

2000 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로에서의 NTD 방안 분석

Analysis of NTD Method in HANARO

전병진, 이충성, 이병철, 김학노

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

하나로에는 NTD(neutron transmutation doping)를 위하여 두 개의 수직 조사공이 마련되어 있다. 이를 이용하여 실제 NTD를 하는 경우에 대비하여 적절한 방법을 모색하였다. 중성자의 질 관점에서 보았을 때 이 조사공들은 NTD를 하기에 매우 양질의 조건을 갖추고 있음이 확인되었다. 하나로에서는 상하 중성자속을 균일하게 만든 뒤 단결정을 한 위치에 두고 단순히 회전만 하는 것이 가장 효과적인 방법으로 확인되었으며, 이를 구현할 수 있는 방안을 모색하였다. 평면적인 조사량 분포는 $\pm 2\%$ 이내의 균일도를 가질 것으로 예측되었으며, 임계제어봉 위치의 변화에 따라 중성자속의 상하 분포가 달라지는 것을 극복할 수 있는 방안이 제시되었다. 운전중에 단결정을 장전/인출함으로써 원자로 반응도에 미치는 영향은 무시할 수 있는 것으로 확인되었으며, 주변 실험공이나 운전용 중성자 계측기에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 제안하였다. 이 분석을 통하여 하나로의 NTD 용량은 연간 약 70톤으로 추정되었다.

Abstract

Two vertical irradiation holes are provided for the neutron transmutation doping in HANARO. Proper methods are searched as a provision for the actual NTD using these holes. From the viewpoint of neutron quality, these holes are confirmed having very good condition. Simple rotation of the single crystal at the fixed position with flattened axial neutron flux distribution is confirmed as the best method, and a methodology to realize it is searched for the HANARO. The non-uniformity of radial irradiation is estimated less than 2%, and a method to overcome the dependence of axial flux distribution on the control rod position is suggested. The reactivity change due to the insertion or withdrawal of the single crystal during reactor operation is confirmed negligible, and a method to minimize the flux change at the nearby neutron detector for operation or other experiments is suggested. Through this analysis, the capacity of NTD at HANARO is estimated about 70 tons/year.

1. 서론

NTD는 고순도의 반도체에 중성자를 쬐여 비저항의 균일도가 매우 높은 n-형 반도체를 얻는 것으로서, 연구용 원자로에서 상업적인 수입을 얻을 수 있는 매우 드문 예 가운데 하나이다. 하나로에는 NTD를 위하여 두 개의 수직 조사공(NTD1, NTD2)이 있다. NTD1은 6" 단결정을 쬐일 목적으로 내경을 22cm로 하였으며, NTD2는 5"를 목적으로 18cm로 하였다[1]. 하나로에의 설계와 건설이 진행되는 동안 NTD를 구현하기 위한 과제가 있었으나[2-7], 원자로가 건설되기 전에 여러 가지 자료가 불확실한 상태에서 장치를 설계하였고, 구동 장치를 원자로 수조 위에 설치할 수 있는 방안이 없어 지금까지 실현되지 못하고 있다. 근래에 원자로 운전 중에 노심에 시료를 삽입/인출하는 요구가 증대하여 원자로 수조 덮개의 개선 방안이 검토되고 있으며, 일본에서 NTD 서비스 가능성을 타진해옴에 따라 하나로에서 NTD를 실현하는 방법을 재검토하였다.

NTD는 주로 단결정의 품질이 좋은 Floating Zone법으로 만든 규소 단결정(FZ-Si)의 도핑(FZ-NTD)에 이용하고 있다. 원자로를 이용하여야 하므로 원자로 이용료와 운반비 등의 부담으로 확산법(FZ-DW) 등 다른 도핑 방법보다 비용이 많이 들며, 비저항에 반비례하여 조사 시간이 길기 때문에 상대적으로 수요가 많은 낮은 비저항을 얻는데 제약이 있다. 그러나 비저항의 균일도가 매우 높아야 하는 고전압 소자용으로는 아직 FZ-NTD가 유일한 방법이다. 따라서 NTD의 가장 중요한 요구 사항은 목표 비저항을 정확하게 맞추고, 균일도를 $\pm 5\%$ 이내로 유지하는 것이다.

반도체 단결정 생산 산업에서는 생산 효율을 높이기 위하여 직경이 큰 단결정을 키우는 방법을 꾸준히 개발하여 왔다. Czochralski법으로 키운 단결정(CZ-Si)의 경우에는 현재 8"가 주력 상품이나, 12"까지 가능하며 수년 내에 주력 생산품이 될 것으로 예상하고 있다. FZ-Si의 경우에는 현재 5" 단결정이 주력 상품이며, 6"도 생산하고 있다. 단결정 생산 기술만을 본다면 8"도 가능하리라 판단된다. 그러나 NTD와 경쟁적이며 현재 시장의 대부분을 차지하고 있는 다른 도핑 방법에서 균일도를 얻는 제약 때문에 앞으로도 상당 기간은 5"가 주력 상품이 될 것으로 예상된다. NTD의 경우에도 현재 전세계적으로 6"를 쬐일 수 있는 원자로는 매우 드물고, 현재 NTD를 하고 있는 원자로의 대부분이 오래되어 공급에 불안 요소가 있다.

