

原子炉熱水力安全解析コード RELAP5

伊藤 耕悦* 三橋 利玄**

Overview of Reactor Thermal Hydraulic Safety Analysis Code : RELAP5

Koetsu Ito* and Toshiharu Mitsuhashi**

原子炉熱水力安全解析コードの RELAP5 はアイダホ国立研究所とロスアラモス国立研究所が開発したソフトウェアである[1]。われわれはこれまで RELAP5 を用いた解析や改良を数多く手がけてきた。本稿ではわれわれの経験に基づき RELAP5 の使い方を中心に解説する。

Key word: RELAP5、熱水力解析コード、原子力安全解析、1次元気液二相流

1. はじめに

RELAP5 コードは、原子力プラントの安全性研究を目的に開発された、1次元モデルを基本とするシミュレーションプログラムであり、International Code Assessment and Applications Program (ICAP)、Code Applications and Maintenance Program (CAMP)、International RELAP5 Users Group (IRUG) の会員である米国エネルギー省原子力規制委員会の支援のもと、アイダホ国立研究所(INL)が開発にあたった。1966年の FLUSH コード、RELAPSE コード以来、RELAP3 コード、RELAP4 コードなどの RELAP シリーズの長年の改良を経て、1次元非均質熱的非平衡モデルを採用した RELAP5 コードが開発され、その後多くのモデル開発と実績を積んでいる[6]。

本稿では、原子力安全解析で広く利用されている RELAP5/MOD3.3 について、機能やプログラム構成の概要に引き続き、入力説明、入力データの作成手順、実行方法、使用例により多くの紙面を割いて、使い方を中心に紹介する。

2. 機能および理論概要

表 1 に RELAP5 の主要な機能の一覧を示す。RELAP5 では原子炉の熱流動解析を目的として、水と水蒸気の気液二相流を扱う。熱流動計算では、気相と液相のそれぞれについて質量および運動量、エネルギー保存式を基礎方程式としている。

数値解析法はボリューム・ジャンクション法をベースとした半陰解法の有限差分法を採用しており、ユーザーは流動領域をコントロール・ボリュームで分割し、ボリューム間をジャンクションで結合することで解析対象の形状をモデル化する。熱伝導計算では、流動状況に応じて構造物と流体との間の伝熱量を計算し、この伝熱量を流体のエネルギー保存式の発熱量に加える。また、構造物については、熱構造物・コンポーネントによってモデル化する。構造物内部の温度は、厚み方向について1次元の熱伝導方程式を解くことによって計算する。ボリューム、ジャンクションおよび熱構造物の関係を図 1 に示す[4]。

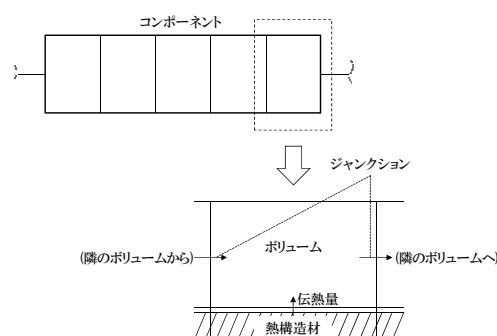


図 1 コンポーネントの関係

*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

表 1 RELAP5 の主要な機能一覧

対 象	原子炉の非定常流動解析 水－水蒸気二相流および非凝縮相
流動計算	
熱水力モデル	1次元非均質熱的非平衡モデル 気相質量、液相質量、気相運動量、液相運動量、気相エネルギー、液相エネルギーの6保存式を解く
数値解法	空間：有限差分法、スタaggerド格子、ドナー・セル法 時間：線形半陰解法(オプションとして近似的陰解法)
行列解法	直接解法
熱伝達計算	強制対流、プール沸騰、自然循環の各グループからなる相関式で計算
熱計算	
構造物熱伝導	1次元熱伝導方程式を解く(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するのに利用される

