

원전정책연구 출연사업 워크숍

원자력 발전의 안전성

2016. 10. 28.

백 원 필

한국원자력연구원 연구개발부원장

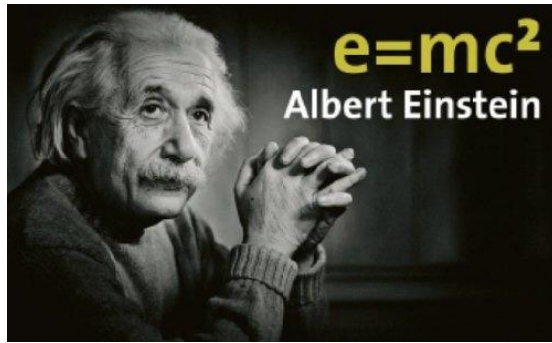
wpbaek@kaeri.re.kr

목 차

- 원자력과 방사선

- 원자력 안전의 기본 개념
- 원자력 사고와 안전성
- 원전 안전성 향상 방향

원자력: 핵분열, 핵융합, 방사능

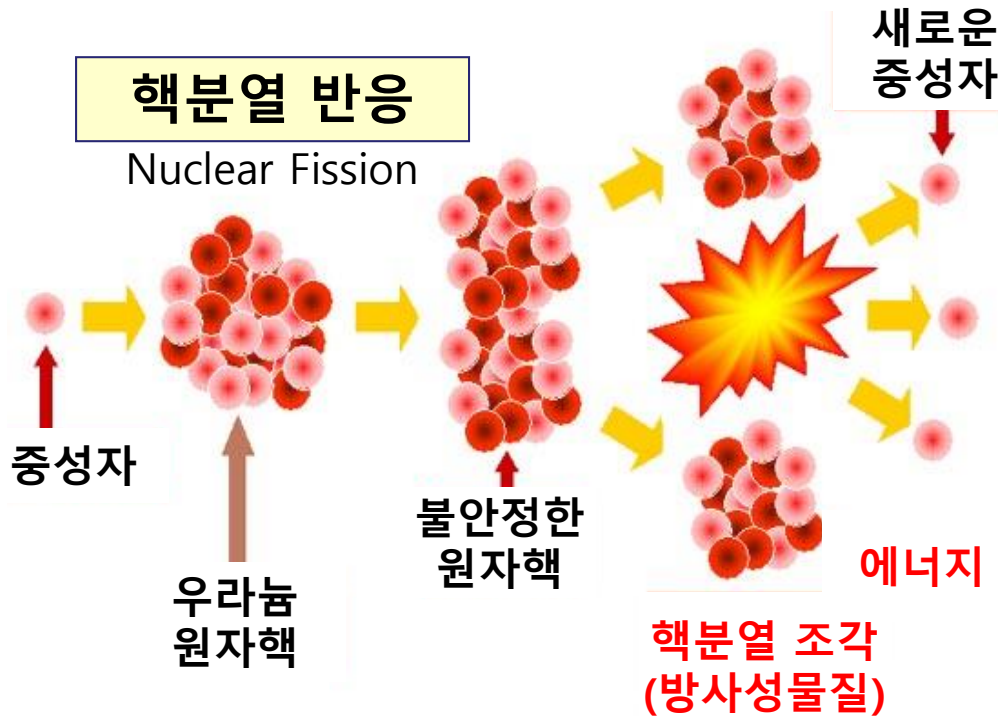


Einstein의 특수 상대성 이론

- 물질과 에너지는 서로 변환 가능
- 물질이 줄어들면서 에너지 생성

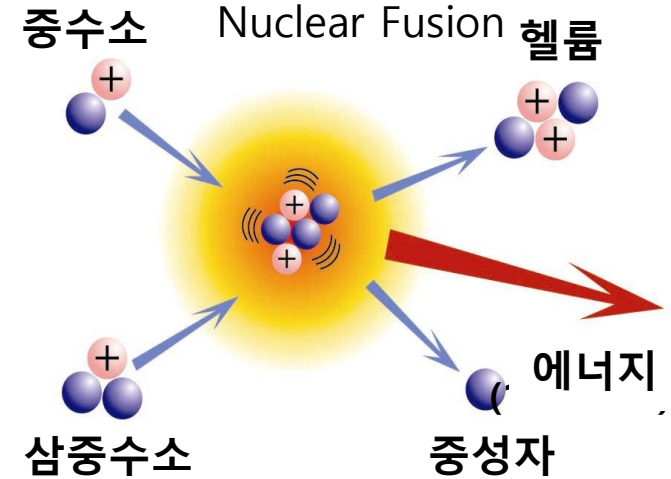
핵분열 반응

Nuclear Fission



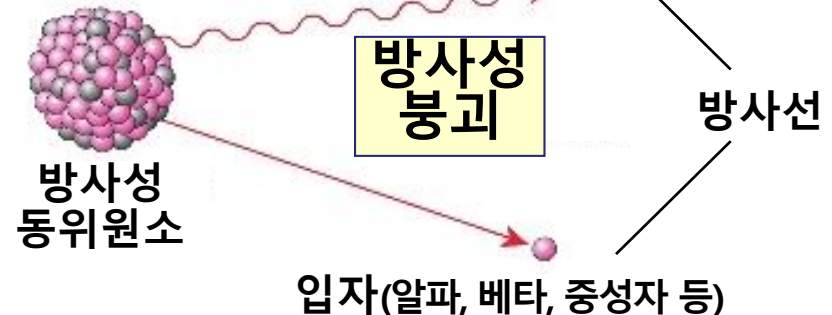
핵융합 반응

Nuclear Fusion

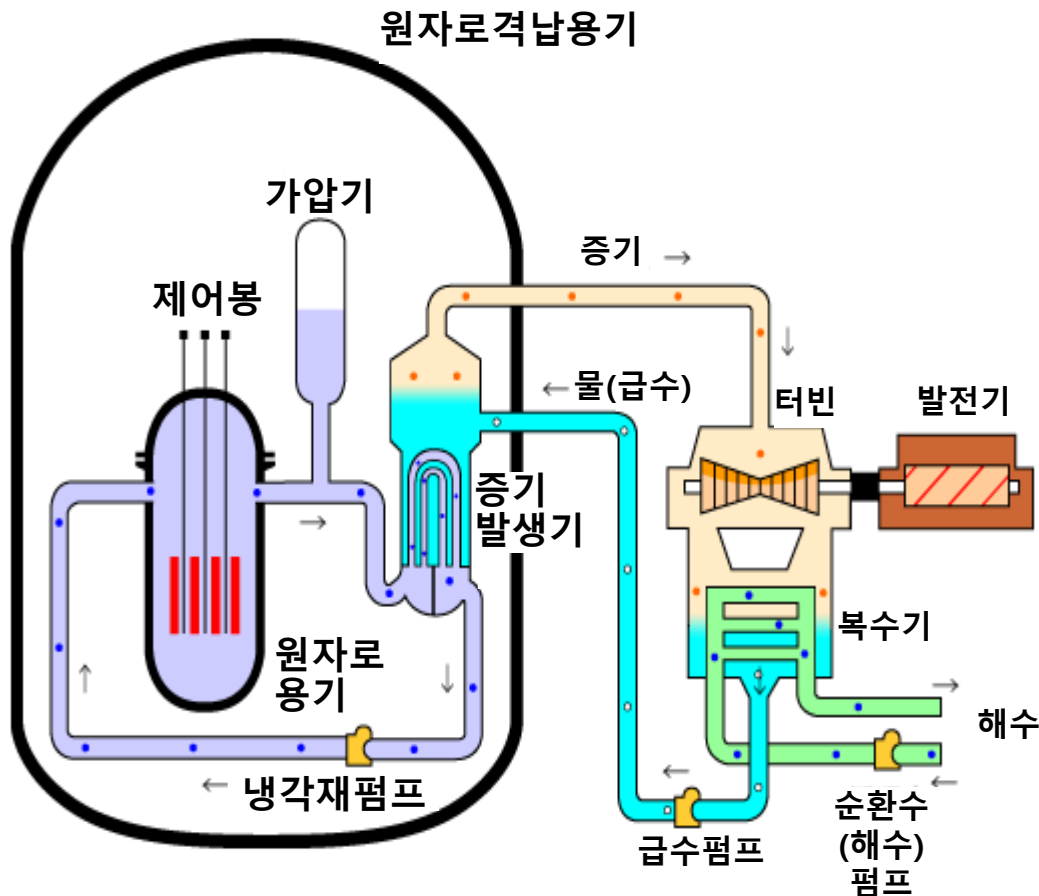


에너지(X선, 감마선 등)

방사성 붕괴

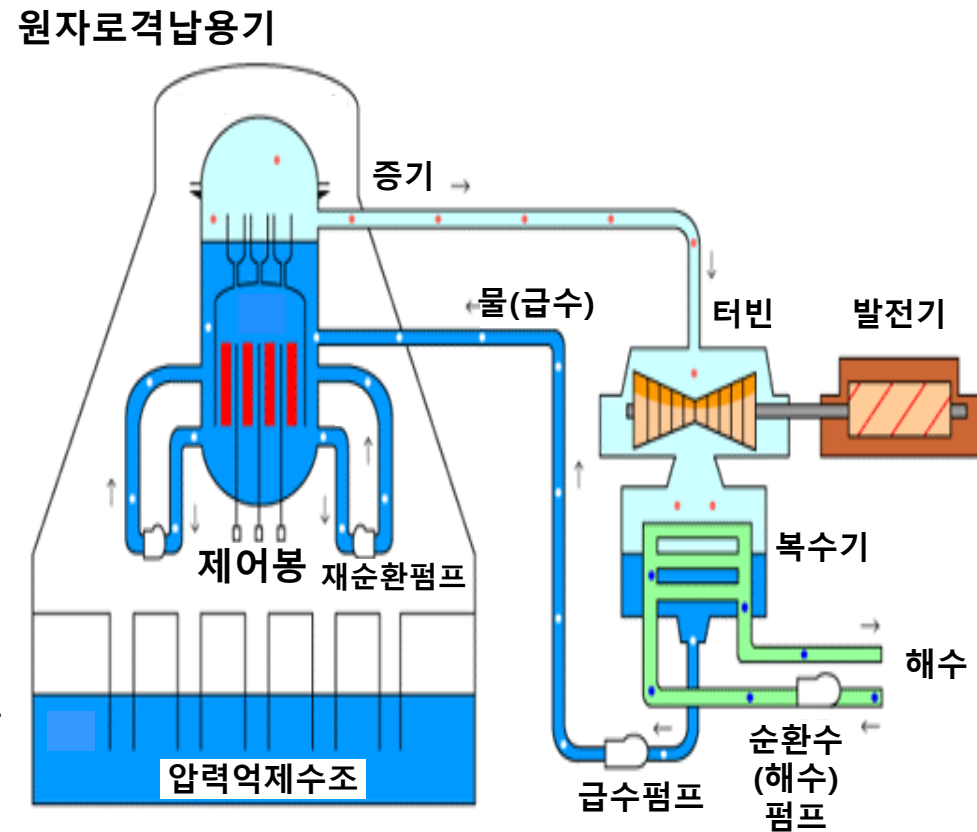


원자력발전소 (Nuclear Power Plant) (1)



가압경수로(PWR)

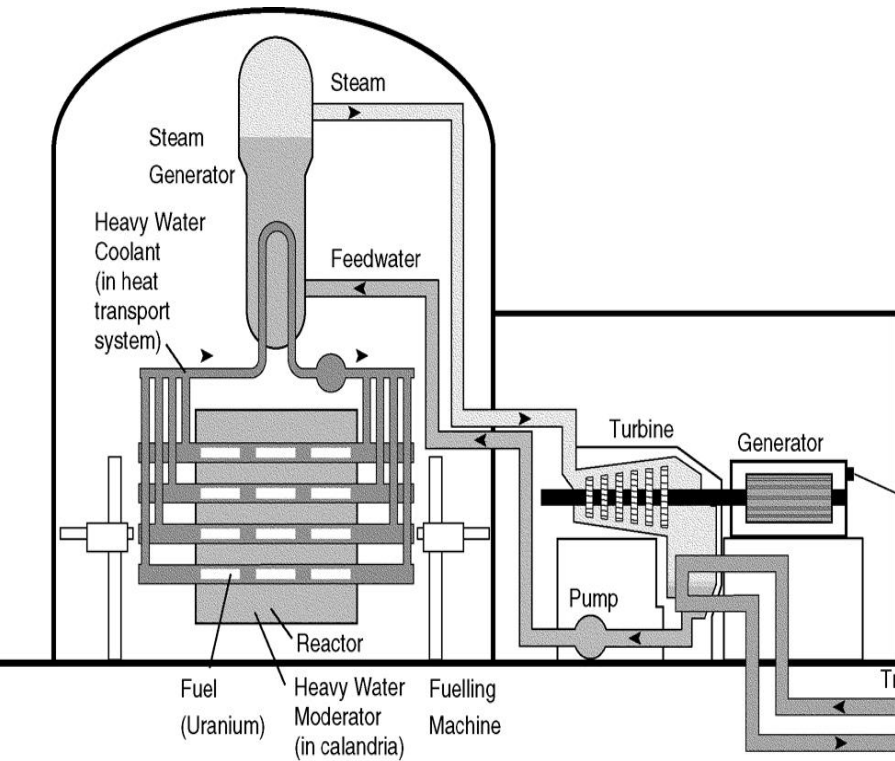
Pressurized Water Reactor



비등경수로(BWR)

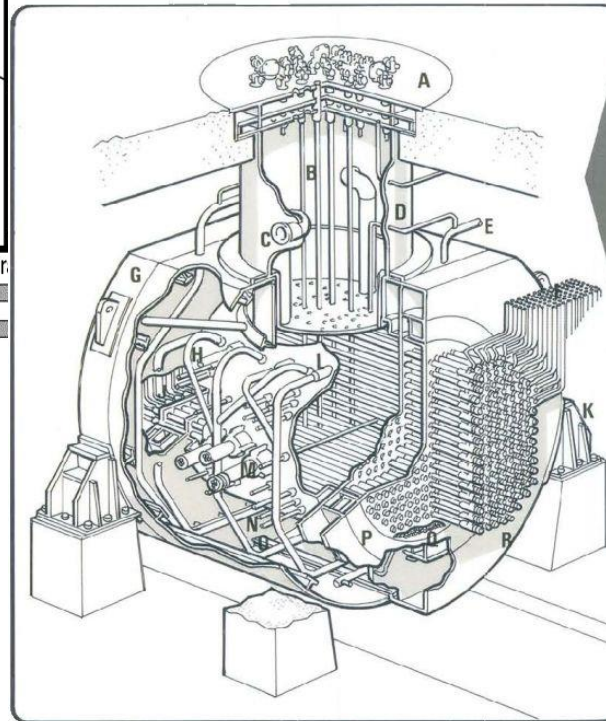
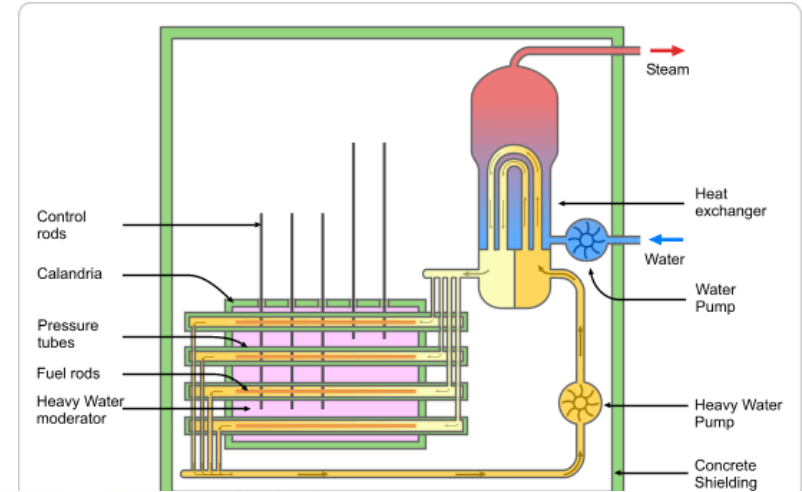
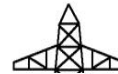
Boiling Water Reactor

원자력발전소 (Nuclear Power Plant) (2)



