2004 춘계학술발표회 논문집 한국원자력학회

월성 1호기 시범장전 조사 CANFLEX-NU 핵연료의 성능평가 및 조사후 핵연료 수중 육안검사

Evaluation of CANFLEX-NU Fuel Performance Irradiated in Wolsong Generation Station #1 and In-Bay Inspection

> 정종엽, 전지수, 조문성, 석호천 이성덕∗, 서형범∗

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150 * 한국수력원자력(주), 월성원자력본부 제1발전소, 경북 경주시 양남면 나아리

요 약

국내 최초의 중수로로써 1983년 준공이래 약 20년간 운전 중에 있는 월성1호기의 노후화 문제 에 대비하기위해 원자로의 운저여유도 감소를 보상할 수 있는 CANFLEX-NU가 한국원자력연구소 와 캐나다원자력공사에 의하여 공동으로 개발되었다. 2002년 7월부터는 한국원자력연구소(KAERI), 한전전력연구원(KEPRI) 그리고 한국수력원자력㈜가 공동으로 월성 1호기에 24개의 중수로용 개량 핵연료, CANFLEX-NU를 시범장전 조사 하였다. 시범장전 채널로는 고출력 채널인 Q07과 저출력 채널인 L21을 선정하였고, 2004년 3월 현재 두 채널에 장전된 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발이 모두 방출되었다. 시범장전 조사 중 수집된 노내 열수력 운전자료들의 분석에 의하면 원자로가 안 정적으로 작동하고 있음을 알 수 있었고, ELESTRES 코드를 이용한 핵연료다발의 기계적 성능 평 가로부터 CANFLEX-NU 핵연료다발이 핵연료의 기계적 설계기준을 만족하고 있음을 확인 할 수 있었다. 한편 원자로로부터 방출되어 수조에 보관중인 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대해 수조 내 에서 육안검사한 결과 특별한 이상은 발견되지 않았으며 핵연료다발의 건전성을 유지하고 있음을 확인하였다

Abstract

To overcome the aging problem of Wolsong Unit 1 that has been in service for about 20 years since 1983, an advanced fuel called CANFLEX-NU was developed jointly by KAERI and AECL. A demonstration irradiation (DI) of 24 KNFC-made CANFLEX-NU fuel bundles in the Wolsong Power Generation Station 1 has been conducted jointly by KEPRI/KHNP/KAERI since July 10, 2002. By selecting the Q07 (high power) and L21(low power) channels, the total 24 CANFLEX bundles were loaded into and discharged from the reactor by 2004 March. Tracking the reactor operation data, it is noted that the reactor has been stably operated during the DI. An unusual performance and integrity of the CANFLEX elements could not be found in the ELESTRES predictions. By the detailed in-bay visual examination of the discharged CANFLEX

bundles in the bay, all the bundles were intact, free of defects and appeared to be in good condition.

1. 서 론

국내 최초의 중수로인 월성 1호기는 1983년 준공이래 약 20년 간 운전 중에 있으므로, 향 후 원자로가 노후화 (aging)되어 발생할 문제에 대비하여야 한다. 특히 압력관에 크립이 발생되고, 증기발생기 세관에 이물질이 누적되면 원자로의 운전여유도가 감소되어 원자로의 운전 및 안전에 지장을 초래할 수가 있다. 이와 같은 문제들에 대한 대처방안으로 원자로 측면의 대책방안이 강구 되어야 하지만, 경제적이면서도 효율적 방법으로, 원자로의 운전여유도를 향상시켜 원자로의 노후 화에 따른 운전여유도 감소를 보상할 수 있는 개량핵연료의 개발이 요구되었다. 이에 한국원자력 연구소는 캐나다 AECL과 공동으로 1991년부터 노후화 된 중수로의 출력감소 운전을 해결하고, 원 전 경제성을 제고하기 위한 방법으로 천연우라늄 (Natural Uranium)을 핵연료로 이용하는 중수로용 개량핵연료다발 (CANFLEX-NU)을 개발하였다[1, 2]. CANFLEX 핵연료다발은 KAERI와 AECL의 다 양한 열수력 및 노내 시험을 통해 성능이 입증되었으며, 1998년 9월부터 2000년 8월까지 천연 우 라늄을 장입한 24개 CANFLEX-NU 핵연료다발의 시범장전이 캐나다 Pt. Lepreau 발전소 (PLGS)에 서 성공적으로 수행되었다[3]. 한편, 이 기간 동안 CANFLEX-NU 핵연료다발의 월성1호기 시범장전 계획도 진행되었다[4].

