

## 2003년도 재료캡슐 하나로 조사시험

### Irradiation Tests of Materials Using HANARO Instrumented Capsules in 2003

주기남\*, 조만순, 오종명, 신윤택, 강영환, 임인철, 황승렬

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

한국원자력연구소에서 연구개발된 하나로를 이용한 조사시험용 캡슐장치는 산·학·연 이용자들의 다양한 중성자 조사시험에 활발히 이용되고 있다. 2003년에는 2개의 계장캡슐이 설계/제작되어 하나로 CT 시험공에서 조사시험되었으며, 1개의 계장캡슐이 설계/제작 중에 있다. 경수로 압력용기재료의 조사특성의 평가와 향상된 평가기술개발을 위하여 02M-02K 계장캡슐이 설계/제작되어 성공리에 조사시험되었다. 또한 2002년도 하나로이용 활성화 사업의 일환으로 참여한 4개 대학과 연구소 중장기 과제인 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 분야의 노심재료 조사시험을 위한 02M-05U이 설계/제작되어 조사시험되었다. 한편 2003년도 하나로이용활성화 사업의 일환으로 참여한 4개 대학의 조사시험을 위한 새로운 계장캡슐이 설계/제작 중에 있다.

#### Abstract

The HANARO irradiation capsule system has been actively utilized for the various irradiation tests requested by users of research institutes, universities, and industries. In 2003, two instrumented capsules were designed, fabricated, and successfully irradiated at HANARO and another is under fabrication. For the evaluation of the irradiation properties of the RPV(Reactor Pressure Vessel) materials and for the development of improved evaluation technology, 02M-02K instrumented capsule was designed, fabricated, and successfully irradiated at HANARO. 02M-05U instrumented capsule was designed, fabricated, and successfully irradiated as a part of 2002 project for active utilization of HANARO. Reactor core materials were also irradiated using 02M-05U capsule. Another instrumented capsule is under design and fabrication as a part of 2003 project for active utilization of HANARO and for the development of precise temperature controlling technology.

## 1. 서 론

한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐을 국산화 연구개발하였다 [1-7]. 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  $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도에서 30MW의 하나로 출력 기준으로 약 6일간의 조사시험만으로 재료가 실제 원자로에서 40년 설계수명 말기까지 받을 중성자 조사량인  $7.26\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ 에 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 [6-7]. 2003년도에는 2개의 재료 계장캡슐이 설계/제작되어 하나로 CT 시험공에서 조사시험되었으며, 현재 새로운 계장 캡슐 하나가 설계/제작 중에 있다.

먼저 한국원자력연구소에서 연구수행중인 원자력신소재 개발 중장기 연구중의 하나인 ‘과피특성평가 및 향상기술개발’ 과제에서 의뢰된 경수로 압력용기재료의 조사특성의 평가와 향상된 평가기술개발을 위한 02M-02K 계장캡슐이 설계/제작되어 성공리에 조사시험되었다 [8]. 본 캡슐의 시편배치는 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 바 있는 4공 분산배치 구조 (00M-02K)를 적용하였다 [9]. 2M-02K 캡슐은 원자로 압력용기 재질인 SA508 저합금강 및 Fe-base 모텔합금 재질의 시편들을  $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 조사하기 위하여 설계되었다. 캡슐은 독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 캡슐 내에 설치되었다. 02M-02K 캡슐에는 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, hardness(Hv), SP(small punch), ST(small tensile), ABI(automatic ball indentation), TEM, BN, UT, PA(positron annihilation) 시편 등 총 802개의 다양한 재질 및 종류의 시편들이 장입되었다. 캡슐은 24MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에서  $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도로, 6일동안 최대  $0.6\times 10^{20}(\text{n/cm}^2)$  ( $E>1.0\text{MeV}$ ) 중성자 조사량까지 조사되었다.

2002년도 원자력 연구 기반 확충 사업중의 한 분야인 하나로 공동 이용 활성화 사업의 일환으로 대학 이용자들의 다양한 조사시험 요구조건들을 만족하는 재료 조사시험용 계장캡슐(02M-05U)이 설계·제작·조사시험되었다. 본 캡슐은 2001, 2002년도에 수행되었던 00M-01U 및 01M-05U 캡슐을 기반으로 하여 설계되었다. 그러나 참여한 4개 대학 이용자들의 제한된 시편 및 예산으로 인하여 연구소 중장기과제인 ‘고온강도 평가 및 신재료 기술 개발’ 과제와 공동으로 캡슐이 설계·제작되었다. 장입된 시편의 재질은 주로 Fe 및 Zr 계열의 합금들이고 일부 Ti 및 Al 합금이 포함되어 있다. 캡슐은 독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로, 조사시편 온도 및 조사량을 측정 위한 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 설치되었다. 02M-05U 캡슐에는 SP, 인장(tensile), Charpy, TEM, 경도(hardness), 조직(optical microscopy) 시편 등 총 504개의 시편들이 장입되었다. 캡슐은 24MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에서  $290\sim 350^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도로, 2차에 걸쳐 (14일, 15일 운전) 총 29일동안 최대  $3.0\times 10^{20}(\text{n/cm}^2)$  ( $E>1.0\text{MeV}$ ) 중성자 조사량까지 조사되었다.

