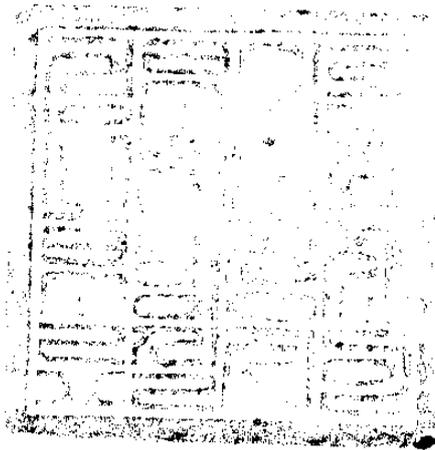


KAERI/RR-912/89

# 중성자변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발

The Development of Silicon Doping Technique by Neutron  
Transmutation

연구 기관  
한국원자력연구소



과학기술처

## 제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 "중성자변환법에 의한 실리콘도핑 기술개발" 사업의 연구보고서로 제출합니다.

1990년 6 월

연구기관명: 한국원자력연구소

연구책임자: 김 헌 준(중성자물리연구실)

연구원 : 김 용 채( " )

: 김 정 도( 원자로설계실 )

: 전 병 칠(중성자물리연구실)

: 이 창 희( " )

: 성 백 석( " )

: 이 정 수( " )

: 심 해 섭( " )

: 최 병 훈( " )

: 호 종 화( " )

감수위원 : 서 두 환( 원자로관리실 )

# 요 약 문

## I. 제 목

중성자변환법에 의한 실리콘도핑 기술개발

## II. 연구의 목적 및 중요성

오늘날 반도체소자는 대부분 고순도, 저결함의 CZ-Si 또는 FZ-Si를 소재로 이용하고 있다. 전자는 주로 IC, LSI 등 제조공정에서 많은 열처리 과정을 소요하는 소자가공에, 그리고 후자는 특히 대/중전력용 Thyristor, Diode 및 Transistor 등의 제조에 이용되고 있다.

FZ-Si 은 결정 제조공정에서 첨가불순물(Dopant)의 분포에 미시적인 불균일성(Striation)을 수반하게 되므로 대전력소자 제조에는 제한을 받게 된다. 즉 각 Ingot로부터 소자를 제조할 때 전기준특성의 기준 미달품이 많이 생기게 되므로 생산수율이 떨어지며, 전기특성정격도 저하하게 된다.

여기에 반해 NTD-Si 은 불순물을 외부에서 첨가하는 대신 고순도, FZ-Si Ingot 에 원자로 중성자를 조사하여 핵변환, 즉  $Si-30(n, \gamma) Si-31 \rightarrow P-31 + \beta^-$  를 통하여 Si 동위체의 하나인 Si-30을 불순물로 변환하는 방법

으로서 넓은 Dopant 농도 범위에 대해서 균일도를 대폭 향상할 수 있으므로 대전류용 소자 제조가 가능하고 또 생산수율도 아주 높일 수 있다. 현재 이와같은 대전력용 NTD-Si의 세계적 생산량은 ~120ton/yr 이고, 산업자동화 추세에 따라 그 수요도 계속 신장하는 추세에 있다.

현재 한국에너지연구소에서 건조중인 30MW 다목적연구로(KMRR)는 노심주위에 중수반사체를 설치하므로 열중성자 대비 속중성자 성분이 적은 양질의 중성자장을 얻을 수 있으므로 높은 품질의 NTD-Si 생산이 가능하다. 따라서 이 KMRR에 NTD 장치를 설계 제작하고 그 기술을 개발하는 것은 한편으로는 해외 반도체 제조업체의 NTD-Si 수탁사업에 참여하고, 다른 한편으로는 주로 Wafer 수입가공 단계에서 이제 막 일부 업체에서 CZ-Si의 생산을 시작한 국내업체에 FZ-Si Ingot 수입 또는 직접 그 생산으로 대전력용소자를 생산할 수 있도록 선도하는데 있다.

### III. 연구내용 및 범위

본 연구의 제2차년도 연구내용 및 범위는 NTD 기술개발을 위한 기초준비 및 기계구동/전자제어장치 설계 등으로 그 내용 및 범위는 다음과 같다.

#### 1. KMRR NTD-1,2 조사공내 핵 특성

- 가. 3차원 노물리계산에 의한 KMRR 노심특성으로부터 열중성자 분포 및 중성자 선질평가
- 나. NTD 장치 원자로반응도 영향 평가
- 다. NTD 장치 방사선가열 (Nuclear Heating) 평가

## 2. NTD 1/2 조사관 설계

가. 조사내관설계

나. NTD 1/2 조사관구조 설계 변경

다. 조사내관 장전기구 기본설계

라. 중성자조사량 실시간 감시

## 3. NTD 조사장치 설계

가. 기계구동장치 설계

나. 전자제어장치 설계

다. 조사방법 검토(유기방사능 평가)

## 4. NTD 조사관내 중성자 절대속 정밀측정법 연구

가. 다 검출박법에 의한 열외중성자 Spectrum 측정에 관한 연구

나.  $\beta$ - $\gamma$  동시계수장치 구성 및 계측특성 시험

다.  $\beta$ - $\gamma$  동시계수법에 의한 붕괴율 측정

## IV. 연구결과 및 건의

NTD-Si를 생산하기 위한 제2차년도 연구개발내용은 주로 기초기술 개발및 장치 설계에 관한 것으로 그 중요 연구내용 및 중간 결과는 다음과 같다.

### 1. KMRR NTD-1,-2 조사공 핵특성

가. NTD-1 조사관내 중심 위치 에서의 노물리 계산에서 얻은 5군

중성자속 으로부터 열 및 열외중성자속 밀도분포를 추산하였다.

$$d\phi_{th} \cong 4.26 \times 10^{13} E(eV)/(kT)^2 e^{-E/kT} dE$$

$$d\phi_{epi} \cong 3.60 \times 10^{10} /E(eV) dE$$

열중성자 및 열외중성자에 의한  $^{31}\text{P}$ -Dopant 생성비율은  $[^{31}\text{P}] \cong 1.78 \phi_{epi}/\phi_{th}$ 로 추산되며, 열외중성자에 의한  $^{31}\text{P}$ -Dopant 생성율은 열중성자의 약 0.15% 이다.

나. 조사내관 및 Si Ingot에 의한 전 Reactivity Loss 는 약 -0.5 mk 로 추산되며, 이로 인한 Control Margin 등 원자로 운전에 대한 영향은 무시될 수 있다.

다. 또한 Si Ingot를 조사내관에 장전/인출시 출력분포의 변화에 의한 RRS Trip 을 유도하므로 그 최대속도는 37cm/sec 를 넘지 않아야 한다.

라. 1D-ANISN 코드로 계산한 NTD 조사관에서의 평균 Nuclear Heating은 57.23 KW 이고, 이중 약 28.4 % 가 Si Ingot 에서 발생되며, Ti 흡수막에서 9.4%, Al 조사내관에서 43.5%, 나머지는 Zircaloy 조사관에서 발생한다. 따라서, 이들 Nuclear Heating 을 제열하여 Si Ingot를 적정온도 이하로 유지하기 위한 냉각법이 강구되어야 한다.

## 2. NTD 1/2 조사관 설계

### 가. 조사내관설계

- 정위치법에 의한 균일조사를 위해서 중성자속 축분포 평탄화를 위한 흡수막과 4개 SPND를 설치한 조사내관을 각 NTD 1/2 조사관에 설치한다.

흡수막은  $\delta\phi = (\phi_{max} - \phi_{min})/\phi_{av}$  를 극소화 하기 위한 Ni, Ti 또는

SUS막의 층상구조로서 그 적정설계법을 개발중에 있다.

원자로 제어봉 위치에 따른 두 축분포 즉,  $\phi_{1/4}$  와  $\phi_{no}$  에 대한 평균축분포,  $\phi_{av}(Z)$ 를 구하고, 길이 50 cm 5 겹 흡수막의 적정구조를 구한 다음 40 cm Si Ingot 를 조사하는 경우, 흡수막의 재료에 관계없이 도달할 수 있는 균일도는 다음과 같다.

(1) 흡수막 및 Si Ingot 의 중심 위치를 조사 당시의 흡수막 설치 전 축분포 중심에 이동하는 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 5\%$  이내로 매우 우수한 균일도를 얻을 수 있다.

(2) 흡수막의 위치는 평균 축분포 중심위치에 고정하고, Si Ingot를 조사 당시의 흡수막 설치 전 축분포 중심에 이동하는 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 10\%$  이다.

그러나 KMRR 각 핵연료 주기 기간의 실제 축분포 변화에 대한 것은 현재로서 알 수 없으며, Si Ingot 자체에 의한 중성자속 분포 변화도 수반되므로 흡수막 상세설계 및 조사 균일도 예측은 KMRR 정상 가동후 축분포 측정 및 예비실험을 통해서 수행할 예정이다.

#### 나. KMRR NTD 1/2 조사관 설계 변경

조사내관 설치의 용이성 및 장전용구와의 상호작용 등을 고려하여 NTD 1/2조사내관의 상부 Flange 및 관두께 등 일부 구조의 설계변경

#### 다. 조사내관의 설치/교체용 기구 기본설계

#### 라. 중성자조사량 실시간 감시

각 조사내관에 설치된 2x4개 SPND 출력 nvt Computer로 감시 하므로써 중성자총조사량, 중성자속의 수직분포변동, Burn-Up 에 대한

검출감도 보정등을 전담한다. 이 장치는 A/D Converter 등 일부 기초실험을 거쳐서 설계를 완성한후 구동장치의 전자제어장치의 일부로서 제작을 외주 중에 있다.

### 3. NTD 조사장치 설계

#### 가. 기계구동장치

Link Chain을 이용한 Si Ingot의 승강운동과 회전운동을 독립적으로 구동할 수 있도록 하며, Stepping Motor와 Absolute Position Encoder (12-bit 분해능)를 연동한 승강운동계를 IBM/PC를 이용하여 정밀한 위치/속도 제어를 하므로써 다양한 기능의 균일조사구동을 가능하게한다. 이 장치는 여러가지 안전장치로 설계를 보완한 후 현재 시제품 제작을 의뢰중에 있다.

#### 나. 전자제어장치

기계구동부의 제어장치로서 산업용 Computer와 PLC로 구성되며, nvt PC와의 통신으로 정위치법, 정속이동법을 자동으로 수행한다. 또, 계기반의 Switch 또는 PC를 이용한 대화식으로 각 행정별 구동의 Manual Mode도 가능하다. 위치/속도제어 등 기초실험을 거쳐서 이 장치는 현재 제작을 의뢰중에 있으며, 앞으로 제어의 편의성 및 안전성을 높이기 위한 Software를 개발할 예정이다.

다. 조사방법의 기본계획은 조사완료된 때 Si Ingot를 ~5m 수심에서 SF Pool 로 옮겨서 냉각하는 방법이었다.

. KMRR 건조사업단에서는 원자로 상부를 Pool Cover로 덮아두고

제한된 시간만 이것을 열 수 있게 한다는 기본방침을 검토중이다. 따라서 Si Ingot를 직접 Pool Cover 위에 설치된 구동장치를 통해서 인출하는 경우 Si Ingot+Al 용기 의 방사능을 검토하였다. 그 결과에 의하면 Si Ingot의 평균상승속도를 25cm/min로 가정할때 Pool 수면에서 Si-31 및 Mn-55, Na-24 등에 의한 방사능은 ~1000Ci로서 전혀 방사선 차폐기능이 없는 Pool Cover의 경우는 RPS 및 작업자의 안전준위를 유지하기 위해서는 각 조사장치마다 ~6ton 의 Shield Tube 와 ~6ton의 차폐용기가 필요하게 되며, 중량부하가 큰 Pool Cover가 필요하게 된다

.따라서 ~5m 수심의 인근 Reactor Pool Liner에 Ingot 중간 저장용 Rack를 준비하여 조사된 Ingot를 차례로 저장해 두었다가 매일 지정시간에 SF Pool로 일괄해서 옮겨가는 방법을 KMRR 건조단과 협의중에 있다.

#### 4. 중성자선질 평가법 연구

가. 1 차년도에의 검출박법에 의한 열중성자속 측정법 연구에 이어서, 열외 중성자속을 측정하기 위하여 서로 다른 Resonance Energy 를 갖는  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{59}\text{Co}$ , 등의 검출박을 이용한 Epithermal Index 결정 및 열외중성자 스펙트럼의  $1/E$  분포로부터의 편차 추정에 관한 연구를 진행 중이다.

나. 75mm $\phi$  x 75 mm NaI(Tl) 검출기와 75mm $\phi$  x 12 mm NE 102A Plastic Scintillator 검출기를 이용한  $\beta$ - $\gamma$  동시계수 장치 조립/제작을 완료하고, 장치의 계측 특성 시험을 수행 하였다.

다. 방사화된 검출박의 절대붕괴율을 정밀하게 측정하기 위하여 검출효율 외삽 보정법등 동시계수법에 대한 제반 해석 연구를 진행중에 있다.

## SUMMARY

### I. Project Title

The Development of Silicon Doping Technique by Neutron Transmutation

### II. Objective and Importance of the Project

The high purity and low defect Czochralski-Silicon and Floatzone-Silicon are used as base materials of the most semiconductor devices. The former is chiefly used for devices requiring a series of annealing in manufacturing processes such as IC and LSI, and the latter particularly for manufacturing of high or medium power devices of such as thyristors, diodes and transistors.

In the case of FZ-Si crystal, however, the dopant striation, microscale variation of dopant concentration striated unavoidably during dopant implantation and crystal growing, causes non-uniform electric characteristics either from device to device or even in a device itself, and these striations eventually reduce production yield or lower the power rating of the devices.

The neutron transmutation doping method is based on the irradiation of high purity FZ-Si ingot in a nuclear reactor to cause nuclear transmutation,  $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P} + \beta^-$ , in which one of the silicon isotopes,  $^{30}\text{Si}$ , is changed into the dopant  $^{31}\text{P}$ . Since this technique is capable of homogeneous doping over large ingot volume in the wide range of aimed dopant concentration, NTD-Si ingot is suitable for manufacturing high or medium power devices with high production yield. At present, the annual world production of NTD-Si for high-power devices amounts to about 120 tons/year and tends to increase owing to the trend of industrial automation.

At KAERI, a multiple-purpose research reactor (KMRR) of 30MW is under construction. Equipped with a heavy water reflector around the core, the reactor is expected to provide a neutron field of good quality with a small fast to thermal neutron ratio, which will accordingly make it possible to produce high quality NTD-Si. This project aims the development of techniques and facilities to produce NTD-Si at KMRR, so as to enable us, on the one hand, to take part in overseas NTD service market and, on the other hand, to lead domestic semiconductor industries, some of which have just begun with CZ-Si production, to manufacturing high-power devices by producing or importing FZ-Si.

### III. Scope and Contents of Project

The scope and contents of the project for the second year include establishment of fundamentals for the evaluation of neutron field, irradiation techniques and design of mechanical driving/electronic control units, etc.. The major subjects are listed below.

1. Investigation of nuclear characteristics in NTD vertical holes

a) Evaluation of thermal neutron distribution and neutron quality based on 3-dimensional reactor physics computation for KMRR core characteristics.

b) Evaluation of radiation heating in NTD.

c) Evaluation of NTD influence on reactor reactivity.

2. Design of NTD-1/2 holes.

a) Design of irradiation sleeve.

b) Design modification of NTD 1/2 holes.

c) The basic design of handling tool for irradiation sleeve.

d) Real-time monitoring of neutron irradiation fluence.

3. Design of NTD facilities.

a) Design of mechanical driving unit.

b) Design of electronic automatic control unit.

c) Evaluation of NTD method (Evaluation of induced radioactivity)

4. Study on precise measurement of the absolute neutron flux distributions in NTD holes.

a) Study of epithermal neutron spectrum measurement by mult-foil detector method.

b) Fabrication of  $\beta$ - $\gamma$  coincidence counting system and characteristics tests.

c) Activity measurement by  $\beta$ - $\gamma$  coincidence counting methods.

#### IV. Results and Proposals

The R/D scope of NTD-Si production technique of the second year includes the development of basic techniques and design of NTD facilities. The important interim results and suggestions are given as follows.

##### 1. Investigation of nuclear characteristics in NTD hole

a) The thermal and epithermal neutron flux density distributions at the center of NTD-1 hole are estimated from the 5 group neutron flux calculation for KMRR core physics as follows ;

$$d\phi_{th} \cong 4.26 \times 10^{13} E(eV)/(kT)^2 e^{-e/kT} dE$$

$$d\phi_{epi} \cong 3.60 \times 10^{10} /E(eV) dE$$

The ratio of dopant concentrations produced from thermal and epithermal neutrons is estimated to be  $[^{31}P] \cong 1.98 \phi_{epi}/\phi_{th}$ .

Therefore, the epithermal contribution is expected to be about 0.15% of the thermal's.

b) The NTD influence( structural materials and Si ingot) on total reactivity loss is estimated to be about 0.5mk and therefore negligible impact is expected on reactor operation parameters, such as control margin

c) The maximum speed of Si ingot into/from NTD hole is estimated to be 37cm/sec not to trip RRS from the induced variation of power distribution.

d) The nuclear heat generation rate is calculated using 1D-ANISN code in NTD-1 hole. The calculated average heat is 57.23KW. Of this, 28% is from Si Ingot, 9.4% from Ti screen, 43.5% from structural materials such as Zr flow tube. Studies are to be continued for the removal of the heat to sustain Si ingot at an appropriate temperature level.

## 2. Design of NTD 1/2 holes

### a) Design of the irradiation sleeve

An irradiation sleeve, equipped with neutron screen to flatten the axial neutron flux distribution and four SPNDs for the monitoring of the irradiation fluence, is to be installed in NTD hole for uniform irradiation.

Using Ti, Ni or SUS foil as neutron absorbing material, an analytical method is under test for the optimum-design of multi-layer

structured neutron screen to minimize the flux variation  $\delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min})/\Phi_{\text{av}}$  over the Si ingot.

Having no knowledge of the time variation of the axial flux distribution due to fuel burn-up and control rod geometry etc, however, the effects of neutron screen are examined in two reference axial distributions, those of 1/4 control rod insertion ( $\phi_{1/4}$ ) and no control rod ( $\phi_{\text{no}}$ ). For example, when 40cm long Si ingot is irradiated inside a 50cm long and 5-layer screen optimum-designed with respect to the average axial distribution,  $\phi_{\text{av}}(Z)$ , some typical results, regardless of screen material, are given as follows.

(1) The flux variation  $\delta\phi(40\text{cm-Si})$  over 40 cm long Si ingot is less than 5%, when the positions of both neutron screen and Si ingot are centered at the peak of actual axial distribution.

(2) The flux variation  $\delta\phi(40\text{cm-Si})$  is estimated to be about 10%, when the neutron screen is centered at the peak of average axial distribution, while Si ingot is centered at the peak of unscreened axial distribution.

In view of the complicated factors, such as time-spatial variation of neutron flux distribution, design-installation of the screen and the position of Si ingots, on uniform irradiation, the neutron screen is to be design-fabricated based on detailed flux mapping experiments over several KMRR fuel cycles.

b) Design modification of KMRR NTD 1/2 holes

Some structural design of NTD-1/2 holes, the upper flange, tube thickness etc., are modified so as to improve installation facility of the irradiation sleeve and mechanical rigidity against possible interaction with handling tool during services.

- c) Basic design of the handling tool for irradiation sleeve.
- d) Real time monitoring of neutron irradiation fluence.

A dedicated nvt-computer, which feeds 2 x 4-SPND signals via A/D converter, is to be operated for the continuous monitoring of integrated irradiation fluence, time-spatial variation of flux distribution and also the correction of detector sensitivity from the emitter burn-up. After fabrication-testing of basic parts, such as SPND signal amplification and multiplex A/D conversion, this unit is on order now for fabrication.

### 3. Design of NTD irradiation facility

#### a) Mechanical driving unit

In the driving unit, the up-down motion and rotation of Si ingot linked to a Al chain are to be operated independently and the former motion is precisely position-controlled using stepping motor and absolute position encoder (12-bit resolution) for a variety of operational modes for uniform irradiation.

The design of this unit is finished with various safety

consideration and prototype unit is on order now for fabrication.

b) Electronic control unit

This unit is to be framed with an industrial computer and PLC units for the automatic control of the mechanical driving unit in a variety modes of homogeneous irradiation, such as fixed-position mode and constant-velocity mode through communication with the nvt-PC. Also, each driving stroke is operated manually through either control panel swiches or dialog mode on PC. After performing preliminary experiment of position-velocity control using stepping motor and absolute position encoder, this unit is on custom-order now for fabrication. The development of software will be followed with due consideration of flexible and safe NTD operation.

c) The original plan for irradiation method reviewed in the first year project is to move each irradiated Si ingot to the cooling station in SF pool at ~5m depth of pool water.

KMRR project group is studying a normal-close concept of the reactor top using a pool cover and to open daily for a limited time period. In view of this, the possibility of removing irradiated Si ingot through the pool cover is examined and estimated the induced radioactivities of Si ingot and Al set-up, such as housing and chain.

When assumed average up-motion velocity of 20 cm/min, total activity of ~1000Ci from  $^{31}\text{Si}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ , etc., is estimated at the the surface of pool water and if the pool cover has no shielding

capablity, a shield tube extended into the pool and the mechanical driving unit with shielding, each with ~6 ton of lead-equivalent weight, are required to secure RPS(2.5mrem/hr) and working personnel.

In view this large loading capacity of the pool cover, an alternative method is under reviewing; irradiated Si ingots is stored in the near-by temporary storage rack provided on 5m deep pool liner and all stored Si Ingots are transfered to SF pool collectively during the pool cover open period.

#### 4. Study on precise determination of neutron flux in NTD holes

a) As a continued work of the thermal neutron flux measurement in the first year, effort is extended to study on epithermal neutron component, namely, measurements of epithermal neutron flux, epithermal index and spectrum deviation from 1/E-distribution by using various foil detectors, such as  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ , with different resonance energies.

b)  $\beta$ - $\gamma$  coincidence system using 75mm $\phi$  x 75mm NaI(Tl) scintillator and 75mm $\phi$  x 12mm plastic scintillator has been fabricated and counting characteristics are tested.

c) For the precise determination of absolute foil activities, study of analytical methods of  $\beta$ - $\gamma$  coincidence measurement, such as efficiency extrapolaton method, is in progress.

## 목 차

제 1 장 서 론 .....	7
제 2 장 본 론 .....	9
제 1 절 NTD 원리 - Dopant 농도 결정 정밀도 .....	9
1. 표적핵 및 생성핵의 감손효과 .....	10
2. 열외 및 속중성자에 의한 기여 .....	12
3. $\sigma$ 등 관련 정수의 정도 .....	15
제 2 절 조사방법 기본방침 .....	19
1. 노물리 계산 .....	20
2. 균일조사방법 .....	35
3. 조사관설계 .....	48
제 3 절 중성자 조사량 실시간 감시 .....	54
제 4 절 조사장치 기본설계 .....	69
1. 반/완전자동 조사방법 .....	69
2. 기계구동부 설계 .....	88
3. 전자제어장치 .....	90
제 5 절 열외중성자 절대속 분포측정 및 선질평가 .....	103
1. 검출박법에 의한 열외중성자 평가 .....	104
2. $\beta$ - $\gamma$ 동시계수법에 의한 절대붕괴율 측정 .....	116
제 3 장 결론 및 건의사항 .....	132
참고문헌 .....	

## 표 목 차

1. Si 동위원소 .....	11
2. $^{30}\text{Si}$ 의 열중성자 흡수 단면적 .....	17
3. NTD 조사관내에 조사물질의 장전에 따른 원자로 반응도 변화 ....	27
4. ANISN에 의해 계산된 NTD-1 조사관 중심에서의 중성자 및 Gamma속 .....	27
5. Kerma Factor .....	33
6. NTD-1 조사관에서의 Total Nuclear Heating .....	34
7. 중성자흡수막에 의한 최적 중성자속 평탄화율( $\delta\phi_{\min}(50\text{cm})$ ) .....	40
8. 중성자흡수막에 의한 평균중성자속의 최적 평탄화율 ( $\delta\phi_{\min}(50\text{cm})$ ) .....	43
9. 5겹 흡수막(50cm) 설치 위치 및 Si Ingot(40cm) 조사위치에 따른 $\delta\phi$ .....	44
10. 10겹 Ni 흡수막(50cm) 설치위치 및 Si Ingot(40cm) 조사위치에 따른 $\delta\phi$ .....	45
11. SPND 특성 .....	57
12. nvt PC에 저장되는 중성자속 계수들 .....	62
13. 4-SPND 계측에 대한 Timing Diagram .....	64
14. 중성자속 계수들의 nvt PC CRT 화면 .....	66
15. 4시간 조사동안 생성된 $^{31}\text{Si}$ 의 냉각시간에 따른 비방사능 .....	76
16. $^{30}\text{Si}$ 및 Al 용기내 주요 불순물의 핵반응 특성 .....	78
17. 조사시간에 따른 Al 용기내 주요 동위원소의 비방사능 .....	79
18. Gamma 선속 - 선량을 환산인자 .....	81
19. Gamma 선의 선형감쇠계수 .....	82
20. 점 등방선원에 대한 조사 측정인자의 Taylor 형식에 따른 계수 ..	82
21. 열외중성자 영역에 이용되는 검출박 .....	104
22. 대표적인 열외중성자 측정용 검출박의 특성 .....	113

## 그 림 목 차

1. NTD-1 조사관 중심에서의 열 및 열외중성자속 밀도 분포 .....	14
2. NTD 조사관에 설치할 조사내관의 개략도 .....	22
3. 원자로 반응도 계산을 위한 NTD 조사관의 측면도 .....	24
4. NTD 조사관에서의 조사물질의 축방향 모델 .....	25
5. 1차원 ANISN 코드로 계산한 동경방향의 열중성자 분포 .....	25
6. 1차원 계산에 의한 Ti, Ni, SUS 및 H <sub>2</sub> O 층 두께에 따른 열중성자속 변화 .....	38
7. NTD-1 조사관내에 적정 Ni 흡수막 구조를 설치할때 도달할 수 있는 조사균일도( $\delta\phi_{min}$ ) .....	39
8. 핵연료주기 동안의 중성자속 분포 변화를 고려한 적정 흡수막 구조 및 도달할 수 있는 조사균일도( $\delta\phi_{min}$ ) .....	42
9. $\phi_{av}$ 의 최대속 위치에 5겹의 적정 흡수막을 설치할때 각 연료주기에서의 조사균일도( $\delta\phi_{min}(50cm)$ ) .....	46
10. $\phi_{av}$ 의 최대속 위치에 10겹의 적정 흡수막을 설치할때 각 연료주기에서의 조사균일도( $\delta\phi_{min}(50cm)$ ) .....	46
11. NTD 수직관 Flange 개략도 .....	50
12. 조사내관 장전기구 개략도 .....	53
13. 중성자속 감시 시스템의 구성도 .....	56
14. DC 증폭기의 회로도 .....	59
15. 조사시간에 따른 실리콘내의 <sup>31</sup> Si 비방사능 .....	76
16. 조사시간에 따른 실리콘내의 <sup>32</sup> P 비방사능 .....	77
17. 4시간 조사동안 AI 용기내에 생성된 주요 동위원소의 인출시간에 따른 비방사능 .....	80
18. 광자속-선량을 환산 인자 .....	81
19. 납차폐관의 개략도 .....	83

20. Pool Cover로부터의 거리에 따른 RPS에서의 선량을	84
21. Pool Cover로부터의 거리에 따른 A 위치에서의 선량을	85
22. Pool Cover 위에 설치된 NTD 장치 (평면도)	86
23. Pool Cover 위에 설치된 NTD 장치 (수직도)	87
24. 반자동 NTD 구동장치	89
25. 시스템 설치 개략도	97
26. 전자제어 시스템의 개략도	98
27. 전자제어장치 장비 외관도	99
28. NTD 자동제어 시스템의 논리도	100
29. 표시/제어반의 전면부	101
30. Z-80 CPU Board	102
31. 절대위치감지기의 표시 출력	102
32. Stepping Motor Driver에 대한 Pulser	102
33. $\beta - \gamma$ 동시계수 장치도	123
34. Coincidence Mixer 의 분해시간	124
35. NE 102A Plastic 섬광계수기의 Background	125
36. NaI(Tl) 섬광계수기의 Background	125
37. $^{90}\text{Sr}$ 표준선원에 대한 NE 102A Plastic 섬광계수기의 $\beta, \gamma$ 반응	126
38. $^{198}\text{Au}$ 검출박에 대한 NE 102A Plastic 섬광계수기의 $\beta, \gamma$ 반응	127
39. $^{60}\text{Co}$ 시료에 대한 NE 102A Plastic 섬광계수기의 $\beta, \gamma$ 반응	127
40. $^{60}\text{Co}$ 에 대한 NaI(Tl) 의 $\gamma$ 스펙트럼	128
41. $^{198}\text{Au}$ 에 대한 NaI(Tl) 의 $\gamma$ 스펙트럼	128
42. 카드뮴을 덮은 $^{198}\text{Au}$ 검출박의 효율함수	129

43. 카드뮴을 덮지 않은  $^{198}\text{Au}$  검출박의 효율함수 ..... 129  
44.  $\beta$ - $\gamma$  동시계수 장치의 안정성 평가 ..... 130  
45.  $^{60}\text{Co}$  시료의 효율함수 ..... 131

# 제1장 서론

오늘날 Bipolar Transistor 에서 VLSI에 이르는 대부분의 반도체 소자는 실리콘(Si)을 소재로 이용하고 있으며, 대량생산의 견지에서 볼때 먼 장래까지 Si 에 대치될 소재는 없을 것으로 전망된다. 이 Si 소재는 대부분 CZ 법 또는 FZ 법으로 제조된 고순도 저결함 단결정으로서 예를들어 LSI 기판용등을 제외하고는 제조과정에서 목적하는 전자적 특성을 부여하기 위해 불순물을 첨가(Doping)한 소재로 제조된다.

이중에서도 주로 대전력용 Thyristor(SCR), Transistor 및 Diode에는 고순도, 고저항의 FZ-Si이 이용되고 있다. 그러나 FZ-Si의 경우 제조과정에서 화합물확산법으로 첨가되는 Dopant 분포는, 결정화 과정에서 고상과 용융액상과의 계면에서 일어나는 열적 불균일성, 용융체의 열대류, 결정의 회전운동등의 여러가지 원인으로 미시적으로 농도분포가 균일치 못하게 되는 소위 변동(Striation)이 생기게 된다. 따라서 대전류용 소자의전기적 특성 및 생산수율성에 여러가지 제한을 받아왔는데 이 문제를중성자변환법에 의한 Doping(Neutron Transmutation Doping ; NTD 법)이 실용화되므로서 해결될 수 있게 되었다.

NTD법은 연구용원자로를 이용하여 Si 중에 존재하는  $^{30}\text{Si}$ 에 중성자를 조사하여 생성하는  $\text{Si-31}$ 이 반감기 2.62 시간으로  $\beta^-$  붕괴하여 안정 동위원소인  $^{31}\text{P}$ 로 변환하는 것을 이용하여 P를 Si중에 균일하게 첨가하는 방법이다. 이 방법으로 제조된 NTD-Si는 넓은 폭의 Dopant 농도에 대해서 균일도를 대폭 향상할 수 있으므로 대전류용 소자 제조가 가능하게 되

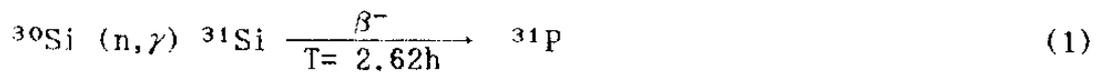
고, 또 아울러 생산 수율도 크게 높일 수 있게 되어 현재는 반도체용 Si 제조의 한 분야를 이루고 있다. 산업자동화 추세에 따라 NTD-Si의 수요도 계속 신장하여 현재 약 120ton/yr를 차지하고 있으며 이 수요에 상응하여 이미 NTD-Si를 생산하고 있는 선진각국에서도 연구용원자로의 NTD 조사시설을 개량 또는 확장 등에 노력하고 있다.

한편 현재 한국원자력연구소에서 건조중인 30MW 다목적연구로(KMRR)는 노심주위에 중수(D<sub>2</sub>O) 반사체를 설치하므로 열중성자 대비 속중성자 성분이 적은 양질의 중성자장을 얻을 수 있어 높은 품질의 NTD-Si 생산이 가능하다. 따라서 이 KMRR에 NTD 장치를 설계 제작하고 그 기술을 개발함으로써 한편으로는 해외 반도체소재 제조업체에 대한 NTD-Si 수탁 사업에 참여하고, 다른 한편 Wafer 수입가공에서 이제 막 일부 업체에서 CZ-Si의 생산을 시작한 단계인 국내업체에 FZ-Si Ingot 도입 또는 직접 그 생산을 촉진함으로써 대전력용소재 생산을 선도 하는데 기여하고자 한다.

## 제2장 본 론

### 제1절 NTD원리-Dopant 농도결정 정밀도

NTD 원리는 열중성자조사에 의한 핵변환, 즉



에 의해서 Si 소재내에 존재율 [%Abn] = 3.1%인 Si-30을 전자공여체 (Donor) 인 P-31로 변환하는 것이다. 이에대한

1. 기본원리
2. 기술개발의 필요성 - 반도체 Si 결정제조  
- NTD 특징
3. 이용전망
4. 연구개발 내용 및 방법

에 대해서는 '88년도 보고서에서 이미 기술한바 있다.<sup>1)</sup>

이 장에서는 위의 핵변환으로 생성된  $^{31}\text{P}$  농도 측정의 정밀도와 관련된 제인자를 검토코져 한다.

생성되는 P Dopant의 농도는 표적핵 농도 [ $^{30}\text{Si}$ ], 포획단면적  $\sigma_c$  및 중성자조사량  $\Phi_{th}$ 에 비례한다.

$$[P] = [^{30}\text{Si}] \sigma_c \phi_{th.t} = K \Phi_{th} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 맥스웰분포에 대한 평균포획단면적이며, 중성자조사량 당  $^{31}\text{P}$  생성율은 다음과 같다.

$$K = \sigma_c [^{30}\text{Si}] = \sigma_c [\text{Abn}] L_0 \rho/A \quad (3)$$

$\rho$  : Si 소재의 밀도  
 $L_0$  : Avogadro 상수  
 $A$  : Si 원자량

그러나 엄밀한 뜻에서 식(2)는 근사식으로서 [P]를 정밀히 알기 위해서는 다음과 같은 보정이 고려되어야 한다.

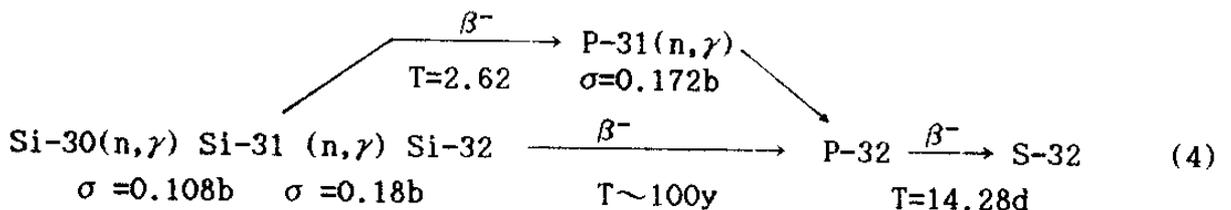
1. 표적핵 및  $[^{31}\text{Si}]$ ,  $[^{31}\text{P}]$  등 생성핵의 감소효과
2. 열중성자 이외 즉, 열외중성자 및 속중성자에 의한  $^{31}\text{P}$  생성
3. 포획단면적 ( $\sigma_c$ ) 등 관련 실험정수의 정밀도

### 1. 표적핵 및 생성핵의 감소효과

핵변환에 수반하여 표적핵  $[^{30}\text{Si}]$ 이 감소 (Burn-up)되며, 또 생성핵  $^{31}\text{Si}$  및  $^{31}\text{P}$ 에 대한  $(n, \gamma)$  반응으로 결국  $[^{31}\text{P}]$ 은 식(2)에 의한 값보다 적어지는 결과가 된다.

가령 진성 Si 반도체를 출발소재로 하여 저항율  $\rho = 10 \Omega\text{-cm}$  되게 NTD할 경우  $^{31}\text{P}$ 의 생성농도는  $[^{31}\text{P}] \approx 5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$  인데 비해서 출발소재내의  $[^{30}\text{Si}] = 1.549 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 로서, 농도비가  $2 \times 10^{-8}$  정도이므로 조사동안에 일어나는  $^{30}\text{Si}$ 의 감소 효과는 무시할 수 있다.

조사시간이 2.62hr에 비해서 길 경우에는 Build-Up 되는  $^{31}\text{Si}$ 과 생성핵  $^{31}\text{P}$ 에 대한  $(n, \gamma)$  반응,



으로 결국  $[^{31}\text{P}]$ 의 감소효과가 있게된다.  $^{31}\text{Si} \longrightarrow ^{31}\text{P}$  변환과

Table 1. Table of Silicon Isotopes, 20, 30

Isotope	Relative Abundance (%)	Atomic Mass	Half-life	Decay Mode	Decay Energy (MeV)	Particle Energy (MeV)	Gamma-ray Energy (MeV)	Thermal Neutron Cross-section (barns)
Silicon	Density : 2.33±0.01 gm/cc	28.0855±0.0003						0.171
Si-28	92.23	27.976927						0.177
Si-29	4.67	28.976495						0.101
Si-30	3.10-1%	29.973770						0.107 ±0.002
	3.09							0.103 ±0.002
								Mean = 0.1075±0.0020
Si-31		30.975382	4.62h	β <sup>-</sup>	1.49	1.471	1.2662±	0.18
Si-32		31.974148	~100y	β <sup>-</sup>	0.227	0.213	0.005	
Si-33		32.977920	6.2s		5.77	3.92		

$L_0 = (6.022045 \pm 0.000031) \times 10^{23}$  atoms/mole

$N(\text{Si}) = L_0/A = 4.996 \times 10^{22}$  cm<sup>-3</sup>

$NT = [Abn] N(\text{Si}) = 1.549 \times 10^{22}$  cm<sup>-3</sup>

$^{31}\text{Si}(n,\gamma)^{32}\text{Si}$  반응의 경쟁율은  $\sigma \phi_{th} / \lambda$  로서  $\phi_{th} \sim 3 \times 10^{13} \text{nv}$  인 경우를 예로들면  $\sim 7 \times 10^{-8}$  이며, 또 0.18 barn의  $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$  반응에 의한  $^{31}\text{P}$ 의 Burn-Up은  $\sim 5 \times 10^{-12} / \text{sec}$  로서 이들 2차 (n, $\gamma$ ) 반응에 의한 효과도 사실상 무시될 수 있다.

## 2. 열외 및 속중성자에 의한 기여<sup>2)</sup>

연구용원자로 조사장에서의 중성자속분포는 일반적으로 열중성자, 열외중성자 및 속중성자 성분에 의한 다음과 같은 표현을 이용한다.

$$\phi(E) = \phi_{th} M(E,T) + \phi_{epi} \frac{\Delta(E/KT)}{E} + \phi_f(E) \quad (5)$$

여기서

$M(E,T)$  : 유효 중성자온도 T인 Maxwell 분포함수,

$$\frac{E}{(kT)^2} e^{-E/kT}$$

$\Delta(E/KT)$  : 열중성자속분포와 열외영역 ( $E > \mu kT$ )에서의  $1/E$  분포를 결합하는 함수, 즉,  $E/KT > \mu$  일때  $\Delta=1$ ,  $E/KT < \mu$  일때  $\Delta=0$  으로 정의되는 계단함수

$\phi_f(E)$  : 핵분열 중성자에 의한 속분포

식 (5)에서 열, 열외 및 속중성자에 대한 중성자에너지 영역 구분은 원자로 특성에 따라 여러가지 논의의 여지가 있으나 편의상  $0 < E_{th} < 0.5 \text{eV}$ ,  $0.5 \text{eV} < E_{epi} < 0.5 \text{MeV}$ ,  $E_f > 0.5 \text{MeV}$  로 한다.  $^{30}\text{Si}$ 의 경우는 공명흡수가  $\sim 10 \text{KeV}$  영역에 있으므로 이들 에너지영역 구분에는 민감하지 않을 것으로 생각된다.

### 가. 열중성자에 의한 [P] 생성

열중성자에 의한 [P] 생성은 다음과 같이 구할수 있다.

$$\begin{aligned}
[^{31}\text{P}]_{\text{th}} &= [^{30}\text{Si}] t \int_0^{0.5\text{eV}} \sigma(E) \phi_{\text{th}} M(E, T) dE \\
&\sim [^{30}\text{Si}] t \phi_{\text{th}} \int_0^{\infty} \sigma(E) M(E, T) dE \\
&= [^{30}\text{Si}] \bar{\sigma} \phi_{\text{th}} t
\end{aligned} \tag{6}$$

여기서 Maxwell 분포에 대한 평균흡수단면적  $\bar{\sigma}$ 는 0.0253eV 흡수단면적  $\sigma_0$ 와 비 1/v 비례성 흡수단면적인 경우에 대한 Westcott 보정인자  $g(T)$ 를 써서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma} = g(T) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293.6^\circ}{T}} \sigma_0 \tag{7}$$

나. 열외중성자에 의한 [P] 생성

열외중성자에 의한 [P] 생성은 1/v성 흡수와  $\sim 10\text{KeV}$  영역의 공명흡수에 의한 것이다.

$$\begin{aligned}
[\text{P}]_{\text{epi}} &= [^{30}\text{Si}] \phi_{\text{epi}} t \int_{0.5\text{eV}}^{\infty} [\sigma_0 \sqrt{E/E_0} + \sigma_r(E)] \frac{dE}{E} \\
&= [^{30}\text{Si}] \phi_{\text{epi}} t (0.447\sigma_0 + I_{r'})
\end{aligned} \tag{8}$$

$\sigma_0 = 0.107\text{b}$ 와 초과공명적분 (Excess Resonance Integral)  $I_{r'} = 0.106 \pm 0.012\text{b}$ 를 인용하고, 또  $T \sim 318^\circ\text{K}$ 로 가정하면 식 (6), (8)에서

$$\frac{[\text{P}]_{\text{epi}}}{[\text{P}]_{\text{th}}} = \frac{(0.447\sigma_0 + I_{r'})}{\bar{\sigma}} \frac{\phi_{\text{epi}}}{\phi_{\text{th}}} \sim 1.78 \frac{\phi_{\text{epi}}}{\phi_{\text{th}}} \tag{9}$$

그림1에서 막대형 그래프는 5군법에 의한 KMRR(30MW) 노심계산에서 얻은 NTD-1 조사관 중심부에서의 미분 중성자속분포이다. 그리고 실선은  $\phi_{\text{epi}}$ 를 추산하기 위해서 여기에 식(5)를 fitting 하여 다음과 같은 식을 얻었다.

