2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료조사시험용 계장캡슐(02F-11K) 설계검증 시험을 위한 안전성 평가

Safety Evaluation for Design Verification Test of Instrumented Capsule(02F-11K) for Nuclear Fuel Irradiation in HANARO

김봉구*, 손재민, 김도식, 오종명, 신윤택, 서철교, 류정수, 강영환, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

조사시험 중 핵연료 온도를 측정할 수 있는 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 설계/제작하였고, 핵적, 구조건전성 및 열적 해석을 통하여 구조적 건전성을 확인하였다. 그리고, 노외시험 및 안전성 평가를 수행하여 설계검증시험기간 동안 핵연료용 계장캡슐의 건전성과 조사공과의 양립성을 확인하였다. 또한, 하나로에서 핵연료용 계장캡슐에 대한 안전성 분석을 수행하여 검증시험 기간동안 핵연료의 건전성은 유지되는 것을 확인하였다. 이에 따라 현재 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 설계검증시험을 하나로 OR5 조사공에서 수행하면서 핵연료의 중심온도와 조사량이 측정되고 있다. 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험 후에는 IMEF hot cell에서 조사후시험을 수행할 예정이다.

Abstract

An instrumented capsule for irradiating the nuclear fuel in HANARO was designed and manufactured. The instrumented capsule was developed to be able to measure the fuel temperature during the irradiation test. The capsule for the fuel irradiation in HANARO was designed and tested at the out-of-pile thermal-hydraulic loop facility and its safety evaluation was performed, showing that all the safety requirements were satisfied. It is expected that the capsule can be irradiated safely in OR5 test hole of HANARO. To verify the in-pile performance of the instrumented capsule for nuclear fuel irradiation developed, the instrumented capsule is being irradiated in OR5 test hole of HANARO research reactor for about 2.5 month. After the irradiation in HANARO, the capsule and UO_2 fuel will be examined at the hot cell.

1. 서 론

하나로 가동과 함께 핵연료 개발을 위한 조사시험 계획이 수립되었으며, 이에 따라 핵연료 조사시험을 위한 무계장캡슐 개발되어 활용되고 있으며, 계장캡슐과 계장기술을 개발하여 왔다. 현재까지 핵연료용 무계장캡슐을 이용하여 핵비확산성건식공정산화물핵연료(DUPIC)와 연구로용 핵연료 개발을 위한 조사시험을 4회, HIMET 핵연료 개발을 위한 조사시험을 1회 수행하였으며, 현재에도 연구로용 핵연료, HIMET 핵연료 및 신형핵연료 등의 조사시험이 수행되고 있다.

핵연료 개발을 위해서 조사시험중 핵연료 특성변화(핵연료 온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 변형 등)을 측정하는 것은 매우 중요하다. 그러나, 핵연료용 무계장캡슐을 이용한 핵연료 조사시험 중에는 핵연료 특성 변화를 측정할 수 없다. 이에 따라, 핵연료 조사시험중 핵연료 특성을 할 수 있는 핵연료 조사시험용 계장캡슐(이하 "핵연료용 계장캡슐"이라함)과 계장기술 개발이 진행되어 왔다[1]. 그 결과 조사시험중 핵연료 온도를 측정할 수 있도록 핵연료봉과 계장캡슐이 개발되었다. 그리고, 핵연료용 계장캡슐에 대한 핵적, 기계적 해석으로 하나로 조사공 내에서의 구조적 안전성을 확인하였으며, 노외시험(압력강하, 진동 및 내구성시험)으로 기계적 및 수력적 안정성도 확인하여 하나로 OR 조사공에서 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험이 진행되고 있다. 또한, 2001년 말에 핵연료 노내조사시험설비(FTL)의 기술적 검토가 완료되었으며, 2006년 설치를 목표로 3-pin 핵연료 노내조사시험설비 구축 및 이용기술 개발연구가 수행되고 있다.

2. 본 론

2.1 핵연료 조사시험용 계장캡슐 검증시험 목적

본 검증시험 목적은 개발된 핵연료용 계장캡슐의 설계검증에 있다. 이를 위해 현재 하나로 OR5 조사공에서 5월 말까지를 예정으로 조사시험을 수행하면서 핵연료의 중심온도와 중성자 조사량을 측정하고 있다. 조사시험 후에는 IMEF hot cell에서 핵연료용 계장캡슐을 해체하여 구조적 건전성을 확인하고, 핵연료에 대한 조사후시험을 통해 설계검증시험기간 동안 측정한 핵연료 온도를 비교 검토할 예정이다.

