

후쿠시마 사고 교훈

2017년 2월 7일

한양대학교
교수 제 무 성

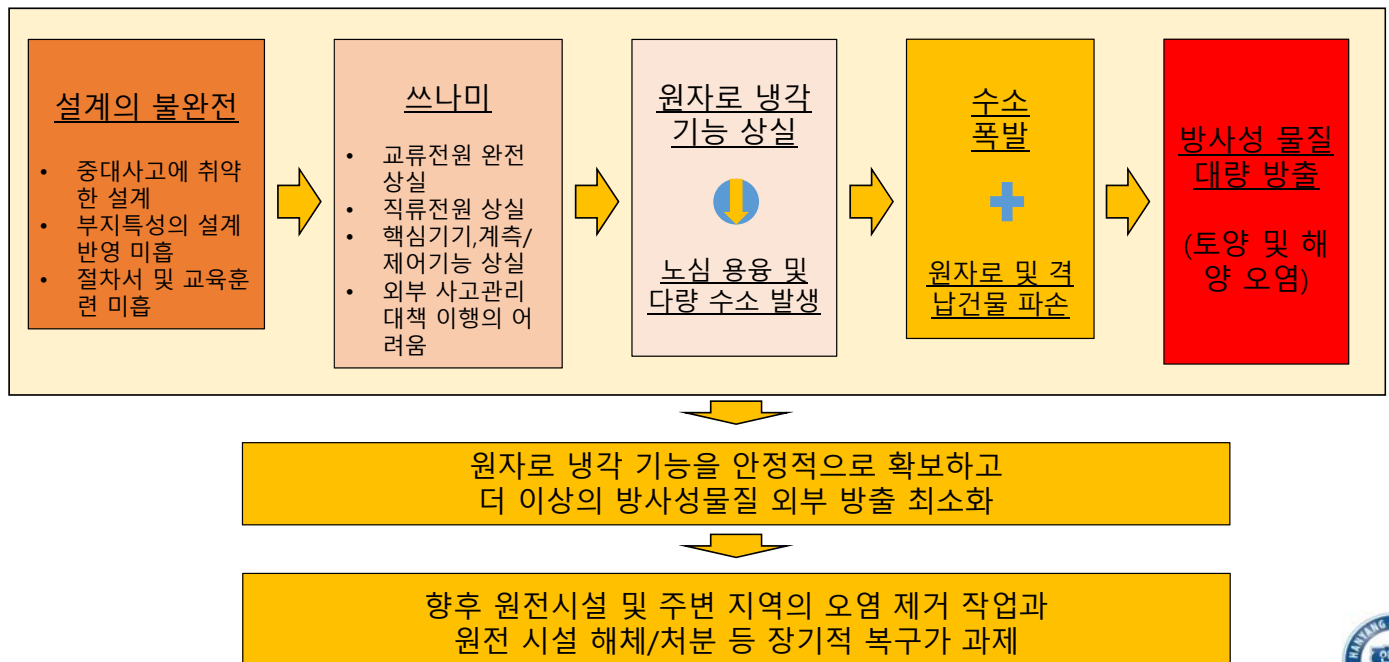


목차

- 서론(PSA)
- 후쿠시마 사고교훈
- 요약



후쿠시마 원전사고 원인



원자력 안전

- 원자력 안전이란,
방사능의 위협으로부터 국민의 생명과 재산을 지키는 것
- 원자력 안전의 철학,
 - As Low As Reasonably Achievable (ALARA)
 - Defense-In-Depth (DID)
 - Design Basis Accident (DBA) → BDBA (PSA와 사고관리)



안전 개념의 변화

- ✓ TMI-2 사고(1979) 이후
 - Human Error의 중요성
 - Multiple Failure, Core melt down accident 현실화
 - PSA의 도입
- ✓ 체르노빌 사고(1986) 이후
 - 조직 내 안전 문화
 - 원자로 고유 안전 설비의 중요성(inherent safety features)
- ✓ 911 이후 (2001)
 - Sabotage, Physical Protection
 - Design Basis Threat (DBT)
- ✓ Fukushima 사고(2011) 이후
 - External Events(Earthquake, Fire, Flood, Typhoon, etc.)
 - 복합 재해의 현실성
 - Multi-unit Site Risk vs. Safety Goals
 - Inherent Safety Features 중요성 (Fukushima vs. Onagawa)



5

안전개념 진화 중

- ✓ New Safety Goal:
 - No Radioactivity Release (Background Level Release)
- ✓ New Design Basis Accident (DBA):
 - Severe Accident (Core Melt Accident)
- ✓ New Engineered Safety Features (ESF's):
 - In- and Ex- Vessel Cooling Systems
 - Double Containment with natural and
 - passive cooling systems, etc



