

# 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 고온 운전절차서 개발

지대영 박수기 이종민 심봉식 이정영 안성호 김영기  
한국원자력연구원 원자력기초과학연구본부 연구로공학부

## 서 론

핵연료 노내 조사 시험 시설은 프랑스, 벨기에, 캐나다, 일본 등 여러 나라에서 연구용 원자로 내에 조사 시험 시설을 설치하여 조사 시험을 수행하는 시설이다.

프랑스는 OSIRIS 시험로에 ISABELLE, IRENE, OPERA Loop 등을 설치하여 핵연료 조사 시험, 시험봉 재료 조사, Power Lamp 시험, 연소도 시험 등의 조사 시험을 수행한다.

벨기에의 BR2 원자로에 설치된 Callisto Loop는 장기간 핵연료 조사 시험, Power Transient Test 등의 조사 시험을 수행하는 Loop이다.

캐나다는 NRX 원자로에 X-1, X-2 등 6개의 Loop가 핵연료 및 압력관 개발, 피복재의 결함 시

험, 부식 재료 및 금속 재료의 조사 시험 등을 수행하였으며, NRU 원자로에 U-1, U-2 등 3개의 Loop를 이용하여 냉각수 Mode에 따른 핵연료 개발, Fuel Power Cycling, 냉각수 화학, 압력관 개발, 부식 시험 및 임계 열속 시험 등의 연구를 수행하였다.

일본은 JMTR 에 설치된 OWL-2 Loop는 핵연료 기초 조사 및 핵연료 부식 규명 등의 연구를 수행하였다.

국내에서 핵연료집합체 조사 시험을 위한 이용자의 요구 사항을 만족하도록 하나로 노심 조사 공에서 시험 핵연료를 조사 시험하는 핵연료 노내 조사 시험 설비(FTL: Fuel Test Loop)의 구축이 요구되어 하나로의 IR 1 조사 공 내에서 3봉의 시험 핵연료의 조사 시험을 수행할 수 있도록 시

험 설비의 상세 설계, 건설 및 인허가를 수행하였으며 현재 상온, 상압에서의 시운전을 종료하고 고온, 고압 운전을 위한 시운전을 수행 중에 있다.

하나로에 설치된 3봉의 시험 핵연료를 위한 핵연료 노내 조사 시험 설비는 정상 상태 핵연료 조사 시험용 루프 시설로서 공칭 120kW의 열 제거 능력과 설계 압력 17.5MPa, 설계 온도 350℃로 설계되었으며 노내 시험부와 노외공정 계통으로 구성된다.

노내 시험부는 IR 1 조사공의 공간을 고려하여 최대 3개의 핵연료봉을 시험할 수 있도록 설계되었으며, 필요한 온도와 압력 조건을 갖는 냉각수를 핵연료봉 주위로 순환시킬 수 있도록 되었다.

핵연료 노내 조사 시험 설비가 상용로의 운전 조건인 고온, 고압

에서 운전되도록 설계되어 시설에 대한 운전을 위하여 정상 운전 절차서의 개발이 운전 로직 및 절차에 대한 개발과 기술 습득이 이루어져야 한다.

이를 위하여 핵연료 노내 조사 시험 설비를 운전하기 위한 운전 형태(operation scheme)에 대한 조건에 따라 요구되는 정상 운전 절차서를 개발하였다.

운전 형태는 루프 운전 정지(LSD), 저온 대기 1(CS1), 저온 대기 2(CS2), 고온 대기(HSB), 고온 운전(HOP)의 5단계로 구분된다.

### 핵연료 노내 조사 시험 설비의 운전 조건

#### 1. 계통 및 운전 조건

핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계 요건은 국내의 원자력법 요건에 따라 설계하고 적용 요건이 없는 경우 미국의 규제 요건 지침(ASME code, 10CFR50 App. B, Reg. Guides 등)이나 이를 전력기준으로 적용하는 KEPIC을 적용한다.

하나로 노심 내에서 시험 핵연료봉의 조사 시험을 실시하기 위하여 핵연료 노내조사 시험 설비의 노내 시험부는 정상 운전 상태의 원자력발전소와 유사한 환경 조건을 유지한다. <그림 1>은 하나로에 설치된 핵연료 노내 조사

시험 설비의 주요 구성도를 나타낸다.

노외 공정 계통의 주요 계통들은 두 개의 격실에 나뉘어서 설치된다.

