

조사시험용 계장캡슐(00M-02K) 조사후시험

Post-Irradiation Examination on the HANARO Capsule(00M-02K) in IMEF

주용선, 주기남, 오완호, 유병옥, 백승제, 홍권표, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구용 원자로인 하나로(HANARO)의 IR2 시험공에서 2001년 5월 2일부터 5월 5일까지(약 72 MWD) 조사한 계장캡슐(00M-02K)을 2001년 6월 4일 조사재시험시설로 이송하여 캡슐절단 및 해체, 중성자 모니터의 핫셀 외부로의 반출 등을 약 1 개월에 걸쳐 수행하였다. 본 캡슐에는 원자로 압력용기의 수명말기에 도달할 것으로 예상하는 중성자량(약 3.4×10^{19} n/cm², E > 1.0 MeV)를 조사시켜 압력용기의 ART(Adjusted Reference Temperature)를 사전에 예측하고, 또한 원자력재료의 연구 및 개발을 위한 충격시편, PCCV(Pre-Cracked Charpy), 소형 인장시편, MBE시편, ABI시편, 1/3 Cv시편, small punch시편 등이 포함되어 있는데, 이들은 다시 총 5개의 구간으로 구분되어 있는 시편홀더의 단면에 0°, 90°, 180°, 270° 간격으로 가공된 홈의 축방향으로 삽입되어 있다. 또한 중성자모니터도 각각의 시편홀더에 90° 간격으로 2 개씩 삽입되어 있다.

캡슐 외통의 절단에는 산화알루미늄 계열의 휠을 사용하였고, 캡슐을 장착한 물림척 회전속도, 휠축의 회전속도 및 이송량은 각각 2.5 rpm, 200 rpm 및 0.15 mm/min이었으며, 캡슐의 상단과 하단부를 절단하는데 소요된 시간은 약 1 시간이었다. 그리고 캡슐에서 인출한 중성자모니터의 방사선량은 중하단인 2 단(캡슐을 수직으로 세웠을 때)의 시편홀더에 삽입한 모니터로써 최대 97 μ Sv/h 이었고, 이는 핵연료다발의 감마스캐닝의 결과와도 유사함을 알 수 있었다.

Abstract

The PIE of capsule cutting, dismantling, specimen classification and neutron monitor carrying out is conducted for the instrumented capsule(00M-02K) which is irradiated at IR2 test hole of HANARO during 3 days with 72 MWD in IMEF(Irradiation Materials Examination Facility) during 1 month. The neutron fluence of this capsule is predicted to 3.4×10^{19} n/cm² (E>1.0 MeV) assumed to the amount of the lifetime of commercial reactor. This capsule consists of 5 specimen holders and contains several kinds of specimens-Charpy specimens, PCCV, small tensile specimens, MBE specimens, ABI specimens, 1/3 size Cv specimens, and small punch specimens-with neutron monitors to research and develop the advanced material

characteristics of reactor material. The capsule is cut with Al_2O_3 cutting wheel and 2.5 rpm of chuck, 200 rpm of wheel and 0.15 mm/min of feed during 1 hour. Also the maximum exposure of neutron monitor is measured $97 \mu\text{Sv/h}$ at second specimen holder from bottom and that is corresponded the gamma scanning results of the HANARO fuel assembly.

1. 서론

원자력연구소의 연구용 원자로인 하나로(HANARO)의 IR2 시험공에서 원자로 압력용기의 수명 말기에 도달할 것으로 예상하는 중성자량(약 $3.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$, $E > 1.0 \text{ MeV}$)를 조사한 계장캡슐(00M-02K)에는 충격시편, PCCV (Pre-Cracked Charpy), 소형 인장시편, MBE시편, ABI시편, 1/3 Cv시편, small punch시편 등의 시편이 총 5개의 구간으로 구분되어 있는 시편홀더의 단면에 0° , 90° , 180° , 270° 간격으로 가공된 홈의 축방향으로 삽입되어 있을 뿐만 아니라 중성자 조사량을 측정하기 위한 중성자모니터가 각 구간별로 2 개씩 삽입되어 있다.

본 계장캡슐에 삽입되어 있는 시편 및 중성자모니터들은 높은 방사능을 지니고 있어 이들에 대한 조사후시험-캡슐 절단, 해체, 시편분류, 중성자모니터 해체-은 반드시 방사선을 차폐할 수 있는 핫셀시설^{1,2)}에서 수행해야 한다.

