

핵연료 시험용 노내조사시험설비의 설계 현황

박 국 남^{†*}, 심 봉 식, 안 성 호, 유 성 연^{*}

한국원자력연구원 하나로이용기술개발센터, *충남대학교 기계설계공학과

The Design Status of the Irradiation Facility for Fuel Test

Kook-Nam Park[†], Bong-Shick Sim, Sung-Ho Ahn, Seong-Yeon Yoo^{*}

HANARO Utilization Technology Development Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

^{*}Department of Mechanical Design Engineering, ChungNam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received October 12, 2007; revision received October 12, 2007)

ABSTRACT: The FTL has been developed to be able to irradiate test fuels at the irradiation hole(IR1 hole) by considering its utility and user's irradiation requirements. FTL consists of In-Pile Test Section (IPS) and Out-of-Pile System (OPS). Test condition in IPS such as pressure, temperature and the water quality, can be controlled by OPS. For safety assurance IPS is designed to have dual stainless steel pressure vessel and OPS is composed of main cooling water system, emergency cooling water system, LMP(letdown, make-up, purification) system, etc. FTL Conceptual design was set up in 2001, basic design had completed including a design requirement, basic piping & instrument diagram (P&ID), and the detail design in 2004. In 2005, the development team carried out purchase and manufacture hardware and make a contract for construction work. FTL construction work began on August, 2006 and ended on March, 2007. After FTL development which is expected to be finished by 2008, FTL will be used for the irradiation test of the new PWR-type fuel and can maximize the usage of HANARO.

Key words: HANARO(High-flux Advanced Neutron Application ReactOr, 다목적연구용원자로), Fuel Test Loop(FTL, 핵연료 노내조사시험설비), In-Pile Test Section(IPS, 노내시험부), Out Pile System(OPS, 노외공정계통), IPS Vessel Assembly(IVA, 노내시험부 압력관).

1. 서 론

연구용원자로 이용자의 조사시험 조건 및 하나의 설비능력 등을 고려하여 시험핵연료 조사(照射)시험을 위한 핵연료 노내조사시험설비(Fuel

Test Loop, FTL)의 개발 타당성을 확보하였다.⁽¹⁾

핵연료 조사시험은 프랑스, 벨지움, 캐나다, 일본 등 여러 나라에서 루프를 설치하여 조사시험을 수행하고 있다. 프랑스의 OSIRIS 시험로에는 ISABELLE 1, ISABELLE 4, IRENE, OPERA Loop 등을 설치하여 핵연료 조사시험, 시험봉 재료조사, power lamp 시험, 연소도시험 등의 조사시험을 수행하고 있다. 특히 OPERA 루프는 4개의 노내시험부를 가지고 있어 핵연료봉 32개의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-2275; fax: +82-42-868-8364

E-mail address: knpark@kaeri.re.kr

다발을 동시에 조사할 수 있으며 상용로 운전조건과 거의 같은 온도 300℃, 압력 15.5 MPa에서 조사시험을 수행하고 있다.

벨지움의 BR2 원자로에 설치된 Callisto 루프는 장기간 핵연료 조사시험, power transient test 등의 조사시험을 수행하는 루프로 운전조건은 온도 313℃, 압력 19MPa로 나타나 있다.

캐나다의 NRX 원자로에 X-1, X-2 등 6개의 루프가 핵연료 및 압력관 개발, 피복재의 결합시험, 부식재료 및 금속재료의 조사시험 등을 수행하며 X-1의 경우 설계온도 및 압력은 343℃ 및 17.3 MPa로 설계되어 있다. 그리고 NRU 원자로에 U-1, U-2 등 3개의 루프가 있는데 냉각수 mode에 따른 핵연료 개발, fuel power cycling, 냉각수 chemistry, 압력용기 개발, 부식시험 및 임계 열유속시험 등의 연구를 수행하며, 연료출력 급상승시험을 수행하기 때문에 설계온도가 다른 루프보다 높은 354℃로 설계되어 있고, 압력은 13.9MPa로 설계되어 있다.⁽²⁾

