

平成25年度実績概要

事故進展解析技術の高度化による 炉内状況把握

平成26年5月29日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(一財)エネルギー総合工学研究所

無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

はじめに

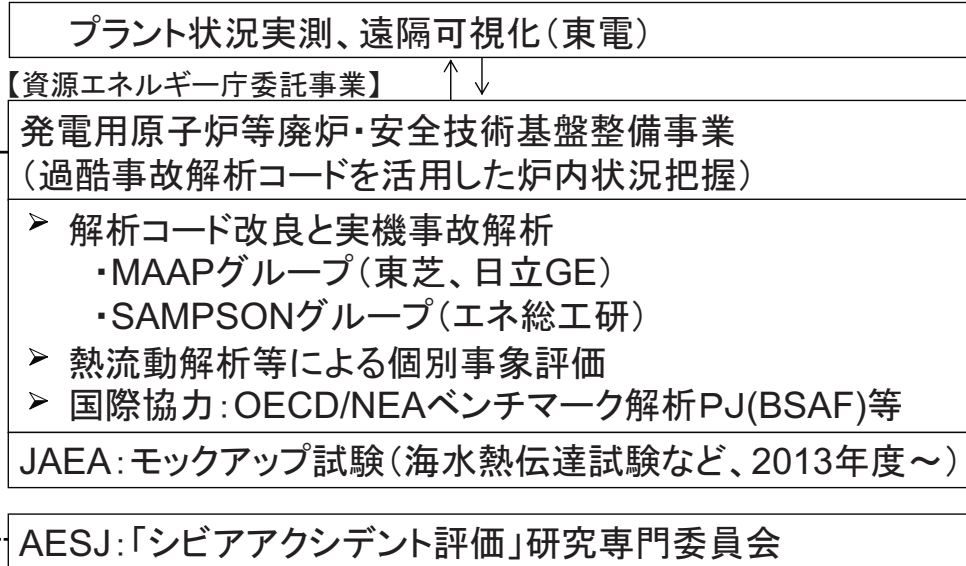
No.1

- デブリ位置の情報は、廃炉のための作業の基本となるものであるが、現時点でも十分な情報を得られていない
- 直接的なデブリ位置検知技術が最も有効な手段であるが、RPV内部を直接確認できるのは、2019年度以降となっている
- そのため、すでに開始されているプロジェクト(デブリ取出し関連技術の検討・開発、RPV内部調査、臨界防止・管理技術、PCV内部調査)では、デブリの位置・状態に関し、幅広い可能性を考慮して、検討を進める必要が生じている
- 検討対象を絞り込むための方法として、解析技術を活用して、デブリ位置の推定を実施しているが、事故進展に於ける未説明問題の存在、解析コードの能力の限界から、解析には不確かさの幅が存在する
- 本プロジェクトは、沸騰水型原子炉特有の構造を考慮した解析モデルの改良及び東京電力の調査を踏まえた解析条件の見直し等により解析コードの評価能力を向上させ、炉内状況の把握に関する不確かさの幅の縮小を目指す
- ✓ なお、すでに福島第一原子力発電所では、1号機2号機の格納容器内の調査等が進められているが、今後、さらに炉内及び格納容器の状況に関するデータが充実すると、これらの情報により解析結果が補強されたり、場合によっては見直しが必要となると考えられる。
- ✓ 今年度からは、このような現場調査の結果からのフィードバックも解析モデルの改良にあたっては考慮していくものと考えている。

目的: 福島第一原子力発電所の廃止措置の円滑な実施に資するため、炉内状況およびデブリの分散状況を解析を主体として把握する

体制: 廃炉・汚染水対策チーム会合

炉内状況把握・解析分野

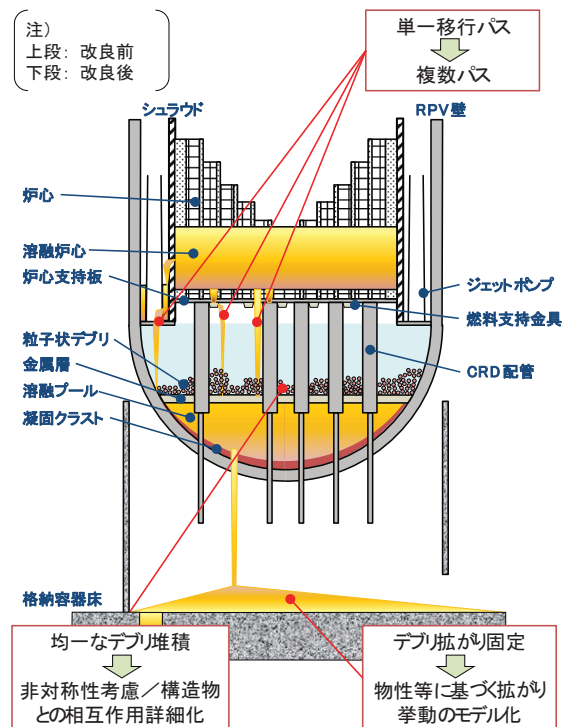


MAAPのモデル改良・追加

MAAPコードの改良により、デブリ位置の推定、プラント挙動の評価精度を高める

■MAAP5コードの改良と検証

- 下記改良項目(右図)及びその高度化仕様に基づいたコード改良を米国EPRI委託にて実施
- 炉心損傷進展モデル改良 (溶融物の移行経路を複数考慮)
- 下部プレナム内デブリ挙動モデル改良 (堆積形態、構造物相互作用)
- 格納容器内デブリ挙動モデル改良 (拡がり挙動、コンクリート相互作用)
- 改良されたコードの検証
- 個別現象のモデルを要素試験等により検証
- プラント全体挙動は実機試験等により検証

