

하나로 공동이용 활성화를 위한 대학 연구지원용
하나로 계장캡슐(00M-01U)의 조사시험

**Irradiation of HANARO Instrumented Capsule (00M-01U)
for the Researches of Universities**

주기남, 김도식, 조만순, 손재민, 박승재, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 공동이용 활성화 사업의 일환으로 5개 대학에서 수행하고 있는 원자력 재료의 조사손상 연구와 연구소의 다양한 조사시험 요구조건(조사량, 온도)들을 만족시키기 위한 하나로 조사시험용 계장캡슐(00M-01U)을 설계·제작·조사시험하였다. 캡슐의 기본설계는 5개 대학의 시편을 구분하여 배치하는 5단의 다공구조로 되어 있으며, 각 단에는 독립제어 전기히터가 장착되어 있으며, 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 설치되었다. 캡슐내에는 재료특성치가 상당히 다른 2종류(Fe 계열과 Zr 계열)의 원자력 재료 시편들이 배치되었다. 조사시편은 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료로 제작된 small tensile, charpy, 1/3 charpy, small punch, TEM, EPMA, microhardness, 그리고 growth 시편 등으로 이용자 요구 조사조건에 따라 캡슐에 장입되었다. 캡슐은 국내 최초로 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에서 각 단별로 270~330℃의 조사온도에서 10일간 조사시험되어 $2.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$ ($E > 1.0 \text{MeV}$) 고속중성자 조사량 범위로 조사되었다. 조사된 시편들은 조사후 시험시설에서 시험재질의 조사성능 평가에 활용될 예정이며, 각 대학의 관련 재료손상연구에 크게 기여할 전망이다.

Abstract

As part of the project for active utilization of HANARO, an instrumented capsule (00M-01U) was designed, fabricated and successfully irradiated at HANARO for the irradiation test of various nuclear materials requested by external researchers from universities. The capsule has a 5-stage structure having multi holes for the specimens. 606 specimens such as tensile, charpy, small punch, TEM, EPMA, microhardness, growth specimens made of two types of materials(Fe and Zr base alloy) having quite different material properties were inserted into the capsule. The

specimens were firstly irradiated in the IR2 test hole of HANARO of 24MW reactor output power at 270~330°C in the range of $2.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20}$ (n/cm^2) of fast neutron fluence ($E > 1.0$ MeV). The irradiated specimens will be tested to evaluate the nuclear irradiation performance of the materials. The obtained results will be effectively used for the related researches of the universities.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐을 국내 기술력으로 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다[1-5]. 연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현하고 조사시험 변수를 조절할 수 있으므로, 여러 가지 원자력 재료의 실제 사용조건을 그대로 모사할 수 있다. 또한 중성자속이 높아 조사시험 기간을 크게 단축하여 단기간에 원자력 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능하게 하는 유용한 설비이다.

현재까지 개발되고 조사시험이 완료된 캡슐은 주로 한국중공업(주)에서 제작되어 한국표준형 가압경수형 원자로인 영광3호기 이후 국내의 전 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로 압력용기(reactor pressure vessel, RPV) 재료의 조사손상 건전성을 입증하기 위한 것이었다. 그러나 이외의 여러 가지 원자력 재료들에 대한 조사특성을 평가하고자 하는 이용자들의 조사시험 요구가 산학연 관련분야에서 급증하고 있다. 이러한 관점에서 하나로의 공동이용 활성화 사업이 1999년부터 시행되고 있으며, 이에 따라 1차년도에는 원자력 재료에 대한 조사손상 기초연구를 수행하고 있는 국내 5개 대학이 공동으로 캡슐조사시험에 필요한 비용을 분담하여 하나로 조사시험용 계장캡슐(00M-01U)을 설계·제작하여, 하나로에서 조사시험하게 되었다. 캡슐 내에는 1999-2000년도 사업에 참여한 6개 대학중 핵연료 연구분야를 제외한 5개 대학에서 연구중인 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 조사손상 기초연구를 위한 시편들이 장입되었다.

캡슐의 주요설계는 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 다공구조의 99M-01K 캡슐[6]을 기본으로 하였다. 기존의 계장캡슐들은 한가지 재료의 조사성능 평가를 위하여 제작 시험되었지만, 본 00M-01U 캡슐은 재료특성치가 상당한 차이를 나타내는 2종류(Fe 계열과 Zr 계열)의 원자력 재료들이 여러 가지 조사조건 하에서 시험될 수 있도록 상세 설계하였다. 캡슐은 이용자들의 다양한 조사시험 요구조건들을 만족시키기 위하여 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 장착되어 조사시험 동안 시편의 온도 및 조사량을 측정할 수 있다.