하나로의 NTD1은 애초에 6"를 목표로 하였으나 8"도 수용할 수 있으며, NTD2는 5"를 목표로 하였으나 6"도 수용할 수 있다. 중성자속의 질도 NTD에 매우 적합하며, 상향 강제 대류로 냉각하는 원자로 설계 특성으로 NTD의 편리성도 매우 높다. 이런 특성으로 현재 전 세계적으로 NTD를 하고 있는 어느 원자로보다 높은 생산 용량을 가지고 있다고 판단된다. 국내 산업체에서는 아직 NTD를 위한 시설 투자를 고려하지 않고 있으나, 전세계적인 NTD 공급의 안정성에 일조하고 직경이 보다 큰 FZ-Si의 생산 동기를 부여하기 위하여 하나로에서 최적의 NTD 방안을 모색하고 있다. 현재의 NTD 서비스 요금은 단결정의 무게에 비례하므로 큰 단결정을 쬐일수록 유리하다. 따라서 큰 단결정의 수요가 창출되어 늘어나는 것이 유리하다. 이를 위하여 주어진 조사공 여건에서 중성자속을 최대한 하여 원자로 사용 시간을 줄이고, 낮은 비저항으로의 용도를 넓히는 것이 중요하다고 판단된다. 그러나 단결정에 결함을 만들고 열을 발생하는 고속중성자속과 감마선의 준위는 상대적으로 낮아야 한다.

같은 이유로서 쬐일 수 있는 단결정의 길이는 가능하면 길어야 한다. 현재 가장 긴 것을 쬐이는 곳은 DR3로서 70cm를 쬐이는 장치가 있다. 그런데 하나로에의 조사공에는 물이 채워져 있으며, 이곳에 큰 단결정이 들어가면 중성자속이 크게 증가한다. 이는 주변에 있는 실험

공의 중성자속에 영향을 미칠 뿐만 아니라 운전용 중성자 계측기의 신호에도 영향을 미칠 수 있다. 조사공은 반사체 영역에 있고 노심에서 비교적 멀리 떨어져 있으므로 원자로 반응도에 미치는 영향은 매우 작을 것으로 예상되나 이를 확인할 필요가 있다.

본 논문에서는 이상의 관점에서 최적의 NTD 방안을 도출하기 위한 분석을 하였다. 분석에는 HANAFMS 및 MCNP를 사용하였다.

2. 계산

계산은 2000년 중반에 22MW로 운전할 때의 노심을 대상으로 하였으며, 이의 노심 배열은 그림 1과 같고, NTD 조사공의 구조는 그림 2와 같다. 하나로의 노심 관리 계산에는 HANAFMS를 사용하여 왔으며, 이 가운데 한 가지의 노심 조건에 대하여 계산하였다. NTD 조사공에서의 중성자속 균일화 방향을 정하기 위한 민감도 계산이나 감마 발열량 계산 등에는 전 노심에 새 연료가 장전되어 있는 경우를 가정하여 MCNP로 계산하였다. HANAFMS 계산은 원자로를 일정한 크기의 육각형 메쉬로 나누어 하며, 각 조사공에 대한 메쉬 구조는 그림 3과 같다. MCNP에서는 실제 구조를 그대로 묘사하여 계산하였다.

계산 결과 각 조사공에서의 고속 중성자속은 열중성자속의 1/400 이하였으며, 감마 발열량은 200W/g 이하였다. 이러한 조건은 NTD에 매우 유리한 것이다. 조사공에 단결정을 넣거나 빼내는 것이 반응도에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있는 정도이나 주변의 중성자속 분포에는 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히 NTD1 인근에 있는 운전용 중성자 계측기의 신호에는 약 5%의 영향을 나타내었다. 이 문제는 조사공에 빈통을 넣어두고 단결정이 이를 밀고 내려가는 방법으로 해결할 수 있을 것으로 기대한다. NTD-Si의 기본 반응인 Si-30의 흡수 단면적은 그림 4와 같이 축 방향에 따라 약간 다른 값을 가지는데, 열중성자 스펙트럼의 경화가 상대적으로 심한 가운데 부분이 가장 자리에 비하여 약 3%큰 것으로 계산되었다.

