

2002년 하나로 공동이용활성화를 위한 계장캡슐(01M-05U)
설계/제작/조사시험

Design/Fabrication/Irradiation Tests of Instrumented Capsules
(01M-05U) for Active Utilization of HANARO

주기남*, 손재민, 김도식, 서철교, 강영환, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

2001년도 원자력 연구 기반 확충 사업중의 한 분야인 하나로 공동 이용 활성화 사업의 일환으로 대학 이용자들의 다양한 조사시험 요구조건들을 만족하는 재료 조사시험용 계장캡슐(01M-05U)을 설계·제작·조사시험하였다. 본 캡슐은 2000년도에 수행되었던 00M-01U 캡슐을 기반으로 하여 설계·제작되었다. 장입된 시편들의 재질은 일련의 Zr 합금들로 핵계산 시에는 모두 동일한 조성의 시편들로 간주하여 계산하였다. 캡슐은 독립 제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터를 설치하였다. 01M-05U 캡슐에는 인장(tensile), TEM, 경도(hardness), 조직(optical microscopy), 성장(growth), force deflection 시편 등 다양한 종류의 시편들이 장입되었다. 캡슐은 24MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에서 300~350°C의 조사온도로, 중성자 조사량이 최대 $3.2 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)까지 조사되었다. 향후 시편의 조사후 시험을 통해 얻어질 결과들은 이용자들의 관련 연구에 귀중한 자료가 될 것이다.

Abstract

As a part of 2001 project for active utilization of HANARO, an instrumented capsule (01M-05U) was designed and fabricated for the irradiation test of various nuclear materials under irradiation conditions requested by external researchers from universities. The basic structure of 01M-05U capsule was based on that of the 00M-01U capsule successfully irradiated in HANARO as 2000 project. The material of

the specimens is Zr-based alloys. Thus, the specimens were considered as same composition in the calculation of nuclear characteristics. The capsule is composed of 5 stages having many kinds of specimens and independent electric heater in each stage. During the irradiation test, the temperature of the specimens and the thermal/fast neutron fluences were measured by 14 thermocouples and 5 sets of Ni-Ti-Fe/Sapphire neutron fluence monitors installed in the capsule. Various types of specimens such as tensile, TEM, hardness, optical microscopy, growth, force deflection specimens were inserted in the capsule. The capsule was irradiated in the CT test hole of HANARO of 24MW thermal output at 300~350°C up to a fast neutron fluence of $3.2 \times 10^{20} (\text{n/cm}^2)$ ($E > 1.0 \text{MeV}$). The obtained results will be very valuable for the related researches of the users.

1. 서 론

국내 유일한 전문 조사시험로인 한국원자력연구소 소재 하나로의 산·학·연 공동이용 활성화 사업이 과학기술부 주관으로 1999년부터 수행되어 왔다. 캡슐을 이용한 재료조사 시험은 활성화 사업의 한 분야로서 시행 첫 해년도에는 5개 대학이 선정되어 00M-01U 캡슐을 이용한 하나로 조사시험이 성공리에 수행되었으며[1], 당해연도인 2001년도에는 3개 대학이 연구 기관으로 선정되어 캡슐을 이용한 조사시험을 공동으로 수행하게 되었다. 한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장 캡슐 국산화 개발연구를 수행하여 왔다[2-7].

현재 관련 기술이 우선적으로 국산화 개발된 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐은 원자력 재료들에 대한 산·학·연의 하나로 중성자 조사시험 연구에 활발히 활용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 표준형 계장캡슐 기술을 활용하여 2001년도 하나로 공동이용 활성화 사업에 선정된 각 대학에서 연구수행중인 원자력 재료의 조사특성 연구를 지원하기 위한 하나로 계장캡슐을 (01M-05U) 설계·제작하였다.

