



## モジュール型プラント動特性解析コード の開発 Super-COPDコードの開発

仲井 悟 岩崎 隆\* 島川 佳郎\*\* 丹治 幹雄\*\*

大洗工学センター機器構造開発部

\* 原子カシステム(株) \*\* 三菱原子力工業(株)

資料番号: 68-3

Development of Module Integrated Plant Dynamics  
Analysis Code

Development of Super-COPD Code

Satoru Nakai Takashi Iwasaki\*

Yoshiro Shimakawa\*\* Mikio Tanji\*\*

(Components and System Division, Q-arai Engineering  
Center.

\* Nuclear Energy System, Inc.

\*\* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.)

「もんじゅ」用プラント動特性解析コード COPD を基に、COPD の機能をすべてきみ、なおかつ種々のプラント概念に適用できるプラント動特性解析コード Super-COPD を開発した。

本コードは、計算ルーチンのモジュール化をはかり、入力データで各モジュール間のインターフェースを指定し、任意の解析対象システムを組み合わせることができるコード構成としている。本コードを用いることにより、種々の FBR 体系の動特性解析を効率的に実施することが可能となった。

### 1. はじめに

FBR のプラント動特性解析は、その対象を原子炉から水蒸気系までの熱輸送系、ポンプ、弁等の動的機器、制御、安全保護系と多岐にわたって取り扱う必要がある。また、各種外乱に対するシステムの応答を制御、熱過渡、安全の各面から解析する必要があり。このため、プラント動特性解析コードには高い性能が要求される。それらの要求は、例えば以下の6点があげられる。

- (1) 詳細化の整合: 設計、安全審査、各種概念評価等の各種使用目的に応じ、必要十分な解析モデルの詳細度を選択できること。同時に、コード全体の解析モデルの整合がとれていること、
- (2) 検証性: 使用する解析モデル、仮定等の妥当性が各種実験等により確認されていること、
- (3) 経済性: コードのターンアラウンド (CPU 時間、メモリーサイズ、必要入力データ) を考慮し、解析体系に合わせた精度で計算できること、

(4) 汎用性: FBR プラントには種々の概念が考えられ、それらの概念に対し、コードの偏正を行うことなく、入力データのみにより柔軟に対応できること、

(5) 整備状況: 解析モデルの追加、変更に対し、容易に行えること。すなわち、メンテナンス性が良好なこと、

(6) 実用性: 入力データの作成が容易に可能であり、特殊な知識、経験を有しなくても使用可能であること。また、出力処理等も整っていること、  
などである。

図1に動特性解析コードの用途と要求性能を示す。「もんじゅ」に使用されてきた COPD-3 コードは、上記(1)から(6)に対し、設計での使用の点から詳細化の程度、検証性、経済性については、ほぼ満足すると考えられるが、「もんじゅ」用ということもあり、汎用性については十分でない。実用性についても、

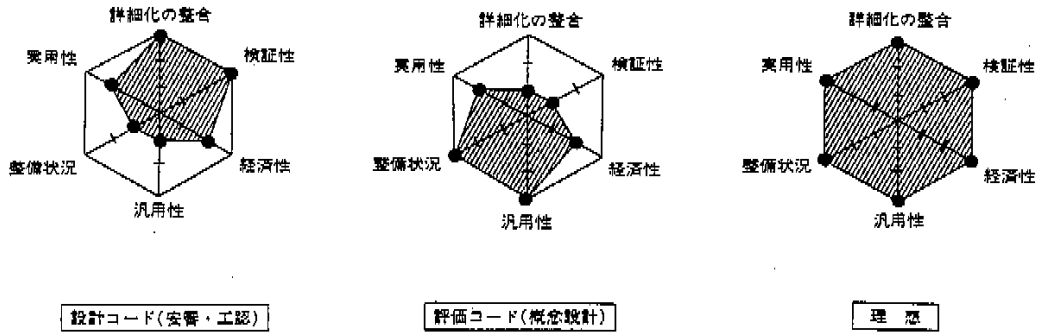


図1 動特性解析コードの用途と要求性能

入力データの作成につき、かなりの経験を要する。

上記観点から COPD-3 コードの解析モデルを基に種々のプラントシステム、サブシステムに適用できる幅広い汎用性と、高い整備性を有するプラント動特性解析コードを開発した。"Super-COPD"コードは、モジュール構造、汎用熱流動モデルを採用することにより、上記目標をほぼ満足するコードとすることができた。

## 2. コードシステム設計

プラント動特性解析コードは、

- (1) 解析対象となる機器、系統が多岐にわたり、かつ相互に影響をおよぼす。
  - (2) 解析モデルは、一部を除き、比較的単純な1次元モデルの場合が多い。
  - (3) 機器、系統毎に境界条件が明瞭である。
- 等の特徴を持っている。これらの特徴をふまえ、プラント動特性解析コードとして見備すべき、詳細化の程度、検証性、汎用性、経済性、実用性、整備状況を備えたコードとするためのコードシステムを構築する。

築する。

### 2.1 解析機能

本コードは、「もんじゅ」用 COPD-3 コードをベースとしている。コードの機能は、COPD-3 の最新バージョンをすべて含んでいる。図2にもんじゅの系統を、図3に COPD-3 コードの解析モデルを示す。COPD-3 コードに含まれるモデルは、

