



福島第一原子力発電所事故

名古屋大学 工学研究科

山本章夫



現在の福島第一の状況

- 「Inside福島第一」で検索
 - <https://www.tepco.co.jp/insidefukushimadaichi/>



概要

- 原子力安全確保の基礎
- 福島第一原子力発電所の概要
- 地震、津波の概要
- 地震による被害状況
- 津波による被害状況
- 事故で明らかになった課題、教訓とその対応
- 事故調査報告書



原子力安全確保の基礎



放射能、放射性物質と崩壊熱

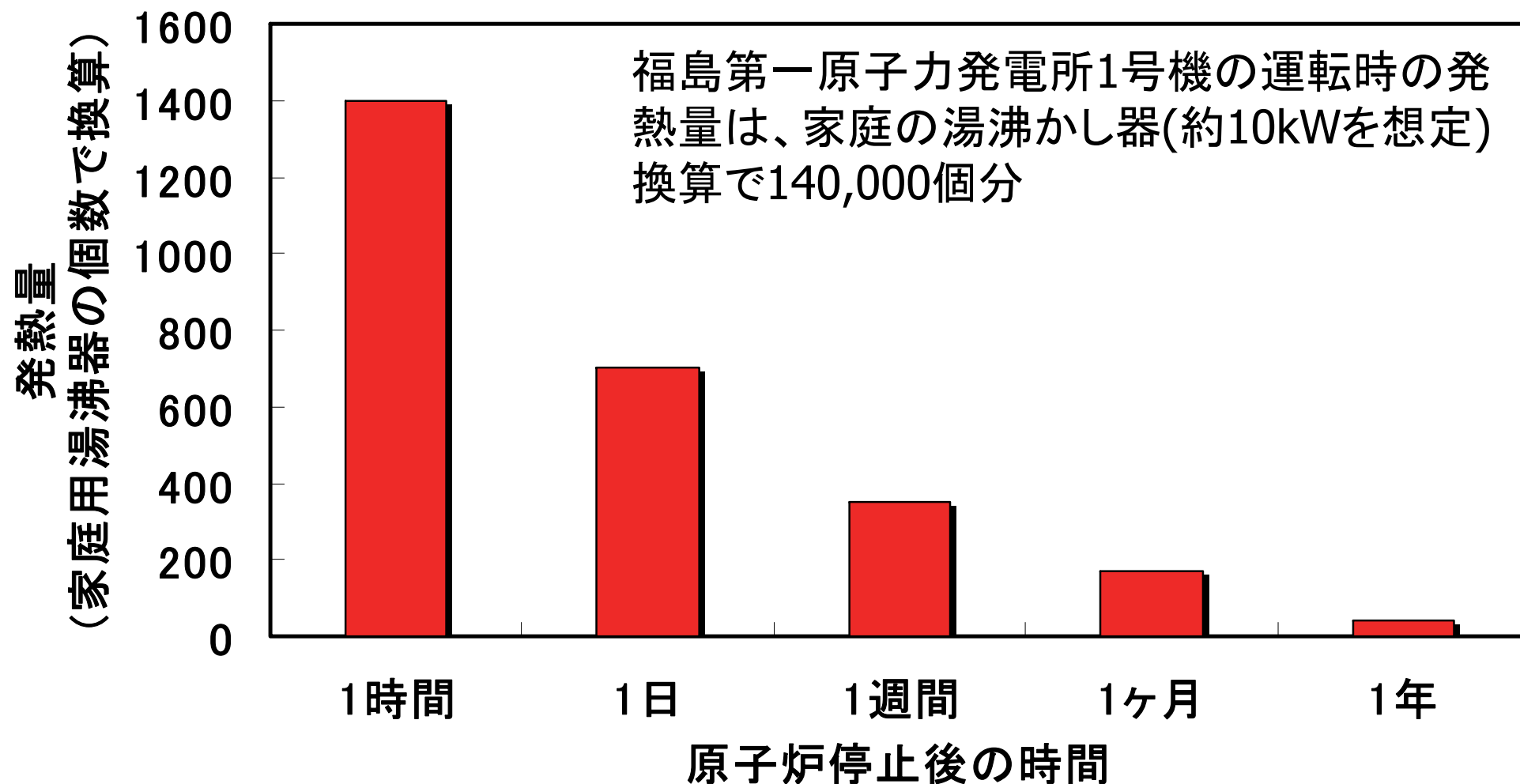
- 核分裂でできた破片の多くは、不安定で、時間とともに変化(崩壊/壊変)する性質を持つ。
- この際に、強い放射線を出す性質を持っている。
(放射線を出す能力、**放射能**)
- 放射線を出す 物質を**放射性物質**と呼ぶ。
- また、変化(崩壊/壊変)する際に、放出された放射線が周囲の物質に吸収されて、熱を発生する。
(**崩壊熱**)



原子炉をなぜ冷やす必要があるか

- 原子炉は、以下の二つで熱を発生する。
 - ウランの核分裂
 - 大量の熱を発生する
 - 核分裂破片の変化(崩壊)
 - 核分裂に比べると少ないが、安全上重要
- 異常時には、中性子を吸収する制御棒が原子炉に挿入され、核分裂は停止する。
- 一方、核分裂で発生した破片から発生する放射線が周りの物質に吸収される際に生じる崩壊熱は、時間とともに少なくなるが、零にはならない。

炉心で発生する崩壊熱(1F1号機)





原子力発電プラントにおける安全確保 の基本的考え方

- 原子力安全の究極の目的は人と環境を放射線リスクから守ること
- そのためには、原子炉内に存在する放射性物質を「閉じ込める」必要がある。
- 異常状態において、放射性物質を「閉じ込める」ためには核分裂の連鎖反応を「止め」熱の発生を停止する必要がある。
- 核分裂停止後も、大量の崩壊熱が生じるため、これを「冷やす」必要がある。
- すなわち、異常状態においては核分裂を「止める」、崩壊熱を「冷やす」、これらにより放射性物質を「閉じ込める」



安全機能

原子力安全の目的: 人と環境を放射線リスクから守る

止める

- 核分裂の急激な増加防止
- 核分裂の停止
- 核分裂停止状態の維持

冷やす

- 崩壊熱除去
- 燃料冠水維持
- 事故時の十分な冷却維持
- ヒートシンクへの熱の伝達

閉じ込める

- 燃料被覆管健全性維持
- 原子炉圧力容器健全性維持
- 格納容器健全性維持



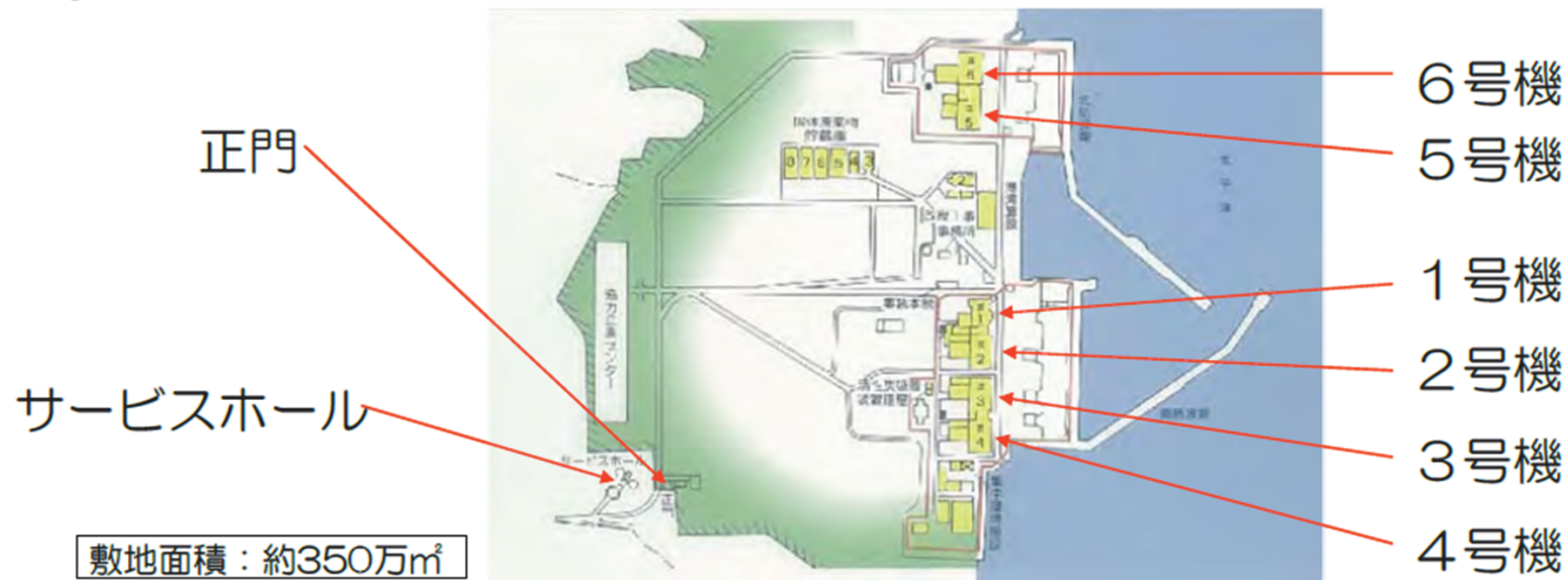
放射性物質を閉じ込める多重障壁

- 障壁
 - 放射性物質を閉じ込めるための物理的な「壁」を形成するもの。
- ペレット
- 被覆管
- 圧力容器
- 格納容器
- (原子炉建屋)
 - 括弧をつけているのは、原子炉建屋には気密性の要求をしていないため。しかし、放射性物質放出の障壁としての効果は一定程度期待できる。



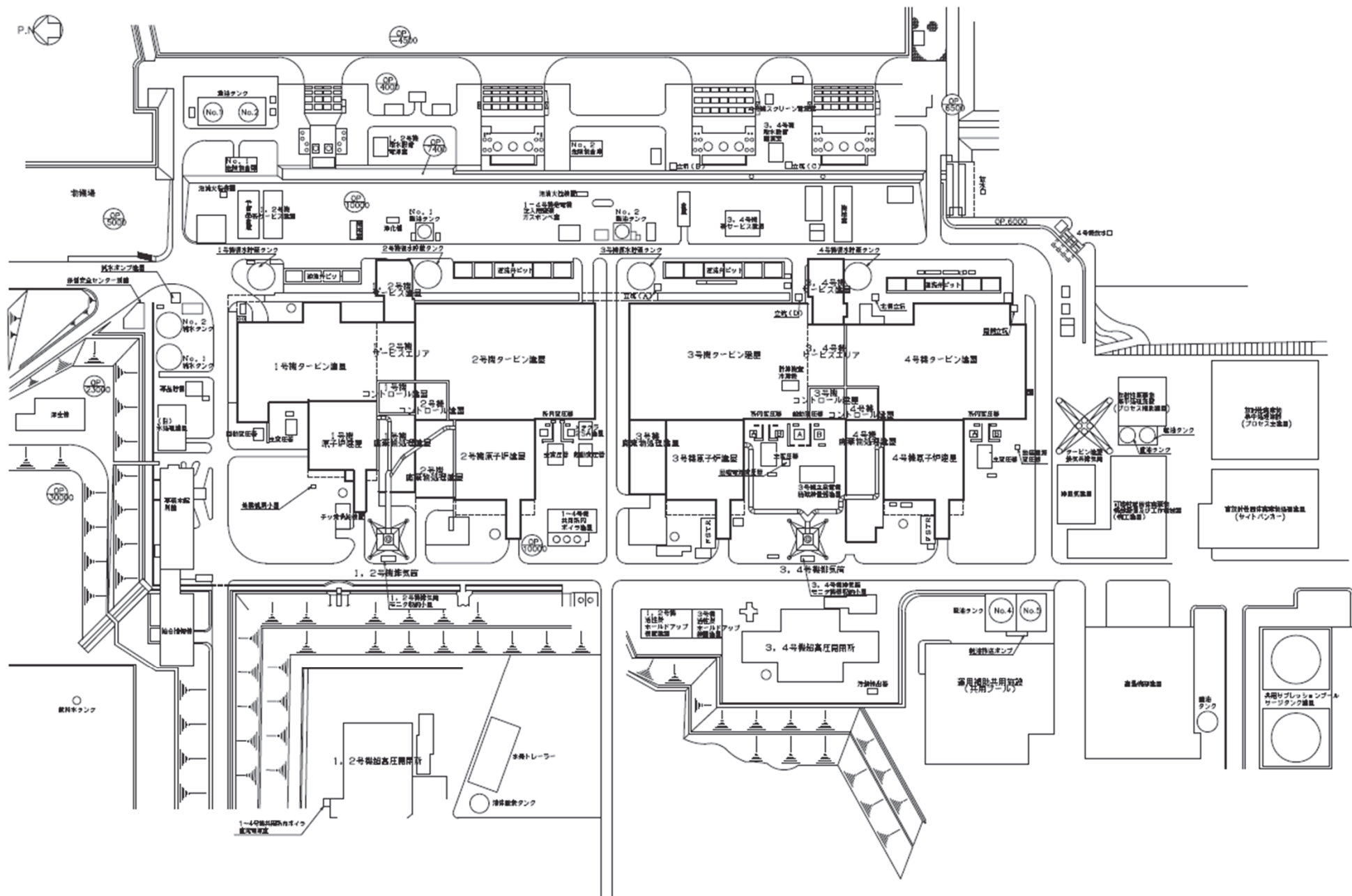
福島第一原子力発電所の概要

福島第一原子力発電所の概要

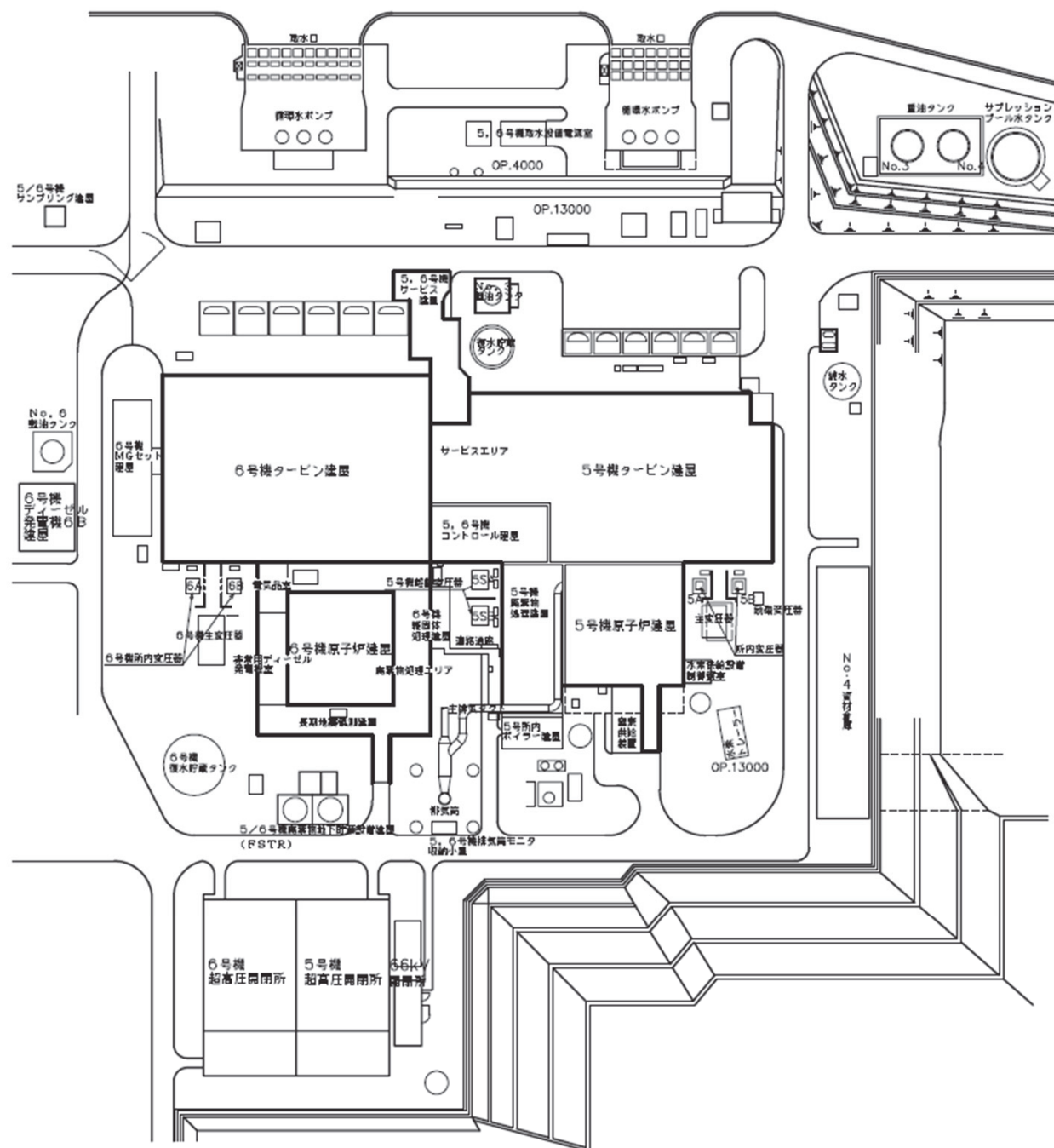


所在地	号 機	運転開始	型 式	出力(万kW)	主契約者	地震発生時の状況	
大熊町	1号機	S46.3	BWR3	46.0	GE	定期 検査中	定格電気出力運転中
	2号機	S49.7	BWR4	78.4	GE/東芝		定格熱出力運転中
	3号機	S51.3	BWR4	78.4	東芝		
	4号機	S53.10	BWR4	78.4	日立	定期 検査中	全燃料取出、プールゲート閉 (シュラウド交換作業中)
双葉町	5号機	S53.4	BWR4	78.4	東芝		原子炉圧力容器上蓋閉
	6号機	S54.10	BWR5	110	GE/東芝		

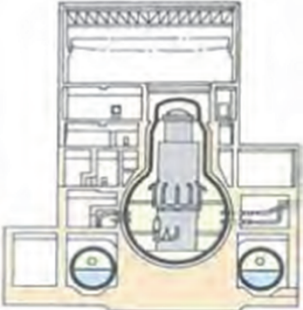
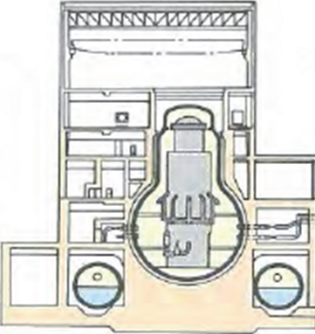
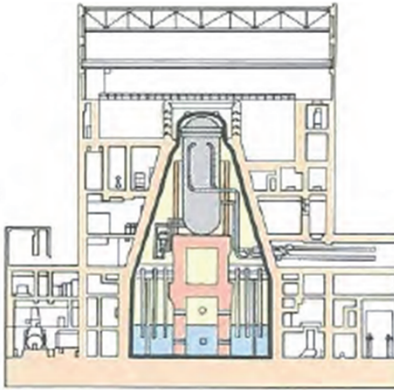
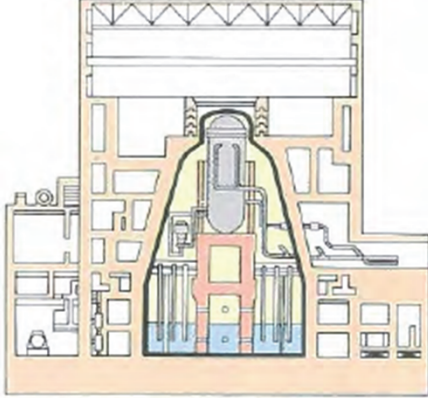
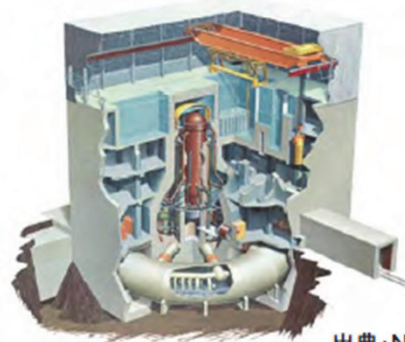


福島第一原子力発電所1号機から4号機 配置図



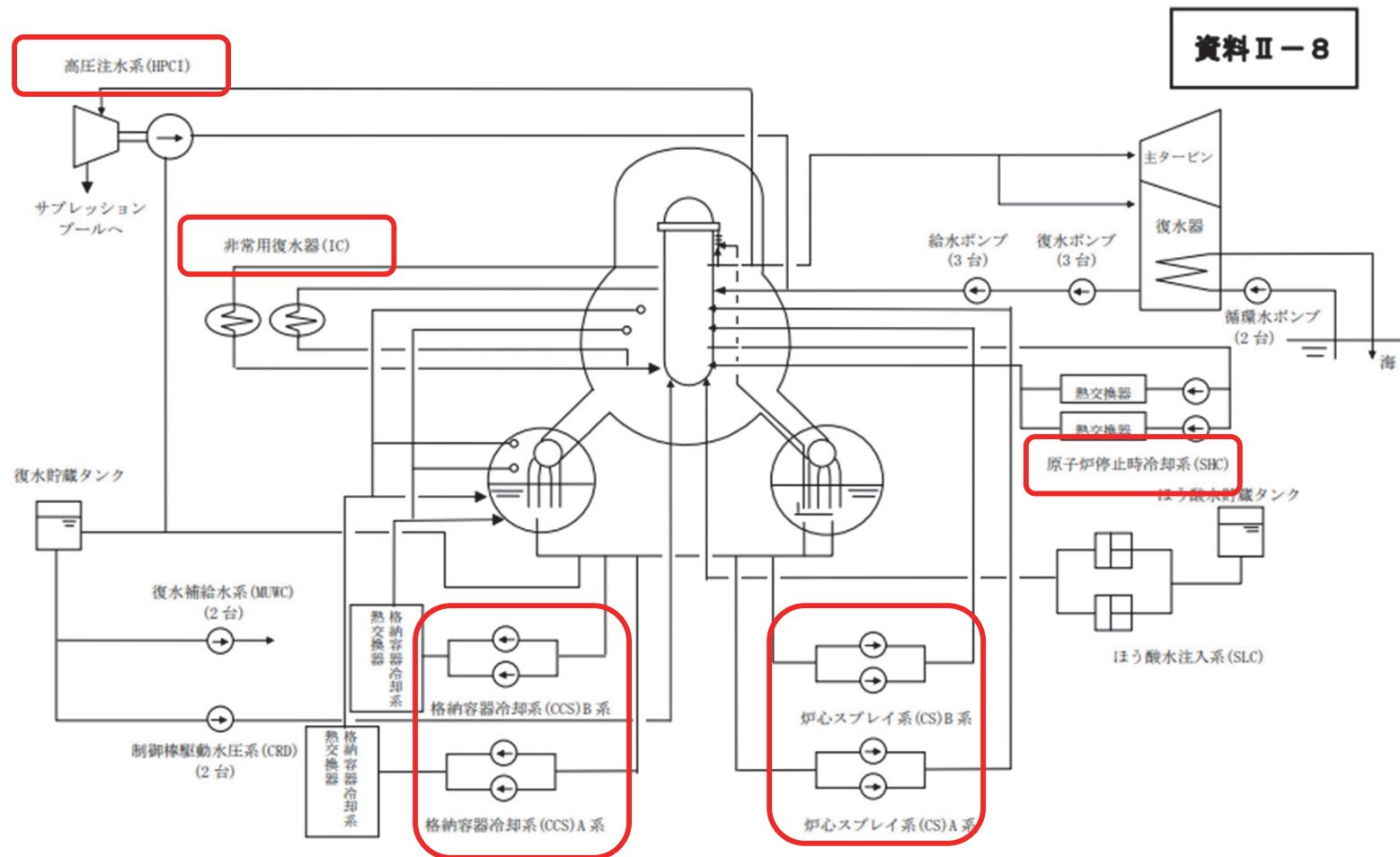
福島第一原子力発電所5号機及び6号機 配置図



福島第一、第二の格納容器

型式	BWR3	BWR4	BWR5	BWR5
プラント	福島第一1号機	福島第一2～5号機	福島第一6号機 福島第二1号機	福島第二2～4号機
電気出力	46万kW	78.4万kW	110万kW	110万kW
格納容器 形状	マークⅠ型 (フラスコ型)	マークⅠ型 (フラスコ型)	マークⅡ型 (円すい型)	マークⅡ改良型 (つりがね型)
				
