일본 원전사태의 문제와 교훈

장 순 흥
KAIST 원자력 및 양자공학과

2011. 04.19(화) 19:00
대덕연구개발특구지원본부
컨퍼런스홀@대전

목 차

Ⅰ. 후쿠시마 원자력 발전소의 개요

Ⅱ. 사고 진행 경위

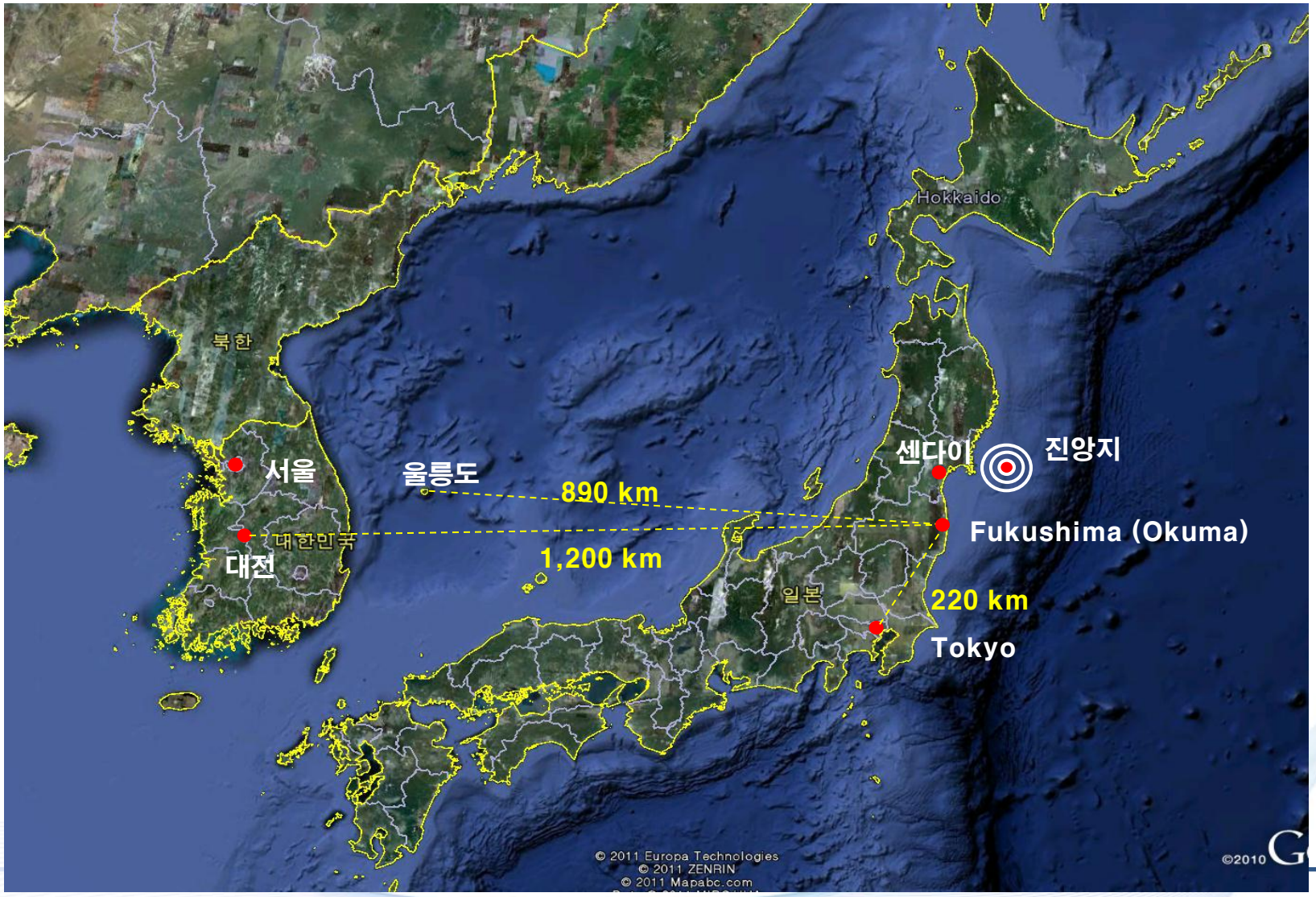
Ⅲ. 국내 원전과 후쿠시마 원전의 비교

Ⅳ. 향후 대책

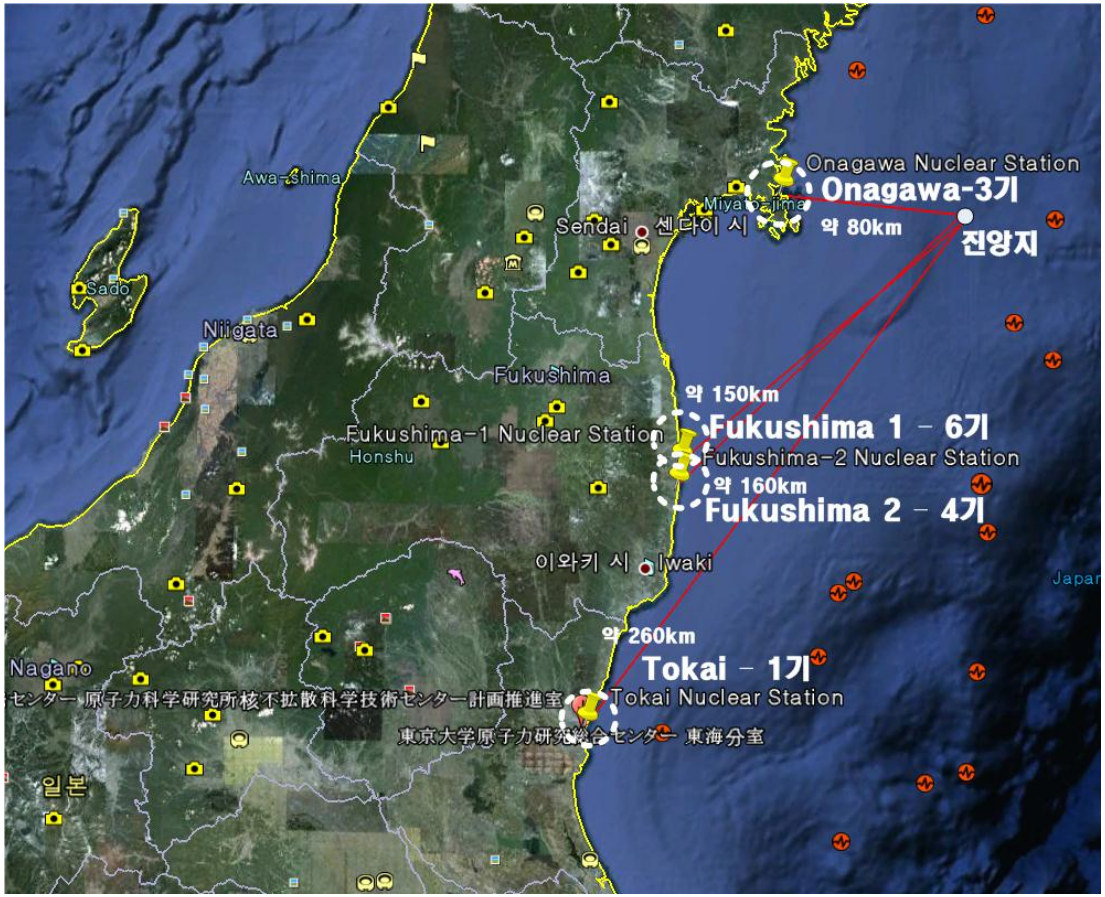
Ⅴ. 교 훈

I. 후쿠시마 원자력발전소의 개요

I. 후쿠시마 원자력발전소의 개요



I. 후쿠시마 원자력발전소의 개요



일본에서 운영중인
원자력 발전소
: 총 54기

진앙지 인접 원전
: 13기

지진으로 인하여
13기 원전 가동 정지
: 후쿠시마 1발전소 6기
후쿠시마 2발전소 4기
오나가와 3기

후쿠시마 1발전소와 2발전소간 거리 : 11.5km

I. 후쿠시마 원자력발전소의 개요

후쿠시마 제 1 원자력 발전소 : 1971년 운영을 시작한 비등형원자로 6기

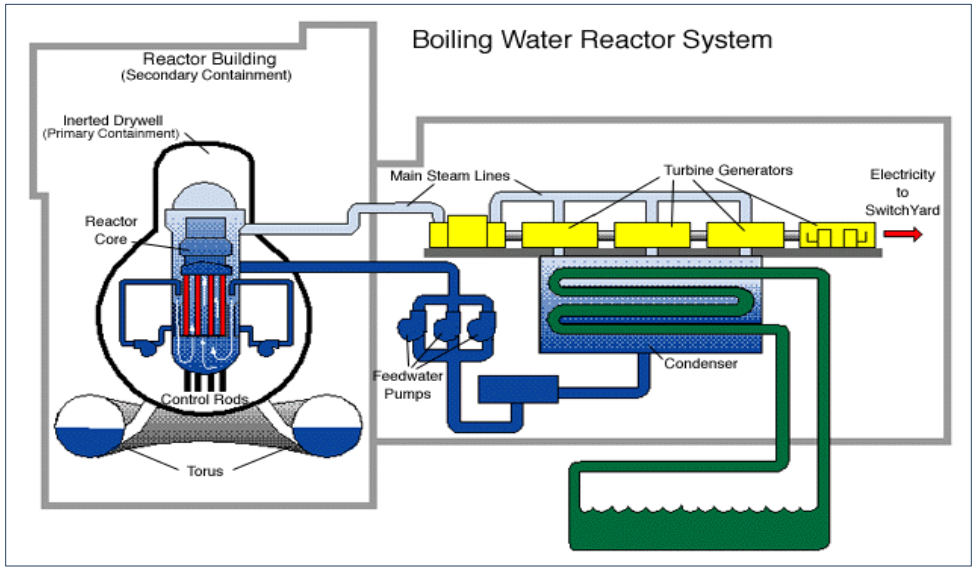
호기	1	2	3	4	5	6
