



최종보고서

고에너지 방사선 입자 측정기 연구 (II)

Research of High Energy Radiation Identification Detector (II)

한국원자력연구소

KAERI/RR-1927/98

최종보고서

고에너지 방사선 입자 측정기 연구 (II)

**Research of High Energy Radiation Identification
Detector (II)**

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소 소장 귀하

본 보고서를 자체연구개발사업 “고에너지 방사선 입자 측정기 연구” 과제
의 최종보고서로 제출합니다.

1999년 8월 일

연구책임자 : 김 용 균(MMIS 팀)

연 구 원 : 이 용 범(칼리머기술개발팀)

최 석 기(칼리머기술개발팀)

하 장 호(핵물리공학팀)

위촉연구원 : 황 종 선(담양대학 전기과 교수)

요 약 문

I. 제 목

고에너지 방사선 입자 측정기 연구 (II)

II. 연구의 목적 및 중요성

현재까지 국내에서는 방사선 측정기기의 설계, 제작 기술 국산화가 완전히 이루어지지 못한 상태이다. 더욱이 α -선, β -선 등의 입자 방사선의 측정 기기는 더욱 개발이 어려우며 본 연구의 대상인 고에너지 양성자 및 중이온 방사선 검출장치는 외국에서 도입하여 학술연구에만 제한적으로 사용하고 있는 상태로서 본격적인 연구가 이루어지지 못하고 있다. 최근에는 산업용 Ion Implanter의 입사빔 에너지가 계속 증가하고 있으나 국내에서는 입사입자의 특성 계측에 관한 연구가 거의 없는 실정이다. 본격적인 고에너지 하전입자 연구에 대비하여 양성자 및 중이온의 에너지 측정기의 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구 과제에서는 고에너지 양성자 및 중이온 에너지 측정기 및 입자 판별기를 국내에서 개발하여 입자 방사선 검출, 주입이온의 특성 측정 및 실험에 이용하고자 하였다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구 과제의 1차년도(1997년)에는 $\Delta E-E$ Telescope 측정 방식에 의한 고에너지 방사선 입자 측정기를 제작하기 위한 전산코드를 개발 완료하여 양성자 에너지 15~50 MeV 영역에서 사용하기 위한 측정기 설계를 완료하여 시험 제작하였으며, 양성자 및 중양자의 에너지 측정 및 입자 판별 테스트를 수행하였다. 2차년도(1998년)에는 양성자 에너지 50-100 MeV 영역의 측정기를 설계하여 $\Phi 3\text{cm} \times 3\text{cm}$ CsI(Tl) 섬광체에 PIN Photodiode를 부착하여 소형화한 시제품을 제작하였으며, 시제품의 테스트 결과는 성공적이었

다. 또한 BGO, NaI(Tl), CsI(Tl) 검출기의 특성을 실험적으로 비교하여 결과를 얻었으며, 양성자 측정기의 설계, 제작 기술을 바탕으로 중이온 검출기의 설계 및 제작 기술을 확보하였다.

IV. 연구 결과 및 활용에 대한 건의

고에너지의 입자 빔이 물질에 입사되었을 때의 에너지 손실을 계산하는 전산 코드를 확보하였으며, 50 MeV 이하의 에너지를 가진 양성자 및 중양자 등의 경이온을 측정·판별하는 검출기의 개발을 성공적으로 수행하였다. 또한 중이온 입자 측정기 제작 기술을 확보하였다. 본 연구에서 개발한 CsI(Tl) 검출기는 양성자나 중이온뿐 아니라 감마선에도 자주 사용하는 방사선 검출기로서 방사선 계측과 관련된 모든 분야에 활용이 가능하다. 본 연구의 결과는 다른 종류의 방사선 측정기에도 응용 가능하므로, 방사선 계측 기술의 향상에 활용할 수 있다. 근래에는 방사선을 이용한 첨단계측 기술의 개발이 Array 검출기를 사용한 영상화에 집중되고 있으며, 본 과제에서 확보된 방사선 검출기 제작 기술은 Array 검출기 제작의 기초 기술이다.

SUMMARY

I. Project Title

Research of high energy radiation identification detector (II)

II. Objectives and Importance of the Project

Till now, most of radiation measurement devices in Korea have been imported from abroad. Especially, it is more difficult to develop a particle radiation detector, such as α - and β -rays. A high energy proton and heavy ion detector, the target of this research, was not studied intensively yet and has been used for academic research restrictively. The more the integrity of semiconductor chips is increased, the higher energy of projectile ion from ion implanters for semiconductor industry is required. But the measurement of projectile ion characteristics was not performed at all. To prepare the intense research of high energy charged particle radiation, R&D of proton and heavy ion detector must be essential.

Therefore, the present research aims to develop particle identification detectors for high energy ions and to use them in the detection of particle radiation and the measurement of beam characteristics of ion implanters.

III. Scope and Contents of the Project

In the first year of present research(1997), we developed the computer code for the fabrication of a high energy radiation detector with ΔE -E telescope method. Using the code, we designed and fabricated a detector to measure 15~50 MeV protons. The detector was successfully tested to

measure the energy of protons and deuterons and to identify the ions. In the second year(1998), we designed and fabricated a detector to measure 50~100 MeV protons. This detector has been miniaturized using a $\Phi 3\text{cm} \times 3\text{cm}$ CsI(Tl) scintillator and a PIN photodiode relative to using a PM tube. The test result of this detector was successful. The characteristics of BGO, NaI(Tl), and CsI(Tl) scintillation detectors were measured and analysed. We developed the design and fabrication technology of a higher energy proton detector and a heavy ion detector.

IV. Results and Proposal for Application

We developed the computer code to calculate the energy loss of energetic particle beam traveling in a matter. We also succeeded to develop a light ion identification detector. The CsI(Tl) detector, which is developed in this project, can be applied as other radiation detectors. The present result will be applicable to the development of heavy ion and higher energy particle detectors and can be used to improve the radiation measurement technology. Recently, the array detector imaging method is one of the most advanced measurement technology using radiation. The detector fabrication technology of this project is the basic technology of array detectors.

목 차

요 약 문 (국문)	2
요 약 문 (영문)	4
목 차	6
표 목 차	7
그림목차	8
제 1 장 서 론	9
제 2 장 본 론	11
제 1 절 전하 입자의 물질과 상호작용 및 전산코드	11
1. 에너지를 가진 입자의 에너지 손실 과정	11
2. Range 및 에너지 손실 계산 전산코드	12
제 2 절 방사선의 검출	17
1. 중성자 계측	17
2. 감마선 및 하전입자 계측	18
3. 방사선량 모니터링	21
제 3 절 ΔE -E Telescope 하전 입자 측정기	28
1. ΔE -E Telescope 입자 측정기의 설계	28
2. 고에너지 양성자 측정기의 제작	29
3. 고에너지 양성자 측정기의 검출 시험	30
제 4 절 인공위성용 고에너지 입자 검출기 검정 실험	39
1. 개 요	39
2. HEPT의 목적	39
3. HEPT 검출기의 구조	40
4. Calibration	40
5. 실험 결과 및 논의	43
제 5 절 PIN photodiode를 사용한 CsI(Tl) 검출기 제작	53
1. CsI(Tl) 섬광체의 특성	53
2. CsI(Tl) 섬광검출기의 제작 과정	53
3. 제작된 CsI(Tl) 섬광검출기의 성능 시험 및 평가	54
제 3 장 결론 및 건의사항	70
참고문헌	72
부 록	74

표 목 차

표 2.3.1. 150 μm 의 Si에서 양성자가 잃는 에너지 계산 결과	32
표 2.4.1. HEPT의 각 채널의 에너지 대역	45
표 2.4.2. HEPT calibration에 사용될 입자의 종류, 에너지, Flux	46
표 2.4.3. 실험에서 얻어진 HEPT의 각 채널의 에너지 대역	47
표 5.1.1. 무기 섬광체의 물리적 특성	56

그 립 목 차

그림 2.1.1. α 입자 투과 실험. R_m 은 Range, R_e 는 외삽 Range이다.	15
그림 2.1.2. 입사 입자의 궤적에 따른 에너지 손실 특성.	16
그림 2.2.1. 중성자 검출에 유효한 핵반응의 단면적	24
그림 2.2.2. 가스봉입 검출기의 여러 가지 작동 영역	25
그림 2.2.3. 광증배관의 기본 구조.	26
그림 2.2.4. 이온 전류함의 작동 원리.	27
그림 2.3.1. CsI(Tl)검출기에서의 Range 곡선.	33
그림 2.3.2. ΔE -E Telescope Test 실험의 Setup.	34
그림 2.3.3. ΔE -E Telescope 전자 회로도	35
그림 2.3.4. 탄성, 비탄성 산란된 양성자의 Peak.	36
그림 2.3.5. 양성자와 중양자의 전 에너지 스펙트럼	37
그림 2.3.6. 양성자, 중양자, 삼중수소의 2차원 ΔE -E Telescope 스펙트럼	38
그림 2.4.1. HEPT의 기계 구조부	48
그림 2.4.2. HEPT block diagram	49
그림 2.4.3. HEPT calibration setup	50
그림 2.4.4. HEPT driving electronics block diagram	51
그림 2.4.5. 50° 에서 측정된 HEPT 의 geometrical factor를 보정한 결과 ..	52
그림 5.1.1. 직경 3cm, 길이 3cm의 NaI(Tl) 섬광체	57
그림 5.2.1. CsI(Tl) 섬광체의 Polishing 과정. (A) \Rightarrow (B) \Rightarrow (C).	58
그림 5.2.2. CsI(Tl) 섬광체와 Hamamatsu S2744 PIN silicon photodiode. ..	59
그림 5.2.3. CsI(Tl) 섬광체와 PIN photodiode의 결합된 모습.	60
그림 5.2.4. 결합된 CsI(Tl) 섬광체와 PIN photodiode를 Al foil로 싸 모습. 61	
그림 5.2.5. 제작 완료된 CsI(Tl) 검출기와 Preamp.	62
그림 5.2.6. PMT를 사용하여 제작된 CsI(Tl) 검출기	63
그림 5.3.1. 3"×3" BGO 검출기	64
그림 5.3.2. 검출기 시험 장비	65
그림 5.3.3. NaI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼	66
그림 5.3.4. BGO 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼	67
그림 5.3.5. PMT 부착 CsI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼	68
그림 5.3.6. PIN photodiode CsI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼	69

제 1 장 서 론

방사선을 검출하고 측정하는 장치에는 여러 가지가 있으나, 보통 사용하는 것은 X-선이나 γ -선을 측정하는 장치들이다. 방사선을 사용하는 곳에서의 Dose 측정, Radiation Monitoring, 환경 방사선 측정 등도 대개 X-선이나 γ -선을 측정하는 방식으로 수행되고 있다.

방사선 입자에 관하여는 직접 측정하는데 상대적으로 어려움이 있으므로, 입자가 물질과의 상호작용으로 발생하는 X-선이나 γ -선을 측정하여 간접 측정이 가능하다. 또한, 방사선 입자는 공기나 물질 중에서의 도달 거리가 상당히 작으므로, (6 MeV α -입자의 공기 중 도달거리는 약 5.03cm 이다.) 직접 측정이 어려운 특성을 가지므로 간접측정이 불가피한 부분도 있다. 그러나, 이러한 측정 방법으로는 방사선 입자의 구별이 불가능하며 입자가 갖는 에너지조차도 측정이 불가능하다. 국내에서는 현재까지 X-선이나 γ -선의 측정을 주로 수행하여 왔으나, 최근에는 대용량의 1 GeV 양성자 가속기 개발 계획이 수행되고 있으며, 또한 우주선에 포함되어 있는 고에너지 입자들에 대한 연구가 본격적으로 진행되고 있어, 이를 위한 고에너지 방사선 입자 측정기의 연구가 중요성을 갖는다.

고에너지 입자가 검출기를 통과할 때 잃어버리는 에너지의 양을 계산하는 전산 코드를 개발, 확보하여 설계에 사용하였다. 고에너지 양성자를 측정하기 위한 $\Delta E-E$ Telescope 방식의 검출기를 설계, 제작하여 시험 Data를 얻었으며, 결과를 분석하였다. 또한 검출기로부터 얻어지는 Spectrum이 어떤 형태를 가지는지 예측하기 위하여 컴퓨터 Simulation을 수행하였다. 시제품 $\Delta E-E$ Telescope 방식의 검출기를 시험하기 위하여, 원자력병원의 MC-50 싸이크로트론의 35 MeV 양성자 빔이 Mylar 표적에 입사될 때 발생하는 여러 가지 에너지의 양성자, 중양자, α -입자 등을 이용하였다.

우리별 3호 인공위성에는 과학 탑재체로 SENSE(Space Environment Scientific Experiment)가 탑재되어 궤도상에서 여러 실험을 수행하게 된다. 이 SENSE module에는 고에너지 입자 검출기 (High Energy Particle Telescope : HEPT)가 탑재되어 있다. HEPT의 검출 원리는 $\Delta E-E$

Telescope 방식으로서, 태양풍에 의한 고에너지 양성자 및 전자, α -입자를 측정하도록 설계되었다. HEPT는 발사 전에 지상에서의 동작 실험과 각 에너지 채널에 대한 Calibration이 필요한데, 이 과정을 원자력 병원의 Scanditronix MC-50 cyclotron을 이용하여 KAIST 인공위성센터, 중앙대학교 핵물리 실험 연구실과 공동으로 수행하였다.

방사선 검출기의 센서 중에서 CsI(Tl) 섬광체는 감마선 및 고에너지 입자에 대한 Response가 우수하고, 결정의 Emission maximum이 550nm로서 PIN photodiode의 감도와 잘 맞으므로 검출기를 소형화할 수 있는 장점이 있다. 또한 흡습성이 거의 없고 가공성이 좋아 여러 가지 형태로 쉽게 제작이 가능하다. 따라서 NaI(Tl) 섬광체의 단점을 보완할 수 있는 새로운 섬광체로서 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 CsI(Tl) 섬광체에 PIN photodiode를 결합한 검출기 시제품을 제작하였으며, 감마선에 대한 반응 특성을 평가하였다.

제 2 장 본 론

제 1 절 전하 입자의 물질과 상호작용 및 전산코드

1. 에너지를 가진 입자의 에너지 손실 과정

입사 입자나 이온이 표적 원자와 탄성 또는 비탄성 상호작용을 일으켜 발생하는 과정은 잘 알려져 있다. 이러한 과정에는 전자의 포획(이온화)이나, 입사 원자 또는 표적 원자를 들뜬 상태로 만드는 상호작용이 포함되어 있다. 결과적으로 입자는 입사 에너지를 잃어버리는데, 이 에너지는 원자의 들뜸 에너지, 이온화, Delta-ray, X-선, Auger 전자 등으로 변환된다. 개별 전자들은 대개 아주 작은 양의 에너지만을 얻는다. 예를 들어, 5 MeV 양성자가 하나의 전자에 줄 수 있는 운동에너지는 10 keV를 넘지 않는다. 따라서 이온들은 대개 무수히 많은 작은 단계들을 거쳐 에너지를 잃는 것이다.

핵충돌이나 핵반응이 일어날 확률은 원자 상호작용이 일어날 확률에 비하여 수백에서 수천 배 이상 작다. 그러나, 아주 낮은 에너지에서는 핵 상호작용에 의한 과정이 주된 에너지 손실 요인이 될 수도 있다. 종합적으로, 무거운 입사 입자와 표적의 상호작용은 다양하고 복잡한 과정이다.

가. 하전입자의 저지능(Stopping power)과 도달 거리(Range)

입사 이온과 매질 원자와의 상호작용을 논할 때 기본이 되는 양은 저지 단면적(Stopping cross-section) ϵ 이며, 대개 $eV(10^{15}(\text{atoms})^{-1}\text{cm}^{-2})$ 단위로 나타내어진다. 보다 실제적으로 쓰이는 양은 저지능(Stopping power) S 인데, $S = -dE/dx = \text{energy loss per unit length of path}$ 로 정의된다. S 의 단위는 $\text{keV mg}^{-1} \text{cm}^2$, $\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$, 또는 간단히 MeV mm^{-1} 를 사용한다.

아주 두꺼운 매질을 때린 이온은 결국 정지할 것이다. 그 정지 시간 T_s 는 대략적으로 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_s \approx 1.2 \cdot 10^{-4} R \sqrt{\frac{M}{E}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

여기서 T_s 는 시간(sec), R 은 도달거리(mm), E 는 에너지(MeV), 그리고 M 은 이온의 질량수(Atomic mass unit, u)이다. 5 MeV 양성자가 Al에 입사될 때, T_s 는 10ps이고, 20 MeV 양성자가 Al에 입사되면 T_s 는 57ps이다.

매질의 두께가 이온의 물질 내부 도달거리를 초과하면, 여러 가지 과정을 거쳐 이온은 결국 정지하게 되는데, 도달 거리 R 은 그림 2.1.1에 정의된 바와 같이 50% 흡수되는 두께에 해당하는 거리이다. 그림에서 R_e 는 Extrapolated Range로서 감소되는 부분을 직선으로 근사하여 얻으며 보통의 Range보다 약간 더 크다.

20~30 MeV 양성자의 경우는 $R_e = 1.027 \times R$, α 입자의 경우는 $R_e = 1.013 \times R$ 이 근사적으로 성립한다. 그림 2.1.1의 경우는 경이온에 대하여 잘 성립하며, 중이온의 경우에는 강도의 하락이 그다지 급격하지 않다. 그림에서 보는 바와 같이, 동일한 에너지를 가졌더라도 모든 이온이 같은 지점에서 정지하는 것은 아니며, 일정한 도달거리 분포를 가지는데, 이를 Range Straggling이라 한다.

나. 에너지 손실 특성

하전입자의 궤적에 따른 에너지 손실을 그림 2.1.2에 나타내었는데, 이를 보통 Bragg curve라 부른다. 처음에 에너지 손실량은 $1/E$ 에 비례하다가, 궤적의 끝에서는 전자 포획에 의하여 이온의 전하가 감소되므로 곡선이 뚝 떨어지게 된다. 실선은 단일 입자에 대한 것이고, 점선은 평행 빔에 대한 평균치로서 이 차이는 Straggling에 의한 것이다.