	 出典: NRCホームページ		 福島第二1号機	 福島第二3号機

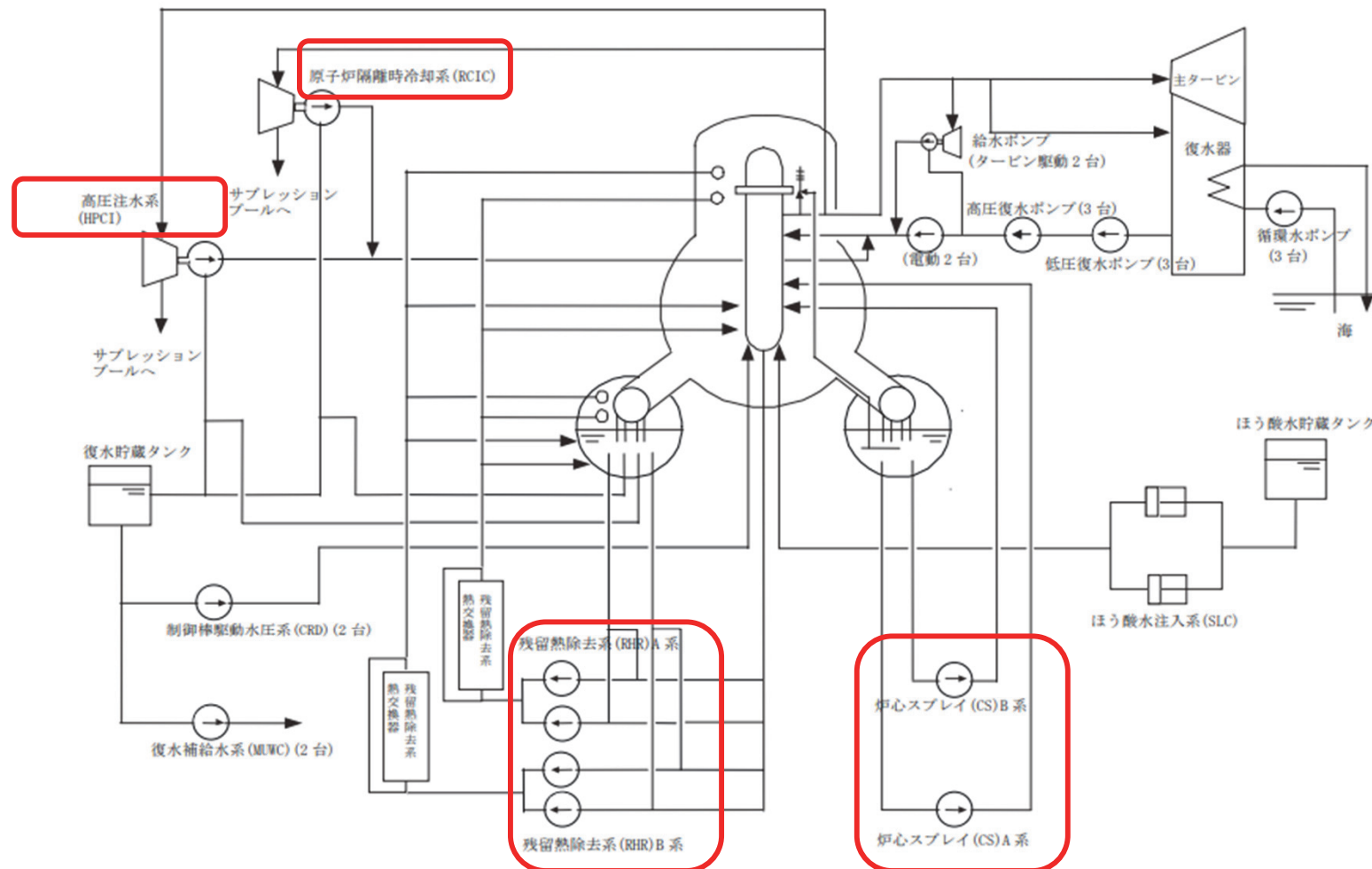
1F1号機の注水系設備



福島第一原子力発電所1号炉の設備構成の概要

(出典)東京電力「福島第一原子力発電所のアクシデントマネジメント整備報告書」(平成14年5月)

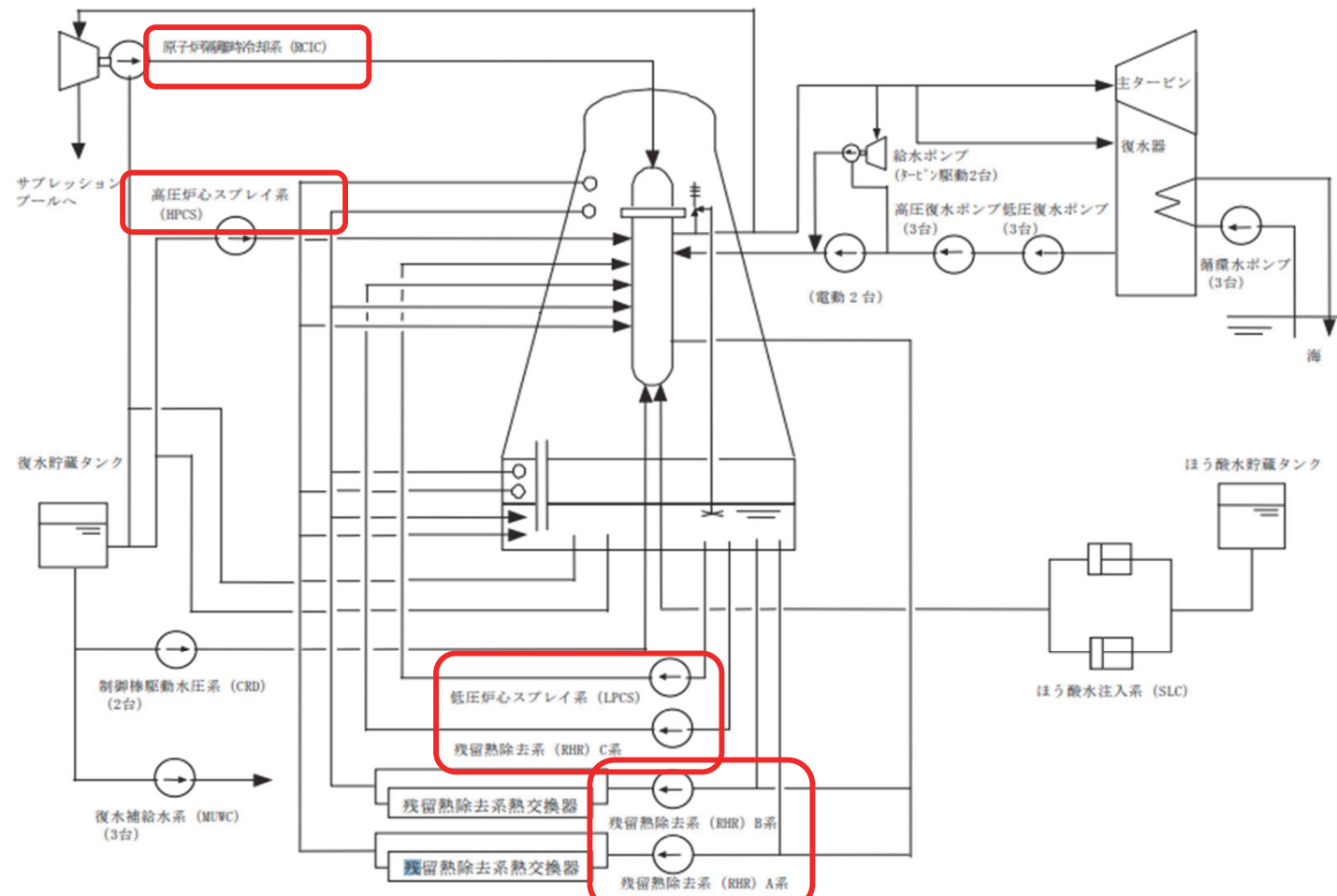
1F2～5号機の注水系設備



福島第一原子力発電所 2～5号炉の設備構成の概要

(出典)東京電力「福島第一原子力発電所のアクシデントマネジメント整備報告書」(平成 14 年 5 月)

1F6号機の注水系設備



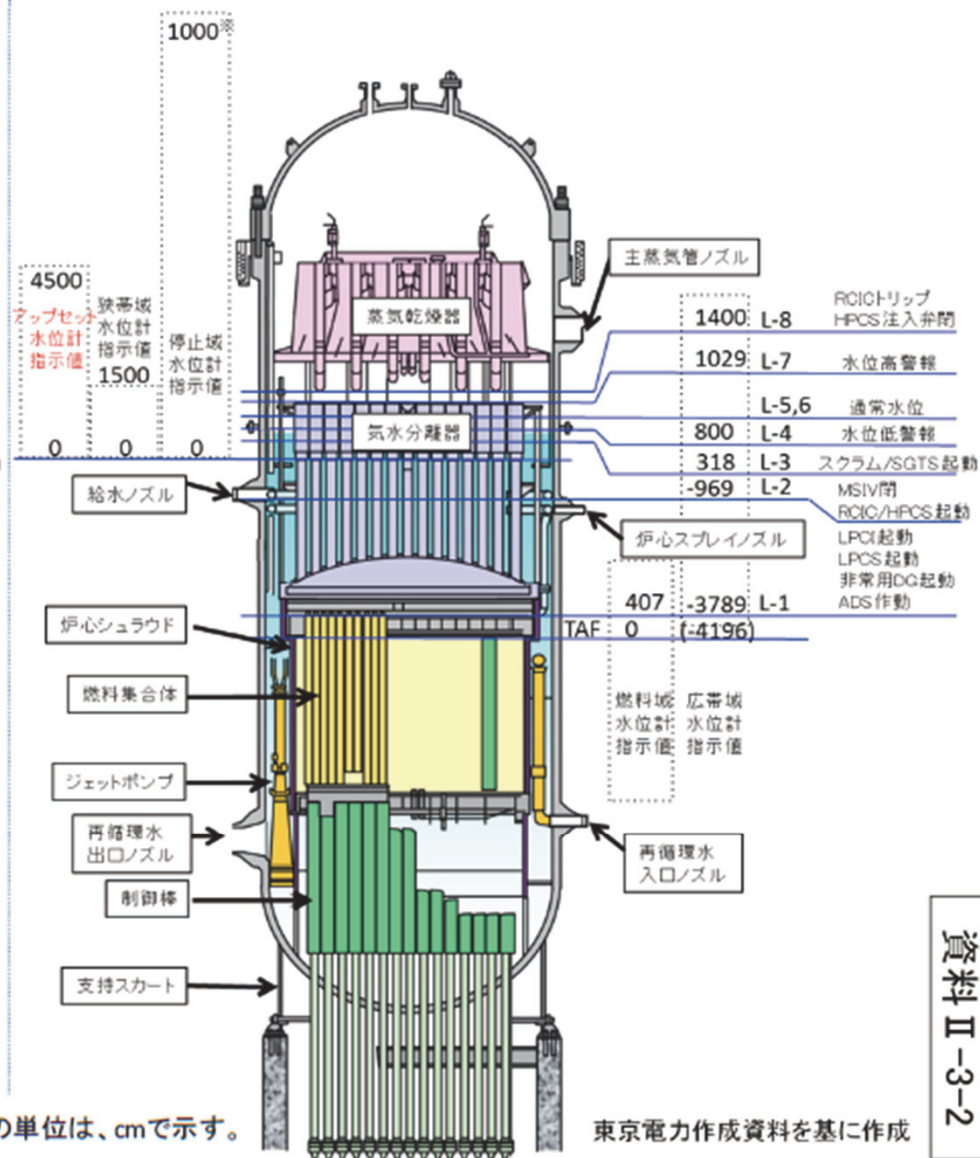
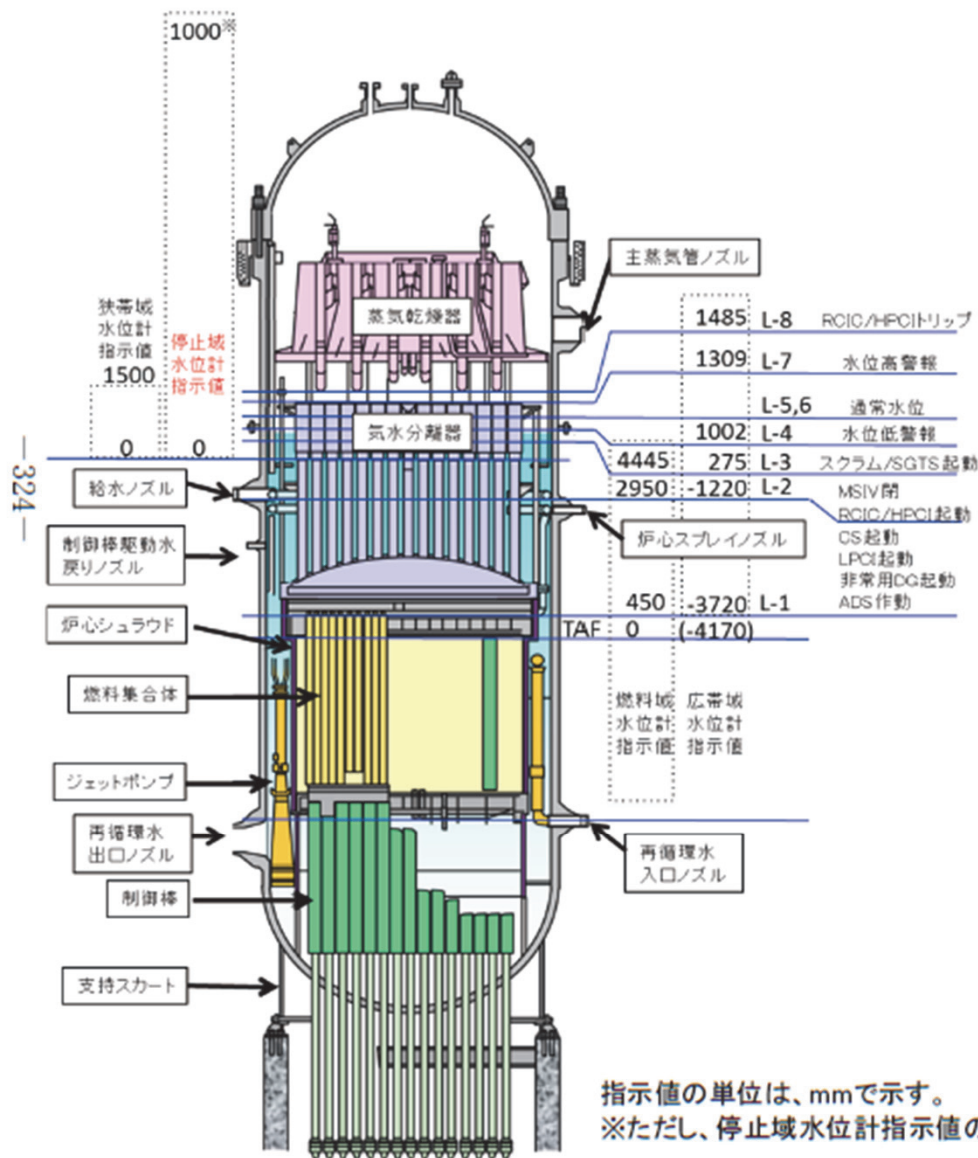
福島第一原子力発電所6号炉の設備構成の概要

(出典)東京電力「福島第一原子力発電所のアクシデントマネジメント整備報告書」(平成14年5月)

福島第一原子力発電所5号機及び6号機の原子炉水位図

5号機

6号機



資料Ⅱ-3-2



地震と津波の概要

地震の概要

発震日時 ; 2011年3月11日(金)午後2時46分

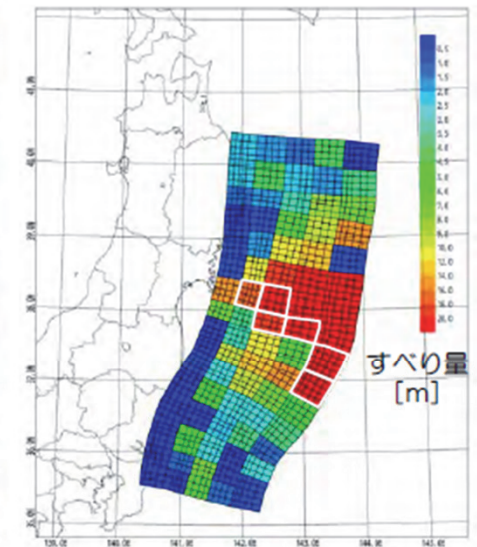
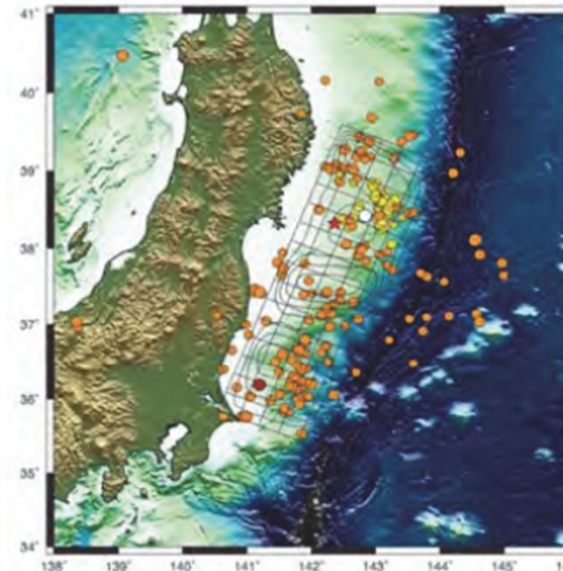
発生場所 ; 三陸沖(北緯38度06.2分、東経142度51.6分)、震源深さ24km

規模 ; マグニチュード9.0

各地の震度; 震度7: 宮城県栗原市
 震度6強 福島県楢葉町、富岡町、大熊町、双葉町
 震度6弱 宮城県石巻市、女川町、茨城県東海村
 震度5弱 新潟県刈羽村
 震度4 青森県六ヶ所村、東通村、むつ市、大間町、新潟県柏崎市



今回の地震の震度分布

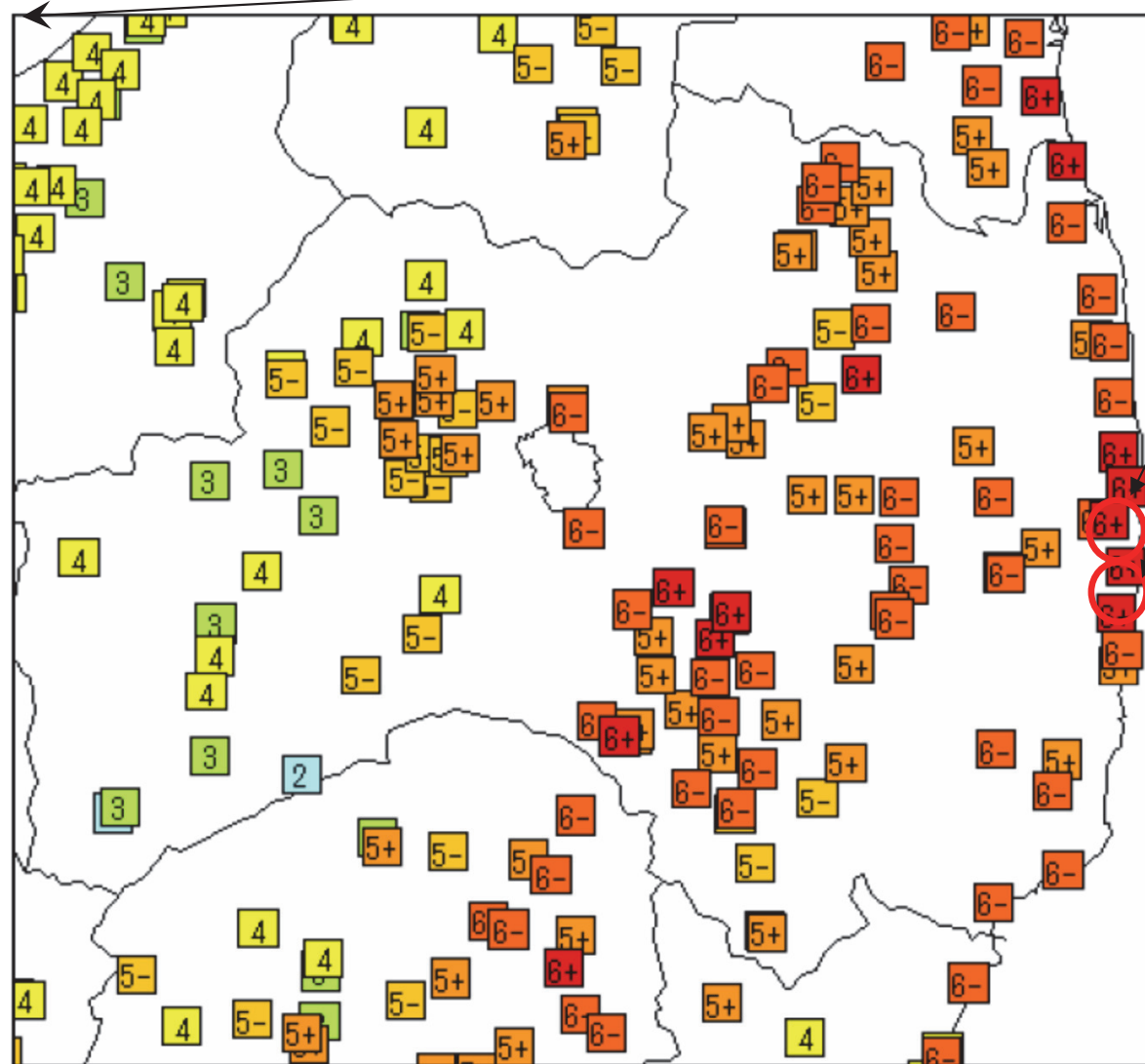


今回の津波の波源
(東京電力作成)

