

《기술보고》

국산 핵연료 1, 2차 시제품의 원자로내 연소 결과보고서

조 영 호 · 이 성 덕 · 엄 두 영

월성 원자력 발전소 기술부

(1987. 4. 13 접수)

1. 개 요

1984년 9월 8일부터 1985년 9월 30일까지 국산핵연료 1차시제품 24다발을 월성원자력 발전소(원전 3호기)에 장전하여 연소시험후 방출하였으며 이어 1985년 11월 15일부터 1987년 2월 5일까지 2차시제품 24다발을 장전하여 연소시험후 방출하였다. 그리고 1987년 2월 3일부터 1987년 2월 26일까지 3차시제품 362다발을 장전하여 현재 노심에서 연소중에 있다.

다음은 국산핵연료 다발의 출력이력 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 결합연료 위치 탐지 계통으로 탐지된 각 연료 집합체의 지발 증성자량을 DNDA (Delayed Neutron Data Analysis) 코드로 분석하였다.

이번 보고서는 원자력 학회지 제18권 제 2호(1986)에 게재된 「국산핵연료 1차시제품의 원자로내 연소결과」 보고서에 2차 시제품의 결과를 추가함으로써 통일된 보고서를 내리는 시도이며 한국에너지 연구소에서 제작된 시제품의 효율성과 건전성에 대한 평가를 널리 소개하므로써 에너지 국산화에 밝은 이정표를 삼고자 한다.

2. 원전 3호기의 노심 핵연료 배열 구조 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 배열되

어 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 연료집합체내의 12개 연료다발중 8개를 교체한다. 따라서 핵연료 평균교체 주기는 약 180일이고 노심내 체류기간은 약 270일이 된다.

3. 국산핵연료 장전 및 방출내역

3.1. 장전 위치의 선정기준

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

(1) 연료집합체 기초 출력준위가 6,000kw~6,500kw 사이인 곳

원전 3호기의 연료집합체당 평균 출력은 약 5,417kw이고 최고치와 최저치는 각각 6,523kw. 및 2,914kw인데 1차 시제품을 장전하였던 D-9, K-9, T-9집합체의 설계기준출력은 각각 6,059kw, 6,312kw, 6,027kw였으며 2차 시제품을 장전했던 F-6, K-16, Q-8은 각각 5,821kw, 6,373kw 6,444kw로서 출력준위가 평균보다 조금 높고 시제품의 성능을 판단하기 용이한 영

