

シビアアクシデント進展解析コード MELCOR

伊藤 耕悦* 森田 秀利* 清野 多美子* 浜野 明千宏*

Overview of Severe Accident Analysis Code : MELCOR

Koetsu Ito*, Hidetoshi Morita*, Tamiko Seino* and Achihiro Hamano*

軽水炉におけるシビアアクシデント解析コードの MELCOR はサンディア国立研究所が開発したソフトウェアである[1][4]。われわれはこれまで MELCOR を用いた解析を手がけてきた。本稿ではわれわれの経験に基づき MELCOR の使い方を紹介する。

Key word: 原子力安全解析、シビアアクシデント、軽水炉、計算パッケージ

1. はじめに

MELCOR (Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases) コードは、軽水炉におけるシビアアクシデント時の事故の進展を解析するシビアアクシデント (SA) 総合解析コードである[1][4]。MELCOR コードは米国 NRC (Nuclear Regulatory Commission 原子力規制委員会) がサンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories, SNL) に委託して開発した計算コードで、他の MAAP[5]コードなどと一緒にユーザーが多い解析コードの 1 つである。

本稿では、MELCOR コードの使用方法を中心とした概要を紹介する。

2. 機能および計算概要

MELCOR はシビアアクシデント現象を幅広く扱うことが可能で、炉心溶融進展やソースタームに係わる現象を解析することが可能である。また、水と水蒸気の 2 相流を扱うことができ、熱流動計算は質量および運動量、エネルギー保存式を基礎方程式としている。

MELCOR コードでは計算を“パッケージ”と呼ばれるモジュール群で計算を行っている。コントロールボリュームパッケージ (CVH) と流路経路パッケージ (FL) を主体として、炉心パッケー

ジ(COR)、放射性核種パッケージ(RN)等、複数のパッケージで構成されている。シビアアクシデントにおける主要事象と計算するパッケージの関連を表 1 に示す。

表 1 主要事象と計算パッケージの関連

主要事象	計算パッケージ
燃料破損	炉心パッケージ (COR)
炉心崩壊	
炉心落下	
下部ヘッドでの デブリ挙動	
圧力容器破損	
コア・ コンクリート反応	キャビティパッケージ (CAV)
FP 挙動	放射性核種パッケージ (RN)

CVH と FL の概念を図 1 に示す。流路経路は”出発”するコントロールボリュームから”到着”するコントロールボリュームを接続している。なお、コントロールボリュームには複数の流路を接続することができる。計算では CVH と FL のパッケージで基礎方程式を解いている。その他のパッケージについての詳細は後述する。



図 1 MELCOR 計算体系

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering

Group, AdvanceSoft Corporation

3. プログラム構成と概略の計算の流れ

図 2 に MELCOR コードの計算フローを示す。MELCOR コードは様々なパッケージ群がサブルーチン化しておりループ計算（MEXLOP）から呼ばれている[2]。