今回の地震・津波は観測史上4番目の世界有数の規模

地震の概要

福島県周辺

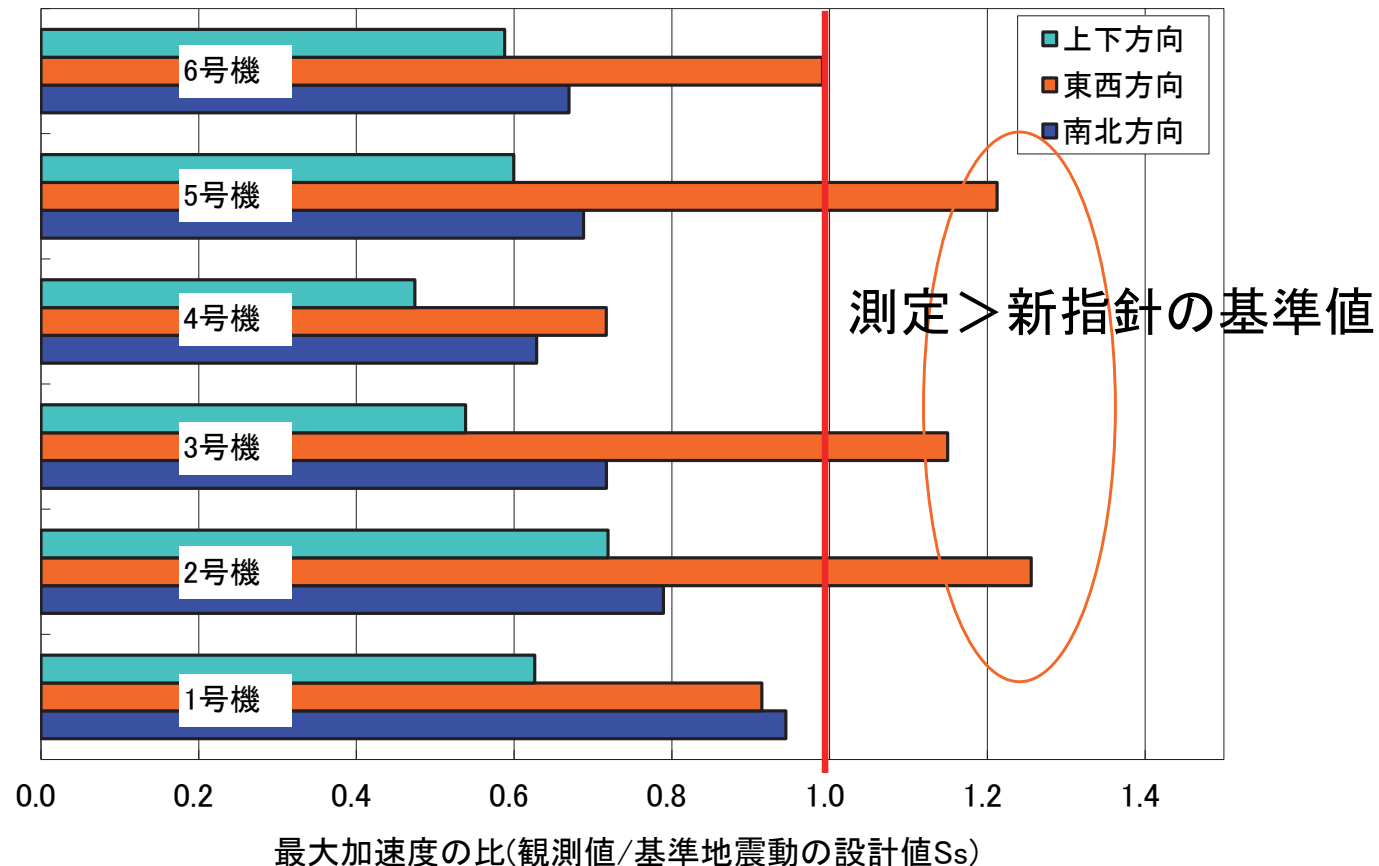


福島第一原子力発電所
福島第二原子力発電所

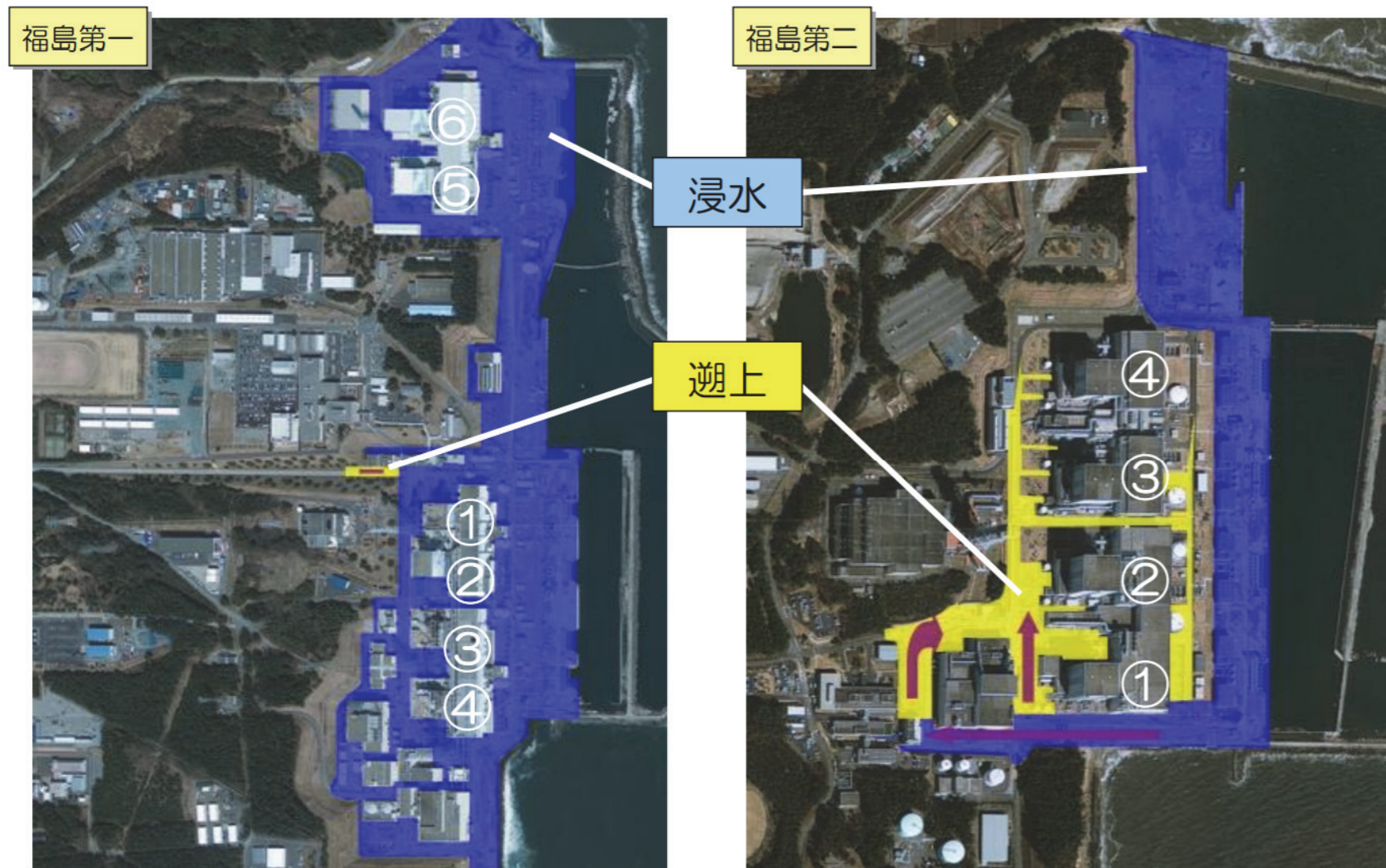
凡 例	
7	震度 7
6+	震度 6 強
6-	震度 6 弱
5+	震度 5 強
5-	震度 5 弱
4	震度 4
3	震度 3
2	震度 2
1	震度 1

地震動(課題)

- 福島第一、女川、東海第二原子力発電所において、観測された地震動(加速度)が新耐震指針で基準となる地震動(加速度)を越えた。



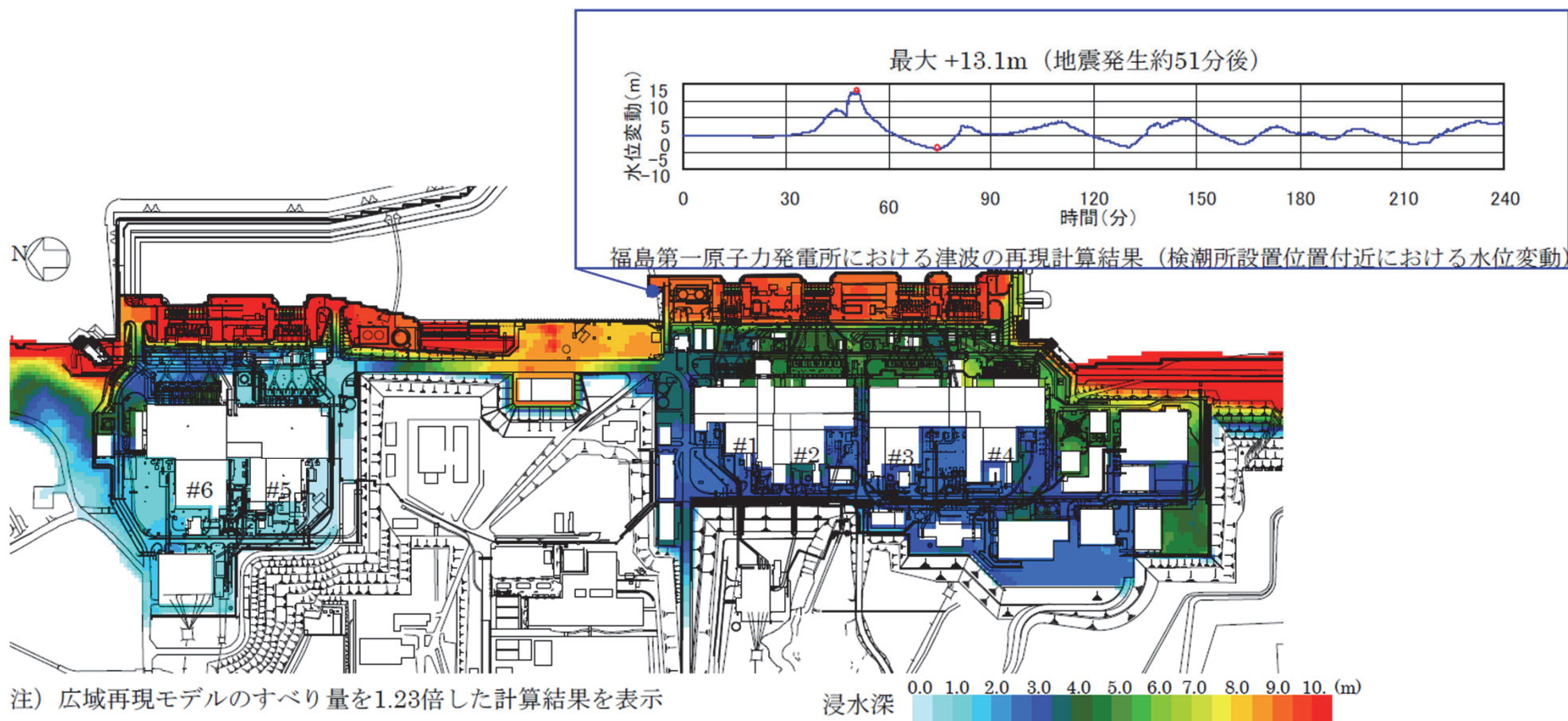
福島第一、第二における津波浸水



© GeoEye

津波の影響(福島第一)

福島第一原子力発電所における津波の再現計算結果(浸水深及び浸水域)



津波の影響(福島第一)

福島第一原子力発電所の屋外浸水状況 (3月11日)

< 4号機南側集中環境施設プロセス主建屋付近：敷地高O. P. +10m、重油タンク高さ約5.5m >



浸水直後：0秒



6秒後



46秒後



56秒後



74秒後



98秒後

注) 経過時間はカメラの内部時計による (撮影時刻は、誤差があるため表記していない)。

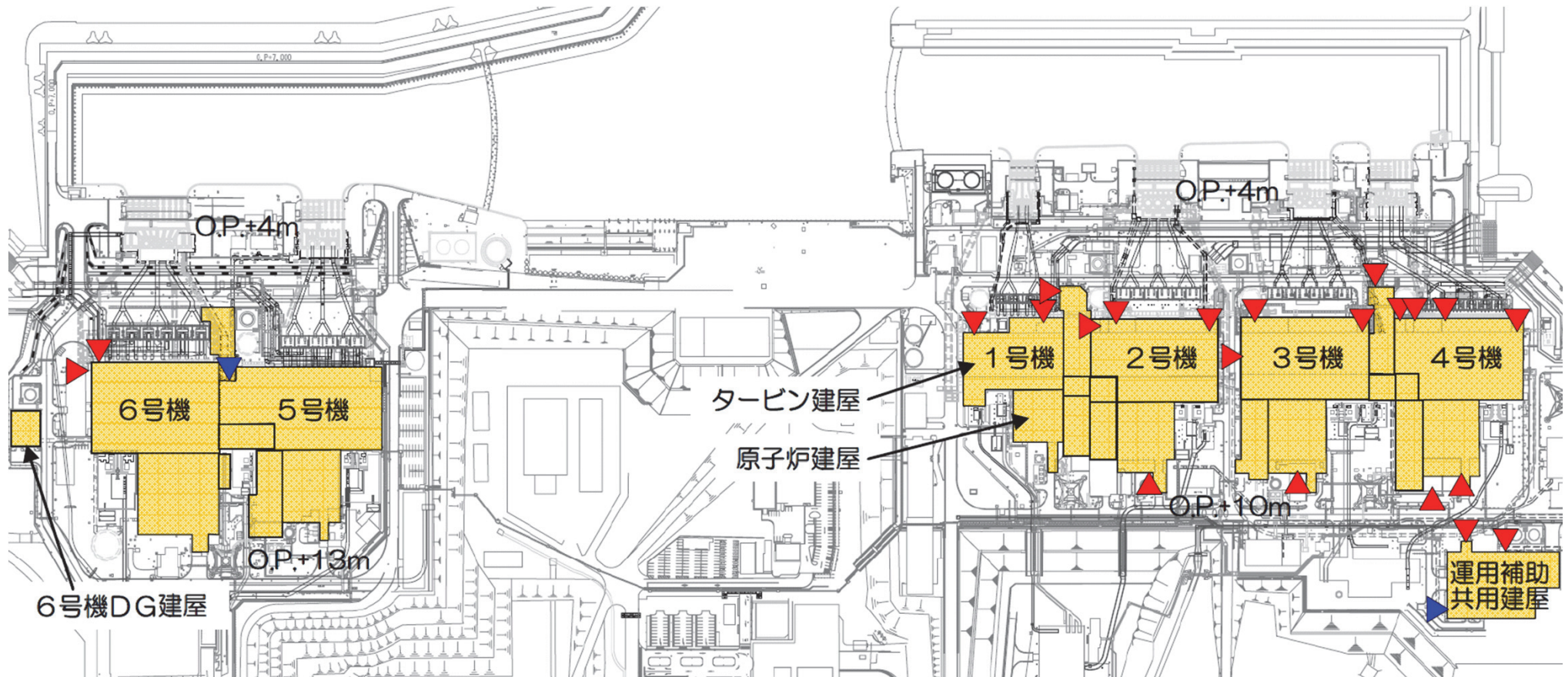
津波の影響(福島第一)

福島第一原子力発電所に襲来した津波の状況
<福島第一原子力発電所の5、6号機海沿い(固体廃棄物貯蔵所東側)>



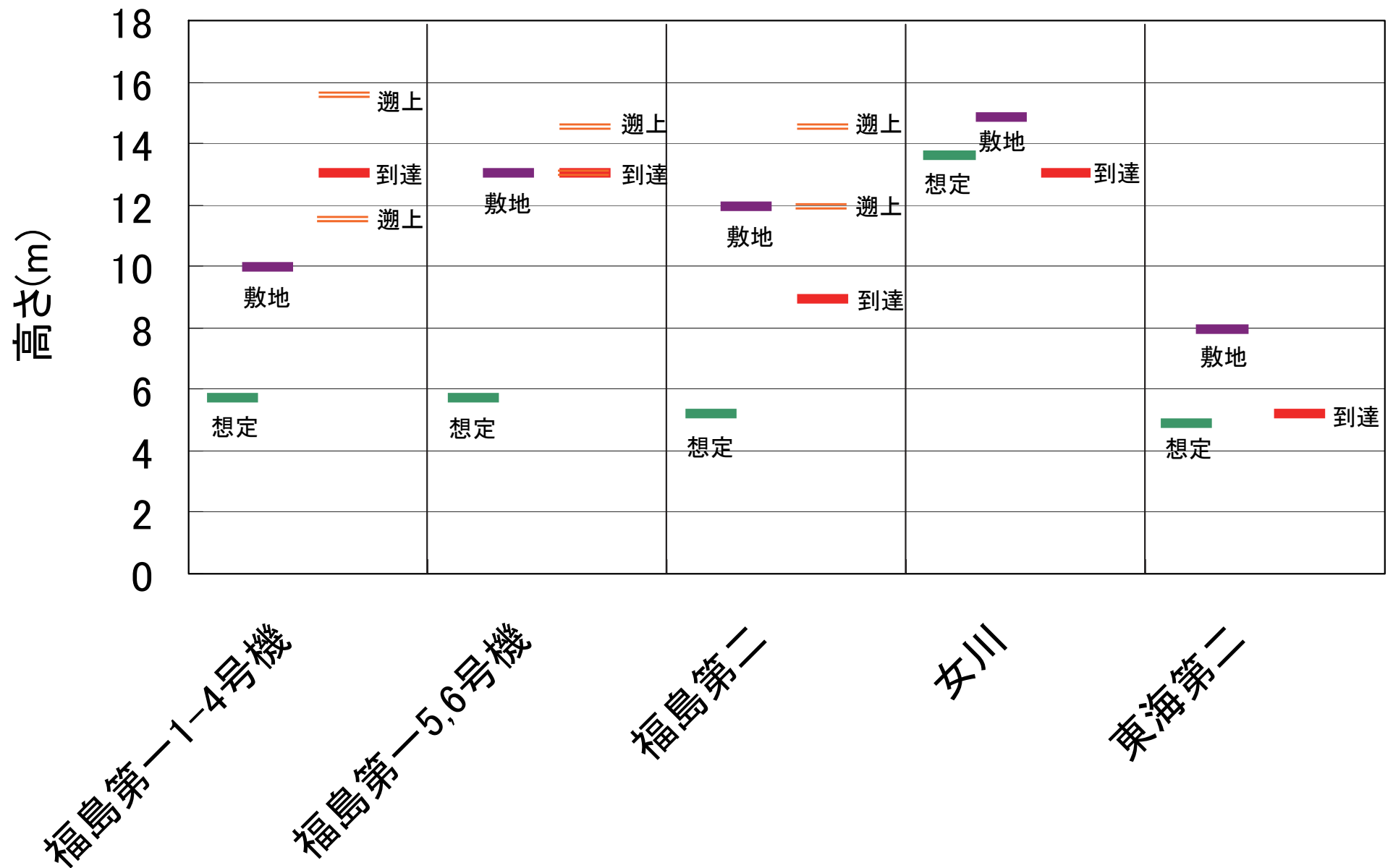
添付3-9

想定される浸水経路

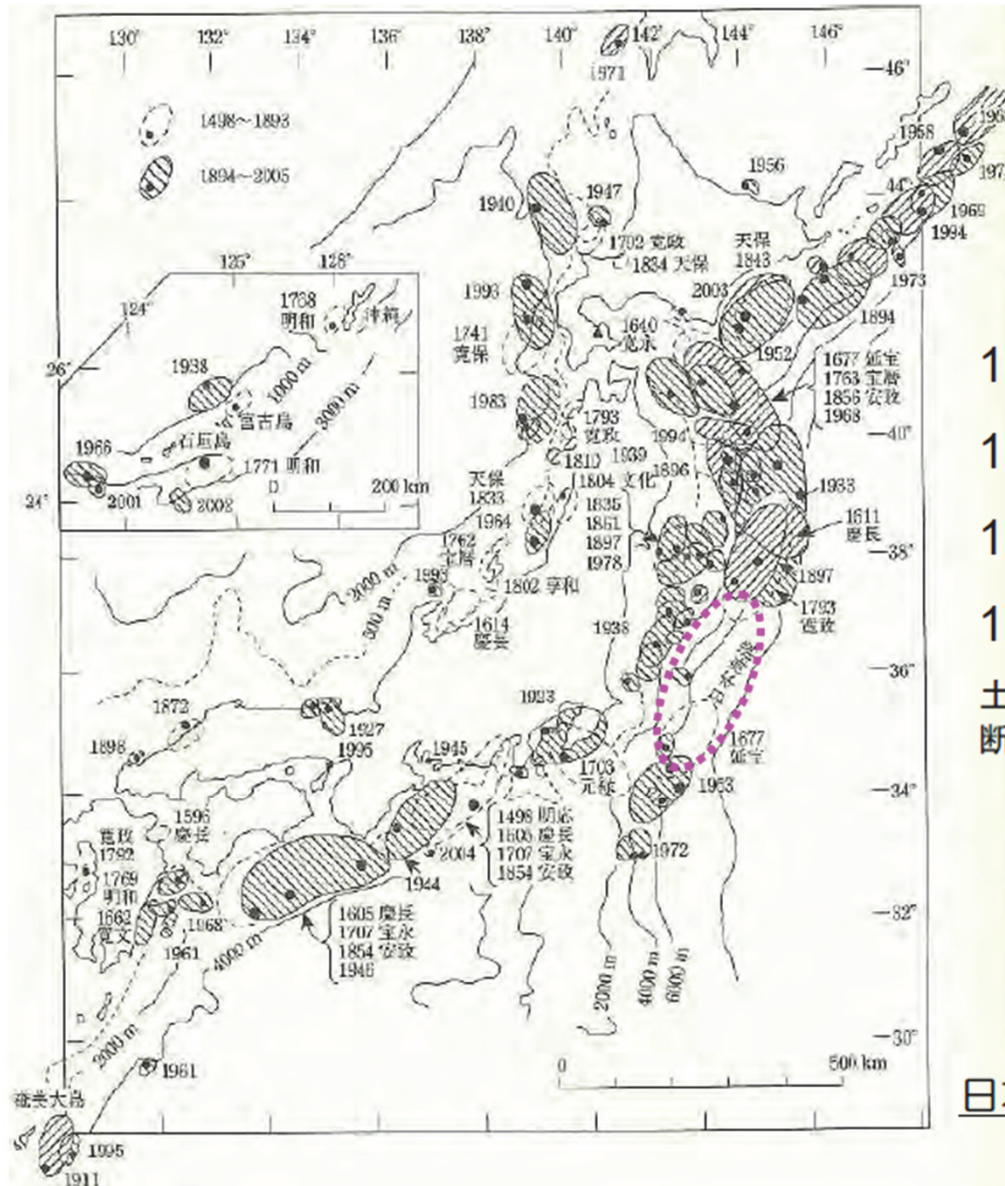


- ▼ : 主要建屋内への浸水経路になったと考えられる地上の開口
- ▼ : 主要建屋内への浸水経路になったと考えられる地下のトレンチ・ダクトへ接続する開口

津波高さの比較



東北地方で発生した主要な津波



869年 貞観津波 (M8.4程度)

