

JAERI - M
89-223

ハイブリッド計算機によるHTTRの
動特性シミュレーション

1990年1月

島崎 潤也・鈴木 勝男・鍋島 邦彦
渡辺 光一・中川 繁昭・篠原 慶邦

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	㈱原子力資料サービス

ハイブリッド計算機によるHTTRの
動特性シミュレーション

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

島崎 潤也・鈴木 勝男・鍋島 邦彦

渡辺 光一・中川 繁昭^{*}・篠原 慶邦

(1989年12月18日受理)

新型ハイブリッド計算機を用いて、高温工学試験研究炉のプラント動特性シミュレーションを実施した。本報告では、試験研究炉のプラント動特性モデル、ハイブリッドシミュレーション方法およびその特徴について述べる。シミュレーションの結果から、ハイブリッド方式のシミュレーションがオンラインのプラント動特性シミュレーションに有効であり、全デジタル計算によるものと比較して、より高速なシミュレーションが簡単なアナログ演算の時間スケールを変更することにより実現できることがわかった。高温工学試験研究炉のプラント動特性シミュレーションでは、実時間の40倍の速さが精度上問題無く実現できた。

HTTR Plant Dynamic Simulation Using a Hybrid Computer

Junya SHIMAZAKI, Katsuo SUZUKI, Kunihiro NABESHIMA
Koichi WATANABE, Shigeaki NAKAGAWA⁺ and Yoshikuni SHINOHARA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 18, 1989)

A plant dynamic simulation of High-Temperature Engineering Test Reactor has been made using a new-type hybrid computer. This report describes a dynamic simulation model of HTTR, a hybrid simulation method for SIMSTAR and some results obtained from dynamics analysis of HTTR simulation.

It concludes that the hybrid plant simulation is useful for on-line simulation on account of its capability of computation at high speed, compared with that of all digital computer simulation. With sufficient accuracy, 40 times faster computation than real time was reached only by changing an analog time scale for HTTR simulation.

Keywords: Dynamic Simulation, Hybrid Computer, Nuclear Reactor Plant,
High-temperature Gas-cooled Reactor, HTTR

+ Department of HTTR Projects, Oarai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. 高温工学試験研究炉の概要	3
2.1 プラント構成	3
2.2 構成機器	3
3. プラント動特性モデル	13
3.1 モデルの基本的考え方	13
3.2 炉 心	17
3.3 中間熱交換器	22
3.4 加圧水冷却器	24
3.5 空気冷却器	27
3.6 その他のサブシステム	29
4. ハイブリッドシミュレーションの方法	34
4.1 ハイブリッド計算機SIMSTARの概要	34
4.2 プログラムソフトウェア	37
4.3 デジタル／アナログ計算の割付	39
4.4 プログラムの構成	40
5. 解析結果	44
5.1 定常計算	44
5.2 外乱応答解析	44
5.3 ハイブリッド計算の特徴	45
6. おわりに	54
謝 辞	54
参考文献	55

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of HTTR	3
2.1 Cooling System and Control System	3
2.2 Components of Systems	3
3. Plant Dynamics Model	13
3.1 Basic Idea of Model Construction	13
3.2 Core	17
3.3 Intermediate Heat Exchanger	22
3.4 Pressurized Water Cooler	24
3.5 Air Cooler	27
3.6 Others	29
4. Method of Hybrid Simulation	34
4.1 Hybrid Computer SIMSTAR	34
4.2 Program Software	37
4.3 Digital/Analog Assignment	39
4.4 Program Structure	40
5. Results of Analysis	44
5.1 Stationary Calculation	44
5.2 Disturbance Response Analysis	44
5.3 Some Features of Hybrid Calculation	45
6. Conclusions	54
Acknowledgement	54
References	55

1. はじめに

原子炉プラントの動特性シミュレーションは原子炉の安全解析、制御系設計評価、プラント運転制御、異常時対応の運転支援システムの開発にとって必須な基礎技術である。著者らは、動特性シミュレーションの実時間性に重点をおき、さらに実時間以上の高速化を同時に追及してプラント動特性シミュレーションの研究を進めてきた。特に、ハイブリッド計算方式（アナログ計算とデジタル計算を結合した方法）を応用したプラント動特性シミュレーションを中心に研究してきた。

ハイブリッド計算方式を用いた理由は、連続系のプラント動特性計算がアナログ要素を用いて並列で高速にできること、実時間のプラントシミュレーションが簡単に実現できること及び動特性解析の結果がハイブリッド計算機の周辺装置で容易に評価できることによる。

著者らがこれまでに進めてきたハイブリッド計算方式によるプラント動特性シミュレーション研究の流れを以下に簡単に述べる。デジタル計算機的能力及び普及に問題があった時代には原子炉の動特性シミュレーションはほとんどアナログ計算機により行い、その後ミニコンピュータが利用できるようになると、ミニコンピュータとアナログ計算機を結合して動特性シミュレーションを実施してきた。また、アナログ部の要素不足とデジタル計算機的能力不足に対応して、抵抗-コンデンサによる熱交換器シミュレータ装置等を作成し、それらを特殊なハイブリッド計算システムに組込んだりもした。汎用のハイブリッド計算機 HYSHARE 600が利用できるようになると、その計算機を用いて多目的高温ガス実験炉に対しプラントシミュレーションを実施し、動特性解析を行った。^{1), 2)}そして、昭和63年には HYSHARE 600に代り新型のハイブリッド計算機 SIMSTARを導入した。この計算機により高温工学試験研究炉のプラントシミュレーションを実施した。

この報告書では今回作成した高温工学試験研究炉のプラント動特性シミュレーションについて、プラント動特性モデル、ハイブリッドシミュレーション方法およびその特徴を述べる。それに先立ち、新型ハイブリッド計算機の特徴およびハイブリッド計算方法の利点と問題点の概略にふれる。新型の計算機 SIMSTARの利用によって動特性シミュレーションプログラムが作成しやすくなったが、いくつかの制約がシミュレーション上存在する。まず、並列処理を行うアナログ回路接続がスイッチマトリクスで自動的に処理されることからアナログ回路のパッチング及び物理方程式から機械方程式への変換作業が不要になった。また、動特性シミュレーションに用いるプログラム言語は連続系のシミュレーション言語の1つであるACSLを母体としてハイブリッド計算用に拡張したもので、計算プログラムの開発作業が容易になった。しかし、ACSL言語の使用の下では、分布定数系のシミュレーションにとって有効であった連続空間-離散時間法が採用できなくなり、動特性モデルをすべて常微分方程式で記述する必要が生じた。それにより、方程式の数が増加する傾向になり、SIMSTARで高速なプラントシミュレーションが可能であるか否かの問題が生じる。この問題は十分ノード数の少ないプラント動特性モデルを作成することで処理した。

ハイブリッド計算ではアナログ部とデジタル部の計算の分担がシミュレーションの効率にとって大きな問題である。ここではハイブリッド計算採用の基本方針として次のような原則をとる。

- 1) アナログ部の並列演算を可能な限り取入れてシミュレーションの高速化を図る。
- 2) デジタル部のジョブは直列的に処理されるので、ここには応答性の緩やかな系や計算処理時間のかからないプラントのサブシステムのジョブを割付る。
- 3) プラントのシステムや特性仕様の変更への対応を考え、プラント動特性を主要なサブシステムに分解して模擬する。

動特性シミュレーションの高速化の観点では、ハイブリッド計算のアナログ部の時間スケールを変更し高速化することが有効である。一方、デジタル部の計算の高速化は予測計算の時間ステップを広げることが考えられるが、プラント全体の動特性計算の安定性に係わり限界値を定めることは難しく、通常安全サイドに取られる。このことから上記2)の原則を与えた。第5章においてこの点を議論する。

2. 高温工学試験研究炉の概要³⁾

2. 1 プラント構成

HTTRは1次冷却材にヘリウムガスを使用した黒鉛減速型の高温ガス炉であり、原子炉出力30 MW、1次冷却材圧力4.0 kg/cm²で原子炉入口冷却材温度395℃から原子炉出口冷却材温度850℃/950℃を達成することができる。Fig. 2.1にHTTRの冷却設備及び制御設備の構成を示す。図に示すように、炉心で発生した熱を1次冷却設備（中間熱交換器、1次加圧水冷却器等）及び2次冷却設備（2次加圧水冷却器等）を介して空気冷却器へ運び、大気へ放散する構成となっている。

また、通常運転時に原子炉を安定に運転するために、原子炉出力、原子炉出口冷却材温度、原子炉入口冷却材温度等を制御するための原子炉制御設備が設けられている。制御棒の位置を調整することにより原子炉出力を制御し、原子炉出力を調整することにより原子炉出口冷却材温度を制御する。加圧水温度を空気冷却器の加圧水流量を調整することにより原子炉入口冷却材温度を制御する。

2. 2 構成機器

(1) 炉心

炉心は、六角柱状の黒鉛ブロックである燃料体、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等から構成し、これらの炉心構成要素を円柱状に積み上げたものである。1次冷却材は、原子炉圧力容器の底部に設けた1次ヘリウムノズルと二重管の内管との間の環状流路から原子炉圧力容器内に入り、原子炉圧力容器の内壁に沿って上方向に流れ、炉心上部のプレナムに至る。その後、炉心内を下降しながら加熱されて高温となり、炉心下部の高温プレナムで混合した後、二重管の内管へ送られる。Fig. 2.2に原子炉圧力容器内の構造、Fig. 2.3に炉心断面図及びFig. 2.4に燃料体の構造を示す。

(2) 中間熱交換器

中間熱交換器は、たて置きヘリカルコイル型であり、胴部は二重胴構造になっている。炉心で加熱された高温の1次冷却材は、二重管の内管内を通過して下部の1次冷却材二重ノズルの内側より流入し、ヘリカルコイル伝熱管の外側を上昇しながら2次冷却材（ヘリウムガス）により冷却されて、1次冷却材出口ノズルより1次ヘリウム循環機に導かれ昇圧される。昇圧された1次冷却材は、1次冷却材入口ノズルより内胴と外胴の間の環状部に流入して胴部を冷却した後、1次冷却材二重ノズルの環状部より二重管の環状部を通過して原子炉圧力容器へ環流する。一方、2次冷却材は二重管の内管と外管との環状部を流れ、4本の分配管に分配され、上部の2次冷却材入口ノズルに導かれる。2次冷却材入口ノズルに流入した2次冷却材は、低温管板で伝熱管内に分配され、ヘリカルコイル伝熱管内を下降しながら加熱されて下部の高温ヘッダ内に再び集められる。この高温の2次冷却材は、内筒内を上昇し、2次冷却材二重ノズルより二重管の内管へ導かれる。中間熱交換器の構造をFig. 2.5に示す。

(3) 1次加圧水冷却器

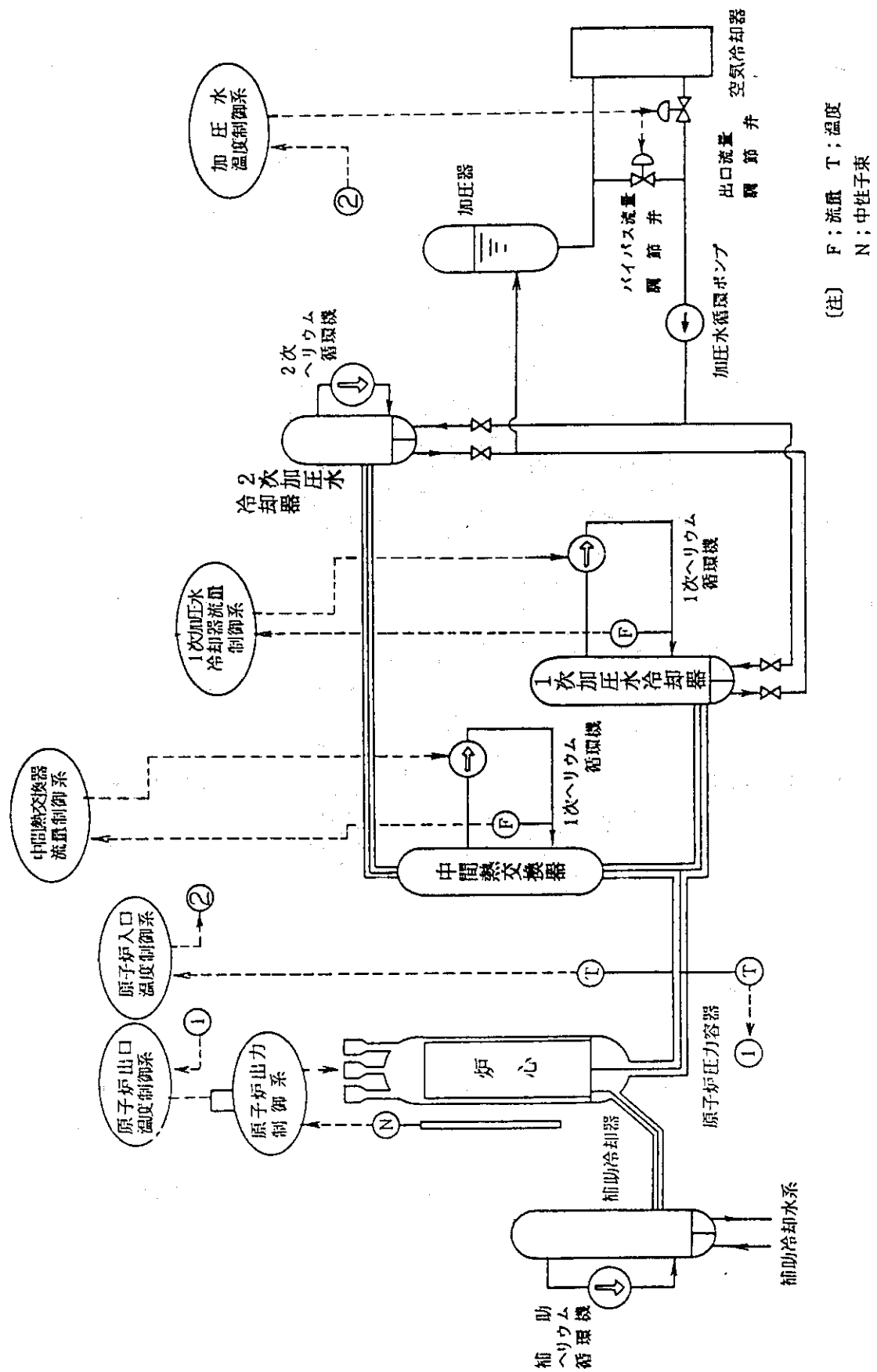
1次加圧水冷却器は、たて置きU字管型であり、胴部は二重胴構造になっている。炉心で加熱された高温の1次冷却材は、二重管の内管内を通過して胴下部の二重ノズルの内側より流入し、管外をバッフル板により流れを反転して上昇しながら加圧水により冷却されて、胴上部の1次冷却材出口ノズルより1次ヘリウム循環機に導かれ昇圧される。昇圧された1次冷却材は、1次冷却材入口ノズルより内胴と外胴との間の環状部に流入して胴部を冷却した後、二重管の環状部を通過して原子炉圧力容器へ環流する。一方、加圧水は下鏡の加圧水入口ノズルより流入し、伝熱管内を流れて加熱され、加圧水出口ノズルより出る。1次加圧水冷却器の構造をFig. 2.6に示す。

(4) 2次加圧水冷却器

2次加圧水冷却器は、1次加圧水冷却器とほぼ同じ構造であるが、2次冷却材（ヘリウムガス）が下降流となる。2次加圧水冷却器の構造をFig. 2.7に示す。

(5) 空気冷却器

空気冷却器は、フィン付管型の冷却器であり、伝熱管、ファン等からなり、伝熱管外に空気を、管内には加圧水を流す構造である。空気冷却器は、1次加圧水冷却器及び2次加圧水冷却器を介して加圧水に伝えられた熱を大気に放散する。空気冷却器に取込まれた空気は、伝熱管内を流れる加圧水と熱交換した後、上部より大気中に流出する。伝熱管内を流れる加圧水の流量は、Fig. 2.8に示すようにバイパス流量調節弁及び出口流量調節弁により調節される。