2. Range 및 에너지 손실 계산 전산코드

입사 이온의 에너지 손실을 나타내는 방정식은 Bethe formula라 알려진 다음의 식으로 표현된다.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$B \equiv Z \left[\ln 2m_0 \frac{v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

여기서 v 와 ze 는 입사입자의 속도와 전하를 의미하고, N 과 Z 는 매질 원자의 Number density와 원자번호이며, m_0 는 전자의 정지질량, e 는 전자의 전하량이다. Parameter I 는 매질의 평균 들뜸 퍼텐셜과 이온화 퍼텐셜을 나타내는 양으로서 대개 실험적으로 결정되는 원소별 특성 값을 갖는다. 비상대론적 입자($v \ll c$)의 경우에는 B 의 첫째항만이 중요한 값이 된다. Eq. 2.2는 하전입자의 속도가 매질 원자의 궤도 전자의 속도보다 클 때에는 여러 종류의 하전입자에 대하여 일반적으로 성립한다.

Eq. 2.2의 B 식을 살펴보면, 비상대론적 입자의 경우 dE/dx 는 $1/v^2$ 에 따라 변화한다. 또, 같은 속도의 전하량이 다른 입자가 입사하는 경우에는 z^2 에 비례하는 에너지 손실이 일어난다. 매질이 달라지면 N 과 Z 의 곱에 비례하는 에너지 손실이 발생하므로, 원자번호가 크고 밀도가 큰 물질에서의 저지능(Stopping power)이 아주 크게 된다.

위와 같은 Bethe formula는 입자의 에너지가 아주 작아지게 되면 성립하지 않는다. 양으로 대전되어 입사된 입자는 매질로부터 전자를 포획하게 되므로 중성원자가 되고, 이 때문에 에너지 손실이 현저하게 감소한다. 이러한 과정이 그림 2.1.2에서 보인 Bragg curve로 나타난다.

본 연구에서는 Bethe formula를 기본으로 하여, Mott, Bloch, 및 낮은 속도 z^3 항 등의 세 가지 보정항을 포함하는 전산코드를 PC에서 계산 가능하도록 개발하였다. 입사 입자는 양성자부터 모든 중이온까지 계산 가능하며, 매질은 고에너지 입자 검출기를 설계할 때 주로 사용하는 Air, Plastic, C, CH₂, Mylar, Cu, Au, Pb, Be, Si, Li, Ta, NaI, CsI에서 계산이 가능하다. 프로그램에 포함되지 않은 매질은 특성 상수들을 입력하면 계산이 가능하다. Fortran으로 Coding된 프로그램의 List를 부록에 첨부하였다.

Range 및 Energy loss를 계산하는 전산코드는 많이 있으나, 본 코드는 입사 입자 및 매질의 종류에 따라 연속적인 에너지 값을 입력하여 손쉽게 계산할 수 있는 것이 특징이다. 계산 결과를 Ziegler의 실험 결과 Table과 비교한 결과 잘 일치함을 확인하였다.

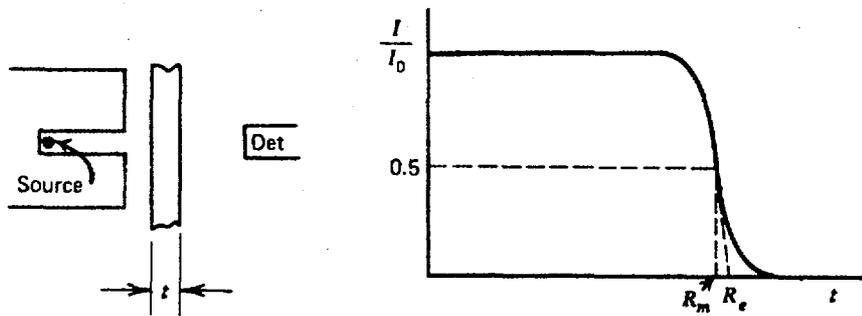


그림 2.1.1. α 입자 투과 실험. R_m 은 Range, R_e 는 외삽 Range이다.

(Fig. 2.1.1. α particle transmission experiment. The mean range R_m and extrapolated range R_e are indicated.)

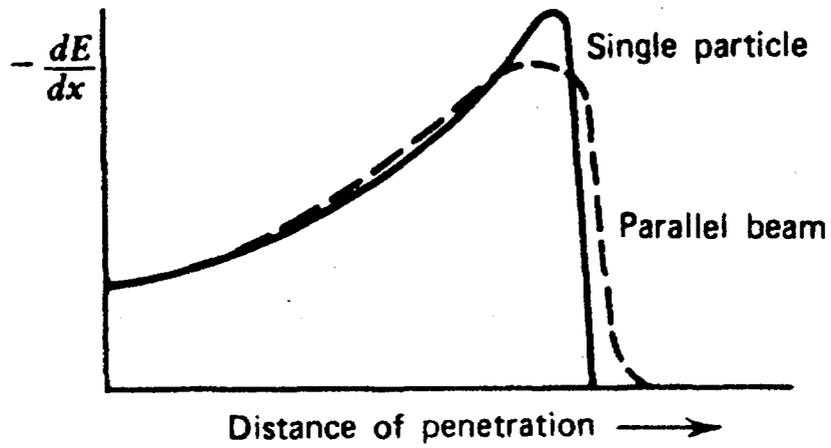


그림 2.1.2. 입사 입자의 궤적에 따른 에너지 손실 특성.

(Fig. 2.1.2. The specific energy loss along incident particle track.)

제 2 절 방사선의 검출

1. 중성자 계측

가. 전량계측

중성자는 양성자, 알파입자 등과 같은 에너지를 가진 하전입자를 발생하는 핵반응을 통해 계측된다. 사실상 모든 형태의 중성자 계측기는 이 변환을 수행하도록 설계된 표적물질과 일반적인 방사선계측기와 결합으로 구성되어 있다. 대부분의 재료에서 중성자 반응에 대한 단면적(Cross section)은 중성자에너지의 함수이므로, 다른 에너지에 대해서는 다소 다른 기술이 발달해 왔다. 약 0.5 eV 카드몹 컷오프 아래는 통상적으로 열중성자(Slow neutrons)영역이라고 불린다. 이 영역에서는 주로 전량 계측을 위한 것이 많고, 에너지 분석은 일반적으로 복잡한 연구목적용 장비가 필요하게 된다.

중성자의 에너지가 증가할수록 중성자의 반응확률은 낮아진다. BF_3 관은 빠른 중성자(Fast neutrons)에 대해서 매우 낮은 계측 효율을 가지고 따라서 거의 사용되지 않는다. ^3He Proportional counter는 열중성자와 고속중성자 모두에 유용하다. 고속중성자 측정장치는 적절한 계측 효율을 가지는 장치가 되기 위해서 변형되거나 완전히 다른 계측방법을 사용해야한다. 에너지에 따른 단면적은 그림 2.2.1에 보여지는 바와 같다.

고속중성자에 대한 가장 중요한 추가적인 변환과정은 탄성 중성자 산란이다. 이 반응에서 입사된 중성자는 그 에너지의 일부를 핵에 전달하여 되튐 핵으로 만든다. 열중성자로부터 전달될 수 있는 에너지는 매우 작아 결과적으로 생기는 되튐 핵 역시 에너지가 매우 낮아서 이 방법을 사용할 수가 없다. 일단 중성자 에너지가 keV범위에 도달하면 되튐 핵은 직접 계측될 수 있으므로 고속중성자 계측에 있어서 아주 중요한 방법이 된다. 가장 유명한 표적핵(Target nucleus)은 수소이다. 수소의 중성자 탄성산란에 대한 단면적(Cross section)은 매우 크고 그 에너지 의존성은 정확히 알려져 있다. 그러나 더 중요한 것은 입사한 중성자가 수소와의 한번의 충돌에서 그 에너지를 모두 전달할 수 있다는 사실이다. 반면 무거운 핵은 에너지의 작은 비율만이 충돌에서 전달될 수 있다. 따라서 되튐 양성자는 상대적으로 계측하기

쉽고 고속중성자 계측에 기본적으로 널리 쓰인다.

나. 에너지 분포 측정

열중성자는 그 에너지가 너무 작아서 변환과정에서 그 초기 에너지 값에 대한 정보가 유실된다. 그러나 계측기에 들어오는 중성자 에너지가 변환에너지에 비해 더 이상 무시할 수 없을 정도로 크게 되면, 반응산물의 에너지는 중성자 에너지의 변화에 따라 다소 다른 값을 갖는다. 따라서 반응산물 에너지의 정확한 측정은 들어온 중성자 에너지를 유도하는데 사용될 수 있다. 탄성산란에서 그 반응 Q값은 영이다. 그래서 중성자에너지는 발생한 되튐 핵이 측정 가능한 운동에너지를 가지는 점에서부터 이 방법으로 측정하는 것이 가능해진다.

2. 감마선 및 하전입자 계측

감마선 및 하전입자 계측에 쓰이는 검출기는 크게 (1) 가스봉입 검출기 (Gas-filled detector), (2)반도체 검출기(Semiconductor detector), (3) 섬광 검출기(Scintillation detector) 등 세 가지로 분류할 수 있다.

가. 가스봉입 검출기

가스봉입 검출기는 방사선이 기체사이를 지나갈 때 생긴 이온을 이용하여 동작한다. 전형적으로, 이러한 계측기는 어떤 전기적 전위가 걸린 두개의 전극으로 구성된다. 두 전극 사이의 공간은 기체로 차 있다. 전극의 전위 세기에 따라 신호의 크기가 변화하는 데, 크게 다음과 같이 세 종류로 나눌 수 있다. 이 작동 영역에 대한 구분은 그림 2.2.2에 도시하였다.

(1) 이온함(Ionization chamber)

평행한 두 평판전극으로 이루어진 이온함은 가장 단순한 가스봉입 검출기

의 일종으로 두 전극 사이를 지나가는 이온화 방사선은 전자-이온 쌍을 형성하면서 그 에너지의 전부 혹은 일부를 잃어버린다. 전자와 이온은 전기장의 영향 하에서 움직이는 전하 수송체(Charge carrier)이다. 이들의 움직임은 전극에서 전류를 유도하고 그것들은 측정 가능하다. 적절한 전자장치들을 이용해서 방사선에 의해 생성된 전하가 펄스형태로 변환하게 되면, 입사한 방사선 입자들을 각각 검출할 수 있다. 평균 전류를 측정하는 방식을 전류방식(Current mode)이라 하고 각각의 펄스 개수를 계수하는 방식을 Pulse Counter라고 부른다. 이온함의 가장 보편적인 형태는 실린더 모양으로 실린더의 벽을 외부전극으로 사용하고 중심부에 금속 심을 넣어 내부전극으로 사용하는 방식이다.

(2) 비례 계수기(Proportional counter/chamber)

같은 에너지의 감마선이 입사하였다 하더라도 전극에 인가된 전압 혹은 결과적으로 전극주변의 전기장이 높을 경우 1차 생성 전자가 중성 가스 분자와 충돌하여 또 다시 2차 전리현상을 일으킬 수가 있는 데 이러한 현상을 증배(Multiplication)라고 한다. 이 경우 수집되는 전하량은 인가된 전압과 비례관계가 있으며 입사한 감마선의 에너지와도 비례관계가 있다. 이러한 영역에서 작동되는 가스봉입 검출기를 Proportional counter라 하고 입사하는 감마선의 에너지 분광에 사용된다. 높은 전기장을 만들기 위해 Proportional chamber는 실린더 모양 혹은 Spherical 모양을 갖고 있다.

(3) Geiger Muller counter

전기장이 매우 클 경우는 증배 현상 역시 매우 크게 되어 조절이 불가능하게 된다. 따라서 입사한 감마선의 에너지에 무관하게 하나의 큰 전류펄스가 만들어지는 데 이러한 영역에서 사용되는 가스봉입 검출기를 GM(Geiger Muller) counter라 한다. GM counter는 방사선의 에너지 정보는 손실되지만 작은 에너지의 방사선에도 큰 신호가 나오므로 신호처리 회로가 간단해지는 장점이 있어 Survey meter용으로 편리하게 사용된다.

나. 반도체 검출기(Semiconductor detector)

반도체 검출기는 이온함과 똑같은 원리로 작동되나 기체 대신 고체인 반도체를 이용한다는 점이 다르다. 또한 반도체 내에서의 전하수송체는 가스 카운터에서처럼 전자와 이온이 아니라 전자와 홀이다. 현재 가장 보편적인 반도체 계측기는 Si와 Ge이다. CdTe와 HgI₂도 일부 사용되고 있다.

다른 방사선 계측기에 비해 반도체 계측기의 가장 중요한 장점은 에너지 분해능이 좋다는 것이다. 그 외의 장점은 다음과 같다. (1) 넓은 에너지 범위에서 선형적 반응을 가진다. (2) 고체물질이 높은 밀도를 가지므로 주어진 에너지 크기에 대해 더 높은 효율을 가진다. (3) 특수한 기하학적 구성이 가능하다. (4) 빠른 펄스 상승시간을 가진다. (5) 진공에서 작동하는 능력이 뛰어나다. (6) 자기장에 덜 민감하다. 반도체 계측기의 성질은 크리스탈의 형태, 크기, 모양 등 재료의 형태뿐만 아니라 반도체가 형성되고 취급되는 방법에도 또한 의존한다.

다. 섬광 검출기(Scintillation detector)

섬광체(Scintillator)는 이온 방사선이 그것들을 통과해 갈 때 빛을 생산해 내는 고체, 액체, 기체 형태의 물질이다. 섬광체 안에서 생성되는 빛의 양은 매우 작아 펄스로 기록될 수 있도록 증폭되어야 한다. 섬광체 빛의 증폭은 광증배관(그림 2.2.3)이라는 장치에 의해서 이루어지는 데 그것은 작은 양의 빛을 받아들여 그것을 여러 번 증폭하여 강한 전류 펄스를 만들어 낸다. 많은 상업용 광증배관이 일반적으로 천만 ~ 백만 배 정도의 전류 증폭률을 갖는다. 섬광검출기의 동작은 (1) 섬광체에 의한 입사 방사선 에너지의 흡수와 가시 광선의 생산 단계, (2) 광증배관에서 빛을 증폭시키고 출력 펄스를 만들어내는 단계로 나누어진다.

섬광 검출기는 섬광체의 종류에 따라 (1) Inorganic scintillators, (2) Organic scintillators, (3) Gaseous scintillators 의 세 가지로 분류될 수 있

다.

3. 방사선량 모니터링

가. 이온 전류함

방사선량(Radiation dose)을 측정하기 위해서, 계측기의 반응은 흡수된 에너지에 비례하여야 한다. 이것을 수행하는 기초적인 계측기에는 이온함(Ion chamber)이 있다. 이온함은 조사단위(Exposure unit) 또는 뢰트겐 등의 작동정의에 기초하여 만들어 질 수 있으므로 조사선량(Exposure)을 계측하는데 쓰일 수 있다.

이온전류함은 선량 측정을 하는데 보건물리학자들에 의해 널리 사용된다. 이온전류함은 기본적으로 두개의 전극으로 구성되어있고, 그 사이는 기체증배(Gas multiplication)를 방지하기에 충분히 낮은 전위가 있다. 방사선에 의해 함의 내부에서 생성된 이온은 수집되어 외부 회로로 흐른다. 이온함은 이런 방식으로 무한대의 내부저항을 가진 전류원처럼 작동한다. 원리적으로 Ammeter가 이온전류를 읽기 위해서 외부회로에 설치될 수 있지만, 이것은 대개 전류가 매우 작으므로 행해지지 않는다. 대신에, 10^{10} 오더의 높은 부하저항 R이 회로에 설치되고, 민감한 Electrometer로 그 저항의 전압강하를 측정한다(그림 2.2.4).

나. 포켓 도시메타(Pocket Dosimeter)

포켓 도시메타라고 불리는 형태의 이온 체임버는 개인 피폭선량을 모니터링하는데 널리 쓰이고 있다. 두 가지 형태의 포켓도시메타가 대체로 사용되고 있다. 이 중의 하나는 콘덴서 타입으로서 간접판독방식(Indirect reading type)으로, 계측된 선량을 판독하기 위해서는 보조장치가 필요하다. 두 번째 형태의 포켓도시메타는 직접판독방식으로서 Gold-leaf electroscope의 원리를 이용하여 작동한다.

포켓도시메타는 그 이름이 의미하는 대로, 주로 개인 피폭 모니터링용으

로 사용되고, X선 혹은 감마선에 피폭될 가능성이 있는 사람의 실제 조사량을 측정하기 위해 사용된다. 그러나 이것은 또한 조사 선량이 측정되어야 하는 곳에 덤으로써 지역 모니터링에도 사용될 수 있다. 이를 위해서 하나 혹은 이상의 선량계를 일주일 이상동안 원하는 장소에 두어야 한다. 지역 모니터링의 경우, 더 크고 감도가 좋은 것을 사용할 수도 있다. 그런 체임버는 콘덴서 타입의 포켓도시메타와 같은 방법으로 전하 판독기와 함께 사용되도록 설계된다.

다. 필름배지(Film Badges)

개인피폭 모니터링에 널리 쓰이는 또 하나의 계측기는 필름배지이다. 이것은 Light-tight paper로 싸고, 적당한 플라스틱이나 금속 용기에 넣은 두개(X 혹은 감마 측정을 위함) 혹은 세 개(X, 감마, 그리고 중성자의 측정을 위함)의 치아 크기의 필름 조각을 하나의 묶음에 넣은 것이다. X선과 감마선의 측정을 위한 두 개의 필름은 민감한 유제(Emulsion)와 상대적으로 덜 민감한 유제(Emulsion)를 포함한다. 이러한 필름 묶음은 라듐감마선 약 10 mR에서 1800 R의 조사범위에서 유용하다. 그 필름은 베타선에도 또한 민감하고, 베타선 선량을 측정하는데도 사용될 수 있다. 최대 에너지가 400 keV이상이 되는 베타에 대해서 약 5 mrad에서 약 1000 rad까지 된다. 적당한 필름과 기술을 사용해서 5 mrad에서 500 mrad까지의 열중성자 선량과 4 mrad에서 10 rad까지의 속중성자를 측정할 수도 있다.

라. 열 형광 선량계(Thermoluminescent Dosimeter)

Mn을 불순물로 가지는 CaF_2 를 포함한 많은 크리스털(Crystal)과 LiF는 방사선에 조사되고 난 후 열을 가하면 빛을 발한다. 이것을 열 형광 크리스털이라고 한다. 방사선으로부터 에너지를 흡수하면 크리스털의 원자가 여기된다. 이때 열 형광 크리스털에 자유전자와 홀이 생긴다. 이것들은 결정 격자내의 불순물이나 결함에 트랩 된다. 크리스털에 열을 가하면 여기 에너지가 빛으로 방출된다.