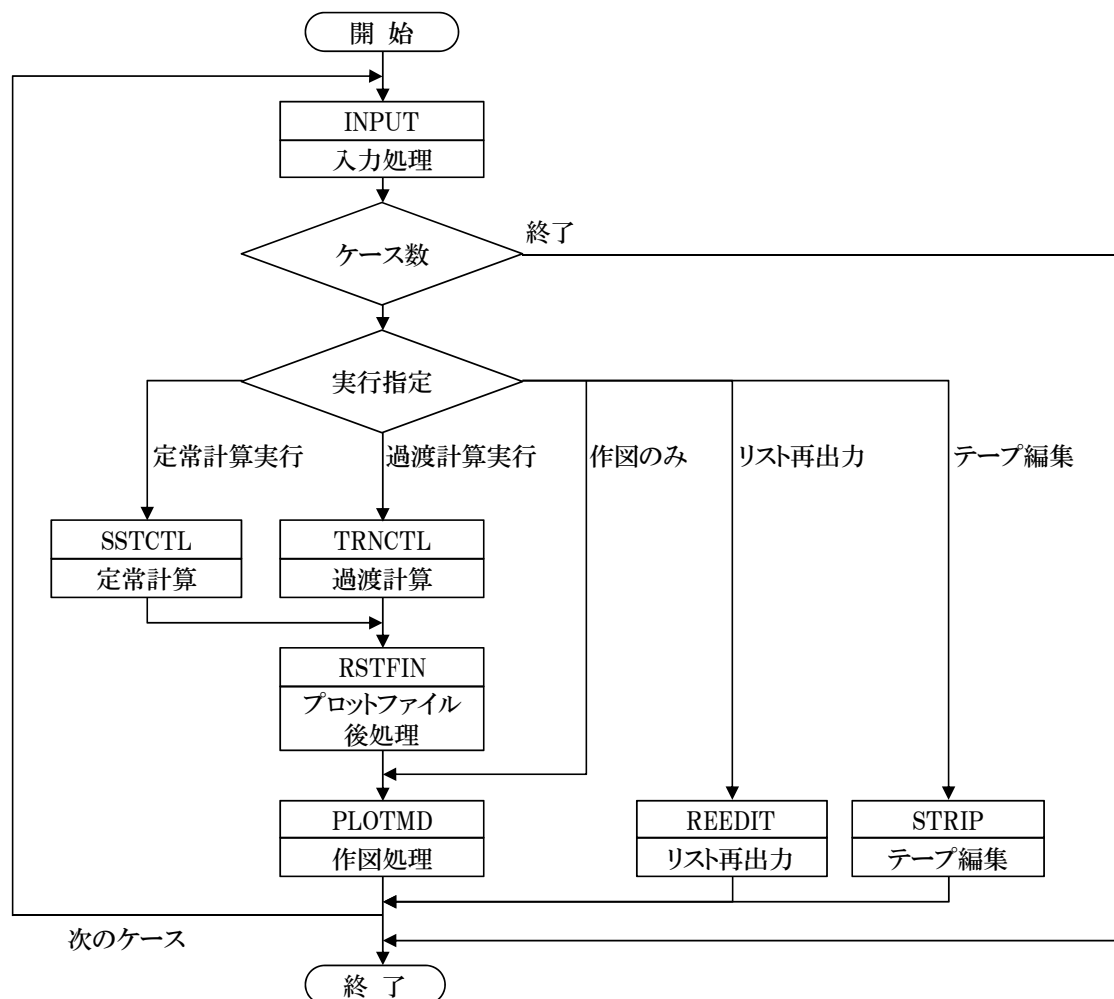


図 2 RELAP5 の計算フロー

3. プログラム構成と概略の計算の流れ

図 2 に RELAP5 の計算フローを示す。通常、①初期設定、②入力処理、③記憶エリア・インデックスの設定、④過渡計算、結果の出力の流れで計算を行う。これらに加えて、定常計算や作図、リスト再出力等の処理がある。

RELAP5 の主要なルーチンとして、図 3 に過渡計算の制御を行う TRAN の計算フローを示す。TRAN ではタイムステップ、トリップ、境界条件、熱構造材計算、熱流動計算、原子炉動特性計算(核計算)、制御変数処理の順に計算制御を行う。

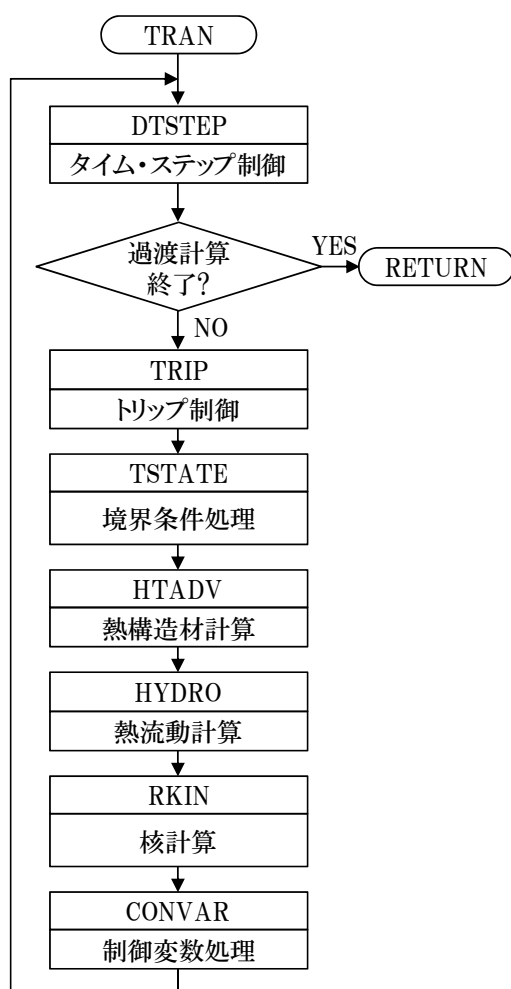


図 3 ルーチン TRAN の計算フロー

4. 入力説明

4.1. 形状モデルの種類と入力項目

表 2 に RELAP5 で用意されている形状モデルの一覧を示す。ユーザーはそれらのモデルを適切に組み合わせることで図 4 に示すような原子炉

圧力容器等の解析体系をモデル化する。本節では形状モデル毎にその特徴と主な入力項目について説明する。

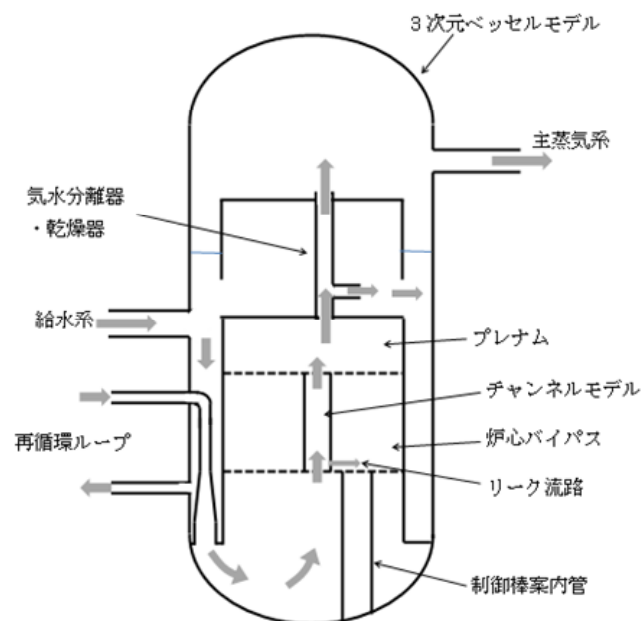


図 4 原子炉圧力容器(BWR)

表 2 水力コンポーネント一覧

No.	コンポーネント (入力キーワード)	内 容
1	シングルボリューム (SNGLVOL)	ボリューム 1 つのみ
2	時間依存 ボリューム (TMDPVOL)	境界条件として、圧力、温度、クオリティなどの状態量を時系列テーブルで与える
3	シングル ジャンクション (SNGLJUN)	ジャンクション 1 つのみ
4	時間依存 ジャンクション (TMDPJUN)	境界条件として、各相の流量または流速を時系列テーブルで与える
5	パイプ (PIPE)	N 個のボリュームと、N-1 個のジャンクション
6	アニュラス (ANNULUS)	N 個のボリュームと、N-1 個のジャンクションから成る二重円筒

