008) 5080].
- (3) $^{\text{nat}}\text{Zr}$ 표적과 $^{\text{nat}}\text{Y}$ 표적에 50, 60 70 MeV 制動輻射감마선을 조사하였을 때 $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)^{89\text{m},\text{g}}\text{Zr}$, $^{\text{nat}}\text{Zr}(\gamma, xn1p)^{86\text{m},\text{g}}\text{Y}$, $^{89}\text{Y}(\gamma, xn)^{87\text{m},\text{g}, 86\text{m},\text{g}}\text{Y}$ 감마-핵반응에 의해서 생성되는 ^{89}Zr , $^{86,87}\text{Y}$ 核異性體 比를 측정하였다.
- (4) $^{\text{nat}}\text{Fe}$ 표적에 50, 60 70 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 조사하여 생성되는 $^{52\text{m},\text{g}}\text{Mn}$ 의 核異性體比를 측정하였다.
- (5) 50, 65 MeV 制動輻射감마선으로 ^{209}Bi 의 감마-核分裂 반응 收得率 및 감마-중성자 반응 단면적 측 정하였으며, 2.5-GeV 制動輻射감마선으로 ^{209}Bi 의 감마-核分裂 반응에서 생성되는 핵의 질량-收 得率 분포도 측정하였다 [J. Korean Phys. Soc. **52** (2008) 934].

2. 중성자를 이용한 실험 결과

- (1) 중성자 飛行時間法으로 Mo과 Pd의 중성자 全단면적을 측정하였으며, 측정된 轉移率 (Transmission rate)을 이용하여 Mo 동위원소들의 共鳴상수도 측정하였다 [Nucl. Instr. Meth. **B 266** (2008) 561, J. Nucl. Sci. and Tech. **S5** (2008) 590].
- (2) $^{\text{nat}}\text{Hf}$ 에 熱중성자를 조사하여 $^{179}\text{Hf}(n, \gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ 와 $^{180}\text{Hf}(n, \gamma)^{181}\text{Hf}$ 반응의 熱중성자 捕獲단면적 및 각 반응 의 共鳴積分 상수를 측정하였다. $^{\text{nat}}\text{W}$, $^{\text{nat}}\text{Mo}$ 시료에 熱중성자를 조사하여 $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$ 및 $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ 반응의 熱중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分 상수를 측정하였다 [Nucl. Instr. Meth. **B 266** (2008) 21, Nucl. Instr. Meth. **B 266** (2008) 861, Nucl. Instr. Meth. **B 267** (2008) 462].
- (3) 일본 동경공대 펠레트론 가속기에서 생성되는 keV 중성자를 이용하여 ^{105}Pd 시료와 $^{117,119}\text{Sn}$ 시료의 keV 중성자 捕獲단면적을 측정하였다 [J. Nucl. Sci. and Tech. **S5** (2008) 443; J. Nucl. Sci. and Tech. **45** (2008) 352].

V. 연구개발결과의 활용계획

核異性體 比 (Isomeric yield ratio)는 핵반응에서 각운동량 전달과정과 핵 준위 밀도의 스핀 의존성 등 이론적 모델의 검증에 활용한다. 光-핵반응 단면적은 방사선 차폐 및 방사선 轉移에 대한 계산에 활용되 고, 방사선 치료 시 인체에 흡수된 도스를 계산하는데도 활용되고, 核融合爐 및 原子爐에 관한 물리적인 성질 및 기술개발에 활용한다. 특히 핵연료 물질의 변형(Transmutation)에 대한 연구와 천체핵물리학에 서 핵합성 과정 이해에도 활용된다.

중성자 쏘단면적과 共鳴 상수들은 핵자료 평가를 위한 기초자료로 활용되며, 본 측정 결과는 핵자료 라이브러리(<http://www-nds.iaea.org/ecfor/exfor.htm>)에 등재되어 전 세계적으로 활용될 수 있도록 한다.

S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

I. Title

Activation Cross-Section Measurement with Neutron and Gamma-Ray

II. Objective and Importance of the Project

Our country is one of the developed countries in the field of constructing the nuclear power-plant. Thus, it is necessary to construct an infrastructure and educate manpower for radiation related researches in order to enter a member of developed country in the field of radiation induced reactions and its application. The objective of this project is to study neutron- and gamma-ray-induced reactions by using 65-MeV and 2.5-GeV electron facility of Pohang Accelerator Laboratory.

III. Scope and Contents of the Project

- We measured photo-nuclear reaction cross-sections, isomeric cross-section ratios, photo-neutron cross-sections, and photo-neutron mass yield distributions at the 65-MeV and the 2.5-GeV bremsstrahlung photons of the Pohang Accelerator Laboratory (PAL) by using the activation method. The bremsstrahlung photons were produced when a pulsed electron beam of the 65-MeV and the 2.5-GeV electron linac hit a thin W target.

The scope and contents of the researches with bremsstrahlung photons are as follows:

- (1) Measurement of isomeric cross-section ratios of $^{44m,g}\text{Sc}$, $^{99m,g}\text{Rh}$, $^{52m,g}\text{Mn}$ isomeric pairs with 65-MeV bremsstrahlung photons
- (2) Measurement of isomeric cross-section ratios for the formation of $^{44m,g}\text{Sc}$ with 2.5 GeV bremsstrahlung
- (3) Measurement of isomeric cross-section ratios for the formation of $^{89m,g}\text{Zr}$ and $^{86m,g,87m,g}\text{Y}$ isomeric pairs with 50-, 60-, 70-MeV bremsstrahlung
- (4) Measurement of isomeric cross-section ratios for the formation of $^{52m,g}\text{Mn}$ at 50-, 60-, 70-MeV and 2.5-GeV bremsstrahlung
- (5) Measurements of the mass yield distribution and photo-neutron cross-sections in ^{209}Bi with 50, 65-MeV and 2.5-GeV bremsstrahlung

- The experiments were carried out by using the pulsed neutrons produced by a thick Ta-target

at the 65-MeV electron linac of the PAL.

- (1) The neutron total cross-sections of Mo and Pd were measured by using the time-of-flight method and the resonance parameters of Mo isotopes were extracted from the transmission by using the SAMMY fitting code.
 - (2) We measured the thermal neutron capture cross-sections and the resonance integral of the $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$, $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$, $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$, and $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ reactions by the activation method.
- We also measured the keV-neutron capture cross-sections of ^{105}Pd and $^{117,119}\text{Sn}$ at the Peletron accelerator, Tokyo Institute of Technology, Japan.

IV. Results

1. Results obtained by using bremsstrahlung photons

- (1) We obtained the isomeric cross-section ratios for the $^{45}\text{Sc}(\gamma,n)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma,x)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$, $^{103}\text{Rh}(\gamma,4n)^{99\text{m,g}}\text{Rh}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma,x)^{52\text{m,g}}\text{Mn}$ reactions induced by 65-MeV bremsstrahlung and reported in the paper [J. Korean Phys. Soc. **50** (2007) 417].
- (2) We obtained the isomeric yield ratios for the formation of $^{44\text{m,g}}\text{Sc}$ in the $^{45}\text{Sc}(\gamma,n)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma,xn1p)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma,xn5p)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$ and $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma,xn8p)^{44\text{m,g}}\text{Sc}$ reactions with 2.5 GeV bremsstrahlung and reported in the paper [Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 5080].
- (3) We obtained the isomeric cross-section ratios of the $^{90}\text{Zr}(\gamma,n)^{89\text{m,g}}\text{Zr}$, $^{\text{nat}}\text{Zr}(\gamma,xn1p)^{86\text{m,g}}\text{Y}$, $^{89}\text{Y}(\gamma,xn)^{87\text{m,g},86\text{m,g}}\text{Y}$ reactions in $^{\text{nat}}\text{Zr}$ and $^{\text{nat}}\text{Y}$ with 50-, 60-, and 70-MeV bremsstrahlung photons.
- (4) We obtained the isomeric cross-section ratios in the production of $^{52\text{m,g}}\text{Mn}$ from $^{\text{nat}}\text{Fe}$ with 50-, 60-, 70-MeV and 2.5-GeV bremsstrahlung.
- (5) The mass yield distribution and the photo-neutron cross-section of ^{209}Bi with 50-, 65-MeV, and 2.5-GeV bremsstrahlung have been determined [J. Korean Phys. Soc. **52** (2008) 934].

2. Results obtained by using neutrons

- (1) We obtained the neutron total cross-sections of Mo and Pd by using the time-of-flight method and the resonance parameters of Mo isotopes by using the SAMMY fitting code. The results were published in Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 561 and in J. Nucl. Sci. and Tech. **S5** (2008) 590.
- (2) We obtained the thermal neutron capture cross-sections and the resonance integral of the

$^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$, $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$, $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$, and $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ reactions by the activation method. The results were published in Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 21 Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 861, and Nucl. Instr. Meth. B **267** (2008) 462.

- (3) We obtained the neutron capture cross-sections of ^{105}Pd and $^{117,119}\text{Sn}$ for keV-neutron using 3-MV Peletron accelerator at the Tokyo Institute of Technology, Japan [J. Nucl. Sci. and Tech. **S5** (2008) 443 and J. Nucl. Sci. and Tech. **45** (2008) 352].

V. Applications

Isomeric cross-section ratios are applied for various studies related to nuclear reaction and nuclear structure such as transfer of angular momentum, spin dependence of nuclear level density, refinements in gamma transition theories and testing the theoretical models. The knowledge of thermal neutron cross-sections and resonance integrals are of great importance not only for design and development of nuclear reactor but also for the activation analysis and other applications concerning the interaction of neutrons with matter.

Precise measurements of neutron cross-sections are very important for the safety design of nuclear reactors and for the evaluation of the neutron flux density and energy spectrum around a reactor. Neutron resonance parameters can be applied the reactor design and also provided reliable information on nuclear level densities. Our measurements are provided in the web (<http://www-nds.iaea.org/ecfor/exfor.htm>) for general users in the world.

CONTENTS

CHAPTER I. OUTLINE OF THE PROJECT	11
Section 1. Objective and Scope of the Project	11
Section 2. Importance of the Project	11
CHAPTER II. STATUS OF THE ART	13
CHAPTER III. CONTENTS AND RESULTS OF THE PROJECT	14
Section 1. Experimental Facility	14
Section 2. Experiment and Data Aquisition System	17
Section 3. Results	25
CHAPTER IV. ACHIEVMENT OF OBJECTIVE AND CONTRIBUTIONS	41
CHAPTER V. UTILIZATION PLAN OF RESEARCH OUTCOME	45
CHAPTER VI. SCIENTIFIC INFORMATIONS	46
CHAPTER VII. REFERENCES	47

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	11
제 1 절 연구개발의 목적 및 범위	11
제 2 절 연구개발의 필요성	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	14
제 1 절 실험 설비	14
제 2 절 실험 방법 및 데이터	17
제 3 절 실험 결과	25
제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도	41
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	45
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보	46
제 7 장 참고 문헌	47

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

포항 가속기연구소의 65-MeV 및 2.5 GeV 전자가속기의 전자빔을 얇은 텅스텐 표적에 입사하여 생성된 制動輻射감마선을 다양한 시료에 조사하여 光-핵반응 단면적, isomeric cross-section 比 및 光破碎 (photospallation) yield를 측정한다. 65-MeV 전자가속기의 전자빔을 여러 장의 Ta 으로 제작한 중성자 표적 장치에 입사하여 생성된 중성자를 시료에 조사하여 熱중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分(resonance integral) 그리고 중성자 飛行時間法으로 중성자 全단면적 및 共鳴 상수를 측정한다.

제 2 절. 연구개발의 필요성

우리나라는 원자력발전 규모면에서는 세계 6위로 原子爐 건설뿐만 아니라 핵연료 설계 제조, 原子爐 안전 규제 등에 있어서 세계시장에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나, 방사선 이용기술은 원자력발전분야에 비해 상대적으로 기술개발 및 산업화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 방사선이용기술은 첨단의료기술, 국방기술, 생명공학기술, 나노기술, 정보기술, 환경기술 등과 연계하여 국가 과학기술발전에 중요한 역할을 담당하는 요소기술들 중의 하나로 응용 분야가 다양하기 때문에 방사선에 관한 기초 연구 및 미래 인력 양성이 필수적이다.

국내에는 방사선(양성자, 전자, 감마선, 중성자)을 이용한 기초 연구 설비가 부족 할 뿐만 아니라, 전문 인력이 부족한 상황이다. 원자력발전소 건설 분야의 선진국인 우리나라가 향후 방사선이용 기술 분야 에서 선진국의 대열에 들어가기 위해서는 방사선을 이용하는 연구를 수행할 기반설비 구축과 인력 양성이 급선무라고 판단된다.

- 기술적인 측면에서 연구개발의 필요성
 - ▶ 포항가속기연구소의 65 MeV 펄스형 전자가속기 기반의 중성자 설비에서 중성자 放射化 단면적을 측정하는 기술 획득 및 인력양성
 - ▶ 포항가속기연구소의 65 MeV 및 2.5 GeV 전자가속기를 이용한 감마선 放射化 단면적 측정 기술획득 및 인력양성
 - ▶ 방사선 단면적 측정 과정에서 획득되는 측정 시스템 및 자료 분석 시스템 관련 기술 확보
- 경제 산업적 측면에서 연구개발의 필요성
 - ▶ 포항가속기연구소에 설치된 65 MeV 및 2.5 GeV 전자가속기 설비를 활용하여 방사선 관련 기초 실험을 수행함으로써 기반 설비의 활용도 향상
 - ▶ 방사선(중성자, 감마선, 양성자, 전자)을 이용한 반응 단면적과 같은 기초자료는 현재까지 주로 국외의 자료를 이용하거나, 국외 설비에서 사용료를 지불하고 필요한 자료를 측정 하였으나, 국내 설비가 구축되고 측정 기술이 확보되

면 필요한 경우 언제든지 가능하게 됨으로 시간과 경비 절약

- ▶ 핵의학, 동위원소 산업, 핵융합, 소멸처리, 반도체 산업 등 방사선 기술 산업에 필요한 기본 자료 공급
- 사회 문화적 측면에서 연구개발의 필요성
 - ▶ 원자력발전산업의 선진국인 우리나라가 방사선 동위원소이용 기술에 필요한 자료를 지금까지는 사용만 하였지만 향후 필요한 기초자료들을 생산하여 국내 및 국외에 제공함으로써 국가 위상을 높이는 계기 마련
 - ▶ 국내의 방사선 기반설비를 이용한 다양한 실험 수행으로 학생들의 실험 경험을 넓힐 수 있고, 방사선 이용기술에 대한 이해 향상

제 2 장 국내외 기술개발 현황

전자가속기를 이용하는 국외 중성자 설비로는 일본 京都대학 原子爐 연구소, 미국 Oak-Ridge 연구소의 ORELA, 그리고 뉴욕에 있는 RPI 대학교의 설비, 벨기에의 GEEL 등이 있다. 그리고, 러시아의 경우는 전자가속기를 原子爐와 연결하여 펄스형 중성자를 생성하여 측정실험을 하는 경우도 있다. 현재까지 이러한 설비들을 이용하여 熱중성자 에너지 영역에서 수백 keV 에너지영역의 핵반응단면적들을 주로 생산하고 있다. 전자가속기를 이용한 중성자 생성설비는 에너지 분해능이 매우 우수하여 共鳴에너지 영역에서의 핵반응단면적들을 얻기 위한 정밀한 실험에 매우 유리하다.

光-핵반응 실험은 단색광의 감마선을 이용하는 실험과 전자가속기의 전자빔을 얇은 표적에 입사하였을 때 생성되는 制動輻射(Bremsstrahlung)감마선을 이용하는 실험이 있다. 단색광의 감마선을 이용하는 실험은 Laser Compton Backscattering 방법으로 단색광을 만들어서 하는 실험설비로는 일본의 TERAS [1], LEPS [2], NewSUBARU [3]가 있고, 미국에는 LEGS [4]와 HIGS [5]가 있고 유럽에는 LADON [6]과 GrAAL [7]등이 있다. 이러한 국외의 단색광 감마설비에서 이용할 수 있는 감마 에너지 영역은 수 MeV에서 80 MeV 혹은 1.5 GeV에서 3.5 GeV 영역이다. 이러한 국외 설비에서 光-핵반응 실험수행으로 다양한 연구를 수행하고 있다. 한편 制動輻射 감마선의 경우에는 전자빔 에너지로부터 연속적인 분포를 갖고 있기 때문에 단색 감마선으로 할 수 있는 정밀한 연구를 전부 수행 할 수는 없지만, 부분적으로 검증 할 수 있는 연구들이 있다.

