



# 원자력 이용의 사회적 비용

## 이창훈(KEI)

2015년 11월 20일

# CONTENTS

**에너지이용 현황**

**국내외 원자력 현황**

**원자력 발전의 사적 비용**

**원자력 발전의 외부 비용**

**요약 및 정책 제언**



# CONTENTS

**에너지이용 현황**

국내외 원자력 현황

원자력 발전의 사적 비용

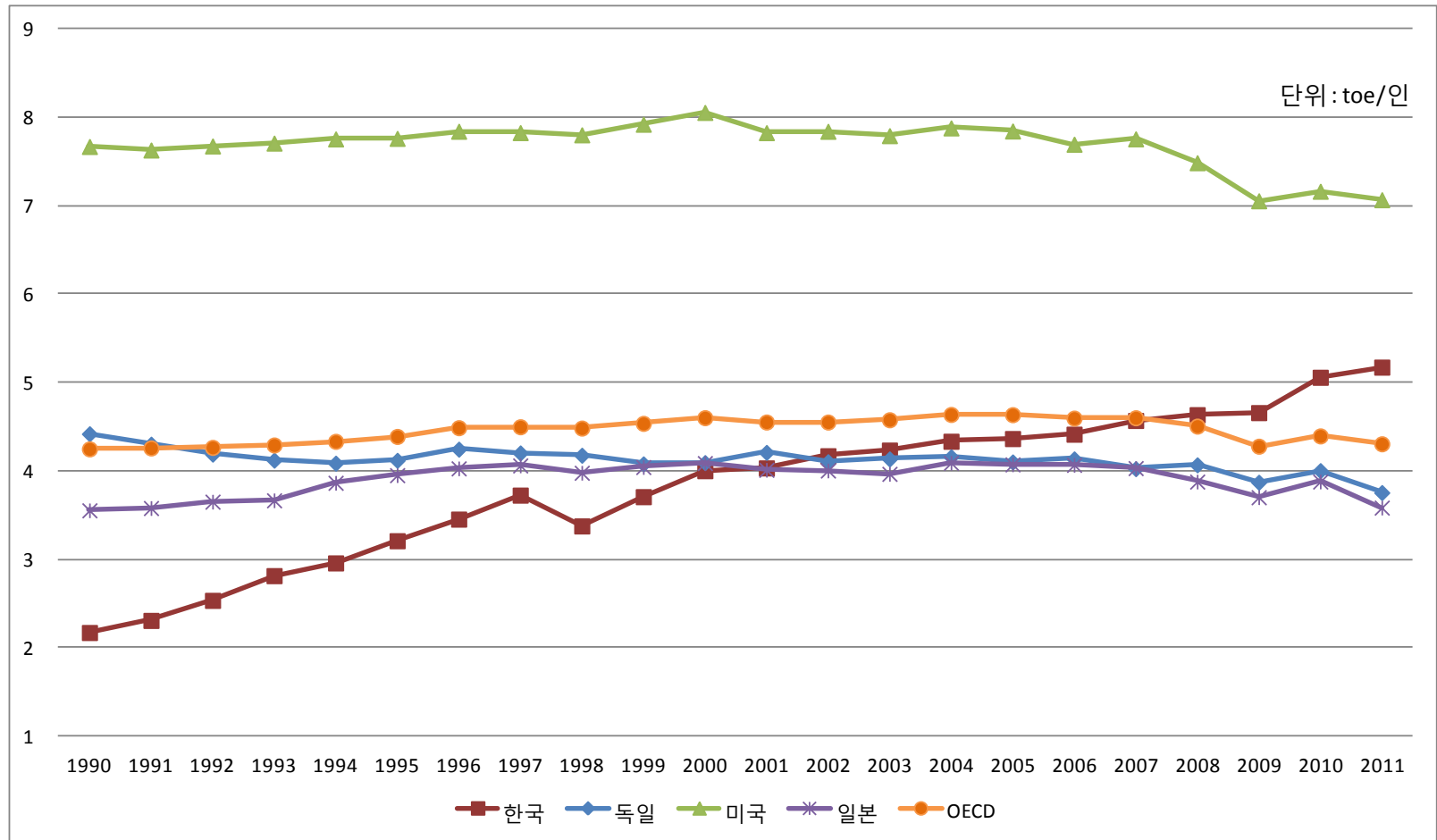
원자력 발전의 외부 비용

요약 및 정책 제언



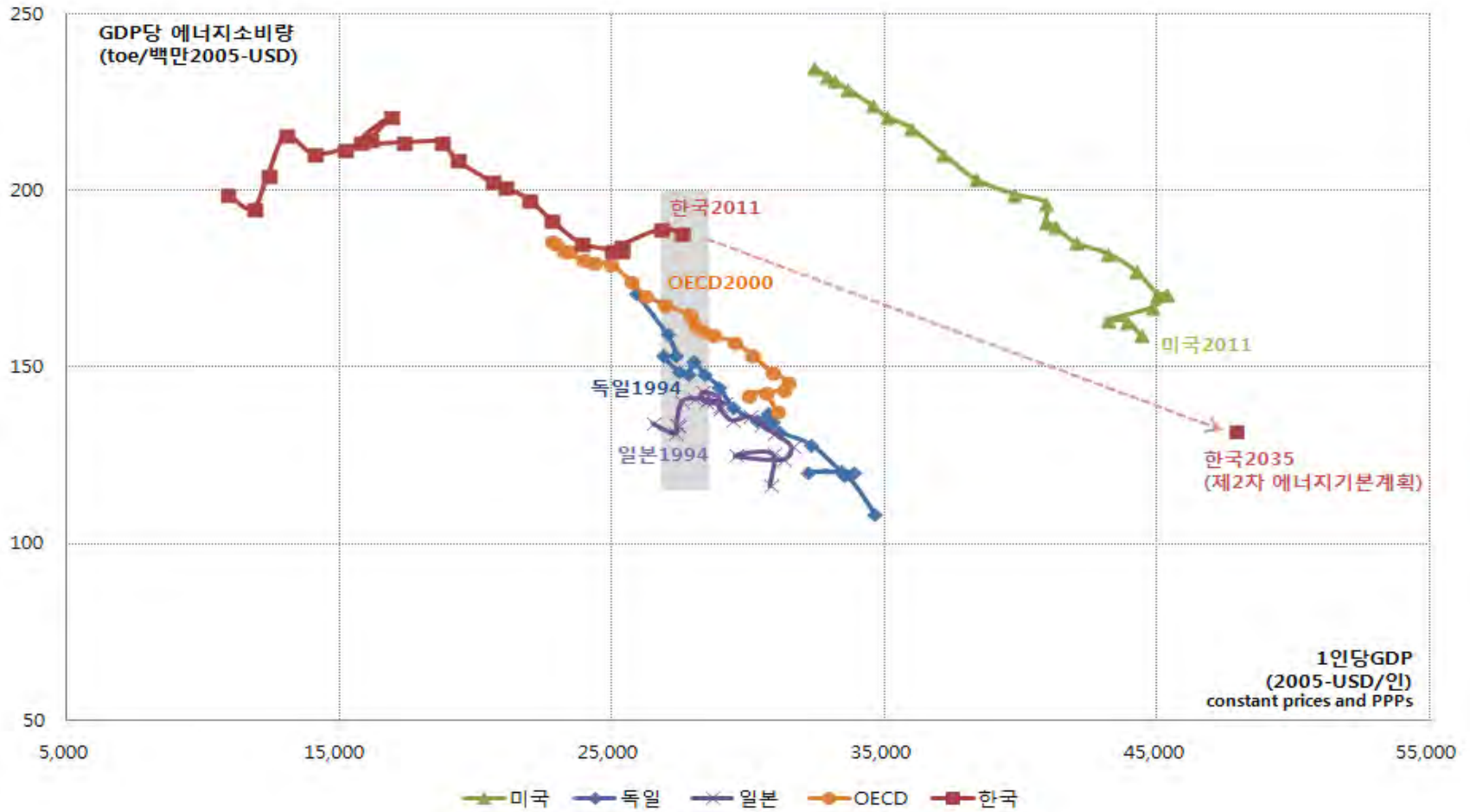


# 우리나라 에너지 이용현황(1인당 에너지소비, PPP기준)



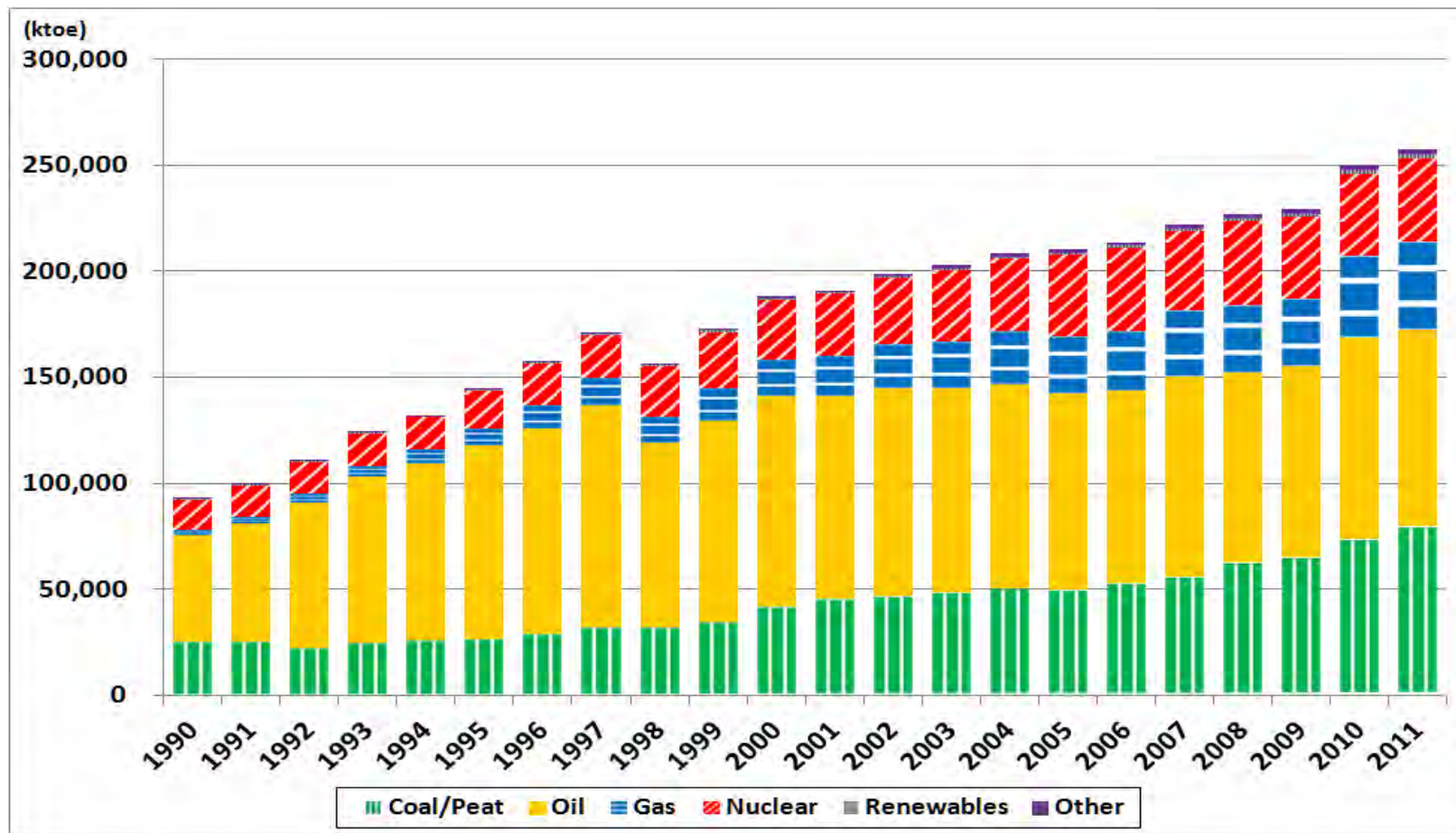


# 우리나라 에너지 이용현황(에너지이용 효율)





## 우리나라 에너지 이용현황(에너지믹스)





## 원자력은 좋은(?) 에너지원인가?

### 좋은 에너지원의 기준(지속가능성)

- 경제성: 원자력은 저렴한 에너지원으로 물가안정 및 우리 기업의 경쟁력 강화에 도움이 된다 -> **외부비용 ?**
- 환경성: 원자력은 이산화탄소를 배출하지 않아 기후변화 완화에 기여한다 -> **방사능 누출 ?**
- 안정성: 원자력발전의 연료는 전체 원가에서 차지하는 비중이 낮아 연료비 상승에 따른 전기요금 영향이 미미하고, 연료의 부피가 작아 유사시 물량확보에 유리하다 -> **발전중단 ?**
- 사회적 수용성: ???



