

シビアアクシデント解析コードIMPACT/SAMPSON

浜野 明千宏* 栗山 剛祐* 森田 秀利* 伊藤 耕悦* 三橋 利玄**

Overview of Severe Accident Analysis Code : IMPACT/SAMPSON

Achihiro Hamano*, Kousuke Kuriyama*, Hidetoshi Morita*, Koetsu Ito*
and Toshiharu Mitsuhashi**

軽水炉プラントのシビアアクシデント解析システム IMPACT/SAMPSON は、財団法人エネルギー総合工学研究所が所有しているソフトウェアである[1]。われわれは IMPACT/SAMPSON を用いた解析に携わってきた。本稿では、IMPACT/SAMPSON の概要理解を目的として、コードマニュアルの概要をベースに、われわれの経験も反映して紹介する。

Key word:原子力安全解析、シビアアクシデント、軽水炉、解析モジュール

1. はじめに

IMPACT[1] (Integrated Modular Plant Analysis with Computer Technologies) は、平成 5 年度から平成 14 年度にかけて旧通商産業省・経済産業省の委託事業の中で旧財団法人原子力発電技術機構が開発し、現在、財団法人エネルギー総合工学研究所が所有しているソフトウェアであり、軽水炉プラントの定常運転からシビアアクシデントに至る種々の事象を対象としたコードの総称である。

IMPACT/SAMPSON (Severe Accident Analysis Code with Mechanistic, Parallelized Simulations Oriented towards Nuclear Fields) はシビアアクシデントの総合解析コードであり、財団法人エネルギー総合工学研究所では、福島第一発電所の事故推移の解明にも IMPACT/SAMPSON による全電源喪失後のプラント挙動解析を実施している[2]。

2. 解析機能の概要

IMPACT/SAMPSON (以下、単に SAMPSON と
*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

**アドバンスソフト株式会社 専務取締役 技師長
Senior Managing Director and Chief Engineer,
AdvanceSoft Corporation

もいう) には、次のような解析機能が組み込まれている。

(1)原子炉容器内熱水力学解析

米国 NRC の RELAP5 をベースとした解析モデルである。(RELAP5 に関しては、本誌 p.13 を参照されたい)

(2)燃料棒ヒートアップ挙動解析

燃料ペレット・ギャップ・被覆管を考慮した 2 次元 $r-z$ 熱伝導モデルを基礎式とし、応力解析に基づく被覆管の膨張・破裂モデル、 Zr - 水反応モデル、被覆管の脆化破損モデル、ジルカロイと酸化ウランの共晶反応モデルおよび被覆管の溶融破損モデルを組み合わせている。

(3)燃料内 FP 放出挙動解析

燃料からの核分裂生成物 (FP: Fission Products) 放出モデル (二酸化ウラン結晶粒内の原子状 FP と FP 気泡の拡散および温度勾配に起因する移動を定式化)、燃料/被覆管ギャップ内移行モデル (粒界に移動した FP が気泡を生成して蓄積され、所定濃度に達するとギャップに放出)、デブリベッドからの FP 放出、溶融プールからの FP 放出等の解析モデルである。

(4)原子炉冷却系内 FP 移行挙動解析

ガス状成分・エアロゾル成分の FP の移行について、旧財団法人原子力発電技術機構で開発された FP 輸送解析コード MACRES[4]で解析する。MACRES は、幾何学的なデータ、熱水力条件、燃料から放された放射性物質の質量を入力として、ソースターム研究に基づいた物理的および化学的モデルに基づき、16 のガス種 (I、I₂、HI、HOI、Cs、CsI、CsOH、Te、Te₂、H₂Te、Ag、In、Cd、Sn、SnTe と Zr) と 9 つの凝縮相 (CsI、CsOH、Te₂、Ag、In、Cd、Sn、SnTe と Zr) の進展を求める。

(5)溶融炉心移動挙動解析

溶融燃料、溶融被覆管、溶融制御棒、構造物、水および蒸気、FP ガス、He、水素等の成分について、気相、液相、固相の質量、運動量、エネルギーの保存則と相間および成分間の相互作用モデルにより解析する。各相の保存方程式は、物理量の移流項に CIP (Cubic-Interpolated Propagation) 法を採用している。

