

図1 燃料域水位計の概略図

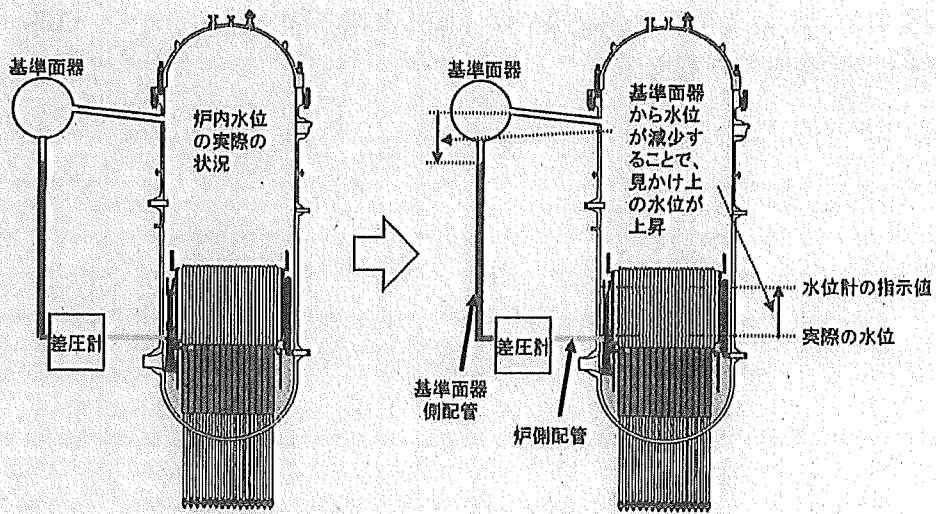


図2 計装配管内の水位低下に伴う燃料域水位計の指示値について

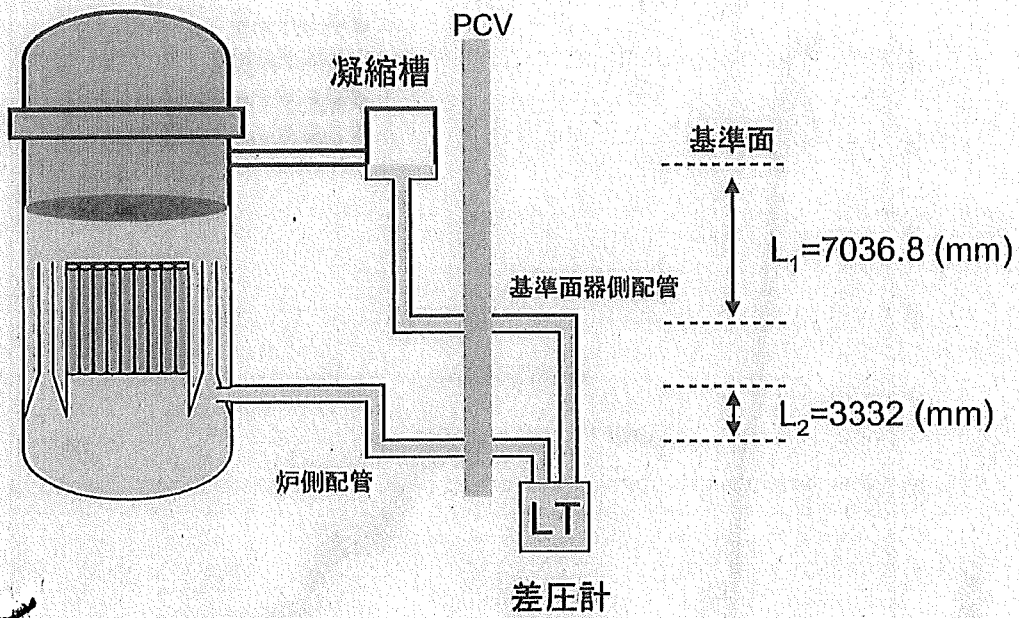


図3 燃料域水位計装配管のD/W内垂直方向長さ

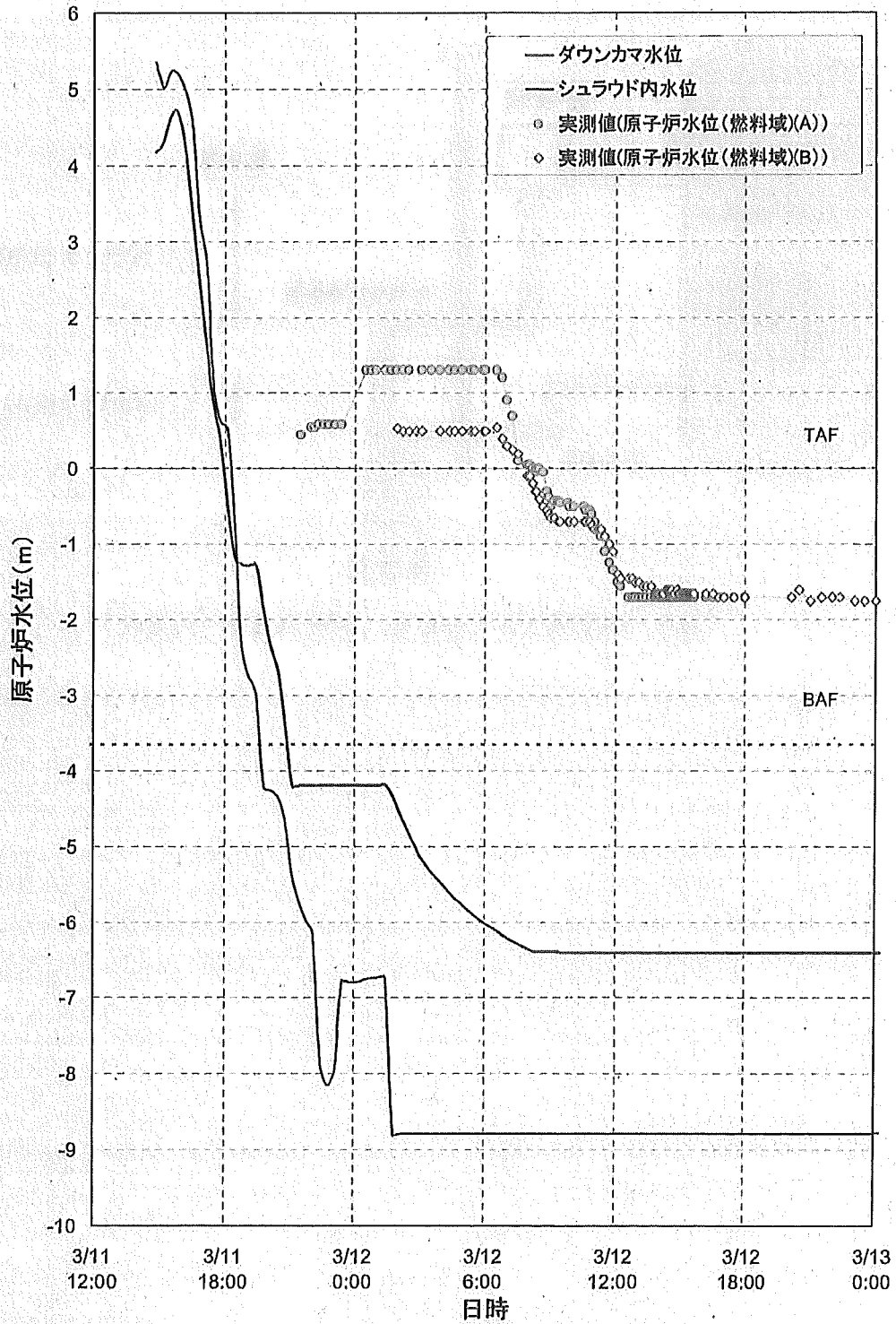


図4 燃料域水位計挙動

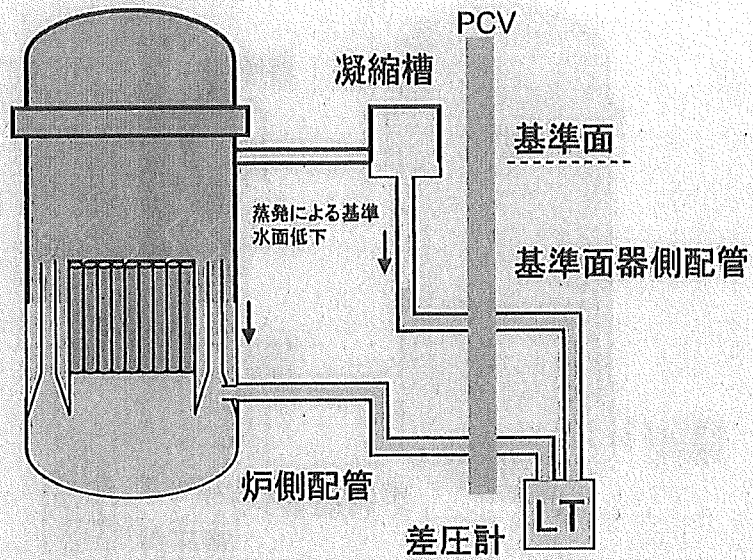