하나로에 설치되는 FTL은 정상상태 핵연료 조사시험용 루프시설로서 120kW의 열제거 능력과 설계압력 17.5MPa, 설계온도 350℃ 및 수화학조건 등과 같은 계통 조건이 요구되는 시설이다. FTL은 노내시험부(IPS)와 노외공정계통(OPS)으로 구성되어 있고 IPS는 수조내 배관, 지지대, 노내시험부 압력용기조립체(IVA)로 이루어졌다.

IVA는 IR 1(Irradiation Hole) 조사공의 공간을 고려하여 최대 3개의 핵연료봉을 시험할 수 있도록 설계되었으며 필요한 온도와 압력조건을 갖는 냉각수를 핵연료 봉 주위로 순환시킬 수 있도록 되어있다. OPS는 주냉각수계통, 비상냉각수계통, 중간냉각수계통, 폐기물이송 및 저장계통 등 다수의 공정계통으로 구성되어 있다.

본 논문에서는 핵연료의 실증실험으로 연구개발에 필요한 자료를 얻고, 신형핵연료의 설계, 제작 기술 자립에 기여할 수 있는 FTL 시설에 대한 설계개념을 정립하고 설계 현황을 기술하였다.

2. 설계요건

2.1 설비 및 운전조건

FTL의 설계요건은 국내의 원자력법 요건에 따라 설계하고 적용요건이 없는 경우 미국의 규제

요건 지침(ASME code, 10CFR50 App. B, Reg. Guides 등)이나 이를 전력산업기술기준으로 적용하는 KEPIC(Korea Electric Power Industry Code)을 적용한다. 개발된 핵연료봉을 하나로 노심 내에서 조사시험을 실시하기 위한 시설인 FTL의 IPS는 정상운전상태의 원자력발전소와 유사한 환경조건에서 시험핵연료의 노내조사를 통하여 핵연료 연소, 기계적 건전성 및 부식시험 등을 수행하며 핵연료 봉을 시험할 수 있도록 설계되어야 한다.⁽³⁾

실제 가동 중인 상업로의 노심조건을 모사한 가압경수로 및 중수로용 핵연료의 시험용 핵연료봉을 하나로의 IR1 조사공(Irradiation Hole)에 장전하고 이를 통하여 핵연료의 안전성을 입증할 수 있는 데이터 확보가 가능하도록 되어있다. 하나로 IR1 조사공의 형상은 안지름 7.44cm의 hexagonal cylinder이며 FTL의 설계 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Design Criteria FTL

Parameters	PWR	CANDU
Fuel Linear Rating	112.3 kW	116.2 kW
Coolant Pressure	15.5 MPa	10.0 MPa
IPS Inlet Temperature	300.3 ℃	276.7 ℃
IPS Outlet Temperature	312.0 ℃	290.0 ℃
IPS Flow Rate	1.6 kg/s	1.63 kg/s
IPS Flow Velocity	4.6 m/s	7.2 m/s

2.2 하나로 계통과의 연계관계

노내시험부(IPS)와 노외공정계통(OPS)으로 구성된 FTL은 Fig. 1과 같다. IPS는 하나로 수조내 박스빔에 IPS 지지대를 설치하여 IVA 상단부를 지탱하도록 한다. 시험핵연료를 장전한 IVA를 하나로 노심 내에 위치한 IR1 조사공에 설치하고, 하나로를 출력 운전하게 되면 시험핵연료가 하나로 노심에서 방출되는 중성자에 노출되므로 하나로에서 제공되는 중성자속에 의해 핵분열을 하고 열을 발생하게 된다. FTL 운전은 하나로의 운전과 별도로 이루어지나, FTL의 비정상상태로 인한 사고 시 하나로에 정지신호를 발생하도록 안전을 고려한 설계가 되었다. IPS의 배관은 사

고 시 원자로 구조물에 피해를 유발하지 않도록 설계되었다.