(6)デブリの拡がり、冷却挙動解析

床面上の溶融物拡がり、2 次元 $x-y$ でデブリ堆積高さを考慮した擬似 3 次元体系で質量、運動量およびエネルギー保存則を差分化し、陽解法により解く。溶融物の先端位置の把握には VOF 法を用いている。デブリ自然循環冷却は、軸対称 2 次元の円筒座標系での質量・運動量・エネルギー保存則を基礎式にし、ブジネスク近似により浮力を模擬している。計算された比エンタルピーから各点の温度と固相率を求め、固相率により流動を停止している。伝熱に関し、クラストと原子炉容器壁のギャップ熱伝達モデル、クラストの亀裂による冷却モデル、デブリベッドモデル等が組み込まれている。原子炉容器壁温度分布を 3 次元の熱伝導方程式で解き、原子炉容器壁のクリープ破損、貫通配管溶融破損をモデル化している。

(7)格納容器内熱水力挙動解析(CVPA)

格納容器内をいくつかのセルに分割し、雰囲気空

間とそれらを囲む構造物 (壁、床、天井) でモデル化する。セル間は流路パスで連結する。

流動計算は、集中定数モデル (ノード・ジャンクションモデル) を用いている。各タイムステップにおいて、運動量保存則のうち圧力損失項を陰的に取り扱って流量を求め、得られた流量から質量保存則とエネルギー保存則に基づいてセルの圧力を求める。ただし、圧力と流量の数値的振動を避けるため、タイムステップ内で圧力と流量が収束するまで反復計算する。セル内雰囲気温度と圧力も、質量保存則とエネルギー保存則に基づき、反復法で計算する。

構造物は平板形状でモデル化し、表面への熱伝達を境界として 1 次元熱伝導方程式を解いている。

このほか、燃焼、格納容器破損・ベント、工学的安全設備 (ファンクーラー、スプレイ、サプレッションプール)、水蒸気爆発トリガリングに関する解析モデルが組み込まれている。

(8)デブリ・コンクリート反応挙動解析

デブリ (組成) 均質モデルとコンクリート浸食モデルを基本とする。コンクリート浸食モデルは、床面と横面を平面 2 次元で分割した格子を独立に厚み方向 1 次元で浸食計算するモデルである。

3. プログラム構成と概略の計算の流れ

SAMPSON コードのうち、シビアアクシデント解析の対象となるモジュールは、解析制御モジュール (ACM) と、以下に示す 10 個の解析モジュールである。各解析モジュールの対象範囲は図 1 に示した通りである。

- ・溶融前熱水力挙動解析モジュール(THA1)
- ・溶融後熱水力挙動解析モジュール(THA2。プログラムは THA1 と同一)
- ・燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール (FRHA)
- ・溶融炉心移動挙動解析モジュール(MCRA)
- ・下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール (DCA)
- ・燃料内 FP 放出挙動解析モジュール(FPRA)

- ・FP移行挙動解析モジュール (FPTA)
- ・格納容器内熱水力挙動解析モジュール(CVPA)
- ・デブリ拡がり挙動解析モジュール(DSA)
- ・デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール (DCRA)

表1に、事象進展に伴う解析モジュールの組み合わせを示す。解析モジュールの関係を図2に示す。解析モジュールは解析制御モジュールACMのサブ

ルーチンとなっている、表1に示した事象の進展に従って必要となる解析モジュールをACMが時間ステップごとに呼び出す。解析モジュール間では、時々刻々の状態量を共通変数によってやりとりし、互いにフィードバックしている。また、燃料棒破損などの主要な事象（イベント）は、担当する解析モジュールで判定されるとACMにデータが渡され、ACMがとりまとめる仕組みとなっている。