01M-05U 캡슐은 3개 대학에서 신청된 Zr 합금들을 이용자들이 따라 각기 다른 300, 320, 330, 350°C의 온도로 조사시험하기 위하여 설계되었다. 01M-05U 캡슐에는 핵연료 피복관 재료, 피복관 지지격자, 순수 Zr, Zr-Cu, Zr-Mn, Zr-Nb 합금 및 Zircaloy-4 합금 등으로 제작된 광학현미경 및 경도 시편, TEM, tensile, 성장(growth), Force Deflection 등 다양한 시편들이 1차로 선정되었다. 한편, 캡슐 상세설계 단계에서 조사시편의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 캡슐내의 빈공간을 채우는 관점에서 일부 다른 이용자들의 Ti 및 Al 성분의 시편들이 추가되어 01M-05U 캡슐 내에는 총 267개의 시편들이 장입되었다.

본 조사시험을 통해 얻어질 결과들은 각 대학에서 연구중인 원자력재료의 조사성능 연구에 기본자료로 활용될 것이며, 또한 소내 피복관 기술개발 연구에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술을 활용하여 향후 산·학·연에서 수행

중인 여러 원자력 재료들에 대한 다양한 조사성능 연구가 활발히 추진될 것이다.

2. 01M-05U 캡슐 설계·제작

2001년도 하나로 공동이용 활성화사업으로 3개 대학과 소내 유사 재질인 신형핵연료 개발팀의 지르코늄 신합금 핵연료 피복관 개발 과제와 공동으로 캡슐 조사시험을 수행하기로 하였다. 이들 이용자 재료들의 조사특성 평가를 위한 하나로 계장캡슐(이하 01M-05U 캡슐로 표기함, M: Material, U: University의 약자)은 표 1과 같이 이용자들의 조사시험 요구조건들을 만족하도록 1차 설계되었다. 01M-05U 캡슐 내에는 Zr, Ti, Al 재질로 이루어진 TEM, 인장(tensile), 핵연료 집합체 Grid의 Force Deflection, 광학현미경 및 경도, 성장(growth) 시편 등 다양한 규격의 총 267개의 시편들이 장입되었다. 캡슐의 기본구조는 다공구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐에 근거하여 그림 1과 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 감마발열량(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.

계장캡슐은 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.

01M-05U 캡슐은 대부분 Zr 합금 시편들을 포함하고 있지만 일부 Ti 및 Al 재질의 시편도 포함하고 있다. 또한 이들 시편들의 규격 및 희망 조사온도가 매우 다양하므로 조사시험 중 시편들이 이용자 요구조건에 맞게 조사되는지를 확인하기 위하여 현재의 표준형 계장캡슐 기본 설계에서 수용될 수 있는 최대 개수인 14개의 열전대를 시편부에 설치하였다. 또한 시편의 중성자 조사량 측정을 위한 5개씩의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터를 각 단에 배치하였다.

캡슐의 주요설계는 그동안 하나로 조사시험을 수행한바 있는 시편의 중심 배치 구조와 (01M-05U 1, 2단) 4공 분산배치 구조를 기본으로 하여 설계하였다. 그러나 01M-05U 캡슐의 경우 핵연료 피복관 시편들을 포함하여 15x15x50mm 규격의 핵연료 집합체 Grid force deflection 시편 등 다양한 크기의 시편들이 존재하므로 기존의 캡슐 내 시편 배치형식으로는 이용자가 요구하는 조사조건을 만족시킬 수 없었다. 이에 내부 설계검토를 통하여 피복관 시편의 경우 6공 분산배치 구조로 배치하였으며, 4공 분산 구조에서도 시편의 크기에 따라 다양한 배치를 적용하였다. 그림 2는 표 1에 포함된 시편의 재질 및 핵적특성을 감안하여 최종 설계된 시편배치도이고, 이 그림에서는 시편배치 횡단면에

표시된 주요 캡슐 종단면을 보여주고 있다. 이와 같은 분산형 시편배치 방식을 적용함으로써 6공 배치 구조의 경우 시편의 4공 배치 형식에 비하여 캡슐 내 시편체적률을 최대 50%까지 향상시킬 수 있었다. 그림 3은 01M-05U 캡슐의 설계를 위하여 이용자들의 조사시험 요구조건(표 1)을 만족하도록 배치한 시편의 gamma heating rate 및 중성자 조사량(neutron fluence)을 기존의 캡슐에 대한 자료들과 비교하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 시편 크기가 상대적으로 큰 시편을 최상단인 1단에 배치하였고, 그 외의 위치에서는 시편들을 6공 배치 형식으로 배치하였다.

