

21世紀의 에너지 體制와 原子力의 役割

本稿는 지난 4月 13日부터 15日까지 日本 東京에서
開催된 第21回 日本原産 年次大會 開會세션에서 特別
講演한 内容이다.



Wolf Häfele

〈西獨 Jülich原子力研究所 所長〉

1. 原子力의 發展과 展望

1985년에 IAEA / OECD는 세계의 原子力發
電설비용량이 253GWe이고, 발전량은 1.4×10^3
TWh라고 집계하였다. 表1에 先進 9개국 및
전세계를 편의상 OECD유럽·태평양(E+P),
OECD美洲(A), 非共產圈 국가(WOCA), 中
央경제통제국가(CPE) 그리고 세계총계로 구
분하여 정리하였다.

1.4×10^3 TWh는 열효율을 33%로 가정할때
0.49TW·년으로서 全世界 1次에너지消費量
10.52TW·년의 4.7%에 해당한다. 1985년에 총발
전량은 9.4×10^3 TWh였기 때문에 原子力發電占
有率은 15%로서 큰 비중을 차지하고 있음을
알 수 있다. 동시에 체르노빌事故와 사회 및 경
제변화로 원자력의 役割에 대한 의문이 제기되
고 있다. 各국별 원자력발전 現況을 개괄하면
다음과 같다.

벨기에:8기의 원자력발전소가 총 電力量의
약 70%를 담당하고 있다. 1,400MWe 발전소가
1990년대에稼動될 예정인데 프랑스가 50%의
持分을 갖고 있다.

캐나다:1986년 18기의 原子力발전소가 總電

力量의 14.7%를 생산하였다. 5기가 건설중에
있으며, 1990년대의 原子力占有率은 19%에 달
할 것이다.

덴마크:1985년 議會는 原子力계획을 否決시
켰다.

프랑스:50기의 원자력발전소가 총 전력량의
70%를 생산하고 있다. 14기가 건설중이고, 1기
가 發注되었다.

西 獨:22기의 발전소에서 40%의 電力量을
담당하며 실질적인 포화상태에 있다. 新規發注
가능성은 보이지 않고, 政治的 여건 또한 불투
명하다.

英 國:대부분이 Magnox型 原子爐인 38기
가 총 전력량의 20%를 생산했다. 1987년 3월
최초의 가압경수로가 認可되었다.

이탈리아:實質的으로 原子力이 停止狀態에
있다.

네덜란드:1985년 2기의 原子力발전소가 전
력공급의 6%를 담당하였다. 후속기 건설이 매
우 지연되고 있다.

스페인:8기의 원자력발전소가 약 30%의 電
力量을 생산하였다. 1985년에 8기의 발전소가 建
設中에 있었는데, 그중 4기가 준공되었다.

〈表1〉原子力설비용량과 원자력발전량

국 명	1985		2000	
	GWel	TWh	GWel	TWh
캐나다	9.776	57.1	15.9	109.1
프랑스	37.533	213.1	77.0	392.0
서독	16.413	119.8	24.3	154.2
일본	23.665	152.0	62.6	370.0
한국	2.720	13.9		
스웨덴	9.455	55.9	9.1	63.4
영국	10.120	53.8	18.0	121.0
미국	77.804	383.7	115.7	659.0
소련	27.756	152.0	79(?)	544(?)
경제협력개발기구(유럽+태평양)	117	710	233	1.400
경제협력개발기구(미국)	90	440	132	800
개발도상자유경제권	12	60	32	200
자유경제권 총계	219	1.210	397	2.300
중앙계획경제권	35	200	111	700
전세계	253	1.400	508	2.900

핀란드: 체르노빌사고 이전에는 4기의 원자력발전소가 전력생산의 40%를 담당하였다. 그러나 체르노빌사고 이후 원자력계획이 정지되었으며 아마도 원자력을 포기할 것이다.

오스트리아: 1978년 원자력을 포기하였다.

스위스: 5기의 원자력발전소가 약 40%의 전력을 담당하고 있다. 1기가 추가 건설될 전망이나 원자력 포기압력이 매우 거세다.

스웨덴: 전력의 50%가 12기의 원자력발전소에서 생산된다. 1980년 스웨덴의회는 2010년에 원자력을 포기하도록 결의하였다.

브라질: 경제적인 부담 때문에 원자력개발계획이 대폭 축소되었다.

일본: 1986년 35기가 전력의 25%를 공급하였다. 후속기 건설도 계획대로 진행되고 있다.

한국: 원자력 7기가 1986년에 약 44%의 전력을 공급하였다. 체르노빌사고 후 2기가 발주되었다.

미국: 1986년말 현재 99기가 운전되어 전력에서의 점유율은 16.6%이었다. 신규준공분도 이제는 거의 없는 상태이고, 1977년 이후 신규발주가 없다.

중앙통제국가(CPE): 원자력이 의욕적으로 추

진되고 있다. 동유럽국가들의 원자력점유율은 국별로 매우 상이하다. 전부 합쳐서 약 70기가 가동중이다.

일본, 프랑스, 서독과 같은 나라에서의 원자력개발계획을 2000년까지 정리해 보면 매우 흥미있는 결과가 나타난다. 이 세나라의 경우 모두 개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 일본의 경우 계획중인 발전소가 최근에 다시 증가하였다. 반면 프랑스의 경우 신규계획분은 더 이상 보이지 않는다. 독일에서는 계획단계에 있는 발전소가 아직 상당수 있다. 소련의 경우 계획단계에 있는 발전소의 수가 줄어들고 있다. 미국은 계획단계 뿐만 아니라 건설중인 발전소의 수도 줄어들고 있다.

