

지 구온난화 문제가 중요한 정치적과제가 됨에 따라서 에너지 분야에서도 30년후는 말할것도 없고, 50년, 100년후 혹은 100년이상 지난후의 에너지소비량

초장기 에너지 수요예측에 관하여

.....
 본고는 장기에너지 수급특집과 관련하여 WEC일본국내위원회 발간자료에서 역재한 것입니다.

이라든지 탄산가스 배출량 등을 논의하게 되었다. 확실히 이문제는 장기간에 걸친 문제이기 때문에 오랜기간을 염두에 둔 고찰이 필요하다고 생각되지만 이와같이 먼 장래의 에너지소비량을 어떻게 예측하는것이 타당한가 하는 의문이 제기된다.

1992년 6월 유엔 환경개발회의를 계기로 에너지와 탄산가스에 관한 많은 보고 자료가 나왔다.

1989년에 발족된 IPCC (기후변동에 관한 정부간 협의체)가 1990년 8월에 제출한 중간보고에 의하면 어떠한 대책이 마련되지 않으면 2025년경에 이산화탄소의 농도가 산업혁명 이전의 2배에 달하고, 지구의 온도는 현재보다 약 1°C상승한다고 한다. 또한 21세기중의 지구 평균기온 상승률은 10년마다 약 0.3°C로서 다음 세기말까지는 3°C가 상승될수 있으며, 해양의 열팽창과 대륙빙의 용해에 의하여 지구의 평균해면이 10년간 약 6cm 상승하리라고 한다.

IPCC의 초기에 화제가 되었던 Edmonds, Reilly의 예측은 현재의

추세가 계속될때 세계의 에너지소비량이 2050년에 석유환산 390억톤에 달하고 CO₂ 배출량은 탄소환산 260억톤에 달할것으로 추정하고 있다. 이 예측에서는 에너지수요의 가격탄력성이라는 개념이 사용되어 2050년까지의 원유가격이 외적여건으로 전제되어 있다. 60년후의 예측에서 이와같은 경제적 개념이 의미가 있는 것인가. 60년전과 현재의 모습을 비교하여 보면 명확히 알수있는 바와 같이 생산과 생활양식에 커다란 질적인 차이가 있으며, 이러한 차이는 계량경제학적 모델로서는 예측할수 없다.

1~15년 정도의 기간인 경우에는 계량경제 모델로도 예측할수 있을지 모르나 이보다 먼 장래에 대한 예측에 개량경제 모델을 이용하는것은 도리어 장래의 폭넓은 가능성을 잘못 판단하게 할 우려가 있다. 경제예측을 하는 사람에게는 조잡하게 보일지 모르지만 이와같은 초장기 예측에서는 半對數방안지를 이용한 과거추세의 외삽(外插)과 커다란 흐름의 기술진보 동향을 근거로한 정성적고찰 등이 보다 바람직하다고 생각된다. 2030년, 2050년의 예측에 계량경제적 수법을 이용 하는것은 오히려 조잡하고 지적으로 태만하다고 할수 있다. 이와같은 관점에서 초장기 에너지예측 시나리오 작성법을 분석하고 금후의 초장기예측에 중요하다고 생각되는 몇가지 관점을 제시한다.

초장기 에너지 예측 방법

초 장기 에너지 예측에는 여러가지 방법이 이용되고 있으나 크게

나누면 차드기법, S.D.기법, 계량경제모델, 역사적 흐름의 고찰등 4개로 구분된다.

첫번째의 차드기법은 과거 100년내지 200년의 추세를 半對數방안지위에 표시하고 이것을 外挿한후 Logistic Curve를 적용하여 예측하는 방법으로 Putnam보고서와 전력중앙연구소 보고서가 그에이다.

제2의 S.D.방법은 중요한 요인의 관계를 일정한 비율로 표시하고 이를 조합하여 장기적인 시뮬레이션을 하는 방법으로 대표적인 것으로는 로마클럽의 「성장의 한계」와 IIASA보고서가 있다.

제3의 계량경제적 방법은 경제적 요인을 대상으로하여 이들의 관계를 과거의 수치를 적용하여 결정하고 이러한 식을 조합하여 장래를 예측하는 방법이다. 대표적인 것으로는 Edmonds, Reilly모델, WEC보고서가 있다.

