

原子力發電：21世紀의 에너지挑戰

本稿는 日本東京에서 開催된 第21回 日本原産
年次大會에서 發表된 論文이다.



Jean- Pierre Capron

〈프랑스原子力廳(CEA) 長官〉

프랑스는 海外에너지依存度를 대폭 감소시키기 위해 지금부터 15년전에 원자력의 개발노력에 착수했으며, 그 결과 현재 다음과 같은 성과를 올리기에 이르렀다.

- 프랑스 국영전력회사인 EDF에 의한 發電量의 70% 이상이 原子力에 의해서 공급되었다.
- 프랑스내의 化石燃料資源은 특별히 언급할 만큼의 부존량이 아님에도 불구하고 프랑스에서 소비되는 1차에너지의 50% 가까이 國産으로 되었다.

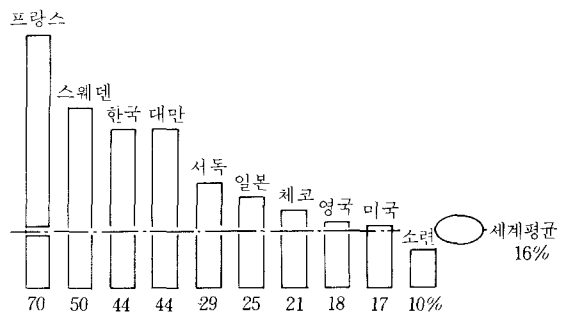
프랑스의 原子力産業이 이미 성숙단계에 도달해 있는 것은 분명한데, 앞으로 原子力의 占有率이 프랑스의 電力網에서 어떻게 발전해 갈 것인지에 대해 예측하기는 어려우나 주요한 관심사는 값싼 전력에 의해서 얻어지는 경제적인 이득을 어떻게 획득할 것인가 하는 점에 있다. 需要의 증가에 맞추어서 發電設備를 증설해야 되겠지만 현재 모든 재래형 발전플랜트가 遊休狀態에 있기 때문에 앞으로 次世紀 初에 걸쳐 신규 원자력발전소가 건설될 전망은 적으리라 생각된다.

지금까지 프랑스에서는 에너지문제에 대한

대처가 잘 되어 왔다는 사실만을 근거로 에너지문제가 해결되었다고 안이하게 생각하는 것은 옳지 못하며, 더욱이 원자력의 研究開發을 스피드·다운시키는 시기가 도래했다고 판단하는 것도 경솔한 생각이다.

이러한 생각이 매우 위험하다는 것은 原子力産業의 리드타임이 10년 이상 걸리는 것이 通例로 되어 있기 때문에 대담하게 路線을 결정하기 전에 먼저 次世紀를 전망해 본후 다음의 두가지 주요한 문제점을 고려하는 것이 중요하다.

- 原子力發電은 과연 일시적인 에너지 형태



〈그림1〉全發電量에서 占하는 原子力의 비율(1986年)

에 불과한 것인가, 또는 중요한 역할을 완수하는 에너지源인가?

• 앞으로 10~20년 사이에 과연 원자력 산업은 어떻게 변모되어 갈까, 또 技術的인 동향은 어떤 것으로 될 것인가?

이번 발표에서는 이상의 두가지를 중점적으로 다루어 검토하고자 한다.

I. 重要한 役割을 맡은 原子力發電

1. 人口統計의 몇가지 事實

에너지 및 기타 경제분야에서 人口統計는 그 특징을 형성하는 것이며, 또 대부분의 경우 여러가지 전개의 背後動機가 되는 것이다. 현재 세계의 총인구는 약 50억명에 이르러 불과 25년 전에 비해 배로 증가했다. 사망률 및 출생률에 근거한 가장 신뢰성이 높은 모델에 의하면 세계인구의 포화치는 100억명으로 보고 있으며, 이 수준에 도달하는 시기는 21세기 중반이 될 것으로 예측되고 있다.

질병과 전쟁이 반복되는 인류의 역사과정에서 20세기 후반부터 21세기 전반에 걸쳐서는 전대미문의 인구신장이 계속되어 당해기간에 인류의 총수는 4배로 팽창되리라 예측되고 있다.