몇몇 국가에 있어서 원자력의 상대적 개발속도 $(1/F) \times (dF/dT)$ 는 다음과 같은 선형의 관계를 갖고 있다(F는 원자력설비용량).

$$(1/F) \times (dF/dt) = \alpha(S-F)$$

S는 포화값이고, α 는 매개변수이다. 표2에는 이 식을 만족하도록 실제자료로부터 구한 S와 α 를 정리하였다. 소련의 매개변수가 낮다. 프랑스의 매개변수는 그 보다 더욱 낮은 0.358인데 포화값 S가 1985년도 실제값 보다는 높고 1992

(表2) IAEA의 예측포화치 S

(단위 : GWe)

	S	상관계수	1992	1985(실제)
캐나다	12.346	0.895	14.565	9.776
서독	20.146	0.863	22.998	16.413
일본	28.256	0.981	30.934	23.665
영국	9.944	0.618	11.420	10.120
미국	101.821	0.685	104.592	77.804
소련	46.884	0.433	58.672	27.756
합계	219.397		243.181	165.534

(註) 1985년 실적치 대비 S의 비율은 1.325였음

년도 IAEA 예상치(1985년에 예상한 것임) 보다 낮은 것으로 나타나 있어 매우 흥미롭다.

이런 種類의 分析結果를 과대평가할 필요는 없으나, 원자력發電의 成長이 최근의 예측보다 매우 느릴 것으로 판단할 수는 있다. 즉, 표1에 주어져 있는 2000년의 원자력시설용량 508GWe는 너무 높은 예상치임을 유추할 수 있다. 그 대신 2000년의 시설용량을 360GWe로 추정할 수도 있는데 이 숫자는 IAEA가 1990년의 시설용량으로 예상한 숫자에 近接한다. 이 숫자는 1985년도의 시설용량 253GWe에 S값과 1985년 시설용량의 比를 곱하고 1990년도에 대한 IAEA 예측치와 일치시키기 위한 24GWe를 더한 것이다. 그러나 2000년에 360GWe가 되리라는 추정은 매우 단순하여 원자력開發이 예상보다 많이 축소되리라는 의견을 나타내는 정도의 의미만을 갖는다.

시설용량 360GWe의 경우 年間 천연우라늄 消費量은 약 60,000톤에 達한다. 原子力發電이 포화상태로 지속된다고 하면 이 量이 바로 계속적인 年間消費量이 된다. 우라늄부존량을 예측하는 것은 매우 복잡한 일이라는 하나 OECD / IAEA는 여러번 이런 豫測을 한 바 있다. 表3에 1986年度 예측치를 정리하였다. 확실히 확인된 매장량과 非共産개발도상국(WOCA)에서의 추정량을 $3,647 \times 10^3$ 톤으로 본다면, 약 72년간 공급이 가능하며 WOCA에 300GWe를 배정할 수도 있다. 그리고 WOCA의 미확인 부존량을 감안하면 이 기간은 2.7~3.4배 늘어난다.

반대로 OECD / IAEA의 최근 評價에서 예

상한 것처럼 原子力發電이 계속 증가한다면, LWR저성장 시나리오의 경우 WOCA國家들이 675GWe의 電源을 2025년까지 開發하므로 $3,078 \times 10^3$ 톤의 천연우라늄을 필요로 한다. 高成長시나리오의 경우 1,555GWe의 電源들 WOCA國家들이 개발하여 $5,386 \times 10^3$ 톤의 우라늄을 使用한다. 다른 原子爐戰略을 택한다면 우라늄 所要量은 적어질 것이다. 高속증식로戰略을 택한 저성장의 경우 WOCA국가는 $1,980 \times 10^3$ 톤의 우라늄을 누적적으로 필요하게 되며, “고성장”의 경우에는 $3,656 \times 10^3$ 톤을 사용하게 된다.

즉, 이러한 未來에의 展望으로 부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

- 만약 原子力發電이 360GWe 근처에서 포화된다면 천연우라늄의 供給은 向後 100년간은 중요한 資源問題가 되지 못한다.

- 만약 原子力이 OECD / IAEA의 저성장시나리오대로 開發되어 2025년에 WOCA國家가

(表3) 우라늄資源 (10⁶톤U)

	RAR ⁽¹⁾	EAR I ⁽²⁾	SR ⁽³⁾	ETPR ⁽⁴⁾
WOCA	2.315	1.332	6.600-12.100	
Outside WOCA	3.647		3.300-8.400	
	3.647		9.900-20.500	

(註) (1) Reasonably Assured Resources, up to 130 \$ /kg
 (2) Estimated Additional Resources, Category I (see OECD / IAEA)
 (3) Speculative Resources
 (4) Estimated total potential resources

675GWe, 全世界的으로는 875GWe가 存在한다
면, 確實히 확인된 매장량과 기타 推定量은 2025
년까지는 거의 消耗될 것이다. 이럴 경우 미확
인 부존량을 開發하여야 할 것이다.

고성장시나리오의 경우 WOCA國家가 1,55-
5GWe, 全世界가 2,160GWe를 2025년까지 保有
하게 될 것이므로 우라늄不足事態는 더 일찍
일어날 것이다.

• 만약 高速增殖爐戰略을 채택한다면 確實
히 확인된 매장량과 추정량만으로도 가능할 것
이며, 적어도 1백년 이상은 미확인 부존량에 의
존하지 않아도 될 것이다.

지난 날 이러한 원자로전략에 대해 活潑한
評價가 있었다. 따라서 이 점에 대해서는 더 이
상 언급하지 않겠다. 本稿에서의 主안점은 確
실히 확인된 매장량과 추정량만의 運用범위
에서 論하고자 한다.

만약 原子力이 360GWe정도에서 포화된다면
이는 경제성장의 둔화, 낮은 石油價格, 그리고
原子力에 대한 社會的 收容度 결핍에 基因
할 것이다.