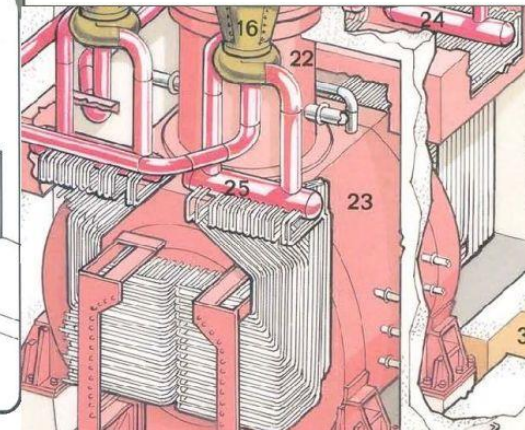
가압중수로(PHWR)

Pressurized Heavy Water Reactor



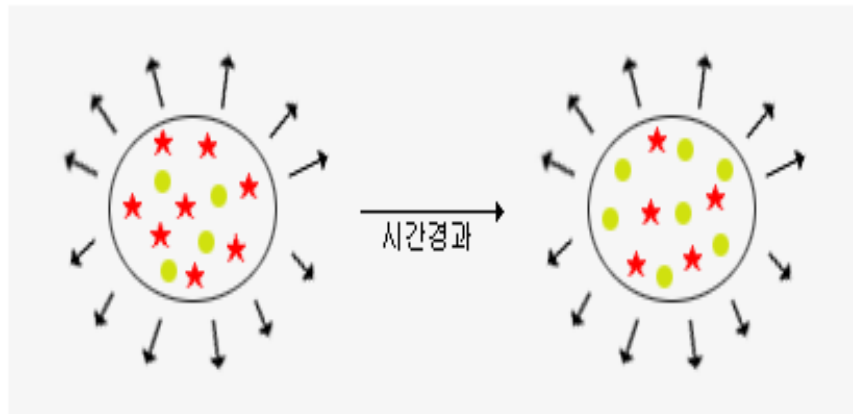
REACTOR CUTAWAY KEY

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| A. Reactivity mechanisms deck. | K. Reactor assembly support. |
| B. Vertical reactivity control units. | L. Calandria shell. |
| C. Overpressure protection pipe. | M. Ion chamber unit. |
| D. Shield tank extension. | N. Horizontal flux detector unit. |
| E. Shield cooling piping inlet. | O. Liquid injection shutdown unit. |
| F. Feeder pipes outlet. | P. End shield. |
| G. Shield tank. | Q. Shielding balls. |
| H. Moderator piping system. | R. Fuel channel assembly. |
| J. Feeder pipe inlet. | |



방사선(Radiation)과 방사능(Radioactivity)

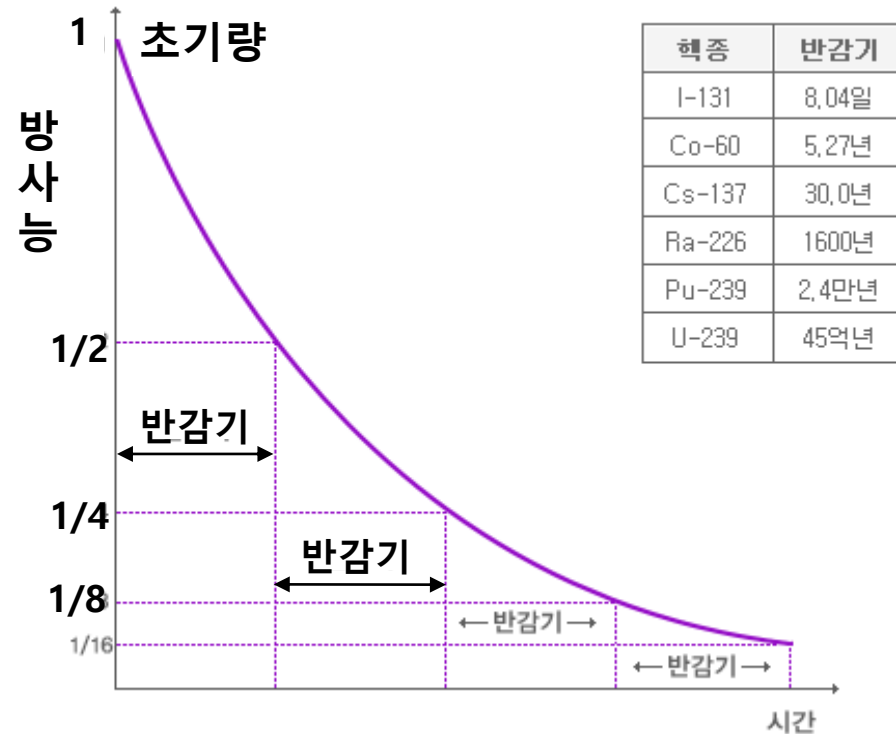
- (이온화, 전리)방사선: 물질을 이온화시키는 능력을 지니는 입자 또는 전자기파 형태의 에너지 흐름
- 방사능: 방사선을 방출하는 능력 또는 그 세기
 - 방사능은 시간이 지나면 줄어든다.
 - 반감기: 방사능이 절반으로 되는데 걸리는 시간



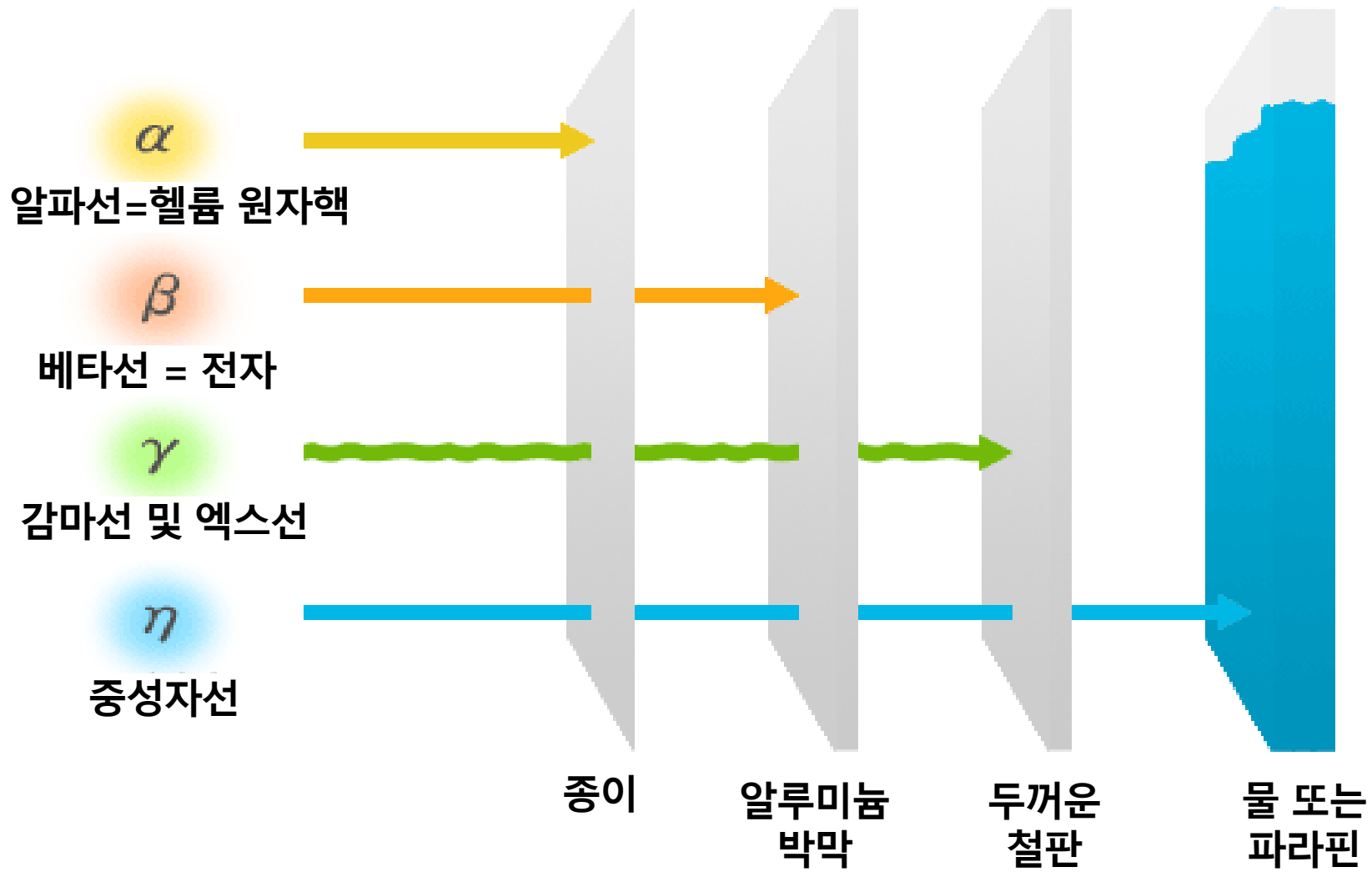
불안정한 핵 ★
안정한 핵 ●

〈초기〉
불안정한 핵(방사성 핵)이 많음
(방사능이 큼)

〈현재〉
불안정한 핵(방사성 핵)이 적음
(방사능이 작음)

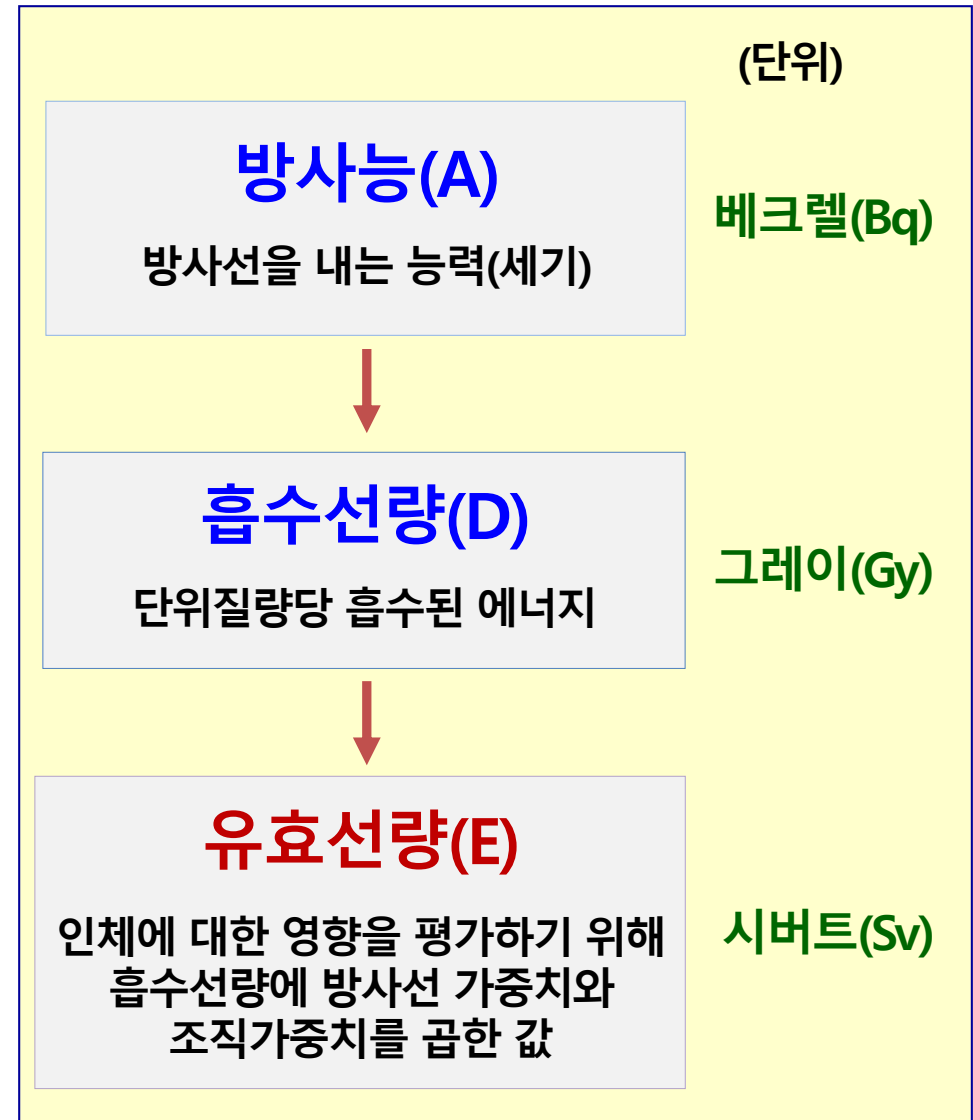
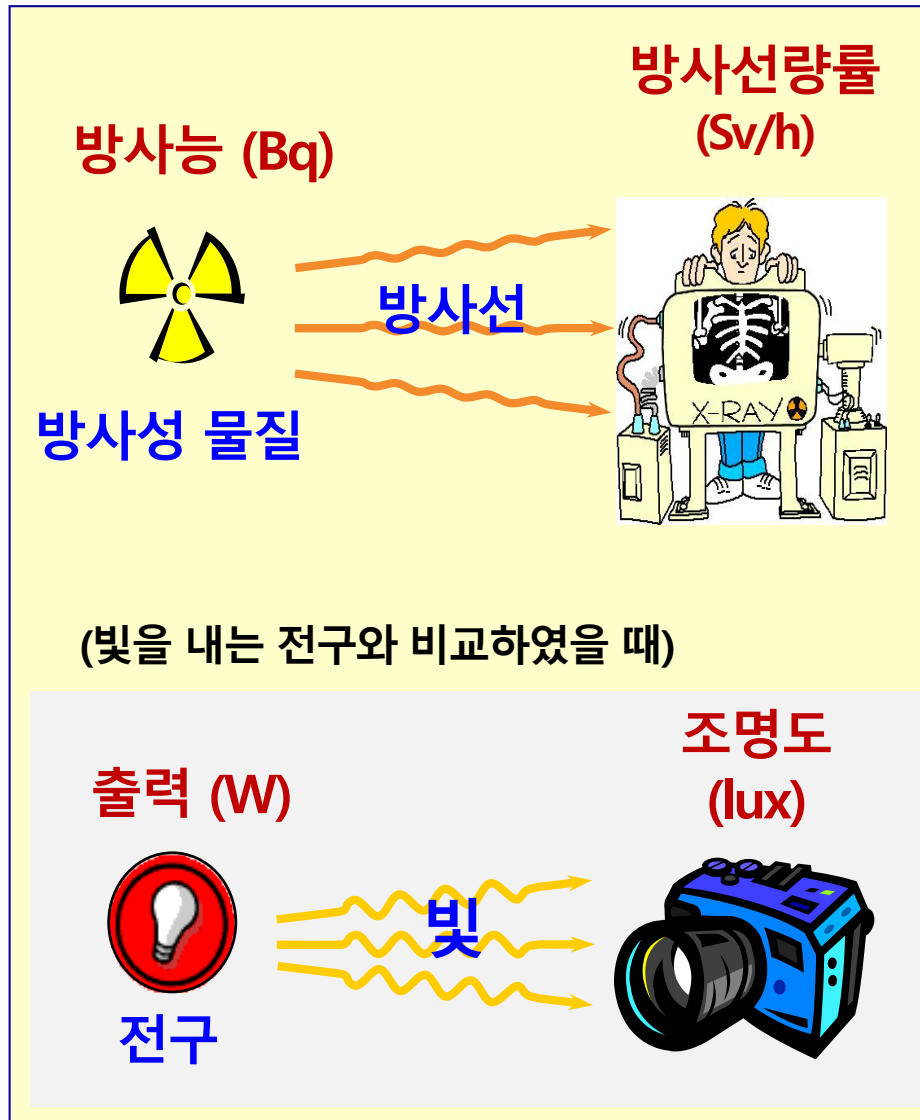


