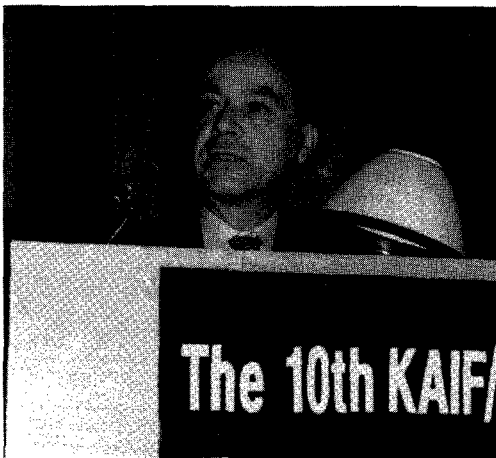


프랑스의 대형원전 개발

J. P. 루주

프랑스원자력학회 회장



나쁜 영향도 주지 않았다.

국경을 초월한 경험의 축적과 교환은 국제적인 안전문화의 출현을 낳게 하고 있으며, 따라서 보다 많은 국가들은 같은 안전목표를 공유하고 있다.

최근에는 동유럽국가 및 러시아도 이러한 경험을 서로 교환하고 있

개발이 절대 필요하다.

세계는 지금 개선된 원자로를 장착한 원자력발전소가 필요하다.

이 원자로는 최신의 안전성 개념을 만족할 뿐만 아니라, 다른 에너지자원보다 훨씬 경제적인 이점을 가지고 있어야 한다.

따라서, 세계 여러나라에서는 새로운 원자로설계 연구를 위해서 수많은 전략을 수행되고 있다.

어떤 국가들은 중소형 발전용량과 수동형 안전특성을 가진 원자로 설계를 선택하고 있으며, 프랑스와 독일 등은 축적된 풍부한 경험을 바탕으로 원전을 건설하고 있다.

또한 경제성과 신뢰성이 입증된 1,300 내지 1,500MWe 규모의 단위 발전소를 확보할 수 있는 개발방법을 제시하고 있다.

그러나 미래의 원자로 개발은 핵연료주기전략의 선택과 연결되어 있어야 한다.

프랑스·일본 등 몇몇의 원자력선

세 | 계적인 수준에서 볼 때 원자력발전소 운영자들은 그들의 원자로가 지금까지 안전하고 경제적으로 운전되어 왔기 때문에, 이것을 하나의 대성공이라고 볼 수 있을 것이다.

서방에서 설계한 경수로를 기준으로 지금까지 6,000원자로/년(reactor-years) 이상의 발전운전경험이 축적되었다.

이러한 발전소들은 환경에 아무런

다.

앞으로는 세계적으로 증가하고 있는 에너지수요가 원자력개발을 결정하는 중요한 요소가 될 것이다.

즉, 원자력발전소는 신뢰성과 높은 이용률로 운전되고 있기 때문에, 앞으로 수십년 동안 증가하는 전력수요를 충당하기 위해서 절대적인 수단이 될 것이다.

그리고 원자력발전이 중장기적으로 살아남기 위해서는 지속적인 연구·

진국들은 소위 RCR(Reprocessing-Conditioning-Recycling) 전략이라고 불리는 폐쇄주기(closed cycle) 사업을 추진하고 있다.

이미 플루토늄을 경수로용 MOX 핵연료에 사용함으로써, RCR 전략의 타당성과 수익성은 입증되었다.

이러한 전략은 사용후핵연료에 남아있는 에너지자원을 보다 많이 사용하고, 동시에 플루토늄 재고량을 조절하는데 큰 역할을 할 것이다.

이와 같이 맨처음 시도된 경수로용 플루토늄 재순환(recycling)은 보다 확장된 재순환계획의 첫단계로 봐야 할 것이다.

플루토늄 재순환은 토륨, 리튬 및 우라늄(TRU) 핵종과 플루토늄을 보다 효과적으로 연소시킬 수 있을 것이다.

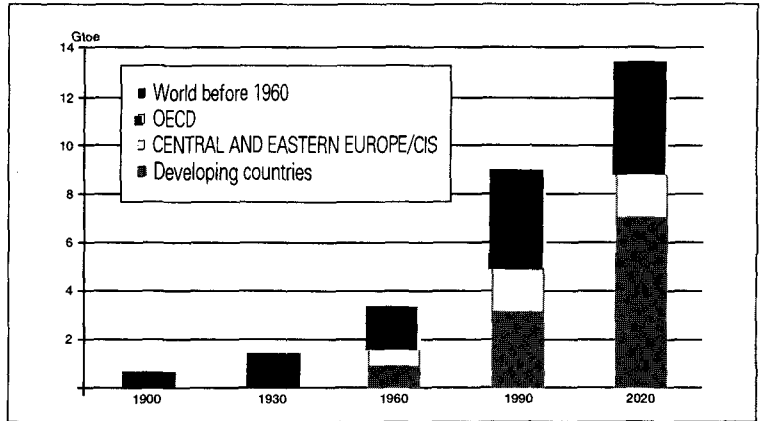
여기에는 고속로가 더 적합할 것으로 이미 확인되었으며, 고속로 개발은 장기 원자력발전개발계획의 주요 부분이 될 것이다.

