

원자로압력용기, 노심/중수로압력관 재료의
하나로 계장캡슐(00M-02K, 00M-03K) 조사시험

Irradiation Tests of Reactor Vessel, Reactor Core/Pressure Tube
Materials Using HANARO Instrumented Capsules
(00M-02K and 00M-03K)

주기남*, 손재민, 신윤택, 박승재, 오종명, 김봉구, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서 연구수행중인 경수로 압력용기, 노심재료 및 중수로 압력관 재료의 조사특성을 평가하고자 설계·제작된 계장캡슐(00M-02K 및 00M-03K)을 하나로에서 조사시험하였다. 00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기재인 SA508 재질의 시편들을 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 온도에서 조사하기 위하여 설계되었으며, 00M-03K 캡슐은 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 각각 $350 \pm 20^\circ\text{C}$, $300 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 온도로 동시에 조사시험하기 위하여 설계되었다. 캡슐내에는 시편 시험온도 조절을 위한 전기히터와 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위한 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ 중성자 모니터가 설치되었다. 00M-02K 캡슐에는 원자로 압력용기 SA508 재질의 small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, 그리고 PCVN 등 총 488개 시편이 장입되었다. 00M-03K 캡슐 상부에는 노심재료로 제작된 tensile 및 TEM 시편, 하부에는 압력관재료로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편 등 총 251개의 시편이 캡슐에 장입되었다. 00M-02K 캡슐은 하나로 24MW 열출력의 IR2 조사공에서 3일간 조사되어 중성자 조사량이 최대 $3.4 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$ 에 도달하였으며, 00M-03K 캡슐은 동일 조사시험 조건에서 11일간 조사되어 중성자 조사량이 최대 $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)에 도달하였다.

Abstract

For the evaluation of the nuclear characteristics of the RPV(Reactor Pressure Vessel), reactor core, and CANDU pressure tube materials, instrumented capsules(00M-02K and 00M-03K) were designed, fabricated, and successfully irradiated at HANARO. 00M-02K capsule was designed to irradiate RPV materials at

290±10°C and 00M-03K capsule to irradiate reactor core and CANDU pressure tube materials at 350±20°C and at 300±10°C, respectively. There are 5 independent electric heaters in the capsule mainbody for the control of specimen temperature. 14 thermocouples and 4 sets of Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ neutron fluence monitors were also inserted in the capsule to measure the temperatures of the specimens and fast neutron fluences, respectively. Various types of specimens such as small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, and PCVN specimens of SA508 steel were inserted into the 00M-02K capsule and tensile, TEM, CB(cantilever beam), growth, and CT(compact tension) specimens of Zr-2.5Nb and stainless steels into the 00M-03K capsule. 00M-02K and 00M-03K capsules were irradiated in the IR2 test hole of HANARO of 24MW thermal power for 3 and 11 days, respectively. The maximum fast neutron fluence (E>1.0 MeV) of the capsules were obtained up to 3.3x10¹⁹ and 1.0x10²⁰ (n/cm²), respectively.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐 국산화 개발연구를 수행하여 왔다 [1-6]. 연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현할 수 있으며 조사 시험 변수를 조절할 수 있고 중성자속이 높아 시험 기간을 크게 단축 할 수 있는 장점이 있다. 원자로압력용기(RPV) 재료의 캡슐조사시험의 경우, 원자로 사용온도인 290±10°C의 조사온도에서 30MW의 하나로 출력 기준으로 약 6일간의 조사시험만으로 재료가 실제 원자로에서 40년 설계수명 말기까지 받을 중성자 조사량인 7.26x10¹⁹n/cm²에 도달하게 되므로 단기간에 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능케 하는 유용한 설비이다.

