

# 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계 특성

지대영 · 박수기 · 박국남 · 이종민 · 이정영 · 김영진  
한국원자력연구소 하나로이용연구단

## 서론

하나로 노심 내의 조사공에 3봉 규모의 핵연료 조사 시험에 대한 사용자 요구가 대두되어 3-Pin 핵연료 조사 시험 설비 과제가 착수되어 하나로 IR 1 조사공 내에서 3봉의 시험 핵연료의 조사 시험을 수행할 수 있도록 시험 설비의 인허가와 건설을 위한 상세 설계를 수행하였다.

핵연료 조사 시험 설비는 가압경수로 핵연료와 중수로 핵연료의 시험을 목적으로 함에 따라 두 가지 운전 모드로 설계되었다.

핵연료 조사 시험은 프랑스·벨기에·캐나다·일본 등 여러 나라에서 연구용 원자로 내에 조사 시험 시설을 설치하여 조사 시험을 수행하고 있다.

프랑스의 OSIRIS 시험로에는 ISABELLE 1, ISABELLE 4, IRENE, OPERA Loop 등을 설치

하여 핵연료 조사 시험, 시험봉 재료 조사, Power Lamp 시험, 연소도 시험 등의 조사 시험을 수행하고 있다.

특히 OPERA Loop는 4개의 노내 시험부를 가지고 있어 핵연료봉 32개의 다발을 동시에 조사할 수 있으며 상용로 운전 조건과 거의 같은 온도 300℃, 압력 15.5MPa에서 조사 시험을 수행하고 있다.

벨기에의 BR2 원자로에 설치된 Callisto Loop는 장기간 핵연료 조사 시험, Power Transient Test 등의 조사 시험을 수행하는 Loop로 운전 조건은 온도 313℃, 압력 19MPa로 나타나 있다.

캐나다의 NRX 원자로에 X-1, X-2 등 6개의 Loop가 핵연료 및 압력관 개발, 피복재의 결함 시험, 부식 재료 및 금속 재료의 조사 시험 등을 수행하며 X-1의 경우 설계 온도 및 압력은 343℃ 및 17.3MPa로 설계되어 있다.

그리고 NRU 원자로에 U-1, U-2 등 3개의 Loop가 있는데 냉각수 Mode에 따른 핵연료 개발, Fuel Power Cycling, 냉각수 Chemistry, 압력관 개발, 부식 시험 및 임계 열속 시험 등의 연구를 수행하며, 연료 출력 급상승 시험을 수행하기 때문에 설계 온도가 다른 Loop보다 높은 354℃로 설계되어 있고, 설계 압력은 13.9MPa로 되어 있다.

일본의 JMTR에 설치된 OWL-2 Loop는 핵연료 기초 조사 및 핵연료 부식 규명 등의 연구를 수행하며 운전 조건은 온도 285℃, 압력 7.2MPa로서 다른 Loop에 비해서 운전 조건이 비교적 낮다.

하나로에 설치되는 3봉의 시험 핵연료를 위한 핵연료 노내 조사 시험 설비(3-Pin Fuel Test Loop)는 정상 상태 핵연료 조사 시험용 루프 시설로서 공칭 120kW의 열계거 능력과 설계 압력 17.5MPa, 설

계 온도 350℃로 설계되었으며 노내 시험부와 노외 공정 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 되어 있다.

노외 공정 계통은 주냉각수 계통, 비상 냉각수 계통, 취출 보충 및 정화 계통, 관통부 냉각수 계통, 폐기물 이송 및 저장 계통, 중간 냉각수 계통 등 다수의 공정 계통으로 구성되어 있다.

**핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계 요건**

**1 최대 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 전력 기준으로 적용하는 KEPIC을 적용한다.

개발된 핵연료봉을 하나로 노심 내에서 조사 시험을 실시하기 위한 시설인 핵연료 노내 조사 시험 설비의 노내 시험부는 정상 운전 상태의 원자력발전소와 유사한 환경 조건에서 시험 핵연료의 노내 조사를 통하여 핵연료 연소, 기계적 건전성

및 부식 시험 등을 수행하며 최대 3개의 핵연료봉을 시험할 수 있도록 설계되어야 한다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 시험 핵연료는 실제 가동중인 상업로의 노심 조건을 모사한 가압경수로 및 중수로용 핵연료의 시험용 핵연료봉을 하나로의 IR1(Irradiation Hole)에 장전하고 이를 통하여 핵연료의 안전성을 입증할 수 있는 데 이터 확보가 가능하도록 되어 있다. 핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계를 위한 최대 운전 조건은 <표 1>과 같다.

**2. 기능 및 성능 요건**

핵연료 노내 조사 시험 설비는 하나로에 설치 가능하도록 설계하고, 특히 노내 시험부의 외부 직경은 IR1 조사공 내경보다 작게 설계하여 설치 및 해체시에 방해되지 않도록 하여야 한다.