증가하는 에너지수요

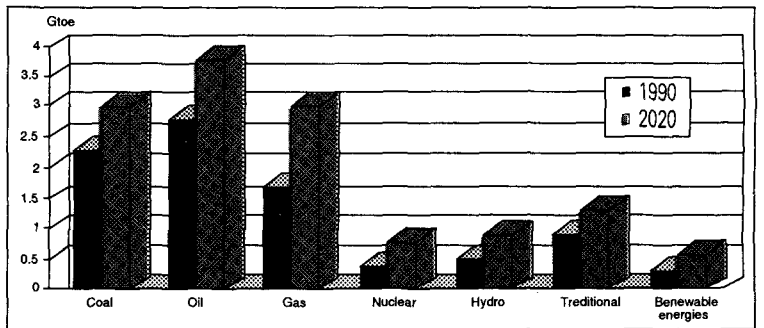
1. 세계적인 전망

어느 국가이든지 에너지개발은 에너지수요의 증가와 밀접한 관계가 있다.

세계에너지위원회(World Energy Council)가 최근에 발표한 에너지수요에 관한 연구논문은 2020년까지 세계인구는 81억명, 연평균 경제성



〈그림 1〉 1990년과 2020년 사이의 세계 에너지 소비증가



〈그림 2〉 가상 시나리오에 대한 에너지 공급구조

장률은 3.3%, 그리고 총에너지수요는 13.4Gtoe(Giga tone oil equivalent)에 도달할 것이라는 가상 시나리오를 제시하였다.

〈그림 1〉에서 보는 바와 같이, 1990년과 2020년 사이의 세계 에너지소비 증가는 거의 대부분 개발도상국들에 의하여 주도되고 있다.

연간 1인당 전력소비량은 2.19 MWh에서 2.84MWh로 증가되며, 총소비량은 11.600TWh에서 23,000

TWh로 2배 증가하는 것에 해당된다.

이러한 전력소비량 증가의 절반, 즉, 6,000TWh 이상은 개발도상국에 의한 것이다.

가상 시나리오에 의한 주요 에너지 공급구조를 보면, 공급구조는 아주 느리게 변하고 있으며, 화석연료가 이러한 변화의 주된 역할을 하고 있다.〈그림 2〉.

원자력의 비율은 2020년도까지 5%에서 6%로 서서히 증가할 것이

다.

그러나 이러한 증가는 30년 사이에 원자력 용량이 두배로, 즉 매년 0.4에서 0.8Gtoe로 증가하는 것을 의미하고 있다.

2. 지역별 원자력성장 전망

원자력에 초점을 맞추어 보면, 1990년~2020년 기간 동안 지역별 소비량은 <표 1>과 같이 전망된다.

원자력은 특별히 태평양 지역과 유럽에서 중요 에너지공급원이 될 것이다.

2020년 이후에 대해서, WEC 전문가가 주장한 결론은 『원자력을 무궁무진한 비축에너지로 활용할 수 있는 방법을 연구하도록 장려하기 위해서는, 핵연료주기의 모든 과정에 대하여 대중적 지지를 먼저 받아야 한다』는 것이다.

차세대 원자로에 대한 프랑스의 개혁

프랑스는 강력한 원자력 이용정책

<표 1> 지역별 원자력 성장에 대한 전망

Area	Nuclear energy (Mtoe)
North America	+43
Latin America	+25
Europe	+91
CIS	+22
Middle East	0
Africa	+5
Pacific Area	+99
China	+40
South Asia	+29
World	+352

을 추구하고 있다.

56기의 가동중인 원자력발전소가 총발전량의 75%를 담당하고 있다.

이에 부응하여, 프랑스의 장래 원자력정책은 2개의 일반원칙과 1개의 중요 증감목표에 그 기초를 두고 있다.

일반적으로 말해서, 프랑스는 첨단 원자로의 설계 및 건설분야에서 계속 지도자 역할을 유지할 것이다.

즉, 프랑스의 원자력 과학기술은 세계의 최고수준을 유지할 것이다.

새로운 설계방법은 각각의 새로운 표준화 시리즈형태로 통칭된, 점진적인 기술개선이 될 것이다(혁명적인 변화보다는 진화적인 변화를 원칙으로 함).

새로운 원자로 설계는 다음 세기초에나 가능할 것이다.

