미래 사회의 원자력 에너지 이용 개발 전략 환경(SWOT) 분석

이 태 준
한국원자력연구소 정책연구부

미래 사회에서 원자력의 역할을 전망하기 위해서는 에너지, 경제 발전, 환경에 대한 사회적 태도 등 미래 사회의 핵심 현안을 규명하고 이들이 원자력 이용 개발과 어떻게 상호 작용하는지를 분석하는 것이 필요하다. 본고에서는 원자력과 관련된 미래 사회의 현안으로서 사회와 경제 환경의 변화, 원자력과 생태 환경에 대한 관심, 에너지 자원의 한계 및 지속 가능성 등에 초점을 두었다. 이를 바탕으로, 미래 사회에서 원자력의 역할을 증진시키기 위한 관점에서, 원자력 이용 개발의 외부적인 기회 요인과 위협 요인, 그리고 내부적인 강점과 약점을 분석 · 전망하였다.

미래 사회 · 경제 환경 변화

1. 소비 행태(위협 요인)

미래 에너지 시스템에서 원자력의 역할은 변화하는 사용자들의 요구 조건, 즉 소비자의 행태와 에너지 소비 패턴의 변화에 원자력이 얼마나 잘 적응할 수 있느냐에 크게 의존할 것이다.

소비자 행태 (consumer behaviour) 측면에서 원자력의 역할에 영향을 미칠 수 있는 요인은 다음과 같다. 첫째, 일반 가정의 에너지 선호 행태가 정부나 에너지 공급자의 에너지원과 에너지 생산 시스템의 선택에 영향을 미친다.

이미 여러 나라에서 소비자들은 전력 회사에 자신들이 공급받기를 원하는 전력 중에서 재생 에너지의 공급 비율을 제시하는 영향력을 행사하고 있다.

만일 미래에 자신들이 필요한 전력의 에너지원과 생산 시스템을 소비자들이 전적으로 결정하게 된다면, 그들은 원자력이 자신들에게 공급되는 에너지원에 포함되어야 하는지, 그리고 포함된다면 어느 정도의 양이 포함되어야 하는지에 대해서 매우 직접적이고 구체적인 영향력을 행사하게 될 것이다.

둘째, 지역이나 국가에서 에너지 소비 행태가 중앙 집중형 전력망을 통한 공급 의존도를 줄이는 대신, 보다 독립적인 분산형 에너지를 확보하려는 움직임이 발견되고 있다.

사실 에너지의 자율 선택과 자급자족 행태는 선진국에서 더욱 확산되고 있으며 이들 국가에서 가정은 자신들의 전력 니즈를 고려한 생산 방식을 직접 선택하기도 한다. 예를 들면, 광전지 패널을 지붕, 그리고 풍력 터빈을 마당에 설치한다.

이러한 분산형 전력 생산 방식에 대한 선호도가 증가한다면, 적어도 현재의 원자력 발전 시스템은 상대

적으로 불리한 경쟁 상황에 처할 것이다.

경제적인 측면에서, 현재의 원전 기술은 자본 집약적인 매우 복잡한 기술 체계로 이루어졌기 때문에 일정 규모의 설비 용량(보통 600 MWe) 이상에서 경제성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 대용량의 발전 기술은 전력 공급 방식에서도 분산 관리 방식보다는 중앙 집중 방식에 더욱 적합하다.

따라서 현재 상용화되어 있는 대규모 원전 시스템은 분산 · 관리되는 일반 가정의 독립 전원으로서는 물론이고 소도시용으로도 적합하지 않다 (NEA, 2002a).

2. 전력화(기회 요인)와 도시화(기회 또는 위협 요인)

도시화와 전력화는 에너지 소비 행태, 그리고 이에 따른 에너지 생산 및 분배 시스템에 영향을 미친다. 이들은 또한 원자력을 포함한 대체 에너지 공급원의 역할에 대한 사회적 인식에도 영향을 미친다.

OECD 국가에서는 산업 발전과 복지 향상에 따라 총에너지 수급상에서 전기의 점유율이 증가되어 왔다. 개도국에서도 이와 유사한 경향을 보이면서 전기의 소비가 급증하고 있다.

에너지 수급상에서 전기의 비중이 늘어날수록 안정적인 전기 공급의 중요성에 대한 사회의 인식이 높아지고 그렇게 되면 원자력은 기저 부하용 중앙 집중식 에너지 공급원으로서 그 역할을 인정받을 수 있다.

도시화, 특히 인구 밀집 지역으로 둘러싸인 대도시의 증가는 총에너지 수요와 요구되는 에너지 서비스의 유형에 큰 영향을 미친다. 전력화의 증가는 설비 용량과 관련 하부 구조의 증가 수요를 유발한다.

특히 개도국이나 신흥 공업국에서 전력화를 기반으로 도시화와 초대형 도시가 증가하고 국가간 경계를 초월하는 시장 개방이 확산되면, 대형 발전소와 통합 전력망의 수요가 늘어난다.

원자력은 농축된 에너지원으로서 대도시에서 요구되는 에너지의 집중수요에 대응이 가능하다. 원자력은 또한 대부분의 재생 에너지원보다 토지 사용률이 훨씬 작은 장점을 가진다.

그러나 방사성 폐기물 문제와 원자력 사고에 대한 비상 계획의 복잡성 등 원자력 위험을 기피하려는 사회의 우려 때문에 도시의 인구 밀집 지역에서 원전의 역할은 제한될 수 있다. 더욱이 현대 사회는 대규모 산업 복합체를 거주 지역 근처에 유치하는 것을 회피하는 경향이 늘어나고 있다.

이러한 상황에서 방사성 폐기물과 안전성 문제를 해결하지 않고는 원전이 그 토지 점유율이 낮고 에너지 밀도가 높은 대도시화에 적합한 장점을 가지고 있다고 하더라도 인구와 에너지 소비가 집중된 대도시 인근에 원전이 유치될 전망은 높지 않다. 따라서 도시화의 진전은 원자력의 발전에 기회 또는 위협 요인이 될 수 있다.

3. 과학 기술 혁신 가속화 (기회 또는 위협 요인)

정보 통신 기술(IT), 생명 공학 기술(BT), 나노 기술(NT), 환경 기술(ET) 등의 신기술이 21세기 과학 기술과 경제 · 사회 변화를 통하여 문명의 발전을 주도할 것으로 전망된다.

특히 정보 통신 기술의 발달과 함께, 과학-산업 기술간 그리고 학제간 상호 작용이 증대하면서 기술 변화 속도가 빨라지고, 기술 분야간 융합화와 시너지 효과가 증대하면서 과학 지식 기반 사회로의 전이가 가속화될 수 있다.

