

원자력 발전 외부비용의 이해



전력정책연구실 연구위원 조성진

2015. 09. 04

- I. | 외부비용 이론적 배경
- II. | 원자력발전의 비용 구성
- III. | 원전 외부비용 선행연구 및 내재화
- IV. | 국내 원전 외부비용 추정 : 사고위험대응비용 측면
- V. | 결론 및 정책 제언

발 표 개 요

■ 발표 목적

- ✓ 발전비용에 대한 객관적 정보 제공으로 원전 수용성 제고와 안전성 인식 확대
- ✓ 국내 전력부문 외부비용 추정을 위한 중·장기적 연구의 필요성 제기
- ✓ 이를 위한 사회적 논의기구(가칭: '발전비용 검증위원회') 구성의 필요성 역설

■ 주요 내용

■ I. 외부비용 이론적 배경

- ✓ 사회적 비용 및 외부효과(Externality) 이론적 개념 설명
- ✓ 외부비용과 외부편익의 사회적 후생 손실과 해결 방법 설명

■ II. 원자력발전의 비용 구조

- ✓ 원전 직접비용과 외부비용(외부편익) 항목별 구분 및 설명
- ✓ 국내 원전 외부비용과 내재화 현황
- ✓ 해외 원전 외부비용 내재화 현황

발 표 개 요

■ Ⅲ. 원전 외부비용 선행연구 및 내재화 사례

- ✓ 국내 연구사례
- ✓ 유럽지역 연구사례
- ✓ 일본 연구사례: 비용등검증위원회(2011년), 발전비용검증위원회(2015년)

■ IV. 국내 원전 외부비용 추정 : 사고위험대응비용 측면

- ✓ 국내 원전 사고위험대응 외부비용 추정 전제
- ✓ 추정 결과

■ V. 결론 및 정책 제언

- ✓ 원칙적으로 모든 발전원의 외부비용은 가격 내재화하는 것이 자원의 효율적 배분 달성 차원에서 바람직함
 - 다만, 현재까지 전력부문 외부비용에 대한 종합연구가 부재하므로, 원전 외부비용 내재화 논의 이전에 먼저 원전사고위험대응비용 및 정책비용 등 외부비용에 대한 객관적이고 정확한 추정 연구가 선행되어야 함
- ✓ 원전을 포함한 전원별 외부비용 추정과 내재화 논의는 언제가, 누군가는 반드시 수행해야 할 과제
 - 각계 전문가 및 시민대표로 구성된 '사회적 논의기구(가칭: '발전비용 검증위원회') 구성을 통한 중·장기 종합연구가 필요한 시점



외부비용 이론적 배경

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

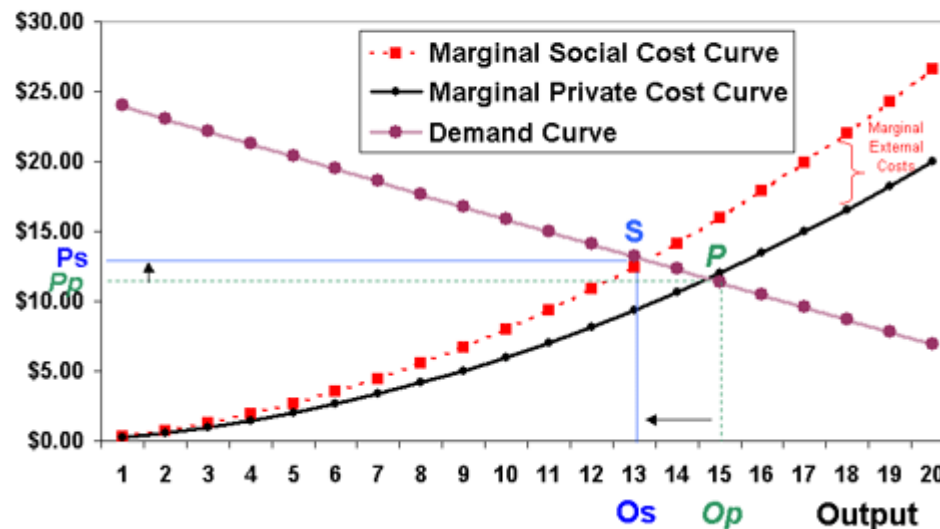
■ 사회적 비용(Social Costs)

: 사회적 비용은 내부비용(Internal Costs) 혹은 직접비용(Private Costs)에 외부비용(External Costs)을 모두 포함한 비용

✓ Private Costs + External Costs = Social Costs

- 만약 External Cost > 0, Social Costs > Private Costs
- 이 경우 시장가격은 사회적 균형가격보다 낮고, 실제 생산량은 균형 생산량보다 커 사회적 후생 손실을 발생

Using Social Costs (Private + External Costs) Results in Higher Prices and Lower Output and Better Resource Use



■ 외부효과(Externality): 외부비용(External Costs)과 외부편익(External Benefit)

: 외부효과(externalities)란 어떤 **경제주체의 생산 또는 소비활동이 다른 경제주체의 생산 또는 소비에 영향을 주지만 이렇게 발생한 편익이나 비용에 대한 보상이 이루어지지 않은 현상**을 의미

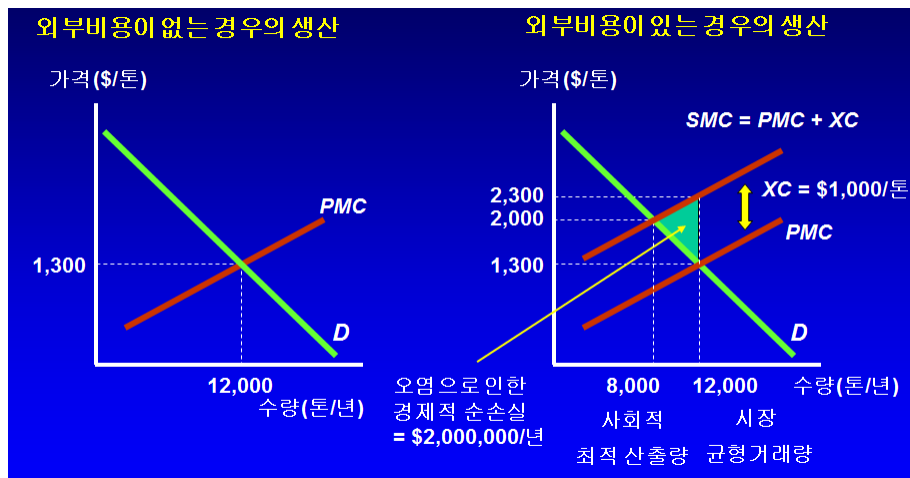
- ✓ 외부효과는 다시 편익을 주는 **긍정적 외부효과(positive externality)**와 비용이나 손실을 초래하는 **부정적 외부효과(negative externality)**로 구분
- ✓ 외부효과가 존재하여 가격기구를 통하여 파레토 최적을 달성할 수 없는 경우 **해결방법은 교정조세와 보조금(피구세, Pigouvian Tax)**

