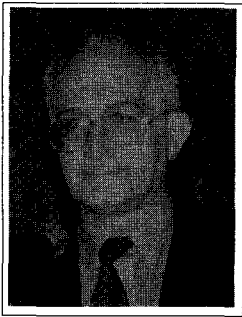


프랑스 원자력산업의 현황과 전망

B. Barré

프랑스원자력학회 회장



서 전국적으로 천연 가스 공급망이 구성될 수 있었다.

오늘날 이들 가스 공급망 속에 흐르는 가스는 네덜란드·알제리 및 시베리아에서 수입된 것이다.

프랑스는 지금까지 육지와 바다에서 충분한 양의 석유를 발굴해 내지 못하였다. 파리 주위의 유정(油井)에서 생산되는 석유의 양은 전체 수요량의 2~3%에 달하는 극히 적은 양에 불과하다.

50년대 후반과 60년대에는 수력 발전소의 건설에 힘을 기울였다. 오늘날 원자력에 대한 공중의 반대가 있는 것과 마찬가지로 당시에는 수력 발전(댐의 건설 등)에 대한 반대가 있었다. 수력 발전소의 댐들은 큰 강을 따라 건설되었으며 고지대에도 건설되었다. 60년대에는 전체 전력 소비량의 60%를 수력 발전이 감당하였다. 70년대 후반부터 수력 발전은 전체 전력 생산량의 약 16%를 차지하고 있으며, 더 이상의 기여는 기대할 수 없는 상황이다.

프랑스는 풍력과 태양력 이용을 시

도해 왔으며, 세계에서 가장 규모가 큰 조력 발전소도 운영하고 있다. 이러한 프랑스의 에너지 상황은 한국의 경우와 크게 다르지 않다(표 1).

73년도에 프랑스의 주요 에너지는 대부분 중동으로부터 수입된 값싼 석유로부터 나왔다. 첫번째 석유 위기는 이러한 상황을 돌변하게 만들었으며, 프랑스는 1년에 6기의 원전을 수년간에 걸쳐 연속적으로 발주하는 등 화력 발전을 대체할 수 있는 원자력 사업을 대규모로 시작하였다.

왜

프랑스는 원자력을 선택할 수밖에 없었는가?

과거에는 프랑스의 북부와 동부 지역에서 많은 석탄이 생산되었으며, 전국 곳곳에는 석탄더미가 수북이 쌓여 있었다. 또한 광부들의 힘든 삶은 에밀 줄라와 같은 소설가들의 작품 소재가 되기도 하였다.

오늘날 프랑스의 대부분의 석탄 광산은 폐쇄되었으며, 많은 양의 석탄이 폴란드 또는 오스트리아에서 수입되고 있다.

60년대에 Lacq 지방에서 막대한 매장량의 천연 가스가 발견됨에 따라

〈표 1〉 한국과 프랑스의 에너지 현황 비교

구 분	프랑스	한 국
면적(km ²)	550,000	100,000
인구(백만명)	58	45
에너지 소비량(백만toe)	235	150
전력 생산량(TWh)	471	177
전체 설비 용량 중 원자력의 비중(%)	76	36
원자력 발전 설비 용량 (GWe)	58.6	9.6
경수로	57.1	9.0
중수로	-	0.6
고속중수로	1.4	-

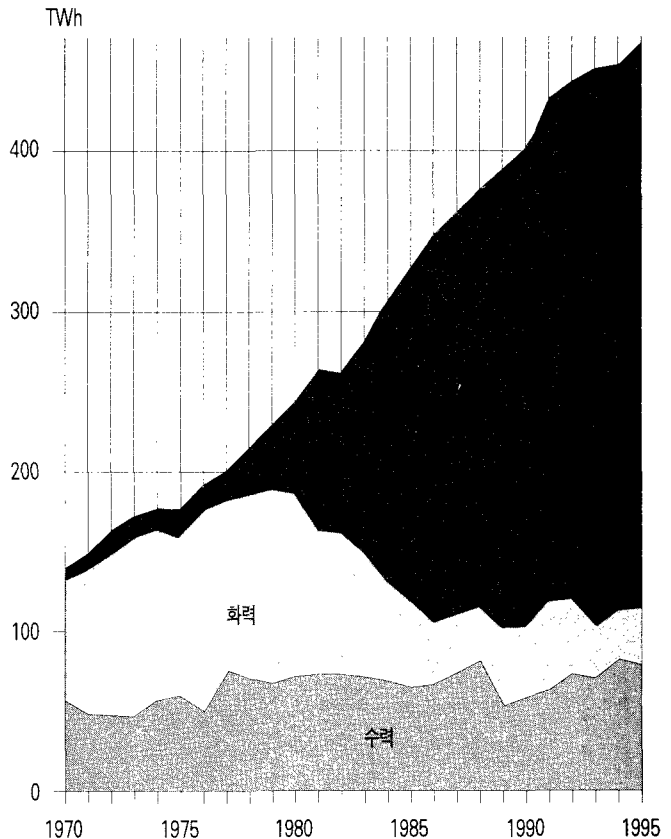
15년 후에 그러한 목표는 충분히 달성되었으며, 90년 이후에는, 프랑스 전체 전력 생산량의 4분의 3 이상을 원자력이 감당하고 있다(그림 1).