7	分岐管 (BRANCH)	入口と出口にそれぞれ1つないし複数のジャンクションがセットとなったボリューム
8	気水分離器 (SEPARATR)	気相出口、液相出口、入口の3つのジャンクションを持つ BRANCHで気水分離モデルを適用
9	ジェットミキサー (JETMIXER)	駆動、吸込、吐出の3つのジャンクションを持つ BRANCHで運動量ミキシングモデルを適用
10	タービン (TURBINE)	タービンモデルを適用するボリューム
11	バルブ ジャンクション (VALVE)	バルブモデルを適用するジャンクション
12	ポンプ (PUMP)	1つのボリュームと2つのジャンクションからなり、ポンプモデルを適用するボリューム
13	蓄圧器 (ACCUM)	蓄圧器モデル適用するボリューム

4.1.1. シングルボリューム(SNGLVOL)

シングルボリューム・コンポーネントは単一のボリュームで構成される。入力データ作成において、シングルボリュームは圧力容器内や蒸気発生器等の冷却材の流動領域に使用される。シングルボリュームの主な入力項目を表3に示す[3]。

表3 シングルボリュームの入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、SNGLVOL
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
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

4.1.2. 時間依存ボリューム(TMDPVOL)

時間依存ボリューム・コンポーネントは状態量を時系列テーブルで与えることができる特殊なシングルボリュームである。時間依存ボリュームは、境界条件として圧力や温度などの時間変化の設定に使用することができる。なお、時間依存ボリュームにできるジャンクション（時間依存ジャンクションを含む）の数は1である。また、時間依存ボリュームでも面積や傾きなどの形状データを入力する必要があるが、運動量保存式の対流項や人工粘性項の計算において時間依存ボリュームの流速を用いているため、適当な数値を与えるのは望ましくない。特に、抵抗係数が小さい場合や臨界条件にならない場合には、注意を要する。時間依存ボリュームの主な入力項目を表4に示す。

表4 時間依存ボリュームの入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、TMDPVOL
幾何データ	流路面積、長さ、体積、高低差、等価直径
境界条件	変数種別、トリップ番号、変数名・番号、変化量テーブルの組

4.1.3. シングルジャンクション(SNGLJUN)

シングルジャンクション・コンポーネントはその名の通り単一のジャンクションからなるコンポーネントで、ジャンクションの中で特に使用頻度が高い。シングルジャンクションはボリューム（パイプ等のコンポーネント）とボリューム（パイプ等のコンポーネント）をつなぐために使用される。なお、接続するコンポーネントには入口・出口、上面・下面等の認識があり、コンポーネント番号を指定するとき、注意する必要がある。詳細はマニュアルを参照されたい。シングルジャンクションの主な入力項目を表5に示す。

4.1.4. 時間依存ジャンクション(TMDPJUN)

時間依存ジャンクション・コンポーネントは流速を時系列テーブルで与えることができる特殊

なシングルジャンクションである。時間依存ジャンクションは境界条件として流量を与える。例えば、上流にポンプがあると仮定して、ポンプトリップ時の流量変化を模擬する場合に使用することができる。なお、時間依存ジャンクションには必ず時間依存ボリューム1個を接続しなければならない。時間依存ジャンクションの主な入力項目を表 6 に示す。

表 5 シングルジャンクションの入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、SNGLJUN
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
初期条件	液相/気相速度等
接続	上流と下流の接続コンポーネント番号

表 6 時間依存ジャンクションの入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、TMDPJUN
幾何データ	流路面積
境界条件	変数種別、トリップ番号、変数名・番号、変化量テーブルの組
接続	上流と下流の接続コンポーネント番号

4.1.5. パイプ(PIPE)・アニュラス(ANNULUS)

パイプ・コンポーネントは N 個のボリュームと、それらをつなぐ N-1 個のジャンクションで構成され、ボリューム数は自由に設定することができる。入力データ作成において、パイプは管路のみならず、压力容器内や蒸気発生器等の原子炉全体の冷却材の流路を模擬するために使用される。

アニュラス・コンポーネントは、压力容器内のダウンカマやアニュラス（PWR における原子炉格納容器と外部遮蔽建屋との間の空間）を模擬す

るために使用する。入力パイプと同じである。パイプ（アニュラス）の主な入力項目を表 7 に示す。

表 7 パイプ（アニュラス）の入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、PIPE(ANNULUS)
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、壁面摩擦計算指定、分割数等
初期条件	温度、圧力、クオリティ、液相・気相内部比エネルギー、ボイド率、非凝縮クオリティ

4.1.6. 分岐管(BRANCH)

分岐管・コンポーネントは入口と出口にそれぞれ 1 つないし複数のジャンクションを合わせ持つ特殊なシングルボリュームである。これを使用することにより、流路が 2 つに分岐するような領域をモデル化することができる。なお、接続するジャンクションをゼロとすることは可能である。分岐管の入力項目を表 8 に示す。

表 8 分岐管(BRANCH)の入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、BRANCH
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、壁面摩擦計算指定
初期条件	温度、圧力、クオリティ、液相・気相内部比エネルギー、ボイド率、非凝縮クオリティ
その他	複数の接続ジャンクション数と番号

4.1.7. 気水分離器(SEPARATR)

気水分離器・コンポーネントは 1 つの入口と気相および液相の 2 つの出口を持つ合流分岐コンポーネントである。BWR の原子炉压力容器や PWR

の蒸気発生器内にある気水分離器をモデル化するために使用される。気水分離器の入力項目を表 9 に示す。

表 9 気水分離器(SEPARATR)の入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、SEPARATR
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、壁面摩擦計算指定
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
その他	ボイド率制限値、3つの接続コンポーネント番号の組

4.1.8. バルブジャンクション(VALVE)

