

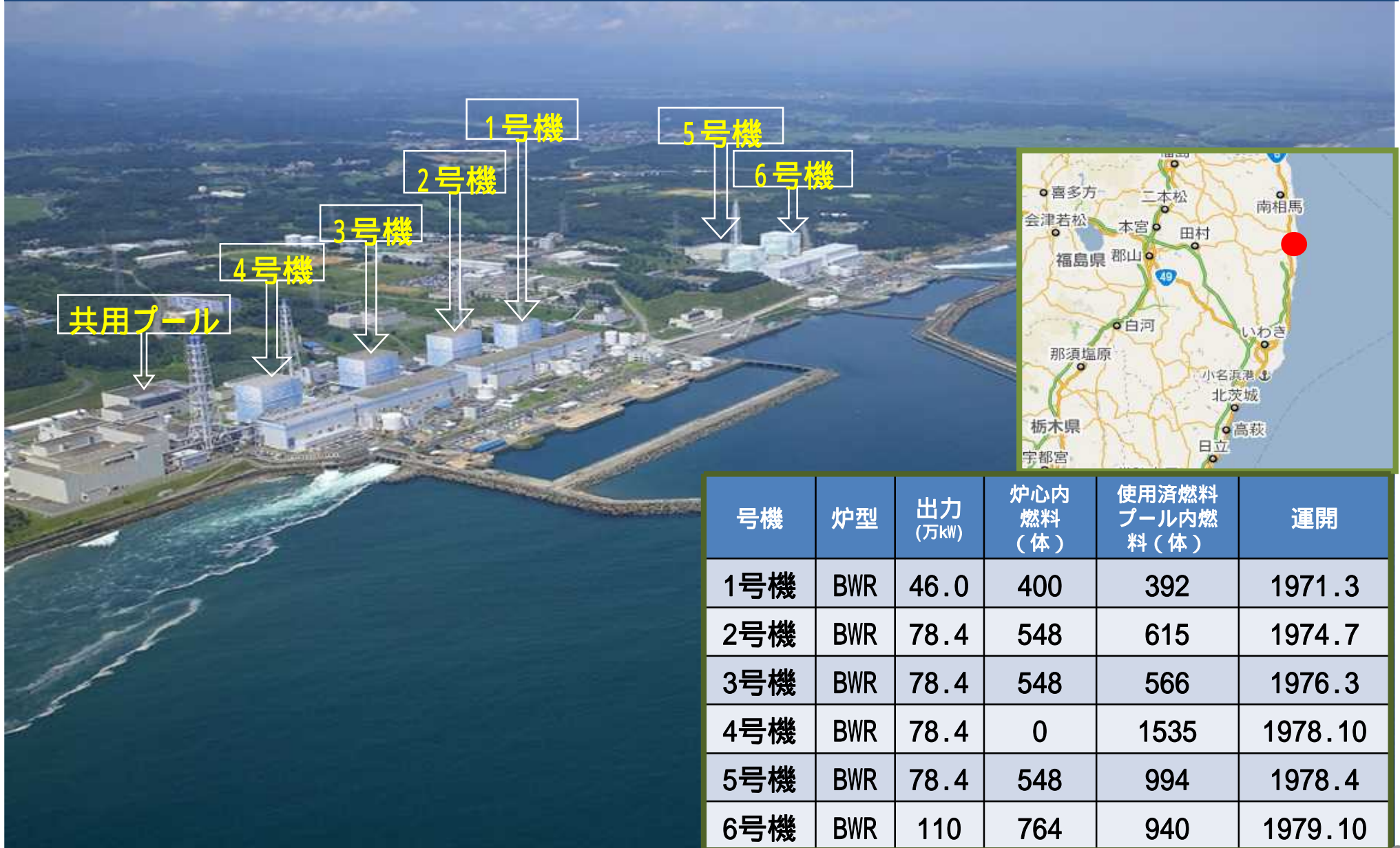
東京電力福島第一原子力発電所 事故の概要と今後の展望

2012.6.5

一般社団法人 日本原子力学会 副会長

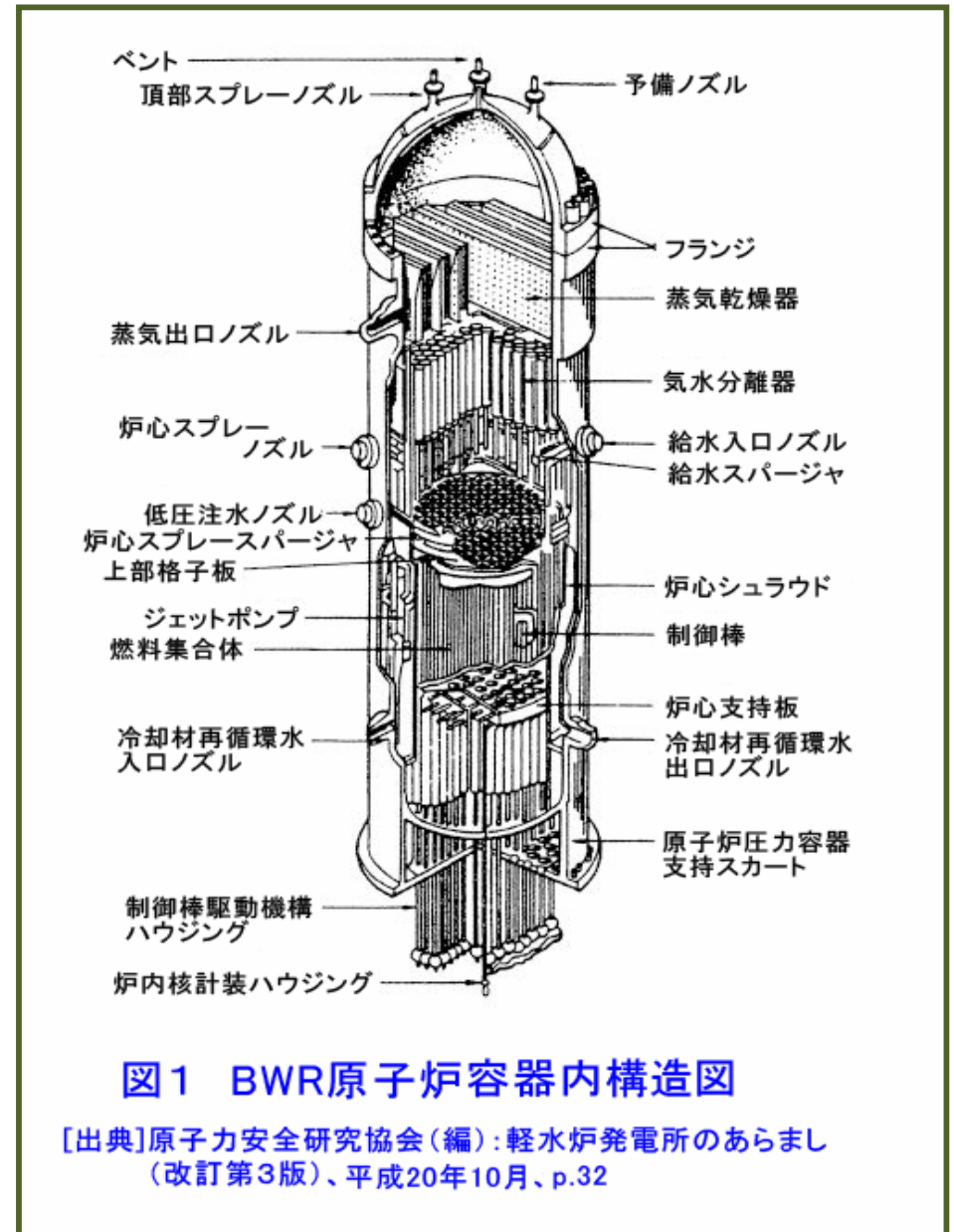
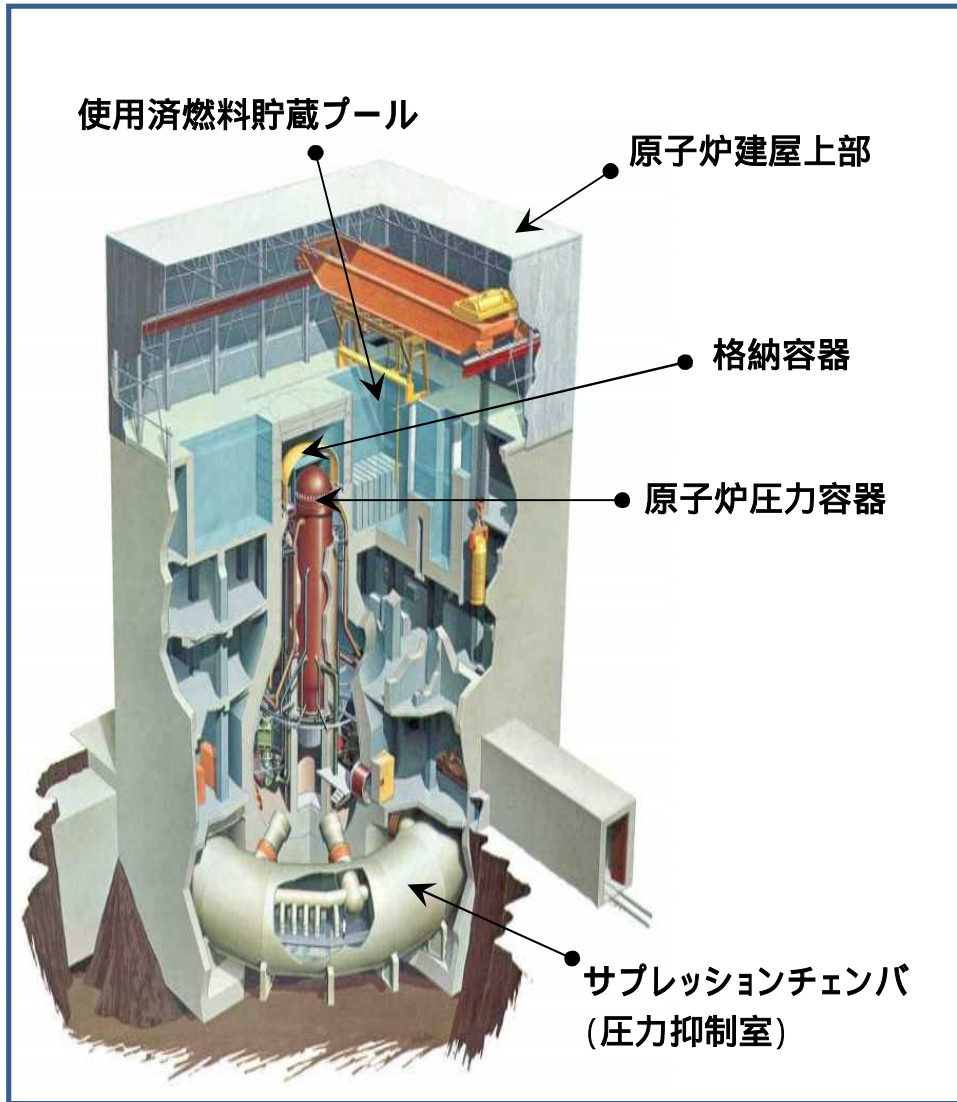
澤田 隆

