

原子炉と原子力発電所

第 2 回

写真 [1 福島第一原発全景 \(被災前\)](#)
写真 [2 福島第一原発全景 \(被災後\)](#)
表 [3 福島第一原発の設備概要](#)

1. 原子力発電所のしくみ

[A 原子力発電所 \(BWR\) のしくみ](#)
[B 原子力発電所 \(PWR\) のしくみ](#)

2. 核分裂と崩壊熱のしくみ

1) 核分裂で放出されるエネルギー

[C 核分裂のしくみ](#)
[D 元素の周期律表](#)
[E 核分裂生成物の生成割合](#)
[F 核分裂と崩壊熱のしくみ](#)
[F C 燃料の燃焼の結果](#)

2) 崩壊熱のしくみ

3) 燃料の燃焼の結果

3. 原子炉周りの構造

1) 原子炉建屋の構造

2) 原子炉圧力容器と原子炉格納容器

3) 燃料集合体と制御棒

[K 原子炉建屋](#)
[L 原子炉格納容器と圧力容器](#)
[M 燃料集合体と制御棒](#)

4. 原子力発電所の安全設計

1) 安全設計指針

2) 核分裂生成物を閉じ込める 5 重の障壁

3) 非常時炉心冷却設備

4) 電源系の多重性

[G 原子力発電所の安全設計指針](#)
[H 核分裂生成物を閉じ込める 5 重の障壁](#)
[N 非常用炉心冷却系](#)
[K 多重の電源系](#)

5) 正常な状態での原子炉冷却

[N B 原子炉隔離時の熱除去系](#)



[前回の数値のおさらい](#)

5. 現在の福島第一原発の状況（原子炉周り）

- 1) 地震発生から建屋爆発に至る主な出来事
- 2) 燃料の損傷状況
 - 1号機 炉内損傷状況
 - 2, 3号機 炉内損傷状況
- 3) 現在の循環注水冷却
- 4) 原子炉冷却状況
- 5) 放射性物質放出量の暫定評価

[R A地震発生から建屋爆発に至る主な出来事](#)

[R B 1号機損傷燃料の状況](#)

[R B 1号機損傷燃料の状況②](#)

[R B 2号機格納容器内の状況](#)

[R C循環注水冷却全体イメージ](#)

[R C循環注水冷却 水処理装置配置](#)

[R E現在の炉内温度](#)

[S放射性物質の放出量の変遷](#)

6. 重大事故を起こした原発

- 1) チェルノブイリ原発事故
- 2) スリーマイル島原発事故

[Pチェルノブイリ原発事故](#)

[Qスリーマイル島原発事故](#)

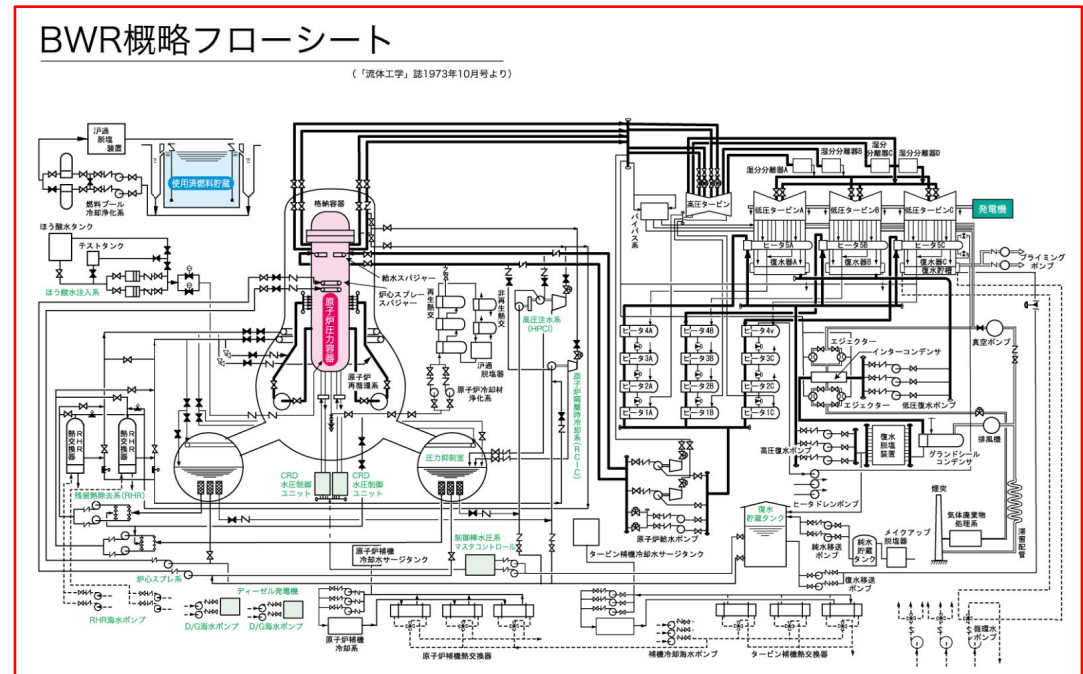
7. 廃炉に向けて

- 1) 一般的な廃炉のプロセス

[T A一般的な廃炉のプロセス](#)

- 2) 予想される廃炉のプロセス

[T B福島原発の予想されるプロセス](#)



前回の数値のおさらい

[詳細計算](#)

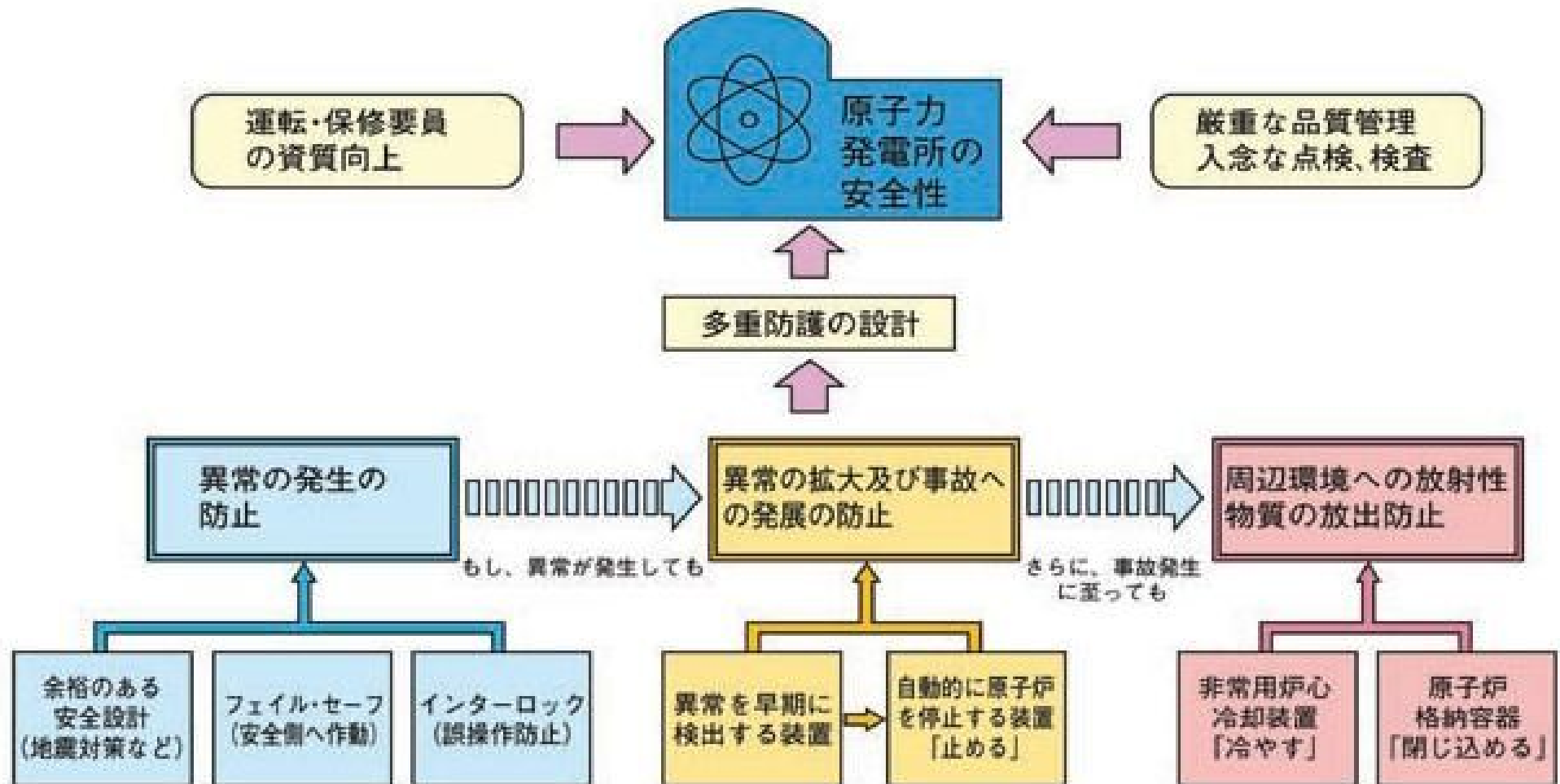
- ① 2号機の年間発電量 52 億 KWH : 1KWH=25 円とすると **約 1300 億円発電**
(2号機定格電気出力 78 万 4 千 KW 年間利用率 75%として、78.4 万 KW*24H*365D)
- ② 2号機の年間発熱量 156 億 KWH (プラント熱効率 33%として)
- ③ U235 1g の発熱量 23,000KWH (U235 原子各 1 個の核分裂で 200Mev)
- ④ 2号機の年間燃料 (U235+Pu239) 消費量 **約 680kg** (156 億 KWH÷23,000KWH)
- ⑤ 核分裂反応で 93%は直ちにエネルギーが放出され、7%が核分裂生成物の放射能の形で放出される (崩壊熱)
- ⑥ 2号機で年間 Cs137 発生量 42kg (1 核分裂あたり Cs137 の発生割合 6.1%)
- ⑦ 2号機の炉心に溜まっている Cs137 の量 **約 81kg** (燃料が炉心に存在する平均期間を 2 年として)
- ⑧ 1~3号機全体で溜まっていた Cs137 の量 **約 220kg** (1号機電気出力 46 万 KW、2・3号機電気出力 78.4 万 KW)