위의 시편배치도(그림 2)를 기준으로 MCNP 전산코드를 이용하여 조사시편 및 캡슐 부품들에 대한 감마발열량(gamma heating rate)과 중성자 조사량 분포를 계산하였다[10]. 핵설계에서의 분석대상 노심은 조사시험 예상시기인 2002년 4월경의 예상 노심으로 36봉 핵연료 다발이 20개, 18봉 핵연료 다발이 12개 장전되어 있는 완전 장전 노심이다. 핵연료는 모두 새 핵연료 그리고 제어봉은 450mm 삽입된 상태로 가정하였다. 조사시편이 받는 고속 중성자 조사량 및 시편에서의 감마발열량은 원자로가 24MW로 20일 동안 운전하는 경우를 대상으로 하고, 00M-01U에서 사용된 방식과 동일한 방식으로 중성자, 즉발감마, 2차 감마 및 지발 감마에 의한 발열량이 고려되었다. 그림 3은 조사시편에서의 감마발열량을 나타낸 것이며, 캡슐이 하나로 노심 중앙의 CT 시험공에 장전되어 4단에서 최대 5.2watt/gm을 보였다. 이 결과를 기초로 조사시편의 4월로 예상되는 조사시험 시 예측되는 원자로 제어봉의 위치변화와 핵연료의 연소도 효과를 고려하여 01M-05U 캡슐에 대한 최종 열설계용 감마발열량 곡선(gamma heating rate curve)을 결정하였다.

기존 계장캡슐의 경우 캡슐내 시편의 최종 조사온도로 1가지의 시험 목표온도를 설정하였지만, 본 캡슐에서는 이용자들의 요구조건에 따라 300, 320, 330, 및 350°C의 다양한 온도를 목표로 하고 있다. 조사시험중 시편의 조사온도는 원자로 출력으로 일정 온도까지 상승하면 캡슐 내 He 압력 및 전기히터 출력 등을 조절하여 순차적으로 최종 시험 목표온도에 도달하게 된다. 일반적으로 원자로 출력만으로 도달하게 되는 1차 목표 조사온도를 기준으로 캡슐 각 부품간의 간격(gap)을 조절하여 각 시편의 길이에 따른 온도편차를 줄이게 된다.

캡슐 내 시편의 조사온도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 단계는 캡슐 내 부품간의 간격을 설계하는 것이다. 이는 앞에서 계산된 감마발열량을 사용하여 부품간의 간격을 조절해가면서 각 단별로 시편의 조사온도가 최종 시험 목표온도로 일정하게 유지되게 조정하는 과정이다. 캡슐 내 시편의 조사온도를 계산하기 위하여 GENGTC, Heating 2f 또는 ANSYS 등의 전산 프로그램들이 이용될 수 있지만, 01M-05U 캡슐에서는 기존의 계장캡슐 설계에 사용되어왔던 GENGTC와 ANSYS code를 이용하여 시편의 조사온도를 계산하였다. GENGTC code는 시편의 온도계산을 수행한 후 열매체와 외통간의 간격(gap)에 따른 감마발열량-시편온도 관계를 작성하고, 이를 토대로 시편의 설계 목표온도를 만족하도록 열매체와 외통간의 간격이 최종 결정된다. 이상의

절차로부터 결정된 열매체와 캡슐외통 사이의 간격(gap)을 사용하여, 이용자들이 요구하는 조사온도를 만족시킬 수 있는 계장캡슐을 설계하였다.

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

3. 조사 및 조사후 시험

하나로 조사시험용 계장캡슐의 기준에 따라 설계·제작된 01M-05K 캡슐은 조사시험 전 노외에서 정해진 절차에 따라, 캡슐외관 및 치수검사, 본체 및 보호관부의 내압 및 He 누설시험, 전기히터와 열전대의 단락여부 및 성능평가, 캡슐온도제어장치와의 양립성 시험 등 여러 가지 건전성 평가가 우선적으로 수행되었다. 캡슐은 이들 노외 시험조건을 모두 만족하였으므로, 그림 4와 같이 24MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에 장입되어 시편에 따라 조사온도 280~350℃ 범위로 20일간 조사시험되었다. 20일간의 조사시험은 하나로를 이용하는 여러 이용자들의 일정 등을 감안하여 최종적으로 4월 26일부터 5월 10일까지 14일간 1차 조사시험된 후, 임시 보관되었다가 5월 20일부터 5월 26일까지 6일간 2차 조사시험으로 나뉘어서 원자로운전팀 및 이용자들의 협력 하에 수행되었다.

