'99 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

하나로 냉중성자원 설치공에서의 중성자속과 감마발열량 측정

Measurement of Neutron Flux and g-Heat in CN Hole of HANARO

조만순, 김학노, 박상준, 박국남, 손재민, 심철무, 최창웅

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로의 반사체 탱크에 있는 냉중성자원 설치공에서의 중성자와 감마선에 의한 발열량은 냉중성자원 설계 중 in-pile 구조물의 설계와 극저온냉동기의 용량 선정을 비롯한 설계의 가장 기본적인 자료로써 계산값과 실측값을 비교 검토하여 정확한 값을 평가하는 것은 매우 중요하다. 열발생량을 측정하기 위하여 방사화법에 의해 중성자속을 측정하고, 이온화 방법인 Bragg-Gray 챔버를 사용하여 감마선에 의한 열량을 측정하였다. 측정값과 비교하기 위하여 중성자속 계산에 대해서는 Venture 와 MCNP code 를 사용하였으며, 감마열량에 대해서는 MCNP 계산 결과를 이용하였다. 계산값이 측정결과보다 발열량을 적게 예측하고 있는데, 그 원인으로 측정시 원자로 출력값에 대한 정확성 검토와 IC-Gray 챔버의 보정 등이 제시되었다.

Abstract

The information of the heat load in the Hanaro CN hole is most fundamental data for design of the in-pile assembly and the cryogenic refrigerator of the system of cold neutron source(CNS). For the heat load determination, the following techniques were executed : 1) Measurement of neutron fluxes by the activation method and γ-heating rate by the ionization method 2) Calculation of the neutron spectrum by the Monte-Carlo method and normalization on experimental neutron fluxes 3) Consideration of the difference between real and measurement conditions. The calculation predicts the heat load lower than the measurement. It is caused from an inaccuracy of the reactor power estimation at the time of measurement and the selection of the calibration factor of the IC-Gray chamber.

1. 서 론

냉중성자는 장파장, 저에너지의 특성을 이용하기 때문에 열중성자를 이용하는 연구분야인 원자. 분자의 배열이나 열진동, 회전 등 미시적 차원의 연구와는 달리, 물질의 성질을 나타내는 좀 더 큰 분자 덩어리나 항공기의 금속균열, void 등의 연구를 할 수 있기 때문에 물리학에 있어서 현재까지 접근이 어려웠던 연구분야에 쉽게 접근할 수 있게 된다. 대표적인 연구로는 생체의 근본을 이르는 단백질, 아미노산, DNA/RNA 등의 구조연구와 기능성 플라스틱 재료, 초경량 복합재료와 같은 신소재의 구성요소인 폴리머의 연구 등 첨단분야의 연구에 필수적인 도구로 이용되고 있다. 이와 같이 유용한 연구도구로 사용될 수 있는 냉중성자를 생산하기 위해서는 냉중성자원(Cold Neutron Source: CNS) 장치를 원자로에 설치하여야 한다. 이 장치는 원자로심 반사체 탱크 내의 열중성자를 약 20K(영하 253 ℃)의 극저온 상태에 있는 액체수소나 액체중수소 등의 감속재 속으로 통과시켜 속도와 에너지를 낮추어 주므로써, 4Å에서 최대의 중성자속을 나타내는 맥스웰 에너지 분포를 가지도록 에너지레벨을 바꾸어 주는 장치이다. 원자로심에 설치되어 있는 감속재와 용기는 중성자와 방사선에 의한 핵발열로 인해 항상 비등, 증발되는데, 핵발열량을 제거하면서 일정량의 수소를 감속재 용기 내에 유지하여야만 안정된 냉중성자를 얻을 수 있다. 냉중성자원에서의 열발생은 두가지 경우에서 발생된다. 하나는 중성자가 냉중성자원의 감속재 또는 감속재용기와의 충돌에 의하여 열이 발생되는 경우이며, 다른 하나는 γ-양자가 냉중성자원 감속재 또는 감속재용기에 흡수되면서 열이 발생되는 경우이다. 본 실험에서는 중성자에 의해서 발생되는 열량을 계산하기 위하여 경수가 채워져 있는 상태의 냉중성자원 설치공에서 방사화 foil과 Au wire를 조사한 후 고속중성자, 열외중성자, 열중성자 속을 측정하고 Monte-Carlo 기법에 의해 spectrum을 계산하여 normalize 한 후 중성자 에너지 영역별 flux를 계산하여 측정 결과와 비교하였다. 그리고, γ-양자에 의해서 발생되는 열량을 계산하기 위하여 냉중성자원 설치공에 IC-Gray 챔버를 조사한 후 그때 발생된 전류의 분포를 측정하고[1], 열량은 이온화 전류에 비례하는 성질을 이용하여 γ-에너지에 따른 전류로의 환산값인 K-factor를 곱하여 열량을 구하고, Monte-Carlo 기법[2]을 사용한 MCNP-4A code에 의해 구한 결과와 비교하였다. 이 결과에서는 알루미늄에 대한 열발생량만을 구하였으므로, 계산 code에 적용되는 중성자속과 γ 분포를 보정하여 MCNP 계산으로 실제 설계 모델에 적용하여 발열량을 구하였다.

