

福島第一原発事故の熱水力挙動

石垣 将宏

ishigaki@u-fukui.ac.jp

福井大学学術研究院
原子力安全工学講座

講義のアウトライン

- 福島第一原発事故の概要
- 1号機, 2号機, 3号機の挙動
- シビアアクシデント時の熱流動挙動
- 福島第一原発事故2号機の熱水力解析

福島第一原発で何が起きたか？

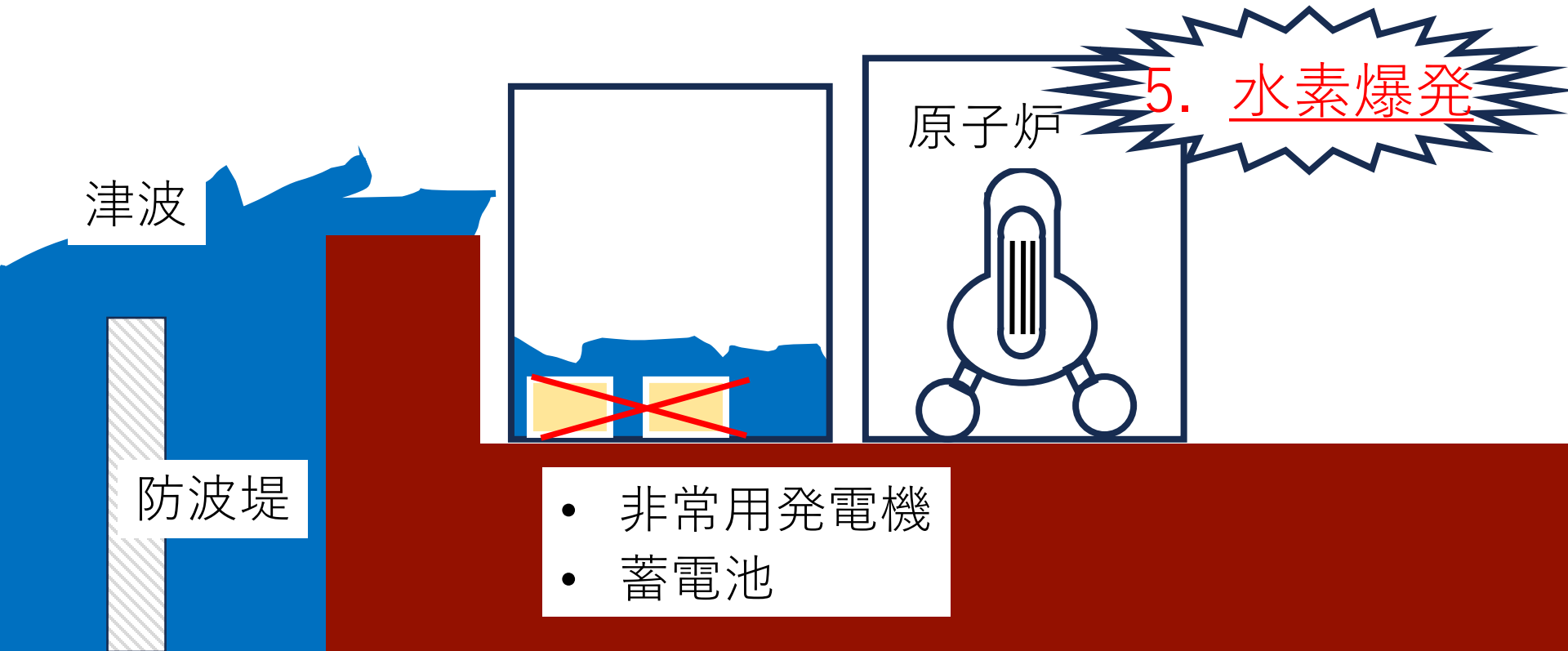
1. 地震・津波により
外部電源，所内電
源を喪失

2. 電源喪失により冷却が停止

3. 燃料が損傷

4. 水素が発生

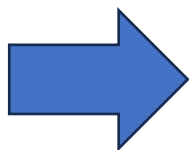
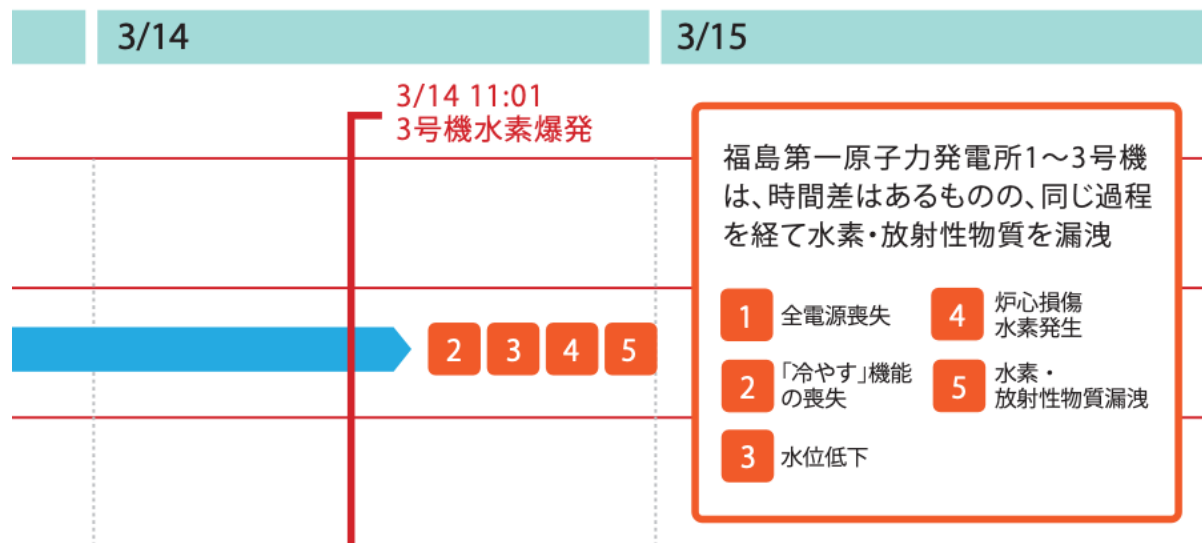
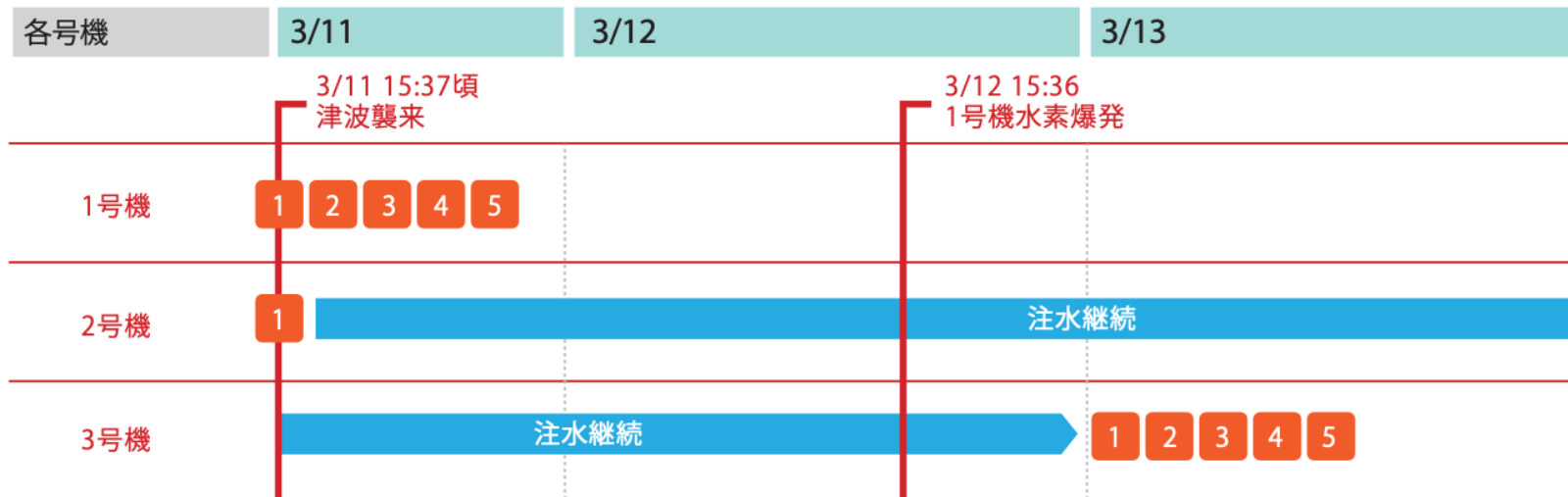
5. 水素爆発



- 非常用発電機
- 蓄電池

福島第一原発事故全体の経過

各号機の経過の概要



福島第一原発事故での10条・15条通報

2011年3月11日14時46分の東北地方太平洋沖地震発生後、原子力安全・保安院（保安院、当時）は福島第一原発の運転中の原子力発電所が自動停止したことを確認した。15時42分、全交流電源喪失となったため、東京電力は原災法第10条に基づき通報を行い、これを受けて、経済産業省は原子力災害警戒本部を設置、原子力安全委員会（原安委、当時）は緊急技術助言組織を立ち上げた。さらに、16時45分、原子炉への注水ができなくなっている可能性があるとして、東京電力は原災法第15条の特定事象発生の通報を行った。保安院から報告を受けた経済産業大臣は官邸に赴き総理大臣に上申、19時3分、政府は、原子力緊急事態宣言を発出し、原子力災害対策本部を設置した。その後、官邸では、総理大臣、関係閣僚、原安委委員長、保安院幹部、東京電力幹部らが集まり、事故の状況を踏まえた避難指示範囲の決定、格納容器ベントや海水注入の指示など、福島第一原発についてとるべき措置等を協議し決定した。3月15日早朝には政府と東京電力による統合対策本部が設置され、一体となって事故対応に当たることになった。一方、オフサイトセンターは、地震の影響で経済産業副大臣や福島県副知事の到着が遅れまた停電も発生したため、事故当初は機能が発揮できなかった。15日には、オフサイトセンターは福島県庁に移転した。またモニタリングについての政府内の役割分担も16日に整理された。

津波の状況



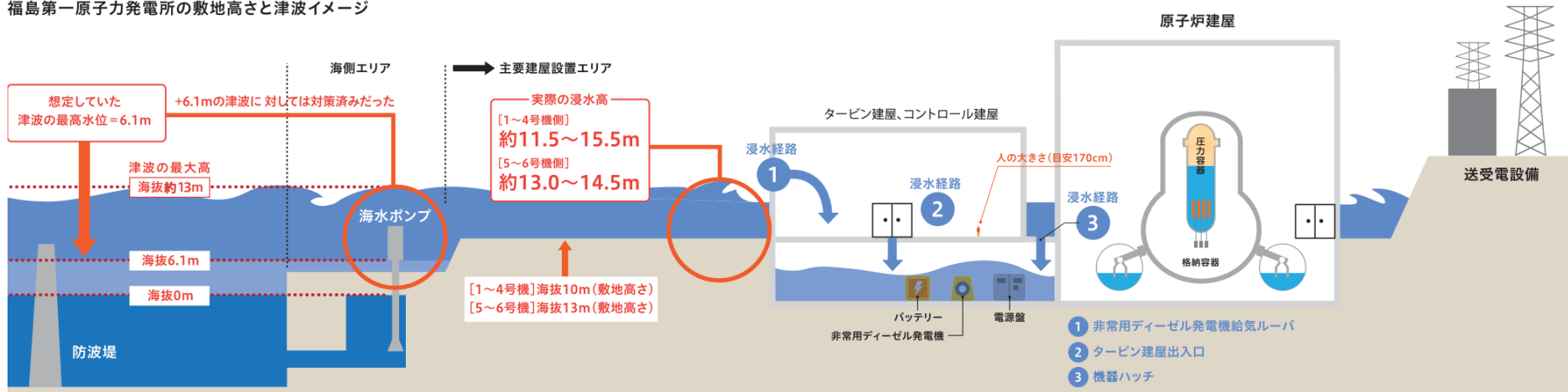
津波による被害を受けた後(全体)の福島第一原子力発電所 2011年3月19日撮影



水没した電源室
(福島第一原子力発電所2号機)