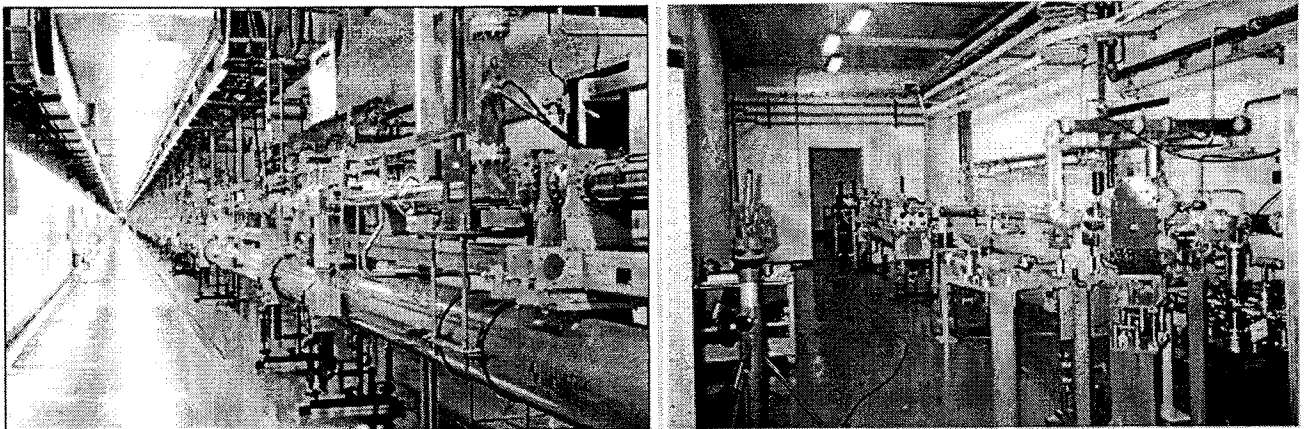
국내에서 가속기를 이용하여 중성자 및 감마선 관련 실험을 수행할 기반설비가 국외와 비교할 때 거의 없는 상황이다. 포항가속기연구소에 2.5-GeV 전자선형가속기와 65-MeV 전자가속기(현재 70에서 50 MeV로 운전 가능)가 있으며, 한국원자력학원의 MC50 사이클로트론이 방사선 실험 수행이 가능한 설비들이다. 그러나, 이러한 국내 가속기 설비를 활용하는 실험을 수행하는 연구가 본 연구팀 이외는 거의 없는 상황이다. 본 연구팀은 포항가속기 연구소의 전자가속기를 이용하여 베트남 및 인도과학자들과 공동연구로 수차례 실험을 수행하여 결과를 국제학술지에 출판하였고, 계속하여 본 연구팀과 함께 공동연구를 수행하고 있다.

국내에는 전자가속기를 이용한 펄스형 중성자 설비나 制動輻射감마선을 이용하는 실험은 본 연구그룹이 유일하게 수행하고 있다. 본 과제 수행을 통하여 국제적으로 인정받는 연구결과를 발표하였으며, 50-70 MeV 制動輻射감마선 발생설비는 새로운 연구영역을 개척할 수 있는 설비로 실험 결과의 대부분이 세계에서 첫 번째 실험결과들이 될 수 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 실험 설비

포항가속기연구소에는 [그림 1]과 같이 2.5 GeV 전자선형가속기가 싱크로트론 방사선 설비의 전자빔 입사용으로 건설되어져 있는 반면, 여러 가지 성능시험을 위해서 2개의 가속관을 이용하여 100-MeV 급 전자선형가속기를 설계하였으나, 현재 65-MeV로 운전 가능하며, 이것을 이용하여 중성자 발생설비로 활용되어 지고 있다.



[그림 1] 포항가속기연구소에 운전 중인 2.5 GeV 전자선형가속기(왼쪽)와 중성자 발생설비로 사용되는 65-MeV 전자선형가속기(오른쪽)

1. 制動輻射 감마선 발생 설비

전자가속기에서 가속되는 전자빔을 얇은 텅스텐 표적에 입사하면 制動輻射 감마선의 최대에너지는 입사하는 전자빔의 에너지이며 아래와 같은 함수로 표현 할 수 있다.

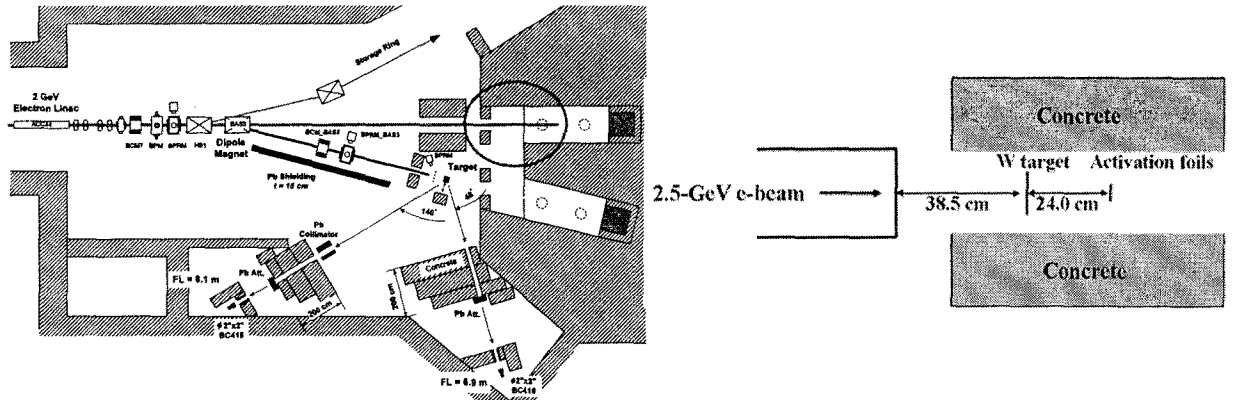
$$f(\theta, E_{th}) = \frac{(1 + (E_{th}/\mu)^2)}{(k + E_{th}\theta^2)^3} + \frac{80}{E_{th}} \tag{1}$$

식에서 $\mu=0.511$ MeV로 전자의 정지 질량이고, θ 는 입사하는 전자빔의 방향과 박막사이의 각이고, E_{th} 는 텅스텐이 광자와 핵반응하게 하는 한계에너지이다. k 는 fitting 으로부터 결정되는 상수인데, 감마선의 한계에너지가 23 MeV 이상일 때는 $k=1$ 이고, 15 MeV 이하일 때는 $k=0.45$ 이다.

2.5 GeV의 전자빔을 이용하면, 감마선의 에너지가 2.5 GeV 로부터 수 MeV영역까지 감마선의 에너지에 따른 감마-핵반응 단면적을 측정 할 수가 있다. 그리고, 65 MeV의 전자 가속기를 이용하면 수십 MeV의 감마선을 이용하는 실험도 가능하다.

가. 2.5 GeV 制動輻射 감마선 발생 장치

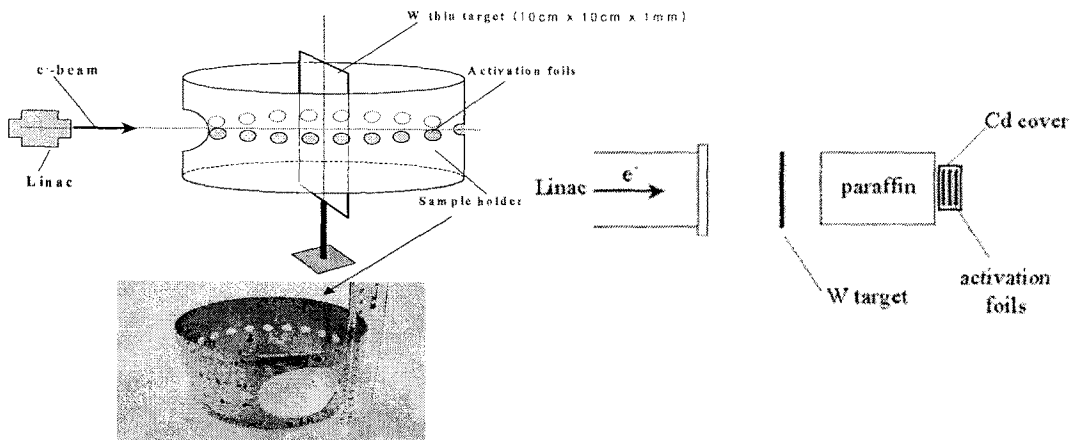
[그림 2]에서와 같이 2.5 GeV 전자선형가속기에서 저장링으로 연결되는 가속기 끝 부분에는 전자빔을 덤프시키는 영역이 있다. 이 영역에 감마선을 발생시키기 위해서 얇은 텅스텐 표적을 설치하면 制動輻射 감마선을 이용하는 실험이 가능하게 된다. 그림에서와 같이 텅스텐을 표적으로 하고 뒷부분에 측정하고자 하는 시료들을 장착하여 制動輻射 감마선에 의한 감마-핵반응 단면적을 측정 할 수 있다.



[그림 2] 2.5 GeV 전자가속기 끝 부분의 구조도와 제동복사 감마선 발생을 위하여 텅스텐 표적 및 실험용 시료를 설치하는 부분의 개략도

나. 65 MeV 制動輻射 감마선 발생 장치

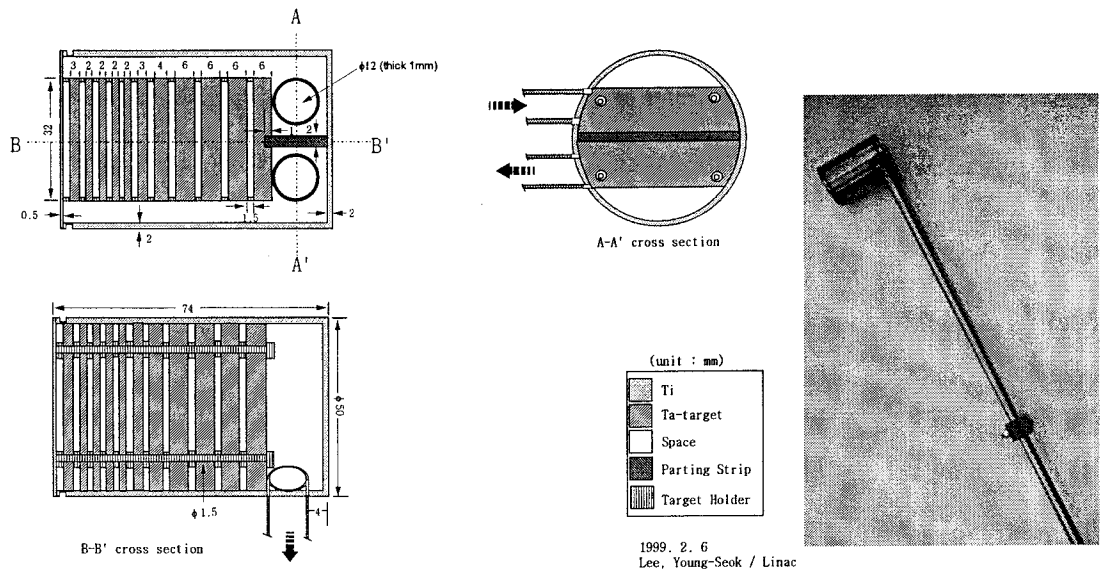
포항가속기연구소에 설치된 65-MeV 전자가속기를 이용하여 制動輻射 감마선을 이용하는 실험은 [그림 3]과 같이 설치하여 制動輻射 감마선의 각 분포를 측정 하는 실험뿐 만 아니라 수십 MeV 감마선을 이용하여 감마-핵반응 단면적 측정 실험을 수행 할 수 있다.



[그림 3] 65-MeV 제동복사 감마선 발생 및 실험 장치

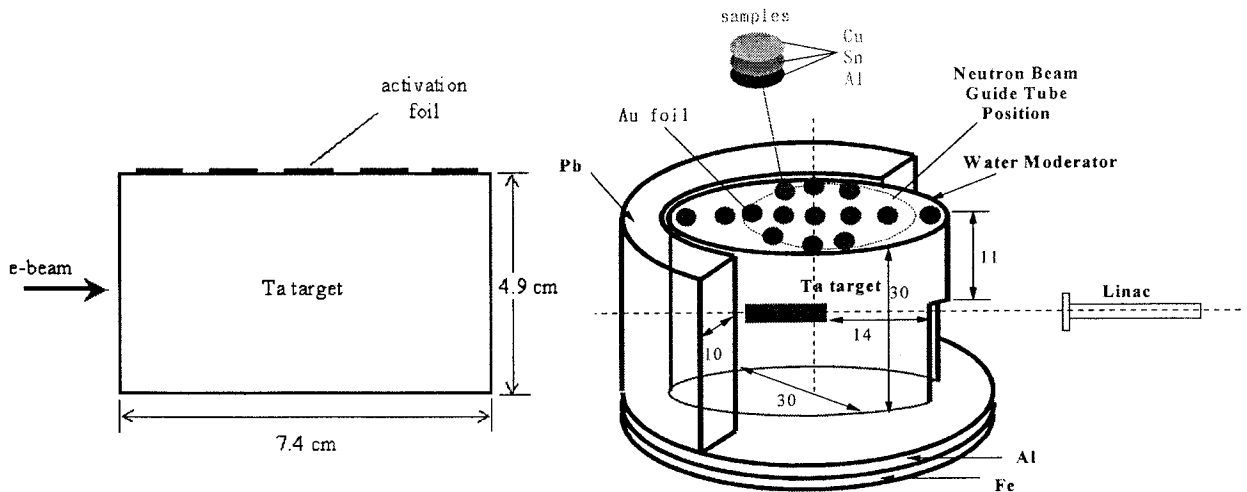
2. 펄스형 중성자 발생 설비

중성자 발생설비는 전자선형가속기에서 생성된 전자빔을 [그림 4]와 같이 여러 장의 Ta으로 제작한 중성자 표적장치에 입사하여 중성자를 생성한다. 이때 중성자와 동시에 制動輻射 감마선도 생성된다. 制動輻射감마선은 입사한 전자빔이 진행되는 방향으로 최대의 강도를 갖지만, 중성자는 등방성으로 생성된다. 그럼으로, 중성자를 이용한 실험을 위해서는 두꺼운 Ta 표적에 전자빔을 입사하여 생성된 중성자는 전자빔이 입사하는 방향에 대해서 90도 방향에서 이용하면 制動輻射 감마선을 최소화 할 수 있다.



[그림 4] Ta 중성자 표적장치 설계도 및 제작된 중성자 표적장치

전자빔을 Ta 중성자 표적에 입사하면 생성된 중성자는 1-2 MeV를 중심으로 맥스웰 분포를 갖는 비교적 높은 에너지의 高速 중성자(Fast Neutron)가 생성된다. 포항의 65-MeV 전자가속기를 이용한 중성자 발생설비는 펄스형 중성자가 발생되기 때문에 飛行時間法으로 중성자의 에너지를 결정 할 수 있기 때문에 중성자 수단면적을 중성자 에너지의 함수로 측정한다. 이때, 중성자의 에너지는 飛行 거리에 따라서 에너지의 분해능이 다르다. 현재 포항에는 12 m의 飛行 거리를 갖고 있기 때문에 高速 중성자는 에너지 분해능이 좋지 않기 때문에 가능한 많은 熱중성자를 발생 하기위하여 moderator로 물을 사용하여 熱중성자를 발생한다. [그림 5]는 포항에서 高速 중성자와 熱중성자를 발생하는 장치의 개략도를 보여주고 있다.



[그림 5] 중성자 발생 장치 및 실험 장치 개략도: (왼쪽) 고속 중성자 발생장치, (오른쪽) 열중성자 발생장치

제 2 절. 실험 방법 및 데이터 분석

위에서 설명한 制動輻射 감마선 발생설비와 중성자 발생 설비를 이용하여 여러 종류의 시료들을 입사 방사선에 조사하여 아래와 같은 실험을 수행 한다.

