

## 원자로 재료 조사시험용 하나로 계장캡슐(98M-02K)의 설계·제작

### Design and Fabrication of 98M-02K Capsule for the Irradiation of Reactor Vessel Materials in HANARO

주기남\*, 김봉구, 오종명, 박승재, 강영환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

최초의 하나로 재료조사시험용 표준형 계장캡슐인 97M-01K 캡슐의 조사시험을 통한 자료 및 기술을 기본으로 하여 원자로 압력용기재 조사 성능평가를 위한 98M-02K 캡슐을 설계·제작하였다. 본 캡슐의 조사시험 목적은 국내산업체에서 제작되어 한국형 원자로의 압력용기재로 사용된 재료에 대한 중성자 조사특성을 평가하기 위해서이다. 캡슐에는 조사시편을 중심으로 하여 각기 독립적으로 작동되는 전기 히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 12개의 열전대 및 4 세트의 Ni-Ti-Fe의 중성자 모니터가 들어 있어 조사시험 동안의 캡슐 각 부위의 온도변화 및 조사 후 중성자 조사량 측정에 각기 사용된다. 캡슐에는 round compact tension, insert sharpy, tensile 등 표준 규격의 조사 시편이 장입되었다. 98M-02K 캡슐은 하나로 CT 혹은 IR2 조사시험공에서 조사온도  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조건에서, 중성자 조사량 ( $E > 0.02 \text{ MeV}$ )  $9.0 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2\text{)}$  까지 조사될 예정이다.

#### Abstract

Based on the obtained results and experience from the irradiation of the first instrumented capsule (97M-01K) in HANARO, a new capsule (98M-02K) for the irradiation of reactor pressure vessel was designed and fabricated. The purpose of this capsule test was to evaluate the nuclear irradiation performance of the Korean nuclear reactor pressure vessel material that was fabricated by HANJUNG Co.

There are 5 stages having specimens and independent electric heaters in the capsule mainbody, 12 thermocouples and 4 sets of Ni-Ti-Fe Neutron Fluence Monitors were also inserted in the capsule to measure the temperatures of the capsule parts and thermal/fast neutron fluences, respectively. Various types of specimens such as round compact tension, insert sharpy, tensile specimens will be inserted in the capsule. 98M-02K capsule will be irradiated in the CT or IR2 test

holes of HANARO at  $290 \pm 10^\circ\text{C}$  up to the fast neutron fluence ( $E > 0.82 \text{ MeV}$ ) of  $9.0 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ .

## 1. 서론

한국원자력연구소 소재 다목적 연구로인 하나로를 이용하여 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐 국산화 개발연구가 수행되어 왔다 [1,2,3]. 하나로를 이용한 주요 재료 조사시험 시설의 하나인 캡슐 (Capsule) 조사시험에서는 원자로 압력용기 재료의 경우, 하나로 출력 30MW에서 약 6일간의 조사시험만으로 재료가 실제 원자로에서 수명 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 가능하다. 또한, 캡슐 설비는 사용자의 다양한 조사조건 요구에 적용될 수 있는 점으로 인해 가장 유용한 조사 시스템으로 평가되고 있다 [4].

이러한 필요에 따라 당 연구소에서는 하나로를 이용한 재료 조사시험용 계장 캡슐을 순수 국내 기술력으로 개발하기 위하여 조사시험용 계장캡슐의 설계·제작·검사에 필요한 기술을 자체적으로 개발하여, 최초의 조사시험용 계장캡슐인 97M-01K 캡슐을 설계·제작하였다. 97M-01K 캡슐은 하나로 중심의 CT 및 IR2 시험공에서 성공적으로 조사성능 시험이 수행되었으며, 캡슐설계에 필수적인 하나로 조사시험공 핵적 기초특성 자료 및 원자로의 단계별 출력 증가, 캡슐내 He 압력, 그리고 전기히터의 용량 등 캡슐 시험 환경변수에 따른 캡슐의 온도 변화에 관련한 자료를 확보할 수 있었다.

