

## 하나로에서의 NTD 실현을 위한 조사 장치의 최적화 설계

### An Optimal Design of the Irradiator for NTD in HANARO

송영동, 이현주  
제주대학교 에너지공학과  
제주시 아라동 산 1번지

전병진, 이병철, 김학노  
한국 원자력 연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로에 중성자 변환 도핑(NTD) 장치를 설치하기 위해 NTD조사공을 대상으로 축방향으로의 균일한 중성자 조사를 위한 조사장치 설계 분석을 수행하였다. 직경 5인치, 길이 60cm의 실리콘을 축방향으로 균일하게 조사하기 위해 다양한 구조의 스크린을 대상으로 중성자속 분포를 계산하였다. 그 결과 축 방향으로  $\pm 1.5\%$ 이내에서 균일한 조사가 가능한 스크린을 설계 할 수 있었다. 반경방향의 중성자속 분포는 그 변화가 크지 않고 조사 장치를 회전 시킴으로써 균일한 조사가 충분히 가능하다. 또한 제어봉 위치변화에 따른 중성자속 분포 변화에 대한 분석결과, 제어봉 위치가 50mm 변할 때 조사 장치의 최적 위치 변화는 1cm 이내임을 확인하였다.

#### Abstract

To set up the facility for NTD(Neutron transmutation doping) in HANARO, the optimal design of screen for flattening the flux has been performed with MCNP code. The neutron flux in silicon ingot with various screens is calculated. The silicon has the diameter of 12.7 cm(5") and height of 60cm. As a result of MCNP calculations, the screen can be modified to satisfy the required condition that the fluctuation of axial neutron flux distribution is below  $\pm 1.5\%$ . The radial flux can be flattened by rotating the device during irradiation. According to the analyzed result of control rod position, the uniform irradiation, when the control rod position changes by 50cm, can be realized by adjusting the location of irradiator within 1cm.

## 1. 서론

하나로에는 NTD(Neutron Transmutation Doping)를 위해 직경이 각각 18cm, 22cm인 조사공이 있다. 조사공 중 NTD2는 직경이 18cm로 중성자속 평탄화를 위한 스크린 설치를 고려할 때 5인치 Silicon 조사에 적당하다. 또한 고속중성자의 비율이 열중성자에 비해  $1/400^{(1)}$ 에 지나지 않으므로 고속 중성자에 의한 Silicon결정의 손상을 최소화시킬 수 있는 좋은 여건을 가지고 있다.

하나로에서 NTD를 위한 조사장치 구성에 고려한 것은 다음 세 가지이다. 첫째는 Si-ingot이 조사하는 동안 일정한 위치를 확보할 수 있도록 지탱해줌과 동시에 외벽을 가공하여 중성자속을 평탄화할 수 있게 스크린으로 사용할 수 있는 조사통이다. 둘째는 반경방향의 균일조사를 위한 회전장치이다. 셋째로는 조사장치의 입,인출시 원자로 반응도에 영향을 최소화하기 위한 장치이다. 이 장치는 Floater로서 속이 빈 알루미늄 통을 Si-ingot 아래에 위치시켜 Silicon 인출시 빈자리에 물 대신 Floater가 위치함으로써 반응도의 영향을 최소화하는 것이다. 본 논문에서는 이런 NTD 조사 장치와 균일한 중성자 조사를 위해 제안된 스크린 장치에 대해 MCNP를 이용하여 분석한 결과를 정리하였다.

## 2. 중성자속 균일화를 위한 스크린 설계 개념

NTD에서는 Si ingot 전체에 걸쳐 균일한 열중성자 조사와 정확한 목표 조사량을 얻기 위한 기술을 개발하는 것이 중요하다. 따라서 NTD 조사공에서의 중성자속 특히, 열중성자속에 대한 분포와 여러 가지 스크린 모델을 통해 중성자속의 평탄화 정도를 파악할 필요가 있다.