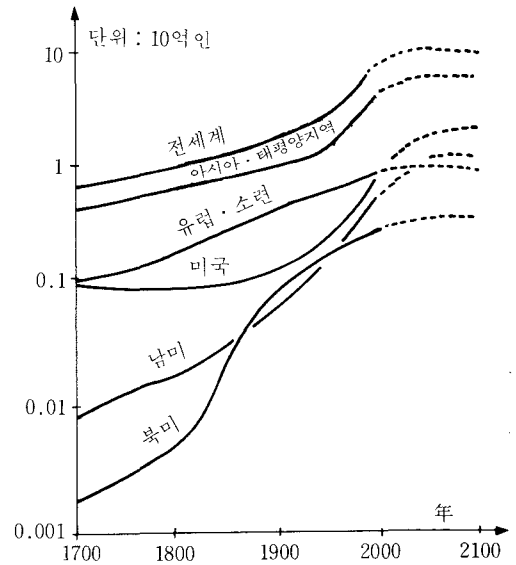
인구의 급증과 동시에 인구의 地域分布狀態에서도 현저한 변화가 일어날 것으로 예상된다.

• 인구의 신장은 주로 아시아·아프리카 양 대륙에서 일어날 것인데, 특히 아프리카대륙의 비중은 11%에서 20%로 배에 가까운 증가가 전망된다.

• 住民은 지방에서 대도시권으로 집중하는 경향을 나타내게 되는데, 이것은 점점 많은 나라에서 농업에서 부터 공업으로 構造變化를 반영하는 것이다.

2. 에너지需要에 주는 영향

세계의 1차에너지 消費總量은 1986년에 석유



(그림2) 세계 人口의 變遷

환산으로 약 75억톤에 달해 인구 1인당 평균 1.5톤이 되었으나, 1인당 에너지소비량은 1인당 GNP와 상관성이 강하기 때문에 각국의 상황에 따라 큰 차이가 인정된다. 예를 들면, 스칸디나비아 또는 北美地方의 각국에서는 7톤을 필요로 하고 있는데 반해, 일본과 유럽 각국에서는 3~4톤이며, 中國에서는 0.6톤, 그리고 이디오피아 농민의 경우에는 불과 10kg에 불과하다.

현재 세계 1차에너지 수요량의 3/4을 소비하고 있는 先進工業國의 인구는 한동안 安定狀態가 계속되리라 생각되지만, 이에 반해 開發途上地域 나라들의 인구는 급격히 팽창되고 있으며, 따라서 同 地域에서는 종래의 농업경제 중심에서 공업에 중점을 둔 경제로의 전환이 이루어지리라 예측된다.

선진공업 각국에서는 1970년대부터 省에너지를 위해 각종 노력을 기울여 왔으며, 앞으로 工業開發의 형태는 低에너지부문을 중심으로 하여 발전해 가기 때문에 개선의 여지는 여전히 남아 있다고 볼 수 있다. 그러나 이런 나라들의 總體的인 효과는 개발도상국의 에너지수요에 비하면 작은 것이다. 개발도상국에서는

工業化로의 전환에 따라 필요로 하는 연료를 공급하고, 보다 높은 생활수준을 만들기 위해 국민 1인당 에너지수요의 더한층 증대가 요구된다.

1986년에 개최된 世界에너지會議에서는 대다수 전문가가 21세기 중반까지는 세계의 1인당 평균 에너지소비량을 2톤으로 보기로 합의했는데, 이 平均值는 현재 유럽에서도 가장 공업화가 뒤떨어진 지역에서 기록된 수치와 동등하다. 동 회의에서는 21세기 중반까지는 세계의 에너지需要量이 200억톤이 될 것이라는 점에 대해서 의견의 일치를 보았다. 이것은 세계의 에너지소비량이 세계의 인구가 두배가 되는 시점에서 세배 가까이 증대되는 것을 의미한다.

