

VVER-440 核燃料性能

핀란드 IVO사의 Loviisa 발전소(소련형 PWR인 VVER-440 2기)는 대체적으로 연료 사용면에서는 좋은 실적을 올리고 있다. 연료의 사용상태(최대발열량 325W/cm)도 바람직하고 원자로 운전상태도 매우 안정돼있어 부하율도 높다.

1989년 오버홀때까지의 누적부하율은 1호기가 81.4%, 2호기가 86.4%였다.

최근 몇년간의 연간부하율은 90%를 넘고 있다. 집단피폭선량도 낮아 1989년에는 1호기가 0.7manSv, 2호기가 1.0manSv였다. 1·2호기 2기의 누적가동연수 23로·년 사이에 연료제어봉 고장회수는 16회(고장률 0.0039%)로 국제적인 기준으로도 좋은 편이다.

부하율이 기대 이상으로 높고 또한 1980년에는 압력용기의 조사선량을 낮추기 위해 원자로 노심을 줄였기 때문에 더 높은 연료연소도가 요구되었다. 따라서 초기의 설계상의 연료봉 연소도 한도인 40MWd/kgU를 50MWd/kgU까지 높일 필요가 있었다. 1980년대 중반에는 연소도 한도를 높여도 좋은지 여부를 확인하기 위한 조사가 시작되었다. 이 조사에서 연료봉과 연료집합체의 최대연소도에 관해 별도로 같은 결과를 얻었다.

전형적인 서방의 설계와 비교해 VVER-440 사용연료의 구조 및 재료상의 큰 차이점은 다음과 같다.

- 연료집합체의 단면이 육각형이고(사각형이 아님) 연료봉 배열이 삼각형 격자로 되어있다(사각형 격자가 아님).

- 연료봉 다발이 Shroud tube(channel)로 둘러싸여있고 이 Shroud tube는 연료집합체에서 하중을 지탱하고 있다.

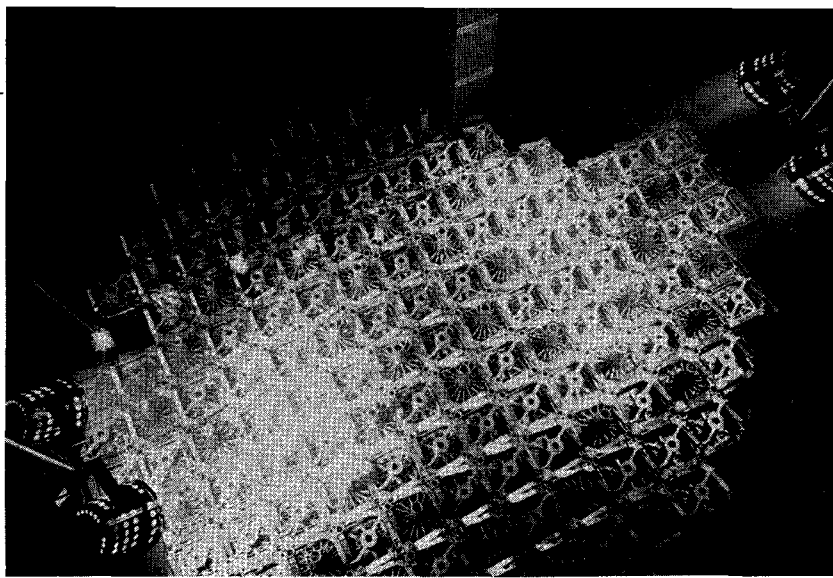
- 피복재료는 Zr 1% Nb 합금이다.

- 연료 펠렛을 고리 모양이다.

과거의 연료설계방식은 연료봉에 1기압의 헬륨을 주입하고 길이 30mm이하의 압출방식에 의한 펠렛을 사용하는 것이었다. 그러나 지금은 연료봉을 6바아의 헬륨으로 가압하고 펠렛을 통상적인 방법으로 프레스 가공하고 있다. 프레스 가공된 펠렛의 불순물(C, Fe 등) 함유량은 과거의 압출방식에 의한 펠렛 보다 낮다. 펠렛 端面의 표면도 과거 보다 좋아졌다.