신기술 혁명이 본격화됨에 따라 산업의 경쟁력 구도가 유망 과학 기술의 핵심 역량을 바탕으로 재편될 전망이다. 따라서 이들 분야의 기술 혁신 벡터가 국가의 경제 · 사회 발전에 결정적인 영향을 미치게 될 것이다.

〈표 1〉은 미국 RAND 연구소에서 미래 기술의 진보 방향을 예측한 것이며, 이와 함께 주요 기술 분야별 발전 배경과 유망 산업을 정리하

〈표 1〉 미래 기술 진보의 추세(Anton et al., 2001)

	과거의 기술	현재의 기술	미래의 기술
경 로	금속과 전통 세라믹	합성물과 폴리머	스마트 소재
	공학과 생물학 분리	생체 물질	생명공학/유전공학
	선택적 경작	유전 삽입	바이오 농업
	소규모 통합	VLSI	기가 칩
	미크론 단위 인쇄술	서브 미크론 인쇄술	나노 수준
	대규모 컴퓨터	개인 컴퓨터	micro appliances
	컴퓨터간 연결 미비	인터넷 연결 기계	네트워크
주요 경향	단일 학문	복수/계층적 학문	다학제적
	거시 시스템	미시 시스템	나노 시스템
	국지적	지역화	세계화
	물리적 생산 요소	정보	지식

면 다음과 같다.

① 정보 통신 기술 : 세계적으로 급속히 확산되는 인터넷 기반을 바탕으로 기술 진보의 방향이 고속화 · 지능화 · 멀티미디어화로 특징지어지면서, 네트워크 고도화 기술 및 휴먼 인터페이스 기술 등의 소프트웨어 산업, 전자 상거래, 콘텐츠 산업, 광통신 · 광소재 산업이 새로운 성장 산업으로 부상하고 있음.

② 생명 공학 기술 : 노령 인구의 증가와 건강에 대한 관심 고조로 유전체 연구, 세포생물학, 생명-정보 기술 등의 발전으로 인간 유전자 지도의 완성과 주요 동 · 식물 유전자 지도의 규명과 함께 신의약 · 신 농약산업, 유전자 변형 식품, 노화 억제 및 복구 산업, 생물 자원 산업 등이 성장할 전망임.

③ 나노 기술 : 물질 구조의 초미세 영역에 도전하는 나노 물질 · 재료 기술, 나노 정보 디바이스 기술, 나노 의료 기술 등의 발전으로 제품과 제조 생산 기술을 근본적으로 변화시킬 전망임.

④ 환경 기술 : 삶의 질 향상에 대한 욕구의 증대로 환경에 대한 관심이 고조됨. 지속 가능한 발전을 위한 리사이클링 산업, 환경 관련 평가 및 관리 기술과 청정 기술 등의 폐기물 처리 산업, 연료 전지 · 태양 전지 등 신에너지 산업이 새롭게 등장하고 있음.

에너지 시스템 발전은 이들 외부적인 과학 기술 발전, 즉 생명공학, 탄소 나노 섬유 같은 재료 기술, 정보 통신 기술 등의 혁신에 의해서 영향을 받는다.

이들 기술의 진보는 생물 전지, 연료 전지 · 수소 같은 새로운 에너지 담체 (energy carrier), 마이크로-동력망, 새로운 세대의 태양 기술 등의 발전을 촉진할 수 있다.

결국 외부의 과학 기술 혁신을 원자력 시스템에 적극적으로 활용하여 원자력 기술 혁신의 효과성과 효율성을 제고할 수 있어야 한다.

그러나 외부의 기술 혁신이 원자력에 대한 기여보다 원자력의 경쟁 또는 대체 기술의 발전을 더욱 촉진한다면 미래 원전 기술 발전에 위협 요인이 될 수도 있다(Shell International, 2001).

4. 정보 통신 기술(기회 요인)

컴퓨터와 정보 통신 기술의 발전은 산업 공정, 소비자 행태 그리고 삶의 방식에 지대한 영향을 미쳤다.

에너지 수요 측면에서 인터넷 사용의 증가는 컴퓨터 이용에 따른 전기 소비를 증가시키게 되며 (NEA, 2002a) 이는 간접적으로 원전에 대한 수요 측면의 기회 요인이 된다.

공급 측면에서는, 전산화된 장비가 원자력 산업에 널리 적용되고 있다. 초기의 원자로 운전은 컴퓨터 없이 인간과 기계간의 인터페이스에 의존하였다. 컴퓨터와 전산망을 이용한 모의 실험과 자동 감시 및 가시화 능력을 통해서 원전과 핵연료주기 시설의 안전성과 운전 성능이 향상되었다.

5. 에너지와 전기 시장의 규제 완화(위협 요인)

미국에서 전력 회사들의 독점 체제는 부시 대통령이 에너지 정책 법

안에 서명한 1992년 여름에 변화하기 시작하였다. 이 법안으로 도매 시장에서의 전력 판매 제도가 개편되었다.

몇 년이 지나지 않아서 펜실베이니아 · 캘리포니아 및 뉴욕 등을 포함한 절반에 가까운 주에서 소매 시장 수준에서 전력 판매에 대한 규제 완화가 시작되었다.

에너지와 전기 시장의 규제 완화는 전기생산용 에너지 자원과 기술의 선택에 영향을 미치게 된다. 규제 완화의 목적은 자유 경쟁을 통해서 전반적인 경제 효율성을 강화시켜서 소비자가 시장 메커니즘으로부터 최대한의 혜택을 얻도록 보장하는 데 있다.

전기 산업 부문에서 시장 완화는 투자자와 운영자에게 큰 영향을 줄 수 있다. 발전 설비에 대한 선행 투자로 인한 경제적 위험은 관리 가격(regulated tariffs) 없이 미래 수요가 불확실한 상황에서 증가하고 있다.

이러한 시장의 규제 완화는 원전 시스템과 같은 자본 집약적 기술에 대해서는 위협 요인이 된다.

원자력과 생태 환경에 대한 사회인식

1. 원자력의 환경 친화성에 대한 논란

1980년대에 들어와서 화석 연료 사용에 의한 산성비, 오존층의 파괴, 지구 온실 효과 등 지구적인 환경 피해에 인식이 높아지고 있다. 이러한 지구 환경 문제를 해결하는 데 있어서 원자력이 상당한 공헌을 할 것으로 평가되고 있으나, 다음과 같은 이유로 아직까지는 대다수의 공감을 얻지 못하고 있다(Williams, 2001).

첫째, 기후 변화와 대기 오염을 방지하는 원자력의 장점에도 불구하고 방사성 폐기물과 원자력 사고 등의 잠재적 위험에 따른 원자력의 환경적 부담이 여전히 논란이 되고 있다.

