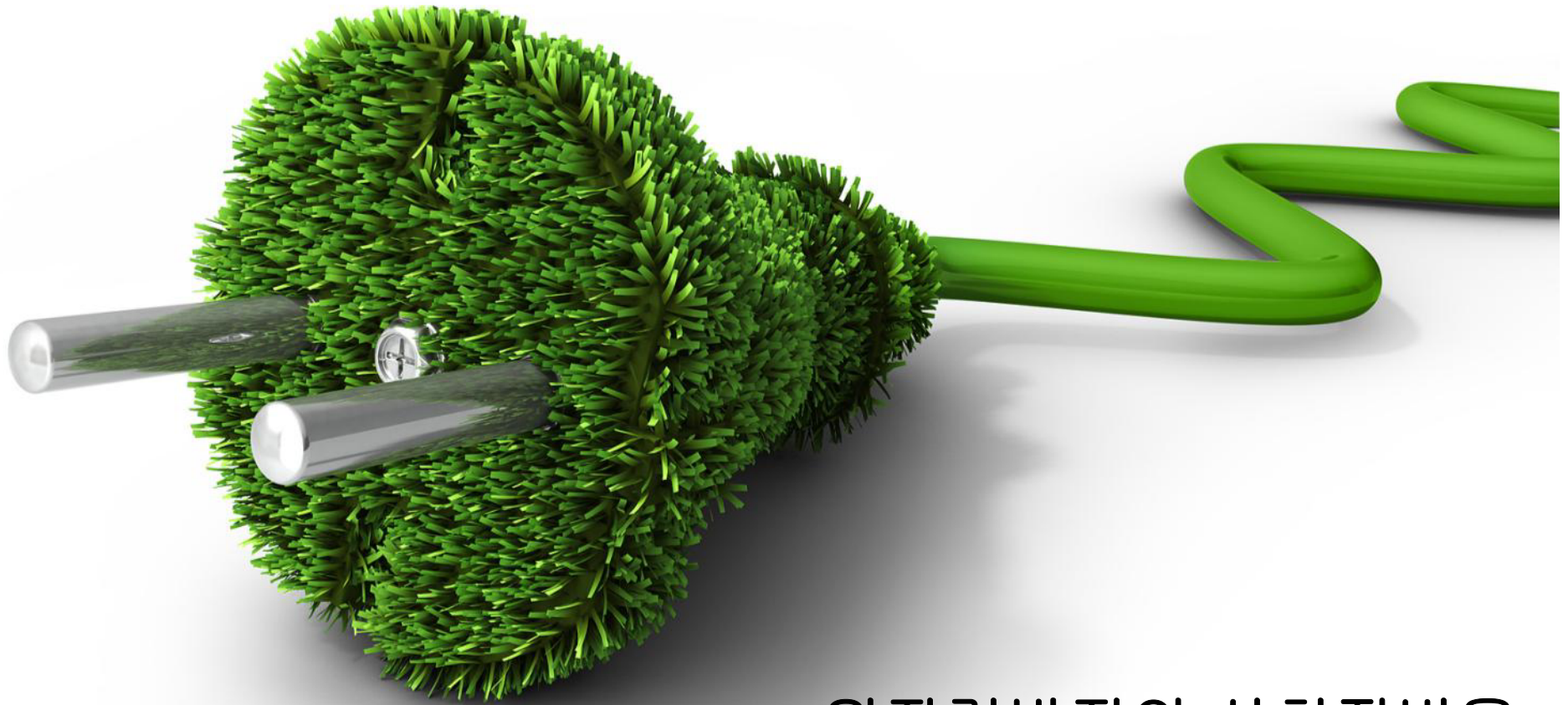




## 원자력발전의 사회적비용

이창훈(KEI)

2018년 6월 28일

# CONTENTS

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

요약 및 정책 제언



# CONTENTS

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

요약 및 정책 제언





## 원자력발전의 사적 비용

### 사적 비용과 사회적 비용

- **사적 비용(Private Costs)**
  - 기업이 지출한, 제품 생산에 필요한 생산요소의 구매비용
  - 예: 제지회사의 사적 비용은 제지 생산 및 판매를 위해 구입한 자원 [기계장비, 노동력, 원목 등]의 구매비용
- **외부 비용(External Costs)**
  - 기업이 제품을 생산하면서 야기한 비용 중 기업이 부담하지 않는 비용
  - 예: 제지공장의 폐수로 인해 어부의 어획량 손실
- **사회적 비용(Social Costs) = 사적 비용 + 외부 비용**

