

후쿠시마 원전 사고의 교훈과 과제

2011. 5. 26

원자력 열수력 및 안전 연구부회
한국원자력학회

발표 내용

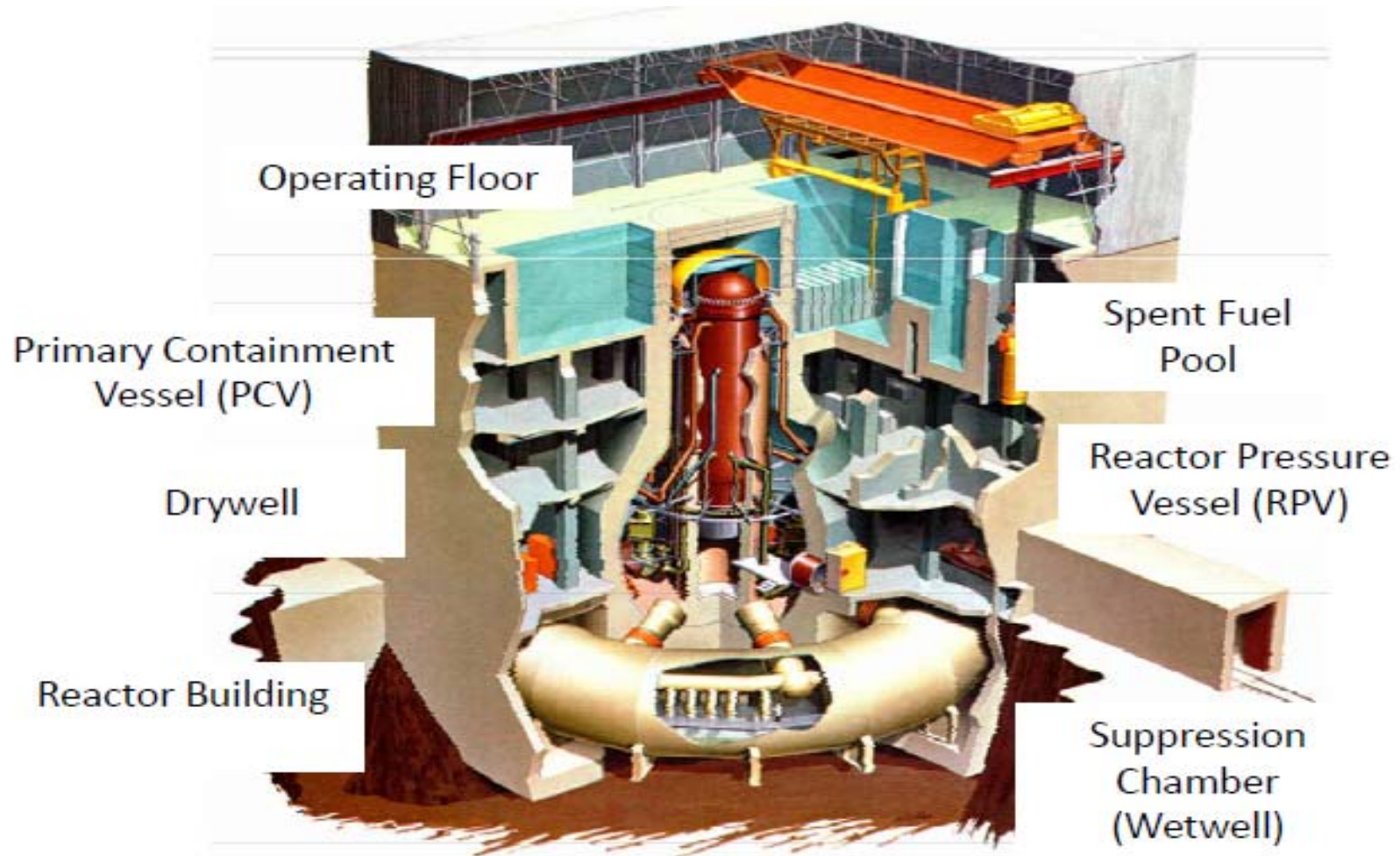
1. 서론
2. 사고 경과
3. 교훈 : 기술적 관점
4. 과제
5. 맺음말

* Data/Figures come from Japanese government presentation at the IAEA meetings

1. 서론 : 후쿠시마 원전 전경 (사고전)

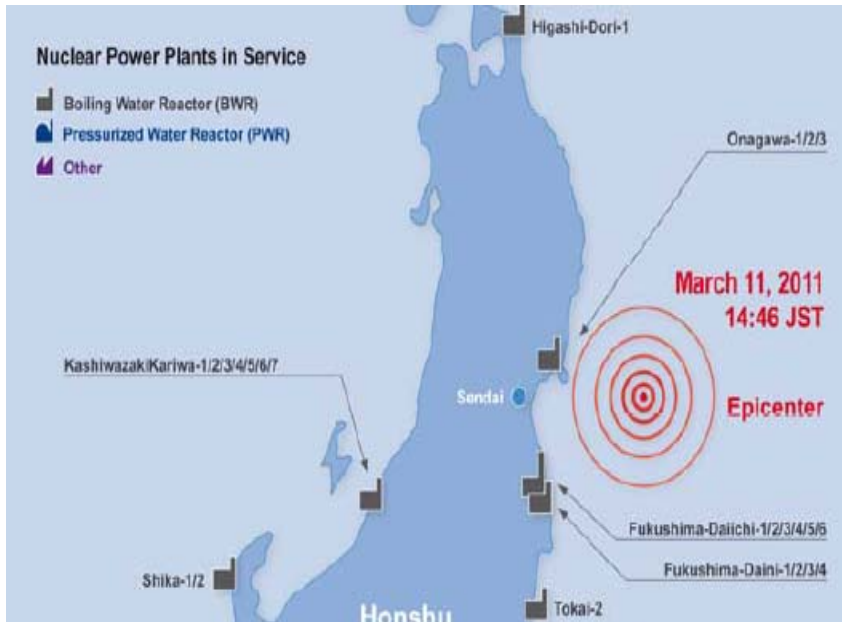


1. 서론 : Mark 1 BWR



1. 서론 : 토호쿠 지진

- 지진 발생시각 : 2011. 3. 11. 14:46 JST
- 지진 규모 : 9.0 Mw
- 진앙 : $38^{\circ}6''N$, $142^{\circ}51''E$, 24km in depth
- 부지 : 0.33g ~ 0.56g peak horizontal acc.(measured)
0.46g ~ 0.50g basic ground motion (JEAG4601)



1. 서론 : 토호쿠 지진 쓰나미

- 발생 시각 : 2011.03.11. 15:41 JST
- 높이 : 14m 이상 (설계기준 5.7 m)