사회적 수용여부는 특히 後行核週期에 대해
더욱 중요하다. 使用後核燃料의 수송, 中間貯藏,
再處理 및 永久處分 이 모두가 점점 더 政治問
題化되고 있다. 새로운 代案으로서 사용후핵연

료의 直接永久處分 方案도 提起되고 있다. 따
라서 民需用 再處理工場의 建設과 運營이 정
체된다고 일단 假定해 보기로 하자. 表4에 이
러한 재처리공장중에서 商業的 규모의 것만을 정리
수록하였다.

電力 1GW·년 生産으로 부터 30톤의 사용
후 핵연료가 發生한다고 하자. 이 중에는 약 0.
2톤의 핵분열성 플루토늄(Pu)이 들어있다. 1990
년대 초반부터 全世界的으로 360GWe, WOCA
國家만으로는 300GWe의 設備로 부터 매년 각
각 10,800톤, 9,000톤의 사용후핵연료가 生産되
며 이중에는 72톤 또는 60톤의 플루토늄이 들
어 있다. 만약 WOCA國家의 기존 재처리施設
만이 가동된다면 WOCA發生分의 22%만이 재
처리될 수 있다. 현재 WOCA國家들이 건설 혹
은 계획중인 모든 재처리시설이 준공된다면 55%
가 재처리될 것이다.

재처리된 플루토늄은 LWR에 다시 使用될
수 있다. 만약 재처리공장으로 부터 生産되는
플루토늄이 계속 축적되면 이러한 재순환이 계
속될 것이다. 재순환을 하지 않는 경우 1GW·
년당 3% 농축된 핵연료·GWe·년당 U-235
900kg을 의미한다. 약 ¼을 재순환한다면 재순
환되는 플루토늄은 30톤의 핵연료재처리로 부
터 오는 플루토늄 200kg과 맞먹는다. 따라서

〈表4〉民間재처리시설 (자유경제권)

A. 가동중 시설명	국 명	가동개시	처리용량(톤/일)	처리용량*(톤/년)
Sellafield, B205	영 국	1964	5	1000
La Hague, UP 2	프랑스	1966/89	4**	800
WAK	서 독	1971	0.2	40
Tokai Mura	일 본	1977	0.7	140
Tarapur	인 도	1978	0.5	100/2080
B. 건설, 계획중		가동개시예상연도		
Kalpakkam	인 도	1986	0.5	100건설중
La Hague, UP-3A	프랑스	1989	4	800건설중
Sellafield, Thorp	영 국	1992	4	800건설중
Rokkosho Mura	일 본	1959	4	800계획중
Wackersdorf, WAW	서 독	1997	2	400/2900 건설중

*년200일 가동기준

**1989년까지 용량2배증가

放出된 모든 핵연료의 22%(또는 55%)가 재처리된다면 사용후핵연료에 포함된 핵분열성 플루토늄 22%(또는 55%)를 사용할 수 있는 것이다. 나머지 플루토늄은 재처리되지 않은 사용후핵연료에 포함되어 있다. 즉, WOCA國家만으로 볼 때 핵분열성 플루토늄이 매년 47톤(또는 27톤)씩 누적되는 것이다.

지난 20~30년간 플루토늄은 WOCA國家에서만 약 1,000톤이 축적되어 軍需用 축적분을超過한다. 이러한 사용후핵연료를 直接處分하는 데에는 논란의 여지가 많다. 그러나 100~150년후 放射能이 充分히 감쇠된 상태에서는 단지 수cm 두께의 납차폐만이 필요하게 되는데, 이때에는 오늘날 우리가 당면한 문제와 유사한 특성을 갖게 된다. 우리 世代가 지난 세대로부터 有毒廢棄物을 물려받았다는 것은 잘 알려진 事實이다. 西獨의 경우 유독성 폐기물이 매년 5백만톤씩 발생하므로 이를 처분하는 것이 매우 큰 문제로 대두되고 있다. 우리는 이 問題의 심각성을 이제 와서야 깨닫고 있다.

이러한 유독폐기물관리상황을 또다시 반복하는 것은 결코 바람직하지 않다. 우리 世代는 인간환경에 미치는 영향을 서서히 깨닫기 시작하였다. 우리는 다음 세대에 1,000톤이상의 플루토늄을 물려 줄 수는 없다. 사용후핵연료의 직접 영구처분은 실질적인 의미에서 人工的인 플루토늄광산을 창조하는 것이 되므로 IAEA의 安全保障措置를 영원히 필요로 하며 未知의 짐을 후세에게 물려주는 것이다. 이러한 논리로 부터 우리가 얻을 수 있는 것은 무엇인가? 이 질문에 대한 답을 네단계로 나누어 보고자 한다.

1) 원자력開發이 정체를 막고, 활발하든 혹은 서서히 쇠퇴하든 재처리시설의 확장이 필요하다. 우리가 유독폐기물 소각로를 건설하듯이 재처리시설도 건설되어야 한다. 사용후핵연료를 처리하여 폐기물의 體積을 最小化하여야 한다. 核分裂生成物에 관한한 사용후핵연료 1톤당 겨우 약 70 l 만이 있게 된다. 플루토늄과 관

련해서는 약 100 l 가 소요된다.

2) 이러한 관점에서 볼 때 IAEA가 주관하는 國際플루토늄저장(IPS)이 바람직한 방법이다. 지금까지의 모든 협의는 플루토늄의 부족, 처분가능성 및 소유에만 주안점을 두어 왔는데 수천톤의 플루토늄이 환경에 주는 영향도 새로운 협의과제가 될 수 있을 것이다. 地域別 核週期센터의 아이디어를 1970년대에 IAEA가 검토한 바 있었는데, 이러한 맥락에서 이 아이디어도 再評價하여야 할 것이다.