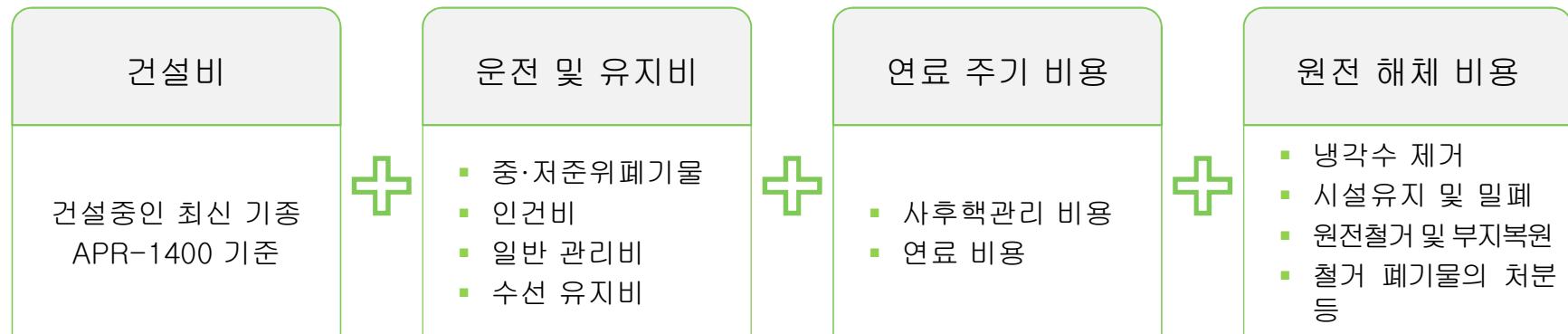




## 원자력발전의 사적 비용

### 사적 비용

원자력발전사업자가 원자력발전소의 건설 및 운영을 위해 지불하는 비용





## 원자력발전의 균등화원가: 기본 가정

| 항목             | 내용            | 비고                                                                                       |
|----------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 용량             | 1,400MWe      | (APR-1400)                                                                               |
| 가동연한           | 40년           |                                                                                          |
| 이용률            | 80%           |                                                                                          |
| 건설비용           | 3.2조원/호기      | 신고리 3,4호기 기준                                                                             |
| 수선유지비용         | 건설비의 4%       | 본문 참조                                                                                    |
| 연료비용           | 620.4억원/년     | 본문 참조                                                                                    |
| 사용후핵연료<br>관리비용 | 170.3억원/년     | 본문 참조                                                                                    |
| 원전해체비용         | 6,033억원/호기    | 산업자원부 고시                                                                                 |
| 할인율            | 6%            |                                                                                          |
| 소내소비율          | 4%            |                                                                                          |
| 발전량            | 9,418,752 MWh | 용량*이용률*(1-소내소비율)*365일*24시/일                                                              |
| 자본회수계수         | 0.066462      | $\frac{\text{할인율} * (1 + \text{할인율})^{\text{가동연한}}}{(1 + \text{할인율})^{(\text{가동연한}-1)}}$ |



## 원자력발전의 균등화 원가

| 항목        | 단가(원/kWh) | 비중     |
|-----------|-----------|--------|
| 건설비       | 22.6      | 46.3%  |
| 연료주기비용    | 8.4       | 17.2%  |
| 연료비       | 6.6       | 13.5%  |
| 사용후핵연료관리비 | 1.8       | 3.7%   |
| 수선유지비용    | 13.6      | 27.8%  |
| 원전해체비용    | 4.3       | 8.7%   |
| 합 계       | 48.8      | 100.0% |

### 균등화원가의 국제비교(US Cent/kWh)

| 국 가    | 한국       | 미국                | 프랑스   | 일본    | 러시아      | 중국       |
|--------|----------|-------------------|-------|-------|----------|----------|
| 기술     | APR-1400 | Advanced Gen III+ | EPR   | ABWR  | WER-1150 | CPR-1000 |
| 균등화 원가 | 42.09    | 77.39             | 92.38 | 76.46 | 68.15    | 44.00    |

자료: IEA/NEA(2010)



## 원자력발전의 균등화 원가

원전건설비 및 해체비 증가와 균등화 원가(원/kWh)

| 항 목    | 기준점             | 각각 30% 증가       | 각각 50% 증가       |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 건설비    | 22.6<br>(46.3%) | 29.4<br>(51.6%) | 33.9<br>(54.4%) |
| 원전해체비  | 4.3<br>(8.7%)   | 5.5<br>(9.7%)   | 6.4<br>(10.3%)  |
| 균등화 원가 | 48.8            | 56.9            | 62.2            |

※ ( )는 균등화원가에서 원전건설비, 원전해체비 비중.

# CONTENTS

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

요약 및 정책 제언

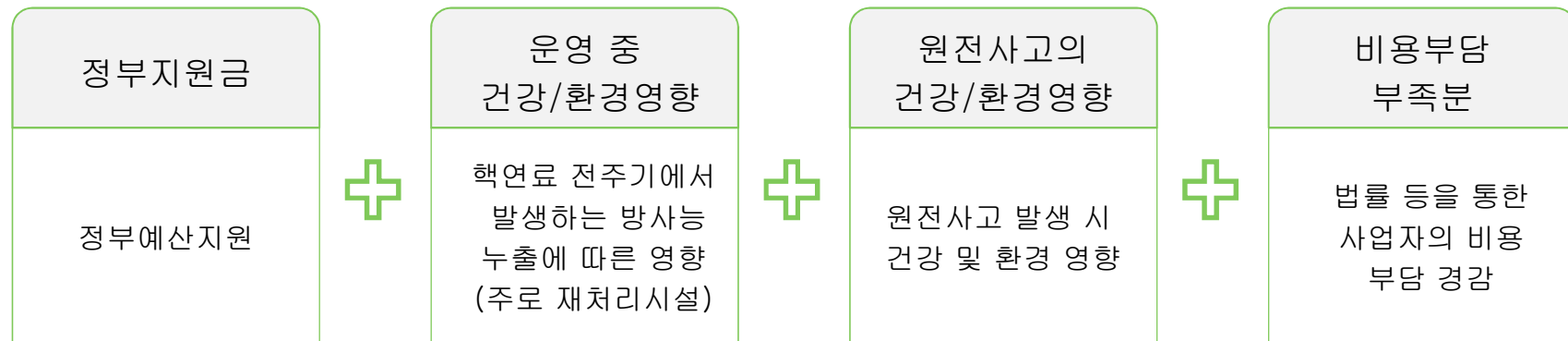




## 원자력발전의 외부 비용

### 외부 비용

- 외부비용: 원자력발전과 관련하여 발생하나 사업자가 부담하지 않고 정부나 제3자가 부담하는 비용
- 외부효과(경제학): 어떤 경제주체의 행위가 다른 주체의 효용이나 생산성에 "직접" 영향을 미치는 경우 발생 ("직접": 시장(가격메커니즘)을 통하지 않는 것)





## 원전 중대사고: 발생 현황

### ■ 원전중대사고의 개념

- IAEA 사고등급 5등급 이상의 사고
- 노심용해가 이루어지고 방사능물질의 일부가 외부로 유출된 경우

| 항목          | 스리마일 섬                        | 체르노빌                              | 후쿠시마                     |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 사고 발생일      | 1979년 3월 28일                  | 1986년 4월 26일                      | 2011년 3월 13일             |
| 발생 국가       | 미국                            | 우크라이나(구소련)                        | 일본                       |
| 사고 등급       | 5등급                           | 7등급                               | 7등급                      |
| 사고 원인       | 운전기준 위반 및<br>운전원의 오조작<br>(인재) | 정보교환 및 협력 미흡,<br>운전원의 오조작<br>(인재) | 지진 및 쓰나미<br>(자연 재해 + 인재) |
| 사고 금액       | US \$13억                      | US \$2,350억(최소)                   | 6.1조엔(최소)~               |
| 2013년 기준(원) | 1조 365억원                      | 246조원~                            | 약 65조원~                  |
| 보험금         | US \$3.7억<br>(3,885억 원)       |                                   |                          |