현재 개발된 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐은 원자력 재료들에 대한 산·학·연의 중성자 조사시험 연구에 활발히 활용되고 있다. 본 연구에서는 한국원자력연구소에서 연구수행중인 원자력신소재 개발 연구중 경수로 원자로압력용기, 노심재료 및 중수로 압력관 재료의 조사특성을 평가하기 위한 하나로 계장캡슐(00M-02K 및 00M-03K)을 설계·제작·조사시험하였다. 캡슐의 주요설계는 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 바 있는 시편을 4공으로 분산배치하는 구조(00M-02K 및 00M-03K 1,2,3단)와 열매체 중심에 배치하는 구조(00M-03K 4,5단)를 적용하였으며, 그동안의 캡슐 조사시험을 통해 도출된 여러 설계개선점들이 설계에 반영되었다 [7,8]. 캡슐은 조사시편을 중심으로 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ 중성자 모니터를 설치하였다.

가압경수형원자로인 영광3호기 이후 국내 모든 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로압력용기의 경우 아직 수명말기까지의 조사손상 건전성이 충분히 입증되지 않은 상태이다. 따라서 한국중공업(주)의 국산 PRV 재의 조사특성 평가를 위해 개발되어 있는 조사시험용 표준형 계장캡슐 기술을 활용하여 조사시험용 계장캡슐(00M-02K)을 설계·제작하였다. 00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기재인 SA508 재료의 시편들을 290±10°C의 온도에서 조사하기 위하여 설계되었으며, 영광 3,4,5호기 및 울진 4호기에

사용된 원자로 압력용기 재료 및 용접재료로 제작된 small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, 그리고 PCVN 시편 등 총 488개의 시편이 장입되었다. 캡슐은 하나로 24MW 출력의 IR2 조사시험공에 장입되어 약 3일간 조사시험되어 시편의 중성자 조사량은 $1.3\sim 3.4\times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$ 에 도달하였다.

00M-03K 캡슐은 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 각기 다른 온도인 $350\pm 20^\circ\text{C}$, $300\pm 10^\circ\text{C}$ 의 온도로 조사시험하기 위하여 설계되었다. 이들 재료는 비록 물성은 서로 다르나 원자로내에서 받는 중성자 조사량이 유사하여 하나의 캡슐로 조사시험이 가능하였다. 00M-03K 캡슐 상부에는 노심재료인 stainless steel 304, 316, 321와 Cr-Mo로 제작된 tensile 및 TEM 시편 170개, 하부에는 중수로 압력관재료인 Zr-2.5Nb 재질로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편 등 81개가 장입되어 총 251개의 시편들이 캡슐 중심부에 장입되었다. 00M-03K 캡슐은 00M-02K 캡슐에 장입된 원자로압력용기 재질보다도 원자로 중심부에 사용되는 재료인 stainless 및 Zr-2.5Nb 재질에 대한 조사시험이므로 24MW 출력의 IR2 조사시험공에 장입되어 약 11일간 조사되어 시편의 중성자 조사량은 $3.6\times 10^{19}\sim 1.0\times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E>1.0\text{MeV}$)에 도달하였다.

조사된 캡슐은 작업원의 방사능 피복 저감화 차원에서 하나로 작업수조에서 약 1개월가량 방사능 냉각기간을 거친 후, 운반용 캐스크에 넣어져 IMEF 시설로 운반된 후 해체되었으며, 현재 분리된 조사시편들을 이용한 조사성능 평가시험이 수행중에 있다. 본 조사시험을 통해 얻어질 결과들은 연구중인 관련 원자력재료의 조사성능 평가연구에 활용되어 국내 원자력발전소의 주요 소재 및 기기의 건전성 확보 및 관련 원자력 산업체 기술의 고부가가치화에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통하여 축적된 경험, 기술, 자료 등을 활용하여 향후 여러 원자력 재료들의 다양한 조사성능 연구가 활발히 추진될 것으로 기대된다.

2. 00M-02K 및 00M-03K 캡슐 설계·제작

한국중공업(주)에서 제작되어 현재 울진 및 영광의 원자력발전소에 설치되어 있는 원자로 압력용기 재질의 조사성능 평가를 목적으로 하는 00M-02K (M은 Material, K는 KAERI의 표기) 계장캡슐과 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 동시에 조사시험 하기 위한 00M-03K 캡슐의 설계는 최근 하나로 조사시험을 통하여 그 구조건전성이 검증받은 시편의 중심 및 4공 배치 구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에 근거하여 [7] 그림 1과 같이 제작되었다. 00M-02K 캡슐의 RPV 재료와 00M-03K 캡슐의 노심재료의 경우 4공 구조로 시편이 배치되었으며, 00M-03K 캡슐의 중수로 압력관 재료의 시편들은 캡슐 중심부에 배치되는 구조로 설계되었다.

