

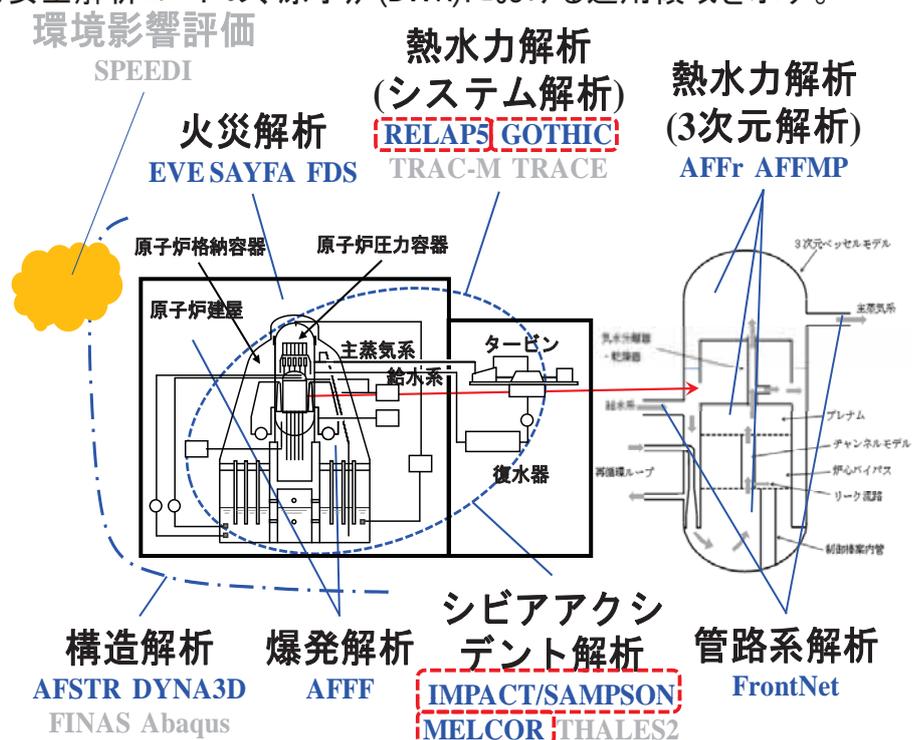
# 原子力安全解析コードの使用例

第2事業部 浜野 明千宏

原子力安全解析セミナー  
2014年11月27日 (木)  
アドバンスソフト株式会社

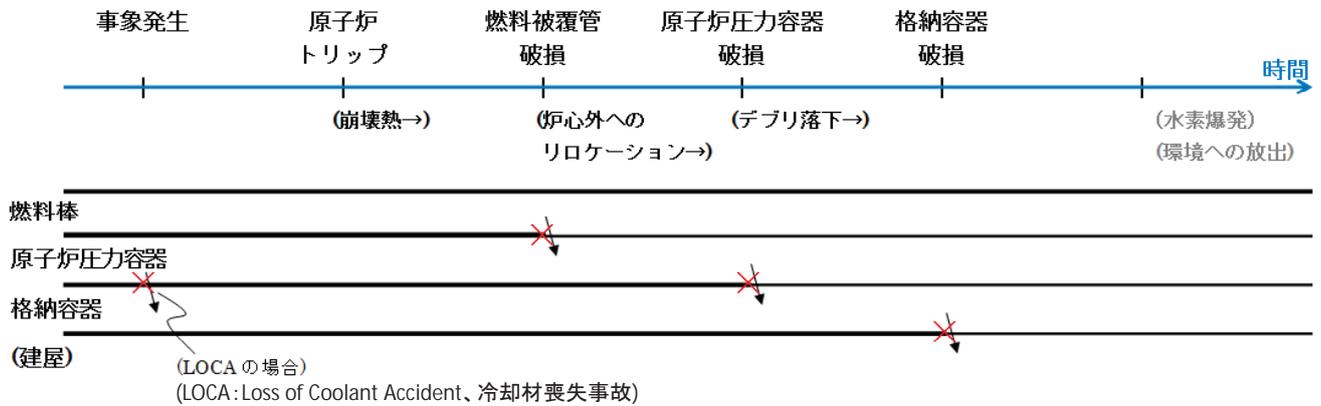
## 原子力安全解析コード

主要な原子力安全解析コードの、原子炉(BWR)における適用領域を示す。

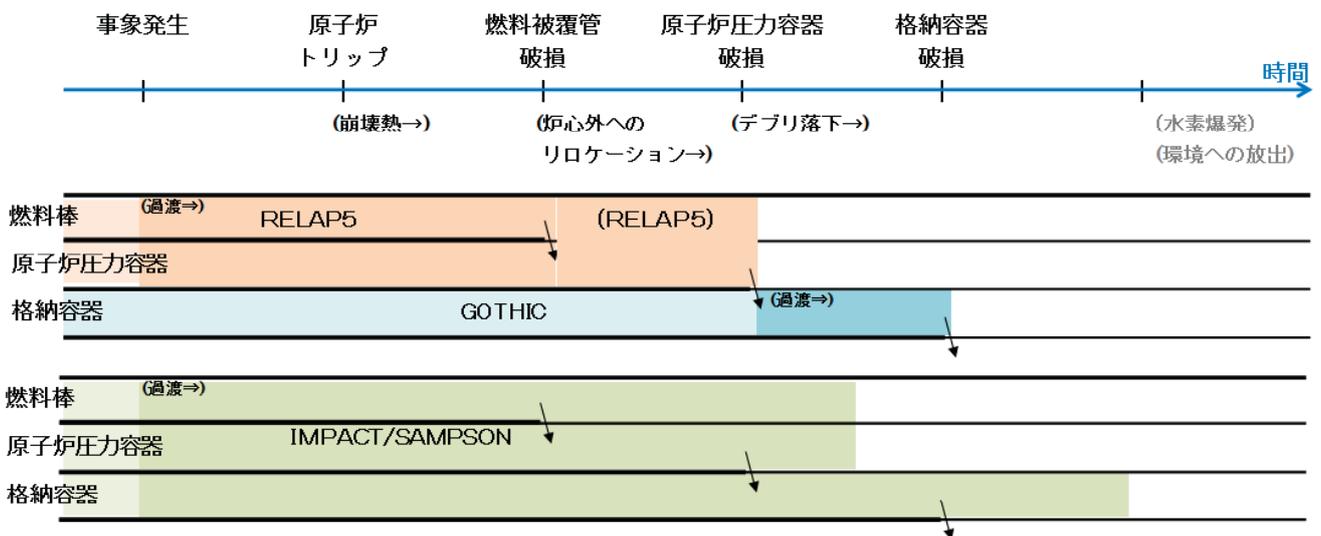


(青字:アドバンスシミュレーション誌19号で紹介、赤枠:本資料で紹介)