혹자는 이러한 상황이 그다지 바람직스럽지 못한 것으로 보고 있는데, 그 이유는 원자력 사업 프로그램이 시작될 당시에 기대되었던 만큼 에너지 소비가 증가되지 않았다는 것이다. 그리고 또다른 두 가지 이유로는 에너지 가격 상승이 효과적인 에너지 절감 조치를 유발하였으며, 경제 성장을 둔화시키는 데 기여하였다는 것이다. 경제 성장의 둔화는 전력 수요 증가를 둔화시켰으며, 이는 오늘날에도 마찬가지이다.

프랑스의 가압 경수로 원전

70년대 이전까지 프랑스는 영국의 마그녹스형 원자로와 유사한 독자 설계의 흑연 감속 가스 냉각로에 기반을 둔 제한된 원자력 프로그램을 개발하였다. 이 원자력 프로그램은 후에 폐기되었지만 이때의 경험은 프랑스의 원자력 관련 분야 발전의 토대가 되었다.

70년대에 프랑스의 유일한 국영 원자력 사업자인 프랑스전력공사(EdF)는 미국에서 설계된 경수로 기술을 개발하기 시작하였다. 그러나 당시 석유 가격이 충분히 낮은 상태였기 때문에 원자력은 장기적인 대안의 하나로 고려되고 있었다. 이때 프



(그림 1) 프랑스의 에너지별 전력 생산

랑스의 원전 주기기 공급 업체는 웨스팅하우스사, 바브록사 및 제너럴 일렉트릭사로부터 가압 경수로 및 비등수형 원자로 설계를 승인받았다.

74년 12월 석유 위기에 때맞추어 프랑스 정부는 EdF가 원자력 발전 사업을 크게 확대할 수 있도록 승인을 하였다.

57년부터 프랑스는 원전 표준화가 가져다 줄 수 있는 경제적 이득을 극대화하기 위하여 프라마톰사를 독점

적인 원자로 생산업자로 선정하고, 미국에서 개발된 900MWe급 가압 경수로를 표준형 원자로로 선정하였다.

또한 프라마톰사가 기술적으로 외국에 종속되는 것을 방지하기 위하여 프라마톰사의 웨스팅하우스사 지분을 회수하여 원자력 분야의 국책 연구 개발 조직인 CEA로 이전시켰다.

6기의 비표준화 원전이 건설된 후에, 동일한 원전 부지에 2기씩의 표준화 원전이 건설되는 방식으로 28기

가 건설되었다.

36기의 원전이 현재 높은 이용률을 나타내며 운전되고 있다. 물론 대부분의 원전이 부하 추종 운전을 하고 있기 때문에 기저 부하로 운전되고 있는 외국 원전의 이용률보다는 낮다. 모든 원전 부지에는 2~6기가 건설됨으로써 부대 설비 공유에 따른 이익을 누리고 있다.

75년 초에 EdF는 웨스팅하우스사의 설계에 기초를 두고 프랑스의 기술을 가미한 1,300MWe급 가압 경수로 원전을 추가로 발주하기 시작하였다. 이 원자로형의 최초의 원전인 PALUEL 1호기가 84년에 상업 운전을 시작하였는데, 이는 미국 최초의 1,300MWe급 원전인 사우스텍사스 1호기보다 4년이 앞선 것이다.