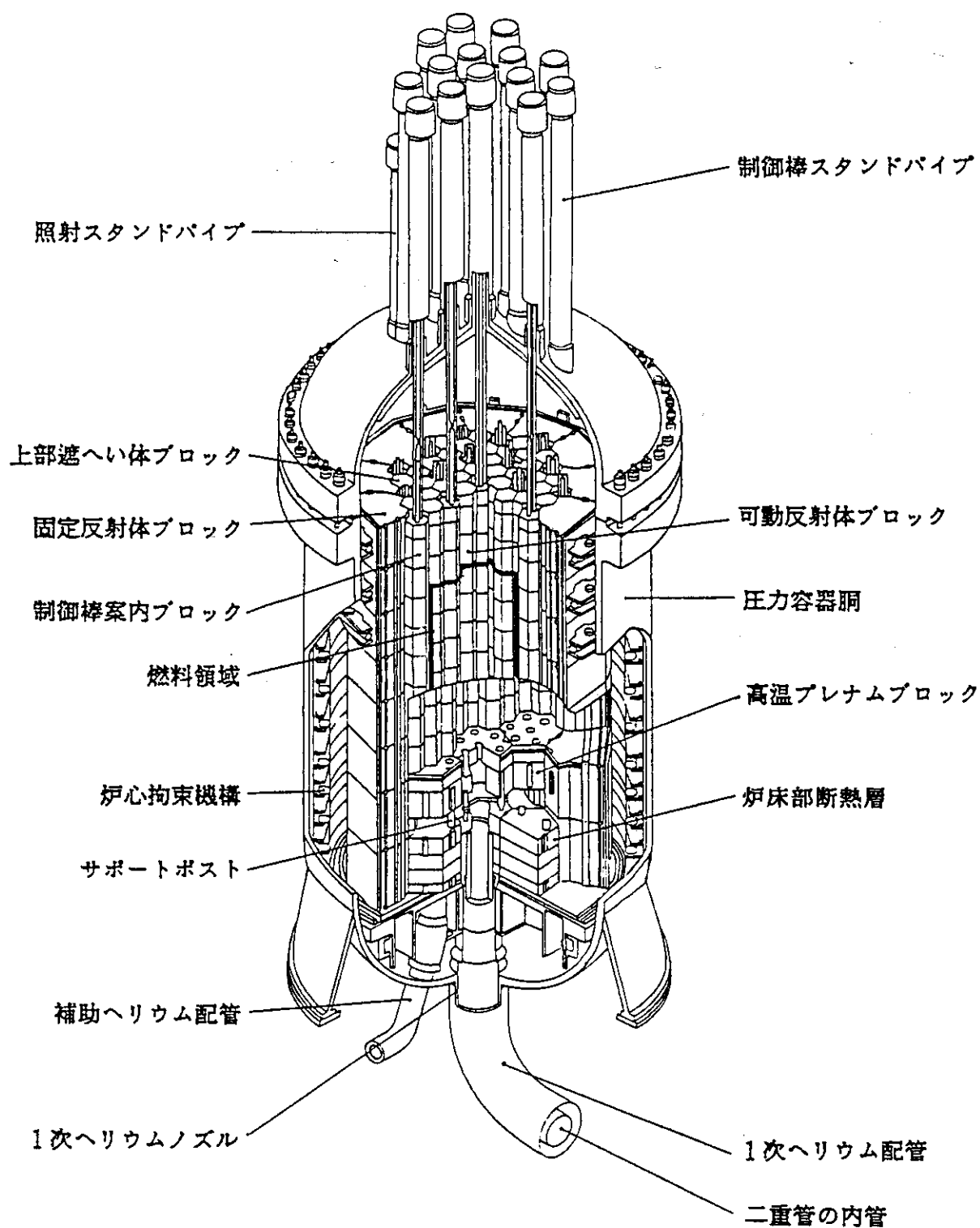


Fig. 2.2 Reactor vessel and core

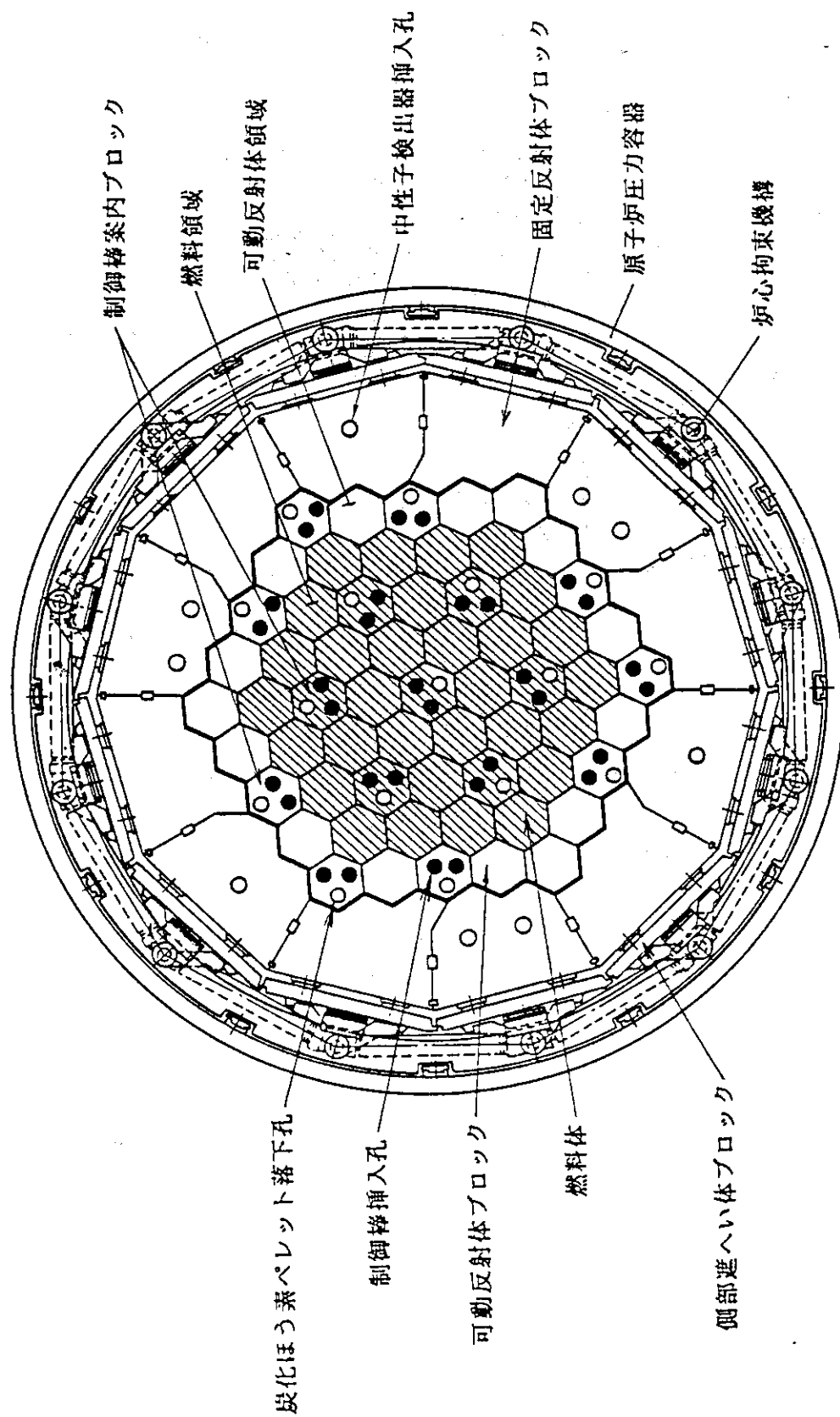


Fig. 2.3 Cross section view of reactor core

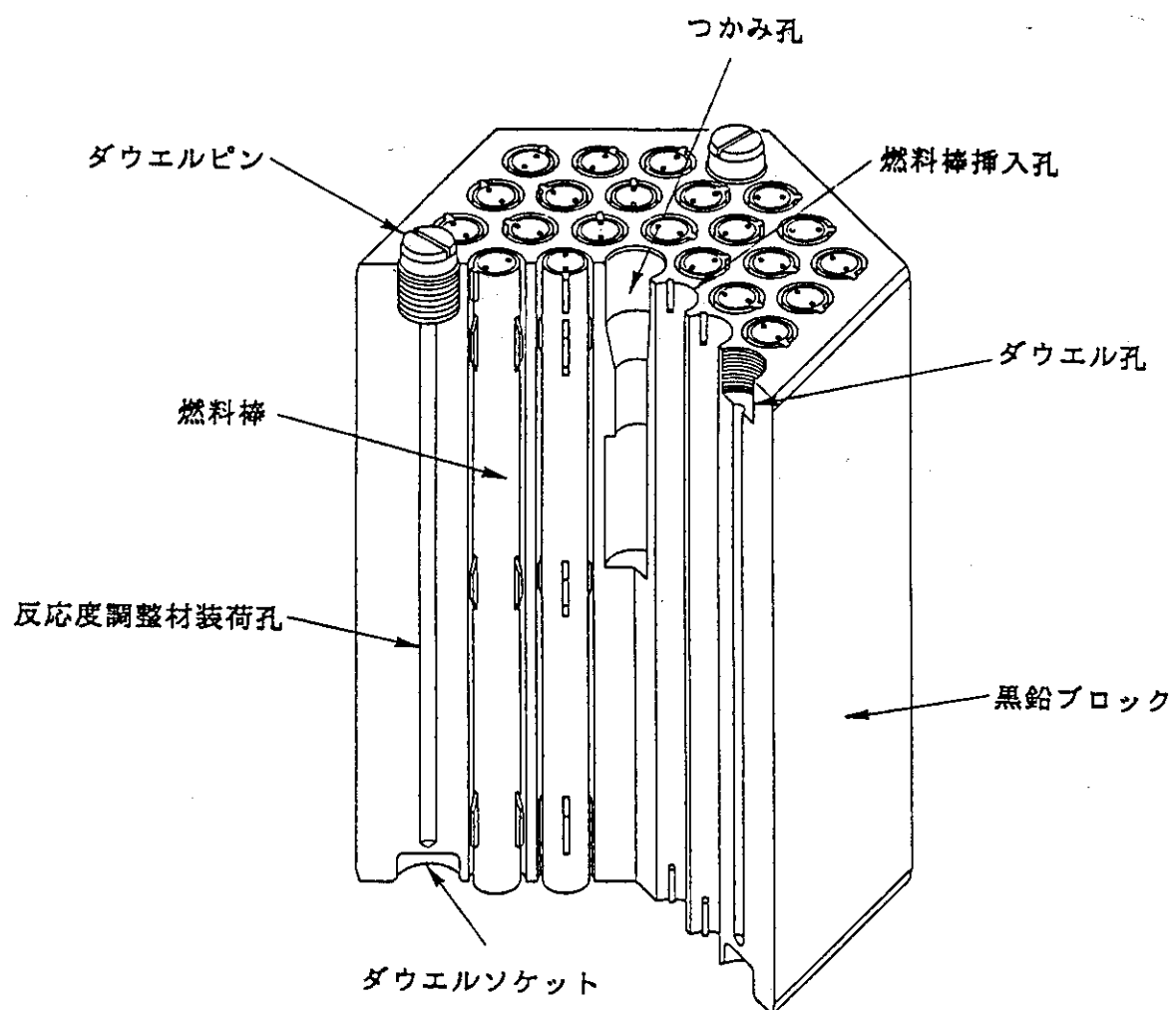


Fig. 2.4 Fuel block

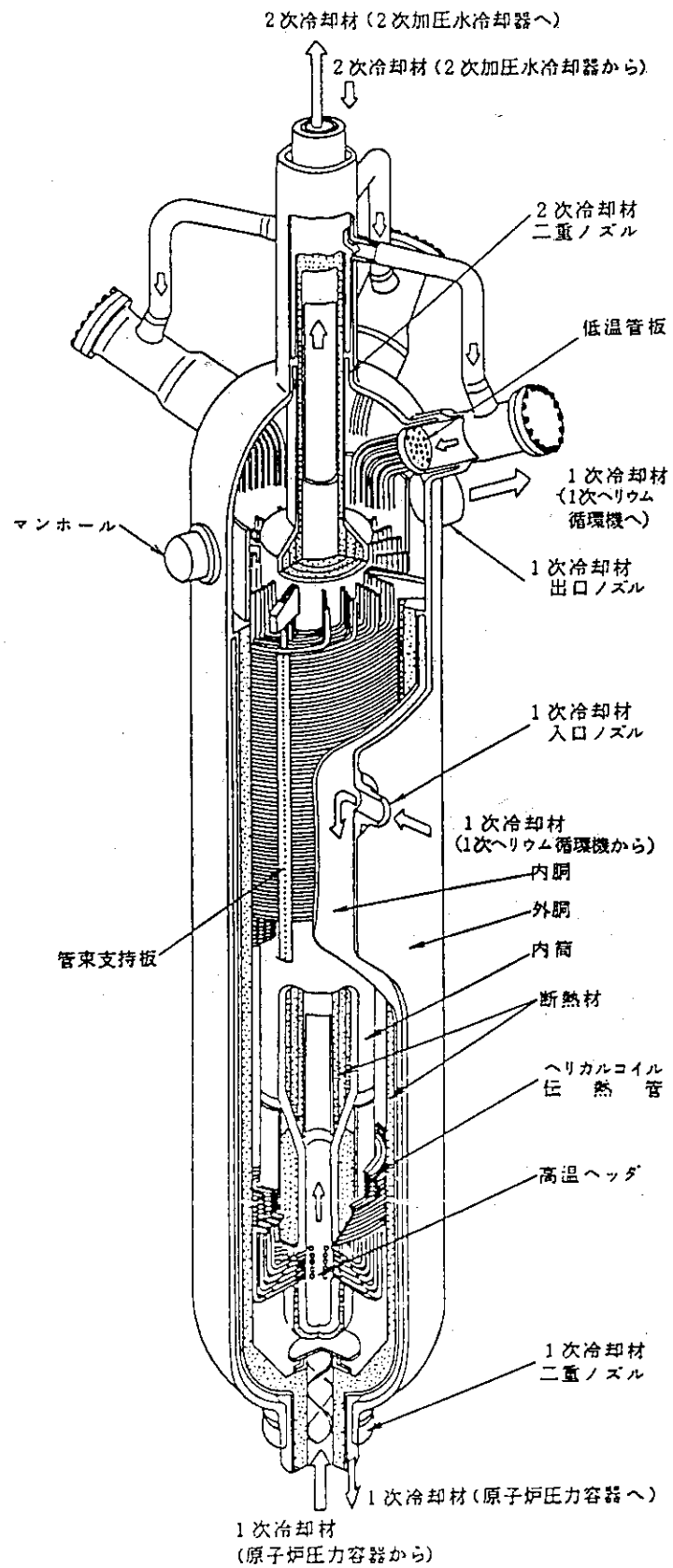


Fig. 2.5 Intermediate heat exchanger

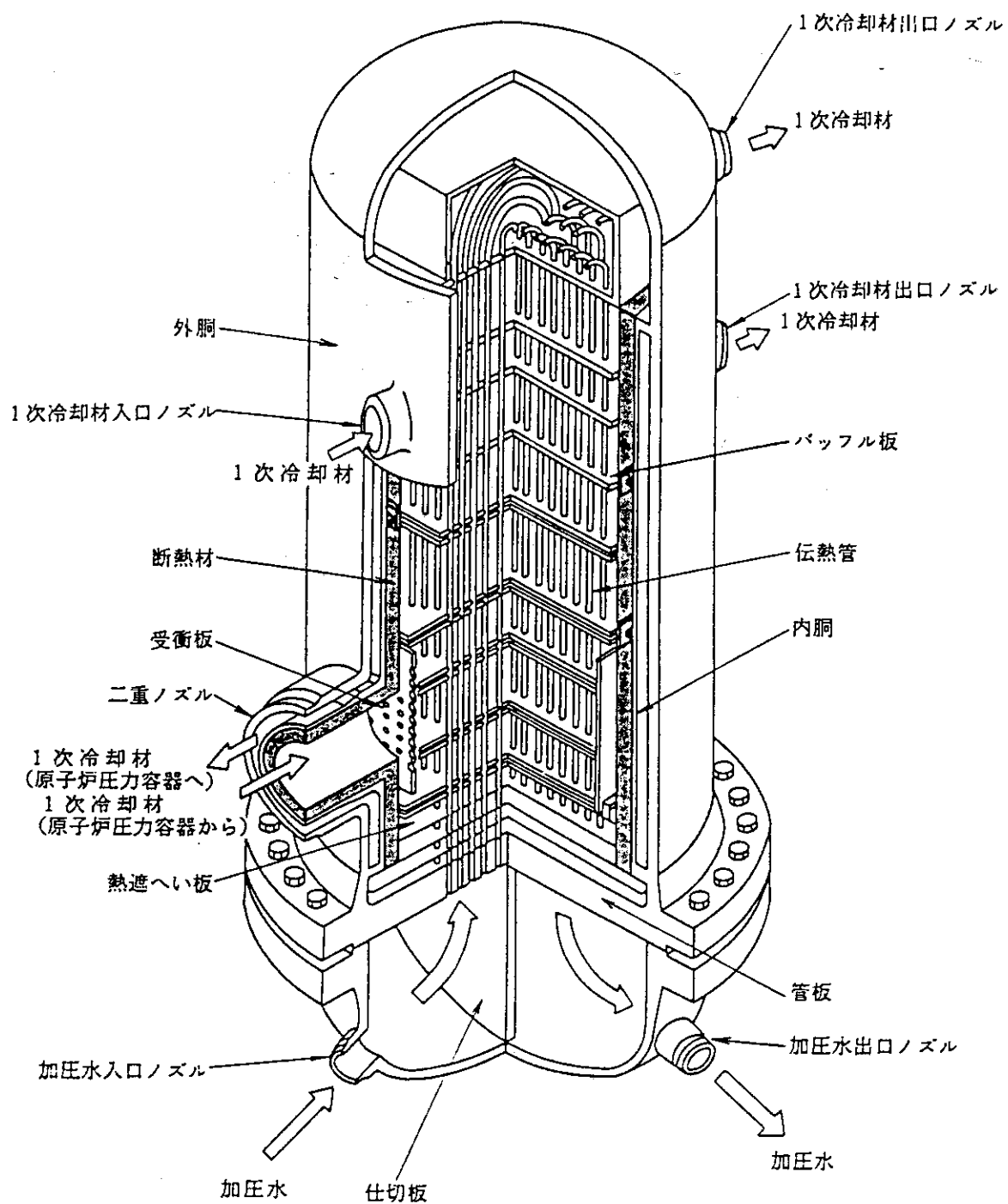


Fig. 2.6 Primary pressurized water cooler

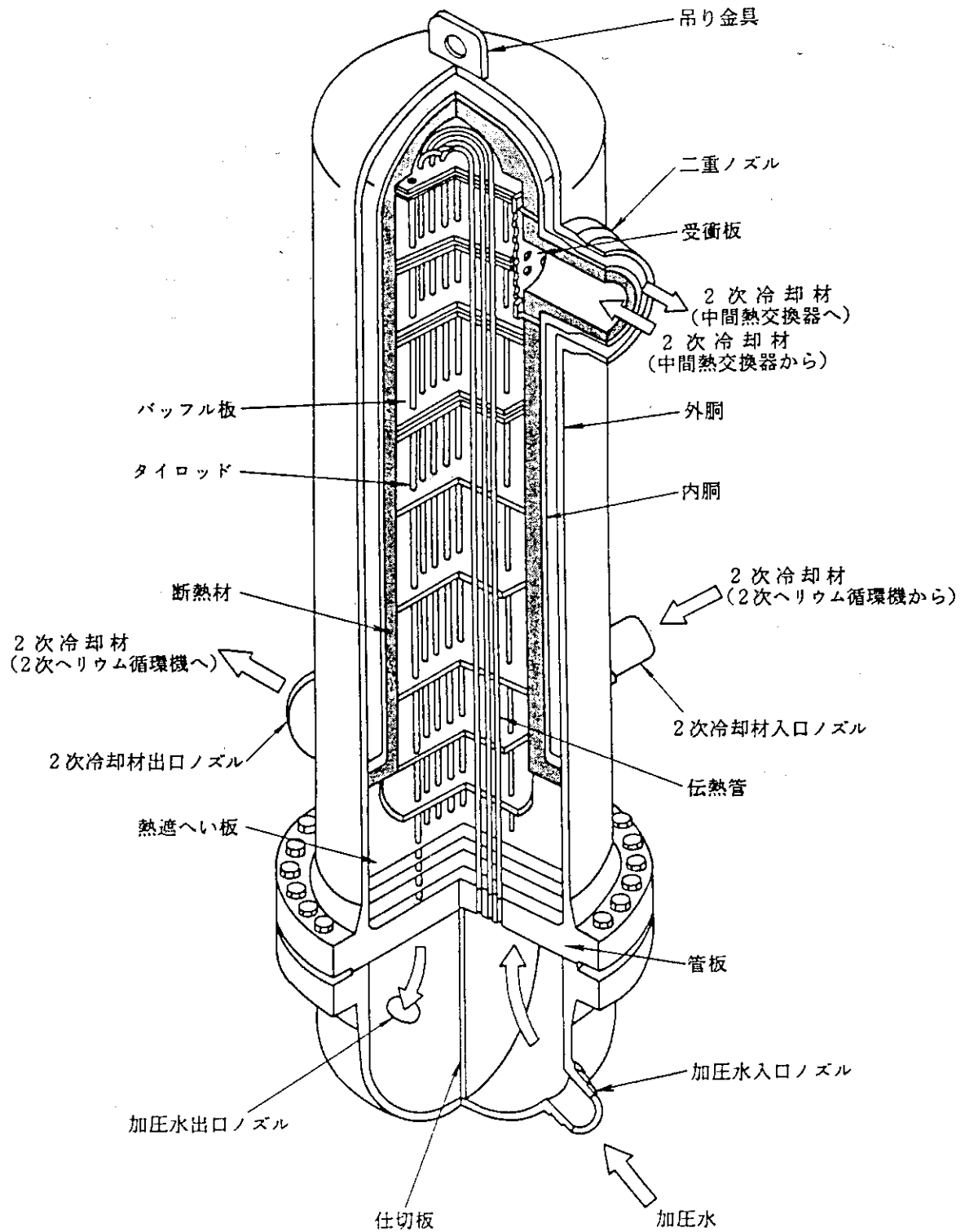


Fig. 2.7 Secondary pressurized water cooler

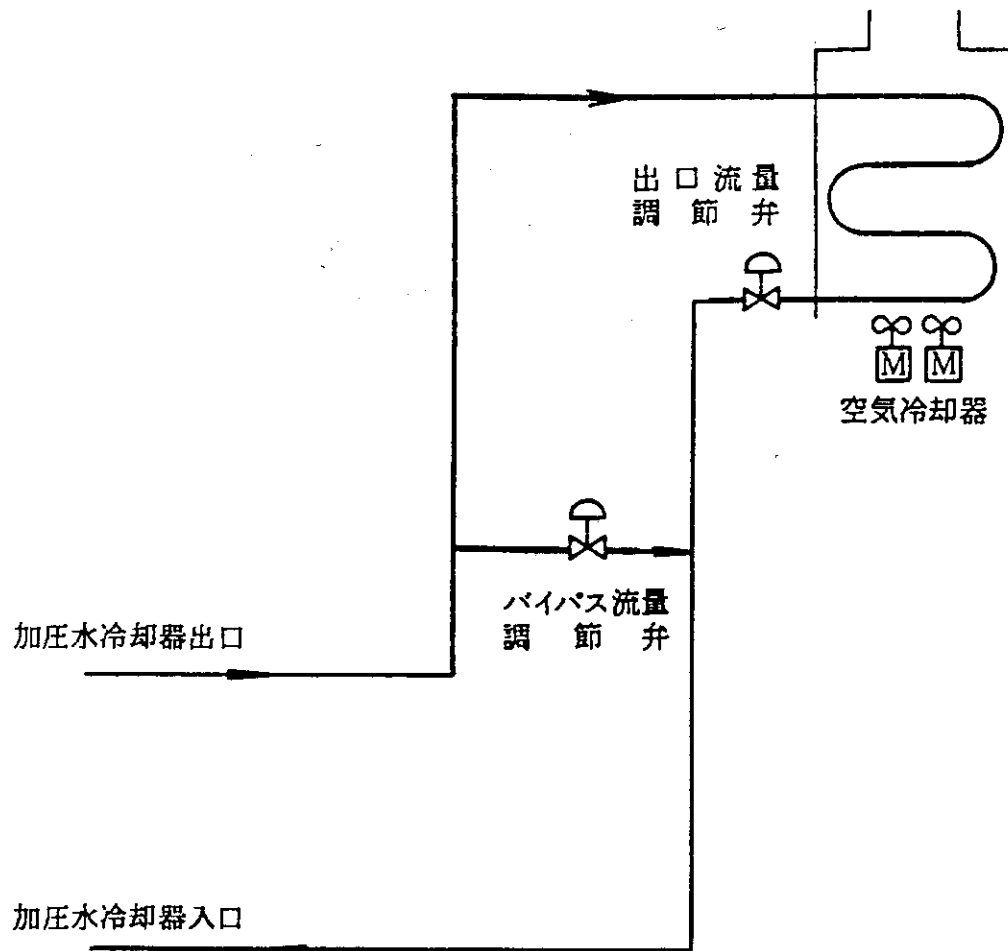


Fig. 2.8 Air cooler and bypass flow valves

3. プラント動特性モデル

3. 1 モデルの基本的考え方

ハイブリッド計算機SIMSTARを用いてプラント動特性シミュレーションを行うが、そこで用いた動特性モデル作成の基本的考え方を述べる。

それにはまず、SIMSTARの特徴を生かした動特性モデルを構成する必要がある。動特性シミュレーションに有効な特徴としては

- ① アナログ部の並列計算によって、密に結合した動特性システムを高速で安定に解くことができること
- ② 連続系シミュレーション言語ACSLによって動特性モデルの記述ができ、アナログ回路の結線や係数の設定が自動的に行われること

