

539.72

7373A

최종보고서

GOVP 19917101

**사이클로트론 가속기를 이용한
고분해능 핵분광학**

**High-resolution Nuclear Spectroscopy
using a Cyclotron**

주관연구기관
중앙대학교

과 학 기 술 부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “사이클로트론 가속기를 이용한 고분해능 핵분광학” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 5. 20.

주관연구기관명 : 중앙대학교

주관연구책임자 : 이춘식

연 구 원 : 허장용 이주한 권영관

(이상 중앙대학교)

채종서 김유석

(이상 원자력병원)

김용균

(이상 원자력연구소)

요 약 문

I. 제목 : 사이클로트론 가속기를 이용한 고분해능 핵분광학

II. 연구개발의 목적 및 필요성

이 연구는 의료용으로 도입되어 가동 중인 원자력병원의 사이클로트론 가속기를 이용하여 고분해능 핵분광학 연구를 수행함으로써 국제적 수준의 핵자료 생산 및 분광학 측정기술 확립하고자 한다. 이를 위하여 원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치 중인 감마선 전용빔라인의 설치를 완료하여, 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기를 이용한 국제적 수준의 핵자료 생산과 양성자 및 알파입자 등의 입자 검출을 위한 망원기법을 개발한다. 또한 펄스빔과 지연분광학을 이용한 핵물리응용 연구분야를 발굴하는 한편 일본 JHF계획 일환인 E-arena의 방사능핵종빔 개발과 이용을 위한 국제협력 연구를 활성화한다. 사이클로트론 가속기의 핵물리관련 기초 및 응용연구를 극대화하기 위하여, 그 구체적인 연구분야로서 알파유도반응 ($\alpha, xn\gamma$)을 적용한 본격적인 핵구조 연구, 아이소머핵을 이용한 초미세상호작용 연구, 펄스빔에 의한 되튐에너지 이온주입법을 이용한 in-beam 자성체연구, 반도체신소재 및 태양열소자의 우주환경에서의 방사선 손상연구, 그리고 우리별 3호에 탑재될 고에너지 입자검출기의 에너지 및 효율 보정 연구를 수행한다.

당해연도에 수행될 이상과 같은 연구내용은 최종적으로는 가속기를 이용한 핵물리 기초연구의 국내 기반시설을 확립하여, 국제적 수준의 핵물리 연구결과의 발표와 창의적인 응용연구를 발굴하고, 차세대 방사능핵종빔의 자체적인 개발을 위한 개념확립 및 탐색연구, 그리고 가속 입자빔을 이용한 산·학·연 핵물리 응용연구의 활용방안을 구축하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

당해연도에 수행될 연구개발의 내용은 크게 4 가지로 나뉘어 있다. 첫째, 고분해능 감마선 핵분광학 연구를 위한 기반조성으로서 감마선 전용빔라인을 완성하여 감마-감마 동시계수 실험시설을 확보한다. 둘째, 사이클로트론 가속기에서 생성되는 양성자와 알파입자의 인출 및 가속 성능향상을 꾀하며, 안정원소와 방사능핵종빔의 생성에 널리 이용되는 중이온빔 ECR 이온원의 제작을 위한 개념연구를 추진한다. 셋째, 가속기 제

어장치의 인터페이스화를 통하여 사이클로트론 가속기 운전의 자동화를 시작한다. 넷째, 하전입자를 검출하기 위하여 $\Delta E-E$ 텔리스코우프 계측기를 개발하고 이를 이용한 핵반응 단면적 측정연구를 수행하며, 우리별 3호에 탑재될 양성자 입자검출기의 지상 보정 실험을 수행한다.

IV. 연구개발결과

당해연도 연구개발수행 내용과 결과를 상기 적시된 연구개발의 목적과 필요성에 의거 수행된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치 중인 감마선 전용빔라인의 설치가 완료되었으며, 인빔 감마선 동시계수 실험을 차례에 걸쳐 수행하였으며, 동 연구의 중간 결과는 "The first in-beam γ -ray coincidence spectroscopy in Korea using by $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}\text{Te}$ reactions" (한국물리학회 회보 Vol.16, No.1, p.46, 1998. 4.) 논문제목으로 한국물리학회에서 발표된 바 있다.

2. BGO 콤프톤억제용 섬광체와 고순도 게르마늄 계측기를 병용하는 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기의 설치작업이 진행 중에 있으며, 관련 전자회로의 구성과 분광기를 설치하기 위한 구조물이 제작되어 조만간 가동에 들어갈 예정이다. 또한 일본과의 공동연구를 통해 질량수 100영역의 고스핀 핵구조에 관한 연구를 수행하였다. 연구결과는 "Strongly coupled rotational bands in ^{113}Sb " (Physical Review C, Vol.58, No.3 pp.1833-1836, 1998. 9.) 논문제목으로 게재되었으며, 프랑스에서 개최된 국제핵물리학회회의에서 "Shape Coexistence at High-spin States in Te Isotopes" (International Nuclear Physics Conference, INPC'98, Paris, France, p.387, 1998. 8.) 논문제목으로 발표하였다.

3. 얇은 Si 반도체 검출기를 ΔE , 1인치 CsI 섬광체를 E 검출기로 하는 조합형 $\Delta E-E$ 하전입자 망원계측기를 제작하여 핵반응단면적 측정 연구를 수행하여 다음 두 편의 논문을 한국물리학회에서 발표하였다. "The measurements of the outgoing particle induced by the 50-MeV proton beam at MC-50 cyclotron" (한국물리학회 회보, Vol.16, No.1, p. 46, 1998. 4.); "Molecular Ion Beam Extraction from KCCH MC-50 Cyclotron" (한국물리학회 회보, Vol.16, No.2, p.296, 1998. 10.)

4. 방사능핵종빔 개발과 이용을 위한 국제협력연구의 일환으로 방사능핵종빔 개발의 첫단계 작업으로 ECR 이온원의 설계연구를 일본 KEK Tanashi분소 연구진과 공동으로 수행하였으며, 2회의 국내학술발표와 1회의 국제학술발표를 하였다. "The Compact ECR Ion Source for Charge Breeding" (한국물리학회 회보, Vol.16, No.2, p.291, 1998. 10.); "ECR 이온원에 관한 연구" (AMS Korea '98 International Symposium,

서울대 기초과학교육공동기지원, 1998. 10.); "Design of a Compact ECR Ion Source with Ku Band" (Particle Accelerator Conference, PAC'99, New York, USA, 1999. 3.)

이외에도, 알파유도반응 ($\alpha, xn\gamma$)을 적용한 핵구조 연구와 우리별 3호에 탑재될 고에너지 입자검출기의 에너지 및 효율 보정 연구를 KAIST와 공동으로 수행하였다. 이의 연구결과는 현재 분석 중에 있으며 1999년 하반기 연구결과가 발표될 예정이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

원자력병원의 사이클로트론 가속기에 설치된 감마선 전용빔라인과 콤프톤억제용 감마선 분광기 시스템의 본격적인 이용이 올 상반기 중 이루어질 전망이다. 이 시스템을 이용하여 질량수 150영역의 다양한 핵에서의 핵구조 연구와 아이소머핵을 이용한 초미세상호작용 연구가 수행될 예정이다. 일년간의 동 연구에서 이루어진 연구기반시설을 토대로 이차년도부터는 국제적 수준의 핵구조 연구가 수행될 것이다. 현재 동 연구책임자가 수행 중인 한일국제공동연구(과학재단지원, 1998. 7. - 2000. 6.)에 제안된 실험의 일부가 이 시설을 활용할 전망이다.

핵물리학 연구의 세계적인 추세인 방사능핵종빔 개발에 대한 지속적인 연구가 이루어질 것이다. 2 - 10 GHz 마이크로파대역 ECR 이온원의 설계부분에서 자기장 분석의 설계가 완료되었으며, 마이크로파의 입력부분에 대한 설계를 진행할 것이다. 우리의 ECR 이온원은 기존의 이온원 설계개념과 다른 "체적형" ECR 이온원으로서, 마이크로파의 전달효율을 최적화하는 장점을 살리는 형태이다.

S U M M A R Y

I . Project Title : High-resolution Nuclear Spectroscopy using a Cyclotron

II . Objective and Importance of the Project

The present proposal has two-fold objectives of producing world-class nuclear data and establishing the nuclear spectroscopic technology through conducting the high-resolution nuclear spectroscopic researches based on a cyclotron accelerator which is currently operated by Korea Cancer Center Hospital (KCCH) for medical purposes. To do so, we shall complete our on-going work of building a dedicated gamma-ray beamline at the KCCH cyclotron and perform a world-class gamma-ray spectroscopy using the high-resolution Compton-suppressed detector. In addition, we plan to develop a telescopic counter for detecting charged particles such as protons and alpha particles. It is also of vital importance in the present project to identify the application area using pulsed beam and delayed spectroscopy as well as to open up a new research opportunity in the research and development of radioactive nuclear beam within international cooperation with E-arena of the Japan Hadron Facility project.

In order to optimize utilization of the cyclotron for basic and applied researches, specific research areas are addressed as follows - nuclear structure research using the alpha-induced ($\alpha, xn\gamma$) reactions, hyperfine interaction using isomers, in-beam magnetism study based on the recoil-implantation by pulsed beam, radiation damage study of novel semiconductors and solar cells under space environments, and finally ground calibration of the high-energy particle telescope on board the KITSAT-3 satellite.

As the long-ranged goal, we intend to firmly establish an infrastructure for our own domestic nuclear physics facility and to bring about world-class research outcome with creative application area being identified. For the future study, we also plan to initiate a conceptual design and feasibility study of the next-generation radioactive nuclear beam physics while broadening the accelerator-based application areas in a close tie with industries and national laboratories.

III. Scope and Contents of the Project

The scope and contents of the present project are categorized into four different research areas. First, we shall complete the dedicated gamma-ray beamline as building up an infrastructure for the high-resolution nuclear spectroscopy researches and establish a research facility to conduct gamma-gamma coincidence counting experiment. Second, we plan to improve our operational capability of the cyclotron for the extraction and acceleration of protons and alphas, and to start a conceptual design work for the electron cyclotron resonance (ECR) source which becomes increasingly popular a heavy-ion source for the production of both stable and radioactive species. Third, we design to facilitate automated operation of the cyclotron through interfacing the electronic control board. Finally, we develop the $\Delta E-E$ telescope counter for the detection of charged particles and conduct the cross section measurements of various nuclear reactions as well as the ground calibration of proton telescope counter on board the KITSAT-3 satellite prior to its launch.

IV. Results of the Proposal

The research results obtained during the one year period of the present project are summarized as follows.

1. The dedicated beamline for the gamma-ray spectroscopy has been completed at the KCCH cyclotron and several in-beam gamma-ray experiments have been conducted. The preliminary results were reported at the Korean Physical Society meeting in April 1998. The title of the submitted paper was "The first in-beam γ -ray coincidence spectroscopy in Korea using by $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}\text{Te}$ reactions" (Bulletin of the Korean Physical Society, Vol.16, No.1, p.46, 1998. 4.)

2. We are currently in the process of setting up a high-resolution Compton-suppressed gamma-ray detection system which is composed of a BGO Compton suppressor and a high-purity germanium semiconductor detector. This system will enter into its first operation soon after the associated electronics and support structure are completed. As a part of the international collaboration research, we performed high-spin nuclear structure study of nuclei near mass region of 100. A

research result has been published under the title of "Strongly coupled rotational bands in ^{113}Sb " (Physical Review C, Vol.58, No.3 pp.1833-1836, 1998. 9.). Another result was reported at International Nuclear Physics Conference 1999, held in France under the title of "Shape Coexistence at High-spin States in Te Isotopes" (International Nuclear Physics Conference, INPC'98, Paris, France, p.387, 1998. 8.).

3. For the detection of charged particles emitted from nuclear reactions, a $\Delta E - E$ telescope counter was developed, which consists of a thin silicon semiconductor detector as a ΔE counter and a 1-inch CsI(Tl) scintillator as an E counter. We performed nuclear cross section measurements for various reactions and reported two results in the Korean Physical Society meetings: "The measurements of the outgoing particle induced by the 50-MeV proton beam at MC-50 cyclotron" (Bulletin of the Korean Physical Society, Vol.16, No.1, p. 46, 1998. 4.); "Molecular Ion Beam Extraction from KCCH MC-50 Cyclotron" (Bulletin of the Korean Physical Society, Vol.16, No.2, p.296, 1998. 10.).

4. As an initial step toward the development of radioactive nuclear beam, we have collaborated with the KEK Tanashi group, also known as JHF E-arena, on the design of the ECR ion source as a part of the international cooperative reserach for the development and utilization of radioactive nuclear beam. The research results were reported at two domestic conferences and at an international conference: "The Compact ECR Ion Source for Charge Breeding" (Bulletin of the Korean Physical Society, Vol.16, No.2, p.291, 1998. 10.); "Study on the ECR ion source" (AMS Korea '98 International Symposium, Inter-University Center for Natural Science Facilities, Seoul National University, 1998. 10.); "Design of a Compact ECR Ion Source with Ku Band" (Particle Accelerator Conference, PAC'99, New York, USA, 1999. 3.)

In addition, the $(\alpha, xn\gamma)$ nuclear reaction has been applied to the ground calibration of a high-energy particle telescope onboard KITSAT-3 in liaison with KAIST. Its research result will be reported in the second half of the year 1999.

V. Plan for Utilizing the Project Results

We are planning to fully utilize the dedicated beamline for gamma-ray spectroscopy and the Compton-suppressed gamma-ray detection system that is being presently installed at the cyclotron of Korea Cancer Center Hospital. Two major research goals are targeted toward the nuclear structure study of various nuclei near mass region of 150 and the hyperfine interaction study using isomers. Following the first-year research outcome of having mainly established the infrastructure for gamma-ray spectroscopy, the world-class nuclear structure study is hoped to carry out in the second year. A portion of research works proposed by the principle investigator for the Korea-Japan cooperative research (funded by Korea Science and Engineering Foundation, from July 1998 to June 2000) will be also carried out by using this facility.

We also hope to continue the research and development on radioactive nuclear beam in view of its world-wide popularity in nuclear physics. The preliminary design of the ECR ion source with the microwave ranging 2 - 10 GHz has been made for the simulation of its magnetic field mapping and future design for the transport of microwave will be made. Our ECR ion source of volume type has novel property that the transfer efficiency of microwave is optimized compared to other conventional type.

CONTENTS

(영 문 목 차)

Chapter 1. INTRODUCTION	1
Section 1 Objective and Importance of the Project	1
Section 2 Scope of the Project	2
Chapter 2. INTERNATIONAL AND DOMESTIC R&D STATUS	4
Section 1 In-beam Gamma-ray Spectroscopy	4
Section 2 Radioactive Nuclear Beam and On-Line Isotope Separation	6
Chapter 3. CONTENTS AND RESULTS OF THE PROJECT	8
Section 1 In-beam Gamma-ray Coincidence Experiments	8
1. Motivation	8
2. Contents	8
(1) Target Chamber and Target Fabrication	8
(2) Coincidence Electronics and CAMAC Data Acquisition System	10
(3) Alpha-induced Nuclear Reactions and Detector Efficiency	12
3. Results	12
(1) $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}\text{Te}$ Coincidence Spectra	12
(2) Compton-suppressed Gamma-ray Detector	18
Section 2 Cross Section Measurements using a Telescopic Counter	22
1. Motivation	22
2. Contents	22
(1) High-Energy Particle Telescope (HEPT)	22
(2) HEPT Calibration using a $\Delta E - E$ Charged Particle Telescope	24
(3) Electronics of the HEPT Calibration Experiment	24
3. Results	27
Section 3 Design of the ECR Ion Source for Radioactive Nuclear Beam	31
1. Motivation	31
2. Contents and Results	31

(1) Axial Mirror Field	31
(2) Radial Field	33
(3) Microwave System	33
3. Discussion	33
Chapter 4. ACHIEVEMENTS AND CONTRIBUTIONS OF THE PROJECT	39
Section 1 Establishment of the In-beam Gamma-ray Spectroscopy Facility	39
Section 2 Nuclear Reaction Studies using the Particle Telescope Counter	40
Section 3 R&D on Radioactive Nuclear Beam and the ECR Ion Source	40
Chapter 5. APPLICATION PLAN OF THE PROJECT	42
Section 1 High-resolution Compton-suppressed Gamma-ray Spectroscopy and Charged Particle Detection	42
Section 2 Pulsed Beam and Hyperfine Interaction Studies	43
Section 3 Development and Utilization of the Volume-type ECR Ion Source	44
Section 4 R&D of Future Scintillation Detectors	44
Chapter 6. REFERENCES	46

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구개발의 범위	2
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	4
제 1 절 인빔 감마선 분광학	4
제 2 절 방사능핵종빔의 연구와 온라인동위원소 분리시설	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	8
제 1 절 인빔 감마선 분광학 동시계수 실험	8
1. 개요	8
2. 연구내용	8
(1) 표적합과 표적핵 제작	8
(2) 동시계수 전자회로 구성과 CAMAC 데이터 수거 시스템	10
(3) 알파빔에 의한 핵반응과 검출기 효율보정	12
3. 연구결과	12
(1) $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha, 2n \gamma) ^{118,120,122}\text{Te}$ 핵반응의 동시계수 스펙트럼	12
(2) 콤프톤억제용 감마선 분광기	18
제 2 절 망원계측기에 의한 핵반응단면적 측정	22
1. 개요	22
2. 연구내용	22
(1) 고에너지 양성자 검출기 (HEPT)	22
(2) $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 이용한 HEPT의 지상 보정실험	24
(3) HEPT 보정실험의 전자회로 구성	24
3. 연구결과	27
제 3 절 방사능핵종빔의 연구개발을 위한 ECR 이온원 설계	31
1. 개요	31
2. 연구내용 및 결과	31
(1) 축방향 미러 자기장	31

(2) 지름방향 자기장	33
(3) 마이크로파 시스템	33
3. 논의	33
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	39
제 1 절 인빔 감마선 분광학 연구시설 확보	39
제 2 절 하전입자 망원계측기에 의한 핵반응 연구	40
제 3 절 방사능핵종빔 연구와 ECR 이온원 설계연구	40
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	42
제 1 절 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광학연구와 하전입자 검출	42
제 2 절 펄스빔과 아이소머핵을 이용한 초미세상호작용 연구	43
제 3 절 Volume-type ECR 이온원의 제작과 이용	44
제 4 절 미래형 섬광검출기 개발 연구	44
제 6 장 참고문헌	46

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

국내에서는 처음으로 복합핵반응을 유도할 수 있는 알파입자빔이 최근 원자력병원 MC-50 사이클로트론에서 인출되었다. 빔에너지는 35 MeV로서 현재 방사선 동위원소의 생성과 중성자 치료에 쓰이는 50 MeV 양성자빔과 함께 In-beam 핵분광실험에 유용한 에너지를 제공하게 되었다 [1,2]. 이 에너지 영역에서의 양성자빔과 알파빔은 직접핵반응에 의해 중핵의 산란 및 반응단면적 측정에 널리 사용 되고 있으며 특히 알파입자빔의 경우 $(\alpha, xn\nu)$ 반응을 이용하여 수 MeV 이하의 에너지준위하에서 발견하기 힘든 준위에 대하여 거의 완벽한 고감도의 생성율을 나타내므로 ν - ν 동시계수에 의한 In-beam 감마선 분광학을 적용한 많은 실험에서 필수적인 입사빔으로 간주되고 있다. 베타붕괴나 중성자 포획반응에 의해 관측되는 에너지준위는 일반적으로 저스핀 상태인 경우가 대부분이며 중이온에 의한 복합핵반응은 고스핀상태에 대해서는 유용한 정보를 제공하고 있는 반면 $(\alpha, xn\nu)$ 반응은 저스핀과 고스핀상태를 연결하는 중간 스핀상태의 핵구조를 규명하는데 있어 아주 유용하다. 종래까지 국내에서는 방사선원에 의한 감마선 분광학이 주종을 이루어 왔으며 핵구조 실험에 적합한 입자가속기가 부재했던 이유로 인하여 In-beam 감마선 분광학의 자체기술 확보가 늦추어져 왔다. 이에 원자력병원의 MC-50 사이클로트론을 이용한 핵분광학 실험은 독자적인 분광기술능력의 확보와 인력양성을 위해 시급히 수행되어야 할 과제로 보인다.