용량(MWe)	460	784	784	784	784	1,100
상업 운전 개시일	'71.03	'74.07	'76.03	'78.10	'78.04	'79.10
현황	운전중 자동 정지			정기점검중		

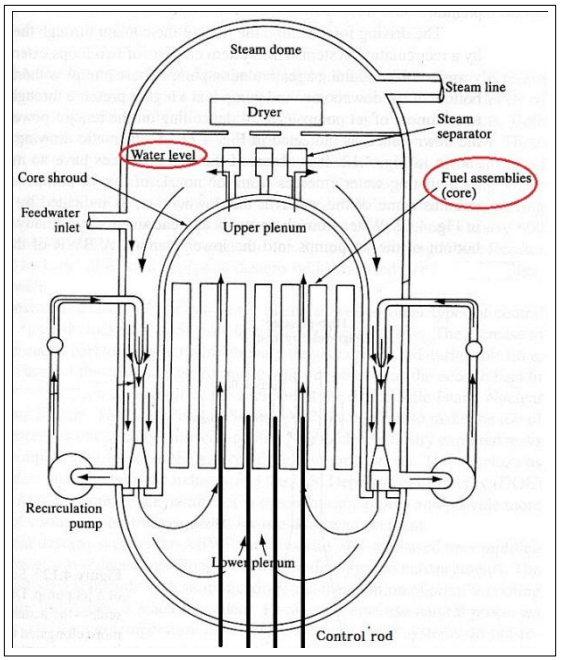
후쿠시마 제 2 원자력 발전소 : 1982년 운영을 시작한 비등형원자로 4기

호기	1	2	3	4
용량(Mwe)	1,100	1,100	1,100	1,100
상업 운전 개시일	'82.04	'83.02	'85.06	'87.08
현황	운전중 자동 정지			

I. 후쿠시마 원자력발전소의 개요

비등형 원자로(Boiling Water Reactor, BWR)의 구조





BWR 원자로 노심의 구조

- 원자로 압력용기 내에서 물이 끓어 증기 발생
- 냉각재(물)는 핵연료 집합체 아래에서 위로 통과
  → 가열되어 증기로 변환 → 상부의 증기 분리기에서 증기와 물로 분리
- 제어봉 집합체는 원자로 하부에 위치 → 고압의 유압계통에 의하여 삽입
- Torus(Suppression Pool) : 많은 양의 증기가 방출되는 사고가 발생하였을 때 방출된 열을 제거하는데 사용 됨.