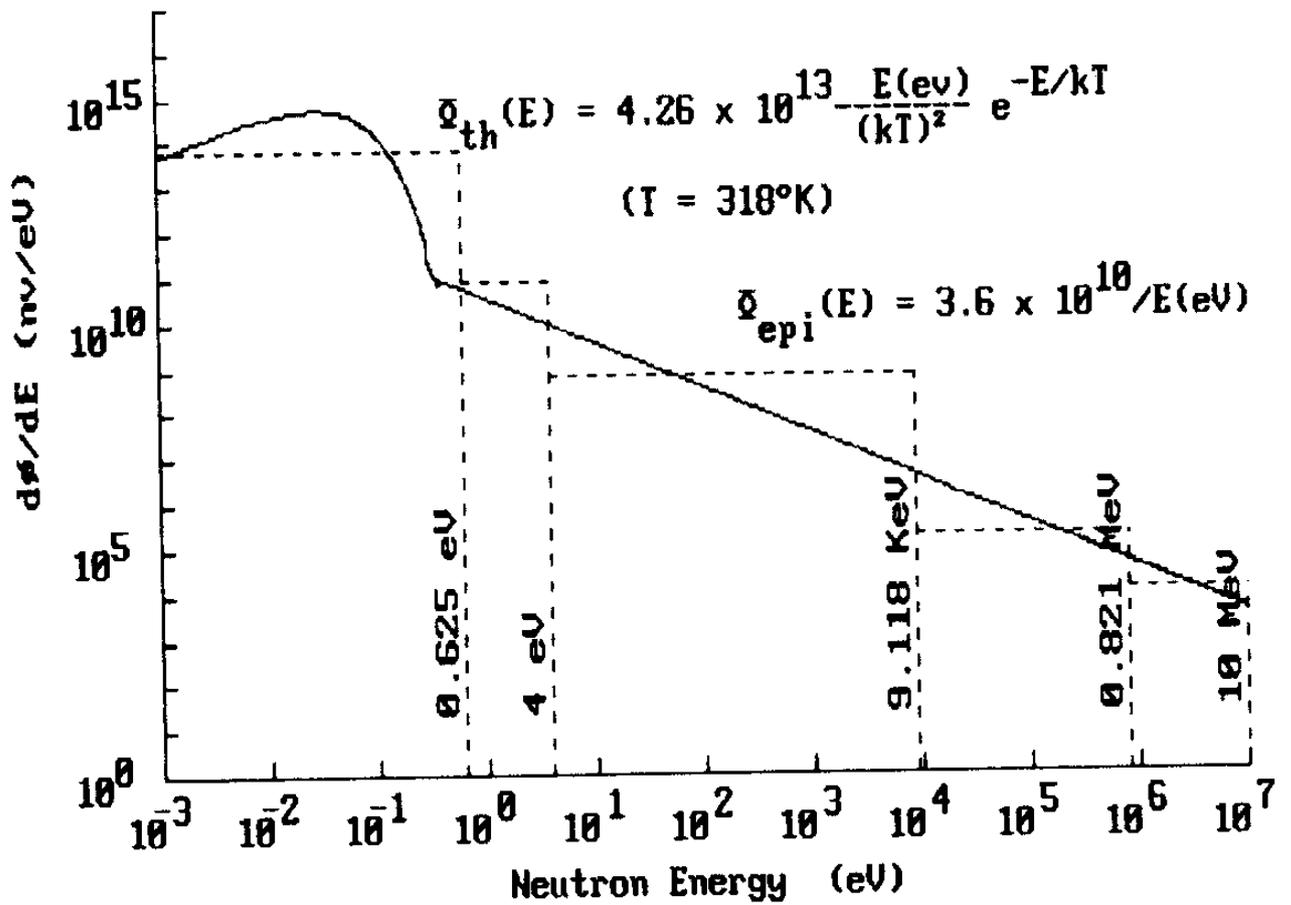


Fig. 1 Thermal and Epithermal Flux Density in NTD-1

$$d\phi_{th}(E) \sim 4.26 \times 10^{13} \frac{E(\text{eV})}{(KT)^2} e^{-E/kT} dE \quad (10)$$

$$d\phi_{epi}(E) \sim 3.6 \times 10^{10}/E(\text{eV})dE \quad (11)$$

이 과정에서 편의상  $\phi_f(E)$ 는 무시하고,  $g(T)=1$ , 또 0.5eV 까지를 제5군의 열중성자 영역으로 하였다.  $\phi_{th} \sim 4.26 \times 10^{13} \text{nv}$ ,  $\phi_{epi} \sim 3.6 \times 10^{10} \text{nv}$ 를 대입하면,

$$\frac{[P]_{epi}}{[P]_{th}} \sim 0.15\%$$

로서, 이 값은 H<sub>2</sub>O 감속재 연구용원자로의 경우의 1~2%에 비교하면 무시될 정도임을 알 수 있다.

다. 속중성자에 의한 [P] 생성

식 (5)에서  $\phi_f(E)$ 는 주로 밀도분포가  $dn/dE \sim A e^{-E} \sinh \sqrt{2.29E}$  등의 실험식으로 근사할 수 있는 <sup>235</sup>U 핵분열 중성자에 의한 것이나, 연구용원자로의 경우, 예를들어 E=1MeV에서의 중성자속밀도 ( $d\phi_f/dE$ )는 0.025eV 중성자속밀도에 비해서  $\sim 10^{-7}$ 에 불과하고, 또 포획단면적도  $\sim 1\text{mb}$  정도이므로 [<sup>31</sup>P]에 대한 기여는 사실상 무시된다.

3.  $\sigma$  등 관련 정수의 정도

KMRR D<sub>2</sub>O 반사체내에 준비된 NTD관의 경우 [P] 생성에 대한 열외중성자의 기여는 열중성자속의  $\sim 0.15\%$  정도이고, 또 [<sup>30</sup>Si]의 감손효과등도 사실상 무시될 정도이므로 결국 식 (2)는 그대로 쓸수있다.

$$[^{31}\text{P}] = [^{30}\text{Si}] \bar{\sigma} \phi_{th} t$$

$$= [^{30}\text{Si}] 0.886 \sqrt{\frac{293.6^\circ}{T}} \sigma_0 \phi_{th} t$$

그리고 이 식은 다시 단위 중성자조사량(nvt)당  $^{31}\text{P}$ 의 생성율 K를 비례정수로하여 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[^{31}\text{P}] = K \Phi \tag{13}$$

$$K(T) = \overline{\sigma(T)} [^{30}\text{Si}] = \overline{\sigma(T)} [\text{Abn}] L_0 \rho/A$$

여기서

$\Phi = \phi_{th} t$  중성자 조사량

$L_0 =$  Avogadro 상수

$\rho =$  Si 소재의 밀도

$A =$  Si 원자량

즉, K는 잘알려져 있는 실험정수로서 구할 수 있다. 그러나 표 1에서 볼 수 있듯이 Si의 밀도와  $^{30}\text{Si}$ 의 [%Abn]는 각각  $\sim 0.43\%$  및  $\sim 1\%$ 의 측정정도로 알려져 있다. 이들에 대한 이와같은 큰 측정오차는  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  등 동위원소의 상대적존재비가 출발원료인 규석( $\text{SiO}_2$ )의 채취장소에 따라 어느정도 변동이 있고, 또 부유용융대법(FZ법)에 의한 소재의 정제 및 결정화 과정에서도 달라질 가능성이 지적되고 있다.

또한편, 표2에 보인바와 같이 지난 20년간 여러사람들에 의해서 NTD 실험방법, 즉  $[P-31]/\Phi=K$ 로부터 측정된 평균단면적은  $\sigma = 0.115 \pm 7.8\%$ 로서 평가핵자료에서 인용된  $\sigma = 0.1075 \pm 1.9\%$  와 비교할때 약 7% 높은 값을 나타내며 그 표준오차도 4배 정도 크다.

NTD 방법으로 측정된  $\sigma$  값이 이와같이 큰 값을 나타내는 주요인은 식 (13) 에서는 조사시료 내에서의 중성자산란 효과를 고려하지 아니한데서 오는 것으로 생각된다. 즉,  $^{30}\text{Si}$ 에 의한 포획단면적  $\Sigma_a(^{30}\text{Si})$ 에 비해서 Si 소재에 대한 전단면적  $\Sigma_t = (\Sigma_a + \Sigma_s)$ 이  $\Sigma_t/\Sigma_a(^{30}\text{Si}) = 6.7 \times 10$  정도로 크므로

Table 2. Thermal Neutron Absorption Cross Sections (2200m/sec)  
for the  $^{30}\text{Si}$  Isotope from the NTD Literature.

Cross section (barn)	Source + Date	Reference
0.12	Schweiner (1959)	( 4 )
$0.11 \pm 0.01$	Tanebaum + Mills (1961)	( 5 )
$0.11 \pm 0.01$	Messier et al (1964)	( 6 )
0.11	Kharchenko + Solov'ev (1971)	( 7 )
0.110	Herman + Herzer (1975)	( 8 )
0.13	Hass + Schnoller (1976)	( 9 )
0.13	Janus + Malmors (1976)	( 10 )
0.110	Herzer(1977)	( 11 )
0.12	Beniere + Agrawai (1978)	( 12 )
0.102	Beniere + Agrawai (1979)	( 13 )
mean $\pm$ avg. deviation 0.115 $\pm$ 0.009(7.8%)		

큰 Si 시료용적을 이용하는 NTD 방법에서는 다중산란으로 인하여 산란을 무시한 식(13)에 의한 [P]보다 다소 초과적인 생성이 있기때문이다.

Dopant 농도 결정은 이 이외에도 출발소재의 Dopant 농도 및 균일도 또 NTD후 Dopant 농도 측정정밀도 등 여러 인자에도 의존한다. 앞으로 이들 인자의 종합적인 검토 및 실험적인 측정 또는 평가법으로 개발 하므로써 Dopant 농도 결정의 정밀도를 향상코저 한다.

## 제 2 절 균 일 조 사 방 법

NTD-Si 생산을 위해 KMRR D<sub>2</sub>O Tank내에 위치 (좌표의 원점은 CT 의 중심 위치) 및 내경이 다음과 같은 두 수직관을 준비하였다.

	Xmm	Ymm	ID
NTD-1	581	-335	180mm $\phi$
NTD-2	-621	266	220mm $\phi$

NTD-2의 220mm $\phi$  내경은 Si 소재가 대구경화 되어가는 추세에 맞추어 장차 150mm $\phi$  Ingot 까지 조사를 시도할 목적으로 결정한 것이다. 핵연료 주기 동안에 중성자속 축분포의 변화를 최소화하기 위해서는 이들의 위치를 제어봉 위치에서 가능한 먼곳에 택하는 것이 바람직하나, 그 위치가 너무 H<sub>2</sub>O Pool 쪽에 가까우면 중성자속의 동경분포가 비선형적으로 급격히 감소할 것이 예측되기 때문에 노심 경계에서 볼 때 D<sub>2</sub>O Tank의 대략 중간에 해당한다.

따라서 균일조사방법의 기본과제는 이 NTD-1/2 조사관을 이용 해서 Si Ingot 전체에 걸쳐 높은 조사균일도와 정확한 목표 조사량을 얻기 위한 기술을 개발하는 것이다.

제 2절에서는 관련 과제중 노물리계산, 균일 조사방법 검토 및 조사관 설계에 대한 '88년도의 연구결과 요약에 이어서 당해년도에 수행한 진행을

기술 한다.

## 1. 노물리 계산

'88년도에는 노의 격자군정수 생산을 위한 WIMS-KAERI 및 이들 5 군정수를 사용하여 VENTURE 코드로 노 물리 계산하여 H<sub>2</sub>O로 차있는 NTD-1/2관내에서의 5군 중성자 스펙트럼과 중성자속분포 (축방향, 동경방향, 원주방향)를 계산하였으며 그 중요 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.(1)

1) NTD-1/2 조사관내의 최대 열중성자속 및 Cd 비는 각각  $\phi_{th} = 4.44 \times 10^{13}$  nv, Rcd=46.9 및  $\phi_{th} = 4.20 \times 10^{13}$  nv, Rcd=49.4 로서 열중성자속 및 중성자선질 모두 NTD에 적절하였다. 제 1절에서 이미 기술한 바와 같이 열외중성자속에 의한 P-31 생성은 열중성자의 0.1%에 불과하다.

2) 열중성자속 축분포는 KMRR의 실제적인 가동상태에 해당하는 분포, 즉 핵연료 Burn-Up 및 제어봉의 위치변동에 따르는 각 핵연료 주기동안의 이 분포의 변화를 아는것이 균일조사법 결정 및 조사관 설계에 대단히 바람직 하나, 현재로서 이들이 계산에 여러가지 기술적인 어려움이 있으므로 원자로심에 제어봉이 없는 경우와 1/4 삽입된 두 Reference Case에 대해서 검토하였다. 열중성자속 축분포는 핵연료 중심높이 주위에 근사적으로 cos 함수형의 분포를 하고 있으며, 최대속 주변의 50cm 범위에

걸친 속분포편차  $\delta\phi(50\text{cm}) = (\phi_{\max} - \phi_{\min}) / \phi_{\text{av}}$  는 이들 두 경우에 약 26% - 29% 이며, 최고 중성자속 위치 변동은 약 4.7cm 이다.(표 7 참고)

3) 동경방향과 원주방향의 분포는 예상외로 다소 복잡한 분포를 나타내었다. 노물리 계산방법중 VENTURE 모델의 X-Y Plane 구조를 고려할 때 내경이 18cm $\phi$  및 22cm $\phi$  인 NTD-1/2 조사관 내부의 동경방향 및 원주방향에 대한 이들 속 분포 해석결과는 아주 근사적인 것으로 사실상 큰 신뢰도가 없는 것으로 생각된다. Si이 충전된 경우를 Mesh를 아주 세분화 하여 구한 1차원 계산 결과에 의하면 이 동경 분포는 거의 직선 분포이고 그 변화율도 아주 작았다.

당해년도에는 Si Ingot의 충전 및 인출이 원자로 반응도에 미치는 영향과 NTD 조사관 및 Si Ingot에서 발생하는 Nuclear Heating을 검토하였다.

#### 가) 원자로 반응도 영향 평가

NTD Si 조사장치가 KMRR 운전 및 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 2 과 같이 NTD 수직관에 조사내관을 설치하고 Si Ingot 를 조사내관에 충전하였을때 원자로 반응도 및 출력분포 변화등 노 물리 계수들을 평가하였다.(14),(15),(16)

#### 1) 노심 계산

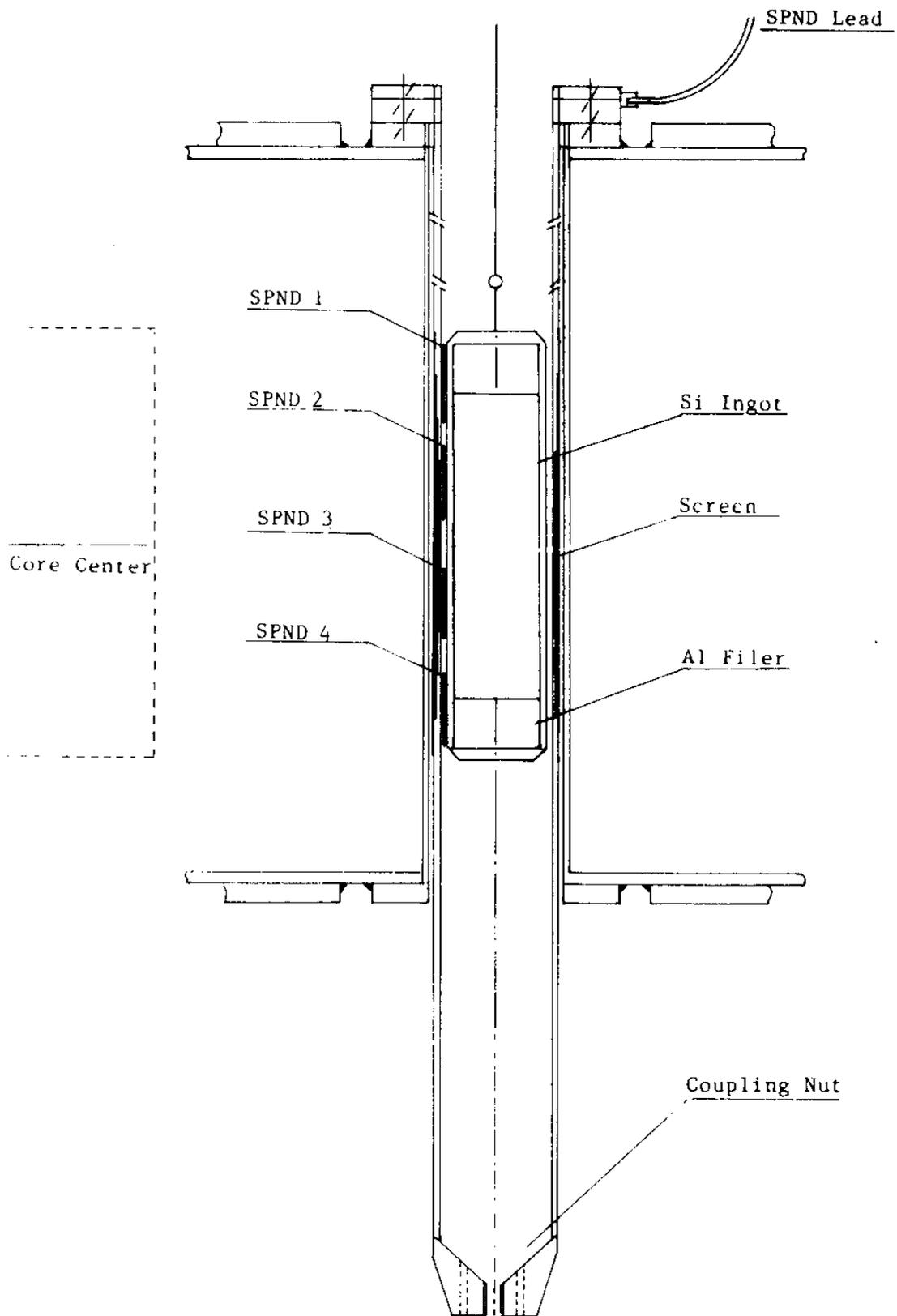


Fig. 2. Irradiation Tube in NTD 1/2 Hole

그림 3 은 조사내관에 Si Ingot 를 설치한 NTD 수직관의 측면도이며 NTD 수직공내에서 축방향의 열중성자속을 평탄화하기 위해 Ti 흡수막을 조사내관의 중심부에 3 층으로 감았다. 그러나 UKNDL 에 기본을 둔 WIMSLIB 에는 Ti Library 가 없으므로 ENDF/B-IV 와 B-V files 로 부터 Ti 을 포함하여 만든 WIMS88N 을 사용하였다. (17)

상세한 노심 해석을 위해서 축방향에 대해서는 NTD 수직관 전체를 포함하는 같은 5 개의 물질 영역으로 나누어 핵연료 길이를 8.75cm 씩 8 마디로 분리하였다. 그리고 Al-H<sub>2</sub>O 영역은 Si Ingot 위 아래 부분에 채워져 있는 부피비에 의해 결정하였으며, 8.75cm 마디에서 Al 길이는 7.5cm, H<sub>2</sub>O 길이는 1.25cm 이다. 또한 Si Ingot 를 조사내관으로 부터 제거한 경우는 Ti 흡수막 층수에 따라 조사내관 영역을 분리하였다.

NTD 조사관의 동경방향은 가능한 한 실제 중성자 spectrum 을 고려하여 좌표의 원점을 KMRR 의 중심 중성자속 위치로 정했을때, NTD-1/2 의 중심 위치는 각각 (59.1, -33.5), (-62.1, 26.6) 이다. 보다 상세한 해석을 위해 X-Y grid 모델은 NTD-1/2에 대해서 각각 24.957cm x 24.09cm, 17.342cm x 20.025cm 로, Si Ingot 의 직경은 각각  $\phi$ 15.0cm,  $\phi$ 12.0cm 로 결정하였으며, NTD 관과 조사내관 사이에는 1.0cm 의 H<sub>2</sub>O 로 채워져 있다. 따라서, 각 노심영역을 균질화하여 WIMS-KAERI 를 이용하여 각 영역의 균정수를 생성하였다. (14) 노심 계산은 이들 균정수를 사용하여 1988년도 보고서 그림 13 에 보인 기학적인 모델과, 그림 4 와 같이 Si Ingot 를



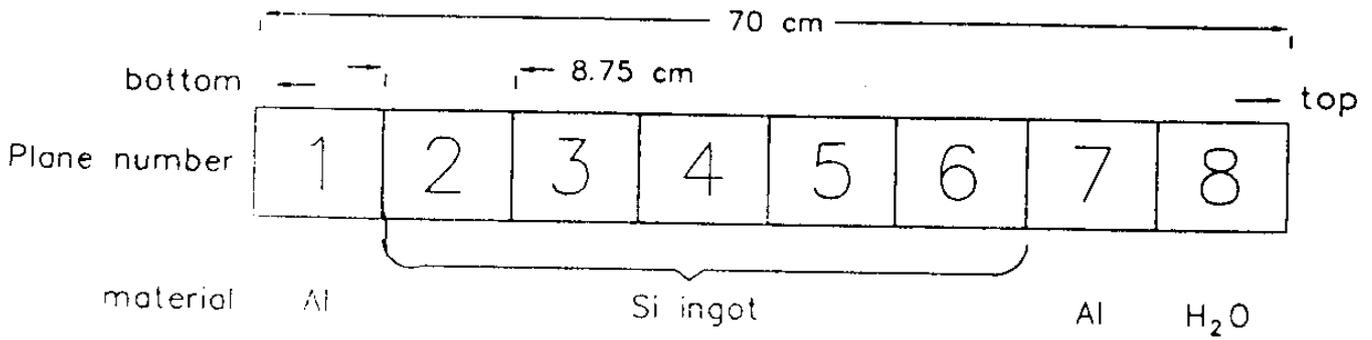


Fig. 4. Axial modelling for irradiation at NTD sites

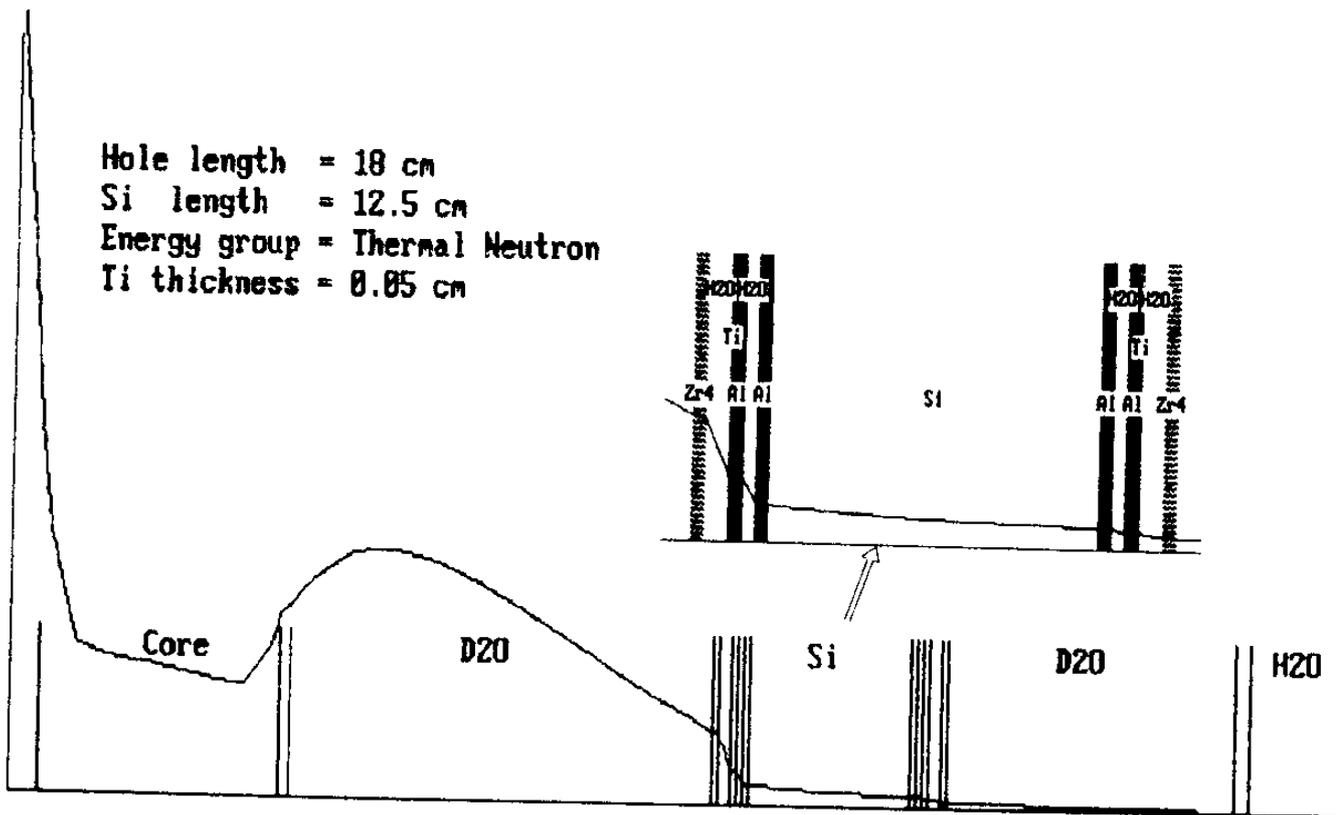


Fig. 5. Radial Flux Profile in One-Dimensional Model

포함한 각 길이가 8.75cm 인 8 마디로 모델화된 조사물질을 NTD 수직관에 설치한 조사내관 안에 장전하였을때 원자로 반응도 변화등을 평가하였다. (15)

또한 운전중에 조사내관에 장전 또는 인출되는 Si Ingot 의 속도에 의한 반응도에 미치는 영향을 KMRRSIM 코드로 평가하였다. (16)

## 2) 해석결과(18)

조사물질의 장전에 따른 원자로 반응도의 변화를 표 3 에 보였으며, NTD-1 및 NTD-2 에 Si Ingot 및 조사내관을 설치할 경우에 원자로 반응도의 변화는 Ti 흡수막을 포함하는 2 개 조사내관에 대해서 총 -0.224mk 이다. 또한 NTD-1에 장전한 Si Ingot( $\phi 15$  cm) 에 의한 반응도는 -0.154mk, NTD-2 에 Si Ingot( $\phi 12$  cm) 를 장전한 경우 반응도는 -0.081mk 이며, 두 Si Ingot를 모두 장전한 경우의 총 원자로 반응도는 -0.241mk 이다. 따라서 NTD-1/2 수직관에 조사내관 및 Si Ingot 를 모두 장전한 경우에는 약 -0.5 mk 로 추산되며, 이로 인한 Fuel Cycle 및 Cost 혹은 Control Margin 의 영향을 무시할 수 있다.

Si Ingot 의 인출 및 장전 속도를 50cm/min 이라할 경우 약  $20 \times 10^{-4}$  mk/sec 의 반응도 변화를 일으키고 대응되는 log rate 는 1%/sec 미만이므로 이에 의한 control logic 및 trip set-point 에 미치는 영향은

Table 3. Reactivity Changes Due to Irradiation Material

Position of Irradiation Material	$k_{eff}$	$\rho(mk)$
Without Irradiation Material	1.05030	-
Irradiation sleeve and Titanium screen only	1.05005	-0.224
NTD - 1	1.04988	-0.154
NTD - 2	1.04996	-0.081
NTD - 1 and NTD - 2	1.04978	-0.241

Table 4. The Flux at the Center of NTD-1 Calculated by ANISN

Group		Upper Energy (MeV)	Flux(#/cm <sup>2</sup> sec )
N E U T R O N	1	17.33	$1.0883 \times 10^{10}$
	2	6.703	$1.6893 \times 10^{11}$
	3	2.019	$1.2192 \times 10^{11}$
	4	1.003	$1.1008 \times 10^{11}$
	5	0.4505	$1.2377 \times 10^{11}$
	6	0.15	$9.1814 \times 10^{10}$
	7	$4.087 \times 10^{-2}$	$2.6795 \times 10^{11}$
	8	$2.035 \times 10^{-3}$	$7.2101 \times 10^{11}$
	9	$3.727 \times 10^{-5}$	$1.4142 \times 10^{12}$
	10	$4.14 \times 10^{-7}$	$4.7976 \times 10^{13}$
γ  R A Y	11	14.0	$4.7462 \times 10^{11}$
	12	7.5	$8.8924 \times 10^{12}$
	13	3.0	$1.0362 \times 10^{13}$
	14	1.33	$1.1261 \times 10^{13}$
	15	0.6	$3.5970 \times 10^{12}$
	16	0.51	$6.0022 \times 10^{13}$
	17	0.1	$1.6661 \times 10^{13}$

무시할 수 있다. 또한 운전중에 Si Ingot 를 조사내관에 장전 또는 인출시 RRS trip 을 유도할 수 있는 순간 최대 출력 분포 변동율은 Set-Point 에서 6%/sec 이내 이므로 이에 따른 Si Ingot 의 최대 속도는 37cm/sec 까지 가능하다.

#### 나. Nuclear Heating

Nuclear Heating 은 주로  $\gamma$  선 및 중성자에 기인하므로 KMRR 의 NTD-1/2 조사관에 조사내관 및 Si Ingot 를 장전하였을 때, 이들 구조물 및 Si Ingot 에서 Nuclear Heating 을 발생한다. 일반적으로 높은 온도에서 조사된 Si Ingot 일수록 열처리에 의한 방사선 손상회복이 어려워지므로 Si Ingot 를 70°C 내외로 유지하는 것이 바람직하다. 따라서 NTD 조사관에서의 방사선에 의한 Nuclear Heating 을 평가하여 앞으로 Si Ingot 및 Al 조사내관을 제열방법을 강구하고자 한다.

원자로내의 물질의 열발생은 일반적으로 물질의 원자핵과 중성자간의 핵반응 및 물질과  $\gamma$  선의 상호작용에 의해 이루어지며, 중성자 핵반응의 경우는 이들 핵반응에 의해 발생하는 중성자와 2 차  $\gamma$  선 및 방사화된 나머지 핵들로 부터 방출되는 하전입자등에 의한 에너지 흡수가 있으며, 이들은 보통 전체 흡수량의 약 10 % 이다.

원자로 내의 임의의 공간에서 중성자에 의한 단위부피당 단위 시간당

발생하는 열은 다음과 같다.

$$H_n(r) = \int \phi(r,E) \sum \sum N_j(r) \sigma_{ij}(E) E_{ij}(E) dE \quad [ \text{eV/cm}^3\text{sec} ] \quad (14)$$

여기서

$\phi(r,E)$  : 위치  $r$  에서 에너지  $E$  인 중성자속

$N_j(r)$  : 위치  $r$  에서 단위부피당  $j$  원소의 수 ( $\text{atom/cm}^3$ )

$\sigma_{ij}(E)$  : 중성자 에너지  $E$  에서  $i$  핵반응에 대한  $j$  원소의 미시적 단면적 ( $\text{cm}^2/\text{atom}$ )

$E_{ij}(E)$  :  $j$  원소의  $i$  핵반응에서 축적되는 에너지( $\text{eV}$ )

(14) 식에서 중성자속 및 단위부피당 원소의 수에 무관한 항들을

$k_{ij}$ ,  $k_j$  로 정의하면

$$k_{ij}(E) = \sigma_{ij}(E) E_{ij}(E) \quad (15)$$

$$k_j(E) = \sum k_{ij}(E) \quad (16)$$

이다.  $k_{ij}$  는 원소  $j$  에서  $i$  핵반응에 대한 미시적 kerma(Kinetic Energy Released In Material) 인자라 하며, 각 원소들에 대해서  $k_j$  를 구할 수 있다. (19), (20)

식 (14) 에서  $E_{ij}(E)$  는 에너지  $E$  인 중성자에 의해 축발되는  $i$  핵반응에 의해  $j$  원소에서 발생하는 에너지이며, 이 에너지는 핵반응 위치에서 무시할 수 있는 거리에서 일어나는 국부적인 에너지 축적이다.

따라서  $E_{ij}$  는 핵반응 원자핵 및 나머지 핵들의 방사선 붕괴로부터 생성되는 하전입자등 전체 모든 에너지의 합으로 주어진다.

같은 방법으로  $\gamma$  선에 대한 kerma 인자  $k_j$  는 photoelectric, pair production, compton scattering 만을 고려하고 다른 모든 가능한 과정들을 무시한 경우에 다음과 같이 쓸수 있다.

$$k_j^{\gamma}(E) = \sigma_{pe}^j E + \sigma_{pp}^j (E - 1.02) + \sigma_{ca}^j E \quad (17)$$

여기서

$E$  : photon 에너지 (MeV)

$\sigma_{pe}^j$  : 원소  $j$  의 광전효과의 미시적단면적 ( $cm^2/atom$ )

$\sigma_{pp}^j$  : 원소  $j$  의 pair production의 미시적단면적 ( $cm^2/atom$ )

$\sigma_{ca}^j$  : 원소  $j$  의 compton 산란의 미시적단면적 ( $cm^2/atom$ )

이다.

pair production 에서는 1.02MeV 의 광자 에너지는 극부적인 에너지 축적에는 기여하지 않으며, pair production 에 의해 생성되는 에너지가 0.51MeV 인 광자쌍들의  $\gamma$  선 다중군 단면적집합으로서 수송단면적으로 주어지므로 에너지 균형이 이루어진다.

따라서 중성자와  $\gamma$  선에 의한 임의의 위치  $r$  에서 열발생율은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 H_n(r) &= \int \phi(r, E) \sum N_j k_j(E) dE \\
 &= \int \phi(r, E) k_n(E) dE
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 H_\gamma(r) &= \int \phi(r, E) \sum N_\gamma^j k_\gamma^j(E) dE \\
 &= \int \phi(r, E) k_\gamma(E) dE
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

여기서  $k_n(E)$  는 임의의 물질내 위치  $r$  에서 에너지  $E$  인 중성자와 물질과의 모든 핵반응을 고려한 kerma 인자 이고,  $k_\gamma$  는 에너지  $E$  인  $\gamma$  선과 물질과의 모든 상호작용을 고려한 kerma 인자이다. 그러므로 물질에서 각 에너지에 대한 kerma 인자와 그 위치에서의 각 에너지에 대응하는 중성자속 및  $\gamma$  선속을 알면 그 물질에서의 열발생율을 구할 수 있으며, 그 물질에서 발생하는 총열량은 식 (18), (19) 을 물질의 전공간에 대한 적분의 합으로 구한다. 그러나  $\gamma$  선의 경우는 물질내에서의  $\gamma$  선속의 감쇠를 고려해야 한다.

예를 들어 원자로 내의 구조물이 두께가  $t$  이고, 무한한 판 이라고 가정하여 1 차원으로 단순화할 경우에는 식 (18), (19) 은 다음과 같다.

$$H^n = \sum \phi(E) k_n(E) \tag{20}$$

$$H^{\gamma} = \sum \phi(E) k_{\gamma}(E) \quad (21)$$

또한 단면적 A 이고  $\gamma$  선의 감쇠효과를 무시한 경우에 중성자 및  $\gamma$  선에 의한 구조물의 총발생열은 다음과 같다.

$$H_{Tn} = A \cdot t \sum k_n(E) \phi(E) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} H_{Tn}^{\gamma} &= A \sum k(E) \int \phi e^{-\mu t'} dt' \\ &= A \cdot t \sum k(E) \phi(E) \end{aligned} \quad (23)$$

그림 5 와 같이 NTD-1 조사관에 조사내관을 설치하여 Si Ingot 를 조사시킬때 조사내관, Ti 흡수막 및 Si Ingot 에서의 열발생율을 1 차원 무한관 모델로 단순화하여 1D-ANISN 코드와 17 군 단면적 데이터를 사용하여 계산하여 표 6 에 보였다<sup>(21)</sup>. 표 4 에는 각 에너지 군에 대한 NTD-1 중심부에서의 선속을, 표 5 에는 위의 계산에 사용된 각 물질의 kerma 인자를 보였다. 표 6 에는 식 (20), (21), (22), (23)을 이용하여 계산한 NTD-1 의 각 물질에서 발생하는 Nuclear Heating Rate 및 총 열발생을 나타내었으며, NTD-1 조사관에서의 총 Nuclear Heating 은 최대 82.31 Kw 및 평균 57.23Kw 이다. 이중 약 28.4% 가 Si Ingot 에서

Table 5. Kerma Factor [(W/cc)/(#/cm<sup>2</sup> sec)]

Group	Zircaloy	H <sub>2</sub> O	Al	Ti	Si
1	3.8037-15	6.7050-14	3.4834-14	1.0256-14	2.4820-14
2	1.0699-15	4.2586-14	3.5913-14	2.6906-15	3.9620-15
3	6.1711-16	2.9136-14	2.0024-15	1.2453-15	1.6416-15
4	2.9534-16	2.0287-14	1.3633-15	6.4540-16	1.1070-15
5	2.9534-16	1.2814-14	7.3998-16	2.2538-16	7.0068-16
6	1.1027-16	6.0626-15	3.3117-16	1.6505-16	5.5497-17
7	1.7723-17	1.2694-15	1.0875-16	2.0341-16	1.1753-17
8	9.4441-19	5.4952-17	3.7540-17	3.1178-17	8.8416-19
9	6.2001-20	9.0694-19	2.8007-16	2.6821-16	2.7237-18
10	4.4925-19	6.7191-21	2.4327-15	2.3304-15	2.3511-17
11	3.3298-13	2.7203-14	8.1606-14	1.6793-13	7.5875-14
12	1.3001-13	1.5843-14	4.1597-14	7.5445-14	3.8030-14
13	4.9563-14	8.6995-15	2.0844-14	3.3869-14	1.8805-14
14	2.6533-14	4.7447-15	1.1229-14	1.8006-14	1.0113-14
15	1.8586-14	2.9040-15	6.8893-15	1.1240-14	6.2092-15
16	2.4222-14	1.5413-15	3.7756-15	7.4218-15	3.4317-15
17	3.8711-13	7.8057-16	1.0657-14	8.6118-14	1.2035-14

\* Read as 3.8037 x 10<sup>-15</sup>

Table 6. The Heat Generated in NTD-1

Materials	Specific Heat(W/cm <sup>3</sup> )		Volume (cm <sup>3</sup> )	Total Heat(watt)	
	Max.	Avg.		Max.	Avg.
Si ( $\gamma$ -ray) (Neutron)	1.23 (1.111) (0.119)		7068.6	8.694 x 10 <sup>3</sup> (7.853 x 10 <sup>3</sup> ) (0.840 x 10 <sup>3</sup> )	
Al	2.16	1.48	3990	8.168 x 10 <sup>4</sup>	5.905 x 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O	0.78	0.51	20160	1.572 x 10 <sup>4</sup>	1.208 x 10 <sup>4</sup>
Al sleeve	2.463	1.562	6480	1.596 x 10 <sup>4</sup>	1.012 x 10 <sup>4</sup>
Ti screen	5.15	3.27	1940	9.991 x 10 <sup>3</sup>	6.344 x 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O	0.836	0.518	5976.8	4.997 x 10 <sup>3</sup>	3.096 x 10 <sup>3</sup>
Zircaloy	10.95	6.565	1073.8	1.833 x 10 <sup>4</sup>	1.099 x 10 <sup>4</sup>
Total				8.231 x 10 <sup>4</sup>	5.723 x 10 <sup>4</sup>

발생되며, Ti 흡수막에서 9.4%, Al 조사내관에서 43.5%, 나머지는 Zr 조사관에서 발생한다. 또한 표 6 에 따르면 Si Ingot 에서 총발생열은 8.694 Kw 이며 이중 90% 는  $\gamma$  선에 의해 나머지 10 % 는 중성자에 의해 발생한다.

따라서, 조사내관 및 Si Ingot 의 Nuclear Heating 을 제열하기 위한 방법이 앞으로 연구되어야할 과제이다.

## 2. 균일조사방법

앞에서 기술한 열중성자의 분포에 대하여 '88년도에는 다음 4가지 균일조사방법을 검토하였다.(1)

1) 중성자 흡수막을 이용하여 조사관내 열중성자속의 축 분포를 평탄화한 후 일정 위치에서 조사하는 정위치법

2) 조사관속을 총조사량에 맞도록 Ingot를 일정속도로 통과시키는 정속이동법

3) 중성자 축 분포 기울기가 반대인 두 위치에서 목표 조사량의 1/2씩 2단계 과정으로 조사하여 총 조사량에 도달하는 위치 이동법

4) 중성자 수직분포의 기울기가 직선에 가까운 위치에서 1/2 목표 조사량을 조사한 후, Ingot를 도치해서 같은 장소에서 다시 1/2 조사하는 도치법

이들 조사방법에 대한 조사균일도 평가를 간단히 중성자속 축 분포의 편차만으로 고려할 때 중성자 흡수막에 의한 평탄화가 없는 정위치법의 경우는 길이 30cm Ingot에 대해서  $\delta\phi \cong 8 \sim 9\%$ 인데 비해서 도치법은 약 1 ~ 2%, 위치이동법에서는 약 2 ~ 3%이다. 40cm Ingot에 대해서는 정위치법은  $\delta\phi \cong 14 \sim 15\%$ , 위치이동법은 약 6%, 그리고 도치법의 경우는 약 4 ~ 8% 이다.

일반적으로 조사관내에 Si-Ingot가 장전되면, 축분포는 H<sub>2</sub>O가 차있는 경우보다 더 평탄화 되는 것으로 보고 되어 있다. 따라서 Ingot 상, 하단에 Al Filler를 넣어서 이 평탄화를 더 향상하면 위치이동법 및 도치법도 유력한 균일 조사법으로 개발될 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 4 절에서 논의 되겠지만 후자의 경우는 방사화된 Ingot를 도치하여 재장전 하는 조작에 많은 어려움이 있으므로 이 방법은 배제하였다.

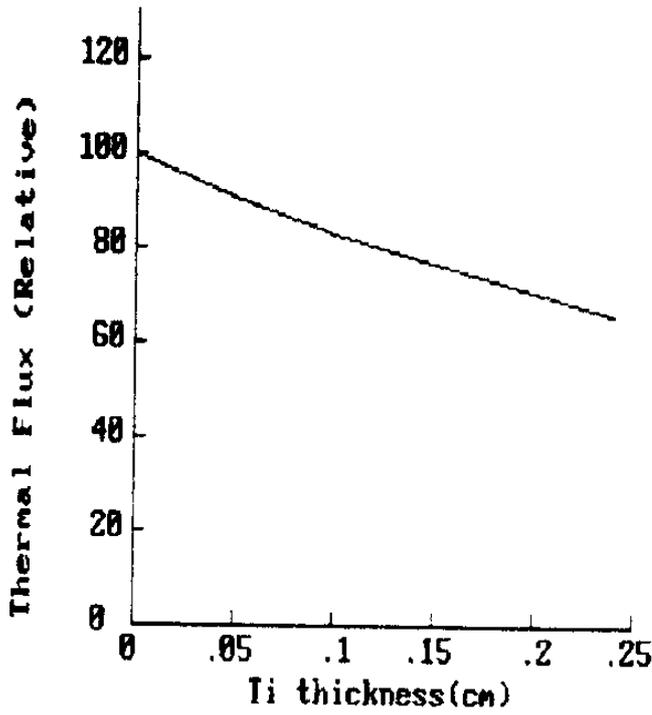
조사의 균일도만 고려한다면 이론적으로는 정속이동법이 가장 이상적이다. 그러나 이 방법은 조사 도중에 원자로의 Scram과 같은 중성자속 분포가 급변할 경우에 나중에 적절한 재 조사로 균일도를 얻을 수 없는 큰 단점이 있다. 따라서 정속이동법과 위치이동법은 원자로운전/운영 이력이 축적되고, 또 각 핵연료주기 동안의 중성자속 축분포의 변화에 대한 정확한 실험 자료가 축적되는 시점에 가서 제 2단계 개발로 시도하는 것이 바람직하다. 따라서 현재로서는 조사관 구조, 구동장치 및 제어장치등의 설계, 제작에 장차 이들 조사방법이

가능하도록 필요한 기능을 준비하여 둔다.( 4 절 참고)

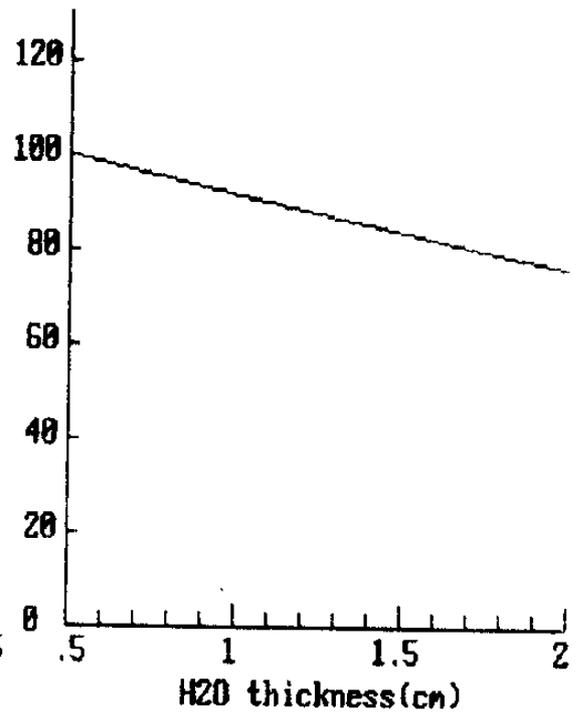
이런 기본방침하에 당해년도에는 조사내관 주위에 흡수막을 설치하여 축방향 중성자속이 가장 높은 영역의 그 분포를 평탄화하기 위해 Ti, Ni, SUS 흡수막 또는 조사관-조사내관 사이에 있는 H<sub>2</sub>O 층의 두께 변화를 이용 하는 방법을 검토하였다. 조사내관과 같이 극소적인 범위에 있어서 중성자속 분포의 자세한 변화를 3차원 노심계산으로 추산하기는 어렵다. 따라서 그림 5 와 같이 NTD 조사관을 간단한 1차원으로 모델화하여 1D-ANISN 코드로 이들 중성자 흡수막에 따른 중성자속 감소효과를 계산하고(그림 6), 이들 결과를 이용하여 흡수막의 구조(종류, 두께, 길이, 설치위치)를 설정하는 추산법을 시도 하였다.

