原子力産業의 國際協力

—英國 우라늄研究所 심포지움의 槪觀—

英國 우라늄研究所가 지난 9月 런던에서 개최한 심포지움에서는 原子力産業界의 국제적인 공동사업 추진에 대한 有用性이 강조되었다. 다음은 Wendy Peters氏가 이 심포지움에서 발표된 논문을 요약하여 Atom誌 11月號에 게재한 내용이다.

美國 原子力發電運轉者協會(INPO, Institute of Nuclear Power Operators)의 Thomas Eckered씨는 原電의 안전성 增進을 위한 國際的인 協力活動을 소개하였는데, 내년 5월 모스크바에서 정식으로 발족식을 갖기로 되어있는 世界 原電事業者協會(WANO, World Association of Nuclear Operators)의 구성을 위해 INPO의 런던파견사무소가 實務準備作業을 주로 담당해 왔었다.

WANO는 원자력발전 종사자간에 정보와 경험을 서로 교환하고, 相互比較를 장려하며, 경쟁심을 자극함으로써 원자력발전의 안전성과 신뢰성을 最大化하자는데 그 목적을 두고 있다.

同 協會의 발족을 위해 작년 10월에 프랑스의 EDF사 주관하에 첫 회의를 개최한 바 있다. 대부분의 세계 원자력발전사업자가 이 회의에 대표를 파견하였으며, 英國 중앙전력청(CEGB)의 회장인 Mashall경이 이 회의의 의장을 맡았다.

그 당시 회의에 참석하지 않았던 3개의 전력회사도 그후 WANO의 設立을 위한 준비작업에 협력해 왔다.

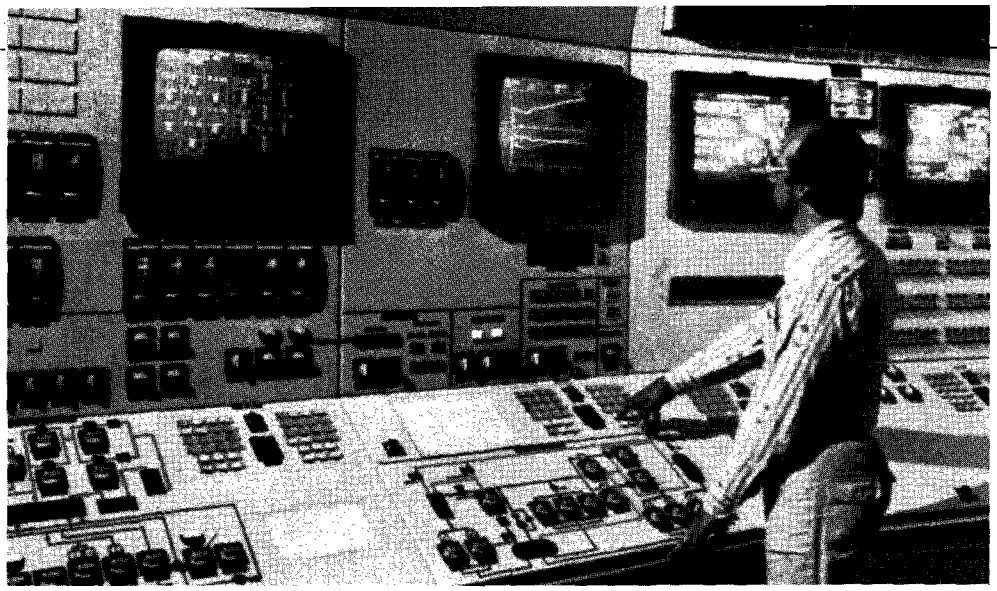
電力會社間 協力强化의 必要性

만약 WANO와 같은 機構가 20년전에 존재하였었다면 TMI나 체르노빌과 같은 발전소사고가 일어나지 않았을 것이라고 Eckered씨는 말하였다.

TMI는 設計 그 자체가 운전원에게 안전성을 의존하도록 되어 있었는데, 그 당시 운전원들의 훈련이 잘 되어있지 않았고 운전원들이 많은 실수를 범했기 때문에 그와 같은 사고가 일어났었다. 그럼에도 불구하고 TMI발전소의 설계는 一般公衆의 피해를 방지하는데는 성공했었다. 미국에서는 이와 같은 실수의 再發을 방지하기 위해 "탁월(Excellence)한 원자력발전소 운영"을 목적으로 INPO를 발족시켰고, INPO로 하여금 그 중추적 역할을 담당하도록 하였다. WANO의 목표와 목적은 INPO의 例를 전세계의 모든 원자력발전소에 적용하자는 것이다.

