

에너지 환경과 폐기물

G. Marsh

영국 AEA Technology사 에너지·환경정책본부장

본

본문은 경제 활동에서 생성되는 폐기물과 그것들이 사회와 자연 환경에 미치는 영향을 조사하여, 에너지 분야의 폐기물 관리와 관련된 배경을 살펴보는 데 있다.

이러한 목적을 위해 고체 폐기물을 포함하여 대기와 생태계로 방출되는 폐기물에 대한 광범위한 정의가 이루어졌다.

본 논문은 에너지 분야와 기타 산업 분야에서 생성된 폐기물의 양을 간단히 비교하면서, 다른 전기 생산 연료 주기로부터 생성된 폐기물의 특색을 조사하고 있다.

이러한 폐기물이 사회와 환경에 미치는 영향을 조사하였고, 그 피해를 화폐 단위로 계산하는 방법에 대해 논의하였다.

마지막으로 최근 외부 비용에 관한 연구의 결과는 다른 폐기물의 유출에 대한 의의를 논의하는 데 이용되었다.

서론

대부분의 경제 활동은 폐기물이 발

생된다.

이는 서로 다른 경제 활동 분야로부터 발생된 다량의 고체 폐기물을 자료화한 경제협력개발기구(OECD)의 데이터에 의해 설명되고 있다(표 1).

현재 경제 개발이 계속 성장 추세에 있고, 개도국들이 빠른 속도로 발전되고 있어 폐기물의 발생은 더욱 증가하고 있다.

이러한 현상은 좀더 지속적인 개발 형태로 나아가려는 범세계적인 활동 목표에 중대한 도전으로 나타나고 있다.

폐기물의 유출은 재순환되거나 다른 목적으로 사용될 수 있는 자원의 커다란 손실로 이어진다(에너지 생산물의 소각).

또한 지속적인 개발이란 측면에서 볼 때 폐기물은 사회와 환경에 부정적인 영향을 미칠지도 모른다.

예를 들면, 건강·건물·농작물·산림과 자연 생태계에 대한 대기와 수질 오염 또는 시각적인 방해 또는 소음의 방출로부터 야기된 쾌적함의 감소에 따른 영향 등이 그것이다.

그러한 영향들이 효과적으로 관리되지 못한다면 고체 폐기물 또는 대기와 생태계에 대한 폐기물(오염 물질)의 직접적인 방출이 야기될 지도 모른다.

특정한 산업 분야의 영향 또는 고체·액체 및 가스화된 폐기물의 영향을 고려하여 각각 개별적으로 조사하는 것보다 종합적으로 그 과정을 고려하는 것이 가장 의미가 있을 것이다.

에너지 분야와 관련하여(표 1)은 고체 폐기물 생성의 주원인을 보여주고 있다.

그것은 또한 CO₂, NO_x, SO₂ 및 개개의 미립자들을 포함한 주요 대기 오염 물질의 주요인이다.

〈표 2〉와 〈표 3〉은 CO₂와 SO₂의 방출을 나타내고 있다.

전기 발전 기술에 초점을 맞추면 이들로부터 폐기물의 방출은 내포된 연료 주기에 따라 상당히 다양하다.

예를 들면, 석탄 연소 발전은 적당한 양의 고체화 및 기체화된 폐기물을 모두 생산한다.

폐기물의 유출은 대체 발전 기술의

연료 주기에서의 다른 과정에서 일어날 지도 모른다.

한 예로 원자력 발전으로부터 나오는 고체 폐기물은 주로 우라늄의 추출과 처리 또는 사용후 연료의 처리 시에 발생된다.

반대로 재생 에너지원으로부터 나오는 폐기물의 유출은 주로 그들의 제조에 사용되는 화석 에너지와 연결되어 있다.

따라서 다른 전력 생산 주기의 폐기물 유출을 비교할 때는 각 기술의 모든 연료(또는 수명) 주기를 조사하는 것이 필요하다.

여기에 대해 몇 가지 세부적인 연구가 행하여졌다.

