

碩士學位論文

하나로에서의 NTD 실현을 위한  
조사장치의 최적화 설계



濟州大學校 大學院

에너지工學科

宋 楹 棟

2002年 2月

하나로에서의 NTD 실현을 위한  
조사장치의 최적화 설계

指導教授 李 憲 周

宋 楹 棟

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



宋楹棟의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 朴 在 雨 印

委 員 金 信 印

委 員 金 學 魯 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

# A Study of optimal design for Neutron Transmutation Doping in HANARO

Young-Dong Song

(Supervised by professor Heon-Ju Lee)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF  
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY  
ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2001. 12

# 목 차

LIST OF TABLES .....	iii
LIST OF FIGURES .....	iv
SUMMARY .....	vi
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. 실리콘 단결정 제조 방법 .....	3
1.1 Floating Zone Growth .....	3
1.2 Czochralski Growth .....	4
2. Neutron Transmutation Doping 원리 .....	5
2.1 표적핵 및 생성핵의 감손 효과 .....	8
2.2 열중성자 및 속 중성자에 의한 기여 .....	8
2.2.1 열 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성 .....	9
2.2.2 열외 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성 .....	10
2.2.3 속 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성 .....	10
2.3 포획 단면적 등 관련 실험 정수의 정밀도 .....	10
3. Neutron Transmutation Doping 특징 .....	11
4. 균일 조사 방법 .....	13

III. 중성자속 평탄화를 위한 예비분석 .....	15
1. 하나로에서 중성자 균일 조사 방법 .....	16
2. MCNP 계산과 실험 비교 .....	16
3. 하나로에서 중성자 스크린 설계 개념 .....	20
4. NTD 조사 장치의 특징 .....	22
IV. 중성자 스크린 최적화를 위한 분석 .....	23
1. 실리콘 단결정 양단 끝에 공기 및 흑연을 설치하는 경우 .....	23
2. 중성자 스크린의 내벽 두께에 따른 축방향 중성자속 변화(1) .....	26
3. 중성자 스크린의 내벽 두께에 따른 축방향 중성자속 변화(2) .....	33
4. 중성자 스크린의 이중 구조 및 양면 가공 .....	38
V. 결과 및 고찰 .....	43
1. 최적화된 중성자 스크린 모델 .....	43
2. 제어봉 위치별 최적화 위치 .....	50
VI. 결    론 .....	55
참 고 문 헌 .....	57



# LIST OF TABLES

Table 1 Nuclear reactions in natural silicon .....	6
Table 2 Flux characterizations of models .....	49
Table 3 Uniformity of axial thermal neutron flux in Si-ingot .....	52



# LIST OF FIGURES

Fig. 1 Growth way of single crystal by using the floating zone method	4
Fig. 2 Growth way of single crystal by using the Czochralski method	5
Fig. 3 Neutron absorption cross-section in natural silicon	7
Fig. 4 MCNP model of the 1st NTD test facility	17
Fig. 5 Thermal neutron reaction rate in the 1st NTD test facility	18
Fig. 6 MCNP model of the 2nd NTD test facility	19
Fig. 7 Thermal neutron reaction rate in the 2nd test NTD facility	20
Fig. 8 Absolute thermal neutron flux distribution in the Al disc vs. the change of Al thickness	22
Fig. 9 MODEL 4.1.1 (graphite + air)	24
Fig. 10 MODEL 4.1.2 (graphite only)	25
Fig. 11 Relative thermal neutron flux distribution in Al-disc	26
Fig. 12 MODEL 4.2.1 (reference case)	28
Fig. 13 MODEL 4.2.2	29
Fig. 14 MODEL 4.2.3	30
Fig. 15 MODEL 4.2.4	31
Fig. 16 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot	32
Fig. 17 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot	32
Fig. 18 MODEL 4.3.1	34
Fig. 19 MODEL 4.3.2	35
Fig. 20 MODEL 4.3.3	36
Fig. 21 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot	37
Fig. 22 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot	37
Fig. 23 MODEL 4.4.1	39

Fig. 24 MODEL 4.4.2 .....	40
Fig. 25 MODEL 4.4.3 .....	41
Fig. 26 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot .....	42
Fig. 27 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot .....	42
Fig. 28 Final model of neutron screen in NTD-irradiator .....	44
Fig. 29 Whole assembly of optimal NTD-irradiator .....	45
Fig. 30 Cross sectional view of NTD-irradiator .....	46
Fig. 31 Detail views of NTD-irradiator .....	47
Fig. 32 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot .....	48
Fig. 33 Uniformity of axial neutron flux distribution within $\pm 1.5\%$ .....	48
Fig. 34 Variation of $\delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / \Phi_{ave}$ vs. MCNP models .....	50
Fig. 35 Variation of $\Phi_{ave} / \Phi_{\max}$ vs. MCNP models .....	50
Fig. 36 Variation of axial flux (maximum, minimum, average flux) in Si-ingot .....	51
Fig. 37 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot according to control rod positions .....	53
Fig. 38 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot according to control rod positions .....	53
Fig. 39 Thermal neutron flux distribution as Si-ingot moves .....	54
Fig. 40 Thermal neutron flux distribution flattened below $\pm 1.5\%$ by adjusting the position of Si-ingot .....	54

## SUMMARY

The Neutron Transmutation Doping (NTD) is a production technique of the semi-conductors using a nuclear reaction between isotopes and thermal neutrons. The interest in NTD stems from two of its advantages over the conventional metallurgical methods of impurity incorporation. The first advantage is high-precision doping, because the concentration of impurities introduced at a constant neutron flux is proportional to irradiation time, which can be controlled with a high accuracy. The second advantage is the high homogeneity of dopant distribution, which is determined by a random isotope distribution, small neutron capture cross section, and the uniformity of the neutron flux.

HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor) with the maximum available thermal neutron flux of  $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{-sec}$  is a unique research reactor in the world and has two NTD irradiation holes. To produce the NTD-Si in 2002, KAERI has been setting up the irradiation facility for NTD. The optimization analyses have been conducted to finalize the irradiator design to produce the high quality NTD-Si grown by floating zone.

The device that flats the axial neutron flux distribution in silicon ingot is very important in NTD process because the neutron screen is the sole method to achieve the uniform irradiation. The high quality NTD-Si must meet the requirement that the axial and the radial uniformity should be less than  $\pm 5\%$  and  $\pm 1.7\%$ , respectively.

In this thesis, the optimal methods for uniform irradiation at silicon ingot in NTD hole are studied. The MCNP4B was used to simulate the neutron screen. The results show that the optimized neutron screen is sure to satisfy the requirements. The uniformity of the axial neutron flux distribution is below  $\pm 1.5\%$  and also the best vertical location of the silicon ingot during irradiation

was analyzed because the critical control rod position greatly affects the axial flux distribution.



# I. 서 론

현재 반도체소재 중 가장 널리 사용되고 있는 소재는 실리콘(silicon)이다. 실리콘 단결정을 성장시키는 방법으로 Czochralski(CZ) 법과 floating zone(FZ)법이 널리 사용되고 있는데, Czochralski 법은 dopant의 도핑 분포의 균일도가 떨어지고 비저항이 높다는 단점이 있다. 반면, FZ법은 비저항이 낮고 CZ에 비해 dopant의 도핑 균일도가 우수하다. 하지만 FZ-Si의 경우, 이온주입법이나 열확산법을 통한 결정화 과정 중 고상과 용융액상과의 계면 사이에서의 온도차에 의한 열 대류가 생기게 되고 이로 인한, 열적 불균일성이 나타나게 된다. 이런 이유 때문에 FZ-Si는 dopant의 원자 밀도가 균일치 못하게 되어 표면에 striation이 나타나게 된다. 따라서, 대전류용 소자의 전기적 특성 및 생산 수율에 여러 가지 제한을 받아 왔는데, 이 문제를 중성자 변환법에 의한 도핑 방법(NTD ; Neutron Transmutation Doping)으로 해결할 수 있다.

한국원자력연구소의 연구용 원자로인 하나로(HANARO)는 출력이 30MW인 다목적 연구로다. 하나로는 NTD를 목적으로 하는 두 개의 조사공 NTD-1, NTD-2가 설치되어 있다. 이 두 조사공의 직경은 각각 22.0cm, 18.0cm이고 8", 6" 단결정 조사를 목적으로 하고 있다. 특히 NTD 조사공은 노심에서 멀리 떨어진 중수 반사체 탱크에 위치하기 때문에 열중성자에 대한 고속중성자의 비율이 1/400 이하에 불과하고 감마선의 비율도 낮아 고속중성자와 감마선에 의한 단결정의 손상을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

현재 하나로 NTD-2 조사공에서 2002년부터 NTD-Si 생산을 목적으로 NTD 조사 장치를 개발하고 있다. 이 장치는 단결정을 넣을 조사통과 슬리브, 플로터(Floater)로 구성하고 이 중 조사통은 외벽을 가공하여 중성자 스크린의 역할도 겸하도록 개념 설정하였다. 이미 NTD-Si를 생산하고 있는 외국의 원자로에서의 균일조사 방법 및 중성자 스크린에 대한 세부 내용이 거의 알려져 있지 않고 각국의 원자로 특성 및 중성자장의 특성에 따라 독자적으로 개발되어졌다. NTD-Si의 품질은 균일한 조사에 의해 결정되기 때문에 하나로에 적합한 중성자 스크린을 개발하는 것은 고품질의 NTD-Si 생산을 위해서 필수 조건이다.

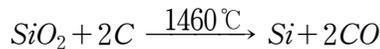
본 연구의 목적은 NTD-Si의 고 품질 요건을 만족시키기 위해 NTD-2 조사공에서 5인치 실리콘 단결정 조사시 단결정내에서 중성자속이 높은 균일도를 유지할 수 있도록 중성자속 평탄화장치 즉, 중성자 스크린을 설계하는 것이다. 조사시간은 dopant의 비저항 및 균일도에 많은 영향을 주기 때문에 조사되는 중성자속은 높을수록 유리하다. 그러므로 중성자 스크린은 조사되는 중성자속이 최대한 높은 상태에서 평탄화가 이루어져야 한다. 또한 설계시, 조사 후 스크린으로 인한 폐기물 발생 및 NTD 조사로 인한 원자로내의 영향을 최소화할 수 있는 방안도 고려되어야 하며, 제어봉 위치에 따라 노심 조건이 달라지기 때문에 제어봉 위치에 따른 단결정 조사의 최적 위치도 분석하여야 한다. 이를 위해서, NTD-2 조사공에서 모의 단결정을 이용하여 조건별 중성자속을 분석하여 분석 도구로서의 MCNP 적절성을 3절에 밝혔다. 그리고 4절에는 각기 다른 중성자 스크린의 모델을 통해 점진적으로 중성자속의 평탄화를 개선해 나가면서 설계한 최적의 중성자 스크린 모델을 도출하였다. 앞 절들의 분석을 바탕으로 최적화된 중성자 스크린의 중성자속 평탄화 및 제어봉 위치별 최적화된 중성자 분포를 5절에서 고찰하였다.



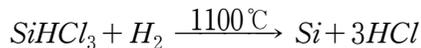
## II. 이론적 배경

### 1. 실리콘 단결정 제조 방법

웨이퍼(wafer)의 제작을 위해 우선 단결정 실리콘 ingot을 만들어야 하며 이 실리콘 ingot을 자르고 다듬는 공정을 거쳐 웨이퍼를 제작하게 된다. 실리콘 ingot의 원료는 석영암(quartzite)이라 불리는 순수한 모래( $SiO_2$ )이며, 이것을 탄소와 함께 노(furnace)에서 가열하면 다음과 같은 반응을 일으킨다.



위 과정에서 약 98%의 순도를 갖는 실리콘 ingot이 만들어지고 이것을 분쇄하고,  $HCl$ 로 처리하면  $SiHCl_3$ 이 생성된다. 이  $SiHCl_3$ 를 증류하여 dopant을 제거하면 고순도의 다결정 재료인 EGS (electronic grade poly-Si)를 만들 수 있다.



다결정 재료인 EGS를 단결정 재료로 만들기 위한 방법에는 대표적으로 CZ법과 FZ법을 사용한다[황호정,1999].

#### 1.1 Floating Zone Growth

그림 1에 FZ법을 간략히 나타냈었다. 그림 1에서 밑쪽에 seed를 갖고 있는 실리콘 다결정 막대가 수직으로 놓여 회전한다. 이 실리콘 다결정 막대는 비 활성화가스를 흘려주는 석영관 안에 있다. 동작 중에는 실리콘 결정이 작은 대역의 고주파 가열기로 용융되고, 이 고주파 가열기는 부유대역(floating zone)의 막대를 가로질러 지나가도록 종결정에서 윗 방향으로 이동한다. 이때 유도 가열에 사용되는 주파수는 보통 3~

4MHz이다[황호정,1999.]. 용융 실리콘은 용액 면과 고체 실리콘 면 사이에서 표면 장력에 의하여 유지된다. 부유대역이 위로 움직일 때 단결정 실리콘은 부유대역의 끝에서 냉각되어 종결정 위에 성장한다.

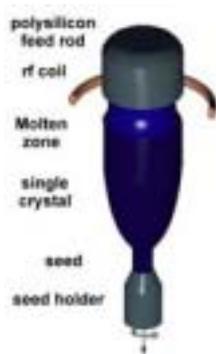
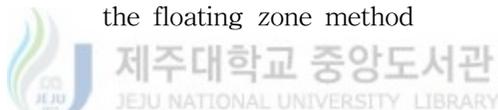


Fig. 1 Growth way of single crystal by using the floating zone method



## 1.2 Czochralski Growth

1950년대 초에 Teal이 개발한 CZ법은 단결정 실리콘을 만드는 가장 대표적인 방법이다. 그림 2는 CZ법에 의해 단결정이 성장하고 있는 모습을 나타낸다. 다결정 실리콘을 노(furnace)에 넣고 실리콘의 용점(1421℃)이상으로 가열하여 실리콘을 녹인 후, 원하는 방향의 single crystal seed를 매달고 녹아 있는 실리콘 액의 표면에 접촉시킨다. 온도의 분포를 균일하게 하기 위해 Seed와 도가니를 천천히 서로 반대 방향으로 회전시키면서 끌어올리면 냉각이 진행됨에 따라 큰 단결정이 얻어진다. 하지만 높은 성장 온도로 인하여 석영 노가 천천히 침식당하여  $SiO_2$ 가 녹아 들어가게 되며, 동시에 B, P 및 다른 금속들의 dopant이 섞여들게 되어 dopant의 불순물의 원자밀도가 높다. 또한 산소가 석영 도가니로부터 빠져나와  $10^{17} - 10^{18} n/cm^3$ 의 산소와 단결정에 함께 존재하게 되는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해서 최근에는 swimming crucible Czochralski (부상도가니)방법과 LEC(liquid encapsulated Czochralski)방법이 사용되기도 한다[황호정, 1999.].

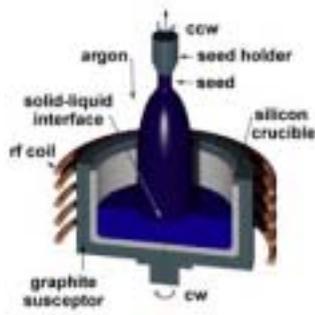


Fig. 2 Growth way of single crystal by using the Czochralski method

## 2. Neutron Transmutation Doping 원리



반도체는 전도체와 부도체의 중간정도의 저항률을 가지는 물질을 지칭한다. 그리고 반도체는 dopant가 거의 없는 진성반도체(intrinsic semiconductor)와 불순물반도체(또는 외인성 반도체; extrinsic semiconductor)로 나뉜다. 불순물반도체는 다시 첨가하는 dopant의 종류에 따라 n(negative)형과 p(positive)형 반도체로 나뉘게 된다. dopant로서 5가 원소인 P, As, Sb 등이 들어가면 자유전자가 도너(donor)로서 작용하게 되어 n형 반도체가 되고, 3가 원소인 B, Al, Ga, In 등의 dopant는 억셉터(accepter)를 형성하면서 p형 반도체가 된다.

dopant를 첨가하면 그와 같은 수의 전자나 억셉터를 첨가하는 것과 동일한 효과를 나타내므로 진성반도체와는 다른 저항 변화가 생긴다. 반도체내의 전기 전도도 ( $\sigma \text{ cm}^{-1}$ )는 식 (1)과 같다.

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu \quad (1)$$

여기에서,

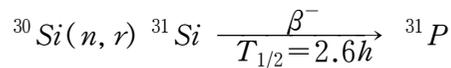
$e$ : 전자의 전하량 ( $C$ ),

$n$ : 원자밀도 ( $n/cm^3$ ),

$\mu$ : mobility. ( $cm^2/V \cdot sec$ ).

그리고 저항률  $\rho$ 는  $1/\sigma$ 와 같다.

NTD는 열중성자의 핵반응을 이용한 도핑방법으로 실리콘에 조사 할 경우 P원자가 dopant원자로 생성되면서 n형 반도체가 되다.



$^{30}\text{Si}$  은 (n, $\gamma$ ) 반응에 의해  $^{31}\text{Si}$  로 변환되고 베타붕괴를 거쳐 dopant  $^{31}\text{P}$ 을 생성하게 된다.  $^{30}\text{Si}$  은 천연 실리콘 중에서 3.1% 존재비를 갖고 있으며 천연 실리콘 내의 각 동위원소의 핵반응은 다음과 같다.

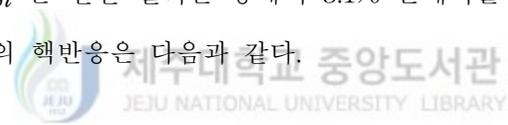


Table 1 Nuclear reactions in natural silicon

Natural abundance	Reaction type	Cross-section at 0.025eV
92.30%	$^{28}\text{Si}(n, \gamma) \rightarrow ^{29}\text{Si}$	$\sigma=0.086$ barn
4.70%	$^{29}\text{Si}(n, \gamma) \rightarrow ^{30}\text{Si}$	$\sigma=0.280$ barn
3.10%	$^{30}\text{Si}(n, \gamma) \rightarrow ^{31}\text{Si}$	$\sigma=0.118$ barn

이중 직접적으로 도핑에 관계되는 동위원소는  $^{30}\text{Si}$  이며,  $^{28}\text{Si}$  과  $^{29}\text{Si}$  는 단지  $^{31}\text{Si}$  의 자연 존재비의 변화를 가져올 뿐이다. 식 (2)에 의해서 원자로에서  $^{30}\text{Si}$  이 열중성자와 반응하여  $^{31}\text{P}$ 가 생성되는 양을 알 수 있다.

$$^{31}\text{P} = ^{30}\text{Si} \cdot \sigma \cdot \phi_{th} \cdot t \tag{2}$$

여기에서,

- $^{31}P$  : Si에 도핑된  $^{31}P$  원자 밀도 ( $n/cm^3$ ),
- $^{30}Si$  : Si중의  $^{30}Si$  원자 밀도 ( $n/cm^3$ ),
- $\sigma$  : 반응 단면적 ( $cm^2$ ),
- $\phi_{th}$  : 열중성자속( $n/cm^2sec$ ),
- $t$  : 조사시간(sec).

