

火力發電과 原子力發電의 危險度 比較



岡本 和人
〈東京學藝大學校 教授〉

1. 序 論

체르노빌원전 사고후 전세계적으로 강한 反원자력 기류가 대두되고 있으며, 일부 국가에서는 원자력 폐지론 까지 제기되고 있다. 한편 화석연료의 사용으로 인한 온실효과의 우려가 증가함에 따라 원자력을 선호하려는 새로운 경향 역시 나타나고 있다.

원자력에 대한 이와 같은 상반된 견해를 고려할때 과학적으로 화석연료와 원자력에너지의 환경영향을 비교하는 것은 상당히 큰 의의가 있을 것이다.

석탄이 화석연료 가운데 가장 풍부하고, 원자력과 경쟁할 수 있는 가장 유망한 에너지원으로 간주되고 있기 때문에 本稿에서의 비교는 주로 석탄과 원자력에 대해 하였으며, 그밖에 석유와 천연가스에 대해서도 언급하였다. 또한 석탄과 원자력 이 두 에너지원은 주로 발전부문에서 경쟁하고 있으므로 발전소의 주변환경영향에 관해 논의하였다

2. 正常運轉中 問題點

2.1 放射能 放出

원자력발전소의 정상운전 중에 발생하는 주된 환경오염으로 방사능 방출이 간주되고 있다. 그러나 화석연료, 특히 석탄의 경우 우라늄, 토륨 및 그 붕괴생성물과 같은 방사성물질은 함유하고 있으며 연소시 이러한 방사성물질이 방출되기 때문에 화력발전소 역시 정상운전 중에 방사능이 방출되고 있다.

1964년 Eisenbud와 Petrow가 석탄화력발전소에서 방출되는 방사능의 영향이 상당하다고 처음 지적한 이래 이 문제와 관련한 수많은 논문이 발표되었으며, 현재는 석탄화력발전소에서 방사선학적 영향은 같은 출력의 원자력발전소에서 의 영향에 필적한다는 생각이 일반화 되었다.

석유와 천연가스는 석탄 보다 깨끗한 연료로 취급되고 있기 때문에 석탄 이외의 화력발전소에서 방출되는 방사능에 대해서는 별로 논의되고 있지 않으나, 미국과 캐나다산 천연가스는 다량

의 라돈을 함유하고 있어서 라돈의 장수명 딸핵종인 납210(23년)과 폴로늄210(138일)이 천연가스화력발전소에서 방출될 수 있다. 따라서 방사선학적 영향은 석탄화력발전소에서의 영향에 필적하는 것으로 평가되고 있다.

2.2 化學的 公害

화력발전소에서 배출되는 화학오염물질의 영향은 방사능 영향 보다 훨씬 크나, 방사능의 경우와는 달리 쉽게 정량화할 수가 없다. 이 문제에 관해서 가장 유명한 논문은 1973년에 발표된 Lave와 Freeburg 논문으로서 상세한 값은 가정에 의존하고 있지만, 97.5%의 분진제거가 이루어지나 배기가스의 탈유황장치가 설치되지 않은 석탄화력발전소는 원자력발전소 보다 훨씬 위험하다고 하였다. 이것은 석유화력발전소의 경우에도 동일하다. 왜냐 하면, 석탄화력과 석유화력 간의 주된 차이는 분진인데 이 분진은 제거된다고 가정하였으며, 공해의 주요인자인 유황산화물(SO_x)은 석유에도 함유되어 있기 때문이다.

탈유황장치가 보편화되면서 일본에서는 거의 모든 화력발전소에 우수한 성능의 탈유황설비가 갖추어졌다. 따라서 이러한 견지에서 이 모델을 사용하여 새로 평가를 하였는데, 그 결과는 0.5%의 유황을 함유한 석탄을 사용하는 석탄화력발전소의 경우 99%의 분진과 95%의 유황이 제거되더라도 원자력발전소 보다 여전히 위험하다고 나왔다. 또한 석유화력발전소의 경우도 대개 이와 비슷할 것이다.