수명 주기 연구가 다른 발전 기술들로부터 나온 폐기물 방출에 관한 확실한 데이터를 나타내주겠지만, 사회적·환경적 영향의 비교를 위한 기초 자료를 제공하지는 않는다.

이는 폐기물마다 다른 영향을 갖고 있고, 그 영향들 자체(건강에 대한 영향, 농작물의 손상 등)가 극히 다양할 수 있기 때문이다.

최근 몇 년간 외부 비용의 계산을 토대로 연료 주기의 비교를 위한 일정한 형태의 개발을 위한 노력이 이루어져 왔다.

외부 비용은 폐기물의 방출로 인한 사회와 환경의 영향 평가이다.

이들은 이러한 비용이 전력의 시장 가격에 포함되어 있지 않기 때문에 '외부 비용'이라고 일컬어진다.

〈표 1〉 고체 폐기물 유출원(1990년)

단위 : k t/年

	Agriculture	Mining	Manufacturing Industry	Energy Production
Japan	77,390	34,000	150,388	54,984
USA*	165,821	1,541,850	760,000	1,093,039
France	400,000	75,000	50,000	N/R
Germany**	N/R	17,787	79,834	29,858
UK	80,000	108,000	56,000	13,000

* 1985 data

** West Germany only

N/R Not reported

〈표 2〉 CO₂ 방출원(1993년)

단위 : m t/年

	Transport	Energy Transformation	Industry	Other
Japan	244	384	297	170
USA	1,490	2,128	694	727
France	133	41	86	109
Germany	185	370	153	207
UK	139	203	82	125

〈표 3〉 SO_x의 대기 방출원(1992년)

단위 : k t/年

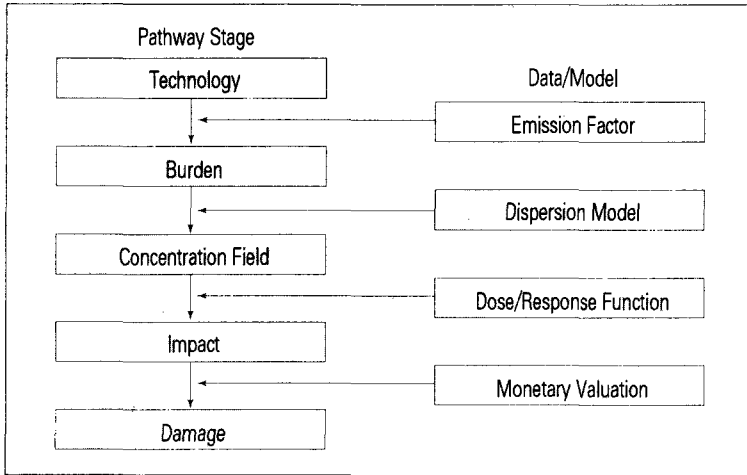
	Transport	Electricity Generation	Industrial Combustion	Industrial Processes	Other
Japan*	199	192	425	N/R	60
USA	958	14,371	3,337	1,919	37
France	155	330	250	182	304
Germany	96	2,913	541	N/R	346
UK	118	2,428	734	19	195