주요 방사선

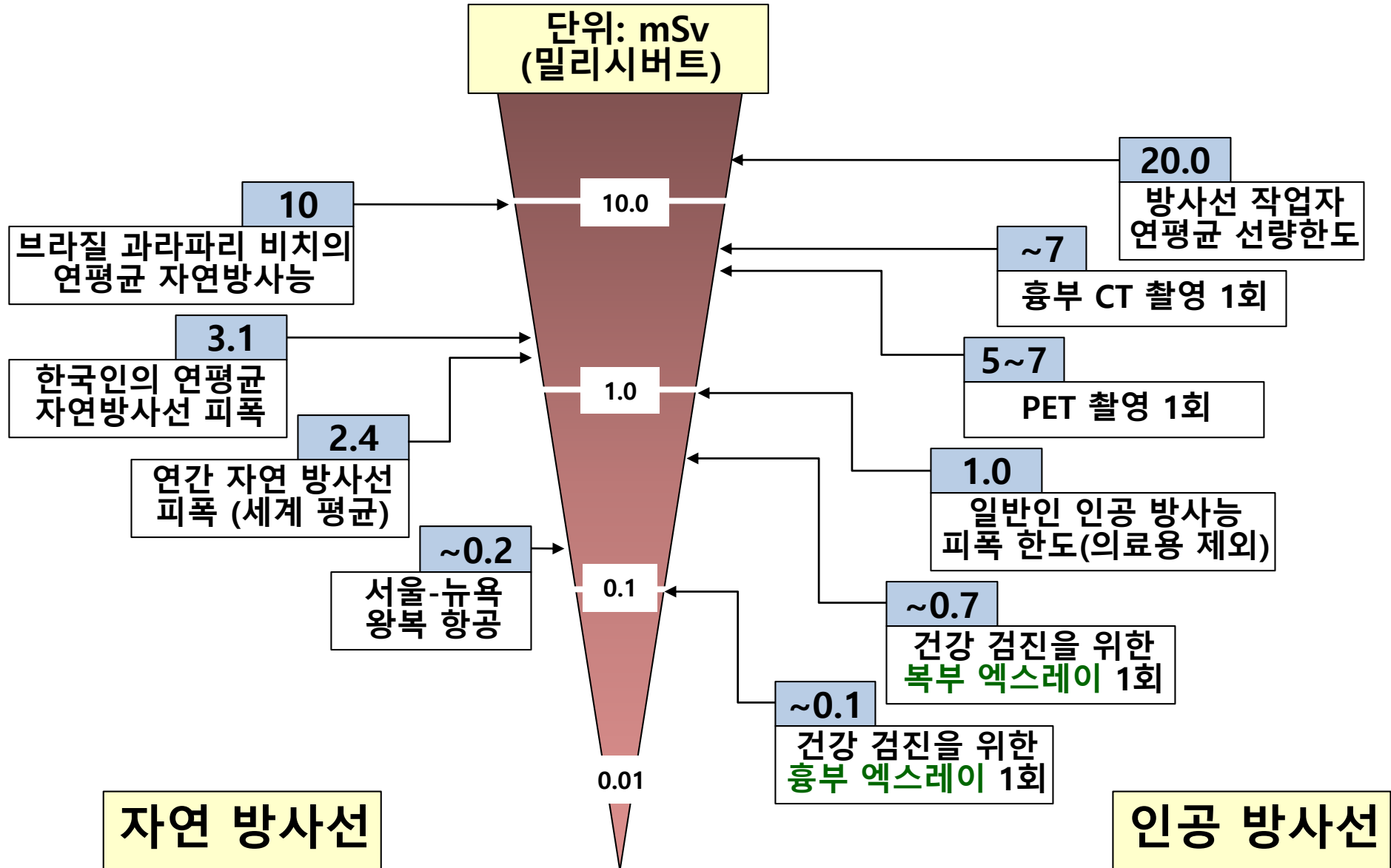


(참고) 감마선과 엑스선은 빛, 적외선, 자외선 등과 성질이 같으나 에너지가 더 높다.

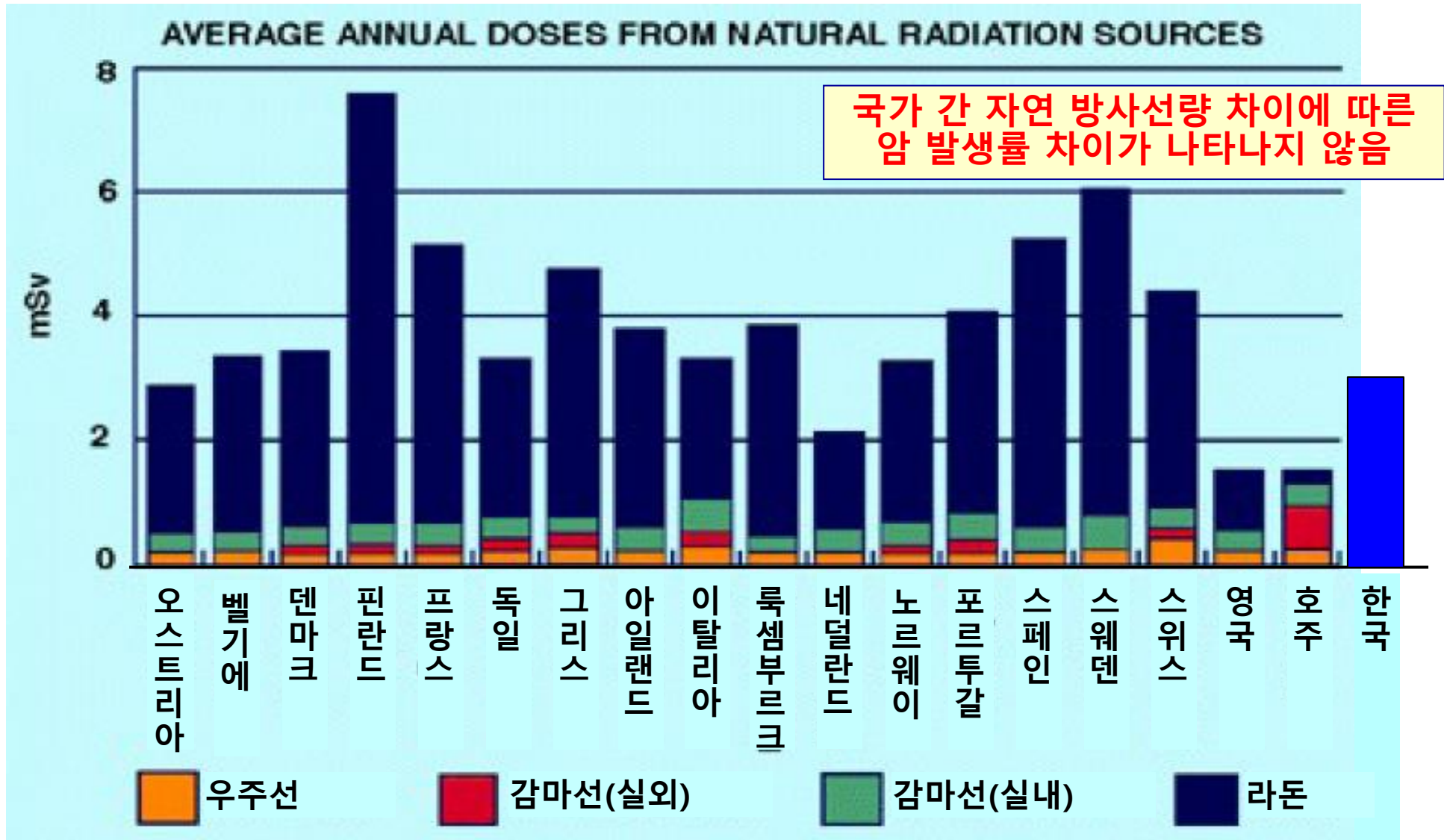
방사능과 피폭(노출)량 단위



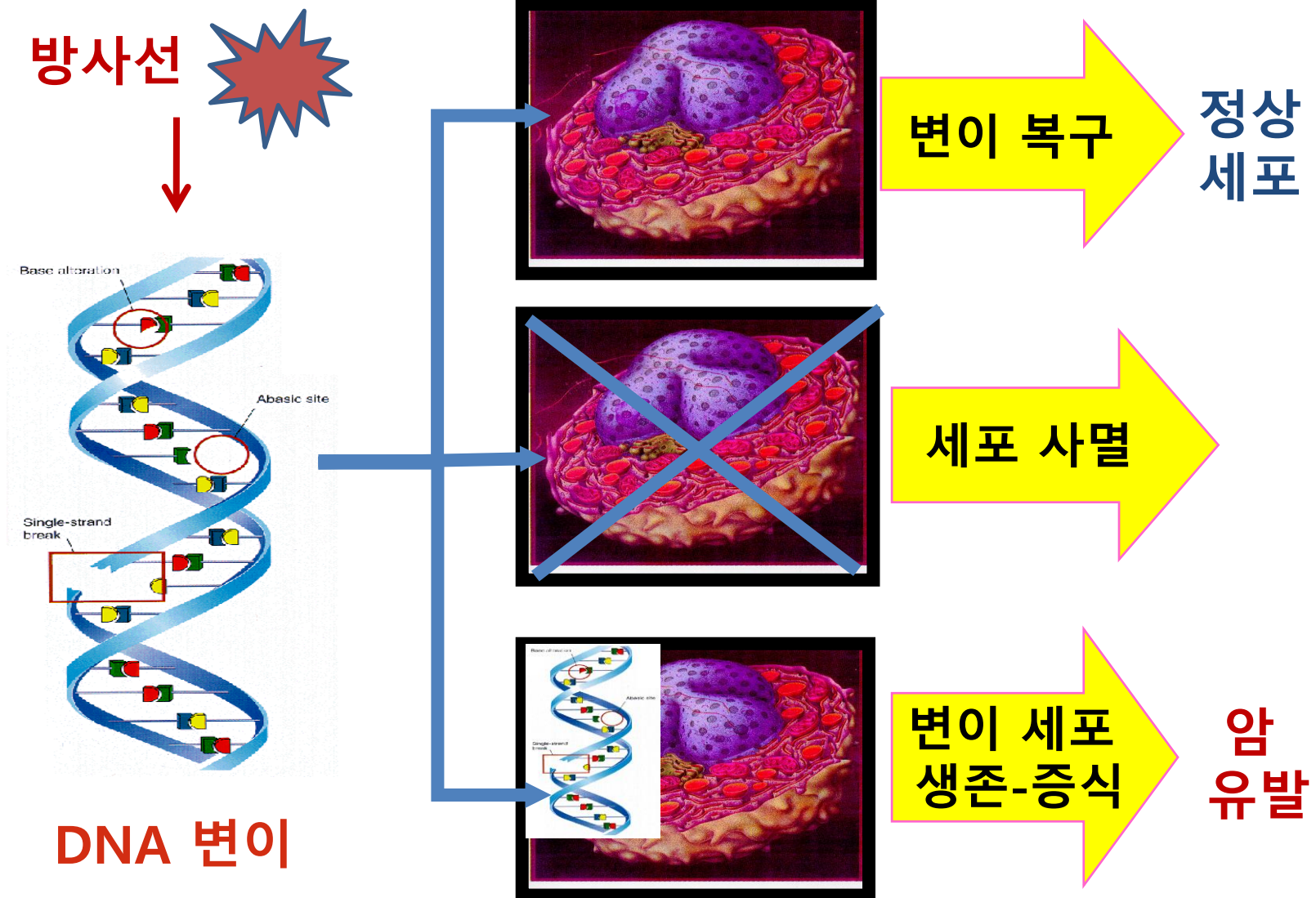
우리 생활에서 만나는 방사선량



국가별 연평균 자연 방사선량



방사선의 인체에 대한 작용



방사선 인체 영향

급성 효과

다량의 방사선 - 짧은 시간에 피폭

고선량, 고선량률

방사선 영향이 수주일 이내 관찰

전신피폭선량	임상 증상
250 mSv	임상 증상 거의 없음
500 mSv	림프구의 일시적 감소
1 Sv	오심, 구토, 전신권태감 림프구의 현저한 감소
4 Sv	30일 이내 50% 사망
7 Sv	100% 사망

(참고: 일반인 연간 허용한도 1 mSv)

만성 효과

저선량 방사선 -오랜시간 꾸준히

저선량, 저선량률

수년~수십년 후 관찰

암, 심혈관질환, 백내장 등

암 등은 방사선 이외의 다른 원인으로 더 많이 발생하므로 방사선과 암의 인과관계를 명확히 하기 어려움.

자료: 이승숙(2011)

목 차

- 원자력과 방사선

- 원자력 안전의 기본 개념

- 원자력 사고와 안전성

- 원전 안전성 향상 방향

원자력 안전 특성과 사고 리스크

□ 원자로 안전의 고유 특성

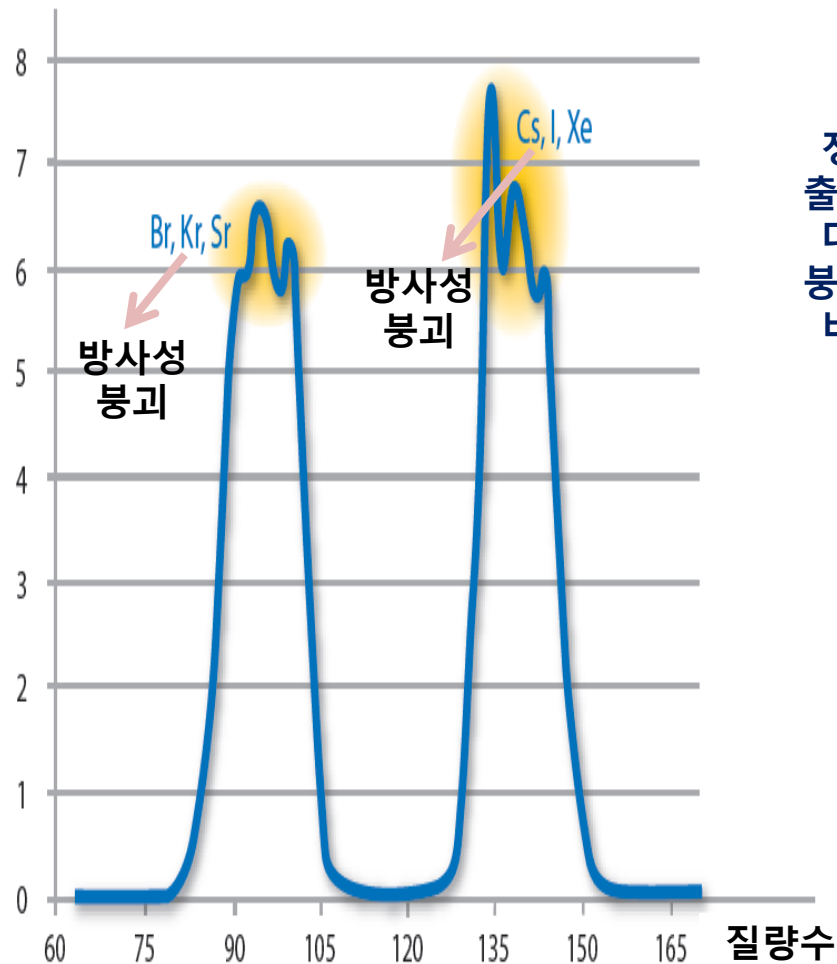
- 원자로 운전에 따라 다량의 방사성물질이 원자로(핵연료) 내에서 생성되어 축적 → 방사성물질과 인간/환경 사이에 다종의 물리적 방벽 필요
- 운전 중 원자로를 냉각시키지 못할 경우 방벽들이 손상되어 방사성 물질의 외부 누출 가능 → 정상 운전시의 신뢰성 있는 냉각 필수
- 원자로 정지 후에도 상당한 크기의 붕괴열(Decay Heat) 발생 → 원자로 정지 후에도 지속적인 냉각 필요