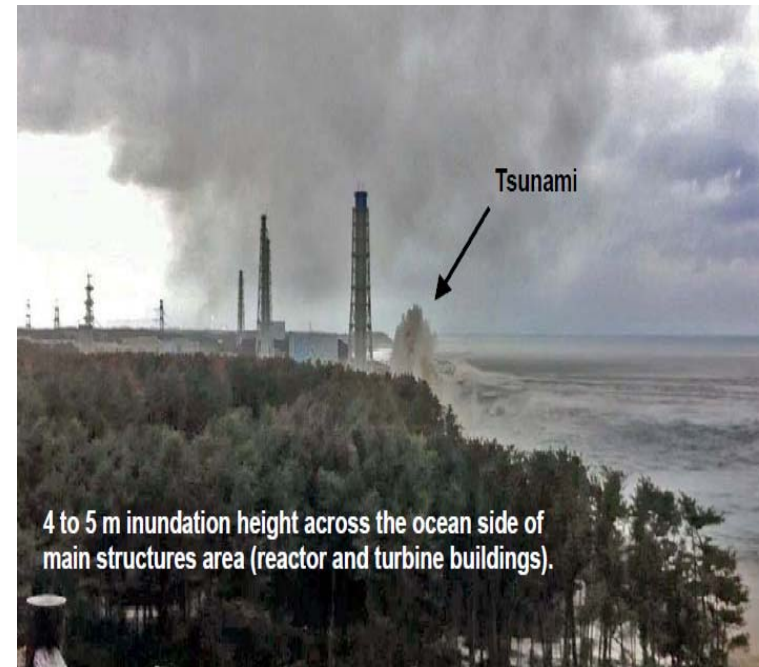
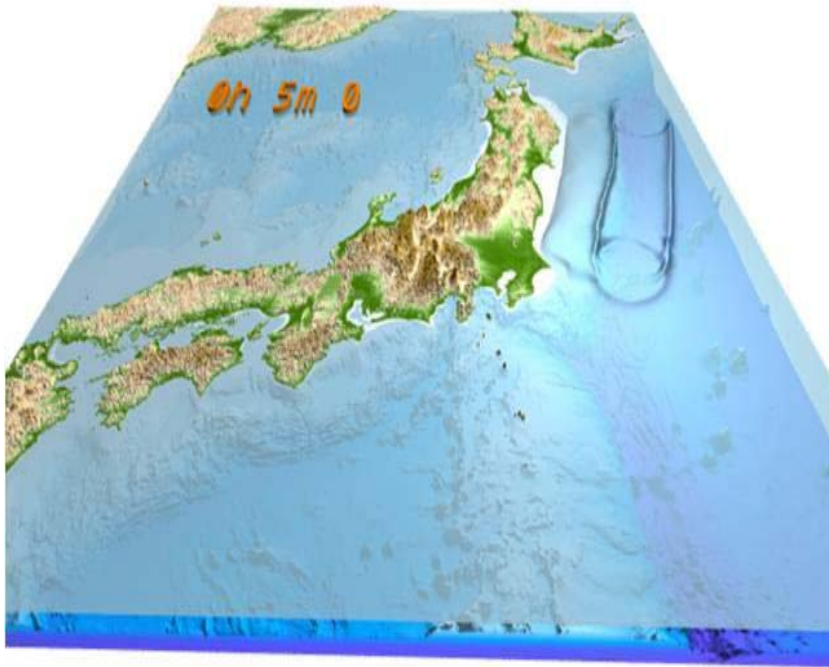


Fig. : Tsunami approaches to the Fukushima NPP site

1. 서론 : 사고 직후 상황

	Unit	Model	Power (Mwe/Mwth)	Commercial operation	Reactor after earthquake*	Emergency DGs after tsunami
F u k u s h i m a (1)	1	BWR-3 Mark I	460/1380	1970	Automatic shutdown	2/2 damaged
	2	BWR-4 Mark I	784/2381	1973	Automatic shutdown	2/2 damaged
	3	BWR-4 Mark I	784/2381	1974	Automatic shutdown	2/2 damaged
	4	BWR-4 Mark I	784/2381	1978	Refueling outage	2/2 damaged
	5	BWR-4 Mark I	784/2381	1977	Refueling outage	2/2 damaged
	6	BWR-5 Mark II	1100/3293	1979	Refueling outage	2/3 damaged 1/3 survived
Fukushima (II) 1-4		BWR-5 Mark II	1100/3293 x 4	1981 - 1986	Automatic shutdown	Survived