2. 측정 방법 및 기술

2.1 방사화법에 의한 중성자속 측정

방사화법에 의한 중성자속 측정은 검출기의 크기를 매우 적게 할 수 있기 때문에 측정 지점에 검출기 삽입으로 인한 중성자 간섭을 최소화 할 수 있다는 장점을 가진다[3]. 본 실험에서는 열중성자속의 측정을 위해서 Fe, In, Au 및 Co와 같은 흡수단면적이 큰 검출기가 사용되었다. 열중성자로부터 공명중성자를 분리하기 위해 검출기의 일부분에 1 mm 두께의 카드뮴을 씌웠다. 고속중성자속의 측정을 위해서는 (n,p) 반응에서 2.3 MeV의 문턱에너지를 가지는 Ni 검출기와 (n,n') 반응에서 1.2 MeV의 문턱(threshold) 에너지를 가지는 In 검출기를 사용하였다[4][5]. 이 실험에서 사용한 검출기의 형상은 그림 1과 같다. 감마선 계측을 위해 ^{60}Co 1332 keV에서 25 %의 상대 효율과 1.9 keV의 분해능을 가지는 고순도의 Ge 검출기(ORTEC model)가 사용되었다.

중성자에 의해 t_{irr} 시간 조사 후의 물질의 방사능(A)은 이 감마선 계측기에서 측정한 감마선의 수(CPS)를 사용하여 구한다.

$$A(t_{irr}, t_c) = \frac{CPS}{eh} \qquad (1)$$

여기서 e은 측정한 감마선 에너지에서의 계측 효율, h는 생성핵의 측정 감마선에 대한 방출비이며 t_c는 조사 이후 계측까지의 지연시간이다.

열중성자와 문턱에너지 이상의 고속중성자에 대한 flux는 다음식으로 계산된다.

$$\Phi_{th} = \frac{2}{\sqrt{p}} \frac{A(t_{irr}, t_c)}{s_o} \frac{M}{gwmN_A} \frac{e^{lt_c}}{(1 - e^{-lt_{irr}})} \qquad (2)$$

$$\Phi_f = \frac{A(t_{irr}, t_c)}{s_{eff}} \frac{M}{gwmN_A} \frac{e^{lt_c}}{(1 - e^{-lt_{irr}})} \qquad (3)$$

여기서, N_A는 Avogadro 수, m은 시료 전체의 무게, M은 표적물질의 질량수, g는 동위원소 존재비, w는 전체 시료에 대한 표적물질의 함량(무게비)을 나타낸다.

2.2 감마 열량의 측정

γ-양자에 의해 발생되는 열을 측정하기 위한 방법으로는 calorimeter를 사용하는 기법과 이온화 방법을 이용하는 두가지 방법이 주로 사용된다. Calorimeter는 주로 10^{-2}~4 W/g범위와 4%의 오차 내에서 열량을 측정할 수 있으며, IC-Gray 챔버는 10^{-6}~10 W/g범위에서 약 10% 정도의 오차를 가진다[1]. 본 실험에서 사용한 IC-Gray 챔버는 러시아의 PNPI에서 수입한 것으로, 측정