* 1989 data

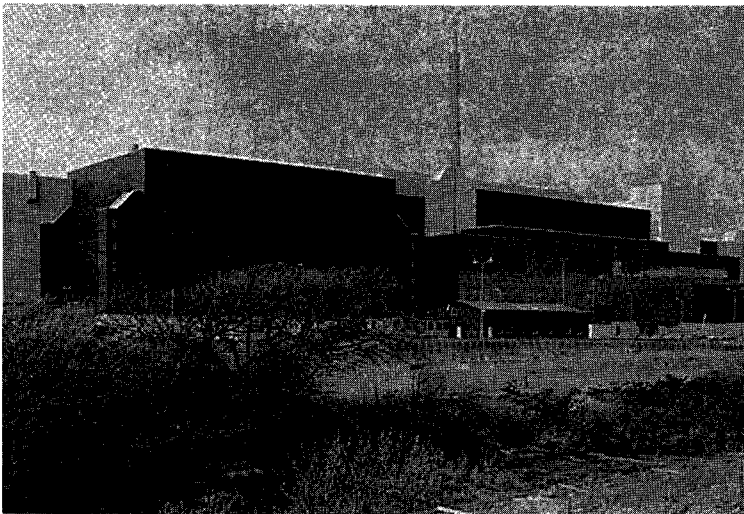
N/R Not reported

본 논문은 일련의 외부 비용 계산 연구의 결과를 기술함으로써 에너지 분야에서 폐기물 관리에 관한 논의의 배경을 설명코자 하는 데 그 목적을 두고, 외부 비용의 평가를 위한 방법론에 관한 간략한 검토를 하고 나

서, 석탄·갈탄·석유·가스·원자력(PWR)·풍력 및 수력 발전 주기에 관한 연구의 결과를 서술하였으며, 지구 온난화의 복합적인 문제에 관한 별도의 논의와 함께 가장 중요한 폐기물 유출에 관한 논의로 결론



〈그림〉 외부 비용 산정에 대한 영향 경로의 접근 방식



영국의 재처리공장 THORP

을 내리고자 한다.

방법론

외부 비용은 영향과 손상을 평가하

거나 손상을 일으키는 오염 물질을 약화시키는 비용을 산출함으로써 계산될 지도 모른다.

본 논문은 유럽위원회의 ExternE 프로젝트를 통한 일련의 전력 연료

주기에 대해 개발되고 적용된 손상 평가의 접근 방식에 초점을 두고 있다.

‘연료 주기’ 라는 용어는 특정의 연료로부터 출력된 전기 발전에 포함된 과정의 연결과 관련된다.

따라서 위에서 언급한 바와 같이 석탄 연료 주기의 평가는 전기 발전 그 자체뿐만 아니라 발전소 건설, 채탄, 석탄과 고체 폐기물의 운송 및 송전과 관련된 영향들을 포함해야 한다.

특정한 문제점 및 그 영향과 관련된 외부 비용의 계산은 ‘영향 경로’의 접근 방식을 통하여 만들어진다.

이러한 접근의 예는 〈그림〉에서 설명되고 있다.

다수의 훈련팀으로부터 얻어진 세부적인 데이터가 이러한 접근을 수행하는 데 필수적이다.

이는 다음 항목에서 필요하다.

- 기술적인 수행과 방출 데이터
- 방출·건강 및 안전 등을 관리하는 법률적 토대
- 사용된 연료의 명세서
- 대기 오염 물질의 분산에 영향을 주는 기상적 조건
- 수리·지질적 조건
- 인구 통계 데이터
- 생태적 자원의 정의와 조건
- 비시장 상품의 가치를 결정하는 개별적 가치 시스템의 정의

영향의 가치 평가는 입혀진 손상의 성격에 많이 의존한다.

영향이 농작물이나 건물에 대한 보수와 같은 거래된 제품에 미칠 때 시장 가격이 얻어질 수 있다.

결 과

ExternE 프로젝트는 다음의 전기 발전 연료 주기로부터 산출된 외부 비용을 고려하였다.

- 화석 연료(석탄·갈탄·석유·가스)
- 원자력(가압 경수로)
- 재생 에너지(풍력·수력)

1. 전기 발전을 위한 화석 연료 주기

현재까지 ExternE 프로젝트는 다음과 같은 발전소에 대한 사례 연구 실적이 있다.

- West Burton(영국)과 Lauffen(독일)에 위치한 무연탄 발전소
- Grevenbroich(독일)에 위치한 갈탄 발전소
- Lauffen(독일)에 위치한 두 개의 다른 석유 발전소
- West Burton(영국)에 위치한 천연 가스 발전소

이러한 연구들은 기존의 발전소들보다 이러한 부지들에 세워질 수 있는 발전소들을 근거로 하였다.

