

원자력 : 지속적인 경쟁력은 어떠한가?*

Nuclear Power : How competitive down the line?

세계는 지금 2종류의 에너지 관련 위협에 직면하고 있다

적절한 가격의 에너지를 충분하고 안정적으로 공급 받지 못하는 위협과 그것을 사용함에 따른 환경 손상 위협이다.

높이 치솟는 에너지 가격과 최근의 지정학적 사건을 통해서 우리는 경제 성장과 인간 개발에서 충분한 양의 에너지가 차지하는 필연적인 역할과 글로벌 에너지 시스템의 공급 장애에 대한 취약성을 보게 된다.

에너지 공급의 안전 보장 조치가 다시 한번 국제 정책의 상위 의제로 부상했다. 여전히 현 에너지 공급 상태는 심각하고 또 돌이킬 수 없는 환경 손상의 위협이 된다.

에너지 보안과 환경 보호 목표를 조화롭게 달성하기 위해서는

강력하고 협조적인 정부 조치와 공중의 지원이 필요하다.

이러한 우려로 인하여 원자력의 역할에 대한 논의가 재개되었다. 지난 2년 간 몇몇 정부는 미래의 에너지 판도(版圖)에 원자력의 역할 증대를 옹호하는 성명을 발표했고, 또 안전하고 비용 효과적인 신세대 원자로 건설에 구체적인 조치를 취한 국가도 있다.

원자력은 향후 25년간 에너지 효율 개선 및 쇄신과 함께 화석연료 발전에 과다하게 의존함에 따른 여러 가지 우려, 특히 가스 수입에의 의존도 증가 및 기후 변화에 대한 우려 해소에 도움이 될 수 있을 것이다.

원자력은 저탄소 전기원이다. 석탄 연소 발전을 대체하여 1GW 용량의 원자력 발전 플랜트를 가동시키는 경우에는 매년 5백6십만

톤의 CO₂ 배출을 방지할 수 있다. 원자력 발전 플랜트는 이산화 황, 산화질소, 또는 분진과 같은 어떠한 공중 부유 오염 물질도 배출하지 않는다.

원자력 발전 플랜트는 수입 가스 의존도를 감소시키는 데 도움이 될 수 있고 가스와는 달리, 우라늄 자원은 전 세계에 널리 분포되어 있다.

현 정책하에서는 모든 OECD (경제협력개발기구) 지역 및 주요 개발 도상 국가의 가스 수입 의존도는 2030년까지 계속 증가할 것인데, 이 증가는 주로 발전 부문에 의한 것이다.

원자력 발전 플랜트는 비교적 안정된 가격으로 전기를 생산하는데, 그 이유는 총생산비 중에서 연료비가 차지하는 비율이 작기 때문이다 즉 원(原) 우라늄 연료는

* Fatih Birol/IAEA Bulletin Vol. 48-2, 번역 게재 : 전력정보센터(EPIC) 해외저널

총전기 생산비의 약 5%를 차지하고, 처리 후의 우라늄 연료는 총생산비의 약 15%이다. 가스 연소 발전 플랜트의 경우, 연료비는 총생산비의 약 75%이다.

원자력의 전망

국제에너지기구(IAEA)의 간행물인 세계 에너지 전망 2006호(World Energy Outlook 2006)에는 2가지 시나리오가 소개되어 있다.

기준 시나리오(Reference Scenario)는 현 정부 정책은 거의 그대로 변경되지 않고 그 정책은 현 프로그램을 그대로 실시하여 원자력을 확대시키거나 또는 폐쇄시키는 것으로 가정(假定)하는 것이다.

원자력 발전 목표는 비현실적인 판단일 수도 있겠으나 달성되지 않는다고 가정한다. 많은 국가들이 수립한 목표의 기초가 되는 거시경제적, 기술적 및 재정적 가정은 간행물 전망(Outlook)에서 사용한 것과는 다르다.

대체 정책 시나리오(Alternative Policy Scenario)는 원자력의 역할 제고 조치를 포함하여 에너지 공급 보안 및 지구 온난화에 대처하는 정책을 추가로 수립한다고 가정한다.

이미 원전 플랜트를 소유하고 있는 국가의 정부는 새로운 원자로 건설이나 기존 원자로의 수명 연장을 지원한다고 추정된다.