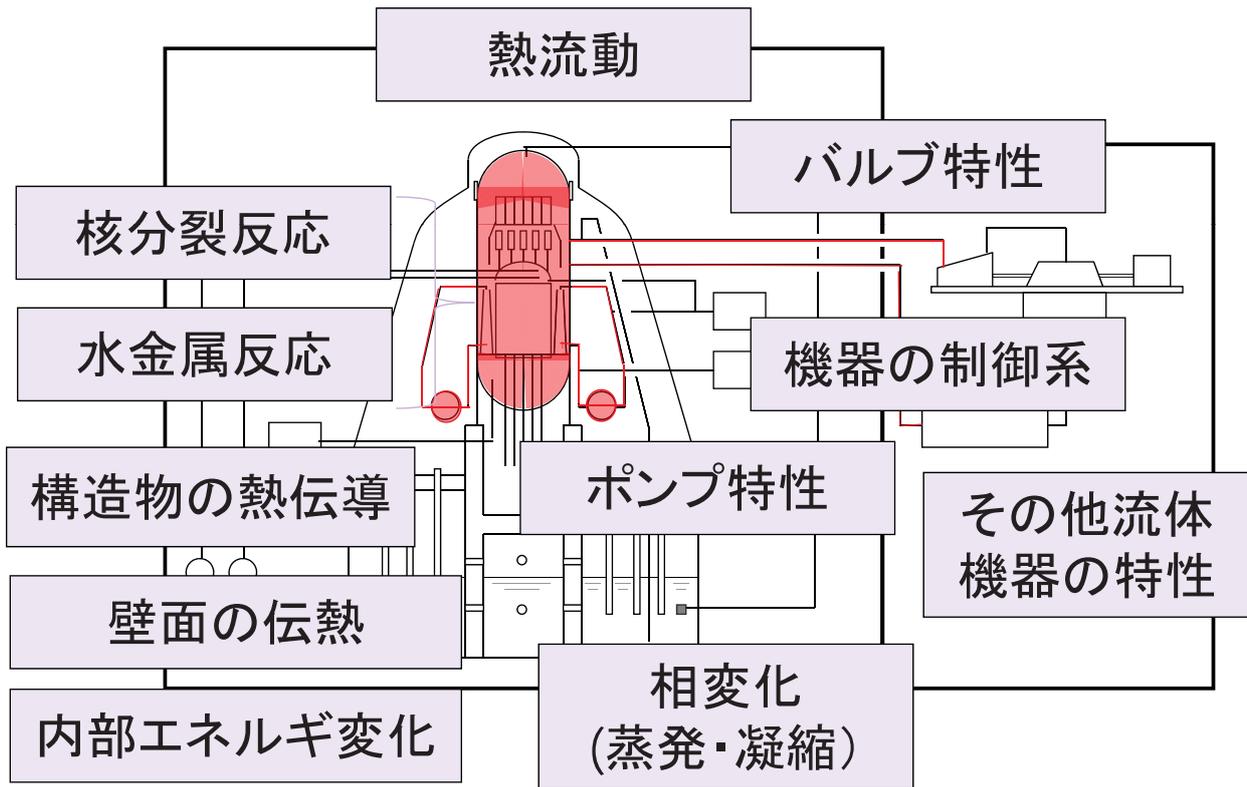
# 事象進展の例



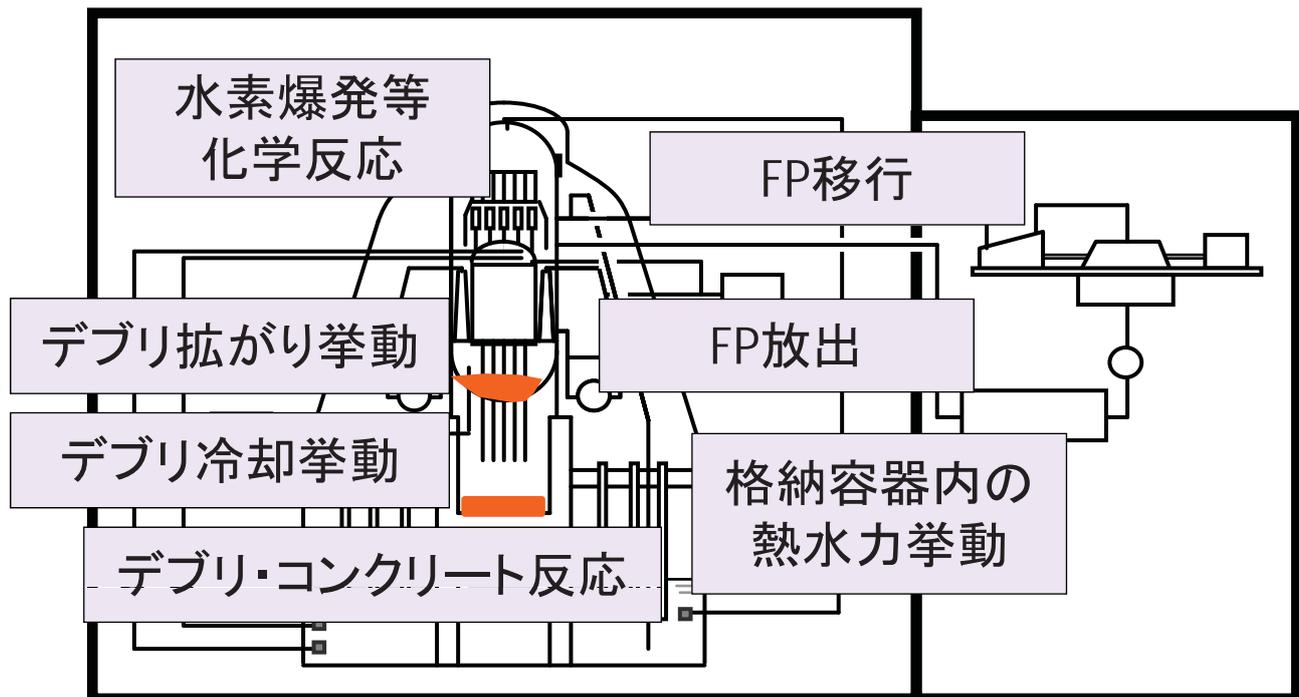
# 解析コードの対象範囲



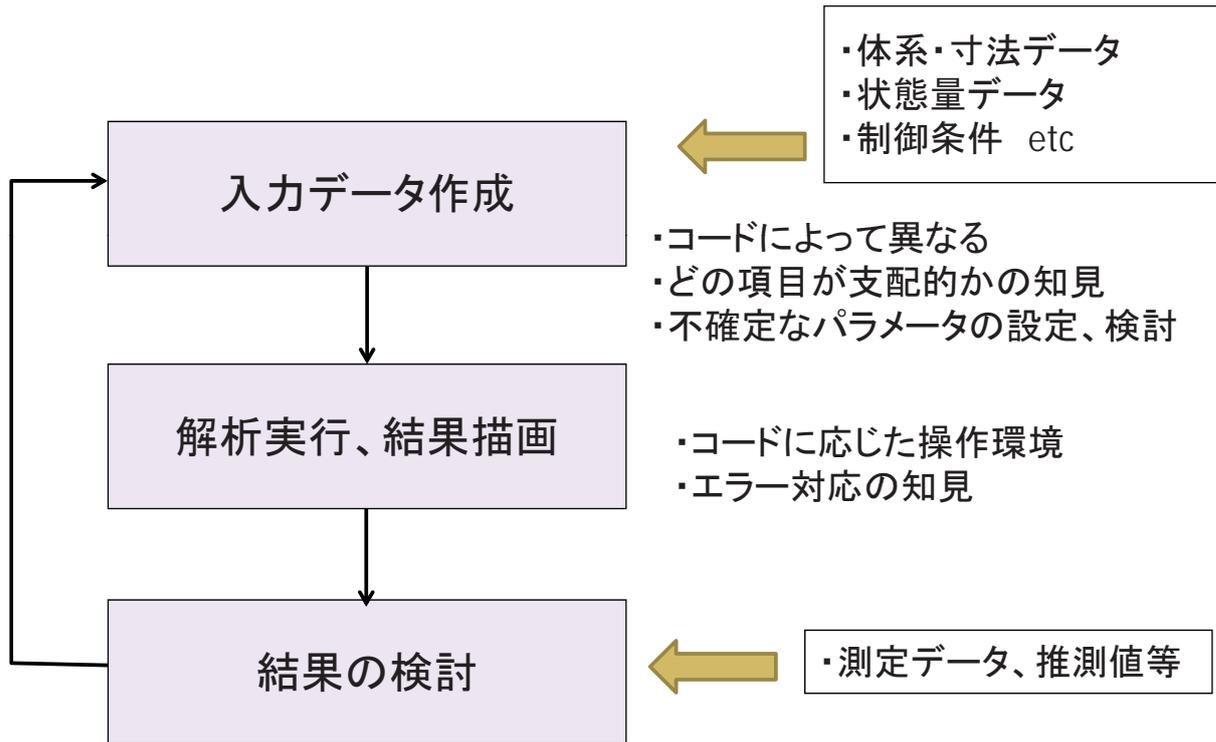
# 熱水力解析（システム解析）の主要要件



# シビアアクシデント解析のその他の主要要件



# 解析の手順



# 入力データの概要

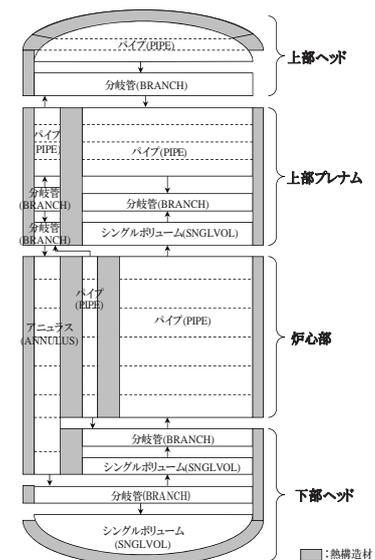
	RELAP5	MELCOR	IMPACT/SAMPSON	GOTHIC
<b>形状モデル</b>	水力コンポーネント・熱構造材の幾何データ	CVH、FL、HS、COR、CAV等	各部のモジュールごとの入力データ	Control Volume、Flow Path、Thermal Conductor
<b>物性データ</b>	物性データ	同上	同上	Material
<b>初期条件</b>	水力コンポーネント・熱構造材のデータ	同上	同上	Initial Condition