Cs137 約 220kg の放射エネルギー $7 \times 10^{17} \text{Bq} = 70 \text{京ベクレル}$ (Cs137 の 1g は $3.21 \times 10^{12} \text{Bq} = 3.21 \text{兆ベクレル}$)

原子力発電所の安全設計指針

前提条件として制御、計測、動力用の電源が使えること。電源も通常電源にたいし、予備電源、非常用電源でバックアップされていてどれかは必ず生き残っているという設計になっている。

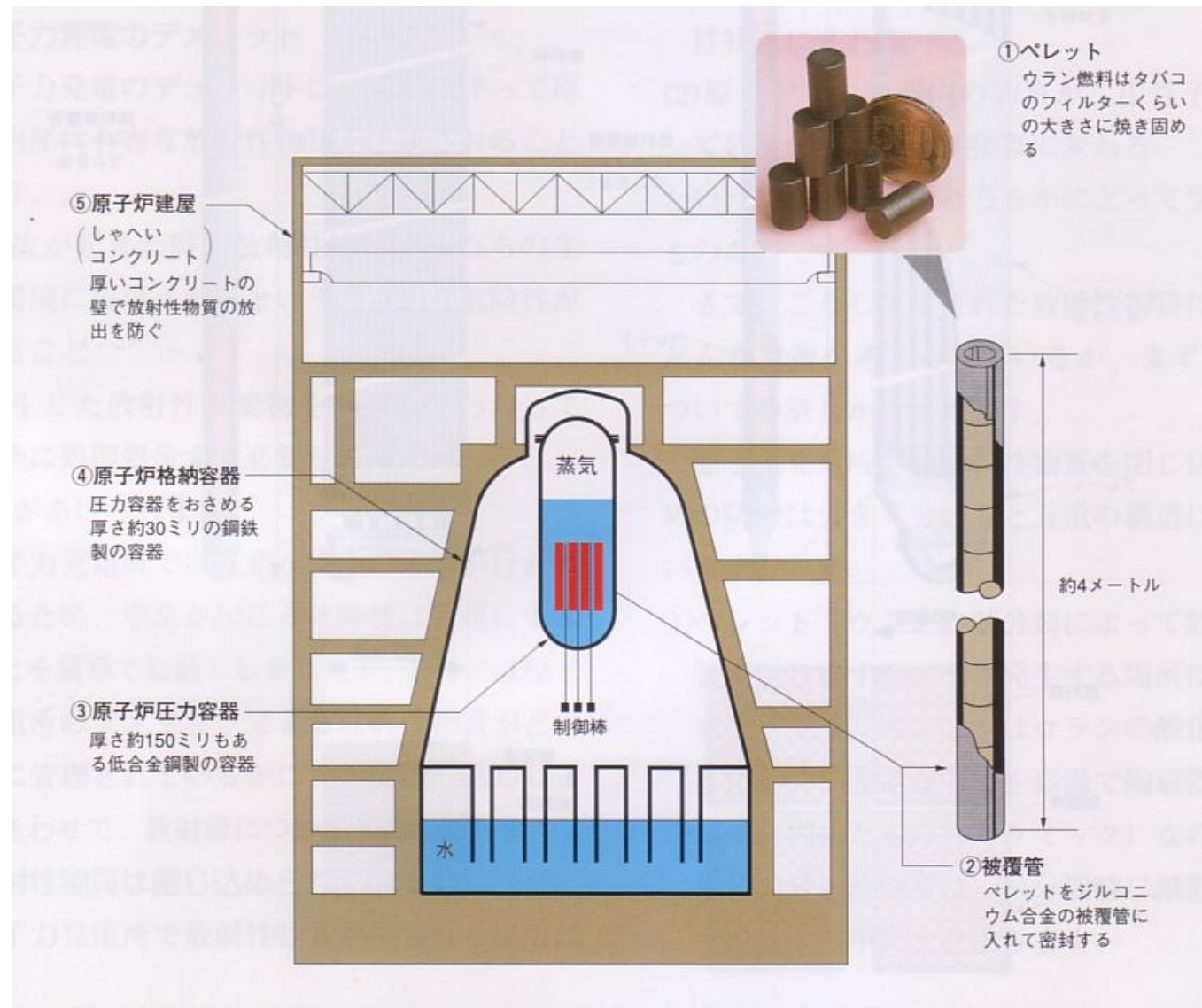
[GA原子炉を自動停止させる信号](#)



核分裂生成物を閉じ込める 5 重の障壁

- ① UO_2 焼結ペレット (セラミック)
- ② ジルコニウム合金筒
- ③ 原子炉圧力容器 鋼鉄の密閉容器
- ④ 原子炉格納容器 鋼鉄の密閉容器
- ⑤ 原子炉建屋 大気圧より水柱数mm 負圧にしてが生きへの漏れ出しを防ぐ 出入り口エアロック(二重扉)