이산화탄소와 기타 유해 가스의 배출을 저감하는 원자력의 순기능과 원자력의 보건 및 환경적 부담간의 직접적인 비교가 어려운 상황에서, 원자력의 환경 친화성을 평가할 때 일반 사회의 위험 인식에 대한 태도는 매우 중요한 인자가 된다.

현재 OECD 국가들을 보면 원자력과 관련된 잠재적 위험이 원자력의 기후 변화에 대처하는 장점보다도 더욱 크게 인정되고 있으며 이러한 태도가 국가 정책으로 에너지원을 선택하는 데 반영되고 있다(NEA, 2002a).

둘째, 원자력의 기후 변화 대처 능력을 인정할 때, 그 실질적인 효과에 대해서 논란이 남아 있다.

기후 변화를 경감시키는 데 있어서 원자력의 역할은 원자력의 이용으로 인해서 줄어드는 이산화탄소 배출 감축량으로써 평가된다. 원자력이 기후 변화를 경감시키는 데 실질적인 기여를 하기 위해서는 중장기적으로 엄청난 규모의 원전이 가동되어야 한다. 예를 들어 2100년까지 원전의 설비 용량이 지금보다 10배 증가할 경우 21세기 말까지 누적적으로 약 15% 정도의 탄소 배출을 줄일 수 있다.

비록 원자력의 기후 변화 경감 능력은 인정하더라도 현실적으로 이러한 규모로 원전의 설비가 증가되기는 어려울 전망이다(NEA, 2002a).

2. 지구 환경 규제 강화와 환경 외부성의 내재화(기회 요인)

미래 원자력의 경쟁력은 부분적으로 에너지 자원의 환경 외부성이 에너지 가격에 내재화되느냐의 여부에 달려 있다.

현재까지 원자력 산업은 화석 연료 산업에 비하여 훨씬 더 부정적인 외부 효과를 가격에 내재화시켜 왔다. 방사성 폐기물 처분 비용은 원자력 발전 가격에 계상되었으나 반면에 화석 연료의 탄소 배출 관련 비용은 화력 발전의 전기 가격에 포함되지 않고 있다.

따라서 지구 환경에 대한 규제가 강화되면서 발전원별 환경 외부 효과가 시장 가격에 모두 반영되도록 제도화된다면 원자력 발전의 경쟁력은 향상될 수 있다. 그리고 원전

의 경쟁력 상승은 대중의 원전에 대한 태도 변화에도 기여할 것이다.

화석 연료의 공급 한계

1. 화석 연료의 공급 불안정 (기회 요인)

산업 혁명 이후 산업 기술의 눈부신 발전과 더불어 인류는 수천년 농업 사회에서 감히 상상조차 할 수 없었던 엄청난 부를 축적하게 되었고 역사상 가장 풍요로운 삶의 시대를 열어가고 있다.

이러한 풍요는, 생산을 통해서 부가 가치를 창출하고 판매를 통해서 이윤을 확보한 다음 이를 다시 재투자하여 더 큰 부가 가치를 창출하는, 이른바 현대 산업 사회의 '확대 재생산'의 산물이다.

그런데 현대 산업 사회의 동력을 제공하는 석유 · 가스 · 석탄 등의 화석 연료는 한번 쓰면 없어지고 마는 고갈성 자원이라는 문제점을 가지고 있다.

2000년 초에 세계의 석유(확정) 매장량은, 앞으로 약 40년 동안 세계소비를 충족시킬 만한 양인 1조 330억 배럴로 추정되었다. 현재의 추세를 인정할 경우 세계 에너지 중에서 연료 부문의 소비량은 2020년까지 1996년 대비 약 2배 증가할 것으로 전망되고 있다(〈표 2〉 참조).[1)]

(표 2) 연료용 세계 에너지 소비량

(단위 : 천조 BTU)

연료 형태	현재		예상치				연평균 변화율
	1996	2000	2005	2010	2015	2020	1996 -2020
석유	145.7	157.7	172.7	190.4	207.5	224.6	1.8
천연가스	82.2	90.1	111.3	130.8	153.8	177.5	3.3
석탄	92.8	97.7	107.1	116.0	124.8	138.3	1.7
원자력	24.1	24.5	24.9	25.2	23.6	21.7	-0.4
기타	30.7	32.7	38.3	41.9	45.6	49.7	2.1
계	375.5	402.7	454.3	504.2	555.1	611.8	2.1

이어서 2050년까지 세계 일차에너지 수요는 현재의 약 3배로 증가하고 일인당 수요는 약 200 GJ 정도가 될 전망이다.

그러나 기술 혁신의 성과가 높아서 2050년까지 에너지 효율이 현재보다 적어도 2배 이상 증가한다면, 일차 에너지 수요는 현재의 약 2배 정도로 증가 할 것이다.

또한 미래의 새로운 기술의 도입은 지금 개발하기에 너무 먼 거리에 있거나 개발하기에 너무 어려운 조건하에 있는-시베리아 북쪽과 대서양 심연의-개발되지 않은 유전들에서 추가로 석유 공급을 할 수 있을 것이다. 따라서 2050년까지 화석에너지 자원이 고갈될 가능성은 적다.

그렇다고 할지라도, 세계는 2020년 내지 2030년까지는 재래식 석유의 심각한 부족을 겪기 시작할 것으로 예상되며, 특히 석유 소비가 매년 2%씩 증가한다면-미 에너지부가 예측한대로-현존하는 공급량은 40년이 아니라 25년에서 30년 내에 사라질 수도 있다(Klare/김태유 · 허은녕 역 2002).

이에 따라 에너지 자원의 고갈에 대한 우려가 커지면서 기존 전통적인 에너지 자원과 생산 시스템의 불연속적인 변화가 활발히 전개될 것이다(Shell International, 2001). 아울러 국제 시장에서 화석 연료 가격의 휘발성 때문에 발전 회사와 송전 회사는 항상 변화하는 시장 조건에 적응하기가 어려워진다.

1) 출처 : US-DOE(1999), International Energy Outlook, 이 자료를 Klare, Michael/김태유 · 허은녕 역 (2002 : 73)에서 재인용함.

이러한 상황에서 원자력은 에너지 자원의 위기에 기술적으로 대처할 수 있는 유망한 에너지원으로 인정받을 수 있다. 원자력은 발전 가격에서 차지하는 연료비의 비중이 낮기 때문에 발전 사업자에게 비용의 안정성을 제공한다. 따라서 국제 시장에서 화석 연료의 가격이 경제적 수요 증가나 정치적인 이유로 상승할 경우에는 원자력의 가격 안정성과 공급 안정성 때문에 원자력에 대한 대중의 태도가 호의적으로 발전할 가능성이 있다.