6

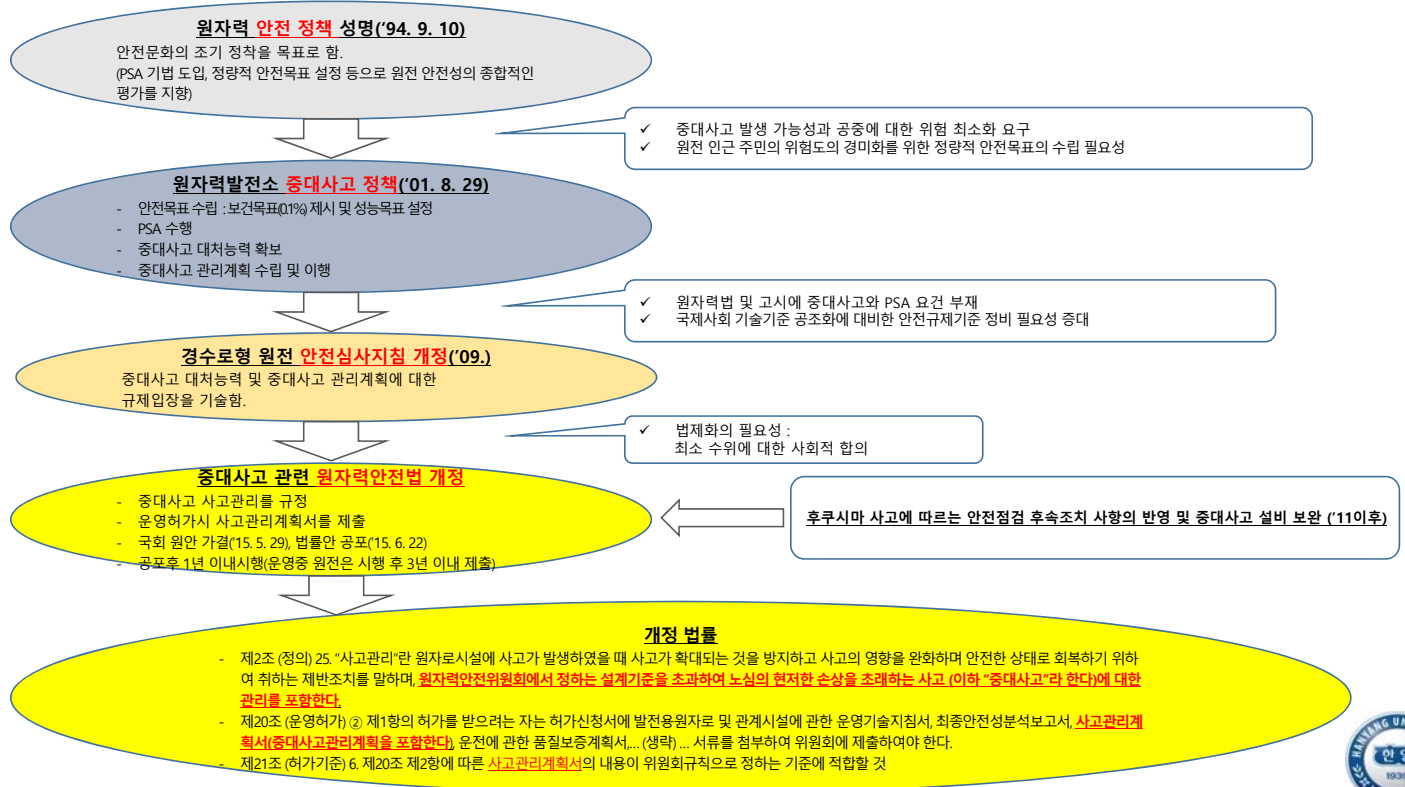
각국의 사고관리(Accident Management) 법제화

A set of **actions**

- to **prevent** the escalation of accidents,
- to **mitigate** the consequence of accidents, and
- to **recover** a NPP from accident conditions



우리나라 원자력 안전법 개정(2015년 6월 22일)



PSA

Probabilistic Risk Assessment(PSA) is a systematic technique for investigating the transformation of an undesired initiating event into a set of possible outcomes and their consequences. Event Trees(ET's) and Fault Trees(FT's) are constructed for PSA.