동 연구는 의료용으로 도입되어 가동 중인 원자력병원의 사이클로트론 가속기를 이용하여 고분해능 핵분광학 연구를 수행함으로써 국제적 수준의 핵자료 생산 및 분광학 측정기술 확립하고자 한다. 이를 위하여 원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치 중인 감마선 전용빔라인의 설치를 완료하여, 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기를 이용한 국제적 수준의 핵자료 생산과 양성자 및 알파입자 등의 입자 검출을 위한 망원기법을 개발한다. 또한 펄스빔과 지연분광학을 이용한 핵물리응용 연구분야의 발굴하는 한편 일본 JHF계획 일환인 E-arena의 방사능핵중빔 개발과 이용을 위한 국제협력 연구를 활성화한다.

그동안 동 연구진은 고스핀상태 또는 극한의 변형에서 제기되는 핵구조연구로서 질량수 110, 160 영역의 중핵 (Te, Sb, Ho, Lu, Po)을 대상으로 미국과 일본의 가속기시설과 고분해능 감마선분광기를 이용하여 수행해 오고 있으며 10여편의 유명 국제학술지에 연구결과를 게재한 바 있다 [3-6]. 로렌스버어클리 국립연구소 (LBNL)에서 행한 ^{198}Po 에서의 초변형상태 발견 [7], 쓰쿠바대와 규슈대에서 행한 $^{154,156}\text{Ho}$, $^{166,168}\text{Lu}$ 등의 이중홀수핵구조의 특이성에 관한 연구 [8,9], 그리고 Te, Sb의 다수 동위원소의 고스핀

상태에서의 핵모양 공존성 발견 [10] 등이 그것이다. 핵합성 및 천체핵반응 연구는 서울대의 400 keV 반데그라프에서의 천체핵물리반응의 단면적 측정과 동경대 핵연구센터 (CNS)의 SF 사이클로트론과 QDD Spectrograph를 이용한 고온 CNO 순환과정과 빠른 양성자포획, 즉 rp (rapid proton capture)과정에서의 핵합성의 경로를 규명하는 천체핵물리학 연구 등을 수행해 오고 있다 [11].

사이클로트론 가속기의 빔분석 측정기술을 개발하기 위하여 양성자빔 에너지 [12]와 펄스빔의 시간적 구조를 측정하는 자체적인 기술을 개발하였으며 [13] 이의 연구결과는 Nuclear Instruments and Methods A 등에 5편의 연구논문을 게재한 바 있다. 동 연구진은 원자력병원의 사이클로트론을 기초핵물리 연구시설로 그 이용도를 높이기 위하여 국내 연구자가 공동으로 사용할 수 있는 분광학 전용빔라인의 설치가 필수적으로 요구된다고 본다. 빔분석전자석 30° 방향으로 새로운 빔라인을 연결하여 Quadrupole Lens, 집속기 등 빔광학적인 작업을 완료하였으며 감마선 분광학을 위한 Targetry 개발을 진행시키고 있다. 현재 80% 정도의 공정을 보이고 있는 감마선 전용빔라인 건설은 동 연구과제를 수행하는 기간 내에 완료될 것으로 보이며 이후 본격적인 핵구조 연구와 천체핵반응 연구가 이루어질 것이다.

당해연도에 수행될 연구내용으로서, 사이클로트론 가속기의 핵물리관련 기초 및 응용연구를 극대화하기 위하여, 그 구체적인 연구분야로서 알파유도반응 ($\alpha, xn\gamma$)을 적용한 본격적인 핵구조연구, 아이소머핵을 이용한 초미세상호작용 연구, 펄스빔에 의한 되튐에너지 이온주입법을 이용한 In-beam 자성체연구, 반도체신소재 및 태양열소자의 우주환경에서의 방사선손상연구, 그리고 우리별 3호에 탑재될 고에너지 입자검출기의 에너지 및 효율 보정 연구 등이 그것이며, 최종적으로는 가속기를 이용한 핵물리 기초연구의 국내 기반시설을 확립하여, 국제적 수준의 핵물리 연구결과의 발표와 창의적인 응용연구를 발굴하고, 차세대 방사능핵종빔의 자체적인 개발을 위한 개념확립 및 탐색 연구, 그리고 가속 입자빔을 이용한 산·학·연 핵물리 응용연구의 활용방안을 구축하려 함에 있다.

제 2 절 연구개발의 범위

당해연도에 수행될 연구개발의 내용은 크게 4 가지로 나뉘어 있다. 첫째, 고분해능 감마선 핵분광학 연구를 위한 기반조성으로서 감마선 전용빔라인을 완성하여 감마-감마 동시계수 실험시설을 확보한다. 둘째, 사이클로트론 가속기에서 생성되는 양성자와 알파입자의 인출 및 가속 성능향상을 꾀하며, 안정원소와 방사능핵종빔의 생성에 널리 이용되는 중이온빔 ECR 이온원의 제작을 위한 개념연구를 추진한다. 셋째, 가속기 제어장치의 인터페이스화를 통하여 사이클로트론 가속기 운전의 자동화를 시작한다. 넷

째, 하전입자를 검출하기 위하여 $\Delta E-E$ 텔리스코우프 계측기를 개발하고 이를 이용한 핵반응 단면적 측정연구를 수행하며, 우리별 3호에 탑재될 양성자 입자검출기의 지상 보정 실험을 수행한다. 그 구체적인 연구내용은 다음과 같다.

원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치 중인 감마선 전용빔라인의 설치를 완료하며, $^{116,118,120}\text{Sn}$ 표적핵을 이용한 $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}\text{Te}$ 핵반응 연구를 수행한다. 또한, BGO 콤프톤억제용 섬광체와 고순도 게르마늄 계측기를 병용하는 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기의 설치작업을 진행시켜, 관련 전자회로의 구성과 분광기를 설치하기 위한 구조물을 제작하여 본격적인 핵구조 연구를 수행한다. 일본과의 공동연구를 통해 질량수 100영역의 고스핀 핵구조에 관한 연구를 수행할 계획이며 핵모양의 공존성이 제기되는 Sb 동위원소 핵에 대한 고스핀 핵구조를 연구하기 위하여 중이온 빔과 가동 중인 쓰쿠바대학의 콤프톤억제용 감마선분광기를 이용한다.

얇은 Si 반도체 검출기를 ΔE , 1인치 CsI(Tl) 섬광체를 E 검출기로 하는 조합형 $\Delta E-E$ 하전입자 망원계측기를 제작하여 핵반응단면적 측정 연구를 수행하며, 이를 이용하여 양성자빔에 의한 탄성 및 비탄성산란 핵반응을 유도하여 우리별 3호에 탑재될 고에너지 입자검출기의 에너지 및 효율 보정 연구를 KAIST와 공동으로 수행할 계획이다.

방사능핵종빔 개발과 이용을 위한 국제협력연구의 일환으로 방사능핵종빔 개발의 첫단계 작업으로 ECR 이온원의 설계연구를 일본 KEK Tanashi분소 연구진과 공동으로 수행할 계획이다. 안정원소와 방사능핵종빔의 생성에 널리 이용되는 중이온빔 ECR 이온원의 제작을 위한 설계연구를 추진하는 한편, 방사능핵종빔 이용 연구분야를 발굴하기 위한 탐색연구를 아울러 병행한다.

당해연도에 수행될 연구분야의 주요내용은 기초연구로서, 감마선 분광학에 의한 핵구조 연구와 하전입자 검출용으로서의 망원계측기에 의한 핵반응 단면적 측정 연구이며, 핵물리 연구 기반시설을 확보하기 위한 응용연구로서 콤프톤억제용 감마선 검출기의 설치, ECR 이온원의 설계연구 등이 주요한 연구개발 내용이라 할 수 있다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 인빔 감마선 분광학

In-beam 감마선 분광학이 60년대 Morinaga, Yamazaki 등이 (α, xn) 반응을 이용하여 중래의 베타 또는 알파붕괴성 동위원소에 의존하던 실험에서 나아가 비교적 높은 스핀상태를 생성한 이래, 80년대에 접어들면서 콤프턴억제용 BGO 섬광체와 4π 조합형 감마선 분광장치의 출현으로 이전에는 관측 불가능했던 여러 흥미로운 핵구조를 보게 되었다. 1986년 Twin등 [14]에 의하여 ^{152}Dy 핵에서 발견된 초변형상태(Superdeformation)는 80년 중반 이후의 감마선 분광학에서 가장 중심적인 테마라 할 수 있다. 더욱이 많은 핵구조 물리학자들의 관심의 대상이었던 극초변형성(Hyperdeformation)의 존재가능성 역시 ^{147}Gd 핵 [15]에서 확인되었다. 이러한 발견은 수십 대 이상의 고효율 게르마늄 검출기를 조합한 4π 형 분광장치에 의하여 가능하였다. 오늘날 대표적인 장치로서 유럽의 Eurogamm, 이태리의 GASP, 미국의 Gammasphere가 있다. 이 가운데서도 Gammasphere는 작년 말, 최종적인 완성을 끝내어 가장 많은 110대의 게르마늄 검출기로 구성되어 있어, 활발한 국제공동 연구시설로 이용되고 있으며 본 연구자는 최근 이 시설을 이용하여 ^{198}Po 핵에서 초변형상태를 발견한 연구결과 [7]를 미국의 Rutegr-LLNL 그룹과 공동으로 발표한 바 있다. 콤프턴억제용 감마선 검출기의 국외 기술동향은 검출기 결정성장과 고속 디지털기술의 관련 산업 기반구조가 선진화되어 있는 미국과 유럽에서 대형 4π 형 감마선 분광기가 '90년대 초부터 개발되어 가동 중에 있으며, 위치민감형 망원검출기는 '90년대 중반 NASA의 콤프턴감마선우주망원경(Compton Gamma Ray Observatory)이 제작되어 지구궤도에서 우주의 감마선 분포를 측정하고 있으며, 로렌스버어클리국립연구소가 GRETA계획을 '90년대 말 시작하여 현재 연구개발 중에 있다. 콤프턴효과를 이용한 감마선분광기의 대표적인 국내외 시설은 아래 [표 1]에 요약되어 있다.

가속기와 이온원의 발전 또한 중요한 역할을 하게 되었는데, 극히 불안정한 중성자 결손핵의 생성을 위한 이차 방사선빔의 개발과 ECR 이온원의 발전으로 특징지어진다. 일본의 RIKEN, 미국의 ORNL 등에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 반해 국내의 연구현황은 이 분야에 관련된 전문인력이 최근들어 늘어나고는 있지만, 국내시설의 부재로 인하여 외국의 연구시설을 이용할 수밖에 없는 상황이었다. 그러나, 원자력병원에서 보유하고 있는 MC-50 사이클로트론에 In-beam 감마선 분광학을 실시할 수 있는 전용빔라인이 개통됨에 따라 국내의 자체적인 연구가 가능하게 되었다. 본 연구진과 서울대는 공동으로 국내에서도 중핵에 나타나는 회전띠의 구조연구를 위해 1997년 4월 공릉 핵물리심포지엄을 주관하여 이 분야에 대한 활성화 방안을 계획하고, 대

학간의 공동연구를 촉진하는 여러 제안 및 향후 빔라인의 부차적인 장비설치를 제안한 바 있다.

[표 1] 콤프톤효과제어 감마선 검출기의 대표적인 시설과 국내외 비교.

유형	검출기명	설치 연구소명: 99. 3월 현재	검출기의 수	중점연구분야 (특기사항)
콤프톤 억제형 검출기	GAMMASPHERE	아르곤국립연구소 (미국)	BGO-Ge 110대	극한핵구조연구, 초변형/초중핵 연구
	HERA	로스알라모스국립 연구소(미국)	BGO-Ge 20대	LANSCE중성자시설 에서의 (n,xn γ)연구
	EUROBALL	스트라스부르그 (프랑스)	BGO-Ge 30대 +26대 Clover형 +15대 Cluster형	극한핵구조연구, 초변형/극초변형성연구
	NORDBALL	닐스보어연구소 (덴마크)	BGO-Ge 20대	인빔 감마선분광학
	JUROSHERE	지브스카대연구소 (핀란드)	BGO-Ge 20대	중성자 결손핵구조 감마선분광학
	EXO GAM	GANIL연구소 (프랑스)	BGO-Ge 16대 (모두 Clover형)	SPIRAL 방사성 동위원소빔 시설에서 극한핵물리학 연구
	TSUKUBA-BALL	스쿠바대(일본)	BGO-Ge 12대	인빔 감마선분광학
	C A U / S N U GAMMA	중앙대/서울대 (한국)	BGO-Ge 2대	원자력병원사이클로트론가 속기에서 인빔 감마선분광학
위치 민감형 망원 검출기	COMPTEL	NASA(미국)	7대 NE213A / 14대 NaI(Tl)	감마선우주망원경 (0.8-30 MeV)
	GRETA	로렌스버어클리 국립연구소(미국)	100 - 200대 Segmented Ge	초분해능 감마선검출기 (R&D 진행)
	KYUSHU/RIKEN	규슈대-이화학 연구소(일본)	Segmented Ge 1대 (시작품)	고스핀 아이소머빔 연구 (R&D 진행)

제 2 절 방사능핵종빔의 연구와 온라인동위원소 분리시설

중이온 및 대용량 양성자 가속기의 기술적 진보와 차세대 핵파쇄 중성자원 시설의 국제적인 개발이 진행되는 가운데, 기존의 핵반응에서 생성되는 대부분의 안정선 근접 핵종의 범위를 넘어선 극도의 불안정한, 혹은 양성자 및 중성자 과잉 핵종의 생성을 가능케 하는 연구가 90년대 들어 본격적으로 시작되고 있다. 이러한 연구는 중이온빔에 의한 입사핵분열법 (Projectile Fragmentation)과 온라인동위원소 분리 (Isotope Separation On-Line; 약칭 ISOL)로 대별된다. 기존의 동위원소 분리는 비교적 장수명의 안정선 근접 핵종을 원자로나 사이클로트론 가속기에서 생산하여 화학적인 처리과정을 통하여 분리하는 데 있으나, ISOL은 극도의 불안정한, 단수명의 양성자 및 중성자 과잉 핵종을 생성하여 질량분석에 의한 물리적인 방법에 의하여 분리하는 것이다. 현재 기존의 입사빔 선속에 대하여 초당 $10^6 - 10^8$ 개 정도의 핵을 얻을 수 있는 수준이나, 차세대 대용량 양성자 가속기의 입사빔 전류가 mA 정도인 경우, 초당 10^{10} 개 이상의 핵을 얻을 수 있으리라 기대된다. 온라인동위원소 분리는 고전류의 일차빔에 의하여 생성되는 잔류핵을 고효율 이온원으로 열적 확산시켜 이온화된 이차빔을 만드는 것이며, 이를 가속하는 중이온 선형가속기 (SC-RFQ나 DTL)에 의하여 가속된 방사능핵종빔 (Radioactive Nuclear Beam; 약칭 RNB, 혹은 Radio-Isotope Beam; 약칭 RIB)을 얻을 수 있다. 이러한 분리기술에서 가장 핵심적인 요소기술은 핵반응과 고효율 이온원을 결합시키는 기술로서 생성된 핵을 얼마나 많이 이온화시키는 정도, 즉 이온화 효율에 대한 기술이라고 할 수 있다.

방사능핵종빔을 생성하는 온라인동위원소 분리기술은 다음과 같은 기술적인 연구개발을 포함하고 있다.

- 고효율 다가이온원의 연구개발
- 중이온빔 질량 분석기의 설계와 제작
- 이온덫과 레이저분광기술을 이용한 질량 및 모멘트의 정밀측정 기술개발
- 방사능핵종빔의 가속기와 되튐질량분리기의 개념연구

기존의 가속기를 이용한 방사능핵종빔의 시설이 각국에서 경쟁적으로 설치되고 있으며, 이를 이용한 핵물리 관련연구는 그 대상 영역이 광범위하게 확장될 것으로 보인다. 21세기 들어 방사능핵종빔에 기초한 각광받을 미래 핵물리 연구분야는 다음과 같이 특징지워 진다.

- 양성자 과잉핵 영역에서의 중핵합성 경로에 대한 천체핵물리 연구

- 방사능핵종빔을 적용한 양성자 및 중성자 Drip line의 극한상태 핵구조 연구
- 방사능핵종 이온빔의 주입법에 의한 재료과학 및 초미세상호작용 연구
- 고전류 가속기, 이온원 개발 등과 관련한 차세대 가속기 물리학의 발전

고전류의 일차빔인 양성자를 표적핵에 입사시켜 Spallation 중성자원의 개발과 함께 Fragmentation 혹은 ISOL 방식에 의하여 방사능핵종빔을 발생시키는 전세계적인 노력이 현재 진행 중이다. 40 MeV에서 3 GeV에 이르는 양성자빔을 이용한 방사능핵종빔 연구시설은 다음 [표 2]에 요약되어 있다.

[표 2] 국내외 방사능핵종빔 시설의 현황

대륙	국가	연구소명	Primary beam 가속기	프로젝트명/ 현황
북미	미국	미시간주립대	초전도 사이클로트론	가동중
	미국	오크리지연구소	60 MeV 사이클로트론	"HRIBF" 가동중
	미국	아르곤연구소	선형가속기	R&D 단계
	캐나다	TRIUMF	500 MeV 양성자가속기	"ISAC" 가동중
유럽	유럽	CERN	1 GeV 양성자가속기	"ISOLDE"가동중
	독일	GSI	사이클로트론	가동중
	프랑스	GANIL	사이클로트론	"SPIRAL"가동중
	벨기에	Louvain	사이클로트론	가동중
아시아	일본	RIKEN	링사이클로트론	"RIBF"가동중
	일본	KEK	3 GeV 양성자가속기	"JHF" R&D
	인도	VEC(캘커타)	60 MeV 사이클로트론	"VECC" R&D
	중국	CIAE(북경)	13 MV 탄뎀가속기	R&D
	한국	원자력연구소	1 GeV 양성자 가속기	아직 계획없음
	한국	원자력병원	50 MeV 사이클로트론	아직 계획없음

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 인빔 감마선 분광학 동시계수 실험

1. 개요

원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치 중인 감마선 전용빔라인의 설치가 완료되었으며, 이를 이용하여 인빔 감마선 분광학에 의한 동시계수 실험을 수행하였다. 특히, 인빔 감마선 분광학 연구에 유용한 알파빔을 인출하는 노력이 경주되었으며, 빔 집속도를 높이기 위하여 Quadrupole Magnet을 설치하였다. 배경계수를 줄이기 위하여 납 차폐벽을 빔라인 주변에 쌓았으며, 검출기를 지지하는 구조물을 제작하였다. 본격적인 동시계수 실험을 위한 선행연구로서 에너지준위와 분광학 정보가 잘 알려져 있는 텔루리움 (Te) 핵을 알파빔에 의하여 생성시켜 두 대의 3" x 3" 고순도 게르마늄 감마선 검출기를 사용하여 동시계수 실험을 수행하였다. 표적핵으로 이용된 주석 (Sn)은 natural-Sn으로서 다양한 Te 동위원소를 생성시켰다. 동 연구의 중간결과는 "The first in-beam γ -ray coincidence spectroscopy in Korea using by $^{116,118,120}\text{Sn}(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}\text{Te}$ reactions" (한국물리학회 회보 Vol.16, No.1, p.46, 1998. 4.) 논문제목으로 한국물리학회에서 발표된 바 있다.

