

원자력 발전과 기후 변화

-세계 기후 변화의 위험과 원자력의 역할-

온실 가스 배출로 인하여 지구 온난화 문제가 심각성을 더해가고 있는 차제에 지난해(1997) 12월 일본 교토에서 제3차 기후변화협약 조약국 회의가 개최되었으며, 회의 결과 일차적으로 선진국에서 온실 가스 배출 감축 목표를 설정하여 2008년부터 시행토록 합의하였다. 우리 나라는 이 회의에서 온실 가스 배출 감축 대상국에서는 제외되었지만 OECD에 가입한 국가로서 멀지 않아 감축 목표 이행 대상국에 들게 될 것으로 예측된다.

이와 관련하여 OECD/NEA는 지난 4월 「원자력발전과 기후변화」라는 보고서를 발표하였다. 이 보고서는 비교적 최근의 연구 자료를 인용하여 원자력이 온실 가스 배출 억제에 어떤 역할을 하는가를 연구한 내용으로서 우리 나라에서도 에너지 정책 입안 등에 도움이 될 것으로 판단된다.

번역

조성수

한전 원자력환경기술원 책임급

1차 에너지의 사용은 온실 가스 방출의 주요 요인 중의 하나이며, 특히 이산화탄소는 세계 온난화와 기후 변화를 일으키는 주범이다.

이산화탄소 방출은 1차 에너지 사용으로 인한 전체 가스 방출량의 75%~90%에 이르는 것으로 추정된다.

기후 변화는 정책 입안자의 제1항목으로 세계적인 주요 문제가 되었다.

따라서 정책 입안의 주요 목표는 중장기적으로 1차 에너지 사용으로 인하여 발생하는 온실 가스 방출 삭감 대책을 강구하는 것이 될 것이다.

기후변화협약 조약국 제3차 회의(COP-3)가 97년 12월 일본 교토에서 개최되었으며 당사국은 온실 가스 방출 삭감 의정서에 합의했다.

교토 회의에서 합의한 의정서의 주요 내용은, 선진국은 2008년~2012년까지 온실 가스 방출량을 1990년의 5.2% 이하의 수준으로 국가별 방출 삭감 목표량에 따라 각각 방출량을 감축하도록 합의하였다.

또 하나의 합의 사항은 선진국이 개발 도상국의 연구 개발의 촉진, 재생 에너지 사용, 이산화탄소 제어 기술 및 혁신적인 환경 기술의 이용 증진을 지원하도록 한 것이다.

온실 가스 방출의 3/4은 인위적인 화석 연료 연소에서 비롯된다는 사실에 비추어, 저농도 함유 에너지 이용 체계로의 전환은 온실 가스 방출 삭감을 위한 최선의 방책이다.

이와 관련하여 교토 회의에서 재생 에너지에 대하여는 구체적인 논의가 있었지만, 근원적으로 이산화탄소를 발생시키지 않는 중요한 선택 중의 하나인 원자력 에너지에 대해서 구체적인 논의가 없었다.

에너지를 이용함에 있어서 온실 가스의 방출을 감소시키거나, 적어도 발생 증가 속도를 늦출 수 있는 기술적인 선택은 여러 가지가 있다.

온실 가스 방출을 극복할 수 있는 선택이라함은 에너지의 최종 사용과 정과 에너지 이용 효율 개선, 저이산화탄소 에너지원으로 전환(예를 들면 석탄을 천연 가스로 대체), 이산화탄

소를 방출하지 않거나 또는 이산화탄소를 적게 방출하는 에너지 개발, 이산화탄소의 제어(예를 들면 산림을 조성하거나 이산화탄소의 흡수 또는 저장) 등 다양한 기술이 있다.

이미 언급한 바와 같이 기술적·정책적으로 다양한 선택을 고려할 수 있다고 하더라도 중·단기간 내에 경제적으로 시행 가능한 선택은 그렇게 많지 않다.

바로 그 선택 중의 하나가 원자력이다.

즉 원자력은 현재 시장이 형성되어 있으며, 여러 국가에서는 다른 에너지와 경쟁중에 있고, 특히 온실 가스 방출 삭감 대안으로서 가격 경쟁력이 확보되어 있으며, 대용량의 에너지 공급이 가능하고(다른 분야에서 사용하지 않는 풍부한 자원이 대용량의 에너지 공급을 뒷받침하고 있다), 또한 실제로 이산화탄소를 발생하지 않는다.

이와 관련하여 원자력기구(NEA)는 세계적인 기후 변화 위기를 완화할 수 있는 원자력 발전에 대하여 연구를 해왔다.

이 연구의 주요 목적은 원자력 개발에 의하여 온실 가스 방출 감축 목표를 달성하고 원자력 분야의 중요성을 평가하는 데 필요한 정량적 자료를 제공하는 데 있다.

원자력 발전에 의한 온실 가스 방출 억제에 대하여는 이미 세계적으로 잘 알려져 있으므로, 기후변화협약

조약국 회의에서 결의한 사항을 준수하기 위하여 원자력 발전 보다는 여러 나라가 고려하고 있는 대안에 더 많은 관심을 기울이고 있다.

이 보고서는 원자력의 경제적·재정적·산업적인 측면, 그리고 원자력 개발(원자력 시나리오)이 환경에 미치는 잠재적인 효과를 분석하고 있다.

본 연구에서 검토한 원자력 시나리오 오는 「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC)이라는 보고서의 Case 'C'의 환경과 사회 생태학적으로 전개한 에너지 수요와 일치한다.

오늘날의 원자력 발전과 환경

96년말 현재 32개국에서 442기의 원자로가 운전되고 있으며, 전체의 시설 용량은 351GWe(OECD 16개국의 원자력 발전 시설 용량이 세계 전체 시설 용량의 85%를 차지한다)이다.

96년에 원자력으로 2,312TWh를 발전하여 전세계 발전량의 17%를 차지하고 있으며, 이는 상업적으로 사용한 1차 에너지의 6%와 같은 양이다.

세계 18개국의 원자력 발전량이 총전력 공급량의 25% 이상을 차지하고 있다.