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

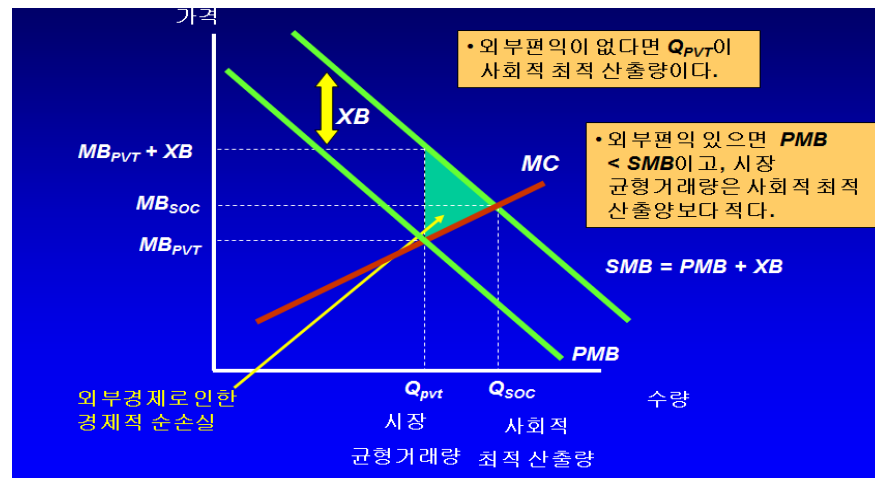
■ 외부비용과 외부편익의 사회적 후생 손실

- ✓ 외부비용이 발생하는 경우 **사회적 최적 산출량보다 더 많은 생산이 발생하고** 이는 사회적 후생 손실로 이어져 비효율적 자원배분을 초래(왼쪽 그래프의 녹색 삼각형)
- ✓ 외부편익이 발생하는 경우 **사회적 최적 산출량보다 더 적은 생산이 발생하여**, 이 역시 사회적 후생 손실이 발생하게 됨(오른쪽 그래프의 녹색 삼각형)

■ 외부비용



■ 외부편익

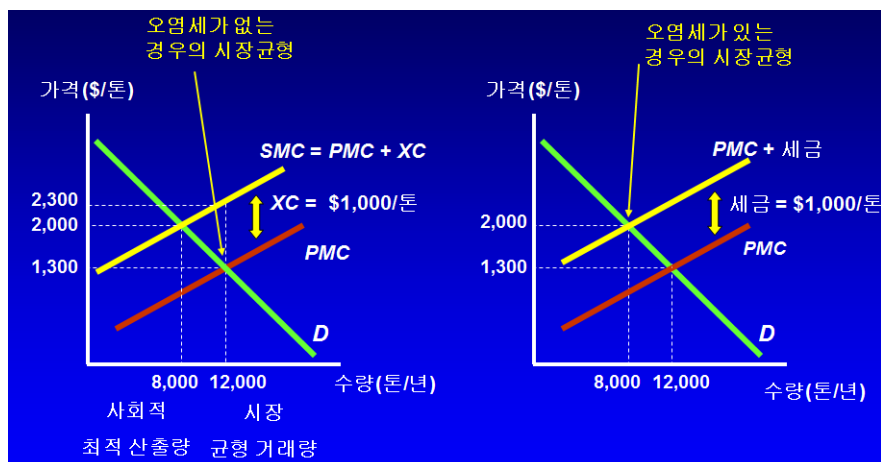


외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

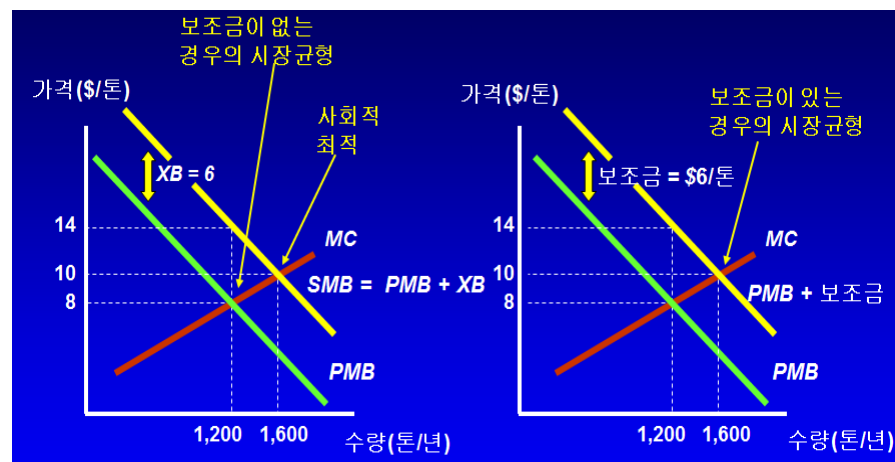
외부효과 해결 방법

- ✓ 외부비용은 교정적 조세를 부과함으로써 사회적 최적 산출량과 최적 한계가격을 달성할 수 있으며, 이 경우 사회적 후생 손실은 발생하지 않음
- ✓ 외부편익 문제는 보조금을 지급함으로써 사회적 최적 산출량과 최적 한계가격을 달성할 수 있음