3) 原子力開發을 중단키로 한 국가에서는 핵분열가능물질을 사용않고 플루토늄을 연소시킬 수 있는 특수한 原子爐型을 개발할 필요가 있다. 이러한 경우에는 핵연료를 $PuO_2 \cdot ZrO_2$ 라는 독특한 성질을 가진 세라믹재료를 근간으로 할 수 있을 것이다.

4) 이상과 같은 점을 고려한다면 고속중식로(LMFBR)를 계속 건설하는 것이 가장 손쉬우면서도 자연스러운 방법으로 보여진다. 이러한 LMFBR은 여러가지 方式으로 운영될 수 있다.

초창기의 운전형태는 금속核燃料를 사용하였는데 플루토늄在庫를 2배로 하는 소위 증배시간을 최소화하는데 중점을 두었다. 미국의 EBR II가 代表的인 事例이다.

제2기의 운전方式에서는 증배시간보다는 핵연료의 연소도 增進, 핵연료비절감 및 대형 爐心 등에 重點을 두었다. 프랑스의 Phenix나 Superphenix, 영국의 PFR, 소련의 BN350과 BN600, 서독의 SNR300 그리고 일본의 Monju가 이에 속한다.

제3의 운전方式에 대해서는 아직까지 잘 알려져 있지 않은데 다량의 플루토늄을 使用하여 고속중식로를 실질적인 플루토늄저장고로서 활용한다. 이 운전方式에서는 爐心을 둘러싼 소위 "Blanket"를 없애버리기도 한다.

本稿의 관점에서는 이러한 운전方式을 매우 중요하게 생각하고 있는데, 이는 각종의 운전方式으로의 변화가 비교적 손쉽기 때문이다. 특히 LMFBR이 아닌 原子爐에 핵연료를 공급

할 수 있는 제4의 운전方式으로 갈 수도 있다. 예를 들면, 高温原子爐用 U-233을 生産하기 위하여 토륨을 LMFBR에 장전하는 것이다.

간단히 要約하면, 各種의 운전형태를 가진 LMFBR은 商業核週期上的 플루토늄량을 증가시킬 수도, 유지할 수도 또는 줄일 수도 있다. 즉, LMFBR은 유연성과 適應性이 높아서 다가오는 새시대에는 꼭 필요하게 될 것이다.

2. 21世紀의 에너지體制

오늘의 投資는 尙後 10年을 결정짓는다는 사실을 감안한다면 現世紀는 이미 지나갔고 21世紀가 시작되었다고 할 수 있겠다. 國際應用시스템分析研究所 (IIASA)는 지난 1981년에 '에너지問題에 대해 종합적이고 거시적인 分析을 한 바 있다. 중요한 결론이 여럿 있지만 그중 두가지는 다음과 같다.

1. 에너지問題중에도 더 심각한 問題가 있는데, 이는 액체연료의 적정공급문제로서 특히 開發途上國에서 더욱 심각하다.

2. 탄소原子를 이용하는 에너지體制로 부터 원자력 및 태양열에너지體制로의 변환이 추진되고 있으며 또 다른 변천이 이와 함께 일어나고 있다. 이 제2의 변환은 비교적 깨끗하고 저렴하며 쉽게 구할 수 있는 화석연료體制로 부터 품질이 열악하고 비싸며 쉽게 구할 수 없는 화석연료體制로의 변화를 말한다.

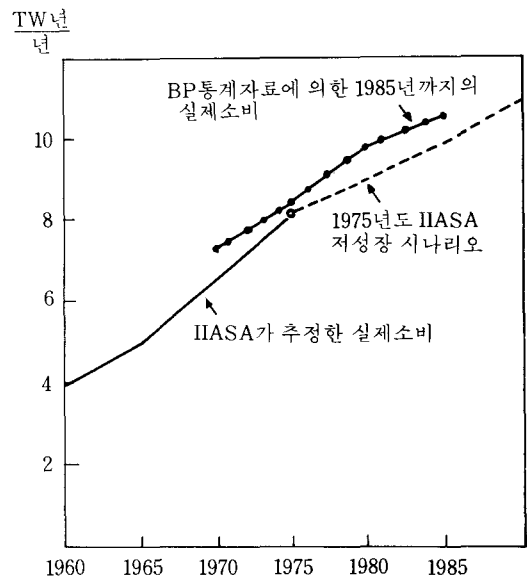
원자력을 最大限度로 追求하더라도 앞의 두 문제는 계속 存在한다. 우리에게 중요한 事實은 이 문제들의 심각성을 깨닫고 그 발생시기를 가늠하는 것이다. 에너지의 適正供給 뿐만 아니라 이러한 화석연료로 부터의 폐기물처분이 매우 큰 과제가 될 것이기 때문이다.

IIASA의 에너지연구에서는 고성장시나리오와 저성장시나리오에 대해 중점적으로 검토하였다. 이 검토가 진행중이던 1970년대의 세계 에너지消費量은 매년 약 8TW·년이였다. 1TW·년은 대략 석탄 10억톤에 상당한다. 고성장시

나리오에서는 2030년에 연간 35TW·년의 에너지를 소비하고, 저성장시나리오에서는 같은 해에 22TW·년이 소비될 것으로 추정하였다.

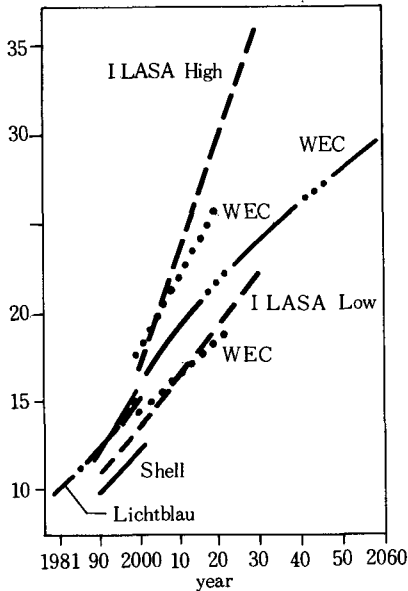
연구가 있는 지 약 10년이 지난 오늘날 실제의 에너지소비현황과 시나리오를 비교해 보는 것도 흥미로운 일이다. 비교 결과 실제소비현황은 저성장시나리오와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났는데 그림1에 이를 나타내었다. IIASA의 저성장시나리오는 전세계를 7개 지역으로 구분하였으며, 이러한 구분에도 불구하고 영국석유(BP)의 실제자료와 잘 일치하고 있다. 이외에도 지난 10년간 각종의 시나리오가 작성되었는데, 그림2에 나타내었다. 상호비교를 해 볼 때 IIASA의 저성장시나리오가 合理的임을 알 수 있다.

