2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DUPIC SPND 계장 리그를 이용한 열중성자속 측정

Thermal Neutron Flux Measurement using the DUPIC SPND-Instrumented Rig

이철용, 문제선, 박희성, 강권호, 류호진, 정인하, 송기찬, 양명승

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료 연구시설(DFDF)에서 제조된 DUPIC 핵연료에 대한 3 차 조사시험을 약 10 개월 동안 하나로에서 수행하였다. 금번 조사시험에서는 OR4 조사공 내 열중성자속 평가를 위하여 DUPIC 축소 연료봉 주위에 3 개의 Rh-type SPND 를 장착하는 계장 리그를 개발하였으며, 조사시험 시작에서부터 약 5 개월 동안 열중성자 값을 측정하였다. 조사시험 중 SPND 에 의해 측정된 열중성자 값은 모니터링 시스템으로 전송되고 하나로 운전 출력 상황과 정확하게 일치함을 확인하였다. 시험 결과 측정된 열중성자값은 평균 0.45 $n/cm^2 \cdot s$ 이며, 이 값으로부터 DUPIC 축소 핵 연료봉의 평균 선출력은 약 33.5 KW/m 로 평가되었다.

Abstract

The 3rd irradiation test of DUPIC fuel, which was fabricated in the DFDF(DUPIC Fuel Development Facility) was performed in HANARO. For the objectives of this 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. The thermal neutron flux was measured at this location for 5 months the start of the test. The measured data were transmitted to monitoring system. We confirmed that the trend of SPND signal is well agree with that of HANARO power. The measured average thermal neutron flux is 0.45 $n/cm^2 \cdot s$ and the average linear power of DUPIC mini-element was estimated to be 33.5 KW/m.

1. 서론

경.중수로 연계(DUPIC : Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) 핵연료 주기 기술개발은 경수로의 사용후 핵연료를 재 가공하여 중수로에 사용하는 기술로 핵 비확성 기술에 잘 부합되어 국제적으로 널리 인정을 받고있다. DUPIC 핵연료를 개발하기 위해서는 연구로 조사시험이 필수적인데, 조사시험을 통해서 핵연료의 노내 거동 및 성능 분석과 설계에 필요한 데이터 등을 얻을 수 있다. 이를 위해 국내에서 가동되는 원자력연구소의 하나로를 이용하여 조사시험을 수행하고 있으며, 이에 필요한 조사시험 기술의 개발과 조사장치의 개발도 병행하여 진행하고 있다[1,2].

DUPIC 핵연료 조사시험 및 성능 평가과제에서는 1 단계로 DUPIC 무계장 조사시험 리그(Rig)를 개발하여, 모의 DUPIC 핵연료에 대한 조사시험을 하나로 OR4 조사공에서 1999 년 8 월 4 일부터 1999 년 10 월 4 일 까지 2 개월에 걸쳐 성공적으로 수행하였으며 조사후시험까지 완료하였다. 이후 원자력연구소 조사재시험시설의 핫셀 을 이용하여 국내 최초로 DUPIC 핵연료 제조에 성공하여 이를 이용한 2 차 조사시험을 하나로 OR4 조사공에서 2000 년 5 월 10 일부터 2 개월 동안 수행하고 조사후시험도 완료하였다[1]. 1 차와 2 차의 조사시험은 무계장 조사시험으로 여러 가지 센서가 설치되는 계장 조사와는 근본적으로 다르다. 이미 노르웨이의 HALDEN 과 같은 선진국에서는 계장 조사시험 위주로 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 핵연료에 대한 계장 조사시험이 하나로에서 2000 년 7 월에 약 2 주간에 걸쳐 수행된 바가 있으나, 선진국 수준의 계장 조사시험은 기술적인 어려움으로 아직 활발히 진행되지 못하고있는 실정이다.

