

原子力発電所事故に備えた進展予測ツールの活用例

An example of accident progress prediction tools
for nuclear emergency



TEPCO

今井英隆 滝口剛司 片寄良亮
(東京電力ホールディングス株式会社)
藤原大資 河合宏
(株式会社テプコシステムズ)

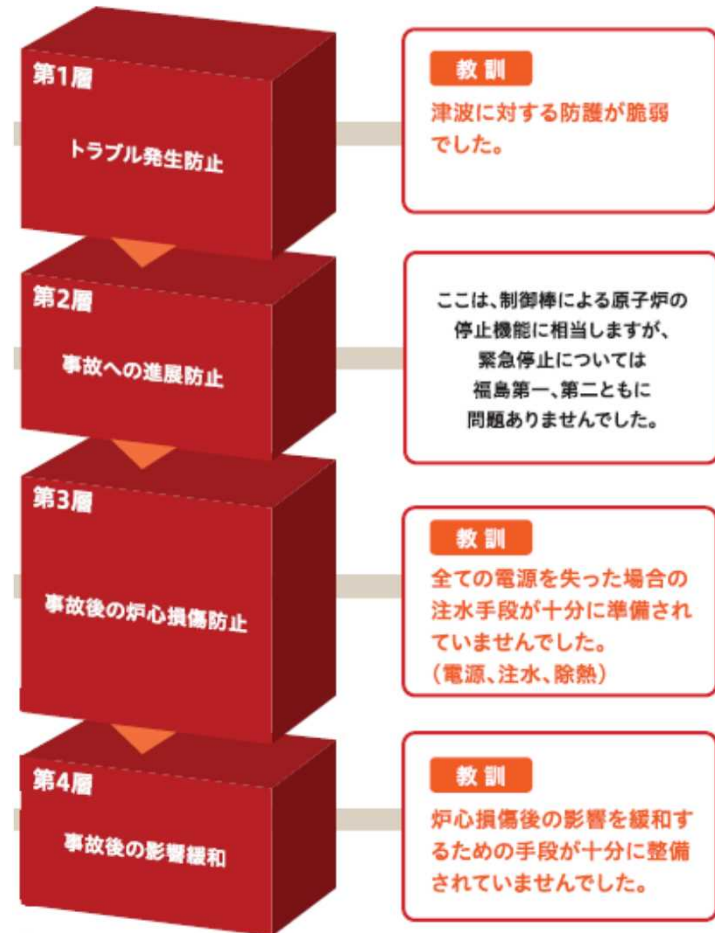
背景 福島第一原子力発電所事故

- 2011年3月11日に発生した地震・津波により、福島第一原子力発電所では、苛酷事故状況となり、格納容器圧力を逃がす目的で放射性物質の放出を伴う格納容器ベント（以下、「ベント」という）を実施。
- 柏崎刈羽原子力発電所では、シビアアクシデントに備えた安全対策を実施してきており、福島第一のようなベントを伴う事故の可能性を低減してきている。その一方、深層防護第4層として事故時の影響を緩和するため、フィルタベント装置やpH制御装置を設置。



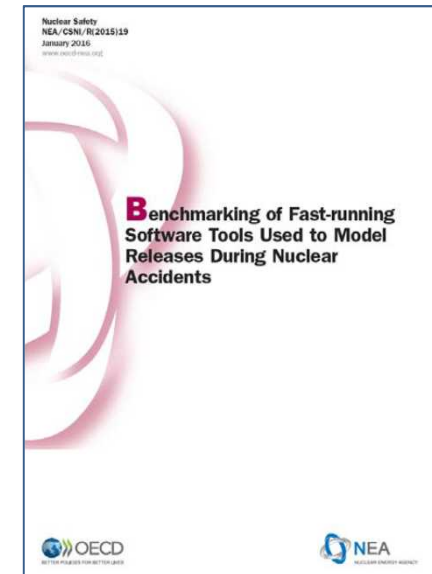
フィルタベント容器の搬入
(柏崎刈羽原子力発電所)

- また、福島第一の事故の際には、事故進展を把握するための情報が十分でなかったため、ベントの時刻を予測をタイムリーに把握することができず、計画的な作業を阻害する要因となった。



背景 海外の動向

- ・福島第一原子力発電所の事故以降、格納容器からの放出に関連する即応性の高い（Fast-running）解析ツールの採用が活発化
- ・事故の経験を教訓とした活用性のあるツールの開発に着手