이를 바탕으로 하여 국내 산업체인 한국중공업(주)에서 제작되어 한국형 표준 원자로에 사용하는 압력용기재의 조사성능을 평가하기 위한 98M-02K 캡슐을 설계·제작하였다. 본 캡슐 설계에서는 97M-01K 캡슐 조사시험에서 도출된 캡슐 설계상의 보완점인 시편 조사온도에서의 이론치와 측정치 간의 차이 축소, 캡슐 반경 및 축 방향으로의 시편 온도의 편차 축소, 캡슐내 시편의 체적 이용률 향상 등의 설계개선이 시도되었다. 향후 98M-02K 캡슐은 하나로 CT 혹은 IR2 조사시험공에 장입되어 조사온도  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 원자로 압력용기의 40년 설계수명동안의 중성자 조사량인  $7.26 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2\text{)}$  ( $E > 0.82 \text{ MeV}$ ) 이상까지 조사될 예정이다.

## 2. 98M-02K 캡슐 설계·제작

국산 원자로 압력용기 재질의 조사시험을 목적으로 하는 98M-02K 계장캡슐의 설계는 하나로를 이용한 최초의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 97M-01K 캡슐의 기준에 준하여 수행되었다. 97M-01K 캡슐의 개략 구조는 다음과 같다.  $\phi 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 캡슐본체 내부는 5단으로 나뉘어지고, 각 단 중심에 있는 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐내 He 진공도의 조절로 1차 조절되며, 각 단별 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되어 진다. 하나로 설계 기준에 준하여 설계된 후 캡슐 제작경험을 보유한 대우정밀(주)에서 제작된 97M-01K 캡슐은 [5] 하나로 노심에 위치한 CT 및 IR2 조사시험공에 (그림 1 참조) 설치되어 조사 성능시험이 성공적으로 수행됨으로써 98M-02K 캡슐설계에 중요한 실험 자료들을 제공하게 되었다.

그림 2는 캡슐이 하나로 CT 시험공에서 조사시험되는 동안의 원자로 출력, 캡슐내 He 진공도, 히터 출력 등 조사시험 조건의 변화와 이에 따른 캡슐 각 부위의 온도변화

및 냉각수 온도 변화를 종합하여 나타낸 그림으로 캡슐 각 부위의 조사온도는 원자로 출력이 증가할수록, 캡슐내의 He 압력이 낮아질수록, 전기히터의 출력이 커질수록 증가하는 경향을 실제 조사시험에서 확인할 수 있었으며, 전체 조사시험 캡슐 설비는 정상적으로 작동하였다. 이들 실험변수에 따른 캡슐 각부의 실측온도는 전산 코드를 이용하여 계산된 이론치와 비교하여 분석되었다.

캡슐을 상세 설계하기 위해서는 앞의 조사시험 변수들에 기준하여 캡슐의 기본설계를 수행한 후 이에 따른 하나로 조사시험공에서의 gamma heating rate 분포를 우선적으로 구해야 한다. 하나로를 이용한 한국형 표준 원자로에 사용된 압력용기재의 조사성능 평가를 목적으로 한 계장캡슐인 98M-02K 캡슐의 설계에 있어서 시편부 온도조절 능력을 향상시키기 위한 여러 설계개선이 이루어졌다.

먼저 캡슐내 장입된 시편부의 온도를 조사 목표온도인  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 로 유지하기 위하여 기존 자료를 기준으로 하여 시편 배치를 한 후, 이를 근거로 하여 MCNP 전산코드를 이용하여 계산한 캡슐 시편부위의 gamma heating rate 분포는 그림 3과 같이 [6] 계산하였다. 이를 기준으로 하여 gamma 값이 비교적 낮은 최상단 (1단)에는 최대 부피를 가지는 round형 Compact 시편을 배치하였으며, 다음 단에는 시편을 중심부에 모두 배치하여 사각 형태로 하였다. 그러나, 단순히 중심에 사각 형태로의 시편배치는 보다 gamma 값이 높은 3,4,5단에서는 이용자가 요구한 조사온도를 맞출 수가 없어 각 시편을 중심의 빈 구멍을 중심으로 분산배치형의 설계로 결정하였다. 이러한 분산배치형의 캡슐 설계는 하나로 조사시험공의 핵적 특성 평가를 위한 무계장캡슐의 조사시험을 통해 그 구조 건전성이 입증된 바 있다 [7]. 한편 축방향의 온도 편차를 줄이기 위한 설계 개선은 주로 열매체와 캡슐 외통간의 간격을 조절함으로써 수행하였는데, 그림 3의 gamma heating 분포와 시편 기본 배치도를 기본으로 하여 캡슐 열계산 전산코드인 GENGTC를 이용하여 try-and-error 보정 방식으로 수행되었다. 열매체와 시편간의 간격은 0.1mm로 일정하게 하였다. 또한 캡슐내 장착되는 micro-heater의 사양 조절을 통하여 단위 발열용량을 약 2배로 증가시킴으로써 각단간 온도 조절폭을 확대시켜 모든 시편의 조사온도 도달에 기여하고자 하였다.