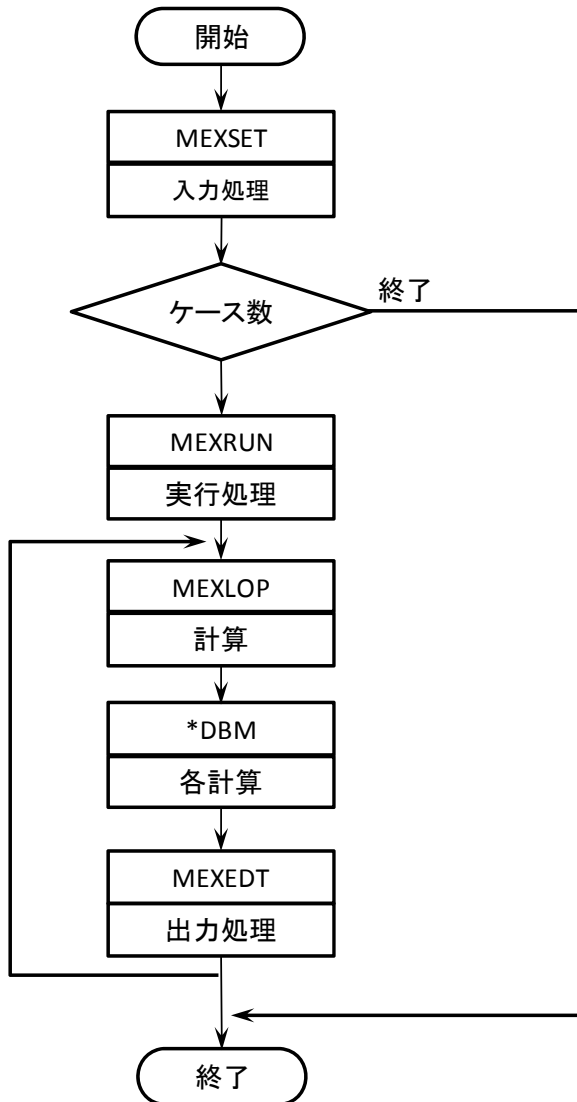


図 2 MELCOR コードの計算フロー

MELCOR コードの主要なサブルーチンとして、図 3 に過渡計算の制御を行う MEXLOP の計算フローを示す。MEXLOP ではコントロールボリューム、フローパス、熱構造材計算、熱流動計算、核計算、制御変数処理などの各パッケージの計算を行う。

図 3 には MEXLOP で計算されているパッケージ群の一部を紹介している。以下の表 2 に計算パッケージの一覧を示している。

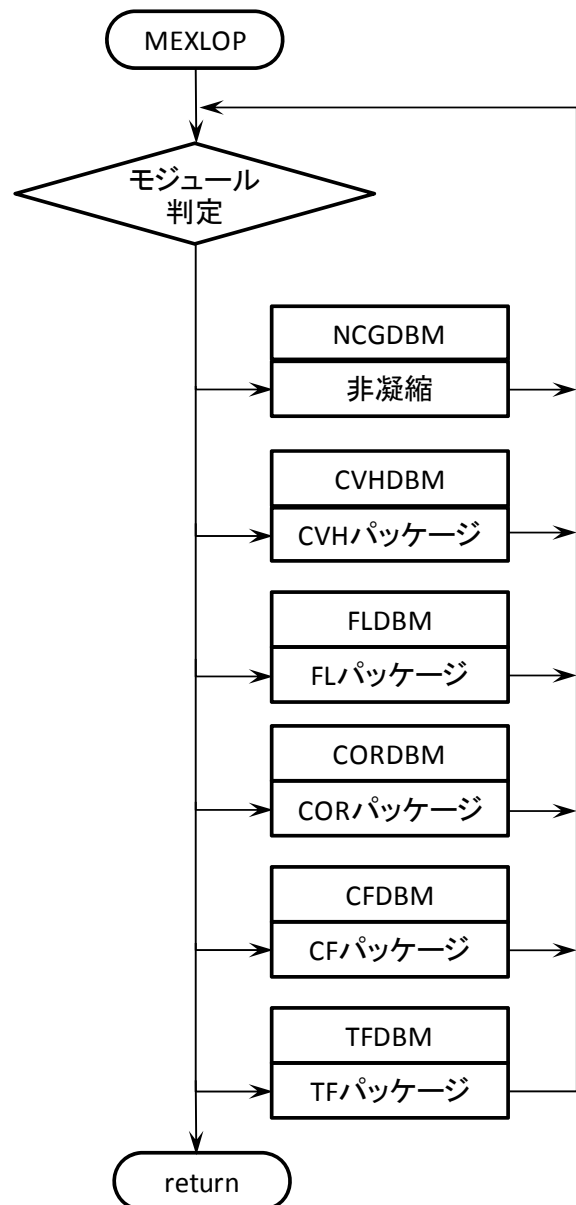


図 3 サブルーチン MEXLOP の計算フロー

表 2 計算パッケージ一覧

No.	コンポーネント (入力キーワード)	内 容
1	コントロール ボリューム (CVHDBM)	コントロールボ リュームの熱流 動計算
2	流動経路 (FLDBM)	流動経路の熱流 動計算
3	コントロール ボリューム熱伝導 (CVTDBM)	コントロールボ リュームの熱伝 導計算
4	炉心 (CORDBM)	炉心計算