본 과제에서는 본격적인 계장 조사시험의 전단계로 조사시험 중 열중성자 측정을 위해 DUPIC 핵연료 조사시험 리그에 SPND(Self Power Neutron Detector)를 부착시킨 3 차 DUPIC 핵연료 조사시험을 2001 년 6 월부터 2002 년 2 월에 걸쳐 약 10 개월 동안 수행하였다. 따라서 본 논문에서는 수행된 3 차 DUPIC 핵연료 조사시험의 SPND 계장 조사시험과 관련하여 SPND 계장리그의 설계, 데이터 측정장치 및 측정된 열 중성자의 선출력 평가에 관하여 기술하고자 한다.

2. DUPIC SPND 계장 리그

DUPIC 핵연료 조사시험장치로 1998 년에 개발된 무계장 리그는 1 차와 2 차 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 기본 단계로

DUPIC 핵연료의 조사시험 중 중성자를 측정함으로써 정확한 선출력 계산과 연소도 평가를 할 수 있는 기술개발을 위해 SPND 를 사용하였다. 이와 관련된 조사장치 개발은 다음과 같다.

2.1 SPND 계장 리그 개발

DUPIC 계장 조사시험에서 어려움 점이 계장선의 처리 문제이다. 전에 수행된 하나로핵연료 조사시험과 재료 조사시험에서는 긴 안내관을 하나로 벽면에 설치된 로보트팔과 결합시켜 사용하였다. 그러나 DUPIC 핵연료인 경우 안내관이 길면 리그운반에 제약을 받는다. 따라서 하나로 침니 내부 지지대에 클램프되는 안내관(guide tube)을 사용하는 방법이 고안되었다[3]. 이때 설계된 안내관은 외경 60.5mm, 두께 1.65mm 의 SUS 파이프로 상하단에 bushing 이 장착된다. 이 안내관은 유동관 내부에 삽입되고, 안내관 내부에 리그가 장착된다. 이 안내관을 사용하려면 기존의 1 차와 2 차 조사시험에 사용한 리그를 설계 변경하여야 한다. 그림 1 은 설계변경된 SPND 계장리그로 1 차와 2 차 조사시험 리그를 기본으로 하여 외통이 2.7mm 축소였으며, 연료봉의 크기는 변하지 않았으나 내부 관련 부품도 각각 2.7mm 씩 축소시켰다. 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 정상 출력 조건에서 장기 연소에 따른 성능평가를 목적으로 하였기 때문이다. 한편 Ø 1mm, 17m 의 3 개의 SPND line 은 핫셀 조립작업과 하나로 장전 시 센서 선이 엉키지 않도록 취급되는 장치가 필요한데, 이를 위해 원격 릴 장치를 고안하여 사용하였다.

2.2 SPND 계장

원자로에서 중성자속을 측정함으로써 위치에 따른 출력 분포와 핵연료의 연소도를 측정할 수 있다. 이때 널리 사용되는 중성자 측정센서가 그림 1 과 같은 구조를 갖는 SPND(Self Power Neutron Detector)이다. SPND 는 전기 신호용 동축케이블의 중심 도선에 중성자가 흡수되면 방사화 되고, 방사화된 방사선 동위원소의 베타

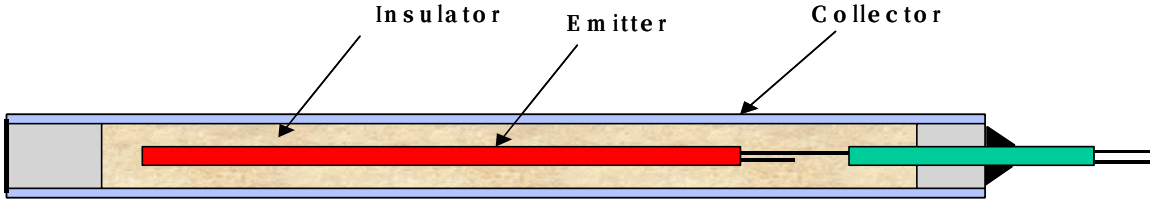


그림 1. SPND 구조

붕괴에 의해 방출되는 베타선이 실드 선에 도달함으로써 중심 도선에는 전자가 부족되어 중심 도선은 + 전위를 보이고, 실드 선에는 전자 공급에 의해 - 전위가 된다는 원리이다. 국내 하나로에서 조사시험의 SPND 사용 예는 2000 년의 계장 조사시험으로 이때 얻어진 열성자 속을 분석함으로써 하나로 노심 코드가 예측하는 열중성자속과 핵연료봉 선출력의 정확성을 평가하는데 사용하였다.