2. 본론

가. 캡슐의 시설 및 핫셀 반입

중량이 약 10 톤인 하나로 핵연료 운반용 캐스크를 사용하여 조사재시험시설의 인수구역까지 트럭으로 운반하고, 최대 취급중이 30 톤인 고정용 호이스트(fixed hoist)를 사용하여 트럭에 실린 캐스크를 들어 운반용 카트(transfer cart)로 옮긴 후, 구동모터를 작동시켜 서어비스 구역(service area)으로 반입하였다.

그리고 운반용 캐스크에 상부에 부착되어 있는 충격흡수체를 제거한 후 캐스크 뚜껑의 체결용 볼트를 풀고, 캐스크 운반용 치구(pedestal)로 캐스크를 들어 올려 풀로 반입하여 캐스크의 뚜껑을 열고 특수공구를 사용하여 캡슐을 담고 있는 바스켓(basket)을 꺼내 버킷 엘리베이터(bucket elevator)의 바스켓에 옮기고 M1 핫셀로 반입하였다. 핫셀로 반입된 캡슐은 인셀크레인(In-cell crane) 및 원격조작기(master-slave manipulator)를 사용하여 바스켓에서 꺼낸 후 작업대(working table)위에 올려놓았다. 일련의 작업절차 및 내용을 그림 1에 나타내었다.

나. 외관검사

캡슐을 M1 핫셀에 설치된 다목적용 벤치(multi-purpose bench)에 수직으로 거치한 후 벤치를 상하 이송 및 회전시켜 캡슐의 표면, 하단부의 로드 팁(rod tip), 그리고 상부의 절단면을 육안 및 쌍안경으로 관찰하였다. 캡슐 표면에는 원자로 내에서 발생할 수 있는 긁힌 자국 등을 전혀 확인할 수 없었고, 하단부의 로드 팁에도 외부로부터의 충격으로 인한 결함을 확인할 수 없었다. 그러나 상부의 절단면에는 절단 후의 틈새를 육안으로 뚜렷하게 확인할 수 있었으나, 원자로 및 조사재시험시설의 풀물 등이 스며들었는지 여부는 확인할 수 없었다.

나. 캡슐의 절단

캡슐의 절단 및 해체를 해체 셀인 M2 핫셀에서 수행하였다. 캡슐 외통의 단면 형태 및 재질은 원형 파이프 및 스테인레스 강이며, 캡슐의 상부 및 하단부에 표시되어 있는 절단 지점을 캡슐 절단기³⁾를 사용하여 절단하였다. 사용한 절단휠의 재질은 산화알루미늄 계열이고, 캡슐을 장착한 물림척은 2.5 rpm으로 회전시켰으며, 휠축의 회전속도 및 이송량은 200 rpm 및 0.15 mm/min이었

고, 캡슐의 상단과 하단부를 절단하는데 약 1 시간 소요되었다.

다. 해체 및 시편분류

캡슐 외통의 하단 및 상하단을 절단 후 외통내부에 열전대(thermo-couple)와 히터선(heater line)으로 단단하게 결합되어 삽입된 시편홀더와 단열재를 분리하기 위해 캡슐절단기에 다시 장착한 후 열전대 및 히터선을 캡슐 상부로부터 절단하였다. 열전대 및 히터용 선을 홀더 및 단열재에 고착시키는 코킹작업이 불완전하여 구성품의 강성(stiffness)이 작아져서 해체하는데 기존의 계장 캡슐보다 작업성이 약간 저하되었다. 왜냐하면 캡슐 외통에서 분리된 내장물을 그림 2와 같이 캡슐절단기의 물림척에 물린 후 홀더 및 단열재에 각각 코킹되어 있는 열전대 및 히터용 선을 휠로 절단하기 위해서 물림척을 회전시켰을 때 편심되게 회전함으로 인해 절단휠에 커다란 하중이 가해졌기 때문이다. 절단 후 홀더 및 단열재를 원격조작기로 취급하여 캡슐내의 위치별로 표시된 베스에 담았는데, 해체된 각각의 홀더 및 단열재에는 캡슐내에서의 위치를 확인할 수 있는 어떠한 표시도 각인된 것을 확인할 수 없었다. 그래서 이들의 캡슐내의 위치를 정확하게 유지하기 위해서 캡슐 상부로부터 꺼내어지는 순서대로 제작도면과의 일치여부를 확인하는 절차를 수행했으며, 캡슐 해체작업에 대한 작업순서별 상세한 내용은 다음과 같다.

