

A stylized illustration of a nuclear power plant. In the background, two large, grey, mushroom-shaped cooling towers emit thick white plumes of steam that rise into a light blue sky with scattered white clouds. In the foreground, there are two orange, dome-shaped containment domes on a concrete base. To the right, a multi-story building with a grid-like window pattern is visible. On the left, there are some smaller, purple and blue structures. The overall style is clean and modern with a soft color palette.

저탄소사회 구현에서의 원전의 역할

서울대학교
이은철



Chap. I

원전의 필요성

우리나라의 에너지 현실

수입 의존도가 높은 취약한 에너지 수급 구조

- 부존 에너지자원이 절대 부족(수입의존도 96%, 수입비용 국민경제 부담)
- 에너지소비량의 지속적인 증가 예상(에너지소비 세계10위, 석유소비 8위)
- '11년 에너지수입액 1,725억불로 전체수입액의 32.9% 차지

에너지 수입액(총 수입대비)



원유 수입량(백만 bbl)



억불



국내 발전원가(정산단가)비교

◆ 원자력은 가장 저렴하게 전력을 생산할 수 있는 발전원임

- 화석연료 발전원인 석유, LNG, 유연탄 발전원의 정산단가는 원자력에 비해 각각 5.7, 3.6, 1.7배 비쌈
- 신재생에너지인 태양광, 풍력, 수력 발전원의 정산단가는 원자력에 비해 각각 11.2, 2.6, 3.5배 비쌈

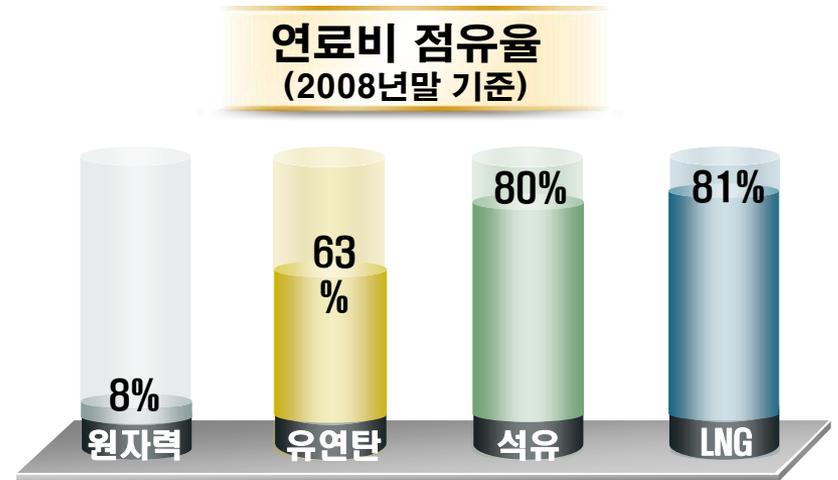


2011년도 발전원별 발전단가 비교

안정적인 에너지 공급

◆ 안정적인 에너지 공급을 통한 에너지 안보

- 우라늄은 세계 전역에 고르게 매장되어 있으며, 수송과 비축이 용이하여 안정적인 연료수급이 가능함
- 가채년수가 가장 긴 에너지원
- 연료비 비중이 낮아 우라늄 가격변동에 민감하지 않음



국가 에너지 기본 계획

- ◆ 에너지정책 관련 최상위 국가전략
- ◆ '저탄소 녹색성장 구현' 등 미래지향적 정책방향 제시

4대 전략 과제

에너지 저소비
저탄소 사회구현

에너지 사용 효율 개선
에너지 시장 효율화
기후변화 대응능력 향상

脫
화석에너지화

신재생에너지 개발 확대
원전의 공급능력 및
국민 이해기반 확충

그린에너지산업
성장동력화

그린에너지산업 기반
에너지산업 해외 진출

에너지자립
에너지복지
실현

해외자원개발 역량 확충
에너지의 안정적 공급
에너지 복지 강화

2030년 원자력 설비 비중을 26%('07년) → 41%로 확대
신·재생에너지 보급률: 2.2% → 11%('30년)

세계의 기상이변

◆ 온실가스 방출에 따른 심각한 기후변화 발생

북극 빙하 감소

북극 해빙 속도
2년 간 10~15배 증가

해수면상승 1.8mm/년



물 부족 심화

25년 이내 인구 1인당
담수공급량 1/3 감소



지구온난화

지난 100년간 0.74°C 상승

아열대 기후화
지역 확산



사막화

아시아 경작지 1/3 사막화
(중국 국토 27%)

매년 사하라사막
10km 확장



환경측면에서의 원자력 : NEWclear

기후변화협약에 따른 CO₂ 감축을 위한 가장 현실적인 대안

전력생산 에너지원별 탄소배출량



* 출처: World Nuclear Association

IEA 저원자력 시나리오 (Low nuclear case)