캡슐 내에 장입된 조사시편은 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등으로 제작된 small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA 그리고 microhardness 시편 등 총 606개이다. 캡슐은 이용자들의 조사 요구조건에 따라 하나로 최초로 24MW 출력의 IR2 조사시험공에서 조사온도 290~330°C의 범위에서 약 10일간 조사시험되어 조사량은 최대 1.0×10^{20} (n/cm^2) ($E > 1.0$ MeV)까지 도달하였다.

조사된 시편들은 원자로 작업수조에서 방사능 처리된 후 현재 조사후시험시설(IMEF)로 옮겨져 해체되었으며, 시험 재료들의 조사 건전성 평가를 위한 기초자료로 활용되어, 압력용기, 핵연료 피복관 및 핵연료 저장·수송용기의 안전성 그리고 국내 자체 개발을 위한 기술력 확보 차원에서 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통하여

얻어진 경험과 축적된 기술 및 database을 기초로 향후 여러 원자력 재료들에 대한 다양한 조사조건을 만족시킬 수 있는 계장캡슐의 기술개발이 활발히 추진될 것이다.

2. 00M-01U 캡슐의 설계 및 제작

원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 조사 특성 평가를 위한 00M-01U(M은 Material, U는 University의 약자) 계장캡슐은 표 1과 같이 5개 대학 이용자들의 조사시험 요구조건들을 만족하도록 설계·제작되었다. 캡슐내에는 그림 1과 같이 이용자들의 요구에 의해 다양한 재질 및 형상의 시편들이 배치되었으며, 다공구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐에 근거하여 그림 2와 같이 설계되었다.

계장캡슐은 먼저 캡슐 이용자와의 협의를 통하여 캡슐의 주요구조, 장입시편 치수 및 임시배치 위치, 조사조건 등을 결정하는 기본설계를 수행하고, 이를 토대로 조사시험이 수행될 하나로 시험공에서의 감마발열률(gamma heating rate) 분포를 계산한 후, 계산된 값을 사용하여 열매체와 캡슐외통간의 간격(gap) 설계, 시편의 최종배치 및 열전대(T/C)와 중성자모니터(F/M)의 배치위치 결정 등의 절차로 설계된다.

캡슐은 크게 본체부, 보호관부, 안내관부로 나뉘어지며, 캡슐 본체는 $\phi 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 튜브 내부에 5단의 Al 열매체로 구성되고, 각 열매체 내에는 조사시편을 포함하여 계장품들(T/C, F/M)이 설치된다. 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐 내 He 진공도를 제어하여 1차 조절되며, 각 단별로 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되어진다.

00M-01U 캡슐은 한가지 재료의 조사특성 평가를 위하여 제작 시험되었던 기존의 계장캡슐과는 다르게 이용자 요구조건에 따라 그림 1과 같이 2종류(Fe 계열, Zr 계열)의 원자력 재료들이 각기 다른 조사조건에서 시험된다. 따라서 시험 중 조사시편들이 이용자 요구조건에 맞게 조사되는지를 확인하기 위하여 현재의 표준형 계장캡슐 기본 설계에서 수용될 수 있는 최대 개수인 14개의 열전대를 설치하였으며, 중성자 조사량 측정을 위한 5개의 중성자 모니터를 각 단에 배치하였다.

00M-01U 캡슐에는 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등으로 제작된 small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA 그리고 microhardness 시편 등이 장입되었다. 표 2는 00M-01U 캡슐에 장입된 606개의 시편중 대략요청 시편을 종류별로 정리한 것이며, 이들 중 Charpy를 제외한 시편들은 각각의 홀더 내에 집어넣은 상태로 장입되었다. 00M-01U 캡슐의 경우 캡슐 중심부에 빈 공간을 두고 이를 중심으로 시편을 분산배치하는 다공형태로 모든 단을 동일하게 설계하였다. 이와 같은 분산형 시편배치 방식을 적용함으로써 시편의 중심배치 형식에 비하여 시편의 캡슐 내 체적률을 크게 향상시킬 수 있었다. 그림 1은 이용자들의 조사시험 요구조건(표 1)을 만족하도록 작성한 시편배치도이다. 요구한 중성자 조사량이 상대적으로 낮은 Fe 계열의 시편들은 주로 1단(최상단), 2단 및 5단(최하단)에 장입되며, 희망 중성자 조사량이 상대적으로 높은 Zr 계열의 시편들은 주로 3단 및 4단에 배치하였다.

