
熱水力安全研究(2)

— 事故解析のための簡易評価ツールの開発 —

(独)日本原子力研究開発機構 安全研究センター
原子炉安全研究ユニット 熱水力安全研究グループ
柴本 泰照

平成23年度 安全研究センター 成果報告会
平成24年1月17日

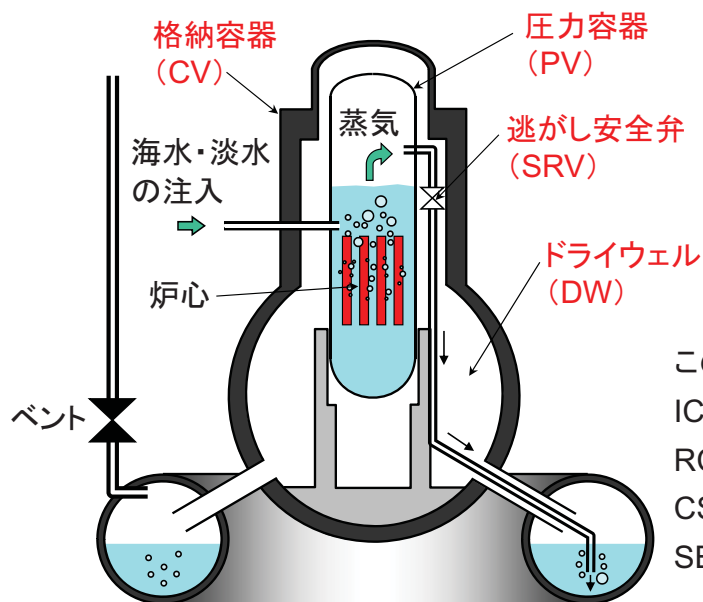


本日のご報告内容 ~ 経緯

- 平成23年3月11日: 東北地方太平洋沖地震が発生. 東京電力福島第一原子力発電所の1~3号機がシビアアクシデントに至る.
- 東電と政府により事故対策本部が東電本社に設置され, メーカー等の各機関の専門家・技術者による検討が開始される.
- 3月下旬: 政府の要請によりJAEAも事故対策本部に参加し, 技術的な支援を行う.
- 4月~5月初旬: 格納容器内の状態把握のための簡易評価コードを検討・開発. **本日の発表の前半部分.**
- 5月~8月: 簡易評価コードの拡張. **本日の発表の後半部分.**



用語集 ~ MARK-I型格納容器



このほかに登場する略語

IC: 非常用復水器

RCIC: 原子炉隔離時冷却系

CST: 復水貯蔵タンク

SBO: 全交流動力電源喪失

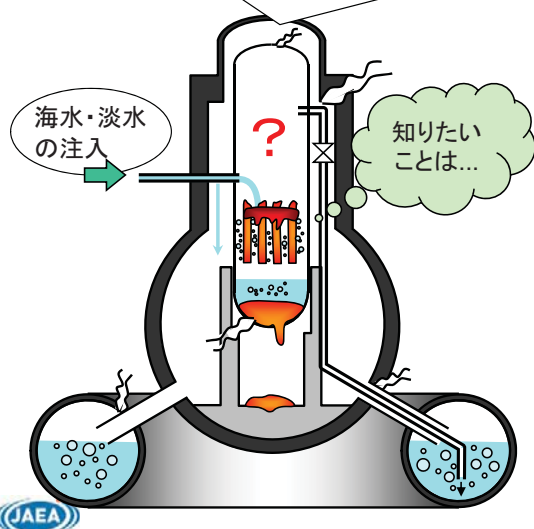
サプレッションチャンバー (SC)



2

背景 ~ 事故当初の状況

- 福島第一原発の事故では、当初からほとんどの計装が使用不能となり、格納容器内の状況の把握すら困難な状態に陥った。
- 地震翌日からの注水で一応の冷却は達せられたが ...



- 次なる作戦(冠水, 窒素イナート, 漏水防止, 仮設熱交設置, など)を取るに当たって, 妥当性を検証するために, **解析的な検討による事故シナリオモデルの構築**が求められていた。
- 基本的には「**質量と熱のバランスモデル**」を確立することが炉内状況把握の第一ステップ。
- 想定や手計算に基づく「感じ」や「危うさ」の排除。



3

背景 ~ 解析ツールの目的と準備(1)

- 解析の道具立ての整備も様々に考えられる. 計算精度, 空間解像度, 計算コスト等の最適化.
- 要求事項(短期的なものとして)
 - 日々進展するプラント状況の把握.
 - 現場作業の必要性を定量的に裏付け.
 - 外部機関への説明資料として.
- 計算時間やインプット作成に時間を要する大規模システム解析コードは「軽快さ」という点において不向き. 入力条件の不確かさも大きい.
- 精度が荒くとも, 見通しの良いモデルを採用した単純な解析ツールが適している.