OECD국가는 원전을 신규 건설 하지 않고, 비OECD국가는 기존계획의 50%만 신규 건설 가정 (2035년 원전용량 630GW → 335GW로 감소)

기존시나리오 대비 (~2035)

	CO ₂ 배출량	3% ↑
	석탄수요	5% ↑
	석탄가격	2% ↑
	가스수요	3% ↑
	가스가격	4% ↑

**원자력 축소가
“기후변화 대응 비용 증가를 의미”**

* 출처: World Energy Outlook 2011

에너지 안보의 중요성

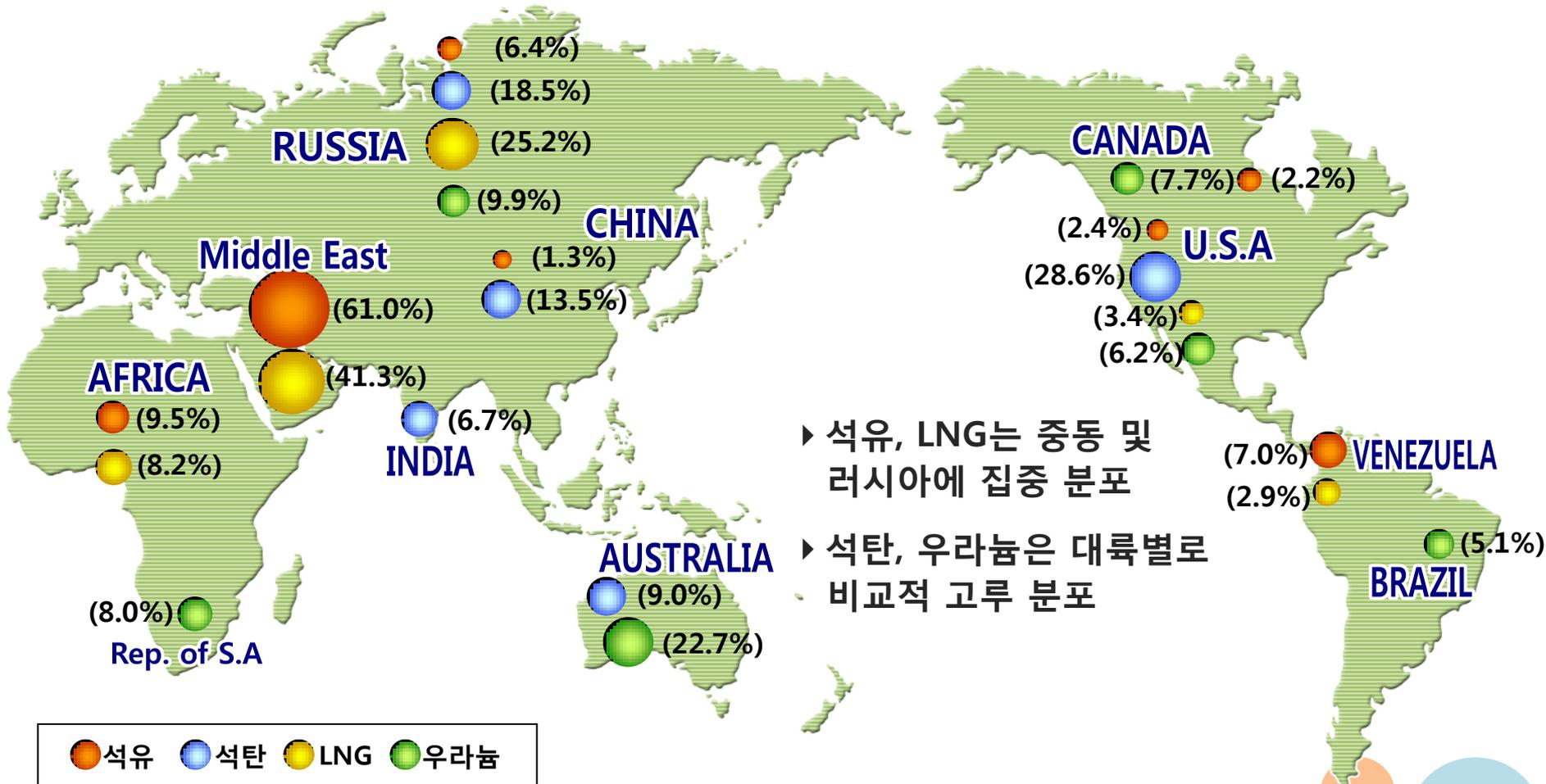
◆ 한국 석유수입 중동 의존도: 86%

• 고밀도 에너지, 원자력



세계 에너지 자원분포

◆ 자원의 국지적 편재



- ▶ 석유, LNG는 중동 및 러시아에 집중 분포
- ▶ 석탄, 우라늄은 대륙별로 비교적 고루 분포

경기부양 효과

◆ 원자력은 경제적으로 가장 잠재력이 높은 산업

- 세계적 원자력 이용확대에 따라
