

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DUPIC 핵 연료의 하나로 조사시험을 위한 SPND 계장 리그 개발
Development of SPND-Instrumented Rig for HANARO irradiation test of
DUPIC fuel

이철용, 문제선, 박희성, 송기찬, 강권호, 정인하, 양명승

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료 연구시설(DFDF)에서 제조된 DUPIC 핵연료에 대한 3차 조사시험이 하나로에서 수행되고 있다. 이를 위해 2차 조사시험에서 사용된 무계장 설계를 기본으로 SPND 계장 리그를 설계 제작하였다. 특히 OR4 조사공내 열중성자 속 평가를 위하여 DUPIC 축소 연료봉 주위에 3개의 Rh-type SPND 장착하였다. 조사 연료봉 제작과 조사시험 리그의 조립은 핫셀 내에 설치된 레이저 용접장치와 리그 조립장치를 사용하여 원격으로 수행되었다. 조립된 조사시험 리그는 OR4 조사공에 설치된 안내관내에 설치되고, 조사시험 중 SPND에 의해 측정된 열중성자 값은 자체 설계한 모니터링시스템으로 전송된다. 금번 하나로 조사시험의 목표 연소도 약 7,000 MWd/tHM 이며 하나로 OR4 조사공에서 2001년 6월부터 조사시험을 수행하고 있다.

Abstract

The 3rd irradiation test of DUPIC fuel, which was fabricated in the DFDF has been performed at HANARO. For the objectives of this irradiation test, The SPND-instrumented rig was designed and manufactured on the basis of the design specifications of the non-instrumented rig used in the last irradiation test. The newly designed irradiation rig was equipped with three Rh-type SPND sensors around DUPIC mini-elements for estimating the thermal neutron flux in the OR4 hole. Manufacturing of mini-elements and assembly of the irradiation rig were remotely done in the hot cells using the laser welding system and assembling equipments. The DUPIC rig is installed through the guide tube at the HANARO OR4 hole and the thermal neutron flux measured at that location is transmitted to the monitoring system. This irradiation test launched in June, 2001 at the HANARO OR4, and its anticipated discharge burnup is about 7,000 MWd/tHE.

1. 서론

1990년 초 시작된 경.중수로 연계(DUPIC : Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) 핵연료 주기 기술개발은 경수로의 사용후핵연료를 재 가공하여 중수로에 사용하는 기술로 핵 비확성 기술에 잘 부합되어 국제적으로 널리 인정을 받고 있다. DUPIC 핵연료를 개발하기 위해서는 연구로 조사시험이 필수적인데, 조사시험을 통해서 핵연료의 노내 거동 및 성능 분석과 설계에 필요한 데이터 등을 얻을 수 있다. 현재 국내에서 가동되는 연구로는 원자력연구소의 하나로 이곳에서 조사시험을 수행하게 되는데, 이에 필요한 조사시험 기술의 개발과 조사장치의 개발도 중요한 분야의 하나이다[1,2]. DUPIC 핵연료 성능 평가의 1 단계로 자체 개발한 DUPIC 무계장 조사시험 리그(Rig)를 사용하여 DUPIC 모의 핵연료에 대한 조사시험을 하나로 OR4 조사공에서 1999년 8월 4일부터 1999년 10월 4일까지 2개월에 걸쳐 성공적으로 수행하였으며 조사후시험까지 완료하였다. 이후 원자력연구소 조사재시험시설의 핫셀 내에서 여러 차례의 시도 후 국내 최초로 DUPIC 핵연료가 제조됨에 따라 이를 이용한 2차 조사시험을 2000년 5월 10일부터 하나로 OR4 조사공에서 2개월 동안 수행하였으며 조사후시험이 진행 중에 있다. 그리고 본격적인 계장 조사시험의 전단계로서 조사시험 중 열중성자 측정을 위해 DUPIC 핵연료 조사시험 리그에 SPND(Self Power Neutron Detector)를 부착시킨 3차 DUPIC 핵연료 조사시험을 2001년 6월부터 수행하고 있다. 본 논문에서는 현재 수행중인 3차 DUPIC 핵연료 조사시험을 위한 SPND 계장 조사시험 리그 및 열중성자 속 모니터링 시스템 개발에 관하여 기술하였다.