★使用済燃料貯蔵プールに関しては発熱量が小さいため ③、④ の障壁はない。



非常用炉心冷却系

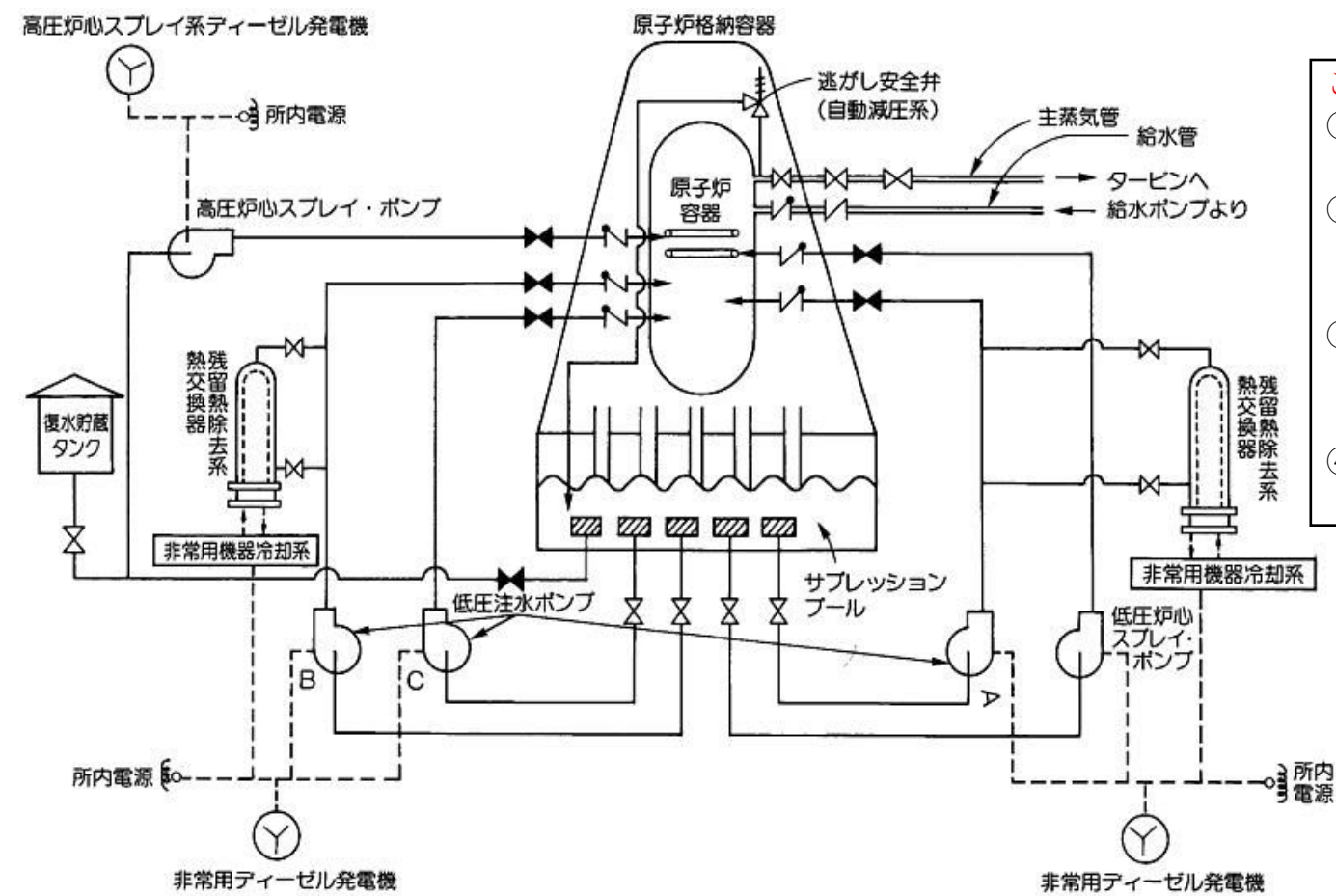


図 1 BWR非常用炉心冷却系

非常時に炉心の燃料が空焚きにならないように炉心に冷却水を送る系
複数のシステムが複数の系統をもつ 何れも電源が必要

- このほかの非常用設備
- ① 可燃ガス濃度制御系：格納容器内の水素を処理する設備
 - ② 非常用ガス処理系：格納容器内の気体を排出する場合に放射性物質を除くための設備
 - ③ 残留熱除去系及び残留熱除去海水系：原子炉が隔離された時、炉心を冷やす冷却水を冷やす設備
 - ④ ホウ酸注入系：手動起動で圧力容器に熱中性子吸収物質を注入する設備

[NA原子炉系主要構成](#)
[NB原子炉隔離時の熱除去系](#)
[NC格納容器ガス管理システム](#)

多重の電源系

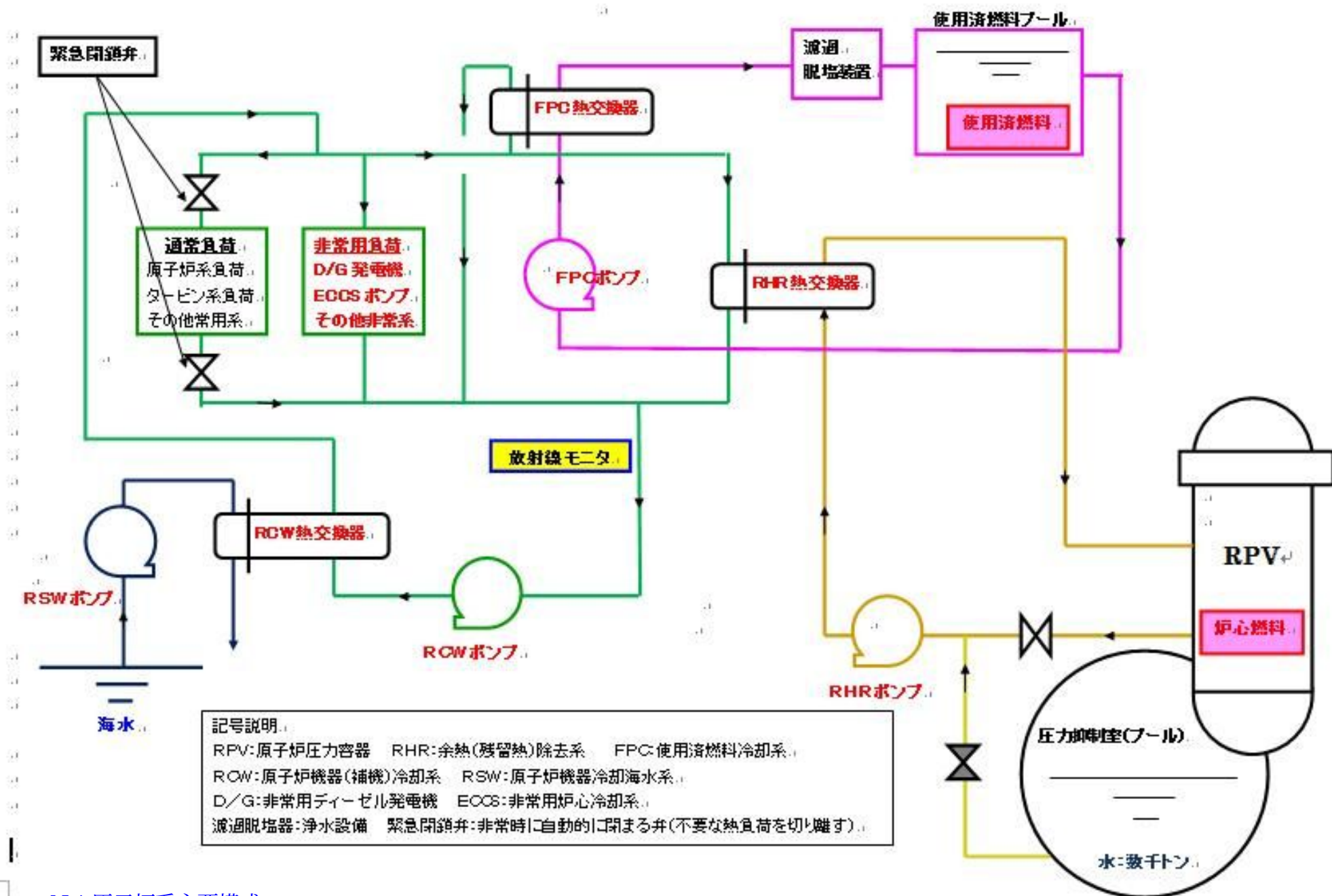
★所内で使う電力は次の3つの独立した電力用交流系統と直流電源系を持つ

- ① 主発電機の電力あるいは主送電線から電力を受ける（所内の動力すべてに給電できる）
- ② 送電線系統とは別の予備送電線から電力を受ける。（停止に必要な動力すべてに給電できる）
- ③ **非常用ディーゼル発電設備および高圧注入系ディーゼル発電設備**（非常用機器のみに給電できる）
- ④ 直流電源系：制御用と一部動力用に使う。蓄電池をもち8時間程度の直流電力を保持できる。