□ 원자력 사고의 핵심 리스크 → 독성 화학물질과 유사

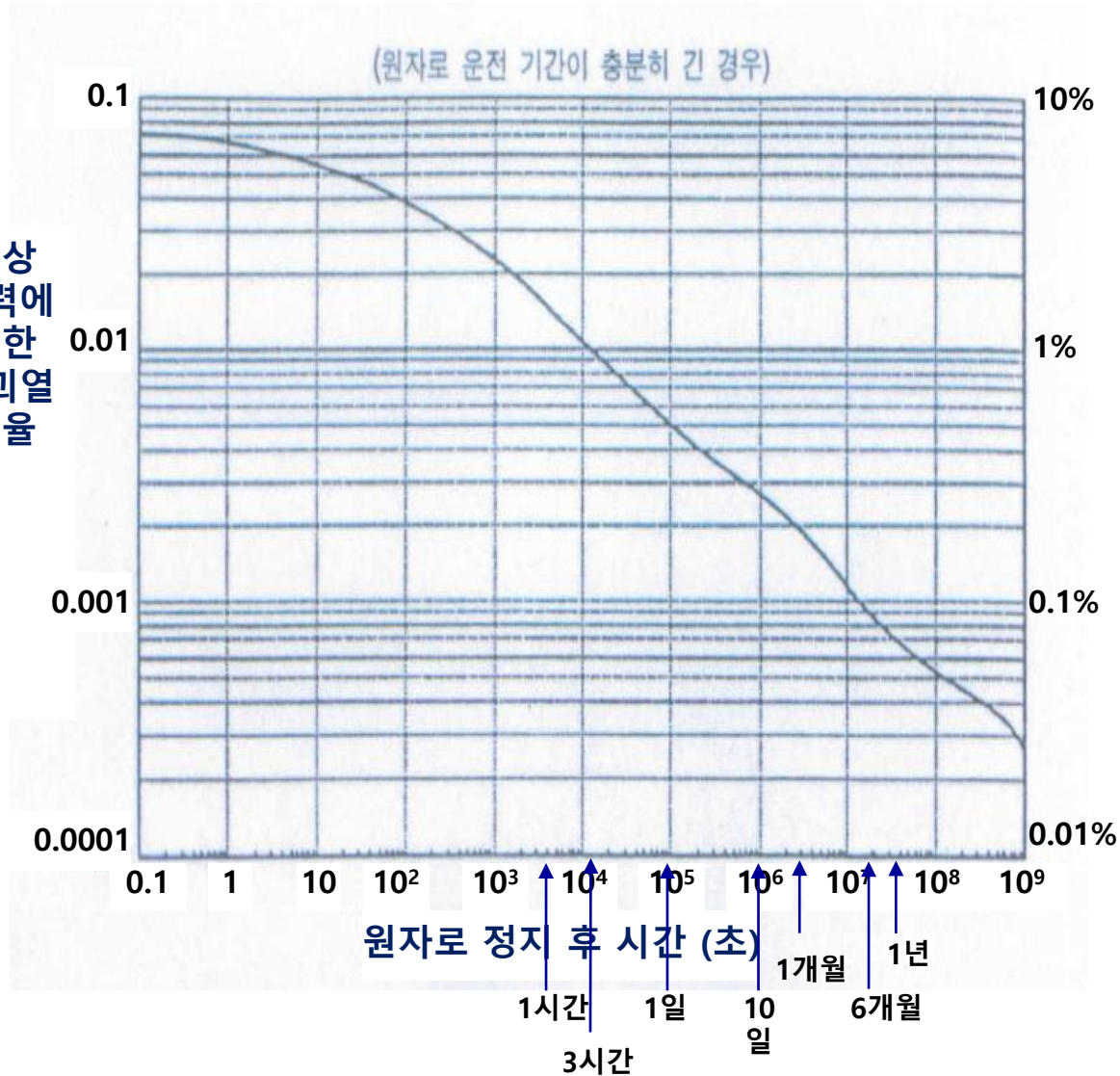
- 매우 높은 선량의 방사선 피폭으로 인한 단기 사망 및 장애 (결정론적 영향)
- 상대적으로 낮은 선량의 방사선 피폭으로 인한 중장기 암 발생 (확률론적 영향)
- 경제적·사회적 손실

핵분열생성물(Fission Products)과 붕괴열(Decay Heat)

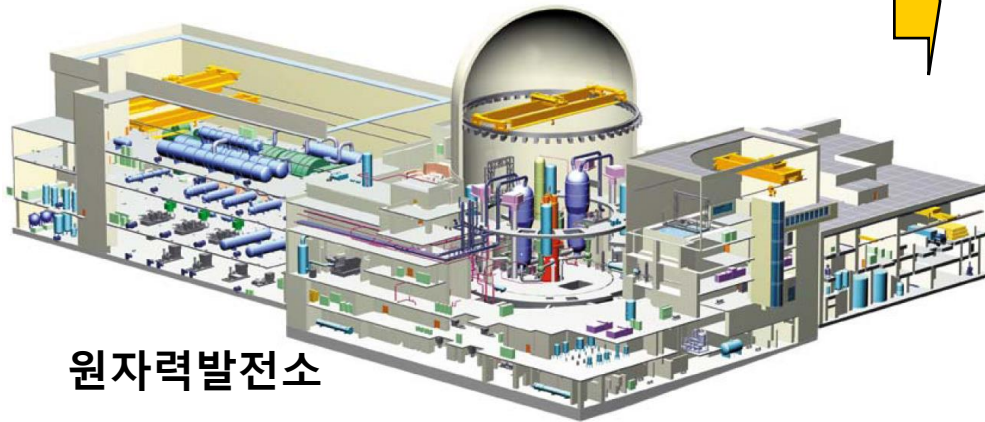
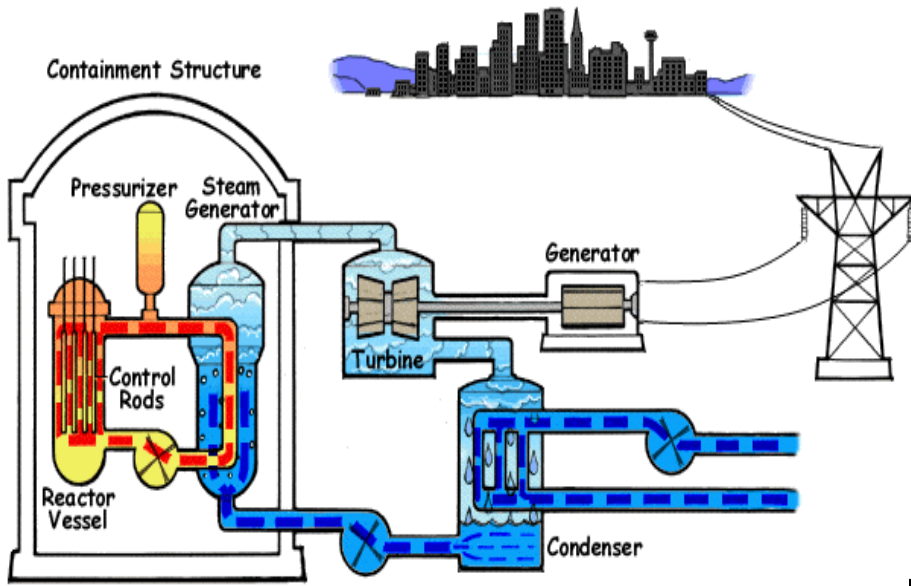
생성분율
(%)



정상
출력에
대한
붕괴열
비율



가압경수로(PWR)

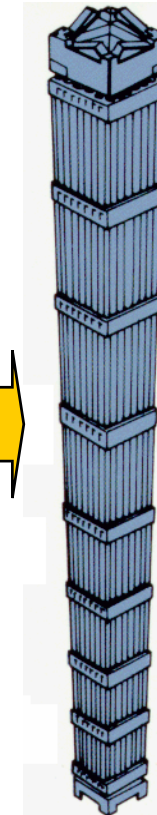


원자력발전소

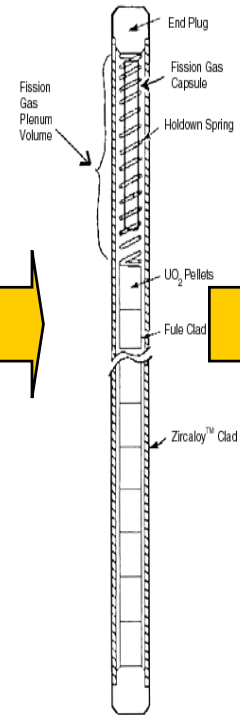
원전 안전의 핵심은 핵연료의 건전성 유지



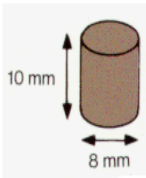
원자로



핵연료
집합체



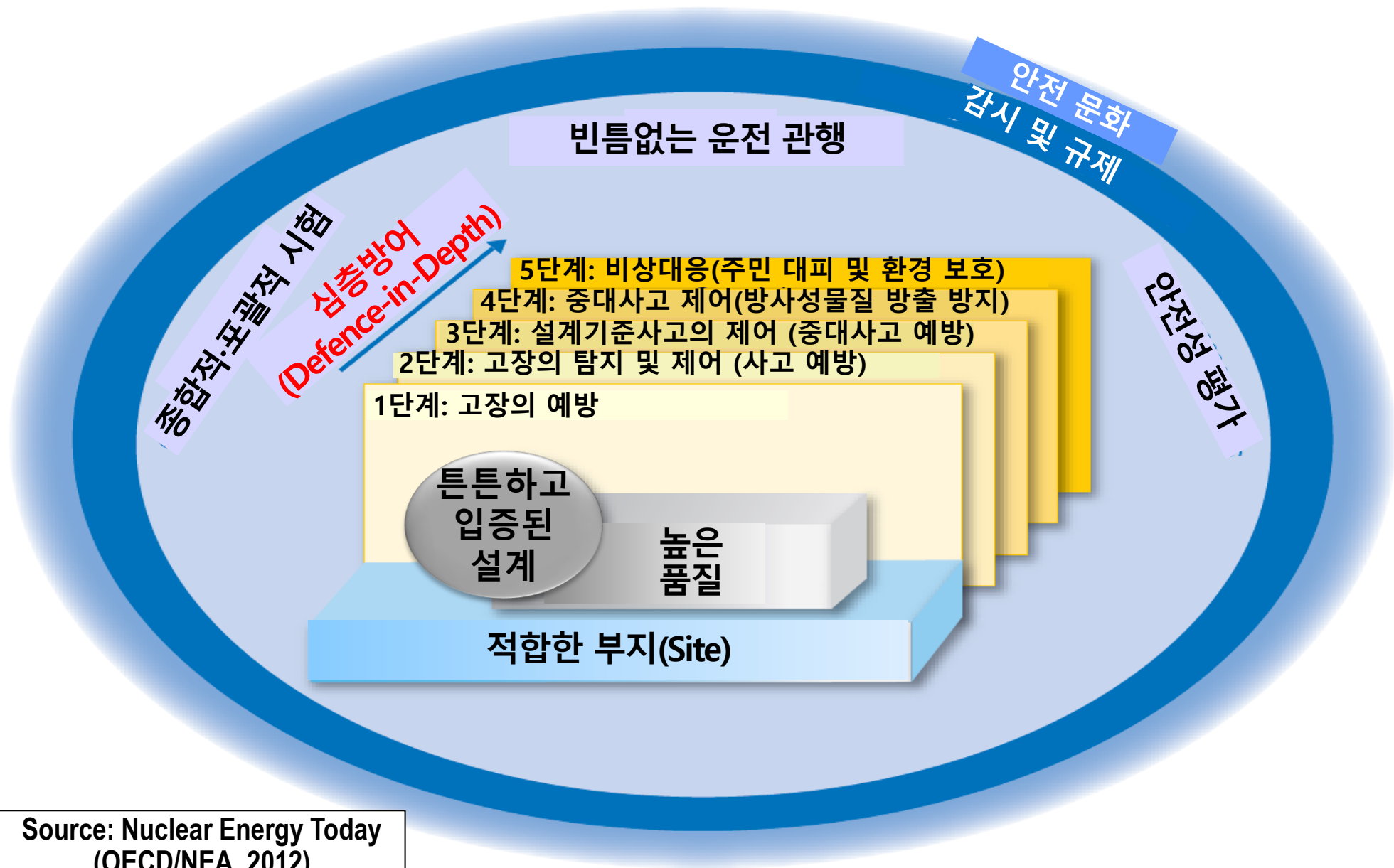
핵연료봉
(방사성물질의
대부분 함유)



핵연료
소결체
(UO_2)



원자력 안전의 핵심 요소



Source: Nuclear Energy Today
(OECD/NEA, 2012)

심층 방어 (Defense in Depth)

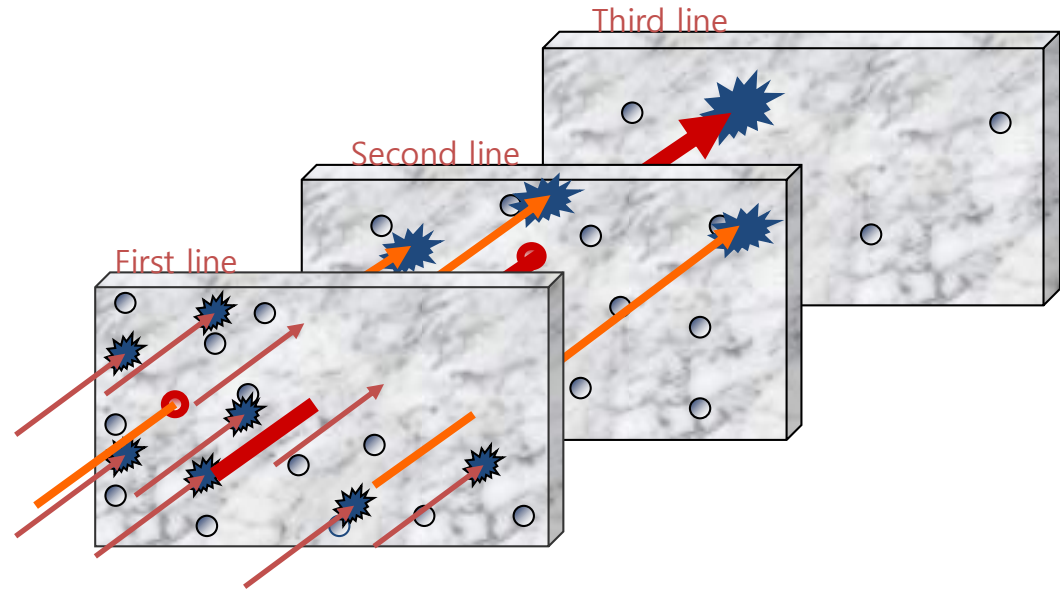
● 가정

- 설계에는 오류가 있을 수 있다.
- 기기들은 때로 고장을 일으킨다.
- 사람은 실수하기 마련이다.

● 기본 개념

(물리적 다중방벽 + 다단계 방호)

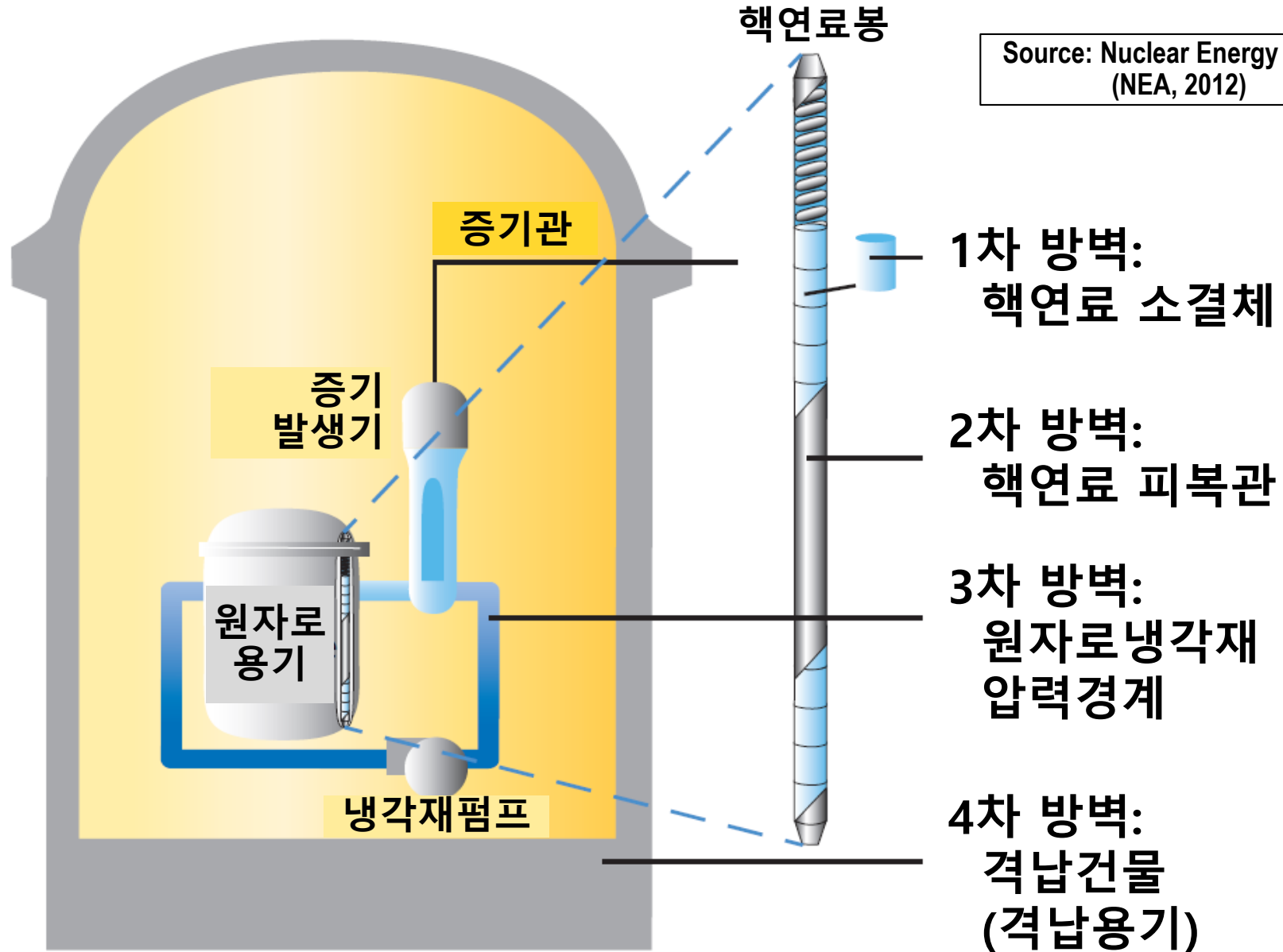
→ (사고 예방 + 사고 완화)