2.2 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계/제조 및 노외시험

가. 핵연료용 계장캡슐 설계

핵연료 조사시험 요구조건과 하나로 OR 조사공과의 양립성을 고려하고, 하나로 가동 및 주변 설비와의 간섭이 일어나지 않도록 부가되는 요구사항[2,3]에 적합하도록 핵연료용 계장캡슐을 그림 1과 같이 설계하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 핵연료용 계장캡슐은 하단 고정부(bottom guide assembly, rod tip과 bottom end plate로 구성됨), 외통, 보호관 및 안내관의 4부분으로 구성되어 있다. 그리고, 캡슐 상부를 조사공 내에 안정적으로 지지·고정하기 위하여 보호관

부에 상·하부 스토퍼를 설치하였다. 이 스토퍼들은 핵연료 조사시험 중 캡슐을 고정하는 기능을 하며, 상부 스토퍼(upper stopper)는 OR clamp에 의해 고정되고, 하부 스토퍼(lower stopper)는 OR 조사공의 반사체 상부에 접촉하여 고정되게 된다.

핵연료 계장캡슐의 본체 외통, 보호관, 핵연료봉 어셈블리 및 상·하 end plate 등의 각 부분 치수들은 강제순환식 냉각수 흐름이 존재하는 하나로 OR 조사공에서의 수력조건(유량 12.7kg/s 이하, 압력강하 200kPa 이상)을 만족하도록 결정하였다. 또한, 상·하 엔드 플레이트(end plate)와 핵연료 어셈블리의 설계는 냉각수의 원활한 흐름을 위한 유로(그림 1의 Section 참조)를 확보하도록 하였다. 그리고, 핵연료용 계장캡슐 설계를 대상으로 좌굴 안전성 평가와 노심에서의 장·탈착 또는 조사시험 중에 발생할 수 있는 충격하중에 대한 구조 건전성 해석을 수행하였다. 또한, 핵연료용 계장캡슐에 장착되는 핵연료봉의 안전성을 온도 및 열응력 해석으로 검토하였다. 이들의 해석으로 핵연료용 계장캡슐의 조사시험 중 안전성을 확인하였고, 하나로 OR 조사공에 장·탈착 시는 물론 조사시험동안의 구조 건전성 평가 기준이 만족됨을 확인하였다[4,5].

나. 시험 핵연료봉 집합체 설계

시험 핵연료봉 집합체에는 그림 2와 같이 조사중 핵연료 온도측정용 열전대가 설치된 3개의 시험핵연료봉과 중성자속 측정용 SPND (self-powered neutron detector)가 각각 3 sets가 설치되도록 하였다. 시험핵연료봉과 SPND는 알루미늄 재질의 cooling block과 함께 조립된다. Cooling block는 냉각수의 유속을 증가시켜 시험핵연료봉의 냉각을 촉진시키는 역할을 한다.

다. 시험 핵연료봉 설계

핵연료 조사시험용 계장캡슐의 설계검증시험을 위한 시험용 핵연료봉의 설계는 그림 3과 같다. 3개의 시험핵연료봉이 계장캡슐에 장착되며, 시험 핵연료봉의 주요 제원은 다음과 같다.

- 시험핵연료봉 전체 길이 : 250 mm
- 피복관 외경 및 두께 : 9.50 mm, 0.57mm
- U-235 농축도 : 2.42w/o(한전원자력연료(주) 제조)
- UO_2 소결체(경수로용 17×17형) 편균 외경/길이 : 8.19mm, 10.2mm
- UO_2 소결체 밀도/결정립 크기 : 10.498g/cm^3(95.8%TD), 9.35μm
- 피복관/소결체 간격(직경기준) : 167μm
- 시험핵연료봉 내부가스 및 압력 : He 기체, 1.2기압

라. 노외 검증시험

핵연료조용 계장캡슐의 성능을 확인하기 위해 노외에서 다음과 같은 노외검증시험을 수행하였다.

(1) 압력강하측정[6]

유량을 변화시키면서 캡슐 전체 압력강하량을 측정하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 실험결과 200kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 약 9.2 kg/s로 측정되었다. 이는 하나로 제한조경인 12.7 kg/s이하를 만족하였다.