2. 연구내용

(1) 표적합과 표적핵 제작

기존의 원자력병원 사이클로트론 가속기에는 0° 방향의 중성자 치료용 빔라인과 45° 방향의 동위원소 생산 빔라인이 있었다. -30° 방향으로 감마선 전용빔라인이 추가로 건설되었으며 빔집속을 위한 Triple Quadrupole Magnet가 국내에서 자체 제작되어 원자력병원 연구진에 의하여 설치되었으며, 주변의 배경계수를 차단하기 위하여 납 차폐벽이 설치되었다. [그림 1]은 현재 원자력병원 사이클로트론 가속기의 빔라인을 보여주는 개략도이다. 동 연구에서 중점적으로 수행된 내용은 표적합의 제작, 검출기를 설치하는 지지대 제작, 동시계수를 위한 전자회로의 구성과 표적실과 제어실 간에 전기신호를 전달하는 케이블 공사 등이다. 표적합은 두께 2 mm, 지름 50 mm인 알루미늄 파이프를 사용하였으며 파이프의 양 끝은 진공을 유지하기 위하여 정밀 가공되었다. 전방끝은 -30° 방향으로 설치된 빔라인에 연결되었으며 후방끝은 페러데이컵에 연결되었다. 표적핵을 장착하는 Target frame은 별도로 제작되었고 파이프의 후방끝을 열어

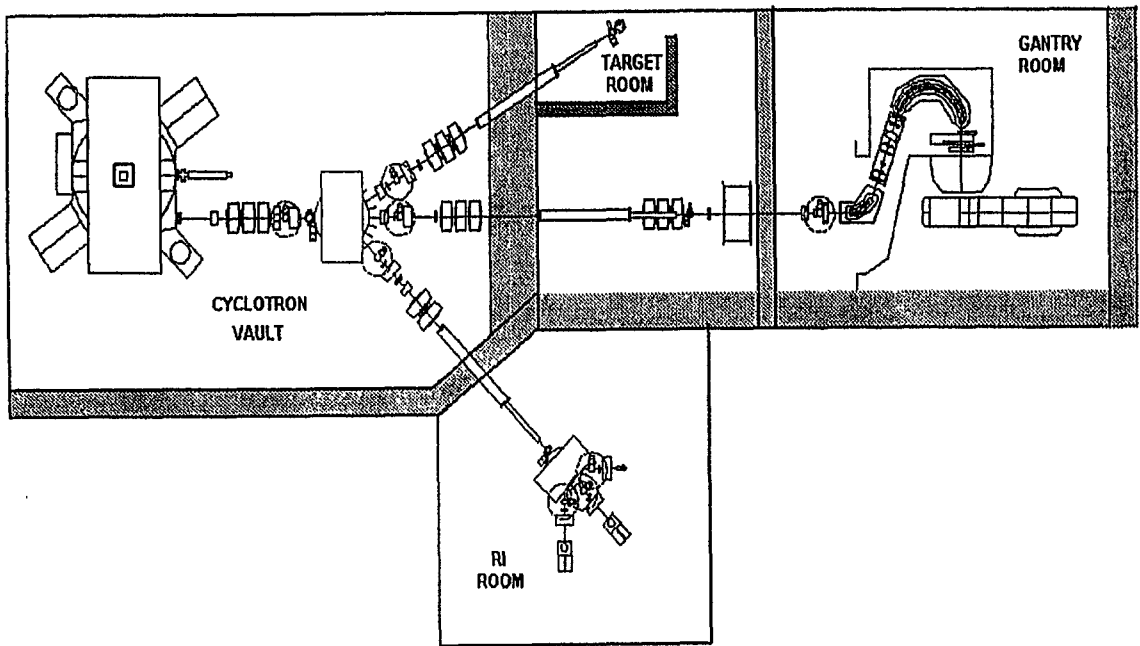


그림 1. 원자력병원 사이클로트론 가속기에 설치된 감마선 분광학 전용빔라인

뒤에서 집어 넣는 식으로 제작되었다. 진공펌프는 페러데이컵과 연결되어 있으며 Rotary형 펌프를 사용하였다. Roughing 진공이 얻어지면 사이클로트론 가속기 빔라인을 차단하는 밸브를 열어 고진공 상태가 유지되도록 하였다. 검출기는 Canberra에서 제작한 고순도 게르마늄 검출기로서 Portable형이며 게르마늄 결정의 크기는 3" x 3"이다. 공간상의 제약으로 인하여 한 검출기는 빔축에 대하여 위로부터 수직으로 세웠으며 다른 검출기는 수평으로 테이블 위에 놓여지도록 하였다. 표적핵과 검출기 사이의 거리는 15 cm가 되도록 하였다. 표적핵은 자연상태의 주석 (^{nat}Sn)을 이용하였는데, 질량수 116부터 122에 이르는 다양한 조성비를 가지고 있다. 표적핵의 형태는 세 가지로서, 면적밀도 9 mg/cm²와 15 mg/cm²로 rolling하여 만든 self-supporting 형태와 2 mm 두께의 납에 약 2 mg/cm²의 면적밀도를 갖도록 증착하여 만들었다. 이 세 가지 표적핵에 알파빔을 조사하여 각 스펙트럼을 분석하여 본 결과 self-supporting 표적핵이 증착한 것보다 비교적 더 깨끗한 스펙트럼을 보이는데 이는 증착한 경우에 썼던 납속에 불순물이 함유된 것으로 추정되며, 알파빔 에너지손실을 감안하여 면적밀도가 낮은 9 mg/cm² 표적핵을 실험에 사용하였다.

(2) 동시계수 전자회로 구성과 CAMAC 데이터 수거 시스템

γ - γ 동시계수를 위한 전자회로의 구성은 fast-slow coincidence 신호처리 방식에 바탕을 둔 것이며 상세한 전자회로 구성은 [그림 2]에 나타나 있다. 게르마늄 검출기로부터 출력된 에너지 신호는 Amplifier로 입력되며, Amplifier의 Unipolar 출력은 Analog-to-Digital Converter (ADC)로 입력되어 에너지 스펙트럼의 신호로 쓰인다. Amplifier의 Bipolar 신호는 Timing Single Channel Analyzer (TSCA)로 입력되며 TSCA의 Logic 출력신호는 slow coincidence를 위한 시간적 신호로 이용한다. 게르마늄 검출기로부터 출력되는 다른 신호는 fast 시간적 신호로서 Timing Filter Amplifier (TFA)와 Constant Fraction Discriminator (CFD)를 거쳐 event들의 동시성 분포를 보여주는 Time-to-Amplitude Converter (TAC)으로 입력된다. 두 대의 검출기로부터 출력되는 fast 시간적 신호는 각각 TAC의 start와 stop 신호로 이용된다. slow 시간적 신호는 TSCA에서 처리되며, 처리방식은 Crossover인 반면, fast 시간적 신호는 CFD에서 처리되는데 이는 Constant Fraction에 의한 방식이다. TAC의 range는 200 ns로 선택하였으며, start 신호와 stop 신호에 의하여 얻어진 event들의 동시성 분포를 의미하는 출력신호는 ADC의 시간 스펙트럼으로 이용된다. 따라서, 하나의 event는 세 개의 word로 구성되며, 이는 두 대의 검출기로부터 처리된 두 개의 에너지 신호와 두 검출기간의 동시성 분포를 보여주는 하나의 시간적 신호로 이루어진다. TAC의 또 다른 출력 신호인 SCA Logic 신호는 fast coincidence를 위한 시간적 신호로 이용되며, 두

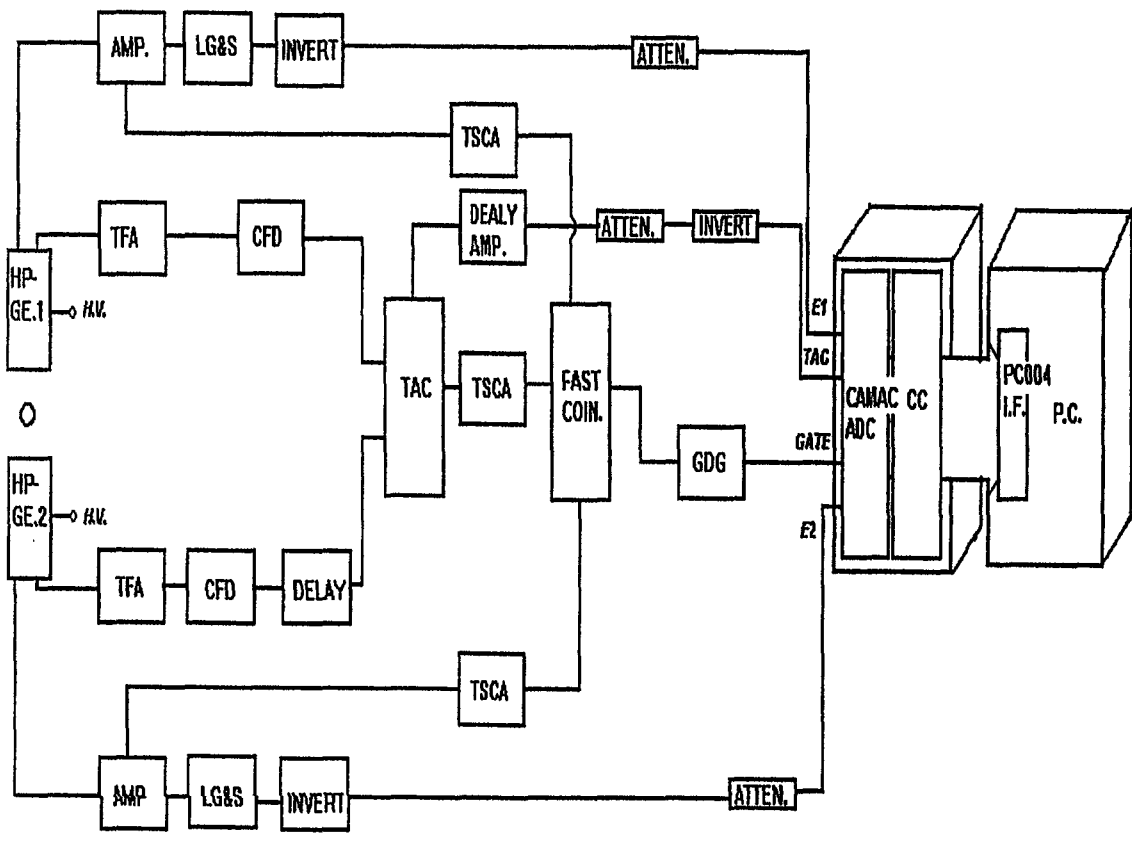


그림 2. γ - γ 동시계수 실험을 위한 전자회로 구성도.

대의 검출기로부터 처리된 두 개의 slow coincidence logic 신호와 이 fast coincidence logic 신호는 Universal Coincidence로 입력되어 3-fold coincidence 조건으로 출력된다. 출력된 신호는 일종의 Trigger 신호로서 ADC를 구동시키는 gate 신호로 이용된다. 데이터 수거 시스템은 CAMAC에 바탕한 실시간 데이터 기록방식인 event-by-event 모드로서 LeCroy 2249W ADC를 이용하여 두 개의 에너지 신호와 한 개의 시간 신호를 기록한다. CAMAC 제어는 Crate Controller와 Personal Computer간을 interface하는 PC-004 카드로 실행된다. 동 실험에서는 총 2백 35만 동시 event를 26시간 동안 기록하였으며, Trigger 신호는 평균적으로 초당 35 개였다.

(3) 알파빔에 의한 핵반응과 검출기 효율보정

실험에 사용한 알파빔의 에너지는 22 MeV이며, 이는 사이클로트론 공명주파수 17.69 MHz에 의하여 인출 및 가속된다. Quadrupole magnet에 의하여 집속된 알파빔은 지름 5 mm 내외이며 통상적으로 중성자 치료용 빔라인에서 얻어지는 양성자빔의 모양에 비하여 다소 떨어지나, 동 실험의 경우 충분히 사용할 수 있는 것으로 보여진다. Al_2O_3 가루를 얇은 Mylar막에 입혀 알파빔에 의하여 섬광되는 빛을 CCD 카메라로 보면서 알파빔의 집속을 시도하였다. 알파빔의 전류는 Faraday cup에서 측정되었으며 약 10 nA 이하로 유지시켰다. 검출기의 에너지와 효율을 보정하기 위하여 표적핵 자리에 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba 표준방사선원을 각각 붙여 얻어진 에너지 스펙트럼을 기초로 하여 수행되었다. 두 검출기는 인가전압이 각각 2.8 kV와 4.0 kV로 차이가 나지만, 검출 효율은 아주 비슷한 것으로 판명되었다. 두 검출기의 상대적 검출 효율은 감마선 에너지에 대한 함수로서 Fitting하였으며 그 결과는 [그림 3]에 나타나 있다.

3. 연구결과

(1) $^{116,118,120}Sn(\alpha,2n\gamma)^{118,120,122}Te$ 핵반응의 동시계수 스펙트럼

데이터는 Linux상에서 실행되는 RADWARE 분석코드 [16]의 GF2 프로그램을 이용하여 분석하였다. TAC 스펙트럼에서 60 ns이내에 동시계수된 event들을 sort하여 실제동시계수 사건으로 하였으며 이 시간안에 포함된 우연동시계수 사건은 근방의 flat한 영역을 동일한 시간범위 60 ns에 해당하는 사건을 뺐다. 이렇게 하여 만들어진 coincidence matrix는 4096 x 4096 채널 크기이며, 두 검출기의 에너지 보정을 동일하게 맞추어 대칭적인 행렬요소를 갖도록 하였다. 다음으로 동시적인 감마선을 찾아내기 위하여 gate를 걸어 한 에너지 축으로 투영하여 감마선 스펙트럼을 만든다. 이 때, 콤

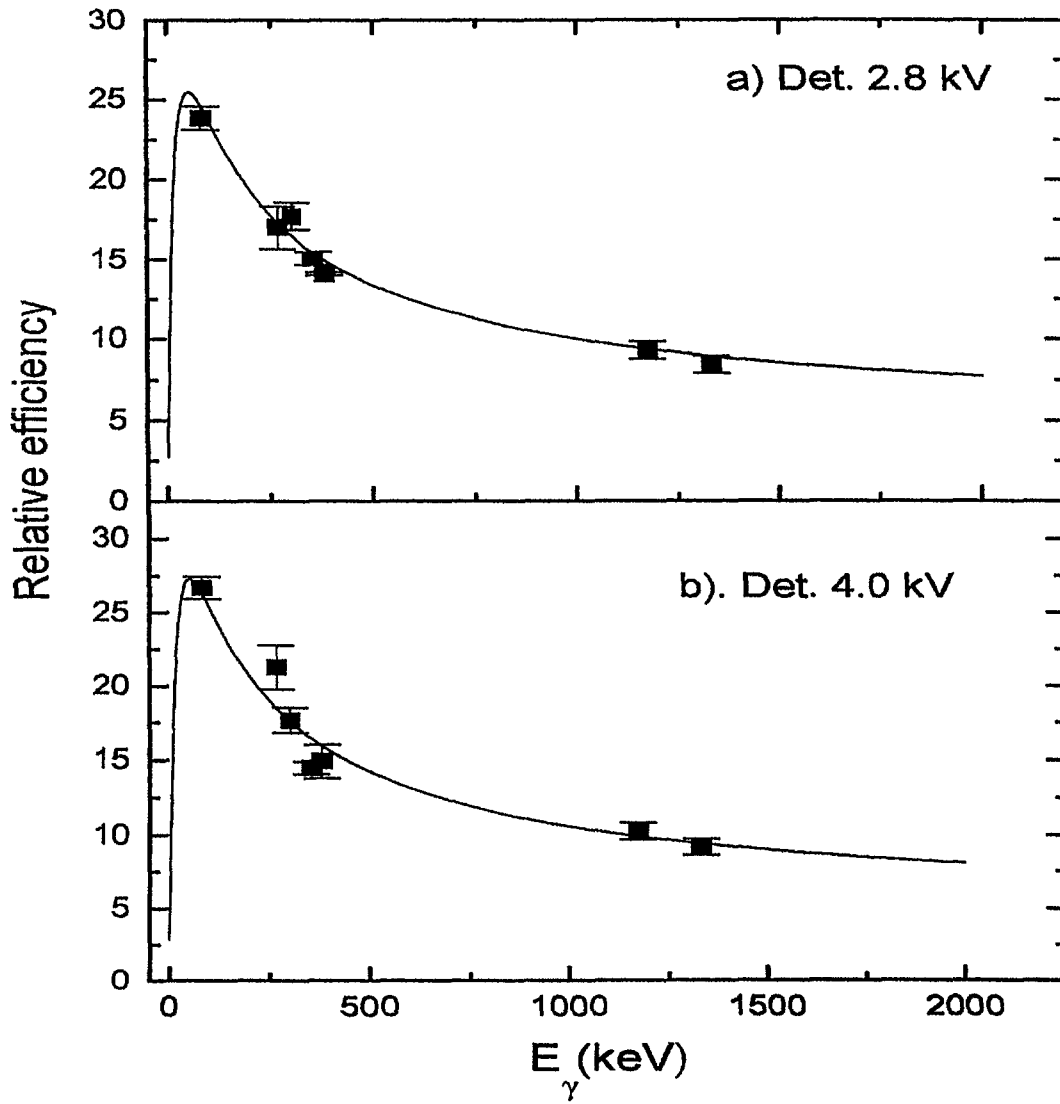


그림 3. 두 대의 3" x 3" 고순도 게르마늄 검출기의 상대적 효율 측정 결과

프톤 산란에 의한 배경계수를 제거한다. [그림 4]는 $^{nat}\text{Sn}(\alpha, xn)\text{Te}$ 핵반응에 의하여 생성된 모든 감마선 동시계수 스펙트럼, 즉 Total projection spectrum을 보여 주고 있으며 주로 ^{120}Te 와 ^{122}Te 에 속한 감마선이 가장 강하게 나타난다. 또한, beamline 주변의 금속과 핵반응을 일으킨 Activity 감마선 역시 나타난다. ^{nat}Sn 에는 ^{120}Sn 이 32.4%, ^{118}Sn 이 24.3%, ^{116}Sn 이 14.6%가 함유되어 있으므로, ^{118}Te , ^{120}Te 와 ^{122}Te 이 $(\alpha, 2n)$ 에 의하여 가장 많이 생성된다. 알파빔의 입사에너지에서 (α, n) 과 $(\alpha, 3n)$ 의 반응단면적은 $(\alpha, 2n)$ 에 비하여 상대적으로 약하여 홀수 질량수를 가지는 Te 동위원소의 생성은 상대적으로 작다. [그림 5]에는 $^{120}\text{Sn}(\alpha, 2n)\text{Te}$ 핵반응에 의하여 생성된 ^{122}Te 핵의 564, 617, 569, 918 keV 감마선을 gate로 하여 얻어진 스펙트럼이 나타나 있다.