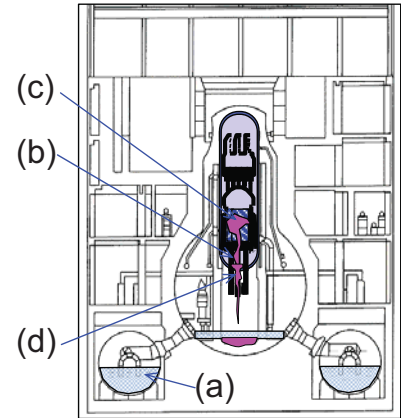


追加された経路①
燃料が乗っている
穴にデブリが落下



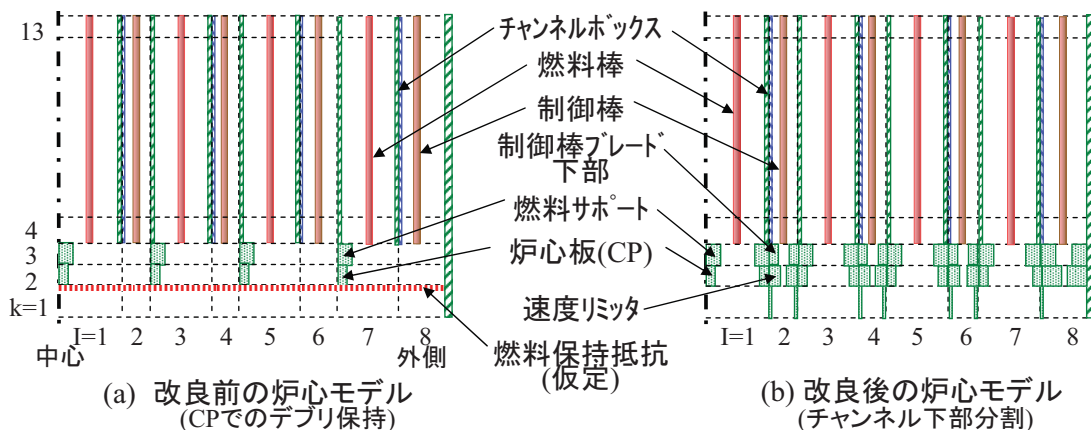
追加された経路②
制御棒(十字型)
が挿入されている
穴にデブリが落下

- (a) 格納容器内圧力抑制プールの温度成層化現象のモデル化
 - ・水の自然循環を解く3次元流動モデルを開発(座標系:デカルト/円筒)
 - ・2号機を対象とした解析で、RCIC動作時の解析機能を検証
- (b) 下部プレナムへの流出経路モデルの改良と下部プレナムにおける溶融物と構造材/冷却材との相互作用モデル
 - ・炉心溶融物の下部プレナムへの流出経路を解析により検討し、モデルを改良
 - ・溶融物と構造材/冷却材相互作用モデルを開発し、機能を検証
- (c) 高温条件における共晶反応及び酸化反応モデルの改良
 - ・ B_4C 及び鉄の酸化反応モデルを追加
 - ・ B_4C と鉄との共晶反応モデルを開発し、機能を検証
- (d) 圧力容器の下部における溶融物・構造材相互作用モデル
 - ・相互作用モデルを開発し、機能を検証



下部プレナムへの流出経路モデルの改良

- ・XR2-1実験結果及び実験解析を踏まえ、炉心モデルを改良(下図(b))
- ・モデル改良の結果、デブリ落下量は各燃料チャンネルでほぼ均一化(下図(d))



(a) 改良前の炉心モデル (CPでのデブリ保持)

燃料チャンネル	落下量	制御棒チャンネル	落下量
1	9.5 wt%	2	1.7 wt%
3	41.4 wt%	4	6.0 wt%
5	33.3 wt%	6	3.5 wt%
7	4.4 wt%	8	0.3 wt%

(b) 改良後の炉心モデル (チャンネル下部分割)

燃料チャンネル	落下量	制御棒チャンネル	落下量
1	21.6 wt%	2	3.1 wt%
3	23.1 wt%	4	3.2 wt%
5	30.1 wt%	6	4.0 wt%
7	14.9 wt%	8	0.0 wt%

(c) 改良前のデブリ落下量(1号機解析例)

(d) 改良後のデブリ落下量(1号機解析例)

■ MAAPコードの特徴と役割

特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験結果等に基づく相関式を採用した「簡易モデル」により構成されており、高速計算が可能 ・ 不確かさの大きな現象を対象としたパラメトリック解析が可能
役割	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高速計算機能を活用して、境界条件やプラント運転条件あるいは物理現象等の不確かさの大きいパラメータに対する感度解析を実施し、燃料デブリの存在位置・量・組成等に与える影響を把握 ・ 境界条件を共通化し、SAMPSONとMAAPのモデルの相違による解析結果の相違を比較し、炉内状況の評価に反映する