* Automatic shutdown: 0.14g horizontally, 0.10g vertically

1. 서론 : 쓰나미 전후 위성사진

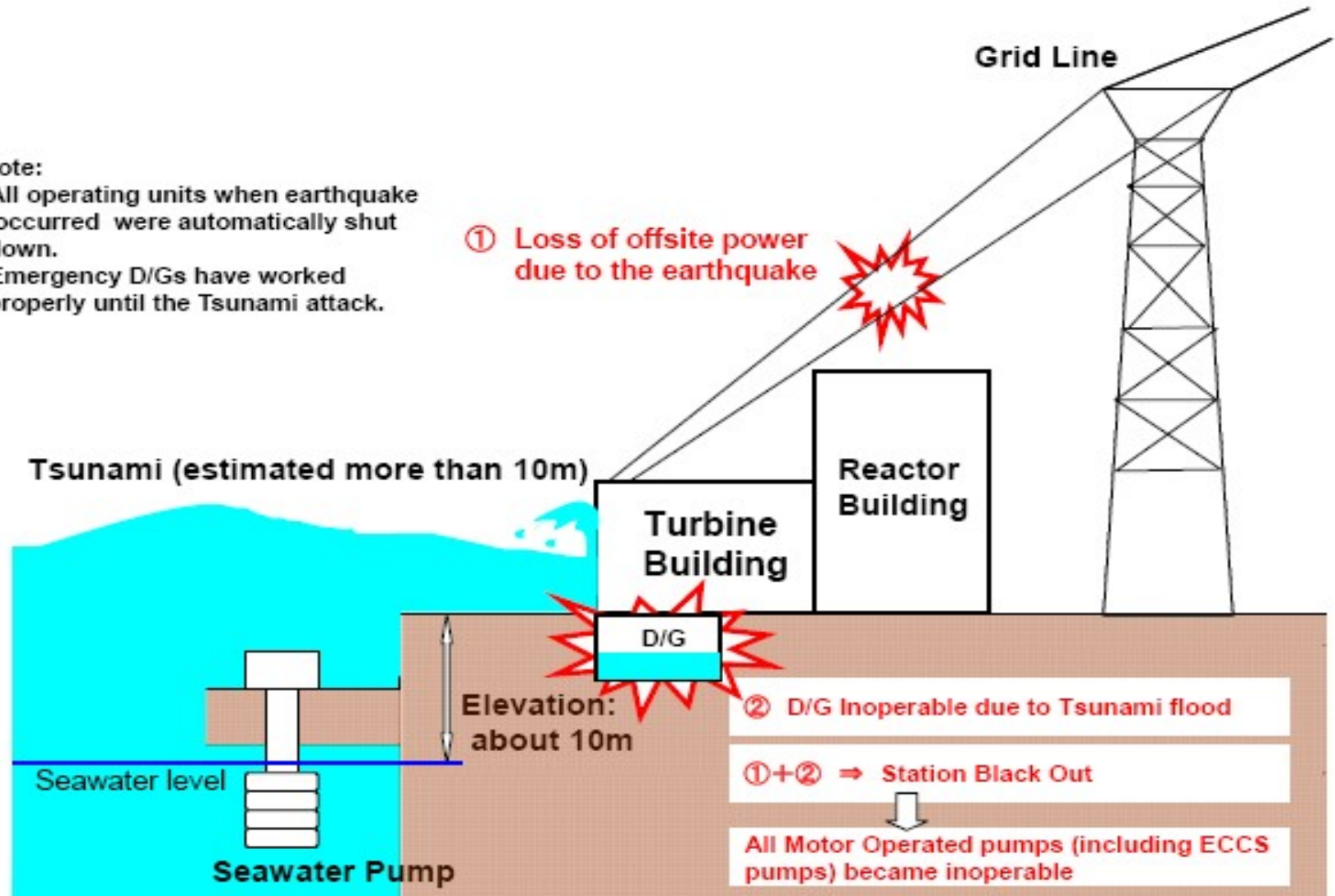


Diesel oil tank and seawater pumps were destroyed

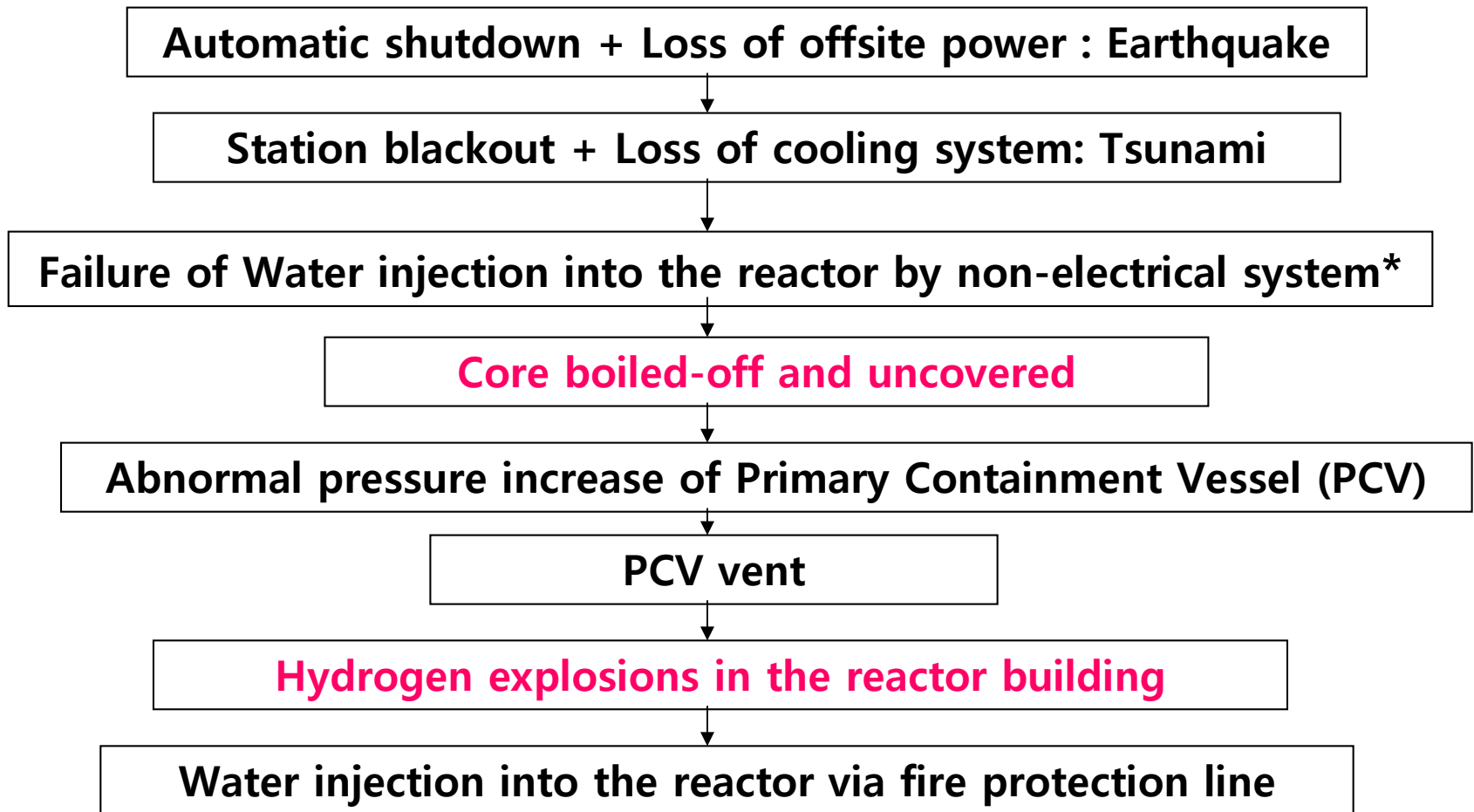
2. 사고 경과 : 초기 조건

Note:

- All operating units when earthquake occurred were automatically shut down.
- Emergency D/Gs have worked properly until the Tsunami attack.

