

第3回東大エネルギー・環境シンポジウム

「エネルギーと環境の調和した発展を求めて」

福島第一原子力発電所の事故と対応について

平成23年11月 4日

東京電力株式会社

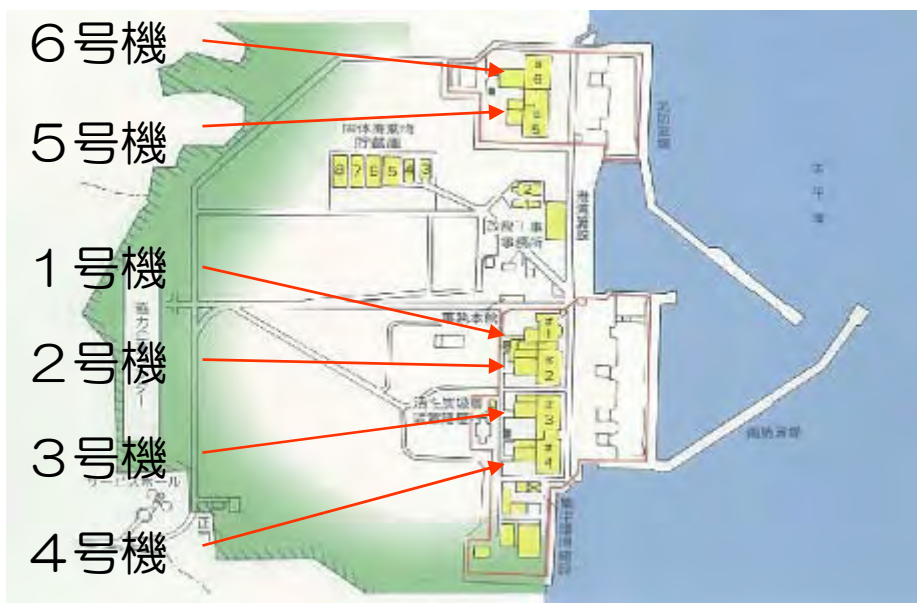
相澤 善吾



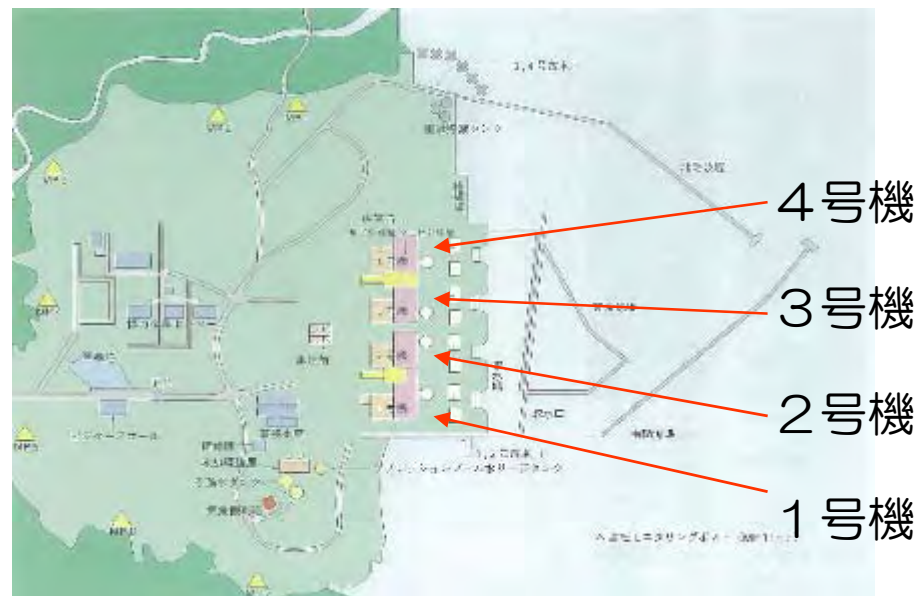
1. 地震及び津波の発生と事故の概要

福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所の概要

福島第一



福島第二



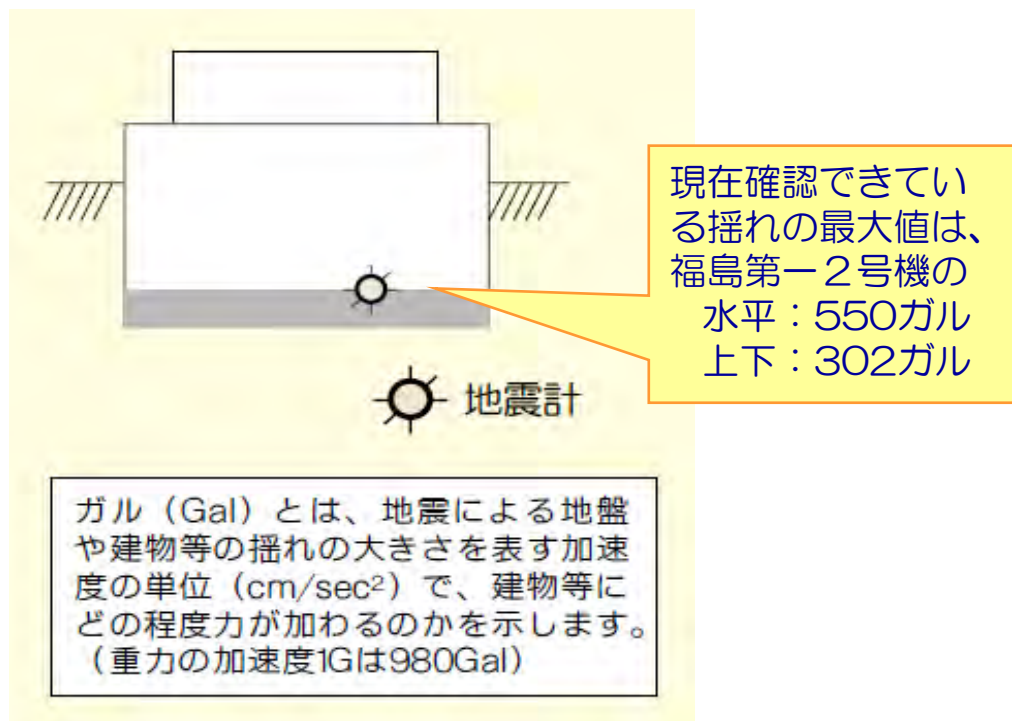
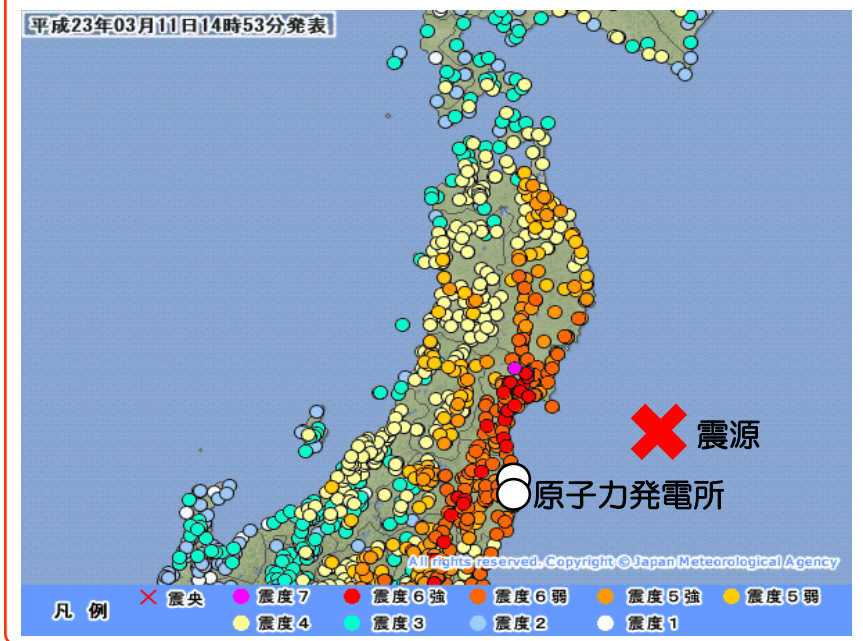
所在地	号機	運転開始	出力 (万kW)	地震発生時の状況
大熊町	1号機	S46.3	46.0	定格出力 運転中
	2号機	S49.7	78.4	
	3号機	S51.3	78.4	
	4号機	S53.10	78.4	
双葉町	5号機	S53.4	78.4	定期検査 中
	6号機	S54.10	110.0	

所在地	号機	運転開始	出力 (万kW)	地震発生時の状況
楢葉町	1号機	S57.4	110.0	定格出力 運転中
	2号機	S59.2	110.0	
富岡町	3号機	S60.6	110.0	
	4号機	S62.8	110.0	

東北地方太平洋沖地震

- 発震日時 : 2011年3月11日(金)午後2時46分頃
- 発生場所 : 三陸沖(北緯38度、東経142.9度)、震源深さ24km、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

【震源との関係】



地震観測記録

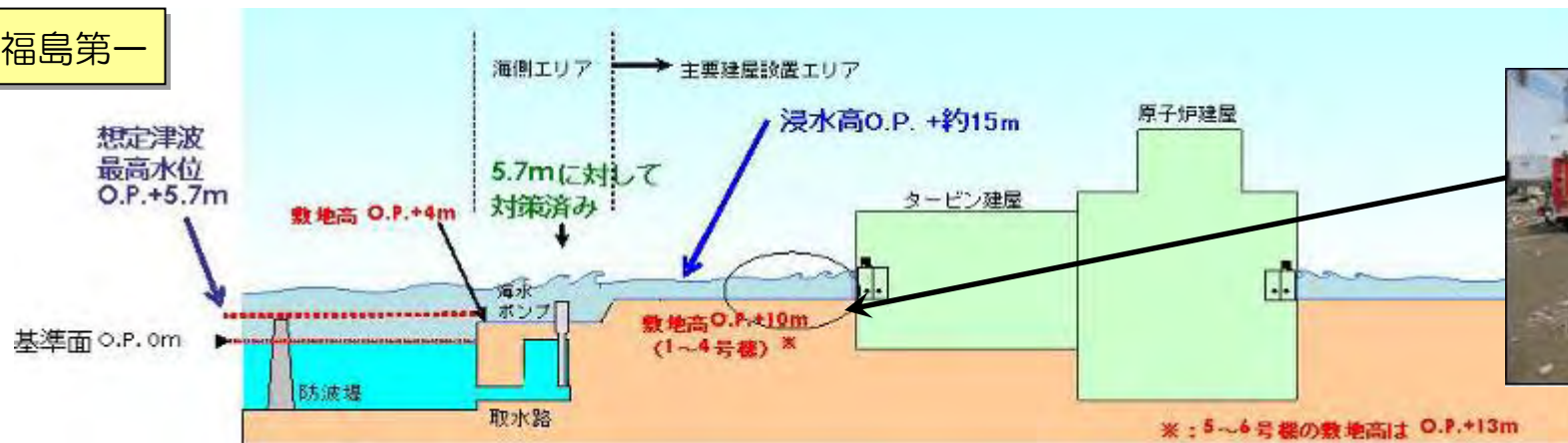
地震観測記録と基準地震動 S_s に対する応答値との比較

観測点 (原子炉建屋最地下階)		観測記録			基準地震動 S_s に対する 最大応答加速度値 (ガル)		
		最大加速度値 (ガル)			南北方向	東西方向	上下方向
		南北方向	東西方向	上下方向			
福島第一	1号機	460	447	258	487	489	412
	2号機	348	550	302	441	438	420
	3号機	322	507	231	449	441	429
	4号機	281	319	200	447	445	422
	5号機	311	548	256	452	452	427
	6号機	298	444	244	445	448	415
福島第二	1号機	254	230	305	434	434	512
	2号機	243	196	232	428	429	504
	3号機	277	216	208	428	430	504
	4号機	210	205	288	415	415	504