■ SAMPSONコードの特徴と役割

特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 可能な限り物理・化学現象を精緻に記述した「機構論的モデル」及び理論式を採用 ・ 空間的に分布が生じる現象について、多次元解析が可能
役割	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーザ入力の影響が少ない「機構論的モデル」に基づく事故進展事象の解明と燃料デブリの存在位置・量・組成等の推定 ・ 多次元解析機能を活用した炉内状況把握に関連する未解明事項の詳細検討(例：溶融炉心の下部プレナム落下挙動)

過酷事故解析コードのデブリ分散状況の評価手法の特徴 No.7

	MAAP	SAMPSON	
H25年度までの取り組みで可能になったこと	炉心部、下部プレナム部、格納容器ペデスタル部とDW部のデブリ分散状況の予測	圧力容器内のデブリ分散状況の予測	
H26年度の目標	圧力容器内の支持板上や制御棒案内管内も含めたデブリ分散状況の予測	圧力容器の下部を含めたデブリ分散状況の予測	
H27年度の目標	圧力容器から格納容器のペデスタル内も含めたデブリ分散状況の予測	圧力容器から格納容器のペデスタル内も含めたデブリ分散状況の予測	

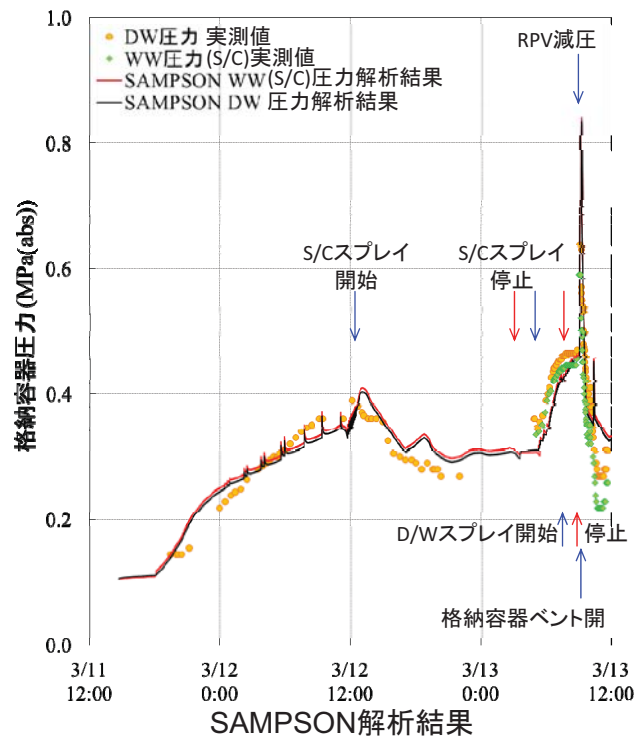
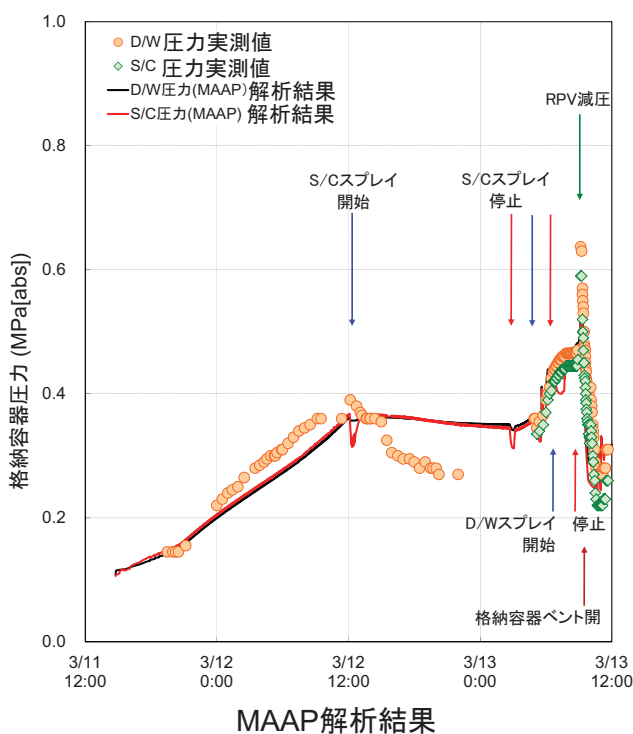
- 東京電力の調査結果を反映した、最新の事故進展シナリオに基づき、改良MAAP及び改良SAMPSONによる福島第一1～3号の事故進展解析を実施
 - 両コードの結果に基づき、現状の炉内状況の解析結果とその不確かさの程度を整理

- 主要イベント発生時刻を以下の観点から整理

イベント	主旨
原子炉水位が燃料有効部上端に到達	原子炉への注水が行われていれば、燃料温度上昇を回避できた時点
炉心損傷 (燃料被覆管温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$)	原子炉への注水が行われていれば、安定な炉心冷却を確保できた時点
炉心熔融 (燃料温度 \geq 約2500K)	原子炉への注水が行われていれば、燃料の冷却可能形状を維持できた時点
原子炉压力容器(RPV)破損	原子炉压力容器から格納容器への燃料の移行が発生した時点