- 1) 原子炉核・熱モデル
  - 2) 1次主循環系運動モデル(自由液面、ナトリウム密度変化により収縮〔シュリンク〕を含む)
  - 3) 中間熱交換器熱モデル
  - 4) 2次主循環系運動モデル(自由液面含む)
  - 5) 蒸気発生器熱・運動モデル
  - 6) 水/蒸気系熱・運動モデル
  - 7) 制御系
  - 8) インターロック、安全保護系
  - 9) 空気冷却器熱モデル
  - 10) ポンプ、弁等の動的機器モデル
- である。また、解析範囲としては、

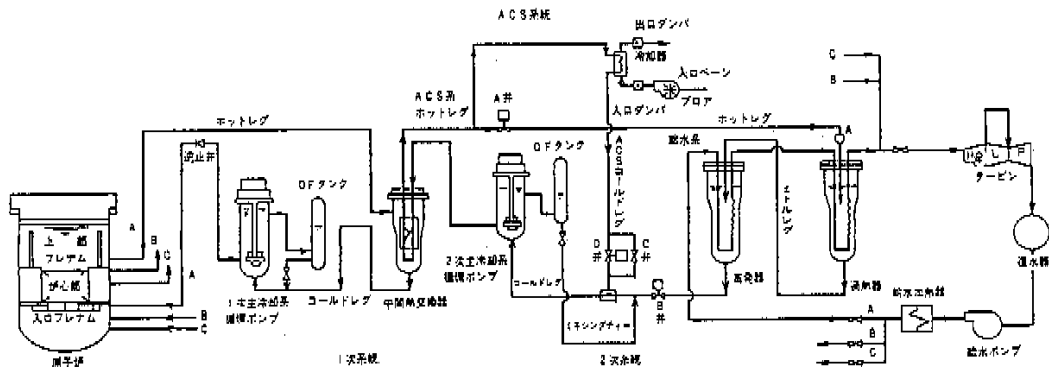


図2 もんじゅ系統

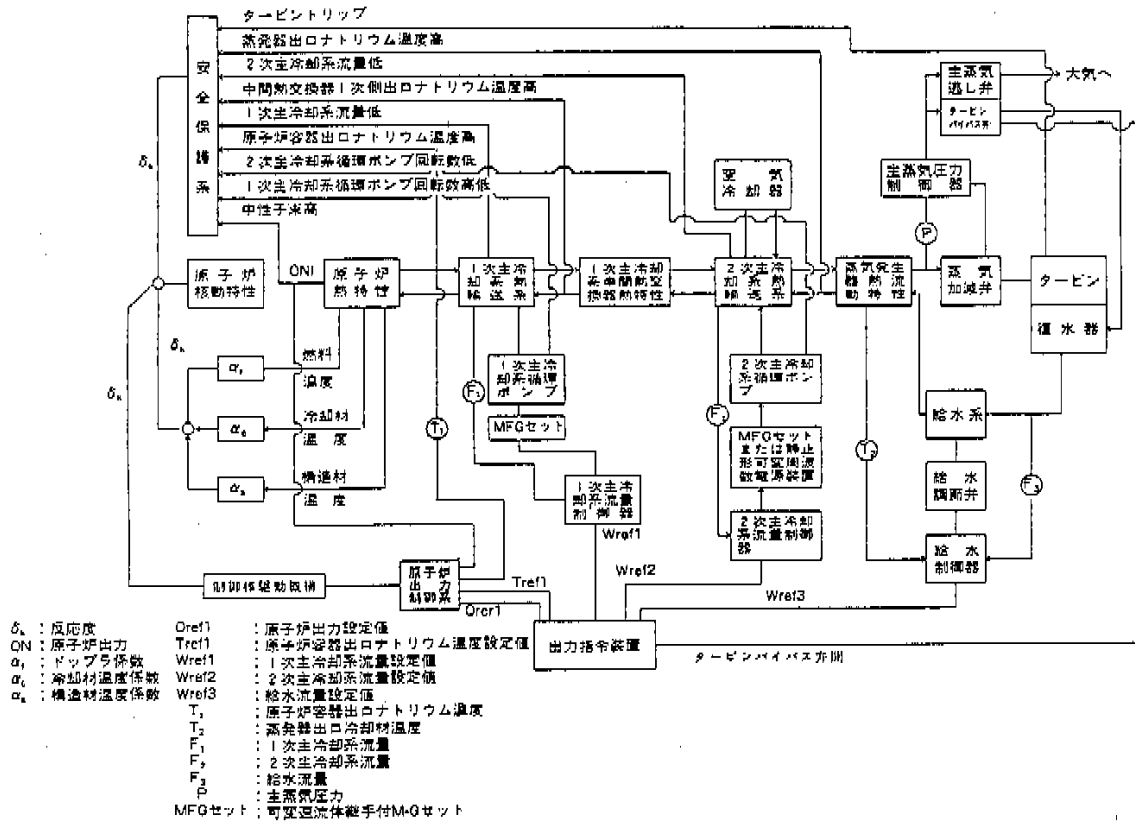


図3 COPD-3解析モデル

- 1) 通常運転時における過渡変化
- 2) 通常運転時における異常な過渡変化
- 3) 事故

であり、各機器の詳細解析あるいは、安全解析（配管大破断等）は含まない。

Super-COPD コードは、上記モデルおよび対象についてはすべて解析可能であるとともに、配管破断等についても、配管よりの消滅モデルを含んでおり、模擬的な計算は可能である。また、Super-COPD は、汎用フローネットワークおよびモジュール構造の採用により、次のFBRシステムに運用できる。

- 1) 系統構成：ループ、タンク、2次系削除型
- 2) 熱交換器型式：向流型、並流型、直行列型、直管型、ヘリカルコイル型、有液面、無液面
- 3) SG系：一体貫流、再循環、分離貫流、ズルツァー
- 4) 崩壊熱除去系：DRACS、IRACS、SGAHRs
- 5) 熱交換媒体：ナトリウム/ナトリウム、ナトリウム/水、ナトリウム/空気、水/空気、水/水