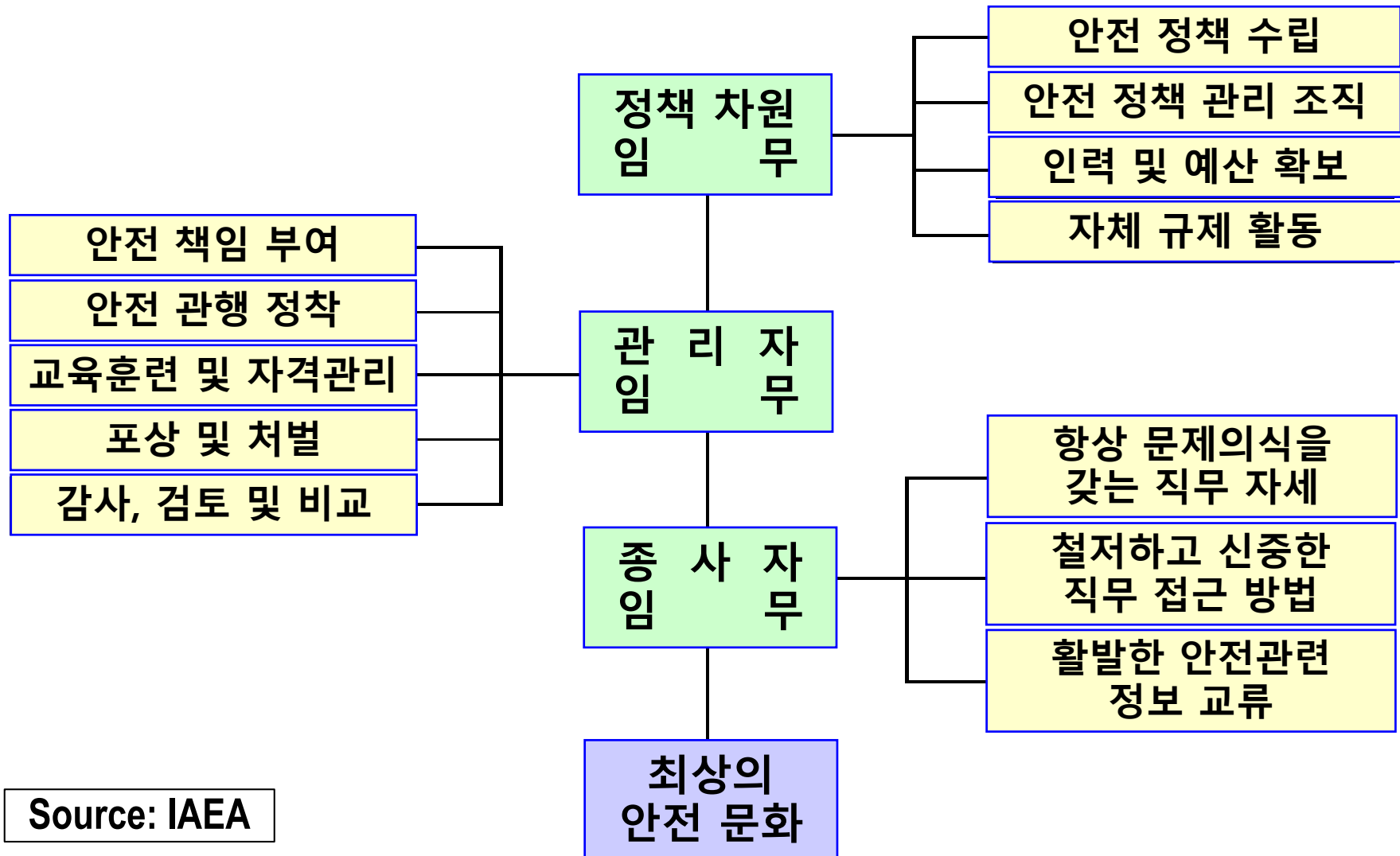
● 다단계 방호

단 계	목 표	핵심 수단
Level 1	이상 상태 및 고장의 예방	보수적 설계; 고품질 건설/운영
Level 2	이상 상태의 제어 및 고장의 탐지	제어, 제한, 보호계통 및 감시계통
Level 3	사고를 설계 기준 범위 내에서 제어	공학적 안전 설비; 사고 관리 절차
Level 4	중대사고 제어	보조적 추가 수단 및 중대사고관리
Level 5	방사성 물질 누출로 인한 피해 완화	소외 비상 대책

다중 방벽 (Multiple Barrier)



원자력 안전 문화 (Safety Culture)

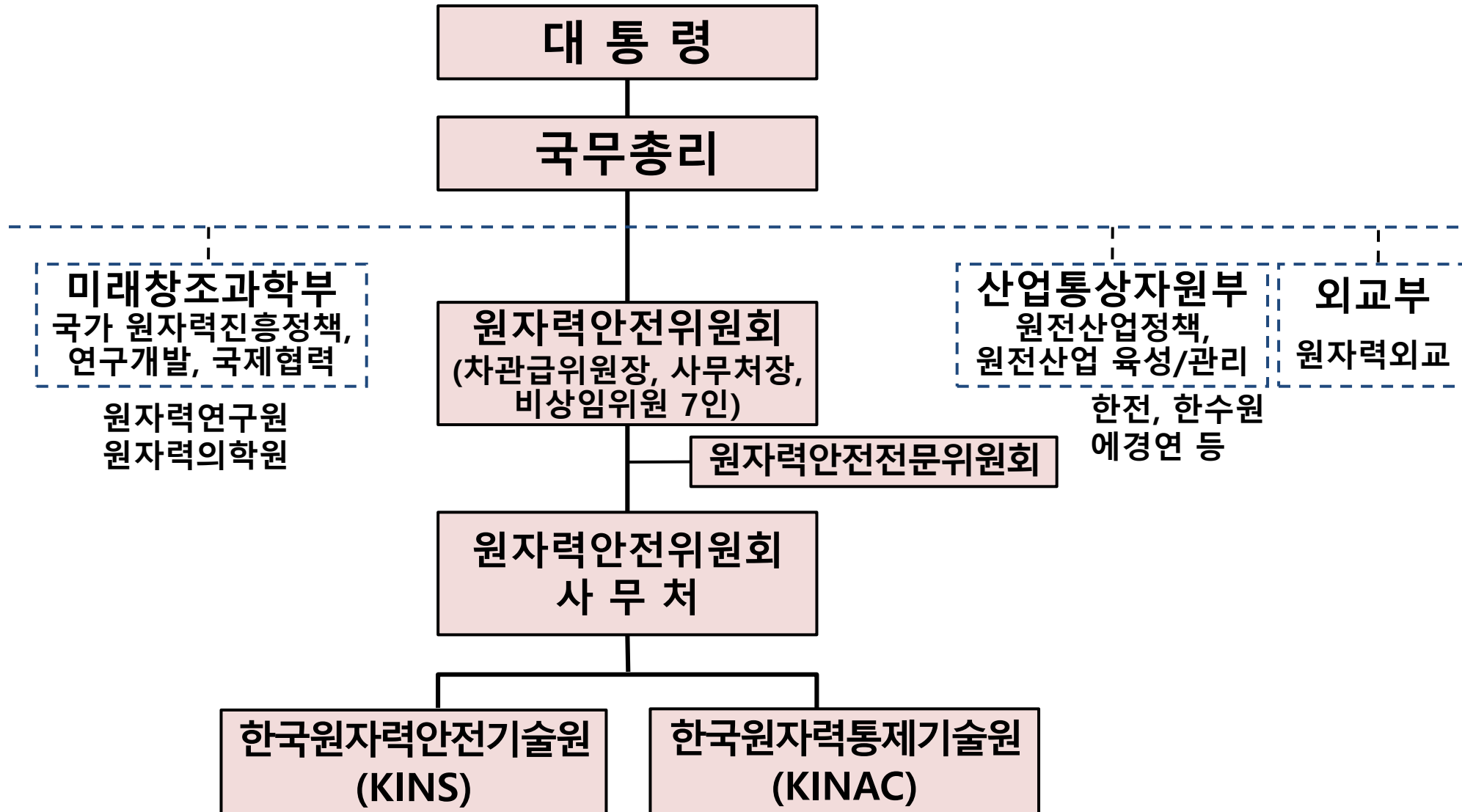


원자력 안전의 기본 원칙

□ IAEA의 기본 안전 원칙

1. 위험수반 시설/행위에 책임있는 기관에게 안전에 대한 일차적 책임
2. 정부는 독립적 규제기관 포함하여 효과적인 법적·행정적 체계 수립
3. 방사선 리스크를 수반하는 시설/행위 관련기관은 안전에 대한 효과적 리더십 및 관리체계를 수립·유지
4. 방사선 리스크 수반 시설/행위는 종합적 이득이 있어야만 정당화
5. 합리적으로 달성가능한 최고수준 안전의 제공을 위해 방호 최적화
6. 어떤 개인도 수용 불가능한 리스크를 갖지 않도록 제어수단 확보
7. 현재와 미래의 방사선 리스크에 대해 인간 및 환경을 보호
8. 원자력/방사선 사고의 예방·완화를 위해 모든 현실적 노력 경주
9. 원자력/방사선 사고에 대비한 비상대응체계 확보
10. 기존/비규제 방사선 리스크 저감을 위한 보호조치의 최적화

국내 원자력 안전 규제 체계



목 차

- 원자력과 방사선
- 원자력 안전의 기본 개념
- 원자력 사고와 안전성
- 원전 안전성 향상 방향

국제 원자력 사건/사고 등급(INES)

등급(Level) 및 명칭	인간 및 환경 영향	방사선 방호벽 및 제어 손상	심층방어(DID) 손상	발생 예
7등급 : 대규모 사고 (Major Accident)	광범위한 보건 및 환경 영향을 유발할 수준의 방사성물질 대량 방출			Chernobyl (우크, '86); Fukushima (일, '11)
6등급 : 심각한 사고 (Serious Accident)	계획된 비상대책 이행이 요구되는 상당한 양의 방사성물질 방출			Kyshtym 재처리공장 임계사고(러, '57)
5등급 : 광역영향사고 (Accident with Wider Consequences)	계획된 비상대책의 부분적 이행이 필요한 수준의 방사성물질 제한적 방출	원자로 노심의 심각한 손상, 임계사고 또는 화재로 인한 대량의 방사성물질 시설 내 누출		TMI(미, '79); Windscale (영, '57)
4등급 : 국지적 사고 (Accident with Local Consequences)	계획된 비상대책 이행 필요성이 거의 없는 수준의 방사성물질 소량 방출	0.1% 이상의 노심재고량 누출을 유발하는 핵연료 용융/손상, 상당한 양의 방사성물질 시설 내 누출		Saint-Laurent A1 (프, '69) & A2 ('80); Tokaimura 임계사고 (일, '99)
3등급: 심각한 사건 (고장) (Serious Incident)	법정한도의 10배를 초과하는 작업자 피폭	작업구역의 1 Sv/h 이상 선량률; 설계시 예상하지 않은 구역의 심각한 오염 (일반인 피폭 가능성 낮음)	남은 안전장치가 없는 수준의 거의 일어난 사고	후쿠 I-4 및 후쿠시마II-1/2/4('11); Vandellós(스페, '89); Davis-Besse (미, '02); Paks(헝, 2003); 몬주('97), 미하마('91)
2등급 : 사건(고장) (Incident)	10 mSv 이상의 일반인 피폭 또는 법정한도를 초과하는 작업자 피폭	작업구역에서 50mSv/h 이상의 선량률; 설계에서 예상하지 않은 구역의 상당한 오염	실제 피해를 유발하지 않은 안전장치들의 중요한 실패/고장	
1등급 : 이상 상태 (Anomaly)	-	-	법정한도 초과 일반인 피폭; 안전기기의 사소한 문제	
0등급 : 등급이하 (No Safety Significance)	-	-	-	-

원자력시설에서의 주요 사고 기록

□ INES 5 이상 원자력시설 사고

- 1957.9, Mayak 재처리공장 폭발사고 (구 소련) : INES 6
 - 냉각 실패로 인한 화학적 폭발 → 수 천 명 비상 대피
- 1957.10, Windscale 원자로 화재 (영국) : INES 5
 - 흑연감속재 에너지 방출과정의 실수로 화재 → 2만 Ci의 요드 방출
- 1979.3, TMI 원전 노심 용융 : INES 5
 - 정비 작업자 실수 → 냉각재 상실 및 운전원 대처 미흡 → 핵연료 대량 용융 → 방사능 외부누출 및 영향 미미했으나 안전대책에 큰 변화
- 1986.4, 체르노빌 원전 폭발/화재 : INES 7
 - 무리한 실험 → 출력 폭주, 수소가스 폭발, 흑연감속재 화재 → 방사성물질 대량 누출 + 주민 대피 지연 → 수십명 조기 사망 + 중장기 영향
- 2011.3, 후쿠시마 원전 사고 : INES 7
 - 초대형 지진/쓰나미 → 전기 및 냉각설비 상실 → 핵연료 용융 및 수소 발생 → 대량의 방사성물질 누출 → 대규모 비상 대피 및 토양/해양 오염

직접적 인명피해는 일반적 예상보다 매우 작았으나,
환경 오염 등 유발

대형 사고와 원자력 안전

□ 대형 사고는 안전성 향상의 계기

● 1950년대 실험용 원자로 사고

- 원자로 정지 계통 신뢰도
- 설계기준사고 및 심층 방어; 격납용기 요건 도입

● 드리마일 아일랜드(TMI) 사고 (1979)

- 중대사고 발생 가능성 확인 → 관련 연구 및 대처설비 개발
- 확률론적 안전성 평가, 인적 실수, 격납용기, ...
- TMI 후속조치를 통해 전세계 원전의 중대사고 확률을 1/10 이하로 줄인 것으로 평가

