



KR9900205

KAERI/TR-1276/99

하나로 냉중성자원 설치공에서의
발열량 측정 및 분석

**Measurement and Analysis
of
Heat Load in CN Hole of HANARO**

30 - 48

한국원자력연구소

/

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 1999년도 "하나로 냉중성자원 설치공에서의 발열량 측정 및 분석" 기술보고서로 제출합니다.

1999. 3. 28.

과 제 명 :	냉중성자원개발	
주 저 자 :	하나로이용기술개발팀	손 재 민
공 저 자 :	하나로이용기술개발팀	최 창 용
	하나로이용기술개발팀	조 만 순
	하나로이용기술개발팀	박 국 남
	하나로이용기술개발팀	최 영 현
	하나로이용기술개발팀	심 철 무
	하나로운영팀	전 병 진
	하나로운영팀	김 학 로
	하나로운영팀	안 국 훈
	하나로운영팀	이 충 성
	하나로운영팀	이 병 철
	하나로운영팀	박 상 준
	하나로운영팀	이 용 섭
	하나로운영팀	임 돈 순
	하나로운영팀	홍 광 표
	하나로운영팀	송 기 영
	하나로운영팀	이 성 효
	방사화분석실	정 영 주

요 약 문

I. 제목

하나로 냉중성자원 설치공에서의 발열량 측정 및 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

하나로에서 중성자빔의 활용을 극대화하기 위하여 냉중성자원(Cold Neutron Source)의 개발을 진행 중에 있다. 냉중성자원 감속재인 액체수소는 중수 반사체 탱크에 위치하고 있는 직경 16cm의 냉중성자원 수직공에 설치될 것이다. 냉중성자원 감속재용기의 형상설계 및 감속재의 냉각을 위한 극저온 시스템의 설계를 위하여 냉중성자원 설치공에서의 발열량을 산출하는 것은 반드시 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

냉중성자원에서의 발열은 감속재와 열중성자의 충돌과 감속재에서 γ 선의 흡수에 의해서 발생하게 되는데 발열량의 측정이란 이 두 가지를 측정하는 것을 의미한다. 발열량을 측정하기 위하여 다음과 같은 기법을 사용하였다. 1) 조사(activation)시험을 통하여 열중성자(thermal neutron), 열외중성자(epithermal neutron), 고속중성자(fast neutron)의 속(flux)을 측정함. 2) Bragg Gray 이온함을 이용하여 γ 선의 흡수에 의한 발열량을 측정함. 3) Monte-Carlo 기법에 의해서 중성자 스펙트럼을 계산하고, 중성자속의 실험값을 normalization 함. 4) 계산된 스펙트럼에 의해 고속중성자와 냉중성자원 감속재가 충돌 시에 발생하는 열량을 산출함. 5) 실제와 계산에 의한 차이를 고려함.

IV. 연구개발의 결과

러시아의 PNPI 에서 개발된 Bragg-Gray 이온전리함의 일종인 IC-Gray chamber 를 이용하여 γ 선에 의한 발열량을 측정하였다. 이 IC-Gray 는 10^{-6} ~ 10 W/g 범위에서 측정이 가능하며, 오차가 4%인 것으로 입증되었다. 개념설계시에 제안된 냉중성자원 모형에서의 열중성자와 고속중성자 속의 측정결과는 MCNP-4A code 에 의해 만족스러운 결과를 산출하였다. 따라서, 중성자에 의해 발생하는 열량은 신뢰성있는 결과를 산출하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

γ 선에 의한 발열량의 분석결과는 약간 미흡하였다. 그 이유는 두 가지로 불

수 있는데 하나는 실험은 냉중성자원 설치공에 경수가 채워져 있는 상태에서 수행하였으며, 계산은 실제 냉중성자원 용기와 같은 상태인 진공에서 수행하였기 때문이고, 다른 하나는 IC-Gray의 보정(calibration) 상태가 실험의 상태에 적합하지 않았다는 것이다. 따라서, IC-Gray에 의한 측정값은 계산 code의 보정을 위해서만 사용되었다. 금번에 MCNP code에 의해서 계산된 값은 향후에 냉중성자원의 감속재용기 형상 및 극저온시스템의 설계시는 물론 계속적으로 중요하게 사용될 것이다.

SUMMARY

I. Project Title

Measurement and Analysis of Heat Load in CN Hole of HANARO

II. Objective and Importance of the Project

Cold neutron source facility is going to be built up in its 30 MW reactor HANARO in order to provide its scientific community a full range of neutron experimental devices. The liquid hydrogen cold neutron moderator currently under development will be positioned inside a vertical hole with 16 cm in diameter at the heavy water reflector of the reactor. In the design of cold neutron source(CNS), it is very important to measure the heat load experimentally for sizing of heat removal system and selection of the refrigerator, etc.,

III. Scope and Contents of Project

Heat release in CNS is basically stipulated by transfer of energy at collisions of fast neutrons with nucleus and absorption of the γ -quantum directly by cold moderator and the construction elements. Heating rate can vary in a very wide range and depends on a CNS arrangement in a reactor. For heat load determination, the following techniques were executed : 1) Measurement of thermal, epithermal and fast neutron fluxes by activation method 2) Measurement of heating rate by γ -quantum absorption by Bragg-Gray ionization chamber 3) Calculation of a neutron spectrum by Monte-Carlo method and normalization on experimental neutron fluxes 4) Account of heating rate stipulated by collision of fast neutrons with nucleuses of CNS moderator on a received spectrum 5) Consideration of the difference between the real and measurement condition.

IV. Result of Project

For γ - heating rate measurement the Bragg-Gray ionization chamber(IC-Gray) was used, which was developed in PNPI, Russia. It permits to measure heating rate in a 10^{-6} ~ 10 W/g range with an error of 4 %. The results of thermal and fast neutron fluxes for both schemes (experimental and CNS model) are in a good agreement with those calculated by MCNP-4A, therefore the heat release data in hydrogen from neutron have a high reliability.

V. Proposal for Applications

Analysis of heat release data from γ -rays has shown that the experimental results are

underestimated. The cause of underestimation can be explained by two cases. One is the different circumstance that the measurement was executed in CNS channel filled with light water, but the calculation was carried out in the vacuum channel. And the other is the fact that the calibration of IC-Gray was executed in the different range from that of real measurement. Therefore the measurement by IC-Gray was used only for calibration of the calculation code, and the calculation data by MCNP will be used as a ground data of design.

CONTENTS

Summary	3
Contents	6
Table Contents	8
Figure Contents	9
Chapter 1. Introduction	11
Chapter 2. Measurement	12
Session 1. Measurement method and procedure	12
Session 2. Measurement environment	20
Session 3. γ -ray measurement using IC-Gray	23
Session 4. Neutron flux measurement using activation foils	27
Chapter 3. Analysis	33
Session 1. Analysis using MCU code	33
Session 2. Analysis using MCNP code	37
Session 3. Analysis Result	38
Chapter 4. Conclusion	51
Appendix 1. Procedure for installation of the dry experimental channel and the irradiation test in CN Hole	52
Appendix 2. Reactor power and control rod position	59
Reference	65

목 차

개 요	2
목 차	7
표목차	8
그림목차	9
제 1 장 서 론	11
제 2 장 측 정	12
제 1 절 측정 방법 및 절차	12
제 2 절 측정시의 하나로 운전환경	20
제 3 절 IC-Gray 를 이용한 γ -선의 측정	23
제 4 절 Activation Foil 을 이용한 중성자속의 측정	27
제 3 장 분 석	33
제 1 절 MCU Code 에 의한 분석	33
제 2 절 MCNP Code 에 의한 분석	37
제 3 절 분석결과	38
제 4 장 결 론	51
부록 1. Procedure for installation of the dry experimental channel and the irradiation test in CN Hole	52
부록 2. 측정시기의 하나로 출력과 제어봉위치	59
참고문헌	65

표 목 차

(표 2-3-1)	냉중성자원 설치공에서 높이에 따른 IC-Gray Chamber에 의한 측정값 -----	25
	(a) 측정 높이와 측정값	
	(b) 측정 높이에 따른 측정값의 변화	
(표 2-4-1)	열중성자와 열외중성자 속(flux)의 측정을 위한 반응 -----	27
(표 2-4-2)	고속중성자 속(flux)의 측정을 위한 반응 -----	27
(표 2-4-3)	Activation Foil 의 1 차 측정 결과 -----	30
(표 2-4-4)	Activation Foil 의 2 차 측정 결과 -----	31
(표 2-4-5)	Activation Foil 의 3 차 측정 결과 -----	31
(표 2-4-6)	Foil 들의 Cadmium 비율 -----	32
(표 3-1-1)	냉중성자원 설치공에서의 측정값과 MCU Code에 의한 계산값 결과 -----	33
(표 3-1-2)	냉중성자원 감속재용기 모형에서의 MCU Code에 의한 계산 결과 -----	37
(표 3-2-1)	냉중성자원 설치공에서의 측정값과 MCNP-4A Code에 의한 계산값 결과 -----	37
(표 3-2-2)	냉중성자원 감속재용기 모형에서의 MCNP-4A Code 에 의한 계산 결과 -----	37
(표 3-3-1)	발열량 분석결과의 비교 -----	39
(표 3-3-2)	알루미늄 발열량에 기여한 영향평가 -----	40
(표 3-3-3)	열중성자속에 대한 측정값과 계산값의 비교 -----	46
(표 3-3-4)	노심가운데에서 9 cm 위에서의 중성자속 -----	47

그림 목 차

(그림 1-1-1) 수행일정	11
(그림 2-1-1) 냉중성자원 설치공의 형상	14
(그림 2-1-2) Dry experimental channel	15
(그림 2-1-3) Dry experimental channel 의 flange	16
(그림 2-1-4) Dry experimental channel 의 guide sleeve	16
(그림 2-1-5) Dry experimental channel 이 냉중성자원설치공에 설치된 도면	17
(그림 2-1-6) Dry experimental channel 이 설치된 상태(1)	18
(그림 2-1-7) Dry experimental channel 이 설치된 상태(2)	18
(그림 2-1-8) Dry experimental channel 이 설치되고, platform guide 에 고정된 상태	19
(그림 2-1-9) 사용후핵연료 저장조에 보관된 dry experimental channel	19
(그림 2-2-1) 하나로의 노심구조도에서 냉중성자원 설치공과 방사화분석장치 시험공인 NAA1 의 위치	20
(그림 2-2-2) 6-3 주기의 핵연료 장전 배치도	21
(그림 2-2-3) 6-3 주기의 원자로출력과 제어봉위치	22
(그림 2-3-1) Pico-ammeter 의 설치 상태	24
(그림 2-3-2) IC-Gray Chamber	24
(그림 2-4-1) Activation Foils	28
(그림 2-4-2) Activation Wire	28
(그림 2-4-3) ORTEX Spectrometer	29
(그림 3-1-1) 냉중성자원 설치공의 높이변화에 따른 열중성자속의 분포	34
(그림 3-1-2) 냉중성자원 설치공의 높이변화에 따른 고속중성자속(fast neutron flux)의 분포	34
(그림 3-1-3) 냉중성자원 설치공의 높이변화에 따른 γ -선에 의한 열의 분포	35
(그림 3-1-4) 냉중성자원 감속재용기 모형	36
(그림 3-3-1) (A)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum (냉중성자원 설치공에 경수가 채워져 있는 경우)	41
(그림 3-3-2) (B)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum (냉중성자원 설치공은 비어있고, 감속재용기에는 액체수소가 채워져 있는 경우)	42
(그림 3-3-3) γ -spectrum (냉중성자원 설치공이 비어있는 경우)	43
(그림 3-3-4) (C)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum	44
(그림 3-3-5) 냉중성자원 설치공의 VENTURE 계산 격자 구조	45
(그림 3-3-6) 중성자속 분포 비교	46

(그림 3-3-7) 열중성자속 절대값 비교	-----	47
(그림 3-3-8) 축방향 절대 열중성자속 분포	-----	48
(그림 3-3-9) 축방향 상대 열중성자속 분포	-----	48
(그림 3-3-10) 축방향 γ 발열량 분포	-----	49
(그림 3-3-11) γ 에너지에 따른 K-factor	-----	50

제 1 장 서 론

하나로의 냉중성자원 설치공(CN hole)에 설치될 냉중성자원(CNS, Cold Neutron Source) 장치에서 중성자와 방사선에 의한 발열량은 수소계통의 설계와 극저온 냉동기의 용량 선정을 비롯한 기본설계의 가장 기본적인 자료로써 계산값과 실측값을 비교 검토하여 정확한 값을 얻는 것이 매우 중요하다. 냉중성자원에서의 열발생은 두가지 경우에서 발생된다. 하나는 중성자가 냉중성자원의 감속재 또는 감속재용기와의 충돌에 의하여 열이 발생하는 경우이며, 다른 하나는 γ -양자가 냉중성자원 감속재 또는 감속재용기에 흡수되면서 열이 발생하는 경우이다. 따라서 본 실험에서는 중성자에 의해서 발생하는 열량을 계산하기 위하여 경수가 채워져 있는 상태의 냉중성자원 설치공에서 activation foil 과 Au wire 를 조사(irradiation)한 후 고속중성자(fast neutron), 열외중성자(epithermal neutron), 열중성자(thermal neutron) 속(flux)을 측정하고 Monte-Carlo 기법에 의해 spectrum 을 계산하여 normalize 한 후 중성자 에너지 영역별 flux 를 계산하여 측정 결과와 비교한다. 그리고, γ -양자에 의해서 발생하는 열량을 계산하기 위하여 냉중성자원 설치공에 IC-Gray chamber 를 조사한 후 그때 발생된 전류의 분포를 측정하고, 열량은 ionization 전류에 비례하므로 PNPI 에서 만든 γ -에너지에 따른 K-factor 를 곱하여 열량을 구하고 Monte-Carlo 기법을 사용한 MCU code 와 MCNP-4A code 에 의해 구한 결과와 비교하였다. 이 결과를 이용하여 계산 code 에 적용되는 중성자속과 γ 분포를 보정하여 MCNP 계산 factor 를 보정하여 실제 설계 모델에 적용하여 발열량을 구하였다.

본 보고서는 제 2 장에서는 측정방법, 절차, 측정환경, IC-Gray chamber 를 이용한 측정, activation foil 을 이용한 측정에 관한 내용을 기술하였고, 제 3 장에서는 측정된 값을 이용하여 분석한 결과를 기술하였다. 본 연구를 위한 측정 및 분석의 수행일정은 다음 그림 1-1-1 과 같다.

수행업무	'97			'98				
	10	11	12	1	2	3	4	5
● 실험장비 설계 및 제작 - IC-Gray chamber - Activation foils and wire - Dry experimental channel								
● 실험장비 test 및 설치		—						
● 측정		—						
● 분석 및 검토			—————					

그림 1-1-1 수행일정

제 2 장 측 정

제 1 절 측정 방법 및 절차

1. 측정방법

냉중성자원 설치공에서의 발열량을 결정하기 위한 개략적인 방법은 다음과 같다.

- (1) 냉중성자원 설치공에서 foil 과 wire 에 대한 조사시험에 의해 열중성자(thermal neutron), 열외중성자(epi-thermal neutron), 속중성자(fast neutron) 속을 측정한다.
- (2) 냉중성자원 설치공에서 Bragg-Gray ionization chamber 를 사용하여 감속재와 감속재용기에서 γ -양자의 흡수에 의해 발생하는 전류를 측정하고 열량으로 환산한다.
- (3) Monte-Carlo 기법에 의해 중성자 spectrum 을 계산하고 그것을 normalize 한다.
- (4) 측정과 계산에 의해 얻어진 중성자 spectrum 에 의해 속중성자가 냉중성자원 감속재에 충돌할 때 발생하는 열량을 계산한다.
- (5) 중성자에 의한 열량과 γ -양자의 흡수에 의한 열량을 고려하고, 냉중성자원 설치의 실제 조건과 측정시의 조건에 대한 영향을 고려하여 측정 오차를 분석하고, 계산에 반영하여 추후 기본설계에 사용할 수 있는 열량을 분석한다.

2. 측정절차

하나로 냉중성자원 설치공에서의 발열량 측정을 위한 절차는 다음과 같다. 상세한 절차는 각 단계에서 기술하였다.

(절차1) 냉중성자원 설치공에 dry experimental channel의 설치

: 냉중성자원 설치공에 Al. 재질 파이프의 하단을 막아 물이 들어 오지 않도록 한 dry experimental channel을 설치한다. 이때, dry experimental channel이 냉중성자원 설치공에 정확하게 설치되었는가를 확인하고, 부력에 의해 떠오르는 것을 방지하기 위하여 원자로 platform에 고정한다.

(절차2) IC-Gray chamber를 이용한 측정

: IC-Gray chamber를 dry experimental channel 내에 삽입하여 냉중성자원이 설치되는 지점에 위치시키고, IC-Gray chamber 상단의 전선을 pico-ammeter에 연결한다.

- (절차3) 원자로를 1 MW로 운전한다.
- (절차4) IC-Gray chamber를 dry experimental channel을 따라 윗쪽으로 5 cm씩 이동하면서 pico-ammeter의 값을 측정 한다.
- (절차5) IC-Gray chamber를 dry experimental channel에서 빼낸 후 수조에 보관한다.
: 이렇게 보관된 IC-Gray chamber는 방사선 level이 낮아질 때 까지 수조 내에 보관한 후 사용후핵연료 저장조로 옮겨서 보관하게 된다.
- (절차6) Activation foil과 Au wire를 이용한 측정
: Activation foil과 Au wire를 dry experimental channel에 삽입한다.
- (절차7) 원자로의 출력을 10 kW로 올린다.
: 냉중성자원 설치공에서 열중성자, 열외중성자, 속중성자의 속(flux)을 측정하기 위하여 Au(Gold), In(Indium) and Ni(Nickel) foils을 10 kW의 출력상태에서 15분 동안 조사(irradiation)하였다.
- (절차8) 원자로의 출력을 17 MW로 증가한다.
: 냉중성자원 설치공에서 열중성자, 열외중성자, 속중성자의 속(flux)을 측정하기 위하여 Au(Gold), In(Indium) and Ni(Nickel) foils을 17 MW의 출력상태에서 60분 동안 조사(irradiation)하였다.
- (절차9) 원자로의 출력을 100kW로 한다.
: Foil에 의한 측정이 끝난 후 gold wire를 냉중성자원 설치공에서 삽입하여 100 kW에서 10분간 조사시킨다. 조사 후 1cm 간격으로 계수율을 측정하고 3군데에서 wire를 잘라 열중성자속 절대값을 계산하기 위하여 계수율을 측정한다. Gold wire의 각 부분에 대한 열중성자속은 1 cm간격으로 측정한 gold wire의 측정 결과를 조사 후 시점의 방사능으로 환산한 후에 이를 절대값을 계산한 위치의 방사능과 비교하여 계산 하였다.