왜냐하면, 현재 발전중인 900MWe 원자로는 2015년 경에 교체될 것이기 때문이다.

일반시양조건

차세대 원자로는 보다 엄격한 안전 기준을 만족해야 할 것이다.

프랑스가 설계·제작한 원자력발전소의 안전성 기록은 아주 우수하다.

그럼에도 불구하고 원자력발전은 여타 산업과 마찬가지로 과학기술의 발달로부터 혜택을 받아 왔고 대중은 안전에 관하여 보다 까다로운 요구를 계속하고 있다.

원자력안전은 다른 나라에서와 마

찬가지로 프랑스에서도 가장 큰 이슈가 되고 있다.

최근 IAEA의 국제원자력안전자문위원회(International Nuclear Safety Advisory Group) 및 안전기본요건시리즈(Safety Fundamental Series)의 보고서에 의하면, 범 세계적인 안전목표와 기준, 그리고 각국의 준수여부가 있는 국제규약에 대한 장점에 점차 공감을 나타내고 있다.

또한 각국은 경제협력개발기구(OECD)를 통하거나 다국적 또는 양국간의 협정을 통하여, 연구개발분야에서 폭넓은 협조와 공동연구 등을 하고 있다.

이러한 협조와 공동연구는 중대사고 방지와 사고완화 조치에 공동보조를 취할 수 있게 할 것이다.

따라서 미국·일본과 유럽에서는 유사한 방향으로 차세대 원자로 개발을 하고 있으며, 몇가지 요소들이 이의 증거가 되고 있다.

가장 높은 원자력 안전수준은 2가지 방법을 혼합 사용함으로써 도달할 수 있다.

첫째 방법은 사고방지를 강화하는 것, 즉 중대노심손상사고의 확률을 더욱 감소시키는 것이다.

두번째 방법은 사고완화능력을 증가시키는 것 예를 들면, 격납용기 기능을 강화하는 것이다.

이와 관련된 기술적 방법은 핵증기공급계통과 격납용기 설계특성의 개선 정도에 따라서, 「점진적인(evolutionary)」

utionary), 혁신적인(Innova-ting) 또는 혁명적인(Revolution-ary)」의 용어로 구분된다.

예를 들면, 프랑스와 독일이 개발한 대형 첨단 원자로(advanced reactor)개발은 '점진적인' NSSS와 혁신적인 설계의 본보기이다.

소위 유럽형 가압원자로(Euro-pean Pressurized Reactor, EPR)라고 불리고 있는 이러한 개발은 다음에서 좀더 자세히 언급하기로 한다.

미래의 원자로는 경쟁력이 있어야 한다

동시에, 미래의 원자로는 기저부하(beseload) 조건에서 가장 현대화된 화력발전소보다 월등한 경제적 우월성을 유지해야 할 것이다.

원자력은 자본집약적인 기술이기 때문에 경쟁력은 투자비용 결정인자, 즉 스케일 효과(scale effect), 시리즈 효과(series effect) 및 건설기간에 크게 의존하고 있다.

프랑스에서는 처음부터 이러한 결정인자를 고려하여 적용하였으며, 그 결과 원자로용량을 보다 크게 하고, 기자재를 표준화하였으며, 산업조직을 효율화하였다.

동일한 산업전략이 지금은 다국적 협약 등의 보다 확장된 틀 안에서 널리 유행하고 있는 실정이다.

유럽에서는 프라마툼사와 지멘스사가 합작하여 NPI사를 설립하였다.

그들은 EPR를 공동설계할 때, 가장 비용절감효과가 큰 1,300 내지

1,500MWe의 단위 용량규모를 적용할 것을 결정하였다.

표준화는 프랑스의 표준화 프로그램의 성공에 힘입어, 원자력사회에서 중요 낱말이 되었다.

가까운 장래에 많은 전력회사들이 그들의 공동의무사항을 준수할 것에 동의한다면, 다소 제한된 시장에서만(최소한 초기에는) 표준화사업은 성공할 수 있을 것이다.

국제간의 협력은 우리의 의무이기도 하다.

경쟁력은 또한 최적의 핵연료 이용에도 의존하고 있다.

핵연료주기비용은 평균 핵연료연소를 보다 높임으로써 낮춰질 수 있다.

따라서 최고 55 내지 60GWd/t의 연소도가 첨단 핵연료설계에 적용되었다.

더구나 주어진 핵연료연소도에서 비핵분열흡수(parasite absorption)와 중성자 누출을 감소할 수 있도록 노심설계를 수정함으로써, 우라늄 농축도를 낮출 수 있을 것이다.

미래의 원자로는 다양한 핵연료 배열과 노심관리를 수용할 수 있도록 설계되어야 한다.

기존의 노심과 핵연료설계는 발전소 운영계획, 노심관리 및 핵연료 이용률에 대하여 결정적인 기술적 제한요소를 남겨 하고 있다.