バルブジャンクション・コンポーネントはバルブモデルを適用する特殊なシングルジャンクションである。バルブジャンクションは管路にある本来のバルブのみならず、パイプの破断事象を模擬する場合、ON/OFF の仮想的なバルブを設けて模擬する使い方もある。バルブジャンクションの主な入力項目を表 10 に示す。

表 10 バルブジャンクションの入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、VALVE
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、接続コンポーネント番号
初期条件	液相/気相速度等
バルブの種別	CHKVLV(逆止弁) TRPVLV(トリップバルブ) INRVLV(慣性バルブ) MTRVLV(モーターバルブ) SRVVLV(サーボバルブ) RLFVLV(逃がし弁)

(逆止弁)	初期開/閉、閉鎖背圧、リーク率
(トリップバルブ)	トリップ番号
(慣性バルブ)	初期開/閉、閉鎖背圧、初期・最小・最大アングル、イナーシャ・フラップのモーメント
(モーターバルブ)	トリップ番号、弁変化率、初期位置、テーブル番号
(サーボバルブ)	制御変数番号、テーブル番号
(逃がし弁)	初期開/閉、入口直径、バルブシート直径、バルブピストン直径、バルブリフト、内側調節リング外径最大値・外側ショルダー高さ、外側調節リングの最小内径、底部エッジの内側高さ、ベロー平均直径、ばね定数、設定圧力、質量、ダンピング係数、ベロー内側直径、初期回転軸位置、初期ピストン速度

4.1.9. ポンプ(PUMP)

ポンプ・コンポーネントは1つのボリュームと2つのジャンクションで構成され、ポンプモデルを適用するコンポーネントである。ポンプはBWRの再循環ポンプやPWRの1次冷却材ポンプ等、原子炉で使用される種々のポンプをモデル化するために使用される。ポンプの入力項目を表 11 に示す。

表 11 ポンプ(PUMP)の入力項目

分 類	データ項目
名前、タイプ	任意の名前、PUMP
幾何データ	流路面積、長さ、体積、水平角、傾角、高低差、ジャンクション面積、正流・逆流エネルギー損失係数
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

ポンプ設定	テーブル種別、二相オプションの使用/不使用、モータートルクテーブル使用/不使用、トリップ番号、逆流可/不可、定格速度、初期比速度、定格流量、定格水頭、定格トルク、慣性モーメント、定格密度、定格モータートルク、摩擦トルク係数、ポンプ慣性係数、シャフトの制御変数番号、シャフトとの遮断トリップ番号、ポンプ停止に至る時間・最大速度、単相ホモロガス曲線のタイプ、二相増倍係数テーブル、二相差テーブル、ポンプ速度・モータートルクの組
時間依存ポンプ設定	トリップ番号,変数名・番号,独立変数・ポンプ速度の組
接続	上流と下流の接続コンポーネント番号

4.1.10. その他の形状モデル

その他、RELAP5にはジェットミキサーやタービン、蓄圧器など、原子炉をモデル化するための様々なモデルが用意されている。その他の形状モデルについての入力項目の詳細はマニュアルを参照されたい。

4.2. 熱構造材の入力項目

熱構造材は燃料棒、圧力容器や蒸気発生器の伝熱材料といった伝熱・発熱材料を模擬するために用意されたコンポーネントである。ユーザーは材質や発熱量、形状（円柱/直方体/球）を自由に設定することができる。熱構造材では1次元熱伝導方程式が解かれ、熱構造材の温度変化を求めることができる。熱構造材の入力項目を表12に示す。

表 12 熱構造材の入力項目

分類	データ項目
コンポーネント	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
削除指定	リスタートで削除する構造材番号

ギャップ熱伝達	初期ギャップ内圧、燃料表面粗度、被覆管表面粗度、燃料・被覆管の径方向移動量、熱構造材番号
計算格子	格子間隔、物性番号、発熱分布
初期温度	内部計算/入力、格子初期温度
境界面	接続ボリューム番号、対称/対流/温度指定、表面積、熱構造材番号、等価直径、流路長さ
発熱	発熱の有無/テーブル入力/核動特性計算/ユーザー定義(制御変数)、内部発熱乗数、発熱量、熱構造材番号
物性	種別、熱伝導テーブル入力/関数入力/モル分率入力、比熱テーブルの入力/関数入力、温度・熱伝導度の組、熱伝導度関数の係数、温度・比熱の組、比熱関数の係数

4.3. 原子炉制御系の入力項目

原子炉制御系には①圧力制御系、②水位制御系、③出力制御系、再循環流量制御系がある。

RELAP5には、これらをモデル化するために control variables が用意されている。原子炉制御系の入力項目を表13に示す。表に示した1次遅れ、進み遅れ、積分、微分、加減、乗除コンポーネントを組み合わせることで原子炉制御系のモデル化を行う。

例えば、制御系の重要な要素のひとつであるPI制御要素は図5に示すように、積分(INTEGRAL)、乗(MULT)、和(SUM)を用いて模擬する。

また、関数(FUNCTION)は、ジェネラルテーブルを介して、リミッター、不感帯、ヒステリシス、スイッチングなどの任意の関数で表される制御要素に利用することができる。

なお、プログラム内部での制御要素の計算は、番号の若い順番に計算される。そのため、フィードバックがあるような制御系では、それを考慮してモデルを構築する必要がある。

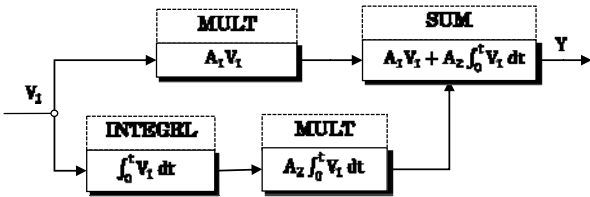


図 5 PI 制御要素のモデル化例

表 13 原子炉制御系の入力項目

分 類	データ項目
定義	変数名、種別、スケール乗数、初期値、初期計算の有無、リミッターの有無、最小値、最大値
和・差(SUM)	定数値、係数、変数名・番号の組
積(MULT)・商(DIV)	変数名・番号の組
微分(DIFFRENT)・積分(INTEGRL)	変数名・番号
関数(FUNCTION)	独立変数の変数名・番号、ジェネラルテーブル番号
標準関数(STDFUNCTN)	関数名(ABS、SQRT、EXP、ALOG、SIN、COS、TAN、ATAN、MIN、MAX)、引数の変数名・番号
時間遅れ(DELAY)	変数名・番号、遅れ時間、ストアする数値の個数
単位トリップ(TRIPUNIT)・トリップ遅れ(TRIPDLAY)	トリップ番号
整数べき乗(POWWRI)・実数べき乗(POWERR)	変数名・番号、指数
変数べき乗(POWERX)	変数名・番号
比例積分(PORP-INT)	係数、変数名、番号
1次遅れ(LAG)	遅れ時間、変数名・番号
進み遅れ(LEAD-LAG)	進み時間、遅れ時間、変数名・番号