네번째 역사적 흐름의 고찰은 오랜과거로 부터의 변천과 추세를 정성적으로 분석하고 이를 근거로 하여 장래를 정성적으로 추정하는 방법이다. 대표적인 것으로는

Herman Kahn의 「The next 200 Years」와 H.Rogner, E. Britton의 「에너지전략 기본골격」이 있으며, 이들방법에는 각기 장단점이 있다.

계량경제적인 방법은 가까운 과거의 경제구조를 상당히 정확하게 반영하여 가까운 장래의 예측에 적합한다.

여러요인간의 수량적인 관계가 명시적으로 나타나고 예측도 숫자로 나온다는 장점이 있다. 이 방법의 딜레마는 구조변화에 대한 예측능력이 결핍되어 예측이 용이하고 예측에 대한 수요가

크지않은 환경에서는 정확도가 높고, 구조변화가 커서 여러사람의 예측에 대한 기대가 큰 시기에는 정확도가 낮아진다는 점이다. 기본적으로 단기인 1~3년이나 긴경우에도 10~15년 정도의 기간에 대한 예측방법이다.

계량경제모델에 없는 요인을 포함하여 요인간의 비율을 간단한 비율로 표현하고 이를 조합하는 S.D. 방법은 초장기 전망을 지향하는 면이 있으나 각요인의 선택과 관계를 나타내는 요인간의 비율 설정방법 등에 의하여 결과에 큰 차이가 나는등 몇가지 문제가 있다.

커다란 구조변화가 예상되는 초장기 예측에는 과거의 초장기적인 기법, 사회변천의 큰 흐름등을 반영한 Logistic Curve를 검토하는 동시에 역사적인 추세에 대하여 고찰하는것이 효과적이다.

초장기 에너지 예측의 내용상의 분류

실 제 초장기 예측에는 이러한 방법들이 다소간에 배합되어 있다. 앞에서 예시한 몇가지 예측도 주로 각기 해당항목에 해당하는 방법을 이용하고 있지만 자세히 보면 다른 방법이 혼합되어 있다. 이와같이 하여 추정한 초장기 예측을 내용에 따라 분류하면 여러가지 분류가 가능하다. 여기서는 전통형, 환경중시형, 기술 breakthrough형등 세가지로 분류한다.

1. 전통형 예측 : 이에측은 현재 또는 가까운 장래에 예상되는 구조를 전제로 하여 기본적으로 계량경제적인 방법을 이용하여 시행한다. 방법자체는 커다란

“계량경제모델보다는 logistic curve에 의한 과거추세의 외삽(外挿)과 기술발전동향의 큰 흐름을 근거로한 정성적고찰이 바람직하다”

구조변화가 예상되지 않은 단기예측에 이용하지만 보통 10~15년후의 미래예측에도 이용하고 있다. 최근에는 30~50년후의 예측에도 계량경제방법이 무리인줄 알면서도 이보다 나은 계량적인 방법이 없다는 구실하에서 이용되고 있다.

이러한 형태의 예측은 정부가 에너지 정책을 입안하거나 에너지사업이 경영계획을 입안할 경우에 작성하는 경우가 많으며, Establishment의 예측이라고도 한다. 그 예로서는 여러나라 정부, 국제기관의 전망, 혹은 앞서 소개한 IIASA, WEC등의 보고서를 들수있다.(표1)

IIASA예측은 세계 1차에너지 수요량을 1990년의 석유환산 77억톤이 2030년에는 150~250억톤에 달할것으로 추정하고 있다. 에너지 믹스는 1990년의 화석연료 92%, 신재생가능에너지 2%, 원자력 6%가 2030년에는 각각 69%, 7%, 24%로 변화할것으로

**미래학자
허만·칸은
“22세기 에너지
시스템은 전기와 수소가
중심이 될것”
이라고 한다**

추정하고 있다.

WEC예측에 의하면 세계의 1차에너지 수요량이 2020년에는 석유환산 130~170억톤에 달하고 에너지원별 구성은 화석연료 72%, 신재생가능에너지 15%, 원자력 13%가 될것으로 보고있다.

미국 원자력위원회의 위탁으로 시행하여 1953년에 발표된 「에너지문제의 장래」(통칭 Putnam보고)도 이러한 분류에 속하는 초장기 예측의 하나이다. 이 보고는 인구, 에너지에 관한 제지표에 관하여 과거 100~200년간의 역사적 데이터를 수집 작성하고 이에관한 차트를 작성하였다. 초장기예측에 필요한 여러가지 요소가 상세하게 검토되어 있어 초장기에너지 예측의 바이블적인 존재라고 한다.