한편 2003년도 하나로 공동 이용 활성화 사업의 일환으로 선정된 4개 대학 이용자들의 다양한 조사시험을 위해 재료 조사시험용 계장캡슐(03M-06U)이 설계·제작 중에 있다.

본 캡슐은 2002, 2003년도에 수행되었던 01M-05U 및 02M-05U 캡슐을 기반으로 하여 설계·제작되고 있다. 그러나 2002년도 사업과 마찬가지로 이용자들의 제한된 시편 및 예산으로 인하여 연구소 중장기과제인 ‘조사시험용 캡슐 개발 및 활용’ 과제와 공동으로 캡슐이 설계·제작될 예정이다. 캡슐 내에는 선정된 4개 대학에서 요청되는 시편 및 캡슐기술 개발 분야의 정밀온도제어용 캡슐기술 개발을 위한 시편들이 장입될 예정이다.

조사된 시편들은 해당 재질의 조사손상 평가에 사용되며, 얻어지는 재료 물성 자료들은 향후 해당 재질에 대한 조사손상 평가기술 향상에 매우 중요하게 활용될 것이다. 또한 본 조사시험을 통하여 축적된 경험, 기술 등을 활용하여 향후 원자력 및 첨단 신소재들의 다양한 조사성능 연구가 활발히 추진될 것으로 기대되며, 이에 적극적으로 대응하기 위해서는 보다 향상된 조사시험 기술 개발도 요구되고 있다.

## 2. 02M-02K 캡슐 설계·제작·조사시험

원자로 압력용기는 상용 원자력발전소의 핵심 구조재로 발전소 안전성 평가에 있어 매우 중요한 부분이며, 발전소 건설초기에 설치되어 발전소의 수명완료시까지 사용된다. 국내 최초의 원자력발전소인 고리1호기부터 외국에서 제작/수입 설치되어 오던 원자로 압력용기는 영광3호기 이후 두산중공업(주)(구 한국중공업(주))에서 국산화 제작되어 이후 국내 모든 원자로에 사용되고 있다. 한편 이들 국내·외에서 제작된 원자로 압력용기 재질들은 수명말기까지의 중성자 조사손상에 따른 구조 건전성이 객관적으로 입증되지 않아 논란이 되어 왔으며, 향후 발전소 수명연장 분야에 있어서도 원자로 압력용기의 조사 건전성 평가는 핵심적인 사안으로 부각되고 있다.

본 연구에서는 국산화 개발된 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐 기술을 활용하여 원자력재료기술개발부의 중장기 과제인 ‘과파특성평가 및 향상기술개발’ 분야의 원자로 압력용기 및 모델합금의 조사성능 평가를 목적으로 계장캡슐 02M-02K를 (M은 Material, K는 KAERI의 표기) 설계·제작하였다.

02M-02K 캡슐은 상용 원자로에 사용중인 원자로 압력용기재 및 모델합금들을 290±10℃의 온도로 조사시험하기 위하여 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. 캡슐의 시편부를 제외한 내부 구조는 원자로압력용기 재료의 조사시험을 목적으로 제작되었던 00M-02K 캡슐의 설계를 기본으로 하였다 [9]. 02M-02K 캡슐에는 영광 및 울진발전소의 SA508 원자로 압력용기재 및 용접부, 그리고 12종의 모델합금 등으로 제작된 PCVN, Charpy, 경도, SP, 인장, ABI, BN, UT, TEM, PA 시편 등 다양한 규격의 총 802개 시편들이 그림 1과 같이 장입되었다.

캡슐의 주요설계는 그동안 원자로 압력용기의 하나로 조사시험에 여러번 적용된 바 있는 시편의 4공 분산배치 구조로 하였으며, 그동안 캡슐 조사시험을 통해 도출된 최적의 설계 조건이 적용되었다 [8]. 캡슐은 조사시편을 중심으로 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 12개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 설치되었다. 또한 시편 내에는 국제적인 조사량 비교 분석을 위하여 해외에서 구입한 F/M도 설치되었다.