図5-1 原子炉水位および燃料域水位計挙動  
【 11日21時30分から12日0時30分頃まで 】

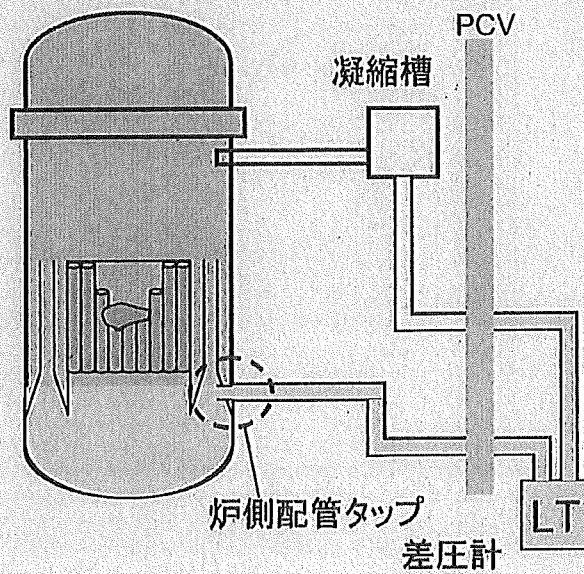


図5-2 原子炉水位および燃料域水位計挙動  
【 12日0時30分頃から6時30分頃まで 】

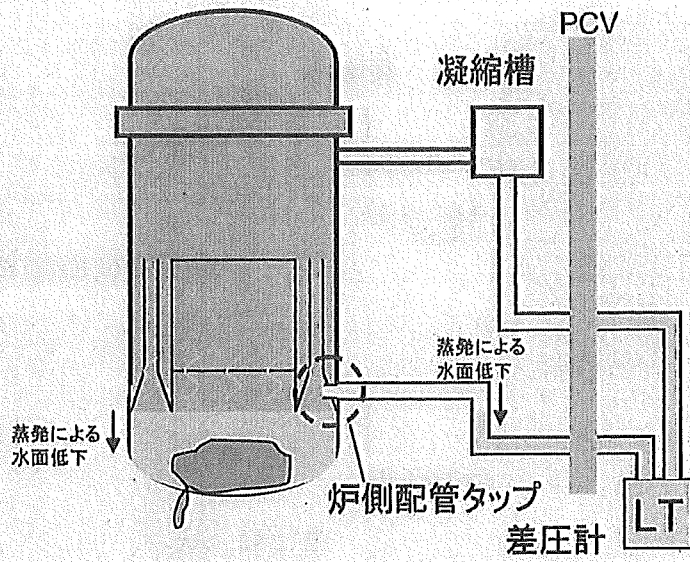
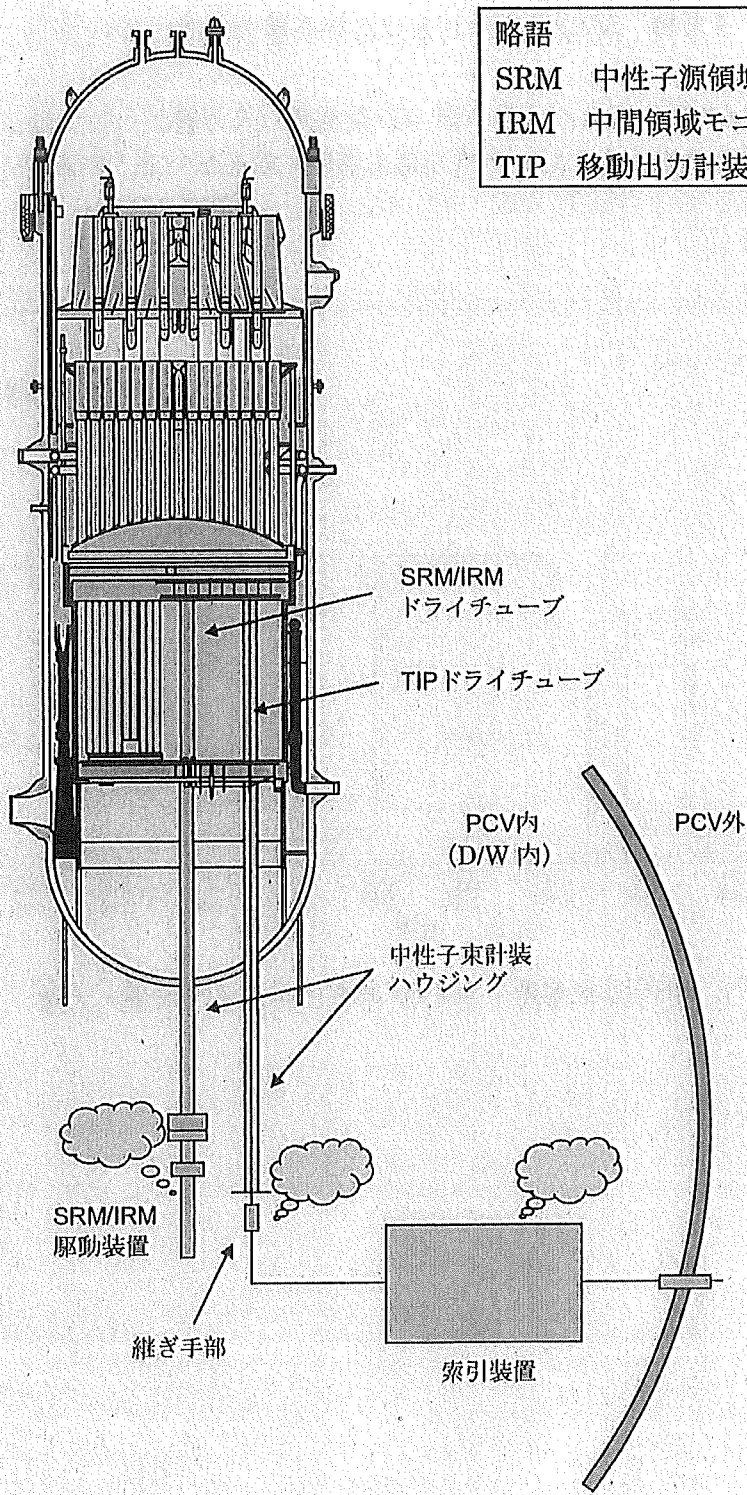