II. 사고 진행 경위

Ⅱ. 사고 진행 경위

원자로 정지 후 붕괴열 제거

붕괴열

- ✓ **원자로 가동 정지 후 노심의 핵분열이 멈춘 후에도, 원자로 내에서는 이전에 만들어진 핵분열 생성물의 붕괴가 계속 되고, 그로 인하여 발생하는 열.**
- ✓ **원자로 출력의 약 7% 수준**

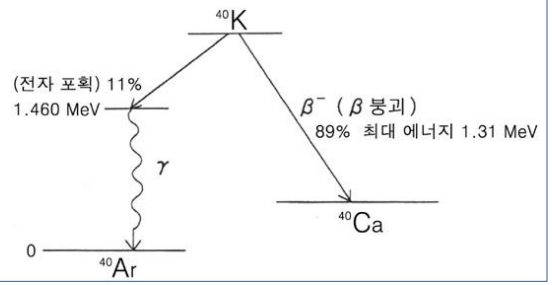
붕괴열 제거가 필수적임

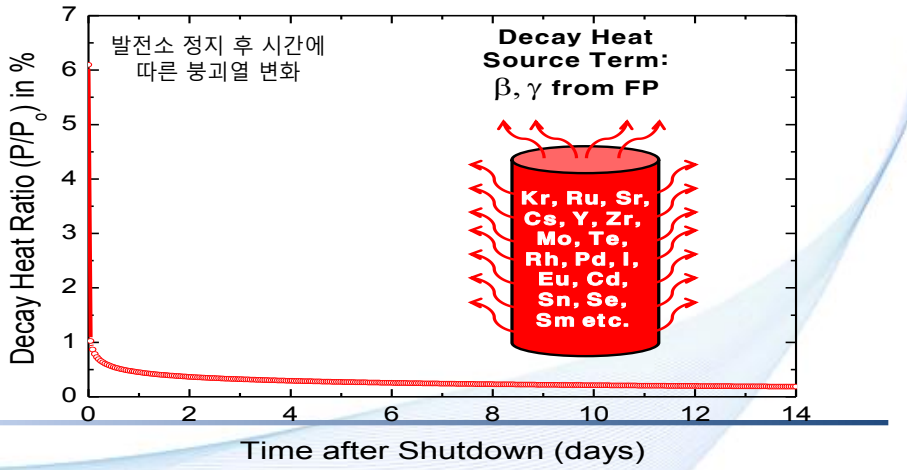
핵분열 에너지

한 개의 원자핵이 두개 이상의 가벼운 원자핵으로 바뀌면서 몇 개의 중성자와 **에너지 방출**

붕괴열

불안정한 원자핵이 안정된 핵종으로 바뀌면서 **β-선/γ-선**으로 방출되는 에너지





Ⅱ. 사고 진행 경위

지진 발생

원자로 자동 정지

비상디젤발전기 가동

해일로 인한 소내·외 전원공급 상실

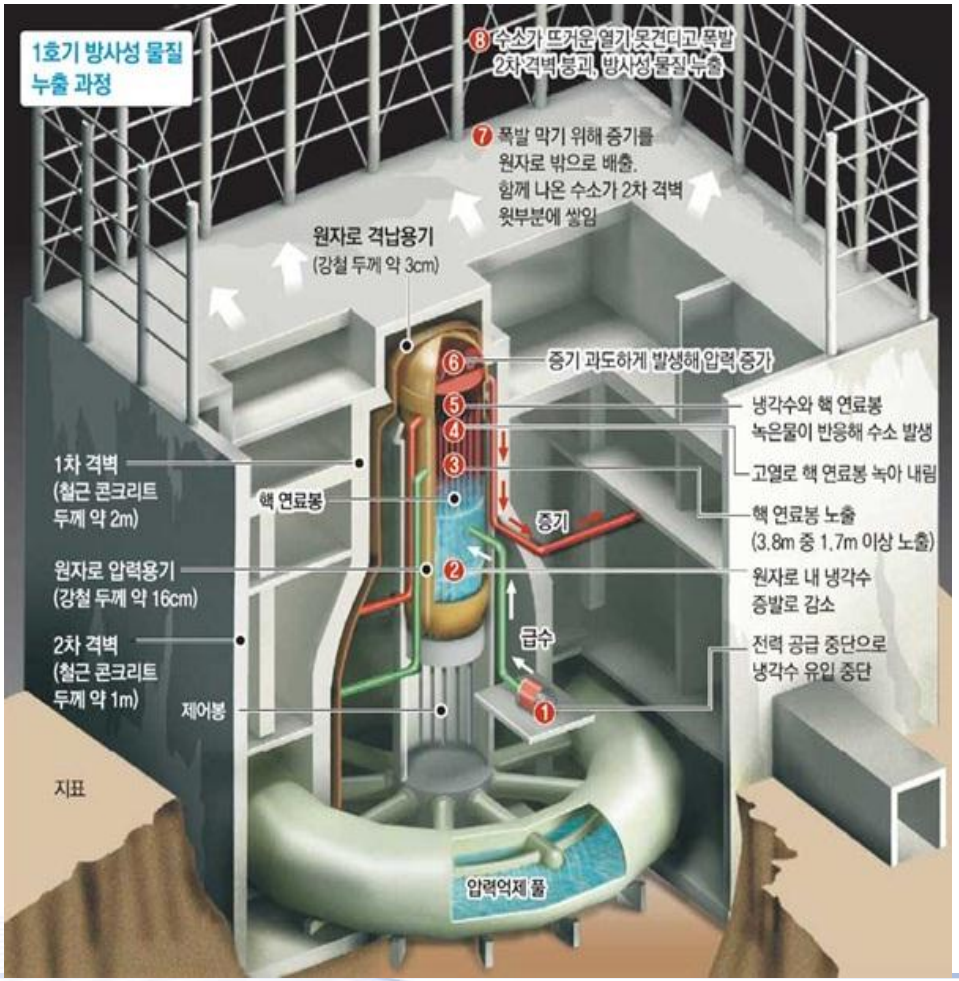
냉각수 유입 중단으로 핵연료 가열

수소 폭발

사고 후 후쿠시마 제 1 발전소의 모습

Ⅱ. 사고 진행 경위