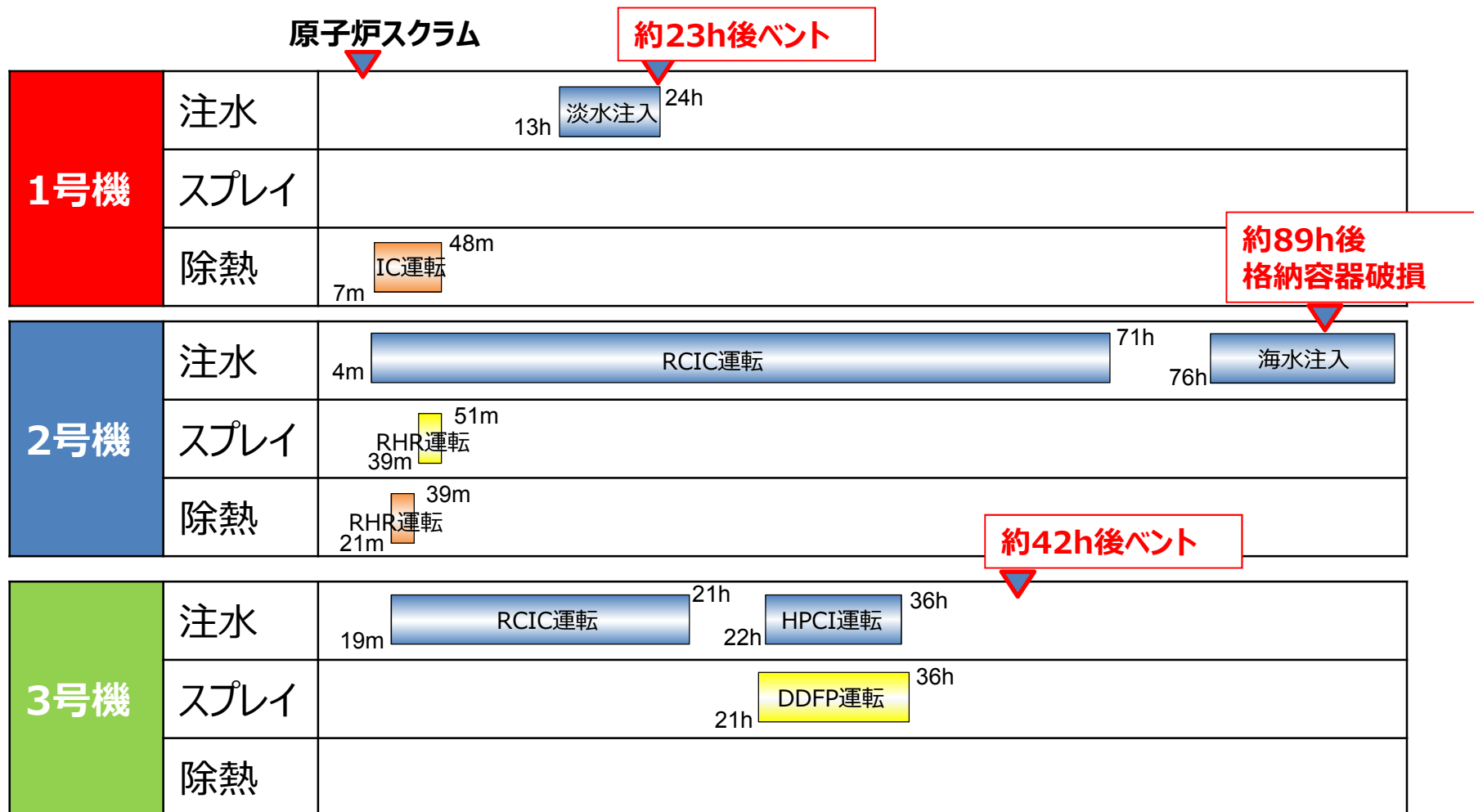


Tool (User/Developer)	On/Off line	Diag nosis	Parameter Trend	Source term	PRA	Environmental Dispersion	
RASTEP (SSM/Scandpower)	On/Off line	☑	Link with external tool*	Pre-calculated Data Base	☑	LENA/ARGOS	
MARS (Oskarshamn/FAI)	On/Off line	☑	MAAP like code			/	/
ADAM (ENSI/ERI)	On/Off line	☑	Simplified mechanistic code			/	/
TEPCO tool (TEPCO/TEPSYS)	Off line	/	Pre-calculated data base			/	DIANA

背景 格納容器の圧力が上昇する要因と不確かさ



・福島第一の事故では「**注水・スプレイ・除熱**」が格納容器圧力の上昇（放出タイミング）に強く影響



格納容器圧力上昇（または抑制）に関わる操作の時刻を織り込んで事前に解析しておくことは効率的ではない。また、緊急時に解析するのは現実的ではない。

■ ツールコンセプト

・シンプルであること

－ 緊急時に使用するものであるため、入力項目が多いと混乱する

・即応性が高いこと

－ 事故時のめまぐるしく変化する状況に対応するためには、計算に数十分以上要するツールは不適合

・一定の技術的説明性を確保できていること

－ 他ツールとの比較計算等を実施し、著しい乖離がないことを確認

■ ツールの基本仕様

【入力項目】

(別スライド参照)

【出力項目】

原子炉内挙動進展 (RPV破損等)

格納容器圧力進展 (ベント基準到達)

核種毎放出量

【計算所要時間】

数秒～数分 / 1 計算

【適用プラント】

複数プラント事故に対応可能

【計算環境等】

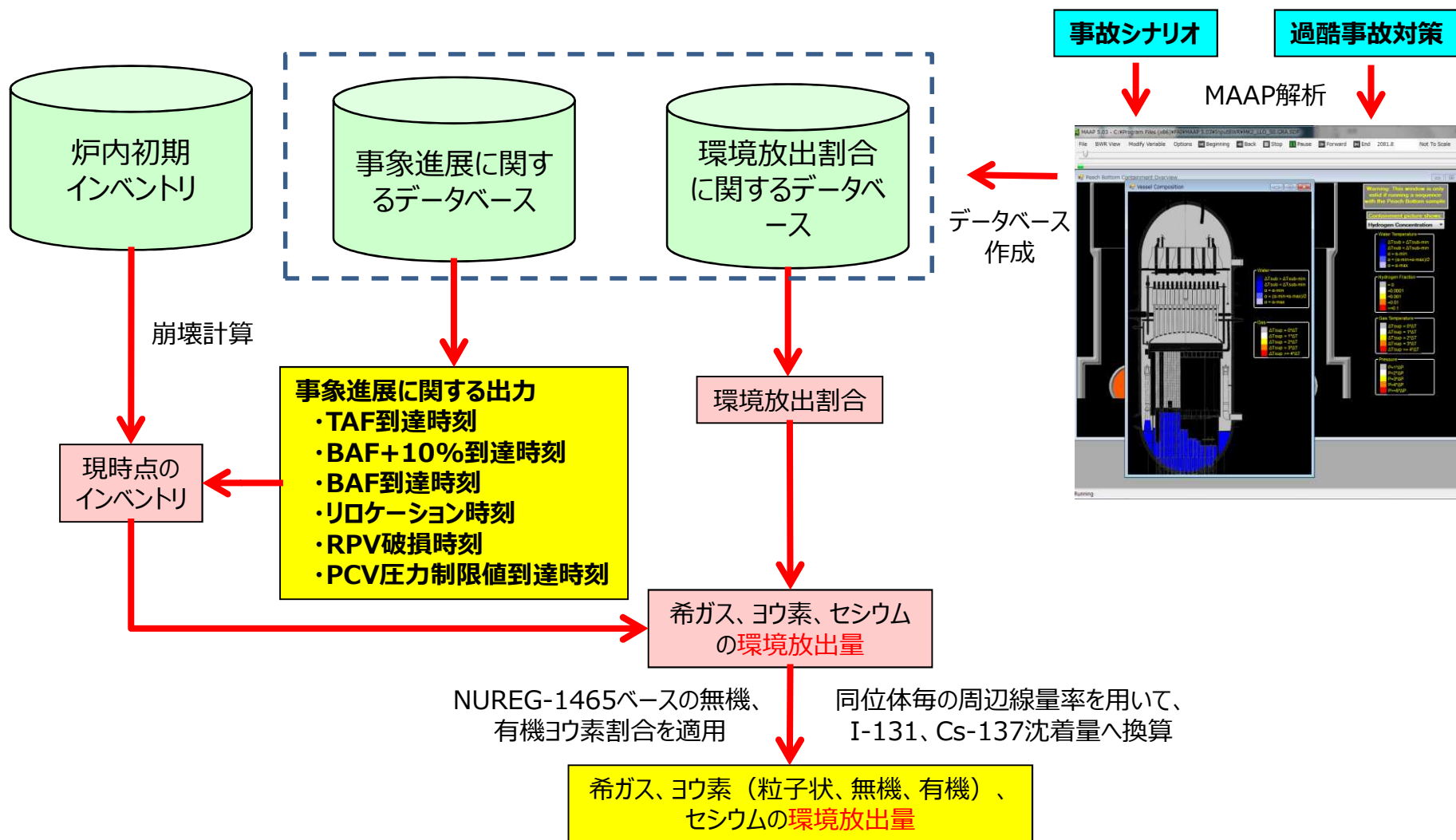
汎用PCで利用できること

オフラインで利用できること



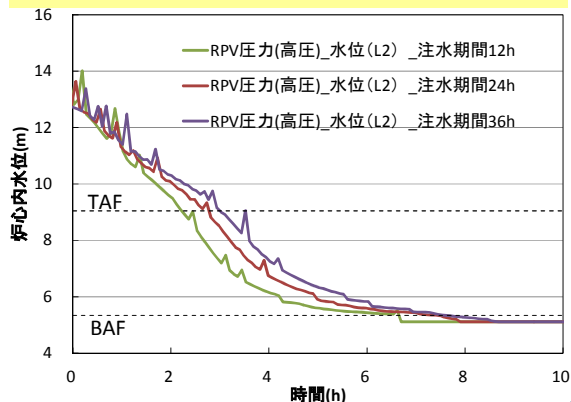
緊急時対策本部訓練の様子
(柏崎刈羽原子力発電所)