CANFLEX-NU 핵연료다발은 43개의 핵연료봉으로 이루어지며, 기존 37개 핵연료봉다발과 핵연료봉 직경 및 배열은 다르지만 CANDU 6 중수원전의 핵연료장전계통과 양립하는 특성을 갖 는다. 이러한 CANFLEX-NU 핵연료다발은 기존 37개봉 핵연료다발과 비교하여 다음과 같은 두 가 지 개선된 설계 특성을 가진다. 첫째, "button"이라 불리는 CHF (Critical Heat Flux) 향상물이 각 핵 연료봉의 최적위치에 부착되어 있어, 임계채널출력 (Critical Channel Power, CCP)을 약 5% 이상 증가시킴으로써 운전여유도를 향상시킨다. 이러한 사실은 캐나다 Stern Laboratories에서 수행된 full scale water CHF 시험을 통해 입증되었다[5-7]. 둘째, CANFLEX 핵연료다발은 외환봉과 내환봉 의 크기가 다른기 때문에 보다 평탄한 반경방향 출력분포를 얻을 수 있으며, 이로 인해 연료봉 선 출력 첨두치가 약 20% 정도 감소되며 이러한 낮은 연료봉 선출력첨두치는 CANDU 원자로의 안전 여유도를 향상시키는 역할을 한다[8-10].

월성 1호기에의 CANFLEX-NU 핵연료다발 시범장전은 2000년 11월부터 한전전력연구원 (KEPRI)과 한국수력원자력㈜, 그리고 한국원자력연구소(KAERI)에 의해 공동으로 진행되었는데, 이 는 국내의 인허가 조건 하에서 CANFLEX 핵연료다발의 성능을 확인하고, 핵연료 제조 능력을 검 증하며 월성 1호기에의 전량장전에 대한 근거를 제시하기 위함이다.

24개 CANFLEX-NU 핵연료다발의 월성 1호기 시범장전에 대한 인허가와 시범장전 채널 선정, 핵연료다발 제조와 품질보증, 시범장전 노내 자료의 열수력 분석 결과 등은 참고문헌 [11]에 기술되어있다. 본 연구에서는 2002년 7월 시범장전한 후 가장 높은 출력을 보이는 CANFLEX-NU 다발과 핵연료의 재장전으로 인해 급격한 출력변화가 생긴 핵연료다발에 대하여 2003년 12월까지 수집된 노내 데이터를 근거로 하여 핵연료봉의 출력-연소도 이력을 구하였고, 이 출력-연소도 이 력을 바탕으로 조사중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 열 및 기계적 성능평가를 수행하였으며, 조 사후 방출된 CANFLEX-NU 핵연료다발의 저장수조 내 외관검사를 수행하여 다발 건전성 유지 여 부를 확인하였다.

2. CANFLEX-NU 핵연료다발의 연소이력 도출 및 기계적 성능 평가

2.1 CANFLEX-NU 핵연료다발 장전이력 및 축방향 출력이력

CANFLEX-NU 핵연료다발은 그림 1과 그림 2에 나타낸 것과 같이 저출력 채널인 L21과 고출력채널인 Q07에 장전되었으며, 총 시범장전 기간은 약 18개월 정도이며, 2003년 1월 31일부터 3월 16일까지의 기간은 정기적인 원자로 예방 정비 보수 작업이 진행되었다.

월성 1호기의 정규 절차에 따라 매주 2회씩 수행되는 RFSP 코드계산은 크게 중성자 확 산 방정식 계산과 Powermap 계산으로 나뉘어 진다. 중성자 확산 방정식 계산은 정상운전 중 POWDERPUF 및 SIMULATE 모듈을 사용하며 History Based (HI Card) 방법에 의해 수행된다. 중 성자 확산방정식 계산 후 Powermap 계산이 수행되는데, 정상운전 중 READAMODE, FLUXMAP 및 SIMULATE 모듈이 사용된다.