No.	コンポーネント (入力キーワード)	内 容
5	コントロール ファンクション (CFDBM)	時間制御部分
6	テーブルデータ制御 (TFDBM)	テーブルデータ 制御部分
7	スプレイ (SPRDBM)	スプレイ計算
8	メッセージ (MESDBM)	計算メッセージ 情報の出力
9	蒸気表 (H2ODBM)	水の蒸気表を 計算
10	ヒートスラブ (HSDBM)	ヒートスラブ 計算
11	燃焼 (BURDBM)	燃料棒燃焼計算
12	放射 (RN*DBM)	放射量計算
13	キャビティ (CAVDBM)	キャビティ 計算

4. 入力説明

先述のように MELCOR は複数の計算パッケージで構成され、それぞれが事故現象やプログラム制御等の異なる部分の計算を担当する。ここでは MELCOR において特に重要な役割を担う CVH、FL、HS、COR、CAV、CF パッケージの入力について解説する。

4.1. CVH パッケージ

CVH(Control Volume Hydrodynamics)は水や水蒸気、ガス類の熱流動計算を行うパッケージである。原子力プラント等の解析体系はコントロールボリュームで分割し、ボリューム間を流路で接続することでモデル化されるが、この中で CVH はコントロールボリュームの定義および計算を行う。

CVH における入力データの書式は次の通りである。

CVnnnXX [データ 1] [データ 2] …

CVH の入力データには、ヘッダ(CVnnnXX)の

先頭に「CV」を記述する。「nnn」はユーザーが指定するコントロールボリューム番号、「XX」はレコード番号である。ヘッダの後には、レコード毎に必要なデータ項目を入力する。CVH パッケージの主な入力項目を表 3 に示す。また、図 4 にその入力例を示す。

表 3 CVH パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
名称	コントロールボリューム名称、 タイプ番号
幾何データ	流路面積、長さ、体積
初期条件	大気速度、プール速度、圧力、 プール高さ、プール温度等
その他条件	外部エネルギー源、質量源等

```
CV00100 'VOLUME ONE' 2 2 1
CV00101 0 0
CV00103 12.5
CV001A0 3
CV001A1 PVOL 7.0E6 ZPOL 9.5
CV001B0 0.0 0.0
CV001B1 10.0 150.0
```

図 4 CVH パッケージの入力例

4.2. FL パッケージ

FL(Flow Path)パッケージは CVH と共に水や水蒸気、ガス類の熱流動計算を行う。FL ではコントロールボリューム間を接続する流路の定義および計算が行われる。

FL における入力データの書式は次の通りである。

FLnnnXX [データ 1] [データ 2] …

FL の入力データには、ヘッダ(FLnnnXX)の先頭に「FL」を記述する。「nnn」はユーザーが指定する流路番号、「XX」はレコード番号である。ヘッダの後には、CVH と同様にレコード毎に必要なデータ項目を入力する。FL パッケージの主な入力項目を表 4 に示す。また、図 5 にその入力例を示す。

表 4 FL パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
名称	流路の名称
幾何データ	流路面積、長さ、高さ、体積、開口率
初期条件	大気速度、プール速度
その他条件	接続コントロールボリューム番号、流路の種別

FL01200 'Door' 10 20 1.0 1.0
 FL01201 2.0 1.0 1.0 2.0 2.0
 FL01202 3
 FL01203 2.0 2.0
 FL012S1 2.0 0.2 1.33

図 5 FL パッケージの入力例

4.3. HS パッケージ

HS(Heat Structure)パッケージは圧力容器壁等の熱構造材のモデル化および構造材内の熱伝導を計算する。また、熱構造材とコントロールボリュームとの間の熱伝達も計算される。

HS における入力データの書式は次の通りである。

HSCCCCCXNN [データ 1] [データ 2] …

HS の入力データには、ヘッダ (HSCCCCCXNN) の先頭に「HS」を記述する。「CCCCC」はユーザーが指定する構造材番号、「X」はレコードタイプ、「NN」は X に関するレコード番号である。ヘッダの後には、レコード毎に必要なデータ項目を入力する。HS パッケージの主な入力項目を表 5 に示す。また図 6 にその入力例を示す。

表 5 HS パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
名称	熱構造材の名称
幾何データ	分割数、形状(直方体/円柱/球/半球(上半分/下半分))、高さ、配向、材料組成