【2】 出典：東京電力ホールディングス

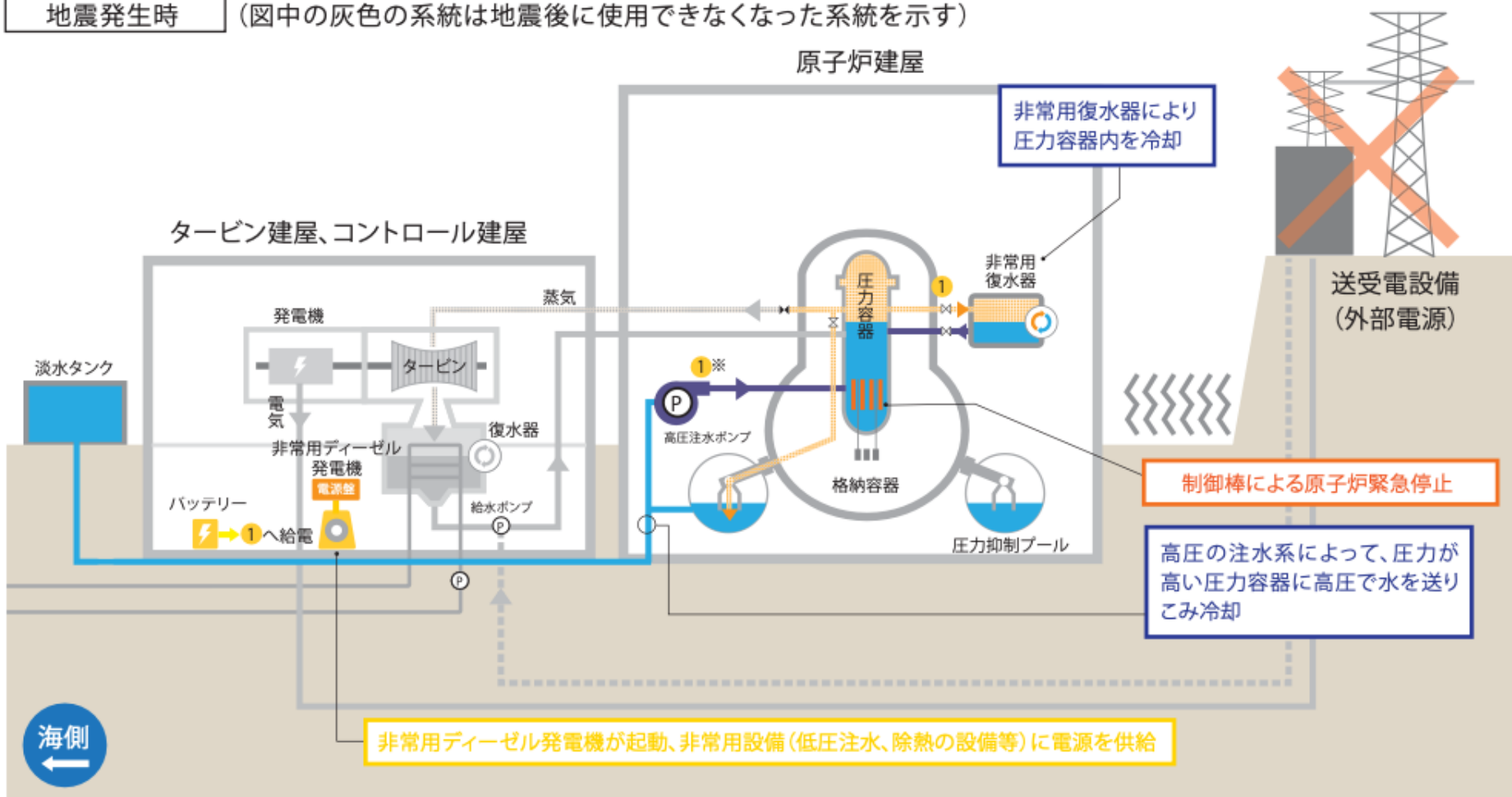
福島第一原子力発電所の敷地高さ&津波イメージ



【3】 出典：東京電力ホールディングス

1号機概況

地震発生時 (図中の灰色の系統は地震後に使用できなくなった系統を示す)



電気の流れ 水の流れ 水の流れ(高圧) 蒸気の流れ (P) ポンプ (X) 弁(開) (▶) 弁(閉)

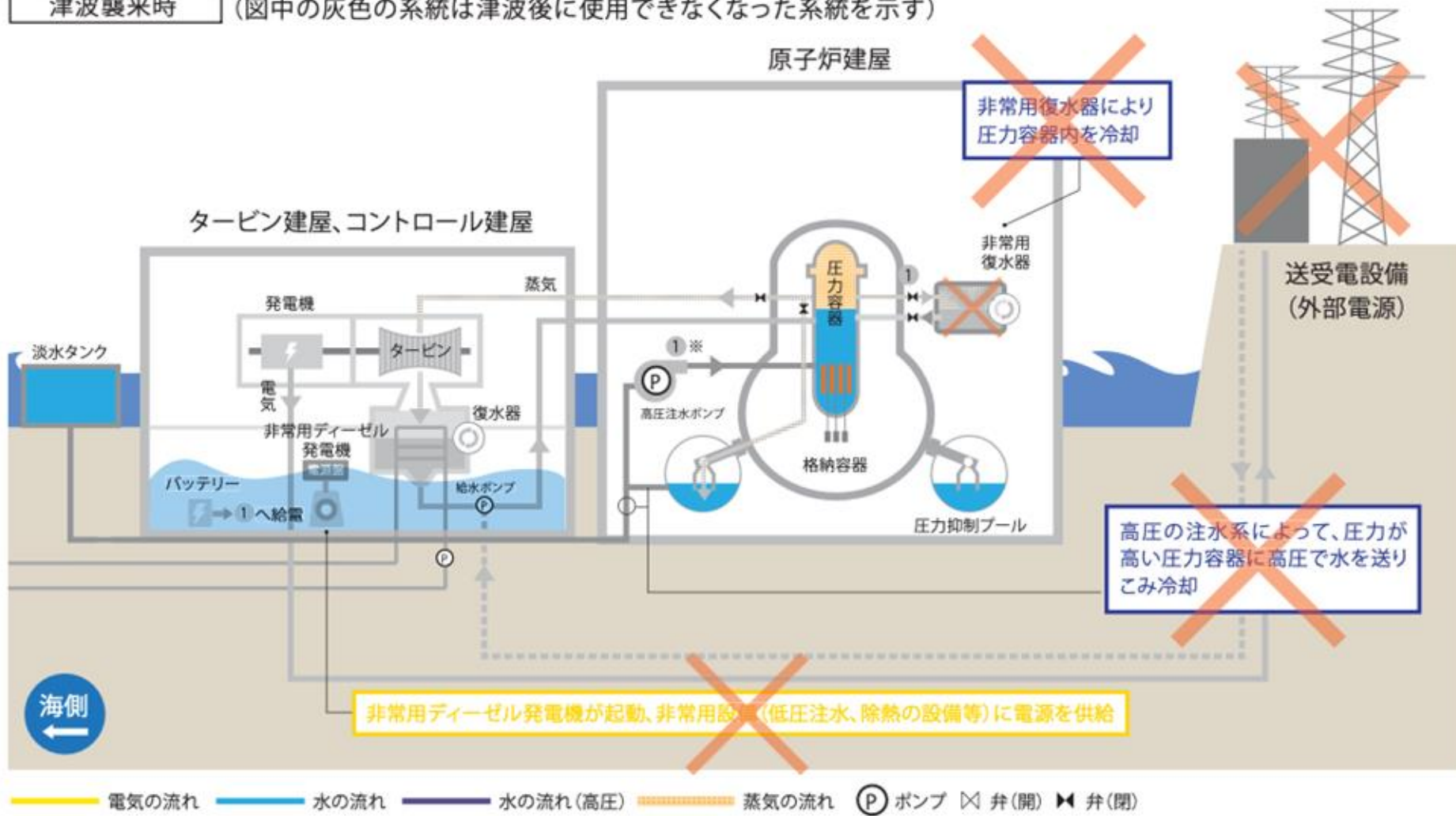
※系統内の弁の開閉に使用

【4】 出典：東京電力ホールディングス

1号機

津波襲来時

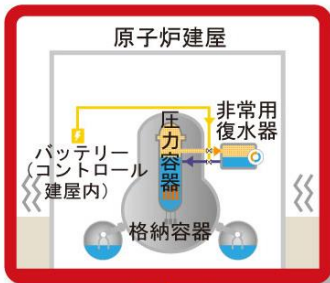
(図中の灰色の系統は津波後に使用できなくなった系統を示す)



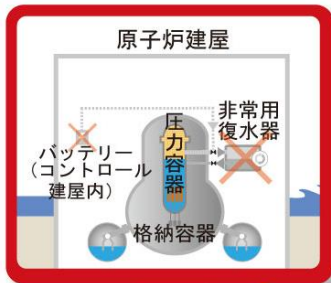
※系統内の弁の開閉に使用

1号機

14:46 地震発生

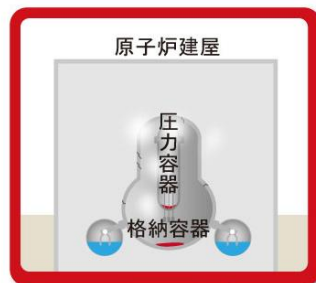


15:37 頃 津波襲来



津波により電源を喪失
炉心の冷却が困難に

水素が建屋に漏洩



15:36 1号機原子炉建屋水素爆発



3/11

通常時の冷温停止
プロセス

原子炉
(スクラム)
自動停止

送電線による
電力供給

復水器による
冷却

残留熱除去
系による
冷却(除熱)

冷温停止

燃料棒の外側の
ジルコニウムと
水蒸気が
化学反応し
水素が大量発生

3/12

緊急時の冷温停止
プロセス

非常用
ディーゼル
発電機

軽油で動く
発電機による
電力供給

高い圧力の
水で冷やす
(高圧注水)

圧力容器の
圧力を下げる
(減圧)

継続的に
水で冷やす
(低圧注水)

残留熱除去
系による
冷却(除熱)

冷温停止



4:00 頃 ~

津波発生後の対応・事象

冷却・注水・
減圧機能を
喪失

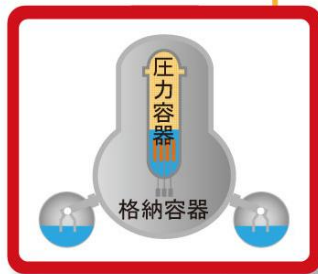
燃料の露出・
損傷
(空焚き状態)

圧力容器の
損傷

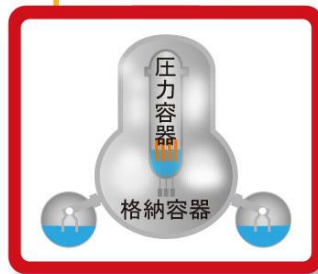
格納容器の
損傷

水素が建屋
に漏洩

消防車など
による注水
冷却



圧力容器内の水位が低下



水素発生

水位の低下や炉心損傷及び水素発生
の順序は、注水量の不確かさに
伴って前後していた可能性があります。

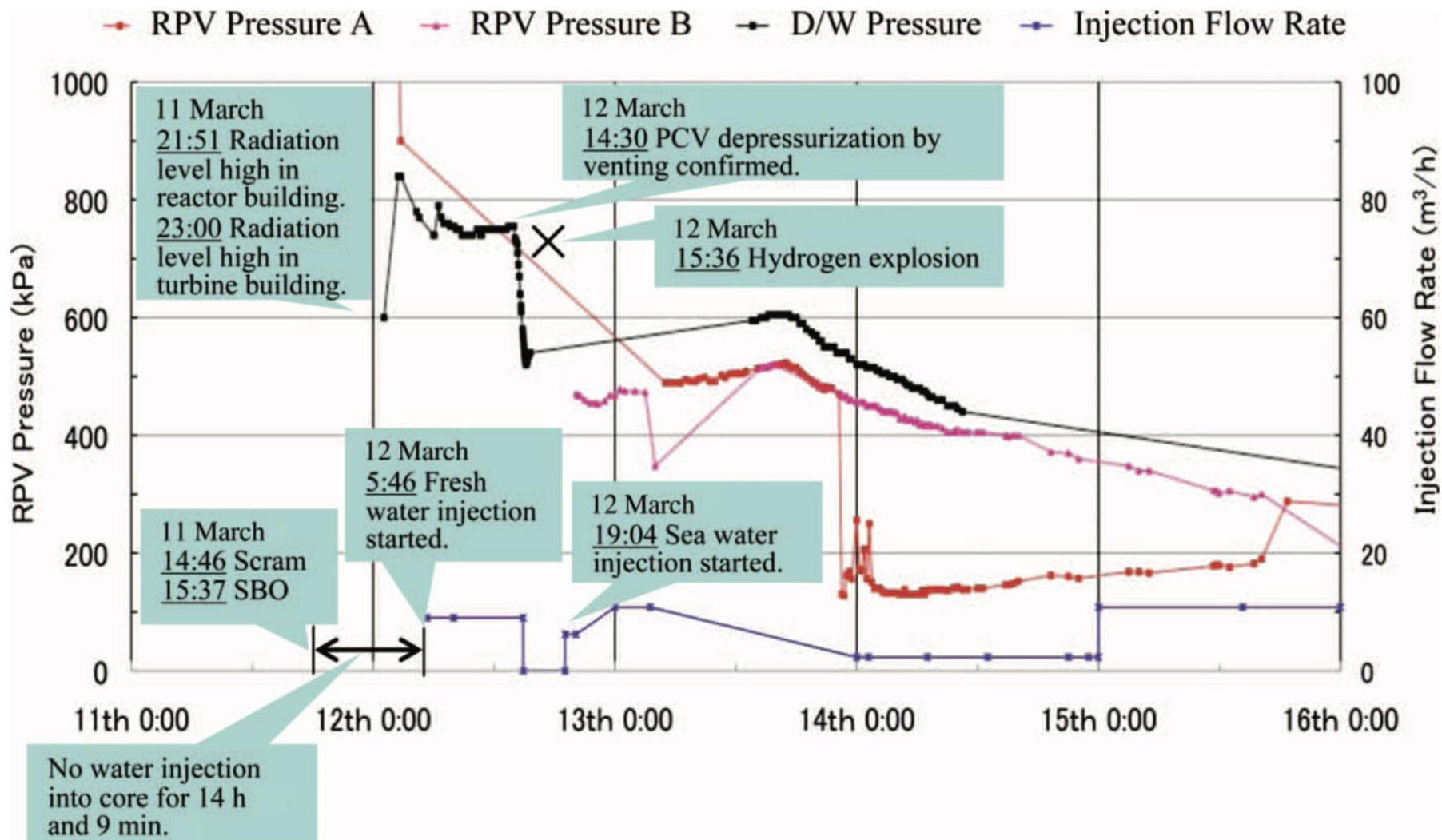
◀ 弁 (閉) ✕ 弁 (開) — 水の流れ
— 水の流れ (高圧) ■ 蒸気の流れ