하나로 원자로 보호를 위해 노내 시험부는 2중 압력 경계를 갖도록 설계하였다. 노내 시험부는 노외 공정 계통과의 연결에서 필요시 장탈착이 가능하도록 하였으며 노내 시험부의 유체와 하나로의 1차 냉각수 사이에 단열을 위한 설계가 고려되어야 한다.

노내 시험부에서 조사 시험을 수행하는 동안 핵연료 부피 변화를 최소화하고 핵분열로 인하여 생성되는 기체 생성물은 핵연료 피복관 내

에서 최대한 수용토록 하여야 한다.

핵연료의 중심부 온도를 가능한 낮게 유지시킬 수 있는 열전도도와 부식과 방사선에 대한 양호한 저항성 등 기하학적 인자 및 재료 특성을 갖도록 설계되어야 한다.

핵연료 노내 조사 시험 설비는 미임계 조건에서 운전되므로 반응도 제어는 필요치 않다. 시험 핵연료봉 및 이들 지지 구조물의 재료는 정상 운전할 때의 압력, 온도 및 방사선에 의하여 발생하는 최악의 조건하에서도 필요한 물리적·화학적 성질을 유지하도록 한다.

**3. 운전 상태 분류**

핵연료 노내 조사 시험 설비의 운전 상태는 정상 운전, 예상 운전 과도, 설계 기준 사고로 분류된다. 각 운전 상태별 설계 요건은 다음과 같다.

**가. 정상 운전 (Normal Operation)**

정상 운전 상태는 가압경수로 및 중수로용 시험 핵연료봉 3개까지 시험할 수 있도록 가압 경수로 및 중수로의 운전 상태를 모사한다. 기동/정지 및 계통 수압 시험도 정상 운전 상태에 포함된다.

**나. 예상 운전 과도(Anticipated Operational Occurrences, AOO)**

예상 운전 과도는 다음과 같으며 예상 운전 과도 사고에서 핵연료 시험 설비는 시험 핵연료의 건전성을

〈표 1〉 Maximum Operating Condition of FTL

구분		가압경수로 모드	중수로 모드
노내 시험부 운전 조건	핵분열 발열량	112.3 kW	116.2 kW
	냉각수 압력	15.5 MPa	10.0 MPa
	IPS 입구 온도	300.3℃	276.7℃
	IPS 출구 온도	312.0℃	290.0℃
	IPS 유량	1.6 kg/s	1.63 kg/s
	IPS 유속	4.6 m/s	7.2 m/s

유지하며 노내 시험부를 안전하게 냉각할 수 있어야 한다.

① 격리 밸브 고장 폐쇄 : 제어 또는 기계적인 고장에 의하여 격리 밸브가 부적절하게 닫히므로 노내 시험부를 격리시키는 사고이다.

② 주냉각수 펌프 회전자 고착 사고 : 주냉각수 펌프 회전자가 고착되어 정상적인 강제 냉각 유량이 상실되는 사고이다.

③ 안전 밸브 고장 개방 : 주냉각수 계통의 과압을 방지하기 위해 설치된 안전 방출 밸브가 고장에 의하여 부적절하게 열리는 사고이다.

④ 소내·외 정전 사고 : 소내·소외 정전에 의하여 주냉각수 펌프가 정지하여 정상적인 강제 냉각 유량이 상실되는 사고이다.

다. 설계 기준 사고(Design Basis Events, DBEs)

설계 기준 사고는 수조내 저온관 및 고온관 파단 사고와 제1기실 저온관 및 고온관 파단 사고이다. 배관 파단 사고시에도 핵연료 시험 설비는 시험 핵연료의 건전성을 유지하며 노내 시험부를 안전하게 냉각할 수 있어야 한다.

4. 환경 평가 요건

제1기실 및 전기실에 위치한 안전 관련 계통의 기계 및 전기 기기는 정상, 비정상(AOO) 및 설계 기준 사고와 같은 모든 환경에서도 적절한 성능을 발휘하도록 보장하

〈표 2〉 Environmental Condition of the 3-Pin FTL

	정상시 환경 조건	비정상시 환경 조건
온도(℃)	4.4~65.6	4.4~65.6
압력(kPa)	101.2	101.2
습도(%)	20 ~ 90	90
방사선(Rads)	3.14×10 <sup>6</sup> (for 20 years)	3.14×10 <sup>6</sup> (for 20 years)

기 위하여 〈표 2〉와 같은 환경 속에서도 그 안전 기능을 수행할 수 있어야 한다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계

1. 시험 설비의 주요 구성

가. 노내 시험부(IPS ; In-Pile Test Section)

노내 시험부는 시험 핵연료를 조사시키기 위하여 하나로 노심에 설치되는 압력 용기로서 유동 분리관, 내부 압력관 및 외부 압력관으로 나뉘어진다.