1) 단열재(최상단, 5단)

재질은 Al_2O_3 이고, 제원은 $\phi 55.8 \times 10$ mm이다. 이를 구성품으로부터 해체하기 위해서 시편홀더 "E"(최상단, 5단) 열전대 및 히터용 선으로 함께 코킹되어 있는 부분을 캡슐절단기의 척을 회전시켜 절단하였다. 본 부품에는 자료생산에 필요한 시편 및 중성자 모니터를 지니고 있지 않았지만, 차후에 중성자 조사영향을 평가하기 위해 폐기물로 처리하지 않고 베스에 담아 보관하였다.

2) 시편홀더(최상단, 5 단)

캡슐의 최상단부 위치하고 있는 홀더로써 재질은 A1050이며 제원은 $\phi 55.88 \times 114$ mm이다. 본 부품에는 열전대 및 히터용 선이 각각 13 개, 10 개씩 홀더의 외부에 가공된 홈에 삽입되어 있으며, 또한 홀더의 내부에는 PCVN 시험시편 8개와 시편홀더의 윗면(캡슐의 상부방향)에 $\phi 3.0$ 및 $\phi 4.3$ 의 구멍을 가공한 자리에 각각 1 개씩의 중성자 모니터가 삽입되어 있다. 이를 구성품으로부터 해체하기 위해서 단열재(중상단, 4 단)와 코킹된 열전대 및 히터용 선을 캡슐절단기의 척을 회전시켜 절단하였다. 그리고 시편홀더 내부에 4 개 방향(0° , 90° , 180° , 270°)으로 삽입한 시편들은 시편홀더의 양쪽에 삽입한 두께 2 mm의 철판(spacer)을 우선적으로 가공한 홈에서 이탈시킨 후 연이어 제원이 $10 \times 10 \times 55$ mm인 PCVN 시험시편 8 개를 매우 쉽게 해체하였다. 또한 중성자 모니터도 시편홀더에 약간의 충격 및 진동을 가해 쉽게 해체하였다. 해체 완료후 시편홀더내의 가공된 홈에 시험시편의 잔존여부를 확인하고, 시험시편들을 베스-E에 담았다.

3) 단열재(중상단, 4 단)

재질은 Al_2O_3 이고, 제원은 $\phi 55.8 \times 10$ mm이다. 작업내용은 최상단(5단)과 동일하게 수행하였다.

4) 시편홀더(중상단, 4 단)

캡슐의 최하단부로부터 상부쪽으로 4번째에 위치하고 있는 홀더로써 재질은 A1050이며 제원은 $\phi 55.8 \times 114$ mm이다. 본 부품에는 열전대 및 히터선이 각각 10 개, 8 개씩 홀더의 외부에 가공된 홈에 삽입되어 있었으며, 홀더의 내부에는 제원이 $10 \times 10 \times 55$ mm인 충격시험용 시험시편 8개가 삽입되어 되어 있고, 또한 시편홀더의 윗면(캡슐의 상부방향)에 $\phi 3.0$ 및 $\phi 4.3$ 의 구멍을 가공한 자리에 각각 1개씩의 중성자 모니터가 삽입되어 있다. 그리고 시편홀더 내부에 4 개 방향(0° , 90° , 180° , 270°)으로 삽입한 시편들은 시편홀더의 양쪽에 삽입한 두께 2 mm의 철판(spacer)을 우선적으로 가공한 홈에서 이탈시킨 후 연이어 제원이 $10 \times 10 \times 55$ mm인 충격시험용 시험시편 8개

를 매우 쉽게 해체하였다. 또한 중성자 모니터도 시편홀더에 약간의 충격 및 진동을 가해 쉽게 해체하였다. 해체 완료후 시편홀더내의 가공된 홈에 시험시편의 잔존여부를 확인하고, 시험시편들을 베스-D에 담았다.

5) 단열재(중단, 3 단)

재질은 Al_2O_3 이고, 제원은 $\phi 55.8 \times 10$ mm이다. 작업내용은 최상단(5단)과 동일하게 수행하였다.

