



원자력과 재생 에너지의 환경 영향 비교

송명재

한수원(주) 원자력환경기술원장

서론

기후 변화는 범세계적인 문제로 모든 나라에 영향을 미치고 있다. 우리나라를 포함한 세계 각국은 온실 가스 문제의 심각성을 인식하고 그 대응책을 강구하고 있다.

재생 에너지란 태양광, 풍력, 조류, 지열, 바이오 에너지 등 자연력을 이용한 에너지원으로, 재생 에너지는 화석 연료나 원자력 에너지와는 달리 무궁한 에너지 자원이며 무공해의 에너지원이라 주창되고 있다.

에너지 부존 자원이 없는 우리나라에는 에너지원(석유·석탄·천연가스)의 대부분을 외국에서 수입하고 있다.

원자력이 경제 발전의 밑바탕이 되어 최근 국제 유가 앙등에 따른 경제 문제를 최소화 하는 데 크게 기여하였음에도 불구하고, 방사성

에 대한 부정적 이미지와 원자력 발전의 부산물인 방사성 폐기물의 문제로 인하여 국민이 갈등과 혼란의 상태에 있다.

환경 단체들은 온실 가스의 주된 원인인 화석 에너지는 제쳐놓고 방사성 폐기물을 배출하는 원자력만을 문제 삼아 풍력·태양력 등 재생 에너지로 대체해야 한다고 주장하고 있다.

기후 변화의 주범인 온실 가스를 감축하는 것은 에너지 정책을 결정하는 데 있어 가장 중요한 기술적·정치적 문제가 되고 있다.

본고는 전수명 평가(Life Cycle Assessment : LCA)와 외부 효과(Externalities) 방법론을 사용하여 발전원의 환경적 영향을 평가하고자 하는데, 상기 방법론은 발전원에 대한 온실 가스 감축 전략을 효과적이고 정확히 평가할 수 있다.

본고는 재생 에너지원 중 가장 각

광을 받고 있는 태양광·풍력 발전과 원자력 발전의 환경 영향을 비교 평가하고자 한다.

전수명 평가(LCA)에서, 에너지 회수율(EPR : 발전소 전수명 기간 중 발생한 에너지를 투여한 에너지로 나눈 수치)은 크면 클수록 에너지 경제성이 우수한 것을 나타내며, 단위 전력 생산당 온실 가스(CO_2) 배출률(Greenhouse Gas Emission Rate)은 환경 영향을 최소화하기 위하여 가능한 적을수록 좋다.

시장 가격에 포함되어 있지 않은 환경 영향은 외부 효과(Externalities)로 표현되며, 이 외부 효과를 단위 전력 생산량(kWh)당 금액으로 환산하여 발전원간의 환경 비용을 비교하였다.

또한 전수명 기간 동안 발전원(태양광·풍력·원자력)의 사용된 자재량, 배출된 오염 물질과 폐기물의 양을 비교·평가하였다.

전수명 평가(LCA) 방법에 의한 분석

1. 에너지 회수율(Energy Pay-back Ratio : EPR)

에너지 회수율(EPR)은 특정한 발전 시스템의 전수명 기간(원료 획득 및 수송, 가공 및 건설, 운전 및 보수, 해체 및 폐기물 처리의 전 과정) 동안 소모된 총에너지에 대한 생산된 유효 에너지의 총량의 비율로서 특정 발전원이 주는 환경 부하의 경제적 평가 지표가 된다.⁽¹⁾⁽²⁾

$$\text{에너지 회수율} = \frac{\text{생산 전력량}}{\text{투입 에너지의 양}}$$

○생산 전력량 = 발전소 전수명 기간 중 생산한 전력량(net electrical energy)

○투입 에너지의 양 = ($E_{\text{mat,L}}$ + $E_{\text{con,L}}$ + $E_{\text{op,L}}$ + $E_{\text{dec,L}}$)

- $E_{\text{mat,L}}$ = 전수명 기간 중 사용된 물질에 투여된 에너지의 총량

- $E_{\text{con,L}}$ = 건설에 사용된 에너지의 총량

- $E_{\text{op,L}}$ = 운전에 사용된 에너지의 총량

- $E_{\text{dec,L}}$ = 해체 및 폐기물 처분에 소요된 에너지 총량

투입한 에너지(Energy Inputs)