이용자 요구조건을 토대로 캡슐의 주요구조, 장입시편, 조사조건 등을 표 1과 같이 결정하여 캡슐의 기본설계를 수행한 후, 이에 따른 하나로 조사공에서의 gamma heating rate 분포 계산결과를 사용하여 시편의 최종배치 및 캡슐 각 부분간의 gap 설계 등 세부 설계를 수행하였다. 두 캡슐의 시편부를 제외한 내부 구조는 원자로압력용기 재료의 조사시험을 목적으로 제작되었던 99M-02H 캡슐의

설계를 기본으로 하였다.

캡슐 설계에서 사용한 gamma 값은 00M-02K 및 00M-03K 두 캡슐의 예상 조사일정 등을 감안하여 동일한 24MW 원자로 출력에서 얻어진 00M-01U 캡슐의 gamma 값(제어봉 370mm 위치)을 [6] 사용하였다. 비록 시편 재질의 차이로 인해 유발되는 gamma 값의 변화는 [9] 향후 조사시험시의 핵연료 연소도, 제어봉 위치 변화 등에 따른 gamma 값의 변화 등을 감안하면 오차범위에 있을 것으로 추정되어 00M-02K 및 00M-03K 캡슐 모두 동일한 gamma 값을 기준으로 설계하였다.

00M-02K 캡슐내 시편의 최종 조사온도는 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 목표로 하고 있으며 고진공 상태인 $0.4\text{K}_{\text{He}=1\text{atm}}$ 조건에서 시편이 목표온도에 도달하도록 gap 설계를 수행하였다. 00M-03K 캡슐의 경우 상부의 노심재료의 경우 $350 \pm 20^\circ\text{C}$ 를 조사온도 목표로, 하부의 중수로압력관 재료의 경우 $300 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 목표로 설계하였고, 특히 3단의 경우 시편 재질에 따라 상이한 조사온도를 가지도록 열매체 내외부 gap을 설계하였다.

시편 온도 계산에는 GENGTC, Heating 2f, ANSYS code등의 전산 프로그램들이 이용되는데, 본 캡슐에서는 ANSYS 및 GENGTC code를 이용하여 계산한 후 그동안의 자료와의 연관성 차원에서 GENGTC 결과를 바탕으로 하여 최종 설계하였다. 이때 시편과 열매체간의 간격은 00M-03K 캡슐의 3단 #1,3 hole을 제외하고는 모두 0.1mm로 하였다. 00M-03K 캡슐의 3단 #1,3 hole에 장입된 STS 노심재료의 경우 290°C 조사온도의 Zr-2.5Nb 시편과 상이한 350°C 의 조사온도를 조성하기 위하여 특별히 gap을 0.12mm로 설계하였다.

00M-02K 캡슐내 조사시편은 영광 3,4,5호기 및 울진 4호기 원자로의 base 및 용접재료인 SA508 class 3 steel로서 표준 charpy 및 PCVN(pre-cracked V-notch charpy), 1/3 길이의 insert PCVN 시편, 그리고 소형시편들인 SP(small punch), ST(small tensile), MBE(magnetic Barkhausen effect), ABI(automated ball indentation) 시편 등이 case에 넣어져 장입되었다. 또한, 00M-03K 캡슐의 경우 상부 1,2단과 중심 3단 일부에는 노심재료 시편을, 중심 3단 일부와 하단 4,5단에는 중수로 압력관 재료의 시편들이 장입되었다. 노심재료 시편으로는 Cr-Mo, STS 316, 304, 321 재질의 판상 인장시편과 Cr-Mo 재질의 TEM 시편들이 장입되었다. 한편 중수로 압력관 재료 시편으로는 상용의 Zr-2.5Nb 압력관으로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편 등이 장입되었다. 00M-02K 및 00M-03K 캡슐에는 각각 488개 및 251개의 시편들이 장입되었다.