미래 우리나라의 성장동력을 책임질 블루오션
- 원전은 고용창출효과 및 수출효과가 큼

〈원자력 시장 규모 예측〉



〈원전 수출효과〉



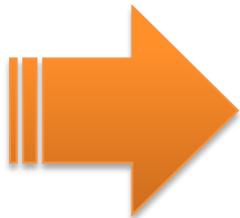
화석연료의 대안

현재 상황

에너지 위기
(화석연료 고갈)



환경 위기
(온실가스 증가)



해결 방안

원자력 및
신·재생 에너지

신·재생 에너지

태양광

태양열

풍력

수력

지열

조력

바이오
매스

연료전지



원자력

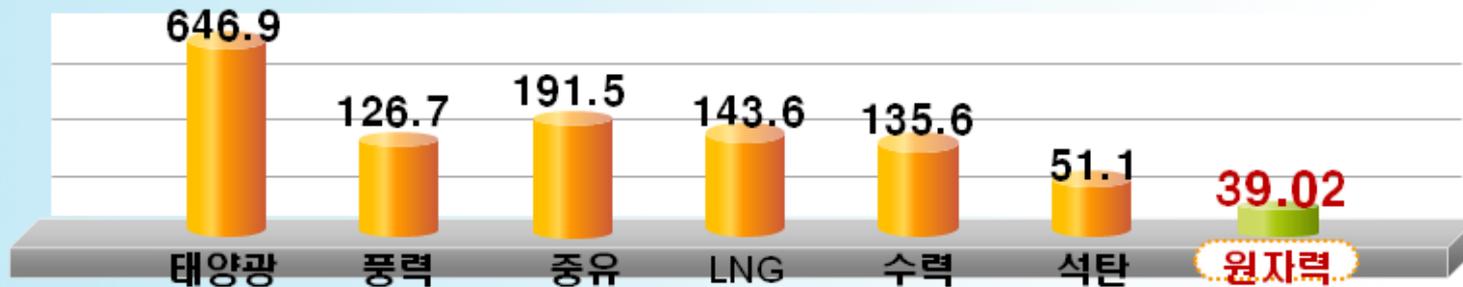
SNUSAL

신·재생 에너지와의 비교

◆ 경제성

○ 판매단가 (원/kWh) : 원자력은 발전원 중 가장 저렴

(2008년 기준)



※ 82년 대비 소비자물가는 221.4% 상승, 전기요금은 10.2% 상승

<국가별 전기요금 비교>

(‘07년 기준, 한국은 ‘08년 / 출처 : 간추려본 한국전력 등)



신·재생 에너지 비교(1)