두 채널의 축방향 출력분포를 시범장전 후부터 약 두 달 간격으로 계산하여 그림 3에 나 타내었다. 그림 3으로부터 시범장전 된 CANFLEX-NU 핵연료 채널의 축방향 출력분포는 정상적인 좌우 대칭형태가 유지되면서 연소됨을 알 수 있으며, 최초 장전 이후 점차 감소하던 다발 출력이 재장전 이후 다시 증가하는 양상을 확인 할 수 있다.

2.2 CANFLEX-NU 핵연료다발 각 봉의 출력-연소도 이력 산출

그림 4 (a) ~ (d)에 나타낸 바와 같이 Q07 고출력채널과 L21 저출력채널에서 조사되는 CANFLEX 핵연료다발 각 봉의 출력-연소도 이력이 도출되었고, 이를 이용하여 핵연료다발의 열 및 기계적 성능을 평가하였다

그림 4(a)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지 Q-07 고출력채널의 6번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0119 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외환봉은 전형적인 고출력-고연소도의 이력을 보이고 있다. 장전 직후의 선출력은 41 kW/m이고, 68 MWh/kgU의 연소도에서 최대 42 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 210 MWh/kgU의 방출연소 도에서 35 kW/m의 선출력까지 감소함을 알 수 있다.

그림 4(b)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지는 Q-07 고출력채널의 4번 위치에 서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기 까지는 12번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0121 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 이 핵연료다발은 다발 재장전으로 인해 출력이 급감하게 되는데, 외환봉의 경우 처음 장전 직후 약 35 kW/m의 선출력을 보이다 180 MWh/kgU 연소도에서 30 kW/m의 선출력까지 감소하고 이 후 채널 내의 12번째 위치로 이동한 후 213 MWh/kgU의 연소 도까지 약 7 kW/m의 거의 일정한 선출력이 유지됨을 알 수 있다.

그림 4(c)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지는 Q-07 고출력채널의 1번 위치에 서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기 까지는 9번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0124 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 이 핵연료다발은 다발 재장전으로 인해 출력이 급증하게 되는데, 외환봉의 경우 처음 장전 직후부터 약 48 MWh/kgU의 연소도까지 약 7 kW/m의 선출력을 유지하다 채널 내의 9번째 위치로 이동한 후 약 35 kW/m의 선출력까지 급증하고 하고 이 후 약 188 MWh/kgU의 연소도까지 약 30 kW/m의 선출력까지 감소됨을 알 수 있다.

그림 4(d)는 2003년 1월 6일부터 2003년 8월 11일까지 Q-07 고출력채널의 6번 위치에서

조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0111 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림 4(a)에 나타낸 KF0119 다발과 마찬가지로 전형적인 고출력-고연소도의 이력을 보이고 있다. 장전 직후의 선출력 은 약 41 kW/m이고, 50 MWh/kgU의 연소도에서 최대 42 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 약 200 MWh/kgU의 방출연소도에서 36 kW/m의 선출력까지 감소함을 알 수 있다.

2.3 CANFLEX-NU 핵연료다발의 열 및 기계적 성능 평가

핵연료봉은 정격출력 운전, 핵연료 재장전 때 발생하는 출력 증가와 과출력 운전 등을 포 함하는 정상상태 운전 시에 구조적 건전성을 유지해야 하며, 이를 위해 다음의 열 및 기계적 설계 기준들을 만족해야 한다.

- 핵연료봉 내압 : 냉각재 압력 이하로 유지
- · 핵연료 온도 : UO₂ 용융온도 이하로 유지
- 피복관 산화 : 피복관 내면온도가 산화가속온도 이하로 유지

그림 5는 본 연구에서 고려하고 있는 KF0119, KF0121, KF0124, KF0111의 외환봉 내부 기체압력 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 출력 급증을 보이는 KF0124 다발 외환봉 에서 약 0.78 MPa의 최대 내부 기체 압력이 계산되며 이는 설계기준인 냉각재 압력에 비해 상당 히 낮은 결과임을 알 수 있다. 연료봉의 내압이 냉각수 압력보다 작다는 것은 소결체와 피복관 사 이에 틈새가 벌어지지 않음을 의미하며, 따라서 현재까지 CANFLEX-NU 핵연료봉은 핵연료봉 내 압에 관한 설계기준을 만족한다고 할 수 있다.