그리고 폐쇄 정책을 실시하는 모든 국가에서는 CO₂배출 억제, 에너지 공급 보안 우려 대처, 새로운 투자 필요성 연기 등의 목적으로 당초의 계획보다 늦게 원자로 가동을 중단시킬 것으로 예상된다.

간행물 전망에 설정된 기준 시나리오에서는 세계의 원자력 발전 용량은 현재의 416GW에서 2030년에는 416GW로, 그리고 대체 정책 시나리오에서는 이것이 516GW로 증가하는 것으로 각각 추산한다.

기준 시나리오에서는 세계의 원자력 발전량은 2005년의 2789 TWh에서 2030년에는 3304 TWh로 증가한다고 추산한다. 이것의 연평균 성장률이 0.7%임에 반하여, 매년 총발전량 증가율은 2.5%이다.

설치된 설비의 발전 용량은 368GW에서 416GW로 증가한다. 원자력의 용량 계수(capacity factor)는 시간이 경과함에 따라, 주로 세계 평균 밑의 국가에서 개선될 것으로 예상된다. 전반적으로, 세계의 평균 용량 계수는 2005년의 85%에서 2030년에 91%로 증가할 것이다.

설치된 용량이 가장 크게 증가하는 국가는 중국, 일본, 인도, 미국, 러시아 및 한국이라고 추정된다.

OECD 유럽의 원전 용량은 131GW에서 74GW로 감소된다. 독일, 스웨덴 및 벨기에의 원전 폐쇄는 35GW를 차지한다. 이들 3개

국가의 모든 원전은 2030년이 되기 전에 폐쇄될 것으로 추정된다.

세계 발전량에서 원자력 발전의 점유율은 15%에서 10%로 떨어진 다. 원전 점유율이 가장 극적으로 감소하는 지역은 OECD 유럽이고, 여기에서는 2005년의 29%에서 2030년에 12%로 줄어든다.

대체 정책 시나리오에서는, 세계의 총원자력 발전량이 2030년에 4,106TWh에 도달함으로써, 연평균 1.6%로 성장한다고 추정한다.

세계 총발전량에서 원자력 발전의 점유율은 현재의 15%에서 약간 감소하여, 전(全) 추정 기간 동안에 약 14%가 증가한다. 설치된 원자력 발전 용량은 2030년에 519GW에 도달한다.

이들 2가지 시나리오의 가정 큰 차이는 2020년 이후에 나타나는 데, 그 이유는 원자력 발전 플랜트의 리드 타임(lead time)이 길기 때문이다.

플랜트 폐쇄를 상쇄하기에 충분치 못한 것으로 추정되는 OECD 유럽을 제외하고, 모든 중요 지역에서 설치된 용량은 증가한다.

유럽의 경쟁 시장에서 이 그림을 변경시키기 위해서는 CO₂ 배출량을 감소시키겠다는 장기적 각오(覺悟)에서 발생하는 강력한 시장 신호가 필요한 것 같다.

2006년 중반 현재, 2012년 이후의 CO₂ 배출량 축소에 대한 어떠한 분명한 목표도 수립되어 있지 않다.

폐쇄 정책은 그대로 유지될 것으로 추정되지만 이것은 10년 정도 지연될 것이다. 이를 기초로, 독일은 2030년까지 원자로 1기를 존속시키는 반면에 벨기에와 스웨덴의 원자로는 2030년에도 여전히 가동될 것이다. 영국에서는 교체됨이 없이 오직 1기만이 남아 있을 것이다.

원자력 발전 용량이 가장 크게 증가하는 국가는 중국, 미국, 일본, 한국, 인도 및 러시아라고 예상된다. 2030년이 되면 이들 국가가 세계 총원자력 발전 용량의 2/3를 차지할 것이다.

원자력 발전 용량이 가장 크게 증가하는 국가는 중국, 미국, 일본, 한국, 인도 및 러시아라고 예상된다. 2030년이 되면 이들 6개 국가가 세계 총원자력 발전 용량의 2/3를 차지할 것으로 추정되는데, 현재는 총용량의 1/2을 약간 상회한다.

원자력 발전 용량계수(Capacity Factor)는 기준 시나리오의 그것과 동일하다.

총발전량에서 원자력 발전량의 점유율이 가장 큰 지역은 태평양 OECD로, 그 지역의 점유율은 현재의 25%에서 2030년에 41%로 증가할 것이다.