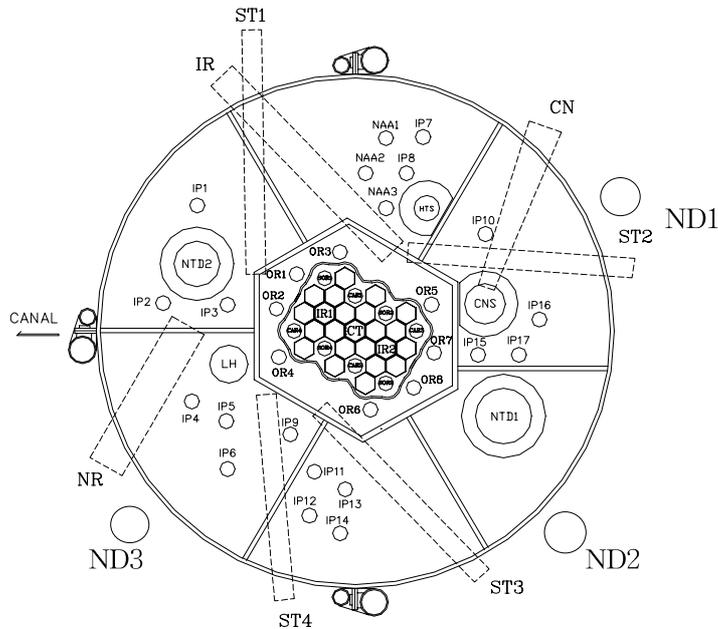


그림 1 하나로 평면도

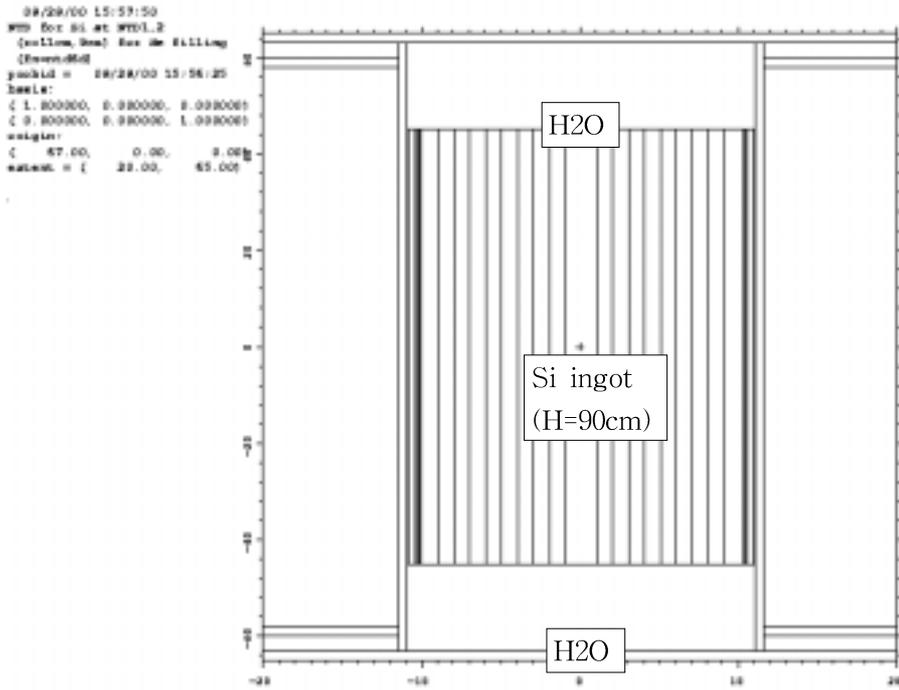


그림 2 NTD 1,2 조사공에 실리콘 장전 모형

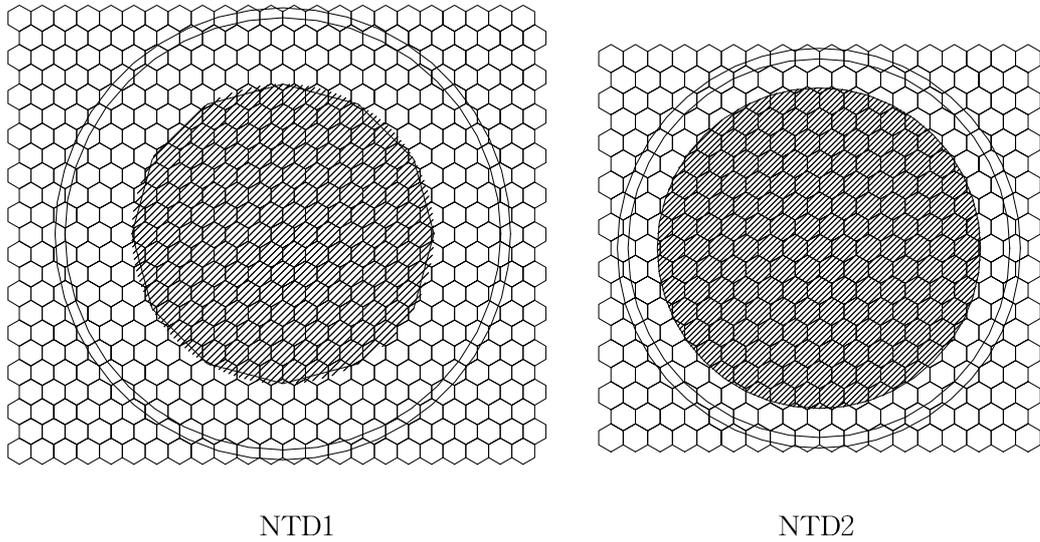


그림 3 NTD1, 2 조사공의 실리콘 장전 모형

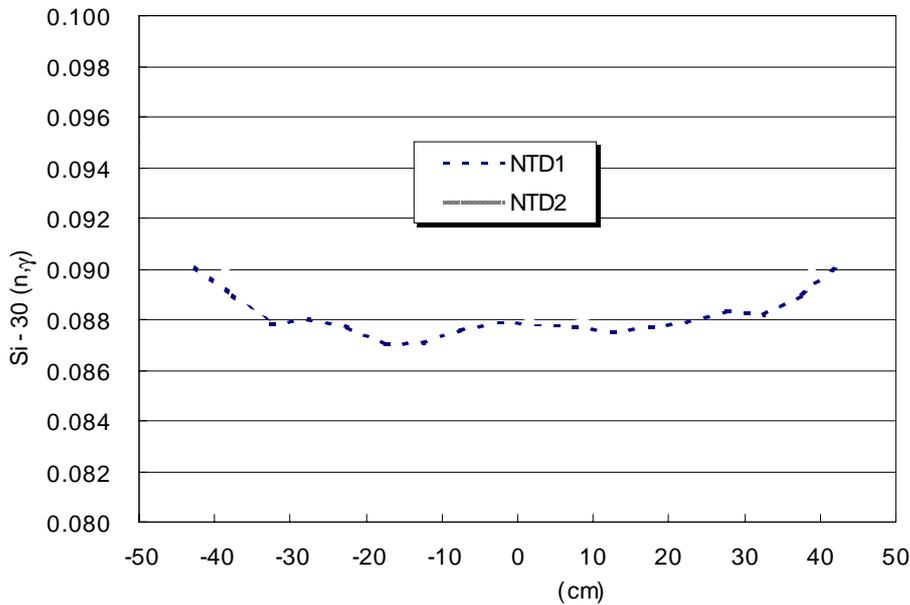


그림 4 MCNP로 계산한 Si-30 축방향 포획 단면적

3. 균일 조사 방법 검토

균일도를 얻는 방법으로는 조사공의 여건에 따라 1) 정 위치법, 2) 도치법, 3) 왕복법 등이 사용되고 있다. 이는 모두 축방향 균일도를 얻기 위한 것이며, 평면적인 균일성을 얻는데는 어느 경우에도 회전법을 이용한다.