균일한 중성자 조사를 위한 방법에는 정 위치법, 왕복법, 도치법이 사용되고 있다.<sup>(2)</sup>

정 위치법은 가장 많이 사용되는 방법으로 Si-ingot을 한 위치에 고정시키고 조사하는 방법이다. 이 경우 중성자속의 변화가 제어봉의 위치에 따라 변화가 적어야 하고 축방향의 중성자속 평탄화를 위해 스크린을 별도로 설치해야 하며, 반경방향의 중성자속 균일화를 위해 회전을 시키게 된다. 왕복법은 Si-ingot을 상하로 왕복시킴으로써 균일하게 조사하는 방법이고, 도치법은 축방향 분포가 대칭에 가까운 곳에서 절반을 쪼인 뒤에 단 결정을 거꾸로 넣어 나머지 절반을 쪼이는 방법이다. 하나로에서는 NTD 조사공 하단부분에 여유 공간이 없는 대신 조사공 직경이 넉넉하여 충분히 스크린을 설치할 수 있는 점에서 정 위치법을 채택하고 있다.

중성자속을 평탄화 하기 위한 스크린은 일반적으로 Stainless Steel, Titanium, Nickel등의 중성자 흡수체를 사용한다. 그런데, 이런 재료를 사용하면 방사화된 뒤 반감기가 비교적 긴 핵종이 생기므로 최적 조건을 찾는 동안 수정이 불가능하고 모두 폐기물이 된다. 하나로 의 조사공은 단결정과 조사관 사이에 충분한 여유가 있기 때문에 물을 써서 균일화하는 방안을 모색하였다. 물의 두께를 조절하기 위한 재료에는 알루미늄을 사용하였다. 구조적인 강도를 가지면서 방사화된 뒤 긴 반감기의 핵종이 적게 생기도록 하기 위하여 Al-6063을 선택하였다. 이것은 Mg와 Si이 합금 제어 물질로 들어가고 다른 원소는 불순물로만 들어간다. Mg와 Si은 방사화된 뒤 반감기가 짧은 핵종이 생긴다. 이 스크린은 조사관 내에 항상 설치되도록 할 수도 있으나 단결정을 담는 통이 스크린 역할을 하도록 하여 원자로 조건이 바뀌면 쉽게 교체하도록 하였다.

### 3. 계산 및 결과

MCNP 계산에서는 목표로 하는 조사장치의 균일도, 실제 제작시의 공차등과 계산의 통계 오차를 고려하여 최대  $\pm 2.5\%$ 이내의 균일도를 유지할 수 있도록 스크린 설계를 수행하였다.

#### 3.1 모의 조사 장치를 이용한 중성자속 측정 및 MCNP 계산 결과와의 비교

사용한 MCNP는 하나로 시운전 시험 자료와의 비교를 통하여 정확도가 입증된 것이다. 그러나 연소 노심을 계산할 수 없기 때문에 새연료로 장전된 노심 조건에 대하여 계산하였다. 전통적인 균정수 생산과 노심 확산 계산으로 연소 효과를 고려할 수 있으나 NTD 장치에서의 복잡한 기하학적 조건을 모사할 수 없다. 이런 이유 때문에 MCNP로 예측하는 중성자속 분포가 실제와 얼마나 일치하는 지를 실험으로 검증하였다. 이 실험은 단결정 주위의 물 두께에 변화가 없는 경우와 변화가 있는 두가지 경우에 대하여 하였다.

그림 1과 같이 Si와 핵적 특성이 유사한 Al을 조사물질로 사용한 모의 조사 장치를 만들어 중성자속 분포를 측정하고 MCNP 계산 결과와 비교하였다. Al 원통의 가운데 및 가장자리에 구멍을 뚫거나 홈을 내어 Au wire를 설치하여 축방향 및 반경방향의 중성자 반응률을 구하였다. 축방향으로 몇 군데에 대하여는 Cd ratio도 측정하였다. 이 Cd ratio를 fitting하여 열중성자 반응률을 구하는데 이용하였으나 상부에 비교적 두꺼운 물로 둘러싸인 부분에서는 Cd ratio가 매우 커서 정확한 값을 반영하지 못하였다. 따라서 이 부분에 대한 열중성자 반응률 측정값은 실제보다 약간 낮다.

원자로 출력 30kW에서 측정된 Au wire의 열중성자 반응률과 계산된 열중성자속의 상대적인 축방향 분포는 그림 2와 같다. 예상되는 Si-ingot 조사 위치인  $-40\text{cm} \sim +20\text{cm}$  사이에서 축방향 분포는 유사함을 알 수 있다. 윗 부분의 측정값에서 Cd ratio가 정확하게 보정된다면 전반적으로 계산과 측정은 잘 일치할 것으로 기대된다. VENTURE는 이 부분에서 더욱 큰 차이를 나타내는데, 이는 두꺼운 물이 있는 부분에 대하여 확산 이론이 정확성을 상실하기 때문이다.