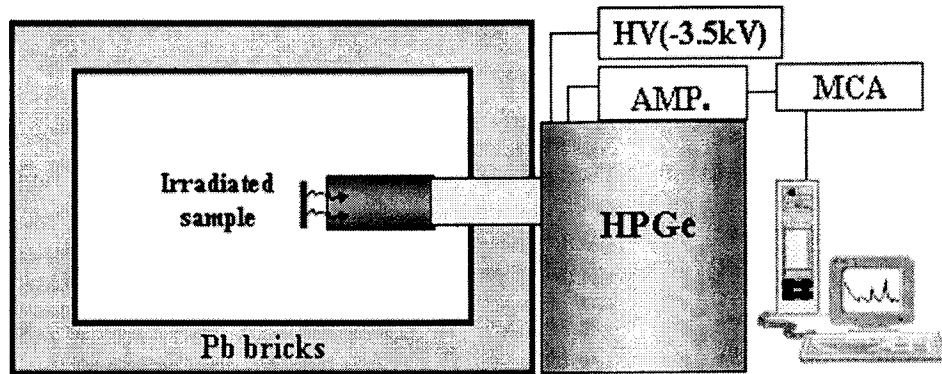
- 制動輻射감마선을 이용한 실험

- 65-MeV, 2.5-GeV 制動輻射 감마선에 의한 시료들의 감마-핵반응 단면적 측정
- Isomeric cross-section 比 측정
- 2.5-GeV 制動輻射 감마선에 의한 光 破碎 (photospallation)반응 yield 측정

- 중성자를 이용한 실험

- 熱중성자에 의한 捕獲단면적 측정
- 중성자 捕獲에 의한 共鳴積分(resonance integral) 측정

감마선 및 중성자 빔으로 조사 되어진 시료들은 [그림 6]에 나타난 것처럼 高分解能을 가진 HPGe검출기를 사용하여 감마선 스펙트럼을 측정하고 측정된 감마선 피크영역을 측정함으로써 조사시료의 방사선량을 측정한다.



[그림 6] 조사 시료의 감마선 스펙트럼 측정 장치

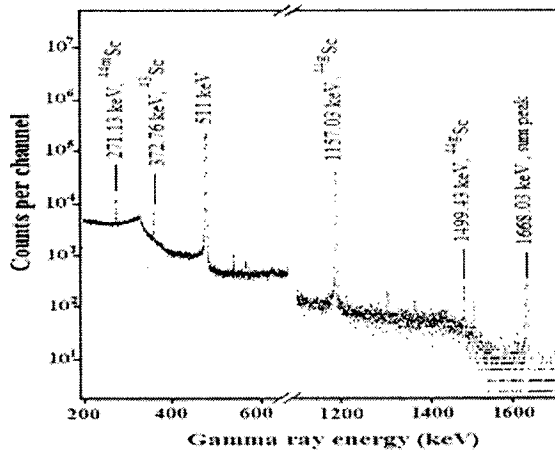
조사시료들은 高分解能의 HPGe 검출기를 이용하여 [그림 6]와 같은 장치에 시료를 장착하여 측정한다. 단 반감기 동위원소인 경우 2-3일간 측정하고, 방사선량이 줄어들어서 장반감기의 동위원소들에 대한 결과들의 분석을 위해서는 반감기에 따라서 계속 측정한다.

- (i) 표준감마선원(^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{133}Ba)들을 이용하여 HPGe검출기의 채널당 에너지를 결정
- (ii) HPGe 검출기의 감마선 에너지에 따른 검출효율 측정
표준감마선원을 이용하여 감마선 에너지에 따른 검출효율을 검출기와 선원사이의 거리가 10, 30, 50, 60 cm 인 경우에 대하여 측정한다. 검출효율은 아래와 같이 계산한다.

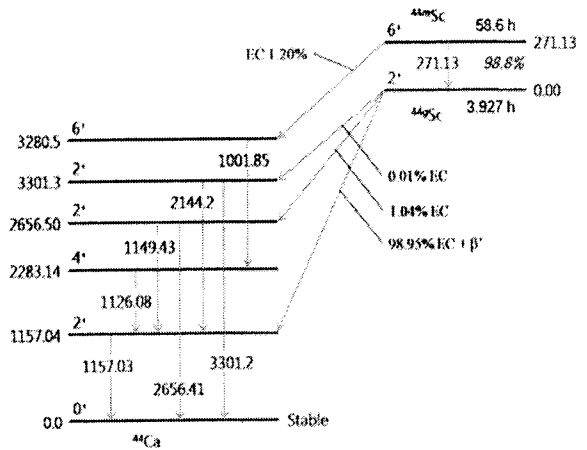
$$\epsilon = \frac{CPS}{A_0 e^{-\lambda t} \times I_\gamma}$$

A_0 는 표준감마선원의 초기 방사선량, λ 는 감마선원의 붕괴상수로 $0.693/T_{1/2}$ 와 같다. I_γ 는 감마선원이 특정 피크 에너지로 붕괴되는 확률이고, CPS는 스펙트럼을 측정하는 시간동안에 생성된 특정 피크내의 감마선 총 수이다. t 는 감마선원이 만들어진 시점에서 현재까지의 시간이다.

- (iii) 조사시료로부터 생성되는 放射性 핵종으로부터 방출되는 감마선 스펙트럼 측정 예로서, [그림 7]는 Sc 시료를 조사 하였을 때 생성되는 감마선 스펙트럼과 방출되는 감마선이 어떤 핵에서 방출되는지를 간략하게 보여 주고 있다.



(a) Sc: $t_i=240$ min, $t_d=100$ min, $t_m=10$ min.

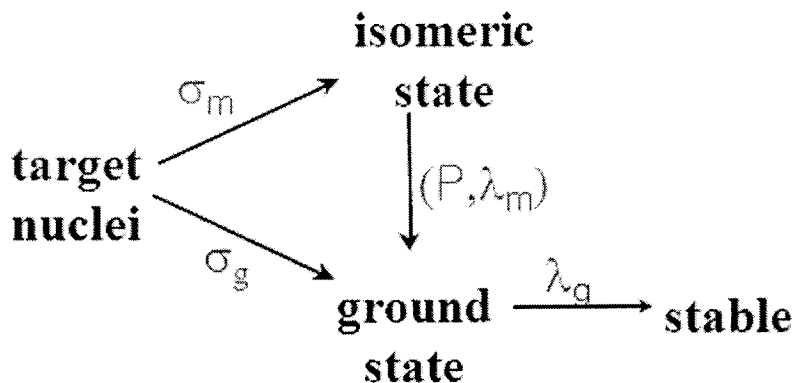


[그림 7] Sc시료를 240분 조사 후 100분후에 10분간 측정 한 감마선 스펙트럼

1. 制動輻射감마선을 이용한 실험

가. 光-핵반응 실험으로부터 核異性體 단면적 比(isomeric cross-section ratio) 측정

制動輻射감마선을 핵 표적에 조사하면 생성된 핵이 준안정상태(isomeric state)인 핵과 불안정한 기저상태(ground state)인 핵이 동시에 생성되는데 준안정상태인 핵은 감마선을 방출하면서 불안정한 기저상태인 핵으로 붕괴되어 진다. 불안정한 기저상태는 다시 붕괴되어 안정한 핵으로 붕괴되어진다. 즉 [그림 8]과 같이 표적핵으로부터 준안정상태인 핵과 불안정한 기저상태의 핵이 생성되어지는 단면적 比를 核異性體 단면적 比($IR = \sigma_m / \sigma_g$) 라고 한다. 制動輻射감마선을 이용한 실험인 경우에는 두 개의 생성단면적을 사용하는 것 보다는 두 상태의 반응 수득률(reaction yield)를 사용 한다 [8].



[그림 8] 표적핵으로부터 준안정상태와 기저상태인 핵이 생성되는 개략도

반응 수득률은 아래와 같이 측정되어진다.

$$Y = N_0 \phi \sigma = \frac{CPS \lambda (1 - e^{-\lambda T})}{\epsilon I_\gamma F (1 - e^{-\lambda \tau}) (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (2)$$

그럼으로 核異性體 단면적比는 아래와 같이 결정되어진다.

$$IR = \frac{\sigma_m}{\sigma_g} = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[\left(\frac{CPS_g}{CPS_m} \times \frac{\epsilon_m I_{\gamma m}}{\epsilon_g I_{\gamma g}} - \frac{P \lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) \times \frac{A_m B_m C_m D_m}{A_g B_g C_g D_g} + \frac{P \lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$A_{m(g)} = \frac{1 - e^{-\lambda_{m(g)} T}}{1 - e^{-\lambda_{m(g)} T}} e^{-\lambda_{m(g)} (T - \tau)}, B_{m(g)} = \frac{1 - e^{-\lambda_{m(g)} t_i}}{\lambda_{m(g)}}, C_{m(g)} = e^{-\lambda_{m(g)} t_w}, D_{m(g)} = 1 - e^{-\lambda_{m(g)} t_c}$$

위식에서 N_0 는 표적 핵의 수, CPS 는 [그림 7]에서 측정된 스펙트럼으로 부터 측정하는 시간동안에 생성된 특정 피크내의 감마선 총 수이고, P 는 준안정상상태에서 기저상태로 붕괴될 확률, $\lambda_{m(g)}$ 는 각 상태(m, g)의 붕괴상수, $\epsilon_{m(g)}$ 는 각 상태에서 방출되는 특정 감마선의 검출효율, I_γ 는 특정감마선의 강도, T 는 빔 조사 기간, τ 는 T 시간 내에서 빔 조사 시간, t_i 는 빔 조사 시작 시간과 빔 조사종료시간 사이의 시간차, t_w 는 빔 조사 종료 후 선량 측정 시작 시간사이의 시간차, t_m 는 선량 측정시간이다.

나. 光-핵반응 실험으로 核分裂 반응 收得率(Yield) 및 光-중성자 반응 단면적 측정

制動輻射감마선을 25 μm 의 알루미늄으로 쏘아 표적시료에 조사하면, 표적시료에서 光-핵반응에 의해서 분열된 핵들은 알루미늄에 존재한다. 알루미늄박막에 있는 核分裂 과정으로 생성된 핵들은 HpGe 검출기로 스펙트럼을 측정하면 생성된 핵 A 에서 방출되는 감마선을 이용하여 核分裂 반응 收得率을 아래와 같은 식을 이용하여 계산 할 수 있다 [12].

$$Y_A = \frac{CPS \cdot (\tau/T) \cdot \lambda}{N_0 \sigma_f \phi_\gamma I_\gamma \epsilon (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (4)$$

이식에 σ_f 는 표적핵 B 의 核分裂 단면적으로 이미 알고 있는 핵자료를 이용한다. 기타 사용된 변수들은 앞에서 정의된 것과 동일하다. ϕ_γ 는 입사 감마선의 강도(flux)로 표준 시료(금박)를 사용하여 측정할 수 있다.

$$\phi_\gamma = \frac{CPS \cdot e^{\lambda(t_w + t_c)}}{\epsilon N_0 \sigma_{Au} I_\gamma (1 - \lambda t_i)} \quad (5)$$

알루미늄박막안의 표적 핵 B가 制動輻射 감마선과 반응하였을 때, 중성자를 방출하는 반응과정 $B(\gamma, xn)$ 의 단면적을 아래와 같은 식을 이용하여 구할 수 가 있다.

$$\sigma(\gamma, xn) = \frac{CPS \cdot (\tau/T) \cdot \lambda}{N_0 \phi_\gamma Y_A I_\gamma \epsilon (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (6)$$

이식에서 생성된 임의의 핵 A의 核分裂 반응 收得率 Y_A 는 앞에서 구한 값을 이용한다. 이때 입사되어지는 제동 복사감마선의 에너지가 증가함에 따라서 생성되는 중성자 數 x 가 증가된다.

2. 중성자를 이용한 실험

가. 飛行時間法으로 중성자 全단면적 측정방법

실제 실험에서 飛行時間 분석기의 channel 폭이 W_c 인 것을 사용하여 중성자의 에너지 E_i 를 飛行時間 법으로 결정할 수 있다.

$$E_i = \left(\frac{72.3 \cdot L}{(I - I_o) \cdot W_c} \right)^2 \quad (7)$$

I : 시간분석기의 飛行時間에 대응하는 channel 수

I_o : 중성자가 선원에서 생성되는 순간의 channel 수

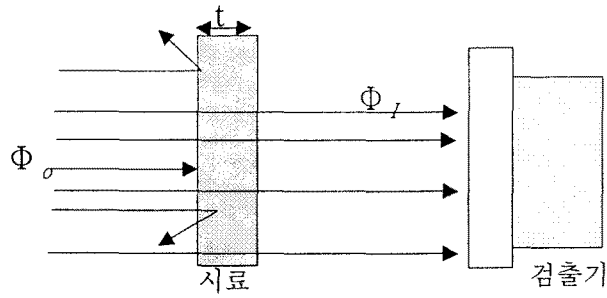
W_c : 시간분석기의 channel 폭 [μs]

아래에서 보는 것처럼 중성자 빔 Φ_o 가 입사할 때 중성자 검출효율이 ϵ 인 검출기에 의한 계수율 C_o 는

$$C_o = \Phi_o \cdot \epsilon \quad (8)$$

로 표시할 수 있고, 같은 방법으로 시료를 투과한 투과 중성자 빔 Φ_I 에 의한 계수율 C_I 는 아래와 같이 표시 할 수 있다.

$$C_I = \Phi_I \cdot \epsilon \quad (9)$$



[그림 9] 비행시간법으로 전단면적 측정 개략도

투과율 T 는 중성자 빔 중에 시료가 있을 경우와 없을 경우의 중성자 flux 比로서 정의 된다.

$$T = \frac{\Phi_I}{\Phi_0} \quad (10)$$

여기에서 투과 중성자 빔 Φ_I 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\Phi_I = \Phi_0 \cdot \exp[-N\sigma_t t] \quad (11)$$

N : 시료의 원자밀도

σ_t : 시료의 중성자 전단면적

t : 시료의 두께

이상의 관계로부터 투과율 T 는

$$T = \frac{\Phi_0 \cdot \exp[-N\sigma_t t]}{\Phi_0} = \frac{C_I}{C_0} \quad (12)$$

이 된다. 위 식으로부터 중성자 쏘단면적은 아래 식에 의해서 구할 수 있다.

$$\sigma_t = -\frac{1}{Nt} \ln \frac{C_I}{C_0} \quad (13)$$

그리고 에너지 E_i 의 중성자에 대한 중성자 쏘단면적 $\sigma_t(E_i)$ 는 에너지 E_i 인 중성자 빔의 투과율 $T(E_i)$ 에서 구한다.

$$\sigma_t(E_i) = -\frac{1}{Nt} \ln T(E_i) \quad (14)$$

위 식에 있는 투과율 $T(E_i)$ 는 실험에서는 아래와 같이 결정한다.

$$T(E_i) = \frac{[I(E_i) - IB(E_i)]/M}{[O(E_i) - OB(E_i)]/MB} \quad (15)$$

이식에서 I 는 시료가 飛行管에 설치되었을 때의 channel 수, O 는 시료가 없을 때의 channel 수 그리고 각각에 표시된 B 는 실험에서 예측한 background의 channel 수를 나타내며, M 은 중성자 모니터의 channel수로 각각의 경우에 대해서 실험 데이터를 규격화하기 위하여 사용된다.

나. 放射化 방법으로 熱중성자 捕獲단면적 측정 및 共鳴積分 상수 측정 방법

펄스형 중성자설비에서 高速 중성자 및 熱중성자를 이용하여 放射化 방법으로 실험을 수행하기 위하여 시료를 설치하는 개략도는 [그림 5]에 보여주고 있다.

熱중성자 빔에 조사한 시료들의 방사능측정결과로부터 熱중성자 捕獲단면적을 측정할 수 있다. 이때 측정된 熱중성자 捕獲단면적은 측정시료와 함께 조사한 표준시료 Au의 熱중성자 捕獲단면적과 비교하여 측정한다.

$$\sigma_{0,x} = \sigma_{0,Au} \times \frac{(R - F_{Cd}R_{Cd})_x}{(R - F_{Cd}R_{Cd})_{Au}} \times \frac{G_{0,Au}}{G_{0,x}} \times \frac{g_{Au}}{g_x} \quad (16)$$

여기서 0은 熱중성자를 의미하고, x는 임의의 측정시료, Au는 표준시료이다. R은 반응율이고, R_{Cd} 는 Cd을 덮었을 때의 반응율이고, F는 보정상수이고, G는 熱중성자 차폐상수이고, g는 Westcott 인자이다.