4

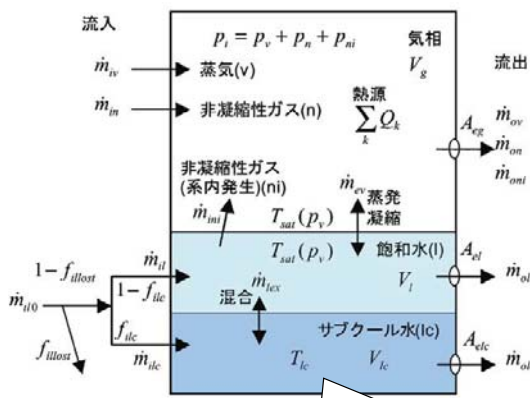
背景 ~ 解析の目的と準備(2)

- 事故当時の入手可能な情報
 - 設置許可申請書: 圧力容器(PV)・格納容器(CV)の容積や初期保有水量. 初期内部エネルギー等が概算できる.
 - 崩壊熱は運転履歴等から計算可.
 - 主要なAM(運転員の介入)の履歴. 限定的な情報.
 - 水・窒素の注入量(リークの可能性あり).
 - PVとCVの圧力データは一応ある(不正確の可能性).
- 知りたいこと
 - CVから外部への熱放出ルート. 蒸気放出か壁冷却か?
 - その他の内部の状態. 水のリーク量等.
- 限られた材料から, 情報が極めて乏しい格納容器内の状況に迫り, どこまで推測・説明できるかに挑む.



5

簡易解析コード(CVBAL)の概要

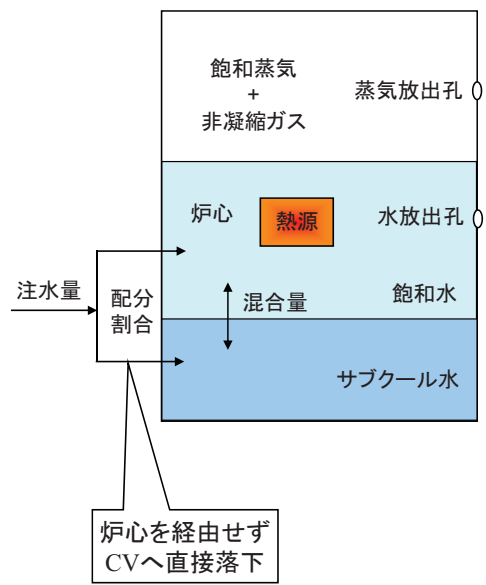


サブクール水系
 本コードの特徴のひとつ、サブクール水は全体の質量と熱バランスの計算には含めるが気液平衡系との熱のやり取りはしない(冷却に寄与しない)。温度を外部から与える。

- 格納容器を水と蒸気、非凝縮ガスの飽和平衡系として**集中定数系**によりモデル化。
- 考慮する成分: l: 飽和水, v: 蒸気, lc: サブクール水, n, ni: 非凝縮ガス(注入と内部発生)。非凝縮ガスは理想気体として扱う。
- 崩壊熱や壁での除熱量は熱源として扱う。
- 流出モデル:
 - ✓ 流出孔の大きさや位置を時間の関数で与える。水位による水没も考慮。
 - ✓ 気相と液相がそれぞれの孔から分離して流出。流速をベルヌイ則に従って見積もる。流出気体には臨界流を考慮。
- 数値解法:
 - ✓ 各相の質量を陽的に時間積分→エネルギー保存式に代入。容積一定の拘束条件のもと、各相の比内部エネルギー(圧力の関数)を陰的に求める。
 - ✓ 連立方程式はNewton法のイタレーションで解く。



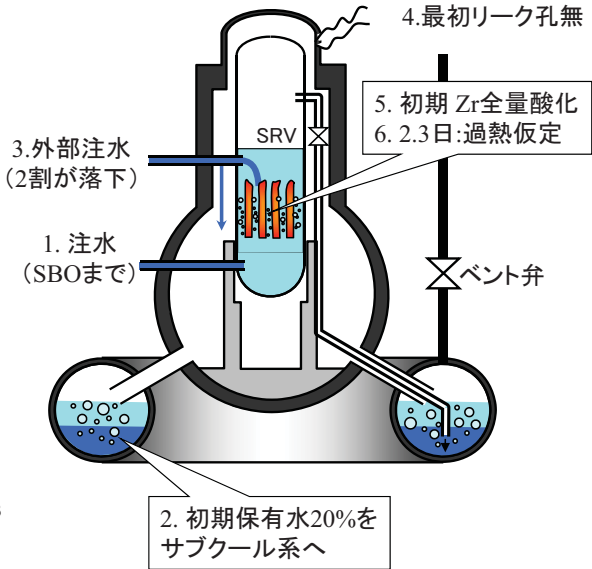
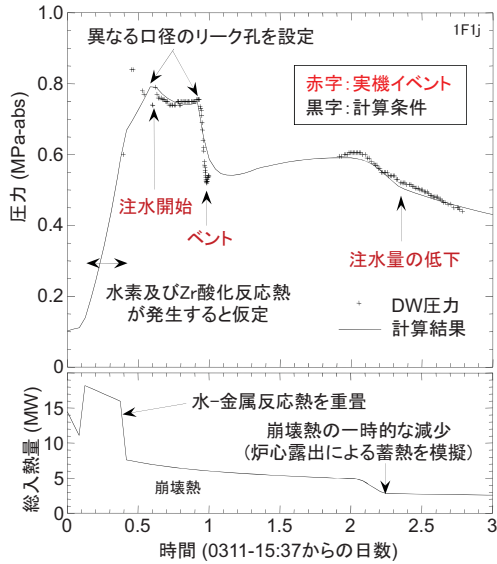
計算の進め方 ~ パラメータの探索