東京電力福島第一発電所の位置と概略仕様



号機	炉型	出力 (万kW)	炉心内 燃料 (体)	使用済燃料 プール内燃 料(体)	運開
1号機	BWR	46.0	400	392	1971.3
2号機	BWR	78.4	548	615	1974.7
3号機	BWR	78.4	548	566	1976.3
4号機	BWR	78.4	0	1535	1978.10
5号機	BWR	78.4	548	994	1978.4
6号機	BWR	110	764	940	1979.10

福島第一原子力発電所の構造



何が事故を起因したのか？

地震発生から津波到着まで

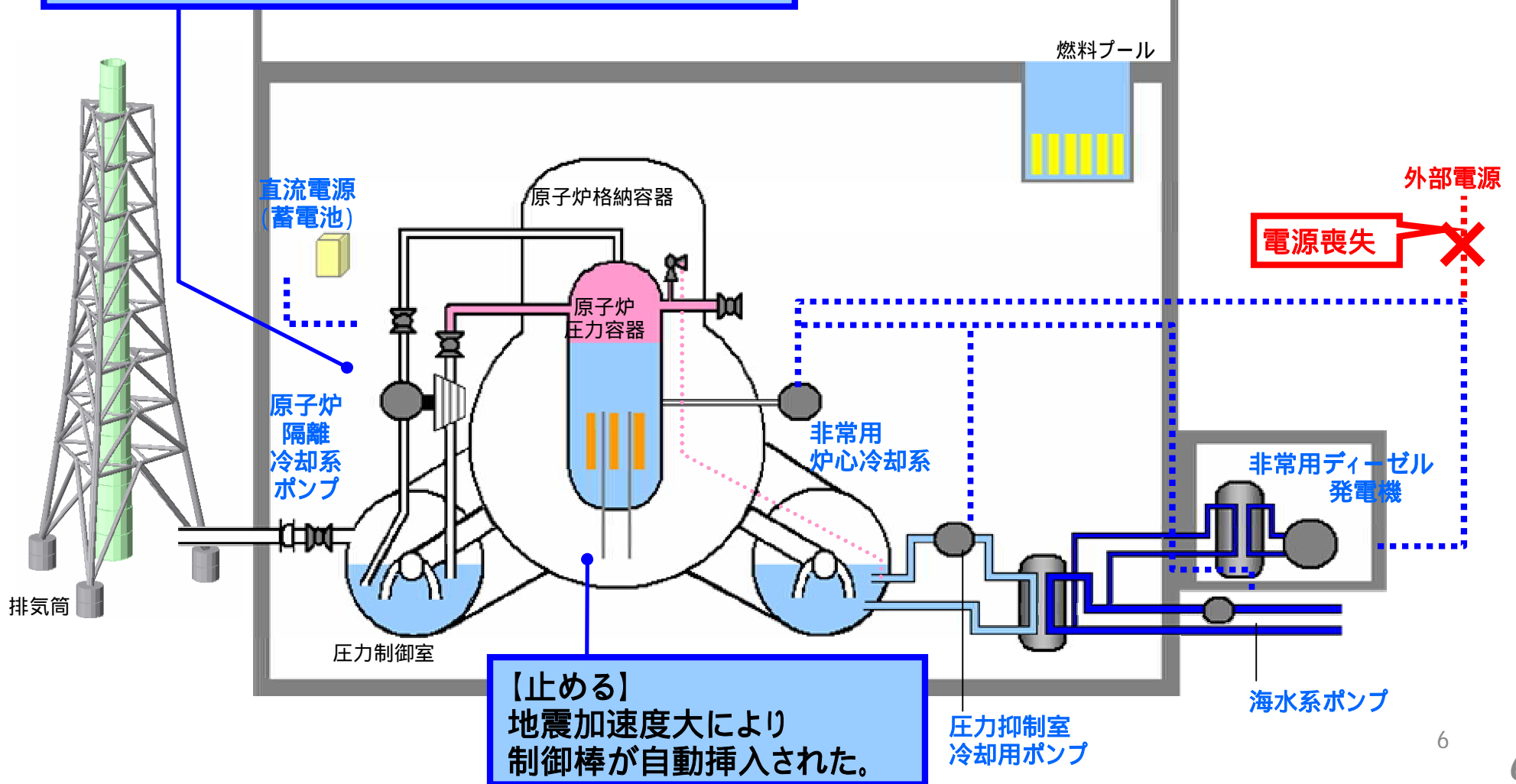
- 2011年3月11日に発生した地震により、運転中であった1～3号機は14:46～14:47に地震加速度大信号によりスクラム
- 地震により外部電源喪失。全号機において非常用ディーゼル発電機(DG、Diesel Generator)が正常に自動起動(定期検査で点検中の4号機の1台を除く)
- 1号機の非常用復水機(IC、Isolation Condenser)は自動起動し、その後運転手順書に従った停止操作が繰り返された(停止状態の時に津波が到着して電源が喪失したため、その後弁を開操作できず使用できなくなった)
- 2,3号機では、隔離時冷却系(RCIC、Reactor Core Isolation Cooling System タービン駆動)を地震後手動で起動して原子炉水位を維持。非常用炉心冷却系が作動することはなかった。

福島第一原子力発電所の状況

地震発生直後

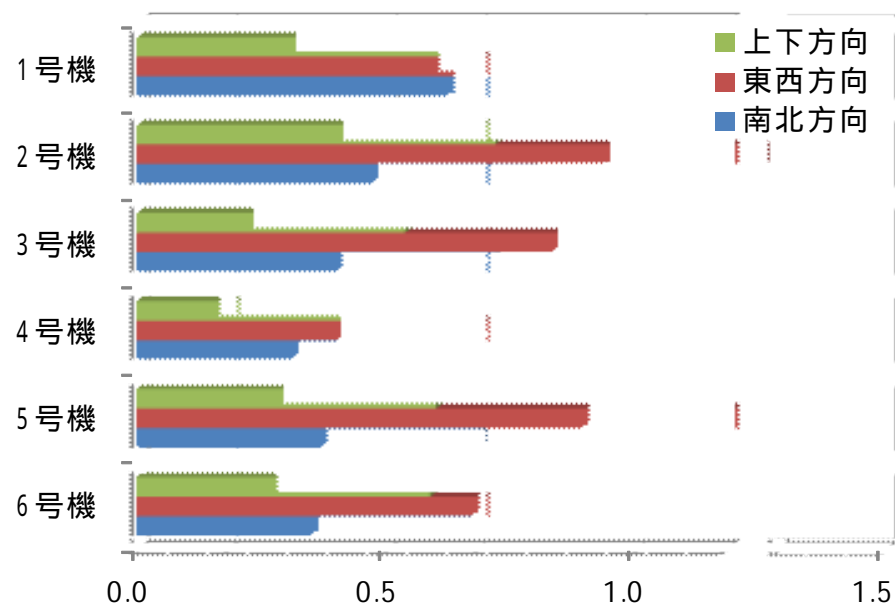
【冷やす】

原子炉隔離冷却系により原子炉へ注水した。
(非常用炉心冷却系は待機)