본 DUPIC 핵연료의 3 차 조사시험의 실험 목적은 OR4 하나로의 조사시험 중 SPND 에의해 측정되는 열중성자속 값을 측정하고, 이 결과로부터 DUPIC 소결체의 정확한 선출력과 연소도를 평가하기 위해 SPND 를 사용하였다[7]. 한편 계장 조사시험에서 습득되는 센서 라인 처리 기술 등은 차후 소결체 중심 온도 및 핵분열 생성기체에 의한 피복관 압력측정 등과 같은 계장 조사시험에 응용하고자 한다. 사용된 Studsvik Instrument 의 SPND 와 신호증폭기의 사양은 다음과 같다.

O Detector
- Emitter : Rh type Φ 0.7 x 50mm
- Collector : Inconel 600 tube Φ 2.5 x 0.25 x 90mm

O Amplifier(4 channel)
- Input signal current range : Emitter : 0-2000 nA
- Amplifier output : 0 to +/- 10V, 10mA max

3. 하나로 조사시험 및 Data Acquisition System

3.1 조사연료봉 제조 및 리그 조립

DUPIC 핵연료 제조에 사용된 경수로 사용후핵연료는 조사 후 시험시설 저장조에 보관 중이던 것으로 고리 1 호기에서 1986 년 10 월 24 일 방출된 초기 농축도 3.21%, 연소도 35,502 MWD/MTU 의 사용후핵연료이다. 이 사용후핵연료는 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 10.55mmn, 길이는 평균 11.50mm, 밀도는 평균 10.23 g/cm^3, 평균 결정립 크기 3.53-9.48 ㎛로 측정되었다. 제조된 DUPIC 소결체는 2 차 조사시험 시 사용된 조사 연료봉과 같은 규격으로 길이 약 200 ㎜, 직경 12.12 ㎜의 zircaloy-4 튜브(두께는 0.66 ㎜) 내에 장전된다. 설계 가공된 조사 연료봉은 평균 출력 500W 급 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접시스템을 사용하여 봉단마개를 밀봉한다. 레이져 용접 과정은 먼저 핫셀 밖에 설치된 용접 챔버에서 mini-element 의 하단면을 용접한다. 다음 하단면이 용접된 3 개의 연료봉은 핫셀 내에 투입하고, 용접할 준비가 되면 소결체 장전기에서 먼저 인코넬 스프링을 넣고 이어서 알루미나(Al_2O_3) 재질의 space block, 5 개의 소결체, space

block 를 순서대로 넣는다. 끝으로 상단부 봉단 마개를 끼워 밀봉 용접하였다. 또한 용접 후 정해진 검사 절차에 따라 용접 부위의 건전성을 검사하였다. 용접부에 대한 조직검사, He 누출 검사, X-선 검사 등을 수행하였다[5].

용접된 3 개의 연료봉은 M6 핫셀에서 조립되고, 조립된 연료봉 집합체는 M1 핫셀로 이동하여 원격 조립기를 사용하여 전체리그가 조립된다. 이때 전체 조립 시 SPND 의 센서는 특별히 고안된 릴 장치에 감겨진 상태에서 조립되었는데, 그림 3 은 최종 조립된 SPND 계장 리그를 보여준다.

3.2 Data Acquisition System

3 차 조사시험의 부차적인 목적으로 계장 조사시험 기술을 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 4 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 5, 6 과 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.