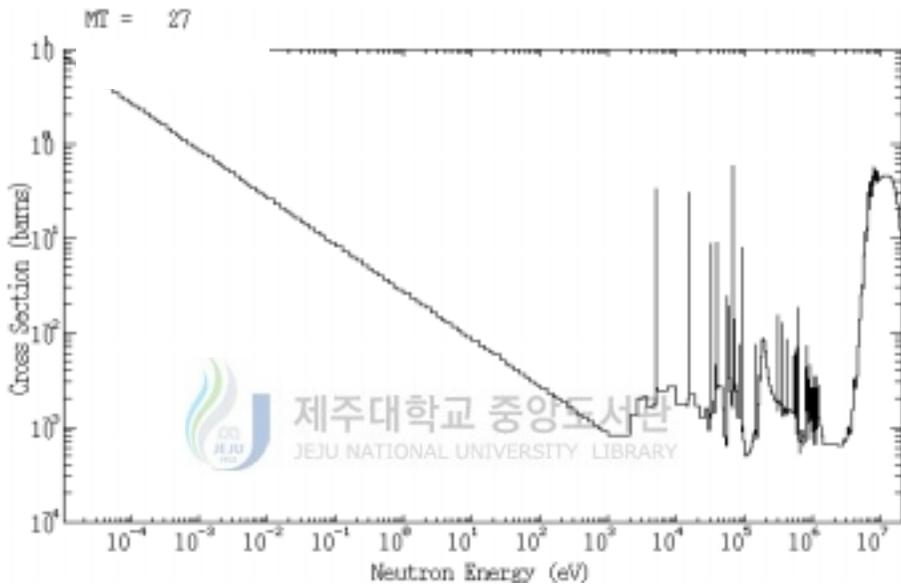


Fig. 3 Neutron absorption cross-section in natural silicon

그림 3은 실리콘의 중성자 흡수 단면적이다. 그림에서 보듯이  $\sim 1keV$ 까지는  $1/v$  비례성이 잘 나타나고 있다. 위에 언급된 식 (2)는 엄밀히 말해, 근사식으로써  $^{31}P$ 의 정확한 dopant의 원자밀도를 알기 위해서는 다음 사항들을 고려하여야 한다[김헌준 등,1989.].

1. 표적핵 및  $^{31}Si$ ,  $^{31}P$  등 생성핵의 감손 효과
2. 열의 중성자 및 속 중성자에 의한  $^{31}P$  생성
3. 포획 단면적등 관련 상수자료의 정확도

## 2.1 표적핵 및 생성핵의 감손 효과

표적핵인  $^{30}\text{Si}$ 은 핵변환이 진행될수록 그 원자밀도가 감소한다. 그리고 생성되는  $^{31}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$  또한 (n,v) 반응과  $\beta$ 붕괴로 인해 감소하게 된다. 중성자 조사 전 실리콘 단결정의  $^{30}\text{Si}$ 의 원자밀도는  $1.54 \times 10^{21} \text{ n/cm}^3$ 이다. NTD-2 조사공간의 열중성자 속을  $4.3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ 로 가정하였을 경우, 조사 후 핵변환에 의해 생성되는  $^{31}\text{Si}$ 의 원자밀도는 식 (2)에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N(^{30}\text{Si}) = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ n/mol}}{28.06 \text{ g/mol}} \times 2.33 \text{ g/cm}^3 \times 0.031 = 1.54 \times 10^{21} \text{ n/cm}^3$$

$$\begin{aligned} N(^{31}\text{Si}) &= N(\text{Si}^{30}) \cdot \sigma \cdot \phi \cdot t \\ &= 1.54 \times 10^{21} \text{ n/cm}^3 \times 0.118 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 4.3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec} \times t \\ &= 7.81 \times 10^9 \text{ n/cm}^3 \text{ sec} \times t \end{aligned}$$

$$\text{at } t = 1 \text{ hour}, N(^{31}\text{Si}) = 2.813 \times 10^{13} \text{ n/cm}^3 \text{ sec}$$

한시간 조사 후  $^{31}\text{Si}$ 의 원자밀도는 조사전의  $^{30}\text{Si}$ 의 원자밀도에 비하여 현저하게 낮기 때문에 감손에 의한 영향은 무시 할 만하다.

## 2.2 열중성자 및 속 중성자에 의한 기여

연구용 원자로 내의 중성자 에너지 분포는 일반적으로 열 중성자, 열외 중성자 및 속 중성자 성분으로 나누어 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(E) = \phi_{th} M(E, T) + \phi_{epi} \frac{\delta(E/kT)}{E} + \phi_f(E) \quad (3)$$

여기에서,

$M(E, T)$ : 유효중성자온도  $T$ 인 Maxwell 분포 함수,  $\frac{E}{(kT)^2} e^{-\frac{E}{kT}}$ ,

$\delta(E/kT)$ : 열중성자속 분포와 열외영역( $E > \mu kT$ )에서의  $1/E$  분포를 결합하는 함수, 즉,  $E/kT > \mu$ 일 때  $\delta=1$ ,  $E/kT < \mu$ 일 때  $\delta=0$ 으로 정의되는 계단 함수,

$\phi_f(E)$  : 핵분열 중성자에 의한 중성자속 분포.

식 (3)에서 열, 열외 및 속 중성자에 대한 중성자에너지 영역 구분은 원자로 특성에 따라 여러 가지 논의의 여지가 있으나 편의상  $0 < E_{th} < 0.625\text{eV}$ ,  $0.625\text{eV} < E_{epi} < 1\text{MeV}$ ,  $E_f > 1\text{MeV}$ 로 한다.  $^{30}\text{Si}$ 의 경우는 공명흡수가  $1\text{keV} \sim 1\text{Mev}$  영역에 있으므로 이들 에너지 영역 구분에는 민감하지 않을 것이다.

### 2.2.1 열 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성



열중성자에 의한 생성은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 {}^{31}\text{P} &= {}^{30}\text{Si} \int_0^{0.625\text{eV}} \sigma(E) \phi_{th} M(E, T) dE \\
 &\simeq {}^{30}\text{Si} \int_0^{\infty} \sigma(E) M(E, T) dE \\
 &= {}^{30}\text{Si} \bar{\sigma} \phi_{th} t
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 maxwell 분포에 대한 평균 흡수 단면적  $\bar{\sigma}$ 는  $0.0253\text{eV}$  흡수 단면적  $\sigma_0$ 와 비  $1/v$  비례성 흡수 단면적인 경우에는 westcott 보정인자  $g(T)$ 를 써서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma} = g(T) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293.6}{T}} \sigma_0 \tag{5}$$

### 2.2.2 열외 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성

열외중성자(epi-thermal neutron)의 중성자 흡수는 대부분 공명영역(resonance region)에서 이루어 질 것이다.  $^{30}\text{Si}$ 의 경우 공명적분의 단면적이 열중성자 단면적의 7배에 해당하므로 열외중성자의 비율이 높은 원자로에서는 그 영향을 고려해야 한다. 하지만 하나로인 경우 열외중성자와 열중성자 비율이 0.084%에 지나지 않으므로 무시할 만하다[김헌준 등, 1989.].

### 2.2.3 속 중성자에 의한 $^{31}\text{P}$ 생성

식 (3)에서  $\phi_f(E)$ 는 주로 밀도 분포가  $dn/dE \sim Ae^{-E} \sinh \sqrt{2.29E}$  등의 실험식으로 근사할 수 있는  $^{235}\text{U}$  핵분열 중성자에 의한 것이나, 연구용 원자로의 경우, 예를 들어  $E=1\text{MeV}$ 에서의 중성자속 밀도  $d\phi_f/dE$ 는  $0.025\text{eV}$  중성자속 밀도에 비해서  $\sim 10^{-7}$ 에 불과하고, 또 포획단면적도  $\sim 1\text{mb}$  정도이므로  $^{31}\text{P}$ 에 대한 기여는 사실상 무시된다[김헌준 등, 1989.].

### 2.3 포획 단면적 등 관련 실험 정수의 정밀도

식 (2)에서의 핵반응은  $(n,\gamma)$ 이므로 중성자 단면적은 포획단면적(capture cross section)을 사용한다. 평가 핵자료[J.F.Mughabghab and D.I.Garber 1973, C.M.Lederer and V.S.Shirley, 1978.]에서 인용된 포획단면적의 평균값은  $0.1075 \pm 0.002(1.9\%)\text{barn}$  이나 20여년 동안 여러 실험자에 의해 측정된 중성자 포획단면적은  $0.115 \pm 0.009(7.8\%)\text{ barn}$ 이다[J.M.Meese and S.L.Gunn, 1980.]. 그러므로 평가 핵자료에서 인용된 포획단면적의 값은 실험치 보다 약 6.9% 높고 표준오차도 4배가량 높다.

그리고 실리콘 밀도와  $^{30}\text{Si}$ 의 자연존재비는 각각  $\sim 0.43\%$ ,  $\sim 1\%$ 의 오차를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 이는  $\text{SiO}_2$ 의 채취장소에 따라 변동이 있고, 또 FZ 법으로 성장한 실리콘 단결정의 정제 및 결정화 과정에서 달라질 가능성이 있기 때문이다.

### 3. Neutron Transmutation Doping 특징

반도체내에 dopant 첨가 방법에는 결정체를 성장시킬 때 용액 속에 유입시키는 방법, 온도를 높여 결정 격자와 dopant 입자의 열 운동에 의한 확산 주입 방법, 그리고 dopant를 이온화시켜 운동에너지를 높인 다음 주입시키는 이온 주입 방법 등이 있다 [황호정, 1999.]. CZ-Si는 대부분 단결정화 과정에서 용융 실리콘에 첨가하고 FZ-Si에서는 세대법이 잘 이용된다. 세대법은 dopant의 원자밀도가 높은 출발 심봉(slim rod)에 열분해반응으로 실리콘을 석출한 후, 부유대법으로 dopant의 원자밀도를 희석하여 만든 봉(master rod)을 다시 가는 봉으로 만든다. 이와 같은 방법을 여러 세대 반복해서 목적하는 dopant의 원자밀도를 가진 대구경 다결정봉을 성장시키게 된다. 그러나 결정화 과정 중 고상 위에 용융 액상이 있게 되고, 이로 인하여 계면의 열적 불균일성, 중력에 의한 용융체의 열대류가 나타나며 또한, 유체내의 교반과 계면의 형상을 고르게 하기 위해서 결정의 상하축을 독립적으로 회전하게 되며 이 과정에서 수반되는 진동 등으로 인해 결정성장 속도에 미시적인 변동이 생긴다. 따라서 dopant 분포에는 불균일한 변동(striation)이 불가피하게 생긴다. FZ법으로는 주로 고저항율 결정을 만들어 고내압의 소자 제조에 쓰이므로, 이와 같은 dopant의 원자밀도 변동은 FZ-Si의 소자가공 수율을 저하시킬 뿐만 아니라, 아주 극소적인 변동은 소자사용 중 break-down 의 원인이 되므로 소정의 내압을 얻는데는 저항율이 더 높은 결정을 쓰게 되고, 따라서 전류치에 제한을 받게 된다[김헌준 등, 1988.].

이에 비하여 NTD법은 dopant 분포의 균일도와 dopant의 원자밀도를 제어할 수 있는 장점이 있다. 즉 dopant 분포의 균일도는 중성자의 균일조사를 통해 실현시킬 수 있고 dopant의 원자밀도는 조사시간에 비례하기 때문에 적당한 조사시간을 통해 원하는 목표의 비저항을 얻어 낼 수 있다.

$$\rho = 5 \times 10^{15} / [^{31}P] \quad (6)$$

여기에서,  $\rho$ =반도체 비저항율 [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ].

비저항은 식(6)에 의해서 간단히 구할 수 있다. 즉 결정내의 비저항은 dopant 원자 밀도에 반비례하기 때문에 조사시간이 늘어날수록 낮은 비저항을 실현시킬 수 있다. 일반적으로 FZ법으로만 성장시킨 단결정의 비저항의 분포는  $\pm 25\%$ 인데 반해, NTD-Si 는 약  $\pm 4\%$ 이내 까지 낮출 수 있다[C.K.Chu and J.E.Johnson, 1979.]. 그러므로 NTD의 가장 큰 특징은 dopant 분포의 균일도를 획기적으로 높일 수 있는데 있다. 이를 위해서 기존의 NTD 조사장치들은 각종 균일조사 방법들을 개발해 왔으며 그리고 적절한 중성자 흡수체를 이용하여 중성자속을 평탄화하는 방법이 주요한 방법으로서 자리잡아 왔다. dopant 균일도는 통상, NTD-Si인 경우 축방향으로는  $\pm 5\%$ , 반경방향으로는  $\pm 1.5\%$  정도로 균일화시킬 수 있을 것으로 보고 있으나 갈수록 더 높은 균일도를 원하고 있다.

NTD는 이러한 좋은 조건에도 불구하고 원자로내에서 이루어진다는 점 때문에 해결해야 할 문제점을 안고 있다. 첫째, 격자이탈로 인한 손상이다. 고순도 단결정은 격자의 일관된 정렬로 인하여 높은 이동도(mobility)를 갖는다. 또한 전자의 life time을 획기적으로 늘릴 수 있는 장점이 있긴 하지만, 감마선이나 속 중성자에 의한 격자이탈로 인하여 이런 전기적 특성에 불이익을 가져올 수가 있다. 그러나 이런 격자 이탈에 의한 방사선 손상은 원자로 감속재 종류 및 조사공 위치에 의한 열 중성자 선질, 즉, 속중성자 및  $\nu$ 선 성분에 따라 달라지며, 조사 후 적절한 열처리를 통하여 대부분 해결이 가능하다[H.M Janus and O.Malmros, 1978]. NTD-Si 결정에 손상을 주는 원인은 다음과 같다.

- (1) 속중성자 충돌에 의한 손상
- (2) 핵분열  $\nu$ 선에 의한 손상
- (3)  $\nu$ 선 되튀김 손상
- (4)  $\beta$ 선 되튀김 손상
- (5) (n,p), (n, $\alpha$ ) 등의 반응으로부터 발생하는 대전입자와의 충돌에 의한 손상

둘째, 조사후의 방사선 문제이다. NTD-Si 인 경우 방사선은 표면과 결정 안에 들어있는 타 물질의 방사화와  $^{32}\text{P}$ 에 의한 방사선의 주요한 원인이다. 실리콘에 들어있는 dopant에 의한 방사화 문제는 단결정의 제조 및 취급시의 오염에 기인한다. 현재 하나로에서의 실리콘 조사가 이루어지지 않았기 때문에 어떤 종류의 오염물질이 발생할지는 예측할 수는 없으나 다른 원자로의 경우와 비교해보면 W-187, Ce-141, Ru-103, Zr-95, Nb-95, Co-60, Cr-51, Au-198 등이 생길 여지가 있다[E.W.Haas and J.A.Matin 1979]. 특히  $^{31}\text{Si}$ 로 인한 방사선의 영향은 3~4일 냉각기간 동안 거의 없어지기 때문에 위에서 언급한 장 반감기 핵종들에 관심을 기울여야 할 것이다. 그리고 이와 더불어  $^{32}\text{P}$ 로 인한 방사선의 문제도 고려해야 한다. IAEA에서는 비 방사능 물질의 기준으로  $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/g}$  이하를 요구하고 있으며, 현재 국내법으로는  $^{31}\text{Si}$ 의 방사성물질의 면제 조건으로 방사성 동위원소의 최소농도를  $10^3 \text{Bq/g}$  ( $2.78 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/g}$ )으로 규정하고 있다[과학기술부 고시 제2001-2호]. 이는 NTD-Si의 비저항의 품질 문제와 연관되어 있다. 즉 낮은 비저항을 실현시키기 위해 오랫동안 조사할 경우 dopant의 생성량이 많아지고 더불어  $^{32}\text{P}$ 의 양도 늘어나게 되면서 방사성 물질 기준을 초과할 우려가 있기 때문이다.

#### 4. 균일 조사 방법

균일조사방법은 조사공내에 위치한 실리콘 ingot의 축방향 중성자속 분포를 균일화하기 위한 목적으로 사용되어진다. 균일조사방법은 중성자 이용률을 높이고 또한 높은 조사 균일도를 유지하게 한다. 그리고 각 원자로 구조에 알맞게 선택되어야 하며 주위의 조사공들에 대한 영향도 적어야 한다. 균일 조사 방법에는 4가지 방법이 사용되고 있다.

- 1) 정위치법: 조사공내에서 실리콘 ingot은 제자리에 정지시킨 후 실리콘 주위에

설치된 중성자 스크린(screen)을 이용하여 축 방향 중성자속을 균일하게 한다. 이 방법은 가장 널리 사용되는 방법중의 하나로서 축방향의 중성자속 중 가장 높은 중성자 분포대를 평탄화하기 때문에 높은 조사량을 통해 조사시간을 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 중성자 스크린의 재료에는 Ni, SUS, Titanium등이 사용된다.

2) 도치법: 중성자 수직 분포 기울기(gradient)가 직선에 가까운 위치에서 조사시간의 1/2를 조사한 후 다시 꺼내어 나머지 시간의 1/2를 조사하는 방법이다. 도치법은 중성자 스크린을 사용하지 않으므로 구조가 단순하고 타 방법보다 우수한 조사 균일도를 가진다. 하지만  $(1/2)T$  조사된 실리콘 ingot을 구동장치에 올려서 상하를 뒤집는 과정이 필요하고, 원자로 외부에서 방사화된 실리콘 ingot을 취급해야 하기 때문에 작업 종사자의 피폭에 대한 대책이 강구되어야 한다. 현재, 일본 JRR-3M과 JRR-4에서 이 방법을 사용하고 있다[전병진, 2001.9].

3) 정속 이동법: 실리콘 ingot을 일정 속도로 조사공 내를 통과하게끔 하면서 조사하는 방법이다. 이 방법은 실리콘 전체에 대해서 높은 조사 균일도를 유지할 수 있는 장점이 있으나 중성자속 분포를 정확히 측정하여 이를 통해 속도를 제어해야 하는 어려움이 있다.

4) 왕복법: 조사공 내에서 단결정을 상하로 왕복 이동시키면서 조사시켜 왕복 구간에 대해 평균 중성자속을 이용한다. 이 방법은 원론적으로 충분한 균일조사를 가능케 할 수 있으나 중성자장을 가운데 두고 왕복하고 중성자속이 무시될 수 있는 지역까지 왕복 시켜야 하기 때문에 조사공 상하부분에 충분한 여유 공간이 확보되어야 한다.

### Ⅲ. 중성자속 평탄화를 위한 예비분석

하나로에서 NTD-Si 조사를 위한 설계는 원자로의 고유한 구조적 특징과 노내의 중성자속 분포를 고려해야 한다. 특히 하나로는 반사체로 D<sub>2</sub>O를 쓰기 때문에 전체 중성자에 대해 열중성자의 비율이 매우 높다. 특히 NTD-2 조사공에서 열 중성자속에 대한 속 중성자속의 비율이 1/400에 불과하다[전병진 등, 2000.].