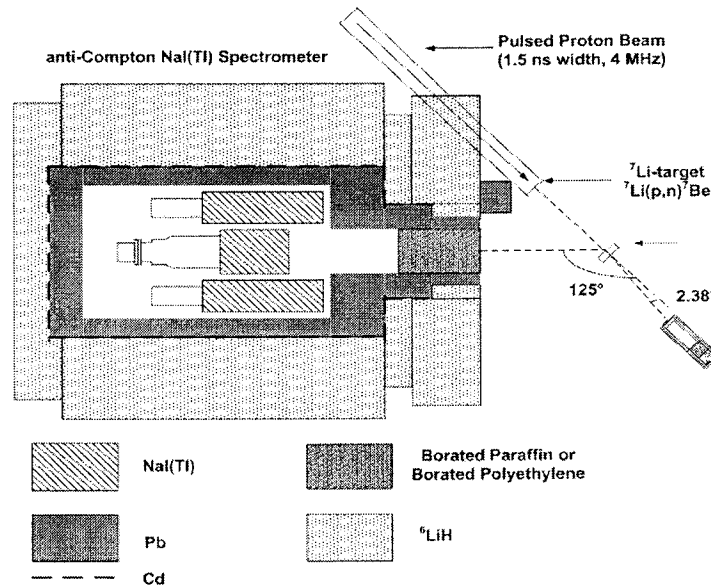
共鳴積分상수는 에너지의 함수로 측정된 단면적을 Cd cut-off 에너지(0.5 eV)로부터 임의의 에너지까지 아래와 같이 적분하여 얻을 수 있다.

$$I_x = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_x(E) dE/E \quad (17)$$

다. 일본 동경공대 펠레트론 가속기 이용 keV 중성자 捕獲단면적 측정 방법

Pelletron 가속기에 의해 가속된 펄스형 양성자 빔은 중성자 발생용의 ${}^7\text{Li}$ 표적에 입사되어 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 반응에 의해 펄스 중성자를 발생되고, 이를 시료에 입사하여 생성된 감마선을 [그림 10]과 같은 측정 장치에 의해서 핵자료 측정 실험을 한다. ${}^7\text{Li}$ 표적은 직경 30mm, 두께 0.5mm의 동판에 금속 ${}^7\text{Li}$ 을 진공 증착 한 것이다. ${}^7\text{Li}$ 표적은 융점이 낮기 때문에 펄스 양성자 빔에 의한 발열로 ${}^7\text{Li}$ 이 증발하지 않도록 ${}^7\text{Li}$

표적에 빔 관의 외부로부터 물을 분사하여 냉각시켰다.



[그림 10] 동경공대 keV 중성자 실험장치 설치도

중성자 검출기는 [그림 10]에서 중성자 표적에서 생성되는 중성자 flux를 모니터링하기 위하여 빔라인 방향에 설치된 ${}^6\text{Li}$ -glass 섬광검출기를 사용한다. ${}^6\text{Li}$ -glass 섬광검출기는 직경 5mm, 두께 5mm의 원통형 ${}^6\text{Li}$ -glass 섬광체에 직경 12.7mm의 光電子増配管이 붙어 있는 小型검출기이다. 중성자 捕獲후 방출되는 감마선을 검출하는 감마 검출기로 사용하는 Compton 抑制型 NaI(Tl) 검출기는 [그림 10]에서 보는바와 같이 직경 152 mm의 주 검출기와 이를 둘러싸고 있는 대형 環狀검출기로 구성되어 있어서 Compton 산란과 전자쌍생성에 의해 주검출기 외부로부터 입사하는 2차 감마선을 대형 環狀검출기로 검출하고, 이 event를 주검출기에서 측정된 감마선 event와 逆同時回路에 의해 제거함으로써 주검출기에 全 에너지를 부여한 event만을 선택하도록 설계되어 있다.

시료의 중성자 捕獲단면적 측정을 위해서는 표준시료인 금박(${}^{197}\text{Au}$)과 측정시료 그리고 시료가 없는 경우로 나누어서 飛行時間法으로 중성자 捕獲단면적을 측정한다. 標準試料인 ${}^{197}\text{Au}$ 와 측정 試料의 (n, γ) 핵반응을 일으킨 중성자數와 감마선 波高 스펙트럼을 Compton 抑制型 NaI(Tl) 검출기로부터 측정된 결과로부터 波高 무계법을 이용하여 감마선 收得率 (yield)를 구하면, 試料의 중성자 捕獲단면적은 아래 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\sigma_{\text{시료}} = \frac{Y}{C_{\text{시료}} \cdot n_{\text{시료}} \cdot \phi_{\text{시료}}} \quad (18)$$

여기서, $C_{\text{시료}}$ 는 시료에 대한 補正因子, $n_{\text{시료}}$ 는 試料의 두께 [atoms/barn],

$\phi_{\text{시료}}$ 는 시료에 입사한 중성자 수이다. 측정용 시료에 입사한 중성자 수 $\phi_{\text{시료}}$ 는, 표준시료에 입사한 중성자 수 ϕ_{Au} 와의 상대측정을 통해서 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\phi_{\text{시료}} = \phi_{\text{Au}} \cdot \frac{CI_{\text{시료}}}{CI_{\text{Au}}} \cdot \frac{Li_{\text{Au}}}{Li_{\text{시료}}} \cdot \frac{C_{\text{시료}}}{C_{\text{Au}}} \quad (19)$$

$CI_{\text{시료}}, CI_{\text{Au}}$: 측정시료와 ^{197}Au 의 측정시 가속기에서 발생된 양성자의 수

$Li_{\text{시료}}, Li_{\text{Au}}$: 측정시료와 ^{197}Au 의 측정시 중성자 검출기에서 측정된 중성자 수

$C_{\text{시료}}, C_{\text{Au}}$: 중성자 검출기에서 검출한 중성자 수들 중에 특정 DW(Digital Window) 영역에서 측정시료와 ^{197}Au 에 입사된 중성자 수

제 3 절. 실험 결과

1. 制動輻射감마선을 이용한 실험 결과

가. 감마-핵반응의 Isomeric Cross-section 比 측정

(1) 65 MeV 制動輻射감마선을 이용하여 $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, x)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{103}\text{Rh}(\gamma, 4n)^{99\text{m}, \text{g}}\text{Rh}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, x)^{52\text{m}, \text{g}}\text{Mn}$ 의 isomeric cross-section 比 측정 [8]

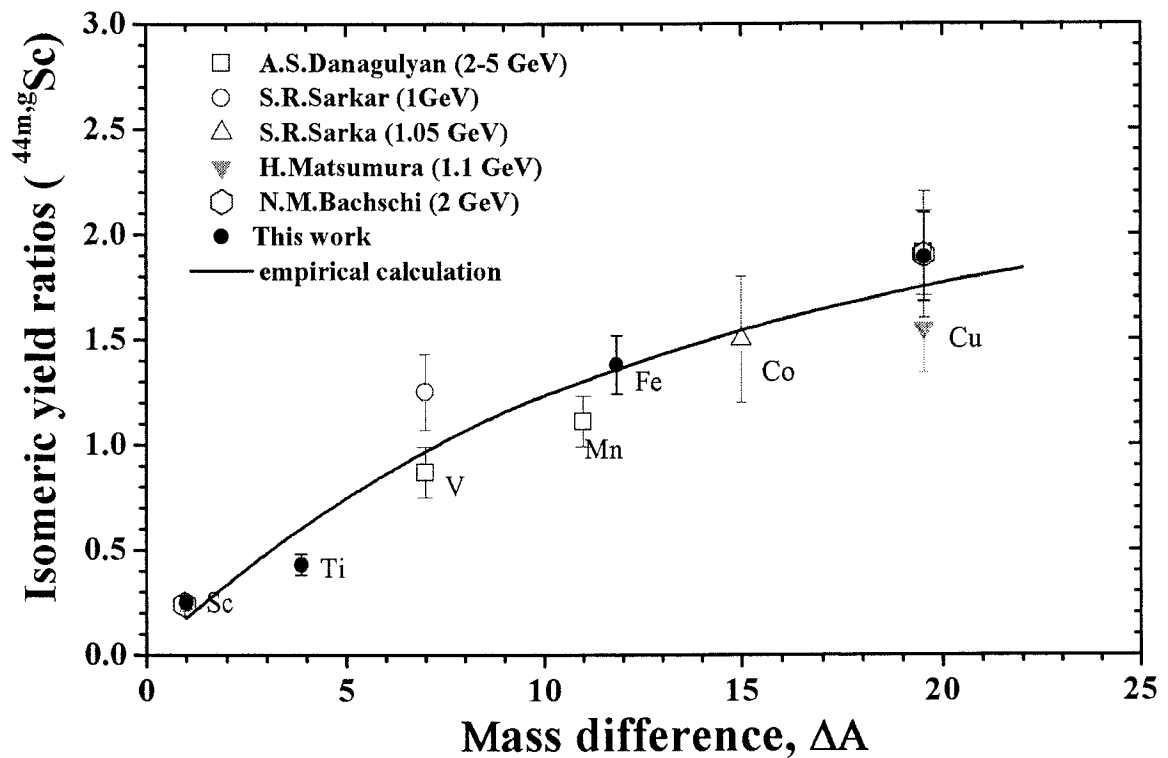
$^{\text{nat}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}$, Rh, $^{\text{nat}}\text{Fe}$ 시료에 65-MeV 전자가속기에서 생성되는 制動輻射감마선을 조사하였을 때 $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, x)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{103}\text{Rh}(\gamma, 4n)^{99\text{m}, \text{g}}\text{Rh}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, x)^{52\text{m}, \text{g}}\text{Mn}$ 감마-핵반응에서 생성되는 동위원소들의 核異性體 比를 측정하였다. 본 연구에서 측정된 결과와 기존의 실험에서 측정된 결과들을 비교하여 [표 1]에 정리 하였다.

(2) 2.5 GeV 전자가속기에서 $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, xn1p)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, xn5p)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$ 및 $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma, xn8p)^{44\text{m}, \text{g}}\text{Sc}$ 의 isomeric cross-section 比 측정 [9]

포항가속기연구소의 2.5 GeV 전자가속기에서 생성되는 전자빔을 이용하여 생성된 制動輻射감마선을 4개의 시료에 조사하여 감마-핵반응에 의해서 생성되는 ^{44}Sc 의 核異性體 比를 측정하였다. 측정된 核異性體 比를 기존의 측정결과와 비교 하여 [표 2]에 정리하였다. 한편 ^{44}Sc 核異性體가 생성될 때의 모핵과 딸핵의 질량차 ΔA 에 따른 核異性體 比를 비교 하여 보았는데, ΔA 가 증가하면 核異性體 比가 증가되어 진다는 것을 [그림 11]로부터 알 수 있다.

[표 1] $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, x)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{103}\text{Rh}(\gamma, 4n)^{99\text{m},\text{g}}\text{Rh}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, x)^{52\text{m},\text{g}}\text{Mn}$ 감마-핵반응에서 생성되는 동위원소들의 核異性體 比

Nuclear reaction	Spin		Photon energy [MeV]	Isomeric ratio, $R=S_{\text{high}}/S_{\text{low}}$	
	Ground state	Isomeric state		Present work	References
$^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	2^+	6^+	15	-	0.14 [10]
			20.83	-	0.211 [10]
			22	-	0.23 [11]
			45	-	0.23 ± 0.03 [12]
			50	-	0.21 ± 0.04 [13]
			65	0.21 ± 0.03	-
			75	-	0.21 ± 0.03 [13]
			300	-	0.21 ± 0.02 [13]
2000	-	0.24 ± 0.03 [14]			
$^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, x)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	2^+	6^+	65	0.12 ± 0.03	-
$^{103}\text{Rh}(\gamma, 4n)^{99\text{m},\text{g}}\text{Rh}$	$1/2^-$	$9/2^+$	65	1.43 ± 0.20	-
$^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, x)^{52\text{m},\text{g}}\text{Mn}$	6^+	2^+	65	0.28 ± 0.04	0.32 ± 0.05 [13]
			70		



[그림 11] 질량차 ΔA 의 함수로 $^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 의 이성체 比

[표 2] $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, xn1p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, xn5p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 및 $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma, xn8p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 반응으로부터 생성된 $^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$ 의 核異性體 比

Nuclear reaction	Photon energy [MeV]	ΔA	Isomeric ratio, $\text{IR}=\text{S}_{\text{high}}/\text{S}_{\text{low}}$	
			Present work	References
$^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	12.43	1	-	0.045±0.011 [11]
	12.78		-	0.057±0.009 [11]
	13.04		-	0.067±0.009 [11]
	13.28		-	0.071±0.011 [11]
	14.21		-	0.126±0.009 [11]
	15		-	0.14±0.015 [11]
	15.46		-	0.145±0.015 [11]
	19.7		-	0.21±0.015 [11]
	20.83		-	0.211±0.013 [11]
	22		-	0.23±0.02 [10]
	45		-	0.23 ±0.03 [12]
	50		-	0.21±0.04 [13]
	65		-	0.21±0.03 [15]
	75		-	0.21±0.03 [13]
	300		-	0.21±0.02 [13]
2000	-	0.24±0.03 [14]		
2500	0.25±0.03			
$^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, xn1p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	65	3.87		0.12±0.03 [8]
	2500		0.43±0.05	
$^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, xn5p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	250-800	11.85		1.0±0.05 [16]
	300-1000			1.1±0.2 [17]
	2500		1.38±0.14	
$^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma, xn8p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	1100	19.5		1.545±0.224 [18]
	2000			1.9±0.3 [14]
	2000-5000			1.91±0.2 [19]
	2500		1.89±0.21	
$^{51}\text{V}(\gamma, 5n2p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	1000	7		1.25±0.18 [20]
	2000-5000			0.87±0.12 [19]
$^{55}\text{Mn}(\gamma, 7n4p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	2000-5000	11		1.11±0.12 [19]
$^{59}\text{Co}(\gamma, 9n6p)^{44\text{m},\text{g}}\text{Sc}$	1050	15		1.5±0.3 [20]

(3) 50, 60, 70 MeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{89}Zr , $^{86,87}\text{Y}$ 核異性體의 核異性體 단면적比 측정

^{nat}Zr 표적과 ^{nat}Y 표적에 50, 60 70 MeV 制動輻射감마선을 조사하였을 때 $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)^{89m,g}\text{Zr}$, $^{nat}\text{Zr}(\gamma, xn1p)^{86m,g}\text{Y}$, $^{89}\text{Y}(\gamma, xn)^{87m,g,86m,g}\text{Y}$ 光-핵반응에 의해서 생성되는 ^{89}Zr , $^{86,87}\text{Y}$ 核異性體比를 측정하였으며, 측정결과가 [표 3]에 타 연구그룹에 의해서 측정된 결과와 비교하였다. 현재 논문이 NIMB에 접수되어 심사 중에 있다.

[표3] Isomeric yield ratio of $^{89m,g}\text{Zr}$, $^{87m,g}\text{Y}$ and $^{86m,g}\text{Y}$ via photonuclear reactions with Zr and Y target.