1. The Reactor Safety Study (**WASH-1400**), 1975, USNRC

- ✓ Surry Power Station Unit 1, 778MWe, Westinghouse, PWR
- ✓ Peach Bottom Atomic Power Station Unit 2, 1065MWe, GE, BWR

Prof. N.C. Rasmussen, MIT

- Mr. Saul Levine, USNRC 1972 – 1975 (3 years)
- 70 man-years about four million dollars



PSA

2. Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, **NUREG-1150**

, USNRC, 1990

- ✓ Surry Unit 1, 778MWe, W, 3-loop PWR, sub-atmospheric containment
- ✓ Peach Bottom Unit 2, 1065MWe, GE, BWR4, Mark I containment
- ✓ Zion Unit 1, 1100MWe, W, 4-loop, large dry containment
- ✓ Sequoyia Unit 1, 1148MWe, W, 4-loop, ice-condenser containment
- ✓ Grand Gulf Unit 1, 1250MWe, GE, BWR6, Mark III containment



대표적인 PSA 결과

- ✓ Reactor Safety study: Small LOCA, 인적오류, 보조계통의 중요성 도출
- ✓ Zion PSA: 외부사건의 중요성 도출
- ✓ Indian Point PSA: 발전소 고유의 리스크 기여요인(Contributors) 중요
- ✓ French PSA: 정지/저출력 운전의 리스크 중요성 도출 등
- ✓ 그 결과들, 원전의 설계-운전-규제에 활용



1. 원전에 절대안전은 없으며 사고가 일어날 수 있다는 인식의 견지

원자력 발전소의 설계기준 확립에 있어 과거 데이터를 주로 고려하는 것은 극한의 자연 재해 위험을 특성화하기에 충분하지 않다. 이용 가능한 포괄적인 자료가 있다 하더라도 관측 기간이 짧기 때문에 자연 재해의 예측에는 큰 불확실성이 있다. 사업자는 안전에 대하여 과신하지 말아야 한다.



2. 지속적 주기적 리스크 평가

원자력 발전소의 안전성은 지식의 발전(진보)을 고려하여 주기적으로 리스크를 재평가하여 보강조치가 이행되어야 한다. 주기적인 평가를 통하여 도출된 취약부분을 즉시 반영하여 보강하는 것을 지속적으로 이행하여야 한다.



3. 다수기 리스크 평가

지진 등 자연 재해에 대한 리스크 평가는 재해의 동시 발생, 또는 순차적 발생 가능성과 이들의 복합적 영향을 고려할 필요가 있다. 그러므로 자연 재해에 대하여 원자력 발전소 부지의 다수기의 사고 리스크를 정량적으로 평가하여야 한다.



4. 운전경험 프로그램 반영

운전 경험 프로그램(OPEX: Operating experience programmes)에는 국내 및 국제 경험이 모두 포함되어야 한다. 운전 경험 프로그램을 통해 확인된 안전강화조치들은 빠짐없이 즉시 이행되어야 한다. 운전 경험의 사용은 주기적 및 독립적으로 평가되어야 한다.



5. 사고관리계획의 이행

심층 방어 개념은 여전히 유효하지만, 개념의 구현은 모든 단계에 대한 적절한 독립성, 중복성, 다양성, 내부 및 외부 재해에 대한 보호를 통해 강화되어야 한다. 사고 예방 뿐 아니라 완화 조치 개선에도 중점을 둘 필요가 있다. 설계기준초과사고 시 필요한 계측 및 제어 기기는 발전소 안전 매개 변수를 감시하고 발전소 운영을 용이하게 하기 위하여 필요 시 기능이 작동되도록 항상 준비되어 있어야 한다.



5. 사고관리계획의 이행 (계속)

잔열 제거(사용후핵연료 저장조 포함)를 위하여 설계기준 조건과 설계기준초과 조건 시에도 작동 가능한 신뢰성 있는 냉각 계통이 제공되어야 한다. 아울러 설계기준초과 사고 시 많은 양의 방사성 물질이 대중에게 방출되지 않도록 신뢰성 있는 격납건물의 기능이 보장되어야 한다(외부 주입유로, CFVS 등).



5. 사고관리계획의 이행 (계속)

사고관리계획은 포괄적이고, 잘 설계되고 최신의(well designed and up to date) 상태를 유지해야 한다. 사고 관리 규정은 포괄적인 초기사건과 발전소 상태의 집합에 근거해야 하며, 다수기 발전소에서 다른 호기들에 영향을 주는 사고 예방과 완화를 포함해야 한다.

훈련(training, exercises, and drills)은 운전원들이 잘 준비되도록 하기 위하여 가상의 중대사고 조건이 포함되어야 하고 훈련에는 중대사고 관리에 배치될 실제 장비의 모의사용이 포함되어야 한다.



6. 규제기관의 안전문화 역량제고 강화

원자력 시설의 안전에 대한 효과적인 규제 감독을 보장하기 위하여 규제기관은 독립적이고 합법적인 권한과 기술 역량 및 강력한 안전 문화를 요구할 수 있는 제도를 구축하고 있어야 한다.

원자력안전 문화를 증진하고 강화하기 위하여, 원자력 안전에 영향을 미치는 의사결정과 조치의 안전적 의미(Implications)에 대하여 개인과 조직 차원의 지속적인 확인과 반복 검토가 필요하다. 이것은 원자력 시설의 전체 수명주기 동안 수행되어야 한다.



