

## 加壓輕水爐에서의 混合酸化物 核燃料 經驗

現在 프랑스는 St. Laurent B1과 B2, Gravelines 3과 4, Dampierre 1 등 5기의 900MWe 原子爐에서 플루토늄을 재순환하고 있다. 지난 3년간의 경험에서는 피복관의 결함도 없었으며, 放射線 차폐와 취급의 관리에서도 문제가 없어 만족스러웠다. 프랑스電力廳(EdF)은 혼합산화물핵연료(MOX)로 부하추종운전을 하여도 특별한 어려움은 없을 것으로 전망하고 있으며, 작년 9월 이에 대한 승인을 받았다. 다음은 Nuclear Engineering Int'l誌 '90年 12月號에 발표된 프랑스 PWR에서의 MOX핵연료 운전경험이다.

프랑스 정부가 사용후핵연료에 대해서 재처리하기로 결정하였기 때문에 프랑스전력청(EdF)은 상당한 양의 플루토늄을 보유하게 된다는 사실을 인식하였다.

가압경수로(PWR)의 경우 일반적으로 1TWh의 발전량에 대해 약 38kg의 플루토늄이 생산된다. 따라서 프랑스전력청(EdF)은 1989년도에 경수로로 293TWh를 발전하였으므로 EdF는 잠재적으로 11톤 이상의 플루토늄을 보유하게 되었다고 유추할 수 있다.

이 플루토늄을 이용하는 최선의 방법은 고속증식로의 핵연료로 사용하는 것이나 고속증식로에 대한 전망이 불투명하므로 EdF는 이 플루토늄을 다른 방법으로 활용하는 방안을 모색하여야만 하였다. 플루토늄을 그대로 저장보관

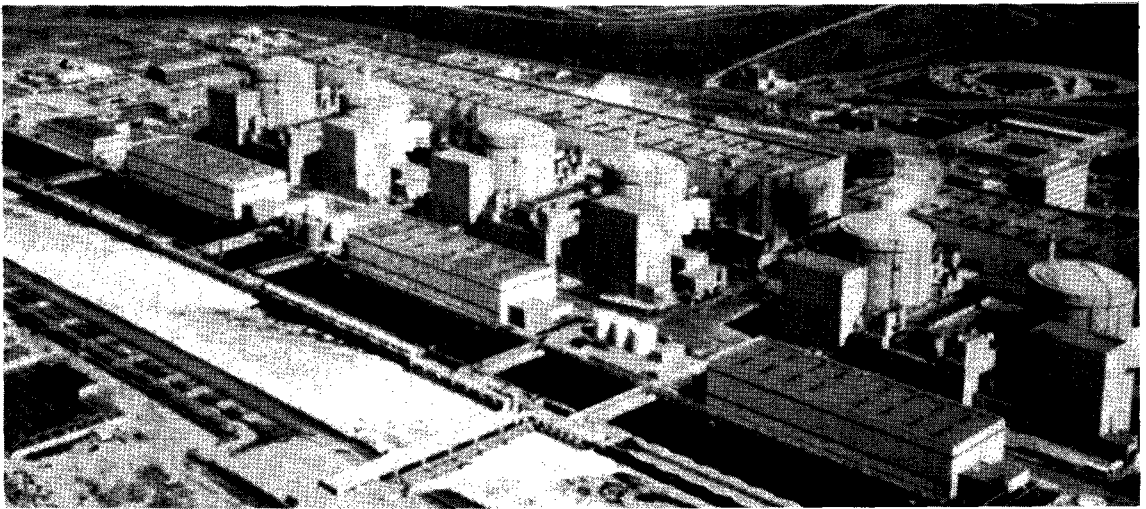
하는 것도 하나의 방안이 되겠으나, 이에 는 다음과 같은 기술적 및 재정적 난관이 있다.

· 플루토늄은 시간이 경과함에 따라 붕괴를 하며, 핵분열성인 붕괴플루토늄-241은 방사선 차폐문제를 유발시키는 아메리슘의 생성으로 이어진다.