스크린은 통상적으로 단결정내 주위에 열중성자 흡수체인 Ti, SUS, Ni, H<sub>2</sub>O의 두께를 적절히 조절하여 실리콘에서의 축방향 중성자분포를 평탄화시킨다. 그리고, 스크린의 재질 및 형상을 결정하기 위해 3차원적으로 실험장치를 직접 모사 할 수 있고 실리콘 내에서의 중성자속 분포를 빠른 시간 내에 알기 위해서는 전산 코드를 이용하는 것이 편리하다.

본 연구에 사용된 코드인 MCNP(Monte Carlo N-particle transport code)4B는 하나로 시운전 시험 자료와의 비교를 통하여 정확도가 입증된 전산 코드이다. MCNP는 NTD 장치의 복잡한 형상을 3차원으로 구현할 수 있을 뿐 아니라 빠른 시간 내에 원하는 위치에서의 중성자속 분포를 계산 할 수 있는 장점이 있다. MCNP외에 전통적인 균정수 생산과 노심 확산 계산을 통해 분석 할 수 있으나 대부분 2차원적인 형상만을 구현할 수 있어 NTD 장치의 복잡한 기하학적 형상을 모사하는 데에는 한계가 있다. MCNP의 계산 결과를 통하여 설계가 이루어지는 만큼 MCNP 결과의 신뢰성을 확인해볼 필요가 있다. 왜냐하면, 특정 조사공에서 MCNP의 계산 결과가 실제의 중성자속 분포를 정확히 예측하고 있다는 보장을 할 수 없기 때문이다. 그러므로 MCNP로 예측하는 중성자속 분포는 실제와 얼마나 일치하는지를 실험으로 입증하기 위해 모의 실리콘 단결정을 제작하고 기하학적인 변화에 따른 실험값과 MCNP의 계산값을 비교하였다.

## 1. 하나로에서 중성자 균일 조사 방법

축방향으로의 균일조사를 위해서는 위에서 언급하였듯이, 정 위치법, 도치법, 정속 이동법, 왕복법이 사용된다. 도치법이나 왕복법은 복잡한 설비 없이 단순한 작업을 통해서 중성자속을 균일화 할 수 있는 장점이 있다. 특히 도치법은 실리콘 예정 조사 시간의 반을 쪼이고 외부로 인출된 후 다시 나머지 시간동안 조사가 이루어진다. 도치법은 실리콘 ingot에서의 조사량을 측정할 수 있기 때문에 조사 균일도면에서 정밀도를 더할 수 있다. 하지만 도치법은 인출 후 취급시 방사선 피폭 문제가 있고, 왕복법은 원자로의 상하구간에 충분한 여유공간이 필요하다. 그러므로 도치법이나 왕복법은 하나로에서 채택하기에는 무리가 있다. 또 정속 이동법은 속도의 제어에 많은 난점이 있으므로 적합하지 않다. 하나로에서 열중성자 비율이 매우 크고 조사공의 직경에 여유가 있어 중성자 스크린 설치가 용이하다. 그러므로 하나로에서 정 위치법이 가능하다면 굳이 다른 방법을 고려할 필요가 없다. 정 위치법이 상대적으로 편리하고 조사하는 동안 다른 조사공에 대한 영향도 최소화시킬 수 있기 때문이다.

평면적인 조사 균일도는 단지 회전을 시켜주는 것만으로도 가능할 것으로 예상되어진다. 현재 이루어지고 있는 각국의 원자로에서는 회전만으로 필요한 균일도를 만족시키는 것으로 보고되고 있다[IAEA, 1988.]. 실리콘 단결정의 중성자 흡수 단면적이 작기 때문에 중성자의 감쇠가 적으므로 반경방향의 불균일도는 그리 크지 않을 것이다.

## 2. MCNP 계산과 실험 비교

MCNP Code의 적절성을 확인하기 위해서는 실험치와 계산치의 비교가 최선이다. 이를 위하여 실리콘과 유사한 핵적 성질을 갖고 있는 알루미늄을 이용하여 모의 단결정을 제작하였다. 모의 단결정내의 중앙 홀에 Au wire를 설치하여 축방향 중성자속을 측정하였다. 30kW와 10kW에서 각각 Au wire를 조사시킨 후 방사능을 측정하

여 열 중성자 반응률을 구하였다. 이를 위해서 모의 단결정 4군데에 대해서 Cd ratio 측정을 위한 장치도 설치하였다. Cd ratio는 Cd이 0.4eV이하의 거의 모든 열중성자를 흡수하는 핵적 특성이 있다. 이를 이용하여 Cd shield가 있는 경우와 없는 경우의 대한 측정치를 서로 비교하는데, 이 두가지 경우의 비를 Cd ratio(cadmium ratio)라고 하고 이 비는 열중성자에 대한 고속중성자의 비를 나타낸다. 그림 4는 모의 단결정 주위를 공기가 들어있는 슬리브가 감싸고 있는 실험 장치의 MCNP 모델이다. 측정된 Au wire의 열중성자 반응률과 MCNP의 열중성자속의 상대적인 측방향 분포는 그림 5와 같다.

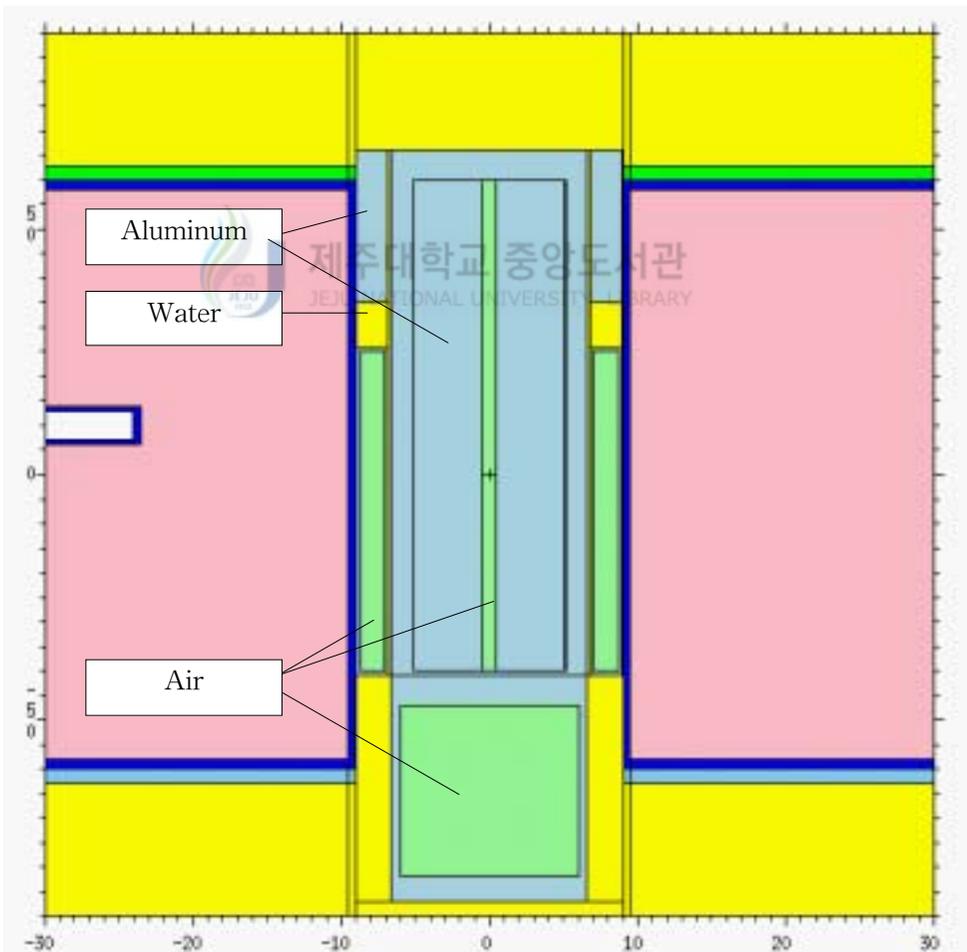


Fig. 4 MCNP model of the 1st NTD test facility

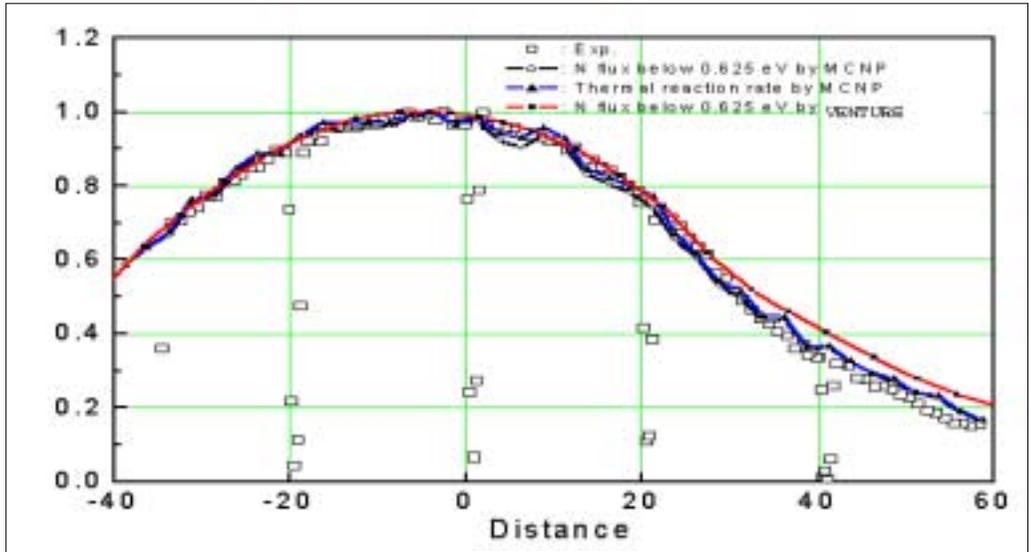


Fig. 5 Thermal neutron reaction rate in the 1st NTD test facility

그림 5는 제어봉위치가 396.2cm일때 MCNP와 중성자 확산 코드인 VENTURE의 계산값을 같이 나타내었다. 예상되는 조사위치인 -40cm ~ +20cm (핵연료 중심을 기준으로)사이에서 실험값과 MCNP와 VENTURE로 계산된 값이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. VENTURE 계산값이 +20cm 외 부분에 가서 측정값과 차이가 나고 있는데, 이는 확산 이론이 두꺼운 물이 있는 부분에서는 잘 맞지 않기 때문이다. 하지만 MCNP의 결과는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Cd ratio는 열중성자를 구하는데 있어 정확한 보정이 이루어지도록 하나, 이번 실험에서 물이 두꺼운 부분에서는 Cd ratio 값이 정확히 측정되지 않았기 때문에 이 부분에 대한 열중성자 반응률의 측정값이 실제보다 낮아지고 있다.

그림 6은 Al 통의 중간부분을 약 1.15cm 깎아내어 Al 대신에 물이 차게 한 조건이다. 이는 물의 두께가 커진 부분에서 얼마나 계산 값이 실제 측정치와 일치되고 있는지를 알아보기 위한 실험이다. 그림 7은 물의 두께가 늘어나는 기하학적인 구조변화에도 MCNP 계산 값이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이들 결과로부터 MCNP 계산 결과가 NTD 조사공내의 중성자의 거동을 잘 예측하고 있음을 보여주고 있고, MCNP의 계산 결과 값에 대한 신뢰성과 적절성을 확인할 수 있다.

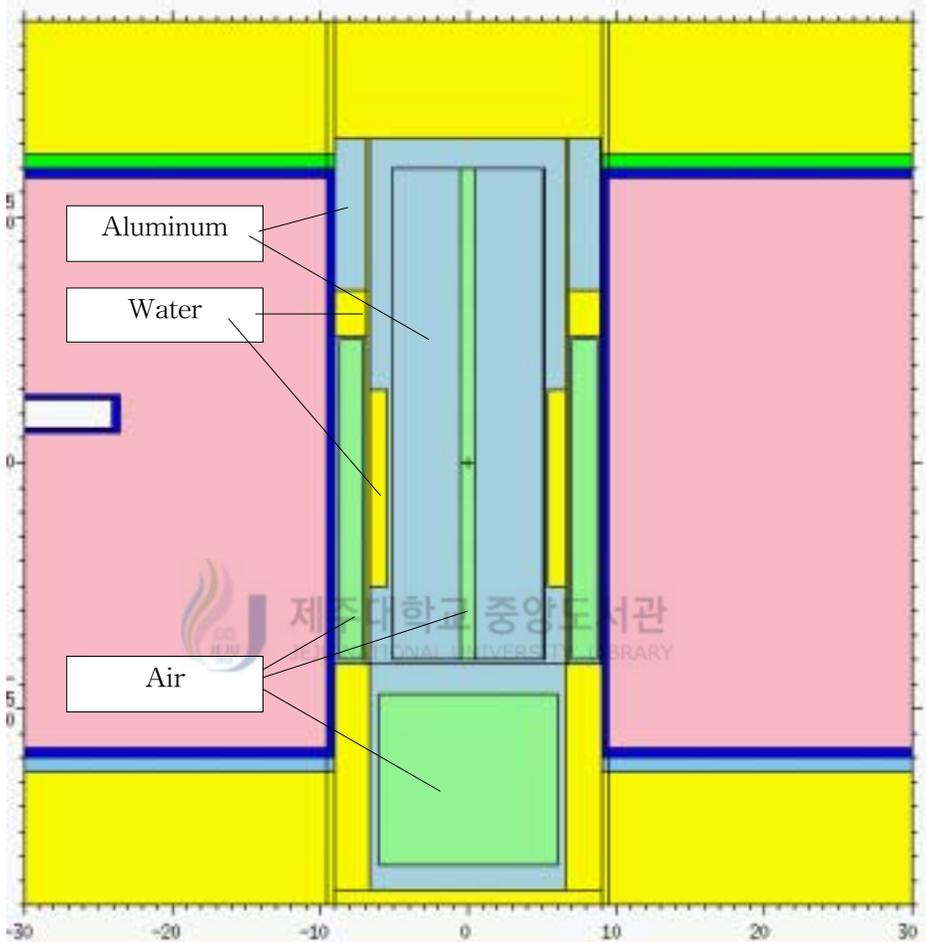


Fig. 6 MCNP model of the 2nd NTD test facility

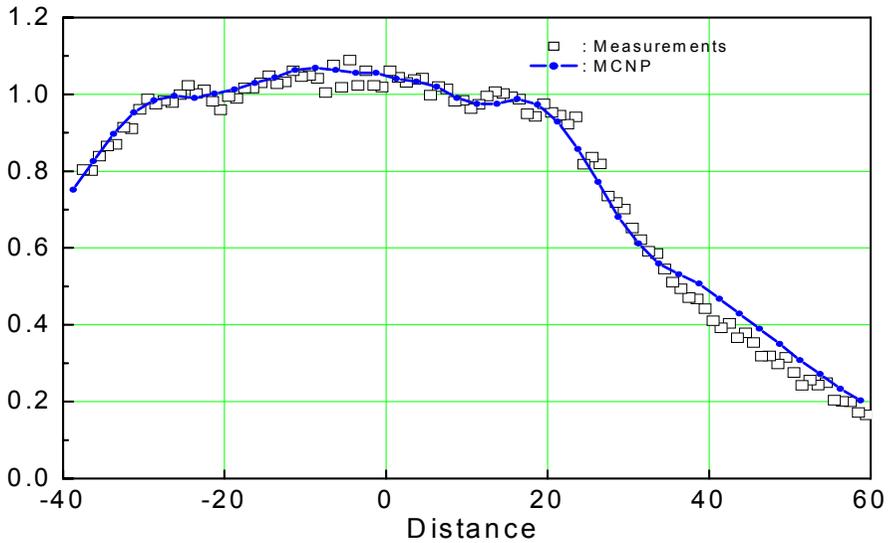


Fig. 7 Thermal neutron reaction rate in the 2nd NTD test facility

### 3. 하나로에서 중성자 스크린 설계 개념

실리콘 ingot을 축방향으로 균일하게 조사키는 것은 실리콘 단결정의 품질을 결정 짓는 중요한 잣대가 된다. 왜냐하면 dopant  $^{31}P$ 의 분포 균일화는 중성자의 균일한 조사에 영향을 받게 되는데,  $^{31}P$ 의 분포의 균일도는 곧 비저항의 균일도를 결정하기 때문이다. 기존의 FZ-Si는 높은 life time과 낮은 점결함을 장점으로 하였으나 비저항 분포(resistivity variation)가  $\pm 25\%$ 이상 되었다. 그러나 NTD-Si는 비저항분포를  $\pm 4\%$ 이하까지 낮출 수 있어 대전류용 소자를 만드는데 이상적이다[C.K.Chu and J.E.Johnson, 1979.]. 중성자 스크린의 설계는 중성자속을 가능한 높이면서 평탄화를 실현시켜야 한다. 일반적으로 문헌상 요구하고 있는 중성자속의 균일도는  $\pm 5\%$ 이지만 갈수록 높은 품질조건을 요구하는 추세에서 그 보다 낮게 균일도를 유지해야 시

장 경쟁력이 있다.

이 중성자속 균일도  $\delta\Phi$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / \Phi_{av} \quad (8)$$

일본 반도체 회사중 대표적인 Komatsu에서는 평면적인 비저항분포가 4%이내, SEH에서는 5%이내를 요구하고 있다. 길이 방향에 대해서는 Komatsu가 400~500mm의 길이에 대하여  $\pm 7\%$ 이내를, SEH는 모든 비저항 측정지점에서의 결과가  $\pm 7\%$ 이내의 만족도를 요구하고 있다[전병진, 2001.9.]. 그리고 이런 조건은 갈수록 더욱 엄격해지는 추세이고 비저항을 못 맞추었을 경우 그에 대한 손해를 감수해야 하기 때문에 균일도는 낮을 수로 좋다.

하나로에서는 정위치법으로 실리콘을 조사시킬 예정이므로 단결정이 고정된 위치에서도 축방향 중성자속이 평탄화될 수 있도록 중성자 흡수체를 이용한 중성자스크린의 설계가 필수적이다. 중성자 스크린은 실리콘을 담은 알루미늄 통의 외벽두께를 조절하는 방법을 이용하였다. 만일 단결정 조사통과 중성자 스크린을 따로 설계 할 경우 단결정을 넣고 빼고 하는 과정이 반복되므로 중성자 스크린을 한번 조사 할 때마다 교체하는 것은 비용측면에서 비효율적이고 방사성 폐기물을 과도하게 배출하게 된다. 이를 최소화하기 위하여 스크린을 두 부분으로 나누어 고정된 스크린과 실리콘 단결정 조사통을 스크린으로 설계하였다. 고정된 스크린은 NTD-2조사공의 벽에 고정되어 실리콘 단결정의 입·인출과 회전시 이를 지탱해주는 역할을 하고 그리고 중성자 스크린의 보조 역할을 하게 된다. NTD-2 조사공에는 여유공간이 충분하기 때문에 스크린 재료로는 물을 이용하였다. 즉 조사통의 두께를 조절함으로써 물의 두께에 변화를 주어 중성자속을 평탄화 시키는 것이다. 조사통 두께에 대한 실리콘 단결정내에서의 중성자속 변화를 보기 위해 그림 4에서 제시된 실리콘 단결정 조사통의 알루미늄 두께를 2, 4, 6mm씩 변화시키면서 중성자속의 변화를 분석하였다. 알루미늄의 두께가 줄어들면 그만큼 물의 두께는 늘어나기 때문에 계산 결과 그림 8에서와 같이 물의 두께에 따른 중성자 분포는 물 두께가 2mm 늘어날 때마다 2%씩 감소하는 모습을 볼 수 있다.