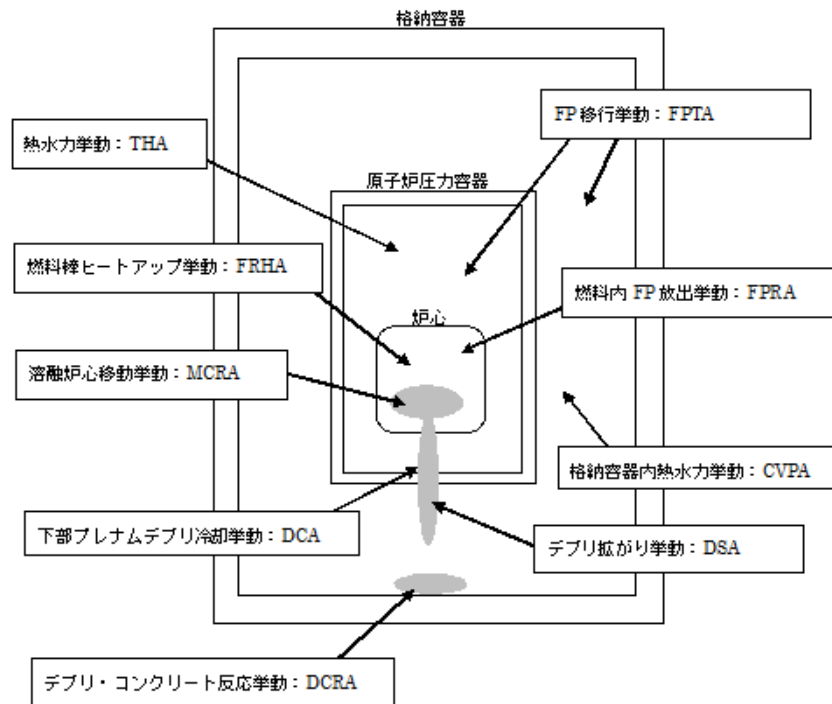
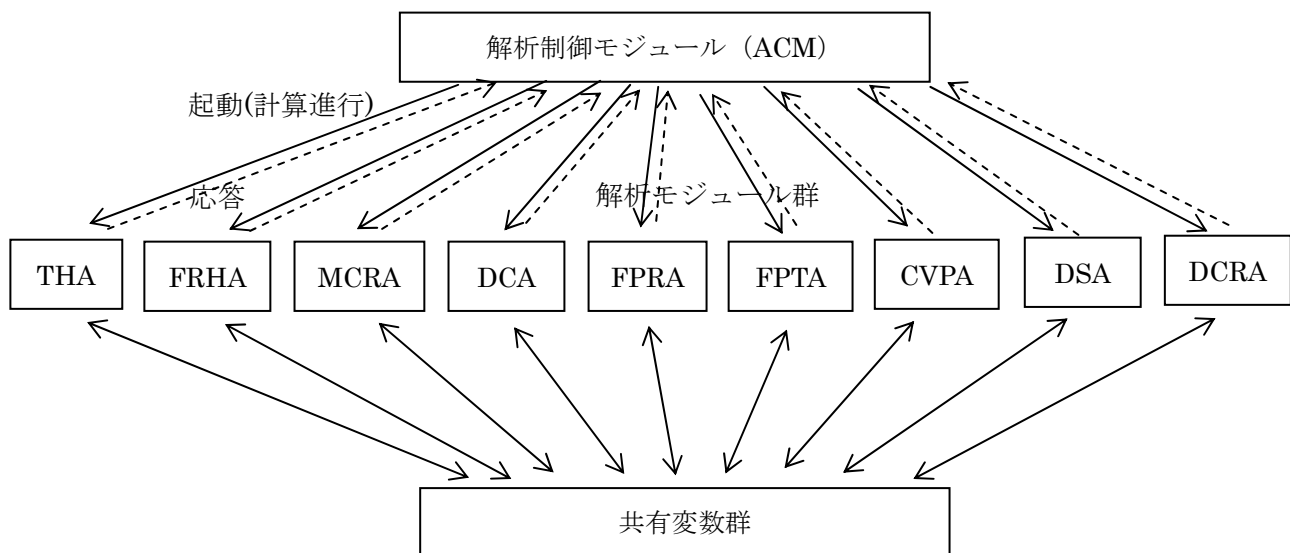