安 全 性

체르노빌原電事故의 원인은 기본적인 설계



결함 때문이었다. 즉, 어떤 경우에 있어서는 안전성을 운전원에게 전적으로 의존하는 설계 때문이었다. 만약 WANO와 같은 기구가 구성되어 전력회사들이 다른 전력회사들과의 정보교환, 상호평가 또는 비평, 경쟁, 모방을 통하여 그들의 공동책임을 성실히 수행하였더라면 운전원에게 안전성 의존이 過多한 이러한 설계는 용납될 수 없다는 論議가 다른 사업자로 부터 파견된 전문가들의 관찰을 통해 제기되었을 것이고, 해결을 촉구하는 압력으로 작용되었을 것이다.

WANO의 목적은 이러한 것에만 국한되는 것은 아니다. 원자력발전사업자들이 비록 적은 규모이지만 중요한 사고나 고장사례를 상세히 보고하여 그들의 운전경험을 공동관리함으로써 각 사업자들은 다른 사업자의 경험으로 부터 교훈을 배울 수 있고, 각종 사고의 잠재 원인을 사전에 찾아낼 수 있어서, 신리성 향상 뿐만아니라 原電의 경제성도 제고할 수 있을 것이다.

WANO는 아틀란타, 모스크바, 파리 및 東京에 地域센터를 설치하고, 中央調整機構를 두어 이들 지역센터의 업무를 조정함으로써 국제원자력기구(IAEA)나 다른 원자력 유관조직과는 중복되지 않는 업무를 수행하게 될 것이다.

業務計劃

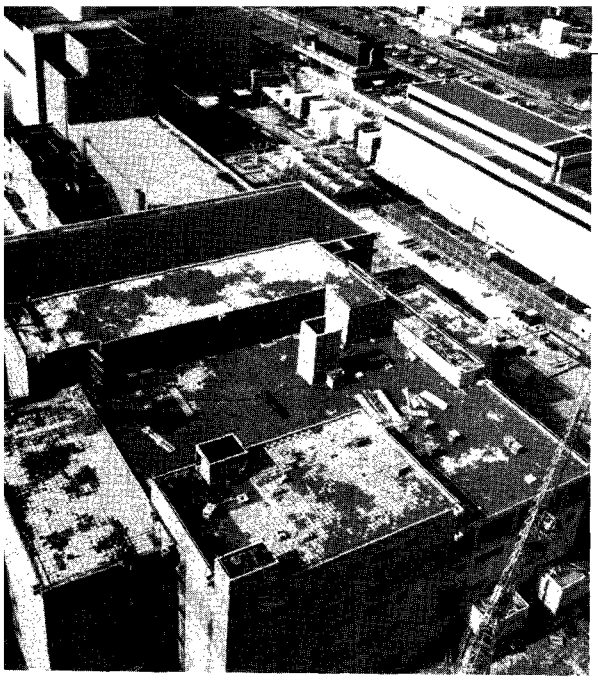
"WANO가 역점을 두는 목표는 어느 한 발전소나 전력회사가 얻은 경험을 그것을 필요로 하는 다른 발전소의 종사자에게 전달하자는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 여러가지 프로그램이 구상되었으며, 각 전력회사와 그들이 속한 지역센터는 이러한 프로그램을 추진하는데 있어 가장 중요한 역할을 할 것으로 기대된다"라고 Eckered씨는 설명했다.

WANO가 먼저 추진할 세가지 주요 프로그램을 요약하면 다음과 같다.

- 운전경험을 교환하는 프로그램
- 模範事例(Good Practice)를 발굴하여 배포하는 프로그램
- 운전원을 포함한 각 전력회사 종사자간의 정보를 직접 교환하는 프로그램

WANO를 설립하기 위한 준비작업을 추진하면서 이러한 프로그램의 개발은 1988년부터 착수하였으며, 여러가지 실제적인 시험을 거쳐 개발해 왔다고 Eckered씨는 말했다. 한편 Eckered 씨는 이들 프로그램중에 종사자간에 직접 정보를 교환하는 프로그램이 가장 중요하다고 강조했다.