이러한 설계 과정을 거쳐 최종적으로 하나로를 이용한 한국형 표준 원자로에 사용된 압력용기재의 조사성능 평가를 목적으로 한 계장캡슐인 98M-02K 캡슐이 그림 4와 같이 설계되었다. 캡슐 기본 규격은 최초의 계장캡슐인 97M-01K 캡슐과 동일한 구조로, 5단의  $\phi 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 캡슐본체 내부는 5단으로 나뉘어지고, 각 단 중심에 있는 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐내 He 진공도의 조절로 1차 조절되며, 각 단별 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되며, 내부에 장입된 열전대를 통하여 조사시험과 동시에 캡슐 조절장치에 기록된다. 캡슐내에는 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe Fluence Monitor(F/M)가 각각 1, 3, 5단의 Al Holder에 장입되어 시편의 정확한 조사량 평가에 사용될 예정이다.

98M-02K Capsule에는 각 단 중심부에 표 1과 같이 실제 규격의 조사시편이 장입되어 있다. 1단에는 round compact tension 시편이, 2,3,4단에는 sharp insert 및 pre-cracked v-notch (PCVN) insert 시편이, 최하단인 5단에는 sharp insert, tensile, small punch, magnetic Barkhausen effect (MBE) 시편 등 총 329개의 시편이

장입되었다. 그림 5는 각단의 주요 시편을 촬영한 사진으로 v-notch를 포함하여 시편에 존재하는 모든 틈은 이에 맞게 동일한 재질로 제작된 spacer로 막아진다. 이들 시편은 모두 SA508 class 3의 RPV 재질로 국내 산업체인 한국중공업(주)에서 제작되어 한국형 표준 원자로인 영광 4,5호기 및 울진 4호기에 사용된 base 및 weld 재료이다.

캡슐 제작은 97M-01K 캡슐등의 제작을 통해 관련기술 및 하나로 품질규격 등을 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 수행되었으며, 캡슐제작 기술시방서에 의거하여 제조 결함없이 설계대로 제작되었음이 확인되었다 [8].

### 3. 향후 조사시험 계획

98M-02K 캡슐은 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 우선 수행될 것이다. 캡슐이 이들 노외 시험조건을 모두 만족하는 경우, 하나로 CT 혹은 IR2 조사시험공에 장입되어 조사온도  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 조사시험될 예정이다. 캡슐의 중성자 조사량은 원자로 압력용기의 40년 설계수명동안의 중성자 조사량인  $7.26 \times 10^{19}$  ( $\text{n}/\text{cm}^2$ ) ( $E > 0.82$  MeV)을 기준으로 하여  $1 - 9.0 \times 10^{19}$  ( $\text{n}/\text{cm}^2$ ) 범위에서 조절될 것이다. 조사시험된 캡슐은 하나로 작업수조 내에서 일정기간 임시 보관되어 냉각기간을 거친 후 캡슐절단장치로 절단되어 캡슐은 반응 Cask에 넣어져 IMEF 시설로 이송되어 해체될 것이다. IMEF 시설 내에서 조사 시편의 시험 및 F/M의 중성자 평가 등의 작업도 수행될 예정이다.

### 4. 결론

표준형 캡슐 조사시험을 통하여 축적된 자료 및 기술을 기본으로 하여 국내의 한국형 원자로의 압력용기재로 사용된 재료의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(98M-02K)을 설계·제작하였다. 98M-02K 캡슐의 기본설계는 하나로 조사시험공 특성파악 및 원자로 압력용기재의 조사시험을 목적으로 설계·제작되어 최초로 하나로 CT 및 IR2 조사시험공에 장입되어 성공적으로 조사시험이 수행된 97M-01K 캡슐을 기본으로 하였다. 98M-02K 캡슐의 설계에서는 시편 조사온도의 반경 및 축방향의 정확한 조절, 캡슐내 시편의 체적 이용률 향상 등의 기술적인 사항이 보완되었다.