<b>流体機器、制御系</b>	機器コンポーネントデータ、制御系データ	当該パッケージデータ、CF(制御関数)データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	Component、Control variable、Trip
<b>境界条件</b>	時間依存ボリューム・ジャンクション、原子炉動特性データ等	CVH、FL等データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	Boundary Condition
<b>事象の想定</b>	トリップデータ、仮想バルブ等	CF(制御関数)データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	( Function )
<b>破損判定条件</b>	-	CF(制御関数)データ	デブリ挙動に関する各モジュールの入力データ	-

# 入力データ作成時の留意点

- 形状モデル**  
 現象に応じた、支配項目を考慮する(容積が重要なのか、高さが重要なのか等)  
 各部それぞれ、メッシュ細分すべきかどうかの検討
- 初期条件**  
 事象の想定(保守的/現実的)
- 流体機器、制御系**  
 機器固有の特性データ、プラント固有データ(運転条件との整合性で調整)
- 境界条件**  
 事象の想定(保守的/現実的)  
 時系列で設定する場合の扱い
- 破損判定条件**(コードに組み込まれている場合もある)  
 模擬実験や過去の事例の知見の解釈

# RELAP5

- BWR 及び PWR プラントの過渡・事故解析
- 開発元: INEL (アイダホ国立工学研究所)
- 流動計算**  
 熱水力モデル: 1次元非均質熱的非平衡モデル  
 (気相と液相の質量、運動量、エネルギーの計6保存式)  
 数値解法: 空間は有限差分法、スタaggered格子、ドナーセル法、時間は線形半陰解法(or近似的陰解法)
- 熱伝達計算** 強制対流、プール沸騰、自然循環の相関式
- 熱計算**  
 構造物熱伝導: 1次元熱伝導方程式(オプションで2次元)  
 原子炉動特性: 1点近似動特性モデル・6群遅発中性子モデル、崩壊熱モデル
- 流体機器**: 気水分離器、ポンプ、ジェット・ポンプ、バルブ、タービン、蓄圧器
- 原子炉制御系**: 例えば、原子炉圧力制御系、原子炉水位制御系、原子炉出力制御系、再循環流量制御系を模擬