- MAAP, SAMPSON両コードの解析結果は次シート以降

事故進展解析結果：3号機の格納容器圧力評価

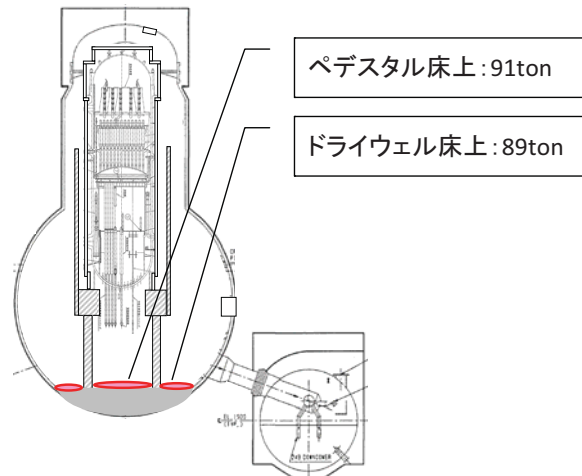
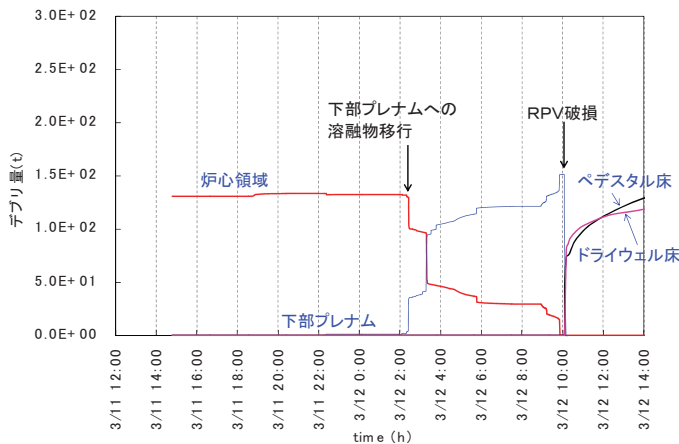


モデル改良と事故進展の理解の改善により実測のデータの再現性が向上

MAAPコードによる1号機事故解析

No.10

イベント	発生時刻
原子炉水位 ≤ 燃料有効部上端	2011/3/11 17:50頃
炉心損傷 (燃料棒最高温度 ≥ 1200°C)	2011/3/11 18:40頃
炉心溶融 (燃料棒最高温度 ≥ 2200°C)	2011/3/11 18:50頃
RPV破損	2011/3/12 10:00頃



(注) 2011/3/12 13:00頃のデブリ量(燃料、構造物)

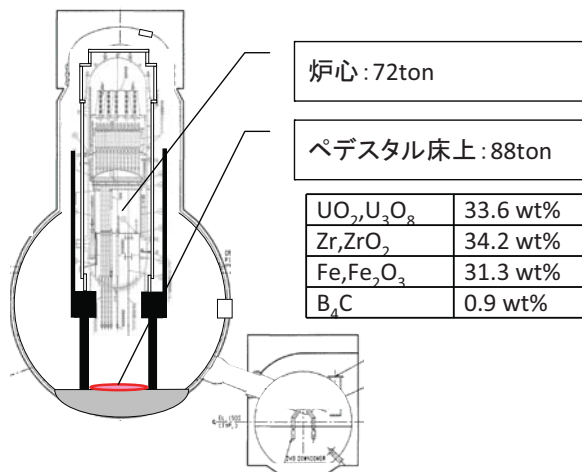
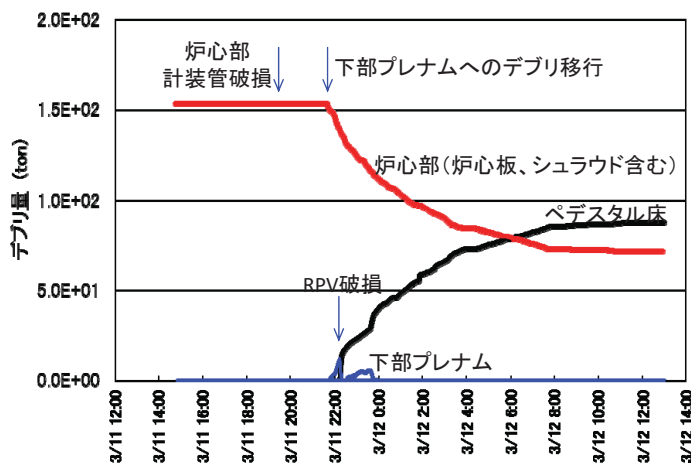


©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

SAMPSONコードによる1号機事故解析

No.11

イベント	発生時刻
原子炉水位 ≤ 燃料有効部上端	2011/3/11 17:50頃
炉心損傷 (燃料棒最高温度 ≥ 1200°C)	2011/3/11 19:40頃
炉心溶融 (燃料棒最高温度 ≥ 2200°C)	2011/3/11 22:00頃
RPV破損	2011/3/11 22:10頃