通常 of 所内交流電力は①を使い、①が使えない時は所内動力は自動的に②に切り替えられる。非常時など①、②が使えない時に③が自動的に所内動力を引き受ける。

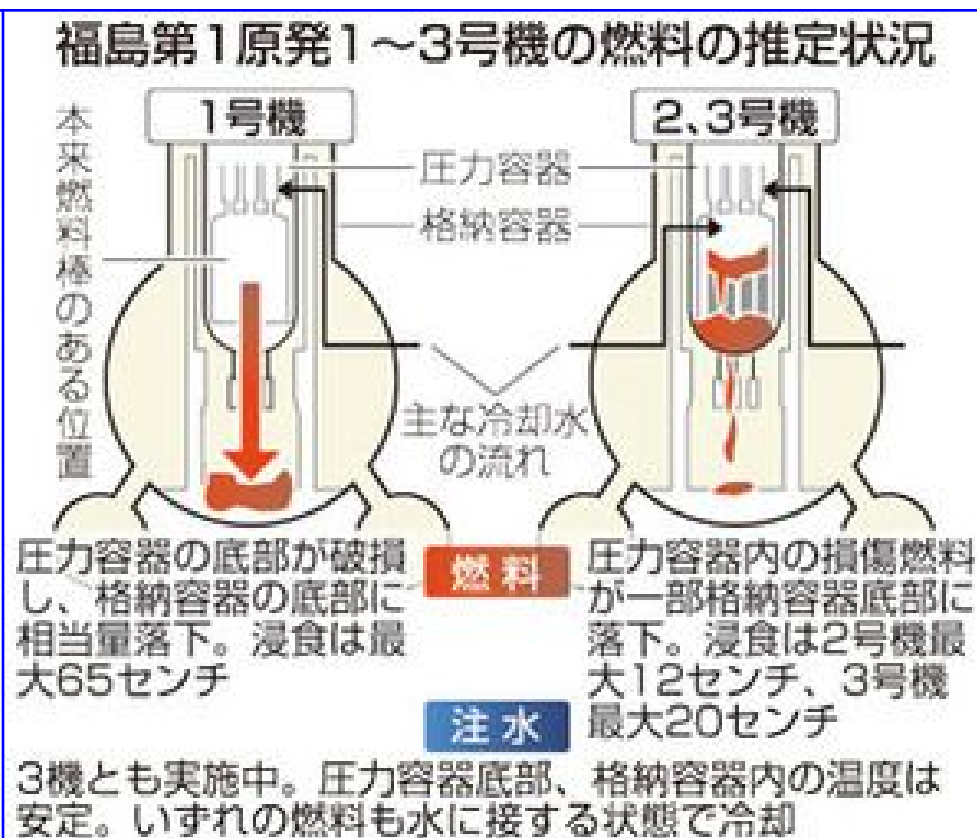
※電力は非常時用設備（非常時の炉心冷却など）を支える根源であり、発電所の設備は非常時でも電源が確保されていることが前提だった 非常用電源は100%容量を2系統持ち、2系統とも使用不能になることはないように設計されていた はずだった！

原子炉停止時（隔離時）の熱除去系



地震発生から建屋爆発に至る主な出来事（後で差し替え）

震災直後の福島第1原発の状況	3月11日	14:46	地震発生。稼働中だった1～3号機が緊急停止
		15:27～15:35	津波襲来
		21:23	政府が3 ^{号機} の避難、3～10 ^{号機} の屋内退避を指示
	12	0:06	所長がベントの準備を指示
		5:44	政府が避難区域を10 ^{号機} に拡大
		6:50	経産相がベントを指示
		7:11～8:04	菅直人首相（当時）が原発視察
		14:30	1号機のベント完了
	13	15:36	1号機で水素爆発
		18:25	政府が避難指示を20 ^{号機} に拡大
		9:36	3号機のベント完了
	14	11:01	3号機で水素爆発
	15	6:00～6:10	大きな衝撃音。4号機で水素爆発か。2号機圧力抑制室の圧力が低下
		11:00	政府が20～30 ^{号機} に屋内退避指示



- ① 運転中の原子炉（1～3号機）は「地震加速度：大」信号で**自動停止（制御棒全挿入、再循環ポンプ速度ダウン）**した。地震により所内受電設備、外部電源も喪失、非常用ディーゼル発電機が自動起動した。[NB原子炉隔離時の熱除去系](#)
- ② 自動停止後約40分後に大津波が襲来し、非常用ディーゼル発電機が停止し**全交流電源が喪失**した。**電動非常用炉心冷却ポンプが運転不能**、津波により破損し**原子炉補機冷却海水ポンプ運転不能**になった。（冷却不能になった）
- ③ 殆どの冷却機能を失った1～3号機の炉心では崩壊熱が蓄積し燃料の損傷が進む。**燃料温度が上がり被覆管のジルコニウムと水が反応し大量の水素が発生した（水の放射線による分解ではない）**。
- ④ **燃料のメルトダウン**が始まり、高温のため原子炉圧力容器の境界が破損し格納容器内に水素が充満する。格納容器が高温高圧になり、シールが破損し水素が原子炉建屋内に充満し、原子炉建屋（原子炉ではない！）爆発にいたる。（**閉じ込めが部分的に不能になった**）