事象進展予測ツールの内部構造イメージ

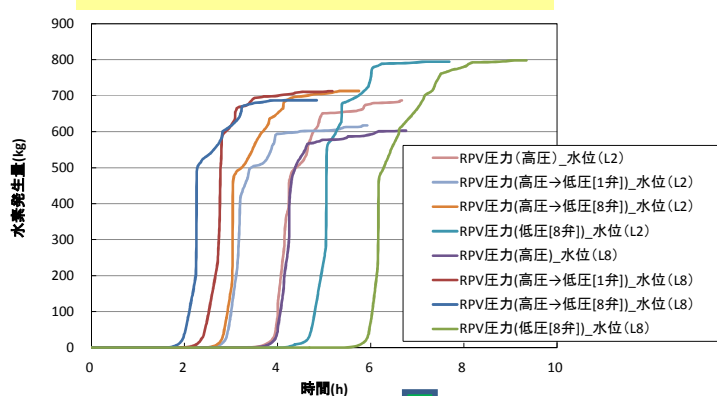


事前データベース化イメージ

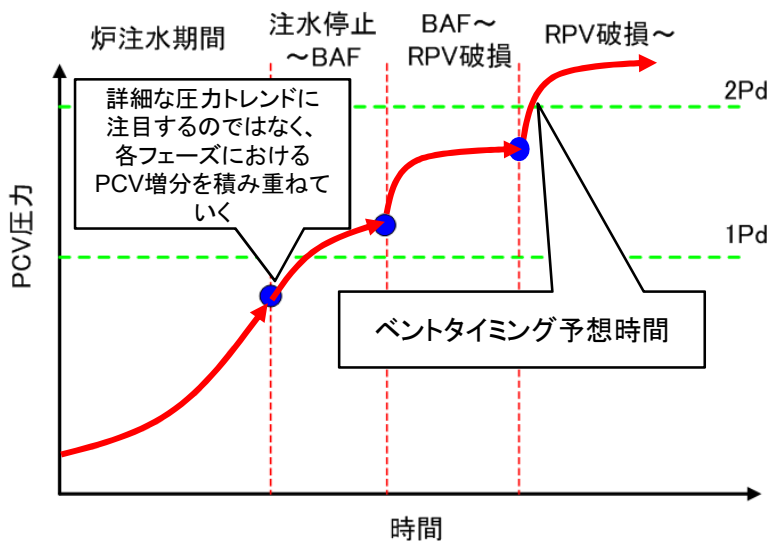
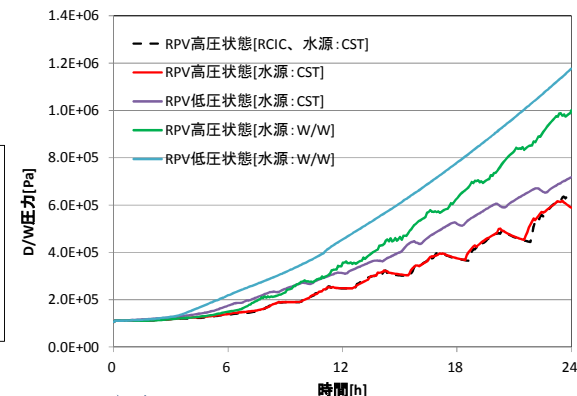
RPV水位低下に関する技術ベース



水素発生量に関する技術ベース



PCV圧力挙動に関する技術ベース



注意点

- ① 対象とする事象がその技術ベースの適用範囲であることが必要
- ② 各フェーズの予測誤差が積み重なり、ベント予測時間の誤差となる
- ③ 複雑なシナリオは苦手

緊急時に入力するパラメータ



入力項目	目的	選択肢
スクラム時刻	崩壊熱評価開始の起点とするため	時刻プルダウン
SAシナリオ	LOCAの有無により格納容器圧力上昇挙動が大きく異なるため	LOCAあり/LOCAなし
LOCA状況	LOCA破断面積/位置により事故進展が大きく異なるため	破断面積：大,中,小,微小 破断位置：上部,中部,下部
原子炉注水停止時刻：S/P水源	原子炉水位低下（炉心露出）評価を行うため	時刻プルダウン
原子炉注水停止時刻：外部水源	原子炉水位低下（炉心露出）評価を行うため	時刻プルダウン
原子炉注水停止時水位	原子炉水位低下（炉心露出）評価を行うため	水位手入力
RPV急速減圧時刻	RPV減圧による水位低下評価を行うため	時刻プルダウン
RPV急速減圧時弁数	RPV減圧による水位低下評価を行うため	1～8弁
環境放出経路	ソースターム評価を行うため	D/Wベントライン/W/Wベントライン
ペDESTAL注水	RPV破損時の圧力上昇評価を行うため	あり/なし
RPV破損後の原子炉注水	ソースターム評価を行うため	あり/なし
ベント直前のD/Wスプレイ実施状況	ソースターム評価を行うため	あり/なし
FCVS	ソースターム評価を行うため	あり/なし
pH制御	ソースターム評価を行うため	あり/なし
環境放出判定	放出タイミング判断基準の設定のため	PCV圧力（手入力）/時刻/ 環境放出無し

事象進展に特に有意な影響を与えるパラメータに絞り、入力パラメータを選定

入力画面の例

- ・ユーザーインターフェイスは改良途上
- ・可能なものはプルダウン形式で選択し時間短縮に繋げる

複数プラント評価可能

評価条件	<input checked="" type="checkbox"/> case1	<input checked="" type="checkbox"/> case2	<input type="checkbox"/> case3	<input type="checkbox"/> case4
プラント名	KK6号機	KK7号機	号機	号機
スクラム時刻	2019/12/24 00:00	2019/12/24 00:00	----/--/----	----/--/----
SAシナリオ	LOCA以外	LOCA	-	-
LOCA状況	破断面積	大	破断面積	破断面積
	破断位置	中部	破断位置	破断位置
原子炉注水停止時刻:S/P水源	2019/12/24 07:00	2019/12/24 00:00	----/--/----	----/--/----
原子炉停止時刻:外部水源	2019/12/24 18:00	2019/12/24 18:00	----/--/----	----/--/----
水位計	RPV下端基準	RPV下端基準	RPV下端基準	RPV下端基準
注水停止時水位	NWL 13422 mm	NWL 13422 mm	NWL -- mm	NWL -- mm
急速減圧時刻	2019/12/24 08:00	----/--/----	----/--/----	----/--/----
急速減圧弁数	2	減圧弁数	減圧弁数	減圧弁数
環境放出経路	W/W バント	W/W バント	バント	バント
ベデスタル注水	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし
RPV破損後の原子炉注水	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし
バント直前のD/Wスプレー実施状況	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし
FCVS	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし
pH制御	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	<input type="radio"/> あり <input checked="" type="radio"/> なし	<input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし
環境放出判定	<input checked="" type="radio"/> PCV圧力 <input type="radio"/> 時刻	<input checked="" type="radio"/> PCV圧力 <input type="radio"/> 時刻	<input type="radio"/> PCV圧力 <input type="radio"/> 時刻	<input type="radio"/> PCV圧力 <input type="radio"/> 時刻
	<input type="radio"/> 環境放出なし	<input type="radio"/> 環境放出なし	<input type="radio"/> 環境放出なし	<input type="radio"/> 環境放出なし
	620 kPa(g)	620 kPa(g)	620 kPa(g)	620 kPa(g)
補正用情報				
格納容器圧力:時刻	2019/12/24 18:00	2019/12/24 18:00	----/--/----	----/--/----
格納容器圧力:圧力	210 kPa(g)	420 kPa(g)	----/--/----	----/--/----
RPV破損時刻	----/--/----	----/--/----	----/--/----	----/--/----