북미 OECD에서는 원자력의 현 점유율이 그대로 유지될 것이고, 유럽 OECD의 원자력 발전 점유율은 2030년까지 20%로 떨어질 것이다. 이 점유율은 기준 시나리오의 그것보다 더 높지만 현재의 점

유율 29%보다는 여전히 낮다.

과도(過渡) 경제에서는 원자력 점유율은 17%에서 23%로 상승한다. 중국과 인도의 경우, 이들 점유율은 현재의 2%와 3%에서 2030년에는 각각 6%와 9%에 도달한다.

경쟁시장에서의 원자력 경제

성숙된 경쟁 기술과 비교되는 새로운 원전 플랜트의 경제적 도대는, 가스 연소 복합 발전 가스 터빈(CCGT), 증기 석탄, 통합 가스화 복합 발전 플랜트(IGCC), 그리고 육상 풍력 터빈인가?

비용은 다음 10내지 15년의 기대를 기초로 추정된 것이다. 풍력 단지화 IGCC 발전 플랜트의 건설비는 오늘날보다 약 10내지 15%가 더 낮다. 천연 가스 가격은 2030년까지 MBtu 당 6내지 7\$ 범위에 머무를 것으로 추정되며, 석탄 가격은 OECD로 수입되는 석탄에 대해서는 국제 시장 가격에 준하겠지만(2015년 톤당 55\$ 및 2030년 톤당 60\$), 미국과 캐나다를 비롯한 몇몇 국가는 좀 더 저렴한 현지 석탄을 사용할 수 있으므로 석탄 연소 발전의 경쟁력이 커질 것이다.

원전 플랜트의 경우에 건설비의 범위가 넓은 것은 2015년에 상업 운전을 시작하는 원자로의 비용 추정이 불확실하다는 것을 반영하는 것이다.

이들 건설비는 원전을 기존 발

전 단지에 건설하는 경우의 것인데, OECD 국가의 신 원자로 대부분은 적어도 다음 10내지 15년 동안에는 기존 단지에 건설될 것 같다.

그들이 운영 회사의 주주이거나 또는 외부 투자자이거나 간에, 발전 플랜트의 투자자가 부담하는 위험 범위에 따라 그들은 서로 다른 투자 수익을 모색할 것이다. 다음은 이를 분석한 2가지 경우다:

▲ 투자 환경의 위험성이 온건한 할인율이 낮은 경우로, 이 경우에는 건설 및 운영 위험이 장기간 전력 구매 계약과 같은 방법을 통해서, 전기 사용자, 외부 투자자, 플랜트 매각자 및 플랜트 구매자 사이에 분산된다.

▲ 투자 도대가 좀 더 위험성이 큰 할인율이 높은 경우로, 이 경우에는 건설 및 운영 위험성의 많은 부분을 플랜트 구매자, 자본 투자자 및 대여자가 부담한다.

간행물 전망(Outlook)은 할인율이 낮은 경우의 주(主)기저 부하 대체 플랜트와 원전 플랜트의 발전비(發電費)를 비교하였다.

건설비가 높다는 가정 하에서는(2500\$/kW), 원전 플랜트가 가스 가격이 MBtu당 약 6\$ (이것은 2005년의 평균 OECD 가격과 가깝고 또 전(全) 추산 기간 동안 MBtu당 약 6내지 7\$이라고 가정한 범위 내에 드는 수치다)인 CCGT 플랜트와 경쟁할 수 있으나, 톤당 55\$인 석탄의 그것보다는 더 비싸다. 건설비가 이보다 더

낮다는 가정 하에서는 (2000 \$/kW), 원자력이 석탄과도 경쟁할 수 있다.

전망(Outlook)은 또한 할인율이 높다는 가정 하의 발전단가를 검토했다. 건설비가 높다고 추산하는 경우와 낮다고 추산하는 경우의 원자력 발전 단가는 각각 kWh 당 5.7cent와 4.9cent이다.

할인율이 높은 경우, 원자력 및 풍력 발전과 같은 자본 집약적 기술은 CCGT나 석탄 플랜트와 경쟁할 수 없으며 이때의 원자력 발전 단가는 kWh당 6.8cent와 8.1cent 사이가 된다.