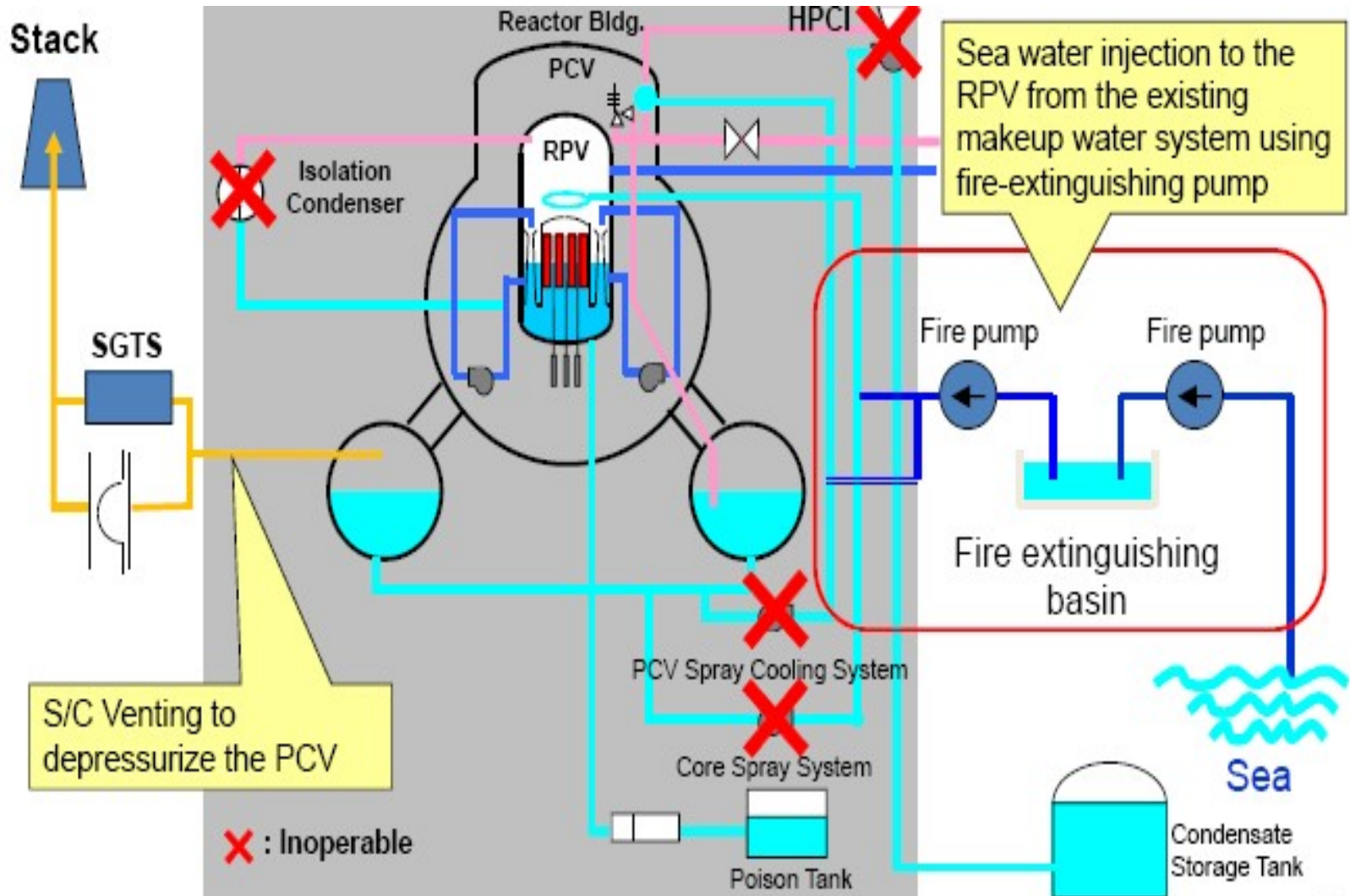


2. 사고 경과 : 주요 단계



- ★ Unit 1 : Isolation condenser, High Pressure Coolant Injection
Unit 2, 3 : Reactor Core Isolation Cooling, High Pressure Core Injection

2. 사고 경과 : Unit 1 운전



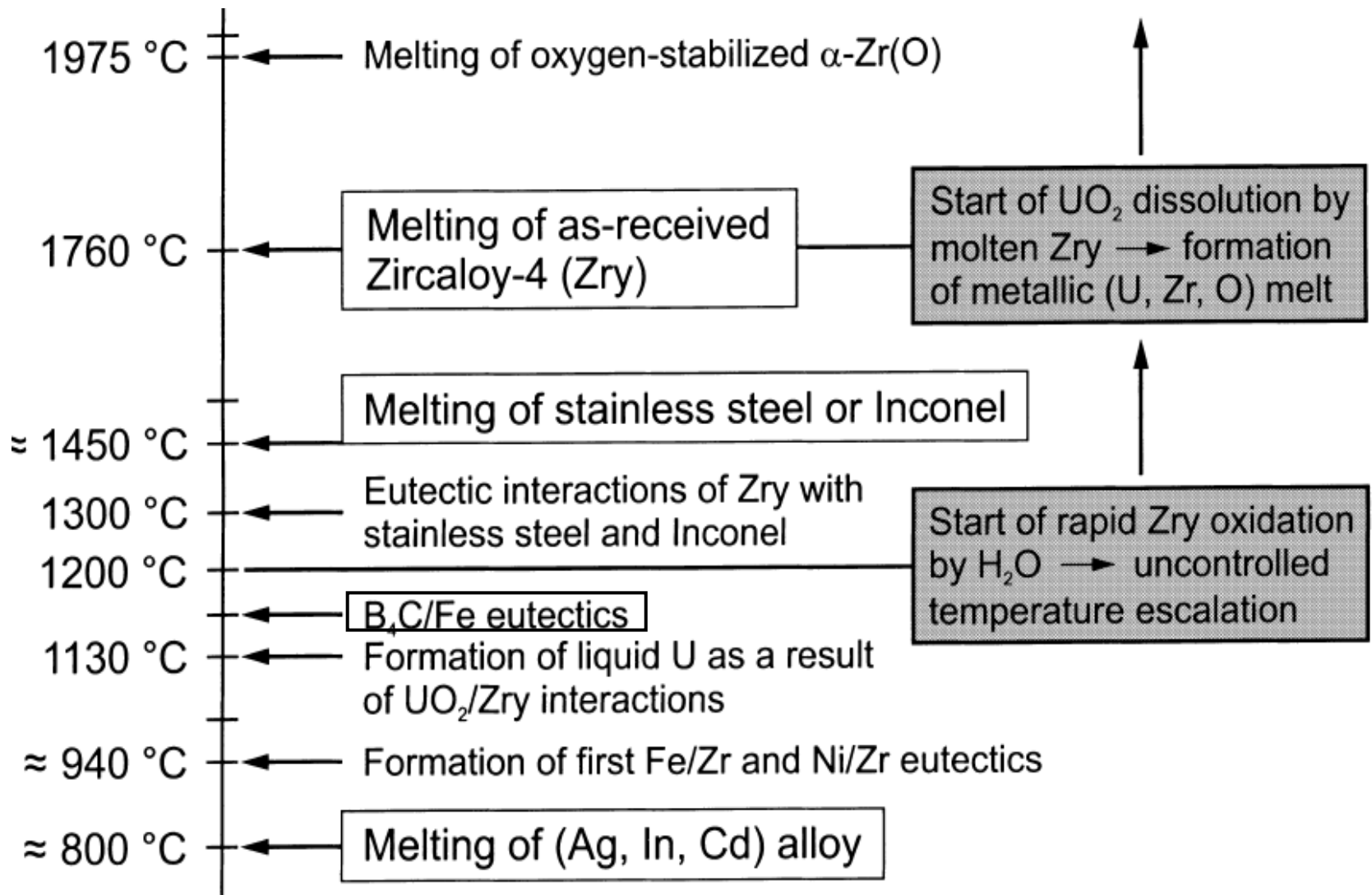
2. 사고 경과 : 비상주입수 상실

- 비상주입수 상실시간

- 1호기 : 격리복수기 기능상실이 발생(3.11 15:30경),이후 고압냉각수주입계통 불능(3.11. 16:36) 에 따라 비상주입수 상실, 해수주입(3.12. 20:22) - **27시간**
- 2호기 : 원자로노심격리냉각계통 정지시점(3.14. 13:25) 부터 비상주입수 상실. 이후 해수주입(3.14. 16:34), 고압냉각수주입계통은 계속 정지 - **3시간**
- 3호기 : 원자로노심격리냉각계통과 고압냉각수주입계통 정지시점(3.13. 05:10)부터 비상주입수 상실, 이후 배기 후 냉각수 주입(3.13. 11:55) - **7시간**

