

《기술보고》

## 원자력 발전소 3호기용 국산핵연료 1차 시제품의 원자로 내 연소결과 보고서

(The Burnup Results of Korean-Made Nuclear Fuel Bundles in KNU-3)

임명관·엄두영

월성 원자력 발전소 기술부

(1986. 2. 20 접수)

### 1. 개 요

1984년 9월 8일부터 1985년 9월 30일까지 원자력발전소(원전) 3호기에 장정된 24개 국산 시제품 핵연료 다발의 노내 연소 기간 동안 연료 다발의 출력 이력 및 연소도를 CANDU의 핵연료 관리 프로그램인 RFSP (Reactor Fuelling Simulation Program) 코드와 실측한 연료 집합체의 온도변화로 핵연료로서의 효율적 가치를 평가하였으며 시제품의 건전성을 확인하기 위하여 원전 3호기의 결함연료 위치 탐지 계통으로 탐지된 각 연료 집합체의 지발중성자량을 DNDA(Delayed Neutron Data Analysis) 코드로 분석하였다.

이번 시제품은 한국 에너지연구소에서 제작하였으며 특히 시제품 자체의 효율성과 건전성에 대한 평가결과를 널리 소개하프르써 에너지 국산화에 밝은 이정표를 삼고자 한다.

### 2. 원전 3호기의 노심 핵연료 배열구조 및 핵연료 교체 방식

원전 3호기는 CANDU형 중수로로서 자연 우라늄을 핵연료로 사용하고 있다. 노심은 380개의 연료집합체(Channel)로 이루어져 있으며 한개의 연료집합체 속에는 12개의 연료다발(Bundle)이 일직선 상으로 배열되어 있어 총 연료다발수는 모두 4,560개이다.

연료 다발은 길이가 약 49cm이고 백묵 굵기정도인 37개의 연료봉으로 이루어져 있다. 모든 연료다발은 압력관 속에 들어 있으며 노냉각수는 압력관 속에서 연료다발의 연료봉 사이사이로 흘러 핵분열로 생성된

열 에너지를 증기 발생기로 옮겨준다.

380개의 연료 집합체는 정면에서 보았을때 그림 1과 같이 원형으로 배열되어 있으며 그 열과행에는 A~W, 1~22의 고유명칭이 각각 주어져 있다.

노냉각수의 흐름은 가압 경수로와는 달리 수평방향으로 흐르게 되어 있고, 노심의 모양은 가로누운 원통형을 이루고 있다.

핵연료는 일정한 잉여반응도의 유지를 위해 매일 평균 2.1개 연료집합체씩 교체되며 한번에 연료집합체 내의 12개 연료다발중 8개를 교체한다. 따라서 핵연료

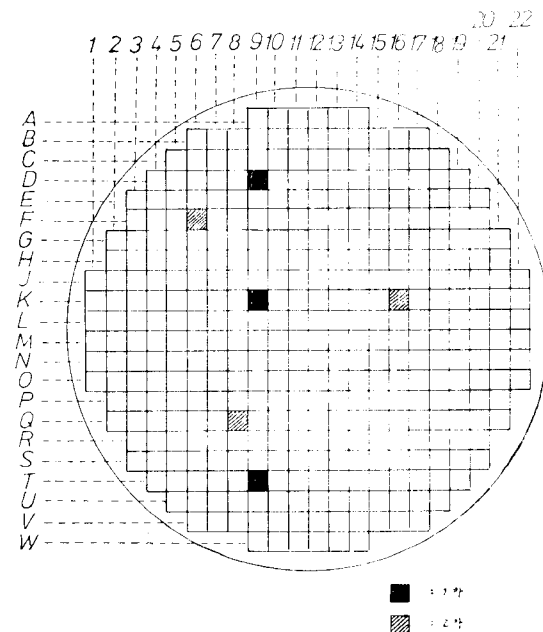


그림 1. 원전 3호기의 핵연료 배열구조 및 국산핵연료  
장전위치

평균교체 주기는 약 180일이고 노심내 체류기간은 약 270일이 된다.

### 3. 국산 핵연료 장전 및 방출내역

### 3.1. 장전 위치의 선정기준

국산 핵연료의 장전위치는 핵연료의 전전성과 효율성이 충분히 입증되도록 하기 위해 다음과 같은 기준을 고려하여 선정하였다.