Nuclear Reaction	Photon energy in MeV	ΔA	Isomeric ratio, IR= $Y_{\text{high-spin}}/Y_{\text{low-spin}}$		
			Present work	References	
$^{nat}\text{Zr}(\gamma, n)^{89m,g}\text{Zr}$	20	2.232	-	0.67±0.04 [21]	
	20.5		-	0.92±0.06 [22]	
	21		-	0.92±0.03 [21]	
	21.5		-	0.80±0.04 [23]	
	22.0		-	0.87±0.03 [23]	
	22.5		-	0.85±0.03 [23]	
	23.0		-	0.82±0.03 [23]	
	23.5		-	0.78±0.04 [23]	
	24.0		-	0.77±0.04 [23]	
	24.5		-	0.71±0.04 [23]	
	25.0		-	0.83±0.03 [24]	
	30.0		-	0.74±0.04 [24]	
	30.0		-	0.49±0.15 [25]	
	40.0		-	0.85±0.04 [26]	
	43.0		-	0.31±0.01 [27]	
	50			0.68±0.07	-
	60			1.05±0.12	-
70			1.07±0.09	-	
$^{89}\text{Y}(\gamma, 2n)^{87m,g}\text{Y}$	23	2.000	-	0.26±0.04 [28]	
	23		-	0.25±0.03 [29]	
	24		-	0.30±0.03 [28]	
	25		-	0.32±0.02 [28]	
	25.6		-	0.35±0.04 [29]	
	26		-	0.33±0.02 [28]	
	27		-	0.36±0.02 [28]	
	28		-	0.42±0.02 [28]	
	28.6		-	0.43±0.04 [29]	
	29		-	0.42±0.02 [28]	
	30		-	0.44±0.02 [28]	
	30		-	0.44	[30]
	30		-	0.44	[31]
	31		-	0.43±0.02 [28]	
	32		-	0.44±0.02 [28]	

	33		-	0.42±0.02 [28]
	34		-	0.43±0.02 [28]
	35		-	0.44±0.02 [28]
	43		-	0.59±0.04 [27]
	50		-	0.54±0.04 [29]
	50		0.55±0.04	-
	60		0.58±0.04	-
	70		0.62±0.04	-
	150		-	0.75±0.05 [13]
	150		-	0.72±0.05 [31]
	280		-	0.75±0.05 [13]
$^{nat}\text{Zr}(\gamma, xn1p)^{86m,g}\text{Y}$	50	5.309	0.27 ± 0.04	-
	60		0.32 ± 0.07	-
	70		0.34 ± 0.05	-
$^{89}\text{Y}(\gamma, 3n)^{86m,g}\text{Y}$	43	2.995	-	0.13±0.02 [27]
	50		0.22±0.04	-
	60		0.25±0.03	-
	70		0.26±0.03	-

(4) 50, 60, 70 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 이용하여 ^{52}Mn 核異性體의 核異性體 단면적비를 측정

^{nat}Fe 표적에 50, 60 70 MeV 및 2.5 GeV 制動輻射감마선을 조사하여 생성되는 $^{52m,g}\text{Mn}$ 의 核異性體비를 측정하였으며, 측정결과가 [표 4]에 타 연구그룹에 의해서 측정된 결과와 비교하였다. 현재 논문을 작성 중에 있다.

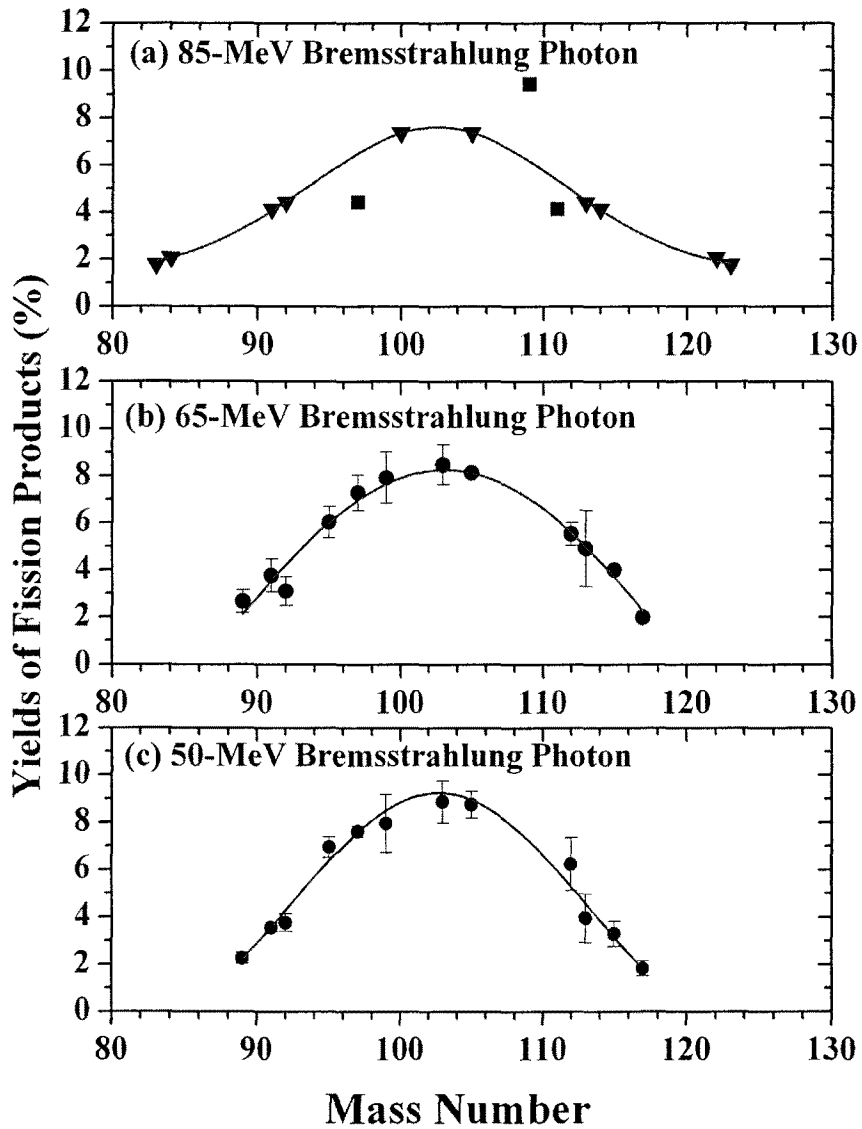
[표 4] Isomeric yield ratios for the $^{nat}\text{Fe}(g, xn1p)^{52m,g}\text{Mn}$ reaction induced by different photon energy.

Nuclear reaction	Photon energy [MeV]	Isomeric yield ratio, $R=Y_{\text{high-spin}}/Y_{\text{low-spin}}$	
		Present work	Existing Results
$^{nat}\text{Fe}(\gamma, xn1p)^{52m,g}\text{Mn}$	30	-	0.102 [30]
	50	0.27±0.03	-
	60	0.33±0.04	-
	65	-	0.28±0.04 [8]
	70	0.34±0.04	0.32±0.05 [32]
	100	-	0.39±0.03 [13]
	150	-	0.36±0.02 [13]
	200	-	0.35±0.02 [13]
	250	-	0.37±0.02 [13]
	300-1000	-	1.3±0.8 [3]
	1500	-	0.87±0.1 [33]
2500	1.25±0.15	-	

나. 光-핵반응 실험으로 核分裂 반응 收得率(Yield) 및 光- 중성자 반응 단면적 측정

(1) 50 MeV, 65 MeV 制動輻射감마선을 ^{209}Bi 에 조사하여 光-核分裂 반응 收得率 및 光- 중성자 반응 단면적 측정 [34]

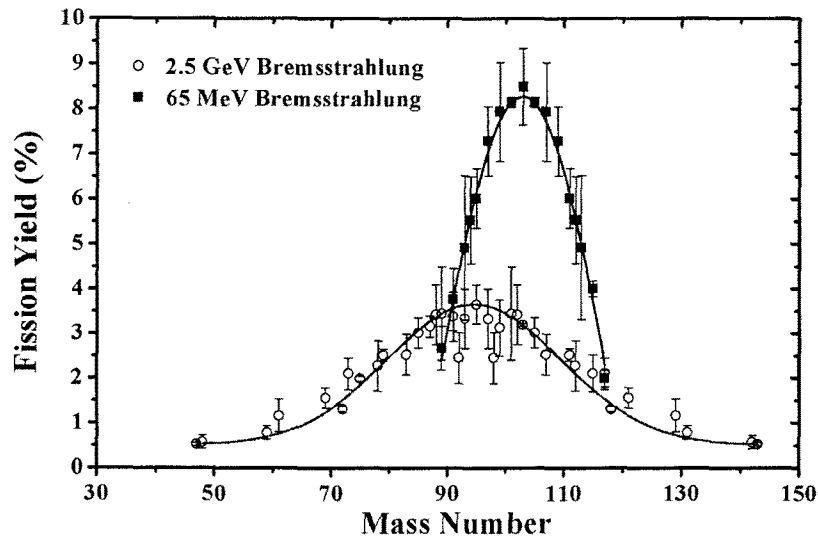
50 MeV 65 MeV 制動輻射에 의해서 ^{209}Bi 에서 생성된 光-核分裂 핵의 收得率(yield) 분포와 타 연구그룹에서 얻은 85-MeV 制動輻射감마선에 의한 결과들을 [그림 12]에 비교하였다. 50 MeV, 65 MeV 및 85 MeV의 질량-收得率 분포는 평균 질량 103.1, 102.7 그리고 102.5 질량단위에서 대칭성을 보이고 있으며, 이 대칭분포의 FWHM은 20.5, 22 그리고 23 질량단위를 보여준다.



[그림 12] 핵분열 반응 수득율(yields) 분포

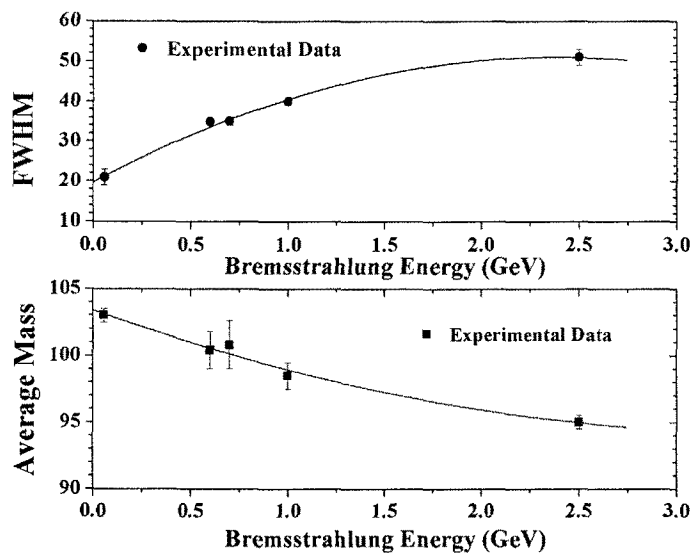
(2) 2.5 GeV 制動輻射감마선을 ^{209}Bi 에 조사하여 光-核分裂 반응에서 생성되는 핵의 질량-收得率 분포 측정 (Eur. Phys. J. A 에 제출하여 심사 중)

[그림 13]에 2.5 GeV 制動輻射에 의해서 ^{209}Bi 에서 생성된 光-核分裂 핵의 질량-收得率 (mass-yield) 분포를 65 MeV인 경우와 비교하여 보았다. 65 MeV 인 경우 평균 질량 102.7 에서 대칭이고 FWHM값이 22 질량단위인 반면, 2.5 GeV인 경우에는 평균 95.0 ± 0.5 이고 FWHM이 51.0 ± 2.0 인 매우 넓은 분포를 보여 주고 있다.



[그림 12] 질량-수득을 분포

질량-收得率 분포에서 평균질량과 FWHM을 制動輻射 에너지의 함수로 표시하면 [그림 13] 과 같이 평균질량은 에너지에 따라서 감소하는 반면 FWHM은 증가하는 것을 알 수 있다.



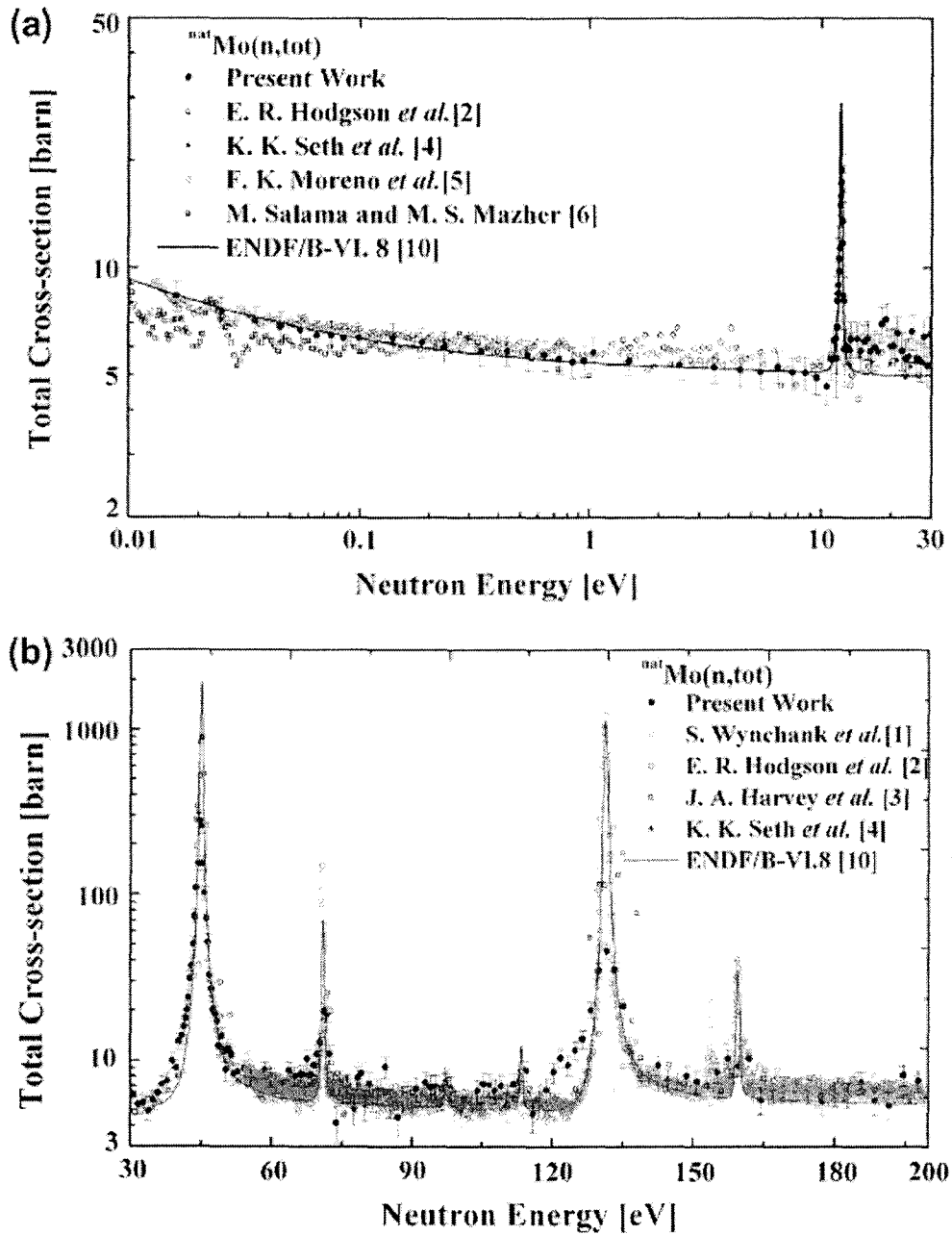
[그림 13] 질량-수득을 분포에서 평균질량과 FWHM값의 에너지에 따른 변화

2. 중성자를 이용한 실험

가. 飛行時間法으로 중성자 쏘단면적 측정 결과

(1) Mo의 중성자 쏘단면적 측정 및 共鳴 상수 측정 [35].

포항 중성자 설비에서 Mo에 대한 중성자 쏘단면적을 중성자 에너지 0.01 eV에서 200 eV 까지 측정하였다. 그 결과를 [그림 14]에 타 연구그룹의 결과와 비교 하였다.



[그림 14] Mo 시료의 중성자 쏘단면적 측정 결과

[그림 14]에 나타난 共鳴상태의 共鳴상수를 얻기 위해서 SAMMY fitting 프로그램을 이용하여 각 共鳴영역에서의 共鳴상수를 획득하였으며, 기존의 측정 결과 및 평가핵자료들의 결과와 비교하여 [표 5]에 정리하였다.