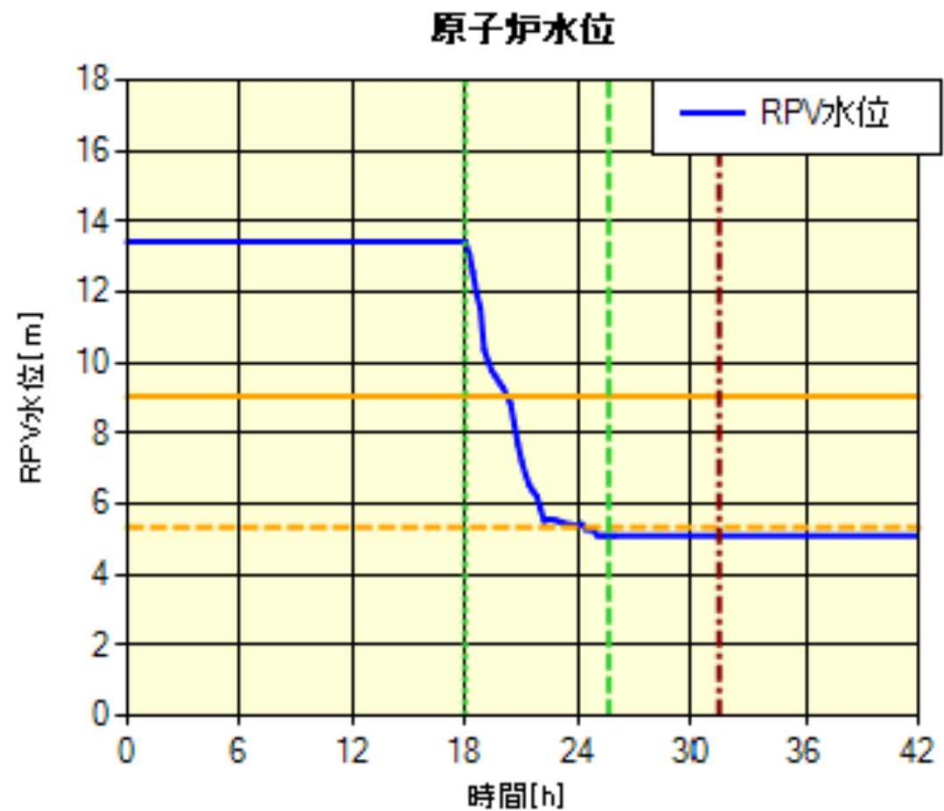
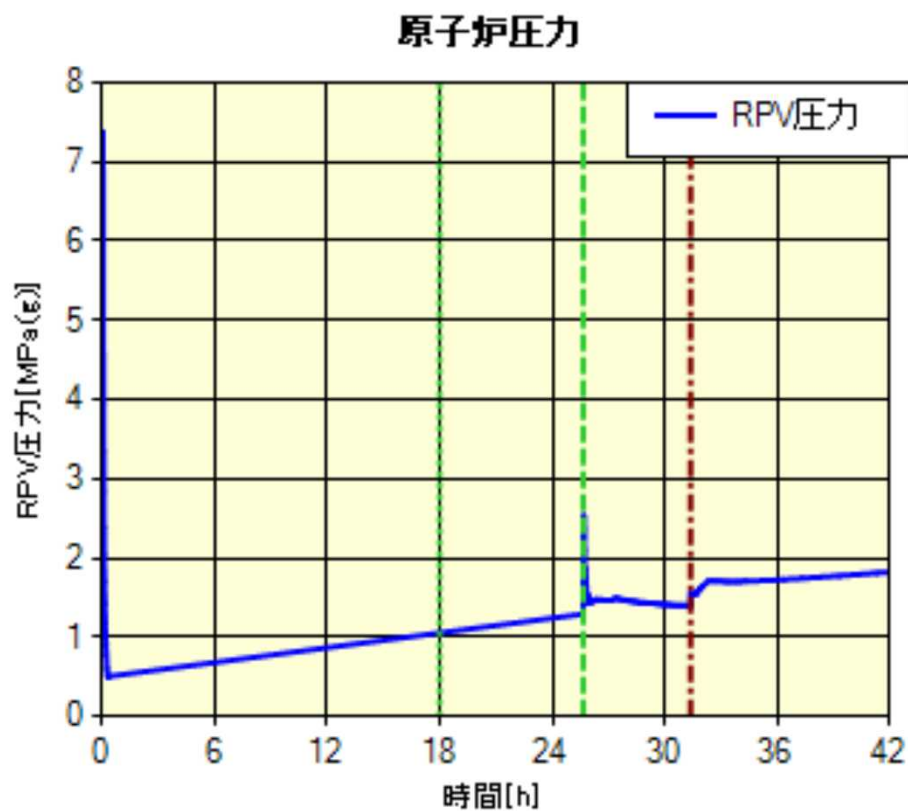
実測値が得られている場合には、
実測値を用いて、補正することも可能

出力画面の例（全プラントサマリ）

評価結果		case1	case2	case3	case4
ケース名		case1	case2	case3	case4
プラント名		KK6号機	KK7号機	-	-
スクラム時刻		2019/12/24 00:00	2019/12/24 00:00	-	-
原子炉水位	TAF到達	2019/12/24 22:36	2019/12/24 20:24	-	-
	BAF+10%到達	2019/12/25 00:48	2019/12/24 22:12	-	-
	BAF到達	2019/12/25 02:00	2019/12/25 00:24	-	-
被覆管最高温度	800℃到達	2019/12/24 22:42	2019/12/24 21:25	-	-
	1200℃到達	2019/12/24 23:13	2019/12/24 21:42	-	-
リロケーション		2019/12/25 03:08	2019/12/25 01:39	-	-
RPV下部破損		2019/12/25 08:56	2019/12/25 07:22	-	-
PCV圧力	1Pd到達	2019/12/24 20:19	2019/12/24 13:18	-	-
	2Pd到達	2019/12/25 02:14	2019/12/24 21:05	-	-
環境放出時刻		2019/12/25 02:14	2019/12/24 21:05	-	-
環境放出量[Bq] (DIANA用)	希ガス(0.5MeV換算)	2.0E+18	1.6E+18	-	-
	ヨウ素131 等価(吸入)	1.2E+13	1.7E+12	-	-
	ヨウ素131 無機(CsI+I ₂ /吸入)	1.1E+13	1.3E+12	-	-
	ヨウ素131 有機(CH ₃ I/吸入)	3.4E+11	3.9E+11	-	-
	Cs-137等価(外部)	6.5E+12	3.5E+11	-	-
	Cs-134	1.5E+12	8.1E+10	-	-
	Cs-136	4.0E+11	2.1E+10	-	-
	Cs-137	1.2E+12	6.6E+10	-	-