그림 6은 KF0119, KF0121, KF014, KF0111 다발의 외환봉 소결체 중심부분에서 구한 핵 연료 온도변화 결과를 나타내었다. 결과에 나타나듯이 핵연료 온도는 출력에 민감하게 변화하며, 최고온도는 Q-07 채널의 KF0119 다발 외환봉에서 1263 ⁰C로 계산되었다. 이 값은 설계기준인 UO₂ 소결체 용융온도 (약 2840 ⁰C) 보다 낮은 값이며 따라서 CANFLEX-NU 핵연료봉은 현재까 지 핵연료 온도에 관한 설계기준을 만족한다.

그림 7은 각 다발의 외환봉에서 구한 피복관 내표면 온도변화 결과를 나타내었다. 핵연료 중심온도 변화와 마찬가지로 피복관 온도변화도 출력에 민감하게 변화한다. 중수로용 핵연료의 경 우 피복관 내면에 Canlub 피막처리를 하므로 피복관 내면에서는 산화 층의 형성이 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 피복관 산화는 냉각재와 접촉하는 피복관 외면에서 발생된다. 그러나 보수적 평가를 위해 피복관 내면에서의 온도를 기준으로 피복관의 산화 개시 여부를 평가하도록 하였다. 이 때 피복관 산화는 피복관 온도에 큰 영향을 받기 때문에 피복관 온도가 산화를 가속시키는 온 도보다 높아지지 않도록 해야 한다. 해석을 통해 구해진 피복관 내표면의 최고온도는 KF0119 다 발 외환봉에서 340 ⁰C이며, 이들 값은 모두 산화가속 기준온도인 397 ⁰C 보다 작음을 알 수 있다. 따라서 CANFLEX-NU 핵연료봉은 현재까지 피복관 산화에 관한 설계기준을 만족한다.

그림 8은 각 다발 외환봉 중간부에서의 원주방향 변형도 결과를 보여준다. 최대 원주방향 변형률은 약 7.5 %이고, 이로 인해 야기될 수 있는 결함 확률(defect probability)은 0 이다.

3. 조사후 CANFLEX-NU 핵연료다발의 수중 육안검사 결과

2002년 7월 10일부터 월성 1호기 Q07 고출력 채널과 L21 저출력 채널에 장전되어 조사

되고 방출된 CANFLEX-NU 핵연료다발들은 사용후연료 저장조에 저장 중이며, 이들 사용후 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대한 육안검사가 2003년 11월 12일에 월성 1호기 사용후연료 저장 조에서 수행되었다.

3.1 육안검사용 CANFLEX-NU 핵연료다발 선정

월성 1호기 Q-07 채널과 L-21 채널에서 조사되고 방출된 CANFLEX-NU 핵연료다발 중 에서 5개의 다발을 선정하여 육안검사를 시행하였다. 육안검사에는 KAERI 및 KEPRI 연구진, AECL 전문가 및 월성1호기 연구원 들이 참여하였다. 선정된 다발들은 Q-07 채널에서 조사된 다 발 4개(KF0111, KF0119, KF0117, KF0121)와 L-21 채널에서 조사된 다발 1개(KF0115)이며 이 다 발들을 선정한 이유는 다음과 같다.

- KF0111, KF0119: Q-07 채널 내 6번째 위치에서 최대 다발 출력으로 조사됨
- KF0117: Q-07 채널 내 8번 위치에서 37개봉 핵연료다발과 인접하여 조사됨
- KF0121: Q-07 채널 내에서 위치이동으로 인한 출력변화가 있었고 이상유동 영역에서 조사됨
- KF0115: L-21 채널 내 6번 위치에서 최대 다발 출력으로 가장 오랫동안 조사됨

3.2 CANFLEX-NU 핵연료다발의 육안검사 결과

(가) 육안검사 시 주요 관찰 사항

- 사이드 스톱 상호작용 (Side Stop Interaction)
- 재장전 충격 (Refuelling Impact)
- 횡류에 의한 피로/마모 (Cross Flow Fatigue/Fretting)
- 내부봉의 간격체 마모 (Spacer Fretting of Non-outer Element)
- 연료봉 휨 (Fuel Element Droop)
- 부착물 (Appendages)
- 37개봉 핵연료다발과의 접촉부 (CANFLEX/37-element Interface)
- 버튼 (Buttons)

