

JAERI-M  
93-223

原子力船エンジニアリング・シミュレーション・  
システムの開発

1993年11月

楠 剛・京谷 正彦・高橋 照雄  
小林日出雄・橋立 晃司・落合 政昭

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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。  
入手の問合せは、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、お申しこしください。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, 1993

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株原子力資料サービス

## 原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの開発

日本原子力研究所原子力船研究開発室

楠 剛・京谷 正彦・高橋 照雄・小林日出雄  
橋立 晃司\*・落合 政昭

(1993年10月14日受理)

原子力船開発の一環として舶用炉設計研究のため、1987年より原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの開発・整備を進めてきた。その結果、1993年3月「むつ」モデルについては完成をみたので、「むつ」モデルの中で重要な位置を占めるソフトウェアを中心にその内容について報告する。

本システム開発の目的は、①原子力船設計の各段階における舶用炉プラント性能の評価・確認、②高度自動化研究の一環として異常診断、運転支援等のシステム開発およびヒューマンインターフェースの研究、にある。

また、本システムの特徴は、①与えられた海象・気象条件下での船体系、推進系、および原子炉プラント系の各挙動を一貫して模擬できる総合エンジニアリング・シミュレーション・システムである点、②物理的根拠に基づいたシミュレーションモデルである点、③ソフトウェアは基本モデル部分と個々のモデルによって変化するプラントデータ部分から構成されており他の炉形に対しての適用等拡張性・柔軟性に富んでいる点、にある。

今後は、本システムを改良舶用炉の設計支援ツールとして活用していく計画である。

Development of Nuclear Ship Engineering Simulation System (NESSY)

Tsuyoshi KUSUNOKI, Masahiko KYOUEYA, Teruo TAKAHASHI  
Hideo KOBAYASHI, Kouji HASHIDATE\* and Masa-aki OCHIAI

Office of Nuclear Ship Research and Development  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 14, 1993)

NESSY has been developed for design studies of advanced marine reactors as a part of nuclear ship research and development since 1987. Engineering simulation model of the Mutsu, which is the first nuclear ship in Japan, was completed in March of 1993. In this report we concentrate on detail description of softwares for Mutsu modeling.

The aims of development of NESSY are as follows;

- ① Assessment and confirmation on plant performance of an advanced marine reactor in each step of nuclear ship design
- ② Development of anomaly diagnosis system and operator support system as a part of enhanced automation study, and study of human interface with hardware

The characteristics of NESSY are the followings.

- ① Total engineering simulation system simulate simultaneously ship motions, propulsion system behavior, and nuclear plant behavior under given weather and sea conditions.
- ② Models based on physical theory as far as possible.
- ③ The simulator has high extensibility and flexibility. It is able to apply to other reactors, as the simulation model consists of the part of basic model and the part of plant data which are easy to change.

After completion of Mutsu modeling, we are planning to utilize this system as one of design tools for an advanced marine reactor.

---

\* Mitsubishi Atomic Energy Industries, Ltd.

Keywords: Simulator, Nuclear Ship, Mutsu, Marine Reactor, Ship Motion,  
Engineering Simulator

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.ハードウェアの概要 .....	4
2.1 ハードウェアの構成 .....	4
2.2 ハードウェアの特徴 .....	5
3.ソフトウェアの概要 .....	9
3.1 ソフトウェアの構成 .....	9
3.2 ソフトウェアの特徴 .....	11
3.3 基本モデルソフトウェア .....	16
3.3.1 炉心計算プログラム .....	16
3.3.2 一次冷却系統計算プログラム .....	31
3.3.3 蒸気発生器計算プログラム .....	49
3.3.4 況用演算プログラム .....	61
3.3.5 船体運動計算プログラム .....	71
3.3.6 大LOCA計算時一次冷却系モデル .....	86
3.4 原子力船「むつ」プラントデータ .....	90
3.4.1 炉心 .....	92
3.4.2 一次冷却系 .....	94
3.4.3 蒸気発生器 .....	103
3.4.4 格納容器 .....	108
3.4.5 原子炉補助系統 .....	111
3.4.6 二次系統・推進系統 .....	123
3.4.7 電気系 .....	140
3.4.8 プロセス制御系 .....	143
3.4.9 安全保護系統 .....	154
3.4.10 船体モデル .....	167
4.おわりに .....	173
謝辞 .....	174
参考文献 .....	175

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of a Hardware of NESSY .....	4
(Nuclear ship Engineering Simulation SYstem) .....	4
2.1 Hardware Composition .....	5
2.2 Features of the Hardware .....	9
3. Outline of the Software of NESSY .....	9
3.1 Software Composition .....	11
3.2 Features of the Software .....	16
3.3 Basic Calculation Programs .....	16
3.3.1 Calculation Program for Core Characteristics .....	31
3.3.2 Calculation Program for Behaviors of Primary Coolant System .....	49
3.3.3 Calculation Program for Behaviors of a Steam Generator ...	61
3.3.4 General Calculation Program for Flow Networks and Control System .....	71
3.3.5 Calculation Program of Ship Motions .....	86
3.3.6 Calculation Model for Behaviors of Primary System during Large Break Loss-of-coolant Accidents .....	90
3.4 Plant Data of the N.S. "MUTSU" .....	92
3.4.1 Reactor Core .....	94
3.4.2 Primary Coolant System .....	103
3.4.3 Steam Generators .....	108
3.4.4 Containment Vessel .....	111
3.4.5 Reactor Auxiliary System .....	123
3.4.6 Propulsion System and Secondary System .....	140
3.4.7 Electric Power Supply System .....	143
3.4.8 Process Control System .....	154
3.4.9 Safety Protection System .....	167
3.4.10 Ship .....	
4. Summary .....	173
Acknowledgment .....	174
References .....	175

## 表 リスト

- 表 2. 1. 1 シミュレータ主要構成機器の概略仕様  
 表 3. 2. 1 マルファンクション項目  
 表 3. 3. 1 3. 3. 1 節の記号表  
 表 3. 3. 2 N E S S Y に特有な機能  
 表 3. 3. 3 ノードリンク要素の概要  
 表 3. 3. 4 一次冷却系統の境界条件  
 表 3. 3. 5 使用する相関式および適用範囲  
 表 3. 3. 6 3. 3. 2 節の記号表  
 表 3. 3. 7 船体運動が蒸気発生器 2 次側に与える影響の模擬機能  
 表 3. 3. 8 3. 3. 3 節の記号表  
 表 3. 3. 9 ノードリンクの要素と機能  
 表 3. 3. 10 3. 3. 4 節の記号表  
 表 3. 3. 11 船体運動計算に必要な入力データ  
 表 3. 4. 1 原子力船「むつ」設計主要目  
 表 3. 4. 2 一次冷却水ポンプモデルの特性データ  
 表 3. 4. 3 加圧器安全弁モデルの特性データ  
 表 3. 4. 4 主蒸気安全弁の特性データ  
 表 3. 4. 5 格納容器のヒートシンクデータ  
 表 3. 4. 6 格納容器のヒートシンク物性値データ  
 表 3. 4. 7 推進系統モデル一覧  
 表 3. 4. 8 「むつ」主機タービンの熱平衡線図  
 表 3. 4. 9 主機制御モデルのテレグラフ設定  
 表 3. 4. 10 「むつ」主発電機駆動用タービンの熱平衡線図  
 表 3. 4. 11 原子炉出力制御系モデルの自動制御可能条件  
 表 3. 4. 12 原子炉起動時インターロックモデル  
 表 3. 4. 13 「むつ」モデル定常ヒータ作動設定値  
 表 3. 4. 14 「むつ」モデル過渡ヒータ作動設定値  
 表 3. 4. 15 「むつ」モデル加圧器スプレイ弁作動設定値  
 表 3. 4. 16 「むつ」モデル加圧器逃がし弁作動設定値  
 表 3. 4. 17 「むつ」モデル加圧器水位制御系作動設定値  
 表 3. 4. 18 原子炉スクラム回路モデル設定値  
 表 3. 4. 19 低出力インターロック回路モデル設定値  
 表 3. 4. 20 ロッドストップ回路モデル設定値  
 表 3. 4. 21 低流量保護回路モデル設定値  
 表 3. 4. 22 非常用炉心冷却設備作動回路モデル設定値  
 表 3. 4. 23 格納容器スプレイ設備作動回路モデル設定値  
 表 3. 4. 24 原子力船「むつ」モデル積み付け状態（冬季満載出港状態）  
 表 3. 4. 25 船体要目ファイル  
 表 3. 4. 26 規則波中船体運動応答関数計算条件(1/2)  
 表 3. 4. 26 規則波中船体運動応答関数計算条件(2/2)  
 表 3. 4. 27 不規則波中抵抗増加係数計算条件  
 表 3. 4. 28 不規則波中波漂流力係数計算条件

## 図 リ ス ト

- 図 2. 1. 1 ハードウェア主要構成図  
 図 3. 2. 1 ソフトウェアの構成図  
 図 3. 2. 2 基本モデルを中心としたソフトウェア  
 図 3. 3. 1 炉心モデル構成  
 図 3. 3. 2 核定数設定サブプログラム概略フロー  
 図 3. 3. 3 核定数補正サブプログラム概略フロー  
 図 3. 3. 4 中性子動特性サブプログラム概略フロー  
 図 3. 3. 5 キセノンサブプログラム概略フロー  
 図 3. 3. 6 エンタルピ計算サブプログラム概略フロー  
 図 3. 3. 7 炉心D N B R 計算プログラムの流れ図  
 図 3. 3. 8 コントロールボリュームの状態の仮定  
 図 3. 3. 9 ノード要素とリンク要素によるネットワーク表現  
 図 3. 3. 1 0 流体リンクのモデル  
 図 3. 3. 1 1 垂直管流動様式マップ  
 図 3. 3. 1 2 メタルノードモデル  
 図 3. 3. 1 3 一次冷却系統計算プログラムの計算の流れ  
 図 3. 3. 1 4 蒸気発生器二次側ノード分割例  
 図 3. 3. 1 5 あるノード i における U 字管部伝熱モデルの概要  
 図 3. 3. 1 6 主蒸気系概要  
 図 3. 3. 1 7 計算手順の概略  
 図 3. 3. 1 8 船体運動プログラムフローチャート  
 図 3. 3. 1 9 船体要目データ入力用座標系  
 図 3. 3. 2 0 船速・有効馬力曲線  
 図 3. 3. 2 1 プロペラ単独試験データ  
 図 3. 3. 2 2 プロペラ没水深度変更試験データ  
 図 3. 3. 2 3 船尾波高および流速減衰実験データ  
 図 3. 3. 2 4 波漂流力係数実験データ  
 図 3. 3. 2 5 風圧力実験データ  
 図 3. 3. 2 6 I S S C スペクトラム  
 図 3. 3. 2 7 船体要目入力用座標系と船体運動計算用座標系  
 図 3. 3. 2 8 プロペラ負荷変動とプロペラ回転数のモデル間でのデータ交換概念  
 図 3. 3. 2 9 大破断 L O C A 計算フロー  
 図 3. 4. 1 原子炉プラントプログラムの全体概念図  
 図 3. 4. 2 エンタルピ上昇補正係数（対象炉心：原子力船むつ）  
 図 3. 4. 3 質量速度補正係数（対象炉心：原子力船むつ）  
 図 3. 4. 4 原子力船「むつ」一次冷却系統概略配置図（側面図）  
 図 3. 4. 5 原子力船「むつ」一次冷却系統概略配置図（上面図）  
 図 3. 4. 6 「むつ」一次冷却系統モデルの流体系の分割  
 図 3. 4. 7 「むつ」一次冷却系統モデルの構造材の分割  
 図 3. 4. 8 一次冷却水ポンプ 吐出流量 - 吐出水頭曲線  
 図 3. 4. 9 一次冷却水ポンプ 吐出流量 - 損失トルク曲線  
 図 3. 4. 1 0 原子力船「むつ」蒸気発生器概略図  
 図 3. 4. 1 1 「むつ」蒸気発生器二次側モデルの流体系の分割  
 図 3. 4. 1 2 蒸気発生器プログラムの対象範囲  
 図 3. 4. 1 3 原子力船「むつ」格納容器概略図

- 図 3. 4. 1 4 格納容器解析モデル  
 図 3. 4. 1 5 体積制御系統・余熱除去系統模擬範囲  
 図 3. 4. 1 6 非常用冷却設備模擬範囲  
 図 3. 4. 1 7 非常用崩壊熱除去系統模擬範囲  
 図 3. 4. 1 8 補機冷却系統・補機冷却海水系統模擬範囲  
 図 3. 4. 1 9 吐出およびベントドレン系統模擬範囲概念図  
 図 3. 4. 2 0 蒸気発生器プローダウン系統模擬範囲概念図  
 図 3. 4. 2 1 制御用空気系統模擬範囲  
 図 3. 4. 2 2 二次系・推進系統モデル全体概念図  
 図 3. 4. 2 3 主蒸気管系統図  
 図 3. 4. 2 4 主機タービンモデル性能曲線  
 図 3. 4. 2 5 主機制御モデル展開図(1/3)  
 図 3. 4. 2 5 主機制御モデル展開図(2/3)  
 図 3. 4. 2 5 主機制御モデル展開図(3/3)  
 図 3. 4. 2 6 高圧給水管系統図  
 図 3. 4. 2 7 主給水ポンプモデル特性曲線  
 図 3. 4. 2 8 船内電源系統モデル  
 図 3. 4. 2 9 非常給電指令盤  
 図 3. 4. 3 0 原子炉出力制御系モデルブロック図  
 図 3. 4. 3 1 原子炉出力制御系モデル自動制御棒の動作  
 図 3. 4. 3 2 蒸気ダンプ制御系モデルブロック図  
 図 3. 4. 3 3 給水制御系モデルブロック図  
 図 3. 4. 3 4 加圧器圧力制御動作図  
 図 3. 4. 3 5 加圧器水位制御系モデル全体ブロック図  
 図 3. 4. 3 6 O F F モード抽出流量制御機能線図  
 図 3. 4. 3 7 L O P R E S S モード抽出流量制御機能線図  
 図 3. 4. 3 8 H I P R E S S モード抽出流量制御機能線図  
 図 3. 4. 3 9 低圧スクラム説明図  
 図 3. 4. 4 0 高温スクラム説明図  
 図 3. 4. 4 1 スクラム回路モデルブロック図  
 図 3. 4. 4 2 低出力インターロック回路モデルブロック線図  
 図 3. 4. 4 3 ロッドストップ回路モデルブロック線図  
 図 3. 4. 4 4 低流量保護回路モデルブロック線図  
 図 3. 4. 4 5 非常用炉心冷却設備作動回路モデルブロック線図(1/2)  
 図 3. 4. 4 5 非常用炉心冷却設備作動回路モデルブロック線図(2/2)

## 1. はじめに

将来の有力な海上輸送手段構築を目的に原子力船の研究開発に取り組んでいるが、その一環として改良船用炉開発の効率化をはかるため、諸運転条件下での原子力船の挙動を模擬できる原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システム（写真1. 1参照。以下、シミュレータと称する）の開発を推進してきた。

本シミュレータ開発の目的は、以下の通りである。

- ① 原子力船設計の各段階における舶用炉プラント性能の評価・確認  
シミュレータにおける物理現象解析のための基本モデルについて、原子力船「むつ」での出力上昇試験、海上試運転および実験航海で得た各種試験の諸データを用い、総合評価することによりその性能を確認する。その後の改良船用炉開発においても類似の物理現象を扱うことから改良船用炉開発のプラント性能の評価・確認を行う。

- ② 高度自動化研究の一環として異常診断、運転支援等のシステム開発およびヒューマンインターフェースの研究

原子力船操船に際し、より一層の安全性の確保と運転効率化のためには高度自動化を実現する必要がある。それには、異常診断、運転支援等の計算機制御によるシステム開発が必要になり、その際本シミュレータはそれらのシステム設計上の有力なツールとなる。具体的には、これらのシステムを実際のプラントに組み込む前に、本シミュレータで性能を確認することができる。

一方で、高度自動化をすすめるにしても、完全自動化は難しく人間に依存せざるを得ない部分が残る。人間が介在する場合には、安全性確保等の面からヒューマンインターフェースが重要な位置を占めるが、この分野の検討を実施する際にも、例えば、運転員の挙動分析、操作性を考慮した機器仕様分析および配置分析等、本シミュレータを使った諸検討が可能である。

次に、本シミュレータの特徴と考えられる点を整理すると以下の通りである。

- ① 総合的なシステム

与えられた海象・気象条件下での船体系、推進系および原子炉プラント系の各挙動を一貫して模擬できる総合エンジニアリング・シミュレーション・システムである。

すなわち、図1.1のシミュレーションの概念図のように、海象・気象条件の下で、船体系・推進系は原子炉プラント系に対して必要な出力情報を提供し、原子炉プラント系はそれらの情報に基づいて運転される。逆に、原子炉プラント系から得られた出力情報は、推進系・船体系に伝えられ、原子力船全体の模擬が可能となる。

## ② 物理的根拠に基づいたシステム

シミュレーションモデルの構築にあたっては、コンピュータの能力が許される範囲内で物理現象をできるだけ忠実に解析できる手法およびモデルを採用しているので、精度の高いシミュレーションが可能である。例えば、モデル化に際し、舶用炉に特有な揺れによる加圧器・蒸気発生器等での液面の動搖・傾斜の影響についても考慮している。

シミュレータの基本的な課題として、実機データとシミュレーション結果との間に生じる乖離の問題があるが、その場合乖離の原因追求は徹底的に行うものの、いわゆる調整のための調整は避け、物理モデルの方を生かすようにしている。この点は、訓練用のシミュレータと異なり、本エンジニアリングシミュレータとして特に留意したところである。