# CONTENTS

에너지이용 현황

**국내외 원자력 현황**

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

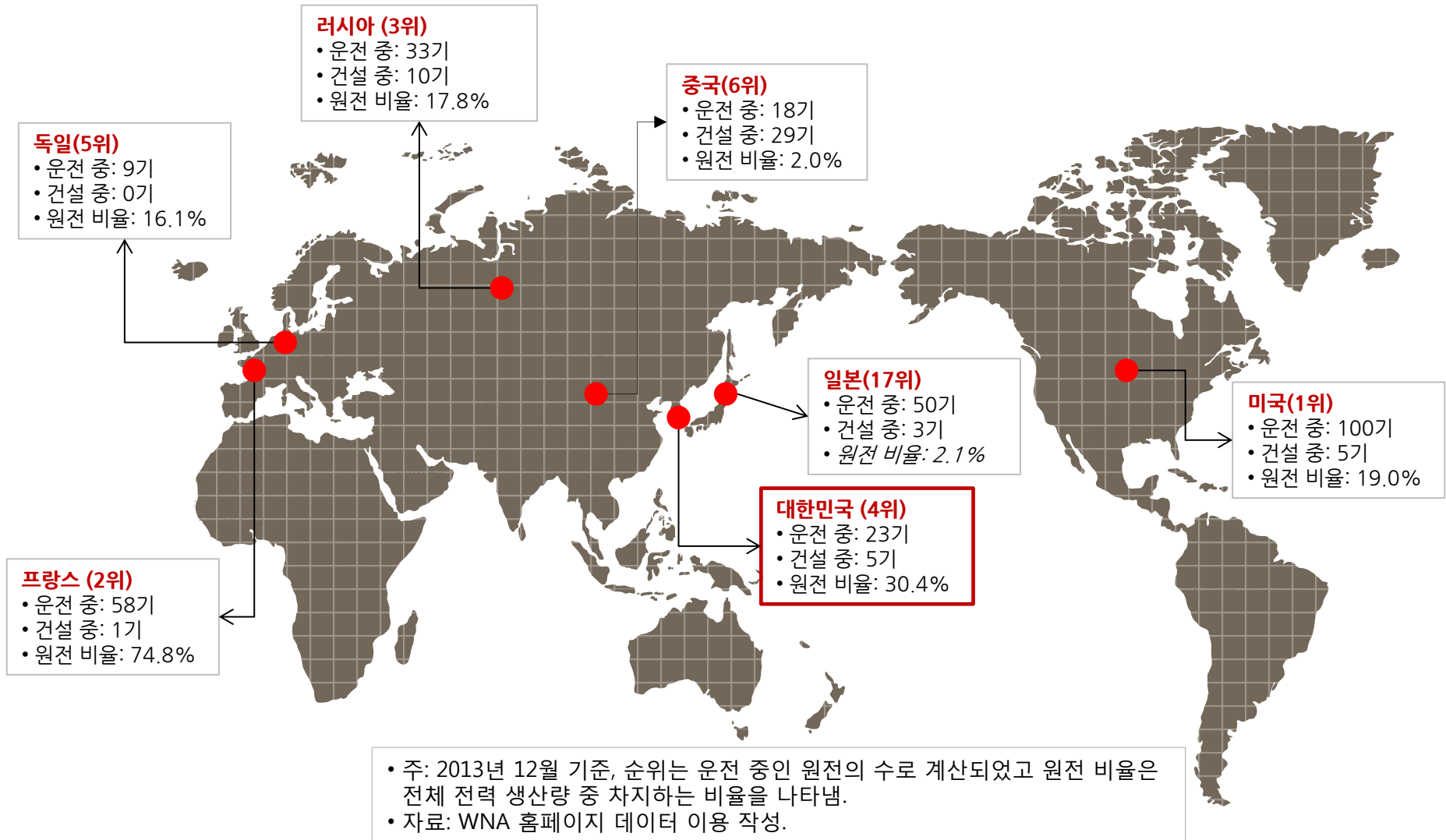
요약 및 정책 제언







# 주요국 원자력 발전 지도



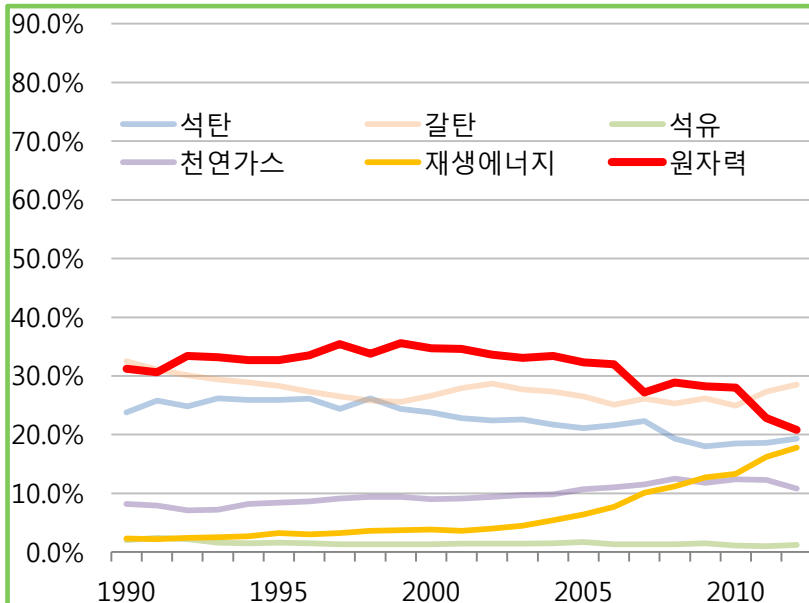


# 주요국 현황

## 독일

- 2011년 6월 30일, **2022년까지 탈원전을 규정**한 '원자력법' 개정안 통과 이후 즉각 8개 발전소 폐쇄, 현재 9기 운영 중
- 2050년 1차에너지의 50% 이상을 재생에너지로 충당할 계획

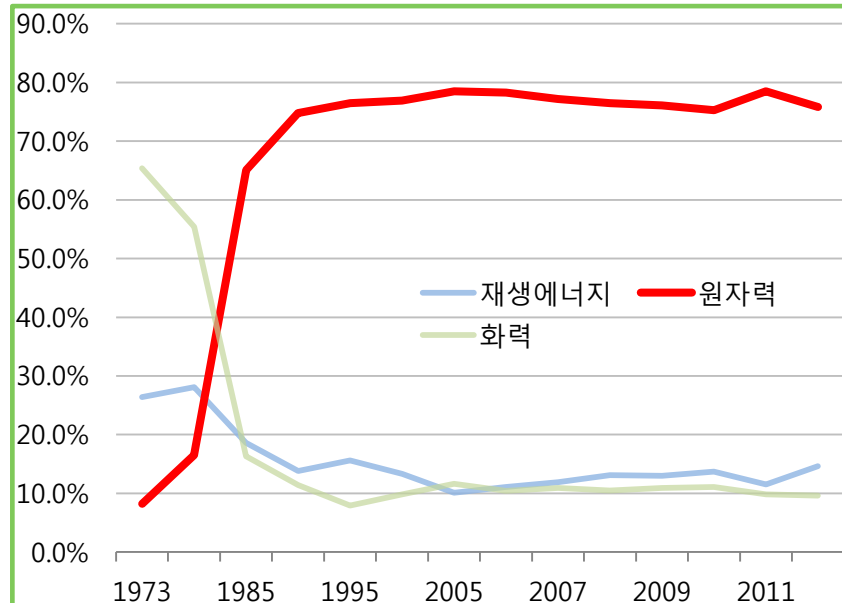
### 에너지원 별 발전 비중



## 프랑스

- 후쿠시마 원전 사고 직후, 원자력 중심의 에너지정책 유지 선언(사르코지 전 대통령)
- 2012년 정권교체 이후, 원자력의 발전 비중을 2012년 77.7%에서 **2025년 50%까지** 낮추겠다는 에너지전환정책 발표(올랑드 현 대통령)
  - 매년 재생에너지 지원에 40억 유로, 에너지효율 개선에 10억 유로 집행 계획
  - 새로운 연료소비세를 신설하여 10억 유로 추가 투입 예정