냉중성자원 설치공에서의 발열량측정을 위한 상세한 절차는 부록1의 절차서에 수록되어 있다.

3. Dry Experimental Channel

Dry experimental channel 은 IC-Gray chamber, activation foil 및 wire 를 수조 위에서부터 냉중성자원 설치공까지 삽입하기 위한 장비이다. 그림 2-1-1 은 dry experimental channel 이 설치될 냉중성자원 설치공의 형상을 나타내고 있다. 이 dry experimental channel(그림 2-1-2)은 외경이 44 mm, 내경이 25 mm, 전체의 길이가 12.375 m 이고, Al-60 계열의 재질로 제작된 파이프이며, 파이프의 밑부분을 막아 수조의 물이 들어오지 못하도록 제작되어 있다. 또한 파이프가 수조에 잠기는 부분을 구부려서 중성자가 파이프를 통하여 수조 밖으로 유도되지 못하도록 제작하였으며, 방사선이 많이 조사되는 하단부분은 실험 후 분리하여 방사선 준위가 낮아질 때까지 원자로의 사용후핵연료 저장조(spent fuel pool)에 저장할 수 있

도록 중간부분에 그림 2-1-3 과 같이 설계된 flange 로 연결하였고, 냉중성자원 설치공에 정확히 삽입하고, 삽입 후 이탈 또는 흔들림을 방지하기 위하여 그림 2-1-4 와 같이 설계된 guide sleeve 를 부착하였다. 그림 2-1-5 는 dry experimental channel 이 냉중성자원 설치공에 설치된 도면을 나타내며, 그림 2-1-6 과 그림 2-1-7 은 설치된 상태를 보여주고 있고, 그림 2-1-8 은 dry experimental channel 이 원자로 platform 에 고정되어 있는 모습을 나타낸다. 측정이 종료된 후에 이 dry experimental channel 은 그림 2-1-9 와 같이 사용후핵연료 저장조로 운반하여 보관하였다.

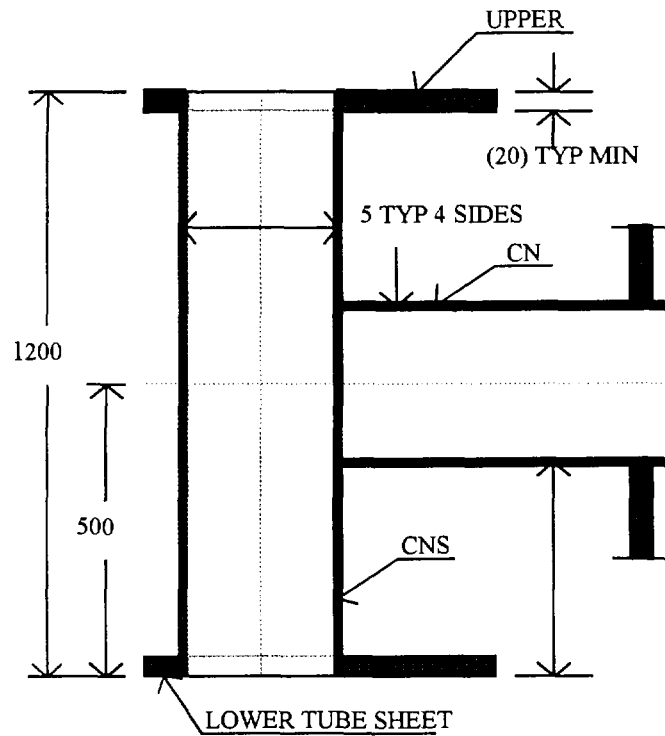


그림 2-1-1 냉중성자원 설치공의 형상

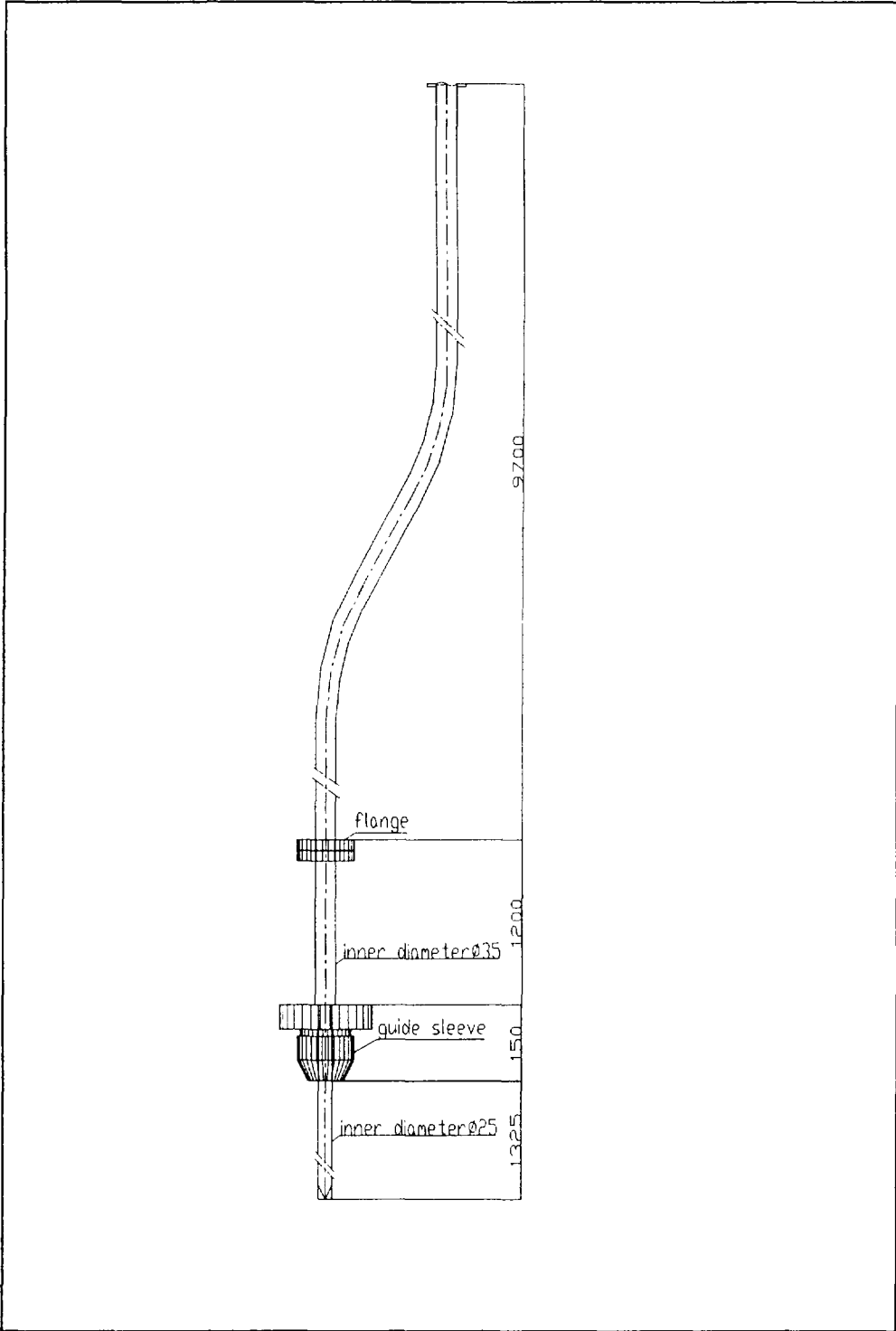


그림 2-1-2 Dry Experimental Channel

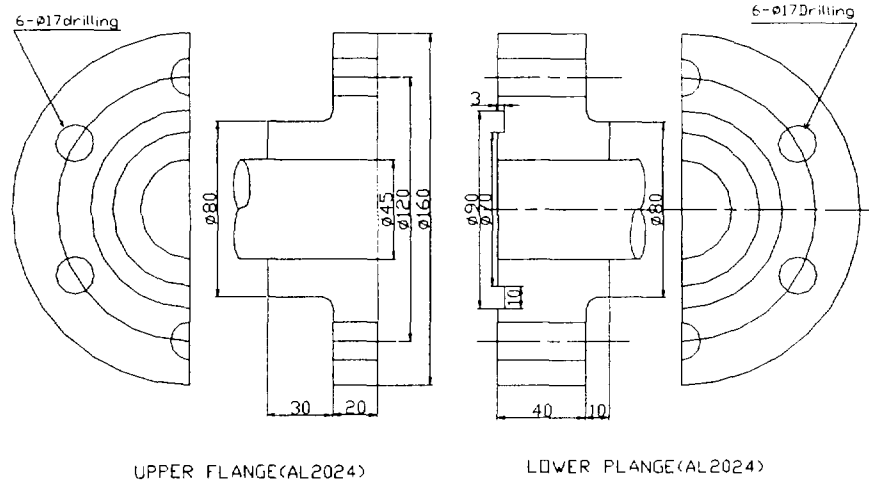


그림 2-1-3 Dry experimental channel 의 flange

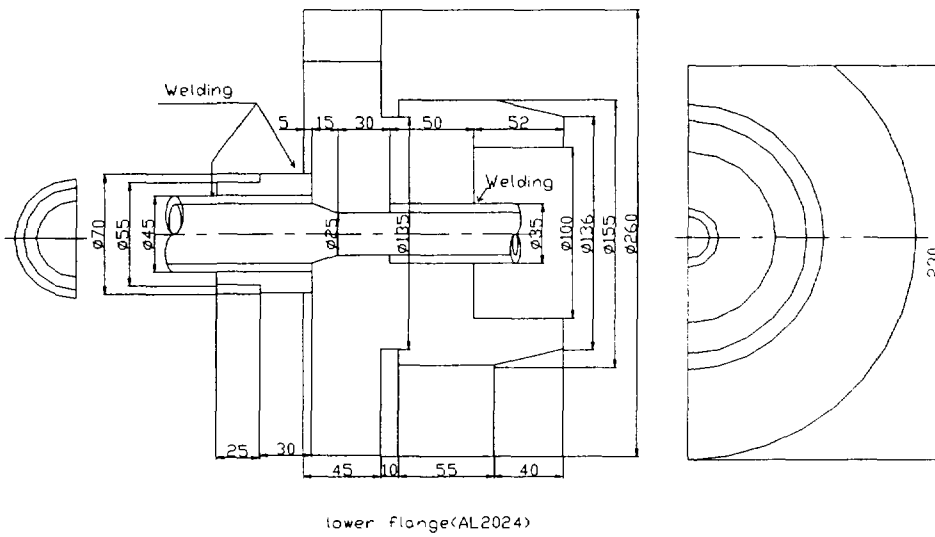


그림 2-1-4 Dry experimental channel 의 guide sleeve

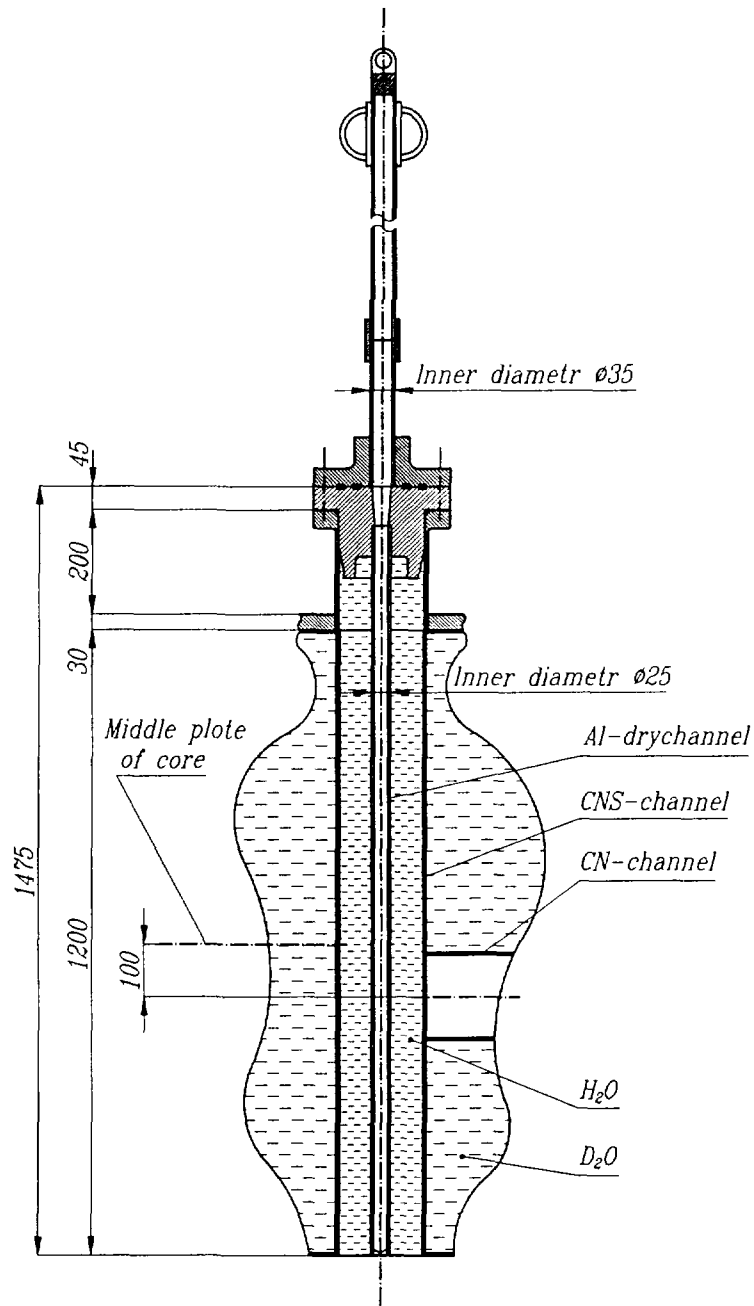


그림 2-1-5 냉중성자원 설치공에 설치된 dry experimental channel

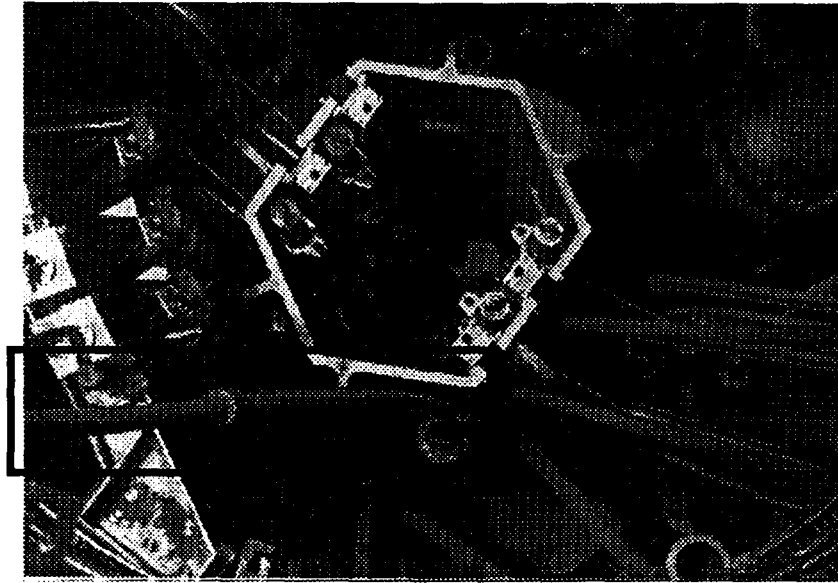


그림 2-1-6 Dry experimental channel 이 설치된 상태(1)

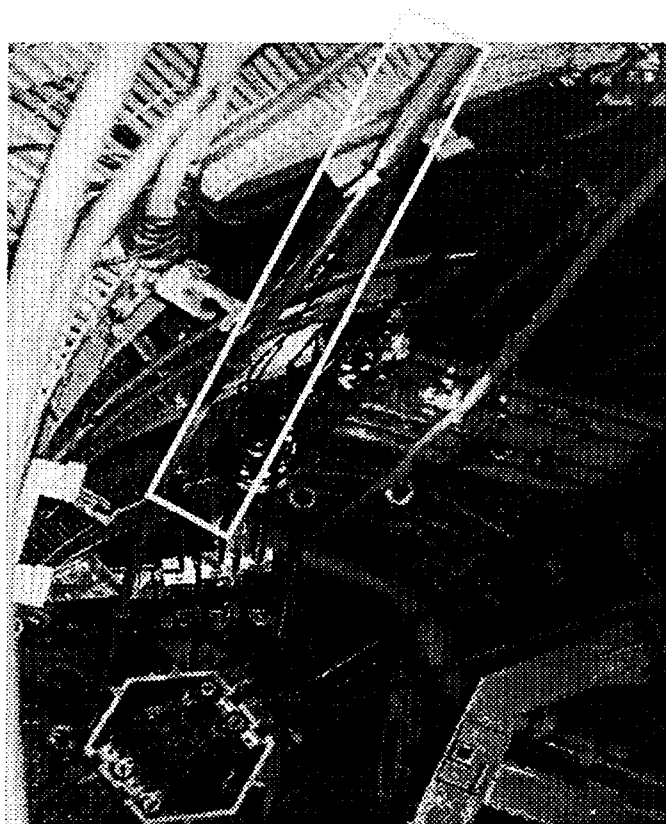


그림 2-1-7 Dry experimental channel 이 설치된 상태(2)

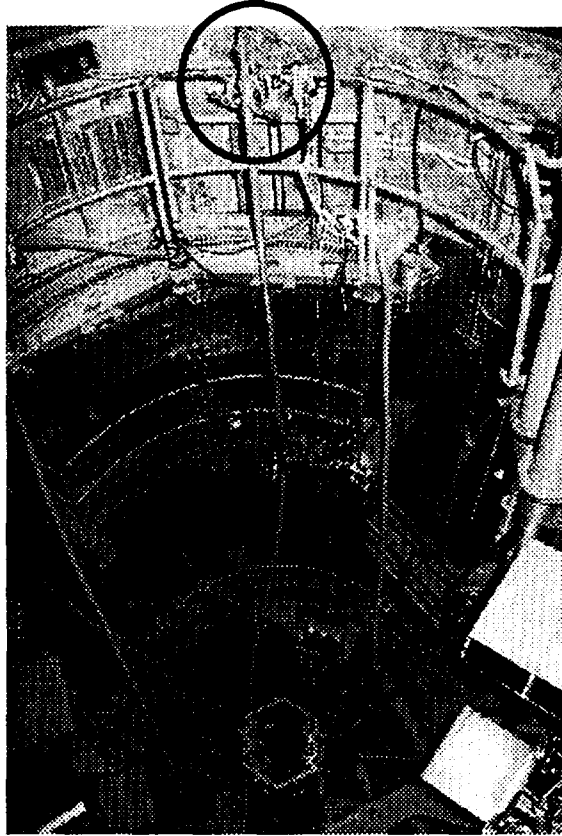


그림 2-1-8 Dry experimental channel 이 설치되고, platform guide 에 고정된 상태

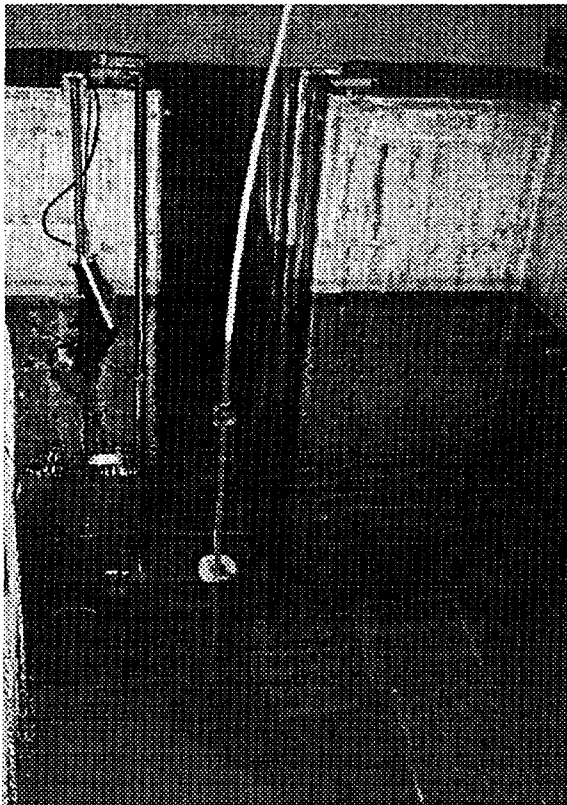


그림 2-1-9 사용후핵연료저장조에 보관된 dry experimental channel

제 2 절 측정시의 하나로 운전환경

1. 냉중성자원 설치공과 NAA1 공 위치

본 절에서는 냉중성자원 설치공에서의 발열량 측정시기의 하나로 환경을 기술하고자 한다. 그림 2-2-1의 하나로 노심구조도에서는 냉중성자원 설치공과 측정 당시의 원자로 출력을 측정하기 위하여 사용된 방사분석장치 시험공인 NAA1 공이 나타나있다.