3. 原子力發電의 寄與

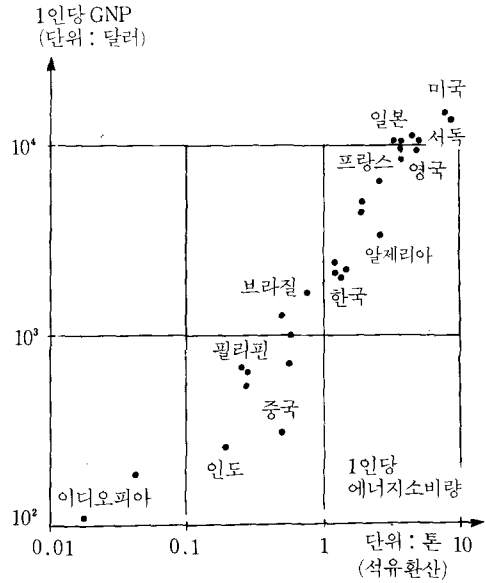
이와 같이 증가하는 수요에 대응하기 위해서는 이용가능한 에너지源을 모두 규합해야 함은 물론이지만, 원자력발전이 기여하는 공헌도 또한 의심할 여지가 없다.

- 먼저 原子力發電은 大量生産이 가능하며, 增殖爐技術에 의해서 물리적인 제한을 받지 않아도 된다. 한편 化石燃料의 경우 수요에 대한 급격한 증대가 가격의 급상승을 초래한다.

- 원자력발전은 코스트의 효율성이 높다. 석유가격이 배럴당 10\$의 수준을 밑돌지 않는 한 원자력발전의 kWh당의 발전코스트는 석유 또는 석탄 보다 싸다. 또한 석유가격이 10\$을 하회하는 사태가 발생한다 하더라도 그다지 오래 계속되지는 않을 것이다.

- 원자력발전은 生産國 보다도 오히려 消費國에 부가적인 가치를 부여한다.

이와 같은 利點과 더불어 더욱 원자력을 추진하는데 중요한 열쇠가 되는 것은 환경보전의 문제인데, 이 문제는 세계의 인구 및 에너지 사용량의 증대라는 관점에서 점점 더 一般大衆의 관심이 높아지고 있다. 本稿에서는 本人이 주장하는 바를 분명히 하기 위해 인구와 公衆의



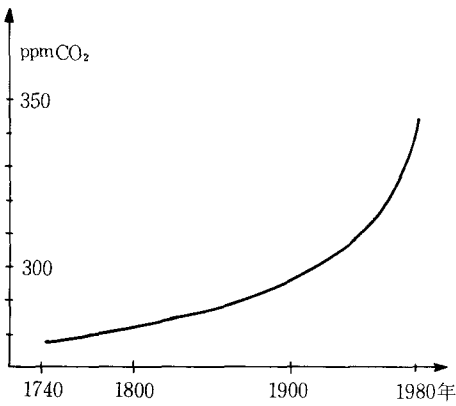
〈그림3〉人口1人당 에너지소비량과 GNP

건강에 대해 두, 세가지 사례를 들어 보기로 한다.

- 極地의 얼음샘플을 자세히 조사함으로써 역사상의 시대마다 대기중의 탄산가스(CO₂)의 濃度를 재현하는 것이 가능해졌는데, 그 결과는 매우 인상적인 것이었다. 温室効果라 일컫는 대기온도와 탄산가스농도 사이의 인과관계는 아직까지 충분히 해명되지 못하고 있으며 여전히 논쟁의 대상이 되고 있으나, 아문든 적지않은 과학자가 심각한 우려를 표명하는 대상 과제로 되어 있다.

- 석탄 또는 석유연소의 발전소에서 환경중에 방대한 양의 오염물질이 방출되는데, 이 중 아황산가스와 질소산화물 등의 오염물질은 그 유독성이 널리 알려져 있다. 이에 비해 原子力施設의 경우에는 극히 소량의 방사능이 방출되는데 불과하며, 석탄의 自然放射能 放出量과 별로 큰 차이가 없다.