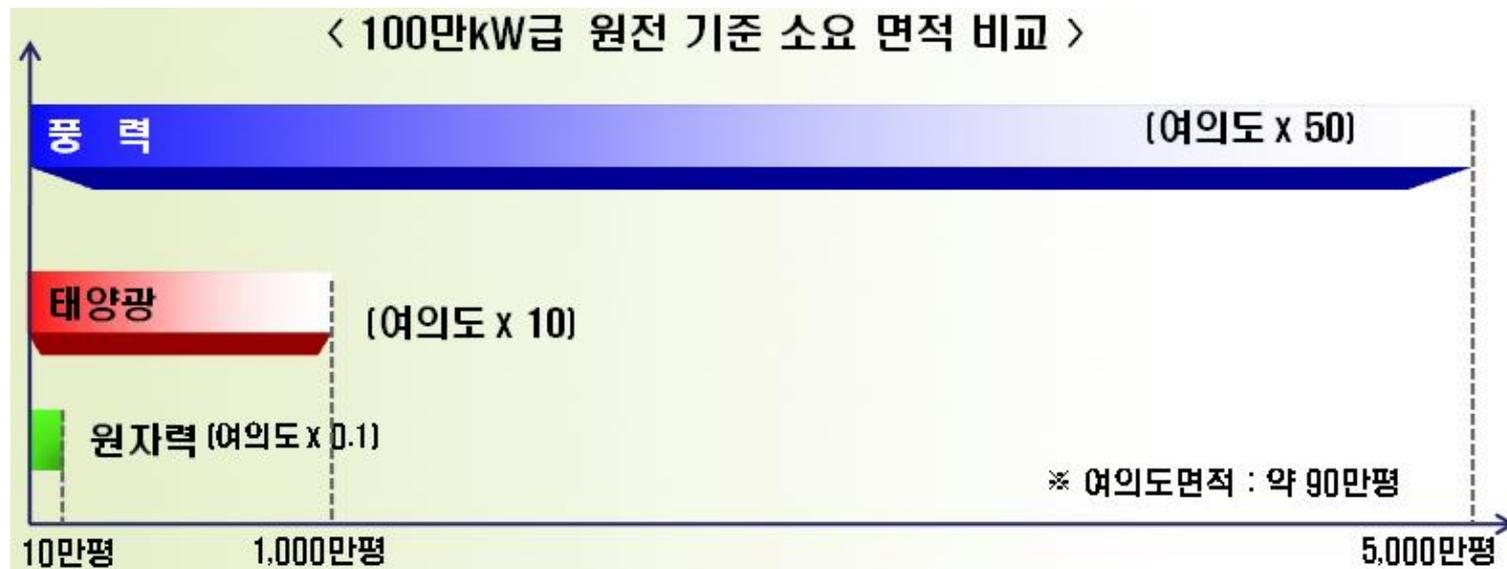
◆ 기술성

- 원자력은 상대적으로 입증된 기술

◆ 설비 이용 효율

- 원자력은 90% 이상, 태양광/풍력은 20% 내외

◆ 부지 면적



신·재생 에너지 비교(2)

◆ 신·재생 에너지

- 기존의 에너지(석유, 석탄, 가스)를 대신할 새로운 에너지
- 선진국을 중심으로 개발 중

◆ 신·재생 에너지의 종류와 특징

실용가능 에너지		태양광 발전	풍력발전	연료전지 발전	석탄가스화 발전
특징	장점	- 무공해 에너지 - 고갈 안됨	- 무공해 에너지 - 고갈 안됨	- 무공해 에너지 - 고갈 안됨 - 고효율/설치 용이	- 무공해 에너지 - 고갈 안됨
	단점	- 에너지밀도 낮음 - 기상여건 영향 - 소규모 발전 유망 - 시설비 고가	- 에너지밀도 낮음 - 기상여건 영향 - 소규모 발전 유망 - 적격지 제한	- 기술 개발 단계 - 시설비 고가	- 기술 개발 단계 - 시설비 고가

후쿠시마 원전사고 이후의 각국 동향

◇ 세계 각국은 원전이용에 있어 2가지 흐름을 보이고 있음

- 그러나 대부분의 국가 (50여 국가)는 원전의 지속 의존에 관심을 가짐



후쿠시마 사고 이후 원자력에 대한 세계적 동향

◆ 주요국 원전정책 동향 개요

- 단기적인 신규 원전건설 위축 예상, 중·장기적 세계 원전 축소로 연결될 가능성은 낮을 것으로 예상됨
 - 원자력은 안정적 에너지 공급과 함께 기후변화에 대응할 수 있는 에너지원
- * 단, 급부상 중인 Shale Gas로 인한 지역적인 원전 위축에 주목할 필요(미국 등)
- (정책 유지 국가) 후쿠시마 이후 모두 원전안전성 점검에 주력하고 있으며, 비교적 지진 위험에서 안전한 국가(폴란드, 카자흐스탄 등) 위주로 원전도입 정책 유지
 - 주요 원전 수출국(미국, 프랑스, 러시아 등)들은 원전 지지 및 적극적 보급 움직임
- * 단, 급부상 중인 Shale Gas로 인한 지역적인 원전 위축에 주목할 필요(미국 등)
- (정책 재검토 국가) 독일, 스위스는 원전 완전 폐기를 선언, 정기점검 등으로 일본은 원전 완전정지 후 재가동 추진 중, 이탈리아, 필리핀 등은 원전재개 정책 철회
 - 지진발생 가능성이 높은 국가(필리핀, 멕시코 등)들은 도입 포기 또는 계획 연기

후쿠시마 사고 이후 원자력에 대한 세계적 동향

원자력에 우호적

- 원자력 발전의 지속적인 기술개발 및 이용확대 추진
 - 미 국 : 신규원전 건설 계획 발표 등 원자력 비중 확대 예정 최근 저렴한 Shale 가스의 부상, 느슨한 온실가스 규제 등으로 그 영향은 제한적일 것임
 - 스페인 : 기존 원전의 계속운전을 위한 법개정을 추진

원자력에 부정적

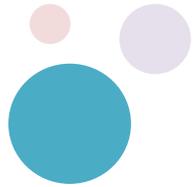
- 원자력 발전의 단계적 폐지 및 재도입 반대
 - 독일 : 노후 원전 8기 완전 가동중지 및 단계적 폐쇄 결정
 - 이태리 : 신규원전 건설 추진하였으나, 국민투표결과 '원전재도입' 반대