- 体系を格納容器ひとつと考え、炉心崩壊熱は全て流体側に伝わる(平衡系)。
- ターゲットデータを**格納容器圧力**とし、実測値に適合するような初期条件・境界条件を探索する。
- 圧力挙動に影響する因子
 - ✓ 蒸気放出孔: 開くタイミングと大きさ。なるべく変えない。
 - ✓ 注水量: 全量が炉心を経由するとは限らない(配分割合)。
 - ✓ 混合量: 激しい過渡期、非凝縮ガス効果、圧力データに合わないところで使用。
 - ✓ 崩壊熱: Wigner-Way式。炉心過熱が疑われる時は発熱量を調節。

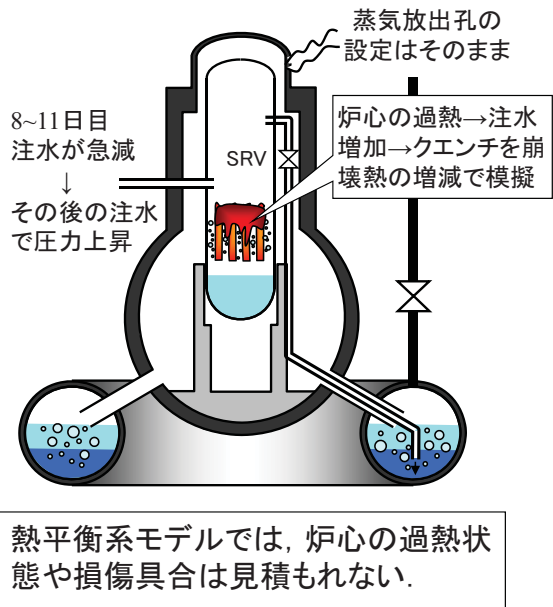
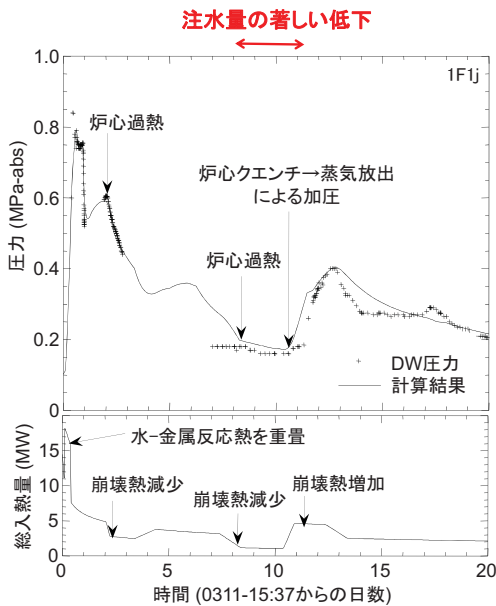


CVBALによる1号機の解析例(3日間)