OPS는 주냉각수 배관이 파단되는 경우에 대비하여 증기배기관 및 관련 솔레노이드 밸브를 설치하였다. 증기배기관은 고온관에 연결되며, 배관 파단 및 이에 따른 계통 격리 시에 생성된 증기를 폐기물저장탱크로 방출한다. FTL은 냉각수를 기존 하나로에서 공급받는다. FTL 제1 및 제2기실의 환기는 하나로의 환기계통을 활용한다. FTL 보호계통 출력은 하나로 원자로 보호계통(RPS)으로 입력되고, 2/3 논리에 의하여 하나로 보호계통은 긴급정지(Fast Trip) 신호를 발생하게 된다.

FTL에 필요한 작업용 및 계기용 압축공기는 하나로 압축공기계통으로부터 공급받는다. 전력은 하나로의 6.6kV 스위치기어에 차단기를 추가하여 공급한다. FTL 관통부는 하나로 수조와 배관 갤러리 사이의 수력학적 장벽을 제공하며, 수조벽과 제1기실 벽에 주냉각수의 유체 통로의 냉각을 제공한다. 관통부 냉각계통을 이용하여 수조쪽이나 제1기실 쪽의 관통부의 콘크리트가 설계온도 66℃를 초과하지 않도록 설계요건이 되어있다.

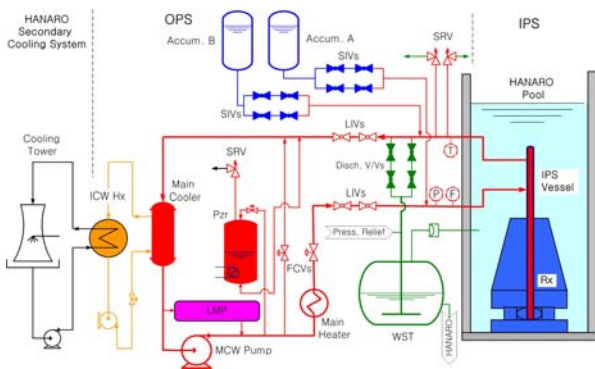


Fig. 1 Schematic Diagram of FTL

3. 설계

3.1 노내시험부(IPS ; In-Pile Section)

노내시험부 압력용기조립체(IPS Vessel Assembly, IVA)는 중성자속이 높은 하나로 노심내 IR1 수직조사공에 설치되며 OPS와 수조내 배관을 통하여 연결된다. Fig. 2와 같이 수조내 배관과 IVA를 지지하기 위하여 사각빔을 이용하여 지지대에 대한 상세설계를 수행하였다.

핵연료시험설비 주냉각수는 IVA의 입구노즐로 들어가서 내부압력용기의 내표면과 유동관사이의 환형공간을 통해 아래로 흘러 간 다음 시험연료 운반체 내부의 시험핵연료를 통과하여 위로 이동하면서 핵연료로부터 열을 흡수한다. 연료운반체 지지대에서 배출되는 냉각수는 IVA 출구노즐을 빠져나가 주냉각기를 통과해서 주냉각펌프로 흐른다. 주냉각펌프에서 냉각수는 추가열기로 이동하게 되고, 이후 IVA 입구로 되돌아오게 된다. IVA는 시험핵연료를 지지하고 위치를 잡아주며 정상, 이상, 비상 및 사고상태동안 정하중 및 동하중을 안전하게 흡수할 수 있도록 설계되어 있으며, 온도 및 압력의 변동, 취급, 지진가속 등으로 인한 응력에 견딜 수 있도록 설계하였다.