4. 열중성자속 측정 및 선출력 평가

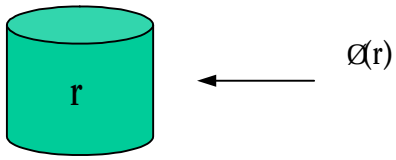
4.1 열중성자속 측정

2002 년 6 월 5 일부터 조사시험이 수행되었다. 설치된 3 개 SPND 의 열중성자 값은 한 개는 전혀 출력 값이 나오지 않아 핫셀 조립 중 단선된 것으로 판단되며, 두번째는 출력 값이 변화가 크게 움직이므로 이것도 조립과 운반 취급 중 센서의 손상을 받은 것으로 판단되었다. 그러나 3 번째 센서의 출력은 매우 안정되게 모니터링되어 이 값을 SPND 출력 값으로 활용할 수 있었다. 그림 7 은 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/cm^2 .sec 의 열중성자 값을 보였다. 보통 하나로 운전은 특별한 실험이 없는 한 일주일 단위로 24MW 출력으로 3 일 운전 후 4 일 정지하는 과정을 반복한다. 조사시험 기간 중 하나로 정기검사가 11 월에 수행되었는데, 이때 리그의 인출과 재장전을 하였다. 재

장전 후 센서가 단선되어 더 이상 SPND 측정실험은 수행되지 못하고 조사시험만 계속 진행하였다. 그림 8 은 장전 후 센서 선이 단선 될 때까지 측정된 값으로 SPND 값은 하나로 운전과 동일한 경향으로 안정되게 측정되었다. 그림 8 에서 보면 측정된 열중자의 평균값은 $0.45x10^{14}$ n/cm^2 .sec 이며, 최대값은 $0.54x10^{14}$ n/cm^2 .sec 로 8 월에 약 10 일 동안 재료 계장캡슐 조사실험이 수행된 기간에 측정되었다.

4.2 선출력 평가

하나로 OR4 에서 조사시험 중 측정된 평균 열중성자값 $0.45x10^{14}$ n/cm^2 .sec 을 가지고 DUPIC 소결체의 선출력을 계산하였다. 계산식은 r 지점에서의 중성자 속 Ø(r), 핵분열 단면적 Σf (r), r 로 표시한 지점에서 단위 체적 단위시간당 일어나는 핵분열의 반응 수는 Ø(r) 、 Σf (r) 이며, 이들 핵분열 반응으로 이 지점에서 단위 체적 단위 시간당 생성되는 열에너지 P(r)은 P(r) = k 、 Ø(r) 、Σf (r) 이다. 여기서 k 는 매 핵분열 당 발생하는 열에너지이며, Σf (r) 는 N_f (r) 、 σ_f 이다.



핵분열성 원자핵의 수밀도 N_f = 밀도/270 x 6.023 x 10^{23} x D 에서 소결체의 밀도 10.2, 농축도 D= 1.134% 값을 대입하여 계산하면 N_f 는 2.582 x 10^{20} 으로 계산된다. 또한 σ_f (U235) = 557 barns, σ_f (P239) = 742 barns 이고, 핵분열 원소인 U_{235}, Pu_{239}, Pu_{241} 의 평균 k 값 250.67 Mev 을 사용하면 평균 선출력은 다음과 같이 계산된다.

P = k 、 Ø(r) 、 Σf (r)
= k 、 Ø(r) 、 N_f (r) 、 σf
= 250.67 x 0.45 x 10^{14} x 2.582 x 10^{20} x 649.5 x 10^{-24} Mev/cm^3 、 sec
= 33.5 Kw/m (평균 선출력)

계산된 평균 선출력 값은 하나로 노심관리 코드에 의해 계산된 그림 9 의 선출력과 매우 유사하다. 또한 선출력의 경향은 측정된 그림 8 의 SPND 출력 값과 같은 경향을 보여주므로 계산된 평균 선출력 값의 정확성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