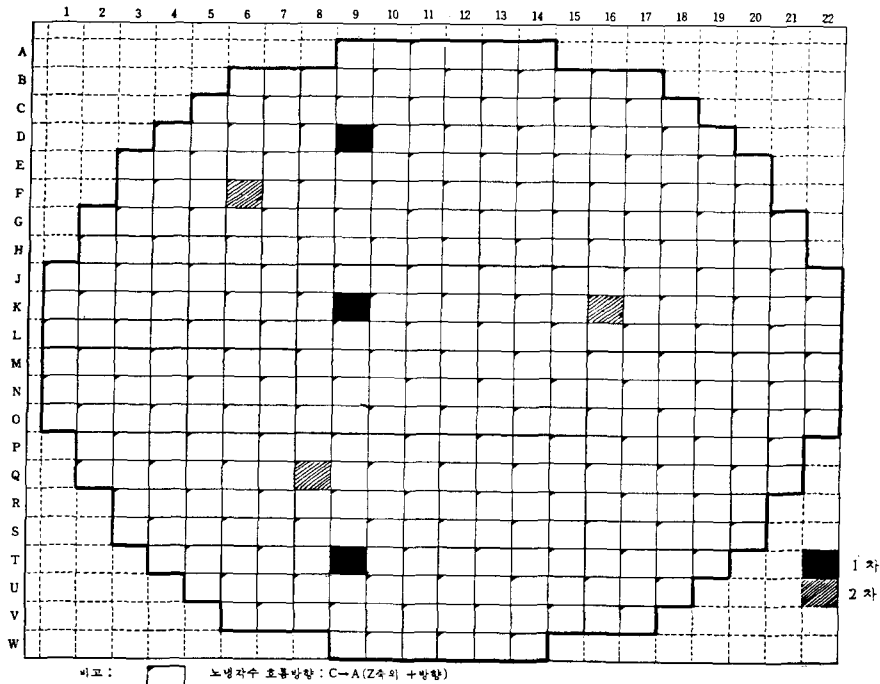


그림 1. 원전3호기의 핵연료 배열구조 및 국산 핵연료 장전위치

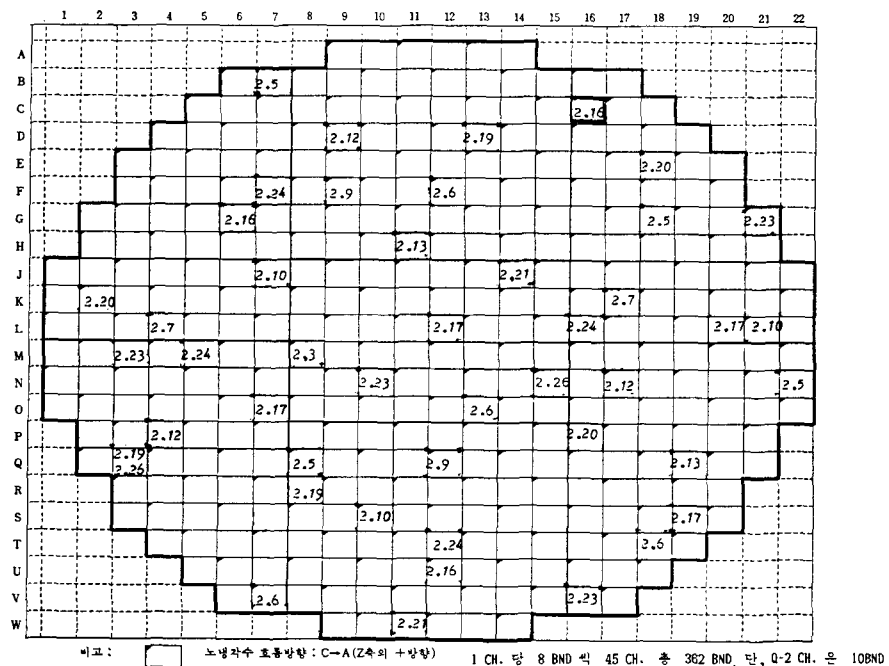


그림 2. 국산 핵연료 3차 시제품 장전 이력 (1987. 2. 3~1987. 2. 26)

역의 연료집합체를 선정하였다.

(2) 결합연료 판별이 용이한 곳

시제품은 연료의 건전성이 입증된 것이 아니기 때문

에 운전중 연료에 결합이 생겨 노냉각수를 심히 오염시킬 우려가 있으면 즉시 교체해야 한다. 따라서 출력 운전중 연료의 결합과 그 위치를 탐지할 수 있는 “결

표 1. 국산 핵연료 장전 및 방출내역

구	분	1차 시제품			2차 시제품		
		D-9	K-9	T-9	F-6	K-16	Q-8
장전 위치		D-9	K-9	T-9	F-6	K-16	Q-8
장전 다발수		8	8	8	8	8	8
장 전 일		84.9. 8	84.9.11	84.9. 8	85.11.15	85.11.15	85.11.15
1차 방출일		85.3.18	85.4. 8	85.4.17	86. 7.24	86. 7.24	86. 7.24
2차 방출일		85.8.16	85.9.17	85.9.30	87. 1.23	87. 1.20	87. 2. 5
노심내체류기간(FPD)		214.6	238.0	251.9	269.5	268.0	276.0
연료다발무게(kg/다발)		23.70	23.71	23.72	23.76	23.72	23.75
UO ₂ 무게(kg/다발)		21.37	21.37	21.38	21.47	21.44	21.45
우라늄 무게(kg/다발)		18.78	18.79	18.81	18.87	18.85	18.86
평균 출력(kw/다발)		568.7	581.0	546.5	546.4	581.0	578.3
최고 출력(kw/다발)		820	764	808	798	811	823
최저 출력(kw/다발)		127	167	122	109	142	130
연 소 도(MWH/KgU)		149.0	174.3	168.5	173.0	190.4	191.0
결 합 여 부		없음	없음	없음	없음	없음	없음

(주) 설계연소도; 155.0 MWH/kgU
 실적연소도; 168.7 MWH/kgU (1985년도)
 169.3 MWH/kgU (1986년도)

합연료 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 지시치의 신뢰도가 높은 곳을 장전위치로 선정했다.