따라서 원자력 발전은 산업 에너지 공급 분야에서 이산화탄소 발생을 저감시키는 데 이미 상당 부분 기여하

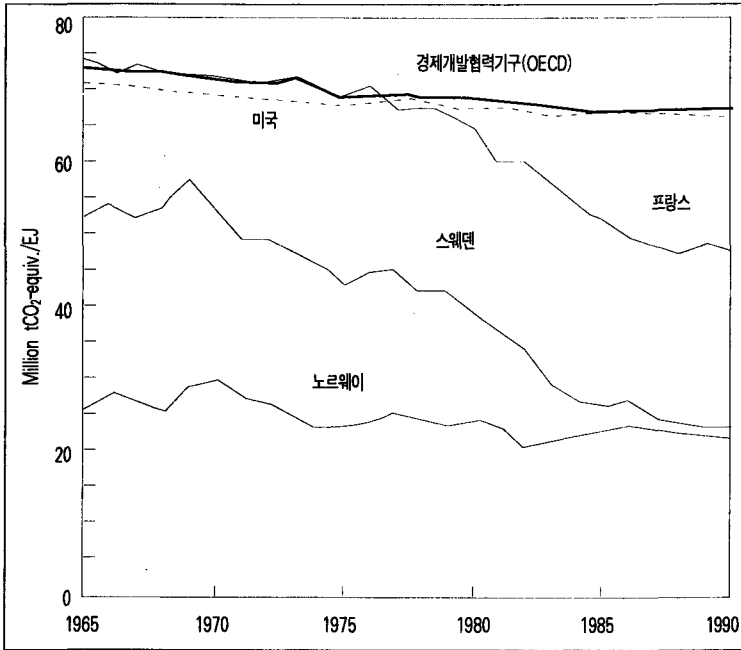
고 있다.

여러 종류의 발전 시설에서 배출하는 온실 가스량을 분석한 결과, 화석 연료를 사용한 발전 시설에서 배출하는 이산화탄소량 450~1,250g(CO₂-equiv/kWh)과 비교하여 원자력 발전은 kWh당 단지 25g의 이산화탄소를 발생시키고 있기 때문에 여러 발전 시설 중에서 이산화탄소 배출 농도가 가장 낮은 시설임을 보여주고 있다.

현대적인 화석 연료를 사용하는 발전 시설을 원자력 발전 시설로 대체할 경우, 에너지 이용 분야에서 이산화탄소 배출량을 약 8%(전력 생산 분야에서 이산화탄소 배출량을 17%로 감축)까지 감축이 가능하다.

국제에너지기구(IEA) 사무총장은 기후변화협약 조약국 2차 회의에서, OECD 국가에서 지난 25년간 원자력 발전이 이산화탄소 배출 농도를 저감시키는 데 크게 공헌했다고 언급하였다.

원자력 발전과 수력 발전 시설을 보유한 국가의 총에너지 생산시 온실 가스 배출 농도를 비교하면, 총에너지 생산에서 원자력 발전과 수력 발전이 12%를 차지하는 미국의 경우 90년도 1EJ(1 EJ(Exajoule)=23.9Mtoe(Megatone of equivalent)당 이산화탄소 배출량은 66 Mt(MtCO₂-equiv./EJ)이며, 총에너지 생산에서 원자력 발전(30%)과 수력 발전이 35%를 차지하는 프랑스의 경



(그림 1) 에너지 생산에 따른 온실 가스 배출 농도

우 1EJ당 이산화탄소 배출량이 48Mt이고, 총에너지 생산에서 원자력 발전(31%)과 수력 발전이 66%를 차지하는 스웨덴의 경우 1EJ당 이산화탄소 배출량은 24Mt이며, 총 에너지 생산에서 원자력 발전과 수력 발전이 71%를 차지하는 노르웨이의 경우 1EJ당 이산화탄소 배출량은 22Mt이다(그림 1).

90년도 OECD 국가의 1EJ당 평균 이산화탄소 배출량은 67Mt이다.

이러한 배출률을 화석 연료 연소 인수로 전환하면, 석탄은 1EJ당 이산화탄소 배출량이 90Mt이며, 유류는 1EJ당 이산화탄소 배출량이 75Mt이고, 천연 가스의 1EJ당 이산화탄소

배출량은 53Mt이다.

프랑스와 스웨덴의 경우에서 알 수 있는 바와 같이 총에너지 생산에서 원자력 발전이 차지하는 비중이 높을수록 이산화탄소 배출량은 감소한다는 사실을 알 수 있다.

원자력 발전은 여러 종류의 가스와 산성비를 유발하는 인자, 도시 연무 또는 오존층을 파괴하는 물질들을 배출하지 않는다.

원자력발전소나 핵연료 주기 시설에서는 방사성 물질을 배출하지만 이는 인간 생태에 위협을 주지 않는 수준으로 규제가 가능하다.

원자력 산업 시설에서 배출되는 방사성 물질에 의한 주민 선량은 유엔

과학위원회(UNSCEAR)에 의하여 감시 및 평가된다.

동 위원회의 94년도 평가 보고서에 의하면, 세계의 현존하는 원자력 시설(예 : 원자력발전소, 우라늄광, 기타 원자력 관련 시설)을 50년간 운영함으로써 전세계 인구에게 미치는 집단 예탁 실효 선량은 2백만man-Sv(man-Sieverts)이며, 이에 비하여 자연 방사선은 6억 5천man-Sv이다.

자연 방사선에 의한 예탁 선량이 전세계의 원자력 시설에 의한 예탁 선량보다 325배 높다는 것을 의미한다.

그러므로 전세계의 원자력 시설의 kWh당 방사성 물질 배출량을 더 이상 감소하지 않더라도(현재 kWh당 방사성 물질 배출량을 감소시키고 있는 경향이다) 원자력 발전 시설 규모의 추가 및 증대는 가능할 것이다.

즉 자연 방사선에 의한 주민 선량이 원자력 시설에 의한 주민 선량보다 높기 때문이다.

연간 GWh당 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물은 500m³이며, 핵연료 주기 시설에서 연간 발생하는 고준위 방사성 폐기물은 수십입방미터 밖에 안된다.

원자력 시설에서 발생하는 방사성 폐기물의 양은 석탄화력발전소에서 나오는 양에 비하여 훨씬 소량이다.

따라서 방사성 폐기물은 소량이기 때문에 인간 환경으로부터 안전하게 그리고 경제적으로 격리시킬 수 있다.

만일의 경우 원자력발전소에서 발생하는 폐기물이 석탄화력발전소에서 발생하는 폐기물처럼 대량일 경우는 경제적인 처리가 불가능하였을 것이다.

에너지 수요와 공급 전망

아래에서 연구한 바와 같이 3개의 원자력에 대한 시나리오는 95년에 발행한 「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'C'를 적용한 것이다.