KFA Julich의 H.C.Runge는 石油의 공급과 수요문제를 깊이 연구하였는데, 그 결과는 그림3과 같다. 2010년 경에는 재래식 석유공급이 감소될 것으로 보이는데 그때의 연간생산량은 약 38억톤의 석탄 즉, 5.5TW·년에 상당한다. H.C.Runge에 의하면, 이 생산량은 기술적인 관점에서 最大量이며, 이는 IIASA의 저성장시나리오의 예측과 일치한다. 따라서 IIASA의 저

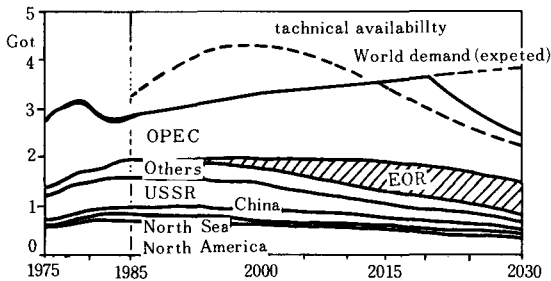


(그림1)전세계 1차에너지소비

세계1차에너지수요추정
TW years/year



<그림2>에너지시나리오 비교



<그림3>세계 석유생산량의 지역별 분포

성장시나리오를 중심으로 더 자세히 검토하고자 한다.

2030년까지의 누계소비량은 약 264TW·년 으로서 이는 재래식 石油資源이 약 80%에 상당한다. 천연가스의 경우 수급의 불균형은 조금 더 늦어서 2020년경에 올 것이다. 이 때의 연간생산량은 27억m³, 즉 3.5TW·년에 상당한다. 2030년까지의 누계소비량은 재래식 가스資源의 약 50%가 될 것이다.

재래식 石油와 가스資源은 531TW·년에 이르는데 이러한 숫자는 확실하게 추정된 것이라기 보다는 어느 정도는 그 定義에 따라 변할 수

있다. 예를 들면, C.D. Masters는 58TW·년이라고 보고하였으며, 또 다른 자료들도 비슷한 수치를 제시한다. 따라서 개략적으로 보면 非재래식 資源으로의 변화는 2010년에서 2040년 사이에 점진적으로 이루어질 것이다.

여기서 “변화”가 내포하는 뜻을 이해하는 것이 필요하다. 즉, 석유는 계속 先導的인 에너지 형태가 되기 때문에 액체연료의 적정한 공급문제는 에너지문제중의 문제가 된다. 石油價格은 에너지市場을 선도하며, 석유시장은 세계시장에 큰 영향을 줄 것이다. 非재래식 資源으로의 변화로 캐나다의 Athabaska, 베네주엘라의 Orinoco, 시베리아의 Olenok 등의 새로운 地域에 대한 관심을 증대시키며, 新技術의 개발로 石油價格과 政治秩序를 유도하게 될 것이다. 따라서 原子力 등을 포함한 다른 에너지源 개발에도 큰 영향을 미칠 것이 명확하다.

그리고 石炭이 있는데, 그 상황은 다른 에너지資源에 비해 매우 다르다. 재래식 및 비재래식 석탄자원은 엄청나게 많다. 그러나 석탄利用은 石油市場의 變化에 따라 변하였다. IASA의 “저성장”시나리오는 2030년까지 총 224TW·년의 석탄이 消費될 것이라고 예측하였다.

전부 합쳐서 IASA 저성장시나리오는 2030년까지 총 633TW·년의 화석연료가 소비된다고 예측하였다. 즉 石油 264TW·년, 가스 145TW·년, 석탄 224TW·년이다. 그러나 IASA “저성장”시나리오에서는 原子力이 상당한 몫을 차지한다고 가정하였다. 2000년에 62-0GWe, 2030년에는 910GWe의 原子力發電設備가稼動될 것으로 가정하였다. 만약 原子力設備가 360GWe에서 포화상태에 이룬다면 화석연료소비량은 대략 660TW·년이 될 것이다.

화석연료를 이렇게 사용하게 되면 世界의 에너지市場은 供給側面에서 큰 변화를 맞게 되며, 동시에 대규모의 화석연료폐기물문제가 야기된다. 화석연료週期도 핵연료주기와 마찬가지로 폐기물문제가 있음을 알아야 한다!

실제로 우리가 이미 당면한 문제는 화석연료

사용의 副産物인 SO₂와 NO_x가 유출된다는 것이다. 日本과 같은 선진국의 경우 통상적인 放出量은 수백만톤에 이른다. 이는 적절한 집진 시설 등을 設置하면 해결될 수 있는 문제이다.