### 에너지원 별 발전 비중



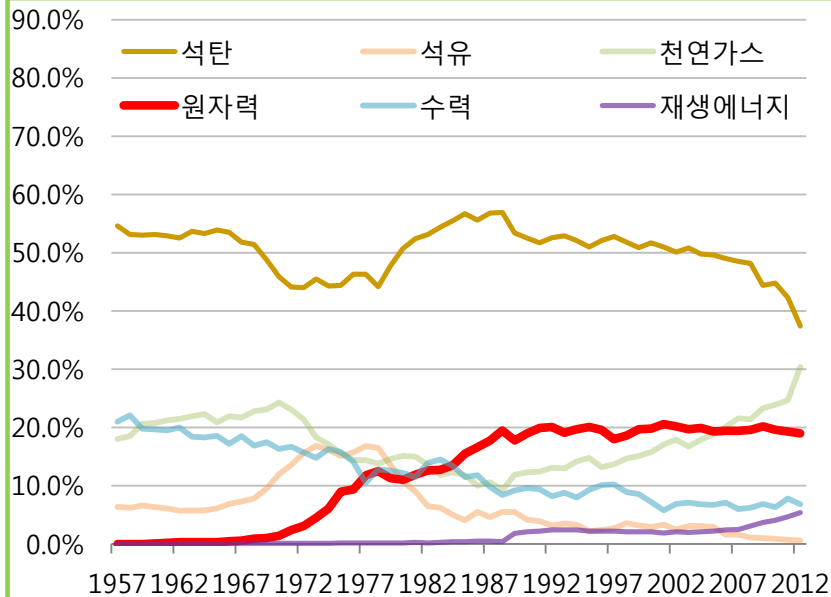


# 주요국 현황

## 미국

- 세계 최대의 원자력발전소 보유국이며 **100기 원전이 운영 중**이고 4기는 2013년도에 폐쇄
- 2013년 말, **5기**의 원자력 발전소 **건설 중**에 있음
  - Watts Bar 2호기: 1987년 중단된 공사 2007년 재개
  - 나머지 4기는 2012~13년 공사 착수

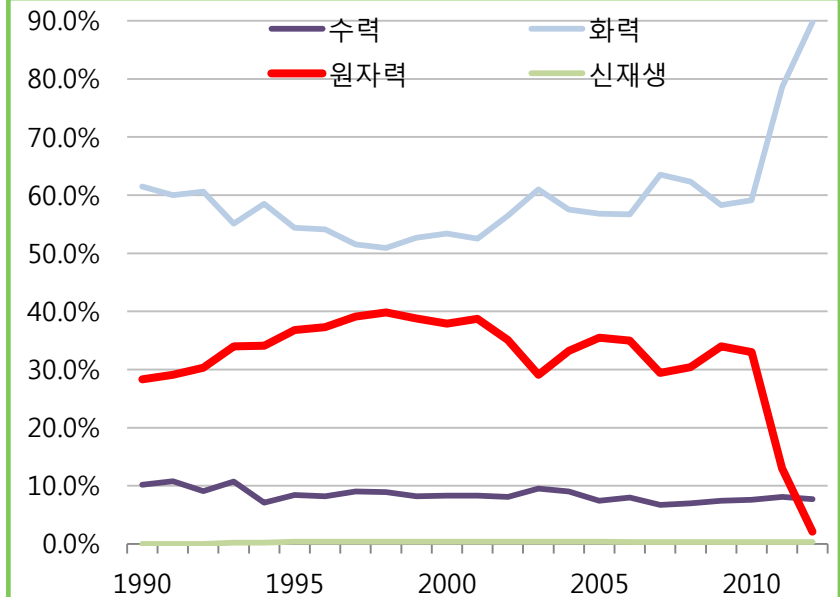
### 에너지원 별 발전 비중



## 일본






- 후쿠시마 원전 사고 이전, 54기의 원전 (48.2GW)이 전체 전력의 30%를 공급
- 사고 이후 화력발전의 비중을 높게 유지하고 있으며 2013년 12월 기준, 원전 **3기** 운영 중

### 에너지원 별 발전 비중

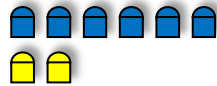




# 국내 원자력 현황

	운영중인 경수로	19기
	운영중인 중수로	3기
	건설중인 경수로	5기
	심사중인 경수로	2기
	운영 중지한 원전	1기

한울(경북 울진군)



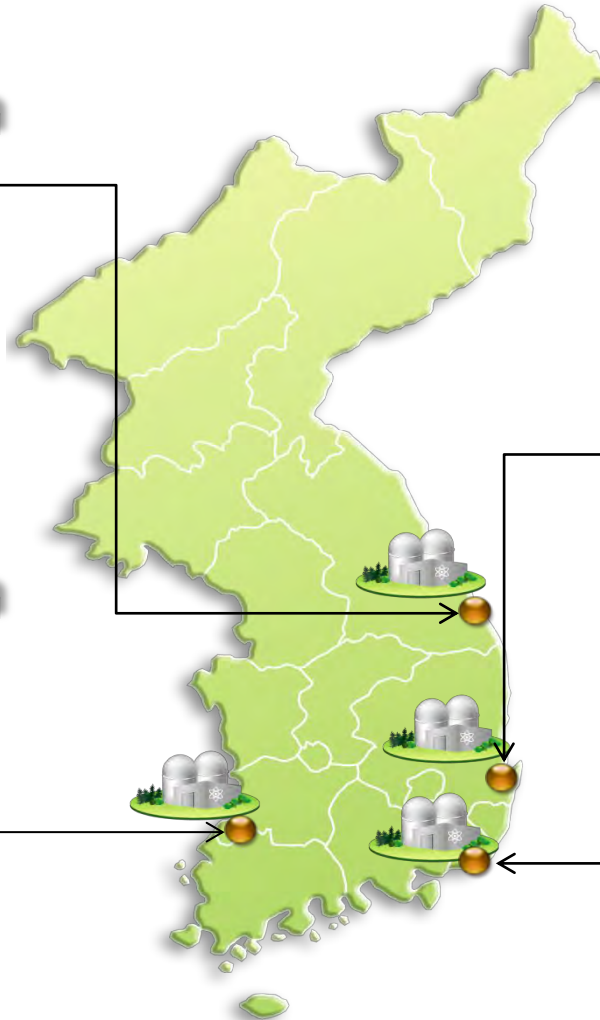
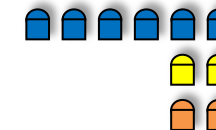
월성(경북 경주시)