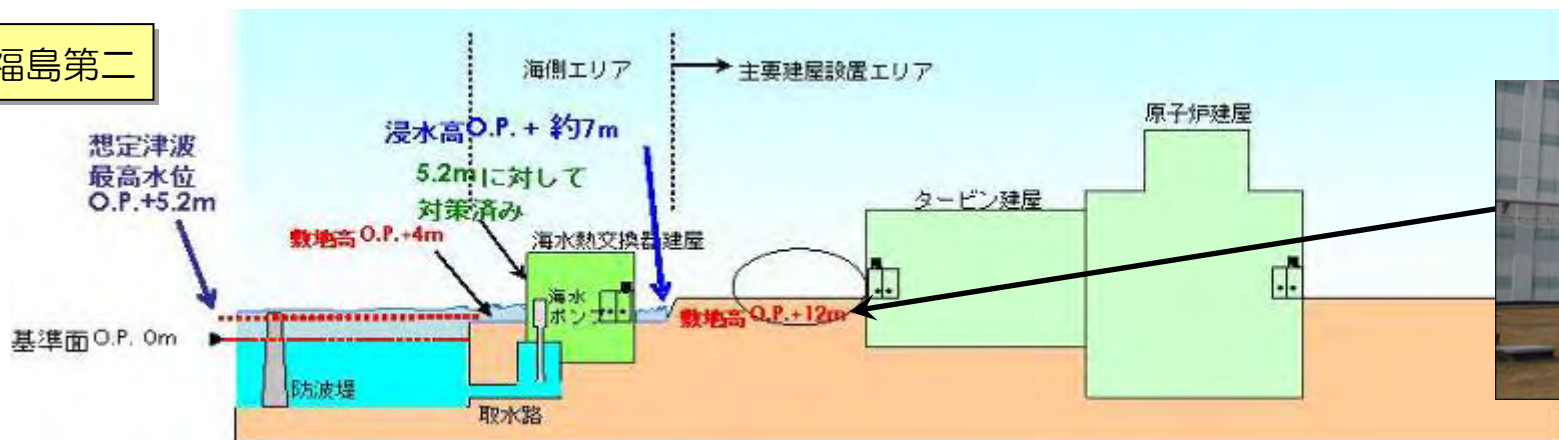
津波の大きさ

- 平成14年改訂の想定津波最高水位は基準面（O.P.）に対し、**5.7m**（福島第一）、**5.2m**（福島第二）でした。
- 福島第一では基準水面に対し**約15m**、福島第二では基準水面に対し**約7m**浸水しました。
- 福島第一への津波の影響（水位及び浸水域）は、福島第二のものに比べ、大きかったことが確認されています。

福島第一



福島第二



O.P. : 小名浜港工事基準面

福島第一・第二の浸水、遡上の領域



© GeoEye

福島第一 津波の襲来（1）

5号機の近傍（南側）から東側を撮影



廃棄物処理建屋4階から北側を撮影

タンク

高さ約5.5m（敷地高O.P.+10m）



福島第一 津波の襲来（2）

3号機海水ポンプエリア近傍を撮影

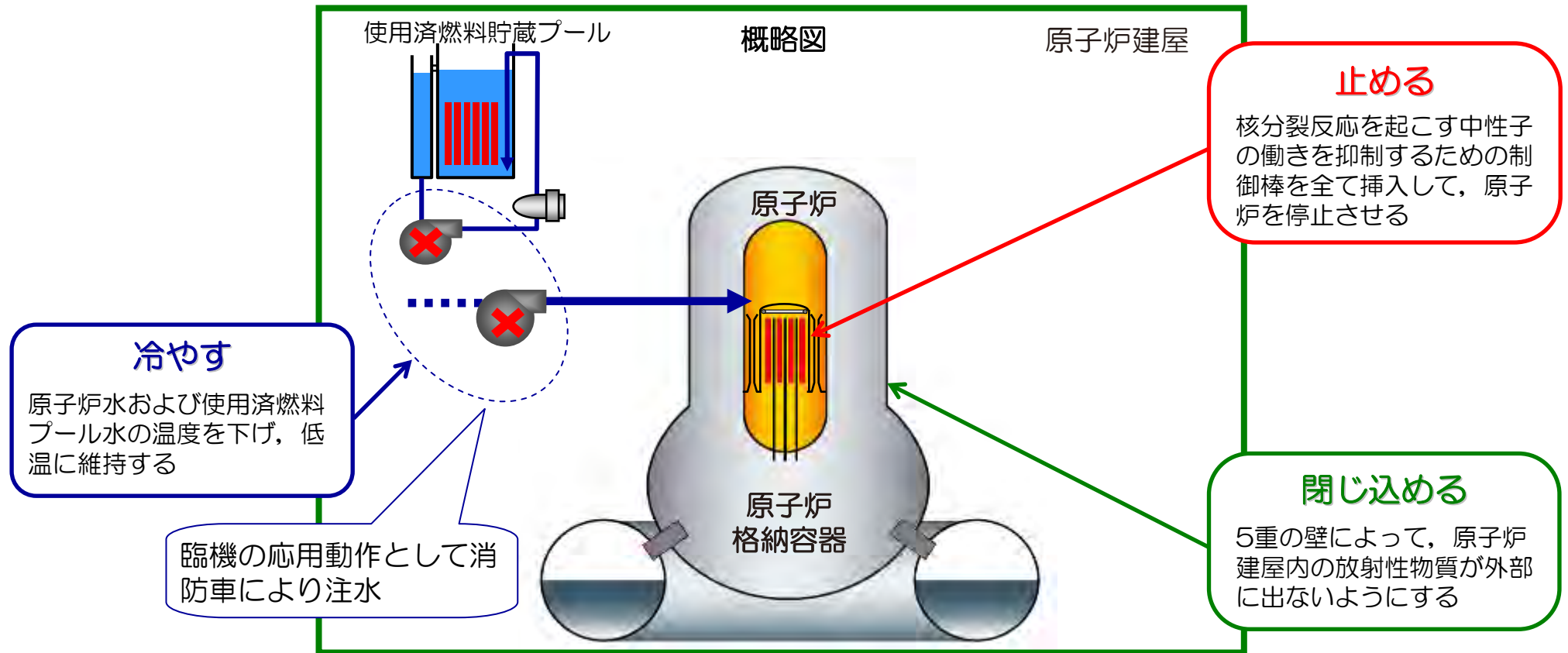


5・6号機取水設備周辺を撮影



福島第一 安全機能への影響

- 地震発生と同時に全制御棒が自動的に挿入され、原子炉内の核分裂連鎖反応は止まりました。
- 地震等の影響により外部電源を喪失し、非常用発電機が起動しましたが、津波の浸水により6号機を除き非常用電源が使用できない状態になりました。
- 津波による交流電源喪失に加え、海水系の喪失などにより、最終的に1～4号機の原子炉と使用済燃料プールの「冷やす」機能を失いました。
- タービン建屋内に高レベル汚染水を確認、「閉じ込める」機能が損なわれています。