がある。しかし実際には、ハイブリッド計算機のハードウェア上の制約およびACSL言語による動特性モデルの記述上の制約がある。ハードウェアの制約では積分器の台数40個が最も大きい、そのほか加算器、係数器、登録パラメータの数の制約がある。ソフトウェアの点では、以前のハイブリッド計算機HYSHARE 600で分布定数系のシミュレーションにとって有効であった連続空間-離散時間(CSDT)法の採用がACSL言語使用によりできなくなり、すべて常微分方程式で記述する必要が生じた。そこで、プラント動特性モデルの方程式の数が増加する傾向になる。今回作成するプラントシミュレーションでは極力方程式の数を減らして動特性モデルを作成し、並列計算によるシミュレーションの高速化のためにアナログ要素をできるだけ用いるようにする。

方程式の数を十分圧縮したプラント動特性モデルを作成するために、主要なプラント構成要素は少数ノードで動特性を近似し、さらに動特性モデル自身についても工夫する。動特性モデルは冷却材の温度分布を設計値に合せることに重点を置き、具体的には冷却材の流れ方向に3分割することを基本にする。熱伝達には、固体-固体と固体-流体の2つの形態が表れるが、この形態を組合せて炉心熱伝達および各種の熱交換器モデルを作成する。2つの形態に対するモデル化について説明する。

(1) 固体-固体の熱伝達モデル

Fig. 3.1(a)のモデルにおいて、固体-固体の熱伝達は各ノードの平均温度をそれぞれの状態変数にとり、軸方向の熱伝導を無視し、径方向の熱伝導を考える。熱伝達量は径方向の対応する平均温度の差に比例し、その比例定数は熱抵抗と伝熱面積により決まる。さらに、熱抵抗は2つの固体の熱伝導度と2種固体間の等価熱通過率から計算する。

(2) 固体-流体の熱伝達モデル

Fig. 3.1(b)のモデルに示すように、流体が軸方向に下から上に流れており、固体の熱がこの流体に熱伝達される状態を考える。相変化や軸方向の熱伝導は無いものとする。問題はいかに少数ノードの方程式を作るかである。熱伝達は固体から流体への熱伝達と流体自身の熱移動である。固体から流体への熱伝達はごく自然に各ノードの平均温度差に比例して2つの平均温度間の熱抵抗(熱伝達係数を含めて)を介して起こると考える。流体の熱移動については、各ノードの境界の温度差に比例して起こると考える。そこで、温度の状態変数は固体ではノードの平均温度を、

流体ではノードの境界での温度を用いる。こうする理由は流体の出口温度をモデルの分割数によらずにエネルギーバランスのとれた設計値に正確に合せることができるからである。ちなみに、通常の方法では流体の状態変数の温度もノードの平均温度を用いるために、その出口温度は状態変数の外挿計算が必要になり、少数ノードのモデルでは設計値に正確に合せるのが難しい。また、流体に対するノード方程式において1つの工夫をする。それは流体温度の時間微分に先に定義した状態変数の境界温度を用いることである。正確には、流体についてもノードの平均温度の時間微分をとる方が望ましいが、そうすると流体の入口温度の微分が必要になり流体側への外乱となる。このために少しの時定数の違いとみて境界の流体温度を採用する。

こうして、固体-固体と固体-液体に対する熱伝達の動特性モデルは次の方程式で与えられる。

(固体-固体間の熱伝達)

$$C_{s1} A_{s1} R_{s1} \frac{dT_{11}}{dt} = U_{s1} S_{s1} (T_{21} - T_{11}) \quad (3.1)$$

$$C_{s2} A_{s2} R_{s2} \frac{dT_{12}}{dt} = U_{s2} S_{s2} (T_{22} - T_{12}) \quad (3.2)$$

$$C_{s3} A_{s3} R_{s3} \frac{dT_{13}}{dt} = U_{s3} S_{s3} (T_{23} - T_{13}) \quad (3.3)$$

$$C_{b1} A_{b1} R_{b1} \frac{dT_{21}}{dt} = U_{s1} S_{s1} (T_{11} - T_{21}) \quad (3.4)$$

$$C_{b2} A_{b2} R_{b2} \frac{dT_{22}}{dt} = U_{s2} S_{s2} (T_{12} - T_{22}) \quad (3.5)$$

$$C_{b3} A_{b3} R_{b3} \frac{dT_{23}}{dt} = U_{s3} S_{s3} (T_{13} - T_{23}) \quad (3.6)$$

(固体-流体間の熱伝達)

$$C_{s1} A_{s1} R_{s1} \frac{dT_{11}}{dt} = S_{c1} U_{c1} (\bar{T}_{21} - T_{11}) \quad (3.7)$$

$$C_{s2} A_{s2} R_{s2} \frac{dT_{12}}{dt} = S_{c2} U_{c2} (\bar{T}_{22} - T_{12}) \quad (3.8)$$

$$C_{s3} A_{s3} R_{s3} \frac{dT_{13}}{dt} = S_{c3} U_{c3} (\bar{T}_{23} - T_{13}) \quad (3.9)$$

$$C_{c1} A_{c1} R_{c1} \left(\frac{dT_{21}}{dt} + v \frac{T_{21} - T_{21}}{\Delta x} \right) = S_{c1} U_{c1} (T_{11} - \bar{T}_{21}) \quad (3.10)$$

$$C_{c2} A_{c2} R_{c2} \left(\frac{dT_{22}}{dt} + v \frac{T_{22} - T_{21}}{\Delta x} \right) = S_{c2} U_{c2} (T_{12} - \bar{T}_{22}) \quad (3.11)$$

$$C_{c3} A_{c3} R_{c3} \left(\frac{dT_{23}}{dt} + v \frac{T_{23} - T_{22}}{\Delta x} \right) = S_{c3} U_{c3} (T_{13} - \bar{T}_{23}) \quad (3.12)$$

ここで、

$$\bar{T}_{21} = (T_{21} + T_{21}) / 2$$

$$\bar{T}_{22} = (T_{21} + T_{22}) / 2$$

$$\bar{T}_{23} = (T_{22} + T_{23}) / 2$$

T_{11}, T_{12}, T_{13} : モデル左側の固体温度(°C)

T_{21}, T_{22}, T_{23} : モデル右側の固体または流体の温度(°C)

T_{21} : 流体入口温度(°C)

A : 物体の体積(m³)

U : 熱通過率(kcal/m²・s・°C)

C : 比熱(kcal/kg・°C)

R : 密度(kg/m³)

S : 伝熱面積(m²)

v : 流体の速度(m/s)

添字は、それぞれ次を意味する。

a, b, s : 固体

c : 液体

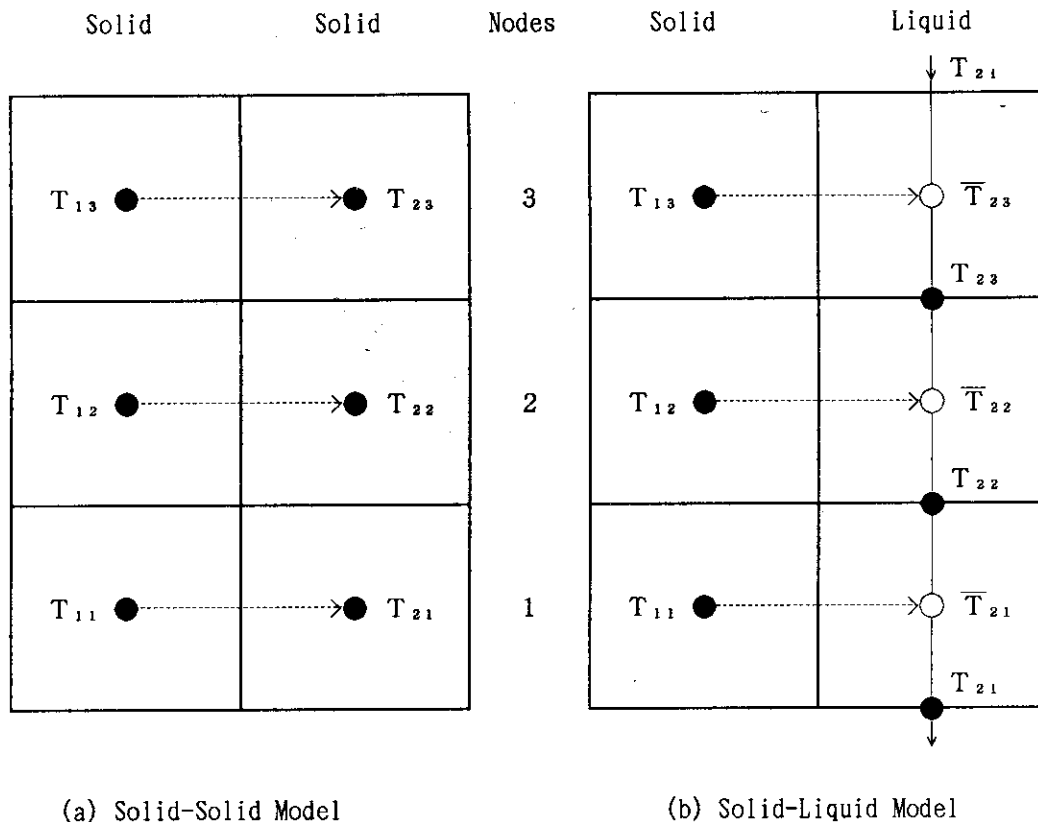


Fig. 3.1 Heat transfer node model

動特性モデルを作成する基本として、プラント動特性モデルの変更や制御特性のケーススタディへの対応を考え、HTTRプラントモデルを次の様な主要サブシステムで構成する。そこで用いる動特性モデルとその特徴を簡単に示す。

(1) 炉心

核的部分は即発跳躍近似、遅発中性子1組近似とする1点炉動特性方程式で記述する。炉心熱伝達部分は冷却材流れ方向を3分割とし、径方向には燃料、スリーブ、冷却材、構造材の4つの熱伝達要素を模擬する。フィードバック反応度としては燃料のドップラ効果と黒鉛の構造材の温度効果による反応度を扱う。従って、炉心は核的方程式1個、熱伝達方程式12個の計13個のノード方程式で記述される。

(2) 中間熱交換器 (IHX)

中間熱交換器はガス/ガスのヘリカルコイル型の熱交換器であるので、1次、2次の冷却材（ヘリウムガス）及び金属壁について流れ（軸）方向に3分割し、向流型の熱交換器として扱う。従って、中間熱交換器は9個のノード方程式で記述される。

(3) 加圧水冷却器 (PWC)

1次加圧水冷却器（20 MW）と2次加圧水冷却器（10 MW）各々について同じ熱交換器モデルとする。IHXと異なり、加圧水冷却器はガス/水の向流型の熱交換器であるので、伝熱管の動特性は2次側冷却水に含ませ、その動特性を省略する。従って、加圧水冷却器は6個のノード

ド方程式で記述できる。

(4) 空気冷却器 (AC)

空気冷却器は水/空気の直交流型の熱交換器であり、加圧水冷却器と同様に伝熱管の動特性を省略し、1次(水)側は3分割にする。空気側の温度分布を必要としないことにして、2次(空気)側は1分割で近似する。従って、空気冷却器は4個のノード方程式で記述される。

(5) その他の構成要素

以上の様にモデル化したプラントのサブシステムを接続する要素として、1次冷却材(ヘリウムガス)の合流、1次PWCと2次PWCの2次側冷却材(水)の合流、各サブシステム間の輸送遅れ等をモデル化する。また、制御系としては原子炉出力制御系のみを扱う。

3. 2 炉心⁴⁾

(1) 核計算モデル

原子炉出力を表す中性子束は即発跳躍近似、遅発中性子は1組近似の一点炉近似の動特性方程式を用いる。反応度 δk は制御系からの反応度、燃料温度、減速材温度からのフィードバック反応度、及び制御棒の操作量からの反応度からなる。従って、核的モデルの基礎方程式は以下のようになる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{l} n + \lambda C = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{l} n - \lambda C \quad (3.14)$$

ここで、

- n : 中性子数(-)
- C : 遅発中性子先行核個数(-)
- δk : 反応度($\Delta k/k$)
- l : 中性子寿命(s)
- β : 遅発中性子生成割合(-)
- λ : 遅発中性子1組の崩壊定数(1/s)

$$\begin{aligned} \delta k = & \delta k_r + \delta k_c + \alpha_1(T_{f1}-T_{f10}) + \alpha_2(T_{f2}-T_{f20}) + \alpha_3(T_{f3}-T_{f30}) \\ & + \alpha_4(T_{b1}-T_{b10}) + \alpha_5(T_{b2}-T_{b20}) + \alpha_6(T_{b3}-T_{b30}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

ここで、

- T_{fi} : 燃料温度 ($i = 1, 2, 3$)
- T_{fi0} : 燃料温度の初期値
- T_{bi} : 減速材温度 ($i = 1, 2, 3$)
- T_{bi0} : 減速材温度の初期値

α_i : 反応度温度係数 ($i = 1, \dots, 6$)

δk_o : 制御系による反応度

δk_r : 制御棒操作による反応度

式(3.13)～(3.15)を状態変数方程式に整理すると次式ようになる。

$$\frac{dC}{dt} = a_{11}C + a_{12}n \quad (3.16)$$

$$n = \frac{\lambda l}{\beta - \delta k} C \quad (3.17)$$

ここで、

$$a_{11} = -\lambda, \quad a_{12} = \frac{\beta}{l}$$

この方程式は安定な1次遅れ回路と割算器によってアナログ回路で実現できる。

(2) 熱伝達モデル

炉心部の熱伝達特性モデルは、燃料チャンネルについて軸方向の出力及び温度分布を取扱えるように軸方向を3分割する。また半径方向の熱伝達要素は、燃料コンパクト、スリーブ、冷却材、黒鉛ブロックとし、1分割要素とする。

Fig. 3.2 に示すように3分割要素モデルの各ノードにおけるエネルギー収支の方程式を求めると次のようになる。

$$C_{f,i} A_{f,i} R_{f,i} \frac{dT_{f,i}}{dt} = q_{f,i} + U_{f,i} S_{f,i} (T_{s,i} - T_{f,i}) \quad (3.18)$$

$$C_{s,i} A_{s,i} R_{s,i} \frac{dT_{s,i}}{dt} = U_{f,i} S_{f,i} (T_{f,i} - T_{s,i}) + S_{c,i} U_{c,i} (\bar{T}_{c,i} - T_{s,i}) \quad (3.19)$$

$$C_{c,i} A_{c,i} R_{c,i} \left(\frac{dT_{c,i}}{dt} + v_i \frac{T_{c,i} - T_{c,i-1}}{\Delta x} \right) = S_{c,i} U_{c,i} (T_{s,i} - \bar{T}_{c,i}) + S_{b,i} U_{b,i} (T_{b,i} - \bar{T}_{c,i}) \quad (3.20)$$

$$C_{b,i} A_{b,i} R_{b,i} \frac{dT_{b,i}}{dt} = S_{b,i} U_{b,i} (\bar{T}_{c,i} - T_{b,i}) \quad (3.21)$$

ただし $\bar{T}_{c,i} = (T_{c,i} + T_{c,i-1}) / 2$ ($i = 1, 2, 3$)

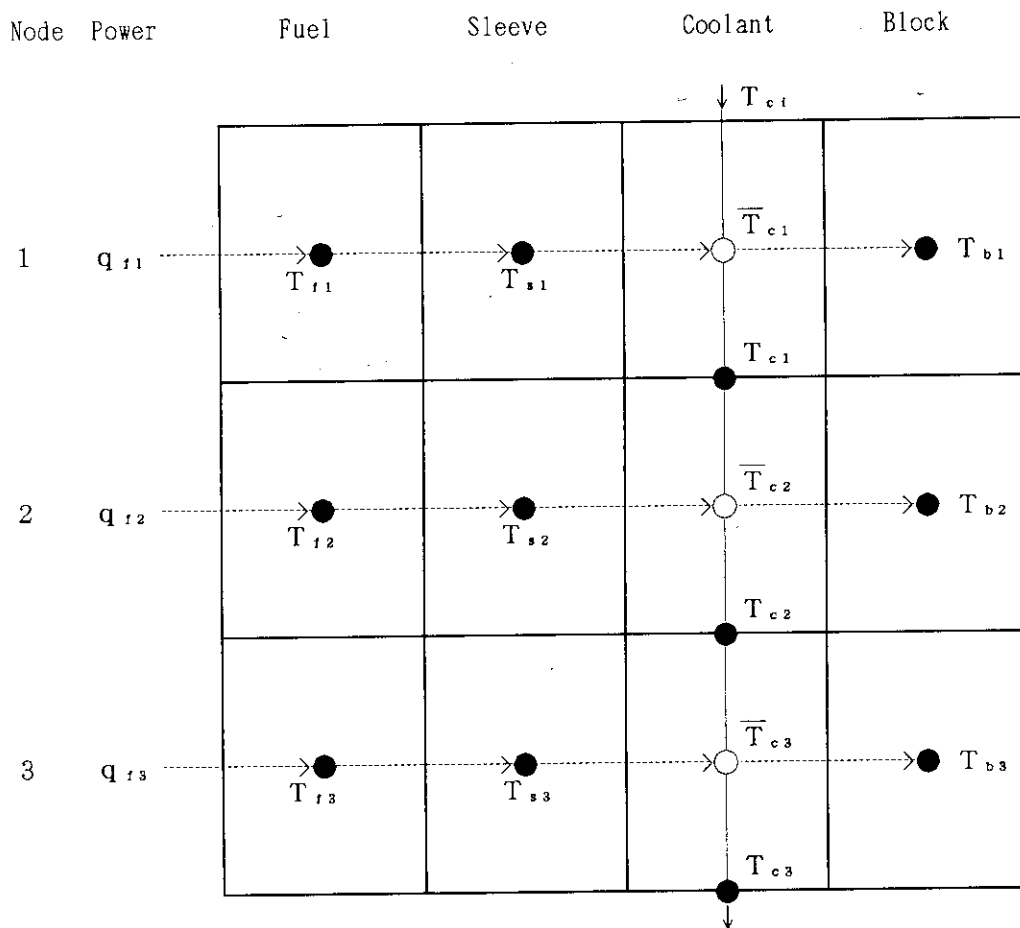


Fig. 3.2 Heat transfer model of core

ここで英文字と添字の意味は次の通りである。

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

q : 燃料棒 1 本あたりの発熱量 ($\text{kcal/sec}\cdot\text{pin}$)

A : 燃料棒 1 本あたりの体積 (m^3/pin)

S : 燃料棒 1 本あたりの断面積 (m^2/pin)

C : 比熱 ($\text{kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

R : 密度 (kg/cm^3)

U : 熱通過率 ($\text{kcal/m}^2\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)

v : 冷却材流速 (m/sec)