흡수막의 구조는 물론 최고 중심속 영역에서 가장 두껍고 상하로 가면서 점점 얇어지는 구조를 갖게 되겠으나 흡수막의 두께를 연속적으로 변화하는 것은 실제 제작상 어려움이 있으므로 그림 7 과 같이 같은 두께의 얇은 판을 5 겹으로 감는 층상 구조로 시도하였다. 따라서 흡수막의 적정 설계는 판의 두께 및 각 층에서의 이들 판의 길이 및 위치를 변화하여  $\delta\phi$ 를 극소화 하는 것이다. 예를 들어 평탄화 영역을 50cm 로 잡으면 최대 중성자속의 약 20%를 흡수하여야 하며, 이때 필요한 Ni, SUS, Ti 및 H<sub>2</sub>O층의 두께는 1.46mm, 2.43mm, 1.23mm 및 17.4mm이다.

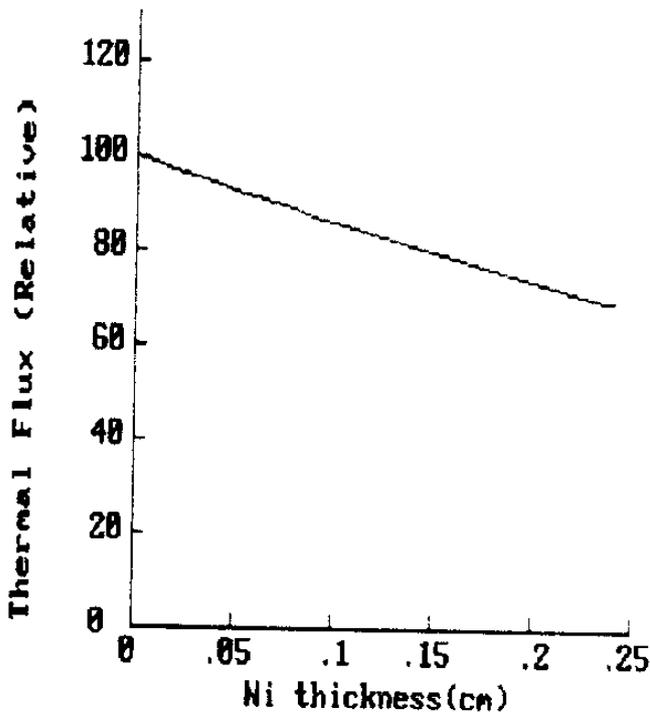
표 7 은 이와 같이 하여 구한 적정 흡수막의 구조로서 흡수막의 재료가 어느 경우이든  $\delta\phi_{\min} \sim 5\%$  에 도달할 수 있다. 그러나



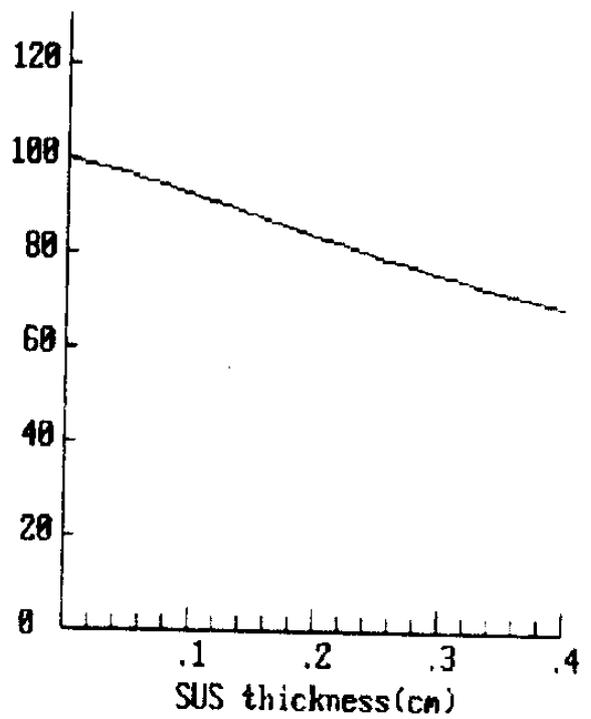
(a) Ti screen



(b) Outer H2O screen

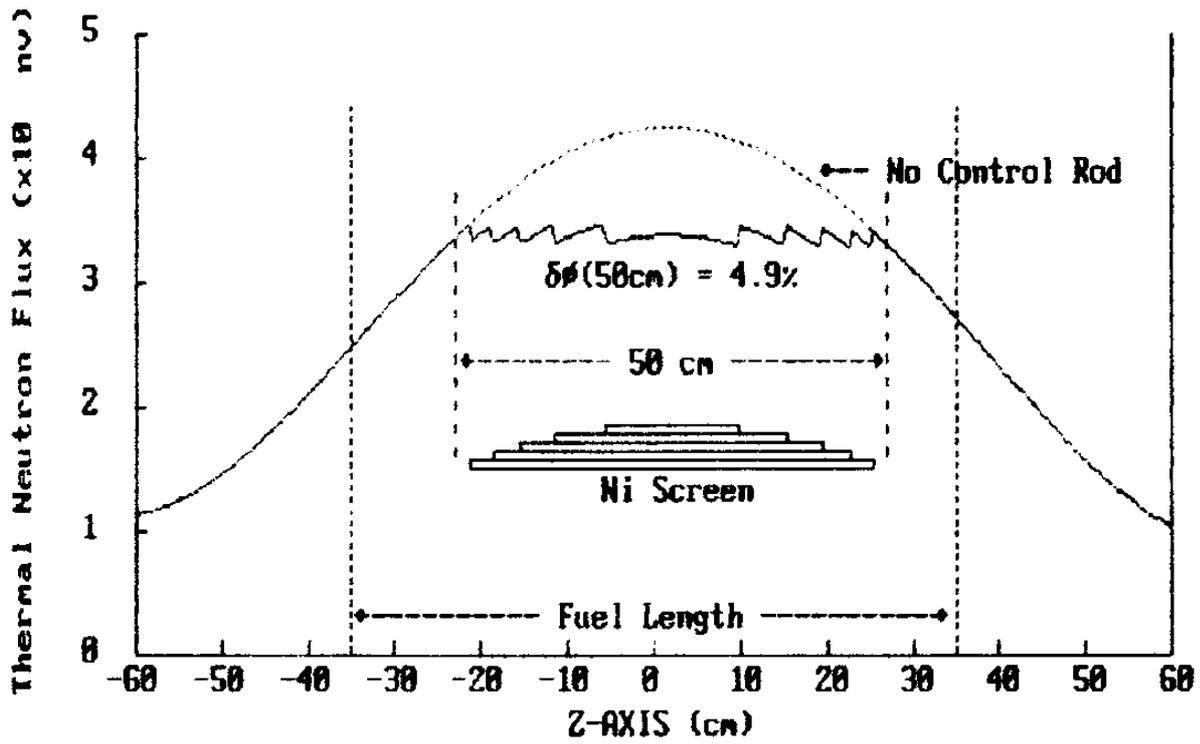


(c) Ni screen

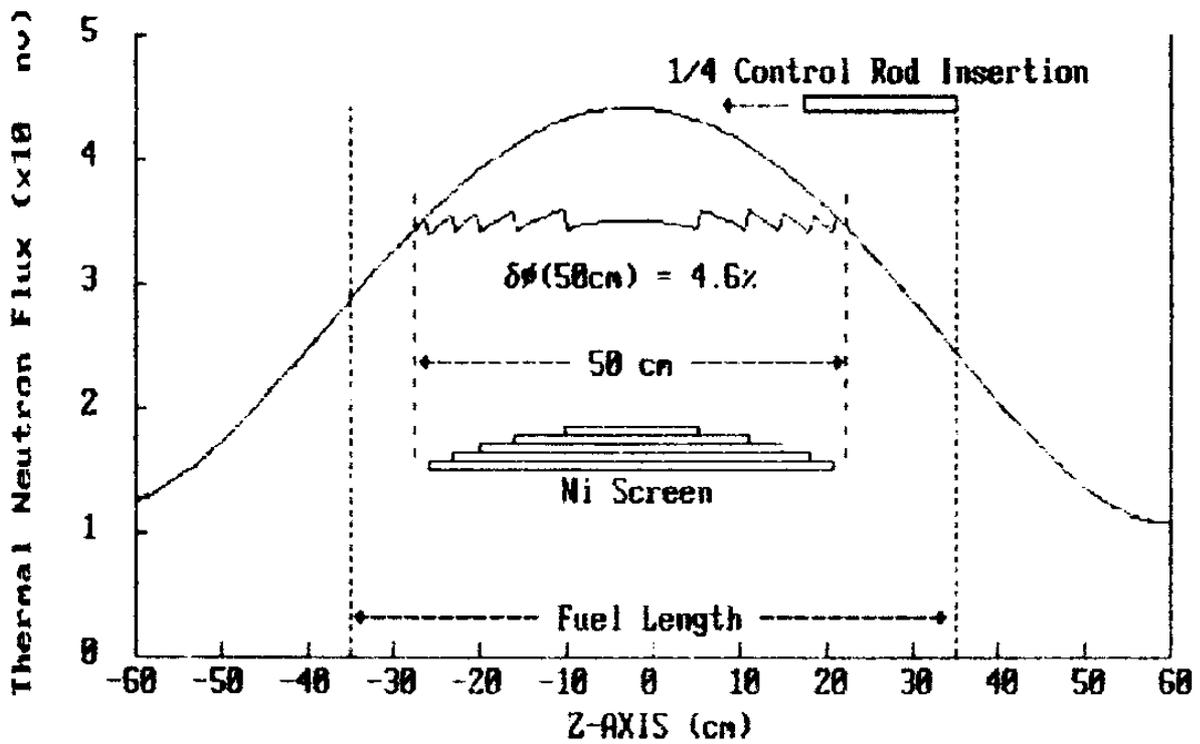


(d) SUS-304 screen

Fig. 6 Variation of thermal neutron flux vs. several screen materials thickness in One-Dimensional Model.



(a) No Control Rod



(b) 1/4 Control Rod Insertion

Fig. 7 Axial variation of thermal neutron flux with and without 5 sheet Ni screen in NID-1 hole

Table 7. 중성자 흡수막에 의한 최적 중성자속 평탄화율( $\delta\phi_{min}(50cm)$ )

흡수막	NTD Hole	흡수막 중심부 두께 (mm)	Without Control Rod			With 1/4 Control Rod		
			$\delta\phi_{min}$ (%)	흡수막 최대길이 (cm)	중심위치 (cm)	$\delta\phi_{min}$ (%)	흡수막 최대길이 (cm)	중심위치 (cm)
Ni	NTD-1	1.5	4.9	47.6 cm	84.0	4.6	46.4 cm	79.4
	NTD-2	1.5	4.9	47.6 cm	84.0	4.6	47.2 cm	79.4
SUS	NTD-1	2.45	5.1	47.0 cm	84.1	5.0	45.2 cm	79.4
	NTD-2	2.45	5.1	47.0 cm	84.1	5.0	45.6 cm	79.4
Ti	NTD-1	1.25	5.1	47.0 cm	84.0	4.8	46.0 cm	79.4
	NTD-2	1.25	5.2	46.2 cm	83.7	5.1	45.8 cm	79.5
H <sub>2</sub> O	NTD-1	18.0	4.8	50.0 cm	84.5	-	-	-

조사내외관간의 H<sub>2</sub>O 층을 흡수막 대신 사용하는 방법은 H<sub>2</sub>O 층의 최대 두께가 18mm 로서 NTD 조사관의 유효 구경이 너무 감소하게 되므로 6" Ingot 를 처리할 수 없게 된다.

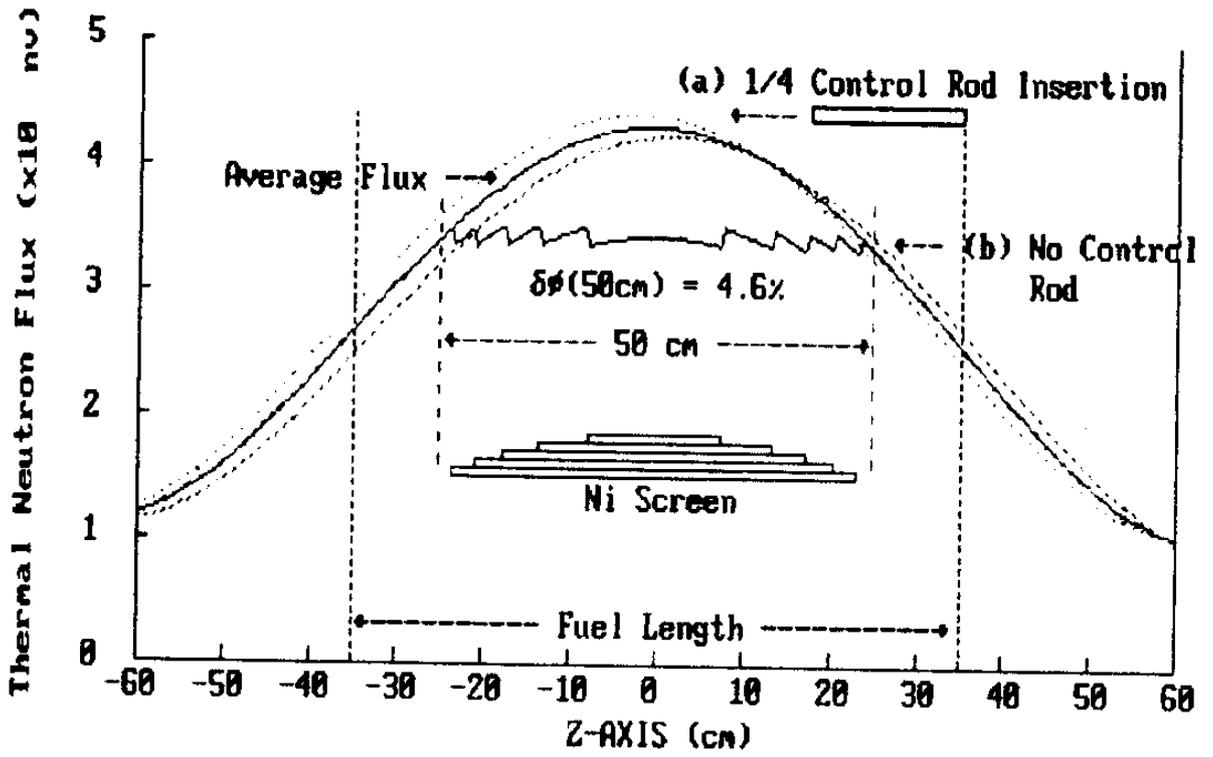
그러나 중성자속 축분포는 일정한 것이 아니고 각 핵연료주기 동안에도 제어봉의 위치에 따라 변하게 되므로 이에 대한 효과를 다음과 같은 방법으로 조사하였다. 즉, 그림 8 과 같이 1/4 Control Rod ( $\phi_{1/4}$ ) 와 No control Rod ( $\phi_{no}$ ) 의 두 경우에 대한 평균 중성자속 분포  $\phi_{av}(Z)$  를 구하고 이에 대한 50 cm 평탄화 영역의 적정 흡수막 구조를 구한 다음 40 cm Si Ingot 를 다음과 같은 3가지 방법으로 조사하는 경우를 검토하였다(표 8, 9, 10).

(A) 흡수막 및 Si Ingot 의 중심 위치를 조사 당시의 축분포 중심에 이동하는 경우

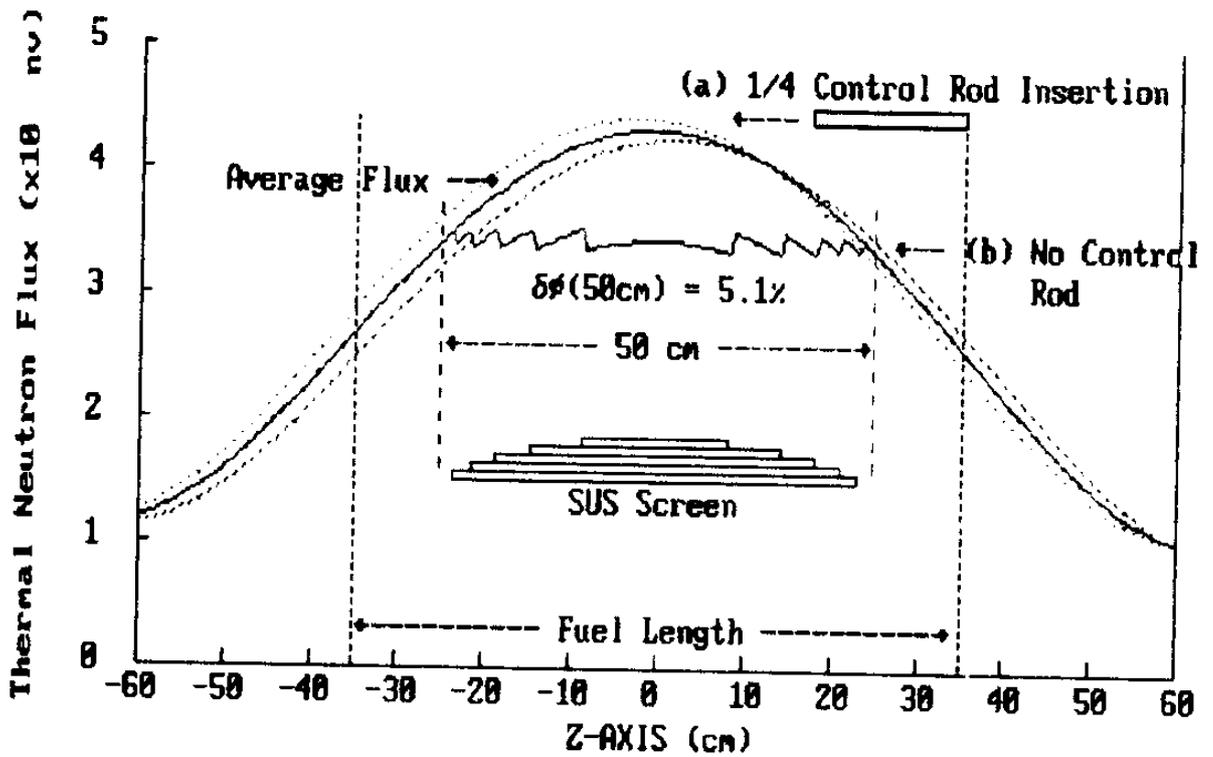
(B) 흡수막 및 Si Ingot 의 중심 위치를 평균 축분포의 중심 위치에 고정하는 경우

(C) 흡수막의 위치는 (B) 처럼 평균 축분포 중심 위치에 고정되어 있으나 Si Ingot는 조사 당시의 축분포 중심에 이동하는 경우

그림 9 는  $\phi_{av}(Z)$  에 대해서 구한 50 cm 평탄화 영역의 적정 Ni 흡수막을 평균 축분포의 중심 위치에 설치하였을 때,  $\phi_{1/4}$  및  $\phi_{no}$  의  $\delta\phi(50cm)$ 를 보인 것이며, 표 9 는 이들 3 가지 방법에 대해서 이와 같은 5겹 층상구조의 흡수막으로 도달할 수 있는  $\delta\phi_{min}(40cm-Si)$ 을 비교한



(a) Ni Screen



(b) SUS-304 Screen

Fig. 8 Axial variation of average thermal neutron flux with and without 5 sheet screen in NTD-1 hole

Table 8. 중성자 흡수막에 의한 평균 중성자속의 최적 평탄화율( $\delta\phi_{min}(50cm)$ )

NTD Hole	Control Rod	No Screen			Ni Screen			SUS-304 Screen			Ti Screen		
		$\delta\phi_{min}$ (%)	$\delta\phi_{min}$ (%)	중심위치 (cm)	흡수막 최대길이 (cm)	중심위치 (cm)	$\delta\phi_{min}$ (%)	흡수막 최대길이 (cm)	중심위치 (cm)	$\delta\phi_{min}$ (%)	흡수막 최대길이 (cm)	중심위치 (cm)	
NTD-1	without	26.1	4.9	84.0	47.6 cm	84.0	5.1	47.0 cm	84.1	5.1	47.2 cm	84.0	
	with 1/4	28.5	4.6	79.4	46.4 cm	79.4	5.0	45.2 cm	79.4	4.8	46.0 cm	79.4	
	평균 Flux	-	4.6	81.7	47.0 cm	81.7	5.1	45.8 cm	81.7	5.0	46.4 cm	81.6	
NTD-2	without	25.2	4.9	84.0	47.6 cm	84.0	5.1	47.0 cm	84.1	6.6	44.6 cm	83.7	
	with 1/4	27.6	4.6	79.4	47.2 cm	79.4	5.0	45.6 cm	79.4	5.0	45.8 cm	79.5	
	평균 Flux	-	4.6	81.7	47.0 cm	81.7	5.1	46.2 cm	81.7	5.1	46.4 cm	81.6	
흡수막 중심부두께		-			1.5 mm			2.45 mm			1.25 mm		

Table 9. 5 겹 흡수막(50cm) 설치 위치 및 Si Ingot(40cm) 조사위치에 따른  $\delta\phi$

중성자 흡수막	흡수막 중심위치	Si Ingot 중심위치	NO Control Rod	With 1/4 Control Rod	비고
			$\delta\phi(40 \text{ cm Si})$	$\delta\phi(40 \text{ cm Si})$	
Ni	$\phi_{no}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	4.6 %	-	가
	$\phi_{1/4}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	4.9 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{av}(\text{max})$	10.1 %	9.2 %	나
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	10.4 %	-	다
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	10.0 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	Core Center	10.2 %	9.2 %	
SUS	$\phi_{no}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	5.2 %	-	가
	$\phi_{1/4}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	4.9 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{av}(\text{max})$	10.3 %	9.8 %	나
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	9.7 %	-	다
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	9.1 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	Core Center	10.3 %	9.8 %	
Ti	$\phi_{no}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	4.8 %	-	가
	$\phi_{1/4}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	4.8 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{av}(\text{max})$	10.3 %	9.8 %	나
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{no}(\text{max})$	9.8 %	-	다
	$\phi_{av}(\text{max})$	$\phi_{1/4}(\text{max})$	-	9.2 %	
	$\phi_{av}(\text{max})$	Core Center	9.5 %	10.3 %	

Table 10. 10 겹 흡수막(50cm) 설치위치 및 Si Ingot(40cm) 조사위치에 따른  $\delta\phi$

중성자 흡수막	흡수막 중심위치	Si Ingot 중심위치	NO Control Rod	With 1/4 Control Rod	비고
			$\delta\phi(40 \text{ cm Si})$	$\delta\phi(40 \text{ cm Si})$	
Ni	$\phi_{no}(\text{MAX})$	$\phi_{no}(\text{MAX})$	2.6 %	-	가
	$\phi_{1/4}(\text{MAX})$	$\phi_{1/4}(\text{MAX})$	-	2.4 %	
	$\phi_{av}(\text{MAX})$	$\phi_{av}(\text{MAX})$	8.4 %	7.7 %	나
	$\phi_{av}(\text{MAX})$	$\phi_{no}(\text{MAX})$	8.3 %	-	다
	$\phi_{av}(\text{MAX})$	$\phi_{1/4}(\text{MAX})$	-	7.0 %	
	$\phi_{av}(\text{MAX})$	Core Center	8.4 %	7.5 %	

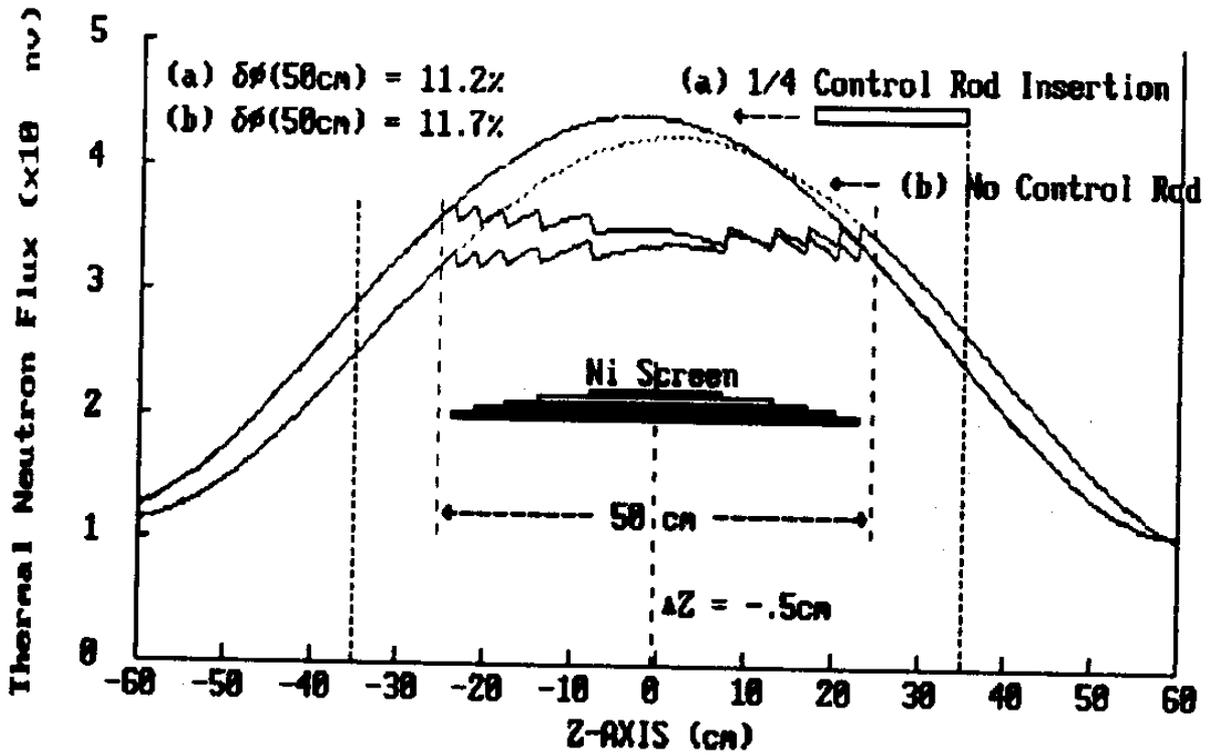


Fig. 9 The thermal neutron flux distributions modified by 5-layer Ni screen fixed at the peak of  $\phi_{av}(Z)$ .  
 (a) 1/4 control Rod Insertion, (b) No control Rod

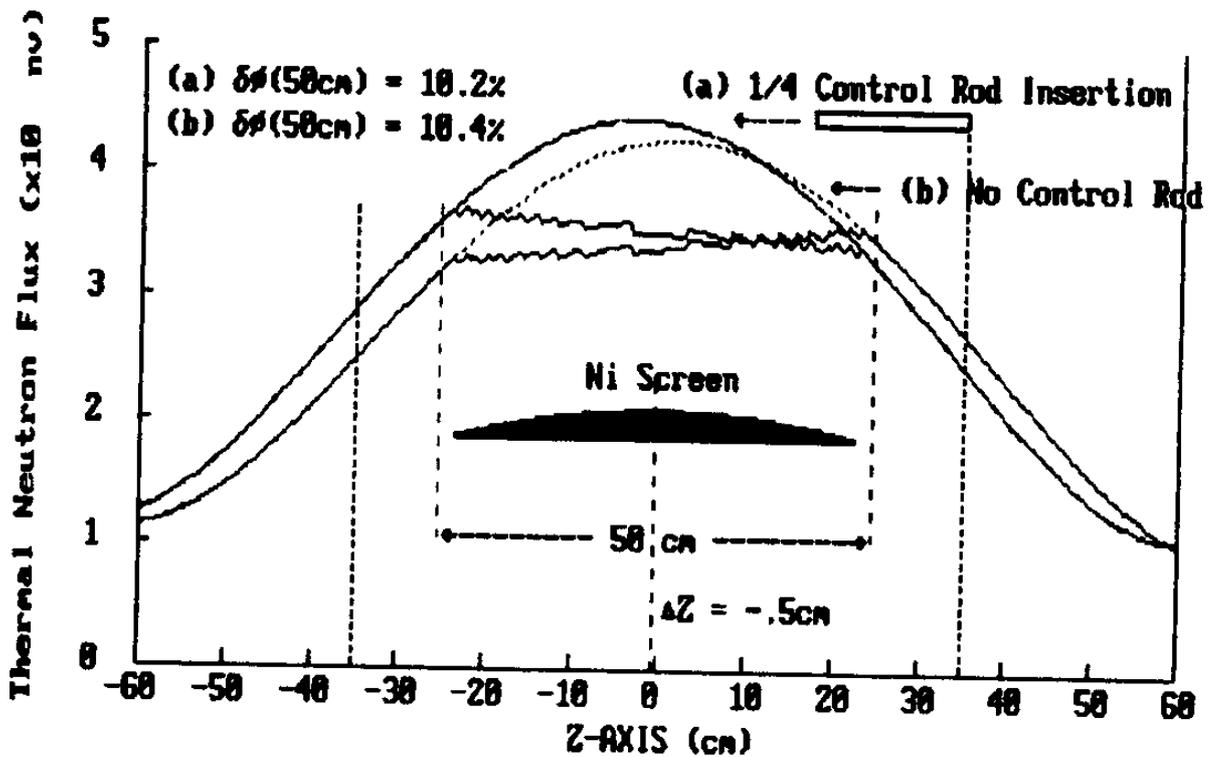


Fig. 10 The thermal neutron flux distributions modified by 10-layer Ni screen fixed at the peak of  $\phi_{av}(Z)$ .  
 (a) 1/4 control Rod Insertion, (b) No control Rod

것이다. 그리고 (C) 방법에서는 Si-Ingot 중심을 원자로심 중심 위치에서 조사하는 경우를 추가하였다. 이들 결과는 흡수막의 종류에는 거의 무관하며, (A) 방법의 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 5\%$  이내로 매우 우수한 균일도를 얻을 수 있다. 이에 비해서 (B), (C) 방법은  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 10\%$ 로서 균일도가 상당히 떨어지며, 예상과는 다르게 (B) 방법에 비해서 (C) 방법의 균일도 향상은 아주 미미하다.

표 10 은 Ni 흡수막을 예로들어 최고 두께는 같으나 중수를 10층 구조로 늘린 경우를 보인 것으로(그림 10 참조) 방법의 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 2.5\%$  이내로 대폭 향상한데 비해서 (B), (C) 방법은  $\sim 8\%$ 로서 다소 개선됨을 알 수 있다.

이상은 두 참고 경우, 즉 no control rod 와 1/4 control rod 간의 축분포 변화에 대한 결과이며 KMRR 각 핵연료 주기 기간의 실제 축분포 변화에 대한 것은 현재로서 알 수 없다. 따라서 흡수막 상세설계 및 조사 균일도 예측은 KMRR 정상 가동후 상당한 축분포 측정자료를 축적한 후에 수행할 예정이다. 따라서 현재로서는 TRIGA-III 연구로 노심 근방에 수직관을 설치하여 축분포 측정 및 흡수막설계 실험 등을 고려하고 있으나 이 원자로의 정상가동 노심위치 주변에는 적당한 여유 공간이 없으므로 여러가지 방법을 검토중에 있다.

핵연료주기 동안에 원자로 제어봉 위치에 따르는 중성자속 축분포의 이동에 맞추어 흡수막의 위치를 바꾸어가는 (A)의 방법은 매우 이상적인 조사방법으로 현재 프랑스 Saclay 연구소 OSIRIS 원자로의

NTD 장치(DIADON)에서 이용되고 있으나, KMRR 원자로에서 채택하기에는 여러가지 기술적인 어려움 과 경험부족에서 오는 문제점이 예상된다. 그러나 제 2 절 3 에서 기술한 바와 같이 NTD-1/2 조사관 상부에는 조사내관 Flange 고정을 위한 구조물이 준비되었으므로, 조사내관 교체 작업에 대한 충분한 경험이 축적되는 시점에서는 이 방법의 시도도 가능할 것으로 생각한다.

### 3. 조사관 설계

제 1차로 정위치법을 채택하기 위해서, 중성자흡수막 및 중성자조사량 감시를 위한 SPND를 설치한 조사내관을 NTD 1/2 수직관에 설치하기로 하고 이에 대한 기본방침을 '88년도에 보고한 바 있다. 아래에 이에 대한 개발진행을 기술한다.

#### 가. NTD 1/2 조사관구조 설계 변경

1) 당초에는 조사내관을 NTD 1/2 조사관에 고정하기 위해서 NTD 조사관의 상부구조를 Spool Type Flange를 하였다. 그러나 조사내관을 장치할때 약 14m의 Pool 상부에서 설치용 기구를 이용하여 결합나사를 조이는등 조작하는 과정에서 Flange에 상당한 충격이 가해질 수 있을 것으로 예상 되기 때문에 Flat Type Flange로 바꾸고, D20 Tank의 Upper Plate에 직접 부착하도록 설계를 변경하였다. 그리고 이 Flange에

조사내관을 정확한 자리에 용이하게 고정될 수 있게하기 위해서 그림 11과 같은 구조의 Position Notch, Pin Hole 및 Bolt Hole를 준비 하였다.

D<sub>2</sub>O Tank의 Lower Plate에도 NTD 조사관 내경보다 6mm 작은 Flange를 부쳐서 NTD 조사관과 조사내관 사이의 간격을 3mm로 유지될 수 있게 하였다.

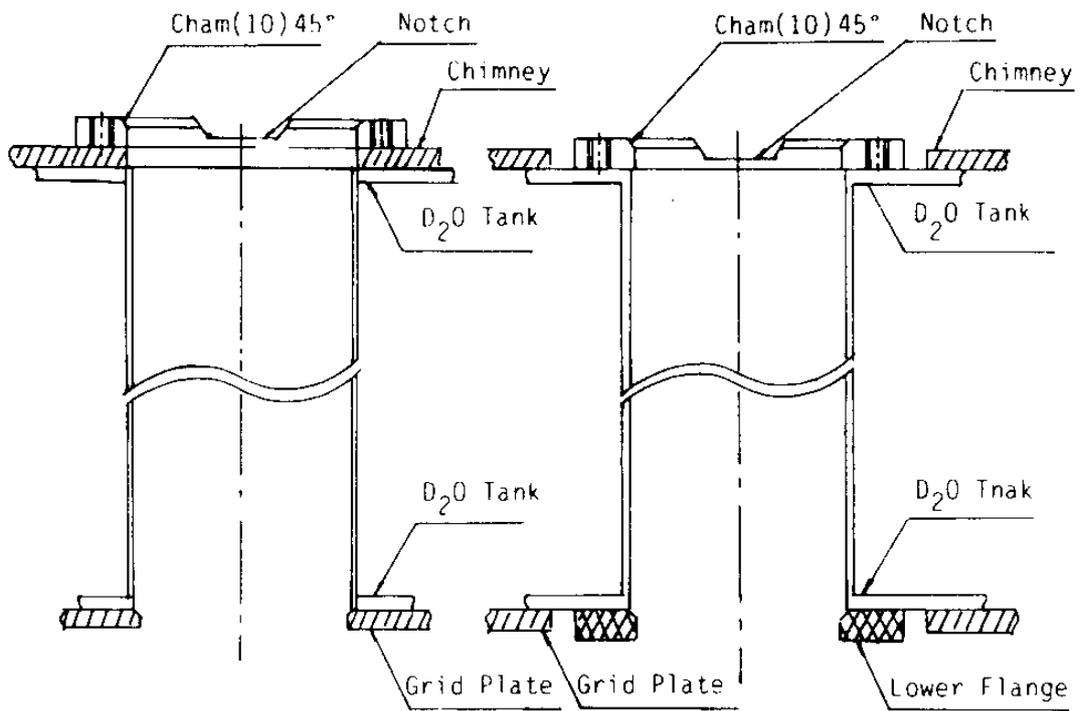
2) NTD 1/2조사관의 두께도 AECL 설계의 2mmT에서 5mmT로 늘리기로 하였다. 이것은 조사내관 설치과정에서 있을 수 있는 충격등 상호작용을 고려해서이다.

3) 위의 Flange 구조 변경에 대해서는 KMRR 건조 사업단 및 AECL과 협의한 결과 설계 변경요청의 시점 및 제작상의 어려움 때문에 이들 상하 Flange는 D<sub>2</sub>O Tank Upper/Lower Plate에 직접 부착하지 않고, Upper/ Lower Plate 위에 있는 Al Grid Plate에 부착하는 것으로 반영되었다. 이 방법은 Zircaloy D<sub>2</sub>O Tank Upper/Lower Plate와 그 위에 고정되는 Al Grid Plate 사이에 열팽창등에 의한 구조적으로 경년 변화가 없을 것으로 가정한 것이다.

#### 나. 조사내관 설계방침

1) 조사내관은 그림 2 처럼 5층 구조의 중성자.흡수막과 4개 SPND가 설치된 Al관으로 그 길이를 D<sub>2</sub>O Tank 하부로 ~70cm 연장하여 정속이동법도 이용할 수 있게한다.

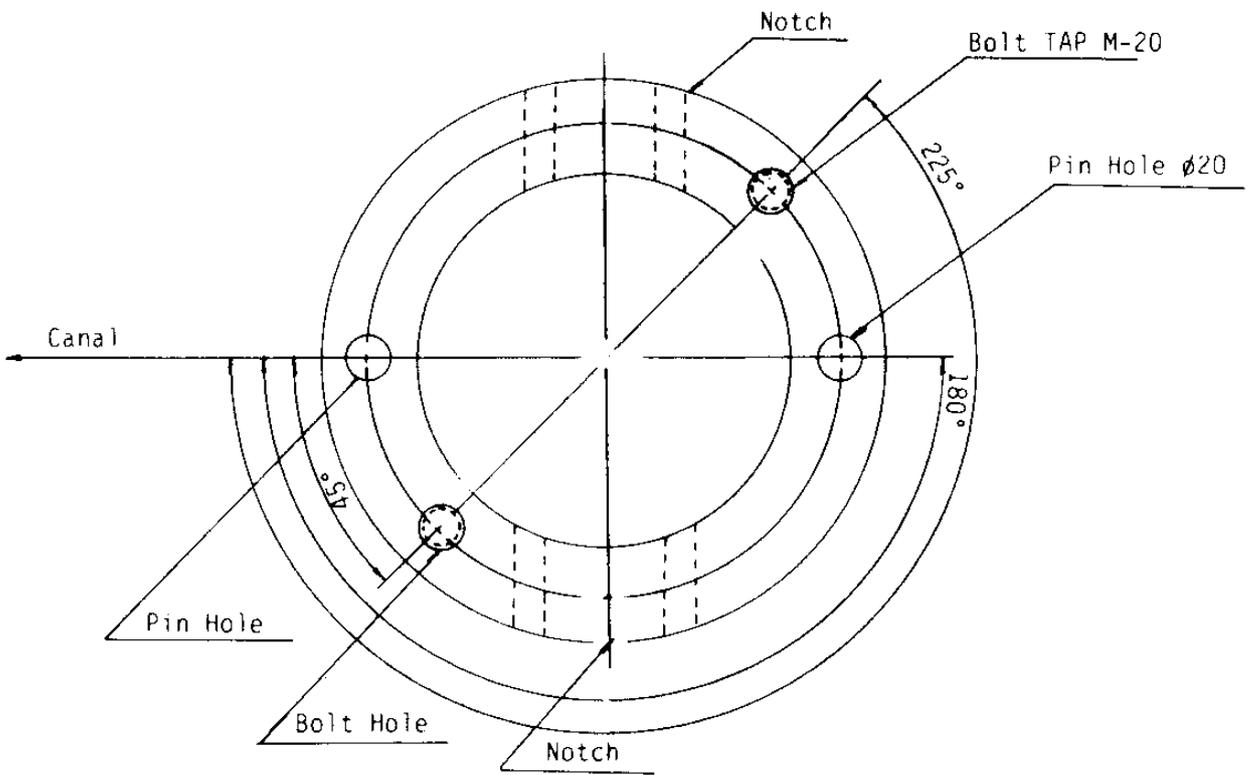
2) 4개 SPND는 Si Ingot 위치에서의 중성자속분포 변화를 검출할



(a) 변경전 Flange

(b) 변경후 Flange

(A) Upper Lower Flange



(B) Flange Top View

Fig. 11. NTD 1/2 수직관 Flange

수 있도록 중성자 흡수막 내부의 조사내관 관벽속 (단, 주변에 2mm 정도의 H<sub>2</sub>O 층이 있게)에 장치하며, 그 방위는 원자로심 쪽이 된다. 그러나 이들 4개 SPND를 설치하는 축방향의 적정위치에 대해서는 앞으로 더욱 검토가 되어야 한다.(제 3 절 참고)

3) 위에 1 의 나 에서 기술한 바 있는 Nuclear Heating의 제열를 검토하여 지장이 없는 한, NTD-1/2 조사관과 조사내관과의 H<sub>2</sub>O 층, 또 조사내관과 Si Ingot의 Al 보호 용기 간의 H<sub>2</sub>O층은 ~3mm 정도로 제한하므로써 동경방향 중성자속분포의 급격한 변화가 없게 한다.

조사내관과 Al 보호용기간 H<sub>2</sub>O 층 ~3mm로 일정하게 유지하는 것은 Si Ingot의 구경이 다를 경우에는 Al 보호용기의 벽 두께를 조절해서 이 H<sub>2</sub>O 층을 ~3mm로 일정하게 하는 것이다. Si과 핵 특성이 아주 비슷한 Al를 이용하여 (Si+Al) 전 조사체의 제원을 일정하게 표준화 하므로써 내부의 중성자속분포를 가능한 일정화 하기 위한 것이다.

같은 이치로 Si Ingot 상, 하단에도 Al Filler를 넣어서 Ingot 양단 본근에서 중성자속 속분포도 급격한 변화를 없게 한다.

4) 위의 2 에서 기술한 바와 같이 흡수막 재료는 원리적으로는 Ti, Ni, SUS의 어느것이든 이용할 수 있으나, 방사화문제, 조달할 수 있는 막의 두께 및 폭 등의 제원등 흡수막 제작상의 용이성 등을 고려해서 결정한다. 특히 SUS의 경우는 핵계산을 위해 정확한 성분을 알수 있어야 한다.

5) 조사내관에서 나오는 SPND 도선은 적절한 보호관과 원자로 Pool Liner 에 고정된 적절한 지지물을 이용해서 안전하게 상부 Junction Box

까지 도출되게 배려 되어야 한다.