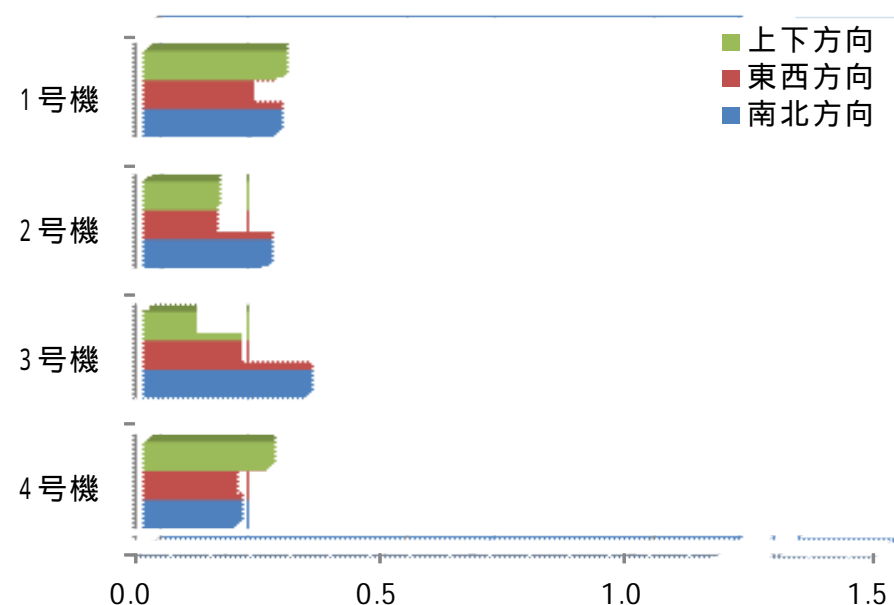


地震(観測値/基準地震動Ss)

福島第一発電所



福島第二発電所



地震発生直後のプラント状況

- 津波到来までの間、原子炉圧力は約6～7 MPaの範囲で推移しており、配管破断等の兆候は確認されていない。
- 地震観測記録を用いたひずみおよび応力解析の結果、評価基準値を超えた設備はなく、安全上重要な設備は地震後も安全機能を保持していたと推定
- 5号機の機器状態等から、安全上重要な設備に地震による損傷は確認されていない

設計津波水位

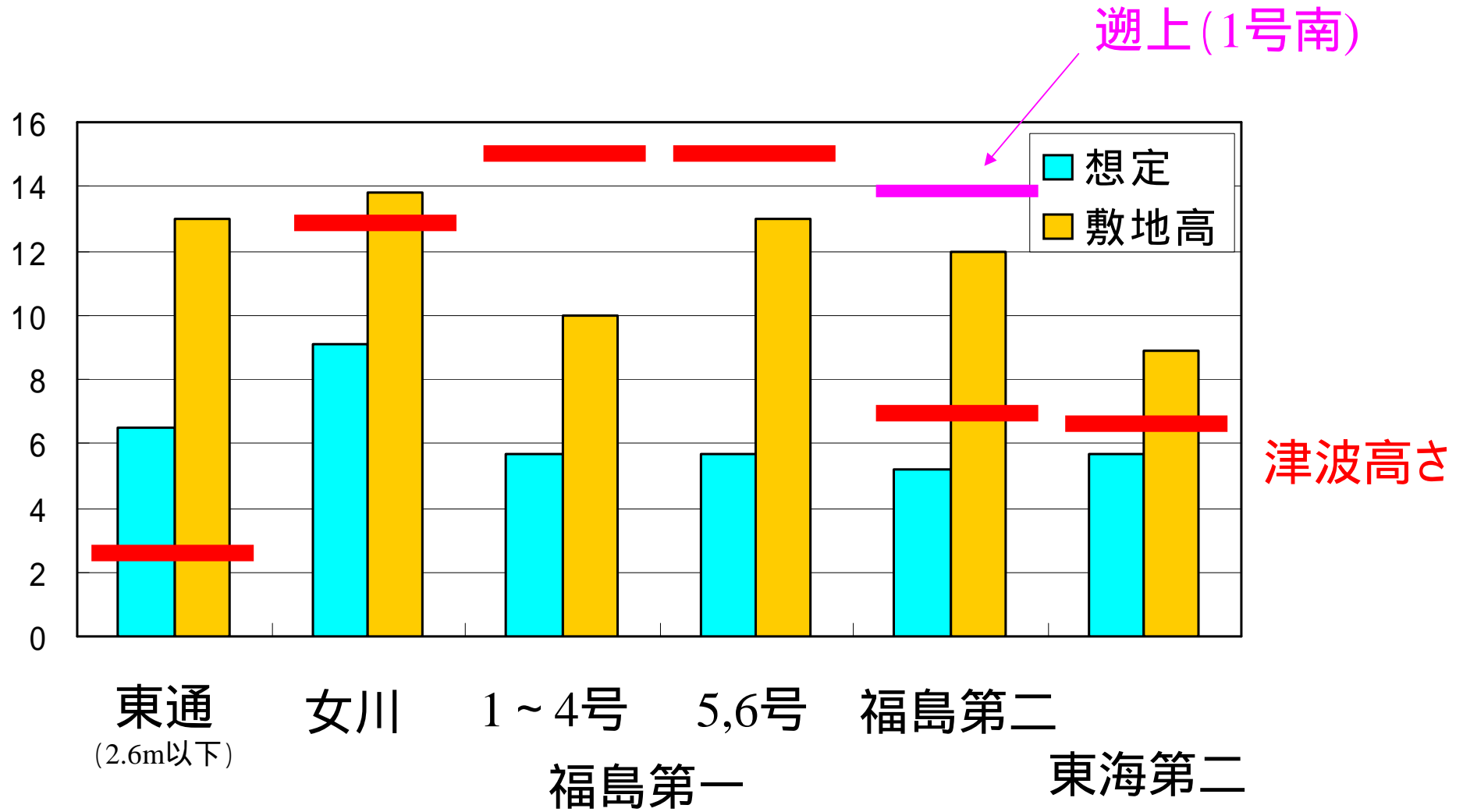
- 福島第一

- ・ 設置許可申請書では、チリ地震 (M9.5, 1960年) を対象波源とし 3.1mとしている。
- ・ 2002年に東京電力は、土木学会原子力土木委員会津波評価部会の「原子力発電所の津波評価技術(2002年)」に基づき、福島県沖地震 (M7.9, 1938年) を自主的にM8.0として設計津波水位を評価し、各号機の水位を5.4m ~ 5.7mとした。