특히 자국의 화석 연료 가용량이 제한적인 경우에는 이러한 국제 시장의 화석 연료 가격 상승은 원자력 이용 개발의 증진에 기회가 된다.

2. 지속 가능한 발전 개념의 확산 (기회 요인)

지구상에 존재하는 자연 자원의 유한성, 특히 화석 연료 자원의 유한성은 많은 사람들로 하여금 인류의 장래에 대하여 비관적인 견해를 갖게 하였다.

1972년 로마클럽의 연구 보고서인 「성장의 한계」에서는 급속한 경제 성장에 따른 환경 파괴와 자원 고갈 등으로 인해 인류의 성장은 앞으로 1세기 이내에 정지할 수 있음을 경고한 바 있다.[2]

지속 가능한 개발의 가장 핵심적인 목표는 다음 세대들이 활용 가능한 전체적인 자산 규모(자연 자산, 인공 자산)를 유지 내지는 증가시키는 것이다.

원자력의 개발은 에너지 생산을 위해 사용 가능한 천연 자원의 기반을 강화시키며 인공적 자본을 증가시킨다.

원자력은 에너지 밀도가 타에너지원에 비해서 상대적으로 매우 높기 때문에 원자력의 사용이 자연 자산, 특히 천연 자원의 소비를 절감하는 데 크게 기여할 수 있다.[3]

비순환 주기를 채택하는 현세대 원전의 경우에도, 우라늄으로부터 얻을 수 있는 질량당 에너지는 화석 혹은 재생 연료로부터 얻을 수 있는 질량당 에너지보다 10,000배 이상 많다(NEA, 2000b).

한편, 석유는 윤활유 · 플라스틱 · 인공 섬유를 포함한 다른 물질의 제조를 위한 원료로 사용된다. 미국 석유협회에 의하면 연간 4억 5,000만 배럴에 해당하는 미국에서 소비되는 모든 석유의 약 7%가 이러한 물질들의 생산에 사용된다(Klare/김태유 · 허은녕 역, 2002).

우라늄은 에너지 생산 이외에는 별로 사용되는 데가 없다. 우라늄을 이용한 전력 생산은 인류를 위해 가능한 에너지자원의 기반을 확충하였고, 선택의 다양성을 제공하였으며, 이를 통하여 수송 및 석유 화학 분야에서 유용한 탄화수소를 이용할 수 있게 하였다(NEA, 2000b).

따라서 화석 연료 자원의 비에너지 용도로의 사용을 지속시키기 위한 대안을 탐색하는 과정에서 화석 연료 자원의 에너지 부문 소비를 줄이는 방안이 중요하게 선택될 수 있다. 이 경우에 원자력의 단일 목적의 가치는 에너지 부문에 대한 화석 연료의 소비를 줄이는 유력한 대안으로 평가될 수 있다.

원자력 에너지 공급 안정성(강점)

현재 경제적 타당성이 입증된 우라늄 매장량은, 현재의 소비 속도(연간 약 5만 톤)를 감안하고 이를 천연 우라늄광으로부터 공급한다면, 약 40년 정도 유지가 가능할 것이다 (NEA, 2000b).

그러나 원자력은 화석 연료와 다르게 재활용의 장점을 가지기 때문에 에너지를 장기적으로 공급할 수 있다. 사용후 핵연료는 재처리를 통해 MOX 핵연료로 경수로에서의

2) 신의순(2001)에서 재인용함 (p. 13-14): Meadows, D. H. et al. (1972), The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of mankind, New York: Universe Books.

3) 천연 자원은 깨끗한 공기와 물, 광물과 에너지, 농경지와 토양, 다양한 조경과 황무지 등과 같이 매우 여러 가지 형태로 존재함.

사용이 가능하며, 이 경우 천연 우라늄의 이용률은 약 30% 정도 증가한다. 이러한 기술은 이미 개발 완료되어 유럽과 일본에서 상당 부분이 사용되고 있다.

더 나아가 고속증식로를 도입하여 비핵분열성 우라늄 자원을 플루토늄으로 전환하여 사용한다면, 사용후 핵연료를 직접 처분하는 경우보다 같은 양의 우라늄으로 60~70배 이상의 에너지 생산이 가능하다.

이러한 방식이 현실적으로 도입되면, 오늘날의 사용 수준으로 볼 때, 천연 우라늄은 3,000년 이상 동안 충분히 사용 가능하게 될 전망이다(IAEA/한원(연) 역, 1998).

다른 한편으로, 원자력은 에너지 밀도가 높은 장점을 지닌다. 에너지 밀도는 주어진 양의 에너지를 생산하는 데 사용되는 연료량으로 정의된다.[4]

1000MWe급의 발전소를 1년간 운전하기 위해서는 원자력의 경우에는 25톤($10m^3$)의 농축 우라늄, 석유의 경우에는 1천만 배럴, 석탄의 경우에는 230만 톤이 필요하다(Blumenthal & Lindeman, 1995). 따라서 원자력 에너지 시스템의 경우에 세라믹 형태의 핵연료를 매우 작은 부지에서 안정적이고 효율적으로 관리할 수 있다(NEA, 2000b).[5]

〈표 3〉 에너지원별 에너지 밀도(IAEA/KAERI 역, 1998)

에너지원	단위 전력 생산량 (kWh/kg)	1000 MWe 발전소 1년간 운전시 연료 소비량
석탄	3	2,600,000톤 : 기차 2,000대분(1,300톤/대)
석유	4	2,000,000톤 : 유조선 10척분
원자력	50,000 (재처리시 3,500,000까지 가능)	30톤 우라늄 : 원자로심($10m^3$)

〈표 4〉 에너지원별 소요 부지(IAEA/KAERI 역, 1998)

에너지원	1,000MWe 발전 설비용 소요 부지(km^2)
화석 연료 및 원자력	1~4
태양열 혹은 태양광 발전	20~50 (작은 도시 규모)
풍력	50~150
바이오매스(경작 면적)	4,000~6,000

이처럼 핵연료의 재순환성과 고에너지 밀도 특성 때문에 원자력은 어떠한 사태로 인해 공급이 중단되었을 때 이를 해결할 수 있는 충분한 시간을 제공함으로써 에너지 안보를 높인다.