*** 환경과 사회 생태학적으로 전개한 시나리오 성격**

- ① 에너지 정책은 환경을 보호하고, 기술 개발을 유지하며 국제적으로 협력을 강화시키는 데 명확하게 초점을 맞출 것이다.
 - ② 세계 인구 증가는 2050년에 100억 이상이 될 것이다.
 - ③ 경제는 완만하게 성장하지만, 선진국의 개발 도상국에 대한 기술 적용과 기술 이전에 있어서 지역적·경제적으로 현재와 같은 불균형은 감소할 것이다.
 - ④ 정책 수단, 기술 발전, 기술 적용 및 기술 이전은 2050년까지 세계 경제의 에너지 수요를 매년 1.4%씩 감소시키는 결과를 가져오게 될 것이다(과거 수십년간 매년 평균 감소율과 비교하여).
- 이 시나리오에서, 세계 1차 에너지

수요는 2050년까지 매년 586EJ (14,000Mtoe)에 이르게 될 것이며, 전력 수요 또한 23,000TWh에 이르게 될 것이다.

「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'A'는 에너지 정책이 제반 환경 요소에 정확하게 반영되지 않을 것이며, 2050년까지 1차 에너지 수요는 매년 1,046EJ(25,000Mtoe)에 이르게 될 것이라고 가정하였다.

「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'C'에서 주요 과제로 지적한 것은 가장 높은 수준의 기술 발전과 남북 협력의 달성이라고 하였다.

또한 이 체제 내에서 원자력 분야의 발전은 원자력계 내에서 기술 개발과 투자 자원의 확보, 그리고 국민 이해를 포함한 원자력 기술 이전에 관련된 정책 결정에 달려 있을 것이라고 지적하고 있다.

원자력 시나리오 예시

「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'C'에서 기술한 1차 에너지 수요 범위

내에서 원자력에 관한 3개의 시나리오를 고려하였다.

이 시나리오는 시행시 예상되는 여러 분야의 정책과 조화를 이루면서 2050년까지 원자력 발전 분야의 광범위하고 시행 가능한 대안을 충족시킬 수 있도록 시도하였다(표 1), <그림 2>.

분석에 이용된 3개의 원자력 시나리오는 모든 실현 가능한 시나리오를 반영한 것은 아니다.

예를 들어 총1차 에너지 수요 시나리오는 3가지의 원자력 시나리오의 어느 것 보다도 높은 수준으로 원자력 발전을 선도하도록 고려했다는 점이다.

그러나 에너지 수급 계획에 반영된 원자력 발전이 3개의 원자력 시나리오에 반영된 수준보다 높거나 낮을 수도 있다.

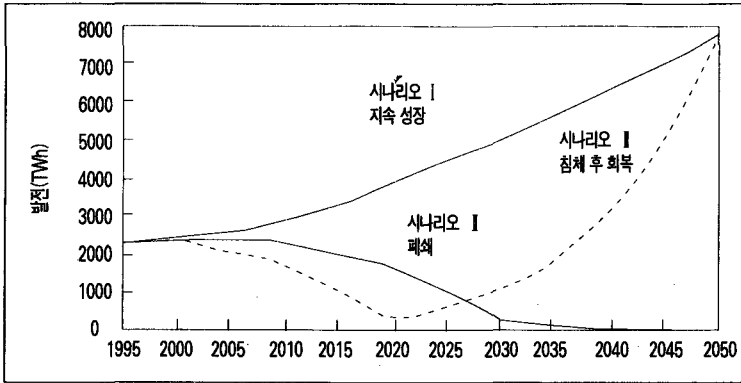
시나리오는 가능한 한 도식화하려고 노력했지만 향후의 정책적인 통합, 제도상의 변화 및 기술의 발전을 고려하지는 않았다.

1. 시나리오 I-지속적인 원자력의 성장

이미 원자력발전소를 운영하고 있

(표 1) 2005년까지 3개의 시나리오에 대한 세계 원자력발전 시설 용량(GWe)

| 원자력시나리오 \ 연도별 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| I. 원자력 발전의 지속적인 성장 | 367 | 453 | 569 | 720 | 905 | 1120 |
| II. 원자력 발전의 폐쇄 | 360 | 354 | 257 | 54 | 2 | 0 |
| III. 침체후 회복 | 355 | 259 | 54 | 163 | 466 | 1120 |



〈그림 2〉 세계의 원자력 발전

는 나라는 원자력 발전이 지속될 것이며, 2010~2015년 사이에 원자력 발전소 건설을 계획하고 있는 나라는 계획대로 추진할 것으로 가정하였다.

이 결과 원자력 발전 시설 용량은 지속적으로 성장하겠지만 성장률은 그리 높지 않을 것이다

그 이유는 선택된 에너지 수요 시나리오에서 전력 수요 성장률을 완만하게 책정했기 때문이며, 즉 총에너지 수급 계획에서 원자력 발전의 증가 속도를 느리게 책정했기 때문이다.

또한 다른 에너지와 경제적 경쟁을 반영하여 원자력 발전 계획의 시행 시기를 길게 잡았기 때문이다.

전세계의 원자력 발전량은 96년에 2312TWh였으나 2050년에 7,850 TWh로 증가하게 될 것이다.

2050년에 원자력 발전은 총 1차 에너지 수요의 12%를 공급하게 되고, 총전력 소비의 35%를 차지하게

되며, 이를 96년도와 비교하면 1차 에너지 수요의 점유 비율이 7%, 전력 소비 점유 비율이 17%였다.

2. 시나리오 II-단계적으로 원자력 발전 시설 폐쇄

원자력 발전에 대한 새로운 발주는 없을 것으로 가정했다.

단지 현재 건설중에 있는 원자력발전소는 준공하고, 모든 원자력발전소는 40년의 수명 기간(조기에 가동 중지를 선언할 발전소가 있을 가능성도 있지만) 동안 운영 후 폐쇄될 것이다.

원자력발전소의 수명은 현재 운영 중인 발전소의 기술적 특성에 따라 결정될 것이며, 또한 원자력발전소를 운영하고 있는 대부분의 나라에서 원자력발전소의 수명은 규제와 인·허가를 관장하고 있는 기구에서 결정할 것이다.

이러한 가정하에서 현재 운전중이거나 건설중인 모든 원자력발전소는

2045년까지 수명을 다하게 될 것이다.

시나리오 II가 세 가지 시나리오 중 원자력 발전이 가장 낮은 경우는 아니다.

예를 들면 원자력발전소가 이 시나리오에서 가정했던 것보다 빨리 폐쇄될 수도 있다.

즉 시나리오 III에서 현존하는 원자력발전소의 수명을 시나리오 II에서 가정한 것보다 짧게 설정했기 때문이다.