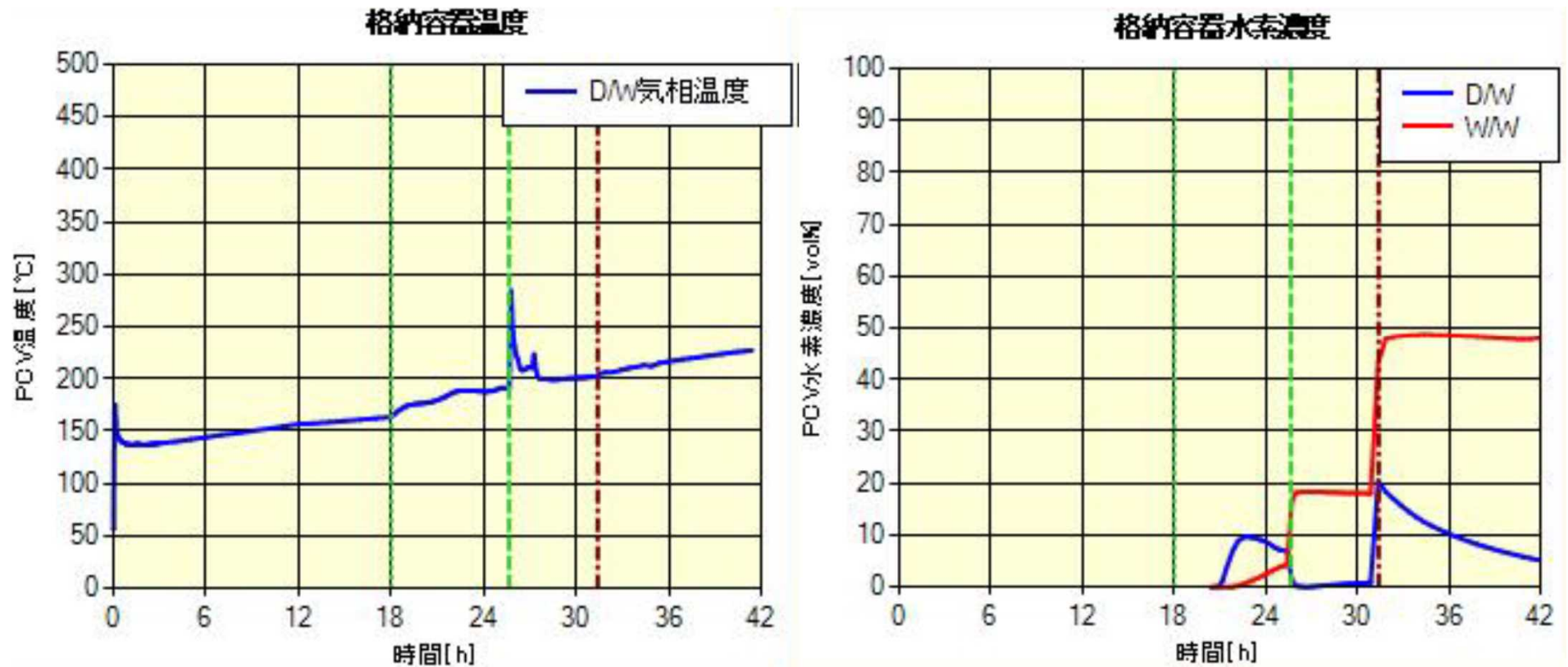
それぞれのプラントの進展及び放出に関わる情報を出力可能
(この例は、柏崎刈羽6,7号機のみ)