福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所の状況推移

3/11 14:46頃 東北地方太平洋沖地震発生

地震により原子炉スクラム（緊急停止）

福島第一 1～4号機

5, 6号機

福島第二 1～4号機

外部電源喪失、D/G（非常用ディーゼル発電機）起動

スクラム対応

スクラム対応

3/11 15:20頃～ 東北地方太平洋沖地震に伴う津波が福島第一・第二原子力発電所に襲来

1～3号機

4号機

【電源】 外部電源・D/G全滅
【海水系】 全 滅

【電源】 D/G6B起動
【海水系】 全 滅

【電源】 外部電源あり
【海水系】 3号機を除き全滅^{※2}

※2 RHR系の海水系

高圧系（蒸気駆動）による注水

6号機→5号機へ電源融通

高圧系（蒸気駆動）による注水

低圧系による海水・淡水注水

低圧系による注水

安定化に向け対応中
10月初旬より、1～3号機の
圧力容器下部温度100℃以下

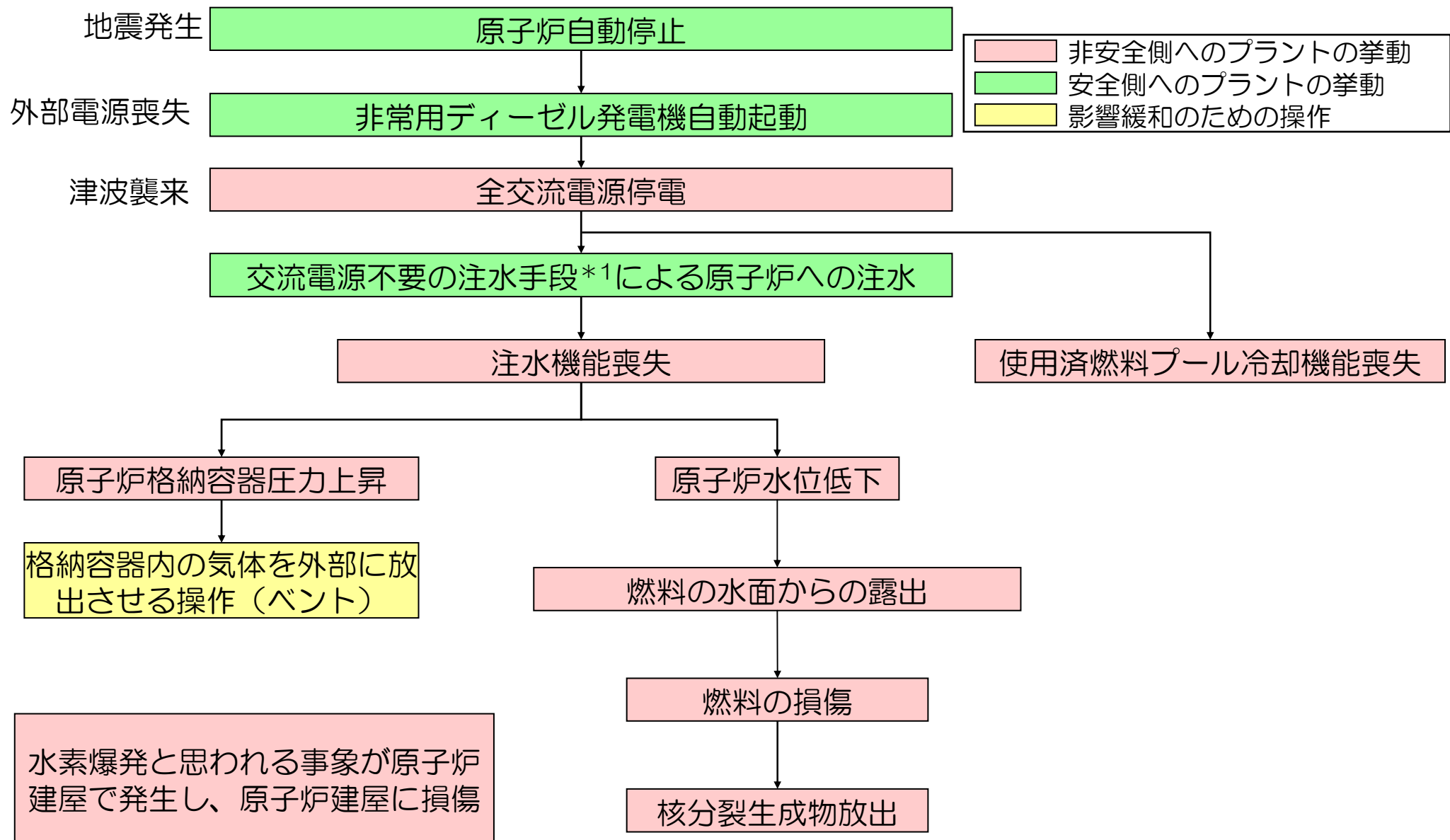
仮設電源、仮設海水ポンプ
による熱除去のルート確保

仮設電源、電動機の交換等による熱除去のルート確保

冷温停止

冷温停止

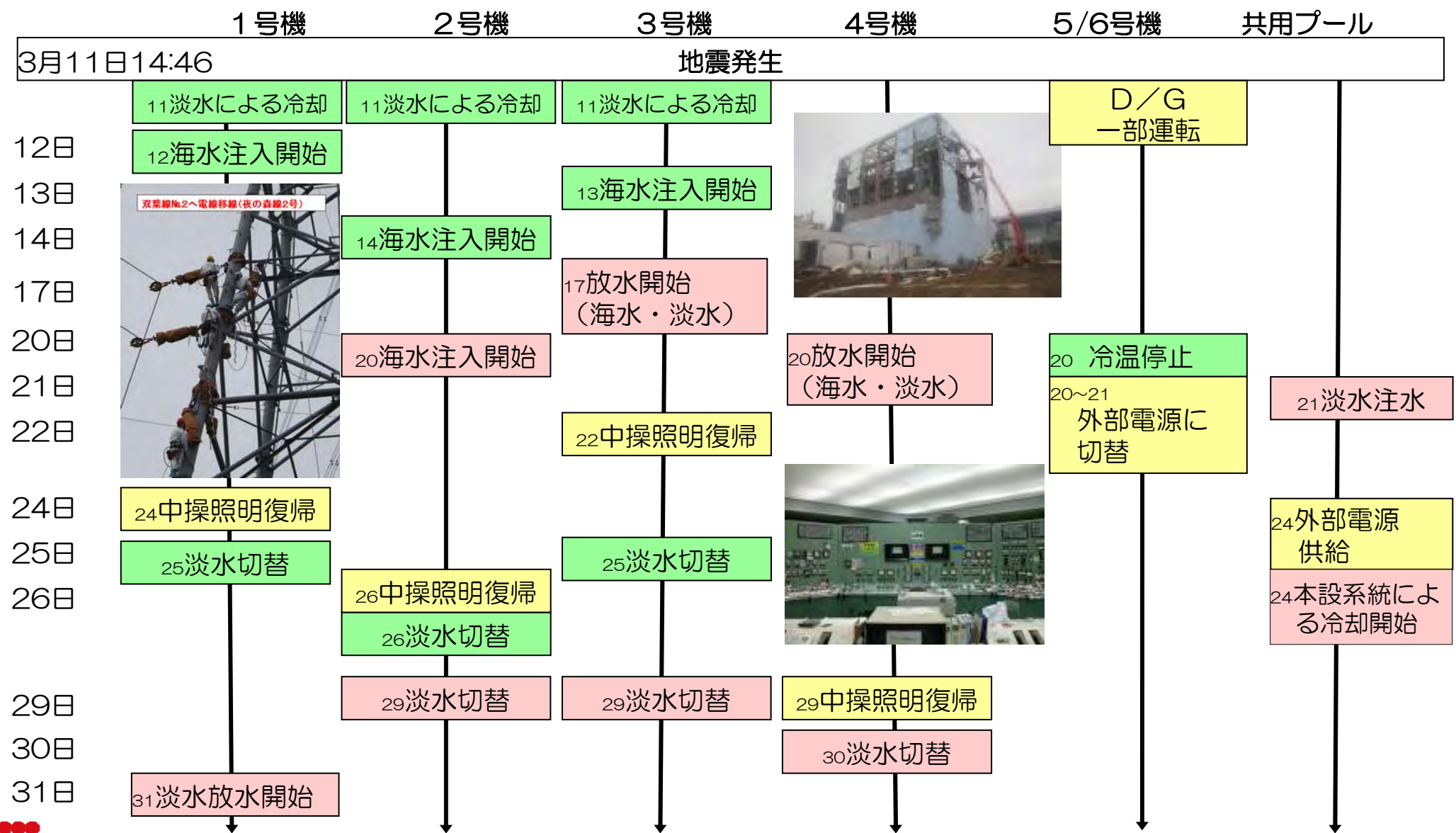
福島第一原子力発電所の事故の経過（3号機の場合）



* 高圧注水系、原子炉隔離時冷却系

福島第一 燃料冷却・電源復旧の取り組み

凡例：
原子炉関係
プール関係
電源関係



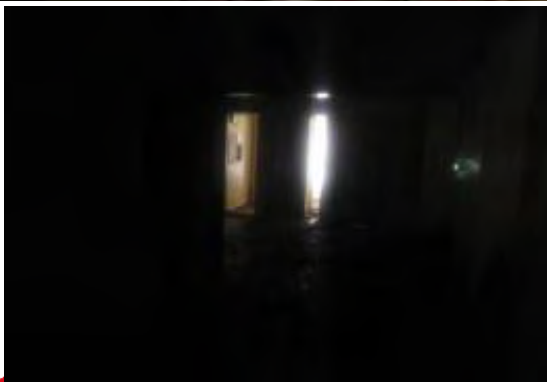
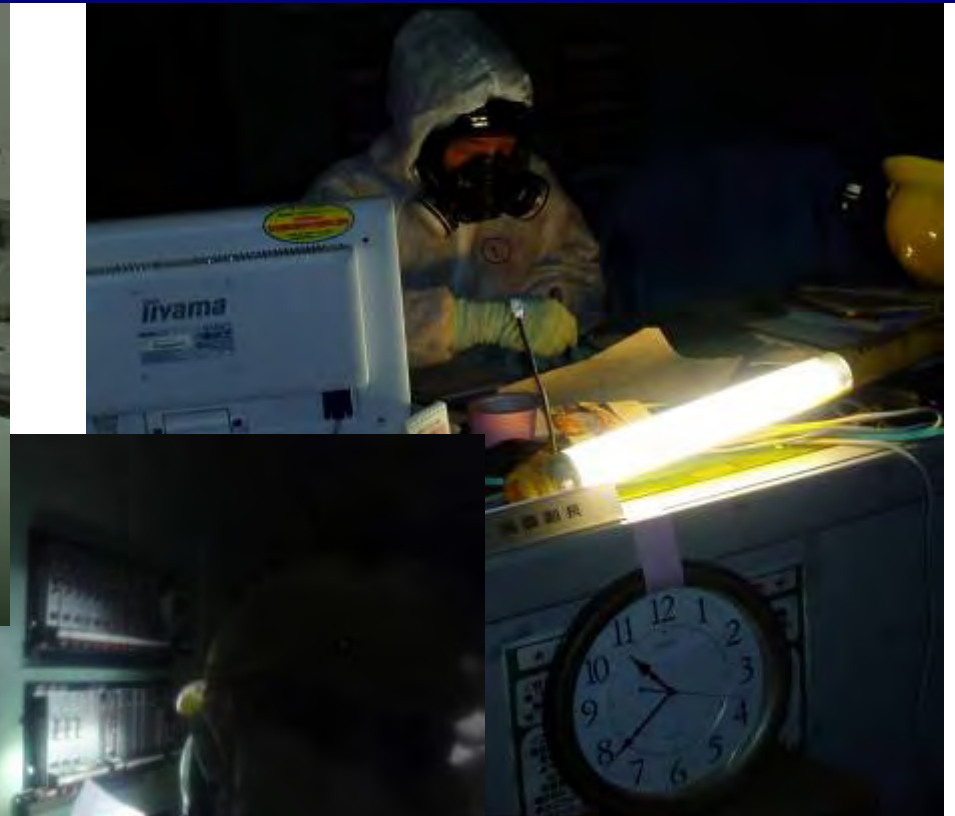
福島第一 事故対応—中央操作室

現場の証言：

「電源を失って何も出来なくなったと感じた。」

「操作もできず、手も足も出ないのに、我々がここにいる意味があるのかと紛糾した。」

「ここに残ってくれと頭を下げ、了解を得た。」



福島第一 事故対応—注水作業

現場の証言：

「相当大きな余震があり、全面マスク着用のまま死に物狂いで高台へ走って行かざるを得ないことも多かった。」

「暗闇の中、ケーブル敷設のための貫通部を見つけたり、端末処理を行う必要もある。水たまりの中での作業で、感電の恐怖すらあった。」



大きく開口し通行を阻んだ数多くの地割れ



消防車と散乱した漂流物



津波で流されて道を塞ぐ重油タンク

福島第一 事故対応—格納容器ベントの実施

- 1～3号機で、原子炉格納容器内の過大な圧力を防止するため、格納容器内の圧力を低下させる措置（ベント）を実施しました。

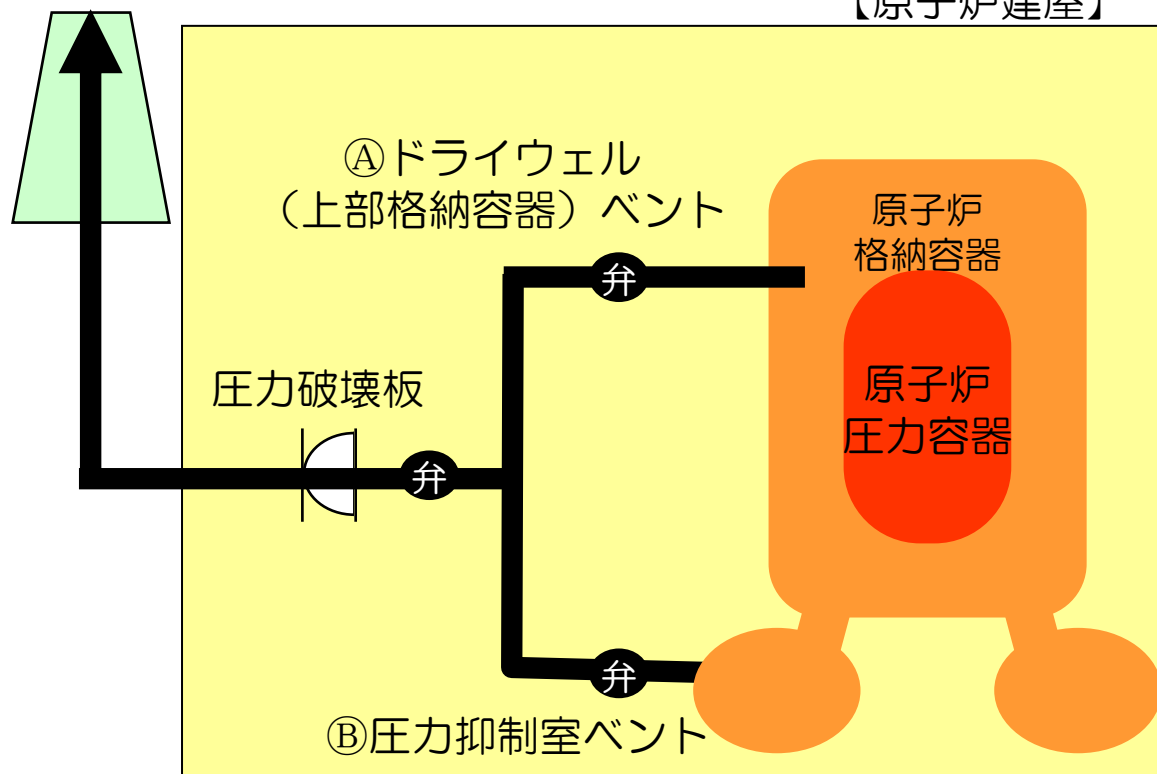


作業者の証言：

「弁が一番上の物であったので、トラス部分に足をかけ作業をしようとしたら、黒い長靴がズルッと溶けた。」

排気筒

【原子炉建屋】



設備の現況（福島第一原子力発電所、10月28日現在）

- 1～3号機では、原子炉内の燃料の冷却のため、滞留水の再利用による循環注水冷却を実施中です。
- 1～4号機では、使用済燃料プール内の使用済燃料の冷却のため、安定的な循環冷却を開始しました。
- 1～3号機のタービン建屋内に高レベル汚染水を確認。滞留水処理施設による処理を継続中です。
- 水素爆発防止のため、1～3号機格納容器内に窒素注入中です。
- 5,6号機は冷温停止中です。

		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
「止める」		○	○	○	定期検査中	定期検査中	定期検査中
「冷やす」	原子炉	○※2 循環注水冷却 窒素ガス封入	○※2 循環注水冷却 窒素ガス封入	○※2 循環注水冷却 窒素ガス封入	— 燃料なし	○ 冷温停止中	○ 冷温停止中
	プール	○ 循環冷却システム	○ 循環冷却システム	○ 循環冷却システム	○ 循環冷却システム	○	○
「閉じ込める」※1		△ 高レベル汚染水確認 滞留水処理施設による 処理を継続	△ 高レベル汚染水確認 滞留水処理施設による 処理を継続	△ 高レベル汚染水確認 滞留水処理施設による 処理を継続	△	○	○

※1：1,3,4号機は原子炉建屋上部に損傷あり。2号機は圧力抑制室の閉じ込める機能に異常がある可能性あり。5,6号機は水素ガス滞留防止のため、原子炉建屋屋根部に穴あけを実施。

※2：1～3号機の炉心損傷状況の暫定的な解析では、燃料ペレットが溶解し、解析条件によっては圧力容器底部に移行したとの結果が得られた。しかし、原子炉への淡水注水により、1,3号機では原子炉圧力容器底部の温度が100℃以下で安定している。2号機においても、10月初旬より100℃を下回っており、試験的に注水量を変化させて圧力容器底部温度を100℃以下で安定できることを確認。

2. 事故の収束に向けた取組状況

「事故の収束に向けた道筋」の進捗状況について

- 原子炉および使用済燃料プールの安定的冷却状態の確立、放射性物質放出の抑制を最優先に、避難されている方々のご帰宅の実現および国民の皆さまの安心のため全力で取り組んでまいります。

＜至近1ヶ月の総括と今後の取組み（主な変更点）＞

「福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」の進捗状況（10月17日）を一部最新化

【課題（1）原子炉】：注水ラインを変更し、より効果的な冷却を開始

2,3号機は給水ラインに加えコアスプレイ（CS）からの注水を開始。1,3号機の原子炉圧力容器底部温度は100℃以下で安定。2号機も試験的に注水量を調整し、100℃以下で安定できることを確認。