그러나 SO₂와 NO_x 보다 더 심각한 CO₂ 방출량은 엄청나서 地球 전체에 큰 영향을 미칠 지경에 이르렀다. 기상관계자들에 의하면, CO₂의 양이 2배가 되면 全世界의 온도가 평균 1.5~4.0°K 정도 상승한다. 더욱 놀랄만한 일은 북극과 남극에서의 온도상승은 빙산의 용융과 기후변화로 最高 10°K에 이른다는 것이다. 이러한 추정이 점점 더 현실로 나타나고 있음을 알아야 한다. 또한 나타나는 효과들의 非線型性 때문에 이 예측 또한 부정확한 것도 사실이다. 소위 自然內의 CO₂ 농도는 지난 世紀末에 측정한 바 있었는데 290ppmv이었다. 이는 600TW·년分の 炭素를 연소시켰을 때 방출되는 CO₂量에 해당한다. 좀 더 정확히 분석하기 위해서는 여러 가지 補正을 하여야 한다. 즉, 탄화수소는 탄소보다 에너지收率이 더 높고, 방출된 CO₂의 절반은 수년내에 海洋에 흡수되며, CO₂ 외에도 CH₄, FCHC 등의 가스도 방출되어 대기에 유입된다.

좀더 근본적으로 관찰해 볼 때 2030년까지 소비할 화석에너지가 600~800TW·년이고, 탄소를 600TW·년 만큼 연소시키면 자연중의 CO₂ 농도가 두 배로 증가된다는 사실을 발견할 수 있다. 물론 이 관측은 비교적 단순하므로 좀

더 자세히 검토하면 어느 정도 변할 수 있기 때문에 이를 과대해석할 필요는 없다. 그러나 몇 가지 일반적인 結論을 얻을 수는 있다.

1) 21세기 前半, 즉 2020에서 2050년 사이에 재래식 화석연료로 부터 非비래식 화석연료자원으로의 변화가 두드러질 것이며, 대기중의 CO₂농도는 2배 정도 높아질 것이다.

2) 과거와는 달리 화석연료자원의 적정한 공급 뿐만 아니라 화석연료폐기물문제가 21세기의 에너지體制를 결정짓게 될 것이다.

3) 따라서 非재래식 화석연료자원으로의 변화가 과연 適當한가가 의문시 될 것이다. 탄소로 부터의 완전한 탈피는 있을 수 없겠지만, 탄소이용을 줄일 수 있는 1次 및 2次에너지燃料을 선호하게 될 것이다.

4) 따라서 21세기의 에너지體制는 커다란 變革을 겪게 될 것이다. 이러한 變革의 特質을 이해하고 유연성과 적응력을 갖추는 것이 必要하다.

5) 결론적으로 우리는 時間을 벌어야 한다.

原則적으로 炭素를 사용하지 않는 에너지體制를 구상하는 것이 그렇게 어렵지는 않다. 2次 에너지쪽에서 볼 때에는 電力을 생산할 수 있고, 電氣를 補充할 수 있도록 貯藏이 가능하고, 수송이 용이한 特性이 있으면 되는데 水素가 가장 有望한 물질이다. 電氣와 水素는 환경에 미치는 영향이 가장 적다.

1次에너지면에서는 태양력과 원자력이 그 후

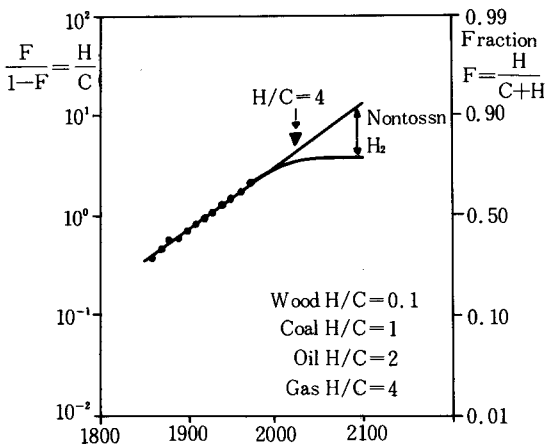
(表 5) 1970~1980年度 실제현황과 IAEA 저성장 시나리오의 비교

지 역	1970		1975		1980		1985	
	IIASA	BP	IIASA	BP	IIASA	BP	IIASA	BP
I 북미	2363	2586	2654	2706	2742	2933	2830	2875
II 소련, 동유럽	1462	1611	1835	2048	2067	2453	2300	2777
III 서유럽, 일본, 호주, 뉴질랜드, 남아프리카, 이스라엘	1825	1995	2256	2179	2473	2387	2690	2402
IV 남미	247	269	338	360	449	482	560	540
V 아프리카, 동남아시아	266	360	328	442	449	639	570	819
VI 중동, 북아프리카	59	98	126	134	198	166	270	204
VII 중공, 아시아지역의 계획경제권	285	411	461	620	545	735	630	900
세 계	6570	7332	8210	8453	9030	9799	9850	10521

보가 된다. 소위 대체에너지라 할 수 있는 風力, 潮力 等도 가능한 한 많이 사용되어야 하지만 이들의 出力은 극히 제한되어 있어 5~10% 이상의 몫을 기대하기는 곤란하다. 앞에서 언급한 태양력은 태양열을 이용하여 생산하는데 이를 위해 십만내지 백만km²의 광활한 사막지대를 뒤덮는 태양전지판들을 설치하여야 한다. 물론 기술적으로는 가능하겠지만 時間과 돈의 문제로 귀결된다. Marchetti는 이러한 변화의 장기적인 動特性을 연구하였는데 그림4에 세계 에너지體制에서의 H/C비율의 변화를 나타내었다. 이 비율의 역사적 변화가 어떤 방향성을 갖고 있음이 놀랍다. 만약 이러한 방향성이 계속 유지되어 H/C비율이 4 보다 커져서 수소가 지배하는 시대가 오려면 앞으로 100~150년이 더 걸려야 한다. 이는 앞에서 언급한 바 있는 CO₂문제 보다 시간적으로 더 멀리 있다. 그리고 이는 非재래식 화석자원의 사용이 예상되는 시점 보다는 가까이에 있다. 따라서 表6에 정리된 시간표를 참고할 필요가 있는데, 이 표로부터 21세기의 에너지體制變化의 동특성을 한 눈에 볼 수 있다.