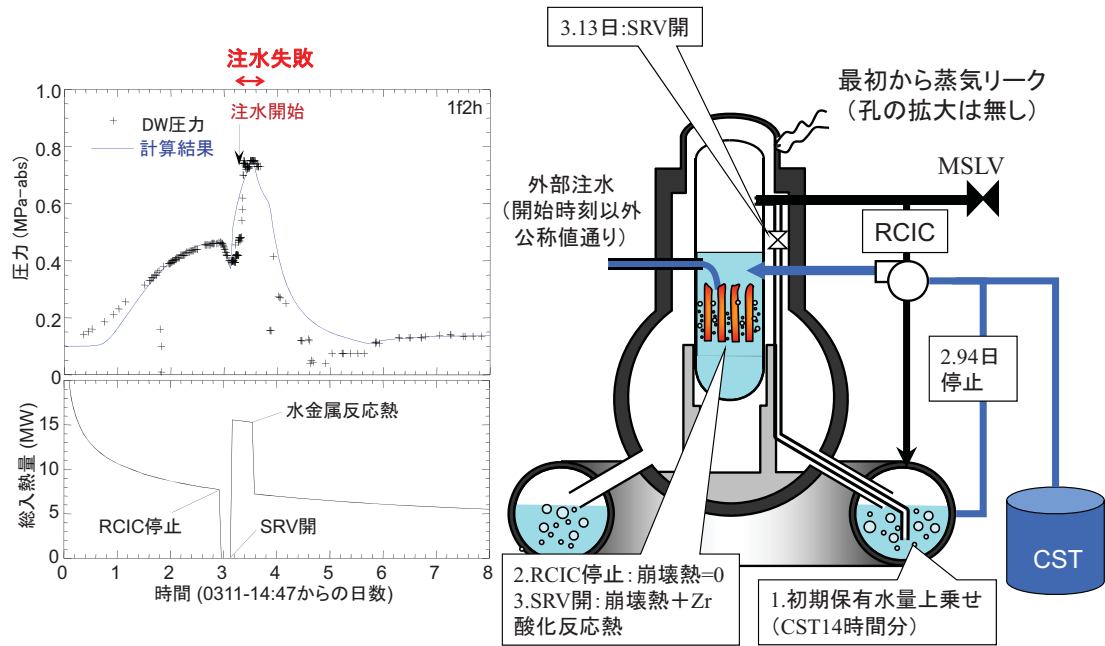
8

CVBALによる1号機の解析例(20日まで)

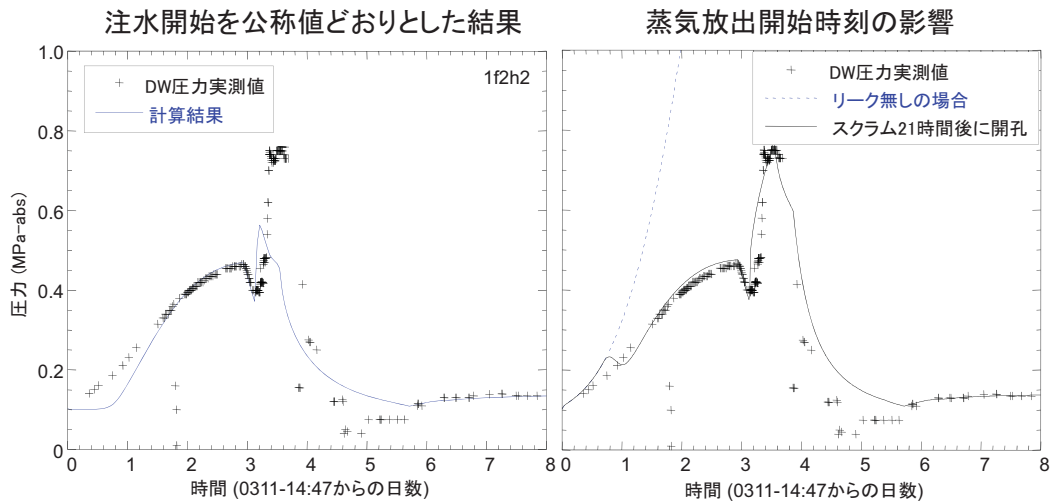


9

CVBALによる2号機の解析例(1)



CVBALによる2号機の解析例(2)



➤ シナリオの同定は難しいものの、感度解析によって、注水の成否や蒸気放出の可能性に関する情報を提供.



ひとまずまとめ

- 当初の要求にどこまで応えられたか? → 事故シナリオや炉内状況の特定には至らないものの、当初の目的である熱バランスや圧カトランジェントに対する原因の可能性は提供できた。
 - 計算結果は事故対策の判断材料として参照。
 - 外部機関への情報提供の材料として活用。
 - ソースコードは事故対策本部内にて配布・共有。
- 新たな要求: 炉心の損傷状態を簡易的に評価し、事故進展を更に踏み込んで調査できるか。