(注) 2011/3/12 13:00頃のデブリ量(燃料、構造物)

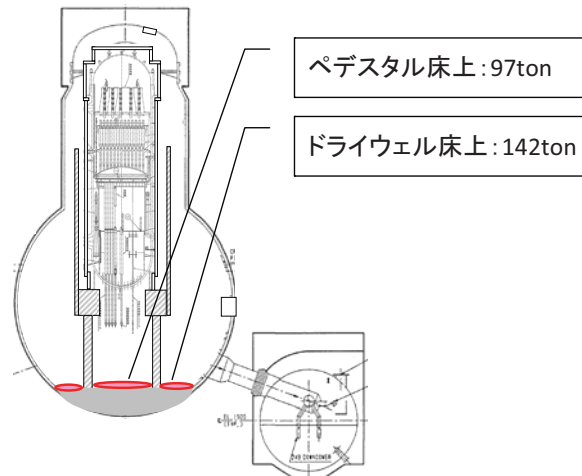
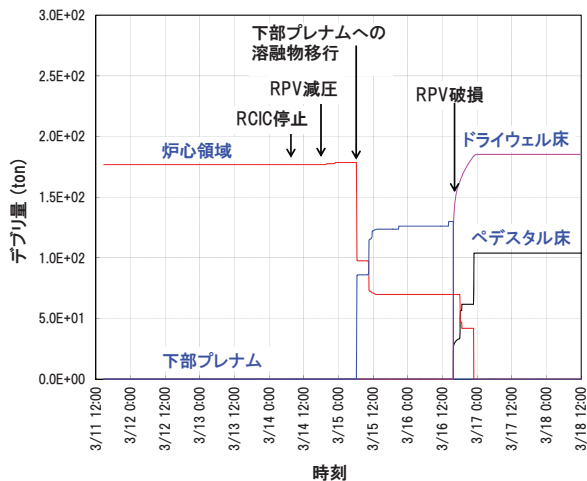


©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

MAAPコードによる2号機事故解析

No.12

イベント	発生時刻
原子炉水位が燃料有効部上端に到達	2011/3/14 18:10頃
炉心損傷(燃料棒最高温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/14 20:17頃
炉心溶融(燃料棒最高温度 $\geq 2200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/14 20:34頃
RPV破損	2011/3/16 15:43頃



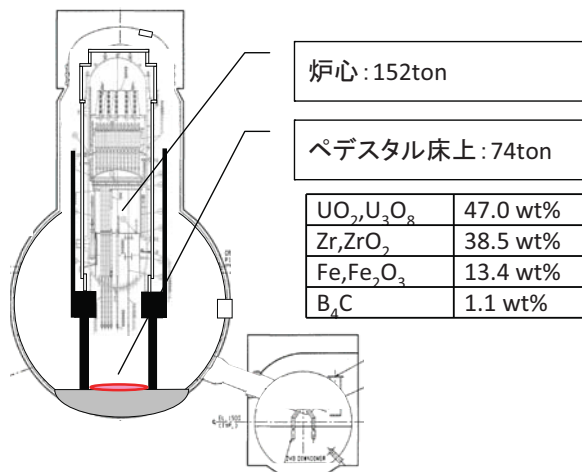
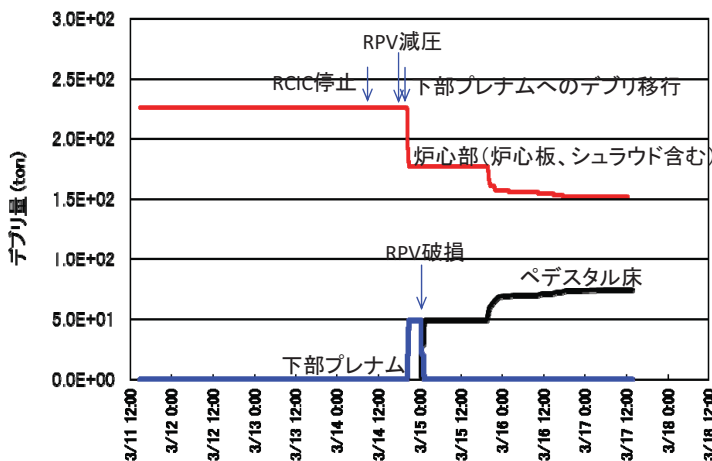
(注)地震発生後1週間後の重量



SAMPSONコードによる2号機事故解析

No.13

イベント	発生時刻
原子炉水位 \leq 燃料有効部上端	2011/3/14 18:00頃
炉心損傷(燃料棒最高温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/14 20:00頃
炉心溶融(燃料棒最高温度 $\geq 2200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/14 20:20頃
RPV破損	2011/3/15 00:20頃