図 5 - 3 原子炉水位および燃料域水位計挙動  
【 6時 30分頃以降 】



略語  
 SRM 中性子源領域モニタ  
 IRM 中間領域モニタ  
 TIP 移動出力計装系

図6 炉内核計装からの漏えいパス

1号機 MAAP 解析における注水量の設定について

1号機 MAAP 解析における原子炉への注水量の入力値については、これまでに公表した操作実績をもとに、平均の注水流量を超えないように設定した（図1参照）。

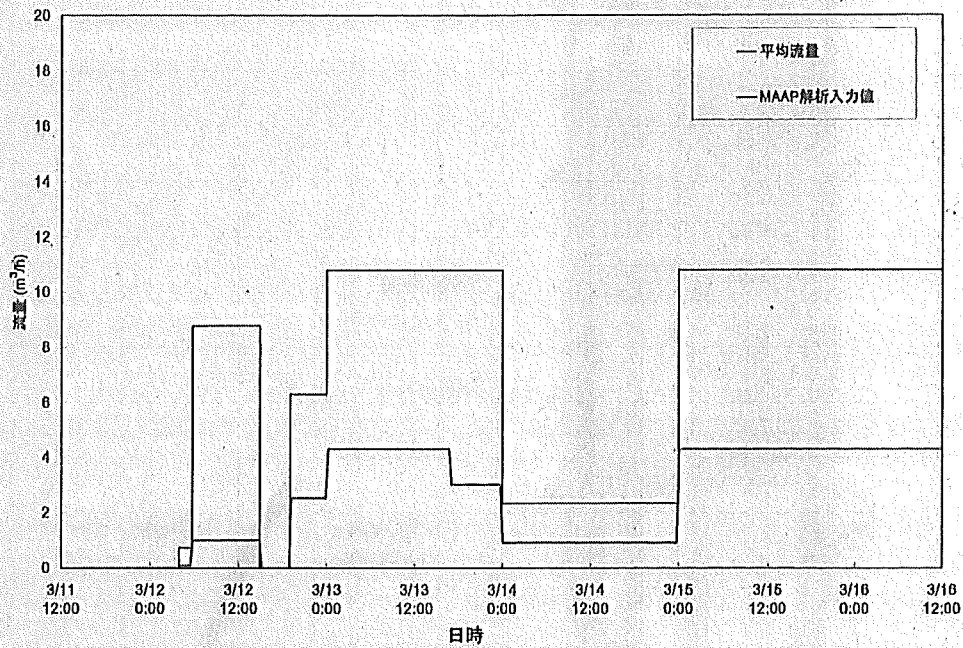


図1 平均注水流量と MAAP 解析における注水量入力値

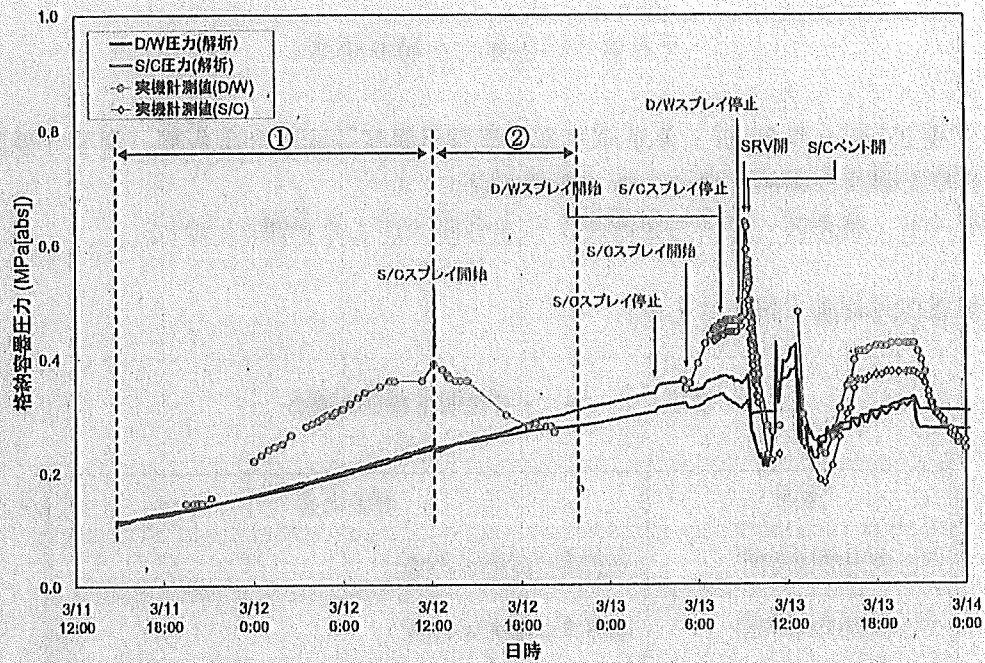


図3 3号機 格納容器圧力変化 (今回解析結果)



これまでに公表した解析結果

- 平成 23 年 5 月 23 日 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について  
別紙-1 福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心の状態について

図表番号は原典と同一とした。

表 3. 1. 3 1号機解析結果の纏め

| 項目          | 解析結果         |
|-------------|--------------|
| 炉心露出開始時間    | 地震発生後約 3 時間  |
| 炉心損傷開始時間    | 地震発生後約 4 時間  |
| 原子炉圧力容器破損時間 | 地震発生後約 15 時間 |