질량수가 짝수인 Te 동위원소의 핵구조를 Shell 모형으로 설명하면, 두 개의 양성자가 $\pi d_{5/2}$ 궤도를 차지하고 중성자들은 $\nu d_{5/2}$, $\nu g_{7/2}$, $\nu h_{11/2}$ 등의 궤도를 차지하게 된다. 첫 2^+ 에너지준위는 집단적인 진동여기에 의한 상태이며, Te는 집단적인 여기와 단입자운동이 공존하는 대표적인 핵이다. 따라서, 4^+ 에너지준위는 집단적인 진동여기의 2-phonon상태와 두 양성자의 단입자 여기가 혼합된 상태로 간주될 수 있다. 그러나, 6^+ 는 $\pi(g_{7/2})^2, \pi(d_{5/2} \otimes g_{7/2})$ 등의 순수한 단입자 여기로 믿어진다. 이를 뒷받침하는 증거로 만약에 6^+ 상태가 3-phonon 진동여기에 의한 것이라 했을 때, 여기에는 두 개의 양성자 단입자 상태가 상당히 혼합되어 있을 것으로 추정되며, 또한 일반적인 진동상태가 붕괴할 때 E2 전이율과 비교하면, 대단히 약하다는 사실 [17]에 근거한다. [그림 6]에는 질량수가 짝수인 Te 동위원소 핵에서 중성자수 (N)에 따른 에너지준위의 Systematics을 보인 것으로, 4^+ 와 2^+ 의 에너지준위의 비, 즉 $E(4^+)/E(2^+)$ 의 값이 ^{118}Te , ^{120}Te , ^{122}Te 에 대하여 각각 1.99, 2.07, 2.09 임을 알 수 있다. 이 값들은 완전한 진동여기에 의한 이론치인 2와 상당히 근접한 것임을 보인다. 그러나, 상대적인 B(E2) 값을 살펴보면 오히려 진동여기 보다는 회전여기에서 예상되는 이론치에 더 가까움을 알 수 있는데, Te핵이 완전한 진동자라고 간주하기 보다는 바닥상태가 다소 변형된 것임을 말해 준다 [18]. Total Routhian Surface에 의한 계산결과는 이를 뒷받침하고 있으며, 이에 대한 상세한 결과는 곧 논문으로 게재될 예정이다.

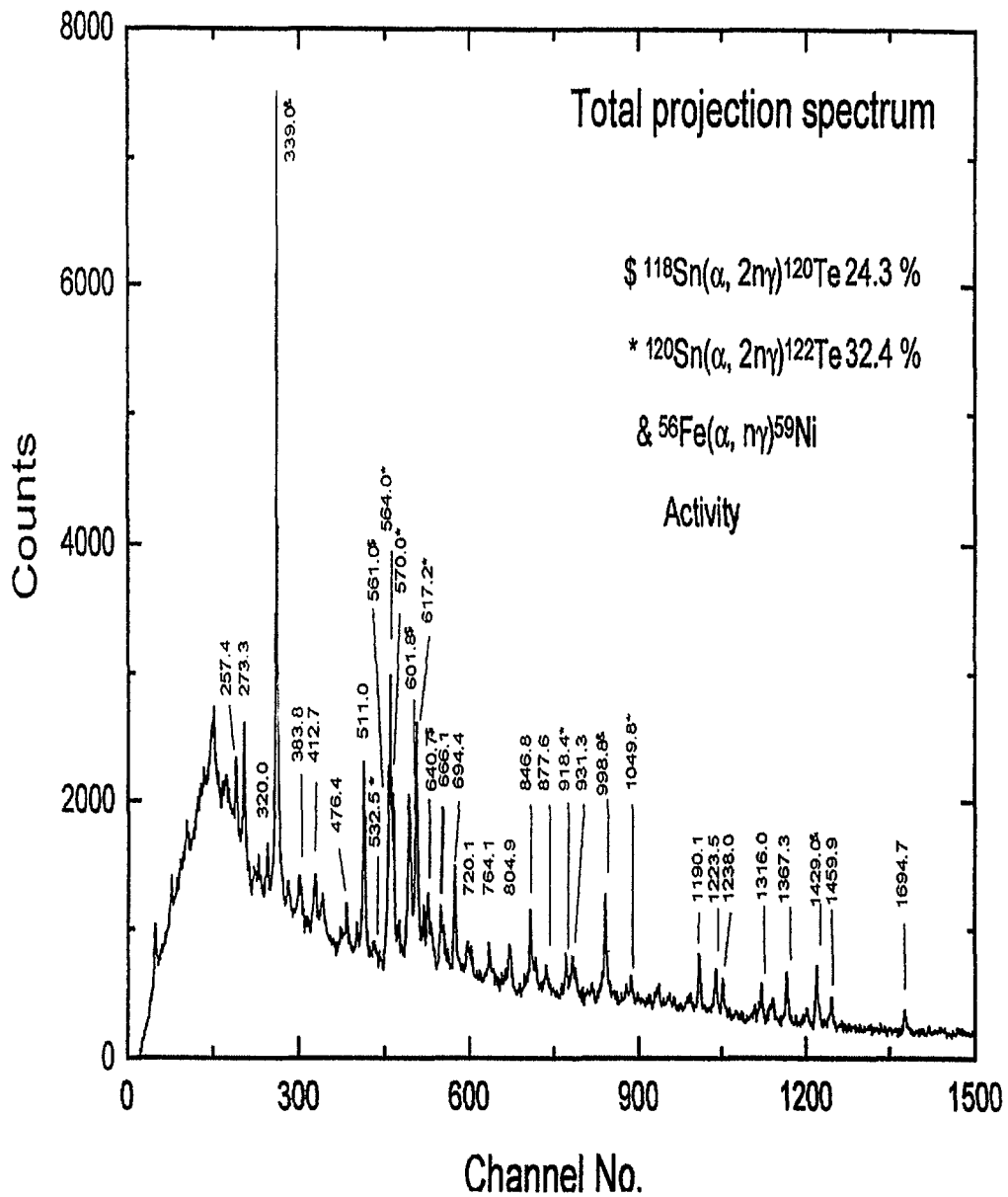


그림 4. $^{nat}\text{Sn}(\alpha, xn)\text{Te}$ 핵반응에 의하여 생성된 감마선 동시계수 스펙트럼과 배경계수.

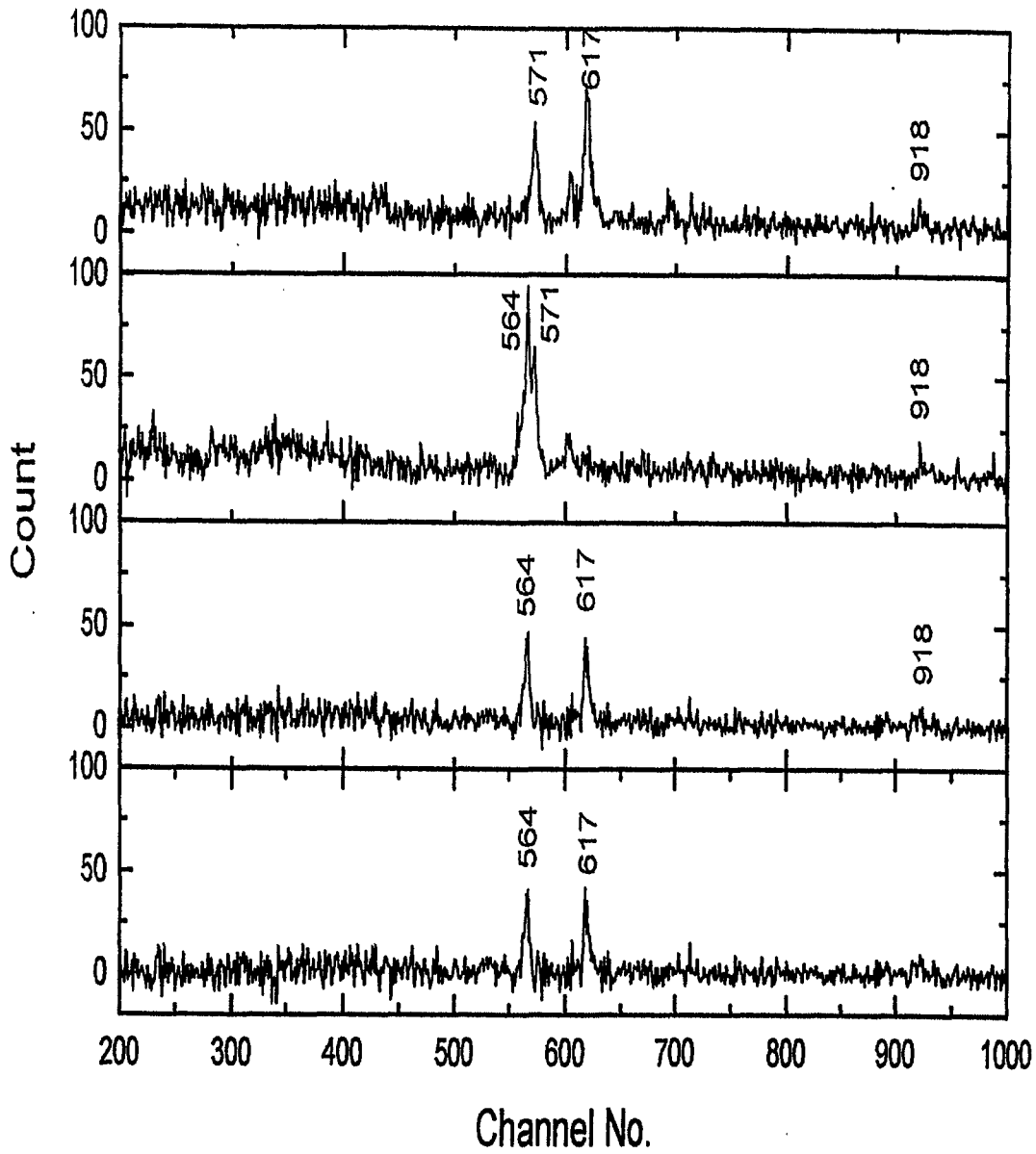


그림 5. $^{nat}\text{Sn}(\alpha, xn)\text{Te}$ 핵반응에 의하여 생성된 ^{122}Te 핵의 564, 617, 569, 918 keV 감마선을 gate로 하여 얻은 스펙트럼.

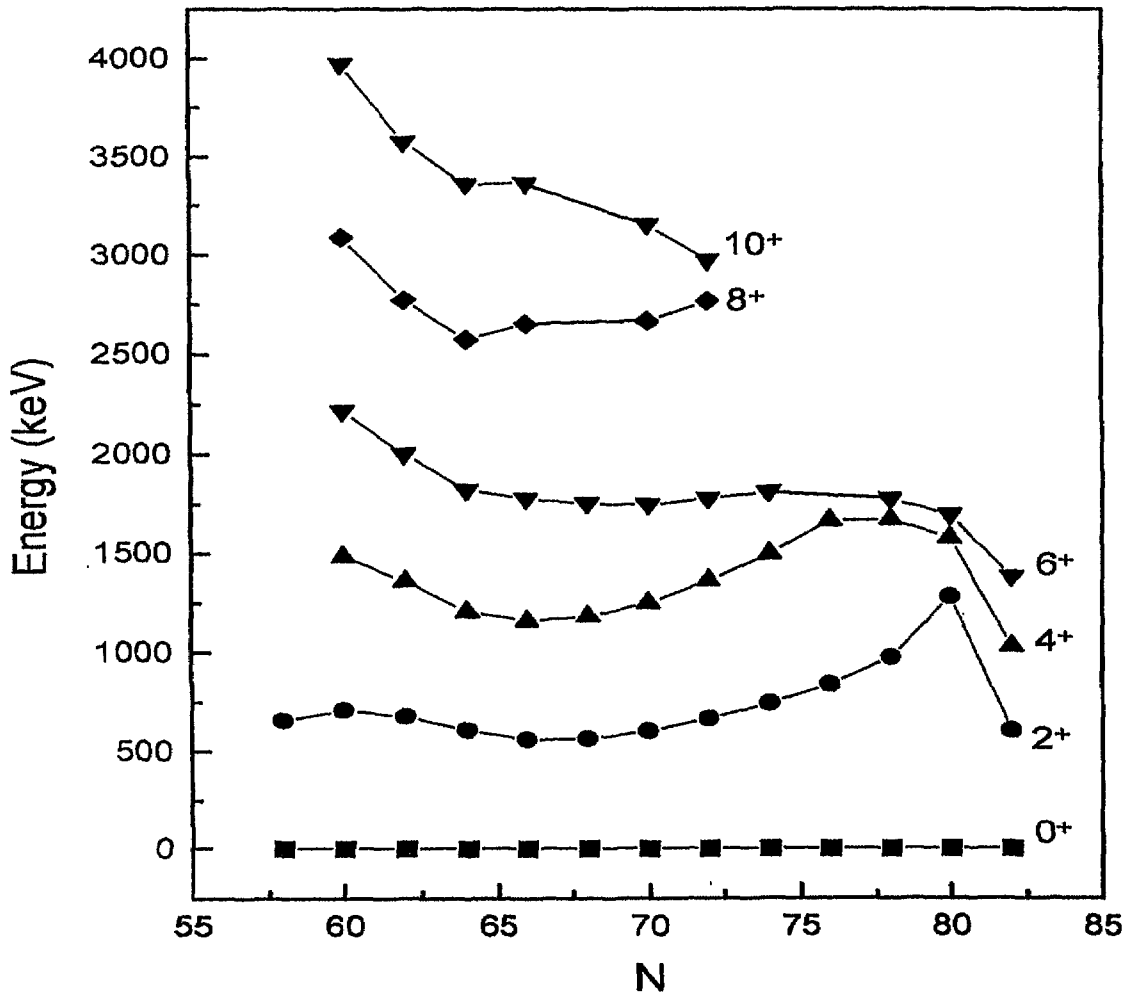


그림 6. Te 동위원소 핵에서 중성자수 (N)에 따른 에너지준위의 Systematics

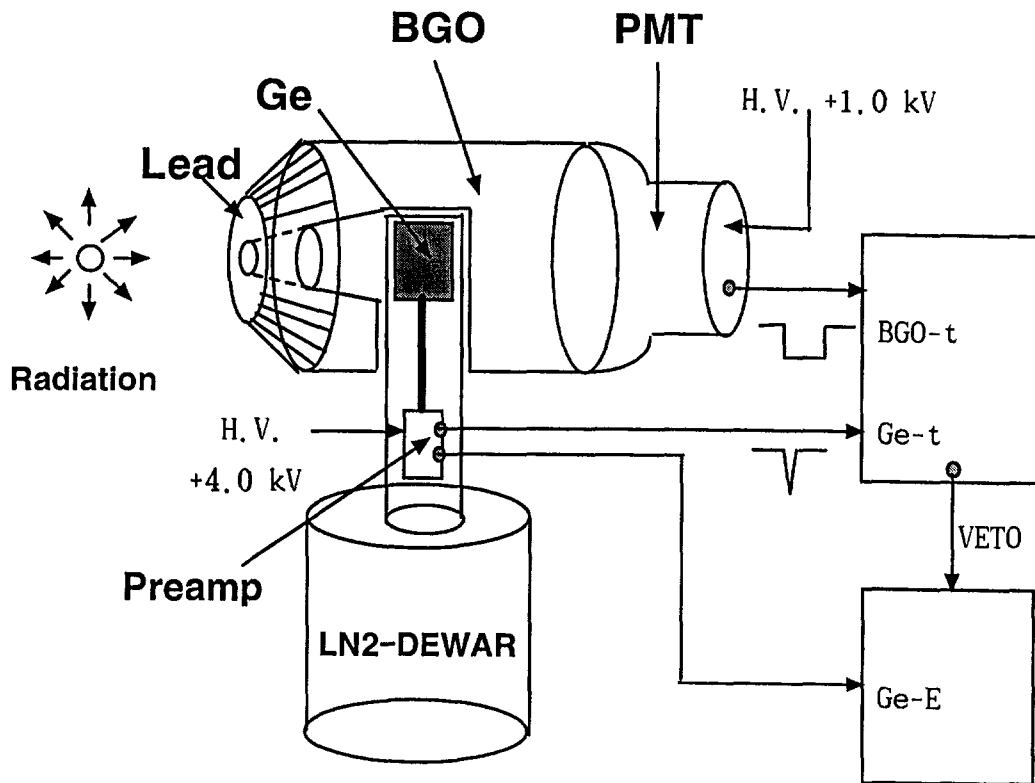
(2) 콤프톤억제용 감마선 분광기

BGO 콤프톤억제용 섬광체와 고순도 게르마늄 계측기를 병용하는 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기의 설치작업이 진행 중에 있으며, 관련 전자회로의 구성과 분광기를 설치하기 위한 구조물이 제작되어 조만간 가동에 들어갈 예정이다. 또한 일본과의 공동연구를 통해 질량수 100영역의 고스핀 핵구조에 관한 연구를 수행하였다. 연구 결과는 “Strongly coupled rotational bands in ^{113}Sb ” (Physical Review C, Vol.58, No.3 pp.1833-1836, 1998. 9.) 논문제목으로 게재되었으며, 프랑스에서 개최된 국제핵물리학회에서 “Shape Coexistence at High-spin States in Te Isotopes” (International Nuclear Physics Conference, INPC'98, Paris, France, p.387, 1998. 8.) 논문제목으로 발표하였다.

콤프톤효과에 의한 광자 산란을 억제하는 감마선 분광학은 '80년대부터 개발되어 왔으며, 이의 핵심적인 기술은 광자 산란에 의하여 검출기를 탈출하는 감마선을 계측하는 고밀도 섬광체를 검출기 주변에 둘러 광자 산란에 따른 거부신호를 발생케 하는데 있다. 방사능 핵으로부터 방출되는 감마선의 에너지는 통상적으로 10 keV에서 수 MeV에 이르며 이 영역의 감마선에 대하여 광자 산란에 의한 배경계수를 최대 10배 정도까지 줄일 수 있으며 높은 동시계수율의 효율을 보장해 준다. 더우기, 콤프톤효과에 의하여 산란된 감마선은 선형적으로 편극되기 때문에 핵준위의 패리티를 실험적으로 결정할 수 있는 감마선 편극기로 이용되기도 한다. '80년대 이후 중이온가속기와 하전입자 질량분석기의 기술적 진보에 힘입어 안정성 한계영역 근방의 핵구조를 탐구하려는 시도로 콤프톤억제형 감마선 검출기는 '80년대 중반부터 구미 각국이 경쟁적으로 연구개발에 착수하였다. 이러한 감마선분광기의 출현으로 희토류핵인 디스프로시움에서 초변형핵의 존재가 최초로 발견되었으며, 다양한 질량수 영역에서 극도로 불안정한 핵종의 새로운 발견이 이루어져 왔다. 또한, 대용량 양성자가속기와 고에너지 중이온가속기를 이용한 방사능핵종빔의 생성으로 기존의 한계영역이 확장되고, 우주의 물질생성에 대한 획기적인 천체물리학 연구가 21세기 들어 활발하게 진행될 것이다.