그림 3은 중성자속 평탄화를 위한 스크린 설계를 위해 Al 통의 중간부분을 약 1.15cm 깎아내어 Al 대신에 물이 차게 한 조사장치이다. 그림 4는 측정과 계산 결과를 비교한 것이다. 여기서의 측정값은 전체 반응률이며, 이전 실험에서 전체 반응률과 MCNP로 계산한 열중성자 반응률을 비교하였을 때와 비슷하다.

이들 결과들로부터 MCNP 계산 결과가 NTD 조사공내에서의 중성자 거동을 잘 예측할 수 있는 것으로 확인되었다. 연소 효과로 MCNP로 예측하는 분포보다 약간 평탄할 것으로 예측되나 그 정도는 작다. 그러나 이후 최적 모델을 찾을 때는 이 영향을 염두에 두었다.

#### 3.2 최적 중성자 스크린 모델

그림 5는 물, Al, 공기 두께를 다양하게 변화시켜 Si-ingot에서의 축방향 중성자속 변화를 분석하여 구한 최적 중성자 스크린 모델이다. 이 계산 모델에는 슬리브, 조사통 외벽을 이용한 스크린, Si-ingot, 반사체, Floater가 포함되어 있다. 슬리브에는 조사중의 중성자속을 감시하기 위한 SPND가 설치되며, 단결정 통을 안내하는 기능을 가진다. 중성자 스크린은 단결정을 담는 통의 외벽을 가공한 것으로써 아래와 위쪽 끝 부분에는 속을 비워서 끝 부분에

서 중성자속이 낮아지는 것을 최소화하도록 하였다. 또한 Si-ingot 양끝에는 흑연을 두어 끝 부분의 중성자속을 높이도록 하였다.

그림 6은 최적 중성자 스크린 모델에 대해 계산된 축방향 중성자속 분포이다. 그림에서 보듯이 Si-ingot이 조사되는 구간에서  $\pm 1.5\%$  이내의 균일도를 보인다. 실제로는 연소 효과로 인하여 양끝의 중성자속이 약간 높아질 수 있으며, 직경이 약간 작은 단결정이 들어갔을 때에도 양끝에서 상대적으로 약간 높아질 수 있다. 따라서 단결정의 중심 부분에서 약간 높은 분포를 갖도록 최적 조건을 정하였다.

계산으로 구한 최적 모델에 대해 직경이 약간 작은 Si-ingot(126.6, 126.1mm)이 장전되는 경우에 대하여 계산한 중간 부분에서 상대적으로 약간 낮아지는 것이 확인되었다. 연소 효과가 어느 정도 작용할지에 대하여는 아직 불확실하다. 그림 2, 4에서는 단결정의 위쪽 끝 부분에서 약간 높는데, 최적화된 조건에서는 수% 높아지는 것이 매우 큰 영향을 미친다. 이 영향은 실제 실험을 통하여 확인하여야 한다.

### 3.3 제어봉 위치 변화에 따른 영향

하나로 운전시 제어봉 위치는 노심 상태에 따라 변한다. 따라서, 제어봉 위치 변화에 따른 중성자속 분포 영향이 분석되어야 한다. 지금까지 분석은 제어봉 위치가 노심 중심위치인 350mm일 경우에 대해 수행되었다. 그림 7은 제어봉 위치가 250mm~450mm 사이에서 변할 때 Si-ingot에서의 중성자속 분포 변화이다. 제어봉 위치가 350mm 이하에서는 중성자속 분포가 거의 변화하지 않았으나 350mm 이상 올라가면 -30cm부근에서 제어봉 위치가 50mm 올라 갈 때마다 최고 약 2%씩 중성자속이 감소하고 있고 +10cm 이상에서는 약 0.5% 이내에서 증가하고 있다. 이러한 현상은 제어봉의 위치가 높아짐에 따라 중성자속의 분포가 위로 치우침을 뜻하며, Si-ingot의 조사 균일도를 유지하기 위해 제어봉 위치에 따라 조사 위치를 조정하여야 한다.

