

# CO<sub>2</sub>문제 대책기술에 대한 포괄적 가능성 평가

CO<sub>2</sub>문제에 대한 대책기술은 현재까지 여러가지 안이 제안되어 그 기술의 실현 가능성과 CO<sub>2</sub>배출량 삭감효과라든지 필요한 비용등에 대한 평가가 각국의 산업계, 정부, 학계등 여러분야에서 진행되고 있다.

그러나 대기중의 CO<sub>2</sub>농도 증가가 현대문명의 기반을 뒷받침하는 석유등의 화석 연료 연소에 기인한다는 점을 생각한다면 현재까지의 여러 연구결과중 어느 한가지 대책기술만으로는 CO<sub>2</sub>문제를 해결하는 것이 곤란하고 복수 방안에 의한 종합적인 접근이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이러한 대책은 21세기 후반을 대상으로 하는 아주 장기적인 것이며, 더욱이 지구적인 규모의 관점에서 검토하지 않으면 안된다. 본고는 이러한 상황에서 세계 각지역 에너지시스템의 특색을 고려할 수 있는 세계에너지 최적화모델에 따라 21세기 후반에 이르기까지의 각종 CO<sub>2</sub>문제 대책기술에 대한 포괄적 가능성의 평가와 앞으로의 대책 시나리오 작성을 시도한 자료의 요지이다. 여기서 사용한 에너지모델은 종래의 계량경제 모델이나 한 국가만을 대상으로한 모델에서는 취급하기 어려웠던 각종 미래기술, 예를 들면 CO<sub>2</sub>회수처리 라든지 H<sub>2</sub>의 세계지역간 수송문제도 반영하고 있다. 따라서 종래와 다른 관점에서 CO<sub>2</sub>문제 대책을 평가할 수 있게 되었다고 할 수 있다.

## 대책기술 평가 기준

### 1. 평가대상이 되는 CO<sub>2</sub>문제 대책기술

본고에서 평가대상이 되는 기술은 화석연료

연소에 수반하여 발생하는 CO<sub>2</sub>를 억제하는 기술이다. 이것은 CO<sub>2</sub>가 온실효과 가스 중에서 가장 영향력이 크고, 더구나 그 배출량의 약 80%가 화석연료 연소에 기인하는 것으로 생각되기 때문이다. 따라서 여기서는 植林등 에너지 시스템 밖에 있는 CO<sub>2</sub>문제 대책기술은 평가 대상에 포함하지 않았다.

### 2. 세계의 지역적 구분

지역간 이질성을 고려할 수 있도록 하기 위하여 세계를 다음 10개 지역으로 분할하여 평가하였다.

- 1) 북미, 2) 서유럽, 3) 일본, 4) 오세아니아, 5) 사회주의 아시아, 6) 기타 아시아, 7) 중동, 북아프리카, 8) 사하라 이남 아프리카, 9) 라틴 아메리카, 10) 구소련, 동구

### 3. 미래 에너지 수요

대책기술 평가를 위한 미래에너지 수요 시나리오는 외생적으로 주어진 것으로 보고, 구체적으로 IPCC에서 작성한 시나리오를 채택하였다. 그러나 본고의 지역분할방법이 IPCC 시나리오와 완전히 일치하지 않기 때문에 현재의 에너지통계를 참고하여 부분적으로 수정하였다.

### 4. 원자력에 대한 예상

원자력발전소 설비용량을 본 에너지 모델에서는

〈표1〉 각종 화석연료의 1989년말 자원부존량

(Gtoe)

|      | 확인매장량 | 최대자원량 | 연간소비량 |
|------|-------|-------|-------|
| 석 탄  | 700   | 5,000 | 2.8   |
| 석 유  | 136   | 230   | 3.1   |
| 천연가스 | 103   | 250   | 1.6   |

최적화 대상으로 보지아니하고 미래 시나리오로서 사전에 주어진 것으로 하여, 세계전체가 2010년까지 500 GW까지 확장되고 그이후는 일정한 수준을 유지할 것으로 예상하였다.

