

풍력 대 플루토늄: 비교

(Arjun Makhijani, "Wind Power Versus Plutonium: A Comparison," *Science for Democratic Action*, vol. 8, no. 1, November 1999.)

이론적으로 풍력 또는 플루토늄은 인류를 위한 장기 에너지를 제공할 수 있다. 플루토늄은 많은 IEER의 간행물에서 증명해 온 것과 같이, 명백한 핵무기 확산과 환경적 책임을 진다. 그러므로 장기적 경제성만이 플루토늄에 유리한 단 하나의 요소일지 모른다. 이 요소를 세부적으로 검토하기 위해 IEER은 에너지원으로서 플루토늄과 풍력간 비교연구를 준비하였고, 여기에는 일본을 사례로 한 연구도 포함된다. 우리가 일본을 선택한 이유는 상대적으로 토지에 기반 한 풍력에너지의 잠재력이 낮고 인구밀도가 높기 때문이다. 만약 우리가 사고로 인해 발생하는 문제점을 논외로 한다면, 풍력에너지가 필요로 하는 토지규모가 플루토늄보다 상당히 크다. 따라서 만약 경제성 분석이 풍력에 유리하게 나타난다면, 이러한 결론은 많은 다른 국가와 지역의 경우에도 상대적으로 쉽게 일반화될 수 있다.

IEER은 이러한 경제성 비교에 있어 근해의 풍력발전기술을 이용하였다. 왜냐하면 터빈을 근해가 설치하는 것은 풍력발전으로 제기될 수 있는 환경적 이슈를 다룰 수 있기 때문이다. 특히, 이러한 대안은 일본과 같이 토지의 심각한 제약을 받는 국가나 지역에서 이용될 수 있다. 근해 풍력발전소는 1991년부터 시작한 이래로 덴마크, 독일과 스웨덴에서 성공적으로 운영되어 왔다.

지난 반세기에 걸쳐, 전 세계적으로 막대한 양의 자원이 에너지원으로서 플루토늄을 개발하는데 지출되어 온 반면, 풍력을 개발하려는 노력은 너무나 빈약하였다. 오직 증식로의 개발에만 수백억 달러의 돈이 지출되었다. 이 원자로는 분열할 수 없는 우라늄-238을 핵분열성 우라늄-239로 전환시켜주는데, 우라늄-238은 상대적으로 자연상태에서 풍부히 존재하지만, 유용한 원자로용 연료는 아니다. 방사능 핵연료로부터 플루토늄을 분리하고 추출하기 하는 재처리기술에 수백 억달러의 자금이 추가적으로 소요된다. 그러나 플루토늄은 어느 지역에서도 상업화되지 못하였다. 심지어 가장 열성적인 지지자인, 세계에서 가장 큰 재처리 서비스의 고객인 EdF(Electricite de France)와 영국의 재처리 회사인 영국 핵연료(British Nuclear Fuels)회사조차도 그들 플루토늄 스톡에 0의 가치를 부여한다.

어떤 국가에서도 상업적으로 경쟁력 있는 플루토늄 증식로 프로그램이 존재하지 않는다.

세계에서 두 개의 가장 큰 증식로가 구소련에 있고, 이는 플루토늄이 아닌 우라늄을 연료로 이용한다. 증식로 프로그램은 경제적 기술적 문제와 비용, 핵확산에 대한 관심으로 인해 미국을 포함한 대다수 국가에서 중단되었다.

증식로의 실패를 가져온 하나의 극적인 사례는 1995년 12월 일본의 몬주 증식로에서 일어난 사고이다. 몬주 증식로는 대량의 액체 소듐의 누출과 화재로 인해 문을 닫게 되었다. 증식로는 1994년 4월에 처음으로 임계에 도달했다. 다른 주요한 예는 한 때는 가장 큰 고속 증식로였던 슈퍼피닉스(Superphenix)와 관련된다. 1997년 6월 19일 슈퍼피닉스의 운영자는 프랑스에 위치한 시설을 영구히 폐쇄할 것을 선언했다. 슈퍼피닉스는 1986년에서 1997년간 단지 278일만 완전히 가동되었다. 슈퍼피닉스 프로젝트의 총 비용은 600억 프랑(1994년 프랑) 또는 1996년(폐쇄를 선언하기 이전 년도)에 약 91억 달러에 달하는 금액이다. 슈퍼피닉스의 해체 및 사후 운영비용은 95억 프랑(약 14억달러)으로 추정되며, 이는 825 MW의 근해 풍력발전 용량의 자본비용을 지불하기에 충분한 금액이다. 나아가, 두 에너지원의 역사를 볼 때, 만약 슈퍼피닉스의 건설에 소요된 자금이 풍력발전에 사용되었다면, 현재까지 총 전력생산량은 원자로의 생산량을 훨씬 능가하였을 것이다.