(2) 진동측정[7]

핵연료용 계장캡슐에 대한 수중 진동시험을 수행하였으며, 계측 진동신호에 대한 분석결과는 다음과 같다. 그림 5와 같이 가속도 최대진폭은 A3위치에서 12.04m/s^2로 나타났으며, 가속도 최대진폭은 원자로구조물의 진동 허용치(18.99m/s^2)보다 작음을 확인하였으며, 핵연료용 계장캡슐에 발생하는 변위의 최대진폭은 0.166mm로 나타났으며, 가속도 및 변위의 최대진폭은 매우 작아 하나로에서의 조사시험시에도 구조적 건전성이 유지되고 인접 구조물과의 간섭이 발생되지 않을 것임이 확인되었다.

(3) 내구성시험[8]

핵연료용 계장캡슐에 대한 내구성시험 조건은 다음과 같다.

- 유량조건 : 하나로의 OR실험공 유량의 110%조건(10.12 kg/s)
- 전체압력강하 : 247 MPa
- 내구성시험기간 : 127 hrs

내구성시험 전후에 모의 계장캡슐 부품에 대한 육안검사를 실시하였으며, 육안검사 결과, 캡슐 외부부품에서 특이한 마모는 발견되지 않았다. 다만, 캡슐 하단부 rod tip의 receptacle과 접촉되는 부위에서 접촉에 의한 흔적이 발견되었다. 이 부분에 대한 표면조도 측정결과에 의하면, 접촉부위의 폭은 0.26mm이고, 깊이는 42.5μm이었다. 이러한 결과는 진동에 의한 것보다는 OR clamp로 상부 스토퍼를 누름에 의한 것으로 추정되며, 계장캡슐의 내구성은 우수한 것으로 나타났다.

마. 핵연료용 계장캡슐 제조

핵연료용 계장캡슐 및 시험 핵연료봉이 품질보증 문서에 규정된 시험항목에 대한 검사를 실시하여 각 시험항목에 대한 품질기준을 만족하도록 그림 6, 7과 같이 제작되었다.

2.3 하나로내 설계검증 시험 안전성 평가

가. 선출력

핵연료의 농축도가 2.42 w/o로 최종 결정됨에 따라 설계검증 시험을 위한 조사공인 OR5에 핵연료용 계장캡슐이 장전될 때의 핵연료 선출력을 평가하였다. 예상되는 운전 노심 조건에서의 운전 중 예상되는 모든 제어봉 위치에 대해 핵연료 선출력을 평가하여 안전성 평가를 위한 최대 선출력을 도출하였다.

나. 반응도 효과

OR5 조사공에 캡슐이 장전됨으로써 삽입되는 반응도 변화량을 MCNP를 이용하여 분석한 결과 12.5 mk 이하임을 확인하였다. 즉. 분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 캡슐 장전에 따른 반응도값 : -1.29 mk
- 캡슐 파손시의 반응도값 : -0.05 mk

다. 핵연료용 계장캡슐의 안전성 분석

하나로에서 수행될 캡슐의 조사시험중 시험 핵연료의 건전성 및 노심 안전성 영향 평가는 다음과 같은 사항을 검토하여 수행되었다.

(1) 정상 운전

정상 운전 시 조사 핵연료의 중심 최고 온도는 2169℃로써 UO_2 핵연료의 용융온도(2849℃)[9] 보다 낮고 표면 온도(105℃)도 포화 온도(125℃) 이하로 유지되므로 운전 중 핵연료 표면에서 기포 발생 염려는 없다.

(2) 반응도 사고

하나로 조건 I & II에서 가장 심각한 사고로 간주되는 제어봉 인출 사고시 MARS에 의한 핵연료 소결체의 최대온도 및 MDNBR 변화가 그림 8에 도시되어 있다. 이 사고에서는 냉각 조건은 정상으로 유지되고 노심 출력은 사고 3.77초 후 최대 129.3% FP까지 증가한다. 그러나, 핵연료의 비열이 크기 때문에 핵연료 중심 최고온도와 MDNBR은 노심 최대출력 시점 보다 0.5~1.3초 느리게 나타난다. 핵연료 중심 최고온도는 2378℃로써 용융 온도보다 낮고 MDNBR도 10.67로 계산의 불확실도를 고려하더라도 충분한 여유가 있는 것으로 판단된다.