를 계산하는 방법으로는 첫째로 Input/Output(I/O) 방식을 들 수 있는 데, 모든 활동 단위(건설, 수송 등)와 소요된 물자(펌프, wiring, 콘크리트 등) 그리고 소요된 에너지 밀도 등의 화폐 가치를

〈표 1〉 발전소 소요 물자의 에너지 밀도

물질	GJ/Ton of Material
Aluminum	208
B ₄ C	211
Calcium	9
Chromium	83
Concrete	1.4
Copper	131
Helium	536
Insulation Materials	95
Lead	35
Lithium	853
Manganese	52
Mercury	87
Molybdenum	378
Nickel	184
NbTi	211
Silver	16,800
Sodium Metal	124
Steel - Carbon/Low Alloy	34
Steel - Stainless	53
Vanadium	3,710
Yttrium	1,470
Zirconium	1,610

주 : Reference Power Plants ; Nuclear (PWR 1,000MW), Nuclear Fusion (Tokamak, 1,494MW), Coal(Conventional Steam Type, 1,000MW), Wind (On-Grid, 25MW)

출처 : White, S. and Kulcinski, G., Reference [1]

에너지로 환산한다.

이 방식의 특징은 계산이 용이하나 화폐 가치는 이윤이나 이자 등을 포함하므로 에너지 소요량을 과대 평가하기 쉽다.⁽¹⁾⁽²⁾

두 번째 방식은 Process Chain Analysis(PCA)로 전수명 기간에 사용되는 모든 자원을 물질별로 분류하고 그 물질 소요량에 '물질의 에너지 밀도' (주: 사용된 물질의 단위 무게당 그 물질을 생성하는 데

소요되는 에너지량; GJ/Ton of Material)를 곱하여 총소요 에너지량을 계산하는 방법이다(〈표 1〉 참조).

그러나 이 방식은 에너지 소요량을 산출할 데이터를 얻기가 용이하지 않으므로 계산하기가 어렵다는 문제가 있다.

또 관리용 건물의 난방 에너지, 수송용 트럭이나 철도에 소요된 철의 소요량과 같은 간접적 에너지 소



〈표 2〉 원자력과 재생 에너지의 에너지 회수율 비교

발전원	Source(저자)	발전소 특성	에너지 회수율 (Output/Input)
원자력	Meiser and Kulcinski (2002)	PWR	16
	Kivisto (2000)	PWR/BWR	59
	Inst. Policy Science (1977)	PWR	46
	Inst. Policy Science (1977)	BWR	43
	Uchiyama (1991)	BWR	47
태양광	Meiser and Kulcinski (2002)	rooftop	6
	Alsema (2003)	rooftop	10-12
	Alsema (2003)	ground	7.5
	Kivisto (2000)	amorphous silicon	3.7
풍력	Meiser and Kulcinski (2002)		23
	White and Kulcinski (1998)		17-39
	Resource Research Inst. (1983)		12
	Uchiyama (1996)		6
	Kivisto (2000)		34

주 : 원자력 발전의 경우 우라늄 농축 방법은 원심 분리법 기준

- 출처 : 1. White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)
 2. White, S. and Kulcinski, G., Reference (2)
 3. Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (4)
 4. UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, Reference (5)

소요되는 에너지는 설비 자재와 설비 제작에 93%정도가 소요되고, 운전·정비에 5%, 설비 해체 및 폐기물 처분에 나머지 2%가 소요된다(〈그림 1〉 참조).