6) 시편홀더(중단, 3 단)

캡슐의 최하단부로부터 상부쪽으로 3번째에 위치하고 있는 홀더로써 재질은 A1050이며 제원은 $\phi 55.8 \times 114$ mm이다. 본 부품에는 열전대 및 히터용 선이 각각 7 개, 6 개씩 홀더의 외부에 가공된 홈에 삽입되어 있었으며, 또한 홀더의 내부에는 ABI시편 블록 4 개, small punch시편 블록 14 개, 소형인장시편 블록 3 개 등 삽입되어 있으며, 또한 시편홀더의 윗면(캡슐의 상부방향)에 $\phi 3.0$ 및 $\phi 4.3$ 의 구멍을 가공한 자리에 각각 1개씩의 중성자 모니터가 삽입되어 있다. 그리고 시편홀더 내부에 4 개 방향(0° , 90° , 180° , 270°)으로 삽입한 시편들은 시편홀더의 양쪽에 삽입한 두께 2 mm의 철판(spacer)을 우선적으로 가공한 홈에서 이탈시킨 후 연이어 ABI시편 블록 4 개, small punch시편 블록 14 개, 소형인장시편 블록 3 개 등을 매우 쉽게 해체하였다. 또한 중성자 모니터도 시편홀더에 약간의 충격 및 진동을 가해 쉽게 해체하였다. 해체 완료후 시편홀더내의 가공된 홈에 시험시편의 잔존여부를 확인하고, 시험시편들을 베스-C에 담았다.

7) 단열재(중하단, 2 단)

재질은 Al_2O_3 이고, 제원은 $\phi 55.8 \times 10$ mm이다. 작업내용은 최상단(5단)과 동일하게 수행하였다.

8) 시편홀더(중하단, 2 단)

캡슐의 최하단부로부터 상부쪽으로 2번째에 위치하고 있는 홀더로써 재질은 A1050이며 제원은 $\phi 55.8 \times 114$ mm이다. 본 부품에는 열전대 및 히터용 선이 각각 4개씩 홀더의 외부에 가공된 홈에 삽입되어 있었으며, 또한 홀더의 내부에는 제원이 $10 \times 10 \times 55$ mm인 충격시험시편 4 개와 1/3 Cv시험시편 108 개가 삽입되어 있고, 또한 시편홀더의 윗면(캡슐의 상부방향)에 $\phi 3.0$ 및 $\phi 4.3$ 의 구멍을 가공한 자리에 각각 1 개씩의 중성자 모니터가 삽입되어 있다. 그리고 시편홀더 내부에 4 개 방향(0° , 90° , 180° , 270°)으로 삽입한 시편들은 시편홀더의 양쪽에 삽입한 두께 2 mm의 철판(spacer)을 우선적으로 가공한 홈에서 이탈시킨 후 연이어 제원이 $10 \times 10 \times 55$ mm인 충격시험시편 4 개와 1/3 Cv시험시편 108 개를 별도의 작업을 수행하지 않고 쉽게 해체하였다. 또한 중성자 모니터도 시편홀더에 약간의 충격 및 진동을 가해 쉽게 해체하였다. 해체 완료후 시편홀더내의 가공된 홈에 시험시편의 잔존여부를 확인하고, 시험시편들을 베스-B에 담았다.

9) 단열재(하단, 1 단)

재질은 Al_2O_3 이고, 제원은 $\phi 55.8 \times 10$ mm이다. 작업내용은 최상단(5단)과 동일하게 수행하였다.

10) 시편홀더(최하단, 1 단)

캡슐의 최하단부에 위치하고 있는 홀더로써 재질은 A1050이며 제원은 $\phi 55.8 \times 114$ mm이다. 본 부품에는 열전대 및 히터용 선이 각각 2 개씩 홀더의 외부에 가공된 홈에 삽입되어 있다. 홀더 내부에는 PCVN 시험시편이 총 8 개가 삽입되어 있으며, 또한 시편홀더의 윗면(캡슐의 상부방향)에 $\phi 3.0$ 및 $\phi 4.3$ 의 구멍을 가공한 자리에 각각 1 개씩의 중성자 모니터가 삽입되어 있다. 그리고 시편홀더 내부에 4 개 방향(0° , 90° , 180° , 270°)으로 삽입한 시편들은 시편홀더의 양쪽에 삽입한 두께 2 mm의 철판(spacer)을 우선적으로 가공한 홈에서 이탈시킨 후 PCVN 시편 2

개씩 총 8 개의 시편들을 매우 쉽게 해체하였다. 또한 중성자 모니터도 시편홀더에 약간의 충격 및 진동을 가해 쉽게 해체하였다. 해체 완료후 시편홀더내의 가공된 홈에 시험시편의 잔존여부를 확인하고, 시험시편들을 베스-A에 담았다.