이러한 장점 때문에 한국과 같은 자원 빈국의 경우에는 원자력의 개발과 사용후 핵연료의 재활용에 상당한 관심을 가지고 있다. 〈표 3〉은 에너지원별 에너지 밀도를 비교한 것이며, 〈표 4〉는 에너지원별 단위 설비당 요구되는 부지 면적을 비교한 것이다.[6]

지구 환경 친화적 에너지(강점)

원자력 에너지의 이용 개발 과정에서는 산성비, 도시 스모그 및 오존층 파괴를 야기하는 SOx · NOx 등의 가스와 그리고 분진 등이 거의 방출되지 않는다. 특히 핵연료 주기 전 과정에서 탄소 화합물은 무시할 만하다.

4) 에너지 밀도는 또한 환경 영향의 정도를 가늠하는 대강의 기준이 될 수 있음. 왜냐하면 에너지 밀도에 따라 연료 채취 과정, 수송 소요량, 환경 오염 물질 배출 및 폐기물의 양에 영향을 미치기 때문임(IAEA/KAERI 역, 1998).
5) 단위 전력 사용에 필요한 거대한 면적의 토지 사용 요건은 재생 에너지원에 대한 사회적 수용성에 부정적 효과를 줄 수 있음(NEA, 2002a).
6) 태양력과 풍력의 이용률은 20~40%로 고려함(IAEA/KAERI 역, 1998).

1GWe 원전 1기가 생산하는 발전량을 석탄 발전소로 대체하였을 경우 발생하는 탄소는 1.75백만 톤이며, 석유 발전소로 대체했을 경우 1.2백만 톤, 천연 가스 발전소로 대체할 경우 0.7백만 톤이 발생한다(NEA, 2000b).[7]

다시 말해서 현재 전 세계에서 가동중인 모든 원전을 가스 화력 발전으로 대체하면 연간 3억톤의 탄소가 추가로 발생하며 에너지 관련 탄소 배출량을 5 % 정도 증가시킨다.

더 나아가 원전을 현재의 화력 발전 구조, 즉 석탄 · 석유 · 가스 발전 비율로 대체하면 세계적으로 연간 에너지 관련 탄소 배출량이 약 8 % 증가하게 된다.

교토 의정서에 따라 기후변화협약 부속서(Annex) I에 속하는 국가들은 2008~2012년 기간 중에 온실 가스 배출을 1990년 기준으로 5.2 %를 감소시켜야 한다. 원자력이 없는 상황에서 이들 국가들이 교토의정서를 준수하기는 매우 어렵다.

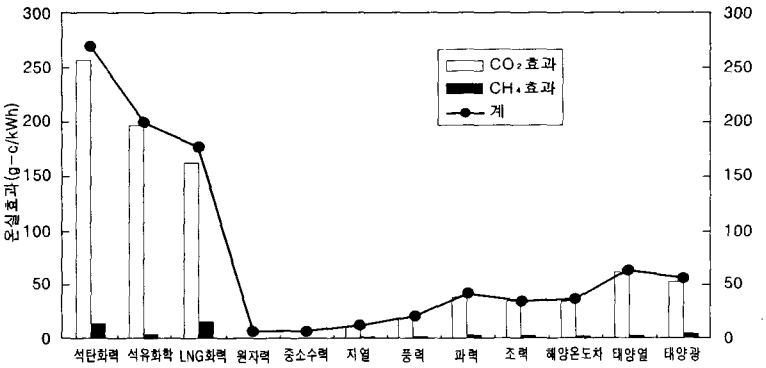
미국 에너지부 산하 에너지정보국에 따르면, 교토 의정서의 지구 온난화 목표를 만족시키기 위해 이산화탄소 배출량 1톤당 250달러의 벌금을 부가하게 된다면 미국의 가스 발전소에서 생산되는 전력은 원자력발전소보다 2배나 비싸지게 될 것으로 전망하고 있다(Wolfe, 2001). 〈표 5〉와 〈그림 1〉은 원자력과 다른 에너지원과의 온실 효과를 비교한 것이다.

따라서 비록 기후 변화에 대한 원자력의 실질적 효과에 대해서 논란이 있음에도 불구하고 기후 변화와 산성비 등 지구 환경 문제에 대처하는 데 있어서 원자력이 투자 효율적으로 가장 대표적인 방안이며 결국

〈표 5〉 발전원별 온실 효과 영향(내용 연수 30년) (内山洋司 등, 1994)

(단위 : g-C/kWh)

발전 플랜트		화력			원자력	중소수력	지열	풍력	파력	조류	해양온도차	태양열	태양광
		석탄	석유	LNG									
설비 용량 (MW)		1,000	1,000	1,000	1,000	10	10	0.1	1	3	2.5	5	1
이용률(%)		75	75	75	75	45	60	35	25	40	80	30	15
온실효과	CO_2 효과 연소	246.32	188.42	128.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CO_2 효과 설비	0.63	0.55	0.50	0.55	4.53	2.37	13.03	22.52	17.82	24.69	50.05	40.64
	CO_2 효과 운용	9.80	7.33	32.67	6.26	0.93	8.49	6.39	17.18	15.33	10.08	9.92	11.78
	CO_2 효과 소계	256.74	196.30	162.03	6.81	5.46	10.86	19.42	39.70	33.15	34.77	59.97	52.42
CH_4 효과		12.70	3.85	15.76	0.45	0.14	0.51	0.83	1.99	1.61	1.21	1.81	2.50
계		269.44	200.15	177.79	7.26	5.60	11.37	20.25	41.46	34.76	35.98	61.78	54.92
원자력 기준비		37.1	27.6	24.5	1.0	0.8	1.6	2.8	5.7	4.8	5.0	8.5	7.6



〈그림 1〉 발전원별 온실 효과

7) 실제 수치는 발전 용량, 화석연료 발전소의 효율, 연료 특성 등에 따라 달라질 수 있음 (NEA, 2000b).

원자력은 지구 환경 문제의 보다 근본적인 해결책이 마련되기 전까지 이들 문제의 출현을 지연시키는 효과적인 수단이 될 수 있는 것으로 평가된다.

원자력 이용 개발의 사회적 현안 (약점)

WEC와 IIASA의 1995년 연구에서 원자력의 성장을 제한하는 요소가 다음과 같이 언급되고 있다.

"현재 원자력이 직면하고 있는 문제들이 어떻게 그리고 어떤 기술에 의해 해결될 수 있는가는 아직 확실하지 않다. 원자력의 미래는 안전, 폐기물 처분, 핵확산 등의 문제들이 어떻게 해결될 수 있는가, 그리고 온실 효과에 대한 논쟁이 이산화탄소 배출에서의 원자력의 장점을 얼마나 부각시키는가에 달려있다. 결론적으로, 2020년 이후 원자력의 미래는 1990년~2050년 사이에 5배로 증가하거나 20 % 감소하는 식으로 매우 다양하게 나타날 수 있다." (IAEA/KAERI 역, 1998: 23)

IPCC의 1996년 〈기술보고서 1〉에는 비화석 연료로의 전환에 의한 온실 가스 배출을 줄이는 방안을 검토하면서 다음과 같이 언급하고 있다.