외부비용 ⇒ 조세부과



외부편익 ⇒ 보조금 지급





원자력발전의 비용 구성

외부비용
이론적 배경

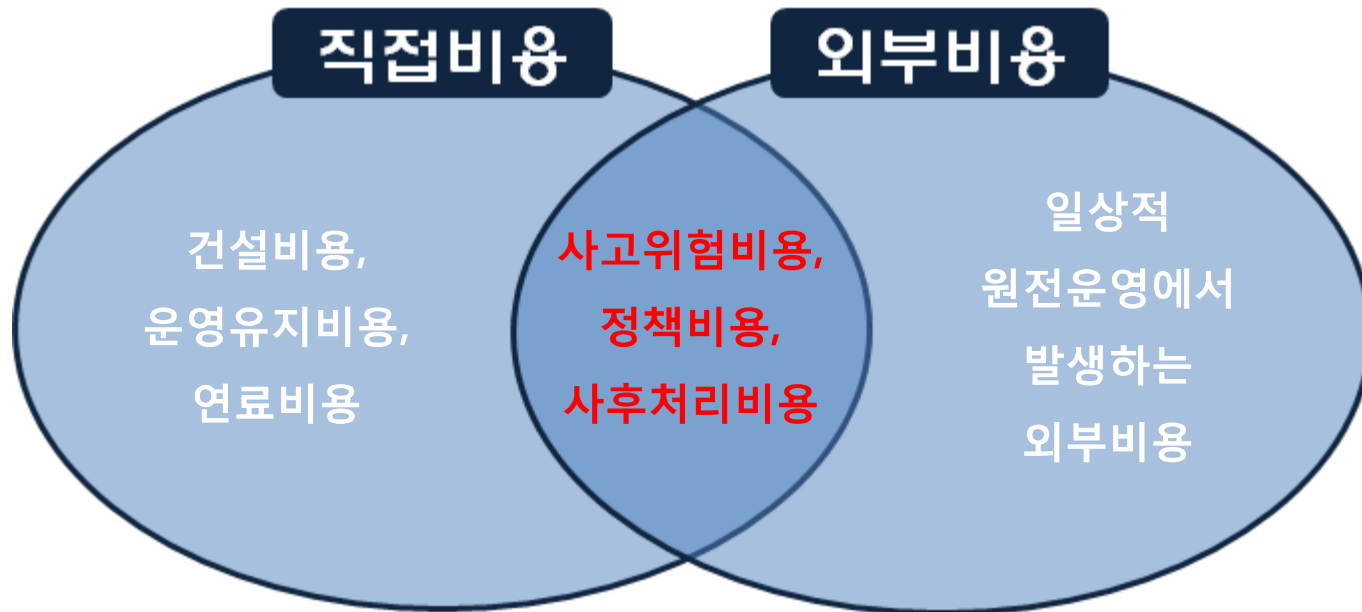
원자력발전의
비용 구조

원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례

국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면

결론 및 정책 제
언

■ 사회적 비용 = 직접비용 + 외부비용

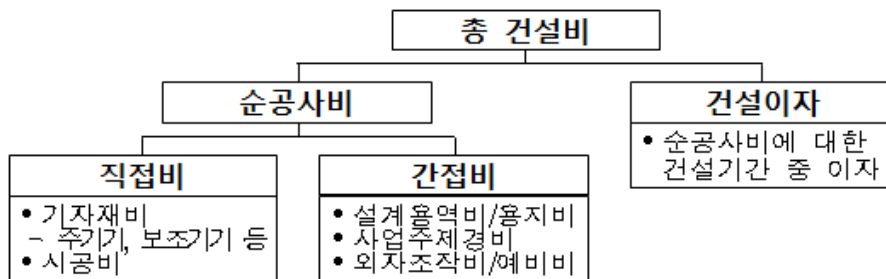


외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 직접비용

: 직접비용은 건설비용, 운전유지비용, 사후처리비용(선행 + 후행핵연료주기), 연료비용, 기타비용(정책비용)으로 구성

- ✓ 건설비: 순공사비(Overnight Cost)와 건설이자(IDC, Interest During Construction)로 구성



- ✓ 운전유지비: 인건비, 수선유지비, 경비, 일반관리비, 사후처리비(원전)로 구성되며, 사후처리비는 원전에만 적용
- 운전유지비에는 1.2원/kWh의 R&D 비용 포함

구분		항목	구성요소
원 자 력	화 력	인 건 비	급여 및 임금, 제수당, 잡급 등
		수선유지비	설비경상보수비, 수선유지재료비, 수선유지용역비 등
		경 비	광고선전비, 교육훈련비, 지역협력비, 제세/보험료 등
		일반관리비	판매 및 관리비
		사후처리비	원자력 철거비, 폐기물 및 사용후연료 처분비용
		R&D 비용	원자력연구개발기금

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 직접비용

- ✓ **연료비: 원자력발전의 연료비의 발전원가 비중은 약 9% 수준(4원/kWh 내외)**

구 분	원자력 1500	석탄 1000	LNG 복합 800
고정비(원/kWh)	37.8 (91.1%)	19.6 (31.1%)	13.6 (11.5%)
연료비(원/kWh)	3.7 (8.9%)	42.4 (68.9%)	104.2 (88.5%)
합 계(원/kWh)	41.5 (100%)	62.0 (100%)	117.9 (100%)

* 6차 전력수급기본계획 기준이며, 이용률 90% 기준임

- ✓ **정책비용**

- **지역자원시설세 (1원/kWh) 그리고 지역협력사업비(0.25원/kWh) 및 사업자 지원(발전소주변지역 지원에 관한 법률, 이하 발주법) 등**
- **송·변전설비 주변지역의 보상 및 지원에 관한 법률(이하 송주법)에 수반되는 일련의 비용 등**

■ 외부비용 및 외부편익

- ✓ 정책비용, 추가안전대책비용, 사고위험대응비용, 일상적 원전운영의 인체건강과 환경오염비용 등 항목이 국내외적으로 원전 외부비용 항목으로 언급되고 있음
- ✓ 원전의 외부비용 항목은 현재까지 정형화되지 않았으나, (OECD/NEA(2003) / William D. D'haeseleer(2013. 11) 보고서에서는 다음과 같은 항목을 원전의 외부비용 혹은 숨은 비용(Hidden Costs)으로 분류하고 있음

■ <OECD/NEA(2003, p12)>

“Aspects of nuclear energy that often are suggested to entail external costs include: radioactive waste disposal, future financial liabilities arising from decommissioning and dismantling of nuclear facilities, health and environmental impacts of radioactive releases in routine operation and effects of severe accidents”