(3) 펌프 고착 사고

핵연료 온도 측면에서 볼 때, 하나로 원자로 조건 III & IV에서 가장 심각한 사고인 펌프 고착 사고시 핵연료 온도 변화가 그림 9에 도시되어 있다. 사고후 원자로 정지 신호에 따라 노심 출력이 감소하지만 노심 출력이 높은 사고 후 2초 이내에 유량이 최저 63%FF까지 감소하는 사고이다. 사고 동안 핵연료 중심 최고 온도는 2170℃로써 용융 온도 MDNBR도 8.62로 핵연료 건전성은 유지될 것으로 생각된다.

(4) 기타 사고

현재 수행 중이 무계장캡슐 조사시험과 비교하여 시험 조건이 같으며, 출력은 더 낮기 때문에 무계장캡슐 조사시험의 안전성 검토 결과[10]에서와 같이 다른 사고에 대해서도 본 시험은 하나로의 안전성에 영향을 주지 않는다.

라. 안전성 검토

앞에서 기술한 계산 결과로 보아 조사시험 동안 시험 핵연료의 건전성은 충분히 유지될 것으로 판단된다. 특히 핵연료에 열전대를 장치하여 연속으로 온도 측정이 가능하므로 안전성 분석이 이루어진 최대 선출력 이하로 조사시험이 이루어지는지 감시할 수 있다.

2.4 온도 측정 및 조사량 측정

현재 하나로 OR5 조사공에서 5월 말까지를 예정으로 조사시험을 수행하면서 핵연료의 중심온도와 중성자 조사량을 측정하고 있으며, 그림 10과 같이 핵연료 중심온도와 조사량이 측정되고 있다. 조사시험 후에는 IMEF hot cell에서 핵연료용 계장캡슐을 해체하여 구조적 건전성을 확인하고, 핵연료에 대한 조사후시험을 통해 설계검증시험기간 동안 측정한 자료를 비교 검토할 예정이다.

3. 결론

핵연료 조사시험중 핵연료 특성을 할 수 있는 핵연료용 계장캡슐과 계장기술이 개발되었으며, 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험이 진행되고 있다. 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험을 수행하기 까지의 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 조사시험중 핵연료 온도를 측정할 수 있도록 시험핵연료봉과 계장캡슐을 설계하고, 품질기준을 만족하도록 제작하였다.

(2) 계장캡슐에 대한 핵적, 기계적 해석으로 하나로 조사공 내에서의 구조적 안전성이 확인되었고, 계장캡슐을 이용한 노외시험(압력강하, 진동 및 내구성시험)으로 기계적 및 수력적 안정성이 확인되었다. 그리고, 하나로에서 핵연료용 계장캡슐에 대한 안전성 분석으로 조사시험 동안 시험 핵연료의 건전성이 유지될 것으로 판단되었다.

(3) 현재 하나로 OR5 조사공에서 핵연료용 계장캡슐에 대한 설계검증을 위한 조사시험이 수행되고 있으며, 핵연료 중심온도와 조사량을 측정하고 있다. 핵연료용 계장캡슐의 설계검증이 완료되면 향후 핵연료용 계장캡슐을 핵연료 개발을 위한 조사시험에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행된 연구결과이고, 본 연구를 위해 UO_2 소결체가 한전원자력연료(주)로부터 지원되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김봉구, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 개발, 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2002
2. 김봉구, 김도식, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 예비설계 요건서, HAN-IC-DD-DR-01-001, 2002. 11. 30.
3. 김봉구, 김도식, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계요건서,

HAN-IC-DD-DR-02-001, 2002. 7. 5.
4. 김도식 외, 핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐에 대한 구조건전성 해석, KAERI/TR-2178/2002, 한국원자력연구소, 2002.
5. 김도식 외, 핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐에 대한 열적거동 예비해석, KAERI/TR-2402/2003, 한국원자력연구소, 2003.
6. 조만순, 핵연료계장캡슐의 유량-차압 측정 실험, 내부통신문, HAN-IC-CR-02-021, 2002. 12. 6.
7. 류정수 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 진동시험보고서, KAERI/TR-2386/2003, 한국원자력연구소, 2003.
8. 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장 설계/제작, KAERI/TR-2408/2003, 한국원자력연구소, 2003.
9. J.Weisman, Elemets of Nuclear Reactor Design, Elsevier Scientific Pub. Co., 1977.
10. 박 철, 신형 핵연료 소결체의 하나로 노내조사시험 안전성 검토, HAN-RR-CR-01-081, 내부통신문, 2001. 11. 19.
11. 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-11K) 설계검증 시험 및 안전성 분석, KARERI/TR-2415/2003, 한국원자력연구소, 2003.