Fig. 2 IPS in HANARO Core

3.1.1 노내시험부 수조내 배관 및 지지대 설계

IVA와 갤러리를 연결하는 수조내 배관은 1"의 스테인레스강으로 양단은 seal welding으로 연결되어 있다. 이 수조내 배관은 고온관(Hot leg) 및 저온관(Cold leg)으로 구성되며 배관은 하나로 수조수와의 단열을 위하여 4"의 단열재 및 안전등급 NNS의 배관커버에 의하여 둘러싸여 있다. 단열재와 배관커버 사이에는 공기를 채우도록 설계하였으며 이에 따른 과압방지를 위하여 1" Rupture disc를 배관 양단에 설치하였다. 또한 Seismic restraint를 배관 끝단에 설치하여 지진하중에 대비하도록 하였다.

Fig. 3에는 수조내 배관 및 지지대의 형상을 나타내었다. 수조내 배관 및 지지대는 ASME Boiling & Pressure Vessel Section III ND 및 NF 코드요건에 따라 설계되었으며, 시험조건, 정상운전, 과도조건, 비상조건 및 극한사고에서 유

발되는 하중에 대하여 구조적 건전성을 확인하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 또한 20년 수명 기간 동안 예측되는 설계하중 조건에서 치수적 안전성 및 기능적 건전성을 유지할 수 있도록 하였다.⁽⁴⁾

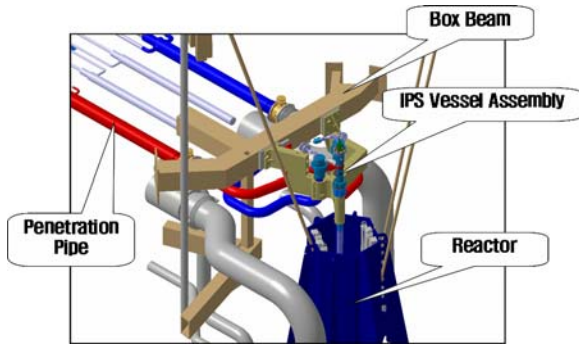


Fig. 3 IPS Piping & Support in HANARO

3.1.2 노내시험부 압력용기(IPS Vessel Assembly)

IVA의 설계는 형상설계에서는 외부압력관, 내부압력관, 노내시험부 헤드(또는 헤드), 내부조립체 및 시험핵연료운반체로 구성되었었다. 그러나 IVA의 제작설계 과정에서 조립, 분해, 시험핵연료 검사를 고려하여 외부조립체와 내부조립체로 나누었으며 그 구성도는 Fig. 4와 같다.⁽⁵⁾

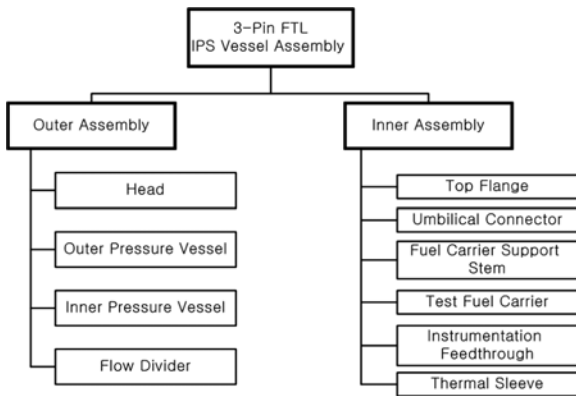


Fig. 4 Structure of the IVA

수조내 배관에 연결 조립되는 외부조립체는 헤드, 외부압력관, 내부압력관, 유동관으로 구성된다. 이 외부압력관의 안쪽에 조립되는 내부조립체는 탑 플랜지, 커넥터, 운반체지지대, 시험핵연료 운반체, 계측라인 관통부, 단열층 슬리브 등으로 구성된다.