고연소도 실험

40MWd/kgU 이상의 고연소도에서의 연료상태를 확인하기 위해 1985년에 고연소도 실험이 시작되었다. 이 실험은 바람직한 연소도를 얻기 위해 2개의 연료집합체를 정상적인 3사이클 대신에 4사이클로 조사, 검사하는 것이었다. 이 실험에는 비교적 높은 연소도의 3사이클 연료집합체의 실험도 포함되었다. 이 연료집합체들의 노심내 위치는 폭넓은 연소도를 유지할



수 있도록 배치했다. 조사후 이 연료집합체들은 Loviisa발전소의 poolside 검사설비로 검사되었다.

3개의 연료집합체중에서 4개의 연료봉을 빼내 스웨덴의 Studsvik Nuclear사의 hot cell로 보내졌다. 1980년대 상반기에 Studsvik사에서 1개의 연료집합체를 검사한 결과를 포함해 32~46MWd/kgU의 연소도 실험결과도 좋았다.

Studsvik사에서의 실험에서 4개의 연료봉의 creepdown치는 25~60 μ m의 평균 지름감소와 50~90 μ m의 국부적인 최대 지름감소를 보였다. 4개의 연료봉의 평균연소도는 43~46MWd/kgU였다.

이 creep데이터는 과거의 평균 40MWd/kgU 또는 그 이하의 기록과 같은 것이었다.

41~48MWd/kgU의 평균연소도에서 각 연료봉의 gamma scanning에서 다음 사항이 밝혀졌다. 즉 연료봉의 어느 부분에서도 세슘 재분포가 일어나지 않았다; 연료 column에서 gap을 볼 수 없었다; 펠렛 interface가 분명했다; 연료 column의 길이가 평균 0.3% 늘어났다. 이러한 측정은 Loviisa발전소의 사용후연료 풀에서 21개, Studsvik사에서 4개의 연료봉에 대해 실시되었다.

핵분열가스 방출량 측정은 ABB Atom사에서 개발한 r-방식에 의해 비파괴적으로 시행되었다. 이 방법은 가스 plenum내의 크립톤-85 성분과 전체 핵분열 가스 방출량과의 연관관계를 이용한 것이다. 이 비파괴검사는

41~48MWd/kgU의 연소도에서 16개의 연료봉에 대해 실시되었는데 핵분열가스 방출량은 0.7~1.5%였고 43~46MWd/kgU의 연소도의 4개의 연료봉에서는 0.5~0.8%였다.

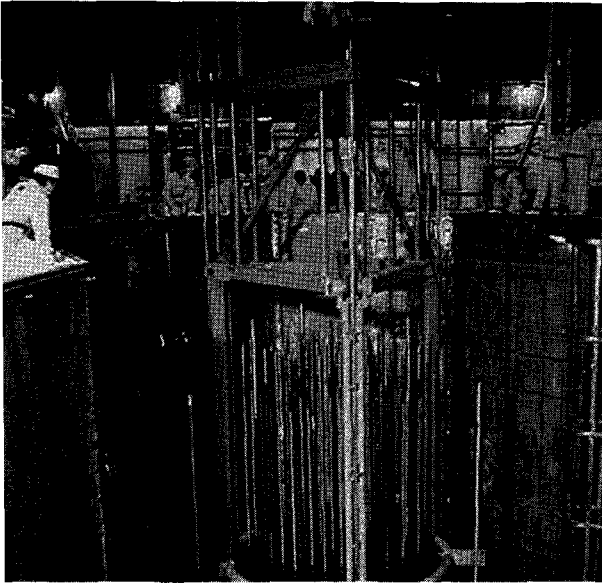
펠렛 피복의 지름방향 gap : Studsvik사 hot cell에서의 실험에서 4사이클 조사후의 지름방향 gap은 실제적으로 없어졌으나 3사이클 연료에서는 약간의 gap이 남아있었다.

피복재의 산화 : Hot Cell에서의 PIE를 위해 보내진 4개의 연료봉중 1개는 파괴시험으로 검사했다. 금속현미경 샘플을 통해 본 것으로는 외부표면의 산화물 두께는 1~4 μ m, 내부표면은 1~13 μ m였다. 이 연료봉의 평균연소도는 45.1MWd/kgU(4사이클 조사)였다.