이 프로그램은 운전원을 포함하여 타 발전소



에 근무하는 종사자들간에 발전소의 조직, 운전, 보수, 화학, 방사선 방호, 기술지원, 훈련, 비상절차 등 각종 분야의 정보를 직접 서로 교환할 수 있도록 하자는 것이다.

核燃料의 管理

"核燃料管理方案과 우라늄需要"라는 주제의 Colette Lewiner박사의 논문도 國際協力을 주제로 하였다. 歐洲原電事業者機構(Open, Organisation des Producteurs d'Energie Nucleaire)는 벨기에, 프랑스, 서독, 이탈리아, 스페인, 스웨덴 및 스위스의 전력사업자로 구성되어 있으며 이들은 西方世界에서 소비하는 우라늄의 약 3분 1을 구매하고 있다.

지난 수년간에 걸쳐 이 기구는 회원사와 함께 핵연료관리의 종합적인 개선방안을 개발하기 위해 공동으로 노력해 왔다. 특히, 여러 실무그룹이 연료장전방식의 수정과 우라늄과 플루토늄의 재처리 및 재순환기술의 효과를 연구해 왔다.

대부분의 Open 회원사는 핵연료 재처리방안을 채택하게 되었으며, 프랑스와 독일은 재처리 연료의 재순환을 이미 시작하였다.

核燃料 再循環

使用後核燃料를 3년간 저장한 후 경수로에서 다시 사용하기 위해 플루토늄을 회수하는데는 막대한 재처리비용이 소요되기 때문에 연료 재처리방안을 채택한 전력사업자들에게는 플루토늄의 재사용, 즉 재순환은 필수적 과정이다.

재처리하여 회수된 플루토늄의 재순환은 기술적인 견지에서는 문제점이 없으나 실제 적용여부는 재순환 비용과 가용 설비용량에 달려있으며, 특히 濃縮役務費用과 설비용량에 좌우된다. 따라서 전력회사는 재처리 플루토늄을 연료로 즉각 다시 사용하던지, 잠정적으로 비축할 수 있는 방안을 선택할 수 있는 여지가 있다고 Lewiner박사는 언급하였다.

연료비용 절감을 위해서 고려해야 할 두가지 기본적인 요소는 다음과 같다.

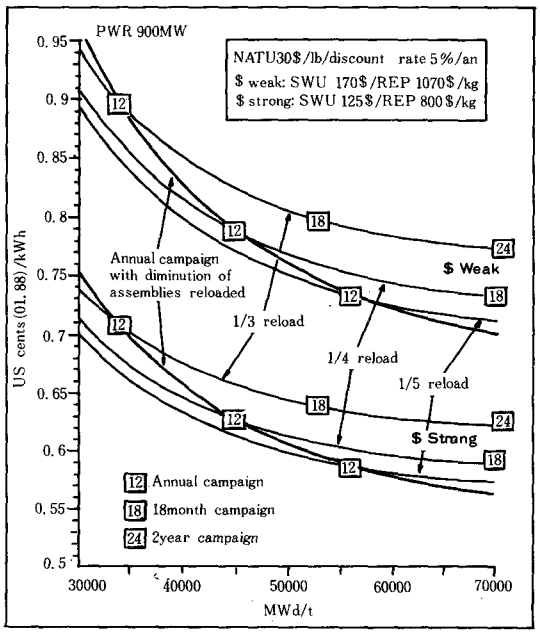
- 연료 연소도의 증가 가능성
- 발전 / 정지 주기에 적합한 연료 재장전주기와 연료교체 방안

역사적으로 돌이켜 볼 때 가압경수형 900MW급 원자로의 표준연료로 3.25% U−235를 사용하였으며, 연료는 3년에 걸친 연료주기동안 평균 30,000MWd / t의 연소도로 爐內에서 연소되었다. 그동안의 기술축적과 더불어 현재 약 45,000MWd / t에 달하는 수준으로 증가되었으며, 지금 진행되고 있는 여러가지 연구를 통해 1995년에는 약 60,000MWd / t까지 점차 증가될 수 있을 것이라고 Lewiner박사는 전망하였다.

새로운 연료 재장전방안으로 전력사업자는 전력계통의 사정에 적합한 연료 교체주기 선택에 있어 신축성을 갖게 된다.