DUPIC 핵연료 연구시설(DFDF)에서 제조된 DUPIC 핵연료에 대한 3 차 조사시험을 약 10 개월 동안 하나로에서 수행하였다. 이를 위해 OR4 조사공내 열중성자속 평가를 위하여 DUPIC 축소 연로봉 주위에 3 개의 Rh-type SPND 를 장착한 계장 리그를 개발하였으며, 조사시험 시작에서부터 약 5 개월 동안 열중성자 값을 측정하였다. 조사시험 중 SPND 에 의해 측정된 열중성자 값은 모니터링 시스템으로 전송되고 하나로 기동과 정지에 따른 신호 출력 변화가 일정하게 측정됨을 확인하였다. 시험 결과 측정된 열중성자값은 평균 0.45 $n/cm^2 \cdot s$ 이며, 이 값으로부터 DUPIC 축소 핵연료봉의 평균 선출력은 약 33.5 KW/m 으로 평가되었다.

앞으로 측정된 값은 분석 코드를 사용하여 선출력과 연소도 계산을 수행할 예정이며, 3 차 조사시험의 경험을 활용하여 중심 온도, 압력 측정 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, 3 차 조사시험용 DUPIC 핵연료 제조, KAERI/ TR-1894/2001, 한국원자력연구소, 2001.
6. 송기찬 외, 제 3 차 DUPIC 핵연료 조사시험 계획서, KAERI/TR-1830/2001, 한국원자력연구소, 2001.
7. 이충성 외, 계장형 시험다발을 이용한 열중성자속 측정과 최대 선출력 평가, 추계한국원자력학회, 2000.
8. 이철용 외, DUPIC 핵 연료의 하나로 조사시험을 위한 SPND 계장 리그 개발, 추계한국원자력학회, 2001

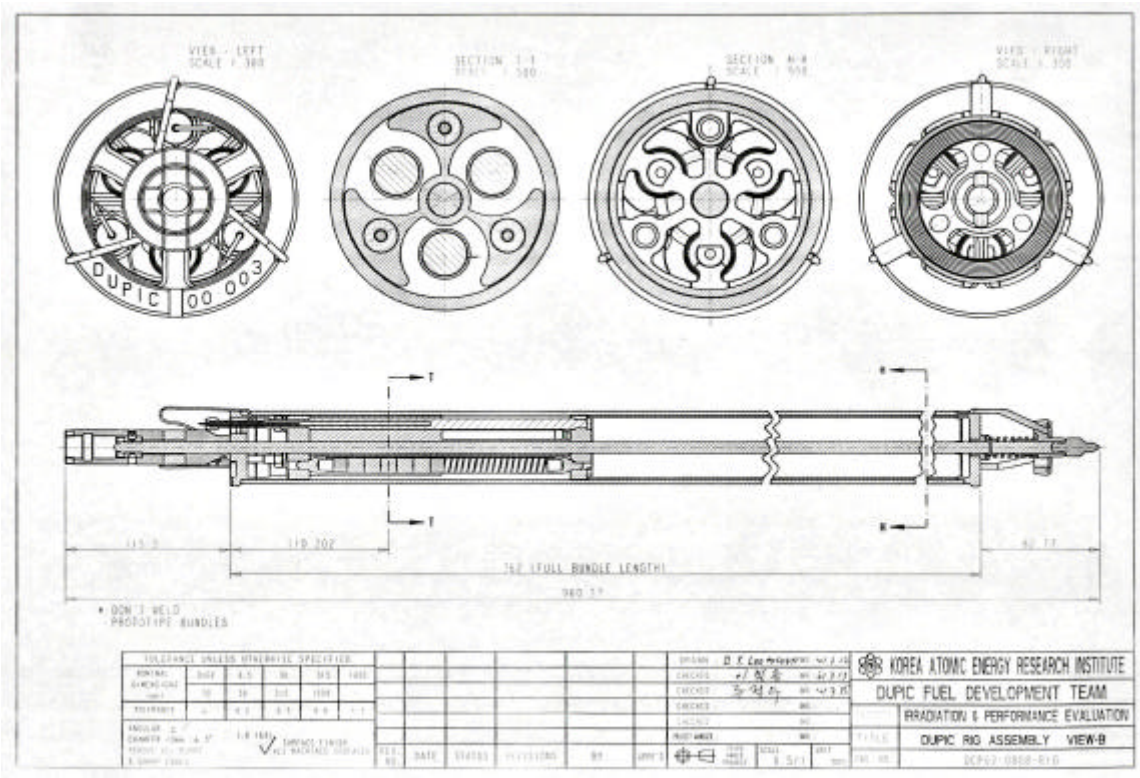
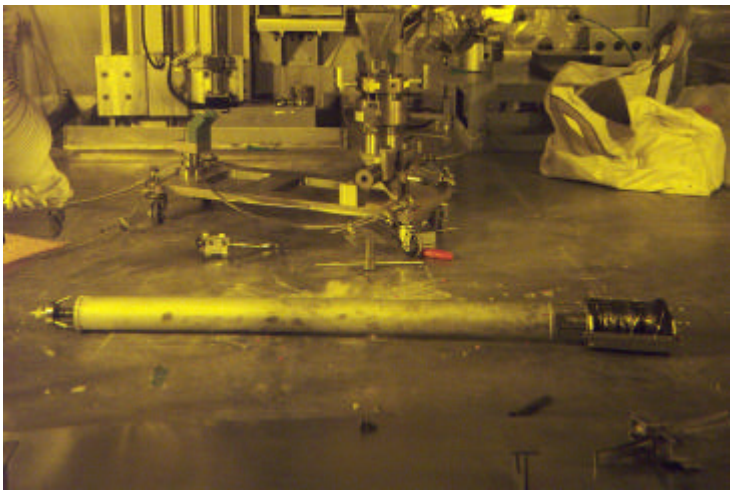