## 원전 중대사고: 피해액 및 발생확률

### 중대사고 시 피해액

- 1) 일본(실제발생): 5.8조엔(보상비용)
- 2) 일본(모델링): 2,000억 유로(IRSN)
- 3) 일본(신규추정): 50~70조엔(JCER, 2017)
- 4) 체르노빌: 벨라루스-2,350억USD, 우크라이나-1,980억USD (Samet/Seo, 2016)
- 5) 프랑스(모델링): 4,300억 유로(IRSN)
- 6) 독일(모델링): 5.9조 유로(Versicherungsforen Leipzig, 2011)

### 중대사고 발생 확률

- 1)  $10^{-6}$ : APR-1400 설계목표
- 2)  $1/7,000$ : 7등급 중대사고 실제 발생률
- 3)  $3.5 \times 10^{-4}$ : 실제발생률 (일본 코스트 등 검증위원회)
- 4)  $10^{-3}$ : 테러로 인한 사고발생확률 (Versicherungsforen Leipzig)





## 원자력발전의 외부비용 I: 정부의 명시적 보조금(2011년 결산)

(단위: 백만 원)

| 회계                 | 세부사업               |         | 사업시행주체               |
|--------------------|--------------------|---------|----------------------|
| 전력 산업<br>기반 기금     | 발전소 주변지역 지원        | 63,558  | 한국수력원자력              |
|                    | 원자력 대국민 홍보         | 9,400   | 한국원자력문화재단            |
|                    | 원자력 융합원천기술개발       | 94,108  | 한국에너지기술평가원           |
|                    | 에너지국제공동연구(원자력)     | 1,489   | 한국에너지기술평가원           |
|                    | 원전 해외수출기반구축        | 4,400   | 지식경제부                |
|                    | 소계                 | 163,222 |                      |
| 에너지 및 자원사업<br>특별회계 | 한국원자력연구원 연구운영비 지원  | 115,744 | 한국원자력연구원             |
|                    | 소계                 | 115,744 |                      |
| 일반 회계              | 한국원자력안전기술원 연구운영비지원 | 22,221  | 한국원자력안전기술원           |
|                    | 한국원자력통제기술원 연구운영비지원 | 17,783  | 한국원자력통제기술원           |
|                    | 원자력국제협력기반조성사업      | 5,403   | 한국연구재단               |
|                    | 원자력통제이행체제구축        | 2,398   | 한국연구재단,<br>한국지질자원연구원 |
|                    | 원자력안전기반구축사업        | 8,380   | 원자력안전위원회             |
|                    | 방사선안전기술개발사업        | 8,054   |                      |
|                    | 소계                 | 64,239  |                      |
| 합계                 |                    | 351,938 | 2.4원/kWh             |



## 원자력 발전의 외부비용 II: 정부의 암묵적 보조금

### Motivation

- 파리조약, 비엔나협약 등 원자력관련 국제협약은 원자력사업자의 경영안전성을 위해 사고발생 시 배상책임한도를 설정
  - 파리조약: OECD 주관, 15개국 참여, 7억 유로
  - 비엔나협약: IAEA 주관, 35개국 참여, 3억 SDR
- 우리나라도 파리협약 등에 가입해 있지 않지만 원자력손해배상법에 의거, 원자력사고로 인한 사업자의 배상책임을 3억 SDR(4.8억 달러)로 제한하고 배상을 위한 준비인 배상책임보험 가입의무를 사고당 500억 원으로 제한

### 접근 방법

- 사업자의 배상책임제한은 원전사업자에게 주는 간접보조금이므로, 현행 원자력 (제3자) 손해배상보험의 보험료 데이터를 이용하여 사고발생확률분포를 추정하고 간접보조금을 계산

### 선행 연구

- Fiore 2007, Nuclear Liability Limit in the OECD Conventions: an Implicit Subsidy
- Heyes/Listorn-Heyes 2000, An Empirical Analysis of Nuclear Liability Act(2070) in Canada
- Dubin/Rothwell 1990, Subsidy to Nuclear Power through Price-Anderson Liability Limit



## 원자력 발전의 외부비용 II: 정부의 암묵적 보조금

### 확률 모형

- 확률변수  $X$ : 중대사고로 인한 피해액
- 확률분포: 원자로·년(reactor year)당 중대사고피해액의 발생확률로, log-logistic 분포함수 가정

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-(a+b\log x)}}, f(x) = \frac{b}{x} \frac{e^{-(a+b\log x)}}{(1 + e^{-(a+b\log x)})^2}, a \in R, b \in R^+$$

### 데이터

- 한수원의 손해배상책임보험료는 손해배상보험료는 연간 35.9억 원으로 호기당 1.56억 원에 해당
- 보험사의 영업비용(30%) 및 리스크프리미엄(10%) 제외: 기대피해비용 = 0.98억 원/호기