제작된 캡슐은 (그림 2 참조) 하나로 조사시험전 노외에서 정해진 절차에 따라, 캡슐외

관 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, 시험 결과 조사시험중 건전성을 유지할 것으로 판정되었다. 캡슐은 24MW 열출력의 하나로 CT 조사시험공에 설치되어 시편에 따라 270~300℃의 조사온도로 약 6일 동안 조사됨으로써 (그림 3 참조) 시편의 최대 중성자 조사량이 상용 원자로 압력용기의 30년 수명말기 조사량에 근접하는  $6.0 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1.0\text{MeV}$ )에 도달하였다 (그림 4 참조). 조사시험기간 동안 시편의 조사온도는 시편 내에 설치된 열전대를 통해 기록되었는데, 시편의 온도는 그림 5에서와 같이 시험기간동안 설계온도인  $290 \pm 10^\circ\text{C}$  조건을 만족하였다. 그러나 4단 시편의 경우 초반 약 1일 정도는  $280^\circ\text{C}$  정도로 조사된 후, 이용자의 요청에 의하여 조사온도가  $270^\circ\text{C}$ 로 조정되어 약 5일간 조사시험 되었다. 본 캡슐은 현재 하나로 작업수조에 보관되어 방사능 냉각처리되고 있으며, 조만간 절단되어 이송용 캐스크에 넣어진 다음 조사후시험시설인 IMEF로 이송/해체될 예정이다. 향후 해체된 조사후 시편들에 대한 각종 재료물성시험이 수행되어 해당 분야에서 수행중인 원자로 압력용기 재료의 조사성능 연구 및 파괴특성 평가기술 향상 연구에 크게 기여할 것이다. 궁극적으로는 본 자료를 활용하여 국내 원자력발전소의 건전성 확보 및 관련 원자력 산업체 고부가가치화에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술을 활용하여 향후 산·학·연에서 수행중인 여러 원자력 재료들에 대한 다양한 조사성능 연구가 활발히 추진될 것이다.

### 3. 02M-05U 캡슐 설계·제작·조사시험

국내 유일한 전문 조사시험로인 한국원자력연구소 소재 하나로의 산·학·연 공동이용 활성화 사업이 과학기술부 주관으로 1999년부터 수행되어 왔다. 캡슐을 이용한 재료조사시험은 활성화 사업의 한 분야로서 시행 첫해연도인 2000에는 5개 대학이 선정되어 00M-01U 캡슐을 이용한 하나로 조사시험이 성공리에 수행되었으며[10], 2001년도에는 3개 대학이 연구 기관으로 선정되어 연구소의 신형핵연료개발 분야와 공동으로 01M-05U 캡슐을 이용한 조사시험이 공동으로 수행되었다[11]. 2002년도에는 4개 대학이 연구 기관으로 선정되어 캡슐을 이용한 조사시험을 공동으로 수행하게 되었다. 그러나 이들 대학들의 시편 및 예산만으로는 캡슐 1개를 제작할 수 없었으므로 소내 중장기 과제인 ‘고온강도 평가 및 신재료 기술 개발’ 과제와 공동으로 캡슐 조사시험을 수행하기로 하였다. 이들 이용자 재료들의 조사특성 평가를 위한 하나로 계장캡슐(이하 02M-05U 캡슐로 표기함, M: Material, U: University의 약자)이 1차 설계되었다. 02M-05U 캡슐 내에는 4개 대학에서 신청된 Fe, Zr, Ti, Al 계열의 합금들과 소내 연구분야의 STS(stainless steel) 304/316/321 등의 재질로 이루어진 SP, 인장, Charpy, TEM, 광학현미경 및 경도 시편 등 다양한 규격의 총 504개 시편들이 장입되었다.

계장캡슐은 먼저 캡슐 이용자들과의 협의를 통하여 캡슐의 주요구조, 장입시편 치수 및 임시배치 위치, 조사조건 등을 결정하는 기본설계를 수행하고, 이를 토대로 조사시험이 수행될 하나로 시험공에서의 감마발열률(gamma heating rate) 분포 및 중성자 조사량 등 핵적 특성을 계산한 후, 계산된 값을 사용하여 열매체와 캡슐외통 간의 간격(gap) 설계, 시편의 최종배치 및 열전대(T/C)와 중성자모니터(F/M)의 배치위치 결정 등의 절차들 거쳐 그림 6과 같이 최종 배치 설계되었다. 캡슐의 주요설계는 4공분산배치 시편구조가 적용되었으며, 최적의 설계 조건이 적용되었다[12]. 캡슐은 5단의 다단독립제어 전기히터가 장착된 구조로 되어 있으며, 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하

기 위한 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 설치되었다.