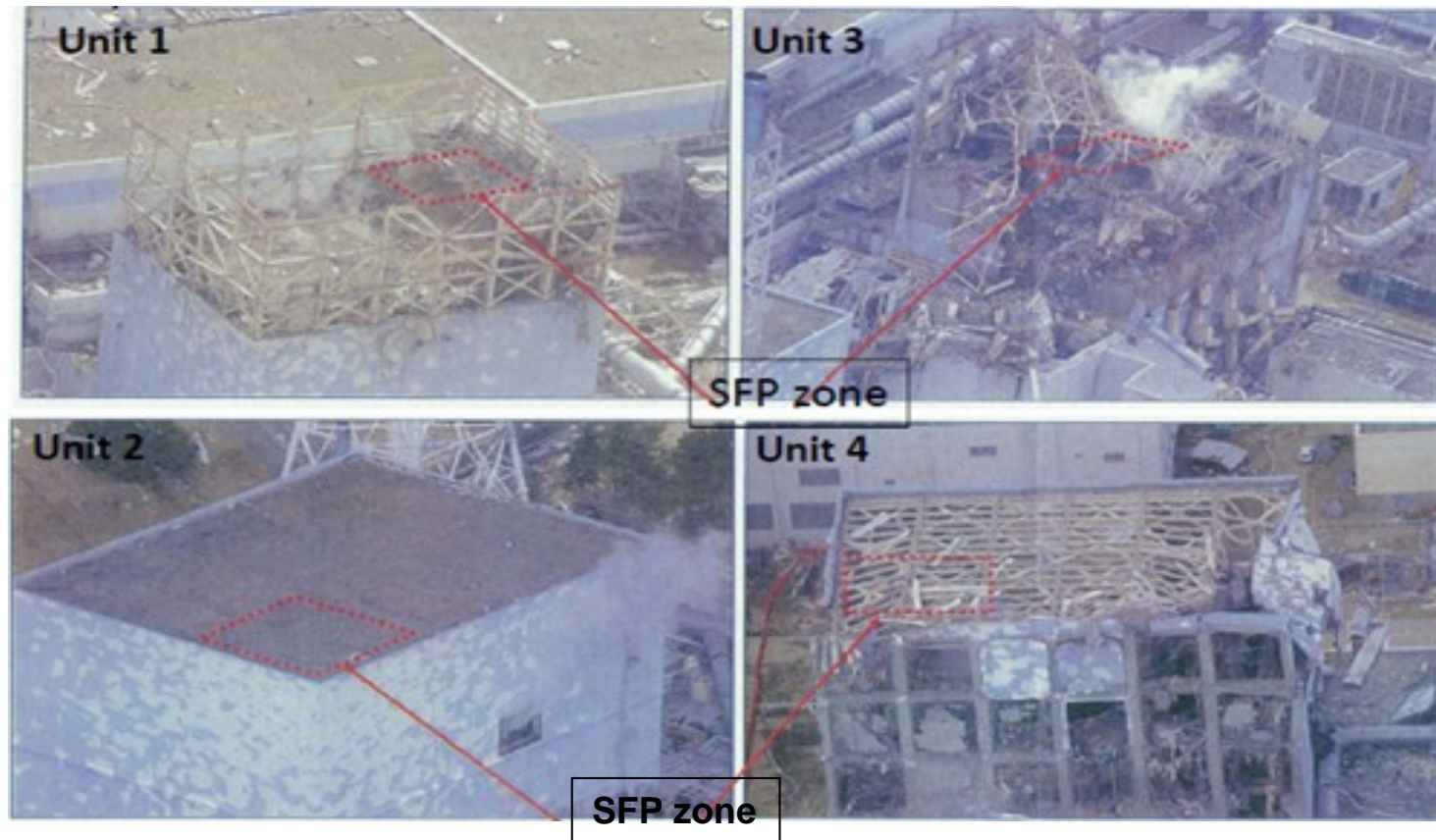
❖ 격리복수기 (Isolation Condenser),
원자로노심격리계통 (Reactor Core Isolation Cooling)
고압냉각수주입계통(High Pressure Coolant Injection)

2. 사고 경과 : Metal Water Reaction



2. 사고 경과 : Hydrogen Explosion

- 가능한 수소 누설 경로
 - Containment flange or airlock
 - Vent line → Standby Gas Treatment System → Reactor building



2. 사고 경과 : 사용후핵연료 냉각 상실

- 전호기 사용후핵연료 손상 가능성
 - 냉각수조 누설 또는 증발에 의한 수위 저하
 - 잔열부하가 큰 Unit 4 사용후핵연료 손상 우려

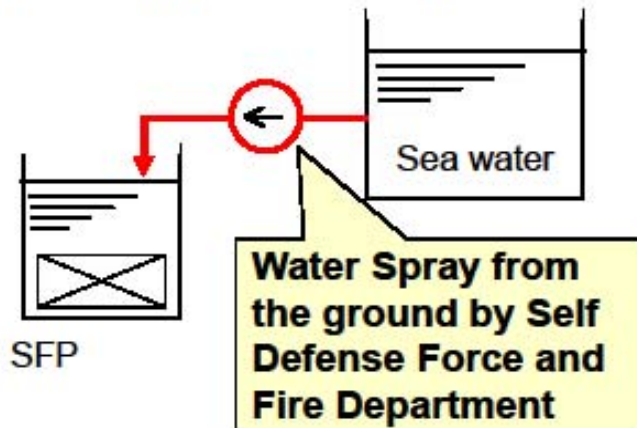
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
Number of FA in the core	400	548	548	-	548	764
Number of spent FA in the spent fuel pool	292	587	514	1331	946	876
Number of new FA in the spent fuel pool	100	28	52	204	48	64
Pool Water Volume (m ³)	1020	1425	1425	1425	1425	1497
Most recent FA Additions	2010. Mar.	2010. Sep.	2010. Jun.	2010. Nov.	2011. Jan.	2010. Aug.

*FA : Fuel Assembly

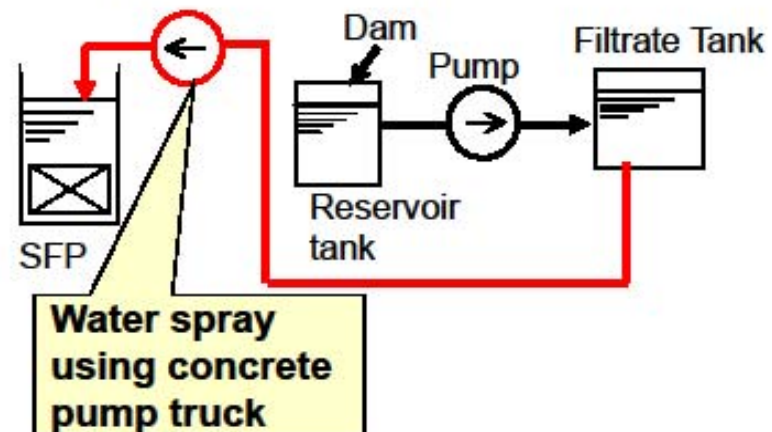
2. 사고 경과 : 사용후핵연료 냉각 비상조치

Unit 4

【1st Stage】 Sea water injection



【2nd Stage】 Fresh water injection



Sampling of SFP water

Analysis result of water in the SFP of Unit 4
(Date of Collection 4/12)