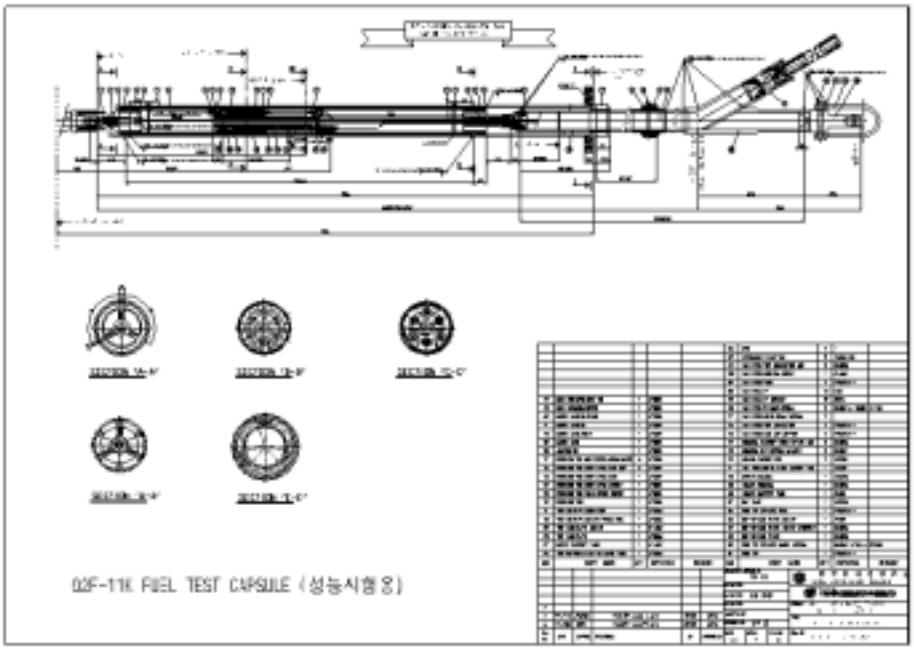
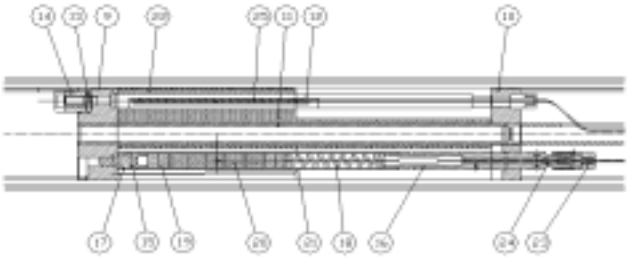


그림 1. 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계도면



24 : 열전대, 25 : SPND

그림 2. 조사시험용 핵연료봉 집합체 설계도

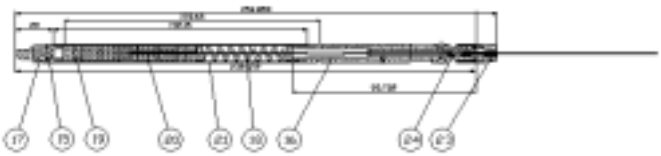


그림 3. 조사시험용 핵연료봉 설계도

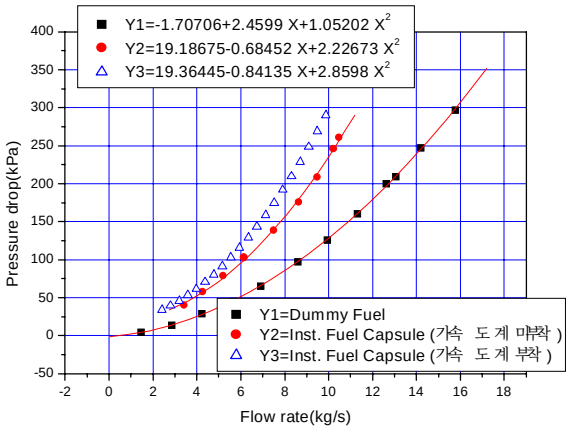
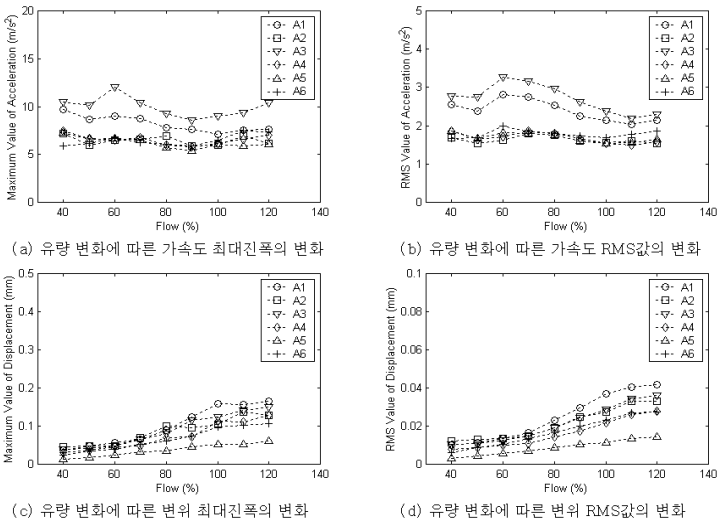