## ③ 拡張性・柔軟性に富んだシステム

シミュレーションソフトウェアは、原子炉プラントに共通して使用可能な基本モデル部分と、個々のモデルによって変化するプラントデータ部分から構成されており他の炉形に対しての適用等、拡張性・柔軟性が高い。

また、タッチパネル付きCRT及びダイナミックキーボードを採用することにより、シミュレータ運転操作盤の操作仕様をソフトウェアで変更が可能である。

今回、原子力船「むつ」の出力上昇試験、海上試運転および実験航海のデータを用いて、原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの総合評価を実施した結果、「むつ」モデルについて計画通りの性能を確認することができ、また今後の原子力船開発に際して有効に活用できるとの見通しがえられたので、ソフトウェアを中心としたシミュレータの内容について報告する。

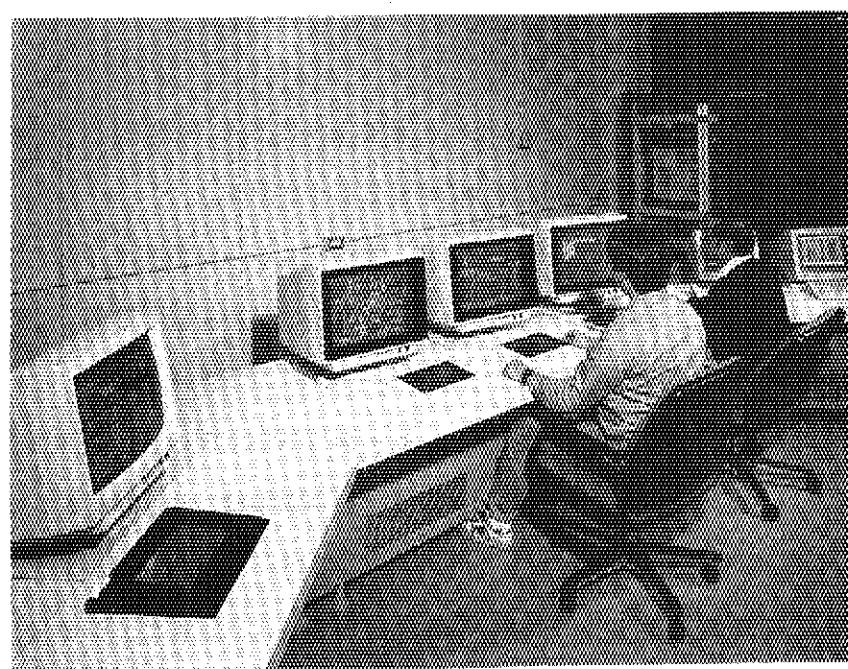


写真 1.1 原子力船エンジニアリングシミュレーションシステムの操作盤

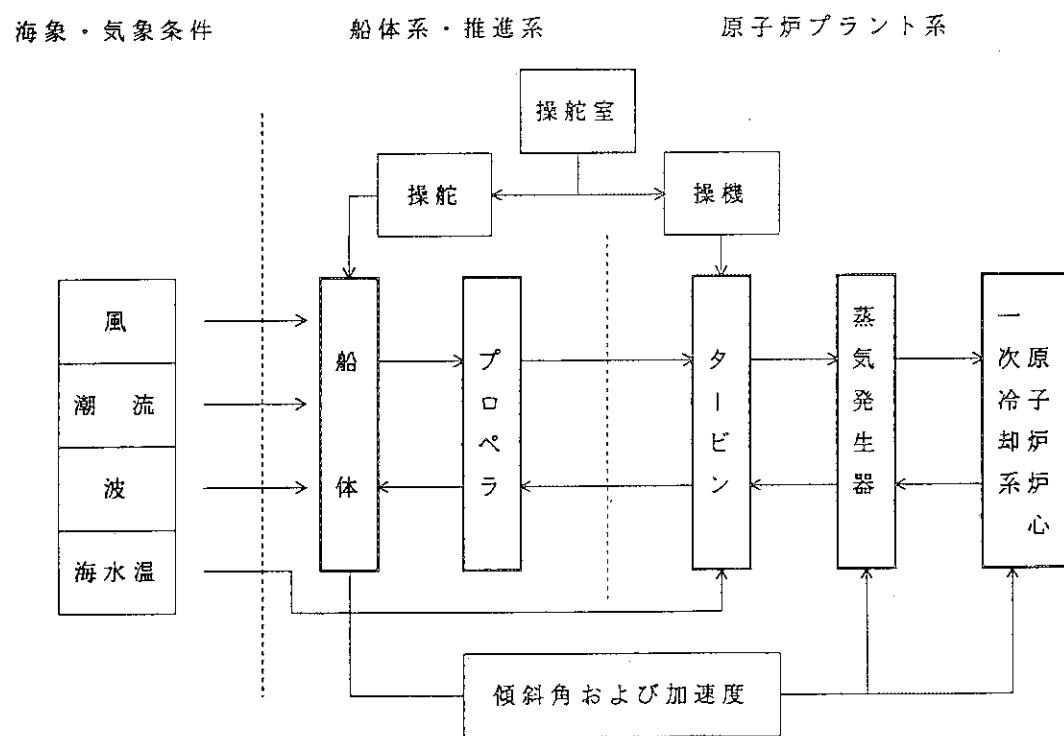


図 1.1 シミュレーションの概念図

## 2. ハードウェアの概要

### 2.1 ハードウェアの構成

本シミュレータのハードウェアは、図2.1.1に示すようにDEC社製VAX系を中心に構成した計算機システムである。各構成機器の概略仕様を表2.1.1に示す。

シミュレーション計算機：VAX-6420は、本シミュレータの主たる計算機であり、海象・気象条件の下で、船体系、推進系および原子炉プラント系の挙動を計算する。また、シミュレータ全体のリアルタイム実行処理を制御する。

シミュレーション計算機の補助記憶装置には、原子炉プラントデータ、推進系データ、船体運動データについて、シミュレーション実行時の初期値、途中経過値、解析結果等を保存する。

CRT・入出力制御用計算機：micro VAX-3000は、シミュレーション計算機で計算されたシミュレーション結果をCRT上に出力するための制御を行う。また、シミュレーションモデルと外部機器との信号のやりとりを行う機能も担っている。

シミュレーション計算機、CRT・入出力制御用計算機等の間は、将来のシステムの拡張等にも容易に対応可能とするためイーサネットによるネットワークで結んでいる。これによって、リアルタイム処理に対応する高速な情報のやりとりを実現している。

端末装置としてシミュレータ運転操作盤があり、1台のシミュレーション実行制御用CRTとそれに付属したダイナミックキーボードおよび3台の運転操作用CRTとそれぞれに付属したダイナミックキーボードから構成されている。

シミュレーション実行制御用CRTは、シミュレーション実行に際してのシミュレータの状態やシミュレーション条件等に関する画面を表示し、付属のダイナミックキーボードによりシミュレーションの開始・終了等の指示、初期状態および故障事象等の設定等の入力操作を行う。

また、運転操作用CRTは、時々刻々変化する海象・気象条件、船体系、推進系および原子力プラント系の諸状態を系統図、トレンド図等として画面上に表示する。また、プラント系統図に表示されたポンプやバルブ等の機器をCRT画面上で選定した上で、付属の運転操作用ダイナミックキーボードによりそれらの開閉指示等を行うことができる。

シミュレーション結果を出力するための周辺装置として、ラインプリンター、ハードコピー、X-Yプロッター等が用意されている。

## 2.2 ハードウェアの特徴

ハードウェアの特徴は以下の通りである。

### ① 分散型のハードウェア構成

2.1に述べたようにハードウェアの構成は、シミュレーション計算機とCRT・入出力制御用計算機とに役割分担および負荷分散させることによってシステムの安定性を確保している。

また、将来のシステムの拡張および変更に対してフレキシビリティを持たせるため、ネットワーク構成としている。将来、ハードウェア機器の更新あるいは増設に際しても、ネットワークに容易に接続が可能である。

### ② エンジニアリングシミュレータとしてのシミュレータ運転操作の効率化

シミュレーション実行制御および運転操作のため、1台のシミュレーション実行制御用CRTと3台の運転操作用CRTをシミュレータ運転操作盤にコンパクトにまとめている。またCRT画面の選択およびダイナミックキーボード上の機器の操作をタッチ操作で行えるようにしており、リアルタイムシミュレーションに際して運転状況を的確にとらえながら、しかも少人数でのシミュレータ運転を可能としており、研究用設備としての配慮がなされている。

また、いろいろなタイプの出力機器を設置し、CRT画面上に表示されたシミュレーション状態等の各種情報を隨時記録できるようにしている。

表 2.1.1 シミュレータ主要構成機器の概略仕様

(1) シミュレーション計算機	Digital Equipment 社製
(a) CPU	
型 式	VAX-6420 CPU
語 長	32ビット
演算速度	約11MIPS(最大13MIPS)
仮想記憶域	4GB
ユーザプログラム領域	2GB/ユーザ
浮動小数点アクセラレータ	内蔵
主記憶容量	128MB
キャッシュメモリ	256KB
CPUサイクルタイム	20ナノ秒
I/O転送速度	60MB/秒以上
(b) 補助記憶装置	
i. 磁気ディスク装置	1式
型 式	SA600-FD
記憶容量	2.4GB(1.2GB×2台)
転送速度	2.8MB/秒・台
平均アクセスタイム	23.5ミリ秒
ii. 磁気テープ装置	1台
型 式	TA81-AB
記憶容量	145MB(6250 bpi)、40MB(1600 bpi)
転送速度	1600/6250 bpi
読み書き速度	75/25 インチ/秒(ストリーミング)
リワインド速度	2.5 インチ/秒(スタート/ストップ)
データ転送速度	468KB/秒
(2) CRT、入出力制御用計算機	Digital Equipment 社製 micro VAX-3000
(a) CPU	
システム形式	2J-C061A-00
型 式	KA650-AA
語 長	32ビット
演算速度	2.7MIPS
仮想記憶域	4GB
ユーザプログラム領域	2GB/ユーザ
浮動小数点アクセラレータ	内蔵
主記憶容量	16MB
キャッシュメモリ	1KB/チップ、64KB/ボード
I/O転送速度	3.3MB/秒
(b) 補助記憶装置	
型 式	RQDX3
固定ディスク	318MB(RD54×2台)
カートリッジテープ	TK50(95MB)
(3) 入出力制御用モジュール	
デジタル入力	32点
デジタル出力	32点
アナログ入力	4チャンネル
アナログ出力	24チャンネル
(4) ネットワーク関連設備	
(a) ローカルネットワークインターフェクタ	
型 式	DELNI-BA 1台

(次頁に続く)

(b) ターミナルサーバ  
型式 DS R V B 2台

## (5) シミュレーション実行制御用および運転操作用コンソール画面表示システム

(a) CRTプロセッサ 型式	ディジタル社製 2台
表示文字数	D P - 1 0 0 0
表示色	1 2 8 文字 × 6 4 行
表示文字種類	同時 6 4 色
画像メモリ	J I S - 1 5 8 種 漢字第一水準
インターフェース	4 MB
	R S - 2 3 2 C (シミュレーション実行制御用)
	T C P - I P (運転操作用)

(b) シミュレーション実行制御用CRT 型式	ディジタル社製 1台
スクリーンサイズ	D P - 1 0 0 0 - 2 0
表示方式	2 0 インチ
走査方式	ラスタースキャン
	ノンインターレス

(c) 運転操作用CRT 型式	ディジタル社製 3台
スクリーンサイズ	D P - 1 0 0 0 - 2 0 T
表示方式	2 0 インチ
走査方式	ラスタースキャン
タッチセンサ	ノンインターレス
	光学式

(6) シミュレーション実行制御用ダイナミックキーボード ディジタル社製 1台  
型式 G P - 5 1 0

(7) 運転操作用ダイナミックキーボード 日本電気社製 3台  
型式 P C - 9 8 0 1 E X 4

プラズマディスプレー  
型式 日本電気社製 3台  
P D 6 4 0 0 G 4 0 0 B A - B B

タッチパネルおよびタッチパネルコントローラ 日本バイナリ社製  
型式 E 2 7 4 Model 2 5 6

(8) カラーハードコピー  
型式 ソニー・テクトロニクス(株)製 1台  
用紙サイズ 4 6 9 3 R G B  
記録方式 A 4 サイズ  
表示色 熱転写方式  
コピー時間 8 色(最高 4 0 9 6 色)  
分解能 4 3 秒/枚(3 パスリボン)  
1 1. 8 ドット/mm

(9) X Y プロッター ヒューレットパッカード社製 1台  
型式 7 4 7 5 A  
用紙サイズ A 3 / A 4 サイズ  
ペン 6 ペン  
インターフェース R S - 2 3 2 C

(10) 漢字端末機 Digital Equipment 社製  
型式 V T 2 8 6 - F A 2 台  
V T 3 8 2 - F A 2 台

(11) ラインプリンター Digital Equipment 社製  
型式 L A 2 8 0 - A B 1 台

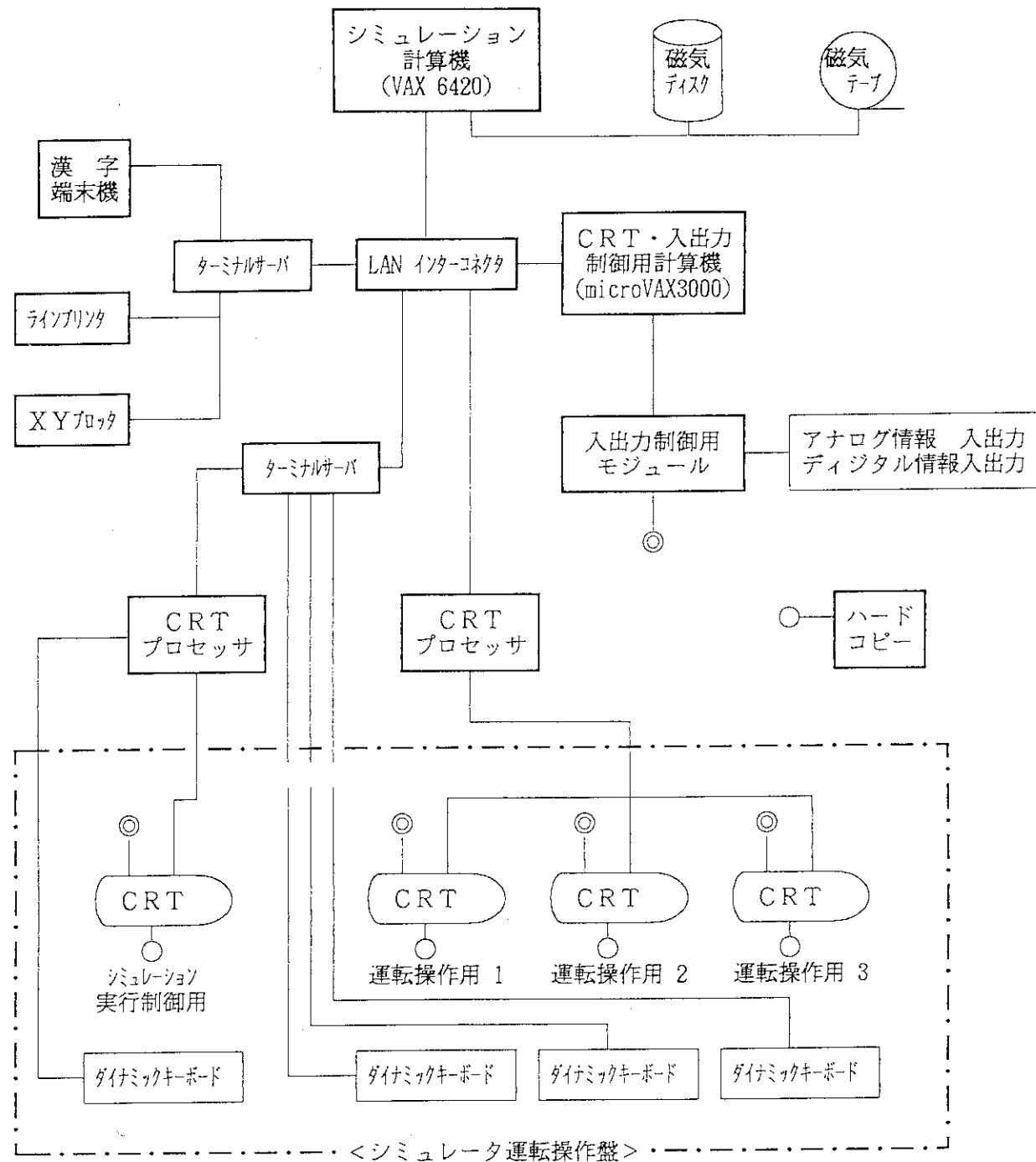


図 2.1.1 ハードウェア主要構成図

### 3. ソフトウェアの概要

#### 3.1 ソフトウェアの構成

シミュレータのソフトウェア構成を、図3.1.1に示す。大別すると、シミュレーション実行制御用ソフトウェア、基本モデルおよびプラントデータから構成されている。

シミュレーション実行制御用ソフトウェアは、シミュレーション時ユーザが使い易いようにシミュレーション計算の実行を制御する機能を持っている。その内容については、3.2で述べる。

基本モデルを中心としたソフトウェアは、図3.1.2に示すようにプラントデータからシミュレーション可能な初期状態を計算する初期計算プログラムとリアルタイムに動特性計算を行う過渡計算プログラムに大別され、後者は、一次系熱水力計算、蒸気発生器二次側熱水力計算、炉心核計算、格納容器内計算等の基本モデルから構成される。