出力画面（個別プラントレポート）



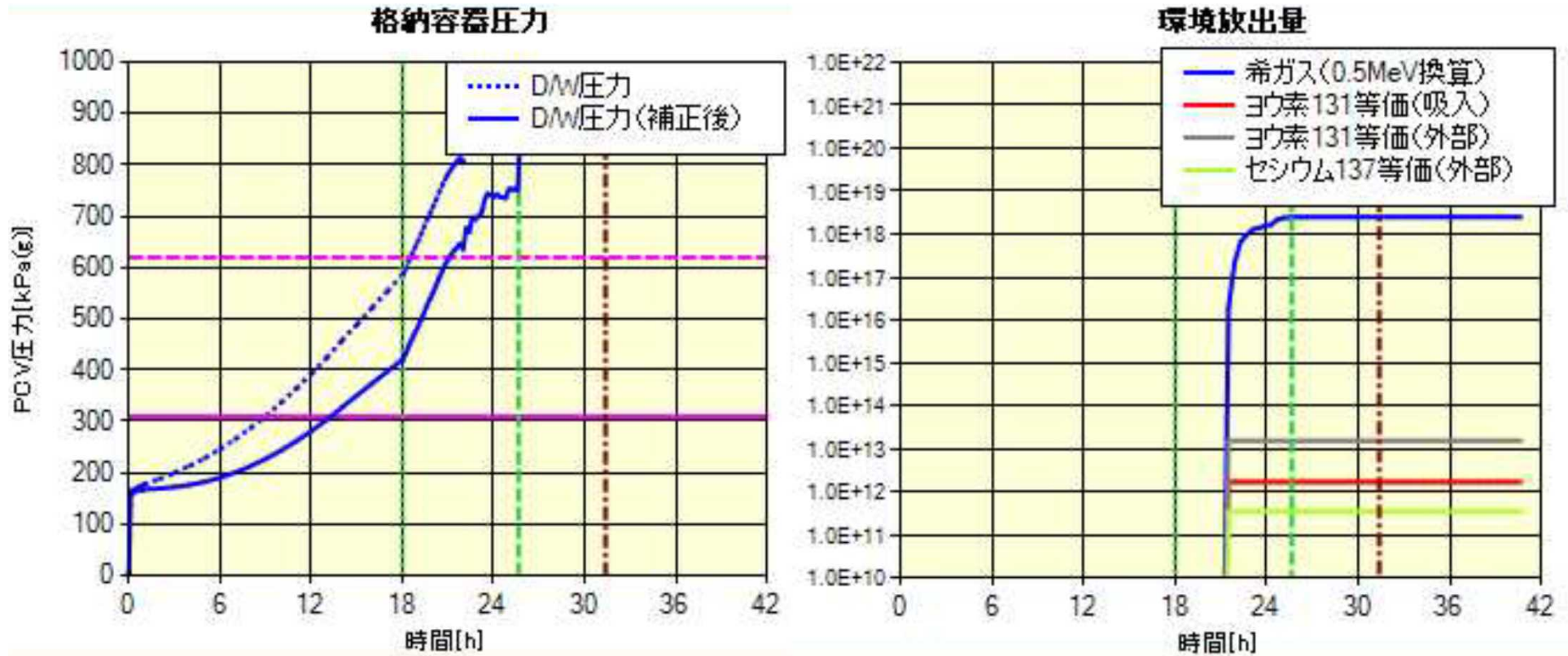
⋯ 注水停止
 - - - リロケーション
 - . - RPV破損

出力画面（個別プラントレポート）

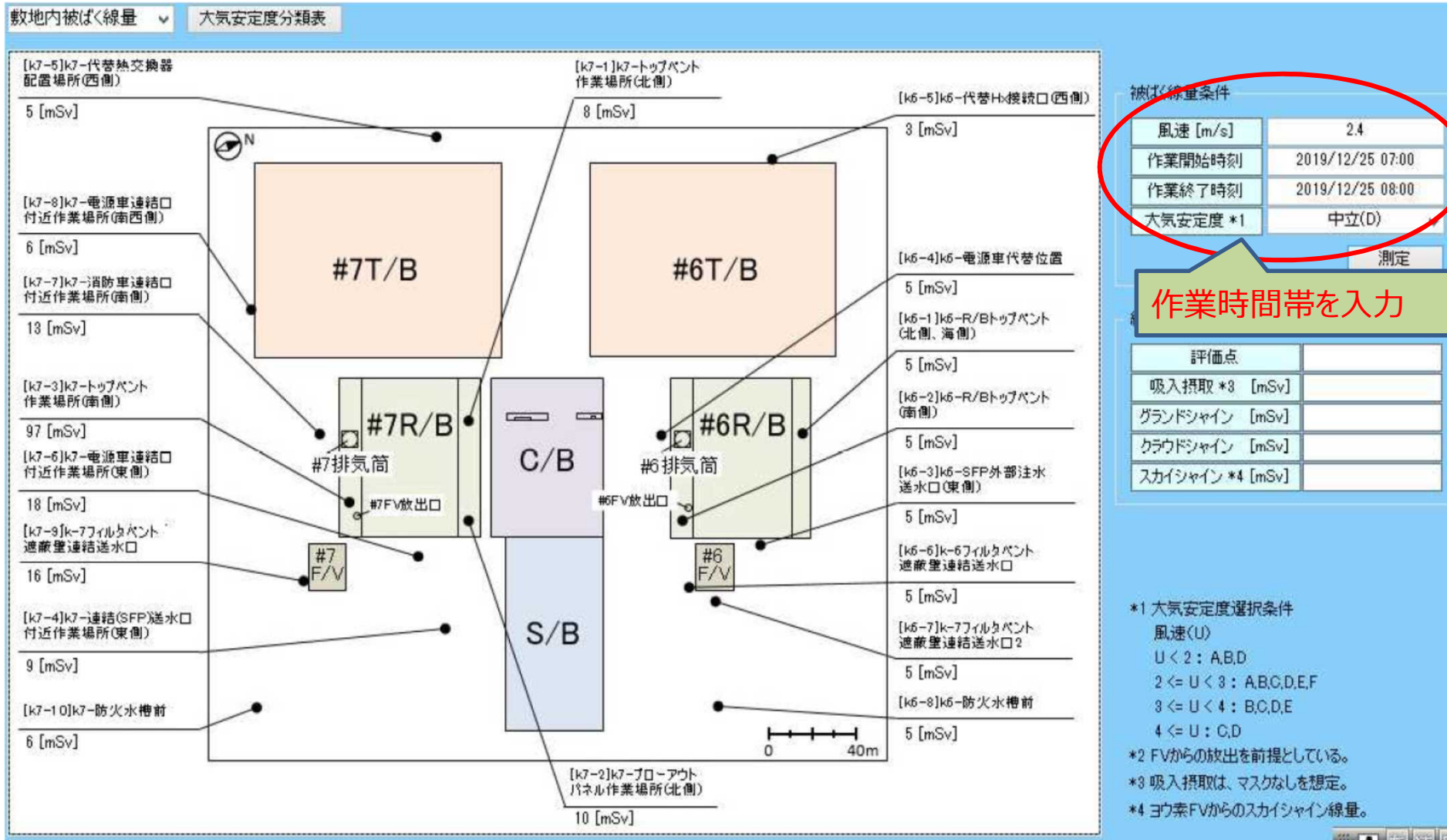


..... 注水停止 - - - リロケーション - . - RPV破損

出力画面（個別プラントレポート）



出力画面（個別プラントレポート）



放射性プルーム起因、フィルタ装置起因の現場作業時被ばく線量を評価

デスクトップシミュレータ (開発中)



Main Window

Overview of the reactor core simulation interface, including a 3D model of the core and associated systems. A table on the left lists various temperatures (e.g., 106.14°C, 126.66°C) and their corresponding components. A 'Triangle Hydrogen' diagram is also visible.

Setting Window

Control panel for setting various system parameters. It includes sections for 'スクラム時刻' (Scram time), 'MSIV閉時刻' (MSIV closing time), 'LOCA関連' (LOCA related), and 'ポンプ設定' (Pump settings). Each section contains multiple ON/OFF toggle switches for different pumps and systems.

System Diagram Window

Detailed schematic diagram of the reactor's primary and secondary loops. It shows the flow of water/steam through various components like pumps (HPCP, HPC, R-H), injectors (LPL, M/W), and heat exchangers (CSP, CRD). The diagram is color-coded to show different flow paths.

Graph Window

Graphical interface for monitoring simulation results over time. It contains several plots showing parameters like 'D/W CASI', 'R/W CASI', 'R/W PWR', and 'D/W PWR' against time (0 to 24 hours). The plots show how these parameters change during the simulation.