### 화석연료 자원

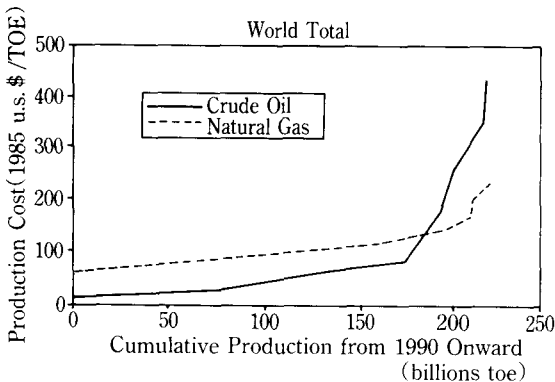
미래의 CO<sub>2</sub>배출량 동향을 알기 위해서는 화석연료의 부존량이라든지 채굴비용 등에 관한 현재의 지식을 정리할 필요가 있다. 화석연료가 현재의 1차에너지 수요의 약 90%를 공급하고 있으며, 앞으로도 계속 중심적인 에너지자원으로서 역할을 다할 것으로 생각되기 때문이다.

#### 1. 화석연료자원량

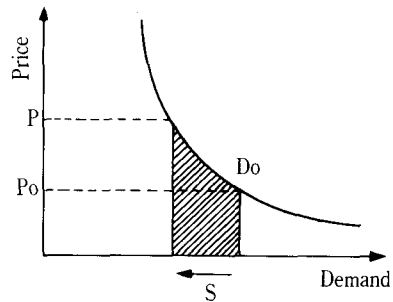
다음표에 보는 바와 같이 천연가스와 석유의 자원이 250 Gtoe정도 존재하는 것으로 생각되고 있다. 석탄자원은 방대하여 앞으로 수백년간 고갈되지 않을 것으로 생각된다.

#### 2. 채굴비용

석유와 천연가스 채굴비용은 <그림1>과 같다. 이것은 세계전체의 비용곡선이지만 최적화 모델에서는 지역별 코스트 곡선을 이용한다. 채굴비용이 개발이 진행됨에 따라서 상승하는 것은 채굴이 어려운 극지나 해저유전 개발을 예상하고 있기 때문이다. 실제 석유가격은 채굴비용에



<그림1> 석유와 천연가스 채굴비용 추정



<그림2> 에너지절약비용과 수요곡선

개발비용과 이권료를 가산한 것이 된다. 석탄의 채굴비용은 자원량이 많기 때문에 앞으로 수십년간 현재의 40불/toe 정도의 수준을 유지할 것으로 생각된다.

### CO<sub>2</sub>문제 대책기술의 모델화

#### 1. 대책기술의 분류

에너지 시스템에서 대기중으로 방출되는 CO<sub>2</sub>를 억제하는 수단은 크게 다음 네가지로 분류할 수 있다.

- 비화석연료의 개발
- 에너지절약 촉진
- CO<sub>2</sub>의 회수, 처리
- 새로운 화석연료 이용 프로세스의 개발

#### 2. 비화석 에너지의 개발

비화석에너지는 수력에너지, 바이오매스, 태양에너지 등 여러종류가 있다. 여기서는 실용적으로 이용가능한 자원량의 크기를 기준하여 여러가지 비화석 에너지 중에서 수력, 지열발전, 삼림바이오매스, 태양광발전, 풍력발전 등 5종류의 에너지를 검토하였다. 이 비화석 에너지자원량의 추정에는 아직까지 불확실한 점이 많이 있으며, 지역별로도 자원량의 차이가 있다. 태양광발전과 풍력발전은 출력이 간헐적이기 때문에 전력계통의 공급 신뢰성을 확보하기 위하여는 그 발전규모를

계통총용량중 일정치 이하로 억제할 필요가 있다. 본고의 모델에서는 이러한 상한치로서 각기 계통총용량의 15% 정도를 예상하였다. 그러나 수전기분해 플랜트라든지 전력저장장치에 공급하는 전력에는 이러한 제약이 없다.

3. 에너지절약 촉진

에너지절약의 촉진이 단기적으로는 가장 효과적인 CO<sub>2</sub>배출량 삭감대책이 될 것으로 생각된다. 여기서는 에너지 최종수요부문을 이하 12개 부문으로 분할하여 각부문별 에너지절약을 가격탄성치(장기)라는 개념을 사용하여 top-down식으로 기술하였다. 따라서 에너지절약 기술에 관하여는 전체로서의 거시적인 효과만을 평가하게 된다.