한빛(전남 영광군)



고리(부산 기장군)





# 신규원전 건설 및 계획 현황

발전소명	위치	설비용량 (MWe)	노형	착공	준공	비고
신고리	#3	1400	가압경수로 (PWR), 신형경수로 (APR1400)	07.09.13	14. 3	건설 중
	#4	1400		07.09.13	14. 9	
	#5	1400		14. 9	19.12	건설 확정
	#6	1400		14. 9	20.12	
	#7	1500		미정	23.12	건설 확정, 천지 원전 #1~2(평가미반영) → 신고리 #7~8 대체 의향
	#8	1500		미정	24.12	
신월성	#2	1000	가압경수로 (PWR), 한국표준원전 (OPR1000)	05.10.01	14.10	건설 중
신한울	#1	1400	가압경수로 (PWR), 신형경수로 (APR1400)	10.04.30	17. 4	건설 중
	#2	1400		10.04.30	18. 2	
	#3	1400		15.11	21.06	건설 확정
	#4	1400		15.11	22.06	

※현재 5기 건설 중, 6기 건설계획 확정; 2차 에너지기본계획에 따라 7GW 원전 건설 필요추가

# CONTENTS

에너지이용 현황

국내외 원자력 현황

**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

### 건설비

건설중인 최신 기종  
APR-1400 기준



### 운전 및 유지비

- 중·저준위폐기물
- 인건비
- 일반 관리비
- 수선 유지비



### 연료 주기 비용

- 사후핵관리 비용
- 연료 비용

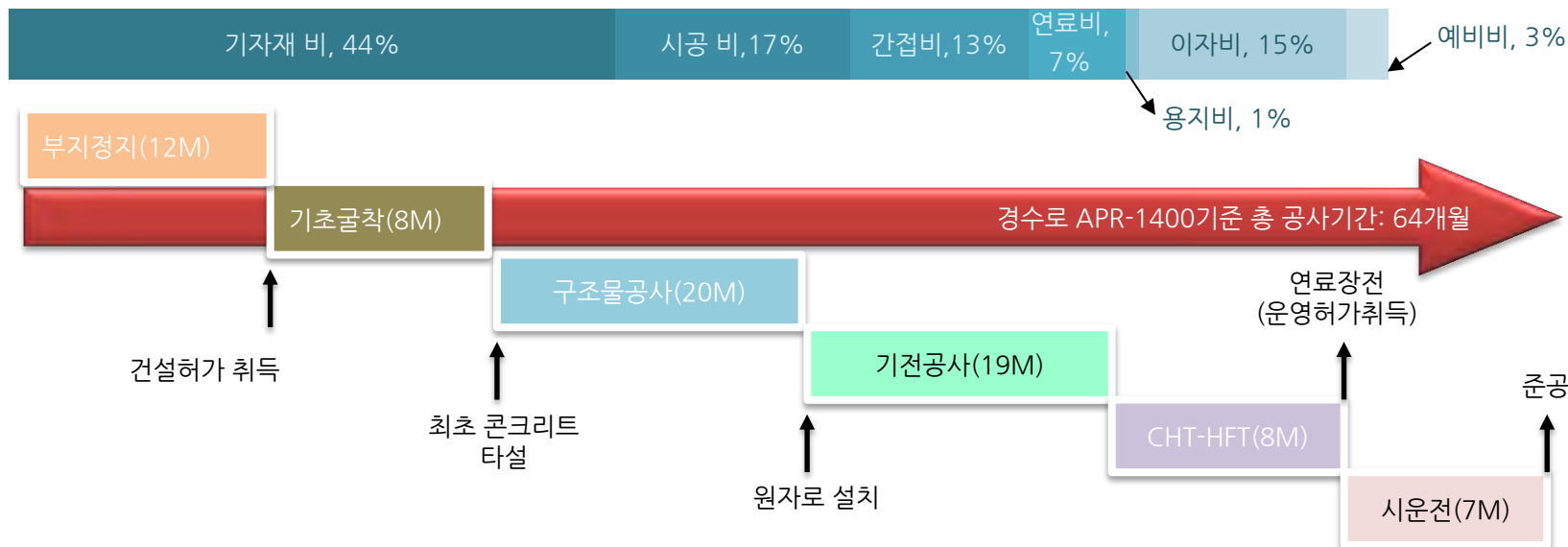
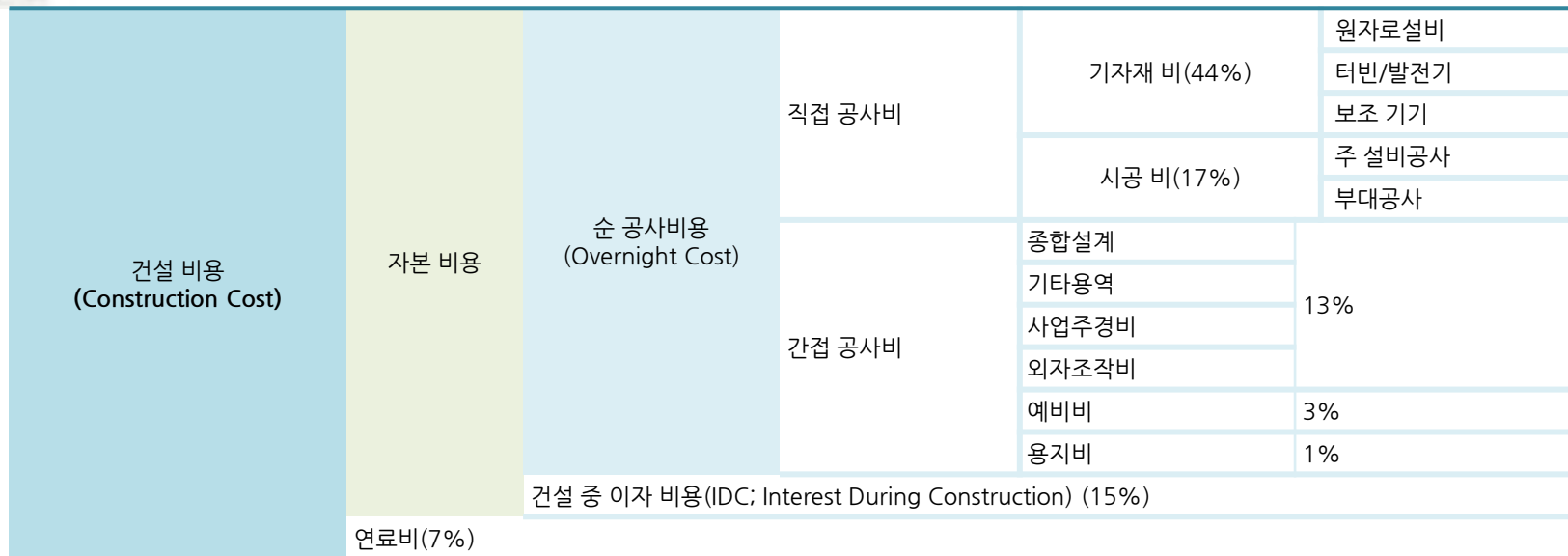