두가지 기본적인 선택방안은 다음과 같다.

- 교체 핵연료다발의 數를 현수준으로 유지하고, 연료교체주기는 늘리는 방안.이 방안을



〈그림 1〉 연소도와 연료교체량 변화에 따른 kWh당 평균 연료비

선택하기 위해서는 우라늄의 농축도를 높여야 하며, 매 주기에 1/3 노심을 교체하고 연료교체주기를 1년에서 부터 18개월까지로 연장이 가능케 된다.

• 연료교체주기를 현재의 표준수준(1년)으로 유지하고 교체연료의 다발수를 감소시키는 방안. 즉, 매 교체주기 마다 1/4, 1/5 또는 1/6 노심을 교체하는 것이며, 따라서 각 연료는 4, 5, 또는 6 연료교체주기동안 爐內에서 연소하게 된다. 이 경우는 연료교체주기를 늘리는 방안 보다 初期爐心의 연료 농축도를 약간 낮출 수 있다.

核燃料費用

그림 1은 弱勢 및 強勢 달러에 대하여 각 연료교체방안에 대한 KWh당 연료비의 변화를 보여준다. 또 이 그림은 세가지 연료교체방안, 즉 1/3, 1/4, 1/5 노심교체방안에 대하여 30,000~70,000MWd/t 범위의 연소도에 대한 소요비용 변화를 보여주고 있다. 더우기 그림 1로부터 다음과 같은 두가지 사실을 알 수 있다.

연소도의 증가에 비례하여 연료교체주기를 증가시킬 수 있으며, 연료교체주기를 1년으로 할 경우 연소도의 증가에 비례하여 매 주기의 연료교체량을 감소시킬 수 있음을 보여준다.

"오늘날 평균 연소도는 PWR에서는 29,000-MWd/ t에서 43,000MWd/t까지 , BWR에서는 27,000MWd/t에서 35,000MWd/t까지 증가되었고, 대부분의 발전소는 1년 주기로 연료재장전을 하고 있다. 그리고 앞으로 Open의 회원사는 연소도를 BWR에 대해서는 27,000MWd/t~45,000MWd/t로, PWR에 대해서는 45,000 MWd/ t 까지 끌어 올릴 것을 고려하여 있고, 대부분의 나라에서 12개월 연료주기를 고수할 것이다"라고 Lewiner씨는 견론짓고 있다.

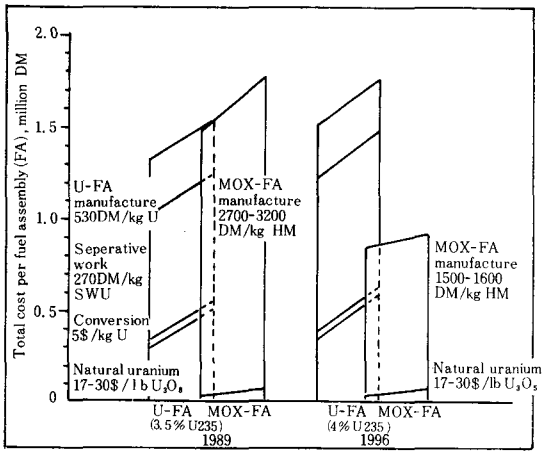
中性子照射로 부터 原子爐容器를 보호하여 원자로용기의 수명을 연장시키기 위해 대다수의 Open 회원사는 중성자 누설을 최소화하는 연료장전방식을 채택하고 있다. PWR의 경우는 새 연료를 노심 중심부에 장전하고 재정전시 마다 점차 노심 외각으로 옮겨가는 방식을, BWR에서는 오랫동안 混合장전방식을 사용해 왔다.

混合酸化物核燃料(MOX)

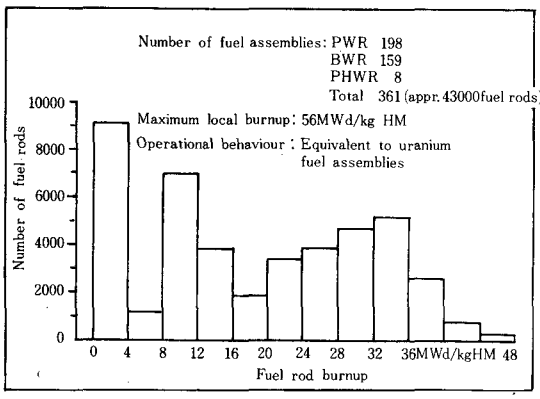
서독에서 제시한 MOX연료의 비용 추정은 플루토늄 재순환에 대한 관심을 끌기에 충분하였다(그림 2 참조). 가까운 장래에 핵연료 폐주기(Closecl Fuel Cycle)에서 Back-end비용의 전반적인 절감에 상당한 기여를 할 것이라고 시멘스社의 Peter Schmiedel씨는 전망하였다.