그림 8은 Si-ingot 위치를 제어봉 위치에 따라 위로 이동시켰을 때 축방향 중성자속 분포이다. 제어봉 위치가 400mm, 450mm, 500mm 일 때 각각 1, 2, 3cm씩 조사장치를 위로 이동시켰다. 그 결과 중성자속 기울기가 그 이전과 반대로 역전되었다. 즉 제어봉 위치에 따른 최적화 위치는 이보다 적게 올려야 함을 뜻한다. 즉 제어봉이 50mm 올라감에 따라 조사 장치가 올라 가야할 이동의 정도는 1cm 이내이다. 각 제어봉 위치별로 최적 조사 위치, 최적 조사 위치에서 벗어나는 정도가 균일화에 미치는 영향 증에 대하여는 현재 계산중이다.

## 4. 결 론

하나로의 NTD 조사장치를 설계하기 위해 다양한 중성자 스크린 모델에 대해 축방향 중성자속 분포를 분석하였다. 중성자 흡수체를 사용하지 않고 Al과 물의 두께만을 조절함으로써 축방향 중성자속을  $\pm 1.5\%$  이내에서 균일하게 조사할 수 있는 스크린을 설계하였다. Al 통을 이용하여 단순한 조사장치를 만들어 축방향 중성자속 분포를 측정하였고 계산과 비교하여 계산 결과의 신뢰성을 확인하였다.

또한, 원자로 제어봉 위치 변화에 따른 축방향 중성자속 분포 변화에 대한 분석 결과 제어봉 위치가 50mm 달라졌을 때 조사 장치의 이동 거리는 1cm 이내임을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 기관 고유사업에 대한 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 전병진 외. “하나로에서의 NTD 방안 분석”, 한국원자력학회. ' 2000 추계 학술 발표회 논문집.2000.
2. 김현준 외 “중성자변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발” 한국 원자력 연구소.1988.