2. 조사장치 개발

DUPIC 핵연료 조사시험장치로 1998년에 개발된 무계장 리그는 1차와 2차 조사시험을 거쳐서 성능이 확인되었다. 그러나 개발된 무계장 리그를 사용하는 조사시험은 정밀도가 요구되는 조사시험에는 한계가 있다. 따라서 여러 가지 계측 장치를 리그 내부에 설치하여 핵연료의 온도 측정, 내압 측정, 핵연료의 치수 변화 등을 측정할 수 있는 계장 리그 조사시험이 요구된다. 먼저 계장기술의 기본단계로 DUPIC 핵연료의 조사시험 중 중성자를 측정함으로써 정확한 선출력 계산과 연소도 평가를 할 수 있는 기술개발을 위해 SPND를 사용하였다. 이와 관련된 조사장치 개발은 다음과 같다.

2.1 계장 리그 개발

그림 1과 같이 SPND 계장 리그를 개발하였는데, 1차와 2차 조사시험 리그를 기본으로 하여 외통이 2.7mm 축소였으며, 연료봉의 크기는 변하지 않았으나 내부

관련 부품도 각각 2.7mm 씩 축소시키는 설계변경을 하였다. 리그의 크기를 외경을 축소시킨 이유는 하나로의 침니 내부 지지대에 고정된 안내관(guide tube)내에 DUPIC 리그를 장전하기 위해서다. 또한 금번의 조사시험은 OR4 조사공의 열 중성자 속 측정을 위해 SPND 센서 3 개를 housing support 에 설치할 수 있도록 설계 변경하였다. 그리고 support tube 의 길이를 조정함으로써 축소 핵연봉 집합체 위치를 70mm 상승시켰다. 이것은 2 차 조사시험은 수행된 고출력 조건에서 DUPIC 핵연료 성능평가를 하였으며, 금번 3 차 조사시험은 정상출력 조건에서 장기 연소에 따른 성능평가를 목적으로 하였기 때문이다.

2.2 리그 제작 및 내구성 실험

설계된 계장 리그는 도면과 같이 제작되었는데, 총길이 960mm 무게 약 3kg 으로 원재료 검사성적서, 용접부위 검사성적서, 치수 검사성적서 등이 엄격한 품질보증 절차서에 의해 제작되었다. 리그는 2 세트가 제작되어 한 세트는 다음과 같은 노외 시험을 하였다[4]. 실험은 원자력연구소 열수력 안전연구팀의 상온, 상압 실험장치인 cold test loop I 에서 모의 안내관을 설치하고 압력강하 실험, 진동 실험 및 내구성 실험이 Test 절차서에 따라 진행되었다. 압력강하 실험결과로 약 200kPa 의 압력강하를 유발하는 유량은 9.049 kg/s 로 측정되고, 진동실험에서는 진동주파수 영역은 약 5-32 hz, RMS 진동변위는 약 12.7 μm 이하, 최대진동 변위는 약 41.015 μm 이하로 측정되어 하나로 제한조건을 만족하였다. 또한 순환수 40 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 9.954 kg/s 유량 조건에서 40 일간 실시된 내구성 실험결과로 리그 각 부품에 대해 인식할 만한 마모는 발생하지 않았다.

2.3 안내관 제작 및 센서 라인처리 장치

하나로 OR hole 을 이용하여 조사시험 시 계장선을 보호하기 위해 침니 내부 지지대에 클램프 되는 안내관(Guide tube) 사용방법이 고안되었다[3]. 이때 설계된 안내관은 외경 60.5mm, 두께 1.65mm 의 SUS 파이프에 상하단에 bushing 이 장착된다. 이 안내관은 유동관 내부에 삽입되고, 안내관 내부에 리그가 장착되는데 설계치수는 그림 3 과 같다. 한편 \varnothing 1mm, 17m 의 3 개의 SPND line 은 핫셀 조립 작업과 하나로 장전 시 센서 선이 엉키지 않도록 취급되는 장치가 필요한데, 이를 위해 원격 릴 장치를 고안하였다.