- |             |               |
|-------------|---------------|
| 1) 가솔린      | 7) 산업용 고체연료   |
| 2) 쉘트연료     | 8) 철강용 코크스    |
| 3) 기타 운수용연료 | 9) 산업용 전력     |
| 4) 산업용 경질유  | 10) 민생용 액체 연료 |
| 5) 산업용 중질유  | 11) 민생용 기체 연료 |
| 6) 산업용 기체연료 | 12) 민생용 전력    |

에너지 절약비용은 다음과 같이 定式化한다. 어느 최종 수요부문 에너지가격을 P<sub>0</sub>, 에너지수요를 D<sub>0</sub>, 에너지수요의 가격탄성치(장기)를 -α(α>0)로 한다. 이때에 에너지가격이 P가 되었을 때 에너지수요 D(P)는 다음과 같다.

$$D(P) = D_0 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{-\alpha} \quad (\alpha > 0) \dots\dots\dots (1)$$

이식에 의하여 역으로 에너지가격P를 산출하고 에너지절약량으로서 S를 도입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$P(S) = P_0 \left( \frac{D_0 - S}{D_0} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots (2)$$

에너지절약에 필요한 비용 C(S)는 위의 식을 적분하여 구할 수 있다.(그림 2의 사선부분 면적) 이 비용에는 에너지소비 감소에 따른 소비자효용

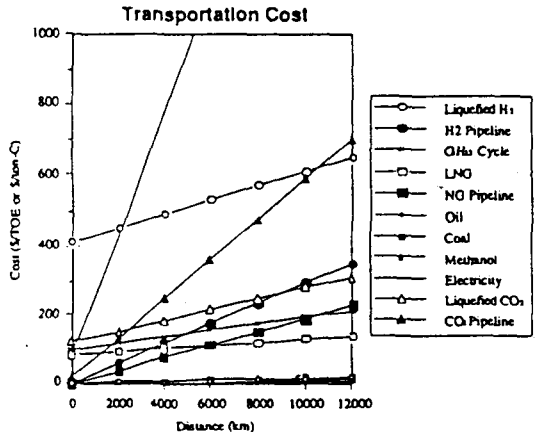
감소분과 에너지절약 투자비용 등 두가지가 포함되어 있다고 해석할 수 있다.

4. 이산화탄소의 분리회수와 처리

화력발전 배기가스와 가스화 플랜트 연료가스에서 CO<sub>2</sub>를 분리회수하여 심해나 폐가스전에 저장하면 CO<sub>2</sub>가 대기중에 방출되는 것을 억제할 수 있다. 모델에서는 아민계 용제를 이용하여 발전소 배출가스에서 분리회수하는 화학 흡수법과 selexal process에 가스화 플랜트 연료에서 분리회수하는 물리 흡수법을 고려하였다. 물리흡수법은 IGOC와 한 조를 이루는 기술도 대책 기술의 하나로 고려하였다.

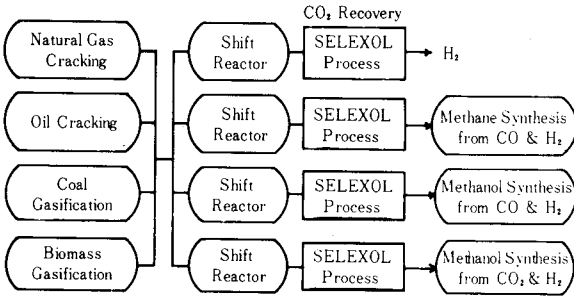
CO<sub>2</sub>의 처리방법은 지중처리와 해양처리로 대별할 수 있다. CO<sub>2</sub>지중처리의 주된 방법은 1) 석유 2차회수(EOR : Enhanced oil recovery)시에 유전에 압입하는 방법, 2) 고갈된 천연가스전에 압입하는 방법, 3) 지하 대수층에 압입하는 방법 등이 있다. EOR시의 압입은 현재에도 석유회수의 한가지 방법으로 시행되고 있으며 2),3)의 방법은 천연가스 개발로 경험이 있는 방법을 근거로 비용과 저장용량을 추정하는 작업이 시도되고 있다.