- 이 점에 관해서는 프랑스의 實例가 원자력 발전에 의해서 얻어지는 환경상의 이점을 구체적으로 나타내는 좋은 예로 되어 있다. 즉, 프랑스의 경우에는 환경중에 방출되는 아황산가스



〈그림4〉대기중 CO₂ 농도의 장기적 경향

	石炭	石油	原子力
CO ₂ 1000톤/1년	7800	4700	0
SO ₂ 톤/년	40000	91000	0
NO ₂ 톤/년	9500	6500	0
먼지 톤/년	6000	1600	0
집단피폭선량 마이크로 시버트/년	10	0	20(★)

★) 모든 원자력산업의 활동을 포함

〈그림5〉각종 발전방식에 의한 환경영향
(100만KW급 발전설비, 연간발전량 66억KWh)

가 1980년부터 1986년에 걸쳐 반감되고 있는데 비해, 같은 시기에 유럽의 다른 나라에서는 평균 20% 감소되는데 불과했다.

• 유독성의 문턱값에 대해서는 가끔 오해되고 있으므로 이를 언급해 두는 것도 의의 있는 일이라 생각된다. 集團被曝의 기준은 放射能에 관한 쪽이 아황산가스에 대한 것 보다 훨씬 적게 나타나고 있다.

아황산가스에 관해서는 各國의 제한치가 각각 다르지만 어느 나라나 많은 적든 冬期에 공업지역에서 인지되는 농도에 근거하고 있으며,

건강상에 미치는 최초의 영향을 기록하기 시작한 시점의 수준에 가까운 것으로 되어 있다. 실제로 이 제한치는 각국의 평균 자연백그라운드를 100배나 상회하는 높은 값으로 되어 있다.

이에 반해 방사능에 관해서는 최초의 영향이 모든 線量과 국제적인 기준 사이에는 10배 이상의 차이가 있으며, 더구나 이 기준치는 각국의 평균 자연백그라운드를 약간 상회하고 있을 뿐이다.

이것은 모두 원자력발전이 현재의 과학상황 하에서는 현저하게 生態學上에 위험을 미치지 않고 성장과정에 대응할 수 있는 유일한 방책임을 증명하는 것이다.

II. 21世紀의 原子力産業 形成

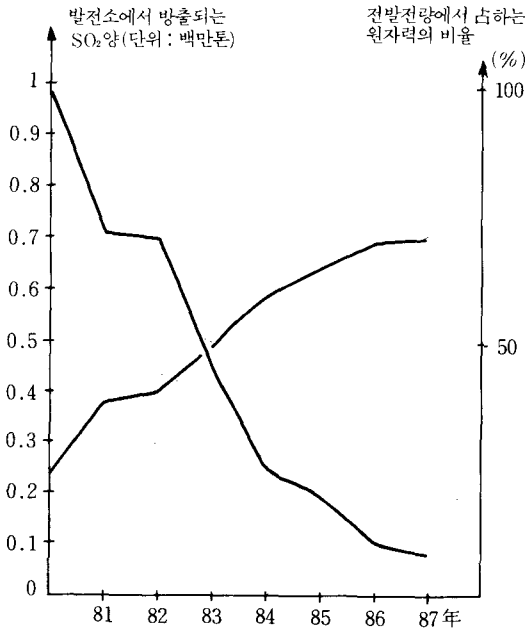
에너지·믹스에서의 占有率이 각국에 따라 달라지는 것이라 해도 원자력발전은 현재로서는 공업 각국에 있어서 항구적인 주역임과 동시에 에너지供給에 없어서는 안될 공헌자가 되었다. 이것은 곧 각국은 공업규모에 따라 앞으로 工業界가 요구하는 적합한 시기에 합치되는 연구개발을 지속해 가야 함을 의미한다.

프랑스에서의 원자력에 관한 연구개발은 현재 세가지 주요한 活動路線에 따라 편성되어 있다. 즉,

- 안전성,
- 연료사이클,
- 次世紀의 원자로 등이다.

1. 安全性

원자력은 안전성에 관한 연구가 끊임없이 실시되고 있어서 인류에게 있어서는 전례를 볼 수 없는 활동이라 생각된다. 안전성 문제는 核分裂爐가 최초로 실현된 이래 40년이 경과한 현재까지 아직 뭔가 신비에 싸인 신기한 것으로 보이는 점에서 公衆 사이에 강한 저항이 존재하기 때문에 科學者에게 있어서도, 또 設計陣에게 있어서도 간과할



(그림6) 프랑스의 원자력발전과 대기오염의 감소

수 없는 큰 관심사였다.