### 모수 a,b의 추정: 비선형연립방정식의 해

$$E(x) = \int_0^{500} xf(x)dx + \int_{500}^{\infty} 500f(x)dx = 0.9833$$

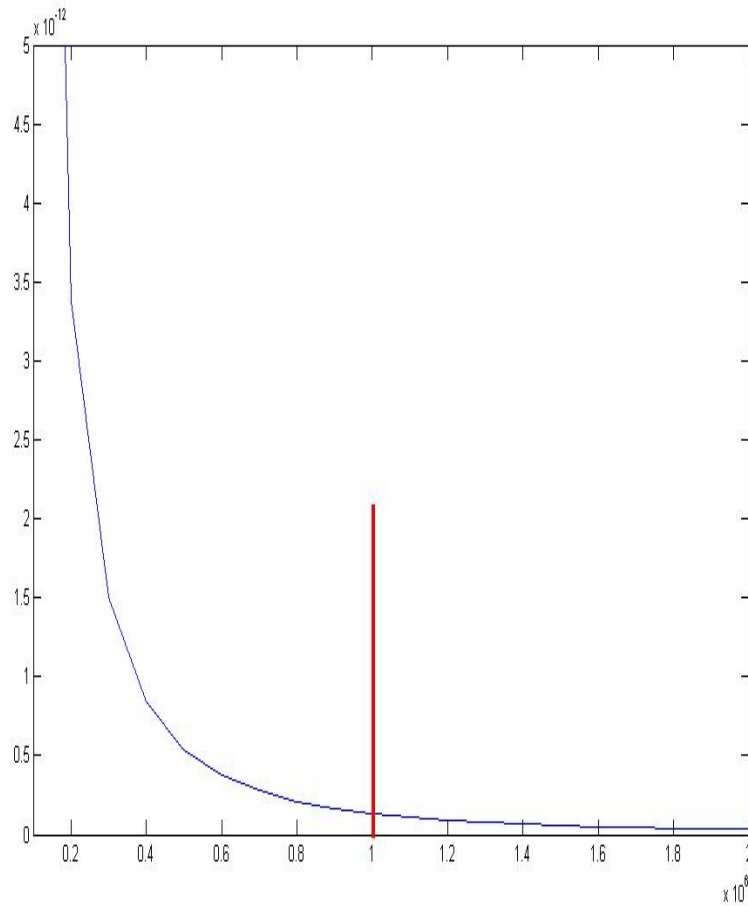
$$1 - F(\bar{X}) = \int_{\bar{X}}^{\infty} f(x)dx = p$$

$\bar{X}$ : 중대사고 최대피해액  
 $p$ : 최대중대사고 발생확률



## 원자력 발전의 외부비용 II: 정부의 암묵적 보조금

### 기대피해비용의 추정



$$\int_0^{\infty} xf(x)dx \quad \text{vs.} \quad \int_0^{\bar{X}} xf(x)dx + p \cdot \bar{X}$$

### 원전 사고의 기대피해비용

| 발생 확률        |           |        |                  |
|--------------|-----------|--------|------------------|
|              |           | 1/7000 | 10 <sup>-6</sup> |
| 중대사고<br>피해비용 | 금액(억원)    | 203.6  | 14.0             |
|              | 단가(원/kWh) | 2.2    | 0.1              |
| 500조원        | 금액(억원)    | 956.4  | 61.0             |
|              | 단가(원/kWh) | 10.2   | 0.6              |



## 원자력 발전의 외부비용 II: 정부의 암묵적 보조금

외부비용(간접보조금의 추정)

$$\frac{\int_0^{\bar{X}} xf(x)dx + p \cdot \bar{X}}{(1-0.3)(1-0.1)} - 1.56$$

<표> 손해배상 책임제한에 따른 암묵적 보조금(외부비용)

| 발생 확률        |           |        |           |
|--------------|-----------|--------|-----------|
| 중대사고<br>피해비용 |           | 1/7000 | $10^{-6}$ |
|              |           |        |           |
| 100조원        | 금액(억원)    | 321.7  | 20.6      |
|              | 단가(원/kWh) | 3.4    | 0.2       |
| 500조원        | 금액(억원)    | 1516.6 | 95.3      |
|              | 단가(원/kWh) | 16.1   | 1.0       |



## 원자력 발전의 외부비용 III: 위험회피비용 (시나리오 접근법)

### Motivation

- 기대피해비용 접근법:  $E(X) = \int_0^{\bar{X}} xf(x)dx$
- 문제점: 시민들의 위험중립적인 태도를 가정
- 위험회피(risk aversion)에 대한 보상이 필요

### 접 근 법

- (상대적) 위험회피계수를 활용하여 위험회피자가 위험 중립자 보다 원자력사고로 인한 위험을 회피하기 위해 얼마나 더 많은 돈을 지불할 용의가 있는 지 추정

### 선 행 연 구

- Eckhoudt/Schieber/Schneider 2000, Risk aversion and the external cost of nuclear accident



## 원자력 발전의 외부비용 III: 위험회피비용 (시나리오 접근법)

### 모 형

- 파워효용함수 가정 (W: Wealth)

$$U(W) = \frac{1-\beta}{\beta} W^\beta$$

- 상대적 위험회피계수  $A_r = -\frac{WU''(W)}{U'(W)} = 1 - \beta$

### 위험 상황

- 재산의 손실률 ( $X_1, \dots, X_N$ ) 및 발생확률 ( $p_1, \dots, p_N$ )

- 기대효용

$$E(U) = \frac{1-\beta}{\beta} \sum_{i=1}^N p_i (W(1-X_i))^\beta$$

- 위험중립자가 위험회피를 위해 지불할 최대 재산비중  $M_N = \sum_{i=1}^N p_i X_i$

- 위험회피자가 위험회피를 위해 지불할 최대 재산비중

$$\frac{1-\beta}{\beta} \sum_{i=1}^N p_i (W(1-X_i))^\beta = \frac{1-\beta}{\beta} W(1-M_A)^\beta \Rightarrow M_A = 1 - \left[ \sum_{i=1}^N p_i (1-X_i)^\beta \right]^{1/\beta}$$



## 원자력 발전의 외부비용 III: 위험회피비용 (시나리오 접근법)

### 적용 사례

- 프랑스 중대사고 피해비용 추정 자료 활용
- 사고발생지와 근접성(100km) 및 이주여부에 따라 세 개 집단으로 분류
- 피해의 크기에 따라 세 집단 별로 4개의 위험상황으로 분류(사고발생 안하는 경우 포함)