IVA에서 냉각수는 Fig. 5과 같이 입구 노즐을

통해서 내부압력관 안쪽으로 유입되고, IVA 내부 끝단에서 방향이 180° 굽어지면서 유동분리관 안쪽으로 흐른다. 이 냉각수가 시험핵연료를 냉각한 후 운반체지지대를 통과해서 흘러나간다. 상세설계에서는 주요 부분인 노내시험부 헤드, 내·외부압력용기와 시험핵연료 운반체에 대해서만 기술하였다.

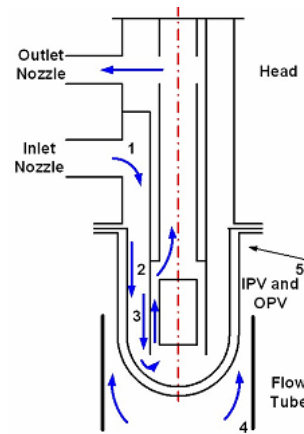


Fig. 5. Flow of the main cooling water

노내시험부 헤드의 상부는 시험핵연료의 교체를 위하여 개폐가 가능한 구조로 되어 있으며, 정상 운전시 17.5 MPa의 냉각수 밀폐기능을 위하여 이중의 오링을 조립하였다. 노내시험부 헤드의 중간부분은 냉각수의 입구와 출구 역할을 하는 2개의 노즐이 있으며 수조수와의 열전달을 차단하기 위하여 단열 공간이 있다. 노내시험부 헤드 하부는 외부압력용기와 플랜지 형태로 연결되며 이들 사이의 내부압력용기는 메탈링이 설치되어 밀폐기능을 한다.

외부압력용기는 설계압력과 온도(17.5 MPa, 315°C)를 수용할 수 있도록 두께 5.0 mm의 321 스테인레스강을 사용하였으며, 주위에는 9개의 SPND(Self Powered Neutron Detector)가 장착되어 있다. 하부는 반구형태에 돌출부가 부착되어 있어 하나로 유동관의 스파이더에 장착이 되도록 하였다.

내부압력용기는 두께 4.0 mm의 321 스테인레스강으로서 하부는 반구 형태로 되어 있어 냉각수의 유동이 180° 전환될 수 있도록 하였다. 입구 노즐 부분의 내부압력용기는 컬러(Collar) 형태로 제작하여 냉각수의 유입시 정체현상을 막도록 하였다. 외부압력용기와 내부압력용기는 서로 다른

압력유지를 가능케 하는 격리구조물로서 수조와의 단열을 위하여 중간 공간에는 불활성기체(Ne)로 채워진다.

시험연료운반체는 상부의 연료운반체지지대(fuel carrier support stem), 하부의 연료운반체다리(fuel carrier leg) 및 이들 두 구조물을 중간에서 연결하는 연료운반헤드(fuel carrier head)로 구성된다. 연료운반체지지대 상부는 고온의 냉각수가 배출될 수 있도록 원주방향으로 6개의 슬롯이 형성되어 있다. 시험연료운반체다리는 120° 간격으로 3개가 위치하여 시험핵연료를 지지하는 역할을 하게 된다. 이와 같이 상세 설계된 IVA의 형상은 Fig. 6과 같다.

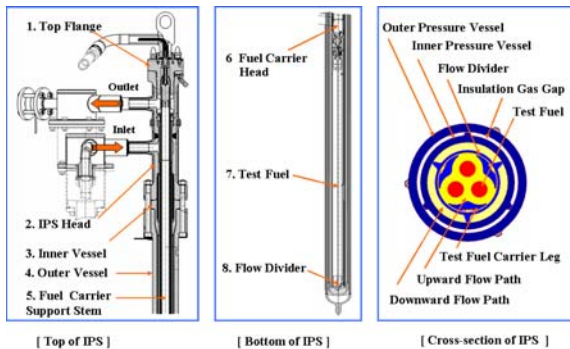


Fig. 6 IPS Vessel Assembly(IVA)

3.2 노외공정계통(OPS ; Out-of-Pile System)