4.4. 原子炉動特性の入力項目

原子炉動特性モデルは原子炉における出力挙動を計算するために使用される。このモデルは核分裂出力と核分裂生成物の崩壊熱を計算する。原子炉動特性の入力項目を表 14に示す。

表 14 原子炉動特性の入力項目

分 類	データ項目
計算制御	計算の有無(リスタート時)、フィードバック・データ種別、崩壊熱計算種別
動特性	全熱出力、初期反応度、遅発中性子

	割合、核生成物(FP)発生割合、 U^{239} 発生割合
崩壊	FP 崩壊モデル種別、同位元素毎の種類数等、遅発中性子先行生成割合・崩壊定数、FP の生成エネルギー・崩壊定数、アクチニドの生成エネルギー・崩壊定数
反応度テーブル	テーブル/制御変数番号、減速材密度・反応度の組、温度・ドップラー反応度の組、ボリウム番号・重み係数・減速材温度係数の組、熱構造材番号・重み係数・燃料温度係数の組、ボリウム番号・重み係数の組、熱構造材番号・重み係数の組等

4.5. 計算制御・トリップの入力項目

入力データにはコンポーネントデータの他にトリップや計算制御に関するデータが必要となる。表 15 にトリップの入力項目、表 16 に計算制御の入力項目を示す。

トリップは、ポンプ、バルブ、原子炉安全系などの機器の動作や、破断の発生、スクラム、タービントリップなどの事象の発生を模擬することを使用することができる。

表 15 トリップの入力項目

分 類	データ項目
変数トリップ	変数名と番号 2 組、論理演算子、ラッチ指定
論理トリップ	トリップ番号 2 組、論理演算子、ラッチ指定
計算停止トリップ	トリップ番号
キャンセル指定	リスタート時のトリップ・キャンセル

表 16 計算制御の入力項目

分 類	データ項目
ケース種別	新規/再計算(リスタート)の選択

単位系	入出力時の単位系(SI/英国)
リスタート入力	開始番号、ファイル名
リスタート出力	出力指定、ファイル名
CPU 時間打ち切り	CPU 時間
非凝縮ガス種別	系で取り扱うガスの種類
熱流動系の基準	基準ボリューム、高さ
タイムステップ	解析時間、タイムステップ幅、出力間隔

4.6. 入力データの作成手順

原子炉の入力データは次の手順で作成する。まず、対象体系の図面を基に解析モデルのノーディングを検討する（ノード図の作成）。次に、その図面およびプラントデータの資料から形状やサイズ、初期条件や境界条件等の入力作成に必要な数値を抽出および表にまとめる。そして、それらの数値データから入力データを作成する。タービンやポンプなどの性能に関するデータが不足している場合は、他のデータから代用する等の方法をとる。

以下では具体例を基に対象体系に対するノーディングの考え方について説明する。

4.6.1. 原子炉圧力容器(RPV)の入力作成

図 6 に加圧水型原子炉(PWR)プラントにおける原子炉圧力容器 (RPV :Reactor Pressure Vessel)のノーディング例を示す[2]。なお、図中の灰色で示した箇所は熱構造材である。

RPV 内部は①上部ヘッド、②上部プレナム、③炉心部、④下部ヘッドの 4 つの領域に分けて考えることができる。基本的にはパイプ・コンポーネント(PIPE)を主体に各領域をノード分割していく。3 つ以上の流路が存在する部位には分岐管・コンポーネント(BRANCH)、詳細に解析する必要のない部位にはシングルボリューム・コンポーネント(SNGLVOL)を使用する。各ボリューム間には基本的にはシングルジャンクション(SNGLJUN)で接続する。しかしながら、対象体系によっては強制的に流量を与えたり、あるいは解析途中に流

路を閉じたりすべき箇所がある。そのようなときには時間依存ジャンクション(TMDPJUN)やバルブジャンクション(VALVE)を適宜使い分ける。燃料棒や圧力容器壁、炉心シュラウド等からの熱伝達は熱構造材を用いてモデル化する。

4.6.2. ループの入力作成

図 7 に PWR プラントにおけるループ(蒸気発生器一基を含む 1 次冷却水の流路)のノーディング例を示す。ここで、ループの説明は次の通りである。炉心部で加熱された 1 次冷却水はループ内のホットレグを通り、蒸気発生器内で 2 次冷却水と熱交換する。熱交換により冷却された 1 次冷却水はコールドレグを経て、再び炉心部へと送られる。一方、熱交換により蒸気発生器内で発生した水蒸気は、気水分離器を経て最上部からタービンへと送られる。