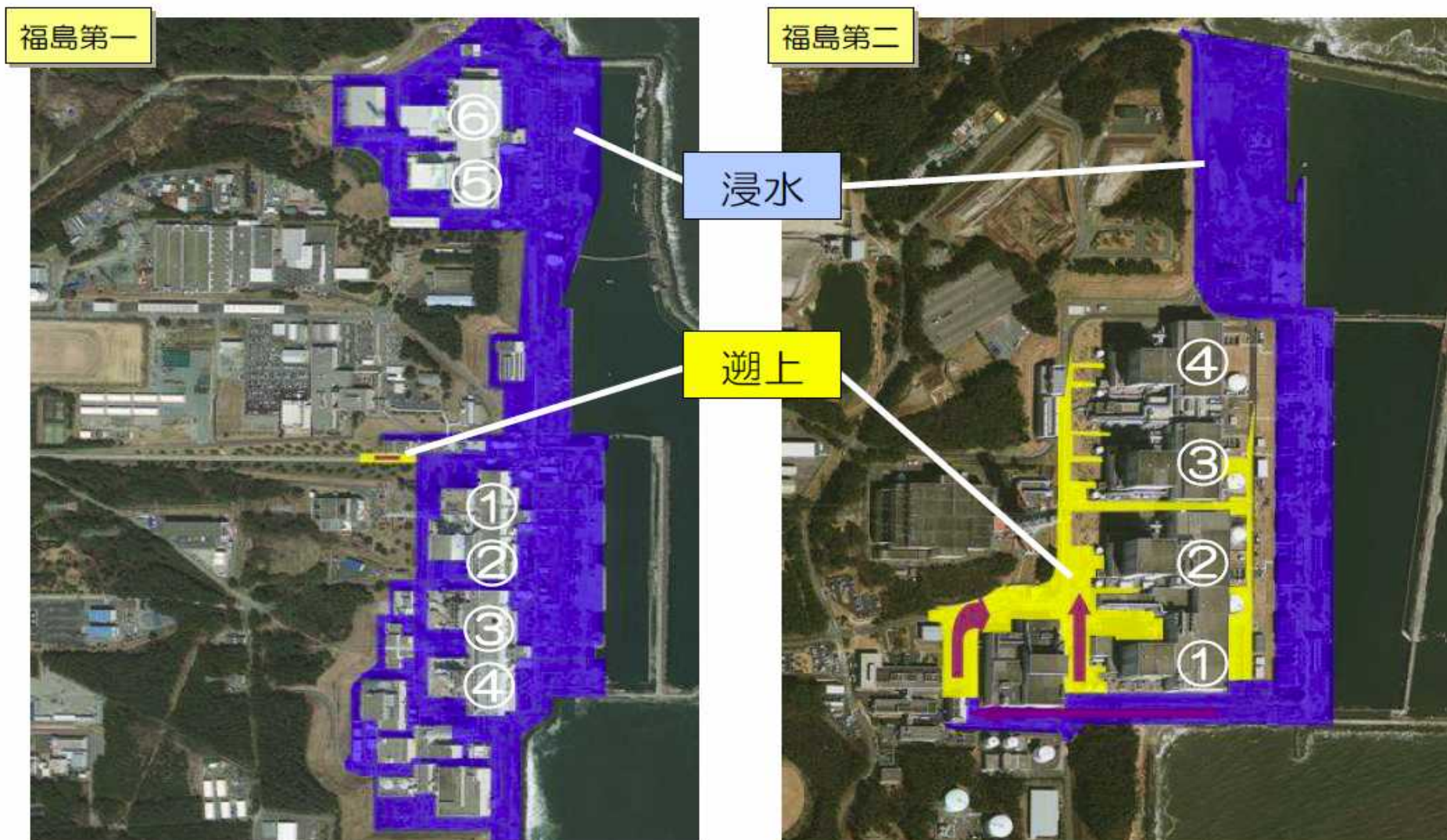
- 福島第二

- ・ 同様に設計津波水位を3.1m ~ 3.7mとしていたが、5.1m ~ 5.2mに見直した。

津波のまとめ

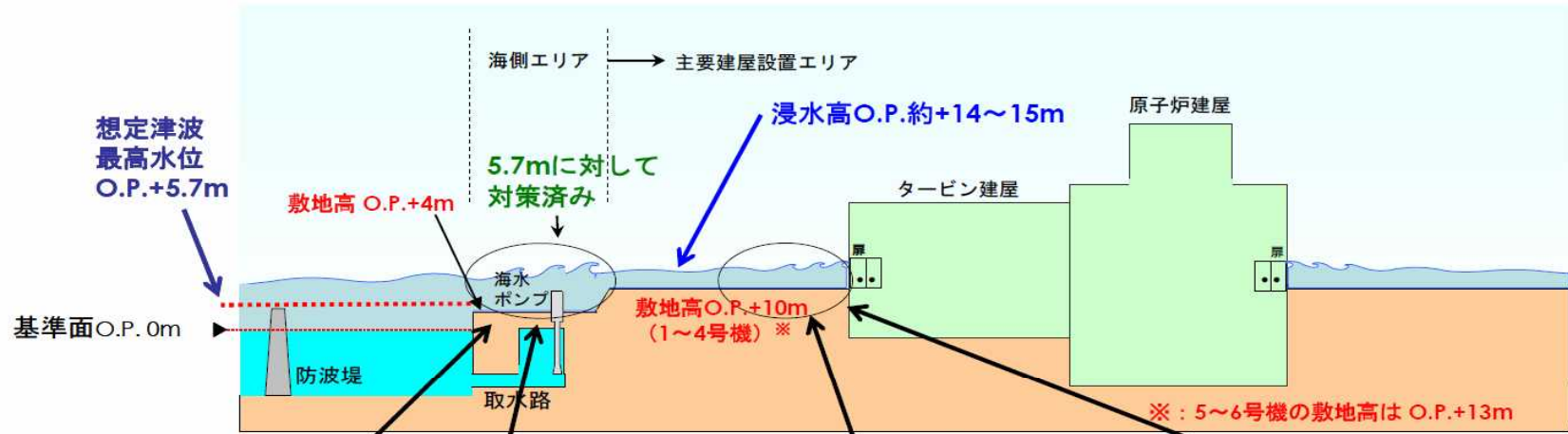


津波 (浸水域と遡上域)



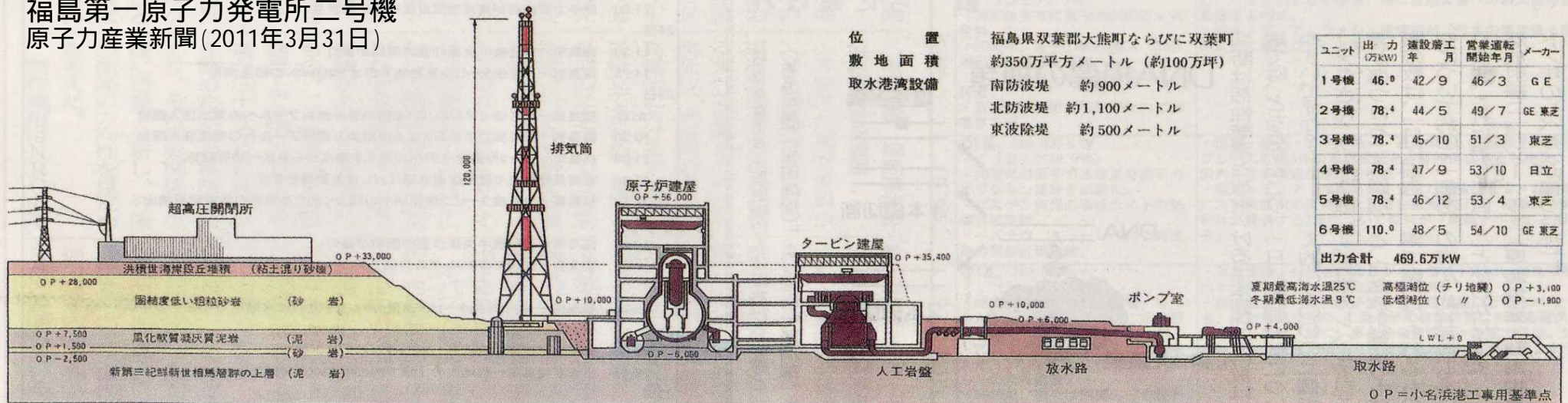
地震前(14時46分)と津波後(15時45分)





福島第一原子力発電所における津波の状況（概念図）

福島第一原子力発電所二号機
原子力産業新聞(2011年3月31日)



位置 福島県双葉郡大熊町ならびに双葉町
敷地面積 約350万平方メートル(約100万坪)
取水港湾設備 南防波堤 約900メートル
北防波堤 約1,100メートル
東波除堤 約500メートル

ユニット	出力 (万kW)	建設工期 年 月	営業運転開始年月	メーカー
1号機	46.0	42/9	46/3	GE
2号機	78.4	44/5	49/7	GE 東芝
3号機	78.4	45/10	51/3	東芝
4号機	78.4	47/9	53/10	日立
5号機	78.4	46/12	53/4	東芝
6号機	110.0	48/5	54/10	GE 東芝
出力合計		469.6万 kW		