캡슐 시편은 24MW 열출력의 하나로 CT 조사시험공에서 285~350°C의 조사온도로 2차에 걸쳐 하나로 최장기간인 약 29일 동안 조사됨으로써 중성자 조사량이 최대  $3.0 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$  ( $E > 1.0 \text{MeV}$ )에 도달하였다 (그림 7 참조). 그림 8은 각 시편의 대표적인 1차 조사시험시의 시편 온도 변화추이를 나타내고 있다. 02M-05U 캡슐에는 여러 재질 및 이용자의 시편이 혼재되어 유사한 재질의 시편이라도 캡슐내 위치에 따라 상당폭의 온도 변화를 보였다. 또한 관상 인장시편이 적층된 시편부에서는 시편 위치에 따라서 최대 40°C 정도의 온도 편차를 보였다. 이러한 관상 인장시편 적층부의 경우 열전대를 시편 gauge length 측면에 있는 spacer에 넣어 조립한 상태이므로 시험과정에서 해당 spacer가 초기 위치를 이탈하여 측정온도가 변화했을 가능성이 크다고 추정된다. 또한 일부 산화처리된 관상 인장시편들은 시편 준비과정에서 발생한 뒤틀림에 의한 비정상적인 조립 상태가 조사온도 차이의 큰 원인으로 작용하였을 것으로 추정된다 [12].

본 캡슐은 조사시험 후 일정기간 방사능 냉각처리된 다음 절단되어 이송용 캐스크에 넣어져 조사후시험시설인 IMEF로 이송/해체되었으며, 조사시편들은 각 이용자에게 인도되어 각종 조사후 재료물성시험이 수행되고 있다. 향후 조사후시험을 통해 얻어진 재료물성 자료들은 각 대학에서 수행중인 관련 재료의 조사성능 연구에 기본자료로 활용될 것이며, 소내 '고온강도 평가 및 신재료 기술 개발' 분야 연구에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

#### 4. 03M-06U 캡슐 설계·제작

하나로를 이용한 2003년도 산·학·연 공동이용 활성화 사업에서는 4개 대학이 연구기관으로 선정되어 캡슐을 이용한 조사시험을 공동으로 수행하게 되었다. 그러나 2002년 과제와 동일하게 선정 대학들의 시편 및 예산만으로는 독립적인 캡슐을 제작할 수 없으므로 소내 중장기 과제인 '조사시험용 캡슐 개발 및 활용' 과제와 공동으로 캡슐 제작을 수행하기로 하였다. 이들 이용자 재료들의 조사특성 평가를 위한 하나로 계장캡슐(이하 03M-06U 캡슐로 표기함)이 현재 설계/제작 중에 있다. 03M-06U 캡슐 내에는 4개 대학에서 신청된 Zr, Zir-4, Zr-2.5Nb, Cu-Ag, Ti, Al 합금, SA508, STS304/430, 저합금강과 소내 캡슐분야에서 요구되는 STS 304 재질로 이루어진 인장, 경도, TEM, Charpy, 전기저항 등 다양한 규격의 총 120개 시편들이 장입될 예정이다.

본 캡슐은 대학이용자들의 조사시험 뿐만 아니라 연구소 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 과제의 연구분야인 조사온도 정밀제어 기술개발 연구에도 활용될 예정이다. 일반적으로 조사시험용 캡슐은 원자로의 초기 출력상승 및 가동후 출력감소, 그리고 가동중 출력저하 기간에는 목표 조사온도보다 낮은 온도에서 중성자 조사를 받게 된다. 이러한 낮은 온도에서의 조사는 비록 작은 양이라도 경우에 따라서는 정밀온도제어 방식에 의한 조사와는 거의 100% 다른 시편의 조사손상 미세조직을 형성시키기도 하는 것으로 보고되었다 [13]. 이러한 조사방식에 따른 미세조직의 차이는 점결함 cluster의 안정성(stability)에 대한 온도 의존성과 결함 생성 및 성장에 대한 천이온도의 관계 등 미세조직 형성 mechanism 관점에서 이해되고 있다 [13-14]. 따라서, 일본, 미국 등 원자력 선진 각국에서는 90년대초부터 원자로 출력 이력에 영향을 받지 않는 정밀온도 제어 캡슐 기술 및 시설을 개발하여 실제 조사시험에 적용하고 있다. 하나로에서도 기존 표준형 계장캡슐 기술을 기본으로 하여 부품간 gap, 캡슐내 He gas 압력, heater 용량 등의 설계 개선을 통하여 조사온도 정밀제어 기술을 개발하고자 한다.

캡슐은 24MW 열출력의 하나로 CT 조사시험공에 설치되어 시편에 따라 288/300/350℃의 조사온도로 약 28일 동안 조사시킴으로써 시편의 중성자 조사량이 최대  $3.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1.0\text{MeV}$ )에 도달하게 할 예정이다.