#### 다. 조사내관 장전기구

KMRR 가동후 현장실험 단계 즉, 이 조사내관은 중성자 흡수막을 이용한 중성자속 측정포의 평탄화를 실증시험 하는 단계에서 몇차례 교체될 가능성이 있으므로 이 교체 작업이 용이하게 설계되어야 한다. 그러나 원자로 Pool 상부에서 조사내관까지 ~14m 거리에서 조사내관을 NTD-1/2 관 Flange에 Bolt 고정하는 등의 작업을 할 수 있기 위해서는 편리하고 안전한 장전용 기구가 고안되어야 하며 아울러 많은 숙련이 필요할 것으로 생각된다.

그림 12 는 검토중인 장전기구의 구조로서 2.5m Al관 6개를 Univ. Joint 로 연결하고 핵연료 교체용 Hoist를 이용하여 조사내관 교체 및 고정 작업을 한다. Al 연결관 하단부는 조사 내관 장전 또는 인출용 Bolt 또는 조사내관을 NTD 1/2관 Flange에 고정하기 위한 Box Spanner 등을 결합할 수 있다.

조사내관 하단 연장부에는 이 장전 또는 인출용 Bolt를 확실하게 결합할 수 있는 나사가 준비 되어 있다.

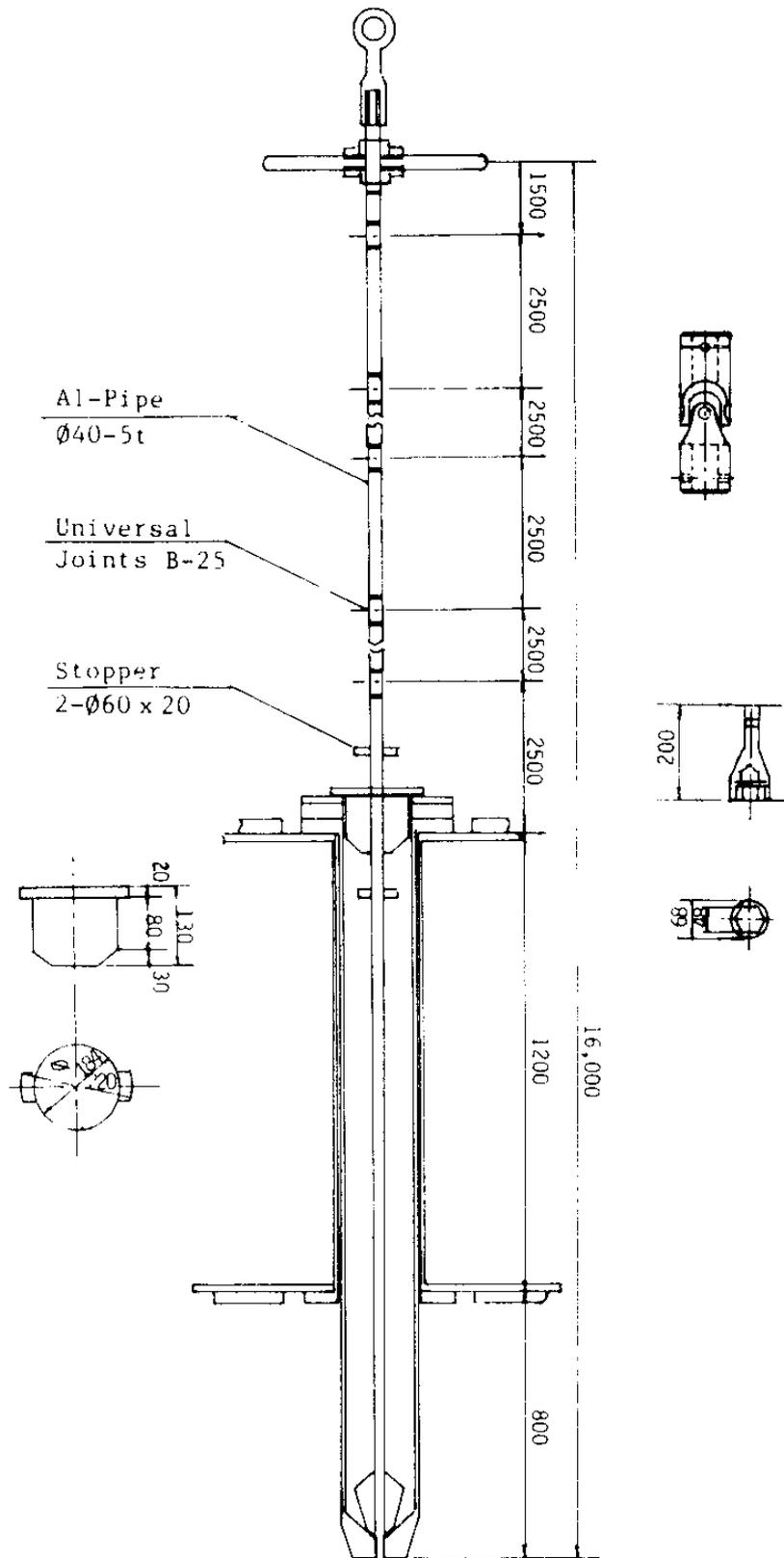


Fig. 12. Exchange Tool

### 제 3 절 중성자 조사량 실시간 감시

NTD 과정에서 중성자 조사량을 정확히 측정, 감시하기 위하여 NTD 조사관에 자기출력형검출기 (SPND)를 설치키로 하고, '88년도 보고서에서 기술한 이에대한 기본 방침을 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1. 원자로 제어봉 위치 변동 등에 따르는 중성자속의 본포변화를 감시하기 위해서 각 조사관에 4개의 SPND를 설치하되, 출력감도가 큰 3개의 Rh-103 검출기와 1개의 V-51 검출기를 이용한다. V-51 검출기는 출력 감도가 낮은 대신 감도 감손율 ( $0.013\%/10^{13}\text{nv/month}$ )도 작고, 또 Rh-103 검출기의 경우 1eV 부근에 큰 공명흡수가 있는데 반해서 V-51 검출기의 경우는 중성자 흡수단면적이 대략  $1/v$  비례성을 갖는다. 따라서 이 V-51 검출기는 Rh-103 검출기의 출력감도 감손에 대한 보정에 이용하고 또, 원자로 출력 변화, Si Ingot 출입, 또는 중성자 흡수 Screen 등에 기인 하는 두 검출기 출력신호의 변화 비교로부터 Westcott  $\gamma$  값등 중성자선질 ( $\phi_{epi}/\phi_{th}$ ) 변화에 대한 참고 정보를 얻기 위한 것이다.

2. SPND 계측장치의 기본구성은 DC 증폭기와 A/D 변환기를 통한 신호를 IBM/PC에 입력 처리하므로써 다음과 같은 기능을 가지게 한다.

가) SPND 설치시부터 매 일정시간 간격의 중성자속을 연속기록,

저장하고, 동시에 이들의 현재 시점까지의 총 적산량으로부터 SPND 출력감도에 대한 감손보정

나) 매 Si Ingot에 대한 조사 시작 시점부터 현재 시점까지의 총 조사량 적산감시 및 목표조사량 도달신호 발생

다) SPND 가동상태를 쉽게 Monitoring 하고, 또 NTD 도중 원자로 Scram 등에 대비하여 출력신호의 연속기록

라) DC 중폭기 감도 및 SPND 저항등 계측장치의 제 중요특성을 현장 또는 실험실에서 손쉽게 검사할 수 있게 하기위한 준비

이상과 같은 기본방침에 대해서 그림 13 은 SPND 계측장치의 구성도로서 이에 대한 당해년도에 수행한 개발진행 현황을 기술한다.

#### 1) SPND

SPND 는 Studsvik 연구소에서 제작한 보상형 5503-Rh-50 검출기 4개와 5503-V-100형 검출기 2개를 1 차로 구입하였으며, 이들에 대한 주요제원 및 특성을 표 11 에 보였다. 출력감도는 Studsvik 연구소의 R2-0 원자로에서 교정한 것이며 초기저항검사 20°C 및 400°C에서 측정되었다. 이외에도 Helium 누출검사, Radiography 검사, Seath 검사등 각종검사를 통해서 USNRC 10 CFR 50 guide, appendix 에서 요청되는 품질보증 (QAR)을 만족한다.(22)

이들 SPND는 앞으로 계속해서 더 구입할 계획이며 중성자선질 ( $\phi_{epi}/\phi_{th}$ ) 및  $\gamma$  선에 의한 출력효과, 감속율계산 및 실측 평가등이 수행될 것이다.

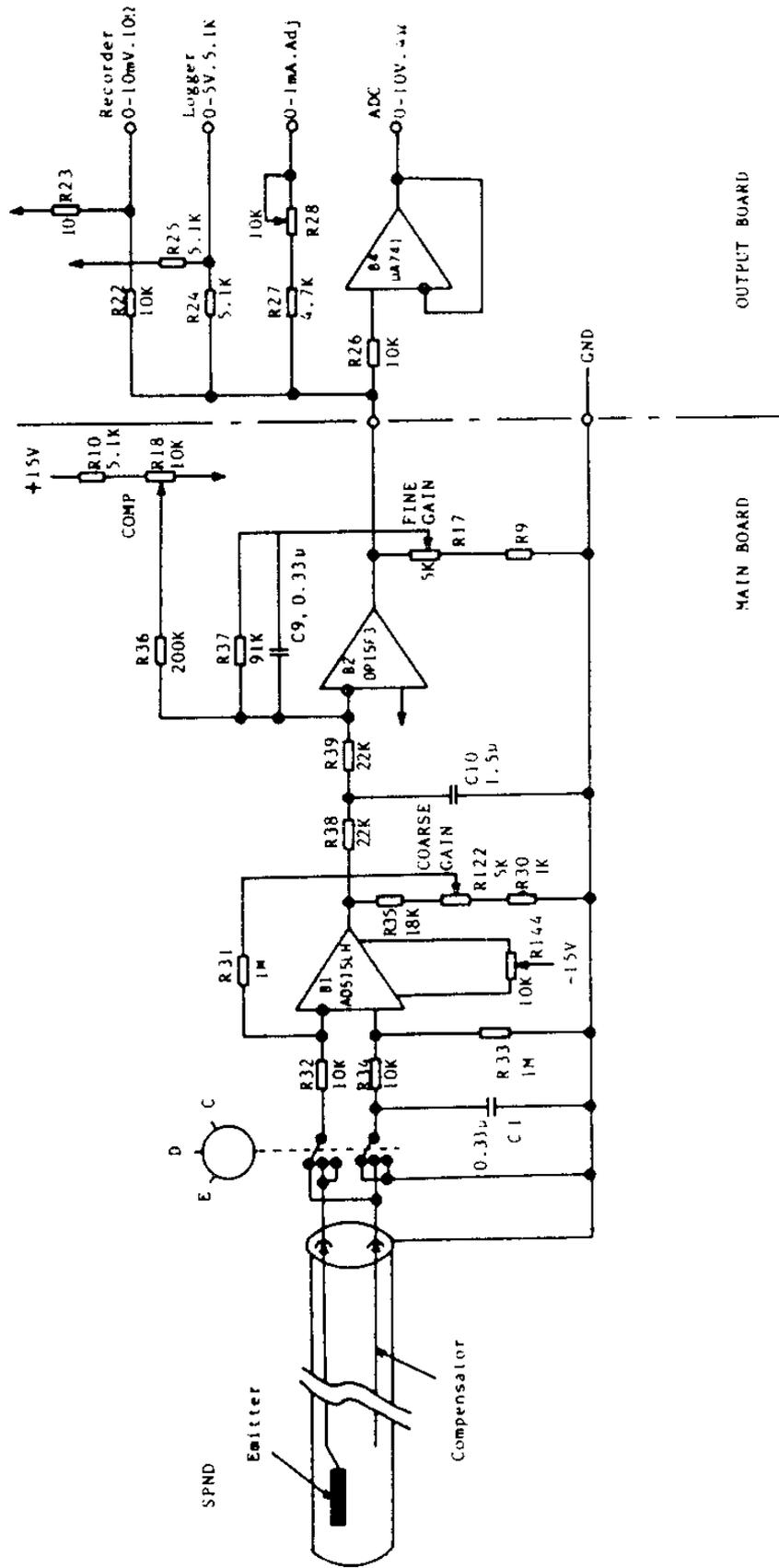


Fig. 13 The circuit Diagram of D-C Amplifier (4695 A)

Table. 11 SPND 특성(22)

SPND NO.	E(D-L) (mm)	D-OD (mm)	Sensitivity (A/n.cm <sup>-2</sup> , sec <sup>-1</sup> )	Insulation Resistance E-C and D-C at 20°C/400°C	
				at 20°C	at 400°C
V-960	2-100	3.5	5.33x10 <sup>-21</sup>	E-C, > 1x10 <sup>12</sup> Ω D-C, > 1x10 <sup>12</sup> Ω	1.5x10 <sup>8</sup> Ω 1.6x10 <sup>8</sup> Ω
V-970	2-100	3.5	5.80	" "	0.9x10 <sup>8</sup> Ω 1.0x10 <sup>8</sup> Ω
Rh-57	0.7-100	2.5	1.76x10 <sup>-20</sup>	" "	1.0x10 <sup>8</sup> Ω 1.2x10 <sup>8</sup> Ω
Rh-89	0.7-60	2.5	1.02	" "	1.7x10 <sup>8</sup> Ω 1.9x10 <sup>8</sup> Ω
Rh-90	0.7-60	2.5	1.05	" "	1.6x10 <sup>8</sup> Ω 1.8x10 <sup>8</sup> Ω
Rh-91	0.7-60	2.5	1.06	" "	1.8x10 <sup>8</sup> Ω 2.2x10 <sup>8</sup> Ω

E(D-L) : Emitter dia and sensitive length  
D-OD : Outer detector diameter

E-C : Emitter-conductor  
D-C : Compensator-conductor

Insulator : Al2O3  
Collector/Sheath Material : Inconel 600  
Outer cable diameter : 2mm

## 2) Junction Box

SPND의 Seath 길이는 20m이며 여기에 40m Cable를 연결하여 계측실에 위치한 Junction Box (48998)에 연결한다(그림 13). Junction Box 는 4개 SPND 검출기를 합류하여 한 Cable로 DC Amplifier에 입력하기 위한 중간 고정장치이다.

## 3) DC Amplifier

DC 증폭기는 저전류의 SPND 출력 증폭 목적으로 Studsvik 연구소에서 개발한 High Gain, Low Impedance, 4-Channel DC Amplifier (Type 4695 A) 를 이용하였다.<sup>(23)</sup> 이 장치는 전류증폭단, 전압증폭단, 그리고 출력단으로 구성되어 있다(그림 14). 전류증폭단은 Low drift FET OP Amp을 이용하고 Feedback 저항 (R31, R33)과 Coarse Gain Trimmer R122 로 증폭율을 결정한다. OP Amp의 입력부는 Emitter-Collector간 출력에 대하여 Compensator-Collector 간 출력을 반전하여 입력하므로써 Emitter의 도선부에 의한 Background가 보정된 Emitter-Compensator간의 전류차를 증폭하게 되어 있다

전압증폭단의 R17은 Fine Gain Trimmer이며 Emitter의 방사화등에 의한 잔류전류가 있을경우 이를 0점으로 교정할 수 있는 보상회로가 있다.

출력단은 AD 변환을 비롯하여 4종류의 계기를 연결할수 있게 다양한 Impedance를 가지는 종단처리가 되어 있다.

이 DC 증폭기의 주특성은 다음과 같다.

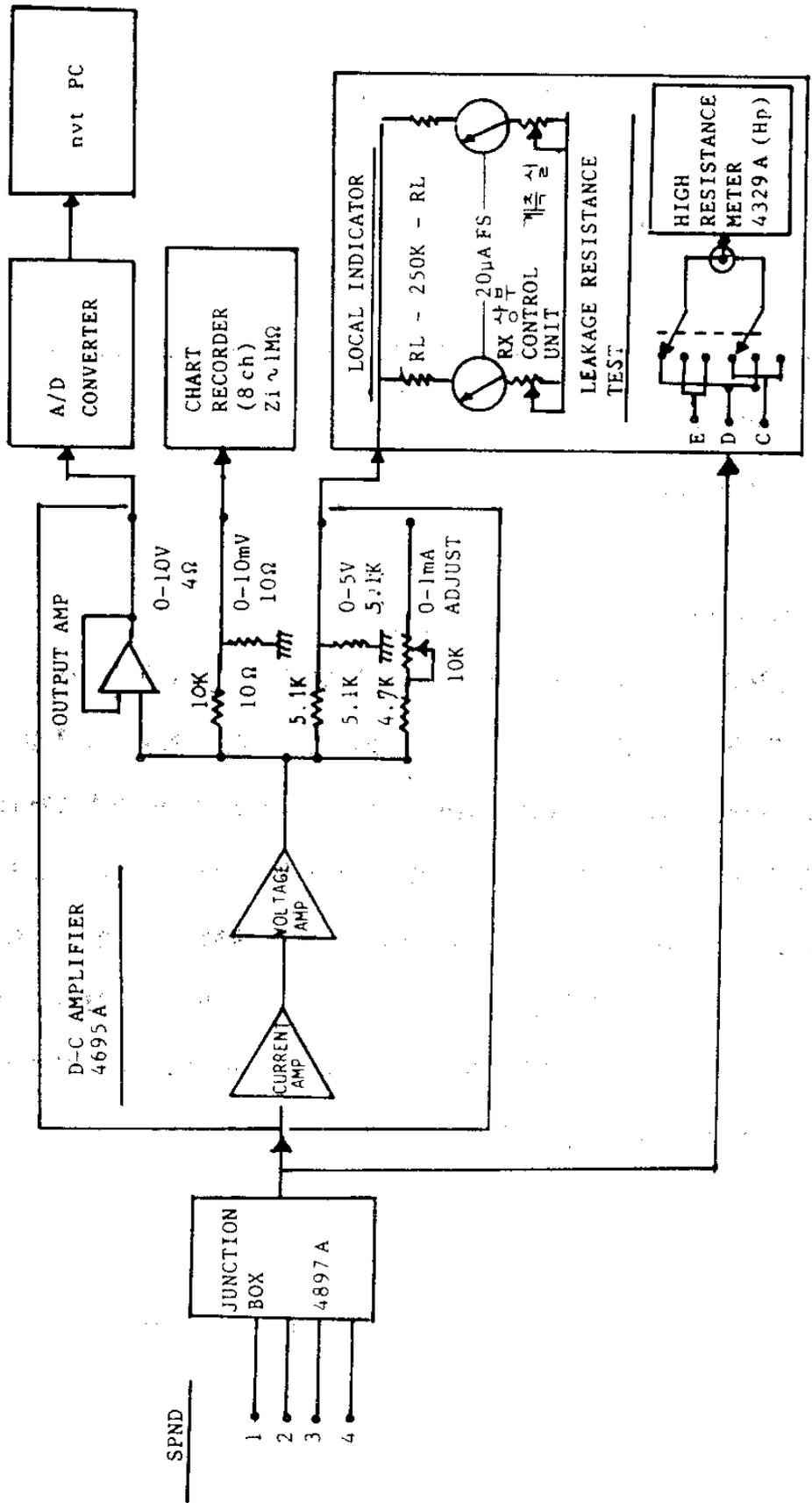


FIG. 14. BLOCK DIAGRAM OF NEUTRON FLUX MONITORING SYSTEM.

- . Input/Output : 500nA/10V
- . Nominal conversion factor,  $5 \times 10$  V/A
- . Responce time, 35ms
- . Linearity,  $< 2.5\%$
- . Accuracy,  $< 0.1\%$
- . Output, 0-10V 4 $\Omega$ , 0-5V 5.1K, 0-10mv 10 $\Omega$ , 0-1mA (Adjustable)
- . Coarse gain, 5 x
- . Fine gain, 2 x

#### 4) A/D Converter

A/D 변환은 DT 2801 Board를 이용하였다. 이 A/D Converter는 16 Channel 입력을 처리할 수 있는 Multiplex, 입력신호를 증폭할 수 있는 Gain Amplifier, Sample and Hold 회로 그리고 최종단에 12bit (4096) Digital 신호로 바꾸는 변환부의 4개 부분으로 되어 있다. 그리고 Gain Amplifier는 Program 에 의해서 각 Channel에 대해서 개별적으로 x1, x2, x4, x8의 4단계로 증폭율을 바꿀 수 있으므로 결국 0~+10V, 0~+5V, 0~+2.5V, 0~±1.25V 입력을 4096 단계 Digital 신호로 분해할 수 있으며 IBM/PC를 이용한 A/D 변환 실험을 완료하였다.

#### 5) nvt PC

각 SPND 출력의 연속감시/기록과 NTD 처리하는 각 Si Ingot에 대한

조사량을 감시하여 정위치법의 경우는 목표조사량 도달 신호발생, 또 정속이동법의 경우는 SPND 출력분포로부터 이동속도 결정을 하기 위해서 A/D converter 신호를 nvt PC에 입력처리 한다.

표 12 는 이 nvt PC에서 수행하는 각 SPND 출력처리의 기본계획을 보인 것이다.

(1) 일정시간 간격마다 읽어드린 A/D 출력 N1에 변환상수 K를 곱해서 중성자속  $\phi(nv)$ 를 계산한다.

$$K = \left[ \frac{10 \text{ V}}{4096} \right] \frac{1}{G(A/D)} \frac{1}{G(\text{Amp})} \frac{1}{So(A/nv)} \frac{1}{C\beta} \quad (24)$$

여기서 첫째 항은 A/D Converter의 분해능이며 다른 항은 다음과 같다.

G(A/D) : A/D Converter Gain Amplifier의 증폭율

G(Amp) : DC Amplifier 증폭율 (V/A)

So(A/nv) : 각 SPND의 열중성자속에 대한 출력감도

C $\beta$  : 각 SPND의 출력감도 감손율

표 12 에서 제 5열의 Grand Fluence (nvt)는 각 SPND의 설치시기 부터 현재까지의 총조사량  $\Psi N = \sum \phi N$  이다. 그리고 각 SPND의 감손율은 매일 24:00시 일괄 보정한다.

(2) 이상과 같은 처리 도중에 Si Ingot가 조사관내 조사위치에 도달한 신호가 들어오면, 그 시점부터 일정시간 간격으로 이 Ingot에 대한 총조사량 (Fluence/Silicon)  $\Phi_i = \sum \phi_i \Delta t$  를 계산저장 한다.

Table. 12 Neutronic Parameters Stored in nvt PC

SPND NO.	A/D Reading	K	Neutron Flux(nv)	Grand Fluence (nvt)	Silicon	Fluence/Silicon	Remark
'94.5.15.23:56	N1	K1	$\phi_1$	$\psi_1 = \phi_1 \Delta t$			.SPND Loading
57	N2	-	$\phi_2$	$\psi_2 = \psi_1 + \phi_1 \Delta t$			
58	.	-	.	.			
59	.	-	.	$\psi_3 = \psi_2 + \phi_2 \Delta t$			.Burn-Up Correction
16.00:00	N5	K2	$\phi_5$	$\psi_4 = \psi_3 + \phi_3 \Delta t$			
01	.	-	.	$\psi_5 = \psi_4 + \phi_4 \Delta t$			
03	.	-	.	.			
04	N8	-	$\phi_8$	$\psi_8 = \psi_7 + \phi_7 \Delta t$	In		.Si Ingot Loaded in NTD Hole
.	N9	-	$\phi_9$	$\psi_9 = \psi_8 + \phi_8 \Delta t$	↓	$\phi_1 = \phi_8 \Delta t$	
.	N10	-	$\phi_{10}$	$\psi_{10} = \psi_9 + \phi_9 \Delta t$	Out	$\phi_2 = \phi_1 + \phi_9 \Delta t$	
08	.	-	.	.			
.	N13	-	$\phi_{13}$	$\psi_{13} = \psi_{12} + \phi_{12} \Delta t$		$\phi_5 = \phi_4 + \phi_{12} \Delta t$	.Target Fluence
12	.	-	.	.			
13	N17	-	$\phi_{17}$	$\psi_{17} = \psi_{16} + \phi_{16} \Delta t$	In		
14	N18	-	$\phi_{18}$	$\psi_{18} = \psi_{17} + \phi_{17} \Delta t$	↓	$\phi_1 = \phi_{17} \Delta t$	
.	N19	-	$\phi_{19}$	$\psi_{19} = \psi_{18} + \phi_{18} \Delta t$	Out	$\phi_2 = \phi_1 + \phi_{18} \Delta t$	
16	.	-	.	.		$\phi_4 = \phi_3 + \phi_{20} \Delta t$	.Target Fluence
.	N22	-	$\phi_{22}$	$\psi_{22} = \psi_{21} + \phi_{21} \Delta t$			
.	.	-	.	.			
.	.	-	.	.			

'94.5.13.24:00	KN	$\psi_N$
'94.5.14.24:00	KN+1	$\psi_{N+1}$

(3) 매 일정시간마다 4개 SPND에 대한  $\phi_i$ 로부터 다음과 같은 평균 총조사량을 계산하여 목표조사량  $\phi(T)$ 와 비교한다.

$$\phi_i = \frac{a_j \phi_i^{(1)} + b_j \phi_i^{(2)} + c_j \phi_i^{(3)} + d_j \phi_i^{(4)}}{4} \quad (25)$$

$$\text{단 } a_j + b_j + c_j + d_j = 1 \quad (26)$$

여기서  $a_j, b_j, c_j, d_j$ 는 각 NTD 조사관에 있어서 중성자속 본포 모양에 의해서 결정되는 가중치들이다. 실험을 통해서 예를들면 원자로의 한 Fuel Cycle 동안의 인근 제어봉위치에 따라서 결정된 몇개 조(j)가 준비되어 있어야 하며, 앞으로 이에 대한 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

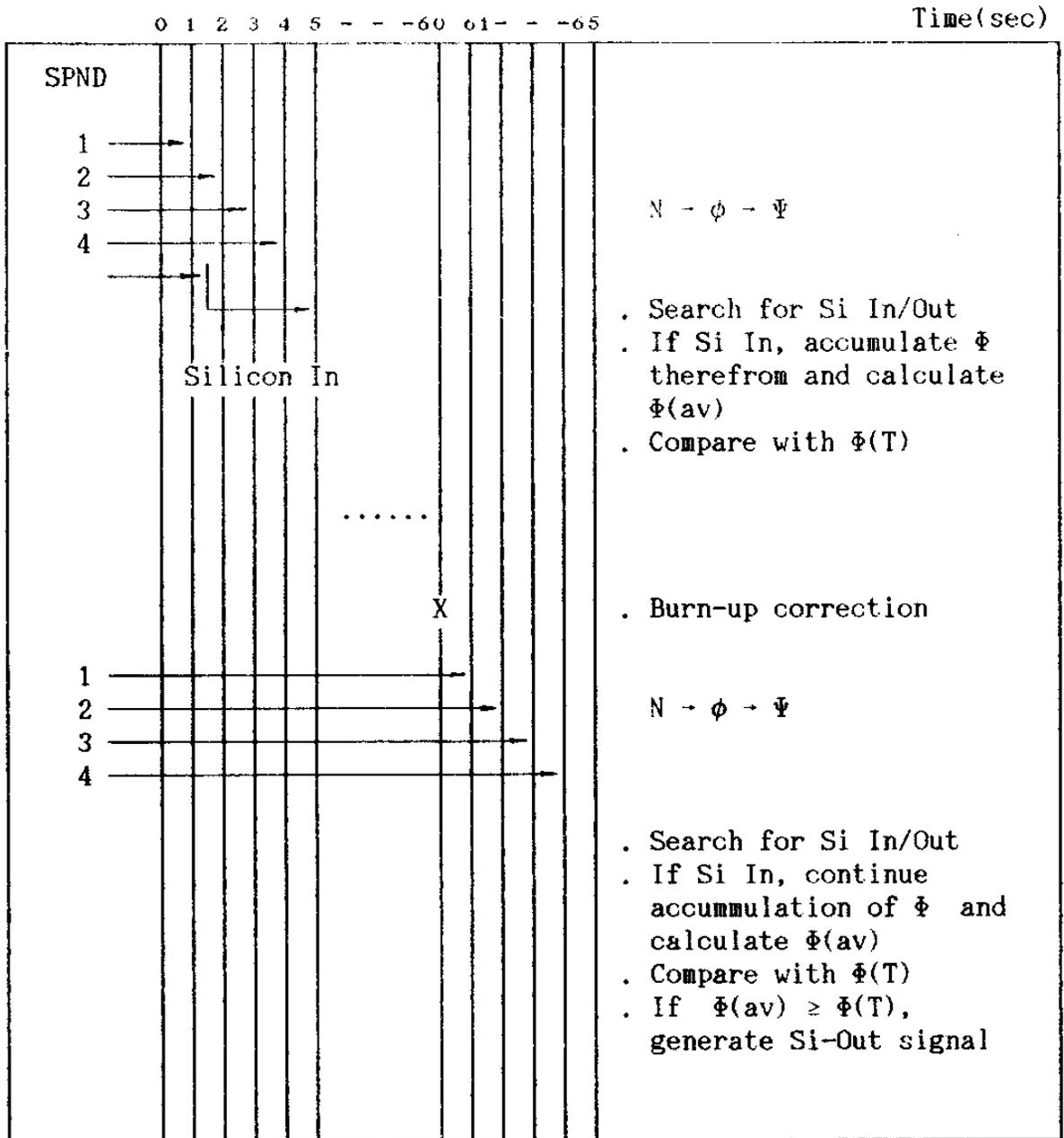
평균조사량이 목표조사량에 도달하면, 즉  $\phi_i \geq \phi(T)$ 이 성립되면 nvt PC는 Control PC에 조사종료 신호를 보낸다.

(4) 4개 SPND에 대하여 표 12 와 같은 조사량 자료는 48시간 이내에는 Print Out 할수 있으나, 이 시간이 지나면 nvt PC는 자료를 압축하여 표 12 의 아래와 같이 일일 정보만을 장기 저장한다.

(5) 표 13 은 4개 SPND 출력감시에 대한 Timing Diagram이다. 이 표에서는 1~4ch SPND 신호입력이 1sec 간격이고 이것을 60sec 주기로 수집하게 되어 있으나 이것은 앞으로 nvt PC의 처리속도 및 기억 용량에 맞추어 조정할 예정이다.

(6) nvt PC는 총조사량 감시를 위해서 년중 계속 가동되어야 하며 원자로 상부에 SPND 내부저항의 Test Post 및 Chart Recorder등을 두는 것이 불리하므로 계측실에 장치하고 RS232C를 통해서 Industrial

Table. 13, Timing Diagram for 4-SPND Monitoring



PC와 Silicon Ingot In/out 및 Si 조사 종료신호를 주고 받게 한다.

(7) 표 14 는 조사량감시와 관련된 자료의 nvt PC의 CRT Display 계획이다.

여기서  $\phi(i) = K(i)N_i$ ,  $\Sigma(i) = \Sigma K(i)N_i \Delta t$ 는 괄호로 표시된 시점부터 적산된 총조사량 (Grand Fluence)이다. 그리고  $(C_i)$ 는 각 SPND에 대한 Burn-Up이다.

이상과 같은 nvt PC는 Industrial PC를 이용한 기계구동장치 제어장치와 한 Net work로 하여 제작 및 Software 개발용역을 발주 중에 있다.

#### 8) 계기반

SPND 출력은 계측실에 위치한 nvt PC로서 연속 기록하고 또 NTD 과정에서 필요한 경우 Chart Recorder로도 기록하게 되어 있으나, 원자로 상부의 Control Unit와 측정실에는  $\mu A$  전류기를 부착하여 작업자가 SPND 출력 상태를 한눈에 점검할 수 있는 계기반을 제작하였다. 그리고 실험실이 계기반에는 고저항 측정기를 써서 개개의 SPND에 대하여 Emitter-Collector, Emitter-Compensator, Compensator-Collector 간의 저항을 측정 점검할 수 있도록 고절연의 Selection Switch와 시험단자를 준비하였다.

#### 9) 보조측정계기

위에서 기술한 SPND감시계통의 예를들면 DC Amplifier의 증폭을

Table. 14 nvt PC CRT Display of Neutronic Parameters

<u>1994. 05. 15. 21 : 15</u>			<u>( 1993. 01. 22. 24 : 00 )</u>			
$\phi(1) =$	$\Sigma(1) = 2.7523 \times 10^E 23$	$C(1) = 0.78524$				
$\phi(2) = 2.2163$	$\Sigma(2) = 3.6245$	$C(2) = 0.68327$				
$\phi(3) = 2.7222$	$\Sigma(3) = 4.0132$	$C(3) = 0.02161$				
$\phi(4) = 1.1531$	$\Sigma(4) = 2.4829$	$C(4) = 0.52673$				
-----						
Silicon Ingot No. 27						
Irrad. Start Time	:	18	:	26	:	43
Irrad. End Time	:	-	:	-	:	-
Control Rod Position	:	4/10,		2/10		
$\Phi(T) = 2.6284 \times 10^E 17$						
$\Phi(av) = 1.8429 \times 10^E 17$						

보정 및 SPND의 저항 점검 등을 위해서 다음과 같은 보조측정 계기들이 발주중에 있다.

가) Picoampere Source, Type 261 Keithley (Standard Current Source)

- Output :  $10^{-4}$  A to  $1.1 \times 10^{-4}$  A
- Accuracy :  $\pm 0.25\%$  at  $10^{-7}$  A,  $\pm 0.7\%$  at  $10 \times 10^{-12}$  A
- Long-term Stability : 0.15%/month to  $10^{-8}$  Through  $10^{-12}$  Ampere Setting
- Setting Range :  $10^{-7}$  to  $10^{-5}$  ,  $10^{-7} \times 1.1 \times 10^{-4}$  (in 5 Ranges)

나) Digital Multimeter, Type 197 Keitkley)

- $5\frac{1}{2}$  Digits Microvolt Sensitivity
- Measuring Range : . Ohms - 200 $\Omega$  2K, 20, 200, 2M $\Omega$ , 20M, 200M  
(Resolution : 1m $\Omega$ -10K $\Omega$ )  
. D.C Volts : 200mV, 2V, 20V, 200V, 1000V  
(Resolution : 1 $\mu$ V-10mV)  
. A.C Volts : 200mV, 2V-200V, 750V
- Display :  $\pm 220,000$  Count LCD (0.45 in)

다) . Milliohmmeter/High Resistance Meter, 4329A Hewlett Packard

- . Resistance Range, 500K $\Omega$  to  $2 \times 10^{16}\Omega$
- . Accuracy :  $\pm 3\%$  at low Resistance

±5% at Near Center Scale

- . Current Range :  $5 \times 10^{-4}$  to  $2 \times 10^{-5}$  A in 8 Ranges
- . Accuracy : ±5% of Full Scale Deflection
- . Recorder Output : 0-100mV dc, (1KΩ Output Resistance)

라) 8 Channel Chart Recorder, LR-8100 Yokogawa

LR-8100의 중요 특성

- . Measuring Range : . DCV - - - 10mV to 200V FS  
1mV to 200V Fs  
0.1mV to 200V Fs
- . Accuracy : DCV - - - ±(0.05% of rdg +0.03% of range +0.5μv)
- . Bias Current : 4nA
- . Input Impedance : 1MΩ (Approx)
- . Number of Channels : 4.6 or 8
- . Span Range : 250mm
- . Chart Speeds : k1,200 to 300mm/min, 299 to 30mm/min, 29 to 10mm/min

## 제4절 NTD 조사장치

NTD 조사장치는 원자로 Pool 상부에 장치하여두고 Si Ingot를 조사관내에 장전, 균일조사 및 인출하는 과정을 조작하는 기계적인 구동장치와 이들 절차를 제어하는 전자 제어장치로 구성된다. 이들 장치에 대한 기본설계 방침은 '88년도 보고에 기술한 바를 더욱 보완하여 설계를 완료하고 현재 제작을 발주한 단계이다. 아래에 관련 연구내용 및 진행현황을 기술한다.

### 1. 반/완전자동 조사방법

기계구동부는 예를들면 차폐된 Turret형의 용기내에 10개 내외의 Si Ingot를 장전하여 두고, 1개씩을 승강운반체에 옮겨서 조사 및 회수하는 과정을 연속자동적으로 구동하는 소위, 전자동식 구동장치는 현재로서는 장치개발 자체에도 여러가지 어려움이 있을 뿐만 아니라, Pool 상부에 설치할 Man Bridge의 구조가 아직 설계 진행 단계이고, 또 기계구동부의 용적 및 중량이 너무 클 경우에는 D<sub>2</sub>O 반사체내에 있는 IP 수직공 이용과의 간섭문제등 아직 확실치 않은 인자가 많다. 따라서 NTD 기술개발의 제1단계에는 조사가 끝난 각각의 Si Ingot를 4 - 5m 수심의 Pool 속에서 Service Pool로 이동시켜 Cooling하는 반자동식을 채택하고, 충분한 NTD 경험속적과 원자로 조사공을 이용하는 다른 실험과의 간섭등이 확실하게 되는 시점에 가서 제2단계사업으로 연속 전자동조사 방법을 개발한다는

방침에 대해서는 이미 보고한 바 있다.

그러나 KMRR 건조사업단에서는 원자로 상부를 Pool Cover로 닫아두고 제한된 시간만 이것을 열 수 있게 한다는 방침을 검토중에 있으므로, 만일 이렇게 된다면 위에 언급한 2단계에 걸친 조사방법의 개발계획에 근본적인 수정을 요하게 된다. 따라서 조사된 Si Ingot를 Canal로 옮겨가는 대신, 직접 Pool Cover 위에 설치된 구동장치를 통해서 인출하는 방법을 검토하기 위해서, Si Ingot와 보호용 Al 용기에 의해서 유기되는 방사능 및 소요 차폐를 평가하였다.

#### 가. 방사능 평가

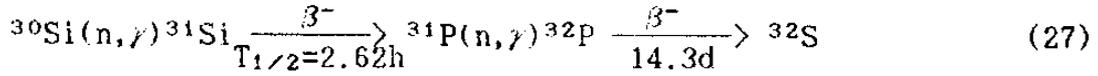
중성자조사에 의해서 유기되는 방사능 평가에는 Si Ingot 및 보호용 Al 용기 및 Chain 외에도 생성된  $^{31}\text{P}$ 의 2차 반응에 의한  $^{32}\text{P}$ 는 그 반감기가 다른 핵종에 비해 매우 긴 편이므로 그 영향도 포함하였다.

계산 과정에서 Flux는 NTD1 조사관에 대한 핵자료를 모델로 하였으며,  $(n, \gamma)$  반응에 대한 열중성자속은  $5.0\text{E}+13/\text{cm}^2/\text{sec}$ 를, 그리고 이외의 반응에 대하여는 Memo, DA-89-044<sup>20)</sup>의 Table1에 제시되어 있는 각 Group별 Flux를 사용하였다. (표4)

##### 1) $^{30}\text{Si}$ 의 방사화

NTD는 기본적으로  $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \xrightarrow{\beta^-} ^{31}\text{P}$ 의 핵 반응을 이용한 기술이므로

방사화를 피할 수는 없으며 2차반응까지 고려하면 다음과 같이 표현된다.



$$\frac{dN_0}{dt} = -N_0\phi\sigma_1 \quad (28)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0\phi\sigma_1 - N_1\lambda_1 \quad (29)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1\lambda_1 - N_2\phi\sigma_2 \quad (30)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_2\phi\sigma_2 - N_3\lambda_2 \quad (31)$$

- $N_0$  :  ${}^{30}\text{Si}$ 의 원자수
- $N_1$  :  ${}^{31}\text{Si}$ 의 원자수
- $N_2$  :  ${}^{31}\text{P}$ 의 원자수
- $N_3$  :  ${}^{32}\text{P}$ 의 원자수
- $\sigma_1$  :  ${}^{30}\text{Si}$ 의 반응단면적 ; 0.11barn
- $\sigma_2$  :  ${}^{31}\text{P}$ 의 반응단면적 ; 0.20barn
- $\lambda_1$  :  ${}^{31}\text{Si}$ 의 감쇠계수 ;  $7.35 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$
- $\lambda_2$  :  ${}^{32}\text{P}$ 의 감쇠계수 ;  $5.61 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$
- $\phi$  : 열중성자속 ; n/cm<sup>2</sup>/sec

우선 1차 (n,  $\gamma$ ) 반응에 의한  ${}^{31}\text{Si}$ 의 방사능은  $\lambda_1 \gg \phi\sigma_1 \sim 0$  를 가정하면 (28), (29) 식으로 부터 다음과 같이 구할 수있다.

$$\text{ACT}({}^{31}\text{Si}) = N_1\lambda_1 = N_0\phi\sigma_1 [ 1 - e^{-\lambda_1 t} ] \quad (32)$$

이로부터 구한 조사 시간에 따른 Si Ingot에 유기되는 비방사능(Specific Activity)는 그림15와 같다. 또한 4시간 조사된 Si Ingot 의 냉각시간에 따른 비방사능은

$$\text{CACT}({}^{31}\text{Si}) = \text{ACT}({}^{31}\text{Si}) \times e^{-\lambda_1 t} \quad (33)$$

로서 표15와 같다.

한편 (27)에서 보는 바와 같이 1차  $(n, \gamma)$  반응으로 부터 생성된  $^{31}\text{P}$ 이 다시  $(n, \gamma)$  2차 반응을 일으켜 생성된  $^{32}\text{P}$ 의 반감기는 매우 길어 취급의 안정성 평가를 위하여 검토할 필요가 있다. (29), (30), (31) 식으로부터  $^{32}\text{P}$ 의 방사능은 다음과 같이 주어진다. <sup>24)</sup>

$$\text{ACT}(^{32}\text{P}) = N_3 \lambda_2$$

$$= N_0 \phi \sigma_1 \left[ 1 - (1 - \phi \sigma_2 \lambda_2 A + B) e^{-\lambda_2 t} - \phi \sigma_2 \lambda_2 A e^{-\phi \sigma_2 t} + B e^{-\lambda_2 t} \right] \quad (7)$$

$$A = \left( \frac{1}{\phi \sigma_2} - \frac{1}{\phi \sigma_2 - \lambda_1} \right) \frac{1}{\phi \sigma_2 - \lambda_1}$$

$$B = - \frac{\phi \sigma_2 \lambda_2}{(\phi \sigma_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

이로부터 구한 조사시간에 따른 단위 무게당 방사능을 그림16에 도시하였다.

## 2) 실리콘 보호용 Al 용기의 방사화

Si의 오염을 방지하고 보호하기 위한 Al 용기의 Al 자체 및 함유된 불순물이 Si를 조사시키는 동안 방사능을 유기하며 그 주요 성분 및 반응에 대한 특성은 표16과 같다.

그 반응에 대한 기본적인 관계식은 식 (28), (29)와 같으며 이로부터 계산된 Al 용기가 4시간 조사되는 동안 유기되는 비방사능은 표17과 같으며

$^{28}\text{Al}$ 과  $^{27}\text{Mg}$ 의 방사능은 이미 포화(Saturation)되었음을 알수있다.

이러한 Al 용기가 조사가 끝나고 인출되는 동안 변화하는 비방사능은 그림17과 같다. 이때 인출속도는 물깊이 350cm까지는 18cm/min, 이후에는 35cm/min로 하였다.

$^{28}\text{Al}$ 은 조사되는 동안 가장 높은 방사능에 도달하지만 그 반감기가 짧아 인출되는 동안 급격히 감소함을 알 수 있으며,  $^{27}\text{Mg}$ 의 방사능도 비교적 빨리 감소함을 알 수 있다.

$^{69}\text{mZn}$ 의 방사능은  $^{68}\text{Zn}$ 의 존재비가 비교적 작고 또 반응단면적이 작아 다른 동위원소에 비해 낮은 방사능을 유지한다.