Detected Nuclides	Half life	Density (Bq/cm ³)
Cesium 134	Approx. 2 Years	88
Cesium 137	Approx. 30 Years	93
Iodine 131	Approx. 8 Days	220

Video still



2. 사고 경과 : 각호기 현재 상황

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4
Core Integrity	Damage	Damage	Damage	-
Reactor Vessel integrity	Damage and leakage	Unknown	Unknown	No damage
Containment Vessel Integrity	Damage and leakage estimated	Damage and leakage suspected	No damage	No damage
Spent Fuel Pool -Fuel Status -Cooling Method	- Unknown - Water spray	- Unknown - Water injection	-Damage suspected -Water spray and injection	- Some fuels may have been damaged - Water spray and injection
Turbine Building	Contaminated water	Contaminated water	Contaminated water	Seawater in the basement

Ref. : JAIF

2. 사고 경과 : 방사성물질 누출

Radiological Release (Bq)

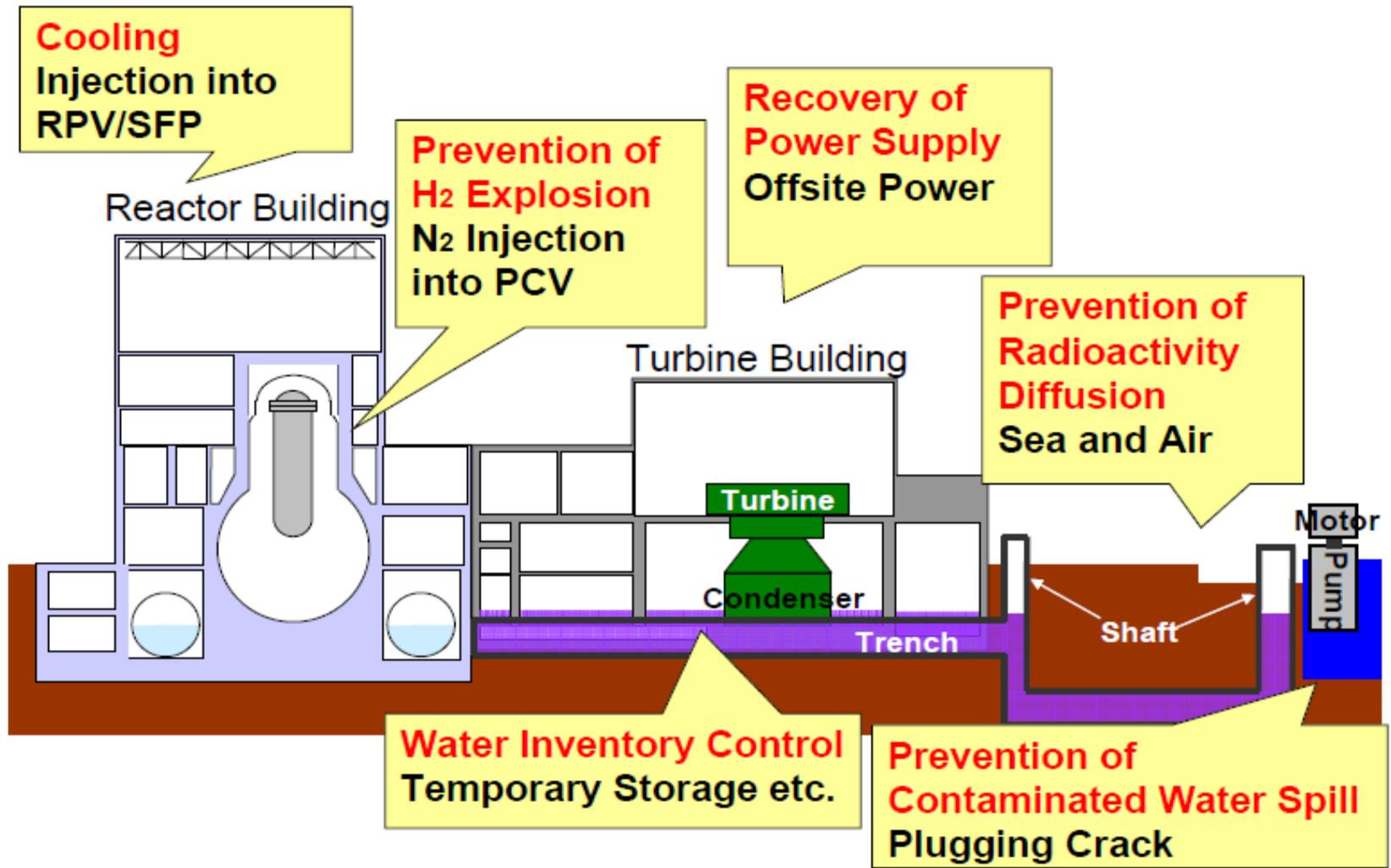
	Fukushima Dai-ichi (assumed amount)		Chernobyl (reference)
	NISA's estimation	NSC's estimation	
I-131	1.3×10^{17}	1.5×10^{17}	1.8×10^{18}
Cs-137 (I-131 eq.)*	6.1×10^{15} (2.4×10^{17})	1.3×10^{16} (5.2×10^{17})	8.5×10^{16} (3.4×10^{17})
Total	3.7×10^{17}	6.7×10^{17}	5.2×10^{18}

1. NISA's estimation based on accident analysis
2. NSC's estimation based on backward calculation of monitoring data

2. 사고 경과 : 비상 대응

- 방사성물질 방출규모에 따라 소개구역 결정
 - 사고로 인한 연간누적선량 20mSv 예상지역 주민 소개
- 시간대별 소개 및 대피
 - 3.11 21:23 3km 이내 주민 소개
 - 3.12 05:54 10km 이내 주민 소개
 - 3.12 18:25 20Km 이내 주민 소개
 - 3.15 11:00 20~30km 옥내 대피
- 구역별 거주 인구
 - 30km내 14만명, 20km내 8만7천명

2. 사고 경과 : 회복 조치



3. 교훈

- 1) 외부사건
- 2) 비상전원계통
- 3) 잔열제거
- 4) 격납시설
- 5) 수소제어
- 6) 중대사고관리계획
- 7) 비상대처방안
- 8) 다수호기 운전
- 9) 사용후핵연료저장조
- 10) 비상대응
- 11) 복구조치

3. 교훈 : 외부사건

- 외부사건 설계기준 강화

- 부지설계기준 초과사건 발생으로 안전계통의 **공통원인 고장** 발생
- 부지설계기준 쓰나미값의 보수성이 역사적 기록에 의해 뒷받침되지 않음 (**Jogan 쓰나미**)
- 지진과 쓰나미 등 **다중 복합적 외부사건**에 대해 원전 설계 및 운전에도 고려 필요
- 기후변화 등에 따른 **가혹한 자연재해** 대해서도 고려 필요

Historical Large Scale Tsunamis in East Japan

	Year Casualty	Magnitude	Height of Tsunami
2011 March 11 East Japan Earthquake	2011	M 9.0 Mw 9.0 (*1)	15 m (*2) at Fukushima Daiichi NPP Site
1960 Chilean Tsunami	1960 142	M 9.5 Mw 9.5	Maximum 6 m
1933 Showa Sanriku Tsunami	1933 3,000	M 8.0 Mw 8.4	28.7 m (*3)
1896 Meiji Sanriku Tsunami	1896 22,000	M 8.5 Mw 8.5	4 m at Erimomisaki, 3 m at Hachinohe, 3.1 m at Obagawa, 8.2 – 21.9 m (*3) at Sanriku Kaigan, 38.2 m (*3) at Ayasato Bay
1611 Keicho Tsunami	1611 >4,783	M 8.1	15 m – 20 m
Jogan Earthquake and Tsunami	896 1,000 drowned	M 8.3~8.6	Recent researches indicate a large scale tsunami occurred at the area including Miyagi and Fukushima. "Jogan tsunami inundated ~3 km far from the past shoreline."