반면, 국내의 기술동향은 대학을 중심으로 콤프톤억제형 검출기가 있는 국외의 시설을 이용한 국제공동연구에 전적으로 의존하여 왔다. 최근, 중앙대와 서울대에 각각 1대씩의 BGO-Ge 콤프톤억제형 검출기가 도입되어 국내에서 유일하게 핵반응에 의한 감마선분광학을 수행할 수 있는 원자력병원의 사이클로트론가속기에 감마선 전용빔라인을 건설하여 알파빔에 의한 고분해능 핵구조 및 핵자료 연구가 시작될 전망이다. 또한, 핵연료의 균일도 조사와 중성자 유도반응연구를 위하여 원자력연구소 하나로 연구용원자로에 동종의 검출기가 도입될 예정이다. 그러나, 이 분야에 국내 전문연구인력의 기반이 아직도 취약하며, 시설면에 있어서 선진국에 비하여 대단히 열악한 상황이다.

특히, 검출기 결정성장과 고속 디지털기술의 관련 산업기반구조는 거의 전무한 상황이다. 이는 핵 및 원자력관련 기초과학분야에서의 수요보다 핵의학 및 방사선과학 등의 응용과학에서의 수요가 앞으로 점증할 것으로 전망되며 이에 대한 산업기반 조성은 필수적으로 요구될 것이다. [그림 7]에는 콤프톤억제용 감마선 분광기의 체계도가 나타나 있으며 [그림 8]에는 중앙대와 서울대가 공동으로 설치 중인 콤프톤억제용 감마선 분광기 CAU/SNU GAMMA SYSTEM의 도면이 나타나 있다.



BGO-t: BGO의 PMT로부터 출력되는 시간 신호
 Ge-t: Ge의 Preamp로부터 출력되는 시간 신호
 Ge-E: Ge의 Preamp로부터 출력되는 에너지 신호

그림 7. 콤프톤억제용 감마선 분광기의 체계도.

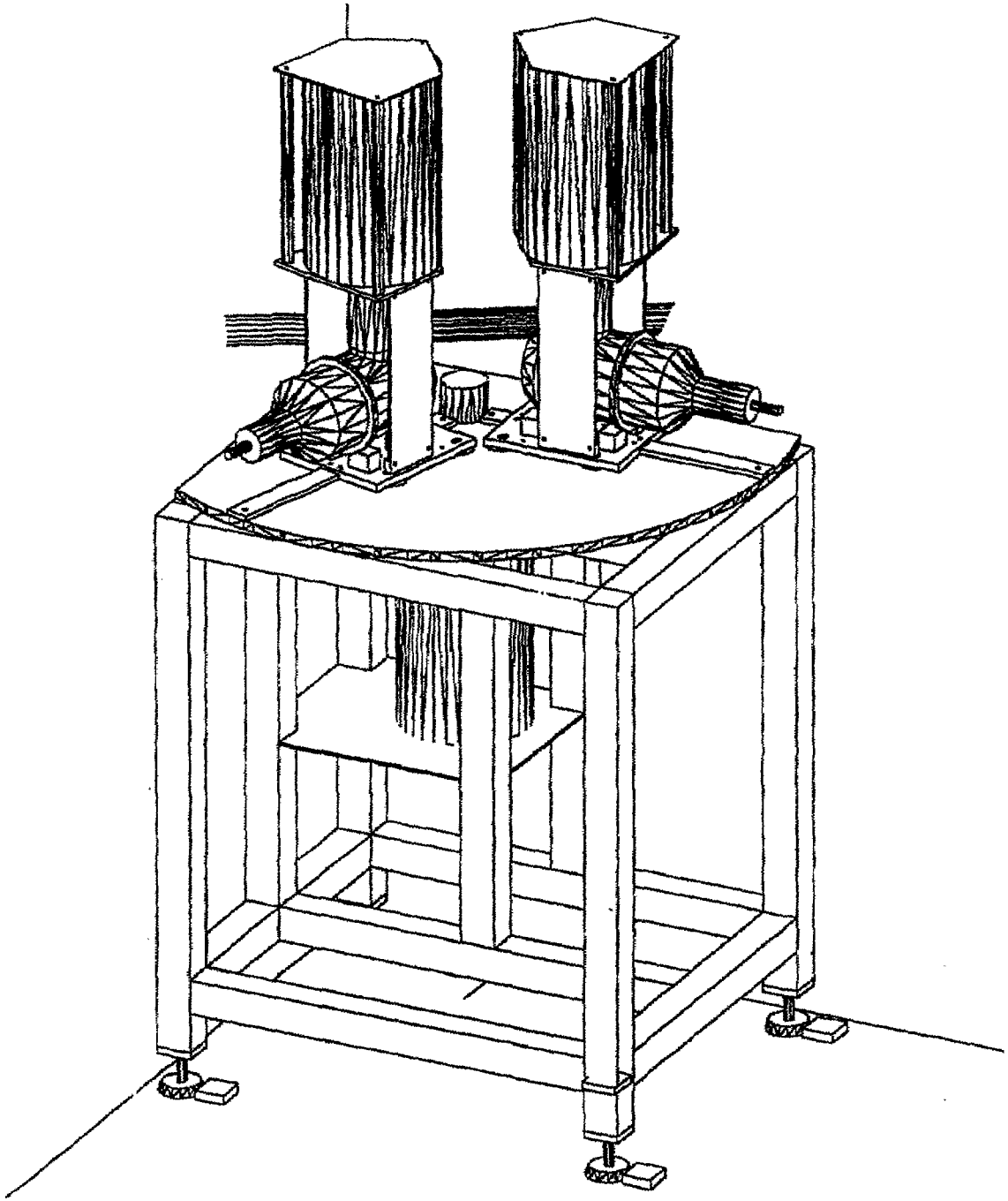


그림 8. 콤프톤억제용 감마선 분광기 CAU/SNU GAMMA SYSTEM의 도면

제 2 절 망원계측기에 의한 핵반응단면적 측정

1. 개요

얇은 Si 반도체 검출기를 ΔE , 1인치 CsI 섬광체를 E 검출기로 하는 조합형 $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 제작하여 핵반응단면적 측정 연구를 수행하였다. 이 망원계측기를 이용하여 1999년에 발사될 예정인 과학위성인 우리별3호에 탑재되는 관측용 계측기의 하나인 고에너지 양성자 검출기 (HEPT)의 지상보정 실험을 수행하였다. 이 검출기는 4개의 얇은 실리콘 검출기를 조합한 망원검출기로서 지구 자기장에 갇혀 있는 양성자, 전자, 알파입자 등의 경입자 flux를 측정하며, 이를 통하여 경입자들의 생성원인 태양활동에 대한 관측을 모니터하게 된다. $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기에 대한 상세한 기술적 내용은 동 연구결과로서 보고된 두 편의 논문 "The measurements of the outgoing particle induced by the 50-MeV proton beam at MC-50 cyclotron" (한국물리학회 회보, Vol.16, No.1, p. 46, 1998. 4.); "Molecular Ion Beam Extraction from KCCH MC-50 Cyclotron" (한국물리학회 회보, Vol.16, No.2, p.296, 1998. 10.)을 참고하기 바라며, 동 보고서에서는 주로 고에너지 양성자 검출기 (HEPT)의 지상보정 실험에 대한 내용을 다루기로 하겠다.

2. 연구내용

(1) 고에너지 양성자 검출기 (HEPT)

우리별 1호에 실렸던 CPE (Cosmic Particle Experiment)는 위성체 내부에서 LET spectrum을 측정하는 것으로 이로부터는 우주 고에너지 환경의 간접적인 정보밖에 얻을 수 없다. 우리별 3호에 탑재되는 HEPT는 particle telescope을 장착하여 입사하는 입자의 각도를 22° 로 제한하고, telescope을 통하여 들어온 고에너지 하전입자를 연속적으로 배열된 4장의 Surface-barrier Silicon Detector(SSD1, SSD2, SSD3 및 SSD4)를 통과하도록 하였다[그림 9]. 이 검출기는 미국의 CRRES 위성에 탑재되어 양성자 에너지 1 - 100 MeV 내의 선속을 측정하는 Protel [19]과 유사한 형태이다. 하전입자들이 SSD1, SSD2, SSD3 및 SSD4 에 전달하는 에너지에 의해 나타나는 신호를 조합하여 입사한 입자의 종류와 에너지를 판별하도록 하였다. 또한 에너지 채널을 구성하기 위해 4장의 sensor사이에는 0.3 mm두께의 알루미늄 (Al)과 0.3 mm, 1.0 mm두께의 구리 (Cu)등의 물질을 삽입하여 입사하는 입자들이 각 silicon detector에 전달하는 에너지 (stopping power)가 구별될 수 있도록 조정하였다. SSD1, SSD2, SSD3 및 SSD4에

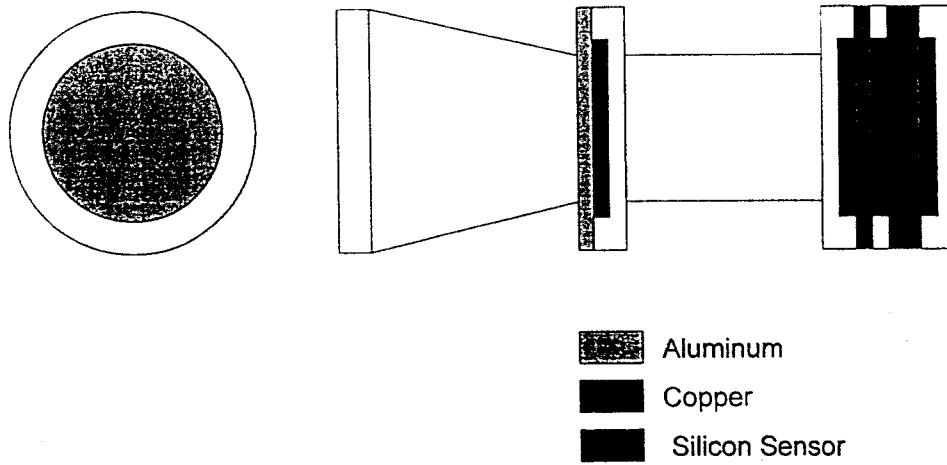


그림 9. 우리별 3호에 탑재되는 고에너지 양성자 검출기 (HEPT) 구조도

는 각각 Charge Sensitive Amplifier (CSA)와 discriminator를 연결하여 특별한 조건에 따라 입자의 종류와 에너지 범위를 판별하여 data를 기록하도록 한 것이다.

(2) $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 이용한 HEPT의 지상 보정실험

원자력병원의 사이클로트론 가속기에서 인출되는 35 MeV 양성자빔을 이용하여 70 μm 두께의 Mylar를 표적핵으로 하여 HEPT의 지상 보정실험을 수행하였다. HEPT는 수 MeV의 에너지 bin안에 들어오는 하전입자의 선속만을 측정하는 검출기이므로 에너지 스펙트럼을 잘 알 수 있는 검출기에 의하여 절대적으로 비교할 필요가 있다. 동 연구에 이용된 $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기는 두께 150 μm Si 반도체 검출기를 ΔE 로 하고 2.5 cm x 3 cm CsI(Tl) 섬광검출기를 E 로 하여 조합된 것이다. Si 반도체 검출기는 EG&G Ortec TB-015-050-150 모델로서 150 V의 인가전압이 걸리며, CsI(Tl) 섬광검출기의 PMT는 HAMMATSU H3690 모델로서 -1000 V의 인가전압이 걸린다. Mylar 표적은 탄소와 수소로 구성되어 있는 폴리머이므로 동 실험에서 가능한 핵반응은 $^{12}\text{C}(p,X)$ 와 $\text{H}(p,X)$ 로서, X는 탄성, 비탄성, 그리고 반응 하전입자에 해당하며 주로 양성자, 중양자, 삼중양자 등이 주된 단면적을 갖고 생성된다. 또한 Mylar 표적은 빔라인의 후단에 붙여져 진공을 유지하는 창 (window)으로도 활용되며, 핵반응시 생성되는 하전입자의 검출은 공기 중에서 이루어 졌다. 수십 MeV의 가벼운 하전입자들은 공기 중에서 에너지 손실이 작으며, 에너지 보정시 이 손실을 고려하였다. Mylar 표적과 검출기간의 거리는 14.3 cm로 하며, $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기와 HEPT는 빔축에 대하여 상호 대칭적인 각도, 즉 conjugate angle에 위치하도록 하여 측정하였다. 또한, 두 검출기들의 입구에는 동일한 지름의 Aperture를 가진 Collimator를 부착하였다. [그림 10]에 $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 이용한 HEPT 보정실험의 장치 개요도가 나타나 있다.

(3) HEPT 보정실험의 전자회로 구성

ΔE counter가 trigger되는 event는 많지 않을 것이라 생각되기 때문에 보정실험에 사용되는 $\Delta E - E$ 망원계측기의 전자회로 구성은 slow-slow coincidence setup을 사용한다. HEPT 보정실험의 전자회로 구성도는 [그림 11]에 나타나 있다. ΔE counter의 100 MHz discriminator의 신호에 적당한 delay time이 주어져서 coincidence gate signal이 생성되고, CsI(Tl) counter에서의 timing single channel analyzer (TSCA)에 의한 signal도 universal coincidence 부분에 공급된다. universal coincidence의 분해시간 (resolving time)은 오실로스코우프로 두 입력 timing을 보면서 최적 시간으로 맞추

Proton Beam ($E_p = 35 \text{ MeV}$)

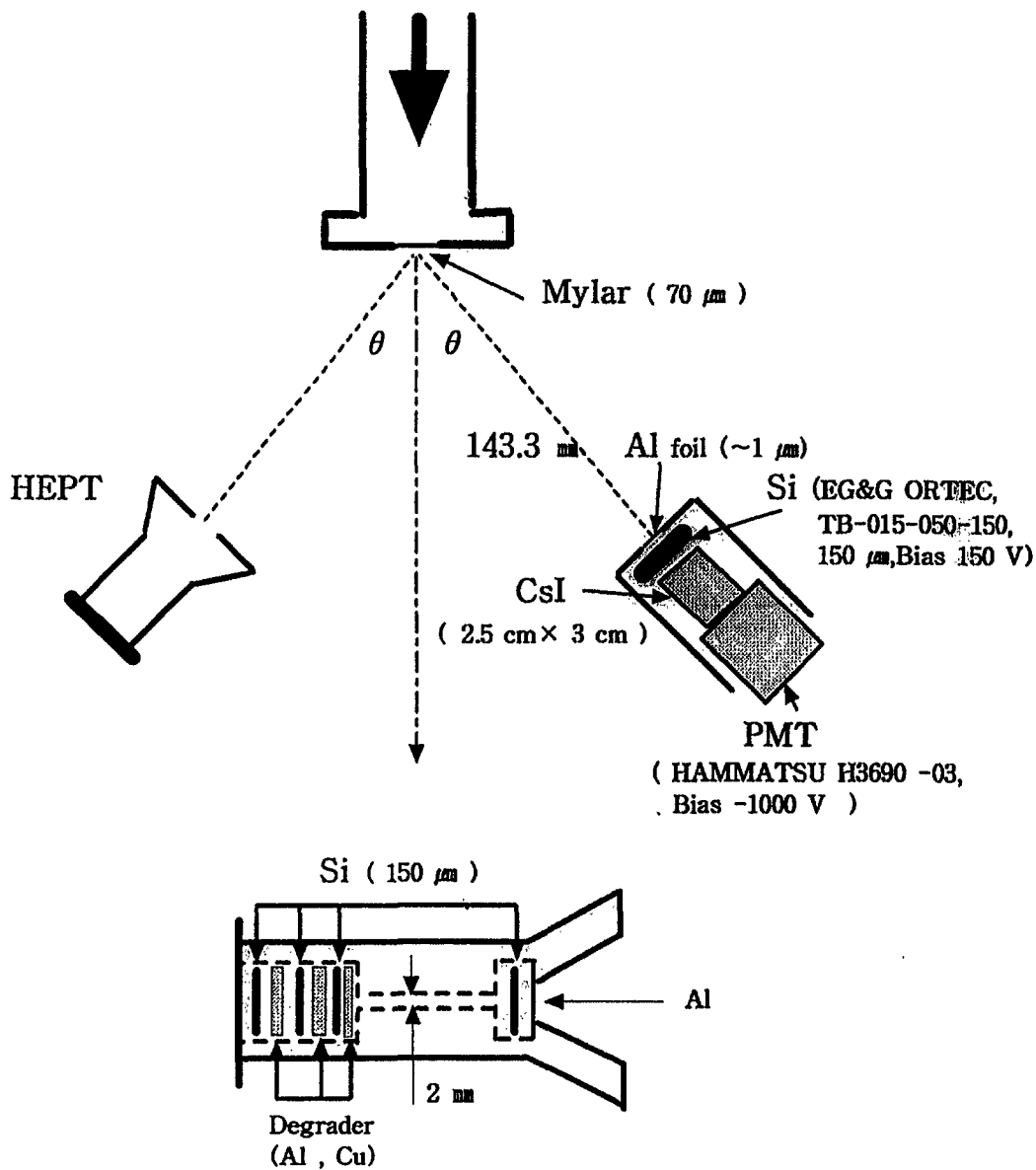


그림 10. $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 이용한 HEPT 보정실험의 장치 개요도

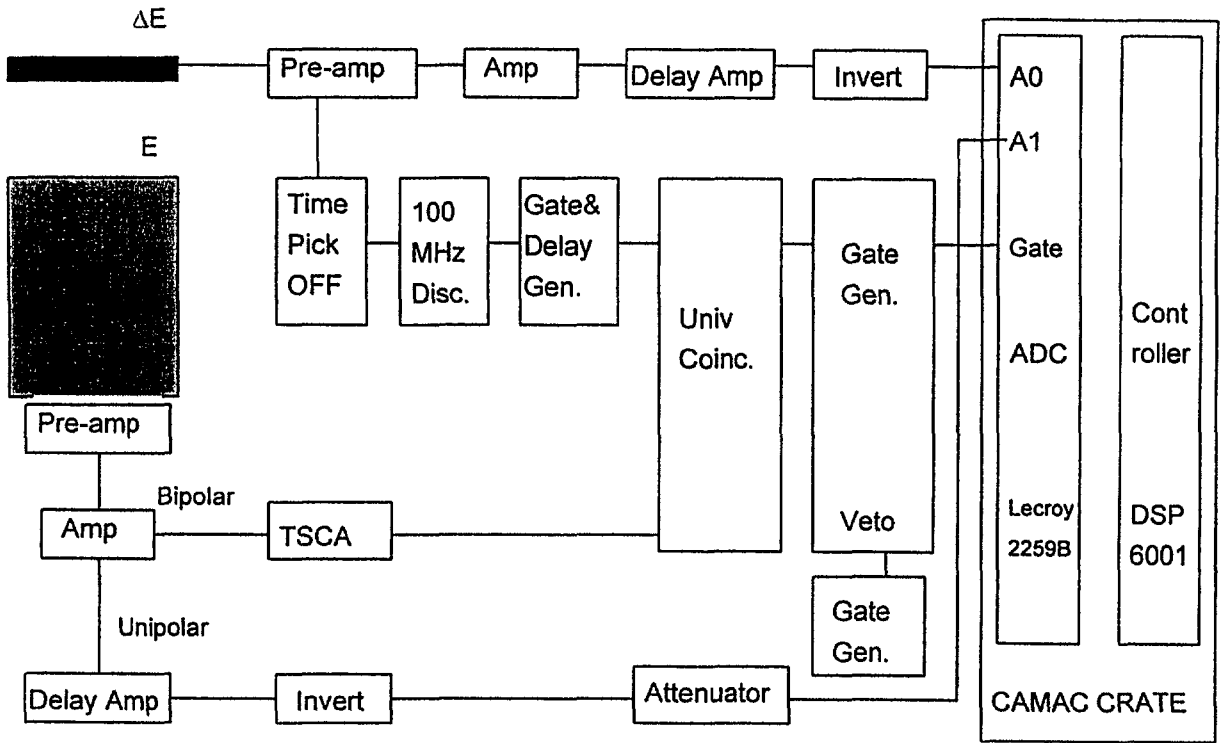


그림 11. HEPT 보정실험의 전자회로 구성도.