7. 비상대응 강화

발생 가능한 원자력 비상 상황에 대비하기 위하여, 자연 재해로 인한 다수기 동시발생 사고를 포함한 원자로 내 핵연료 또는 부지내 사용후핵연료의 심각한 손상을 초래할 수 있는 비상 상황을 고려해야 한다. 이 비상 상황에 대응하기 위한 비상 관리 체계는 사업자, 지자체, 국가 기관의 명확한 역할과 책임을 포함해야 한다. 운영 조직과 당국 간의 소통을 포함한 체계는 정기적 훈련으로 평가되고 개선해 나가야 한다. 그리고, 비상 근무자(emergency workers)는 어떤 조직에 속하든, 명확하게 규정된 임무를 부여 받고, 적절한 훈련을 받아야 하며, 비상 상황시 적절한 보호를 받을 수 있어야 한다(면진중요동 등).



8. 피폭량 모니터링

작업 피폭량에 대한 기록, 모니터링 할 수 있는 시스템이 필요하다. 시스템은 모든 피폭경로와 심각한 사고 관리 현장에 있는 작업자의 내부피폭경로를 파악해야 한다. 비상사태 대응활동 중 근로자의 피폭을 제한하기 위해서 근로자는 개인용 보호장비를 사용할 줄 알아야하며, 사전에 충분한 훈련을 받아야 한다. 아울러 보호 조치 및 기타 대응 조치의 종료와 복구 단계로의 전환을 준비하는 단계가 절차서로 마련되어 있어야 하며 방사성 물질이 외부로 누출되는 사고의 경우, 방사성 물질의 방출량과 구성을 즉각적으로 모니터링 할 수 있어야 한다.

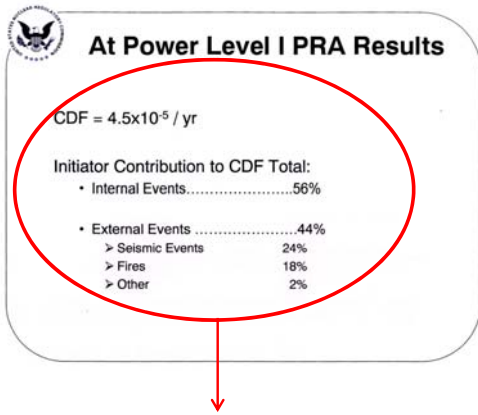


요약

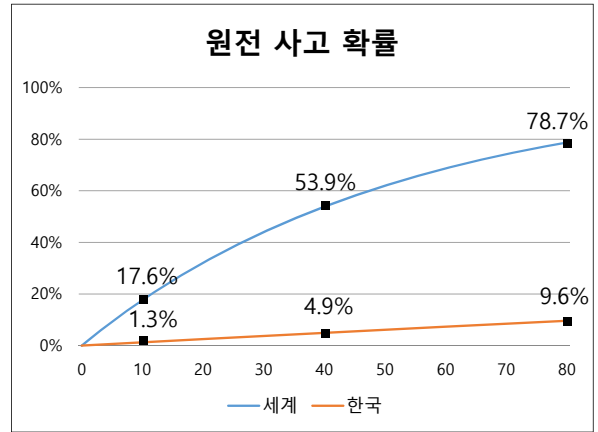
1. 원전에 절대안전은 없으며 사고가 일어날 수 있다는 인식의 견지
2. 지속적 주기적 리스크 평가
3. 다수기 리스크 평가
4. 운전경험 프로그램 반영
5. 사고관리계획의 이행
6. 규제기관의 안전문화 역량제고 강화
7. 비상대응 강화
8. 피폭량 모니터링



TMI급 사고빈도 Binomial 확률분포함수: n 년 동안 사고가 지역에서 발생할 확률, iid와 규제환경 가정



이것이 대중에게 받아들이 질만 한가?



미국 Level 1 PSA 결과 (전체 430기)

	평균	비율
내부	2.52E-05	56%
외부	1.98E-05	44%
전체	4.50E-05	100%

우리나라 Level 1 PSA 결과 (전체 24기)

	평균	비율
내부	6.63E-06	12.6%
외부	4.27E-05	81.0%
전체	5.27E-05	100%

원전이 향후 80년 안에 사고발생 확률?

$\Pr[X = k | n, p] = B(n, p)$ (n 시간 동안 사고가 k번 발생할 확률)

Let $k = 0$

CDF = 4.5×10^{-5} (RY) 세계, 5.27×10^{-5} (RY) 한국, $n = 80$ (years), $p = 0.00013$

$\Pr[\text{원전사고발생}] = 1 - \Pr[X = 0 | n, p]$
= 0.787



4th 원전 사고 원인은? Management Failure Accident caused by Nuclear Safety Culture
(1979 TMI accident → 1986 Chernobyl accident → 2011 Fukushima accident)

AHP (Analytical Hierarchy Process)