1호기 방사성 물질 누출 과정



원자로 내 냉각수 유입 중단

원자로 내 냉각수 증발로 핵연료봉 공기중 노출

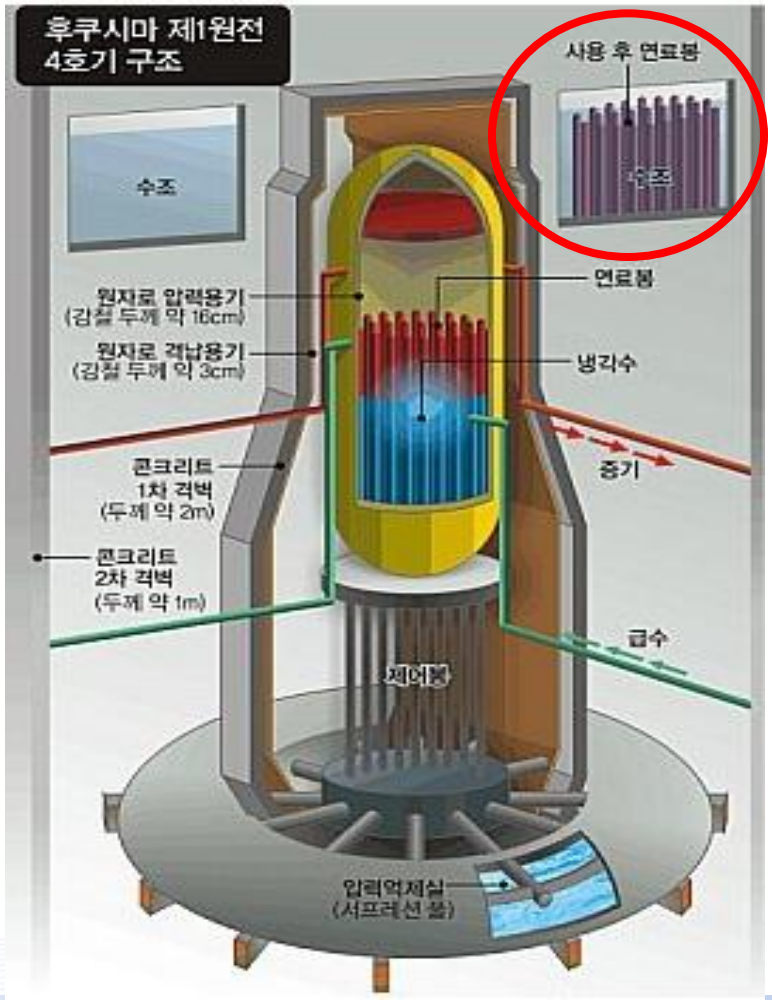
녹아내린 핵연료봉과 냉각수와의 반응으로 수소발생

원자로 밖으로 배출된 수소와 증기가 2차 격벽내에 쌓임

고온 고압의 수소에 의해 2차 격벽 붕괴, 방사성 물질 누출

Ⅱ. 사고 진행 경위

4호기 내 사용후 핵연료 저장시설



원자로 건물 내에 위치한 수조에
사용후 핵연료봉 저장

냉각수의 공급이 끊기면서
수조의 수위가 지속적으로 감소

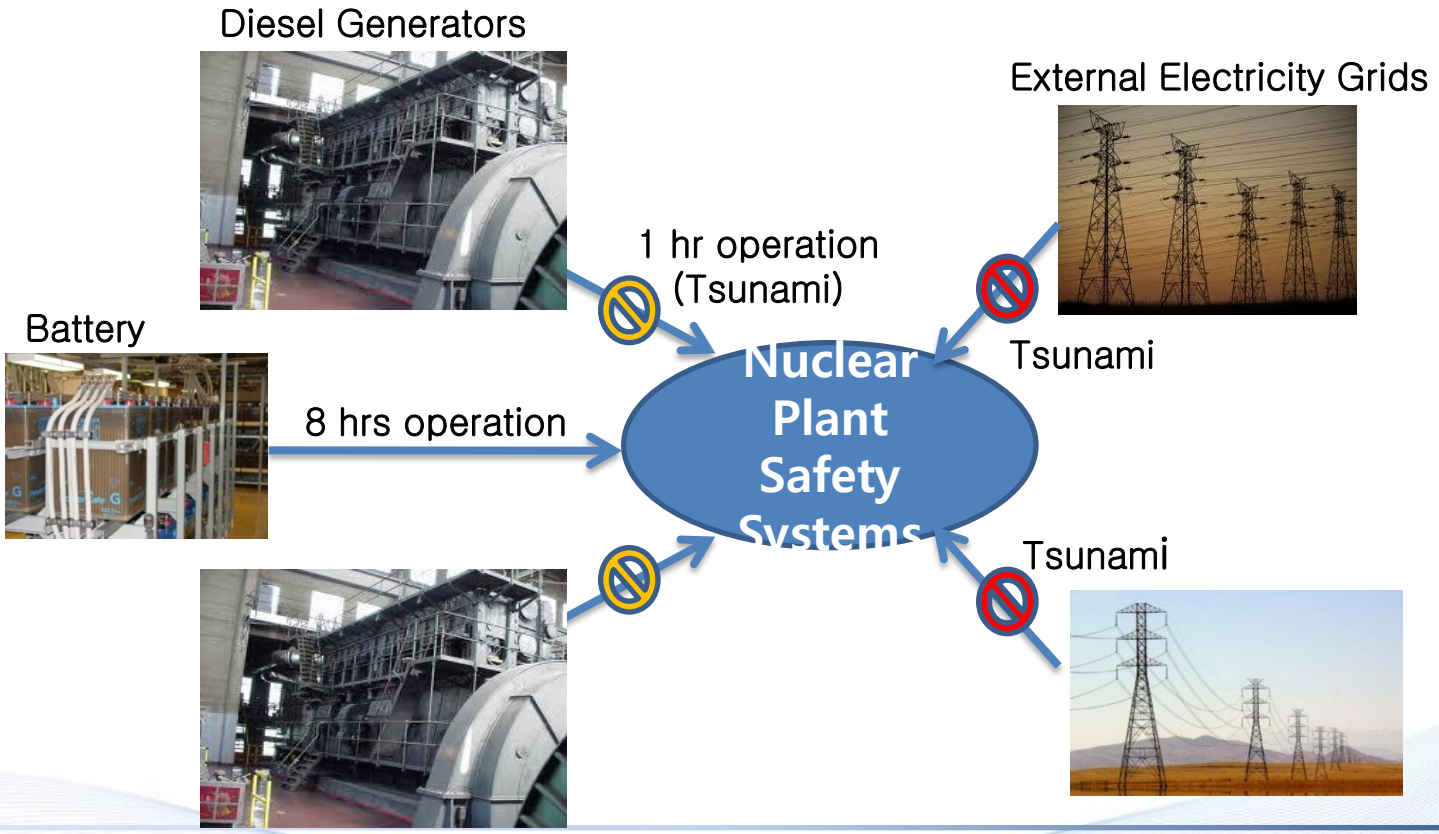
공기중으로 노출된 연료봉의
온도 상승

수소와 방사성 물질이 섞인 증기
발생으로 건물 상부 수소 폭발

사용후 핵연료봉이 녹아내릴 경우
다량의 방사성 물질 유출 가능성

II. 사고 진행 경위

- ✓ 지진 발생으로 인한 발전소 자동 정지 및 비상계통 작동은 성공적
- ✓ 해일로 인하여 전기 공급이 제대로 이루어지지 않아 붕괴열 제거에 실패