다. 각 ΔE counter의 신호와 E 신호는 각각 CAMAC 시스템의 analog-to-digital converter (ADC)의 sub-address A0와 A1에 연결한다. 하전입자에 의한 ΔE trigger신호와 CsI(Tl) counter에 입사하는 이차 감마선에 의한 E timing신호의 우연 동시사건 (Accidental coincidence events)을 막기 위해서 E spectrum의 threshold level은 10 MeV 이상으로 한다. 두 신호 ΔE 와 E 에 의해서 생기는 각각의 event는 event-by-event로 기록되어 DSP-6001 crate controller에 의해서 처리되어 DSP-PC004 interface card를 통해 Personal Computer에 저장된다. 이 전체 system은 13개 slot의 LeCroy mini CAMAC system이다.

3. 연구결과

각분포 측정은 30, 50, 70도에서 이루어졌으며, $^{12}\text{C}(p,X)$ 와 $\text{H}(p,X)$ 의 핵반응에서 생성되는 잔류핵으로부터 방출되는 경이온 하전입자의 에너지를 계산하여 우리의 $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기의 에너지 보정을 하였으며, 시스템의 에너지 손실 또한 고려하였다. 다양한 각도에서 이루어진 각분포 측정은 에너지 보정의 신뢰도를 기하기 위한 목적에서 수행되었으며, 더불어 보정실험의 재연성에 대한 보장을 확보하기 위한 것이기도 하다. $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기의 동작 원리는 아래에 나타난 바와 같이 Bethe formula에 의해서 설명할 수 있는 데, 질량이 M 이고 energy가 E 인 비상대론적 입자의 경우에 Bethe formula는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$E \frac{dE}{dx} = kM z^2$$

이 때, k 의 값은 에너지에 의해서 조금 변하는 상수이므로 ΔE 부분에서 측정된 dE/dx 값과 CsI(Tl) counter에 의해서 측정된 energy loss E 을 통해서 입사하는 입자의 질량 M 과 전하량 z 를 알 수 있으므로 이 원리를 통해서 입자를 구별할 수 있다. [그림 12]에는 동 실험에서 측정된 경이온 하전입자들의 분포가 나타나 있다. 양성자, 중양자, 삼중양자 군에 속한 다양한 에너지를 가진 경이온 하전입자들이 잘 분리되어 나옴을 볼 수 있다. [그림 13]은 양성자와 중양자를 에너지 축인 E 축에 투영하여 얻어진 일차원적인 스펙트럼이다. [그림 14]는 양성자만을 E 축에 투영하여 얻어진 일차원적인 스펙트럼으로서 탄성산란된 양성자, 즉 $^{12}\text{C}(p,X)$ 에서 $X=p$ 혹은 p' 에 해당하는 것이다. 우리는 측정의 신뢰도를 높이기 위하여 양성자만의 스펙트럼을 이용하여 HEPT의 보정 결과를 분석하였다. HEPT의 에너지 bin에 대응하는 양성자 에너지 구간을 설정하여 이 구간 안에 측정되는 양성자의 Counts를 비교해 보았다.

2D Plot ($\Delta E-E$) $^{12}\text{C}(p, X)$ $E_p = 35 \text{ MeV}$
 $\theta_{\text{lab.}} = 30^\circ$

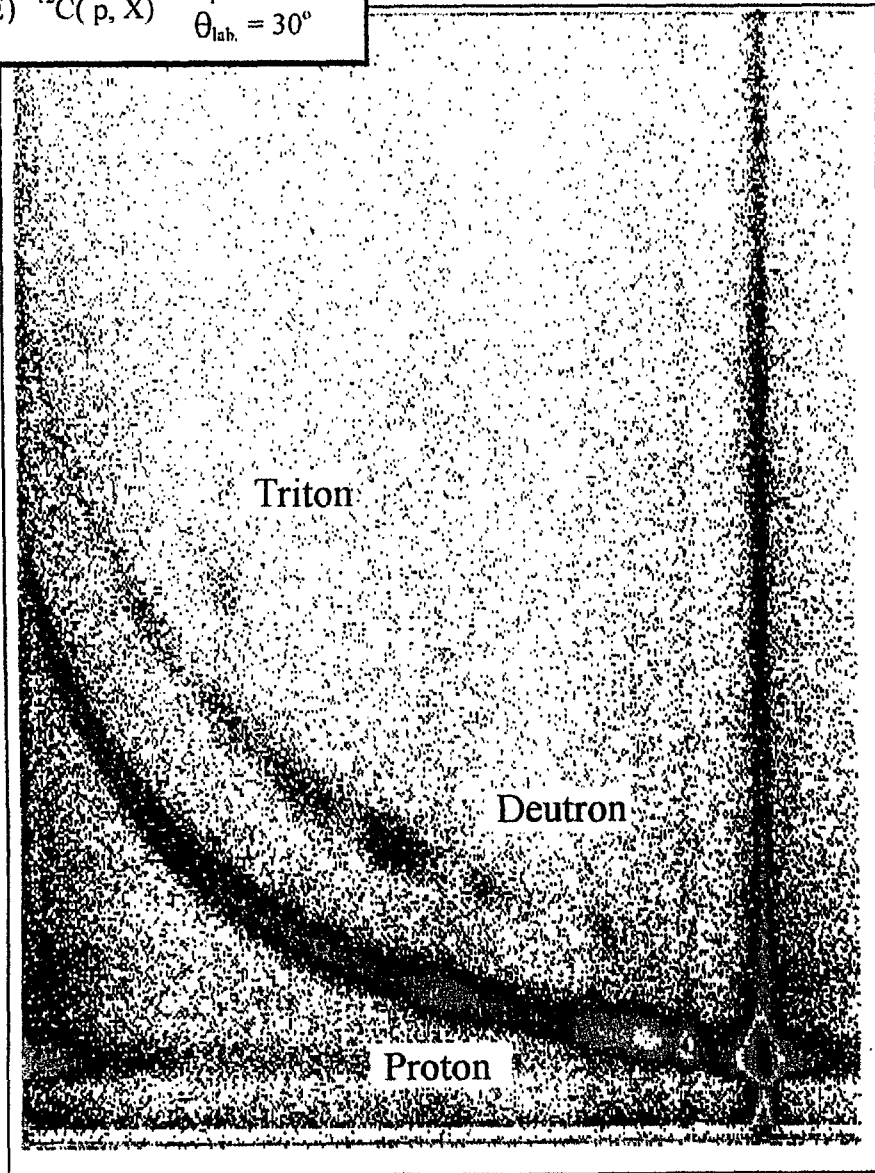


그림 12. $\Delta E - E$ 2차원 산란입자 스펙트럼.

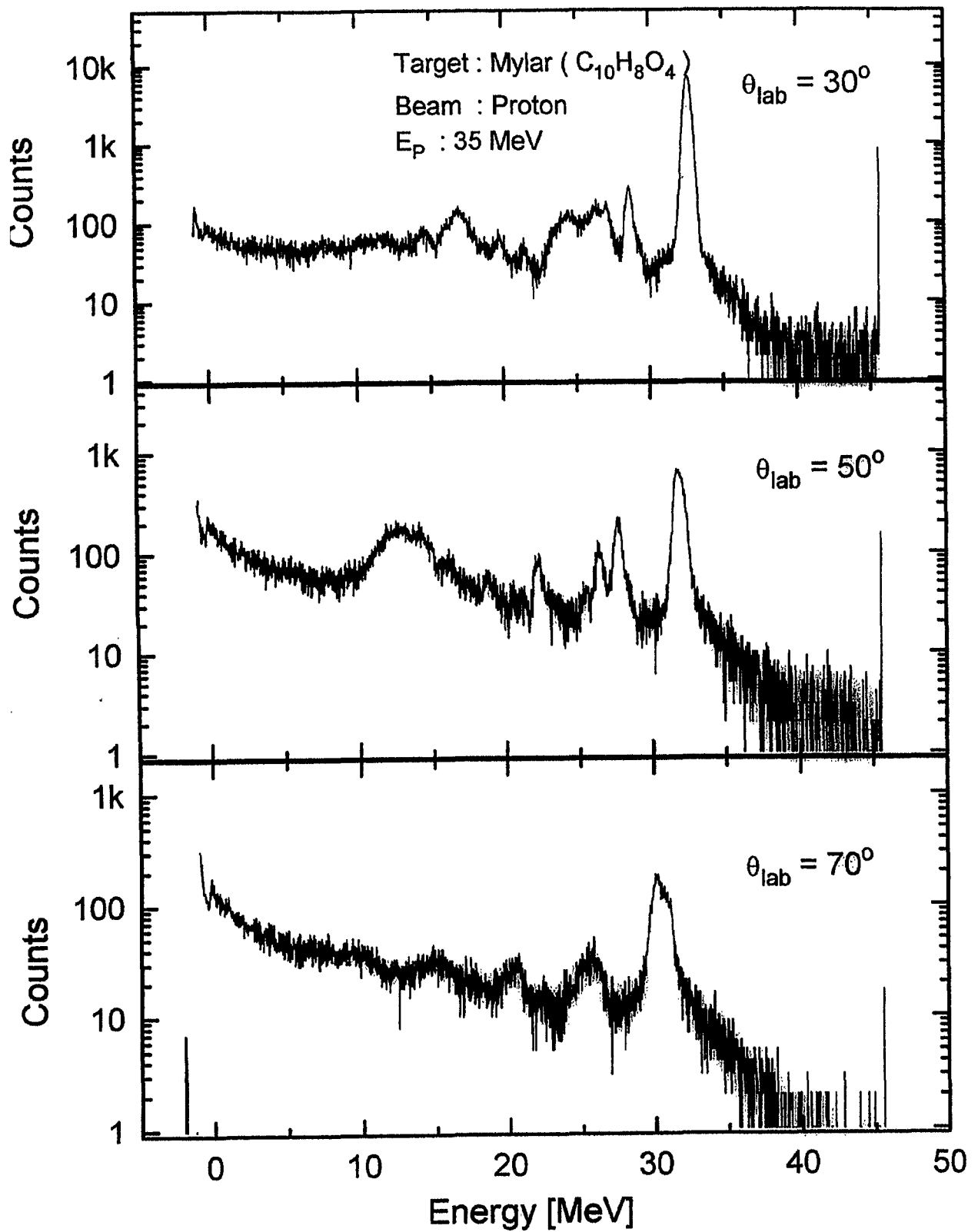


그림 13. 양성자, 중양자 스펙트럼.

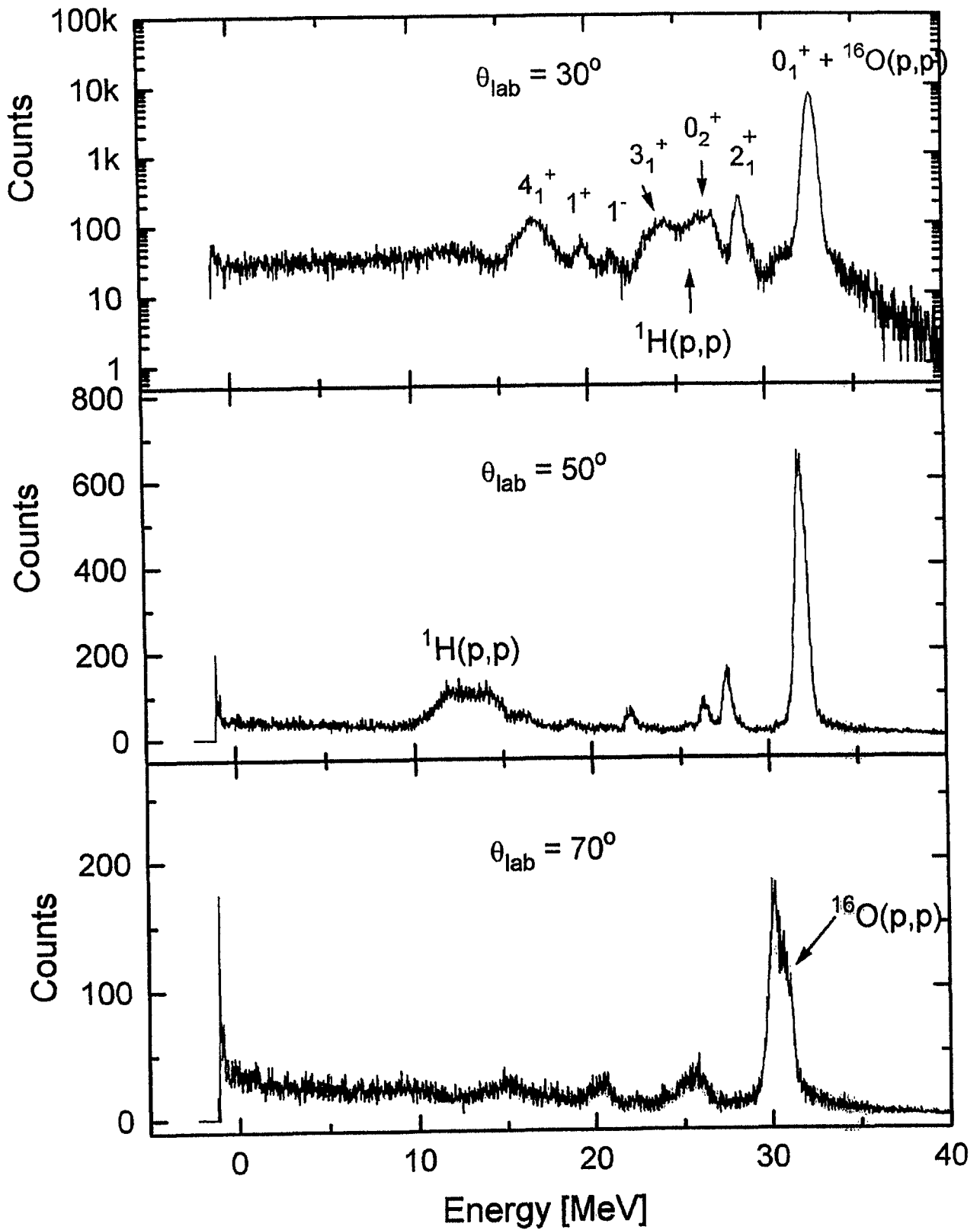


그림 14. 탄성 및 비탄성산란 양성자 스펙트럼.

제 3 절 방사능핵종빔의 연구개발을 위한 ECR 이온원 설계

1. 개요

1960년대 후반 플라즈마 융합 연구를 위해 R. Geller와 H. Postma에 의해 제안된 전자사이클로트론공명 (Electron Cyclotron Resonance, 이하 ECR)을 이용한 ECR 이온원은 이후, 많은 과학분야에서 성능이 향상되었으며, 특히 다가이온을 매우 효율적으로 만들어내는 특징으로 인해 원자 및 핵물리, 표면물리, 재료공학 등에서 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 다가이온을 만들어내기 위한 중요한 요소들로는 전자의 밀도와 온도, 그리고 플라즈마의 가둠 (confinement)시간 등이 있다. 기존의 ECR 이온원에서는, 자기미러 (magnetic mirror)가 포물선모양의 자기장을 형성하고, 마이크로파의 주파수와 전자의 사이클로트론 주파수가 같은 곳에서 타원-면적형의 ECR존이 만들어진다. 이후, 보다 많은 다가이온을 얻기 위해 여러 가지 방법이 시도되어 왔다. 그중 다중주파수 (multi-frequency heating)를 이용한 이온원은 ECR존의 수(數)와 폭을 넓히는데 매우 유용한 방법으로 증명이 된 바 있다 [20]. 플라즈마실 내벽을 코팅하는 wall coating [21]은 이차 전자를 발생시켜 보다 많은 이온화를 이루기 위하여 시도되었다. Afterglow effect [22]를 이용하여 마이크로파를 펄스형으로 주입함으로써 빔의 세기를 10배 정도 강화시킨 이온원도 개발되었다. 그러나, 이러한 노력들에도 불구하고, 전체 플라즈마 중 마이크로파와 전자의 공명에 참여하는 율은 여전히 작은 부분을 차지하였다. 즉, 전자는 오직 ECR존에서만 가속이 되어 이온화에 참여하는 것이다. 더욱이, ECR존은 플라즈마 체적에 비해 매우 작아서 마이크로파의 흡수는 극히 일부분에 제한되어 있다. 좀더 효율적인 다가이온의 생성을 위해서는 무엇보다도 보다 큰 ECR존이 필요한 것이다. Alton등에 의해 제안된 “체적형” ECR 이온원 [23,24]은 ECR존의 크기를 크게 하는데 매우 유용한 방법이다. 이번의 연구과정에서, 우리는 자기미러를 위해 두 개의 솔레노이드를 사용하고, 플라즈마실 중앙부에 편평한 자기장을 만들기 위해 철로된 return yoke가 들어간다. 그와 동시에 플라즈마실 벽으로 빠져나가는 전자의 양을 최소화하기 위하여 NdFeB 영구자석 12개로 이루어진 지름방향의 자기장을 형성한다.