그럼에도 불구하고 시나리오 II는 여러 나라의 정책에서 논평한 바에 따라 원자력의 개발 가능성은 고려하지 않았으나, 화석 연료와 개발 가능한 재생 에너지 자원이 부족하기 때문에 원자력을 계속 사용하지 않을 수 없는 현실이다.

본 연구에서 시나리오 II를 포함한 이유는 화석 연료에 대한 대체 에너지의 필요성과 화석 연료 사용으로 인하여 야기되는 환경 문제를 강조하기 위함이었다.

시나리오 II에서 전세계의 원자력 발전량이 2005년까지 2,370TWh로 약간 증가했지만 이는 건설중인 원자력발전소가 완성되었기 때문이며, 그 이후 급속히 감소하기 시작하여 2045년에 0에 이르게 된다.

기간중에 전력 공급과 에너지 분야에서 원자력의 점유 비율이 지속적으로 감소하게 될 것이다.

3. 시나리오 III- 침체후 회복

2015~2020년까지는 원자력 발전의 신규 발주는 없고, 기존의 원자력발전소는 30년간 운영 후에 폐쇄하는 것으로 가정하였다.

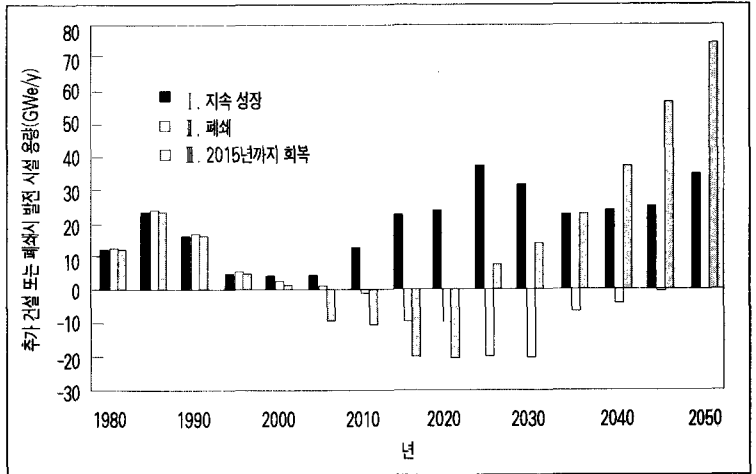
원자력발전소의 수명(현재 기대하고 있는 것보다 짧아질 가능성도 있음)은 정치적인 이유나 또는 경제적인 요인(예를 들면 사기업에서 운영하는 원자력 발전 시설은 여러 가지 불확실성에 직면하여 채투자를 하지 않거나 또는 규제가 심하지 않은 발전 시장에 참여하기 위하여)으로 인한 원자력 발전 시설의 조기 폐쇄의 충격을 예시하기 위하여 채택한 것이다.

2015년부터는 전력 시장과 정치권에서 원자력 발전을 증가시켜 2025년까지 원자력 발전 시설 용량이 늘어나도록 가정하였다.

그 이후 원자력 발전이 지속적으로 성장하여 2050년에는 시나리오 I의 수준에 도달하는 것으로 가정하였다.

이 시나리오를 설정한 이유는 원자력산업에 대한 분석을 할 수 있는 구도를 제공하기 위함이며, 또 하나의 이유는 원자력산업이 침체 후에 회복하는 데 따른 모든 산업에 미치는 충격에 대하여 정부 당국자의 주의를 환기시키는 데 있다.

시나리오 III은, 세계의 원자력 발전량이 30년 수명이 끝난 원자력발전소가 폐쇄됨에 따라 2000년대초부터 감소하기 시작하거나, 또는 계획된 수명 기간 이전에 폐쇄할 수도 있



(그림 3) 추가 건설 또는 폐쇄시 총원자력 발전 시설 용량(GWe/y)

으며, 폐쇄한 원자력발전소를 대신하는 신규 발주는 없는 것으로 예측하였다.

2020년에 원자력 발전 시설 용량은 360TWh가 된다. 다시 말하면 96년 원자력 발전의 16%나 그 이하가 될 것이다.

2025년 이후 원자력 발전은 지속적으로 성장하여 2050년에 시나리오 I 수준인 7,850TWh에 이르게 될 것이다.

원자력 시나리오의 실행 가능성 예측

3개의 원자력 시나리오는 원자력계가 당면한 과제를 검토하기 위하여 도출된 것이며, 이러한 시나리오들은 기술적·경제적으로 실현 가능한 것으로 구상하였다.

시나리오 I과 III에서 투자 규모, 원자력 기술의 선택, 원자력 기술 이전에 관하여는 「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'C' 에너지 시나리오에서 가정한 기술·경제·정치적인 상황과 일치한다.

원자력 시나리오 실행 가능성 예측은 다음과 같은 요소를 적용하여 검토하였다.

- ① 원자력발전소 건설률
- ② 투자 재정 소요
- ③ 입지와 부지 요건
- ④ 자연 자원 수요

원자력발전소 건설은 요구된 수준까지 달성이 가능할 것이다.

시나리오 I에서 원자력 발전의 시설 용량은 95년~2050년 사이에 3배 이상으로 성장하여 2050년에 1,120GWh에 이르게 된다.

하여튼 전세계적으로 원자력 발전 시설의 건설은 완만하게 증가할 것이 다.

수명(40년으로 가정)이 끝난 원자력발전소를 대체하기 위해 신규로 건설하는 것을 고려하더라도, 원자력 시나리오 I에 의하여 2010년~2050년까지 매년 건설되는 원자력발전소 시설 용량은 35GWe를 초과하지는 못할 것으로 보인다(그림 3).

과거의 경험으로 보아 이 수준의 건설률은 달성 가능할 것으로 보인다.

81년~85년 사이에 연평균 원자력 발전 시설 용량은 23GWe이다.

이를 국가별로 보면 2040년~2050년까지 47개국에서 원자력 발전 시설을 운영할 것으로 가정하면, 전세계적인 원자력발전소 건설률(매년 35GWe)은 매년 각국에서 1,000MWe 이하일 것으로 예측된다.

시나리오 I에서 원자력 발전 시설 용량이 지속적으로 성장한 것으로 가정한 데 비하여, 시나리오 III에서는 2015년~2020년까지는 침체하였다가 그 후 급속히 성장하여 2050년에는 시나리오 I 수준의 원자력 발전 시설 용량을 유지하게 되는 것으로 가정하였다.