- ① **Routine Operation**: In normal operation under independent and effective regulation, nuclear power plants and fuel cycle facilities have relatively small health and environmental impacts
 - 일상적 원전운영이 외부비용은 원전 선행핵연료주기 및 발전, 그리고 후행핵연료주기 등 원전 전주기에서 발생하는 인체건강과 주변 환경오염을 의미
- ② **Severe Nuclear Accidents**
 - 원전사고위험대응에 대한 외부비용은 노심손상(CDF, Core Damage Frequency), 방사성물질의 대량조기방출빈도(LERF, Large Early Release Frequency) 등과 같이 중대한 원전사고 발생 시 외부비용을 의미함
- ✓ OECD/NEA(2003) 보고서에서는 원전의 외부비용뿐만 아니라, 외부편익에 대해서도 언급하고 있으며, 정량적 분석의 애로로 정성적 분석만 언급
 - Energy security, Environmental protection, Research and development spin-off, Balance of payments, Price stability
 - ❖ Energy Security 정의: IEA(국제에너지기구, International Energy Agency)의 정의에 의하면, 에너지안보는 ‘합리적인 가격으로 에너지 자원을 중단 없이 가용할 수 있음’을 의미함

■ 국내 원전 외부비용과 내재화 현황

- ✓ 국내 원전의 발전비용에는 건설비, 운전유지비(사용후핵연료폐기물 처리비용과 해체비용 포함), 연료비 등 직접비용과 지역자원시설세 (1원/kWh) 및 R&D비용(원자력연구개발기금, 1.2원/kWh), 그리고 지역협력사업비(0.25원/kWh) 및 사업자 지원 등 기타비용이 포함
 - 사후처리비용은 2012년 말 개정과 2015년 재개정을 통해 세계 수준으로 대폭 인상하였고, 지역자원시설세 역시 기존 0.5원/kWh에서 1원/kWh로 100% 인상
 - 2014년 12월, 원자력손해배상액을 기존 500억원에서 5,000억원으로 상향 조정하는 등 사고위험대책비용의 외부비용 일부를 이미 내재화

■ 방사성폐기물관리비 산정 결과

사후처리비 항목		'12년 말	'14년 말
방사성폐기물 관리비용 (200L 드럼당)	중·저준위	1,193만원	1,219만원
사용후핵연료 관리부담금 (다발당)	경수로	320백만원	동일
	중수로	13백만원	동일
해체충담금 (호기당)		6,033억원	6,437억원

자료 : 산업통상자원부 방사성폐기물관리비용산정위원회(2015. 5), '2014년 방사성폐기물 관리비용 산정 최종보고서-방사성폐기물 관리비용, 사용후핵연료관리 부담금, 원전해체 충담금'의 내용을 요약·정리

- 중·저준위 방사성폐기물 관리비용(1,193만원/드럼 → 1,219만원/드럼)
- 사용후핵연료관리 부담금(경수로 : 319,814천원/다발, 중수로 : 13,202천원/다발)
- 원전해체 충담금(6,033억원/호기 → 6,437억원/호기)

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 국내 원전 외부비용과 내재화 현황

- ✓ '발주법'과 '송주법'을 통해 정책비용을 기 내재화하고 있으며, 후쿠시마 사고 직후 약 1조 500억 원의 자금을 투입하여 원전시설의 안전성을 보강
 - 이는 추가안전대책비용의 외부비용을 기 내재화한 것으로 볼 수 있으며, 결과적으로 기술적 측면에서 발전기의 확률론적 사고발생 빈도를 낮춤
- ✓ 사건으로 국내 원전 외부비용 항목에서 고려해야 할 부분은 사고위험대응비용(원전 보험 측면)의 적정 반영 여부와 일상적 원전운영의 인체건강과 환경오염 비용의 반영 여부로 판단됨. 사후처리비용은 2012년 말 개정과 2015년 재개정을 통해 세계 수준으로 대폭 인상하였고, 지역자원시설세 역시 기존 0.5원/kWh에서 1원/kWh로 100% 인상

외부비용 항목	해당 사항	외부비용 반영 유무
Routine Operation	Mining and Milling	미반영
	Conversion	
	Enrichment	
	Fuel Fabrication	
	Electricity Generation	
	Reprocessing	
	Waste Disposal	
	Transportation	
Nuclear reactor accident	- 중대 CDF 사고 - 중대 LERF	일부 반영: 원자력손해배상법에 의해 사고 발생 시 사업자는 5,000억 원의 손해배상금 지불(유한책임)

■ 해외 원전 외부비용 내재화 현황

- ✓ 원전 과세는 원자력 연료에 세금을 부과하는 핵연료세와 방사성폐기물에 부과하는 방사성폐기물세로 분류
- ✓ 일본의 경우 지방자치단체가 법정 외 일반세로 원전연료세, 사용후핵연료세 및 핵연료등취급세를 자치단체별로 다르게 부과
 - 징수된 세수는 원자력안전대책비와 민생안정대책비로 대부분이 충당되며, 일부 세원은 생업안정대책비로 지출
- ✓ 벨기에는 국세로 부과되는 원자력 생산세 (Nuclear production tax)와 수수료 형태인 방사능위험 부담금(Fees for ionizing radiation), 지방세 형태의 원자력 개발위험 보상금(Compensation for nuclear exploitation nuisance) 등 3가지 원전 과세 부과
- ✓ 스페인은 원자력 발전으로 인한 사용후핵연료 및 방사능 폐기물의 생산에 대한 세금과 원자력 발전으로 인한 사용후핵연료 및 방사능 폐기물의 저장에 세금 부과
 - 첫 번째 세금은 원자력 발전에 사용된 핵연료와 폐기물이 원자력발전 원자로에서 영구적으로 제거된 양에 대해 부과하는 것이고, 두 번째 세금은 발전소에 임시로 저장된 사용후핵연료와 방사성 폐기물에 대해 부과
- ✓ 스웨덴은 1990년대 말 원전 과세 부과를 시작하였고, 세율은 애초 0.30~0.32유로/kWh에서 2006년 1월 0.6유로/kWh로 인상되었고, 2008년에는 0.67유로/kWh로 인상
 - 세율 부과 목적은 원전 가격경쟁력을 다른 발전원보다 낮게 하기 위함. 이는 1980년대 정부의 원전 단계적 폐지 정책의 일환
- ✓ 헝가리 1998년에 원자력 발전의 사용후핵연료와 방사성 폐기물의 처리와 저장비용을 마련하기 위하여 원자력 발전에 부담금을 부과
 - 부담금은 중앙 원자력 재정 기금(Central Nuclear Financial Fund)으로 쌓이게 되고 핵연료, 방사성 폐기물의 관리와 처리에 소요되는 비용 충당