発熱	内部熱源データ、発熱分布
その他	境界流体温度、温度ノード位置、温度ノード番号、接続ボリューム番号、輻射熱伝達データ、境界面積等

HS10402000 5 5 -1
 HS10402001 'UPPER HEAD'
 HS10402002 18.53
 HS10402100 -1 1 3.226
 HS10402101 3.334 5
 HS10402200 -1
 HS10402201 CARBON-STEEL 4
 HS10402300 -1
 HS10402400 1 104 INT 0.5 0.5
 HS10402401 .75 EQUIV-BAND 3.
 HS10402500 50.59 3.226 3.226
 HS10402600 5120 205 EXT 0.5 0.5
 HS10402601 .3 EQUIV-BAND 15.
 HS10402700 54.55 3.334 3.334
 HS10402800 -1
 HS10402801 560.0 5

図 6 HS パッケージの入力例

4.4. COR パッケージ

COR(Core)パッケージは炉心および下部ヘッドを含む下部プレナムの内部構造の熱的応答を計算する。このパッケージはまた、原子炉容器の破損および原子炉キャビティへのデブリ放出を含む溶融、スランピングおよびデブリ形成の間の炉心および下部プレナム構造材料のリロケーションをモデル化する。

COR の入力データは主に①炉心および下部プレナムの一般データ②軸レベルデータ③半径リングデータ④各セルの詳細データ⑤下部ヘッドデータ⑥下部ヘッド貫通部データに分類される。

COR における炉心および下部プレナムの一般入力データの書式は次の通りである。

COR000XX [データ 1] [データ 2] …

COR の入力データ全般において、ヘッダ (COR000XX) の先頭には「COR」を記述する。「000」は一般入力データを意味し、「XX」はレコード記号である。ヘッダの後には、レコード毎に必要なデータ項目を入力する。

軸レベルの入力データの書式は次の通りである。

CORZijXX [データ 1] [データ 2] …

軸レベルの入力データには、「COR」に続けて「Z」を記述する。「ij」は軸レベル番号、「XX」はレコード番号である。

半径リングの入力データの書式は次の通りである。

CORRiiXX [データ 1] [データ 2] …

半径リングの入力データには「COR」に続けて「R」を記述する。「ii」は半径リング番号、「XX」はレコード番号である。

各セルの詳細入力データの書式は次の通りである。

CORijjXX [データ 1] [データ 2] …

ヘッダの「i」は半径リング番号、「jj」は軸レベル番号を意味する。「XX」はレコード番号である。

下部ヘッドの入力データの書式は次の通りである。

CORLHDXX [データ 1] [データ 2] …

下部ヘッドの入力データには「COR」に続けて「LHD」を記述する。「XX」はこれまでと同様にレコード番号である。

下部ヘッド貫通部に関する入力データの書式は次の通りである。

CORPENXX [データ 1] [データ 2] …

下部ヘッド貫通部の入力データには「COR」に続けて「PEN」を記述する。「XX」はこれまでと同様にレコード番号である。

COR パッケージの主な入力項目を表 6 に示す。また、COR における軸レベルデータの入力例を図 7 に示す。

```
CORZ0101 0.0 1.2954 0.0 0.3
CORZ0201 1.2954 0.9803 0.0 0.3
CORZ0301 2.2757 0.9803 0.0 0.3
CORZ0401 3.2560 0.9803 0.0 0.3
CORZ0501 4.2363 0.9803 0.0 0.3
CORZ0601 5.2166 0.2777 0.0 0.3
CORZ0701 5.4943 0.635 0.0 0.3
CORZ0801 6.1293 0.635 0.0 0.3
CORZ0901 6.7643 0.635 0.0 0.3
CORZ1001 7.3993 0.635 0.0 0.3
CORZ1101 8.0343 0.635 0.0 0.3
CORZ1201 8.6693 0.635 0.0 0.3
```

図 7 COR パッケージの入力例
(軸レベルデータ)