이 보고는 세계인구가 2000년에 37억, 2050년에 63억에 달하고 세계 1차에너지 수요량은 1950년의 석유환산 17억톤(화석연료 98%, 신재생가능 에너지 2%, 원자력 0%)

이 2050년에는 270억톤(각기 25%, 15%, 60%)에 달할것으로 보고있으며, 2050년에는 에너지 공급의 절반이상이 원자력으로 커버될 것으로 추정하고 있다. 이보고는 에너지의 입력과 출력을 구별하고 용도별 최종에너지 이용효율을 가중평균하여 에너지 이용효율을 과거에 대해서 추계하는 동시에 장래에 대하여는 추정하고 있다. 즉 세계에너지 이용 효율이 1860년에 10.4%, 1900년 11.7%, 1950년 23.5%의 추세로 변화하여 2000년에 35.3%, 2050년 36.0%가 될것으로 추정한다. 더욱이 이보고는 이시점에서 모든 화석연료 소비가 기후 및 해면수위에 미치는 영향에 대하여 유의하여야 한다고 지적하고 있다.

2. 환경중시형 예측 : 이형의 예측은 환경을 중시하는 입장에서 장래를 예측한다. 방법으로는 차드기법, 계량적인 방법, S.D.방법, 역사적인 흐름의 고찰 등 여러가지형의 방법을 이용하고 있다.

이 형의 예측은 일반적으로 수요측면을 중시하고 에너지절약 기술의 발전을 중시한다. 경제성장에는 비판적이며, 소박하고 자연과 조화되는 목가적이고도 충실한 생활 스타일을 목표로 한다.

에너지원으로는 재생가능 에너지를 중시하고 원자력을 부정하며, 화석연료에 관하여서도 한정적인 의미 밖에 인정하지 아니한다.

이와같은 사고방식은 예정조화적인 세계관, 핵무기가 가져다줄 인류에 미칠 재앙에 대한 우려를 바탕으로 한 인류적 휴머니즘, 또는 기술의 독자적인 움직임에 대한 불안 등으로 부터

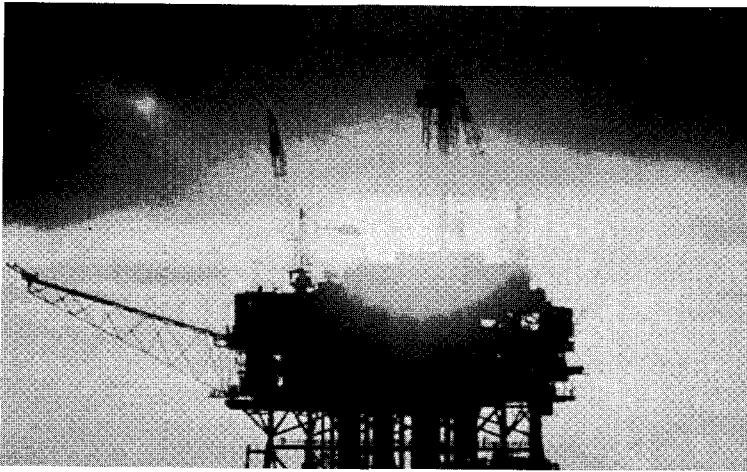
생긴것이다.

이와같은 에너지관의 대표적인 것으로서는 A.B.Lovins의 Soft Energy Path(1977)가 있다. Lovins는 에너지 이용 효율향상의 가능성을 크게보고 에너지수요와 경제성장의 decoupling을 주장한다. 그의 예측에 의하면 2050년의 세계 1차에너지 수요량은 경제성장에도 불구하고 1990년 석유환산 77억톤의 약 절반에 해당하는 36억톤 수준으로 낮아진다. 에너지원으로서 최종적으로는 재생가능 에너지가 주류가 될것이나 그때까지는 석탄과 천연가스가 이용된다.

이와같은 에너지관을 담은 보고서는 그밖에도 J.Goldemberg의 「최종수요 지향적 에너지 전략」(1985), 로마클럽의 「성장의 한계」, E.F.Schumacher의 「Small is beautiful」, Barry Commoner의 「빈곤의 힘 : 에너지와 경제위기」, 槌屋治紀 「에너지 경작형 문명」, 室田素弘 「탄산가스 에너지 모델」 등이 있다.