조사시험이 완료된 캡슐은 하나로 작업수조 내에서 일정기간 냉각을 위하여 임시 보관 후 캡슐절단장치로 절단된다. 절단된 캡슐은 캡슐운반용 Cask에 넣어져 IMEF 시설로 이송된 후 해체될 것이다. 캡슐 해체 후 조사시편 및 F/M은 IMEF 시설에서 분류 정리되고, 이들을 사용하여 재료의 조사특성 및 중성자 조사량 평가 등의 작업이 수행될 예정이다.

4. 결 론

2001년도 하나로 공동 이용 활성화 사업에 선정된 대학 이용자와 연구소의 다양한 조사시험 요구조건들을 만족하는 재료 조사시험용 계장캡슐(01M-05U)을 설계·제작·조사 시험하였다. 본 캡슐은 2000년도에 수행되었던 00M-01U 캡슐을 기반으로 하여 설계·제작되었는데, 핵연료 피복관을 포함한 다양한 규격의 시편이 혼재된 6공구조의 시편배치로 기존의 4공구조에 비해 캡슐 내 조사시편 부피를 최대 50%까지 향상시킬 수 있었다. 캡슐은 독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Sapphire 중성자 모니터를 설치하였다. 01M-05U 캡슐에는 인장(tensile), TEM, 경도(hardness), 조직(optical microscopy), 성장(growth), force deflection 시편 등 다양한 종류의 시편들이 장입되었다. 캡슐은 24MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에서 300~350℃의 조사온도로, 최대 $3.2 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)의 중성자 조사량까지 조사시험되었다. 향후 시편의 조사후 시험을 통해 얻어질 결과들은 이용자들의 관련 연구에 귀중한 자료가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 하나로공동이용활성화 및 원자력중장기사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구 과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 주기남 외, 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (00M-01U) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1857/2001 (2001).
2. 강영환 외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
3. 강영환 외, KAERI Report, KAERI/RR-1760/96 (1997).
4. 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).
5. Y.H. Kang et. al., Structural analysis for the HANARO irradiation capsule through vibration test, Pro. of 6th ASRR symposium, Mito, Japan, march 1999.
6. 강영환 외, KAERI Report, KAERI/RR-2038/99 (2000).
7. 주기남 외, 하나로 공동이용 활성화를 위한 대학 연구지원용 하나로 계장캡슐 (00M-01U)의 조사시험, '01춘계원자력학회, Cheju, Korea, May 2001.
8. 강영환 외, ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석, '99추계원자력학회, Seoul, Korea, October 1999.
9. 주기남 외, 노심 및 중수로 압력관 재료 하나로 조사시험용 계장캡슐 (00M-03K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1985/2001 (2001).
10. 서철교, 계장캡슐 01M-05U의 핵적 특성, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-02-001, 2002년 1월.