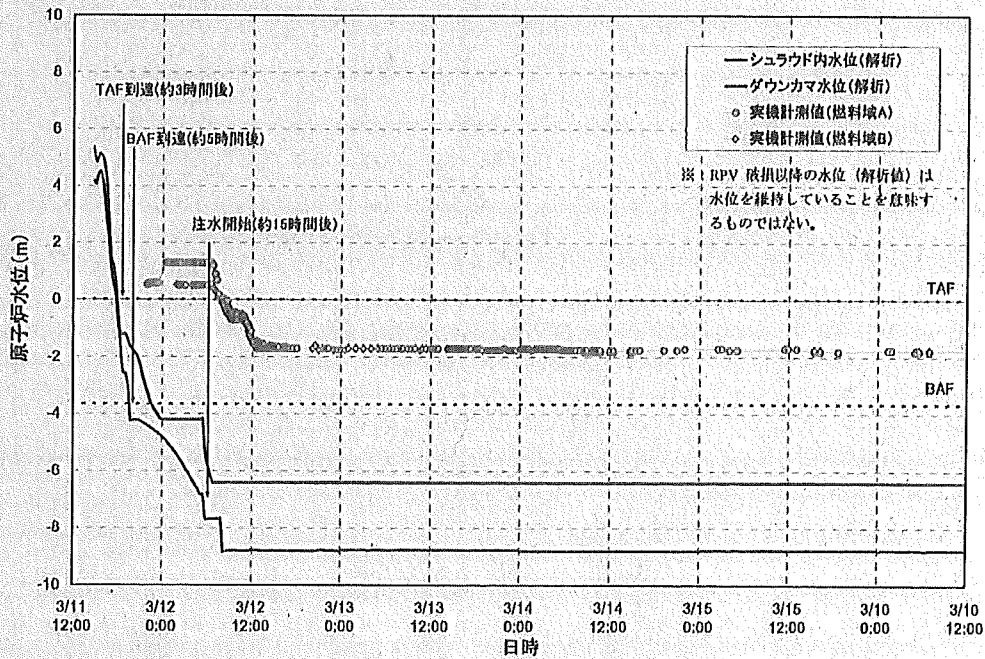


図 3. 1. 1 1号機 原子炉水位変化

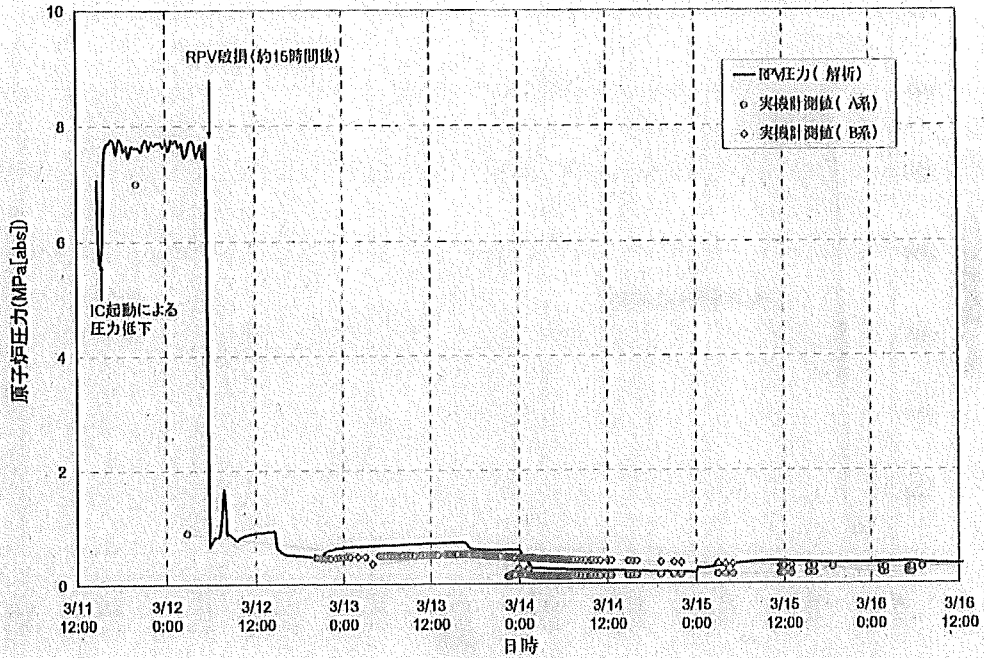


図3. 1. 2 1号機 原子炉圧力容器圧力変化

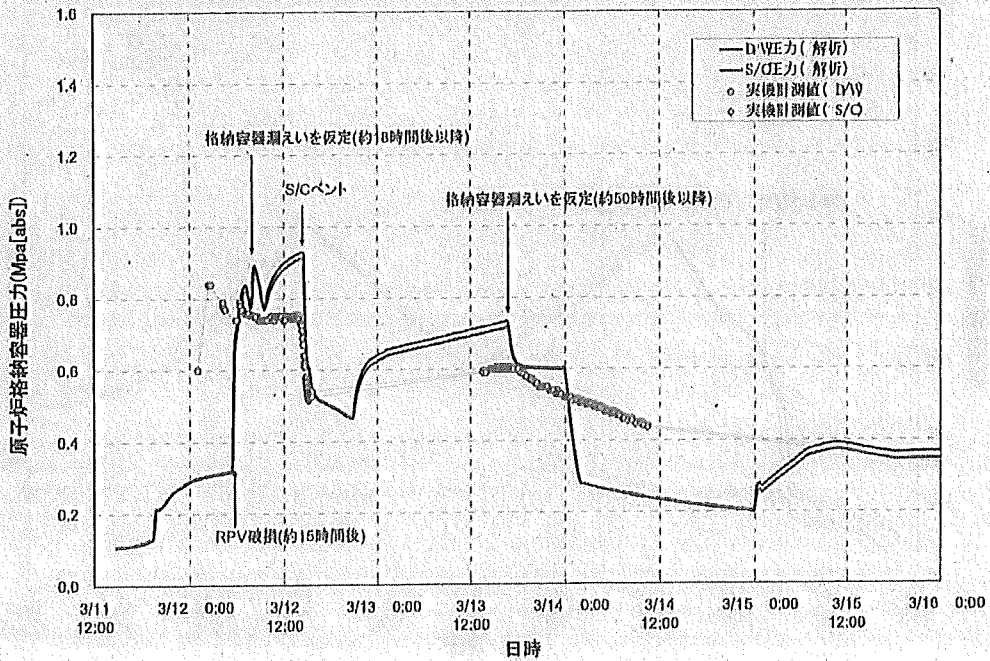


図3. 1. 3 1号機 原子炉格納容器圧力変化

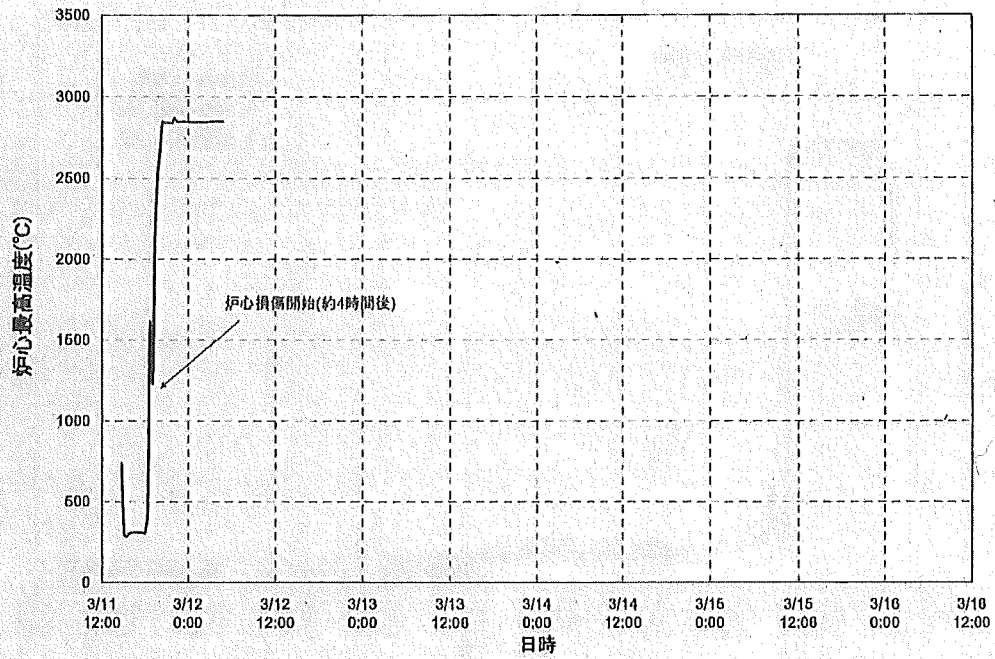


图 3. 1. 4 1号機 炉心温度变化

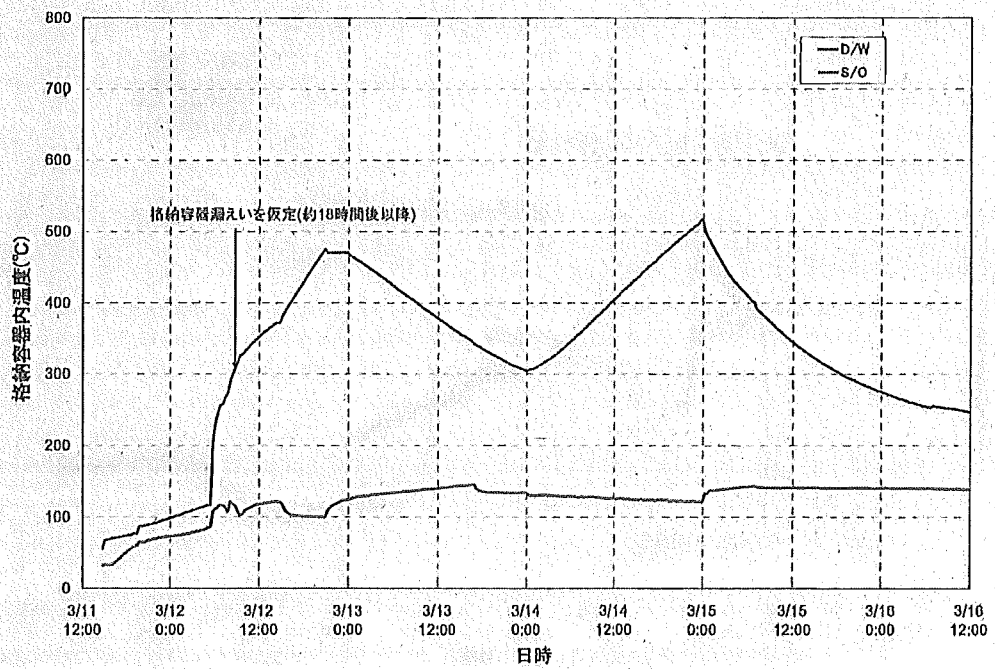