1611年 慶長三陸津波 Mw8.6

1677年 延宝房総沖津波 Mw8.2

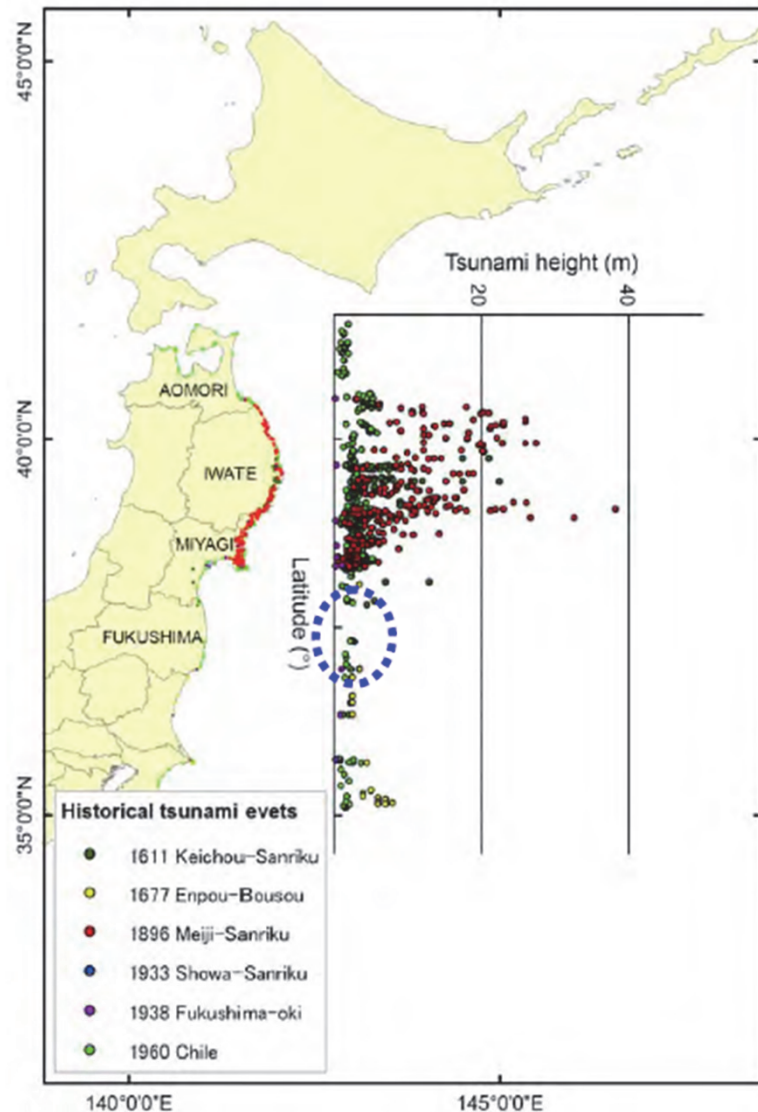
1896年 明治三陸津波 Mw8.3

1933年 昭和三陸津波 Mw7.9

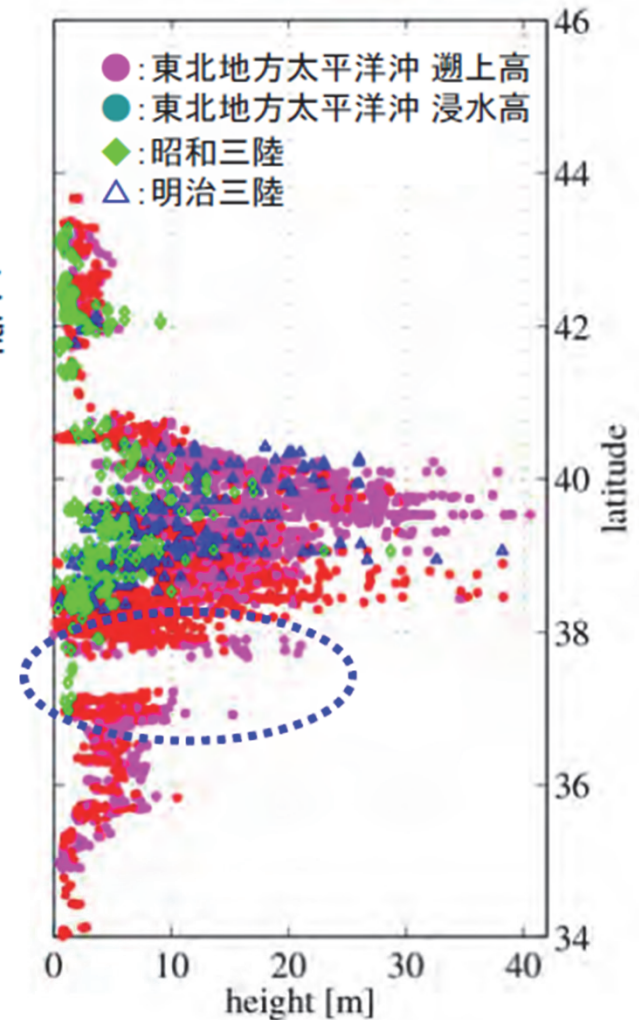
土木学会(2002)既往津波の痕跡高を説明できる
断層モデルにおけるMw(モーメントマグニチュード)

日本近海において想定される津波波源域の分布

東北地方の津波の痕跡



東北地方太平洋沖津波と
明治三陸津波、昭和三陸
津波を比較



江戸時代以降の主な津波痕跡高記録の分布

東北地方沿岸における津波痕跡高の分布



地震による被害

発電所の設備への影響(確認方法)

- 津波が襲来するまでの圧力容器、格納容器内の温度や圧力変化、蒸気流量の確認
 - 津波が襲来するまでは、各種のデータがとられており、これらのデータは公開されている。
- 今回観測された地震動を用いて、設備や建物が機能を保てたかどうか、計算により確認
- 地震動が基準値を超えた福島第一発電所5号機において、内部の設備を確認
- 1号機のアイソレーションコンデンサ(IC)近辺の現場確認、など



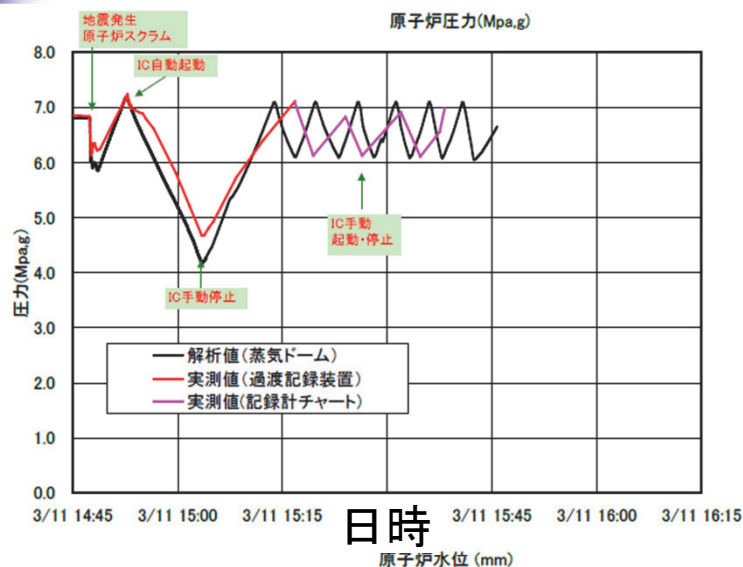


地震による設備被害の評価

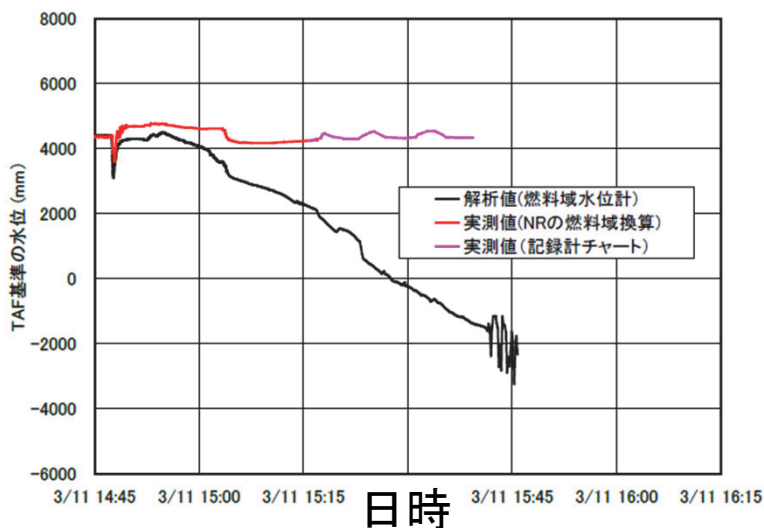
国会	事故の直接的原因を津波のみに限定することには疑念。安全上重要な機器の地震による損傷はないとは確定的には言えない。
政府	地震発生から津波到達までの機器の動作状況に特段の異常は認められず、冷却機能を損なうような損傷はなかったと考えられる。
民間	地震発生から電源喪失までのプラントパラメータから推察して破損は考えにくい。
東電	安全上重要な機器は、地震時および地震後の対応を適切に実施できる状態にあった。

地震による設備被害の評価

原子炉圧力

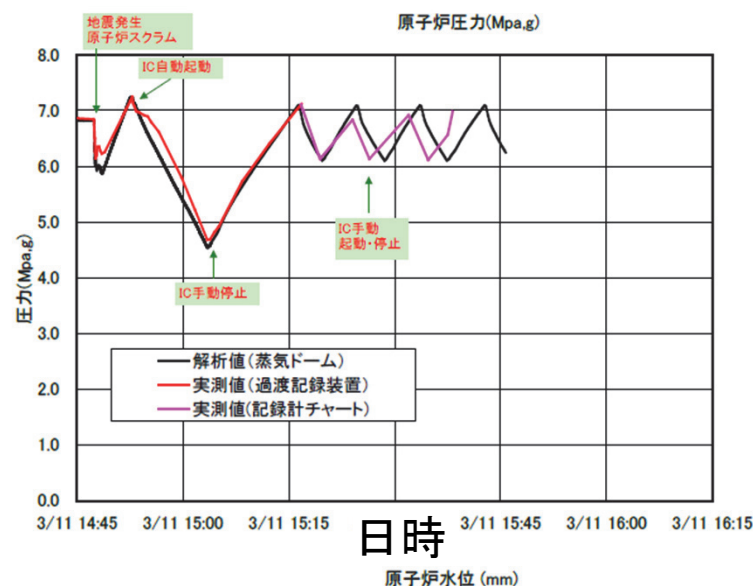


原子炉水位

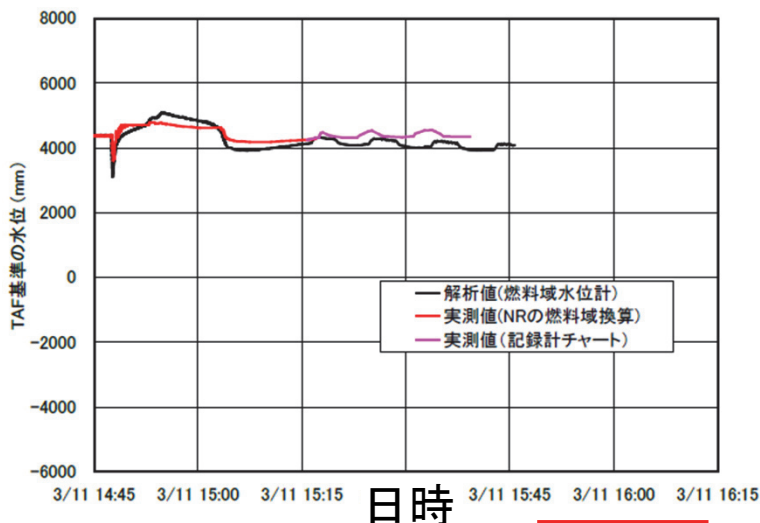


A-3 漏えい面積 3cm^2

原子炉圧力

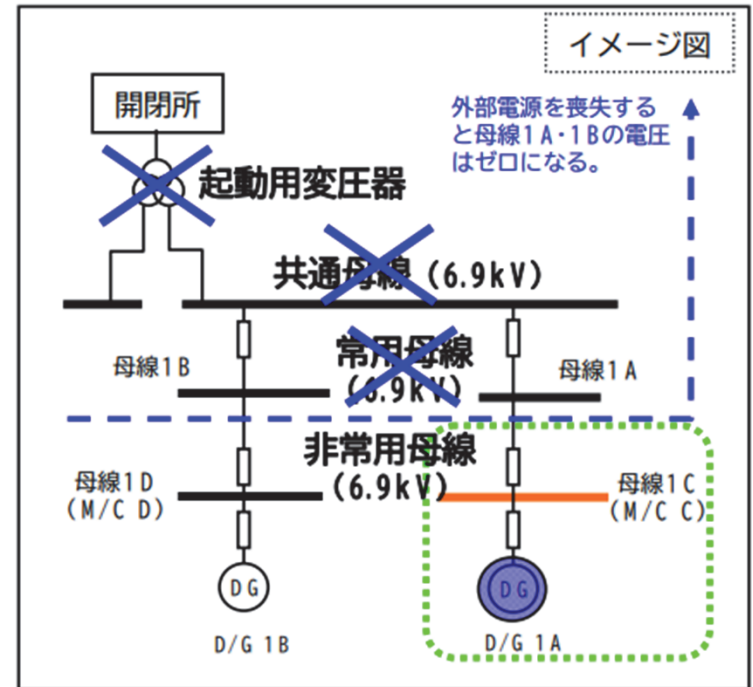
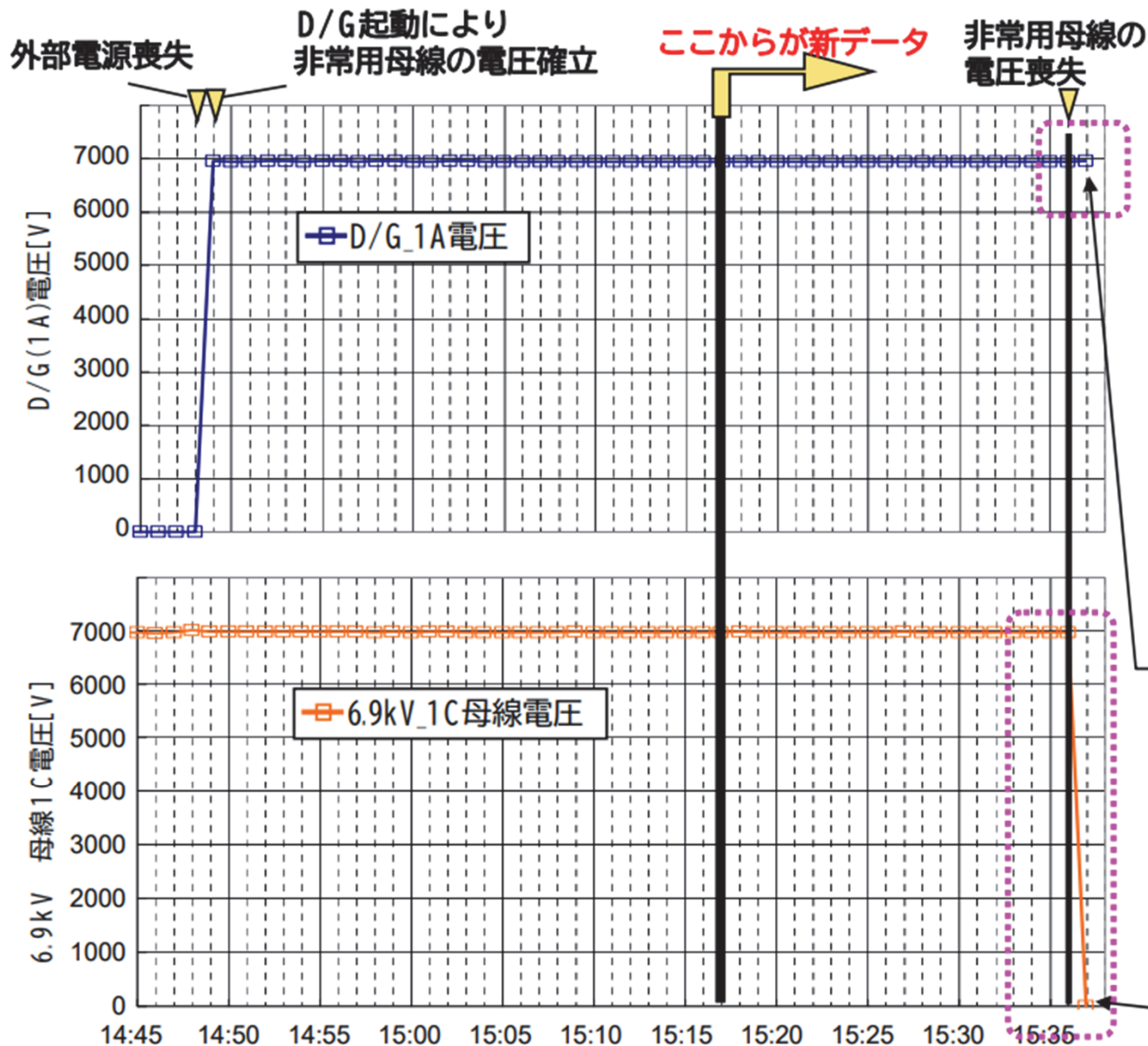