석탄과 갈탄 발전소들은 flue gas desulphurization을 갖는 증기 터빈을 사용하며, 석유 발전소는 경유를 태워 가스 터빈을 사용하고, 중유와

(표 4) 화석 연료 주기의 외부 비용 산정

단위 : 엔/kWh

Damage Category	Coal		Lignite	Oil(D)		Gas
	(UK)	(D)	(D)	GT	CCGT	(UK)
Public Health	0.6	1.8	1.4	1.6	1.4	0.1
Occupational Health						
- diseases	0.01	0.04	NQ	NQ	NQ	NQ
- accidents	0.1	0.3	0.01	0.07	0.04	0.01
Agriculture	0.004	0.003	0.003	0.006	0.003	NQ
Timber	0.0006	0.001	0.0006	0.002	0.001	Neg.
Marine Eco-systems	Neg.	Neg.	Neg.	0.03	0.03	0.0001
Materials	0.1	0.03	0.01	0.04	0.03	0.008
Noise	0.03	NQ	NQ	NQ	NQ	0.004

NQ = not quantified
Neg. = negligible

가스를 위한 열병합 발전소는 열병합 기술을 사용한다.

연료의 국내 자원은 모든 경우를 고려하여 사용하는 것으로 가정한다. <표 4>는 이러한 연료 주기들의 결과를 요약하고 있다.

가장 크게 정량화된 영향은 대중의 건강에 관한 것이다.

이러한 것들은 주로 1차 및 2차 미립자인 SO₂ 및 O₃들을 포함한 대기 방출로부터 발생하며, 그것들의 대부분은 발전소 자체의 발전에 의해 발생된다.

이들 그룹 내에서 지배적인 영향은 <표 4>에서 수치의 75%를 나타내고 있는 미립자들에 기인한 운동성이다.

그러나 이러한 평가는 평가에서 만들어진 2개의 가정들과 관련된 특정한 불확실성을 전제 조건으로 한다.

첫째, 세세한 입자들은 건강에 영향을 주지 않으며 둘째, 통계적인 수

명의 총수치가 모든 사망에 적용되었다.

후자는 손실된 수명 기간 또는 그 수명의 질은 무시한다.

이것은 특히 이러한 사망은 주로 만성적으로 아픈 사람들 가운데에서 발생하였기 때문에 매우 중요하다.

다른 중요한 손상 범위는 직업병(질병과 사고)과 기계의 손상이다.

전자는 사고와 해로운 물질에 대한 반복적인 노출, 소음과 물리적 및 정신적 스트레스와 관련된다.

2. 핵연료 주기

연구된 핵연료 주기는 후속의 핵연료 재처리와 함께 가압 경수로(PWR)에서의 농축 우라늄의 사용이었다.

핵연료 주기의 모든 단계는 프랑스에서 측정되었고, 우라늄의 채광 및 분쇄, 변환, 농축, 원자로 조사, 재처리, 폐기물의 처리 처분을 포함하였

〈표 5〉 기압 경수로 핵연료 주기의 외부 비용 산정

단위: m 엔/kWh

Range	Timescale		
	Short	Medium	Long
Local			
Mining	1	4	0.04
Conversion	0.08	0.04	6×10 ⁻⁴
Enrichment	0.1	10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁴
Fabrication	0.1	0.1	Neg.
Construction	4	0	0
Generation	1	7	Neg.
Decomm.	0	3	0
Reprocessing	0.4	0.04	4×10 ⁻⁴
LLW disposal	0	3×10 ⁻³	3×10 ⁻⁴
HLW disposal	0	Neg.	4
Transport	0.06	0.06	0
Sub Total	10	14	4
Regional			
Mining	0	3	0.03
Conversion	0	Neg.	3×10 ⁻⁴
Enrichment	0	Neg.	1×10 ⁻⁴
Fabrication	0	3×10 ⁻⁴	Neg.
Construction	0	0	0
Generation	0	0.4	Neg.
Decomm.	0	0	0
Reprocessing	0	1	0.3
LLW disposal	0	0	0
HLW disposal	0	0	0
Transport	0	0	0
Sub Total	0	4	0.3
Global			
Mining	0	0.003	0
Conversion	0	Neg.	0
Enrichment	0	Neg.	0
Fabrication	0	Neg.	0
Construction	0	0	0
Generation	0	4	42
Decomm.	0	0	0
Reprocessing	0	28	282
LLW disposal	0	0.01	0.7
HLW disposal	0	0	0
Transport	0	0	0
Sub Total	0	32	324

Neg. = <10⁻⁴ m엔/kWh

다.