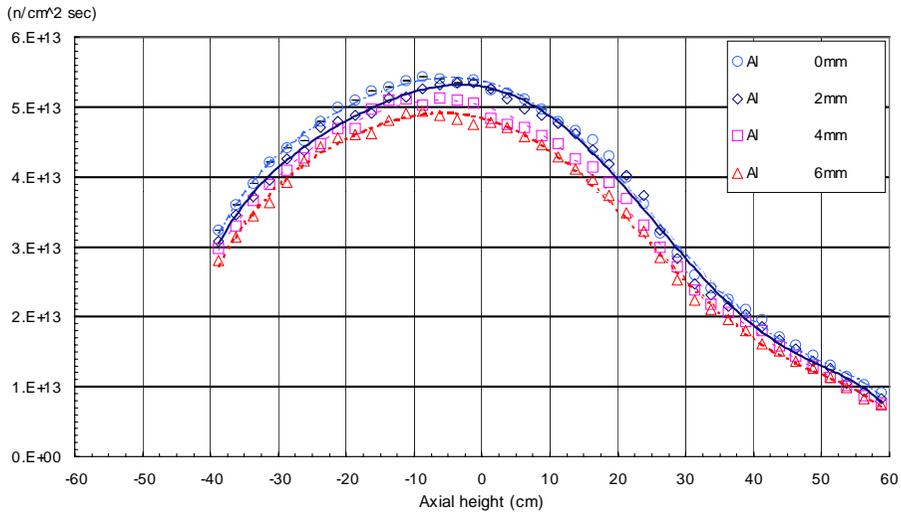


Fig. 8 Absolute Thermal neutron flux distribution in the Al disc vs. change of Al thickness



#### 4. NTD 조사 장치의 특징

NTD를 위한 조사장치는 크게 실리콘 단결정과 floater, 그리고 양단의 중성자의 손실을 막기 위한 graphite 반사체, 그리고 중성자 스크린으로 사용될 조사통, 단결정의 입·인출과 회전시 궤도를 유지시키기 위한 sleeve로 이루어진다. floater는 실리콘 단결정의 장전 인출시 주위 조사공이나 원자로 출력 감시기(중성자 계측기)에 영향을 낮추기 위한 장치이다. 그리고 graphite 반사체는 실리콘 단결정 양단에 반사체를 설치하지 않을 경우, 중성자속이 양단 부분에서 급속히 낮아지기 때문에 이를 보완하기 위한 장치이다. 실리콘의 비저항 정도는 조사후에 실리콘 단결정 사이에 설치한 Co wire의 방사능을 측정하여 알 수 있다 이 측정용 Co wire를 단결정에 설치하기 위해 단결정 사이에 bismuth 판을 설치하였다.

## IV. 중성자 스크린 최적화를 위한 분석

예비분석을 통해 MCNP 계산결과가 실제 조사공내에서의 중성자속을 잘 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 하나로에서의 적당한 균일조사 방법 및 조사장치의 개념을 통해 대략적인 NTD 조사장치를 설계할 수 있는 토대를 마련하였다. 이를 바탕으로 기본적 모델을 설계하고 실리콘에서의 중성자속을 구한 다음 평탄화 정도를 파악하여 점차 조사장치의 구조를 변화 시켜나가면서 최적화시켰다.

### 1. 실리콘 단결정 양단 끝에 공기 및 흑연을 설치하는 경우

실리콘 단결정 양끝단에 공기 부분을 추가로 설치할 경우 중성자속이 증가할 것이다. 이는 실리콘 단결정의 비저항 측정시 각 단결정 양단 끝을 잘라 측정하기 때문에 양끝의 중성자속을 높일 필요가 있기 때문이다. 그러므로, 아무런 대책없이 조사할 경우 중성자속이 단결정 끝단에서 급속이 낮아질 경우가 있고 측정시 원하던 비저항을 얻지 못할 수가 있기 때문이다. 그러므로, 공기 또는 적절한 반사체를 설치할 경우 중성자가 증가 내지는 누설(leakage) 되는 것을 막을 수가 있어 이를 확인하기 위한 계산을 수행하였다. 그림 9는 실리콘 단결정을 둘러싸고 있는 조사통의 내부에 공기가 들어있는 상태에서 단결정위에 공기층과 흑연층을 두었다. 반사체 물질로는 흑연이 가장 적당한 것으로 판단되었다. 그리고 그림 10은 공기를 제거하고 모두 흑연으로만 채운 경우이다. 그 결과는 그림 11의 그래프로 확인 할 수 있다. 그림 9처럼 공기와 흑연이 같이 설치되어 있는 경우 양단 끝단에서 평탄화 부분이 나타났고 그림 10에서는 그림 9의 조건보다 중성자속이 약 3% 증가하고 있음을 알 수 있다. 평탄화 정도가 약 3~4%이내에서 만족할 것으로 판단되어 졌을 때 중성자속의 3% 증가는 양단의 중성자속을 높이는데 효과적일 것으로 기대할 수 있다.

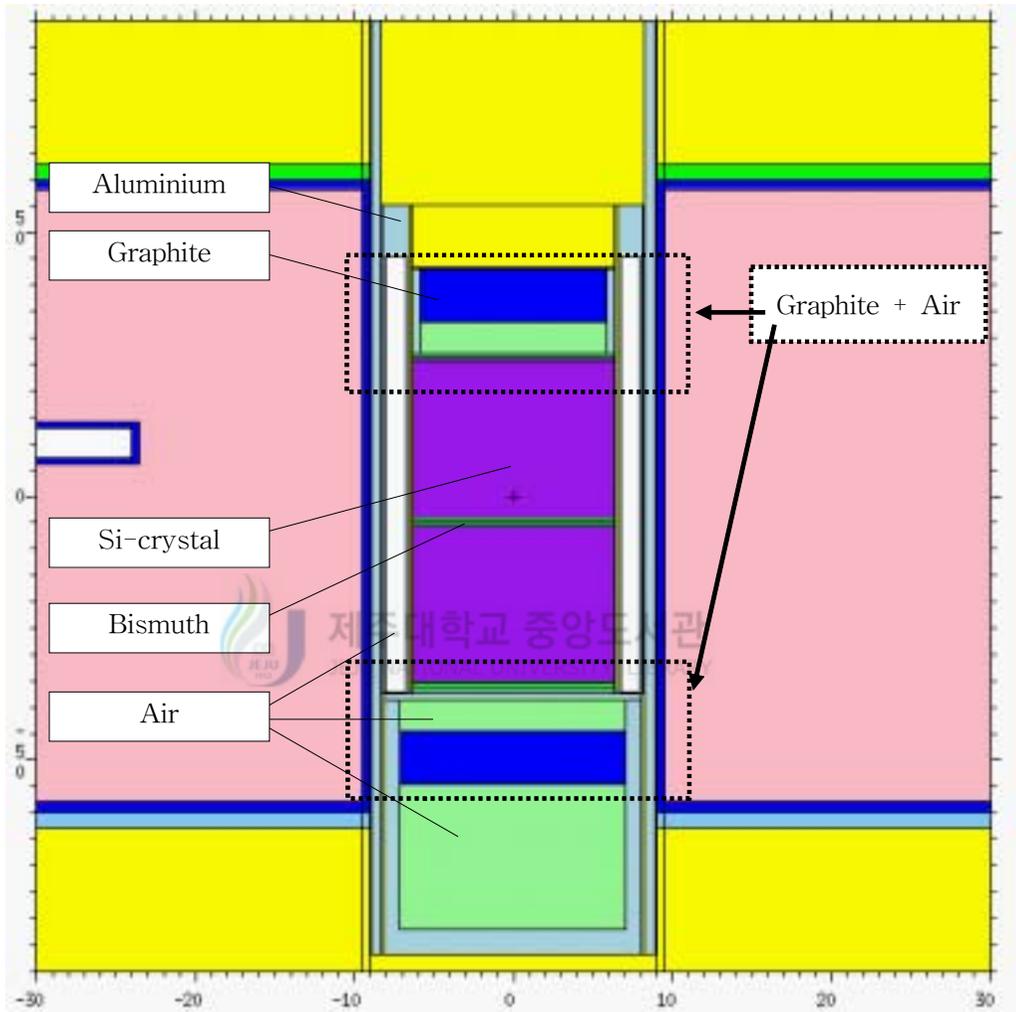


Fig. 9 MODEL 4.1.1 (graphite + air)

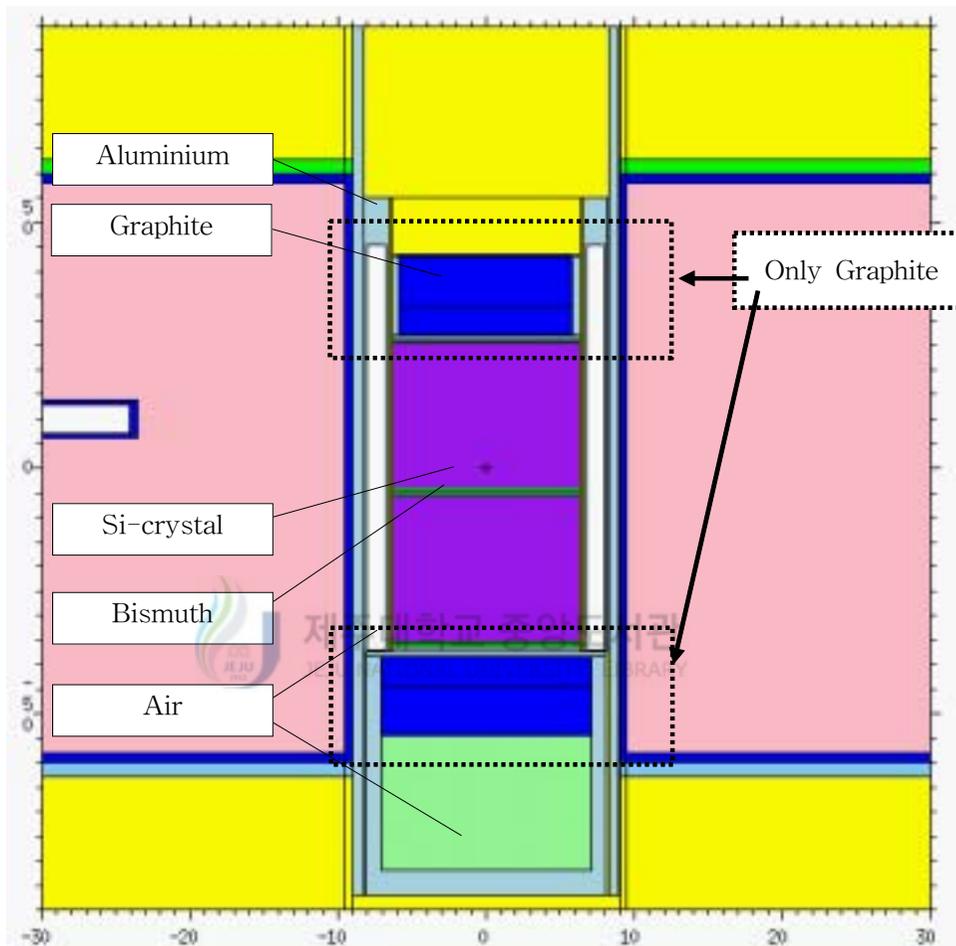


Fig. 10 MODEL 4.1.2 (graphite only)

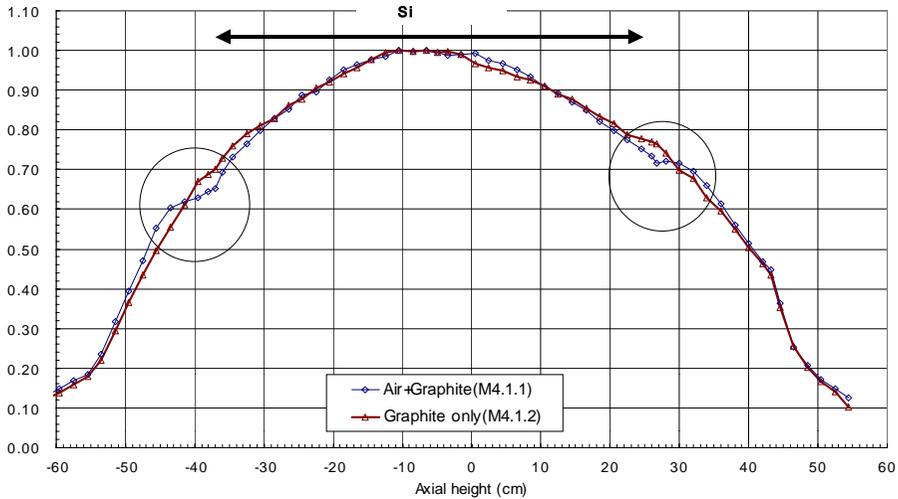


Fig. 11 Relative thermal neutron flux distribution in Al-disc



## 2. 중성자 스크린의 내벽 두께에 따른 축방향 중성자속 변화(1)

단결정을 둘러싸고 있는 조사통 내벽의 가공면적을 늘이면서 중성자속이 어떻게 변화하는지를 보기 위해서 각각 물의 길이 및 Al과 공기의 양을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 조사통의 공기층은 중성자와 다른 물질과의 반응으로 인해 감쇄되는 것을 막고 실리콘 단결정에 도달하는 중성자속을 최대로 만들기 위한 것이다. 또한 알루미늄은 가공성과 잔류 방사선 측면에서 핵적 특성이 우수하기 때문에 알루미늄의 두께의 효과 여부를 판단하여 스크린의 재료로서 적절한가를 판단하였다. 그림 12~15는 조사통의 기하학적인 변형을 준 MCNP 계산 모델이다. 모델 M 4.2.1은 조사통의 내벽을 가공하기 전의 설계 모습이다. 이때의 조사통속에는 공기가 들어있다. M4.2.2는 조사통 내부에 알루미늄을 일정량 채워 넣어 알루미늄으로 인한 실리콘 단결정내의 중성자속을 변화를 보기 위한 계산 모델이다. M4.2.3은 M4.2.2에서 조사통의 가운데 부분을 제거하여 물이 차 있도록 하였다. 물로 인해서 실리콘내의 중성자

속은 급격히 낮아 질 것이다. M4.2.4는 그 전 모델에 비해 물의 부피를 위·아래로 증가시킨 모델이다. 그림 16과 17은 각 모델별 절대 중성자속과 상대 중성자속을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 알루미늄에 의한 중성자 감소정도는 공기를 채웠을 경우에 비해 약 8%감소하고 있다. 그리고 물에 의한 중성자의 감소는 공기에 대하여 약 21%에 이른다. 중성자 스크린의 중요한 중성자 흡수체로서 물의 이용은 상당히 효과적이며 또한 알루미늄을 통한 미세조정이 가능할 것이다. 즉, 이후 중성자 스크린의 모델은 물에 의한 급속한 감소를 통해 1차적으로 중성자속을 낮춘 이후에 알루미늄의 두께를 이용한 미세조정이 효과적일 것이다.



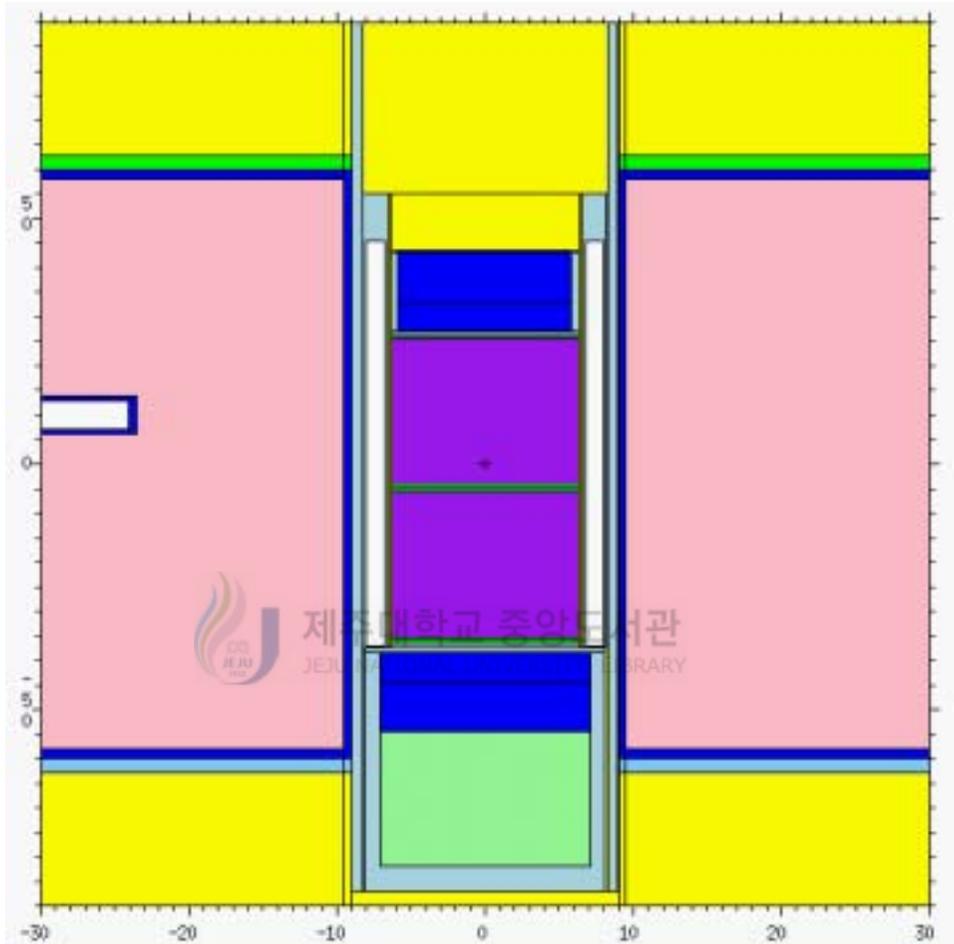


Fig. 12 MODEL 4.2.1 (reference case)