(나) 육안검사 결과

앞서 기술한 주요 관찰 사항에 대하여 조사후 방출된 CANFLEX-NU 핵연료다발 중 선 정된 5개 다발에 대한 육안검사 결과, 모든 CANFLEX-NU 핵연료다발이 건전함을 확인할 수 있 었다. 그림 9와 10은 육안검사가 이루어진 5개의 다발 중 KF0119에 대해 end plate 정면 모습과 용접부위를 검사한 사진 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

월성 1호기에의 CANFLEX-NU 핵연료다발 시범장전은 2000년 11월부터 한전전력연구원 (KEPRI)과 한국수력원자력㈜, 그리고 한국원자력연구소(KAERI)에 의해 공동으로 진행되었는데, 이 는 국내의 인허가 조건 하에서 CANFLEX 핵연료다발의 성능을 확인하고, 핵연료 제조 능력을 검증하 며 월성 1호기에의 전량장전에 대한 근거를 제시하기 위함이다.

시범장전 조사 중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 출력 이력을 도출하기 위해 RFSP, POWDERPUFS-V, 그리고 WIMS-AECL 등의 코드를 이용하였다. Q07 고출력채널의 6번 위치에서 조사 된 KF0119 외환봉은 전형적인 고출력-고연소도의 이력을 보여 주었다. 장전 직후의 선출력은 41 kW/m이고, 68 MWh/kgU의 연소도에서 최대 42 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 210 MWh/kgU의 방출연소도에서 35 kW/m의 선출력까지 감소하였다. 한편 2002년 7월 10일부터 2003 년 1월 6일까지는 Q07 고출력채널의 1번 위치에서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기까지는 9번 위 치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0124 다발 재장전으로 인해 출력이 급증하였는데, 외 환봉의 경우 처음 장전 직후부터 약 48 MWh/kgU의 연소도까지 약 7 kW/m의 선출력을 유지하다 채 널 내의 9번째 위치로 이동한 후 약 35 kW/m의 선출력까지 급증하고 이 후약 188 MWh/kgU의 연소 도까지 약30 kW/m의 선출력까지 감소되었다. 시범 장전된 모든 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대해 조사 기간동안 특이한 출력 이력을 보인 다발은 없었다.

ELESTRES 코드를 이용하여 조사된 CANFLEX-NU 다발의 성능 평가를 수행한 결과, 다음 의 결론을 얻을 수 있었다: a) 최대 내부 기체 압력은 출력 급증을 보이는 KF0124 다발 외환봉에서 약 0.78 MPa로 구해졌고, 이는 설계기준인 냉각재 압력에비해 상당히 낮은 결과임을 알 수 있으며, b) 소결체 중심온도의 최대값과 피복재 내면의 최대온도는 각각 약 1263 °C와 340 °C로 KF0119 다 발에서 구해졌으며 이는 각각의 설계기준인 UO2 용융온도 2840 °C와 피복관 산화가속 기준온도인 397 °C 보다 작음을 확인하였으며, c) 최대 원주방향 변형률은 약 0.75 %로 이로 인해 야기될 수 있 는 결함확률(defect probability)은 0임을 계산결과로부터 확인하였다. 한편 시범장전 조사 후 방출되 어 수조에 보관되어 있는 CANFLEX 다발들의 수조 내 정밀 육안검사 결과 모든 방출 다발들이 건전한 상태임을 확인할 수 있었다

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] H.C. Suk, et al., "Basic Research and Industrialization of CANDU Advanced Fuel," KAERI/RR-2011/99, May 2000.
- [2] 석호천, 심기섭, 박주환, 전지수, 정창준, 정장환, "월성로(CANDU 6) 형 CANFLEX-NU 핵 연료 설계 보고서," KAERI/TR-1220/99, 1997.
- [3] W. Inch, and H.C. Suk, "Demonstration Irradiation of CANFLEX in Pt. Lepreau", Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Cycle Options for LWRs and HWRs, Victoria, Canada, 1998.
- [4] H.C. Suk, M.S. Cho, J.S. Jun, S.H. Lee, and Y.B. Kim, "Status of the Demonstration Irradiation Program of the New Fuel Bundle CANFLEX-NU in Korea", Proceedings of the

7^{th I}nternational Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, pp 63-74, Kingston, Ontario, Canada, 2001 September 23-27.