また、解析効率の向上のため各モジュール単体で

実行可能であるとともに、リスタート機能も有している。

## 2.2 シミュレーションの範囲

Super-COPD コードは、プラントシステムおよびサブシステムにおける各種外乱に対するシステムの過渡応答解析を行う。このため、FBRプラントすべて（水・蒸気系の一部は除く）をシミュレーション可能としている。また、確定したシステムに対しては、安全審査、工認、設計に充分使用可能であるとともに、簡略なモデルを使用することにより、各種のプラントシステムの評価も可能である。以下に解析可能事象の例を示す。

### (1) 運転状態 I

- ① 各種のステップ、ランプ状外乱に対する各部応答（制御系含む）

### (2) 運転状態 II

- ① 制御棒誤引抜
- ② 1/2次主循環ポンプ、給水ポンプトリップ
- ③ タービントリップ
- ④ 各種制御系、インターロック故障

- ⑤ ナトリウム系/水蒸気系各種弁誤作動
  - ⑥ 外部電源喪失
  - ⑦ 部分負荷喪失 (セットバック)
  - (3) 運転状態III
    - ① 1/2次主循環ポンプスティック
    - ② 主蒸気管破損
    - ③ 空気冷却器起動失敗
  - (4) 運転状態IV
    - ① 蒸気発生器除熱能力喪失事故
    - ② 1/2次冷却材喪失
  - (5) 多重故障
- 上記I-IVの状態の重ね合せ

2.3 コード基本構造

Super-COPD コードは、その基本構造にモジュール構造を採用し、入力データにより各モジュール間のインターフェースを指定することにより、任意の解析対象システムを組むことができる。各モジュールは、それぞれ、

- (1) データ入力
- (2) 初期設定計算部分
- (3) 過渡計算部分
- (4) 出力

をもっている。また、モジュールプログラムが複数個の機器に対応する場合 (IHX、SG 等) 各機器のシステムデータおよび初期条件は独立に与えることができる。

2.3.1 モジュール構造

コード全体を

- ① モジュールプログラムを統合するコントロール部分
- ② 熱計算、流動計算等実際の計算を行うモジュールプログラム部分
- ③ 各モジュールが共通に使用する基本計算要素部分

に分類し、整理した。かつ、各部分に対応するサブルーチンと引用するコモン変数を規則化した。本コードにおけるモジュールの定義を以下に示す。

- 1) モジュールとは、境界条件の明瞭な、独立性の高い計算を行う一連の計算ルーチンの集合である。
- 2) モジュール間のインターフェイスは、境界条件となる温度・流量等のプロセス量を、格納しておくプール変数 (特別に定義したコモン変数) を介して行う。
- 3) モジュール間のインターフェイスを入力データで指定することにより、複数個のモジュール

を組み合わせ、任意の解析対象システムを構成することができる。

4) 各モジュールは、固有の初期設定計算ルーチンと過渡計算ルーチンを持ち、入力データで構成された解析対象システムの中の計算要素として、汎用的に初期設定計算および過渡計算を行うことができる。

本コードにおけるモジュールの種類および、計算のインターフェースを図4に示す。また、本コードに含まれるモジュール一覧を表1に示す。

2.3.2 モジュールの例

流動計算 (モジュール FN)

(1) モデルの概要

本モデルは、特定のシステムを対象とするのではなく、入力データにより任意のシステムについて流路網 (フローネットワーク) を組み、流動計算を行う汎用モデルである。冷却材の流れを、代表圧力点と流路バスより成る流路網で近似し、その圧力、流

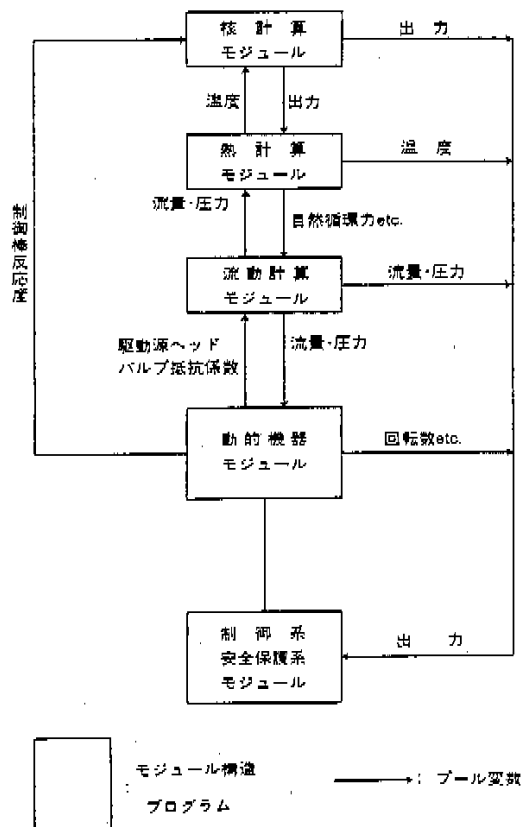


図4 モジュール間インターフェイス

表1 計算モジュール一覧

名称	機能	備考
KN	原子炉核計算	核計算モジュール
RF	原子炉簡易熱計算	熱計算モジュール
RX	原子炉詳細熱計算	//
HX	中間熱交換器熱計算	//
AC	空気冷却器熱計算	//
SG	蒸気発生器熱計算	//
PC	空冷復水器熱計算	//
MN	完全混合、ミキシング・テイ要素熱計算	//
LN	ナトリウム系配管要素熱計算	//
LS	水・蒸気系配管要素熱計算	//
LW	原子炉下部プレナム熱計算	//
UP	原子炉上部プレナム熱流動計算	熱流動計算モジュール
FM	水・蒸気系熱流動計算	//
FN	ナトリウム系流動計算	流動計算モジュール
FA	空気系流動計算	//
CR	制御棒の計算	動的機構モジュール
CK	遮止弁の計算	//
PP	循環ポンプの計算	//
VV	各種弁の計算	//
CL	制御系の計算	制御系・安全保護系
LG	安全保護系の計算	モジュール