"만약 원자로 안전, 방사성 폐기물 수송 및 처분 그리고 핵확산 등에 대한 우려가 해소될 수 있다면, 세계의 여러 곳에서 원자력은 기저부하용 전원으로서 화석 연료 발전원을 대체할 수 있을 것이다." (IAEA/KAERI 역, 1998: 23)

또한 WEC는 최근의 「Message for 1997」에서 다음과 같이 주장했다.

"원자력이 에너지 공급에서 보다 많은 역할을 가능케 하는 조건은 높은 안전성을 확보하고 우수한 운전 실적을 달성하는 것, 그리고 핵폐기물의 안전한 취급을 실증하는 것을 의미한다." (IAEA/KAERI역, 1998: 23)

1. 원전의 안전성

TMI 사고 이후의 안전성 강화 노력은 원전의 설계, 건설 공사 및 인허가 등에서 안전성의 개선을 요구함으로써 결국 시스템의 복잡성 증가 및 공기 연장 등으로 자본 집약적인 원전 시스템의 경제적 경쟁력을 약화시켰다.

이것은 대중이 우려하고 있는 원전의 사고 위험에 더하여 자본 시장에서 원자력 산업의 투자 위험이 높게 인식되는 결과를 낳았고 이어서 세계적인 원자력 산업 발전의 침체로 이어졌다.

2. 방사성 폐기물 관리

방사성 폐기물 중에서 보다 관심을 끄는 것은 고준위 폐기물이다. 저준위 폐기물들의 방사능은 약 300년이 지나면 소멸되지만 고준위 폐기물인 사용후 핵연료의 경우에는 소멸되는 데 수천 또는 수십만 년 이상이 걸린다(Wolfe, 2001).

사용후 핵연료에 1% 정도 존재하는 플루토늄은 10만년 후 전체 사용후 핵연료 방사능의 90%를 차지한다. 재처리 과정에서 플루토늄의 99.8 %를 빼낼 수 있기 때문에, 방사성 폐기물 관리 관점에서 보면, 재처리는 플루토늄을 분리해내고 이후에 유리 고화 등에 의한 폐기물 처리 방법을 통해 수천년 동안 저장될 폐기물의 양을 줄이는 데 유용하다.

재처리시 장반감기를 가진 고체의 양은 현재 핵연료 1톤당 약 $1m^3$을 차지하고 있다. 만일 재처리를 하지 않고 저장할 경우 약 $2m^3$의 폐기물이 발생하게 된다. 현재 프랑스의 COGEMA는 핵연료 1톤당 고체 폐기물을 $0.3\sim0.5m^3$으로 줄이려고 노력하고 있다(신형기, 2002).

3. 핵확산성

전 세계의 모든 원자력 개발 계획은 원자력 시설의 안전성과 방사성 폐기물 관리의 신뢰성을 확보해야만 하는 것과 마찬가지로 핵확산의

위협을 제공하지 말아야만 한다.

20세기 말에 세계적으로 고농축 우라늄과 플루토늄의 총량은 약 300톤으로 파악되었다. 이 양은 미국의 원자로를 20년 동안 가동시킬 수도 있는 반면에 초보적인 핵무기를 수십만 개 만들 수 있다(Christensen et al., 2000).

평화적 이용과 군사적 악용과의 경계를 명확히 구분할 수 있는 기술적 수단이 현재까지 개발되지 못하고 있는 상황에서, 경수로 핵연료 주기의 경우 정상적인 운전 과정에 포함된 농축과 재처리 과정에서는 핵무기급 물질인 우라늄-235(U-235)와 플루토늄-239(Pu-239)가 각각 얻어질 수 있다.

우라늄-235의 농축도가 90% 이상이 되면 핵무기급으로 분류된다. 평화적인 원전용으로 농축도 3~5%의 저농축 우라늄을 생산하기 위한 기술은, 이론적으로는 핵무기급 고농축 우라늄 생산에 이용될 수 있다.

우라늄 농축은 동일한 화학적 성질의 상이한 핵종을 분리해내는 복잡한 물리적 과정을 필요로 한다. 비록 이 과정에서 기술적으로 매우 어려운 문제를 해결해야 하며 동시에 많은 비용이 필요하지만, 상용 기술 능력을 군사적으로 전용하는 것은 전혀 불가능한 문제는 아니다.

원전의 상용 운전 과정에서 생산되는 플루토늄의 품질은 무기용으로 직접 사용되기는 어렵다. 그러나 상당한 경제적 손실을 감수한다면, 원자로 내에서 우라늄-238의 연소도를 조절함으로써 순도를 높이는 것이 가능하다.

1000MWe급의 경수로는 그 운전 과정에서 약 200~250kg의 저품위(reactor-grade) 플루토늄이 생성되며 그 양은 30 내지 40기의 핵무기를 제조하는 데 사용될 수 있다 (Holdren, 1989).

원자력 에너지 시스템의 비용 구조 (약점)

1. 기존 원전의 경쟁력

기술 개발과 함께 시장의 경쟁 상황이 산업의 자생력을 높이는 데 기여한다는 것이 경험적으로 밝혀지면서 세계적으로 전기 시장에서는 경쟁이 더욱 심화되고 있다.

전기 사업은 이제 더 이상 국가 기간 산업으로서 전략적으로 다루어지는 것이 아니라 일반 상품(kWh)과 상용 서비스를 판매하는 사업으로 취급되고 있다.

보호 독점 시장 구조에 비해서 시장 경쟁의 증가는, 즉 전력 시장 자유화는 산업 구조의 인수 합병과 설비 용량의 확대 및 운전 인허가 연장 등을 촉진하면서 일반적으로 발전 비용을 줄이는 데 기여하고 있다.

미국에서 원전의 평균 생산 비용은 1990년에 1.83 cents/kWh, 그리고 2000년에는 1.74 cents/kWh를 기록했다. 프랑스에서도 1998년과 2000년 사이에 발전 비용이 7 % 하락하였다. 이러한 발전 비용 하락 추세는 계속될 전망이다.

그러나 모든 원전의 발전 비용이 줄어들고 있는 것은 아니다. 미국의 경우 약 2/3의 원전은 2cents/kWh 이하의 발전 비용은 기록하고 있으나 나머지의 발전 비용은 6~13cents/kWh에 이르고 있다. 영국에서 브리티시에너지의 사유화된 8기의 발전소는 경쟁적인 가격으로(평균 약 3cents/kWh) 전기를 판매하고 있으나 BNFL에 속한 마그녹스 발전소는 여전히 약 5cents/kWh의 비용으로 전기를 생산하고 있다.