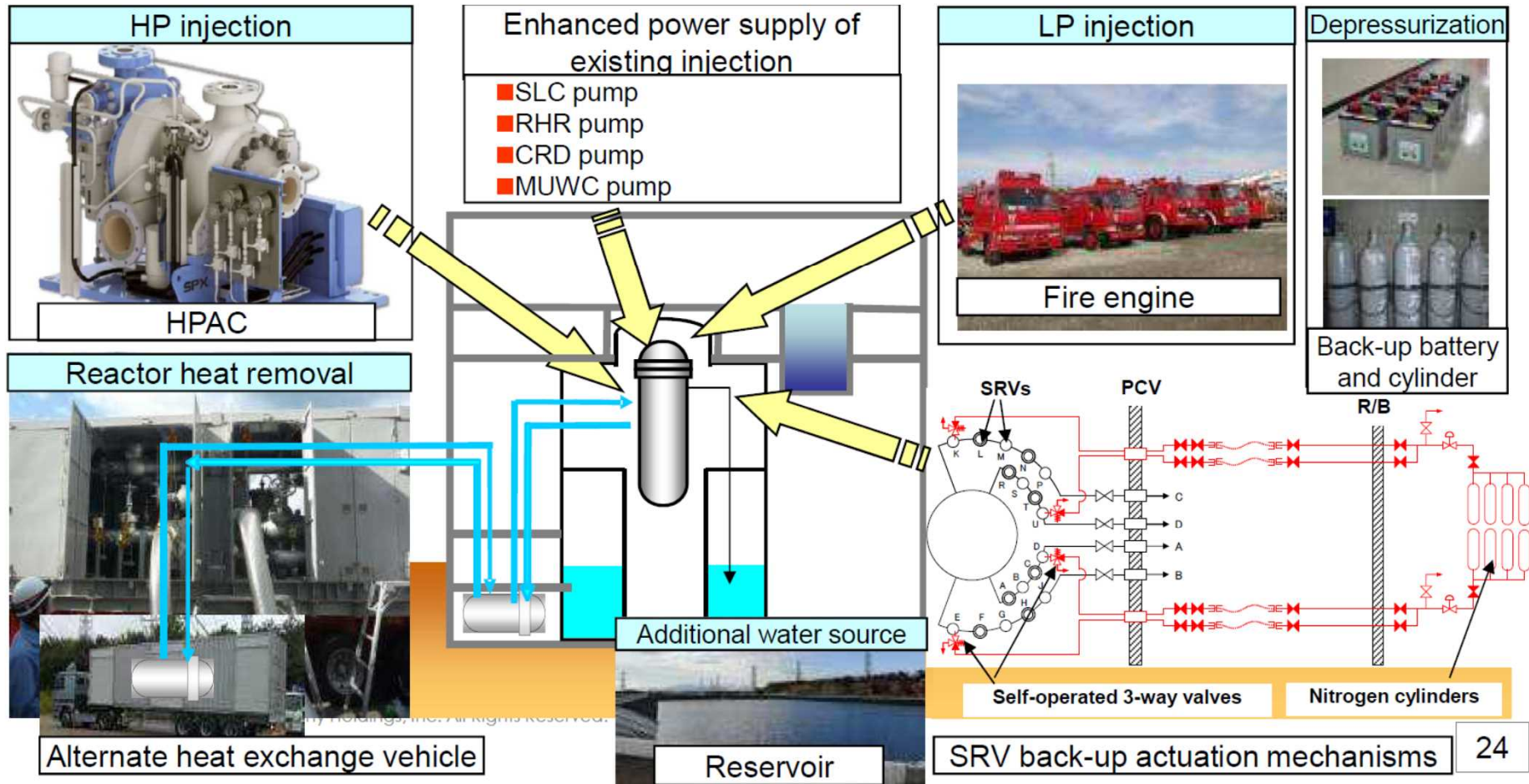
SFP Window

Interface for monitoring Spent Fuel Pool (SFP) parameters. It displays 'Water Temperature', 'Mass of gas', 'Mass of water', and 'Spent fuel parameters' in a table. The table lists fuel elements (e.g., 01, 02, 03) and their status (Broken/Intact) and temperatures.

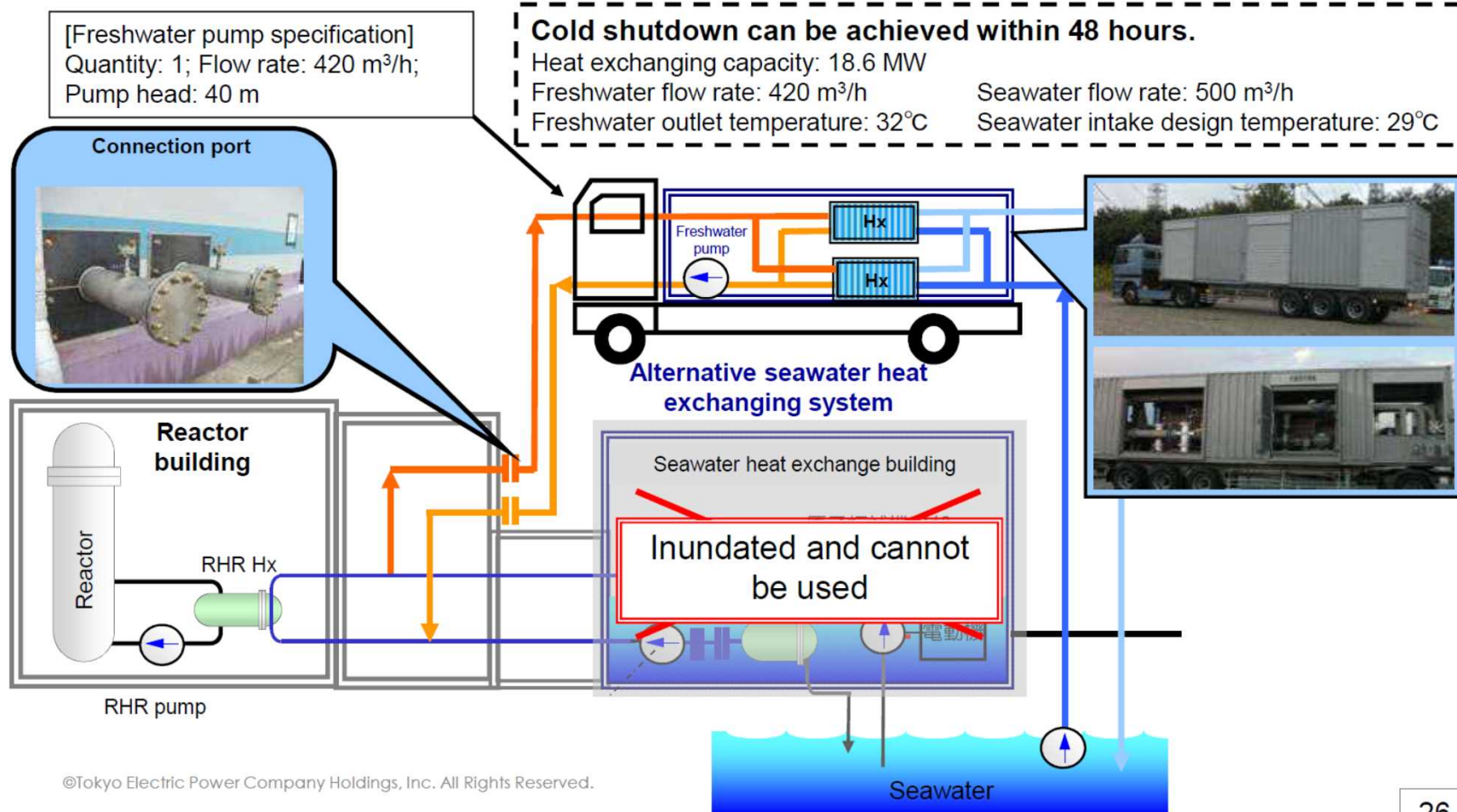
Top view

Top-down view of the reactor core, showing the arrangement of fuel elements in a grid. The grid is labeled with coordinates A through B and A' through B'. The fuel elements are color-coded to represent different states or temperatures.