한편  $^{64}\text{Cu}$ 는  $^{63}\text{Cu}$ 의 존재비와 특히 반응단면적이 큰편인데다 반감기도 길어 비교적 높은 방사능을 유지하고 있으나 발생하는  $\gamma$ 에 대한 Yield가 매우 작아 심각한 영향을 주지 않을 것임을 예측할 수 있다.

그러나  $^{27}\text{Al}$ 에 대한 (n, $\alpha$ ) 반응에 의해 생성되는  $^{24}\text{Na}$ 는 비교적 높은 에너지의  $\gamma$ 를 방출할 뿐 아니라, 그 Yield도 높고 반감기도 길어 많은 영향을 주게 된다.

그리고 불순물 중에서도  $^{56}\text{Mn}$ 은  $^{55}\text{Mn}$ 의 존재비가 높고 특히 반응단면적이 커서 유기되는 방사능이 매우 큰데다, 비교적 높은 에너지의  $\gamma$ 를 방출하고 반감기도 길어 그 영향이 제일 심각한 것으로 보인다.

Al 용기내에는 이외에도 Cr, Mg, Ti, Fe 및 Ni등이 함유되어 있으나, 그 존재비가 매우 작거나 조사시간에 비해 반감기가 매우 길어 방사화 양이 적기 때문에, 또는 그 반감기가 매우 짧아 인출되는 동안에 방사능이 급격히 감소하여 그 영향이 작은 것으로 간주하여 무시하였다.

### 3) 차폐

자동조사 구동방식을 이용하는 경우 조사완료된 Si Ingot를 Pool Cover상부의 Cask로 인출할때 방사능에 대한 안전성을 고려하기 위하여 인출시의 RPS 위치 및 Pool Cover 상부에 대한 선량율(Dose Rate)을 계산하였다. 이때  $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si}$ 반응은  $^{30}\text{Si}$ 의 존재비가 작고  $^{31}\text{Si}$ 의  $\gamma$  Yield가 작아(0.07%) 무시하였으며 Al 용기의 방사화만을 고려하였다.

단일 에너지 등방점선원에 대한 선량율은 다음과 같이 주어진다.<sup>25)</sup>

$$D = C \frac{BSV}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \quad (35)$$

C : Gamma선의 선속-선량율 환산인자(표18, 그림18)  
(rem/hr)/(photons/cm<sup>2</sup>/sec)

B : 축적인자

S : 선원의 비방사능(Ci/cm<sup>3</sup>)

V : 선원의 부피 (Al 용기 ; 3990cm<sup>3</sup>)

$\mu$  : Gamma선의 감쇠계수(cm<sup>-1</sup>) (표19)

r : 선원-검출위치간 거리(cm)

한편 축적인자(Buildup Factor)는 다음과 같은 Taylor의 근사식을 이용하여 구하였으며 각 계수는 표20에 수록하였다.

$$B(\mu r) = A e^{-a_1 \mu r} + (1 - A)e^{-a_2 \mu r}$$

RPS는 NTD Hole 중심으로부터 1m 떨어진 거리의 Pool Surface 높이에 위치하였다고 보았으며, Pool Cover 상부에 대한 계산에 있어서는 NTD Hole 위에 놓이는 Cask를 고려하여 Hole 중심으로부터 50cm 떨어진 위치 A에서

계산하였다.(그림19참고)

또한 계산과정에 있어서 RPS위치에서는 1.5mrem/hr 이하, Pool Cover에서는 2.5mrem/hr 이하가 되도록 조정하였다.

이러한 계산에 의해 얻어진 납차폐관의 제원은 그림19와 같으며, 이때 그 무게는 약 5.92톤이다. 이 차폐관을 사용하였을 경우, Al 용기가 인출되는 동안 Pool Cover로부터의 Al 용기 위치에 따른 RPS 위치 및 A 위치에서의 선량율은 각각 그림20, 그림21과 같다.

이상을 종합하면 15cm x 40cm Si Ingot, 그리고 3mm 두께 Al Housing과 Si 상하 양단의 7cm 두께 Al Filler 및 Al Chain을 합한 약 4000cm<sup>3</sup>의 Al에 대한 방사화로, 위에서 언급한 선량율 계산에서와 같은 속도, 즉 Reactor Pool 수면까지의 도달속도가 약 55분일 경우, 이때의 총방사능은 약 1000Ci로 추산된다. 따라서 방사선 차폐기능이 전혀 없는 Pool Cover의 경우 RPS 및 작업자의 안전준위를 유지하기 위해서는 각 조사장치마다 ~6 ton의 차폐관과 ~6 ton의 차폐용기가 필요하게 되므로 중량부하가 큰 Pool Cover가 필요하게 된다.

따라서 NTD 구동장치 근방의 Reactor Pool Liner에 Ingot 중간 저장용 Rack를 준비하여 조사된 Ingot를 차례로 저장해 두었다가 하루에 한번씩 Service Pool로 일괄해서 옮겨가는 방법을 KMRR 사업단과 협의중에 있다.(그림22, 23)

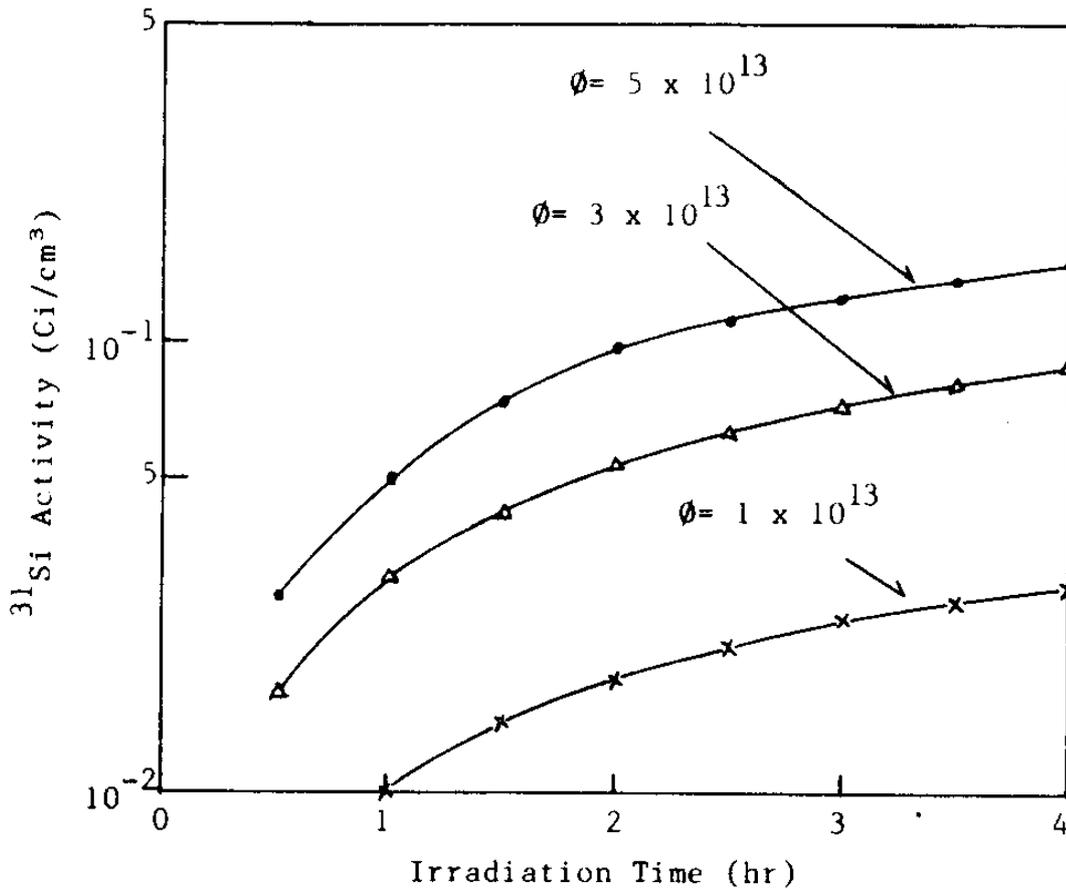


Fig. 15. Formation of  $^{31}\text{Si}$  Isotope in Silicon

Table 15. Specific Activity of  $^{31}\text{Si}$  Produced During the 4hr Irradiation For the Cooling Time.

Neutron Flux ( $\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )	(Ci/ $\text{cm}^3$ )					
	Cooling Time (day)					
	0	1	2	3	4	5
1.0+13*	2.87-02	5.01-05	8.76-08	1.53-10	2.68-13	4.68-16
3.0+13	8.61-02	1.50-04	2.64-07	4.59-10	8.03-13	1.40-15
5.0+13	1.43-01	2.51-04	4.38-07	7.66-10	1.34-12	2.34-15

\* Read as  $1.0 \times 10^{13}$

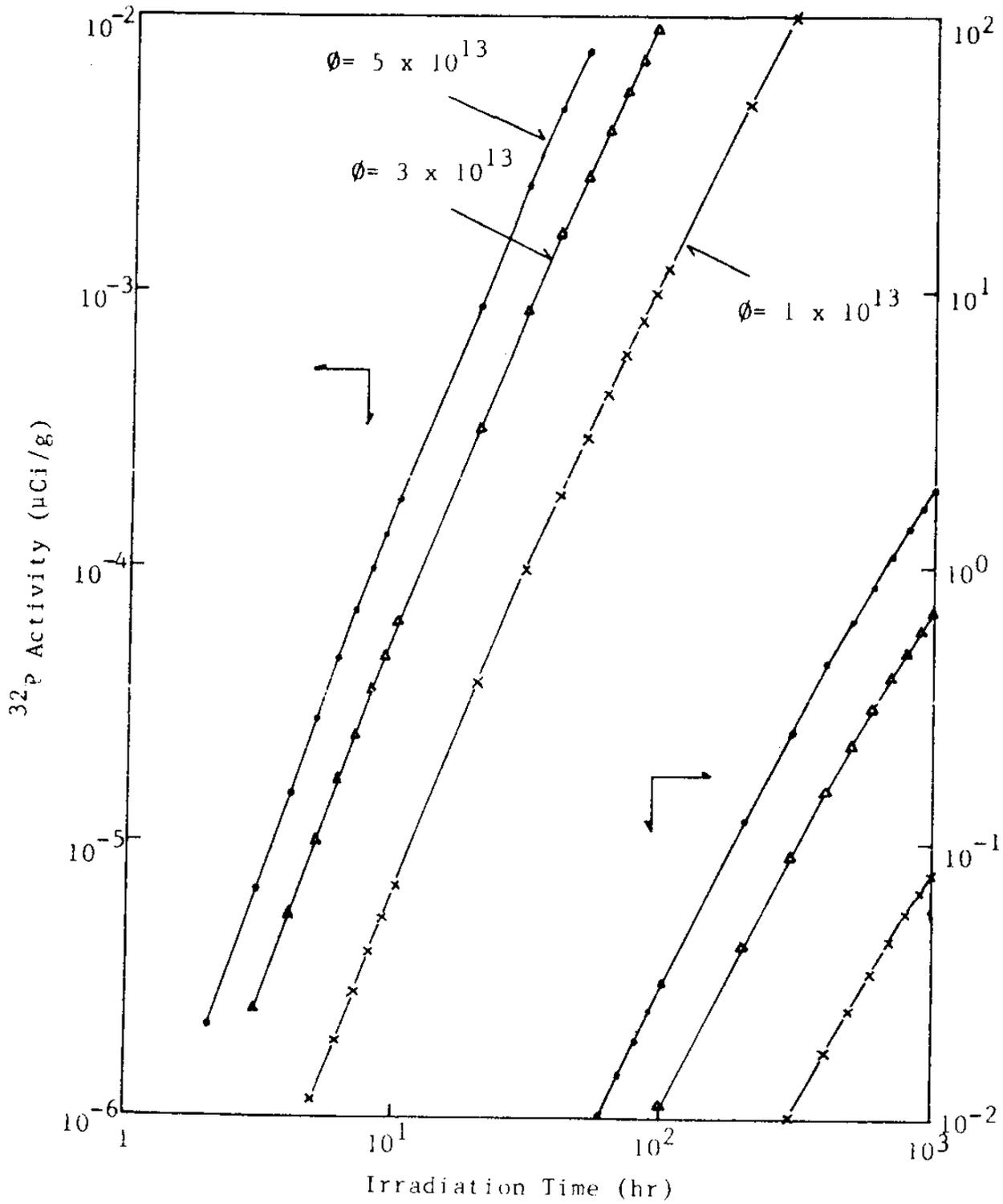


Fig. 16. Formation of  $^{32}\text{P}$  Isotope in Silicon.

Table 16. The Characteristics of Nuclear Reactions for the  $^{30}\text{Si}$  and the Main Impurities in Al Can.

Parent Isotope	Contents Ratio(%)	Isotopic Abundance (%)	Reaction	Product Isotope	Half-Life	Cross Section (barn)	$\gamma$ -Energy (MeV)	Yield (%)
$^{30}\text{Si}$		(%) 3.05	(n, $\gamma$ )	$^{31}\text{Si}$	2.52 h	Thermal 0.11	1.25	0.07
			(n, $\gamma$ )	$^{28}\text{Al}$	2.3 min	Thermal 0.23	1.78	100
$^{27}\text{Al}$	~ 100	100	(n, p)	$^{27}\text{Mg}$	9.45min	2.6<E<6.703MeV 20.967E-03 *	0.843 1.015	70 30
			(n, $\alpha$ )	$^{24}\text{Na}$	15 h	6.703<E<17.33MeV 79.25E-03 *	1.369 2.754	100 100
$^{55}\text{Mn}$	<0.1	100	(n, $\gamma$ )	$^{56}\text{Mn}$	2.579 h	Thermal 13.3	0.85 1.81 2.11	98.9 27.2 14.3
			(n, $\gamma$ )	$^{69}\text{Zn}$	14 h	Thermal 0.072	0.44	94.9
$^{63}\text{Cu}$	<0.2	69.1	(n, $\gamma$ )	$^{64}\text{Cu}$	12.7 h	Thermal 4.5	1.346	0.48

\* Averaged values from neutron cross section curves in Neutron Cross Section, Vol. 2, 1988 by Victoria McLane, et al.

Table 17. Specific activity of major isotope in Al housing for the irradiation time

T(hr)	Al-28	Mg-27	Na-24	Zn-69m	Mn-56	Cu-64
0.0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.2	1.82E+01	3.78E-03	1.72E-05	1.12E-06	3.64E-03	3.08E-04
0.4	1.87E+01	5.34E-03	3.42E-05	2.22E-06	7.09E-03	6.13E-04
0.6	1.87E+01	5.99E-03	5.11E-05	3.32E-06	1.04E-02	9.15E-04
0.8	1.87E+01	6.26E-03	6.79E-05	4.40E-06	1.35E-02	1.21E-03
1.0	1.87E+01	6.38E-03	8.44E-05	5.48E-06	1.64E-02	1.51E-03
1.2	1.87E+01	6.42E-03	1.01E-04	6.54E-06	1.92E-02	1.80E-03
1.4	1.87E+01	6.44E-03	1.17E-04	7.59E-06	2.18E-02	2.09E-03
1.6	1.87E+01	6.45E-03	1.33E-04	8.63E-06	2.43E-02	2.38E-03
1.8	1.87E+01	6.45E-03	1.49E-04	9.67E-06	2.67E-02	2.66E-03
2.0	1.87E+01	6.45E-03	1.65E-04	1.07E-05	2.89E-02	2.94E-03
2.2	1.87E+01	6.45E-03	1.81E-04	1.17E-05	3.11E-02	3.21E-03
2.4	1.87E+01	6.45E-03	1.96E-04	1.27E-05	3.31E-02	3.49E-03
2.6	1.87E+01	6.45E-03	2.12E-04	1.37E-05	3.50E-02	3.76E-03
2.8	1.87E+01	6.45E-03	2.27E-04	1.47E-05	3.68E-02	4.03E-03
3.0	1.87E+01	6.45E-03	2.42E-04	1.56E-05	3.85E-02	4.29E-03
3.2	1.87E+01	6.45E-03	2.57E-04	1.66E-05	4.01E-02	4.55E-03
3.4	1.87E+01	6.45E-03	2.72E-04	1.76E-05	4.17E-02	4.81E-03
3.6	1.87E+01	6.45E-03	2.87E-04	1.85E-05	4.31E-02	5.07E-03
3.8	1.87E+01	6.45E-03	3.01E-04	1.94E-05	4.45E-02	5.32E-03
4.0	1.87E+01	6.45E-03	3.16E-04	2.04E-05	4.58E-02	5.57E-03

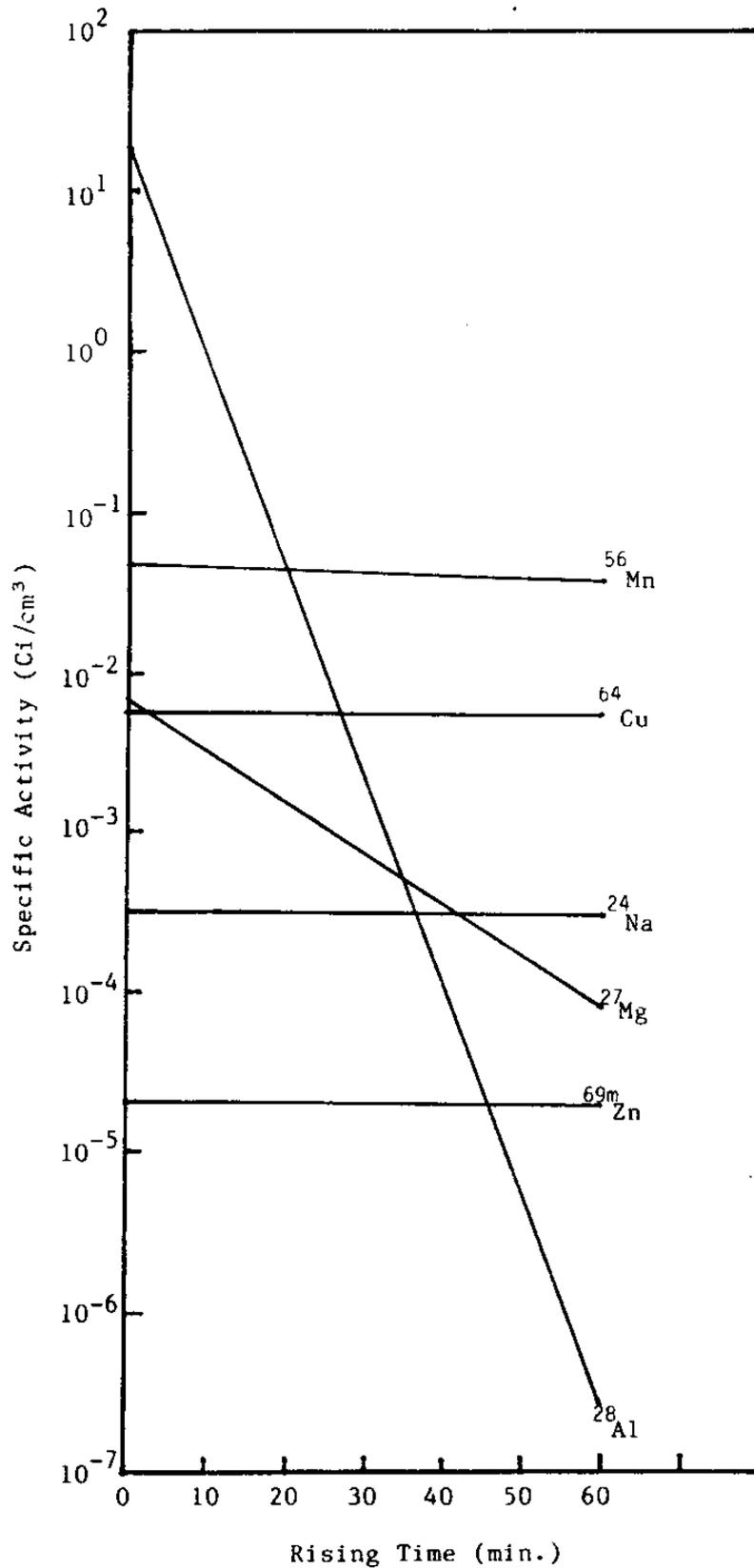


Fig. 17. Specific activity as a function of rising time for the main isotopes produced in Al can during the irradiation.

Table 18. Gamma-Ray Flux-to-Dose Rate Conversion Factors.<sup>26)</sup>

Photon Energy (MeV)	(rem/h)/ (particles/cm <sup>2</sup> /sec)	Photon Energy (MeV)	(rem/h)/ (particles/cm <sup>2</sup> /sec)
0.01	3.96 - 06*	0.55	1.27 - 06
0.03	5.82 - 07	0.6	1.36 - 06
0.05	2.90 - 07	0.65	1.44 - 06
0.07	2.58 - 07	0.7	1.52 - 06
0.1	2.83 - 07	0.8	1.68 - 06
0.15	3.79 - 07	1.0	1.98 - 06
0.2	5.01 - 07	1.4	2.51 - 06
0.25	6.31 - 07	1.8	2.99 - 06
0.3	7.59 - 07	2.2	3.42 - 06
0.35	8.78 - 07	2.6	3.82 - 06
0.4	9.85 - 07	2.8	4.01 - 06
0.45	1.08 - 06	3.25	4.41 - 06
0.5	1.17 - 06	3.75	4.83 - 06

\* Read as  $3.96 \times 10^{-06}$

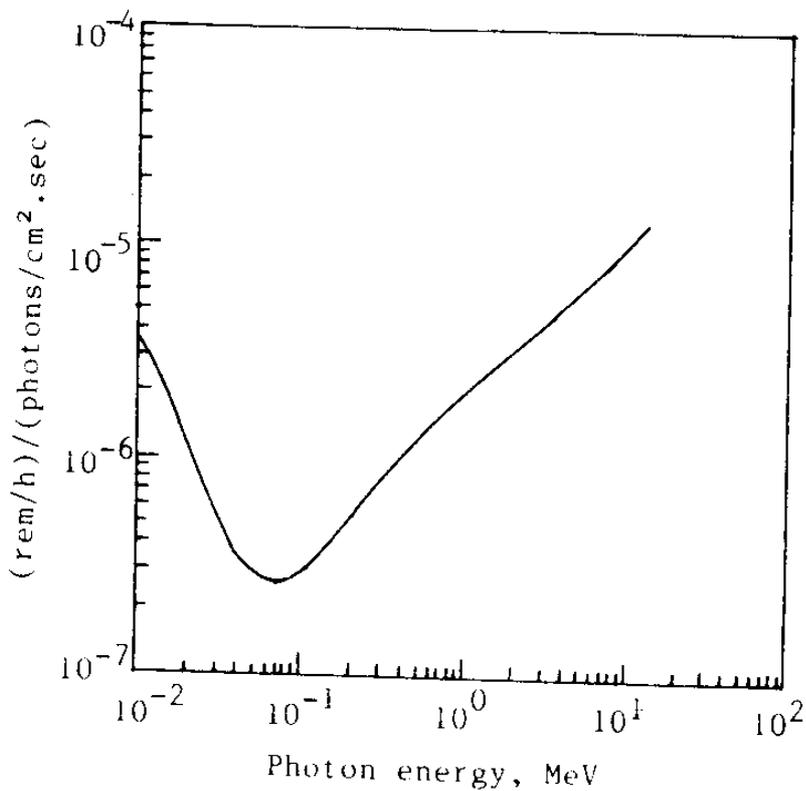


Fig. 18. Photon flux-to-dose rate factors for energies from  $10^{-2}$  to 15 MeV.<sup>26)</sup>

Table 19. Linear Attenuation Coefficients for Gamma Rays<sup>27)</sup>

Photon Energy (MeV)	( cm <sup>-1</sup> )	
	Pb	H <sub>2</sub> O
3.00-01*	4.34+00	1.18-01
4.00-01	2.49+00	1.06-01
5.00-01	1.75+00	9.67-02
6.00-01	1.36+00	8.95-02
8.00-01	9.71-01	7.86-02
1.00+00	7.82-01	7.07-02
1.50+00	5.78-01	5.75-02
2.00+00	5.10-01	4.94-02
3.00+00	4.72-01	3.97-02

\* Read as 3.00 x 10<sup>-1</sup>

Table 20. Parameters for the Taylor Form of the Exposure Buildup Factor for Point Isotropic Source<sup>25)</sup>

Substance	Energy (MeV)	A	-α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	0.5	100.845	0.12687	-0.10925
	1.0	19.601	0.09037	-0.02522
	2.0	12.612	0.05320	0.01932
	3.0	11.110	0.03550	0.03206
Pb	0.5	1.677	0.03084	0.30941
	1.0	2.984	0.03503	0.13486
	2.0	5.421	0.03482	0.04379
	3.0	5.580	0.05422	0.00611

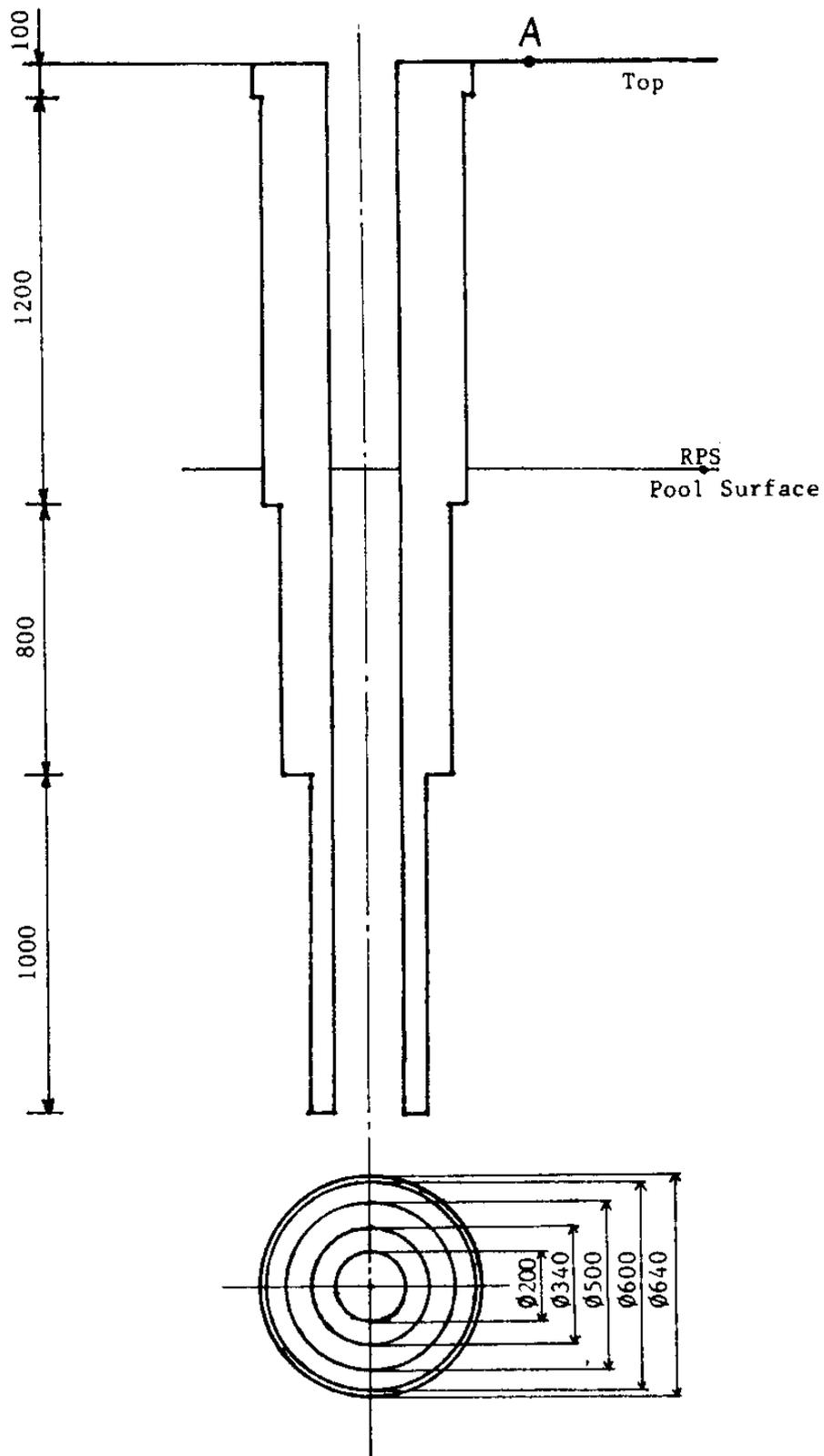


Fig. 19. Schematic Diagram of Shielding Tube (Pb)

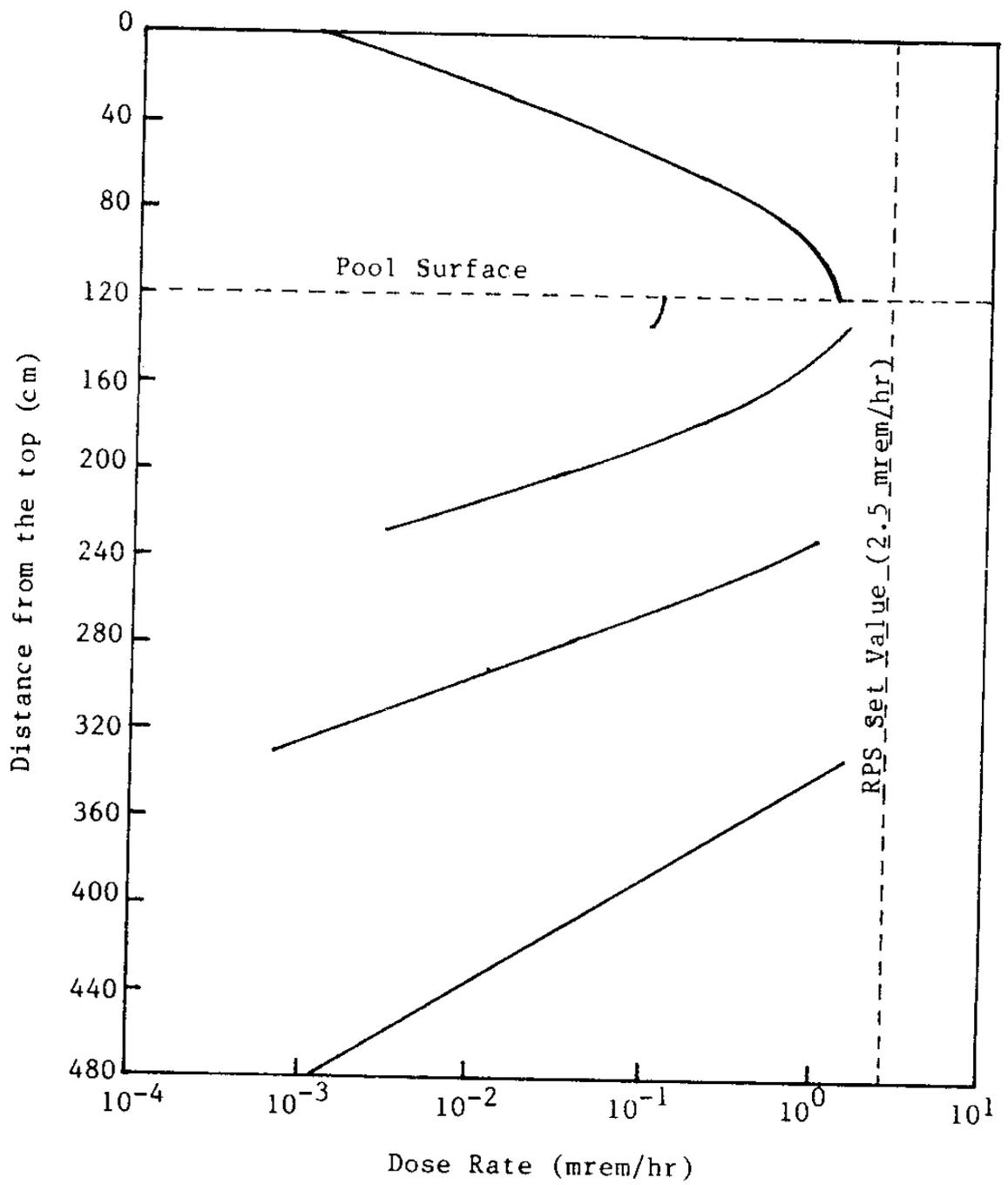


Fig. 21. Dose rate at RPS point as a function of distance from the top.

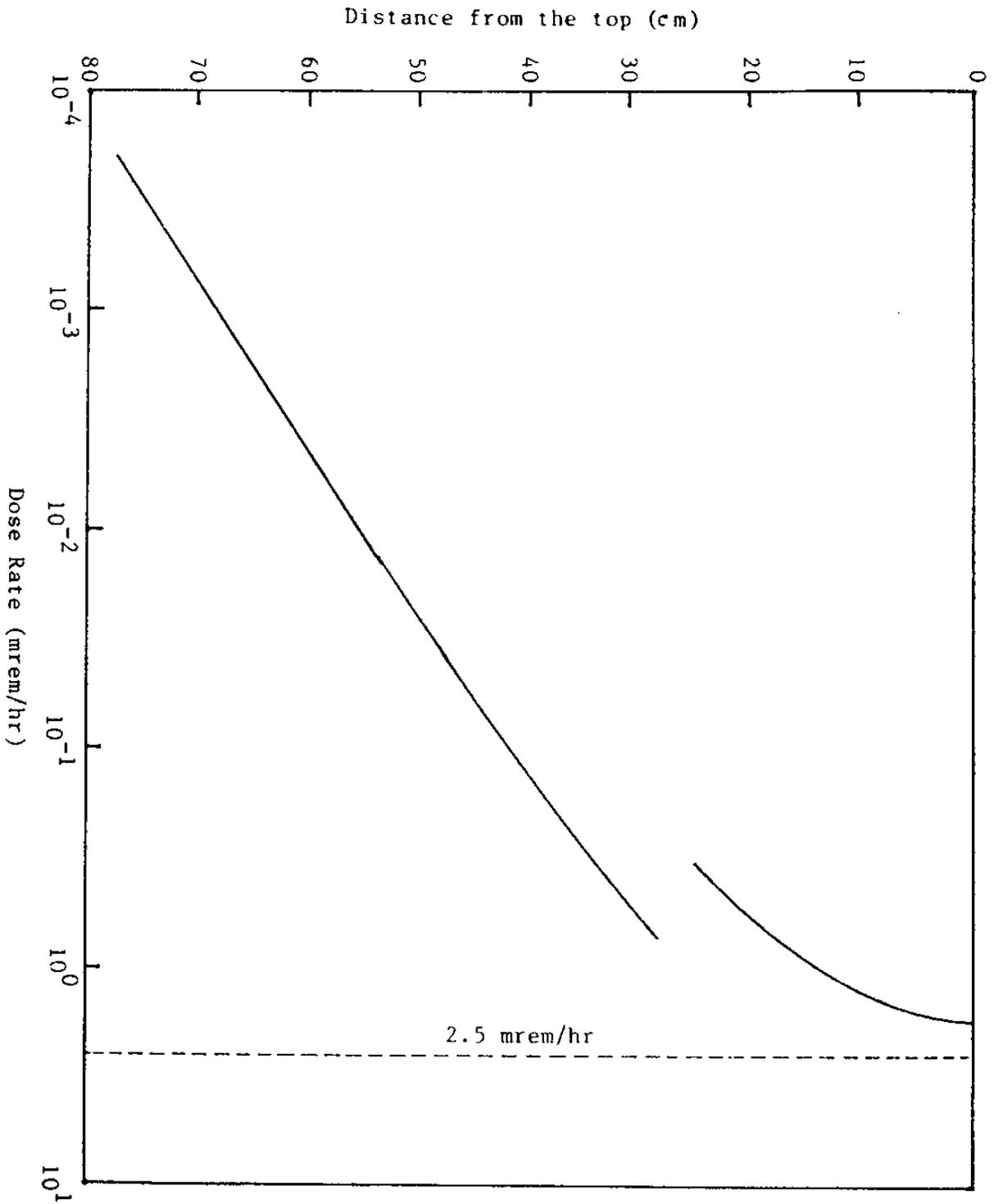


Fig. 20. Dose rate at point A as a function of distance from the top.

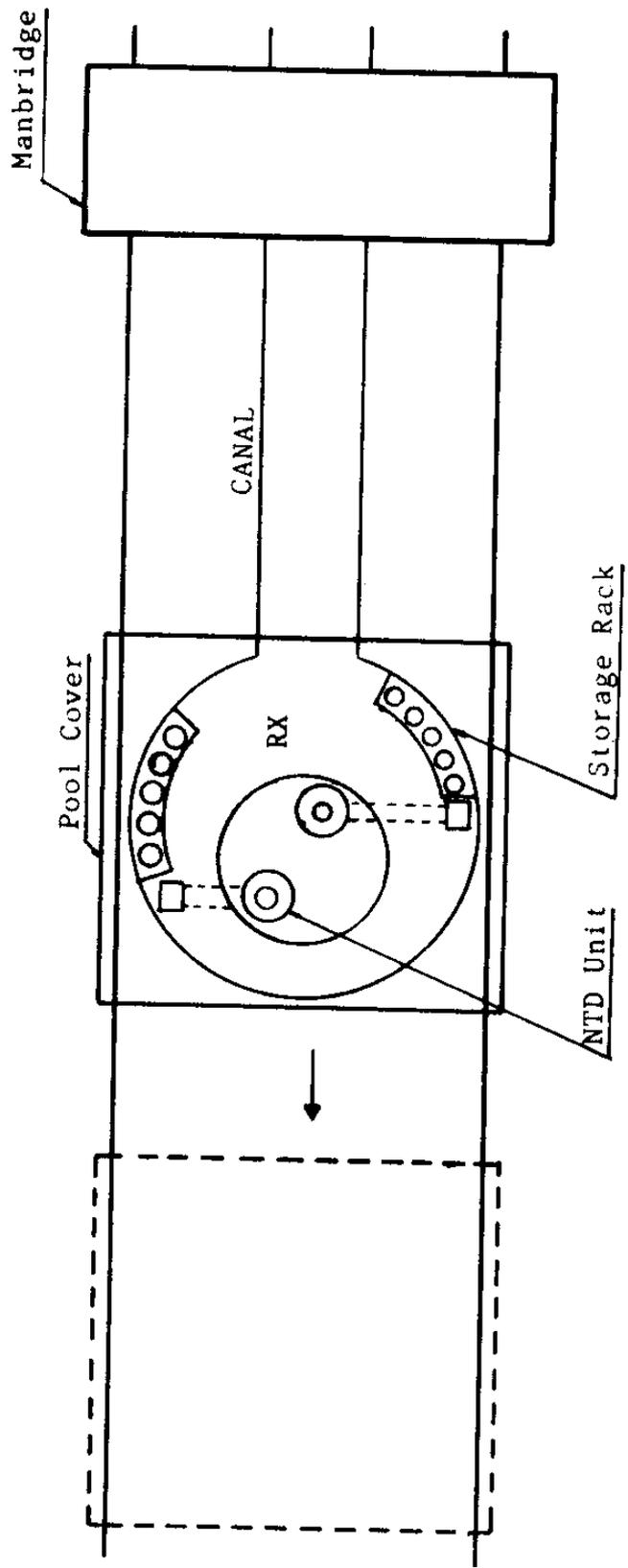


Fig. 22. NTD Units Installed on the Pool Cover (Plan View)

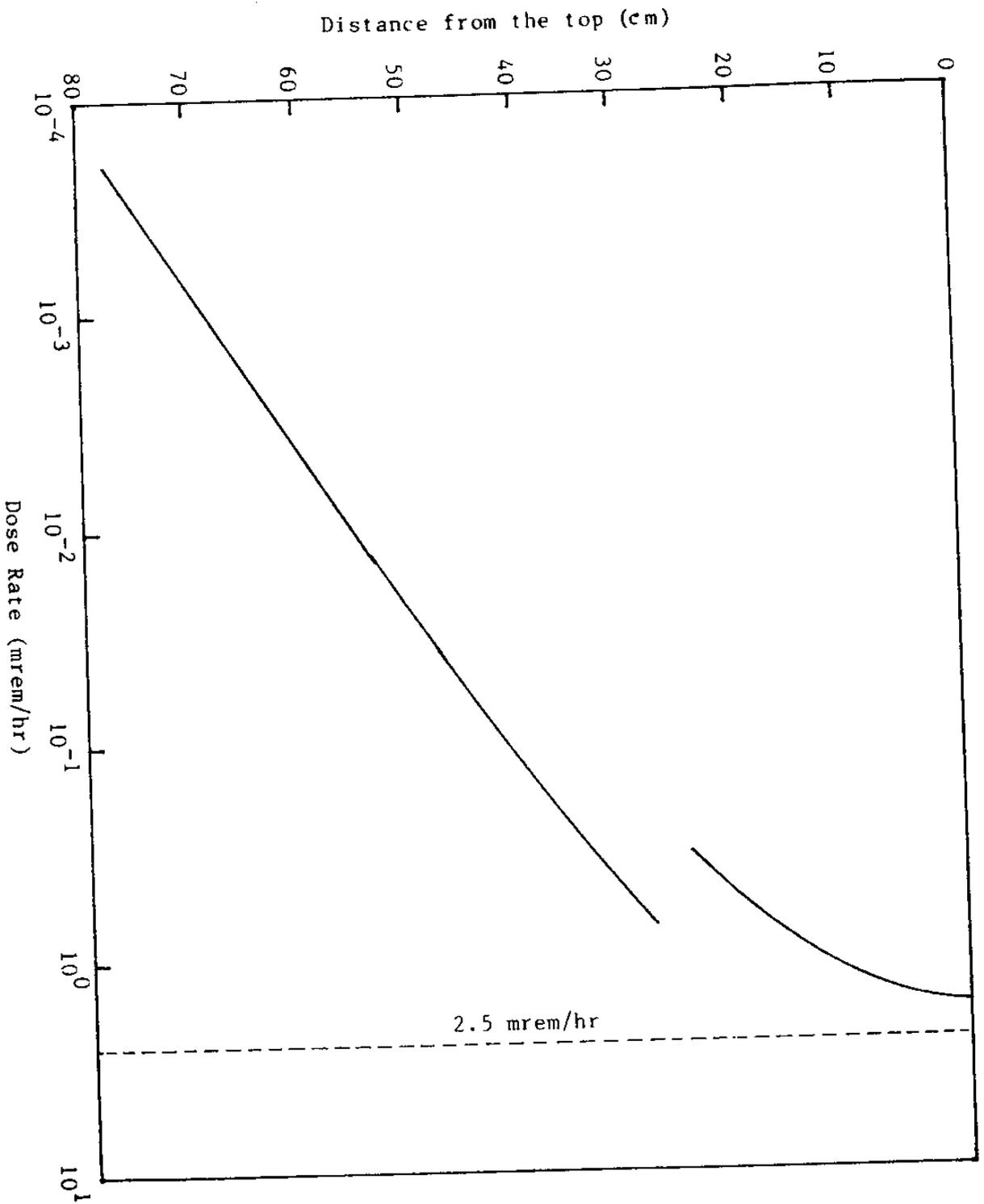


Fig. 20. Dose rate at point A as a function of distance from the top.