98M-02K 캡슐은 하나로 CT 혹은 IR2 조사시험공에서 조사온도  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ , 중성자 조사량 ( $E > 0.82$  MeV)  $9.0 \times 10^{19}$  ( $\text{n}/\text{cm}^2$ ) 까지 조사될 예정이다.

### 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 als, Design of a new capsule controlling neutron flux and fluence and temperature of test specimens, J. Kor. Nucl. 29(2), 148 (1997).
4. JMTR Irradiation Handbook, JAERI, 1994.
5. EMR Report (End of Manufacturing Report : HANARO 표준형 계장 캡슐 (97M-01K)), FA-KA-970826, 대우정밀(주), (1997년 6월).
6. 김봉구외, 중성자속 측정용 무게장 캡슐 제작, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1249/99 (1999).
7. 서철교, 98M-02K 캡슐의 핵적 특성, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-98-74, 1998년 11월.
8. EMR Report (End of Manufacturing Report : HANARO 표준형 계장 캡슐 (98M-02K)), FA-KA-990103, 대우정밀(주), (1999년 1월).

Table 1. Specimens loaded in the 98M-02K capsule.

STAGE	SPECIMEN	DIMENSION (mm)	MATERIAL	NUMBER	REMARKS
1, 5	Round Bar	Φ16x120	STS 304	1	Nuclear Properties of HANARO
3	Round Bar	Φ10x120	STS 304	1	
2	Round Bar	Φ10x30	SA 508-3	2	Irradiation Of SA508 cl.3 RPV by HANJUNG (Co)
	Small Punch	Φ8.9x0.9	“	50	
	Tensile	5x0.94x25.4	“	14	
	Small Punch	Φ3x0.25	“	87	
4	Sharp	3.33x3.33x18	SA 508-3	12	
	MBE	3.33x1x18	“	12	
	TEM	Φ3x0.01	“	70	
	Round Bar	Φ10x30	“	2	

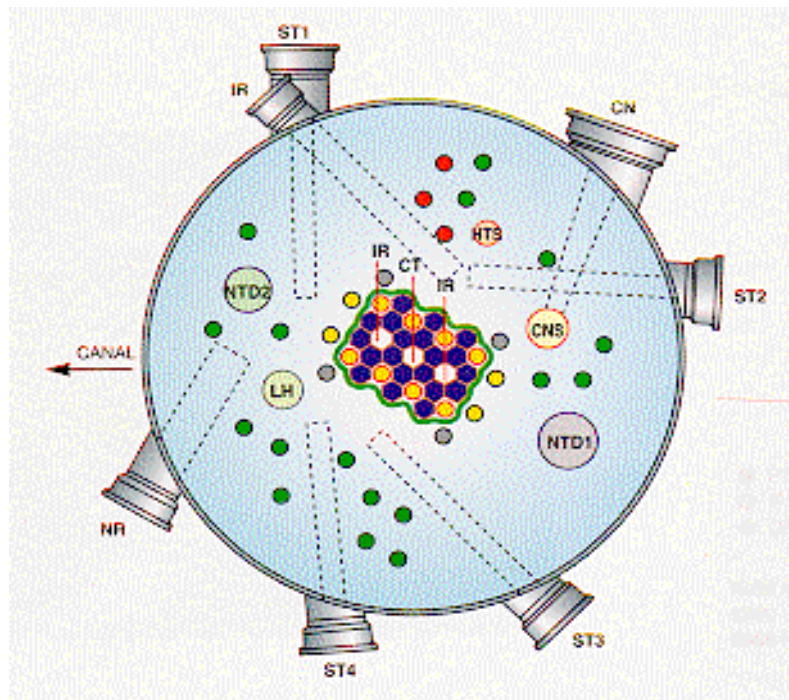


Fig.1 Core configuration of HANARO.