図1 IMPACT/SAMPSON の解析モジュール

表1 事象進展に伴う解析モジュールの組み合わせ

事象	ACM	FRHA	THA	CVPA	FRA	MCRA	FPTA	DCA	DSA
・ 事象発生	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
・ 原子炉トリップ	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
・ 燃料被覆管破損	↓	↓	ノード 変更	↓	↓	↓	↓	↓	↓
・ 圧力容器下部プレナム へのデブリ落下	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
・ デブリ拡がり停止	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
・ 格納容器破損	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓



(注)どのモジュールを起動するかは、ACMがシナリオデータに沿って判断する

図2 解析モジュールの関係

4. 入力説明

SAMPSONの入力データを表2に示す。入力データは使用する解析モジュール別に必要であり、それぞれのマニュアルに基づいて入力データを作成する。作成作業の主な流れは次の通りである。

(1) プラントの体系モデル

対象とするプラントの体系や形状データを収集整理し、テキストファイルの入力データとして作成する。プラントの体系や形状データ項目の概要は表

3に示す通りである。実際には変更不要のものも含め、項目は多数あり、詳細は解析モジュールのマニュアルを参照されたい。

THAモジュールは、溶融前後でノーディングを変更した入力データを用意する(図3)。溶融前のTHA1では炉心部も含めて解析するが、溶融後のTHA2では炉心部はMCRAモジュールとなるため、THA1からTHA2に安定して移行するには、抵抗係数を調整して圧力振動を抑える工夫が必要となる。

表2 入力ファイル

ファイル名	主な内容
*.poe.dat	シナリオ指定 (各フェーズで起動するモジュールの指定等)
*.acm.dat	ACMモジュールの制御データ (ケース名、前のフェーズのケース名、リスタート開始時間[s]、フェーズ終了時間[s] (イベント発生しない場合の打ち切り時間))
dset	各フェーズのファイル設定制御、前のフェーズの結果フォルダ名、前のフェーズからコピーするファイル番号 (前のフェーズの終了時間)
io/ *.tha1.dat、*.tha_ifdef.dat *.frha.dat、*.mcra.dat、*.dca.dat、 *.fpra.inp、*.cvpa.dat、*.dsa.dat *.macr.inp 等	解析モジュールの入力データ