중·저준위 폐기물의 처분은 기존의 프랑스 설비에 의한 것이었고, 유리 고화된 고준위 폐기물은 가설물에 보관되었다.

ExternE 프로젝트는 원전의 정상 운전으로부터 발생된 영향에 초점을 두었다.

대중과 작업 종사자들을 고려하여 인간 건강에 대한 방사성 물질의 영향이 강조되었다.

핵연료 주기의 영향은 넓은 공간 범위와 시간 평가 기준(timescales)을 갖고 있기 때문에 특히 복잡하다.

그 결과는 지방·지역 및 국제적으로 나뉘어지고, 단기(1년 미만), 중기(1~100년) 및 장기(100~100,000년)로 분류된다.

이 연구의 결과는 〈표 5〉에 나타내었다.

대중 건강 영향은 0.35엔/kWh 94%로 나타났다.

나머지 6%는 본질적으로 비방사성 물질에 의한 사고 상해인 직업적인 영향이다.

이러한 결과들을 적용시킬 때 특별히 고려되어야 할 문제가 있다.

첫째, 외부 비용의 80%가 장기적인 것에서 발생되며,

비할인 비용의 91%는 지구 영향에 기인된다.

이것은 100,000년 이상에 걸친 매우 적은 방사선량을 합계한 방법론을 통하여 발생된다.

영향 평가에 관한 이러한 타입의 화폐적 평가의 유의함은 좀더 고려할 필요가 있다.

이러한 문제점들에는 대처하지 못하였으나, 연료 주기로부터 발생된 폐기물 유출의 중대성을 보여주기에는 충분하다.

중·저준위 폐기물뿐만 아니라 고준위 폐기물도 외부 비용에는 영향을 주지 못하였다.

이것은 폐기물 형태와 계획된 저장과 처분 조건 등 모든 설계 수행을 반영한다.

지구 온난화

지구 온난화의 외부 비용에 대한 평가 방법론에서는 다음과 같은 범주의 주요 문제점들이 나타났다.

○지구 온난화의 양을 평가할 수 있는 기후 모델은 지난 10년간 잘 세워졌지만, 온난화 영향의 크기에 관한 불확실성은 여전히 남아있다.

○기후 변화의 영향에 관한 평가(농업, 수자원, 생물의 다양성, 연안 보호, 기타)는 큰 불확실성에 매여 있다.

○온실 가스의 방출과 기후 변화의

영향은 일시적으로는 분리되지
만 그 영향은 수년간 지속된다.

- 온실 가스 방출의 범위는 경제적·사회적 개발을 위한 미래의 지구 행로에 달려 있다.
- 거래 또는 비거래된 상품들의 가치는 미래의 경제 개발에 의존될 것이다.
- 새로운 발전소로부터 온실 가스 방출의 한계 영향 비용은 발전된 kWh당 발전소의 방출과 그것이 운전되고 있는 미래의 시나리오에 의존될 것이다.
- 지구 온난화의 영향은 시간에 의존하기 때문에 할인율의 문제는 영향의 평가에 중요하다.