노외공정계통은 온도, 압력, 유속 및 수질을 모사 가능하도록 상세설계를 수행하였다. 상세설계시 계통의 열/질량 평형계산을 통하여 운전조건을 유지하도록 배관의 크기와 각 기기의 위치를 결정하였다. 각 기기의 기능과 운전논리를 결정하여 배관계장도와 Design manual을 작성하였다. 계통의 기능을 유지하기 위한 필요 기기의 용량을 계산하여 설계계산서를 작성하고, 기기의 성능과 제작 시 요구되는 사항은 기술사양서에 포함하였다. 주요 기기로는 주냉각기, 주가열기, 주냉각수 펌프, 고압주입 탱크, 폐기물 저장탱크, 중간냉각수 열교환기, LMP 냉각기 및 Inter-changer 등이다.⁽⁶⁾

냉각수는 기기실로부터 수조 내에 설치된 배관을 통해 IPS로 유입되며 IPS를 거친 냉각수는 수조내 배관을 거쳐서 기기실로 복귀된다. IPS에서 냉각수에 가해진 열은 주냉각수계통의 냉각기

에서 제거된다. 주냉각수펌프는 계통 내에서 냉각수가 순환되기 위한 구동력을 제공한다. 또한 시험핵연료에 따라 적절한 압력을 유지하기 위하여 가압기를 두었으며 설비 기동 시 냉각수의 온도를 올리기 위하여 가열기를 펌프 후단에 두었다. 이와 같이 주냉각수는 IPS 운전온도, 압력, 유량조건을 맞추어 IPS로 공급된다.

정상냉각기능상실이나 배관과단사고 시 시험핵연료를 냉각시키기 위하여 비상냉각수계통을 두었다. 비상냉각수계통에는 2대의 고압주입탱크를 두어 일정기간동안 시험핵연료에 피동적으로 냉각수를 공급하도록 설계하였다. 기기의 다중화를 통하여 초기사고와 동시에 발생하는 안전관련계통 또는 기기의 단일고장에서도 안전기능을 지속적으로 유지할 수 있도록 하였다. 또한 냉각수의 충수, 배수, 처리 및 운전을 위하여 관통부냉각수계통, 중간냉각수계통, 취출, 보충 및 정화계통, 시료채취계통, 방사선 감시계통, 계측제어계통과 같은 지원계통을 설계하였다.

OPS의 주요 계통을 정리하면 다음과 같다.

- 주냉각수계통 : 노외공정설비의 주냉각계통은 하나로의 주냉각수 계통과는 별도의 시험압력, 온도 및 유량조건을 유지한다.
- 비상냉각수계통 : 주냉각수 배관 과단사고 시 초기 냉각을 위해 고압주입탱크로부터의 비상 냉각수를 주냉각수 계통에 직접 주입한다.
- 관통부냉각수계통 : 하나로 수조수를 순환시켜 주냉각계통 콘크리트 관통부의 환형공간을 냉각한다.
- 취출·보충 및 정화계통 : 주냉각수의 체적, 순도 및 화학적 특성을 제어한다.
- 폐기물저장 및 이송계통 : 핵연료노내조사시험설비의 전체의 계통수, 안전밸브와 감압밸브를 통해 배출되는 냉각수 및 기체폐기물을 수집하여 처리한다.
- 중간냉각수계통 : 주냉각수계통 및 취출, 보충 및 정화계통에서 열을 제거하여 이를 하나로 2차 냉각계통으로 전달하는 기능을 수행한다.
- 시료채취계통 : 유체의 수질을 주기적으로 감시하는데 사용한다.
- 수소제어계통 : 주냉각수의 용존산소를 제거하기 위하여 탈기탱크에 수소를 공급하는 계통이다.

- IPS 충전가스 공급 및 감시계통 : IPS 내부압력관과 외부압력관 사이에 네온가스 충전 및 배관과 배관커버 사이에 공기를 충전하고 감시하는 역할을 한다.