핵연료의 유연성을 높이기 위한 조사연구가 미래의 열중성자로 및 고속로 개념의 범주 안에서 수행되고 있다.

미래의 원자로는 부하추종과 주파수 제어 유럽의 전력그리드 요구조건을 충족시킬 수 있도록 설계될 것이다.

운전비용은 중성자 조사시간을 더 늘리고(18개월 또는 2년까지) 원자로 트립회수를 줄임으로써, 감소될 수 있을 것이다.

이와 더불어, 재장전 운전정지기간을 단축하게 되면 이용률을 더욱 높일 수 있을 것이다.

노심에 MOX 연료 사용을 포함한 플루토늄 재순환 역시 노심 및 핵연료 설계에 있어서, 하나의 중요 변화요소(evolution factor)이다.

단기적인 목표는 MOX 연료로 장전된 원자로의 수를 늘리며, MOX 연료장전과 관련된 노심관리 제약조건을 완화시키는 것이다.

특, 현재 진행중인 원자로 실험은 3주기로부터 4주기장전의 핵연료 관리 시스템으로 바꾸는 것과, 고연소도에서 검증된 핵연료 거동을 확인하고, MOX 핵연료로 장전된 원자로의 부하추종 작동 가능성을 입증하기 위한 것이다.

그 실험은 또한 장전량(loading rate)을 30%까지 증가하는 것도 추진 중이다.

노심의 유연성은 100% MOX 연료를 재장전할 수 있도록 확장되어야 한다.

주요업적

프랑스는 15년 동안 천연우라늄을

사용하는 원자로계통 개발에 노력한 결과, 1970년대에 저농축 우라늄을 사용하는 원자로계통 즉, 가압경수로 를 채택하였다.

제1차 실규모(full scale) 프랑스형 900MWe 가압경수로인 Fessenheim-1 발전소가 1977년에 전력망에 연결되었다.

그 이후 900MWe급 34기와 1,300 MWe급 20기가 건설이 완공되어 가동중에 있다.

이들은 현재 프랑스 전력의 75%를 생산하고 있다.

지금은 또한 최근 시리즈인 1,450 MWe N4형 발전소 4기가 여러 모양으로 건설단계에 있다.

EDF사는 차기 시리즈 즉, 앞서 설명한 사양조건을 만족하도록 설계된 REP 2000 표준 시리즈 개발을 적극적으로 서두르고 있다.

따라서 차기 시리즈는 10년내에 건설단계에 들어갈 것이 확실하다.

이와 관련하여 REP 2000 프로그램은 다음과 같은 몇 가지 관심사항을 포함하고 있습니다.

1. 집중적인 국제활동

활동의 목표는 새로운 시리즈에 국제적인 관심을 가지도록, 다양한 사양조건을 조화시키는 것이다.

이를 위하여, 국제관계 조직이 유럽, 미국 및 아시아에서 이미 결성되어 활동을 하고 있다.

국제화의 기반을 닦음으로써, 우리

는 표준화를 통하여 더 많은 이익을 얻을 수 있을 것이다.

이러한 이유 때문에, EDF사의 요구조건과 기타 고객의 요구조건에 대한 경쟁력을 확보한다는 것은 바람직하며, 유럽 전력회사 요구조건 연구그룹(European Utility Requirements Group, EUR)을 결성하게 된 동기가 되었다.

2. EPR사업

이 사업에 따라서 프랑스와 독일의 합작회사 NPI사는 EDF사와 독일 전력회사와 함께 REP 2000시리즈에 설치될 표준원전 아일랜드를 설계할 것이다.

3. 지원사업인 연구개발사업

이 사업의 특징은 역시 국제적 협력이다.

반응도 제어와 붕괴열의 방출연구가 사업에 포함된 토픽 중 두 가지 실례가 되겠다.

EPR 사업은 프라마투스사와 지멘스사 전력그룹이 협력협정에 조인하던 1989년도에 시작되었다.

이러한 협력의 수단으로 NPI사가 합작 회사 형태로 1989년 가을에 설립되었다.

그 전에 추진되었던 두개의 국가적인 설계사업, 즉 프랑스의 REP 2000과 독일 Planungsauftragrhk 사업은 NPI 개발사업과 함께 EPR 사업으로 합병되었다.

EPR의 개념설계에 대한 합의는 1993년에 이루어졌다.

EPR 기본설계는 1995년 초에 시작되었으며, 프랑스와 독일의 안전규제기관 및 전력회사들로부터 폭넓게 지지를 받고 있다.

기본설계는 2년간 계속될 것이며, 아직 부지특성에 따른 설계는 못한 상태이다.