1号機の損傷燃料の状態に関するまとめ①

- 燃料は、地震前にあった位置から溶融して下方に全て移動。

【MAAPによる解析】

- さらに、圧力容器の破損も発生している可能性が高く、格納容器の底部に相当量滴下していったと推定。

【水位計指示値による推定】

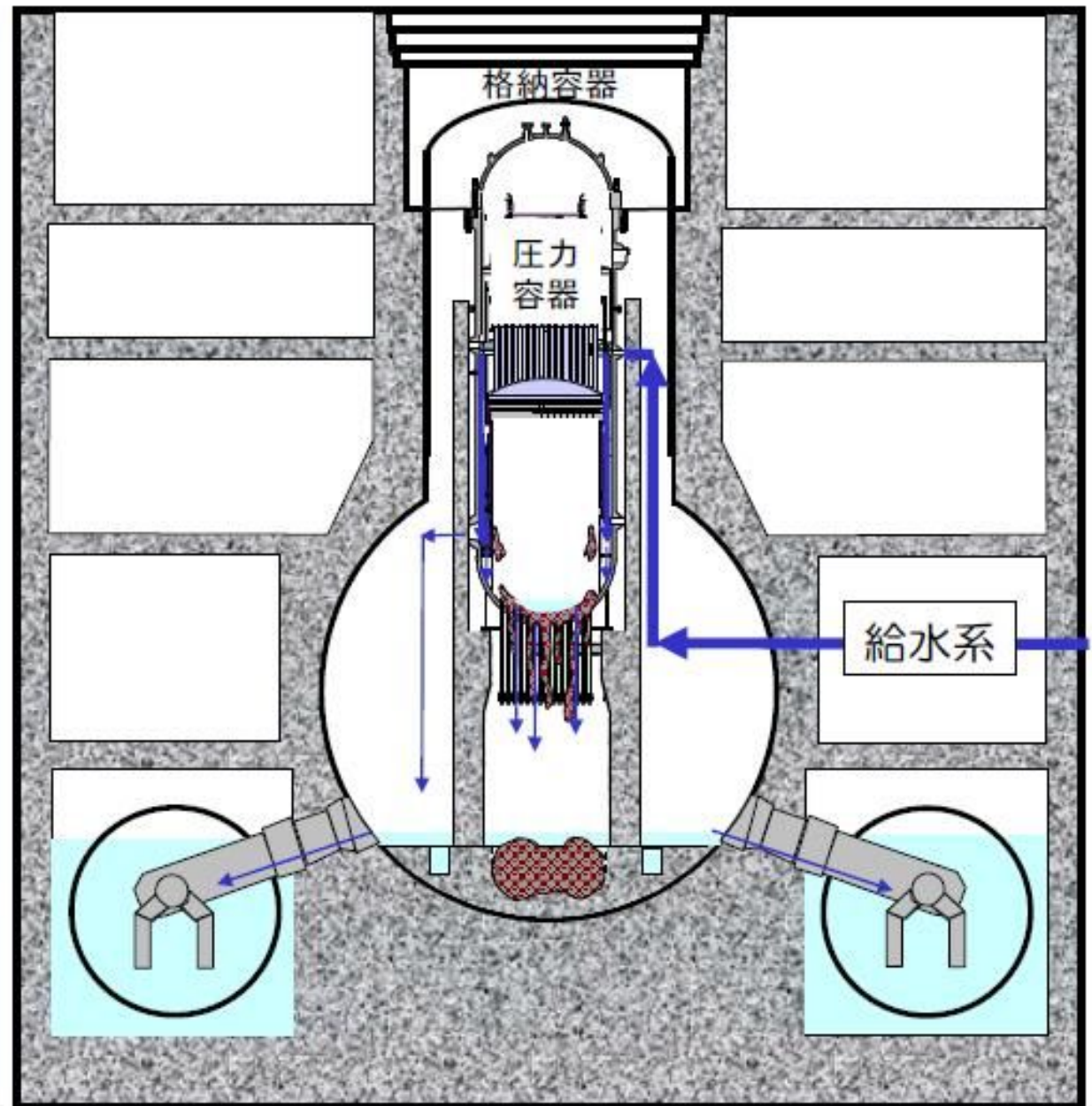
【注水実績に基づく熱バランスによる推定】

【格納容器内ガス濃度による推定】

【原子炉補機冷却系による推定】

【温度計指示値による評価】 等

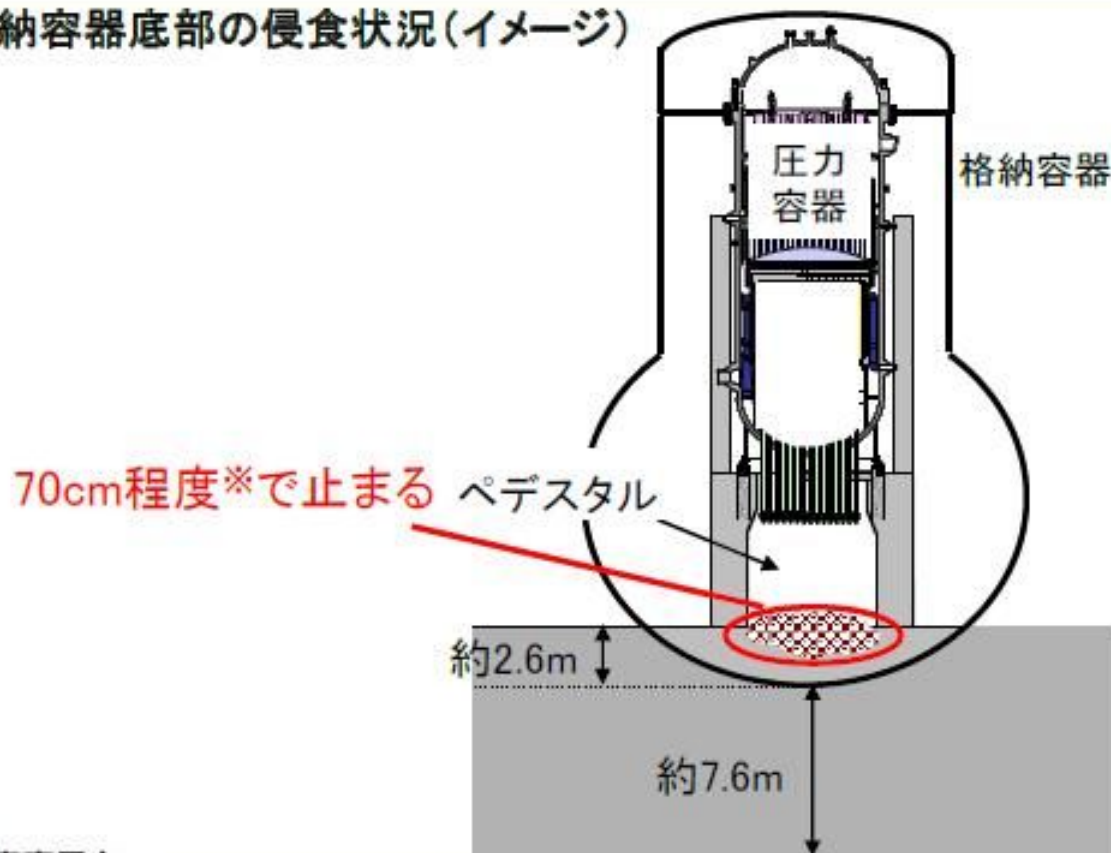
- 現在、注水は給水系配管より実施中であり、圧力容器底部及び格納容器内の温度は 100°C 以下で安定。
- よって、格納容器に落下した燃料も注水により概ね水に接する状態で冷却されているものと評価。



4-2. 1号機の損傷燃料の状態に関するまとめ②

- 格納容器底部に相当量滴下した溶融燃料は、格納容器底部にあるコンクリートを侵食している可能性があるが、現実的と考えられる条件で1号機のコア・コンクリート反応による侵食を解析コード（MAAP）で評価した結果、溶融した燃料による侵食は70cm程度※で止まるとの結果が得られた。
- また、格納容器内のガスサンプリング結果から、コア・コンクリート反応に起因すると思われるガスは確認されておらず。現在進行形でコア・コンクリート反応が発生しているとは考えにくいと推定される。

格納容器底部の侵食状況（イメージ）



評価条件

● 堆積条件

- ペデスタル内部に落下した燃料デブリは、スリット（円筒状のペデスタルの切り欠き部分）を通過して、ドライウェル床面（ペデスタル外側）にも拡散。
- ペデスタルにある機器ドレンサンプ、床ドレンサンプへも一定量のデブリが堆積する。