OPS 계통에 대한 3차원 기기배치도는 Fig.7에 나타내었다.

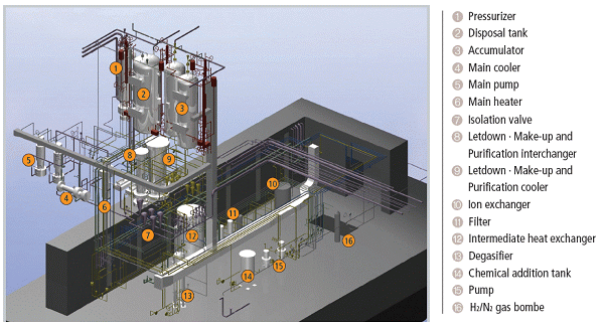


Fig. 7 3D view of Out-Pile System

4. 결 론

핵연료시험설비는 핵연료 봉에 대한 연소시험, 기계적 건전성 및 부식시험 등을 수행할 수 있도록 설계하였다. 원자로를 안전하게 보호하기 위하여 IVA는 2중 용기로 설계하였고 OPS와 장·탈착이 용이하도록 하였다.

FTL의 비정상 상태로 인한 사고시 하나로에 정지신호를 주도록 설계하였다. 정상운전와 예상 운전과도는 물론이고 설계기준사고 시에도 그 건전성을 유지하고, 안전기능을 수행하도록 하였다.

FTL은 2002년에 설계요건 및 설계개념을 정하고 기본적인 공정계통도(P&ID) 작성 등 기본설계가 완료되었다. 2003년에는 IVA, 수조내 배관, 지지대 등 IPS에 대한 구성, 상세 형상설계가 완료되었다. 그리고 OPS에 대한 사양서 및 계산서 작성 등 상세설계를 수행하였다. 2004년에는 구조해석, 열유체 해석, 사고해석 및 방사선방호 등이 계획되어 수행중이며 IPS 설계검증을 위한 mock-up 제작 및 실험이 수행되었다. 그리고 2005년에는 OPS의 기자재를 구매 제작하고, 안전성분석보고서를 작성하여 인허가를 신청하였다.

2006년 7월에 설치공사에 대한 인허가 승인을 받아 FTL 설치공사를 착수하여 하나로에 설치공사가 완료되었다.⁽⁷⁾

정상운전에 들어가게 되면 개발중인 경수로용 신형핵연료 등의 조사시험, CANFLEX, DUPIC, 미래형핵연료, 신형핵연료의 연소도 측정, 건전성 평가에 활용되어 핵연료개발 분야의 기술 확립에 기여하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업에 의해서 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Lee, C. Y., et al., 2001, Technical Review for Feasibility Study on Installation of Fuel Irradiation Test Facility, KAERI/CR-112/2001, Korea Atomic Energy Research Institute
2. Kim, Y.S., et al., 1992, KMRR Irradiation Test Loop Design Report KRF-KAE-003-DG-0038, Korea Atomic Energy Research Institute
3. Kim, J. Y., et al, 2002, esign Criteria of 3-Pin Fuel Test Loop, FL-070-DR-K001, Korea Atomic Energy Research Institute
4. Park, K. N., et al, 2003, Conceptual Design of In-Pile Parts for 3-Pin Fuel Test Loop for the HANARO, KAERI/TR-2541/2003, Korea Atomic Energy Research Institute
5. Park, K. N., et al, 2005, Manufacturing Design and Mock-up Fabrication of IPS Vessel Assembly, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 29~33
6. Lee, D. H., et al, 2005, Design Manual-Mechanical Parts, 3-Pin Fuel Test Loop, HAN-FL-E-070-DM-H001, Rev.1, Hyundai Engineering Co. Ltd./Korea Atomic Energy Research Institute
7. Lee, C. Y., et al, 2007, Development of 3-Pin Fuel Test Loop and Utilization Technology KAERI/RR-2836/2006, pp. 304~311