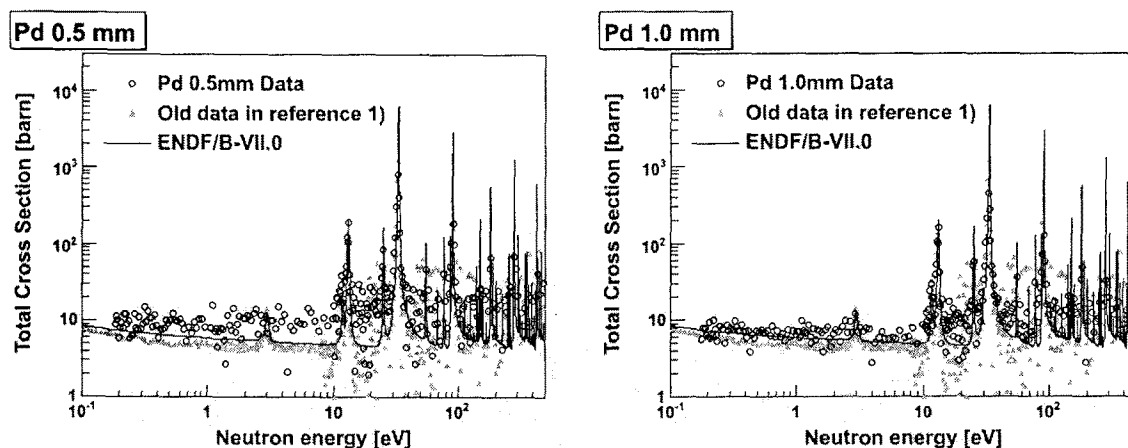
[표 5] Resonance parameters of Mo isotopes.

Nuclide	J/I	E_γ [eV]	Γ_γ [meV]	$g\Gamma_n$ [meV]	
^{94}Mo	0.5/1	Present	107.2±0.8	173.9±17.4	0.20±0.02
		Mughabghab [36]	108.8±0.2	-	0.16±0.02
		Landolt-Börnstein [37]	108.8±0.2	-	0.16±0.02
		JEFF-3.1 [38]	108.8	175.0	0.16
		ENDF/B-VII.0 [39]	108.8	188.0	0.16
^{95}Mo	3/0	Present	44.75±0.01	106.8±6.6	126.4±1.6
		Mughabghab [36]	44.9±0.2	150.0±10.0	111.0±5.0
		Landolt-Börnstein [37]	44.9±0.2	150.0±10.0	100.0±5.0
		Harvey et. al. [40]	45.0±0.6	260±80	103.25±8.26
		JEFF-3.1 [38]	44.9	150.0	100.0
		ENDF/B-VII.0 [39]	44.9	150.00	100.0
	1/1	Present	110.6±1.0	310.4±31.0	0.08±0.01
		Mughabghab [36]	110.4±0.2	310.0±80.0	0.09±0.02
		Landolt-Börnstein [37]	110.5±0.2	310.0±80.0	0.08±0.02
		JEFF-3.1 [38]	110.4	310.0	0.08
		ENDF/B-VII.0 [39]	110.4	310.00	0.08
	2/1	Present	118.5±1.0	200.5±20.1	0.079±0.008
		Mughabghab [36]	117.8±0.2	200.0±120.0	0.13±0.02
		Landolt-Börnstein [37]	117.8±0.2	200.0±120.0	0.075±0.010
		JEFF-3.1 [38]	117.8	200.0	0.075
		ENDF/B-VII.0 [39]	117.8	200.0	0.075
	3/0	Present	159.4±0.3	147.2±14.6	7.65±0.55
		Mughabghab [36]	159.5±0.2	166.0±20.0	8.0±0.5
		Landolt-Börnstein [37]	159.49±0.20	166.0±20.0	7.5±0.5
		Harvey et. al. [40]	162±4	260±80	6.77±1.29
		JEFF-3.1 [38]	159.50	166.0	7.5
ENDF/B-VII.0 [39]		159.50	166.0	7.5	
^{96}Mo	0.5/1	Present	114.7±0.4	134.0±13.4	0.67±0.06
		JEFF-3.1 [38]	113.4	136.0	0.451
		ENDF/B-VII.0 [39]	113.4	136.0	0.451
		Mughabghab [36]	113.4±0.1	200.0±20.0	0.45±0.05
	1.5/1	Landolt-Börnstein [37]	113.41±0.10	-	0.45±0.05
	0.5/0	Present	131.4±0.1	97.7±8.7	205±4
		Mughabghab [36]	131.4±0.1	95.0±5.0	240 ±20
		Landolt-Börnstein [37]	131.4±0.1	95.0±5.0	240±20
		Harvey et. al. [40]	133±2	260±80	215±28
		JEFF-3.1 [38]	131.4	82.999	326
		ENDF/B-VII.0 [39]	131.4	82.999	326

Nuclide	J/I	E_γ [eV]	Γ_γ [meV]	$g\Gamma_n$ [meV]	
^{97}Mo	2/0	Present	71.2±0.1	157.6±14.7	6.54±0.22
		Mughabghab [36]	70.93±0.03	130.0±30.0	8.40±0.75
		Landolt-Börnstein [37]	70.92±0.03	130.0±30.0	8.40±0.75
		Harvey et. al. [40]	71.5±1.2	260±80	7.42±2.00
		JEFF-3.1 [38]	70.900	130.0	8.04
		ENDF/B-VII.0 [39]	70.920	130.000	8.4
	4/1	Present	78.98±0.59	124.8±12.5	0.089±0.009
		Mughabghab [36]	79.55±0.03	120.0±60.0	0.055±0.010
		Landolt-Börnstein [37]	79.55±0.03	120.00±60.0	0.055±0.010
		JEFF-3.1 [38]	79.60	150.0	0.056
	1/1	ENDF/B-VII.0 [39]	79.55	120.0	0.055
	3/1	Present	109.09±0.84	130±13	0.17±0.02
		Mughabghab [36]	109.58±0.05	-	0.11±0.04
		Landolt-Börnstein [37]	109.58±0.05	300±150	0.11±0.04
		JEFF-3.1 [38]	109.60	150.0	0.11
	1/1	ENDF/B-VII.0 [39]	109.580	210.0	0.11
	4/1	Present	126.9±1.1	180±18	0.11±0.01
		Mughabghab [36]	126.89±0.06	-	0.10±0.04
		Landolt-Börnstein [37]	126.89±0.06	-	0.10±0.04
		JEFF-3.1 [38]	126.9	150.0	0.098
1/1	ENDF/B-VII.0 [39]	126.89	210.00	0.10	
3/1	Present	137.87±0.29	150.8±15.0	0.598±0.059	
	Mughabghab [36]	136.37±0.08	-	0.600±0.005	
	Landolt-Börnstein [37]	136.32±0.28	-	0.600±0.005	
	JEFF-3.1 [38]	136.3	150.0	0.575	
4/1	ENDF/B-VII.0 [39]	136.320	210.0	0.60	
^{98}Mo	1.5/1	Present	12.2±0.1	153±11	0.070±0.002
		Mughabghab [36]	12.1±0.1	125.0±20.0	0.059±0.004
		Landolt-Börnstein [37]	12.08±0.1	125.0±20.0	0.067±0.003
		JEFF-3.1 [38]	12.1	120.0	0.058
		ENDF/B-VII.0 [39]	12.1	120.0	0.058
^{100}Mo	1.5/1	Present	97.2±0.7	80.1±8.0	0.52±0.05
		Mughabghab [36]	97.2±0.1	-	0.45±0.02
		Landolt-Börnstein [37]	97.2±0.1	-	0.47±0.02
		JEFF-3.1 [38]	97.2	80.0	0.36
		ENDF/B-VII.0 [39]	97.20	80.0	0.36

(2) 飛行時間法으로 Pd의 중성자 쏘단면적 측정 [41].

0.5 mm 와 0.1 mm 두께의 Pd 시료에 대한 중성자 쏘단면적을 중성자 에너지 0.1 eV에서 500 eV 까지 측정하였다. 측정된 결과가 [그림 15]에 보여 주고 있다. 공鳴상태가 관찰되지만 아직 공鳴상수를 얻지 못하였다.



[그림 15] Pd 시료의 중성자 쏘단면적 측정결과

나. 放射化 방법으로 熱중성자 捕獲단면적 측정 및 공鳴積分 상수 측정

(1) 放射化방법으로 Hf의 중성자 捕獲단면적 및 공鳴積分상수 측정 [42]

포항가속기연구소의 중성자 생성 설비에서 ^{nat}Hf 에 熱중성자를 조사하여 $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180m}\text{Hf}$ 와 $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$ 반응의 熱중성자 捕獲단면적 및 각 반응의 공鳴積分 상수를 측정하였다. 각각의 핵반응에 대한 결과들이 [표 6]과 [표 7]에 있다.

[표 6] Thermal neutron cross-sections(σ_0) and resonance integrals (I_0) for the $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180m}\text{Hf}$

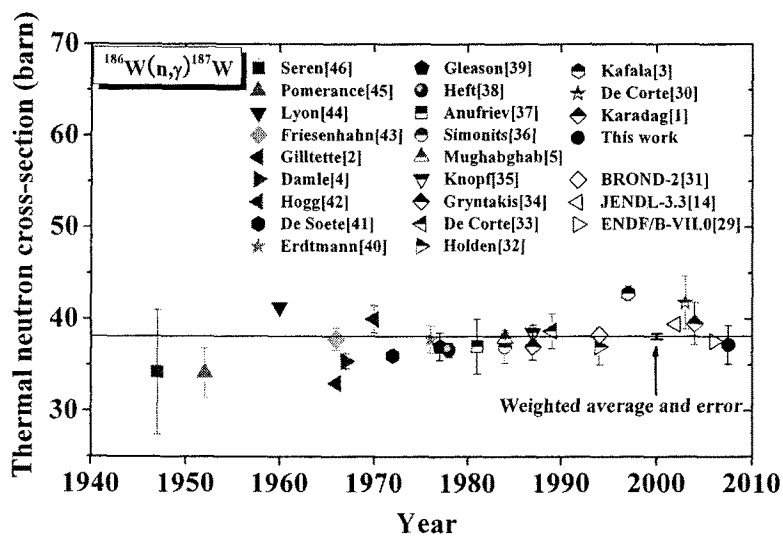
Year	References	σ_0 (barn)	I_0 (barn)
2008	This work	0.424 ± 0.018	6.35 ± 0.41
1987	Gryntakis <i>et al.</i> [43]	0.34 ± 0.03	-
1984	Mughabghab [44]	0.445 ± 0.003	6.9 ± 0.6
1978	Heft [45]	0.407 ± 0.02	-
1975	Mannhart [46]	0.4326 ± 0.0024	-
1974	Van Der Linden [47]	-	4.75 ± 0.16
1972	De Soete <i>et al.</i> [48]	0.33	-
1967	Scharff-Goldhaber <i>et al.</i> [49]	0.34 ± 0.03	-

[표 7] Thermal neutron cross-sections(σ_0) and resonance integrals (I_0) for the $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$

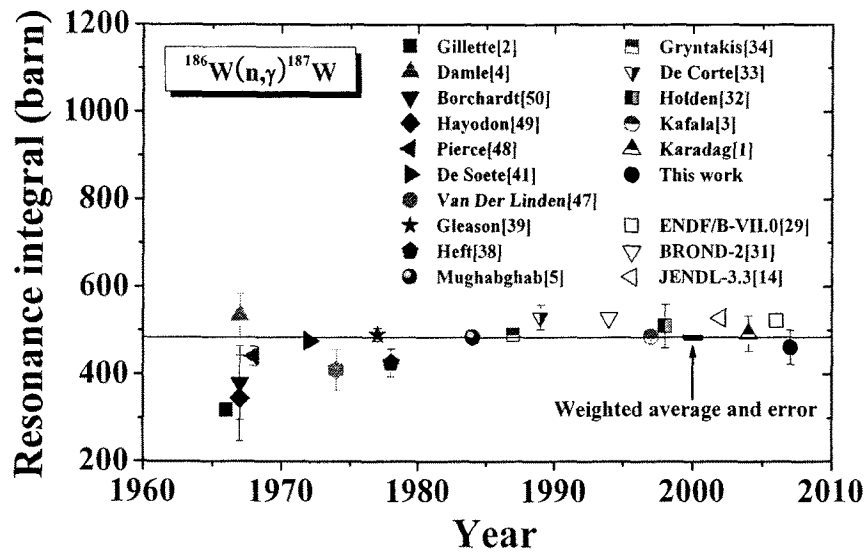
Year	References	σ_0 [barn]	I_0 (barn)
2008	This work	12.87 ± 0.52	32.91 ± 2.38
2005	Trbovich <i>et al.</i> [50]	-	28.8 ± 0.1
2002	JENDL-3.3 [51]	12.99	34.02
2001	Cho <i>et al.</i> [52]	13.04 ± 0.07	32.4 ± 1.6
1994	JENDL-3.2 [53]	13	33.85
1994	JEF-2.2 [53]	13.08	35.44
1994	ENDF/B-VI [53]	13.08	34.28
1988	De Corte <i>et al.</i> [54]	13.5	35.0
1987	Gryntakis <i>et al.</i> [43]	12.6 ± 0.7	33.6 ± 3.2
1984	Mughabghab [44]	13.04 ± 0.047	35 ± 1
1978	Heft [45]	13.1 ± 0.1	33.7 ± 2.1
1975	Mannhart [46]	13.04 ± 0.07	-
1974	Van der Linden <i>et al.</i> [47]	-	31.5 ± 1.6
1973	Alian <i>et al.</i> [55]	-	30.8
1972	Steinnes <i>et al.</i> [56]	-	32 ± 3

(2) 放射化방법으로 W의 熱中性자 捕獲단면적 및 共鳴積分상수 측정 [57]

본 연구에서 측정된 $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ 반응의 熱中性자 捕獲단면적은 37.2 ± 2.1 barn 이고, 共鳴積分상수는 461 ± 39 barn 이며, 측정된 결과를 기존의 결과들과 비교하여 [그림 16]과 [그림 17]에 보여 주고 있다.



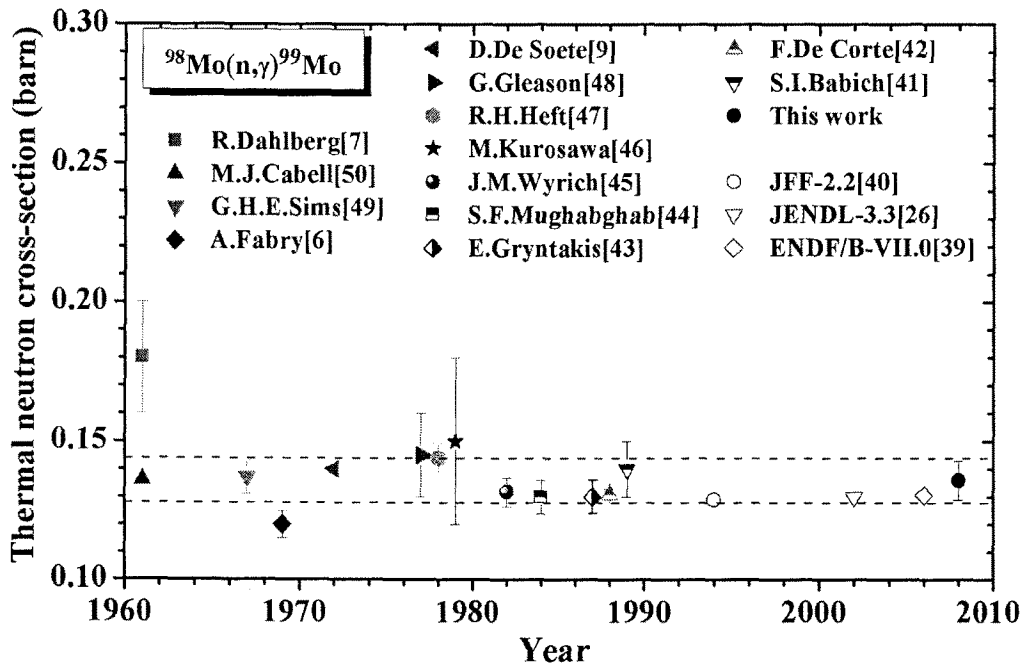
[그림 16] $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ 반응의 열중성자 포획단면적 결과 비교



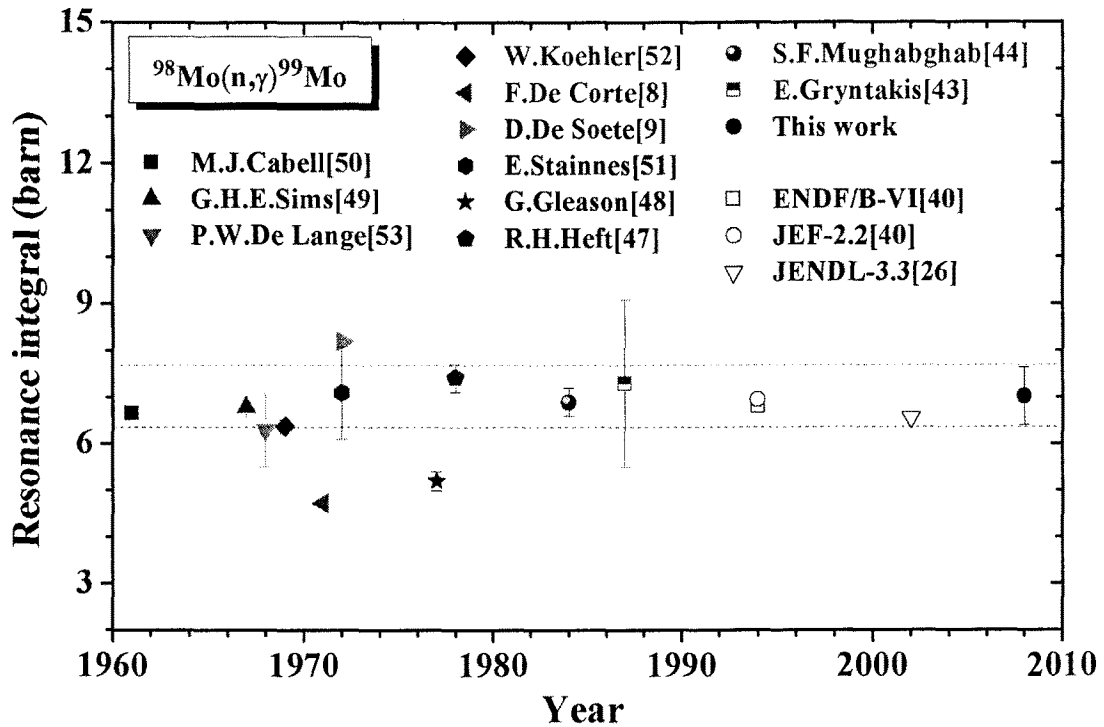
[그림 17] $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ 반응의 공명 적분상수 측정 결과 비교

(3) 放射化방법으로 Mo의 중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分상수 측정 [58]

측정된 $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ 반응의 열중성자 捕獲단면적은 0.136 ± 0.007 barn이고, 共鳴積分상수는 7.02 ± 0.62 barn이며, 측정된 결과를 기존의 결과들과 비교하여 [그림 18]과 [그림 19]에 보여 주고 있다.