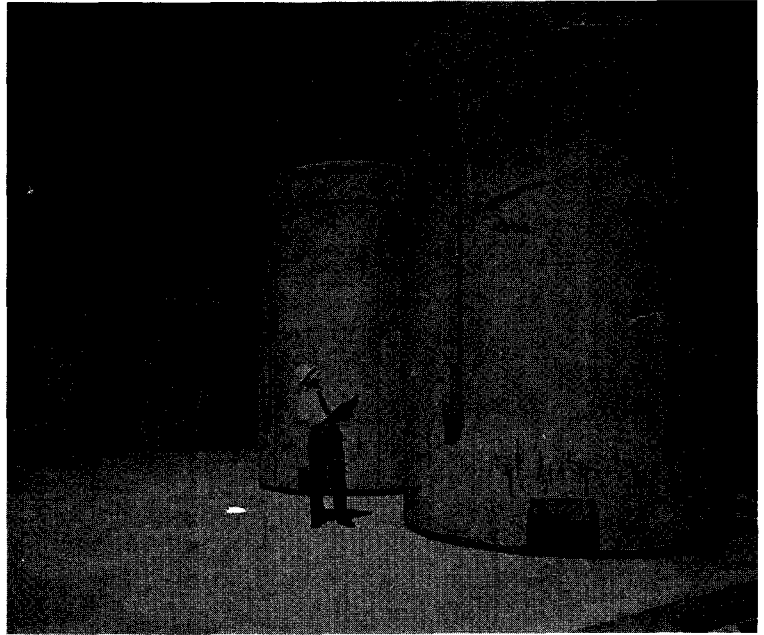
이러한 주요 문제들에 대한 세부적인 토론은 본 논문의 범위에는 포함되어 있지 않다.

이러한 복잡함과 적절한 데이터의 부족 때문에 특정한 연료 주기의 외부 비용에 관한 어떠한 계산도 불확실성을 조건으로 하고 있다.

그러나 국제에너지기구(IEA)의 온실 가스 연구 개발 프로그램에 의한 최근의 계산은 본 논문에서 보고된 다른 외부 비용과의 비교를 쉽게 하고 있다.

본 연구는 지역적인 기반 위에서 각각의 영향을 고려하여 총체적으로 산정할 수 있도록 하부에서 상부까지의 접근을 수행하였다.

이러한 것들은 <표 6>에 명시되어 있다.



미국의 Palisades 원전에 있는 건식 저장 시설

보고된 비용의 범위는 기후 변화 영향과 그것들의 비용에 관한 산정에 덧붙여진 불확실성의 범위를 반영하고 있다.

그러나 현재 최적의 평가라고 표현되는 중앙값은 이전에 보고된 다른 외부 비용에 대한 양과 비교할 수 있음을 주목해야 한다.

마이너스 값은 지구 온난화로부터 산정된 플러스적인 이익이 있는 상황을 나타낸다.

이것은 에너지 절약(난방의 감소) 면에서 이익이 마이너스적인 영향보다 더 중요할 때 발생한다.

중앙값은 또한 비교적 이전에 산정된 기후 변화의 값과 조화되어 있다.

<표 6> 특정 발전 기술 환경의 외부 비용 산정

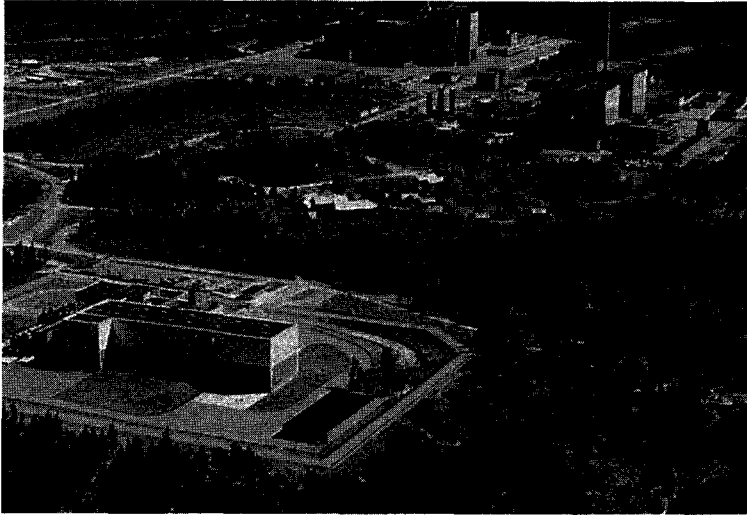
단위 : 엔/kWh

Fuel Cycle	Scenario	
	Intervention	Non-Intervention
Natural Gas(CCGT)		
High	33	67
Median	0.36	1
Low	-0.007	0.003
Coal(PF+FGD)		
High	55	113
Median	0.6	1.7
Low	-0.01	0.005

* Zero discount rate

원자력과 재생 연료 주기에 영향을 줄 기후 변화의 외부 비용을 계산하기 위한 시도가 이루어지지 않았다.