격실 1은 주로 고온, 고압의 운전 조건에서 작동하는 기기로 구성되어 있고 격실 2는 상온, 상압의 기기로 구성된다.

주냉각수 계통은 시험에서 요구되는 노내 시험부의 입구 및 출구 측에서의 유량, 압력, 온도 조건을 유지하는 하나의 폐회로 냉각 계통으로서 주냉각기, 가압기, 주냉각펌프, 주가열기 등으로 구성된다. 주냉각수 계통은 두 대의 냉각펌

프를 설치하여 정상 운전시 한 대의 펌프가 운전되고 다른 한 대는 대기하는 대리 기능성 개념을

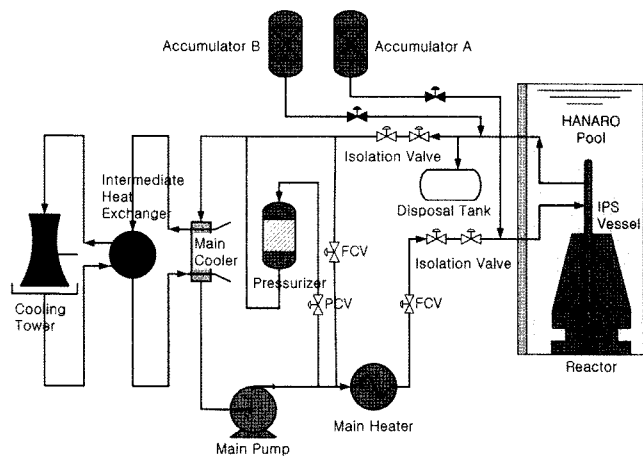
갖도록 하였다.

비상 냉각수 계통은 비상시 주냉각수 계통에 냉각수를 공급하여 붕괴열을 제거하도록 하였다. 비상 냉각수 계통은 별도의 비상 펌프 없이 사고시 고압 주입 탱크 내의 냉각수를 이용하여 사고를 진압하도록 하였다.

비상 냉각수 계통은 고압 주입 탱크, 감압 베기 밸브로 구성되며 이들은 모두 다중화되어 있다. 관통부 냉각수 계통은 하나로 수조와 격실 1 사이의 주냉각수 계통의 배관이 통과하는 콘크리트 관통부에 냉각 기능을 제공한다.

취출, 보충 및 정화 계통은 주냉각수 체적, 순도 및 화학적 특성을 제어한다.

폐기물 저장 및 이송 계통은 방사성 액체 또는 기체 폐기물을 수



<그림 1> 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 주요 구성도

<표 1> 하나로 핵연료 노내 조사 시험 시설의 정상 상태 운전 조건

주냉각수 계통 운전 변수	정상 상태 운전 조건
노내 시험부 유량(kg/s) 210-J-FT022	1.58~1.68
주냉각수 압력(MPa.g) 210-J-PT021	15.0~15.8
주냉각수 온도(℃) 210-J-TE023	270~300 ± 3
가압기 압력(MPa.g) 210-J-PT057/060	14.4~15.2
가압기 온도(℃) 210-J-TE058/059	339~344
가압기 수위(mm) 210-J-LT055/056	800 < L < 1000

집하여 액체 폐기물은 하나로 액체 폐기물계통으로 보내고, 기체 폐기물은 하나로 환기 계통으로 이송하는 역할을 한다.

시료 채취 계통은 핵연료 노내 조사 시험 설비 유체의 수질을 주기적으로 감시하는데 사용한다.

중간 냉각 계통은 주냉각수 계통 및 취출, 보충 및 정화 계통에서 열을 제거하여 이를 하나로 이차 냉각 계통으로 전달하는 기능을 수행하는 계통이다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 주냉각수 계통 운전 변수에 대한 정상 상태 고온 운전조건은 <표 1>과 같다.

## 2. 정상 운전 절차서

정상 상태 운전 절차서의 구성

은 상용 원자력발전소, 연구용 원자로 하나로 및 국외 시험 시설의 사례를 비교하여 하나로의 시험 시설로서 적용하기에 가장 적합한 방안을 도출하였다.

<그림 2>는 운전절차서의 구성 방안에 대한 비교도이다. 하나로의 정상 운전 절차서의 구성이 각 계통별로 구성됨에 따라서 핵연료 노내 조사 시험 설비에 적용되는 정상 운전 절차서도 각 계통별로 구성되도록 하였다.