체르노빌事故後 이 불신감은 점점 강해지고 있어서 원자력산업에서의 안전성 문제는 프랑스와 같이 安全問題에 대해 소홀히 한 적이 없는 나라에서 조차 충분한 대응을 갖추어야 했다.

소련에서 발생한 사고가 原子爐의 설계 및 운전에 관한 한 우리에게 많은 교훈을 주는 것은 아니었으나, 다음 사항에 관해 부단한 노력을 유지해가야 하는 것은 의심할 여지가 없는 것이다.

● 重大事故의 영향을 최소한으로 막기 위한 干涉節次.

● 방사성물질의 대량방출시 집단오염의 조기진단.

● 나쁜 환경하의 작업, 특히 耐방사선 로봇트를 이용한 작업.

● 人爲的 要因에 대한 한층 改善된 관리.

● 오염된 토양의 재생 및 修復.

그리고 「固有安全」爐를 둘러싼 끝없는 논쟁은 계속될 것으로 생각된다.

私見이긴 하지만 단지 말로써 남을 오해하도록

만드는 것은 매우 위험하다고 생각한다. OECD에서는 원자력의 안전성은 사고의 發生確率을 무시할 수 있을 정도까지 저하시킴과 동시에, 만일 발생했을 경우에도 公衆의 건강상에 주는 영향을 최소한에 머물게 할 수 있도록 다른 산업에서 인정되는 기준 보다도 훨씬 엄격한 것으로 수용되고 있다. 안전성은 앞으로도 더욱 改善의 여지가 있으며, 또 반드시 개선될 것으로 확신하지만, 절대적인 안전이 매우 쉽게 달성될 수 있다고는 할 수 없다.

2. 燃料사이클에서의 重要關心事項

프랑스 原子力廳에서는 현재 연료사이클과 관련하여 다음과 같은 주요 세가지 計劃을 계속 수행중이다.

● 레이저 同位體 分離

● 再處理

● 廢棄物管理

a) 레이저同位體分離

우라늄濃縮은 발전코스트의 약 10%를 차지하며, 또 현재의 기술수준으로는 방대하고 경비가 많이 필요하므로 연료사이클의 중요한 스텝으로 볼 수 있다. 레이저광선을 사용하여 우라늄원자의 蒸氣를 선택적으로 이온化시켜 농축하는 방법은 차세대의 농축플랜트로서 경제성 향상에 있어서 매우 유망하며 21세기 초에는 戰列에 참가하리라고 생각된다. 이 방법은,

● 30~50%의 코스트·다운을 초래하며,

● 재처리된 우라늄을 취급함과 동시에,

● 소수의 모듈·유니트를 필요로 할 뿐 이므로 시장변동에 대폭적인 유연성을 갖는다.

이 계획은 용이하게 달성될 성질의 것은 아니지만, 최근 수년동안의 실험실에서의 연구에서는 예상을 초월한 진전을 보이고 있으며, 현재는 본격적인 시스템의 개발에 이르고 있다. 주요한 成分은,

● 銅蒸氣레이저

● 波長可變色素레이저

• 光學

• 蒸發 및 회수장치 등이다.

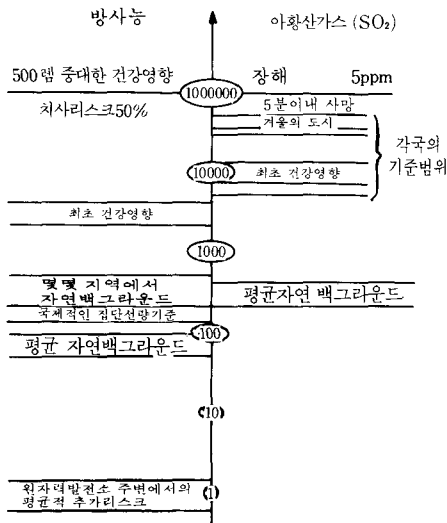
이들 컴포넌트는 현재 프랑스 국내산업계와의 협력하에 CEA에서 테스트중이지만, 각 공정의 경제성을 검토하기 위해 다음 단계에서는 대표적인 규모의 파일로트시설로의 통합이 도모되고 있다.