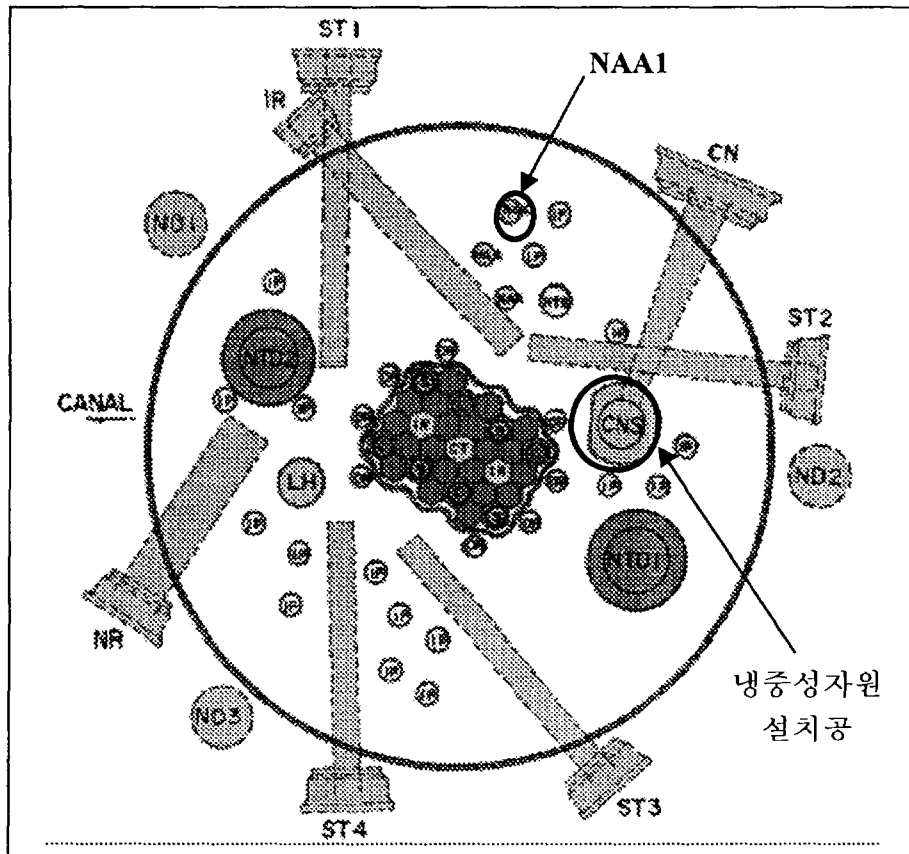
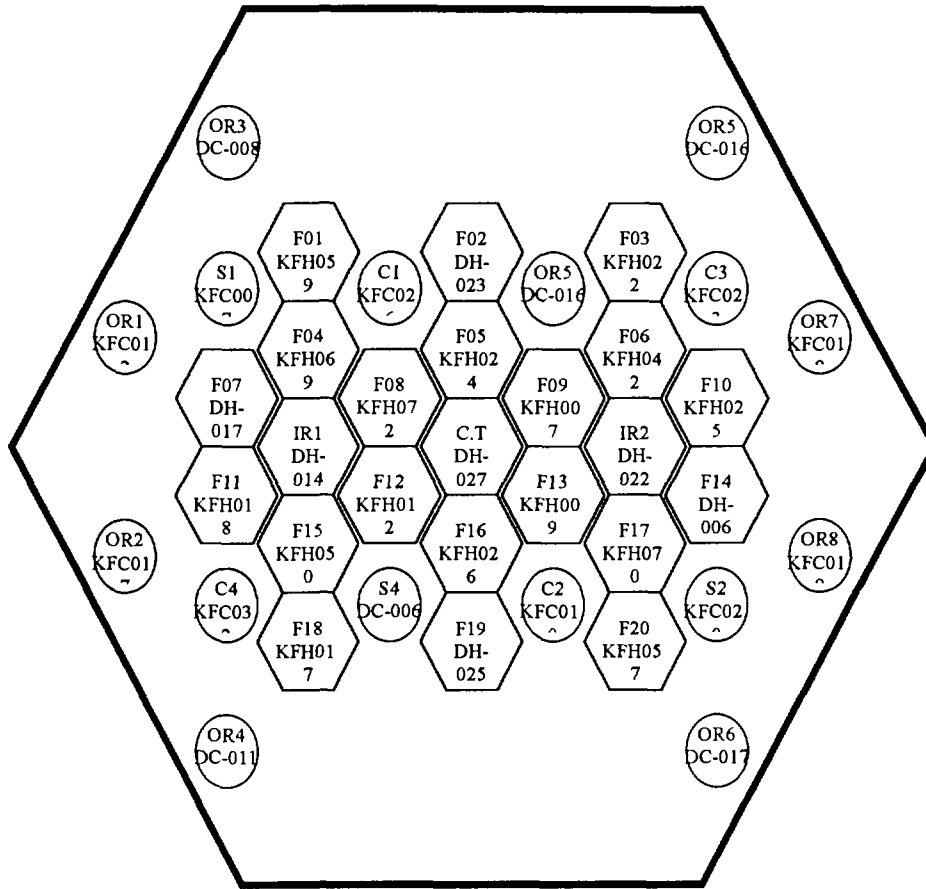


그림 2-2-1 하나로의 노심구조도에서 냉중성자원 설치공과 방사화분석장치 시험공인 NAA1 공의 위치

2. 핵연료 배치

측정은 하나로 6-3 주기 초에 실시되었다. 그림 2-2-2는 하나로 6-3 주기의 핵연료 배치도를 나타내고 있다.



OR(1~8) : 외부노심	F (01~20) : 핵연료집합체
S(1~4) : 운전정지봉	C(1~4) : 제어봉 KFH : 36 봉 집합체
KFC : 18 봉 집합체	DH : Dummy 집합체

그림 2-2-2 6-3주기의 핵연료 장전 배치도

3. 하나로 출력과 제어봉의 위치

그림2-2-3은 하나로 6-3주기 중 조사시험 당시의 하나로 출력과 제어봉의 위치를 나타내고 있다. 이 하나로 출력과 제어봉의 위치에 대한 상세자료는 부록2에 수록하였다.

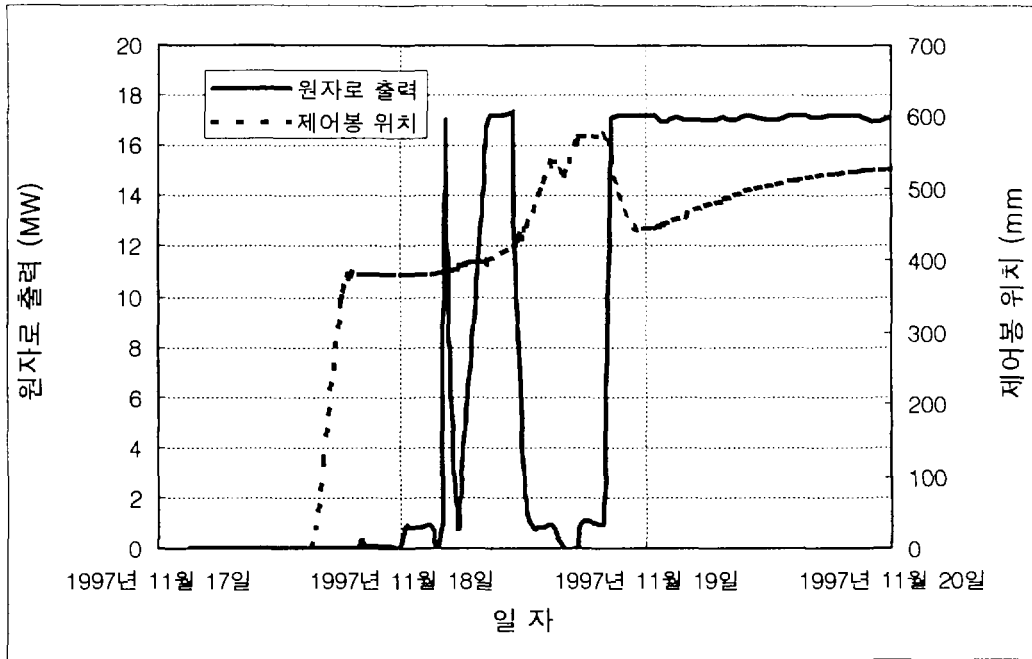


그림 2-2-3 6-3주기의 원자로출력과 제어봉위치

제 3 절 IC-Gray Chamber를 이용한 γ 열량 측정

본 절에서는 IC-Gray chamber의 설명과 이를 이용하여 냉중성자원 설치공에서의 측정 방법, 절차, 내용 등을 기술하고자 한다. γ -양자에 의해 발생하는 열을 측정하기 위한 방법으로는 quasi-adiabatic calorimeter를 사용하는 기법과 Bragg-Gray 이온전리함(ionization chamber)인 IC-Gray chamber를 사용하는 두 가지가 주로 사용된다. 공동연구 수행기관인 러시아의 PNPI에서는 10^{-2} ~4 W/g 범위와 4%의 오차 내에서 열량을 측정할 수 있는 quasi-adiabatic calorimeter와 10^{-6} ~10 W/g 범위 내에서 열을 측정할 수 있는 IC-Gray chamber를 개발하였다. Quasi-adiabatic calorimeter는 WWR-C(Obninsk, 러시아), WWR-M(Gatchina, 러시아), EWA-10(Sverk, 폴란드) 등의 연구로에서 다른 calorimeter들과 함께 비교 평가하여 그 신뢰성이 입증되었다. IC-Gray chamber에 대해서는 그 신뢰성을 입증하기 위하여 WWR-M 연구로에서 quasi-adiabatic calorimeter와 함께 비교평가를 수행하였다. IC-Gray chamber는 calorimeter보다 정확성은 떨어지지만(오차 범위 15%), 측정범위가 넓고 실험의 편리성이 입증되었다. 본 실험에서는 γ -양자에 의해 발생하는 열을 측정하기 위한 방법으로 IC-Gray chamber를 사용하였다.

1. IC-Gray Chamber

IC-Gray chamber는 γ -양자에 의해 내부에 있는 전극에서 전류를 발생시키는 장치이며, 이 IC-Gray chamber에 pico-ammeter를 연결하여 전류의 변화를 측정하도록 되어 있다. IC-Gray chamber는 그림 2-3-2와 같이 원통형 구조를 가지고 있으며, 크기는 높이가 70 mm 외경이 18 mm 이고, 0.5 mm 두께의 알루미늄으로 제작되었다. 내부에는 외경이 15mm 이고, 내경이 6.6 mm 인 즉, 4.2 mm 두께의 실린더형 external electrode과 직경이 5 mm인 원통형 central electrode가 있으며, external과 central electrode 사이에는 0.8 mm 두께의 실린더형 공기층이 존재한다. 또한 pico-ammeter로의 연결을 위한 두개의 단자가 위쪽으로 설치되어있으며, rubber lining, 플라스틱의 일종인 floroplast-4 재질로 제작된 isolator들로 구성되어 있다.

2. Pico-ammeter

IC-Gray chamber에 연결되어 전류를 측정하기 위한 장치이다. 이 pico-ammeter의 전류측정 범위는 10^{-14} ~ 10^{-6} A이다. 그림 2-3-1은 pico-ammeter의 설치 상태를 나타내고 있다.

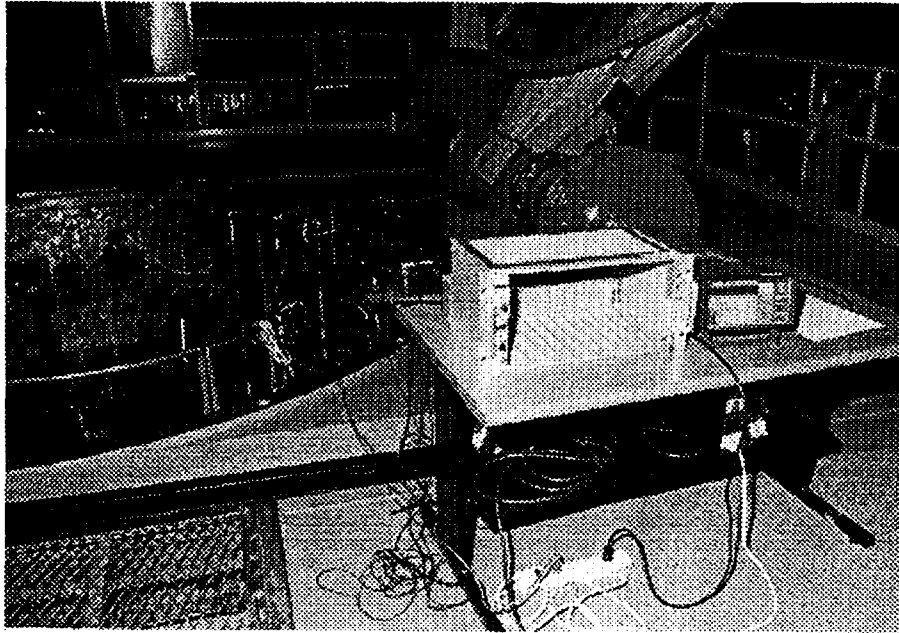


그림 2-3-1 Pico-ammeter 의 설치 상태

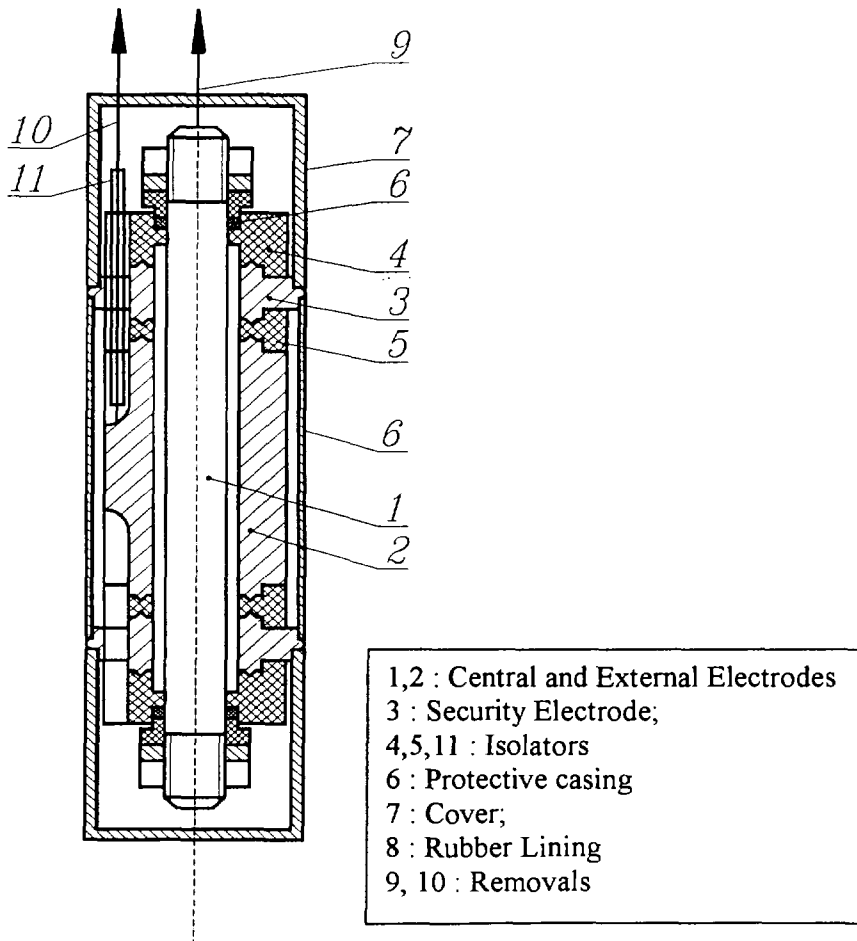


그림 2-3-2 IC-Gray chamber

3. IC-Gray chamber 에 의한 측정

IC-Gray chamber 에 의한 측정은 원자로의 출력이 1 MW 일 때 다음과 같은 절차에 의해 수행하였다.

(절차 1) IC-Gray chamber 를 dry experimental channel 을 통하여 냉중성자원 설치공의 바닥까지 삽입한다.

(절차 2) 원자로의 출력을 1 MW 로 상승시킨다.

(절차 3) Dry experimental channel 을 통하여 IC-Gray 를 윗쪽으로 5 cm 씩 이동하면서 γ -선에 의해 발생하는 전류의 분포를 측정한다.