근해 풍력에너지를 통한 전력생산은 대지 위에 세워지는 풍력발전의 가장 심각한 영향(풍력터빈의 설치를 위한 광범위한 토지 이용)을 회피할 수 있다. 비록 근해 풍력발전의 건설로 인해 추가적인 비용이 소요된다 할지라도, 토지취득비용이 들지 않고, 보다 일정한 바람과 보다 높은 풍속으로 인해 추가적 비용은 적어도 부분적으로 상쇄될 것이다. 거친 바람이 적을수록 터빈의 마모가 줄어들고, 이로 인해 터빈의 수명이 더욱 연장된다. 근해 풍력터빈의 부지계획을 통해 가시적 영향들은 감소되고 제거될 수 있다. 그러나 이러한 근해 풍력 계획은 또한 부정적 영향을 지닌다. 여기에는 해안 수송 라인과 해안 생태계에 미치는 잠재적 영향이 포함된다. 시범사업의 불가분의 일환으로서 이러한 영향에 대한 평가가 이루어져야 한다.

근해 풍력단지의 전력비용은 시간이 지남에 따라 감소해 왔다. 초기 프로젝트의 경우 kWh당 8.8¢에서 9.9¢였던 비용이, 1997년 스웨덴의 북스티겐(Bockstigen) 프로젝트의 경우 kWh당 약 5.5¢로 감소로 하였다. 1990년대 동안 근해 풍력터빈은 잘 작동되고 있고 비용도 상당히 감소하였다. 또한 근해 풍력발전의 안정성도 증명되고 있다.

비교에 따르면, 비록 원자로로부터 생산된 최초의 전력이 증식로(1951년 idaho 국가 기술 연구소의 시험용 고속증식로)로부터 생산되었다 할지라도, 증식로의 비용은 시간이 지남에 따라 감소하지 않고 있다. 아래 표에서는 경수 원자로와 고속증식로의 플루토늄 연료비용과 풍력발전의 전력생산비용을 비교하였다. 이러한 계산에 들어간 세부적 가정들은 IEER 보고서를 보면 알 수 있다.

풍력 대 플루토늄 : 전력 비용들

비용 요소	근해 풍력	혼합 산화연료(MOX) : 경수 원자로	증식로
자본비용	4.2 ¢ /kWh	3.8 ¢ /kWh	7.6 ¢ /kWh
연료비용 (재처리 제외)	적용 불가능	0.9 ¢ /kWh	0.9 ¢ /kWh
재처리 비용	적용 불가능	0.7 ¢ /kWh	1.0 ¢ /kWh
유지관리비용	1.2 ¢ /kWh	1.5 ¢ /kWh	1.5 ¢ /kWh
MOX 연료를 위한 핵폐기물 처리비	적용불가능	0.2 ¢ /kWh	0.2 ¢ /kWh
해체 비용	0.14 ¢ /kWh	0.1 ¢ /kWh	0.1 ¢ /kWh
합 계	5.54 ¢ /kWh	7.2 ¢ /kWh	11.3 ¢ /kWh

풍력에너지의 한 가지 단점은 간헐적 에너지 공급에 있다. 보다 낮은 설비 이용이 - 즉, 최대출력으로 이용되는 시간이 보다 적음 - 위의 비용계산에 포함시킨다 하더라도, 풍력에너지는 저장 장치 또는 다른 에너지원(태양에너지와 바이오매스 연료와 같은)으로부터의 보완적 에너지 공급이 없이는, 주 에너지원으로 이용될 수 없다. 더욱이, 풍력에너지는 추가적 투자 없이 도로 수송에 이용될 수 없지만, 이는 플루토늄도 동일하다.

에너지 자급이 국가의 에너지 정책을 위한 건전한 목표라는 주장을 가정해 볼 때, 이 목표의 가장 중요한 면은 수송을 위한 충분한 연료를 가지는 것이다. 이는 석유가 가격 변동과 공급 불안정성에 가장 취약할 뿐만 아니라, 동시에 중,단기간내 대체되기에는 매우 어렵기 때문이다. 그러나 석유를 풍력 또는 플루토늄으로 대체하는 것은 수송 시스템내 주요한 변화를 필요로 할 것이고, 에너지 자급을 목표로 하는 자동차 분야의 목표와 관련하여, 어떠한 에너지원도 우선적 이점을 가지지 못한다.

풍력, 플루토늄이나 다른 에너지원이던, 자동차 수송 분야에서 전력을 이용하는 두 가지 방법이 존재한다. 한 가지 방법은 전기자동차를 이용하는 방법이고, 또 다른 방법은 수소를 연료전지 자동차의 연료로 이용하는 것이다.