2. 연구내용 및 결과

(1) 축방향 미러 자기장

이번 이온원에는, 미러자기장을 가변토록 두 개의 솔레노이드 코일 (안지름 40 mm,

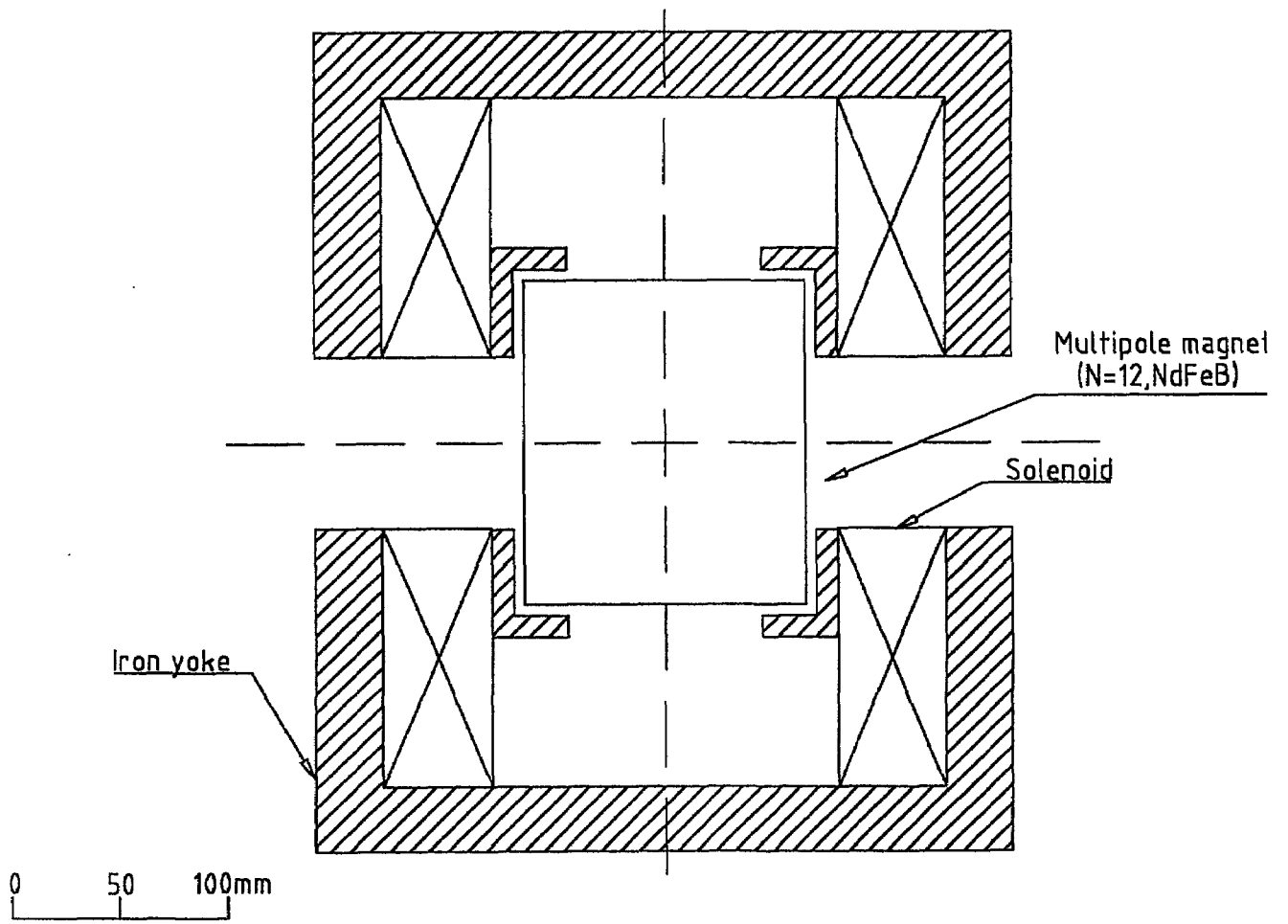


그림 15. “체적형” ECR 이온원의 자기시스템 개요도.

바깥지름 160 mm, 두께 50 mm)을 사용한다. 자기시스템은 [그림 15]와 같다. 여기에 전력소비를 줄이기 위해 두께 30 mm의 return yoke를 더하고, 플라즈마실의 편평한 자기장 형성을 위하여 yoke를 첨가한다. 또한 기존의 “면적형” 이온원과 “체적형” 이온원의 연구를 병행할 수 있도록 yoke는 제거, 부착이 용이토록 제작한다. 최대자기장과 최소자기장의 비, 즉 mirror ratio는 마이크로파가 14 GHz일 때 $B_{max}/B_{min} \approx 2.4$ 이다. 이렇게 형성된 큰 ECR존은 플라즈마의 전 영역에 걸친 전자와 마이크로파와의 공명이 가능해진다. 이러한 많은 hot 전자의 생성은 보다 많은 다가이온의 생성을 가능케 한다. [그림 16]과 [그림 17]은 POISSON code [25]를 이용한 시뮬레이션의 결과이다.

(2) 지름방향 자기장

플라즈마를 지름방향으로 가두기 위하여 기존의 ECR 이온원에서 통상적으로 사용 하였던 여섯 개의 영구자석 대신, 이번에는 NdFeB 영구자석 12개를 사용하여 “체적형”을 구현토록 하였다. 잘 알려진 바대로 지름방향의 자기장은 다음과 같이 표현된다. $B_r = B_0 r^{2N-1}$ [26] 즉, 자석의 수를 증가할수록 보다 편평한 자기장이 형성된다. 그리하여, 지름방향의 ECR 체적이 보다 쉽게 얻어질 수 있다. 자석은 12개의 NdFeB를 이용하며 각각 가로 14 mm, 세로 30 mm이다. [그림 18]과 [그림 19]는 OPERA-3D [27]를 이용한 3차원 자기장 분포를 시뮬레이션한 결과이다.

(3) 마이크로파 시스템

마이크로파는 지름방향의 하나의 포트를 이용하여 6.45에서 14 GHz까지 가변토록 하였다. [그림 17]은 마이크로파의 주파수에 대응한 축방향 자기장을 나타낸 것이다. 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{ce} &= eB/m = \omega_{rf} , \\ f_{ce} &= 2.8B_{ecr} \text{ (GHz) } (B_{ecr} \text{ 은 kilogauss이다.}) \end{aligned}$$

3. 논의

ECR존의 크기를 확장시키는 것은 다가이온의 생성을 위한 매우 효율적인 방법이다. 다중주파수 heating, 광폭밴드 주파수 [24] 그리고 “체적형” ECR 이온원은 이러한 목적을 위하여 사용되어지는 방법들이다. 앞으로의 연구는 Alton등 [24]과 Heinen등이 [28] 성공적으로 그 성과를 입증한 “체적형” ECR 이온원의 제작을 수행할 것이며, 이번 연구는 이온원의 설계와 자기장의 시뮬레이션을 수행하였다. 방사능핵종빔 개발과

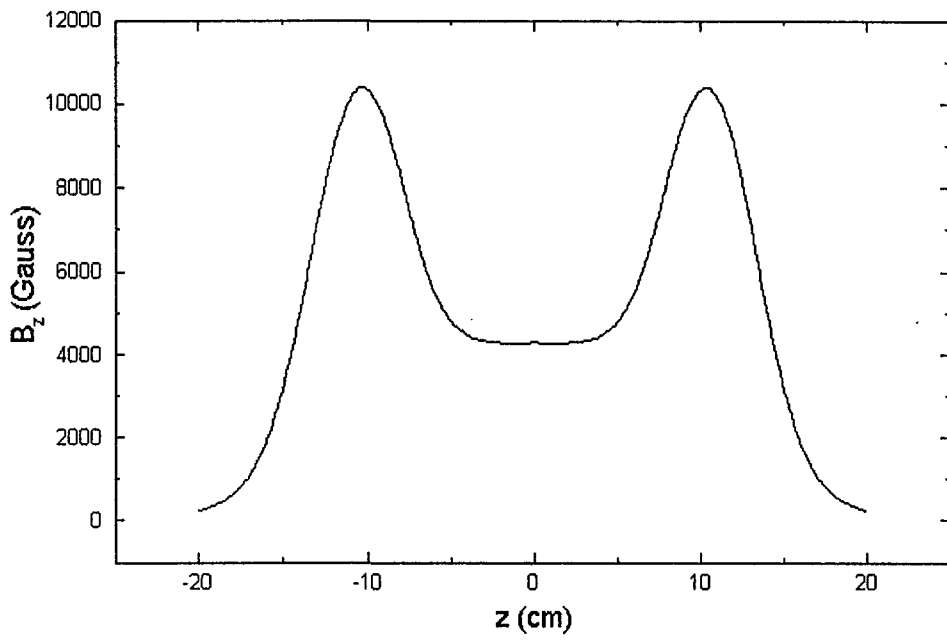


그림 16. 14 GHz용 “체적형” ECR 이온원의 축방향 미러 자기장

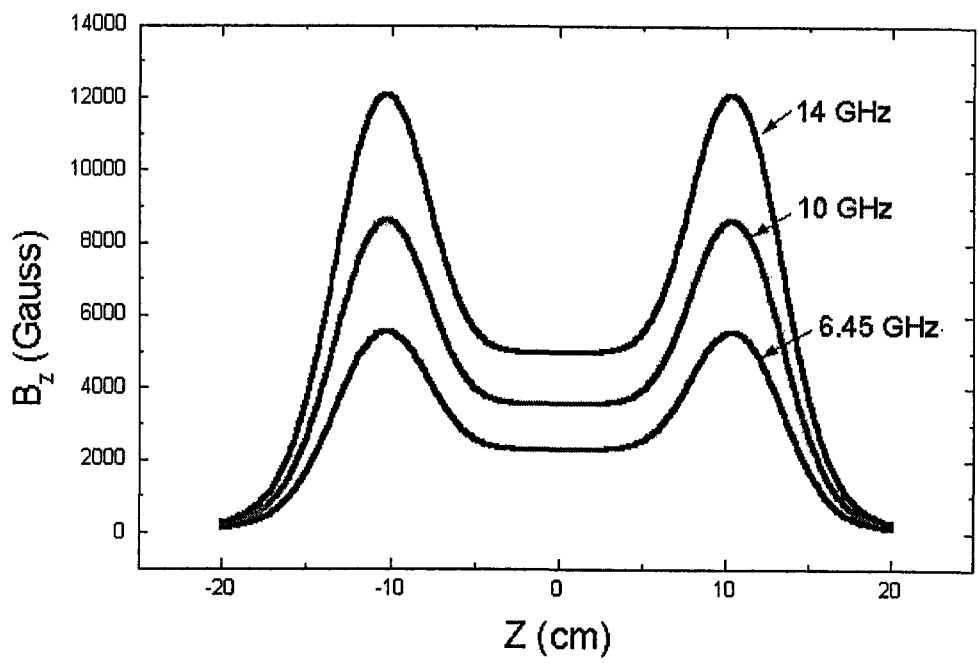
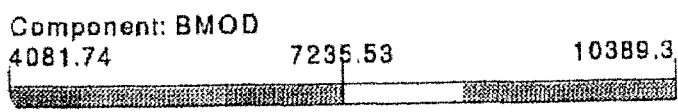
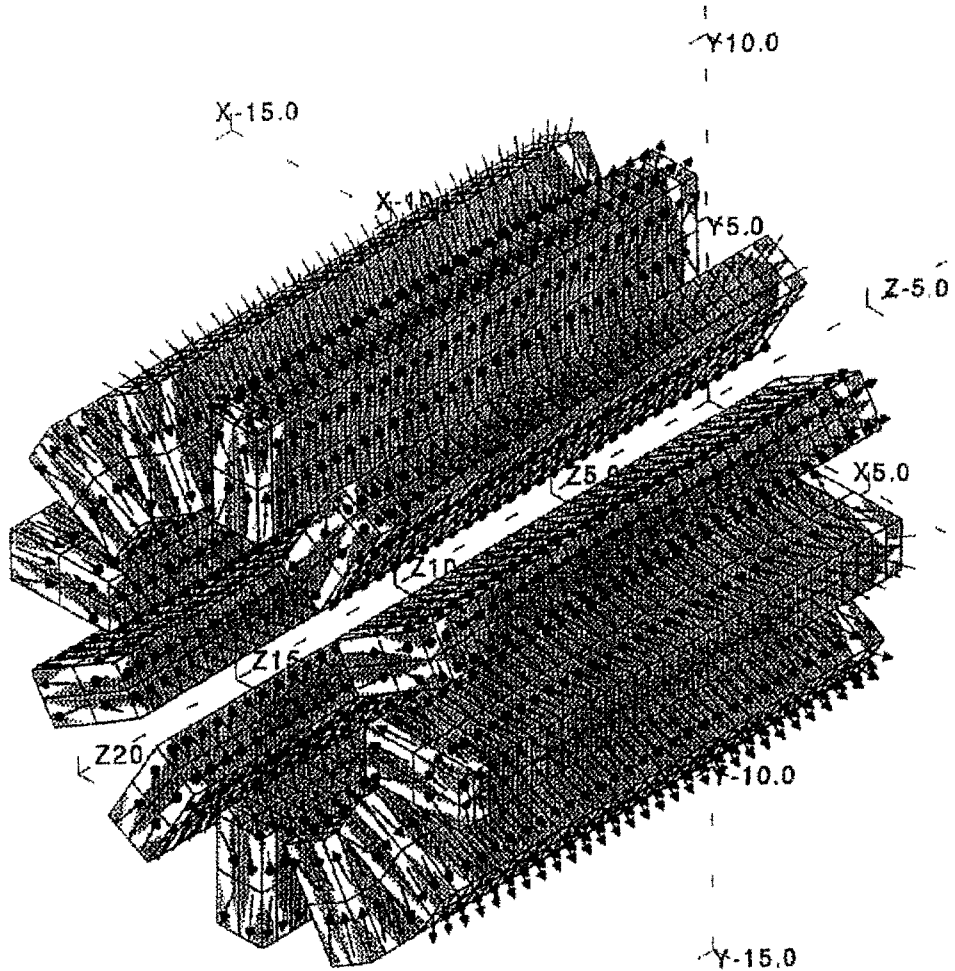


그림 17. 6.45 - 14 GHz용 “체적형” ECR 이온원의 축방향 미러 자기장



12중극자에 의하여 발생하는 지름방향 자기장의 삼차원적인 분포.

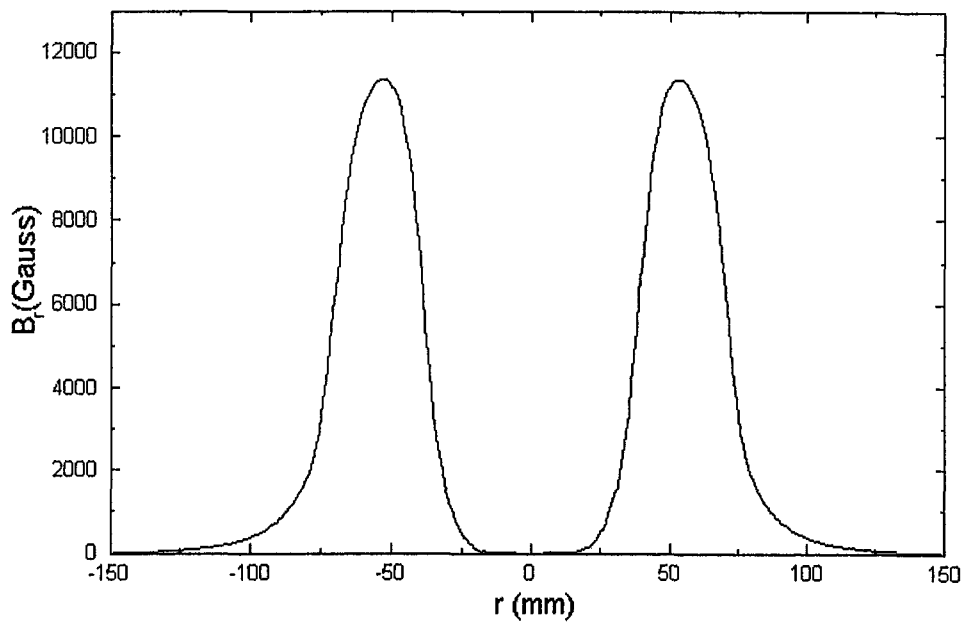


그림 19. 지름방향 자기장과 반지름 거리와의 관계.

이용을 위한 국제협력연구의 일환으로 방사능핵종빔 개발의 첫단계 작업으로 ECR 이온원의 설계연구를 일본 KEK Tanashi분소 연구진과 공동으로 수행하였으며, 2회의 국내학술발표와 1회의 국제학술발표를 하였다. “The Compact ECR Ion Source for Charge Breeding” (한국물리학회 회보, Vol.16, No.2, p.291, 1998. 10.); “ECR 이온원에 관한 연구” (AMS Korea '98 International Symposium, 서울대 기초과학교육공동기기원, 1998. 10.); “Design of a Compact ECR Ion Source with Ku Band” (Particle Accelerator Conference, PAC'99, New York, USA, 1999. 3.)

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

제 1 절 인빔 감마선 분광학 연구시설 확보

원자력병원의 사이클로트론 가속기에 감마선 전용빔라인의 설치를 완료하여 알파빔에 의한 핵반응을 통해 다수의 인빔 감마선 분광학 연구를 추진하였다. 또한 오늘날 감마선 분광학 연구에 필수적인 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광기 시스템을 개발 중에 있으며, 올 상반기 본격적인 가동에 들어갈 예정이다. 이로 인하여 국제적 수준의 핵자료 생산 및 감마선 분광학 측정기술의 확립할 수 있는 연구기반시설을 갖추게 되었다.

국내에서 유일하게 중핵의 쿨롱장벽을 극복할 수 있는 빔에너지를 가진 원자력병원의 MC-50 사이클로트론의 활용도를 높이며, 이의 전제조건인 빔분석 및 분광장치의 개발에 관한 연구가 촉진될 것이다. 둘째, 희토류와 악티나이드 핵종에서 발현하는 흥미로운 핵구조 연구에 있어서, 경이온을 이용한 국내에서의 연구가 중이온을 이용한 일본 및 미국에서의 연구와 상호보완적인 관련이 있으므로 국내에서 얻어지는 결과는 국제적인 수준의 연구로 평가될 것이다. 셋째, 잔류핵판별기인 FMA (Fragment Mass Analyzer)와 Gammasphere와 같은 감마선 분광장치를 이용한 실험에서 얻어진 기술축적은 아시아, 태평양 지역에서의 고분해능 감마선 분광학의 첨단화에 기여할 것으로 예상된다.

핵 및 입자물리 실험의 대부분이 외국의 시설을 이용하여야만 하는 현실에서 그나마, 국내에서 섬광검출기와 고순도 게르마늄 검출기를 사용한 In-beam 감마선 분광학 연구는 국내의 자체적인 분광학 연구조직과 시설을 태동시키는 촉진제가 될 것이다. 포항공대의 방사광 가속기와 서울대 공동기기원에 최근 도입되어 가동을 시작한 3 MV 탄뎀 정전가속기를 이용한 본격적인 핵물리 및 응용연구가 활성화될 시점에서 이에 대비한 연구인력의 확보는 시급한 과제이다. 실험에 직접적인 연구경험을 습득할 수 있는 국내 가용시설의 적극적인 활용은 국가의 전략적인 차원에서도 필요하다.

원자핵연구의 감마선 분광학과 응집물리연구의 가시광선 분광학에서 실험수행을 위한 상호보완적인 실질적 필요성의 예를 들면, 시간분해적 (Time-resolved) 광자분광학의 경우, 펄스빔을 이용한 원자핵 지연분광학이 시그널 처리와 획득방법에 있어 펄스레이저를 이용한 물성연구의 실험기법과 많은 측면에서 동일하다. 그러나, 이에 소요되는 분광기기 및 전자기기 대다수는 20기 정도의 핵계측 전자기기 (NIM)로 구성되어 막대한 연구기기 구입비용을 요구한다. 상호 실험기법을 지원하며 부족한 광자분광기기를 공유함으로써 창출되는 연구효과는 비용과 시간에 있어 실로 크다고 보지 않을 수 없다.