原子炉水位



A-2 漏えい面積 0.3cm^2

1号機非常用ディーゼル発電機(1A)の 電圧データ

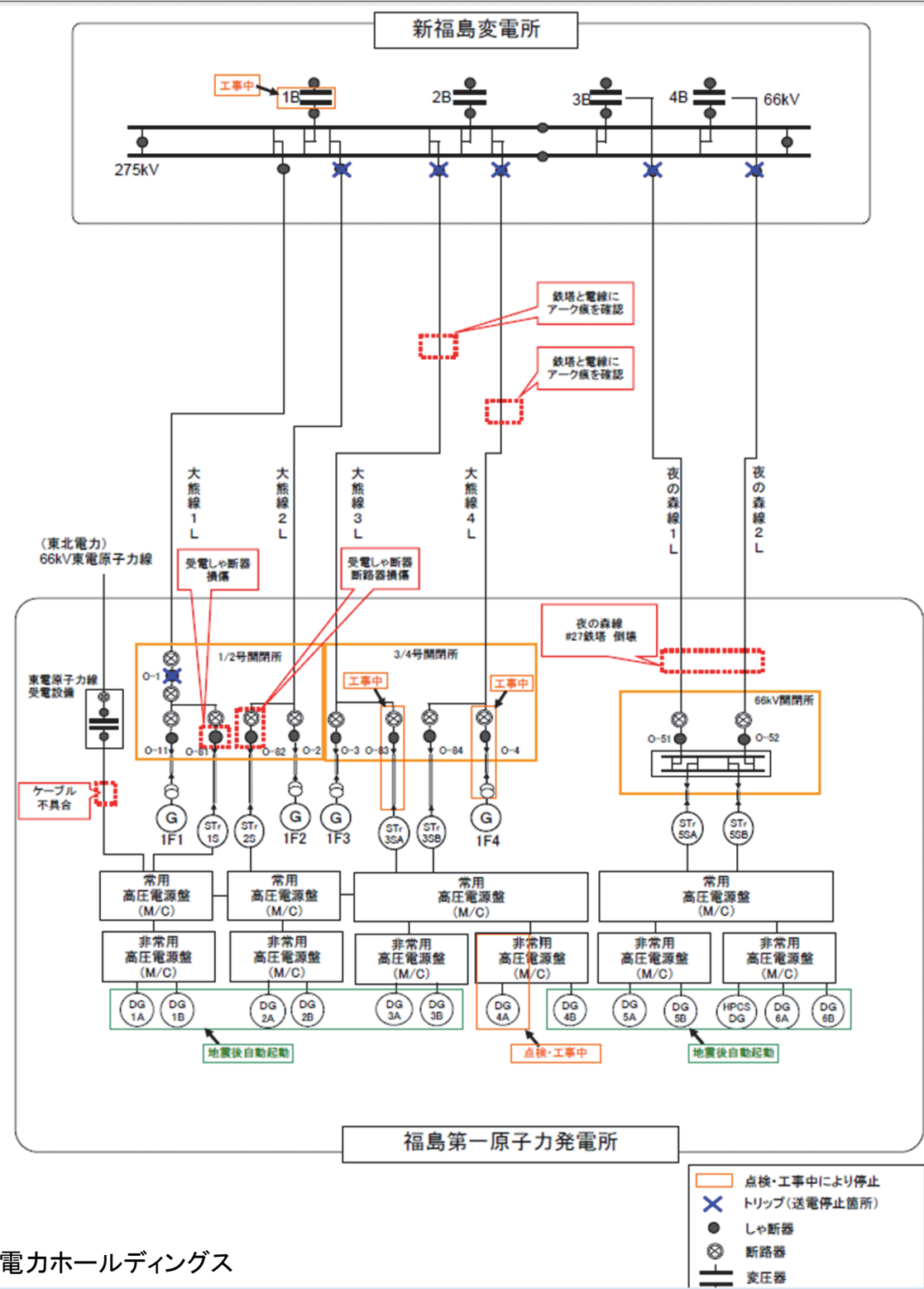


15:36:59
D/G 1Aは電圧約7000Vで正常な運転状況

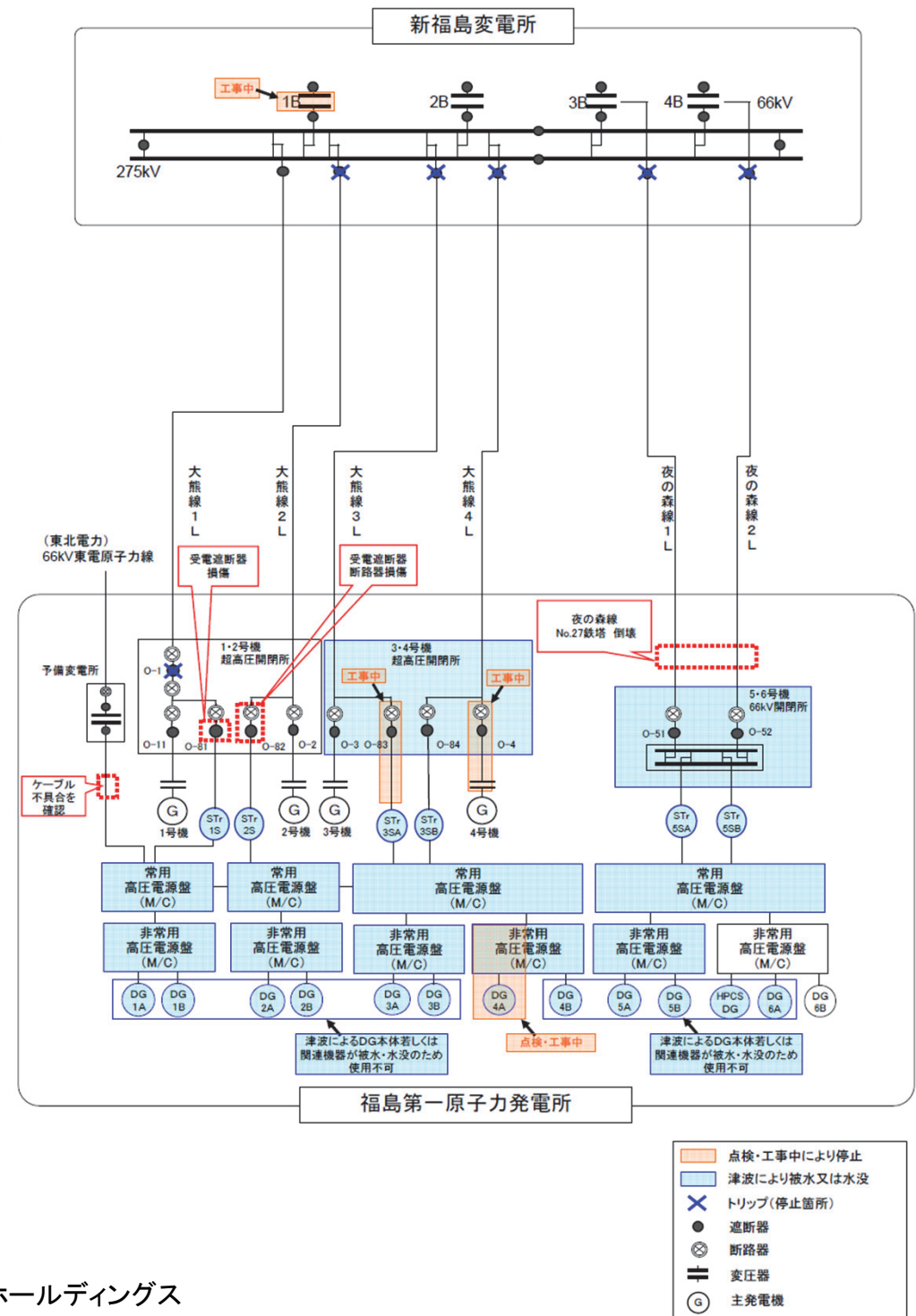
母線1Cの異常（電圧低下）は、
D/G 1Aが原因ではない。

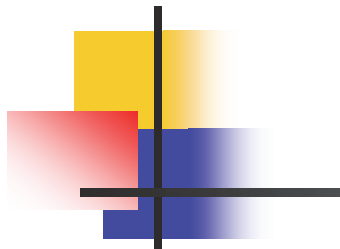
15:36:59
母線1Cは電圧0で異常が発生

1F外部電源



1F外部電源





平成23年3月23日 東京電力撮影

写真①. 1/2号開閉所内の落下した遮断器(O-81)



平成23年3月23日 東京電力撮影

写真②. 1/2号開閉所内の落下した遮断機(O-82)



平成23年3月23日 東京電力撮影

写真③. 1/2号開閉所内の落下した断路器

外部電源の状況

法面の土砂崩壊(視点①)



鉄塔の倒壊(視点②)



・土砂崩壊の写真:平成23年3月19日 ©Geo Eye撮影
・視点①、②の写真:平成23年3月18日 東京電力撮影

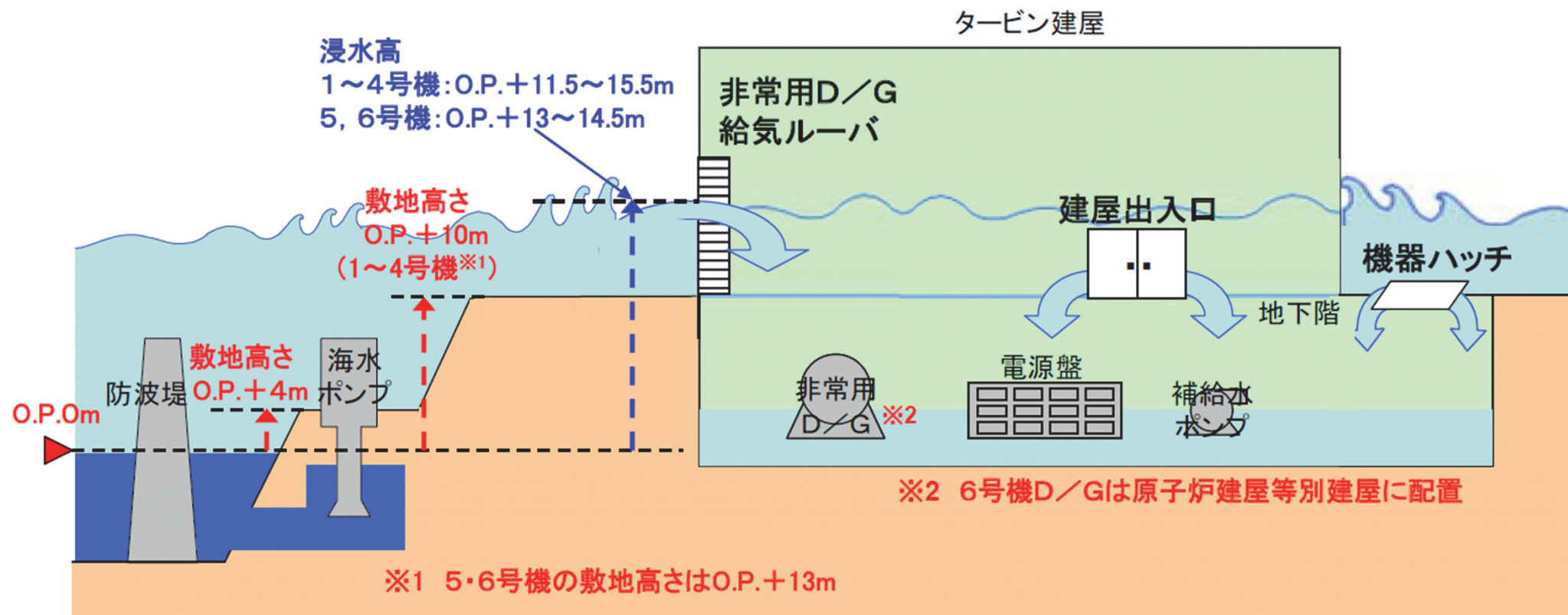
写真⑧. 倒壊した夜の森線1L及び2Lの鉄塔(No.27)



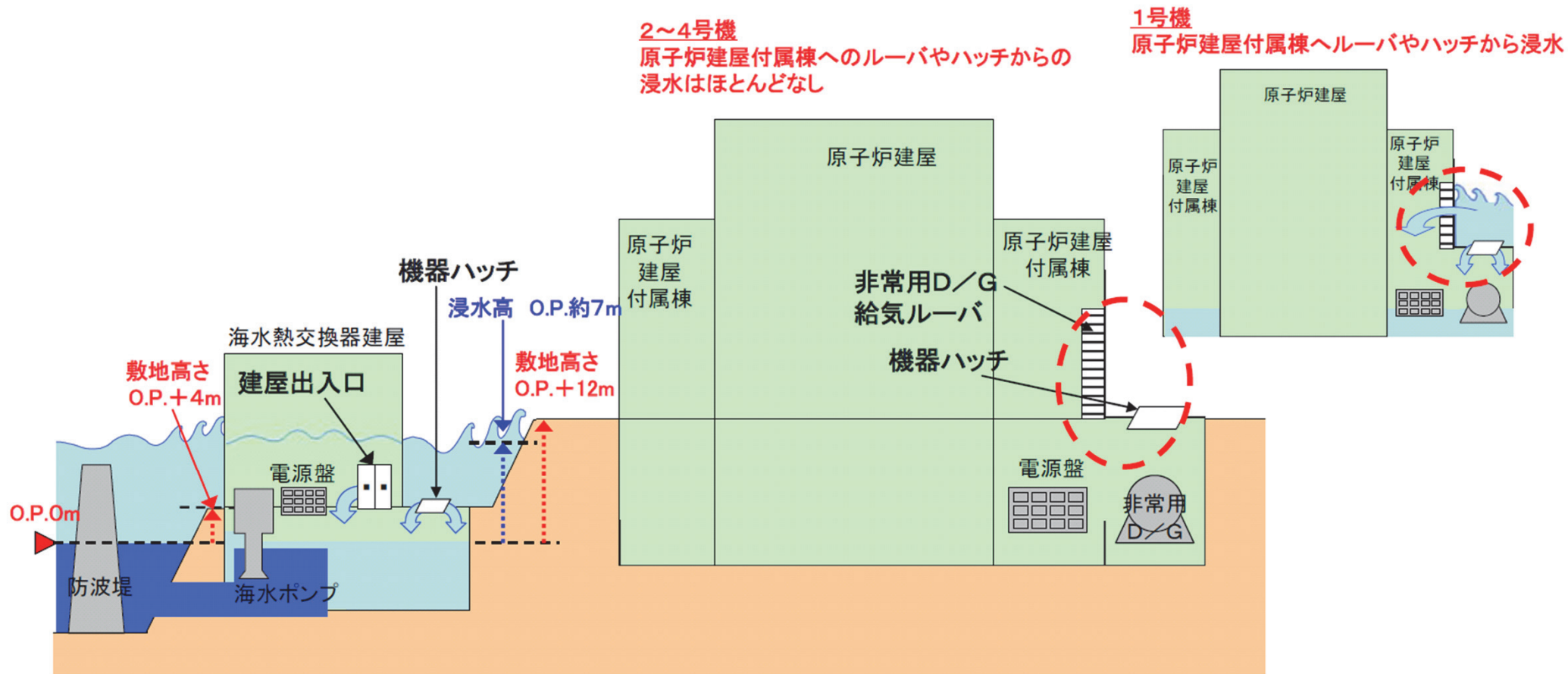


津波による被害

津波による浸水状況(1F)



津波による浸水状況(2F)



海側エリア、屋外海水設備の状況



非常用ディーゼル発電機の状況

非常用D/Gの設置場所と津波被害の状況

		福島第一原子力発電所						福島第二原子力発電所			
		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	1号機	2号機	3号機	4号機
津波高さ※1		約+13m						約+9m			
敷地高さ		O.P.+10m				O.P.+13m		O.P.+12m			
主要建屋周り 浸水深 [浸水深]		約1.5～約5.5m [O.P.約+11.5～約+15.5m]※2				約1.5m以下 [O.P.約+13～約+14.5m]		約2.5m以下 (1号機周囲以外はほとんどゼロ) [O.P.約+12～約14.5m]※3			
D/G 設置建屋 [設置階]	A系	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]
	B系	タービン建屋 [地下1階]	共用プール 建屋 [1階]	タービン建屋 [地下1階]	共用プール 建屋 [1階]	タービン建屋 [地下1階]	D/G建屋 [1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]
	HPCS 系	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> D/G本体が被水した </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #90ee90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> D/G本体が被水していない </div>					原子炉建屋 付属棟 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]

※1 両発電所の検潮所設置位置における津波高さ。計器損傷のため、検潮所における実際の津波高さは把握できていない。

※2 当該エリア南西部では局所的にO.P.約+16～約+17m[浸水深 約6～7m]

※3 1号機建屋南側から免震重要棟にかけて局所的にO.P.約+15～約+16m[浸水深 約3～4m]

- ・福島第一5号機のD/Gはタービン建屋に設置
- ・当該D/G本体は被水していない

- ・福島第二1号機のD/Gは原子炉建屋付属棟に設置
- ・当該D/G本体は被水している

M/Cの損傷状況

	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所
	1号機		2号機		3号機		4号機		5号機		6号機	
非常用 M / C	1C	T/B 1階	2C	T/B 地下1階	3C	T/B 地下1階	4C	T/B 地下1階	5C	T/B 地下1階	6C	R/B 地下2階
	1D	T/B 1階	2D	T/B 地下1階	3D	T/B 地下1階	4D	T/B 地下1階	5D	T/B 地下1階	6D	R/B 地下1階
	—	—	2E	共用 プール 地下1階	—	—	4E	共用 プール 地下1階	—	—	HPCS用	R/B 1階
常用 M / C	1A	T/B 1階	2A	T/B 地下1階	3A	T/B 地下1階	4A	T/B 地下1階	5A	C/B 地下1階	6A-1	T/B 地下1階
	1B	T/B 1階	2B	T/B 地下1階	3B	T/B 地下1階	4B	T/B 地下1階	5B	C/B 地下1階	6A-2	T/B 地下1階
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6B-1	T/B 地下1階
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6B-2	T/B 地下1階
	1S	T/B 1階	2SA	2SA 建屋 1階	3SA	C/B 地下1階	—	—	5SA-1	C/B 地下1階	—	—
	—	—	2SB	T/B 地下1階	3SB	C/B 地下1階	—	—	5SA-2	C/B 地下1階	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	5SB-1	C/B 地下1階	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	5SB-2	C/B 地下1階	—	—

凡例: 表中のセルの色は以下の内容を意味する。

ピンク色: 機器自体が被水した。

青色: 機器は被水しなかった。

P/Cの損傷状況

	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所	機器	設置場所
	1号機		2号機		3号機		4号機		5号機		6号機	
非常用 P / C	1C	C/B 地下1階	2C	T/B 1階	3C	T/B 地下1階	4C	T/B 1階	5C	T/B 地下1階	6C	R/B 地下2階
	1D	C/B 地下1階	2D	T/B 1階	3D	T/B 地下1階	4D	T/B 1階	5D	T/B 地下1階	6D	R/B 地下1階
	—	—	2E	共用 プール 地下1階	—	—	4E	共用 プール 地下1階	—	—	6E	DG建屋 地下1階
常用 P / C	1A	T/B 1階	2A	T/B 1階	3A	T/B 地下1階	4A	T/B 1階	5A	C/B 地下1階	6A-1	T/B 地下1階
	1B	T/B 1階	2A-1	T/B 地下1階	3B	T/B 地下1階	4B	T/B 1階	5A-1	T/B 2階	6A-2	T/B 地下1階
	—	—	2B	T/B 1階	—	—	—	—	5B	C/B 地下1階	6B-1	T/B 地下1階
	—	—	—	—	—	—	—	—	5B-1	T/B 2階	6B-2	T/B 地下1階
	1S	T/B 1階	2SB	T/B 地下1階	3SA	C/B 地下1階	—	—	5SA	C/B 地下1階	—	—
	—	—	—	—	3SB	C/B 地下1階	—	—	5SA-1	T/B 地下1階	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	5SB	C/B 地下1階	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

凡例: 表中のセルの色は以下の内容を意味する。

ピンク色: 機器自体が被水した。

青色: 機器は被水しなかった。

緑色: 機器自体は被水していないが、関連機器が被水したために機能を喪失。

灰色: 工事中

M/C, P/Cの被水状況



平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真①. 1号機タービン建屋1階北側のM/C
(肩の高さまで津波の痕跡が残る)



平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真②. 1号機タービン建屋1階北側のM/C
(奥に見える装置は箱から引き出された遮断機)