열 형광 선량계는 약 10 mrad에서 100,000 rad까지의 범위를 가진 X선, 감마선, 베타선, 전자, 양성자에 정량적으로 반응한다. LiF 형광체의 유효원자번호는 8.1이고 소프트 티슈의 유효 원자번호는 약 7.4이기 때문에, LiF 열 형광 선량계는 대체로 사람피부와 동등하다는 장점이 있다(Tissue equivalent).

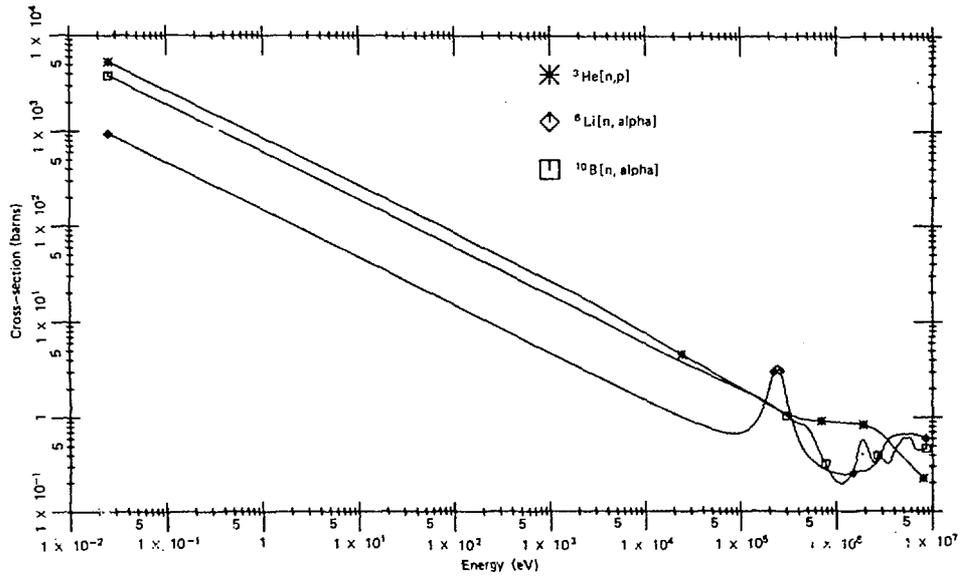


그림 2.2.1. 중성자 검출에 유효한 핵반응의 단면적

(Fig. 2.2.1. Cross section versus neutron energy for some reactions of interest in neutron detection)

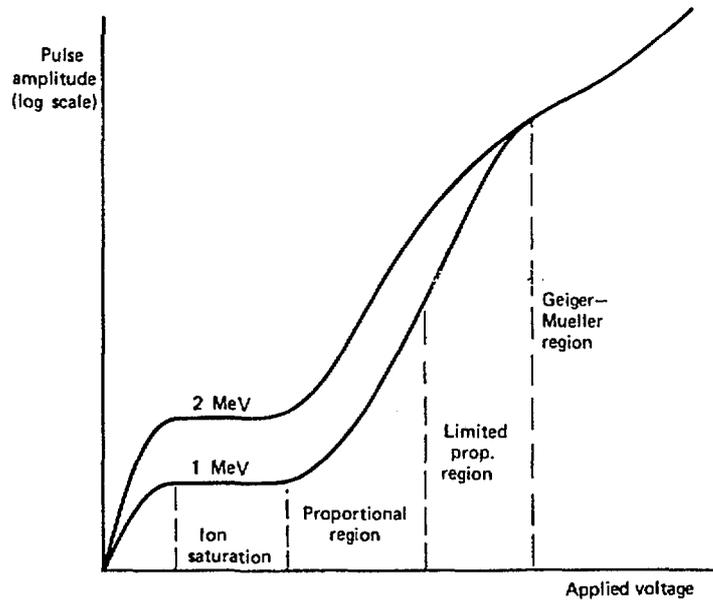


그림 2.2.2. 가스봉입 검출기의 여러 가지 작동 영역
 (Fig. 2.2.2. Operation region of Gas-filled detector)

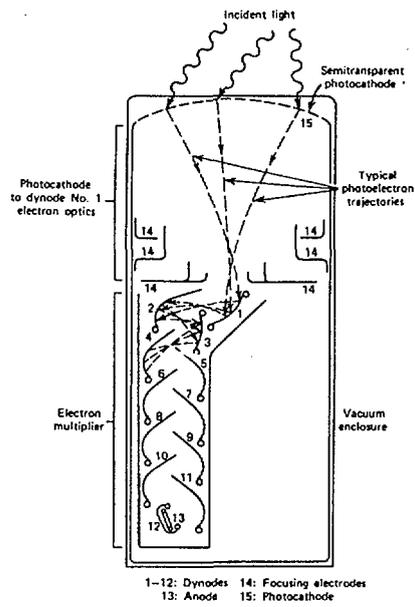


그림 2.2.3. 광증배관의 기본 구조.

(Fig. 2.2.3. Basic structure of photo-multiplier tube.)

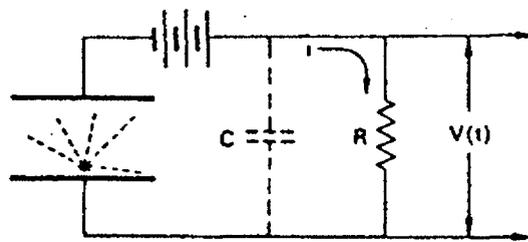


그림 2.2.4. 이온 전류함의 작동 원리.

(Fig. 2.2.4. Operation principle of ion chamber.)

제 3 절 ΔE -E Telescope 하전 입자 측정기

1. ΔE -E Telescope 입자 측정기의 설계

X-선이나 γ -선을 검출하는 방사선 측정기와는 달리 고에너지 입자를 검출하고, 검출된 입자의 전하 및 질량수를 구분하기 위하여 ΔE -E Telescope 방식의 입자 측정기를 사용한다. 에너지를 가진 입자가 Range보다 상당히 얇은 두께의 매질을 통과하면 일정한 분량의 에너지를 잃게 되는데, 이 매질을 섬광 검출기나 반도체 검출기 등으로 제작하여 ΔE 검출기로 사용한다. 한편 ΔE 검출기를 통과한 입자는 아직도 높은 운동 에너지를 가지고 있으므로 이 입자의 전체 에너지를 측정하기 위해서는 완전히 정지시킬 수 있는 Range 이상 두께의 검출기가 필요하며 이를 E 검출기라 한다.

한 개 이상의 ΔE 검출기와 최종적으로 입자를 정지시켜 에너지를 측정하는 E 검출기의 Set으로 구성되어 두 검출기의 신호를 동시 계수할 수 있도록 한 검출계를 보통 ΔE -E Telescope 측정법이라 하며, 두 검출기를 하나의 검출기처럼 복합시킨 Sandwich 검출기로 구현되기도 한다. ΔE 검출기를 통과하는 입자는 에너지의 일부를 잃는데, 그 양은 Bathe formula에서 알 수 있듯이 입자의 에너지에 반비례한다. 검출기에서 발생하는 신호의 크기는 검출기 매질 내에서 입자가 잃는 에너지의 양과 비례하므로, 에너지가 클수록 물질과의 상호 작용할 반응시간이 짧으므로 작은 양의 에너지를 잃게 되고 작은 신호를 발생시킨다.

특정한 에너지 영역의 고에너지 방사선 입자를 측정하기 위해서는 특성에 따라 ΔE 검출기의 Scintillator나 반도체의 재료를 잘 선택하여야 하며, 동시에 ΔE -E Telescope의 Spectrum을 통하여 입자의 구분이 가능하도록 ΔE 검출기의 두께를 적절하게 설계하여야 한다. ΔE 검출기에서 너무 많은 에너지 손실이 있는 경우에는 전하에 따른 입자의 효과적인 Spectrum을 얻을 수가 없으며, 에너지 손실이 너무 작아서 신호가 아주 작아지면, 검출기의 전자회로에서 발생하는 Noise와의 구분이 어려워 ΔE 검출기의 역할을 수행할 수 없다. 또한 E 검출기에서는 ΔE 검출기를 지나온 입자를 완전히 정지시켜 에너지 Spectrum을 얻어야 하므로 Range 이상의 충분한 두께를

가져야 한다.

이와 같은 점을 고려하여 고에너지 방사선 입자 측정기를 ΔE -E Telescope 방식으로 설계하였다. 입사 입자는 20~50 MeV의 에너지를 가진 양성자로 가정하여, ΔE 검출기는 Si로 택하였으며, E 검출기는 취급하기 쉬운 CsI(Tl) Scintillator를 선택하였다. CsI(Tl) Scintillator는 일반적으로 감마선 검출에 사용되는 검출기이나 수 십 MeV에 이르는 감마선은 핵반응에서 극히 희박하게 일어나므로 에너지의 차이로 하전입자를 검출하는 용도로도 사용할 수 있다. Si 등의 감마선에 거의 반응하지 않는 반도체 검출기를 사용함이 유리하나 반도체 검출기를 사용할 시 진공함과 고에너지 양성자를 사용하므로 그 두께는 수 cm에 이른다. 이러한 검출기는 상용화 된 것이 없으며 고가로 ORTEC사 등이 주문 제작을 하고 있다.

ΔE 검출기에서 양성자가 잃는 에너지는 PC에서 사용하도록 개발된 Range 계산 코드를 이용하여 계산하였다. 표 2.3.1에 나타낸 값은 15~50 MeV의 양성자가 두께 150 μm 의 Si 검출기를 통과할 때 상실하는 에너지 양의 코드 계산 결과이다.

E 검출기로는 CsI(Tl) Scintillator $\phi 2.5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 를 사용하였는데 50 MeV 양성자의 CsI(Tl) Scintillator에서의 Range는 0.9 cm이므로 양성자를 완전히 정지시킬 수 있는 충분한 두께이다. 예상되는 양성자의 에너지에 따른 CsI(Tl) Scintillator의 range는 그림 2.3.1 에 도시하였다.

2. 고에너지 양성자 측정기의 제작

ΔE 검출기로 사용한 Silicon Surface Barrier(SSB) 반도체 검출기는 EG&G ORTEC 사의 TB-015-050-150 모델로서 Depletion depth 및 두께가 150 μm 이며, High Voltage Bias는 150 V로 사용하였다. Si 반도체 검출기를 E 검출기의 앞에 고정시켜 제작하였으며 CsI(Tl) Scintillator는 섬광을 전기적 신호로 바꾸기 위한 광증배관(PMT, Photo-multiplier Tube)에 Optical Epoxy로 부착하고 외부 빛을 차단하는 Light shield를 하였다. PMT는 일본 Hamamatsu의 H3690-03 모델을 사용하였는데, 여기에는

(-)1000 V의 High Voltage Bias로 사용하였다.

E 검출기로 사용한 Scintillation detector의 제작과정은 참고문헌(W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, A How-to Approach", 2nd Revised Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1994)의 제9장에 기술된 방법에 근거하였다. PMT는 외부 자기장의 영향에 민감하므로 반드시 Magnetic shielding 속에 두어야만 한다.

3. 고에너지 양성자 측정기의 검출 시험

시험 제작된 ΔE -E Telescope를 Test하기 위하여 원자력병원의 MC-50 Cyclotron에서 발생하는 35 MeV 양성자 빔을 수소와 탄소가 주성분인 Mylar foil에 조사하여 산란되는 2차 입자들을 계측하는 실험을 수행하였다. 그림 2.3.2에 실험장치의 배열을 도식화하였다. 2차 입자의 에너지는 산란각 θ 에 따라 변화하므로 ΔE -E Telescope의 위치를 빔 입사 축에 대하여 회전하면서 실험을 수행하였다.

검출기에 측정된 신호를 그림 2.3.3의 전자회로 구성을 통하여 측정하였다. 각각의 검출기에서 측정된 신호는 Pre-amplifier와 Amplifier를 통하여 처리 후 CAMAC ADC 2259B에 넣었다. 시간에 대한 정보를 얻기 위해서 ΔE 검출기는 Time pickoff 모듈을 거친 후 100MHz Discriminator를 거쳐 빠른 시간 Logic 신호를 발생시킨 후 동시계수 모듈에 넣기 위해 Gate & Delay Generator에서 시간 조절 및 시간을 맞춘다. 또한 E 검출기에서는 Amplifier의 Bipolar신호를 Timing Single Channel Analyser를 거쳐 느린 시간 Logic 신호를 얻고 이를 동시계수 모듈인 Universal Coincidence 모듈에 시간 구간 안에 일치 시켰다. 이를 CAMAC ADC에서의 주 Gate 신호를 얻기 위해 Gate generator를 구동하였다. 이러한 과정으로 얻어진 CAMAC ADC의 에너지와 시간 상관 정보는 DSP사의 6001 Crate Controller에 의해 Personal Computer로 PC-004 Interface Card를 통하여 저장 분석된다.

그림 2.3.4는 Mylar에 의하여 $^{12}\text{C}(p, p')$ 반응에서 발생하는 탄성 또는 비탄성 산란된 양성자의 Peak 스펙트럼이다. Mylar는 화학식 $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ 로 표현

되는 바와 같이 탄소 뿐 아니라 수소와 산소 원자도 포함하고 있으므로, 그림 2.3.2의 스펙트럼은 탄소, 수소, 및 산소 핵에 의한 산란 양성자의 Peak를 이 동시에 검출되는 결과를 보인다.

그림 2.3.5는 양성자와 중양자의 전 에너지 스펙트럼이다. 이 스펙트럼은 가로축은 E, 세로축은 ΔE 로 하여 2차원으로 그리면 그림 2.3.4를 얻는다. 관은 에너지에서의 양성자, 중양자, 삼중수소의 ΔE 검출 기에서의 에너지 준위가 질량수가 증가함에 따라 함께 증가하므로 2차원 Plot에서는 분리된 곡선의 형태로 나타난다. 이러한 특성이 $\Delta E-E$ Telescope의 장점으로써 검출기에서 입자를 구별하는 것이 가능함을 확실하게 보여주고 있다.

실험의 결과에서 알 수 있듯이 본 과제에서 자체 제작한 고에너지 방사선 입자 검출 $\Delta E-E$ Telescope의 Test는 매우 성공적이었으며, 이러한 검출기를 사용하여 입자의 식별이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 국내에서도 최근 고에너지 입자 가속기의 개발이 수월 중에 있으며, 본 연구의 결과는 고에너지 입자의 검출 및 계측에 직접 적용 가능하리라 사표된다.

표 2.3.1. 150 μm 의 Si에서 양성자가 잃는 에너지 계산 결과
 (Table 2.3.1. Energy loss of proton in 150 μm Si.
 Calculated results.)

양성자에너지 (MeV)	ΔE (keV)	양성자에너지 (MeV)	ΔE (keV)
15	808	35	416
20	672	40	383
25	542	45	342
30	483	50	320

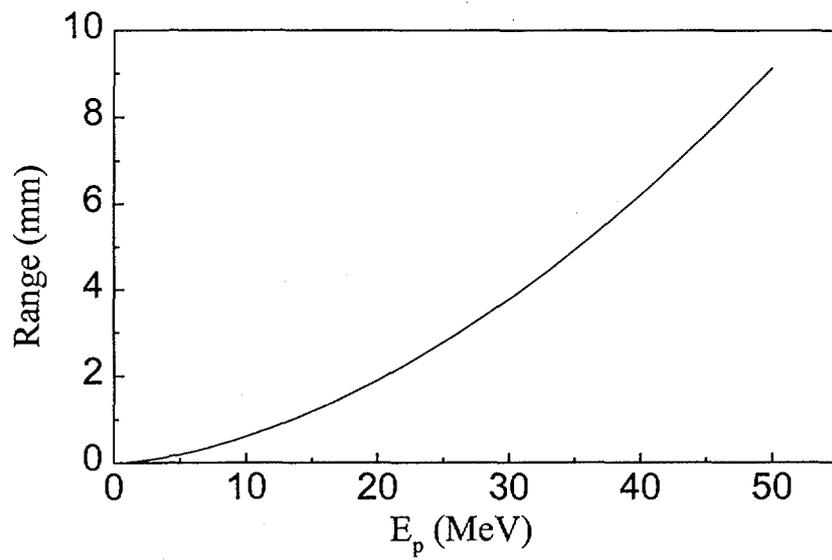


그림 2.3.1. CsI(Tl)검출기에서의 Range 곡선.

(Fig. 2.3.1. Range curve at the CsI(Tl) scintillator)

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

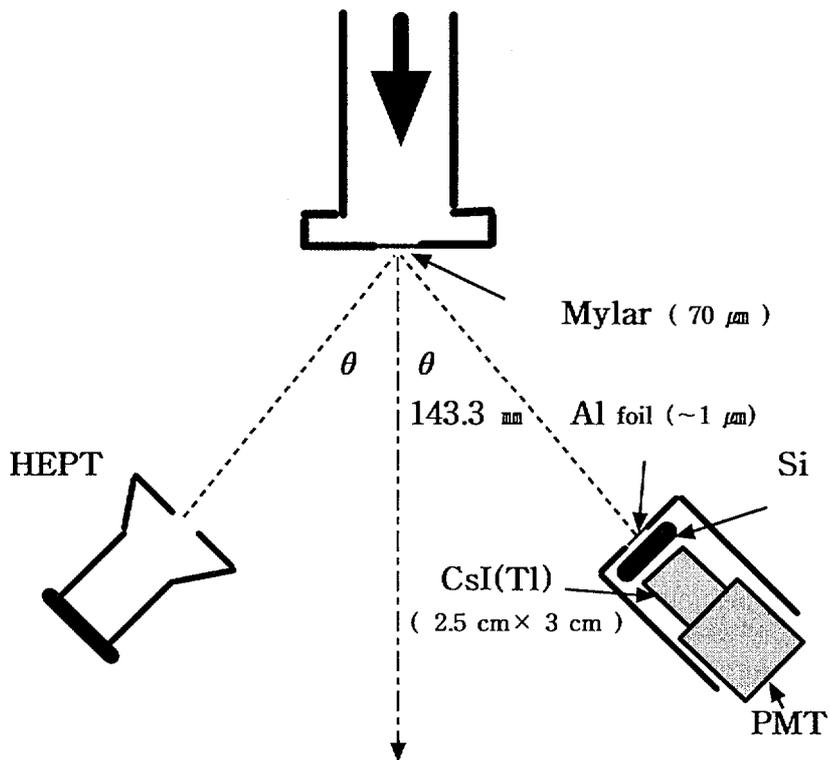


그림 2.3.2. ΔE -E Telescope Test 실험의 Setup.