제 2 절 하전입자 망원계측기에 의한 핵반응 연구

감마선 분광학 외에, 양성자와 알파입자에 의한 핵반응을 이용한 하전입자 검출연구에 있어서도 괄목할 만한 진전을 거두었다. 얇은 Si 반도체 검출기를 ΔE , 1인치 CsI(Tl) 섬광체를 E 검출기로 하는 조합형 $\Delta E - E$ 하전입자 망원계측기를 이용하여 핵반응단면적 측정 연구를 수행하였으며, 반도체신소재, 태양열소자의 우주환경에서의 방사선손상연구와 우리별 3호에 탑재될 고에너지 입자검출기의 에너지, 효율 보정 연구 등을 통하여 사이클로트론 가속기의 대외 기여도를 높였다.

하전입자를 판별하는 망원계측기의 자체 개발은 핵반응 단면적 측정에 필수적이다. 섬광체 및 반도체 검출기의 특성연구와도 밀접하게 연관되어, 검출기 개발연구에 적절한 연구분야이기도 하다. 이를 통해 수십 MeV의 양성자, 알파빔 등의 경이온 입자빔을 이용한 산·학·연 핵물리 응용 연구가 활발히 진행되리라 예상된다.

위성산업이 각광을 받을 21세기 국내 산업의 기반연구 분야인 차세대 반도체, 태양열소자 등의 우주환경에서의 방사선손상연구나 Single Event Upset과 같은 통신장애 연구에 곧바로 이용되어질 것이다. 태양풍에 의한 지구자기권 변화와 우주환경을 탐사하는 임무를 띤 과학연구용 저궤도위성인 우리별 3호를 시작으로 하여 고에너지 입자검출기를 탑재하는 작업을 진행 중에 있다. 양성자 텔리스코프로 제작되는 이 검출기의 에너지 보정과 효율 측정 실험은 우리별 사업의 성공여부에 커다란 영향을 끼칠만큼 본 연구에서 수행된 일련의 지상 보정실험은 그 의의가 크다고 할 수 있다.

제 3 절 방사능핵종빔 연구와 ECR 이온원 설계연구

방사능핵종빔 개발과 이용을 위한 국제협력 연구의 한 분야로서 일본 KEK연구소와 ECR 이온원의 설계를 공동으로 시작하였으며, 이의 결과를 토대로 실제적인 제작에 들어갈 예정이다. 사이클로트론에서 중이온빔을 인출하는 경우 가장 대표적으로 이용되고 있는 이온원이 ECR 이온원이지만, 현재 원자력병원의 사이클로트론 가속기에는 이 이온원이 없으며 PIG 이온원에 의한 경이온 (양성자, 알파입자)의 인출만이 가능하다. 따라서 동 ECR 이온원의 연구개발은 사이클로트론 가속기에서 향후 중이온빔을 인출하는 데 있어서 중요한 기초연구가 될 것이다..

ECR 이온원은 수소이온에서 우라늄이온에 이르는 광대역 질량수대와, 고전류, 다가이온상태, 낮은 에미턴스를 가진 이상적인 이온빔을 생성하는 이온원으로서, 핵 및 원자력 관련 입자빔가속기의 이온원과 레이저광학과 결합된 이온뎀 및 페닝뎀에서의

원자물리연구 등의 기초연구를 비롯하여, 고전류 안정원소 이온주입에 의한 표면개질 및 반도체 소자개발, 방사성 동위원소빔의 이온주입에 의한 신개념의 방사선 치료 등의 광범위한 응용연구에 이용될 것이나, 아직 국내에서 실제로 가동 중인 ECR 이온원은 아직 없다. 기존의 ECR 이온원은 입력 마이크로파의 에너지가 ECR 표면에만 전달되는 surface-type 으로서, 거울자석에 의한 축상자기장이 축상중심에서 최소가 되도록 설계된 min-B의 개념에 의하여 설계, 제작된 것이나, 최근, 마이크로파 에너지의 전달효율을 극대화할 수 있는 “체적형” ECR 이온원의 신개념이 제안되었으며 세계적으로도 극히 일부 연구기관에서만 이 개념을 실현시키는 제작기술을 막 시도하기 시작하였다. 동 연구에서도 “체적형” ECR 이온원의 설계를 수행하였으며, 이는 국제적인 선도기술의 하나로 그 의의가 크다고 볼 수 있다.

“체적형” ECR 이온원의 장점은 마이크로파 발생 및 증폭기술과 도파관 제작기술이 안정되어 있는 2.45 GHz대의 낮은 주파수에서도 기존의 “면적형”에 비해 약 100배 정도의 고전류빔을 생성할 수 있을 것으로 추정되며, 마이크로파 기술, 전자석 제작기술, 화합물 강자성체의 개발, 진공장치, 이온빔 진단장치의 개발 등의 복합적인 요소기술을 필요로 하며, 이는 국내에서 원천기술력을 확보하는 미래 산업의 창출에 기여할 것이며, 고전류 이온빔, 다가이온 상태의 생성, 고분해능 질량분리, 방사능핵종빔의 생성 등의 핵심기술이 연구계와 산업계에서 필연적으로 요구될 21세기를 대비하여 설계와 제작의 전과정을 국산 부품과 자체기술력으로 추진하여야 할 필요성이 있다고 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광학연구와 하전입자 검출

국내에서 최초로 개발되는 고분해능 콤프톤억제용 감마선 분광학연구는 이의 개발이 성공적으로 수행되는 경우 국제적 수준의 핵자료 생산과 핵구조 연구에 큰 기여를 할 것이다. 다중검출기에 의한 감마-감마 동시계수 분광학은 CAMAC을 바탕으로 한 실시간 데이터수득시스템의 확보를 전제로 하고 있다. 인터페이스와 분석 및 온라인 프로그램 개발은 국내의 분광학관련 소프트웨어 기술력을 높이는 데 기여할 것이다. 하전입자를 판별하는 텔리스코우프 검출기의 자체 개발은 핵반응 단면적 측정에 필수적이다. 섬광체 및 반도체 검출기의 특성연구와도 밀접하게 연관되어, 검출기 개발연구에 적절한 연구분야이기도 하다.

'80년대 이후 중이온가속기와 하전입자 질량분석기의 기술적 진보에 힘입어 안정성 한계영역 근방의 핵구조를 탐구하려는 시도로 콤프톤억제형 감마선 검출기는 '80년대 중반부터 구미 각국이 경쟁적으로 연구개발에 착수하였다. 이러한 감마선분광기의 출현으로 희토류핵인 디스프로시움에서 초변형핵의 존재가 최초로 발견되었으며, 다양한 질량수 영역에서 극도로 불안정한 핵종의 새로운 발견이 이루어져 왔다. 또한, 대용량 양성자가속기와 고에너지 중이온가속기를 이용한 방사능핵종빔의 생성으로 기존의 한계영역이 확장되고, 우주의 물질생성에 대한 획기적인 천체물리학 연구가 21세기 들어 활발하게 진행될 것이다.

최근, 동 연구주관기관인 중앙대와 서울대에 각각 1대씩의 BGO-Ge 콤프톤억제형 검출기가 도입되어 국내에서 유일하게 핵반응에 의한 감마선분광학을 수행할 수 있는 원자력병원의 사이클로트론 가속기에 감마선 전용빔라인을 건설하여 알파빔에 의한 고분해능 핵구조 및 핵자료 연구가 시작될 전망이다. 또한, 핵연료의 균일도 조사와 중성자 유도반응연구를 위하여 원자력연구소 하나로 연구용원자로에 동종의 검출기가 도입될 예정이다.

그러나, 이 분야에 국내 전문연구인력의 기반이 아직도 취약하며, 시설면에 있어서 선진국에 비하여 대단히 열악한 상황이다. 특히, 검출기 결정성장과 고속 디지털기술의 관련 산업기반구조는 거의 전무한 상황이다. 이는 핵 및 원자력관련 기초과학분야에서의 수요보다 핵의학 및 방사선과학 등의 응용과학에서의 수요가 앞으로 점증할 것으로 전망되며 이에 대한 산업기반 조성은 필수적으로 요구될 것이다. 수 인치 크기의 단결정을 성장시킬 수 있는 기반산업과 고속의 데이터를 처리하는 분광학 전자장비를 생산하는 전자산업이 전무하다고 볼 수 있다. 그러나, 이미 국내에 3대나 도입된 양전자단층촬영기 (PET)의 핵심재료가 콤프톤억제형 감마선 검출기에서 거부신호를

출력하는 BGO 섬광체와 동일한 재료임을 볼 때, 박막가공 위주의 결정성장 산업에서 검출기 제작에 필요한 체적형 (Bulk) 결정성장 산업의 태동이 필요한 시점이기도 하다.

제 2 절 펄스빔과 아이소머핵을 이용한 초미세상호작용 연구

동 연구개발이 다년간 지속적으로 추진될 경우, 펄스빔과 감마선을 탐침으로 하는 시간분해적 분광학으로 초미세상호작용을 통한 다양한 물성 연구가 가능할 것으로 전망한다. 사이클로트론의 펄스빔을 이용한 지연분광학 (Delayed spectroscopy) 실험이 그것이다. 50 MeV 양성자빔의 경우 25.89 MHz의 RF에 의하여 가속되는데, 이는 약 40 nanosecond의 반복주기를 가진 펄스빔을 의미한다. 사이클로트론의 경우 전형적인 펄스빔폭은 3 nanosecond 이내이므로, 희토류 및 악티나이드 계열의 다양한 핵종에서 발견되는 아이소머 상태의 수명에 근접함으로써 핵구조를 규명하는 수명, 전자기적 다중극자의 정밀측정에 매우 유용하다. 아이소머핵의 분광학적 물리량은 수명, 자기쌍극자, 전기사중극자로 특징된다 [29]. 새로운 아이소머핵의 발견은 수명의 측정으로 찾아내고 전자기 다중극자의 측정은 핵스핀과 초미세상호작용을 하는 강력한 전자기 섭동장 (Perturbation field)을 필요로 하고 있는데 이는 강자성체의 내부자장이나 비입방 (Non-cubic) 결정구조를 가지는 금속의 전기장 Gradient를 이용한다 [30]. 비등방적인 감마선의 각분포는 핵스핀의 세차운동에 따라 같이 주기적인 회전형태를 보이므로 시간분해적인 방법으로 이를 관측할 수 있다. 시간분해적 섭동각상관 (Time-differential Perturbed Angular Correlation: TDPAC) [31-33]으로 알려져 있는 이 기술은 NMR, Mossbauer효과 등과 더불어 초미세상호작용의 연구기술로 널리 이용되고 있다.

오늘날 그 연구가 활발하게 진행되고 있는 자성체 화합물 반도체의 국소적 결정결함, 미시적 전자기장 탐사에 아이소머핵을 탐침으로 하여 초미세효과를 측정하는 실험 기법의 적용은 물리학을 비롯한 응용과학 등 광범위한 적용력을 발휘할 것으로 예상된다. 또한 비정질 자성 (Amorphous Magnetism) 연구에 주로 이용되는 핵자기공명 (NMR), Mossbauer효과 등의 전통적인 기법에 비해 자장 분해능, 탐침의 광범위한 선택, Skin depth 문제의 극복 등의 여러 측면에서 우위의 장점을 가진 기법이 아이소머핵을 이용한 시간분해적 초미세상호작용 연구라 할 수 있다. 그 한 예로서, 고온초전도체의 발생원인이 구성 원자들 간에 존재하는 자성 질서 (Magnetic Ordering)의 규명으로부터 해결하려는 세계 각국의 자성 연구가 진행되던 당시, 캐나다의 TRIUMF 핵연구소의 Umemura등이 행한 뮤온 스핀회전 (Muon Spin Rotation; μ SR) 기법으로 CuO 평면상에서 Cu와 O 원자간에 자성 질서가 스핀이 서로 반대방향으로 정렬된 Antiferromagnetism이라는 사실을 밝혀 내었다. 이 발견은 고온초전도체의 자성 연구

에 있어 가장 비중있는 연구결과의 하나로 평가되고 있다. 뮤온 스핀회전 기법은 2.2 microsecond의 수명을 가진 뮤온의 모멘트가 국소적 자장하에 초미세상호작용을 느끼면서 세차운동을 한다는 원리에 그 바탕을 두고 있는데, 이는 아이소머핵을 이용한 시간분해적 초미세상호작용 연구와 기법의 원리에 있어 거의 완벽하게 동일한 것이라 할 수 있다.

제 3 절 Volume-type ECR 이온원의 제작과 이용

ECR 이온원에 대한 국내의 기술수준은 유아기적 이온원 제작 기술수준에 미치고 있으나, ECR 이온원이 개발된다면 일차적으로는 다양한 중이온빔의 생성과 가속에 대한 연구가 활발하게 일어날 것이며, 원자력병원에서 제작 중인 PET전용 13 MeV 사이클로트론 가속기의 외부이온원, 암치료용 방사성 핵종의 생산이 가능하며, 반도체산업 및 재료공학과도 연계, 이온의 식각 및 주입기술에의 응용이 실행되어질 수 있으며, 이온빔에 기반한 기초과학연구에도 활용될 것으로 전망된다.

ECR 이온원의 활용도는 첫째, 원자력분야에서 방사능핵종의 포획, 온라인동위원소 분리기술 (ISOL)의 국내개발, 서울대 기초과학교육 공동기지원에서 수행될 원자력관련 분야 연구, 그리고 중입자빔 이용기술, 빔진단 기술, 질량분리 기술 연구 등에 활용될 것이다. 둘째, 기초과학분야 분야로서, 제3세대 극미량 질량분리에 의한 연대측정 (AMS) 신기술 개발, 원자핵 및 이온의 질량, 모멘트 등의 정밀 측정 연구. 셋째, 의학분야 연구로서, 방사성동위원소의 이온주입에 의한 방사선 치료의 신기술 창출, 원자력병원 사이클로트론 가속기의 외부이온원으로 활용하여 희소 동위원소 생산을 위한 기반 구축에 활용될 것이다. 넷째, 공학 및 응용연구 분야로서, 이온주입에 의한 표면개질 연구와 마이크로파 발진 및 증폭에 관련한 국내기술의 확립에 기여할 것이다.

ECR 이온원의 연구개발은 전일제로 전념할 수 있는 대학의 단위연구실을 거점으로, 창의적인 연구분야의 발굴과 기술 도입상 국제협력 연구가 비교적 용이하게 이루어질 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 동 연구분야의 선도적인 기술력을 확보하고 있는 미국의 오크리지연구소 (ORNL)와 일본의 이화학연구소 (RIKEN)와의 즉각적인 국제협력연구가 가능함으로써 이 분야에 대한 지속적인 연구가 이루어질 것으로 전망한다.

제 4 절 미래형 섬광검출기 개발 연구

최근 서울대병원, 삼성의료원, 원자력병원에 국내에서는 처음 도입된 양전자방출 단층촬영기 (PET)의 핵심적 기술 요소는 고밀도, 고효율을 가진 BGO

(Bismuth-Germanate-Oxide) 섬광물질을 이용한 감마선분광학이다. 이는 원자핵의 감마선분광학 기법과 응집물리의 물성연구가 결합되어 막대한 잠재력을 가진 PET 시장에 그 응용력을 실현시킨 좋은 실례로 평가된다. 고밀도, 고효율을 가진 화합물 섬광체의 개발은 이미 일본의 Hitachi Chemical을 비롯한 선진 각국이 치열한 연구를 수행하고 있는 분야이기도 하다. 희토류 (RE)와 SiO₂ 화합물로 구성된 RESiO₂ (RE = Gd, Eu, Tb 등) 섬광체는 최근 Hitachi Chemical에 의해 개발되어 PET, 원자핵분광기, 방사능 측정 등에 이용될 상용화단계에 와 있다. 본 연구가 장기적 계획아래 지속적인 지원이 보장된다면 이러한 연구 및 개발 분야는 본 연구에서 실효성 있게 추진되리라 전망한다. 화합물 반도체의 결정성장과 물성연구에 오랫동안 기술을 축적해온 응집물리계의 연구자와 섬광체를 이용한 In-beam 감마선 분광기법을 국내에서 주도적으로 추진해온 원자핵의 연구자간의 상호 연계적 연구형태는 고밀도, 고효율 차세대 화합물 섬광체의 개발에 이상적인 연구그룹으로 예상되며, 이러한 일련의 연계적 연구의 발굴은 동 연구과제가 21세기 지향하여야 할 중요한 성격 중의 하나라고 본다.

제 6 장 참고문헌

- [1] J. H. Ha et al., Nuclear Instruments and Methods A 350 (1994) 411.
- [2] C. S. Lee et al., Journal of the Korean Physical Society 27 (1994) 474.
- [3] C.-B. Moon et al., Physical Review C 51 (1995) 2222.
- [4] C.-B. Moon et al., Zeitschrift fur Physik A 357 (1997) 53.
- [5] C.-B. Moon et al., Zeitschrift fur Physik A 357 (1997) 127.
- [6] S. J. Chae et al., Zeitschrift fur Physik A 350 (1994) 89.
- [7] D. P. McNabb et al., Physical Review C 53 (1996) R541.
- [8] J. H. Ha et al., The European Physical Journal A 1 (1998) 245.
- [9] S. H. Bhatti et al., Zeitschrift fur Physik A 353 (1995) 119.
- [10] C.-B. Moon et al., Physical Review C 58 (1998) 1833.
- [11] S. H. Park et al., Physical Review C 59 (1999) 1182.
- [12] C. S. Lee et al., Journal of the Korean Physical Society 32 (1998) 20.
- [13] C. S. Lee et al., Journal of the Korean Physical Society 31 (1997) 258.
- [14] P. J. Twin et al., Physical Review Letters 57 (1986) 88.
- [15] D. R. LaFosse et al., Physical Review Letters 74 (1995).
- [16] D. C. Radford, Proc. 1989 Int. Nucl. Conf. Sao Paulo, Brazil.
- [17] C. S. Lee et al., Nuclear Physics A 528 (1991) 381.
- [18] S. Raman et al., Atomic Data Nuclear Tables 42 (1989) 1.
- [19] M. D. Violet et al., IEEE Transactions on Nuclear Science 40, No. 2 (1993) 242.
- [20] Z. Q. Xie and C. M. Lyneis, Review of Scientific Instruments 66 (1995) 4218.
- [21] M. Litvin, M. Vella, and A. Sessler, Nuclear Instruments and Methods 198 (1982) 189.
- [22] T. Nakagawa et al., Japanese Journal of Applied Physics 35 (1996) L1124.
- [23] G. D. Alton and D. N. Smithe, Review of Scientific Instruments 65 (1994) 775
- [24] G. D. Alton, Nuclear Instruments and Methods A 382 (1996) 276.
- [25] Reference Manual for POISSON/SUPERFISH Group of codes, LA-UR-87216.
- [26] Y. Liu, G. D. Alton, G. D. Mills, C. A. Reed, and D. L. Haynes, Review of Scientific Instruments 69 (1998) 1311.
- [27] Reference Manual for OPERA-3D, VF-07-96-D2.
- [28] A. Heinen et al., Review of Scientific Instruments 69 (1998) 729.

- [29] H. Ejiri and M.J.A. de Voigt, *Gamma-ray and Electron Spectroscopy in Nuclear Physics* (Oxford, 1989).
- [30] E.N. Kaufmann and R.J. Vianden, *Review of Modern Physics* 51 (1979) 161.
- [31] H. Morinaga and T. Yamazaki, *In-beam Gamma Ray Spectroscopy* (North-Holland, 1976).
- [32] G.N. Rao, *Hyperfine Interactions* 7 (1979) 141.
- [33] P. Raghavan and R.S. Raghavan, *Nuclear Instruments and Methods* 92 (1971) 435.