3. DUPIC 핵연료봉 제조

DUPIC 핵연료 제조에 사용된 사용 후 경수로 핵연료는 조사 후 시험시설 저장조에 보관 중이던 것으로 고리 1 호기에서 1986년 10월 24일 방출된 초기 농축도 3.21%, 연소도 35,502 MWD/MTU 의 사용 후 핵연료이다. 이 사용후핵연료를 약

25cm 길이로 절단하고, 연료봉의 피복관을 절개하여 내부의 소결체를 분리하였다. 탈피복된 소결체 덩어리는 산화와 환원의 여러 공정을 거치고 소결하여 총 37 개의 소결체를 제조하였으며, 그 중 조사 시험용으로 육안검사를 토대로 15 개의 소결체를 선정하였다. 한편 제조된 소결체를 무심 연마기에서 건식 연마하였는데, 소결체의 직경은 평균 10.55mm, 길이는 평균 11.50mm, 밀도는 평균 10.23 g/cm³, 평균 결정립 크기 3.53-9.48 μ m 으로 측정되었다. 제조된 DUPIC 소결체는 2 차 조사시험 시 사용된 조사 연료봉과 같은 규격으로 길이 약 200 mm, 직경 12.12 mm의 zircaloy-4 튜브(두께는 0.66 mm) 내에 장전된다. 그림 2 와 같이 설계되어 가공된 조사 연료봉은 평균 출력 500W 급 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접시스템을 사용하여 봉단마개를 밀봉한다. 레이저 용접과정은 먼저 핫셀 밖에 설치된 용접 챔버에서 mini-element 의 하단면을 용접한다. 다음 하단면이 용접된 3 개의 연료봉은 핫셀 내에 투입하고, 그림 3 과 같이 용접할 준비가 되면 소결체 장전기에서 먼저 인코넬 스프링을 넣고 이어서 알루미나(Al₂O₃) 재질의 space block, 5 개의 소결체, space block 를 순서대로 넣는다. 끝으로 상단부 봉단 마개를 끼워 밀봉 용접하였다. 또한 용접 후 정해진 검사절차에 따라 용접부위의 건전성을 검사하였다. 용접부에 대한 조직검사, He 누출 검사, X-선 검사 등을 수행하였으며, 검사결과 레이저 용접에 의해 원격으로 제조된 mini-element 는 하나로 조사시험을 위한 건전성을 확인할 수 있었다[5].

4. DUPIC 리그 조립

용접된 3 개의 mini-element 는 2 차 조사시험에서 사용된 조립장치를 사용하여 조립절차에 따라 다음과 같이 원격 조립된다.

4.1 Element assembly 조립

Element assembly 는 3 개의 mini-element 가 중심으로 조립된 부분이다. 조립은 핫셀 내에 투입 전에 lower housing 과 housing supporting 및 cooling block 을 조립시키고, 각각의 mini-element 를 순서에 맞게 조립기 handle 을 조정하여 조립한다. Element assembly 의 최종 조립으로 housing nut 를 토크 10 kgf.cm 으로 설정된 수동 토크 드라이버를 사용하였다.

4.2 DUPIC 리그 조립

조사재시험시설의 M6 핫셀에서 조립된 element assembly 는 pardirac 을 이용하여 M1 cell 로 이송하고, 리그 조립장치를 사용하여 그림 5, 6 과 같이 전체 DUPIC 리그를 조립한다. 매뉴플레이터에 의해 원격으로 모든 과정을 처리해야 되는데 특히 3 개의 SPND 를 housing support 내에 삽입하고 swagelok 으로 고정하는 조립 과정이 매우 어려웠다. 차후 계장 리그 설계 시 보완되어야 할 사항이다. 한편

clamping nut 에 끼워지는 set screw 는 망원경으로 위치를 확인하고 콘덴서 방전기를 사용하여 고정시켜서 조립을 완성하였다.

4.3 DUPIC 리그 운송

조립이 완성된 DUPIC 리그는 하나로 조사시험을 위해 하나로 핵연료 cask 를 이용하여 하나로 Pool로 운반되는데, SPND 의 센서 선은 릴 장치에 의해 감겨진 상태로 리그의 grapple head 에 끼워진 상태로 운반하였다.