### 분석결과

$$A_r = 2 (\Rightarrow \beta = -1)$$

| 위험회피<br>재산비중 | 100km 이내,<br>이주      | 100km 이내,<br>비이주      | 100km 바깥              |
|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $M_A$        | $1.5 \times 10^{-8}$ | $1.5 \times 10^{-9}$  | $1.5 \times 10^{-9}$  |
| $M_N$        | $4.2 \times 10^{-9}$ | $4.9 \times 10^{-10}$ | $1.0 \times 10^{-10}$ |

### 민감도 분석

| $A_r$     | 0.5 | 1.2 | 2  | 2.5 | 3   |
|-----------|-----|-----|----|-----|-----|
| $M_A/M_N$ | 2   | 2   | 20 | 83  | 385 |





## 원자력 발전의 외부비용 III: 위험회피비용 (시나리오 접근법)

위험회피성향을 반영한 외부비용

|              |           | 발생 확률    |           |
|--------------|-----------|----------|-----------|
|              |           | 1/7000   | $10^{-6}$ |
| 중대사고<br>피해비용 | 금액(억원)    | 4,073.2  | 279.3     |
|              | 단가(원/kWh) | 43.2     | 3.0       |
| 100조원        | 금액(억원)    | 19,128.5 | 1,219.9   |
|              | 단가(원/kWh) | 203.1    | 13.0      |
| 500조원        | 금액(억원)    |          |           |
|              | 단가(원/kWh) |          |           |

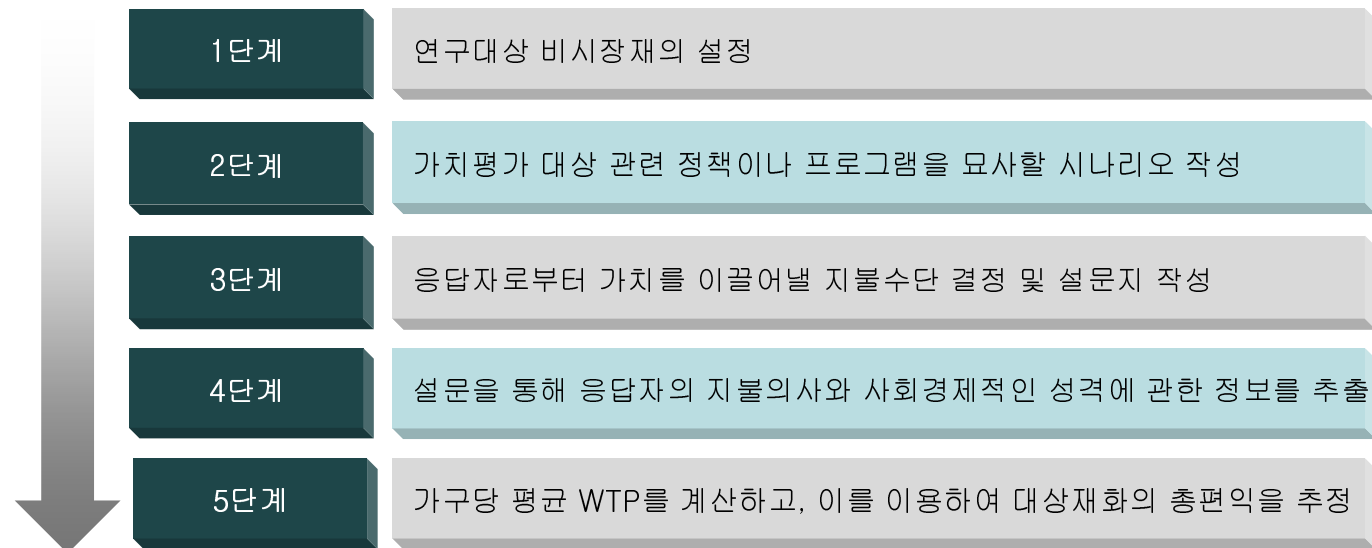


## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### Contingent Valuation Method

- 1990년대 초반 미국 학계에서 환경재(environment goods)와 같은 비시장재화의 가치 측정에 가장 합당하다고 인정된 방법론
- 실제 시장에서 관측된 자료가 아닌, 가상적 상황에서의 응답자 반응에 대한 관측 자료를 이용하는 진술선호(stated preference) 분석 기법에 해당함
- 다양한 유형의 상품 및 서비스, 환경재 등의 비시장재화에 유연하게 적용이 가능함
- 원자력 관련 CVM 연구 사례:
  - 스웨덴(Tamara Lafta, 2013), 한국(Jun et al., 2010), 일본(Goto and Ariu, 2010) 등

### CVM 분석단계

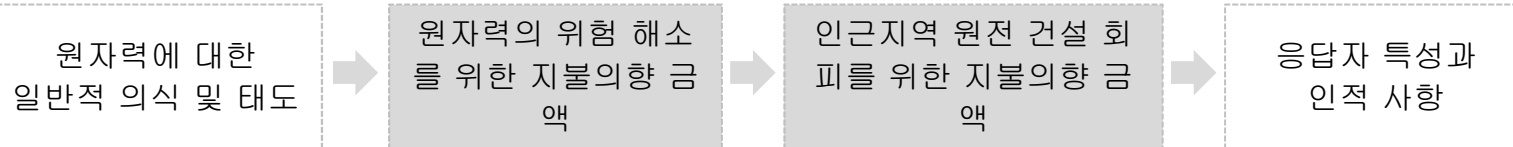




## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 설문지 디자인

- 1) 지불수단의 선택: 가구당 매월 추가적인 전기요금
- 2) 지불의사 유도방법: 양분 선택형 질문
- 3) 초기 제시금액 설정: 230가구에 대한 사전조사를 통해 1,000~15,000원(7등급)으로 구성



### 조사 대상 및 표본 설계

- 1) 전국을 대상으로 소득이 있는 가구의 만 20세 이상 64세 이하 세대주 또는 세대주의 배우자
- 2) 총 1,000 가구 조사: 지역 단위 별로 단계별 층화추출법 사용(제주도 제외)