3. 기술 Breakthrough 중시형 예측 : 이러한 형의 예측은 주로 기술진보의 역사적고찰, 기술진보의 동향에 대한 관찰이 그 방법이며, 일반적으로 이와같은 관찰결과에 따라서 기술진보에 의한 혁신적인 에너지의 미래를 전망한다.

대표적인 것으로는 Herman Kahn의 「The next 200 Years」(1976)가 있다. 이책은 제1차 석유위기 직후에 출판된 책이지만, 석유위기의 영향은 오래 계속되지 않고 에너지 코스트는 초장기적으로는 하락한다고 설명한다. 장래의 에너지수요에 관하여는 과거에 에너지를 사치스럽게 사용하던 기능은



“원자력에너지를
중심으로 하는
제7차 에너지
혁명은 이제부터
본격화 될것이다”

앞으로도 계속되지만 실행수단의 효율이 향상된다고 하고 세계의 GNP는 1975년에서 2175년까지 200년간 60배, 즉 연 2.1%씩 증가하지만 에너지수요는 15배, 즉 연 1.4%씩 증가할 것이라고 한다.

에너지원에 관하여 원자력에 대하여는 신중한 태도를 보이고, 2050년경까지 석탄과 오일셀에서 나오는 청정연료가 주류가되어 15~20달러/배럴에 공급될 것으로 보고있다. 2050년을 전환점으로 하여 2075년경 부터는 화석연료는 주로 기초화학 원료로만 사용하게 되고 태양, 지열, 핵융합이 중심이된다.

또 21세기에는 축전지, 연료전지, 축전용속도 조절마취가 유망하게 되며, 22세기 에너지 시스템은 전기와 수소가 중심이 될것이라고 설명한다. 결론적으로 에너지시스템은 10년 이내로 보면 비교적 경직하게, 20년 이상은 탄력적으로, 반세기 폭으로 볼때는 잠재적인 대변혁이 예상된다고 한다.

H. Rogner와 E.Britton은 21세기중에 전기, 수소시대가 도래

할것으로 예상한다. 이들은 거의 또는 전혀 의미가 없는 표면적인 적은 물결이 아니라 장기적으로 깊은 저층의 계속되는 에너지 시스템의 폭넓은 조류를 연구하여 이를 근거로 먼 장래에 대한 예측을 한다. 먼저 경제성, 코스트, 가격은 단기적으로는 중요하지만, 장기적으로는 그릇된 결과를 초래하는 경우가 많아서, 역사적으로는 코스트 가격 분석으로는 실현되지 않는다고 하는것이 실현되고 세계가 혁명적으로 변화한 많은 사례가 있다고 하면서 초장기 예측에 경제분석을 도입하는 것에 주의를 환기하고 있다.

이와같은 장기간에 걸친 과거의 관찰에 의하여 결과적으로 에너지체어의 변천을 나타내는 평탄한 커브가 일단 확립되면 어떠한 에너지자원이라 할지라도 시장에 침투할 계기가 극히 크다는 것을 보여주는데, 여기서는 대공황, 1, 2차 세계대전 등도 적은 변화에 불과하고 전쟁이나 규제변화 등이 평탄한 커브로부터 이탈을 초래하는 경우도 있지만 이것도

겨우 10년에서 20년간일 뿐이라고 결론짓고 있다. 이러한 관찰결과를 초장기 예측에 半對數방안지를 이용하는 것을 정당화한다. H. Hart는 사회현상에 대한 Logistic Curve의 의미를 다음과 같이 요약, 설명한다.

1. 인류의 문화는 성장의 물결속에서 계속하여 발전한다.
2. 이와같은 물결은 대발명 (예를들면 증기기관, 기선, 가솔린기관, 원차폭탄), 미대륙발견 같은 대발견, 미독립전쟁, 1,2차 세계대전과 같은 전쟁 및 대공황 (예를들면 1929~1939년)등의 큰사건에 의하여 시작되고 중단되거나 종식된다.
3. 시대에 뒤지게되는 문화유산 (범선, 마차, 마경농기구 등)도 또한 Logistic Curve를 그리면서 쇠퇴하는 일이 종종 있다.
4. 선사시대, 오랜 역사의 기간 또는 가까운 근년에 있어서 모두 Logistic의 구배가 가속도적으로 증대되는 경향이 있다.
5. 소규모 Logistic의 물결이 보다 규모가 큰물결에 흡수되는 경향을 볼수 있다.