量分布を計算する。またカバーガス、シュリンクも計算可能である。流動計算モデルの例を図5に示す。

(2) 境界条件

入力はポンプヘッド、バルブ圧力損失係数、自然循環力であり、出力は代表圧力点の圧力、流路パスの流量、自由液面の液位である。

(3) 基礎式

① 圧損の定義

圧損素子の圧損に関する定義式を示す。

$$\Delta P_{ik} = \Delta P_{iko} (G_i / G_{io})^2$$

$G_i$  : 流路 i 流量

$G_{io}$  : // 基準流量

$\Delta P_{ik}$  : // 圧損素子 k の流量  $G_i$  に対する圧損

$\Delta P_{iko}$  : // // 流量  $G_{io}$  に対する圧損

$\alpha_{ik}$  : // 圧損の流量依存性を示す指数

② 質量保存則・運動量保存則

1) 質量保存則

$$\sum_{m=1}^N a_{jm} G_m = S_j \quad (j = 1 \dots MN)$$

2) 運動量保存則

$$\sum_{m=1}^N b_{in} P_n = F_i - G_i - \Delta H_i - e_i E_i$$

$$+ v_i V_i - G_i G_i$$

$$+ L_i / g (dG_i / dt) \quad (i = 1 \dots N)$$

$a_{ji}, b_{ij}$  : 流路の結合係数

$G_i$  : 流路 i の流量

$S_j$  : 圧力ノード j の湧出・消滅流量

$P_j$  : 圧力ノード j の圧力

$F_i$  : 流路 i の圧力損失係数

$\Delta H_i$  : // 自然循環力

$E_i$  : // 駆動源ヘッド

$e_i$  : // 駆動源存在係数

$V_i$  : // バルブ抵抗係数

$v_i$  : // バルブ存在係数

$L_i$  : // 流体慣性

ナトリウム熱交換器 (モジュール HX)

(1) 概要

ナトリウム/ナトリウム熱交換器 (IHX, DHX) の熱計算。対象とする IHX (DHX) は、管外流体 1

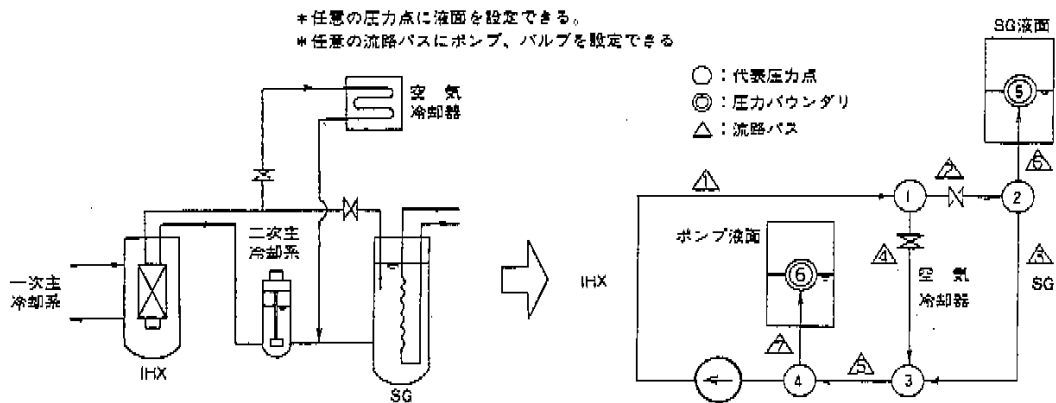


図5 流動計算モデル

次ナトリウム、管内流体2次ナトリウムの向流型交換器。

(2) 境界条件

入力は、1次ナトリウム入口温度、2次ナトリウム入口温度、1次ナトリウム流量、2次ナトリウム流量、シェルに接する外部流体温度。

出力は、1次ナトリウム出口温度、2次ナトリウム出口温度、1次側自然循環力、2次側自然循環力、シェル温度平均値。

(3) 基礎式

① エネルギー保存則

1次側ナトリウム

$$CpMp \frac{\sigma}{\sigma t} Tp(z,t) = -CpGp(t) \frac{\sigma}{\sigma Z} Tp(z,t)$$

$$-U1A1 (Tp(z,t) - Tt(z,t))$$

$$-U3A3 (Tp(z,t) - Tv(z,t))$$

伝熱管

$$CtMt \frac{\sigma}{\sigma t} Tt(z,t) = U1A1 (Tp(z,t) - Tt(z,t))$$

$$-U2A2 (Tt(z,t) - Ts(z,t))$$

2次側ナトリウム

$$CsMs \frac{\sigma}{\sigma t} Ts(z,t) = CsGs(t) \frac{\sigma}{\sigma Z} Is(z,t)$$

$$+U2A2 (Tt(z,t) - Ts(z,t))$$

シェル

$$CvMv \frac{\sigma}{\sigma t} Tv(z,t) = U3A3 (Tp(z,t) - Tv(z,t))$$

$$-U4A4 (Tv(z,t) - T_{AIR}) - U5A5 (Tv(z,t) - T_{EX})$$

— 記号説明 —

- P : 1次側ナトリウム
- T : 伝熱管
- S : 2次側ナトリウム
- V : シェル
- AIR : 空気雰囲気
- EX : 他の外部流体

3. コードの運用

3.1 プログラムの構成

(1) プログラムの全体構成

図6に本コードシステムの全体構成を示す。本コードは、計算部コード (Super-COPD) および出力処理コード (時系列印字: SUMY、図形処理: EDIT) より成る。また、Super-COPDは、データ入力、初期設定計算、過渡計算、出力処理部分より成る。