라. 중성자 모니터 절단, 해체 및 시편분류

본 캡슐에는 모두 3 종류의 중성자 모니터가 삽입되어 있었다. 이 중에서 2 종류는 캡슐의 중성자 조사량을 평가하기 위한 것이고, 나머지 1 종류는 시편의 중성자 조사량을 평가하기 위한 것이다. 그래서 상호간의 중성자모니터에 대한 고유 특성 유지 및 섞임을 방지하기 위해서 다음과 같이 분류하여 실험을 수행하였다.

1) 캡슐용 중성자 모니터

캡슐용 중성자 모니터 중에서 제원이 $\phi 2.5 \times 20$ mm인 것은 한쪽 끝단을 니퍼(nipper)로 절단한 후, 변형된 끝단을 다시 롱노우즈(long nose)로 원형에 근사하도록 복원시키고, 그리고 흔들어 원통내부에 삽입한 직경이 약 $\phi 0.5$ 인 중성자 모니터를 해체하였다. 해체한 중성자 모니터는 캡슐 위치에 대한 정보를 정확하게 유지하기 위해서 별도로 준비한 바이알(vial)에 담아 분류하였다. 반면에 제원이 $\phi 3.8 \times 17.7$ mm인 것은 한쪽 끝단을 니퍼(nipper)로 절단한 후, 변형된 끝단을 다시 롱노우즈(long nose)로 원형에 근사하도록 복원 또는 원통을 찢어 원통에 삽입한 알루미늄 봉을 2 개 꺼내고 나서 크리스탈(crystal) 중성자 모니터를 해체 및 분류하였다. 이것 역시 캡슐 위치에 대한 정보를 정확하게 유지하기 위해서 별도로 준비한 바이알(vial)에 담아 분류하였다. 작업자가 중성자 모니터 1 개를 해체하는데 약 15분 소요되었다. 각각의 중성자 모니터별 방사선량 및 운반용 용기의 표면에서의 방사선량을 측정하였고, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

2) 시편용 중성자 모니터

시편에 장착한 문을 치구로 연 후, 시편을 원격조작기로 잡고 원격조작기의 손잡이에 약간의 충격을 가해 시편에 진동을 가하면서 중성자 모니터를 해체하려고 하였으나, 가공한 구멍에 고착하여 쉽게 해체가 이루어지지 않았다. 그래서 가공한 구멍속에 날카로운 송곳을 삽입하여 고착되어 있는 중성자 모니터를 움직이도록 한 후 시편에 진동을 가한 후 중성자모니터를 해체하였다. 그리고 이를 별도로 준비한 바이알에 분류 저장하였으며, 핀셋을 사용하여 각각의 바이알(vial)에 담겨져 있던 중성자 모니터를 꺼내 소형의 플라스틱 용기에 옮겨 담은 후 각각의 중성자 모니터별 방사선량 및 운반용 용기의 표면에서의 방사선량을 측정하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

바. 개발 및 개조된 시험장비

시편용 중성자모니터를 시편에서 해체하기 위해서 시편에 장착되어 있는 셔터(shutter)를 원격으로 제거하는 치구를 제작하였다.

3. 결론 및 건의사항

캡슐의 조사후시험 중 각종 시편들에 대한 시험을 제외한 캡슐의 외관검사, 절단 및 해체, 그리고 중성자 모니터의 핫셀외부로의 반출 등이 성공적으로 수행하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 캡슐 외통의 절단에는 산화알루미늄 계열의 휠을 사용하였고, 캡슐을 장착한 물림척 회전속도, 휠축의 회전속도 및 이송량은 각각 2.5 rpm, 200 rpm 및 0.15 mm/min이었으며, 캡슐의 상단과 하단부를 절단하는데 소요된 시간은 약 1 시간이었다.
- 2) 캡슐에서 인출한 중성자모니터의 방사선량은 중하단인 2 단(캡슐을 수직으로 세웠을 때)의 시편홀더에 삽입한 모니터로서 최대 97 $\mu\text{Sv/h}$ 이었고, 이는 핵연료다발의 감마스캐닝의 결과와도 유사함을 알 수 있었다.

3) 특히 기존의 캡슐보다 시편홀더, 각종 시편 및 중성자모니터 조립이 매우 양호하게 이루어져 많은 시간과 인력을 투입하지 않고 쉽게 수행되었다.