なお、添字はつぎのことを意味する。

f : 燃料

s : スリーブ

c : 冷却材

b : 減速材

i : 流れ方向上から i 番めの分割要素

式(3.18)~(3.21)を状態変数方程式の形で書き直すと、次のようになる。

(燃料チャンネル)

$$\frac{dT_{f1}}{dt} = a_{21}T_{f1} + a_{22}T_{s1} + a_{23}Q_{f1} \quad (3.22)$$

$$\frac{dT_{f2}}{dt} = a_{31}T_{f2} + a_{32}T_{s2} + a_{33}Q_{f2} \quad (3.23)$$

$$\frac{dT_{f3}}{dt} = a_{41}T_{f3} + a_{42}T_{s3} + a_{43}Q_{f3} \quad (3.24)$$

ここで、

$$a_{21} = \frac{-U_{f1}S_{f1}}{C_{f1}A_{f1}R_{f1}}, \quad a_{22} = -a_{21}, \quad a_{23} = \frac{1}{C_{f1}A_{f1}R_{f1}}$$

$$a_{31} = \frac{-U_{f2}S_{f2}}{C_{f2}A_{f2}R_{f2}}, \quad a_{32} = -a_{31}, \quad a_{33} = \frac{1}{C_{f2}A_{f2}R_{f2}}$$

$$a_{41} = \frac{-U_{f3}S_{f3}}{C_{f3}A_{f3}R_{f3}}, \quad a_{42} = -a_{41}, \quad a_{43} = \frac{1}{C_{f3}A_{f3}R_{f3}}$$

(スリーブ)

$$\frac{dT_{s1}}{dt} = a_{51}T_{f1} + a_{52}T_{s1} + a_{53}T_{c1} + a_{54}T_{c2} \quad (3.25)$$

$$\frac{dT_{s2}}{dt} = a_{61}T_{f2} + a_{62}T_{s2} + a_{63}T_{c2} + a_{64}T_{c1} \quad (3.26)$$

$$\frac{dT_{s3}}{dt} = a_{71}T_{f3} + a_{72}T_{s3} + a_{73}T_{c3} + a_{74}T_{c2} \quad (3.27)$$

ここで、

$$a_{51} = \frac{U_{f1}S_{f1}}{C_{s1}A_{s1}R_{s1}}, \quad a_{52} = \frac{-(U_{f1}S_{f1} + U_{c1}S_{c1})}{C_{s1}A_{s1}R_{s1}}, \quad a_{53} = \frac{S_{c1}U_{c1}}{2 \cdot C_{s1}A_{s1}R_{s1}}, \quad a_{54} = a_{53}$$

$$a_{61} = \frac{U_{f2}S_{f2}}{C_{s2}A_{s2}R_{s2}}, \quad a_{62} = \frac{-(U_{f2}S_{f2} + U_{c2}S_{c2})}{C_{s2}A_{s2}R_{s2}}, \quad a_{63} = \frac{S_{c2}U_{c2}}{2 \cdot C_{s2}A_{s2}R_{s2}}, \quad a_{64} = a_{63}$$

$$a_{71} = \frac{U_{f3}S_{f3}}{C_{s3}A_{s3}R_{s3}}, \quad a_{72} = \frac{-(U_{f3}S_{f3} + U_{c3}S_{c3})}{C_{s3}A_{s3}R_{s3}}, \quad a_{73} = \frac{S_{c3}U_{c3}}{2 \cdot C_{s3}A_{s3}R_{s3}}, \quad a_{74} = a_{73}$$

(冷却材)

$$\frac{dT_{c1}}{dt} = a_{81}T_{s1} + a_{82}T_{c1} + a_{83}T_{b1} + a_{84}T_{c2} \quad (3.28)$$

$$\frac{dT_{c2}}{dt} = a_{91}T_{s2} + a_{92}T_{c2} + a_{93}T_{b2} + a_{94}T_{c1} \quad (3.29)$$

$$\frac{dT_{c3}}{dt} = a_{101}T_{s3} + a_{102}T_{c3} + a_{103}T_{b3} + a_{104}T_{c2} \quad (3.30)$$

ここで、

$$a_{81} = \frac{S_{c1}U_{c1}}{C_{c1}A_{c1}R_{c1}}, \quad a_{82} = \frac{-(\Delta x (S_{c1}U_{c1} + S_{c1}U_{b1}) + 2 \cdot C_{c1}A_{c1}R_{c1} v_1)}{2 \cdot C_{c1}A_{c1}R_{c1} \Delta x}$$

$$a_{83} = \frac{S_{b1}U_{b1}}{C_{c1}A_{c1}R_{c1}}, \quad a_{84} = \frac{-(\Delta x (S_{c1}U_{c1} + S_{b1}U_{b1}) - 2 \cdot C_{c1}A_{c1}R_{c1} v_1)}{2 \cdot C_{c1}A_{c1}R_{c1} \Delta x}$$

$$a_{91} = \frac{S_{c2}U_{c2}}{C_{c2}A_{c2}R_{c2}}, \quad a_{92} = \frac{-(\Delta x (S_{c2}U_{c2} + S_{c2}U_{b2}) + 2 \cdot C_{c2}A_{c2}R_{c2} v_2)}{2 \cdot C_{c2}A_{c2}R_{c2} \Delta x}$$

$$a_{93} = \frac{S_{b2}U_{b2}}{C_{c2}A_{c2}R_{c2}}, \quad a_{94} = \frac{-(\Delta x (S_{c2}U_{c2} + S_{b2}U_{b2}) - 2 \cdot C_{c2}A_{c2}R_{c2} v_2)}{2 \cdot C_{c2}A_{c2}R_{c2} \Delta x}$$

$$a_{101} = \frac{S_{c3}U_{c3}}{C_{c3}A_{c3}R_{c3}}, \quad a_{102} = \frac{-(\Delta x (S_{c3}U_{c3} + S_{c3}U_{b3}) + 2 \cdot C_{c3}A_{c3}R_{c3} v_3)}{2 \cdot C_{c3}A_{c3}R_{c3} \Delta x}$$

$$a_{103} = \frac{S_{b3}U_{b3}}{C_{c3}A_{c3}R_{c3}}, \quad a_{104} = \frac{-(\Delta x (S_{c3}U_{c3} + S_{b3}U_{b3}) - 2 \cdot C_{c3}A_{c3}R_{c3} v_3)}{2 \cdot C_{c3}A_{c3}R_{c3} \Delta x}$$

(ブロック)

$$\frac{dT_{b1}}{dt} = a_{111}T_{c1} + a_{112}T_{b1} + a_{113}T_{c1} \quad (3.31)$$

$$\frac{dT_{b2}}{dt} = a_{121}T_{c2} + a_{122}T_{b2} + a_{123}T_{c1} \quad (3.32)$$

$$\frac{dT_{b3}}{dt} = a_{131}T_{c3} + a_{132}T_{b3} + a_{133}T_{c2} \quad (3.33)$$

ここで、

$$a_{111} = \frac{S_{b1}U_{b1}}{2 \cdot C_{b1}A_{b1}R_{b1}}, \quad a_{112} = \frac{-S_{b1}U_{b1}}{C_{b1}A_{b1}R_{b1}}, \quad a_{113} = a_{111}$$

$$a_{121} = \frac{S_{b2}U_{b2}}{2 \cdot C_{b2}A_{b2}R_{b2}}, \quad a_{122} = \frac{-S_{b2}U_{b2}}{C_{b2}A_{b2}R_{b2}}, \quad a_{123} = a_{121}$$

$$a_{131} = \frac{S_{b2}U_{b2}}{2 \cdot C_{b2}A_{b2}R_{b2}}, \quad a_{132} = \frac{-S_{b2}U_{b2}}{C_{b2}A_{b2}R_{b2}}, \quad a_{133} = a_{131}$$

3. 3 中間熱交換器

中間熱交換器のモデルでは、冷却材流れ方向の温度分布を扱うために流れ方向に3分割する。径方向の温度分布を扱うため、1次冷却材、伝熱管および2次冷却材を1分割要素としそれらの要素間の熱伝達を扱う。中間熱交換器は対向流型熱交換器であるので、Fig. 3.3 に中間熱交換器のノード分割を示すように1次冷却材ノード出口は2次冷却材ノード入口に対応する。各ノード毎のエネルギー収支を表す方程式は次のようになる。

(1次冷却材)

$$W_1 C_1 \left(\frac{dT_{11}}{dt} + v_1 \frac{T_{11} - \bar{T}_{10}}{\Delta x_1} \right) = \frac{v_1 S_1 U_1}{\Delta x_1} (T_{m1} - \bar{T}_{11}) \quad (3.34)$$

$$W_1 C_1 \left(\frac{dT_{12}}{dt} + v_1 \frac{T_{12} - T_{11}}{\Delta x_1} \right) = \frac{v_1 S_1 U_1}{\Delta x_1} (T_{m2} - \bar{T}_{12}) \quad (3.35)$$

$$W_1 C_1 \left(\frac{dT_{13}}{dt} + v_1 \frac{T_{13} - T_{12}}{\Delta x_1} \right) = \frac{v_1 S_1 U_1}{\Delta x_1} (T_{m3} - \bar{T}_{13}) \quad (3.36)$$

(伝熱管)

$$C_m A_m R_m \frac{dT_{m1}}{dt} = U_1 S_1 (\bar{T}_{11} - T_{m1}) + U_2 S_2 (\bar{T}_{21} - T_{m1}) \quad (3.37)$$

$$C_m A_m R_m \frac{dT_{m2}}{dt} = U_1 S_1 (\bar{T}_{12} - T_{m2}) + U_2 S_2 (\bar{T}_{22} - T_{m2}) \quad (3.38)$$

$$C_m A_m R_m \frac{dT_{m3}}{dt} = U_1 S_1 (\bar{T}_{13} - T_{m3}) + U_2 S_2 (\bar{T}_{23} - T_{m3}) \quad (3.38)$$

(2次冷却材)

$$W_2 C_2 \left(\frac{dT_{21}}{dt} + v_2 \frac{T_{21} - T_{22}}{\Delta x_2} \right) = \frac{v_2 U_2 S_2}{\Delta x_2} (T_{m1} - \bar{T}_{21}) \quad (3.40)$$

$$W_2 C_2 \left(\frac{dT_{22}}{dt} + v_2 \frac{T_{22} - T_{23}}{\Delta x_2} \right) = \frac{v_2 U_2 S_2}{\Delta x_2} (T_{m2} - \bar{T}_{22}) \quad (3.41)$$

$$W_2 C_2 \left(\frac{dT_{23}}{dt} + v_2 \frac{T_{23} - T_{20}}{\Delta x_2} \right) = \frac{v_2 U_2 S_2}{\Delta x_2} (T_{m3} - \bar{T}_{23}) \quad (3.42)$$

ただし、

$$\bar{T}_{1i} = (T_{1i} + T_{1i-1})/2 \quad (i=1, 2, 3)$$

$$\bar{T}_{2i} = (T_{2i} + T_{2i+1})/2 \quad (i=1, 2, 3)$$

T_{10} : 1次冷却材入口温度

T_{24} : 2次冷却材入口温度

また、方程式中の変数は次のとおりである。

T_{1j} : j -ノード出口の1次冷却材温度(°C)

($j=1, 2, 3$)

T_{2j} : j -ノード出口の2次冷却材温度($^{\circ}\text{C}$)

($j=1, 2, 3$)

T_{1i} : 1次冷却材入口温度($^{\circ}\text{C}$)

T_{2i} : 2次冷却材入口温度($^{\circ}\text{C}$)

v_i : 流速(m/s) ($i=1$; 1次冷却材、
 $i=2$; 2次冷却材)

Δx_i : 流れ方向分割長さ(m) ($i=1$; 1次側、
 $i=2$; 2次側)

W_i : 重量流量(kg/s) ($i=1$; 1次冷却材、
 $i=2$; 2次冷却材)

C_i : 比熱($\text{kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) ($i=1$; 1次冷却材、
 $i=2$; 2次冷却材)

U_i : 熱通過率($\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$) ($i=1$; 1次側、
 $i=2$; 2次側)

S_i : 1分割当りの伝熱面積(m^2/m)
($i=1$; 1次側、 $i=2$; 2次側)

$H_{mi} = U_i S_i / (A_m \cdot R_m \cdot C_m)$
($i=1$; 1次側、 $i=2$; 2次側)

A_m : 伝熱管1分割当りの体積(m^3)

C_m : 伝熱管比熱($\text{Kcal/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

T_{1i} : 1次冷却材入口温度($^{\circ}\text{C}$)

T_{2i} : 2次冷却材入口温度($^{\circ}\text{C}$)

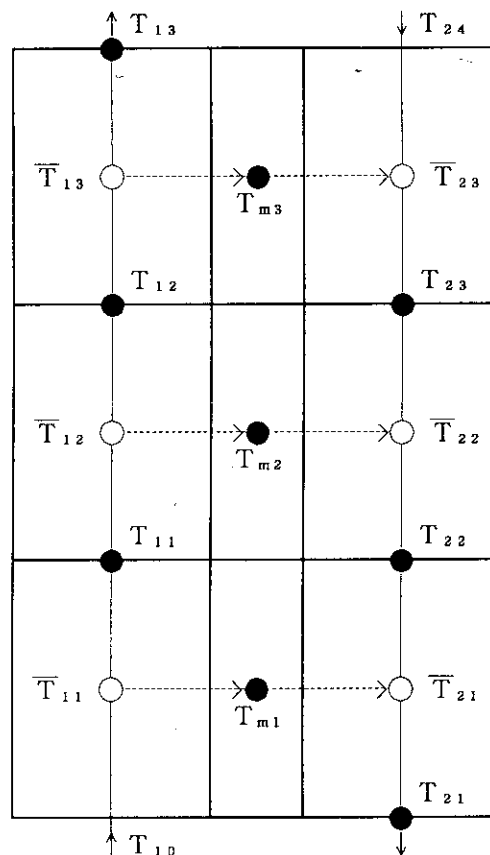


Fig. 3.3 Heat transfer model of IHX

式(3.34)~(3.42)を変形して各ノードに対する状態方程式の形にすると、次のようになる。

(1次冷却材)

$$\frac{dT_{11}}{dt} = v_1 (a_{141}T_{10} + a_{142}T_{11} + a_{143}T_{m1}) \quad (3.43)$$

$$\frac{dT_{12}}{dt} = v_1 (a_{151}T_{11} + a_{152}T_{12} + a_{153}T_{m2}) \quad (3.44)$$

$$\frac{dT_{13}}{dt} = v_1 (a_{161}T_{12} + a_{162}T_{13} + a_{163}T_{m3}) \quad (3.45)$$

(伝熱管)

$$\frac{dT_{m1}}{dt} = a_{171}T_{10} + a_{172}T_{11} + a_{173}T_{m1} + a_{174}T_{21} + a_{175}T_{22} \quad (3.46)$$

$$\frac{dT_{m2}}{dt} = a_{181}T_{11} + a_{182}T_{12} + a_{183}T_{m2} + a_{184}T_{22} + a_{185}T_{23} \quad (3.47)$$

$$\frac{dT_{m3}}{dt} = a_{191}T_{12} + a_{192}T_{13} + a_{193}T_{m3} + a_{194}T_{23} + a_{195}T_{20} \quad (3.48)$$

(2次冷却材)

$$\frac{dT_{21}}{dt} = v_2 (a_{201}T_{m1} + a_{202}T_{21} + a_{203}T_{22}) \quad (3.49)$$

$$\frac{dT_{22}}{dt} = v_2 (a_{211}T_{m2} + a_{212}T_{22} + a_{213}T_{23}) \quad (3.50)$$

$$\frac{dT_{23}}{dt} = v_2 (a_{221}T_{m3} + a_{222}T_{23} + a_{223}T_{20}) \quad (3.51)$$

ここで、係数 a_i はつぎのとおりである。

$$a_{141} = a_{151} = a_{161} = (1/\Delta X_1 - U_1 S_1 / 2W_1 C_1)$$

$$a_{142} = a_{152} = a_{162} = -(1/\Delta X_1 + U_1 S_1 / 2W_1 C_1)$$

$$a_{143} = a_{153} = a_{163} = U_1 S_1 / W_1 C_1$$

$$a_{171} = a_{181} = a_{191} = H_{m1} / 2$$

$$a_{172} = a_{182} = a_{192} = H_{m1} / 2$$

$$a_{173} = a_{183} = a_{193} = -(H_{m1} + H_{m2})$$

$$a_{174} = a_{184} = a_{194} = H_{m2} / 2$$

$$a_{175} = a_{185} = a_{195} = H_{m2} / 2$$

$$a_{201} = a_{211} = a_{221} = U_2 S_2 / W_2 C_2$$

$$a_{202} = a_{212} = a_{222} = -(1/\Delta X_2 + U_2 S_2 / 2W_2 C_2)$$

$$a_{203} = a_{213} = a_{223} = (1/\Delta X_2 - U_2 S_2 / 2W_2 C_2)$$

3. 4 加圧水冷却器

二つの加圧水熱交換器は、Fig. 3. 4に示すように流れ方向にそれぞれ3ノードに分割し、1次側と2次側の間にある金属壁は省略した。これは、1次側冷却材がヘリウムで2次側が水の場合、金属壁の温度は2次側と瞬時に等しくなると考えられるので、金属壁は動特性上無視できるからである。

なお、1次PWCと2次PWCは全く同じモデルとするので、ここでは1つで代表させる。

(ノ-F1)

$$\frac{dT_{11}}{dt} = -v_1 \frac{T_{11} - T_{m1}}{\Delta x_1} - \frac{v_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{11} - T_{m1}) \quad (3.52)$$

$$\frac{dT_{21}}{dt} = -v_2 \frac{T_{22} - T_{21}}{\Delta x_2} - \frac{v_2 U_2 S_2}{W_2 C_2 \Delta x_2} (\bar{T}_{21} - T_{m1}) \quad (3.53)$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{11} - T_{m1}) + H_{m2} (\bar{T}_{21} - T_{m1}) = 0 \quad (3.54)$$

ここで、

$$H_{m1} = \frac{U_1 S_1}{A_m R_m C_m} \quad H_{m2} = \frac{U_2 S_2}{A_m R_m C_m}$$

$$\bar{T}_{11} = (T_{11} + T_{12})/2, \quad \bar{T}_{21} = (T_{21} + T_{22})/2$$

(ノ-F2)

$$\frac{dT_{12}}{dt} = -v_1 \frac{T_{12} - T_{11}}{\Delta x_1} - \frac{v_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{12} - T_{m2}) \quad (3.55)$$

$$\frac{dT_{22}}{dt} = -v_2 \frac{T_{23} - T_{22}}{\Delta x_2} - \frac{v_2 U_2 S_2}{W_2 C_2 \Delta x_2} (\bar{T}_{22} - T_{m2}) \quad (3.56)$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{12} - T_{m2}) + H_{m2} (\bar{T}_{22} - T_{m2}) = 0 \quad (3.57)$$

ここで、

$$\bar{T}_{12} = (T_{11} + T_{12})/2, \quad \bar{T}_{22} = (T_{22} + T_{23})/2$$

(ノ-F3)

$$\frac{dT_{13}}{dt} = -v_1 \frac{T_{13} - T_{12}}{\Delta x_1} - \frac{v_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{13} - T_{m3}) \quad (3.58)$$

$$\frac{dT_{23}}{dt} = -v_2 \frac{T_{21} - T_{23}}{\Delta x_2} - \frac{v_2 U_2 S_2}{W_2 C_2 \Delta x_2} (\bar{T}_{23} - T_{m3}) \quad (3.59)$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{13} - T_{m3}) + H_{m2} (\bar{T}_{23} - T_{m3}) = 0 \quad (3.60)$$

ここで、

$$\bar{T}_{13} = (T_{12} + T_{13})/2, \quad \bar{T}_{23} = (T_{23} + T_{21})/2$$

T_{1i} : 1 次側He入口温度(°C)
 T_{2i} : 2 次側冷却水入口温度(°C)
 v_1, v_2 : 流量(m/s)
 $\Delta x_1, \Delta x_2$: 流れ方向分割長さ(m)
 W_1, W_2 : 重量流量(kg/s)
 C_1, C_2 : 比熱(kcal/kg·°C)
 U_1, U_2 : 熱通過率(kcal/m²·s·°C)
 S_1, S_2 : 1 分割当りの伝熱面積(m)
 A_m : 伝熱管1分割当りの体積(m³)
 R_m : 伝熱管密度(kg/m³)
 C_m : 伝熱管比熱(kcal/kg·°C)