펠렛의 미세조직 : 입자 크기는 펠렛 마다 약간 달랐지만 펠렛 중심부를 향해 입자가 커진 것은 발견할 수 없었다. 펠렛에서 약간의 지름방향 균열과 크고 불규칙한 기공이 발견되었다. 펠렛 샘플의 둘레에는 기공이 많았다. 밀도 측정에서 약 4%(체적)의 펠렛 swelling이 일어난 것으로 나타났다.

펠렛 피복재 상호작용 : 피복재 내부표면의 UO₂의 bonding 상태를 검사한 결과 펠렛과 4사이클 연료의 피복재 사이는 밀착되어있는 것으로 나타났다. 3사이클과 4사이클의 연료봉의 외경도 비교해 보았는데 4번째 사이클에서 접촉압력이 증가한 것으로 나타났다.

요약 : 고연소도 프로그램에 의한 연료시험 결과로 연료봉의 연소도가 40에서 48MWd



/kgU로 높아졌을 때의 연료 상태를 직접 알 수 있는 것은 아니다. 펠렛과 피복재 사이의 gap이 메워져 밀착된 것은 연소도 보다는 조사 시간과 관계가 있는 것 같다.

연료사고 사례

대체적으로 Loviisa발전소의 연료봉은 매우 신뢰성이 높다. 23사이클 동안 16개의 연료집합체에서 고장이 발견되었다. 1990년 연료재장 전사까지의 전체 고장률은 3.9×10^{-5} 이었다. 고장난 연료집합체의 연소도는 12~23MWd/kgU였다. 2개의 연료집합체가 첫번째 사이클에서, 8개가 두번째 사이클에서, 6개가 세번째 사이클에서 고장이 났었다.

1차계통의 방사능 변화를 계속 측정 감시함으로써 연료의 고장을 추적할 수 있었다. 이러한 측정을 통해 2가지의 고장 유형이 있는 것으로 밝혀졌다: ①갑작스러운 방사능 상승이 일어난 다음 최대치 이하의 수준에서 안정된다. ②소규모의 갑작스러운 방사능 상승이 앞서 보다 5~10배 크기로 일어난 다음 약 15~45시간 동안 안정된 방사능을 유지했다가 방사능이 다시 높아지고 최대치 이하 수준에서

안정된다.

어떤 경우에는 옥소와 불활성가스가 동시에 증가했고 어떤 경우에는 incubation후에 옥소의 방사능이 높아졌다.

원자로 정지기간중 옥소의 방사능이 약 0.5~1.5시간(사양에는 10 ± 3 분)동안 2배로 높아졌다. 그 원인은 펠렛 파편과 연료봉 피복재가 밀착되어 옥소가 자유롭게 빠져나오지 못했기 때문인 것 같다.

3개의 고장난 연료집합체의 poolside검사에서 한개의 연료집합체는 연료봉 1개가 거의 파손돼 있었고 또 한개의 연료집합체는 1개의 연료봉이 plenum부분에서 부풀고 약 70mm의 구멍이 하나 나 있었다.

3번째 연료집합체는 외관상으로는 이상이 없었으나 일부 연료봉이 휘고 내부의 한 연료봉은 약간 단면이 커져 있었다.

이 3개의 연료집합체중의 2개는 upper spacing lattice가 변형돼 있었는데 이로인해 일부의 연료봉이 압축응력을 받았을 것 같다. 한 연료봉에서 plenum이 부풀은 것은 원자로 시동시에 연료봉 내부에서漏水가 증발해서 일어난 것으로 추정된다. upper lattice의 변형 원인은 조립과정이나 설계과정에 잘못이 있는 것 같다. 연료공급업체는 앞으로 이러한 원인을 제거하도록 조치했다. 일부 연료의 고장 원인은 구형인 압출식 펠렛의 비교적 높은 불소 함유량에도 있는 것 같다. 또 하나의 원인으로서는 불규칙한 端面과 펠렛의 연료 chip을 들 수 있다. 이 2가지 원인은 프레스 가공한 펠렛을 사용함으로써 2년내에 제거할 수 있을 것 같다.

결론

Loviisa발전소의 VVER-440원자로 연료는 잘 사용되고 있다. 연소도를 48MWd/kgU까지 높이는 것은 핵분열 생성가스 방출, 규격, 연료봉의 기계적 강도 등의 변화를 가져오지 않는다. 평균고장률은 국제적 수준이고 일부의 연료고장 원인도 새로운 펠렛가공방식에 의해 제거 되었다.