신흥 개발국

- 석유수요 급증으로 석유의존도 완화를 위해 원자력발전 확대
 - 중 국 : 현 900만kW 원전설비 → 2020년 원전 규모 7,000만kW로 확대
 - 인 도 : 2030년 원전 규모 6,000만kW 목표, 미/프/러와 협력협정체결

중동 산유국

- 풍부한 석유 절대 의존에서 탈피, 원자력 등 신 에너지 정책 적극 모색
 - UAE : 급증하는 전력 공급 및 환경적 경제적 측면에서 원전도입 추진
 - 요르단 : 2040년 전력수요의 40% 원자력이 조달, 자국의 우라늄 활용



Chap. Ⅱ

원자력이란?

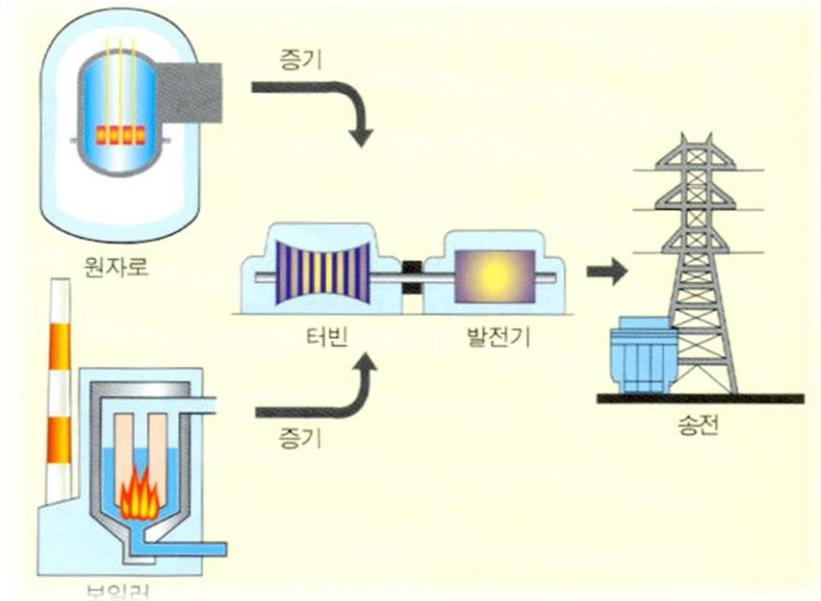
원자력 발전과 화력 발전

◆ 공통점

- 열원에서 발생한 에너지를 바탕으로, 물을 끓여 증기로 전환
- 증기의 힘으로 터빈을 회전시키고, 이를 통해 전력 생산

◆ 차이점

- 화력발전의 에너지원은 석유나 석탄 등의 화석연료
- 원자력발전의 에너지원은 우라늄의 핵분열 에너지



NPP의 안전 관련 특징

◆ 특유의 특징과 기본 안전 기능

운전중지 이 후에도 많은 에너지방출이 오랜 시간 동안 진행

- 열발생과 열제거의 균형
- 노심으로 부터 잔류열제거
 - ★ 공학적 안전설비 (ex. ECCS)

노심(연료)에 많은 양의 방사능 물질

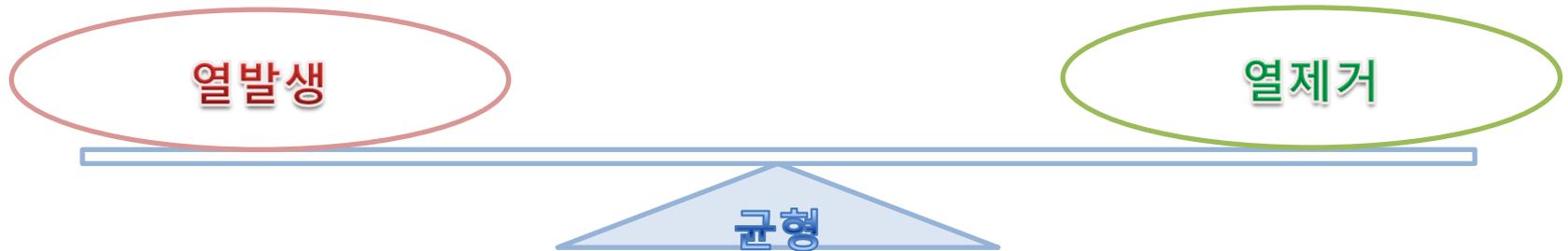
- 방사능 물질의 밀폐
- 운영 폐기물 관리
- 누출 사고 제한
 - ★ 심층 방어