● 崩壊熱

- 揮発性の核分裂生成物に関しては、コア・コンクリート反応時には既に揮発済みとして、考慮しない。

格納容器内の状態に関するまとめ（2・3号機）

- 燃料は損傷・溶融したものの、一部は炉心部に残り、一部は原子炉圧力容器下部プレナム又は原子炉格納容器ペデスタルへ落下。

【水位計指示値による推定】

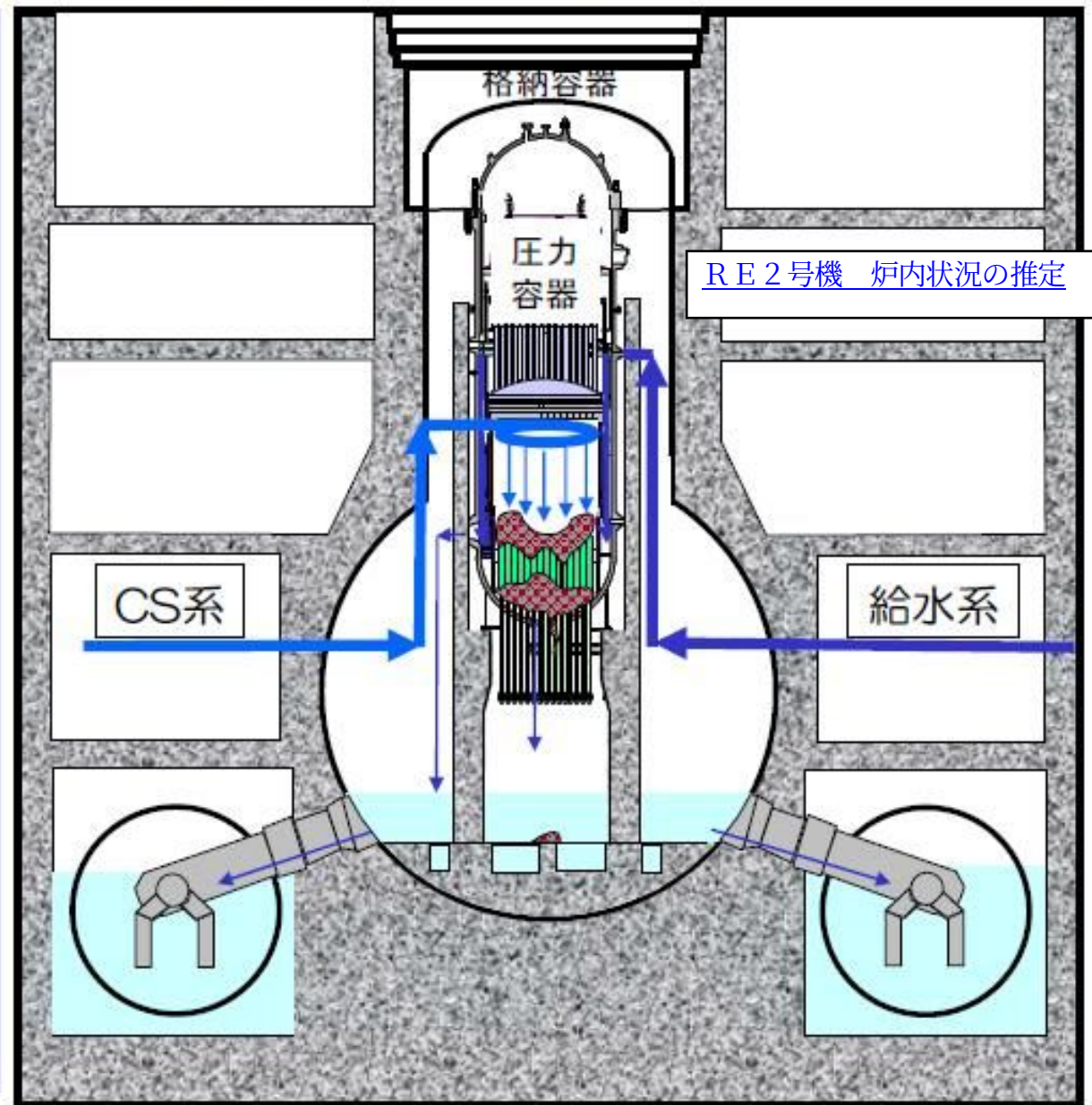
【注水実績に基づく熱バランスによる推定】

【温度計指示値による評価】 等

- 評価結果は、「地震発生前に燃料があった位置にほぼ残っている状況」から「損傷燃料の一部が格納容器底部に滴下」まで推定の幅がある。

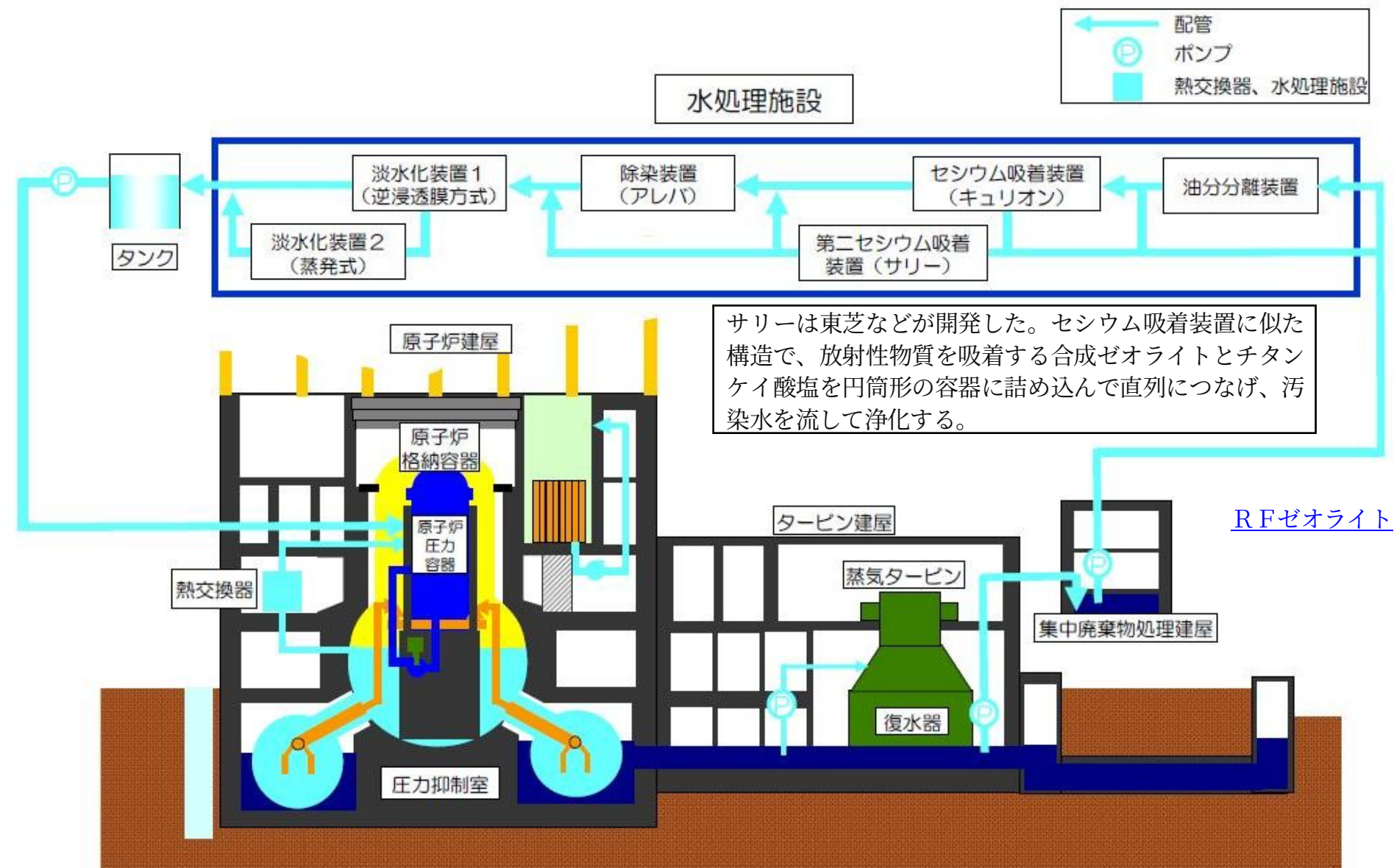
【MAAPIによる解析】

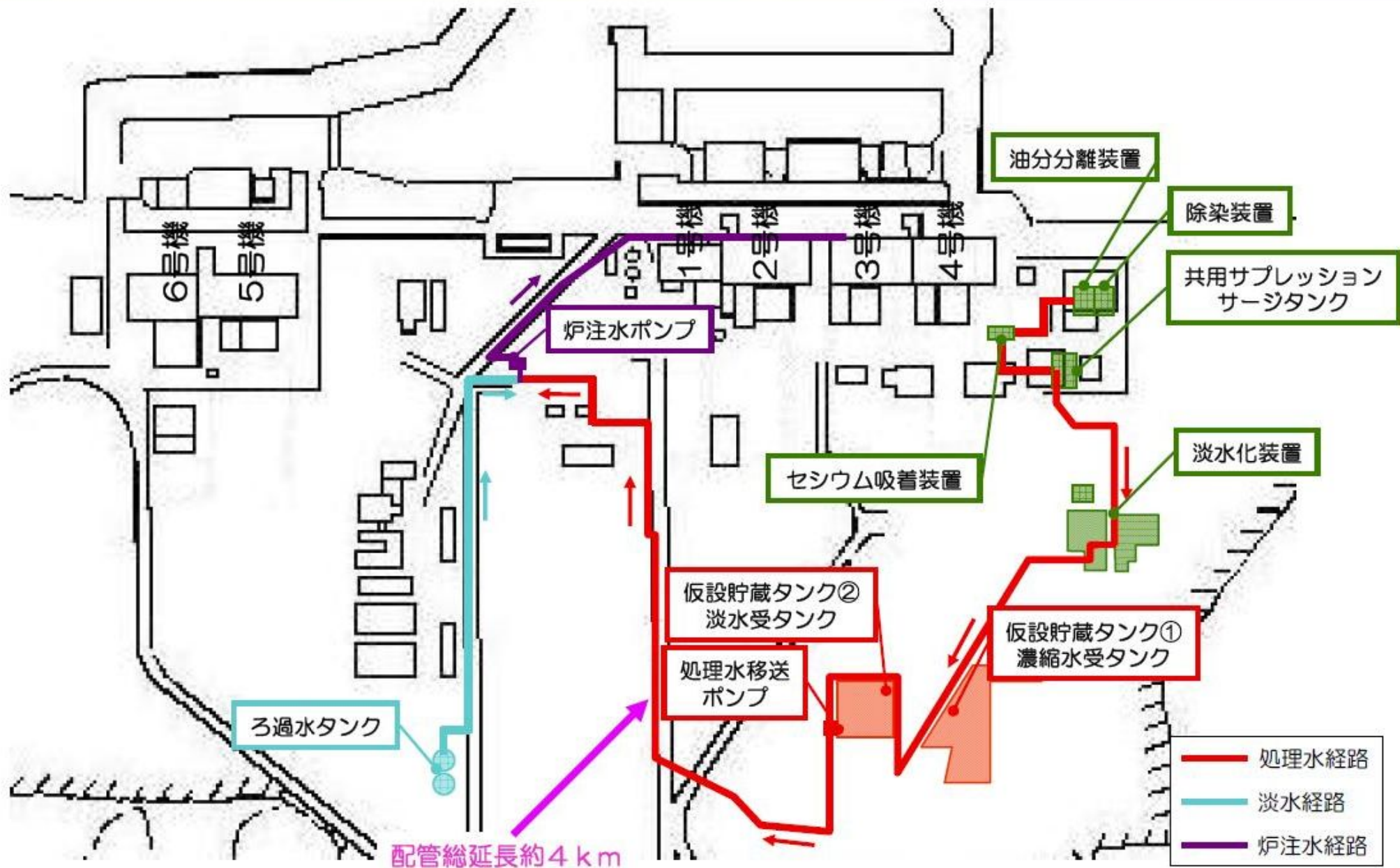
- 現在、注水は給水系配管と炉心スプレイ系（CS系）配管から実施中であり、格納容器内の各箇所の温度は100℃以下で安定。
- よって、いずれに移動した燃料も注水により概ね水に接する状態で冷却されているものと評価。