## 5. 결론

하나로 주요 조사시험 시설의 하나인 계장캡슐 시설을 이용하여 2003년에는 2개의 계장캡슐이 조사시험되었으며, 1개의 캡슐이 설계/제작 중에 있다. 경수로 압력용기재료의 조사특성의 평가와 향상된 평가기술개발을 위한 02M-02K 계장캡슐에는 SA508 재질의 802개 시편들이 장입되어 24MW 하나로 CT 조사시험공에서  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조사온도로, 6일동안 최대  $0.6 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1.0\text{MeV}$ ) 중성자 조사량까지 조사되었다. 2002년도 하나로이용활성화 사업에 참여한 4개 대학과 연구소 중장기 과제인 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 분야를 위한 02M-05U 캡슐에는 Fe, Zr, Ti, Al 합금, STS 304/316/321 재질의 504개 시편들이 장입되어 285~350℃의 조사온도로 29일 동안 최대  $3.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1.0\text{MeV}$ ) 중성자 조사량까지 조사되었다. 또한 2003년도 하나로이용활성화 사업과 조사온도 정밀제어 기술개발을 위한 새로운 계장캡슐이 설계/제작중에 있다. 본 연구를 통하여 얻어지는 자료들은 향후 관련 재료의 조사특성 연구 및 캡슐 조사시험 기술의 향상에 크게 기여할 것이다.

## 감사의 글

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

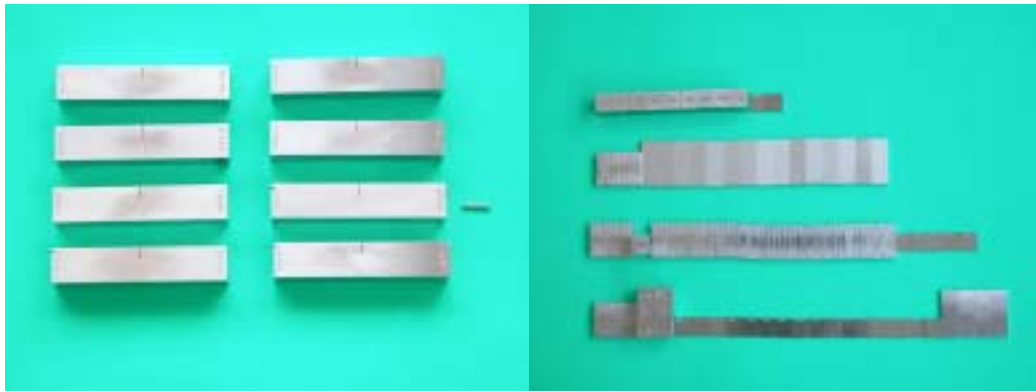
## 참고문헌

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. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-2360/03 (2003).
7. 주기남외, Capsule Irradiation Tests of Non-Fissile Materials in HANARO, '03춘계원자력학회, 경주, Korea, May 2003.
8. 주기남외, 파괴특성평가 및 향상기술개발용 계장캡슐 (02M-02K) 설계·제작·시험 보고서, KAERI 기술보고서, 작성중.
9. 주기남외, 원자로 압력경계 재료 하나로 조사시험용 계장캡슐 (00M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1945/2001 (2001).
10. 주기남외, 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (00M-01U) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1857/2001 (2001).
11. 주기남외, 2001년도 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐

- (01M-05U) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-2342/2002 (2002).
12. 주기남외, 2002년도 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (02M-05U) 설계·제작·시험 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-2558/2003 (2003).
13. M. Kiritani et als, "Fission-fusion correlation by fission reactor irradiation with improved control", J.N.M. 174 (1990) 327-351.
14. M. Kiritani, "The need for improved temperature control during reactor irradiation", J.N.M. 160 (1988) 135-141.

Table 1. 2003 HANARO instrumented capsules for the researches of nuclear materials

캡슐명	관련과제	재질	시험	조사 조건
02M-02K	파괴특성평가 및 향상기술개발	원자로 압력 용기(SA508 cl.3)	PCVN, Charpy, Hv, SP, ST, ABI, TEM, BN, UT, PA(총 802개 시험)	270/290±10℃ 최대: 6.0×10 <sup>19</sup> (n/cm <sup>2</sup> ) (E>1.0MeV)
02M-05U	2002년 이용 활성화 4개 대학 / 고온 강도평가 및 신재료 기술개발	Fe, Zr, Ti, Al 계열 합금 / STS 304/316/321	SP, 인장, Charpy, TEM, 광학현미경, 경도 (총 504개 시험)	330±20℃, 300±10℃ 최대: 3×10 <sup>20</sup> (n/cm <sup>2</sup> ) (E>1.0MeV)
03M-06U	2003년 이용 활성화 4개 대학 / 조사시험용 캡슐 개발 및 활용	Zr, Zir-4, Zr-2.5Nb, Cu-Ag, Ti, Al (합금), SA508, STS304, 430, 저합금강	Tensile, 경도, TEM, Charpy, 전기 저항 (총 120개 시험)	288/300/350℃ 조사 예정 최대: 3×10 <sup>20</sup> (n/cm <sup>2</sup> ) (E>1.0MeV)