그림 1의 시편배치도를 기준으로 MCNP 전산코드를 이용하여 조사시편 및 캡슐 부품들에 대한 감마발열률(gamma heating rate)과 중성자 조사량 분포를 예비 계산하였다[7]. 분석대상 노심은 조사시험 예상시기인 2000년 11월초의 예상 노심으로 36봉 핵연료 다발이 20개, 18봉 핵연료 다발이 12개 장전되어 있는 완전 장전 노심이

다. 핵연료는 모두 새 핵연료 그리고 제어봉은 450mm 삽입된 상태로 가정하였다. 조사시편이 받는 고속 중성자 조사량 및 시편에서의 감마발열량은 원자로가 24MW로 10일 동안 운전하는 것으로 하고, prompt & delayed gamma 값을 구하는 방식으로 계산하였다. 조사시편에서의 감마발열량은 캡슐이 노심 중앙에서 오른쪽인 IR2에 장전되므로 열매체 내에 270°로 배치된(No 4) 시편에서 가장 높은 값을 보일 것으로 가정하였다. 조사시편의 11월초로 예상되는 조사시험시 예측되는 원자로 제어봉의 위치변화와 핵연료의 연소도 효과를 고려하여, 그림 3과 같이 00M-01U 캡슐에 대한 최종 열설계용 평균 감마발열량 곡선(gamma heating rate curve)을 결정하였다.

기존의 계장캡슐에서는 캡슐내 모든 시편의 조사온도는 동일하게 한 온도로 설정하였지만, 본 캡슐에서는 이용자들의 요구조건에 따라 300 및 350±10℃의 2가지온도를 목표로 하고 있다. 캡슐 내 시편의 조사온도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 단계는 캡슐 내 부품간의 간격을 설계하는 것으로, 이는 계산된 감마발열량에 따라 부품간의 간격을 조절해가면서 각 단별로 시편의 조사온도가 최종 시험 목표온도로 일정하게 유지되게 조정하는 과정이다. 시편 온도 조절을 위해 캡슐 부품간의 간격을 조정함에 있어 시편과 열매체간의 간격은 기계 가공상의 어려움 때문에 모두 0.1mm로 고정하고, 고진공 상태인 0.4K_{He=1atm} 조건에서 열매체와 캡슐외통의 간격(gap) 설계를 수행하여 각 단 시편의 온도가 원하는 조사온도로 유지되도록 하였다. 캡슐내 시편의 조사온도를 계산하는 데는 GENGTC와 ANSYS code를 이용하였다. 결정된 열매체와 외통간의 간격은 캡슐의 최상단(1단) 위로부터 캡슐 중심부로 갈수록 감소하다가 최하단(5단)으로 갈수록 다시 증가하는 경향을 가진다. 한편 열매체 단면상의 전체 온도분포를 2차원적으로 계산할 수 있는 ANSYS code에 의한 열해석에서는 2차원 온도 및 응력을 동시에 계산할 수 있는 PLANE13 요소를 사용하였으며, 경계조건으로는 감마발열량에 의한 시편, 열매체 및 캡슐 외통의 열발생밀도(heat generation density)와 냉각수의 온도가 사용된다. 그림 4는 00M-01U 캡슐의 3단에 대한 온도해석모델과 이 모델을 사용하여 계산된 대표적인 온도분포를 나타낸 것이다. 여러 시편 크기 및 재질에 대한 다양한 이용자 요구 조사조건에 따라 각 부분에서의 설계도 달라지게 된다. 같은 3단 내에서도 stainless steel 재질인 No 1,3 시편은 330℃의 조사온도로 설계되었으며, 유사 재질의 No.2 시편의 경우 상대적으로 낮은 gamma 값과 작은 크기로 인해 300℃로 설계되었다. 한편 No. 4 시편의 경우, 상대적으로 높은 gamma 값과 Zr 재질의 열특성으로 인해 330℃로 설계되었다.

캡슐 내 시편부에는 14개의 열전대가 설치되어 있어, 조사시험 동안 조사시편의 온도 변화가 캡슐온도제어장치에 연속적으로 기록되게 하였으며, 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe Fluence Monitor(F/M) 5개를 각 단의 Al 열매체 내에 설치하여, 조사시험후 시편의 정확한 조사량 평가에 사용되도록 하였다.

이상에서 언급한 바와 같은 캡슐의 상세설계 방침에 따라 캡슐은 하나로 설계 기준에 준하여 그림 2와 같이 최종 설계되었으며, 그동안의 하나로 캡슐 제작 등을 통하여 캡슐 제작경험을 충분히 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 그림 5와 같이 제작되었다.