해양처리를 하는 경우에는 처리현장 주변 해저에 국지적으로 해수의 pH등을 크게 변화시킬 가능성이



액화수소의 전력단가는 5센트/kwh로 예상

<그림3> 각종 에너지의 장거리 수송비용



〈그림4〉 통합형에너지 시스템

있기 때문에 해양생태계에 대한 영향이 우려된다. 그러나 한편으로는 CO<sub>2</sub>의 처리가능량을 실질적으로 무제한으로 볼 수 있기 때문에 만일 경제성을 갖추게 되면 상당히 유력한 대책기술이 될것으로 생각 된다.

CO<sub>2</sub>해양처리방법으로서 몇가지 방법이 제안되고 있지만 여기서는 액화 CO<sub>2</sub>를 3,000m이상 깊은 장소에 저유하는 방법을 고려하는 것으로 보고, 처리 지점까지의 CO<sub>2</sub>수송은 전적으로 액화탱커를 사용하는 것으로 예상하였다.

### 5. 그밖의 대책기술

#### 에너지장거리 수송

지구적 규모의 최적에너지시스템 구축을 지향하는 경우에 종래의 석유와 천연가스에 뒤이어 수소와 전력 등의 장거리수송이 중요한 역할을 하게 될 것으로 생각되며, 또한 에너지는 아니지만 회수한 CO<sub>2</sub>의 장거리수송이 필요하게 될 가능성도 있다.

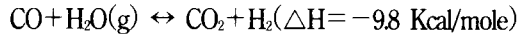
〈그림3〉은 이와같은 각종 에너지의 장거리 수송비용을 표시한다. 본고의 에너지 모델에서는 천연가스, 석유, 석탄, 메탄올, CO<sub>2</sub>, 전력 등 7개 품목 물자의 수출입을 예상하고 있다. 기체연료, CO<sub>2</sub>, 전력 등의 각 지역간 수송거리는 각 지역간 대표 도시간 거리로 표현하고, 나머지 석유, 석탄, 메탄올 등의 수송비용은 비교적 저렴하기 때문에 모델에서의 수송비용은 일정한 것으로 예상하였다.

시스템적인 대응책

석탄이나 석유 등의 연료에서 수소, 메탄, 메탄올 등 단위발열량당 탄소 방출량이 적은 연료가 생성된다면 CO<sub>2</sub>회수장치 부설이 곤란한 최종수요 부문에서도 CO<sub>2</sub>배출량 삭감을 기대할 수 있다. 수소등을 제조하는 과정에서 발생 하는 CO<sub>2</sub>가 회수된다는 전제가 따른다.

본 모델에서는 각종 연료에서 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>를 주성분으로 하는 연료가스를 생성하고, 그다음 shift반응을 통해서 H<sub>2</sub>, 메탄, 메탄올을 제조하는 다음과 같은 통합형 에너지 시스템을 예상하고 있다. 또한 회수된 CO<sub>2</sub>의 일부를 메탄올 합성원료로 이용하는 방법도 고려하고 있다.

shift 반응



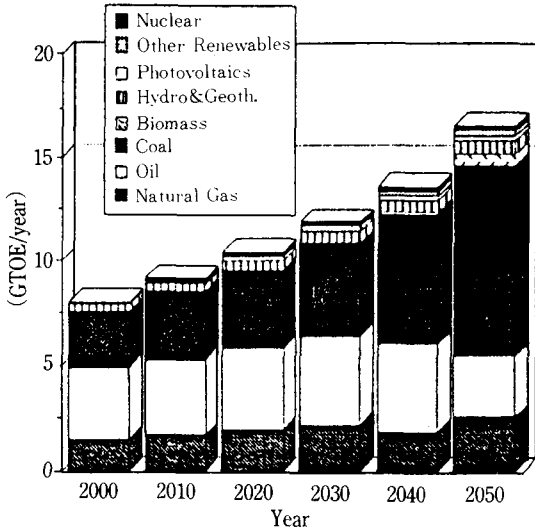
그밖에도 화석연료 이용 신프로세스로서 Steinberg가 제안한 Hydrocarb 프로세스도 간단한 모델화를 통하여 도입하였다.