정 위치법은 축방향 중성자속을 균일하게 만드는 것이다. 가장 흔히 사용되는 방법이나 제어봉의 위치 변경 등으로 축 방향의 중성자속 분포가 달라지는 문제를 해결하여야 하며, 중성자속이 높은 곳을 낮추기 위하여 흡수 물질 등을 넣는 경우 전체적으로 중성자속이 낮아질 수 있다.

도치법은 축 방향 분포가 거의 직선적인 모양을 갖는 등 점 대칭에 가까운 곳에서 절반을 쪼인 뒤에 단결정을 거꾸로 넣어 나머지 절반을 쪼이는 것이다. 일본의 JRR-3M과 JRR-4에서 이 방법을 사용하고 있다[8].

왕복법은 단결정이 중성자장을 여러 번 왕복하도록 하는 것이다. 벨기에의 BR2[9]와 DR3[10]의 최근 NTD 장치가 대표적인 예이다. 원론적으로는 매우 균일한 도핑을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있으나 단결정의 위치에 따라 중성자속의 분포가 달라지는 문제가 있다. 중성자 활용 관점에서 보면 왕복 운동하는 전체 구간의 평균 중성자속을 이용하는 풀인데, 중성자속을 거의 무시할 수 있는 구간까지의 평균이므로 활용도가 상대적으로 낮다. 또한 중성자장을 가운데 두고 양쪽 끝에 중성자속을 거의 무시할 수 있는 곳까지 단결정을 왕복시킬 수 있는 공간이 있는 경우에만 가능하다.

하나로의 중수 반사체 아래쪽에는 충분한 공간이 없으므로 전체 중성자장을 단결정이 왕복하도록 할 수는 없다. 또한 이후 분석 결과에서 보듯이 전체 구간을 왕복하더라도 정위치법에 비하여 중성자 이용 효율이 낮다. 도치법의 경우에는 중성자속을 낮추지 않고 사용하

므로 중성자를 최대한 활용할 수 있을 것으로 기대할 수 있으나 중성자속이 최대가 되는 중심부가 점 대칭에서 심하게 벗어나는 경우에는 이 부분을 사용할 수 없다. 또한 단결정을 뒤집어 넣는데 걸리는 시간이 전체 조사 시간에 비하여 비중이 크다면 불리하다. 하나로 경우에는 중성자속이 충분히 높아서 조사 시간이 비교적 짧을 것으로 기대되므로 정위치법이 가장 유리할 것으로 판단하였다.

우선 평면적인 중성자속의 분포가 어느 정도 균일할 것인지를 확인하기 위하여 각 조사공의 중심에 단순히 6" 단결정이 놓이는 경우에 대하여 계산하였다. 그림 5는 이 결과로써, 물에서는 열중성자속이 급격히 낮아지나 단결정 내부에서는 훨씬 완만하게 변하는 것을 알 수 있다. 단결정을 회전시키면 동심원 위의 각 지점은 같은 중성자속 조건에 놓이며, 이는 동심원 위 중성자속의 평균이다. 그림 6은 그림 3의 각 육각형 링별 평균 중성자속의 분포를 나타낸 것으로서 중심이 낮고 가장 자리가 높다. 최대/최소의 비는 1.035 이내이다. 이것은 동심 원주상의 평균이 아니고 동심 육각형내에 대한 것이므로 MCNP로 재확인하였다. MCNP의 통계적 오차를 고려할 경우 그 결과는 거의 같았다. 따라서 평면적으로는 $\pm 2\%$ 이내의 균일 조사를 할 수 있다.

축 방향 비저항 분포를 균일하게 하기 위하여 어느 방법을 선택하든지 열중성자속을 최대한 높이고, 축방향 중성자속 분포를 최대한 균일하게 하는 것이 유리하다. 반사체 영역에 중성자 단면적이 작은 물질이 있는 곳, 특히 빈 공간에서는 중성자속의 분포가 상대적으로 평탄해진다. 규소 단결정은 물에 비하여 단면적이 훨씬 작기 때문에 단결정이 들어가면 이곳의 중성자속 분포가 평탄해진다. 마찬가지로 축 방향 분포도 약간 더 평탄해진다. 그림 7은 조사공 내부에 물만 있을 때, 단결정을 넣었을 때의 조사공 내부 전체 평균과 단결정 내부에서의 평균값이 나타내는 축 방향 분포이다. 이 그림에서 앞서 예상한 것이 그대로 나타남을 알 수 있다.

이러한 현상을 최대한 이용하려면 단결정 이외의 부분에서 물이 차지하는 공간을 최소화하고 단면적이 작은 물질로 채워야 하는데, 현실적으로 가장 유리한 재료는 알루미늄이다. 특히 단결정을 담는 통은 많이 필요하며, 단결정을 담을 때와 빼낼 때의 작업에서는 방사능이 낮을수록 좋다. 알루미늄은 방사화 생성물의 반감기가 짧고 제작성 등이 좋다. 강도 때문에 합금을 써야할 것이며, 마그네슘이나 규소만 들어가는 합금을 선택하고 불순물은 최소로 하는 것이 좋다. 또한 단결정과 통 사이의 간격을 일정하게 유지할 수 있도록 정밀 가공하여야 한다. 통 바깥의 공간에도 알루미늄을 사용하되, 두께가 충분한 경우에는 속을 최대한 비우는 것이 좋다. 이렇게 하면 단결정 부분에서의 열중성자속이 높아지고 축 방향 분포도 더욱 평탄해진다.