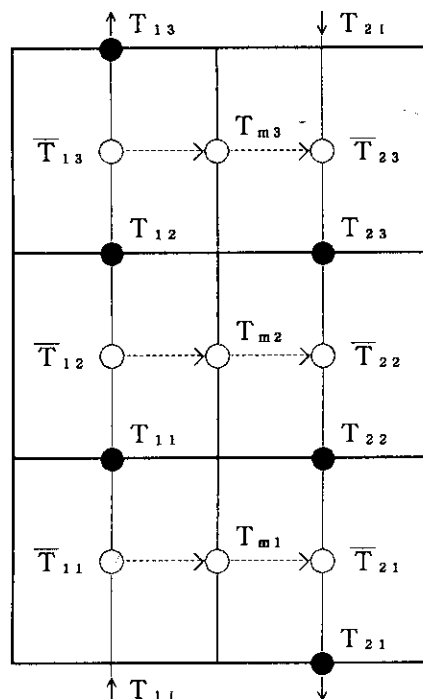


Fig. 3.4 Heat transfer model of PWCs

式(3.52)～(3.60)を各分割要素に対する線形状態方程式の形にすると次のようになる。

$$\frac{dT_{11}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{11} + a_{12}T_{12} + a_{13}T_{21} + a_{14}T_{22}) \quad (3.61)$$

$$\frac{dT_{12}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{11} + a_{12}T_{12} + a_{13}T_{22} + a_{14}T_{23}) \quad (3.62)$$

$$\frac{dT_{13}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{12} + a_{12}T_{13} + a_{13}T_{23} + a_{14}T_{2i}) \quad (3.63)$$

$$\frac{dT_{21}}{dt} = v_2 (a_{21}T_{11} + a_{22}T_{12} + a_{23}T_{21} + a_{24}T_{22}) \quad (3.64)$$

$$\frac{dT_{22}}{dt} = v_2 (a_{21}T_{11} + a_{22}T_{12} + a_{23}T_{22} + a_{24}T_{23}) \quad (3.65)$$

$$\frac{dT_{23}}{dt} = v_2 (a_{21}T_{12} + a_{22}T_{13} + a_{23}T_{23} + a_{24}T_{2i}) \quad (3.66)$$

ここで、

$$a_{11} = \frac{1}{\Delta x_1} \left(1 - \frac{\alpha}{W_1 C_1} \right) \quad a_{12} = \frac{-1}{\Delta x_1} \left(1 + \frac{\alpha}{W_1 C_1} \right)$$

$$a_{13} = a_{14} = \frac{\alpha}{W_1 C_1 \Delta x_1}$$

$$a_{21} = a_{22} = \frac{\alpha}{W_2 C_2 \Delta x_2}$$

$$a_{23} = \frac{-1}{\Delta x_2} \left(1 + \frac{\alpha}{W_2 C_2} \right), \quad a_{24} = \frac{1}{\Delta x_2} \left(1 - \frac{\alpha}{W_2 C_2} \right)$$

$$\alpha = \frac{U_1 S_1 U_2 S_2}{2 (U_1 S_1 + U_2 S_2)}$$

3. 5 空気冷却器

IHX、1次PWC、2次PWCと同様に向流型の熱交換器として動特性モデルを立てるが、Fig. 3.5 に示すように、1次側を3分割で、2次側を1分割と更に簡略化して扱う。これは2次（空気）側では冷却材の空気が単に大気中に熱放出されるだけなのに対して、1次側の冷却水出口温度はプラントの内部にフィードバックするので幾分正確に模擬したかったからである。空気冷却器の基礎方程式は次のようになる。

(1次側)

$$\frac{dT_{11}}{dt} = -V_1 \frac{T_{11} - T_{1i}}{\Delta x_1} - \frac{V_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{11} - T_{m1}) \quad (3.67)$$

$$\frac{dT_{12}}{dt} = -V_1 \frac{T_{12} - T_{11}}{\Delta x_1} - \frac{V_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{12} - T_{m2}) \quad (3.68)$$

$$\frac{dT_{13}}{dt} = -V_1 \frac{T_{13} - T_{12}}{\Delta x_1} - \frac{V_1 U_1 S_1}{W_1 C_1 \Delta x_1} (\bar{T}_{13} - T_{m3}) \quad (3.69)$$

ここで、

$$\bar{T}_{11} = (T_{1i} + T_{11})/2$$

$$\bar{T}_{12} = (T_{11} + T_{12})/2$$

$$\bar{T}_{13} = (T_{12} + T_{13})/2$$

$$\bar{T}_{21} = (T_{2i} + T_{21})/2$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{11} - T_{m1}) + H_{m2} (\bar{T}_{21} - T_{m1}) = 0$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{12} - T_{m2}) + H_{m2} (\bar{T}_{21} - T_{m2}) = 0$$

$$H_{m1} (\bar{T}_{13} - T_{m3}) + H_{m2} (\bar{T}_{21} - T_{m3}) = 0$$

$$H_{m1} = \frac{U_1 S_1}{A_m R_m C_m}, \quad H_{m2} = \frac{U_2 S_2 / 3}{A_m R_m C_m}$$

(空気側)

$$\frac{dT_{21}}{dt} = -V_2 \frac{T_{21} - T_{2i}}{\Delta x_2} - \frac{v_2 U_2 S_2 / 3}{W_2 C_2 \Delta x_2} \{(\bar{T}_{21} - T_{m1}) + (\bar{T}_{21} - T_{m2}) + (\bar{T}_{21} - T_{m3})\} \quad (3.70)$$

ここで、

T_{1i} : 1次側冷却水入口温度 (°C)

T_{2i} : 2次側外気温度 (°C)

v_1, v_2 : 流速 (m/s)

$\Delta x_1, \Delta x_2$: 流れ方向の分割長さ (m)

W_1, W_2 : 重量流量 (kg/s)

C_1, C_2 : 比熱 (kcal/kg°C)

U_1, U_2 : 熱通過率 (kcal/m²s°C)

S_1, S_2 : 1分割当りの伝熱面積 (m²)

A_m : 伝熱管1分割当りの体積 (m³)

R_m : 伝熱管密度 (kg/m³)

C_m : 伝熱管比熱 (kcal/kg°C)

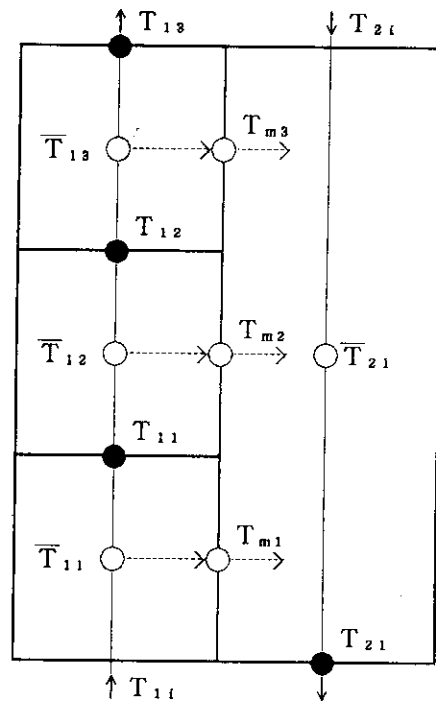


Fig. 3.5 Heat transfer model of AC

式(3.67)～(3.70)を整理して、状態変数方程式にまとめると以下ようになる。

$$\frac{dT_{11}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{1i} + a_{12}T_{11} + a_{13}T_{2i} + a_{14}T_{21}) \quad (3.71)$$

$$\frac{dT_{12}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{1i} + a_{12}T_{12} + a_{13}T_{2i} + a_{14}T_{21}) \quad (3.72)$$

$$\frac{dT_{13}}{dt} = v_1 (a_{11}T_{12} + a_{12}T_{13} + a_{13}T_{2i} + a_{14}T_{21}) \quad (3.73)$$

$$\frac{dT_{21}}{dt} = v_2 (a_{21}T_{1i} + a_{22}T_{11} + a_{23}T_{12} + a_{24}T_{13} + a_{25}T_{21} + a_{26}T_{2i}) \quad (3.74)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{1}{\Delta x_1} \left(1 - \frac{\alpha}{W_1 C_1} \right), & a_{12} &= \frac{-1}{\Delta x_1} \left(1 + \frac{\alpha}{W_1 C_1} \right) \\
 a_{13} &= \frac{\alpha}{W_1 C_1 \Delta x_1}, & a_{14} &= a_{13} \\
 a_{21} &= \frac{\alpha}{W_2 C_2}, & a_{22} &= \frac{2\alpha}{W_2 C_2}, & a_{23} &= a_{22}, & a_{24} &= a_{21} \\
 a_{25} &= \frac{-1}{\Delta x_2} \left(1 + \frac{3\alpha}{W_2 C_2} \right), & a_{26} &= \frac{1}{\Delta x_2} \left(1 - \frac{3\alpha}{W_2 C_2} \right) \\
 \alpha &= \frac{V_1 S_1 U_2 S_2 / 3}{2(U_1 S_1 + U_2 S_2 / 3)}
 \end{aligned}$$

3. 6 その他のサブシステム

(1) 制御系

ここでは原子炉出力制御系のみをPID制御系で考慮した。具体的には原子炉出力と設定出力（定格30MW）の偏差をもとに、その信号の定数倍を制御棒の速度にフィードバックすることにより定値制御を実現する。数式で表せば次のようになる。

$$\delta k_c = k_p \int \frac{n_0 - n(t)}{n_0} dt \quad (3.75)$$

ここで、

n_0 : 原子炉設定出力

$n(t)$: 原子炉出力（測定値）

k_p : 制御系の比例定数

(2) サブシステムの接続

Fig. 2.1 に示すHTTRプラントを模擬するために、以上与えたサブシステムを結合して1つのプラントシステムを構成することが必要である。結合にあたっては、各サブシステムの入口出口の冷却材温度の接続と冷却材温度伝達の時間遅れを考慮して接続のモデル化を行う。各サブシステムへの冷却材入口温度は以下のように与える。

①原子炉入口温度 $T_{c,i}(t)$ は1次PWCからの冷却材とIHX側からのものが合流してくるので、それぞれの輸送遅れを τ_1 、 τ_2 としてつぎのように与えられる。

$$T_{c,i}(t) = \frac{W_1 \cdot T_{x1o}(t - \tau_1) + W_2 \cdot T_{F1o}(t - \tau_2)}{W_1 + W_2} \quad (3.76)$$

ここで、 T_{x1o} : I H X 1 次側出口温度
 T_{p1o} : 1 次 P W C 1 次側出口温度
 W_1 : I H X 1 次側ヘリウム流量 (Kg/s)
 W_2 : 1 次 P W C の 1 次側ヘリウム流量 (Kg/s)

② I H X の 1 次、2 次側のそれぞれの冷却材入口温度 $T_{x1i}(t)$ 、 $T_{x2i}(t)$ はつぎのように与えられる。I H X と 2 次 P W C 間の輸送遅れを τ_3 とする。

$$T_{x1i}(t) = T_{co}(t - \tau_1) \quad (3.77)$$

$$T_{x2i}(t) = T_{w1o}(t - \tau_3) \quad (3.78)$$

ここで、 T_{co} : 原子炉出口温度
 T_{w1o} : 2 次 P W C 1 次側出口温度

③ 1 次 P W C の 1 次ヘリウム側、2 次冷却水側の冷却材入口温度 $T_{p1i}(t)$ 、 $T_{p2i}(t)$ はそれぞれの輸送遅れを τ_2 、 τ_4 として次式で与えられる。

$$T_{p1i}(t) = T_{co}(t - \tau_2) \quad (3.79)$$

$$T_{p2i}(t) = T_{Am}(t - \tau_4) \quad (3.80)$$

ここで、 T_{Am} : 空気冷却器 1 次側出口温度とバイパス流温度との混合温度 (式 (3.85) 参照)

④ 2 次 P W C の 1 次ヘリウム側、2 次冷却水側の冷却材入口温度 $T_{w1i}(t)$ 、 $T_{w2i}(t)$ はそれぞれの輸送遅れを τ_3 、 τ_5 として次式で与えられる。

$$T_{w1i}(t) = T_{x2o}(t - \tau_3) \quad (3.81)$$

$$T_{w2i}(t) = T_{Am}(t - \tau_5) \quad (3.82)$$

ここで、 T_{x2o} : I H X 2 次側出口温度

⑤ 1 次 P W C 及び 2 次 P W C それぞれの出口における加圧水温度を T_{p2o} 、 T_{w2o} 、それぞれの加圧水流量を W_1 、 W_2 とする。また、1 次 P W C 及び 2 次 P W C の出口からバイパス流分岐点までの輸送時間遅れをそれぞれ τ_4 、 τ_5 とする。混合温度 T_{A1i} は次式で表される。

$$T_{A1i}(t) = \frac{W_1 T_{p2o}(t - \tau_4) + W_2 \cdot T_{w2o}(t - \tau_5)}{W_1 + W_2} \quad (3.83)$$

⑥空気側については

$$T_{A21}(t) = \text{外気温度} \quad (3.84)$$

ここで設定した輸送遅れ（むだ時間） τ_1 から τ_5 は、さらに詳細には配管の構造、長さ等を考慮して動特性を含めモデル化する必要があるが、ここではプラント動特性の観点、通常の運転が定格流量の近くの状態であることから簡便に処理した。その輸送遅れの概略の値及びプラントでの表示を Fig. 3.6 に示す。

(3) 空気冷却器バイパス流によるPWC入口温度の扱い

原子炉入口温度制御のために空気冷却器の流量バイパス弁が設けられている。この流量バイパスによる1次及び2次PWCの2次側入口温度のモデル化は次のように扱った。すなわち、Fig. 3.7 に示すように加圧水冷却材の全流量 $W = W_1 + W_2$ のうち、空気冷却器をバイパスする流量を w として、 $\gamma = w/W$ で定義する。この γ を用いて、空気冷却器を出て来た冷却材とバイパス流冷却材が合流する点の混合温度 T_{Am} は、次式で与えられる。

$$T_{Am} = \gamma T_{A11}(t) + (1 - \gamma) T_{A10}(t) \quad (3.85)$$

通常は全流量629t/hのうち299t/hがバイパスされるので流量比 γ は

$$\gamma = 299 / 629 = 0.475 \quad (3.86)$$

である。

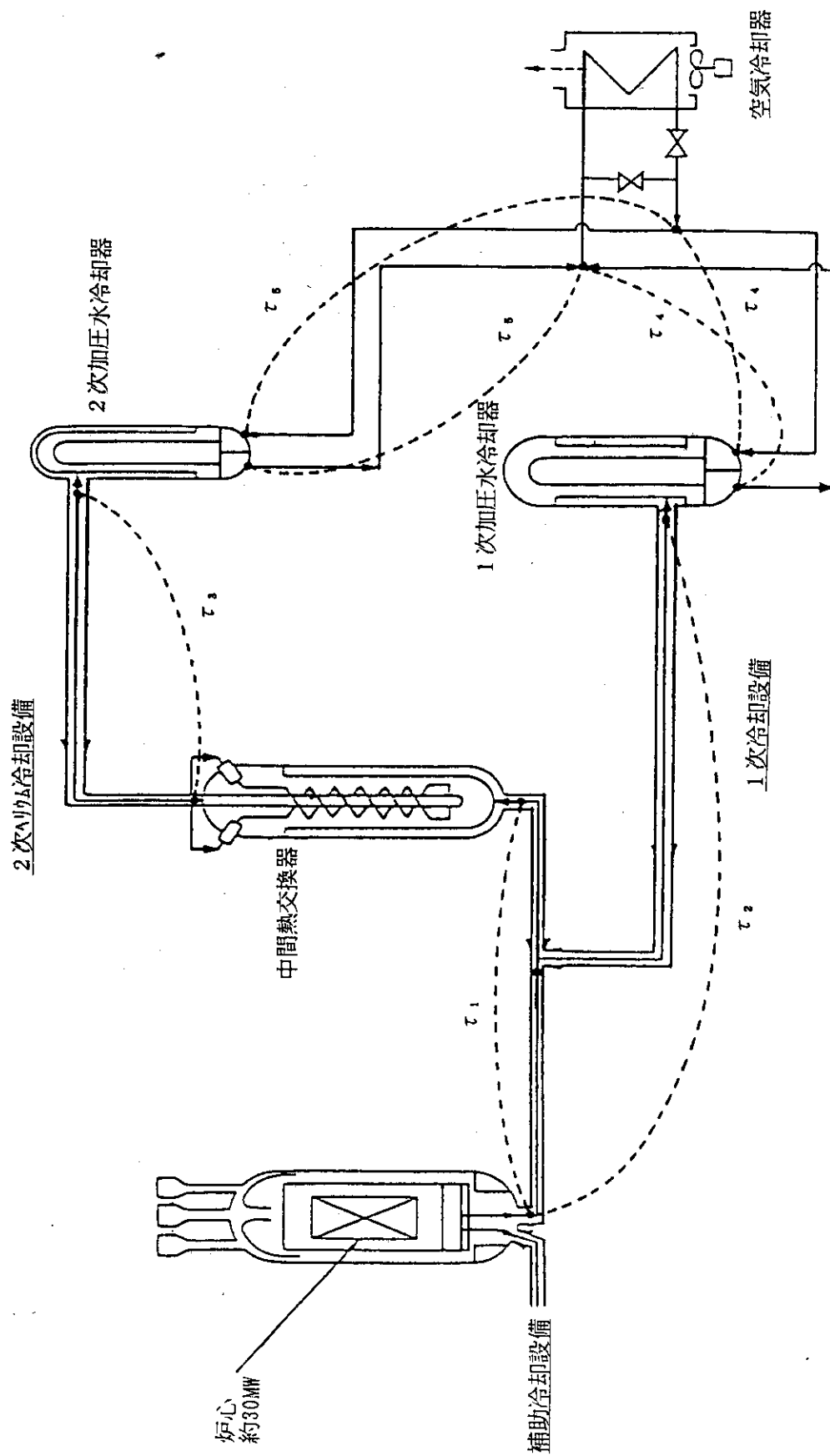


Fig. 3.6 Transport delay times between subsystems

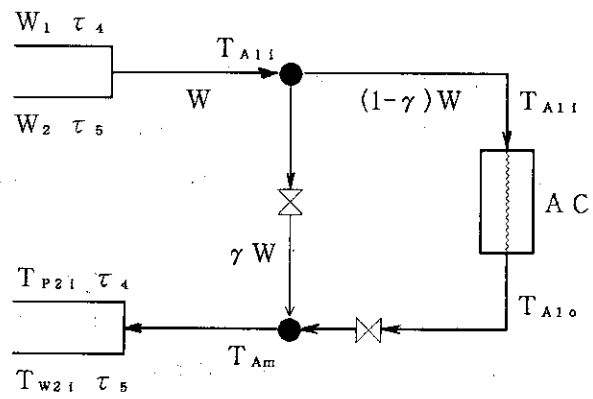


Fig. 3.7 Mixing temperature model at merging point of bypass flow and AC flow

4. ハイブリッドシミュレーションの方法^{5), 6)}

4. 1 ハイブリッド計算機SIMSTARの概要

一般にハイブリッド計算機システムの構成は、ディジタル演算部とアナログ演算部とが、リンケージ部を介して電氣的に接続されているものであり、これに双方の入出力装置が接続しているものである。

新型ハイブリッド計算機SIMSTARシステムは、シミュレーション専用のアタッチド・マルチプロセッサで、いわゆるアナログ（連続並列処理）とディジタル（離散逐次処理）、さらにロジック（論理処理）と異なった3つの処理方式を、一つの計算機システムに統合したものであり、そのハードウェア構成は次の様な3つのサブシステムから成っている。

① P S P (parallel Simulation Processor)

アナログ演算部、論理演算部（ロジック部）、スイッチマトリクス部、コントロール部からなり、SIMSTAR の主要部である。ここではアナログ部とロジック部のプログラムを分担する。

② D A P (Digital Arithmetic Processor)

ディジタル演算部で、プログラム処理および実行を分担する。PSPの設定と全体のプログラム制御はすべてこのDAPの端末から行なわれる。

③ D C P (Data Conversion Processor)

アナログ演算部PSPとディジタル演算部DAPとの間のデータ変換を受け持つところで、高速かつ高精度のA/D, D/A変換を行うと共にアナログ／ディジタル間のタイミングをコントロールする。この部分はいわゆるリンケージ部に相当する。

Fig. 4.1 に SIMSTARシステム構成の概念図を示す。

4. 1. 1 並列演算部P S Pの性能と機能

P S Pは大きく分けて次の3つの部分から成っている。

① P M U (parallel Math Unit) は、複数の積分器、加算器、乗算器などのアナログ演算要素とアナログ信号スイッチマトリクスから成っている。

② P L U (Parallel Logic Unit) は、ブール関数発生器 (BFG: Boolean Function Generator) , フリップフロップ, カウンタなどのパラレルロジック要素とロジック回路マトリックスから成っている。