【課題（2）燃料プール】：燃料プールは「より安定的な冷却」状態

【課題（3）滞留水】：滞留水の水位は豪雨や処理施設の長期停止にも耐えうるレベルに到達

滞留水の水位は当面の目標レベル（O.P3,000）に到達。安定的な処理に向け、セシウム吸着処理施設（サリー）を設置し、除染処理施設の増強完了。蒸発濃縮装置による塩分処理施設の増強完了。

【課題（4）地下水】：遮水壁の工事を開始

10月28日より工事に着手。

【課題（5）大気・土壌】：3,4号機原子炉建屋上部瓦礫撤去開始

3,4号機原子炉建屋上部の瓦礫撤去を開始。瓦礫等を保管エリア内で管理。燃料プール上部をフロートで養生

【課題（6）測定・低減・公表】：現時点における放射性物質の放出量を評価

1～3号機からの現時点の放出量を、原子炉建屋上部や陸域及び海域での空气中放射性物質濃度を用いて評価。「除染推進に向けた基本的考え方」及び「除染に関する緊急実施基本方針」等を決定。

【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】：仮設寮は予定の1,600人分を建設完了

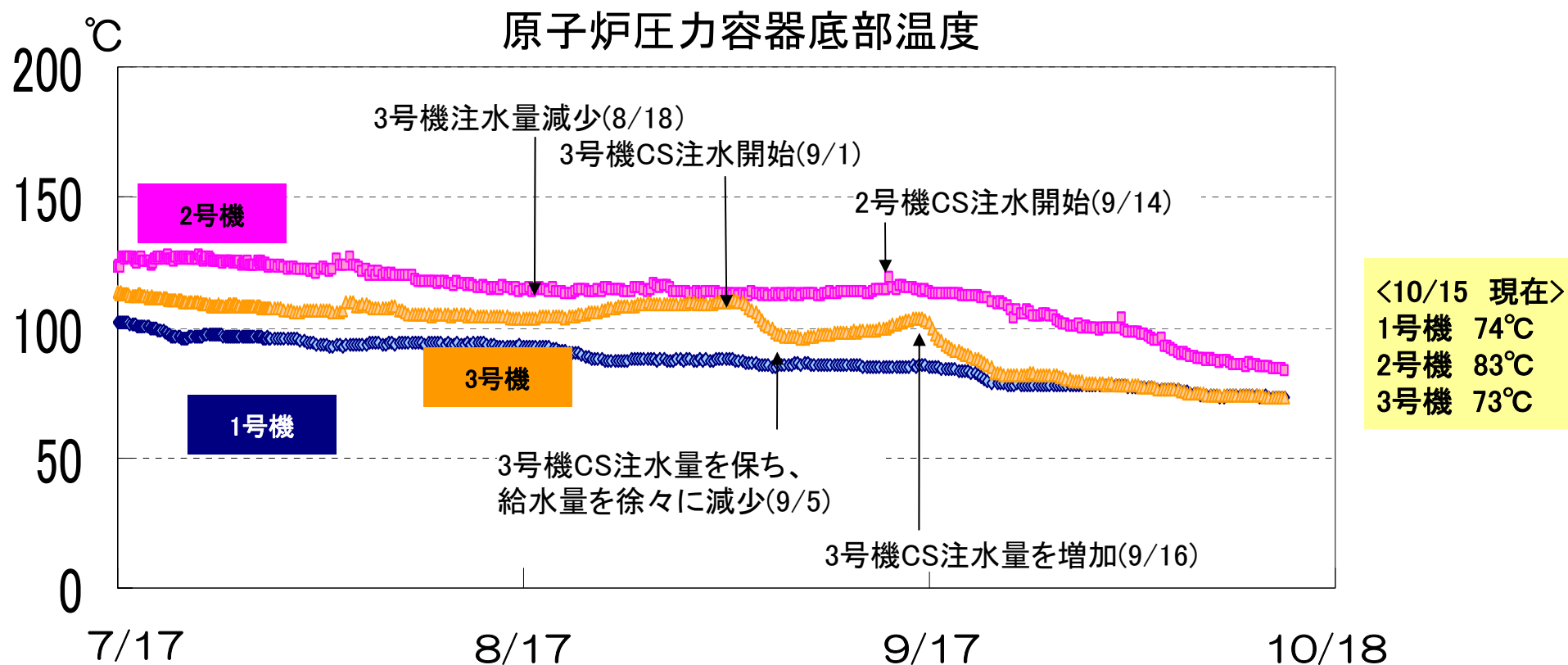
【課題（9）放射線管理・医療】：作業員の健康管理を充実

夏場限定だった5/6号機救急医療室を恒常施設化、看護師・放射線技師の派遣も開始。

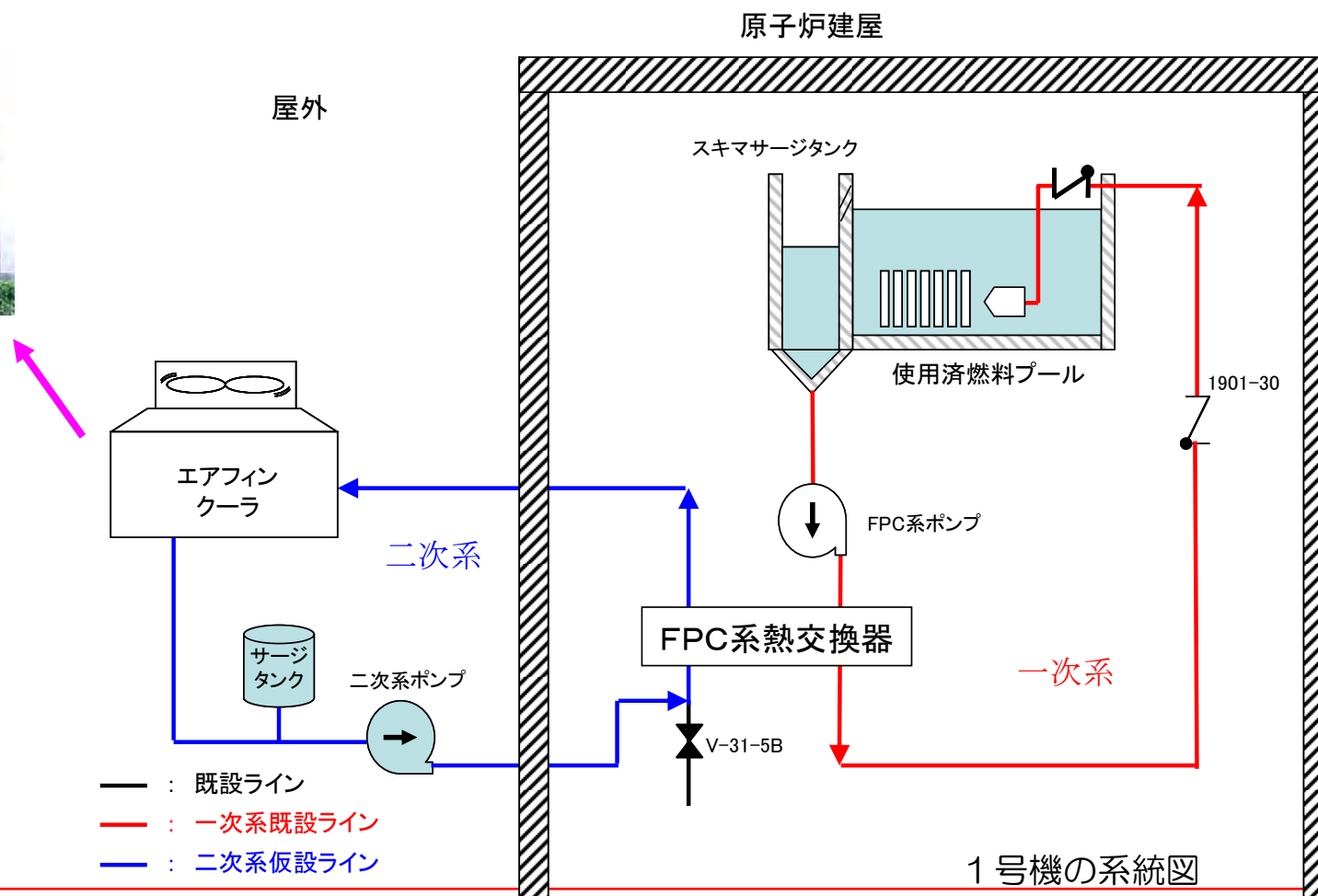
【課題（10）要員育成・配置】：放射線関係の要員育成研修を継続実施

原子炉の冷却 注水ラインを変更し、より効果的な冷却を開始

- 2,3号機では、給水ラインに加えコアスプレイ（CS）からの注水を開始しました。少ない水量で安定的に冷却をすることができます。
- 1,3号機の原子炉圧力容器底部温度は100℃以下で安定しています。2号機も試験的に注水量を調整し、100℃以下で安定できることを確認しました。



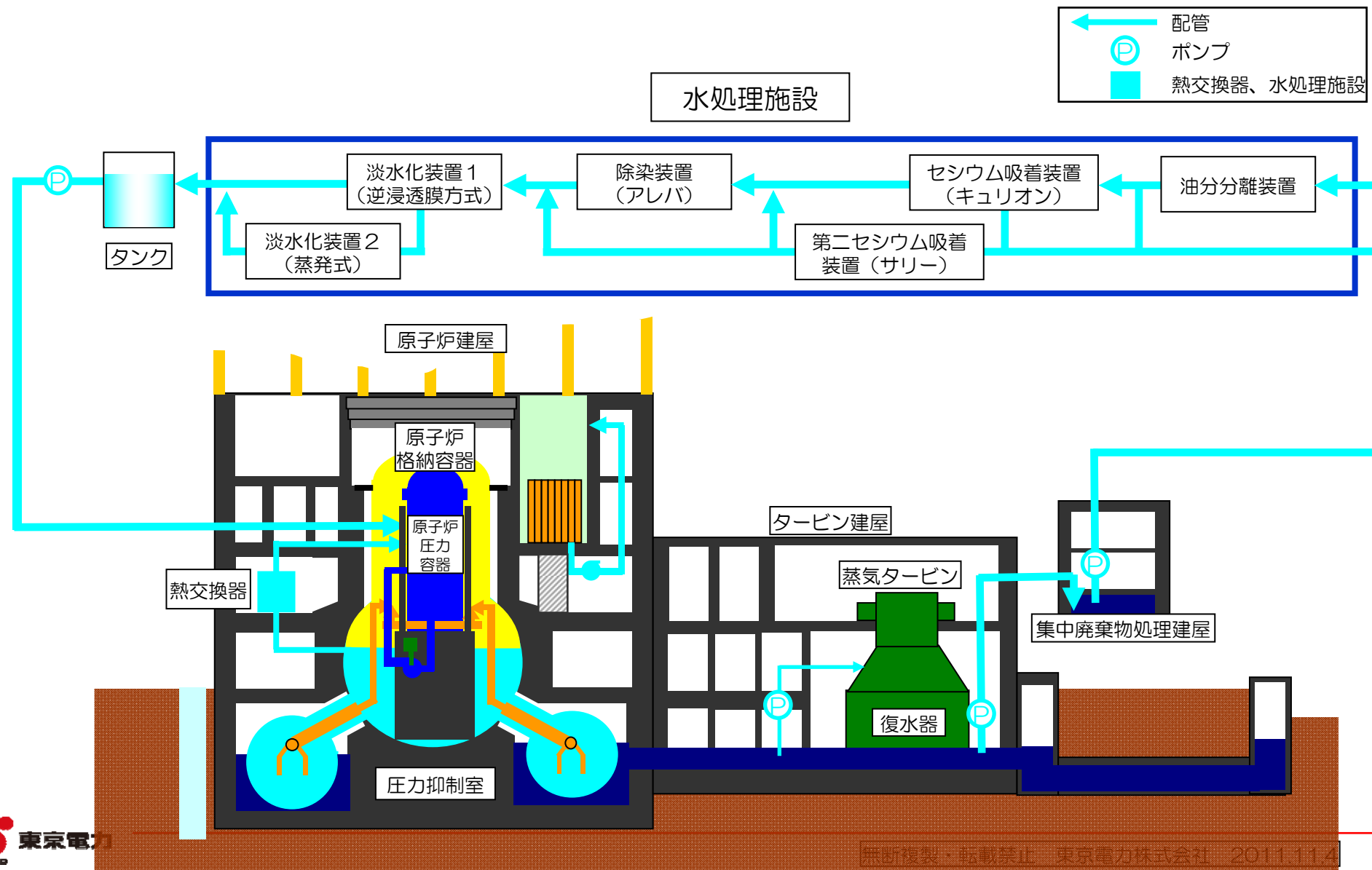
- 2,3号機はステップ1 終了時点で既に熱交換器を設置し、プールの水位が維持され、より安定的に冷却できている状態（ステップ2の目標）を達成しました。
- 1,4号機も循環冷却システムが完成し、8月10日、全号機がステップ2の目標を達成しました。
- 4号機では、8月20日、塩分除去装置を稼動しました。2,3号機についても順次塩分除去を実施予定です。