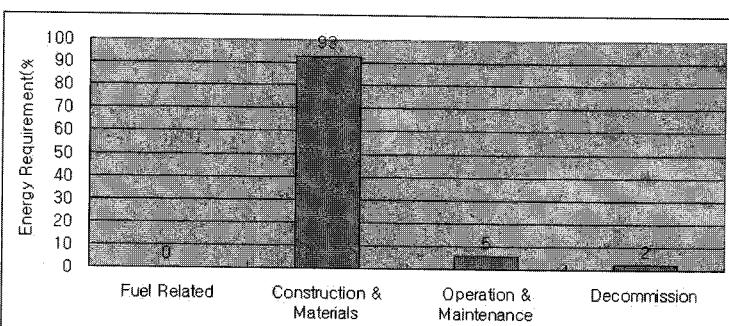
여기에 에너지 저장 설비 비용을 추가하면 에너지 회수율(EPR)이 더욱 감소될 것이다. 여기서는 전력 계통과 연계된 시스템을 가정하여 에너지 저장 설비가 없는 것으로 하여 문제를 단순화 하였다.

에너지 회수율 분석치를 보면 같은 발전원이라 하여도 각 발전소의 특성이나 이용률에 따라 상당한 차이를 보인다(〈표 2〉 참조).

〈표 3〉은 〈표 2〉를 기초로 하여 각 발전원별 EPR의 범위를 나타낸다. 그리고 〈표 3〉을 기초로 하여 각 발전원의 에너지 회수율의 최대치와 최소치의 중간값을 취하여 발전원간의 에너지 회수율을 비교하였다(〈그림 2〉 참조).

에너지 회수율에 대한 상기 결과를 종합해 보면, 태양광 발전은 원자력 대비 4.8배, 풍력 발전은 1.7배의 환경 영향이 있음을 알 수 있다.

재생 에너지는 연료비는 없지만 설비 제작 비용 및 설치 비용이 상당함으로 전수명 기간 동안 동일 전력을 생산하기 위한 에너지 소비는 태양광 발전과 풍력 발전은 원자력 발전을 훨씬 상회한다.



출처 : Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (4)

〈그림 1〉 태양광 발전의 전수명 소요 에너지 비교표

요량을 산입하지 않기 때문에 에너지 소요량을 과소 평가할 우려가 있다.⁽³⁾

따라서 Energy Inputs의 통상적인 계산 방법은 PCA 방법을 주

로 사용하며 물질에 대한 수요가 없는 과정(non-materials related process)에서는 I/O 방법을 사용하고 있다.⁽¹⁾

태양광 발전의 경우 전수명에서

〈표 3〉 발전원별 에너지 회수율(Energy Payback Ratio) 비교

발전원	LNG	석탄	원자력	태양광	풍력
EPR	4~26	7~34	16~59	3.7~12	6~39

2. 온실 가스 배출률 (Greenhouse Gas Emission Rate)

발전소의 전수명 기간 동안에 원료 획득 및 가공, 건설, 운전, 해체 및 폐기물 처리의 과정에서 직·간접적으로 발생하는 환경 오염 물질을 이산화탄소(CO_2)로 환산한 온실 가스 배출률을 환경 영향 평가 지표로 사용할 수 있다.(1)

$$\text{온실 가스 배출률} = \frac{\text{CO}_2 \text{ 배출량}}{\text{생산 전력량}}$$

○ 생산 전력량 = 발전소 전수명 기간 중 생산한 전력량 (net electrical energy)

○ CO_2 배출량 = $\sum i$ (소요된 물질(i)의 양) \times (물질(i)의 CO_2 배출 환산 계수)

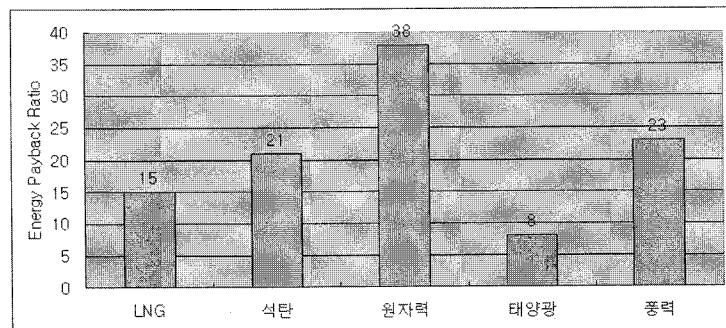
온실 가스 배출률을 계산할 때 사용하는 '배출 환산 계수' (주: 사용된 물질의 단위 무게당 그 물질을 생성하는 데 발생하는 CO_2 의 양; kg CO_2 /Ton of Material)의 예는 〈표 4〉와 같다.