5. 하나로 조사시험

5.1 조사시험 목적

DUPIC 소결체의 3 차 하나로 조사시험 목적은 낮은 출력상태에서 장기간 조사 거동을 확인하고자 한다. 하나로 OR4 조사공에서 DUPIC 소결체가 조사 시험되는 조사조건은 다음과 같다. 하나로 출력 24MW , 제어봉 600mm 에서 MCNP 코드에 의해 계산된 최대 선출력은 48.9 kW/m 이며, 목표 연소도는 약 7,000 MWd/tHM 이다. 조사시험을 위하여 핵적, 기계적, 열수력적인 안전성 평가가 수행하였으며 하나로 사고 분석도 수행하였다. 이에 대한 자세한 내용은 제 3 차 DUPIC 핵연료 조사 시험 계획서에 잘 나타나 있다[6].

5.2 하나로 장전 및 Data Acquisition System

3 차 조사시험의 부차적인 목적으로 계장 조사시험기술을 확보하고, 하나로 OR4 조사공 내에서의 정확한 연소도 계산을 위해 SPND 를 이용하는 계장 조사시험이다. 따라서 1 차와 2 차 조사시험과는 다르게 DUPIC 리그를 장전하는데, 먼저 DUPIC 리그는 하나로 수조에서 건져올린 SPND 선과 함께 엉키지않도록 주의하면서 미리 설치된 안내관 상부까지 운반한다. 다음 안내관 뚜껑을 열고, SPND 선이 끊어지지 않도록 안내관 내부에 리그를 장전한다. 그림 7 는 조사시험을 위하여 조립된 DUPIC 리그를 하나로 연구로 OR4 에 장전하는 사진이다. 장전 후 SPND 선은 하나로 동남쪽 트렌치를 통하여 하나로 2 층 난간에 설치된 모니터링 시스템과 연결하였다. 이를 위해 조사시험 중 리그에 설치된 3 개의 SPND 로부터 열중성자를 측정하는 모니터링 시스템을 그림 8 와 같이 개발하였다. 이 모니터링 시스템에 의해 SPND 는 열중성자속 크기에 따라 0-2,000 nA 의 전류를 발생시키고, amplifier 는 이 신호를 0-10Volt 로 증폭시키고 PLC 와 인터페이스된 PC 로부터 모니터링 된다. 그림 10 는 샘플링 시간을 4 초로 하여 리그 장전 후 2 주차 모니터링된 SPND 데이터인데 하나로 출력이 0 MW 에서 24MW 로 기동함에 따라 SPND 값은 0 에서 0.5×10^{14} n/cm²-sec 의 열중성자 값을 보였다. 현재 장전 후 10 주까지 하나로 운전시 SPND 값은 그림 10 과 같은 경향으로 안정되게 측정되고 있으며,

SPND 선이 끊어지지 않으면 조사기간(2001년 6월 12일부터 2002년 1월까지 약 8개월) 까지 계속 모니터링할 예정이다.

6. 결 론

3차 DUPIC 핵연료에 대한 조사시험이 하나로에서 성공적으로 수행되고 있다. 이를 위해 2차 조사시험에서 사용된 무게장 리그를 기본으로 설계변경이 이루어졌는데, 특히 중성자 측정 센서인 로듐형 SPND를 DUPIC 핵연료 주위에 설치되는 리그를 개발하였다. 조사 연료봉 제조는 핫셀에서 설치된 레이저 용접장치를 사용하였으며, 리그의 조립은 핫셀 내에 설치된 조립장치를 사용하여 각 부품과 SPND를 원격 조립하였다. 한편 조립된 리그는 OR4 조사공에 설치된 안내관내에 설치되고 조사시험 중 SPND에 의해 측정된 중성자 값은 모니터링시스템으로 전송된다. OR4 조사공의 열중성자값은 24MW 하나로 출력에서 0.5×10^{14} n/cm²-sec 로 측정되었으며, 하나로 기동시작과 정지에 따른 신호출력 변화가 일정하게 측정되고 있다. 또한 이 측정값을 가지고 선출력과 연소도 계산에 활용하려고 한다.

금번의 조사시험의 경험을 바탕으로 4차 조사시험부터는 중심온도, 압력측정 및 중성자 속을 실시간으로 측정할 수 있는 계장 리그 조사시험을 계획하고 있다.