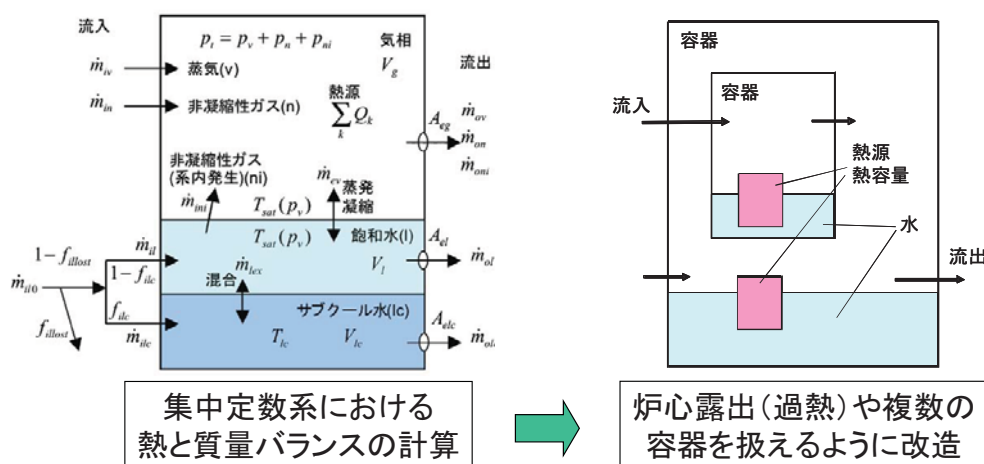


炉心や容器壁などの固体の伝熱モデルを組み込んだHOTCBの開発に発展。



12

HOTCB (hot cans & bodies) の開発

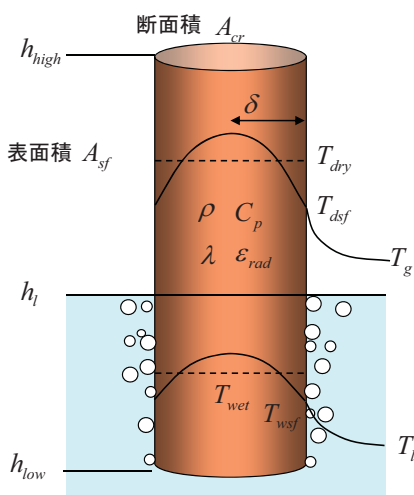


- CVBALに炉心や構造材と気液平衡系間との伝熱計算(1点近似)を組み込み、炉心の過熱や構造材温度、それに伴う系内の圧力応答計算を可能にした。
- 複数の容器を扱えるようにし、PVとCVの陽的な連成計算を可能にした。RV, SRV, RCICなどの機能を追加。



13

HOT Body ~ 発熱・熱容量を伴う物体モデル



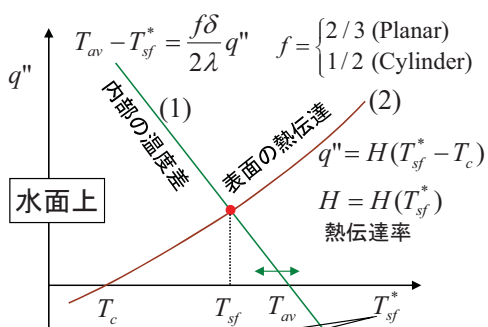
Body体積 $V = A_{cr}(h_{high} - h_{low})$

浸漬部分の割合 $f_{wet} = \min\left(\frac{\max(h_l - h_{low}, 0)}{h_{high} - h_{low}}, 1\right)$

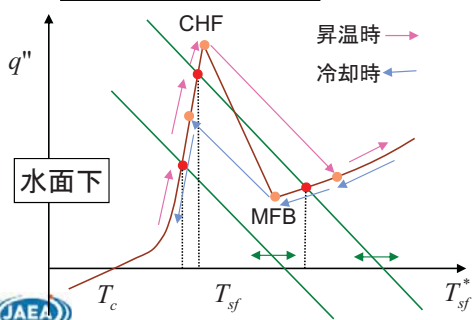


- CVBALでは熱源は全て流体に伝達されるとしていたところを、物体 (Body) と流体との熱伝達計算を可能とした。
- 周囲の状況 (気相・液相の成分、水面位置) により表面熱伝達を相関式で評価し、周囲の冷却材との熱交換を計算する。
- 発熱を伴う炉心や熱容量のある容器壁、内部構造物の計算が可能となり、**炉心溶融**や**容器貫通**の評価が可能になる。