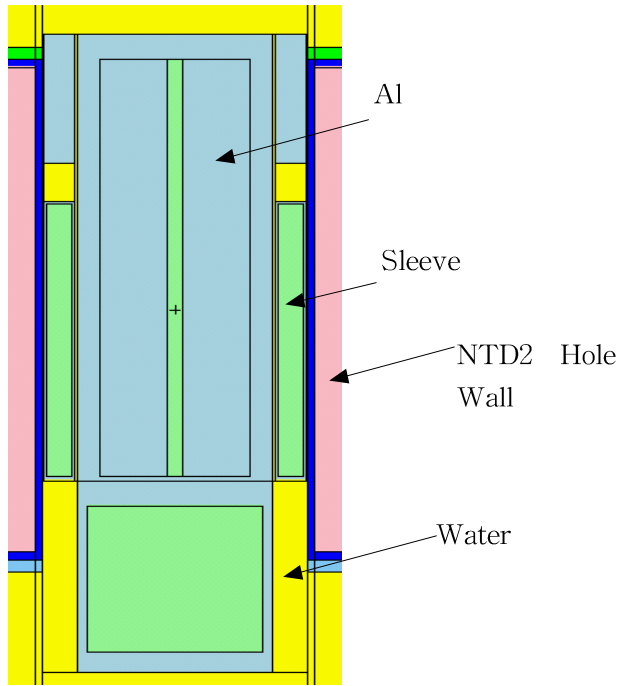


그림1. 중성자속을 측정하기 위한 실험 모델

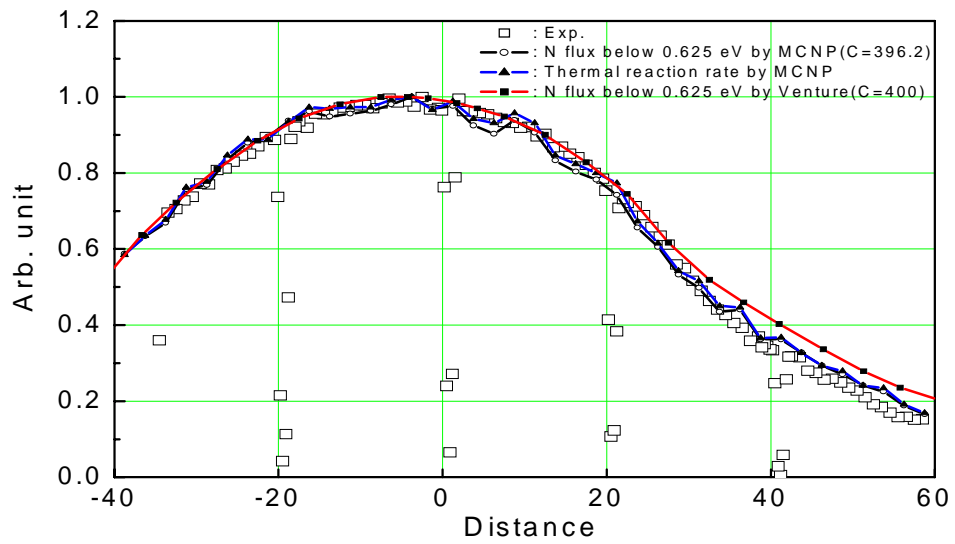


그림2. Au 열중성자 반응률 측정값과 MCNP 계산의 결과값 비교

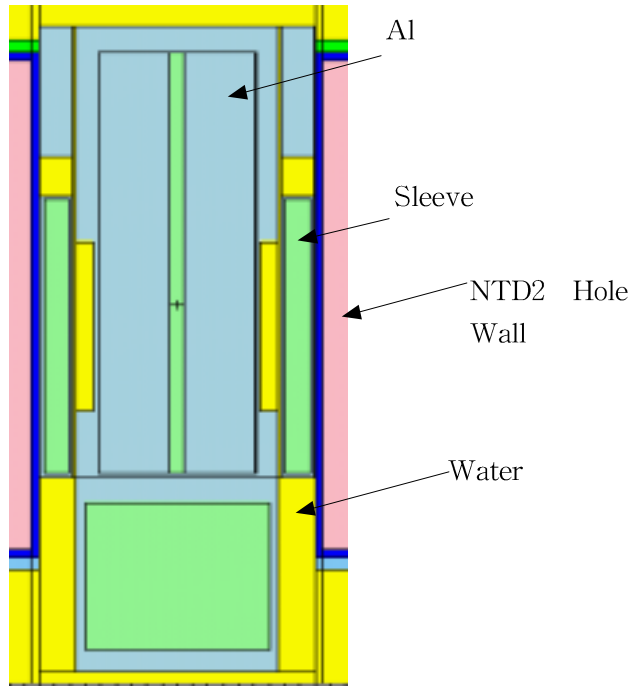