제어봉의 위치에 따라 축 방향 중성자속 분포를 그림 8에 비교하였다. 이와 같이 분포가 다르지만 최대점이 일치하도록 이동시키고 상대적인 분포를 비교해보면 그림 9와 같이 거의 같은 모양임을 알 수 있다. 길이 60cm의 단결정을 쪼이는 경우를 가정할 때 가운데 부분 60cm 구간에서는 평균값에서 벗어나는 것이 0.6% 이내이다. 또한 60cm 구간의 가장 자리 중성자속은 최대 중성자속의 70% 이상이다. 단결정 바깥 물 층의 상당 부분을 알루미늄 등으로 대체할 경우를 그림 5로 추정하면, NTD1은 약 2배, NTD2는 30-50%의 전반적인 증가가 예상되고, 가장 자리 중성자속은 최대값의 75% 이상이 될 것으로 예상된다. 또한 그림 4에서 보듯이 가운데 부분의 Si-30 단면적이 가장 자리에 비하여 약간 작은 것을 고려하면 가장 자리의 중성자속은 중심에 비하여 약 3% 작은 분포를 가져야 균일한 비저항 분포를 얻는다. 이를 고려하면 균일화를 위하여 중성자속을 낮추어야 하는 정도는 20% 이내일 것

으로 추정된다.

따라서 평균적인 상하 분포를 기준으로 하여 균일화 장치를 설계하고 이 장치를 제어봉의 위치에 따라 상하 이동을 할 수 있도록 하면 항상 매우 균일한 도핑을 할 수 있다. 그림 8에서 최대값의 위치는 제어봉의 위치에 따라 최대 5.1cm의 차이를 나타내었다. 따라서 균일화 장치가 10cm 정도만 상하 이동을 할 수 있으면 어느 경우에도 최적의 위치에 둘 수 있다. 이러한 이동을 가능하게 하는 방법으로는 부력이나 스프링의 힘을 이용할 수 있다. 즉, 균일화 장치가 최고 위치에 있다가 단결정을 넣으면 이의 무게로 목표 위치로 내려가도록 하는 것이다. 단결정을 회전시키기 위하여 수조 상부에서 매달고 있으므로, 이 구동 장치에서 목표 지점까지만 내려가도록 할 수 있다. 이렇게 하였을 때 균일화된 중성자속은 $3.5 \sim 4.5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{-s}$ 로 기대된다. 향후 원자로 출력이 30MW로 증가되면 이에 거의 비례하여 $4.5 \sim 6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{-s}$ 이 기대된다. 조사 시간은 요구되는 비저항에 따라 달라지지만, NTD 용량을 추정할 때는 50 또는 60 Ω -cm를 기준으로 한다. 50 Ω -cm를 얻기 위한 조사량은 약 $5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ 이므로, 조사 시간은 약 3시간이다.

만일 도치법을 쓴다면 중성자속이 최대가 되는 지점을 중심으로 하여 그 위와 아래에 각각 30cm의 단결정을 넣는 경우가 중성자를 가장 최대한 이용하는 것이며, 가장 자리 중성자속이 최대값의 80%라고 가정하였을 때 평균적으로는 최대값의 90%를 이용하는 셈이다. 그러나 그림 9에서 보듯이 균일 비저항을 얻으려면 중심 부분을 어느 정도 피하여야 할 것이므로 90% 미만이 될 것이다. 또한 단결정을 뒤집어 넣기 위하여 30분이 필요하다고 가정하면 15 ~ 20%의 시간이 더 필요하다. 따라서 중성자 이용 효율면에서 정위치법보다 불리하며, 조사에 소요되는 인력이 2배로 증가된다. 이 방법이 갖는 유일한 장점은 균일화 장치를 설계할 필요가 없는 것이다.

하나로에서는 왕복법을 사용할 수 없으나, 이러한 방법이 가능하다고 하더라도 중성자 이용 효율이 훨씬 낮다. 왕복 구간은 중성자속이 충분히 낮은 부분까지 연장되어야 하는데, 전체 단결정이 반사체 바깥까지 나가도록 하여야 한다. 따라서 반사체 높이 120cm에 단결정의 길이 60cm를 더한 180cm 이상의 구간을 왕복하여야 하며, 이 구간의 평균 중성자속은 최대 중성자속의 약 40%이다. 또한 이 방법을 채택하려면 회전 이외에 왕복 운동을 하는 구동 장치가 필요하다.

이상으로서 하나로에서 가장 유리한 NTD 조사 방법은 정 위치법이며, 길이 60cm의 단결정을 30MW에서 조사할 경우 조사 시간은 약 3 시간이다. 단결정을 교체하는데 걸리는 시간은 약 30분으로 추정된다. 따라서 두 개의 NTD 공에서 하루에 13 ~ 14개의 단결정을 쪼일 수 있다. 연간 200일 운전하면 약 2,700개를 쪼일 수 있으며, 이는 약 70톤이다. 실제로는 직경이 작은 단결정도 쪼여야 하며, 현재의 주요 수요는 5"라 하므로 실제 조사량은 이보다 훨씬 적을 것이다. 그러나 현재 가장 많은 NTD를 하고 있는 것으로 알려져 있는 RISO의 DR3가 연간 약 40톤의 용량이므로[10] 하나의 NTD 용량은 매우 큰 것임에 틀림없다.