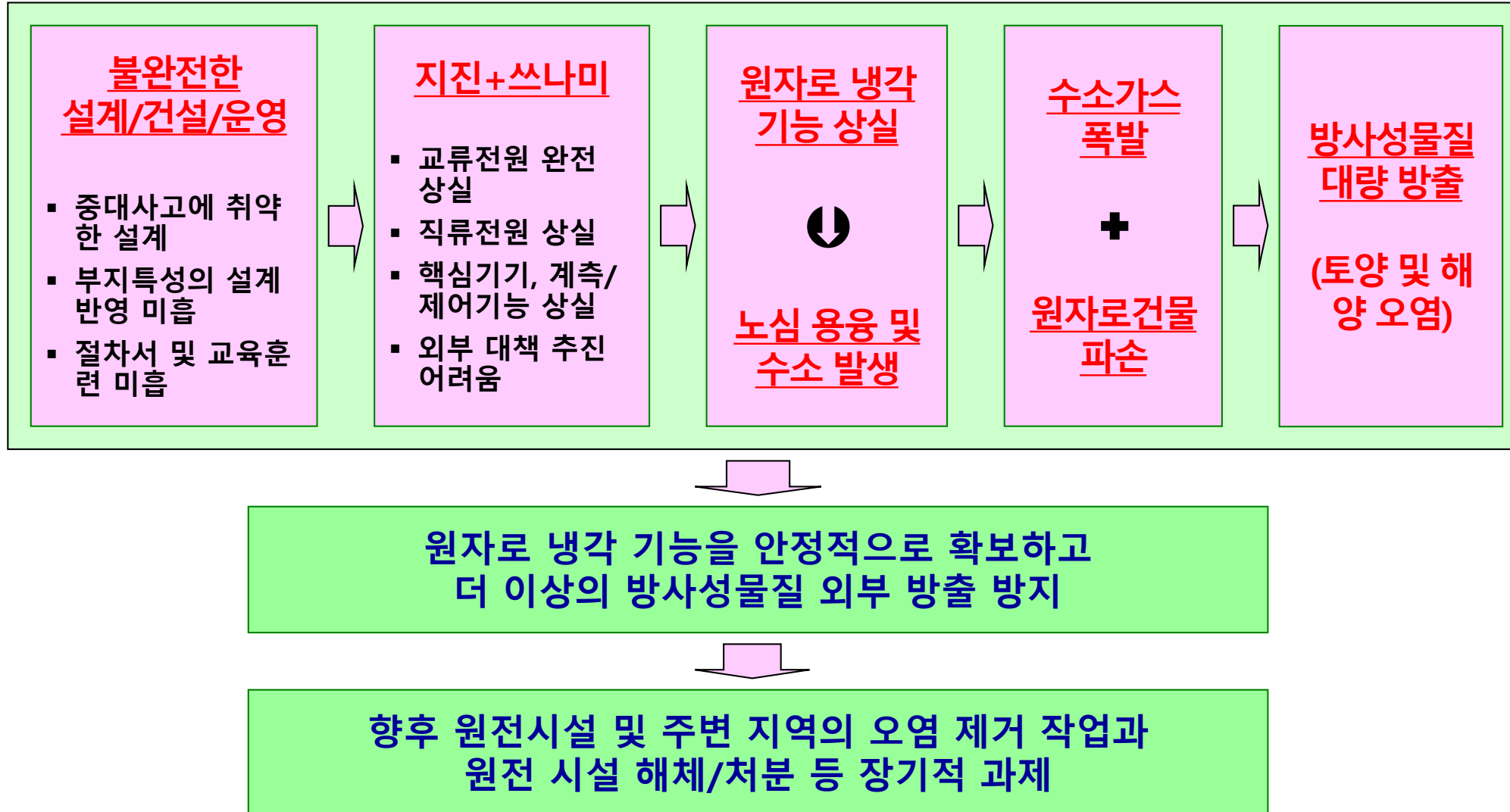
● 체르노빌 사고(1986)

- 원자로 정지 능력의 중요성, 격납용기
- 안전문화(Safety Culture)의 중요성 대두
- 폐쇄된 국가의 특정 원자로에서 발생한 사건으로 인식 평가

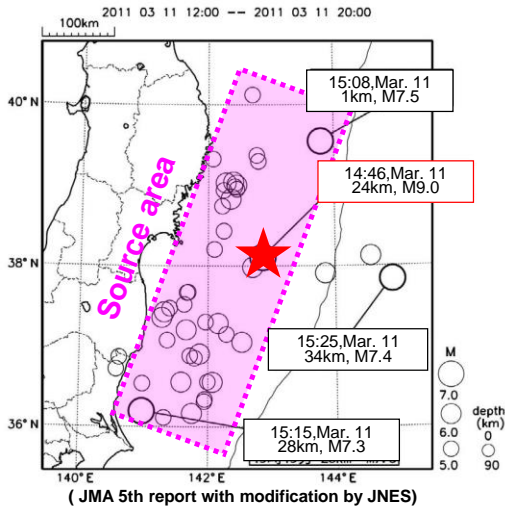
● 후쿠시마 사고 사고(2011)

- 극한 자연재해 등 외부사건 대응, 다수호기 동시 중대사고 대책 등
- 조직문화 및 안전문화,

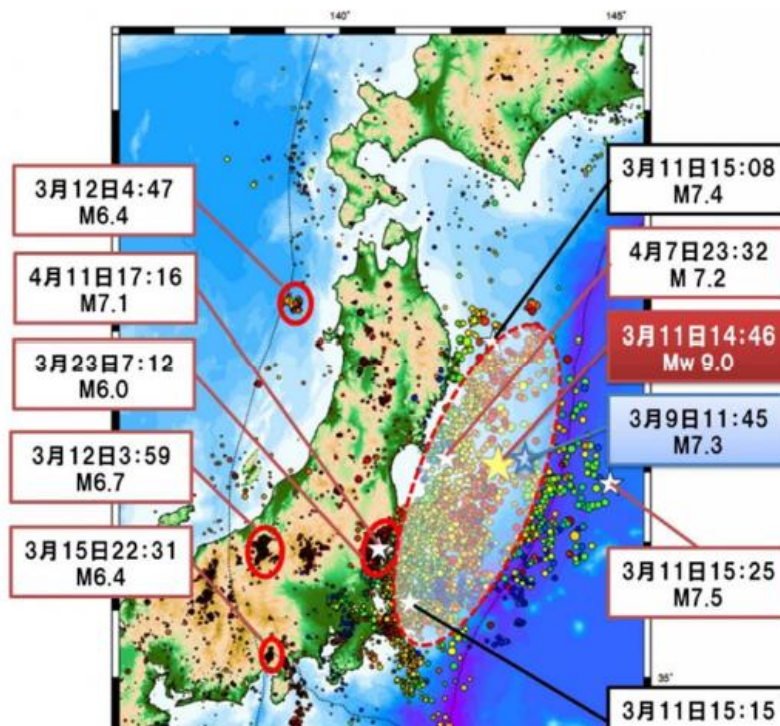
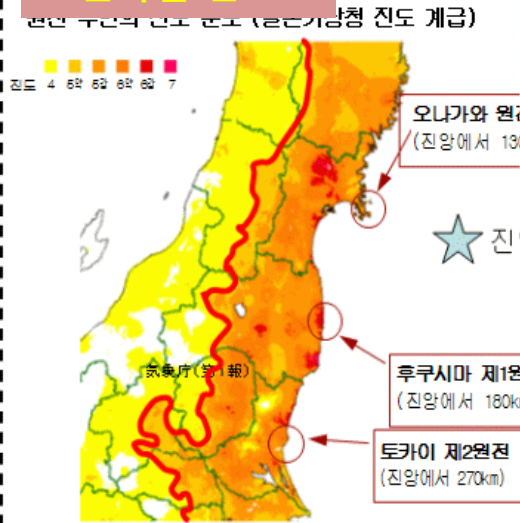
후쿠시마 사고



동일본 대지진

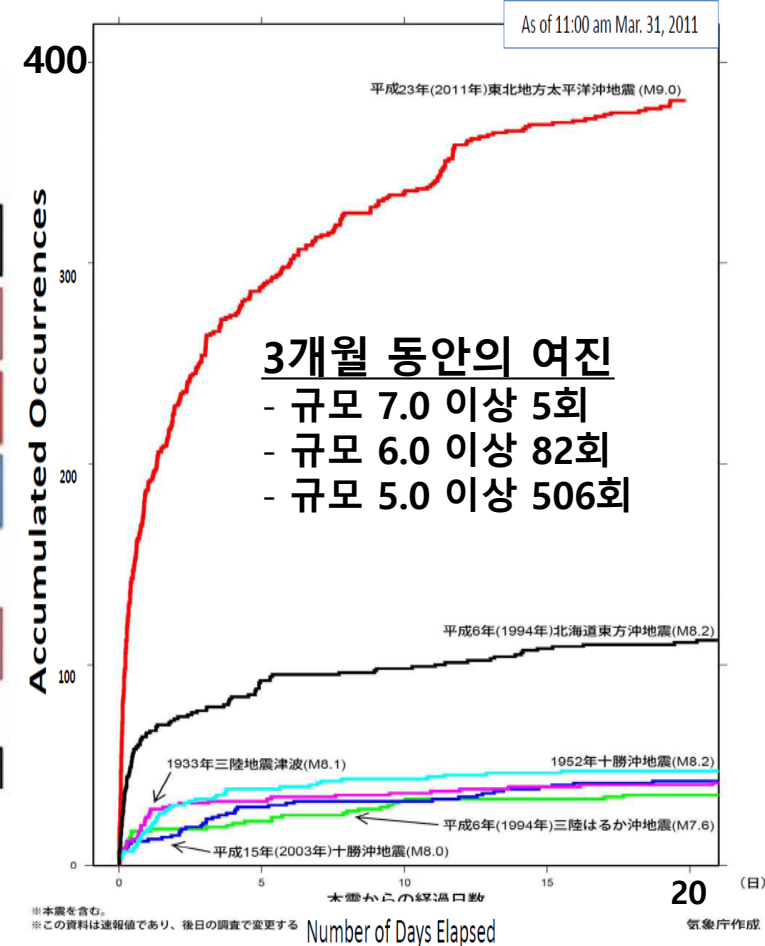


동일본 대지진시 관측된 진도



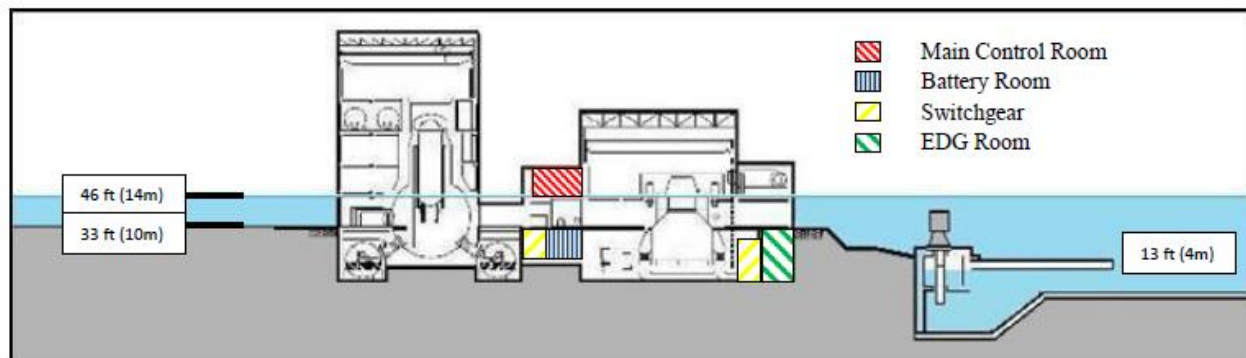
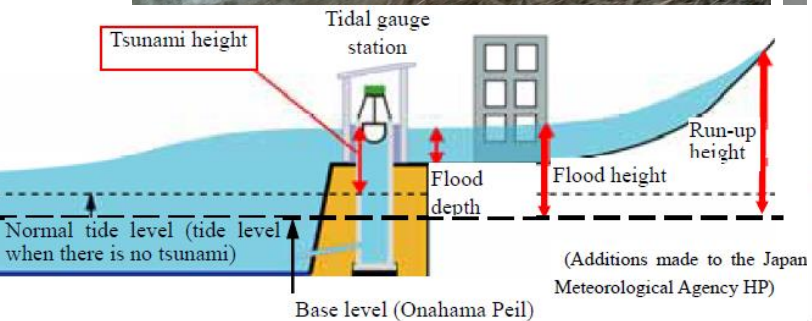
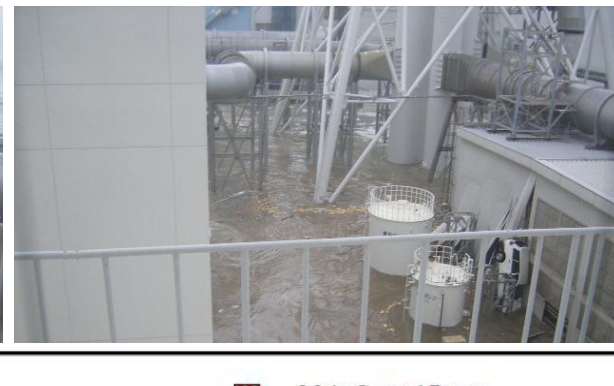
여진 발생

규모 5 이상의 여진 발생 누적회수



気象庁作成
Japan Meteorological Agency

쓰나미

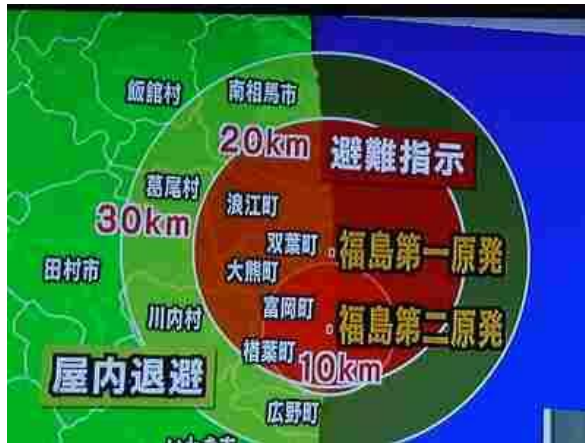


수소가스 폭발 후의 후쿠시마 제1원전



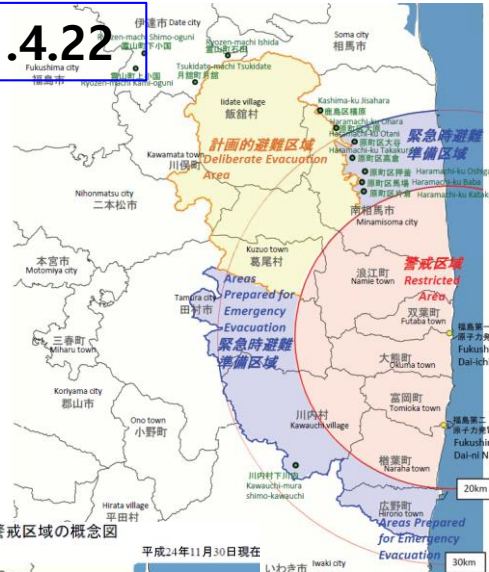
Shutters were destroyed by the tsunami attack.