(Fig. 2.3.2. Experimental setup of ΔE -E telescope test.)

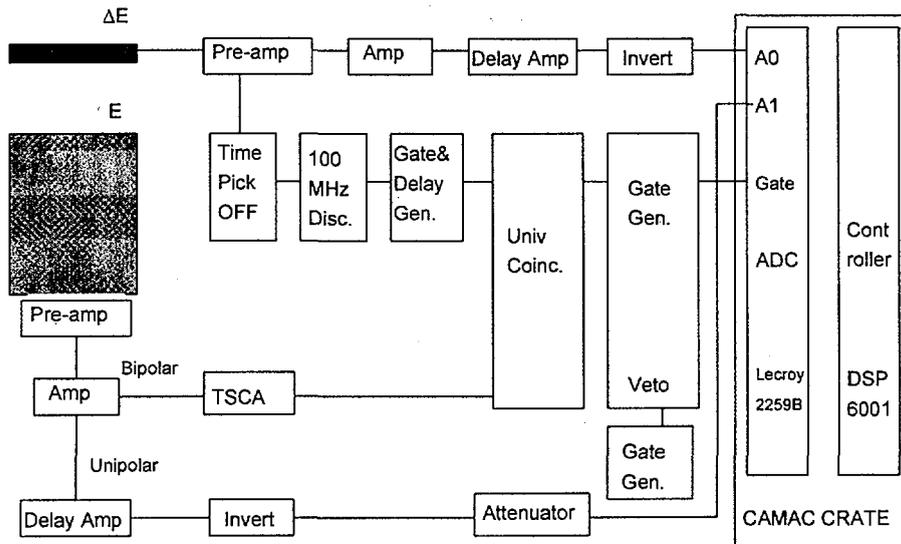


그림 2.3.3. ΔE -E Telescope 전자 회로도 .

(Fig. 2.3.3. ΔE -E Telescope electronics.)

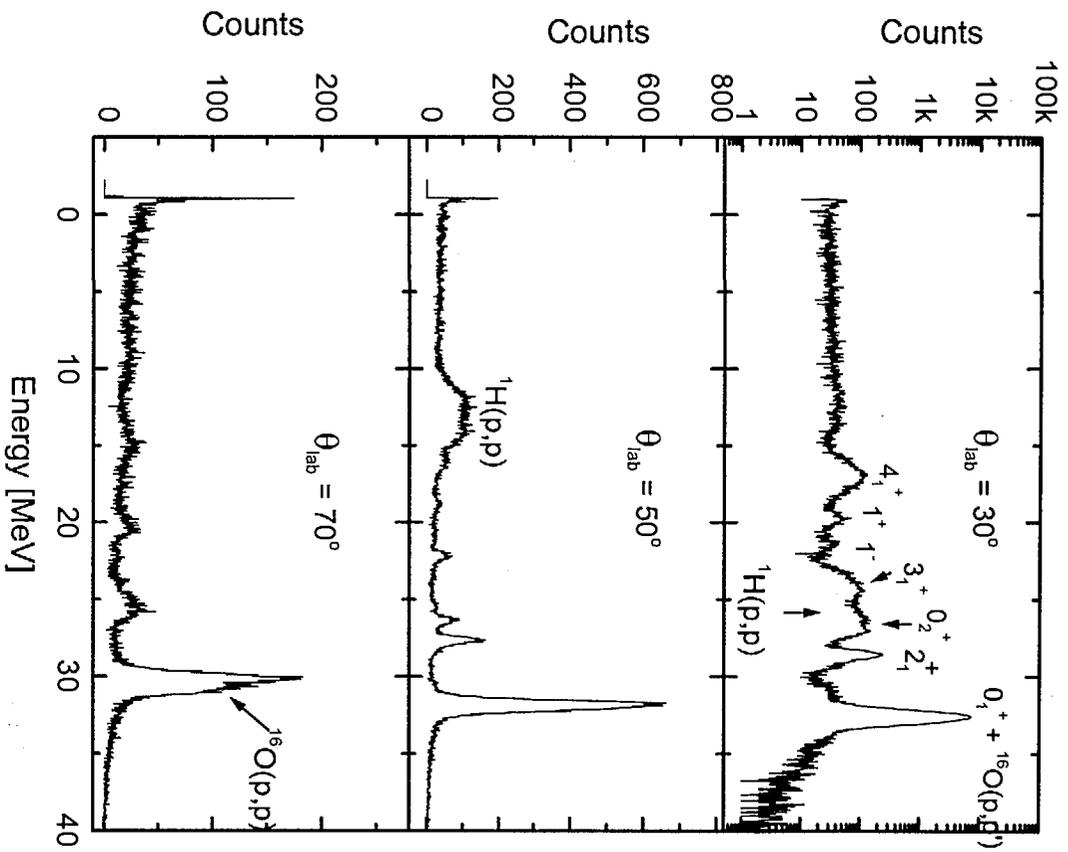


그림 2.3.4. 탄성, 비탄성 산란된 양성자의 Peak.

(Fig. 2.3.4. Elastic and inelastic proton peaks.)

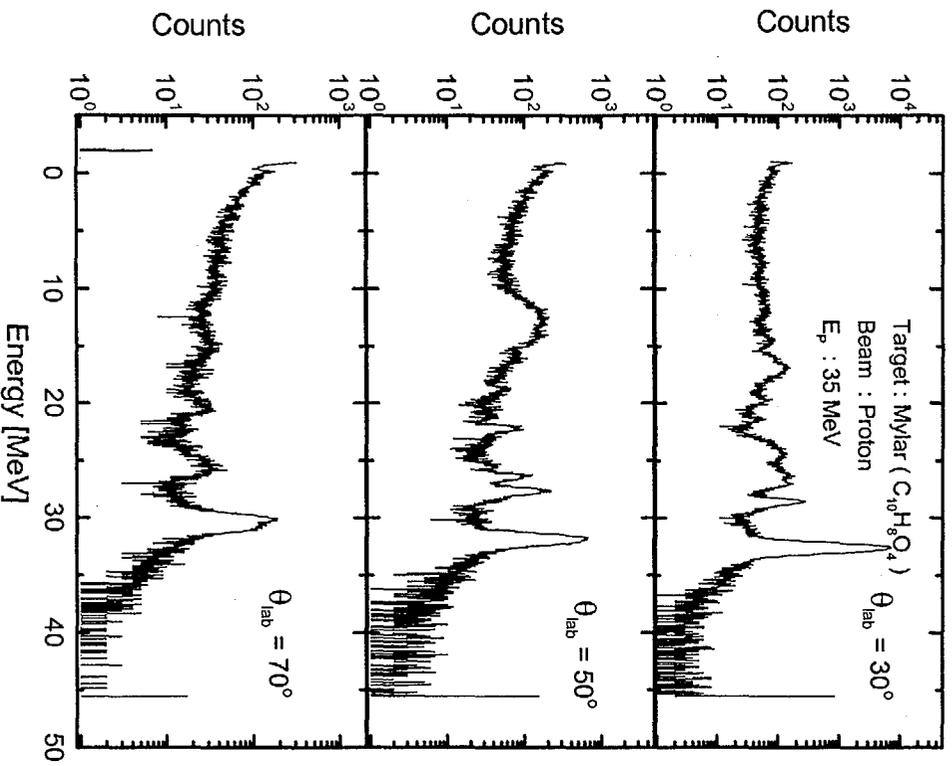


그림 2.3.5. 양성자와 중양자의 전 에너지 스펙트럼

(Fig. 2.3.5. Total energy spectrum of protons and deuterons)

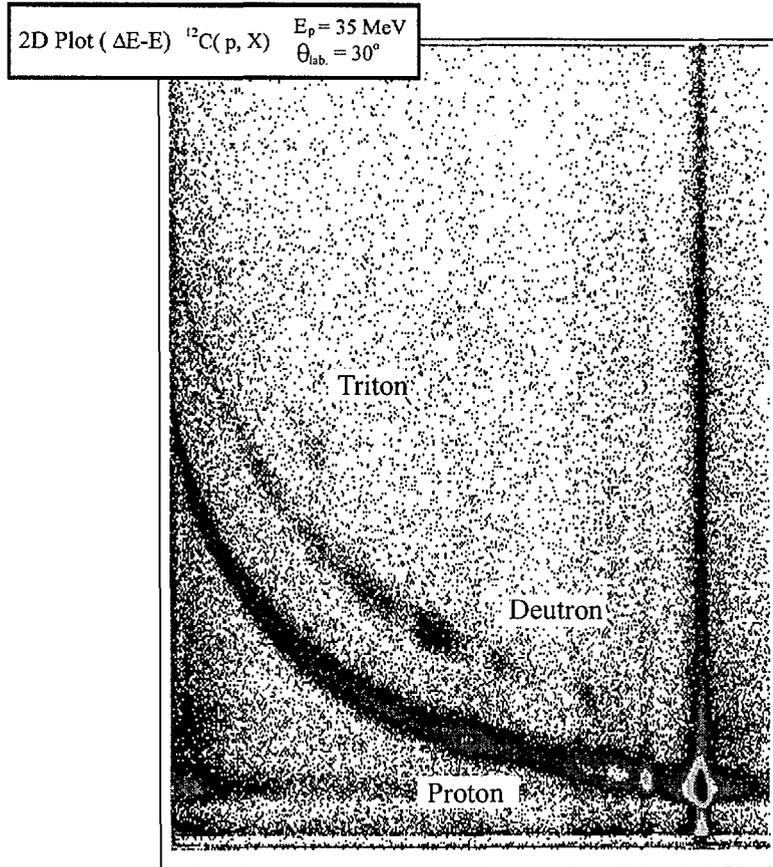


그림 2.3.6. 양성자, 중양자, 삼중수소의 2차원 ΔE -E Telescope 스펙트럼

(Fig. 2.3.6. 2-dimensional plot of ΔE -E telescope spectrum)

제 4 절 인공위성용 고에너지 입자 검출기 검정 실험

1. 개 요

인공위성에는 과학 탑재체로 SENSE(Space Environment Scientific Experiment)가 탑재되어 궤도상에서 여러 실험을 수행하게 된다. 이 SENSE module에는 고에너지 입자 검출기(High Energy Particle Telescope : HEPT)가 탑재되어 있다. HEPT는 발사 전에 지상에서의 동작 실험과 각 에너지 채널에 대한 Calibration이 필요한데, 이 과정을 원자력 병원의 Scanditronix MC-50 cyclotron을 이용하여 공동으로 수행하였다.

2. HEPT의 목적

태양풍과 지구 자기장의 지속적인 상호 작용은 지구 주위에 자기권(Magnetosphere)이라는 자화된 플라즈마 공간을 만든다. 이 자기권은 정적인 상태로 유지되지 않으며 태양풍의 조건에 따라 매우 동적인 현상을 나타낸다. 그 한 예가 Magnetospheric storm, 또는 Substorm이며, 이들은 전리층에 직접적인 영향을 주어 통신 교란 등의 현상을 일으킬 수 있다. 한편, 태양의 플레어 현상은 많은 양의 X-ray 또는 자외선을 방출시키므로 이들에 의해 전리층이 직접적으로 교란을 받기도 한다. 에너지가 큰 플레어는 태양 입자를 가속시켜 Proton event를 야기한다. 이러한 자기권의 변화에 관한 연구는 학문적으로도 중요하지만 그 궤도에서 운용되고 있는 위성체에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 위성의 제작, 운용에 있어서 태양의 활동과 지구 자기권 및 전리층의 변화 현상을 이해하는 것은 필수적이다.

인공위성의 탑재체인 HEPT (High Energy Particle Telescope)는 정량적으로 지구 자기권의 고에너지 입자의 생성, 소멸, 변화 등에 대한 정보를 얻기 위한 장치이다. 이러한 변화에 가장 커다란 영향을 주는 것은 태양의 활동이다. 태양풍이나 플레어와 같은 영향은 곧 지구의 자기권에 전달되고 하전입자의 에너지와 공간 분포를 바꾸게 된다. HEPT에서는 이러한 역동적인 자기권 입자의 에너지를 7개의 에너지 채널로 측정하고, 입자의 운동의 중요한 변수인 피치각을 측정함으로써 역동적 운동의 기본 과정을 밝혀 불

계획이다. 그리고, 멀리 태양계의 끝에서 가속되어 지구자기장에 갇혀 있을 것으로 생각되는 Anomalous cosmic ray의 존재 유무에 대한 간접적 정보를 얻을 수 있을 것이다.

3. HEPT 검출기의 구조

HEPT는 Particle telescope(그림 2.4.1)을 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. Particle telescope는 HEPT의 기계구조물로서 재질은 Aluminum을 사용한다. Particle telescope의 구조 설계는 인공위성의 궤도에서 Particle flux와 실험에 요구되는 Pitch angle accuracy에 의해서 결정되어야 한다. 하전입자들이 SSD1, SSD2, SSD3 및 SSD4에 전달하는 에너지에 의해 나타나는 신호를 조합하여 입사한 입자의 종류와 에너지를 판별하도록 하였다.

또한 에너지 채널을 구성하기 위해 4장의 Sensor사이에는 그림 2.4.1과 같이 0.1mm 두께의 알루미늄(Al)과 0.3mm, 2.0mm 두께의 구리(Cu) 등의 물질을 삽입하여 입사하는 입자들이 각 Silicon detector에 전달하는 에너지(Stopping power)가 구별될 수 있도록 조정하였다. SSD1, SSD2, SSD3 및 SSD4에는 그림 2.4.2처럼 각각 Charge Sensitive Amplifier(CSA)와 Discriminator를 연결하여 특별한 조건에 따라 입자의 종류와 에너지 범위를 판별하여 Data를 기록하도록 하였다.

HEPT가 측정하는 입자의 종류와 채널, 에너지 영역은 표 2.4.1과 같다. 이번 Calibration에서는 Proton 3개 채널 pE1, pE2, pE3을 Calibration 하였다.

4. Calibration

가. 일정

날짜	계획
5월 29일	원자력 병원 Cyclotron에 Detector setting
5월 30일	Beam profile 측정
5월 31일	HEPT calibration
6월 1일	결과 토의 및 철수

나. Test setup

HEPT의 Calibration setup은 그림 2.3.3과 같다. 실험대 위에 HEPT의 Particle telescope 부분을 올려놓고 실험대 아래에는 그림 2.3.2와 같은 HEPT 센서에 bias voltage를 공급하고 센서의 신호를 증폭하는 Amplifier 부분, Particle identification block, 통신 부분이 들어 있는 Driving electronics box가 있다. 이 부분은 직접 고에너지 입자에 노출되지 않도록 납으로 차폐한다. 이 실험 결과는 벽 뒤의 Control room에서 PC로 Monitor 하게 된다. 실험이 행하여지는 곳과 Control room 사이의 거리는 약 40 meter 정도이므로 원거리 통신을 위해서 RS422 방법을 사용한다.

다. Calibration에 사용되는 고에너지 입자 Beam

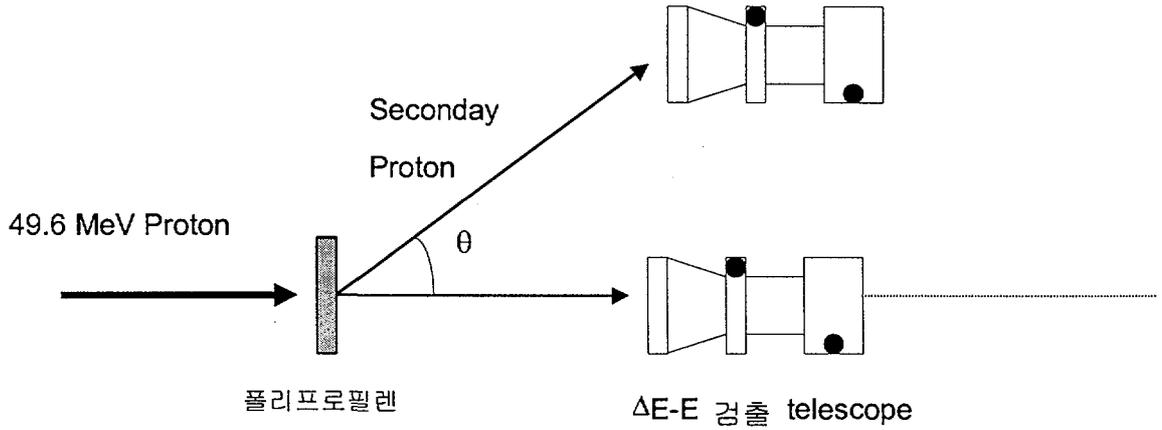
Calibration에 사용되는 입자의 종류를 바꾸기 위해서는 Cyclotron setting에 많은 시간이 필요하므로, 이번 실험에는 양성자(Proton)만을 이용한 Calibration을 한다. 채널 에너지에 따른 Calibration에 사용할 양성자 에너지와 Flux는 표 2.4.2와 같다.

라. Calibration procedure

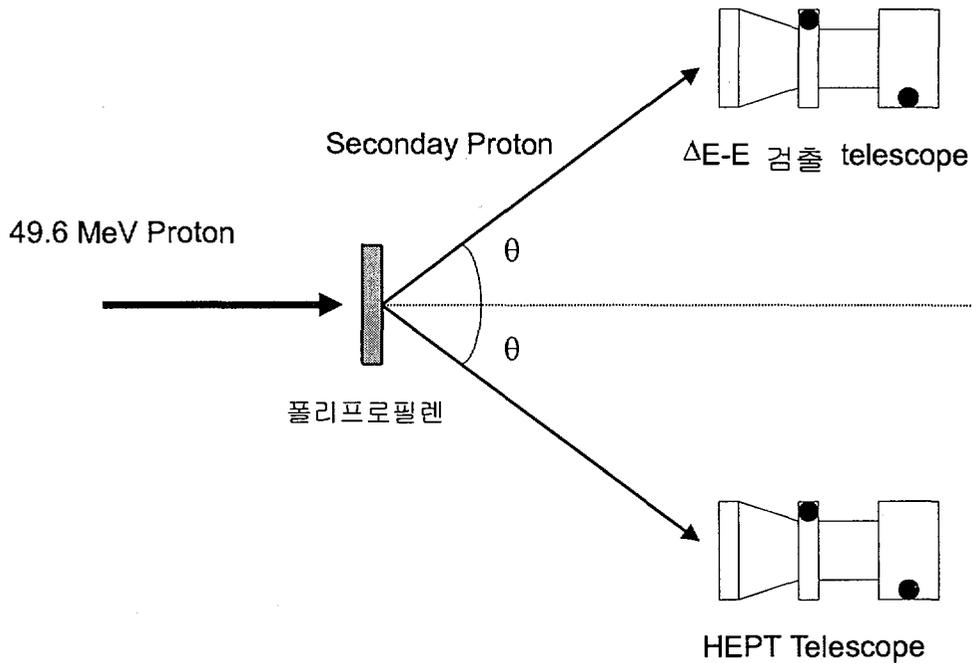
- Beam profile을 측정한다.