4. 결론

하나로에 있는 두 개의 NTD 조사공에서는 현재 생산되고 있는 FZ-Si 가운데 가장 직경이 큰 6"를 쪼일 수 있으며, 향후 8"가 생산되면 NTD1에서는 이것도 수용할 수 있다. 열중성자속에 대한 고속 중성자의 비는 1/400 이하이며, 감마 발열량은 200W/g 이하로서 NTD에 매우 좋은 여건의 중성자 질을 가지고 있다. 시료의 장전 또는 인출이 원자로 반응도에

미치는 영향은 무시할 수 있으나 주변 실험공이나 운전용 중성자 계측기에는 영향을 미칠 수 있다. 이 문제는 조사공에 빈 알루미늄 통을 넣어두고 단결정 이 이를 밀고 들어가도록 하여 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

단결정을 회전시키면서 쪼이면 평면적인 비저항 균일도는 $\pm 2\%$ 이내일 것으로 예측되었다. 축방향 균일화를 위하여는 정위치법이 가장 유리하며, 단결정 바깥에 물이 차지하는 공간을 최소화하고 빈 알루미늄 통을 두어 중성자속도 높이고 축 방향 분포도 더욱 평탄하게 할 수 있다. 제어봉의 위치 변화에 따라 축방향 분포가 달라지나 모양은 거의 같은 것이 확인되었다. 따라서 한가지의 균일화 장치를 두고 이것이 제어봉 위치에 따라 적정 위치에 놓이도록 하여 항상 균일한 조사가 가능할 것이다. 60cm 길이의 단결정을 조사시킬 경우 균일화된 중성자속은 최대 중성자속의 약 80%로 예상되며, 6" 단결정을 $50\Omega\text{-cm}$ 의 비저항을 갖도록 쪼이는 경우 용량은 연간 약 70톤으로 추정되었다. 이와 같이 큰 단결정에 대하여 대용량의 NTD 공급이 가능해지면 전세계적으로 NTD의 안정 공급에 크게 기여할 것으로 기대된다.

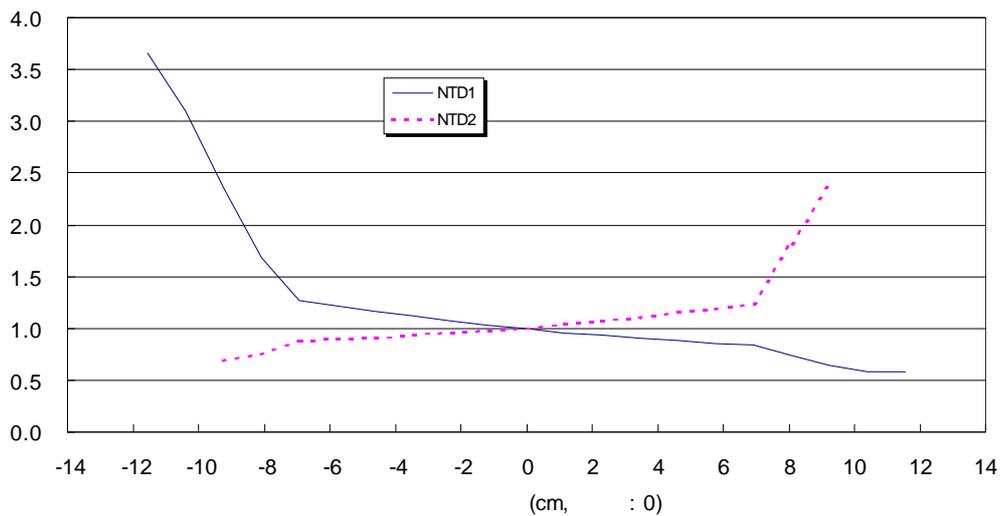
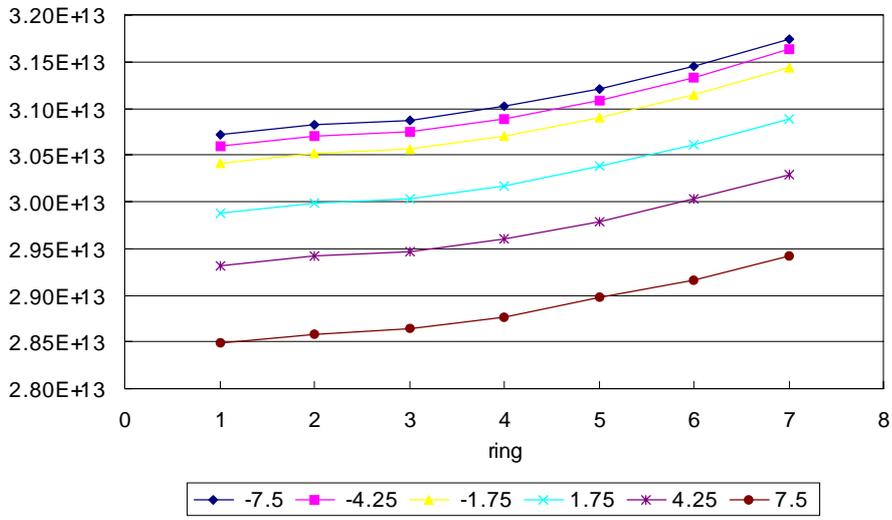
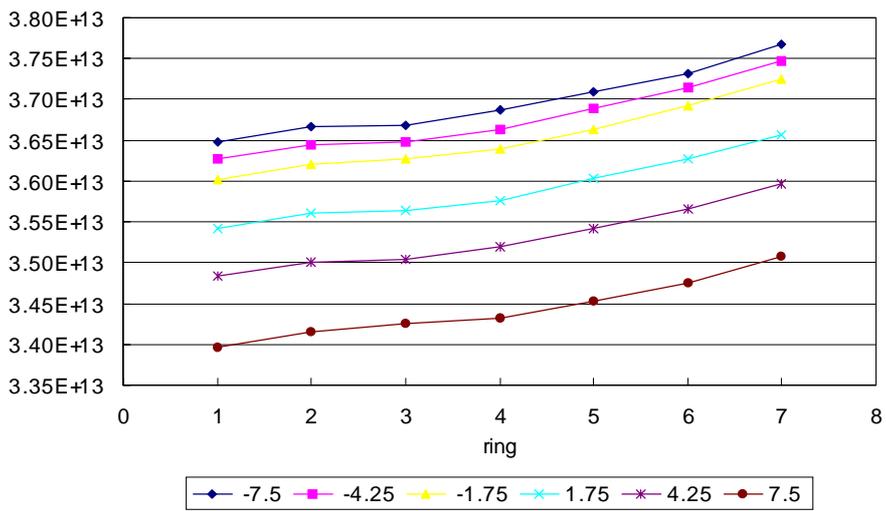