图 3. 1. 5 1号機 原子炉格納容器温度变化

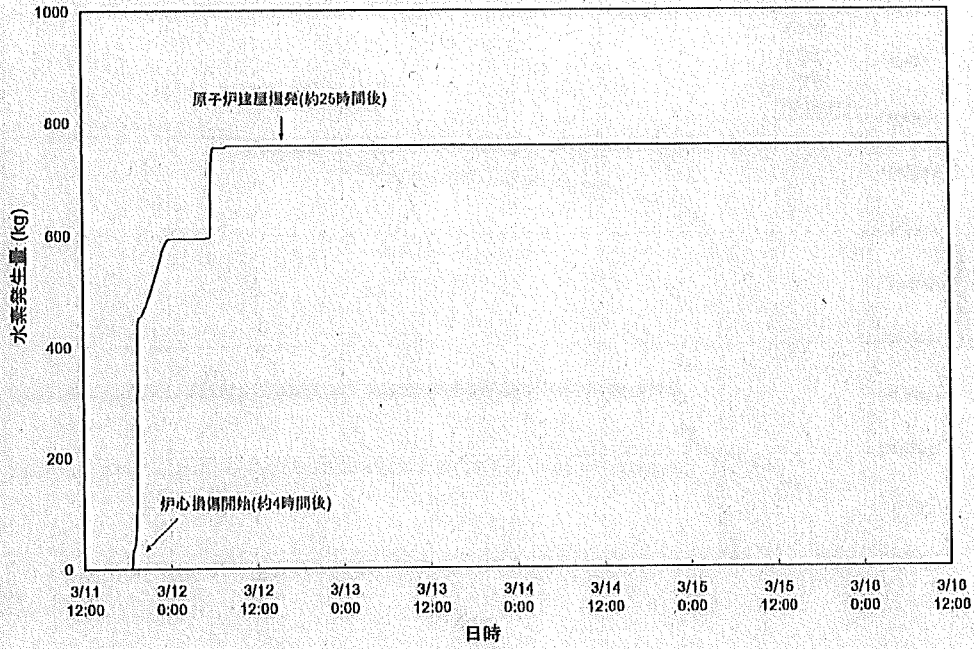


図3. 1. 6 1号機 水素発生量変化

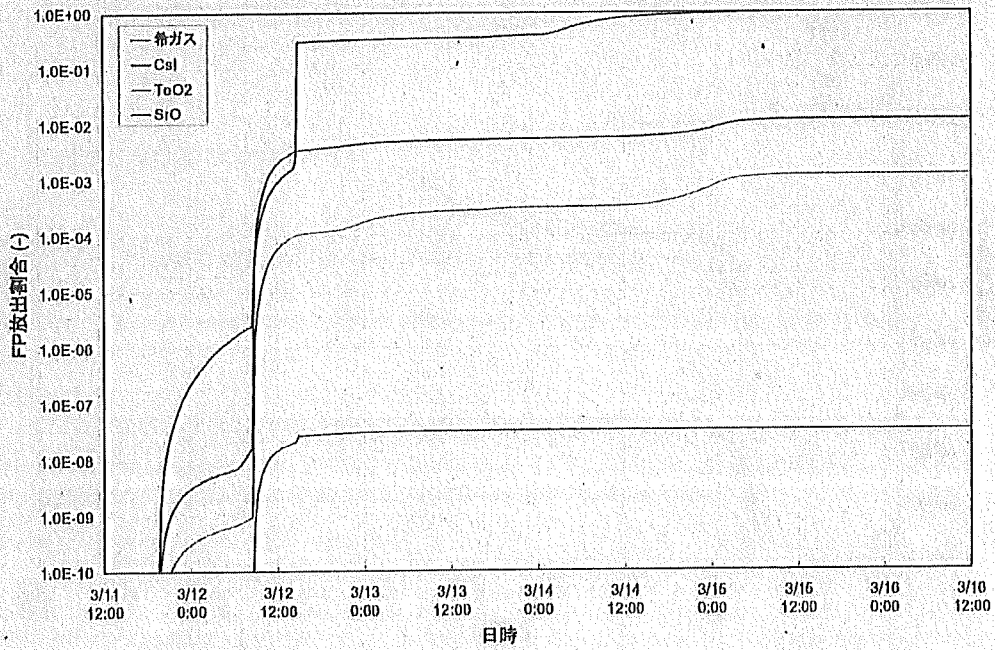


図3. 1. 7 1号機 FPの放出割合 (1/3)

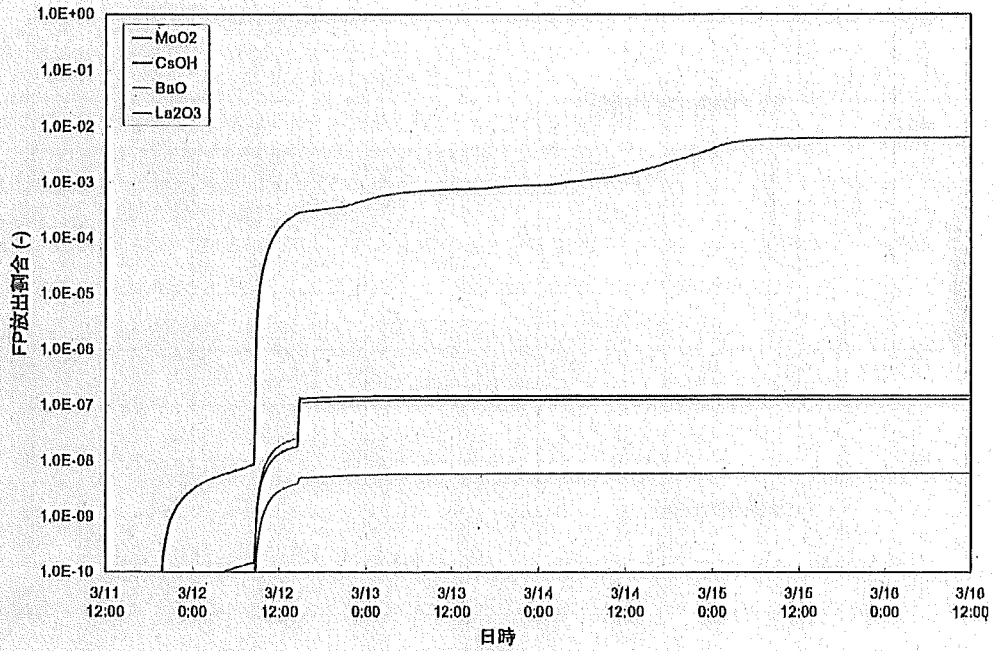


図3. 1. 7 1号機 FPの放出割合 (2 / 3)

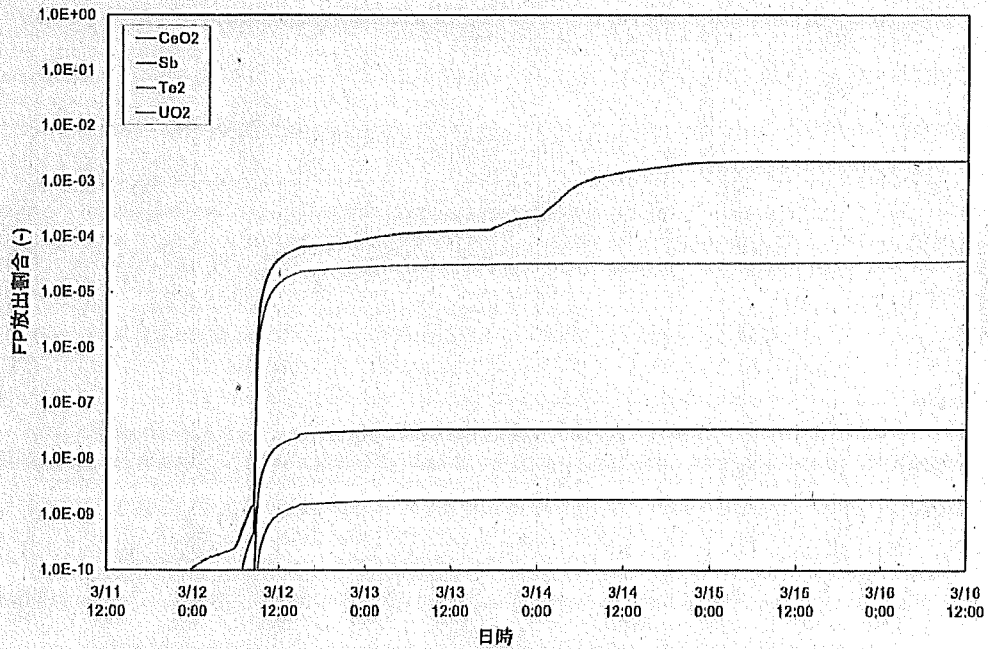


図3. 1. 7 1号機 FPの放出割合 (3 / 3)