3. 하나로 조사시험

00M-01U 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 평가시험이

수행되었으며, 시험결과 캡슐은 조사 건전성을 유지할 것으로 판정되었다.

캡슐의 조사시험은 국내 최초로 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에서 약 10일간 (240MWD) 조사시험되었다(그림 6 참조). 조사된 00M-01U 캡슐내의 시편들은 그림 7에서와 같이 270~330°C의 평균온도에서 조사되었으며, $2.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$ ($E > 1.0 \text{MeV}$) 고속중성자 조사량 범위로 조사되었다.

24MW에서의 하나로 최초 캡슐 조사시험인 관계로 조사시험 초기에는 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 이 조건으로 원자로 출력이 240MW-day에 도달할 때까지 조사시험하였다.

조사시험기간 동안 시편의 조사온도는 시편내에 설치된 열전대를 통해 기록되었는데 표 2에서 볼 수 있듯이 시편 case 재질의 불량으로 밝혀진 1개 대학의 시편을 제외하고는 이용자 요구조건을 수용하는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7은 00M-01U 캡슐의 조사시험 전 과정동안 in-situ로 측정된 시편의 조사온도를 각단 대표시편에 대한 평균값으로 나타낸 것이다. 일부 시편의 조사 기간에 따른 약간의 온도증가 현상은 원자로의 제어봉 위치 변화에 따른 gamma 값 변화에 기인된 것으로 추정되고 있다.

그림 8은 00M-01U 캡슐내 시편이 조사시험 동안 받은 고속중성자 ($E > 1.0$ 및 $E > 0.1 \text{MeV}$) 조사량을 VENTURE 코드로 계산한 그림이다 [8]. 시편은 캡슐내 위치에 따라 $E > 1.0 \text{MeV}$ 고속중성자의 경우 $2.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$ 범위로, $E > 0.1 \text{MeV}$ 고속중성자의 경우 $5.4 \times 10^{19} \sim 2.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 의 조사량을 가지는 것으로 계산되었으며, 캡슐내 시편의 최대 조사량은 3단 하부 및 4단 상부에 걸쳐 얻어졌다. 또한 설계시와는 달리 하나로 설치시 No 2 시편(90°)이 노심쪽으로 설치되어 gamma 값 및 중성자 조사량이 최대치를 보였다.

4. 조사후 시험 일정

국내 최초로 24MW 출력의 하나로 IR2 시험공에 장입되어 장기간 조사된 캡슐은 원자로 작업수조에 보관되어 약 3개월동안 냉각되었으며, 캡슐 표면에서의 방사능 선량이 안전치 이하로 떨어져 후속작업이 가능하도록 하였다. 현재 캡슐은 원자로 작업수조내에서 캡슐절단장치를 이용하여 정해진 크기로 수중에서 절단한 후 캡슐이송용 cask에 넣어 조사후시험시설인 IMEF 핫셀로 이송되었다. 이송된 캡슐은 핫셀내에서 정해진 절차에 따라 해체되었고 분리된 조사시편은 현재 물성평가를 위한 조사후 시험이 수행되고 있다. 이들 시편들은 각기 정해진 조사후시험을 통하여 해당 대학의 관련 연구에 활용될 예정이다. 캡슐내 포함되어있던 Fe-Ni-Ti F/M는 별도로 분리되어 방사능 평가를 통한 시편의 실제 중성자 조사량 평가 작업이 수행되고 있다.

5. 결 론

원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(00M-01U)이 성공적으로 설계·제작되어 국내 최초로 24MW 출력의 하나로에서 10일간 조사시험되었다. 본 캡슐은 참여 대학의 각기 다른 시편 재

질 및 형상과 다양한 조사시험 요구조건에 따라 다공구조의 표준형 계장캡슐을 기본으로 시편의 핵적특성 평가, 원자로 제어봉의 위치변화, 핵연료의 연소도 효과 등을 고려하여 설계·제작되었다.

00M-01U 캡슐은 국내 최초로 24MW 출력의 하나로 IR2 시험공에 장입되어 240MWD까지 조사되었다. 시편의 평균 조사온도는 270~330℃로 유지되었으며, 캡슐내 위치에 따라 $E > 1.0\text{MeV}$ 고속중성자의 경우 $2.6 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$ 범위로, $E > 0.1\text{MeV}$ 고속중성자의 경우 $5.4 \times 10^{19} \sim 2.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 의 범위로 조사되었다.