결과적으로 1,300MWe급 원전의 설계는 프랑스의 설계팀에 의해서 완성된 것으로 볼 수 있다. 1,300MWe급 원전은 <표 2>에 나타난 것과 같이 20기가 운전중에 있다. 총 54기의 가동중 원전의 이용률은 80%를 상회하고 있다.

N4시리즈(450MWe급 가압 경수

로)의 첫 호기인 Chooz B1이 84년 발주되어 96년 여름에 상업 운전을 개시하였다.

4기의 N4 시리즈 원전은 최신의 기술이 반영된 100% 프랑스 독자 설계인데, 선행 호기들의 운전 경험이 충분히 반영되었다. 전산화된 계측 제어 계통은 오늘날 가장 최신의 기술이다. 현재 프랑스의 총전력 생산량 중 원자력의 비중은 상당히 높으며, 가동 연수가 짧고(가장 오래된 원전인 Fessenheim 1호기의 가동 연수가 20년을 갓 넘음), 전력 수요 증가율이 높지 않기 때문에 4기의 1,450 MWe급 원전의 상업 운전으로 수년 동안은 풍부한 전력을 공급할 수 있을 것으로 생각된다.

연료 주기의 완결

프랑스는 원자력 사업 초창기부터 원자로와 연료 주기 자립을 동시에 추구하여 왔다.

우라늄 채광 분야에서 세계적인 명성을 얻고 있는 코제마사에 의해서 우라늄 광산이 프랑스 및 외국에서 개발되어 왔다. 프랑스 기술에 기초를 두고 Eurodif에 의해서 운영되고 있는 다국적 기체 확산 농축 공장이 Tricastin에 위치하고 있는데 연간 1,000만SWU를 공급할 수 있다.

또한 코제마사가 운영하는 2기의 재처리 공장이 La Hague에 위치하고 있는데, 연간 1,600톤HM의 용량

을 갖추고 있다.

UP3 공장은 해외 수요를 담당하고 있으며, UP2-800 공장은 EdF 원전의 수요를 담당하고 있다.

현재까지 La Hague 공장에서 1,000톤 이상의 경수로 연료가 재처리되었다. 재처리 과정에서 생성된 고준위 액체 폐기물은 유리화 공정을 거쳐 고화되며, 현재는 콘크리트 저장고에 임시 저장되어 있으며, 최종 처분을 기다리고 있다.

재처리 과정에서 추출된 플루토늄은 87년부터 일부 900MWe급 원전에 재사용되고 있다. 이들 원전의 연료의 1/3은 MOX 연료이다.

현재 8기의 원전이 MOX 연료를 사용하고 있으며, 8기의 원전은 준비중에 있다. 900MWe급 원전 총 28기가 30% MOX 연료를 사용하는 데 따르는 기술적인 문제는 없으며, 이를 승인하기 위한 규제 기관의 인허가 심사가 진행중에 있다.

Marcoule에 위치한 MELOX 연료 조립 공장이 준공되었으며, 96년부터 상업 운전을 시작하였다.

현재까지 약 250톤의 경수로형 MOX 연료가 제작되었으며, 원자로 내에서의 연료 거동은 상당히 만족스러운 것으로 나타나고 있다.

표준형 LEU 연료보다 개발 역사가 짧기 때문에 MOX 연료는 LEU 연료와 동일한 연소도로 연소되는 것은 허용되지 않는다.

따라서 LEU 연료는 노심 내에서

<표 2> 900MWe · 1,300MWe급 원전 비교

(96. 6 현재)

구 분	900MWe	1,300MWe
원전 호기 수	34	20
원자로×年	514	178
평균 운전 연수	15.1	9.9
설비 용량(MWe)	32,194	30,770
누적 발전량(TWh)	2,800	1,310

4주기를 머물지만, MOX 연료는 3주기를 머물게 된다. 이러한 복잡한 재장전 방법을 고려하더라도 MOX 연료의 경제성은 충분히 인정되고 있다.

방사성 폐기물의 관리를 책임지고 있는 국가 기관인 ANDRA는 Soulaines에 위치한 저준위 폐기물 처분장에서 운영하고 있다. 이 시설의 용량은 향후 40년 이상 프랑스에서 발생하는 모든 폐기물을 처리할 수 있는 양이다. 그러나 아직까지도 고준위 폐기물 처분을 위한 방안은 수립되어 있지 않고 있다.