정밀도는 calorimeter에 비해 약간 떨어지지만 측정의 편리성을 장점으로 들 수 있다. IC-Gray 챔버에 대해서는 그 신뢰성을 입증하기 위하여 PNPI의 WWR-M 연구로에서 quasi-adiabatic calorimeter와 함께 비교평가를 수행하였다. IC-Gray 챔버는 γ-양자에 의해 내부에 있는 전극에서 전류를 발생시키는 장치이며, 전류계를 연결하여 전류의 변화를 측정하도록 되어 있다. IC-Gray 챔버는 그림 2와 같이 원통형 구조를 가지고 있으며, 크기는 높이가 70 mm 외경이 18 mm이고, 0.5 mm 두께의 알루미늄으로 제작되었다. 내부에는 외경이 15 mm이고, 내경이 6.6 mm인 4.2 mm 두께의 실린더형 전극봉과 직경이 5 mm인 원통형 내부 전극봉이 있으며, 그 사이에 0.8 mm 두께의 실린더형 공기층이 존재하여 이 공기층이 감마에너지에 의해 이온화되면 전류가 흐르게 된다. 에너지는 생성된 전류에 비례하며, 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$q = K \times I \tag{4}$$

여기서, I는 생성된 전류(nA)를 나타내고, K는 비례상수로서 에너지로 환산하기 위한 계수이다.

본 실험에서는 사용된 IC-Gray 챔버는 평균 감마에너지가 0.661 MeV에서 보정되었으며, 이때의 K 값은 7.4 x 10^4 W/g.A이다. 환산계수를 구하기 위하여 두개의 알루미늄 전극봉에 대해 감마선원으로 Cs137을 사용하였다. 전류와 감마에너지에 대한 K-factor가 그림 3에 나타나 있다[1].

3. 결 과

3.1 중성자속

중성자속에 대한 측정결과를 Venture[7]와 MCNP code[8]를 이용하여 계산한 값과 비교한 결과는 표 1과 같다. 그림 4는 열중성자속의 상대값에 대하여 계산값과 측정값을 normalize하여 비교한 것이다. 상대값을 먼저 비교한 이유는 측정시 검출기를 삽입할 때, 측정 위치가 물 속 11 m 지점에 있기 때문에 위치의 정확성을 확인할 필요가 있고, 상대값과 계산값이 나타내는 경향이 서로 일치하지 않는다면 측정에 잘못이 있다는 것을 알 수 있기 때문에 상대값 비교가 중요하다. 결과에 의하면 상대값이 거의 일치하고 있음을 보여 준다. 그림 5는 절대값에 대한 측정치와 MCNP에 의한 계산 값을 비교한 것이다[9]. 이 결과에 따르면 계산값이 측정값보다 25%정도 낮게 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 하나로 성능시험 중 열 및 고속중성자속 측정, NAA에서의 열중성자속 측정 등의 결과를 MCNP 계산과 비교한 경험으로 볼 때, 열중성자속의 경우 계산과 실험의 차이가 10~15% 이내였고 일반적으로 방사화법에 의해 측정한 열중성자속은 비교적

정확하다는 것을 고려하면 CN 공에서의 열중성자속 측정결과와 계산의 차이는 조금 큰 것으로 판단된다. 이 차이에 대한 원인으로, 계산은 냉중성자원 설치공이 전부 물로 차 있는 것으로 가정하였지만 실제로는 알루미늄 파이프 내경 2.5 ㎝ 영역에는 공기로 차 있다는 점과, 계산시에는 측정과는 달리 모든 핵연료를 새것으로 가정하였다는 점을 원인으로 들 수 있다. 또한 실험시의 원자로의 출력값에 대한 정확성이 검토되어야 하며, MCNP 계산 결과를 절대값으로 환산할 때 사용한 인자도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