(a)

(b)

그림 1 02M-02K 캡슐내 시편배치 사진 (a) 1,5단 시편, (b) 4단 시편



그림 2 02M-02K 및 02M-05U 하나로 조사시험용 계장캡슐

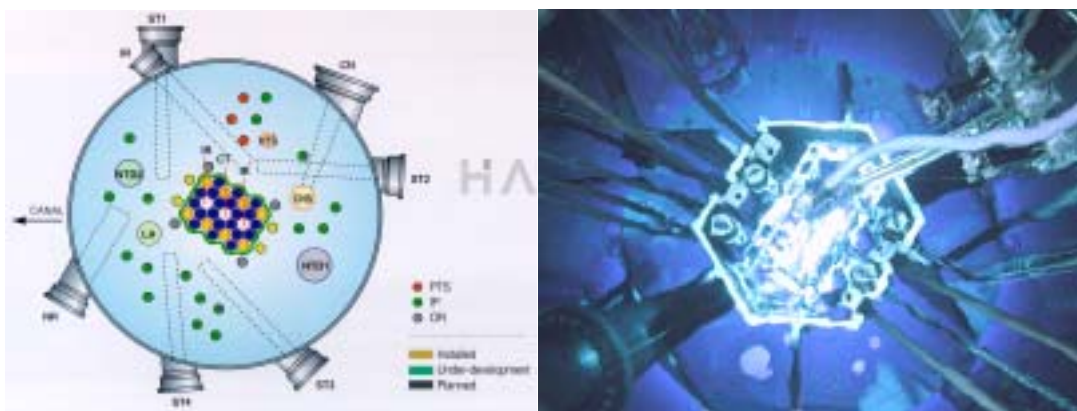


그림 3 하나로 노심 배치 및 캡슐조사 시험



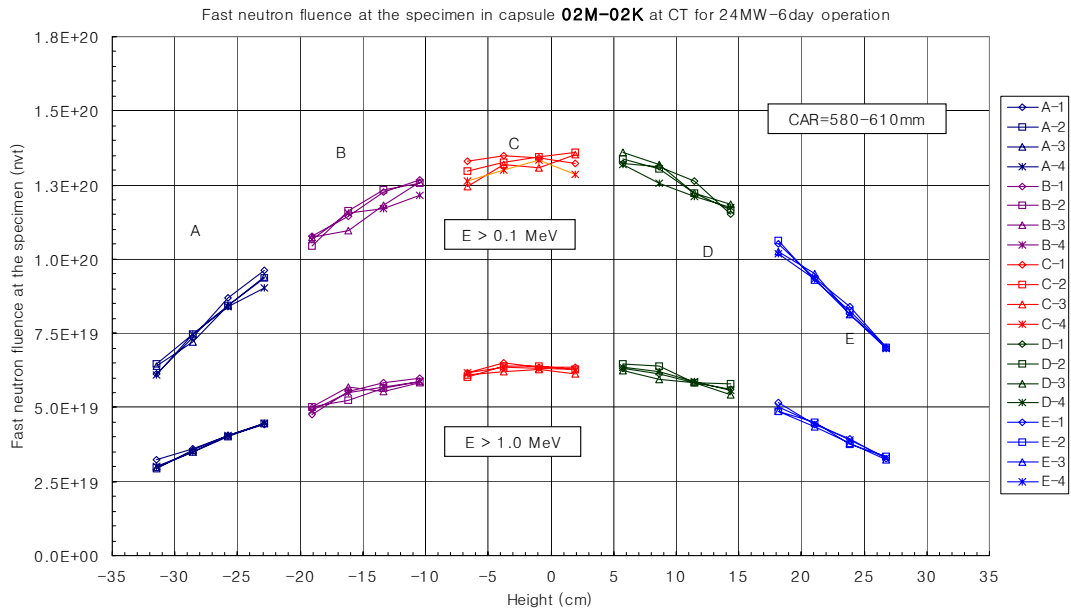


그림 4 02M-02K 캡슐내 조사시편의 고속중성자 조사량 분포

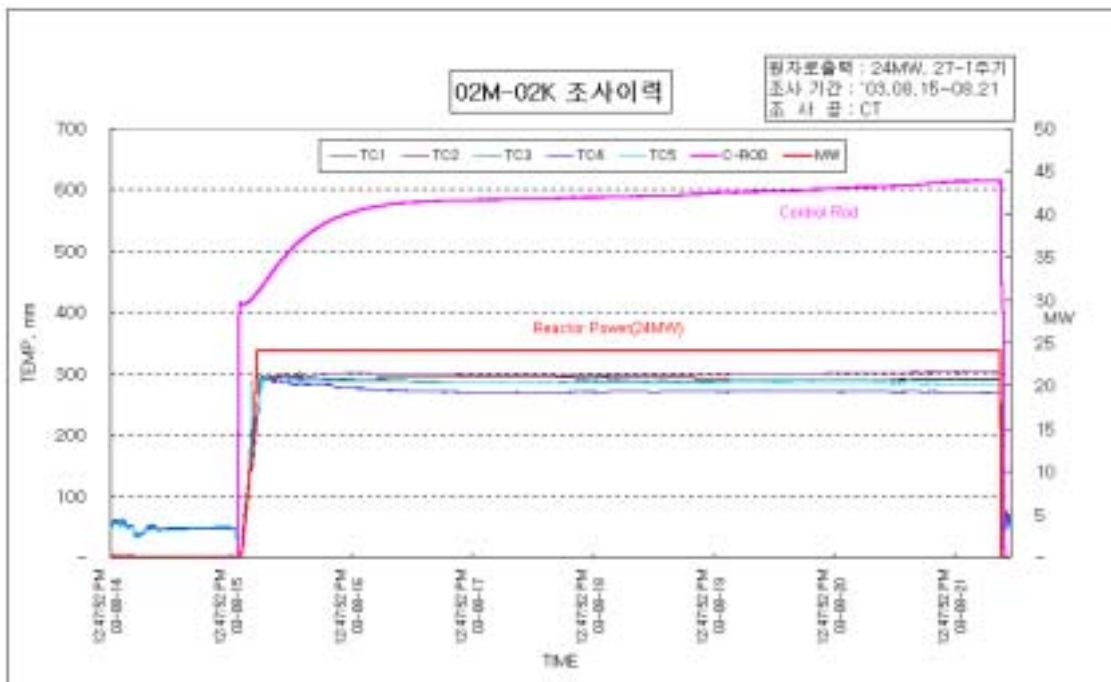