(1) 연료집합체 기준 출력 준위가 6,000KW~6,500 KW사이인 곳

원자력 3호기의 연료 집합체당 평균 출력은 약5,417 KW이고 최고치와 최저치는 각각 6,523KW, 2,914KW 인데, D-9, K-9, T-9집합체의 기준 출력은 각각6,059 KW, 6,312KW, 6,027KW로서 출력 준위가 평균보다 조금높고 시제품의 성능을 판단하기 용이한 영역의 연료집합체를 선정 하였다.

(2) 결합연료 판별이 용이한 곳

시제품은 연료의 건전성이 입증되었기 아니기 때문에 운전중 연료에 결합이 생겨 노냉각수를 심히 오염시킬 우려가 있으면 즉시 교체해야 한다. 따라서 출력 운전중 연료의 결합과 그 위치를 탐지할 수 있는 “결합연료 위치 탐지계통”의 기능이 완벽한 연료집합체를 시제품 장전 위치로 선정했다.

(3) 연료집합체 온도지시치가 정상인 곳

연료집합체의 온도 분포는 출력 및 핵연료의 결합율과 깊은 관계가 있다. 따라서 국산핵연료가 장전된 후 방출될 때까지의 온도 변화 이력을 추적하여 시제품의 성능 판단에 도움이 될 수 있도록 연료집합체의 온도

표 1. 국산핵연료 장전 및 방출 내역

	D-9	K-9	T-9
장 전 일	1984. 9. 8	1984. 9. 11	1984. 9. 8
1 차 방출일	1985. 3. 18	1985. 4. 8	1985. 4. 17
2 차 방출일	1985. 8. 16	1985. 9. 17	1985. 9. 30
평균연소도 (MWH/kgU)	149.0	174.3	168.5

지시치의 신뢰도가 높은 곳을 장전위치로 선정했다.

### 3.2. 장전 및 방출 내역

3.1항에서 설명한 기준에 의해 연료집합체 D-9, K-9, T-9이 국산 핵연료의 장전 위치로 결정되었다. (그림 1참조)

그 결과 1984년 9월 8일 D-9연료집합체에 최초로 8개의 연료다발을 장전하였으며 같은날 T-9에 8개, 9월 11일 K-9에 8개씩 장전하였다.

사용연료의 방출은 1985년 3월 18일부터 시작하여 1985년 9월 30일 T-9 연료집합체에서 마지막 4개의 극산 연료다발이 방출되었다. 자세한 장전 및 연료 교체 내역은 표 1에 나와있다.

#### 4. 국산 핵연료 연소 기록

#### 4.1. 연소도 산출

국산 핵연료가 장전된 이후 모두 방출될때까지의 연료다발당 출력 및 연소도는 원전 3호기의 노심관리 프로그램인 RFSP(Reactor Fuelling Simulation Program)에 의해서 매주 계산, 추적되어 왔으며 핵연료의 결합 유무는 결합연료 위치 탐지 계통을 통하여 매주 확인

표 2. D-9 에 대한 연료다발 연소기록

[illegible]

표 3. K-9에 대한 연료다발 연소기록

장 전 순 서	1	2	3	4	5	6	7	8	평 균
고 유 번 호	한 83040	한 84042	한 83031	한 83022	한 83035	한 83025	한 83030	한 83023	—
연료다발무게(kg)	23.69	23.70	23.69	23.76	23.67	23.73	23.68	23.75	23.71
UO <sub>2</sub> 부 게(kg)	21.36	21.36	21.35	21.41	21.34	21.41	21.35	21.40	21.37
우 라 늑 무 게(g)	18,775	18,775	18,767	18,819	18,758	18,819	18,767	18,811	18,786
장 전 일	84.9.11	84.9.11	84.9.11	84.9.11	84.9.11	84.9.11	84.9.11	84.9.11	—
방 출 일	85.4.8	85.4.8	85.4.8	85.4.8	85.9.17	85.9.17	85.9.17	85.9.17	—
노심내채류일수 { 달력일	210	210	210	210	373	373	373	373	292
	FPD	160.5	160.5	160.5	315.5	315.5	315.5	315.5	238.0
평 균 출 력(KW)	672.8	722.9	722.2	671.6	431.1	495.6	497.3	434.6	581.0
최 대 출 력(KW)	709	764	760	696	723	636	630	747	708.1
최 저 출 력(KW)	628	667	665	623	167	368	400	180	462.3
방 출 연 소 도(MWH/kgU)	144	155	155	144	186	213	213	184	174.3
결 합 여 부	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	—