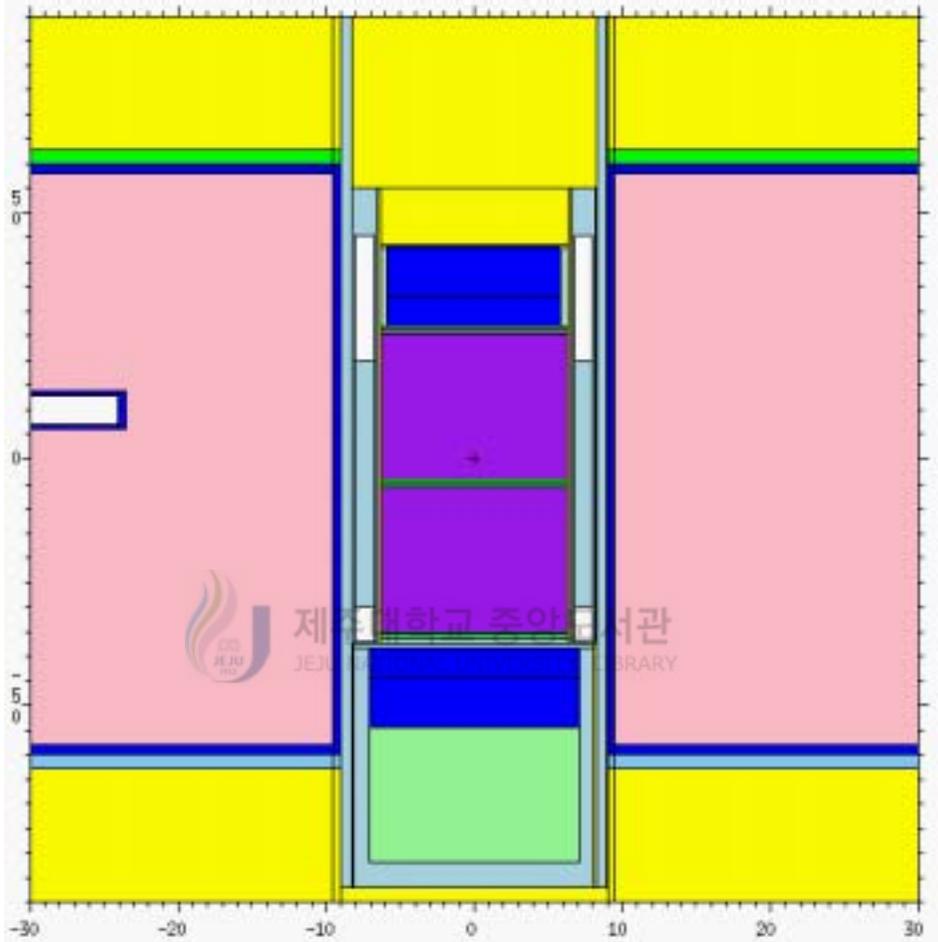


Fig. 13 MODEL 4.2.2

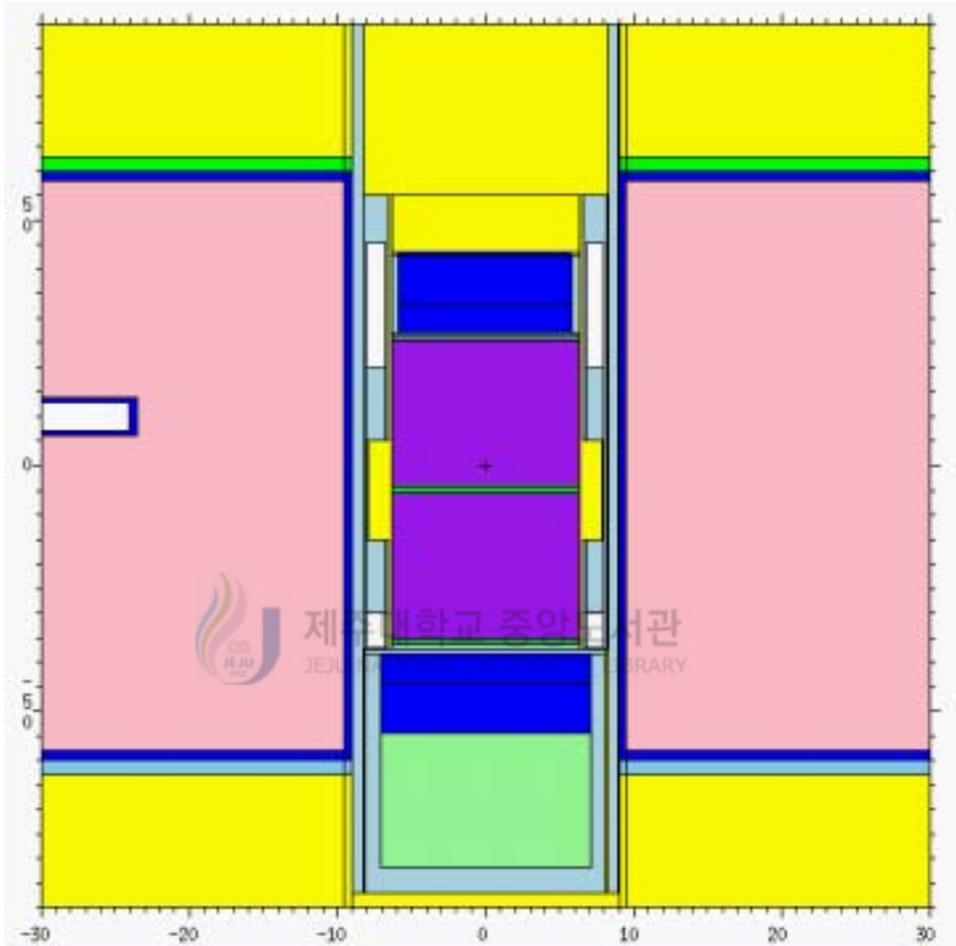


Fig. 14 MODEL 4.2.3

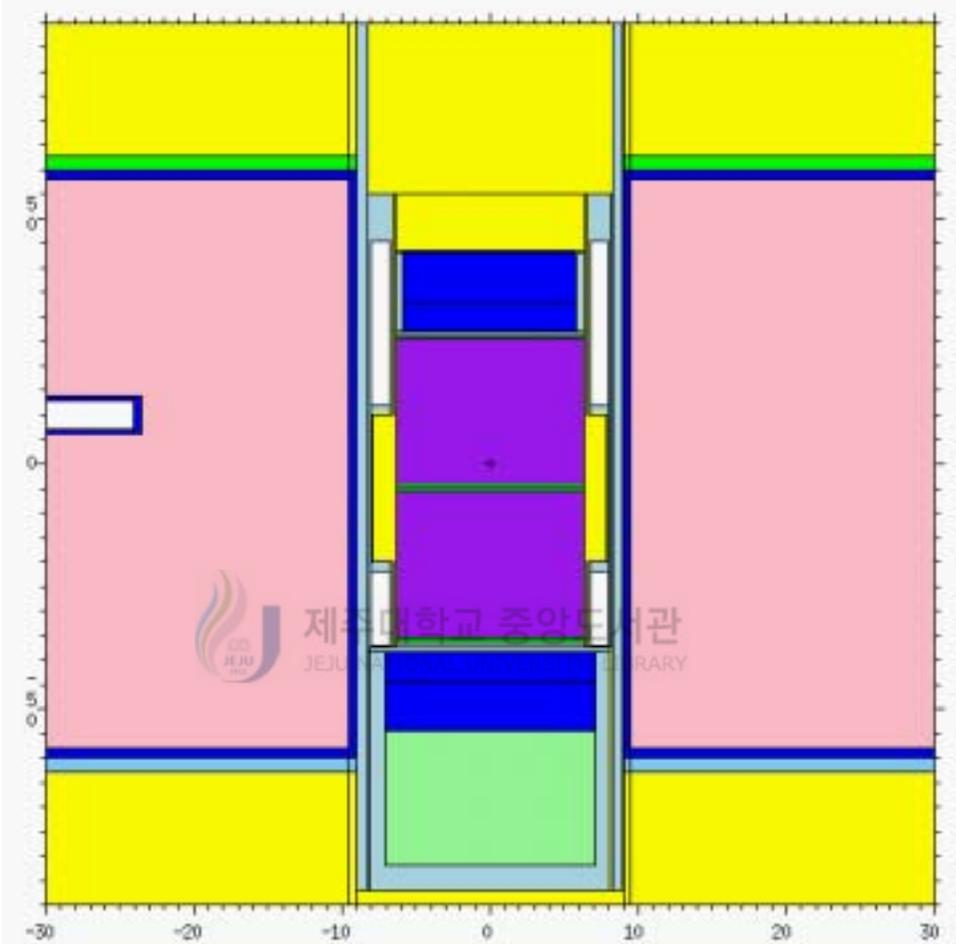


Fig. 15 MODEL 4.2.4

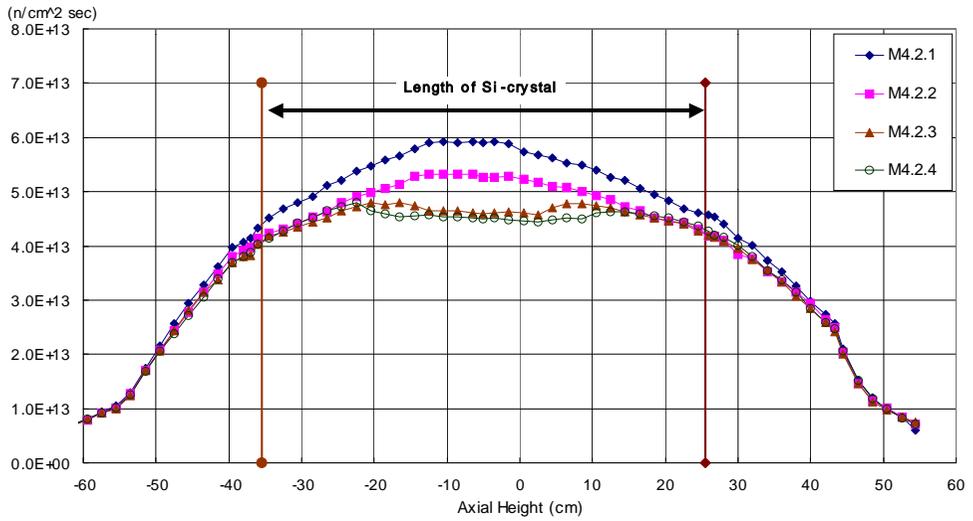


Fig. 16 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot

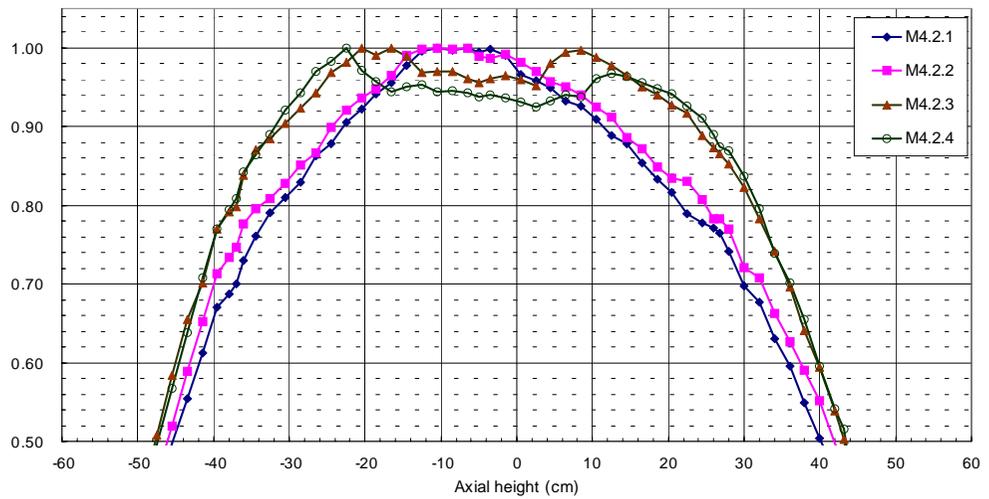


Fig. 17 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot

### 3. 중성자 스크린의 내벽 두께에 따른 축방향 중성자속 변화(2)

그림 12~15에 이어 계속 조사통의 물의 양을 증가시키면서 중성자속의 변화 추이를 지켜보았다. 결국 어느 시점에서는 중성자속이 더 낮아지지 않는 포화점을 갖을 것으로 예상된다. 왜냐하면, 어느 정도의 중성자속 감소는 계속될 것이지만 양 옆으로 늘어나는 물의 양에 대해서 평평해지던 분포가 결국에는 가운데가 볼록한 cosine 형의 분포로 환원될 것이다. 그림 18~20에 제시된 모델 M4.3.1~M4.3.3은 그전 모델을 바탕으로 미세 조정된 모델이다. 즉 조사통과 외통의 물의 간격과 조사통에서의 물의 부피, 그리고 조사통에서의 알루미늄 두께에 차이를 두었다. 계산결과는 그림 21과 22에 나타내었다. 모델 M4.3.2가 밑부분에서 물의 양이 늘어남에 따라 중성자속이 가운데 보다 더 낮아지는 결과를 보였다. 물의 길이가 -25cm ~ +15cm를 넘어가면서 중성자속 분포 모양이 가운데가 볼록한 모양으로 되돌아오고 있는 것이다. 즉 가운데 부분의 중성자속을 평탄화 하는데 -25cm ~ +15cm 사이에서 물의 두께가 1.5cm 내에서 조절이 이루어질 것으로 판단된다. 그림 22는 상대중성자속 분포로서 실리콘 단결정(-35cm ~ +25cm)에 대한 평탄화 정도는  $\pm 5\%$  정도이나 계산에서의 통계오차가 약 2% 이내임을 감안할 때 더 정밀한 평탄화의 설계를 해야한다.