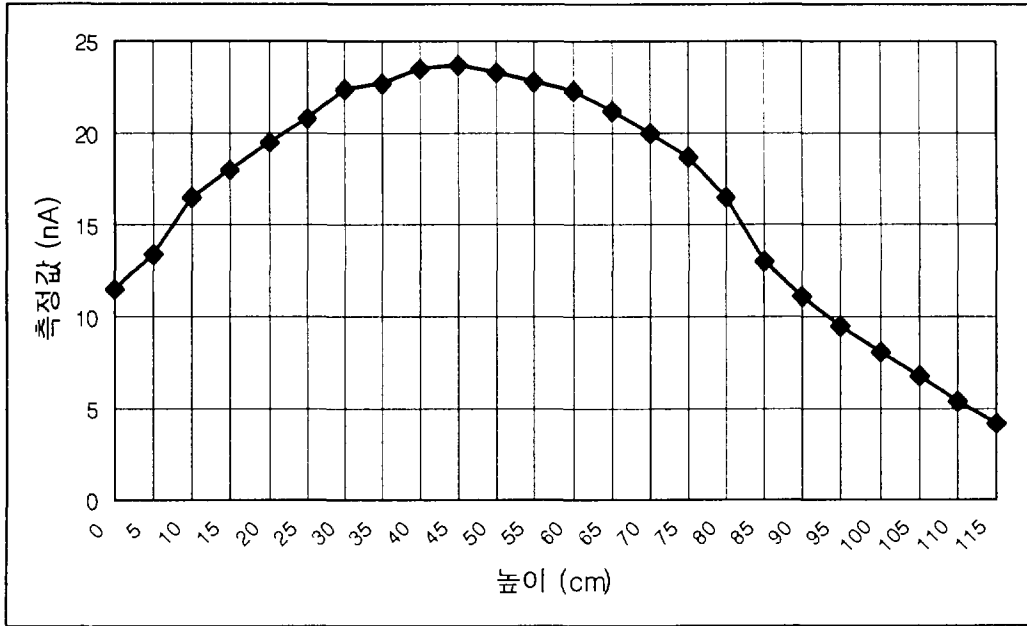
위의 절차에 의하여 측정한 전류값은 다음 표 2-3-1 과 같다. 이때 높이가 0 인 것은 dry experimental channel 의 바닥을 의미하는 것이며, 이것은 냉중성자원 설치공의 바닥으로부터 약 2.5 cm 정도 위 부분과 일치한다. 측정은 115 cm 까지만 수행하였다. 그 이유는 냉중성자원 설치공의 높이가 120 cm 이며, 이 설치공의 맨 윗부분 5 cm 에는 flange 가 위치하고 있기 때문에 115 cm 까지만 측정하여도 결과를 산출하기에 충분했기 때문이다.

표 2-3-1 냉중성자원 설치공에서 높이에 따른 IC-Gray chamber에 의한 측정값

(a) 측정 높이와 측정값

높이(cm)	I (nA)	높이(cm)	I (nA)	높이(cm)	I (nA)
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

(b) 측정 높이에 따른 측정값의 변화



제 4 절 Activation Foil을 이용한 중성자속의 측정

1. Activation foil 및 wire

Activation foil 및 wire 는 냉중성자원 설치공에서의 열중성자(thermal neutron), 열외중성자(epithermal neutron), 속중성자(fast neutron)의 속을 측정하기 위하여 사용되었다.

실험에서 사용된 그림 2-4-1 과 같은 activation foil 들은 Fe, Co, Ni, In 및 Au 이다. 이들 중에서 Fe, Co 그리고 Au foil 들은 1 mm 두께의 Cd(Cadmium)를 입힌 것과 입히지 않은 것 두 종류를 사용하였다. 따라서 8 개의 Foil 이 사용되었다. 이 8 개의 foil 들은 그림 2-4-2 와 같이 Ni 선으로 만든 activation wire 의 하단부분으로부터 70 cm 길이 안에 균등한 간격으로 부착하였고, 그림에서 나타난 것과 같이 foil 들이 부착된 중간 위치가 core 의 중심부분에 위치하도록 하였다. 또한 이 activation wire 는 dry experimental channel 에 삽입이 용이하도록 끝부분에 추를 설치하였다. 이 activation foil 들의 nuclear data 는 표 2-4-1 과 표 2-4-2 와 같다.

표 2-4-1 열중성자와 열외중성자 속(flux)의 측정을 위한 반응

Reaction	σ_{th}, b	$T_{1/2}$	E_{γ} (keV)	I_{γ}
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	1.28(5)	44.496(7)d	1099.3	0.565
			1291.6	0.432
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	37.18(6)	5.2714(5)y	1173.2	0.9990
			1332.5	0.99982
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	98.85(9)	2.6952(2)d	411.8	0.9551

표2-4-2 고속중성자 속(flux)의 측정을 위한 반응

Reaction	E_{th} (MeV)	σ_f, b	$T_{1/2}$	E_{γ} (keV)	I_{γ}
$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	1.2	0.288	4.486(4)h	336.2	0.54
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	2.3	0.337	70.82(3)d	810.8	0.993

냉중성자원 설치공에서의 조사를 위한 activation foil 들은 dry experimental channel 을 통하여 삽입하고, NAA1 hole 에서의 조사를 위한 Foil 들은 NAA tube 에

고정하였다. 그리고 두 실험공에 설치된 두 foil 들은 동시에 조사되도록 하였다.



그림 2-4-1 Activation Foils

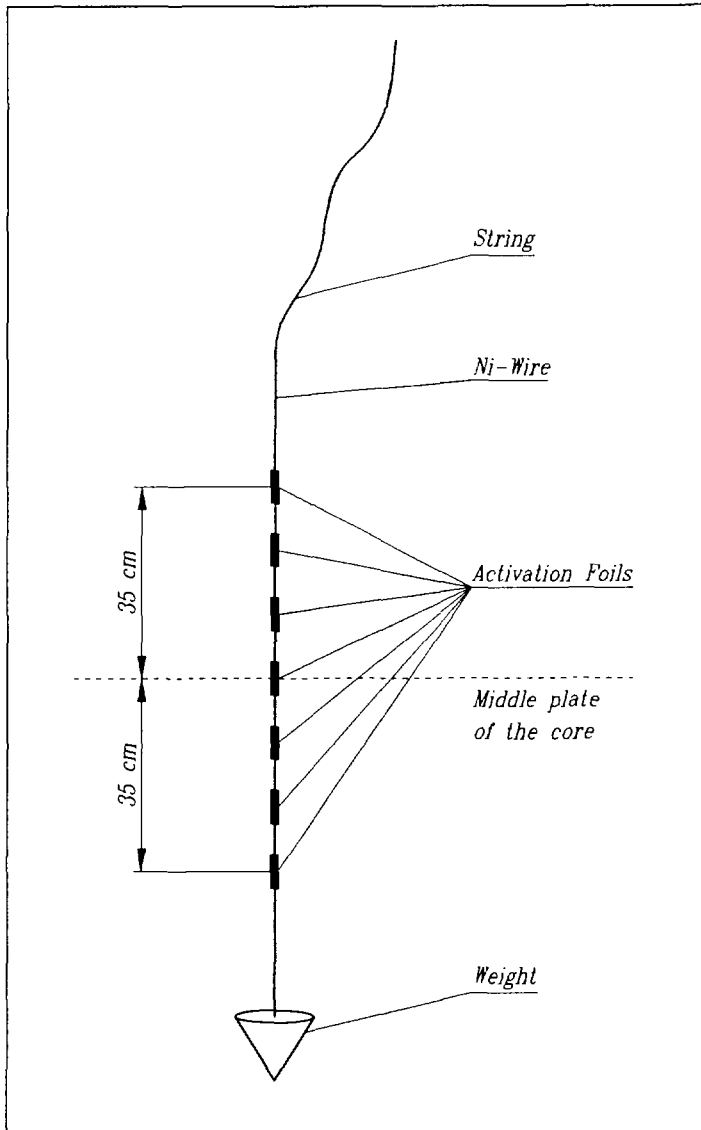


그림 2-4-2 Activation Wire

2. Au Wire 및 측정

Foil에 의한 측정이 끝난 후 gold wire를 냉중성자원 설치공에서 삽입하여 100 kW에서 10분간 조사시킨다. 조사후 1cm 간격으로 계수율을 측정하고 3군데에서 wire를 잘라 열중성자속 절대값을 계산하기 위하여 계수율을 측정한다. Gold wire의 각 부분에 대한 열중성자속은 1 cm간격으로 측정한 gold wire의 측정 결과를 조사후 시점의 방사능으로 환산한 후에 이를 절대값을 계산한 위치의 방사능과 비교하여 계산하였다. Gold wire는 그림 2-4-2와 같은 형태로 foil이 달려 있지 않다.

2. Spectrometer

조사된 foil 과 wire 의 스펙트럼을 생성하기 위하여 그림 2-4-3 과 같은 ORTEX spectrometer 를 사용하였다. ORTEX spectrometer 의 모델은 Gem-25-185-P 이며, 이것의 정밀도는 $^{60}\text{Co}(E_\gamma=1.33\text{MeV})=1.67\text{ keV}$ (amplifier time constant = 6 ms)이다.

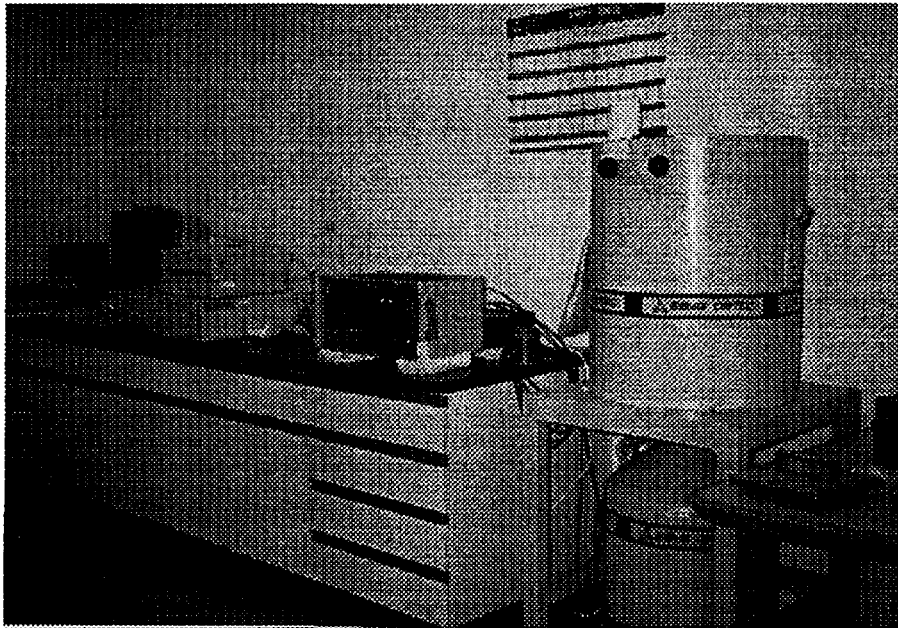


그림 2-4-3 ORTEX Spectrometer

4. Activation foil에 의한 측정

냉중성자원 설치공과 방사분석장치 시험공인 NAA1에서의 activation foil에 의한 측정은 3회에 걸쳐 수행하였다. 그 측정 결과는 표 2-4-3, 표 2-4-4와 표 2-4-5와 같다. 이때 높이가 0인 것은 냉중성자원 설치공의 경우 dry experimental channel의 바닥을 의미하며, NAA1의 경우 조사공의 바닥을 의미한다. 앞에서

설명한 바와 같이 dry experimental channel의 바닥은 냉중성자원 설치공의 바닥보다 약 2.5 cm 높은 곳에 위치하게 된다. 표 2-4-3의 1차 측정은 열중성자속을 측정하기 위한 것이었으며, 표 2-4-4의 2차 측정은 속중성자속을 측정하기 위한 것이었다.

표 2-4-3 Activation Foil의 1차 측정 결과

- ◆ 수행일시 : 1997. 11. 17. 19:29 ~ 19:44
- ◆ 원자로 출력 : 10 kW
- ◆ 제어봉의 위치 : 381 mm

냉중성자원설치공 ◇ 조사시간 : 15 분				NAA1 ◇ 조사시간 : 10 분			
높이 (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg	높이 (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg
+70	Au	49.75	3068	+6	Au	49.92	7201
+63	In	732.8	3.95	0	Cd Au	58.39	25.83
+63	Cd Au	52.55	48.50	0	Ni	967.8	1.073×10^{-3}
+49	Au	50.30	8557				
+35	In	449.7	11.9				
+35	Cd Au	51.15	144.0				
+35	Ni	973.1	2.492×10^{-2}				
+21	Au	49.80	15793				
+6	In	741.4	15.9				
+6	Cd Au	51.0	197.9				
0	Au	49.70	13048				

표 2-4-4 Activation foil의 2차 측정 결과

- ◆ 수행일시 : 1997. 11. 18. 09:25 ~ 10:25
- ◆ 원자로 출력 : 17 MW
- ◆ 제어봉의 위치 : 409 mm

냉중성자원설치공 ◇ 조사시간 : 60 분				NAA1 ◇ 조사시간 : 60 분			
H (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg	H (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg
+40	Fe	15.83	322.3	+6	Fe	19.00	369.3
+40	Ni	23.60	98.90	0	Fe	19.35	380.3
+20	Fe	6.73	440.7	0	Ni	34.88	7.206
+20	Ni	20.83	146.7				
0	Fe	18.20	401.1				
0	Ni	26.72	137.5				

표 2-4-5 Activation foil의 3차 측정 결과

- ◆ 수행일시 : 1997. 11. 18. 19:40 ~ 20:10
- ◆ 원자로 출력 : 1 MW
- ◆ 제어봉의 위치 : 571 mm

냉중성자원설치공 ◇ 조사시간 : 30 분				NAA1 ◇ 조사시간 : 30 분			
H (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg	H (cm)	Nucl	P (mg)	Dec/s×mg
				+6	Fe	51.44	12.64
				+6	Co	6.80	286.1
				+6	Ni	94.72	0.1916
				0	Cd Fe	826.3	4.288×10 ⁻²
				0	Cd Co	110.3	4.29

다음 표 2-4-6에서는 냉중성자원 설치공과 NAA1에서 조사시험을 위하여 사용한 Au, Fe, Co Foil에 대한 cadmium의 혼합비율 상태를 나타내고 있다.

표 2-4-6 Foil의 cadmium 비율

실험공	R_{AU}	R_{FE}	R_{CO}
CNS	86.5	-	-
NAA1	287.1	303.6	681.2

제 3 장 분 석

제 1 절 MCU Code에 의한 Heat Load 계산

본 절에서는 Monte-Carlo기법을 사용한 MCU code를 사용하여 중성자와 γ -선의 spectrum들을 3차원상에서의 계산한 결과를 기술하고자 한다. Monte-Carlo기법은 계산을 위하여 정확한 형상의 자료를 입력으로 요구한다. MCU code는 러시아의 Kurchatov Institute of Atomic Energy에서 개발하였으며, 이것은 verification and validation의 절차를 만족시킨 code이다.

1. 냉중성자원 설치공에서의 측정 및 MCU Code에 의한 계산결과

냉중성자원 설치공에서의 측정과 MCU code에 의한 발열량의 계산결과는 표 3-1-1과 그림 3-1-1, 그림 3-1-2, 그림 3-1-3, 그림 3-1-4에 나타나 있다. 계산과 측정은 냉중성자원 설치공의 중심축과 노심의 중앙높이에서 수행되었다. 냉중성자원 설치공에서의 γ -양자의 평균에너지 값은 0.982 MeV이다.

표 3-1-1 냉중성자원설치공에서의 측정값과 MCU code에 의한 계산값 결과

구분	측정값	MCU Code 에 의한 계산값
$\Phi_{\text{thermal neutron}}$ $(E \leq 0.625 \text{ eV})$ $\text{N/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW}$	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^{12}$
$\Phi_{\text{epithermal neutron-1}}$ $(5 \text{ keV} > E \geq 0.625 \text{ eV})$ $\text{N/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW}$	$(5.6 \pm 0.1) \times 10^9$	$(4.8 \pm 0.4) \times 10^9$
$\Phi_{\text{epithermal neutron-2}}$ $(1 \text{ MeV} > E \geq 5 \text{ keV})$ $\text{N/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW}$	-	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{10}$
$\Phi_{\text{fast neutron}}$ $(E \geq 1 \text{ MeV})$ $\text{N/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW}$	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{10}$	$(2.3 \pm 0.2) \times 10^{10}$
q_{γ}^{Al} $\text{W/g} \cdot \text{MW}$	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	$(2.5 \pm 0.2) \times 10^{-3}$

표 3-1-1 에서 보듯이 측정한 값과 MCU code 를 사용하여 계산한 값이 비슷하게 나타나고 있다. 그림 3-1-1, 그림 3-1-2, 그림 3-1-3 은 각각 냉중성자원 설치공의 축방향과 높이에 따른 열중성자, 속중성자, 그리고 γ -양자에 의한 열분포를 나

타내고 있다. 이들 분포곡선에서는 최대값을 냉중성자원 설치공의 중앙부분에서 축을 따라 바닥으로 약 10~15 cm 만큼 이동하여 최대값이 냉중성자원 설치공의 중간에서 나타나도록 하였다.