하나로 수조 내의 지지 구조물에 노내 시험부 지지대를 부착 설치하여 노내 시험부 용기 상단부를 지탱하도록 한다.

시험 핵연료를 장전한 노내 시험부 용기를 하나로 노심 내에 위치한 IR1 시험공에 설치하고 하나로를

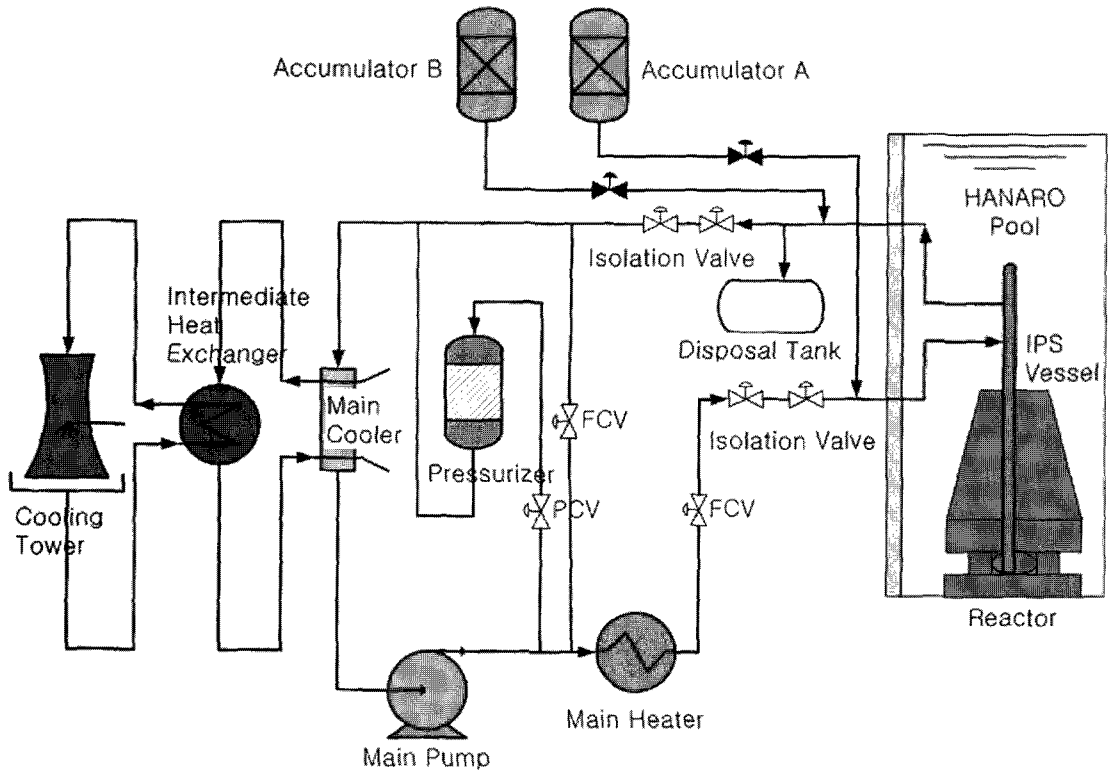
출력 운전하게 되면 시험 핵연료가 하나로 노심에서 방출되는 중성자에 노출되므로 하나로에서 제공되는 중성자속에 의해 핵분열을 하고 열을 발생하게 된다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 운전은 하나로의 운전과 별도로 이루어지나, 핵연료 노내 조사 시험 설비의 비정상 상태로 인한 사고시 하나로에 정지 신호를 발생하도록 설계하였다.

나. 노외 공정 계통(OPS ; Out of Pile System)

노외 공정 계통의 주요 계통은 다음과 같다.

- 주냉각수 계통
- 비상 냉각수 계통
- 관통부 냉각수 계통
- 취출, 보충, 정화 계통
- 폐기물 저장 및 이송 계통
- 시료 채취 계통
- 중간 냉각수 계통



〈그림 1〉 Schematic Diagram of FTL

상기 계통들은 두 개의 격실에 나뉘어서 설치되며 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 출구측에서의 유량·압력·온도 조건을 유지하는 하나의 폐회로 냉각 계통으로서 주냉각기·가압기·주냉각 펌프·주가열기 등으로 구성된다.

주냉각수 계통은 두 대의 냉각 펌프를 설치하여 정상 운전시 한 대의 펌프가 운전되고 다른 한 대는 대기하는 대리 기능성 개념을 갖도록 하였다.

비상냉각수 계통은 비상시 주냉각수 계통에 냉각수를 공급하여 붕괴열을 제거하도록 설계한다.