고유파워레벨과 갑작스런 출력급증 불가능

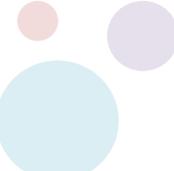
- 반응도 관리
- 빠른 운전 중지 시스템
- 되먹임 기전의 내재

열발생과 열제거의 균형

◆ 열정산



- 열발생 = 열제거 → 안전
- 열발생 < 열제거 → 위험하지 않음
- 열발생 > 열제거 → 매우 위험함



열발생 > 열제거

- **Protection Against(WASH-1400)**

- Overpower: Power excursion from rated power
- 노심냉각에서의 감소: 과냉
 - $W \propto \rho \cdot v \cdot A$
 - ρ : coolant temperature rise or boiling, LOFW, LOHS etc.
 - v : pump failure etc.
 - A : flow blockage etc.
- Loss of Reactor Coolant:
 - LBLOCA, SBLOCA etc.
 - Steepen coolant boiling
 - Emergency Core Cooling System
 - Residual Heat Removal System

심층 방어 단계

1 단계

(정상운전)

목적	비정상운전과 실패 방지
방법	보수적인 설계와 고품질의 건설 및 운전

2 단계

(비정상운전)

목적	비정상운전관리와 실패 탐지
방법	관리, 제한 및 보호시스템과 감시 기능

↑ 사고 방지

3 단계

(DBA)

목적	설계기준을 바탕으로 사고 관리
방법	공학적 안전설비와 사고 절차

↑ 심각한
노심손상
방지

4 단계

(DBA이상)

목적	사고진행과 중대사고 완화를 포함한 심각한 원전 상태 관리
방법	보완제도와 사고관리

5 단계

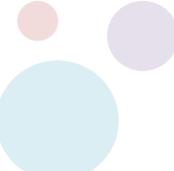
(대량누출)

목적	방사능 물질 대량 누출 완화
방법	현장비상대응



설계기준사고 (Design Basis Accidents)

- 1. 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accidents)
- 2. 주증기배관 파손사고(Main Steam Line Break)
- 3. 증기발생기 세관 파단사고(Steam Generator Tube Rupture)



중대사고(Severe Accidents)

- 자연재해 등 설계기준사고에서 고려하지 못했던 사고
- Beyond Design Basis Accidents(BDBA)
- Hypothetical Accidents

대표적인 방사능 생성량(for a 1000MWe NPPs)

위치	총계(Curies)			Core Inventory 분율		
	Fuel	Gap	Total	Fuel	Gap	Total
노심(a)	8.0×10^9	1.4×10^8	8.1×10^9	9.8×10^{-1}	1.8×10^{-2}	1
사용후핵연료저장조 (Max.) (b)	1.3×10^9	1.3×10^7	1.3×10^9	1.6×10^{-1}	1.6×10^{-3}	1.6×10^{-1}
사용후핵연료저장조 (Avg.) (c)	3.6×10^8	3.8×10^6	3.6×10^8	4.5×10^{-2}	4.8×10^{-4}	4.5×10^{-2}
수송용기 (d)	2.2×10^7	3.1×10^5	2.2×10^7	2.7×10^{-3}	3.8×10^{-5}	2.7×10^{-3}
연료보급(e)	2.2×10^7	2×10^5	2.2×10^7	2.7×10^{-3}	2.5×10^{-5}	2.7×10^{-3}
배출가스 저장탱크	-	-	9.3×10^4	-	-	1.2×10^{-5}
액체폐기물 저장탱크	-	-	9.5×10^1	-	-	1.2×10^{-8}

- (a) Core inventory 는 운전해지 ½ 시간 후의 활동 바탕
- (b) 3/2 노심로딩의 인벤토리; 붕괴 3일과 3/1의 노심 그리고 붕괴 150일과 1/3 노심
- (c) ½ 노심로딩의 인벤토리; 붕괴 150일과 1/6 노심 그리고 붕괴 60일과 1/3 노심
- (d) 7 PWR이나 17 BWR 연료집합체의 붕괴 150일 인벤토리 바탕
- (e) 한 연료집합체의 붕괴 3일 인벤토리

ECCS의 판정기준

- **10CFR50.46: LWR의 ECCS 기본조건**

- 1. 첨두피복재온도 (Peak Clad Temperature)**

계산된 최대 연료의 첨두피복재온도는 2200 °F를 넘지 않는다

- 2. 최대피복재산화도 (Maximum Cladding Oxidation)**

계산된 총 피복재의 산화는 산화 전의 총 두께의 17%를 초과한다

- 3. 최대수소생성량 (Maximum Hydrogen Generation)**

피복재의 화학반응으로 부터 생성된 총 수소량은 피복관 안의 플라늄을 둘러싸고 있는 금속이 반응했을 때 생성될 가능성의 가설량 1%를 초과하지 않는다