예비적인 평가는 이미 실시되었으며, 이에 따르면 적어도 농축코스트의 40% 삭감을 기대할 수 있다고 한다.

b) 再處理

현시점에서 중요하게 생각되는 업무는 라·아그에서 확장공사중인 再處理施設을 성공리에 가동시키고, 日本의 六個所村프로젝트에 대해 기술이전을 원활하게 하는 것이다.

UP2(1988년 2월말 현재 합계 2,200톤 재처리)의 運轉經驗 및 세심한 기술을 통해 새로운 시설의 試運轉이 예정대로 실시된다는 확증을 얻기에 이르렀다. 주요 컴포넌트는 모두 CEA의 實규모데스트를 받았으며, 예를 들어 버킷 호일 連續溶解槽는 UP3에 설치하기에 앞서 마르쿠울에서 최종테스트를 받을 수 있도록 개조가



<그림7> 유독성의 수준

되고 있다. 遠心機, 펄스칼럼원격조작기에 대해서도 최종설계 및 설치에 앞서 광범위에 걸친 테스트가 실시되었다.

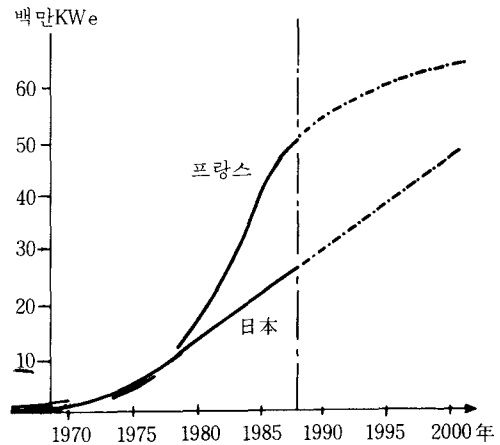
라·아그의 재처리시설이 운전개시되는 1990년대 초에는 照射된 연료는 풀·인벤티리에 축적하기 보다는 빨리 재처리해야 한다는 선택을 정당화하기 위해서 R&D는 플랜트의 운전에서 얻은 경험의 활용에 의해 코스트 감축을 지향하게 될 것이다.

c) 廢棄物管理

폐기물관리는 단순한 기술상의 문제가 아니라 원자력을 수용할 것인지를 둘러싼 논쟁의 중심과제가 되어 있기 때문에 특히 신중하게 취급해야 할 문제이다.

短壽命인 低·中準位의 방사성폐기물에 관해서는 현재 적용할 수 있는 해결책이 이용가능한 상태에 있다고 생각된다. 스텐누에 위치한 제2사이트는 이미 관계당국으로부터 전면적인 승인을 받았으며, 현재 건설공사가 추진되고 있는데 운전개시는 1990년으로 전망된다.

한편, 高準位 폐기물에 관해서는 CEA의 관련실험 실시로 시행되어 온 이론적 및 실험적 연구결과, 人工배리어와 결합된 일정한 지층은 각 방사성원소가 붕괴에 이르는 기간동안 방사능을 안전하게 폐쇄시킬 능력이 있음이 실증되



<그림8> 원자력발전설비용량

었다고 생각된다.

현장에서의 테스트시기는 이미 도래했다고 생각되며, 1989년 말까지는 地下研究所의 설치를 요구하는 제안을 정부에 제출할 것으로 생각된다. 1996년까지 實證計劃을 완료시키기 위해 굴착은 1990년에 시작될 것이다. 사이트의 타당성이 확인되면 地下處分場의 운전개시는 世紀가 바뀔 때 쯤에는 실현될 것이다.

3. 次世紀의 原子爐

프랑스에서는 發電爐에 큰 투자를 하고 있으며, 그것은 1,000억 \$를 넘었다. 따라서 프랑스의 R&D는 두가지 목적을 갖게 된다. 즉,

- 투자액의 최대효율을 도모한다. 특히, 코스트, 利用率 및 플랜트수명에 중점을 두며,
- 이런 시설중 가장 구식에 속하는 것의 교체를 실시하기 위해 차세기 초에 결정해야 할 사항에 대해 준비작업을 추진한다.