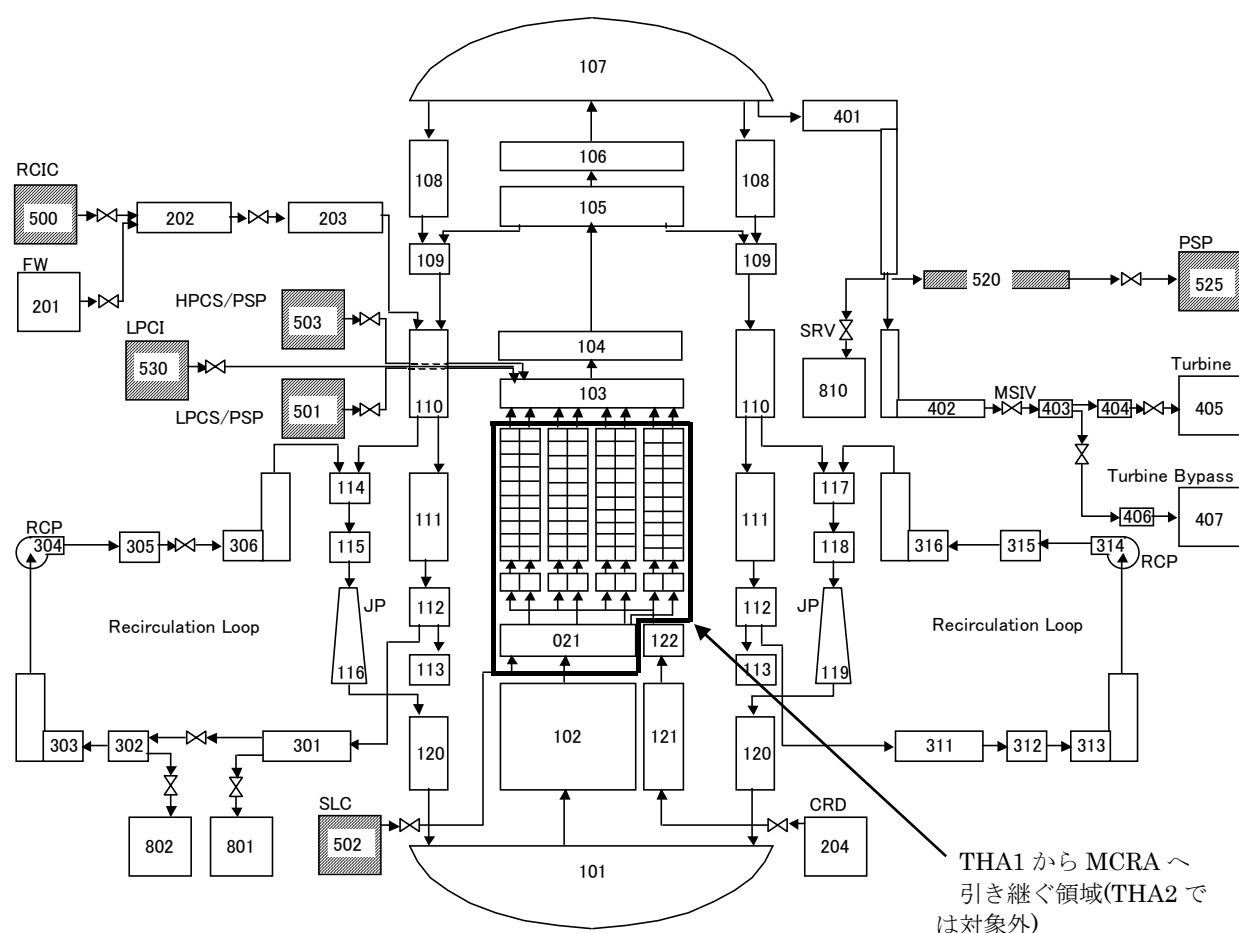


図 3 BWR を対象とした THA モジュールのノード分割例

表 3 入力データ (プラントの体系モデル)

解析モジュール	主なデータ項目
溶融前後熱水力挙動解析モジュール(THA)	水力コンポーネントの寸法・接続、熱構造体の寸法・接続・物性、流体機器データ、核特性データ等
燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール(FRHA)	燃料棒や制御棒に関する寸法や分割数、物性データ
溶融炉心移動挙動解析モジュール(MCRA)	構造物の寸法・材質データ、FRHA とのセル対応データ
下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール(DCA)	X, Y, Z 方向のメッシュ分割数と分割幅、圧力容器寸法と分割数、放射率、物性値
燃料内 FP 放出挙動解析モジュール(FPRA)	燃料の寸法・メッシュ分割座標、物性値、FP 化学種物性値
FP 移行挙動解析モジュール (FPTA)	各区画の寸法、種別
格納容器内熱水力挙動解析モジュール(CVPA)	セルの寸法・接続、熱構造体の寸法・接続・物性、工学的安全設備データ等
デブリ拡がり挙動解析モジュール(DSA)	X,Y,Z 方向のメッシュ分割数と分割幅、圧力容器寸法と分割数、放射率、物性値
デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール(DCRA)	下部キャビティ寸法、デブリとコンクリートの物性値、放射率

(2) 運転条件

次に、想定ケースにおける運転条件を入力データに反映し、ナルトランジェント計算によって定常状態が達成されているか確認する。運転条件に対応する解析モジュールの入力項目の概要は表 4 に示す通りである。実際には変更不要のものも含め、項目は多数あり、詳細は解析モジュールのマニュアルを参照されたい。

(3) 事故想定等

最後に、起因事象と流体機器の動作想定を整理し、入力データに反映する。境界条件に関連した項目の概要は表 5 に示す通りである。実際には変更不要のものも含め、項目は多数あり、詳細は各モジュールのマニュアルを参照されたい。