6. 포병이 수학적 탄도학을, 또 기계공학이 압력, 가속도, 응력의 방식을 이용하여야 하는 것처럼 사회공학은 Logistic의 물결을 이용하지 않으면 안된다.

Rogner와 Britton은 초장기적인 에너지시스템과 기술진보에 대한 관찰결과 21세기가 전기와 수소의 시대가 될것이라고 예상하면서 그 한가지 근거로서 전기와 수소가 다음과 같은 점에서 상호 보완적인

점을 들고있다.

1. 전기를 사용하여 수소를, 수소를 사용하여 전기를 발생할수 있다.
2. 수소는 얼마든지 저장할수 있으나 전기는 할수없다. (최소한 현재의 기술로는 할수 없으나 고온 초전도와 같은 기술이 발전하면 극적으로 변화할 가능성이 있다)
3. 전기는 물건을 움직이지 않으면서 에너지를 이동할수 있다.(장거리 수송은 수소가 적합)

4. 수소는 화학제품이나 그밖의 중간재가 될수 있으나 전기는 될수 없다.

5. 전기는 정보의 가공, 전달, 저장에 이용할수 있으나 수소는 할수 없다. 이들은 변환효율의 한계, 환경 오염물질 발생등의 이유로 열엔진이 쇠퇴하여, 자동차, 비행기의 연료가 장래에는 수소가 될것으로 예상하고 있다. 또한 수소의 생산방법도 현재는 재래식 방법으로 천연가스로

〈초장기에너지 전망〉
Very Long Term Energy Forecasts

(석유환산 : 억톤)

	Putnam (1953) (1)	Herman Kahn (1976) (2)	IIASA (1981) (3)	WEC전망 (1983) (4)	Edmonds Reilly (1983) (5)	A. B. Lovins (1981) (6)	Jose Goldemberg (1985) (7)
1950	17	17	17	17	17	17	17
	화 98%						
	신 2%						
	원 -%						
1970	77	77	77	77	77	77	77
	화 92%						
	신 2%						
	원 6%						
2020 ~ 2025		320		130~170			78
				화 72%			화 72%
				신 15%	220		신 21%
				원 13%	화 70%		원 7%
					신 13%		
					원 17%		
2030			150~250			36	
			화 69%				
			신 7%				
			원 24%				
2050	270				390		
	화 25%				화 69%		
	신 15%				신 9%		
	원 60%				원 22%		
2075		640					
2125		850					

1. Palmer Putnam "Energy in the Future" New York D. Van Norstrand Co. 1953
2. Herman Kahn, William Brown, Leon Martel "The Next 200 Years" A Scenario for America and the World, William Morrow 1976
3. International Institute for Applied Systems Analysis "Energy in a Finite World ; A Golbal Systems Analysis" Cambridge, Ballinger 1981
4. World Energy Conference "Energy 2000~2020 : World Prospects and Regional Structure" London Graham & Trotman 1983
5. Joe Edmonds, John Reilly "Global Energy and CO₂ to the Year 2050" The Energy Journal Vol.4 No.3 1983
6. A.B. Lovins "Energy Strategy for Low climatic Risk" Report to the German Ecdsral Environmental Agency 1981
7. Jose Goldemberg An End Use Oriented Global Energy Strategy" Annual Review of Energy 1985

부터의 생산이 주류가 되지만, 장래에는 전기화학적, 광학적 프로세스 또는 원자력, 태양에너지에 의한 생산방법이 주류가 될 것이라고 한다.

또 이와같은 에너지시스템의 변혁을 가져오기 위하여는 외부코스트를 내부화하여 시장메카니즘의 활용을 도모하는 것이 최선의 길이라고 설명한다. 그 밖에도 주로 기술적인 진보의 방향과 가능성을 근거로 MIT의 Tabors와 Lee교수는 천연가스와 고온가스로가 배합된 미래의 에너지 시스템(1990)을 제창하고 있다.