이 배출 환산 계수에 건설, 운전, 해체 및 폐기물 처분 과정 등 전수명 기간 동안에 소요되는 자재량(연료 포함)을 각각 곱하면 CO_2 환산량이 산출되며, 그 산출량을 전수명 기간의 총발전량으로 나누면 단위 전력 생산량(GWh)당 온실 가스 배출률(Greenhouse Gas Emission Rate: Ton CO_2 -equivalent)을 구할 수 있다.⁽¹⁾

다음의 온실 가스 배출률의 분석

주 : 수치가 클수록 경제성 유리

- 출처 : 1. White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)
 2. White, S. and Kulcinski, G., Reference (2)
 3. Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (4)
 4. UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, Reference (5)



주 : 수치는 〈표 3〉의 최대치와 최저치의 중간값 채택

- 출처 : 1. White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)
 2. White, S. and Kulcinski, G., Reference (2)
 3. Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (4)
 4. UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, Reference (5)

결과(〈표 5〉 및 〈표 6〉)와 〈그림 3〉을 보면, 환경 단체의 주장과는 달리 태양광, 풍력 모두 온실 가스를 전혀 배출하지 않는 발전원은 아닌 것을 알 수 있다.

각 발전원의 전수명 기간 동안의 직·간접적인 환경 영향을 비교하면, 모든 형태의 발전 설비는 전기를 생산하기 위한 에너지 투입이 필요하므로 재생 에너지가 무공해가 아니라 상당량의 환경 오염 물질을 배출하는 것을 알 수 있다.

또한 풍력 발전이나 태양광(67 Tonnes of CO_2)은 원자력(16

Tonnes of CO_2)과 대비하여 약 4 배 더 많은 온실 가스(Greenhouse Gas)를 배출하는 것으로 밝혀짐으로 재생 에너지는 무공해라는 통념을 무색케 한다.

발전원별 외부 효과 비교

에너지의 외부 효과(Externalities)란 에너지 생산이나 소비 활동에 직접 관여하지 않는 사회나 환경에 비용이나 편익을 가져다주는 것을 말한다.

이제까지의 경향을 보면, 에너지

〈표 4〉 CO₂ 배출 환산 계수(Emission Factors)

물질	kg CO ₂ /Ton of Material
Aluminum	13,300
B ₄ C	13,200
Calcium	619
Chromium	5,390
Concrete	520
Copper	7,450
Helium	33,600
Insulation Materials	5,680
Lead	2,500
Lithium	53,000
Manganese	3,500
Mercury	4,940
Molybdenum	20,300
Nickel	9,830
NbTi	13,200
Silver	1,060,000
Sodium Metal	7,730
Steel - Carbon/Low Alloy	2,470
Steel - Stainless	3,280
Vanadium	228,000
Yttrium	84,000
Zirconium	97,200

주 : Reference Power Plant ; Nuclear(PWR 1,000MW), Nuclear (Tokamak, 1,494MW), Coal (Conventional Steam Type, 1,000MW), Wind (On-Grid, 25MW)

출처 : White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)

비용 계산에 있어서 에너지 사용에 의한 환경과 건강 영향에 대한 정량화 평가는 제외되었고, 또 에너지의 시장 가격에 포함되어 있지 않았다.

그러나 최근에는 이 외부 효과를 정량화하여 에너지 정책 결정에 활용하고 있다.

특히 유럽공동체위원회(European Commission)은 미국 에너지부(DOE)와 공동으로 1991년부터 ExternE (External Costs of Energy) project를 수행하고 있

다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

정량화할 수 있는 외부 효과(Externalities)로는 건강 영향(Health effects), 농수산물 수확 감소, 건물 손상, 소음, 산성비, 하천 오염, 지구 온난화, 직업병, 사고 재난 등이 있다.

이 외부 효과 방법론을 사용하면 전수명 평가(LCA)에서 고려하지 않은 환경 영향의 비용(예: 산성비, 풍치 손상, 생태계 보존 등)이나 편익(예 : 수력 발전소가 부가적으로

수행하는 관개나 홍수 조절)을 정량화할 수 있다.