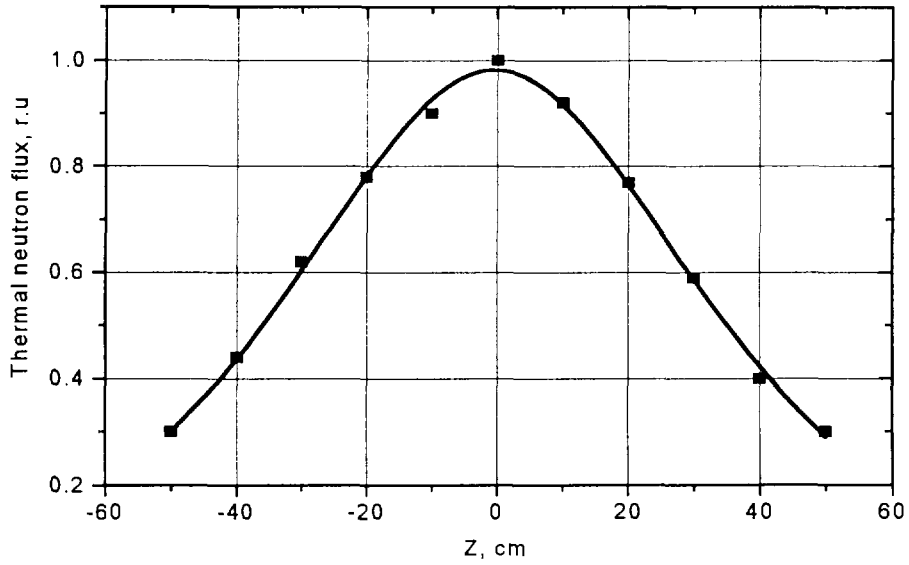


그림 3-1-1 축방향 높이에 따른 열중성자속 분포

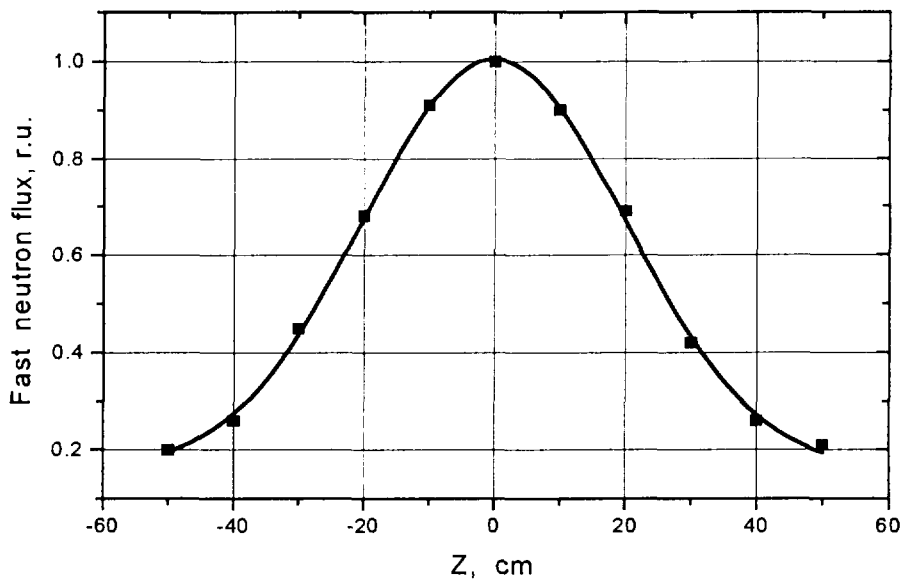


그림 3-1-2 축방향 높이에 따른 고속중성자속 분포

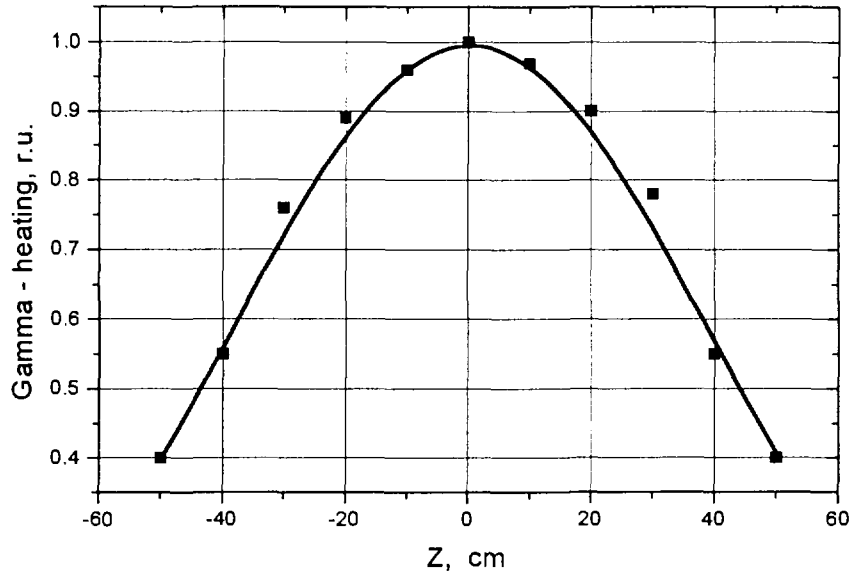


그림 3-1-3 축방향 높이에 높이에 따른 γ -선에 의한 열의 분포

2. 감속재용기 모형에서의 MCU Code에 의한 계산 결과

그림 3-1-4와 같이 실제 설계에 적용될 냉중성자원 감속재용기 모형에 대한 중성자속과 γ -선에 의한 발열량의 계산 결과는 표 3-1-2와 같다.

표 3-1-2 냉중성자원 감속재용기 모형에서의 MCU code에 의한 계산 결과

구 분	MCU code에 의한 계산값
$\Phi_{\text{thermal neutron}}$ ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW}$)	$(3.9 \pm 0.2) \times 10^{12}$
q_{γ}^{Al} ($\text{W}/\text{g} \cdot \text{MW}$)	$(6.5 \pm 0.1) \times 10^{-3}$
q_{γ}^{Fe} ($\text{W}/\text{g} \cdot \text{MW}$)	$(6.6 \pm 0.1) \times 10^{-3}$
q_{γ}^{Zr} ($\text{W}/\text{g} \cdot \text{MW}$)	$(7.1 \pm 0.2) \times 10^{-3}$
$q_{\gamma}^{\text{H}_2}$ ($\text{W}/\text{g} \cdot \text{MW}$)	$(9.8 \pm 0.2) \times 10^{-3}$
$q_n^{\text{H}_2}$ ($\text{W}/\text{g} \cdot \text{MW}$)	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$

감속재인 액체수소에서의 발열은 중성자의 충돌과 γ -양자에 의해서 발생한다. 측정은 냉중성자원 설치공의 가장 가까이에 위치하고 있는 외부노심인 OR5공에는 핵연료가 들어있지 않은 상태에서 수행되었다. 만일 이 OR5공에 18봉 핵연료집합체가 들어 있을 경우에는 중성자에 의한 발열량이 약 2배 정도 증가될 것이다.

version 2
H₂ moderator

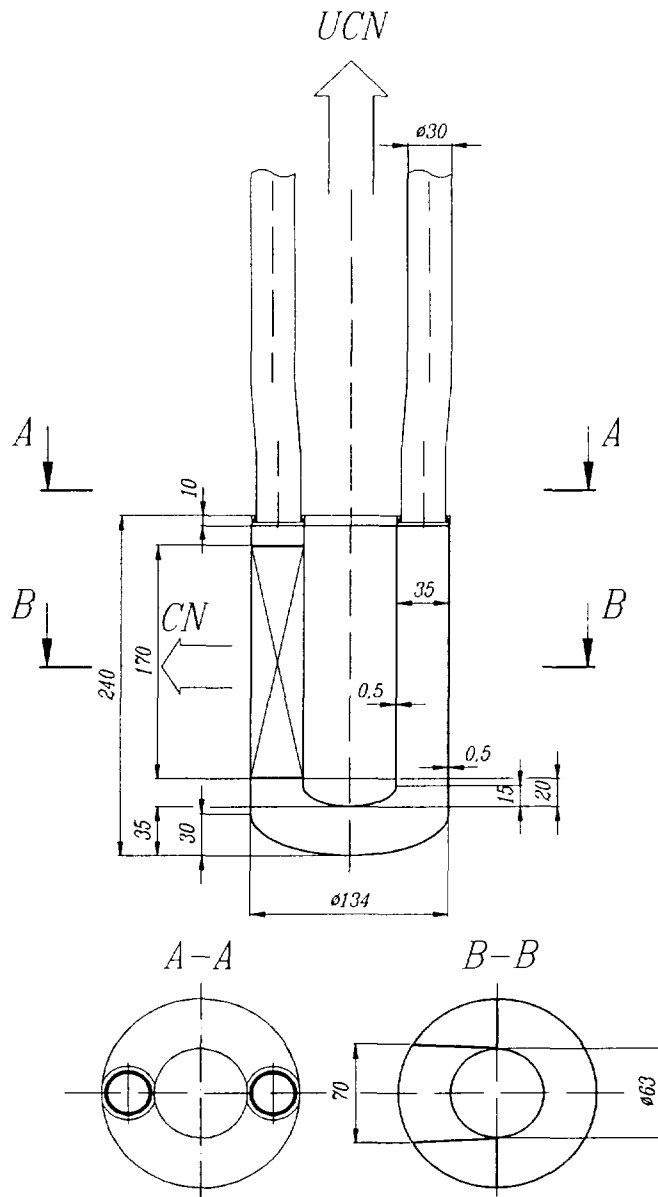


그림 3-1-4 냉중성자원 감속재용기 모형

제 2 절 MCNP Code에 의한 발열량 계산

본 절에서는 Monte-Carlo기법을 이용한 MCNP code의 최신본인 MCNP-4A code에 의해서 계산된 발열량에 관하여 기술하고자 한다. 이 MCNP-4A code를 사용하여 계산할 때 ENDF/B-6[8]의 nuclear cross section data library를 이용하였다.

1. 냉중성자원 설치공에서의 MCNP-4A에 의한 계산 결과

실험에 사용된 모델에 대하여 측정값과 MCNP-4A code에 의해서 계산된 설치공 중앙에서의 중성자속과 γ -열량 계산결과는 표 3-2-1과 같다.

표 3-2-1 냉중성자원 설치공에서의 측정값과 MCNP-4A code에 의한 계산값 결과

구분	측정값	MCNP-4A Code에 의한 계산값
$\Phi_{\text{thermal neutron}} (E \leq 0.625 \text{ eV})$ N/cm ² ·s·MW	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$
$\Phi_{\text{epithermal neutron}} (5 \text{ keV} > E \geq 0.625 \text{ eV})$ N/cm ² ·s·MW	$(5.6 \pm 0.1) \times 10^9$	-
$\Phi_{\text{fast neutron}} (E \geq 1 \text{ MeV})$ N/cm ² ·s·MW	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{10}$	$(2.02 \pm 0.34) \times 10^{10}$
q_{γ}^{Al} W/g·MW	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	$(8.7 \pm 0.4) \times 10^{-3}$

2. 냉중성자원 감속재용기 모형에서의 MCNP-4A Code에 의한 계산 결과

그림 3-1-4와 같은 냉중성자원 감속재용기 모형에 대하여 MCNP-4A code를 사용하여 중성자와 γ -선에 의한 발열량의 계산 결과는 표 3-2-2와 같다. 이 계산은 냉중성자원 설치공이 비어있는 상태이며, 감속재 용기에는 액체수소가 들어있는 상태에서의 계산을 의미한다.

표 3-2-2 냉중성자원 감속재용기 모형에서의 MCNP-4A code에 의한 계산 결과

구분	MCNP-4A code에 의한 계산값
$\Phi_{\text{thermal neutron}} (n/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW})$	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^{12}$
$\Phi_{\text{fast neutron}} (n/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MW})$	$(3.6 \pm 0.2) \times 10^{10}$
$q_{\gamma}^{\text{Al}} (W/g \cdot \text{MW})$	$(7.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$
$q_{\text{In}}^{\text{H2}} (W/g \cdot \text{MW})$	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-2}$

제 3 절 분석 결과

본 절에서는 앞에서 기술된 내용을 정리하고, 분석결과를 기술하고자 한다. 개념설계 시에 제시되었던 발열량과 이번의 실험에서 측정되고 MCU code와 MCNP-4A code에 의해 분석된 자료는 다음 표 3-3-1과 같다. 표 3-3-1의 첫번째 열에는 측정값이, 두번째 열에는 개념설계 시에 제시되었던 값이, 세번째와 네번째 열에는 실험에 이용된 냉중성자원 모델을 대상으로 경수가 채워져 있는 상태의 냉중성자원 설치공에서 MCNP-4A와 MCU code에 의해 계산된 값이, 다섯번째와 여섯번째 열에는 실제 설계에 이용될 냉중성자원 모델을 대상으로 냉중성자원 설치공이 비어 있고 그 내부가 액체수소로 채워져 있다고 가정한 상태에서 다섯번째 열에는 MCU code에 의해 계산된 값이, 여섯번째 열에는 MCNP-4A code에 의해 계산된 값이 수록되었다. 실험에 사용한 형상에 대하여 중성자속에 대한 결과는 MCNP-4A code 와 MCU code 두가지 경우에 모두 측정값과 잘 일치하고 있다. 위의 표 3-3-1의 내용을 분석하여 보면 다음과 같다. 냉중성자원 설치공에 경수가 채워져 있는 경우와 냉중성자원 감속재용기 모형에서 MCNP-4A code에 의해 계산된(3 & 5열) Φ_{th} 과 Φ_{fast} 에 값은 서로 잘 일치되고 있다. 또한 4번째 행에 나타난 MCNP-4A code와 MCU code에 의한 $q_{(v)}^{H2}$ 의 계산 값이 서로 거의 일치하고 있다. 그러나 3번째 행에 나타난 MCNP-4A code에 의해 계산된 $q_{(v)}^{H2}$ 값이 측정 값보다 4배 정도 큰 것으로 나타났다.

표 3-3-1 발열량 분석결과와의 비교

구분	1	2	3	4	5	6
	측정값	개념설계	실험계산 (MCNP-4A)	실험계산 (MCU)	CNS 모델계산 (MCNP-4A) *	CNS 모델계산 (MCU)
열중성자 flux Φ_{th} ($E < 0.625$ eV) $n/cm^2 \cdot s \cdot MW$	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^1$	-	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^{12}$	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^{12}$	$(3.9 \pm 0.2) \times 10^{12}$
속중성자 flux Φ_{fast} ($E > 1$ eV) $n/cm^2 \cdot s \cdot MW$	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{10}$	-	$(2.02 \pm 0.34) \times 10^{10}$	$(2.3 \pm 0.2) \times 10^{10}$	$(3.6 \pm 0.2) \times 10^{10}$	-
냉중성자원 감속재용기 인 알루미늄에서 γ -양자 에 의한 발열량 $q_{(r)}$ W/g·MW	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^3$	$9.7 (8.3) \times 10^{-3}$	$(8.7 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(2.5 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	$(7.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	$(6.5 \pm 0.1) \times 10^{-3}$
냉중성자원 감속제인 액체수소에서 γ -양자에 의한 발열량 $q_{(n)}$ W/g·MW	-	$1.2 (1.7) \times 10^2$	-	-	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^2$	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^2$

*Core의 중심을 (x,y,z)=(0,0,0)라고 할 때 CNS 모델에서의 계산위치는 (x,y,z)=(-30.46 cm, 35.81 cm, -10 cm)

다음 표 3-3-2는 알루미늄에서의 발열량을 상세하게 분석한 것이다.

표 3-3-2 알루미늄 발열량에 기여한 영향 평가

- (A) 실험에 사용한 형상
- (B) 설계에 사용될 냉중성자원 모델
- (C) 냉중성자원 설치공이 진공상태인 경우

γ_i - sources	(A) $q_\gamma \times 10^{-3}$, $W \times g^{-1} \times MW^{-1}$ (%)		(B) $q_\gamma \times 10^{-3}$, $W \times g^{-1} \times MW^{-1}$ (%)		(C) $q_\gamma \times 10^{-3}$, $W \times g^{-1} \times MW^{-1}$ (%)	
		γ - rays from n,fission turned off		γ - rays from n,fission turned off		γ - rays from n,fission turned off
Fuel (1)	0.02 (0.2%)	0	0.04 (0.5%)	0	0.03 (0.5%)	0
Fuel (2)	0.99 (11.0%)	0	1.76 (22.3%)	0	1.60 (25.4%)	0
Fuel (3)	0.46 (5.3%)	0.01 (0.2%)	0.87 (11.0%)	0.03 (2.3%)	0.71 (11.3%)	0.02 (3.3%)
Fuel Models	0.11 (1.3%)	0.03 (0.6%)	0.13 (1.6%)	0.05 (3.9%)	0.16 (2.5%)	0.04 (6.7%)
SOR(I), I=1,8	0.79 (9.0%)	0.12 (2.4%)	1.46 (18.5%)	0.36 (27.7%)	1.25 (19.8%)	0.21 (35%)
Total Reactor Core	2.37 (27.2%)	0.16 (3.3%)	4.26 (53.9%)	0.44 (33.9%)	3.76 (59.5%)	0.27 (45%)
D ₂ O - reflector	1.09 (12.5%)	0.13 (2.7%)	2.42 (30.6%)	0.23 (17.7%)	2.03 (32.2%)	0.21 (35%)
CNS (hydrogen)	3.90 (44.8%)	3.30 (67.9%)	0.50 (6.5%)	0.44 (33.9%)	0.00	0.00
Al - detector	0.48 (5.5%)	0.45 (9.3%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Al vac. ch. wall	0.60 (6.9%)	0.76 (15.6%)	0.13 (1.6%)	0.08 (6.1%)	0.11 (1.7%)	0.12 (20%)
Zr CNS wall	0.26 (3.0%)	0.04 (0.8%)	0.58 (7.3%)	0.09 (6.9%)	0.39 (6.2%)	0.02 (3.3%)
Total CNS envir.	5.24 (60.0%)	4.56 (93.8%)	1.22 (15.4%)	0.61 (40.7%)	0.50 (7.9%)	0.14 (23.0%)
TOTAL	8.7±0.4 (100%)	4.9±0.3 (100%)	7.9±0.2 (100%)	1.3±0.1 (100%)	6.5±0.3 (100%)	0.6±0.01 (100%)

*Fuel (1), Fuel (2), Fuel (3) – various fuel elements assemblies in reactor core. Fuel(1) actually is light water assemblies in the reactor core, Fuel (2) and Fuel(3) are the assemblies with different fuel concentration.

위의 표 3-3-2에서 (A)의 경우에서의 γ -선의 분포도는 그림 3-3-1과 같으며, (B)의 경우는 그림 3-3-2와 3-3-3과 같으며, (C)의 경우는 그림 3-3-4와 같다.