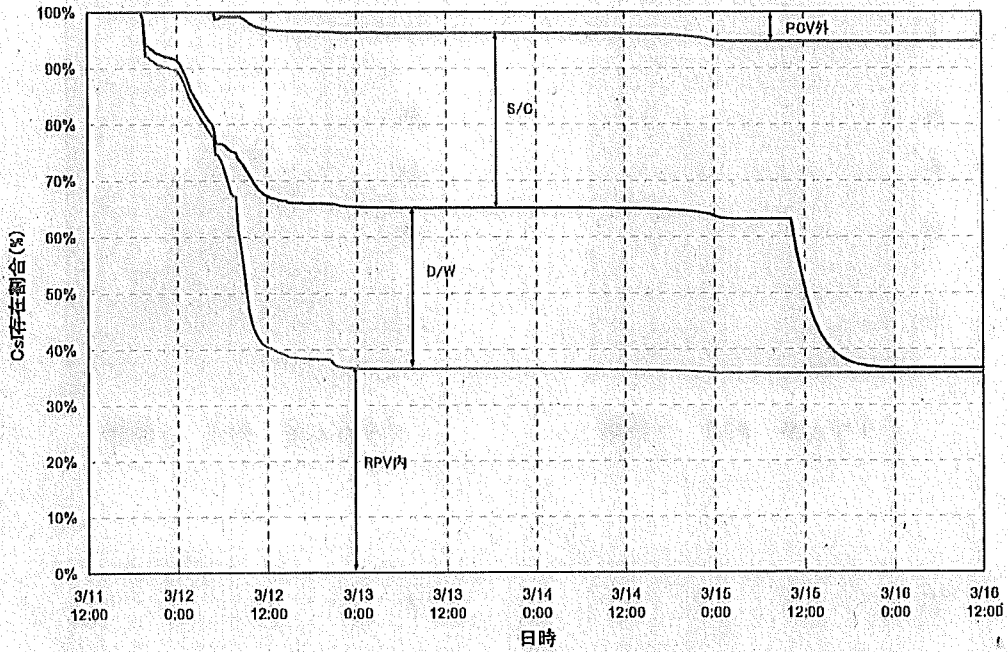


図3. 1. 8 1号機 FPの存在割合 (1/2)

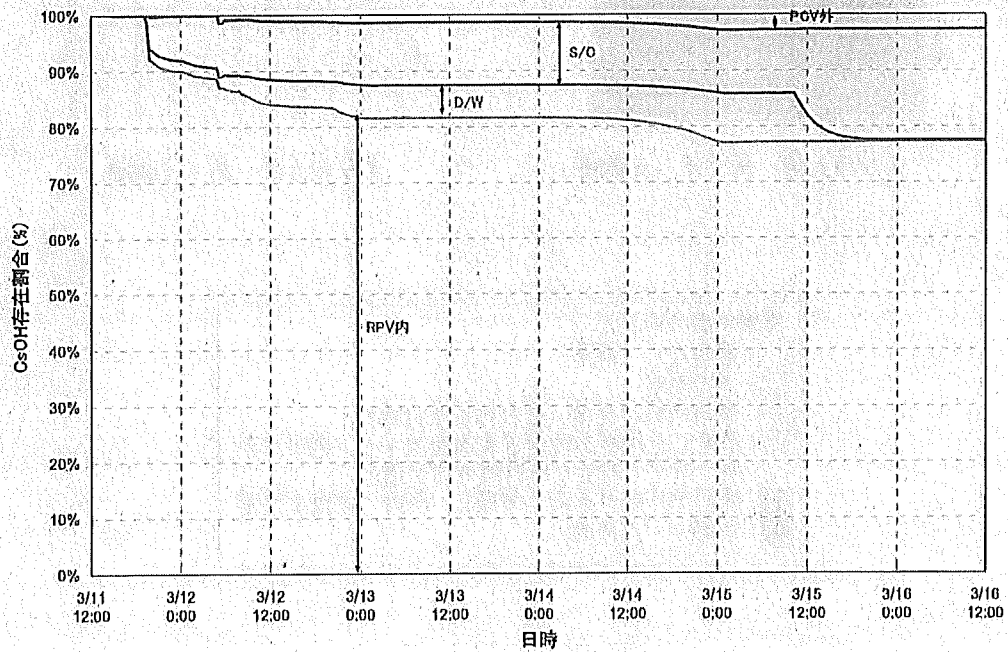
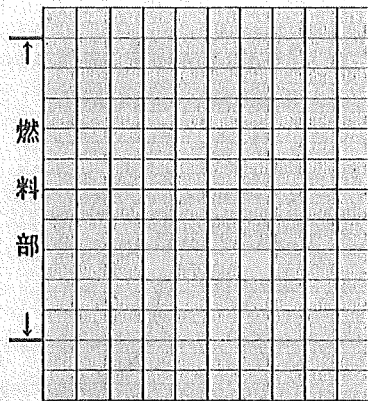
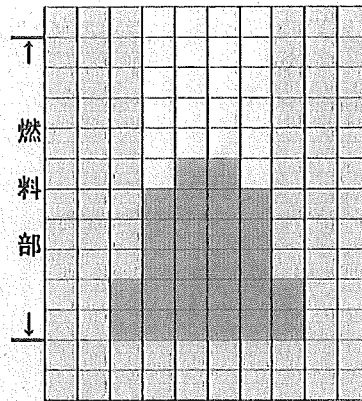


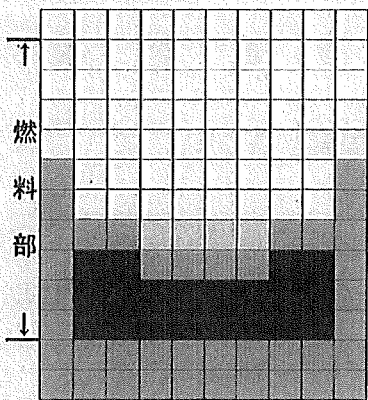
図3. 1. 8 1号機 FPの存在割合 (2/2)