· 플루토늄을 저장보관하는데는 비용이 매우 많이 소요된다.

따라서 플루토늄이 생성되고 있는 원자로, 특히 EdF의 16기의 900MWe급 원자로에서 이 플루토늄을 재순환시키는 방안이 개발되었다. 이 16기의 원자로는 다음과 같다.

- Tricastin 1~4호기
- Gravelines 1~4호기
- Dampierre 1~4호기



▲플루토늄을 재순환하고 있는 프랑스 900MWe급 발전소인 Gravelines 1~4호기 전경.

- Blayais 1호기와 2호기
- Saint Laurent - des - Eaux B1과 B2

또한 플루토늄의 재순환 활용에 의해서 천연 우라늄의 소요량과 농축작업량이 감소됨으로써 경제적으로도 유리한 결과를 가져온다.

### 플루토늄의 재순환

1980년대 초에 프랑스원자력청(CEA)과 프랑스전력청(EdF)이 Euratom의 후원하에 수행한 연구결과에 의하면 플루토늄 재순환은 30%의 재순환 비율에서 타당성이 있는 것으로 나타났다. 몇년후 또다른 타당성 연구를 Framema, Cogema, EdF가 공동으로 수행하였는데, 이 연구의 목적은 플루토늄을 재순환시킴으로써 핵연료주기에서 야기될 수 있는 어려운 문제들을 명확하게 파악하기 위한 것이었다. 이 연구는 EdF의 900MWe급 원자로에서 플루토늄을 재순환시키는 것이 가장 적합하다고 결론내렸다.

따라서 EdF는 1985년 6월 가능한한 빠른 시일내에 플루토늄 재순환에 관한 관리전략을 수립하기로 결정하였고, 1987년 11월 St Laurent B1 가압경수로에 최초로 16개의 혼합산화물핵연료(MOX) 집합체를 장전하였다.

### 현행 핵연료관리

현행 핵연료관리제도의 특징은 주로 플루토늄의 중성자특성에 의해서 나타나고 있다. 플루토늄은 열중성자영역에서 높은 중성자흡수특성(우라늄의 약 2배)을 갖으며, 방출되는 저속 중성자의 비율은 매우 낮다. 이러한 특성에 의한 영향은 다음과 같다.

- 제어방법(제어봉, 수용성의 독물질)의 낮은 효율
  - 과도조건하에서 원자로의 민감한 거동
- 한편 스펙트럼의 경화특성은 특히 크세논에 대해서 안정성을 갖는다.

### 대 책

플루토늄의 높은 중성자흡수특성으로 인해 제어의 효율이 낮기 때문에 이에 대한 대책을 강화하여야만 했다. 따라서 4개의 보충제어클러스터를 추가 설치할 수 있는 900MWe급 원자로의 유리한 점이 선택되었다. 또한 일부 탱크의 붕소농도도 증가되었다.

그밖에 플루토늄의 높은 중성자흡수특성에 맞춘 특수한 혼합산화물핵연료집합체가 개발되었다. 이 집합체는 각각 농도가 다른 세구역으로 구성되어 있는데, 재래식 우라늄핵연료집합

체에서 바람직하지 않은 hot point factor를 유발할 수 있는 문제를 방지하기 위해 바깥쪽에서 중심부로 갈수록 농도가 높아진다.

### 앞으로의 연구

플루토늄 핵연료 집합체를 장전함으로써 저속 증성자의 비율이 낮고 경화된 스펙트럼이 되기 때문에 사고에 관한 연구를 재검토할 필요가 있다. 특히 감속재온도계수가 주기의 말에 매우 네가티브가 되기 때문에 사고냉각에 관한 연구에 특별한 주의가 요구된다. 원자로 트립과 안전주입계통 작동후 임계상태로 복귀되지 않음을 입증할 필요가 있다.

그밖에 1차냉각재 상실사고후 노심의 장기냉각을 확고히 하기 위해서 터빈바이패스시스템을 채택할 필요가 있는데, 이에선 내진성의 문제가 요구된다.