Cyclotron에서 나오는 49.6 MeV의 양성자를 Mylar 창을 통해서 폴리프로필렌($(CH_2-CH-CH_2)_n$)에 조사하여 생기는 이차 양성자들의 각도에 따른 에너

지 분포를 먼저 측정한다.



- Beam profile 측정 결과를 바탕으로 표 2.4.2의 양성자 에너지가 나오는 각도를 선정한다.
- HEPT에 입사하는 양성자의 Flux를 측정하기 위해서 Conjugate 각도에 ΔE-E 검출 Telescope를 설치하여 동작을 확인한다.
- HEPT를 동작 시켜서 양성자가 입사하지 않을 때, System의 Noise level을 측정한다.
- Test signal을 통해서 HEPT Amplifier의 동작을 확인한다.
- HEPT와 ΔE-E 검출 Telescope를 Conjugate 각도에 두고 Cyclotron의 양성자 빔을 조사하기 시작한다.



- 3개 각도에 대해 같은 실험을 반복한다.
- 실험이 끝나면 Beam 조사를 마치고, Test pulse에 의한 Amplifier 동작 실험을 한다.
- HEPT를 동작 시켜서 양성자가 입사하지 않을 때, System의 Noise level을 측정한다
- 실험을 마치고, 실험 데이터를 저장한다.

5. 실험 결과 및 논의

본 실험의 목적은 HEPT 각 채널의 에너지 범위를 알고자 하는 것이다. 이전의 Range와 Stopping power의 이론적 계산을 통하여 예상되는 에너지의 범위는 표2.4.1에 서술하였다. 본 검출기의 전자 회로의 설계 특성상 세 개의 검출기의 신호와 잡음을 구별하는 Threshold voltage level은 각각 조

질이 불가능하고 하나의 discriminator에 의해 조절된다. 정확한 Threshold level을 알기 위하여 예상되는 에너지 0.5 MeV - 2.1 MeV에 해당하는 threshold level에서 HEPT 양성자 검출기 각각에 측정된 양성자의 개수를 Telescope방식의 독립적인 검출기로 얻은 양과 비교함으로써 정확히 정하였다.

실험시 발생하는 문제 중 가장 심각한 점은 싸이크로트론에서 인출되는 양성자와 검출기 장치간의 정렬 문제가 가장 심각하였다. 이는 인출 양성자를 표적물에서 발광체(Al_2O_3)로 확인하고 이를 바탕으로 방사형으로 원운동이 가능한 검출기를 정렬하기 때문이며, 또한, 정렬시 실험 설비가 의료용인 중성자 치료기의 moving floor위에서 설치되기 때문에 작은 충격에도 정렬이 쉽게 변하기 때문이다.

실험시 발생하는 잡음을 신호로 인식하는 오류를 범하는 사례를 발견하였는데 이는 bench test에는 발생하지 않은 것이었다. 이의 원인으로서는 싸이크로트론의 가동은 대전력 및 고주파장치를 사용하기 때문에 이로부터 발생한 부차적인 전자파 및 전원상의 전기적인 문제가 SSB의 반도체 검출기를 교란시키기 때문이다. 이러한 실례로 pE1과 pE2 검출기에 각각 60 Hz와 2 Hz 정도의 잡음이 측정되었다. 이러한 잡음은 반도체 검출기의 두께와 밀접한 관련이 있으며, 측정된 자료는 이러한 두께 즉, geometrical factor를 보정하여야한다. 그 결과는 그림 2.4.5에 50도에서 측정된 결과를 예시하였다. 검출기 pE1은 40%정도의 많은 차이를 보였으며, 검출기 pE2와 pE3은 알루미늄 frame 내부에 있는 관계로 주변과의 차단이 되어서 잡음이 거의 측정되지 않았다.

이러한 오차 요소를 제거한 결과 얻어진 HEPT검출기의 특성은 threshold level 2.06 MeV이고, 각 채널의 에너지 범위는 표.2.4.3과 같다. 지상에서 얻어진 보정된 자료를 바탕으로 위성체에서 측정 전송될 우주 공간상의 하전 입자들의 물리적인 특성 정보가 정밀히 분석되고 이해할 수 있게 되었다.

표 2.4.1. HEPT의 각 채널의 에너지 대역

(Table 2.4.1. Energy range of HEPT channels.)

Channel#	Energy Range (MeV)	Particle	Length (Bit)
pE1	6.3 ~ 15	Proton	16
pE2	15 ~ 29	Proton	16
pE3	29 ~ 38	Proton	32
eE1	0.25 ~ 0.7	Electron	16
eE2	0.7 ~ 2.0	Electron	16
eE3	> 2.0	Electron	32
AA	15 ~ 60	Alpha Particle	16

표 2.4.2. HEPT calibration에 사용될 입자의 종류, 에너지, Flux
(Table 2.4.2. Species, energy, and flux of particles used in HEPT
calibration.)

species	energy	flux
proton	10 MeV	$1.0 \times 10^9/\text{cm}^2.\text{sec}$
proton	25 MeV	$1.0 \times 10^9/\text{cm}^2.\text{sec}$
proton	35 MeV	$1.0 \times 10^9/\text{cm}^2.\text{sec}$

표 2.4.3. 실험에서 얻어진 HEPT의 각 채널의 에너지 대역

(Table 2.4.3. The measured energy range of HEPT channels.)

Channel#	Energy Range (MeV)	Particle	Length (Bit)
pE1	7.75 - 13.50	Proton	16
pE2	14.60 - 19.82	Proton	16
pE3	26.80 - 30.74	Proton	32

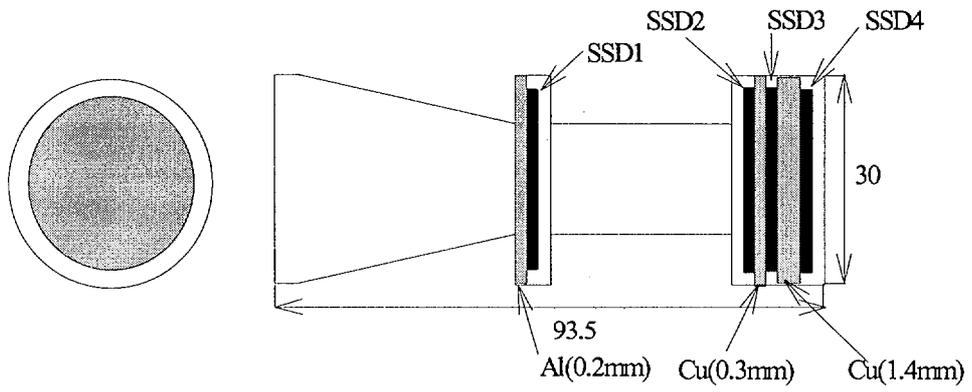


그림 2.4.1. HEPT의 기계 구조부

(Fig. 2.4.1. Mechanical structure of HEPT)

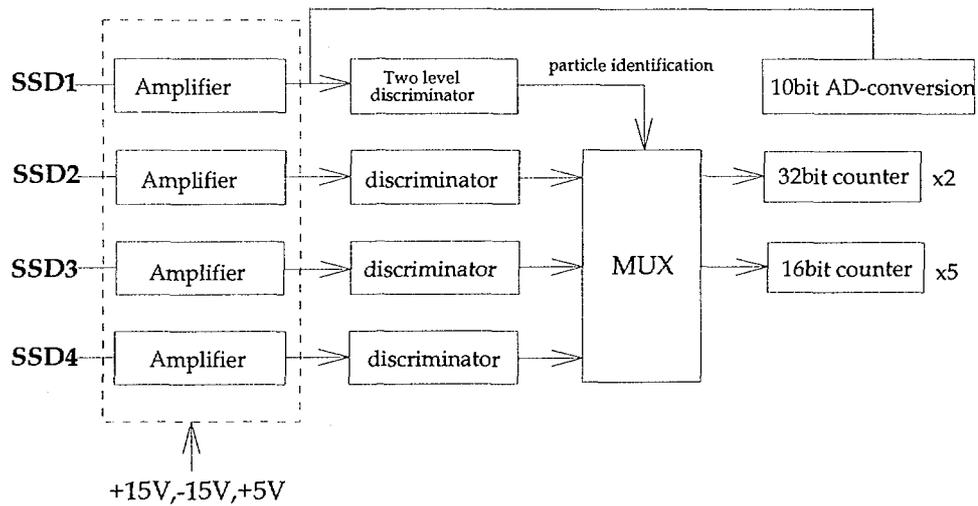


그림 2.4.2. HEPT block diagram

(Fig. 2.4.2. HEPT block diagram)

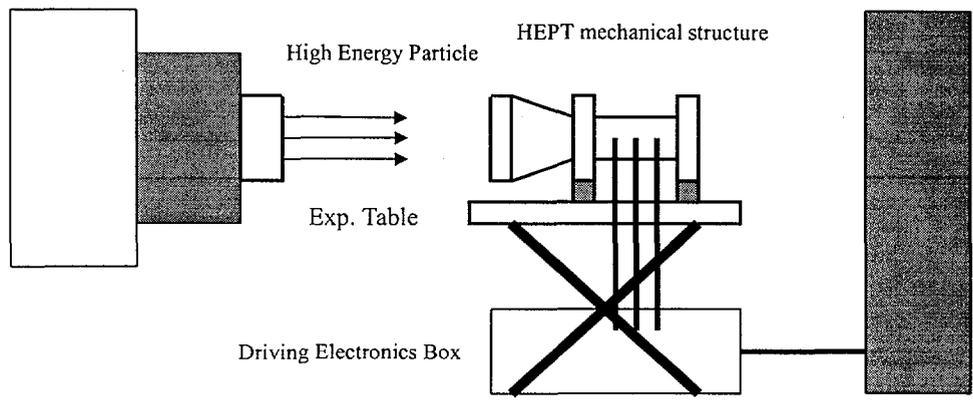


그림 2.4.3. HEPT calibration setup
(Fig. 2.4.3. HEPT calibration setup)

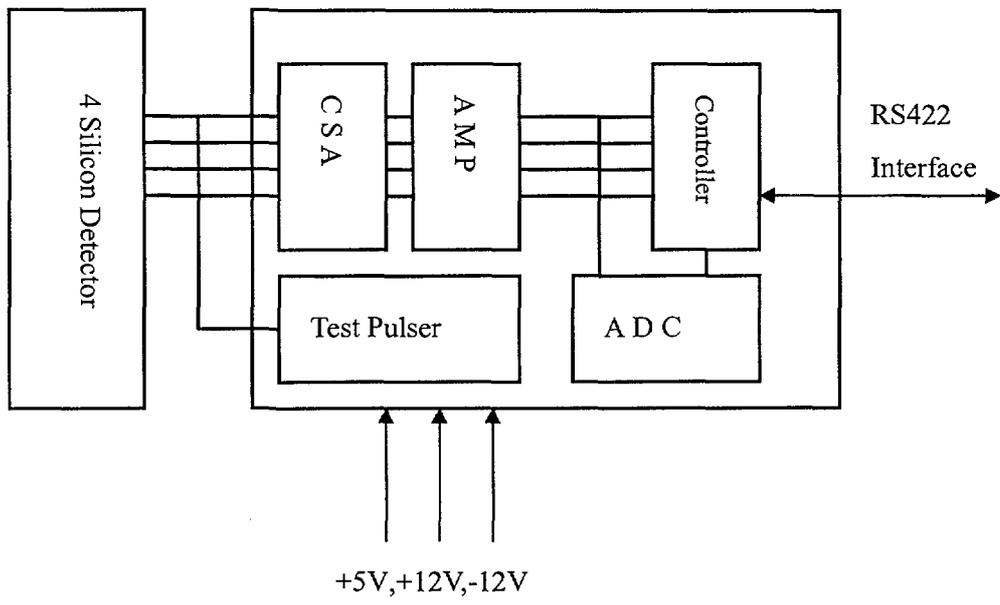


그림 2.4.4. HEPT driving electronics block diagram
 (Fig. 2.4.4. HEPT driving electronics block diagram)

50° Data before and after reduction

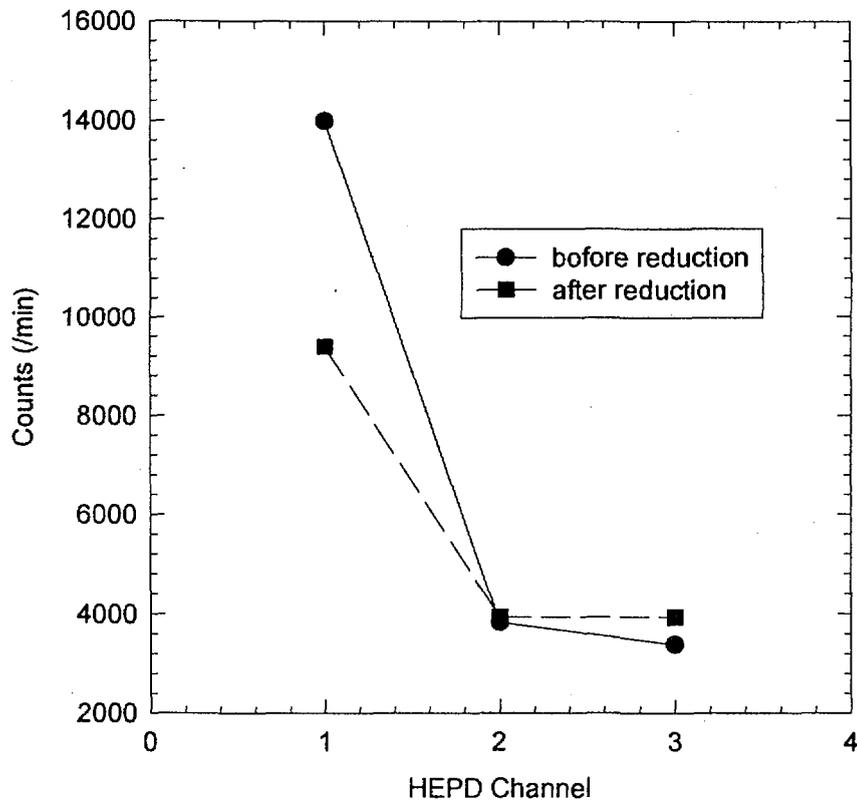


그림 2.4.5. 50°에서 측정된 HEPT 의 geometrical factor를 보정한 결과
(Fig. 2.4.5. HEPT geometrical factor collection data measured at 50°)

제 5 절 PIN photodiode를 사용한 CsI(Tl) 검출기 제작

1. CsI(Tl) 섬광체의 특성

섬광체(Scintillator)는 이온 방사선이 그것들을 통과해 갈 때 빛을 생산해 내는 고체, 액체, 기체 형태의 물질이다. 가장 널리 사용되는 무기섬광체(Inorganic Scintillator)는 NaI(Tl)로서 형광효율이 매우 높고, 다양한 크기와 형태로 사용된다. 그러나 잔광성 및 흡습성이 강하므로 섬광체를 밀봉하여 사용하여야 한다. 또한 밀도(3.67g/cm^3)와 유효원자번호($Z_{\text{eff}}=50$)가 작아서 소형화하는데 어려움이 있다. 따라서 NaI(Tl)의 단점을 보완할 수 있는 새로운 섬광체들이 개발되고 있으며, CsI(Tl), BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), CdWO_4 , GSO(Se) 등이 많이 사용되고 있다. 표 5.1.1에 섬광체의 특성을 요약하여 나타내었다. 특히 Bialkali photocathode를 사용하는 PM tube의 감도가 400nm 근방에서 가장 높는데 비하여, Si PIN photodiode는 950nm 근방에서 광 감도가 가장 좋으므로 발광 스펙트럼의 Peak 파장이 550nm로 가장 높은 CsI(Tl)이 특히 잘 어울린다.

CsI(Tl) 섬광체의 유효원자번호는 54이므로 NaI(Tl)의 50보다 크고, 밀도도 더 크므로 감마선 저지능이 크고 Peak-to-Compton 비율도 더 높으므로 Photo Peak를 계수하는 소형의 계측기에 장점이 있다. 그림 5.1.1은 본 연구에서 사용한 CsI(Tl)로서 직경 3cm, 길이 3cm의 원통형이다. CsI(Tl)은 표면이 거칠거칠하고 경도가 2인 섬광체로서 현재까지 알려진 섬광체 중에서 방사선 에너지 당 광자 생성량이 가장 큰 물질이다. 또 약간의 흡습성이 있고, 물과 알코올에 잘 녹으므로 취급에 주의해야 한다. 그러나 NaI(Tl)처럼 공기 중의 습기와 직접 반응을 일으키지는 않으므로 보관에 문제는 없다.

2. CsI(Tl) 섬광검출기의 제작 과정

CsI(Tl) 섬광체에 PIN photodiode를 결합한 섬광 검출기 시제품을 제작하는 과정은 다음과 같다.

첫째, CsI(Tl) 단결정은 무른 재질의 표면이 거칠한 재료이므로 제작하려

는 검출기의 용도에 따라 가공하여 적절한 크기와 모양을 갖도록 한다. 본 연구에서는 3cm 직경, 3cm 길이의 원통형으로 가공된 재료를 구매하여 사용하였다.

둘째, 원통의 양 끝 면은 photodiode와 광학적으로 연결되어야 하므로 Polishing 과정을 거쳐야 한다. 그림 5.2.1과 같이 2000번 사포 (A), SiO₂ 0.25 μm (B), Al₂O₃ 0.05 μm (C)의 순서로 Polishing하여 빛이 잘 투과되도록 한다. CsI(Tl)은 물과 알코올에 모두 잘 녹으므로 Gel 타입의 연마제를 사용할 때는 잘 건조한 후에 사용하여야 한다.