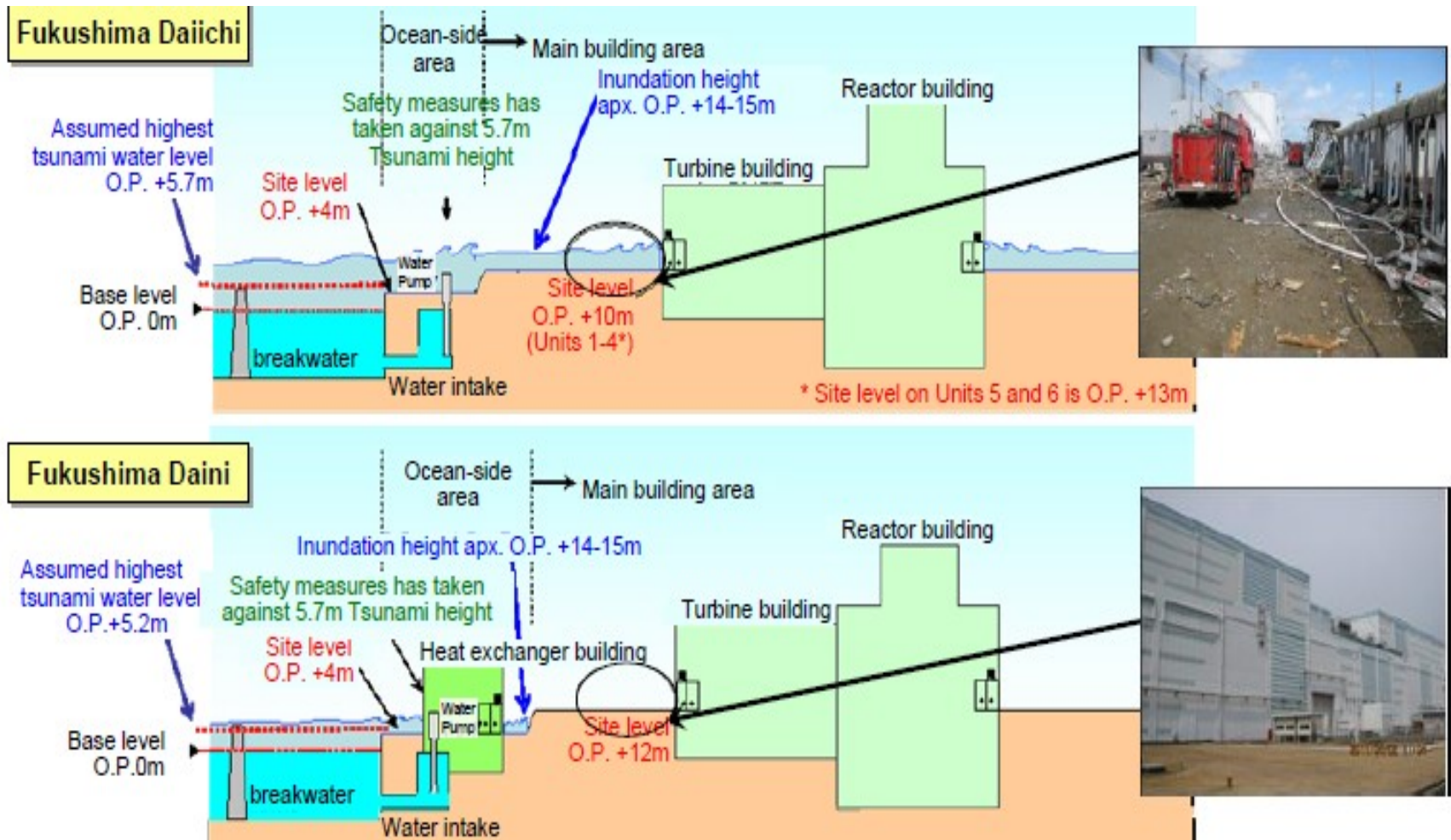
Note(*1): Mw: Moment Magnitude. Note(*2): Highest level of immersed water above sea level.

Note(*3): Height of highest water reached point above sea level

3. 교훈 : 비상전원계통

- 침수 대비 비상전원계통 신뢰성 개선
 - Fukushima Daiichi 원전은 부지가 높아 비상전원이 가용하여 원자로 저온정지 도달
 - Fukushima 부지에서 110km 떨어진 Onagawa 원전도 동일한 지진과 쓰나미를 겪었으나 비상전원계통이 가용하여 원자로 냉각 도달
 - 지진 쓰나미 침수시 비상전원계통의 가용성이 확보되도록 지원계통을 포함한 계통설계 개선 필요

Fukushima 제1, 2 원전 쓰나미 피해 비교



3. 교훈 : 잔열 냉각

- 냉각계통의 성능 개선

- 사건초기 비상공급수의 주입에도 불구하고 시간경과에 따라 제어전원 및 발전소냉각계통의 작동불능으로 원자로 압력 제어 및 냉각 실패
- 해수를 장기적인 냉각수 공급원으로 사용시 소금 석출에 의한 원자로 내부의 열적 화학적 영향, 발전소 기기의 부식 등 평가 필요
- 안정적인 최종열침원 제공이 가능한 장기냉각계통 도입 고려 필요 (피동계통)

3. 교훈 : 격납시설

- 격납시설의 성능 개선

- 격납용기 배기를 위해 Hardened Venting System 이 설계에 고려되었음에도 불구하고 원자로건물로 누출된 수소가 폭발하면서 건물 파손
- 중대사고관리에서 배기 전략이 요구되는 경우에도 중대사고 환경에 견딜 수 있도록 배기계통 설계 필요
- 격납용기 감압 및 열부하 제거에 피동형 격납용기 냉각계통 검토 필요

3. 교훈 : 수소 제어

- 수소제어계통 개선

- 수소 폭발에 의한 원자로건물의 파손으로 현장 접근성을 저하시켜 사고 수습의 어려움 가중
- 질소를 이용한 불활성화 전략을 채택하였으나 노심용융 등 다량의 수소 생성 조건에서는 수소 제어에 한계를 보임
- 격납용기에서의 수소 배출 경로, 내부 공간의 수소 분포, 수소제어설비의 성능 등에 대한 종합 검토 후 필요시 설계 개선