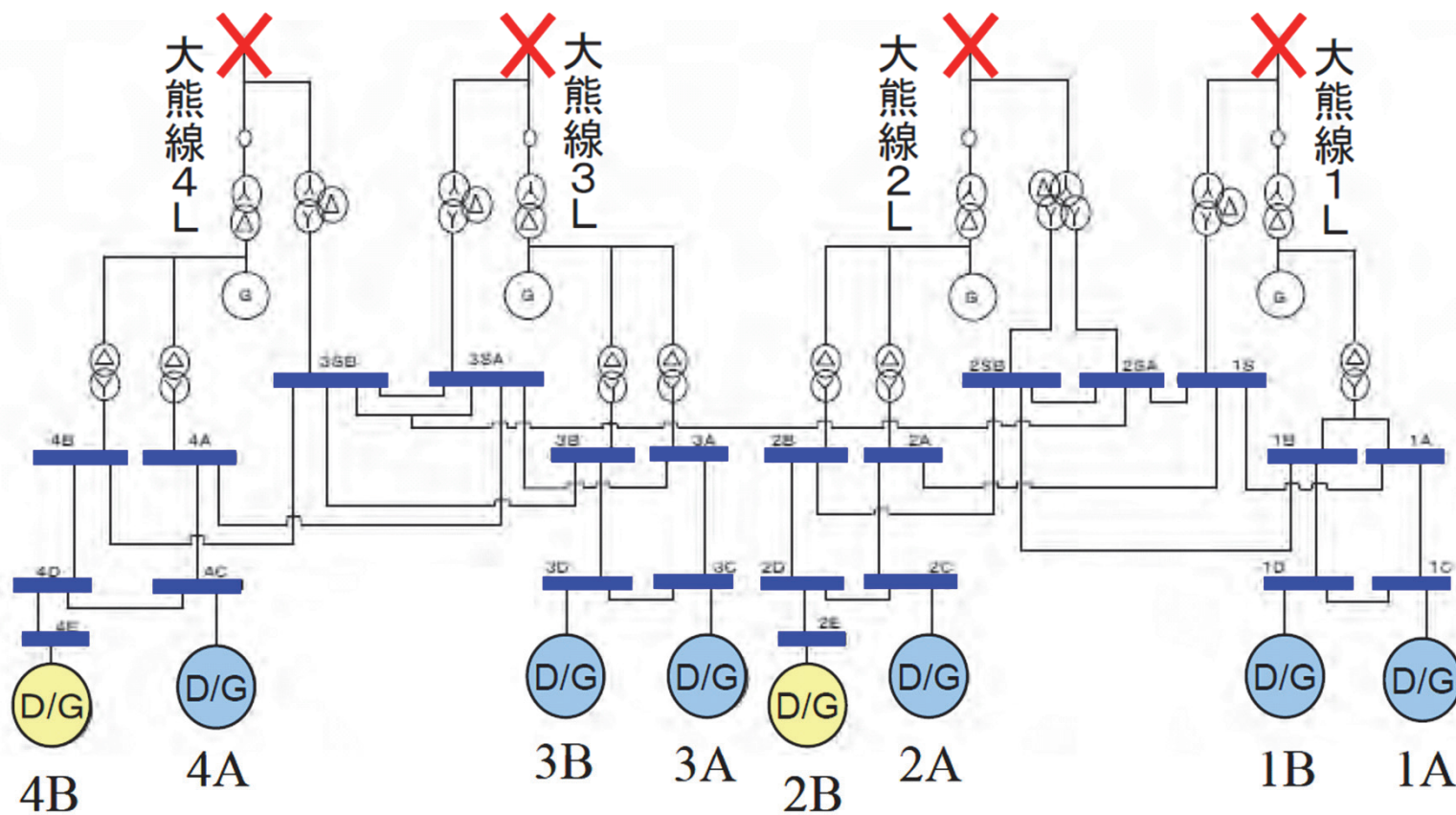


平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真③. 1号機タービン建屋1階のP/C-1S

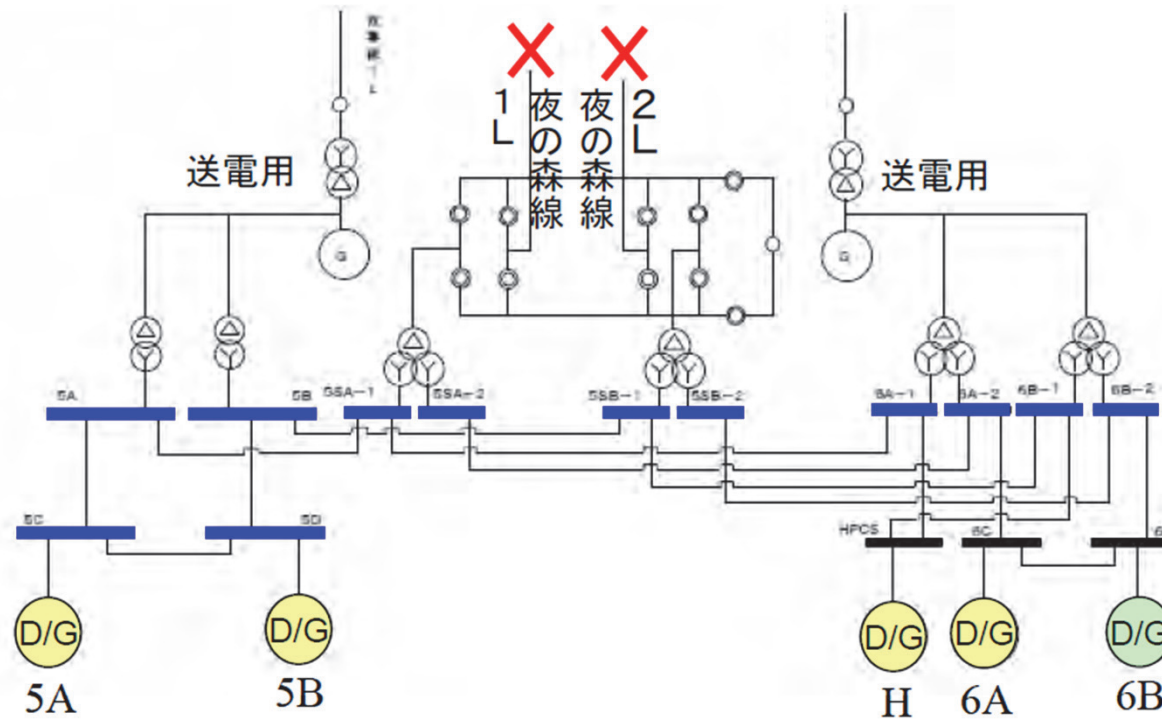
1F電源被害状況

福島第一 1 ～ 4 号機の電源系津波被害



1F電源被害状況

5, 6号機



✕ : 地震の影響により停止

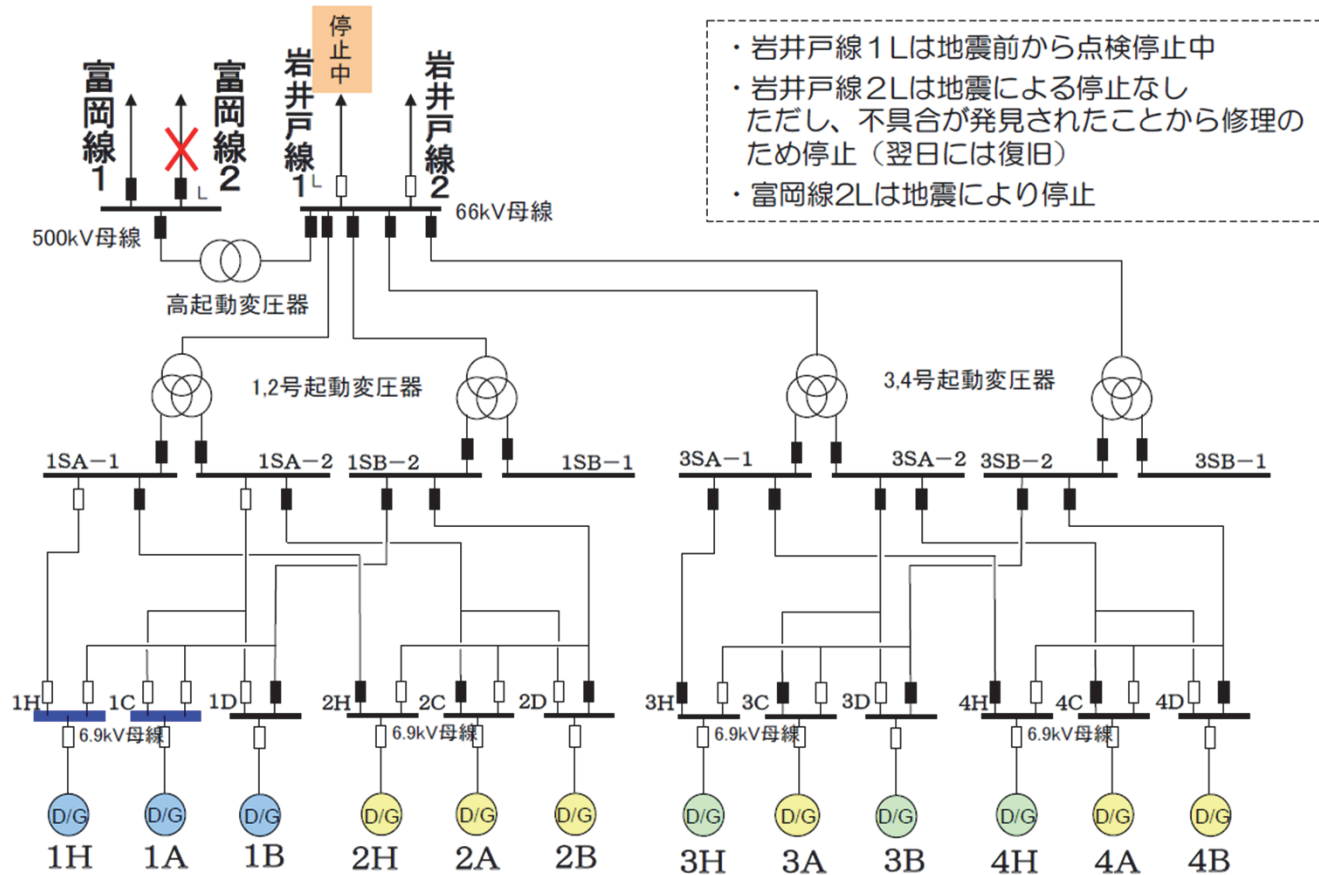
— : 津波の影響により電源盤被水又は水没

⦿ : 津波の影響により本体水没

⦿ : 津波の影響によりM/C, 関連機器水没

⦿ : 津波後も運転可能

2F電源被害状況




✕ : 地震の影響により停止

— : 津波の影響により電源盤被水又は水没

● : 津波の影響により本体水没

● : 津波の影響によりM/C, 関連機器水没

● : 津波後も運転可能



事故で明らかになった課題、教訓とその対応

原子力安全・保安院がとりまとめた「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について(中間とりまとめ)」、各種事故調査報告書などより



地震動(教訓)

- 複数領域が連動して動くという想定が不十分であった。その結果、地震動の設定が不十分であった。
 - 東海・東南海・南海地震の連動は考慮済み。
- 観測された地震動の超過は大幅なものではなかった。
- 地震動が発電所の設備に与えた影響は？

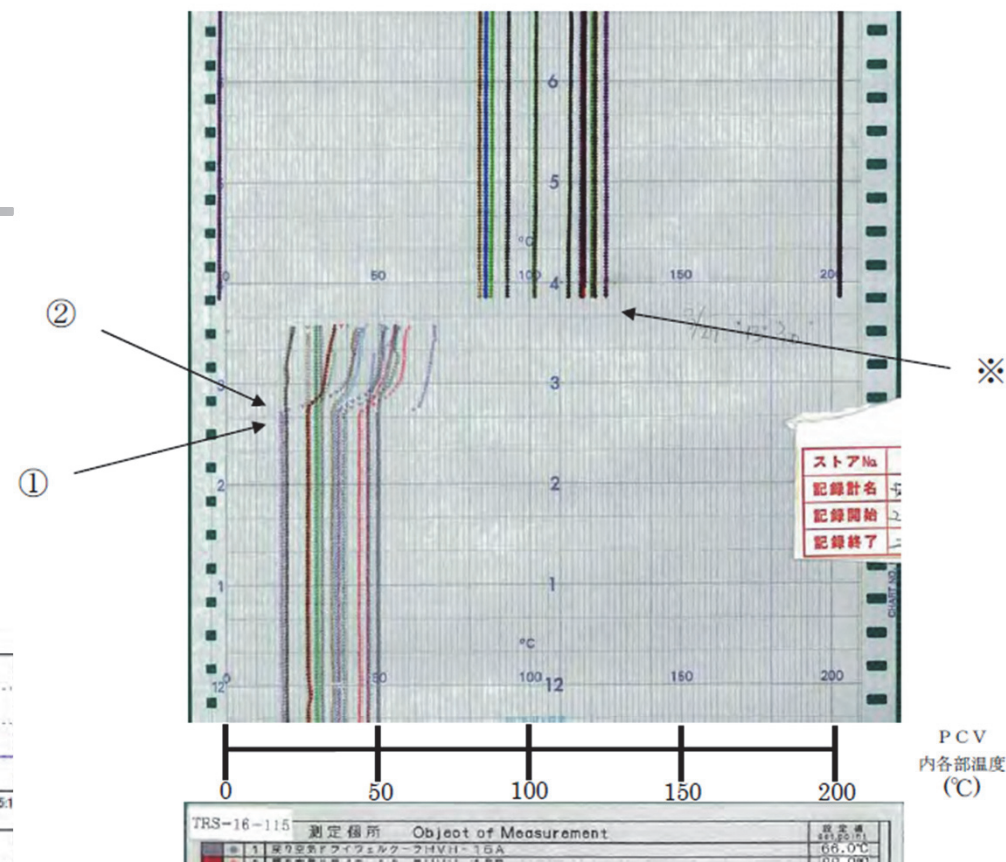
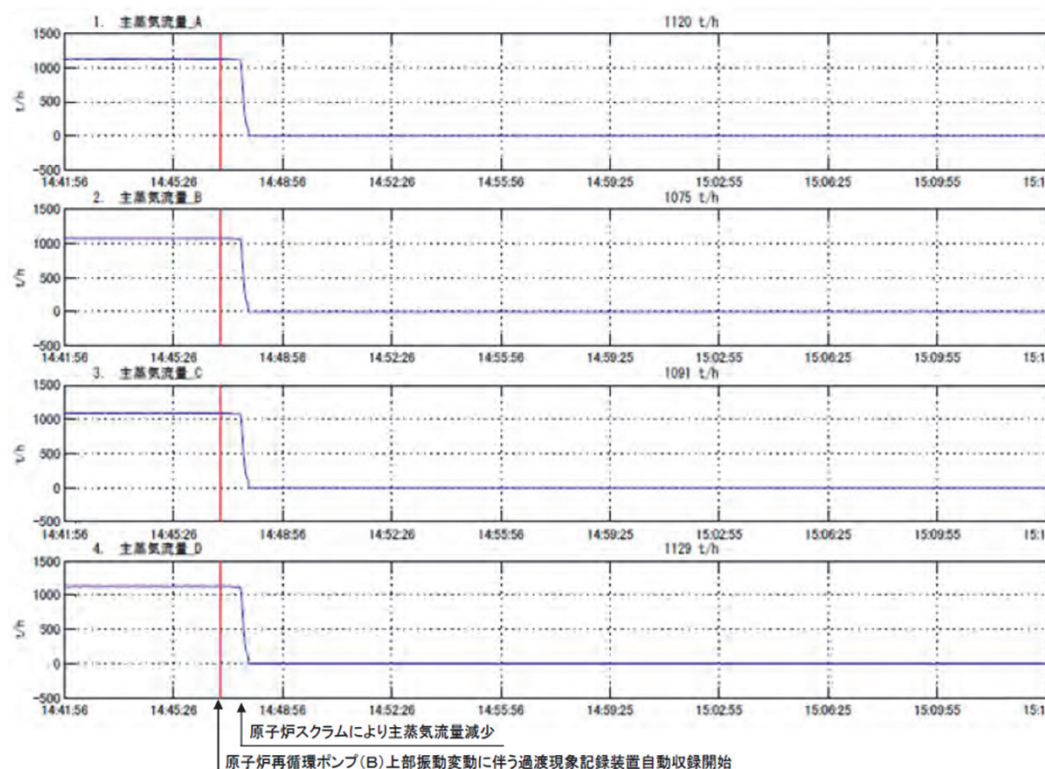


発電所の設備への影響(確認方法)

- 津波が襲来するまでの圧力容器、格納容器内の温度や圧力変化、蒸気流量の確認
 - 津波が襲来するまでは、各種のデータがとられており、これらのデータは公開されている。
- 今回観測された地震動を用いて、設備や建物が機能を保てたかどうか、計算により確認
- 地震動が基準値を超えた福島第一発電所5号機において、内部の設備を確認

データの一例

■ 2号機主蒸気量の変化



■ 2号機格納容器内の温度変化

- ① 14時47分 地震によるスクラム
- ② 電源喪失による格納容器空調停止に伴うPCVの温度上昇（配管破断等起因する極端な温度上昇は認められず）
- ※ 15時30分過ぎに津波が到来したと想定される。津波の影響により記録計一旦停止。その後、仮設電源の接続により記録計再稼動。正確な指示をしていないことも想定される。



発電所の設備への影響(評価)

- 政府事故調報告書

- 圧力容器、格納容器、冷却系(非常用復水器、隔離時冷却系、高圧注入系)、非常用ディーゼル発電機等の重要機器については、地震動で本来の機能を損なうような損傷を受けていないと推認される。

- 国会事故調報告書

- 大規模な冷却材喪失事故が起きていないことは明白。
- 安全上重要な機器の地震による損傷はないとは確定的には言えない。

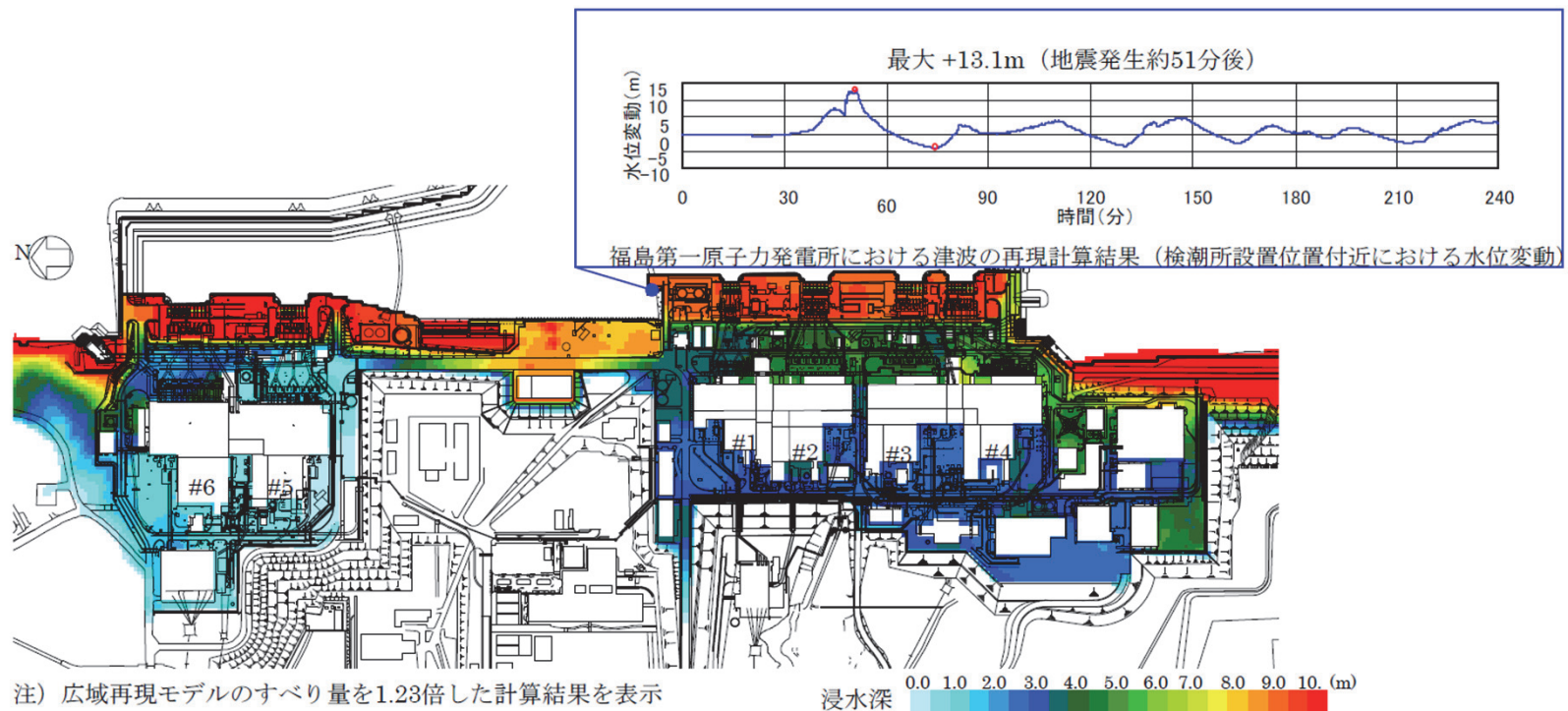
- 原子力安全・保安院(技術的知見)

- 安全上重要な機能を有する主要な設備のうち地震後に機能していたものは、今回の地震により機能に影響するような損傷は生じていないと考えられる。
- 一方、今回の地震の影響により微少漏えいが生じるような損傷が安全上重要な機能を有する主要な設備に生じたかどうかについてまでは、現時点で確かなことは言えない。

津波(課題)

- 考慮していた高さをはるかに越える津波に見舞われ、安全上重要な機器が同時に故障し、事故の悪化を防げなかった。

福島第一原子力発電所における津波の再現計算結果(浸水深及び浸水域)





津波(教訓)

- 想定している津波高さが全く不十分であった。
- 旧原子力安全委員会の新耐震指針では津波は地震に伴って発生する事象の一部として取り上げられているだけであった。
- 設計や評価で用いる津波高さおよび大きな津波が発生する地震の設定方法の検討。
- 津波に対する原子力発電所の安全性評価方法の標準的な手順の作成。また、津波に対する原子力発電所の弱点の把握。
- 大きな津波に対する原子力発電所の標準的な安全対策の設定。



津波(対策)

- 設計想定津波高さ評価の厳格化
- 外的事象PRA(津波PRA)やストレステスト(安全余裕の確認)により、事故シナリオ及び脆弱性を特定し強化
- 防波堤などによる発電所敷地内部への津波侵入の阻止に加え、原子炉建屋や重要機器室の水密化

電源喪失(課題)

- 通常電源・非常用電源に加え、電源盤などの多くが使用できなくなり、原子炉の状態が分からなくなり、また安全上重要な機器が動かなくなった。



平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真①. 1号機タービン建屋1階北側のM/C
(肩の高さまで津波の痕跡が残る)



平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真②. 1号機タービン建屋1階北側のM/C
(奥に見える装置は箱から引き出された遮断機)



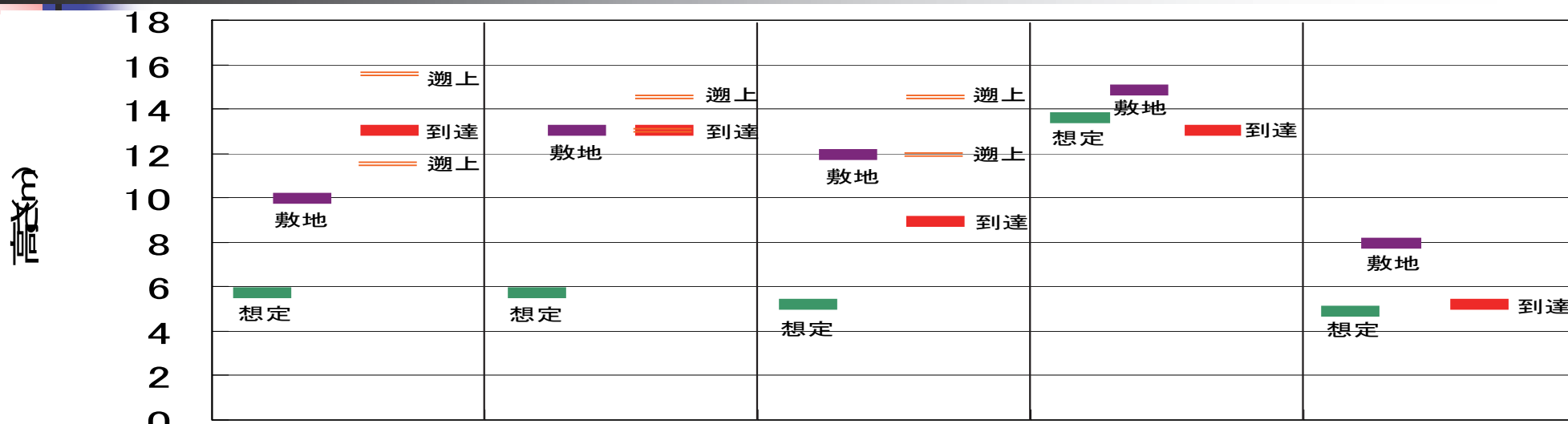
平成 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

写真③. 1号機タービン建屋1階のP/C-1S

被災後の電源・冷却状態の比較

	福島第一 1-4号機	福島第一 5, 6号機	福島第二 1-4号機	女川 1-3号機	東海第二
通常電源	×	×	○	○	×
非常用 電源 (ディーゼル発 電機)	×	○	1, 2号機 × (6台中6台 ×) 3, 4号機 ○ (6台中3台 ×)	○ (8台中2台 ×)	○ (3台中1台 ×)
電源車	×	○	○	不要	不要
	(水素爆発等で 使用不可)	(一部使用)	(一部使用)		
通常電源 復旧	×	×	○	○	3/13 19:37 に復旧
	(早期復旧せず)	(早期復旧せず)	当初から	当初から	
冷却系統	高圧 × 低圧 ×	高圧不要 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○
最終状態	過酷事故	冷温停止	冷温停止	冷温停止	冷温停止