감 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이철용 외, DUPIC 핵 연료봉의 하나로 조사시험, 추계한국원자력학회, 2000.
2. 이철용 외., DUPIC 핵연료의 조사시험을 위한 계장기술, KAERI/TR-1484/2000, 한국원자력연구소, 2000.
3. 류정수 외, 하나로 침니내부지지대의 설계 지침서, KAERI/TR-1577/2000, 한국원자력연구소, 2000.
4. 문제선 외, DUPIC Irradiation Test Rig-003 내구성실험, KAERI/TR-1810/2001, 한국원자력연구소, 2001.
5. 김웅기 외, 3차 조사시험용 DUPIC 핵연료 제조, KAERI/ TR-1894/2001, 한국원자력연구소, 2001.
6. 송기찬 외, 제 3차 DUPIC 핵연료 조사시험 계획서, KAERI/TR-1830/2001, 한국원자력연구소, 2001.

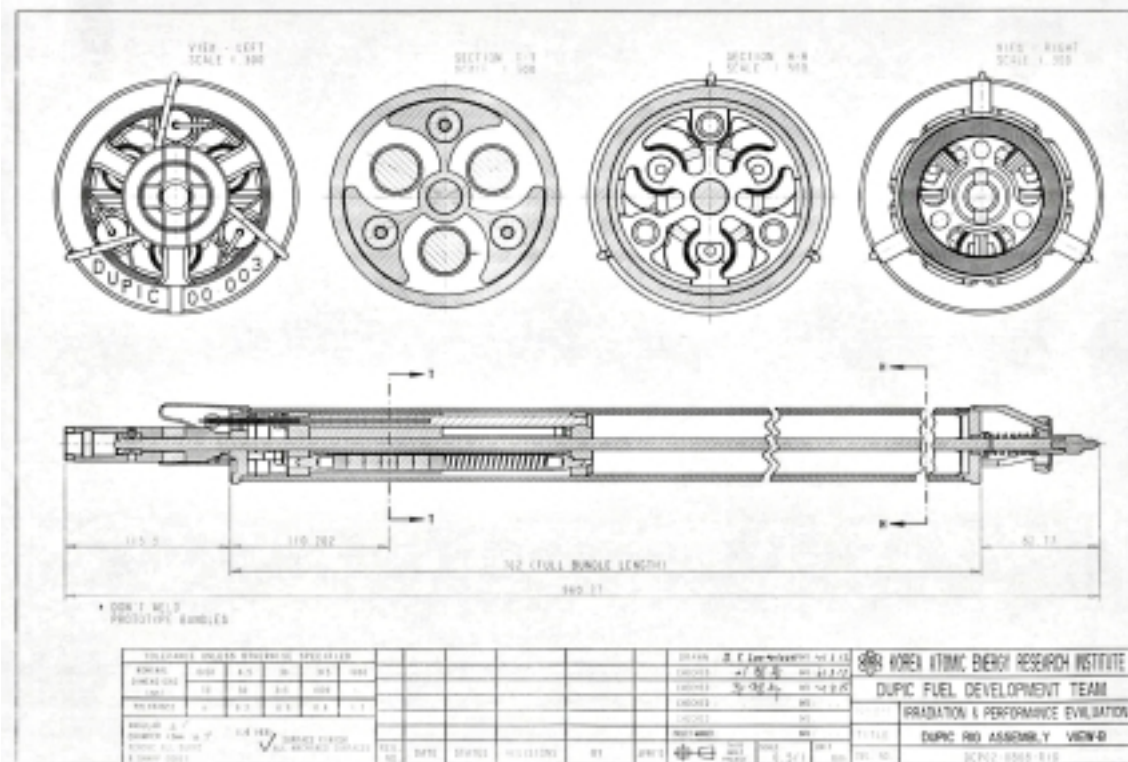
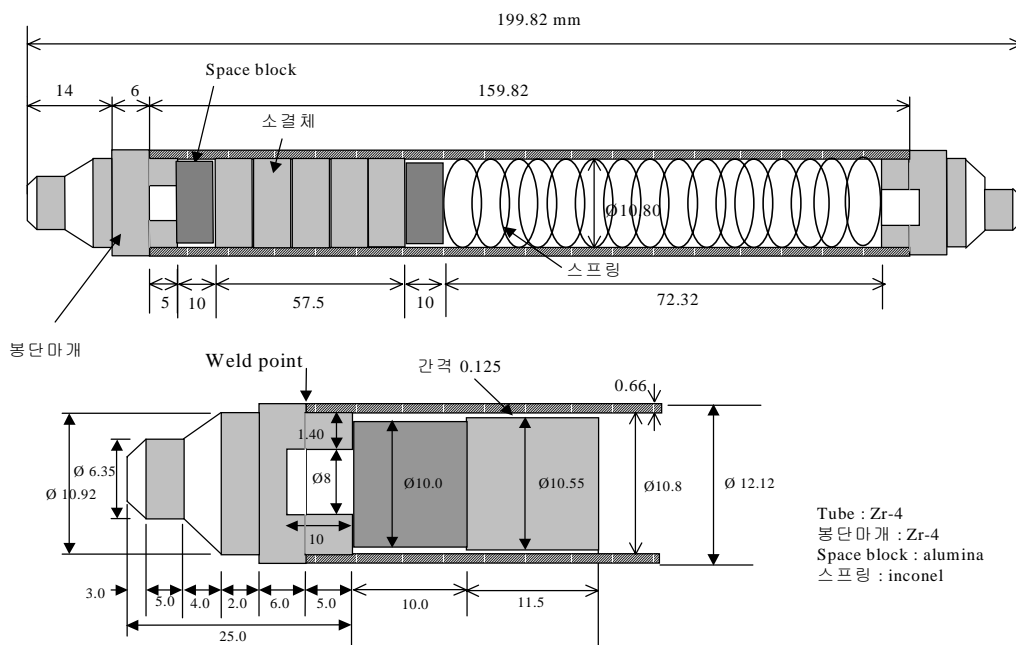