조사된 시편들은 현재 조사후시험시설(IMEF)로 옮겨져 조사성능 평가시험이 수행되고 있으며, 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 핵연료 저장·수송용기 재료들의 조사 건전성 평가를 위한 기초자료가 제공되고, 이들 재료를 사용한 기기의 건전성 확보 및 관련 원자력 산업체 기술의 고부가가치화에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술들은 향후 원자력 재료들의 다양한 조사성능 연구에 활발히 이용될 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 강영환 외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
1. Y. H. Kang et als, 1999, "Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test," Proceedings of The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, Mito, Japan, pp. 227~232.
2. K. N. Choo, et als, 1999, "Irradiation of Reactor Materials using an Instrumented Capsule in HANARO," Proceedings of The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, Mito, Japan, pp. 279~284.
3. 강영환 외, 1999, "ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석," '99 원자력학회 춘계학술대회 논문집.
4. 강영환 외, 1999, "조사시험용 캡슐개발 및 활용," KAERI Report, KAERI/RR-2038/99.
5. 강영환 외, 2000, "하나로 캡슐의 설계개선," '00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
6. 주기남 외, 2000, "한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 재료의 하나로 조사시험용 계장캡슐 설계·제작," '00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
7. 서철교, 2000, "계장캡슐 00M-01U의 핵적특성," 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-066.
8. 서철교, 계장캡슐(00M-01U)의 조사시험에 대한 핵적 특성 평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-089, 2000년 12월.

Table 1. 하나로 공동이용 활성화 과제 참여대학 및 연구분야

				UO ₂ / UO ₂ + 가 Fission gas release
(00M-01U)		KAIST	RPV	/ (SA508, STS309L)
	가			(SA240, 350, 508), Database
	Zr-			(Zr)
	RPV			TEM,
	Zr			Zircaloy-4, Zr (Tube, Plate) 10 ¹⁹ -10 ²⁰ n/cm ² 가 ,

Table 2. 00M-01U 캡슐 시편 이용자별 조사조건

재 질	대학	시편		조사온도(°C)		조사량(n/cm ²) (E>1.0 MeV)	
		종류	개수	희망	실측	희망	최종
SA508 class3 Type 309L STS	KAIST	Small tensile	48	288	296 ±10	5×10 ¹⁸ ~3×10 ¹⁹	5.3-8.0 x10 ¹⁹
		1/3 Charpy	40				
		Microhardness	4				
		TEM	52				
SA508 class 3 Type 304 STS	선문대	Small tensile	30	300	305	5×10 ¹⁸	5.5-9.0 x10 ¹⁹
		TEM	40	-350	-316		
Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe Zr-1Nb-1Sn-0.2Mo-0.1Fe Zr-1Nb-1Sn-0.5Mo-0.1Fe	인하대	TEM	54	300	286 -317	1×10 ¹⁹	2.7-8.5 x10 ¹⁹
		EPMA	27			1×10 ²⁰	
SA305 LF2 Type 316 STS	충남대	Small tensile	10	300	325	5×10 ¹⁹	5.3-7.6 x10 ¹⁹
		Charpy	6	-350	±10		
Zirconium alloy	한양대	Small tensile	51	300	270	~1×10 ²⁰	3.0-9.8 x10 ¹⁹
		TEM	54	350	-290		

STS : stainless steel

(Capsule)

2000. 11. 24.