### 최적화 모델에 의한 계산

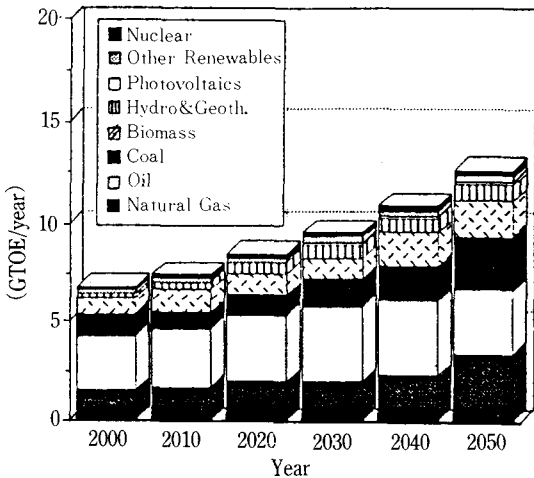
#### 1. 최적화 방법의 개요

본고의 에너지모델은 1990년부터 2050년까지 10년 간격으로 세계전체 에너지 시스템을 최적화 하고, 자원의 고갈이라든지 각종 플랜트 수명기간 등을 고려하여 모순이 없게 시나리오를 작성한다. 그러나 동학(動學)적인 최적화는 하지못한다. 본고의 목적이 구체적인 최적설비계획 입안이 아니고 오히려 이에 선행되는 각종기술의 가능성을 평가하는 것이기 때문에 이와 같이 준동학적인 방법에 의할지라도 충분히 유의한 정보를 얻을 수 있다고 생각한다.

본 에너지모델의 최적화는 이산형 최대원리에 의한 분해해법으로 한다. 모델은 10개의 지역 서브모델과 서브모델간의 에너지수급균형을 탐색하는 밸런스 모듈로 구성된다. 최적화문제에 관한 평가함수 J는, J=설비건설비+설비유지비+



〈그림5〉 1차에너지 생산량(Base Case)



〈그림6〉 1차에너지 생산량(Case3)

연료비 + 에너지절약비 + 탄소배출량 + 탄소세이다. 연료비와 에너지절약 비용은 비선형 함수로 기술한다. 총변수의 수는 1시점 당 약 3,200개, 제약조건식은 1,400본이다.

2. 예상 시나리오

탄소과세액 등을 중심으로 6개 케이스를 예상하였다.

기준케이스 : 탄소세 없음

케이스 1 : 탄소세 \$ 100/탄소톤, 해양처리 없음

케이스 2 : 탄소세 \$ 200/탄소톤, 해양처리 없음

케이스 3 : 탄소세 \$ 300/탄소톤, 해양처리 없음

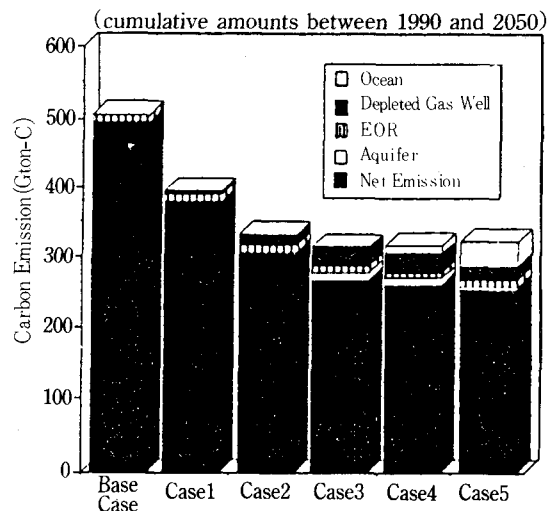
케이스 4 : 탄소세 \$ 300/탄소톤, 해양처리 있음  
해안까지의 CO<sub>2</sub>육상수송거리 최저 300 km (단 일본은 0 km 예상)

케이스 5 : 탄소세 \$ 300/탄소톤, 해양처리 있음  
해안까지의 CO<sub>2</sub>육상수송거리 무시 (단 북미,구소련, 중국은 1,000 km 예상)

3. 계산결과

구하려는 미래 세계1차에너지 생산량 추세는 〈그림 5,6〉과 같다. 탄소세 도입으로 석탄의 소비량이 대폭 감소되고 한편 천연가스와 비화석연료의 소비량이 증가된다. 또한 에너지절약이 진전됨에 따라서 에너지수요 그 자체가 감소된다.