3.2. 장전 및 방출 내역

3.1항에서 설명한 기준에 의해 1차시제품의 장전 위치는 연료집합체 D-9, K-9, T-9, 2차시제품의 장전 위치는 F-6, K-16, Q-8로 선정되었다(그림 1 참조). 따라서 1984. 9. 8일 최초로 국산핵연료 1차시제품을 노내에 장전하여 1985. 9. 30일까지 1차시제품을 모두 방출하였고 2차시제품은 1985. 11. 15일에 장전하여 1987. 2. 5일까지 모두 방출하였다(표 1 참조).

4. 국산 핵연료 연소기록

4.1. 연소도 산출

국산 핵연료가 장전된 이후 모두 방출될때까지의 연료다발당 출력 및 연소도는 원전 3호기의 노심관리 프로그램 RFSP(Reactor Fuelling Simulation Program)에 의해서 매주 계산, 추적되어 왔으며 시제품이 장전된 6개 연료 집합체의 연소기록을 표 1에 나타내었다. 각 연료다발의 연소도는 최소 137MWH/kgU에서부터

최대 215MWH/kgU까지 분포되었다.

4.2. 방출 연소도

1차 시제품 24개 연료다발의 평균 연소도는 164.0 MWH/kgU이다. 이는 원전 3호기의 평균 설계 연소도인 155.0MWH/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 1차 시제품의 방출 연소도는 평균 정도이다.

2차 시제품 24개 연료다발의 평균 연소도는 184.8 MWH/kgU으로서 설계 연소도 보다는 18.8%, 1986년도 평균 연소도 169.3MWH/kgU보다는 8.8%가량 높았다. F-6, K-16, Q-8에서의 평균 방출연소도는 통상적으로 각각 160, 191, 190 MWH/kgU정도로 높은 지역인데 국산연료의 성능확신을 위하여 평균연소도보다 높도록 연소시켰다.

5. 원자로 운전내역

5.1. 연료다발 출력

1,2차 시제품의 연료다발 출력 평균은 각각 565.4kw, 568.6kw로서 노심평균 연료다발 출력 451.4kw 보다 각각 25.3%, 26.0% 높는데 이것은 국산연료가 장전

표 2. 연료 집합체 출력변화

구 분	장 전 다 발		교체일의 출력(kw)			교체 후 40 FPD의 출력(kw)	교체일의 온도변화(°C)	교 체 40일 후의 온도(°C)
			교 체 전	교 체 후	증감(%)			
1 차 시 제 품	D-9 '84. 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 '84. 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 '84. 9. 8	PMCR	RFSP	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	—	—
2 차 시 제 품	F-6 '85.11.15	PMCR	5,560	6,110	9.9	5,830	304→306	307
		RFSP	5,466	5,988	9.5	5,849		
	K-16 '85.11.15	PMCR	5,770	6,540	13.3	6,450	303→307	307
RFSP		6,013	6,551	8.9	6,646			
Q-8 '85.11.15	PMCR	RFSP	5,760	6,550	13.7	6,400	303→307	306
		RFSP	5,970	6,858	14.9	6,737		
평 균			5,757	6,433	11.7	6,319	—	—

된 위치의 출력이 평균보다 높아 시제품의 전전성을 입증하는 중요 요소이다.

5.2. 연료 집합체 출력

일반적으로 핵연료를 교체하면 해당 연료 집합체의 출력은 약 10%온도는 약 3°C 상승하고 출력과 온도는 교체 후 40전출력일(FPD: Full Power Day)이 될때까지 큰 감소없이 유지된다.

표 2은 시제품이 장전된 위치의 출력변화를 RFSP와 PMCR(Power Mapping and Calibration Routine)코드로 추적한 결과이며 온도는 출구 FEEDER관에 설치된 RTD (Resistance Temperature Detector)로 측정된 결과이다.