■ 해외 원전 외부비용 내재화 현황

- ✓ 국가마다 원전 과세항목과 세율이 다르고, 세금부과 목적 역시 상이하여 정형화가 어려운 관계로 해외사례를 우리나라에 그대로 적용하는 것은 부적절함
 - 원전에 과세를 하는 국가 중에 원전사고위험대응비용과 일상적 원전 운영에서 발생하는 외부비용을 조세로 내재화하는 국가는 없음
 - 원전과세를 일반세 내지 목적세 혹은 국세 내지 지방세로 설계하고 있으며, 세율 역시 국가별 환경을 고려하여 다르게 책정
 - 세수의 활용 방안 역시 국가별로 상이한데 일본과 브라질과 같이 지방재정으로 이관하는 경우가 있는 반면, 독일과 벨기에 그리고 프랑스와 같이 세수를 재생에너지확대 및 수요관리 정책에 지원하는 사례도 있음
- ✓ 우리나라의 경우 원전에 과세를 부과하지는 않고 있으나, 해체비용 및 방사성폐기물처리비용을 모두 발전비용에 포함하고 있고, 지방세 성격의 지역자원시설세 및 1.2원/kWh의 원전 R&D 비용 역시 발전비용에 포함
 - 벨기에, 스페인, 헝가리 등과 같은 국가는 방사성폐기물처리비용을 원전 과세의 형태로 부과하고 있어, 우리나라의 경우와 직접적인 비교는 부적절
 - 독일, 스웨덴, 프랑스, 브라질 등은 정치적인 이유 혹은 신재생에너지 확대를 위한 재정 마련 등의 이유로 원전에 과세
 - 일본의 경우 국세인 전원개발촉진세와 지방세인 핵연료세 및 사용후핵연료세를 부과하고 있어, 우리나라에서 지방세인 지역자원시설세만을 부과하는 것과 차별화됨



원전 외부비용 선행연구 및 내재화

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 국내 사례

- ✓ 사회적 갈등비용을 제외한 사고위험대응비용과 정책비용만을 외부비용으로 가정했을 때, 원전의 외부비용은 최소 1.80 원/kWh(에기본)에서 최대 63.7원/kWh(국회예산정책처 보고서의 에기본워킹그룹 참고자료, 사고위험비용+정책비용)으로 나타남

■ 국내 선행연구의 외부비용 추정결과

연구	외부비용 추정결과
박원석 위원실	7.5원/kWh
김승래	사고위험비용: 7원/kWh, 제반사회갈등비용: 17원/kWh
국회예산정책처	사고위험비용: 0.08 ~ 59.8원/kWh + 정책비용: 3.9원/kWh
에기본	사고위험비용+정책비용: 1.80 ~ 5.75원/kWh

주 : 사고위험대응비용과 정책비용의 외부비용을 중심으로 정리함

■ 국내 선행연구의 외부비용 추정결과

세부항목		내역
직접 비용	발전원가	43.02~48.8원/kWh
	사고위험비용	총사고비 58조~343조원 0.08~59.8원/kWh)
사회적 비용	안전규제비용	안전규제 강화에 따른 건설비 및 운전유지비 증가 (신규 원 자력발전소 안전설계 수준에 따라 달라짐) 후쿠시마 사고대응비용 9,194억원 (2014~2015년)
	입지갈등비용	중준위 방폐장 입지갈등비용(~2013) 9,395억원 고준위 방사성폐기물 처분장 입지갈등비용 고압 송전선로 경과지의 입지선정시 갈등 신규 원전 1기당 송전선로 건설 관련 비용 4,037억원 (신규 원전부지에 230km 구간 765kV 설치 가정)
	정책비용	2013년 재정사업비 5,169억원(3.9원/kWh)
	미래세대비용	고준위 방사성폐기물 처분장의 국토손실비용

자료 : 국회 예산정책처(2014. 3)

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 유럽지역 사례

■ 1) William D'haeseleer(2013. 11)

- ✓ 유럽연합 지역의 원전 외부비용에 대한 주요 연구사례를 종합적, 포괄적으로 조사·분석하고 있어, 원전 정책담당자와 사업자의 원전정책 및 프로젝트 의사결정의 유용한 지침서를 제공
 - 동 연구에서는 원자력발전의 외부비용 항목 중 일상적인 원전 운영에 따라 발생하는 외부비용과 중대 원전사고 발생에 따른 외부비용을 기존 연구사례 비교분석을 통해 구분하여 제시
 - 일상적인 원전 운영에서 발생하는 외부비용에는 방사성 폐기물처분비용, 원전 해체 비용 및 일상적인 원전 운영 중 발생하는 방사성물질의 방출에 따른 인체 및 환경 피해비용이 포함됨
- ✓ 원전사고가 아닌 일상적인 운영에서 발생하는 외부비용 추정치는 1~4 €/2012/MWh의 범위 제시, 이는 다른 발전원의 외부비용과 비교할 때 매우 낮은 비용 수준임
- ✓ 중대원전사고 발생에 대한 외부비용은 평균 1 €/2012/MWh, 최소값은 0.3 €/2012/MWh이며, 최대값은 3 €/2012/MWh으로 제시

■ 유럽지역 사례

■ 2) 독일 IER(2013. 2)

- ✓ 일상적인 원전 운영에 따라 발생하는 외부비용은 3~3.5 €/2010/MWh로 추정
- ✓ IER에서 추정한 석탄발전의 환경오염 및 인체에 미치는 외부비용은 40 €/2010/MWh, 가스발전은 20 €/2010/MWh, 태양광(PV) 10 €/2010MWh, 풍력발전은 2 €/2010/MWh으로 풍력발전을 제외한 발전형식의 외부비용이 원자력발전보다 높게 추정
- ✓ IER은 독일의 중대 원전사고 발생에 대한 외부비용 역시 추정하고 있는데, 추정한 사고 발생의 외부비용은 원전사고 등급에 따라 최소 0.13 €/2010/MWh 에서 최대 0.15 €/2010/MWh로 도출되었고, 등급별 외부비용을 더한 총합은 0.23 €/2010/MWh

■ 3) Lévêque(2013a, b)

- ✓ 원전사고 피해비용을 430 billion€, 연간발전량을 10TWh로 전제, 사고 발생빈도는 과거 다양한 원전사고 중 노심손상 사고만을 중대원전사고로 전제하여 2×10^{-5} / reactor year적용
- ✓ 도출한 원전사고의 외부비용은 0.86€/MWh으로 소수점 첫째 자리에서 반올림해서 약 1€/MWh으로 제시

■ 유럽지역 사례

■ 4) Rabl(2013)