表 6 COR パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
炉心/下部プレナムの一般データ	半径リング数、軸レベル分割数、対応コントロールボリューム番号、下部ヘッドにおける温度ノード数、下部ヘッド貫通部の総数、燃料ペレットの外半径、燃料棒被覆管の外半径、燃料ペレットと被覆管との間のギャップ厚さ、キャニスターの厚さ、原子炉の種別、制御材の種別、デブリから貫通部構造材への熱伝達係数、デブリから下部ヘッドへの熱伝達係数、貫通部/下部ヘッドの破損温度、破損口からのデブリ放出係数
軸レベルデータ	下部境界の高さ・長さ、空孔率、外側境界の熱構造材等
半径リングデータ	上部境界の熱構造材番号等
各セルの詳細データ	セルに隣接するコントロールボリューム番号、セルに含まれる各コンポーネントの重量・初期温度・等価直径、外半径方向のセル境界面積、セルのチャンネルフロー面積等
下部ヘッドデータ	セグメント番号、下部ヘッドノードの初期温度、原子炉キャビティボリューム番号等
下部ヘッド貫通部データ	貫通部が配置される半径リング、貫通部構造材の総重量・総表面積、貫通部の初期温度

4.5. CAV パッケージ

CAV(Cavity)パッケージは溶融炉心材料と基礎コンクリートとの反応(MCCI)をモデル化する。この計算には熱伝達の影響、コンクリートのアブレーション、キャビティ形状の変化およびガス生成が含まれる。

CAV における入力データの書式は次の通りである。

CAVnnXX [データ 1] [データ 2] ...

CAV の入力データには、ヘッダ(CAVnnnXX)の先頭に「CAV」を記述する。「nn」はユーザーが指定するキャビティ番号、「XX」はレコード記号を意味する。ヘッダの後には、レコード毎に必要なデータ項目を入力する。CAV パッケージの主な入力項目を表 7 に示す。また図 8 にその入力例を示す。

表 7 CAV パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
名称	キャビティの名称
幾何データ	トップエッジの Z 座標、 円筒形の有効半径、 円筒形状キャビティの高さ、 キャビティの角の半径、 コンクリートの外部半径、 キャビティの底の厚さ、 平底を定義する点の数、 角を定義する点の数
その他	関連付けられる CV 番号、 コンクリート種別、 崩壊熱制御の指定、 外部の移動プロセス番号、

```
CAV0100 201 'CAVITY 1'
CAV01C0 CORCON 2
CAV01C2 FE 0.135
CAV01G0 CORCON 2
CAV01G1 95 0.0 0.5
CAV01G2 0.0 3.0 5.0 0.1 4.0 2.0 10 10
CAV01TP 102 * RN will use TP 602
CAV01Y1 EMISS.MET 0.7
```

図 8 CAV パッケージの入力例

4.6. CF パッケージ

CF(Control Function)パッケージは MELCOR コードにおいて種々の制御関数の定義を行う。CF の入力データはほぼ全ての計算パッケージでさまざまな形で利用される。

CF における入力データの書式は次の通りである。

CFn...nXX [データ 1] [データ 2] ...

CF の入力データには、ヘッダ(CFn...nXX)の先頭に「CF」を記述する。「n...n」は制御関数番号、「XX」はレコード番号を意味する。ヘッダの後には、レコード毎に必要なデータ項目を入力する。CF パッケージの主な入力項目を表 8 に示す。また、図 9 にその入力例を示す。

表 8 CF パッケージの主な入力データ項目

分 類	データ項目
定義	変数名、種別、引数の数、 スケール乗数、付加定数、 初期値
和・差・積・商	係数・変数名・番号の組
トリップ	係数・変数名・番号、 設定値の組
論理	係数・変数名・番号の組

```
CF00100 PI EQUALS 1 0.0 3.1416
CF00110 1.0 0.0 TIME
CF00100 PI EQUALS 1 1.0
CF00110 0.0 3.1416 TIME
```

図 9 CF パッケージの入力例

4.7. その他の計算パッケージ

MELCOR コードにはその他にも BUR、DCH、MP、RN、SPR 等、さまざまな計算パッケージが含まれている。これらの入力の詳細についてはマニュアルを参照されたい[1]。

5. 実行方法

5.1. 操作方法

MELCOR コードは、入力データのチェックを行う MELGEN と、実際に計算を行う MELCOR

コードの2つのパートで構成されている。ここでは Windows 環境で MELCOR コードを使用する場合について説明する。

まず、MELGEN による入力チェックを行う。コマンドプロンプト画面に次のように入力する。

C:\>MELGEN.exe [入力ファイル名]