## 2. 기계구동부 설계

위에서 기술한 조사방식, 즉 Si Ingot + 5m Link Chain의 결합 및 분리를 제외한 모든 조작을 자동적으로 구동하기 위한 반자동 기계구동장치의 기본설계에 대해서는 '88년도에 이미 보고한 바 있으며 그 기능상의 특징은 다음과 같다.(그림 24 참고)

가. Sprocket Wheel 및 Link Chain 방식으로 Si Ingot 승강구동

나. 정위치법 또는 위치이동법 뿐만 아니라 정속이동법도 가능하게 하기 위해서 Si Ingot의 승강운동과 회전운동을 독립적으로 동시 구동

다. Stepping Motor와 절대위치검출기 (분해능 : 12bit/rev)를 연동하여 정밀한 위치/속도제어

라. Multi-turn Lead Cam과 Micro Switch를 이용하여 승강운동의 두기준 위치 정밀검출

마. 비상시에는 승강 및 회전운동을 핸들로 수동조작

바. 정전시 Si Ingot 자유낙하 방지, 중요부품의 기말화 또는 내부식재료를 이용한 내습기 조치 등 각종 안전조치

등에 대한 고려를 들 수 있다. 이 기계구동부는 다음 3.항에서 기술한 바와

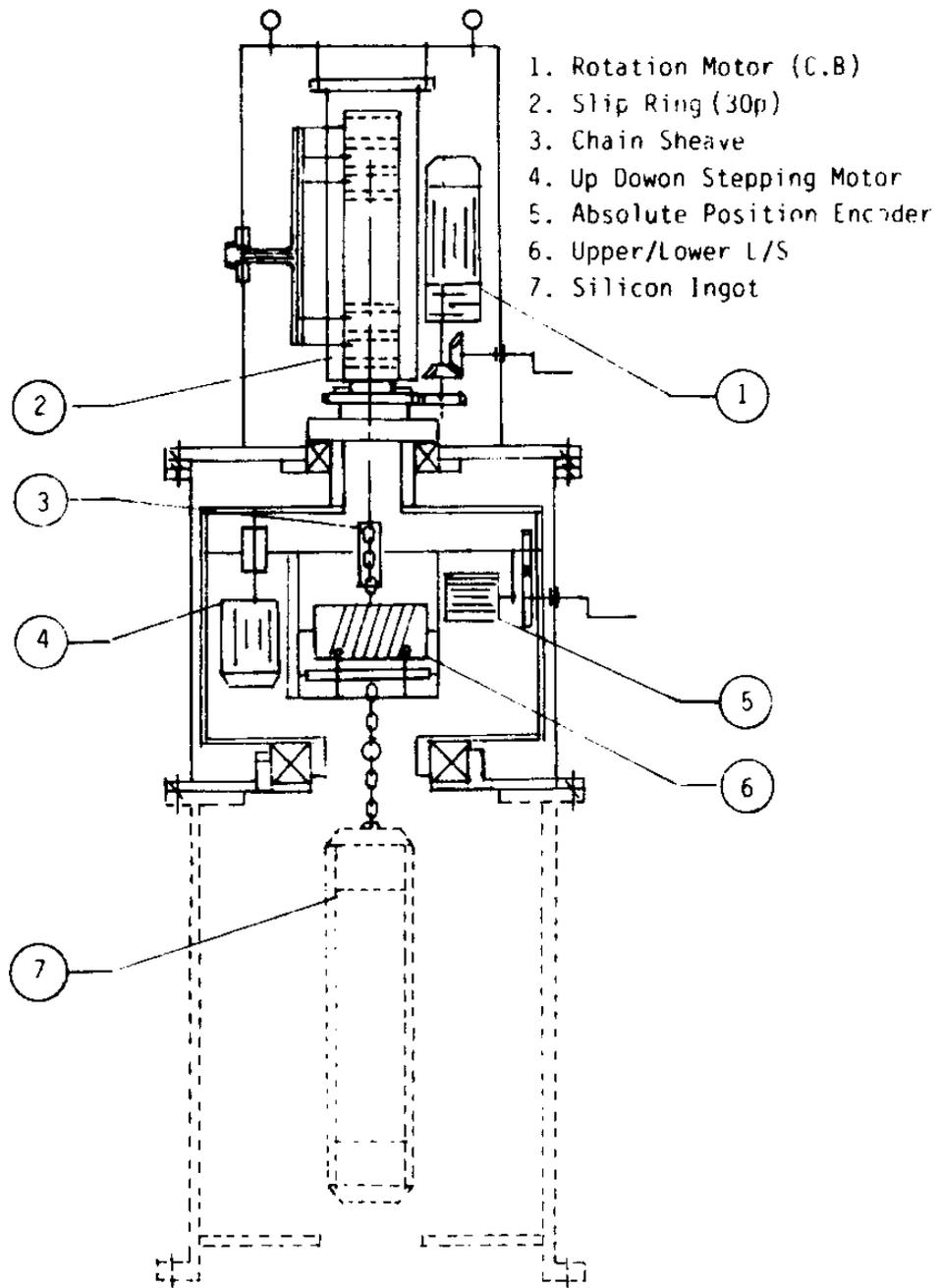


Fig. 24. NTD Driving Facility (Semiautomatic)

같이 Stepping Motor/위치검출기에 의한 제어 실험등을 수행한 후 현재 시제품 제작을 발주중에 있다.

### 3. 전자제어장치.

전자제어장치의 기본적인 기능 및 설계 방침에 대해서는 1차년도 보고서에 기술한바 있으나 다음과 같이 그중 일부를 수정 보완하였다.

#### 가. 기본설계방침.

- 1) 원자로 상부 기계구동장치 근방에 위치하는 중앙제어부는 원자로 내의 많은 강전잡음과 원자로 상부의 습기등 분위기를 고려하여 Industrial Computer를 이용한다.
- 2) 중성자속 실시간 감시를 위한 nvt-P.C는 년중 동작하여야 하며, 또 기록장치와 SPND 및 DC Amplifier 특성조사를 위한 계기반 등이 있으므로 원자로실내 계측실에 두어 ~ 40 m 거리의 중앙제어부와 RS-422 통신하도록 한다. ( 그림 25, 26 참조 )
- 3) NTD 조사의 각 과정을 원자로실내 다른 작업자에게 쉽게 알 수 있는 각종 경고등을 준비하며, 기계구동부의 과부하등에 대한 안전장치는 Hardware 및 Software적으로 상호보완하므로써 안전도를 높인다.
- 4) NTD 처리중 정전시는 독립적인 비상전원으로 Si Ingot를 NTD 조사관 밖의 안전위치까지 인출하고, 동시에 조사이력과 관련된 모든

제어정보를 보존토록 한다.

나. 중앙제어부는 2개의 표준 Rack에

- 중앙처리부. ( Industrial Computer )
- PLC Interface.
- Motor Control ( Step & AC Motor ) Interface.
- Absolute Position Encoder Interface.
- Display/Manual Control Panel.

로 구성되어 nvt-P.C의 도움으로 다음과 같은 제어조작이 가능하도록 개발중에 있다.(그림 27)

- Manual Mode : 구동의 각 제어행정이 Panel에 있는 기능별 Action Switch에 의하여 독립적으로 수동조작.
- P.C Manual : 대화식 프로그램으로 Keyboard에 의하여 각 제어행정을 독립적으로 반자동 제어.
- Auto Mode 1 : 정위치법을 이용한 연속자동조사 제어.
- Auto Mode 2 : 정속도 이동법을 이용한 연속자동조사 제어.

다. 각 중요부분의 기능과, IBM/PC/AT 개발환경 내에서 제어기용 CPU Z-80을 선택하여 실험한 내용은 다음과 같다.( Logic Diagram, 그림 28 참조)

1) 전자제어장치의 부분별 기능.

가) 중앙처리부.

각 부분별로 Control Signal을 주고 받아 전체제어를 총괄하고 SPND 4CH Sensor 신호를 A/D Converter를 거친 Digital 값을 비교/분석 및 nvt

적산 프로그램으로 처리 후 각 외부장치에 적절한 제어신호를 보내고, 진행되고 있는 Status Signal을 각 외부장치로 부터 받아서 Status Monitoring을 한다.

대부분의 Interface Board들을 Computer 내부의 I/O Slot에 내장형으로 설계하여 장치간의 Control Signal Delay Time을 극소화 하고 신뢰성 향상 및 안정성을 극대화 하였으며, 특히 원자로실내의 온·습도, 전기적잡음 등 불리한 주위조건에서 안전동작을 할 수 있도록 Industrial Computer ( IBM/PC /ATCompatible )를 채택하였다.

#### 나) SPND A/D Conversion.

조사량 및 시간제어의 기준이 되는 SPND (Self Powered Neutron Detector) Analog Voltage Signal은 A/D Conversion 되어 Computer에 2진 Code값으로 인식된다.

DC Amp를 통과한 SPND Analog Voltage Signal은 Analog Multiplexer에 의하여 Input Channel이 선택되고, 프로그램 가능한 Gain Amplifier를 거쳐 입력값이 Buffering 된다. 이값은 Sample & Hold Circuit을 통하여 Capacitor에 충전되어 정확한 A/D Conversion이 되도록 일정한 전압을 유지하여 A/D Converter에 전달되어 12 bits Digital Code로 변환된다.

0 ~ 10 Volt 값의 DC Amp를 통한 SPND Signal은 4096( $2^{12}$ )단계로 Sampling 되어 ( 2.4414 mV 씩 0 ~ 9.9976 V ) 변환된 Digital Code는 프로그램에 의하여 미리 계산되어진 예정값과 비교되어 조사량 및 조사시간이 제어되

고 그에 따른 후속 제어가 이루어 진다.

다) PLC Interface.

종래의 Relay Sequence Control의 복잡성, 운영 및 보수의 난이성, 높은 단가등을 개선하여 마이크로프로세서와 메모리등의 IC를 주체로한 제어장치로서 Sequence Control Program을 수행하는 CPU 모듈, 제어프로그램을 작성하여 CPU 모듈로 전달하는 Programmer ( IBM-PC ), 외부와 입출력 신호를 교환하는 Input/Output 모듈, 상용전원을 공급받아 PLC 내부에서 사용하는 전원으로 변환해 주는 전원부 및 이상이 있을시에 정전복구 기능을 위한 전력모듈, PLC 주변의 주변장치 모듈 및 통신망 모듈( Communication Network )로 구성되어있다. 이러한 PLC I/O 모듈들의 기능별 특성을 적절히 조합하여 IBM-PC AT 컴퓨터와 구동장치를 연결하여 Signal Insulation을 하고 안전 및 신뢰성 있는 Sequence 제어를 하며 RS-232C Communication Interface를 통하여 Real Time Processing Status를 Monitoring 한다.

라) Motor Control Interface.

Silicon Ingot의 경방향 균일조사를 위한 Rotation AC Motor를 제어하며, 축방향 균일조사를 위한 Stepping Motor의 Driver에 정 역방향 및 속도제어를 위하여 IBM-PC 환경에서 Programming된 Counter/timer ( VLSI Intel 8253 PIT ) Register Control Program으로 Pulse Width/Duration을 조절한다.

마) Absolute Position Encoder Interface.

Silicon Ingot의 정확한 위치를 제어하기 위하여 12 bits 분해능

(  $2^{12} = 4096$  )을 갖는 Absolute Encoder의 Gray Code를 Binary로 바꾸고 위치에 따른 제어신호를 발생하며, 절대값을 Display 하기 위한 BCD Code를 생성하여 Display/Control Panel로 보낸다.

바) Display/Control Panel. ( 그림 29 )

7-Segment와 각종 Lamp로 조합되어 구동되고있는 각 Actuator들의 현재 상태를 전체적으로 확인할 수 있도록 되어 있으며, 수동 또는 비상시 해당되는 기능별 Action Switch에 의하여 독립적으로 구동할 수 있다.

사) Software. ( Control, Monitoring, Communication )

Hardware의 장점을 최적화시킨 본 제어부에 High Level Language와 Assembler를 Link시켜 Control 및 Multi Window 방식 Monitoring을 하며, 실험실과 Communication을 실현한다. 또한 단계별 Error Check Mode를 넣어 비상시에 대처할 수 있도록 하며, 정확한 중성자속 검출을 위한 프로그램으로 SPND 출력을 적산하여 조사량 실시간 감시 및 조사시간을 제어한다.

2) 전자제어장치의 중요부분 제작, 실험

위에 기술한 전자제어장치의 중요부분은 중앙처리부(Industrial Computer)와 결합된 PLC에 의해 Stepping Motor, Absolute Position Encoder등 각 Actuator를 구동제어하는데 있으므로, IBM/PC/AT를 주축으로 프로그램을 개발하고 Z-80 CPU와의 대화를 통해 각 기능 요소의 구동제어 실험을 수행하였으며, 그 제작 및 대화 과정에서 다음과 같은 도구를 사용하였다.

- ① IBM/PC/AT인 Host와 제어기( CPU\_Board Controller )의 통신규격은 RS-232C표준을 채택한다.
- ② 통신 프로그램은 화일 송수신이 유리한 상업용 프로그램인 XTALK XVI Version 3.61을 사용한다.
- ③ 제어 프로그램은 Z80 어셈블리어의 Cross Assembler AD2500 사용
- ④ 인쇄회로기판 제작용 프로그램은 orCAD SDT III Version 3.11을 회로도 작성과 회로정보입력( Schematic Capture )용으로 사용하고, Artwork/Auto\_Routing은 orCAD PCB Version 1.0을 사용하였다.

가) Z-80 CPU Board.

CPU로 Z-80A, Memory는 EPROM 2764 ( 8K ) SRAM 6264 ( 8K ), Serial 통신용 VLSI 8251 ( Programmable Communication Interface ), 통신 Level 변환 ( 1488, 1489 ), Buffer 등으로 구성되어지며( 그림 30 ) Monitor Program을 Cross Assembler로 작성하여 EPROM에 Writing을 하였다.

또한 64 pin DIN Connector에 Data, Address, Control BUS 및 Power를 구축하여 각종 Controller들을 제어할 수 있도록 하였고, 프로그램 Up/Down Load, 수정( Debugging ), 수정 후 확인 ( DUMP ), 메모리의 일부분을 일정한 값으로 바꾸어 쓰는 기능 ( FILL ), Address Moving ( MOVE ), 메모리를 Byte 단위로 고치거나 쓰는 기능 ( WRITE ), 실행기능 ( GOTO ), Register 값의 상태를 검토하는 기능 ( BREAK ), Register값의 잘못을 찾는 기능

( TRACE ) 등을 모니터 프로그램에 작성하여 Controller 개발에 용이하도록 하였다.

나) Display Output of Absolute Position Encoder.

Absolute Position Encoder의 특성은 분해능이  $2^{12} = 4096$  이므로 절대값 ( 0 ~ 4095 )을 Display 하였다.

또한 Encoder의 출력단이 오차율이 적은 Gray Code이므로 Code 변환이 필요하다. 변환은 Gray → Binary → BCD 과정이 되므로 Gray → Binary는 Hardware적으로, Binary → BCD는 Software로 해결하였다.

Board는 Display Output, Code Conversion 2가지로 구분하여 제작하였으며, 데이터 입출력은 VLSI 8255 ( Programmable Peripheral Interface )를 사용하였고 Display Component는 7-segment ( SMD-437 )을 사용하고, Assembler로 프로그램을 작성 하였다. ( 그림 31 )

다) Pulser for Stepping Motor Driver.

Motor의 특성은 Step Angle Accuracy가  $0.72^\circ$ , Torque 23Kg-cm, 로우터치수 (  $Z_R = 50$  )인 5상을 선택하고 상품화된 Driver를 사용하였다.

Driver에 CW, CCW, P.D( Power Down ), AL( Alarm ), F.G ( Frame Ground ) 등이 준비되어 있으므로 이 기능을 이용하는 Pulser를 제작 하였다.

Timer용 IC NE555를 발진회로로 정하고 펄스 ( Frequency )를 제어하여 가속, 정속, 감속의 Speed Control을 하고, 비상시 P.D를 이용하여 정지 기능을 실험하였다. ( 그림 32 )

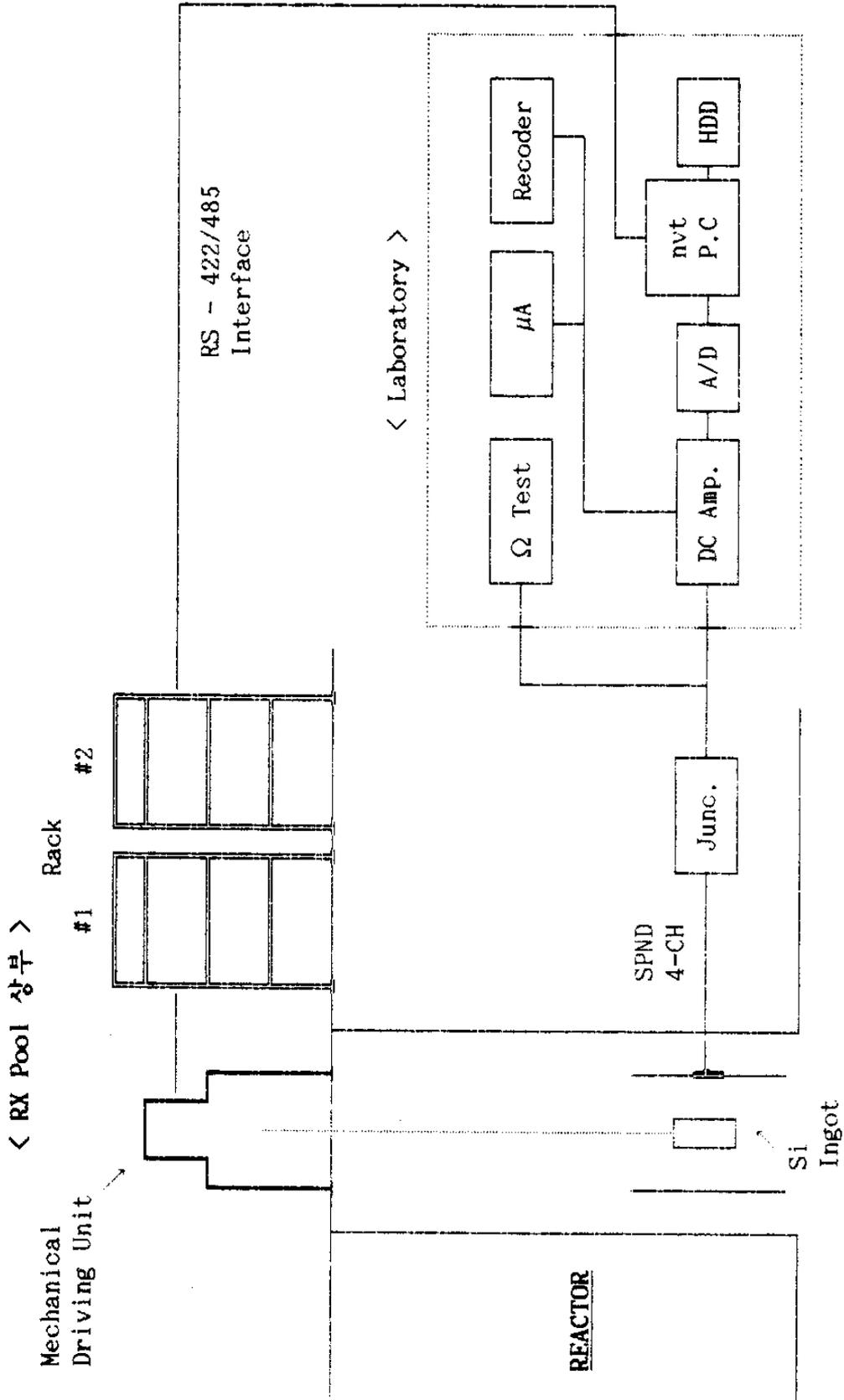


그림 25. System 설치 개략도.

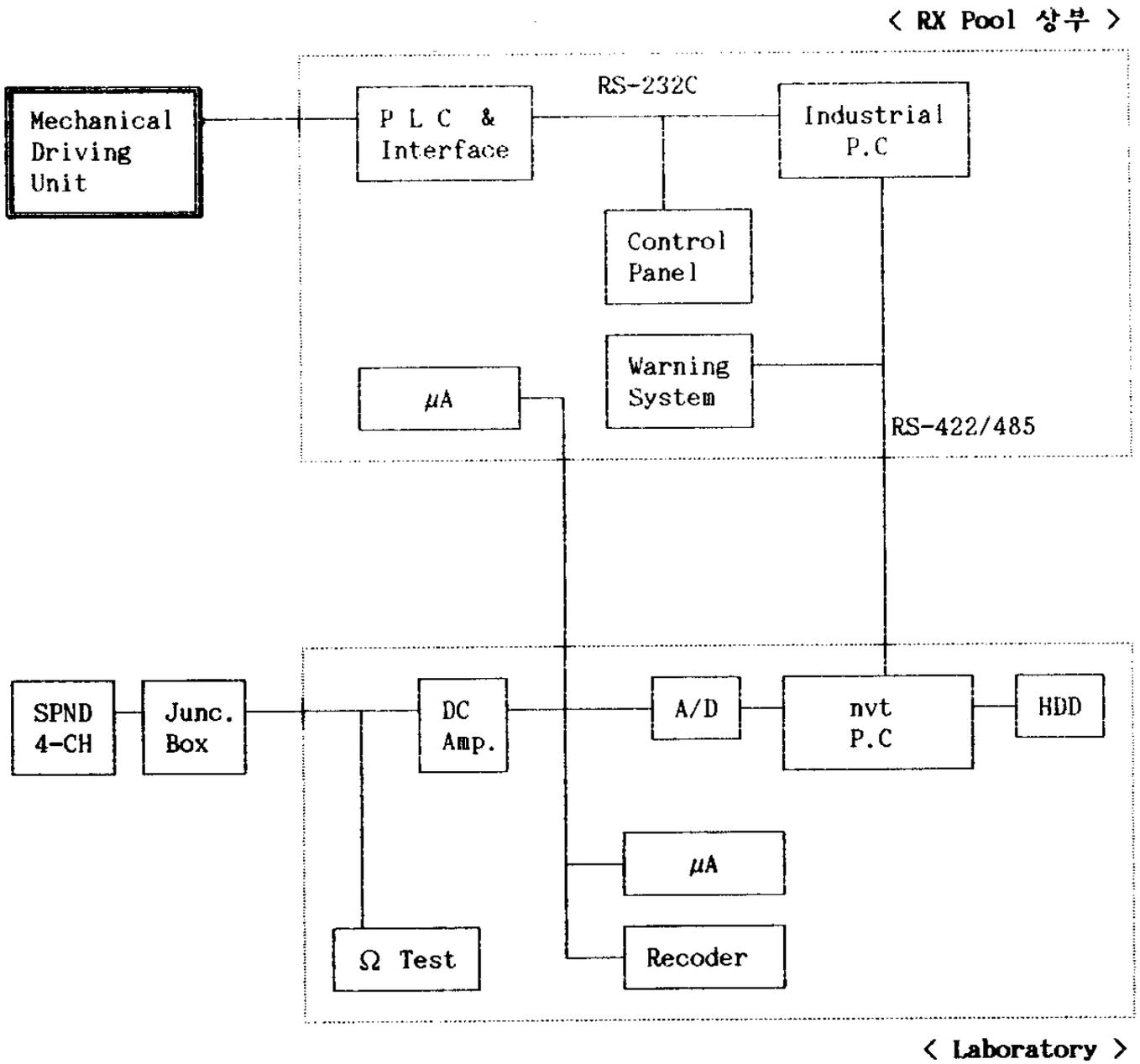
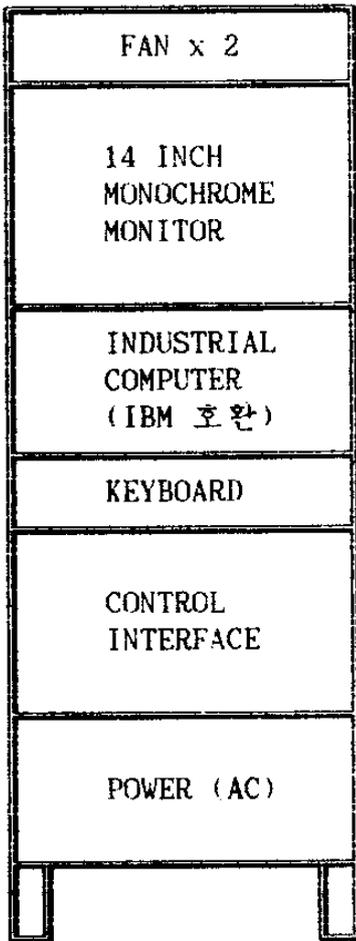


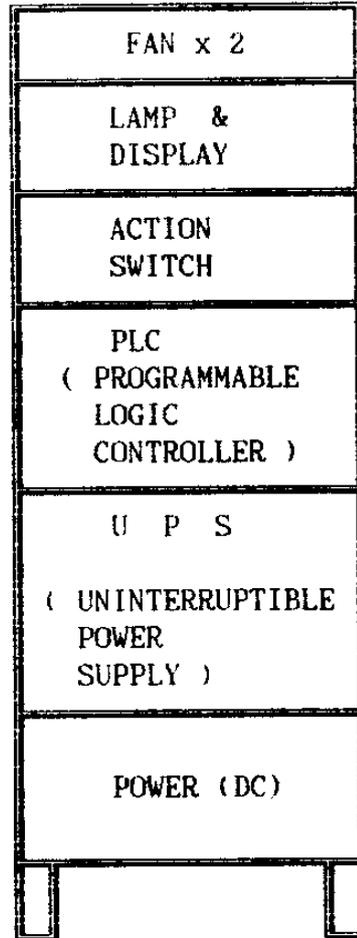
그림 26. Block Diagram of Electronic Control System.

그림 27. 장비 외관도.

1) Rack Configuration.



RACK #1 ( Main Rack )



RACK #2 ( Action Rack )

< BLOCK DIAGRAM OF RACK FOR NTD CONTROL >

그림 28. Logic Diagram of NTD Automatic Control System.

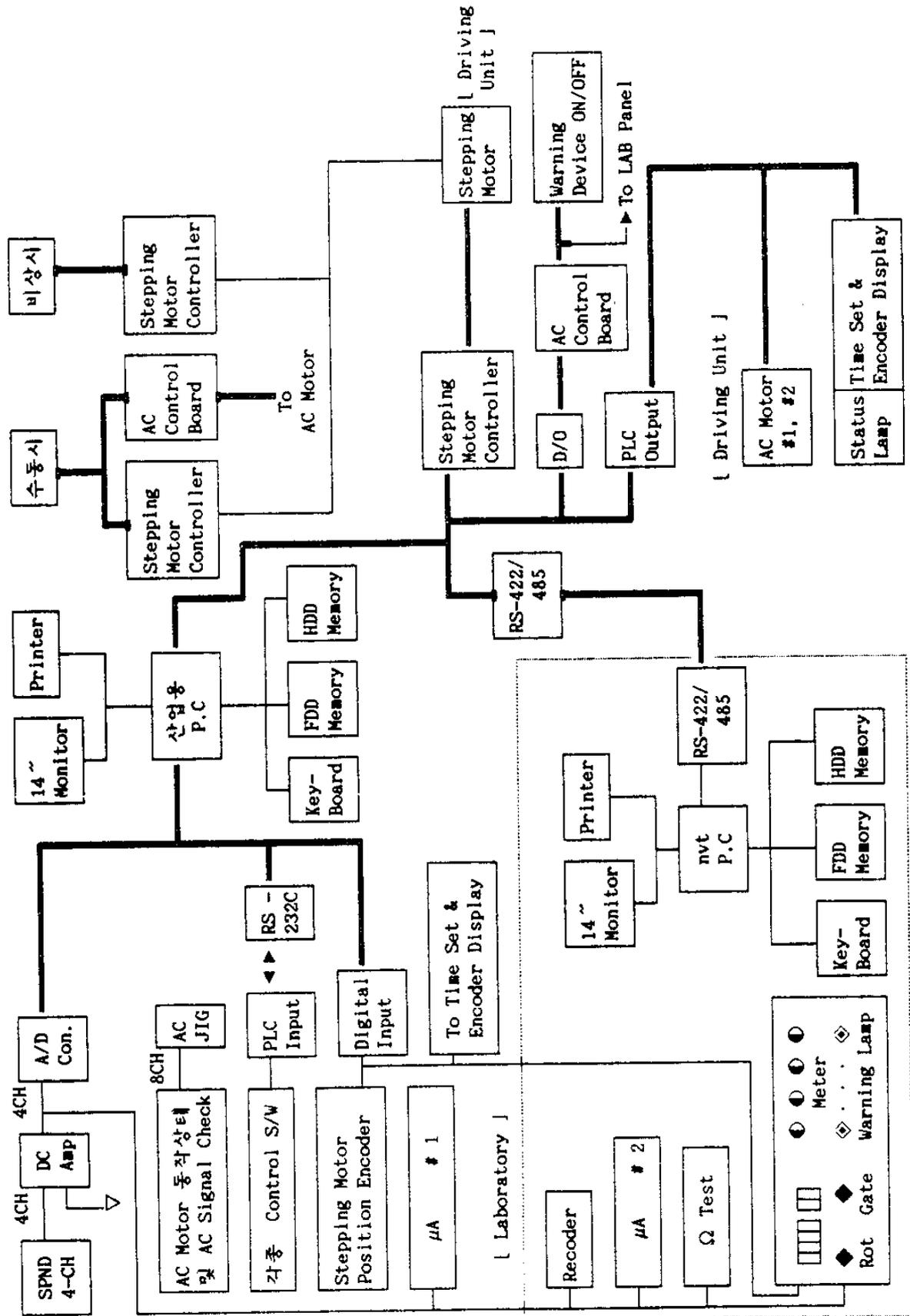


그림 29. Front Panel of Display/Control.

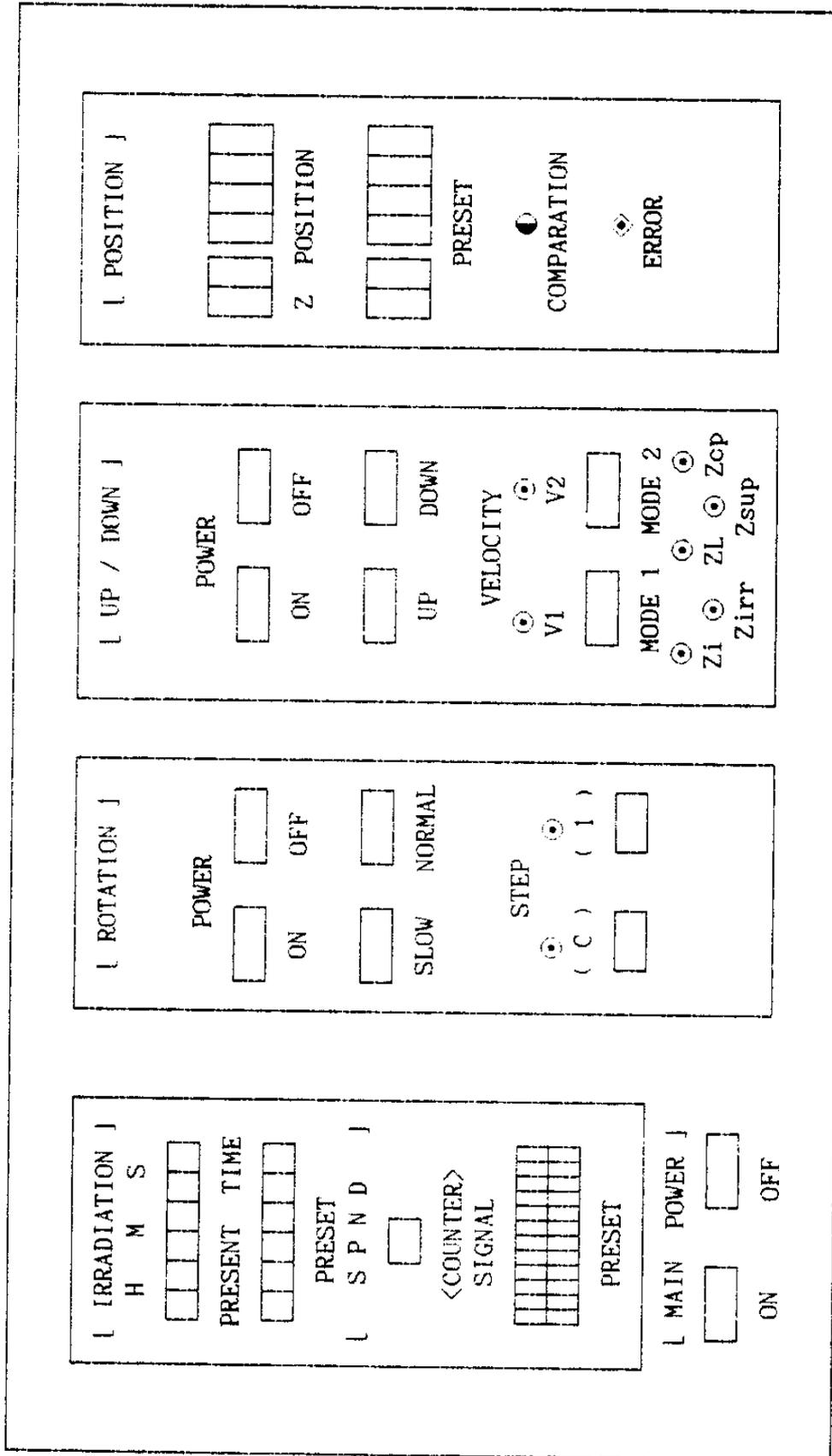


그림 30. Z-80 CPU Board.

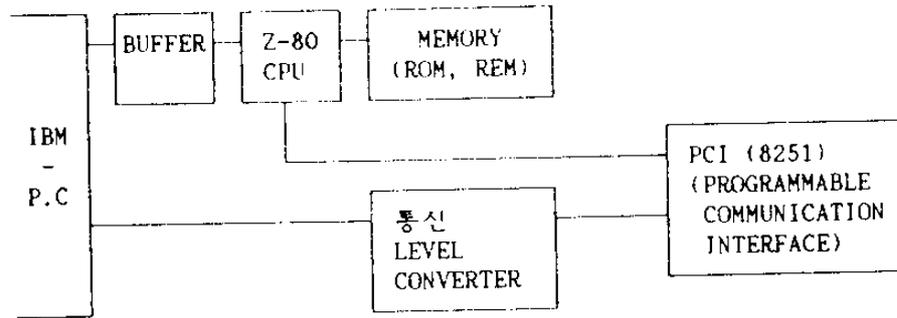


그림 31. Display Output of Absolute Position Encoder.

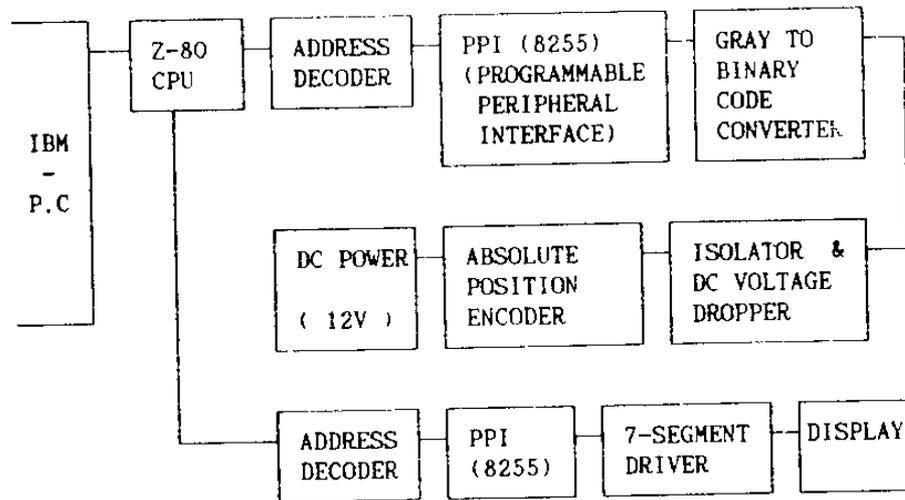
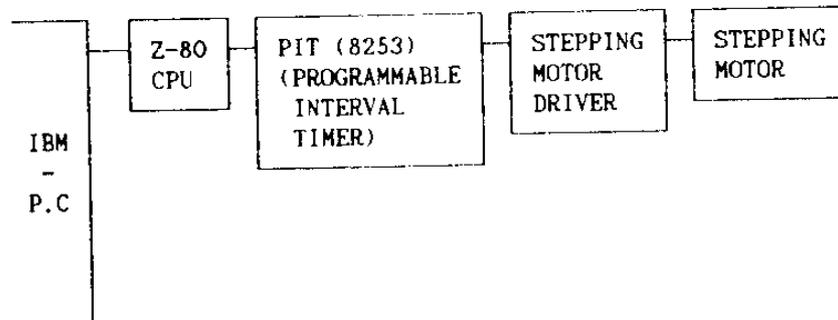


그림 32. Pulser for Stepping Motor Driver.



## 제5절. 열외중성자 절대속 분포측정 및 선질평가

NTD조사관내 중성자속분포의 정밀한 절대측정은 Si 조사방법결정, 조사관 설계, 기항율분포의 균일도 향상 및 목표저항을 정밀제어 등 NTD 기술개발의 핵심적인 과제와 하나이다. 그 구체적인 목적은 다음과 같은 자료를 얻는 것이다.

- (1) 조사관내 열중성자속의 축방향 및 경방향 분포
- (2) 조사관내에 여러가지 재료의 Si Ingot 도입에 따르는 Ingot 내외의 열중성자 분포변화
- (3) 핵연료주기간, 즉 핵연료 연소 및 제어봉 배치 변동에 따르는 열중성자속 분포변화
- (4) 열외중성자, 속중성자 및 7선 성분 측정에 의한 선질평가

원자로심 방사체내에 복잡한 구조를 가지는 국소적인 NTD 조사관내의 중성자속밀도분포는 계산으로는 정밀한 정보를 얻을 수 없고 직접적인 측정에 의존할 수 밖에 없으며, 그 대표적인 방법으로는 중성자장 각 위치에서 일정시간 조사된 검출박의 유도방사능을 절대측정하는 방법이 있다.

검출박에 의한 열중성자속 측정에 관련된 여러가지 보정에 대한 이론적인 검토와 붕괴율의 정밀측정을 위한 저·중·고차계수장치 준비에 대해서는 1차년도에 보고한 바 있으며, 아래에 이 기제의 진행에 대해서 기술하였다.

1. 열외중성자 평가<sup>28)</sup>

제1절에서 검토한 바와 같이 중수(D<sub>2</sub>O) 반사체내에 NTD 조사관이 있는 KMRR의 경우 열외중성자에 의한 <sup>31</sup>P의 생성은 열중성자에 의한 기여의 거의 ~0.15% 정도로서 문제가 되지 않으나, 열외중성자의 정밀한 측정 및 평가는 열중성자의 정밀평가와 밀접한 관계가 있으며 또, 속중성자속과 더불어 Si 에 대한 중성자 조사손상 평가에도 필요하다.

따라서 당해년도에는 Cadmium법에 의한 열외중성자속측정에 관하여 검토하고, 열외중성자속의 상대적인 비율로서 원자로중성자선질의 평가로 널리 쓰이고 있는 열외중성자지수(Epithermal Index) 계산에 대하여 Westcott

Table 21. Foil Detectors for Intermediate(Resonance) Neutron Region.

Neutron Energy	Element of Interest	Nuclear Reaction
0.142eV	Lu	Lu <sup>176</sup> (n,γ)Lu <sup>177</sup>
1.457eV	In	In <sup>115</sup> (n,γ)In <sup>116m</sup>
4.28 eV	Ta	Ta <sup>181</sup> (n,γ)Ta <sup>182</sup>
4.906eV	Au	Au <sup>197</sup> (n,γ)Au <sup>198</sup>
5.20 eV	Ag	Ag <sup>109</sup> (n,γ)Ag <sup>110m</sup>
6.7 eV	U <sup>238</sup>	U <sup>238</sup> (n,γ)U <sup>239</sup>
18.8 eV	W	W <sup>186</sup> (n,γ)W <sup>187</sup>
24 eV	Th	Th <sup>252</sup> (n,γ)Th <sup>253</sup>
132 eV	Co	Co <sup>59</sup> (n,γ)Co <sup>59</sup>
230 eV	Fe	Fe <sup>58</sup> (n,γ)Fe <sup>59</sup>
337 eV	Mn	Mn <sup>55</sup> (n,γ)Mn <sup>56</sup>
480 eV	Mo	Mo <sup>98</sup> (n,γ)Mo <sup>99</sup>
580 eV	Cu	Cu <sup>63</sup> (n,γ)Cu <sup>64</sup>
1000 eV	Pu	Pu <sup>239</sup> (n,γ)Pu <sup>240</sup>
1710 eV	Na	Na <sup>23</sup> (n,γ)Na <sup>24</sup>
5000 eV	Sc	Sc <sup>45</sup> (n,γ)Sc <sup>46</sup>

표현에 의해 검토하였다. 아울러 KMRR 가동시 노심 특성조사에 중성자온도 측정도 포함하기 위하여, Westcott 표현과 이로부터 구한 열외중성자지수로 부터 중성자온도를 구하는 방법에 대하여 검토하였다.

열외중성자평가에는 주로 표21과 같은 공명특성이 뛰어난 검출박들이 사용되고 있다.

### 가. 열외중성자에 의한 방사화

열외중성자의 에너지분포는 일반적으로 다음과 같이  $1/E$ 에 비례한다.

$$\Phi(E) dE = \Phi_{epi}(E) \frac{dE}{E} \quad (36)$$

이때  $\Phi_{epi}(E)$ 는 에너지에 따라 그 변화가 매우 작다고 가정한다. 이러한 중성자장에 놓인 검출박의 방사화율은 검출박내 산란을 무시하면 다음과 같이 주어진다.

$$C = \frac{1}{2} \int_{0}^{E_{max}} \frac{1}{h\nu} \Phi_{epi} \frac{\mu_{act}}{\mu_a} \phi_0(\mu_a(E)\delta) \frac{dE}{E} \quad (37)$$

$E_{epi}$ 는 스펙트럼에서 나타나는 최대값으로서 큰 오차없이 무한대로 설정할 수 있다.

한편 열외중성자영역에서는 공명흡수등으로 복잡한 효과를 발생하므로 방사화율  $C$ 를 계산하는데 있어서 다음과 같은 몇가지 가정이 필요하다.

- 1)  $\Phi_{epi}(E)$ 는 상수, 즉 중성자선원은 순수한  $1/E$  스펙트럼을 갖는다.
- 2) 검출박의 흡수계수  $\mu_a$ 는  $1/v$  부분과 Breit-Wigner식을 따르는 공명부분의 합으로 표현할 수 있다.