津波高さと電源状態の比較



	福島第一 1-4号機	福島第一 5, 6号機	福島第二 1-4号機	女川 1-3号機	東海第二
非常用 電源 (ディーゼル発 電機)	× (8台中8台×)	○ (5台中4台×)	1, 2号機 × (6台中6台×) 3, 4号機 ○ (6台中3台×)	○ (8台中2台×)	○ (3台中1台×)
非常用 発電機 位置	タービン 建屋 B1F	タービン建屋 B1F、 専用建屋1F	コントロール 建屋B2F	コントロール 建屋B3F, 原子炉建屋 1F	コントロール 建屋B1F
状態	過酷事故	冷温停止	冷温停止	冷温停止	冷温停止



電源喪失(教訓)

- 通常(外部)電源を信頼しすぎており、その結果として、長時間にわたり通常(外部)電源が停電することに対して準備が不足していた
- 長期間にわたり、通常電源・非常用電源がともに停電する「全交流電源喪失」に対する準備が不足していた
- 非常用電源や電源盤の「多様性」と「独立性」が不足していた
- 原子炉の状態を監視するセンサーを動かすために必要となる直流電源(バッテリー)の機能喪失、あるいは枯渇に対する準備が不足していた



多重性・多様性・独立性

- 「独立性」とは、二つ以上の系統又は機器が、想定される環境条件及び運転状態において、物理的方法その他の方法によりそれぞれ互いに分離することにより、共通要因によって同時にその機能が損なわれないことをいう。
 - 非常用発電機のうち一台を津波の影響がない高台に設置する
 - 共通の環境要因による故障を防ぐ
- 「多重性」とは、同一の機能を有する同一の性質の系統又は機器が二つ以上あること
 - 例えば、非常用のディーゼル発電機を二台以上設置
 - 偶発的な故障による影響を防ぐ
- 「多様性」とは、同一の機能を有する異なる性質の系統又は機器が二つ以上あること
 - 例えば、ディーゼル発電機に加えガスタービン発電機を設置
 - 共通の原因(例:メンテナンスの失敗)による故障を防ぐ
- 「単一故障基準」とは、「多重性」、「多様性」、「独立性」の効果を確かめるために設計上の最悪の故障を1つ考えること。これにより設備設計の妥当性を確認する。



電源喪失(対策)

- 外部電源の信頼性向上
 - 複数の変電所から複数のルートで電源供給
 - 変電所や開閉所の電気設備の耐震性向上
- 外部電源の復旧の迅速化
 - 復旧のための資機材の確保
 - 損傷箇所を特定するための機器の導入
- 所内電源の信頼性向上
 - 電気設備を位置的に分散して配置
 - 電気設備の浸水対策(建物の水密化など)
 - 多様な手段による交流電源の供給(高台へのガスタービン発電機の設置、大容量電源車など)
 - 電源車などからの電源供給を容易にする繋ぎ込み口や手順の整備
 - 直流電源の大容量化(24時間)
 - 代替直流電源、交流直流変換器による充電を整備
 - 重要な電気設備品の予備を備蓄



冷却機能喪失(課題)

- 交流および直流電源喪失により、原子炉への注水手段を失い、福島第一1-3号機では炉心損傷に至った
- また、手順が定められていなかったことなどから、消防車などを用いた代替注水をスムーズに行うことができなかった。
- 福島第二1, 2, 4号機においては、炉心の崩壊熱を海に放出するための崩壊熱除去システムが使用できなくなり、冷温停止までに時間を要した
- 使用済燃料プールの冷却および注水ができなくなり、崩壊熱による水の沸騰と蒸発による水位の低下によって使用済燃料が露出する危険性があった

冷却機能の確保状態

	福島第一原子力発電所						福島第二原子力発電所			
	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	1号機	2号機	3号機	4号機
津波直後の 高圧注水系の作動 (IC、RCIC、HPCI)	×	○	○	—	—	—	○	○	○	○
高圧注水系作動中に 低圧注水系の待機 (MUWC、DDFP、消防車)	×	×	○ (注3)	—	×⇒○ MUWC	○	○	○	○	○
高圧注水系作動中に 逃がし安全弁による減圧機能 の待機(炉圧コントロール)	×	×	×	—	○	○	○	○	○	○
ドライウェル設計圧力未満の内の 格納容器ベント(W/W)での 除熱の待機	×	○⇒×	○	—	○	○	○	○	○	○
海水系ヒートシンクの(仮)復旧	×	×	×	—	×⇒○	×⇒○	×⇒○	×⇒○	○	×⇒○
備考				定検中 (炉心燃料 なし)	定検中	定検中				

注1) 津波直後はICは機能していないと考えられる。

18時過ぎ一時電源が復帰し操作を行ったが機能状態は不明である。

注2) D/Wの圧力が設計圧未満の内にベントラインの準備は完了した。

但し、3号機の建屋爆発の影響で弁が閉止しその後操作が困難になった。

注3) 高圧の注水系停止の時点でDDFPが作動していたが、原子炉圧が勝ったことから炉心に注入されていない。

冷却機能喪失(消防車による注水)





冷却機能喪失(教訓)

- 浸水や電源喪失などにより、複数の冷却設備が同時に故障することを防ぐ対策が不十分であった
- 本来の冷却設備が停止した後、消防車などの代替手段による炉心への注水に時間を要し、炉心損傷を防げなかった。
- 使用済み燃料プールへの注水および冷却に時間を要し、水位の低下を招いた



冷却機能喪失(対策)

- 事故時の対応能力の向上
 - 大津波警報発令時の対応手順をあらかじめ定めておく、など
- 冷却(設備・手段)の信頼性向上
 - 共通の原因による冷却設備の故障を防ぐ(設備が置いてある部屋の水密化など)
 - 炉心からの熱除去を様々な方法で行えるようにする(水冷に加えて空冷を使用など)
 - 代替注水を様々な方法で行えるようにする。(蒸気駆動やディーゼル駆動など、電気以外による駆動方法を用いた注水方法)
 - 使用済み燃料プールでの燃料の保存量を減らす。また、燃料プールの冷却を様々な方法で行えるようにする(水冷に加えて空冷を使用など)

使用済み燃料の発熱量と蒸発水量推定値

号機	1	2	3	4	5	6	共用
使用済み燃料体数	292	587	514	783	946	876	6300
縦 [m]	12	12	12	12	12	12	12
横 [m]	7	10	10	10	10	10	29
高さ [m]	12	12	12	12	12	12	11
水の量[t] (体積 [m ³])	1020	1425	1425	1425	1425	1497	3828
発生熱(東電報告) [kW]	70	470	230	2300	810	700	1200
1日に蒸発する水 [t]=[m ³]	2	17	8	81	29	25	42
1日に減少する水位 [cm]	2.9	14	6.7	67	24	19	12
燃料上部7mの水がなくなるまでの日数[day]	245	51	104	10	30	36	57



水素爆発(課題)

- 建屋の放射能の閉込め機能が失われた。
- 復旧作業の実施に大きな影響を与えた。
- がれきにより周辺の放射線量が上昇し、また、他号機の事故対応に大きな影響を与えた。

水素発生源

R/B内における主な水素発生原因

亜鉛酸化反応

格納容器内壁の塗装等に用いられる亜鉛(Zn)が高温環境下に長時間置かれた場合、亜鉛が酸化して水素が発生する。

ジルコニウム-水反応

炉心が露出し、燃料被覆管の温度が高くなると、燃料被覆管中のジルコニウム(Zr)が水と反応し、水素が発生する。燃料被覆管温度が約900度を超えると、反応割合が大きくなり、より多量の水素が発生する。

コア・コンクリート反応

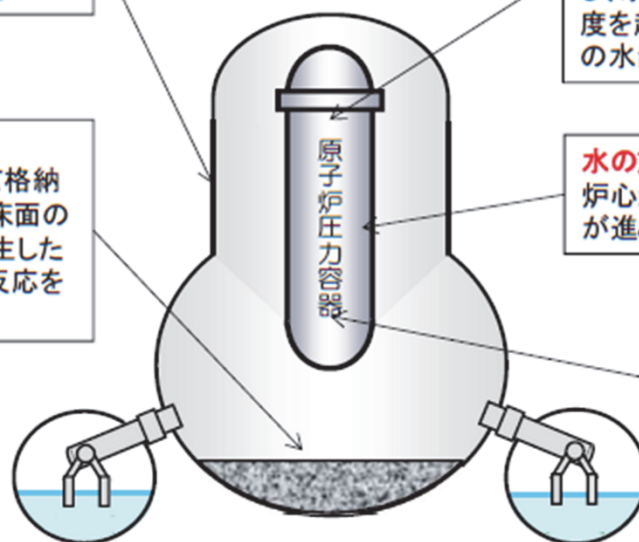
溶融燃料が圧力容器底部を貫通して格納容器ペDESTAL部に落下した場合、床面のコンクリートを熱分解し、その際に発生した水蒸気が溶融燃料中の金属と酸化反応を起こし、水素が発生する。

水の放射線分解

炉心から放出される放射線によって、水の分解が進み、水素が発生する。

ボロン・カーバイド酸化反応

制御棒に含まれているボロン・カーバイド(B₄C)が水と反応して酸化することにより、水素が発生する。



炉心以外に起因する水素

使用済燃料プールにおける水素

- 水の放射線分解
→プール水が低温の場合、すぐに融合。
- ジルコニウム-水反応
→プール水が確保されている限り、反応せず。

CAMS校正用水素

各号機のR/B内にCAMS校正用水素が設置されている。ただし、水素の量は少ない。

バッテリー電解液

各号機のR/B内にバッテリーが設置されている。バッテリーは、充電時、電解液が反応して水素が発生するが、今回の事故対処時、充電した事実は認められない。

資料Ⅱ-2-3

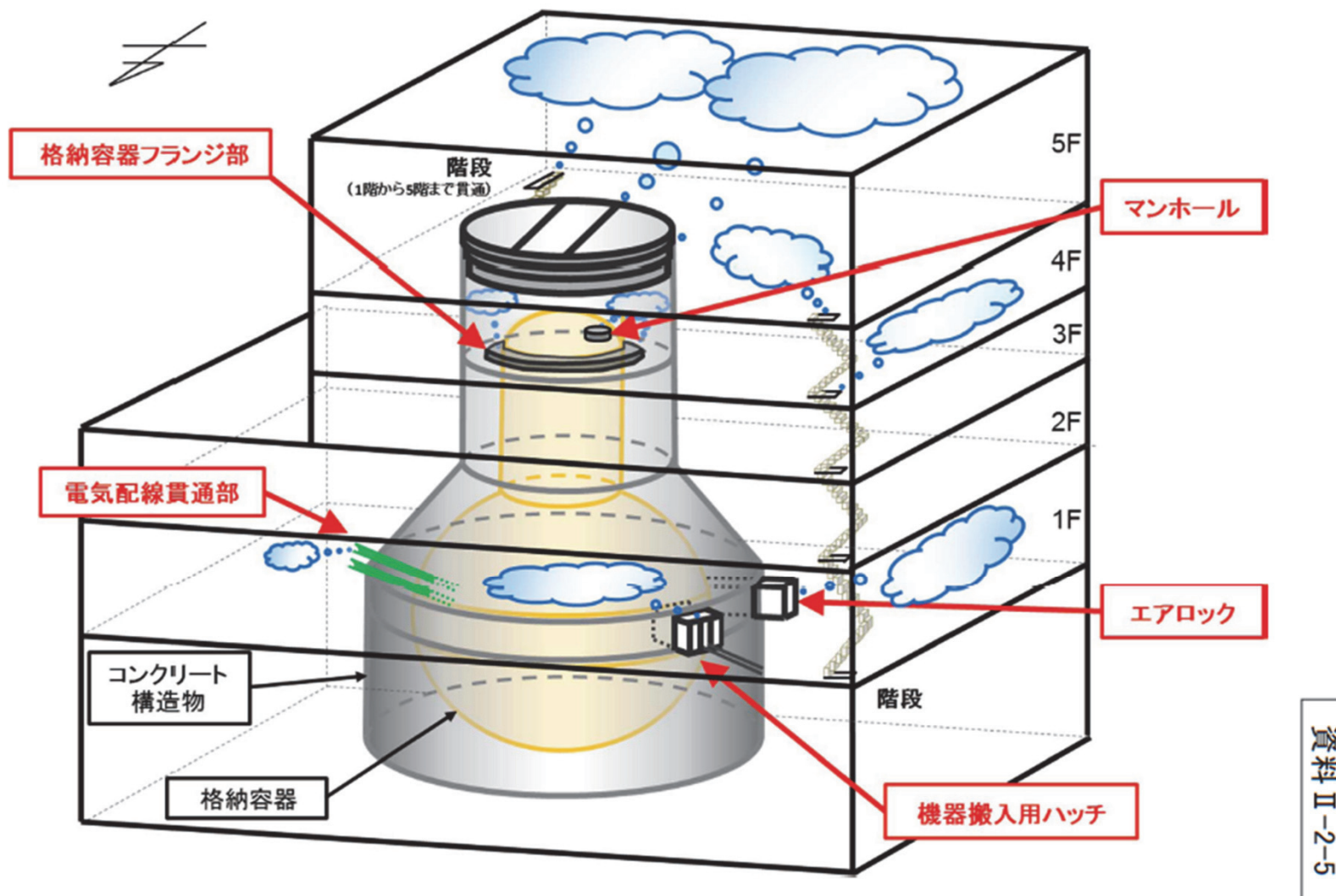


水素爆発

- 水素が爆発を起こす範囲
 - 空気との混合の場合、4.1%～74.2%
 - 水素濃度が18%を越えると、燃焼の速度が音速を超え、衝撃波を発生する「爆轟」を生じる可能性がある。

格納容器からの水素漏えい経路

格納容器から水素が漏えいした可能性のある箇所



1号機水素爆発

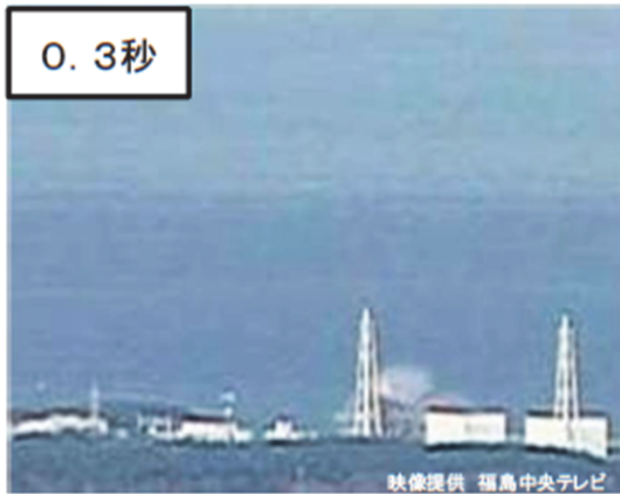
1号機及び3号機の水素ガス爆発映像

【1号機】

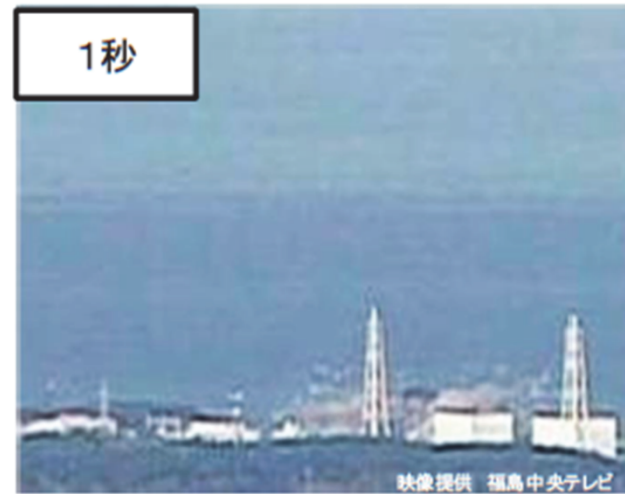
0秒



0.3秒



1秒



4秒



7秒



15秒



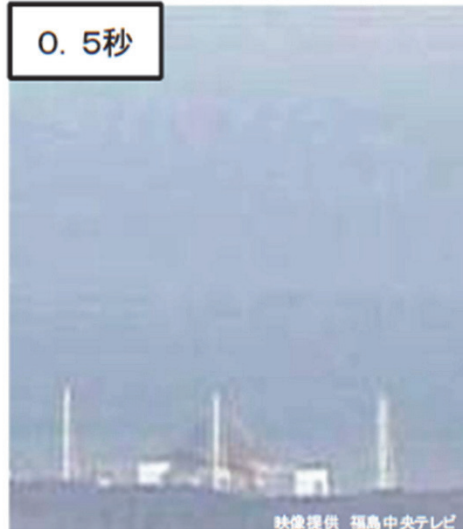
3号機水素爆発

【3号機】

0秒



0.5秒



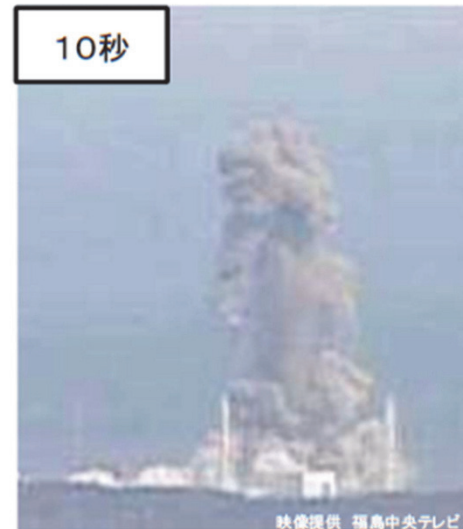
2秒



7秒



10秒



13秒



映像提供 福島中央テレビ

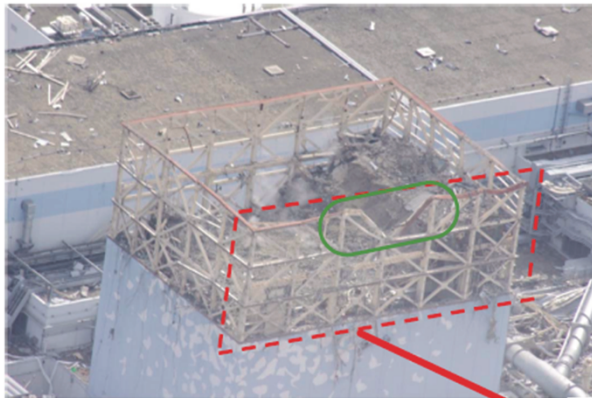
※無断転載を禁ずる

1号機原子炉建屋破損状況

資料Ⅱ-2-2

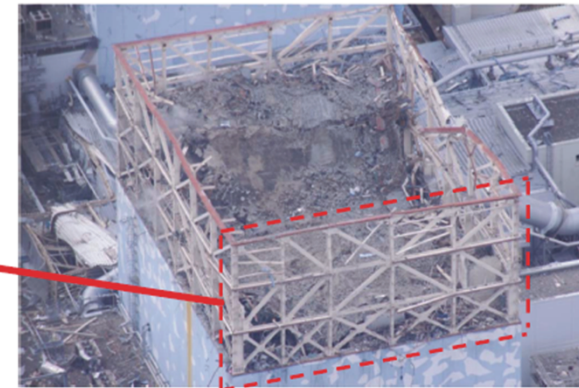
1号機R/B5階の損傷状況

【西側壁面】



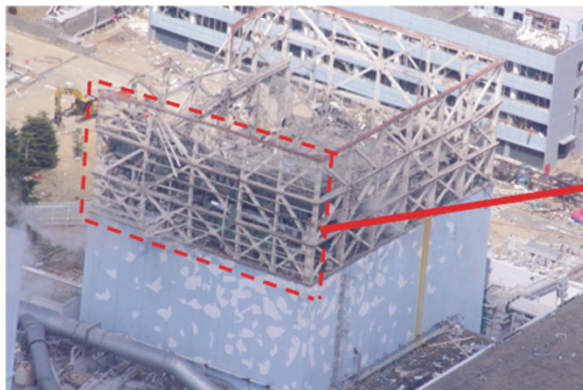
平成23年3月27日 防衛省撮影

【北側壁面】



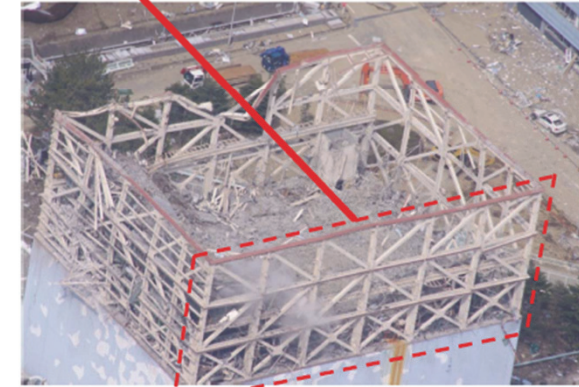
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