入力データに問題がない場合、次のメッセージが出力される。

Restart written TIME= 0.00000E+00 CYCLE= 0

また、MELGEN の実行後、①ダイアログファイル(MEGDIA)、②結果出力ファイル(MEGOUT)、③リスタートファイル(MELRST)の3種類のファイルが作成される(ファイル名は任意の名前に変更可能)。この中で、MELRST ファイルがその後の MELCOR コードを実行する上で必要となる。

次に、コマンドプロンプト画面に次のように入力して MELCOR コードを実行する。

C:\>MELCOR.exe [入力ファイル名]

MELCOR コードが正常に実行されると、新たに①結果出力ファイル(MELOUT)、②メッセージファイル(MELMES)、③ダイアログファイル(MELDIA)が出力される。④プロットファイル(MELPTF)の4種類のファイルが作成されるとともに、MELRST ファイルが更新される(ファイル名は任意の名前に変更可能)。

5.2. 結果の確認方法

全てのプロット変数の値は MELPTF ファイルに書き込まれている。ユーザーは MELCOR コード専用の結果抽出プログラム HISPLT か、その他のグラフィック後処理プログラムを使用して MELPTF のデータを読み取る。読み取った出力結果は作図プログラム(Excel など)を使用してグラフにする。

5.3. 異常終了時の対応

MELGEN の実行時に入力データに異常がある

場合、次のエラーメッセージがコマンドプロンプト画面に出力される。

ABORT - FATAL ERROR DETECTED IN MELGEN

エラーの詳細は MEGDIA ファイルに出力されている。ユーザーはそのファイルに書かれている内容を手掛かりに入力データの誤りを修正する。

MELCOR コードの実行中に計算エラーが生じた場合、次のエラーメッセージがコマンドプロンプト画面に出力され、計算が強制終了する。

Calculation terminated by : (エラー原因)

エラーの詳細は MELOUT ファイルに出力されている。エラーの原因はさまざまであるが、その多くが最大タイムステップ幅を修正(エラー時よりも小さくする)することで解消される。しかしながら、タイムステップ幅をあまりにも小さくすると計算時間が膨大になってしまうため、注意が必要である。タイムステップ幅を調整してもエラーが解消されない場合は入力データを見直す等の方法をとる。

6. 使用例

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による地震動と津波の影響により、福島第一原子力発電所において炉心溶融および建屋爆発の重大事故が発生した。この事故について、原子力規制委員会(旧独立行政法人原子力安全基盤機構)により MELCOR ver.1.8.5 を用いたシビアアクシデント解析が行われた[3]。1号機の解析モデルを図12に示す。図10に1号機の炉心圧力と水位の解析結果を示す。また、図11に1号機のドライウェル圧力の解析結果を示す。

7. おわりに

軽水炉におけるシビアアクシデント総合解析コード MELCOR の使用方法を中心とした概要およびを解説した。また、MELCOR コードの使用例として福島第一原子力発電所1号機の事故解析を紹介した。