천연가스발전소의 경우는 석탄이나 석유발전소 보다는 깨끗하나 그래도 질소산화물(NO_x)은 여전히 배출한다. 질소산화물에 대한 평가는 매우 어려운데, 석탄이나 석유가 원자력 보다 위험하다는 평가가 나와있다. 표1은 원자력발전소가 천연가스를 포함한 모든 형태의 화력발전소 보다 훨씬 안전하다는 것을 보여준다.

〈표 1〉 석탄·석유·천연가스·원자력발전소의 대기오염 환경영향 상대비교

구 분	SO ₂	분진	NO _x	불소	Xe	Kr	계	비 고
무연탄	0.94	0.45	0.17	0.75	-	-	2.31	1.4×10 ³
갈 탄	1.20	0.86	0.28	1.65	-	-	3.99	2.3×10 ³
석 유	1.16	0.22	0.20	0.06	-	-	1.64	9.6×10 ²
천연가스	0.00031	-	0.16	-	-	-	0.16	9.6×10
BWR	-	-	-	-	0.001	0.001	0.002	1.2
PWR	-	-	-	-	0.0004	0.0014	0.0017	1.0

(자료 : Buecker, 1973년)

2.3 燃料週期 전반에 대한 危險度

연료주기 전반에 대한 위험도 평가는 매우 어려운데, 이에 관한 논문이 몇편 발표되어 있다. 그중 한가지를 표2에 나타내었다.

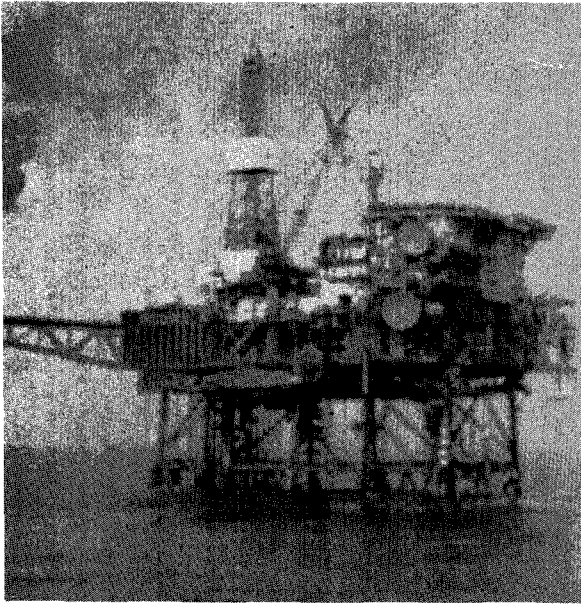
〈표 2〉 석탄·석유·원자력발전소 1GWY 운전시 사망자 추정

구 분	석 탄	석유	원자력	
			재순환제외	재순환포함
채광 등 정상운전	1.0~1.3	0.1	0.12	0.08
재 순 환	26	10	0.01	0.01
중대사고	-	-	-	0.03
총대사고	-	-	6×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵
계	~30	~10	0.13	0.12

(자료 : Okamoto, 1981년)

이 수치들은 아직 보정이 안된 값이기 때문에 정량(定量)적으로 정확한 비교는 할 수 없으나 적어도 정성(定性)적으로 원자력이 석탄이나 석유 보다 훨씬 안전하는 것은 알 수 있다. 또한 이와 같은 결론은 1976년에 발표된 Comar와 Sagan의 논문에서도 얻을 수 있다.

방사능 오염의 장기적인 영향에 관해서는 Cuddihy 등이 동일 출력의 고속중성자로(FBR)와 석탄화력발전소의 연료주기 전반에 대한 방사선학적 영향(500년)을 비교하였다. 이에 따르면 석탄발전소의 경우가 암발생과 유전적 영향을 더 많이 주는 것으로 나타나 있다.