전원별로 환경에 영향을 주는 외부 효과는 서로 상이하다. 예를 들어 원자력은 방사능에 의한 건강 영향이 주된 요인이고, 풍력은 소음 등에 의한 인체의 영향, 그리고 태양광 발전의 경우는 환경에 배출되는 폐기물이다.⁽⁸⁾

외부 비용 비교 평가 방법은 다음과 같이 활용된다.

첫째, 발전원의 사회적 총비용을 비교함으로써 가장 낮은 사회적 비용의 발전원을 선택할 수 있으므로 발전 설비 투자에 대한 의사 결정이나 정책 수립에 유용하다.

둘째, 앞으로 환경세를 도입할 경우 기초 자료로 사용될 수 있다. 예를 들면, 영국의 경우 외부 비용에 기초하여 환경세(종합환경세, 쓰레기매립지세)를 산정하였다.⁽⁷⁾

이러한 인자들을 화폐 단위로 환산하면 전원별 환경 영향성을 종합 비교할 수 있으며, 이 외부 효과를 에너지 총비용에 산입하면 경제적·환경적 비용을 모두 고려한 에너지원간의 종체적인 비교가 가능하다.

즉 외부 효과(Externalities)를 비용화하면 외부 비용이 되는데, 이 외부 비용과 내부 비용(발전 원가)를 합하면 환경 비용을 포함한 발전원의 ‘사회적 총비용’(Final Social Cost)이 된다.⁽⁷⁾

〈표 7〉은 국제에너지기구(IEA)가 연구한 외부 효과(환경 비용)인데, 원자력의 환경 비용이 통상적으로 알고 있는 것보다 적음을 알 수 있으며, 오히려 태양광 발전이 원자력 발전의 4배에 달함을 알 수 있다.

폐기물 및 소요 자재량 비교

발전원별 환경 영향은 온실 가스 외에도 고체 폐기물에 의해서도 발생된다.

고체 폐기물은 발전소의 건설 및 운영에 소요되는 자재에 의해서 그 양이 결정된다. 또한 그 발생량과 함께, 발생되는 폐기물의 독성과 그 영향 기간에 의해서 환경 영향이 결정된다.

예를 들면, 태양광 발전 설비에도 납과 카드뮴, 비소가 들어있고 그 독성이 영원히 지속된다.

이에 비하여 원자력 발전에서 나오는 방사성 폐기물은 그 물량이 제한적일 뿐더러 방사능의 양이 반감기를 갖고 감소하므로 인간과 생태계에 주는 영향은 시간과 함께 줄어든다는 차이가 있다.

따라서 전원별로 발생하는 폐기물의 독성과 그 영향 기간에 대해서는 별도의 심층 검토가 필요하며, 본 검토에서는 폐기물의 물량적인 비교만을 하기로 한다.

태양 전지를 생산하려면 고순도

〈표 5〉 원자력과 재생 에너지의 온실 가스 배출률 비교

(Ton CO₂/Gwh)

발전원	Source(저자)	국가	온실 가스배출률
원자력	Meiser and Kulcinski (2002)	U.S.A.	15
	White and Kulcinski (1998)	U.S.A.	15
	UIC Nuclear Issues (2004)	일본	22
	UIC Nuclear Issues (2004)	스웨덴	6
	UIC Nuclear Issues (2004)	핀란드	10-26
태양광	Meiser and Kulcinski (2002)	미국	39
	UIC Nuclear Issues (2004)	일본	53
	UIC Nuclear Issues (2004)	스웨덴	50
	UIC Nuclear Issues (2004)	핀란드	95
	Central Research Institute (2004)	일본	53
풍력	Meiser and Kulcinski (2002)	U.S.A.	14
	White and Kulcinski (1998)	U.S.A.	9-20
	UIC Nuclear Issues (2004)	일본	29
	UIC Nuclear Issues (2004)	스웨덴	5.5
	UIC Nuclear Issues (2004)	핀란드	14