두 캡슐 모두 시편부에는 14개의 열전대가 설치되어 있어 조사시험 동안의 조사시편의 온도 변화를 기록하게 하였으며, 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe 및 Al_2O_3 fluence monitor(F/M)가 각 단의 Al holder에 장입되었다. 또한 00M-02K 캡슐 시편내부에는 조사량 평가방법의 비교검증을 위하여 외국의 표준 dosimeter가 설치되었다.

앞에서 기술한 상세설계된 캡슐은 캡슐 제작경험을 충분히 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 그림 1과 같이 제작되었다.

3. 하나로 조사시험

00M-02K 및 00M-03K 캡슐은 하나로 조사시험전 노외에서 정해진 절차에 따라, 캡슐외관 및 치수검사, 본체 및 보호관부의 내압 및 He leak 시험, heater 및 열전대의 건전성 및 성능평가, 캡슐온도 조절장치와의 양립성 시험 등 여러 건전성 평가가

수행되었으며, 시험결과 두 캡슐은 조사시험중 건전성을 유지할 것으로 판정되었다.

캡슐의 조사시험은 그림 2에서와 같이 24MW 출력의 하나로 노심부 IR2 조사 시험공에서 정해진 목표기간 동안 수행되었다. 먼저 조사시험 초기에 새로운 구조를 가지는 캡슐 조사시험에 대한 안전도 확인 및 설계관련 기초자료를 확보하기 위하여 24MW까지 원자로 출력을 단계적으로 올리면서 각 단계에서 He 진공 및 heater 출력 효과를 확인하는 캡슐 성능시험을 수행하였다. 성능시험 단계에서 각단 시편의 목표 조사온도에 맞는 최적의 He 진공도 및 heater 출력 등의 조사조건을 도출하여 요구된 조사량에 도달할 때까지 조사시험을 수행하였다. 24MW 출력에서의 최적 시험조건은 원자로 출력 증가로 인한 gamma heating 증가에 따라 전반적으로 상승하는 시편 온도를 기준으로 하여 초기 He 1기압인 캡슐 내부 He gas 압력을 낮은 기압으로 조절하여 시편의 목표온도 부근까지 상승시킨 다음 최종적으로 micro-heater를 이용하여 각 단별 최종 목표온도로 미세조절하였다.

00M-02K 캡슐은 원자로 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 장입되어 약 3일정도 조사되어 (약 72MWD) 그림 3과 같이 시편에 대한 고속중성자 조사량이 $1.3 \sim 3.4 \times 10^{19}$ (n/cm²) (E>1.0 MeV)에 도달하였다. 조사시험기간 동안 시편의 조사온도는 시편내에 설치된 열전대를 통해 기록되었는데, 시편의 온도는 그림 4에서와 같이 비교적 설계온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 비교적 만족하는 수준의 균일한 값을 시험기간동안 보였다. 다만 조사기간중 하나로 출력 자체의 비정상 거동으로 인하여 시험온도의 일시적인 변화가 있었으나, 바로 수정되었다.

00M-03K 캡슐에는 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 장입되어 약 11일정도 조사되어 (약 264MWD) 그림 5와 같이 시편에 대한 고속중성자 조사량이 $3.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20}$ (n/cm²) (E>1.0MeV)에 도달하였다. 그림 6은 캡슐 각단 시편의 시험기간동안의 평균온도 변화를 나타낸 그림이다. 단일 시편으로 구성된 상부 및 하부단들에서는 비교적 설계온도 조건에 (노심재료는 $350 \pm 20^\circ\text{C}$, 중수로 압력관 재료는 $300 \pm 10^\circ\text{C}$) 도달한 반면 특성이 다른 두 재료가 동시에 장입된 중심 3단의 경우 설계온도보다 다소간 낮은 조사시험 온도를 보이고 있다. 그러나, 11일간의 장기간 시험에서도 시험 초기에 설정하였던 시험온도 조건을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