これらはマルチタスク構成をとり、互いに共通データエリアであるグローバルコモンを介してプログラム間の変数をやりとりしている。

プラントデータは、系統構成やプラント諸元値を特定のフォーマットに記述するもので、初期計算の際のデータとして使用される。

なお、プログラミング言語は技術計算用として一般的なFORTRAN言語で統一している。

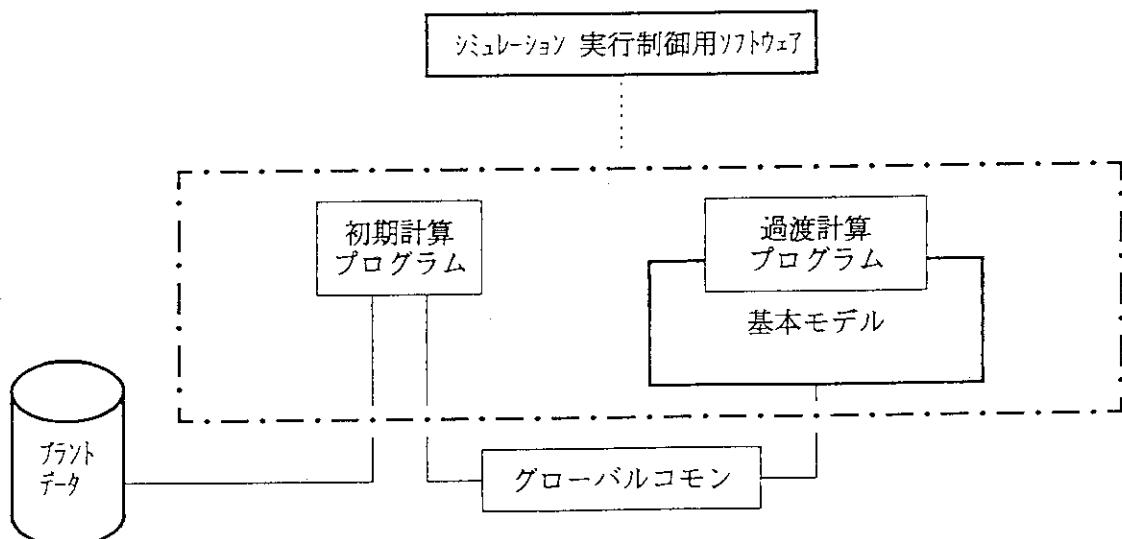


図3.1.2 基本モデルを中心としたソフトウェア

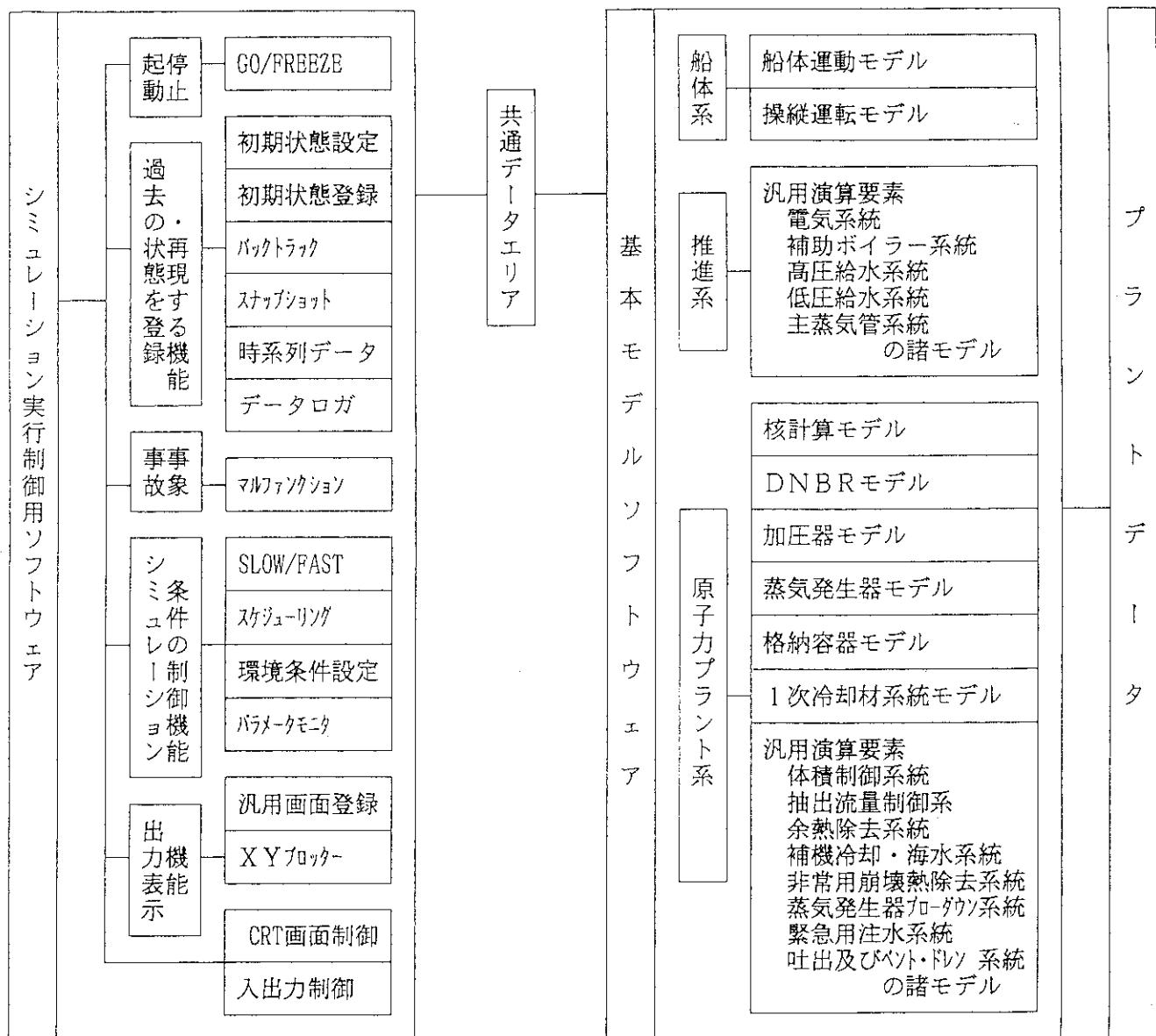


図3.1.1 ソフトウェアの構成図

### 3.2 ソフトウェアの特徴

ソフトウェアの特徴は以下の通りである。

#### ① ソフトウェア指向によるシステムとしての拡張性・柔軟性の確保

改良船用炉の基本設計に際して設計支援ツールとして適用できるよう拡張性・柔軟性を持たせるため、できるだけソフトウェアで拡張・変更に対応できるよう指向したシステムである。

例えば、改良船用炉への適用のために、運転操作盤の操作機器の仕様が「むつ」モデルで使用したものと変わっても、CRT・ダイナミックキーボード画面の変更のみで対応できるようにし、ハードウェアの追加・変更は不要である。

#### ② モジュール構成によるソフトウェアの拡張性・柔軟性の確保

ソフトウェア構成については、3.1で述べたように、シミュレーション実行制御用ソフトウェア部分、物理現象モデルを記述した基本モデル部分、およびプラント毎に異なるプラントデータ部分とからなっている。改良船用炉等の新炉型に対応し、拡張が容易なようモジュール構造としている。すなわち、新炉型に対しては、それに対応する基本モデル部分（例として、貫流型蒸気発生器基本モデル）の追加とプラントデータを入力することにより、現システムが利用可能である。

また、各モジュールは機能毎にわかれており、インプットデータとして境界条件を与えることによって構成要素毎のシミュレーションも可能である。

#### ③ 船体および原子力プラントの挙動を同時に解析する総合的なソフトウェア

本シミュレータの最大の特徴は、海象・気象条件下で船体運動、推進系、原子炉プラント系の挙動を時系列的に連成解析できる点、特に船体運動の影響を考慮した原子炉プラント系の解析が可能な点にある。船体の傾斜および加速度の影響を考慮した例として、一次冷却系のループ内循環量・蒸気発生器二次側循環量の解析に際し運動量保存式に加速度の流れ方向成分を考慮している点、あるいは重力加速度の熱伝達率への影響を考慮している点をあげることができる。

#### ④ リアルタイム処理のためのモデル化の工夫

リアルタイム処理のために、限られた演算時間内で精度よくシミュレーションが実行できるようモデル化を工夫した。モデル化の工夫の例として、一つの流体ノード内に液位が存在する場合に、伝熱を扱うメタルノードを多分割して液相部と気相部で熱伝達の取扱いを変えることにより、ノーディングの粗さを補い解析精度の向上をはかっていることがあげられる。また、船体運動の計算では予め波浪に対する船体運動ファイルを用意してシミュレーション実行時に利用することでリアルタイム処理を可能としている。モデル化の詳細については、3.3を参照して欲しい。

## ⑤ 膨大なソフトウェアの保守管理を助けるツールの活用

本ソフトウェアは約30万ステップからなる膨大なものであり、モジュール構成とともに、ソフトウェアの管理面から、また今後のシステム拡張面から履歴管理・バージョン管理をシステムマッチクに行えることが開発段階はもとより保守管理段階においても不可欠である。本システムでは、そのようなツールとして、DEC社VAXコンピュータのCMS (Code Management System) を使用している。

## ⑥ シミュレーションを効率的に実施するためのシミュレーション実行制御機能の具備

シミュレーションを効率的に実施するに際し、以下のようなシミュレーション実行制御機能を用意している。内容的にグループ分けして述べる。

### (a) シミュレーション時過去の状態を登録・再現する機能

#### i 初期状態設定

シミュレーションを効率的に行うために、予めシミュレーションによって作成された幾つかのプラント状態を初期状態ファイルとして補助記憶装置に登録しておき、これらのファイルから実行しようとするプラント状態をシミュレータ上に設定する。なお、初期状態ファイルとしては、最大30個まで登録可能である。

#### ii 初期状態登録

シミュレーション実行中の任意の時点でシミュレーションを停止し、その時の原子力船の状態・シミュレータの制御情報等を初期状態ファイルに登録する。

#### iii バックトラック

現時点から30分前まで2分間隔で過去に遡ってプラントの状態を再設定し、その設定時点からシミュレーションを開始することができる機能である。

#### iv スナップショット

シミュレーションの実行中に任意の時点のプラント状態を、スナップファイルとして登録する機能で、最大10個まで登録可能である。このファイルは、初期状態ファイルと同様に初期状態設定機能によりシミュレータに入力できる。

このファイルの特徴は、初期状態ファイルに比べ、ファイルサイズが小さく初期状態設定に要する時間が短時間で済むことにある。但し、元の初期状態ファイルを更新するとそのファイルを参照していたスナップショットファイルは無効となる。従って、スナップショットファイルは一次的な使用に適している。

## v 時系列データ

予めインプットデータに設定しておいた時系列データ（アナログ／ディジタル）からのデータ発生・停止を制御する機能である。時系列データは最大40変数まで設定可能である。

例えば、海象条件の一つである波高データを時系列データとして予め補助記憶装置に登録しておき、シミュレーション時それを利用することによって環境条件を設定することができる。

## vi データロガ

警報の発信・解除、弁・ポンプ等の機器の操作、シミュレーション実行制御操作、C R T・ダイナミックキーボード操作等について、操作内容を記録する機能である。

## (b) 事故事象のシミュレーション機能

## i マルファンクション

プラントの異常事象または事故事象を発生および解除させる機能である。事象の設定には、事象発生までの時間、発生箇所および発生量を入力する。異常事象の項目は47種類用意されている（表3.2.1参照）。予め30個までのマルファンクションを選択しておくことができ、それらのマルファンクションを一括してシミュレータに設定することもできる。

## (c) シミュレーション条件のコントロール機能

## i SLOW/FAST

シミュレーションの実行速度を変更させる機能で、シミュレーション実行中でも使用できる。SLOWは実時間に比してシミュレーション速度を遅くする機能で、FASTはその逆である。FASTは実行刻み時間 ( $\Delta t$ ) をn倍にして実行するので、「むつ」モデルでは精度面で3.0倍がその限度である。SLOWは急激な過渡現象をシミュレーションする場合に有効である。最大0.1倍まで可能である。

## ii スケジューリング

予め選定した複数のマルファンクションおよび操舵・出力変更等の操作手順をプログラム化し、自動的に実行する機能である。また、このスケジュールをファイルとして登録し、必要に応じて使用することができる。このスケジューリングファイルは、最大20ファイルまで登録可能である。

## iii 環境条件設定

環境条件は、波、風、潮流および海水温度を設定する機能である。波については、6成分

の有義波高、波周期および波方向を入力することにより、ISSCスペクトルに従う合成した波が発生する。風および潮流については、それぞれ1成分の風向、風速、潮流方向、潮流速度を設定することができる。なお、環境条件はシミュレーションの途中で変更可能である。

#### iv パラメータモニタ

プラントのXe飽和量、崩壊熱、放熱量等の主要パラメータを表示するとともに強制的に変更する機能であり、シミュレーション実行制御用CRTから操作できる。

なお、監視のみのパラメータはシミュレータ運転操作用CRTのパラメータモニタ画面で最大5画面まで設定することが可能である。また、パラメータを予め登録するためのファイルには、変数名(パラメータ)を40個まで登録でき、最大10ファイルまで可能である。

#### (d) 出力・表示機能

##### i 汎用画面登録

シミュレータ運転操作用CRTの汎用CRT画面（トレンドグラフ、ディジタルトレンドグラフ、複合トレンドグラフ、XYプロット表示）に表示するパラメータをCRT画面毎に選定する機能である。

##### ii XYプロッタ

最大80個の変数の値を1変数につき最大7200点分、ダンプファイルに保存し、そのファイルから任意の変数の組合せ（最大5変数）でプロッタに出力する機能である。ダンプファイルは最大10個、プロッタ出力用変数組合せファイルが最大10個入力可能である。なお、ダンプファイルに記録する際の記録間隔は、0.26秒（シミュレータ実行制御の基本周期）の整数倍である。

表 3.2.1 マルファンクション項目

関連項目	マルファンクション名称
原子炉	制御棒誤引抜 制御棒誤挿入 制御棒誤落下 制御棒不動作 原子炉自動トリップ失敗
核計装	中性子源領域核計装故障 中間領域核計装故障 出力領域核計装故障 出力領域核計装故障
一次冷却水系統	一次冷却水ポンプトリップ 一次冷却水ポンプ誤起動 一次冷却水ポンプ軸固着
加圧器	加圧器逃し弁故障 加圧器スプレイ弁故障 加圧器ヒータトリップ 加圧器ヒータ誤投入
体積制御系統	抽出流量異常 充填ポンプトリップ 充填ポンプ誤起動 充填ポンプ自動起動失敗
余熱除去系統	余熱除去ポンプトリップ
補機冷却系統	補機・冷却海水ポンプトリップ
主蒸気系統	ガバナ弁故障 主蒸気安全弁故障 主ダンプ弁故障 崩壊熱ダンプ弁故障 蒸気発生器蒸気塞止弁故障
主給水系統	主給水弁故障 主給水ポンプトリップ 主給水ポンプ誤起動 高圧給水加熱器故障 補助給水弁故障 補助給水ポンプトリップ
タービン	タービントリップ タービン単筒運転
復水器	主復水器真空喪失
冷却系統	主循環ポンプトリップ
電気系	発電機トリップ
保護装置	安全注入信号異常
事 故	一次冷却水喪失 加圧器気相部破断 蒸気発生器電熱管破断 主蒸気管破断 主給水管破断
船体事故	海水取水不能

### 3.3 基本モデルソフトウェア

#### 3.3.1 炉心計算プログラム

##### (1) 炉心計算プログラムの概要

炉心計算プログラムでは、図3.3.1に示すように、炉心入口エンタルピ、炉心入口流量、炉心圧力、制御棒位置等を入力とし、燃焼度、制御棒位置、キセノン濃度、ほう素濃度等を考慮して中性子動特性計算を行い、準3次元的燃料発熱分布、DNBRを計算する。入力として与えられる変数のうち、炉心入口エンタルピ、炉心入口温度、炉心入口流量、炉心圧力は一次冷却系統計算プログラムから与えられる。核特性を計算する炉心計算プログラムの軸方向分割数と、熱流動を計算する一次冷却系統計算プログラムの軸方向分割数とは別個に設定できるが、通常、炉心計算プログラムの分割数は一次冷却系統計算プログラムの分割数の整数倍としている。

本プログラムの特徴は以下の通りである。

- ① 2群、軸方向一次元近似中性子動特性計算。軸方向分割数は最大50分割。
- ② 軸方向に多分割した各領域毎にキセノン濃度を計算する。
- ③ 別途実施した詳細3次元解析結果を基に、制御棒パターンにより原子炉出力3次元分布を計算する。

本プログラムは、以下に示す8個のサブプログラムにより構成される。

- ① 核定数設定サブプログラム
- ② 核定数補正サブプログラム
- ③ 中性子動特性サブプログラム
- ④ 疑似3次元分布計算サブプログラム
- ⑤ 崩壊熱動特性サブプログラム
- ⑥ 炉出力計算サブプログラム
- ⑦ キセノン動特性サブプログラム
- ⑧ エンタルピ計算サブプログラム
- ⑨ 炉心DNBR計算サブプログラム

各サブプログラムの内容を以下に記述する。なお、記号は表3.3.1の記号表を参考されたい。

##### (1) 核定数設定サブプログラム

本サブプログラムでは、軸方向に多分割した各領域毎に燃焼度を求め、燃焼度からマクロ断面積基準値、ミクロ断面積等を計算する。計算の概略の流れを図3.3.2に示す。

##### (2) 核定数補正サブプログラム

本サブプログラムでは、軸方向に多分割した各領域毎のマクロ断面積をドップラ効果、減速材密度、ほう素濃度、キセノン濃度及び制御棒位置により補正する。計算の概略の流れを図3.3.3に示す。