データの inputs は、1) デフォルトデータ入力、2) リスタートデータ入力、3) 変更データ入力の順で行う。入力データはすべて、ネームリスト形式の入力である。

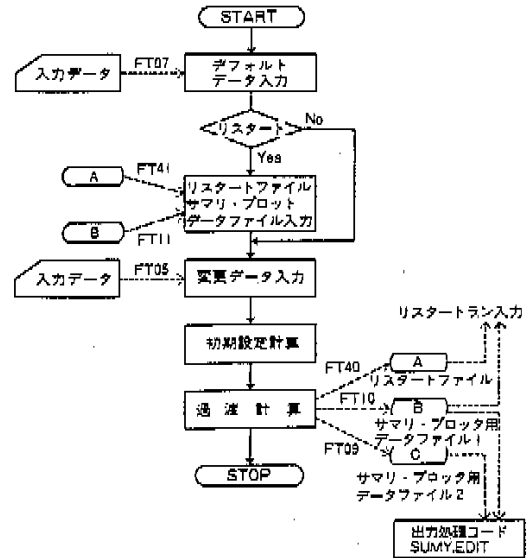


図6 計算の流れと入出力

データ出力は、1) リスタートデータ出力、2) サマリ・プロット用データ出力、3) サマリ・プロット用出力情報出力、4) 中間出力がある。サマリプロット用出力は、時系列データ出力(サマリ出力)コード SUMY および図形処理(グラフ出力)コード EDIT に受けわたされる。

(2) 初期設定計算

本コードでは、過渡計算に先立って初期設定計算を行い、解析対象システム全体の静特性を設定する。初期設定計算は、原則として下記に示す各計算モジュールの基礎方程式の時間微分項をゼロとした式を解くものであり、熱計算、流動計算、動的機器の計算、制御系・安全保護系の計算、の順で進めて行く。

$$\frac{X(t+\Delta t) - X(t)}{\Delta t} = \text{func}(X) = 0$$

熱計算については、各熱交換器について、1次側(ヒートソース側)、または2次側(ヒートシンク側)の出力が所定の値になるように、すなわち流量および出入口温度が所定の値になるよう、図7に示すような収束条件、修正因子によりヒートバランスを設定している。

すべての熱計算モジュールについて、計算を行う順を入力データにより指定することによって、任意の形のシステム全体のヒートバランスの計算が可能である。

流動計算については、熱計算モジュールで計算された、自然循環力、蒸気密度等を入力し、冷却材の流量、圧損分布を既知とし、圧力分布、液面、ポンプヘッド等の設定を行う。

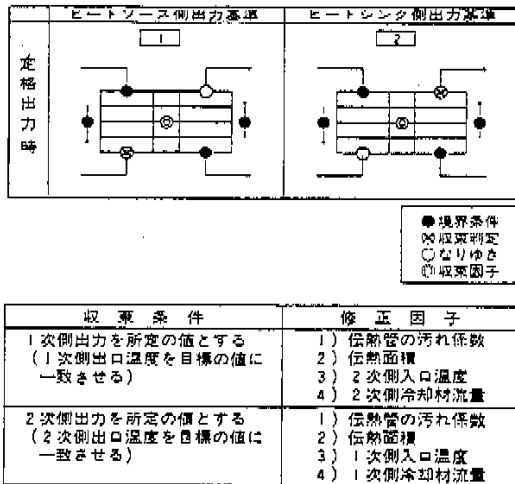


図7 ヒートバランス設定法

動的機器では、熱・流動計算モジュールで計算された各種情報を入力し、必要な初期設定を行う。例えば、ポンプヘッド、流量を入力とし、ポンプの回転数、トルクの設定をする。また、井の圧損、流量を入力とし、井の開度を設定する。

制御系・安全保護系では、熱・流動・動的機器モジュールで計算された各信号（検出、指令信号）の値を入力し、制御系、安全保護系の諸信号の設定を行う。

(3) 過渡計算

過渡計算においては、下記に示す基礎方程式を各モジュールについて解き  $X(t+\Delta t)$  をもとめる。

$$\frac{X(t+\Delta t) - X(t)}{\Delta t} = \text{func}(X)$$

高速増殖炉冷却系の様な複雑なシステムでは、ある部分では現象が急激に推移し、ある部分では緩やかに推移するという具合に、時定数の異なる多数の現象が相互にフィードバックしながら進行している。

本コードのモジュールには、換言すれば、比較的似通った時定数をもつ計算ルーチンの集合であるため、各モジュールは固有の計算経過時間と計算進み時間幅を持ち、そのモジュールで扱う現象に対応した最適な計算進み時間幅をコード中で自動設定しながら計算を進める。