夏期最高海水温25℃ 高潮水位(チリ地盤) O.P.+3,100
冬期最低海水温9℃ 低潮水位(//) O.P.-1,900

O.P.=小名浜港工専用基準点

どのようにして
炉心が壊れたのか？

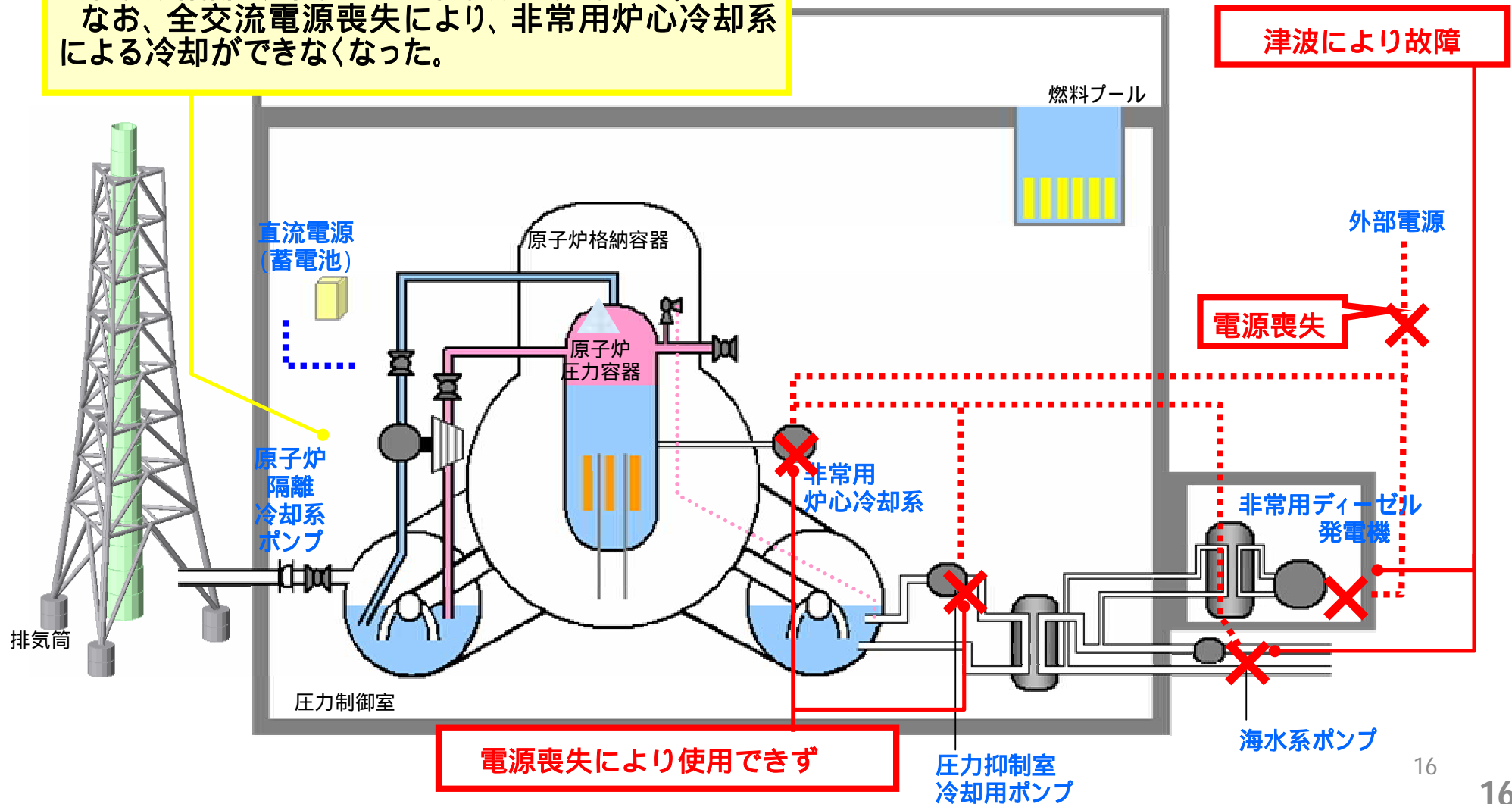
津波後

- 津波により海側に設置された非常用海水系ポンプの電動機が冠水し、全プラントで機能を喪失
- 1～4号機：非常用DGも機能喪失し、全交流電源喪失に至った
- 1、2、4号機では直流電源も喪失し、中央制御室での計測機器も機能喪失
- 5、6号機：6号機の1台の空冷の非常用DGが被害を免れ、原子炉は冷温停止に至り、使用済燃料プールの冷却も維持できた。

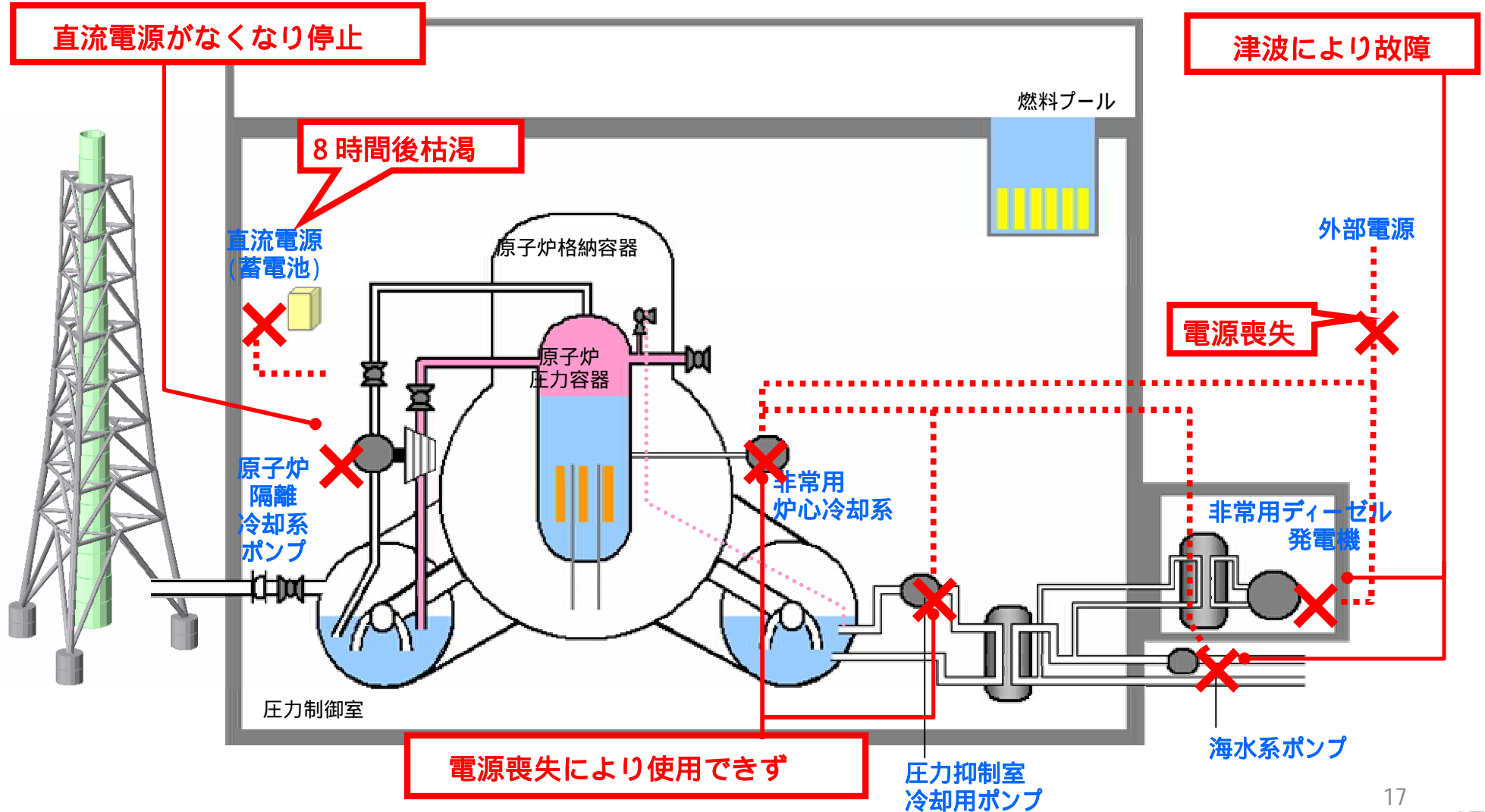
福島第一原子力発電所の状況

津波来襲直後

【冷やす】
原子炉隔離冷却系により原子炉へ注水した。
なお、全交流電源喪失により、非常用炉心冷却系
による冷却ができなくなった。



福島第一原子力発電所の状況 ～ 直流電源枯渇後 ～



津波後の対応状況

- 中越沖地震対策で配備した消防車を用いて注水を試みる（応用動作）
現場の放射線量の上昇、原子炉建屋の爆発によるホースの損傷等でスムーズに注水できず
- 手動で弁を開いてベントしようとしたが、線量が高くアクセスを断念
可動式コンプレッサーおよび小型発電機の接続等の別の方策で試みることにしたため、時間が掛かった

MAAPコードによる炉心解析例

	1号機	2号機 (ケース2)	3号機 (ケース2)
炉心露出	約3時間 (3/11 18時頃)	約75時間 (3/14 18時頃)	約40時間 (3/13 7時頃)
炉心損傷 (PCT=1200)	約4時間 (3/11 19時頃)	約77時間 (3/14 20時頃)	約42時間 (3/13 9時頃)
原子炉压力容器破損 (TRV=1000)	約15時間 (3/12 6時頃)	約109時間 (3/16 4時頃)	約66時間 (3/14 9時頃)