- [5] G.R. Dimmick, W.W. Inch, J.S. Jun, H.C. Suk, G.I. Hadaller, R.A. Fortman, and R.C. Hayes, "Full Scale Water CHF Testing of the CANFLEX Bundle", Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 2, Niagara Falls, Ontario, Canada, 1999 September 26–30.
- [6] L.K.H. Leung, D.C. Groeneveld, G.R. Dimmick, D.E. Bullock, and W.W. Inch, "Critical Heat Flux and Pressure Drop for a CANFLEX Bundle String Inside an Axially Non–Uniform Flow Channel", Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, Niagara Falls, Ontario, Canada, 1999 September 26–30.
- [7] L.K.H. Leung, J.S. Jun, G.R. Dimmick, D.E. Bullock, W.W. Inch, and H.C. Suk, "Dryout Power of a CANFLEX Bundle String with Raised Bearing", Proceedings of the 7th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, pp 27–39, Kingston, Ontario, Canada, 2001 September 23–27.
- [8] H. C. Suk, K-S. Sim, B. G. Kim, C. B. Choi, C. H. Chung, A. D. Lane, D. F. Sears, J. H. K. Lau, I. Oldaker, and P. G. Boczar, "CANFLEX as a CANDU Advanced Fuel Bundle", Proceedings of the 5thInternational Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, pp.U1-1 to U1-16, Beijing, China, 1997 April.
- [9] A. D. Lane, D. F. Sears, I. E. Oldaker, B. M. Townes, A. Celli, H. C. Suk, C. H. Chung and K-S. Sim, "Recent Achievement in the Joint AECL/KAERI Program to Develop the CANFLEX Fuel Bundle", Proceeding of the 10th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, 1995 April 6–7.
- [10] A. D. Lane, G. R. Dimmick, J. H. K.Lau, H. C. Suk, C. H. Chung and C. B. Choi, "CANFLEX : A New CANDU Fuel Bundle with Expended Operating Capabilities", Proceeding of the 11th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, 1996 April 11–12.
- [11] 석호천, 전지수, 정종엽, 조문성 외, "중수로용 개량핵연료 CANFLEX-NU의 월성 1호기 시 범장전 조사 현황", 2003 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2003, 10.



 8 CANFLEX-NU fuel bundles are discharged: KF0110 to KF0113, KF0124 to KF0122, KF0121

 (d) 4th Fuelling(Expected on 2004 February): (A→C Refuelling)
 C-584

 A-589
 Bundle Position in Q07 Chemnel
 C-584

 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 6
 9
 10
 11
 12

 201204
 201204
 201204
 201204
 201204
 201204
 201204

Fuelling History of CANFLEX-NU (Mk-IV) Fuel Bundles in the High Power Channel Q07 in WGS-#1

그림 2 고출력 Q-07 채널의 CANFLEX-NU 핵연료다발 장전이력



(a) L-21 채널



(b) Q-07 채널

그림 3 CANFLEX-NU 핵연료 장전채널의 일자별 축방향 출력분포



그림 4 시범장전 조사된 각 다발(KF0119, KF0124, KF0121, KF0111)의 선출력-연소도

Note 1. KF0119 CANFLEX Bundle Irradiated in the 6thBundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6.

Note 2. KF0124 CANFLEX Bundle Irradiated in the 1st Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6 and then Being Irradiated in the 9th Channel Position from 2003 January 6.

Note 3. KF0121 CANFLEX Bundle Irradiated in the 4th Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6 and then Being Irradiated in the 12th Channel Position from 2003 January 6.

Note 4. KF0111 CANFLEX Bundle Irradiated in the 6th Bundle Position from 2003 Jan. 6 to 2003 Aug. 11



그림 5 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 내압 비교



그림 6 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 소결체 중심온도 비교



그림 7 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 피복관 내면 온도 비교



그림 8 CANFLEX-NJ 핵연료다발 외환봉 중간부에서 구한 피복관 변형률 비교



그림 9 CANFLEX-NU KF0119 Bundle - Serial Number



그림 10 CANFLEX-NU KF0119 Bundle - Endcaps-Endplate Welding