그림 1. 계장 리그 설계도면



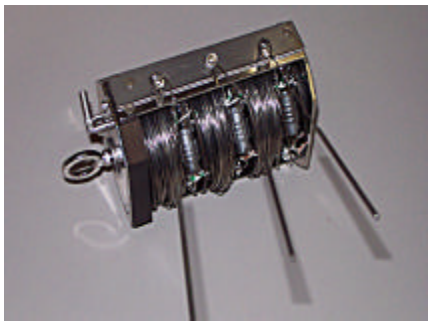


그림 2. DUPIC 리그조립 및 센서 릴장치

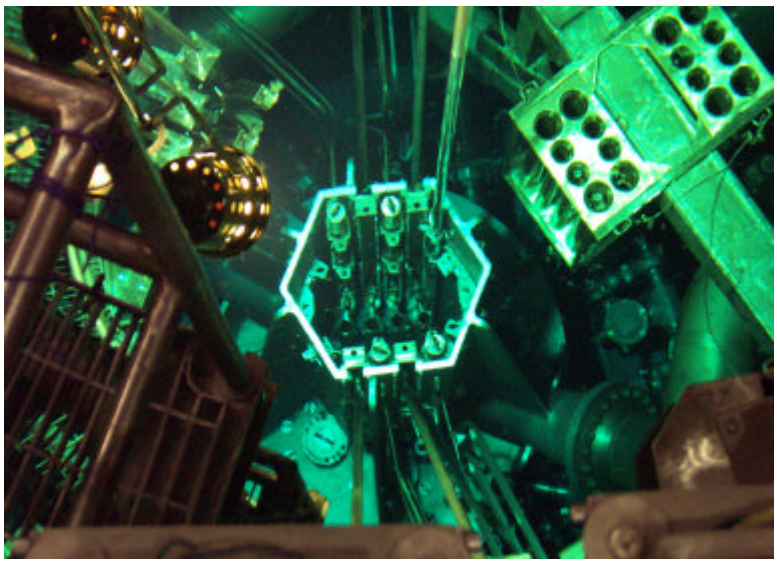


그림 4. DUPIC 리그 하나로 장전