- 4. 냉각이 용이한 구조 (Coolable Geometry)**

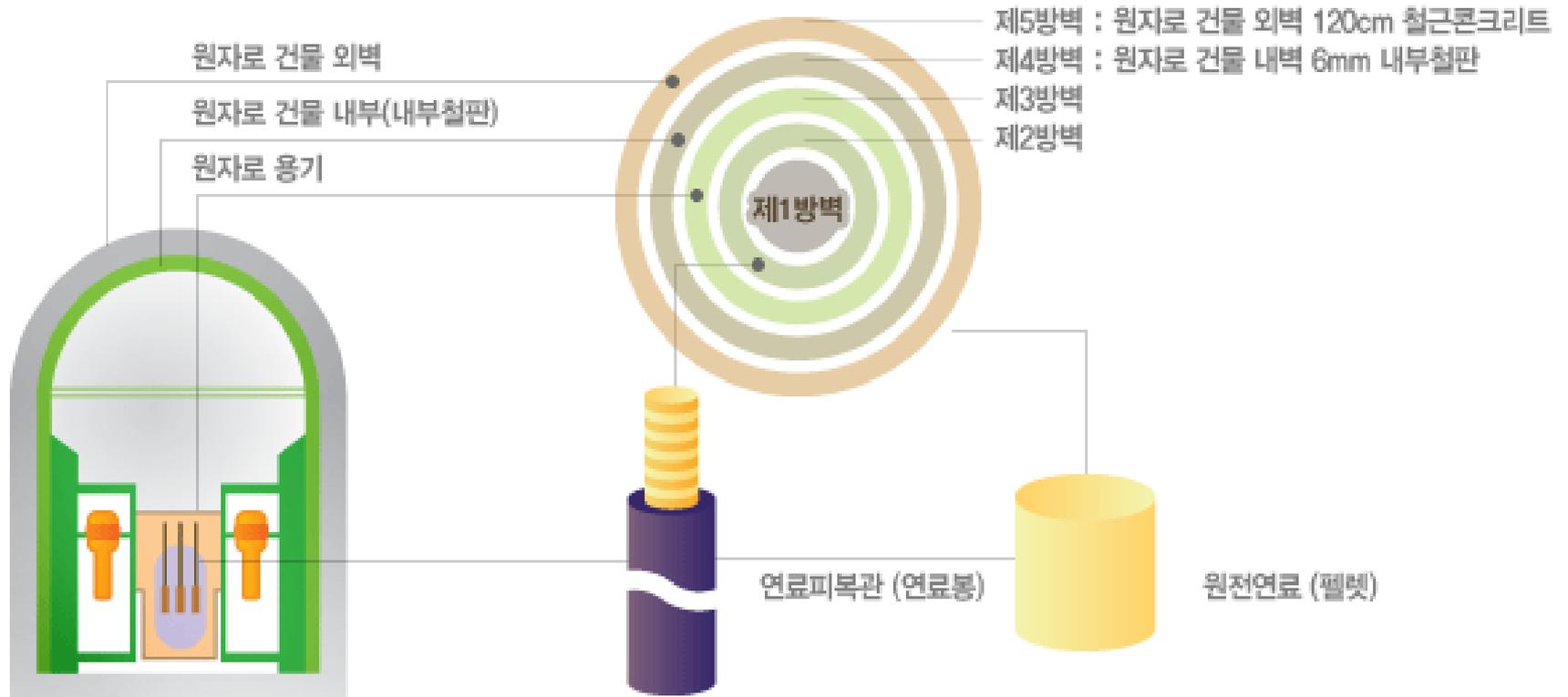
노심구조의 계산된 변경사항이 될 수 있는 것은 노심이 냉각될 수 있도록 수정유지 되는 것이다.

- 5. 장기냉각 (Long-Term Cooling)**

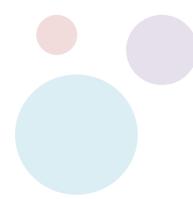
계획된 ECCS의 초기운전 후, 계산 된 노심온도는 받아들릴 수 있는 낮은 점에서 유지되고 붕괴열은 노심에 머무르고 있는 장기수명의 방사능을 제거된다