③ L C U (Local Control Unit) は、P M U, P L Uの設定, アドレッシングやその結線およびスイッチングマトリクスのモニターとコントロールを自動的に行う。

アナログ演算要素は演算の精度と速度（周波数特性）を上げるため、特別に設計された複合アンプ (Compound Amplifier) が使用されており、広帯域（約60MHz迄）と低ドリフト、低オフセットを実現している。また係数器はディジタル式設定になっており、精度落ちがないように17ビットの疑似浮動小数点方式が取られている。したがって、従来のアナログ計算機の演算要素の精度（0.01%）の約1桁以上も上回っている。

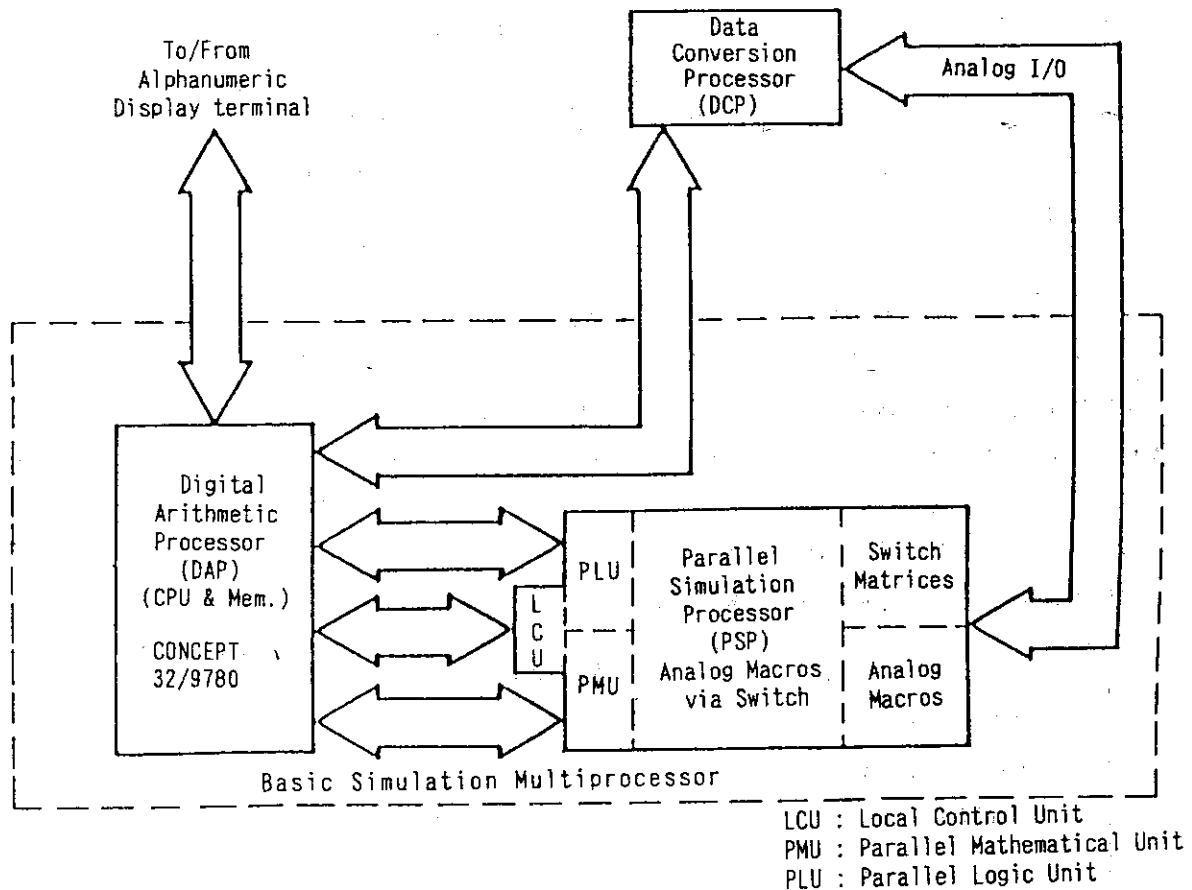


Fig. 4.1 Elementary block diagram of the SIMSTAR

さらに乗算器は、小入力での精度を上げるためオートレンジ方式を採用し、レンジ切換え時のスパイクを除くため特別の除去回路が付いている。

アナログ要素と数量は次の通りである。

①リミット付2入力積分（モードコントロール付）／トラックスストア／一次遅れ要素 [M/INT]	4 0
②スイッチ付2入力2回路加算要素 [M/2SUM]	1 2
③リミット付4入力可変ゲイン加算要素 [M/SUM]	3 0
④リミット付乗算（除算、平方根）及びスイッチ付加算要素 [M/MULSUM]	2 4
⑤サイン／コサイン関数発生要素 [M/SC]	3
⑥12コンパレータ要素 [M/12COMP]	1
⑦任意関数発生要素 [M/FUN]	6

これら各要素の性能をチェックするため、自動テスト装置（ATE:Automatic Test Equipment）が組込まれており、アナログ要素の静的特性のみならず動的特性（例、TIDE:Total Instantane-

ous Dynamic Error) を測定して、その値が許容値以上になると自動的に登録要素から除外されるようになっている。

なお、本装置のアナログ基準電圧は9 Vであるが、入出力時の演算の範囲は-10 Vから+10 Vで使用できるように自動変換される。従ってそのオーバーレンジの許容範囲は、約11% ($10/9=1.11\cdots$) となる。

4. 1. 2 デジタル演算部DAPの性能と機能

DAPは、Gould社のCONCEPT 32/9780 スーパーミニコンピュータを使用している。これは特に実時間処理の応用に適しているデジタル計算機である。

本機は、MPX (Mapped Programing Executive) と呼ばれるリアルタイム・オペレーティングシステム (OS) のもとで、効率的なインターラプトとマルチプログラミング処理が行なわれる。このOSは、すべてメモリーに常駐している。

DAPの性能、機能の仕様は以下の通りである。

中央処理装置	
基本データ語長 (ビット)	32
汎用レジスタ数	8
加減算実行時間 (μ sec)	0.075
浮動小数点加算命令 (μ sec)	0.225
浮動小数点乗算命令 (μ sec)	0.173 (MACC付加)
キャッシュ (容量, サイクルタイム)	128KB (CPU, IPU各64KB), 75ns/64bit
タイマ機構	リアルタイム, インターナルタイマ
主記憶装置	
サイクルタイム (μ sec/語)	0.3Read Cycle (0.15Write Cycle)
実装容量 (バイト)	8 MB
周辺装置	
フロッピーディスク	1.6 MB $\times$ 2
固定ディスク	340 MB
バック／カートリッジディスク	80 MB
磁気テープ装置	1600/6250 bpi, 50 ips

4. 1. 3 データ変換プロセッサDCPの性能

DCPは、アナログ演算部 (PSP) とデジタル演算部 (DAP) 間のデータ変換を内蔵のタイマーで多チャンネル駆動し、浮動／固定小数点変換もハードウェアで実行させ、CPUのオーバーヘッドなしに極めて効率的に行うものである。

本DCPの性能およびチャンネル数は以下の通りである。

D A M (Digital to Analog Multiplier) 3 2 チャンネル

A D C (Analog to Digital Converter) 3 2 チャンネル

DAMとADCともに15ビットの分解能を有し、その変換速度は300KHz/チャンネルである。

4. 2 プログラムソフトウェア

SIMSTARのソフトウェアプログラム生成システム STARTRAN は、ユーザ専用プログラミングシステムで、複雑なソフトウェアシステムを時間的にも演算処理的にも、非常に効率よくかつ精巧なソフトウェアとして容易に利用できるように設計されている。シミュレーション演算を行う上でその内容によっていくつかの計算手法を選択できるようになっている。

並列（アナログ）演算を行う場合は、P-TRAN(Parallel Translator)がディジタル部によってプログラムを生成すると同時に、必要に応じ自動的にアナログ部の方程式に要素の割り付け、接続を行う。さらにロジック部のマトリクスを設定し接続も行う。一方シミュレーションモデルのディジタル演算は、D-TRAN(Digital Translator)によってプログラムを生成し演算を行う。また非実時間演算に対してはACSL(Advanced Continuous Simulation Language)を利用できる。

要約すれば演算目的によって、次の3つの処理方法がある。

1. 実時間パラレル（アナログ）演算 … P-TRAN
2. ハイブリッド（パラレル/連続ディジタル）演算 … P-TRAN/D-TRAN
3. 連続系の非実時間ディジタル演算 … ACSL

このように高速演算にはSIMSTARのアナログ演算部を、低速度の演算にはディジタル演算部を、必要に応じて選択できるようになっている。また実時間応用の航空機、宇宙機器、船舶、車輛、原子力プラントなどの広帯域で複雑なシミュレーションモデルの解析にはその双方の特徴を生かした本格的なハイブリッド演算が可能である。

また、ディジタル計算には単独でFORTRAN 77+ コンパイラを使用できる。さらにこのFORTRAN 77+ と組合せて、科学計算用ライブラリがあり、これらは ANSI, MILSTD, ISA の仕様に従っている。Fig. 4. 2に STARTRAN プログラム生成システムのフローを示す。

4. 2. 1 P-TRAN

P-TRANは連続系のパラレルシミュレーション言語であり、アナログ演算部であるPSP(Parallel Simulation Processor)で実行させるシミュレーションモデルを定義する数学的モデルの方程式を受付け、PMU (Parallel Math Unit) とPLU (Parallel Logic Unit) の数学的なブロックとロジックハードウェアブロックとが等しい形となるように、方程式を変形する。そしてパラレルコンパイラによって、PSPの数学的および論理的構成ブロックのマッピングディレクトリーを作成し、データの定義づけや、論理/数学式のブロックの実際の変換に対して、ハードウェアのアドレスの割当てを含んだテーブルを作成する。またセットアップロードによってPSPの内部のロードを行う。これはシミュレーションに必要なアナログ要素の検証機能を持っていて、ハードウェアの故障状況などをチェックする。

P-TRANは、問題とする変数の最大値、最小値およびタイムスケールの入力を用いて、P-TRANにおけるモデル方程式を自動生成する。

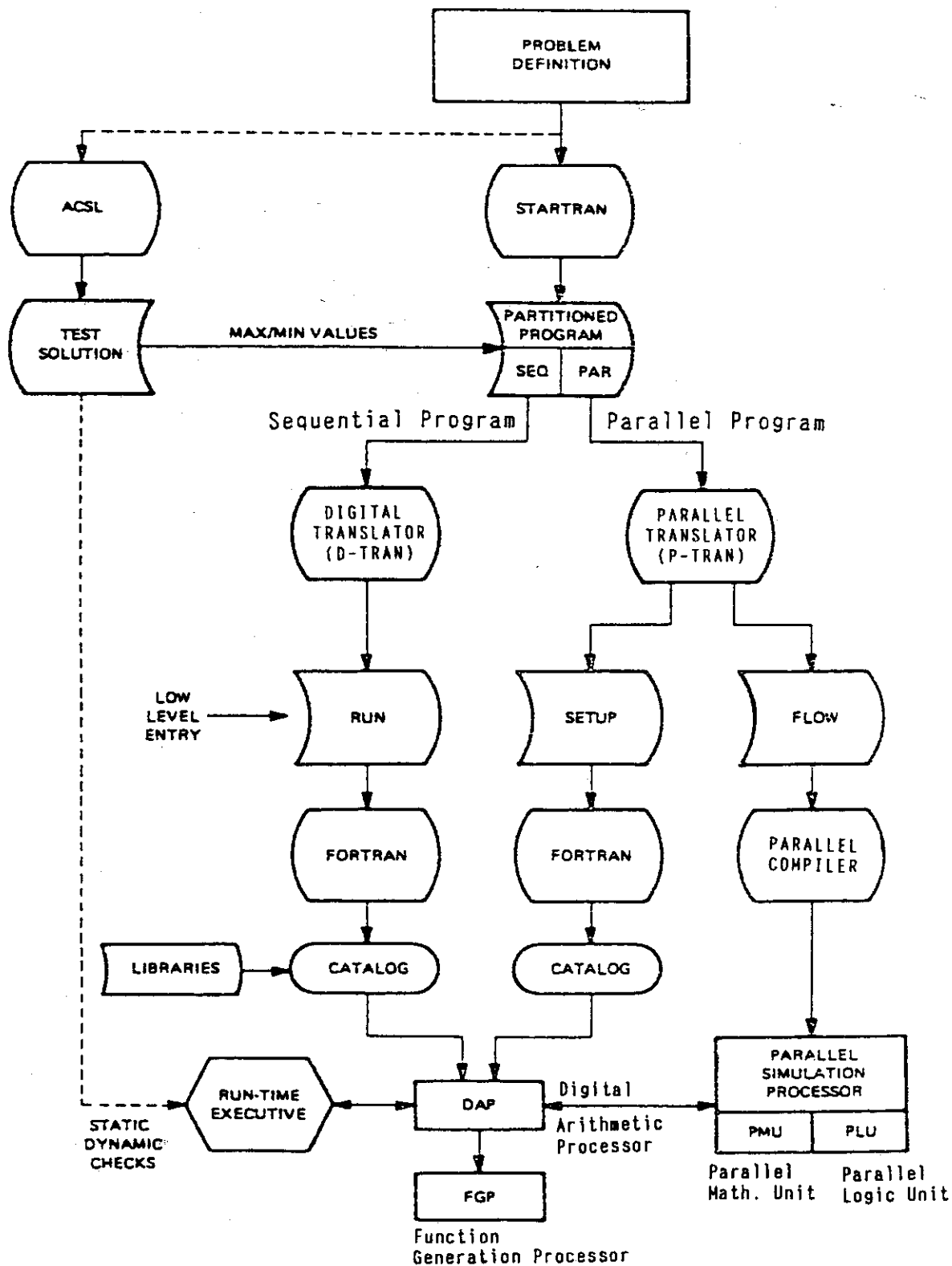


Fig. 4.2 STARTRAN program generation process

4. 2. 2 D-TRAN

D-TRAN (Digital Translator) はデジタル演算の実時間実行手段であり、後述のACSLの持つ特徴に加えて次の様な特徴がある。

- ①実際のハイブリッドシミュレーション用の実時間インタラプト能力は、SIMSTARのインタラプトラインをまとめたものであり、DAP演算における各フレーム時間を統合したものとなる。
- ②PSP/DAPのインタフェース変数 (A/D, D/A, ディスクリットロジック) のデータ変換用チャンネルプログラムは、実時間演算用プログラムライブラリを用いる。
- ③選択された実時間のPSPおよびDAPの変数を記録するように修正したデータ集録ルーチンを採用している。
- ④PSPとDAPプログラムの設定、制御、モニター及び演算後の処理を行う。

D-TRANはシミュレーションのデジタル部分を、P-TRANの出力プログラムと結合し、完全なモデル表現の形をしたPORTTRANプログラムに翻訳する。

4. 2. 3 ACSL

ACSLは時間依存や非線形の微分方程式を解くこと、あるいは伝達関数によって記述される系の動的シミュレーションを行うことを目的として開発されたものであり、SIMSTARのデジタル部で実行する。

ACSLの特徴としては、入力自由形式、3変数以上の関数発生、各々の積分器に独立した誤差制御を行うなどの機能を有している。ACSL言語はデジタル計算機の複雑な数式モデルを、簡単な方法で表すことが出来るように設計されている。

ACSLにはユーザが与えなければならない2つのグループの命令がある。一つはモデルの定義またはシステム構成に関するグループ、もう一つは一連の演算に関する命令で、システムのセットアップ、パラメータの変更、演算の開始、プロットの選択などを行うものである。

与えられた問題あるいはモデルのブロックダイアグラムからの数式の記述は、相当するACSLの記述子で表わす。これらの命令を書き表わす場合、ACSLプロセッサが、値が決ってない変数に数値を計算して入れたり、自動的に操作をして最後に順序正しく並べ直してくれるので、その順番は考えなくても良い。そしてこのプログラムの実行は、ACSLによって生成された命令順に行なわれる。

SIMSTARのプログラム生成ソフトウェアシステムにおいて、ACSLは全デジタルシミュレーションの能力を有しており、シミュレーションプログラムの照合や、スケーリングデータの取得、静的あるいは動的な解の確認に使用出来る。

4. 3 デジタル/アナログ計算の割付

実施したプラントシミュレーションでは、極力並列計算を取入れるため積分器を含めアナログ要素をできるだけ用いるようにした。そこで、プラントの主要なサブシステムである炉心、中間熱交換器、1次及び2次の加圧水冷却器、原子炉出力制御系までをアナログ部で模擬できたが、空気冷却器とサブシステムの結合にデジタル部を導入しなければならなかった。

プラント全体のノード方程式の数はアナログ部の積分器総数40台に制約され、余裕をみて(ア

ナログ要素の故障時の対応) 39個とした。しかし、実際は積分器の総数とは別なハードウェア(加算器の不足)およびソフトウェア(定数表オーバーフロー)の制約が生じた。

① 加算器の不足

ノード方程式をアナログ回路で実現するには、係数器を介して右辺の状態変数をフィードバックする必要がある。SIMSTARでは係数器が単独で使用できず、2個または4個の入力の計42個の加算器と一緒に使われる。そこで多量に係数器が必要となる39個のノード方程式に対して加算器が不足となった。

② 定数表のオーバーフロー

最終的に与えたノード方程式の物理的パラメータ及び状態変数、時間のスケーリング後のアナログ回路上の係数が定数表としてメモリに蓄えられる。この定数表が約350個に制約されていることによって、オーバーフローが生じた。

そこでプラントシミュレーション実現のために、ディジタル部を導入した。しかし、ディジタル部の計算は直列処理で高速シミュレーションに不利であるので、そこでの計算は極力少なくし、安定なサブシステムの動特性を扱うようにした。すなわち、むだ時間をもつサブシステムの結合部処理と最も単純に模擬した空気冷却器をディジタル部で処理した。

ここでディジタル部の計算処理について少し説明を加える。ディジタル部で1つのCPUで動特性等の計算処理を行う場合、計算処理は直列的になされ、そこでの計算量に比例して計算時間がかかる。そこで、高速化をねらった動特性シミュレーションの実現のためには、単純で計算時間のかからない計算アルゴリズムが適用でき、かつ動特性計算において時間ステップが比較的大きくとれるサブシステムをディジタル部で扱う方が良い。さらにディジタル計算向きの処理を分担することも考慮する必要がある。すなわち、サブシステム間の接続と強い非線形現象の模擬をディジタル部で扱うようにする。サブシステムの結合について注意すべき点は計算によって持込まれる遅れの問題である。これは密に結合した動特性システムを分解して扱うときに生じるので、ここではサブシステムへの分解は、サブシステム間に輸送遅れ等明確に物理的意味をもつ遅れ要素が介在するようにした。

4. 4 プログラムの構成

STARTRANのプログラムは、ACSL言語とFORTRANをベースにしたものである。

基本的なSTARTRANのプログラム構成をFig. 4. 3に示す。

PROGRAMとINITIALの間(pre-INITIALとも呼ばれる)では、A/D、D/A変換する変数を定義する。INITIAL...ENDでは、いろいろな定数のセットや係数の定義を行う。DYNAMIC...ENDでは、サブシステムのデータや方程式を記述する。このなかでは、複数個のDERIVATIVE...ENDが存在しうる。それぞれのDERIVATIVE...ENDでディジタル計算部の刻み時間を独立に設定できるため、応答の速いサブシステムと遅いサブシステムを分離することによって、効率の良いシミュレーションを行うことができる。ただしその場合、全てのDERIVATIVE...ENDの刻み時間は最も小さい刻み時間の整数倍でなくてはならない。DERIVATIVE以外のDYNAMIC部は最も優先順位が低く、通常はここで終了時間を含めたRUN-TIME制御を行う。

DERIVATIVE...ENDの中には、'@PARALLEL'...'@ENDPARALLEL'で区切られたアナログ（パラレル）部と、それ以外のデジタル部が存在する。1つのDERIVATIVE...END内では、アナログ部は当然の事ながらデジタル部においてもプログラミングの際に方程式やデータの順序を考える必要がない。これは、ACSLと同様にコンパイラが自動的に正しい順序に並べ変えてくれるからである。