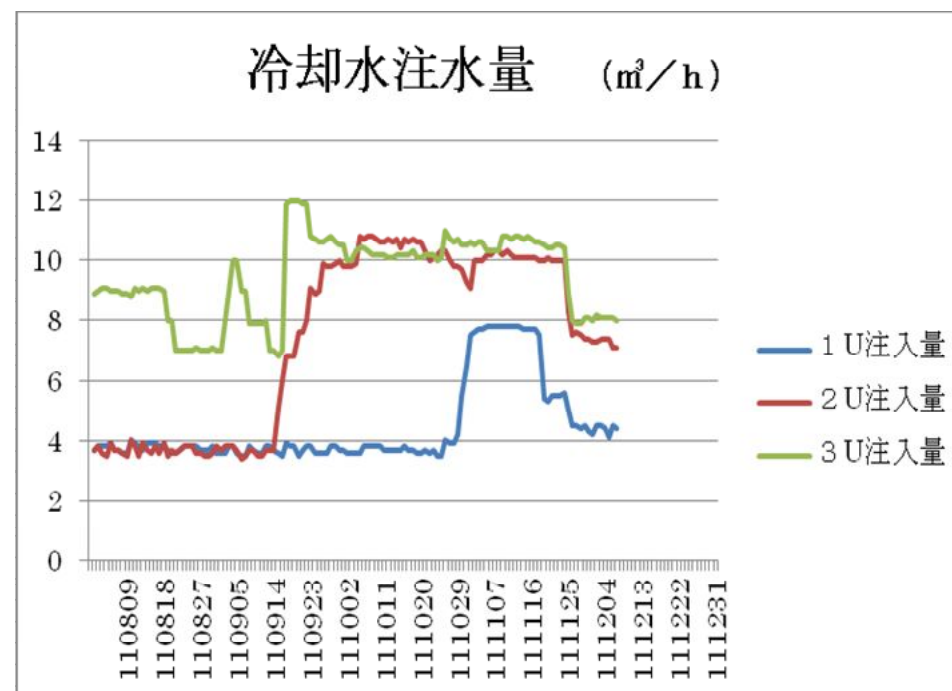
[R D 2 号機炉内状況の推定](#)

➤ 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。



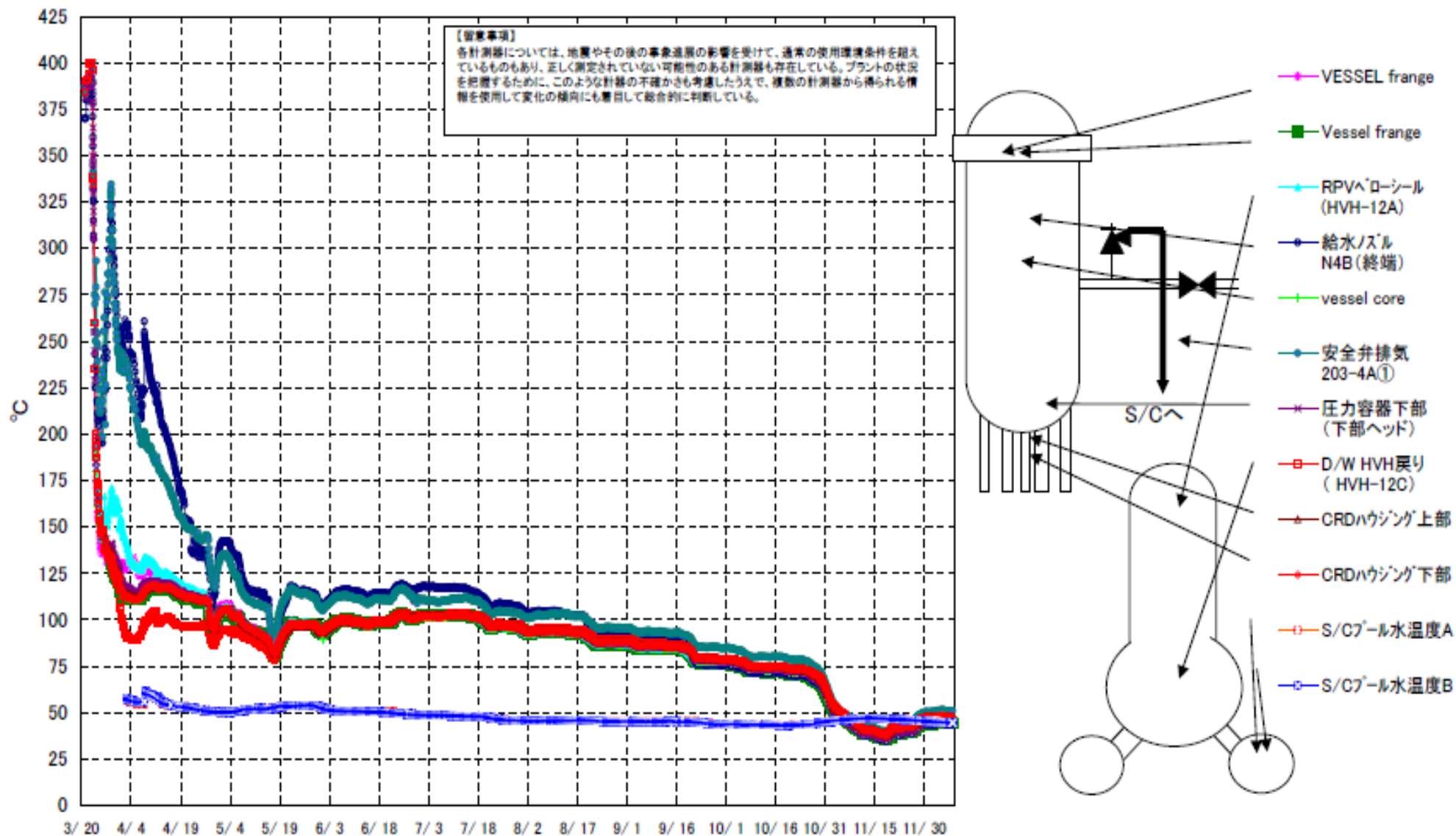


- 1,2,3号機の原子炉圧力容器底部温度は100℃以下に安定しています。なお、損傷した燃料が圧力容器及び格納容器内のどこに存在しているかを正確に把握することは難しいため、格納容器内に漏洩している場合においても、冷却されていることを確認する必要があります。
- 格納容器内には、下部から上部まで多くの場所で温度を測定しており、特に格納容器内温度は圧力容器底部温度と同様に100℃以下で安定しています。
- その他の測定点においても同様の傾向を示していることから、損傷した燃料が格納容器内に漏洩している場合においても、冷却されて蒸気発生が抑えられ、それに伴う格納容器からの放射性物質の放出は抑えられている状態です。



原子炉周り温度変化

福島第一原子力発電所 1号機 温度に関するパラメータ (代表点)

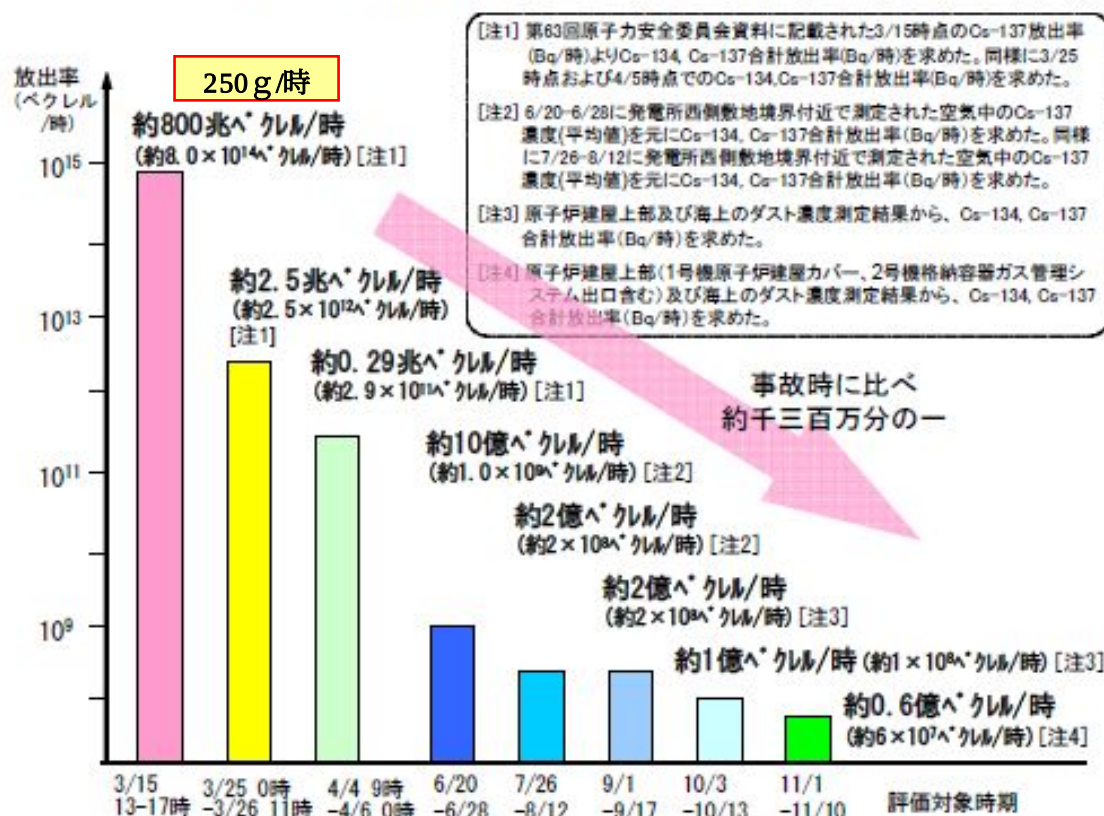


放射性物質の現時点の放出量の暫定評価（福島第一1～3号機）

- 1～3号機格納容器からの現時点の放出量（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）を基に評価すると、放出量の最大値は 合計約0.6億ベクレル/時となりました。これは事故直後と比べ、約1300万分の1の値です。
- これによる敷地境界の被ばく線量は、最大0.1mSv/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。