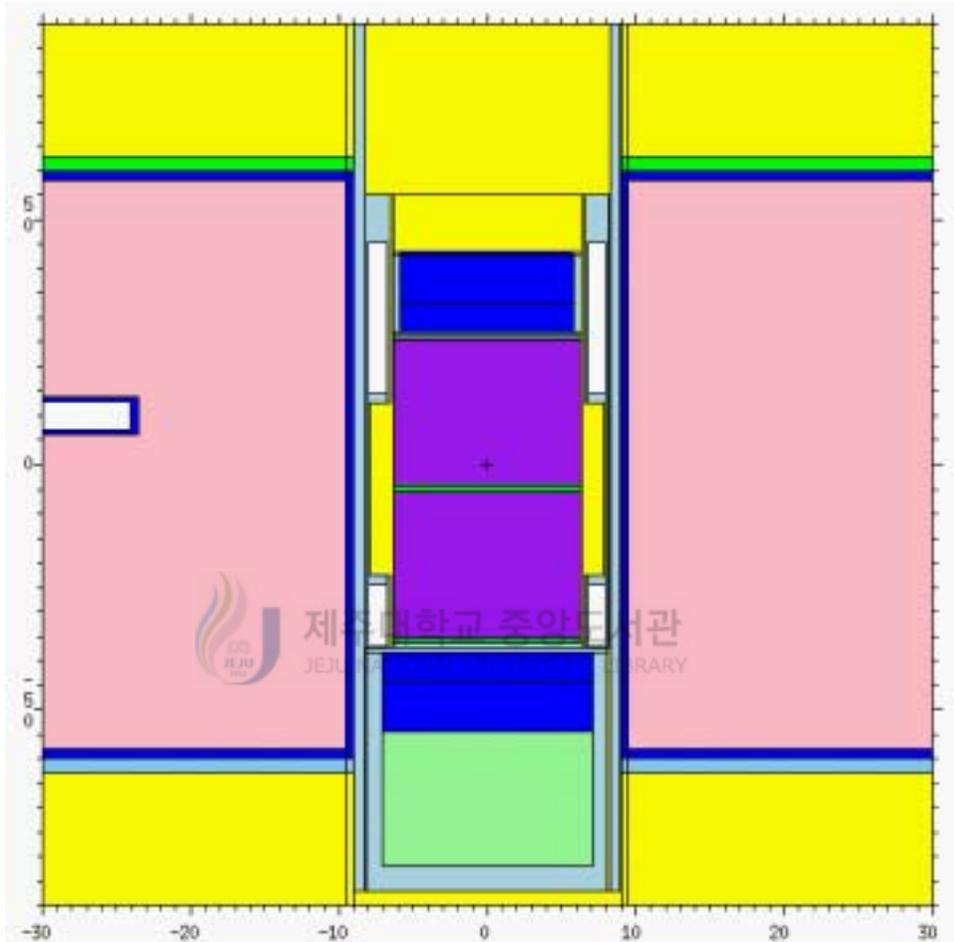


Fig. 18 MODEL 4.3.1

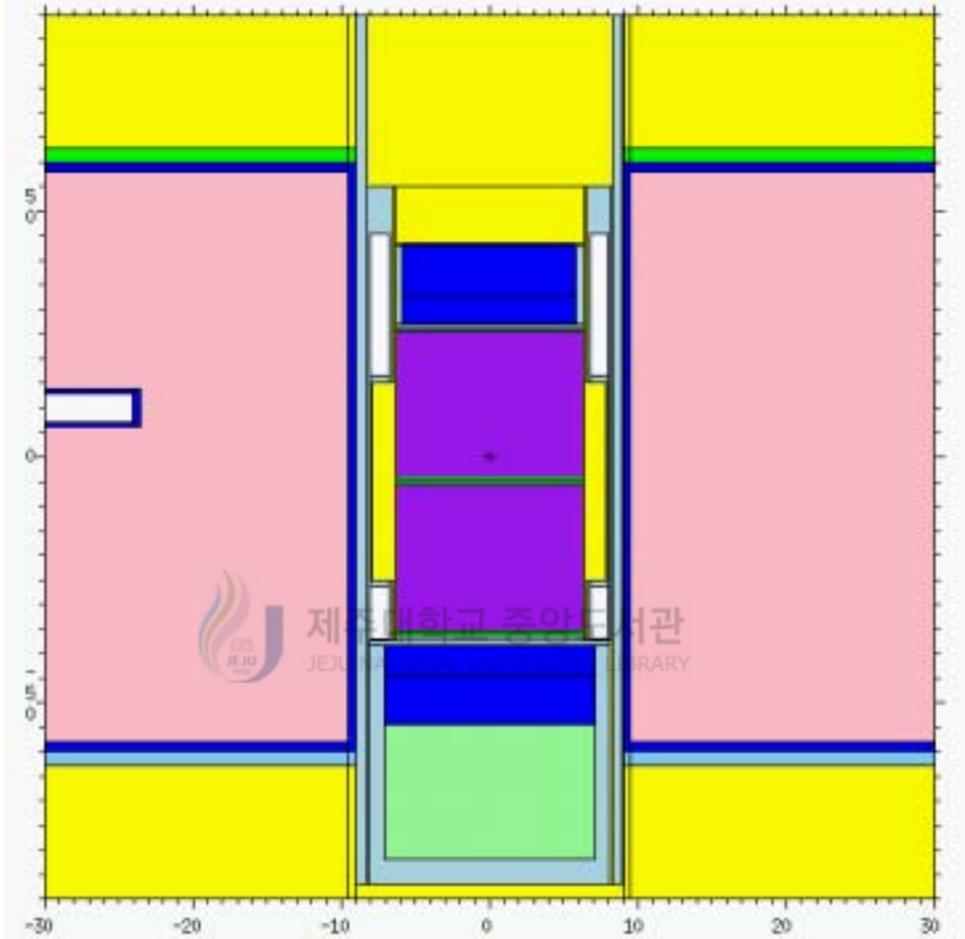


Fig. 19 MODEL 4.3.2

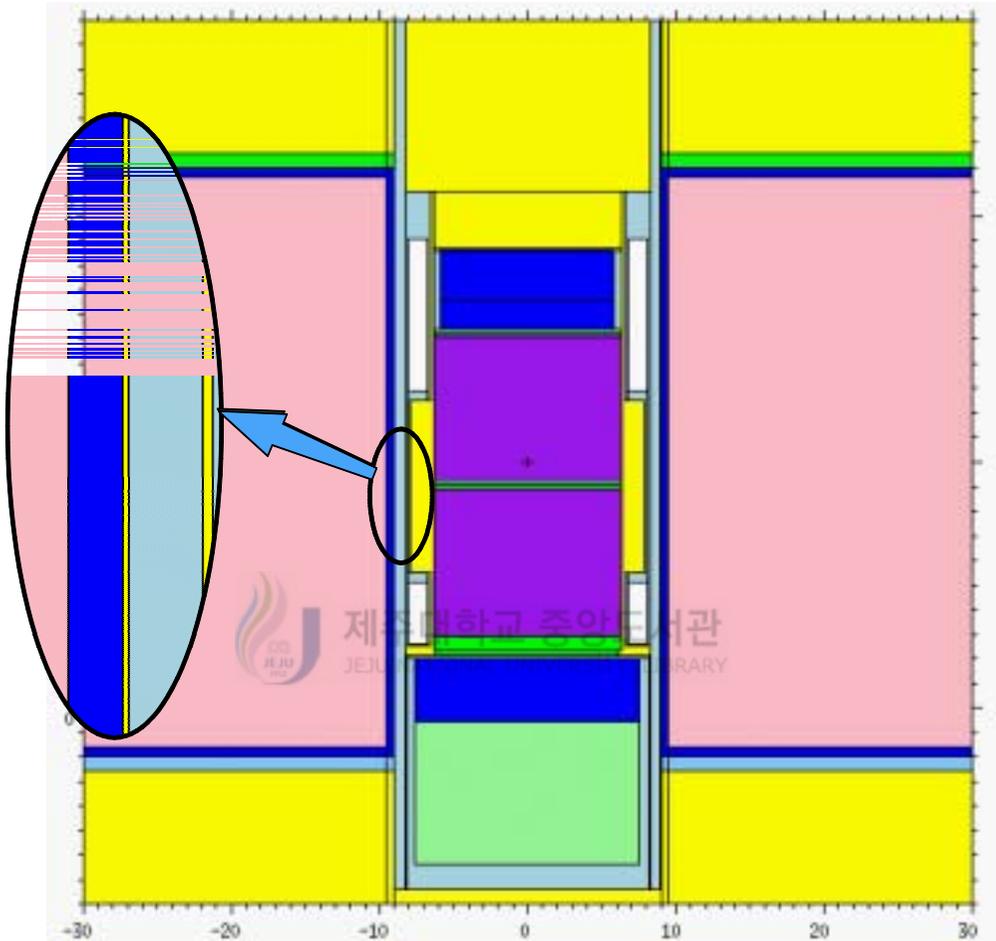


Fig. 20 MODEL 4.3.3

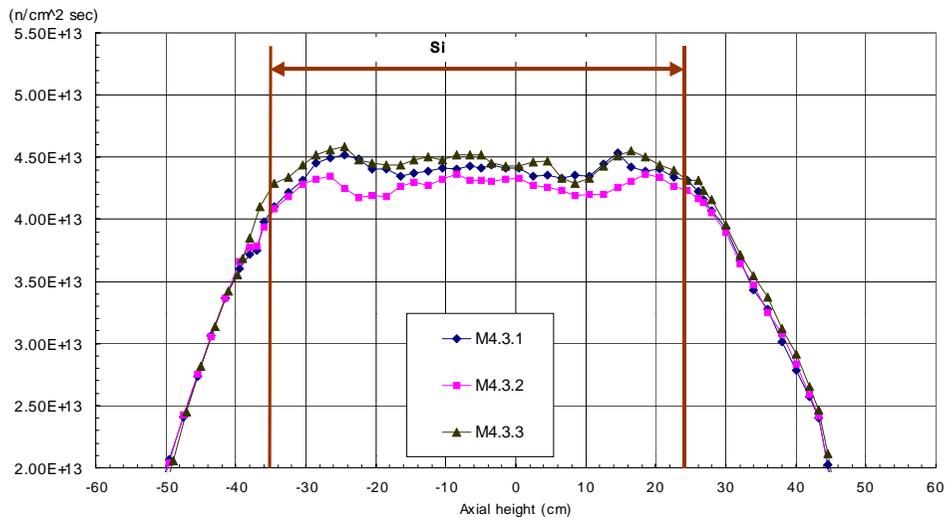


Fig. 21 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot

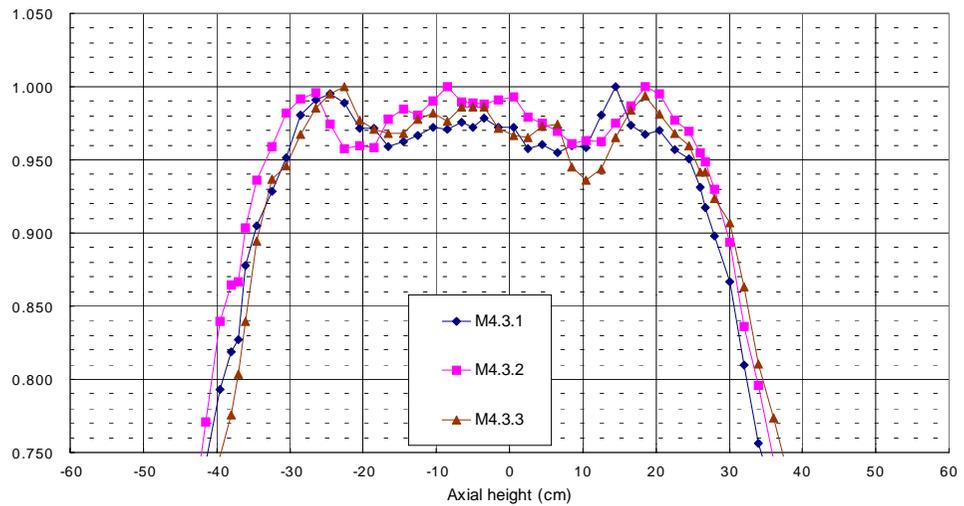


Fig. 22 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot

#### 4. 중성자 스크린의 이중 구조 및 양면 가공

모델 M4.3.3까지 조사통의 내벽만을 가공하여 평탄화 모델을 설계하였다. 하지만 계산 결과 실리콘 양끝에서의 중성자속을 낮추기 위해서 물의 부피를 증가시킬수록 가운데 부분의 중성자속은 다시 위로 솟아오르는 형태를 보였다. 이를 해결하기 위해 가운데 부분의 중성자속을 좀더 낮출 필요가 있다.

Model 4.4.1~M4.4.3은 조사통의 내·외벽은 가공하였고 그리고 가운데 중성자속을 더 낮추기 위해 가운데 구멍을 뚫어 물과 알루미늄 부분의 비율을 7:3 비율이 되도록 하였다. 조사통의 양 벽을 가공함으로써 생겨난 슬리브와 조사통 사이의 물 간격과 실리콘 사이의 물 간격을 이용하여 물의 부피를 좀더 쉽게 조절할 수 있는 여유가 있다. 또한 알루미늄의 두께를 양옆으로 늘이고 줄임으로서 미세조정이 더 쉽다. 이렇게 미세조정을 통한 계산 결과는 각각 그림 26과 27에 나타내었다. 그림 26은 모델 M4.2.1과 비교하였을 때 상당히 평탄화 되었음을 알 수 있다. 그림 27은 상대중성자속을 나타내고 있는데 M4.4.3의 중성자속 분포가 4.5%이내의 평탄화율을 보이고 있다.