TERMINAL...ENDでは、シミュレーション終了後の再スタートやFORTRANのプログラムの呼び出しが可能である。DERIVATIVE...ENDがアナログのみ、またはデジタルのみで構成されている場合には、この後にPROGRAMのENDを書いてこのSTARTRANのプログラムが終了する。ハイブリットで使用する場合には、ENDのあとに、A/D変換のためのサブルーチンPREP1とD/A変換してスケール化を行うサブルーチンPOST1を付ける。また、プログラムの中でFORTRANのサブルーチンをCALLしている場合には、最後にそれらを付け加える必要がある。

今回作成したプログラムは、アナログ部には比較的応答の速い炉心、IHX、1次PWC、2次PWCを、そしてデジタル部には比較的応答の遅い空気冷却器とそれぞれのサブシステムの結合を割り当てた。デジタル部の計算式が少ないため、このプログラムは1つのDERIVATIVE...ENDから構成されている。また、今回はFORTRANのプログラムは使用しなかった。

プログラムのフローチャートをFig. 4.4に示す。デジタル部のサブシステムの結合で計算された値の内、炉心入口温度（TCI）、IHX 1次側入口温度（TX1I）、IHX 2次側入口温度（TX2I）、1次PWC 1次側入口温度（TP1I）、1次PWC 2次側入口温度（TP2I）、2次PWC 1次側入口温度（TW1I）、2次PWC 2次側入口温度（TW2I）がD/A変換されてアナログ部に渡される。アナログ部に割り当てられた炉心、IHX、1次PWC、2次PWCの動特性は、D/A変換された各コンポーネントの入口温度に基づいて並列的に計算され、各コンポーネントの出口温度が同時に求められる。アナログ部で求められた炉心出口温度（TCO）、IHX 1次側出口温度（TX1O）、IHX 2次側出口温度（TX2O）、1次PWC 1次側出口温度（TP1O）、1次PWC 2次側出口温度（TP2O）、2次PWC 1次側出口温度（TW1O）、2次PWC 2次側出口温度（TW2O）は再びA/D変換され、つぎのタイムステップ（ Δt ）でデジタル部の結合に引き渡される。一方、空気冷却器のシミュレーションはデジタル部で行われる。

今回の計算ではデジタル部のタイムステップは0.01～0.07秒であるが、これはD/A、A/D変換後アナログ部とデジタル部で受け渡される時間幅と同じである。なお、このタイムステップは純デジタル計算のACSLによるシミュレーション結果をもとに決定した。つまり、全てのコンポーネントをデジタル計算した場合においても時間幅0.07秒以下ではシミュレーション結果がほとんど同じであった。したがって、空気冷却器と結合のみをデジタル計算する場合には、時間幅が0.07秒でも十分であることを確認した。

(STARTRAN Processing directive)

PROGRAM name

(Processing Options)

(Global SYSTEM Declarations)A/D Definition

(Program Initialization)

INITIAL

(SUBSYSTEM Initialization)

(Computer RUN Initialization)Initial value set

END

DYNAMIC

(Lowest Priority Run-Time Procedures)

DERIVATIVE

@PARALLEL'

(Analog Part)Core
IHX
PWC(1)
PWC(2)

@END PARALLEL'

(Digital Part)AC
Connection

(Run-Time Control)

END

END

TERMINAL

(Display Results)

(Exit)

END

END

(Multiprocessor Interface Directives)

SUBROUTINE PREP1

(A/D Conversion)Unscaling

END

SUBROUTINE POST1

(D/A Conversion)Scaling

END

(FORTRAN Subroutines)

Fig. 4.3 Structure of STARTRAN-program

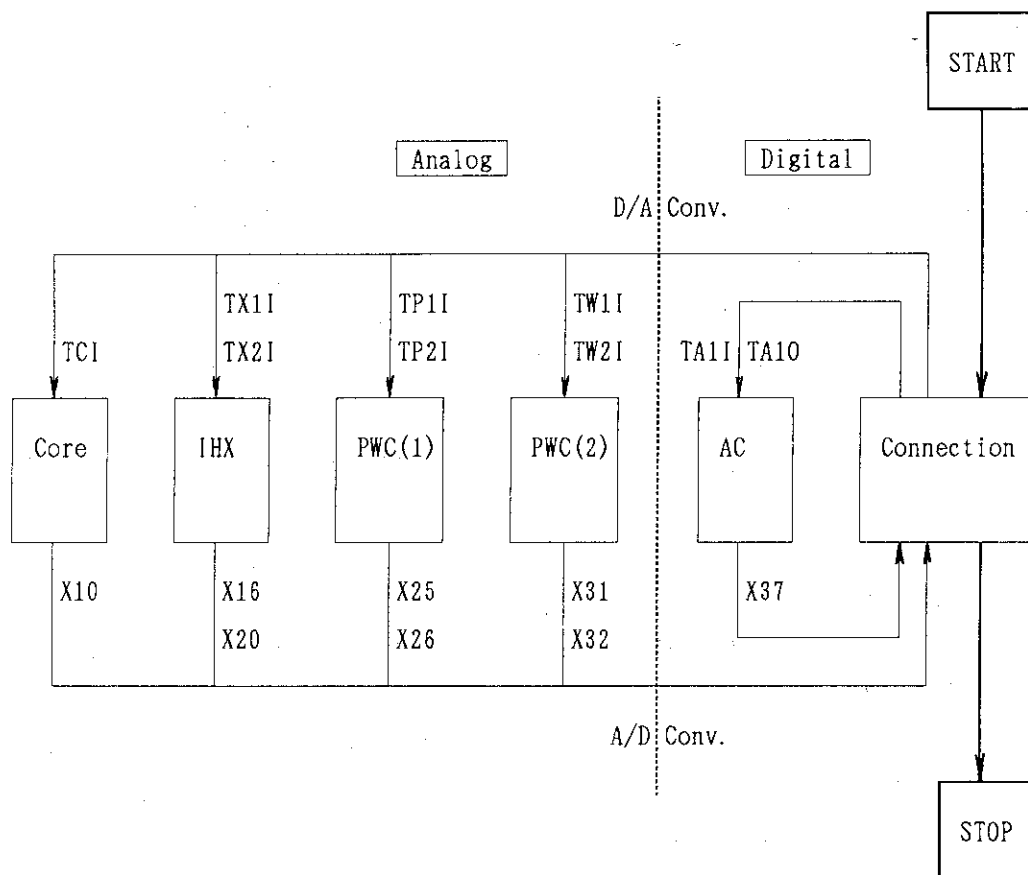


Fig. 4.4 Flow chart of internal data transfer in the program

5. 解析結果

5. 1 定常計算

ACSLによるデジタル計算は少々計算時間がかかるものの、各状態変数のスケールファクタの設定が不要なこと、ハイブリッド計算のようなハード上からの制約が少ないこと、十分な精度の定常解が得られること等の特徴をもつ。そこで、ハイブリッド計算の定常状態の設定はACSLによるデジタル計算の定常値をもとに行った。

定常状態の設定手順は次のとおりである。まず、各サブシステムの接続を切り、単独のサブシステムへ入力（冷却材入口温度、1次側、2次側の流量、原子炉出力、熱出力等）を与えて動特性シミュレーションを実施し、その定常値をACSL計算によって求める。動特性モデルの出入口温度がプラントの設計値に合うように、熱伝達係数、伝熱面積を調整する。こうして得られた結果をFig. 5.1 に示す。

5. 2 外乱応答解析

本シミュレーションの妥当性を確認するために、100%出力(30 MW)の定常状態における各種外乱に対する動特性シミュレーションを実施した。炉心側の外乱として、原子炉出力の設定値変更の動特性を解析した。また、除熱の最終段の空気冷却器附近の外乱の原子炉への影響をみるために、空気冷却器バイパス弁の変動と外気温度の変化に伴うプラント動特性を解析した。それらの応答はガス炉特有の時定数の大きい系の特性を示し、ごく妥当なプラント応答であった。以下に個々の外乱に対する原子炉出力、各種温度の応答特性を示す。

1) 原子炉出力の設定値変更

原子炉出力制御系の出力設定値を10%ステップ状に減少させた時の原子炉及び冷却系の動特性をFig. 5.2に示す。原子炉出力は、制御系の動作により30 MWからアンダーシュートすること無く瞬時に27 MWまで低下し、その後安定している。したがって、出力制御系のパラメータは妥当に設定されているといえる。出力の低下に伴い原子炉出口温度は一次遅れ的に880℃まで低下する。この影響が熱移送系下流のサブシステムに次第に伝播していく様子はそれらの固有の時定数から判断して妥当であると考えられる。

2) 空気冷却器のバイパス弁の変動

空気冷却器のバイパス弁の変動により、バイパス流量が+5%ステップ状に増加した場合の冷却材温度及び原子炉出力の動特性をFig. 5.3に示す。空気冷却器の加圧水出口温度は約1℃低下し整定する。しかし、バイパス流量は増加しているので、バイパス流量と空気冷却器流量の合流にとる混合温度は上昇し、1次加圧水冷却器及び中間熱交換器の1次側冷却材温度を上昇させる結果となることが示されている。バイパス流量の外乱が上流側へ伝播していくこのような様子はほぼ妥当なものであると考えられる。なお、原子炉出力は制御系の動作に依り30 MW一定に保たれておりバイパス流量外乱に対しても原子炉出力制御系は適切に作動しているものと考えられる。また、

Fig. 5.4はバイパス流量が-5%ステップ状に減少した場合の動特性である。バイパス流量+5%の場合の動特性は対称的ではなく、バイパス流量変動からみたプラント動特性は非線形であることがわかる。

3) 空気冷却器の外気温度の変化

外気温度が37℃から15℃にステップ状に低下した場合のプラントの動特性をFig. 5.5に示す。空気冷却器出口温度は急速に低下する。一方、中間熱交換器及び1次加圧水冷却器の1次側冷却材出口温度も比較的速く低下するが原子炉出口温度は炉心の大きな熱容量を反映してゆっくりと低下する。原子炉出力は制御系の動作によりほぼ一定に保たれており外気温度の外乱は出力に影響しないことがわかる。

5. 3 ハイブリッド計算の特徴

ハイブリッド計算の最大の特徴はアナログ部とデジタル部の適切な協調計算によって連続系のシミュレーションが簡便にできることである。特に、アナログ部の並列計算の採用によるシミュレーションの高速化が実現できることである。この高速性はハイブリッド計算機においてアナログ演算の時間スケール(β)を高めるという操作によって簡単に実現できる。

ハイブリッド計算におけるデジタル/アナログの演算時間とその相互関係を概念的に示すとFig. 5.6 のようになる。アナログ部における演算時間は並列計算であり、アナログ要素の精度が維持できる限り、演算の時間スケールを高めて処理することが可能である。アナログ部の演算はまさに物理的時間で並列に計算されるが、デジタル部ではいくつかのジョブを直列に処理する。デジタル部での所要計算時間は時間ステップ1つ先の予測計算に必要な時間であり、それは用いる計算アルゴリズムとジョブ数によって決まるので、アナログ部の計算のように時間スケールを簡単に変更して所要時間を短縮することはできない。以下ではデジタル部の所要計算時間を固定して考える。この条件のもとでアナログ部の時間スケールを高めてどこまで高速化ができるかを調べた。概念的には Fig. 5.6 の $\beta=1$ が実時間に対応し、 $\beta=1/2, 1/4$ ではそれぞれ実時間の2倍、4倍に対応する。実時間のときにはデジタルの所要計算時間は相対的に小さく時間ステップ1つ先の時間まで十分なあき時間があるが、 $\beta=1/4$ になるとこのあき時間は非常に少なくなる。図において β をこれ以上小さくすると、デジタル部の計算時間がアナログ部の計算速度に追い付かなくなり、デジタル/アナログ計算のマッチングエラーを起こしハイブリッド計算ができなくなる。この対策はデジタル部における計算処理を効率的にしておくことであり、デジタル部へのサブシステムの具体的割付けについては4.3節で述べた。

アナログの時間スケールを高めていって、精度上、安定的にどこまで高速化ができるかのシミュレーション実験を行った。その結果をTable 5.1に示す。このデジタル部の計算では空気冷却器、サブシステムの結合ともに時間ステップ $\Delta t = 0.07$ sとしてある。実時間の40倍までは達成できたが、45倍にすると計算が停止してしまった。その原因はデジタル/アナログ計算のマッチングエラー、すなわちデジタルの1時間ステップ Δt に要する計算時間がアナログの時間スケール上の Δt より大きくなったためであり、精度上の問題ではなかった。

全デジタル計算では、時間ステップ $\Delta t = 0.01$ sのときは計算時間が実時間の1/2倍であり、

$\Delta t = 0.07$ sのときは実時間の1/14倍で、ほぼ同精度で解析できた。

これらを総合するとデジタル計算に比較しても約3倍、実時間に対して約40倍の速さでプラントシミュレーションを、アナログ部の時間スケールを高めることにより容易に実現できた。精度の点においてもプラント全体の動的挙動としては満足いくものであった。ただ、原子炉出力に少しの高周波雑音が発生したが他のサブシステムに影響を与えるほどのものではなかった。これはアナログ部の構成要素の特性によるもので、回路上の安定化等の工夫を取り入れることにより、この誤差は減少できる。

Table 5.1 Stationary value of plant state variables in hybrid simulation with different analog time scales

Disturbance : Step change of reactor power set point (30MW $\rightarrow$ 27MW) β : Analog time scale factor

IHX : Intermediate heat exchanger

PWC-1 : Primary pressurized water cooler

PWC-2 : Secondary pressurized water cooler

	A n a l o g P a r t										Digital Part	
	Reactor Core		I H X		PWC-1		PWC-2		Air Cooler			
	Power (MW)	outlet (°C)	1ry out (°C)	2ry out (°C)	1ry out (°C)	2ry out (°C)	1ry out (°C)	2ry out (°C)	1ry out (°C)	2ry out (°C)	1ry out (°C)	2ry out (°C)
ACSL	27.00	860.15	360.5	782.30	360.59	128.66	241.29	128.6	60.14	73.10		
$\beta = 1$ (Real)	27.01	865.7	365.1	787.8	361.4	129.4	243.3	129.5	60.39	73.49		
$\beta = 0.1$ ($\times 10$)	27.05	863.6	364.5	786.4	360.7	129.3	242.9	129.4	60.33	73.39		
$\beta = 0.05$ ($\times 20$)	27.05	864.3	364.2	786.7	360.9	129.3	242.9	129.4	60.36	73.44		
$\beta = 0.025$ ($\times 40$)	27.02	864.6	364.9	787.7	361.1	129.4	243.2	129.5	60.39	73.48		

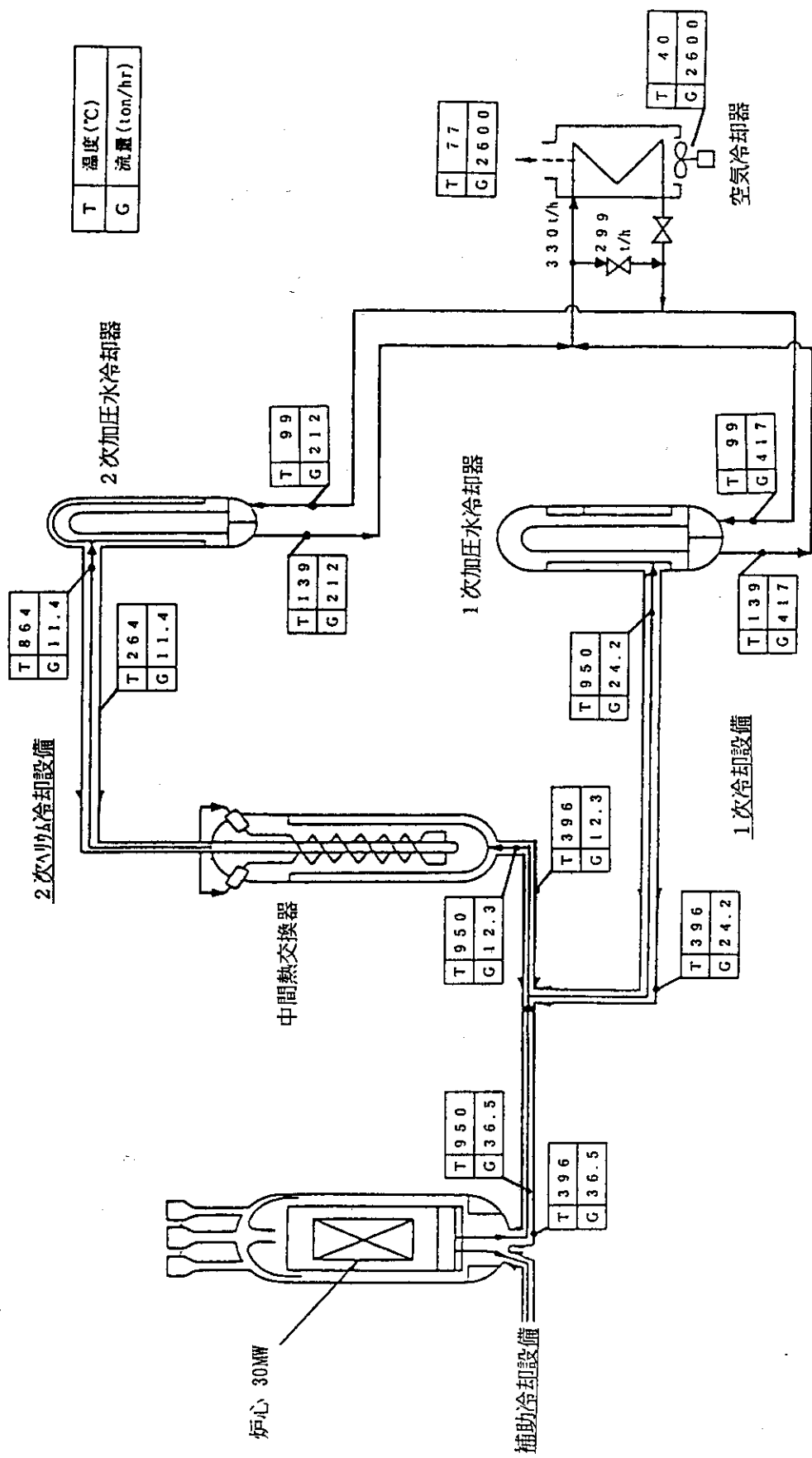


Fig. 5.1 Heat mass balance at stationary state of 30MW reactor power operation

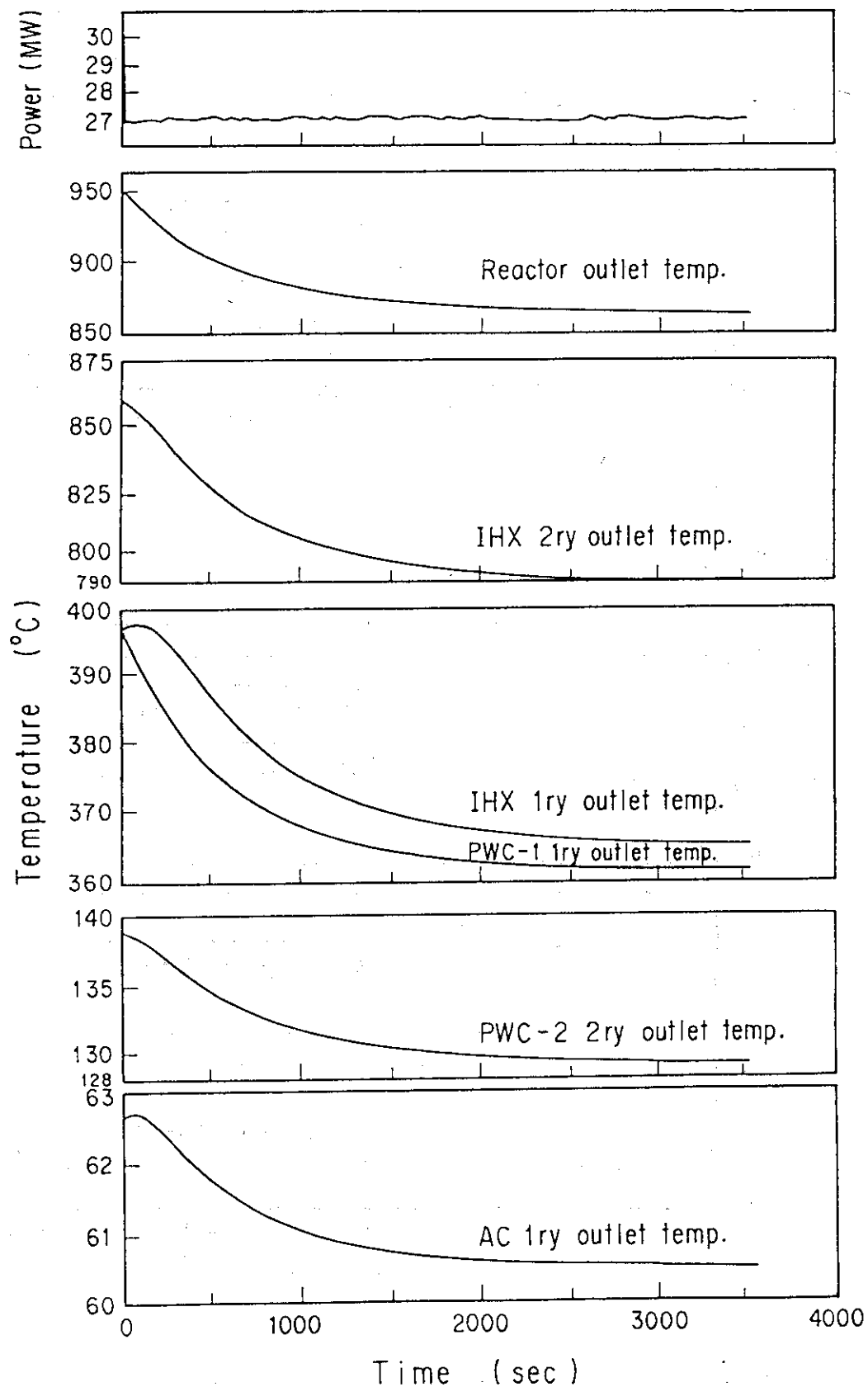


Fig. 5.2 Responses of reactor power and outlet temperatures of subsystems due to step change of power level set point from 30MW to 27MW.