- ✓ 중대 원전사고 발생 시 원자로 상실비용, 전력손실 비용, 암유발 비용, 농작물 피해비용, 피난민 비용 및 사고 주변 정화 비용 등의 원전사고에 대한 외부비용을 정량적으로 추정
- ✓ 사고피해비용은 체르노빌의 비용 360 billion€2010, 사고 발생확률은 체르노빌과 후쿠시마 원전사고 발생년도 주기인 25년을 전제로 25년에 1회의 사고 발생 가정
- ✓ 도출한 원전 사고의 외부비용은 중간값의 경우 3.8 €2010/MWh이며, 최저 0.8 €2010/MWh, 최고 22.9 €2010/MWh

■ 5) 프랑스 원전규제기관 ASN 산하 기술지원기관인 IRSN의 연구

- ✓ 연구에서는 원전사고를 두 분류로 구분하고 있는데, 첫째는 심각한 원전사고(Severe accident)이고, 다른 하나는 중대 원전사고(Major accident)
- ✓ 심각한 원전사고의 경우 추정된 피해비용은 120 billion €2010이며, 중대 원전사고의 피해비용은 430 billion €2010
- ✓ 원전사고 발생확률은 국제원자력기구(IAEA)의 기준인 방사성물질의 대량조기방출빈도(large early release frequency)를 적용
- ✓ 제3세대 원전의 대량조기방출빈도 10-5/reactor year 적용 시 원전 사고의 외부비용은 0.12 €/MWh ~ 0.43 €/MWh로 추정되며, 보다 보수적인 빈도 10-4/reactor year 적용시 추정된 외부비용은 1.2 €/MWh ~ 4.3 €/MWh

■ 일본 사례(비용등검증위원회(2011년), 발전비용검증위원회(2015년))

- ✓ 2015년 '발전비용검증 워킹그룹'에서는 장기 에너지수급전망 참고가 되는 전원별 발전비용을 추정
 - 추정 방법은 OECD, EIA(미국 에너지 통계국) 등 전 세계적으로 널리 사용하는 **모델플랜트 방식(균등화발전비용법)**

$$\text{엔/kWh} = \frac{\text{자본비} + \text{운전유지비} + \text{연료비} + \text{사회적비용}}{\text{발전전력량(kWh)}}$$

- 원전 비용 항목으로는 발전과 직접 관계된 비용뿐 아니라 **폐로비용, 핵연료주기비용(방사성폐기물 최종처분을 포함) 등 미래 발생하는 비용, 사고대응비용(손해배상, 제염을 포함), 전원입지교부금·몬주 등의 연구개발 정책비용 포함**
- 재산정된 사고 피해비용 규모는 **사고 폐로비용 1.8조 엔, 배상비용 5.7조 엔, 제염·중간저장비용은 3.6조 엔, 그 외 비용 1.1조 엔으로 총 12.2조 엔이며 이를 출력규모, 지역성, 인구비율로 보정하여 도출한 최종 피해규모는 9.1조엔(86조 원)**

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 일본 후쿠시마 원전사고 피해비용 규모(2015년 기준)

(단위 : 조엔)

구분	보정 전 피해비용 규모	보정 후 피해비용 규모	비중 (%)
사고폐로비용	1.8	1.3	14.75
배상비용*	5.7	4.3	46.72
제염·중간저장비용	3.6	2.7	29.51
기타 비용	1.1	0.8	9.02
총계	12.2	9.1	100

*: 후쿠시마 원전 반경 30km 이내의 인구는 약 17만2천 명 거주로 추정

- 주 1: 손해배상비용 중 일과성의 비용에 관해서는 출력과는 관계없이 계상하고, 매년의 비용에 관해서 모델플랜트와 후쿠시마 1호기부터 3호기까지의 출력의 비로 보정
- 주 2: 손해배상에는 생명·신체적 손해, 정부에 의한 운항위험구역 및 비행금지구역의 설정에 관한 손해 등 정부지시에 의한 손해, 지방공동단체 등의 재산적 손해도 포함

- 사고발생 확률은 추가적 안전대책 시행으로 각국 규제기관과 국제기관의 안전 목표 기준, 안전대책 실시 후의 위험평가 개선(5,200로 · 년에 1회 → 12,100로 · 년에 1회 : 약 2.4분의 1로 저하)을 종합적으로 감안해 충분히 보수적으로 어림잡아 2011년 '비용등검증위원회'의 '2,000로 · 년'의 반분인 '4,000로 · 년'으로 전제
- 플랜트 이용률을 70%로 전제
- 위의 전제를 근거로 도출한 사고위험대응비용은 0.3엔/kWh

$$\frac{\text{① 손해비용 (円)} / \text{② 산정근거(로 · 년)}}{\text{③ 모델 플랜트의 연간 발전 전력량 (kWh)}} = \frac{\text{① 9.1 조 (円)} / \text{② 4,000 (로 · 년)}}{\text{③ 73.6 억 (kWh)}} = 0.3\text{円} \sim / \text{kWh}$$

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 2011년과 2015년 일본 원전 발전비용 추정 비교

구 분	비용등검증위원회 추정 (2011년)	발전비용검증 워킹그룹 (2015년)
추정방법	상호부조법	모델플랜트 방식(균등화발전비용법)
추정식	【 2011년 비용등검증위원회의 공제방식 】 모델 플랜트 기준 40년 ↓ ↓ $\frac{A) \text{손해비용 (円)} / B) \text{지불기간 (년)}}{C) \text{사업자의 연간 발전 전력량 (kWh)}}$ ↑ ↑ 2010년에 실제로 가동한 50기 합해서 표현	【 이번 】 모델 플랜트 기준 2011년 비용등검증 위원회에서는 2,000로 · 년 ↓ ↓ $\frac{A) \text{손해비용 (円)} / B') \text{산정근거 (로 · 년)}}{C') \text{모델 플랜트의 발전 전력량 (kWh)}}$ ↑ ↑ 모델 플랜트에 합침 모델 플랜트 1기
피해비용 집계액	5.8조엔	9.1조엔
사고발생 확률	1회/2,000로·년	1회/4,000로·년
사고위험대응비용 추정결과	0.5엔/kWh	0.3엔/kWh



국내 원전 외부비용 추정: 사고위험대응비용 측면

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

■ 국내 원전사고의 외부비용은 일본 사례를 벤치마킹, '모델플랜트' 기법을 적용하여 추정

- ✓ 제7차 전력수급기본계획의 원전 사고위험대응비용(5.72원/kWh)전제 및 2차 에너지기본계획(최대 5.75원/kWh)의 원전 사고위험대응비용 추정 결과도 일본 사례를 벤치마킹하여 도출