- プラントが重大事故あるいはそれに進展しうる状態になり避難を必要とする事態に陥った場合に、事象の進展をタイムリーに簡易評価するためのツールを開発した。
- MAAP解析を事前に複数回実施し、それらの結果をデータベース化することで、緊急時に評価に要する時間の短縮化を図った。
- 今後も引き続き、柏崎刈羽原子力発電所における緊急時対策本部内訓練で使用し、現場での利便性向上を図っていく。

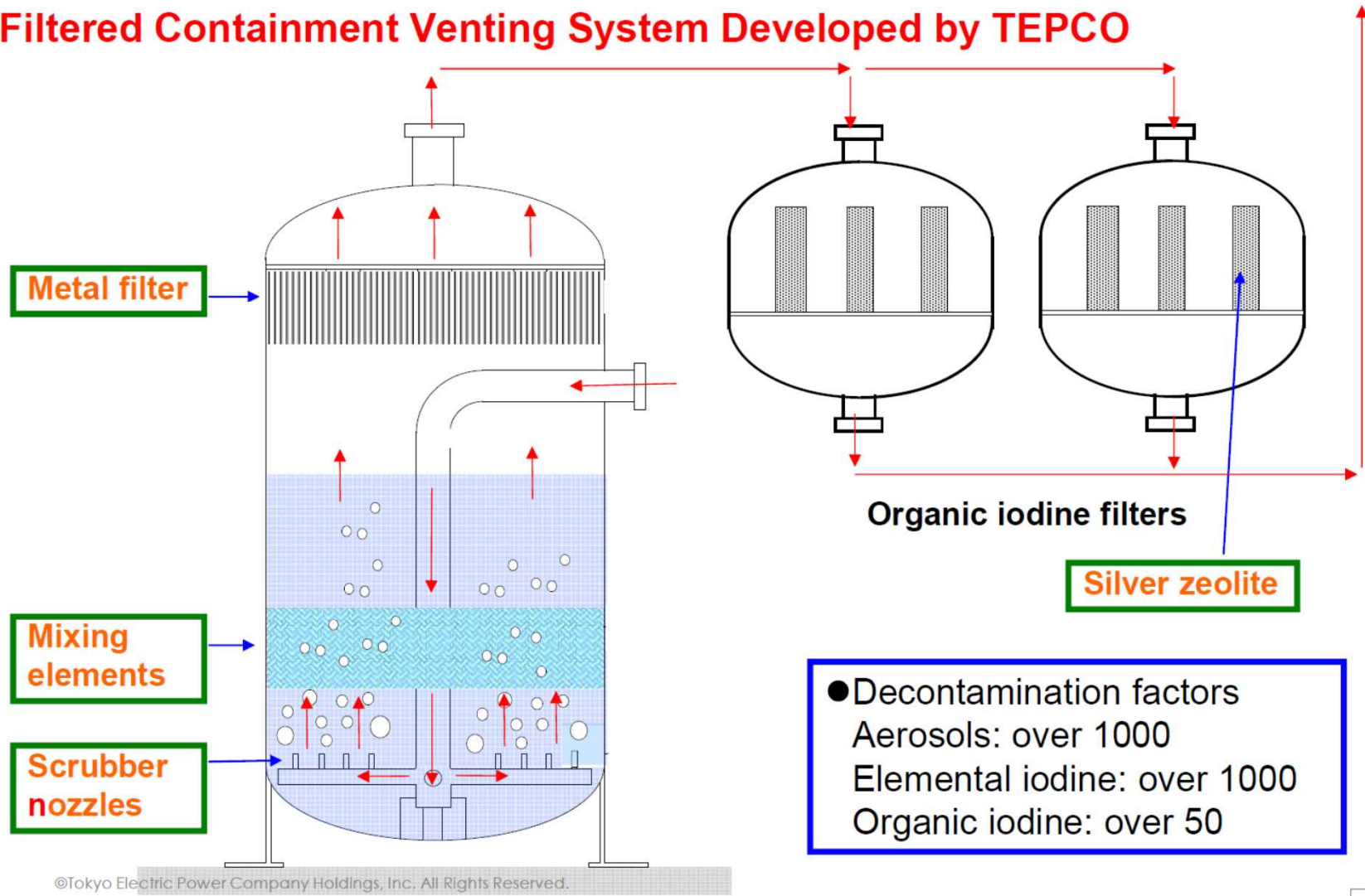


Back-up ultimate heat sink for the reactor in case of LUHS events



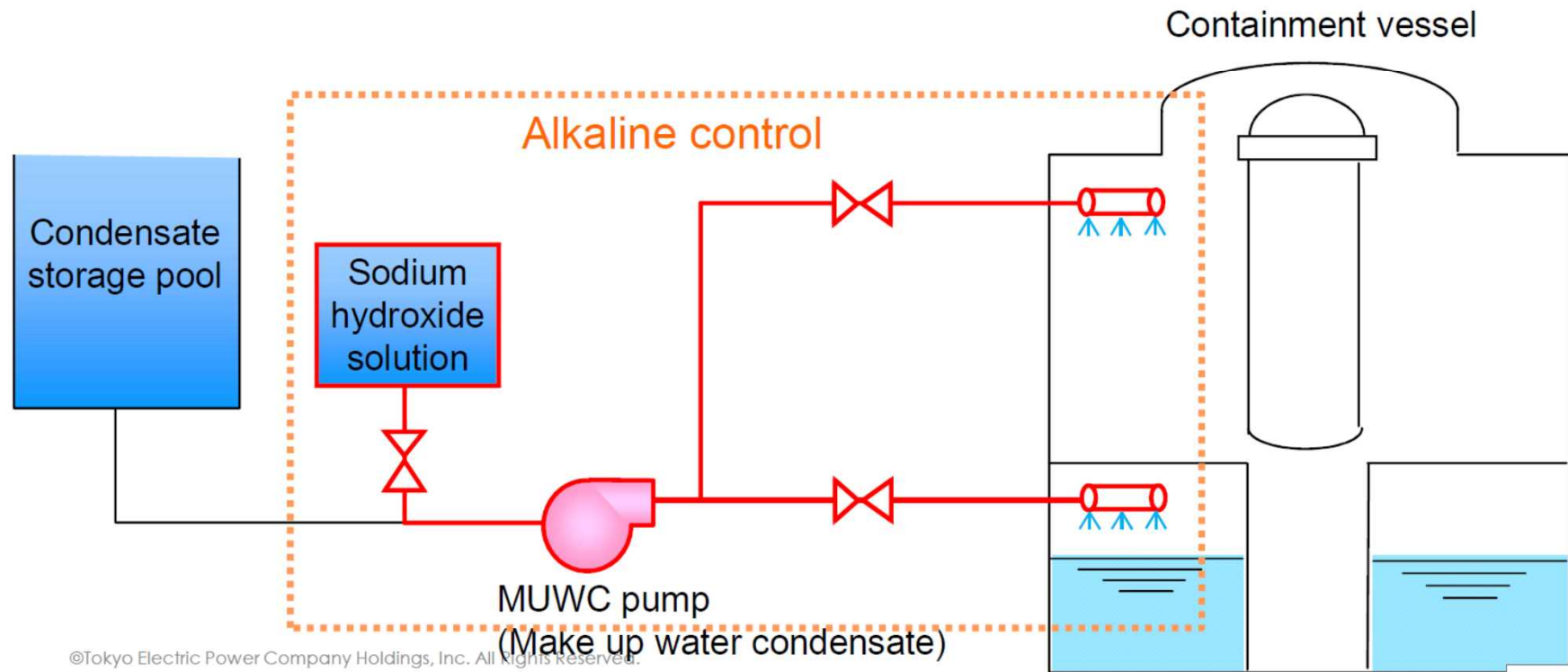
©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

Filtered Containment Venting System Developed by TEPCO



Aerosol and elemental iodine filter

- Inhibit production of iodine gas, and reduce amount of iodine released from the containment vessel by making water in the containment alkaline



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.