원전이 경쟁력을 갖추게 된 것은 지난 10년간 이용률과 운전 비용에서 이룩한 성과 덕분이다. 세계적으로 원전 이용률은 평균 10% 이상(1990년 약 73%에서 2001년 84%) 증가하였으며 이는 33 GWe의 신규원전을 도입한 효과와 같다. 미국의 경우 1998년 80%의 이용률이, 2001년에는 89.8%를 기록하였다. 독일 · 스페인 · 핀란드 · 브라질 · 한국 및 네덜란드에서는 2001년에 평균 90%를 초과하는 이용률을 달성하였다 (IAEA, 2002).

이러한 원전의 운영 능력 향상은 합리적인 원자력 규제 체제를 가져

올 뿐만 아니라 원전의 신뢰성을 제고하는 데에도 크게 기여하고 있다. 특히 원전의 전반적인 운영 실적 향상은 발전 원가 저감 등 경제성 향상을 가져와 원전의 안전성과 경제성이 서로 양립할 수 있음을 보여주고 있다(최양우, 2002).

아울러 원전의 이용률 향상은 원전 수명 연장에 대한 관심을 증가시키게 되었다. 그 결과 미국에서는 10기의 원전이 60년까지 수명 연장 허가를 받았고, 운전중 원전의 40%가 추가로 수명 연장을 추진하고 있으며 궁극적으로 미국원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)는 수명 연장을 꾀하는 원전이 85%에 달할 것으로 전망하고 있다. 또한 러시아에서도 2001년에 노보보로네츠 3&4호기의 15년간 수명 연장을 결정했다(IAEA, 2002).

이용률 증가는 또한 출력 격상을 일으키게 하고 있다. 2001년에 출력이 증강된 규모는 북미에서 510MWe, 서유럽에서 180MWe, 전 세계적으로 약 740 MWe 이다.

NRC는 향후 5년간 출력 격상을 통해서 약 1600MWe의 가치를 창출할 것으로 기대하고 있다.

그러나 이용률 향상과 수명 연장 등 운영능력의 향상만으로는 경쟁력을 근본적으로 해결하지 못한다. 보다 적극적으로 자유 시장에서 투자를 유인할 수 있도록 자본 비용의 비율이 높은 원전의 비용 구조 개선을 위한 기술 혁신 노력을 기울여야 한다.

2. 원전의 투자 위험 비용 구조

에너지 시스템의 총비용은 모든 자본 비용과 한계 비용을 합쳐서 계산된다. 원전의 경우 총비용에서 자본 비용은 원전의 설계 · 건설 비용이며, 한계 비용은 연료비 및 운전 유지비를 포함한다.[8]

원자력 시스템은 높은 자본 비용과 낮은 한계 생산 비용으로 특징지어진다. 원전은 일반적으로 대규모 발전원이며 비용도 수십억 달러에 이른다.

IEA/NEA의 발전 비용 추정에 관한 연구에서 발췌한 〈표 6〉에 따르면,[9] 5 %의 할인율하에서 건설중 이자를 포함하는 자본 비용이 총원자력 발전 비용에서 차지하는 비율은 약 55~60 %이며, 운전 유지 비용이 20~25 %, 연료 비용이 약 15~20 %를 차지한다.

〈표 7〉에서 보면, 현재의 기술로 설계되는 원자력발전소의 경우, 해체 비용 및 건설 중 이자를 포함하는 투자 비용은 1700~3100 $/kWe으로 추정된다. 이는 1 GWe 규모의 원전 건설에 소요되는 총투자가 평균 20억 달러를 초과한다는 것을 의미한다.

석탄 발전소의 경우 자본비는 일반적으로 1000~2500 $/kWe이며, 가스 발전소의 경우 이보다도 더욱 낮아서 450~900 $/kWe이다. 또한 가스 발전소의 경우 건설 기간도 5~7년이 소요되는 원자력 발전소에 비해 짧아서 1.5~3년이며, 석탄 발전소는 약 3~5년 정도이다. 석탄 발전소의 발전 단가는 자본비 약 35%, 운전 유지 비용 20%, 연료비 45%로 구성된다. 또한 가스 발전소는 자본비 약 20%, 운전 유지 비용 10%, 연료비 70%로 구성된다(NEA, 2002b; IAEA, 2002). 즉 신규 원전은 석탄에 비해서는 약 2배, 가스에 대해서는 약 4배의 높은 자본 비용이 든다.

신규 원전은 화석 연료, 재생 에너지, 수요 관리를 포함하는 여러 가지의 대안들과 전력 생산 총비용 측면에서 경쟁해야 할 것이다.

8) 원전의 안전 및 해체 관련 비용은 자본 비용에 포함되어 있으며, 수명 기간 동안 원전의 운영자에 의해 회수된 할인되지 않은 해체 비용은 초기 자본 비용의 10%~20%로 고려됨(NEA, 2000b)

9) 많은 OECD 회원국 및 비회원국들에서는 기존의 원자력발전소가 5%의 할인율하에서는 다른 발전원에 비해 상당히 경쟁력이 있음. 그러나 전력 시장이 경쟁 체제에 있거나 민영화되었을 경우 10%의 할인율을 적용하는 것이 타당할 것임(NEA, 2000b).

〈표 6〉 국가별 원자력 발전 비용 현황 (NEA, 2000b: 30)

국가	할인율	자본 비용 (%)	운전 유지 비용(%)	연료 비용 (%)	총비용 (cent/kWh)
캐나다	5%	67	24	9	2.5
	10%	79	15	6	4.0
핀란드	5%	59	21	20	3.7
	10%	73	14	13	5.6
프랑스	5%	54	21	25	3.2
	10%	70	14	16	4.9
일본	5%	43	29	27	5.7
	10%	60	21	19	8.0
한국	5%	55	31	14	3.1
	10%	71	20	9	4.8
스페인	5%	54	20	26	4.1
	10%	70	13	17	6.4
미국	5%	55	27	19	3.3
	10%	68	19	13	4.6

(표 7) 발전원별 자본 비용, 발전 비용 및 건설 기간(IAEA, 2002)[10]

	kW(e) 설비 비용 ($)	1000 MWe 설비 총비용 (10억$)	건설 기간 (년)	플랜트 규모 (MWe)	턴키 비용 (10억$)	발전비용 costs (c/kWh)
Nuclear LWR	2100~3100	2.1~3.1	6~8	600~1750	1.5~4.2	4.9~6.8
Nuclear best practice	1700~2100	1.7~2.1	4~6	800~1000	1.3~2.1	4.0~4.7
Coal, pulverized, ESP	1000~1300	1.0~1.3	3~5	400~1000	0.5~1.3	3.2~4.5
Coal, FGD, ESP, SCR	1300~2500	1.3~2.5	4~5	400~1000	0.6~2.5	3.6~6.3
Natural gas CCGT	450~900	0.45~0.9	1.5~3	250~750	02.~0.6	2.6~4.8
Wind farm	900~1900	0.9~1.9	0.4	20~100	0.03~0.12	3.5~9.2

원전의 자본 비용은 설계, 기자재 공급, 건설 방법, 노동력 및 경영 능력, 품질 보증, 규제 및 승인 절차에 따라 달라진다. 차세대 원전의 설계 및 공급 회사들은 기존의 원전 비용보다 25% 이상을 절감시키는 목표를 추진중에 있다(NEA, 2002b; IAEA, 2002).