셋째, Polishing된 CsI(Tl)의 한쪽 끝을 Optical grease를 이용하여 PIN photodiode(또는 Photomultiplier tube)와 결합한 후, Al foil로 전체를 잘 싸서 CsI(Tl) 내부에서 생성된 섬광은 안쪽으로 다시 반사시키도록 하며, 동시에 외부의 빛이 스며들어가지 않도록 한다. 그림 5.2.2는 본 연구에서 사용한 CsI(Tl)과 PIN photodiode의 사진이며, 그림 5.2.3은 Optical grease를 사용하여 결합된 모습이다. 그림 5.2.4와 같이 Al foil로 잘 싸 다음, 검정색 Wrapping tape로 마무리하여 외부 빛이 스며들어가지 않도록 한다. 완성된 CsI(Tl) 검출기를 그림 5.2.5에 보였다. CsI(Tl) 섬광체에 PIN silicon photodiode, 또는 PMT를 부착한 경우를 서로 비교하기 위하여 PMT를 연결한 CsI(Tl)을 하나 더 제작하여 비교하였다(그림 5.2.6). 여기에 사용된 PMT는 일본 Hamamatsu의 H3690-03 모델로서 (-)1000V Bias에서 사용한다.

3. 제작된 CsI(Tl) 섬광검출기의 성능 시험 및 평가

CsI(Tl) 검출기 시제품의 성능을 시험하기 위하여 BGO 검출기(그림 5.3.1), NaI(Tl) 검출기를 각각 1대씩 준비하여 감마선에 대한 응답을 측정, 비교하였다. 검출기 시험 장비(그림 5.3.2)는 PC에 장착된 Multichannel analyser, Amplifier, Preamp, High voltage power supply로 구성하였으며, ¹³⁷Cs source를 사용하여 661.6 keV 감마선에 대한 응답 스펙트럼을 각각 측정하였다.

그림 5.3.3.은 3"×3" NaI(Tl) 검출기에서 얻은 스펙트럼으로서 전형적인

형태를 보이며, 이 스펙트럼을 기준으로 다른 측정 결과를 평가하고자 하였다. 그림 5.3.4.는 3"×3" BGO 검출기의 Spectrum으로서 NaI(Tl)의 것과 비교할 때, Peak의 폭이 약 1.5배 넓어짐을 확인할 수 있다. 그러나 BGO의 유효 원자번호와 밀도가 NaI(Tl)보다 크므로 Photo peak의 비율이 훨씬 크다. 즉 BGO 검출기는 NaI(Tl)에 비하여 에너지 Resolution은 떨어지지만 같은 크기에서 검출효율이 좋고 Photo peak의 비율이 큰 장점을 가진다.

그림 5.3.5.는 본 과제에서 제작한 검출기로서 CsI(Tl) scintillator에 PMT를 부착한 것이다. NaI(Tl) 검출기의 Spectrum과 비슷한 특성을 보여주며, 특히 에너지 분해능이 6.5%로서 상당히 우수하다. 그림 5.3.6.은 CsI(Tl) scintillator에 PIN Si photodiode Hamamatsu S2744-08을 부착하여 제작된 검출기의 측정 결과이다. PMT를 부착한 검출기에 비하여 상당히 넓어진 Peak를 보이고 있으며, 낮은 Channel의 Noise와 연결된 스펙트럼을 보인다. 오실로스코프로 측정해 보면 검출기에 30V Bias 전압을 걸어주어도 0.1mV 이상의 Noise들이 발진파의 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 앞으로 이 부분의 보완이 필요할 것이다. PIN Si photodiode로 제작된 섬광검출기는 분해능이 그다지 우수한 결과를 얻지는 못하였으나, 개선할 경우 더 우수한 성능을 보일 것으로 사료된다.

표 5.1.1 무기 섬광체의 물리적 특성

(Table 5.1.1 Physical Properties of Common Inorganic Scintillators)

섬광체	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	CdWO ₄
밀도(g/cm ³)	3.67	4.51	7.13	7.90
Max. Emission 파장(nm)	415	550	480	470
Decay Constant (μ sec)	0.23	0.9	0.3	20.0
녹는점(°C)	651	621	1050	1325
Photons/MeV	40000	52000	8500	13000
Radiation Length(cm)	2.59	1.86	1.13	1.00
Refractive Index at peak emission	1.80	1.78	2.15	2.25
Stability	Very Hygroscopic	Slightly Hygroscopic	Stable	Stable

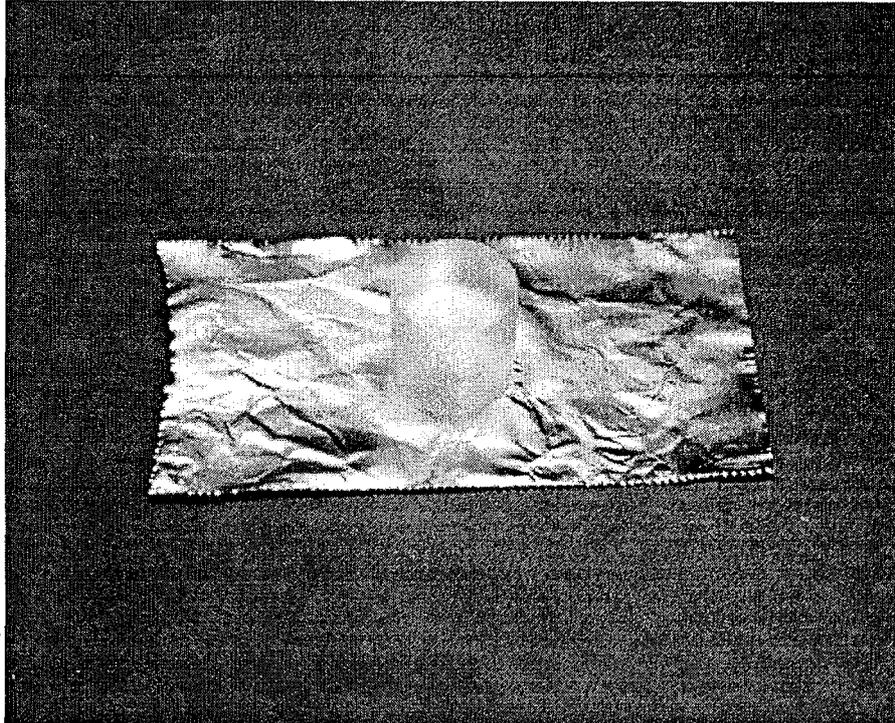
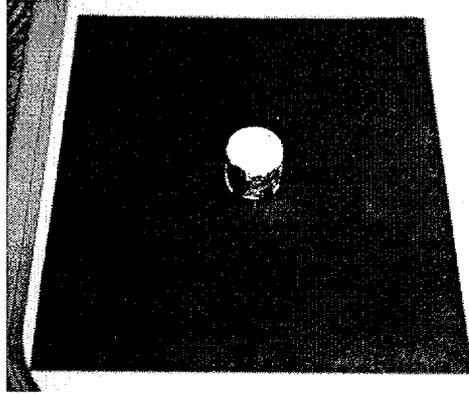
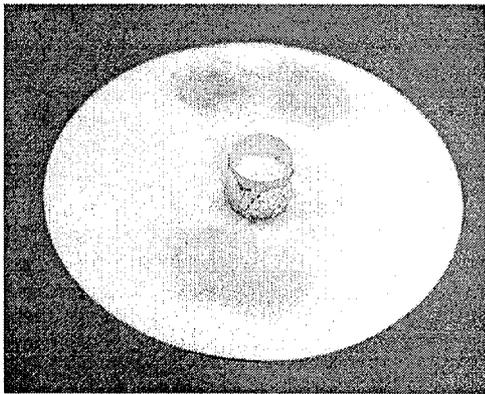


그림 5.1.1 직경 3cm, 길이 3cm의 NaI(Tl) 섬광체

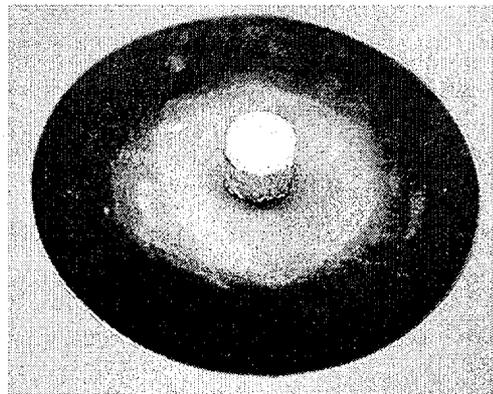
Fig. 5.1.1 NaI(Tl) scintillator 3cm diameter 3cm long



(A)



(B)



(C)

그림 5.2.1 CsI(Tl) 섬광체의 Polishing 과정. (A) \Rightarrow (B) \Rightarrow (C).

(Fig. 5.2.1 Polishing procedure of CsI(Tl) scintillator. (A) \Rightarrow (B) \Rightarrow (C).)

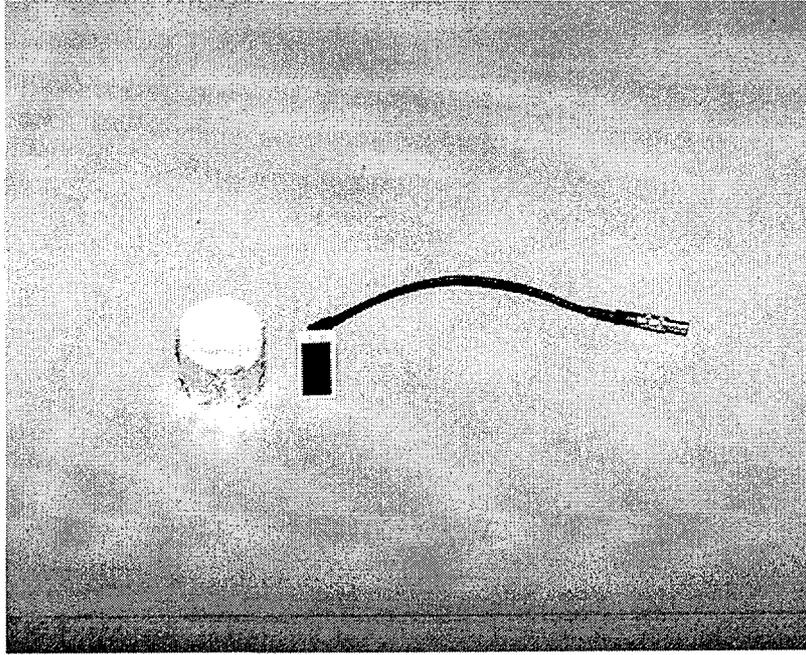
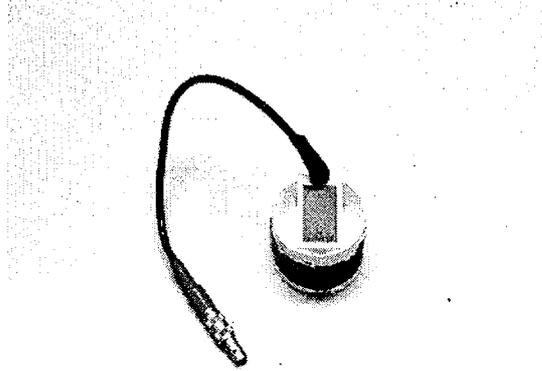


그림 5.2.2 CsI(Tl) 섬광체와 Hamamatsu S2744 PIN silicon photodiode.

(Fig. 5.2.2 CsI(Tl) and Hamamatsu S2744 PIN silicon photodiode.)



(A)



(B)

그림 5.2.3 CsI(Tl) 섬광체와 PIN photodiode의 결합된 모습.

(Fig. 5.2.3. CsI(Tl) scintillator coupled to PIN photodiode.)



그림 5.2.4 결합된 CsI(Tl) 섬광체와 PIN photodiode를 Al foil로 싸 모습.

(Fig. 5.2.4. CsI(Tl) detector wrapped with Al foil.)

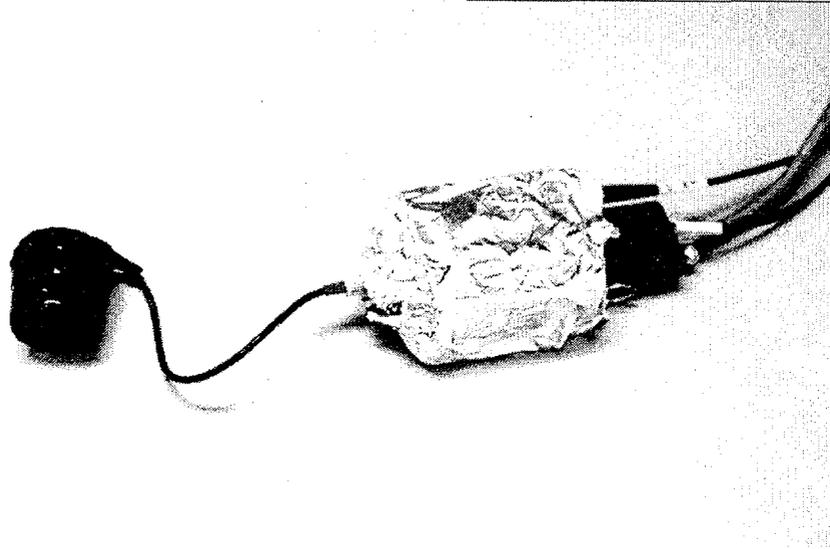


그림 5.2.5 제작 완료된 CsI(Tl) 검출기와 Preamp.

(Fig. 5.2.5. Finished CsI(Tl) detector and Preamp.)

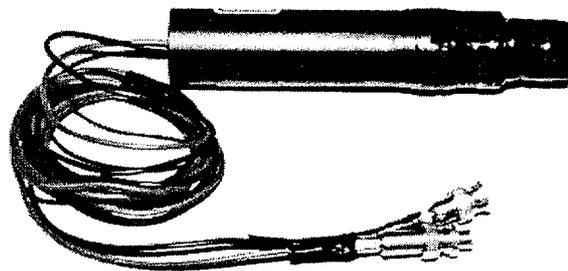


그림 5.2.6 PMT를 사용하여 제작된 CsI(Tl) 검출기
(Fig. 5.2.6 Fabricated CsI(Tl) detector using PMT)

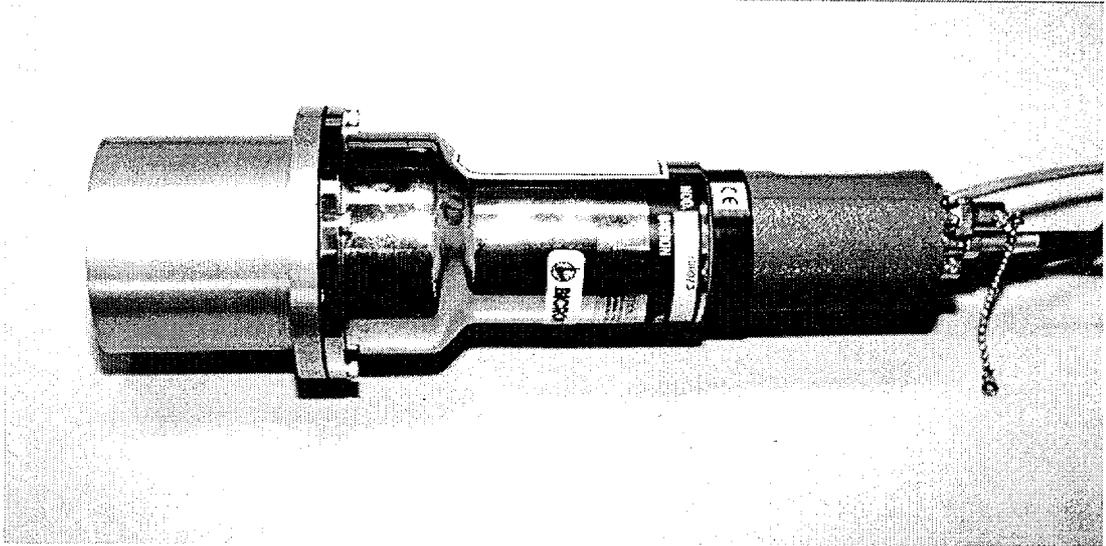


그림 5.3.1. 3"×3" BGO 검출기

(Fig. 5.3.1 3"×3" BGO detector)

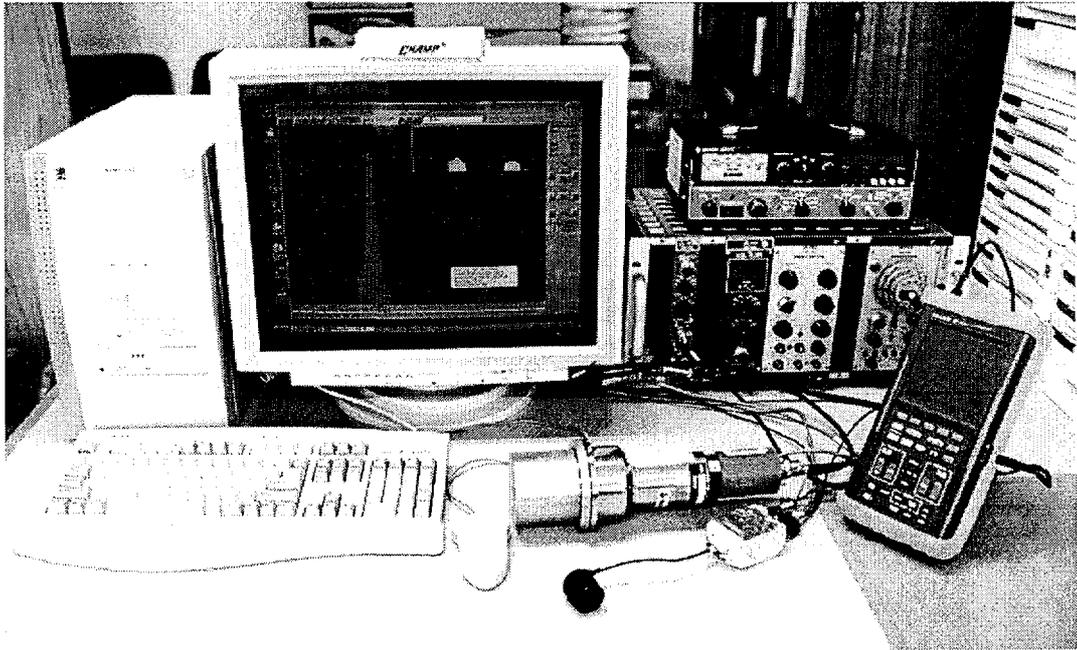


그림 5.3.2. 검출기 시험 장비

(Fig. 5.3.2. Detector test electronics)