그림3. 슬리브를 가공한 중성자 조사 장치

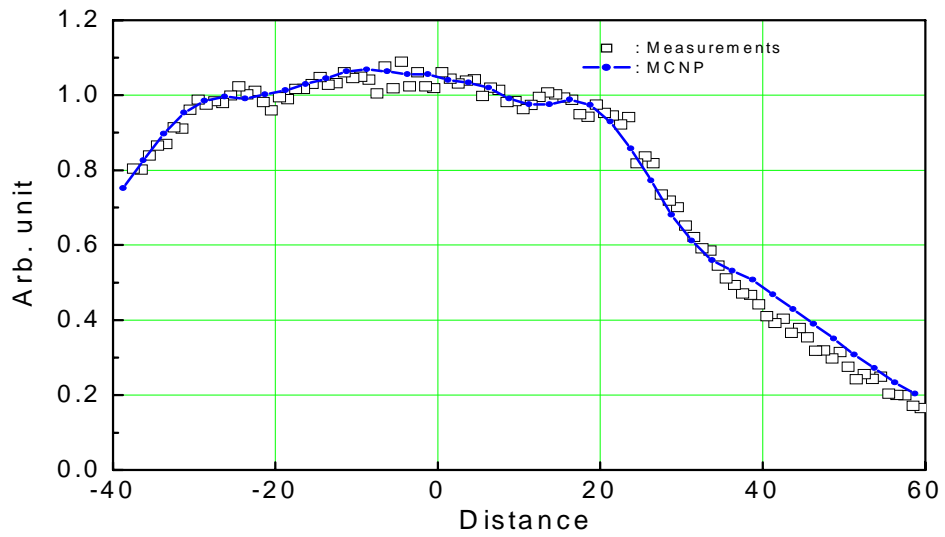


그림 4. Al 조사통을 깎아내었을 때 측정 및 계산된 중성자속 분포

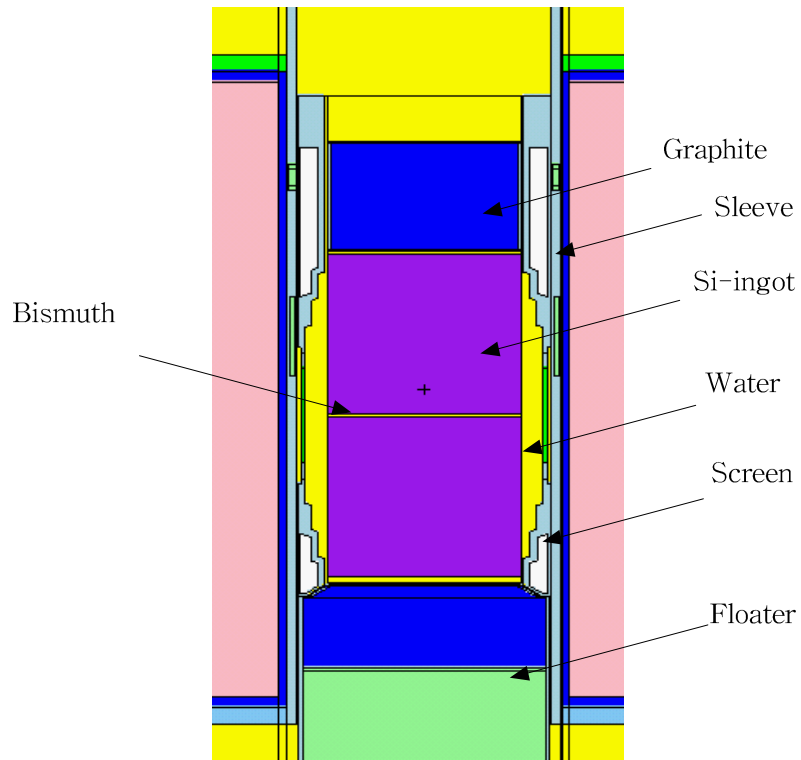


그림5. 최적 중성자 스크린 모델

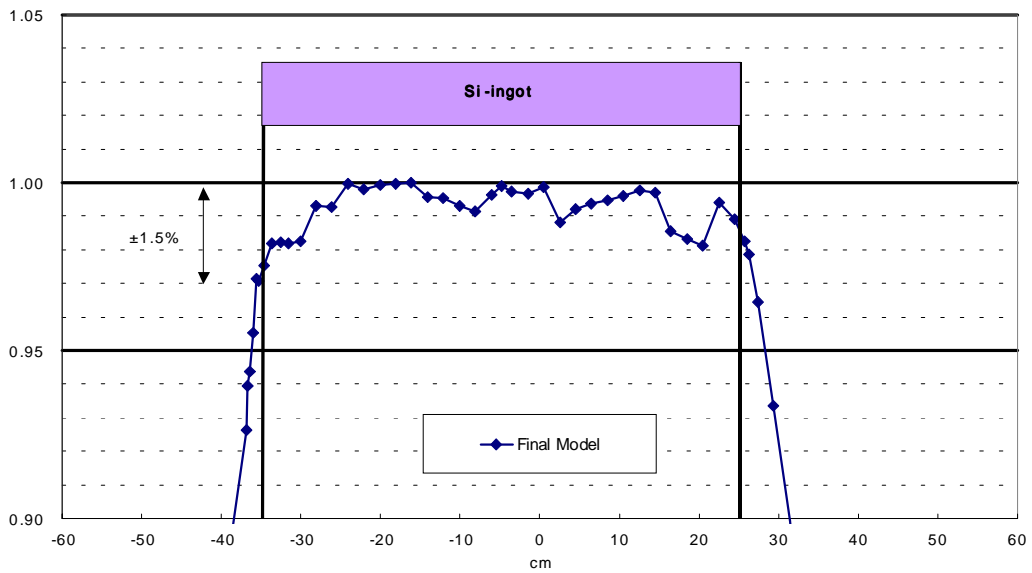