자본 비용과 연결되어 신규 원전의 투자 위험은 세 가지가 있다.

첫째, 건설 기간 변동 위험(completion risk)으로서 건설이 예정대로 완료되지 못해서 투자 회수가 늦어질 위험이다.

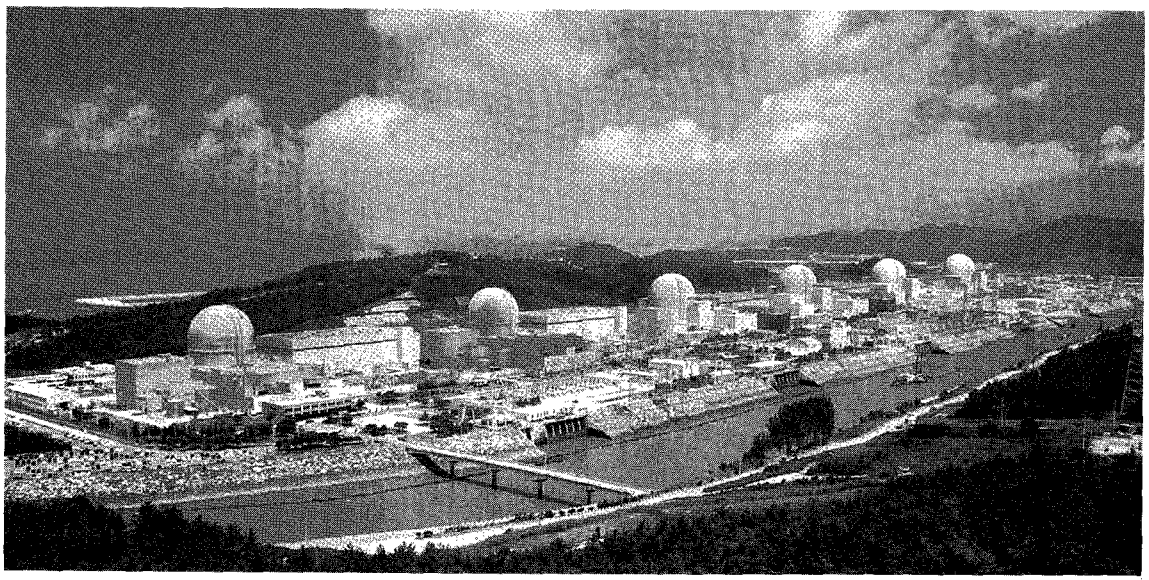
둘째는 현재의 규제 요건들이 변화될 위험(regulatory risk)이며, 셋째는 정치적 위험(political risk)으로서 원전의 도입/확장에 우호적인 정부의 정책이 바뀔 가능성에 따른 위험이다(IAEA, 2002).

OECD 투자 규칙을 보면 이미 원전과 관련된 개도국의 수출에 대해서 대출 이자에 대한 1% 추가 부담을 적용하고 있다. 높은 자본 비용과 긴 건설 기간 때문에 원전 비용은 이자율에 매우 민감하다.[11]

원전에 대한 미래의 불확실성은 미래의 시장이 이러한 원전의 위험

10) ESP = electrostatic precipitator, FGD = flue gas desulphurization; SCR = selective catalytic reduction; CCGT combined cycle gas turbine; GJ = gigajoule; kWe 설비당 비용은 건설 중 이자를 포함함. 발전 비용은 10% 할인율, 계획 기간 20 년과 연료 비용 (석탄: $1/GJ - $2/GJ, 천연가스: $1/GJ)을 고려하였음. 풍력 발전 비용은 평균 풍속과 이용률에 좌우될 수 있음.

11) 한편, 석탄 발전의 자본 비용은 공해 방지 정책에 크게 의존함. 기후 변화를 경감시키기 위한 국제적인 조치의 하나로 탄소세가 도입될 경우 화석 연료, 특히 석탄과 석유를 사용하는 발전소의 자본 비용이 증가할 수 있음. 가스 비용의 경우에는 연료 가격에 매우 민감함 (IAEA, 2002).



영광 1~6호기

을 어느 정도 반영할 것인지에 달려 있다.

따라서 자유 시장 경쟁 체제하에서 원자력 에너지 산업이 성장하기 위해서는 원자력 발전의 자본비와 운영비가 현재 원자력보다 값싸고 풍부한 것으로 평가되고 있는 천연가스 발전보다 더욱 낮아져야 한다. 특히 원전의 자본 비용이 대폭적으로 낮춰져야 한다(INSC/이창건 역, 1996).

결론 및 시사점

미국 에너지부는 상용 원전 산업이 미래에 자생력을 갖추고 발전하는 데에는 다름의 요인들이 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 다시 말해서 전력 수요 증가, 화석 연료의 가용성과 비용, 온실 가스 방출에 대한 국제 조약에 대한 대응 등의 외부 환경이 원자력에 유리하게 조성되고, 원자력계 내부적으로는 대체 에너지 자원의 개발에 비하여 안전성과 핵비확산 문제 해결을 포함한 세계 차원의 기술 혁신이 이루어져야 한다고 지적하였다(Christensen et al., 2000).

〈표 8〉 원자력 이용 개발의 미래 외부 환경과 내부 능력

	요소	특징	강점	약점	대책
기회	전력화	총전력 수요 증대	전기 전용 대량 생산 기저 부하 안전 공급	전반적인 원자력 현안에 대한 사회 수용성 낮음	원자력 현안 개선 사회 수용성 증진 안전성, 폐기물 관리

본고에서는 이들 요인 외에, 미래 사회 변화, 즉 정보 통신 사회 확산, 과학 기술 발전 가속화, 도시화 증가, 소비 행태 변화 및 시장 경쟁 심화 등을 포함시켜서 21세기 전반의 원자력 이용 개발을 위한 전략 환경을 전망하고 이를 〈표 8〉과 같이 정리하였다.