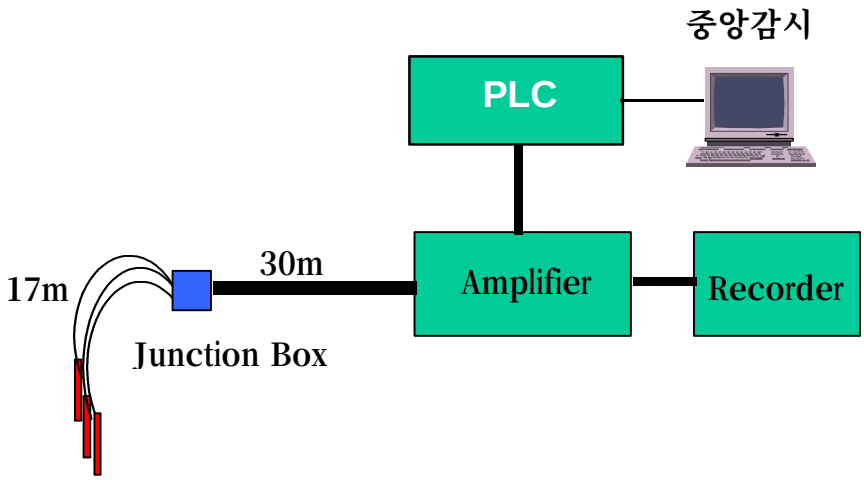


그림 5. SPND Data Acquisition System

그림 6. 열중성자속 모니터링

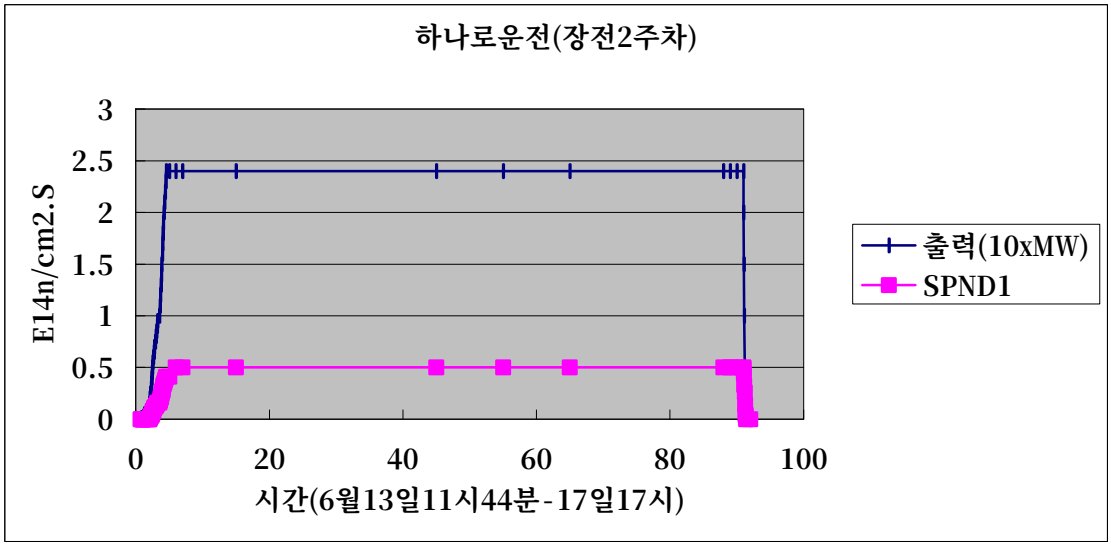