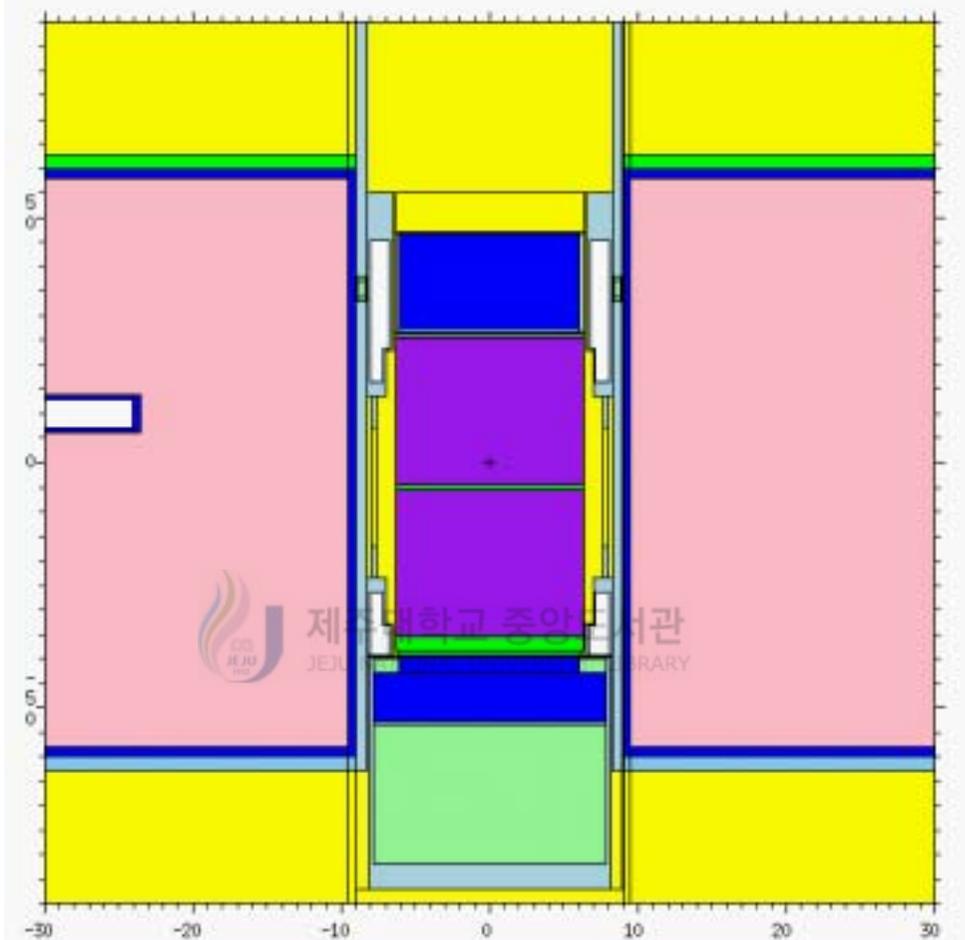


Fig. 23 MODEL 4.4.1

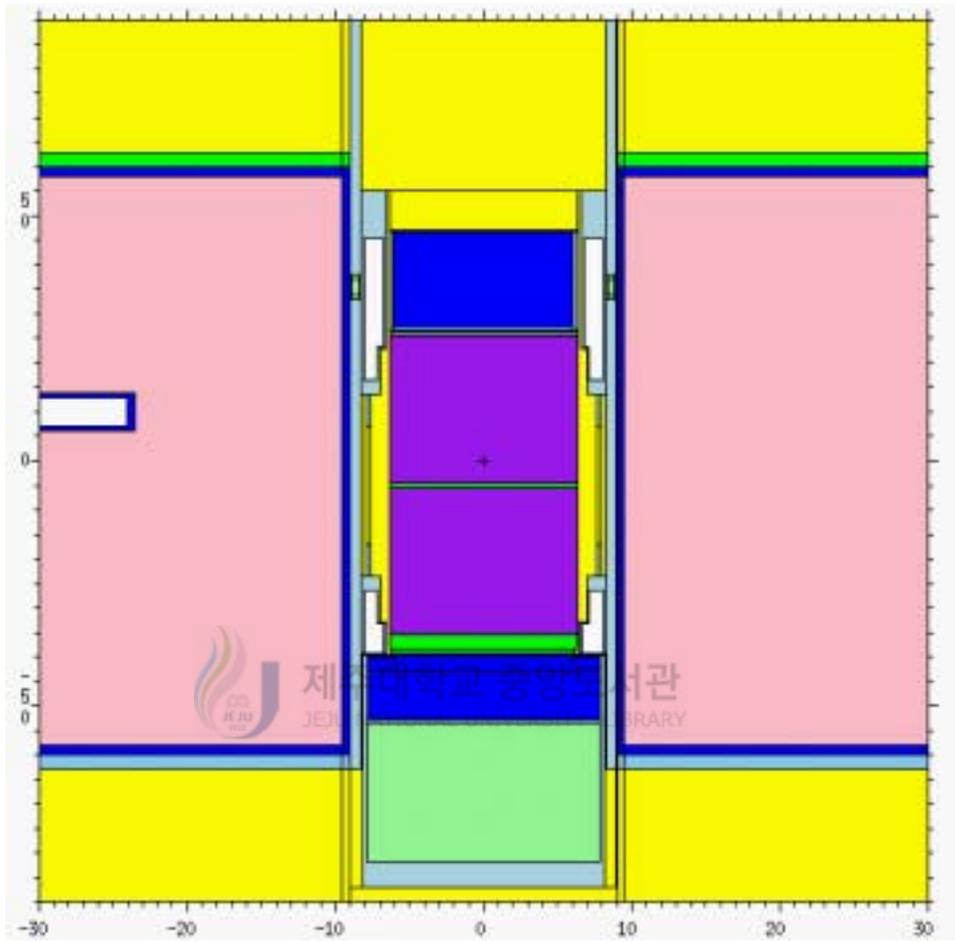


Fig. 24 MODEL 4.4.2

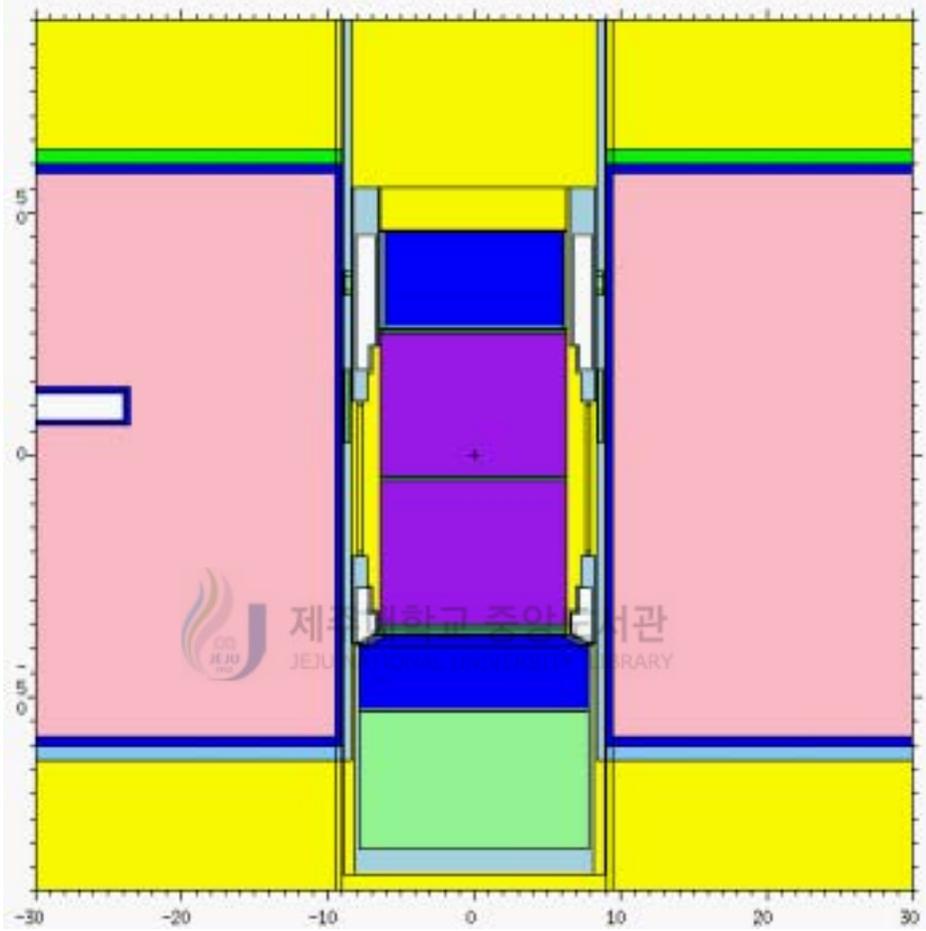


Fig. 25 MODEL 4.4.3

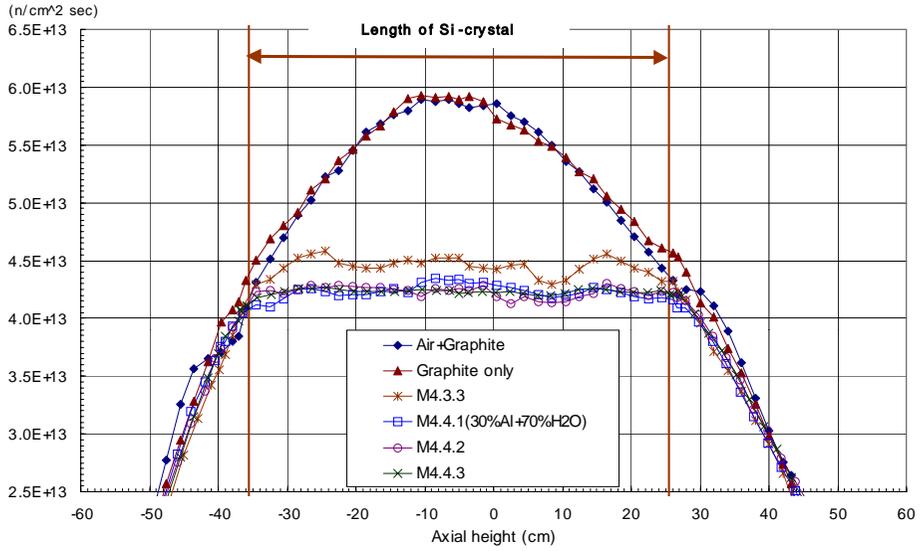


Fig. 26 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot

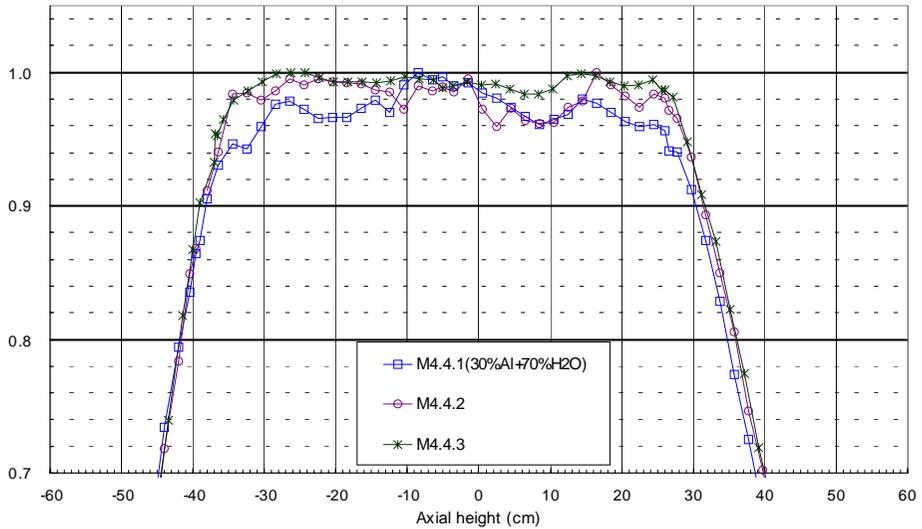


Fig. 27 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot

## V. 결과 및 고찰

### 1. 최적화된 중성자 스크린 모델

여러 중성자스크린 모델에 대한 분석을 통하여 실리콘 축방향 열중성자속을 평탄화 시킨 결과 전체 실리콘 단결정에 대하여 길이 방향으로 3%이내의 균일도를 보이는 것으로 확인되었다. 하지만 실제 원자로내에서 조사할때는 연소 효과로 인하여 중성자속 분포가 상대적으로 가운데가 낮고 양 끝단에서 높게 나올 수 있다. 그러므로 실리콘 단결정내의 중성자속 분포가 가운데가 볼록한 형태로 나오는 것이 유리하다. 왜냐하면, MCNP를 이용한 계산은 연소효과가 고려되어지지 않은 새 핵연료에 대해서만 계산되어졌기 때문이다. 그림 28은 중성자 스크린의 예비분석과 각 모델별 평탄화 분석을 통하여 설계된 최종적인 NTD 조사장치의 중성자 스크린의 모습이다. 최적화된 모델은 길이 20cm 와 15cm의 흑연 반사체를 실리콘 단결정 양끝에 설치하여 중성자 누설을 최소화 시켰으며, 조사통과 단결정 사이에는 1.5mm의 간격을 두어 냉각수가 흐를 수 있도록 하였다. 또한 조사통과 슬리브 사이에는 0.5mm의 공간을 두어 조사장치의 회전에 유도하고 마찰로 인한 영향이 미치지 않도록 하였다. 그리고 슬리브 내부에 SPND(self-powered neutron detector)를 설치할 수 있는 공간을 마련하였다. 그림 29~31은 조사장치의 전체 모습 및 각 부분별 모습이다. 그림 32와 33은 최적화된 모델을 통한 실리콘 단결정내의 중성자속의 최적의 평탄화 정도를 보여주고 있다. 이 최적화된 설계로 인하여  $\pm 1.5\%$ 이내의 중성자속의 균일도를 실현할 수 있었다. 표 2는 최적화 설계에 이르기까지의 각 모델의 중성자속의 특징을 나타내었다. 단결정내의 최고와 최저의 중성자속의 차를 평균 중성자속으로 나누어 평탄화율 ( $\delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / \Phi_{ave}$ ) 을 계산하였으며  $\Phi_{ave} / \Phi_{\max}$  를 함께 계산하여 중성자속이 평탄화 되는 추이를 확인할 수 있다. 통상  $\pm 5\%$ 의 중성자속 평탄화를 실현시켰던 대다수의 외국 원자로에 비해 이번 최적화 설계된 조사장치의 평탄화율은  $\pm 1.5\%$ 로 가장 낮게 설계되었다. 또한 중성자속의 분포추이(fluctuation)도 그리 심하지 않음

을 그림 35를 통하여 알 수 있다. 즉 평균 중성자속에서 평탄화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 36은 모델의 설계가 최적화 되어감에 따라 최저의 중성자속은 더 이상 낮아지지 않고 최대의 중성자속을 평균 중성자 값으로 수렴시키면서 최적화가 되어감을 알 수 있다. 즉 중성자의 추가적인 손실 없이 조사통의 가공을 통해 최대 중성자속을 낮추면서 최적화 시켰다.

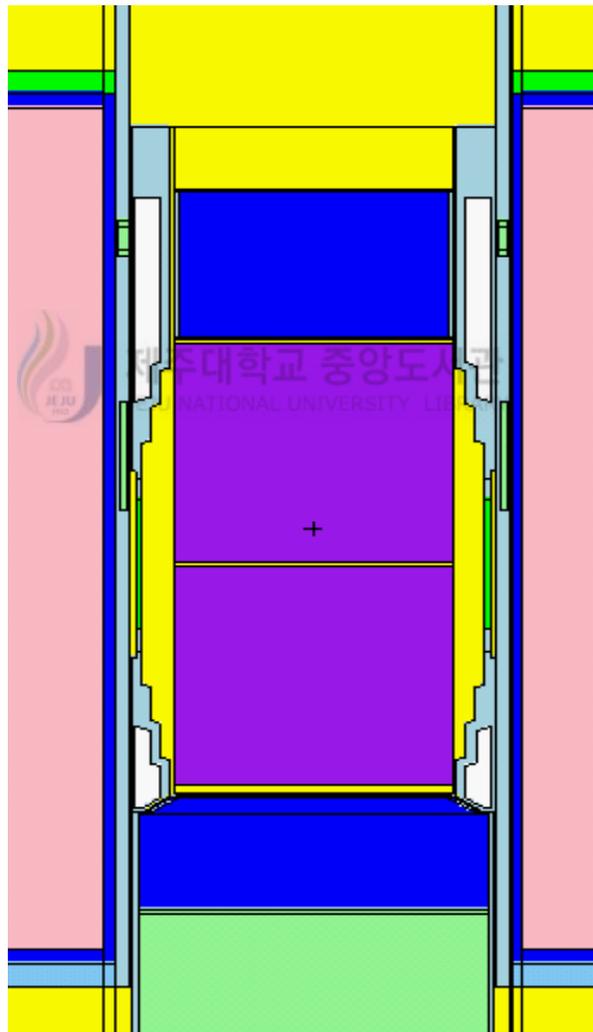


Fig. 28 Final model of neutron screen in NTD-irradiator

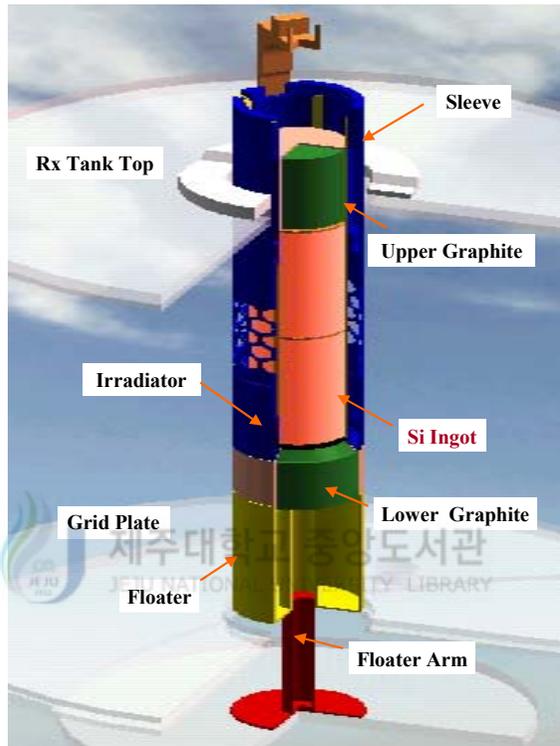


Fig. 29 Whole assembly of optimal NTD-irradiator

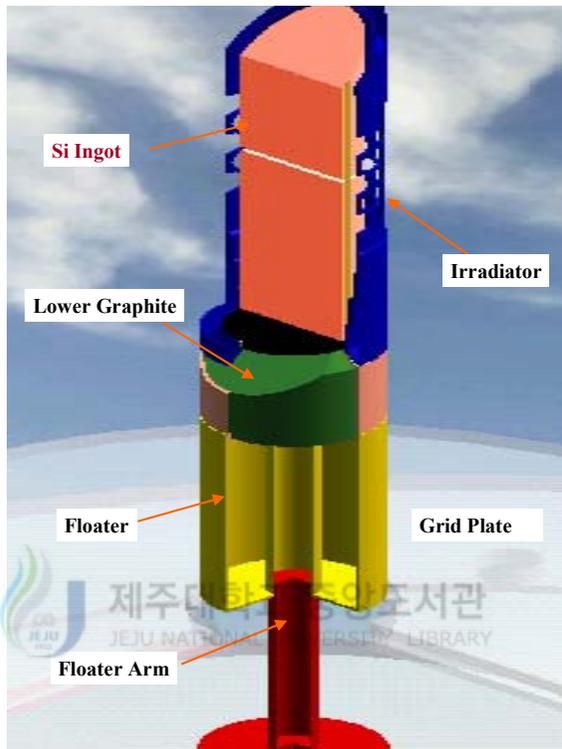


Fig. 30 Cross sectional view of NTD-irradiator

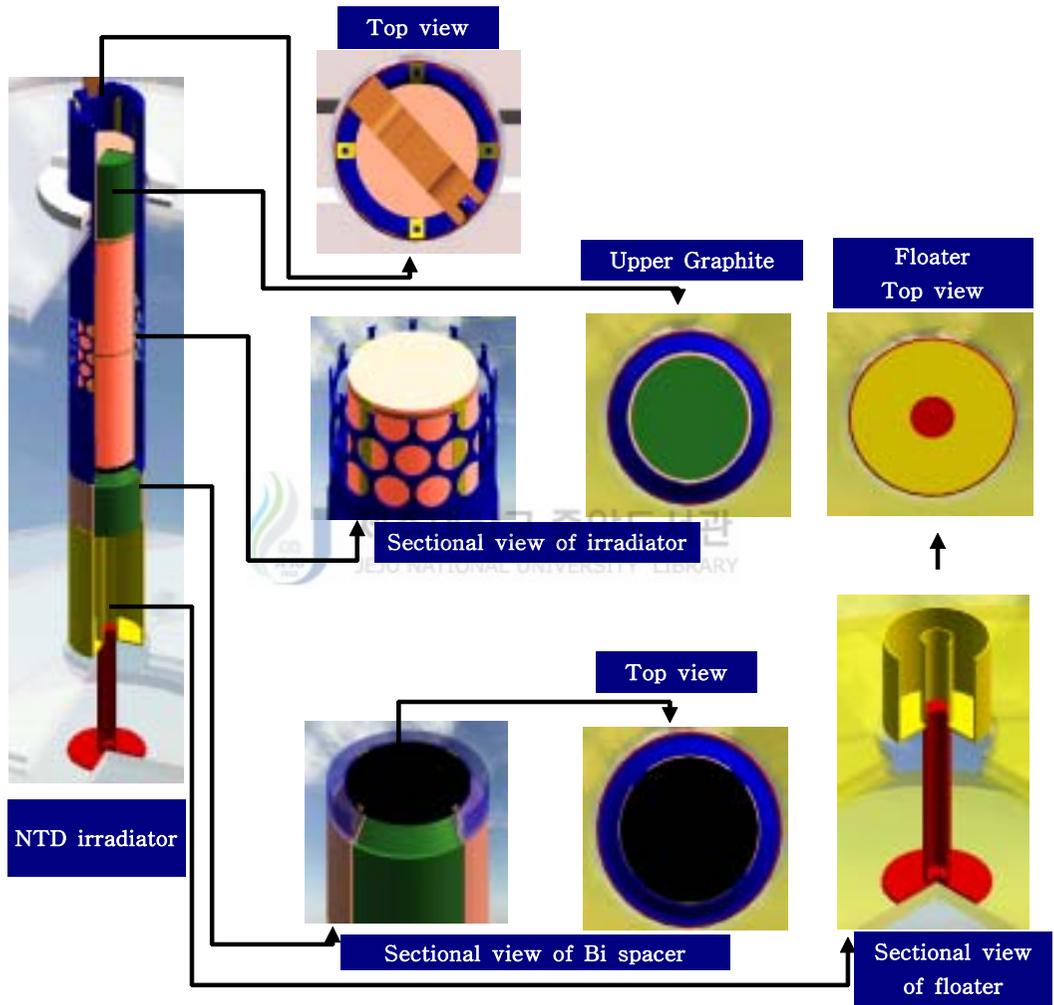


Fig. 31 Detail views of NTD-irradiator

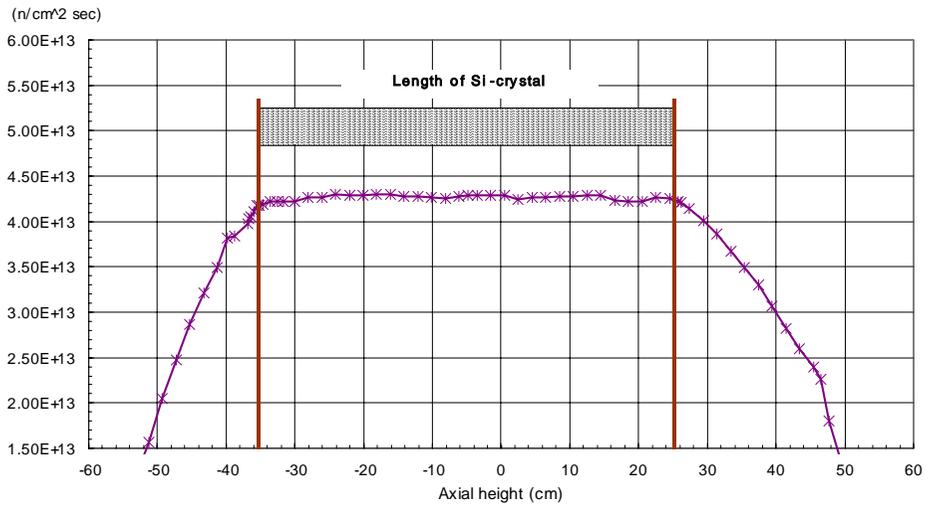


Fig. 32 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot

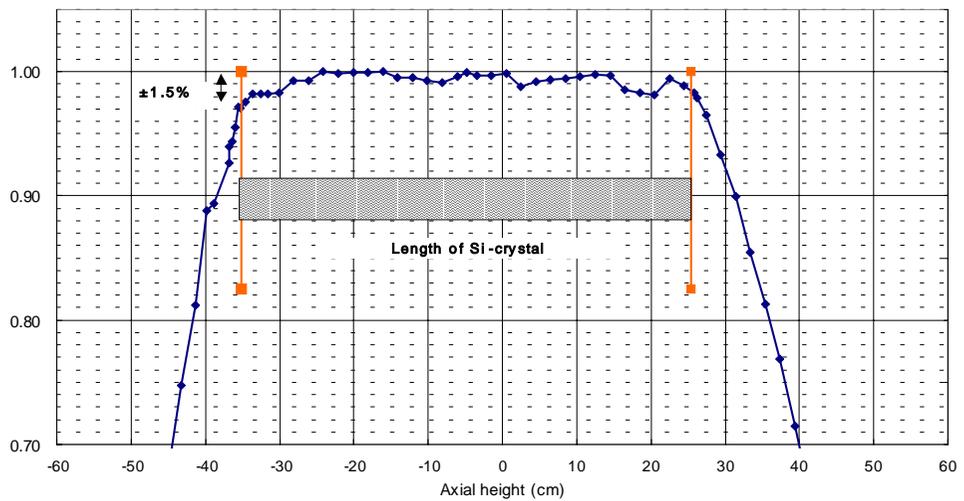


Fig. 33 Uniformity of axial neutron flux distribution within  $\pm 1.5\%$

Table 2 Flux characterizations of models

단위: ( $\times 10^{13} / \text{cm}^2 \text{sec}$ )					
Model	$\Phi_{\text{max}}$	$\Phi_{\text{min}}$	$\Phi_{\text{average}}$	$\delta\Phi = (\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}) / \Phi_{\text{average}}$	$\Phi_{\text{ave}} / \Phi_{\text{max}}$
M4.2.1	5.93	4.51	5.37	0.264	0.906
M4.2.2	5.33	4.24	4.90	0.223	0.919
M4.2.3	4.80	4.18	4.59	0.135	0.956
M4.2.4	4.79	4.14	4.52	0.144	0.943
M4.3.1	4.54	4.10	4.39	0.099	0.967
M4.3.2	4.36	4.08	4.27	0.066	0.978
M4.3.3	4.58	4.29	4.45	0.065	0.97
M4.4.1	4.35	4.10	4.23	0.059	0.973
M4.4.2	4.30	4.13	4.229	0.041	0.982
M4.4.3	4.34	4.15	4.24	0.045	0.978
최종 모델	4.30	4.17	4.26	0.030	0.992

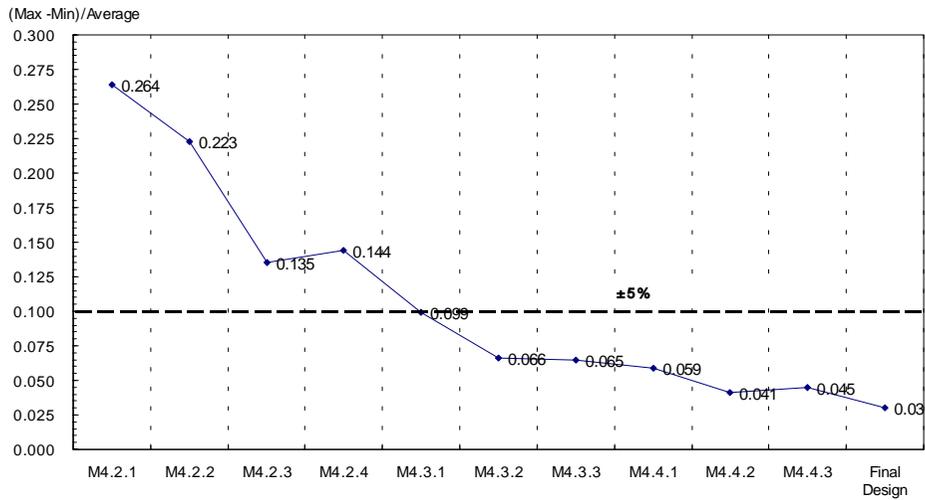


Fig. 34 Variation of  $\delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / \Phi_{ave}$  vs. MCNP models