주 : 1. 수치가 작을수록 환경성 유리

2. 원자력 발전의 경우 우라늄 농축 방법은 원심분리법 기준

출처 : 1. White, S. and Kulcinski, G., Reference [1]

2. White, S. and Kulcinski, G., Reference [2]

3. Meier, P., Reference [3]

4. Meier, P. and Kulcinski, G., Reference [4]

5. UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, Reference [5]

6. Central Research Institute of Electric Power Industry, Reference [6]

의 특정 물질을 얻기 위해 복잡한 화학 공정이 필요하기 때문에 불화물, 염화물, 질화물, 유기물과 더불어 이산화탄소, 이산화황 등의 화학 폐기물이 다량 발생할 수밖에 없다.

〈표 8〉과 〈표 9〉에서 폐기물 생성량을 물량적으로 비교해 보면, 태양광이 원자력보다 4배 정도의 폐기물을 배출하는 것을 알 수 있다.

폐기물 발생량을 추정하려면 건설 소요 자재량에 대한 평가가 필요하다.

원자력과 태양광 발전 및 풍력 발전으로 동일한 발전량을 얻기 위한 건설 소요 자재량을 비교하면 다음과 같다.

이때 원자력의 이용률은 90%로 가정하고(우리나라의 최근 5년간 (1999~2003년)의 평균 이용률은 91.7%)⁽¹¹⁾ 풍력 발전의 경우 20%(On-Grid 기준)로 가정하고 태양광 발전의 경우 이용률 7.6%를 기준으로 하였다.

〈표 10〉과 〈표 11〉에 따르면, 원

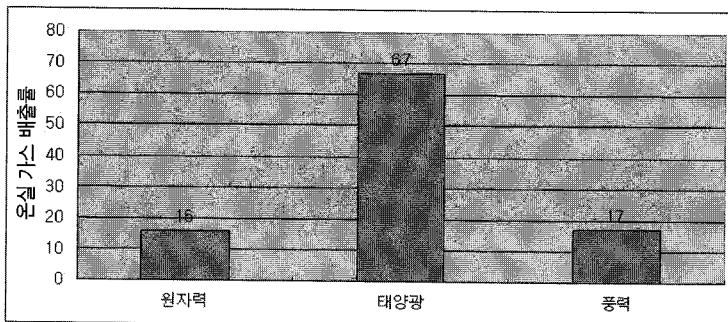
〈표 6〉 온실 가스 배출률 비교 (Ton CO₂/GWh)

발전원	LNG	석탄	원자력	태양광	풍력	수력
Ton CO ₂ /GWh	450~1170	894~980	6~26	39~95	5.5~29	3~11

주 : 1. 〈표 6〉은 〈표 5〉를 기초로 하여 각 발전원별 온실 가스 배출률의 범위를 표시

2. 수치가 작을수록 환경성 유리

- 출처 : 1. White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)
 2. White, S. and Kulcinski, G., Reference (2)
 3. Meier, P., Reference (3)
 4. Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (4)
 5. UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, Reference (5)
 6. Central Research Institute of Electric Power Industry, Reference (6)



〈그림 3〉 원자력과 재생 에너지의 온실 가스배출률 비교표

주 : 1. 수치는 표6의 최대치와 최저치의 중간값 채택

2. 수치가 작을수록 환경 영향 유리

출처 : Reference (1), (2), (3), (4), (5), (6)

자력 대비 풍력이 약 15배, 태양광이 약 22배의 자재량이 소요됨을 알 수 있다.

있으며, 우리의 현재 생활 수준을 과거로 되돌리기 전에는 재생 에너지만으로는 현재의 에너지 수요를 감당할 수 있을 것 같지 않다.

일반적인 통념으로는 태양광이나 풍력과 같은 대체 에너지원이 무공해의 무한 에너지원으로 알려져 왔으나, 전과정 평가(Life Cycle Assessment)에 의한 환경 영향을 비교하면 풍력이나 태양광(Photo-voltaic)과 같은 재생 에너지는 동일 전력을 생산하는 데 소요되는 에너지량이 원자력보다 더 많아 결과

적으로 온실 가스 배출 측면에서도 상대적으로 불리한 것으로 밝혀졌다.