비상 대피



사고 직후

2011.4.22

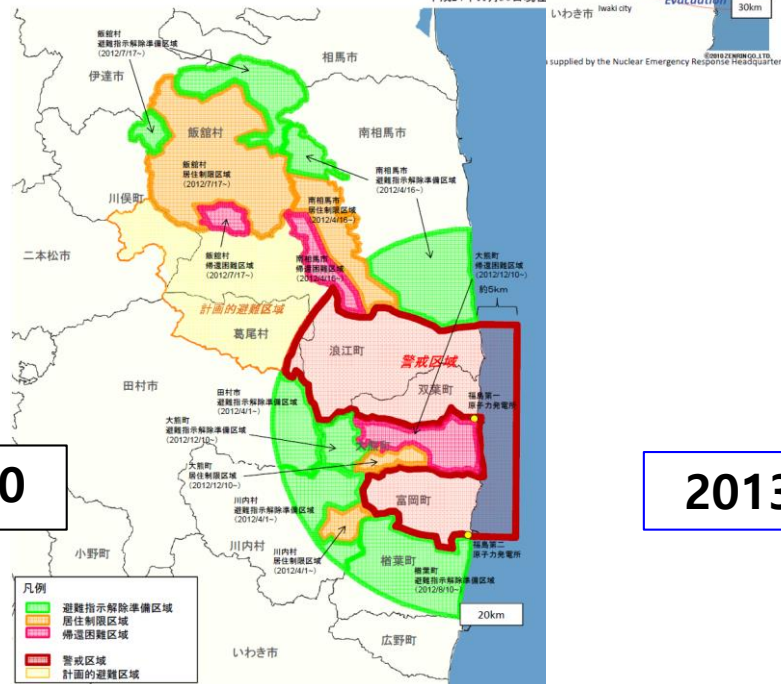


2011.9.30



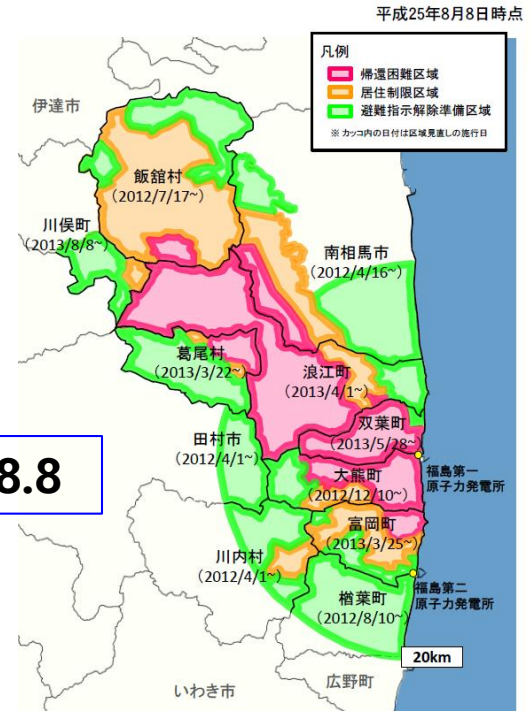
避難指示区域と警戒区域の概念図

平成24年11月30日現在



2012.12.10

2013.8.8



후쿠시마 사고의 근본 원인

□ 원자력학회 후쿠시마위원회 분석 결과

● 미국 설계 원전을 건설하면서 일본 고유의 부지특성 고려 미흡

- 지진: 최초 설계기준 0.18g → 0.447g vs. 0.561g
- 쓰나미: 최초 설계기준 3.1m → 5.7m vs. 15m
- 비상디젤발전기, 직류축전지, 배전반 등의 지하/1층 위치 등

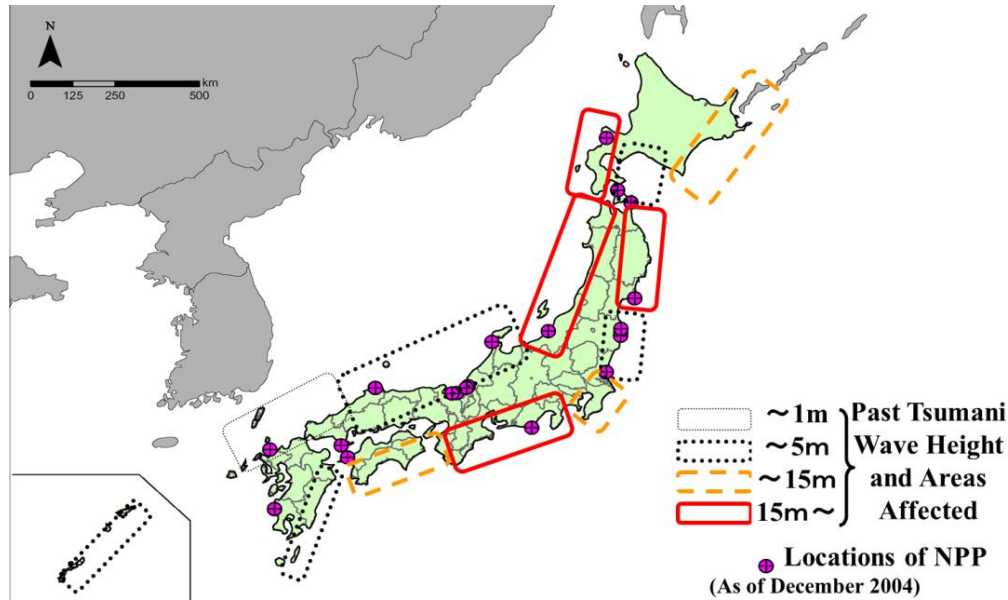
● 최상의 지식에 기반을 두지 않은 의사 결정

- 원전 안전성에 대한 과신/무지: 중대사고, 쓰나미 가능성 및 영향 등
- 기관 간, 기관 내부의 정보 소통 부족
- 다른 전문조직으로부터 원전 산업체 및 규제기관의 고립
- 동경전력의 안전문화 취약: 과거에도 문제 다수 발생
- 운전경험, 연구결과로부터 도출된 새로운 지식의 반영 미흡

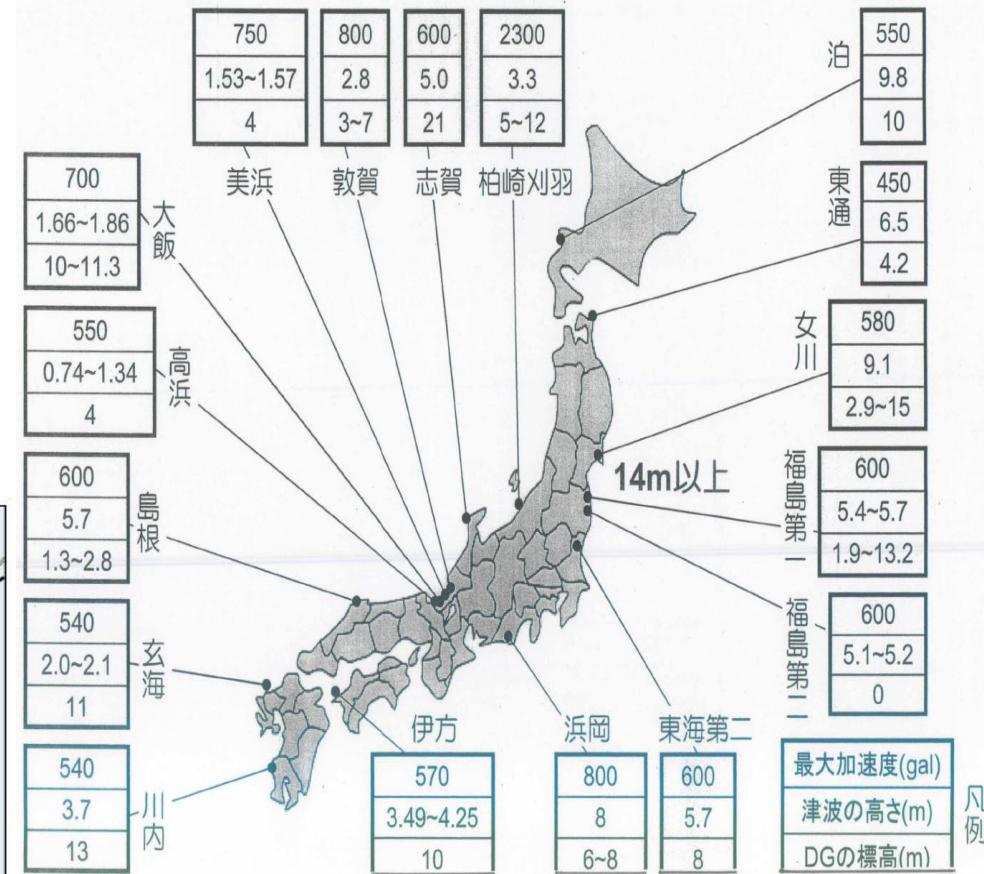
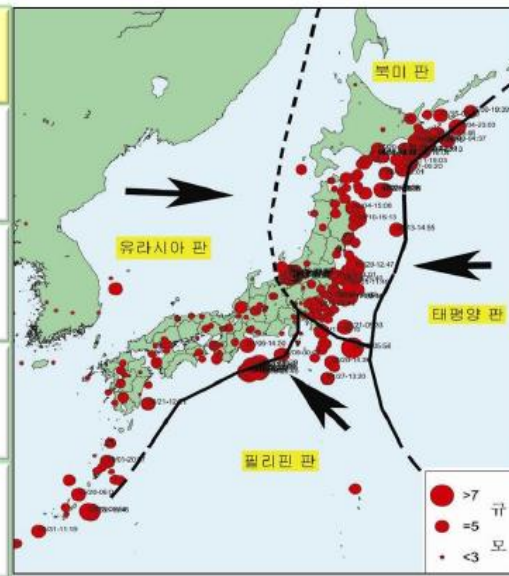
● 제도/조직 및 규제의 실패

- 규제기관과 산업체 간의 독립성 부족 및 유착문화
- 매우 제한적인 전문가 역할 ← 원전산업현장(산업체+규제)의 고립

후쿠시마 사고의 근본 원인



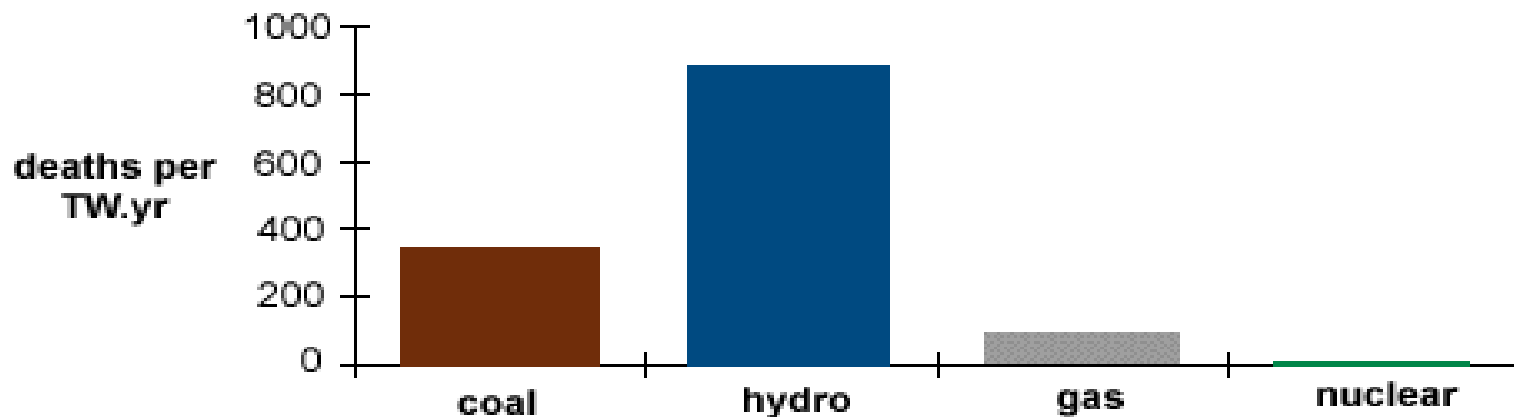
규모	한국	일본	전세계
3.0<	10회/년	1,200회/년	1,000,000회/년
4.0<	0.7회/년	400회/년	15,000회/년
5.0<	0.1 회/년	100 회/년	3,000 회/년
6.0<	-	10회/년	100회/년



원자력 발전의 상대적 안전성 (1)

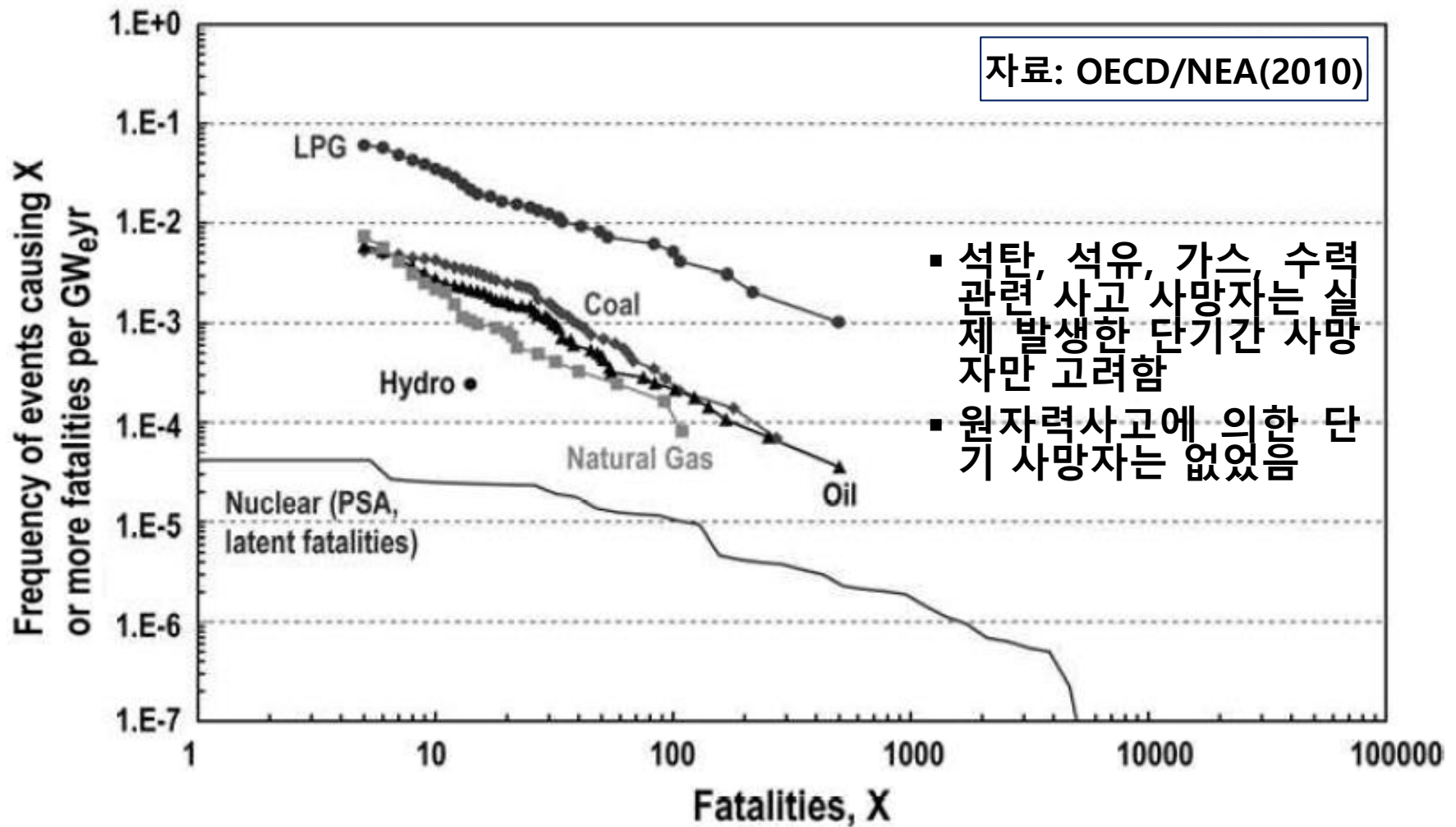
□ 전원 별 사망자 통계의 예 [OECD/NEA, 2010]

Energy chain	OECD		Non-OECD	
	Fatalities	Fatalities/TWyr	Fatalities	Fatalities/TWyr
Coal	2259	157	18,000	597
Natural gas	1043	85	1000	111
Hydro	14	3	30,000	10,285
Nuclear	0	0	31	48



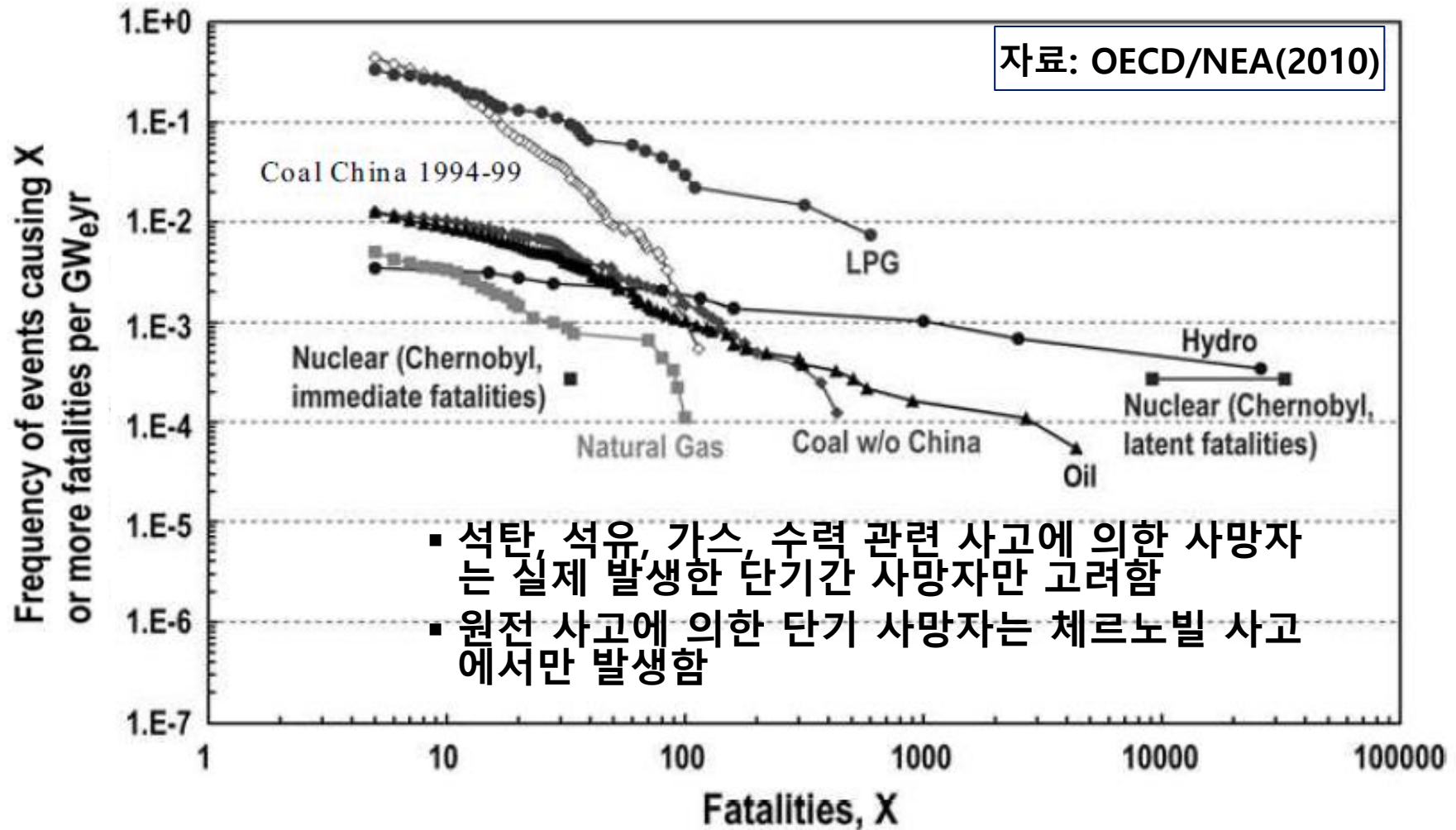
원자력 발전의 상대적 안전성 (2)