그리고 그것은 2000년까지 프랑스에 설치(설치확률이 가장 높음)하게 되는 첫 발전소 건설사업에 대한 기술자료를 제공할 것이다.

NPI사의 노력과 전력회사의 협력으로, 프랑스와 독일의 규제기관 즉, 프랑스의 안전전문기구 PSN과 독일의 GRS사 사이의 협력기반이 형성되었다.

1989년 중반에도 정부는 안전규제기관 수준의 실무팀을 만들어, 이들로 하여금 양국에 설계의 인허가 가능성을 입증하도록 하고 있다.

유럽형 고속로

유럽국가들은 2년 이상 고속로 개발에 참여해 왔다.

250MW급 시범 원자로 2기가 1974년 이후 계속해서 가동되고 있다.

하나는 프랑스의 Phenix이고, 다른 하나는 영국의 PFR이다.

PFR은 현재 가동이 중지된 상태이고, Phenix는 아직도 계속 가동계획

을 가지고 있으며, 앞으로 10년 동안 첨단 핵연료 시험을 지원할 것이다.

특히 강조되어야 할 사항은 반복되는 플루토늄 재순환이 Phenix 원자로와 관련 재처리공장 간에서 이루어짐으로서, 고속증식원리를 산업규모에 근접시킬 수 있음을 보여 주었다.

유럽은 이러한 고속증식로에 대한 경험을 바탕으로, 1986년에 1,250 MWe급의 실증로인 Superphenix 발전소를 건설하였다.

원자로 규모를 5배 증가시키면서 이러한 사업을 착수하였다는 것은 대단한 결정이었다.

결과적으로 이 사업은 투자비용이 많이 들었으나, 이것은 실증로사업의 필연적인 결과이기도 하다.

Superphenix의 건설과 운전경험은 다음 사업의 설계사양에 반영될 것이며, 이로 인하여 기술팀들을 보다 긴밀하게 유지하여 EFR 사업을 추진할 수가 있었다.

1989년에는 몇몇 유럽국가들의 전력회사·연구개발기구 및 설계제작회사들이 유럽형 고속로에 대한 공용 상업용 설계의 개발을 위해서, 장기계획 사업에 함께 참여하였다.

공동설계 조직인 EFR 연합회사는 프랑스의 프라마톱 Navatom사와 독일의 Siemens KWU사와 영국의 NNC사로 구성되어 있다.

EFR 설계목적은 과거 설계요건의 기본특성 즉, Na 냉각수, 수조배치형 원자로 및 산화 핵연료의 기본특성을

그대로 유지함으로써, 달성될 수 있었다.

1,500MWe(3,600MWt)급의 원자로가 규모효과(scale effect)면에서 가장 좋은 것으로 나타났다.

EFR 목표를 지원하기 위해서, 상당한 규모의 연구개발계획이 확립되었다.

프랑스, 독일 및 영국의 원자력연구개발센터의 연구계획은 EFR 요구조건을 만족하기 위하여 재조정되었다.

EFR 사업의 설계검증단계는 기술적이면서 경제적으로 잘 확립된 아일랜드 설계방식과 사전(부지특성이 포함되지 않는) 안전성 분석보고서로 완료되었다.

이들 두 분야를 결합, 강화하기 위해서는 2~3년이 더 필요할 것이다. 설계연구에서는 종합설계(BOP)를 분석하여, 이것이 핵증기공급계통설계와 국가적 관행과 양립될 수 있는지를 확인한다.

원자로 부지가 선정이 되면, 그 다음에는 최종 기술 및 연구검토 즉, 원자력 아일랜드와 BOP에 대한 부지관련 상세설계, 기기의 검증시험, 발주국의 인허가 준비 및 사전 제조지원 등에 대한 기술 및 연구검토가 시작될 것이다.

최근에는 이러한 원자로형의 평가를 수행하기로 하고, 특별히 후행 핵주기와 관련하여, 추가적으로 가능한 설계개선 및 혁신적인 아이디어와 새로운 연구대상을 평가하기로 하였다.

1993년 CEA에 의해 시작된 CAPRA(Concepts to Amplify Plutonium Reduction in Advanced fast reactor)사업에서는, 이러한 연구목표들, 특히 플루토늄과 액티나이드 연소에 관한 EFR 노심유연성 계고연구가 수행되고 있다.

다음 세가지의 성공적인 발전과정은 이 사업을 촉진시키고 있다.

첫째, 맨 처음 나온 연구결과에 의하면, 저농축 보초다발을 첨가하거나 연소가능 독물질의 장전이 허용되는 기본 EFR 노심을 이어나갈 차기노심을 결정하였다.

혼합 핵연료에는 최고 약 45%의 플루토늄을 함유할 수 있으며, 이러한 핵연료를 장전한 노심은 약 70kg/TWhe(PWR용 핵연료의 30kg/TWhe 생산량과 비교)의 플루토늄 소비량을 생산하게 된다.