결론적으로, 수송 부문내 플루토늄 또는 풍력에너지의 이용은 전기자동차로의 전환 또는

연료전지의 이용과 같은 엄청난 변화를 요구한다. 그러한 변화들은 효율성, 도시 대기오염 감소와 온실가스 배출감소라는 측면에서 바람직 할 것 같다. 현재, 수소를 연료로 이용하는 연료전지가 수송부문의 전환을 달성하는데 있어 가장 효율적이고 오염물질을 덜 배출하는 방법일 것 같다. 따라서 우리는 도로 수송부문에서 연료전지의 에너지원으로서 풍력을 이용하는 경우와 플루토늄을 이용한 경우의 비용을 비교하였다.

kWh당 5¢의 전력비용에 기초하여, 풍력을 이용한 수소 비용을 계산해 보면, 연료전지 자동차의 경우 GJ당 약 33 달러로 나타났고, 이는 휘발유 자동차의 갤런당 1.66 달러와 맞먹는다. 증식로를 이용한 수소비용은 풍력과 비교해 볼 때 거의 2배(GJ당 60달러)에 해당한다.

풍력에너지와 증식로 기술과 관련된 장기적 이슈를 평가해보면, 풍력발전의 불연속적 에너지 공급의 특성을 보완하기 위한 추가적 에너지 저장비용을 고려하더라도, 풍력에너지가 증식로보다 더욱 매력적이다.

권고안

플루토늄은 신재생에너지원에 비해 오래 전부터 에너지원의 대상에서 제외되어 왔다. 심지어 상업용 원자력의 시대가 시작되기 이전인 1952년에 트루만 대통령에 의해 임명된 파레이 위원회(Paley Commission)는 신재생에너지가 원자력보다 더욱 유망한 에너지원이라는 결론을 내렸다. 플루토늄 연료와 증식로는 모든 관점에서 원자력 몽상의 실패를 가져온 가장 큰 부분일 것이다. 이제, 풍력에너지, 특히 근해 풍력 에너지가 경제적이고 이용가능하다는 측면에서, 플루토늄 에너지 기술에 공공투자를 지속할 어떠한 가능한 주장도 존재하지 않는다. 이러한 투자는 즉각 중단되어야만 한다.

거의 상업화되고, 환경적 차원과 에너지 안보차원에서 바람직한 에너지 기술의 경우, 공적 자금들이 보다 낮은 비용으로 사적 연구개발(R&D)기금의 성과와 투자를 촉진시키는 방법으로 투자되어야 한다. 온실가스 배출을 감소시키고 다른 환경적 목표와 핵 비확산 목표를 달성하는 방법으로, 단기 또는 중기에 걸쳐 많은 풍력발전 시설이 설치되는 것이 바람직하다. 문제는 바람직한 목표를 달성하는데 소요되는 비용을 최소화하기 위해 어떻게 납세자와 납부자의 재원을 투자할 것인가에 달려있다.

풍력발전을 촉진시키는 과거의 정부 정책을 검토해 보면, 매년 공개입찰에 의해 미리 공고된 전력량을 구매하는 공공 당국이나 전력회사에 의한 전력 구매는 환경적으로 건전한 에너지 미래로 전환하도록 촉진시킴으로서 바람직한 목표를 달성하게 만들 것이다. 정부는 근해 지역을 포함한 사전후보지를 미리 명시해야 하고, 사적 당사자들은 입찰을 통해 15년에서 20년 동안 명시된 가격으로 전력을 공급할 것이다. 이는 공공 자원을 보다 효율적이고 보다 낮은 비용으로 이용할 수 있는 연구개발(R&D)과 성과에 기반 한 경쟁적 입찰을 촉진시킬 것이다.

미국의 경우, 적어도 2010년까지 풍력으로 생산된 연간 1000MW의 전력을 정부가 구매할

것을 제안한다. 풍력 발전 부지는 풍력발전의 특성, 지역 에너지 필요, 최소 토지영향, 생태계 영향과 같은 수많은 기준을 토대로 선택될 것이다. 입찰들은 특정한 기간동안 성과를 입증할 필요가 있다.

이는 석유시추를 위한 임대차 계약에서의 입찰 방식과 다소 유사하고, 풍력의 경우, 자원의 적정 규모가 이미 알려져 있다는 점이 위의 방법과는 차이가 있다. 따라서 계약은 풍력발전을 통해 생산된 전력의 실질적 이전을 위해 필요하다.

미국 에너지부는 2010년까지 10,000 MW의 풍력에너지를 설치하는 목표를 선언하였다. 이는 주로 세액 공제와 풍력에너지를 구매하는 연방 프로그램을 통해 달성될 수 있으며, 이 프로그램을 통해 2010년까지 연방 정부의 전력이용의 5%를 풍력에너지 구매를 통해 충분히 충당할 수 있을 것이다. 2010년까지 풍력 설비의 대규모 증가 목표가 건전하게 보인다 할 지라도, 선택된 방법은 IEER에 의해 제시된 방법만큼 비용을 감소시키지는 않을지 모른다.

This article originally published in English in [Science for Democratic Action, vol. 8, no. 1, November 1999](#)

[한국어 - Index of Korean language articles](#)

[Institute for Energy and Environmental Research](#)

Comments to Outreach Coordinator: [ieer\[at\]ieer.org](mailto:ieer[at]ieer.org)
Takoma Park, Maryland, USA

Web posted July 2004