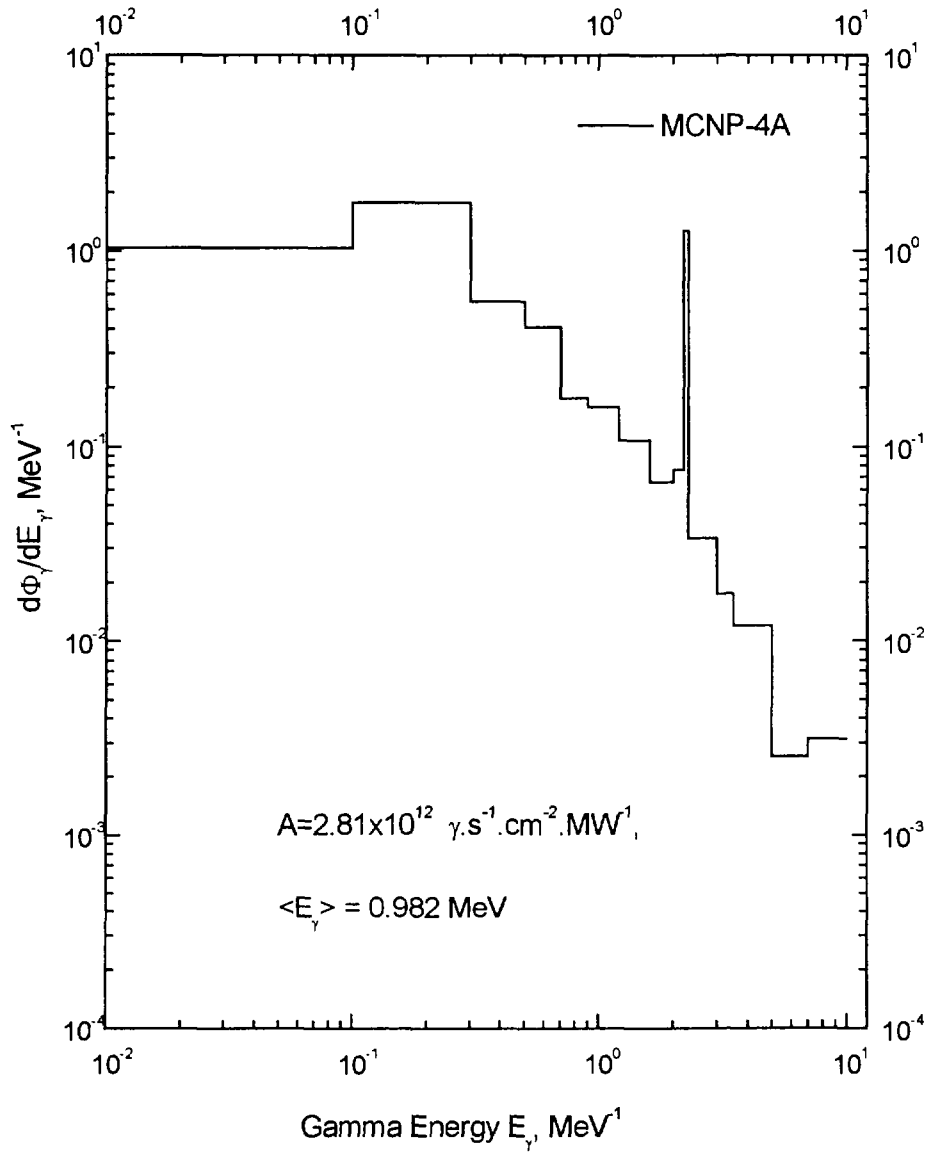


그림 3-3-1 (A)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum (냉중성자원 설치공에 경수가 채워져 있는 경우)

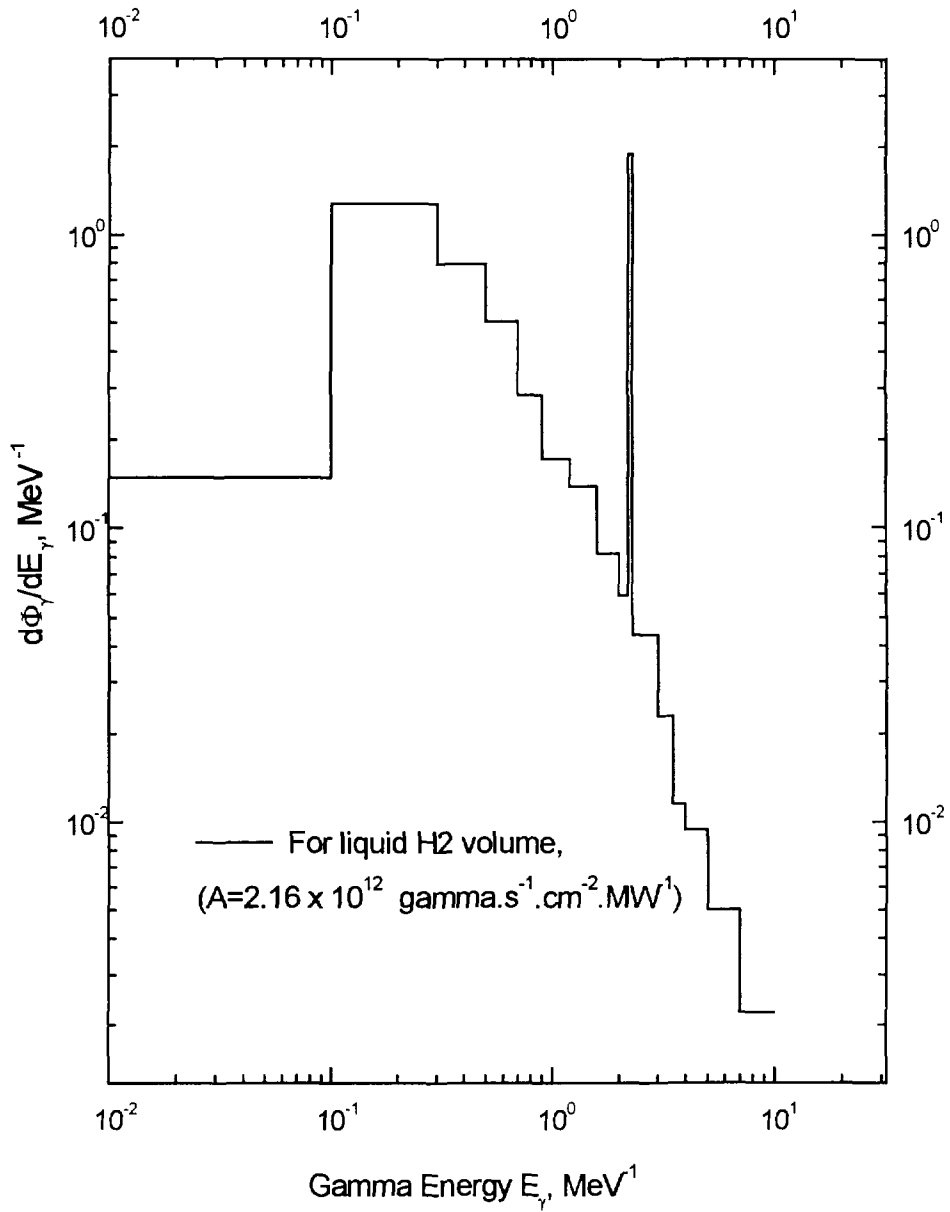


그림 3-3-2 (B)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum
 (냉중성자원 설치공은 비어있고,
 감속재용기에는 액체수소가 채워져 있는 경우)

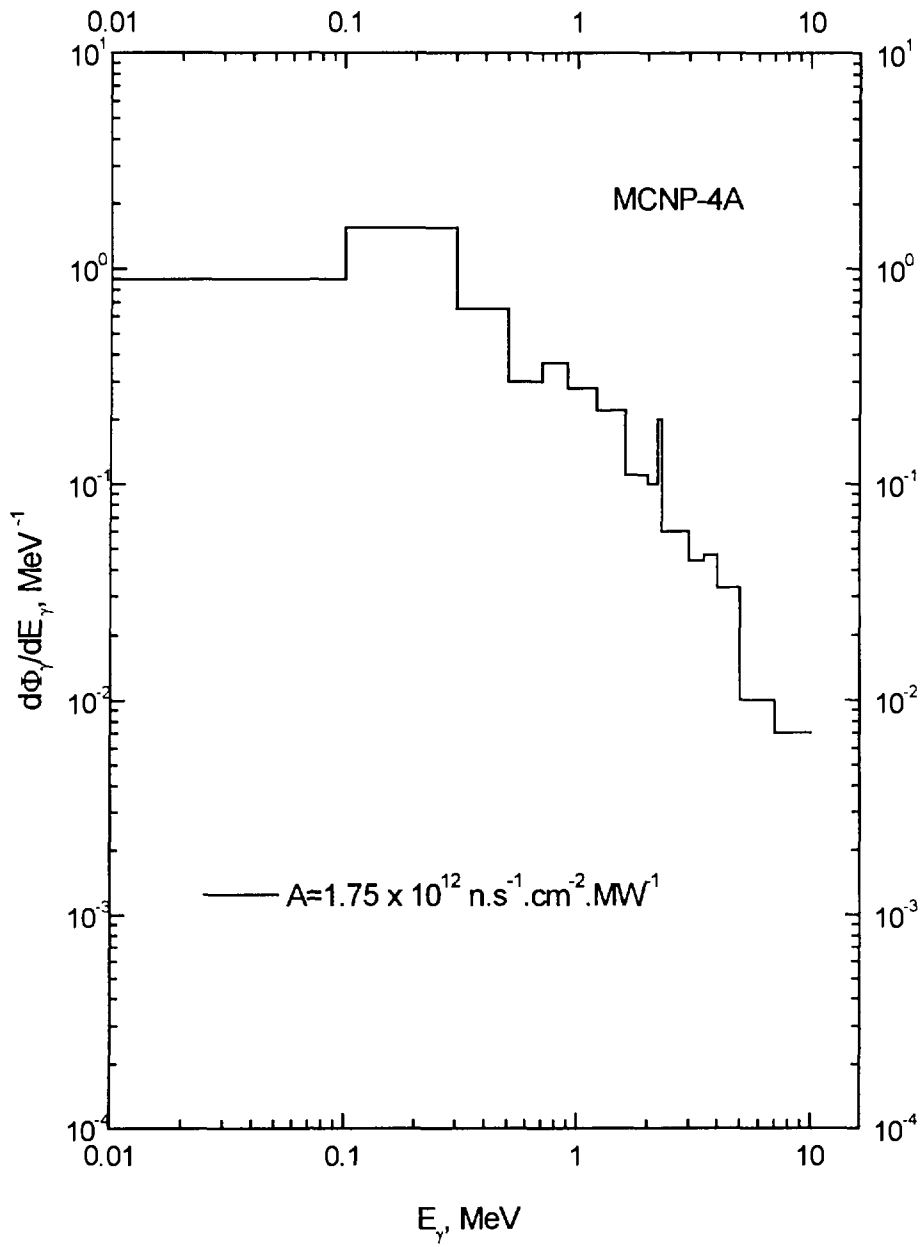


그림 3-3-3 γ -spectrum (냉중성자원 설치공이 비어있는 경우)

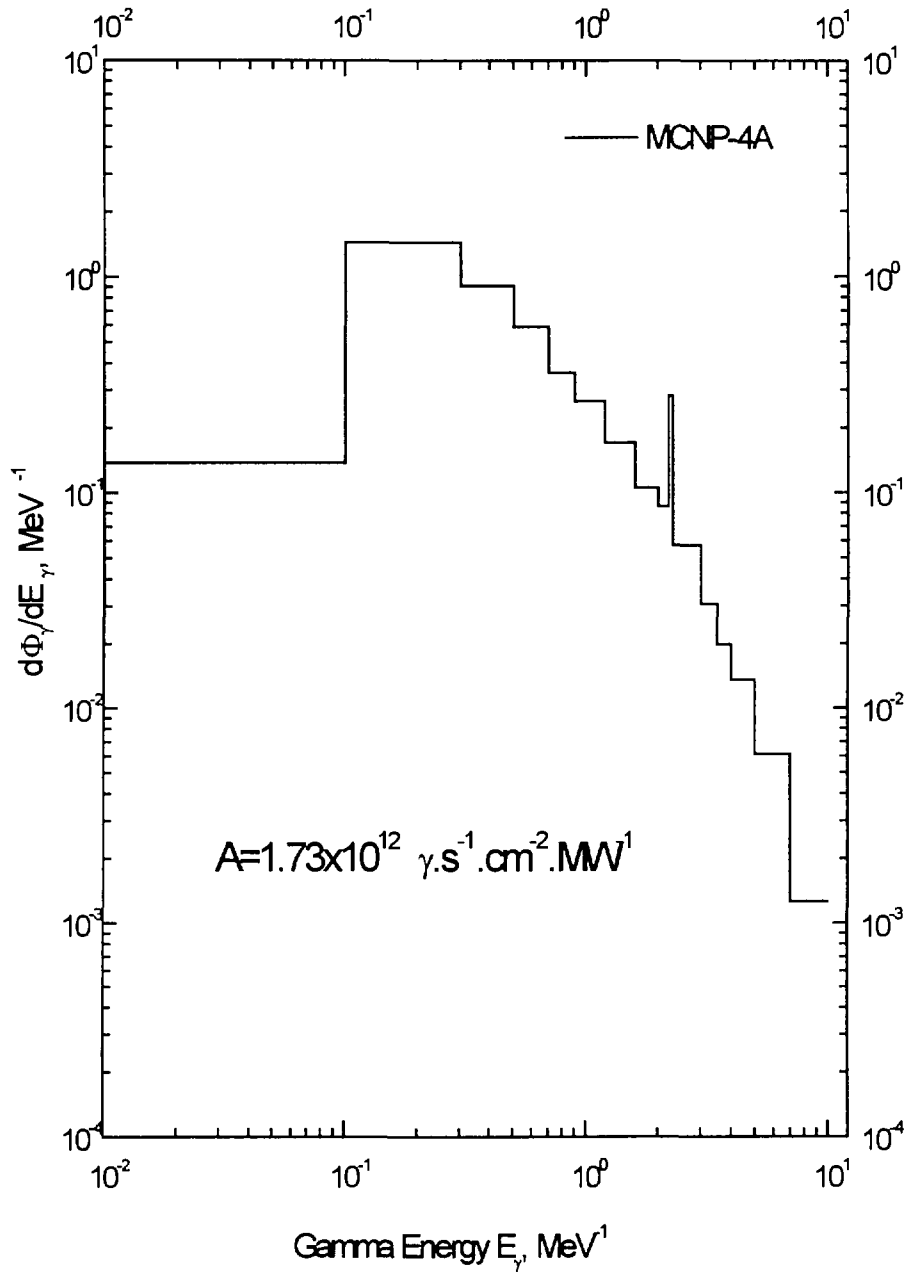


그림 3-3-4 (C)의 경우 IC-Gray chamber의 Al detector에서의 γ -spectrum

열중성자속에 대한 VENTURE code 계산시 노심 계산 모델에서 CNS공의 계산 격자구조는 그림 3-3-5와 같다.

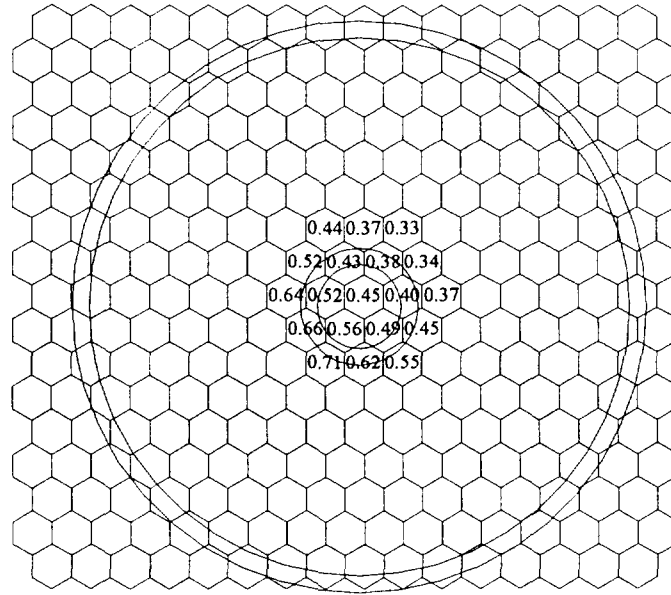


그림 3-3-5 냉중성자원 설치공의 VENTURE 계산 격자 구조

격자와 격자사이는 약 1.156 cm이고 그림에서 가운데 작은 원이 내경 2.5 cm, 두께 0.5 cm의 알루미늄관을 그려 넣은 것이다. 계산모델에는 알루미늄관은 없고 냉중성자원 설치공에 전부 물이 있는 것으로 가정하였다. 육각형 격자 안에 숫자는 VENTURE에서 계산한 냉중성자원 설치공에서 평균 열중성자속을 1.0으로 하였을 때 육각형 격자에서 평균 열중성자속의 값이다. 그림 3-3-6은 Gold, Ni foil의 조사후 시점에서의 방사능 값과 Gold, Ni wire를 사용해서 측정한 열중성자속, VENTURE의 열중성자속 계산 결과를 토대로 축방향 분포를 그린 것이다. 이 그림에서 보면 Gold wire와 VENTURE로 계산한 중성자속 분포가 서로 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 측정시 Gold wire를 삽입할 때 위치의 오차가 있을 수 있고, 실제 원자로 구조와 계산 모델의 차이가 있을 수 있기 때문이다. Foil에 의한 측정도 측정시 그 위치가 정확치 않음을 알 수 있는데 이 위치에 대한 오차는 중성자속 절대값 비교시 문제가 된다.

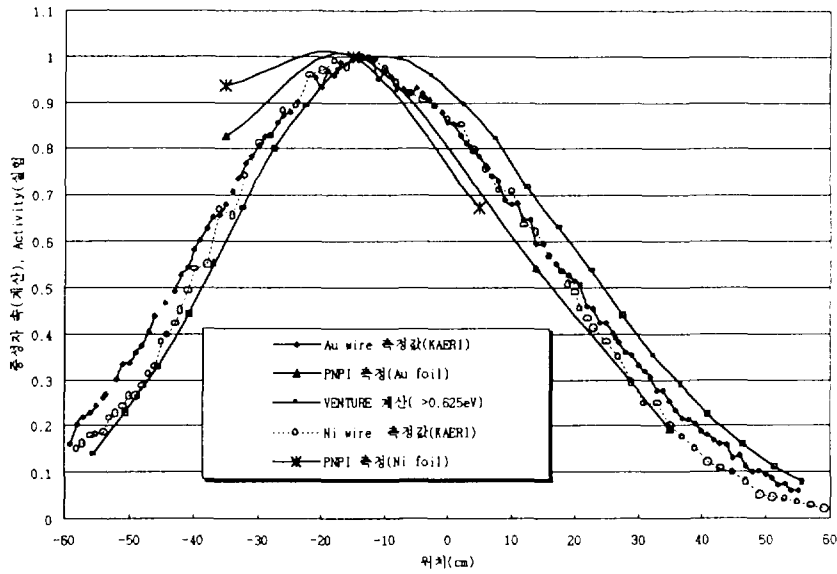


그림 3-3-6 중성자속 분포 비교

Foil과 wire를 이용하여 측정한 열중성자속 절대값을 VENTURE 및 MCNP 계산값과 비교한 data가 표 3-3-3에 나타나 있다.