吸収断面積についての補正は、まず、ドップラ効果による中性子吸収変化分を補正して、次に、減速材密度、ほう素濃度、キセノン濃度及び制御棒位置の変化に応じてマクロ吸収断面積を補正し、最後に、吸収断面積のスペクトル硬

化による補正を行い、補正後のマクロ吸収断面積を得る。

ドップラ効果による中性子吸収の変化分は各領域毎の出力に応じて(3.3.1)式により補正する。

$$\Sigma_{a1} = \Sigma_{a1}^{Ref} + \Delta \Sigma_{a1}(P) \quad (3.3.1)$$

$$\Delta \Sigma_{a1} = A_1 (\sqrt{P - 1}) + A_2 (P - 1)$$

P : 規格化局所出力

拡散係数の補正は、まず、拡散係数の減速材密度による補正を行い、次に、拡散係数のスペクトル硬化による補正を行う。

除去断面積 $\Sigma_r$ の補正是以下のとおり行う。

$$\Sigma_m^{Ref} = \frac{\Sigma_{a1}^{Ref}}{1 + \frac{\Sigma_{a1}^{Ref}}{\Sigma_r^{Ref}}}$$

$$\Sigma_m^{(1)} = \delta N^W \sigma_n + \Sigma_r^{Ref}$$

$$\Sigma_r = \frac{\Sigma_{a1}}{\exp\left(\frac{\Sigma_{a1}}{\Sigma_m^{(1)}}\right) - 1}$$

$\nu$ \*分裂断面積 $\nu \Sigma_{f1}$ 、 $\nu \Sigma_{f2}$ の補正是以下のとおり行う。

$$\frac{\kappa \Sigma_{f1}^{(1)} - \kappa \Sigma_{f1}^{Ref}}{\kappa \Sigma_{f1}^{Ref}} = \alpha H \frac{\rho_{act} - \rho_{pref}}{\rho_{pref}}$$

↓

$$\nu \Sigma_{f2} = \nu \Sigma_{f2}^{Ref}$$

$$\nu \Sigma_{f2} = \nu \Sigma_{f2}^{Ref}$$

$\kappa$ \*分裂断面積 $\kappa \Sigma_{f1}$ 、 $\kappa \Sigma_{f2}$ の補正是以下のとおり行う。

$$\frac{\kappa \Sigma_{f1}^{(1)} - \kappa \Sigma_{f1}^{Ref}}{\kappa \Sigma_{f1}^{Ref}} = \alpha H \frac{\rho_{act} - \rho_{pref}}{\rho_{pref}}$$

↓

$$\kappa \Sigma_{f1} = \kappa \Sigma_{f1}^{(1)}$$

$$\kappa \Sigma_{f2} = \kappa \Sigma_{f2}^{Ref}$$

### (3) 中性子動特性サブプログラム

このサブプログラムでは、2群拡散方程式を解いて軸方向中性子束分布を計算する。遅発中性子は6群に近似する。計算の概略の流れを図3.3.4に示す。定常計算時の実効増倍率Kを計算する。定常計算における収束の判定は、各メッシュの中性子束と前ステップの中性子束のずれの最大値が収束判定中性子束偏差 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ よりも小さくなった場合に、収束とみなす。

## (4) 疑似 3 次元分布計算サブプログラム

このサブプログラムでは、制御棒配置より燃料集合体単位の横方向出力分布を求め 3 次元の出力分布を計算する。

本シミュレータでは実時間でのシミュレーションを行うために、直接 3 次元の中性子拡散を解くのではなく、軸方向と水平方向に変数分離することにより疑似的に 3 次元として扱う。PWRは原子炉内での冷却材の沸騰がなく、概略一様な核特性として扱え、また、制御棒パターンも複雑なものでないので、3 次元出力分布は、軸方向 1 次元出力分布と水平方向 2 次元出力分布に変数分離して扱えることが実測ならびに解析結果から知られている。すなわち、3 次元出力分布  $\phi(x, y, z, t)$  は次のように分離できる。

$$\phi(x, y, z, t) = f(x, y) \phi(z, t) \quad (3.3.2)$$

ここで  $\phi(z, t)$  は、軸方向 1 次元の中性子束分布であり、軸方向の中性子束拡散方程式を解く軸方向分布モデルで求める。 $f(x, y)$  は、制御棒のパターンにより定める水平方向出力分布である。炉心の反応度収束の過渡的な挙動は、軸方向分布モデルでのみ考慮し、水平方向出力分布計算では相対的な出力分布のみを扱う。

水平方向出力分布  $f(x, y)$  は予め詳細な核計算プログラムにより得られた水平方向出力分布に基づく定数  $A(x, y)$  を用いて求める。

## (5) 崩壊熱動特性サブプログラム

本サブプログラムでは、崩壊熱の発生を 6 群で近似し、遅発中性子動特性モデルと類似するモデルにより、崩壊熱先行核の存在を仮定してその動特性を以下のように計算する。

$$\frac{\alpha D_i}{dt} = \alpha_i (\kappa \sum f \phi)_a - \lambda_i D_i \quad (i = 1, 6) \quad (3.3.3)$$

軸方向分割は 1 領域として取り扱うため、 $(\kappa \sum f^n \phi_n)_a$  は燃料装荷部の全領域での平均値を用いる。

(3.3.3)式を離散化すると (3.3.4)式が得られる。

$$D_i = D_{i0} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{\alpha_i}{\lambda_i} (\kappa \sum f \phi)_a (1 - e^{-\lambda_i \Delta t}) \quad (3.3.4)$$

( $\Delta t$  は演算周期)

定常計算では、 $e^{-\lambda_i \Delta t} = 0$  とする。シミュレータを起動したとき（初期状態）では、 $D_i$  の値は炉心寿命によらず全出力状態における平衡値に設定される。

## (6) 炉出力計算サブプログラム

本サブプログラムでは、中性子束分布に基づき、核分裂による発生熱及び核分裂生成物の崩壊熱の総和としてから原子炉出力を計算する。

炉心各領域の出力  $P_L^i$  は、(3.3.5)式で与えられる。

$$P_L^i = C_{MW}(1-\alpha)(\kappa \sum f_1 \phi_1 + \kappa \sum f_2 \phi_2) + C_{MW} \frac{P_{LB}}{P_{MD}} \sum_{i=1}^6 \lambda_i D_i \quad (3.3.5)$$

また、炉心平均出力  $P_M$  は(3.3.6)式で与えられる。

$$P_M = \frac{\int_{N_1}^{N_2} P_L dn}{N_{CR}} \quad (3.3.6)$$

ここで、 $N_{CR}$  は燃料が装荷されている部分の領域の個数である。

$$N_1 = N_u + 1, \quad N_2 = N - N_L$$

なお、式(3.3.5)における  $P_{LD}$  、  $P_{MD}$  は崩壊熱先行核の平均崩壊時定数相当時間  $T_{DK}$  以前の  $P_L$  、  $P_M$  であり各々式(3.3.6)、(3.3.7)で与えられるとする。

$$T_{DK} \frac{dP_{LD}}{dt} = P_L^n - P_{LD} \quad (3.3.6)$$

$$P_{MD} = \frac{\int_{N_1}^{N_2} P_{LD} dn}{N_{CR}} \quad (3.3.7)$$

ただし、 $P_{LD_0}$  は 1 ステップ前の  $P_{LD}$  である。

定常計算においては  $P_{LD}$  および  $T_{DK}$  は次の通りである。

$$P_{LD} = P_L = (\kappa \sum f_1^n \phi_1 + \kappa \sum f_2^n \phi_2) C_{MW}$$

$$T_{DK} = \exp \left\{ \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^6 \alpha_i \ln \left( \frac{1}{\lambda_i} \right) \right\} \quad (3.3.8)$$

全出力  $P_A$  は次式(3.3.9)により計算される。

$$P_A = \int_{N_1}^{N_2} P_L H_n A_{CORE} \times 10^{-6} dn \quad (3.3.9)$$

軸方向出力の歪み  $P_{OFFSET}$  は次式(3.3.10)で与えられる。

$$P_{OFFSET} = \frac{\int_{N_1}^{N_m} P_n dn - \int_{N_m'}^{N_2} P_n dn}{\int_{N_1}^{N_2} P_n dn} \quad (3.3.10)$$

式(3.3.10)での  $N_m$  および  $N_m'$  は炉心中央部の領域を示す。

高速中性子束のオフセット  $\phi_{1OFFSET}$  および熱中性子束のオフセット  $\phi_{2OFFSET}$  も  $P_{OFFSET}$  と同様の方法で計算する。

#### (7) キセノン動特性サブプログラム

本サブプログラムでは、各領域毎にキセノンおよびよう素の発生および消滅量を計算し、キセノンによる中性子吸収の増加分を補正する。概略フローを図 3.3.5 に示す。

よう素 I 、キセノン Xe の濃度は次式(3.3.11)、(3.3.12)で与えられる。

$$\frac{dI^n}{dt} = Y_I (\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n) - \lambda_I I^n \quad (3.3.11)$$

$$\frac{dXe}{dt} = Y_{xe} (\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n) + \lambda_I Xe^n - (\sigma a_{x1}^{xe} \phi_1^n + \sigma a_{x2}^{xe} \phi_2^n) Xe^n \quad (3.3.12)$$

ただし、燃料を装荷していない部分については  $I = Xe = 0$  である。

定常計算は、式(3.3.11)、(3.3.12)において  $\frac{dI^n}{dt} = 0$ ,  $\frac{dXe^n}{dt} = 0$  とおき、次式(3.3.13)、(3.3.14)により行う。

$$I^n = \frac{Y_I}{\lambda_I} (\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n) \quad (3.3.13)$$

$$Xe^n = \frac{(Y_x + Y_z)(\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n)}{\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1^n + \sigma a_2^{xe} \phi_2^n} \quad (3.3.14)$$

非定常計算は、次式(3.3.15)、(3.3.16)により行う。

$$I^n = I_0^n \cdot e^{-\lambda_I \Delta t} + \frac{Y_I (\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n)}{\lambda_I} (1 - e^{-\lambda_I \Delta t}) \quad (3.3.15)$$

$$Xe^n = Xe_0^n e^{-(\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1 + \sigma a_2^{xe} \phi_2) \Delta t} \quad (3.3.16)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{(Y_I + Y_{xe})(\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n)}{\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1^n + \sigma a_2^{xe} \phi_2^n} (1 - e^{-(\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1 + \sigma a_2^{xe} \phi_2) \Delta t}) \\ &+ \frac{\lambda_I I_0^n - Y_I (\sum f_1^n \phi_1^n + \sum f_2^n \phi_2^n)}{\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1^n + \sigma a_2^{xe} \phi_2^n - \lambda_I} (e^{-\lambda_I \Delta t} - e^{-(\lambda_{xe} + \sigma a_1^{xe} \phi_1 + \sigma a_2^{xe} \phi_2) \Delta t}) \end{aligned}$$

ただし、 $I_0^n$  は 1 ステップ前の  $I^n$ 、 $Xe_0^n$  は 1 ステップ前の  $Xe^n$  である。

#### (8) エンタルピ計算サブプログラム

このサブプログラムでは、各領域毎の冷却材エンタルピ、ほう素濃度及び減速材密度の計算を行う。概略フローを図 3.3.6 に示す。

前述したように、通常炉心計算プログラムの分割数は一次冷却系統計算プログラムの分割数の整数倍としている。流体計算用の領域での入口での流体の物性値は、順流の場合は、上流側の領域の流体物性値とし、逆流または滞留の場合には、当該領域の物性値を用いる。核計算用領域の物性値は流体計算用領域の物性値より内挿法により、次式により求める。

$$h^n = h^{j+1} \theta^n + h^j (1 - \theta^n) \quad (\text{エンタルピ}) \quad (3.3.17)$$

$$B^n = B^{j+1} \phi^n + h^j (1 - \phi^n) \quad (\text{ほう素濃度}) \quad (3.3.18)$$

補間係数  $\theta^n$  および  $\phi^n$  は炉心に水位がある場合とない場合について以下のように定める。

##### ① 炉心部の流体が単相（液相又は気相）の場合

エンタルピおよび乾き度については、炉出力で重み付けした補間を行う。

ほう素濃度については単純に線型補間を行う。

$$\theta^n = \frac{\int_{N1}^n P_E dn}{\int_{N1}^{N2} P_E dn} \quad (\text{炉出力で重み付けした補間係数})$$

$$\phi^n = \frac{\int_{N1}^n dn}{\int_{N1}^{N2} dn} \quad (\text{単純線型補間係数})$$

## ② 炉心部の流体が気液2相の場合

液位を含まない流体計算用ノードの内部は均一に混合していると仮定し、核計算用領域毎の内挿は行わない。水位を含む領域については、線型内挿を行う。従って、 $\theta^n$ および $\phi^n$ は以下の通りとなる。

$$\theta = \phi = \begin{cases} 0 & (\text{液位より下のメッシュ}) \\ 1 & (\text{液位より上のメッシュ}) \\ \frac{N_h - N_n}{N_h - N_L} & (\text{液位を含むメッシュ}) \end{cases}$$

ただし、 $N_h$ ：液位を含む核メッシュの上側境界位置  
 $N_L$ ：液位を含む核メッシュの下側境界位置  
 $N_n$ ：液位

以上より核メッシュ毎の減速材密度が以下の式(3.3.19)で求められる。

$$\rho^n = \begin{cases} \rho(h^n, P) & (\text{単相流の場合}) \\ \frac{h_g - h_1}{(h^n - h_1)v_g + (h^n + h_g)v_1} & (\text{飽和二相流の場合}) \end{cases} \quad (3.3.19)$$

## (9) 炉心DNBR計算サブプログラム

炉心DNBR計算サブプログラムは、定常状態を仮定して静止時DNBRを求め、静止時DNBRに対して船体運動による加速度変化の影響を補正して動揺時DNBRを求める。

計算の流れを図3.3.7に示す。図に示すように、一次冷却系計算プログラム、炉出力計算サブプログラム、船体運動加速度計算プログラムのリアルタイムでの出力とDNBR計算用プラントパラメータの入力データから静止時DNBRを計算する。高温水路の熱水力特性計算では、詳細熱水力計算プログラムの計算結果から得た熱水力特性の相関を用いて計算の高速化を図っている。即ち、計算に用いる高温水路のエンタルピ上昇は、高温水路出口蒸気重量率の関数としてリアルタイムに補正している。また、高温水路の質量速度は高温水路の各軸方向位置での蒸気重量率の関数としてリアルタイムに補正している。これらの数値を用いて各時刻での静止時DNBRを計算する。次に船体動揺時のDNBRを計算する。加速度変動が限界熱流束に与える影響については十分な実験データがないが、横村<sup>13</sup>等によれば上下動揺時のDNB熱流束に及ぼす影響がフレオンを用いた2重管の試験データを用いて検討されており次式で整理できると報告されている。ただし、実験実施範囲は加速度振幅0.5g以下であるので加速度振幅がこれを超える範囲では外挿となる。

$$q''_{\text{CHF}} / q''_{\text{CHFO}} = (1 + a/g)^c \quad (3.3.20)$$

$q''_{\text{CHF}}$  : 加速度変動時限界熱流束

$q''_{\text{CHFO}}$  : 静止時限界熱流束

$a$  : 変動加速度 (上向き加速度が+、下向き加速度が-)

$g$  : 重力加速度 ( $-9.8 \text{m/s}^2$ )

$c$  : 定数 (0.20~0.25)

シミュレータでは、限界熱流束の低下をDNBRの低下として扱い今後の知見を反映できるように次式で補正する。

$$\text{動搖時 DNBR} = \text{静止時 DNBR} \times [ (A+B(a/g)^c) + D ] \quad (3.3.21)$$

当面、各値は以下とする。

A=1.0	B=1.0
c=0.25	D=0.0

#### (10) シュミレータの運転モード

炉心モデルは、初期バランスの計算方法および過渡計算の方法に対して、いくつかの運転モードを持っている。運転モードの設定は入力のモード設計で行う。

##### ① ほう素濃度固定モード

与えられたほう素濃度でバランスするように実効増倍係数を与える。過渡計算では実効増倍係数を固定して計算を行う。

##### ② 制御棒位置サーチモード

実効増倍係数が1.0でバランスするように制御棒位置を修正する。

##### ③ クリーンモード

燃料装荷直後のように素、キセノンが全く存在しない状態とする。

##### ④ キセノン固定モード

初期バランス計算時と同様によう素濃度、キセノン濃度を固定して過渡計算を行う。

##### ⑤ 未臨界モード

未臨界状態を作り出す。プラント状態、制御棒位置はシミュレーションシステムの運転者が設定した状態となる。

表 3.3.1 3.3.1 節の記号表

B	: ほう素濃度	[ppm]
C <sub>t</sub>	: 遅発中性子 先行核濃度	
C <sub>MW</sub>	: エネルギーの単位換算	[Wt/MeV]
D <sub>t</sub>	: 崩壊熱先行核密度	[atom]
I	: よう素濃度	[atom/cm <sup>3</sup> ]
K	: 実効増倍率	[—]
n	: 着目メッシュ番号	[—]
N	: 全メッシュ数	[—]
N <sub>CR</sub>	: 燃料装荷のメッシュ数	[—]
N <sub>u</sub>	: 炉心上部外挿メッシュ番号	[—]
N <sub>l</sub>	: 炉心下部外挿メッシュ番号	[—]
P	: 炉心圧力	[atg]
P <sub>L</sub> <sup>N</sup>	: 炉心メッシュの出力	
P <sub>M</sub>	: 炉心平均出力	
$\sigma_{\text{u1}}^w$	: 減速材のミクロ高速吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{u2}}^w$	: 減速材のミクロ熱吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{u1}}^b$	: ほう素 <sup>-10</sup> のミクロ高速吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{u2}}^b$	: ほう素 <sup>-10</sup> のミクロ熱吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{u1}}^{xe}$	: キセノンのミクロ高速吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{u2}}^{xe}$	: キセノンのミクロ熱吸収断面積	[cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_m$	: ミクロ減速材断面積	
$\Sigma_{\text{u1}}^t$	: 速中性子吸収断面積	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_{\text{u2}}^t$	: 熱中性子吸収断面積	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_{\text{u1}}^{\text{Ref}}$	: 高速吸収断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_{\text{u2}}^{\text{Ref}}$	: 熱吸収断面積基準値	[n/cm]
$\nu \Sigma_{\text{u1}}^t$	: $\nu$ *分裂断面積(速中性子)	[n/cm]
$\nu \Sigma_{\text{u2}}^t$	: $\nu$ *分裂断面積(熱中性子)	[n/cm]
$\Sigma_m^{\text{Ref}}$	: 減速断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_r^t$	: 除去断面積	[cm <sup>-1</sup> ]