### 원전 해체 비용

- 냉각수 제거
- 시설유지 및 밀폐
- 원전철거및부지복원
- 철거폐기물의처분등



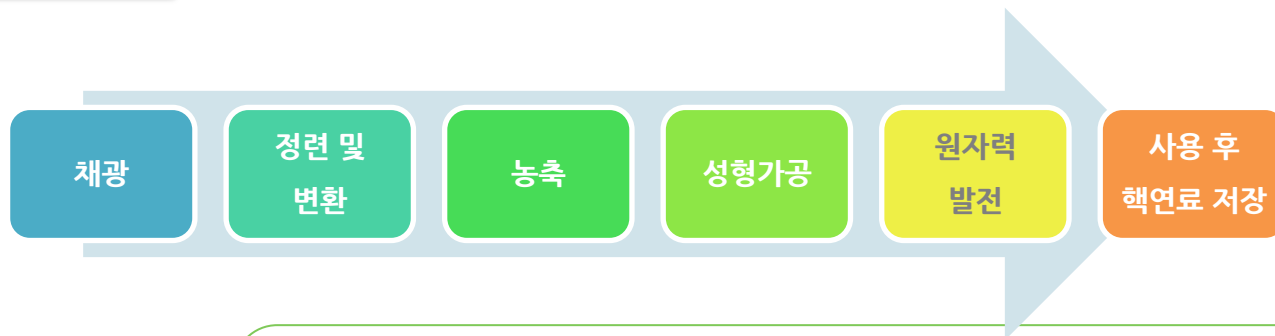
# 원자력발전의 사적 비용: 건설비용





# 원자력발전의 사적 비용: 핵연료 주기비용

## 핵연료 주기



## 연료 비용

- 1) 핵연료비용: \$2,360/kg (WNA)
- 2) 18개월에 1호기당 80다발 사용
- 3) 1다발 = 약 450kg
- 4)  $(\$2,360/\text{kg} \times 450\text{kg}/\text{다발} \times 80\text{다발})/1.5\text{년}$

## 사용후 핵연료 처리비용

	1차 전력수급기본계획	5차 전력수급기본계획
원전	28기(2002년)	34기(2010년)
사용후핵연료	3만 4천 톤	4만 7천 톤
중수로 다발당	414만원	1,320만원
경수로 다발당	2.93억원	3.19억 원



## 원자력발전의 사적 비용: 해체비용

예상비용	
2211억 원(1995년 1월 해체 시)	2005 한수원 보고서
2366억 원	2003 OECD 보고서
9861억 원	2001 IEA 보고서(1999년 물가 기준)
6033억 원	2012년 말 지경부 발표
6,546억 원	세계 평균비용

- 원전해체 비용은 물가상승률 및 중·저 준위 처분 단가 반영, 미국 7,800억 원, 프랑스 4,856억 원, 일본 9,590억 원, 스웨덴 2,414억 원 등의 사례 참조, 새로이 15%의 예비비 항목 신설하여 호기당 3,989억 원이었던 비용을 호기당 6,033억 원으로 대폭 인상함
- 원전해체비용은 원전 사업자인 한수원이 정부(한국방사성폐기물기금)에 납부하는 대신 매년 충당금으로 자체 적립중이며 2012년 11월 기준으로 5조 5,911억 원이 적립 중이며 이를 2014년부터 15년간 분할 납부(매년 2,500억 원 정도 예상)하기로 함(미정)

원전해체충당금 구성현황	밀폐관리	운영 종료 전 사전 준비
		연료 이송, 냉각수 제거
		저장조 냉각 후 연료 방출
		시설 유지 및 밀폐
	철거	원전 철거 및 부지 복원
	폐기물 처분	철거 폐기물 처분



# 원자력발전의 사적 비용: 운전유지비용

운전 유지비용 (O&M)	인건비
	수선유지비
	경비
	일반관리비
	주변지역 지원비
	중·저준위 방사성폐기물 처리비
	보험료 등

현재 건설중인 중저준위 방폐장의 건설비용 재원에 대한 이자비용을 추가로 반영, 드럼당 관리비용을 **736만원--> 1,193만원으로** 인상

\* 아직 중저준위 방폐장이 건설중인 관계로 방폐기금의 '중저준위 방폐물 관리비용' 계정에는 적립금액이 없는 상황. 이에 경주 방폐장 건설비는 방폐기금의 '사용후핵연료 부담금' 계정의 적립금에서 차입하고 있음

## 중·저준위 방폐장 1단계 건설사업 소요 예산 변화

위치	경북 경주시 양북면 봉길리 일원 (면적 약 210만 m <sup>2</sup> )
주요시설	지상시설- 인수저장건물, 폐기물 건물, 지원건물 등 지하시설- 건설 동굴, 운영동굴, 처분동굴(사일로) 등
사업자	한국방사성폐기물관리공단
시설규모	10만 드럼
처분방식	지상 시설: 인수저장건물, 폐기물 건물, 지원건물 등 9개동 지하 시설: 건설 동굴, 처분 동굴(지하 80~130m 사일로 6기)
총 사업비	1조 5,228억 원(준공년도 경상금액 기준)



## 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 관리비용	170.3억원/년	본문 참조
원전해체비용	6,033억원/호기	산업자원부 고시
할인률	6%	
소내소비율	4%	
발전량	9,418,752 MWh	용량*(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 (46.3%)	29.4 (51.6%)	33.9 (54.4%)
원전해체비	4.3 (8.7%)	5.5 (9.7%)	6.4 (10.3%)
균등화 원가	48.8	56.9	62.2

※ ( )는 균등화원가에서 원전건설비, 원전해체비 비중.