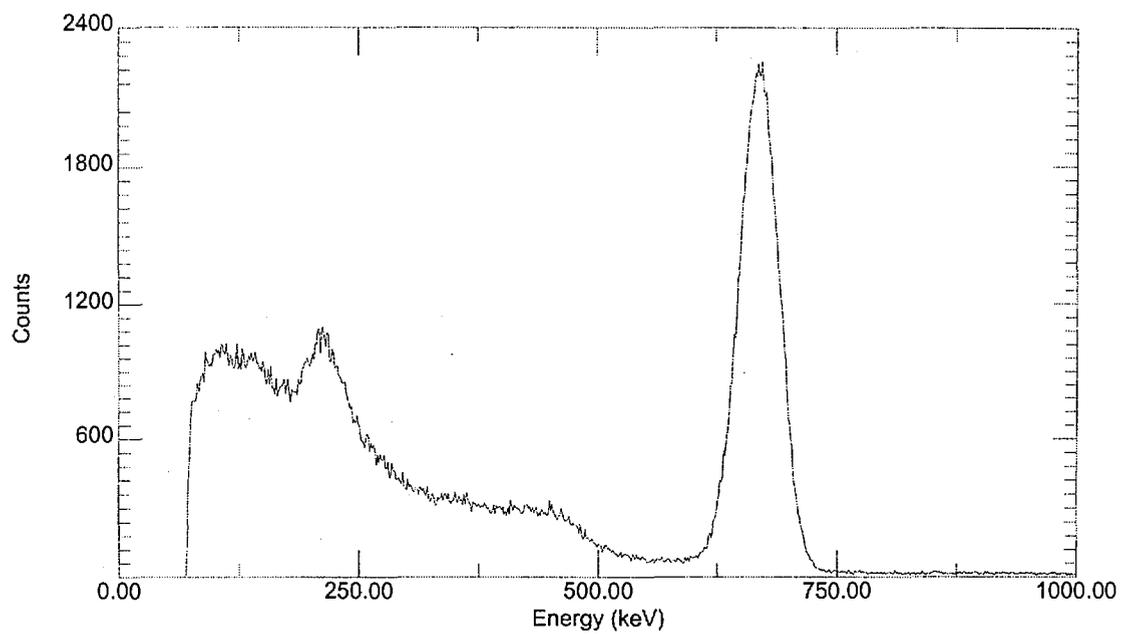


그림 5.3.3. NaI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼

(Fig. 5.3.3. 662keV γ -ray spectrum of NaI(Tl) detector)

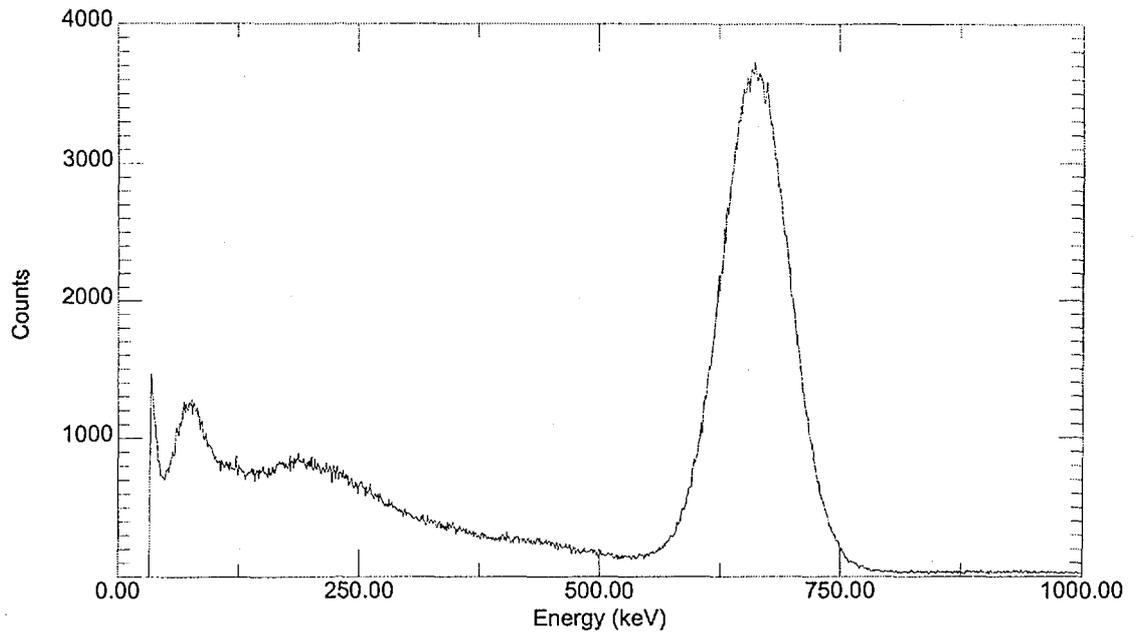


그림 5.3.4. BGO 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼

(Fig. 5.3.4. 662keV γ -ray spectrum of BGO detector)

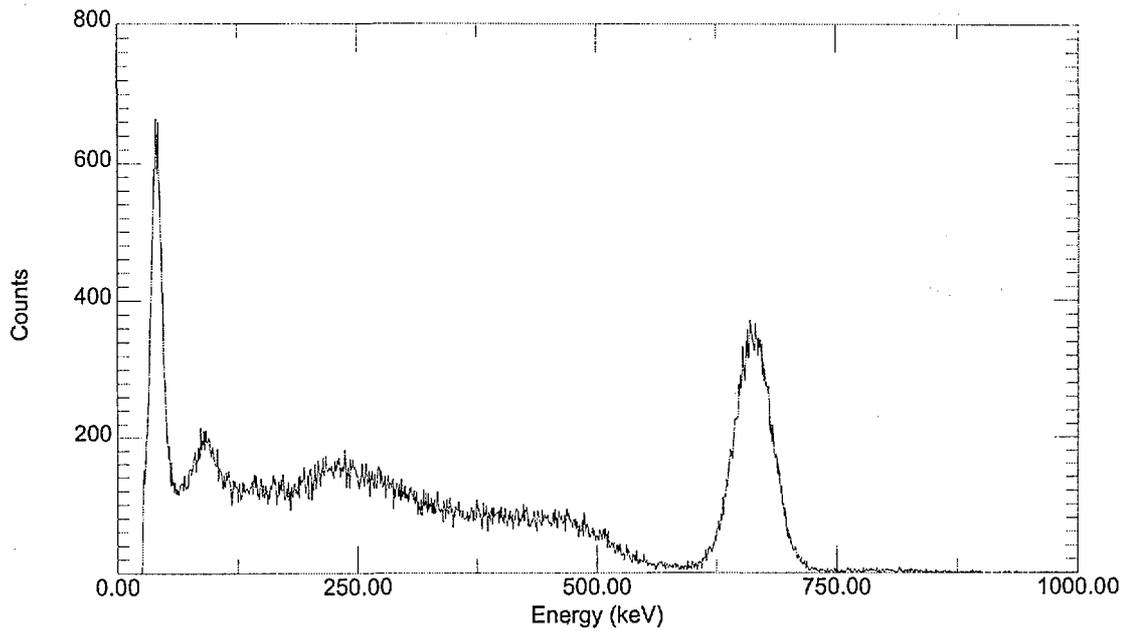


그림 5.3.5. PMT 부착 CsI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼
(Fig 5.3.5. 662keV γ -ray spectrum of CsI(Tl) detector with PMT)

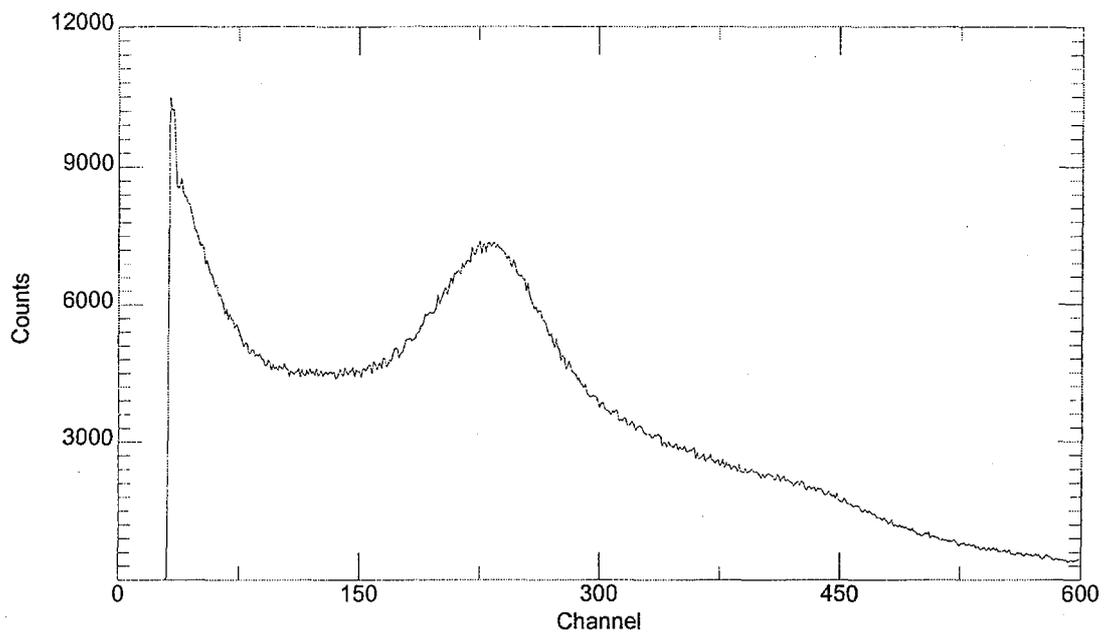


그림 5.3.6. PIN photodiode CsI(Tl) 검출기의 662keV 감마선 스펙트럼

(Fig. 5.3.6. 662keV γ -ray spectrum of CsI(Tl) detector with PIN photodiode)

제 3 장 결론 및 건의사항

고에너지 방사선 입자 측정기는 일반적으로 사용하는 X-선, γ -선 측정기와는 달리 입자의 에너지 측정과 Identification이 동시에 가능한 장치이다. Silicon Surface Barrier 검출기를 ΔE 검출기로 하고, CsI(Tl) Scintillator를 E 검출기로 하여 ΔE -E Telescope를 시험 제작하였으며, 35 MeV 이하의 양성자, 중양자 및 삼중수소 검출 실험을 성공적으로 수행하였다.

ΔE -E Telescope를 설계, 제작할 때는 검출기 매질에서의 입자 에너지 손실량을 미리 예측하여야 하며, 이를 위하여 PC에서 손쉽게 계산할 수 있는 전산코드를 Bethe formula에 근거하여 개발하였다. 계산 결과는 실험적으로 얻어진 Table의 값과 잘 일치하였으며, ΔE -E Telescope의 설계에 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

고에너지 방사선 입자 검출에는 검출기 뿐 아니라 전자회로의 구성 및 스펙트럼의 분석 기술도 매우 중요하며, 따라서 앞으로 이 부분의 개발도 매우 중요한 과제 중의 하나이다. 2년 간의 연구를 통하여 기본 설계 및 양성자 검출기 시험 제작 및 Test를 수행하여 성공적인 결과를 얻었으며, 중이온 검출기의 설계 기술을 확보하였다. 앞으로 1 GeV 근방의 아주 높은 에너지에서의 입자 검출기 개발로 발전시키는 것도 중요한 의미를 가질 것이다. 또, ΔE -E Telescope는 설계 과정에서 어떤 검출기를 선택하느냐에 따라 전자회로의 구성이 조금씩 달라지므로 이에 대한 연구도 심도 있게 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 BGO, NaI(Tl), CsI(Tl) 검출기의 특성을 실험적으로 비교하여 결과를 얻었으며, 특히 CsI(Tl) 섬광체 검출기는 PMT 또는 PIN Si photodiode와 결합된 검출기를 각각 직접 제작하여 좋은 결과를 얻었다. 앞으로 고에너지 입자 관별기로서 뿐 아니라 감마선 검출기의 제작 및 응용 계측 장비의 개발에도 유용하게 사용될 것을 기대한다.

본 연구에서 개발한 CsI(Tl) 검출기는 양성자나 중이온뿐 아니라 감마선

에도 자주 사용하는 방사선 검출기로서 방사선 계측과 관련된 모든 분야에 활용이 가능하다. 본 연구의 결과는 다른 종류의 방사선 측정기에도 응용 가능하므로, 방사선 계측 기술의 향상에 활용할 수 있다. 근래에는 방사선을 이용한 첨단계측 기술의 개발이 Array 검출기를 사용한 영상화에 집중되고 있으며, 본 과제에서 확보된 방사선 검출기 제작 기술은 Array 검출기 제작의 기초 기술이다.

참고문헌

- [1] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 2nd ed. (J. Wiley & Sons, New York, 1989).
- [2] S. P. Ahlen, Phys. Rev. A17(1978) 1236.
- [3] Heman Cember, Health Physics 2nd Ed. (Pergamon Press, 1983).
- [4] W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, A How-to Approach", 2nd Revised Edition, (Springer-Verlag, Berlin, 1994).
- [5] J. Kantele, "Handbook of Nuclear Spectroscopy", (Academic Press, London, 1995)
- [6] L. C. L. Yuan and C.-S. Wu Ed., Methods of Nuclear Physics, Vol. 5, Nuclear Physics Part A, (Academic Press, New York, 1961).
- [7] J.H. Ha, J.C. Kim, Y.K. Kim, M. Youn, S.J. Chae, H.T. Chung, J.H. Choi, C.S. Lee, J.U. Kwon, C.-B. Moon, J.S. Chai, Y.S. Kim, and J.D. Lee, "Energy measurement of 50 MeV proton beam with a NaI(Tl) scintillator", Nuclear Instruments and Methods in Physical Research A350, 411-414(1994)
- [8] KAERI/RR-1769/96, "원자력 산업용 가속기 개발 계획(안) 수립 및 기본 설계 연구", 한국원자력연구소.
- [9] Z. F. Ziegler, "Handbook of Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements", Pergamon Press, New York, 1980.
- [10] W. B. Mann, A. Rytz, A. Spornol, and W. L. McLaughlin, "Radioactivity Measurements, Principles and Practice", Pergamon Press, Oxford, 1991.

[11] N. Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

[12] J. B. Marion and F. C. Young, "Nuclear Reaction Analysis, Graphs and Tables", John Wiley & Sons, Inc. - New York, 1968.

부 록

Energy Loss 계산 전산 코드 List

```

PROGRAM ECHANGE
C   CALCULATE THE ENERGY OF A PARTICLE(P,D...) AFTER PASSING THROUGH
C   MATERIALS
DIMENSION E(20),P(20),MATHC(19),MATNAM(19),THICK(19)
DIMENSION ERANGE(20),Erng_cm(20),DDE(20)
CHARACTER*8 MATNAM
REAL MATHC
COMMON /RANGE/ ERNG,Erng_cm,RRNG,REGY,THMAT
1   CONTINUE
    OPEN (UNIT=3, FILE='Elossout', STATUS='NEW')
    write(*,*)'=====
PRINT *, 'Incident particle,Z(F10),A(F10),E(F10) in MeV/nucleon'
READ(*,1000) ZI,AI,E(1)
1000 FORMAT(3F10.5)
    if(zi.le.0.0) go to 999
1010 FORMAT(A8)
    PRINT *, ' How many of materials do you need (up to 19)?'
    READ(*,1001) LAYER
1001 FORMAT(I2)
    DO 10 I=1,LAYER
        PRINT 1030,I
        READ(*,1010) MATNAM(I)
        PRINT *, ' Thickness of material in cm (F10.5)'
        READ(*,1000) MATHC(I)
    10 CONTINUE
1030 FORMAT('/' NO. ', I2, ' Material(AIR, PLASTIC, Carbon, CH2, AL, MYLAR, '
+         ', 'CU, AU, PB, BE, SI, LI, TA, NAI, CSI)')
    DO 20 I=1,LAYER
        E(I+1)=E(I)-ELOSS(E(I), ZI, AI, MATNAM(I), MATHC(I))
        DE=DE+ELOSS(E(I), ZI, AI, MATNAM(I), MATHC(I))
        DDE(I)=ELOSS(E(I), ZI, AI, MATNAM(I), MATHC(I))
        ERANGE(I)=ERNG
        Erng_cm(I)=Erng_cm
        THICK(I)=THMAT
        IF(E(I+1).LE.0.0) GO TO 30
    20 CONTINUE
    30 CONTINUE
    DO 40 I=1,LAYER
        PMOM=(E(I)+931.5)**2-867692.25
        P(I)=SQRT(PMOM)
    40 CONTINUE
        I=LAYER+1
        IF(E(I).GT.0.0) THEN
            PMOM=(E(I)+931.5)**2-867892.25
            P(I)=SQRT(PMOM)

```

```

ELSE
P(I)=0.0
END IF
  write(3,9)Zi,Ai,E(1)
  write(*,9)Zi,Ai,E(1)
9   FORMAT(///4x,'Incident particle of Z=',F4.0,' A=',F4.0,
*     ' E=',F7.2,' MeV/nucleon')
DO 99 I=1,LAYER
  write(3,11)I,matnam(I),mathc(I)
  write(*,11)I,matnam(I),mathc(I)
11  format(//2x,'Layer',I3,'> Material:',A8,
*     ' with the thickness of ',F10.5,' in cm',/)
  write(3,*)' Old Energy = ',E(I),' AMeV',E(I)*AI,' MeV '
  write(3,*)' Range = ',ERANGE(I)*1e3,' in mg/cm2', '->',
*     Erange_cm(I),' in cm'
  write(3,*)' New Energy = ',E(I+1),' AMeV',E(I+1)*AI,' MeV'
  write(3,*)' Energy Loss = ',DDE(I),' AMeV',DDE(I)*AI,' MeV'
C
PRINT *,' Old Energy = ',E(I),' AMeV',E(I)*AI,' MeV '
PRINT *,' Range = ',ERANGE(I)*1e3,' in mg/cm2', '->',
*     Erange_cm(I),' in cm'
PRINT *,' New Energy = ',E(I+1),' AMeV',E(I+1)*AI,' MeV'
PRINT *,' Energy Loss = ',DDE(I),' AMeV',DDE(I)*AI,' MeV'
99 CONTINUE
  write(3,12)De,De*Ai
  write(*,12)De,De*Ai
12  format(/3x,'Total Energy Loss = ',F7.3,' AMeV ',F7.2,' MeV',/)
  DE=0.
  go to 1
999 STOP
END