결과적으로 2045년~2050년까지의 원자력 발전 시설 건설률은, 시나리오 I의 경우는 매년 25~35GWe인데 반하여, 시나리오 III의 경우는

매년 55~75GWe로 훨씬 높은 성장을 하게 된다.

원자력산업은 원자력 분야의 제반 활동이 오랜 기간 위축된 데 따른 원자력 발전 시설의 급격한 건설 수요 증가에 직면하여 이를 해소시키는 데 어려움을 맞게 될 것이다.

특히 20여년간 제반 활동이 침체되어 있던 원자력계에서 적정 수준의 연구 개발과 새로운 원자로 설계 지원을 유지하는 것은 어려운 문제일 것이다.

원자력 발전 시설 건설의 회복 속도에 따른 원자력발전소 건설은 자격을 가진 발전소 운영 요원에 대한 교육과 훈련 문제, 원자력 분야가 장기적으로 장래를 보장할 비전이 없기 때문에 대학의 해당 학과에 학생이 지원하지 않아 소요 인력 확보가 어려운 점 등 여러 문제들에 직면할 것이다.

중복 투자 수요, 절대 규모 측면에서는 에너지 분야의 투자 수요는 방대하다.

그러나 2050년까지 에너지 분야의 투자 수요는 기간중 방대한 유동 자본의 규모에 비하면 극히 적은 부분을 차지하게 될 것이다.

90년~2020년까지의 에너지 분야의 투자 수요는 세계의 국내 총생산(GDP)의 1.5%이며, 2020년~2050년까지는 GDP의 1.1%에 불과하다.

세계의 저축률은 비교적 안정적인

수준인 20%를 유지할 것 같으며, 앞으로 20%의 저축률이 유지될 것으로 가정하면 에너지의 총투자 수요는 세계 저축률의 5~7%까지는 투자가 가능할 것이다.

「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 연구 보고서는, 에너지 분야의 투자를 위한 기체의 어려운 점은 기체의 규모가 아니라 투자자에 대한 재정적인 위험 인식과 에너지 투자에 대한 이윤 환수의 보장이라고 지적하고 있다.

이 두 가지의 중요한 요인은 원자력 발전 시설과 핵연료 주기 시설에 대한 투자에 큰 영향을 미칠 것이다.

개발 도상국의 경우, 이 보고서의 시나리오 'C'의 경우에서 계획하고 있는 원자력 발전 계획의 시행은 국제 협력을 필요로 한다.

예를 들면 원자력 발전 시설 건설에 대한 국제 협력은 이미 중국과 루마니아에서 시행되고 있다.

본 보고서의 수요는 이 보고서의 시나리오 I을 적용한 것이다.

복합 발전 시설의 투자비는 현재 자본적인 제약이 적고, 국가별 여건에 따라 원자력 발전 시설 투자비의 약 30~60%밖에 소요되지 않는 가스 화력 발전 시설에 투자되고 있다.

오염 방지 시설이 갖추어진 석탄 화력 발전 시설의 투자비는 원자력 발전 시설 투자비의 약 75%이다.

핵연료 주기 시설의 부대 시설 투자 수요는 기술 분야별로 국가 상호

간에 광범위하게 변화하고 있다.

에너지에 대한 투자는 원자력 발전 시설보다 화석 연료 에너지 체계에 보다 많이 투자를 하는 것이 일반적인 경향이다.

이러한 이유로 인하여 특히 개발도상국에서 kWe당 전력 생산비를 산정할 때 핵연료 주기 시설의 투자비를 어떻게(kWe당 생산 원가에 포함 여부) 할 것인가에 대하여 고민하게 된다.

원자력 발전 시설과 핵연료 주기 시설의 입지 선정은 비록 몇몇 국가에서 부지 요건을 충족시킬 수 있는 입지 선정 등 원자력 발전 시설의 입지 지역 주민의 동의를 얻는 데 어려움을 겪고 있지만 전세계적으로 큰 문제는 없을 것이다.

원자력발전소를 운영중이거나 건설을 계획하고 있는 대부분의 나라는 이미 충분한 부지를 확보하고 있거나 혹은 현재 운영하고 있는 원자력 발전 시설 부지 내에 원자력 발전 시설을 추가로 건설할 수 있는 부지를 확보하고 있다.

새로 설계하고 있는 원자로는 수동 안전 체계를 채택하고 있기 때문에, 사고 발생시 원자력발전소 외부 지역에 충격을 최소화 할 수 있는 중소형 원자로로서 원자력발전소 건설과 운영시 부지 적합성에 대한 부담을 완화해 줄 것이다.

원자력발전소 연료용 천연 우라늄은 계획된 원자력발전소 운영에 차질 없이 지원 가능하다.

현재 원자로에는 주로 우라늄을 사용하고 있으며, 경우에 따라서는 재처리된 플루토늄을 사용하는 경우도 있다.

즉 장기적으로는 토륨이 원자로에 연료로 장전되는 추가적인 자원이 될 수 있을 것이고, 고속증식로는 비록 약간의 핵분열성 물질을 보충하더라도 근본적으로는 원자력 발전을 재생에너지화 할 수 있을 것이다.

중기적으로 연료의 가용성을 검토한 결과, 천연 자원 수준과 기술 수단 및 산업 능력은 2050년까지 적용을 고려하고 있는 3개의 원자력 시나리오 시행에 필요한 모든 천연 자원 공급을 보장할 수 있는 수준이다.

천연 우라늄 수요는 연료 수급 전략에 달려 있다.

세계의 모든 원자력발전소가 직접 순환 주기로 운영되고, 우라늄 농축 시설의 폐염물은 현재 수준인 0.3%를 유지하는 것으로 가정하면, 연간 우라늄 수요는 2000년경 연간 6만톤, 2050년에는 연간 175천톤으로 수요가 성장하게 될 것이다(표 2), <그림 4>.

이러한 수요는 현재의 천연 우라늄 생산 수준(90년에 연간 3만톤 내외)과 2000년대초까지 예상되는 생산 시설 능력(연간 4만톤 이하)을 초과할 것이다.

하여튼 수요 성장은 70년대에 있었던 바와 같이 생산 시설 확충을 자극하게 될 것이다.

현재 우라늄 공급은 민간 재고 초과를 유발하여 부분적으로 수요와 공급이 일치하게 될 것이며, 이는 앞으로 5~10년간 계속될 것으로 예측된다.

핵무기 해체는 기존 원자로에 추가적으로 연료를 공급하게 될 것이며, 소요 측면에서 보면 kWh당 우라늄 소비량이 감소하게 될 것이나, 이는 다음과 같은 수단을 통해서 달성될 것이다.