4. 조사후 시험

24MW 출력의 하나로 IR2 시험공에 장입되어 각각 3일 및 11일간 조사된 캡슐은 원자로 작업수조에 약 1개월동안씩 냉각되어, 캡슐 표면에서의 방사능 선량이 안전치 이하로 떨어져 후속작업시 작업원의 방사능 피폭을 가능한 줄이도록 하였다. 현재 캡슐은 원자로 작업수조내에서 캡슐절단장치를 이용하여 정해진 크기로 절단된 후 캡슐이송용 cask에 넣어져 조사후시험시설인 IMEF 핫셀로 이송되었다. 이송된 캡슐은 핫셀내에서 정해진 절차에 따라 해체되었고 분리된 각 캡슐의 조사시편들은 이용자들에게 인도되어 현재 해당 재료의 방사능 조사에 따른 물성변화 평가를 위한 조사후 시험이 수행되고 있다. 또한 캡슐내 포함되었던 Fe-Ni-Ti F/M은 별도로 분리되어 방사능 평가가 이루어짐으로써 조사시편의 실제 중성자 조사량 평가 작업이 수행되었다. 또한 00M-02K 캡슐에 별도로 장입되었던 비교분석용 F/M 모니터는 미국의 PNNL(Battelle Pacific Northwest National Laboratory) 사에 보내져 분석되었으며, 이 결과는 소내 분석결과와 비교검토되었다 [10-12].

5. 결 론

국내 영광 3,4,5호기, 울진 4호기 원자로의 압력용기재로 사용된 원자로 압력용기 재료의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(00M-02K) 및 노심재료인 STS 재료와 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 동시에 조사시험하기 위한 계장캡슐(00M-03K)을 성공리에 설계·제작·조사시험하였다. 캡슐은 시편을 중심부 및 4공 분산배치하는 표준구조로 설계하였다. 두 캡슐은 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 설치되어 중성자 조사량이 각각 최대 $3.4 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$, $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)까지 조사되었다. 00M-02K 캡슐의 원자로 압력용기재인 SA508 시편들을 설계온도 범위인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 조사되었으며, 00M-03K 캡슐의 서로 다른 재질인 stainless steel 계열의 노심재료와 Zr-2.5Nb 합금의 중수로 압력관 재료는 각각 다른 $300 \pm 30^\circ\text{C}$, $310 \pm 20^\circ\text{C}$ 에서 조사되었다. 현재 조사후시험시설에서 해체·분리된 조사시편을 사용한 조사후 물성평가 시험이 수행중으로, 향후 관련 재료의 조사건전성 평가 및 신소재 개발 등의 연구에 크게 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기사업중 조사시험용캡슐개발및활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
2. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1760/96 (1997).
3. K.N. Choo et. al., Design of a new capsule controlling neutron flux and fluence and temperature of test specimens, J. Kor. Nucl. 29(2), 148 (1997).
4. Y.H. Kang et. al., Structural analysis for the HANARO irradiation capsule through vibration test, Pro. of 6th ASRR symposium, Mito, Japan, march 1999.
5. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-2038/99 (2000).
6. 주기남외, 하나로 공동이용 활성화를 위한 대학 연구지원용 하나로 계장캡슐 (00M-01U)의 조사시험, '01춘계원자력학회, Cheju, Korea, May 2001.
5. 강영환외, ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석, '99추계원자력학회, Seoul, Korea, October 1999.
6. 주기남외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐 (98M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1392/99 (1999).
7. 주기남외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기소재의 조사용 계장캡슐 (99M-01K·02H) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1646/2000 (2000).
8. 주기남외, 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (00M-01U) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1857/2001 (2001).
9. 서철교, 계장 캡슐(00M-01U)의 조사시험에 대한 핵적 특성 평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-089, 2000년 12월.
10. 이충성, 계장 캡슐(00M-02K) 조사량 평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-01-48, 2001년 5월.
11. 서철교, 계장 캡슐 00M-03K의 조사량 및 발열량 평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-01-078, 2001년 11월.