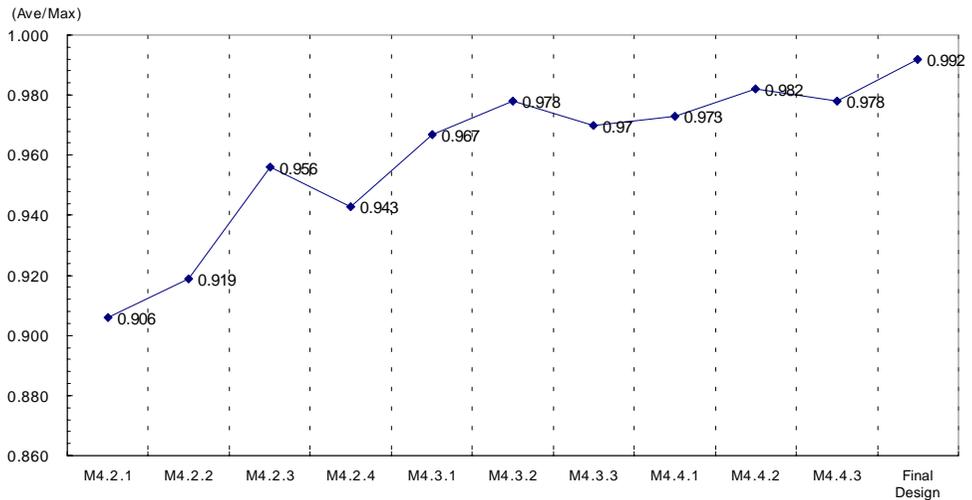


Fig. 35 Variation of  $\Phi_{ave} / \Phi_{\max}$  vs. MCNP models

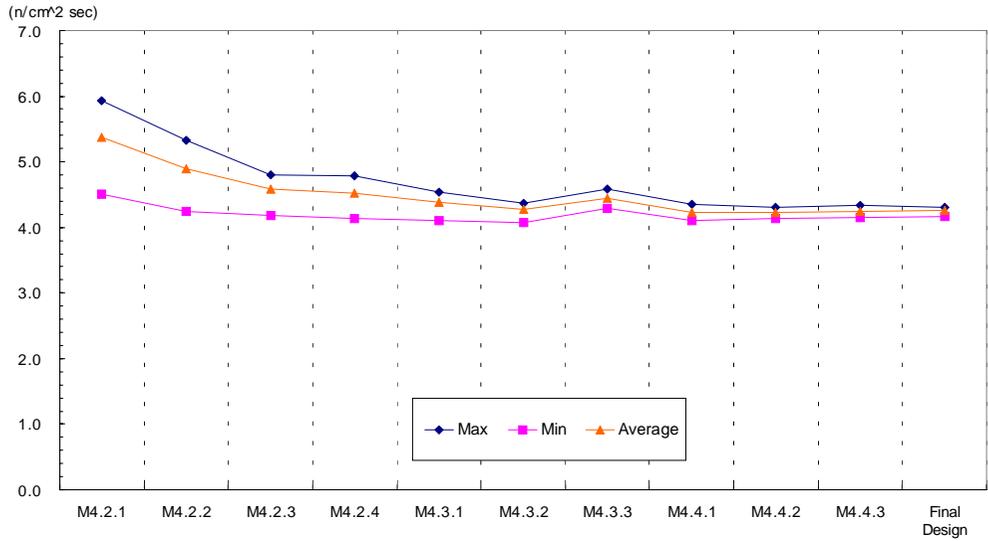


Fig. 36 Variation of axial flux (maximum, minimum, average flux) in Si-ingot



## 2. 제어봉 위치별 최적화 위치

그림 32와 33은 제어봉 위치가 350mm 즉 핵연료의 중심 위치에 있을 때의 열 중성자속의 분포이다. 즉 350mm에서는 조사조건에 맞는 균일도를 만족하고 있으나 원자로의 운전 조건에 따라 제어봉 위치는 수시로 바뀌게 되므로 각 제어봉 위치에 따른 중성자의 분포를 파악하고 그 위치에 대해서 중성자 균일도를 만족시킬 수 있는 조건을 찾아야 한다.

그림 37과 38은 제어봉의 위치 변화에 따른 중성자속 분포이다. 제어봉이 위로 이동하면 실리콘 단결정내의 중성자속은 밑에 부분은 낮아지고 윗부분은 약간 높아지는 경향을 보인다. 그 변화는 양 끝에서 가장 크게 나타나는데 단결정이 최적위치에서 1cm 벗어남에 따라 최대 2.5%의 변화가 있다. 하지만, 특이하게도 350mm 이하에서는 중성자속에 변화가 없다. 그리고, 그림 39에서 제어봉 위치가 400mm, 450mm, 500mm 일 때 실리콘 단결정을 각각 1cm, 2cm, 3cm 위로 이동시킨 결과 중성자속이

역전되는 결과를 보였다. 그림 39를 통해 제어봉에 따라 실리콘 단결정을 1cm 이내로 이동시킬 경우 평탄화가 가능함을 예측하게 한다. 이의 결과들로부터 각 제어봉 위치에 따른 열중성자속 평탄화 정도를 계산하였다. 표3은 각 제어봉 위치에 따른 열중성자속을 평탄화 하기 위해 실리콘 단결정을 이동시킨 결과와 그 평탄화 정도이다. 모든 위치에 대해서 평탄화가 고르게 이루어지고 있음을 알 수 있고, 단지 550mm 위치에서 평탄화 정도가  $\pm 2\%$ 를 보이고 있어 추가적인 분석이 필요함을 알 수 있다. 그림 40은 각 제어봉 위치 따른 실리콘 단결정내 중성자속의 평탄화된 모습이다.

Table 3 Uniformity of axial thermal neutron flux in Si-ingot

제어봉 위치	Si 단결정 이동	중성자속 평탄화정도
250mm	no move	$\pm 1.5\%$ 이내
300mm	no move	$\pm 1.5\%$ 이내
350mm	no move	$\pm 1.5\%$ 이내
400mm	+0.6cm	$\pm 1.5\%$ 이내
450mm	+1.3cm	$\pm 1.5\%$ 이내
500mm	+2.0cm	$\pm 1.5\%$ 이내
550mm	+2.7cm	$\pm 2.0\%$ 이내

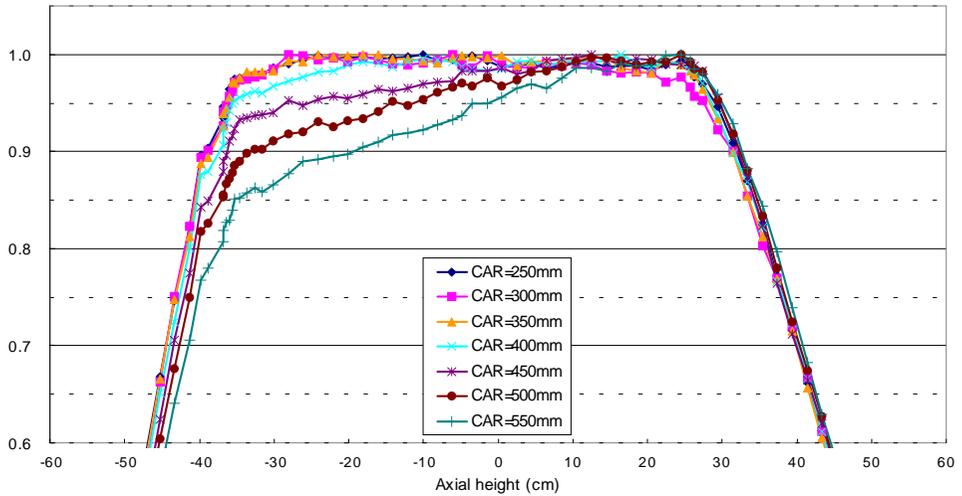


Fig. 37 Relative thermal neutron flux distribution in Si-ingot according to control rod positions

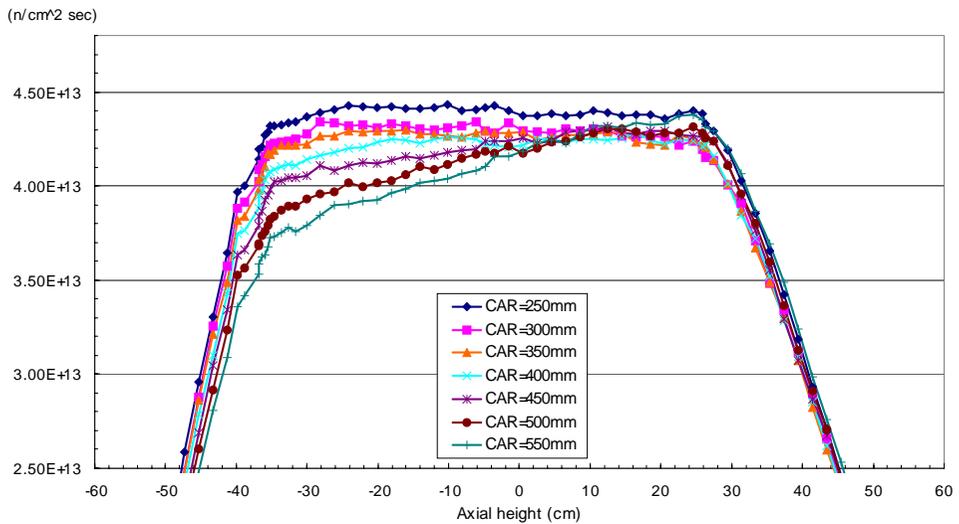


Fig. 38 Absolute thermal neutron flux distribution in Si-ingot according to control rod positions

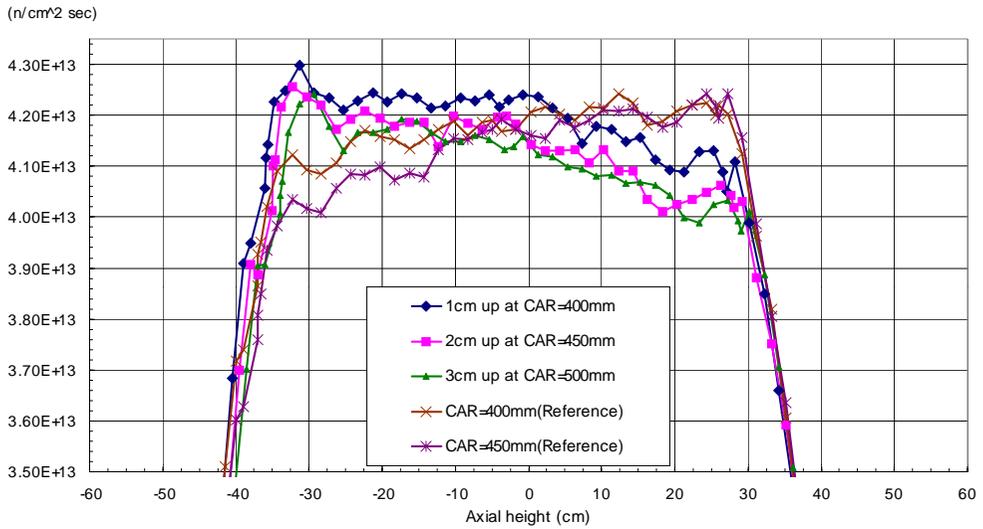


Fig. 39 Thermal neutron flux distribution as Si-ingot moves

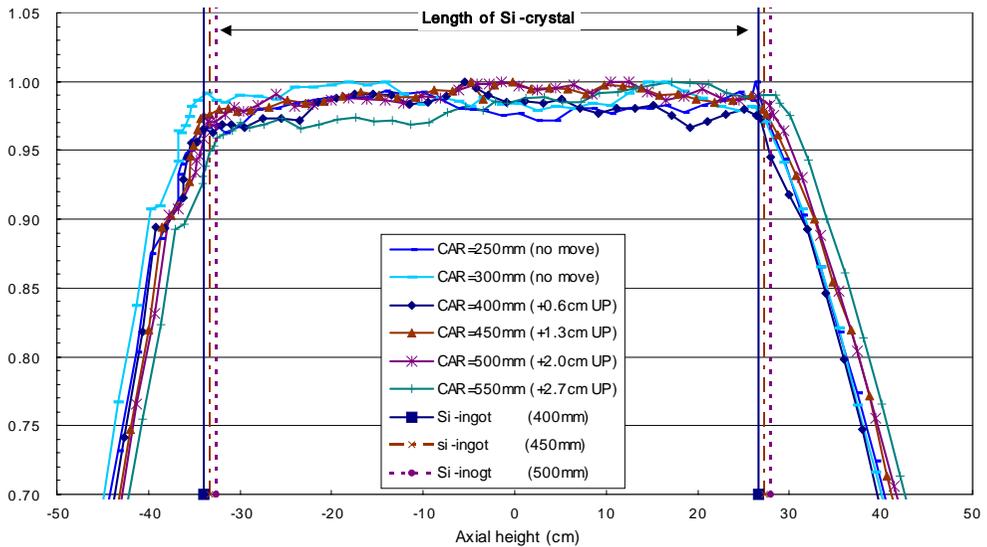


Fig. 40 Thermal neutron flux distribution flattened below  $\pm 1.5\%$  by adjusting the position of Si-ingot

## VI. 결 론

본 논문에서는 MCNP Code를 이용하여 NTD2 조사공에서의 NTD(neutron transmutation doping)를 실현시키기 위한 조사장치의 최적화 설계를 위한 분석을 수행하였다. 특히 조사장치 중 중성자스크린을 통한 중성자속 평탄화에 중점을 두어 연구하였다. 그리고 본 논문에서 사용한 Monte Carlo simulation code인 MCNP의 계산에 대한 신뢰성을 확인하기 위한 실험도 수행하였다. 실험결과 MCNP code를 이용한 중성자 스크린의 설계의 타당성을 확인 할 수 있었다.

최적화 방식은 MCNP code를 통해 다양한 중성자 스크린의 모델을 분석하여 점진적으로 최적화하는 방법을 선택했다. 즉, 예비 분석을 통해 얻은 결과들을 갖고 최적화 가능 모델을 도출하여 각 모델별 중성자속 평탄화를 점진적으로 개선해나가는 방법이다. 그 결과 실리콘 단결정의 축방향으로  $\pm 1.5\%$  이내에서의 균일조사를 할 수 있는 중성자 스크린을 설계하였다.

최적 설계된 중성자 조사장치의 특징은 다음과 같다.

1. 중성자 흡수체인 SUS, Ti, Ni 등을 사용하지 않고 H<sub>2</sub>O와 Al만을 이용하여 중성자 스크린을 설계하였다. 이는 장 반감기 핵종의 양을 최소화함으로써 폐기물을 줄이는 효과가 있고 제작비용을 절감할 수 있는 장점이 있다.
2. 중성자속을 평탄화 함에 있어 중성자속의 감소를 최소로 하여 높은 중성자속에서 평탄화를 이루었다.
4. 실리콘 단결정내 양단에 설치한 흑연 반사체는 양단의 중성자속을 높혀 평탄화에 유리하다.
5. floater는 실리콘 단결정 입·인출시 중성자 계측기 및 주변 조사공의에 대한 영향

을 최소화시켰다..

6. 제어봉의 변화에 따른 중성자속의 변화는 실리콘 단결정을 이동시켜 요구되는 균일도를 만족시켰다.



## 참 고 문 헌

C.M.Lederer and V.S.Shirley, 1978, Table of Isotopes, 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

C.K.Chu and J.E.Johnson, 1979, NTD silicon on high power devices, 2nd Int.conf. of Neutron Transmutation Doping in Semiconductors, Univ.of Missouri.

E.W.Haas and J.A.Martin, 1979, Radioactivity formation, 2nd Int.conf. of Neutron Transmutation Doping in Semiconductors, Univ.of Missouri.

H.M Janus and O.Malmros, 1978, Application of thermal neutron irradiation for large scale production of homogeneous phosphorous doping of float zone silicon ,IEEE Trans.on Electronic Devices, ED-23, 8.

IAEA, 1988, Silicon transmutation doping technique and practices, IAEA-TECDOC-456.

J.M.Meese and S.L.Gunn, 1980, Factor affecting phosphorous rate in NTD silicon, 3rd Int.conf.of Neutron Transmutation Doping of silicon, Copenhagen, Denmark.

J.F.Muhabghab and D.I.Garber, 1973, Neutron Cross Sections vol.1, Resonance Parameter, BNL325, 3rd ed., Brookhaven, Upton, New York.

김현준 외 10, 1988, 중성자변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, KAERI / RR-797/88, 한국원자력연구소.

김헌준 외 10, 1989, 중성자변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, KAERI / RR-912/89, 한국원자력연구소.

전병진, 이충성, 이병철, 김학노, 2000, 하나로에서의 NTD 방안 분석, 2000 추계 학술 발표회 논문집, 한국원자력학회.

전병진, 중성자 도핑, 2001.9., 기술 현황 보고서, KAERI/AR-604/2001, 한국원자력연구소.

황호정, 1999, 반도체 공정 기술, 생능출판사.



## 감사의 글

이제 하나의 작은 결실을 마무리지었습니다. 누가 보기에는 작고 보잘것없는 것일지도 모르지만 막연하고 불분명했던 2년의 세월을 통해 뚜렷이 앞에 나타난 한편의 논문을 보면서 흐뭇한 미소가 이는 것은 부인할 수 없습니다. 이 한편이 논문이 중요한게 아니라 또 다른 도전의 토대가 생겼다는 것에 더 큰 의미를 두고자 합니다.

이 작은 결실이 완성되는데는 많은 분들이 격려와 질책, 그리고 희생이 있었습니다. 제가 원자력연구소에서 연구할 수 있도록 기회를 마련해 주시고, 물심양면으로 지도해주신 이 현주 교수님을 비롯한 이 윤준 교수님, 박 재우 교수님, 천 원기 교수님, 김 신 교수님께 감사드립니다.

제가 한국원자력연구소에서 학연과정으로 연구하면서 한편의 논문을 완성할 수 있도록 많은 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 김 학노 팀장님과 전 병진 팀장님 그리고, 이병철 선생님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 1년간 동고동락하면서 학업 및 연구소 생활에 전념할 수 있도록 배려해주신 연구로 기술 개발실의 김 현일 실장님을 비롯하여 이 충성 선생님, 한 기양 선생님, 박 철 선생님, 채 희택 선생님, 오 수열 선생님, 채 희택 선생님, 이 기홍 선생님, 박 장준 선생님, 서 철교 선생님과 운전 관리실의 임 인철, 김 명섭 선생님, 기술 관리실의 장 천익 실장님께 감사한 마음 전합니다. 연구소 생활의 밑거름이 되도록 조언과 관심을 아끼지 않으셨던 한 현수 실장님, 조 운갑 선생님을 비롯한 동위원소실 선생님들께도 미흡하나마 이 논문으로 감사의 마음을 전하고자 합니다.

멀리 제주도에서 선배의 굳은 일을 도맡아 처리해 줬던 플라즈마 LAB의 지훈이, 상범이에게도 고맙다는 말 꼭 전하고 싶고, 대체에너지 LAB의 준호형과 경진형, 종관이형에게도 감사한 마음 전합니다. 그리고, 대학원 생활을 같이 하면서 서로 힘이 되어 주었던 상훈, 현조, 성택, 정선, 숙희에게도 고마운 마음 전합니다.

어려운 가정 형편에서도 학업에 전념할 수 있었던 것은 가족의 희생이 있었기에 가능했지 않나 생각합니다. 부족한 아들의 공부 뒷바라지에 주저하지 않으셨던 부모님과 동생들에게 미안한 마음 감출 수가 없습니다. 비록 이 한 권의 논문으로 전부다 보답 할 수는 없지만 이 작은 결실을 바탕으로 좀더 성숙된 아들, 오빠가 되도록 노력하겠습니다. 그리고 멀리서 항상 염려 해주시는 장모님과 많이 부족한 나를 끊임없는 사랑과 내조로 앞길을 열어준 내 아내 상진에게 미안한 마음과 함께 고마운 마음 전합니다.

이 작은 결실의 공을 제주도에 계신 부모님과 아내 상진에게 돌립니다.