그림 4. 핵연료계장캡슐의 차압비교(OR공)



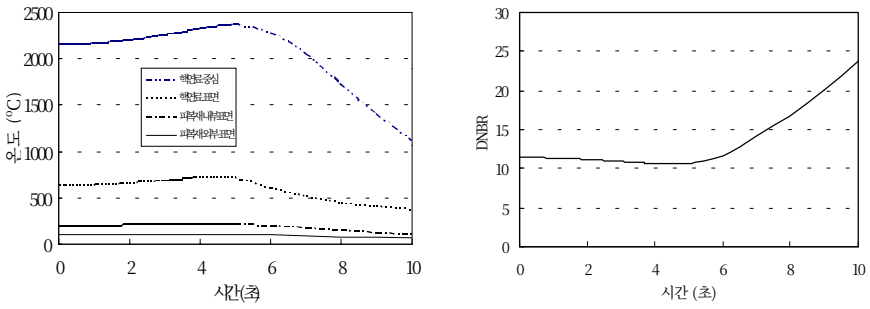
(a) 유량 변화에 따른 가속도 최대진폭의 변화 (b) 유량 변화에 따른 가속도 RMS값의 변화

(c) 유량 변화에 따른 변위 최대진폭의 변화 (d) 유량 변화에 따른 변위 RMS값의 변화

그림 5. 계장캡슐에서 계측된 진동신호의 최대진폭과 RMS값[7]

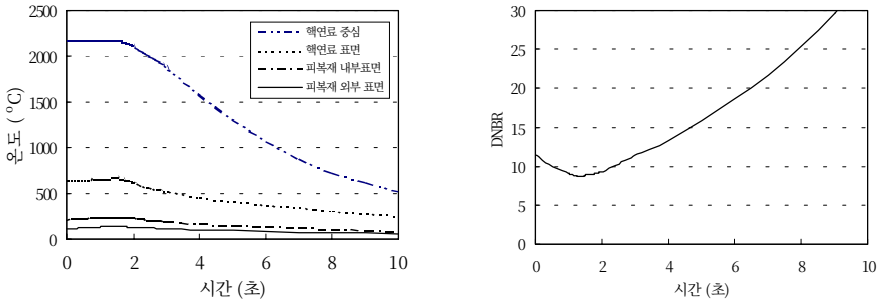
그림 6. 조사시험용 핵연료봉 사진

그림 7. 핵연료 조사시험용 계장캡슐 조립 사진



a) 핵연료 온도 변화 b) MDNBR 변화

그림 8. 반응도 사고시 핵연료 온도 및 MDNBR 변화[11]



a) 핵연료 온도 변화 b) MDNBR 변화

그림 9. 펌프 축 고착 사고시 핵연료 온도 및 MDNBR 변화[11]

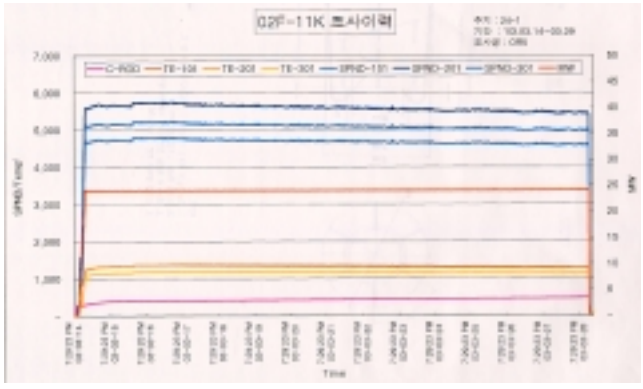


그림 10. 핵연료 중심온도 및 조사량 측정결과