표 3-3-3 열중성자속에 대한 측정값과 계산값의 비교

위치 (cm)	측정	측정값	VENTURE 계산/ 오차(%)		MCNP 계산/ 오차(%)	
-37.5 average ^a	Au wire	1.21E+12				
		1.37E+12	8.05E+11	33.7	7.886E+11	42.4
-26 average	Au foil	1.65E+12				
		1.86E+12	1.21E+12	26.4	1.150E+12	38.2
-19 average	Au wire	1.82E+12				
		2.05E+12	1.38E+12	24.3	1.415E+12	31.0
-5 average	Au foil	1.88E+12				
		2.12E+12	1.44E+12	23.7	1.445E+12	31.8
36 average	Au wire	1.21E+12				
		1.37E+12	8.64E+11	28.4	4.442E+11	67.6
44 average	Au foil	3.75E+12				
		4.23E+11	2.86E+11	23.7	3.323E+11	21.4

^a flux(2,200 m/s)x2/√π

그림 3-3-7은 축방향 위치를 보정하였을 때 열중성자속의 절대값에 대한 측정치와 VENTURE의 비교를 나타낸 것이다. VENTURE 계산과 Gold wire를

조사시켜 측정된 값을 비교하면 계산값이 30% 정도 낮게 예측하고 있다. 이는 VENTURE 계산은 냉중성자원 설치공이 전부 물로 차 있는 것으로 가정하고 계산하였으며, 알루미늄 내경 2.5cm 영역에서 평균한 열중성자속을 구한 것이다. 실제 실험은 알루미늄 파이프가 CNS 공에 박히고 파이프 내부는 공기로 차 있다.

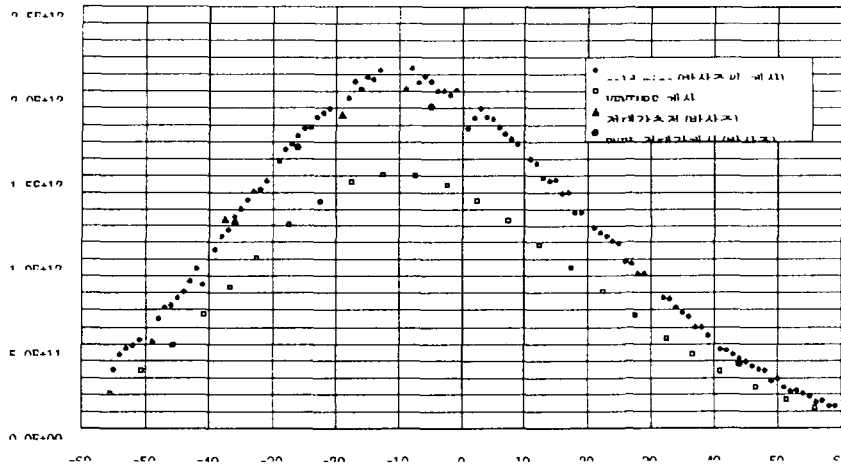


그림 3-3-7 열중성자속 절대값 비교

표 3-3-4는 노심 가운데로부터 9 cm 위에서의 중성자속 측정값과 MCNP 결과를 비교한 것이다.

표 3-3-4 노심가운데에서 9 cm 위에서의 중성자속

구 분	Measurement		MCNP
	Au Foil	Au Wire	
열중성자(2,200 m/s) average	$(1.64 \pm 0.08) \times 10^{12}$ 1.85×10^{12}	1.73×10^{12} 1.95×10^{12}	$1.24 \times 10^{12} (0.0289)^d$
속중성자($E > 1\text{MeV}$)	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{10}$	-	$1.54 \times 10^{10} (0.2333)$

^dFractional standard deviation

위 표에서 열중성자속 측정값은 2,200m/sec에서의 핵반응 단면적을 이용하여 구한 중성자속이고 계산값은 $E > 0.625\text{eV}$ 의 중성자속 이므로 2,200m/sec 중성자속에 $2/\sqrt{\pi}$ 를 곱하여 구한 열중성자속을 계산값과 비교하였다. 표에서 보는 바와 같이 MCNP가 측정값을 30~40 % 정도 낮게 평가함을 볼 수 있으며, MCNP와 VENTURE는 비슷한 결과를 보여 준다. 그림 3-3-8과 3-3-9는 축방향 열중성자속 분포를 MCNP결과와 비교한 것으로 각각 절대값과 상대값을 비교한 것이다. 절대값은 차이가 많이 나지만 상대분포는 잘 일치하고 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 Au foil이나 wire로 측정한 열중성자속은 비교적 정확하다는 것을 고려하면 냉중성자원 설치공에서의 열중성자속 측정결과와 계산의 차이는 조금 큰 것으로 판단된다. 그 원인으로서는 실험시의 원자로 출력값에 대한 오차가 가장 큰 원인일 것으로 추정되며 MCNP계산 결과를 절대값으로 환산할 때 사용한 인자(normalization factor) 등도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

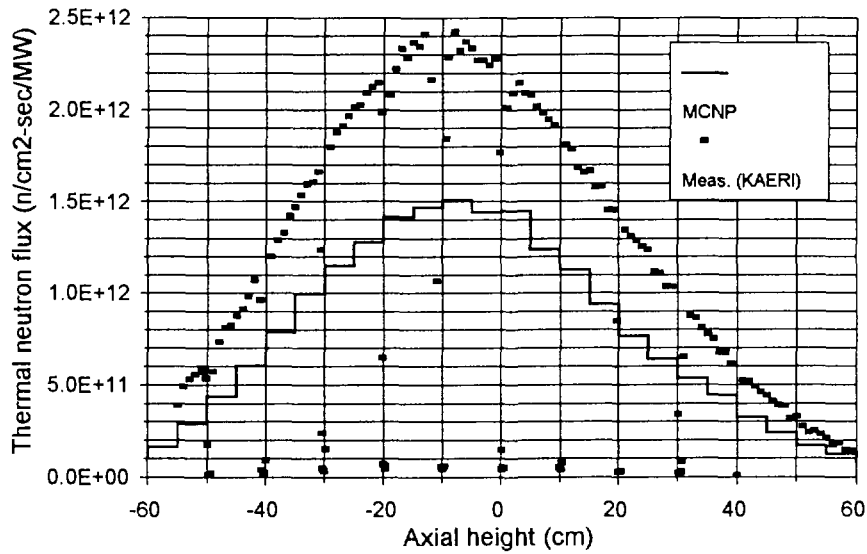


그림 3-3-8 축방향 절대 열중성자속 분포

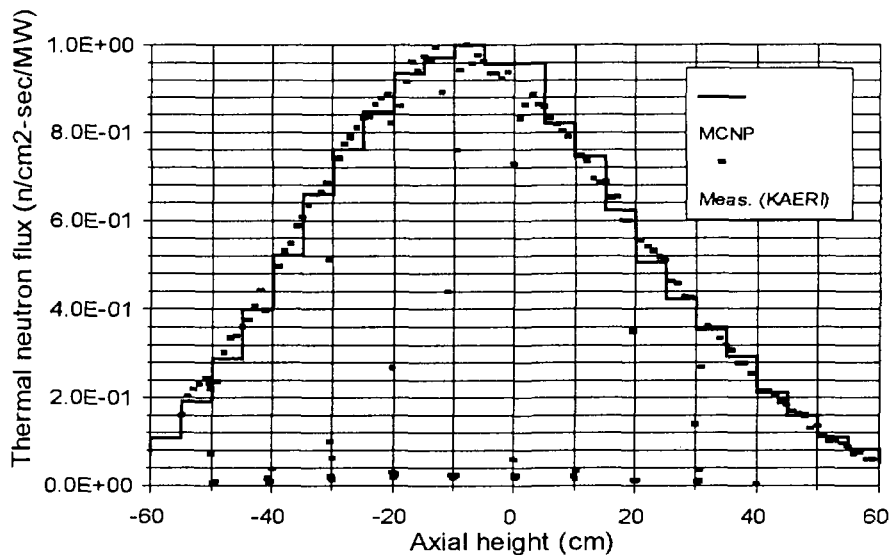


그림 3-3-9 축방향 상대 열중성자속 분포

IC-Gray로 측정된 감마발열량은 노심 중앙 높이에서 9 cm 되는 곳에서 $q_{\gamma}^{AI} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ Watt/gm-MW이고, MCNP로 같은 위치에서 구한 Al에 대한 발열량은 $q_{\gamma}^{AI} = 7.1 \times 10^{-3}$ (fsd=0.0369) Watt/gm-MW였다. MCNP 감마값은 지발감마에 의한 영향이 포함되지 않은 것으로 경험에 의하면 지발감마선에 의한 영향이 냉중성자원 감속재용기의 설치위치에서는 MCNP로 구한 감마값의 20 % 이내에 해당될 것으로 예상된다. 그림 3-3-10은 IC-Gray로 측정된 전류와 MCNP로 구한 감마발열량의 축방향 분포를 비교한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 위쪽에서는 분포가 비교적 잘 일치하고 있지만 아래쪽에서는 측정값이 조금 더 크게 나타나고 있다.

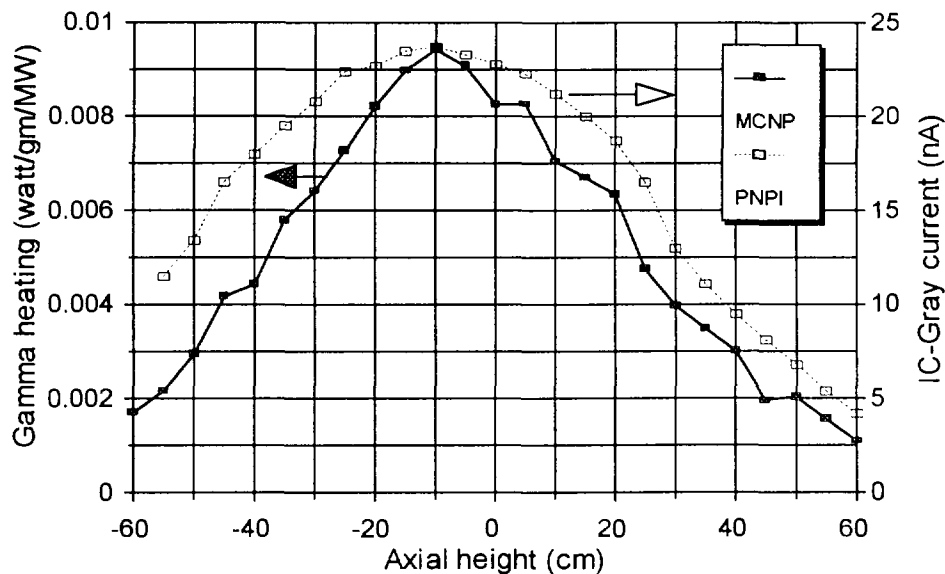


그림 3-3-10 축방향 γ 발열량 분포

감마발열량이 차이가 나는 이유로 H의 (n, γ)capture 반응에 의해 생성되는 2.23 MeV 감마를 IC-Gray가 측정하지 못하였고, IC-Gray가 0.662 MeV의 감마에 calibration 되었으나 냉중성자원 설치공에서의 감마에너지(평균 1MeV, H(n, γ) 2.23 MeV)에 대한 calibration factor에서의 차이 등을 들 수 있다. 그림 3-3-11에 감마에너지에 따른 IC-Gray의 calibration factor가 상대값으로 주어져 있는데 2 MeV 이상 감마의 calibration factor는 0.662 MeV 감마의 calibration factor 보다 20%정도 높다. 따라서 감마발열량의 차이가 발생한 주된 이유는 2.23 MeV 감마를 측정하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그림 3-3-1~4에 Al dry channel에서의 감마스펙트럼을 축방향 높이 따라 보여 주고 있는데 2.23 MeV에서 peak를 보여 주고 있으며 축방향 높이에 따라 큰 차이는 없다.

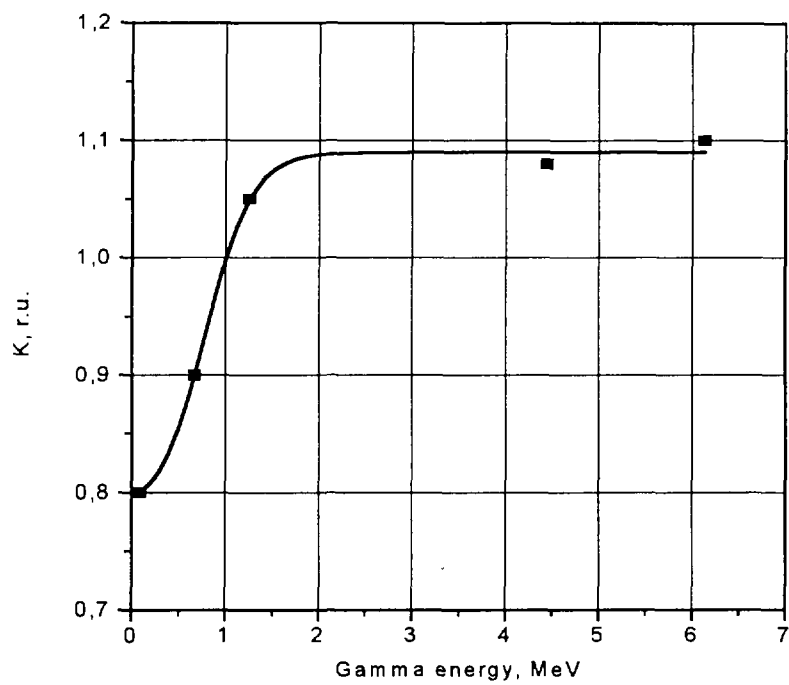


그림 3-3-11 γ 에너지에 따른 K-factor


제 4 장 결 론


중성자속 측정결과와 MCNP 계산결과는 실험결과의 축방향 위치를 조정하면 축방향 분포는 비슷하게 나오지만, 절대값은 지금까지의 경험으로 비추어 볼 때 차이가 조금 큰 것으로 판단된다. 차이가 발생하는 이유로는 여러 가지가 있을 수 있지만 실험시의 출력 값에 대한 오차가 가장 큰 것으로 추정된다. 따라서 CNS volume 이 액체수소로 채워진 CNS model 에 대한 MCNP 나 MCU 의 중성자속 계산결과도 확인하는 과정을 거쳐야 할 것으로 사료된다. 감마발열량에 대해서는 측정과 계산 결과의 차이가 매우 크기 때문에 IC-Gray 의 보정을 재수행하여 재측정을 하거나, MCNP 계산결과를 CNS 설계에 이용하는 것이 추천된다. 계산을 이용할 경우에는 지발감마선에 의한 영향에 대해서도 평가하여야 할 것이다.

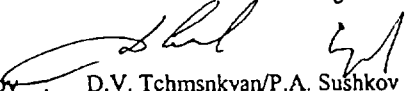
본 실험을 통하여 하나로 실험공에서 발열량 측정을 위한 새로운 방법인 IC-Gray chamber 를 이용하는 방법과 그 결과에 대하여 여러가지 계산과 비교 분석하였다. IC-Gray chamber 를 사용하는 방법은 calorimeter 를 이용하는 방법보다 측정방법이 상당히 용이하기 때문에 하나로의 다른 실험공에서의 열량 측정을 위해서도 사용할 수 있다는 것을 확인하였다.

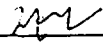
부록 1. Procedure for installation of the dry experimental channel and the irradiation test in CN Hole

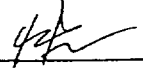
**Procedure for installation of the dry experimental channel and
the irradiation test in CN hole**

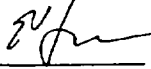
Written by : Kook Nam Park, Young Hyun Choi  Date of signature : 97. 11. 19

Reviewed by : Man Soon Cho  Date of signature : 97. 11. 19

Reviewed by : D.V. Tchmsnkyan/P.A. Sushkov  Date of signature : 19. 11. 97

Reviewed by : Byung Jin Chun  Date of signature : 97. 11. 19
Manager of Hanaro operation management group

Reviewed by : Seong Hong Yang  Date of signature : 97. 11. 24
Manager of Hanaro quality assurance group

Approved by : Chang Oong Choi  Date of signature : 97. 11. 25
General manager at development team for Hanaro utilization

목 차

- 1.0 목 적
- 2.0 적용범위
- 3.0 장치설명
 - 3.1 조사용 파이프
 - 3.2 IC-Gray
 - 3.3 방사화 검출기 집합체
- 4.0 작업준비
 - 4.1 작업 허가
 - 4.2 작업 준비물
 - 4.3 작업 인원
 - 4.4 초기 조건
- 5.0 주의 사항
- 6.0 작업 및 실험 절차
 - 6.1 조사 파이프 설치작업 준비
 - 6.2 실험 절차
 - 6.3 측정작업 종료 후 조치
- 7.0 붙 임
 - 6.1 조사 파이프 조립도 (dry experimental channel)
 - 6.2 IC-Gray scheme

1.0 목 적

이 절차서는 하나로 반사체 영역에 냉중성자 (Cold Neutron)을 얻기 위해 마련된 냉중성자원 설치공(이하 CN 공 이라함.) 안에서의 방사능에 의한 발열량 측정을 위해 필요한 조사 파이프 설치 및 시료 조사 절차를 마련하는데 그 목적이 있다.

2.0 적용범위

- 1) 이 절차서에 따른 모든 작업 절차는 해당 실험에 대해서만 적용하며, 실험이 종료된 후에는 조사용 파이프를 비롯한 기타 설치물은 완전 철거하여 원상 복구한다.
- 2) 측정자료의 계산, 분석 및 결과 검토는 해당 분야의 정해진 절차에 따른다.

3.0 작업준비

3.1 조사용 파이프

- 1) 원자로 수조 밖에서 측정기 또는 검출기 등을 CN 공까지 유도할 수 있도록 제작된 dry experimental channel 을 말한다 (그림 1).
- 2) 안지름 25mm 의 60 계열 알루미늄 파이프로 제작하며, 파이프 내부 공간을 통해서 방사선이 직접 유출 되는 것을 방지하기 위하여 휨 구조로 한다.
- 3) 파이프 아래부분은 CN 공 상부 플랜지에 걸쳐져 안정되게 설치될 수 있도록 하며, 자체 무게가 부력보다 크면서도 최소한의 무게를 가질 수 있도록 설계한다.
- 4) 반사체 탱크 내의 CN 공에 삽입되는 부분은 상부 파이프 부분과 분리할 수 있도록 제작하여 실험 후에 방사성 폐기물 부피를 줄일 수 있도록 한다.

3.2 IC-Gray

- 1) γ 선에 의해 발생하는 열량에 비례하는 전류를 on-line 으로 측정할 수 있도록 한 전리함 (ion chamber)의 일종이다 (그림 2).
- 2) 이 전리함은 바깥지름 18 mm, 길이 70 mm 정도의 크기이며 power supply, picoammeter 등과 cable 로 연결된다.

3.3 방사화 검출기 집합체

- 1) 중성자속 측정을 위하여 조사되는 wire 또는 foil 형태의 방사화 검출기와 이를 조사 위치까지 유도해 주는 추(weight) 및 지지선(support wire) 등으로 구성된 집합체를 말한다.