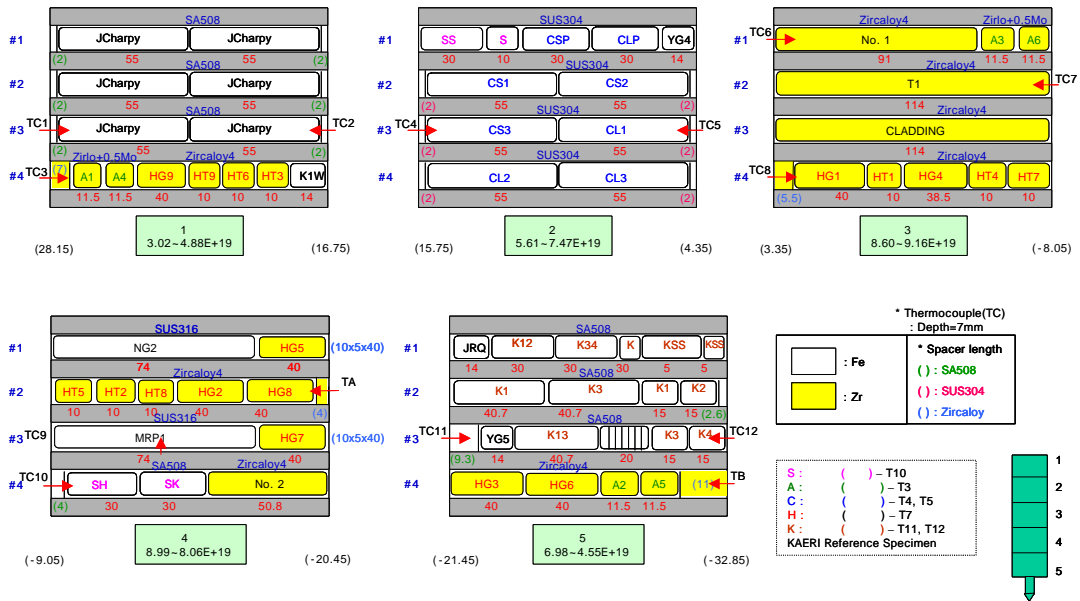


그림 1 00M-01U 캡슐내 조사시편 배치도

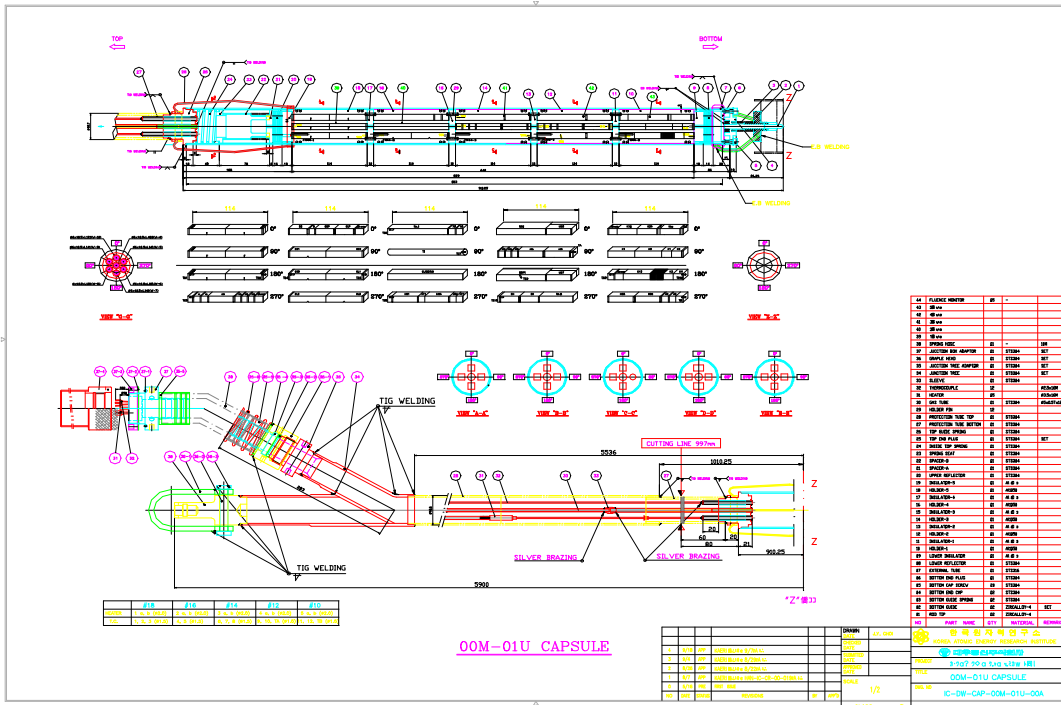


그림 2 00M-01U 캡슐 설계도 (하나로 공동이용 활성화, 대학연구 지원용)