정량화할 수 있는 외부 효과(Externalities)로는 건강 영향(Health effects), 농수산물 수확 감소, 소음, 산성비, 하천 오염, 지구 온난화, 직업병, 사고 재난 등이 있다.

이 외부 효과 방법론을 사용하면 전수명 평가(LCA)에서 고려하지 않은 환경 영향의 비용이나 편익을 정량화할 수 있다.

외부 효과(Externalities)를 비용화하면 외부 비용이 되는데, 이 외부 비용과 내부 비용(발전 원가)를 합하여 환경 비용을 포함한 발전 원의 '사회적 총비용'이 된다.

원자력의 환경 비용이 통상적으로 추정하고 있는 것보다 적음을 알 수 있으며, 오히려 태양광 발전이 원자력 발전의 4배에 달함을 알 수 있다. 원자력 발전의 내부 비용(발전 원가)은 태양광이나 풍력 발전보다 월등히 저렴하므로 결국 사회적 총비용을 기준으로 하면 원자력 발전이 가장 저렴하다는 것이 의심할 여지없이 분명해진다.

또한 풍력 발전이나 태양광 발전에서 발생하는 폐기물의 양은 원자력에 비하여 풍력 발전이 15배, 태양광 발전이 22배에 달하는 것으로 추정되며 그 독성 또한 영원히 지속되므로 산업 폐기물 측면에서도 엄

맺는 말

기술 발전에 따라 태양광이나 풍력과 같은 재생 에너지의 공급 비용은 낮아지고 효율은 증대하겠지만, 기존의 원자력 발전과의 차이를 좀 허기에는 재생 에너지의 낮은 에너지 밀도, 전력의 비연속성과 가변성 등 극복하여야 할 수많은 과제들이

〈표 7〉 전원별 환경 비용 (cent/kWh)

영향	태양광	풍력	원자력
건강 영향	0.4	0.05	0.2
농작물 손실	-0.003	0.0005	0.0008
자재 손상	0.01	0.001	0.002
소음 공해		0.006	
산성화/부영양화	0.04	0	0
지구 온난화	0.3	0.03	0.03
총계	0.8	0.09	0.2

청난 부담 요인이 되는 것으로 나타났다.

결론적으로 재생 에너지가 꿈의 발전원이라는 통념과는 달리 경제성, 환경성 모두를 종합하여 볼 때 가까운 미래에 재생 에너지가 기존의 원자력 발전이나 화력 발전을 대체적으로 대체하기에는 그 실현 가능성성이 희박하다고 분석된다. ☺☺

〈참고 자료〉

[1] White, S. W. and Kulcinski, G. L., "Birth to Death Analysis of the Energy Payback Ratio and CO₂ Gas Emission Rates from Coal, Fission, Wind, and DT Fusion Electrical Power Plants", Fusion Technology Institute, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, March, 1988.

[2] White, S. W. and Kulcinski, G. L., "Net Energy Payback and CO₂Emissions from Wind-Generated Electricity in the Midwest", Fusion Technology Institute, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, December, 1998.

[3] Meier, P., "Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis",

주 : 참조 발전소의 사양 : 원자력(PWR 1,375MW), 태양광(주택용, 비정질(非晶質) 실리콘 태양전지(amorphous silicon), 5kWp), 풍력(1MW, 평균 풍속 5.5m/sec)

출처 : Maria Rosa Virdis, "ENERGY POLICY AND EXTERNALITIES: THE LIFE CYCLE ANALYSIS APPROACH", International Energy Agency, Workshop Proceedings, Paris, France, 15-16 November 2001

〈표 8〉 태양광의 Chemical Waste(제작 과정중 발생하는 화학 폐기물)

(단위 : Ton/1,000MW 공급 용량, 40년간)

화학 폐기물	염화물	황화물	암모니아	Oil & Fat	방향족 화합물	아연	합계
물량(Ton)	10,374	2,562	8	49	3	4	13,000

출처 : Dones, R. and Frischknecht, R., Reference [26]