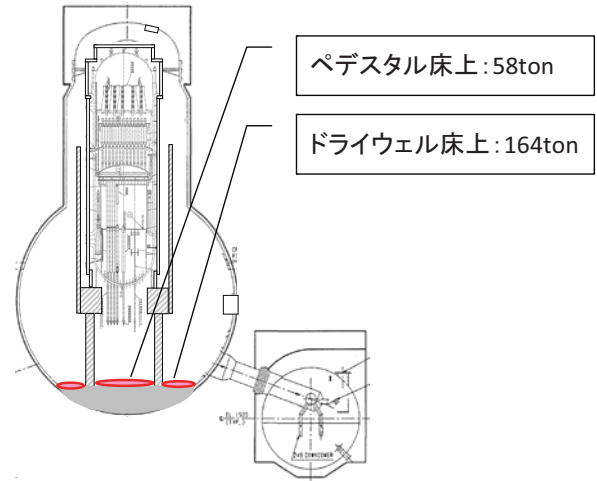
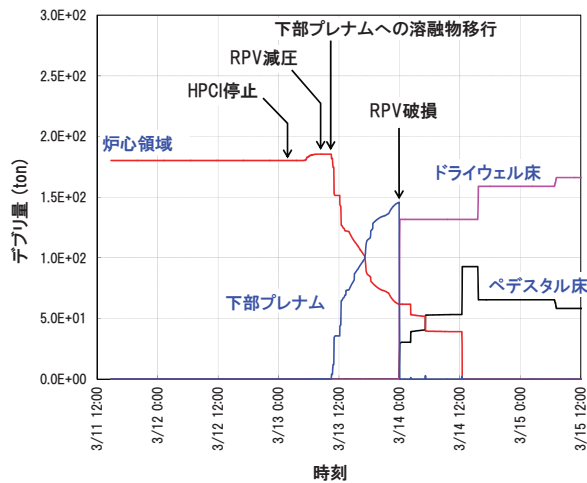
(注)2011/3/17 13:50頃のデブリ量(燃料、構造物)



MAAPコードによる3号機事故解析

No.14

イベント	発生時刻
原子炉水位が燃料有効部上端に到達	2011/3/13 2:21頃
炉心損傷(燃料棒最高温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/13 5:12頃
炉心溶融(燃料棒最高温度 $\geq 2200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/13 5:29頃
RPV破損	2011/3/13 23:57頃

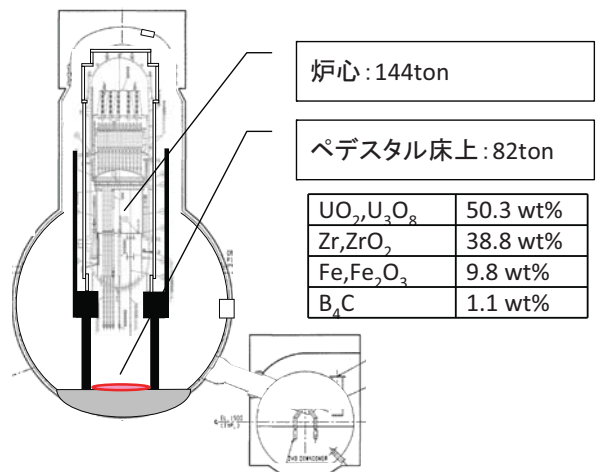
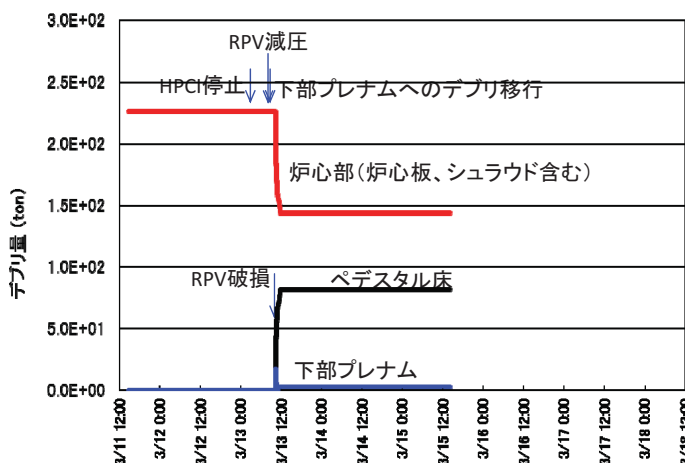


(注)地震発生後1週間後の重量

SAMPSONコードによる3号機事故解析

No.15

イベント	発生時刻
原子炉水位 \leq 燃料有効部上端	2011/3/13 2:00頃
炉心損傷(燃料棒最高温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/13 10:10頃
炉心溶融(燃料棒最高温度 $\geq 2200^{\circ}\text{C}$)	2011/3/13 10:20頃
RPV破損	2011/3/13 10:30頃



(注)2011/3/15 22:53頃のデブリ量(燃料、構造材)

- **モデル改良後の解析結果**
 - MAAP解析結果からは、全号機、炉心全量が格納容器内に放出され、ドライウェルにまで広がっている可能性があることを示唆
 - SAMPSON解析結果からは、全号機、損傷炉心の一部はRPVに残存するものの、RPV破損に伴って、ペDESTAL床上に存在していることを示唆
- **解析結果からの知見**
 - 炉心溶融物によるシュラウドの部分損傷／ジェットポンプ部から下部プレナムへの溶融物移行の可能性
 - 燃料支持金具、制御棒案内管内での金属溶融物固化の可能性
 - ドライウェル床上の燃料デブリ存在の可能性
 - ペDESTALサンプピット内の燃料デブリ存在の可能性
 - 炉心溶融物によるPCVシェルアタックによる損傷の可能性
- **今後の課題**
 - 解析コードによって結果が大きく異なるため、MAAP、SAMPSON各コードの能力と限界を把握しつつ、解析結果を解釈し、活用することが重要。
 - また、解析結果から有用な情報を得るためには、コードで取り扱う現象の不確かさの幅を小さくするための継続的な改善が必要