이 두가지 목적중 최초의 목적, 즉 투자액의

최대효과를 도모하기 위해 CEA는 燃料設計의 개량에 노력함과 동시에 90만 kW급 유니트용에 플루토늄산화물을 포함한 혼합산화물연료를 도입했다. 원자력발전의 높은 참여율은 부하추종을 의미한다. 때문에 프랑스는 이 운전모드를 1978년부터 개시하였는데 PWR은 충분히 유연성을 갖추고 있으며, 부분적인 부하에서도 매우 원활하게 작동하는 爐임을 인식하기에 이르렀다. 프랑스의 경험은 현재로서는 광범위하게 미치는 것이며, 그 안전성에 대해서도 충분한 확신을 갖게 되었다.

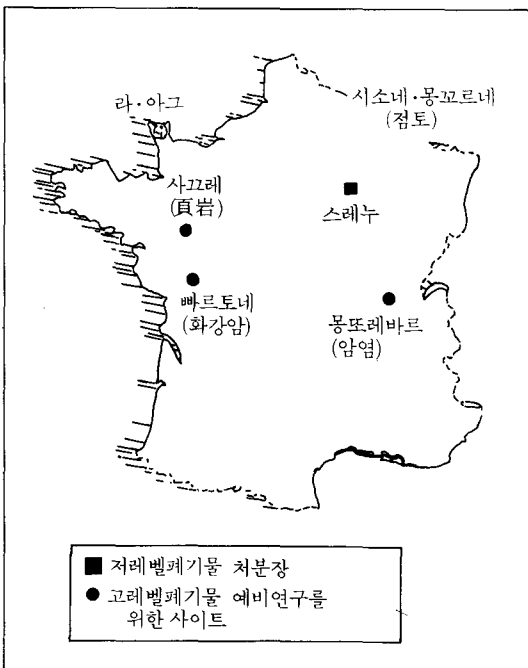
더 長期的으로는 두가지의 상호보완적인 설계가 실시될 것으로 생각된다. 즉, 新型PWR과 增殖爐의 편성이다.

• 新型 輕水爐의 개발연구는 주로 혼합산화물연료를 장전한 減速爐心 또는 스펙트럼시프트 노심에 관한 것이다. 이런 종류의 설계는 天然우라늄의 에너지·포텐셜을 유효하게 이용함으로써 이 포텐셜을 최대한으로 이용할 수 있는 增殖爐의 상업이용까지의 시간을 벌게 된다고 생각한다.

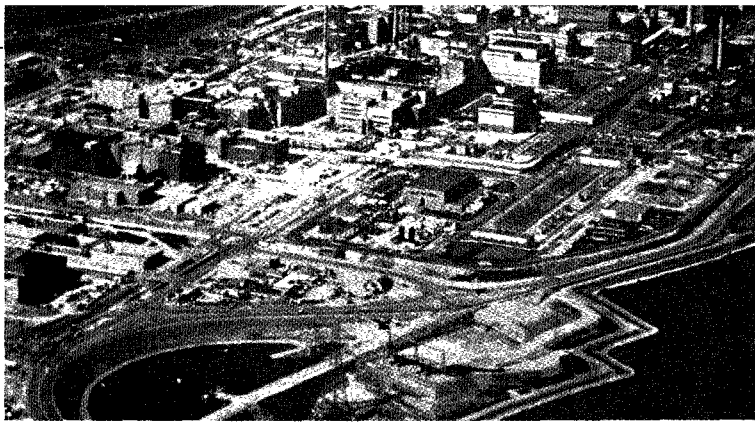
• 高速增殖爐는 일찍부터 일본, 프랑스, 영국 등 몇몇 나라에서 관심의 대상이 되어 왔다.