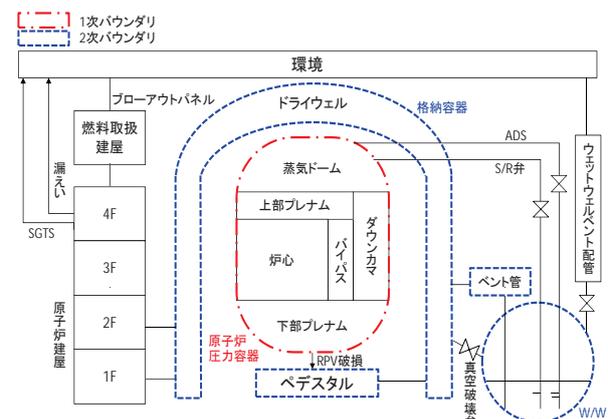


## RELAP5の主な入力データ

- 個々の水力コンポーネント**  
 ボリューム幾何データ(流路面積、長さ、体積、水平角、傾角、高低差、粗度、等価直径、壁面摩擦・熱的平衡等の計算モデルの指定)  
 ボリューム初期条件(温度、圧力、クオリティー、液相・気相内部比エネルギー、ボイド率、非凝縮クオリティー)  
 ジャンクション幾何データ(流路面積、正流・逆流エネルギー損失係数、水平/垂直、臨界流計算指定、面積平滑変化指定、流路急変指定、クロス・フロー指定)  
 ジャンクション初期条件(液相/気相速度等)
- 熱構造材**: 形状内の構造材数、厚さ方向格子点数、形状(直方体/円柱/球)、初期計算の有無、左右境界座標、再冠水モデル指定、軸方向最大分割数
- 境界条件データ**(時間依存ボリューム、ジャンクション時間依存)  
 変数種別、トリップ番号、変数名・番号、変化量テーブルの組
- 流体機器**: 機器固有の特性データ
- 制御系、トリップ**
- 原子炉動特性**

## MELCOR

- MELCOR (Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases)
- 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
- 米国NRC(原子力規制委員会)がサンディア国立研究所(SNL)に委託して開発



出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-6-1.pdf>

## MELCORのモジュール(「パッケージ」)

- BH(Bottom Head)下部プレナムの熱応答、下部ヘッドのヒートアップ、原子炉容器からドライウェルへの炉心構造材の流出
- BUR(Burn) : 水素・一酸化炭素の燃焼・爆燃
- CAV(Cavity) : ベースマットコンクリートへの高温(溶融)炉心の接触(溶融炉心／コンクリート相互作用;MCCI)(伝熱、コンクリートのアブレーション(融蝕)、キャビティの変形、ガス発生)
- CND(Condenser) : 熱交換(アイソレーションコンデンサー系(ICS)・受動的格納容器冷却系(PCCS))
- COR(Core) : 炉心・炉内構造物(炉心直下の下部ヘッド部分を含む)の熱応答(溶融、落下、デブリリロケーションによる炉心・下部プレナム構造物のリロケーション)
- CVH、FL(Control Volume Hydrodynamics、Flow Path) : コントロールボリュームの熱水力・熱流動等

## MELCORのモジュール(「パッケージ」)

- DCH(Decay Heat) : 崩壊熱
- FCL(Fan Cooler) : ファンクーラー内質量・熱移行
- FDI(Fuel Dispersal Interactions) : 下部ヘッド破損時の低圧・高圧融体放出
- HS(Heat Structure) : 熱構造体の熱伝導
- MP(Material Properties) : 物性
- NCG/H2O(Non-Condensable Gas/Water) : 非凝縮性気体・蒸気表
- PAR(Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner) : 触媒式水素再結合器
- RN(Radionuclide) : 放射性物質の放出・移行挙動
- SPR(Containment Spray) : スプレー液滴／格納容器雰囲気間の熱伝達

## MELCORの主な入力データ

パッケージ別の入力データを、データヘッダで区別  
(ファイルは分けても分けなくてもよい)

- **CVH:**  
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)
- **FL:**  
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)
- **HS:**  
幾何データ(分割数、形状(直方体/円柱/球/半球)、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)
- **COR:**  
炉心/下部プレナムの一般データ、軸レベルデータ、半径リングデータ、各セルの詳細データ、下部ヘッドデータ、下部ヘッド貫通部データ
- **CAV:**  
幾何データ、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

## MELCORの解析事例

原子力規制委員会(旧独立行政法人原子力安全基盤機構)による、  
福島第一原子力発電所1号機の解析(MELCOR ver.1.8.5)

出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-6-1.pdf>

# IMPACT/SAMPSON

IMPACT (Integrated Modular Plant Analysis with Computer Technologies)

- 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
- 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。
- 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

## IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **原子炉容器内熱水力解析:**  
RELAP5がベース
- **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、被覆管の熔融破損モデル
- **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、燃料／被覆管ギャップ内移行モデル、デブリベッドからのFP放出、熔融プールからのFP放出等モデル
- **原子炉冷却系内FP移行挙動解析:**  
対象はガス状成分・エアロゾル成分のFPの移行  
ソースタム研究に基づいた物理的および化学的モデル

## IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **溶融炉心移動挙動解析:**  
対象は溶融燃料、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  
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
- **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  
溶融物の先端位置: VOF法を適用  
デブリ自然循環冷却: 軸対称2次元座標系の質量・運動量・エネルギー式  
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。  
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

## IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **格納容器内熱水力挙動解析:**  
格納容器内をセル分割し、雰囲気空間とそれらを囲む構造物(壁、床、天井)でモデル化。  
セル間は流路パスで連結、流動計算は、集中定数モデル  
構造物は1次元熱伝導方程式  
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
- **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  
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

## IMPACT/SAMPSONの主な入力ファイル

- \*.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

## IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

### ①プラントの体系モデル

- 溶融前後熱水力挙動解析モジュール: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:燃料棒や制御棒の寸法や分割数、物性
- 溶融炉心移動挙動解析モジュール:構造物の寸法・材質データ、燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュールとのセル対応
- 下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール: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: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: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: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: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:下部キャビティ寸法、物性値、放射率

## IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

### ②運転条件

- **溶融前後熱水力挙動解析モジュール**: 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**: 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**: 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**: 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**: 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**: 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**: 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**: 各部の成分の初期質量比

## IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

### ③事故想定等

- **溶融前後熱水力挙動解析モジュール**: 起回事象の模擬(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**: 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**: 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**: 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**: 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**: コンクリート溶融温度

## IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

### ④全体制御

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

## IMPACT/SAMPSONの解析事例

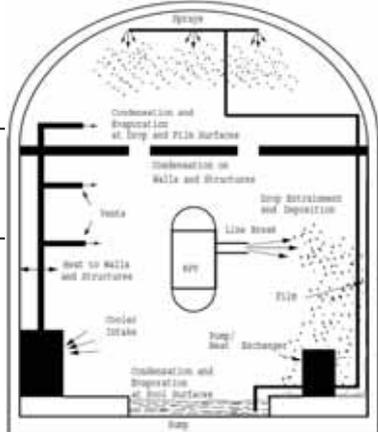
(財)エネルギー総合工学研究所による、  
福島第一原子力発電所2号機の解析

出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-7.pdf>

# GOTHIC

- GOTHIC (: Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments) は、米国電力研究所(EPRI)とNAI(Numerical Applications Inc.)社が、1989年に開発
- 格納容器内圧挙動解析コードであり、新設プラント申請にも使用
- 中核部分は、1973年のCOBRA-IVに由来し、COBRAコードのバージョンアップの経緯を経て、最終的には1986年のFATHOMSコードをベースとして発展
- 空間はボリュームとしてモデル化、それらをパス(流路)で接続。ボリュームは集中定数系or細分して有限差分法
- ポンプ、弁、スプレー、熱交換機、イグナイタ、リコンバイナ

## GOTHICの流体相

気相 vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 蒸気 + 非凝縮ガス成分 (複数)</li> <li>• (ボリューム単位で) 温度と速度は同一</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 各々、ボリューム単位で質量・エネルギー・運動量収支を保つ</li> <li>• 圧縮性を仮定</li> <li>• 相間、壁との間の質量・エネルギー・運動量の移行を構成式で計算</li> </ul>
液滴 drop	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (ボリューム単位で) 直径、温度、速度は同一</li> </ul>	
連続液相 continuous liquid	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 液滴以外、液膜・プール等</li> </ul>	
ミスト mist	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気相流速で動く</li> <li>• 気相運動方程式で気相密度に加算</li> <li>• 温度は、蒸気分圧の飽和温度</li> </ul>	
氷 ice	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 質量収支のみ保つ</li> <li>• 溶融まで初期温度を保つ</li> </ul>	

## GOTHICの主な入力データ

### ①形状モデル(流体)「Control Volumes」

- **幾何データ**: 体積、底部高さ、高さ(dz)、等価直径、L/V

### ①'ボリュウムの細分割「Subdivided Volumes」

- 分割数の指定、障害物の設定
- 当該ボリュウムに接続する流路パス、熱構造体、スプレイノズル位置等の指定

### ②形状モデル(熱構造体)「Thermal Conductors」

- **伝熱データ**: 表・裏の熱伝達タイプ、熱伝導タイプ(\*)
- **幾何データ**: 伝熱面積
- **初期条件**: 初期温度

\*熱伝導タイプ: 幾何データ(円筒・壁・円柱の指定、厚さ、外径)、メッシュ分割

### ③流路パス「Flow Paths」

- **幾何データ**: 両端のエレベーションと高さ(dz)、流路面積、水力直径、ベンド角
- **抵抗データ**: 慣性長さ、摩擦長さ、順方向損失係数、逆方向損失係数