滞留水の抑制

滞留水処理の全体イメージ図

➤ 集中廃棄物処理施設に移送・貯蔵した滞留水を処理し、原子炉への注入水に利用します。



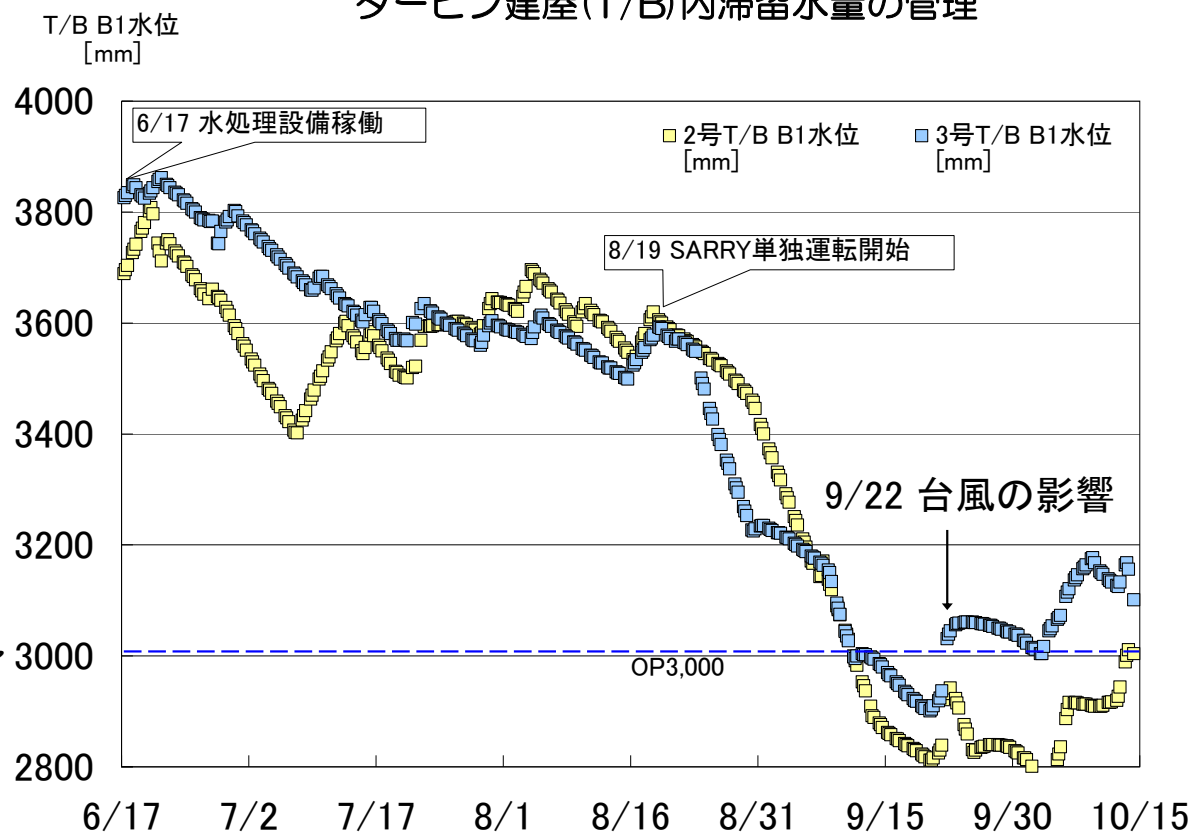
- 8月18日のサリー本格運用開始に伴い、滞留水の水位は当面の目標レベル（O.P.3,000）に到達し、滞留水の全体量は、豪雨や処理施設の長期停止にも耐えられるレベルまで減少しました。
- 現在、さらに循環注水冷却を継続・強化中です。

<滞留水の処理状況>

- 滞留水処理実績
累計約128,140トン（10/13時点）
- セシウム除染係数※
10⁶（キュリオン-アレバ、8/9実績）
10⁴（キュリオン、9/26実績）
10⁶（サリー、9/26実績）
- 塩素濃度
6,000ppmのものを20ppm程度に低下
（逆浸透膜による装置、8/9実績）
12,000ppmのものを1ppm未満に低下
（蒸発濃縮による装置、8/16実績）
- 蒸発濃縮装置による塩分処理施設の増強完了
（10/9）。

※処理前の試料のセシウム濃度／処理後の試料のセシウム濃度

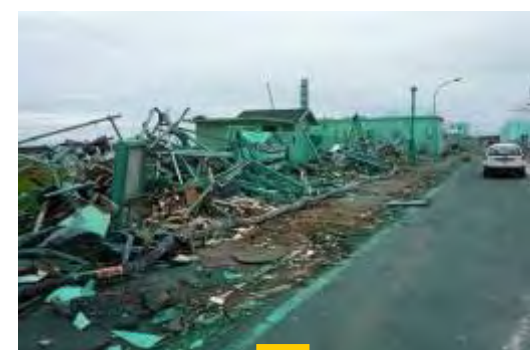
タービン建屋(T/B)内滞留水量の管理



- 放射性物質の飛散を防ぐため、飛散防止剤を散布しました。
(4月1日以降、敷地に散布。4月26日より本格散布。5月27日より建屋本体に散布。)
- 放射性物質を含む水の海への流出を防ぐため、下記対策を実施しました。
 - ✓ 立坑周辺の穴から凝固剤を注入し、止水を確認(4月6日 5:38頃)。
 - ✓ 止水状況をさらに完全なものとするため、流出箇所に対して、ゴム板と治具による止水対策を実施。
 - ✓ 発電所防波堤周辺で大型土のうの積み込みによる止水工事、シルトフェンスの設置を実施。
 - ✓ スクリーンエリアへの循環型の浄化装置の設置を実施。
- 瓦礫の撤去により、発電所敷地内の放射線量が低下しています。3号機および4号機では原子炉建屋上部の瓦礫撤去を開始しました。



海水循環型浄化装置設置



敷地、建屋本体への飛散防止剤散布

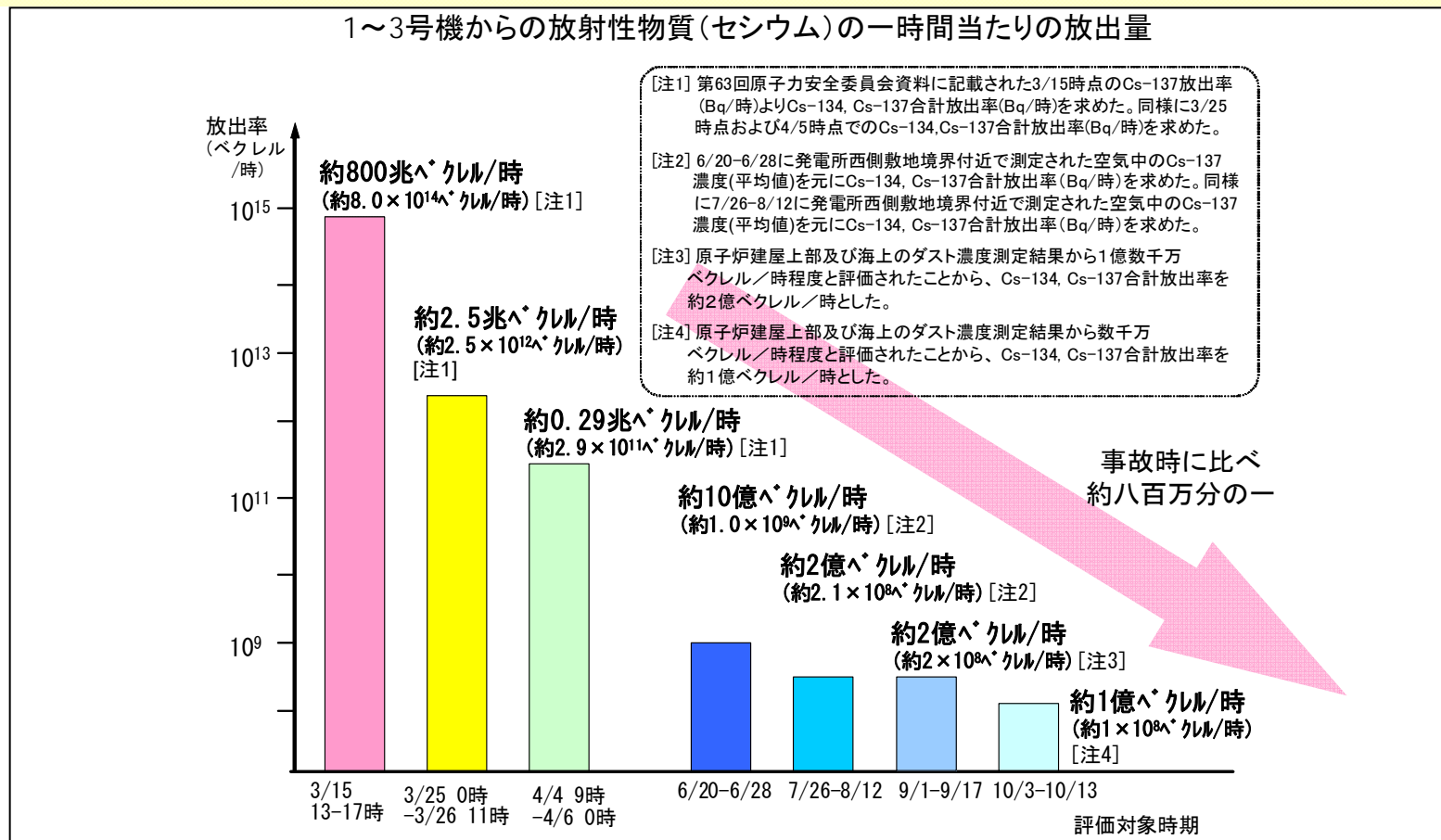


シルトフェンス設置



瓦礫の撤去

- 1～3号機からの現時点の放出量は1時間当たり約1億ベクレルで、事故直後と比べ、約800万分の1の値です。
- これによる敷地境界の被ばく線量は、最大0.2mSv/年となりました。（これまでに既に放出された放射性物質の影響を除きます）
 なお、法令で定める線量限度は1mSv/年です。



周辺住民の避難

福島第一、第二から国への報告に基づき、国は以下の通り屋内退避・避難などの措置をとりました。

3月11日 (金)

- 14:46 地震発生
- 19:03 緊急事態宣言 (福島第一)
- 21:23 半径3km圏内の避難指示 (福島第一)
- 半径10km圏内の屋内退避指示 (福島第一)

3月12日 (土)

- 5:44 半径10km圏内の避難指示 (福島第一)
- 7:45 半径3km圏内の避難指示 (福島第二)
- 半径10km圏内の屋内退避指示 (福島第二)
- 17:39 半径10km圏内の避難指示 (福島第二)
- 18:25 半径20km圏内の避難指示 (福島第一)

3月15日 (火)

- 11:00 半径20km～30km圏内の屋内退避指示 (福島第一)

4月21日 (木)

- 11:00 半径20km圏内を警戒区域に設定 (福島第一)
- 半径8km以遠区域の避難解除指示 (福島第二)

4月22日 (金)

- 9:44 半径20km～30km圏内の屋内退避解除 (福島第一)
- 計画的避難区域及び緊急時避難準備区域の設定

6月16日 (木)

- 午後 特定避難勧奨地点の設定

9月30日 (金)