3)  $\phi_0$  함수는 다음과 같은 근사식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \frac{2\mu_a \delta}{1 + 2\mu_a \delta} \\ &\cong 2\mu_a (kT) \sqrt{\frac{kT}{E}} \delta + 2 \sum_i \frac{\mu_{a_0}^i}{1 + \left(\frac{E-E_R}{\Gamma^i/2}\right)^2 + 2\mu_{a_0}^i \delta} \end{aligned} \quad (38)$$

이러한 가정을 전제로 하면 식(37)로 주어진 방사화율 C를 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C &= \Phi_{epi} \left[ \lambda_0 \int_{\mu kT}^{\infty} \mu_a (kT) \sqrt{\frac{kT}{E}} \delta \frac{dE}{E} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_i \lambda_i \int \frac{\mu_{a_0}^i}{1 + \left(\frac{E-E_R}{\Gamma^i/2}\right)^2 + 2\mu_{a_0}^i \delta} \frac{dE}{E} \right] \\ &= C_{1/v} + C_{res} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서  $\lambda_0$ 는  $1/v$  흡수,  $\lambda_i$ 는  $i$ 번째 공명흡수에 의한 비율을 나타낸다. 따라서  $1/v$  흡수에 의한 기여는

$$\begin{aligned} C_{1/v} &= 2 \lambda_0 \Phi_{epi} \mu_a (kT) \sqrt{\frac{kT}{\mu kT}} \delta \\ &= 2 \lambda_0 \Phi_{epi} \mu_a (\mu kT) \delta \\ &= 2 \lambda_0 \Phi_{epi} N \sigma_{act}^{1/v} (\mu kT) d \end{aligned} \quad (40)$$

이며, 단일 공명흡수에 의한 기여는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{res}^i &= \Phi_{epi} \lambda_i \mu_{a_0}^i \delta \int \frac{1}{1 + \left(\frac{E-E_R}{\Gamma^i/2}\right)^2 + 2\mu_{a_0}^i \delta} \frac{dE}{E} \\ &= \Phi_{epi} \lambda_i N I_{eff}^i d \end{aligned} \quad (41)$$

여기서  $I_{eff}^i$  는 검출박의 두께등이 고려된 유효공명적분으로

$$I_{\text{eff}}^i = \sigma_{a_0}^i \int \frac{1}{1 + \left( \frac{E-E_R}{\Gamma^i/2} \right)^2 + 2 N d \sigma_{a_0}^i E} dE$$

$$= \frac{I_{\infty}^i}{\sqrt{1 + 2 N d \sigma_{a_0}^i}} \quad (42)$$

$$I_{\text{eff}}^i = \frac{\pi}{2} \sigma^i \frac{\Gamma^i}{E_R^i}$$

따라서  $1/v$  흡수 및 공명 흡수를 함께 고려한 전방사화율은 다음과 같이 주어진다.

$$C = \Phi_{epi} N I_{\text{eff act}}^i d \quad (43)$$

$$I_{\text{eff act}}^i = 2 \sigma_{\text{act}}^{1/v}(\mu kT) + \frac{\lambda_i I_{\infty}^i}{\sqrt{1 + 2 N d \sigma_{a_0}^i}}$$

한편 무한히 얇은, 즉  $N d \sigma_{a_0}^i \ll 1$  인 검출박에 대해서는

$$I_{\text{act}}^i = 2 \sigma_{\text{act}}^{1/v}(\mu kT) + 2 \lambda_i I_{\infty}^i$$

$$= \int_{\mu kT}^{\infty} \sigma_{\text{act}}(E) \frac{dE}{E} \quad (44)$$

이므로 검출박의 두께로 인한 열외중성자의 자기차폐는 다음과 같이 주어진다.

$$G_{epi} = \frac{I_{\text{eff act}}^i}{I_{\text{act}}^i}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 2\mu_{ac}^i \delta}} \quad (45)$$

나. 일반적인 중성자장에서의 열외중성자속 측정

앞에서는 순수한 열외중성자장에서의 방사화율을 검토하였으나 연구용원

자료와 같은 일반적인 중성자선원에는 열중성자와 열외중성자가 함께 존재하며 1차년도에 언급한 바와 같이 다음과 같은 에너지분포를 갖는다.

$$\phi(E) = \phi_{th} \frac{E}{(kT)^2} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) + \phi_{epi} \frac{\Delta(E/kT)}{kT} \quad (46)$$

이러한 중성자장의 전체 중성자속중에서 열외중성자가 차지하는 비율은 일반적으로 카드뮴을 씌우지 않은 검출박과 씌운 검출박의 방사화율의 비인 카드뮴비를 사용하며, 카드뮴에 대한 열중성자의 투과를 무시하면 다음과 같이 주어진다.

$$R_{cd} = \frac{C}{C_{cd}} = \frac{C_{epi} + C_{th}}{\frac{C_{epi}}{F_{cd}}} \quad (47)$$

여기에서  $F_{cd}$ 는 1차년도에 고려한 카드뮴보정계수이다. 식(47)를 정리하면 열중성자속 및 카드뮴비와 열외중성자속의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{cd} - F_{cd} = \frac{\phi_{th}}{\phi_{epi}} \frac{\frac{\sqrt{\pi}}{2} g(T) \sqrt{\frac{293.6^\circ}{T}} \sigma_{act}(v_0=2200\text{m/sec})}{\int_{E_{cd}}^{\infty} \sigma_{act}(E) \frac{dE}{E}} \quad (48)$$

따라서 1차년도에 기술한 바와 같이 카드뮴법에 의해 열중성자절대속을 구하고 (47)식에 의해 카드뮴비를 구하면 (48)식에 의해 열외중성자속을 산출할 수 있다.

#### 다. 열외중성자지수

중성자선원의 선질을 평가하는데 있어서 열외중성자의 상대적인 양으로 카드뮴비를 사용하기도 하지만 열외중성자지수  $r$  또는  $r\sqrt{T/T_0}$  를 구하는

방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 열외중성자지수는 기본적으로 방사화에 대한 Westcott 표현으로부터 파생되는 것이므로 우선 Westcott 표현에 대해 알아보기로 한다.

1) Westcott의 유효단면적<sup>29)</sup>

지금까지는 중성자장에 놓인 검출박의 반응율에 대해서 열중성자 및 열외중성자에 대해 각각의 반응단면적을 분리하여 표현하는 방법을 사용하여 왔다. 이러한 방식에 의하면 검출박이 자기차폐를 무시할 수 있을 정도로 얇을 경우에 그 반응율은 다음과 같이 주어진다.

$$R = N d \left[ \Phi_{th} \frac{\sqrt{\pi}}{2} g(T) \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sigma_a(v_0) + \Phi_{epi} \int_0^{\infty} \sigma_a(E) \frac{\Delta(E/kT)}{E} dE \right] \quad (49)$$

그러나 Westcott는 전중성자속을 중성자밀도  $n$ 과 열중성자 표준속도  $v_0$ 의 곱으로 취하고, 열외중성자속의 상대적인 양을 비롯한 중성자선원 스펙트럼의 특성과 검출박의 특성을 유효단면적  $\hat{\sigma}_a$ 라는 새로운 변수를 사용하여 반응율을 다음과 같이 표현하였다.

$$R = N d n v_0 \hat{\sigma}_a \quad (50)$$

한편 중성자밀도  $n$ 은 다음과 같이 열중성자밀도  $n_{th}$ 와 열외중성자밀도  $n_{epi}$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$n = n_{th} + n_{epi} \quad (51)$$

$$n_{th} = \frac{\Phi_{th}}{v} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Phi_{th}}{vT}$$

$$n_{epi} = \Phi_{epi} \int \frac{\Delta(E/kT)}{E v} dE = \frac{2}{\sqrt{\mu}} \frac{\Phi_{epi}}{vT}$$

이제 열외중성자의 비율을  $f = \frac{n_{epi}}{n}$  이라 놓으면  $1-f = \frac{n_{th}}{n}$  이고 (49)

식으로부터  $\hat{\sigma}_a$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_a &= (1-f) g(T) \sigma_a(v_0) + f \frac{\sqrt{\mu} vT}{2 v_0} \int_0^\infty \frac{\Delta(E/kT)}{E} \sigma_a(E) dE \\ &= g(T) \sigma_a(v_0) + f \left[ \frac{\sqrt{\mu} vT}{2 v_0} \int_0^\infty \frac{\Delta(E/kT)}{E} \sigma_a(E) dE - g(T) \sigma_a(v_0) \right] \\ &= g(T) \sigma_a(v_0) + \frac{\sqrt{\mu} vT}{2 v_0} f I' \end{aligned} \quad (52)$$

여기에서  $I'$ 은  $1/v$  흡수를 제거한 순수한 공명흡수적분(Excess Resonance Integral)으로 다음과 같다.

$$I' = \int_0^\infty \left( \sigma_a(E) - g(T) \sigma_a(v_0) \frac{v_0}{v} \right) \frac{\Delta(E/kT)}{E} dE \quad (53)$$

식(52)에서 첫번째 항은  $1/v$  흡수를 나타내며, 두번째 항은 검출박의 공명 특성과 이와 반응할 상대적인 열외중성자의 양으로 이루어져 있다. 먼저 검출박의 공명특성을 변수  $s$ 를 도입하여 나타내면

$$s = \frac{1}{\sigma_a(v_0)} \frac{2}{\sqrt{\mu}} \sqrt{\frac{T}{T_0}} I' = s_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (54)$$

다음으로 중성자선원의 상대적인 열외중성자의 양을 열외중성자지수  $r$ 을 사용하여 나타내면 다음과 같고

$$r = f \frac{\sqrt{\pi\mu}}{4} \quad (55)$$

(51)식을 사용하면 열중성자와 열외중성자의 상대적인 양과의 관계로 표현할 수 있다.

$$r = \frac{\sqrt{\pi\mu/4}}{1 + \frac{\sqrt{\pi\mu}}{4} \frac{\Phi_{th}}{\Phi_{opi}}} \quad (56)$$

이와 같은 보조변수를 사용하면 유효단면적 (52)식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_a &= \sigma_0 (g + r s) \\ &= \sigma_0 (g + r \sqrt{\frac{T}{T_0}} s_0) \end{aligned} \quad (57)$$

## 2) 열외중성자지수<sup>30)</sup>

앞서 언급한 바와 같이 중성자선원의 선질, 즉 열외중성자속에 관한 정보는 열외중성자지수에 포함되어 있으며 일반적으로 온도가 알려져 있지 않은 스펙트럼에 대해  $r \sqrt{T/T_0}$  를 구한다.

카드뮴비 (47)식은 Westcott 표현을 사용하고 보정계수를 무시하면 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$R_{cd} = \frac{(r \sqrt{\frac{T}{T_0}})^{-1} + \frac{s_0}{g}}{\frac{s_0}{g} + \frac{1}{K}} \quad (58)$$

여기에서  $(r \sqrt{T/T_0})^{-1}$ 는 주로 열중성자에 의한 기여를 나타내며, 카드뮴을 씌운 검출박의 방사화를 나타내는 분모의 경우 카드뮴을 투과한 열중성자에 의한 방사화를 고려하기 위해서는  $\chi_{th}^{cd} (r \sqrt{T/T_0})^{-1}$ 를 추가하여야 한다.

그리고  $s_0/g$ 는 공명흡수에 의한 기여를 나타내는 것으로

$$\begin{aligned}
\frac{S_0}{g} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\mu kT}^{\infty} \left( \frac{\sigma}{g\sigma_0} - \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right) \frac{dE}{E} \\
&= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_{cd}}^{E_{cd}} \left( \frac{\sigma}{g\sigma_0} - \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right) \frac{dE}{E} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_{cd}}^{\infty} \left( \frac{\sigma}{g\sigma_0} - \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right) \frac{dE}{E} \\
&= W + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_{cd}}^{\infty} \left( \frac{\sigma}{g\sigma_0} - \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right) \frac{dE}{E} \quad (59)
\end{aligned}$$

여기서 W는 검출박의 반응단면적 특성이 1/v성에서 벗어날때 에너지  $\mu kT$ 와  $E_{cd}$  사이의 영역에서 순수공명적분에 의한 방사화를 의미한다.

또한 K는 카드뮴의 한면으로 입사하는 열외중성자의 투과율로

$$K = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi E_{cd}}{E_0}} \quad (60)$$

한편 검출박의 두께에 따른 자기차폐계수  $G_{th}$ ,  $G_{epi}$ 를 고려하여야 하며 카드뮴을 씌운 경우 카드뮴 보정계수  $F_{cd}$ 도 고려되어야 한다. 따라서 이러한 모든 보정들을 고려하면 (58)식은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$R_{cd} = \frac{G_{th} \left( r \sqrt{\frac{T}{T_0}} \right)^{-1} + G_{epi} \frac{S_0}{g}}{\frac{G_{epi}}{F_{cd}} \frac{S_0}{g} + \frac{1}{K} - W + G_{th} X_{th}^{cd} \left( r \sqrt{\frac{T}{T_0}} \right)^{-1}} \quad (61)$$

이때  $W = G_{epi}W/F_{cd}$ 의 근사를 취하였다.

이제 (61)식의 카드뮴비로부터 열외중성자지수를 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$r \sqrt{\frac{T}{T_0}} = \frac{G_{th} (1 - X_{th}^{cd} R_{cd})}{\left( \frac{R_{cd}}{F_{cd}} - 1 \right) G_{epi} \frac{S_0}{g} + R_{cd} \left( \frac{1}{K} - W \right)} \quad (62)$$

한편 이러한 방법에 의해 열외중성자 평가를 하는데 필요한 Parameter들이 잘 알려져 있고, 그 공명위치가 관심영역내를 대표하는  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,

Table. 22. The Characteristics of Major Epithermal Probes.

	$^{115}\text{In}$	$^{197}\text{Au}$	$^{186}\text{W}$	$^{59}\text{Co}$	$^{55}\text{Mn}$
공명위치(eV)	1.456	4.91	18.8	132	337
$T_{1/2}$	54 min	2.69 d	24 h	5.28 y	2.58 h
반응단면적 ( $\sigma_0$ ; barn)	198±3 <sup>31)</sup> 202±2 <sup>33)</sup>	98.3±0.3 <sup>31)</sup> 98.65±0.09 <sup>33)</sup> 98.8±0.3 <sup>34)</sup>	34±7 <sup>28)</sup> 35.5±3 <sup>31)</sup> 37.9±0.6 <sup>34)</sup>	38.0±0.7 <sup>31), 32)</sup> 37.18±0.06 <sup>33)</sup> 38.0±0.5 <sup>35)</sup> 36.5±0.6 <sup>36)</sup>	13.2±0.12 <sup>8)</sup> 13.3±0.2 <sup>31), 33)</sup>
공명적분 (barn)	3620±100 <sup>30)</sup>	1550±28 <sup>32)</sup> 1558±60 <sup>37)</sup> 1533±40 <sup>39)</sup> 1553 <sup>43)</sup>	214±30 <sup>33)</sup> 374±30 <sup>38)</sup> 420±100 <sup>40)</sup>	75±5 <sup>17)</sup> 74±2 <sup>33)</sup> 73±4 <sup>38)</sup> 81±4 <sup>41)</sup> 72.3±5 <sup>45)</sup>	14.0±0.32 <sup>8)</sup> 15.6±0.62 <sup>8)</sup> 14.0±0.33 <sup>3)</sup> 13.7±0.53 <sup>8)</sup> 15.7±0.64 <sup>2)</sup> 14.2±0.64 <sup>6)</sup>
순수공명적분 (barn)	3600±350 <sup>46)</sup>	1513±60 <sup>37)</sup>	330±60 <sup>46)</sup>	38.2±0.74 <sup>6)</sup>	9.5±5 <sup>46)</sup>
Westcott 변수 g	1.027 <sup>38)</sup> 1.021 <sup>47)</sup> 1.019 <sup>48)</sup>	1.0051 <sup>33)</sup> 1.006 <sup>38)</sup> 1.0054 <sup>7), 48)</sup>	147).48)	1.0014 <sup>33)</sup> 147).48)	147).48)
$S_0$	17.6 <sup>38)</sup> 19.89 <sup>48)</sup> 18.84 <sup>9)</sup>	17.28 <sup>22)</sup> 15.33 <sup>36)</sup> 17.32 <sup>48)</sup>	10.3 <sup>38)</sup>	1.50 <sup>38)</sup> 1.99±0.13 <sup>41)</sup> 1.72±0.16 <sup>44)</sup> 1.64±0.13 <sup>45)</sup> 1.732 <sup>48)</sup> 1.52±0.17 <sup>50)</sup> 1.60±0.08 <sup>51)</sup>	0.60 <sup>38)</sup> 0.67 <sup>43)</sup>
Cd 보정(1mm) $1/K^{29)}$ $F_{cd}$	0.436 1.091 <sup>47)</sup> * 1.119 <sup>52)</sup> 1.097 <sup>53)</sup>	0.436 1.002 <sup>47)</sup> 1.042 <sup>52)</sup> 1.045 <sup>53)</sup> 1.02 <sup>54)</sup>	0.436 147)	0.436 1.042 <sup>51)</sup>	0.436 147)
W	0.245 <sup>30)</sup> ** 0.335 <sup>47)</sup>	0.027 <sup>30)</sup> 0.089 <sup>47)</sup>	0 <sup>47)</sup>		0 <sup>30)</sup> 0 <sup>47)</sup>

\* In the Ref. 47, the case of Cd thickness = 0.76 mm is considered.

\*\* In the Ref. 30, only is the first major resonance integral considered.

$^{186}\text{W}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ 을 선택하여 사용하고자 하며, 그 특성을 표22에 수록하였다. 또한 이와같이 각기 다른 공명위치를 갖는 검출박으로 얻어진 열외중성자지수를 상호비교함으로써 해당 중성자장에 있어서 열외중성자 스펙트럼의 1/E성을 조사할 수 있다.

#### 라. 중성자 온도

중성자선원의 스펙트럼 특성을 보고자할 때는 열외중성자 특성을 직접적인 열외중성자속 대신 열외중성자지수를 구해 나타내는 것처럼 열중성자 특성을 1차년도에 기술한 방법에 의한 열중성자속 측정과 달리 중성자온도로 나타내기도 한다. 중성자온도란 그 스펙트럼에서 맥스웰분포의 최빈값에 해당하는 온도를 말하는 것으로 열중성자 스펙트럼의 형태를 결정하며, 검출박의 반응단면적 특성은 이 온도와 함수관계를 지니고 있으므로 각 영역의 중성자속을 정밀하게 구하기 위해서는 이에 관하여 알아볼 필요가 있다.

이미 1차년도에 언급한 바와 같이 검출박의 반응단면적은  $1/v$ 성에 따라 변화율이 서로 다른 온도의존함수  $g(T)$ 에 비례하며 공명흡수에 있어서도 식 (54)에서 보인 것처럼  $s$ 가 온도의존함수이다. 이러한  $g(T)$  및  $s(T)$ 의 온도의존도는 다음과 같은 다항식으로 주어지며 각 계수  $a_i$ 는 Westcott에 의해 계산된 바 있다.<sup>48)</sup>

$$g(T) \text{ or } s(T) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (63)$$

$$x = 10^{-3} T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

한편 일반적으로  $s(T)$ 는 (57)식에서 보는 것처럼 온도에 무관한  $s_0$ 를 사용하고 대신 온도인자를 열외중성자지수에 포함하여 (62)식과 같이  $r \sqrt{T/T_0}$ 를 구한다.

1/v성 검출박의 방사화는 항상 선원의 스펙트럼에 무관하고 중성자밀도(n)에 비례하는 반면, 비1/v성 검출박의 방사화는 선원의 선속(nv)에 비례한다. 따라서 중성자온도를 구하기 위해서는 1/v성 검출박과 비1/v성 검출박의 상대적인 방사화율을 비교함으로써 평균속도를 결정하는 방법을 이용한다. 이때 1/v 검출박으로는  $^{55}\text{Mn}$ 이, 그리고 비1/v 검출박으로는  $^{176}\text{Lu}$ 이 주로 사용된다. 28)

이미 온도를 알고 있는 표준 스펙트럼과 온도를 알고자 하는 임의의 스펙트럼에서 각각  $^{176}\text{Lu}$ 과  $^{55}\text{Mn}$ 을 동시에 조사시켰을때 그 방사화율의 비는 다음과 같다. 55)

$$R_x = \frac{\dot{A}_x / \dot{A}_d}{A_x / A_d} = \frac{(A' / A)_x}{(A' / A)_d} = \frac{Y_x}{Y_d} \quad (64)$$

: primed ;  $^{177}\text{Lu}$   
 unprimed ;  $^{56}\text{Mn}$   
 d : 온도를 아는 표준 스펙트럼  
 x : 온도를 알고자하는 임의의 스펙트럼

$R_x$ 는 실험에 의해 산출되며  $Y_d$ 는 중성자온도를 알고 있으므로 계산될 수 있다. 따라서  $^{55}\text{Mn}$ 에 대해  $g(T)=1$ 인점을 감안하여 (64)식을 임의의 스펙트럼에서의 방사화율 비로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$Y_x = \frac{g'_x + (r \sqrt{T/T_0})_x S_0' G_{\text{epi}}}{1 + (r \sqrt{T/T_0})_x S_0 G_{\text{epi}}} = R_x Y_d \quad (65)$$

$$Y_d = \frac{g'_d + (r \sqrt{T/T_0})_d S_0' G_{\text{epi}}}{1 + (r \sqrt{T/T_0})_d S_0 G_{\text{epi}}}$$

따라서  $g'_x$ 에 (63)식의 다항식을 대입하고 반복법에 의해 온도 T를 결정할 수 있다.

한편 (65)식에서 각 검출박의  $S_0$  및  $G_{\text{epi}}$  값은 기존의 자료로부터 산출하기도 하지만 보다 정밀한 측정을 위해서는 In 등 그 값이 비교적 정확

히 알려진 검출박과의 방사화율을 비교하여  $s_0 G_{epi}$  값을 다음과 같이 구하여 사용하기도 한다.

$$s_0 G_{epi} = g \left[ \frac{Z}{Q} \frac{G_{th}''}{G_{th}} \left( \frac{s_0'' G_{epi}''}{g''} + \frac{1}{K} - W'' \right) - \left( \frac{1}{K} - W \right) \right] \quad (66)$$

$$Q = \frac{F R_{cd} - 1}{F'' R_{cd}'' - 1}$$

$$Z \cong 1 + W r \sqrt{T/T_0}$$

여기에서 Double Prime은  $^{115}\text{In}$ 에 대한 값을 나타내며, 이에 대해  $s_0 = 18.8 \pm 0.5$ 로 비교적 정확히 알려져 있다.<sup>49)</sup>

1차년도에 열중성자속측정법에 이어 당해년도에 열외중성자속측정법을 확립함으로써 실리콘내에 생성되는 Dopant의 양을 정밀하게 산출할 수 있도록 하였으며, 아울러 열외중성자지수 및 중성자온도 측정법을 확립하여 NTD 조사관내 중성자선질 특성을 기술할 수 있도록 하였다.

다음 3차년도에는 당해년도에 확립한 열외중성자 평가법에 대한 추가적인 자료를 수집하는 한편, Dopant 형성에는 거의 기여가 없는 반면에 실리콘결정 손상의 원인이 되는 속중성자속에 대한 평가법을 확립하고자 한다.

## 2. $\beta - \gamma$ 동시계수법에 의한 붕괴율 측정

### 가. $\beta - \gamma$ 동시계수 장치

3" x 3" NaI(Tl) 섬광계수기와 3" x 1/2" Plastic 섬광계수기를 이용한  $\beta - \gamma$  동시계수 장치는 88년도 보고서에서 기술한 구성을 완성하였다. (그림 33) 이들  $\beta, \gamma$  계수기는 자연방사능 계수를 줄이기 위하여 두께가 6 cm 이고 0.5 mm 두께의 동판을 부착한 내부용적 50 x 50 x 100 cm 의 Pb

차폐속에 수평으로 장치 하였으며, 중심부의 시료 위치에 대하여 0-15 cm 의 범위에서 거리를 조정할 수 있다.

전치증폭기는 전하민감형의 NE 5289B ( $T_r = 30\text{ns}$  at Zero Input Capacity, Decay time =  $50 \mu\text{s}$ ) 로서 PM 관에 직결 하였다.

TSCA(Canberra 2037A)는 Leading edge 와 Crossover 의 두 timing mode 가 가능하며 출력을  $0.1 \sim 11 \mu\text{sec}$  범위에서 delay 할수 있다. Universal Coincidence(ORTEC 418A) 는 5 입력 까지 동시 또는 반동시계수 할 수 있으며 그중 한 채널은 분해시간을 조절할 수 있도록 입력 펄스폭을  $100 \text{ns} - 2 \mu\text{s}$  범위에서 가변토록 되어 있다. 그림 34) 는  $^{198}\text{Au}$  선원에 의한  $\beta\text{-}\gamma$  신호에 대해서 TSCA 지연시간을 조정하여 얻은 delay curve 이다.

#### 나. 계측 특성

##### 1) 차폐 특성

그림 35) 및 36) 은 13 시간 계측한  $\beta$ , 및  $\gamma$  계수기의 자연 방사선 스펙트럼이다. 전자의 경우는 100 ch(0.5V) 파고 영역에서 급속히 감소하는 단순한 본포로서  $1 \text{cm}^3$  Plastic Scintillator 당 자연 계수율은 1.26 cpm 이다. 후자의 경우는  $^{40}\text{K}$  와 RaC 계열등 천연 방사선 이외에서 오는 현저한 Peak 는 없으며 NaI 결정  $1 \text{cm}^3$  당 자연 계수율은 1.96 cpm 이다.

##### 2) $\beta$ 채널

Plastic 섬광계수기의 분해능 함수는 Gauss 본포와 후방산란에 의한 연속분포가 추가된 다음과 같은 표현이 잘 이용된다. (56)

$$R(E, E') = \frac{1}{2} \frac{b}{E'} \operatorname{erfc}\left(\frac{E - E'}{\sigma \sqrt{2}}\right) + \frac{1 - b}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(E - E')^2}{\sigma^2}\right] \quad (67)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

$\sigma$  = Standard deviation of the Gaussian

$b$  = Fraction of electrons in the tail

$$b = \left[ 1 + (2\pi)^{1/2} \left(\frac{g}{\tau} - \frac{1}{2}\right) \frac{\sigma}{E'} \right]^{-1}$$

$g$  : Height of the peak

$\tau$  : Height of the backscattering

따라서  $^{113}\text{Sn}$  과 같은 EC 전자의 단일 에너지 선원을 이용하여 계수기의 분해능 함수 및 계수효율등의 검출특성을 조사할 수 있으나 시료준비의 어려움이 있어  $^{90}\text{Sr}$  에 의한 정성적인 계수특성을 조사 하였다. 그림 37) 은  $^{90}\text{Sr}$  표준선원에 의한 결과로서 a)는  $\beta + \gamma$ , b) 는 두께 1 mm Al 판을 검출기 전면부에 부착하여  $\beta$  입자를 차단한 것이다. c) 는 이들 두 측정결과와의 차이로서 대략  $\beta$  입자만에 의한 효과로 볼수 있다.  $^{90}\text{Sr}$  선원은 0.546 MeV ( $T_{1/2} = 28.1$  y) 이외에 2.284 MeV( $T_{1/2} = 64$  hr) 의  $\beta$  입자도 같은 비율로 방출 하며, Al 판에 의한 이들  $\beta$  선의 감쇠효과가 복잡하므로 c) 로부터 검출효율을 구할수 없었다.

그림 38)에서 a) 는  $^{198}\text{Au}$  박 (12mm  $\phi$ , 0.025mm t) 에 대한 측정결과로 선원과 검출기간의 거리는 1 cm 이다. b) 는 두께 1.5 mm Al 판으로 0.971 MeV  $\beta$  입자를 차단함으로써 얻은  $\gamma$  선에 의한 반응을, c) 는 a)-b) 로부터

얻은, 즉  $\beta$  입자만에 의한 반응을 보인 것이다.  $\beta$  선 계수기의  $\gamma$  선 반응은  $\beta$ - $\gamma$  동시계수에 의한 절대붕괴율 측정에서 중요한 뜻을 갖는다.  $^{198}\text{Au}$  선원 붕괴율과 b) 방법으로 얻은  $\gamma$  선 반응으로부터 구한 Plastic 섬광계수기의  $\gamma$  선 검출효율은  $\epsilon_{\beta\gamma} = 4.0\%$  이었다. 같은 방법으로 그림 39) 의 a) 는  $^{60}\text{Co}$  선원(12mm  $\phi$ , 0.127mm t) 의  $\beta + \gamma$  반응이며, c) 는 0.317 MeV  $\beta$  입자선을 1.5 mm Al 판으로 차단하고 측정한  $\gamma$  반응율 뺀 0.317 MeV  $\beta$  선만의 반응이다.

### 3) $\gamma$ 채널

NaI(Tl) 계수기의 계측특성, 즉 에너지-파고 선형성, 분해능 및 계수효율 등은  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{137}\text{Cs}$   $^{22}\text{Na}$  선원과 2048 Channel MCA 를 이용하여 조사하였으며 그림 40) 과 41) 은  $^{60}\text{Co}$  및  $^{198}\text{Au}$  에 대한 스펙트럼을 예로 보인 것이다. NaI(Tl) 계수기의 에너지 분해능(반치폭:  $\Gamma$ )은  $\Gamma = a E^b$  또는  $1/\Gamma^2 = \alpha + \beta/E$  의 관계식이 자주 이용된다. 위에 언급한 4 개 선원에서 얻은 6 개 Photo Peak 에 대해서 앞의 관계식을 fitting 하여 이용할때  $\Gamma$  (KeV) = 72.0 E(MeV)  $^{0.65}$  를 얻었다.  $^{137}\text{Cs}$  662KeV Peak 에 대해서 8.3% 의 분해능을 갖으며 보통급에 해당한다. [A급: 6.5% 이내; B급 6.5~9%]

$^{22}\text{Na}$  및  $^{60}\text{Co}$  표준선원을 이용해서 10 cm 거리에서 측정한 검출효율은 각각 0.49%와 0.41% 로서, 예를 들어 Heath(57)에 의한 전효율( $\epsilon_T$ ) 및 Peak total ratio(P) 와 SUS Housing(560 mg/cm $^2$ ) 에 대한 감소효과를 고려한 예상보다 15 ~ 25% 낮은 값이었다.

다.  $\beta - \gamma$  동시계수의 효율외삽에 의한 절대붕괴율 측정

1차년도에 검토한  $\beta - \gamma$  동시계수의 효율외삽법에 의하면  $\beta$ ,  $\gamma$  및 동시계수 계수율  $N\beta$ ,  $N\gamma$ ,  $N_c$ 로부터 다음과 같은 관계식을 이용하여 붕괴율  $N_0$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c} = N_0 \left[ 1 + (1 - K) \frac{1 - N_c/N_{\gamma}}{N_c/N_{\gamma}} \right] \quad (68)$$

에서  $K$ 는 선원의 붕괴형식, 검출효율 및 내부전환 등에 복잡하게 의존 하는 보정 인자이나, 효율외삽시 Fitting 하는 1차 함수의 기울기로 기여하므로 이들 검출효율 및 붕괴형식 등에 대한 개별적인 보정 없이도 붕괴율을 얻을 수 있는 것이 특징이다.

시판되고 있는 대부분의 표준선원은 여러가지 재료의 Holder에 내장 되어 있기 때문에  $\beta - \gamma$  동시계수 선원으로서는 적합하지 않다.  $^{198}\text{Au}$  및  $^{60}\text{Co}$ 는 열중성자속 측정에 대표적으로 이용되는 선원이며, 붕괴형식도 비교적 간단하여  $^{198}\text{Au}$  경우는 0.961 MeV  $\beta_2$  분기율이 98.6%, 또  $^{60}\text{Co}$ 의 경우는 0.318 MeV  $\beta_1$  분기율이 98.6%로 거의 단일 선원으로 볼 수 있으므로 효율외삽법에 편리하다. 따라서 TRIGA-III 원자로 기송조사공에서 직접 방사화한 이들 시료를 이용하여 효율 외삽법을 시도중에 있으며 아래에 그 중간 결과를 간단히 기술한다.

각 채널의 계수치에 불감시간, 우연동시계수 및 Background를 보정하여 얻은 변수  $N_c/N_\gamma$  를 이용하여 식 ( 68 )에서  $x$ 와  $y$ 를 각각

$$x = \frac{1 - N_c/N_\gamma}{N_c/N_\gamma}, \quad y = \frac{N_\gamma N_\beta}{N_c}$$

으로 놓고  $y = a_0 + a_1x$  로 최소자승 Fitting 하고 또  $\chi^2$  Test 를 통하여 Fitting 함수와 Data point 의 차이  $S$  를 구함으로서 봉괴율과 그 오차를 평가 하였다.

이 과정에서  $\gamma$  채널은 우연동시계수 등의 효과를 줄이기 위해서 Timing SCA의 에너지 Window ( $E_0+AE$ )를 0.311 ~ 0.442 MeV로 열어서 0.412 MeV Photo Peak 만을 계수하였다. 그리고 위에서 언급한 바와같이 식 ( 68 )에서 각종 보정인자가 1차 함수의 Fitting 과정에 포함 된다고 하였으나, 그 중에서도 특히  $\beta$  검출기에 의한  $\gamma$  계수는 가능한 적게하여  $\epsilon \beta \ll 1$  되게하는 것이 바람직하다. 따라서  $\beta$  채널의 Discriminator level조절에 의한 외삽변수  $N_c/N_\gamma \sim \epsilon\beta$  는 그림 38)에서  $\gamma$  검출이 없는 영역에 한정 하였다.

그림 42) 와 43) 은 Cd-covered 및 Bared Au 검출박에 대한 효율외삽 결과를 보인 것이다. 이 방법의 측정정도를 알기 위해서 현재 한국표준연구소의  $4\pi \beta(PPC)-\gamma$  동시계수장치를 이용한 측정을 의뢰 중에 있다. 그리고 그림 44) 는 측정정도를 간접적으로나마 조사하기 위해서 같은 방법으로 구한 두 Au 검출박의 Decay 이며, 이로부터 결정된 평균 반감기는

$T_{1/2} = 2.654$  d 로서 공인 값  $2.696$  d 와 1.5% 이내에서 일치하였다.

그림 45) 는  $^{60}\text{Co}$  에 대한 결과이다.  $\gamma$  채널은 1.1773 MeV 및 1.333MeV Photo Peak 만을 계수하였다. 그러나  $\beta_{\text{max}} = 0.31779$  MeV 에 비해서  $\gamma$  선 에너지가 월등히 큰  $^{60}\text{Co}$  의 경우는 그림 39) 에서 알 수 있듯이  $\beta$  검출만의 영역 분리가 불가능 하였다.

서두에서 언급한 바와같이 Plastic 섬광 검출기는  $4\pi\text{PPC}$   $\beta$  검출기에 비해서 측정절차의 간편성 때문에 많은 시료를 취급하는 경우에는 편리하다는 이유에서 선택하였다. 그러나  $\gamma$  선에 대한 반응이 크고 특히,  $^{60}\text{Co}$  경우에 볼 수 있듯이  $\epsilon\beta$  를 변화해 가는 과정에서 수반되는  $\epsilon\beta\gamma$  의 영향 등에 대해서는 많은 검토가 필요하며 앞으로 연구되어야 할 과제 이다.

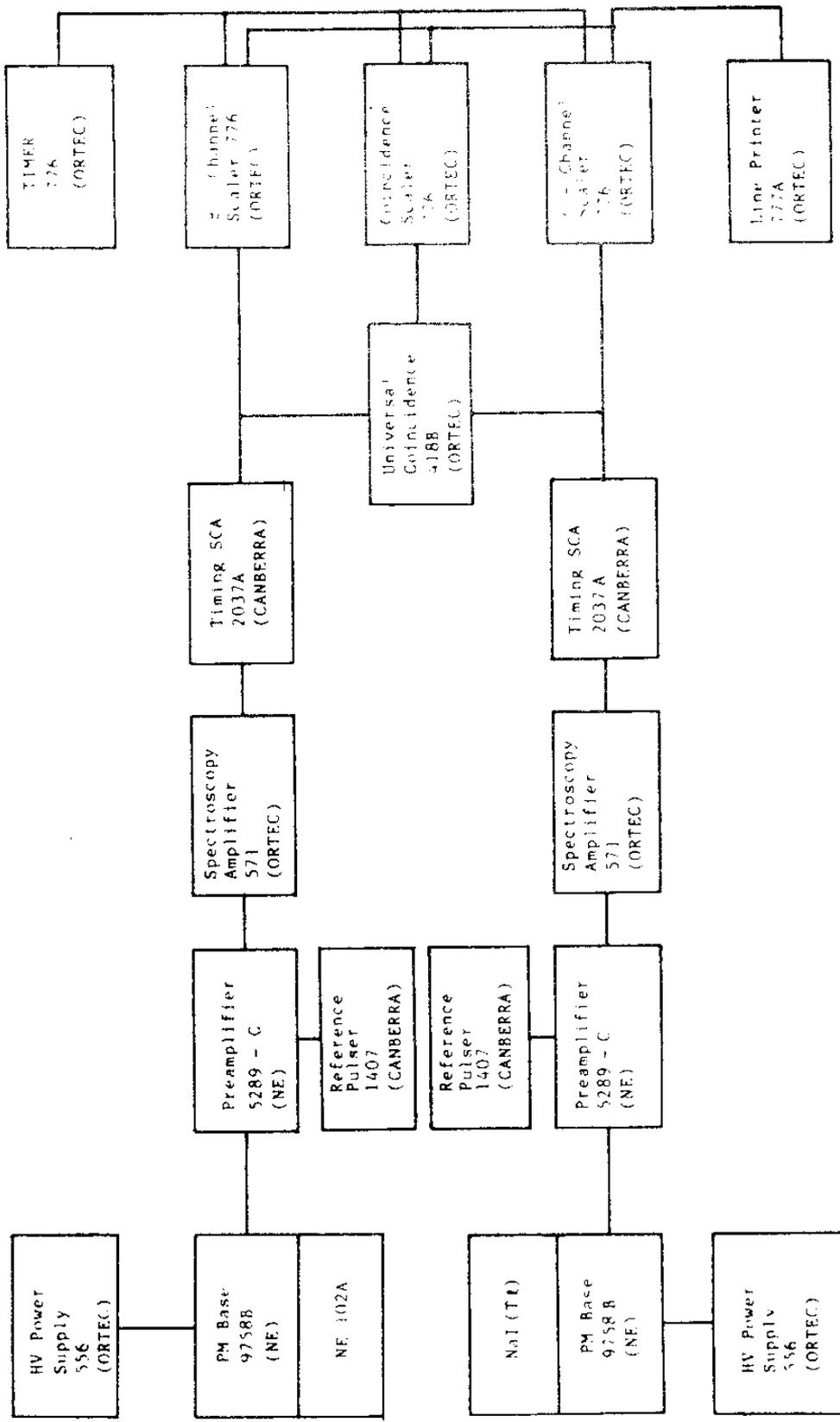


Fig. 33. Block diagram of the  $\beta$ - $\gamma$  coincidence system.

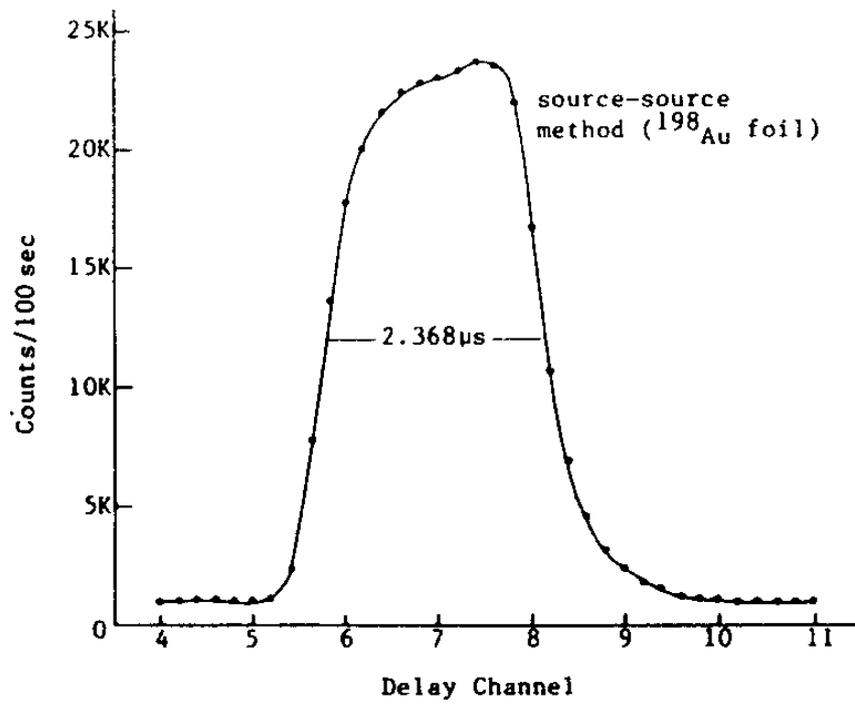


Fig. 34. The resolving time curve of coincidence mixer.

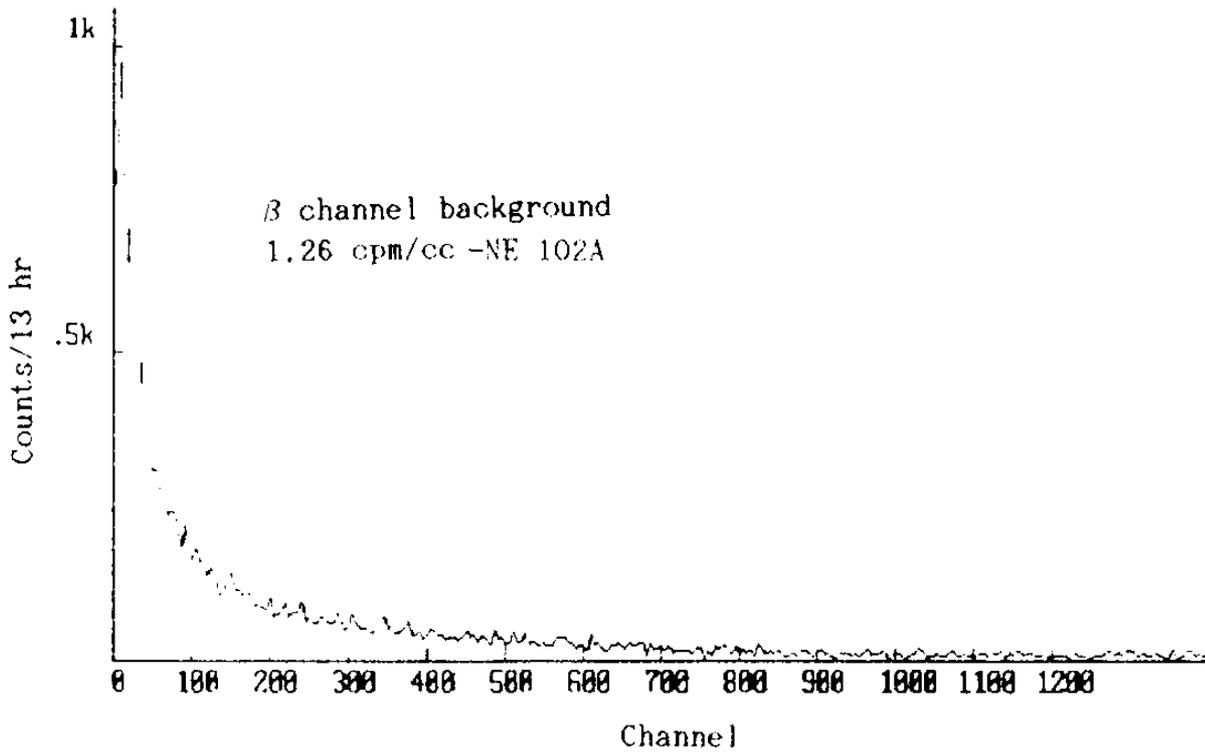


Fig. 35. The background of NE 102A plastic scintillator.