### 플루토늄 재순환을 위한 핵연료관리

핵연료관리체계의 주된 특성은 안전당국으로부터 인허가를 받아 현재 플루토늄을 재순환시키고 있는 5기의 가압경수로에 적용시키고 있다.

- 30%의 재순환비율. 재장전하는 52개의 새로운 집합체중 16개는 혼합산화물핵연료 집합체이고, 나머지 36개는 우라늄핵연료 집합체이다.

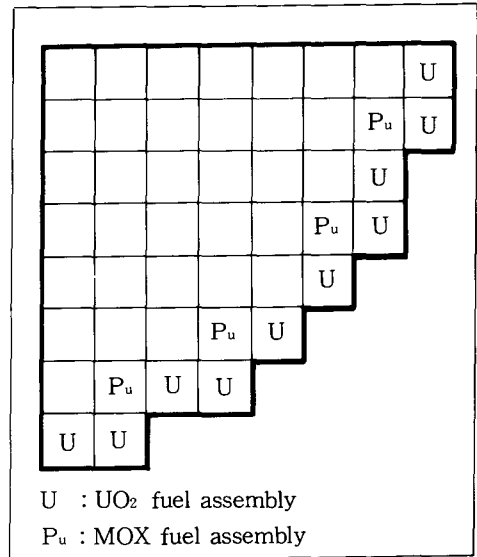
- 우라늄핵연료 집합체의 농축도는 3.25%이다.

- 혼합산화물핵연료 집합체의 플루토늄 평균 농축도는 5.3%에 가까우나 사용되는 플루토늄의 동위원소 구성비율에 따른다. 산화플루토늄은 열화산화우라늄(0.225%)과 혼합한다.

- AFA형 Framagma 핵연료 집합체를 사용한다.

- 그림과 같은 새로운 핵연료패턴을 사용한다.

이 핵연료관리모드는 핵연료주기의 기간을 약 300EFPD가 되게 하며, 연소율은 혼합산화물핵연료 집합체의 경우 36,000MWd/t 정도가 된다.



U : UO<sub>2</sub> fuel assembly  
Pu : MOX fuel assembly

〈그림〉 EdF가 MOX 핵연료에 대해서 사용하고 있는 새 핵연료 장전 패턴

### 經驗의 피드백

각 발전소의 운전개시기간에 수행된 물리시험의 결과는 계산과 시험이 잘 일치함을 보여주었다. 이것은 제어클러스터, 봉산의 농도, 온도계수가 정확하였음을 입증하는 것이다.

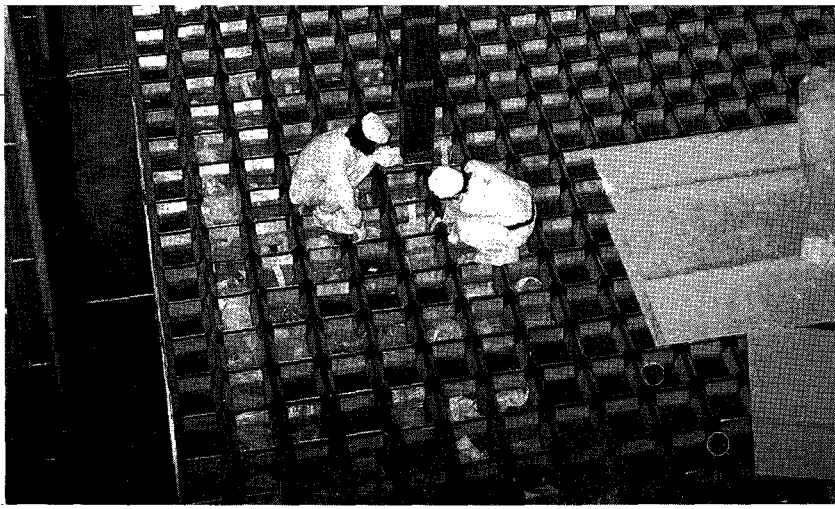
한편, 혼합산화물핵연료 집합체 계산에서의 오차가 입증되었는데 플럭스분포분석에서 6%의 수정이 이루어졌다.