$\Sigma r^{R \times t}$	: 除去断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ]
$\phi_1$	: 中性子束(速中性子)	[n/cm <sup>2</sup> ·sec]
$\phi_2$	: 中性子束(熱中性子)	[n/cm <sup>2</sup> ·sec]
$T_{DK}$	: 崩壊熱先行核の平均崩壊時指定	[sec]
$X_e$	: キセノン濃度	[atom/cm <sup>3</sup> ]
$Y_t$	: よう素発生割合	(-)
$Y_{xe}$	: キセノン発生割合	(-)
$\alpha$	: 崩壊熱先行核全発生割合	(-)
$\alpha_1$	: 崩壊熱先行核発生割合	(-)
$\beta$	: 全遅発中性子発生割合	(-)
$\beta_t$	: 遅発中性子発生割合	(-)
$\Delta_t$	: 演算周期	[sec]
$\delta N^w$	: 減速材密度変化による単位体積当たりの原子数の変動	[atom/cm <sup>3</sup> ]
$\delta N^b$	: 単位体積あたりのほう素 <sup>-10</sup> 原子数	[atom/cm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon \phi_1$	: 収束判定中性子束偏差(速)	
$\varepsilon \phi_2$	: 収束判定中性子束偏差(熱)	
$\kappa$	: 1核分裂当たりの発生エネルギー	(MeV/fission)
$\kappa \Sigma_{t1}^{R \times t}$	: $\kappa$ *高速分裂断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ] · $\kappa$
$\kappa \Sigma_{t2}^{R \times t}$	: $\kappa$ *熱分裂断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ] · $\kappa$
$\kappa \Sigma_{t1}$	: $\kappa$ *分裂断面積(速中性子)	[MeV/cm]
$\kappa \Sigma_{t2}$	: $\kappa$ *分裂断面積(熱中性子)	[MeV/cm]
$\lambda_t$	: 崩壊熱先行核の崩壊定数	[1/sec]
$\nu \Sigma_{t1}^{R \times t}$	: $\nu$ *高速分裂断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ]
$\nu \Sigma_{t2}^{R \times t}$	: $\nu$ *熱分裂断面積基準値	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_{t1}$	: 速中性子分裂断面積	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Sigma_{t2}$	: 熱中性子分裂断面積	[cm <sup>-1</sup> ]
$\rho_{act}$	: 減速材密度	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{rect}$	: 減速材密度基準値	[g/cm <sup>3</sup> ]