12. L. R. Greenwood, "Neutron Dosimetry for KAERI for the HANARO Reactor", KAERI-PNNL Project 42794 Report, July 23, 2001

Table 1. HANARO instrumented capsules for the researches of nuclear materials

| 캡슐명 | 관련재료 | 재질 | 시험 | 조사 조건 |
|---------|------------------|--------------------------------|--|--|
| 00M-02K | 원자로 압력용기 | SA508 cl.3 | PCVN, Charpy, SP, Tensile, MBE, AB (총 488개 시험) | $290 \pm 10^\circ\text{C}$ $3 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)(E > 1.0\text{MeV})$ |
| 00M-03K | 노심재료 / 중수로압력관 | STS304, 316, Cr-Mo/Zr-2.5Nb | Tensile, CB, TEM, Growth, CT (총 251개 시험) | $350 \pm 20^\circ\text{C}$, $300 \pm 10^\circ\text{C}$ $1 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)(E > 1.0\text{MeV})$ |



그림 1 00M-02K 및 00M-03K 하나로 조사시험용 계장캡슐

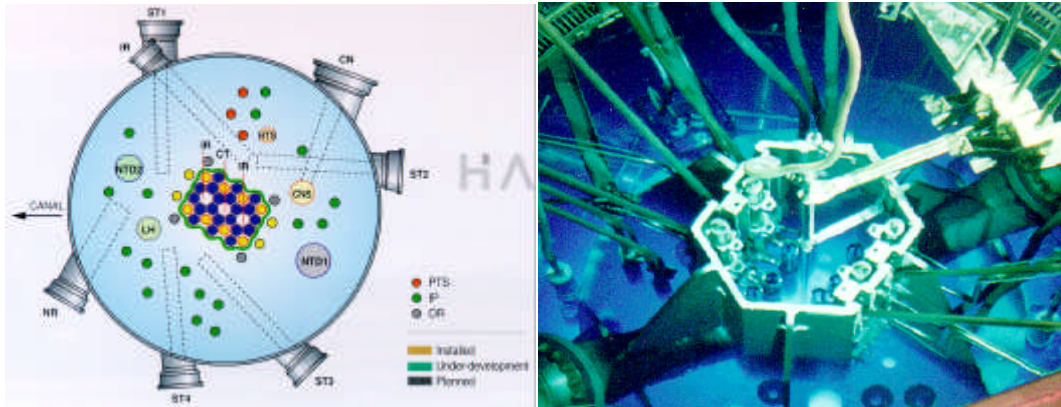


그림 2 하나로 노심배치 및 캡슐조사 시험

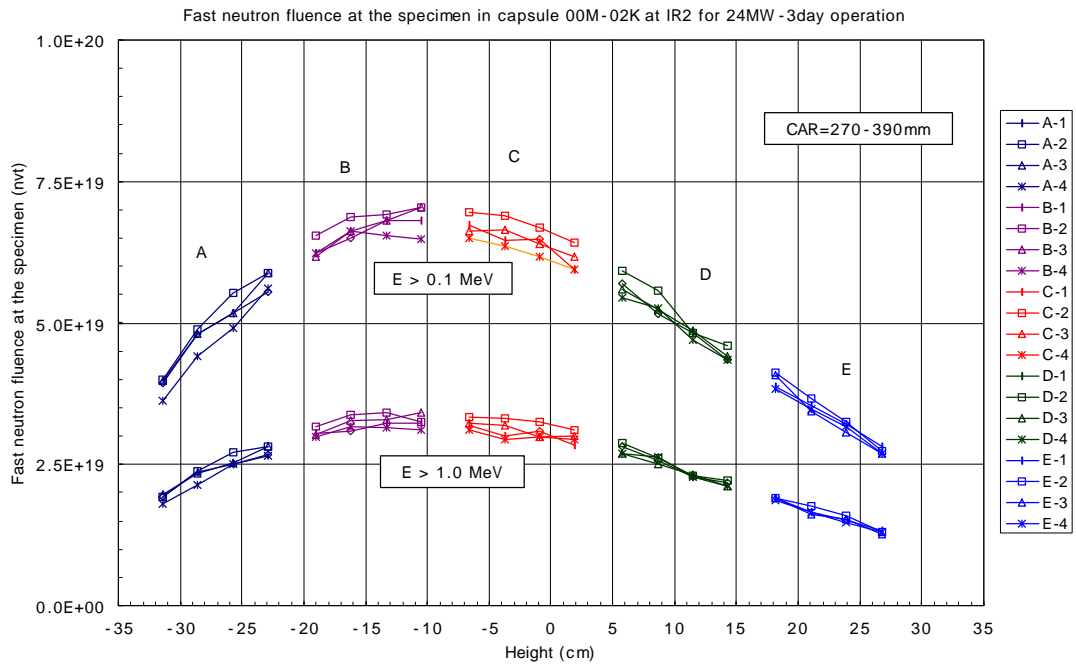


그림 3 00M-02K 캡슐내 조사시편의 고속중성자 조사량 분포

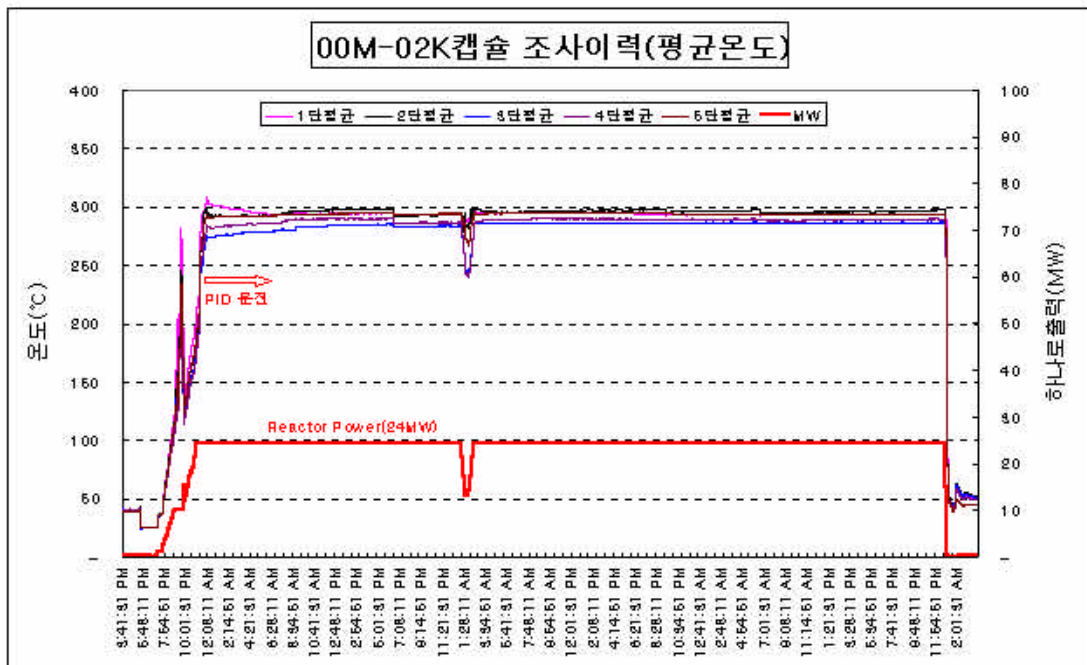


그림 4 조사시험중 00M-02K 캡슐내 시편의 평균온도 변화

Fast neutron fluence at the specimen in capsule 00M-03K at IR2 for 24MW-11.1day operation