그림 5 NTD1, 2에서 조사공 중심을 기준으로 반경 방향 열중성자속 비

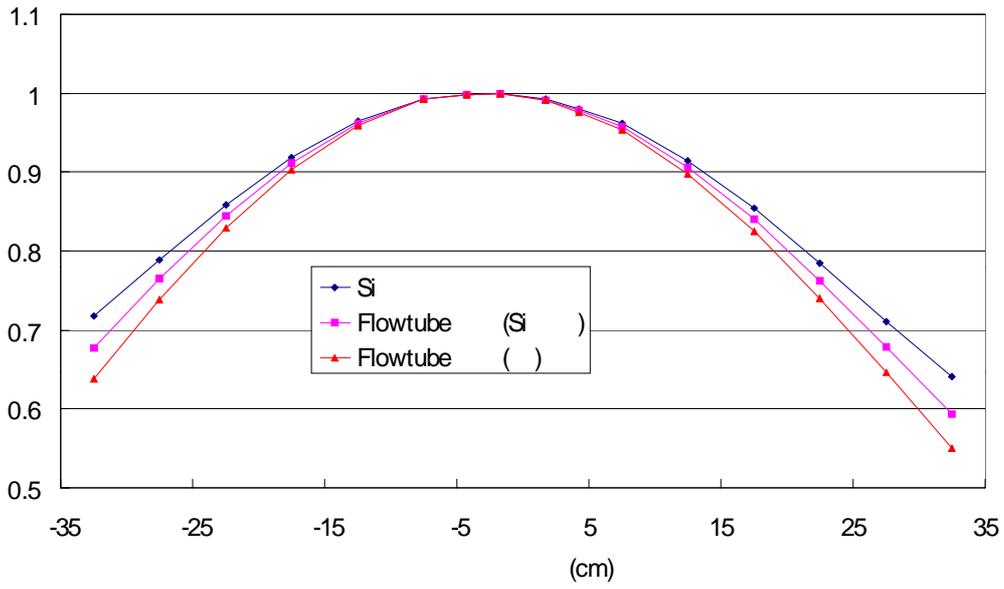


NTD1

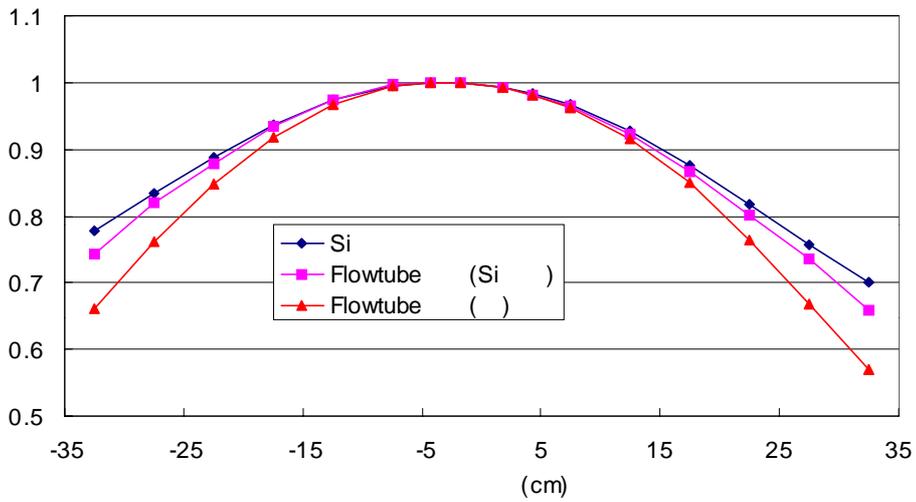


NTD2

그림 6 축방향 위치에 따른 NTD1, 2 ring별 열중성자속(제어봉 350mm)