과세케이스에서는 태양광발전이 설비상의 한계(계통용량의 15%예상)까지 도입되지만 물을 전기분해하는 데는 적용되지 않는다. H<sub>2</sub>의 지역간



〈그림7〉 CO<sub>2</sub>누적배출량과 처리량

수송은 중동에서 서유럽으로 보내는 것을 제외하고는 최적해(最適解)에 나타나지 않는다. H<sub>2</sub>의 제조자체는 각종 가스화 플랜트를 통해서 이루어지며, 제조된 H<sub>2</sub>의 대부분은 메탄올 합성에 이용된다.

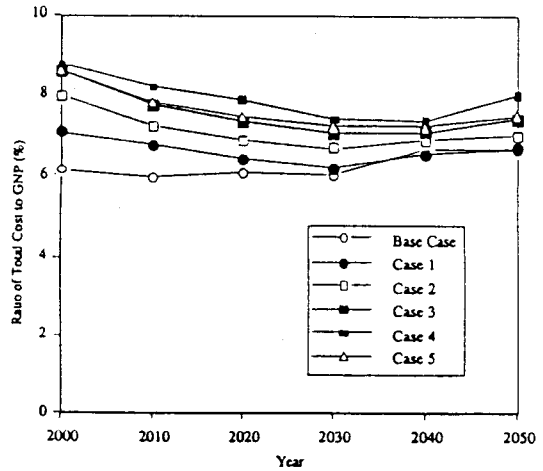
각 케이스별로 1990년부터 2050년까지의 CO<sub>2</sub>누적배출량 및 누적처리량은 <그림7>과 같다. 탄소세 \$300/탄소톤을 도입한 케이스(케이스 3,4,5)에서는 모두 CO<sub>2</sub>의 누적배출량을 기준케이스의 절반가량의 양으로 삭감하였다. 여기서 예상한 탄소세가 적절한 것인가 아닌가는 별개문제로 하고 기술적으로는 상당량의 CO<sub>2</sub>배출량 삭감이 가능하다고 생각된다.

그러나 이와같이 누적량을 반감한다고는 하지만 Airborne Fraction=50%를 가정하면 그양이 대기중 CO<sub>2</sub>농도를 거의 60 ppm증가시키는 양에 해당한다. 더욱이 2050년의 연간 배출량은 대기중 CO<sub>2</sub>농도를 안정시킬 수 있는 수준까지 충분히 억제되는 것도 아니다.

해양처리량의 규모는 해안까지의 CO<sub>2</sub>육상 수송거리 예상에 따라서 상당히 변화한다는 것을 알 수 있다. 이것은 지중처리 비용의 상승이 아직 현저하게 높지않고 해양처리와 지중처리 두방법이 코스트면에서 경합관계에 있기 때문이다.

이번 계산에서는 액화 CO<sub>2</sub>탱커에 의한 지역간 무역은 보이지 않았으며, CO<sub>2</sub>의 폐가스전 처리를 목적으로 하는 서유럽에서 중동까지의 파이프라인에 의한 수출이 한때 최적해로 나타났었다.

에너지시스템 총비용의 추세를 각 시점의 세계 GNP에 대한 비율로 표현한 것이 <그림 8>이다. 그러나 여기에 나타난 비용에는 탄소세가 포함되어 있지 않다. 이 그래프로부터 본고에서 예상한



<그림8> 에너지시스템 총비용의 GNP에 대한 비율 (세계전체)

탄소시나리오 하에서는 에너지 시스템의 총코스트 상승폭이 GNP의 2~3%수준에 달할 것이라는 것을 예상할 수 있다.

### 맺는말

세계 각지역 에너지시스템의 특색을 고려할 수 있는 준동학적인 최적화형 세계 에너지 모델을 구축하고 몇가지 탄소세 과세 시나리오 하에서 각종 CO<sub>2</sub>문제 대책기술의 포괄적 가능성 평가에 대하여 시도한 결과의 요지를 살펴 보았다. 경제적, 기술적 가능성 등 아직 불확정적인 것이 많이 있으나 GNP 몇 %의 비용으로 의미있는 CO<sub>2</sub>배출량 삭감이 가능하다는 시산결과를 얻었다. 민감도 해석을 포함해서 앞으로 계산결과를 보다 상세하게 정리할 필요가 있다고 생각된다.

(후지이 야쓰마사, 일 에너지경제, 93/4)(KJ)