表 4 入力データ（運転条件）

解析モジュール	主なデータ項目
溶融前後熱水力挙動解析モジュール(THA)	水力コンポーネントの初期値、熱構造体の初期値、流体機器の初期値等
燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール(FRHA)	燃料棒各部の初期温度、酸化膜厚さ等
溶融炉心移動挙動解析モジュール(MCRA)	構造物の初期温度、液相・気相の成分、初期圧力・温度・流速、燃料等の初期成分比
下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール(DCA)	初期温度、各成分の初期質量、クラスト体積
燃料内 FP 放出挙動解析モジュール(FPRA)	炉心初期出力、炉心材質の初期質量
格納容器内熱水力挙動解析モジュール(CVPA)	セルの初期値、熱構造体の初期値
デブリ拡がり挙動解析モジュール(DSA)	初期温度、各成分の初期質量、クラスト体積
デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール(DCRA)	各部の成分の初期質量比

表 5 入力データ（事故想定等）

モジュール名	主なデータ項目
溶融前後熱水力挙動解析モジュール(THA)	起因事象の模擬（例、破断口バルブの開、電源喪失によるポンプ停止等）
溶融炉心移動挙動解析モジュール(MCRA)	破損データ（寸法、破損条件）
下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール(DCA)	貫通配管の溶融温度・破損口径
格納容器内熱水力挙動解析モジュール(CVPA)	工学的安全設備の起動・停止条件
デブリ拡がり挙動解析モジュール(DSA)	貫通配管の溶融温度・破損口径
デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール(DCRA)	コンクリート溶融温度

(4) 全体制御

なお、以上の解析モジュールの実行制御はメインプログラムでもある ACM モジュールで行われるため、ACM モジュールの入力データも必要である。また、

解析モジュールごとに時間刻み幅を指定し、モジュールが扱う事象に応じて時間刻み幅の粗密を調整する必要がある、サンプルデータにならって設定する。ACM モジュールの主な入力データを表 6 に示す。

表 6 ACM モジュールの主な入力データ

項目	説明
CASENAME	計算ケース名
RESTARTCASE	リスタート計算のケース名
RESTART	リスタート計算のリスタート時間
TEND	解析終了時刻
EEND	解析終了イベント名
DTRST	リスタートファイル出力間隔
DTTRD	主要変数の時系列結果 (*.acm.out1)出力間隔
DTMAX(配列)	タイムステップ (ACM とモジュール間の通信間隔) 最大値
DTMIN(配列)	タイムステップ (ACM とモジュール間の通信間隔) 最小値
DTVFF(配列)	VFF ファイルの出力間隔
DTOUT(配列)	プリントデータの出力間隔

なお、計算の終了は、入力ファイルに設定した終了時刻に達した時、又は終了条件の事象が発生した時に終了となり、各モジュールのリスタート用のファイルが書き出される。このリスタート用のファイルをコピーして、目的の時刻又は事象までリスタート計算を繰り返して実行する。

また、リスタートファイルは、入力ファイルで設定した周期で定期的に出力される。事象発生（例えば圧力容器下部プレナムへのデブリの落下等）の前後では、計算の収束性が悪くなり、収束エラーが発生するケースがある。この場合は、エラー発生の直前のリスタートファイルより、計算条件（タイムステップ幅等）を変更して計算を継続することができる。

5. 実行方法

(1)計算の実行方法

SAMPSON のコンパイルと実行には、以下の実行環境が必要である。SAMPSON のコンパイル方法に関しては、マニュアルを参照されたい。

- ・ OS: CentOS

- ・ fortran: Intel Fortran 64bit 版

SAMPSON の実行には、go シェルファイルを実行する。go シェルファイルの内容は以下である。

- ・ 不要ファイルの削除
- ・ リスタート元ファイルのコピー
- ・ 更新ファイルの用意
- ・ 実行モジュール呼び出し

(2)結果の見方

多数の結果ファイルが出力される。主なものを表 7 に示す。主要な変数は *.acm.out1 に出力されるので、このファイルを使って時系列グラフを描けば解析結果の概要が分かる。*.acm.out1 ファイルに出力される主なデータ項目を表 8 に示す。

表 7 主な出力ファイル

ファイル名	主な内容
io/ *.acm.out1	主要変数の時系列結果（グラフ作図用）
io/*.acm.out2	主要事象発生履歴
io/*.tha*out	THA モジュールの結果リスト
io/*.cvpa.out	CVPA モジュールの結果リスト
ftn06.dat	燃料被覆管計算結果（熔融等の詳細）