이는 석탄화력발전소가 고속증식로 보다 악티늄원소(악티나이드)를 더 많이 방출하기 때문이다. 그러나 방사능의 독성과 방출율에 대한 가정이 너무 오래 된 것이어서, Tokyo Gakugei 대학교에서 이 가정들을 새로 개정하여 다시 계산을 하였다(아직 미발표). 그 결과는 석탄과 고속증식로의 격차가 줄어들기는 하였으나 방사선학적 영향은 아직 석탄의 경우가 고속증식로 핵연료주기 전반 보다 10~100배 더 크다. 따라서 화학적 공해를 포함하여 석탄이 고속증식로 보다 더 큰 환경영향을 준다는 것을 알 수 있다.

물론 이같은 결론에는 큰 불확정 요소가 있고, 또 사용된 분석방법도 약간 구식이긴 하나, 최소한 정상운전 중에는 원자력이 석탄 보다 안전하다고 보는데에는 큰 무리가 없을 것이다.

3. 重大事故

체르노빌사고는 일반대중에게 큰 충격을 주었으며, 과학적인 견지에서 이 문제는 검토되어야 한다.

체르노빌원전의 원자로는 소련 만이 보유하고 있는 매우 독특한 노형이다. 이 원자로는 중성자 감속재로 흑연이 사용되고, 물은 오직 냉각재 역할만 한다. 따라서 만약 냉각재 상실사고(LOCA)가 일어나더라도 중성자 감속은 억제되지 않는다. 오히려 냉각재 상실로 인해서 물에 흡수되는 열중성자가 줄어들음으로써 열중성자의 수가 늘어나기 때문에 연쇄반응은 가속되는 현상이 일어난다. 즉, 단기적으로 반응도가 양(+)이 되어 사고는 자기 스스로 가속되는 형태가 되는데 이것이 체르노빌에서 경악의 사고를 일으키게 된 원인이다.

이와 같은 상황은 일본과 한국을 위시하여 서방세계에서 널리 이용되고 있는 경수로(LWR)와는 근본적으로 차이가 있다. 경수로에서는 물이 감속재와 냉각재 두가지 역할로 이용되기 때문에 냉각재 상실사고가 일어나면 중성자 감속도 억제되어 연쇄반응이 줄어들게 된다. 즉, 반응도가 음(-)이 되어 사고가 스스로 억제되는 형태가 되는데, 이것은 미국 TMI사고가 소련 체르노빌사고 보다 진행속도가 훨씬 느렸던 사실로 입증된다. 그밖에 서방세계에서 이용되고 있는 다른 노형에서도 음의 반응도를 유지하는 이 원칙은 항상 지켜지고 있다.

따라서 체르노빌원자로와 경수로는 사고에 대응하는 근본적인 반응이 상반되기 때문에 체르노빌과 같은 형태의 사고가 서방세계에서도 일어날 수 있다는 주장은 완전히 비과학적인 사고방식이다.

3.1 소시스템에 관한 考察

체르노빌원자로와 서방세계에서 이용되는 경수로 및 기타 노형 사이에는 또다른 매우 중요한 차이가 있다. 이것은 사고시 소시스템(방출되는 방사능의 양)의 차이이다.

TMI사고시에 방출된 요오드131의 양은 단지 10~20Ci로서 1957년 Windscale 사고의 20,000

Ci 방출과 비교하면 믿을 수 없을 정도로 적은 양이다. 사실 TMI 사고는 절대값으로 비교할 때 Windscale의 약 1천분의 1이고, 열출력으로 비교하면 약 1천분의 10 정도이다. 이 같은 사실에 자극을 받아 사고시 소스텀에 대해 상세한 검토가 수행되어 그 결과가 미국원자력학회의 보고서(ANS 84)로 정리되었다.

상세한 검토의 결과는 복잡하지만, 핵연료 주위의 화학적 분위기가 환원상태가 되는 중대 사고의 경우에 소스텀은 일반적으로 매우 적다고 요약할 수 있다. 반대로 분위기가 산화상태가 되면 소스텀은 크다. 중대 사고의 기록 중에서 심각한 방사능 오염이 발생한 예는 Windscale (1957년)과 체르노빌 두 번 뿐이었으며, 이 두 경우 모두 원자로노심의 흑연에서 화재가 발생한 경우이다. 그런데 화재는 매우 강한 산화현상이다.