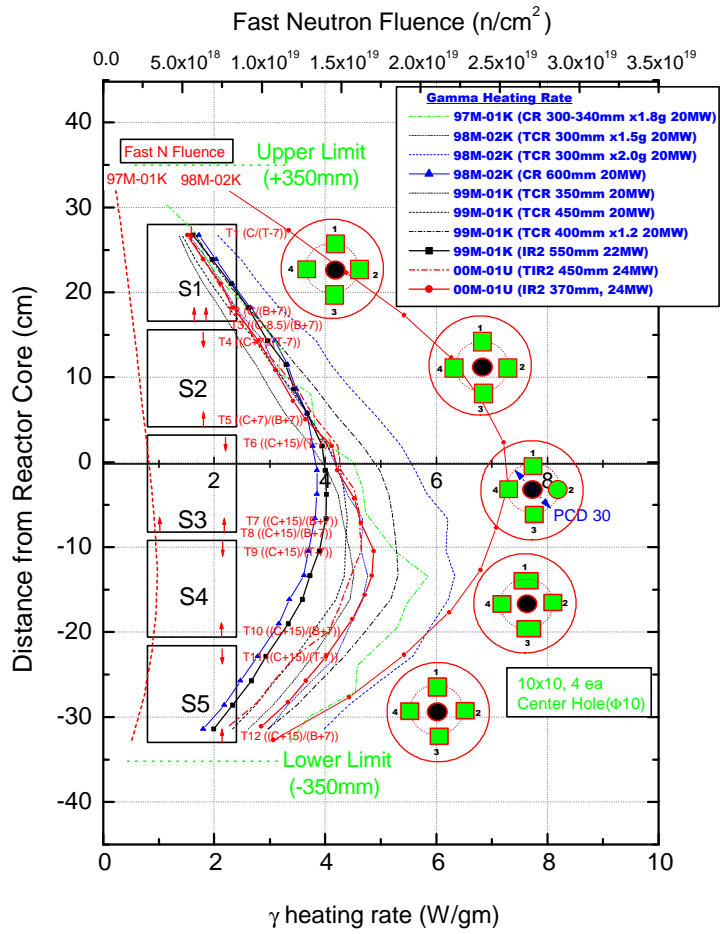


그림 3 00M-01U 캡슐의 gamma heating rate 분포 (C=center, T=top, B=bottom)

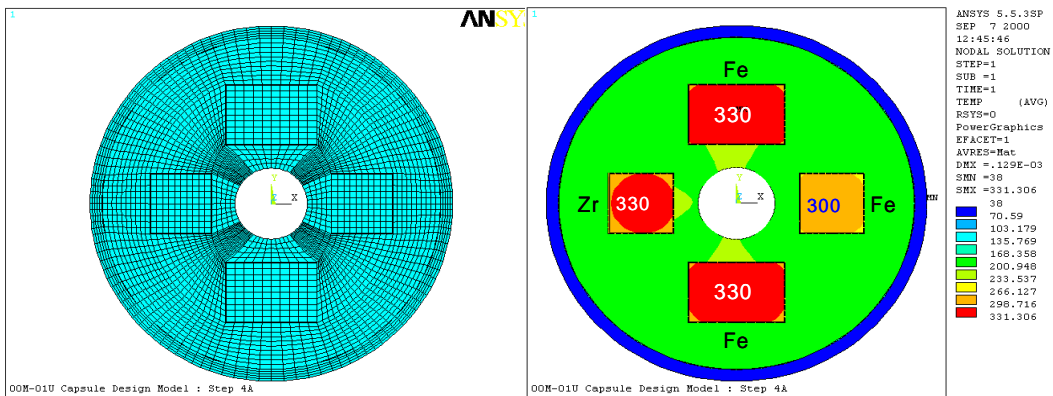


그림 4 ANSYS를 이용한 유한요소해석모델 및 온도분포 해석결과 (3단)



그림 5 하나로 표준형 계장캡슐 (00M-01U)