(3)使用上の注意点

SAMPSON の計算でエラーが発生する場合の主な原因は、以下の通りである。

- 蒸気表等の参照ファイルが実行フォルダにない、あるいは dset ファイル等が書き込み不可に設定されている。
- 収束条件で収束しない
- モジュールのチェック処理で異常値のため停止
 - ・ 状態量（温度等）が最小値、最大値の範囲外
 - ・ 参照値が定義データ（物性値等）の範囲外

また、フェーズが変わってリスタートする場合に、前のフェーズの参照指定データ（リスタート番号や時間指定）にも注意する。

エラーが発生した場合は、標準出力ファイル (*.lis) をチェックして、どのモジュールでエラーが発生したか確認し、エラーが発生したモジュールの、出力ファイル(モジュール名.out)を確認し、エラーメッセージをチェックする。エラーメッセージの内容に応じて、モデルを修正し再実行する。

収束エラーの場合は、タイムステップ幅と各モジュールの収束条件を変更して計算する。タイムステップ幅は、解析モジュールより ACM への指定が優先されるので、タイムステップ幅を変更する場合に注意を要する。

表 8 主な出力項目 (*.acm.out1 ファイル)

対応する解析モジュール	主な出力項目
溶融前後熱水力挙動解析モジュール(THA)	1 次系圧力、上部プレナム冷却材温度 (液相・気相)、炉心入口流量、炉心熱伝達量、炉心コラプスト水位、破断流量 等
燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール(FRHA)	各チャンネルの燃料被覆管表面最高温度・燃料ペレット中心最高温度
溶融炉心移動挙動解析モジュール(MCRA)	下部プレナムへの全移行デブリ量、炉心内デブリ質量、炉心内冷却水質量、健全な燃料の割合、下部プレナムへの落下デブリ流量・温度 等
下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール(DCA)	下部プレナム内連続相デブリ最高温度、下部プレナム内の各種デブリの平均温度、原子炉容器壁最高温度、格納容器キャビティへのデブリ流出量、下部プレナムへの全移行デブリ質量、下部プレナム内連続相デブリ質量 等
燃料内 FP 放出挙動解析モジュール(FPRA)	崩壊熱割合、各核種の放出割合
FP 移行挙動解析モジュール(FPTA)	各部の全核種質量
格納容器内熱水力挙動解析モジュール(CVPA)	格納容器原子炉キャビティ水位、格納容器の圧力・雰囲気温度、格納容器内水素質量、水素モル分率、水蒸気モル分率 等
デブリ拡がり挙動解析モジュール(DSA)	格納容器内連続相デブリ最高温度、格納容器内の各種デブリの平均温度、コンクリート最高温度、デブリから格納容器キャビティへの熱伝達量、Zr-ガス反応による発熱量、ガス発生率 等
デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール(DCRA)	デブリ平均温度、冷却材あるいはキャビティへの熱損失量、コンクリートへの熱損失量、Dry/Wet 界面 侵食界面位置、デブリ横方向広がり半径、コンクリート垂直方向侵食深さ

6. おわりに

IMPACT/SAMPSON について、機能と入出力項目を中心に紹介した。紙面の都合で概要説明にとどまったが、参考となれば幸いである。

参考文献

- [1] 内藤 正則「原子力分野における安全解析技術とその応用展開—安全解析グループの取り組み」(季報 エネルギー総合工学 第 31 巻 第 3 号 平成 20 年 10 月 20 日発行 財団法人 エネルギー総合工学研究所)
- [2] 内藤 正則「福島原発で起きた原子炉建屋も損傷 なぜ水素爆発が起きたのか」(日本原子

力学会誌 Vol.53, No.7 2011)

- [3] 浜野, 森田, 吉岡, 三橋, 湊, “シビアアクシデント解析コード IMPACT/SAMPSON”, アドバンスシミュレーション Vol. 10
- [4] Akagane, Himi and Okamoto., “Development of the aerosol behavior code macres and falcon experimental analyses”, Journal of Aerosol Science, Vol. 26, Suppl. 1, (1995)

※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。)