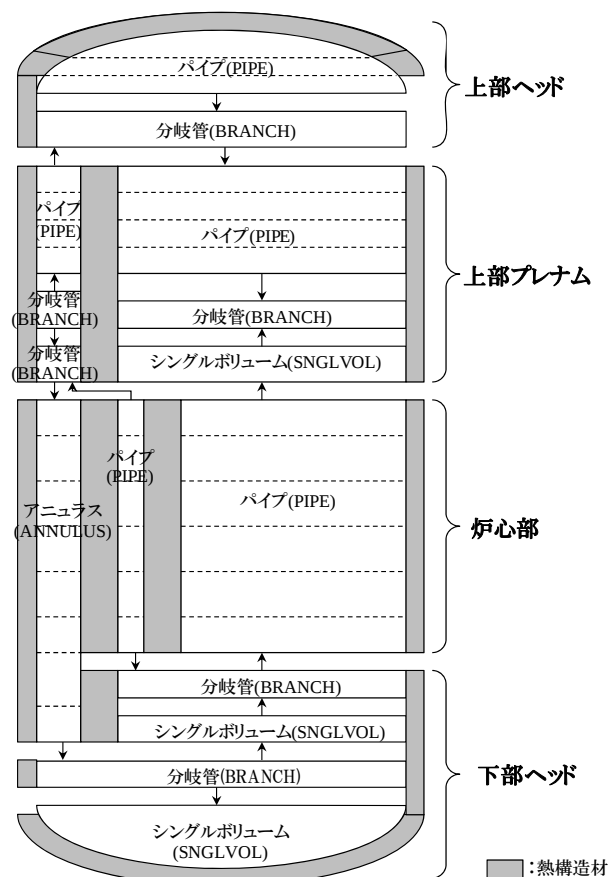


図 6 RPV のノーディング例

ループはホットレグやコールドレグで構成される 1 次側と蒸気発生器を主とした 2 次側に分けて

考えることができる。

1次側において、管路と加圧器は基本的にパイプ・コンポーネント(PIPE)を用いてモデル化する。流路が合流する箇所には分岐管(BRANCH)を使用する。ポンプおよび蓄圧器には、RELAP5で用意されているポンプ・コンポーネント(PUMP)および蓄圧器・コンポーネント(ACCUM)をそのまま使用すればよい。加圧器逃し弁(1次冷却系を減圧するための制御弁)にはバルブジャンクションを使用し、このバルブは境界条件として時間依存ボリュームに接続する。バルブの開閉はトリップ(TRPVLV)によりコントロールする。

2次側において、蒸気発生器はパイプを用いて

モデル化する。なお、図には描かれていないが、蒸気発生器と1次側の管路は熱構造材で接続し、伝熱を考慮する。蒸気発生器上部の気水分離器にはRELAP5で用意されている気水分離器・コンポーネント(SEPARATR)を、タービンにはタービン・コンポーネント(TURBINE)をそれぞれそのまま使用すればよい。蒸気加減弁には1次側の加圧器と同様にバルブジャンクションを使用し、時間依存ボリュームに接続する。このバルブの開閉は制御系によりコントロールする。主給水系および補助給水系には時間依存ボリュームと時間依存ジャンクションを使用し、時間制御で冷却水を供給するように設定する。

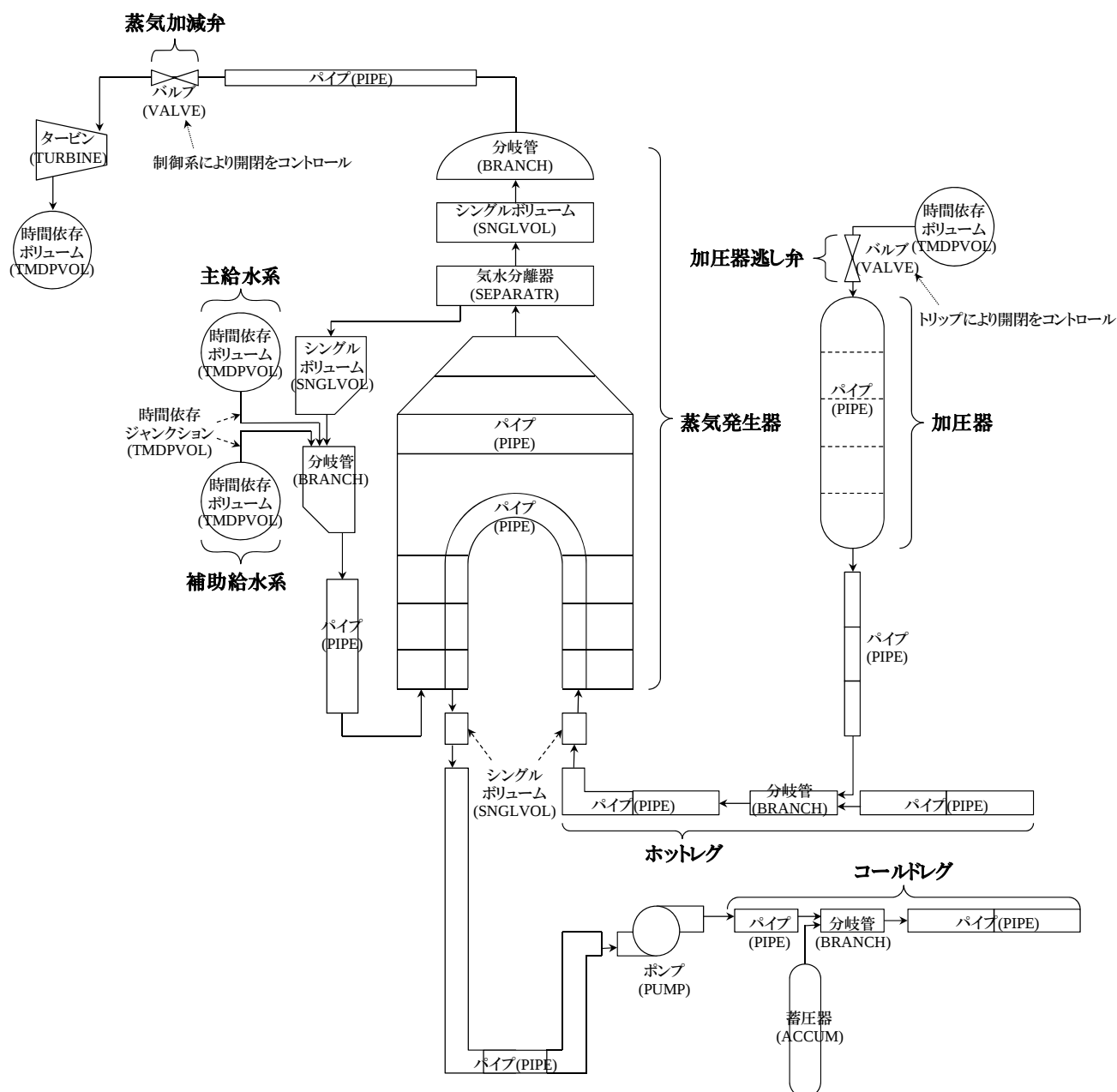


図 7 ループのノーディング例

4.7. 入力方法

図 8 に示すように、RELAP5 の入力データは少なくとも 1 つのタイトルカード、コメントカード、種々のデータカードおよび終了カードで構成される。タイトルカードは最初の文字が等号(=)であることによって識別される。コメントカードは最初の文字がアスタリスク(*)もしくはダラー(\$)であることによって識別される。また、終了カードは最初の文字がピリオド(.)もしくはスラッシュ(/)であることによって識別され、入力データの最終行に記述する[5]。