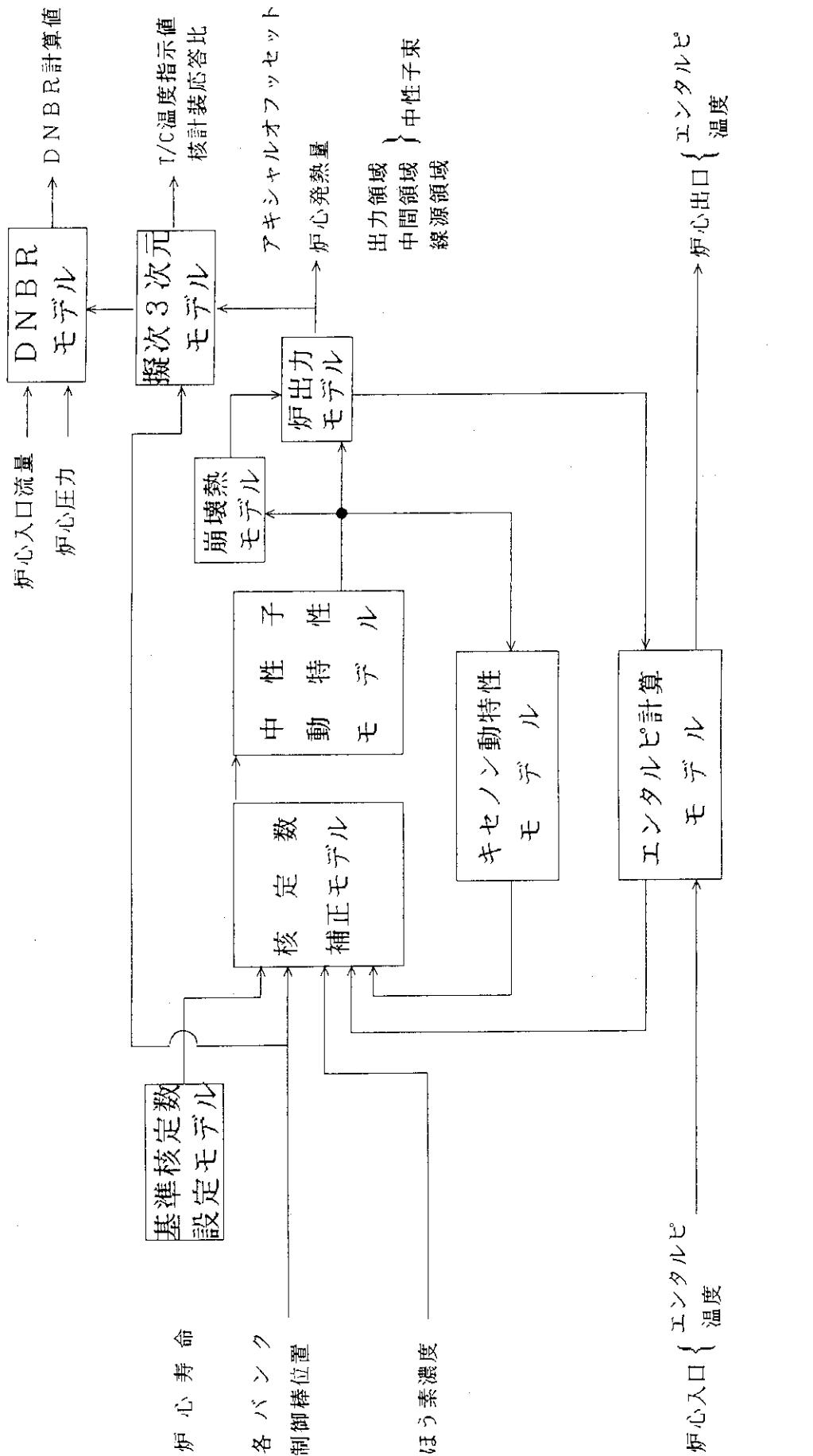


図 3.3.1 炉心モデル構成

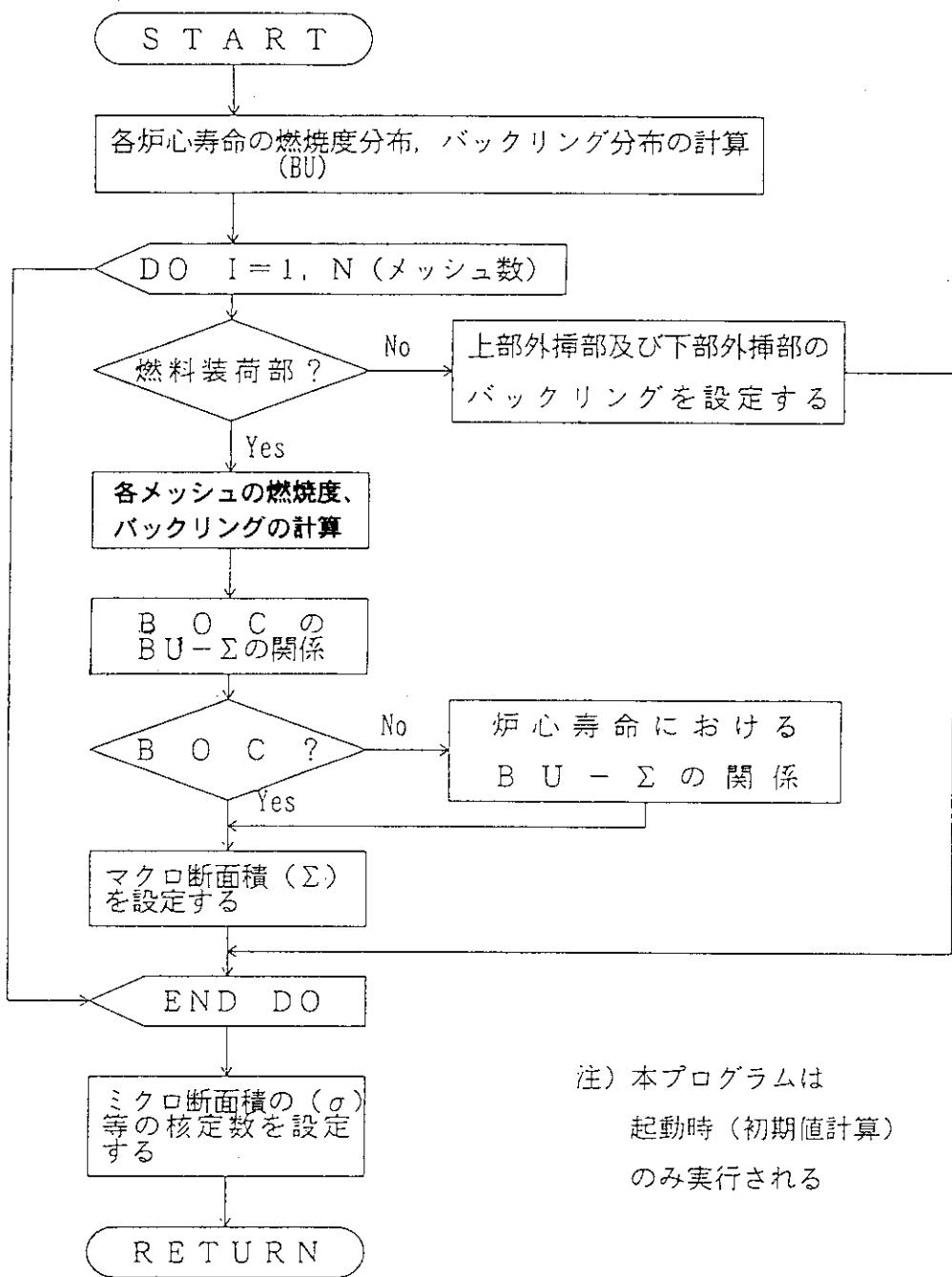


図 3.3.2 核定数設定サブプログラム概略フロー

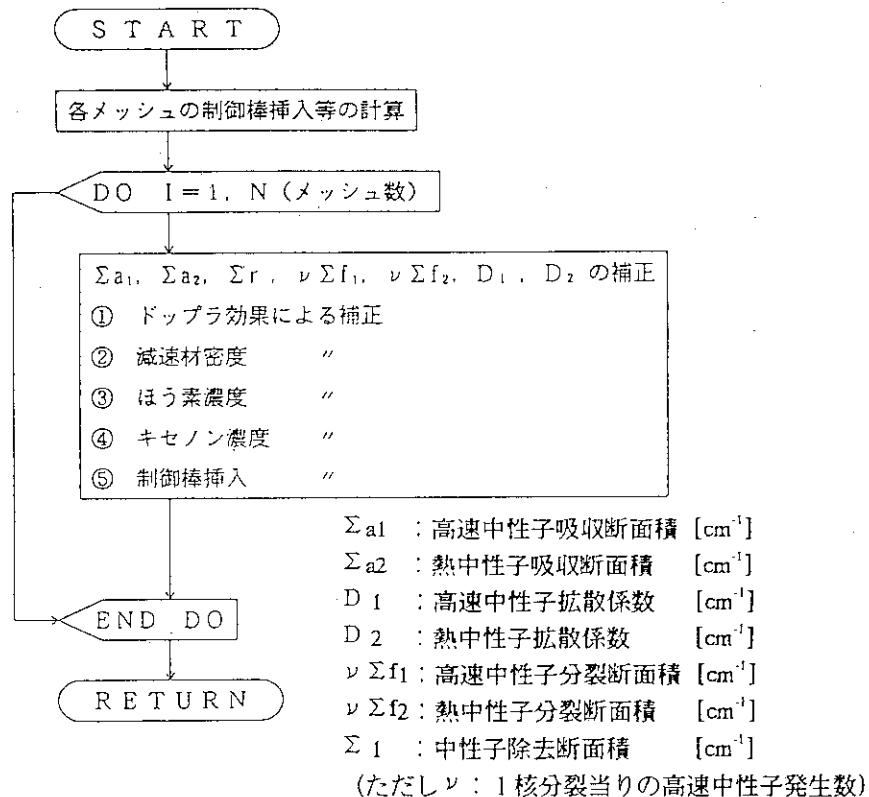


図 3.3.3 核定数補正サブプログラム概略フロー

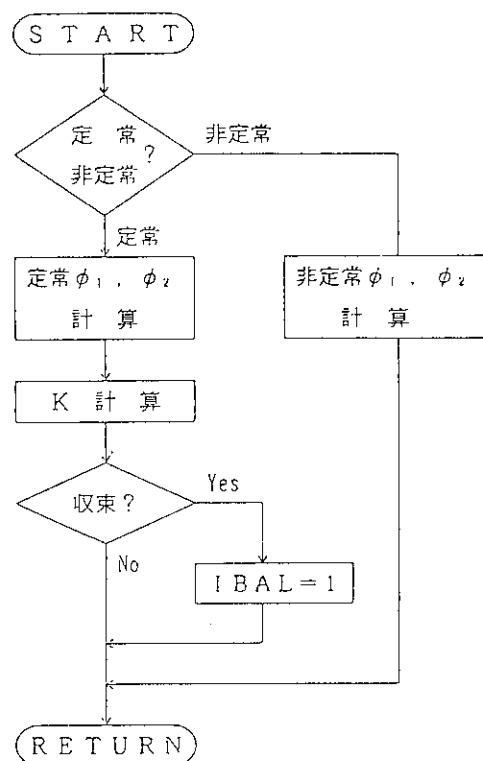


図 3.3.4 中性子動特性サブプログラム概略フロー

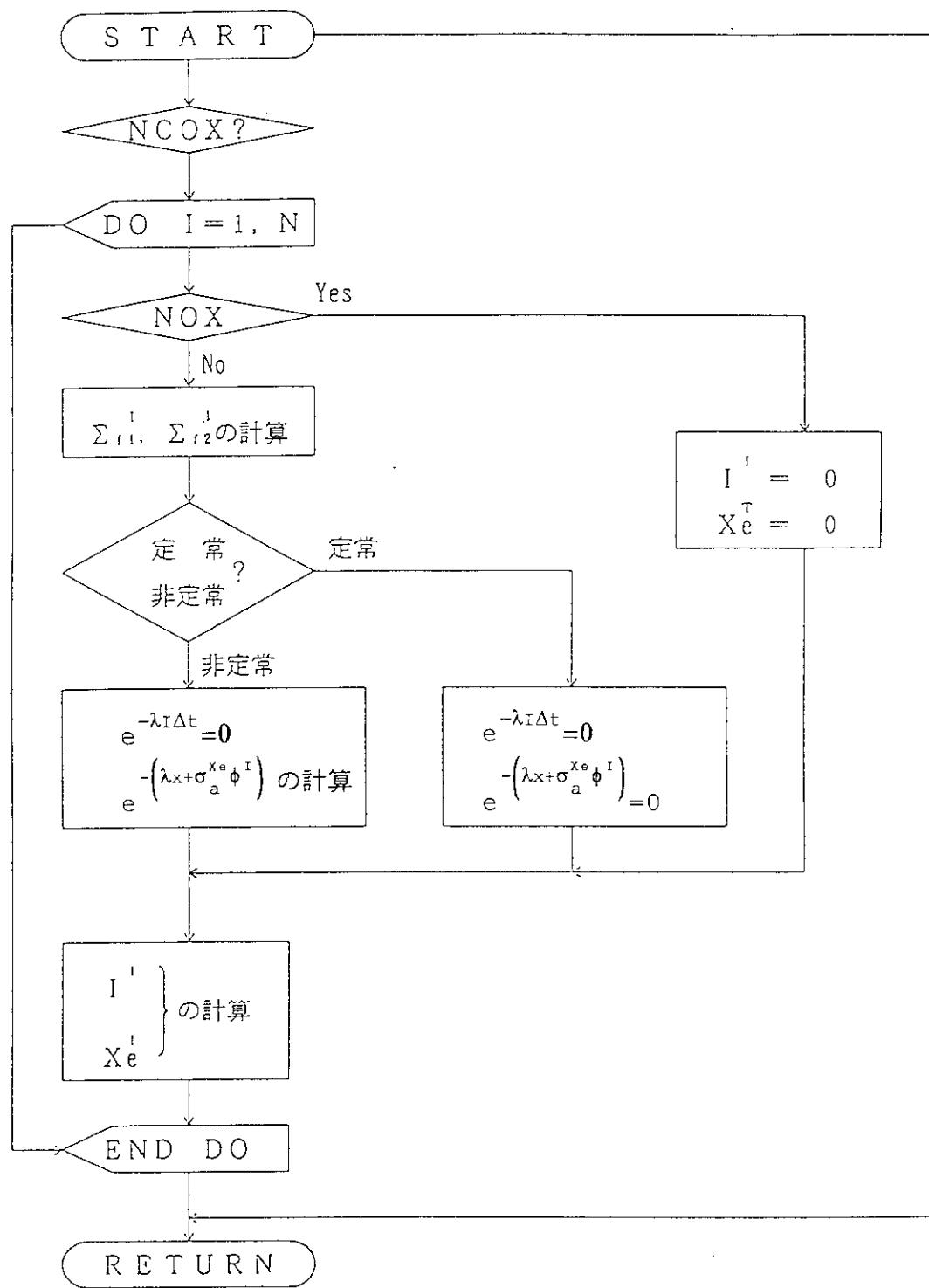


図 3.3.5 キセノンサブプログラム概略フロー

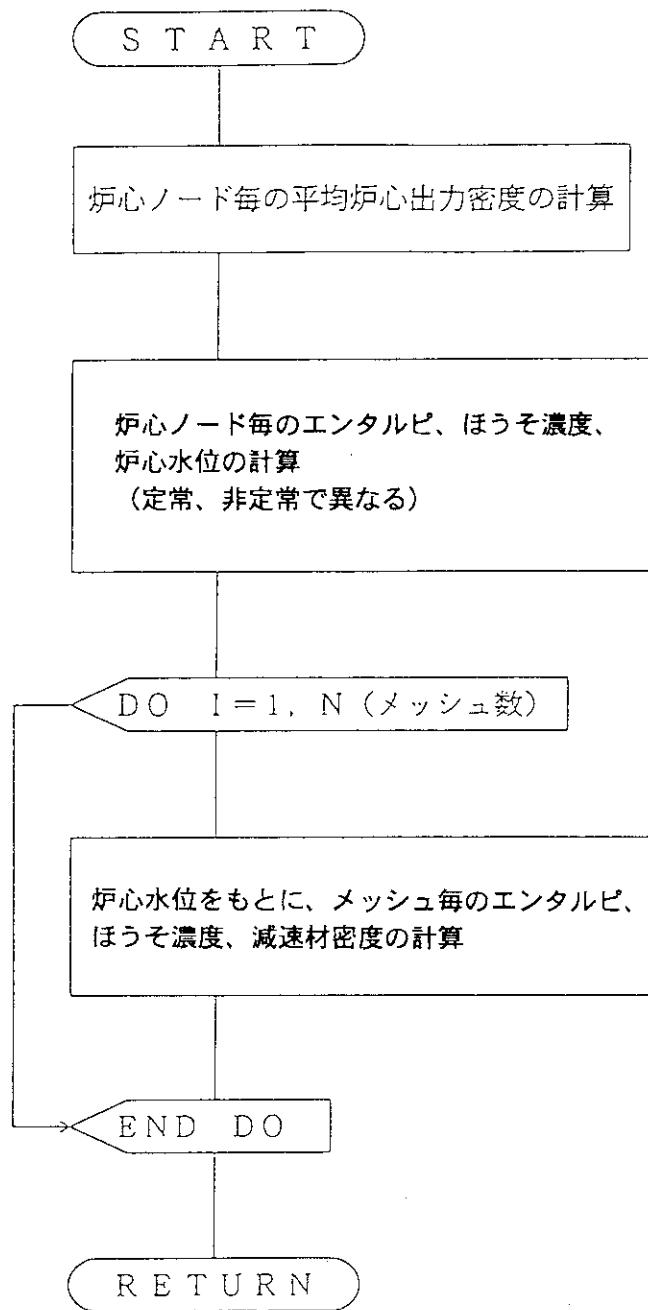


図 3.3.6 エンタルピ計算サブプログラム概略フロー

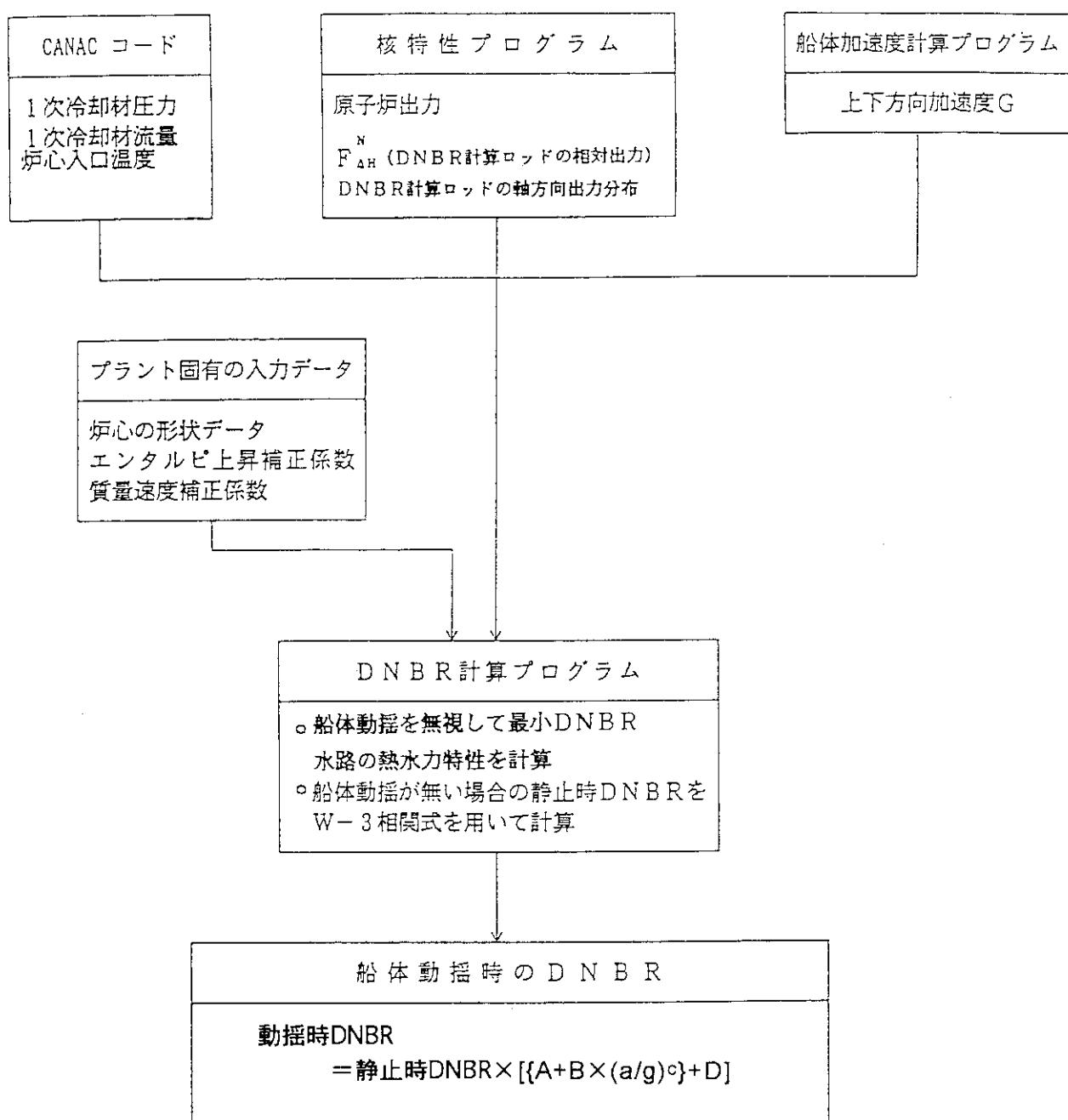


図 3.3.7 炉心 DNBR 計算プログラムの流れ図

### 3.3.2 一次冷却系計算プログラム

#### (1) 概要

本プログラムは、汎用一次冷却系計算プログラム CANAC-II<sup>2)</sup>を基礎プログラムとして、本シミュレータに特有の船体運動が原子炉プラントに与える影響を模擬するための機能等を附加したものである（表3.3.2参照）。基本的には、一次元の2温度1速度モデルで、気液速度差はドリフトフラックスモデルで扱う。ただし、一次元モデルではあるものの、3次元の船体運動の影響を表現できるような考慮がはらわれている。

本プログラムは、汎用のノード・リンク要素を用いて系統を記述し一次冷却系のシミュレーションを行う。用意されているノード・リンクは、流体ノード、流体リンク、メタルノード、伝熱リンクの4種類に大別される。各要素の概要を表3.3.3に示す。

本プログラムでは、炉心発熱量（炉心計算プログラムで計算）、蒸気発生器伝熱量（蒸気発生器計算プログラムで計算）、充填および抽出水量等（汎用演算要素プログラムで記述される補助系統で計算）、破断流量（境界条件）、加圧器ヒータ出力等を入力として、一次冷却系での伝熱・流動の計算を行う。これらの計算の流れの概略を表3.3.4に示す。

#### (2) 仮定

一次冷却系計算プログラムでは、リアルタイムシミュレーションの実現のために次の仮定を設けている。

- ① 系内の圧力分布による水／蒸気の物性変化が無視できる。
- ② 破断口の上流圧力は炉心圧力で近似し、さらに系内の水／蒸気の物性値を計算するときの代表圧力を炉心圧力とする。
- ③ コントロールボリュームの状態は、図3.3.8に示す4種類の状態に限定する。

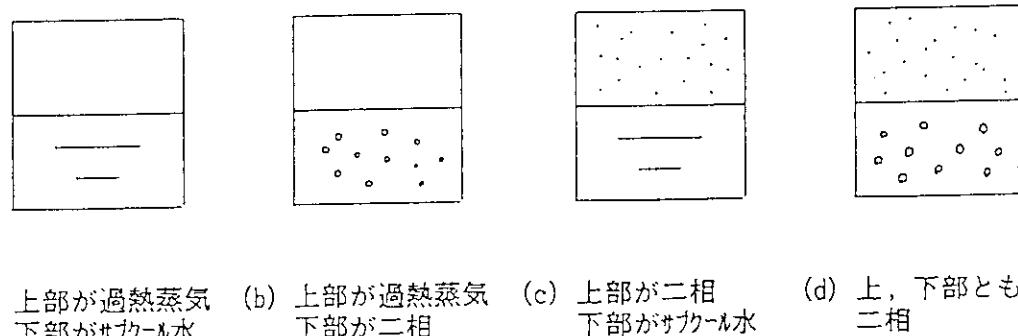


図3.3.8 コントロールボリュームの状態の仮定

- ④ 上部に流入する水は瞬間に下部に落下し、流入水がサブクール水であるときは、飽和水まで加熱され、その顯熱により蒸気を凝縮し、流入水と一緒に落下する。

- ⑤ 減圧などにより、蒸気中に発生した水滴は、蒸気中に浮遊し、落下に時間を見る。この落下速度は一定値とする。
- ⑥ 下部に流入した蒸気の取扱いは、下部がサブクール状態であるか、二相流状態であるかにより異なる。サブクール状態では、下部に流入した蒸気が飽和蒸気まで減温されその顯熱により水を蒸発させて、瞬間に上部に浮上する。下部が二相状態の時は完全混合とし所定の気泡上昇速度で上部に上昇する。
- ⑦ 上部および下部はそれぞれ温度またはボイド率が一様とする。
- ⑧ 船体運動に起因する加速度変動が体積力に及ぼす影響は準静的に取り扱うことができる。
- ⑨ ドリフトフラックス相関式が式に含む重力加速度項に実際に作用する加速度を代入した場合にも適用できる。また、ボイド率が準定常状態を仮定して評価できる。

### (3) 基礎式

一次元ネットワークにより空間の接続関係を表現する。表現する単位は図3.3.9に示すように、流体ノードおよび流体ノードを結び付ける流体リンクである。流体ノードは状態量を変数にもち、流体リンクは流速、流量を変数にもつ。

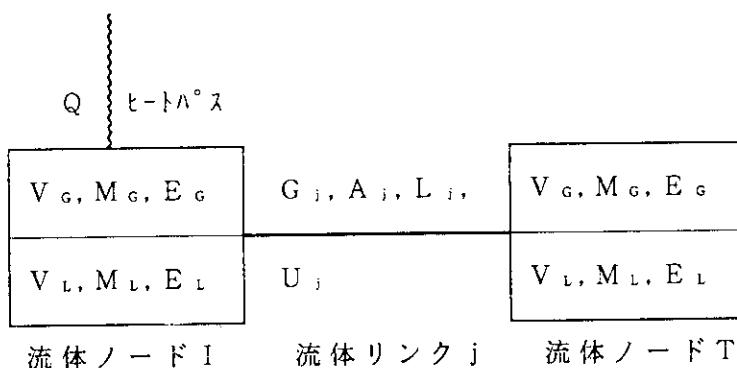


図3.3.9 ノード要素とリンク要素によるネットワーク表現

液面が存在する流体ノードTでは上部に対して、次のエネルギー収支、質量収支を適用する。

$$\frac{dE_g}{dt} = \sum_j (hG)_{gj} + (hG)_B - (hG)_e + Q_g - Q_x - \frac{P}{J} \frac{dV_g}{dt} \quad (3.3.22)$$

$$\frac{dM_g}{dt} = \sum_j (G)_{gj} + G_B - G_e \quad (3.3.23)$$

ここで

$E_g$  ; 上部の内部エネルギー、

$\sum_j (hG)_{gj}$  ; 単位時間に流入する流体が持ち込むが持ち込むエンタルピ、

$(hG)_B$  ; 下部から上部へ流入するエンタルピ、

( $hG$ )。; 上部から下部へ流入するエンタルピ、

$$Q_c; \text{伝熱量}, \quad Q_x; \text{下部との伝熱量}, \quad \frac{P}{J} \frac{dV_G}{dt}; \text{流体が行う仕事}$$

$$M_G; \text{上部流体質量}, \quad \sum_j (G)_c j; \text{単位時間の流入質量},$$

$G_B$ ; 下部から上部への質量移動、 $G_c$ ; 上部から下部への質量移動を表す。

下部に対しても同様にエネルギー収支、質量収支を適用する。

$$\frac{dE_L}{dt} = \sum_j (hG)_{Lj} - (hG)_B + (hG)_c + Q_L + Q_x - \frac{P}{J} \frac{dV_L}{dt} \quad (3.3.24)$$

$$\frac{dM_L}{dt} = \sum_j (G)_{Lj} - G_B + G_c \quad (3.3.25)$$

2 温度ノードであっても液面がない状態あるいは1 温度ノードのオプションが指定された場合には次式を基礎式とする。

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j (hG)_j + Q \quad (3.3.26)$$

$$\frac{dM}{dt} = \sum_j G_j \quad (3.3.27)$$

流体リンク  $j$  モデルでは、図 3.3.10 に示すようにノード内にノードポイントを設定し、ノードポイント間の流体（図中の斜線部）が左右のノードポイントの圧力によって駆動されるものとする。ノードポイントはそのノードの圧力を代表する点で、通常はノードの中央に設定する。流体リンクの長さ  $L_I$  部分と長さ  $L_T$  部分に運動保存則を適用すると(3.3.28)および(3.3.29)式となる。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{G}{A_I} L_I \right) = (P_I - P_j) - \frac{F_I}{A_I} + \rho_{IJ} (\vec{a} \cdot \vec{\ell}_{IJ}) + \frac{G}{A_I} (u_I - u_j) \quad (3.3.28)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{G}{A_T} L_T \right) = (P_j - P_T) - \frac{F_T}{A_T} + \rho_{JT} (\vec{a} \cdot \vec{\ell}_{JT}) + \frac{G}{A_T} (u_j - u_T) \quad (3.3.29)$$

上記の2式を加えて流体リンク  $j$  における運動方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left\{ \left( \frac{L_T}{A_T} + \frac{L_I}{A_I} \right) G \right\} &= (P_I - P_T) - \left( \frac{F_I}{A_I} + \frac{F_T}{A_T} \right) + (\rho_{IJ} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{IJ} + \rho_{JT} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{JT}) \\ &\quad + \left( \frac{G \cdot u_I}{A_I} - \frac{G \cdot u_T}{A_T} \right) - G u_j \left( \frac{1}{A_I} - \frac{1}{A_T} \right) \end{aligned} \quad (3.3.30)$$

ここで、 $L_T, L_I$ ; 流体リンクの各ノード  $T, I$  での流路長さ、

$A_T, A_I$ ; ノード  $T, I$  の流路面積、

$P_T, P_I$ ; ノード  $T, I$  での圧力

$G$ ; 流体リンクでの質量流量

$F_T, F_I$ ; ノード  $T, I$  での摩擦損失、形状損失およびポンプによる昇圧に等価な力、

$\frac{G \cdot u_T}{A_T}, \frac{G \cdot u_I}{A_I}$ ; 各ノードポイントを通過する流体の運動量束

$$\rho_{IJ} \vec{a}_{IJ} + \rho_{JT} \vec{a}_{JT} ; \text{ 体積力に等価な差圧}$$

$$G u_j \left( \frac{1}{A_I} - \frac{1}{A_T} \right) ; \text{ ノード間のジャンクション部における面積差に起因する壁面反力}$$