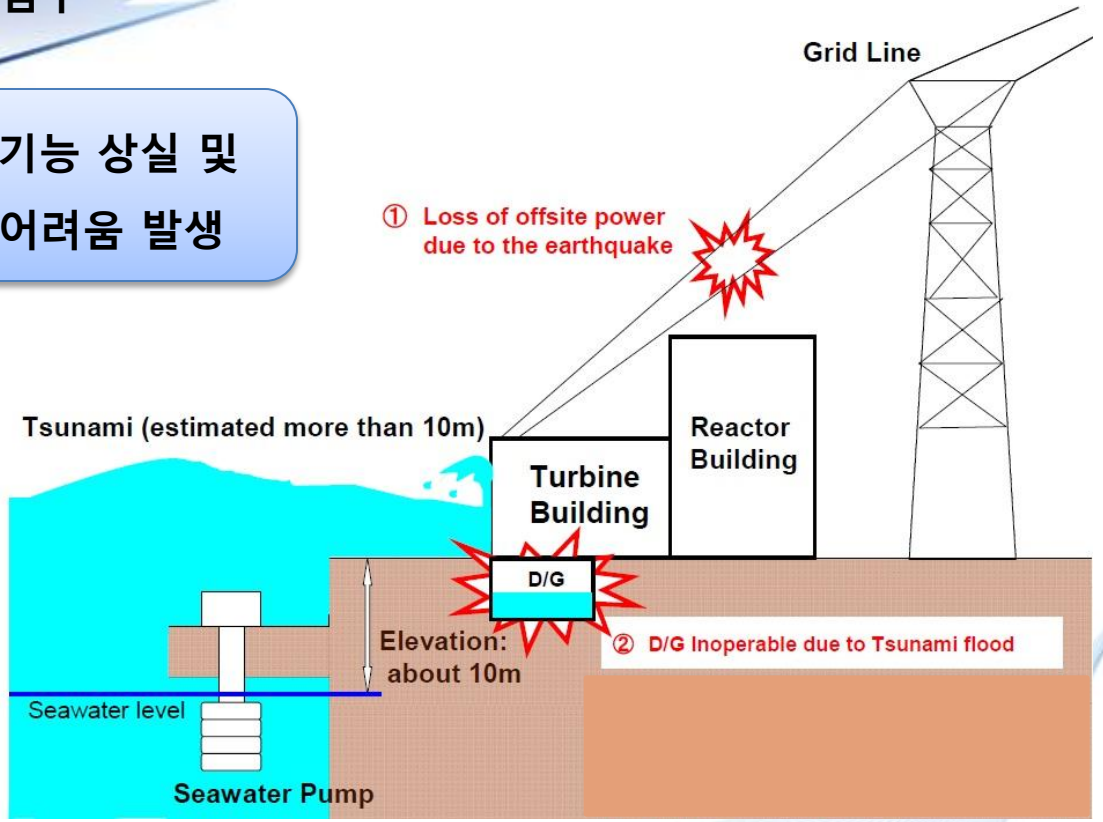


II. 사고 진행 경위

비상 디젤발전기가 터빈 건물 아래에 위치

해일로 인한 침수

비상시스템으로서의 기능 상실 및
복구시 침수로 인한 어려움 발생



Ⅱ. 사고 진행 경위

국제원자력사고등급(INES)

Japanese NISA

체르노빌 사고(1986, 우크라이나)
사망 28명, 암 발병률 증가
(자연 발생률의 0.8% 수준)

France, Finland

When Unit 1 H_2 Explosion (IAEA)

TMI 사고(1979,미국)
주민 20여만명 대피
암 발생 확률 1/50,000 증가
(일반적인 암 발생확률은1/7)
허용 기준 1/300수준의 방사능물질 검출

7 대형 사고
방사성 물질 대량 유출
(I^{131}기준 10^{16}Bq이상)
생태계의 심각한 영향 초래

6 심각한 사고
상당량(I^{131}기준 10^{16}Bq)의 방사성 물질 유출

5 시설 외부로의 위험사고
방사성 물질의 한정적 외부유출
(I^{131}기준 10^{14}-10^{15} Bq수준)
원자로의 심각한 손상
중대한 임계사고