# CONTENTS

에너지이용 현황

국내외 원자력 현황

원자력 발전의 사적 비용

**원자력 발전의 외부 비용**

요약 및 정책 제언

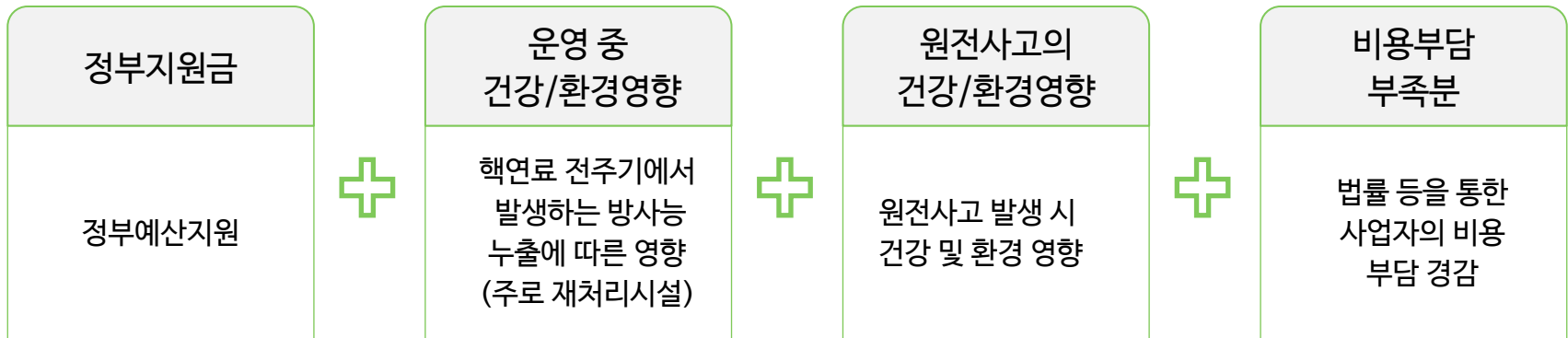




# 원자력발전의 외부 비용

## 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 운전원의 오조작 (인재)	정보교환 및 협력 미흡, 운전원의 오조작 (인재)	지진 및 쓰나미 (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 (3,885억 원)		



# 원전 중대사고: 피해액 및 발생확률

## 중대사고 시 피해액

- 1) 일본(실제발생): 5.8조엔(보상비용)~26조엔(2,000억 유로, IRSN)
- 2) 프랑스(모델링): 4300억 유로 (IRSN)
- 3) 독일(모델링): 5.9조 유로 (Versicherungsforen Leipzig, 2011)

## 중대사고 발생 확률

- 1)  $10^{-6}$ : APR-1400 설계목표
- 2)  $1/7000$ : 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 기반 기금	발전소 주변지역 지원	63,558	한국수력원자력
	원자력 대국민 홍보	9,400	한국원자력문화재단
	원자력 융합원천기술개발	94,108	한국에너지기술평가원
	에너지국제공동연구(원자력)	1,489	한국에너지기술평가원
	원전해외수출기반구축	4,400	지식경제부
	소계	163,222	
에너지 및 자원사업 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, 한국지질자원연구원
	원자력안전기반구축사업	8,380	원자력안전위원회
	방사선안전기술개발사업	8,054	
	소계	64,239	
	합계	351,938	



# 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

## 접근법

- 사업자의 배상책임제한은 원전사업자에게 주는 간접보조금이므로, 현행 원자력 (제3자) 손해배상 보험의 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 = 0.98억원/호기

### 모수 $a, b$ 의 추정: 비선형연립방정식의 해

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

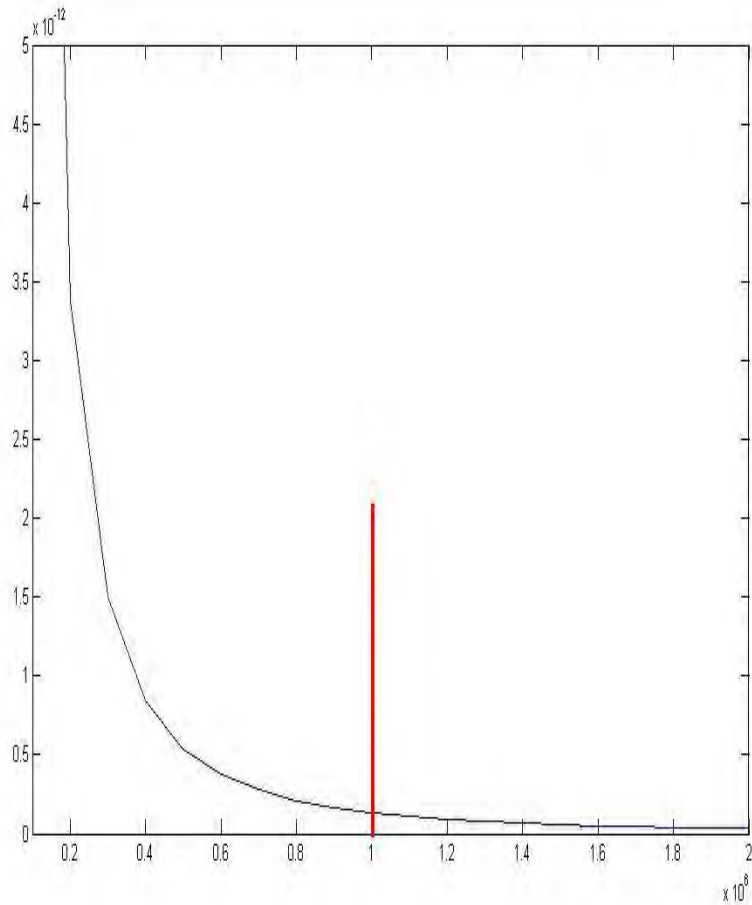
$$1 - F(\bar{X}) = \int_{\bar{X}}^{\infty} f(x)dx = p$$

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



# 원자력 발전의 외부비용 II: 정부의 암묵적 보조금

## 기대피해비용의 추정



$$\int_0^{\infty} xf(x)dx$$

vs.

$$\int_0^{\bar{X}} xf(x)dx + p \cdot \bar{X}$$

## 원전사고의 기대피해비용

발생 확률		1/7000	
		10 <sup>-6</sup>	
중대사고 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)

중대사고 피해비용		발생 확률		
			1/7000	10 <sup>-6</sup>
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

## 접근법

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

## 선행연구

- 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

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

### 위험상황

- 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 재산비용	100km 이내, 이주	100km 이내, 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			
중대사고		1/7000	$10^{-6}$
피해비용			
100조원	금액(억원)	4,073.2	279.3
	단가(원/kWh)	43.2	3.0
500조원	금액(억원)	19,128.5	1,219.9
	단가(원/kWh)	203.1	13.0