위에 제시한 비용 추산에 사용된 파라미터의 크기에는 불확실한 요소가 적지 않다.

원자력의 경쟁력에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 투자비, 할인율 및 플랜트의 경제적 수명이다. 가스와 석탄 가격이 증가하거나 또는 탄소값을 적용하면 대체 에너지에 대한 원자력의 경쟁력 요소가 개선되며, 또 플랜트 위치와 크기 역시 비용에 영향을 미친다.

원전의 경우 발전비에서 차지하는 연료비의 비중은 크지 않다. 우라늄, 가스 및 석탄 가격이 50% 증가하면(기본 가정과 비교하여), 원자력 발전비는 약 3%, 석탄 발전비는 21%, 그리고 CCTG 발전비는 38%가 각각 증가하므로, 연료 가격의 위험에 대한 원자력 발전의 탄력성이 크다는 것을 알 수 있다.

할인율이 낮은 경우에, 원자력, 석탄 및 가스 연소 발전비에 탄소 가격이 미치는 영향은 어떠한가?

CO₂의 톤당 가격이 약 10\$가 되면 건설비가 지금보다 더 높다는 가정 하에서도 원자력 발전은 석탄 연소 발전과 경쟁할 수 있다.

이 낮은 탄소 가격은, 원자력이 비용 효과적인 위험 완화 옵션(선택 대상)이 될 수 있음을 암시하는 것이다.

EU의 배출권 거래 제도(ETS)의 평균 탄소 가격은 때때로 현재보다 훨씬 더 높았다. 2005년의 평균 CO₂ 가격은 톤당 18.3 $\text{\textcircled{1}}$ (약 23\$)였는데, 이것이 2006년에는 가격이 붕괴된 4월 말까지는 22.9 $\text{\textcircled{1}}$ (약 33\$)로 상승했다. 2006년 4월의 가격 붕괴시부터 2006년 8월 말까지 CO₂ 가격은 평균 15.5 $\text{\textcircled{1}}$ (약 19\$)였다.

할인율이 높은 경우에는 탄소 가격이 10내지 25\$가 되면 원자력 발전은 자본 비용이 더 낮다는 가정 및 더 높다는 가정에서도 석탄 연소 발전과 경쟁할 수 있으며 15내지 50\$가 되면 가스 연소 발전 플랜트와도 경쟁이 가능하다

원자력 발전은 가스 연소 CCGT와 석탄 연소 플랜트와 같은 대체 기저 부하 화석 연료 기술의 경우보다 훨씬 더 자본 집약적이다.

원자력 발전비의 3가지 주요 구성 요소 - 자본, 연료, 및 운영과 정비 - 가운데 자본 비용 요소가 총비용의 대략 3/4을 차지하는데,

이는 CCGT 총비용의 약 20%에 지나지 않는다. 원자력 발전 플랜트의 초기 투자액은 원자로 당 2십억 내지 3십5억\$이다.

대규모 선행 자본 투자는 이를 조달하기가 더 어려울 수 있다. 원자력발전 플랜트의 계획, 허가 취득 및 건설 단계의 리드 타임(lead time)이 길다. 모든 기간 설비(基幹設備, infrastructure)를 갖추고 있는 국가의 정책 결정과 상업 운전 사이의 총리드 타임은 7내지 15년 사이라고 생각된다.

원전 플랜트의 건설 기간은 풍력 발전 플랜트(1내지 2년), CCGT 플랜트(대체로 2내지 3년)의 그것보다 더 짧고, 또 석탄연소 플랜트(4년) 보다도 더 작다.

많은 국가, 특히 유명하기로는 미국과 영국의 원전 플랜트 건설 기간이 길었다. 일본에서는 그것을 4년 미만에 건설했고, 중국과 한국의 몇몇 원전 플랜트는 예정을 앞당겨 건설되었다.

원자력 연료비는 전치(前置, front-end) 비용과 후치 비용으로 구성되어 있다. 전치 비용은 우라늄 비(총연료비의 약 25%), 그것의 변환(5%), 경수로에서의 농축(30%) 및 연료 어셈블리 제작(15%) 비용으로 구성되어 있고, 후치 비용(총연료비의 대체로 25%)에는 직접 처분, 또는 재사용을 위한 분열성 물질의 후속 재순환에 의한 재처리 비용이 들어있다.