핵융합 또는 기타 “미래의 에너지”와는 달리 고속증식로의 타당성은 실증되고 있다. 최근 CEA의 연구개발을 감안하면 원자로 설계 뿐 아니라 연료사이클 면에도 충분히 코스트 개선의 여지가 있다고 생각된다. 유럽의 고속증식로 전력회사그룹으로 규합되어 있는 유럽의 전력회사는 현재 사전에 경합성을 갖춘 증식로의 개발을 목표로 한 조사연구를 고려중이다. 프랑스에서도 이 이니셔티브에 전면적인 지지를 받고 있다.

次世代爐를 결정하는데에 이 두가지 설계(신형 LWR 및 증식로)의 경제성에 관한 신뢰할 만한 데이터가 2000년부터 2010년에 걸쳐 이용 가능하게 되는 것이 우리들에게 있어서는 매우 중요하다. 개인적으로는 원자력산업이 필요한



(그림9) 프랑스의 방사성폐기물 처분계획



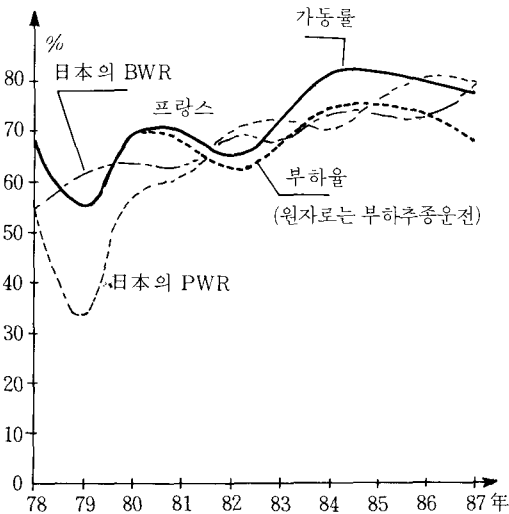
◀ 라·아그 再處理 工場 全景

노력을 경주해 간다면 증식로가 충분히 경합력을 갖기에 이르는 기회는 결코 적지않다고 믿는다. 우리들은 이미 설계상 변경함으로써 증식로와 경수로간의 투자면에서의 차이를 대폭 감소시킬 수 있다는 점에 대해서 확고한 자신을 갖고 있으며, 더욱 앞으로의 개량이 가능하다고 생각되는 부문도 여전히 남아 있는 상황이다

Ⅲ. 結 論

원자력의 미래에 대해 두, 세가지 느끼고 있는 바를 요약하고자 한다.

1) 원자력발전은 발전분야에서 이미 높은 경



<그림10> 원자력발전소의 가동률

합성을 갖추기에 이르렀으나, 아직 코스트에 관해서는 개선의 여지가 많다.

원자력발전의 진전을 저해하는 주된 요소는 公衆이 본의는 아니지만 분명하게 표명하고 있는 것인데, 이 심정은 불안감에 매우 깊이 기인한데서 오고 있다. 즉, 새로운 것, 친숙하지 않은 것에 대한 공포감이다.

2) 이런 이유에서 각국은 원자력의 옵션을 결정하는데 있어서 自國에 있어서 원자력 이외에 선택의 여지가 없다고 판단했을 때에 한정되고 있다. 이 경우가 1970년대의 에너지위기에 즈음한 일본, 벨기에, 프랑스 등이다.

代替에너지源이 이용가능한 그 밖의 나라에서는 뭔가 극적인 변경이 에너지事情에 새롭게 발생하여 一般大衆 사이에 원자력으로 비약해야 할 시기가 도래했다는 확신이 생기지 않는 한 원자력발전의 보급속도는 완만해 질 것이다.

3) 이와 같은 事象은 몇몇 先進工業國에서는 전력수급의 부족이 계기가 되어 일어날 가능성이 있다.

전력은 저장이 어렵기 때문에 그것이 부족하면 석유가 부족했을 경우 보다도 훨씬 격렬한 파괴상태를 초래하게 된다.

4) 원자력의 취급에는 세심한 주의가 필요하며, 대화를 통해 一般大衆(여론)에게 각종 에너지의 옵션을 제시하여 각각의 의존상태, 환경, 공급상황 및 코스트 등 각 부문에서의 영향을 명확히 제시해 가야 되겠다.