各モジュールの計算は、全モジュールのうち、計算経過時間が最も遅れているものから順次進められる。

3.2 コードの運用

本コードを用いて解析作業・整備作業を行う際

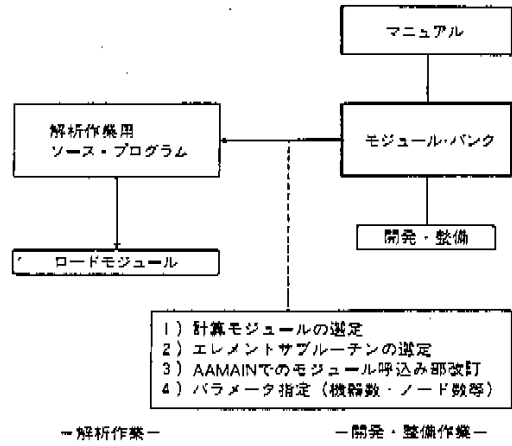


図8 コードの運用

の手順を図8に示す。

- 1) すべてのモジュールのソースプログラム、コモン変数および関連マニュアルは、モジュールバンクとして登録し、一括管理する。
- 2) 解析作業を行う場合、まず、モジュールバンクの中から、コントロールモジュールと解析上必要となる計算モジュールのソースプログラムとコモン変数を抽出して、解析作業用ファイルを作成する。
- 3) ピックアップした各計算モジュールと、コントロールモジュールで使用するエレメントサブルーチンを、同じくモジュールバンクから抽出し、解析作業用のファイルに加える。
- 4) コントロールモジュールの、メインプログラム(AAMAIN)中の、計算モジュール呼び込み部(各計算モジュールにつき1行)を改訂する。
- 5) 各モジュールのコモン変数について、プログラム容量を支配する、例えば機器の数、ノード分割数等に対応する DIMENSION の大きさを、パラメータ指定する。
- 6) 解析作業用のソースプログラムをコンパイルし、ロードモジュールを作成する。

4. 試計算

本コードを用いた試計算例として

- (1) DRACS 水流動試験装置
- (2) 大型炉

の体系他における試計算を実施し、その機能の一例を示す。

4.1 DRACS 水流動試験装置

大型炉における崩壊熱除去システムとして有望と

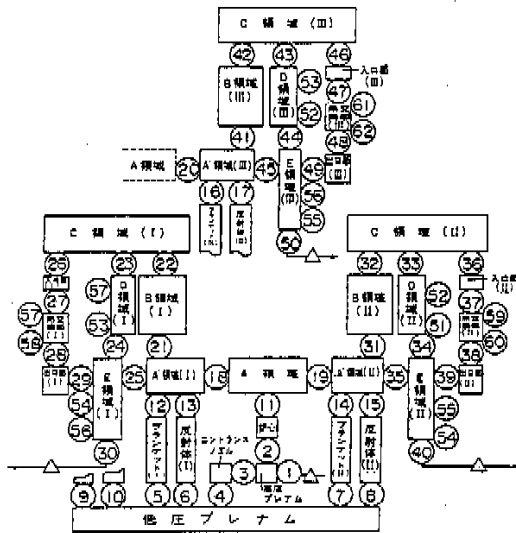


図9 熱計算モジュール

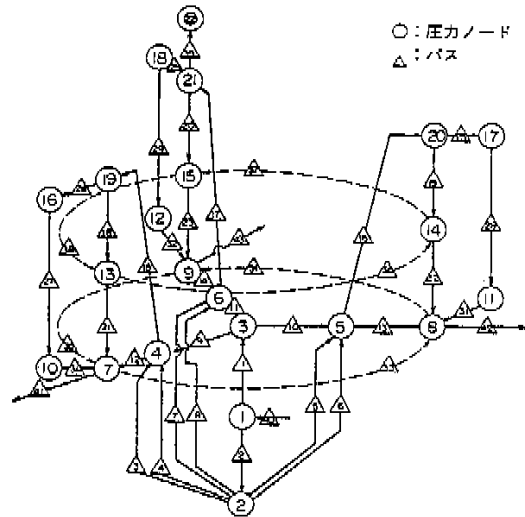


図10 流動計算モデル

考えられる直接炉心冷却システム (DRACS) の成立性確認のために実施した、約 1/6 スケール、全周モデルによる水流動試験装置体系における計算を実施した。

(1) 解析体系

① 熱計算

図9に熱計算モデル、およびプール変数の対応を示す。

② 流動計算

図10に流動計算モデルを示す。

(2) 解析結果

図11に解析結果を示す。また、図12に試験結果を示す。

(3) 検討

試験および解析は、流量コーストダウンが始まり、40秒後に定格の2%となる。また、試験体入口温度は、冷水タンク側へラインが切り換わるため、29秒後に16°Cまで降下するが、試験装置内の水が循環して3分ほどで23°C一定となる。