[그림 18] $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ 반응의 열중성자 포획단면적 측정 결과 비교



[그림 19] $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ 반응의 공명 적분상수 측정 결과 비교

다. 일본 동경공대 펠레트론 가속기 이용 keV 중성자 捕獲단면적 측정 방법

(1) 2007년도 측정된 ^{105}Pd 시료의 keV 중성자 捕獲단면적 측정 [59]

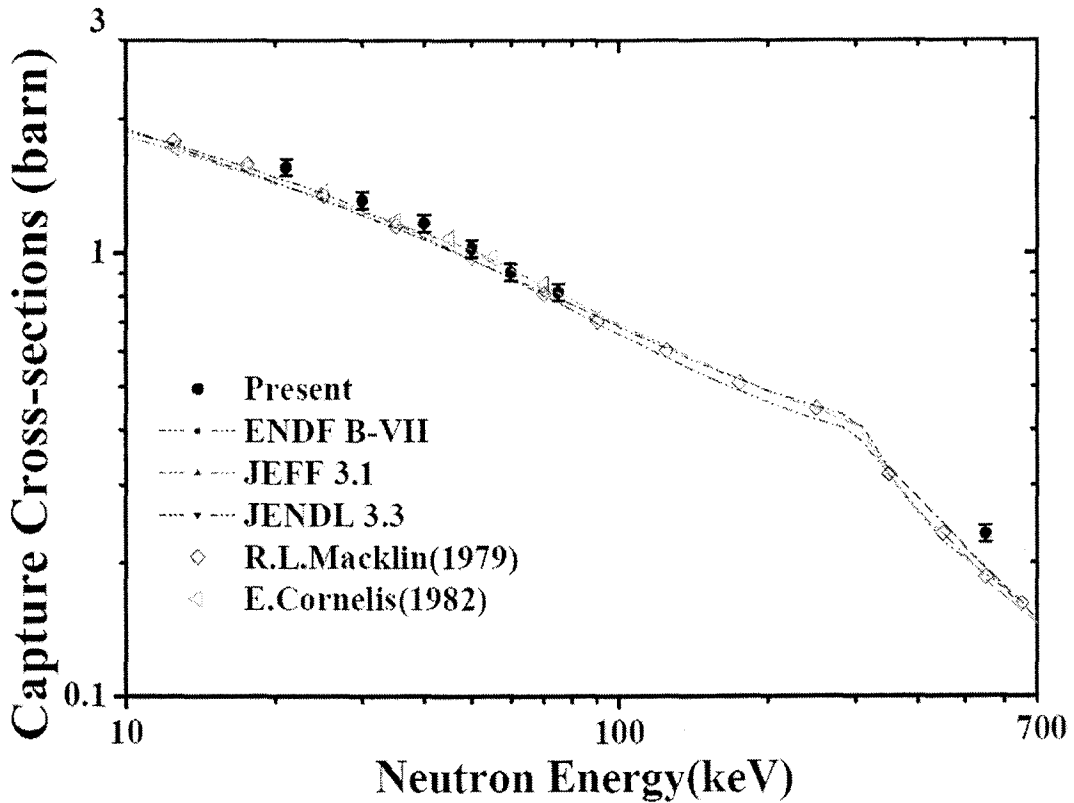
측정된 ^{105}Pd 의 keV 중성자 捕獲단면적은 [표 8]과 같다.

[표 8]

Average neutron Energy [Energy region] (keV)	Capture cross-section (barn)	
	^{105}Pd	$^{197}\text{Au}^+$
21 [15 ~ 25]	1.558 ± 0.063 [4.02%]	0.717
30 [25 ~ 35]	1.313 ± 0.053 [4.02%]	0.567
40 [35 ~ 45]	1.167 ± 0.047 [4.02%]	0.494
50 [45 ~ 55]	1.025 ± 0.041 [4.03%]	0.439
60 [55 ~ 65]	0.906 ± 0.037 [4.04%]	0.399
75 [65 ~ 90]	0.818 ± 0.033 [4.04%]	0.356
550 [FWHM : 99keV]	0.232 ± 0.009 [4.00%]	0.123

+ Data from ENDF/B-VII

측정된 ^{105}Pd 의 keV 중성자 捕獲단면적결과를 타 연구그룹의 결과와 비교하였다 ([그림 20] 참조).



[그림 20] ^{105}Pd 의 keV 중성자 포획단면적 측정결과

(2) 2007년도 측정된 $^{117,119}\text{Sn}$ 시료의 keV 중성자 포획단면적 데이터 분석 및 결과 발표 [60]

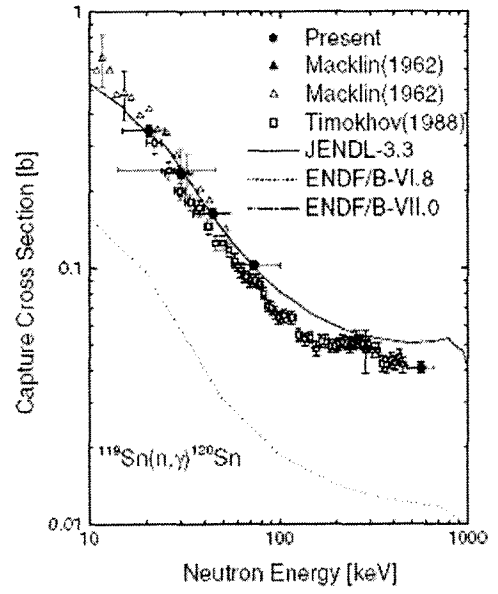
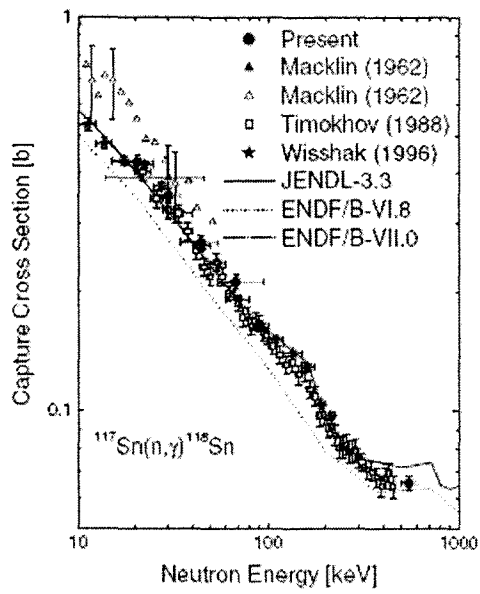
본 연구는 일본 동경공대 연구팀과 공동으로 수행한 연구결과이다. 측정된 $^{117,119}\text{Sn}$ 의 keV 중성자 포획단면적 측정결과를 [표 9] 와 [그림 21]에 정리하였다.

Average neutron energy ^{a)} (energy region) [keV]	Capture cross section [mb](Relative error)	
	^{117}Sn	^{119}Sn
21 (15–25)	453 ± 19 (4.2%)	345 ± 15 (4.2%)
30 (25–35)	359 ± 15 (4.1%)	235 ± 9 (4.0%)
45 (35–55)	268 ± 11 (4.0%)	164 ± 6 (3.8%)
68/72 ^{b)} (55–100)	213 ± 9 (4.0%)	103 ± 4 (3.7%)
550/570 ^{b)} (FWHM ^{c)})	65.5 ± 2.9 (4.5%)	40.7 ± 1.8 (4.5%)

^{a)}In the laboratory system

^{b)} $^{117}\text{Sn}/^{119}\text{Sn}$

^{c)} ^{117}Sn :100 keV, ^{119}Sn :170 keV



[그림 23] 측정된 포획단면적 측정결과를 타 연구그룹의 결과와 비교

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

* 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전에의 기여도 등을 기술

본 연구의 목표는 포항 가속기연구소의 65-MeV 및 2.5 GeV 전자가속기의 전자빔을 얇은 텅스텐 표적에 입사하여 생성된 制動輻射감마선을 다양한 시료에 조사하여 光-핵반응단면적, isomeric cross-section 比 및 光破碎 (photospallation) yield를 측정하는 것이다. 한편, 65-MeV 전자가속기의 전자빔을 여러 장의 Ta 으로 제작한 중성자 표적 장치에 입사하여 생성된 중성자를 시료에 조사하여 열 중성자 捕獲단면적 및 共鳴積分(resonance integral) 그리고 중성자 飛行時間法으로 중성자 全단면적 및 共鳴 상수를 측정하는 것도 본 연구과제의 목표 중의 하나이다. 연차별 연구목표 및 평가의 착안점을 과제 시작시점에 제시한 것을 아래에 정리 하였다.

구분	년도	세부연구목표 대비 연구개발성과	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차 년도	2007	65-MeV, 2.5-GeV制動輻射 감마선 조사로 Al, Cu, Hf, Sn, Fe, Bi, Pb 시료들에 대한 감마-핵반응 단면적, Isomeric 단면적 比 및 光破碎 반응 yield 등을 측정한 결과를 1편 이상의 논문 작성과 2회 이상 국내외 학술회의 발표	60 %	<ul style="list-style-type: none"> 사용 시료 7개중 5개 이상의 시료에 대한 측정 결과 확인 SCI 논문 1편 이상 작성 및 국내외 학술회의 2회 이상 발표 유무
		65-MeV 전자가속기를 이용하여 Hf과 W의 열 중성자 捕獲단면적과 共鳴積分 측정 결과를 1편 이상의 논문작성 및 국내외 학술회의에 1회 이상 발표	40 %	<ul style="list-style-type: none"> 2개 이상의 시료에 대한결과 확인 SCI 논문 1편 이상 작성 및 국내외 학술회의 1회 이상 발표 유무
2차 년도	2008	65-MeV, 2.5-GeV制動輻射 감마선 조사로 Zr, Mo, Rh, Au, Sc, Bi, Pb 시료들에 대한 감마-핵반응 단면적, Isomeric 단면적 比 및 光破碎 반응 yield 등을 측정한 결과를 1편 이상의 논문 작성과 2회 이상 국내외 학술회의 발표	60 %	<ul style="list-style-type: none"> 사용 시료 7개중 5개 이상의 시료에 대한 측정 결과 확인 SCI 논문 1편 이상 작성 및 국내외 학술회의 2회 이상 발표 유무
		65-MeV 전자가속기를 이용하여 Au과 Dy 의 열 중성자 捕獲단면적과 共鳴積分 측정 결과를 1편 이상의 논문작성 및 국내외 학술회의에 1회 이상 발표	40 %	<ul style="list-style-type: none"> 2개 이상의 시료에 대한 측정 결과 확인 SCI 논문 1편 이상 작성 및 국내외 학술회의 1회 이상 발표 유무
최종 평가	2008	65-MeV, 2.5-GeV制動輻射 감마선 조사로 12 개의 시료들에 대한 감마-핵반응 단면적, Isomeric 단면적 比 및 光破碎 반응 yield 등을 측정한 결과를 2 편 이상의 논문 작성과 4회 이상 국내외 학술회의 발표	60 %	<ul style="list-style-type: none"> 사용 시료 12개중 10개 이상의 시료에 대한 측정 결과 확인 SCI 논문 2편 이상 작성 및 국내외 학술회의 4회 이상 발표 유무
		65-MeV 전자가속기를 이용하여 4개의 시료에 대한 열 중성자 捕獲단면적과 共鳴積分 측정 결과를 2 편 이상의 논문작성 및 국내외 학술회의에 2 회 이상 발표	40 %	<ul style="list-style-type: none"> 4개 이상의 시료에 대한 측정 결과 확인 SCI 논문 2편 이상 작성 및 국내외 학술회의 2회 이상 발표 유무

본 연구과제 수행기간동안 측정한 결과들을 SCI 국제학술지에 9편의 논문을 발표하였고, 국내외 학술지에 17회 연구결과들을 발표 하였다. 연구목표에 설정된 목표이상을 달성하였다.

1. V. D. Nguyen, D. K. Pham, T. T. Kim, B. V. Loat, Md. S. Rahman, K.S. Kim, G. N. Kim, Y. D. Oh, H. S. Lee, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Thermal neutron cross-section and resonance integral of the $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ reaction," Nucl. Instr. Meth. B **267** (2009) 462.
2. V. D. Nguyen, D. K. Pham, T. T. Kim, T. S. Le, Md. S. Rahman, K.S. Kim, M.W. Lee, G. N. Kim, Y. D. Oh, H. S. Lee, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Isomeric yield ratios for the formation of $^{44\text{m,g}}\text{Sc}$ in the $^{45}\text{Sc}(\gamma,n)$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma,xnp)$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma,xn5p)$ and $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma,xn8p)$ reactions with 2.5 GeV bremsstrahlung," Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 5080.
3. V. D. Nguyen, D. K. Pham, T. T. Kim, T. S. Le, G. N. Kim, Y. S. Lee, Y. D. Oh, H. S. Lee, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Thermal neutron cross-section and resonance integral of the $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ reaction," Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 863.
4. T. F. Wang, A. K. M. M. H. Meaze, M. U. Khandaker, M. S. Rahman, G. N. Kim, L. P. Zhu, H. H. Xia, Z. Y. Zhou, Y. D. Oh, H. Kang, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Measurement of the total neutron cross-section and resonance parameters of molybdenum using pulsed neutrons generated by an electron linac," Nucl. Instr. Meth. B **266** (2008) 561.
5. V. D. Nguyen, D. K. Pham, T. T. Kim, T. S. Le, Y. S. Lee, G. N. Kim, Y. D. Oh, H. S. Lee, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Measurement of thermal neutron cross-sections and resonance integrals for $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ and $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$ reactions at the Pohang Neutron Facility," Nucl. Instr. Meth. B. **266** (2008) 21.
6. Y. Oh, H. Kang, M.H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, T. Wang, Md. S. Rahman, M.W. Lee, G.N. Kim, "Measurement of the Neutron Total Cross Sections of Natural Palladium by using Pulased Neutrons at Pohang Neutron Facility," J. Nucl. Sci. and Tech. S5 (2008) 590.
7. T. I. Ro, B. R. Park, W.C. Chung, G.N. Kim, Y.D. Oh, S. Lee, M. Igashira, T. Ohsaki, "Measurements of keV-Neutron Capture Cross-Sections and Capture γ -ray of ^{105}Pd ," J. Nucl. Sci. Tech. S5 (2008) 443.
8. J. Nishiyama, M. Igashira, T. Ohsaki, G. N. Kim, W.C. Chung, T. I. Ro, "Measurements of keV-Neutron Capture Cross Sections and Capture Gamma-Ray Spectra of $^{117,119}\text{Sn}$," J. Nucl. Sci. Tech. 45 (2008) 352.
9. H. Naik, A. V. R. Reddy, S. Ganesan, D. Raj, K. Kim, G. N. Kim, Y.D. Oh, D. K. Pham, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, "Post-Neutron Mass Yield Distribution and Photo-Neutron Cross-section Measurements in ^{209}Bi with 65 MeV Bremsstrahlung," J. Korean Phys. Soc. **52** (2008) 934.