3.2 감마 열량

감마발열량은 원자로 출력 1 MW에서 IC-Gray 챔버를 CN공의 바닥에서부터 5㎝ 간격으로 올리면서 측정하였다. 각 위치에서의 측정결과는 표 2와 같다. 설치공의 중앙 높이보다 9㎝ 상부에서 측정된 감마발열량은 q_g^{Al} =4.5x10^{-3} Watt/gm-MW였다. MCNP로 같은 위치에서 구한 Al에 대한 발열량은 q_g^{Al} =7.0x10^{-3} Watt/gm-MW였다. 그림 6은 IC-Gray로 측정한 전류와 MCNP로 구한 감마발열량의 축방향 분포를 비교한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 위쪽에서는 분포가 비교적 잘 일치하고 있지만 아래쪽에서는 측정값이 조금 더 크게 나타나고 있다. 감마발열량이 차이가 나는 이유로, 실험시 주위에 물이 채워져 있었기 때문에 실제 환경과는 다른 이 물은 감마선을 감쇄 시키는 경향이 있을 뿐만 아니라, 물속의 수소와 (n,) capture 반응에 의해 2 MeV 이상의 에너지를 방출시킨다. 감마선 감쇄의 영향은 약 50%로 추정된다. 또한, IC-Gray 챔버는 0.662 MeV의 감마에서 보정되었지만 CN공에서의 감마에너지는 상세한 계산에 의하면 약 60%가 H의 (n,) capture 반응에 의한 2.23 MeV가 차지하고 있다. 따라서 IC-Gray 챔버가 이 2.23 MeV의 에너지를 count하지 못했을 가능성이 고려되어야 한다. 그림 4에 있는 환산계수에 의하면 2 MeV 이상 감마의 calibration factor는 0.662 MeV 감마의 calibration factor 보다 30% 정도 높다. 따라서 감마에너지로 환산하기 위해 사용한 K 값을 증가시키는 것이 필요하다.

3.3 설계 모델에 대한 전체 발열량 평가

MCNP에 의한 계산은 알루미늄 이외의 재질에 대한 발열 밀도를 예측한다. 냉중성자원 in-pile 구조물은 Al. 또는 지르칼로이를, 감속재는 수소 또는 중수소를 사용하며, 구조물에 대한 발열은 중성자, 포톤, 베타붕괴에 의해 일어나지만, 1 MeV 이상의 고속중성자에 의해 가장 많은 열이 발생된다. 여러가지 재질에 대한 발열 밀도는 표 3과 같으며, 설계 모델에 대한 전체 발열량은

표 4와 같다. 수소를 감속재로 사용할 경우 발열량은 중수소를 사용할 때보다 약 4배에 이른다.

4. 결 론

중성자속 측정결과와 MCNP 계산결과는 신뢰할 수 있는 범위에 든다고 할 수 있지만, 두번의 실험과 계산에 있어서 계산값이 모두 약간 낮은 경향을 나타내고 있으므로 계산에서 이를 고려해야 할 것으로 사료된다. 감마발열량에 대한 측정과 계산 결과에는 50% 정도의 차이가 있지만, 감마발열량 측정은 많은 경우 1.5~2배의 차이가 나는 실험들이 있기 때문에[1] 본 실험의 결과도 타당한 범위에 든다고 할 수 있다. 정확한 자료를 얻기 위해 IC-Gray 챔버의 보정을 재수행하여 재측정을 하거나, MCNP 계산결과를 CNS 설계에 이용하는 방안이 추천된다. 계산을 이용할 경우에는 지발감마선에 의한 영향에 대해서도 평가하여야 할 것이다.

참고문헌

1. A. P. Serebrov, S. I. Kalcheva et al., “Heat Release in CNS Model of the Hanaro Reactor”, PNPI Report for collaboration work with Hanaro, 1998

2. Y. S. Cho, J. H. Chang and C. O. Choi, “Conceptual study for the moderator selection of the cold neutron source facility for Hanaro”, Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 2, pp140~147, 1998

3. Donald D. Glower, “Experimental Reactor Analysis and Radiation Measurement”, Chap. 7, McGrow-Hill series in Nuclear Eng., 1965

4. J. C. Yang, “Measurements of thermal neutron spectrum parameters in the TRIGA MARK-II reactor”, Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 11, No. 1, pp21~27, 1979

5. Dong Hoon Kim, Hong Sik Kim et al., “Measurement of fast neutron spectrum and flux in central thimble of TRIGA Mark-II reactor,” Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 2, No. 2, pp67~72, 1970

6. Man Cho, “Fast neutron spectrometer”, Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 4, No. 1, pp47~59, 1972

7. C. S. Lee, Comparison between calculation by VENTURE and measurement for neutron flux in CNS hole, KAERI report HAN-RR-CR-98-051, 1998