재래의 우라늄핵연료 노심보다 더 현저한 방위각 출력 경사의 존재도 주의하여야 한다.

운전에서는 제어에 특별한 어려움이 없으며, 운전체제도 운전원들에게 쉽게 인식되었다.

부하추종운전의 경우 이 운전모드에 대한 인허가가 1990년 9월 안전당국으로부터 나왔으나, 실제의 부하추종운전에서 핵연료가 손상을 받지 않는다는 것이 확인될때까지 2기의 St Laurent B 원자로로 한정되었다.

부하추종운전에 대한 기술사양은 혼합산화물핵연료 집합체의 출력이 우라늄핵연료 집합체의 출력보다 훨씬 적게 감소하기 때문에 매우 엄



격하다.

그밖에 플루토늄을 재순환시킨 3년동안의 경험에서 혼합산화물핵연료피복재에서 결함이 발견되지 않았음도 주목할만한 성과이다.

### 혼합산화물핵연료의 취급

현재 혼합산화물핵연료는 벨기에 Dessel의 FBFC공장에서 제작되고 있으며, 극히 일부가 Cadarache의 CEA시설에서 공급되고 있다. 여기서 제작된 혼합산화물핵연료집합체들은 각각 2개씩의 집합체를 수용하는 컨테이너 4개로 세트되어 수송된다. 이것은 1회의 재장전분인 16개의 집합체를 수송하기 위해서는 별개의 2개의 운송수단이 필요함을 의미한다. 운송과정에서는 특별한 방호대책이 실시된다.

컨테이너가 원자력발전소에 도착하면 추가의 방호대책이 취해진 가운데 핵연료를 컨테이너에서 꺼내 핵연료건물내에서 20m 정도 들어올린 다음 특별검사스테이션에서 여러가지 체크를 한다. 이 체크가 끝난후 원자로에 장전할때까지 핵연료건물의 폴속에 넣어 보관한다.

### 개인선량

혼합산화물핵연료는 플루토늄-240의 자발핵분열에 의해서 중성자와 감마선을 방출하기 때문에 취급에 있어서 개인피폭선량을 최소화하도록 하여야 한다.

St Laurent B발전소에서의 집적개인피폭선량은 감마선량의 경우 평균 0.2mSv이고, 중성자선량은 평균 1.6mSv였다.

### 앞으로의 開發

#### 實 験

CEA, Framatome, EdF가 공동으로 수행하는 실험은 대부분 900MWe 원자로에서 플루토늄을 재순환시키는 선택이 정당함을 확인하기 위한 것이다.

Epicure라는 이름의 이 프로그램은 Cadarache Eole원자로에서 실시되고 있는데, 여기에는 핵연료핀과 출력의 상대적인 분포, 흡수재효율, 반응도, 온도계수 등 핵연료핀에 대한 측정이 포함되어 있다.

#### 設 計

대부분의 EdF 900MWe PWR은 초기의 3주기 3.25% 관리와 비교하여 핵연료비용면에서 훨씬 경제적인 4주기 관리시스템을 채택하도록 하고 있으며, 플루토늄을 재순환하는 원자로에 이 관리방법을 도입하는 것이 유리함이 명백하나, 高照射된 혼합산화물핵연료의 거동에 관한 경험의 피드백이 아직 충분하지 못하다.

우라늄핵연료집합체에 대한 4주기 관리와 혼합산화물핵연료집합체에 대한 3주기 관리로 이루어진 이 혁신적인 관리방법이 현재 연구중에 있다.

이 관리방법은 우라늄핵연료집합체로부터 더 많은 에너지를 추출해 낼 수가 있어서 경제성이 더 한층 향상될 것이다. 이 관리방법은 1992년 하반기에 안전당국으로부터 인허가를 받은 다음 실제로 응용될 것이다.