그림 7. 장전 2 주차 SPND 데이터

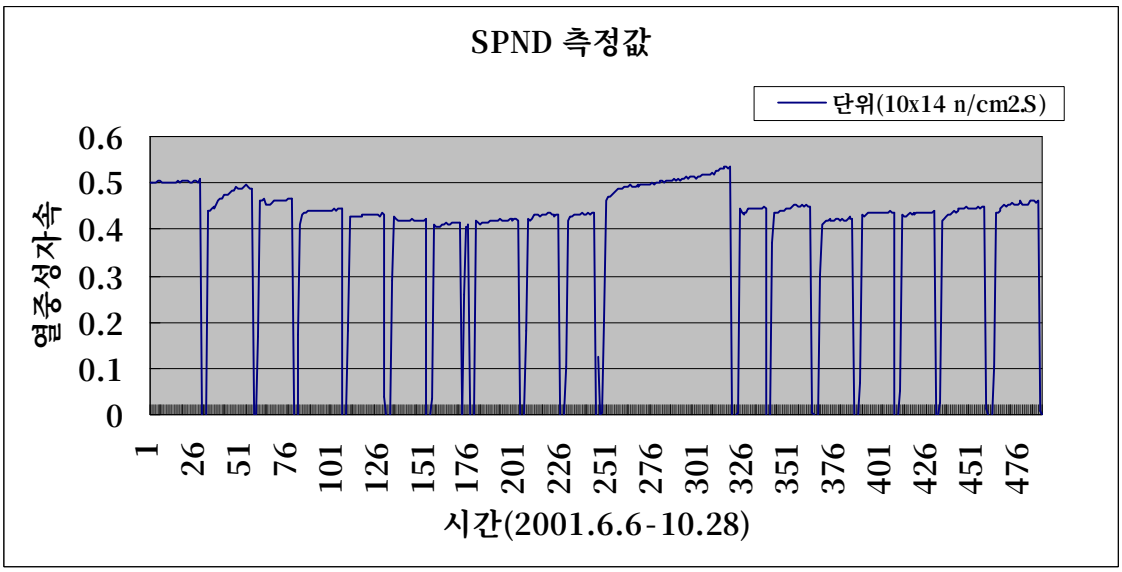


그림 8. 열중성자 측정 데이터

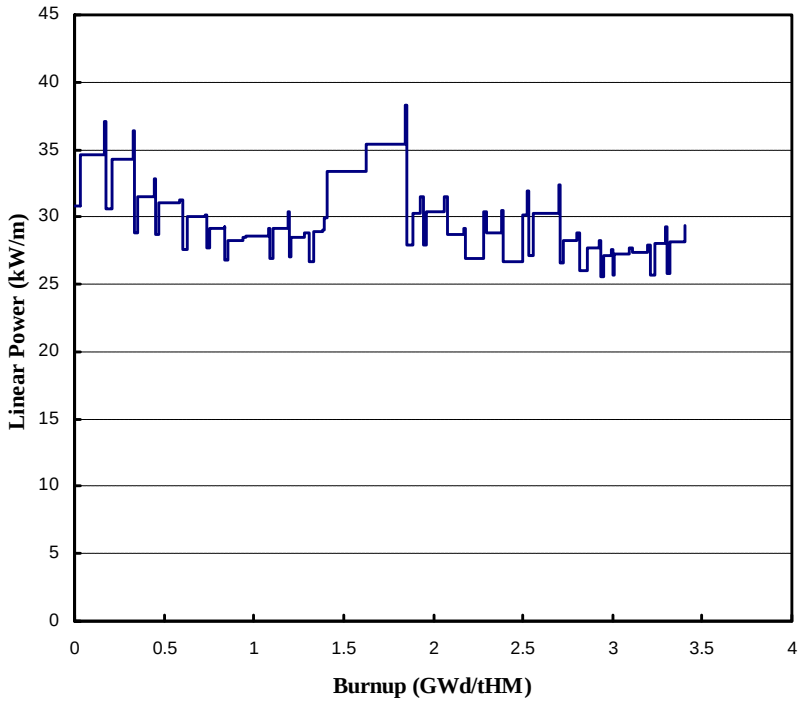


그림 9. 선출력 및 연소도