직접 처분 비용은 현재 유틸리

티가 부담하는데, 현장 저장 비용과 몇개 국가에서 부과하는 궁극적 폐기물 처리 비용으로 구성되어 있다. 이들 비용은 총발전 비용에 비하여 매우 적은 양이다.

보고된 기존 플랜트의 폐로(廢爐) 비용 범위는 서방 PWR의 경우 200-500\$/kW(2001년의 \$이다), 러시아의 VVER은 330\$, BWR은 300-500\$, 캐나다의 캔두(CANDU)는 270-450\$, 그리고 몇몇 가스 냉각식 마그녹스(Magnox) 원자로의 경우는 2,600\$나 되었다. 오늘날 건설된 플랜트의 폐로 비용은 초기 자본의 9내지 15%로 추정된다.

전반적으로, 폐로 비용은 총발전 비용에 비하여 극히 미미하다. 미국에서는 원전 회사가 폐로 기금으로 kWh 당 0.1내지 0.2cent를 모금한다.

정책의 의미

위에 제시한 분석 내용을 보면 새로운 원자력 발전 플랜트가 경쟁 가격으로 전기를 생산할 수 있음을 알 수 있다.

가스와 석탄 가격이 충분히 높고, 또 원전 플랜트 건설 및 운영 위험을 플랜트 매각자, 운영 회사 및/또는 규제 당국(시장이 관리 상태에 있는 경우)이 적절히 처리하

는 경우, 자본 비용이나 할인율을 충분히 낮게 유지시킬 수 있다.

할인율이 더 낮다는 추정 하의 발전 단가는 kWh당 4.9 내지 5.7cent 범위가 되므로, 원전 플랜트가 CO₂배출량 감축, 에너지 판매도(版圖) 다양화 및 수입 가스 의존도 축소를 위한 비용 효과적인 옵션(선택 대상)이 될 수 있다.

경제는 단지 하나의 요소에 지나지 않는다. 원자력 발전에의 투자를 조장하기 위해서는 수많은 다른 여러 문제를 해결해야 한다.

원전 플랜트의 건설과 운영에 허가를 득하도록 규정한 규제적 프로세스의 특성이 핵심 요소다. 허가를 얻고 건설 현장 준비에 사용되는 비용과 불확실성을 최소화시켜야 한다.

이제 원자력 발전의 역할을 논의하는 수많은 국가는 아직 원전 플랜트를 건설한 경험이 일천(日淺)하다. 미국 정부는 규제 프로세스를 검토하여 간소화시키는 조치를 취했다. UK 에너지 검토(UK Energy Review)기구에서 정부는 규제와 계획 수립 프로세스를 간소화시키겠다는 의사를 피력했다.

발전 비용

안전성, 핵폐기물 처리 및 핵확산 위험이 공중의 수락 여부를 테

스트하고 또 납득이 되도록 해결해야 하는 모든 문제다.

자유화된 시장에서 민간 투자자는 새로운 원전 건설로 인한 폐기물 및 폐로 비용을 부담하고 또 이들 비용을 관리할 목적의 기존 장치를 평가할 수 있어야 한다. 국제 협력(예를 들면, 폐기물 처리 용량 및 기간 설비의 공유)이 도움이 될 수 있다.

민간이 원자력 관련 활동에 참여함에 따른 핵확산 공포는, 여기에 완전 참여토록 하는 것만이 이를 경감시킬 수 있고, 또 원자력 이용과 관련된 국제 협약의 준수(遵守)가 입증될 수 있다.

정부가 에너지 안보를 강화하고, 탄소 배출량을 감소시키며, 화석 연료의 가격에 가해지는 부당한 압력을 경감시키겠다는 각오를 하는 경우, 그들은 원자력 발전으로 향하는 길 위에 놓여있는 장애물을 처리할 수 있고, 원전 플랜트에 필요한 1기 당 2십억 내지 3십 5억\$의 대규모 초기 투자를 촉진시킬 수 있으며, 그리고 새 세대 원자로의 개발로 향하는 길을 닦는데 어떠한 역할을 할 수 있다.

이들 목적은 근년에 들어와서 좀 더 명백해졌고 경제 역시 원자력 발전을 옹호하는 방향으로 움직였다. 그러나 아직까지 구체적인 조치는 거의 없는 실정이다. 