그러나 이러한 것들은 이러한 주기가 온실 가스를 직접 방출하지 않았기 때문에 위에서 보고된 것들보다 실질적으로는 적었다.



스웨덴의 사용후 연료 소외 중간 저장 시설인 CLAB 시설 전경

토론과 결론

본 논문은 폐기물 관리와 에너지 공급 및 이용의 환경·사회적 영향에 관한 논의의 배경 설명을 하기 위해 준비되었다.

이러한 목적을 시행하기 위하여 본 논문은 외부 영향의 비용에 대한 개념과 접근법에 대해 서술하였고, 아울러 최근의 연구 결과를 발표하였다.

그 내용은 화석 연료, 원자력과 재생 연료 주기, 그리고 환경 및 사회적 요소들에 미치는 영향 등을 다루었다.

기후 변화와는 별도로 비용 산정 결과는 1~2엔/kWh의 외부 비용을 갖는 석탄과 석유 연료 주기를 나타냈다.

가스 연료 주기 비용은 이것보다 적은 양의 등급에 관한 것이다.

핵연료 주기 비용은 약 0.3엔/kWh로 낮고 어떤 할인이 장기적으로 지구 영향에 적용되면 더 적게 될 수 있다.

기후 변화의 외부 비용은 가장 커다란 불확실성을 조건으로 하나, 가장 최상의 현재의 산정은 천연 가스 발전용은 0.3~1.0엔/kWh, 그리고 석탄 발전용은 0.6~1.7엔/kWh의 정도가 되어야 함을 제안하고 있다.

검토된 모든 연료 주기를 통해 고체 폐기물은 환경적 또는 사회적 영향의 주요한 자원으로서 고려되지 않는 점은 주목할 만하다.

이것은 아마도 대부분의 폐기물이 에너지 분야에서 잘 관리되고 있기 때문일 것이다.

사실 일부 폐기물은(발전소에서 생산된 재) 건축 또는 도로 건축 재료로

서 사용 가치가 있는 시장성을 갖고 있다.

전기 발전의 연료 주기로부터 발생된 고체 폐기물은 훌륭하게 관리되어 외부에 대해 영향력이 미치지 못하고 있다.

즉 잠재적인 영향에 대한 비용이 내부에 흡수된 것이다.

한 가지 마지막 관찰은 핵연료 주기의 외부 비용이 정상 운영을 토대로 계산되었다는 것이다.

그러나 사고 조건에 따라 핵연료 주기의 외부 비용은 더 높은 값으로 나타날 수도 있다.

현재의 폐기물 관리와 처분을 포함한 원자력에 대한 대중의 저항은 그 안전성이 공학적인 분석에 의해 나타난 것 만큼 그렇게 높지 않다는 인식에 연계되어 있기 때문에 이점이 논쟁이 될 수도 있다.

즉 다르게 말하면 외부 비용에 대한 대중 인식이 공학적으로 분석된 산정치보다도 더 크다는 것이다.

근본적으로 외부 비용은 비거래 상품에 매겨진 사회적 가치와도 연계되어 있기 때문에, 이러한 '인식된 외부 비용'은 일반 대중이 핵연료 주기 운영에 기인된 것으로 보는 외부 비용을 사실적으로 반영할 수 있을지도 모른다.

결론적으로 이러한 걱정을 줄일 수 있는 방법들이 도출될 수 있다면 그 인식된 비용은 줄어들 수 있다는 것이다. ☞