□ 에너지원 간의 리스크 비교 - OECD 국가



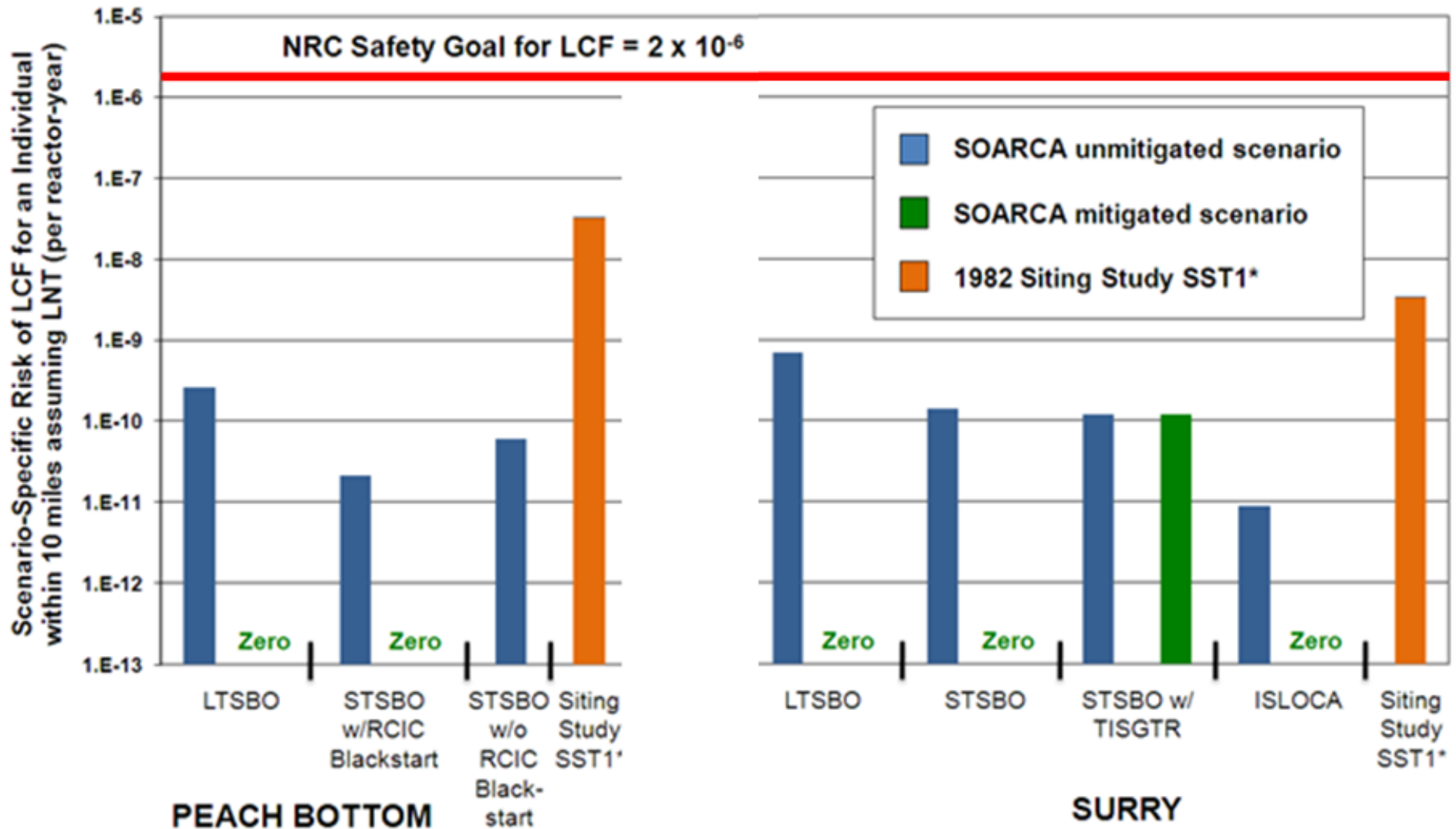
원자력 발전의 상대적 안전성 (3)

□ 에너지원 간의 리스크 비교 - 비 OECD 국가



원자력 발전의 상대적 안전성 (4)

□ U.S.NRC의 사고결말 분석 (SOARCA) (NUREG-1935, 2013)



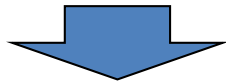
목 차

- 원자력과 방사선
- 원자력 안전의 기본 개념
- 원자력 사고와 안전성
- 원전 안전성 향상 방향

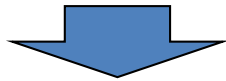
원전 안전성 확보의 기본 방향

□ 원전 사고 예방/대응의 3 단계

최상의 설계/시설 안전성 확보
(입지, 건설, 유지보수 포함)



최상의 절차서 및 교육훈련
(EOP, SAMG, EDMG 등)



미리 대비되지 않은 사고에 대한
창의적 대응

- 심층방어 개선하고 철저하게 이행
- 최신 연구결과와 운전경험을 반영하여 안전성을 지속적으로 향상
- 최상의 과학기술지식을 이용하여 철저하게 분석(해석)
- 발전소 내부 및 외부 자원을 최대한 활용
- 실효성 있는 교육 및 훈련
- 일어날 수 없을 것 같은 일까지 상상 (Imagine the unimaginable)
- 훈련되고 경험이 있는 높은 수준의 인력
- 발전소 동작 원리 및 설계 특성에 대한 깊은 이해
- 깊은 과학기술 지식과 발전소 현장지식을 겸비한 전문가 자문그룹 확보

“지식 기반 의사 결정”

Knowledge-Based Decision Making

“최상의 과학기술지식에 기반한 심층방어 이행”

Knowledge-Based Implementation of Defense-in-Depth

원전 안전성 향상 방향

● 최상의 지식/정보에 근거한 의사 결정

- 대내외 소통 + 정보 교류 + 연구 협력
- 임직원에 대한 적극적 교육/훈련
- 안전 정책 수립/이행에 전문가 의견의 적극 반영
- 국제 수준의 안전전문가그룹 육성 + Globalization

● 중대사고 예방대책과 중대사고 대응대책의 균형

- 사고 예방이 우선: 자연재해 대책도 중대사고 예방 관점에서 더욱 중요
- 현실적 중대사고의 충분한 대비 + 최악 상황에 대한 최후수단 확보
- 원전 부지 내 및 부지 인근의 비상대응시설 강화: 최악의 환경 고려

● 방사성물질 대량 누출 가능성의 실질적 제거

- 좁은 국토, 다수호기 밀집, 대도시 인접 부지 특성 고려
- 방사능 대량 누출 시나리오 확인 → 실질적 억제 대책 이행

지식에 기반한 심층방어 이행

Do the “Right” Things “Right”

for Securing a High Level of Safety

(안전성 확보를 위해 ‘올바른’ 일을 ‘제대로’ 이행)

by

Fully Utilizing the Best Available

Scientific Knowledge, Resources and Human Wisdom

(최상의 과학기술 지식, 자원 및 인간의 지혜를 최대한 활용)

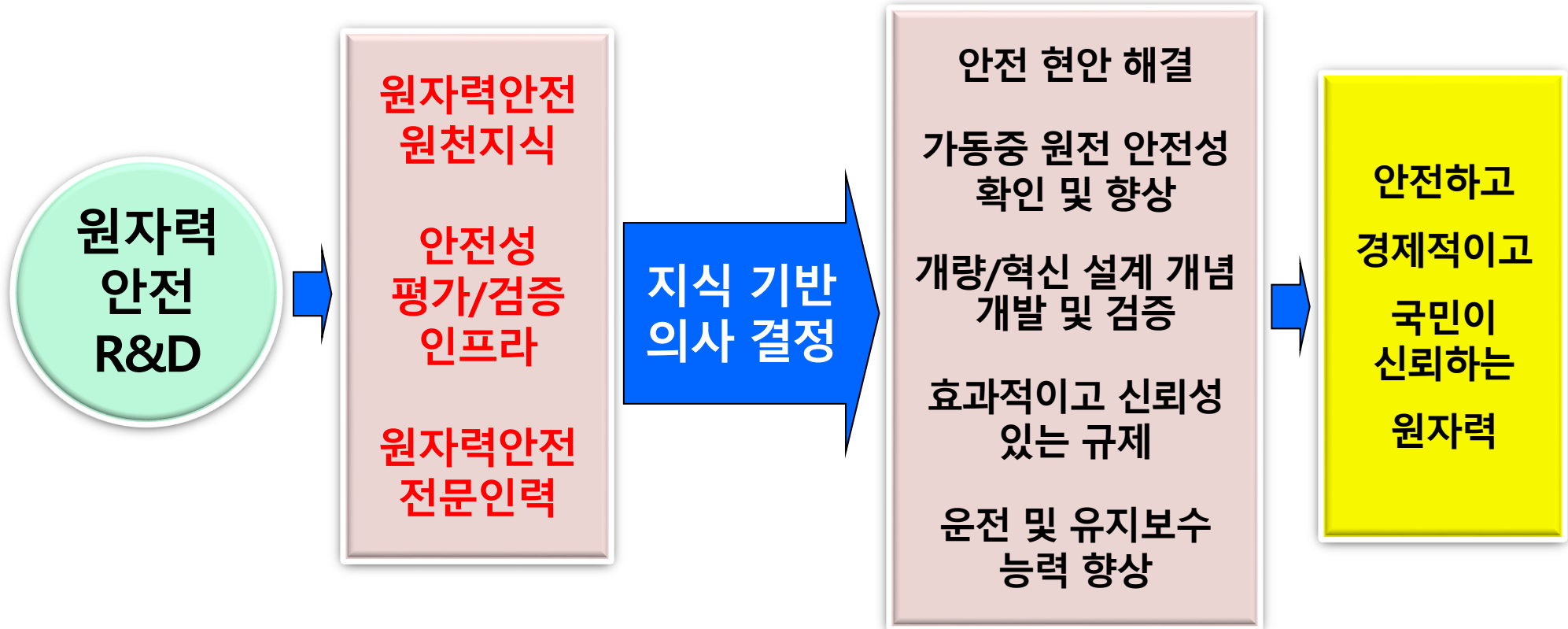
in

Effective Communication with Stakeholders

(이해당사자들과의 효과적 소통)

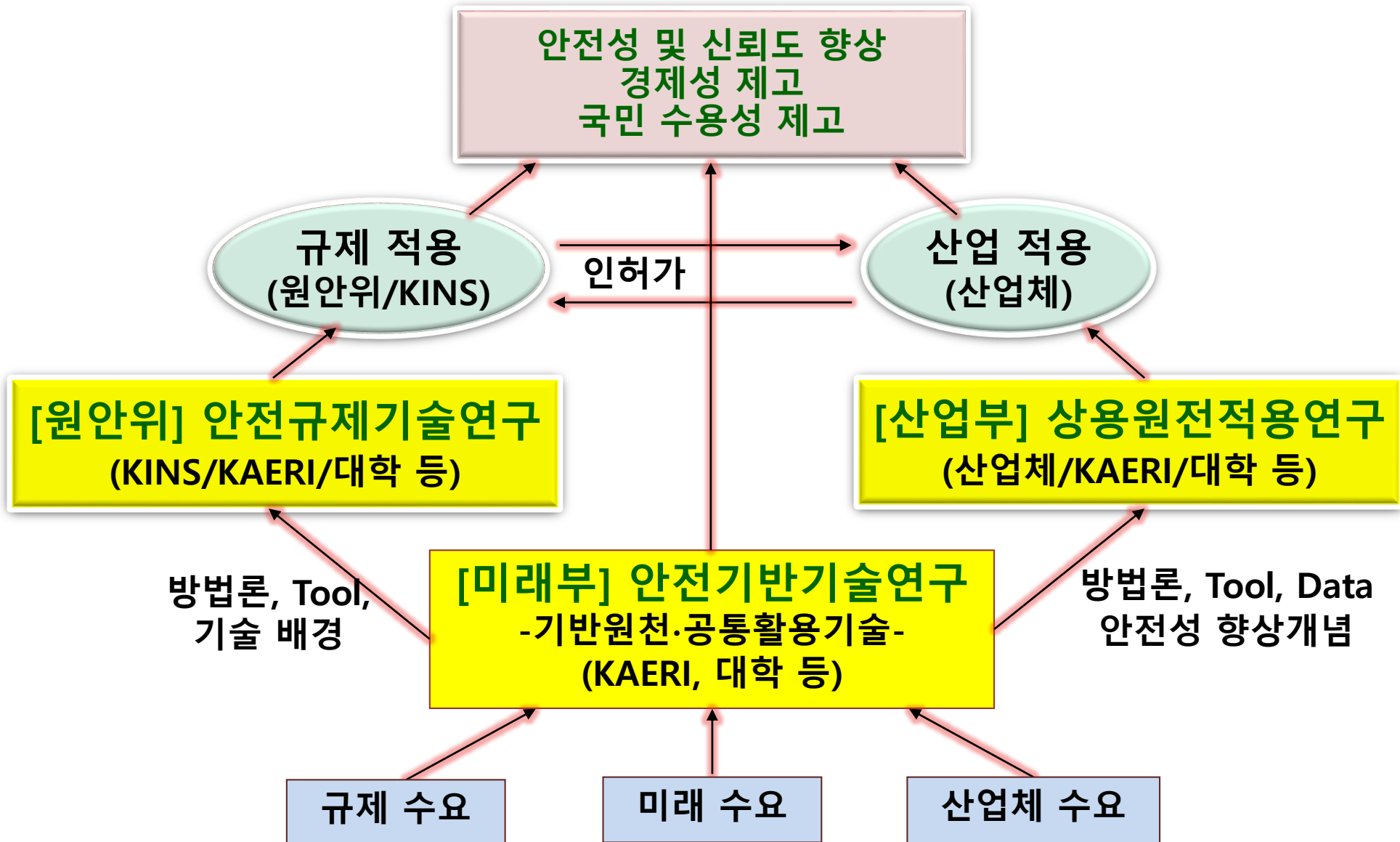
원자력안전 R&D

□ 원자력안전 R&D: 지식기반 심층방어 이행의 핵심요소



- 안전연구 목표: 원자력 안전의 평가/검증/대처/향상기술 개발
- 안전연구에서 최상의 지식과 인프라를 제공하고, 모든 관련 기관이 함께 사용해야 최상의 원자력 안전 확보 가능

정부주도 원자력안전 R&D



감사합니다.

Let us “Do the Right Things Right!”
“최상의 지식에 기반하여 올바른 일을 제대로”