流量コーストダウン+コールドショックにより、炉上部プレナム内(A,B)領域が冷却され、自然循環力のバランスが崩れ、内筒を越える流量が減少し、

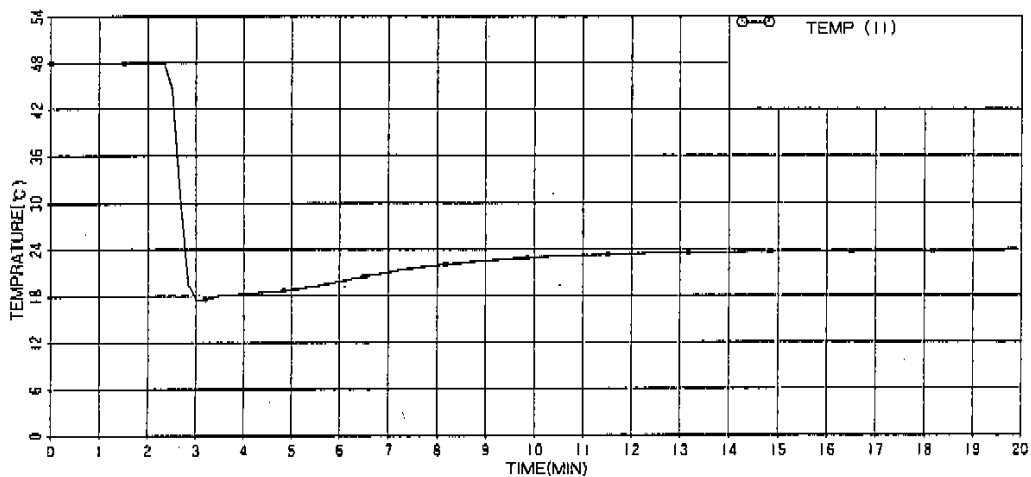


図11 炉心出口温度(解析)

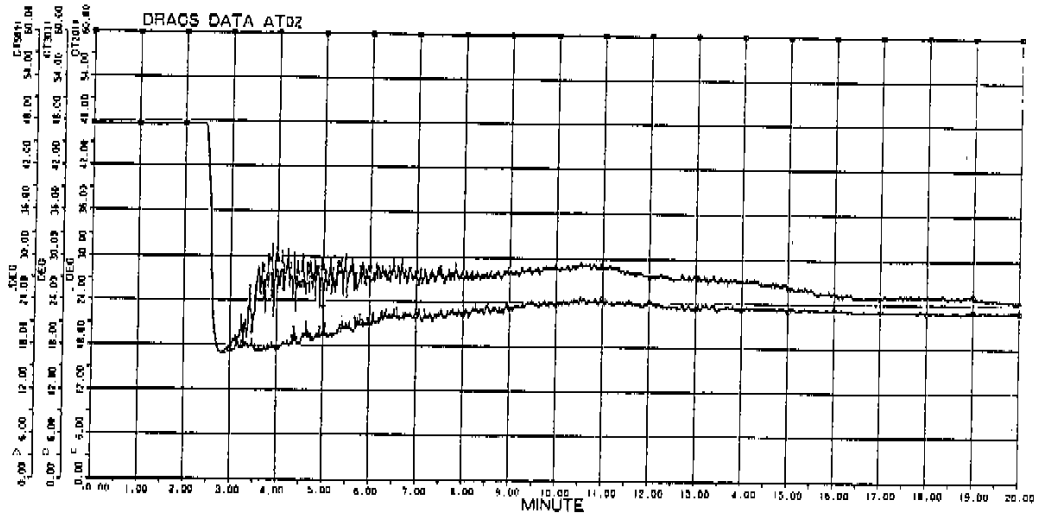


図12 炉心出口温度(実験)

フローホール流量が相対的に増加した。各領域の温度は試験結果と比較すると傾向が一致し、妥当な結果が得られた。このことは、ヒートソースとヒートシンクが同一の容器内にあり、自然循環が大きく影響する原子炉容器内における崩壊熱除去時の計算に対しても、フローネットワークによる熱流動計算が有効であることを示していると考えられる。

なお、DRACS 水流動試験装置の流体は水であり、構造材は Cu、アクリル等であるが、Super-COPD コードは、それらの物性値計算ルーチンを持っているので計算可能である。

#### 4.2 大型炉

##### (1) 解析体系

大型炉全系 (100万 KW、4 ループ) を対象とし、下記に示す解析体系で手動トリップ、補助給水による SG 除熱計算を実施した。

##### ① 流路網構成

図13に1次主冷却系流路網構成を示す。

##### (2) 熱計算モジュール構成とプール変数との対応

図14に原子炉・1次系・2次系熱計算モジュール構成を示す。

##### (3) 解析結果

図15に解析結果を示す。

##### (4) 検討

炉心および各熱交換器の温度応答、1次・2次主冷却系および水/蒸気系の流量応答等、ほぼ妥当な結果が得られ、熱、流動、動的機器、制御等の各計算モジュールの妥当性が示されていると考えられる。

#### 4.3 使用性

DRACS 水流動試験の計算においては、使用モジュールは、熱および流動モジュールのみであり、入力データも少なく、データのセットアップに要する時間も従来に比し短縮されている、また計算においても使用メモリーは約1MB、計算時間はシミュレーション時間の約1/15であり、計算のターンアラウンドは従来に比し1桁以上向上していると考えられ