4 시설 내부의 위험사고
피폭으로 적어도 1명 사망, 소량의 방사성 물질 유출, 원자력 시설의 상당한 손상

3 중대한 고장
원전 종사자들의 심각한 피폭, 예기치 않은 심각한 방사능 오염, 원자력 발전소 인근에서의 사고

2 고장
원전관련 종사자들의 법정 연간피폭한계치 내 방사선 노출, 시설물 내 방사능 오염

1 단순 고장
안전상의 사소한 문제

0 경미한 고장
일반 원전활동상의 경미한 이상

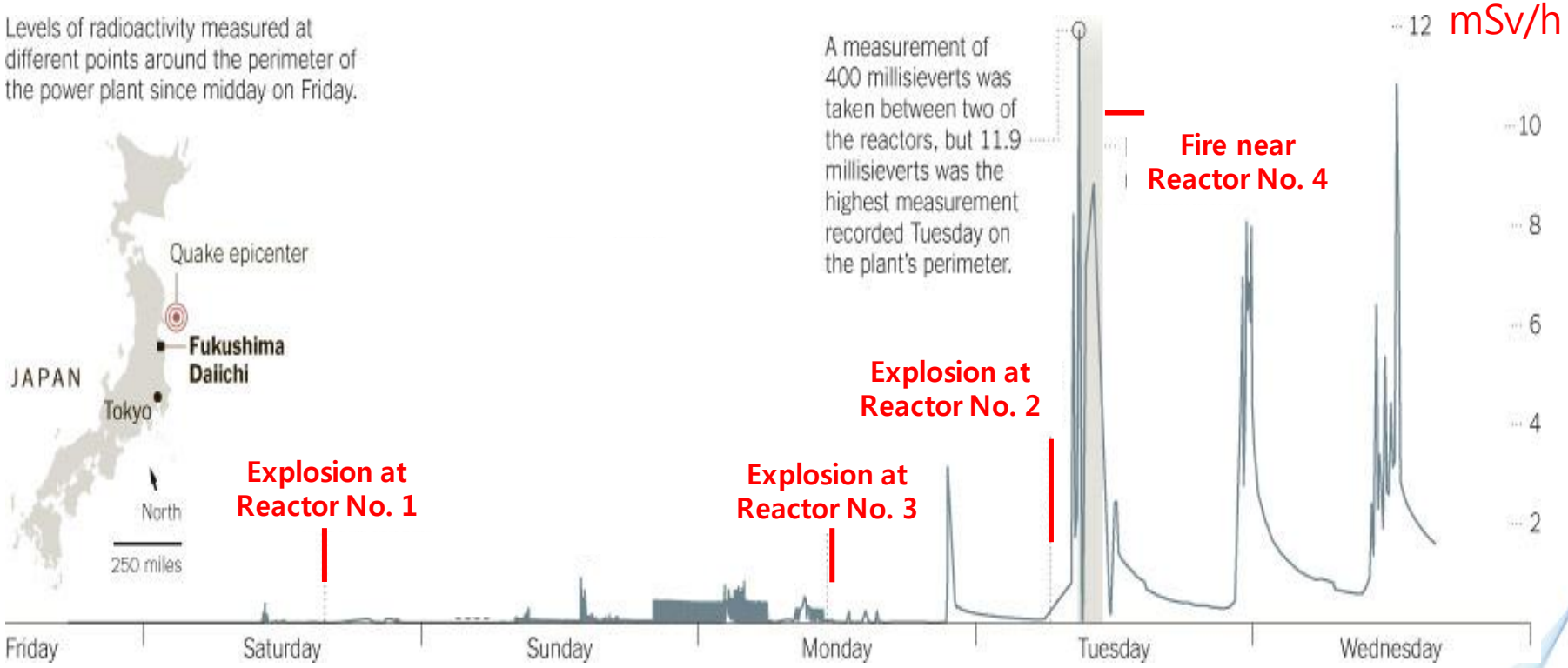
7등급 사고 : 방사능 물질 누출량 (I^{131}기준) 10^{16}Bq 이상

일본원자력안전보안원 추정 : 37만 TBq
원자력안전위원회 추정 : 63만 TBq
(체르노빌 당시 100만TBq 정도의 방사능 물질 유출)

사고발생 등급을 7단계로 상향 조정

II. 사고 진행 경위

사고 후 후쿠시마의 방사선 준위



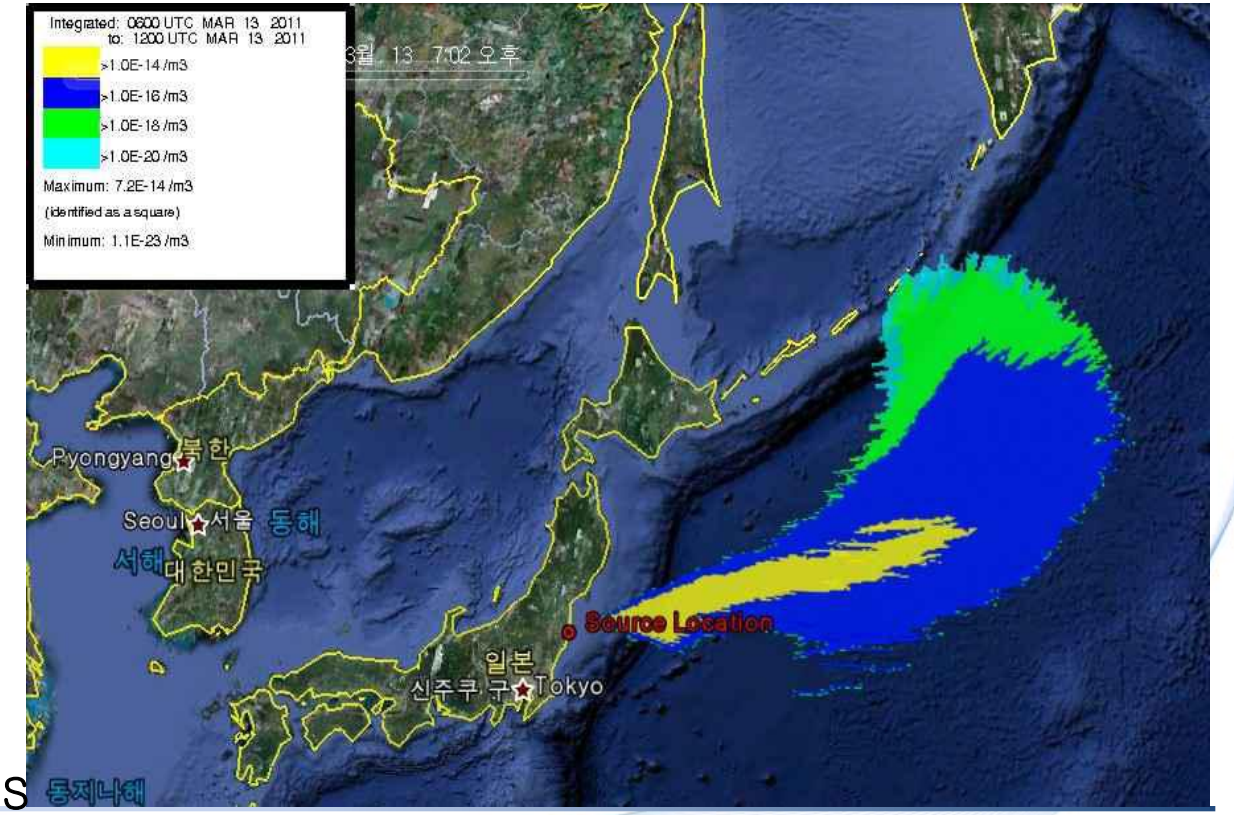
II. 사고 진행 경위

사고 후 방사성 물질의 예상 이동 경로

1) 국내에서도 요오드, 세슘 등의 방사능 물질이 검출되고 있음

2) 검출된 방사능 물질의 최고 농도 : 요오드(I-131) 2.77(mBq/m³)