종합 운전 절차서인 기동, 정지 절차서와 각 계통 및 기기에 대한 운전 절차서로 구성된 정상 운전 절차서의 개발을 완료하였다. <그림 3>은 핵연료 노내 조사 시험 설비의 정상 운전 절차서의 구성을 나타낸다.

## 핵연료 노내 조사 시험 설비의 시운전

핵연료 노내 조사 시험 설비의 시운전은 상온 기능 시운전과 고온 기능 시운전으로 나뉘어지며 고온 기능 시운전은 시험 핵연료의 장전 상태에 따라 핵연료 장전 전 시운전과 핵연료 장전 후 시운전으로 구분된다.

### 1. 상온 기능 시운전

상온 기능 시운전 시험은 건설 인수 시험이 완료된 후에 각 계통별로 상온, 상압 상태에서 시운전 시험을 수행하였다.

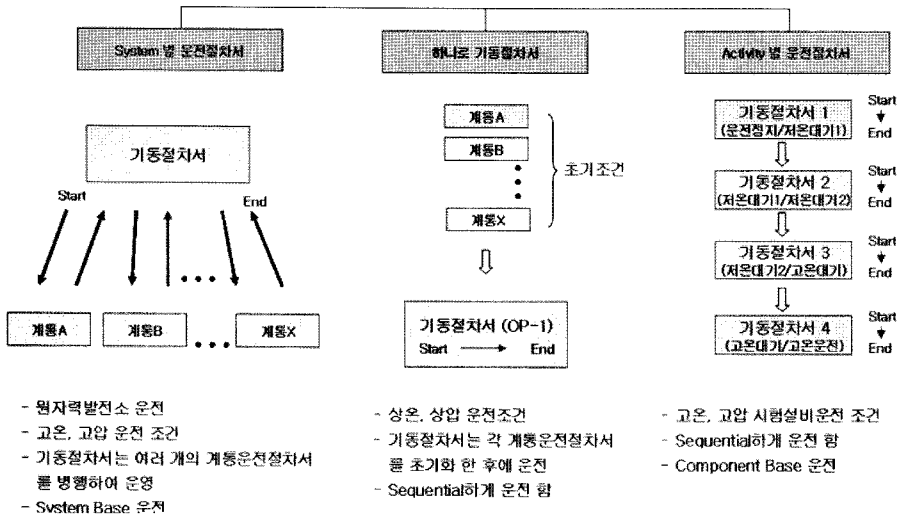
시험의 범위는 계기 경보 설정치 시험, 펌프 성능 시험, 밸브 성능 시험 및 제어 로직 시험 등이다.

노의 공정 계통은 주냉각수 계통(MCW), 비상 냉각수 계통(ECW), 관통부 냉각수 계통(PCW), 취출, 보충 및 정화 계통(LMP), 폐기물 저장 및 이송 계통(WST), 시료 채취 계통(TLS), 중간 냉각수 계통(ICL), 방사선 감시 계통(RMS), 전력 계통, 계측 및 제어 계통, 기타 보조 계통에 대하여 상온 상태의 계통 시험을 수행하였다.

### 2. 고온 기능 시운전

고온 기능 시운전은 시험 핵연

# | 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 고온 운전절차서 개발 |



〈그림 2〉 운전절차서의 구성 방안에 대한 비교도

료의 장전 상태에 따라 핵연료 장전 전 시운전과 핵연료 장전 후 시운전으로 구분되며 현재까지 핵연료 장전 전 고온 기능 시운전을 수행 중이다. <표 2>는 고온 기능 시운전의 시험 및 절차서 종류를 나타낸다.