그림 5 조사시험중 02M-02K 캡슐내 시편의 평균온도 변화

### 02M-05U 캡슐 시편조립 (Capsule 횡단면)

2003. 02. 28.

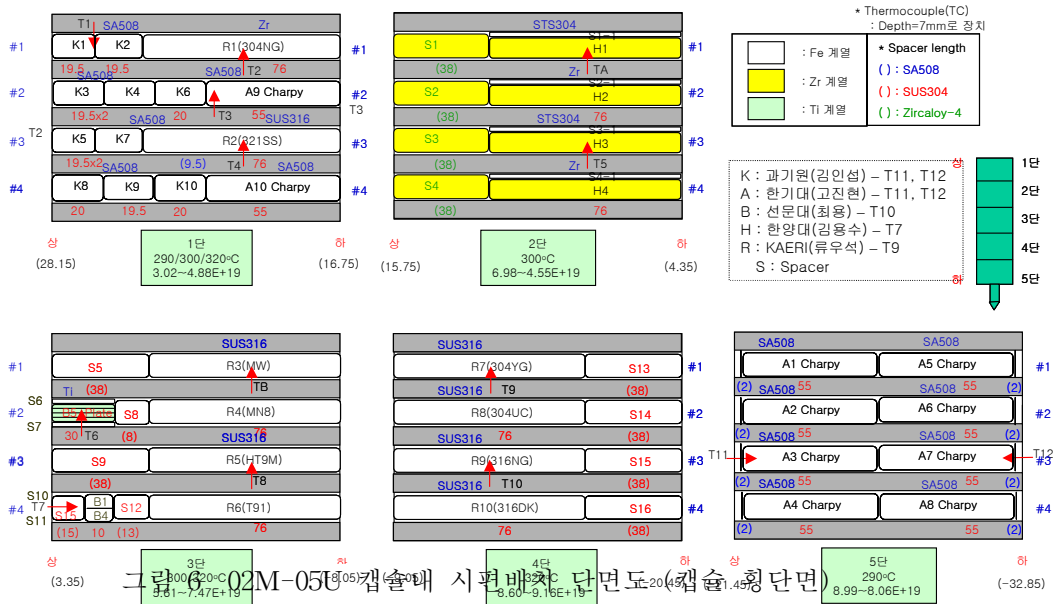


그림 6 02M-05U 캡슐내 시편배치 단면도 (캡슐 횡단면)

Fast neutron fluence at the specimen in capsule 02M-05U at CT for 24MW-29day operation