국내 학술회의 발표 논문 (9편)

- Wang Tao feng, 김귀년 등, "Neutron Resonance Parameters Analysis of Rare Earth Isotopes Erbium based on Transmission Measurement using an electron linac," 한국물리학회 가을 학술대회, (2008년 10.23-24, 광주)
- Md.S. Rahman, 김귀년 등 "Studies of Energy Dependence Isomeric Yield Ratios in the

Production of $^{89}\text{Y}(\gamma, \text{xn})^{87\text{m.g.}, 86\text{m.g.}}\text{Y}$ by Photonuclear Reactions," 한국물리학회 가을 학술대회, (2008년 10.23-24, 광주)

- Md.S. Rahman, 김귀년 등 "Isomeric Yield Ratis for the $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, \text{xnp})^{52\text{m.g.}}\text{Mn}$ Reaction Induced with 50, 60, and 70 MeV," 한국물리학회 가을 학술대회, (2008년 10.23-24, 광주)
- Wang Tao feng, 김귀년 등 "Measurement of the Total Neutron Cross-sections and Resonance Parameters of Natural Niobium using pulsed Neutrons generated by an electron linac," 한국물리학회 봄학술대회, (2008년 4.17-18, 대전).
- 오영도, 김귀년 등, "Measurement of the Neutron Total Cross-sections of Natural Erbium by using pulsed Neutrons at Pohang Neutron Facility," 한국물리학회 봄학술대회, (2008년 4.17-18, 대전).
- Md.S. Rahman, 김귀년 등, "Invesitigation of Energy dependence Isomeric cross-section ratios of $^{197}\text{Au}(\gamma, \text{n})^{196\text{m.g.}}\text{Au}$ by Photoactivation method using electron beam linac," 한국물리학회 봄학술대회, (2008년 4.17-18, 대전)
- 강영록, 정원정, 노태익, 이삼열, 김귀년 등, "The capture gamma-ray pulse-height spectra unfolding of ^{117}Sn in the neutron energy region from 10 to 90 keV," 한국물리학회 가을 학술 논문발표회 (2007년 10월 18-19, 제주).
- 박병룡, 정원정, 노태익, 이삼열, 김귀년 등, "Pulse-height spectrum unfolding of keV-neutron Capture gamma-ray of ^{105}Pd ," 한국물리학회 가을 학술 논문발표회 (2007년 10월 18-19, 제주).
- 오영도, 강홍식, 조무현, 고인수, 남궁원, 김귀년 등, "Measurement of the neutron Total cross sections of natural paladium by using pulsed neutrons at Pohang Neutron Facility," 한국물리학회 가을 학술 회의 (2007. 10월 18-19, 제주).

국제 학술회의 발표 논문 (8편)

- Wang Taofeng, G. N. Kim et al. "Measurement of the total neutron cross-sections and resonance parameters of natural molybdenum and niobium," XVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-16), (June 11-12, 2008, Dubna, Rusia)
- G. N. Kim et al. "Isomeric ratios for the $^{45}\text{Sc}(\gamma, \text{n})^{44\text{m.g.}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(\gamma, \text{xn1p})^{44\text{m.g.}}\text{Sc}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}(\gamma, \text{xn5p})^{44\text{m.g.}}\text{Sc}$ and $^{\text{nat}}\text{Cu}(\gamma, \text{xn8p})^{44\text{m.g.}}\text{Sc}$ reactions induced by 2.5 GeV Bremsstrahlung," XVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-16), (June 11-12, 2008, Dubna, Rusia).
- T. F. Wang, M. Rahman, 이만우, 김경숙, 김귀년 등, "Measurement of the neutron Total cross sections and resonance parameters of natural Niobium," The 11th International Workshop on Accelerator and Beam Utilization, (Sept. 13-14, 2007, Gyeongju, Korea).
- 오영도, 강홍식, 조무현, 고인수, 남궁원, 김귀년 등, "Measurement of Resonance Parameters and Total cross sections of natural Paladium at Pohang Neutron Facility," The 11th International Workshop on Accelerator and Beam Utilization, (Sept. 13-14, 2007, Gyeongju, Korea).
- G. N. Kim, K. Kim, H. Naik, S. Ganesian, H. S. Kang, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung,

"Post-Neutron Mass Yield Distribution and Photo-Neutron Cross-section Measurements in ^{209}Bi with 65 MeV Bremsstrahlung," The 11th International Workshop on Accelerator and Beam Utilization, (Sept. 13-14, 2007, Gyeongju, Korea).

- 오영도, 강홍식, 조무현, 고인수, 남궁원, 김귀년 등, "Measurement of the neutron Total cross sections of natural Paladium and Niobium by using pulsed neutrons at Pohang Neutron Facility," The Fourth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-4), (July 18-20, 2007, Seoul, Korea).
- 박병룡, 정원정, 노태익, 윤정란, 정원정, 김귀년 등, "Measurement of keV-neutron capture cross-sections and Capture gamma-rays of ^{105}Pd ," The Fourth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-4), (July 18-20, 2007, Seoul, Korea).
- 김은주, 강영록, 김현, 박병룡, 노태익, 김귀년 등, "Measurement of the $^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}$ reaction Cross-sections and the prompt gamma-rays for keV neutrons," The Fourth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-4), (July 18-20, 2007, Seoul, Korea).

본 연구결과는 포항가속기연구소의 100-MeV 전자가속기 및 2.5-GeV 전자가속기를 이용하여 핵물리 및 핵자료 측정관련 실험결과를 획득한 것으로 국내 설비를 활용하는 연구결과도 국제적인 수준의 연구결과가 될 수 있다는 것을 보여 주었다. 한편, 국내실험설비에서 공동 연구를 수행하기위하여 베트남, 인도 과학자들이 참여하여 국제적인 실험 설비로 활용할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

지금까지 연구를 수행하면서 획득한 실험 방법 및 경험 등은 향후 보다 좋은 연구결과 산출을 위한 기초 연구였기 때문에 계속해서 연구를 수행하여 보다 좋은 결과들을 획득할 예정이다. 이를 위해서는 가속기의 성능을 향상하는 연구가 수행되어야 할 뿐만 아니라, 검출기의 성능 보완과, 捕獲감마선을 측정 할 수 있는 BGO 혹은 NaI를 이용한 감마검출기의 제작이 필요하다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

2년간 포항가속기연구소의 100-MeV 전자가속기와 2.5-GeV 전자가속기를 이용하여 制動輻射 감마선을 이용하는 실험과 중성자를 이용하는 실험을 수행하여 9편의 SCI 논문을 발표하였다. 연구를 수행하는 과정에서 얻은 경험과 연구에 대한 새로운 아이디어들이 향후 보다 좋은 연구결과를 얻기 위한 기반이 될 것으로 판단된다. 보다 좋은 결과를 얻기 위하여 가속기의 성능향상에 대한 연구가 필요하며, 지금까지 중성자 쏠단면적 측정 실험만 가능하였는데, 감마검출기를 제작 보완한다면, 중성자 捕獲단면적 측정 실험도 가능하게 될 것이다. 이와 같이 중성자 쏠단면적과 捕獲단면적 측정이 동시에 이루어지면 共鳴상수의 결정이 보다 정확하게 될 것으로 예상된다.

본 연구결과 중 核異性體比 (Isomeric yield ratio)는 핵반응에서 각운동량 전달과정과 핵준위 밀도의 스핀 의존성 등 이론적 모델의 검증에 활용된다. 光-핵반응 단면적은 방사선 遮蔽 및 방사선 轉移에 대한 계산에 활용되고, 방사선 치료 시 인체에 흡수된 도스를 계산하는데도 활용되고, 核融合爐 및 原子爐에 관한 물리적인 성질 및 기술개발에 활용된다. 특히 핵연료 물질의 변형(Transmutation)에 대한 연구와 천체핵물리학에서 핵합성 과정 이해에도 활용된다.

본 연구결과의 일부인 중성자 쏠단면적과 共鳴 상수들은 핵자료 평가를 위한 기초자료로 활용되며, 본 측정 결과는 핵데이터 라이브러리에 등재되어 전세계적으로 활용될 수 있도록 웹 (<http://www-nds.iaea.org/ecfor/exfor.htm>) 에 등록되어 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- ① H. Snell, "Nuclear Instruments and Their Uses," John Wiley & Sons, Inc., New York (1962).
- ② P. Morrison and B. T. Feld, "Experimental Nuclear Physics," John Wiley & Sons, Inc., New York (1953).
- ③ D. P. Barry, "Neodymium Neutron Transmission and Capture Measurements and Development of a New Transmission Detector," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, NY (2003).
- ④ F. Ajzenberg-selove, "Nuclear Spectroscopy," Academic Press, NY (1960).
- ⑤ B. E. Moretti, "Molybdenum Neutron Transmission Measurements and the Development of an Enhanced Resolution Neutron Target," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, NY (1996).
- ⑥ G. Leinweber, "Calculations of Multiplicity and Efficiency from Neutron Capture in the RPI Multiplicity Detector," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, NY (1994).

제 7 장 참고문헌

- [1] T. Yamazaki et al., Nucl. Instr. Meth. B 144 (1998) 83.
- [2] T. Nakano et al., Nucl. Phys. A 684 (2001) 71.
- [3] K. Aoki et al., Nucl. Instr. Meth. A 516 (2004) 228.
- [4] IEEE Trans. Nucl. Sci. 30 (1983) 3083.
- [5] H. R. Weller and M. W. Ahmed, Med. Phys. Lett. A 18 (2003) 1569.
- [6] D. Babusci et al., Nucl. Instr. Meth. A 305 (1991) 19.
- [7] R. Caloi et al., Il Nuovo Cimento Lett. 27 (1980) 339.
- [8] V.D. Nguyen et al., J. Korean Phys. Soc. 50 (2007) 417.
- [9] V.D. Nguyen et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 5080.
- [10] M. G. Davidov et al., Atom. Energy 58, 47 (1985);
<<http://depni.sinp.msu.ru/cgi-bin/exfV3.cgi>>.
- [11] V. A. Zheltonozhski and V. M. Mazur, Yad. Fiz. 63 (2000) 389;
<<http://depni.sinp.msu.ru/cgi-bin/exfV3.cgi>>.
- [12] R. Volpel, Nucl. Phys. A 182, 411 (1972).
- [13] W. B. Walters and J. P. Hummel, Phys. Rev. 150, 867 (1966).
- [14] N.M. Bachschi et al., Nucl. Phys. A 264, 493 (1976).
- [15] H.S. Lee et al., J. Nucl. Sci. Tech. (Suppl. 1) (2000) 207.
- [16] W. Gunther et al., Nucl. Phys. A 297 (1978) 254.
- [17] V. di Napoli et al., J. Inorg. Nucl. Chem. 40 (1978) 175.
- [18] H. Matsumura et al., Radiochim. Acta 88 (2000) 313.
- [19] A.S. Danagulyan et al., Nucl. Phys. A 285 (1977) 482
- [20] S.R. Sarkar et al., Radiochim. Acta 55 (1991) 113.
- [21] I.V. Bodrov et al., Phys. Atom. Nucl. 57 (1994) 1277.
- [22] H.D. Luc et al., Jour. Phys., 14 (1987) 152.
- [23] M.G. Davydov et al., Atom. Energ. 63 (1987) 362.
- [24] S.R. Palvanov and O. Razhabov, Atom. Energ. 87 (1999) 553.
- [25] J.H. Carver et al., Nucl. Phys. 37 (1962) 449.
- [26] N.A. Demekhina et al, Phys. Atom. Nucl., 65 (2002) 390.
- [27] D. Kolev, Appl. Radiat. Isot. 49 (1998) 989.
- [28] S.R. Palvanov and O. Razhabov, Atom. Energ. 84 (1998) 278.
- [29] J.W. Watson et al., Phys. Rev. C 6 (1972) 497.
- [30] T. Kato and Y. Oka, Talanta, 19 (1972) 515.
- [31] M.G. Davydov et al., Atom. Energ. 77 (1994) 717.
- [32] R.M. Henry and D.S. Martin, Jr., Phys. Rev. 107 (1957) 772.
- [33] G. Kumbartzki and U. Kim, Nucl. Phys. A176 (1971) 23.

- [34] H. Naik et al., J. Korean Phys. Soc. 52 (2008) 934
- [35] T. F. Wang et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 561
- [36] S.F. Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross-Sections, $Z = 1 - 100$, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, 2006.
- [37] Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Low Energy Neutron Physics, Group I, Vol. 16B, Springer, Verlag, Berlin, 1998.
- [38] The Joint Evaluated Fission and Fusion File (JEFF-3.1),
<<http://www.nea.fr/html/dbdata/JEFF/>>.
- [39] D.E. Cullen, POINT 2004 A Temperature Dependent ENDF/B-VII, Release 8 Cross-Section Library (UCRL-TR-202284), Lawrence Livermore National Laboratory, 2004, available at <<http://www.nds.iaea.org/point2004/>>.
- [40] J.A. Harvey et al., Phys. Rev. 99 (1955) 10.
- [41] Y. Oh et al., J. Nucl. Sci. Tech. S5 (2008) 590
- [42] V.D. Nguyen et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 21
- [43] E. Gryntakis et al., Handbook on Nuclear Activation Data, IAEA Technical Report Series No. 273, Vienna 1987.
- [44] S.F. Mughabghab, Neutron Cross Section, Vol. 1, Academic Press, Inc, San Diego - New York - Boston - London - Sydney - Tokyo - Toronto, 1984.
- [45] R.E. Heft, A consistent set of nuclear parameter values for absolute instrumental neutron activation analysis, in: Conference on Computers in Activation Analysis and Gamma-ray Spectroscopy, Mayaguez, Puerto Rico, 1978, p. 495.
- [46] W. Mannhart, Z. Phys. A 272 (1975) 273.
- [47] R. Van der Linden et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 20 (1974) 695.
- [48] D. De Soete et al., Neutron Activation Analysis, John Wiley and Sons Ltd., 1972.
- [49] G. Scharff-Goldhaber and M. Mc Keown, Phys. Rev. 158 (1967) 1105
- [50] M. J. Trbovich et al., in: R.C. Haight, M.B. Chadwick, T. Kawano, P. Talou (Eds.), Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, 2004, p. 949.
- [51] JENDL-3.3, <<http://www.ndc.tokai-sc.jaea.go.jp/jendl/j33/j33.html>>.
- [52] H.J. Cho et al., Nucl. Instr. and Meth. A 462 (2001) 442
- [53] JFF Report 14, Table of simple integral neutron cross section data from JEFF-2.2, ENDF/B-VI, JENDL-3.2, BROND-2 and CENDL-2, OECD 1994.
- [54] F. De Corte and A. Simonits, Nuclear Data for Science and Technology (Mito

1988). JAERI, 1988, p. 583.

- [55] A. Alian et al., J. Radioanal. Chem. 15 (1973) 535.
- [56] E. Steignes, J. Inorg. Nucl. Chem. 34 (1972) 2699
- [57] V.D. Nguyen et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 863
- [58] V.D. Nguyen et al., Nucl. Instr. Meth. B 267 (2009) 462
- [59] T.I. Ro et al., J. Nucl. Sci. Tech. S5 (2008) 443
- [60] J. Nishiyama et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45 (2008) 352

주 의

1. 이 보고서는 교육과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 교육과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니 됩니다.