독일의 여러 전력회사가 연합하여 MOX연료를 사용한 약 28,000개의 연료봉(133개 연료다발)을 이미 제작하여 대부분 爐內에 장전한 바 있다.

KWU社가 제작한 MOX연료를 사용하여 상당한 기간동안 연소시험을 해왔다고 Schmiedel



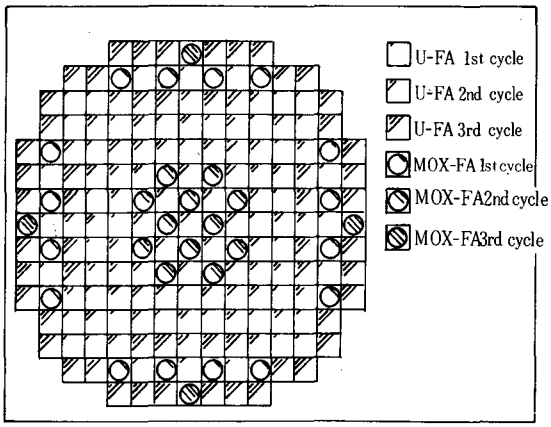
〈그림 2〉 1989년과 1996년에 공급될 우라늄연료와 MOX연료의 Front-end 비용전망 (PWR 기준)



〈그림 3〉 KWU社 MOX연료의 사용현황 (1988년)

씨는 밝히고 있다. 그림 3은 플루토늄 재순환방안을 채택하고 있는 발전소에서 MOX연료에 대한 연소시험 현황을 보여준다. 그림에서 가장 많은 수의 연료봉(약 86,000 개)이 노내에 새로 장전되어 가장 낮은 연소도를 보여주고 있지만 곧 높은 연소도쪽으로 옮겨가게 될 것이다. 평균 연소도는 43,000MWd / tHM(최대 펠렛 연소도 56,000MWd / tHM에 해당)에 이미 도달하였다.

일반적으로 MOX연료의 운전특성은 최소한 우라늄연료의 운전특성과 같았다. MOX연료에 대해서 약 35,000MWd / tHM의 연소도에 이르기까지 30회 이상의 출력변동시험(Ramp Test)을 한 결과, Ramp출력변동특성이 훨씬 우수한



〈그림 4〉 1,300MWe급 PWR의 제6차 연료교체 주기의 노심연료장전

것으로 밝혀졌다. 한편 400~500W / cm의 선형출력밀도에서도 연료손상이 일어나지 않은 것으로 보아 負荷추종에 대한 MOX연료의 적응성을 뒷받침해 주고 있다.

核燃料 裝塡方式

그림 4는 MOX연료를 사용한 또 하나의 예이다. 이 그림은 지난 여름에 제6차 연료주기를 마친 1,300MW급 PWR의 실제 핵연료장전방식을 보여준다. 총 193개의 연료다발 가운데 32개의 연료다발이 MOX연료로 되어 있는데 16개, 12개, 4개의 연료다발이 각각 첫번째, 두번째, 세번째 주기에 들어간 연료이다.

이 원자로는 熱中性子의 누설을 줄이기 위해 개선된 연료장전방식을 채택하고 있다. 반응도의 기여가 높은 새 연료나 적게 탄 연료를 상대적으로 노심 내부에 두고, 반대로 많이 탄 연료를 노심 주변에 배치함으로써 열중성자의 누설을 줄이고 있다. 만약 이러한 방법을 그림 4에서와 같이 과다하게 적용할 경우, 새로 장전되는 우라늄연료에는 노심출력분포의 제한으로 인해 중성자 흡수물질인 산화가돌리늄 독물질봉을 사용해야 한다. 이 경우에서는 연료주기의 초기에 장전된 60개의 우라늄연료다발 가운데 32개에 가돌리늄 독물질봉이 사용되었다.