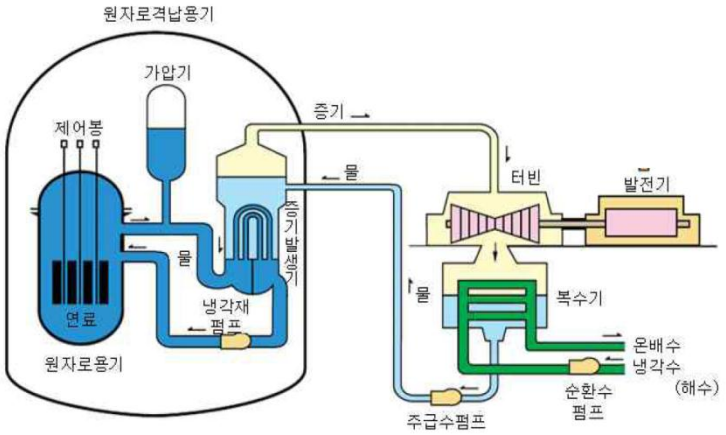
3) 미량으로 인체에 영향을 주는 정도는 아님 → 국내 영향은 거의 없음



Ⅲ. 국내 원자력 발전소와 후쿠시마 원자력 발전소의 비교

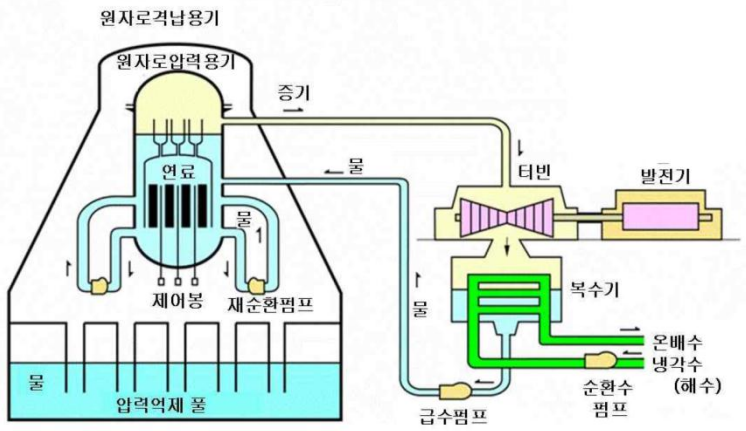
Ⅲ. 국내 원자력 발전소와 후쿠시마 원자력 발전소의 비교

국내 원자력 발전소
(PWR, Pressurized Water Reactor)



- ✓ 원자로에서 발생된 열을 증기 발생기를 통하여 2차측으로 전달하여 터빈/발전기 구동
- ✓ 원자로측 폐쇄회로 형성

후쿠시마 원자력 발전소
(BWR, Boiling Water Reactor)



- ✓ 원자로에서 발생된 증기가 터빈으로 직접 들어가 발전기 구동
- ✓ 원자로와 터빈이 분리되어 있지 않음

Ⅲ. 국내 원자력 발전소와 후쿠시마 원자력 발전소의 비교

PWR의 안전 특성

증기발생기와 분리된 원자로측 폐쇄회로 형성	✓ 사고시 방사능 물질의 유출을 막을 수 있는 하나의 방벽이 더 존재함
다양한 비상냉각 시스템이 구축되어 있음	✓ BWR에서는 1차측을 통해서만 붕괴열 제거 가능 ✓ 다양한 안전 계통 및 저장수 확보
10배 더 큰 격납 건물 부피	✓ 사고시 건물 내 압력 상승이 느림 ✓ 사고시 대처시간 확보 용이