データカードには計算制御、水力コンポーネントおよび熱構造材データ等を記述する。データカードは次のように必ずカード番号を先に記述し、続けて指定のワードを入力する。

[カード番号] [ワード 1] [ワード 2] …

データカードの種別はカード番号によって識別される。例えば、カード番号 100 は「問題の種類・オプション」として識別される。計算制御の入力例を図 9 に示す。また、コンポーネントの入力例として、パイプの入力データ例を図 10 に示す。入力方法の詳細はマニュアルを参照されたい。

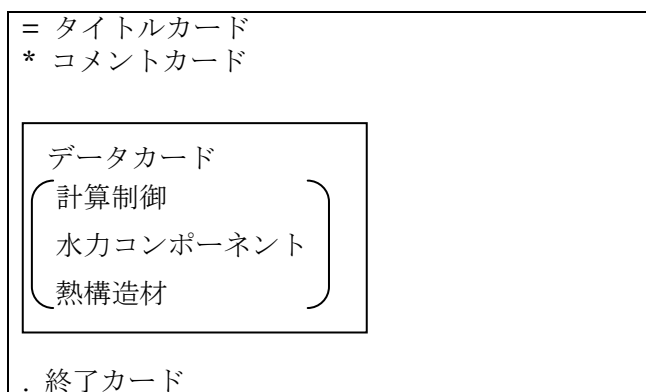


図 8 RELAP5 入力データの構成

```

* time step control card
0000201 0.020 1.0-7 0.001 3 2 10 100
0000202 0.100 1.0-7 0.001 3 10 20 100
0000203 0.500 1.0-7 0.001 3 10 50 100
  
```

図 9 計算制御の入力例

```

0010000 sample pipe
0010001 10
0010101 4.56037-3 10
0010301 2.04801-1 10
0010601 0 10
0010801 1.177911-6 0 10
0011001 0 10
0011101 0 9
0011201 0 7.0+6 9.78293+5 2.58184+6 0 0 10
0011301 0 0 0 9
  
```

図 10 パイプの入力例

5. 実行方法

5.1. 操作方法

RELAP5 を Windows で使用する場合、基本的にはコマンドプロンプトからの実行となる。図 11 に relap5.exe を実行する際のコマンド入力例を示す。

```
C:\>relap5.exe -i (入力ファイル名)
```

図 11 RELAP5 の実行例

計算が正常に終了すると、コマンドプロンプト画面に図 12 に示すようなメッセージが表示される。また、計算が正常に実行された場合、①結果出力ファイル(outdta)、②リスタートファイル(rstplt)の 2 種類のファイルが作成される。

```

(途中省略)
Transient terminated by end of time step cards.
  
```

図 12 計算終了のメッセージ

5.2. 結果の確認方法

結果出力ファイル(outdta)には①入力データの内容、②初期状態、③メジャーエディット、④マイナーエディット、⑤その他の出力結果が書き込まれる。メジャーエディットとは、入力データに使用された全てのボリューム、ジャンクション、熱構造材についての計算結果のリストのことであり、ユーザーの指定した出力時間間隔毎に計算結果が出力される。また、マイナーエディットと

は、特定ボリュームの特定物理量の時間変化のリスト出力のことであり、メジャーエディットよりも細かい時間間隔毎にユーザーの指定した変数についての計算結果が出力される。マイナーエディットで出力された結果は作図プログラム(Excelやgnuplot等)を用いてグラフにすることが可能である。ここでは、マイナーエディットの入力および確認方法を説明する。

マイナーエディットは次のように入力する。

301(~399) [変数コード] [パラメータ] …

カード番号 301~399 がマイナーエディットの入力となる。[変数コード]には出力したい物理量に対応する記号を入力する。例えば voidg と入力した場合、指定したボリュームのボイド率の時間変化が出力される。[パラメータ]にはコンポーネントや熱構造材番号等を入力する。変数コードとパラメータの詳細はマニュアルを参照のこと。

入力で指定したマイナーエディットは図 13 に示すように outdta に出力される。また、1 列目に時間、2 カラム目以降に入力で指定したコンポーネントの物理量の結果が出力される。

1 time (sec)	p 3010000 (Pa)	tempf 3010000 (K)
0.00000	7.00000E+06	502.22
2.047300E-03	6.88594E+06	502.19
4.389828E-03	2.24411E+06	501.20
6.427657E-03	2.30698E+06	501.18
8.555576E-03	2.34162E+06	501.16
1.035248E-02	2.36108E+06	501.15
1.235248E-02	2.38322E+06	501.13
1.435248E-02	2.40381E+06	501.12
1.635248E-02	2.42215E+06	501.11
1.835248E-02	2.43836E+06	501.09
2.035248E-02	2.45275E+06	501.08

図 13 マイナーエディットの出力例

5.3. 異常終了時の対応

計算が何らかの理由により正常に終了しなかった場合、outdta の最終行に次のよう出力される。

0***** (エラーメッセージ)

ここで「0*****」がエラーを意味する記述である。最終行だけでなくエラーの詳細が出力されている箇所にもこの記述が確認できる。そのため、まずはこれを手掛かりにエラーの原因を調査していくことになる。次に、エラーが生じていると思われるコンポーネントに関する計算結果を確認し、設定条件等の入力データを見直す。この一連の操作をエラーが解消されるまで繰り返す。