時間は地震後の経過時間

ケース2は、原子炉水位系未較正のため、水位が燃料域に維持できていないと仮定

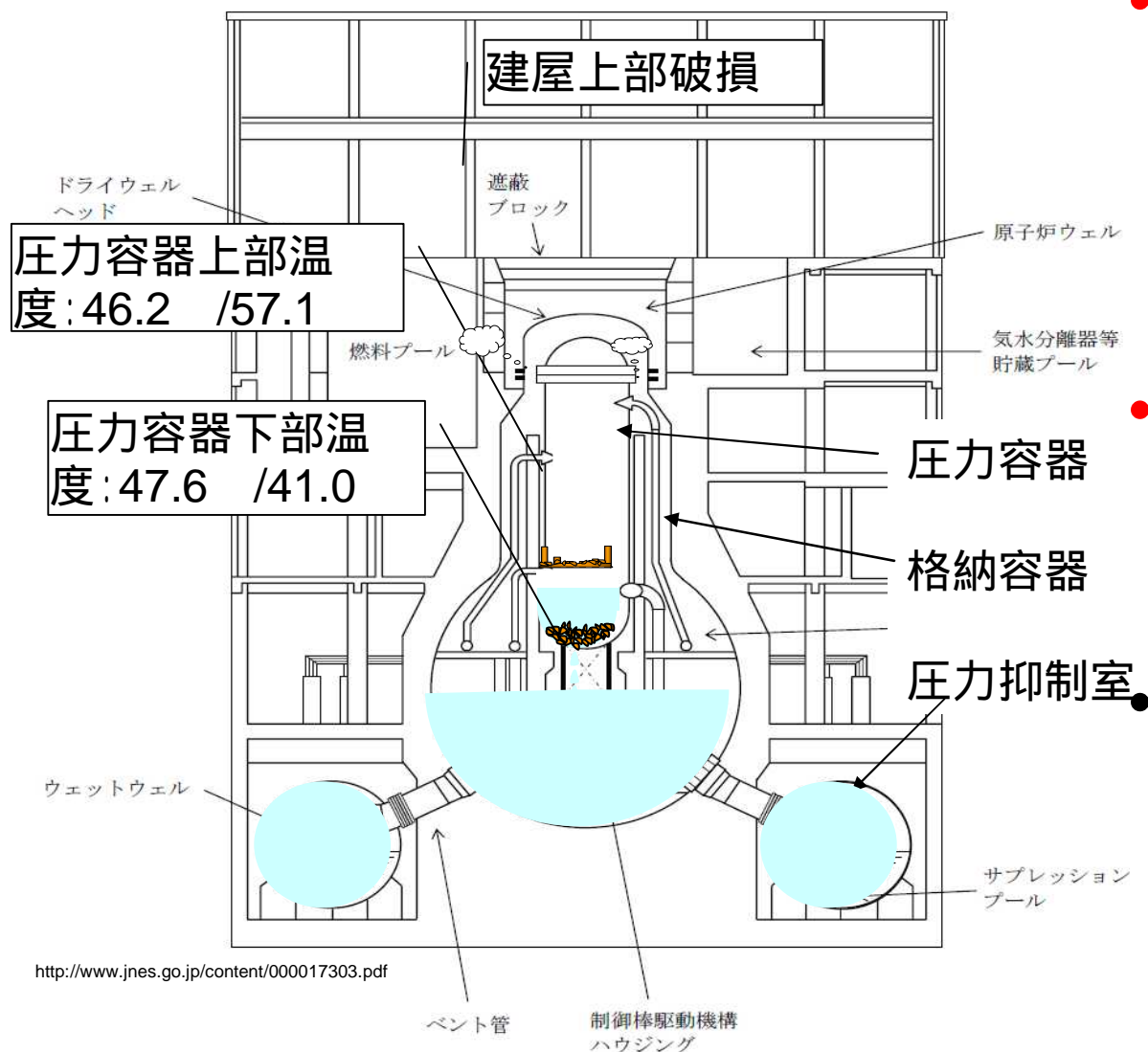
PCT: 被覆管最高温度 (Peak Clad Temperature)

TRV : 原子炉压力容器底部温度

炉心状態の評価

- 1号機では、津波到着後比較的早い段階で燃料が溶融し、原子炉压力容器下部に落下し、原子炉压力容器も破損したとの解析結果
- 2, 3号機では水位が低いと仮定すると燃料が溶融し、原子炉压力容器下部に落下したとの解析結果だが、水位が測定値通りであれば燃料は一部溶融したものの炉心領域にとどまり、原子炉压力容器の破損は生じないとの解析結果
- 1号機ではかなりの燃料が原子炉压力容器から格納容器に落下し、2, 3号機では燃料の大部分は原子炉压力容器内にとどまり、いずれも現在の原子炉压力容器の温度データなどから、冠水して固体状態で冷却されていると推定
- 現在、注水による冷却が継続して行われていることから、今後、大規模な放射性物質放出につながるような事象の進展はないと考えられる。

福島第一原子力発電所2、3号機の現状推定



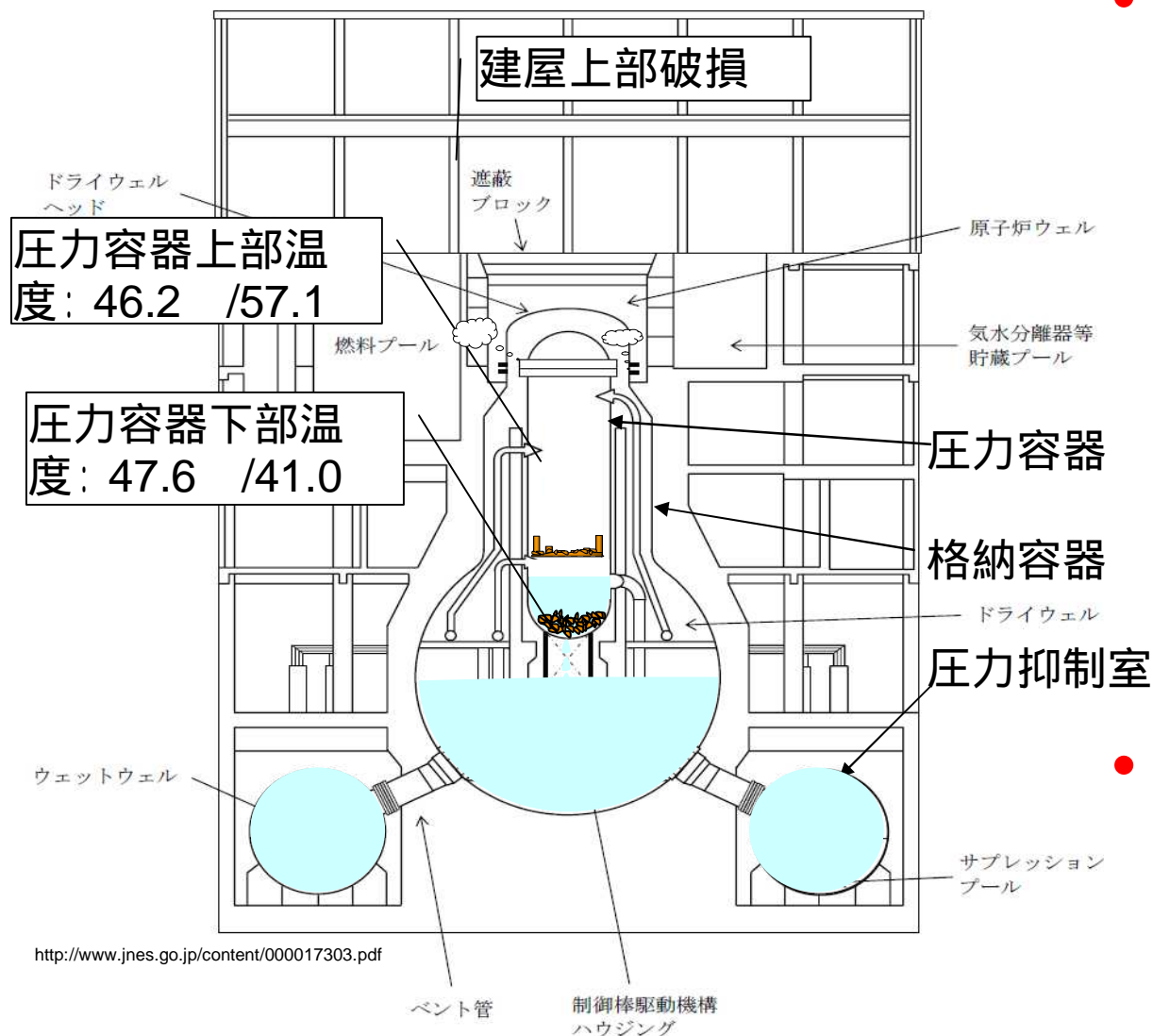
<http://www.jnes.go.jp/content/000017303.pdf>

- **炉心**: 燃料が損傷。燃料の大部分は、炉心下部もしくは原子炉压力容器下部に落下している可能性。下部に落下した燃料は冠水状態で冷却され、固体状になっていると推定。

- **原子炉压力容器**: 注水量と蒸発する水の量のバランスを考えると、蒸気(気相)および水(気相)について、漏洩の可能性有り。

9/28 1～3号機全てで原子炉压力容器の温度が100以下に

福島第一原子力発電所2, 3号機の現状推定



<http://www.jnes.go.jp/content/000017303.pdf>

- 格納容器**: 窒素注入に伴う圧力上昇が約0.2MPa程度で止まっていたことから、気相の漏洩の可能性有り。圧力容器への注水の一部がドライウエル(D/W)に流出し、D/W内の水位が上昇している可能性あり。崩壊熱による蒸発量と圧力容器への注水量のバランスを考えると、格納容器からの液相の漏洩の可能性有り。
- 建屋**: 1, 3, 4号機では水素爆発により、上部が破損。



http://www.asahi.com/special/gallery_e/view_photo_feat.html?jisin-pg/TKY201109280633.jpg

事故後の取組み

ステップ2完了と現状

「事故の収束に向けた道筋」ステップ1の終了

2011/7/19

原子力安全・保安院の評価のまとめ（2011/8/4）

- 福島第一の原子炉施設の安全確保状況については、水素爆発の防止対策、原子炉及び使用済燃料プールの安定的な冷却対策、耐震対策等が講じられており、住民等の避難や屋内退避が必要となる異常事象が発生する可能性は小さいと評価される。
- しかしながら、念のため、避難又は屋内退避が必要となることが否定できない事象として炉心の冷却失敗を想定し、これが仮に発生した場合について、その放射線影響について評価した。その結果、炉心への注水が長時間停止した場合であっても、発電所から20km 圏外に影響が及ぶ蓋然性は極めて小さいことが確認された
- ただし、炉心の冷却失敗による放射線影響を可能な限り低減する観点からは、注水の再開は10 時間以内、可能な限り 5 時間以内とすることが適切であると考えられる。