船体運動に伴う傾斜および加速度の変動により変化する項は(3.3.30)式の右辺第3項の体積力に等価な差圧である。この項の取扱いを表3.3.2(1/4)に示す。

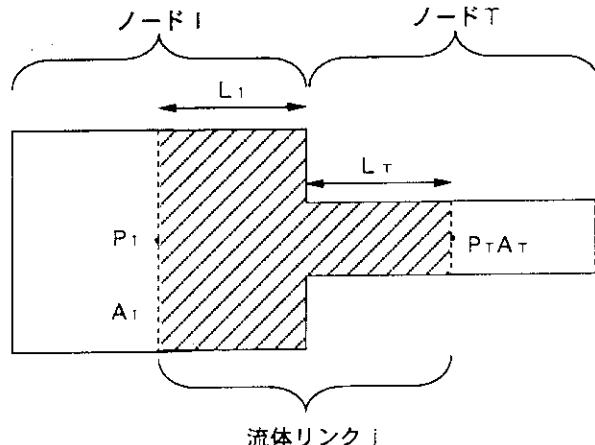


図3.3.10 流体リンクのモデル

流体リンクにおける気液相対速度は、実験データが多く十分に検証されたドリフトフラックスモデルで表現する。

ドリフトフラックスモデルの基本式は次の通りである。

$$J_e / \alpha = C_o J + V_{ei} \quad (3.3.31)$$

ここで、  $J$  : 混合平均流速 =  $J_e + j_i$ 、

$J_e$  : 気相のみかけ流速、  $j_i$  : 液相の見かけ流速

$C_o$  : 分布パラメータ、  $V_{ei}$  : ドリフト速度

$C_o$  および  $V_{ei}$  は通常実験相関式から与えられるものである。本プログラムで用いたドリフトフラックス流動マップのうち垂直管の流動マップを図3.3.11に示す。

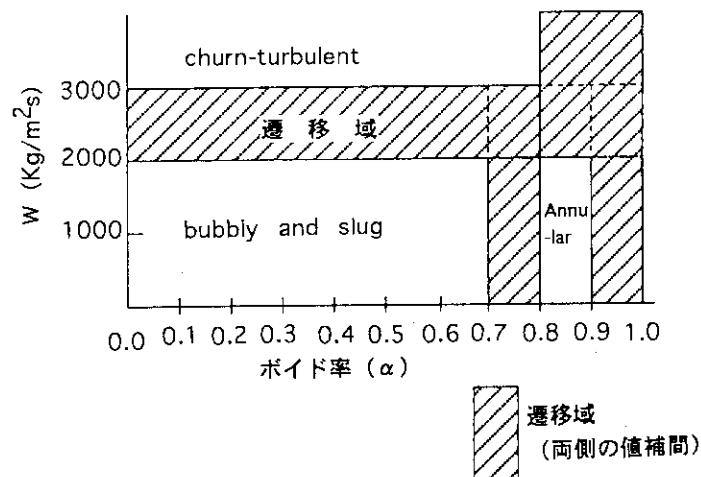


図3.3.11 垂直管流動様式マップ

2 温度モデルであるので過熱蒸気とサブクール水の対向流も発生し得るため、飽和二相流のドリフトフラックスモデルを拡張して適用することとする。なお、対向流の熱量交換は流体ノードで計算されるので、リンクでは熱量交換、質量交換がないものとして取り扱う。ドリフトフラックス相関式に用いる物性値は飽和物性値で近似する。船体運動による加速度の変化が二相流の気液速度差に与える影響を表現するために重力加速度に船体運動に起因して発生する加速度を重畠した加速度をドリフトフラックス相関式の重力加速度項に代入してリンク方向の成分をもって気液速度差として扱う。この扱い方の詳細は表3.3.2(2/4)に示す通りである。

構造材の熱容量と伝熱はメタルノードとヒートリンクで模擬する。メタルノードは図3.3.12に示すように厚さ方向に多分割され、さらに対応する流体ノードが2温度状態になっているときは、流体ノードの液面位置で高さ方向に自動的に分割される。高さ方向の境界線の移動に際してはメタルの熱量が保存されるように取り扱う。

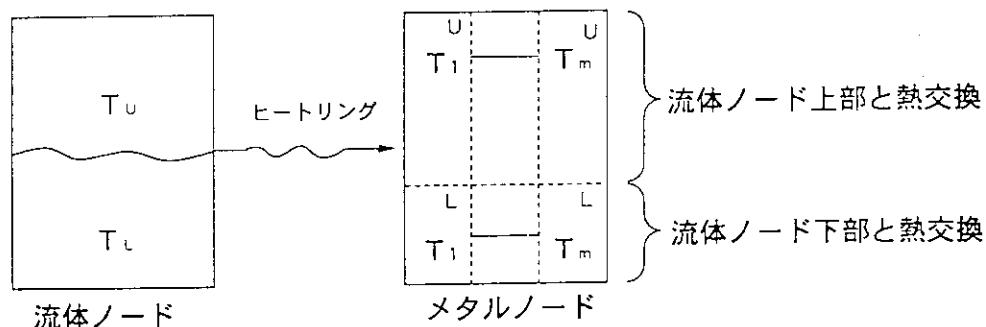


図3.3.12 メタルノードモデル

メタルノードの内部分割間は一様金属の熱伝導だけではなく燃料棒のギャップ熱伝達も考慮できる。ヒートリンクでは伝熱形態に即した熱伝達率が計算され、流体ノードの上部流体はメタルノードの上部と、下部流体は下部メタルノードとの伝熱計算が行われる。ヒートリンクの定義にあたっては一本のヒートリンクを定義するだけであるが、プログラム内では伝熱面積が可変の2本のヒートリンクとして取り扱う。現在シミュレータで使用している相関式および適用範囲を表3.3.5に示す。

Rohsenowの式<sup>11)</sup>によればプール沸騰熱伝達では熱伝達率は加速度の1/6乗に比例する形となっている。一方、強制対流熱伝達では通常 Martinelliパラメータで記述され重力の影響は含まれない。シミュレータでは表3.3.2(3/4)に示すように重力加速度のx乗で補正できる構成とした。

流体ノードにおける液面は船体の運動および傾斜により変動する。この現象を考慮するために分離型PWRを想定して自由液面をもつ加圧器および蒸気発生器での液面の傾きおよびスロシングを考慮した液面モデルを採用する。スロシング計算は円筒形タンクを対象として、液面が速度ポテンシャル理論に従うものとしてモーダル解析法を使用する。得られた液位変動を船体の傾斜による液面の傾きを重畠した実際の液面高さとする。水位計算方法に関しては表3.3.2(4/4)に示す。

液面変動が熱流動プロセスに及ぼす影響は、液面と流体リンクおよび伝熱リンク結合点との相対的な位置関係により決まる。すなわち、加圧器の場合には、液面高さの計算結果を用いてスプレイノズルの水没およびヒータの部分露出が発生したかを判定し、発生した場合には該当するノードにてこの状態を模擬することとした。

#### (4) 数式モデルへの展開

熱流動解析プログラムは、一般に基礎式を直接数値積分する場合が多いが、良く知られているように個々の流体リンクで定義される運動量収支を解く微分方程式(3.3.30)がstiffになり、さらにドリフトフラックスモデルを使用すると、非線形性が強くなる。本プログラムの開発目的からすれば、シミュレータにて実時間計算が実現できる程度の高速さを保ちながら、例えば co-current flow から counter current flow への移行で微係数が不連続に変化する強い非線形性をもった方程式を解かなければならぬ。従って、時間刻みを大きくすることで高速化を図る陰解法による数値積分の高速化は期待できない。そこで、数式モデルへの展開に際して、陰解法の採用し、体積流量を未知数とし、運動方程式をループ一巡運動方程式で扱うことにより、数値計算の安定化と計算の高速化を得た。

体積流量を未知数としたモデルとすることによりドリフト速度を自然な形で反映することができる。式(3.3.31)の両辺に流路面積Aを乗じることにより、体積流量Uを用いたドリフト速度の式(3.3.32)が得られる。

$$U_s / \alpha = C_0 U + A V_s \quad (3.3.32)$$

ここで、  $U$  : 全体積流量 =  $U_s + U_l$

$U_s$ ,  $U_l$  : 気相の体積流量, 液相の体積流量

一方、ノード内の質量とエネルギーの保存則である式(3.3.22)～(3.3.25)を(2)仮定の①～⑥に示した仮定を適用してまとめると式(3.3.33)をようく体積流量Uと圧力の微係数 $dp/dt$ を未知数とする関係式が得られる。

$$\sum_{j \in J} C_j U_j = b \frac{dp}{dt} + a Q + d \quad (3.3.33)$$

ただし、J : あるノードに結合しているリンクの集合

また、左辺はノードに接続するパスの体積流量の和、右辺第1項は系圧力Pの変化に伴うノードの流体体積の変化、第2項はヒートシンクあるいはヒートソースに伴うノードの流体体積の変化、第3項はノード内における上部流体と下部流体との質量交換およびエネルギー交換によって生じる体積変化をそれぞれ表している。C, b, aはそれぞれU,  $dp/dt$ , Qの係数であり、図3.3.8に示した4つの状態ごとに関係式が求められている。

次に式(3.3.30)の運動方程式の扱いを示す。一次系の主ループのほか、加圧スプレイ管、サージ管からなるループや、炉心バイパス流路が形成する閉じたループについて運動方程式を周積分することにより、ノード圧力 $P_i$ 、 $P_T$ およびループ内結合部での運動量束 $P_{m1}$ 、 $P_{mT}$ は相殺し、次の式(3.3.34)がループ毎に得られる。

$$\frac{d}{dt} I = \sum_{i \in L} \left\{ -\left( \frac{F_i}{A_i} + \frac{F_T}{A_T} \right) + (\rho_{ij} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{ij} + \rho_{jT} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{jT}) \right\} + P_m \quad (3.3.34)$$

$L$  : あるループに属する全てのリンクの集合

$F_T, F_i$  : ノード  $T, i$  での摩擦損失、形状損失およびポンプによる昇圧に等価な力、

$\rho_{ij} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{ij} + \rho_{jT} \vec{a} \cdot \vec{\ell}_{jT}$  ; 体積力に等価な差圧

$P_m$  : 外部から流入する運動量束 (例えば、SI 流量)

ここでは、 $I$  は単位面積あたりループ一巡運動量 [ $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ ] であり次式 (3.3.35) となる。

$$I = \sum_{j \in L} \left\{ \left( \frac{L_i}{A_i} + \frac{L_T}{A_T} \right) G_j \right\} \quad (3.3.35)$$

リンクの質量流量はドリフト速度の基本式 (3.3.32) を用いると、体積流量  $U$  を用いて次式 (3.3.36) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} G &= G_g + G_1 = \frac{1}{V_g} U_g + \frac{1}{V_1} U_1 \\ &= \frac{1}{V_g} \alpha (C_o U + A V_{gj}) + \frac{1}{V_1} \{ U - \alpha (C_o U + A V_{gj}) \} \end{aligned} \quad (3.3.36)$$

式 (3.3.36) を式 (3.3.35) 式に代入して整理すると、ループ一巡運動量  $I$  と体積流量  $U$  との関係が得られる。

$$I = \sum_j (C_{1j} U_j + C_{2j}) \quad (3.3.37)$$

ただし、リンクが 2 相または 2 温度条件の時、

$$C_{1j} = \left( \frac{L_i}{A_i} + \frac{L_T}{A_T} \right) \left( \frac{\alpha C_o}{V_g} + \frac{1-\alpha C_o}{V_1} \right)$$

$$C_{2j} = A \left( \frac{L_i}{A_i} + \frac{L_T}{A_T} \right) \left( \frac{1}{V_g} - \frac{1}{V_1} \right) \alpha V_{gj}$$

リンクが単相の時、

$$C_{1j} = \left( \frac{L_i}{A_i} + \frac{L_T}{A_T} \right) \frac{1}{V}$$

$$C_{2j} = 0$$

式 (3.3.30) を積分するのではなく、式 (3.3.34) のループ一巡方程式を積分することにより、数値計算の安定化を図る。ループ一巡運動量は積分の結果得られるので、式 (3.3.37) とノードに関する体積流量の関係式 (3.3.33) とから体積流量  $U$  および圧力の微係数  $dp/dt$  を線形方程式を解くことにより求めることができる。

伝熱リンクにおける伝熱量の計算およびメタルの熱容量を考慮した熱伝導の計算方法については熱量保存則を直接解く。

使用した記号については表 3.3.6 にまとめた。

## (5) 計算手順

一次冷却系統計算プログラムの計算の流れは図 3.3.13 に示す通りである。

前タイムステップの状態量をもとに式(3.3.34)を数値積分し、得られたループの運動量  $I$  と式(3.3.33)の係数  $C_1, b, a, Q, d$  および式(3.3.37)の  $C_{1j}, C_{2j}$  を計算し、式(3.3.33)および式(3.3.37)の連立方程式を、係数マトリックスのスパース性を利用した行列解法により時間に関して半陰的に解き、 $U$  と  $dp/dt$ を得る。

蒸気および液の質量流量  $G_g, G_l$  はドリフトフラックスモデルと体積流量  $U$  から次式(3.3.38), (3.3.39)のように示される。

$$G_g = \alpha(C_0 U + A V_{gj}) / v_g \quad (3.3.38)$$

$$G_l = \{(1 - \alpha C_0) U - \alpha A V_{gj}\} / v_l \quad (3.3.39)$$

こうして得られた質量流量を用いて、式(3.3.22)～(3.3.25)で表される質量保存則とエネルギー保存則とを解く。なお、圧力に関する微分方程式を導出し、これを積分するので、式(3.3.22)～(3.3.25)は独立ではなくなり、ひとつ余分となる。一次冷却系統計算プログラムでは2温度状態のノードでは式(3.3.23)の積分は行わず、積分の結果得られる上部の比エンタルピ、下部の質量と比エンタルピ、および系の代表圧力  $P$  とから上部質量を算出している。系内の圧力分布は数値積分で得られる代表圧力を炉心圧力として、位置水頭と式(3.3.22), (3.3.23)の流量から得られる圧力損失とを求めて、系内各部の圧力を計算する。

表3.3.2 NESSYに特有な機能(1/4)

	船体運動が循環力に及ぼす影響の計算機能
内 容	<p>船体運動計算プログラムより、一次冷却系統各点の傾斜、加速度を受け取り、自然循環力を計算する。</p> <p>座標系は、船体に固定した座標系を用いる。</p>

運動方程式への導入

一次冷却系の一部として下図のような配管を想定し、運動方程式への導入を示す。

ノードおよびリンクの座標値を下記のように記述する。

- ( $x_I, y_I, z_I$ ) : ノード I の代表点座標
- ( $x_T, y_T, z_T$ ) : ノード T の代表点座標
- ( $x_j, y_j, z_j$ ) : リンク j の接続点座標

まず、定常計算段階でリンクベクトルを設定する。

- 1) イニシャルノード I とリンク jとのリンクベクトル  
 $\vec{l}_{Ij} = (x_j - x_I, y_j - y_I, z_j - z_I)$
- リンク j とターミナルノード T とのリンクベクトル  
 $\vec{l}_{jT} = (x_T - x_j, y_T - y_j, z_T - z_j)$

船体運動計算プログラムより重力加速度、傾斜、船体運動に伴う付加加速度の影響を含めたリンクに実際に作用する加速度  $\vec{a}_j^*$  を受け取る。

各リンク方向に沿った加速度成分を次式により計算する。

$$\ell a_{Ij} = \vec{a}_j^* \cdot \vec{l}_{Ij}$$

$$\ell a_{jT} = \vec{a}_j^* \cdot \vec{l}_{jT}$$

自然循環力(静水頭)の計算は次式による。

$$\Delta P_{aj} = \ell a_{Ij} \cdot \rho_{Ij} + \ell a_{jT} \cdot \rho_{jT}$$

ここで、

- $\rho_{Ij}$  : ノード I - リンク j 間の平均比重
- $\rho_{jT}$  : リンク j - ノード T 間の平均比重

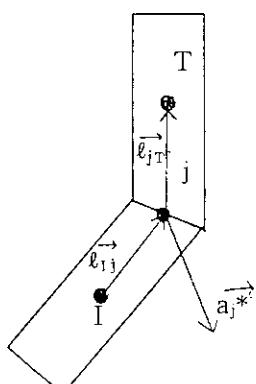


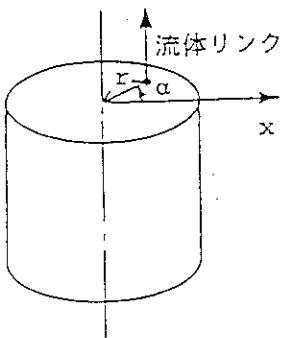
表 3.3.2 NESSY に特有な機能 (2 / 4)

	船体運動条件下でのドリフト速度 $V_{gj}$ の計算機能
内 容	ドリフトフラックス相関式に現れる重力加速度項を船体運動の影響を考慮した加速度に置き換えて、ドリフト速度 $V_{gj}'$ を計算し、リンク方向の成分をもってドリフト速度 $V_{gj}$ とする。 座標系は、船体に固定した座標系を用いる。
	<p>船体運動による垂直方向加速度の変化が二相流の気液速度差に与える影響を模擬するため、ドリフトフラックス相関式に現れる重力加速度の項に船体運動を考慮した瞬時加速度を用いてドリフト速度を計算する。</p> <p>(気泡流の場合、Zuber-Findlayの式<sup>2)</sup> より)</p> $V_{gj}'_j = \sqrt{2} \left[ \frac{\sigma  \vec{a}_j^*  (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1^2} \right]^{\frac{1}{4}}$ <p>ドリフト速度 <math>V_{gj}'</math> は、加速度方向と逆向きが正となるので下図のように示される。実効的なドリフト速度 <math>V_{gj}</math> は下式により計算する。</p> $V_{gj}_j = V_{gj}'_j \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( -\frac{\vec{l}_{1j} \cdot \vec{a}_j^*}{ \vec{l}_{1j}   \vec{a}_j^* } - \frac{\vec{l}_{jT} \cdot \vec{a}_j^*}{ \vec{l}_{jT}   \vec{a}_j^* } \right)$ <p><math>V_{gj}'_j</math> ; 垂直管のドリフト速度相関式に船体運動の影響を考慮して求めた加速度を用いて求めたドリフト速度  <math>V_{gj}'_j</math> ; シミュレーションに用いるリンク <math>j</math> のドリフト速度</p> <p>備考：ドリフトフラックスの非定常効果は無視できると仮定している。</p> <p>2); Zuber, N. and Findlay, J. A. "Average volumetric concentration in Two-phase flow system", Trans ASME, J. Heat Transfer, 87(1965), 435-468</p>