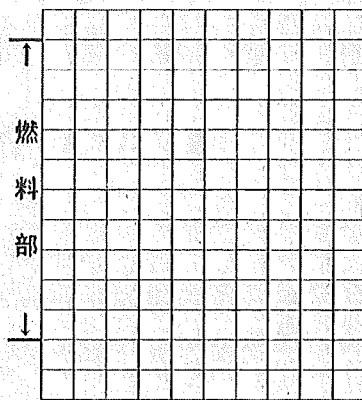
スクラム後 約4.7時間



スクラム後 約5.3時間



スクラム後 約14.3時間



スクラム後 約15時間

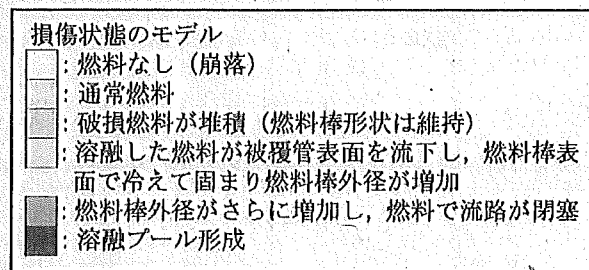


図3. 1. 9 1号機 炉心の状態図

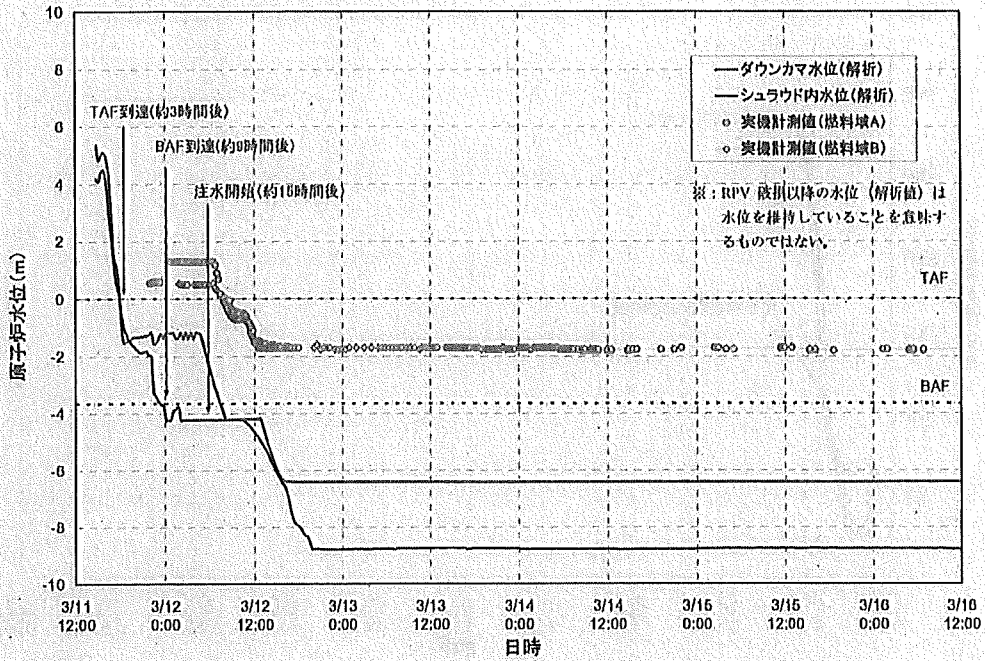


図 3. 1. 10 1号機 原子炉水位変化 (IC 継続運転)

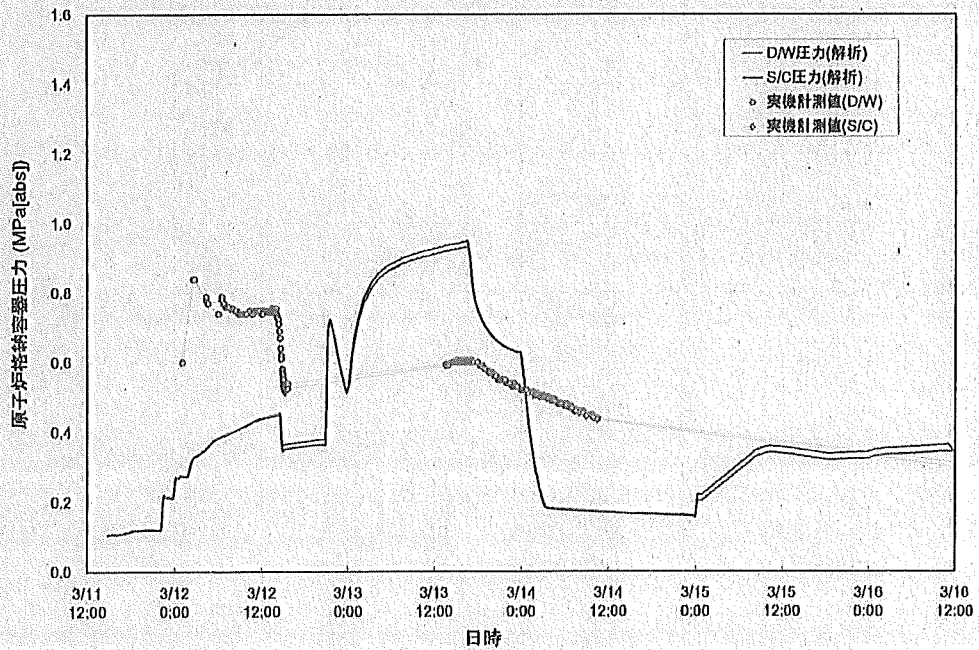


図 3. 1. 11 1号機 原子炉格納容器圧力変化 (IC 継続運転)



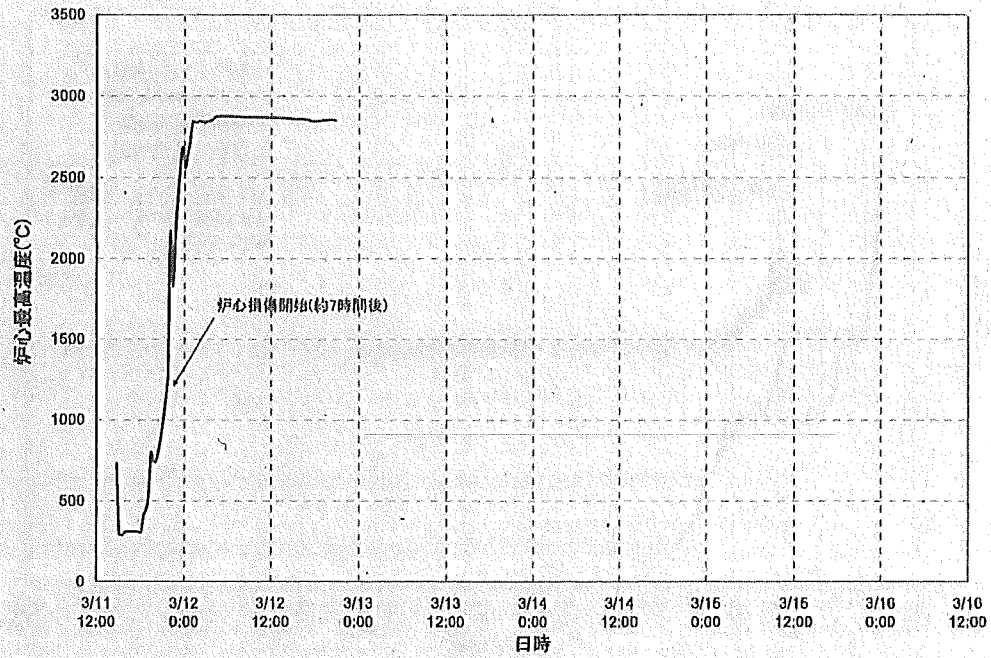


図3. 1. 1 2 1号機 炉心温度変化 (10 継続運転)



AE-OG-5501

この資料及びこの資料に添付のコンピュータ、記録紙などから出力の記録については、複写又は第三者への開示を禁止致します。

# シビアアクシデント解析コード (MAAP) の概要

2012年3月9日

日立GEニュークリア・エナジー(株)

© Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. 2012. All rights reserved.

## 目次

HITACHI



1. はじめに
2. 解析コードの概要
3. 主な解析モデルの説明
  - 3.1 原子炉冷却系内事故進展解析モデル
  - 3.2 格納容器内事故進展解析モデル
  - 3.3 放射性物質とエアロゾルの放出・移行モデル

- 原子炉施設のシビアアクシデント時のプラント挙動の模擬には、シビアアクシデント総合解析コードが活用されている。
- シビアアクシデント総合解析コードは、確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment: PSA), アクシデントマネジメント策の検討, 福島事故の評価等に適用されてきた。
- 本資料では、福島事故の評価に用いたMAAP (Modular Accident Analysis Program)の概要について説明する。

## 2. 解析コードの概要

- 解析コードの概要
  - 原子炉施設のプラント全体を模擬
  - シビアアクシデント時の事故の進展と放射性物質の放出・移行挙動を予測
  - 原子炉施設を複数の領域に分割して、それらを流路で連結し、領域の質量およびエネルギーに対して、一点集中定数近似のモデルで解析
- MAAP (Modular Accident Analysis Program)コードの経緯
  - 米国産業界 (EPRI) が開発したシビアアクシデント総合解析コード
  - 米国: NRCの要請で実施した個別プラントPSAで活用
  - 日本: PSAおよびAM策の検討で活用

参考文献 (社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的安全評価に関する実施基準(レベル1PSA編):2008」, AESJ-SG-P008:2008, 2009年3月。