경수로나 CANDU로의 경우에는 원자로에 가연성 물질이 없기 때문에 화재는 물리적으로 불가능하다. 따라서 소스텀은 매우 적을 수밖에 없으며, 체르노빌에서와 같은 심각한 방사능 오염이 경수로나 CANDU로에서 일어난다는 것은 상상할 수도 없다.

3.2 重大한 非原子力事故

원자력은 중대한 사고가 일어나면 환경에 심각한 손상을 주는 특성이 있다고 알려져 있다. 그러나 이것은 옳지 않다. 석탄의 사용으로 인한 대기 오염도 몇배 심각하다. 가장 유명한 사건이 1952년 런던의 예이다. 체르노빌 사고에서의 31명의 사망자수와 비교하여 런던의 경우에는 4,000명의 사망자가 발생하였고, 만성적 영향도 크나 방사능의 경우와는 달리 쉽게 정량화할 수가 없다. 따라서 사고로 인한 재해는 원자력이 아니더라도 일어날 수가 있다. 그러나 이같은 비극적인 사고는 석탄과 원자력 모두 기술적인 방법으로 방지할 수가 있다.

4. 地球規模의 公害

최근 지구규모의 공해에 대한 우려가 급증하고 있다. 여기에는 산성비, 온실효과, 오존층 파괴가 있다. 산성비와 온실효과는 화석연료의 사용과 연관됨이 명백하고, 오존층 파괴도 화석연료의 사용과 전혀 무관하지는 않다.

4.1 酸性비와 放射線學的 영향

산성비에 의한 피해가 여러 지역으로 확산되고 있다. 피해를 받은 지역을 세계지도에다 표시할 수 있을 정도로 넓다. 원자력 역사상 가장 멀리까지 영향을 준 최악의 사고인 체르노빌 사고도 그 정도로 넓은 지역에 심각한 영향을 주지는 않았다. 물론 체르노빌 사고가 일반대중에게 준 정신적 충격은 매우 심각하지만, 실제의 피해는 산성비가 훨씬 크다.

또한 산성비도 방사선학적 영향을 준다. 토양이 산성비로 인해 산성화되면 중금속의 용해율이 증가하는 것으로 알려져 있다. 방사성물질 역시 중금속이므로 용해율이 증가한다. 따라서 식물로의 이동속도가 증가하게 되면, 이러한 식물을 직접 섭취하거나 또는 이 식물을 사료로 먹은 동물을 섭취함으로써 일반대중의 방사선선량이 증가하게 된다.

정확한 평가는 어렵지만 이러한 경로를 통한 선량 증가가 발전소에서 방출되는 방사능으로 인한 직접적인 방사선선량 보다 훨씬 클 것이다.

체르노빌 사고에 의한 방사선선량도 산성비로 인해 증가할 것이다. 토양 pH에 따른 세슘 137의 식물로의 이동속도가 Kuehn 등에 의해서 연구되었는데, 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$Y = 286X^{-5.37}$$

여기서 X와 Y는 각각 토양의 pH와 세슘 137의 이동속도이다.

따라서 이산화탄소(CO₂)가 두배가 되어 토양

의 pH를 단지 0.3 변화시키더라도 이동속도는 상당히 증가하게 된다. 예를 들어 pH가 6에서 5.7로 변화하면, 이동속도는 32% 증가한다. 유황 산화물이나 질소산화물로 인한 산성비의 경우에는 그 영향이 무척 크다. pH가 6에서 5로, 또 6에서 4로 변하면 이동속도는 각각 2.66배와 8.82배로 증가하게 되며, 이에 따라 사고시 방출된 방사능의 주요 핵종인 세슘137에 의한 집단선량도 같은 계수로 증가하게 된다. 따라서 체르노빌사고의 두려움 때문에 원자력을 화석연료로 대체시키는 것은 에너지정책상 현명하지 못하며, 또한 유황산화물과 질소산화물 방출을 엄격히 규제하지 못하면 국민들의 방사선선량을 증가시키는 결과를 가져온다.