둘째, 현재의 재처리 용액은 최소 60%까지 플루토늄을 함유하고 있으며, 여기에 용해돼 있는 질소화물 연료(nitride fuel)를 사용하며, 95kg/TWhe의 소비량을 생산할 수 있을 것이다.

③ 우리나라가 전혀 없는 첨단 핵연료 설계를 적용할 경우에는 최고 100kg/TWhe의 소비량을 생산할 수 있을 것이다.

이와 같은 연구개발사업에는 Phenix와 Superphenix 원자로가 매우 좋은 도구가 될 수 있다.

Phenix 원자로에서 조사를 받게 되

면, 미량의 액티나이드 원소의 변형에 대한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

Superphenix를 이용하면, 전력망에 연결된 고속로로부터 산업적인 경험을 얻을 수 있을 것이며, 플루토늄 저장소로서 이용될 수 있는 가능성을 알아 볼 것이다.

상업용 고속증식로의 개발은 아직도 프랑스에서 핵심적인 장기사업이라고 생각된다.

고속증식로는 핵연료의 이용면에서 폭넓은 유연성, 즉 주요에너지 수급상황을 볼 때 연소와 증식을 동시에 할 수 있는 유연성을 가지고 있다.

문주 고속로의 가동을 이제 막 시작한 일본은 이러한 관심사항에 대해 같은 견해를 가지고 있다. 따라서 양국은 최근에 이 분야의 연구개발을 위한 협력협정에 서명하였다.

핵연료 개발

1. UOX에서 MOX 핵연료 까지

원자로 설계변경과 병행해서, 핵연료 설계와 관리분야도 안전성·신뢰성 및 성능면에서 개선되어 왔다.

가장 두드러진 것은 원자력발전 비용이 20% 내지 25%를 차지하고 있는 총연료주기비용은 지난 10년간 40% 감소하였다는 것이다.

핵연료다발 설계가 핵연료주기비용 중 다른 분야에 주는 영향은 아주 크다.

이것이 핵연료 공급자 및 원자로 운

전원이 핵연료설계와 성능개선에 역점을 두고 있는 이유이다.

최근 몇년동안 플루토늄 재순환의 산업응용은 핵연료주기분야에서 가장 중요한 신개발사업이 되었다.

재처리와 플루토늄 재순환에 힘입어, 사용후핵연료는 더 이상 문제가 되기 보다는 값진 보배로 생각되게 되었다.

재순환은 기존의 원자료를 이용하여 플루토늄 재고량을 통제하는데, 단기적으로는 가장 큰 장점을 가지고 있다. 장기적으로는, 재처리를 함으로써 최종체적을 줄이고 지하저장소에 처분하게 될 것이다.

현재 La Hague에 도입 되고 있는, 새로운 폐기물관리 및 검사기술은 재처리 우라늄 톤당 0.5m³보다 적은 양을 생산하게 될 것이며, 이에 비해 사용후핵연료 캡슐처리(encapsulation process) 방식은 1.7m³의 양을 생산하고 있다.

더구나 최종처분에 대한 안전성 보고서에 의하면, 많은 양의 플루토늄 생산에 대한 문제 제기는 점차 줄어들 것이라고 하였다.

프랑스에서는, 1987년 이후 플루토늄 재순환사업이 꾸준히 추진되어, 900MWe원자로 노심의 30%를 MOX 핵연료다발로 채울 수 있는 양을 생산하여 왔다.

현재는 16기 중 7기가 MOX 핵연료 사용에 대한 인허가를 취득하여 MOX 핵연료를 장전하여 운전중에

있다.

이들 중 4기는 MOX 연료비율이 허용된 평형치에 이미 도달하였으며, 시범목적으로, 매년 장전된 노심의 3분의 1은 기저부하용으로, 나머지 3분의 2는 부하추종 운전용으로 이용되도록 되어 있다.

평균 MOX 핵연료다발 연소도는 최고 36GWd/t까지 허용되어 있으며, 이 허용치는 3기의 발전소에 이미 시험증명이 완료되었다.

즉, 시험에 사용된 핵연료다발은 조사기간 동안 아무런 사고, 특히 연료봉 누출사고를 유발시키지 않고 원자로에서 인출되었다.

다음 단계는 45GWd/t의 평균 연소도에 도달하는 것이다.

가압경수로에서 플루토늄을 연료로 사용할 경우, 중성자 스펙트럼을 경색화(hardening)시킴으로써, 고체흡수체와 보틀의 흡수효과를 감소시키고 원자로용기(reactor vessel)로 누출되는 중성자속을 증가시키게 된다.

이러한 실험결과에 따라, 900MWe 원자로 노심에 4개의 제어봉이 추가 설치되었다.