그림 1. 계장 리그 설계도면



Mini-element(0.66mm tube)

※ 3차 조사시험

그림 2. 조사연료봉 설계도



그림 3. 조사연료봉 용접 전

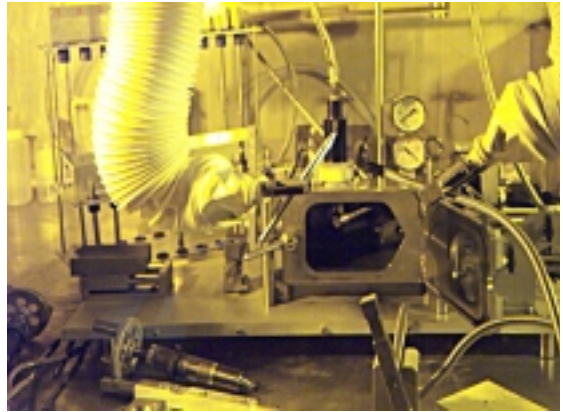


그림 4. 조사연료봉 용접 후



그림 5. DUPIC 리그 조립 전

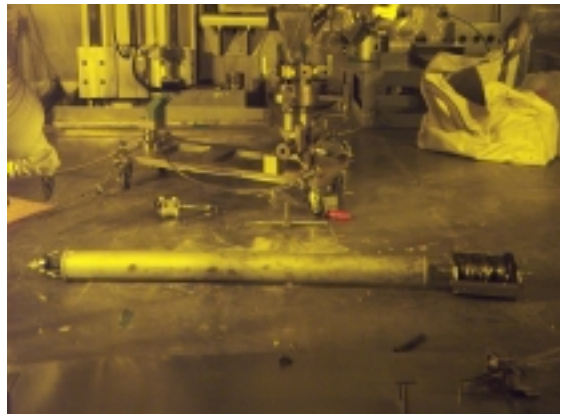


그림 6. DUPIC 리그 조립 후