「事故の収束に向けた道筋」ステップ2の終了

2011/12/16

STEP 2: 放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている

- 【課題(1)原子炉】: 「冷温停止状態」に到達
- 【課題(2)燃料プール】: 「より安定的な冷却」に到達
- 【課題(3)滞留水】: 処理施設を安定的に稼働させて「滞留水全体量を減少」
- 【課題(4)地下水】: 遮水壁工事に着手したことによりステップ2の目標達成
- 【課題(5)大気・土壌】: 1号機原子炉建屋カバー竣工によりステップ2の目標達成
- 【課題(6)測定・低減・公表】: 特措法に基づく基本方針閣議決定により本格的除染開始
- 【課題(7)津波・補強・他】: 全号機の原子炉建屋の耐震安全性評価を完了、4号機の支持構造物設置完了
- 【課題(8)生活・職場環境】: 仮設寮建設・現場休憩場開設により生活・職場環境を改善
- 【課題(9)放射線管理・医療】: 放射線管理強化や医療体制整備等により健康管理を充実
- 【課題(10)要員育成・配置】: 要員育成を継続、要員の安定的確保策を継続検討
- 【中長期的課題への対応】: 循環注水冷却システムの中期的安全を確保

今心配なこと？

- 放射性物質は放出されているのか？
- 原子炉が臨界になる心配はないのか？
- 冷却できなくなることはないのか？
- 地震や津波がきても大丈夫か？

放射性物質の放出抑制

- 1～3号機格納容器からの放射性物質の放出量(セシウム)を,原子炉建屋上部等の空气中放射性物質濃度(ダスト濃度)を基に継続的に評価。
- 放出量の評価値(4/15/2012)は合計約0.1億ベクレル/時と算出。
- 事故直後と比べ,約8000万分の1
- これによる敷地境界の被ばく線量は,最大0.02mSv/年と評価。
(これまでに既に放出された放射性物質の影響を除く。)
- 註)法令で定める線量限度は1mSv/年。

今後、放出しないため、安心するために

- 放射性物質を新たに出さない
 - 温度を100 以下に維持する
- 放射性物質を除去する
 - 空調、ガス管理システムとフィルター
- 放射性物質を閉じ込める
 - 2号機はブローアウトパネルの対処
 - 3号機はがれきの撤去、建屋カバー
 - 4号機はがれきの撤去、プールの燃料取り出しのときに“蔽い”



放射性物質飛散防止用カバーを設置するため、福島第1原発1号機原子炉建屋の周囲に組み立てられた鉄骨。今後、樹脂コーティングした繊維のパネルを取り付ける(左奥が1号機タービン建屋、右奥が2号機)(東京電力提供)(2011年09月09日)【時事通信社】



原子炉建屋カバーの設置工事が進む東京電力福島第1原子力発電所1号機(9月15日、福島第1原発)[東京電力提供](2011年09月15日)【時事通信社】

原子炉の臨界とは？

臨界に維持するのは大変

- 臨界となるためには
 - 燃料と水がある割合で混合
 - 制御棒が混ざらない
 - 水に浸されている
 - 燃料が集まっている
 - 中性子が外に漏れない
 - 構造材などが少ない
- 臨界になると何がおこるか
 - 発熱が大きくなる
 - 水が沸騰する
 - 臨界でなくなる

日本原子力学会

「原子力安全」調査専門委員会

技術分析分科会の提言

(2011/5/9)

1. 地震
2. 津波
3. 全電源喪失
4. 全冷却系喪失
5. アクシデントマネジメント
6. 水素爆発
7. 使用済み燃料貯蔵プール
8. 安全研究
9. 安全規制と安全設計
10. 組織・危機管理
11. 情報公開
12. 緊急時安全管理

各電力で安全確保対策を実施

【安全確保対策】

- 全交流電源喪失の対策
 プラント監視をする為に必要な電源設備を確保
- 最終ヒートシンクの喪失の対応
 蒸気発生器への給水設備を確保 (PWRの場合)
- 重要機器の被水防止
 建屋の浸水対策を実施
- 電源確保 / 水源確保 / 浸水対策
- 「多様化」と「多重化」

電源確保への対応 (大飯発電所の例)

- ハード対応: 重油・発電所外からの支援なしで85日間給電可能
電源車の配備4台 電源車の追加配備+3台 空冷式非常用
発電装置の設置 (恒設非常用発電機)
- ソフト対応
体制の確立
マニュアルの整備
訓練の実施
平日昼間訓練 22回
平日夜間訓練 1回
休日訓練 6回
(2012/3/19現在)

水源確保への対応 (大飯発電所の例)

- ハード対応: ガソリン・発電所外からの支援なしで16日間給電可能
消防ポンプの配備25台 消防ポンプの追加配備 + 28台 可搬式エンジン駆動海水ポンプの配備30台 大容量ポンプの配備1台
- ソフト対応
体制の確立
マニュアルの整備
訓練の実施
蒸気発生器給水訓練 26回
使用済み燃料貯蔵プール注水訓練 21回
(2012/3/19現在)

安全確保対策の効果を実証するための措置

安全確保対策の効果を実証的なものとするため、福島事故を経験した方々の生の声を反映して、着実な作業遂行に必要な各種措置を講じている。

- 作業環境
事故時の中央制御室換気系(再循環系)の着実な運用手順を整備
- 所内通信手段
トランシーバ/携行型通話装置/衛星電話
- 放射線管理
高線量対応防護服/事業者間の資機材融通
- 水素爆発防止
事故時のアニュラスからの着実な排気手順を整備
- 瓦礫撤去
ブルドーザー/ホイールローダー/クローラーキャリア

津波・耐震補強等

- 4号機原子炉建屋が傾いていないことを確認。
- 水面は常に水平であることを利用して、5階床面と原子炉ウェルおよび使用済燃料プールの水面の距離を計測し、建屋が傾いていないことを確認。
- 各号機原子炉建屋の現状の耐震評価を実施し、補強を行わなくても耐震安全性を確保できることを確認。
- 4号機燃料プール底部に支持構造物を設置。
設備の健全性は確認できたが、安全余裕向上のためにプール底部に支持構造物を設置。
- 余震に伴う津波対策として仮設防潮堤を設置(OP+14m)。
(6/30/2011)

うまくいくのか？ 不確かさに対する備え

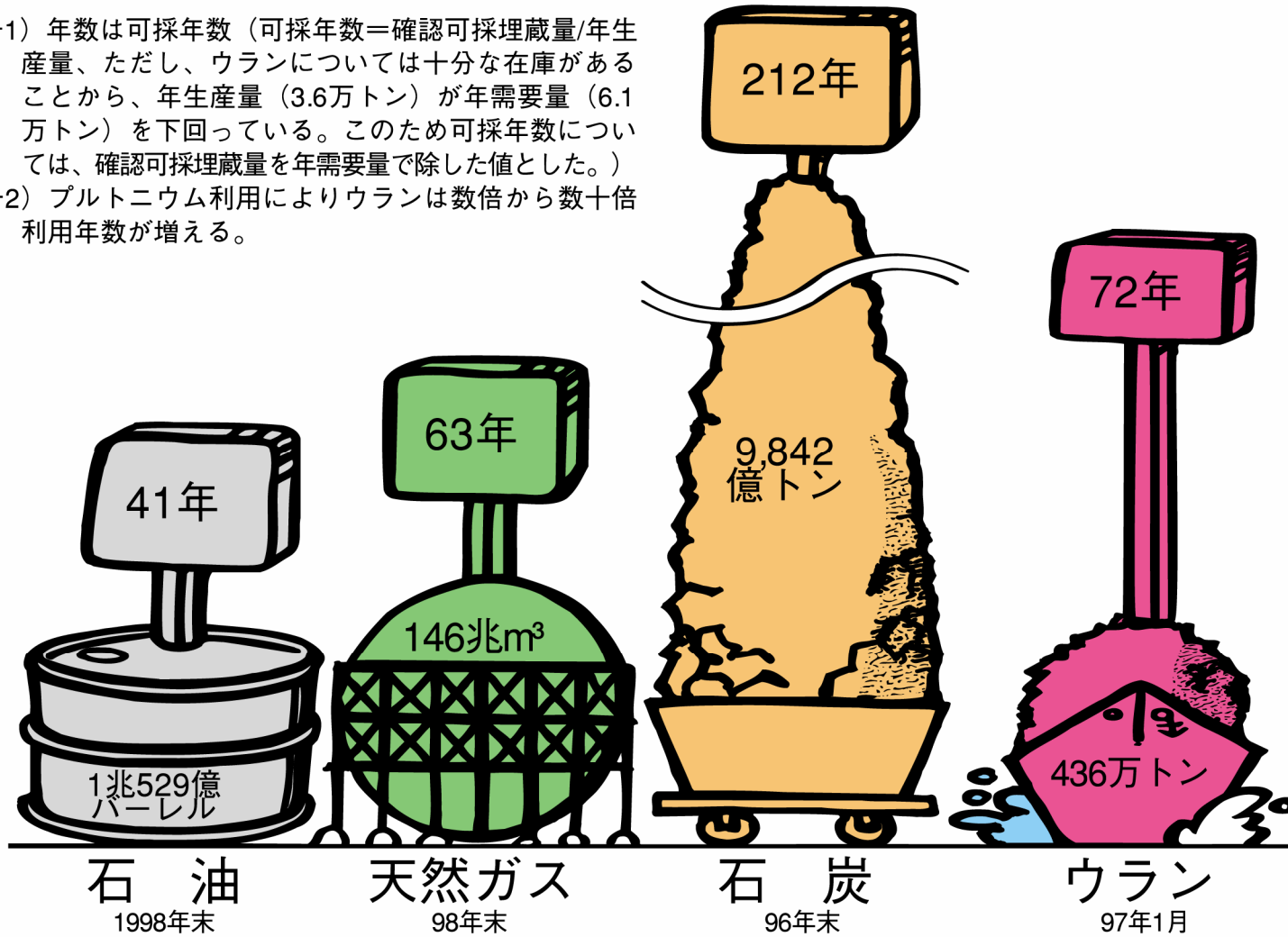
- 予想と異なることは起こりうる
- そのときに適切に対応できること
- 目標を明確にすること
- リスクの評価と備えを実施
- 柔軟な対応こそ有効で備えになる