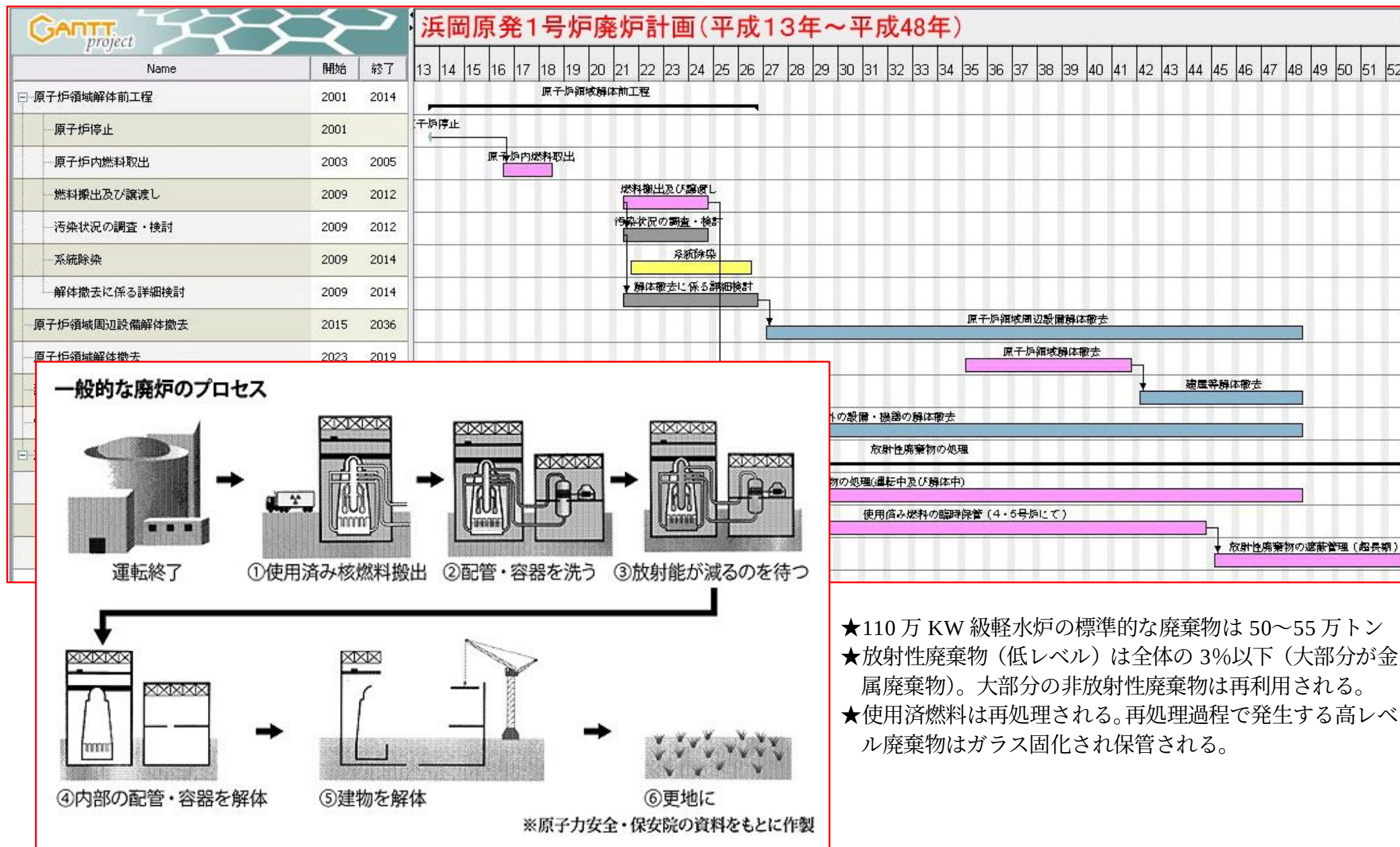
[RG原子炉周り温度変化](#)

1～3号機からの放射性物質（セシウム）の一時間当たりの放出量

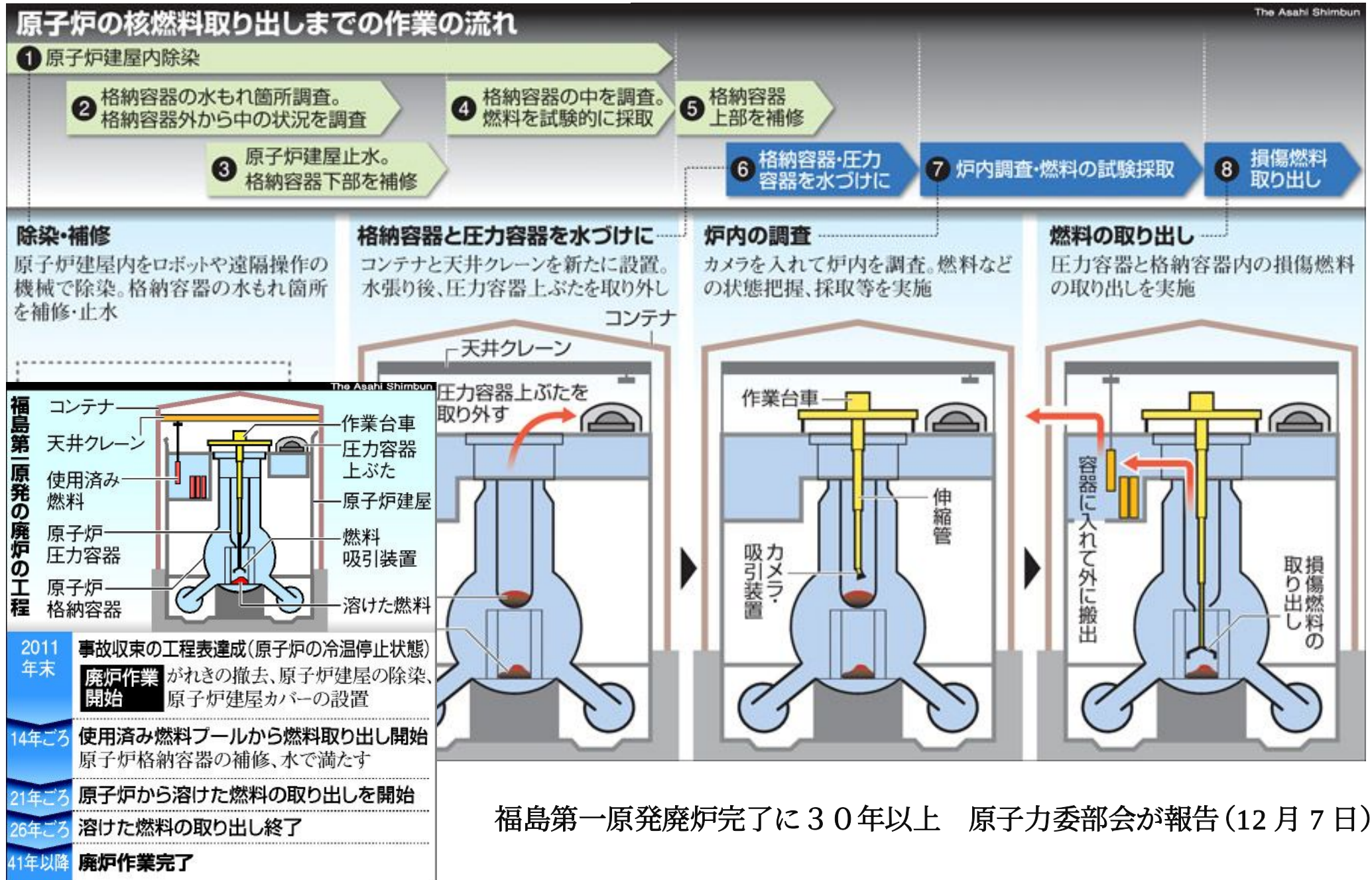


0.02mg/時

一般的な廃炉のプロセス



福島原発の予想される廃炉プロセス



福島第一原発廃炉完了に30年以上 原子力委部会が報告(12月7日)