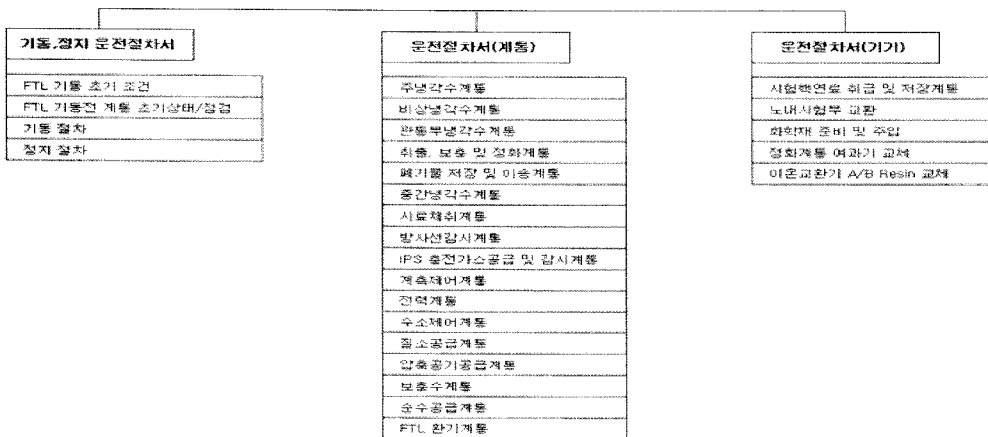
## 결론

핵연료 노내 조사 시험 설비는 연구용 원자로 하나로에 설치된 노내 조사 시험 시설로서 상용 발전소와 유사한 조건에서 운전되어 최대 3봉의 시험 핵연료에 대한 연소 시험, 기계적 건전성 및 부식 시험 등을 수행할 수 있도록

설계되었다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 안전하고 효율적인 운전을 위하여 5개의 운전 형태를 갖도록 하였으며 이에 따라 계통 및 기기에 대한 정상 운전 절차서를 개발하였다.

본 정상 운전 절차서는 비정상 및 이상 운전 절차와 연계하여 운



〈그림 3〉 핵연료 노내 조사 시험 설비의 정상 운전 절차서의 구성

〈표 2〉 핵연료 노내 조사 시험 설비의 주요 고온 기능 시운전

구분	시험 및 절차서 종류
핵연료 장전 전 고온 기능 시운전	핵연료 장전 전 고온 기능 시험 관리
	주가열기 성능 시험
	가압기 성능 시험
	취출 정화 계통 종합 성능 시험
	주냉각수 펌프 성능 시험
	주냉각수 유량 측정 시험
	배관 정상/과도상태 진동 및 열팽창 시험
	가압기 열손실 시험
	주냉각수 화학분석 시험
	가압기 압력 및 수위 제어 시험
	비상냉각수 고온주입 시험
	핵발열량 측정 시험
	중성자속 측정 시험
IPS 충전 가스 공급 및 감시 계통 시운전 시험	
핵연료 장전 후 고온 기능 시운전	핵연료 장전 후 고온 기능 시험 관리
	주냉각수 계통 유량 측정 시험
	주냉각수 화학 성분 분석 시험
	출력 상승 시험

영되어야 할 것이며, 각 계통의 상태 및 비정상시의 운전 로직에 대한 계획 수립과 각 절차서의 작성 작업이 요구되어진다.

또한 예상되는 모든 경보에 대하여 수동 혹은 비상 조치를 위한 절차를 수립하여 적절히 대응하여야 할 것이다.

본 시험 시설의 개발이 완료되어 하나로에 설치되면 핵연료의 실증 실험으로 연구 개발에 필요한 자료를 얻고 신형 핵연료의 설계, 제작 기술 자립에 기여하게 되어 연소도 측정, 건전성 평가에 활용됨으로써 핵연료 개발 분야의 기술 확립에 기여하게 될 것이다.

### 후기

본 연구는 원자력연구개발 중 장기계획사업에 의해서 수행되었다. ⊗

#### 〈참고 문헌〉

1. 하나로 안전성분석보고서, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. 핵연료노내조사시험설비 안전성분석보고서, 한국원자력연구소, 2006.
3. Operation & Maintenance Manual, HAN-FL-E-070-DO-H001, Rev. 0, 2004.
4. 3-Pin 핵연료노내조사시험설비 Design Manual-기계분야,

HAN-FL-E-070-DM-H001, Rev. 0, 2004.

5. 3-Pin 핵연료 노내조사시험설비 Design Manual-계장분야, HAN-FL-E-074-DM-H001, Rev. 0, 2004.

6. 3-Pin 핵연료 노내조사시험설비 Design Manual-전기분야, HAN-FL-E-074-DM-H002, Rev. 0, 2004.

7. 핵연료노내조사시험설비 기동 및 정지운전절차서, HANTAP-05-OD-ROP-OP-60, Rev. 1, 2008.

8. 핵연료장전 전 고온기능시험 관리절차서, HAN-FL-S-062-DO-K101, Rev. 1, 2008.