HOT Body ~ 表面温度と熱流束の評価

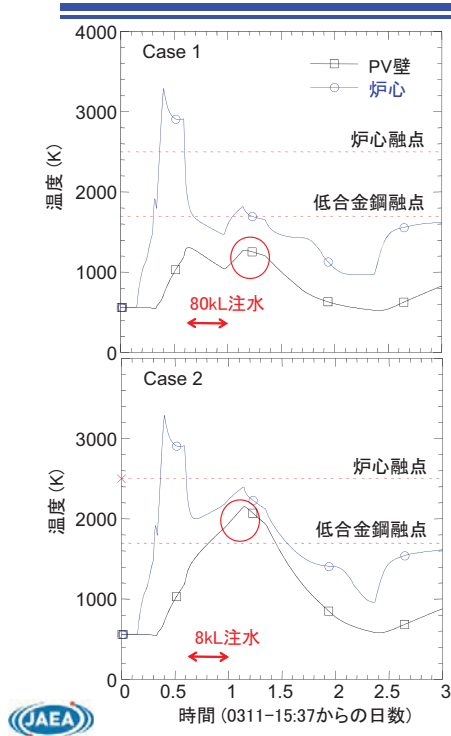


図中の横軸変数は T_{sf} をパラメータとして動かす意味で * を付した。



- 物体内部の平均温度と表面温度の温度差を表面熱流束の関数としてプロフィール法を用いて表す(1)。
- 一方、表面熱流束は表面温度 (過熱度) の関数として相関式で与えられる(2)。
- (1)と(2)の交点を2分法により求める。但し、水面下では(2)が非線形 (沸騰曲線) で、複数の交点となる場合がある。温度履歴から沸騰遷移やクエンチを判断。
- 求まる表面温度及び表面熱流束を乾き面と濡れ面の非定常エネルギー方程式にそれぞれ代入し、新タイムステップの平均温度を陰的に解く。
- 熱伝達には輻射も考慮。輻射はすべて流体 (水・蒸気) が吸収とし、物体間のやり取りは考慮しない。

HOTCBによる1号機の解析(炉心崩壊の見積もり)



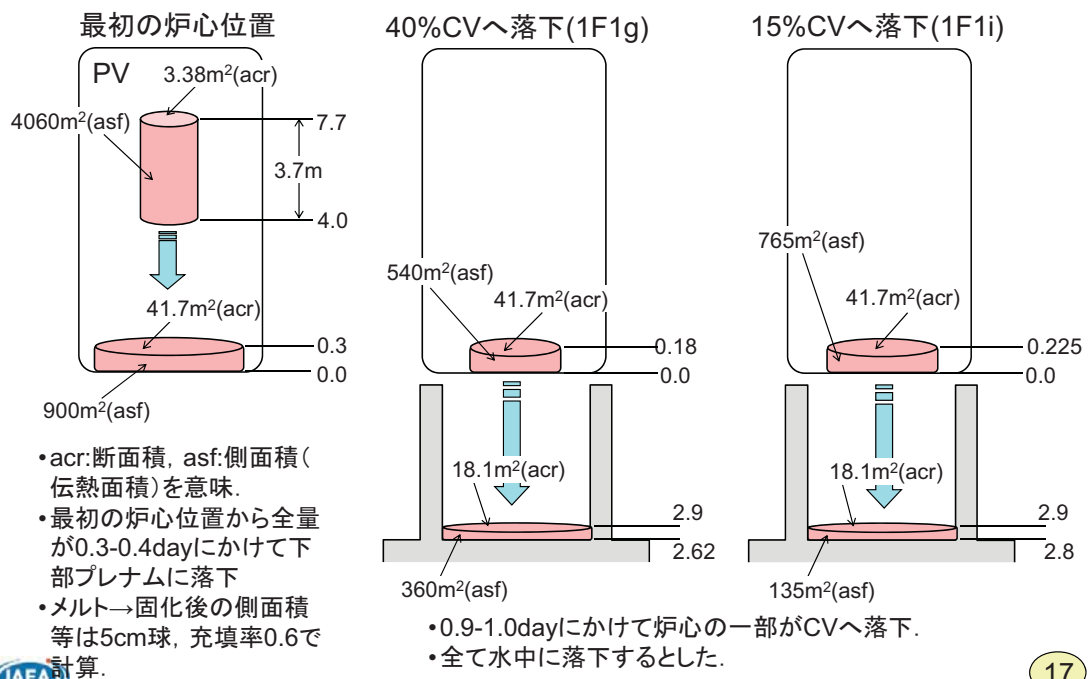
- 事故後のSBOから0.2日後に炉心過熱が開始し、0.3日後に炉心の融点を突破.
- PV容器壁温度は融点に至らない.

- MAAPやMELCORによる解析では注水開始前(地震後5-15h後)にPVが破損.
- HOTCBでは構造材相互の輻射は未考慮なので、壁の過熱が遅い(非保守的).

3月12日の淡水注入(80t)は、当時のPV圧力が0.8MPaと高圧であったことから注水に失敗したと仮定すると0.8日後(19時間後)にPV容器壁温度が融点を上回る。→このシナリオを採用。