■ 국내 원자력발전 사고위험대응비용 추정 전제

추정방법	상호부조법	모델플랜트 방법
피해비용 전제	일본 피해비용 동일 적용 : 9.1조엔 (약 86조원, 환율 940원/100엔) ※ TMI 원전사고: 약 2조원 / 체르노빌 사고: 체르노빌은 265조원 (2011년 환율기준)	
연간발전량	2014년 원전 총설비용량 기준(20,716MW) 이용율 80, 85, 90%	이용율 80, 85, 90% / 1,000MW 원전 발전량
원전사업자 지불기간	40년	40년(설계수명)
사고 발생빈도 전제		
확률론적 빈도	A) 1.0×10^{-5} : 국제원자력기관(IAEA)가 설정하고 있는 기설치된 원자로의 조기대규모방출사고에 대한 안전기준이며, 세계에서는 230년에 한 번만 severe accident가 발생하는 확률 B) 1×10^{-4} : 국제원자력기관(IAEA)가 설정하고 있는 노심손상빈도(자료: INSAG-12(IAEA))	
과거 실적에 근거한 사고 발생빈도	A) 3.5×10^{-4} : 세계의 원자력발전소의 운전실적에 기초하는 것임. 14,353로·년에 5번의 사고발생이 측정되었음. 일본에서는 57년에 1번, 세계에서는 10년에 1번 severe accident가 발생하는 것에 상응 B) 2.0×10^{-3} : 일본의 원자력발전소의 운전실적에 기초하는 것임. 1,494로·년에 3번의 사고 발생이 측정됨. 일본에서는 10년에 한 번, 세계에서는 거의 1년에 1번으로 severe accident가 발생하는 것에 상응하는 것으로 매우 보수적인 전제임 ※ 일본의 원자로로는 50기, 전 세계 원자로 430기 전제 C) 2.5×10^{-4} : 일본 '발전비용검증 워킹그룹'이 적용한 사고 발생빈도 전제임	

1) 일본 원전사고 피해비용 규모의 국내 적용시 원전 입지특성 및 인구밀도 등을 고려하지 않음

2) IAEA(1999. 10), Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12(http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf).

■ 국내 원전사고의 외부비용은 일본 사례를 벤치마킹하여 '모델플랜트' 기법을 적용하여 추정

- ✓ 일본 원전사고 피해비용규모의 국내 적용 시, 단위면적당 인구밀도와 GDP 수준 등을 조정하여 준용할 필요가 있음
 - 일본 피해비용규모(86조 원)를 국내의 인구밀도 비율로 비례하게 산정한 피해비용규모는 약 127조 원이며, 1인당 명목 GDP까지 포함하여 조정한 피해비용규모는 약 85조 원임
 - 만일 일본 원전사고 피해비용 세부항목 중 배상비용(총 피해비용의 46.72%)만을 국내 인구밀도 비율로 조정하여 재추정한 피해비용규모는 105조 원 수준이며, 1인당 명목 GDP까지 포함하여 조정하여 집계한 피해비용은 86조 원으로 일본 피해비용규모와 유사
 - 보다 정확한 피해비용 규모 추산은 원전 주변 지역의 인구밀도와 해당 지역의 부동산 가치 등 배상기준에 대한 선행적 분석 연구가 필요
- ✓ 또한, 일본과 국내 원전의 피해비용규모는 원전 주변지역 및 기후 여건, 인구밀도 등 차이점이 많아, 원전 사고발생시 피해비용 역시 차이가 존재함

■ 주요국 인구밀도 및 1인당 GDP(2013년 기준)

지역/국가	인구밀도 (명/km ²)	1인당 GDP (US\$, Current)	중대원전사고경험
European Union	119.68	34,300	
Japan	349.29	38,634	후쿠시마 원전사고
United States	34.56	52,980	TMI 원전사고
France	120.42	42,631	원전사고 없음
Ukraine	78.52	4,030	체르노빌 원전사고
Korea, Rep.	515.87	25,998	원전사고 없음

외부비용
이론적 배경원자력발전의
비용 구조원전 외부비용 선행연구
및 내재화 사례국내 원전 외부비용 추정:
사고위험대응비용 측면결론 및 정책 제
언

추정 결과

- ✓ 추정결과에 따르면 원전 사고위험대응비용은 사고 발생빈도 기준과 이용율에 따라 최소 0.1091원/kWh에서 최대 24.5434원/kWh로 추정
- ✓ 국제적으로 공감대가 가장 큰 '세계원전 운영기준' 사고 발생빈도를 이용하여 추정한 외부비용은 3.8179원/kWh ~ 4.2951원/kWh
 - 이는 제7차 전력수급기본계획의 원전 사고위험대응비용 전제 5.72원/kWh, 제2차 에너지기본계획의 원전 외부비용 전제인 5.75원/kWh보다는 낮은 수준
 - 또한, 이 추정치는 유럽지역의 원전 외부비용을 종합적으로 연구한 William D"haeseleer(2013. 11)의 결론과도 유사
- ※ 중대원전사고 발생에 대한 외부비용은 평균 1 €2012/MWh, 최소 0.3 €2012/MWh이며, 최대 3 €2012/MWh

원전 사고위험대응비용 추정 결과(모델플랜트)

(단위 : kWh)

구 분		이용율(%)별 사고위험대응 비용 추정결과		
사고 발생빈도 기준	사고 발생빈도	80%	85%	90%
IAEA 기준(LERF)	0.00001	0.1227	0.1155	0.1091
IAEA 기준(CDF)	0.0001	1.2272	1.1550	1.0908
세계원전 운영기준	0.00035	4.2951	4.0424	3.8179
일본원전 운영기준	0.002	24.5434	23.0997	21.8163
일본 발전비용검증 워킹그룹 전제	0.00025	3.0679	2.8875	2.7270