- ① 연료 연소도 향상(핵연료 단위당 에너지 생산량)
- ② 농축 시설의 폐염물 저감
- ③ 사용후 핵연료 재처리를 통한 플루토늄과 우라늄 회수(천연 우라늄 소요 감소)

기간중 세계 모든 원자력발전소가 직접 순환 주기로 운영되고 농축 시설의 폐염물은 0.3% 수준으로 운영된다면 2050년까지 시나리오 I에서 우라늄의 누적 수요는 5백60만톤에 달하게 될 것이다.

이러한 가정하에 현재 우라늄 재고(최소한 우라늄 kg당 80달러를 유지할 것을 보장)는 2025년까지 소진되고, 현재 알려진 우라늄 자원은 2040년까지 동나게 될 것이다(그림 4).

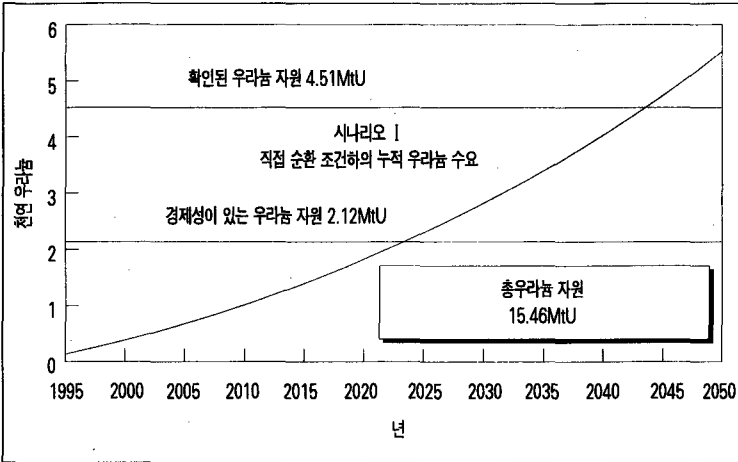
그러나 우라늄 가격이 kg당 유지할 경우 우라늄 누적 수요는 총우라늄 자원량(1,550만톤 우라늄)을 하회하게 될 것이다.

수십년 내에 추가적인 탐사를 실시하여 새로운 우라늄 자원을 발견할 수 있을 것이며, 따라서 현재 확인된

(표 2) 시나리오 I에서의 천연 우라늄 수요

| 내 용 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| 연간 우라늄 수요(100 tU) | 54 | 70 | 88 | 112 | 141 | 175 |
| 95년부터의 누적 수요(100만 tU) | 0.34 | 0.94 | 1.75 | 2.75 | 4 | 5.6 |

주: 88년의 연간 생산량 58천tU, 94년 연간 생산량 315백톤.



(그림 4) 누적 천연 우라늄 소요 및 자원 수준(MtU)

우라늄은 경제성이 있는 우라늄 자원이 될 것이다.

즉 우라늄 수요 증가와 가격 상승에 따라 우라늄 탐사와 새로운 우라늄 광 개발이 가능해질 것이다.

천연 우라늄 가격이 전력 생산에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 우라늄 가격 상승이 원자력 발전 단가에 큰 영향을 미치지 않을 것이다.

우라늄 수요는 위에서 언급한 시도를 통해서나, 혹은 농축 시설의 폐염물을 조절하거나 사용후 연료 재처리를 통하여 플루토늄과 우라늄을 회수하여 활용함으로써 현저히 감소시킬 수 있다.

농축 시설의 폐염물을 0.3%에서

0.15%로 낮추면 우라늄 누적 수요는 2050년까지 5백60만톤에서 4백20만톤으로 감소 가능할 것이고, 사용후연료 재처리를 통하여 회수된 우라늄과 플루토늄을 혼합 산화 연료(MOX)로 경수로에 사용할 경우 2050년까지 60만톤의 천연 우라늄이 절약 가능하다 (즉 원자력에 MOX 연료 30% 사용, 산화 우라늄 70% 사용).

농축 시설의 폐염물을 줄이고 사용후 연료 재처리를 통하여 30% 이상의 우라늄 누적 수요를 감소시킬 수 있을 것이다.

모든 원자력발전소가 직접 순환 주기로 운영될 경우 사용후연료는 지속적으로 증가하여 2050년에는 연간

19,500tHM에 이르게 되며, 이는 95년 사용후연료 누적량(약 9,300tHM)의 2배에 이르게 되는 것이다.

재처리와 재순환 전략은 재처리되지 않은 사용후연료 누적량을 현저히 감소시킬 것이다.

모든 경수로 사용후연료가 재처리되고 MOX 연료를 30%까지 재순환할 경우 재처리되지 않은 사용후연료 누적량이 연간 약 5,000tHM씩 감축될 것이다. 이는 95년 누적량의 절반 이하이다(표 3), (그림 5).

이러한 전략하에서 재처리 수요는 2025년에는 연간 약 8,360tHM, 2050년에는 연간 14,960tHM에 이르게 될 것이며, MOX연료의 제조 수요는 2025년에는 매년 1,000tHM, 2050년에는 1,900tHM에 이르게 될 것이다.

경수로용 사용후연료와 MOX 연료의 재처리에 필요한 시설 용량은 현재 운영중이거나 계획중인 재처리 시설 용량으로 20여년간은 지원 가능하지만 2020년 이후는 새로운 재처리 시설이 필요하게 될 것이다.

원자력발전소와 핵연료 주기 시설에 저장되어 있는 재처리되지 않은 사용후핵연료와 플루토늄은 고려 대상에서 배제하였다.