표 4. T-9 에 대한 연료다발 연소기록

장 전 순 서	1	2	3	4	5	6	7	8	평 균
고 유 번 호	한 83019	한 83020	한 83021	한 83018	한 83044	한 83043	한 83041	한 83039	—
연료다발무게(kg)	23.78	23.74	23.75	23.77	23.67	23.69	23.68	23.70	23.72
UO <sub>2</sub> 부 게(kg)	21.41	21.41	21.40	21.40	21.35	21.36	21.35	21.37	21.38
우 라 늑 무 게(g)	18,819	18,819	18,811	18,811	18,767	18,775	18,767	18,784	18,805
장 전 일	84.9.8	84.9.8	84.9.8	84.9.8	84.9.8	84.9.8	84.9.8	84.9.8	—
방 출 일	85.4.17	84.4.17	85.4.17	85.4.17	85.9.30	85.9.30	85.9.30	85.9.30	—
노심내채류일수 { 달력일	222	222	222	222	389	389	389	389	306
	FPD	172.4	172.4	172.4	331.4	331.4	331.4	331.4	251.9
평 균 출 력(KW)	696.4	739.5	737.6	692.0	363.5	389.0	391.6	362.6	546.5
최 대 출 력(KW)	758	808	808	761	665	532	512	656	687.5
최 저 출 력(KW)	619	651	650	613	122	283	293	128	419.9
방 출 연 소 도(MWH/kgU)	161	172	171	161	171	177	174	160	168.5
결 합 여 부	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	—

하였다. 그 결과로 핵연료가 장전된 3개 연료 집합체의 연소기록을 간추려 보면 표 2, 표 3 및 표 4와 같고 연료다발의 연소도는 최소 137MWH/kgU에서부터 최대 213MWH/kgU까지 연소 되었다.

#### 4.2. 방출 연소도

24개 시제품 연료다발의 평균 연소도는 164.0MWH/kgU이다. 이는 원전 3호기의 평균 설계 연소도인 155.0 MWH/kgU보다는 5.8%가 높으나 1985년도 원전 3호기의 평균 연소도 167.8MWH/kgU보다는 2.3%가 낮다. 그 이유는 K-9, T-9은 각각 174.3MWH/kgU, 168.5MWH/kgU으로 평균보다 높으나 D-9에서는 149.0MWH/kgU으로 낮기 때문인데 통상적으로 D-9 위치에서의 평균 방출 연소도는 150.0MWH/kgU으로 장전위치를 고려한다면 시제품의 방출 연소도는 평균

정도이다.

### 5. 원자로 운전 내역

#### 5.1. 연료다발출력

24개 시제품의 연료 다발 출력 평균은 565.4KW이고 노심 평균 연료 다발출력은 451.4KW로서 국산 핵연료의 평균 출력이 노심 평균 출력보다 25.3% 높는데 이것은 국산 연료가 장전된 위치의 출력이 평균보다 높아 시제품의 건전성을 입증하는 중요 요소이다.

#### 5.2. 연료 집합체 출력

일반적으로 핵연료를 교체하면 해당 연료 집합체의 출력은 약 10%, 온도는 약 3°C 상승하고 출력과 온도는 교체후 40 전출력일(FPD: Full Power Day)이 될

표 5. 연료 집합체 출력변화

		교체일의 출력(KW)			교체 후 40 FPD 의 출력(KW)	교체일의 온도변화(°C)	교체 40일 후 의 온도(°C)
		교 체 전	교 체 후	증감(%)			
D-9 1984.9. 8	PMCR	5,768	6,174	7.0	6,518	303→306	306
	RFSP	5,648	6,294	11.4	6,180		
K-9 1984.9.11	PMCR	6,017	6,750	12.2	6,674	304→306	306
	RFSP	5,775	6,428	11.3	6,448		
T-9 1984.9. 8	PMCR	5,022	6,009	19.7	5,676	303→307	307
	RFSP	5,430	6,177	13.8	6,062		
평 균		5,610	6,305	12.4	6,260	—	—

때까지 큰 감소없이 유지된다.

표 5는 시제품이 장전된 D-9, K-9, T-9의 출력 변화를 RFSP와 PMCR(Power Mapping and Calibration Routine) 코드로 추적한 결과이며, 온도는 출구 Feeder 관에 설치된 RTD(Resistance Temperature Detector)로 측정된 결과이다.