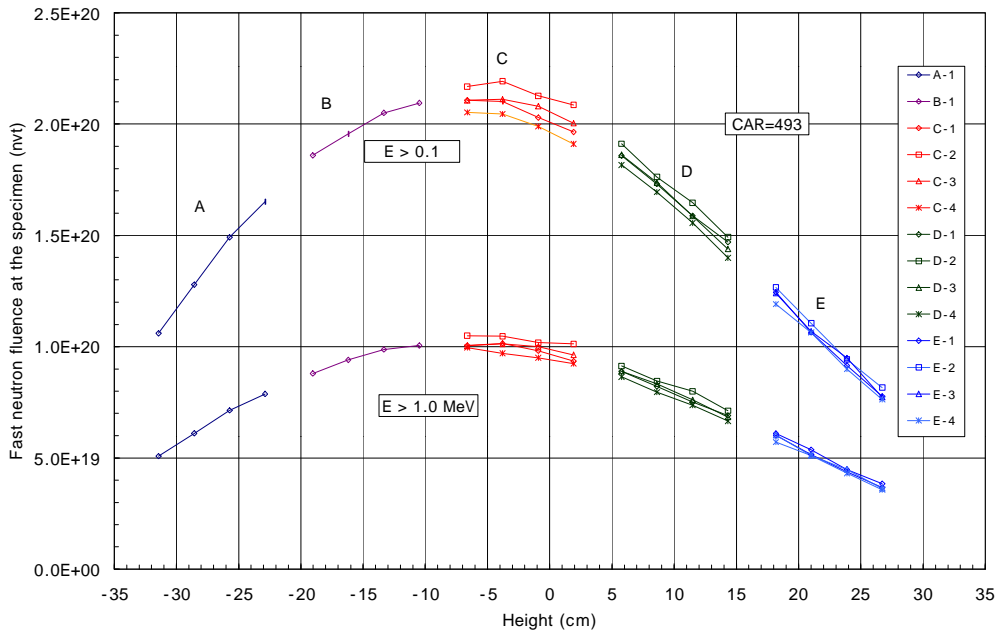


그림 5 00M-03K 캡슐내 조사시편의 고속중성자 조사량 분포

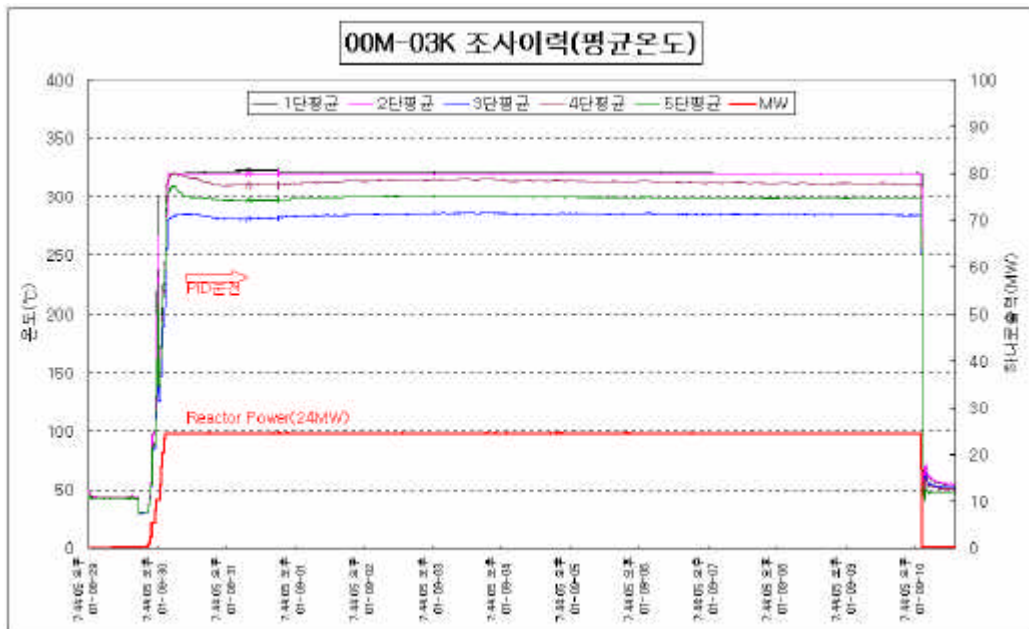


그림 6 조사시험중 00M-03K 캡슐내 시편의 평균온도 변화