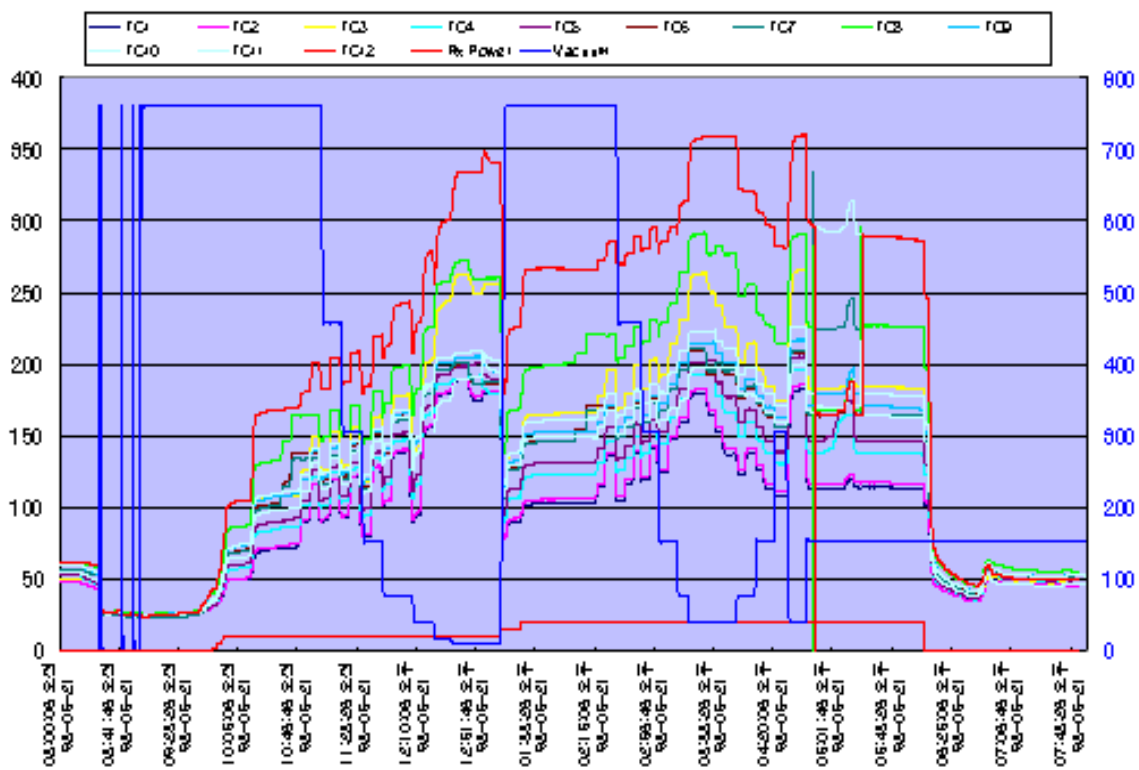


Fig.2 Details of irradiation test of 97M-01K capsule in HANARO CT hole.

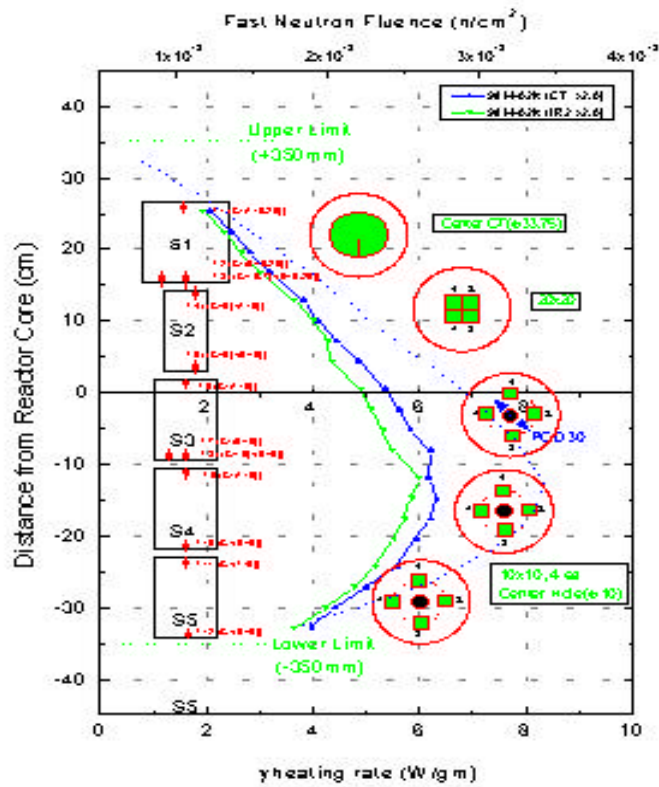


Fig. 3 Schematic view of irradiation capsule for RPV(Reactor Pressure Vessel) materials, (C=center, T=top, B=bottom)