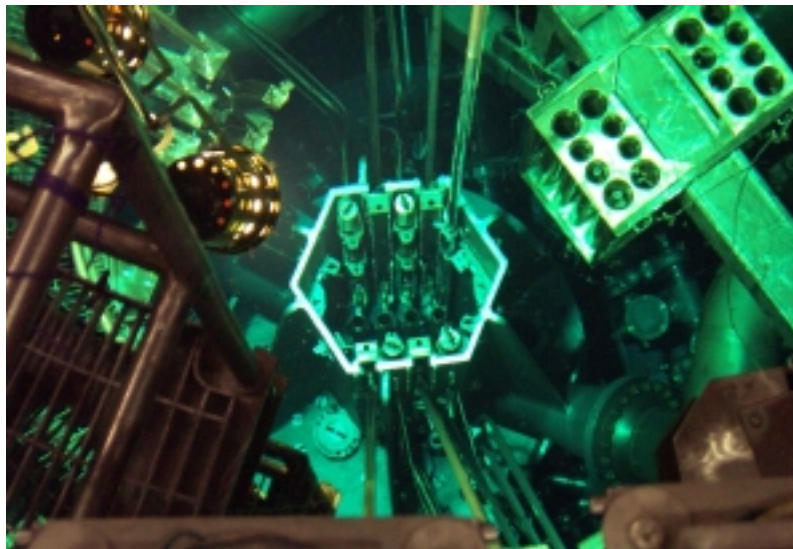


그림 7. DUPIC 리그 하나로 장전

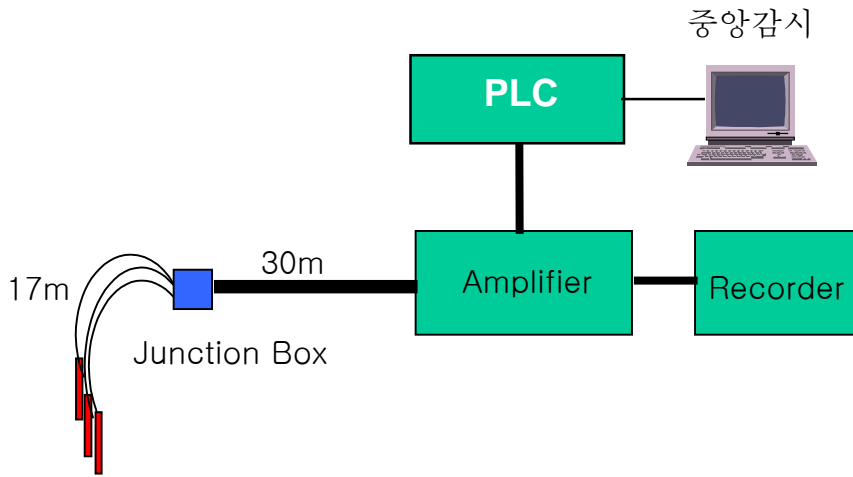


그림 8. SPND Data Acquisition System



그림 9. 열중성자 모니터링

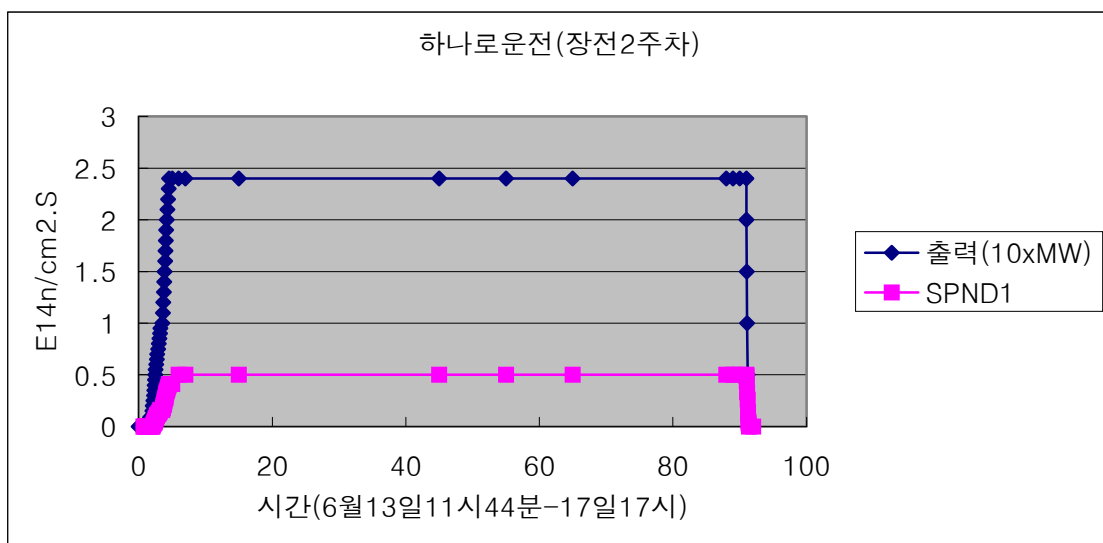


그림 10. 장전 2 주차 SPND 데이터