3. 原子力의 重要한 役割

長期的인 에너지狀況이 이렇게 명백한 설득



〈그림4〉세계 화석연료의 수소/탄소비율 (H/C)

력이 있다면, 21세기前半의 對策은 어떻게 되어야 하는가?

화석연료주기의 폐기물문제에 신경을 써야 하며, 최대한의 H/C비를 얻도록 해야하며, 同時에 電力에 比重을 가능한 대로 높여야 한다. 화석연료주기의 폐기물관리대책은 무엇보다도 放出量을 줄이는 것이다. KFA Julich에서는 水平的綜合에너지體制 (Novel Horizontally Integrated Energy Systems ; NHIES) 計劃을 심층 연구하였다. 대형선형계획프로그램인 유명한 MARKAL코드와 MARNES코드를 이용하였다.

NHIES 계획에서는 다음의 세가지 아이디어를 근간으로 하고 있다.

1) 첫번째 아이디어는 모든 1차에너지를 먼저 분해하여 깨끗한 資源으로 만드는 것이다. 석탄 뿐만 아니라 유황 및 중금속이 많이 함유된 重資源油와 타르(Tar)도 분해한다.

여러가지 분해방법이 있을 수 있는데 TEXACO 법, SHELL-KOPPER포획법, 그리고 熔融鐵漕法 등이 포함된다. 용융철조법에서는 유황과 중금속이 철조表面에 슬래그로서 축적된다. 이러한 석탄가스화공정의 산물은 H/C 비가 1에 가까운 合成가스이다. 그런데 모든 1차에너지源을 분해하는 아이디어는 여기에 그치지 않고 天然가스를 분해할 수도 있는데 Julich Eva공정에서는 高温原子爐의 工程熱을 이용하여 이 방안의 타당성을 立證한 바 있다. 이때 合成가스의 H/C 비는 6이다.

〈表6〉時間展望

NO _x , SO ₂ 방출에 따른 지역별 영향	현재있음
CO ₂ 문제 심각화(CO ₂ 농도 배증)	50년
재래식 화석자원(석유+가스)의 공급	50년
환경상 양호한 에너지체제개발	100-140년
비재래식화석자원(석유, 가스, 석탄)의 공급	250년
대기중에 방출된 CO ₂ 소멸	50-1000년
방사성폐기물의 방사능감쇠(자연방사선 수준으로)	1000년
원자력에너지 공급	15000년
태양열공급	수십억년

1차燃料 뿐만 아니라 공기도 분해시킨다. 질소는 再活用하거나 다시 공기로 되돌려 보낸다. 산소는 용융철조법에 사용하고 또한 공기 대신 연소재로서 화석연료週期에 活用한다. 그리고 필요하다면 물도 전기分解法으로 분해하여 합성가스의 H/C比를 조정할 수도 있다.

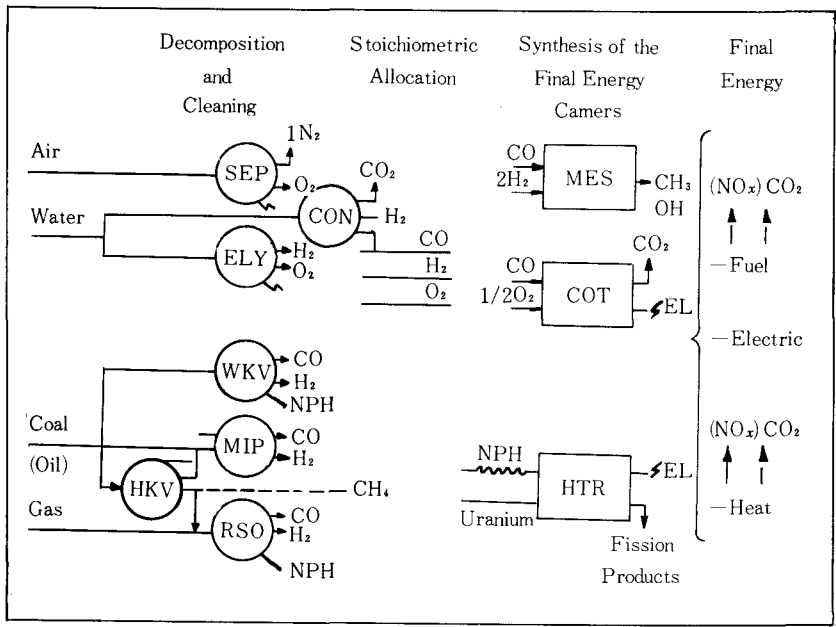
2) 모든 화석연료를 가스화하고 분해하여 생긴 합성가스는 CO와 H₂의 혼합물이며, 공기로부터 얻은 O₂가 제3의 要素로서 추가된다. 따라서 두번째 아이디어는 이 세가지 깨끗한 要素들을 수집하여 H/C의 比, 즉 H₂/CO의 比를 조절한다. 즉, 이는 일종의 가스系統網으로서 전력계통망이 발전소로부터 전력을 받는 것과 비슷하므로 이를 水平的綜合이라고 한다.

3) 제3의 아이디어는 이 合成가스와 산소를 각각의 에너지변환공장에 配定하는 것이다. 전력생산을 위해서는 1/2O₂와 CO를 적절히 설계된 가스터빈에 보낸다. 이 연소공정은 질소를 처음부터 배제시키고 있으므로 NO_x의 放出 자체를 피할 수 있다. 물론 너무 높은 반응온도를 피하기 위해서 불활성가스가 필요한데, 이는 연소결과 생긴 CO₂를 재순환시키면 된다.

액체형 에너지 수송기관을 위해서는 2H₂와 CO를 결합시켜 메타놀을 만든다. 메타놀은 메탄과 같이 H/C比가 4이므로 수소를 最大한 活用할 수 있지만, 메탄과 다른 점은 메타놀이 액체라는 점이다.