그러나 캡슐의 중성자조사 평가에 사용할 중성자모니터의 크기 및 내용물은 핫셀 작업의 특성에 알맞게 개선되어야 할 것으로 판단되며, 이러한 내용은 차기 계장캡슐의 설계 및 제작에 반영하여 효율적이고도 경제적인 조사후시험을 수행하는데 많은 도움이 될 것이다.

4. 참고문헌

1. 박대규 외, “핫셀설계기술”, KAERI/AR-468/97, 한국원자력연구소, 1997.
2. 노성기 외, “조사재시험시설건설”, KAERI/RR-880/89, 과학기술처, 1989.
3. 주용선 외, “연구로원자로에서 조사된 캡슐 및 핵연료다발 해체장비 기술개발”, KAERI/TR-1078/99, 한국원자력연구소, 1999.

표 1. 캡슐용 중성자 모니터 방사선량을 측정결과

시편홀더 번호	시편고유번호	수량 (개)	방사선량을 (μ Sv/h)	비고 (Vial 번호)
10	44-1A	1	8.6	S1
	44-1B	1	93	T1
12	44-2A	1	9.6	S2
	44-2B	1	97	T2
14	44-3A	1	1.5	S3
	44-3B	1	67	T3
16	44-4A	1	2.5	S4
	44-4B	1	45	T4
18	44-5A	1	2.8	S5
	44-5B	1	1.5	T5

표 2. 시편용 중성자 모니터 방사선량을 측정결과

캡슐내 시편홀더 번호	중성자 모니터 고유번호	수량 (개)	방사선량을 (μ Sv/h)	비고 (Vial 번호)
14	8R	1	265	8R
14	RY	1	260	RT
16	8L	1	210	8L
18	EA	1	137	EA
10	ZT	1	126	ZT
소 계			755	

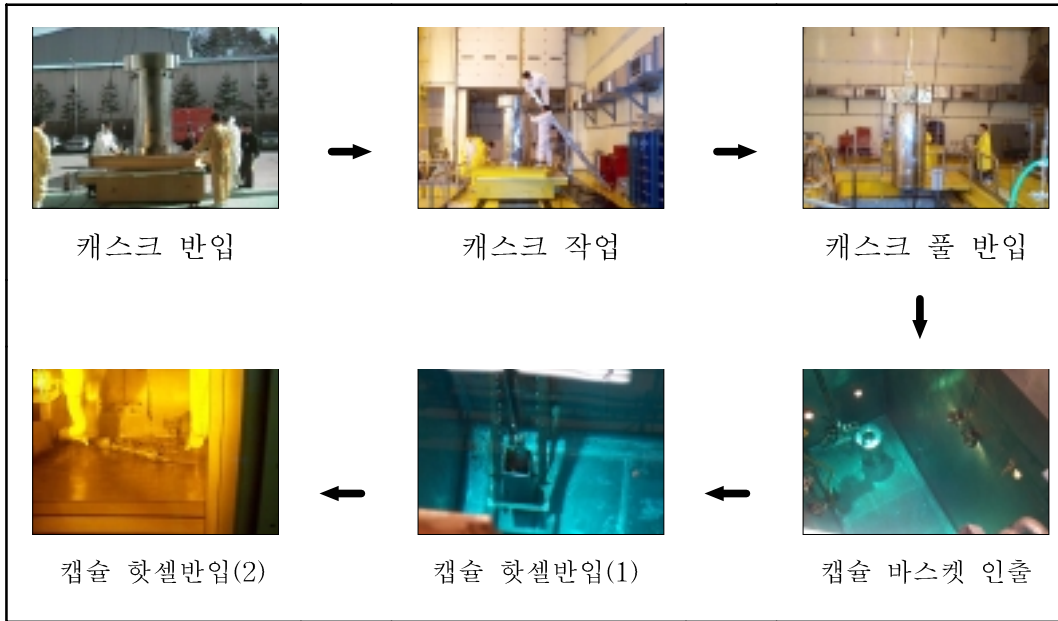


그림 1. 조사시험용 계장캡슐(00M-02K)의 시설 및 핫셀내 반입 작업.



그림 2. 조사용 계장캡슐(00M-02K) 절단 및 시편분류 작업사진.

그림 3. 시편용 중성자모니터 해체용 치구 및 중성자모니터 해체 및 분류작업.