今後の中長期計画

- 福島第一の廃止措置に向けた工程はTMI-2に比較して複雑
 - 現状で想定する工程は多数の不確定因子を含む
 - 廃炉作業と平行して多くの技術開発を進めていく必要がある
- 政府の協力に基づき,
「政府・東京電力中長期対策会議 / 運営会議および研究開発推進本部」を設置
参加機関
 - 政府(内閣府, 経産省, 文科省)/ 国立研究所(JAEA, 産総研など), 電力中央研究所/ プラントメーカー(東芝/ 日立GE / 三菱重工)/ 学識経験者/ 東京電力(電力各社(H24年度より))
- 現在, 12テーマの研究開発が進行中(合計18テーマが計画)
- 海外叡智の活用に向けた取組みも実施中
 - 米国: DOE, INPO, EPRI, National Labs. Academic/ フランス: CEA, LAAS-CNRS/ ドイツ: KIT(Karlsruhe Institute of Technology)/ ロシア: Russian Academy of Sciences 等

世界のエネルギー資源確認埋蔵量

(注-1) 年数は可採年数（可採年数＝確認可採埋蔵量/年生産量、ただし、ウランについては十分な在庫があることから、年生産量（3.6万トン）が年需要量（6.1万トン）を下回っている。このため可採年数については、確認可採埋蔵量を年需要量で除した値とした。）
(注-2) プルトニウム利用によりウランは数倍から数十倍利用年数が増える。

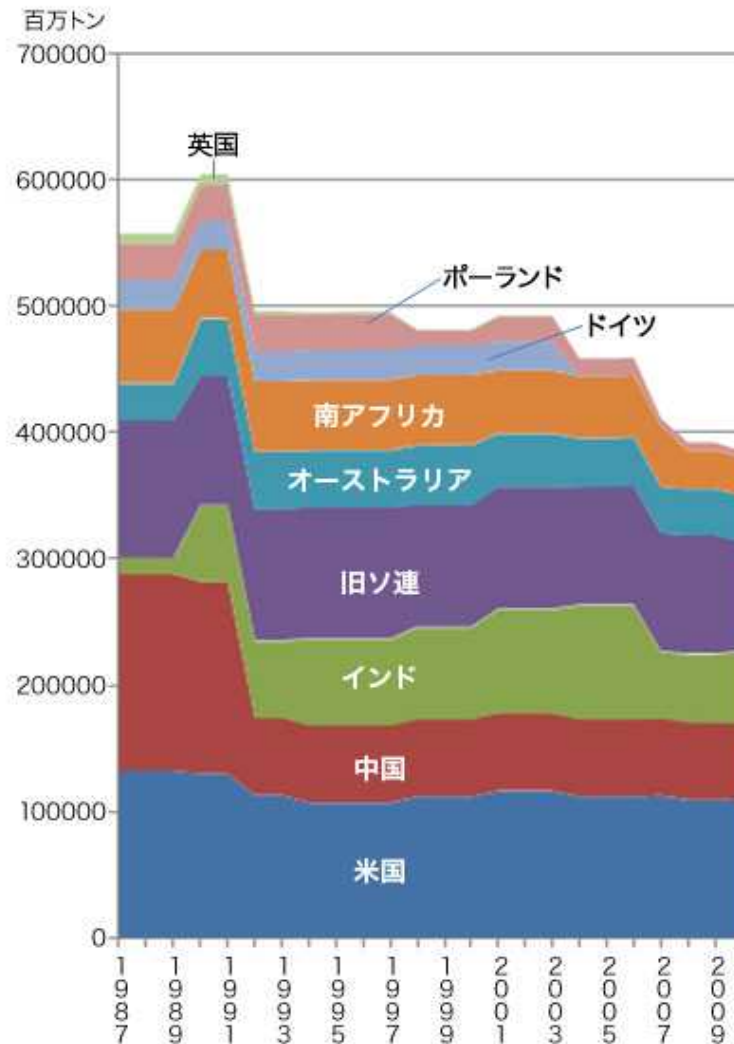


出典：「総合エネルギー統計(平成11年度版)」

主要産炭国の石炭埋蔵量の推移

日経ビジネス2012年5月28日

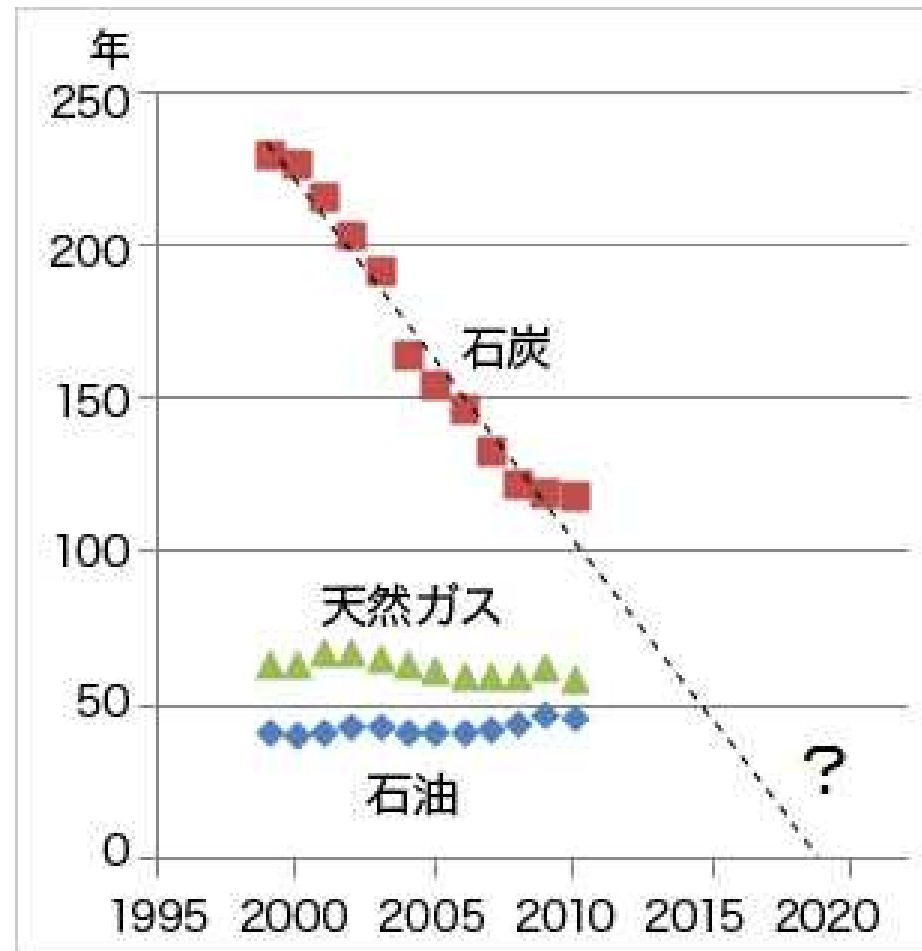
大場紀章



各化石燃料の可採年数の推移

日経ビジネス2012年5月28日

大場紀章



おわりに

日本原子力学会は、原子力に関わる一員として、今回の福島第一原子力発電所事故が極めて重大なものと真摯に受け止め、この事故から大切な教訓を抽出し、今後の原子力安全の向上に資するべきと認識している。

学会活動を通じて今後とも安全性の不断の追及と環境修復のための努力を惜しまず、本学会の責任を果たしていきたい。