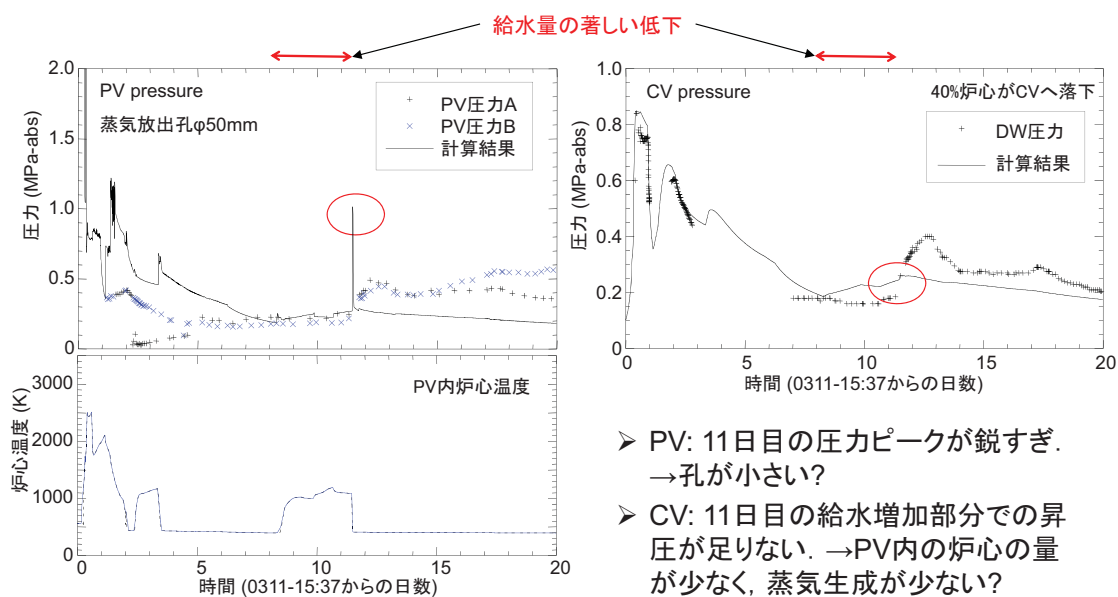
16

1号機の炉心崩壊モデル(外部入力で与える)



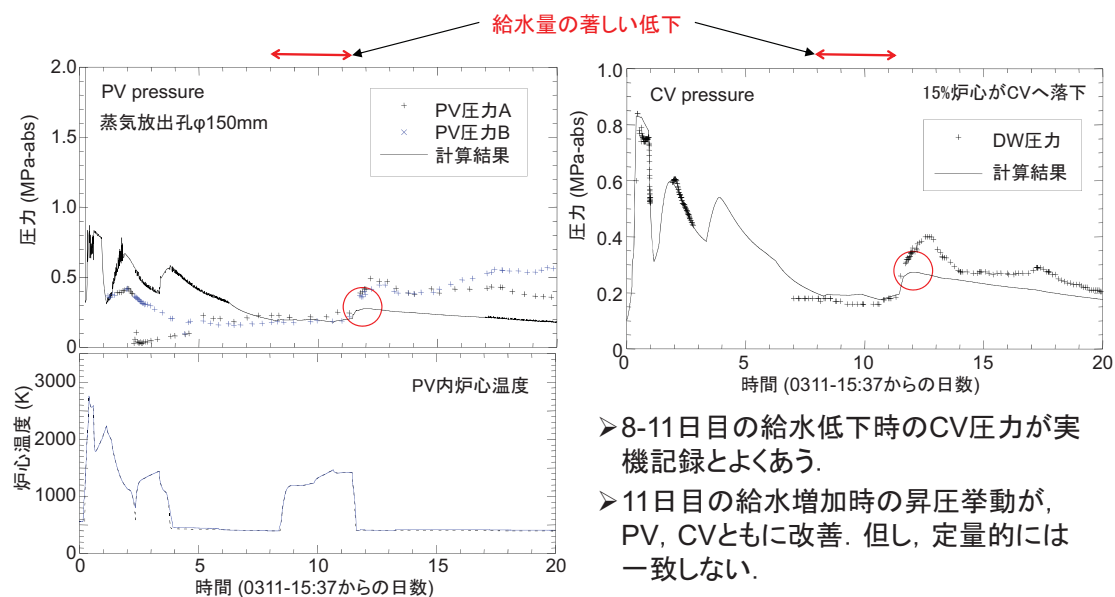
17

HOTCBによる1号機解析例(40%炉心落下)



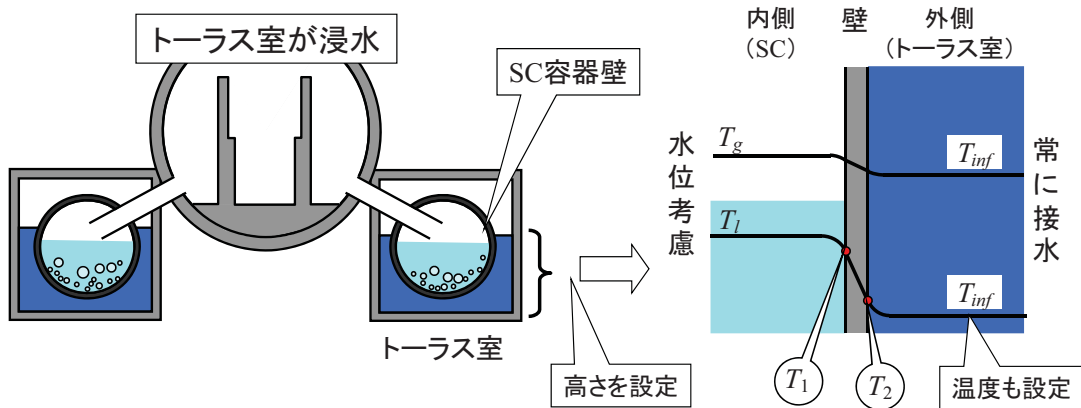
18

HOTCBによる1号機解析例(15%炉心落下)