〈표 9〉 폐기물 생성량 : 원자력 발전과 태양광 발전 비교

(단위 : Ton/1,000MW 공급 용량, 40년간)

구분	원자력	태양광
폐기물의 종류 및 양	2,310 (중저준위 폐기물)	13,000 (화학 폐기물)
	800 (사용후핵연료)	250 (비소, 카드뮴, 갈륨 등 독극물)
총배출량	3,110	13,250

주 : 1. 원자력 설비 용량 : 1,111MW, 태양광 설비 용량 : 13,000MW

- 원전 1,000MW 1기당 매년 100드럼(용량 200l, 비중 2.6 ; 신규 원전 기준)의 중저준위, 18ton의 사용후핵연료의 폐기물 생성량을 1,111MW로 비례 산출
- 태양광 발전의 수명 기간은 20년 기준으로 하였으며, 원자력은 40년 기준
- 해체 폐기물량은 별도(건설 소요 자재량 참조)

출처 : 1. Dones, R. and Frischknecht, R., Reference [9]
2. Fthenakis, V., Reference [10]
3. 산업자원부, Reference [11]

Fusion Technology Institute, 2002.

University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, August, [4] Meier, P. J. and Kulcinski, G. L., "Life-Cycle Energy



〈표 10〉 원자력·풍력 건설 소요 자재 비교

(단위 : Ton/1,000MW 공급 용량, 40년간)

구분	원자력	풍력
알루미늄	20	0
콘크리트	199,626	2,753,019
구리	810	1,899
강화 플라스틱	0	178,767
단열재	1,024	0
납	51	0
망간	482	0
니켈	139	0
은	0.6	0
탄소강	37,761	679,644
스테인리스강	2,311	81,441
총 량	242,224	3,694,770

- 주 : 1. 원자력 설비 용량 : 1,111MW, 풍력 설비 용량 : 5,000MW
 2. 풍력의 경우 On-Grid 발전 기준
 3. 풍력 발전의 수명 기간은 20년 기준으로 하였으며, 운전·보수 기간 중의 추가 투여 물량은 무시
 4. 원자력의 수명 기간은 40년 기준

출처 : White, S. and Kulcinski, G., Reference (1)

〈표 11〉 태양광 발전소(Photovoltaic) 소요 자재

(단위 : Ton/1,000MW 공급 용량, 40년간)

구 분	소요량	비 고
Modules	4,988,750	Module 구성 요소 : Encapsulation, Substrate, Deposition Materials, Busbar, Back Reflector, Grid, Conductive Oxide
Inverter	156,000	
Wiring	78,000	
총소요량	5,222,750	

- 주 : 1. 태양광 설비 용량 : 13,000MW
 2. On-Grid 발전 기준
 3. 태양광 발전 수명 기간은 20년 기준으로 하였으며, 운전·정비 기간 중의 추가 투여 물량은 무시

출처 : Meier, P. and Kulcinski, G., Reference (9)

Requirements and Greenhouse Gas Emissions for Building-Integrated Photovoltaics",
 Fusion Technology Institute, University of Wisconsin,

Madison, Wisconsin, April, 2002.
 [5] Uranium Information Centre Ltd., "Energy Analysis of Power Systems", UIC

Nuclear Issues Briefing Paper #57, January, 2004.

[6] Central Research Institute of Electric Power Industry, "Japan's Lifecycle Assessment CO2Emissions Intensity by Source", 2000.

[7] Pearce, D. "Energy Policy and Externalities: An Overview", Workshop Proceedings, Paris, France, November, 2001

[8] Virdis, M. R., "Energy Policy and Externalities: The Life Cycle Analysis Approach", International Energy Agency, Workshop Proceedings, Paris, France, November, 2001.

[9] Dones, R. and Frischknecht, R., "Life-cycle Assessment of Photovoltaic Systems: Results of Swiss Studies on Energy Chains", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Prog. Photovolt. Res. Appl. 6, 117-125, 1998.

[10] Fthenakis, V. M., "End-of-life management and recycling of PV modules" Energy Policy 28, 1051-1058, 2000.

[11] Ministry of Commerce, Industry and Energy, "Nuclear