### 설문조사 일정

- 1) 설문조사: 2013년 9월 6일부터 10월 4일까지 진행
- 2) 조사기관: 한국갤럽 주관



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### CVM 설문 구조

- 1) CVM 1: 원자력 발전의 사고위험 해소를 위한 지불의사금액  
CVM 2: 인근 지역 신규 원전 건설 관련 지불의사금액
- 2) 지불수단: 가상의 상황과 가장 밀접한 cash vehicle로 전기요금을 설정
- 3) 논리 구조에 따라 제시금액에 대한 지불의향을 각각 2번 질문
- 4) 2개의 CVM 설문에 대해 무작위 추출을 통해 초기제시금액 할당

### < CVM 설문 초기제시금액 설계 >

| 설문지 유형 | 원전 사고위험<br>해소 제시금액<br>(원) | 인근지역 원전<br>건설 제시금액<br>(원) | 표본<br>수<br>(가구) |
|--------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| A type | 5,000                     | 3,000                     | 142             |
| B type | 7,000                     | 10,000                    | 147             |
| C type | 2,000                     | 5,000                     | 147             |
| D type | 10,000                    | 15,000                    | 138             |
| E type | 15,000                    | 7,000                     | 139             |
| F type | 3,000                     | 1,000                     | 143             |
| G type | 1,000                     | 2,000                     | 144             |





## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 조사 표본의 기초 통계

- 1) 성별: 남성이 51.6%, 여성이 48.4%로 남성의 응답 비중이 조금 높게 나타남
- 2) 연령: 40대(31.2%), 50대(26.6%), 30대(33.8%)의 순으로 나타남
- 3) 교육수준: 고등학교 졸업과 대학교 재학 이상이 유사한 비중을 나타냄
- 4) 월평균 가구소득은 343만원, 월평균 가구지출은 244만원, 월평균 전기요금은 51,600원

| 특성 분류 |       | 표본<br>수(가구) | 비율(%) | 특성분류        |           | 표본<br>수(가구) | 비율(%) |
|-------|-------|-------------|-------|-------------|-----------|-------------|-------|
| 성별    | 남성    | 516         | 51.6  | 자가주택        | 보유        | 673         | 67.3  |
|       | 여성    | 484         | 48.4  |             | 미보유       | 327         | 32.7  |
| 연령대   | 20대   | 93          | 9.3   | 월평균<br>가구소득 | 99만원 이하   | 9           | 0.9   |
|       | 30대   | 238         | 23.8  |             | 100-149만원 | 39          | 3.9   |
|       | 40대   | 312         | 31.2  |             | 150-199만원 | 76          | 7.6   |
|       | 50대   | 266         | 26.6  |             | 200-249만원 | 93          | 9.3   |
|       | 60대   | 91          | 9.1   |             | 250-299만원 | 123         | 12.3  |
| 교육수준  | 중졸 이하 | 88          | 8.8   |             | 300-399만원 | 258         | 25.8  |
|       | 고졸    | 471         | 47.1  |             | 400-499만원 | 182         | 18.2  |
|       | 대재 이상 | 441         | 44.1  |             | 500만원 이상  | 219         | 21.9  |



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### WTP 분석 모형

#### 1) Double-Bound Dichotomous Choice model

- $K$  번째 응답자가 제시금액  $x_K$ 에 대해 '예'라고 대답하는 경우 두 번째 제시금액을  $b_K$ 보다 큰  $a_K$ 이라 하고, '아니오'라고 응답하는 경우 두 번째 제시금액을  $b_K$ 보다 작은  $c_K$ 라 함
- 여기서 얻을 수 있는 4가지 응답 '예-예', '예-아니오', '아니오-예', '아니오-아니오'에 대한 확률을 고려한 로그우도함수(log-likelihood function)는 다음과 같이 표현

- 여기서 누적 확률분포함수를 logistic distribution 또는 normal distribution으로 가정하여 추정하고, 평균 WTP 계산

#### 2) Spike model

- 지불의사가 전혀 없는 응답자의 비율이 높은 경우, 해당 응답자를 별도로 고려한 로그우도함수를 다음과 같이 추정하는 것이 효과적(Kristrom, 1997)

- 여기서 누적 확률분포함수를 logistic function으로 가정하여 추정하고, 평균 WTP 계산



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 추정 결과 IVa-1

원전 사고위험 해소에 대한 WTP 추정 결과

- 1) DBDC model과 Spike model을 추정한 결과, **현재 우리나라 원자력 발전의 사고 위험을 해소하기 위해 가구당 월평균 2,540~4,184원의 전기요금**을 추가적으로 지불할 용의가 있음
  - 모형의 추정계수는 모두 통계적으로 유의
  - Spike model에서 지불의사액이 0인 가구의 비율은 42.6%로 추정되었음(실제 41.8%와 유사)
  - 이는 설문조사 가구의 월평균 전기요금 51,600원의 5~8%에 해당함
- 2) 이로부터 현재 우리나라 원자력 발전의 사고 위험을 해소하기 위해 전체 가구가 지불하고자 하는 **연간 총 WTP는 5,489~9,042억 원**으로 계산됨
  - 가정용 전기요금 뿐만 아니라 다른 수요부문으로 확대될 경우 원자력의 외부비용을 더욱 증가

| 구분                   |       | 추정결과      |        | 월평균 WTP<br>(가구당) | 연간 총 WTP<br>(2013년 기준) |
|----------------------|-------|-----------|--------|------------------|------------------------|
|                      |       | 추정 계수     | t-통계량  |                  |                        |
| DBDC mode<br>(정규분포)  | Mean  | 2540.1 ** | 7.756  | 2,540원           | 5,489억 원               |
|                      | Sigma | 7528.7 ** | 34.096 |                  |                        |
| DBDC model<br>(로지스틱) | Alpha | 0.6590 ** | 7.985  | 2,549원           | 5,509억 원               |
|                      | Beta  | 0.0003 ** | 27.812 |                  |                        |
| Spike model          | Alpha | 0.2933 ** | 4.610  | 4,184원           | 9,042억 원               |
|                      | Beta  | 0.0002 ** | 26.690 |                  |                        |
| Sample               |       | 1,000     |        |                  |                        |