8. Briesmeister ed., “MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A”, LA-12625-M, 1993

9. B. C. Lee, MCNP calculation for neutron flux and γ-heat in CNS hole, KAERI HAN-RO-CR-98-037, 1998

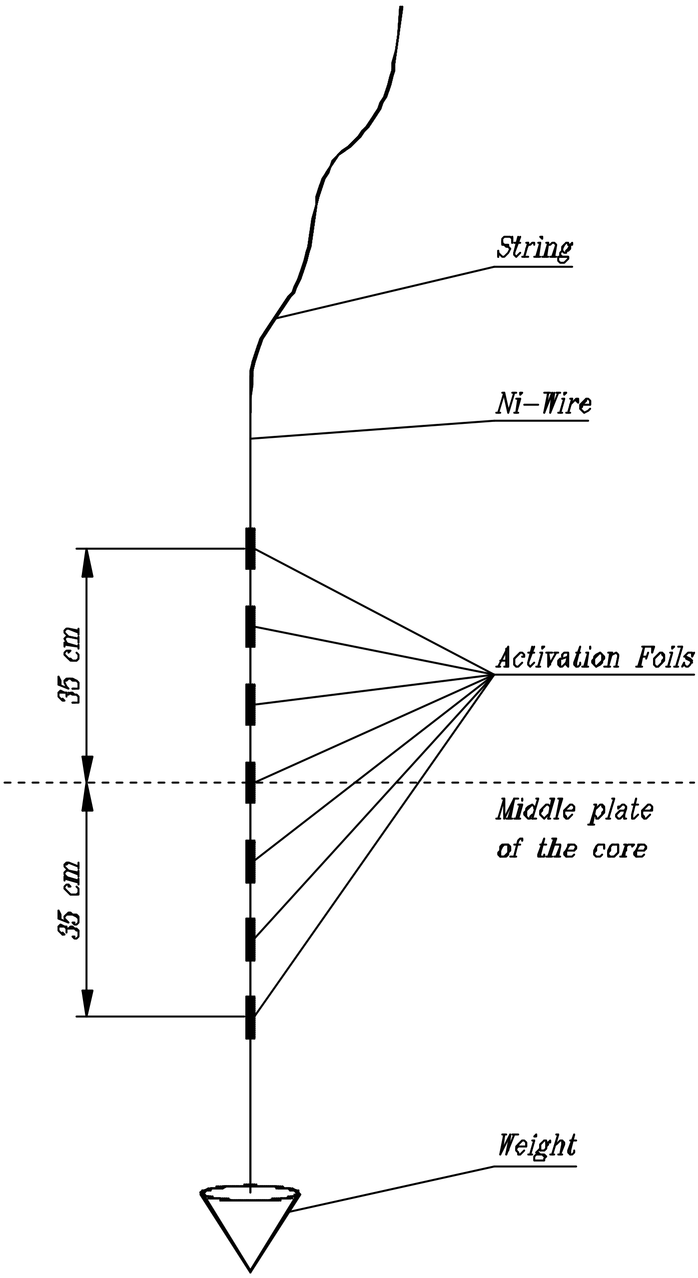
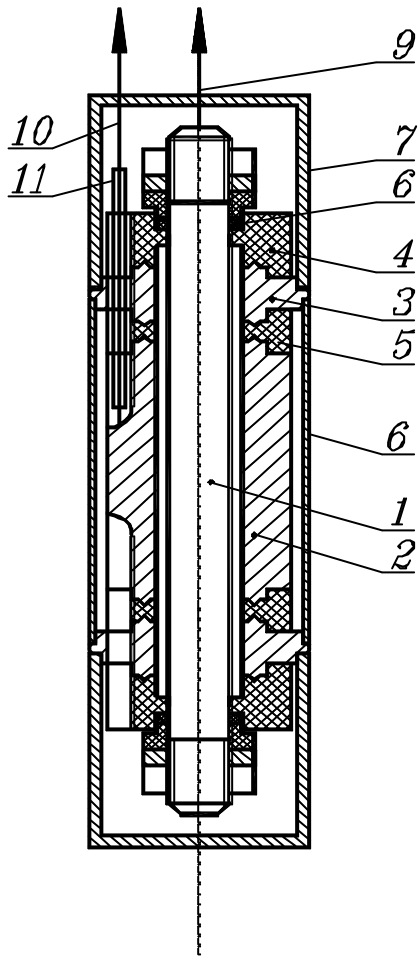


그림 1. Activation detectors



1,2 : Central and External Electrodes
3 : Security Electrode;
4,5,11 : Isolators   6 : Protective casing
7 : Cover;   8 : Rubber Lining,   9, 10 : Removals