## GOTHICの主な入力データ

### ④境界条件「Boundary Conditions」

- 状態量(圧力、温度またはエンタルピー、流量)(\*)、高さ
- \*: 時系列テーブルで指定可能(「Functions」)、テキストファイルから取込み可能

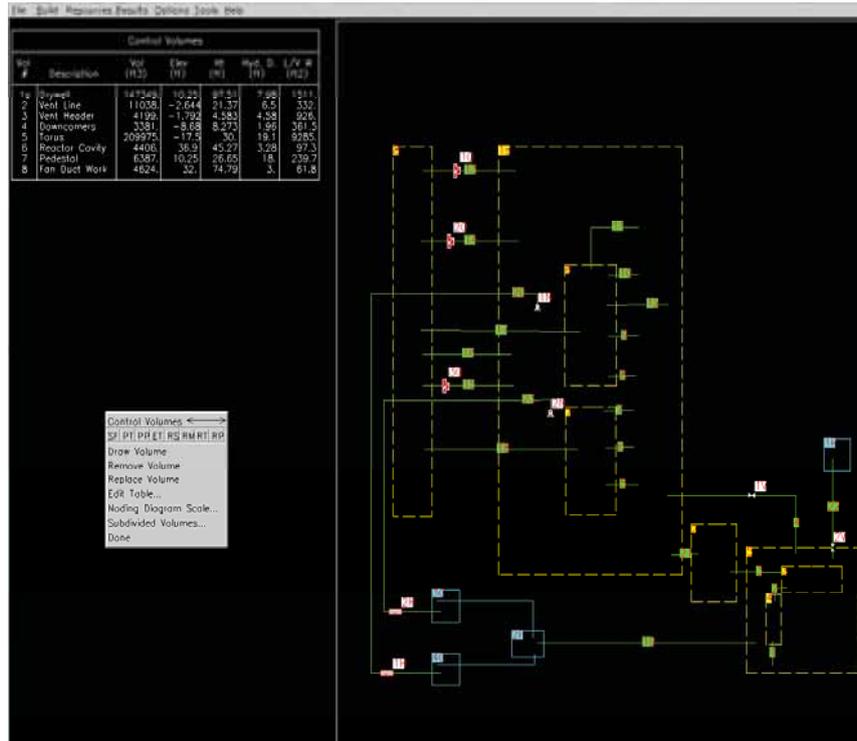
### ⑤流体機器「Component」

- 各種機器の特性等  
(ポンプ・ファン、バルブ・ドア、熱交換器、真空破壊弁、スプレイノズル、クーラー・ヒーター、リコンバイナ、イグナイタ、アイソトープフィルタ、RPVs)

### ⑥初期条件

- 圧力、気相温度、液相温度、相対湿度、液相体積率、液相成分割合  
(ボリュウム別)

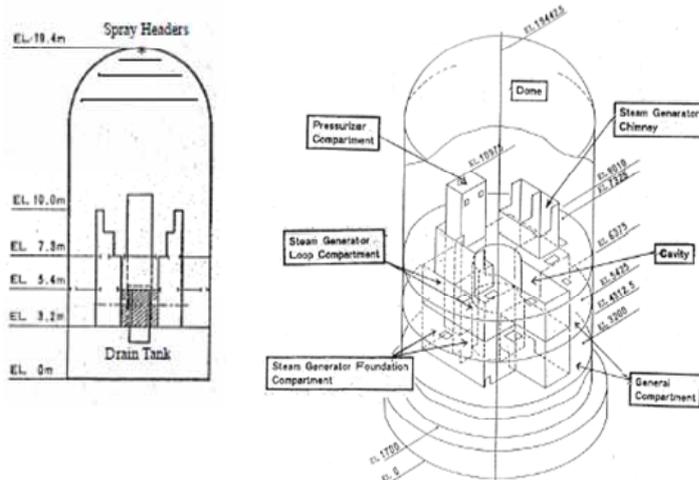
# GOTHICの入力画面例



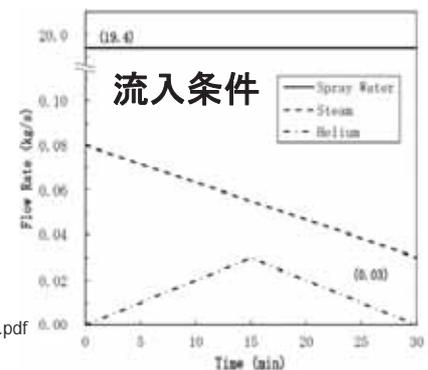
# GOTHICの解析事例

実機プラントの大破断LOCA時のECCS失敗を模擬したNUPEC試験

- ・水素の代替であるヘリウムガスの拡散・混合
- ・構造材との熱伝達と内部熱伝導
- ・格納容器スプレイによる効果
- ・OECD/NEAの国際標準問題ISP35として採用

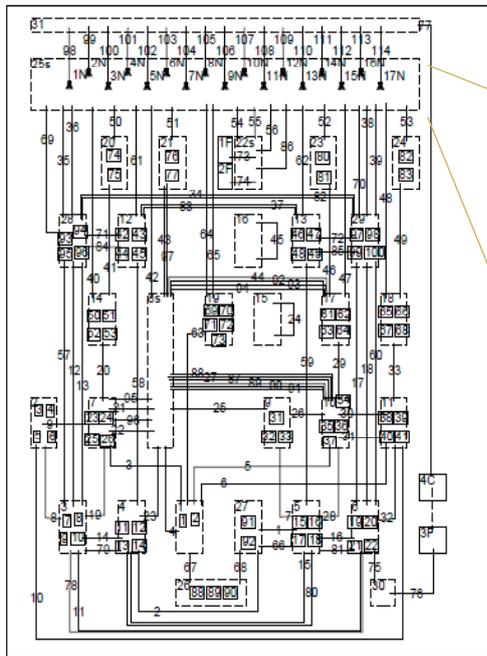


初期条件	
ドーム部圧力	139.7 kPa
ドーム部温度	66.4 °C
ドーム部湿度	100 %
外気温度	11 °C
気相 (ヘリウム/蒸気) 放出	
ヘリウム放出流量	0.0-0.03-0.0 kg/s
蒸気放出流量	0.08-0.03 kg/s
放出ヘリウム温度	14 °C
放出蒸気温度	165 °C
放出期間	30 min
放出位置	Dループ SG基礎区画
スプレイ	
スプレイ流量	19.4 kg/s (70 m <sup>3</sup> /h)
スプレイ水温	40 °C
放出期間	30 min
スプレイ液滴径 (平均液滴径)	0.75 mm
スプレイノズル個	21 個
放出位置	ドーム部