시제품 장전으로 D-9, K-9, T-9에 각각 9%, 12%, 15%의 출력 상승이 있었는데 출력 1%당 노냉각수 온도가 0.5°C씩 상승하므로 노냉각수 온도 증가로 각각 6%, 4%, 8%의 출력 증가가 흡수되고 나머지 3%, 8%, 7%는 노냉각수의 비등에 의하여 증가되는 출력을 흡수하였다. 즉 노냉각수 비등은 해당연료 집합체에서 출력이 각각 97%, 92%, 93%에서 시작되었으며 교체 후 40전출력일 까지도 비등이 계속되고 있었다.

### 5.3. 원자로 출력 변동

일반적으로 결합연료의 발생은 원자로 운전이 불규칙적일 때, 즉 원자로 트립이나 급격한 출력변동으로 핵연료의 선출력 밀도가 변할때 증가하는 경향이 있다

국산 핵연료 장전 기간중에는 1984년 11월 25일의 중수누출사고를 포함하여 모두 2회의 원자로 정지가 있었고 원자로 출력이 10%이상 변동한 주요 출력 변동은 모두 9회가 발생했다.

### 5.4. 결합 연료 발생 여부

시제품 24개 연료다발에 대하여 결합 연료 위치탐지 계통으로 핵연료의 결합유무를 추적한 결과 전 기간동안 결합의 미세한 징후도 없었다.

참고로 원전 3호기가 최초로 임계에 도달한 1982년 11월 부터 국산핵연료 시제품이 완전히 방출된 1985년 9월까지의 운전 기간중 총 교체연료 다발수는 10,152개이고 같은 기간중 확인된 결합연료 다발은 26개로서 결합발생율은 약 0.26%이다. 또한 국산 핵연료 연소 기간중에 교체된 총 연료 다발수는 5,456개이고 이중

표 6. 핵연료(24 다발)와 방카-C유의 비교

	비 용 (백만원)	무 게 (톤)	부 피 1 (kl)	부 피 2 (kl)
방카-C유	887	5,098	5,575	5,575
핵연료(24다발)	48	0.576	0.0998*	0.60**
방카-C유 핵연료	18.5배	8,850배	55,860배	9,290배

\* 핵연료부피 1 : 연료봉 사이의 공간을 포함한 핵연료 자체부피

\*\* 핵연료부피 2 : 핵연료의 운반, 저장을 위해 포장된 나무상자의 부피

에서 결합이 발생한 연료는 4개로(R-8, Q-5, R-15, O-6)결합 발생율은 약 0.073%이다.

### 5.5. 국산 연료 시제품의 에너지 생산량 및 경제성

국산 연료 시제품이 생산한 총 핵분열 에너지는 74,390MWH로서 원전 3호기가 1.438일(34.5시간)동안 생산한 열 에너지에 해당되며 23,522,000KWHe의 전력을 생산했다.

이와 동등한 전력을 생산하기 위해서는 방카-C유 5,575kl(약 5,098톤)가 소요되고 비용은 887,000,000원인데 핵연료의 총량은 576kg, 소요 비용은 48,000,000원으로 방카-C 유는 핵연료에 비해 총량은 8,850배, 비용은 18.5배이고 부피는 55,860배이다. (표 6 참조)

## 6. 결론 및 전망

이번의 1차 시제품 24개 연료 다발로 국산 핵연료의 품질이 완전히 입증된다고 할 수는 없으나 이상의 기록을 토대로 판단할때 국산 핵연료는 핵연료의 품질을 판별하는 가장 중요한 요소인 건전성(결합 발생율) 및 효율성(연소도와 출력)에 있어서 대단히 만족스러우며 캐나다산 연료와 비교할때 동등 이상의 품질 수준이라

고 판단된다. 에너지 부존자원의 빈곤으로 연간 70억 달러 상당의 석유를 수입하여 그 대부분을 에너지 생산에 소요하고 있는 우리나라가 에너지를 자립할 수 있는 길은 우리가 가지고 있는 기술과 노력을 에너지로 전환시키는 것뿐이라고 볼때 시제품의 노내 연소결과를 이제 우리나라도 원자력 산업기술을 에너지로 전환시킬 수 있는 단계에 이르렀음을 입증하고 있다. 현

재 원전 3호기에는 국산 핵연료 2차 시제품 24개 연료 다발이 1985년 11월 15일에 연료 집합체 F-6, K-16및 Q-8에 장전되어 연소중에 있고 3차 시제품의 장전계획을 비롯한 핵연료의 국산화계획이 순조롭게 진행되고 있어 CANDU형인 원전 3호기를 필두로 모든 원자력 발전소의 핵연료가 국산으로 대체 될 날도 멀지 않아 우리나라의 에너지 자급전망은 밝다.