19

HOTCBによる2号機の解析(除熱源の考察)



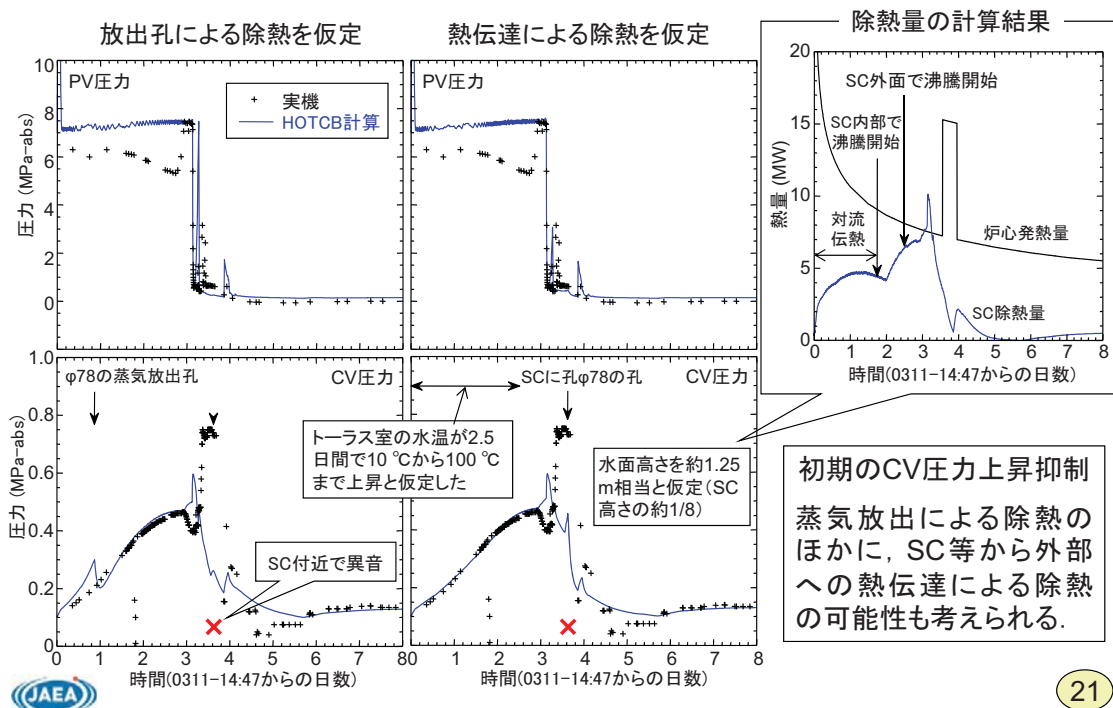
- トラス室が浸水したと仮定し、外面が接液しているSC壁の熱伝達を考慮。
- 外表面は常に接水、SC内部は水位を考慮。準定常仮定のもと(壁内熱伝導とのバランス式, 下記), 表面熱伝達係数(\$h_{in}\$, \$h_{out}\$)と壁表面温度(\$T_1\$, \$T_2\$)を陰的に求め、内側乾き面と濡れ面での除熱量を評価。

$$-h_{in}(T_1 - T_i) = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} = h_{out}(T_2 - T_\infty)$$



20

HOTCBによる2号機の解析例



21

まとめ

- CVBAL: 東電・政府事故対策本部にて情報提供.
- HOTCB: STEP2等の事故進展解析に活用. オープンソースコードとしてwebサイトにて公開.
- 今回の事故対応を通して感じたこと.
 - 情報が極度に不足した状況では、物理現象に対する知見と工学的な基礎知識に基づいた分析が不可欠. はじめは手計算だった....
 - 簡易評価手法の整備の重要性: オープンソース, 見通しの良いモデル, 堅牢なコーディング, 操作の簡便性, マニュアルの整備, 等々.



22

<http://www.jaea.go.jp/04/anzen/index.html>

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
安全研究センター

安全研究センタートップへ

センター長 挨拶
安全研究センターの組織について
安全研究審議会資料
安全研究センタートップへ

安全研究センターでは、原子力発電所の原子炉や核燃料サイクル施設などの安全性に関して、広範な観点から試験研究を行っています。

1 ニュース&トピックス

[2011/12/7]
安全研究センター成果報告会の開催(平成24年1月17日)について(ご案内)

[2011/11/15]
蒸気缶内質量熱収支解析プログラム(HOTCB)の配布について

Copyright(C) Japan Atomic Energy Agency. All Right Reserved.

●本ホームページの内容は、2011年11月現在のものです。

ここ



23