(参考)解析結果に関する東京電力の評価(1/2)

- シュラウドの損傷の可能性についての見解
 - 燃料移行経路がシュラウド側からなのか、炉心支持板側からなのかは、競争事象なので、どちらの経路に行くかの不確かさは大きい
 - 2号機では、給水系(シュラウド外側への注水)からの注水量を増加させた際に、再循環ポンプ部の圧力が上昇後、一定値をキープしたとの観測結果→これは、シュラウド外水位変化を捉えた可能性が高く、2号機のシュラウドは健全と考えられる。1,3号機については同様の観測結果は得られていない
- シェルアタックについての見解
 - 格納容器に落下する燃料は、溶融状態であるとするとうまがりやすい傾向にあることから、解析結果からは溶融燃料が格納容器シェルに到達する可能性は否定できない
→格納容器調査では、十分に調査することが必要
 - ただし、シェルアタックは燃料デブリが格納容器外に直接漏れ出すこと、格納容器にも穴が開くことを意味しているものであるが、それほどの高線量は確認されていないことや、格納容器の水位推定値からはシェルアタックを直接示唆する情報は、現時点では得られていない。

(参考)解析結果に関する東京電力の評価(2/2)

- 従来推定との相違 (SAMPSON: 1号機で全量落下なし) についての見解
 - MAAPとSAMPSONを比較すると、Zrの酸化の進み方が異なり、発熱量の少ないSAMPSONの方が炉心部に残りやすい傾向
 - 改良モデルでは、一部の燃料が空中に不自然に残る解析結果となっており、これらを落下させると、落下割合は上昇する
- 従来推定との相違 (MAAP: 2,3号機で全量落下) についての見解
 - MAAPでは、落下する場合、全量落下となりやすい傾向がある (過去の解析でも同様の傾向にあり、測定データと整合しない)
 - 制御棒案内管内に落下した燃料・制御棒は、そこで固化し移動しないことから、改良したMAAPコードでは移行経路としてモデル化していない
 - 燃料が熔融する状態であれば、SAMPSONの解析結果が示すように制御棒案内管の中、制御棒速度リミッタの上に残存している可能性が判明したことは重要な成果

東京電力が公表している炉心・格納容器状態の推定には変更は無いが、燃料支持金具内の燃料存在の可能性など、デブリ位置の推定に関し、今後の廃炉作業を考える上で有益な情報を得ることができた



©2014 The Tokyo Electric Power Company, INC. All Rights Reserved.

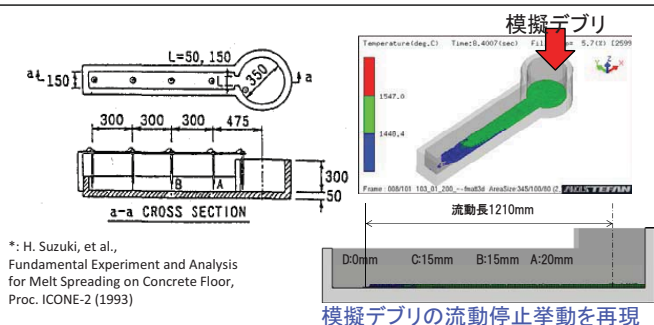
CFDによる個別事象解析

No.19

過酷事故解析コードによる事象進展解析に、3次元CFD解析を組み合わせ、デブリ位置推定、プラント挙動の評価精度を高める

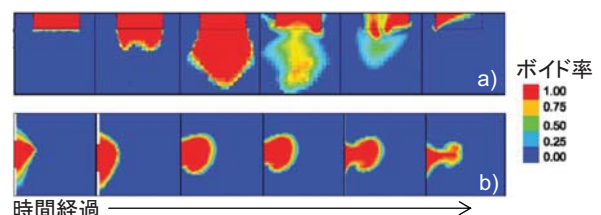
■ デブリ拡がり挙動 (日立GE)

・ 鋳造シミュレーションコード (ADSTEFAN) のデブリ拡がり試験*による検証
⇒ 1号機評価への適用性を確認



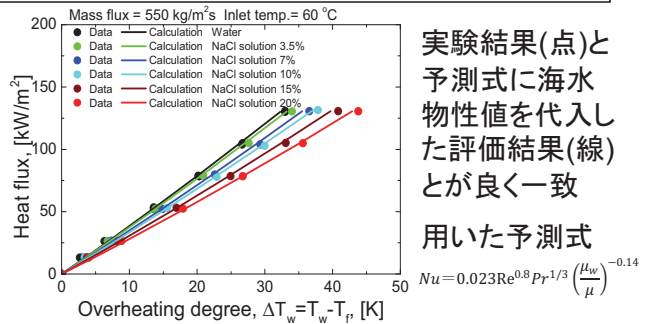
■ S/P内温度成層化及び蒸気不完全凝縮現象の評価 (エネ総工研)