4.2 温室効果

온실효과를 야기시키는 가스의 대기중 농도가 계속 증가 일로에 있는데, 이들 가스의 대부분은 인간생활을 영위해 나가는 중에 방출되고 있다. 그러나 에너지문제의 가장 관련이 깊은 이산화탄소에 대해서는 여러가지 인간생활, 특히 화석연료의 연소와 삼림파괴의 상대적 중요성에 관해 의문이 제기되고 있다.

현재 화석연료의 연소로 인해 대기중에 거의 60억톤의 탄소가 방출되고 있다(표3). 삼림파괴에 대한 평가는 어려우며 분석에 따라 결과가 달라지지만 일부 전문가들은 화석연료의 연소와 비교할 수 있다고 주장한다. 그러나 이에 대해 강한 반대 의견도 있다. 그 이유중 하나는 삼림파괴의 영향이 그렇게 크다면 해양이 탄소를 흡수하는데는 한계가 있으므로 다량의 탄소가 행방불명되었다는 것이다.

그러나 더 직관적인 주장은 이산화탄소의 위도상의 분포이다. 그 피크는 북위 30~40도 부근인데, 시간이 경과함에 따라 더 커지고 있다. 만약 이산화탄소 증가의 주요 원인이 화석연료의 연소라면 화석연료의 연소가 주로 이 지역에 밀집돼

〈표 3〉 연간 탄소 방출량 (1986년)

(단위: 100만톤)

국 명	방 출 량	비 율 (%)
미 국	1,299	23
소 련	1,030	18
중 국	621	11
개발도상국	1,452	26
일 본	260	5
동남아시아	146	3
세계총합계	5,575	100%

이루어지고 있기 때문에 쉽게 설명이 될 수 있다. 그러나 삼림파괴는 주로 저위도에서 일어나고 있기 때문에 삼림파괴가 이산화탄소 증가의 큰 요인이라면 피크의 신장은 지금 관측되고 있는 것과는 반대로 적도 부근에서 나타나야 한다. 따라서 화석연료의 연소가 대기중 이산화탄소 증가의 주된 요인이라고 결론내릴 수 있다.

다른 공해물질과는 달리 이산화탄소는 완전히 제거시킬 수가 없다. 따라서 이산화탄소문제를 해결할 수 있는 유일한 방법은 화석연료의 사용을 줄이는 것이다.