V



KEEi

결론 및 정책 제언

- 원칙적으로 외부비용을 발생시키는 모든 발전원에 대해서는 종합적인 연구분석 통해 관련 외부비용을 정량화하고, 교정조세 수단으로 가격 내재화하는 것이 자원의 효율적 배분을 달성하는 이상적인 방향임
 - ✓ 다만, 현실적으로 외부비용에 대한 명확한 정의나 산정기준, 타 전원과의 비교 검토 등이 이루어지지 않고 있고, 기존 선행연구의 결과마다 원전 외부비용 항목과 추정결과에서 큰 차이가 존재하며, 개별 외부비용 항목에 이론적 근거가 부족
- 따라서 원전 외부비용 내재화 논의 이전에 먼저 원전사고위험대응비용 및 정책비용 등 외부비용에 대한 객관적이고 정확한 추정 연구가 선행되어야 함
 - ✓ 원전에 대한 외부비용 논의는 국제적 기준과 타 전원과의 비교 검토, 원전 이용에 따른 긍정적 효과 등이 종합적으로 반영된 상태에서 신중한 사회적 협의와 합의를 통해 도출되어야 하며, 이렇게 도출된 외부비용은 그 성격에 부합하는 조세의 형태로 반영하여 내재화시켜야 함

■ 원전 외부비용 내재화에 대한 이론적 근거나 타당성 확보, 외부비용의 정의 수립 및 산정절차, 조세 성격과 형평성 문제, 조세규모와 부과방식 등 다양한 해결과제가 선행되어야 함

- ✓ 우리나라 원전 발전비용에는 원전 해체 및 방사성폐기물질 처리비 등 사후처리비용과 지역자원시설세(1원/kWh) 및 R&D비용(원자력연구개발기금, 1.2원/kWh), 그리고 지역협력사업비(0.25원/kWh) 및 사업자 지원 등이 모두 포함되어 있음
 - 사후처리비용은 2012년말 개정과 2015년 재개정을 통해 세계 수준으로 대폭 인상하였고, 지역자원시설세 역시 100% 인상
 - 2014년 12월에 원자력손해배상액을 국제적 수준과 동일하게 500억원에서 5000억원으로 상향 조정하는 등 외부비용 일정 부분은 기 내재화됨

■ 원전을 포함한 전원별 외부비용 추정과 내재화 논의는 언젠가, 누군가는 반드시 수행해야 할 과제

- ✓ 각계 전문가 및 시민대표로 구성된 '사회적 논의기구(가칭: '발전비용 검증위원회') 구성을 통한 중·장기 종합연구가 필요한 시점
- ✓ 종합 연구에서는 전원별 **외부비용**뿐만 아니라, **외부편익**도 동시에 고려될 필요



참고자료 : 전 세계 원전 사고 현황

■ 전세계 원전사고 현황, 자료 Sovacool(2008), 피해비용은 2006 US\$

Year	Incident	INES level	Country	Fatalities	피해비용 (million\$/엔)	IAEA description
2011	Fukushima	7	Japan		9.1조엔 (2015년 기준)	Reactor shutdown after the 2011 Sendai earthquake and tsunami; failure of emergency cooling caused an explosion
2011	Onagawa		Japan			Reactor shutdown after the 2011 Sendai earthquake and tsunami caused a fire
2006	Fleurus	4	Belgium			Severe health effects for a worker at a commercial irradiation facility as a result of high doses of radiation
2006	Forsmark	2	Sweden			Degraded safety functions for common cause failure in the emergency power supply system at nuclear power plant
2006	Erwin		US	0	98	Thirty-five litres of a highly enriched uranium solution leaked during transfer
2005	Sellafield	3	UK	0	65	Release of large quantity of radioactive material, contained within the installation
2005	Atucha	2	Argentina			Overexposure of a worker at a power reactor exceeding the annual limit
2005	Braidwood		US	0	41	Nuclear material leak
2003	Paks	3	Hungary	0	37	Partially spent fuel rods undergoing cleaning in a tank of heavy water ruptured and spilled fuel pellets
1999	Tokaimura	4	Japan	2	54	Fatal overexposures of workers following a criticality event at a nuclear facility
1999	Yanangio	3	Peru			Incident with radiography source resulting in severe radiation burns
1999	Ikitelli	3	Turkey			Loss of a highly radioactive Co-60 source
1999	Ishikawa	2	Japan	0	34	Control rod malfunction
1993	Tomsk	4	Russia	0	44	Pressure buildup led to an explosive mechanical failure
1993	Cadarache	2	France			Spread of contamination to an area not expected by design
1989	Vandellios	3	Spain			Near accident caused by fire resulting in loss of safety systems at the nuclear power station
1989	Greifswald		Germany			Excessive heating which damaged ten fuel rods
1986	Chernobyl	7	Ukraine (USSR)	4056	2,350억 달러 (2011년 기준)	Widespread health and environmental effects. External release of a significant fraction of reactor core inventory
1986	Hamm-Uentrop		Germany	0	267	Spherical fuel pebble became lodged in the pipe used to deliver fuel elements to the reactor
1981	Tsuruga	2	Japan	0	3	More than 100 workers were exposed to doses of up to 155 millirem per day radiation
1980	Saint Laurent des Eaux	4	France			Melting of one channel of fuel in the reactor with no release outside the site
1979	Three Mile Island	5	US	0	2,400	Severe damage to the reactor core
1977	Jaslovské Bohunice	4	Czechoslovakia	0	1,700	Damaged fuel integrity, extensive corrosion damage of fuel cladding and release of radioactivity
1969	Lucens		Switzerland	0	22	Total loss of coolant led to a power excursion and explosion of experimental reactor
1967	Chapelcross		UK	0	76	Graphite debris partially blocked a fuel channel causing a fuel element to melt and catch fire
1966	Monroe		US	0	19	Sodium cooling system malfunction
1964	Charlestown		US			Error by a worker at a United Nuclear Corporation fuel facility led to an accidental criticality
1959	Santa Susana Field Laboratory		US	0	32	Partial core meltdown
1958	Chalk River		Canada	0	67	Due to inadequate cooling a damaged uranium fuel rod caught fire and was torn in two
1958	Vinča		Yugoslavia			During a subcritical counting experiment a power buildup went undetected - six scientists received high doses
1957	Kyshtym	6	Russia			Significant release of radioactive material
1957	Windscale Pile	5	UK	33	78	Release of radioactive material to the environment following a fire in a reactor core
1952	Chalk River	5	Canada	0	45	A reactor shutdown rod failure, combined with several operator errors, led to a major power excursion of more than double the reactor's rated output at AECL's NRX reactor

■ 원전 사고위험대응비용 추정 결과(상호부조법 적용)

(단위 : 원/kWh)

손해비용(조원)	이용률(%)		
	이용률 80%	이용률 85%	이용률 90%
후쿠시마 Case (86조원)	14.81	13.94	13.16
TMI Case (2조원)	0.34	0.32	0.31
체르노빌 Case (265조원)	45.63	42.95	40.56

감사합니다 !



KEEi
에너지경제연구원