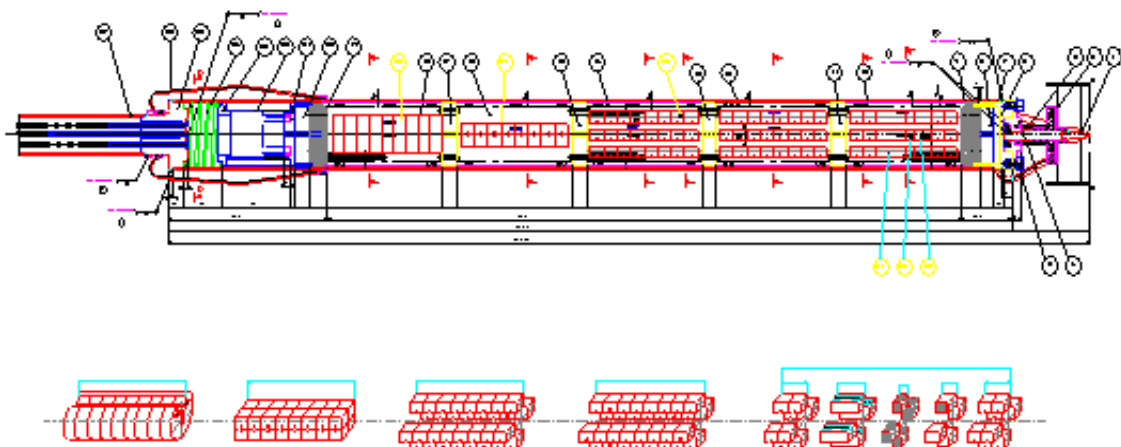


Fig.4 Drawing of HANARO capsule (98M-02K) for the irradiation of RPV material.

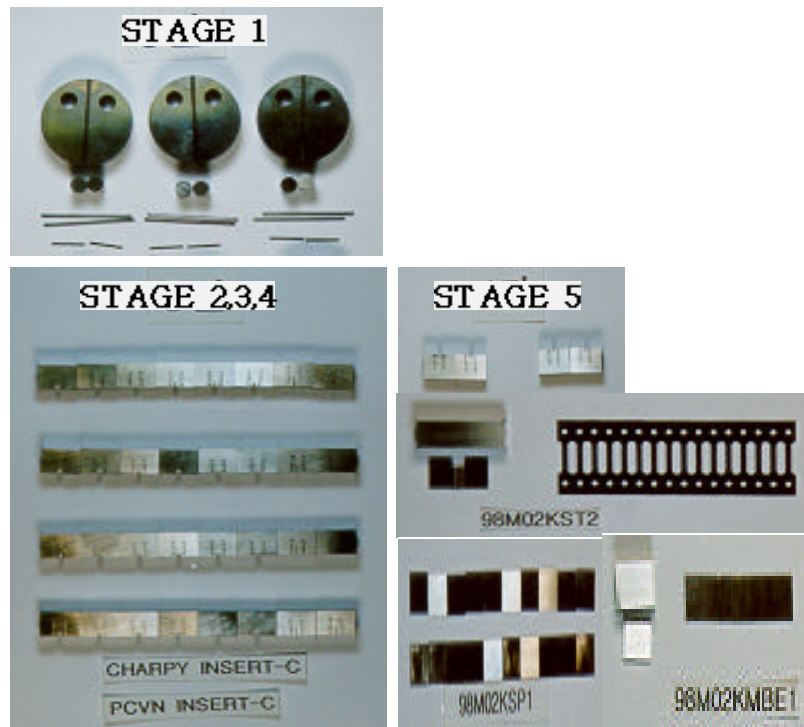


Fig. 5. Photographs of the specimen loaded in the 98M-02K capsule.