1号機

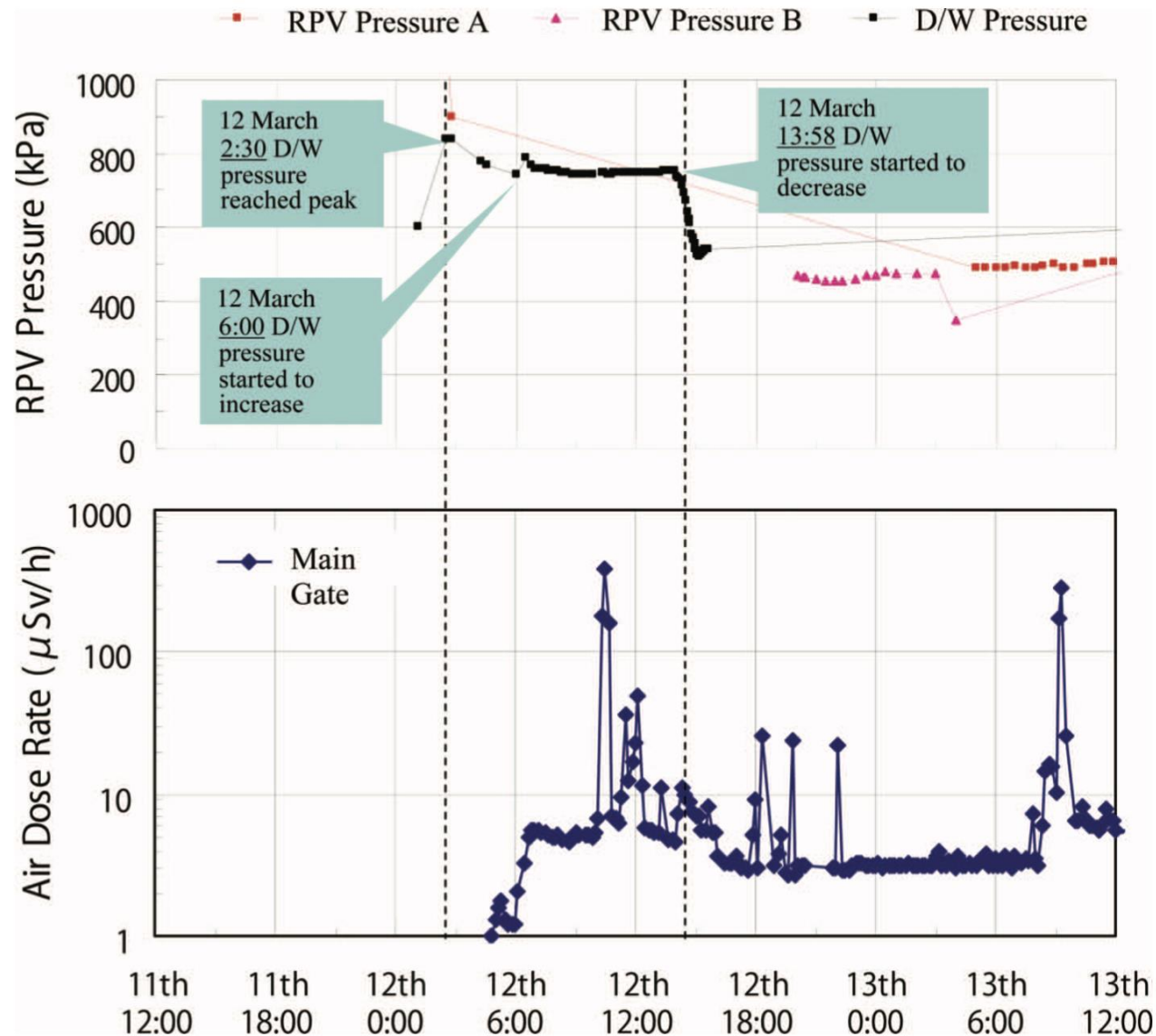
事故のポイント(1号機)

事故の教訓	発生した問題点
1:津波からの防護	<ul style="list-style-type: none"> ●津波の襲来により、建屋内外が浸水した。
2:電源/注水手段の確保	<ul style="list-style-type: none"> ●交流・直流全ての電源を喪失したことにより、全ての注水・除熱機能を失った。 ●注水・除熱ができなくなったことにより、圧力容器内の水位が低下し、津波から約4時間で炉心損傷に至った。
3:炉心損傷後の影響緩和	<ul style="list-style-type: none"> ●炉心損傷によって発生した水素が、圧力容器・格納容器から原子炉建屋内に漏れ出し、水素爆発が起こった。 ●溶融した炉心が圧力容器を貫通して、格納容器のコンクリートを侵食した。
4:プラントの状態把握	<ul style="list-style-type: none"> ●全ての電源が失われたことで照明、通信、監視・計測等の手段を失った他、全号機同時に危機的状況に陥ったことにより初動対応の混乱や情報共有の不備が生じた。
5:復旧作業環境の改善	<ul style="list-style-type: none"> ●大きな余震やそれに伴う津波の恐れ、瓦礫等の散乱により、現場のアクセス性・作業性が低下した。

1号機の熱水力挙動



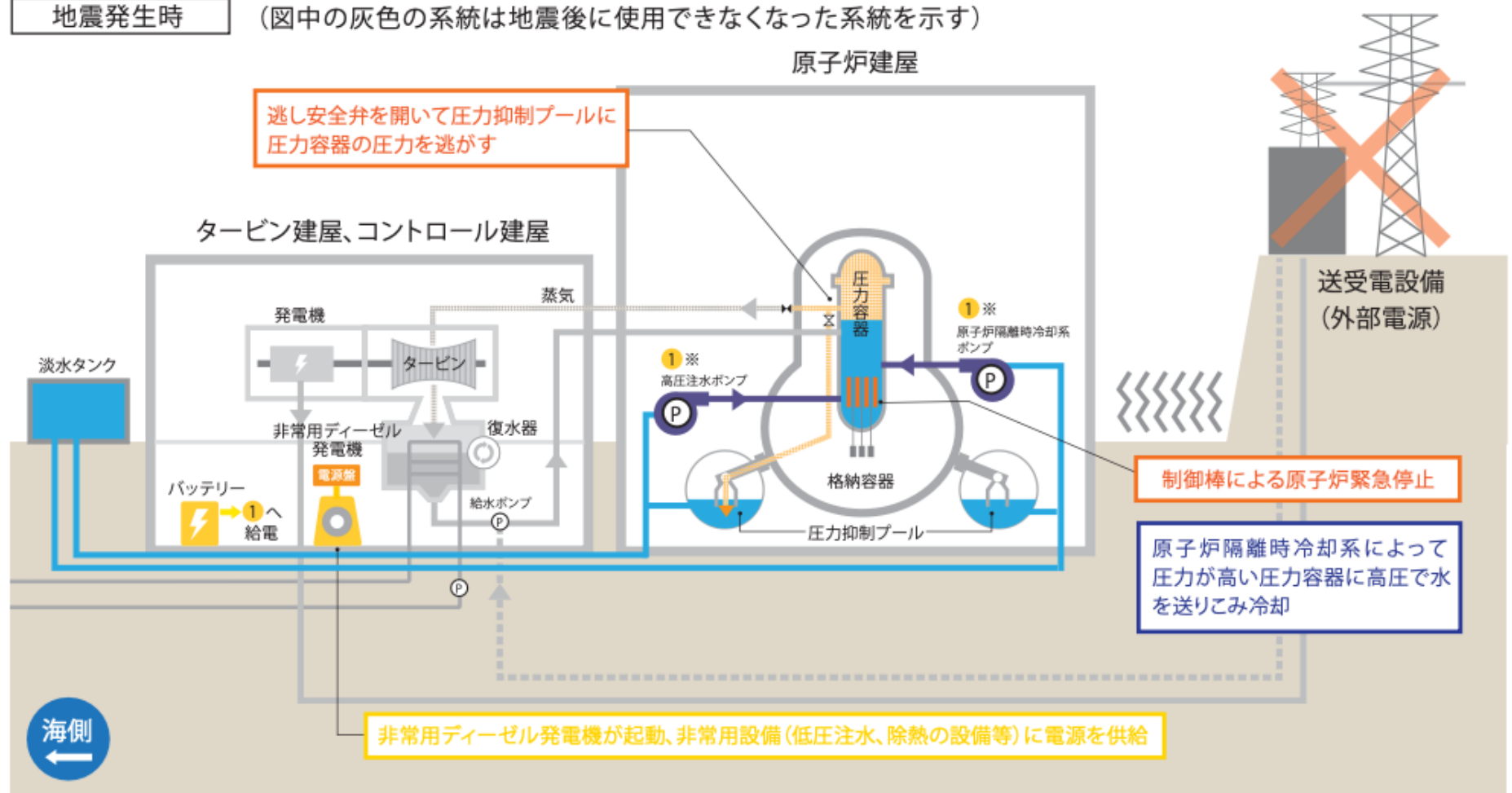
1号機の熱水力挙動



2号機概況

地震発生時

(図中の灰色の系統は地震後に使用できなくなった系統を示す)



逃し安全弁を開いて圧力抑制プールに圧力容器の圧力を逃がす

制御棒による原子炉緊急停止

原子炉隔離時冷却系によって圧力が高い压力容器に高圧で水を送りこみ冷却

非常用ディーゼル発電機が起動、非常用設備(低圧注水、除熱の設備等)に電源を供給

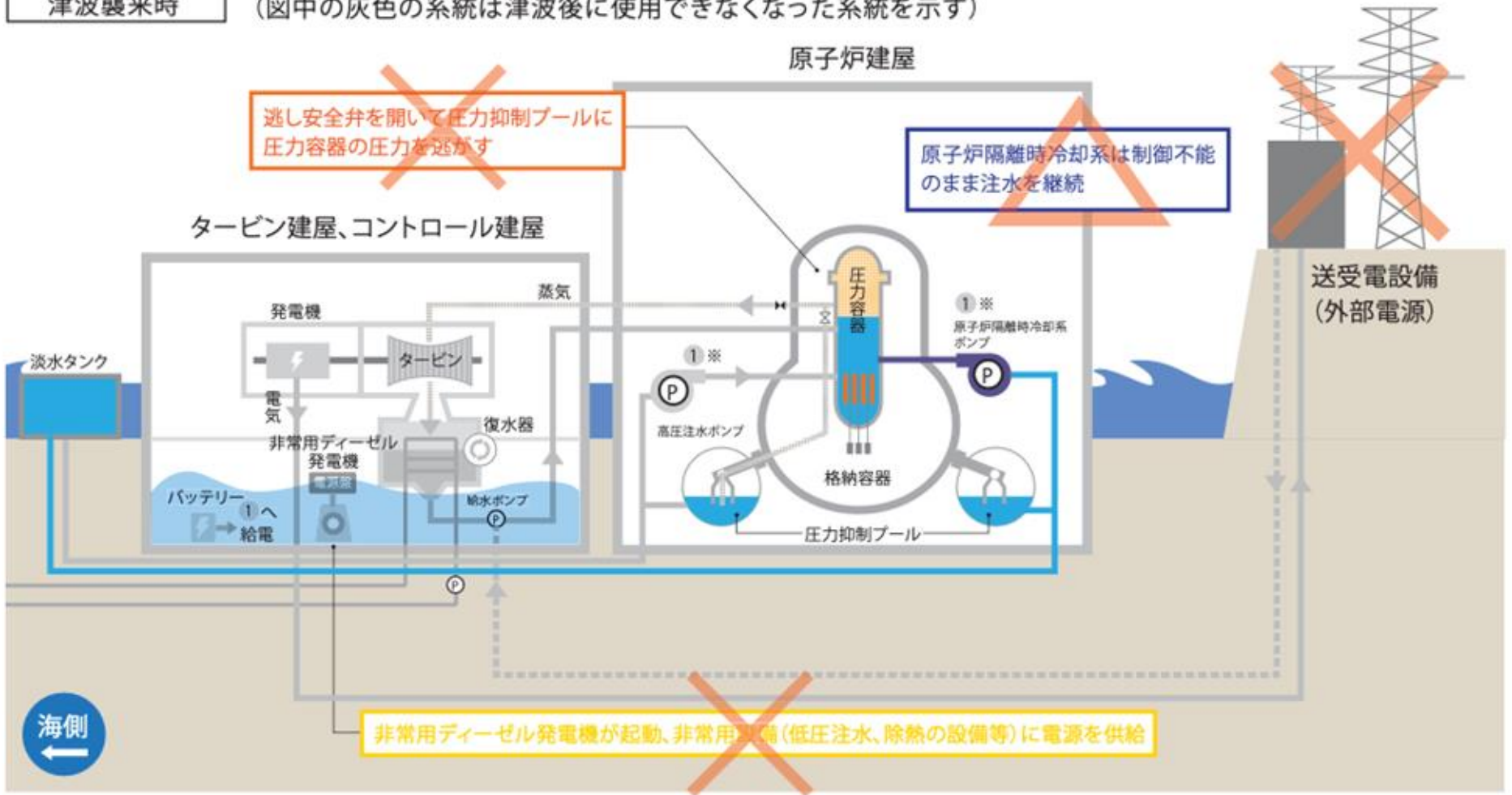
電気の流れ 水の流れ 水の流れ(高圧) 蒸気の流れ (P) ポンプ (X) 弁(開) (⇐) 弁(閉)