Ⅲ. 국내 원자력 발전소와 후쿠시마 원자력 발전소의 비교

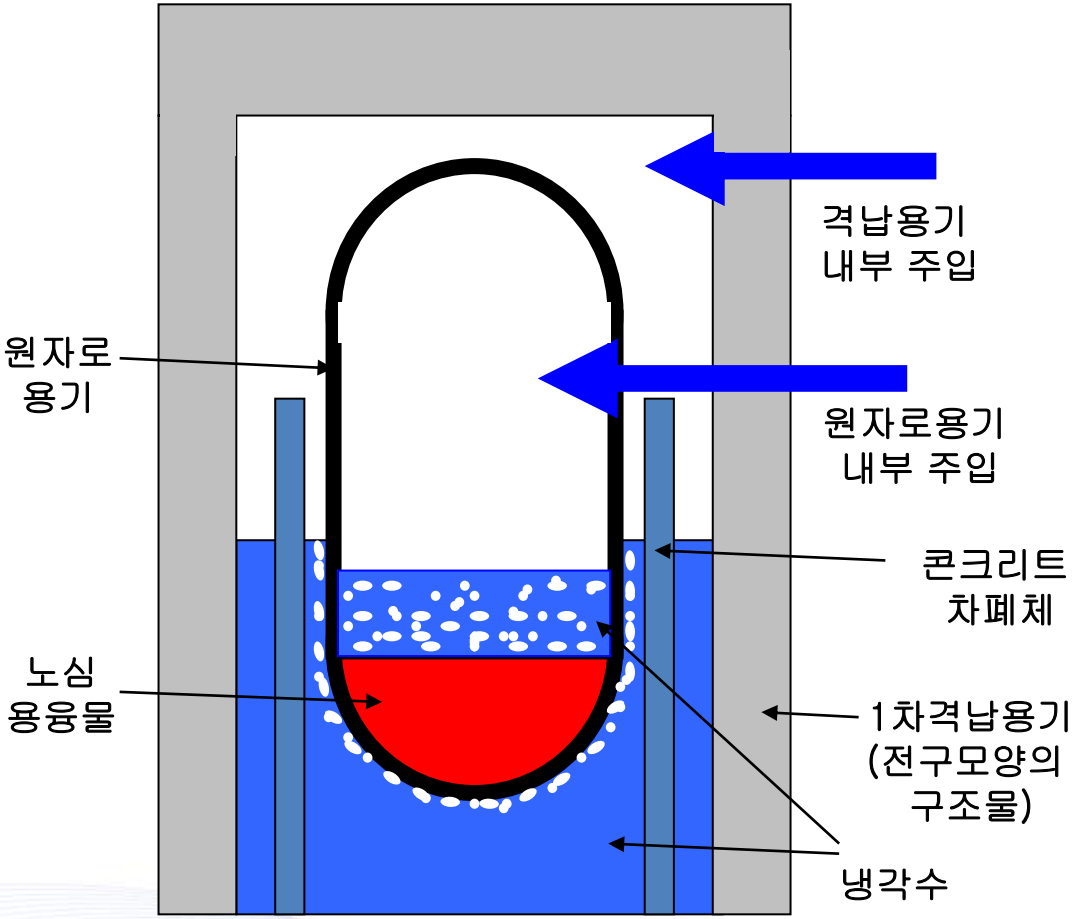
기타 안전적 특성 비교

	PWR	BWR
구조적 안전성 확 보	원자로에 물이 가득 차 있으므로 연료봉의 온도가 천천히 상승함	물과 수증기가 함께 있어 사고 발생시 연료봉 온도의 급격한 상승.
전원 상실시 노심 냉각	증기 발생기를 이용한 자연순환 냉각기능	자연순환 냉각기능 없음
수소 제어 시스템	피동형을 포함한 4가지의 수소 제어 시스템	수소제어 시스템 미비
사용후 핵연료 저장 시설	소내 별도의 저장 시설에 보관	후쿠시마 원전의 경우 원자로 건물 안에 함께 보관

Ⅳ. 향후 대책

Ⅳ. 향후 대책

원자로 용기 내외부 냉각을 통한 노심용융물감금(In-Vessel Retention)기술



노심이 녹아 내려
원자로 용기 내부로
냉각수 주입이
어려운 경우

원자로 용기와
콘크리트 차폐체 사이에
냉각수를 주입하여
원자로용기 외벽 냉각

노심 용융물을
압력용기 내에 유지

Ⅳ. 향후 대책

원자로 용기 내외부 냉각을 통한 노심용융물감금(In-Vessel Retention)기술

1. 노심용융물을 원자로용기에 억류함으로써 아래의 이점이 있음
   - 격납용기를 보호할 수 있고, 노심용융물을 물 아래에 둠으로써 핵분열생성물 방출을 줄일 수 있음
   - 사고 후 제염 및 해체 시에 편리

2. 증기폭발 및 원자로용기 열충격 우려
   - 원자로 내부에 수위가 있는 것으로 보아 증기폭발 및 원자로용기 열충격 가능성은 적음
   - 원자로용기 내부 주입 시 발생하는 증기 양은 주입하는 물의 양에 의해 제한되므로 증기폭발의 가능성은 없음
   - 원자로용기 외부 냉각 시에는 직접 접촉이 없으므로 증기폭발 가능성 없음

일본의 전문가와 심도 있게 논의하여 왔고
현재 일본에서 이 대응 방안을 받아들인 상태임

Ⅳ. 향후 대책

1. 외벽냉각기술을 이용한 격납 용기의 건전성 유지
   - 격납 용기 내부의 핵연료가 완전히 잠기도록 냉각수 주입
   - 격납 건물 안쪽의 Drywell 환기구 부분까지 냉각수 주입
   - 냉각수의 장기적 순환이 가능하도록 시스템 구축
   - 격납 용기 내·외부 냉각을 통한 용기의 건전성 유지

2. 추가 수소폭발 방지
   - 현재 시도하고 있는 질소주입 등 가능한 방법을 동원
   - 격납 건물 venting으로 격납 건물 내의 압력을 낮춤

3. 장기적 관리
   - 원자로는 폐쇄하거나 제염/해체.
   - 부지는 재활용 할 수 있는 가능성.

Ⅳ. 향후 대책

	원 자 로	사용후핵연료저장소	방사능 오염 대책
1단계 (3개월)	✓ 질소 주입으로 수소폭발 방지 ✓ 열교환기능 회복 ✓ 격납용기에 냉각수 주입작업 (1,3호기) ✓ 2호기 손상부분 밀폐	✓ 순환냉각시스템 복구 ✓ 4호기 건물 내진 보강	✓ 오염수 보관장소 확보 ✓ 수처리시설 설치 ✓ 원전 건물 덮는 시설 설치 착수
2단계 (3~6개월)	✓ 필요에 따라 1단계의 대책 지속 ✓ 격납용기에 냉각수 주입 작업(2호기) ✓ 냉온정지상태유지	✓ 사용후 핵연료 저장소 열교환기 설치 ✓ 원격조작에 의해 냉각수 주입 확대	✓ 방사능 오염대책 ✓ 오염수 전체량 감소 ✓ 건물 전체를 뒤덮음
이 후	✓ 원자로 부식에 의한 손상 방지	✓ 사용후핵연료 저장소 연료봉 꺼냄	✓ 방사능 오염대책 ✓ 본격적인 처리시설 설치

V. 교 훈

V. 교 훈

일본 원전 사고로부터 우리가 얻을 수 있는 10대 교훈

기술적인 측면

1. 비상 전기공급 등 비상냉각시스템 강화
2. 사용후 핵연료 보관 수조에 대한 안전성 강화
3. 수소제거시스템의 점검 및 보완
4. 가동중 원전에 대하여 PSA 분석 등을 통한 안전성 재점검
5. 신규 원전에 대한 피동안전계통 강화

V. 교 훈

일본 원전 사고로부터 우리가 얻을 수 있는 10대 교훈

제도적인 측면

6. 중대사고시 대응할 수 있는 절차서의 확립
7. Control Tower의 기능 강화 및 고급인력양성
8. 중대사고를 포함한 안전 연구를 증진하고 매뉴얼에 반영
9. 국제 협력 및 산학연 협력을 통한 정보 및 지식 교류
10. 안전문화 확립 및 국민 이해 증진

감사합니다.