표 2에 의하면 시제품 장전으로 연료집합체 D-9, K-9, T-9은 각각 9%, 12%, 15%, 연료집합체 F-6, K-16, Q-8은 9%, 11%, 14%씩 실제출력상승이 있었는데 출력상승 1%당 노냉각수 온도가 0.5°C씩 증가하므로 노냉각수 온도 증가로 각 연료집합체 출력상승분 중 6%, 4%, 8%, 4%, 8%, 8%가 흡수되고 각 연료 집합체의 나머지 출력상승분인 3%, 8%, 7%, 5%, 3%, 7%는 노냉각수의 비등에 의하여 증가하는 출력을 흡수하였다. 즉 노냉각수 비등은 해당 연료집합체에서 원자로 출력이 각각 97%, 92%, 93%, 95%, 97%, 93%일때 시작되었다.

5.3. 원자로 출력 변동

일반적으로 결합연료의 발생은 원자로 운전이 불규칙적일때 즉 원자로 정지나 급격한 출력변동으로 핵연료의 선출력 밀도가 변할때 증가하는 경향이 있다. 1차 시제품 장전중에는 1984.11.25일의 중수 누출사고

를 포함하여 모두 2회의 원자로 정지와 9회의 주요 출력 변동이 있었다(출력변화 10%이상) 2차 시제품 장전 기간중에는 1986.10.10 서대구 송전선로 사고를 포함하여 4회의 원자로 정지와 40회의 출력변동이 있었다.

5.4. 결합연료 발생 여부

원전 3호기가 최초로 임계에 도달한 1982년 11월부터 국산 시제품이 완전히 방출된 1987년 2월 5일까지의 총 교체 연료 다발수는 16,916개이고 같은 기간중 결합연료 다발은 30개로서 결합 발생율은 0.18%이었다.

국산시제품에 대한 핵연료의 결합 발생유무는 결합 연료 위치 탐지계통으로 감시하고 DNDA코드로 분석하였는데 결합의 징후가 발견되지 않았다.

한편 1차 시제품 장전 기간중 교체된 연료다발수는 5,456개였으며 이중 결합이 발생한 핵연료다발은 4개로 결합발생율은 0.07%였다.

2차시제품 장전기간중에는 6,024개의 연료다발을 교체하였고 결합연료는 두다발이 발생하여 결합발생율은 0.05%이었다.

5.5. 국산 연료 시제품의 에너지 생산량 및 경제성

국산연료 1,2차 시제품이 생산한 총 핵분열 에너지는 158,000MWhth로서 원전 3호기가 3.05일(73.3시간) 동안 생산한 열에너지에 해당하며 49,740,000 KWHe의 전력을 생산했다. 이와 동등한 전력을 생산하기 위해서는 방카-C유 12,560k(약 11,485톤)가 소요되며 비용으로는 약 20억원에달해 핵연료에 비해 중량은 9,970배 비용은 20.8배이고 부피는 64,080배이

다(표 3 참조)

표 3. 핵연료(48다발)와 방카-C유의 비교

	비 (백 단원)	용 무게 (톤)	부피 1(kJ)	부피 2(kJ)
방카-C유	2,000	11,485	12,560	12,560
핵연료 48다발	96	1,152	0.196	1.20
<u>방카 C-유</u> <u>핵연료</u>	20.8배	9,970배	64,080배	10,466배

* 핵연료부피 1: 연료봉 사이의 공간을 포함한 핵연료 자체부피

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

6. 결론 및 전망

이상의 1,2차 시제품 48개 연료다발의 노내 연료결과

를 토대로 볼때 2차 시제품이 1차 시제품보다 방출 연소도면에서 12.3%높았고 잦은 원자로 정지와 출력 변동에도 불구하고 결합발생 징후가 없어 1차 시제품에서 확인된 국산연료의 건전성(결합 발생율) 및 효율성(연소도와 출력)이 한번더 입증되었다.

현재 원전 3호기에는 1987.2.3일부터 1987.2.26일까지 3차 시제품 362다발이 장전되어 (그림 2)있고 대량생산계획이 순조롭게 진행중이며 88년부터는 전량 국산화할 계획이어서 에너지 부존자원이 적은 우리나라가 핵연료를 국산화 함으로서 가까운 장래에 에너지를 자급할 수 있는 기틀이 마련될 것으로 확신된다.