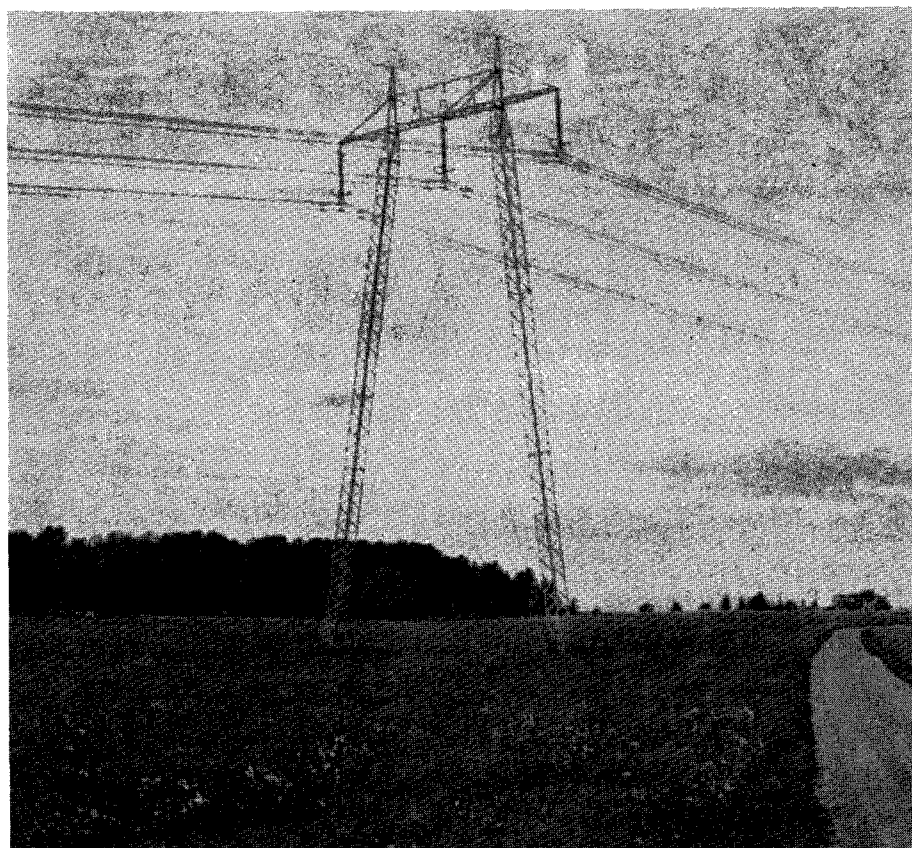
온실효과에 대한 예상은 이산화탄소가 두배가 되었을때의 온도상승(ΔT_d)으로 나타내고 있다. 그 값은 계산에 따라 다르지만, 가장 많이 이용되는 값은 다음과 같다.

$$\Delta T_d = 3.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$$

이 값의 정확도에 대해서는 아직 전세계적으로 논의되고 있지만, 타당성이 있는 것으로 받아들여지고 있다.

금세기 초부터 지구 전체의 기온이 상승하고 있으며, 현재 관측사상 가장 높게 기록되고 있다. 이것이 온실효과에 대한 단적인 증거가 될 수는 없을지 모르지만 최소한 예상과 어긋나지는 않는다.

온실효과로 인한 온난화의 환경영향은 매우 복잡하며, 인간생활의 여러 분야에 그 영향을



준다.

삼림학의 경우 온실효과에 의한 기온 상승으로 등온대가 고위도로 올라온다. Tokyo Gakugei 대학교에서 수행한 평가에 의하면, 다음 세기에 실현될 수 있는 에너지시나리오에서 이 등온대의 고위도현상은 삼림이 따라올 수 없을 만큼 빨라서 여러가지 나쁜 영향이 나타날 것으로 보여진다.

농업의 경우 일부 전문가들은 이산화탄소의 증가가 광합성작용을 자극하여 수확량을 증대시키므로 이롭다고 주장하고 있다. 그러나 기후변화의 영향으로 이 이익은 상쇄될 것이다. 이점을 조사하기 위해 대평원이라고 불리는 미국의 중앙부가 선택되었는데, 그 이유는 기후가 더워지면 이 지역이 건조해질 것으로 알려져 있기 때문이

다. 계산은 이산화탄소 증가에 따른 포지티브영향과 네가티브영향 둘 다를 고려하여 여러가지 에너지시나리오에 대해 수행되었다. 그 결과는 포지티브영향을 고려하더라도 이산화탄소가 무한정 증가하는 것은 바람직하지 않다는 것이었다. 만약 대평원에서 농작물 생산이 감소된다면, 한국과 일본 양국도 타격을 받을 것이다.

그러나 일본 북부지역에서는 온난화가 쌀생산에 유익하다. 이 문제에 대해 Tsukuba 대학교와 농업환경기술연구소가 연구를 하였는데, 그 결과는 쌀 수확량에 상당한 증가가 있다는 것이었다. 그러나 그들은 기온 만을 고려하였지 이산화탄소의 다산화효과(Fertilization)는 생각하지 않았다. Tokyo Gakugei 대학교에서는 이 효과를 고려하여 추가 연구를 하였다. 예상했던대로

쌀 수확량은 더욱 증가하였고, 수확량의 변동폭도 안정화되었다.