그림 2.   IC-Gray Chamber

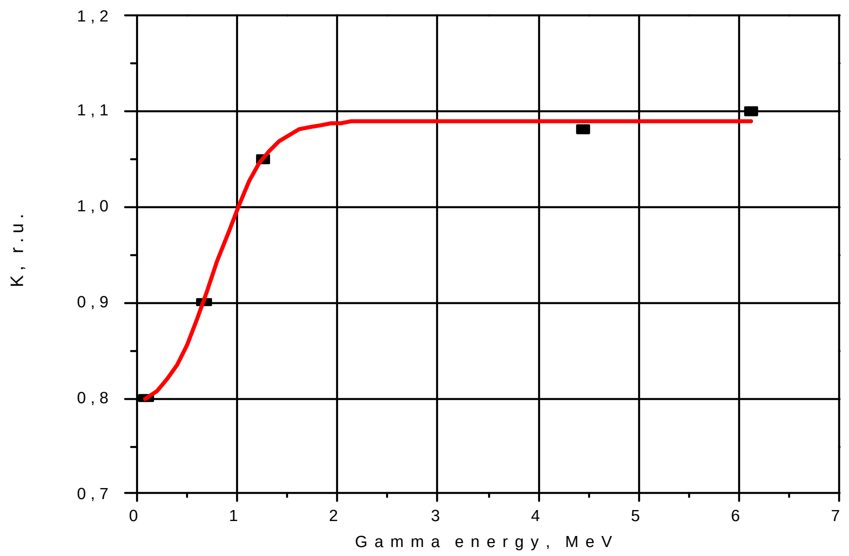


그림 3. Dependence of K-factor for γ-quantum energy

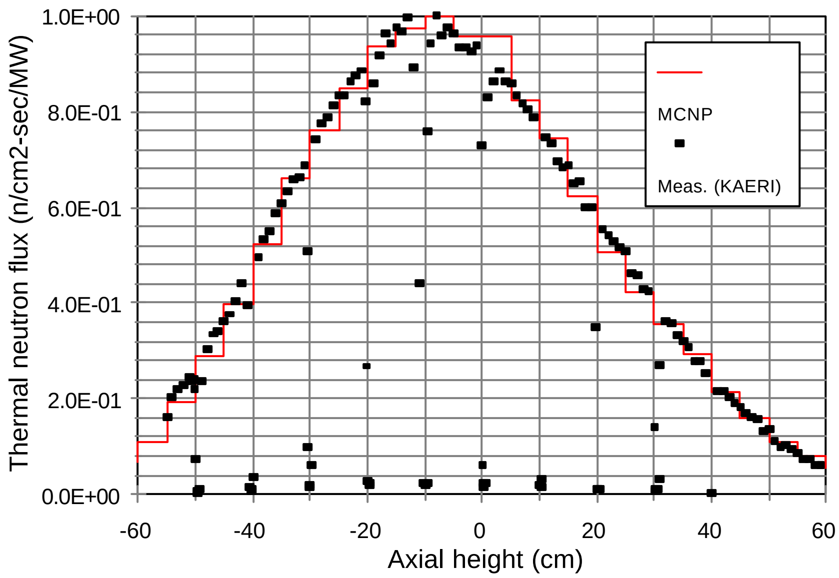


그림 4. Relative thermal neutron fluxes in the axial direction

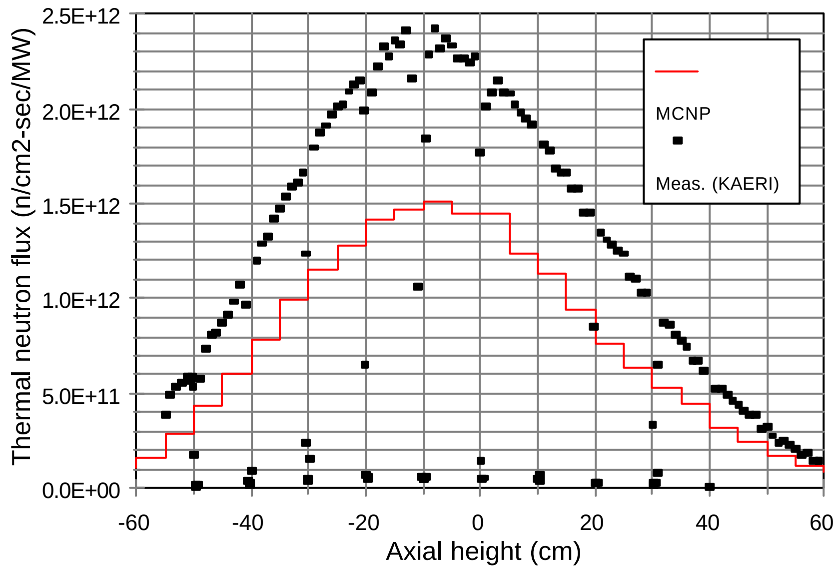


그림 5. Absolute thermal neutron fluxes in the axial direction

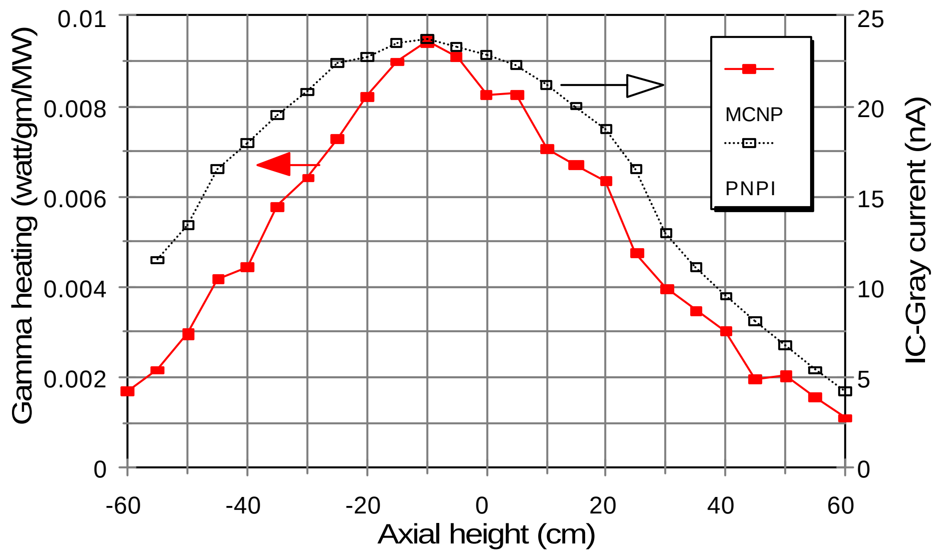


그림 6. Gamma heating in axial direction

표 1. Neutron flux

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">Measurement</td><td rowspan="2">MCNP</td></tr>
<tr><td>Foil</td><td>Wire</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Φ_{th} (2200 m/s)
(average)</td><td>$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$</td><td>$1.73 \times 10^{12}$</td><td></td></tr>
<tr><td>1.85×10^{12}</td><td>1.95×10^{12}</td><td>1.24×10^{12}(0.0289)[a]</td></tr>
<tr><td>Φ_f (E>1 MeV)</td><td>$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{10}$</td><td></td><td>$1.54 \times 10^{10}$(0.0289)</td></tr>