Table 1 O1M-05U Capsule 시편에 대한 이용자 상세 요구조건

2001. 10. 23

이용자	재질	시편 종류	시편 (Case) 규격 (mm)	Case 단 시편 수	총 시편 개수	조사 온도	조사량 (n/cm ²)	도면여부*		기타
								시편	기타	
정음환	신형 피복관 (Tube)	OM & Microhardness	∅ 9.5x5 (14x14x64)	10	1	10	2 × 10 ²⁰ (>1MeV)	○	○	OM/TEM은 동일 Case (부피) - 1단 : OM/FD - 1단 : Growth6 - 1단 : Growth4/T4+Δ - 1단 : T12 + ΔΔ - 1/2단 : T4 + ΔΔΔ
		TEM	∅ 3x0.1 (14x14x64)	30	1	40		○	○	
		Tensile(1/2)	∅ 9.5x83	2	10	20		○	○	
		Growth	∅ 9.5x150	1	10	10		○	○	
		Force Deflection	15x15x50	1	1	1		○	○	
		Tensile	7.9x1x44.9	-	-	21		○	○	
위명용	Pure Zr (Plate) Zr-(0.1/0.3/0.5)Cu Zr-(0.1/0.3/0.5)Mn	TEM	∅ 3x0.1 (10x10x10)	21	1	21	1.8 × 10 ²⁰ (>1MeV)	○	×	T/H는 case 사용안함 (부피) - 0.3단 : T/TEM/H
		Hardness	10x10x1	-	-	21		○	○	
		TEM	∅ 3x0.1 (10x10x6.5)	8	2	16	5 × 10 ²⁰ , 1 × 10 ²¹ n/cm ² (>1MeV)	○	×	(부피) - 0.03단 : TEM
김응수	Zircaloy-4 (Plate) Zr-1.0Nb Zr-2.5Nb Pure Zr	Tensile	15x76x1	-	-	32	최대 fluence, 1/2최대 fluence	○	○	case 사용안함 (부피) - 0.67단 : Tensile
		TEM, Microhardness	∅ 10	10	3	84	최대 fluence, 1/2최대 fluence	○	○	case 사용 (부피) - 0.5단 : Hardness

* 모든 시편 및 case에 대한 도면 필요함. 기타 : case, spacer, pin 등.