3. 교훈 : 중대사고관리계획

• 중대사고관리계획의 적용성 제고

- PWR (TMI), RBMK (Chernobyl), BWR (Fukushima) 등 다른 유형의 원자로에서 인적 실수, 자연재해 등 각각 다른 이유로 중대사고가 발생
- 후쿠시마 사고에서는 배기(Venting) 등 초기의 비상 운전조치 과정에서 일본정부와 발전소간의 기술적 견해가 달랐던 것으로 보임
- ‘중대사고는 발생한다’는 현실인식 하에 사고시 신속, 정확한 대응을 위해 **운전원의 중대사고관리에 관한 정규훈련프로그램 강화, 실시간 시뮬레이터 운용 필요**
- 중대사고시 **계측계통의 생존성**을 설계에 반영
- 중대사고 관리시 발생하는 **방사성폐기물을 최소화**하고 복구작업에 지장이 적도록 고려

3. 교훈 : 비상대처방안

- 우발적 사건 대비 비상대처방안 확보

- 우발적인 설계기준 초과사건에 의한 전원상실과 열침원 상실로 발전소 안전설비가 무력화되었으나 대체수단(설비, 절차, 요원)이 적시에 제공되지 못함
- 항공기 충돌 등 인위적 사건을 포함한 극한사고상황에서 노심 냉각, 격납, 사용후핵연료 냉각을 위한 비상대처방안 확보 필요 (이동형 전원공급 및 잔열냉각수원의 확보, 수소 제어 및 배기 등 격납용기 건전성 확보 등)
- 중대사고 발생 이후 수십 년간의 복구를 위한 장기 계획 수립

3. 교훈 : 다수호기 운전

- 동일 부지 다수호기에 대한 고려

- 부지 설계기준 초과사건으로 다수호기에서 동시에 사건이 진행되면서 격납용기 배기 및 해수 냉각, 사용후 핵연료저장조 냉각 등 중요 의사결정에 혼란과 지연이 있었던 것으로 보임
- 중대사고관리 의사결정체계에서 발전소 내부 및 규제기관의 역할과 책임을 명백히 하며 준비된 전문성에 입각한 신속 정확한 결정이 이루어질 수 있도록 지휘 체계 정비 필요
- 또한 중대사고관리에서 이웃 발전소와의 공유 또는 연결설비에 대한 영향 고려 필요

3. 교훈 : 사용후핵연료저장조

- 중대사고시 사용후핵연료 관리

- 중대사고 진행시 운전원은 원자로 운전에 대한 관심 집중으로 사용후핵연료저장조 냉각상실에 대해서는 주의가 미치지 못할 수 있음
- 화재 등 사용후핵연료에 대한 위협 요소를 줄이는 한편, 건식저장조 도입 등으로 냉각수조에 보관중인 핵연료 재고량을 최소화할 필요가 있음
- 사용후핵연료 냉각을 중대사고관리계획의 항목으로 포함 필요

3. 교훈 : 비상 대응

- 소개/대피의 실효성

- 전원완전상실(SBO)시에는 노심손상 및 원자로 파손 까지 사건이 신속히 진전 (후쿠시마원전의 경우 초기 사건 발생후 1호기는 23시간, 2호기는 16시간, 3호기는 30시간 만에 수소폭발)
- 사건 진행에 따라 기준에 따른 소개/대피 구역을 설정 하는데 있어 부지 주변 인구 분포 및 도시환경을 고려 할 경우 실제 적용에 난관/혼란 예상
- 격납시설의 성능기준을 강화하여 어떠한 경우에서도 소개/대피가 필요없거나 최소한의 구역에만 적용될 수 있도록 고려 (최신 유럽기준 참조)

3. 교훈 : 복구조치

- 장기적 복구조치

- 발전소냉각계통이 정상화되지 않아 저온정지 안정화에 어려움 지속
- 원자로 상태에 관한 정보, 필수 계측기와 기기 운전, 고방사선에 의한 접근성 제한으로 복구작업 지연
- 사고경위, 노심용융물 재배치, 수소 생성, 원자로 용기 손상 등 중대사고 영향에 대한 정보 미흡으로 복구계획 수립에 어려움
- 중대사고관리계획에 장기적인 노심용융물 냉각전략을 설정하고 반영

4. 과제 : 단계별 접근

- 가동 원전

- 중대사고 예방조치와 함께 **실제적인 사고관리 기술과 위해도 평가 및 완화 기술**을 개발/적용 (설비보완 포함)

- 신형 원전

- 중대사고로의 진전을 방지하는 **피동안전설비의 개발, 적용 및 유효성 평가**

- 미래 원전

- 고유 설계 특성에 의해 **원천적으로 중대사고 발생 가능성을 배제**하여 안전성 확보

4. 과제 : 기술기반 조성

- 선진국 중심으로 방대한 연구 수행 중이나
 - 증기 폭발 등 일부 분야 외 **국내 원천기술 확보 미흡**
 - 열수력-화학-재료-방사선-초고온 등 다분야 기술 필요/실증 실험이 어려움
 - 투자 대비 성과를 위해서 **전략적/선택적 접근 필요**
 - 현상의 불확실성이 커서 연구 결과 적용이 어려움
 - 불확실성 저감과 함께 중대사고관리 전략/중대사고 대처 설비 개발 등 **목표 지향적인 연구 필요**
-
- 핵심 분야에 대한 원천기술 개발 노력
 - **고유의 분석수단** 개발 등 국제 경쟁력 확보
 - 중대사고 정보의 원활한 소통
 - 정보의 **종합관리**와 정기적인 **정보교환회의** 개최

4. 과제 : 남는 질문들

- 국내 원전 중대사고 예방 대책은 충분한가 ?
- 원전 안전에 대한 대중 우려에 어떻게 대응할 것인가 ?
- 후쿠시마 이후 국제 원자력 안전규범은 어떻게 될 것인가 ?
- 원자력 안전에 대한 사업자와 규제자의 역할과 책임은 무엇인가 ?

5. 맺음말

- 후쿠시마 원전의 중대사고는 지진과 연이은 쓰나미로 인한 발전소 정전과 냉각능력 상실로 발생
- 사고 진전에 따른 노심용융, 방사성물질 방출, 원자로 및 격납용기 손상의 원인과 정도를 정확히 알기 위해서는 사고 초기의 운전원 행위와 발전소 거동에 대해 상세한 추가 정보가 필요
- 국내 원전에 대해서 사고 예방 및 완화 관련 가능한 대응조치를 취하는 한편 국제적인 컨센서스 형성과정에 적극 참여 및 후속조치 대비 필요
- 중대사고 완화설비의 개발에 필요한 기술적 기반을 강화하고, 실제적인 중대사고 대처기술을 개발하기 위해서는 대폭적인 투자가 필요

**안전한 원자력
푸른 미래**

감사합니다