</table>

[a] Fractional standard deviation

표 2. Measurement of current by IC-Gray in axial direction

H(cm)	I (mA)	H(cm)	I (mA)	H(cm)	I (mA)
0	11.5	+40	23.5	+80	16.5
+5	13.4	+45	23.7	+85	13.0
+10	16.5	+50	23.3	+90	11.1
+15	18.0	+55	22.8	+95	9.5
+20	19.5	+60	22.3	+100	8.1
+25	20.8	+65	21.2	+105	6.8
+30	22.4	+70	20.0	+110	5.4
+35	22.7	+75	18.7	+115	4.2

표 3. Heat release densities for various materials by MCNP-4A

Material	q_n	q_r	q_b	Σq_i (W/g)
Para-H_2	0.42	1.27		1.69
Ortho-H_2	0.44	1.49		1.93
Ortho-D_2	0.16	0.24		0.40
Zr	0.05	0.42	0.01	0.48
Al	0.0005	0.56	0.43	0.99
Cu	0.09	0.36		0.45

표 4. Heat load for design model

	Weight	Moderator	
		H_2	D_2
Source cell	380 g	182.4	182.
Tubes	430 g	206.4	206.4
LH_2 in cell	3000 cm^3 x 0 .07 g/cm^3	354.9	
LD_2 in cell	3000 cm^3 x 0.165 g/cm^3		198
LH_2 in tube	1000 cm^3 x 0.07 g/cm^3	118.3	
LD_2 in tube	1000 cm^3 x 0.165 g/cm^3		66
Total Heat Load		862 W	652.4 W