- 18:11 緊急時避難準備区域の解除指示



※緊急時避難準備区域は9月30日に解除

出所：原子力安全・保安院Webサイトより

○余震に備え4号機では、燃料プール底部に支持構造物を設置しました。

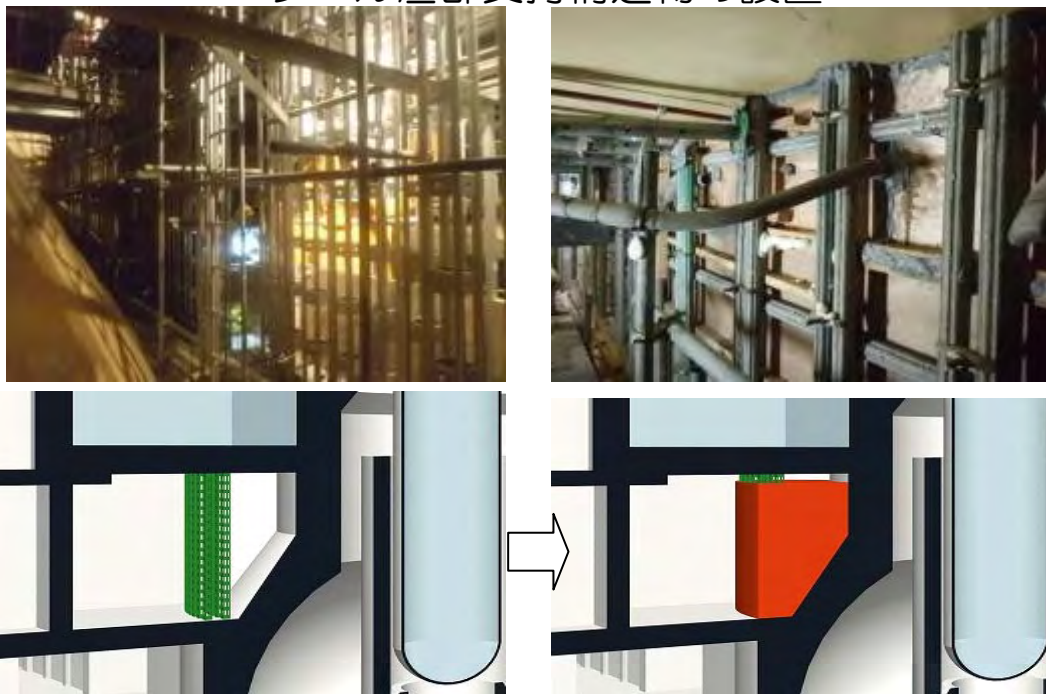
○津波に備え下記の対策を実施しました。

- ・高台に非常用仮電源移動 (4/15)
- ・注水ラインの多重化 (~4/15)
- ・高台に消防車等設置 (~4/18)
- ・仮設防潮堤の設置 (~6/30)

○各号器原子炉建屋の耐震評価を実施しました。

- ・1号機から6号機までの原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討を実施、評価。
- ・解析結果として、補強を行わなくても耐震安全性は確保できていることを確認。
- ・線量低減対策後に建屋内部調査を予定。

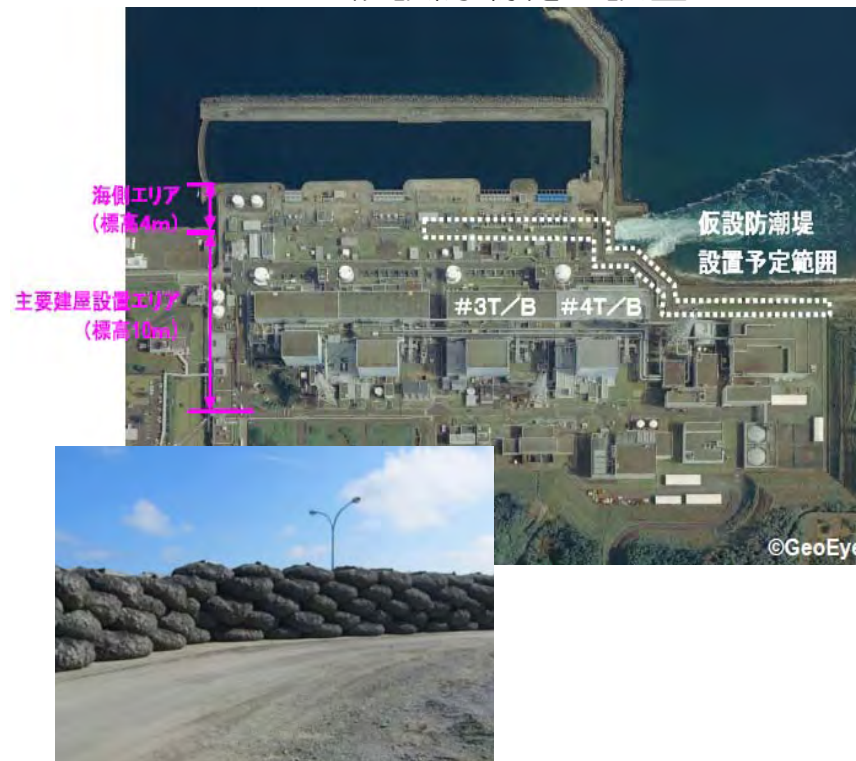
プール底部支持構造物の設置



鋼製支柱の設置

コンクリート壁の設置

仮設防潮堤の設置



東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋 当面の取組のロードマップ（改訂版）（案）

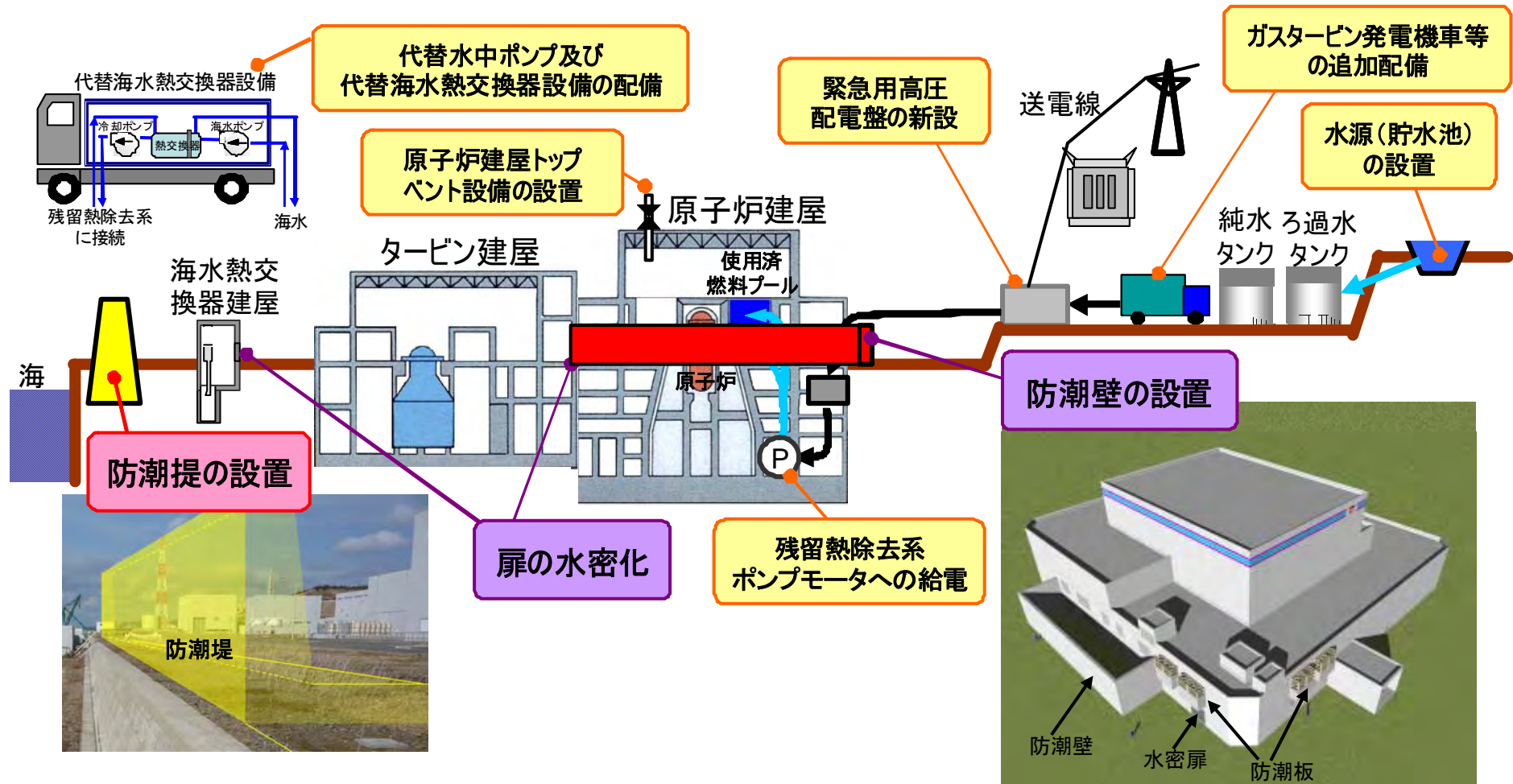
平成 23 年 10 月 17 日
原子力災害対策本部
政府・東京電力統合対策室

赤字：前回からの追加点、☆印：報告徴収済、緑色は達成した目標

課題		初回(4/17)時点	ステップ1(3ヶ月程度)	ステップ2(年内) ▼現時点(10/17)	中期的課題 (~3年程度)
I. 冷却	(1) 原子炉	淡水注入 最小限の注水による燃料冷却(注水冷却) 滞留水再利用の検討/準備	循環注水冷却(注水冷却) 循環注水冷却(開始) ☆ 窒素充填 ☆ 作業環境改善 ☆	循環注水冷却(継続) 窒素充填(継続)	冷温停止状態の継続 構造材の腐食破損防止 ※一部前倒し
	(2) 燃料プール	淡水注入	注入操作の信頼性向上/遠隔操作 ※前倒し 循環冷却システム(熱交換器の設置) ☆ ※一部前倒し	注入操作の遠隔操作 熱交換機能の検討/実施	燃料の取り出し作業の開始
II. 抑制	(3) 滞留水	放射性レベルの高い水の移動 放射性レベルの低い水の保管	保管/処理施設の設置 ☆ 保管施設の設置/除染処理	施設拡充/本格水処理施設検討 除染/塩分処理(再利用)等 廃スラッジ等の保管/管理 ☆ 海洋汚染拡大防止	本格水処理施設の設置 滞留水の処理継続 廃スラッジ等の保管/管理 廃スラッジ等の処理の研究 海洋汚染拡大防止
	(4) 地下水		地下水の汚染拡大防止 遮水壁の方式検討	管/処理施設拡充計画にあわせてサブドレンホプを復旧) 遮水壁の設計・着手	地下水の汚染拡大防止 遮水壁の構築
	(5) 大気・土壌		飛散防止剤の散布 瓦礫の撤去・管理	飛散防止剤の散布(継続) 瓦礫の撤去・管理(継続) 原子炉建屋カバーの設置(1号機) ☆ 瓦礫撤去(3,4号機原子炉建屋上部) 原子炉建屋コンテナの検討 格納容器ガス管理システム設置	飛散防止剤の散布 瓦礫の撤去・管理 瓦礫の撤去/カバーの設置(3,4号機) 原子炉建屋コンテナ設置作業の開始 格納容器ガス管理システム設置
III. 除染・モニタリング	(6) 測定公表	発電所内外の放射線量のモニタリング拡大・充実、公表	本格的除染の検討・開始	除染 環境モニタリングの継続 除染の継続	
IV. 余震対策等	(7) 津波・地震補強	余震・津波対策の拡充、多様な放射線遮へい対策の準備 (4号機燃料プール)支持構造物の設置 ☆	各号機の補強工事の検討 ☆	災害の拡大防止 多様な遮へい対策の継続 各号機の補強工事	
V. 環境改善	(8) 生活環境・職場環境改善		作業員の生活・職場環境の改善	環境改善 作業員の生活・職場環境改善	
	(9) 放射線管理・医療体制改善		放射線管理・医療体制の改善	健康改善 放射線管理・医療体制改善	
中期的課題への対応			要員の計画的育成・配置の実施	徹底の管理 要員の計画的育成・配置の実施	
			政府による安全確保の考え方 上記に基づく施設運営計画の策定	施設運営計画に基づく対応	

今回の事故を踏まえて

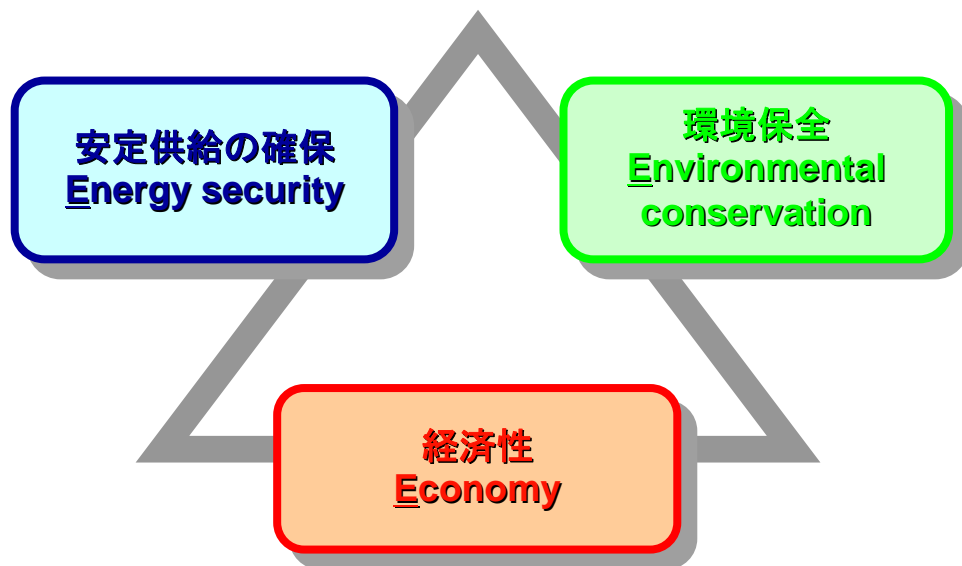
- 津波により電源と原子炉内の燃料及び使用済燃料を冷却する機能が失われても、炉心損傷や使用済み燃料の損傷を防止し、放射性物質の放出を抑制しつつ冷却機能の回復をはかること。
- 全国の原子力発電所において緊急安全対策を実施済み。