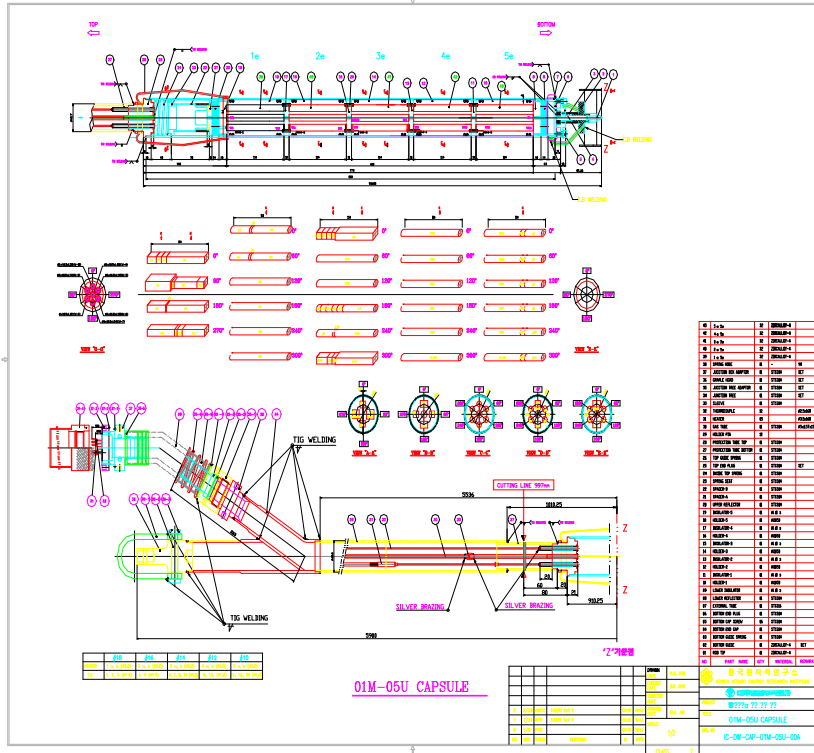


그림 1. 01M-05U 캡슐의 설계도

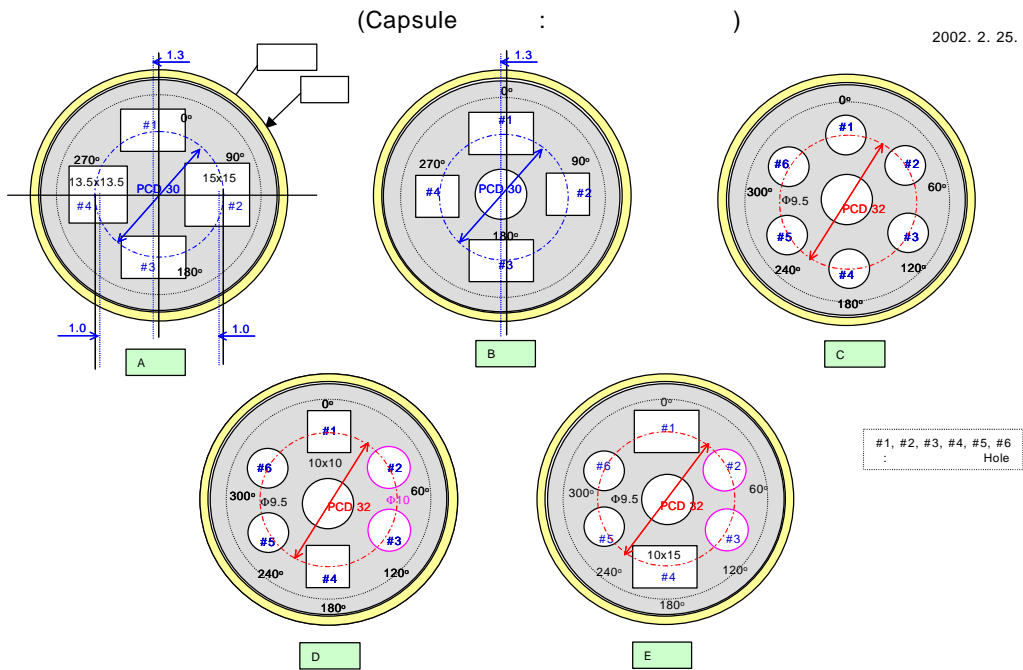


그림 2. 01M-05U 캡슐 내 시편배치도

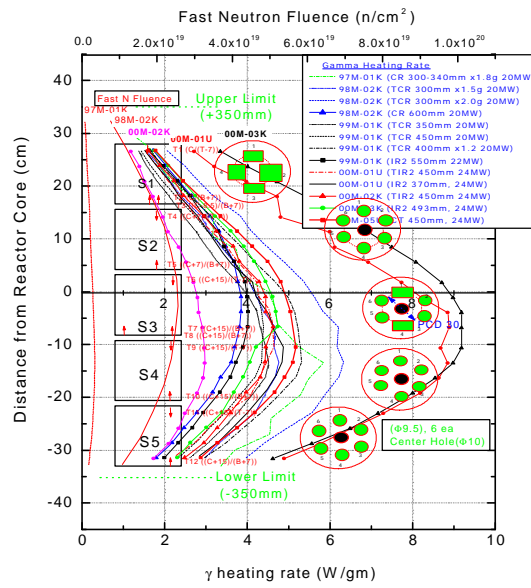


그림 3. 01M-05U 캡슐 설계를 위한 하나로 캡슐 내 조사시편에서의 감마발열량 자료

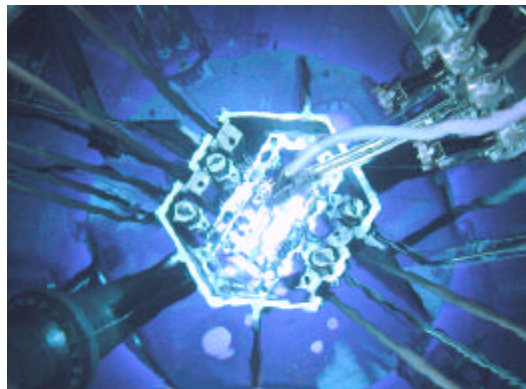
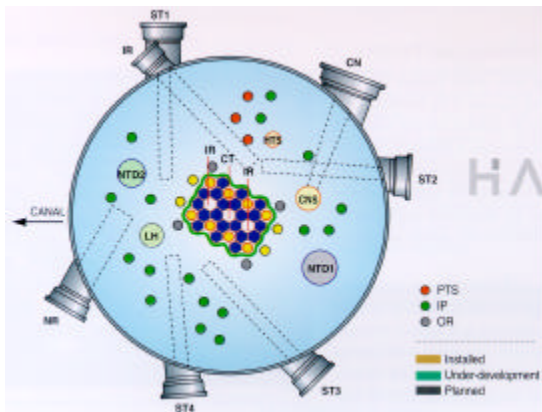


그림 4. 하나로 노심배치 및 캡슐 조사시험