주) \*\*: 유의수준 1% 에서 각각 통계적으로 유의함을 의미



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 추정 결과 IVa-2

원전 사고위험 해소에 대한 WTP 추정 결과

- 1) 앞의 모형에서 개별 특성변수(성별, 나이, 가족수, 교육수준, 소득, 환경의식)를 고려하여 추정한 결과, **가구당 월평균 2,551~4,133원의 전기요금**을 추가적으로 지불할 용의가 있음
  - 교육수준, 소득, 환경의식 등이 지불의향금액에 영향을 주는 요인으로 파악됨
  - 환경의식이 높은 사람일수록 원자력의 사고위험 해소에 더 큰 가치를 부여한다는 것이 특징적
- 2) 이로부터 현재 우리나라 원자력 발전의 사고 위험을 해소하기 위해 전체 가구가 지불하고자 하는 **연간 총 WTP는 5,513~8,932억 원**으로 계산됨
  - 공변량이 없는 모형에서와 유사한 결과를 나타냄

| Spike model<br>추정결과 | Estimation results |        | Mean WTP<br>(가구당 월평균 추가<br>전기요금) | 연간 총 WTP<br>(2013년 기준) |
|---------------------|--------------------|--------|----------------------------------|------------------------|
|                     | 추정계수               | t-통계량  |                                  |                        |
| alpha               | -2.6997 **         | -3.531 | 4,133원                           | 8,932억 원               |
| beta                | 0.0002**           | 26.635 |                                  |                        |
| 성별                  | 0.1165             | 0.960  |                                  |                        |
| 나이                  | 0.0051             | 0.800  |                                  |                        |
| 가족수                 | 0.0291             | 0.404  |                                  |                        |
| 교육수준                | 0.1788*            | 1.853  |                                  |                        |
| 소득                  | 0.0370**           | 3.252  |                                  |                        |
| 환경의식                | 0.5167**           | 3.118  |                                  |                        |

주) \*\*, \*: 유의수준 1%, 10% 에서 각각 통계적으로 유의함을 의미





## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 추정 결과 Mb-1

인근지역 원전건설 회피에 대한 WTP 추정 결과

- 1) DBDC model과 Spike model을 추정한 결과, **인근 지역의 신규 원자력 발전소 1기 건설을 막기 위해 가구당 월평균 2,270~4,135원의 전기요금**을 추가적으로 지불할 용의가 있음
  - 모형의 추정계수는 모두 통계적으로 유의
  - Spike model에서 지불의사액이 0인 가구의 비율은 43.4%로 추정되었음(실제 42.1%와 유사)
  - 이는 설문조사 가구의 월평균 전기요금 51,600원의 4.4~8%에 해당함
- 2) 이로부터 현재 인근 지역의 신규 원자력 발전소 1기 건설을 막기 위해 전체 가구가 지불하고자 하는 **연간 총 WTP는 4,906~8,936억 원**으로 계산됨
  - 추정결과 1과 유사하나, 추정결과 2는 신규 원전 1기에 대한 추정값임을 유념하여 해석

| 구분                      |       | 추정결과      |        | 월평균 WTP<br>(가구당) | 연간 총 WTP |
|-------------------------|-------|-----------|--------|------------------|----------|
|                         |       | 추정 계수     | t-통계량  |                  |          |
| DBDC model<br>(정규분포)    | Mean  | 2269.9 ** | 6.186  | 2,270원           | 4,906억 원 |
|                         | Sigma | 8238.4 ** | 38.441 |                  |          |
| DBDC model<br>(로지스틱분포)  | Alpha | 0.5902 ** | 7.332  | 2,378원           | 5,139억 원 |
|                         | Beta  | 0.0003 ** | 30.342 |                  |          |
| Spike model<br>(로지스틱분포) | Alpha | 0.2519 ** | 3.938  | 4,135원           | 8,936억 원 |
|                         | Beta  | 0.0002 ** | 28.888 |                  |          |
| Sample                  |       | 1,000     |        | -                | -        |

주) \*\*: 유의수준 1% 에서 각각 통계적으로 유의함을 의미



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

### 추정 결과 Mb-2

인근지역 원전건설 회피에 대한 WTP 추정 결과

- 1) 앞의 모형에서 개별 특성변수(성별, 나이, 가족수, 교육수준, 소득, 환경의식)를 고려하여 추정한 결과, **가구당 월평균 2,290~4,096원의 전기요금**을 추가적으로 지불할 용의가 있음
  - 교육수준, 소득, 환경의식 등이 지불의향금액에 영향을 주는 요인으로 파악됨
  - 환경의식이 높은 사람일수록 인근지역의 원자력 발전소 건설을 회피하고 싶어하는 것으로 해석
- 2) 이로부터 현재 우리나라 원자력 발전의 사고 위험을 해소하기 위해 전체 가구가 지불하고자 하는 **연간 총 WTP는 4,949~8,852억 원**으로 계산됨
  - 공변량이 없는 모형에서와 유사한 결과를 나타냄

| Spike model<br>추정결과 | Estimation results |        | Mean WTP<br>(가구당 월평균 추가<br>전기요금) | 연간 총 WTP<br>(2013년 기준) |
|---------------------|--------------------|--------|----------------------------------|------------------------|
|                     | 추정계수               | t-통계량  |                                  |                        |
| Logistic_alpha      | -2.6017 **         | -3.388 | 4,096원                           | 8,852억 원               |
| Logistic_beta       | 0.0002**           | 28.723 |                                  |                        |
| 성별                  | 0.1801             | 1.485  |                                  |                        |
| 나이                  | 0.0032             | 0.493  |                                  |                        |
| 가족수                 | -0.0019            | -0.036 |                                  |                        |
| 교육수준                | 0.1953*            | 1.988  |                                  |                        |
| 소득                  | 0.0397**           | 2.977  |                                  |                        |
| 환경의식                | 0.4752*            | 2.898  |                                  |                        |

주) \*\*, \*: 유의수준 1%, 10% 에서 각각 통계적으로 유의함을 의미



## 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

원전 사고회피를 위한 지불의사액

|             | 기존원전 사고위험회피   | 신규원전 사고위험회피   |
|-------------|---------------|---------------|
| 총 액(억원/년)   | 5,489 ~ 9,042 | 4,906 ~ 8,936 |
| 단위비용(원/kWh) | 3.8 ~ 6.3     | 52.1 ~ 94.9   |