이같은 결론을 확대 해석하면 한국에 대해서도 적용할 수 있을 것이다. 그러나 이 같은 결론은 오직 농업의 견지에서만 생각한 것이다. 사회 전반에서 보면 쌀생산의 증가는 공급과잉이라는 심각한 사회문제를 유발하므로 항상 바람직한 것은 아니다.

태풍의 다발 가능성 역시 또다른 문제이다. 태풍은 해양으로부터 그 에너지를 흡수하기 때문에 앞으로 점점 더워지는 해양은 태풍을 자주 발생시킬 것이다. 이 논리는 1987년에 발표된 Emanuel의 계산이 뒷받침하고 있다. Tokyo Gakugei대학교에서는 저기압과 기온 사이의 상관관계를 연구하고 있는데, 그 결과는 통계학적 분석에 따른 것이지만 상관관계가 있는 것 같다. 태풍이 자주 발생하게 되면 일본의 서부지역은 심각한 타격을 받게 되며, 한국 역시 태풍의 피해를 입게 될 것이다.

5. 오존층의 破壞와 化石燃料燃燒의 關係

염화불화탄소(클로로플루카본)가 성층권의 오존층을 파괴시킨다는 사실은 잘 알려져 있지만, 에너지문제와는 무관한 것으로 여겨지고 있다. 그러나 에너지문제와 전혀 무관하지만은 않다.

오존층 파괴의 기구는 대류권에서는 안정한 염화불화탄소가 성층권으로 올라가 분해되어 성층권의 오존을 파괴시키는 염소(CI)를 방출하는 것이다. 이 기구는 낮은 온도에서는 억제된다. 온실효과는 대류권의 온도는 상승시키나 성층권은 냉각시킨다. 그 결과 온실효과에 의해서 성층권의 오존층은 보호를 받는다. 이 논리가 오랫동안 잘 알려져 있으며, 상당히 많은 논문이 발표되었다.

이 전통적인 이론을 기초로 하는 오존층 파괴는 다음 세기에는 오직 10% 이하가 될 것이다. 최근 남극지방의 오존층 구멍이 30% 이상인 것이 발견되었고, 이것은 지금까지의 전통적인 이론으로 설명될 수가 없다.

따라서 이 현상을 설명하기 위해서 새로운 가설이 도입되었다. 극지방의 성층권에서는 극지방성층권구름(PSC)이라 불리는 특별한 에어로솔이 겨울철에 영하 약 80℃ 이하의 매우 낮은 온도에서 형성되는데, 이 표면에 염화불화탄소가 흡수·분해되어 염소(CI)를 방출하게 되며, 이것이 겨울철에 축적된다. 봄에 해가 뜨게 되면 PSC의 표면에 흡수되었던 염소가 대기중으로 증발하여 오존을 파괴한다. 이 가설은 오존층에 구멍이 뚫린 현상을 합리적으로 잘 설명한다.

그런데 이 가설에 따르면 온실효과로 인한 성층권의 냉각은 오히려 PSC의 형성 기회를 증가시키게 되며, 이로 인해서 오존층 구멍이 생기게 된다. 아직 확실히 규명되지는 않았지만 이 가능성은 매우 높은 것으로 보인다. 만약 이 설명이 옳다면, 온실효과는 지금까지와는 다른 견지에서 고려되어야 한다.

지금까지 온실효과는 저위도 또는 중위도에서는 해로우나, 고위도에서는 온난화로 인해 오히려 이 지역을 거주할 수 있게 만든다고 생각되었다. 그러나 온실효과가 고위도에서 오존층 파괴를 촉진시킨다면, 온실효과는 두 지역 모두에 해가 된다. 즉, 저위도 또는 중위도에서는 너무 덥고, 고위도에서는 오존층 파괴로 자외선이 증가하게 된다.

6. 結 論

이 모든 요소들을 종합·분석하여 볼때 원자력 에너지가 화석연료 보다 훨씬 유리하며, 우리가 살고있는 이 지구의 환경보전을 위해서 원자력 에너지의 사용이 장려되어야만 한다.