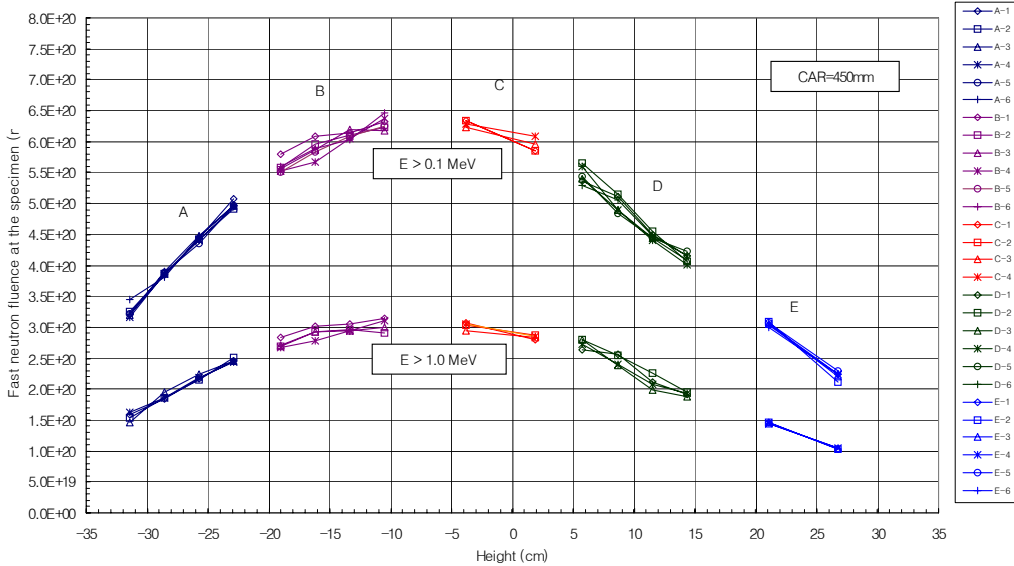


그림 7 02M-05U 캡슐내 조사시편의 고속중성자 조사량 분포

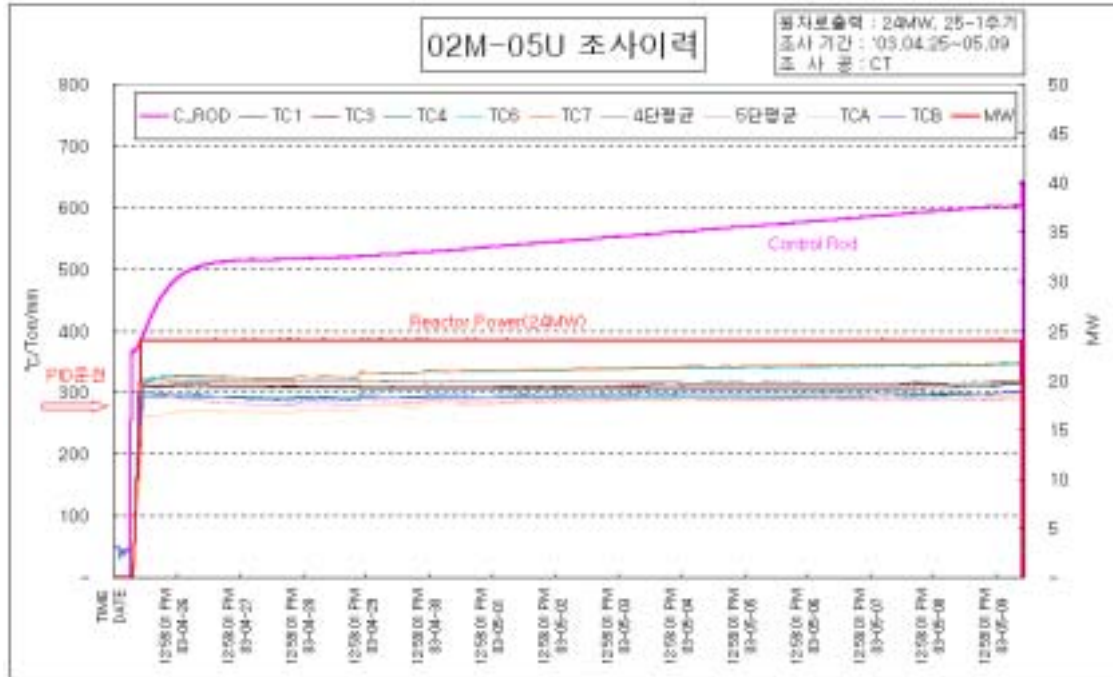


그림 8 1차 조사시험중 02M-05U 캡슐내 각단 시편의 온도 변화