- 2) 0.1 mm의 SUS wire로 된 지지선은 끝단에 납으로 된 추를 달아 무게를 유지토록 한다.
- 3) Wire 형태의 방사화 검출기는 CN공 길이 방향 전체를 측정할 수 있도록 120 cm의 길이를 지지선에 고정하며, cadmium cover가 필요한 경우에는 1 cm 정도 길이의 cadmium tube를 이용하여 20 cm의 간격으로 검출기에 끼워 고정시킨다. 필요에 따라서 한 개의 지지선에 여러 개의 wire 검출기를 붙일 수 있다.

4.0 장치 설명

4.1 작업 허가

- 1) 작업은 연구로 운전관리실에 작업의뢰서를 제출하여 허가를 받은 후에 실시한다.
- 2) 방사선 피폭관리가 필요한 경우에는 방사선작업 허가서를 방사선관리실에 제출하여 허가를 받은 후 작업을 실시한다.

4.2 작업 준비물

- 1) 조사용 파이프 (dry experimental channel)
- 2) 아세톤, 순수 및 세척용 천
- 3) 클램프 (2 개)
- 4) IC-Gray 및 cable
- 5) DC power supply (200~500 V)
- 6) Picoammeter (측정범위 : 10^{-14} ~ 10^{-6} A)
- 7) SUS wire (굵기 : 0.1 mm) 및 납 추
- 8) 방사화 검출기 (wire 또는 foil : Au, Ni, Fe, Co)
- 9) Cadmium tube 또는 plate (두께 : 0.5 mm)
- 10) 방사성 폐기물 보관용 container
- 11) 개인 방사선 방호 용구 및 portable dosimeter
- 12) 작업대 및 기타공구 등

4.3 작업 인원

- 1) 작업 책임자 : 1 인 (연구로 운전관리실)
- 2) 작업자 : 3 인 (냉중성자원개발 과제참여자, 연구로운전관리실)
- 3) 크레인 및 man bridge 운전자 : 1 인 (연구로 운전관리실)
- 4) 러시아 전문가 : 2 인 (Petersburg Nuclear Physics Institute)

4.4 초기 조건

- 1) 원자로는 안전 정지상태 이어야 한다
- 2) 원자로 수조 platform 과 수조 상부에는 주변 시설물과 간섭이 없도록 충분한 작업공간을 확보한다.

5.0 주의 사항

- 1) 원자로 수조 덮개를 열어놓은 상태로 작업 또는 실험을 수행하여야 하므로 안전사고가 발생하지 않도록 항상 주의 하여야 한다.
- 2) 조사가 끝난 IC-Gray 또는 방사화 검출기 등을 인출할 때에는 방사능을 측정하여 안전한 상태에서만 인출하여야 한다.
- 3) 조사 후 인출한 방사화 검출기를 분석실로 운반할 경우에는 반드시 차폐 container 에 담아 이동하여야 한다.
- 4) 모든 작업자 및 실험자는 방호복 및 개인 방사선 방호용구를 착용하여야 한다.

6.0 작업 및 실험 절차

6.1 조사 파이프 설치작업 절차

- 1) 조사 파이프는 설치 전에 파이프 연결 부위 및 용접부위에 누수 현상이 없는지 확인한다.
- 2) 조사 파이프를 아세톤으로 잘 닦은 후 다시 순수로 닦아내어 이물질 제거한다.
- 3) 조사파이프 상부의 윗부분을 크레인에 매달아 설치작업 중에 조사 파이프가 실수로 떨어지는 것을 방지한다.
- 4) 크레인으로 조사 파이프를 수직으로 세운 후 원자로 수조 안의 구조물과 충돌하지 않도록 서서히 반사체 탱크 상단까지 내린다.
- 5) 조사 파이프를 CN 공에 삽입하여 파이프의 하부 플랜지가 반사체 탱크 위에 있는 침니의 CN 공 상부 플랜지에 똑바로 놓여질 수 있도록 한다.
- 6) 조사 파이프의 상단은 원자로홀 수조 platform 의 난간에 클램프로 단단히 고정한다.

6.2 실험 절차

- 1) 원자로 출력 교정이 끝났음을 확인한다.
- 2) 시료를 인출할 때 원자로 주변 고방사능으로 인하여 원자로가 trip 되는 것을 방지하기 위하여 trip set point 임시변경을 원자로 운전관리실에 사전 요청한다.
- 3) 원자로 출력을 10kW 로 유지한다.
- 4) 준비된 열중성자 측정용 방사화 검출기를 조사 파이프에 삽입하여 약 10 분간 조사한다. 이 때 검출기가 CN 공 안에서 수직을 유지하며 지탱할 수 있도록 지지선의 장력을 조절한 후 조사 파이프 입구에 테이프 등으로 잘 고정한다.
- 5) 조사가 완료된 방사화 검출기 집합체는 5 m 가량 뽑아올려 1 시간이 지난 뒤 작업 가능한 방사능 준위 이하로 되었음을 확인한 다음 인출하여

지지선을 절단한 후 방사선 차폐 container 에 넣어 분석실로 옮긴다. 검출기를 제거한 나머지 지지선 및 납 추 등은 별도로 분리하여 방사선 차폐 container 에 넣어 보관한다.

- 6) 다른 열중성자 측정용 방사화 검출기에 대해서는 4)과 5)의 과정을 반복한다.
- 7) 고속 중성자 측정을 위한 방사화 검출기 집합체를 IC-Gray cable 에 걸리지 않도록 조사 파이프 바닥까지 삽입하여 10 MW 원자로 출력에서 조사시킨 후 열중성자 측정용 시료 집합체에서와 같이 처리한다.
- 8) IC-Gray 를 조사 파이프에 삽입하고 계측기의 고전압 공급기, 전류 측정기를 연결한다.
- 9) 원자로 출력을 2 MW 로 올린 후 IC-Gray 로부터의 발생전류를 측정하여 기록한다.
- 10) IC-Gray 에 연결된 cable 을 손으로 잡고 일정 간격으로 들어 올리면서 CN 공 수직 방향에 대한 분포를 측정, 기록한다.
- 11) 원자로 출력이 4 MW, 6 MW, 8 MW, 10 MW 인 상태에서 10)의 절차를 반복하여 측정, 기록한다.
- 12) 원자로를 안전 정지시킨 후 작업종료 후의 조치를 취한다.

6.3 측정작업 종료 후 조치

- 1) 조사 파이프 및 IC-Gray (cable 포함)는 방사능 준위가 감쇄할 때까지 작업 수조로 옮겨 보관 할 수 있도록 한다. 조사 파이프를 철거할 때에는 설치할 때의 역순으로 한다.
- 2) 방사화 검출기 조사과정에서 발생한 방사능 폐기물은 차폐 container 에 넣어 지정된 장소에 보관, 폐기토록 한다.
- 3) 수조 상부에 설치한 작업대 및 각종 측정기기들은 오염 여부 확인 후에 원자로실 밖으로 반출한다.
- 4) 조치사항이 완료된 후에는 연구로 운전관리실의 확인 검사를 받아야 한다.

7.0 붙임

7.1 조사용 파이프 조립체 (dry experimental channel)

7.2 IC-Gray scheme

부록 2. 측정시기의 하나로 출력과 제어봉위치

일 시	출 력 (MW)	제어봉 위치 (mm)
97-11-17 3:00	0.000000299	0
97-11-17 6:00	0.000000299	0
97-11-17 9:00	0.000000299	0
97-11-17 12:00	0.000000299	0
97-11-17 15:00	0.000000299	0
97-11-17 18:05	0.0000693	358
97-11-17 19:00	0.00998	381.4
97-11-17 19:45	0.00995	381
97-11-17 20:03	0.299	380.8
97-11-17 20:35	0.102	380.6
97-11-17 21:00	0.0987	380.6
97-11-17 22:00	0.0982	380.4
97-11-17 23:00	0.1	380.2
97-11-18 0:00	0.0982	380.2
97-11-18 0:18	0.81	380.2
97-11-18 1:00	0.797	380.4
97-11-18 2:00	0.805	380.8
97-11-18 3:00	0.81	381.8
97-11-18 3:31	0.0104	381.2
97-11-18 3:58	0.997	383.2
97-11-18 4:06	7.083	383.8
97-11-18 4:14	11.02	384
97-11-18 4:25	17	383.2
97-11-18 4:31	10.58	383.2
97-11-18 4:34	12.94	383.2
97-11-18 4:37	10.96	383.2
97-11-18 4:41	9.023	383.2
97-11-18 5:30	0.997	390.2
97-11-18 5:55	3.008	393.2
97-11-18 6:18	5.065	395.2
97-11-18 6:45	7.083	396.6
97-11-18 7:18	10.08	397
97-11-18 8:10	15	398.8
97-11-18 8:36	17.03	401
97-11-18 10:00	17.16	409
97-11-18 11:00	17.32	417.8

일 시	출 력 (MW)	제어봉 위치 (mm)
97-11-18 11:01	17	418.6
97-11-18 11:06	15	418.8
97-11-18 11:10	13	421.2
97-11-18 11:16	11	421.2
97-11-18 11:26	9	426.2
97-11-18 11:42	7	437
97-11-18 11:52	5	430.6
97-11-18 12:12	3	444.8
97-11-18 12:18	1.5	446.2
97-11-18 13:00	0.8	468
97-11-18 14:00	0.8	508
97-11-18 15:00	0.8	536.6
97-11-18 16:00	0.00146	518.8
97-11-18 17:19	0.005	563.4
97-11-18 17:30	0.1	569
97-11-18 17:41	1	571
97-11-18 19:00	1	572.4
97-11-18 20:00	1	571.8
97-11-18 20:27	10	565.6
97-11-18 20:40	17	544
97-11-18 21:00	17.11	512.8
97-11-18 22:00	17.14	466.2
97-11-18 23:00	17.21	445.4
97-11-19 0:00	17.14	443
97-11-19 1:00	17.16	444.6
97-11-19 2:00	16.9	449.8
97-11-19 3:00	17.08	456.4
97-11-19 4:00	16.98	462.4
97-11-19 5:00	17.03	469.2
97-11-19 6:00	17	475
97-11-19 7:00	17.01	479.2
97-11-19 8:00	17.06	486.2
97-11-19 9:00	17.03	491
97-11-19 10:00	17.14	495.4
97-11-19 11:00	17.06	499.2
97-11-19 12:00	17.03	503.2
97-11-19 13:00	17.03	505.4

일 시	출 력 (MW)	제어봉 위치 (mm)
97-11-19 14:00	17.19	510.6
97-11-19 15:00	17.14	510.8
97-11-19 16:00	17.16	515.2
97-11-19 17:00	17.06	517.2
97-11-19 18:00	17.21	519.2
97-11-19 19:00	17.16	520.8
97-11-19 20:00	17.14	523.2
97-11-19 21:00	17.16	523.8
97-11-19 22:00	16.98	525.6
97-11-19 23:00	16.89	527
97-11-20 0:00	17.11	526.8
97-11-20 1:00	17.03	528.2
97-11-20 2:00	16.95	529
97-11-20 3:00	17.19	530
97-11-20 4:00	17.11	530.8
97-11-20 5:00	16.93	531
97-11-20 6:00	17.19	531.6
97-11-20 7:00	17.19	532.2
97-11-20 8:00	17.11	532.2
97-11-20 9:00	17.16	532.6
97-11-20 10:00	17.16	532.4
97-11-20 11:00	17.11	533.4
97-11-20 12:00	17.24	532.6
97-11-20 13:00	16.98	533.8
97-11-20 14:00	16.93	534.2
97-11-20 15:00	17.11	534.8
97-11-20 16:00	17.08	534.2
97-11-20 17:00	17.16	534.8
97-11-20 18:00	17.03	535
97-11-20 19:00	17.16	534.4
97-11-20 20:00	17.08	534.6
97-11-20 21:00	17.12	534.6
97-11-20 22:00	17.01	534
97-11-20 23:00	17.06	534.4
97-11-21 0:00	16.9	535.2
97-11-21 1:00	16.98	536.2
97-11-21 2:00	16.85	536.4

일 시	출 력 (MW)	제어봉 위치 (mm)
97-11-21 3:00	17.03	536.4
97-11-21 4:00	17.14	536.2
97-11-21 5:00	17.01	536.6
97-11-21 6:00	17.01	537.4
97-11-21 7:00	16.93	536.2
97-11-21 8:00	16.82	537.4
97-11-21 9:00	16.85	537
97-11-21 10:00	17.06	535.6
97-11-21 11:00	17.06	536.2
97-11-21 12:00	16.88	536.6
97-11-21 13:00	16.88	536.6
97-11-21 14:00	17.03	536.4
97-11-21 15:00	16.98	536.8
97-11-21 16:00	16.98	537.6
97-11-21 17:00	16.95	537.6
97-11-21 18:00	16.8	539
97-11-21 19:00	17.07	537.4
97-11-21 20:00	17.03	537.4
97-11-21 21:00	16.98	537.6
97-11-21 22:00	16.93	537.6
97-11-21 23:00	16.8	538
97-11-22 0:00	16.93	538.6
97-11-22 1:00	16.93	538.6
97-11-22 2:00	16.9	538.8
97-11-22 3:00	17.03	538.2
97-11-22 4:00	16.95	538.8
97-11-22 5:00	16.9	539.4
97-11-22 6:00	17.16	539.6
97-11-22 7:00	16.93	539.4
97-11-22 8:00	16.9	540
97-11-22 9:00	16.98	539
97-11-22 10:00	16.9	540
97-11-22 11:00	16.95	539.4
97-11-22 12:00	16.93	539.4
97-11-22 13:00	16.88	540
97-11-22 14:00	16.93	540.2
97-11-22 15:00	16.94	540.4

일 시	출 력 (MW)	제어봉 위치 (mm)
97-11-22 16:00	16.9	540.2
97-11-22 17:00	17.16	541
97-11-22 18:00	16.98	541
97-11-22 19:00	17.11	540.8
97-11-22 20:00	17.11	541.8
97-11-22 21:00	17.06	542
97-11-22 22:00	17.02	542.2
97-11-22 23:00	17.03	542
97-11-23 0:00	16.93	542.2
97-11-23 1:00	16.98	542.2
97-11-23 2:00	16.93	542.4
97-11-23 3:00	17.03	542
97-11-23 4:00	17.06	544
97-11-23 5:00	16.95	543.4
97-11-23 6:00	16.93	543.2

참 고 문 헌

1. 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, Number 2, pp140~147, 1998.
2. 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.
3. C. S. Lee, Comparison between calculation by VENTURE and measurement for neutron flux in CNS hole, KAERI report HAN-RR-CR-98-051, 1998.
4. B. C. Lee, MCNP calculation for neutron flux and γ -heat in CNS hole, KAERI report HAN-RO-CR-98-037, 1998.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1276/99			
제목 / 부제	하나로 냉중성자원 설치공에서의 발열량 측정 및 분석		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	손재민 / 하나로이용기술개발팀		
연구자 및 부서명	하나로이용기술개발팀 : 최창웅, 조만순, 박국남, 최영현, 심철무 하나로운영팀 : 전병진, 김학로, 안국훈, 이충성, 이병철, 박상준, 이용섭, 임돈순, 홍광표, 송기영, 이성호 방사화분석실 : 정영주		
출판지		발행기관	한국원자력연구소
페이지	65 p.	도표	있음(○), 없음() 크기
참고사항		발행년	1999. 3.
비밀여부	공개(○), 대외비(), 급비밀	보고서종류	기술보고서 (TR)
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>하나로에서 중성자빔의 활용을 극대화하기 위하여 냉중성자원(Cold Neutron Source)의 개발을 진행 중에 있다. 냉중성자원 감속재인 액체수소는 중수 반사체 탱크에 위치하고 있는 직경 16cm의 냉중성자원 수직공에 설치될 것이다. 냉중성자원 감속재용기의 형상설계 및 감속재의 냉각을 위한 극저온 시스템의 설계를 위하여 냉중성자원 설치공에서의 발열량을 산출하는 것은 반드시 필요하다.</p> <p>γ선에 의한 발열량의 분석결과는 약간 미흡하였다. 그 이유는 두 가지로 볼 수 있는데 하나는 실험은 냉중성자원 설치공에 경수가 채워져 있는 상태에서 수행하였으며, 계산은 실제 냉중성자원 용기와 같은 상태인 진공에서 수행하였기 때문이고, 다른 하나는 IC-Gray의 보정(calibration) 상태가 실험의 상태에 적합하지 않았다는 것이다. 따라서, IC-Gray에 의한 측정값은 계산 code의 보정을 위해서만 사용되었다. 금번에 MCNP code에 의해서 계산된 값은 향후에 냉중성자원의 감속재용기 형상 및 극저온시스템의 설계시는 물론 계속적으로 중요하게 사용될 것이다.</p>		
주제명 키워드 (10단어내외)	냉중성자원, 발열량, 냉중성자원설치공, IC-Gray chamber, Activation Foils		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-1276/99			
Title / Subtitle	Measurement and Analysis of Heat Load in CN Hole of HANARO		
Project Manager and Department (or Main Author)	J.M. Sohn / HANARO Utilization Technology Development Team		
Researcher and Department	HANARO Utilization Technology Development Team : C.O. Choi, M.S. Cho, K.N. Park, Y.H. Choi, C.M. Sim		
	HANARO Operation Team : B.J. Jun, H.R. Kim, K.H. Ahn, C.S. Lee, B.C. Lee, S.J. Park, Y.S. Lee, D.S. Im, K.P. Hong, K.Y. Song, S.H. Lee		
	Activation Analysis Department : Y.J. Jung		
Publication Place	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute	Publication Date
			1999. 3.
Page	65 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)
			Size
			Cm.
Note			
Classified	Open(<input type="radio"/>), Restricted(<input type="radio"/>), ___ Class Document	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)	<p>Cold neutron source facility is going to be built up in its 30 MW reactor HANARO in order to provide its scientific community a full range of neutron experimental devices. The liquid hydrogen cold neutron moderator currently under development will be positioned inside a vertical hole with 16 cm in diameter at the heavy water reflector of the reactor. In the design of cold neutron source(CNS), it is very important to measure the heat load experimentally for sizing of heat removal system and selection of the refrigerator, etc.</p> <p>Analysis of heat release data from γ-rays has shown that the experimental results are underestimated. The cause of underestimation can be explained by two cases. One is the different circumstance that the measurement was executed in CNS channel filled with light water, but the calculation was carried out in the vacuum channel. And the other is the fact that the calibration of IC-Gray was executed in the different range from that of real measurement. Therefore the measurement by IC-Gray was used only for calibration of the calculation code, and the calculation data by MCNP will be used as a ground data of design.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	HANARO, Cold Neutron Source, Heat Load, IC-Gray Chamber, Activation Foils		