91년 12월에 발효된 법령에 의해서 프랑스는 고준위 폐기물을 처분하기 위한 몇 가지 가능한 방안을 연구 중에 있다. 현재 고려되고 있는 방안은 심층 처분, 악티늄 원소 분리, 변환 및 직접 처분 등이다.

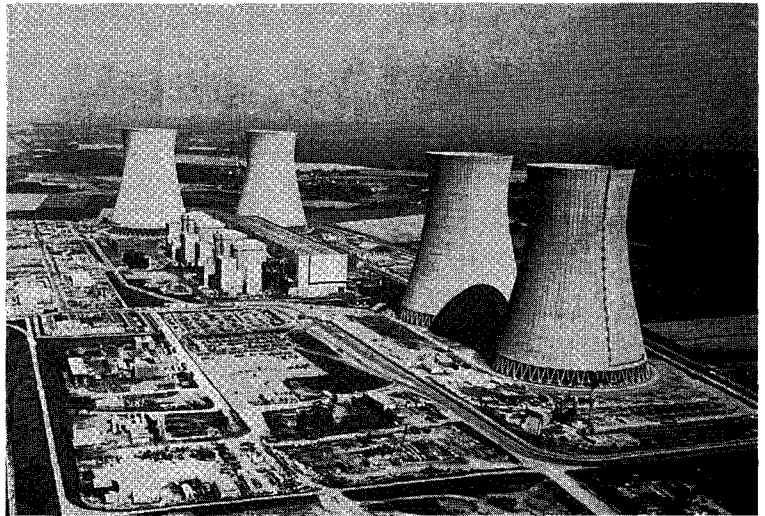
15개년 연구 개발 프로그램 수행 후에 프랑스 의회는 최종 결정을 내릴 것이다.

이 프로그램의 가장 중요한 단계는 3곳의 지하 저장고의 위치 선정인데, 한 곳은 향후 영구 처분장으로 활용될 예정이다. 현재 이들 3곳에 대한 주민 청문회가 개최 중이다.

연구 개발

프랑스의 원자력 산업계의 가장 큰 장점은 유관 기업체간의 긴밀한 협력 관계이다.

Edf는 원전의 운영자인 동시에 구



프랑스의 Dampierre 원자력발전소

조물 설계자이다. 독점적인 원자로 공급자인 프라마톰사는 연료 제작도 담당하고 있다. ALCATEL-ALSTOM 사는 터빈/발전기를 제작·공급하고 있다. 코제마사는 MOX 연료 제작과 연료 주기 용역을 수행하고 있다.

유사하게 원자력 관련 연구 개발의 대부분은 CEA에 의해서 수행되고 있는데, CEA는 연구용 원자로, 핫셀, 대형 시험 설비 등과 같은 시설을 운영하고 있다. CEA는 원자로 물리 및 기술, 연료 및 연료 주기, 안전성 증진 등 모든 분야의 연구 개발을 수행하고 있는데, 위에서 언급한 산업체들은 이 연구 활동을 지원하고 있다. CEA는 또한 정부의 요청에 의한 연구도 수행하고 있다.

원자력 사업의 해외 진출

이러한 독특한 원자력 사업 체계를

통하여 프랑스는 원자력 발전에 관계된 모든 기술력을 확보할 수 있었으며, 세계 각국의 원전 사업자들과 기술을 공유하고 있다.

현재까지 벨기에·남아프리카공화국 및 한국 등과 협력 관계를 체결하고 있으며, 가장 최근에는 중국에 2기의 원전을 공급한 바 있다.

중국 대아만에 건설된 1,000MWe 급 원전 2기 외에 링아오에 2기의 원전을 추가로 건설하고 있다. 이외에도 코제마사는 전세계를 대상으로 핵연료 사업을 수행하고 있다.

지속적인 원자력발전을 향한 노력

프랑스는 비교적 짧은 시기에 원자로 및 연료 주기 공장에 대한 투자를 포함하여 약 2,000억달러에 해당하는 금액을 원자력 사업의 발전에 투자하였다. 프랑스의 원자력 발전량은

(표 3) 각국의 원자력 발전량(1995)

국가명	발전량(TWh)
미 국	673.4
프 랑 스	358.6
일 본	286.9
독 일	154.1
러 시 아	99.4
캐 나 다	92.2
영 국	89.5
스 웨 덴	66.7
한 국	63.7
스 페 인	53.1
대 만	40.0
벨 기 에	39.2
스 위 스	23.5
핀 란 드	18.1
불 가 리 아	17.3
헝 가 리	13.2
중 국	12.4

미국의 절반 이상이다(표 3).