장진인출형 관리방법(in-out type management)은 반경방향의 중성자 누출을 감소시키고, 원자로 용기를 보호하는데 사용된다.

MOX 핵연료다발은 서로 다른 플루토늄 농도를 가진 3개 영역으로 되어 있으므로, MOX와 UOX 연료다발 사이의 경제지역에서 반경방향의 출

력분포를 완화시킬 수 있다.

EPR 사업의 기본사업으로 100% 플루토늄으로 재장전을 할 수 있는 몇 가지 원자로형이 연구되었다.

이들 중 하나가 고소각능력(high incineration capacity)을 보유하고 있는 초감속로(Over-moderated Reactor, OMR)이다.

OMR의 MOX 핵연료다발은 표준형인 17×17배열을 유지하게 되고, 264개의 연료봉 중 36개가 몰로 채워짐으로써 원하는 감속인자를 얻을 수 있게 되어 있다.

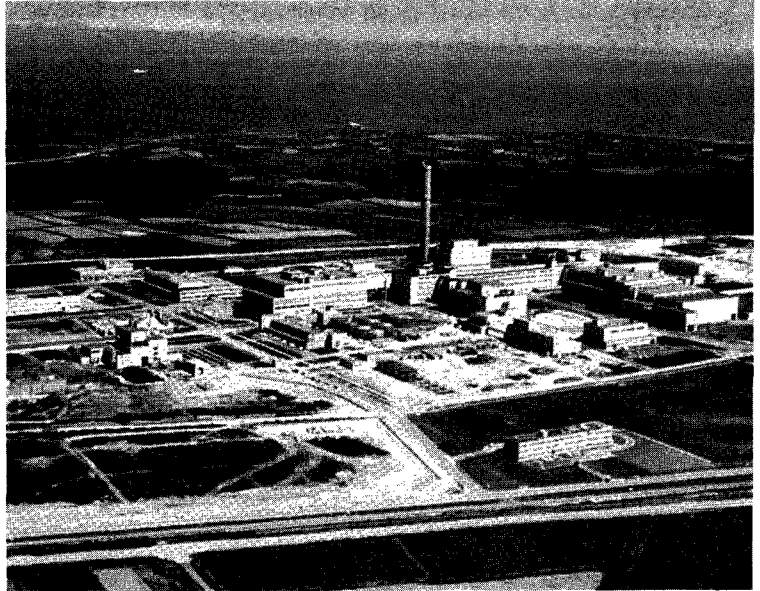
100% MOX 노심에서는 현재의 3개 영역으로 된 MOX 핵연료다발 형태, 즉 플루토늄과 우라늄으로 혼합된 노심이 더 이상 필요하지 않으며, 따라서 핵연료 관리비를 절감하고 핵연료 제조를 간소화할 수 있다.

필요한 경우에는 전량 플루토늄 노심으로부터 전량 우라늄 노심으로의 전환이 가능하다.

OMR 개념을 적용하면, 비록 플루토늄이 여러번 재순환 되더라도, 플루토늄 소비를 증가시키고 소량의 TRU 계열원소의 생산을 극소화시킬 수 있다.

무기처원의 핵분열물질

최근 미국과 독립국가연합 사이에서 맺어진 전략핵무기감축 감소협정은 2~3년 안에, 대량의 핵물질 재고량을 양국간 또는 다국간의 핵통제하



프랑스의 La Hague 재처리공장

에 두고, 나중에 점차로 제거하거나 무해상태로 처리하도록 하고 있다.

핵탄두를 제거하는 작업은 핵탄주 조립에 사용되었던 시설을 해체함으로써 가능할 것으로 생각한다.

핵무기급 플루토늄과 고농축우라늄(high enriched uranium, HEU)은 각각 분리하여 시험검사되어야 한다.

왜냐하면 그것들이 할 수 있는 전략적이고 기술적인 기능이 아주 다르기 때문이다.

HEU는 천연우라늄 또는 재처리 된 우라늄과 혼합하여 농축을 낮춤으로써 본래의 사용목적을 바꿀 수 있다.

이렇게 하여 얻어진 저농축우라늄(low enriched uranium, LEU)은 아무 문제없이 몇년 동안 저장되거나, 상업용 원자로 연료로 직접 사용될 수 있다.

무기급(weapon-grade) 플루토늄은 핵분열 동위원소(즉, 주로 Pu239로 농축된 에너지자원임)로 고농축된 것이다.

이 값진 것을 이용할 수 있는 가장 간단한 방법은 이것을 MOX 핵연료로 전환하는 것일 것이다. 여기에는 아무런 기술적인 문제가 있을 수 없다.

왜냐하면, MOX 성형가공처리와 MOX 핵연료 노심관리 양쪽 모두가 원자로급 플루토늄 연료의 플루토늄 농도변화에 적용될 수 있기 때문이다.