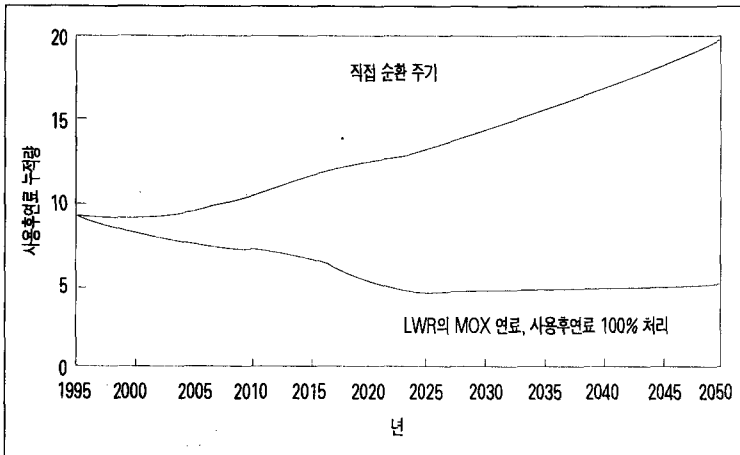
원자력산업의 과제

1. 시나리오 I

이미 원자력발전소를 운영하고 있

(표 3) 사용후 연료 누적량과 재처리 및 MOX 연료 제조 수요(시나리오 I)의 재처리와 재순환 전략

| 내 용 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 재처리되지 않은 사용후 연료 누적량(1000tHM/y) | 7.9 | 7.2 | 5.1 | 4.5 | 4.8 | 5.0 |
| 재처리 수요(1000tHM/y) | 2.5 | 3.5 | 7.0 | 9.8 | 12.2 | 14.7 |
| MOX 연료 제조 수요(1000tHM/y) | 0.27 | 0.40 | 0.70 | 1.2 | 1.6 | 1.9 |



(그림 5) 시나리오 I의 조건하에서 재처리 되지 않은 사용후연료 누적량(1,000tHM/y)

는 나라는 원자력 발전을 계속할 것이며, 각국의 에너지 수급 계획에 포함된 원자력발전소 건설은 계획대로 추진될 것으로 가정하였다.

원자력발전소를 운영하고 있거나 원자력발전소 건설을 계획하고 있는 나라의 정부와 원자력 산업계는 설정된 시나리오에서 제시하는 조건에 따라 하나의 대안을 선택해야 하는 과제라고 고민하게 될 것이다.

특히 원자력 발전은 대체 에너지와 경제적이고 경쟁적인 위치에서 발전시키고 유지하는 것이 필요하게 될 것이며, 또한 원자력 산업계는 원자력 발전에 대한 국민 이해를 돕는 노력을 강화해야 할 것이다.

이와 관련하여 국제 기구는 세계적 인 위험과 기후 변화를 완화할 수 있는 원자력 발전에 대한 가용한 정보를 제공해야 할 것이다.

2. 시나리오 II

2010년 이후에 원자력 발전소가 폐쇄됨에 따라 원자력 산업계는 원자력 발전 시설을 수요에 충족할 수 있도록 유지하여야 하고, 원자력발전소 해체 기술 확보, 그리고 방사성 폐기물을 처분해야 하는 등의 과제가 산적하게 될 것이다.

원자력산업이 상당한 기술력을 확보하고 있음에도 불구하고, 성장시키지 않고 퇴출시키도록 정책을 결정한

것이다.

이러한 정책을 채택한 나라는 이탈리아·핀란드·스웨덴 및 미국 등을 들 수 있다.

원자력발전소를 운영하고 있는 나라의 규제 기구와 체제는 원자력 발전 시설을 해체하고 방사성 폐기물을 영구 처분하는 데 소요되는 기금을 확보할 수 있도록 업무 영역을 전환해야 할 것이다. 기금은 수익자가 적립하여 필요에 따라 사용할 수 있도록 관리되고 있다.

원자력 시설을 운영하고 있는 대부분의 나라가 원자력발전소와 핵연료 주기 시설이 폐쇄된 후에 관련되는 모든 작업을 사업 시행자가 책임지고 수행토록 협정을 체결해 두고 있다.

또한 원자력 발전 시설을 포함한 원자력 시설 해체와 방사성 폐기물 관리에 필요한 기술과 전문 인력은 이미 확보되어 있다.

시나리오 II는 원자력 발전을 대체 에너지로 충당하는 것으로 가정했기 때문에 비원자력 에너지계에서 어려운 과제를 떠맡게 될 수도 있다.

최소한 2025년까지 재생 에너지는 시나리오 I에서 가정했던 이상으로 총전력 공급에 이바지할 것 같지는 않으며, 원자력 발전 에너지는 화석 연료를 사용하는 대규모 발전 시설로 대체되지 않으면 안될 것이다.

화석 연료 수요 증가는 국제 시장에 영향을 미칠 것이며, 특히 가스의 경우 공급과 가격의 불안정을 유발할

수 있고, 발전을 위한 화석 연료의 연소 증가는 온실 가스 방출 감소 협약 준수를 더욱 어렵게 만들 수도 있다.

시나리오Ⅱ에서 가정한 바와 같이 원자력 발전 시설이 폐쇄된다면 천연 가스가 가장 유력한 대체 연료가 될 것이다.

전세계적으로 가스 화력 발전의 평균 점유율을 50%로 가정하면 추가적인 천연 가스 수요는 2025년까지 약 6천6백억입방미터가 될 것이며(이는 96년도 천연 가스 생산량의 29%에 해당되는 양임), 2050년까지는 1조4천9백억입방미터(이는 96년도 생산량의 64%에 해당되는 양임)가 될 것이다.

대량의 천연 가스 소요는 가격을 상승시킬 뿐만 아니라 비축 가스가 전 세계로 고루 분배되지 않아 에너지 공급 안정도를 해치게 될 것이다.

장기적으로 원자력 발전은 천연 가스 화력 발전 시설과 선진 기술이 적용된 석탄 화력 발전 시설(Clean Coal)과 재생 에너지로 대체되어야 할 것으로 분석되었다.

3. 시나리오 Ⅲ

원자력 산업계는 원자력 시나리오에서 선택한 대안을 지키기 위하여 20여년 이상 침체기에 원자력산업을 지탱하면서 추진하여야 할 기술적이고 경제적인 대안을 마련해야 하는 과제를 안게 될 것이다.

원자력 기술(원자로 설계, 핵연료

주기 전략)이 선진화 된 화력 발전 기술, 재생 에너지 자원 및 세계 기후 변화에 대한 위협을 완화시킬 수 있는 여러 가지 대책과 경쟁이 가능할 것 이란 가정하에 원자력 발전이 2015년 까지 회복될 것으로 설정하였다.

비록 단기간이지만 시장성을 상실한 여건하에서 원자력 산업계가 2015년까지 기술적인 측면과 경제적인 측면에서 회복할 수 있는 경쟁력을 갖추는 것은 어려운 것으로 생각 된다.

이러한 과제를 해결하기 위하여 정부는 원자력 분야의 연구 개발 지원, 재생 에너지 자원과 기후 변화 위협을 완화할 수 있는 여러 가지 정책 대안과 적용 체제를 마련해야 할 것으로 분석되었다.