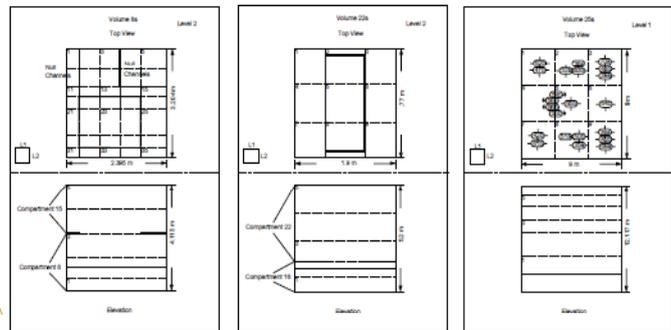


# GOTHICの解析事例

出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(QA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)



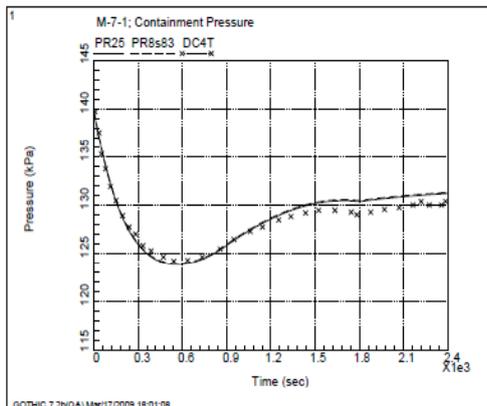
ノードイング



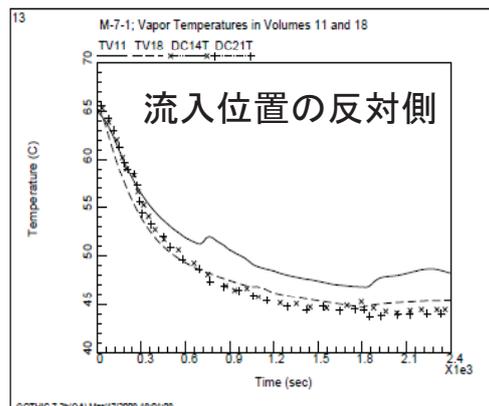
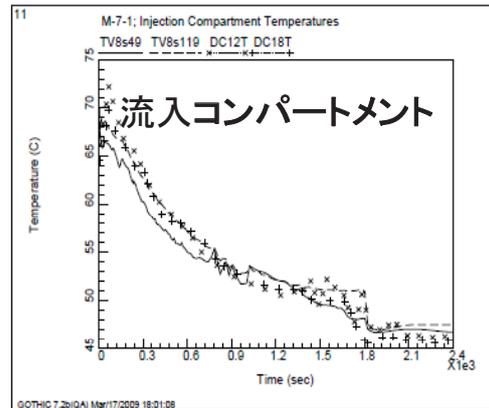
細分メッシュ(上下3層で定義)

# GOTHICの解析事例

## 格納容器圧力



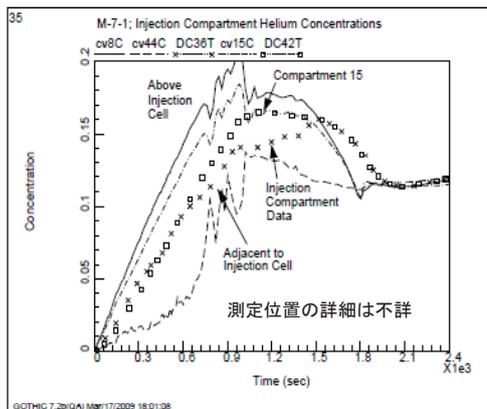
## 気相温度



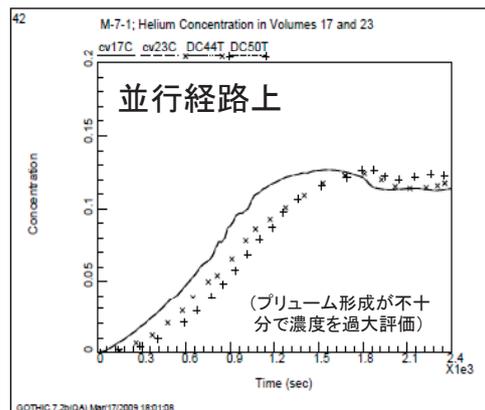
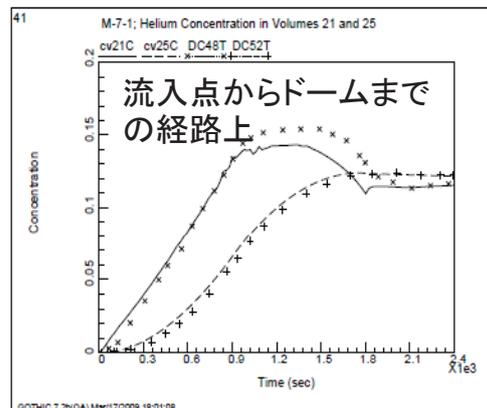
出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(QA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)

# GOTHICの解析事例

## ヘリウム(水素の代替)濃度



流入コンパートメント



出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(OA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)