그림6. 최적화된 screen 사용시 Si-ingot 에서의 상대 중성자속 분포



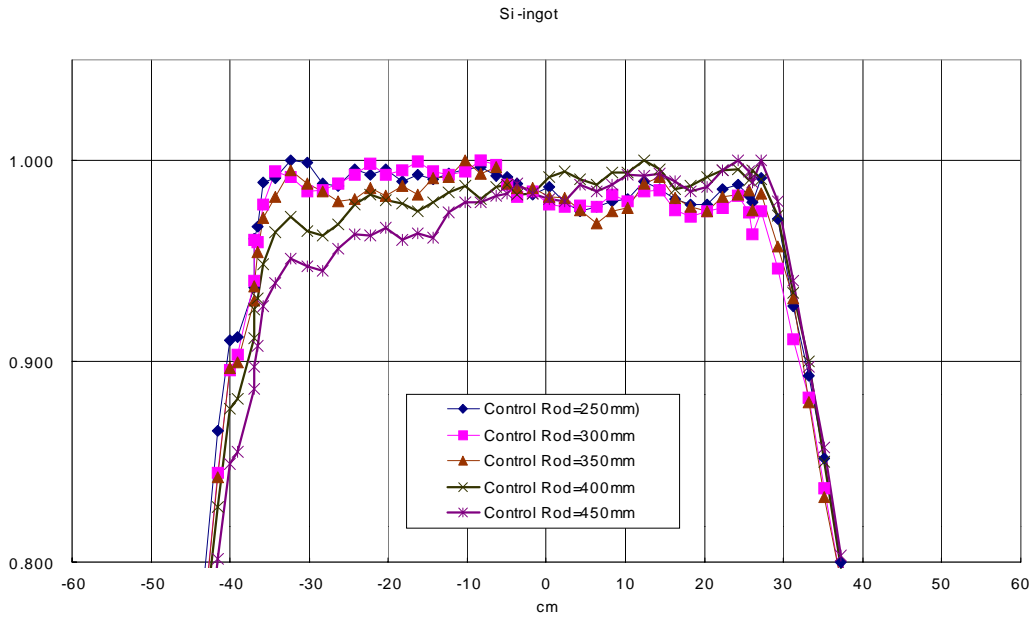


그림7. 제어봉 위치에 따른 중성자속 변화

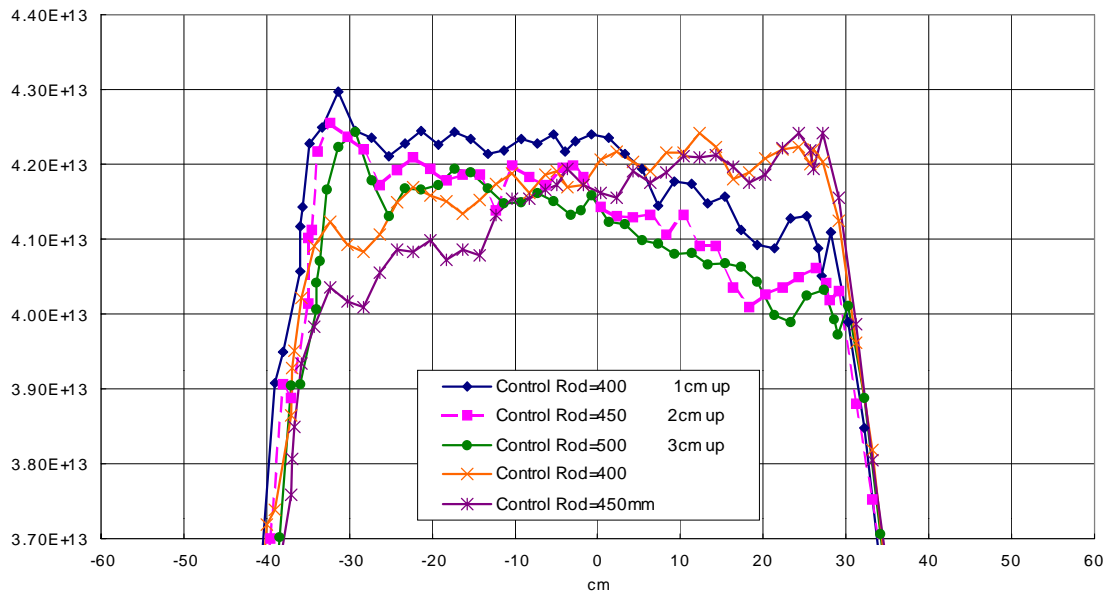


그림8. 제어봉 위치에 따라 조사장치 상 방향 이동시 중성자속 변화