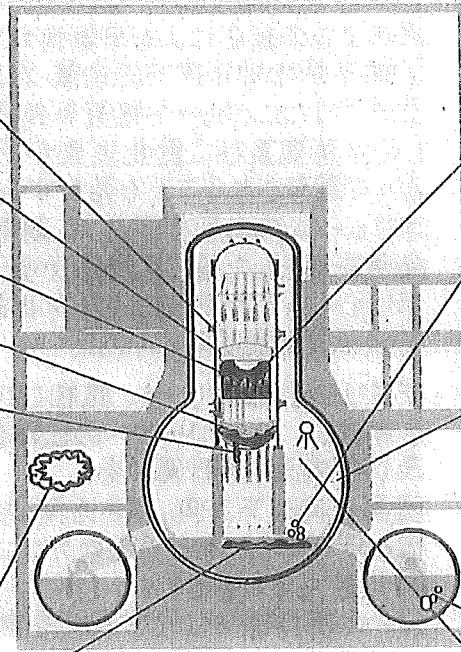
### 3. 主な解析モデルの説明

#### ● 原子炉冷却系内事故進展モデル

- 原子炉冷却系内の流動モデル
- 炉心および原子炉冷却系内の伝熱計算モデル
- 炉心の溶融落下挙動モデル
- 金属-水反応モデル
- 原子炉圧力容器破損モデル

#### ● 格納容器内事故進展解析モデル

- 可燃性ガスの燃焼モデル
- デブリ-コンクリート相互作用モデル



#### ● 放射性物質とエアロゾルの放出・移行モデル

- 原子炉圧力容器内での燃料又はデブリからの放出率
- デブリ-コンクリート相互作用時のデブリからの放出率
- 放射性物質の取扱い
- 放射性物質の形態
- エアロゾルの沈着モデル
- ガス状の放射性物質の沈着モデル
- エアロゾルの成長モデル
- プールスクラッピングモデル
- スプレイモデル

### 3.1 原子炉冷却系内事故進展解析モデル

| No. | モデル/項目                 | 説明   |
|-----|------------------------|--|
| 1   | 原子炉冷却系内の流動モデル          | エネルギー保存及び質量保存則によって圧力と流体の比体積変化を計算し、起点となるボリュームに生じた流動に対し、それぞれのボリュームの形状体積と流体体積の過不足を補うようにボリューム間の流量を計算する。それぞれのボリュームの水位は、ポイド率を考慮した液相体積から計算する。 |
| 2   | 炉心及び原子炉冷却系内の伝熱計算モデル    | 放射性物質の崩壊熱及び金属-水反応の反応熱を熱源として、燃料棒、炉内構造物、雰囲気、冷却材の相互間の熱伝達及び炉心と周囲の構造物間の輻射熱伝達を計算する。  |
| 3   | 金属-水反応モデル              | 金属-水反応の相関式(例えばZrに対してはBaker-Just式及びCathcart式)を用いて水素発生量を計算する。  |
| 4   | 炉心の溶融落下挙動モデル           | 沸騰状態や雰囲気の流れに応じた熱伝達率相関式を含む伝熱モデルにより燃料温度を計算する。燃料被覆管の破裂、共晶溶融による変化、 $UO_2$ 溶融を含む燃料の溶融モデルにより燃料の破損及び溶融を計算する。                                  |
| 5   | 原子炉圧力容器破損モデル<br>5つのモデル | ①原子炉圧力容器の貫通部(計装管又は制御棒案内管)の破損(本体、サポート部)②圧力容器下部ヘッドのクリープ破損、③デブリジェットによる侵食、④金属層による熱損傷を計算する。   |

### 3.2 格納容器内事故進展解析モデル

| No. | モデル/項目            | 説明   |
|-----|-------------------|--|
| 1   | 可燃性ガスの燃焼モデル       | 次の2つの反応による可燃性ガスの発生をモデル化する。<br>①原子炉冷却系内での金属-水反応から発生する水素。<br>②デブリ・コンクリート相互作用時にコンクリート分解で発生した水蒸気及び二酸化炭素がデブリ中の金属酸化反応によって還元されることで発生する水素及び一酸化炭素。<br>ボリュウム内の可燃性ガス、酸素及び水蒸気の濃度が判定条件を満たした場合に燃焼が起こるモデル。燃焼が生じたボリュウムでは燃焼後のガスの組成変化を考慮すると共に、燃焼熱を気相領域に付加。 |
| 2   | デブリ・コンクリート相互作用モデル | デブリからコンクリート、気相(又は液相)、構造物への伝熱を考慮し、コンクリートへの伝熱量からコンクリートの分解量及び侵食深さを計算する。<br>侵食方向は下方(深さ方向)と横方向を計算する。侵食の際にデブリ中に取り込まれたコンクリート成分(水蒸気及び非凝縮性ガスを含む)と、デブリ中に存在する多数の金属成分との間の様々な化学反応を考慮する。   |

### 3.3 放射性物質とエアロゾルの放出・移行モデル(1)

| No. | モデル/項目                    | 説明  |
|-----|---------------------------|---|
| 1   | 原子炉圧力容器内での燃料又はデブリからの放出率   | 燃料被覆管破裂時の放射性物質放出量は、燃料溶融する頃のものとは比べ無視できるとし、当時期での放出量を計算しない。被覆管破損後に更に燃料加熱時が続くと、燃料又はデブリ中の放射性物質は拡散によって燃料表面まで運ばれ、原子炉冷却系内に放出される。MAAPでは、水蒸気が燃料ペレットに進入して燃料結晶粒界が変形して放出が加速される水蒸気酸化モデル、およびアレニウス型放出率計算モデルがある。 |
| 2   | デブリ・コンクリート相互作用時のデブリからの放出率 | デブリ・コンクリート相互作用時、コンクリートの分解ガスであるH <sub>2</sub> O及びCO <sub>2</sub> がデブリ中の放射性物質を含む未酸化金属と反応して、揮発性の比較的高い放射性物質がデブリ表面からガスとして放出される。放出率は化学熱力学的平衡モデルで計算する。   |
| 3   | 放射性物質の取扱い                 | 放射性物質は、12グループにまとめて系統的に扱う。   |

### 3.3 放射性物質とエアロゾルの放出・移行モデル(2)

| No. | モデル/項目          | 説明  |
|-----|-----------------|---|
| 4   | 放射性物質の形態        | 放射性物質は放出された後、分圧と飽和蒸気圧によって、ガスとエアロゾルに分配される。ガス及びエアロゾルは、プラント内を移行する間に、雰囲気中に浮遊した状態、構造物表面へ沈着した状態、液相へ溶解した状態となる。これらの状態と状態間の遷移を全て計算する。                            |
| 5   | エアロゾルの沈着モデル     | エアロゾルは、原子炉冷却系内及び格納容器系内を移動する間に構造物表面に沈着する。エアロゾルの沈着機構として、慣性衝突、重力沈降、熱泳動、拡散泳動を考慮する。エアロゾルの粒子径分布については、凝集に伴う粒子径分布を準定常近似から決まる分布関数で計算し、それに応じた相関式からエアロゾルの沈着率を計算する。 |
| 6   | ガス状の放射性物質の沈着モデル | ガス状の放射性物質の主要な沈着機構は、凝縮・蒸発及び化学吸着であり、MAAPでは、凝縮及び蒸発を計算する。   |
| 7   | エアロゾルの成長モデル     | 放射性物質蒸気の過飽和分がすべて凝集してエアロゾルを形成すると仮定して、エアロゾルの成長率を計算する。   |

### 3.3 放射性物質とエアロゾルの放出・移行モデル(3)

| No. | モデル/項目       | 説明   |
|-----|--------------|--|
| 8   | プールスクラビングモデル | ガス状及びエアロゾル状の放射性物質がプール水中に流入すると、それらの一部はプール水中に移行するが、それぞれ除去機構が異なる。<br>①ガス状の放射性物質:ガスがプール水で凝縮し、エアロゾルとなる場合は、ガス流に入ってきた液滴による捕集を計算する。<br>②エアロゾル状の放射性物質:別途詳細解析を実施した結果(除染係数)をデータベース化しており、条件に応じて内挿することで除染係数を計算。 |
| 9   | スプレイモデル      | スプレイにより、雰囲気中に浮遊するガス状及びエアロゾル状の放射性物質が除去されるが、それぞれ除去機構が異なる。<br>①ガス状の放射性物質:格納容器内ではエアロゾルの形態が支配的であることから、ガス状放射性物質の除去は計算しない。<br>②エアロゾル状の放射性物質:拡散、慣性衝突、さえぎり及び拡散泳動を考慮した捕集の効率、液滴とエアロゾルの衝突効率を考慮し計算する。           |