※系統内の弁の開閉に使用

2号機

津波襲来時

(図中の灰色の系統は津波後に使用できなくなった系統を示す)



— 電気の流れ
 — 水の流れ
 — 水の流れ(高圧)
 - - - 蒸気の流れ
 (P) ポンプ
 X 弁(開)
 \llcorner 弁(閉)

※系統内の弁の開閉に使用

【11】 出典：東京電力ホールディングス

2号機

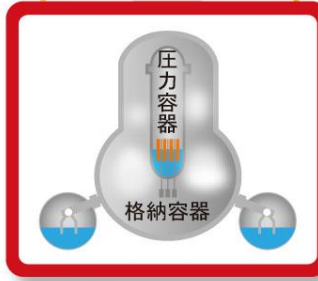
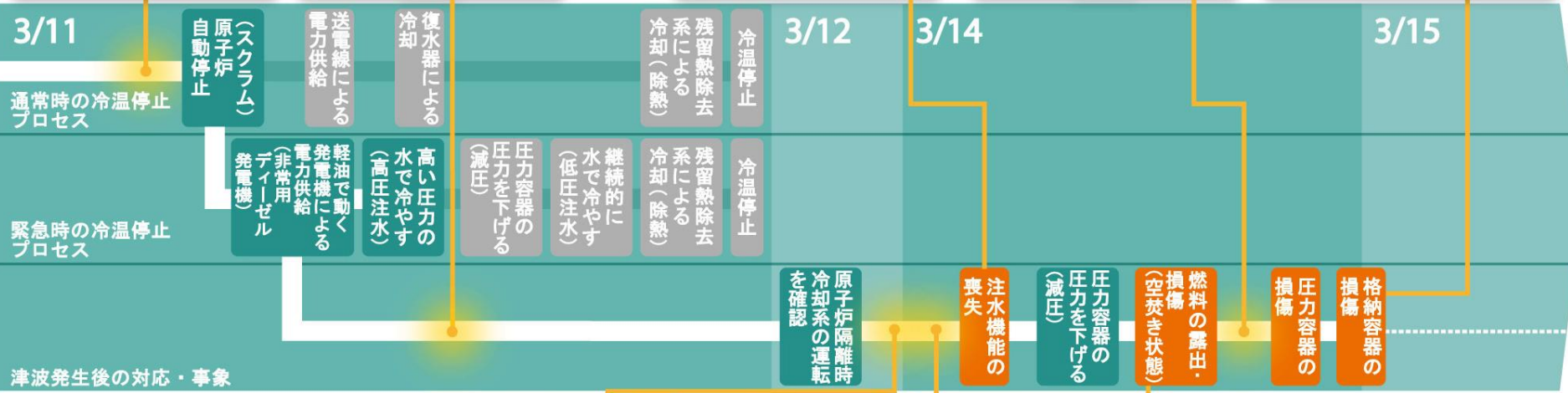
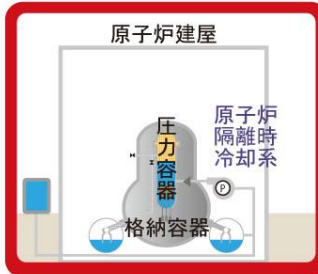
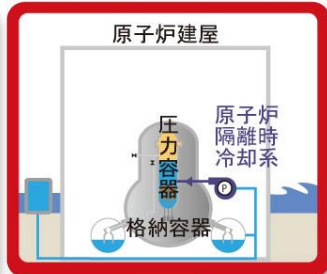
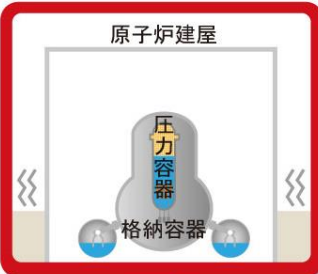
午前頃～ 原子炉建屋外への放射性物質の放出

14:46 地震発生

15:37 頃 津波襲来

13:25 原子炉隔離時冷却系 停止と判断

19:54 注水開始



水位の低下や炉心損傷及び水素発生
の順序は、注水量の不確かさに
伴って前後していた可能性があります。

15:36 1号機原子炉建屋 水素爆発

11:01 3号機原子炉建屋 水素爆発

(2号機原子炉建屋上部側面のパネルが開放)

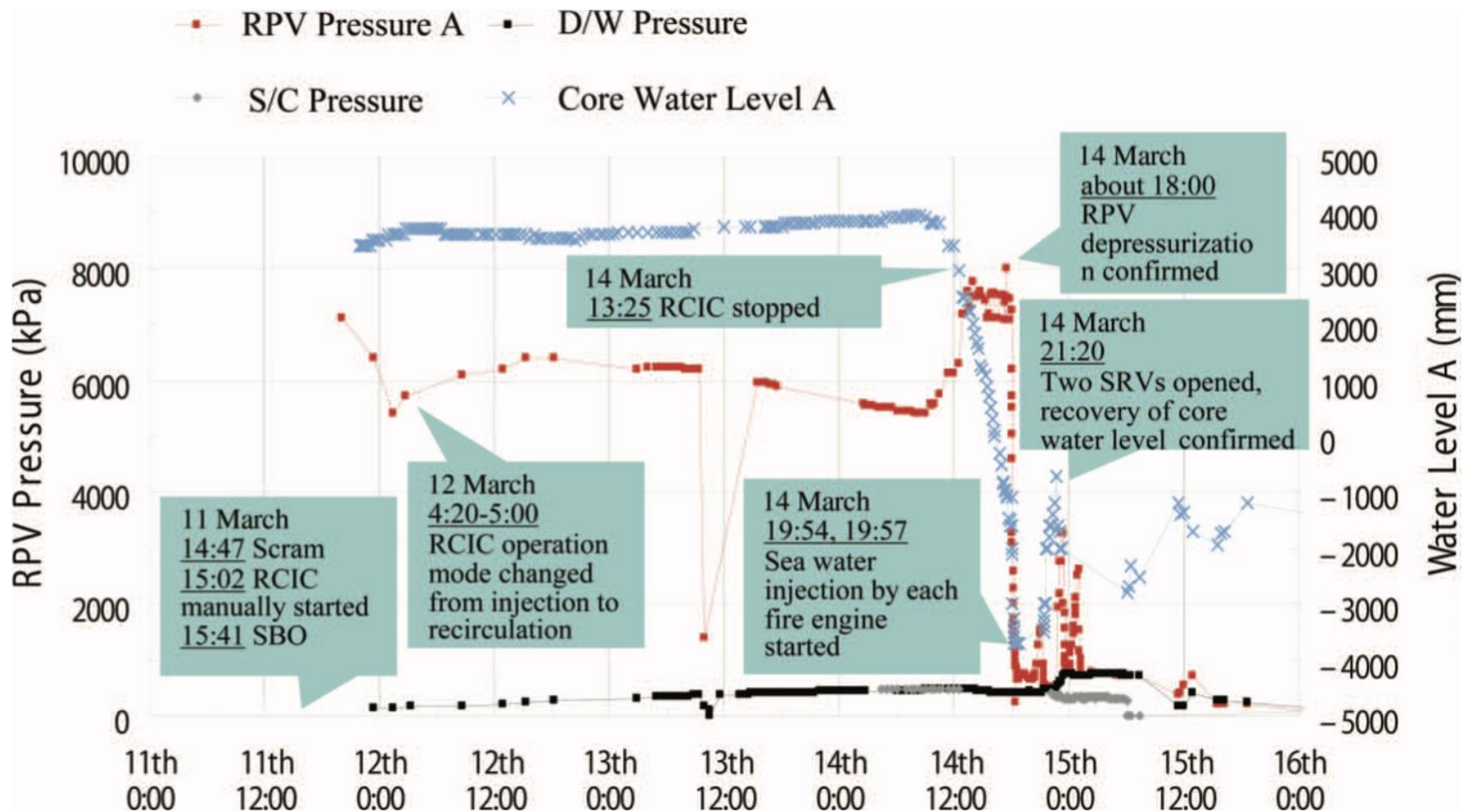
■ 弁(閉) □ 弁(開) — 水の流れ
— 水の流れ(高圧) ■ 蒸気の流れ

2号機

事故のポイント(2号機)

事故の教訓	発生した問題点
1:津波からの防護	<ul style="list-style-type: none"> ●津波の襲来により、建屋内外が浸水した。
2:電源/注水手段の確保	<ul style="list-style-type: none"> ●交流・直流全ての電源を喪失したことにより、原子炉隔離時冷却系を除く注水・除熱機能を失った。同時に原子炉隔離時冷却系は制御不能となり、数日間動作したが、その後停止した。 ●原子炉隔離時冷却系停止後、圧力容器の減圧に時間を要し、水位が低下、炉心損傷に至った。
3:炉心損傷後の影響緩和	<ul style="list-style-type: none"> ●炉心損傷の後、格納容器も損傷し、水素や放射性物質が外部に漏れだした。
4:プラントの状態把握	<ul style="list-style-type: none"> ●全ての電源が失われたことで照明、通信、監視・計測等の手段を失った他、全号機同時に危機的状況に陥ったことにより初動対応の混乱や情報共有の不備が生じた。
5:復旧作業環境の改善	<ul style="list-style-type: none"> ●大きな余震やそれに伴う津波の恐れ、津波や1・3号機の水素爆発による瓦礫の散乱で、現場のアクセス性・作業性が低下した。 ●1・3号機の水素爆発によって、準備を進めていた電源車や消防車が損傷した。 ●放射線量の上昇や放射線管理等に対応するための資機材の不足、事故対応が数日間に亘るなど著しく作業環境が悪化した。

2号機の熱水力挙動



[14] Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

3号機概況

地震発生時

(図中の灰色の系統は地震後に使用できなくなった系統を示す)

圧力容器の逃がし安全弁を開いて
圧力抑制プールに圧力を逃がす

原子炉隔離時冷却系によって
圧力容器に水を送りこみ冷却

送受電設備
(外部電源)

タービン建屋

原子炉建屋

淡水タンク

発電機

タービン

蒸気

原子炉隔離時
冷却系ポンプ

バッテリー

非常用ディーゼル
発電機

電源盤

電気

へ給電

復水器

給水ポンプ

高圧注水ポンプ

格納容器

圧力抑制プール

スクラム成功による原子炉緊急停止

非常用ディーゼル発電機が起動、非常用設備(低圧注水、除熱の設備等)に電源を供給

海側

電気の流れ

水の流れ

水の流れ(高圧)

蒸気の流れ

ポンプ

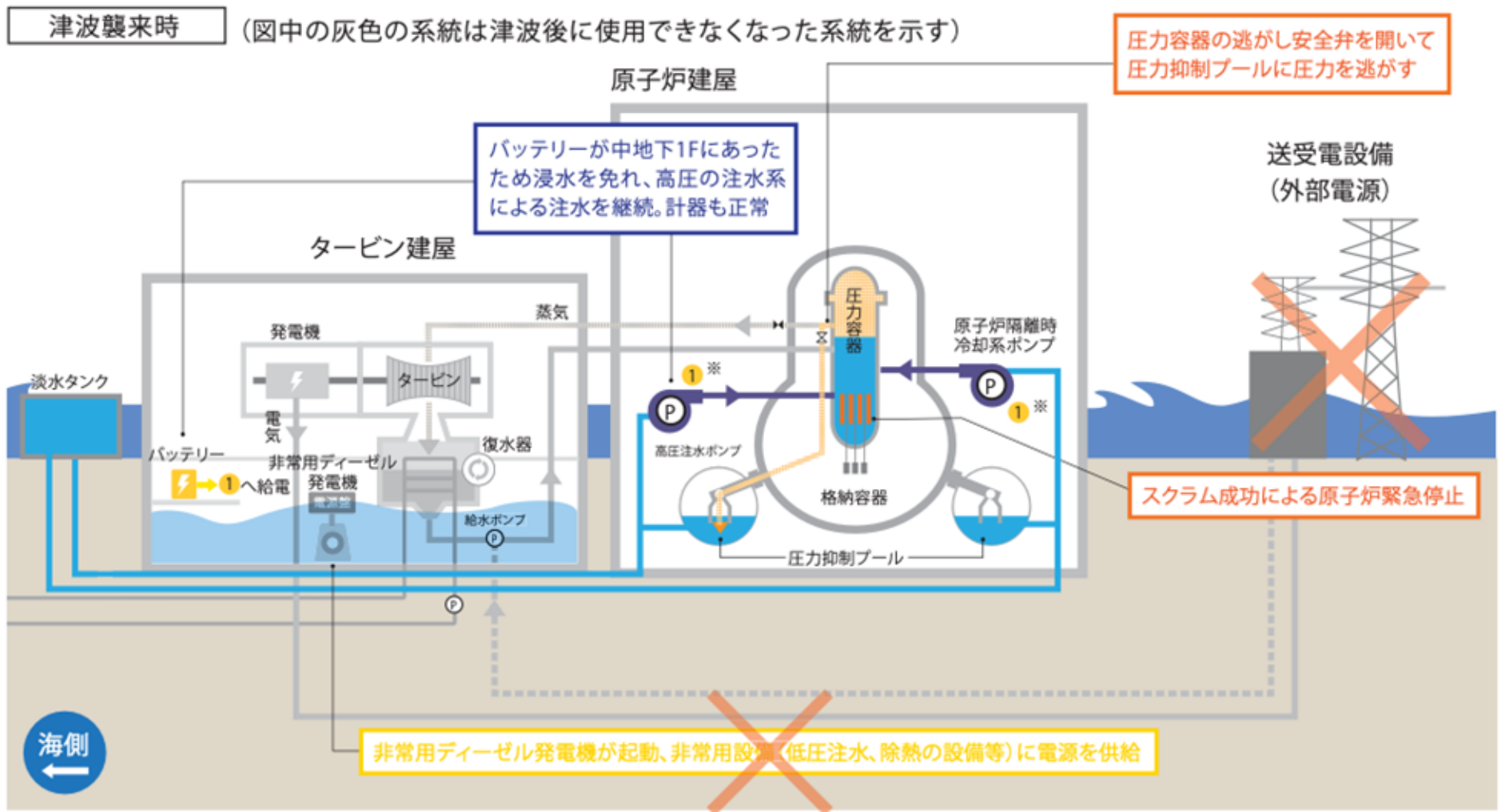
弁(開)