원자력발전소의 안전성

◆ 원자력 발전소의 다중 방호 개념



다중 방호를 통해 방사능 유출을 원천 봉쇄함



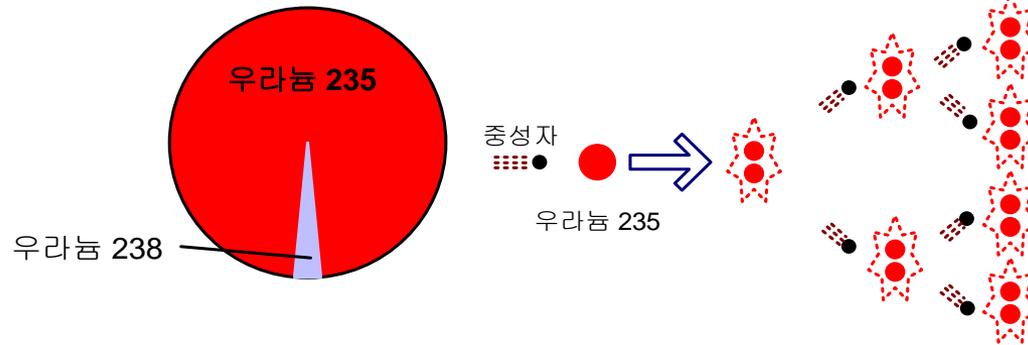
원자력에 대한 의구심

- 1. 폭발 가능성
- 2. 방사선에 의한 피해
- 3. 원전폐기물의 안전성

원자폭탄과 원자로의 비교

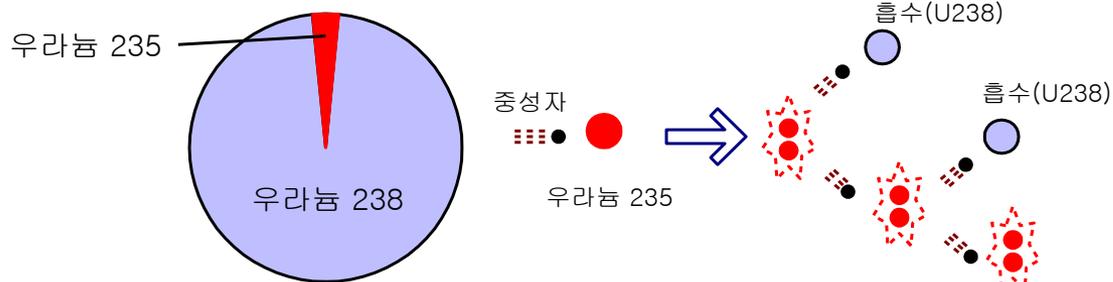
◆ 원자폭탄

- 고농축 핵분열성 물질의 핵연료 사용
- 기하급수적으로 증가하는 핵분열 연쇄 반응: 제어 불가



◆ 원자로

- 저농축 핵분열성 물질의 핵연료 및 잉여 중성자 흡수
- 제어 가능한 속도의 핵분열 연쇄반응



방사선

◆ 방사선이란?

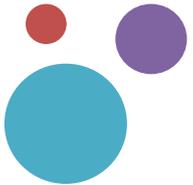
- 불안정한 원자가 안정한 원자로 바뀔 때 방출하는 입자나 전자기파를 방사선이라 함
 - 알파선(α), 베타선(β), 감마선(γ), X-선, 중성자 등이 있음



◆ 원자로와 방사선

- 연료의 핵분열을 통해 2~3개의 불안정한 가벼운 핵이 생성되며 이들이 안정되기 위해 방사선을 방출함
- 발생한 방사능 물질의 99%는 핵연료 내부에 잔류함
- 나머지 1%의 방사능 물질도 다중 방호벽에 의해 차폐



 Chap. Ⅲ

원자력 딜레마와 우리의 현실

원자력의 딜레마와 우리의 현실

원자력에 대한 논란

1 위험성

- 방사선 누출, 핵폐기물 등

2 경제성

- 건설비 및 사후처리비용 ↑
(일본 원자력검증위원회)

VS

1 지구온난화 등 기후변화 문제

2 폭발적으로 증가하는 에너지수요(BRICs,,)

3 저렴한 전기요금

4 신재생에너지의 경제성

5 에너지효율향상 기술개발 수준(CCS,,)



우리의 현실

경제규모 **세계10위**

에너지 해외의존도 **96%**

부가가치 에너지 원단위가
선진국에 비해 **높은 수준**

신재생에너지 비율 **2%**

한반도 기온상승률 **지구 평균치의 2배**

온실가스 배출 증가율 **OECD국가 중 1위('90~)**

에너지다소비 산업구조

에너지요금체계 왜곡

생각해볼 문제



에너지믹스 다변화를 위한 최선의 선택은?

전통에너지



신재생에너지



사회·경제적 효과를 고려한 원자력 정책 추진

원전의 확대
또는 축소



전기요금 상승에
대한 기회비용



어떻게 에너지관리정책의 Balance를 유지할 것인가?

수요 Side
관리정책

공급 Side
관리정책