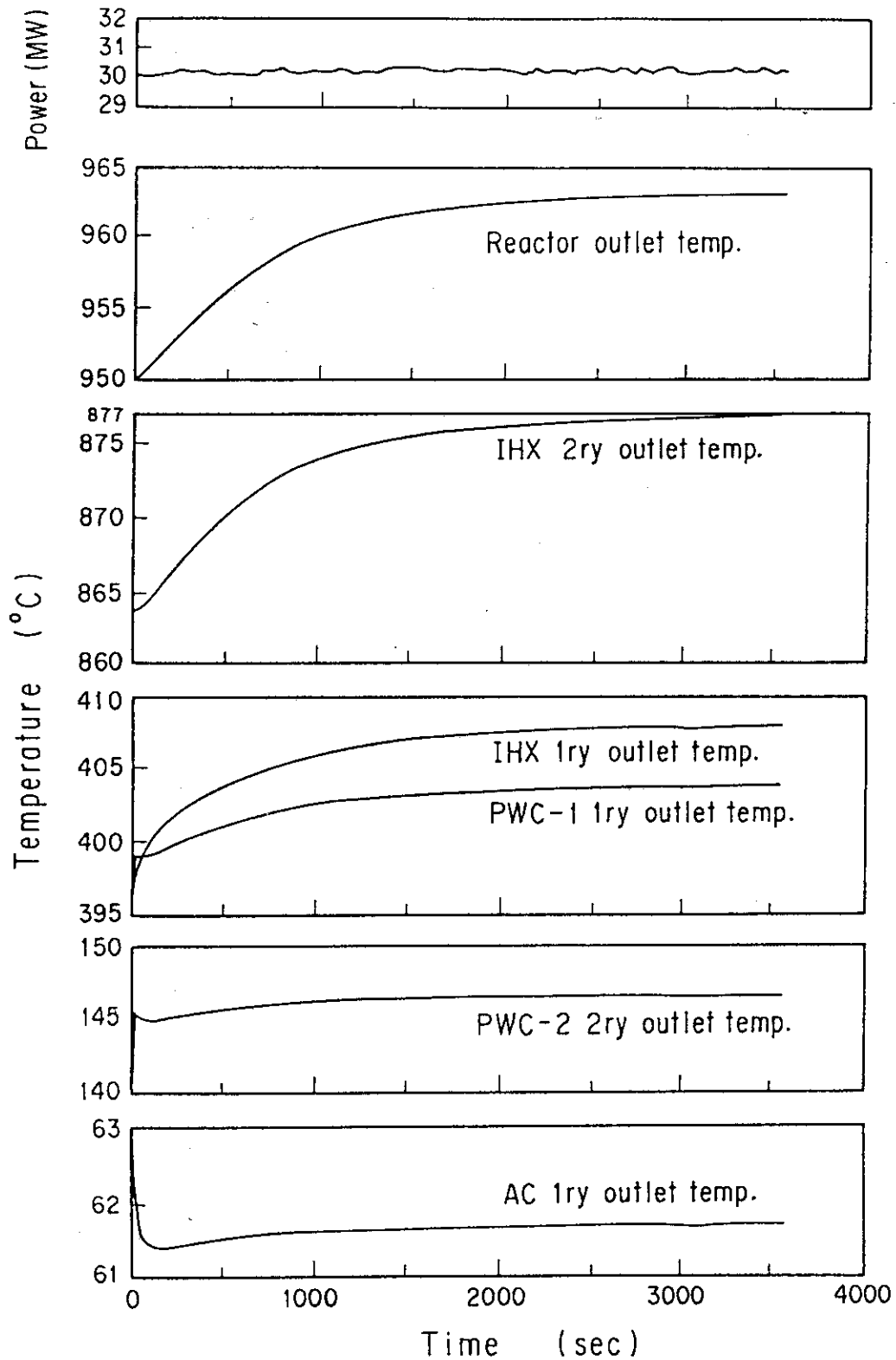


Fig. 5.3 Responses of reactor power and outlet temperatures of subsystems due to step increase of +5% bypass flow rate of Air Cooler.

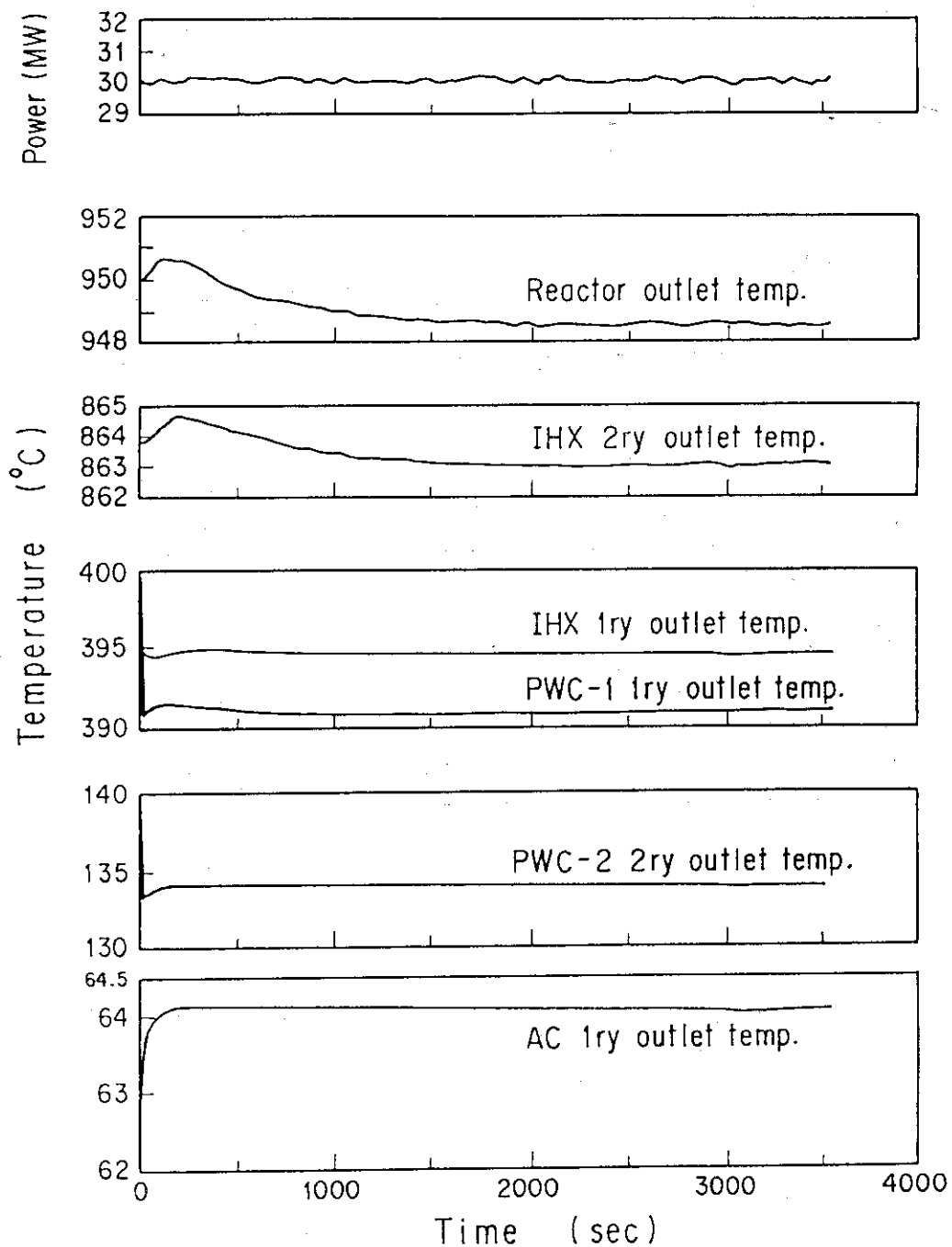


Fig. 5.4 Responses of reactor power and outlet temperatures of subsystems due to step increase of -5% bypass flow rate of Air Cooler.

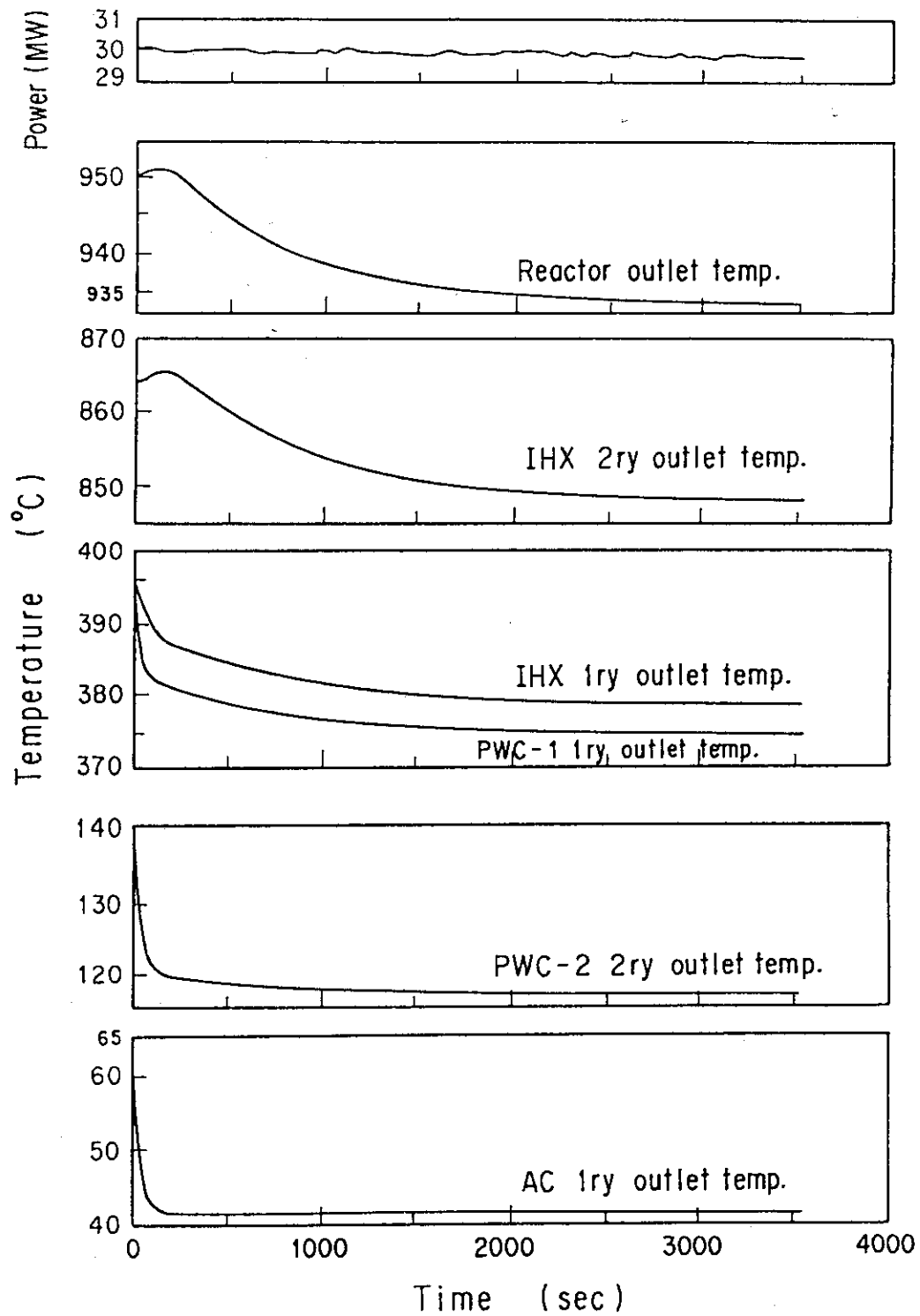


Fig. 5.5 Responses of reactor power and outlet temperatures of subsystems due to step change of air temperature from 37°C to 15°C.

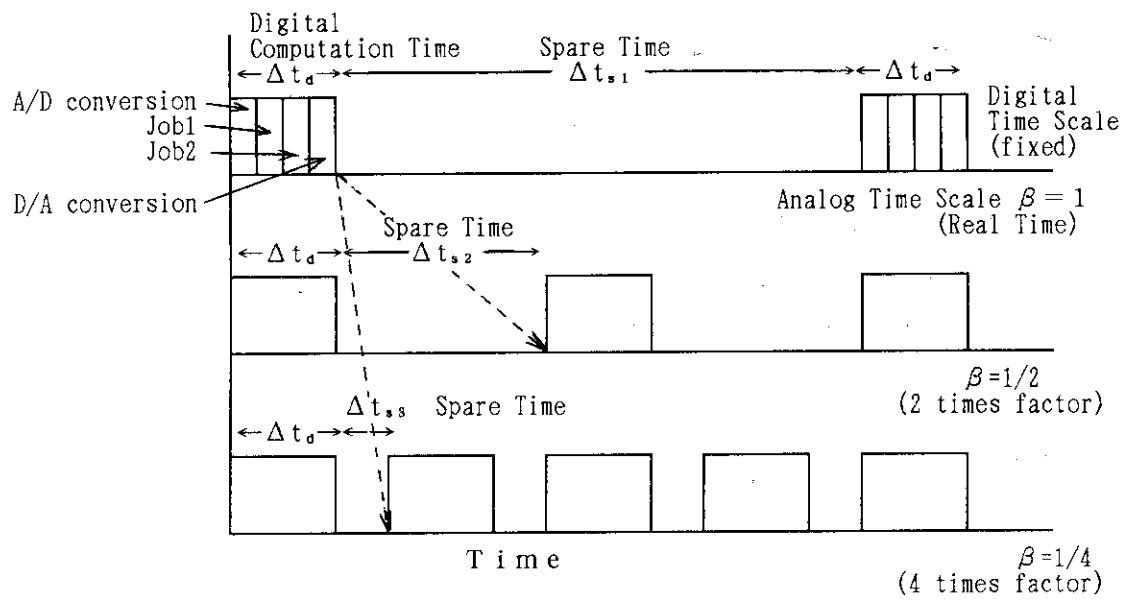


Fig. 5.6 Relation between analog and digital computation time

6. おわりに

新型ハイブリッド計算機 SIMSTARを用いて高温工学試験研究炉のプラント動特性シミュレーションを実施した。この経験を通して得られた結果をまとめるとプラント動特性シミュレーションについて次のことがいえる。

- (1) ハイブリッド計算では、アナログ演算要素を併用するためアナログ回路の精度の範囲内において、プラント全体の動特性シミュレーションを全デジタル方式よりも高速化できる。高温工学試験研究炉に対する現在のプラント動特性モデルではシミュレーション時間を実時間の約40倍に上げることがアナログの時間スケールを変更するだけで容易にできた。
- (2) 計算時間の上限値はデジタル部における1ステップの計算処理時間で決まる。ハイブリッド計算機上では、アナログの時間スケールを上げて行ったときアナログ／デジタル間のデータ変換のミスマッチとしてその上限値が推定できる。
- (3) デジタル部の計算処理時間は動特性計算の時間ステップと用いる計算アルゴリズムに依存して決まり、アナログ部の並列計算のように時間軸を一様に縮小する計算法は一般的にはない。そこで、デジタル部で計算するジョブは時間ステップを大きくして計算できるサブシステムの動特性計算か計算時間のかからないデジタル計算向きのジョブ（むだ時間、外乱作成、サブシステムの結合など）にした方がよい。

以前に経験したハイブリッド方式のシミュレーションとは随分異なり、計算プログラムはデジタル計算方式とほぼ同様なものを作成すればよいが、アナログ計算法特有の問題であるアナログ要素の精度、状態変数の変動幅、回路の安定性を検討することによってより安定な回路構成で精度を高い計算が可能である。

謝 辞

本報告作成のうえで、動特性モデル作成に必要な高温工学試験研究炉のプラントデータを提供し、援助していただいた大洗研究所高温工学試験研究炉開発部原子炉建設室の藤本望氏に感謝致します。また、原子炉工学部原子炉制御研究室の臼井甫積氏にはハイブリッド計算に関して貴重なコメントを戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

6. おわりに

新型ハイブリッド計算機 SIMSTARを用いて高温工学試験研究炉のプラント動特性シミュレーションを実施した。この経験を通して得られた結果をまとめるとプラント動特性シミュレーションについて次のことがいえる。

- (1) ハイブリッド計算では、アナログ演算要素を併用するためアナログ回路の精度の範囲内において、プラント全体の動特性シミュレーションを全デジタル方式よりも高速化できる。高温工学試験研究炉に対する現在のプラント動特性モデルではシミュレーション時間を実時間の約40倍に上げることがアナログの時間スケールを変更するだけで容易にできた。
- (2) 計算時間の上限値はデジタル部における1ステップの計算処理時間で決まる。ハイブリッド計算機上では、アナログの時間スケールを上げて行ったときアナログ／デジタル間のデータ変換のミスマッチとしてその上限値が推定できる。
- (3) デジタル部の計算処理時間は動特性計算の時間ステップと用いる計算アルゴリズムに依存して決まり、アナログ部の並列計算のように時間軸を一様に縮小する計算法は一般的にはない。そこで、デジタル部で計算するジョブは時間ステップを大きくして計算できるサブシステムの動特性計算か計算時間のかからないデジタル計算向きのジョブ（むだ時間、外乱作成、サブシステムの結合など）にした方がよい。

以前に経験したハイブリッド方式のシミュレーションとは随分異なり、計算プログラムはデジタル計算方式とほぼ同様なものを作成すればよいが、アナログ計算法特有の問題であるアナログ要素の精度、状態変数の変動幅、回路の安定性を検討することによってより安定な回路構成で精度を高い計算が可能である。

謝 辞

本報告作成のうえで、動特性モデル作成に必要な高温工学試験研究炉のプラントデータを提供し、援助していただいた大洗研究所高温工学試験研究炉開発部原子炉建設室の藤本望氏に感謝致します。また、原子炉工学部原子炉制御研究室の臼井甫積氏にはハイブリッド計算に関して貴重なコメントを戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 臼井甫積、工藤和彦：多目的高温ガス実験炉1次系動特性のハイブリット・シミュレーション，JAERI-M 8974(1980)
- 2) 島崎潤也、他：動特性制御のための多目的高温ガス実験炉のシミュレーション，第3回シミュレーションテクノロジー・コンファレンス，日本シミュレーション学会，P249-252(1983)
- 3) 多目的高温ガス炉研究開発の現状，日本原子力研究所，1988年版
- 4) 中川繁昭、他：高温ガス炉の炉心動特性解析コード“BLOOST-J2”，JAERI-M 89-013(1989)
- 5) SIMSTAR User Guide and Programming Manual, Electronic Associates, Inc., 1989
- 6) Advanced Continuous Simulation Language (ACSL) Reference Manual, Mitchell and Gauthier Associates, 1987