号機	出口形状	解析結果
1F2		<ul style="list-style-type: none"> サブクール水中に放出された蒸気が凝縮するときに発生するチャギング現象を再現 (右図a))。 蒸気はベント管の出口で凝縮し、出口から上の温度は比較的均一になる。
1F3		<ul style="list-style-type: none"> 多数の穴が存在し、主にパイプ上部 (水面近く) で蒸気の凝縮が発生 (右図b))。 このため、蒸気放出位置より上が局所的に温度上昇する可能性がある。

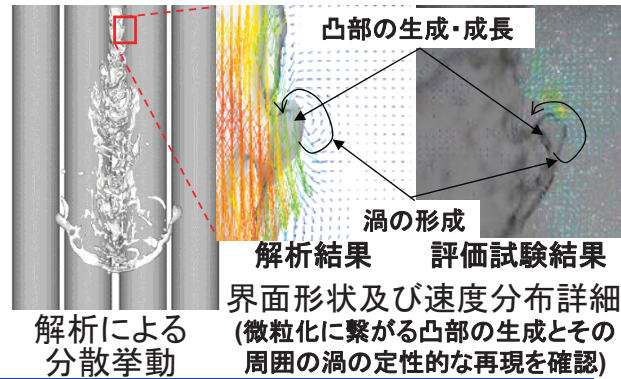


海水注入時の熱流動や溶融燃料落下挙動に関するモックアップ試験により、デブリ位置推定、プラント挙動の評価精度を高める

- 25年度は試験準備,基礎試験の実施
- 海水熱伝達評価試験
 - 健全炉心を対象に海水が熱伝達や圧力損失に与える影響を把握するための基礎データを取得
 - 沸騰の無い条件では、濃度により変化する物性値を与える事で、既存の予測式で評価可能(右上図)
- 溶融燃料落下挙動評価試験
 - BWR下部プレナムを簡易に模擬した体系で溶融燃料分散挙動に関するデータを取得し構造物の影響を検討
 - 溶融燃料が冷却材に落下する際の挙動を模擬する解析手法の開発を実施し基本モデルを作成(右下図)



実験結果(点)と予測式に海水物性値を代入した評価結果(線)とが良く一致
用いた予測式



国際協力: OECD-NEA BSAFプロジェクト

Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF)

期間: 2012年11月~2014年10月

目的: ①専門家の叡智を結集し、事象進展および炉内状況に関する知見を得る
②解析手法・解析コードの高度化に資する



参加機関:		
日本: JAEA, JNES, 電中研, エネ総工研	ドイツ: GRS	アメリカ: USNRC他
フランス: IRSN, CEA	スイス: PSI	韓国: KAERI
ロシア: ROSATOM, IBRAE		スペイン: CSN

国際プロジェクト会議*、WEBサイト (<https://fdada.info/index>) を通じた情報の共有

* 準備会議	2012年6月18日-20日	パリ (NEA本部)
• 第一回会議	2012年11月6日-8日	東京
• 第二回会議	2013年10月15日-17日	パリ (NEA本部)
• 第三回会議	2014年6月	東京
• 第四回会議 (最終)	2014年10月	パリ (NEA本部)

■他プロジェクトからのインプット

- ・他プロジェクトや、廃炉作業にて得られる原子炉・格納容器に関する情報は多くが本プロジェクトへの有力なインプットとなっている。
 - －1～3号機トールラス室調査
 - －1～3号機格納容器内温度測定
 - －1号機及び2号機の床コンクリート成分分析
 - －2号機TIP案内管健全性確認、等

■他プロジェクトへのアウトプット

- ・今年度末の解析結果を取り纏め、他プロジェクトへ情報を発信
 - 燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発プロジェクト
(アウトプット例: 燃料デブリの炉内における分散状況、炉内破損状況予測)
 - 燃料デブリ性状把握・処置技術の開発プロジェクト
(アウトプット例: 炉内に分散したデブリの性状(構成成分など))
 - 圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発プロジェクト、等
(アウトプット例: 圧力容器／格納容器の対象部位の圧力／温度履歴)

■人材育成に係る取り組み

(1) 大学・研究機関における人材育成の取り組みへの支援

- ・委託を通じた大学の活用(4件程度を予定)
- ・学会活動を通じた大学・研究機関の活用
 - 日本原子力学会「SA評価」研究専門委員会 SAMPSON分科会において、SAMPSONコードを貸与。若手研究者を中心にSA評価の研究に活用。
 - 日本原子力学会「SA評価」研究専門委員会PIRT分科会と共同作業にてPIRT作成。議論の経緯を整理することで、課題の明確化、知見の整理が図られ、今後の研究課題の選定のみならず、人材育成にも活用できる。

(2) 実施機関における取り組み

- ・現場作業及び研究開発プロジェクトを推進する上で必要な人材を計画的に育成
- ・20代・30代の若手職員を20名以上プロジェクトへ登用

■国内外叡智の活用

- ・OECD/NEA BSAFプロジェクトの実施
- ・日本原子力学会「SA評価」研究専門委員会PIRT分科会との連携
- ・シビアアクシデントに関する海外機関との情報交換