7회의 에너지혁명과 초장기 에너지 추세의 결정요인

인류는 이제까지 7회의 에너지혁명을 경험하였다고 한다. 제1의 에너지혁명은 40~170만년전의 불의 이용개시이다. 제2의 에너지혁명은 약 1만년전부터 시작된 목축농경을 위한 태양에너지의 적극적 이용개시이고 제3차 혁명은 기원전 1000년경부터 시작된 철기이용, 제4차 혁명은 14~15세기 화약 이용의 보급, 제5차 혁명은 16~19세기의 석탄이용 증대, 증기기관의 발명, 전기의 등장이며, 제6차 혁명은 19세기 석유이용과 내연기관의 보급, 제7차 혁명은 20세기 원자력의 등장이다. 이와같은 과거 에너지시스템의 변천을 살펴보고 먼 장래의 에너지시스템을 생각하면 다음과 같은 점이 중요한 요소로서 부상하게 된다.

첫째 과학기술의 진보는 멈추지 않고 대형화, 고속화, 고도화하면서 계속된다.

둘째로 더한층의 쾌적함, 편의함을 추구하게 된다.

셋째 한편으로는 환경도 파괴되어서는 안된다고 하는 강한 욕구가 대두되어 장래의 시스템은 이와같은 요청에도 대응할수 있는 것이어야 한다.

넷째 필요는 발명의 모체라고 하며, 강한 필요가 있는곳에서는 어떠한 해결책이 실현 되었었다. 그러나 이점과 관련하여 커다란 변혁에는 획기적인 발명이나 발견이 기대되는 기술을 필요로 한다는 Clark법칙을 상기하여야 한다. 석탄액화, 가스화, 풍력발전 등은 재래식 기술에 크게 의존하고 있어 혁신적인 역할은 기대할수 없다.

다섯째 에너지기술은 군사력증강과 밀접한 관계를 가지고 발전되어 왔다는 점이다. 불의 이용, 동계무기, 철제무기, 제철기술의 향상, 군용기로서의 비행기의 성능향상, 군함연료로서의 석유의 등장, 원폭의 등장등을 보면 항상 군사력을 향상시키기 위한 의도가 있었음을 알수 있다. 앞으로 레이저라든가 우주 이용기술의 진보에 의하여 우리가 이용할수 있는 에너지에도 다른 국면이 나타날 가능성이 있다고 할수 있다.

이상과 같은 점을 생각한다면, 전기-수소가 짝이되어 바람직한 초장기 에너지 시스템으로서 부상하고 있으며, 탄소세등은 전기-수소 등에 의하여 지구환경 문제의 완전한 해결을 가져다줄 신에너지 시스템으로 이행하는 과정에서 발생하는 과도적인 대책이라고 할수 있다.

새로운 에너지의 등장에 따른 생산과 생활양식의 변화

과거의 에너지 역사를 돌이켜 보면 새로운 에너지의 등장으로 질이 다른 생산방법, 생활양식을 가져오게 되었음을 알수 있다. 불의 등장으로 농경문화, 동계무기, 철제무기를 갖게되고 나무, 목탄에서 석탄으로의 변화는 산업혁명을 촉진케 하였다. 전기의 등장은 정밀 기계문명과 정보혁명을 가져오게 되었으며, 석유의 등장은 자동차, 비행기 이용의 폭발적인 확대를 가져오고 우리의 생활권을 비약적으로 확대케 하였다.

더욱이 도쿄, 교토간에 거의 15일간 소요되던것이 이제 시간선으로 약 2시간 반이 소요된다. 이것을 단순히 필요한 에너지량으로 비교하면 후자가 전자의 2배에 못미치지만 에너지 밀도의 차이 때문에 전자의 방법으로는 얼마만큼의 에너지를 투입한다 할지라도 후자의 일을 달성할수 없다. 에너지밀도의 차이가 질이 다른 생활과 문화를 가져왔다 할수 있다. 이러한 관점에서 생각할때 원자력은 오랜만의 새로운 에너지의 등장이라고 할수 있다. 원자력 에너지는 원폭 이외에는 에너지밀도에 상응하는 용도에 이용되지 않고, 발전용으로 석탄, 석유, 가스등 재래에너지 대신으로 이용되고 있을 뿐이다.

평화적인 이용부문에서도 원자력이 갖고있는 높은 에너지밀도를 활용할수 있고 이에 따라서 질이 다른 생산과 생활양식이 비롯 될수 있는 이용방법이 없는 것일까. 이와같은 관점에서 보면 원자력은 아직도 시작일 뿐이며, 제7차 에너지 혁명은 이제부터 본격화 될것으로 생각된다.(일 동력 93/7)