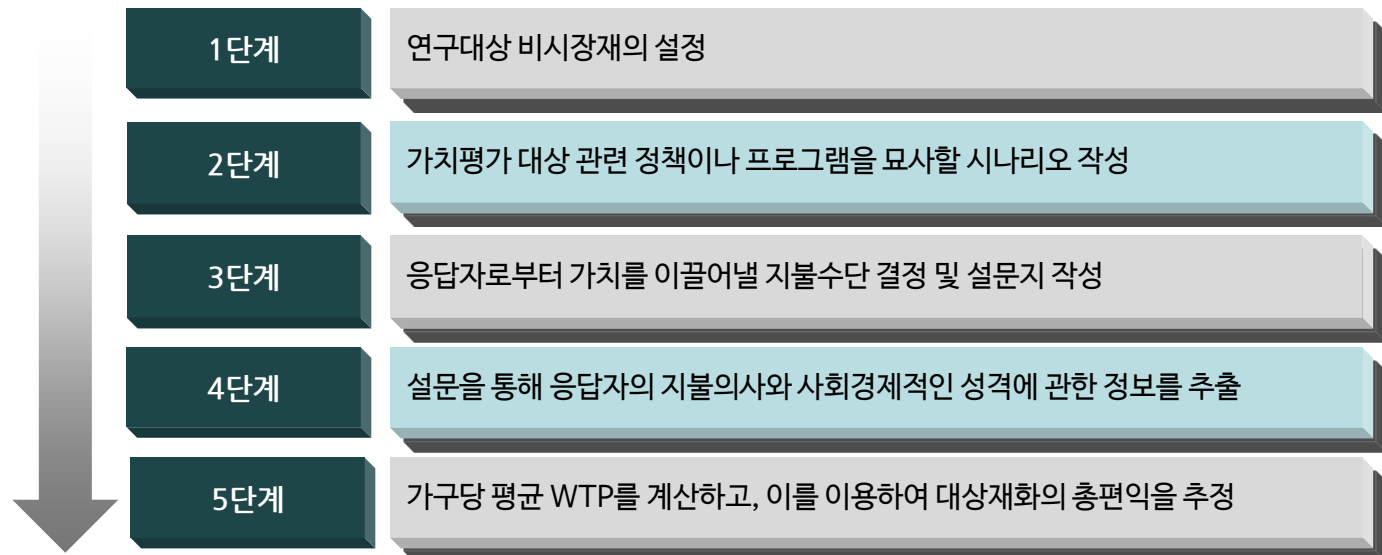


# 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

## 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

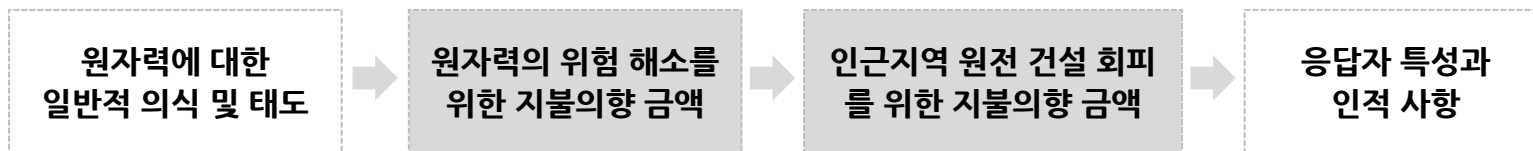




# 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

## 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



## 조사대상 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 해소 제시금액(원)	인근지역 원전건설 제시금액(원)	표본 수 (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 수(가구)	비율(%)	특성분류		표본 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 가구소득	99만원이하	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
					300-399만원	258	25.8
교육수준	중졸 이하	88	8.8		400-499만원	182	18.2
	고졸	471	47.1		500만원 이상	219	21.9
	대재 이상	441	44.1				



# 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

## WTP 분석 모형

### 1) Double-Bound Dichotomous Choice model

- $K$ 번째 응답자가 제시금액  $A_k$ 에 대해 '예' 라고 대답하는 경우 두 번째 제시금액을  $A_k$ 보다 큰  $A_k^u$  이고, '아니오' 라고 응답하는 경우 두 번째 제시금액을  $A_k$ 보다  $A_k^d$  이하 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

$$\log L = \sum_{k=1}^K I_k^{YY} \ln [1 - G(A_k^u)] + I_k^{YN} \ln [G(A_k^u) - G(A_k)] + I_k^{NY} \ln [G(A_k) - G(A_k^d)] + I_k^{NN} \ln [G(A_k^d)]$$

- 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(Krstrom, 1997)

$$\log L = \sum_{k=1}^K I_k^{YY} \ln [1 - G(A_k^u)] + I_k^{YN} \ln [G(A_k^u) - G(A_k)] + I_k^{NY} \ln [G(A_k) - G(A_k^d)] + I_k^{NNY} \ln [G(A_k^d) - G(0)] + I_k^{NNN} \ln [G(0)]$$

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



# 원자력 발전의 외부비용 IV: 위험회피비용 (조건부 가치평가법)

## 추정 결과 Na-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 (가구당)	연간 총 WTP (2013년 기준)
		추정계수	t-통계량		
DBDC mode (정규분포)	Mean	2540.1 **	7.756	2,540원	5,489억 원
	Sigma	7528.7 **	34.096		
DBDC model (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 Na-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 추정결과	Estimation results		Mean WTP (가구당 월평균 추가 전기요금)	연간 총 WTP (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 (가구당)	연간 총 WTP
		추정계수	t-통계량		
DBDC model (정규분포)	Mean	2269.9 **	6.186	2,270원	4,906억 원
	Sigma	8238.4 **	38.441		
DBDC model (로지스틱분포)	Alpha	0.5902 **	7.332	2,378원	5,139억 원
	Beta	0.0003 **	30.342		
Spike model (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 추정결과	Estimation results		Mean WTP (가구당 월평균 추가 전기요금)	연간 총 WTP (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)

### 원전사고회피를 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 원전발전량으로,  
거주지 인근지역 신규원전으로 인한 위험회피의 경우에는 APR-1400 1호기의 연간발전량으로 나눈 값임

# CONTENTS

에너지이용 현황

국내외 원자력 현황

원자력 발전의 사적 비용

원자력 발전의 외부 비용

**요약 및 정책 제언**





# 원자력 발전의 사회적 비용

원자력발전의 사회적 비용(원/kWh)

외부 비용		사적 비용		
		기준	건설비/해체비 30% 인상	건설비/해체비 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 (시나리오)	3.0~203.1	51.8~251.9	59.9~260.0	65.2~265.3
IVa 기존위험 회피비용 (CVM)	3.8~6.3	52.6~55.1	60.7~63.2	66.0~68.5
IVb 신규위험 회피비용 (CVM)	52.1~94.9	100.9~143.7	109.0~151.8	114.3~157.1



## 정책 제언

외부효과(외부비용)에 대한 환경경제학의 해법

→ 외부효과와 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 발전연료의 개별소비세율(발전량 당 동일 세율 적용): 3,155원/g, 8.04원/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



## 향후 연구방향

- 우리나라 실정에 적합한 중대사고 시나리오 개발 및 이에 기반한 중대사고 피해비용 추정
- 효용함수 및 우리나라 데이터를 활용한 상대적 위험회피계수의 추정
- 조건부 가치평가법의 토대가 되는 단순 설문조사를 '공론조사' 등을 통해 보완
- 향후 타 에너지원과 비교 시 송전망 비용도 고려