弁(閉)

※系統内の弁の開閉に使用

【15】 出典：東京電力ホールディングス

3号機



— 電気の流れ
 — 水の流れ
 — 水の流れ (高圧)
 — 蒸気の流れ
 (P) ポンプ
 X 弁 (開)
 \blacktriangleright 弁 (閉)

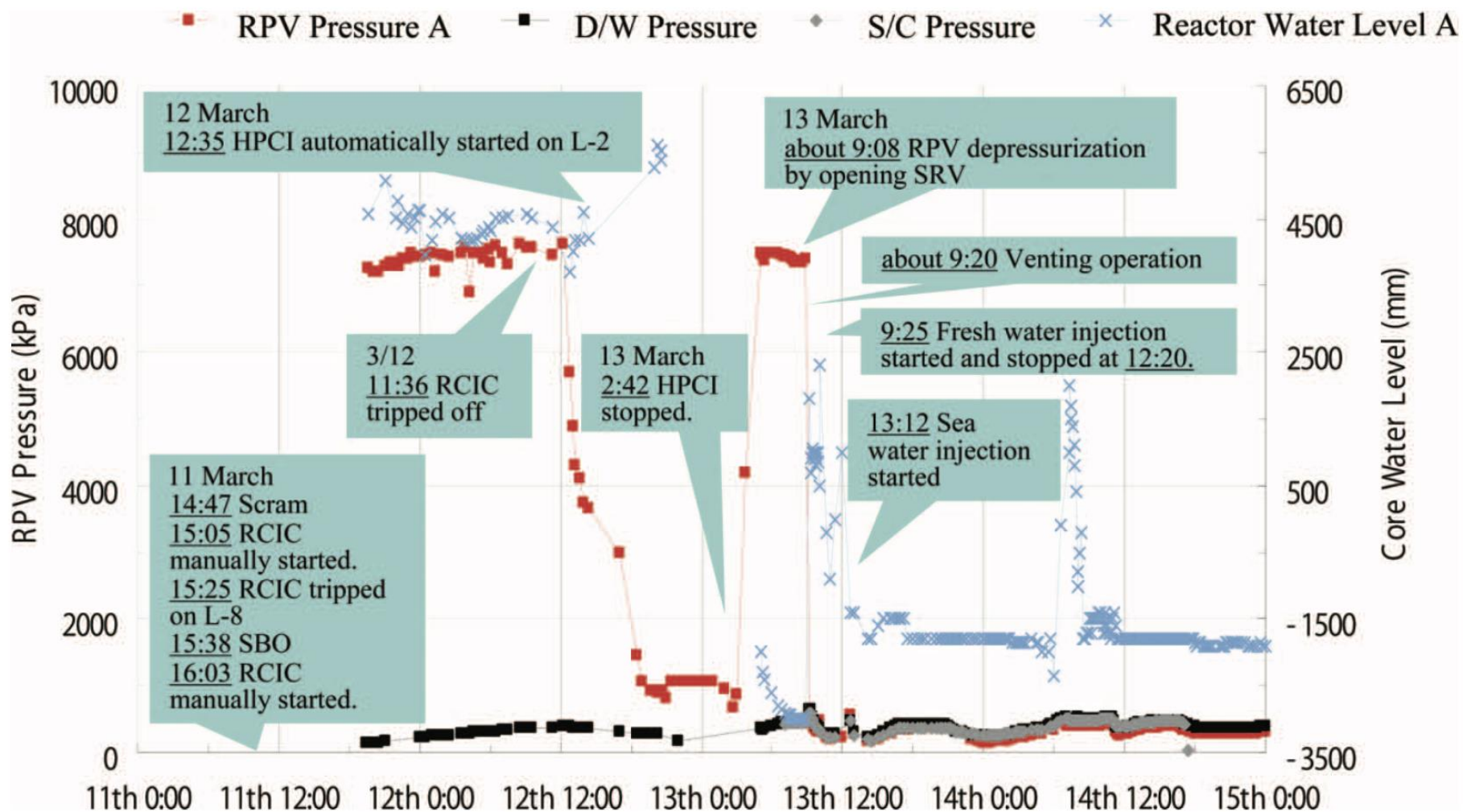
※系統内の弁の開閉に使用

3号機

事故のポイント(3号機)

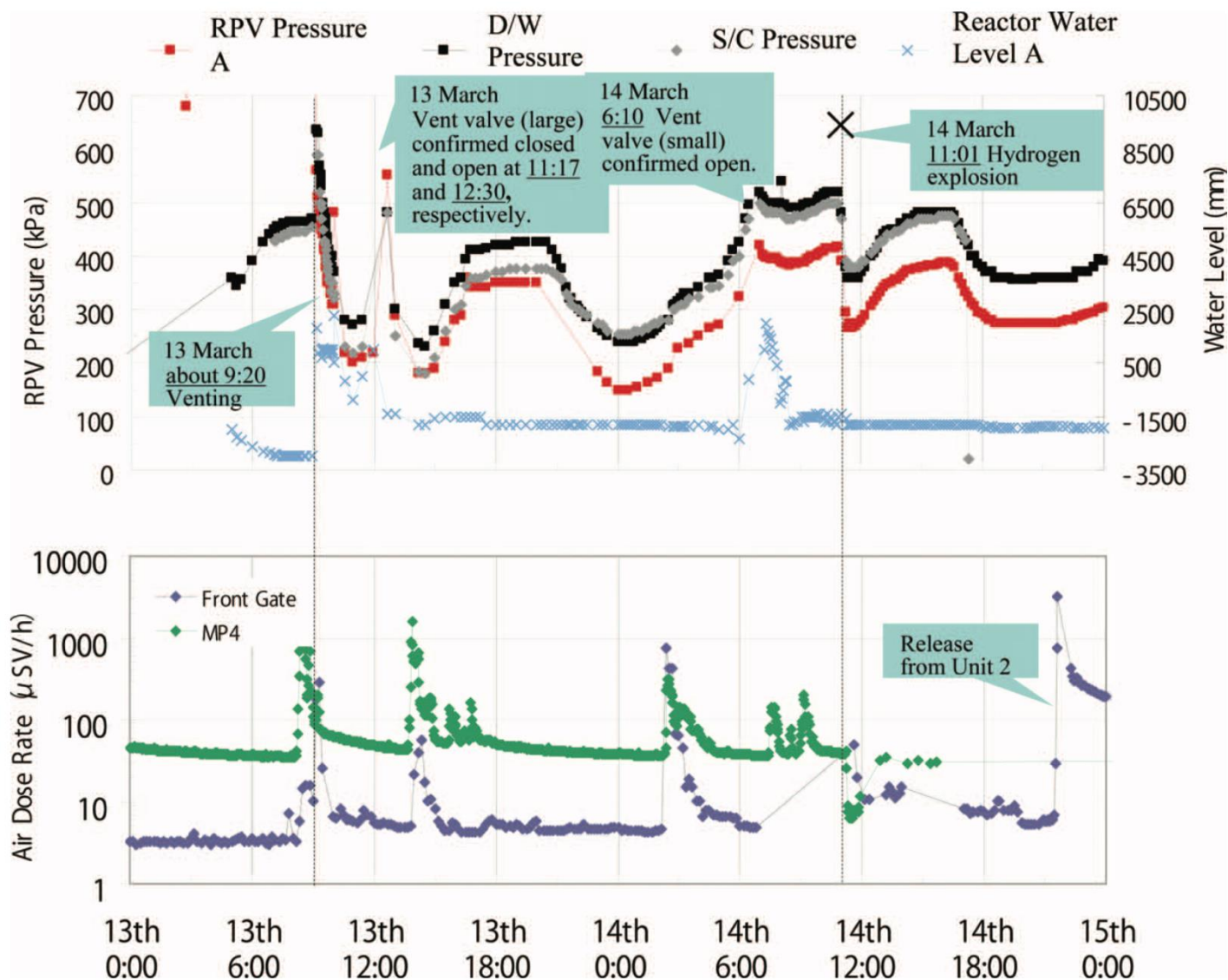
事故の教訓	発生した問題点
1:津波からの防護	<ul style="list-style-type: none"> ●津波の襲来により、建屋内外が浸水した。
2:電源/注水手段の確保	<ul style="list-style-type: none"> ●全ての交流電源を喪失したことにより、交流駆動の注水・除熱機能を失った。 ●高圧注水系の停止後、圧力容器の減圧に時間がかかり、水位が低下、炉心損傷に至った。
3:炉心損傷後の影響緩和	<ul style="list-style-type: none"> ●炉心損傷によって発生した水素が、圧力容器・格納容器から原子炉建屋内に漏れ出し、水素爆発が起こった。
4:プラントの状態把握	<ul style="list-style-type: none"> ●交流電源が失われたことにより、照明や通信手段が限られた他、全号機同時に危機的状況に陥ったことにより、初動対応の混乱が生じた。
5:復旧作業環境の改善	<ul style="list-style-type: none"> ●大きな余震やそれに伴う津波の恐れ、瓦礫の散乱等により、現場のアクセス性・作業性が低下した。 ●放射線量の上昇や放射線管理等に対応するための資機材の不足、事故対応が数日間に亘るなど著しく作業環境が悪化した。

3号機の熱水力挙動



[19] Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

3号機の熱水力挙動



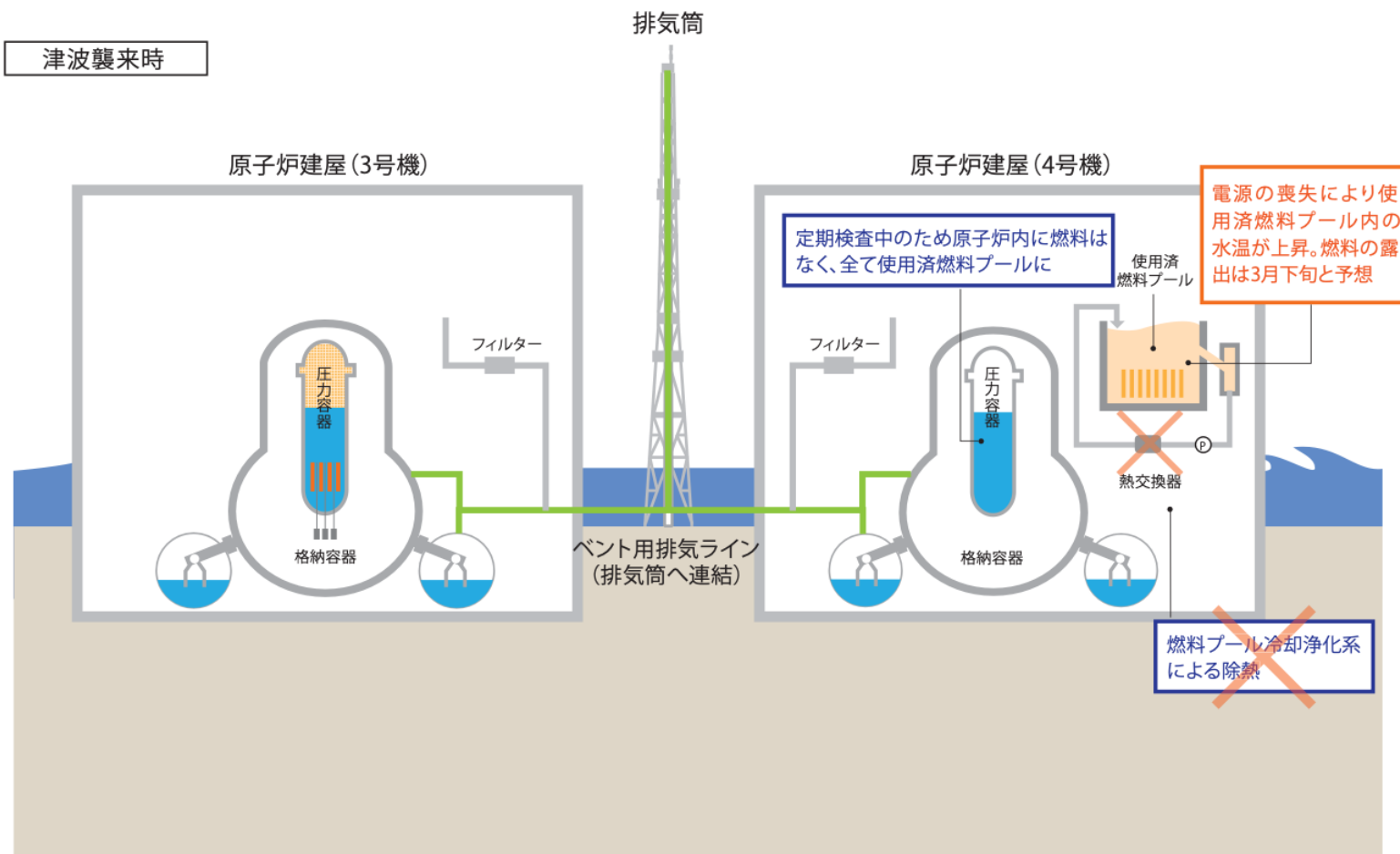
4号機

事故のポイント(4号機)