핵사찰 능력과 관련하여, 군사위원회(military establishment)에 의한 핵안전관리(secure management)를 받음으로써, 핵무기를 해체하여 우라늄과 플루토늄 혼합물로 전환하는 것이 허용될 수 있을 것이다.

그러면 민간 핵연료 산업체들은 이러한 혼합물로 부터 MOX 핵연료를 생산할 수 있을 것이며, 산업체들은 핵물질과 관련된 핵사찰조항을 잘 준수해야 할 것이다.

플루토늄을 기존 경수로의 MOX 핵연료로 사용할 경우 이것은 군사용 플루토늄 처분에 이용할 수 있는 가장 빠르고 가장 안전하고 가장 경제적인 방법이며, 또한 비용이 많이 드는 연구개발을 수십년이나 할 필요가 없는 유일한 대안이다.

재처리 우라늄

경수로에서 재순환과 재처리된 우라늄(recycling reprocessed uranium, REPU)은 몇 나라에서 여러해 동안 연구 조사되어 왔다.

총비용은 우라늄과 독성동위원소(poisoning isotope)인 우라늄236의 잔유량 뿐만 아니라, 천연우라늄에 비해 방사능이 높은 사용후핵연료의 우라늄처리 비용에 의해서 결정된다.

사용후핵연료에 남은 우라늄235의 농도는 0.9%로서 천연우라늄과 혼합하여 사용할 경우 상당한 비용을 절감할 수 있으며, 여기에서 얻은 비용절감은 재처리된 우라늄을 전환·농축 및 가공처리에 소요된 비용을 상쇄하고 남을 것이다.

더구나 재처리된 우라늄을 재순환 처리함으로써 우라늄의 필요량을 줄일 수 있고 안정적인 공급이 가능할

것이다.

이러한 전략의 타당성을 확인하기 위하여 프랑스·독일·일본 및 벨기에에서는 시범사업이 완료되었거나 진행 중에 있다.

먼저 프랑스의 경우를 보면 맨처음 사업이 1987년 CRUAS 4호기 원자로에서 이루어졌다.

이때 여덟개의 REPU 다발이 노심에 장전되었으며, 그 중 1개 다발은 42GWd/t까지 연소되었다.

또한 추가로 재장전된 24개의 REPU 다발은 표준형 3.7% 핵연료에 해당되는 우라늄235 농축도를 가지고 있으며, 산업 적용시험을 수행하기 위하여 같은 원자로에서 조사중에 있다.

이들은 조사후 시험을 통하여 만족할 만한 핵연료 가동을 입증한 것이며, 우라늄 재순환의 타당성을 재확인하게 될 것이다.

COGEMA사는 계획된 REPU 핵연료산업전략과 보조를 맞추기 위하여 UF₆ 전환과 농축공장의 용량을 증가할 계획을 세우고 있다.

결 론

미래의 원자로 프로그램은 프랑스의 원자력장기계획을 뒷받침 해주고 있다.

그것은 또한 개발정책의 연속성을 강조하고 있다. 즉, 어떤 사람이 한 단계씩 언덕을 올라가는 그림을 연상하듯이, 하나의 표준원자로 시리즈로부

터 한 단계 높은 원자로 시리즈로 한 단계씩 발전하는 것이다.

그러나 이러한 개발정책은 몇가지 관점, 즉 안전기준·연구개발·설계 및 엔지니어링 부문에서 국제적인 협력이 더욱 필요한 것으로 나타났다.

2개의 주요 유럽 프로젝트인 EPR 과 EFR은 이러한 국제협력으로부터 결실을 얻은 경우이다.

국제협력의 개방은 유럽국가에 국한되지 않을 뿐더러, 또 다른 성공사례도 가능할 것이다.

왜냐하면 원자력은 세계속에서 더욱더 넓게 이용되고 있기 때문이다.

증가하는 에너지수요에 대한 원자력의 역할은 지속적인 국가발전을 위해 필요한 기본 요소이다.

1990년부터 2020년까지 세계의 원자력발전량은 2배로 증가할 것이다.

특히 미래의 원자력산업은 고도의 경제성장과 그에 따른 전력수요가 필요한 국가에 의하여 지원이 될 것이다.

한국은 그들 국가들 중의 하나이며, 이러한 발전의 본보기가 되고 있다.

한국의 원자력에 대한 노력은 괄목할 만한 것이며 아주 착실하게 뿌리를 내리고 있다.

한국 정부와 산업계는 확실한 그들의 의지를 밝히고 원자력의 수용능력을 계속 확대해 나가야 할 것이다.

한국은 국가의 역량과 국제적인 기술 및 경험을 최대한 이용하여 강력한 원자력의 수용능력을 키울 수 있다는 것을 의심치 않는다. ☼