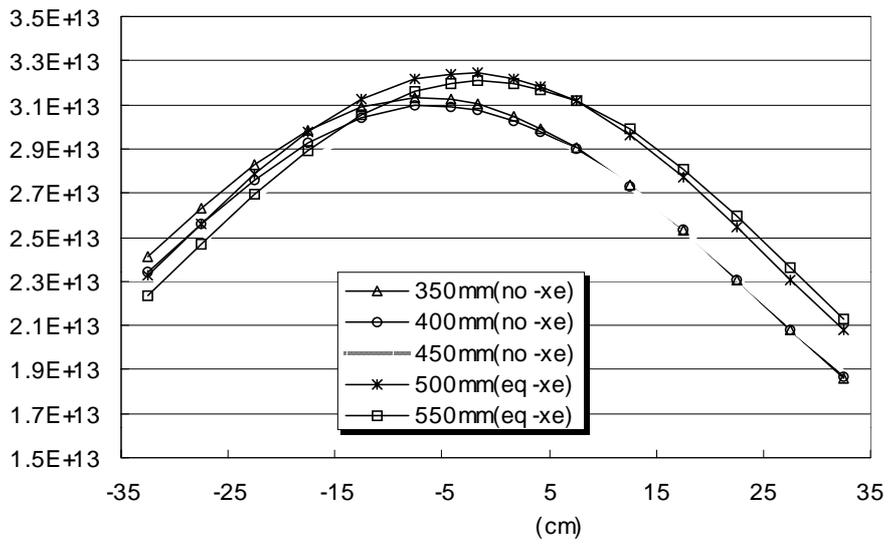


NTD1

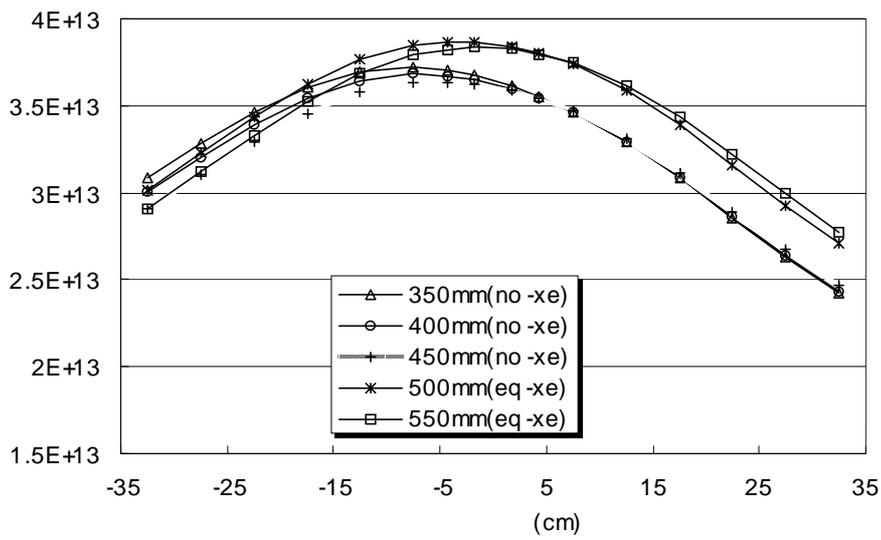


NTD2

그림 7 NTD1, 2에 물, 실리콘이 장전되었을 때 열 중성자속 분포 비교

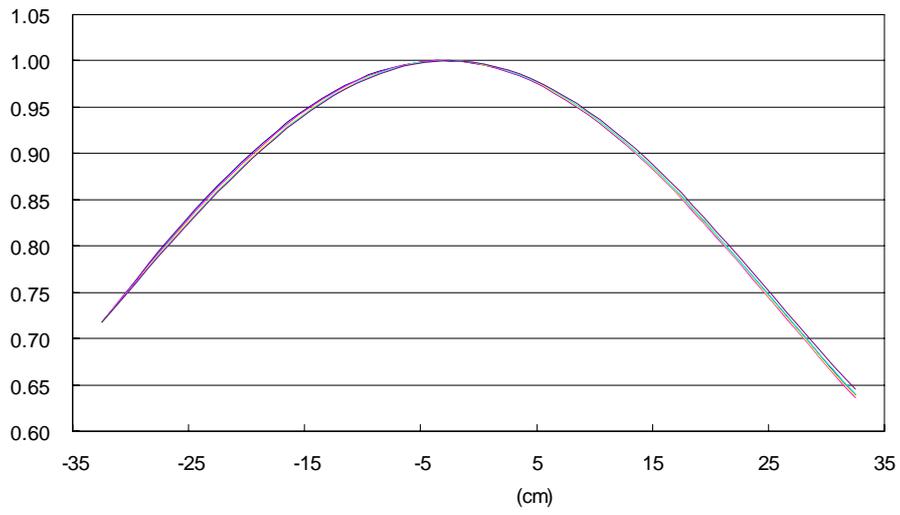


NTD1

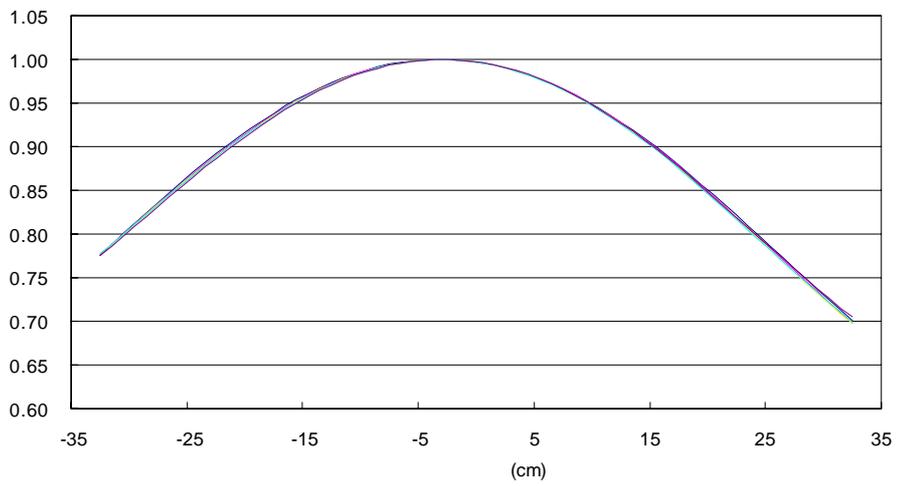


NTD2

그림 8 NTD1, 2에 실리콘 장전시 실리콘 부분 평균 열중성자속



NTD1



NTD2

그림 9 NTD1, 2 Si 영역에서 열중성자속 shape

감사의 글

본 논문은 과학기술부의 연구비 지원에 따라 수행된 결과입니다.

참고 문헌

1. 이창희, 개인적인 정보 교환
2. 김현준 등, 중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-797/88, 1989.5.
3. 김현준 등, 중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-912/89, 1990.6.
4. 김현준 등, 중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1017/90, 1991.8.
5. 김현준 등, 중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1120/91, 1992.6.
6. 김현준 등, 중성자 빔 이용 재료 물성 연구, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1349/93, 1994.7.
7. 김현준 등, 중성자 빔 이용 재료 물성 연구, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1533/94, 1995.7.
8. Handbook of Research Reactor Utilization, 2nd Rev., JAERI, 187-205, March 1999.
9. D. R. Cundy, et. al, SIDONE - a new silicon irradiation facility in BR2.
10. K. H. Nielsen, New horizontal facility for neutron transmutation doping of silicon, KAERI/GP-128/98, Proc. 6th Meet. IGORR, April 29-May 1, 1998, Taejon, Korea, 151-164.