- 電源/注水手段の確保…地震と津波の襲来により全電源を喪失し、使用済燃料プールへの注水・冷却手段を喪失した。
さらに、他号機の原子炉への対応と並行して使用済燃料プールへの対応を行わなければならなかった。
- 事故後の影響緩和……3号機からの水素の流入により水素爆発が発生した。

【21】出典：東京電力ホールディングス

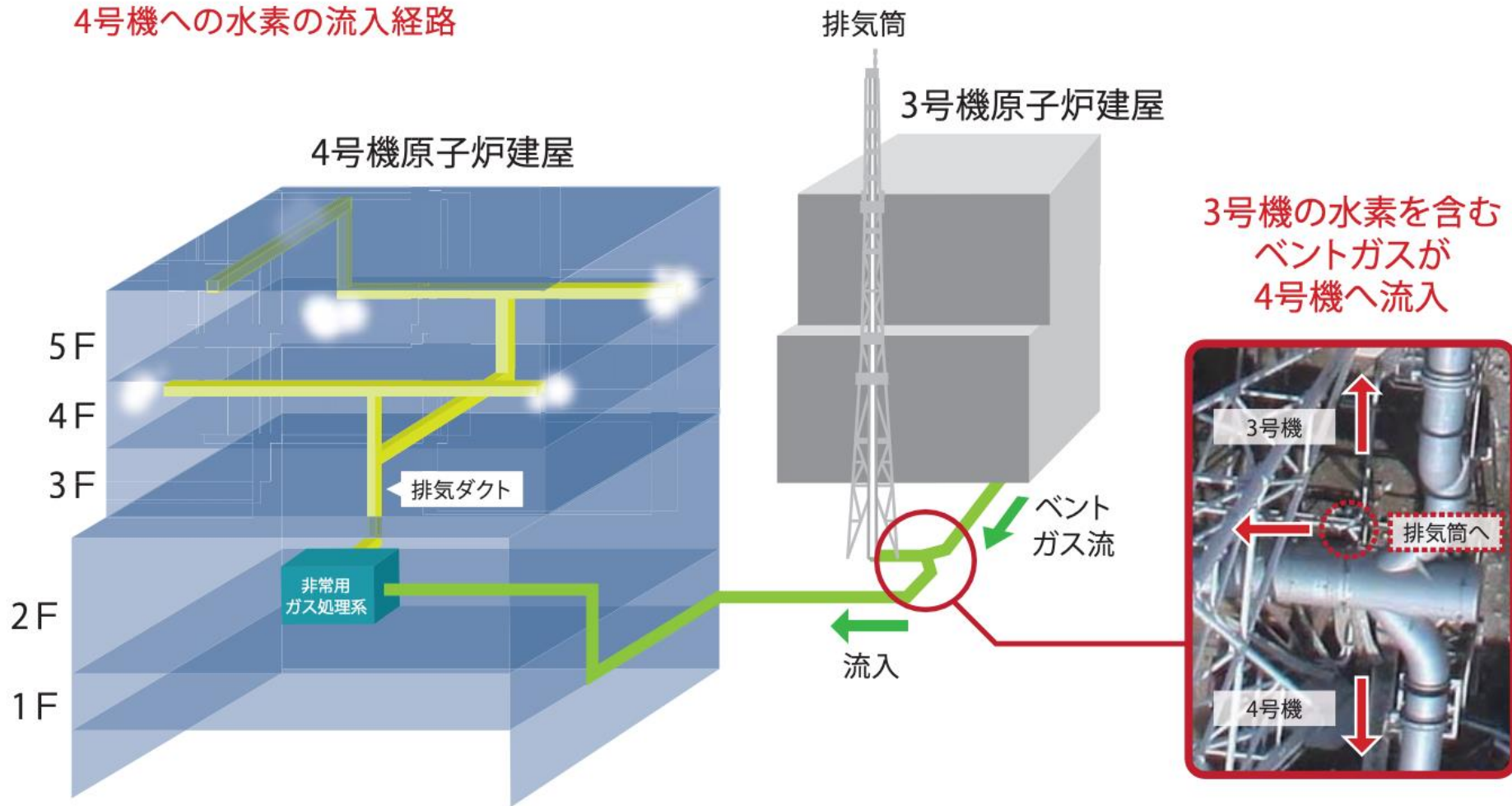
津波襲来時の4号機の変化



【22】出典：東京電力ホールディングス

4号機

4号機への水素の流入経路



3号機の水素を含む
ベントガスが
4号機へ流入

シビアアクシデント時の熱流動挙動

- 溶融燃料

- 水・Zr反応による水素が発生および漏洩。水素爆発。

➢ 水素除去のための機器：PAR, イグナイター

- 溶融燃料と水の相互作用による水蒸気爆発

- 溶融燃料とコンクリートの反応：MCCI

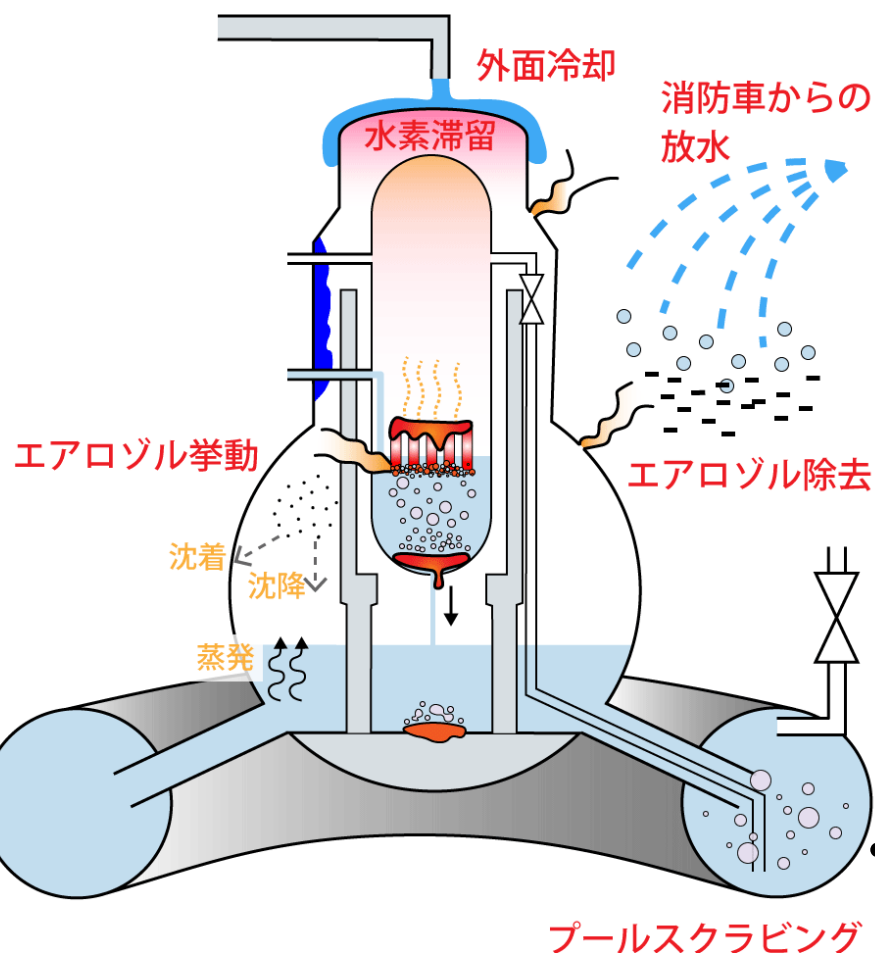
- 水の相変化による格納容器の過圧（破損）

- 溶融した燃料から発生する熱によるシール材の破損

- ソースターム

- エアロゾル状の核分裂生成物の放出とその除去（放水）

- プールスクラビングによる核分裂生成物除去



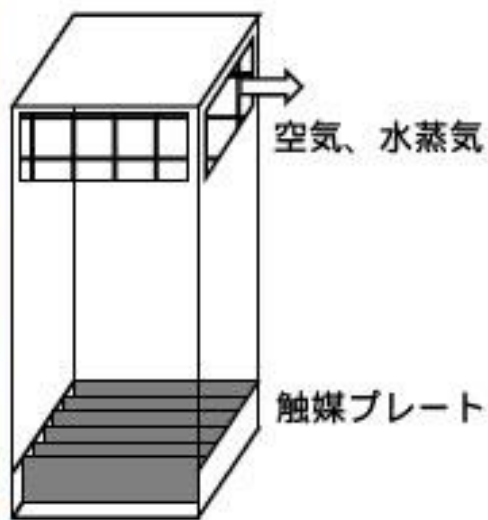
水・ジルコニウム反応による水素発生

- 燃料被覆管が非常に高温の場合，燃料被覆管に含まれるジルコニウムと炉内の水と反応して水素が発生する。
- 約 900℃以上で反応が顕著になる。

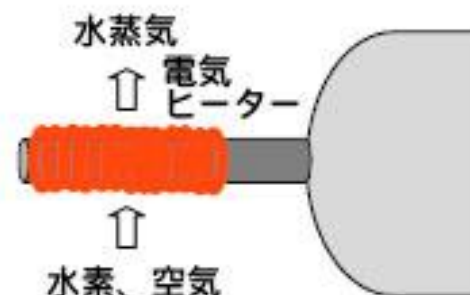


水素濃度低減のための機器

- PAR (Passive Autocatalytic Recombiner) : 静的触媒式水素再結合装置
- イグナイタ : 電気式水素燃焼装置



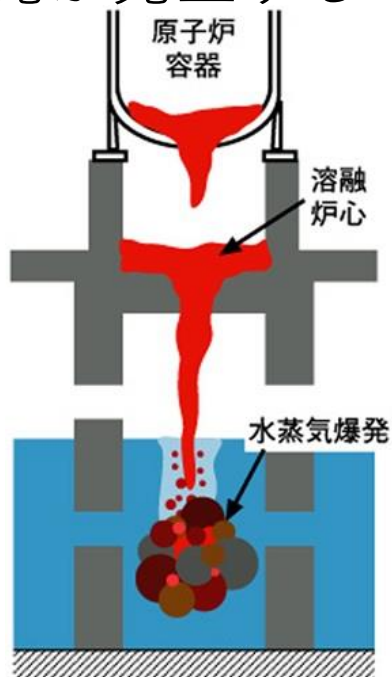
↑ 水素、空気、水蒸気
〔動作原理〕



〔動作原理〕

水蒸気爆発

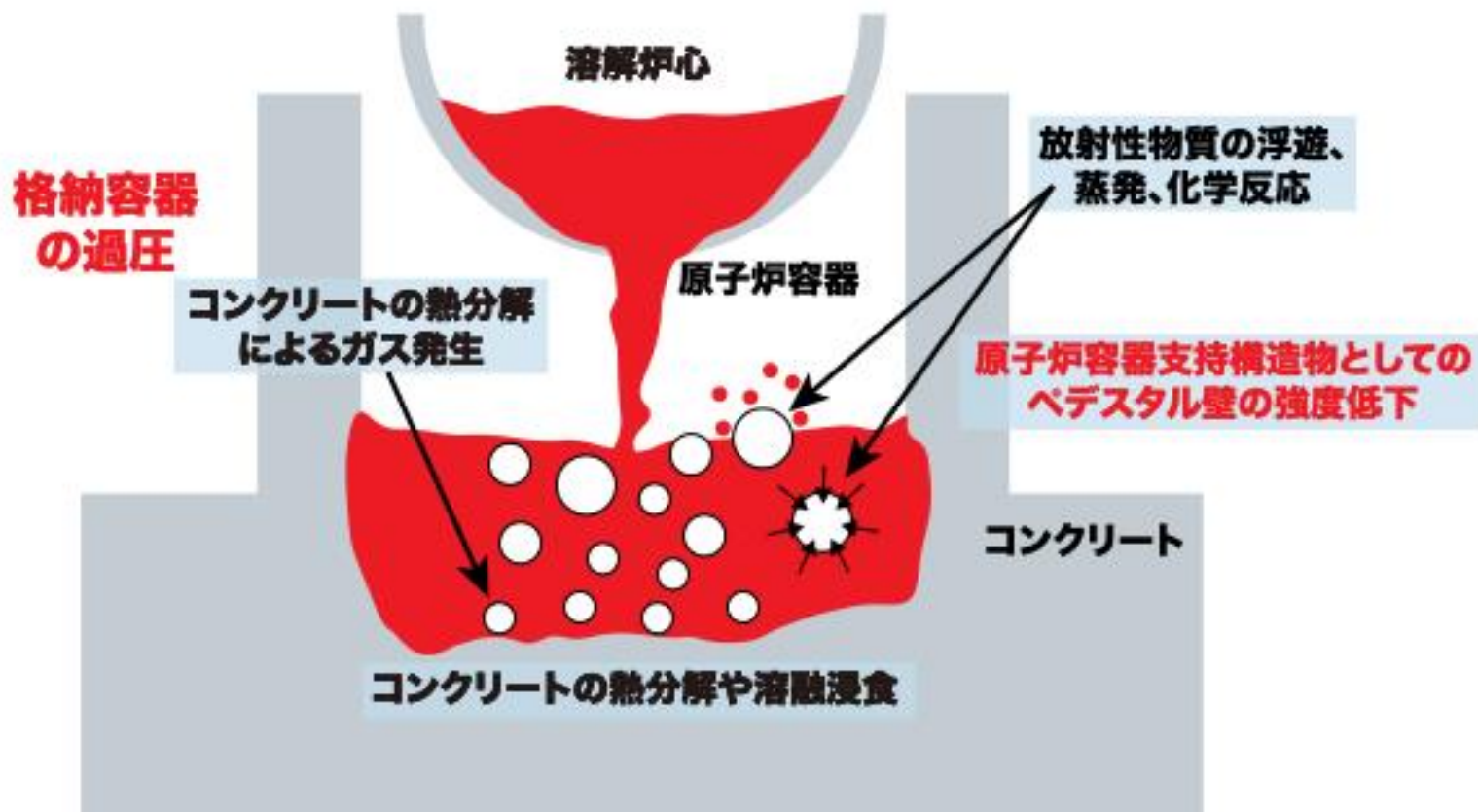
- 高い熱エネルギーを有する溶融金属等が低温の水に接触すると、急激に蒸気を発生させ、それによる圧力波が発生して機械的な破損を伴う現象
 - ATOMICAより
http://www.rist.or.jp/atomica/dic/dic_detail.php?Dic_Key=371
- 溶融炉心が格納容器等にたまった水に落下すると水蒸気爆発が発生する可能性がある。