비상 냉각수 계통은 별도의 비상 펌프 없이 사고시 고압 주입 탱크 내의 냉각수를 이용하여 사고를 진압한다.

비상 냉각수 계통은 고압 주입 탱크, 감압 배기 밸브로 구성되며 이들은 모두 다중화되어있다.

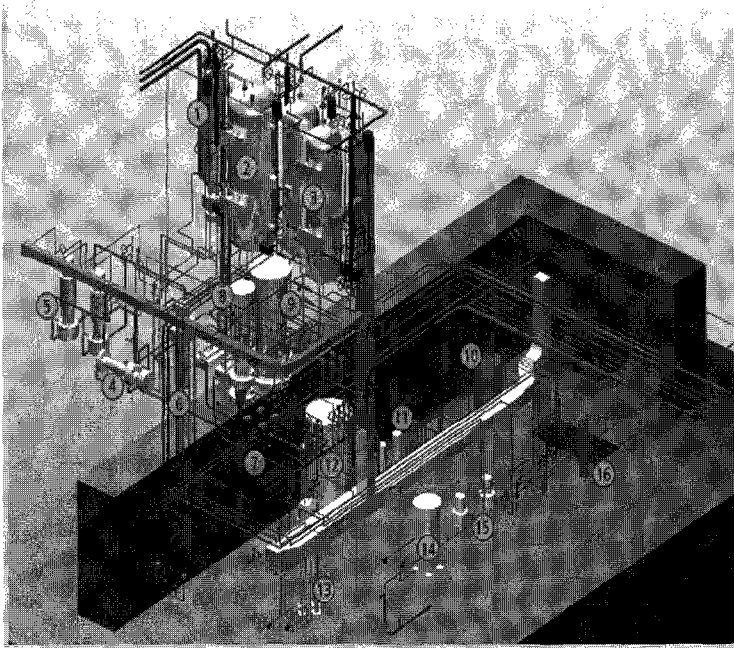
관통부 냉각수 계통은 하나로 수조와 격실 1 사이의 주냉각수 계통의 배관이 통과하는 콘크리트 관통부에 냉각 기능을 제공한다. 취출, 보충 및 정화 계통은 주냉각수 체적, 순도 및 화학적 특성을 제어한다.

폐기물 저장 및 이송 계통은 방사성 액체 또는 기체 폐기물을 수집하여 액체 폐기물은 하나로 액체 폐기물 계통으로 보내고, 기체 폐기물은 하나로 환기 계통으로 이송하는 역할을 한다.

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

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

〈그림 1〉 〈그림 2〉는 각각 시험 설비 계통의 주요 구성도와 3차원



- ① Pressurizer
- ② Disposal tank
- ③ Accumulator
- ④ Main cooler
- ⑤ Main pump
- ⑥ Main heater
- ⑦ Isolation valve
- ⑧ Letdown · Make-up and Purification interchanger
- ⑨ Letdown · Make-up and Purification cooler
- ⑩ Ion exchanger
- ⑪ Filter
- ⑫ Intermediate heat exchanger
- ⑬ Degasifier
- ⑭ Chemical addition tank
- ⑮ Pump
- ⑯ H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> gas bombe

〈그림 2〉 3D View of Out-of-Pile System Equipment

기기 배치도를 나타낸다.

**결론**

핵연료 노내 조사 시험 설비는 하나로에서 조사 시험을 통하여 핵연료의 개발을 위하여 최대 3봉의 시험 핵연료에 대한 연소 시험, 기계적 건전성 및 부식 시험 등을 수행할 수 있도록 설계하였다.

설계 요건으로서 가압경수로 핵연료와 중수로 핵연료에 대한 상용로 운전 조건에서의 노내 조사 시험을 위하여 두 개의 운전 모드를 갖도록 하였다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 안전 특성은 비정상 상태로 인한 사고시 하나로에 정지 신호를 주도록 설

계하였으며 정상 운전과 예상 운전과도는 물론이고 설계 기준 사고시에도 그 건전성을 유지하고 안전 기능을 수행하도록 하였다.

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

본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업에 의해서 수행되었다.

〈참고 문헌〉

1. “하나로 안전성분석보고서”, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. 노내시험시설 설치 타당성 검토를 위한 기술분석, KAERI/CR-112/01, 이정영 외, 2001. 3
3. 3-Pin 핵연료 노내 조사 시험 설비 설계 요건서, FL-070-DR-K001, 김준연 외, 2002. 7
4. 하나로 3-Pin Fuel Test Loop에서의 노내 시험부 개념설계, KAERI/TR-2541/2003, 박국남 외, 2003. 7
5. 3-Pin 핵연료 노내 조사 시험 설비 Design Manual- 기계분야, HAN-FL-E-070-DM-H001, Rev. 0, 2004.