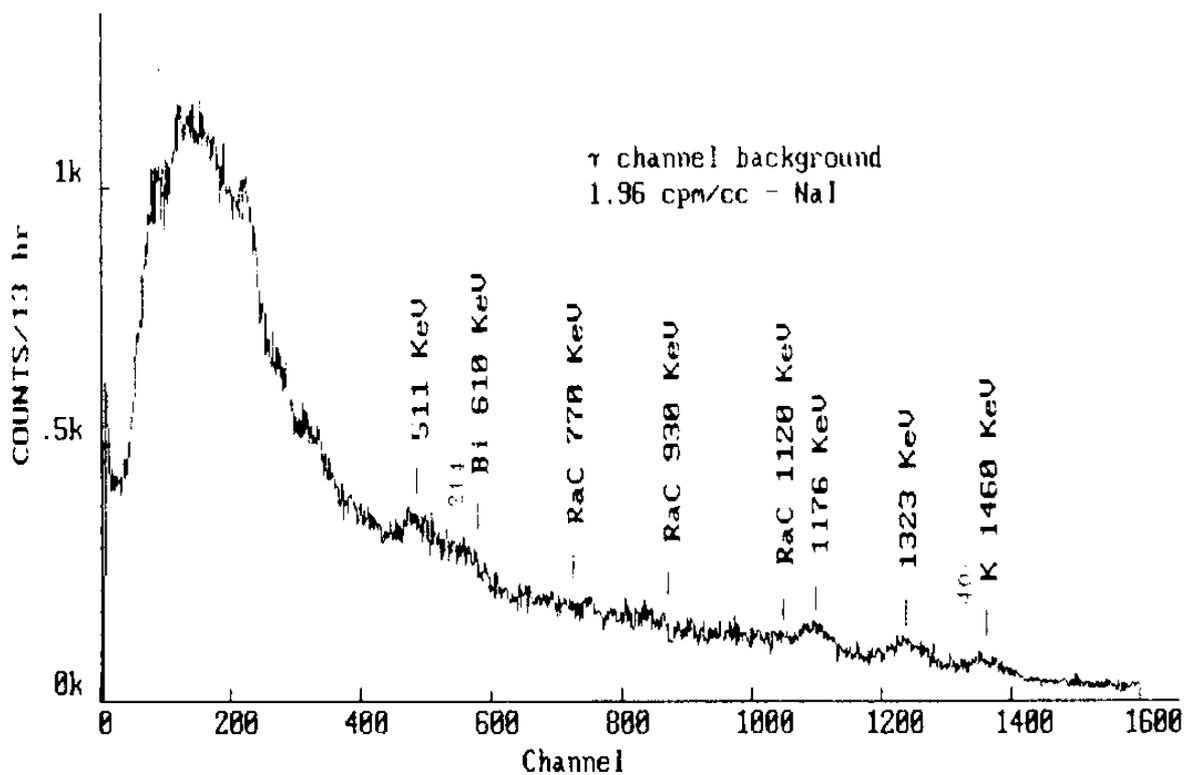


Fig. 36. The background of NaI(Tl) scintillator

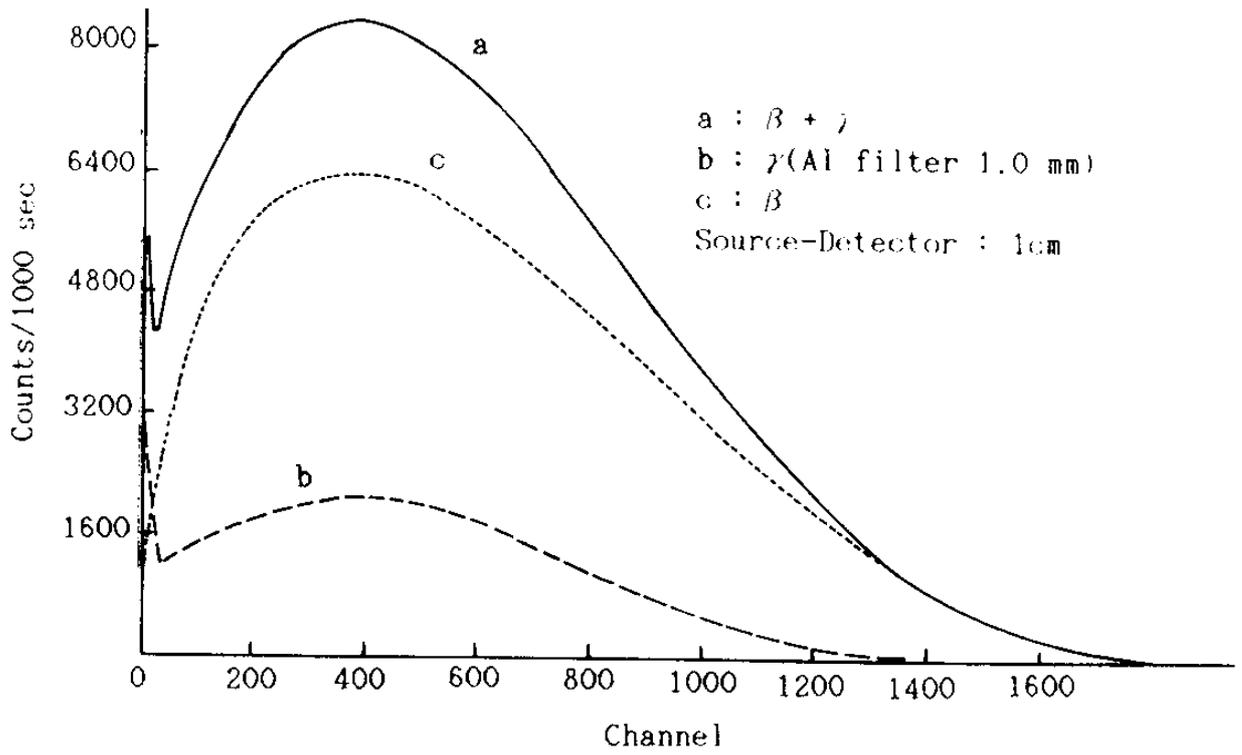


Fig.37. The  $\beta$ ,  $\gamma$  response of NE102A plastic scintillator for  $^{90}\text{Sr}$  standard source.

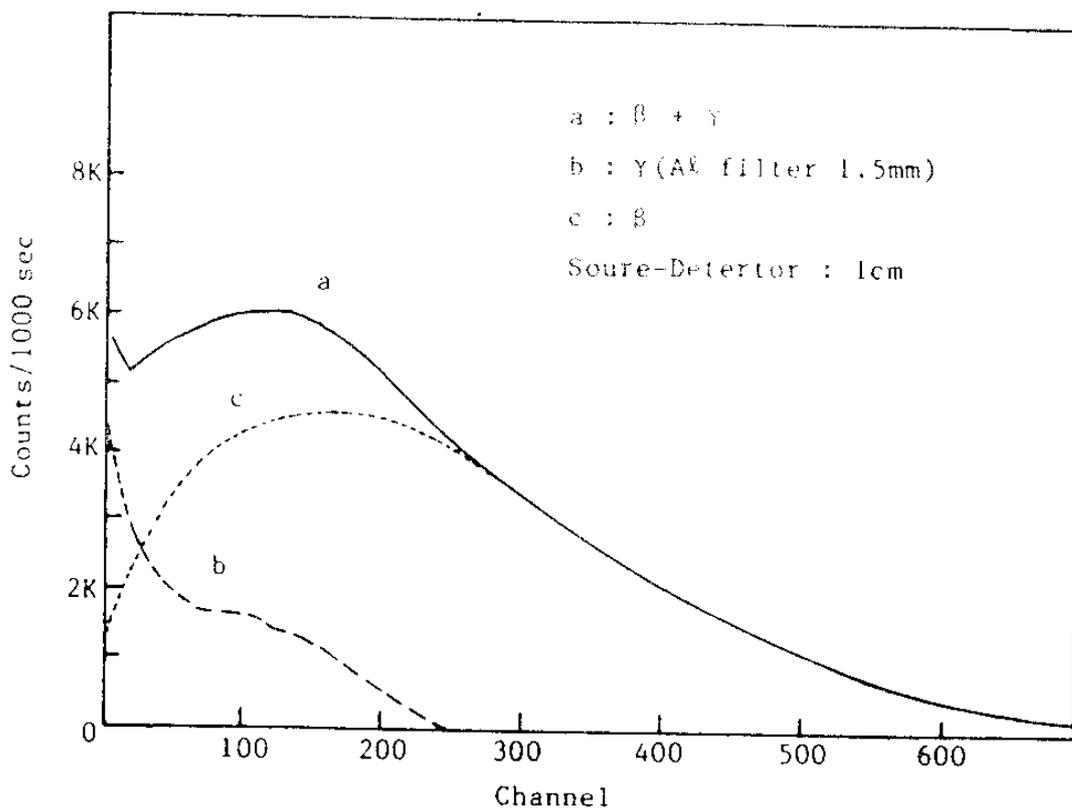


Fig. 38. The  $\beta, \gamma$  response of NE 102A plastic scintillator for  $^{198}\text{Au}$  foil.

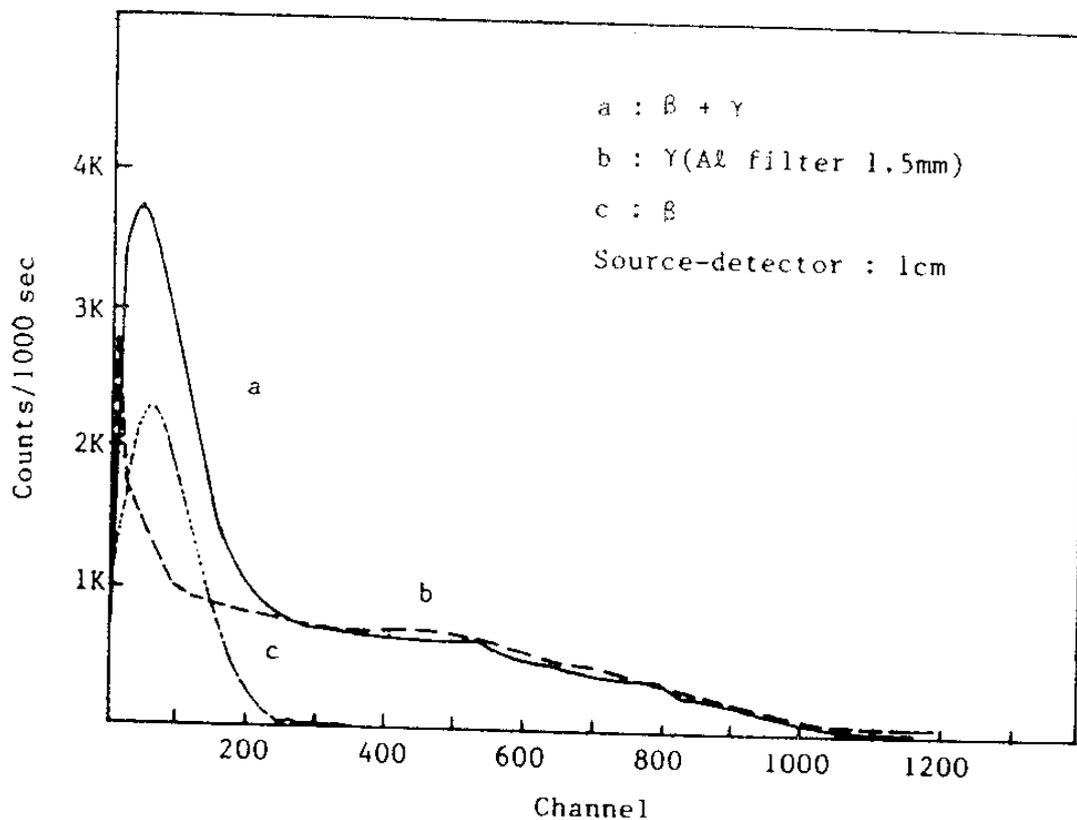


Fig. 39. The  $\beta, \gamma$  response of NE 102A plastic scintillator for  $^{60}\text{Co}$  foil.

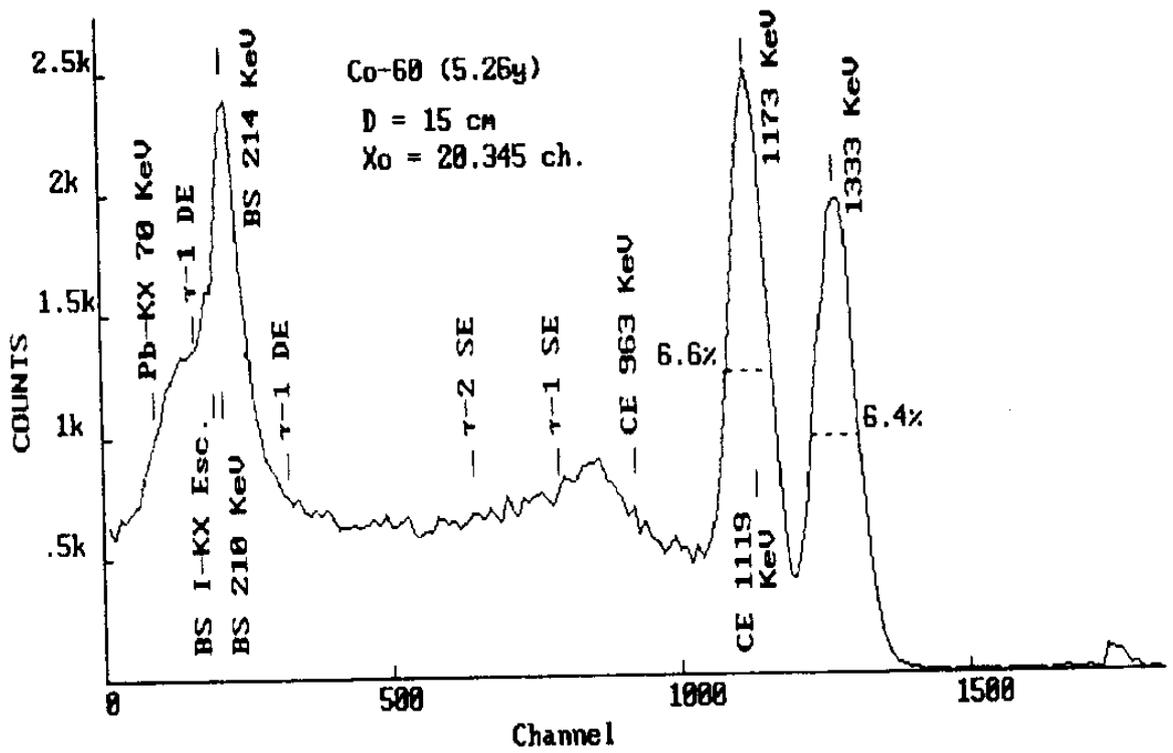


Fig. 40. The  $\gamma$  spectrum of NaI(Tl) for Co-60

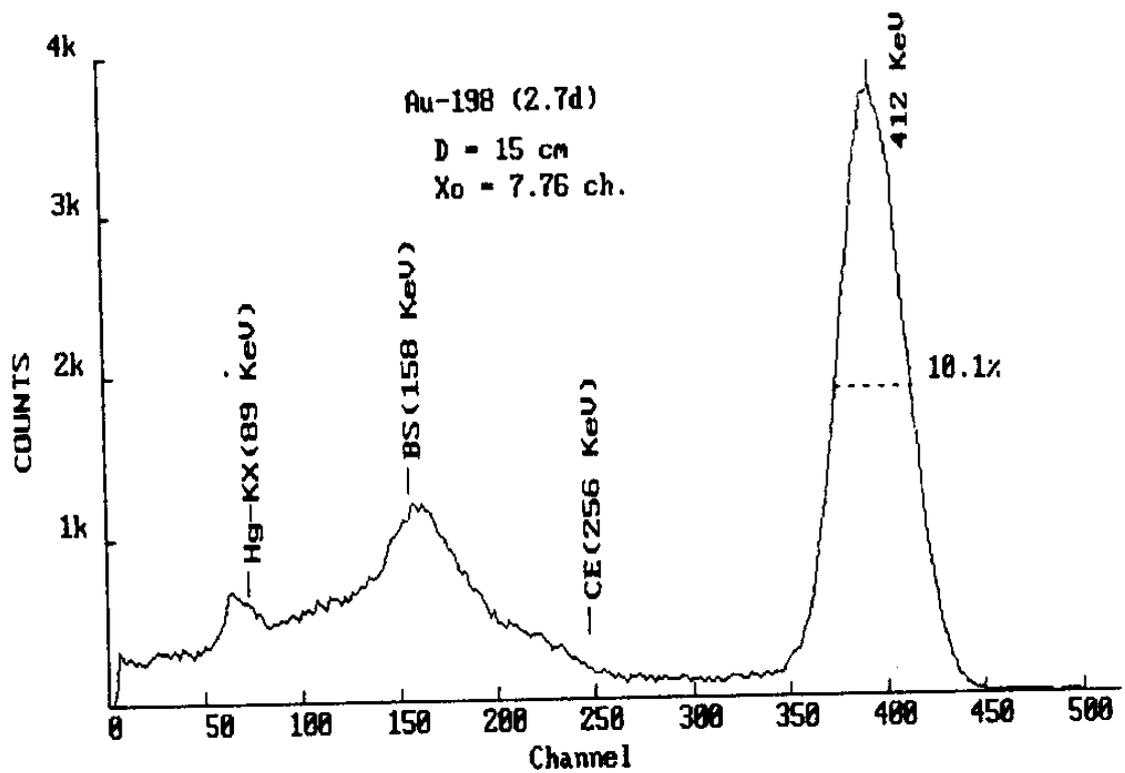


Fig. 41. The  $\gamma$  spectrum of NaI(Tl) for Au-198

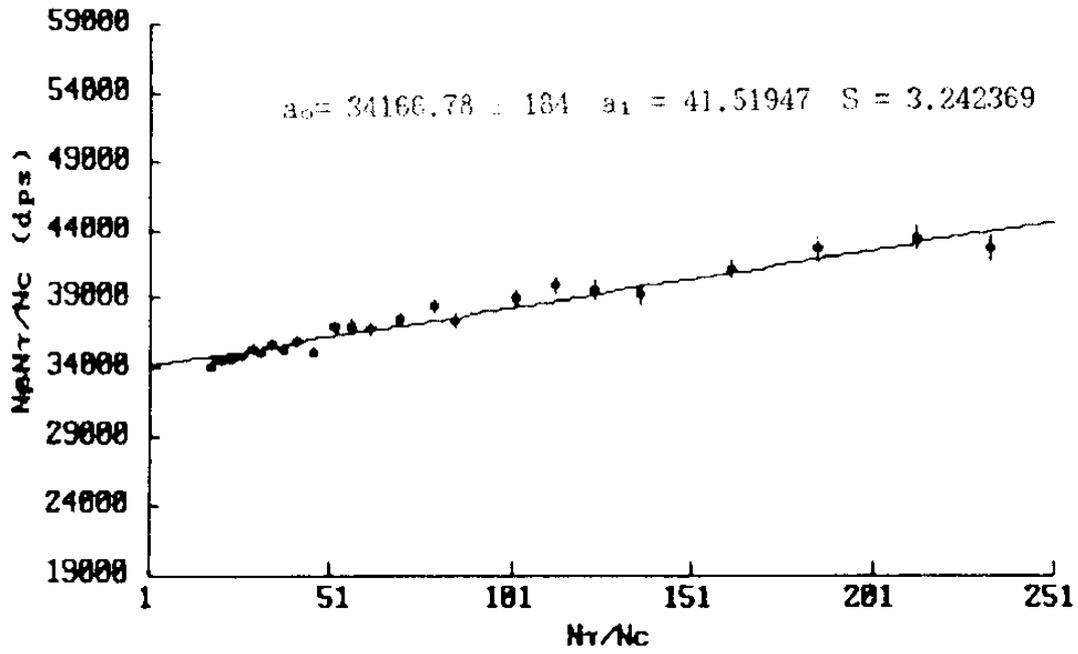


Fig. 42. Efficiency function for cadmium-covered  $^{198}\text{Au}$  foil.

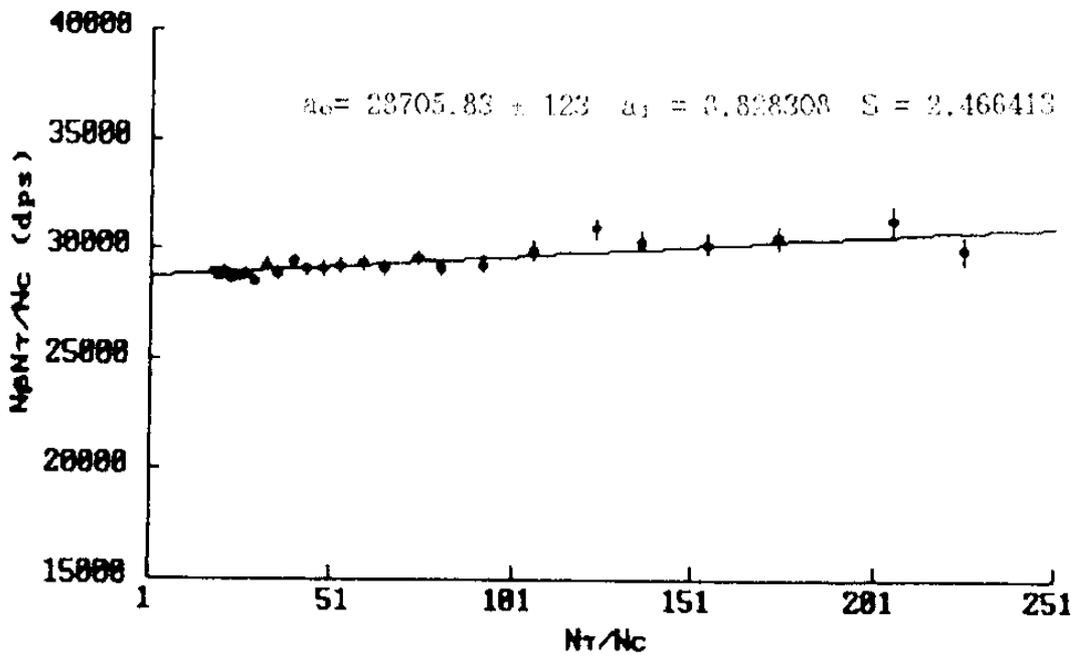


Fig. 43. Efficiency function for bared  $^{198}\text{Au}$  foil.

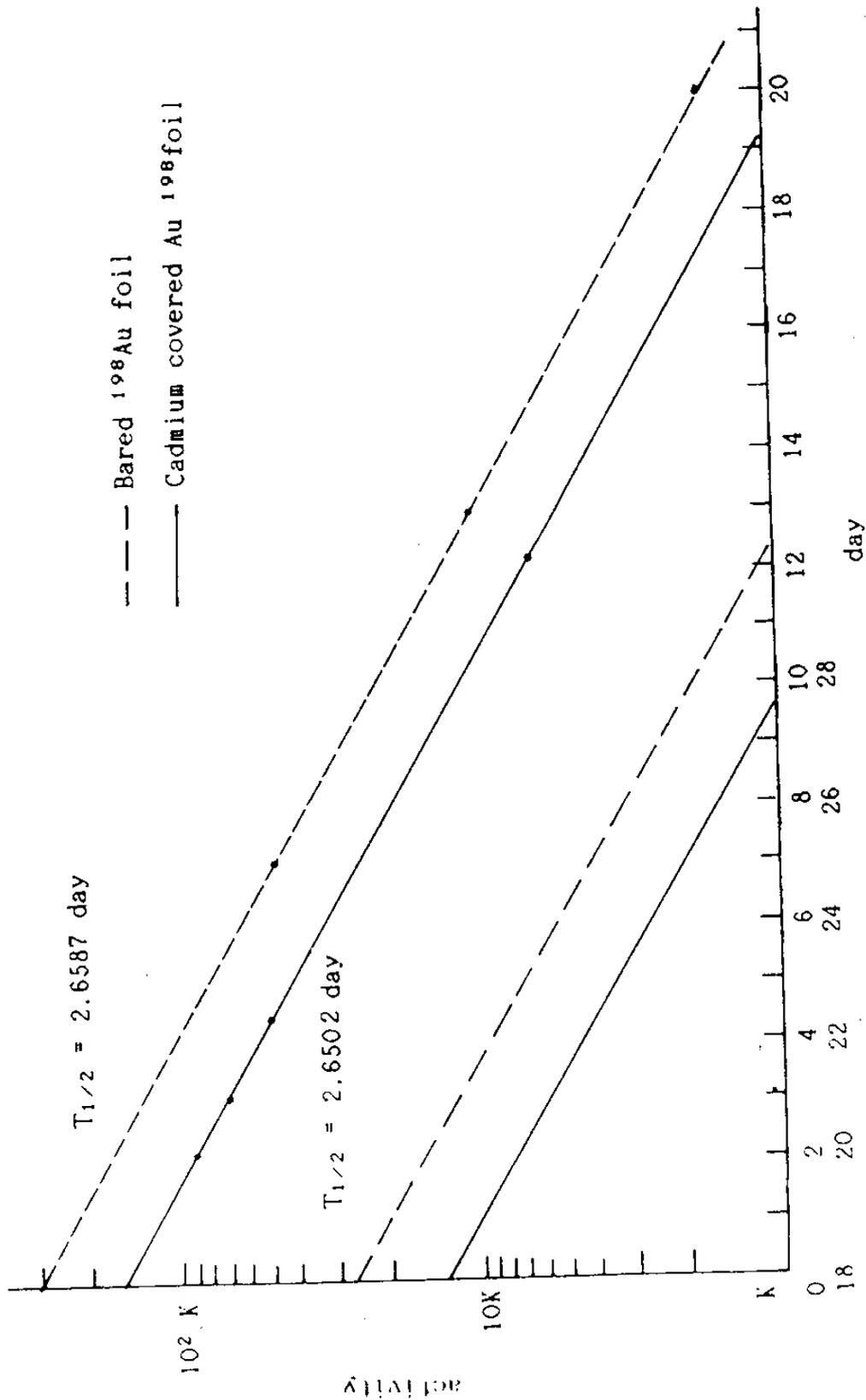


Fig 44. The evaluation of stability for  $\beta - \gamma$  coincidence counting system.

$a_0 = 11854.19 \pm 298$   $a_1 = 109.2185$   $S = 1.562866$

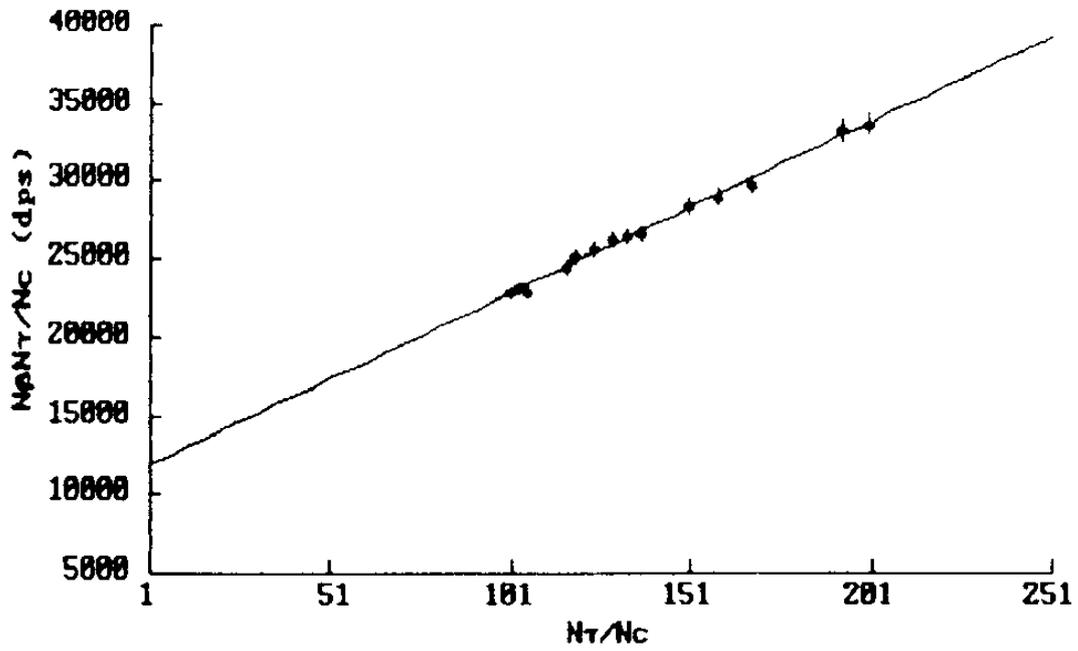


Fig. 45. Efficiency function for bared  $^{60}\text{Co}$  sample.

## 제 3 장 결론 및 건의사항

한국원자력연구소에서 1992년 말에 완공하여, 1993년 중반부터 정상운전할 계획으로 30MW 다목적연구로(KMMR)를 건조중에 있다. 이 원자로 중수반사체내에 준비되어 있는 NTD-1/2 조사관을 이용하여 중성자변환법에 의한 반도체 Silicon 도핑, 즉 NTD-Si 를 생산하기 위한 기술개발의 제 2 차 년도의 연구를 수행하였다. 1 차년도의 중요기술에 대한 방향설정 및 기본방침 검토에 이어서 수행한 당해년도의 연구내용은 NTD 기술개발을 위한 기초준비 및 기계구동/전자제어장치 설계등으로

1. KMMR NTD-1/2 조사공 핵 특성
2. NTD-1/2 조사관 설계
3. NTD 조사장치 설계
4. 중성자선질 평가법 연구

등에 대하여 얻은 중간 결과를 기술한다.

1. KMMR NTD-1,-2 조사공 핵특성

가. NTD-1 조사관내 중심 위치 에서의 노물리 계산에서 얻은 5근 중성자속 으로부터 열 및 열외중성자속 밀도분포를 추산하였다.

$$d\phi_{th} \cong 4.26 \times 10^{13} E(eV)/(kT)^2 e^{-E/kT} dE$$

$$d\phi_{epi} \cong 3.60 \times 10^{10} /E(eV) dE$$

열중성자 및 열외중성자에 의한  $^{31}\text{P}$ -Dopant 생성비율은  $[^{31}\text{P}] \cong 1.78 \phi_{epi}/\phi_{th}$ 로 추산되며, 열외중성자에 의한  $^{31}\text{P}$ -Dopant 생성율은 열중성자의 약 0.15% 이다.

나. 조사내관 및 Si Ingot에 의한 전 Reactivity Loss 는 약 -0.5 mk 로 추산되며, 이로 인한 Control Margin 등 원자로 운전에 대한 영향은 무시될 수 있다.

다. 또한 Si Ingot를 조사내관에 장전/인출시 출력분포의 변화에 의한 RRS Trip 을 유도하므로 그 최대속도는 37cm/sec 를 넘지 않아야 한다.

라. 1D-ANISN 코드로 계산한 NTD 조사관에서의 평균 Nuclear Heating은 57.23 KW 이고, 이중 약 28.4 % 가 Si Ingot 에서 발생되며, Ti 흡수막에서 9.4%, Al 조사내관에서 43.5%, 나머지는 Zircaloy 조사관에서 발생한다. 따라서, 이들 Nuclear Heating 을 제열하여 Si Ingot를 적정온도 이하로 유지하기 위한 냉각법이 강구되어야 한다.

## 2. NTD 1/2 조사관 설계

## 가. 조사내관설계

- 정위치법에 의한 균일조사를 위해서 중성자속 축분포 평탄화를 위한 흡수막과 4개 SPND를 설치한 조사내관을 각 NTD 1/2 조사관에 설치한다.

흡수막은  $\delta\phi = (\phi_{\max} - \phi_{\min}) / \phi_{\text{av}}$  를 극소화 하기 위한 Ni, Ti 또는 SUS막의 층상구조로서 그 적정설계법을 개발중에 있다.

원자로 제어봉 위치에 따른 두 축분포 즉,  $\phi_{1/4}$  와  $\phi_{\text{no}}$  에 대한 평균축분포,  $\phi_{\text{av}}(Z)$  를 구하고, 길이 50 cm 5 겹 흡수막의 적정구조를 구한 다음 40 cm Si Ingot 를 조사하는 경우, 흡수막의 재료에 관계없이 도달할 수 있는 균일도는 다음과 같다.

(1) 흡수막 및 Si Ingot 의 중심 위치를 조사 당시의 흡수막 설치 전 축분포 중심에 이동하는 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 5\%$  이내로 매우 우수한 균일도를 얻을 수 있다.

(2) 흡수막의 위치는 평균 축분포 중심위치에 고정하고, Si Ingot를 조사 당시의 흡수막 설치 전 축분포 중심에 이동하는 경우는  $\delta\phi(40\text{cm-Si}) \sim 10\%$  이다.

그러나 KMRR 각 핵연료 주기 기간의 실제 축분포 변화에 대한 것은 현재로서 알 수 없으며, Si Ingot 자체에 의한 중성자속 분포 변화도 수반되므로 흡수막 상세설계 및 조사 균일도 예측은 KMRR 정상 가동후 축분포 측정 및 예비실험을 통해서 수행할 예정이다.

## 나. KMRR NTD 1/2 조사관 설계 변경

조사내관 설치의 용이성 및 장전용구와의 상호작용 등을 고려하여  
NTD 1/2조사내관의 상부 Flange 및 관뚜껑 등 일부 구조의 설계변경

#### 다. 조사내관의 설치/고체용 기구 기본설계

##### 라. 중성자조사량 실시간 감시

각 조사내관에 설치된 2x4개 SPND 출력 nvt Computer로 감시  
하므로써 중성자총조사량, 중성자속의 수직분포변동, Burn-Up 에 대한  
검출감도 보정등을 전담한다. 이 장치는 A/D Converter 등 일부  
기초실험을 거쳐서 설계를 완성한후 구동장치의 전자제어장치의 일부로서  
제작을 외주 중에 있다.

### 3. NTD 조사장치 설계

#### 가. 기계구동장치

Link Chain을 이용한 Si Ingot의 승강운동과 회전운동을 독립적으로  
구동할 수 있도록 하며, Stepping Motor와 Absolute Position Encoder (12-  
bit 분해능)를 연동한 승강운동계를 IBM/PC를 이용하여 정밀한 위치/속도  
제어를 하므로써 다양한 기능의 균일조사구동을 가능하게한다. 이 장치는  
여러가지 안전장치로 설계를 보완한 후 현재 시제품 제작을 의뢰중에  
있다.

#### 나. 전자제어장치

기계구동부의 제어장치로서 산업용 Computer와 PLC로 구성되며, nvt

PC와의 통신으로 정위치법, 정속이동법을 자동으로 수행한다. 또, 계기반의 Switch 또는 PC를 이용한 대화식으로 각 행정별 구동의 Manual Mode도 가능하다. 위치/속도제어 등 기초실험을 거쳐서 이 장치는 현재 제작을 의뢰중에 있으며, 앞으로 제어의 편의성 및 안전성을 높이기 위한 Software를 개발할 예정이다.

다. 조사방법의 기본계획은 조사완료된 매 Si Ingot를 ~5m 수심에서 SF Pool 로 옮겨서 냉각하는 방법이었다.

. KMRR 건조사업단에서는 원자로 상부를 Pool Cover로 닫아두고 제한된 시간만 이것을 열 수 있게 한다는 기본방침을 검토중이다. 따라서 Si Ingot를 직접 Pool Cover 위에 설치된 구동장치를 통해서 인출하는 경우 Si Ingot+Al 용기 의 방사능을 검토하였다. 그 결과에 의하면 Si Ingot의 평균상승속도를 25cm/min로 가정할때 Pool 수면에서 Si-31 및 Mn-55, Na-24 등에 의한 방사능은 ~1000Ci로서 전혀 방사선 차폐기능이 없는 Pool Cover의 경우는 RPS 및 작업자의 안전준위를 유지하기 위해서는 각 조사장치마다 ~6ton 의 Shield Tube 와 ~6ton의 차폐용기가 필요하게 되며, 중량부하가 큰 Pool Cover가 필요하게 된다

.따라서 ~5m 수심의 인근 Reactor Pool Liner에 Ingot 중간 저장용 Rack를 준비하여 조사된 Ingot를 차례로 저장해 두었다가 매일 지정시간에 SF Pool로 일괄해서 옮겨가는 방법을 KMRR 건조단과 협의중에 있다.

#### 4. 중성자선질 평가법 연구

가. 1 차년도에의 검출박법에 의한 열중성자속 측정법 연구에 이어서, 열외 중성자속을 측정하기 위하여 서로 다른 Resonance Energy 를 갖는  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{59}\text{Co}$ , 등의 검출박을 이용한 Epithermal Index 결정 및 열외중성자 스펙트럼의  $1/E$  분포로부터의 편차 추정에 관한 연구를 진행 중이다.

나.  $75\text{mm}\phi \times 75 \text{ mm NaI(Tl)}$  검출기와  $75\text{mm}\phi \times 12 \text{ mm NE 102A Plastic Scintillator}$  검출기를 이용한  $\beta\text{-}\gamma$  동시계수 장치 조립/제작을 완료하고, 장치의 계측 특성 시험을 수행 하였다.

다. 방사화된 검출박의 절대붕괴율을 정밀하게 측정하기 위하여 검출효율 외삽 보정법등 동시계수법에 대한 제반 해석 연구를 진행중에 있다.

## 참 고 문 헌

1. H. J. Kim et al., "The Development of Silicon Doping Technique by Neutron Transmutation", KAERI/RR-797/88, KAERI (1989).
2. J. M. Meese and S. L. Gunn, "Factors Affecting Phosphorus Production Rate in NTD Silicon", in NEUTRON-TRANSMUTATION-DOPED SILICON, J. Guldberg ed., Plenum Press, New York (1981).
3. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 67th edition, ed. by R. C. Weast (1986).
4. H. C. Schweiner, J. Appl. Phys. 30, 1125 (1959).
5. M. Tanenbaum and A. D. Mills, J. Electrochem. Soc. 108, 171 (1961).
6. J. Messier, Y. le Coroller, J. M. Flores, I.E.E.E. Trans. Nuc. Sci. NS-11, 276 (1964).
7. H.A. Kharchenko and S. P. Solov'ev, Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorgan. Mat. 7, 2137 (1971).
8. H. A. Herman and H. Herzer, J. Electrochem. Soc. 122, 1568 (1975).
9. W. E. Hass and M. S. Schnoller, J. Electronic Mat. 5, 57 (1956).
10. H.M. Janus and O. Malmros, I.E.E.E. Trans. Electron Devices ED-23, 297 (1976).
11. H. Herzer, Semiconductor Silicon 1977, ed. by H. R. Huff and E. Sirtl, Electrochem. Soc. Proc. vol. 77-2 (Electrochem. Soc., Princeton, N.J., 1977), p106.
12. F. Beniere and V.K. Agrawal, J. de Physique Lett. 39, L-257 (1978).

13. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 58th edition, ed. by R. C. Weast (1977).
14. H. R. Kim, "Neutron Transmutation Doping Hole", Memo. DA-89-035.
15. B. G. Kim, "Effective of Irradiation Material at Site of NTD", Memo. DA-89-039.
16. K. H. Lee, "Kinetics of NTD Si Ingot Insertion", Memo. DA-89-037.
17. J. D. Kim, et al, "Nuclear Data Evaluation and Group Constant Generation for Reactor Analysis", KEARI/RR-750/88 (1988)
18. O. K. Oh, "Review of NTD Si Production Facility in Operation and Safety Aspects", Speedy Memo. (1989. 10. 19)
19. M. A. Abdow and C. W. Maynard, Nuclear Science and Engineering, 56, 360 - 380 (1975)
20. M. A. Abdow, et al, ORNL-TM-3994 (1973)
21. B. C. Lee, "Nuclear Heating and Activation in NTD-1", Memo. DA-89-044
22. Studsvik, Production Certificate, NO. 89-111
23. Studsvik, DC Amplifier 4695 A (1985.3.29)
24. Kant, J. Paul Cali, and Harriet D. Thompson, "Determination of Impurities in Silicon by Neutron Activation Analysis", Anal. Chem. 28, 1867-1871 (1956).
25. 방사선차폐, 한국원자력연구소, 1980.
26. Neutron and Gamma-ray Flux-to Dose Rate Factors, American National Standard, ANSI/ANS-6.11-1977.
27. J. H. Hubbell, "Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients,

- and Energy Absorption Coefficients from 10keV to 100 GeV", NSRDS-NBS 29 C (1969).
28. K. H. Beckurts and K. Wirtz, Neutron Physics, Springer-Verlag, New York, 1964.
  29. C. H. Westcott, W. H. Walker and T. K. Alexander, "Effective Cross Sections and Cadmium Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors", Proc. 2nd Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy 16, 70-76 (1958).
  30. W. H. Walker, C. H. Westcott, and T. K. Alexander, "Measurement of Radiative Capture Resonance Integrals in a Reactor Spectrum, and the Thermal Cross Section of Pu-240", Can. J. of Phys. 38, 57-77 (1960).
  31. D. J. Hughes and J. A. Harvey, Neutron Cross Sections, BNL-325 (1955).
  32. H. Rose, W. A. Cooper and R. B. Tattersal, Proc. 2nd Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy 16, 34 (1958).
  33. S. F. Mughabghab et al., Neutron Cross Section, Part A (1981)
  34. F. T. Gould, T. I. Taylor, W. W. Havens, Jr., B. M. Rustad, and E. Melkonian, "Long Wavelength Crystal Spectrometer and the Neutron Absorption Cross Sections of Gold and Boron", Nucl. Sci. and Eng. 8, 453-466 (1960).
  35. G. Wolf, Nukleonik 2, 255 (1960).
  36. J. W. Meadows and J. F. Whalen, Nucl. Sci. and Eng. 9, 132 (1961).
  37. R. L. Macklin and M. S. Pomerance, "Resonance Capture Integrals",

- Progr. in Nuclear Energy, Series I, 179 (1956).
38. B. Fastrup and J. Olsen, "Measurement of the Thermal and the Epithermal Neutron Flux in the Reactor DR 1", Riso Report No. 43, (1962).
  39. K. Jirlow and E. Johansson, "The Resonance Integral of Gold", J. Nucl. Energy Part A 11, 101-107 (1960).
  40. J. J. Scoville, E. Fast and D. W Knight, "Resonance Absorption Integrals of Dysprosium and Tungsten", Trans. Am. Nucl. Soc. 5, No. 2, 377 (1962).
  41. F. Feiner and L. J. Esch, KAPL-2000-12, 1.37 (1960).
  42. F. Feiner, "Resonance Integrals of Manganese, Hafnium, and Niobium", KAPL-2000-16 (1961).
  43. R. A. Benett, "Effective Resonance Integrals of Cu and Au", HW-63576 (1960).
  44. F. J. Johnston, J. Halperin and R. W. Stoughton, "The Thermal Neutron Absorption Cross-Section of  $^{233}\text{Th}$  and the Resonance Integrals of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Th}$  and  $^{59}\text{Co}$ ", J. Nucl. Energy, Part A 11, 95-100 (1960).
  45. R. Dahlberg, K. Jirlow and E. Johnson, J. Nucl. Energy Part A/B 14, 53 (1961).
  46. R. B. Tattersall, H. Rose, S. K. Pattenden and D. Jowitt, "Pile Oscillator Measurements of Resonance Absorption Integrals", J. Nucl. Part A 12, 32-46 (1960).
  47. C. B. Bigham, R. E. Green and A. Okazaki, "Slowing-Down Spectra in

- ZFEP, ZED-2 and PTR", Nucl. Sci. and Eng. 21, 295-303 (1965).
48. C. W. Westcott, "Effective Cross Section Values for Well-Moderated Thermal Reactor Spectra", AECL-1101, (1960).
  49. B. G. Childley, R. B. Turner and C. B. Bigham, "Neutron Temperatures in a CANDU-Type Power Reactor", Nucl. Sci. and Eng. 16, 39-67 (1963).
  50. A. P. Jain, R. E. Chrien, J. A. Moore and H. Palevsky, Nucl Sci and Eng. 17, 319 (1963).
  51. T. A. Eastwood and E. Matyas and D. J. Hnatowich, Can. J. Phys. 41, 1519 (1963).
  52. J. E. Powell and J. V. Walker, "A Determination of the Cadmium Absorption of Resonance Neutrons in Cadmium-Covered Indium Foils", Nucl. Sci. and Eng. 20, 476-480 (1964).
  53. J. E. Powell and C.L. Beck, "Cadmium Correction Factors for Iodine, Indium, and Gold Foils", Nucl. Sci. and Eng. 25, 198-206 (1966).
  54. D. H. Martin, "Correction Factors for Cd-Covered-Foil Measurements", Nucleonics 13, No. 3, 52-53 (1955).
  55. C. B. Bigham, R. B. Turner and B. G. Chidley, "Neutron Temperature Distribution in a Cylinder of Hot Moderator, Nucl. Sci. and Eng. 16, 85-100 (1963).
  56. Tsoufandis, N., Wehring, B. W., and Wyman, M. E., Nucl. Instr. Meth. 73, 98 (1969).
  57. R. L. Heath, "Scintillation Spectrometry, Gamma-Ray Spectrum Catalogue", USAEC Report IDG-16880-1 (1964).

주 의

1. 이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구 개발 사업의 연구 보고서이다.
2. 이 연구 개발 내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술처에서 시행한 특정연구 개발사업의 연구결과임을 밝혀야 한다.

중성자변환법에 의한 실리콘  
도핑 기술 개발

1990年 6月 15日 印刷

1990年 6月 30日 發行

發行人 韓 弼 淳

發行處 韓國 原子力 研究所

大田直轄市 儒城區 德津洞 150

印刷所 新 友 社

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회