【25】未来を拓く原子力 原子力機構の研究開発成果 2006,
独立行政法人日本原子力研究開発機構, 2006.10, 図5-14

MCCI : Molten Core Concrete Interaction

- 溶融炉心とコンクリートの相互作用
 - シビアアクシデント時，格納容器の健全性に対する脅威となりうる現象の1つ
 - コンクリートの浸食及び構造強度の低下、非凝縮性・可燃性ガス及び放射性物質の発生



解析の例：福島第1原発2号機の挙動の解析

- 2号機では，原子炉隔離時冷却系（RCIC）の作動により炉心（核燃料）の冷却が3日間維持。
 - RCICは圧力容器から発生する蒸気により駆動できる設計。
- 冷却機能の回復操作（原子炉の減圧と注水の再開）が行われたが，炉心損傷に至った。
 - 原子炉を減圧しないと，消防ポンプによる注水ができなかった。

2号機における熱流動挙動をBEコードTRAC-BF1により解析することで，原子炉の現象を明らかにする。

解析モデル

解析対象: 110万kW BWR5

解析条件:

原子炉スクラム
再循環ポンプ停止
主給水停止
主蒸気隔離弁閉

RCIC作動 (25万秒まで)

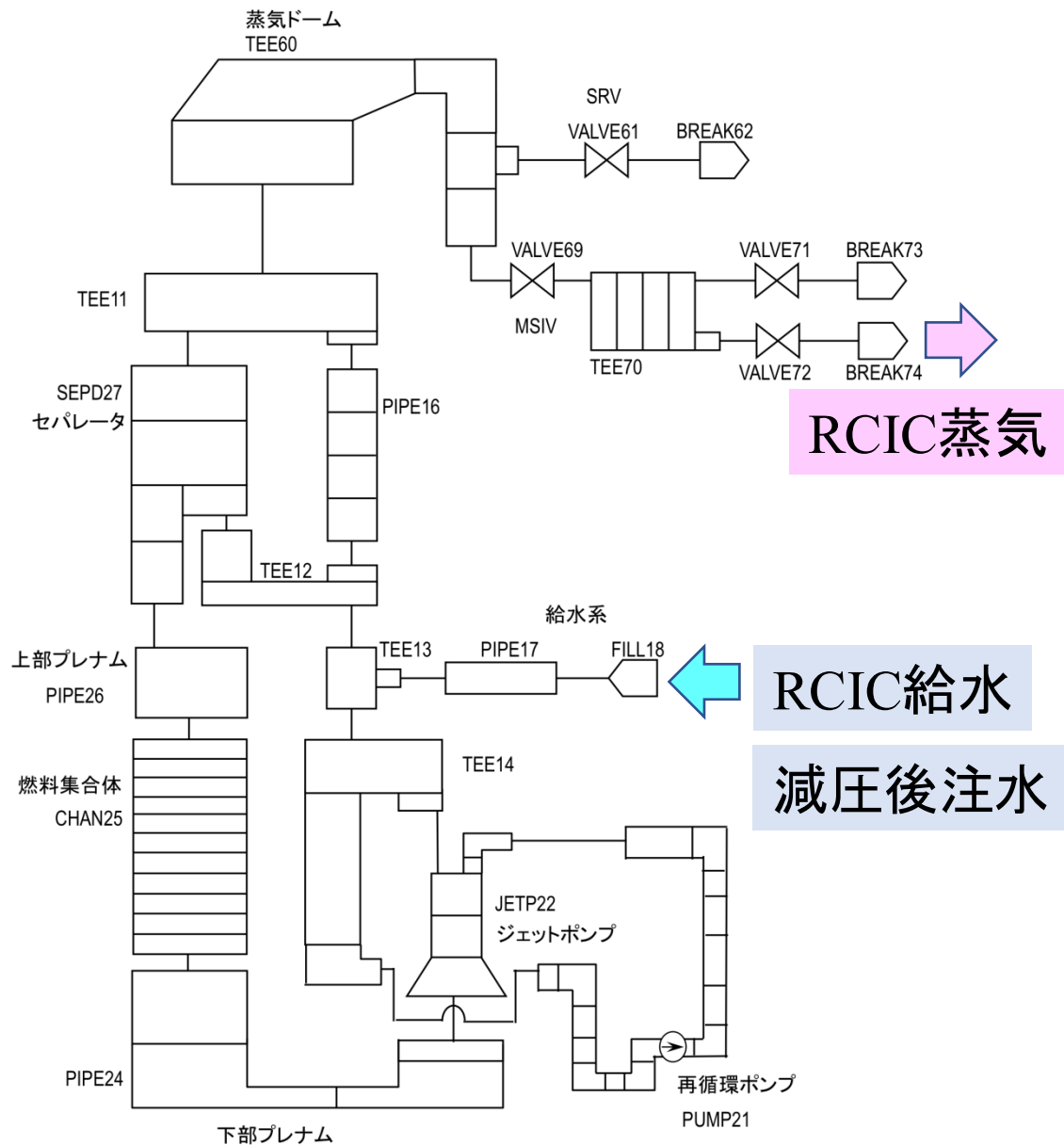
蒸気: 蒸気ラインより
給水: 給水ラインより
流量: 出力に比例

SRV開

RCIC停止後2万秒

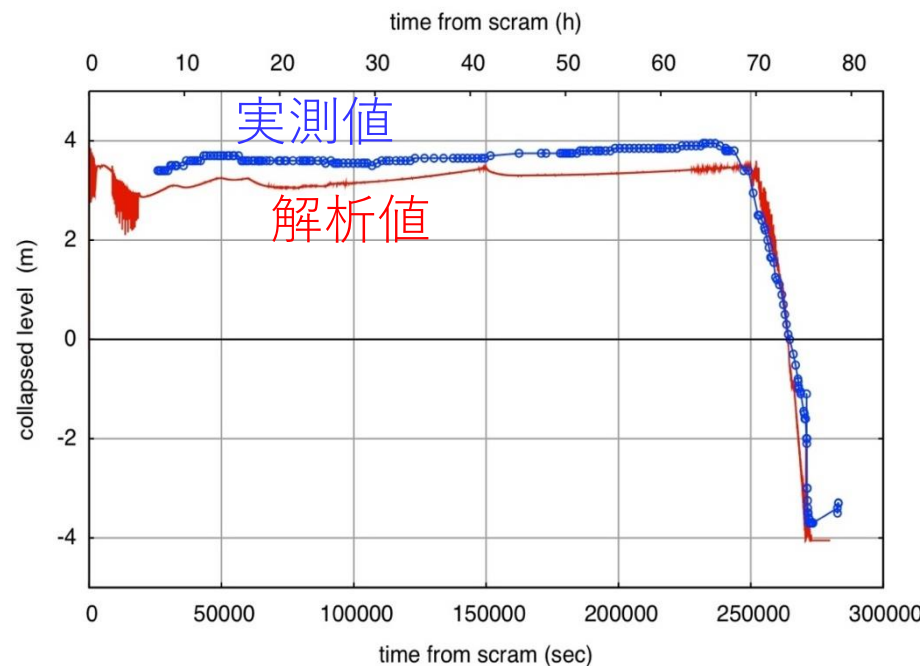
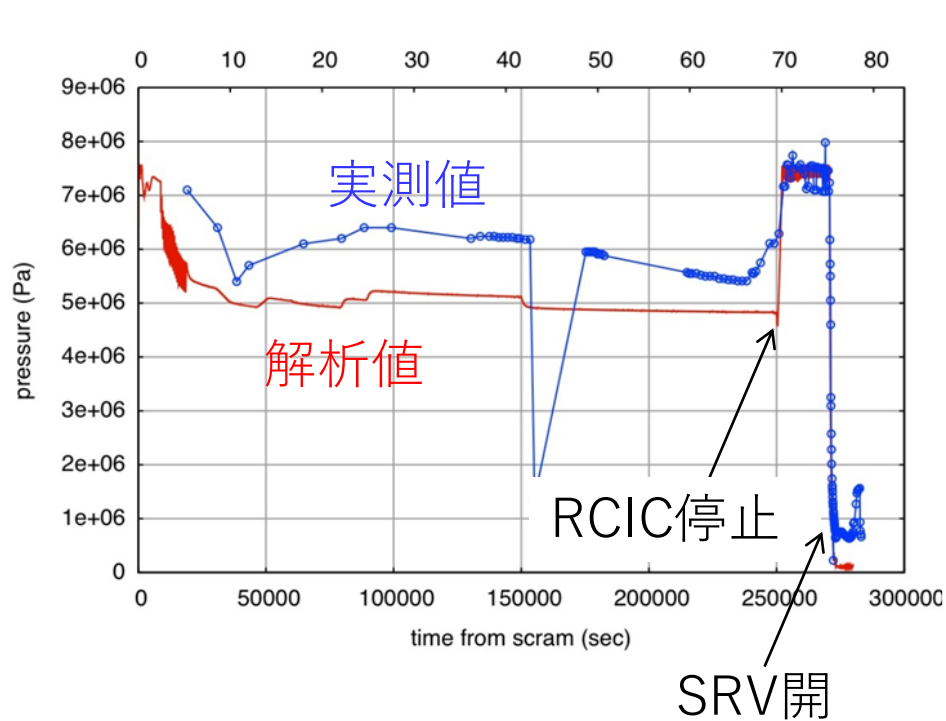
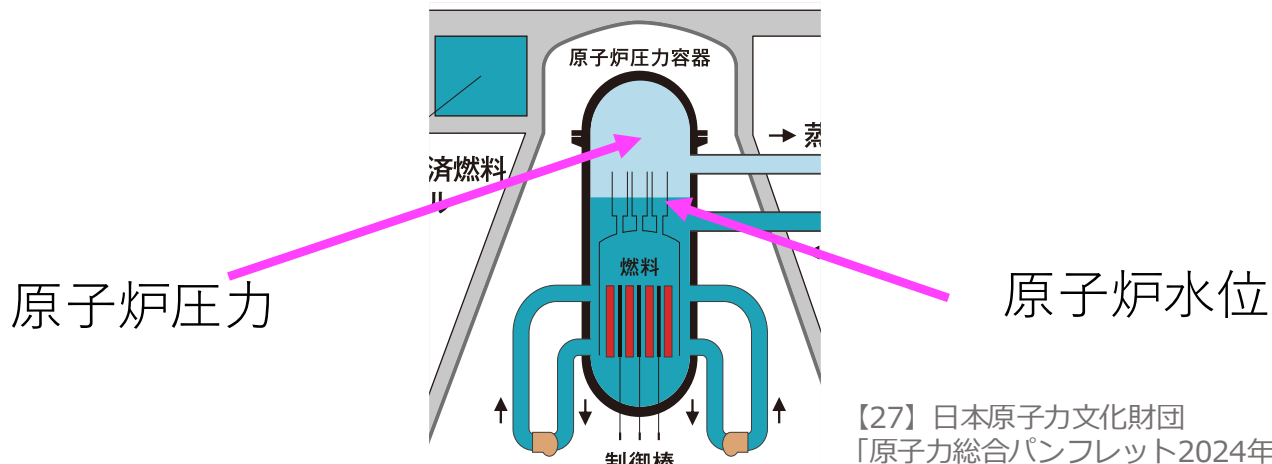
減圧後注水

0.6MPaで15kg/s.