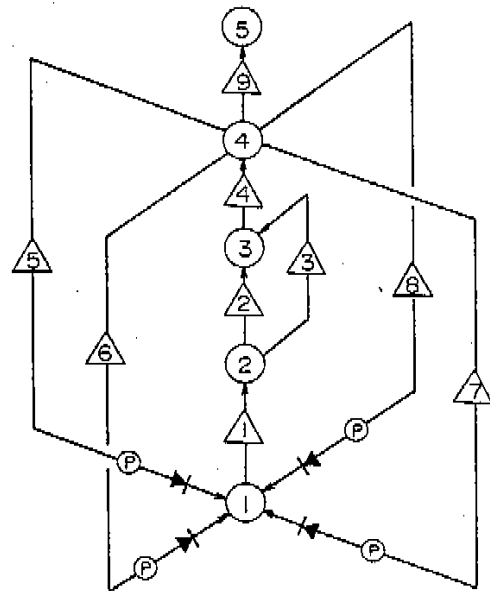


図13 1次主冷却系流路網構成

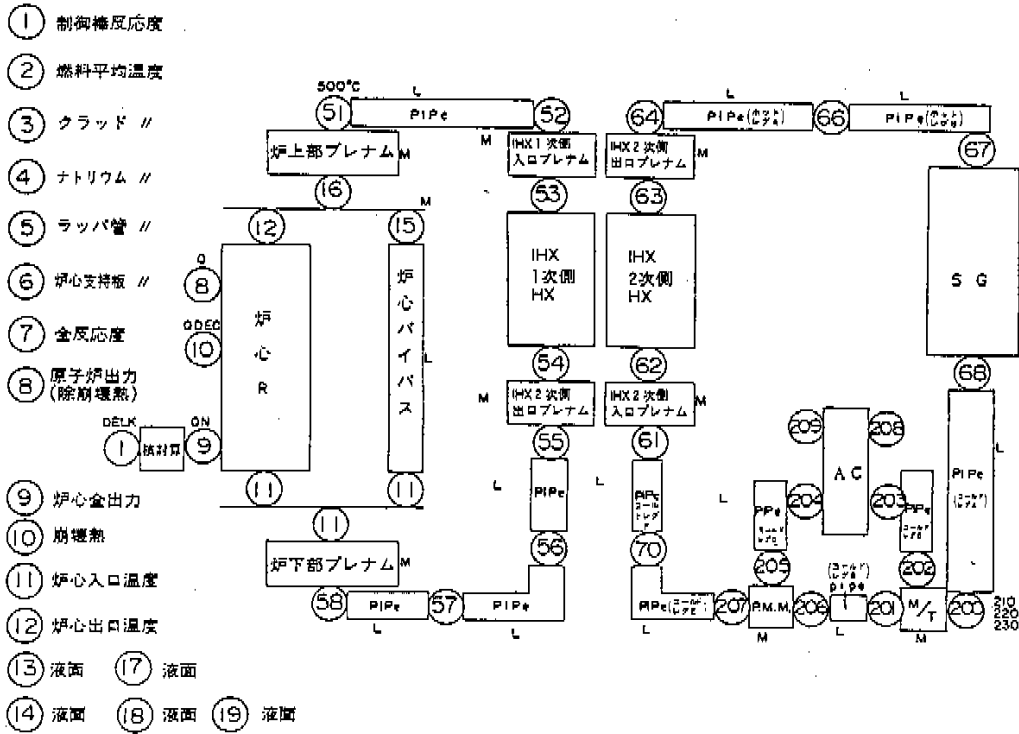


図14 熱計算モジュールとブール変数TEMP

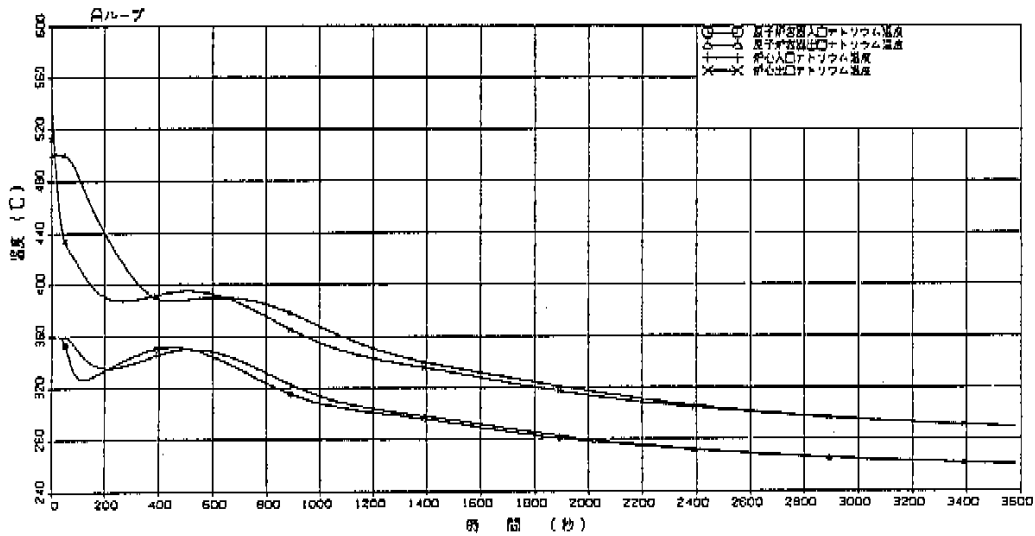


図15 原子炉廻り温度

る。

大型炉全系における計算では、ほぼすべてのモジュールを使用しているため、計算のターンアラウンドの点では従来より若干向上するのみであるが、各

モジュール単体でのチェック、入力データで計算体系の指定が可能であり、プログラムの修正が不要になる事により、解析結果を得るために要する時間は、約1/2以下となっている。

## 5. 結 言

種々のプラント概念に適用でき、かつ概念検討から設計、安全審査、性能評価まで使用可能なプラント動特性解析コード“Super-COPD”を開発した。本コードは、FBRプラント動特性解析コードに要求される、

- 1) 詳細化の程度
- 2) 検証性
- 3) 経済性
- 4) 汎用性
- 5) 整備状況
- 6) 実用性

を満足することを目標とした。このため「もんじゅ」用プラント動特性解析コード“COPD”を基に、モジュール構造の採用、汎用熱流動モデルの開発を行うことにより、上記目標をほぼ満足するコードとすることができた。

本コードは“COPD”コードの機能をすべて含むとともに、機器レベル、系統レベルの単体の解析、あるいは新系統（補助系等）の追加が容易であり、「もんじゅ」総合機能試験、性能試験についても運用可能である。なお、その試験の評価に際しては、入力の実備（試験データの読み込み、出力の実備（オーバープロット））等一部のコード整備が今後必要である。