프랑스는 원자력 발전이 다음 세기의 세계 에너지 공급에 상당한 기여를 하지 않는다면, 세계 경제의 발전은 기대할 수 없을 것이라고 판단하고, 미래의 원자력 발전을 위한 투자를 게을리하지 않고 있다.

단기 목표로서 프라마투스사와 독일의 지멘스사는 우수한 안전 특성을 가진 EPR(유럽형 가압 경수로)의 설계를 수행하고 있는데, 현재 완성 단계에 있다. 비록 노심 용융 사고의 가능성은 상당히 낮은 것으로 평가되고 있지만, EPR은 노심 용융 사고를 설계에 반영함으로써 사고로 인한 영향을 충분히 완화시킬 수 있다. 또한 노

심의 MOX 연료 비율은 30% 이상으로 올릴 수도 있다.

안전 설비의 추가로 인한 건설 단가의 증가는 향상된 이용률과 연장된 운전 수명(약 60년)에 의해서 상쇄될 수 있다. EPR은 현재의 가압 경수를 대체할 수 있는 훌륭한 대안이 될 것이며, 궁극적으로는 유럽 표준형 원전으로 자리잡게 될 것이다.

가압 경수로 원전은 경제성 있는 전력 생산 수단이지는 않지만, 우리나라에 내재된 에너지의 활용은 상당히 낮은 발전 수단이다. MOX 연료를 통한 재활용을 고려한다 하여도 에너지 이용률은 1%를 넘지 못한다.

장기적으로 볼 때, 원자력 발전이 세계 에너지 수요를 충족시키는 데 중요한 역할을 수행하기 위해서는 우리나라 또는 토륨의 에너지 이용률을 높일 수 있는 방안이 강구되지 않으면 안된다. 따라서 고속 증식로의 필요성이 대두된다.

약 20여년전 오일 쇼크로 인한 위기감이 팽배하던 시기에, 원자력에 대한 기대감은 매우 높았으며, 금세기 말까지는 고속 증식로가 필요하다는 전망이 제시되었다.

이미 250MWt급 고속 증식로인 피닉스를 운영하고 있던 프랑스는 1,200MWt급 슈퍼피닉스를 추진하기로 결정하였다.

당시에 프랑스는 프랑스가 건설을 계획하고 있는 모든 고속 증식로에 공급할 플루토늄의 양이 부족할 것으

로 예측하였다. 따라서 높은 증식비를 갖도록 설계하는 것이 중요하다는 생각이 지배적이었다.

그러나 70년대 중반의 그러한 전망은 상당히 과대 평가된 것으로 드러났으며, 향후에는 고속 증식로를 필요로 할 지 모르겠으나 현재는 불필요하다는 것이 정설이다.

이 과정에서, 고속 증식로는 플루토늄 재고량을 적절히 관리할 수 있는 유용한 수단이 될 수 있을 것이며, 필요시에는 반감기가 긴 소량의 악티늄 원소를 변환시키고 연소시키는 데도 활용될 수 있다.

96년도에 슈퍼피닉스는 매우 성공적으로 운영되었다. 그리고 프랑스 정부로부터 특별한 「블루리본 과학증서」를 수여받았는데 이는 슈퍼피닉스의 새로운 임무의 유용성을 입증해주는 것이다. 슈퍼피닉스는 98년도에 점진적으로 증식로에서 연소로로 전환될 예정이며, 프랑스의 「CAPRA 및 SPIN 연구 개발 프로그램」을 지원하기 위한 개량형 연료가 노심에서 시험될 것이다.

미래의 연료 주기를 준비하기 위하여, 프랑스는 AVLIS 레이저 농축 공정을 개발중에 있으며 현재 상당한 진전을 이룩하였다. 또한 몇 가지의 개량화된 재처리-분리 공정을 개발중이다.

프랑스는 모든 노력을 통해서 원자력 에너지를 인류를 위한 지속 가능한 에너지로 개발할 것이다. ☉