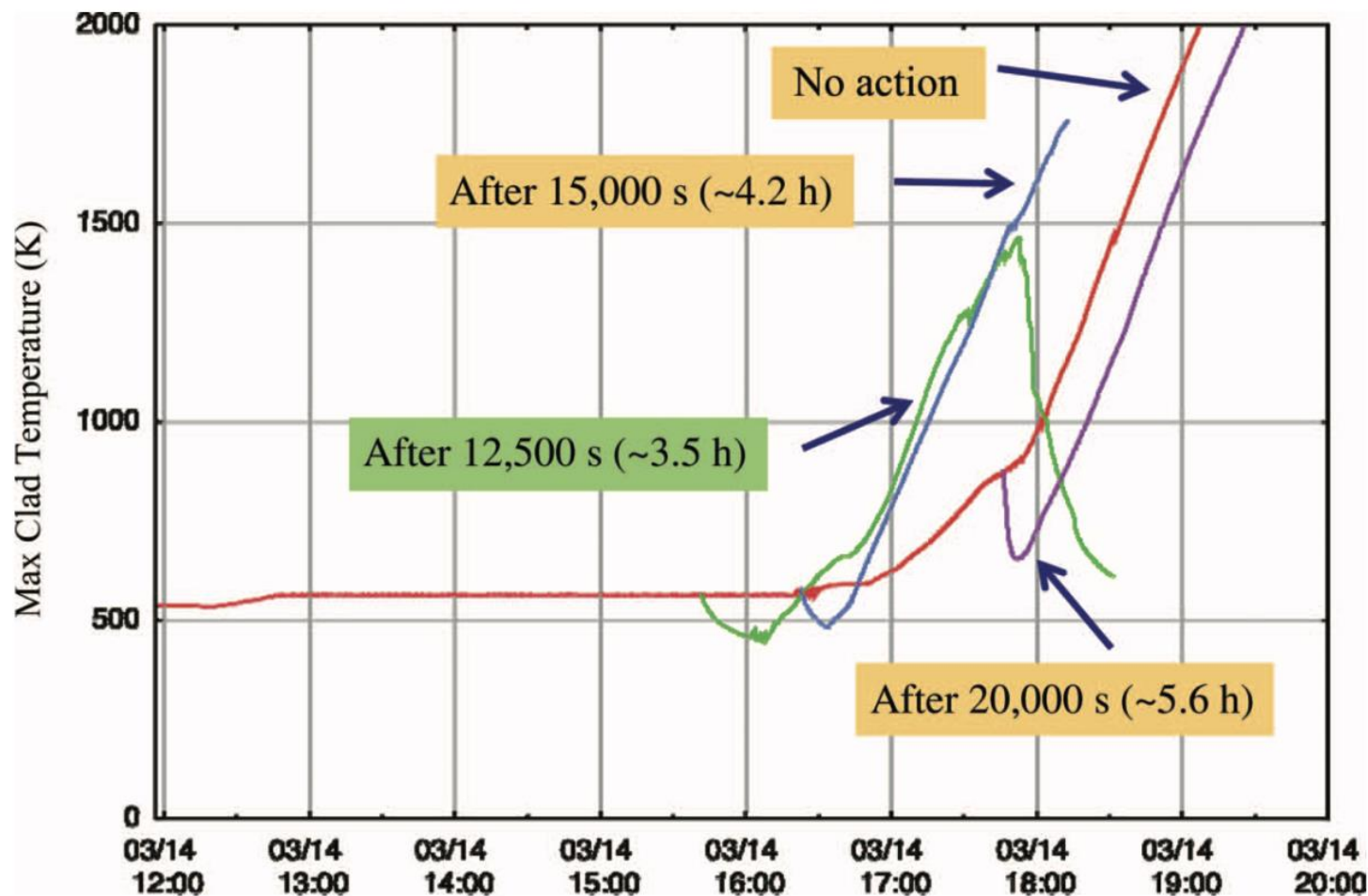
【26】 出典：渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報：BWR全電源喪失事故の解析
福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌,
10巻, 4号, pp. 240-244

解析結果



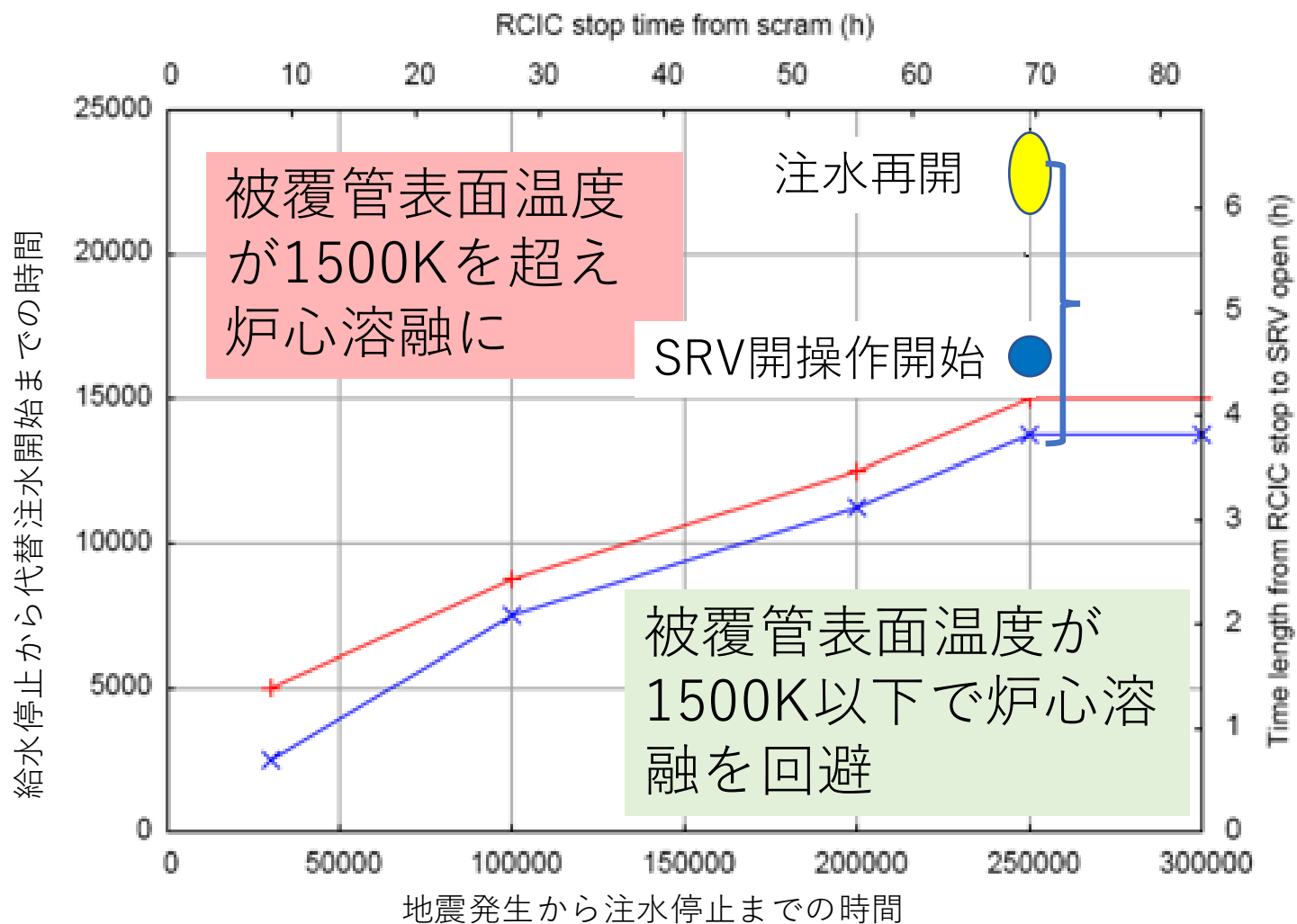
(左下) 【28】 (右下) 【29】 出典：渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報：BWR全電源喪失事故の解析 福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌, 10巻, 4号, pp. 240-244

燃料温度の感度解析



RCIC停止後の減圧・注水再開までの時間の感度解析。
注水再開が4h以内であれば炉心損傷を回避できた可能性。

安全装置停止から注水再開までの時間余裕の検討



格納容器圧力の挙動

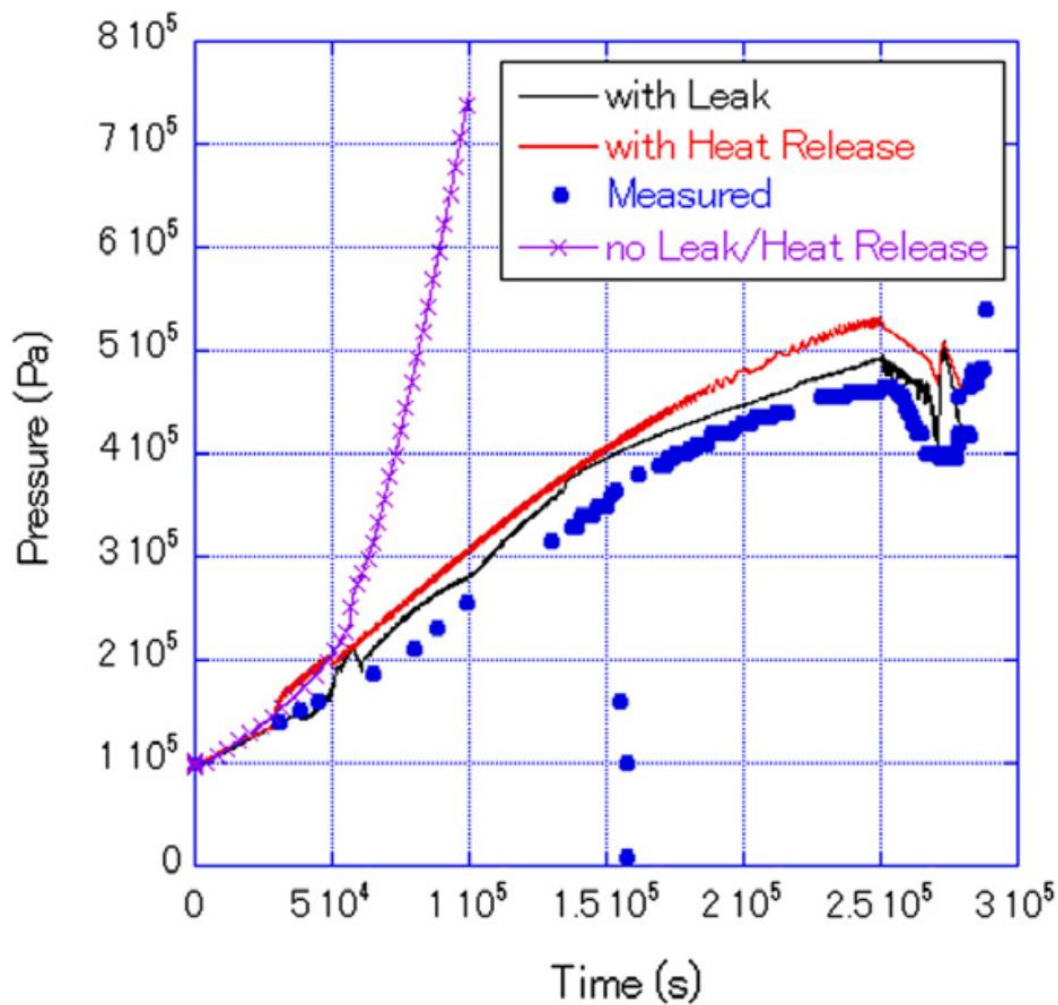


Fig. 6. Containment pressure.

まとめ

- 福島第一原発事故時の1号機，2号機，3号機での事象進展とその熱水力挙動について説明しました。
- 2号機の熱水力解析の結果について説明しました。

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	⌘	東京電力ホールディングス
【2】	⌘	東京電力ホールディングス
【3】	⌘	東京電力ホールディングス
【4】	⌘	東京電力ホールディングス
【5】	⌘	東京電力ホールディングス
【6】	⌘	東京電力ホールディングス
【7】	⌘	東京電力ホールディングス
【8】	⌘	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【9】	⌘	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【10】	⌘	東京電力ホールディングス
【11】	⌘	東京電力ホールディングス
【12】	⌘	東京電力ホールディングス
【13】	⌘	東京電力ホールディングス
【14】	⌘	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【15】	⌘	東京電力ホールディングス
【16】	⌘	東京電力ホールディングス
【17】	⌘	東京電力ホールディングス
【18】	⌘	東京電力ホールディングス

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【19】	+	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【20】	+	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【21】	+	東京電力ホールディングス
【22】	+	東京電力ホールディングス
【23】	+	東京電力ホールディングス
【24】	+	北海道電力株式会社 HP(https://www.hepco.co.jp/energy/atomic/safety_improve/prepared_accident.html)
【25】	+	未来を拓く原子力 原子力機構の研究開発成果 2006, 独立行政法人日本原子力研究開発機構, 2006.10, 図5-14
【26】	+	渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報: BWR全電源喪失事故の解析 福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌, 10巻, 4号, pp. 240-244
【27】	+	日本原子力文化財団 「原子力総合パンフレット2024年度版」

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【28】	+	渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報: BWR全電源喪失事故の解析 福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌, 10巻, 4号, pp. 240-244
【29】	+	渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報: BWR全電源喪失事故の解析 福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌, 10巻, 4号, pp. 240-244
【30】	+	Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident, Masashi Hirano et al., Journal of Nuclear Science and Technology, © 2012 Atomic Energy Society of Japan reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【31】	+	渡辺正, 石垣将宏, 佐藤聡, 中村秀夫, 速報: BWR全電源喪失事故の解析 福島第1発電所2号機における炉心損傷までの熱水力挙動, 日本原子力学会和文論文誌, 10巻, 4号, pp. 240-244
【32】	+	Reprinted from Annals of Nuclear Energy, Vol.49, Tadashi Watanabe et al., Analysis of BWR long-term station blackout accident using TRAC-BF1, P223-226, 2012, with permission from Elsevier.