온실 가스 방출 감소 대책에 대한 원자력 시나리오의 적용 효과

원자력 발전 시설이 kWh당 이산화탄소 800g을 방출하는 화석 연료를 사용하는 화력 발전 시설로 대체되는 것으로 가정했을 경우, 석탄 화력 발전 시설과 가스 화력 발전 시설에서 방출하는 평균 이산화탄소량은 현존하는 발전 시설에서 방출하는 양과 대체로 동등하다는 가정하에 3개의 원자력 시나리오를 적용한 결과, 이에 대한 온실 가스 방출 삭감량이 예측되었다.

이러한 예측은 고려된 기간에 대부

분의 원자력 발전 시설이 OECD국가에서는 가스 화력 발전 시설로, 개발도상국에서는 석탄 화력 발전 시설로 대체되는 것으로 가정한 것이다.

하여튼 앞으로 다음 세기 50년간은 화석 연료를 사용하는 화력 발전 시설의 온실 가스 방출을 감소시킬 수 있는 기술 개발이 이루어질 것이며, 천연 가스 화력 발전 시설의 점유 비율의 확대는 단위 발전 시설당 온실 가스 평균 방출량을 감소시키는 결과를 가져오게 될 것이다.

원자력 시나리오Ⅰ을 적용한 결과 2050년에 연간 온실 가스 방출 억제량(이산화탄소로 환산)은 63억톤에 이른다.

이 양은 「2050년 이후 세계 에너지 전망」(IIASA/WEC) 보고서의 Case 'C' 에서 예측(190억톤)한 전체 에너지계에서 방출한 이산화탄소량의 1/3에 이른다.

원자력 시나리오Ⅱ를 적용한 결과 온실 가스 방출 억제량은 원자력 발전 시설 용량이 현 수준인 2010년~2015년까지는 연간 18억톤이며, 2025년에는 급속히 감소되어 연간 8억톤, 2045년에 이르러서는 0에 이르게 된다.

원자력 시나리오Ⅲ을 적용한 결과 온실 가스 방출 억제량은 2050년에는 원자력 시나리오Ⅰ의 수준과 동일하지만, 결국 침체기에 속한 2015~2030년에는 원자력 발전이 온실 가스 방출 억제에 기여를 하지 못하게

된다.

원자력 시나리오 I 을 적용했을 경우 2050년에 온실 가스 누적 방출 억제량은 2,000억톤, 원자력 시나리오 III 을 적용했을 경우는 1,000억톤, 원자력 시나리오 II 를 적용했을 경우는 550억톤에 이르게 된다(그림 6).

시나리오 I (원자력의 지속적인 성장)을 적용시 온실 가스 방출 억제량은 시나리오 II (원자력 발전 시설 폐쇄)에 비하여 4배에 이른다.

각 시나리오에서 보여주는 바와 같이 분명한 사실은 원자력 이용을 확대했을 경우, 이산화탄소 방출 억제에 도움을 준다는 사실이다.

시나리오 III (침체 후 회복)을 적용했을 때 2050년에 이산화탄소 방출 억제량은 시나리오 I 의 경우와 동일한 수준임에도 불구하고 누적 방출 억제량은 시나리오 I 의 절반 수준에

도 이르지 못한다.

이와 같은 사실은 온실 가스 방출 억제 기술을 적용함에 있어 적용 시점의 중요성을 명확하게 시사해 주고 있다.

결론

본 연구에서는 다른 여러 분야의 연구 결과를 참조하여 원자력 시나리오에 대하여 검토하였다.

이 검토 결과는 원자력 발전이 세계 기후 변화의 위험을 완화시키는데 기술적 및 경제적으로 공헌할 수 있다는 사실을 명확하게 시사해주고 있다.

현재까지 국제적으로 혹은 국가별로 제시된 온실 가스 방출 감축 목표 달성이 어렵다는 사실을 인식하면서 제시된 방출 감축 목표 달성에 도움이 될 수 있는 모든 대안을 공개하여

공동 대처하는 것이 중요하다.

원자력 발전이 세계 기후 변화의 위험을 완화시킬 수 있는 하나의 대안이며 온실 가스 방출 감축 목표 달성에 커다란 공헌을 하는 것은 명확하다.

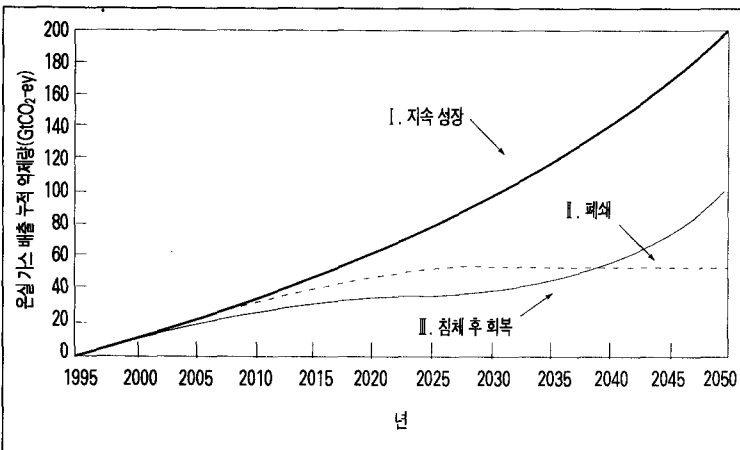
원자력 발전을 유지하기 위하여 앞으로 해야 할 일은 OECD 국가가 원자력발전소를 고도로 안전하게 운영하고 원자력 발전의 지속성을 확보하기 위하여 고준위 방사성 폐기물을 안전하게 처분하는 데 달려 있다.

원자력산업 발전에 관련되는 중요한 자료를 공개하기 위해서는 원자력 산업계와 정부가 많은 노력과 관련되는 조치를 취해야 한다.

장기적으로 발전 분야 이외의 원자력 이용 전망은 지역 난방, 해수 담수, 수소 생산 등의 분야를 개발할 수 있을 것이다. 비전력 분야의 원자력 이용 확대는 온실 가스 방출 억제에 크게 기여할 수 있다.

이 분야의 이용 확대에 대한 연구 개발은 화석 연료와 재생 에너지를 사용한 시설과 산업적으로 경제적으로 경쟁력이 있는지 여부에 대한 기술적인 가능성을 검토하는 데 초점을 맞추어야 할 것이다.

정부는 이러한 분야의 연구 개발에 대한 지원을 하여야 하며, 국제 기구는 이 분야에 대한 추진 사항과 시설 건설에 대한 정보를 교환하도록 역할을 다하여야 한다.



(그림 6) 온실 가스 배출 누적 억제량(GtCO₂-equiv.)