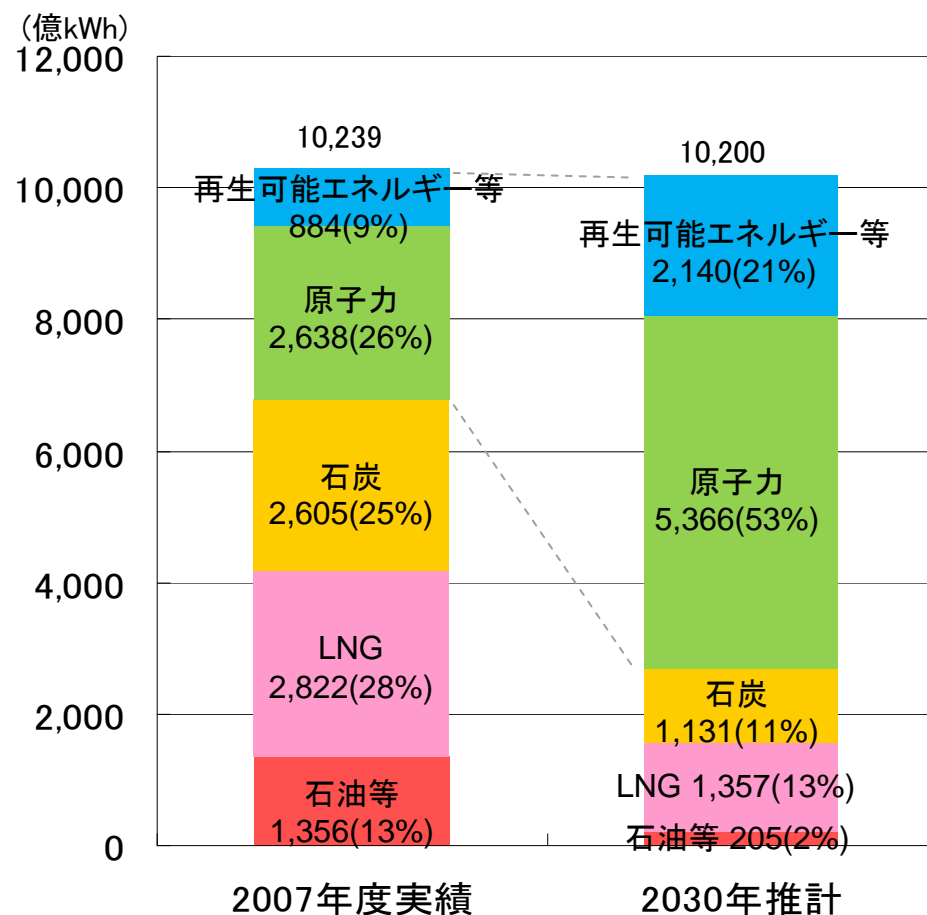
3. 今後のエネルギー・環境戦略の方向性

震災『前』のエネルギー・環境戦略の視点

- 3つのE（安定供給の確保、環境保全、経済性）の同時達成
- 地球温暖化対策の高まりから、再生可能エネルギーとともに、供給安定性・経済性・環境性に優れる原子力の推進を計画



エネルギー基本計画（平成22年6月）発電電力量



各エネルギー源の特徴

- エネルギー資源の特徴から供給安定性、経済性、環境特性（3E）を考慮して、電力需要に応じた電源の組み合わせを考え、開発・運用
- 原子力はベース供給力を担い、発電出力の調整が容易な火力・水力が変化する需要に合わせて発電

国産／輸入	一次エネルギー	確認埋蔵量	特徴
国産	水力		<ul style="list-style-type: none"> ・再生可能な国産エネルギー ・今後、大規模な開発は困難
輸入	石油	42年	<ul style="list-style-type: none"> ・発電以外にも用途が広い ・埋蔵量が少なく、政情不安定な中東に偏在 ・価格変動が激しい
	LNG	60.4年 (天然ガス)	<ul style="list-style-type: none"> ・石油・石炭に比べクリーン ・供給は安定しているが、調達条件は硬直的 ・価格は石油に連動
	石炭	122年	<ul style="list-style-type: none"> ・埋蔵量が豊富で、世界に広く分布 ・環境保全対策が特に必要
準国産	原子力 (ウラン)	100年 MOX使用で 1割～2割増 FBRサイクル 1000年以上	<ul style="list-style-type: none"> ・政情の安定した国に広く分布、価格も安定 ・原子燃料サイクルの確立によりウラン資源利用効率が飛躍的に向上 ・放射線管理や廃棄物の適切な処理・処分が必要 ・運転中にCO₂を排出しない