6. 使用例

使用例として RELAP5 による Edward's pipe 問題の解析について紹介する。ここで、Edward's pipe 問題は高温、高圧水で満たされた水平配管内の一端を破断させたときの内部挙動を調査した実験である。

図 14 に Edward's pipe 問題の解析モデルを示す。モデルはそれぞれ 1 つのパイプ、時間依存ボリューム、シングルジャンクションおよび熱構造材で構成される。パイプは 20 個のボリュームに分割し、全長は 4.09602 m、流路面積は 0.00456 m²とした。また、シングルジャンクションおよび時間依存ボリュームの流路面積はそれぞれ 0.003967 m²、0.004560 m²とした。表 17 に解析条件を示す。また、表 18 および

表 19 にコンポーネントおよび熱構造材の形状データをそれぞれ示す。



図 14 Edward's pipe 問題の解析モデル

表 17 Edward's pipe 問題の解析条件

初期条件	
圧力	7.0[MPa]
液相の比内部エネルギー	9.8E+5[J/kg]
気相の比内部エネルギー	2.6E+6[J/kg]
	502K 相当

気相/液相速度	0.0[m/s]
境界条件 圧力(時間依存ボリューム) 断熱(熱構造材)	0.1[MPa] —
数値解析条件 メッシュ分割(パイプ) タイムステップ幅 解析時間	20[—] 1[ms] 500[ms]

図 15 および図 16 にパイプのボリューム 1、10 および 20 番における圧力変化およびボイド率の変化をそれぞれ示した。破断面に近いほどパイプ内部の圧力およびボイド率が早く低下した。図 17 に熱構造材の温度変化を示す。パイプに関する傾向と同様に、破断面に近いほど熱構造材の温度が早く低下した。

表 18 コンポーネントの形状データ

コンポーネント	流路面積 [m ²]	長さ [m]	等価直径 [m]	角度 [°]	分割数 [—]
パイプ	4.56037E-3	4.09602	0.762E-2	0.0	20(等分割)
シングルジャンクション	3.96752E-3	—	—	—	—
時間依存ボリューム	4.56037E-3	2.04801E-1	0.762E-2	0.0	—

表 19 熱構造材の形状データ

形状	分割数 (軸方向)	分割数 (径方向)	座標(左側) [m]	座標(右側) [m]	長さ(左側) [m ²]	長さ(右側) [m ²]
円筒	20	11	3.81E-2	4.41E-2	4.09602	4.09602

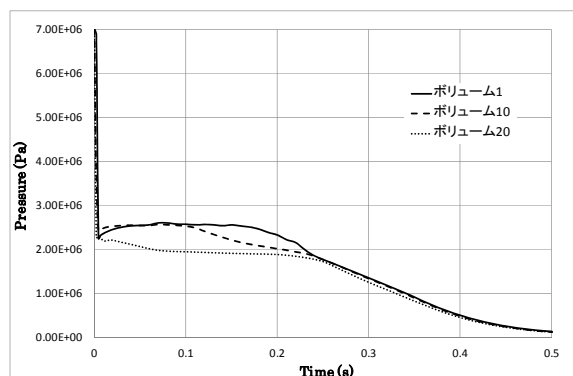


図 15 パイプの圧力変化

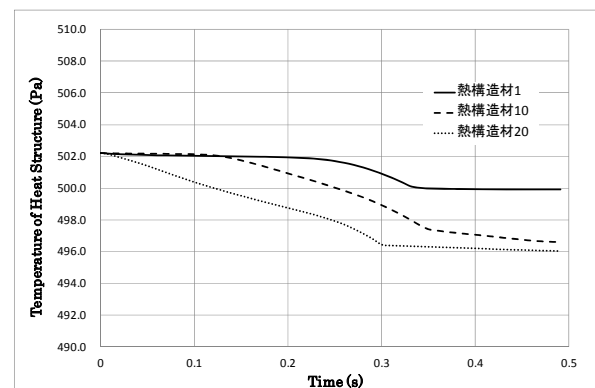


図 17 熱構造材の温度

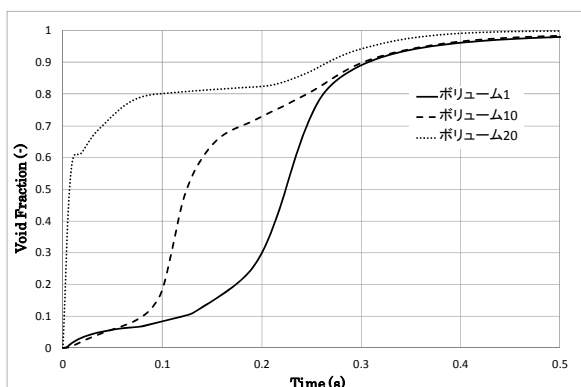


図 16 パイプのボイド率

7. おわりに

本稿では、原子力安全解析で広く利用されている RELAP5/MOD3.3 について、使い方を中心に、入力説明、入力データの作成手順、実行方法、使用例を紹介した。紙面の都合で概要説明にとどまっているが、参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] "RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods", NUREG/CR-5535

- SCIENTECH, Inc. (July 2003)
- [2] "RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume
III: Developmental Assessment",
NUREG/CR-5535 SCIENTECH, Inc.
(December 2003)
- [3] "RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume
II: Appendix A Input Requirements",
NUREG/CR-5535 SCIENTECH, Inc. (June
2004)
- [4] 小池秀耀, 三橋利玄, 浜野明千宏, “管路内の
流れのシミュレーションプログラム”, 丸善
(1995)
- [5] 独立行政法人 原子力安全基盤機構,
“RELAP5/MOD3 コードの解析環境整備(付
録)RELAP5/MOD3 入力マニュアル”,
(2006)
- [6] 浜野, 吉岡, 森田, 三橋, “原子炉熱水力解析
プログラムの概要 -RELAP5 と TRACE の
実際”, アドバンスシミュレーション vol.10

※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。)