이러한 세가지 기본 아이디어는 최종수요를 만족시키며 기체 폐기물의 방출은 적어도 원칙적으로는 필요하지 않게 된다. 단지 메타놀 연소에 따라 NO_x와 CO₂가 방출될 수 있다. 그러나 이 방출량은 점점 줄일 수 있다. 그림5에 이러한 아이디어를 개념적으로 나타내었다.

水平綜合의 과정을 통해서 燃料間의 대체가능성을 매우 높이므로 유연성과 적응성을 키울 수 있다. NHIES방식은 또한 탄소의 연소를 수송수단용 2차燃料에만 국한시키게 된다. 즉, 電力은 어디에나 다 쓰일 수 있음을 의미하며, 이에 따라 原子力을 필수불가결하게 만든다. 만약 原子力發電으로 電氣가 충당되면 탄소사용량과 CO₂방출량이 격감될 것이다. 게다가 原子力은 고온의 工程熱을 제공할 수도 있을 것이다. 메탄에 증기를 흡열반응시켜 메탄을 분해하는 것도 그러한 응용의 하나가 될 수 있다.



(그림5) 水平的綜合에너지体系 (NHIES)

석탄의 가스화도 또 다른 응용예가 되며 수소의 생산이 아마도 가장 중요한 예가 될 것이다. 이를 위해서는 高温原子爐가 필요한데 이 原子爐는 그 연료를 고속중식자로 부터 얻을 수 있다. 따라서 CO₂의 放出을 더욱 줄일 수 있게 된다. 最近 Juilich에서의 電算處理결과 CO₂ 방출량을 오늘날의 1/3 이하 수준으로 낮출 수 있음이 밝혀졌다. 즉, 우리가 시간을 벌 수 있음을 의미하는데 이것은 21세기의 에너지體制가 추구해야할 주요 목표임을 앞에서 언급한 바 있다. 따라서 21세기에 원자력이 담당해야 할 役割은 다음과 같다.

1) 電力供給에 있어서 가급적이면 原子力을 많이 사용하여, 화석연료자원을 메타놀합성에 이용할 수 있게 한다.

2) 핵연료와 화석연료 모두 폐기물處分の 문제가 따르는데 원자력을 대규모로 사용함으로써 화석연료폐기물문제를 해소할 수는 있지만 핵폐기물처분문제가 대두된다. 핵폐기물은 고도의 정밀도가 필요하지만 처분이 가능하다. 그러나 CO₂폐기물은 처분할 방법이 없다.

3) 종합에너지體制의 一員으로서 원자력은 이 體制의 유연성과 적응성을 증가시킨다. 이 유연성과 적응성은 에너지소비가 급격히 증가하거나 어떤 충격을 받는 경우와 대비해 볼때 경제적인 最適化문제 이상의 더 큰 중요성을 가진다. 원자력의 역할은 電力 이외의 부문으로도 확장될 수 있는 것이다.

4) 종합에너지體制내의 原子力은 탄소연소를 최소로 하는 궁극적인 에너지시스템으로의 전환을 용이하게 할 것이다.

NHIES방식의 실제성과 세부내용의 완성은 매우 광범하고 긴 시간을 필요로 한다. NHIES에 대한 자세한 내용은 조만간에 冊으로 출판될 예정인데 연구결과의 일부는 이미 보고된 바 있다. Juilich의 전산처리결과중 몇가지는 다음과 같다.

NHIES방식은 기존의 에너지體制가 수직적

綜합을 이루고 있음을 지적하였다. 石油의 경우 上部工程이 있고, 下部工程이 있으며, 이를 수직적으로 종합하는 관리體制가 존재한다. 천연가스의 경우도 비슷한데 석유와 경쟁관계에 있다. 석탄의 경우도 마찬가지이다.

線型計劃方式을 이용하는 평가는 그 本質上 巨視경제적일 수 밖에 없어 경영側面을 무시하게 된다. 이렇게 명백한 구분이 가능하다고 前提한다면 NHIES개념은 최종에너지消費에 있어서 한 몫을 차지할 수 있다. 이 몫은 石油價格, 石炭, 市場占有率 및 CO₂ 제한치의 함수가 될 것이다. 이에 대해 좀더 자세히 계산한 결과, 特定地域에서는 NHIES개념중의 일부를 선택할 수 있음을 발견하였다.

따라서 NHIES방식을 좀더 보편화시킨다면 綜合에너지體制(IES)를 세울 수도 있는데 이에 대해서는 수개국가와 IASA가 검토분석하고 있다. 예를 들면, 스웨덴의 경우 Nyneshamn에 에너지團地를 建設하고자 계획중에 있다. 이 프로젝트에서는 석탄을 대규모로 가스화시켜서 암모니아와 메타놀을 생산하며 스톡홀름에 전력과 지역난방열을 공급할 계획이다.

미국의 Cool Water프로젝트도 이와 비슷하게 소위 열병합발전이라고도 한다. 가스터빈과 증기터빈을 이용한 복합사이클발전소로 부터 전기, 암모니아 및 지역난방열을 생산한다. 미국 Oklahoma에서는 천연가스를 대량사용하여 가스터빈을 돌리고 배기가스인 CO₂와 H₂O를 석유생산에 이용하고자 연구중이다.

그리고 소련 과학원의 시베리아지부 Irkutsk 에너지연구소는 東시베리아의 Krasnoyarsk 부근의 Kansk-Achinsk지구의 開發과 관련하여 IES를 연구중이다. 이 지역에는 저품질의 갈탄이 대량으로 매장되어 있어 환경문제만 해결된다면 매년 10억톤의 갈탄생산이 가능하다. 일본 Tokai Mura의 연구진, 대만, 미국 보스톤의 MIT, 그리고 오스트리아의 IASA가 유사한 연구를 추진중에 있다.