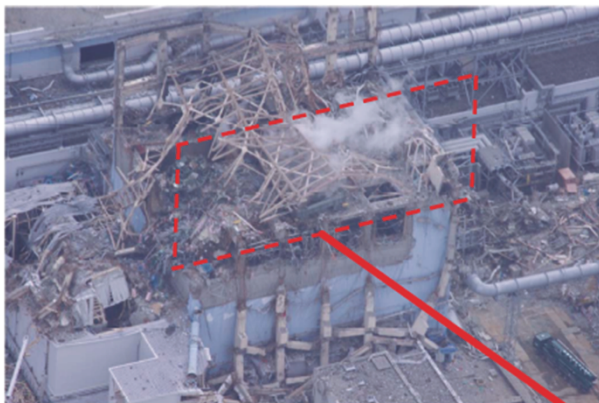


3号機原子炉建屋破損状況

3号機R/Bの損傷状況

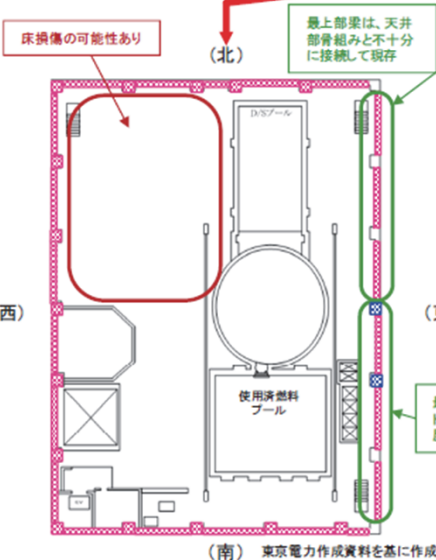
資料Ⅱ-2-8

【西側壁面】

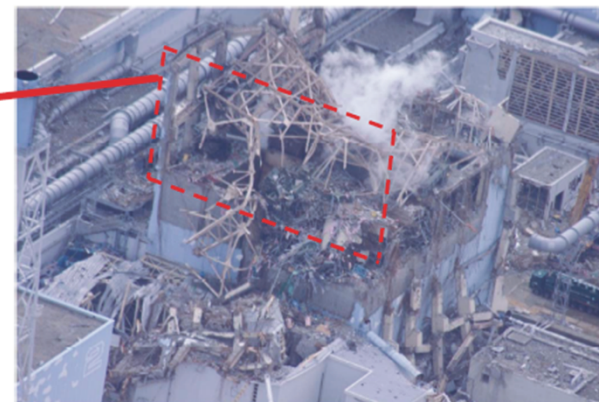


平成23年3月27日 防衛省撮影

【5階】



【北側壁面】



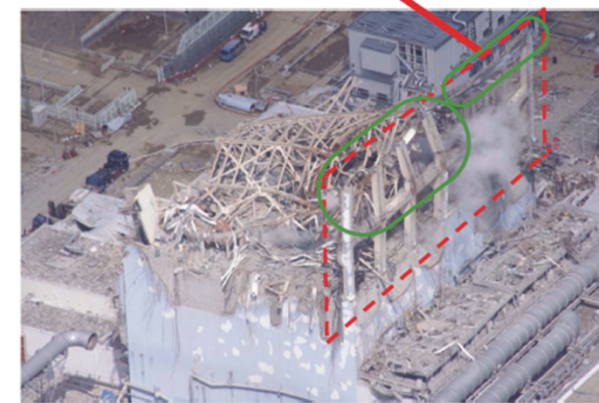
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



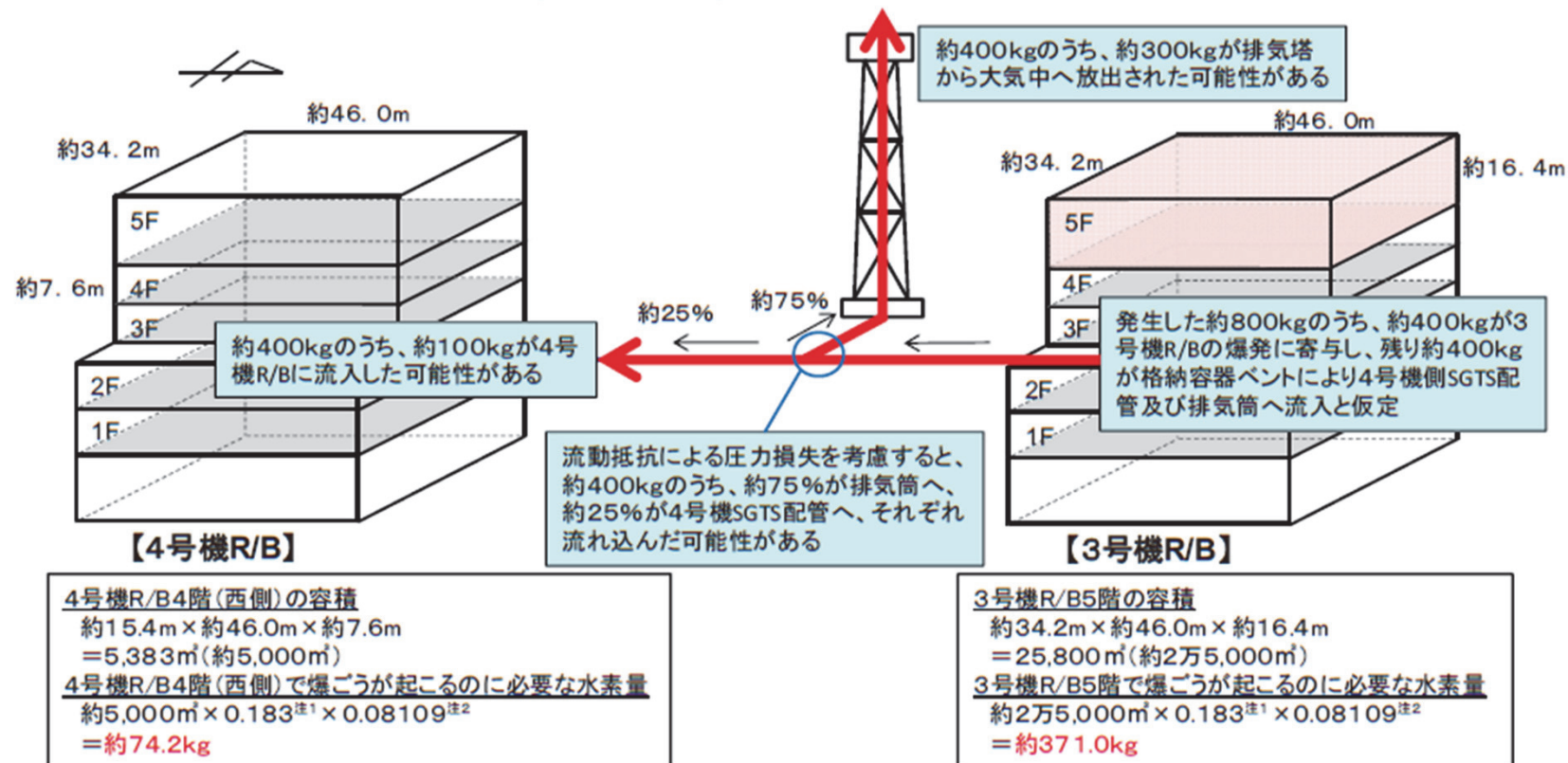
平成23年3月27日 防衛省撮影

凡例

：全壊
：一部損傷

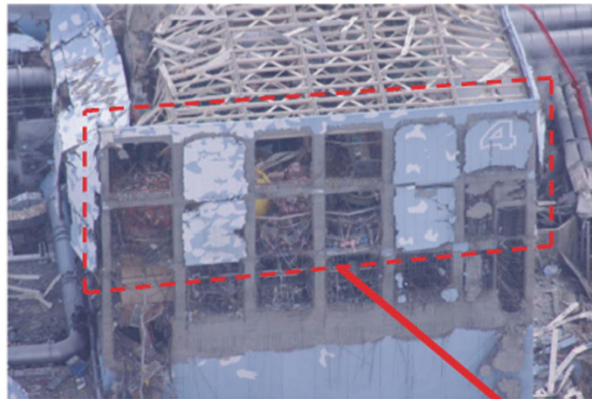
3号機から4号機への水素流入

3号機及び4号機における水素発生量



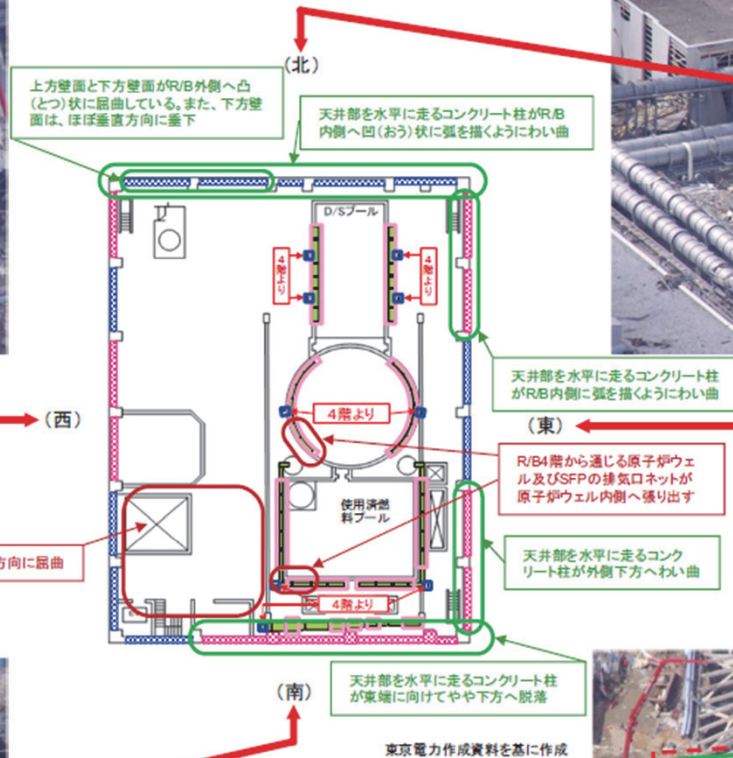
4号機原子炉建屋破損状況

【西側壁面】

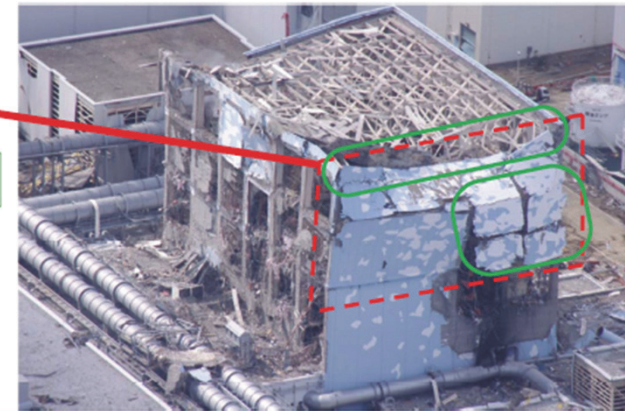


平成23年3月27日 防衛省撮影

【5階】

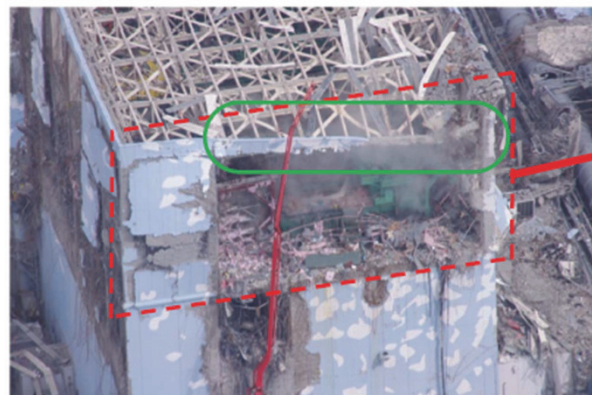


【北側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影



水素爆発(教訓)

- 格納容器から水素漏えいすることと、それに伴う水素爆発により建物が破損することは考慮されていなかった。
- 水素対策として、最高使用圧力で自動的に格納容器の圧力を下げる「格納容器ベント」を行うなど、ベントの手順が十分でなかった
- ベントラインからの水素逆流を防ぐ対策が考慮されていなかった
 - 4号機の水素爆発は、3号機で発生した水素が逆流し、4号機の建物に流れ込んだためと推定されている。



水素爆発(対応)

- 格納容器ベントの確実な実施
 - 格納容器ベントを確実に実施できるよう、手動で弁が開けられるなどの対応を検討。
 - 放出される放射性物質を減らすため、ベントに放射性物質を取り除くフィルターをつける(フィルタードベント)
- 非常時に原子炉建屋から水素を逃すための開口部を開けることを可能とする。
- 水素を酸素と結合させて徐々に水に戻す再結合装置を設置する
- 水素濃度検出器の設置



その他の課題、教訓と対応

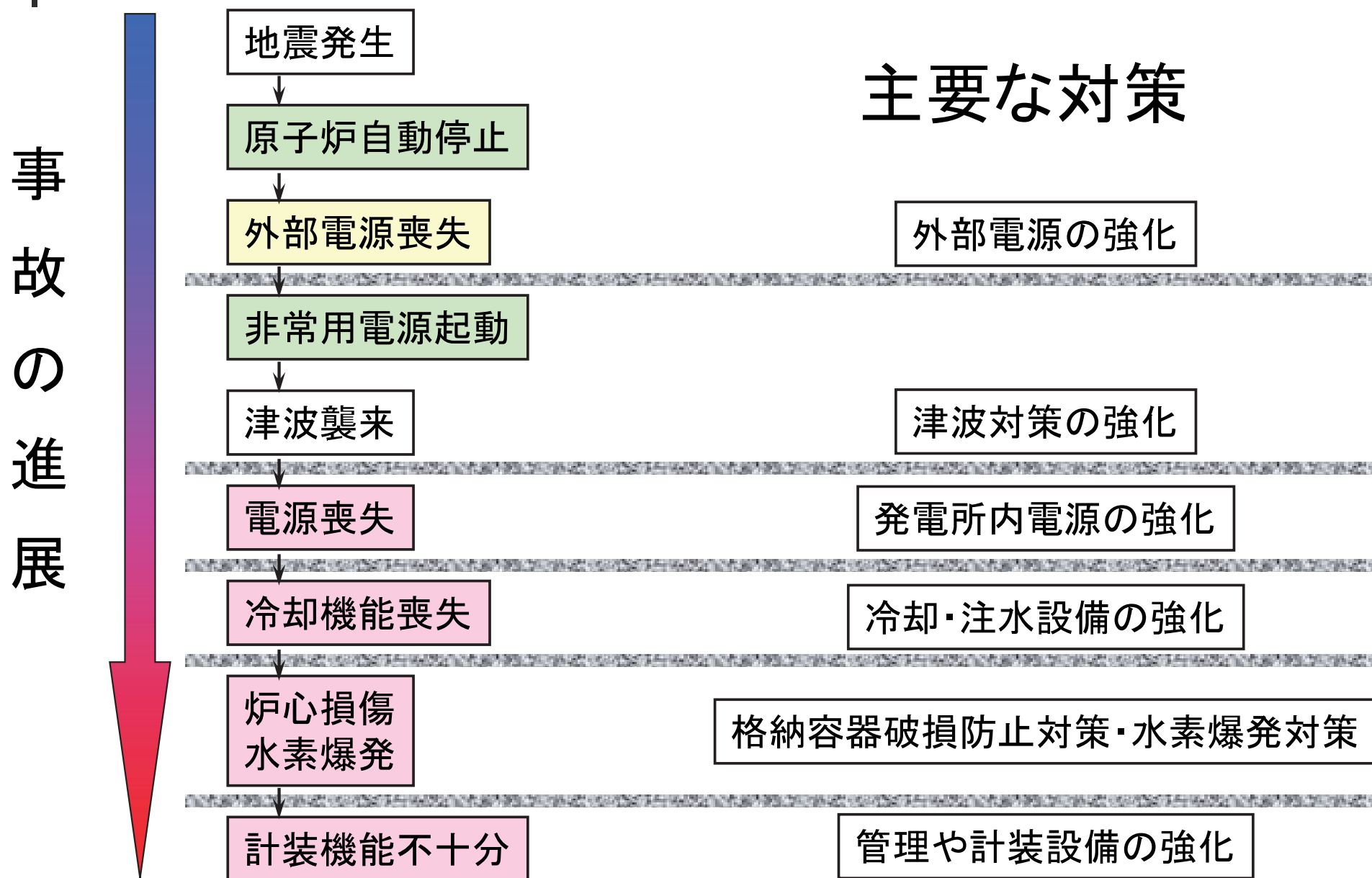
■ 過酷事故対応

- 過酷事故に対する準備と対応が十分でなかった
- 過酷事故対応は現行規制基準では要件化されている。

■ 原子炉の状態監視

- 原子炉の状態を監視するための計測系が機能しなくなった
- 計装系専用の電源の設置、計測器の予備の確保、過酷事故下で正確な測定が可能な計測器の開発と導入がなされている

事故の進展と主要な対策の関係





事故調査報告書



国内の主な報告書

- 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書
 - 平成23年6月公表
 - https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html
- 国会事故調
 - 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会
 - 平成24年7月5日公表
 - <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3514600>
- 政府事故調
 - 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会
 - 中間:平成 23 年 12 月 26 日
 - 最終:平成 24 年 7 月 23 日
 - <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/index.html>
- 民間事故調
 - 福島原発事故独立検証委員会
 - 平成 24 年 2 月 27 日
 - 福島原発事故10年検証委員会 民間事故調最終報告書
- 東電事故調
 - 福島原子力事故調査委員会
 - 中間:平成 23 年 12 月 2 日
 - 最終:平成 24 年 6 月 20 日
 - <https://www.tepco.co.jp/cc/press/11120203-j.html>
 - https://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628_1834.html
- 学会事故調
 - 東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会
 - 2014年3月公表
 - 福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言: 学会事故調 最終報告書



国会・政府・民間事故調の結論概要

■ 国会事故調

- 根源的原因: 規制当局と東電の先送り、不作為等によって、地震発生時の発電所は、「地震にも津波にも耐えられる保証がない、脆弱な状態であった」と推定。今回の事故は「自然災害」ではなくあきらかに「人災」。
- 直接的原因: 事故の主因を津波のみに限定することには疑義がある。「地震による損傷はないとは確定的には言えない」ことから、第三者による継続的な検証を期待。

■ 政府事故調

- 根源的原因: 自然災害と原発事故の「複合災害」が起こるという視点が、国、自治体、電力会社に欠如していた。極めて深刻・大規模な事故の背景には、事前対策の不備、現場対処、被害拡大防止策等の問題点が複合的に存在。東電も国も根拠なき安全神話を前提に対策をとらなかったところに根源的な原因がある。
- 直接的原因: 重要機能を喪失する損傷は地震によるとは認められず、津波の影響により全交流電源・直流電源を喪失し、冷却機能喪失等の事態が生じたと考えられる。

■ 民間事故調

- 直接的原因: 直接の事故の原因は、津波に対する備えが不十分で、電源喪失による多数の機器の故障が発生したことに尽きる。シビアアクシデントに対する備えの不足と連絡系統の混乱で、代替注水に速やかに切り替えることができなかったことが決定的な要因となり、放射性物質の放出を抑制できなかった。



学会事故調の根本原因分析：直接要因

- 不十分であった津波対策：事前に得られていた2つの重要な警鐘を対策に活かせなかった。第一は貞観三陸沖地震津波，第二は福島県沖海溝沿いの津波地震である。
- 不十分であった過酷事故対策：2002 年以降，過酷事故対策の強化が行われなかった。地震，津波などの外的事象に対する過酷事故対策が行われなかった。9.11 テロ後に海外で強化されたテロ対策がほとんど行われなかった。
- 不十分だった緊急時対策，事故後対策及び種々の緩和・回復策：10km 以内と想定していた緊急時の避難範囲が不十分であった。オフサイトセンターが地震や津波により使用できなかった。ヨウ素の服用指示の連絡が徹底せず，ほとんどの地域で服用されなかった。
- 結果論としてはオンサイトにおける過酷事故の現場対処に不手際が認められるが，それは事前準備に起因するもので，直接要因とは言えない。



学会事故調の根本原因分析：背後要因



- 1) 専門家の自らの役割に関する認識の不足
 - 自然災害に対する原子力安全の専門家の理解が足りなかった。
 - 研究や警鐘が社会で活かされる仕組みが不足していた。
 - 中立性を守るための努力が不足していた。
- 2) 事業者の安全意識と安全に関する取組の不足
 - 事業者である東京電力は、津波や過酷事故に対する新たな知見により明らかとなったリスクを軽視し必要な安全対策を先延ばしにした。
 - 事業者は規制要求以上の安全対策を自ら進める姿勢に欠けていた。
 - 事業者は安全を優先させるための俯瞰的なマネジメント能力に欠けていた。リスク管理が経営の一環であるとの認識が不足していた。
- 3) 規制当局の安全に対する意識の不足
 - 規制当局が安全規制に責任をもつ意識が不足していたため、東京電力から得ていた津波想定情報を活かせなかった。
 - 過酷事故対策及び原子力防災に関わる安全規制が国際的に大きく後れをとっていたにも拘らず、規制当局は安全規制の進化を迅速に行ってこなかった。
 - 緊急時の対策などに関するマネジメントが確立されていなかったことが事故対応における多くの不手際の要因となった。



学会事故調の根本原因分析：背後要因

- 4)国際的な取組や共同作業から謙虚に学ぼうとする取組の不足
 - マグニチュード9.1 を記録した平成16 年(2004 年)のスマトラ沖地震では巨大津波が発生しており、インド洋の対岸にある原子力発電所が浸水するという事態に至っている。しかしながら、このような規模の地震と津波がわが国の近海で発生すると想定し、その場合に原子力発電所が浸水する事態になることを予測し、対策を施すということがなかった。
- 5)安全を確保するための人材及び組織運営基盤の不足
 - 原子力発電所は巨大複雑系システムである。これは、単に工学的な巨大複雑システムというだけでなく、社会や経済も深く関わっている。たとえば、安全対策は単に安全機器を設置するだけで機能するものではなく、その維持管理や緊急時の操作など、人的なマネジメントも大きく関わっている。ここまで述べてきた背後要因の更に共通的な要因として、巨大複雑系システムである原子力発電プラントの安全を確保するための俯瞰的な視点を有する人材及び組織運営基盤が形成されていなかったことが挙げられる。

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	+	福島原子力事故調査報告, 添付資料, 東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0306.pdf
【2】	+	中間報告(資料編), 平成23年12月26日, 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-3.html
【3】		首相官邸ホームページ, 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(最終報告), 資料編, http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2012/pdf/jikocho/siryou.pdf
【4】		気象庁ホームページ, 平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震について, https://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11b/kaisetsu201103111600.pdf
【5】	+	東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況について(平成23年4月18日), p. 3, 東京電力ホールディングス, https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/kaigi/01/pdf/s012.pdf
【6】	+	東京電力ホールディングス, https://photo.tepco.co.jp/library/120808_01/120808_05.jpg
【7】	+	東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について(参考資料), p. 223, 原子力規制委員会, https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9482678/www.meti.go.jp/press/2011/03/20120328009/20120328009-2.pdf
【8】	+	福島第一原子力発電所1号機における電源喪失の調査・検討状況について(平成25年6月1日), p. 6, 東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/news/2013/images/130601b.pdf
【9】	+	福島原子力事故調査報告書(中間報告), 平成23年12月2日, 東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202c.pdf
【10】	+	東京電力ホールディングス, https://photo.tepco.co.jp/library/110620_3/110620_21.jpg



出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	+	福島第一原発事故と4つの事故調査委員会, 2012年8月23日, 国立国会図書館, https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3526040_po_0756.pdf?contentNo=1
【12】	+	福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会報告における提言の実行度調査ー10年目のフォローアップー, 2021年5月, 日本原子力学会, https://www.aesj.net/aesj_fukushima/jikochofollow