```

```

FUNCTION ELOSS(E,ZI,AI,MAT,THICK)
COMMON /RCMMN/ MIADJ,TENERG(138),TRANGE(138,20)
COMMON /RANGE0/ ERNG,Erng_cm,RRNG,REGY,THMAT
DIMENSION NAMAT(15)
DIMENSION ZM(15),AM(15),AIADJ(15),RHO(15)
CHARACTER*8 MAT,NAMAT
DATA NAMAT /'AIR','PLASTIC','C','CH2','AL','MYLAR','CU','AU','PB',
+ 'BE','SI','LI','TA','NAI','CSI'/
DATA ZM / 7.2,3.38,6.0,2.64,13.0,4.5,29.0,79.0,82.0,
+ 4.0,14.0,3.0,73.0,32.,55.5/
DATA AM /14.41,6.56,12.01,4.62,26.98,8.64,63.54,196.97,207.9,
+ 9.01,7.,49.0,180.9,75.,133.5/
DATA AIADJ/85.7,64.7,78.,57.4,166.0,78.7,322.,790.,823.,63.7,
+ 173.,40.,718.0,452.,553.1/
DATA RHO /0.00121,1.032,2.0,0.940,2.7,1.395,8.96,19.32,11.35,
+ 1.848,0.534,4.50,16.6,3.667,4.51/
DATA GFAC /0.948/
DO 10 I=1,15
IF(MAT.EQ.NAMAT(I)) GO TO 20

```

```

10 CONTINUE
   K=10
   PRINT *, 'GIVE ME ZM, AM, AIADJ, RHO, IGAS, ETA (4F10.5, 2I)'
   READ(*, 1000) ZM(10), AM(10), AIADJ(10), RHO(10), IGAS, ETA
1000 FORMAT(4F10.5, 2I5)
   GO TO 30
20 CONTINUE
   K=I
   IGAS=0
   IF(K.EQ.1) IGAS=1
   ETA=1.0
   IF(K.EQ.1) ETA=GFAC
30 CONTINUE
   ERNG=RRANGE(E, ZI, AI, ZM(K), AM(K), AIADJ(K), 1, 1, 1, RHO(K), IGAS, ETA)
   Erng_cm = ERNG/RHO(K)
   THMAT=THICK*RHO(K)
   RRNG=ERNG-THMAT
   IF(RRNG.GT.0.0) GO TO 40
   REGY=0.0
   GO TO 50
40 REGY=RNERGY(RRNG, ZI, AI, ZM(K), AM(K), AIADJ(K), 1, 1, 1, RHO(K), IGAS, ETA)
50 ELOSS=E-REGY
   RETURN
   END
   FUNCTION RDEDX(E1, Z0, A1, Z2, A2, IADJ, I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
   COMMON/FLOOK/F1, F2, F3, F4, F5, F6, Z1
   REAL IADJ
   DIMENSION VA(4), V2FVA(4), Z1ABA(14), COSXA(14)
   DATA Z1ABA, COSXA/0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.30, 0.4, 0.5, 0.6,
C 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 1.000, 0.9905, 0.9631, 0.9208, 0.8680,
C 0.7478, 0.6303, 0.5290, 0.4471, 0.3323, 0.2610,
C 0.2145, 0.1696, 0.1261/
   DATA VA, V2FVA/1., 2., 3., 4., 0.33, 0.30, 0.26, 0.23/
   PI=3.14159265
   ALPHA=1./137.03604
   G=1.+E1/931.5016
   DELT=DELTA(G, Z2, A2, IADJ, RHO, IGAS, ETAD)
   BSQ=1.-1./G**2
   B=SQRT(BSQ)
   Z1=Z0*(1.-EXP(-130.*B/Z0**(2./3.)))
   ETA=B*G
   EMASS=0.5110034E+06
   F1=0.3070722*Z1**2*Z2/(BSQ*A2)
   ETAM2=1./ETA**2
   CADJ=1.0E-06*IADJ**2*ETAM2*(0.422377+ETAM2*(0.0304043-ETAM2*
1 0.00038106))+1.0E-09*IADJ**3*ETAM2*(3.858019+ETAM2*(-0.1667989
2 +ETAM2*0.00157955))
   F2=ALOG(2.*EMASS*BSQ/IADJ)-CADJ/Z2
   F6=2.*ALOG(G)-BSQ
   F3=0.0
   F4=1.0

```

```

F5=0.0
IF(12.EQ.0)GO TO 60
Y=Z1*ALPHA/B
Y2=Y**2
MSUM=INT(5.*Y)+1
SUMR=0.
DO 90 N=1,MSUM
FN=FLOAT(N)
FN2=FN**2
90 SUMR=SUMR+(1./(FN2+Y2)-1./FN2)/FN
F3=-Y2*(1.202+SUMR)
60 IF(13.EQ.0)GO TO 50
V=ETA/(ALPHA*SQRT(Z2))
IF(V.GE.4.)GO TO 25
DO 10 I=1,3
IF(V.GE.VA(I+1))GO TO 10
V2FV=V2FVA(I)+(V-VA(I))*(V2FVA(I+1)-V2FVA(I))
GO TO 30
10 CONTINUE
25 V2FV=0.45/SQRT(V)
30 F4=1.+2.*Z1*V2FV/(V**2*SQRT(Z2))
50 IF(11.EQ.0)GO TO 70
Z1A=Z1*ALPHA
Z1AB=ABS(Z1A/B)
COSX=0.
DO 40 I=1,13
IF(Z1AB.GE.Z1ABA(I+1))GO TO 40
COSX=COSXA(I)+(Z1AB-Z1ABA(I))*(COSXA(I+1)-COSXA(I))/
C (Z1ABA(I+1)-Z1ABA(I))
40 CONTINUE
F5=0.5*Z1A*(B*(1.725+0.52*PI*COSX)+Z1A*(3.246-0.451*BSQ
1 +Z1A*(1.522*B+0.987/B+Z1A*(4.569-0.494*BSQ-2.696/BSQ
2 +Z1A*(1.254*B+0.222/B-1.170/BSQ/B))))
IF(Z1AB.LE.100.*ALPHA)GO TO 70
IF((Z1AB**9/6.).LT.ABS(F5/(F2*F4+F3+F5+F6-DELT/2.)))GO TO 70
F5=0.
70 RDEDX=F1*(F2*F4+F3+F5+F6-DELT/2.)/A1
RETURN
END

FUNCTION DELTA(G,Z2,A2,FIADJ,RHO,IGAS,ETA)
IF(G.GE.1.8)GO TO 10
DELTA=0.
RETURN
10 PLASMA=28.8*SQRT(RHO*Z2/A2)
CBAR=2.*ALOG(FIADJ/PLASMA)+1.0
B=SQRT(1.-1./G**2)
Y=2.*ALOG(B*G)+IGAS*ALOG(ETA)
IF(IGAS.EQ.1)GO TO 100
IF(FIADJ.GE.100.)GO TO 20
Y1=9.212

```

```

        IF(CBAR, GE, 3.681)GO TO 11
        Y0=0.9212
        GO TO 200
11      Y0=1.502*CBAR-4.606
        GO TO 200
20      Y1=13.82
        IF(CBAR, GE, 5.215)GO TO 21
        Y0=0.9212
        GO TO 200
21      Y0=1.502*CBAR-6.909
        GO TO 200
100     IF(CBAR, GE, 12.25)GO TO 110
        Y1=18.42
        IF(CBAR, LT, 12.25)Y0=9.212
        IF(CBAR, LT, 11.5)Y0=8.751
        IF(CBAR, LT, 11.0)Y0=8.291
        IF(CBAR, LT, 10.5)Y0=7.830
        IF(CBAR, LT, 10.0)Y0=7.370
        GO TO 200
110     Y1=23.03
        IF(CBAR, GE, 13.804)GO TO 120
        Y0=9.212
        GO TO 200
120     Y0=1.502*CBAR-11.52
200     A=(CBAR-Y0)/(Y1-Y0)**3
        IF(Y, GT, Y0)GO TO 210
        DELTA=0.
        RETURN
210     IF(Y, GE, Y1)GO TO 220
        DELTA=Y-CBAR+A*(Y1-Y)**3
        RETURN
220     DELTA=Y-CBAR
        RETURN
        END

```

```

FUNCTION RRANGE(E, Z1, A1, Z2, A2, IADJ, I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
REAL IADJ, IADJA(20)
COMMON/PARAC/Z1P, A1P, I1P, I2P, I3P, NIADJ, IADJA, Z2A(20), A2A(20)
1      , RHOA(20), IGASA(20), ETADA(20)
COMMON/RCMMN/MIADJ, TENERG(138), TRANGE(138, 20)
DATA TENERG/1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8., 9., 10., 12., 14., 16., 18.,
C 20., 22., 24., 26., 28., 30., 32., 34., 36., 38., 40., 42., 44., 46.,
C 48., 50., 55., 60., 65., 70., 75., 80., 85., 90., 95., 100., 105.,
C 110., 115., 120., 125., 130., 135., 140., 145., 150., 155., 160.,
C 165., 170., 175., 180., 185., 190., 195., 200., 210., 220., 230.,
C 240., 250., 260., 270., 280., 290., 300., 310., 320., 330., 340.,
C 350., 360., 370., 380., 390., 400., 410., 420., 430., 440., 450.,
C 460., 470., 480., 490., 500., 510., 520., 530., 540., 550., 560.,
C 570., 580., 590., 600., 610., 620., 630., 640., 650., 660., 670.,
C 680., 690., 700., 710., 720., 730., 740., 750., 760., 770., 780.,
C 790., 800., 820., 840., 860., 880., 900., 920., 940., 960., 980.,

```



```

C 1000., 1200., 1400., 1600., 1800., 2000., 2400., 2800., 3200. /
IF((Z1. EQ. Z1P). AND. (A1. EQ. A1P). AND.
C (I1. EQ. I1P). AND.
C (I2. EQ. I2P). AND. (I3. EQ. I3P))GO TO 451
NIADJ=1
MIADJ=1
Z1P=Z1
A1P=A1
I1P=I1
I2P=I2
I3P=I3
IADJA(1)=IADJ
Z2A(1)=Z2
A2A(1)=A2
RHOA(1)=RHO
IGASA(1)=IGAS
ETADA(1)=ETAD
GO TO 450
451 DO 420 I=1, NIADJ
MIADJ=I
IF((IADJ. EQ. IADJA(I)). AND. (Z2. EQ. Z2A(I)). AND.
1 (A2. EQ. A2A(I)). AND. (RHO. EQ. RHOA(I)). AND. (IGAS. EQ. IGASA(I)).
2 AND. (ETAD. EQ. ETADA(I)))GO TO 100
420 CONTINUE
NIADJ=NIADJ+1
IF(NIADJ. GE. 20)NIADJ=20
MIADJ=NIADJ
IADJA(MIADJ)=IADJ
Z2A(MIADJ)=Z2
A2A(MIADJ)=A2
RHOA(MIADJ)=RHO
IGASA(MIADJ)=IGAS
ETADA(MIADJ)=ETAD
450 DO 30 I=1, 8
30 TRANGE(I, MIADJ)=(A1*(931. 5016/938. 213)/Z1**2)*PRNGLO(TENERG(I),
1 IADJ, Z2, A2)+BZ(TENERG(I), Z1, A1, Z2, A2, IADJ)
DO 300 I=9, 138
DE2=(TENERG(I)-TENERG(I-1))/2.
DEDX1=RDEDX((TENERG(I-1)+1. 33998104*DE2), Z1, A1, Z2, A2, IADJ,
C I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
DEDX2=RDEDX((TENERG(I-1)+1. 86113631*DE2), Z1, A1, Z2, A2, IADJ,
C I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
DEDX3=RDEDX((TENERG(I-1)+0. 13886369*DE2), Z1, A1, Z2, A2, IADJ,
C I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
DEDX4=RDEDX((TENERG(I-1)+0. 66001869*DE2), Z1, A1, Z2, A2, IADJ,
C I1, I2, I3, RHO, IGAS, ETAD)
DR=DE2*(0. 65214515/DEDX1 + 0. 34785485/DEDX2
C +0. 34785485/DEDX3 + 0. 65214515/DEDX4)
300 TRANGE(I, MIADJ)=TRANGE(I-1, MIADJ)+DR
100 IF(E. GT. TENERG(1))GO TO 60
RRANGE=E*TRANGE(1, MIADJ)/TENERG(1)

```

```

RETURN
60 DO 70 I=2,138
   IF(E.GT.TENERG(I))GO TO 70
   RRANGE=TRANGE(I-1,MIADJ)+(E-TENERG(I-1))
   C *(TRANGE(I,MIADJ)-TRANGE(I-1,MIADJ))
   C /(TENERG(I)-TENERG(I-1))
   GO TO 200
70 CONTINUE
200 CONTINUE
RETURN
END

FUNCTION BZ(E,Z1,A1,Z2,A2,IADJ)
REAL IADJ
G=1.+E/931.5016
B=SQRT(1.-1./G**2)
IF(B.GE.(2.*Z1/137.))GO TO 10
BZ=A1*(931.481/938.259)*(48.0+5.8*IADJ**(5./8.))*
C (A2/Z2)*1.0E-05*Z1**(-1./3.)*B
GO TO 20
10 BZ=(A1*(931.481/938.259))*(7.0+0.85*IADJ**(5./8.))*
C (A2/Z2)*1.0E-06*Z1**(2./3.)
20 CONTINUE
RETURN
END

FUNCTION PRNGLO(E,IADJ,Z2,A2)
REAL IADJ
CR=938.213/931.5016
ELN=ALOG(E*CR)
ALN=ALOG(IADJ)
RLN=ALOG(A2/Z2)-7.5265E-01+2.5398*ELN-2.4598E-01*ELN**2
C +7.3736E-02*ALN-3.1200E-01*ELN*ALN
C +1.1548E-01*ALN*ELN**2+4.0556E-02*ALN**2
C +1.8664E-02*ALN**2*ELN-9.9661E-03*ALN**2*ELN**2
PRNGLO=EXP(RLN)/1.0E+03
RETURN
END

FUNCTION RENERGY(R,Z1,A1,Z2,A2,IADJ,I1,I2,I3,RHO,IGAS,ETAD)
REAL IADJ,IADJA(20)
COMMON/PARAC/Z1P,A1P,I1P,I2P,I3P,NIADJ,IADJA,Z2A(20),A2A(20)
1 ,RHOA(20),IGASA(20),ETADA(20)
COMMON/RCMMN/MIADJ,TENERG(138),TRANGE(138,20)
E=600.
RR=RRANGE(E,Z1,A1,Z2,A2,IADJ,I1,I2,I3,RHO,IGAS,ETAD)
IF(R.LE.TRANGE(1,MIADJ))GO TO 20
DO 10 I=2,138
K=I
IF(R.LE.TRANGE(I,MIADJ))GO TO 30
10 CONTINUE

```

```
30  RENERGY=TENERG(K-1)+(R-TRANGE(K-1, MIADJ))*(TENERG(K)-TENERG(K-1))/
C      (TRANGE(K, MIADJ)-TRANGE(K-1, MIADJ))
RETURN
20  RENERGY=TENERG(1)*R/TRANGE(1, MIADJ)
RETURN
END
```

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-1927/98					
제목 / 부제	고에너지 방사선 입자측정기 연구(II)				
연구책임자 및 부서명	김용균 (미래원자력기술개발단)				
연구자 및 부서명	이용범, 최석기 (신형로개발단) 하장호(미래원자력기술개발단) 황중선(담양대학)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1999년
페이지	81 p.	도표	있음(○), 없음()	크기	29.7 cm.
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), _ 급비밀	보고서종류	연구보고서		
연구위탁기관			계약번호		
초록	<p>△E-E Telescope 측정 방식에 의한 고에너지 방사선 입자 측정기를 자체 설계 제작하여 35 MeV 근방의 양성자 에너지 영역에서 시험하였다. 설계를 위하여 고에너지 입자 빔이 물질로 입사되었을 때의 에너지 손실을 계산하는 전산코드를 개발 완료하였다. 양성자 에너지 15~50 MeV 영역에서 사용하기 위한 측정기를 설계하여 시험 제작하였으며, 양성자 및 중양자의 에너지 측정 및 입자 판별 테스트를 수행하였다. 또한 CsI(Tl) 섬광체와 PIN photodiode를 결합한 소형 방사선 검출기 시제품을 개발하여 성공적인 결과를 얻었다. BGO, CsI(Tl), NaI(Tl) 섬광검출기들의 특성을 측정·분석하였으며, 앞으로 더 높은 에너지 영역에서의 양성자 검출기 및 중이온 검출기의 개발로 발전시키고자 한다.</p>				
주제명 키워드	<p>고에너지 방사선 입자 측정기, △E-E Telescope, 에너지 손실 계산 전산코드, 양성자 에너지 15~50 MeV, 에너지 측정, 입자 판별 테스트 BGO, CsI(Tl), NaI(Tl) 섬광검출기</p>				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1927/98					
Title / Subtitle		Research of High Energy Radiation Identification Detector(II)			
Project Manager and Department		Y. K. Kim (Advanced Nuclear Technology Development)			
Researcher and Department		Y. B. Lee, S. K. Choi (Advanced Reactor Technology) J. H. Ha (Advanced Nuclear Technology Development) J. S. Hwang (Provincial College of Damyang)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1999. 8.
Page	81 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ()	Size	29.7 cm.
Note					
Classified	Open(○), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract		<p>ΔE-E telescope high energy radiation detector was designed, fabricated, and tested at the 35 MeV proton energy. We developed the computer code to calculate the energy loss of projectile ions in the matter. Using the code, we designed and fabricated a detector to measure 15~50 MeV protons. The detector was successfully tested to measure the energy of protons and deuterons and to identify the ions. We also successfully developed a small radiation detector which is composed of CsI(Tl) scintillator and PIN Si photodiode. The characteristics of BGO, NaI(Tl), and CsI(Tl) scintillation detectors were measured and analysed. In future, we would like to extend the present result to the development of a higher energy proton detector and a heavy ion detector.</p>			
Subject Keywords		<p>High energy radiation detector, ΔE-E telescope, Computer code to calculate the energy loss, 15~50 MeV protons, Energy measurement, Particle identification, BGO, NaI(Tl), and CsI(Tl) scintillation detectors</p>			