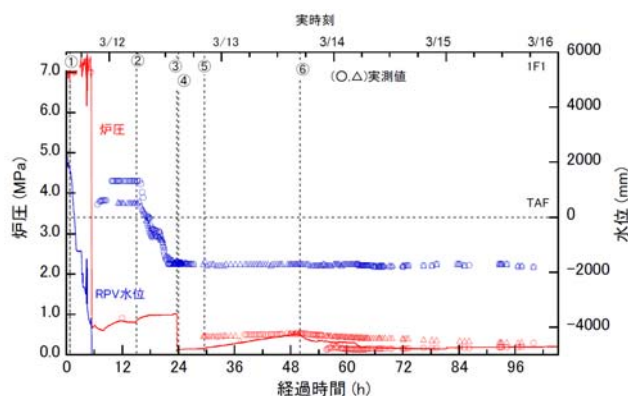


図 10 1号機の炉心圧力・水位

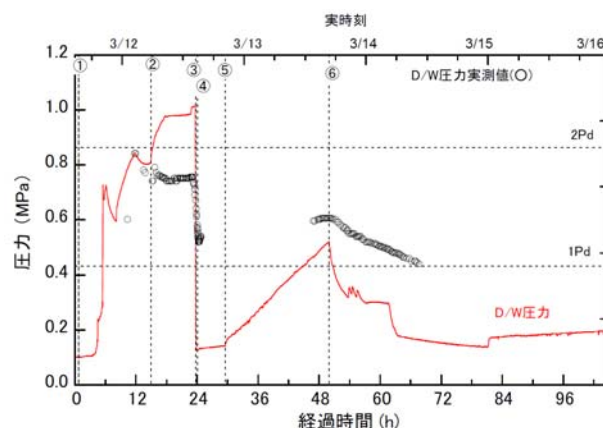


図 11 1号機のドライウェル圧力

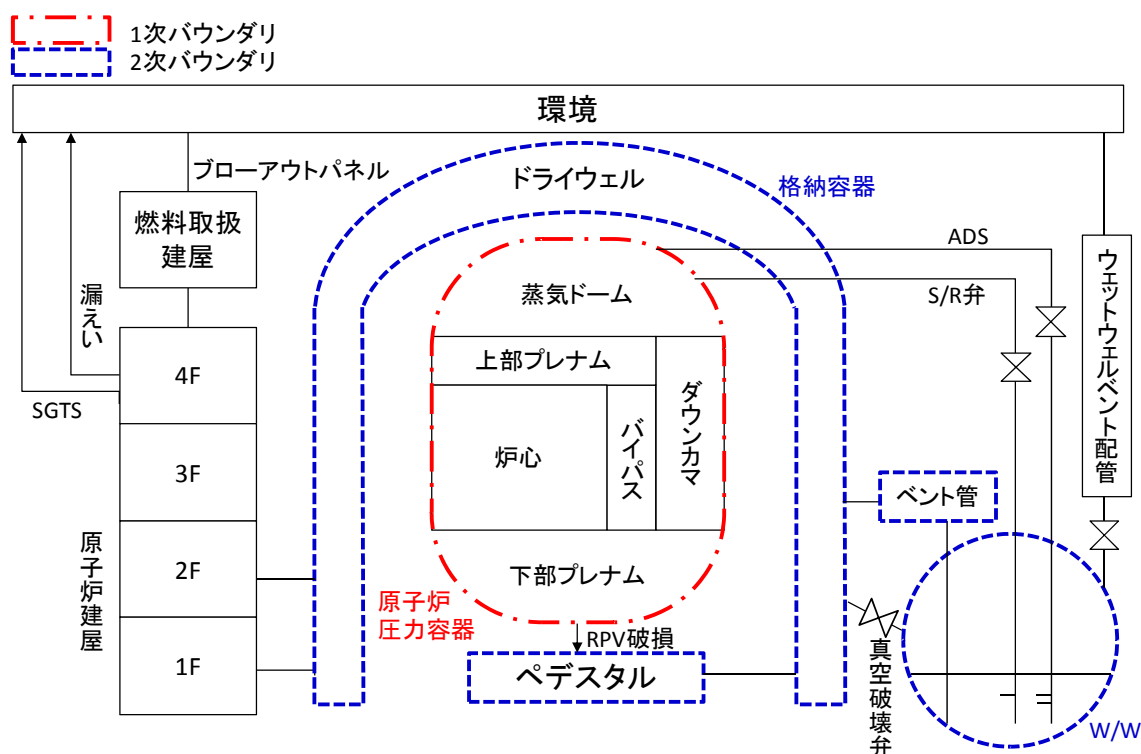


図 12 福島第一原子力発電所 1号機の解析モデル

参考文献

- [1] "MELCOR Computer Code Manuals Vol. 1: Primer and User's Guide Version 1.8.6", NUREG/CR-6119, Sandia National Laboratories (September 2005)
- [2] "MELCOR Computer Code Manuals Vol. 2: Reference Manuals Version 1.8.6", NUREG/CR-6119, Sandia National Laboratories (September 2005)
- [3] 原子力規制委員会「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故に係る 1号機、2号機および 3号機の炉心の状態に関する評価」2011年 11月 30日
- [4] <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingika/i/700/12/001/1-6-1.pdf>
- [5] <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0101/ML010120463.html>
- [6] <http://www.fauske.com/nuclear/maap-modular-accident-analysis-program>

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)