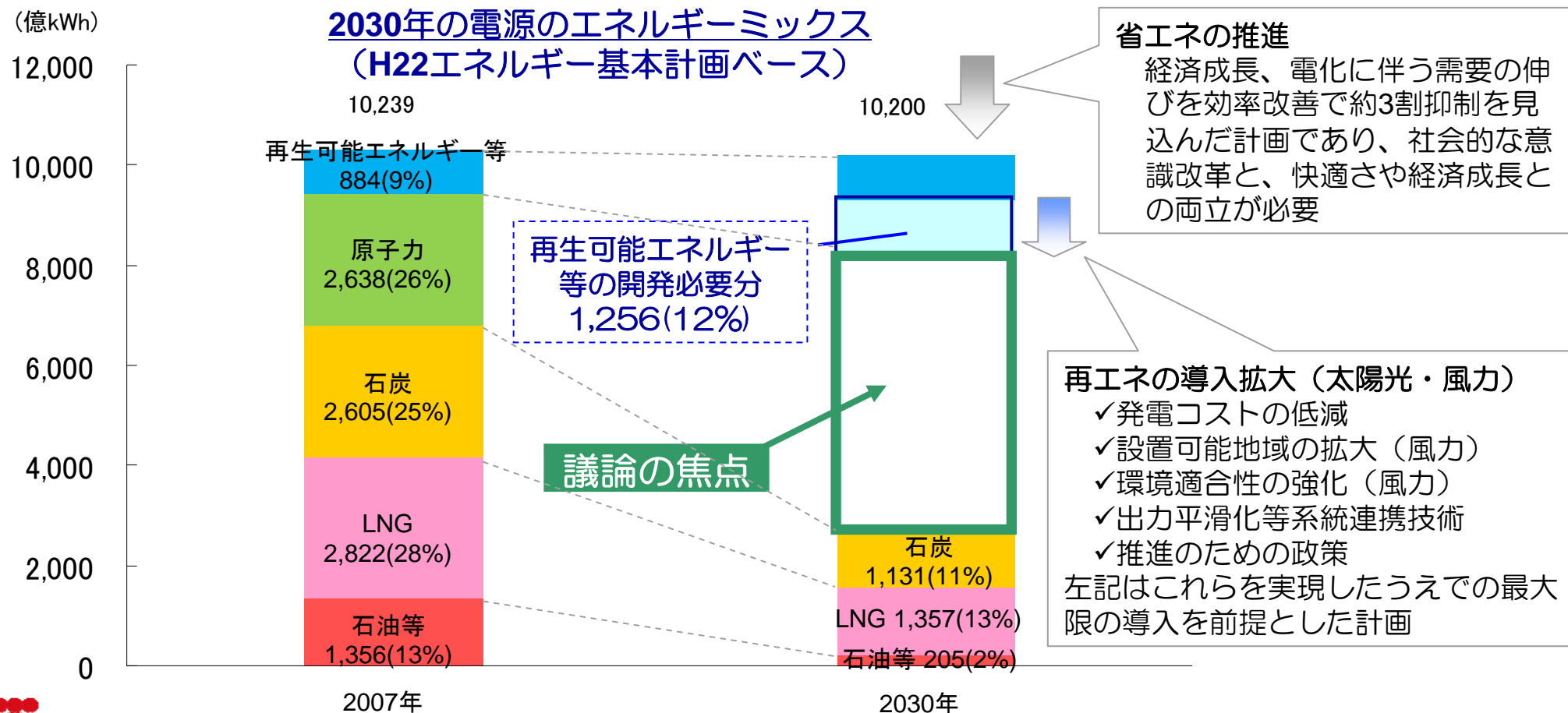
電源ベストミックスの再構築に向けた考え方（1）

東日本大震災により、

- 原子力災害の影響の甚大さ
- エネルギー安定供給の重要性

を認識。

日本の将来のエネルギー供給構造のあり方について現在議論が行われている。



電源ベストミックスの再構築に向けた考え方（2）

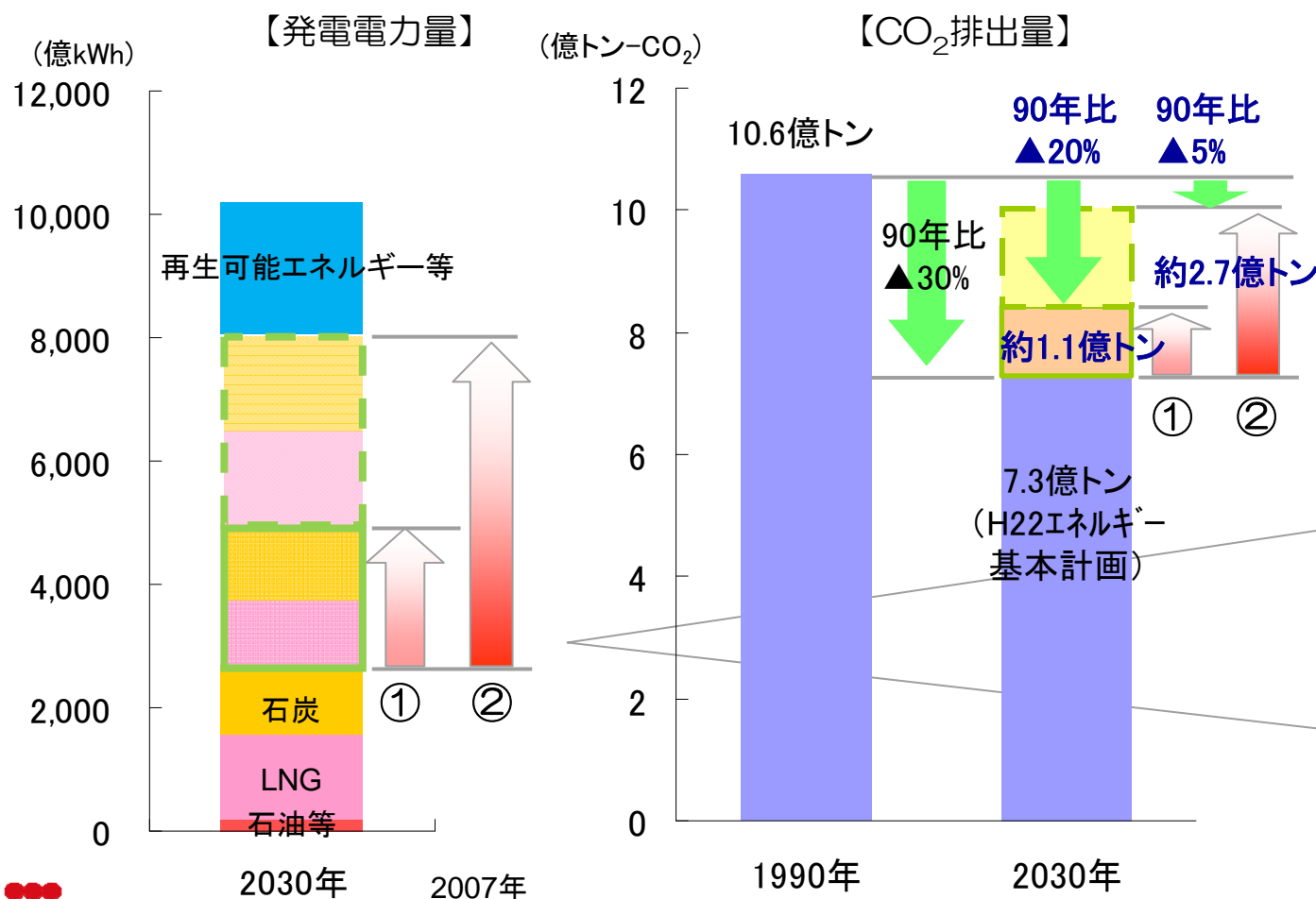
原子力発電の計画分を火力発電で代替した場合（2030）

H22エネルギー基本計画の2030年推計に対し、

①原子力発電の新增設中止分（約2,200億kWh）

②原子力発電の全量（5,366億kWh）

をLNG火力（MACC）、石炭火力（IGCC）で代替した場合



火力発電の効率向上

✓CO₂排出量は目標を超過
 ✓増分燃料の調達と燃料費増加
 これらを低減するためには、高効率化が必要

【石炭火力の効率向上】

- ・IGCC、A-USCの開発
- ・IGFCの開発

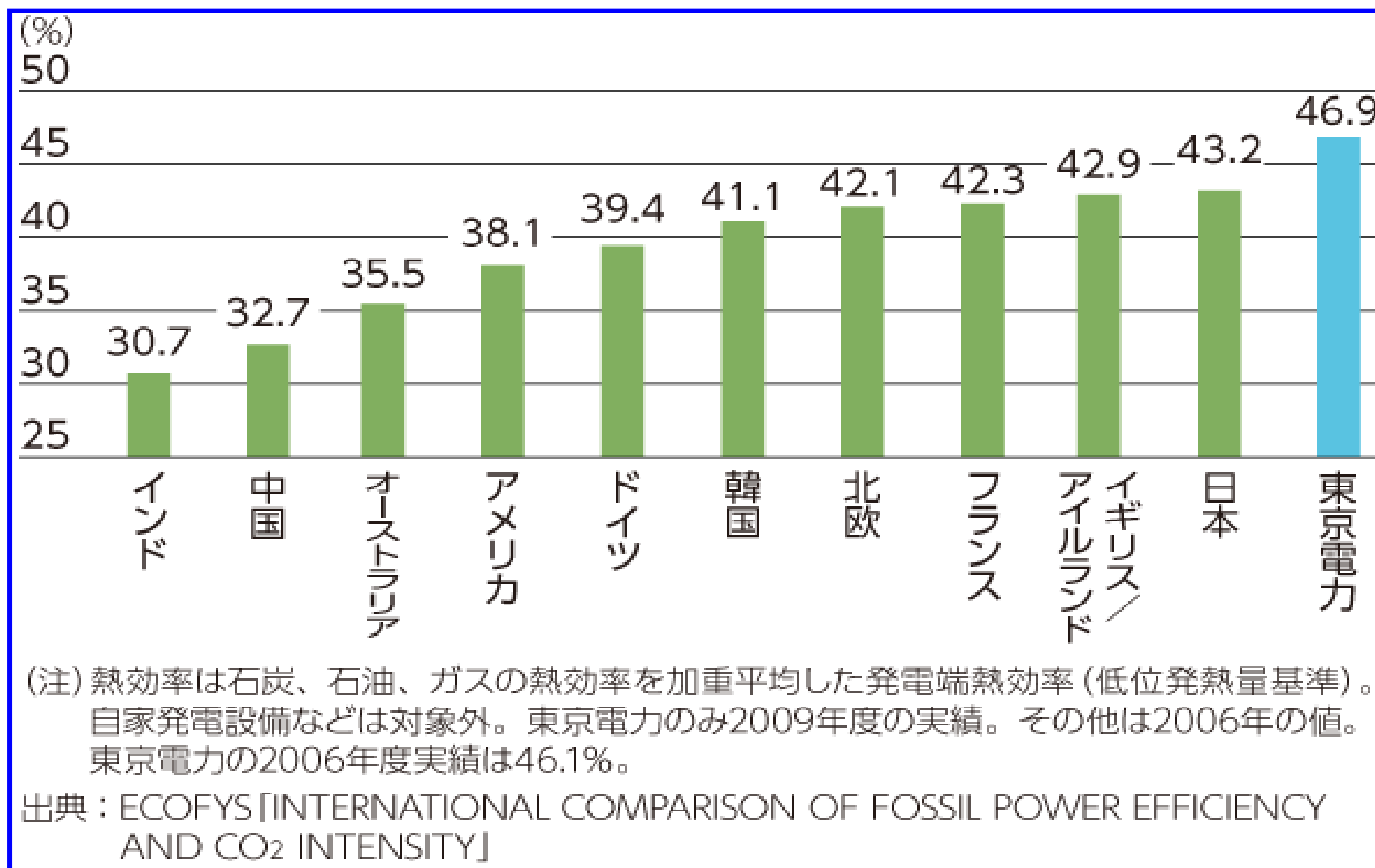
【LNG火力の効率向上】

- ・MACCへのリプレース
- ・1700℃級GTの開発
- ・トリプルサイクルの開発

【その他】

- ・CO₂回収貯留（CCS）の開発
- ・調整能力拡大（再エネ導入拡大時の負荷調整）

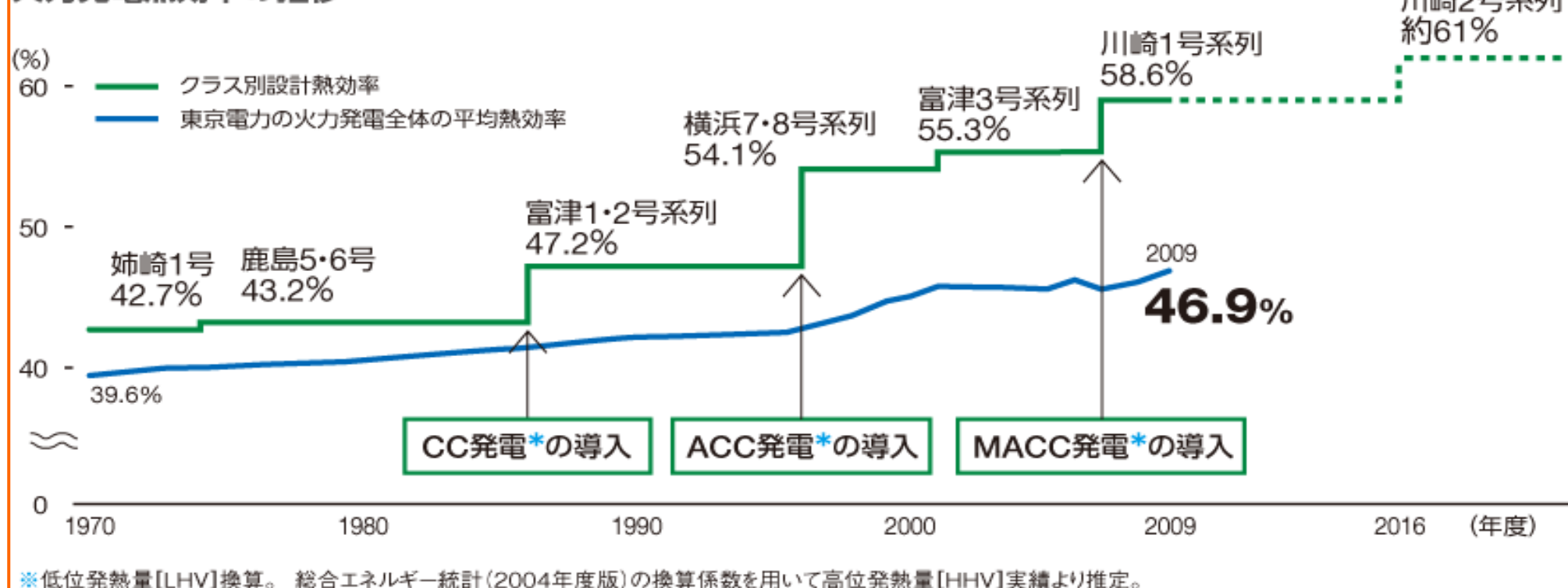
火力発電所熱効率の国際比較（東京電力）



火力発電所の熱効率向上（東京電力）

- 1980年代半ばからLNGコンバインドサイクル発電を導入し、平均熱効率が向上
 - ・ 2007年には1,500℃級の「MACC」（世界最高水準の熱効率59%）を導入
 - ・ 2016年には1,600℃級の「MACC II」（熱効率は約61%）を導入予定
- 平均熱効率が1%向上すると、CO₂排出量は約190万トン削減

火力発電熱効率の推移

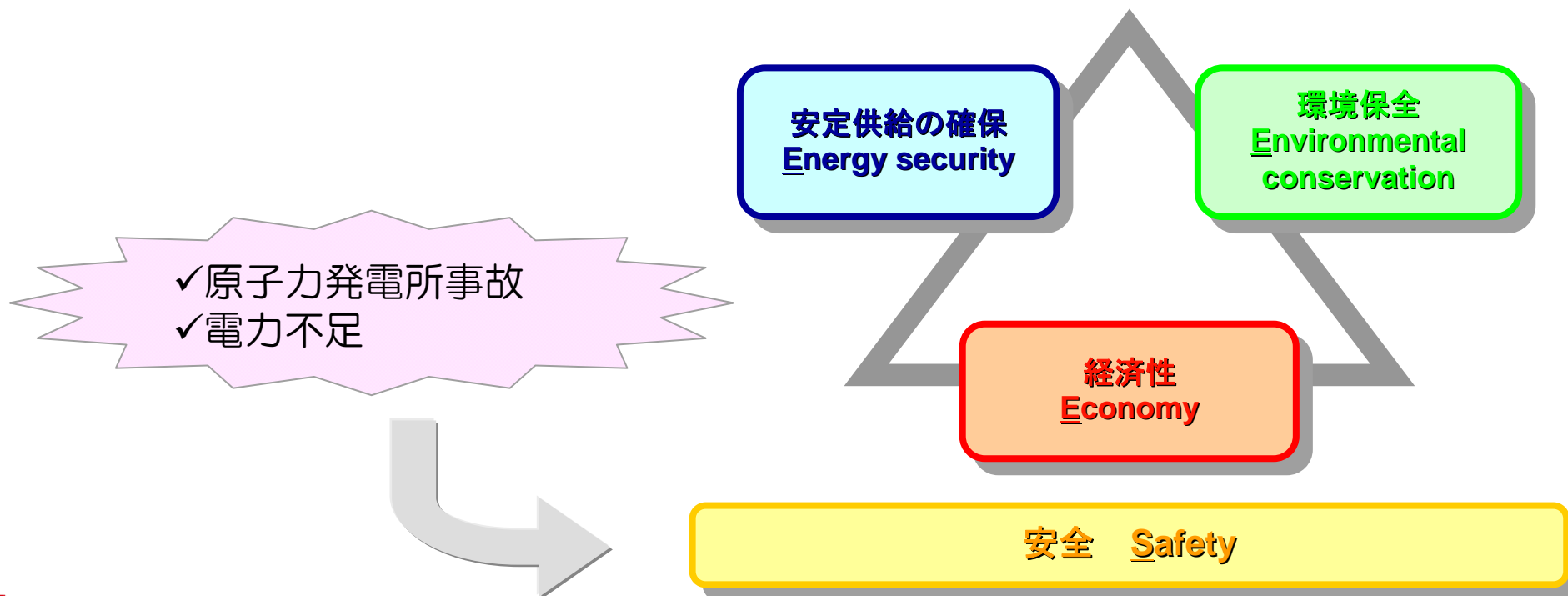


震災『後』のエネルギー・環境戦略の視点

- 省エネルギーの推進／再生可能エネルギーの導入拡大／火力発電の効率向上
- 安全・安心の確保を大前提に、将来にわたるエネルギー安全保障、地球温暖化対策の視点に基づく原子力の評価



- エネルギーの『安全』確保を大前提とした、
- 3つのE（安定供給の確保、環境保全、経済性）の同時達成



まとめ

- 避難されている住民の方々の一日も早いご帰宅の実現のため、事故の収束・プラントの安定化を最優先の課題として取り組む。
- 事故の教訓を踏まえた緊急安全対策の実施に加え、万一の電源・冷却系の喪失事故の発生においても重大事故に至ることのないように、運転中を含む全プラントを対象に、シビアアクシデント対策を実施します。
- エネルギー自給率4%の我が国にあって、「エネルギーセキュリティ」を確保しつつ、「地球温暖化問題への対応」を適確に実施するため、エネルギーのベストミックスに取り組む。
 - 再生可能エネルギーの利用拡大
 - 供給弾力性に優れた火力発電の活用
 - 原子力発電は「安全」を大前提に