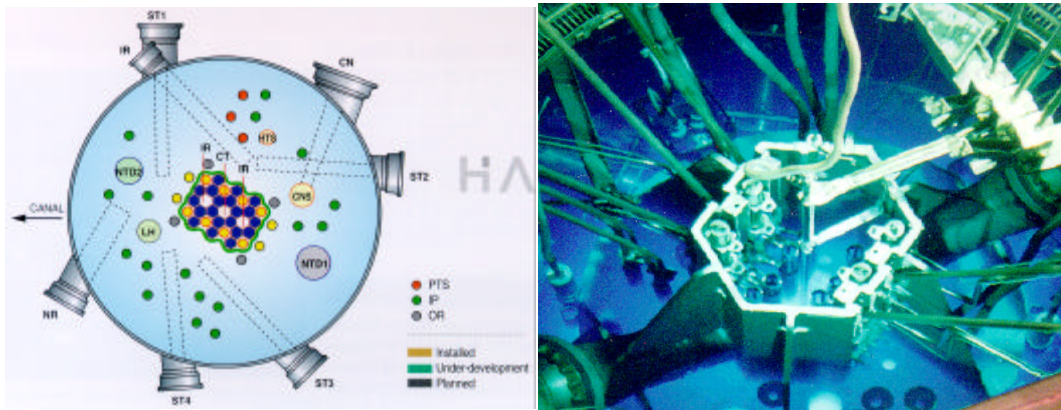


그림 6 하나로 노심배치 및 캡슐조사 시험

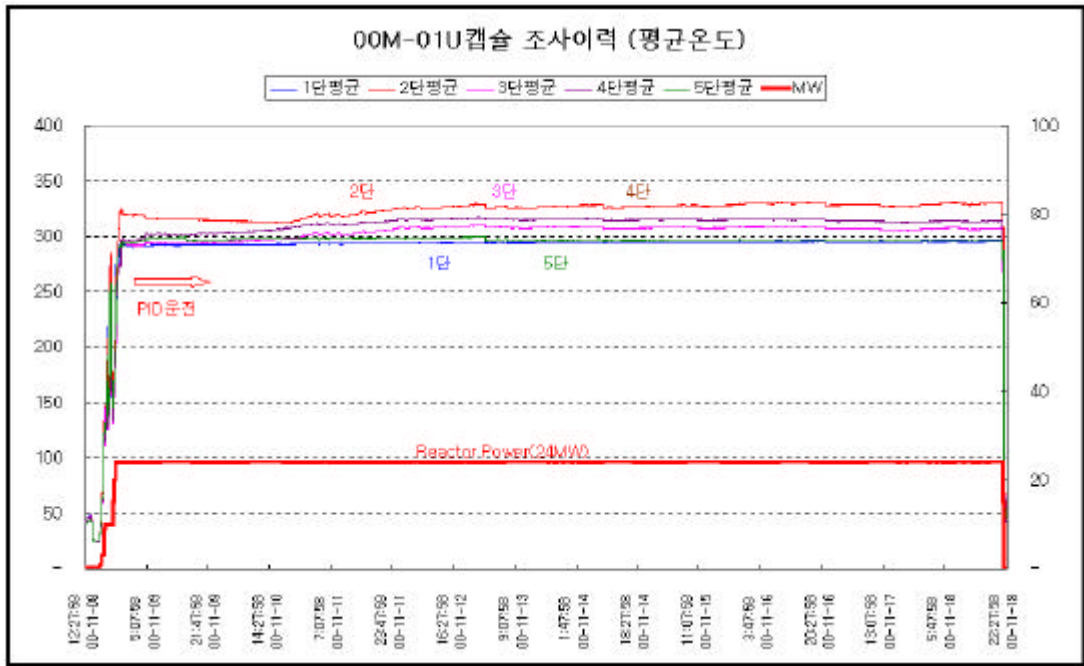


그림 7 조사시험중 00M-01U 캡슐내 각단 시편의 평균온도 변화

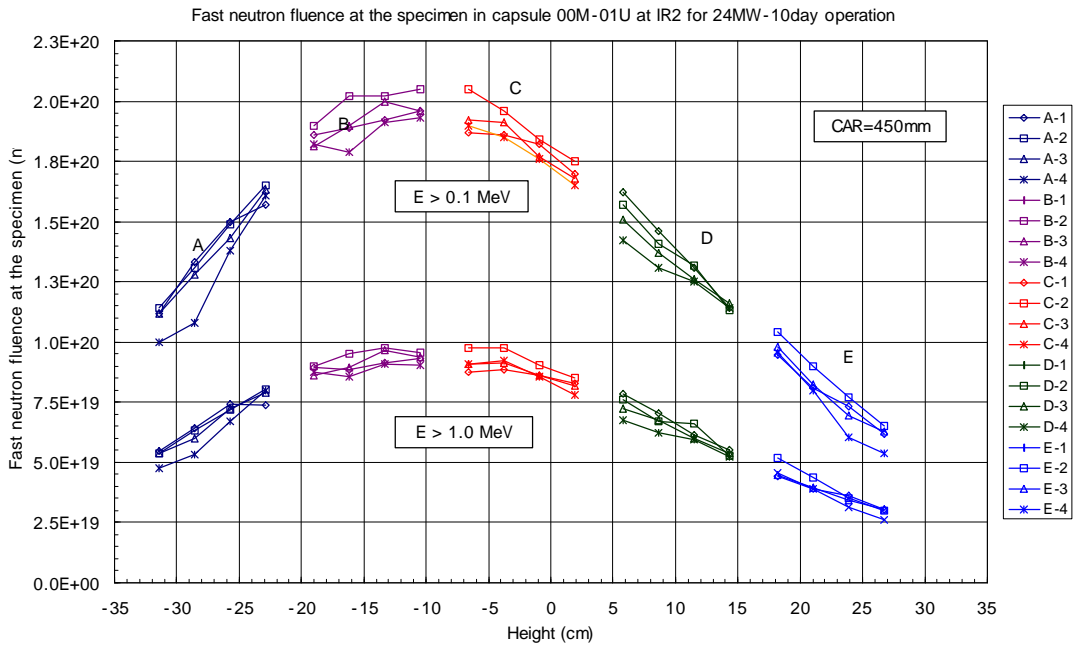


그림 8 캡슐내 조사 시편의 고속중성자 ($E > 1.0$, $E > 0.1$ MeV) 조사량 (원자로 출력 24MW에서 10일간 조사시)