주: 단위비용은 지불의사총액을, 기존원전 사고위험회피의 경우에는 2012년 원전 발전량으로,  
거주지 인근지역 신규원전으로 인한 위험회피의 경우에는 APR-1400 1호기의 연간발전량으로 나눈 값  
임



## 원자력 발전의 외부비용 V: 산업조직학회(2017)

### 접근 방식

- 중대사고 **피해 기대값** 산정: 예상피해액 \* 사고확률  
※ 위험회피성향 미반영
- **예상피해액**: 후쿠시마사고 피해액을 우리나라 실정에 맞게 변환
- **사고확률**:  $5/14,325 \approx 3.5/10,000$   
※ 중대사고빈도 5회(후쿠시마 사고호기 3개 호기 반영)

### 후쿠시마 피해액

| 피해항목(조엔) | 원자력손해배상 및 페로지원기구 | JCER 일본경제연구센터 |
|----------|------------------|---------------|
| 손해배상액    | 9.704            | 9.704         |
| 페 로 비 용  | 8.000            | 32.000        |
| 제염중간저장   | 6.000            | 30.000        |
| 행 정 경 비  | 1.219            | 1.291         |
| 합 계      | 24.995           | 72.995        |

주: 원배기구는 정부기구이며, JCER은 일본경제신문 think tank임  
원배기구는 2012년 사고피해액을 5조엔으로, JCER은 2011년 피해액은 20조엔으로 추정한 바 있음



## 원자력 발전의 외부비용 V: 산업조직학회(2017)

### 피해액 보정방 법

- 손해배상액: GRDP, 영향인구, 소비자물가 등 반영 전환
- 폐로 비용: 사고기수가 3기 임을 반영 1/3
- 제염,중간저장비용: 기수영향 1/3, 풍향변수(3/2) -> 1/2
- 행정경비: 비보정

### 피해액 보정결과

| 피해항목(조원)          | 원자력손해배상 및 폐로지원기구 | JCER 일본경제연구센터 |
|-------------------|------------------|---------------|
| 손해배상액             | 443.0            | 443.0         |
| 폐로비용              | 23.5             | 94.0          |
| 제염중간저장            | 32.6             | 138.4         |
| 행정경비              | 11.3             | 11.3          |
| 합계                | 510.4            | 686.7         |
| 사고위험비용<br>(원/kWh) | 18.2             | 24.5          |

# CONTENTS

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

요약 및 정책 제언





## 원자력발전의 사회적 비용

원자력발전의 사회적 비용(원/kWh)

| 외부 비용                  |           | 사적 비용       |                   |                   |
|------------------------|-----------|-------------|-------------------|-------------------|
|                        |           | 기준          | 건설비/해체비<br>30% 인상 | 건설비/해체비<br>50% 인상 |
|                        |           | 48.8        | 56.9              | 62.2              |
| I 명시적 보조금              | 2.4       | 51.2        | 59.3              | 64.6              |
| II 암묵적 보조금             | 0.2~16.1  | 49.0~64.9   | 57.1~73.0         | 62.4~78.3         |
| III 위험회피비용<br>(시나리오)   | 3.0~203.1 | 51.8~251.9  | 59.9~260.0        | 65.2~265.3        |
| IVa 기존위험<br>회피비용 (CVM) | 3.8~6.3   | 52.6~55.1   | 60.7~63.2         | 66.0~68.5         |
| IVb 신규위험<br>회피비용 (CVM) | 52.1~94.9 | 100.9~143.7 | 109.0~151.8       | 114.3~157.1       |
| V 산업조직학회               | 18.2~24.5 | 67.0~73.3   | 75.1~81.4         | 80.8~87.1         |



## 정책 제언

### 너무 범위가 크지 않는가?

#### 독일 환경청의 해법 (UBA, 2012, pp.28-29)

Ökonomische Bewertung von Umweltschäden.

METHODENKONVENTION 2.0 ZUR SCHÄTZUNG VON UMWELTKOSTEN.

- 독일의 경우도 원자력에 대한 외부 비용 평가는 매우 상이: 0.2ct~200 ct/kWh
- 이는 재해발생가능성과 피해액에 대한 가정이 상이한 데서 발생
- 이러한 극심한 재난과 관련된 의사결정은 사회적, 정치적 토론과정을 통해 이루어져야 함
- 그럼에도 불구하고, 비용추정치가 필요한 경우 그 다음으로 높은 외부비용을 갖는 발전원의 외부비용을 추정치로 사용 : 독일의 경우 갈탄의 외부비용





## 정책 제언

### 외부효과(외부비용)에 대한 환경경제학의 해법

→ 외부효과의 크기만큼 **환경세('가격')**를 부과하여 다시 '시장메커니즘' 안으로 내부화!

부과형태: 핵연료에 대하여 개별소비세 부과

- 원자력발전이 초래하는 '위험'에 대해, 그 위험을 야기하는 발전연료에 개별소비세를 부과

세율: 원전위험비용의 반영

세율의 준거점

- 독일 '핵연료세'의 세율: 8,700원/g, 22.17원/kWh
- 타 발전연료(유연탄 36원/kg)의 개별소비세율(발전량 당 동일 세율 적용): 5,500원/g, 14원/kWh

※ 유연탄의 외부비용(독일 환경청의 해법): 약 70원/kWh

세수의 활용

- (가칭) '**원자력사고대응기금**'을 설치, 핵연료에 부과된 개별소비세의 세수를 전입
- 원자력의 이점('낮은 발전단가'(사적 비용기준))은 현세대가 향유하고, 그 위험은 미래세대가 부담하므로, 기금의 재원은 미래세대를 위해 원전사고의 예방과 치유에 국한하여 사용
- 통상적인 안전관리비용은 원전사업자가 직접 부담하고, '원전조기폐쇄' 등 중대사고의 위험을 실질적으로 제거하는 경우에만 기금 투입