表 3.3.2 NESSY に特有な機能 (3 / 4)

	船体運動条件下でのプール沸騰熱伝達の計算機能
内 容	熱伝達率を上下方向加速度の関数として計算する。
<p>プール沸騰時および強制対流沸騰時のそれぞれの場合について、熱伝達率を下記の式の上下方向加速度の <math>x</math> 乗で補正できる機能を与えた。</p> <p>通常設定では、プール沸騰熱伝達の場合については <math>1/6</math> を与えている。 また、強制対流熱伝達の場合には <math>0</math> を与えている。</p> $q^* = q \cdot \left( \frac{\ddot{z}}{g} \right)^x$ <p>ここで、 <math>q</math> : 相関式から得られた熱流束, <math>g</math> : 重力加速度,  <math>\ddot{z}</math> : 重力加速度および船体運動を考慮した船体固定座標系での <math>z</math> 軸      方向加速度</p>	

表3.3.2 NESSYに特有な機能(4/4)

水面傾斜、スロッシング計算機能(1/2)	
内 容	<p>加圧器、蒸気発生器等の自由液面を有する流体ノードにて船体運動に伴う水面傾斜およびスロッシング計算を行う。 加圧器については、スプレインノズルの水没および加圧器ヒータの部分露出をモデル化する。</p> <p>流体ノード内の流体が速度ポテンシャル理論に従うとして、モーダル解析法を利用した水面動揺ならびにタンク壁面に作用する圧力を求める。水面傾斜は3次元にて取り扱う。スロッシングによる水面動揺は船の前後方向をx方向、左右方向をy方向とした平面にて作用する加速度のみを取り扱う。</p> <p>流体ノード中心から距離<math>r</math>、x軸からの角度<math>\alpha</math>の線上の水位変動を考える。(船体傾斜による水面傾斜) 船体傾斜に伴う壁面での静的な水位<math>h_s(r, \alpha)</math>は次式により求める。</p> $h_s(r, \alpha) = h + r \cos(\alpha - \alpha_0) \tan \beta$ <p>ここで、<math>\tan \beta = \frac{\tan \theta}{\tan \phi}</math>, <math>\tan^2 \alpha = \tan^2 \theta + \tan^2 \phi</math></p> <p>(スロッシングによる液面変位)</p> <p>x, y方向加速度に起因するスロッシングによる液面変化分は次式により求める。現在、振動モードは2次までを考慮している。静的な傾斜に対する水面傾斜の精度を上げるために3次から5次までの振動モードは準整定状態を仮定した取扱いとした。</p> $\Delta h(r, \alpha, t) = \frac{R}{a_z} \left\{ \sum_{m=1}^n \frac{2}{K_m^2 - 1} \frac{J_1(K_m \frac{r}{R})}{J_1(K_m)} ([\ddot{q}_{x,m}(t) - \ddot{x}(t)] \cos \alpha + [\ddot{q}_{y,m}(t) - \ddot{y}(t)] \sin \alpha) \right\}$ <p>R : ノードの半径  <math>K_m</math> : <math>\frac{dJ_1(K_m)}{dK_m} = 0</math> の正根 (<math>0 &lt; K_1, K_2, \dots</math>)  <math>J_1</math> : 第1種ベッセル関数  <math>q_{x,m}, q_{y,m}</math> : m次の振動モード関数</p> <p>(液面の計算)  液面は船体傾斜による水面傾斜とスロッシングによる液面変位の和として表される。</p> $h(r, \alpha, t) = h_s(r, \alpha) + \Delta h(r, \alpha, t)$ 

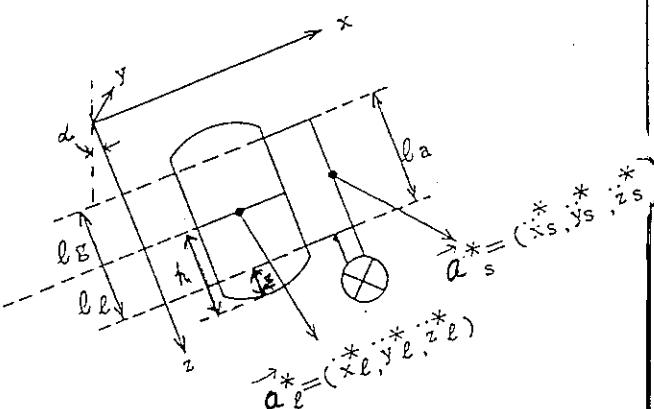
## 水面傾斜、スロッシング計算機能 (2 / 2)

## (水位指示特性の計算)

水位計のモデルは原子力第1船「むつ」に装備された形式の水位計に依存したモデルとなっている。使用にあたっては注意を要する。

加圧器水位計と蒸気発生器水位計については水位計下部タップに作用する流体圧力と基準タップに作用する圧力との差圧を計算し、この差圧を基に計測される水位を%表示する。

船体座標系 ( $x, y, z$ ) 上で機器の配置と作用する加速度を右図に示す。



水位計下部タップに作用する流体の圧力を次式で計算する。

$$P_b = \ddot{z}_\ell^* (\rho_s l_s + \rho_1 l_1) + \rho_1 \sum_{m=1}^n \frac{2}{K_m^2 - 1} \frac{J_1\left(K_m \frac{r}{R}\right)}{J_1(K_m)} * \left\{ \frac{\cosh\left(K_m \frac{Z}{R}\right)}{\cosh\left(K_m \frac{h}{R}\right)} (\ddot{q}_{xm} \cos\alpha + \ddot{q}_{ym} \sin\alpha) - (\ddot{x}_\ell \cos\alpha + \ddot{y}_\ell \sin\alpha) \right\}$$

ここで、  $h$  : タンクボトムからの平均水面までの距離 (m)

$z$  : タンクボトムから下部タップまでの距離 (m)

$l_1$  : ( $\equiv h - z$ ) 平均水面から下部タップまでの距離 (m)

$l_s$  : ( $\equiv l_1 - l$ ) 上部タップから平均水面までの距離 (m)

第1項は船体座標系で、  $z$  軸方向に作用する加速度による圧力損失、第2項は  $x, y$  軸方向に作用する加速度による圧力損失である。

容器加速度は、容器中央における加速度を使用する。

基準タップの圧力は、常温(40°C)の水で満たされているものとして次式で計算する。

$$P_s = \ddot{z}_s^* \rho_s l_s$$

基準タップ加速度は、基準レグ中央の加速度とする。また、容器および基準レグには船体座標系で垂直に設置されているものとする。

水位系に係る差圧  $\Delta P$  は次式により計算される。

$$\Delta P = P_s - P_b$$

表 3.3.3 ノードリンク要素の概要

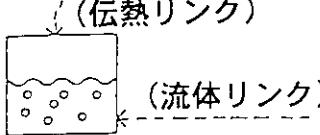
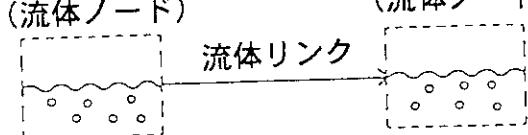
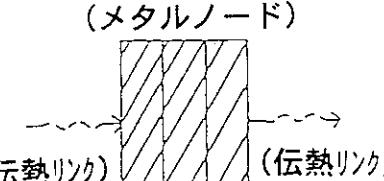
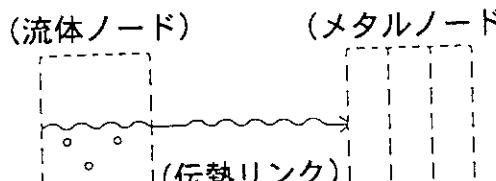
要素名	概要および概念図
流体ノード	<p>ノードは配管や容器の性質を模擬するものである。 ノードでは一般に次の保存則を解く。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・上部エネルギー保存則</li> <li>・下部エネルギー保存則</li> <li>・上部質量保存則</li> <li>・下部質量保存則</li> </ul>  <p>ノードに結合されている流体リンクを介して出入する流れや、伝熱リンクを介して出入する伝热量はノードにとって境界条件として与えられる。</p>
流体リンク	<p>流体リンクは配管や容器の流路としての性質を模擬する。 流体リンクでは次の保存則を解く。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・運動量保存則</li> <li>・2相状態のリンク</li> </ul>  <p>と液相の流速とが異なり、この性質が系全体の2相流挙動を特徴づけるために流速差を正確に扱うモデルが必要となる。流速差はドリフトフラックスモデルで扱う。混合平均流速は圧力損失特性、ポンプ特性、水頭、流体慣性を考慮して運動方程式を解く。</p>
メタルノード	<p>メタルノードは圧力容器、配管、燃料棒、伝熱管の熱容量としての性質を模擬する。 メタルノードではエネルギー収支とメタル内部での熱伝導が計算される。メタル内は多分割可能である。2温度状態の流体ノードに接しているメタルノードは液面に対応する位置に境界を設け、上部と下部とに分けて伝熱計算を行う。</p> 
伝熱リンク	<p>メタルと流体との伝熱パスとしての性質を模擬する。 伝熱リンクでは流体側の状態により</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・強制対流沸騰</li> <li>・熱伝達</li> <li>・沸騰熱伝達</li> <li>・凝縮熱伝達</li> </ul> <p>に区分して、表 3.3.5 に示す相関式を用いて伝熱計算を行う。</p> 

表 3.3.4 一次冷却系統の境界条件

境 界	概要および概念図
炉心部	<p>境界伝熱リンクは設定伝熱量をメタルノードに強制的に加える機能を持つ。設定伝熱量は炉心計算プログラムが計算する炉心発熱量にリンクしている。炉心計算プログラムへは炉心入口の冷却材エンタルピ、圧力、流量を出力する。</p>
蒸気発生器部	<p>蒸気発生器部では蒸気発生器計算プログラムが計算する蒸気発生器伝熱量を境界伝熱リンクの設定伝熱量にリンクしている。蒸気発生器計算プログラムへは各ノードの圧力、エンタルピ、流量を出力する。</p>
補助系統	<p>境界流体リンクは所定の流量を強制的に流す機能をもち、一方境界流体ノードは所定の圧力、エンタルピ、ほう素濃度、非凝縮性ガス濃度に設定できる。従って境界リンクと境界ノードを結合し、流量、圧力、エンタルピ等を汎用演算要素プログラムを用いて記述した補助系統で計算された値にリンクしている。</p>
破断部	<p>破断部分は境界流体リンクの破断オプションを用いて模擬される。破断流計算はサブクール水二相流、蒸気の広範囲の条件で適用できるHenry-Fauskeの式<sup>6)</sup>を用いる。蒸気発生器細管破断時の破断流は実績のあるザローテイツ* の式を用いる。</p>

表3.3.5 使用する相関式および適用範囲

項目	相関式名	適用範囲および備考
気泡上昇速度	Yehの式 <sup>4)</sup> Wilsonの式 <sup>5)</sup>	
二相流圧力損失増倍係数	HTFSの式*	
破断流	Henry-Fauskeの式 <sup>6)</sup> Moody臨界流の式 <sup>7)</sup>	
単相強制対流熱伝達率	Dittus-Boelterの式	Reynolds数 上限は不明であるが $10^6$ 程度まで適用可能と考えられている。 Prantle数 $0.7 \sim 10$
沸騰熱伝達率	Thomの式 <sup>8)</sup>	日本機械学会伝熱工学資料には特に適用範囲を設けずに記載されている。実際の適用範囲の詳細は不明であるが、工学的には核沸騰の範囲で使用できると考えられている。
凝縮熱伝達率	HTRIの式*	RAVIS-Rohsenowの式を主としている。適用範囲の詳細については不明である。原論文ではR-12, R-13のデータで相関式を導いており、その実験範囲は以下の通りである。 Quantity ; 0.07 ~ 0.96, 流量 ; $1.1 \sim 11.3 \times 10^6 \text{ lb}/\text{ft}^2\text{h}$
单相熱伝達率	層流強制対流の式	$\text{Nu}=4$ ( $\text{Re} < 600$ )
対流沸騰熱伝達率	chenの式 <sup>9)</sup>	Martinelli parameter $X_{tt}$ ; $0.1 \sim 100$ Reynolds数 ; $10^4 \sim 10^6$
Post dryout熱伝達率	Groneweldの式 <sup>10)</sup>	準拠した実験範囲 : 壓力 ; $6.8 \sim 21.5 \text{ MPa}$ , 等価直径 ; $0.25 \sim 2.5 \text{ cm}$ , 流量 ; $700 \sim 5,300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 質量 ; $0.1 \sim 0.9$ , 熱流束 ; $12 \times 10^4 \sim 210 \times 10^4 \text{ W/m}^2$

\* ; 非公開資料

表3.3.6 3.3.2節の記号表

## 英数字

A	流路面積 ( $\text{m}^2$ )
a	加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
E	内部エネルギー (J)
e	比内部エネルギー (J/kg)
G	質量流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ )
g	重力加速度 ( $9.8\text{m}/\text{s}^2$ )
h	比エンタルピ (J/kg) または 高さ (m)
I	運動量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$ )
J	熱の仕事量 (-) または 見かけ流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )
$J_1$	第1種ベッセル関数
L	リンクの長さ (m) または あるループに属するリンクの集合 (-)
$\ell$	リンクベクトル
M	流体の質量 (kg)
P	圧力 (Pa)
Q	伝熱量 (J/s)
R	半径 (m)
T	温度 ( $^\circ\text{C}$ )
t	時間 (s)
U	体積流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
u	流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )
v	比容積 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
V	容積 ( $\text{m}^3$ )
x	クオリティ (-)

## ギリシャ文字

$\alpha$	ボイド率 (-)
$\rho$	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	表面張力 ( $\text{N}/\text{m}$ )

## 添字

G	上部流体
g	飽和蒸気
C	凝縮
B	沸騰
j	リンク番号
L	下部流体
$\ell$	飽和水
$g_{\perp}$	$X_{g\perp} = X_g - X_{\perp}$

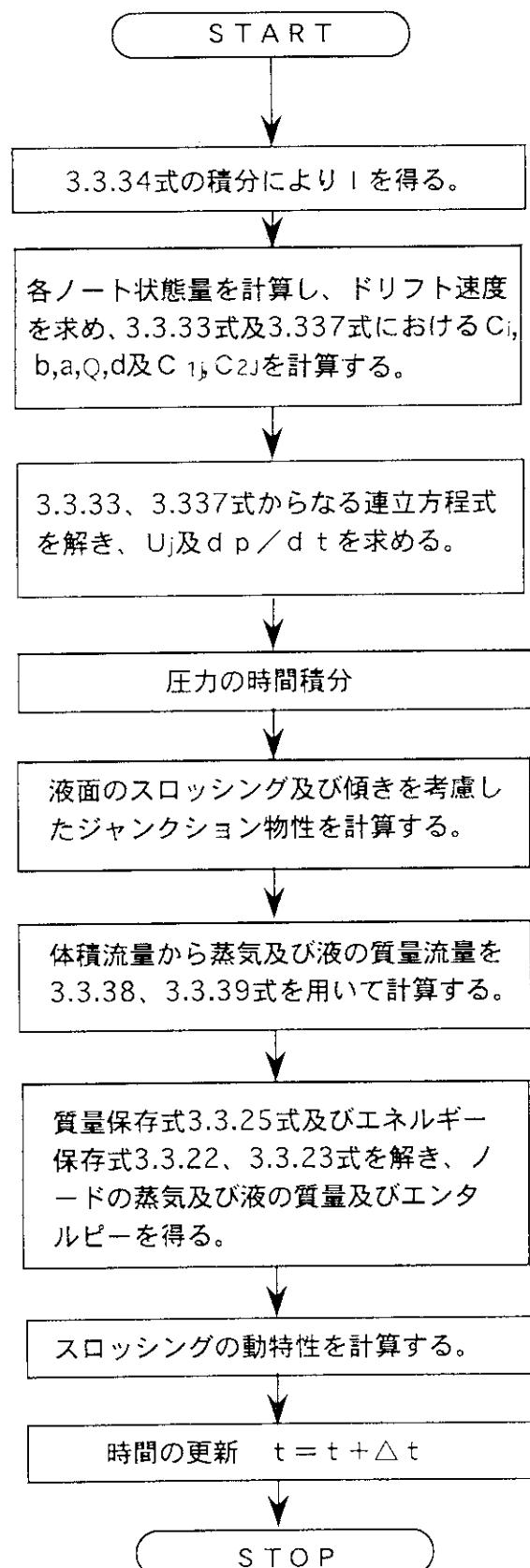


図 3.3.13 一次冷却系統計算プログラムの計算の流れ

### 3.3.3 蒸気発生器計算プログラム

#### (1) 蒸気発生器計算プログラムの概要

蒸気発生器計算プログラムは、再循環式蒸気発生器を想定したモデル構成となっており、蒸気発生器二次側と主蒸気ヘッダの熱水力および蒸気発生器の伝熱を計算する。流体系のモデルは熱平衡ドリフトフラックスモデルであり、数値積分法は後退オイラー法による陰解法を採用している。

空間分割の例を図3.3.14に示す。図3.3.14においてノード番号1～6は加熱管領域である。この領域の分割数と分割の高さは入力データによって指定できるが、指定にあたっては一次側のノードの分割高さは2次側ノードの分割高さのどれか一つと一致していなければならない。また、高温側伝熱管と低温側伝熱管の分割高さが同一となるように分割しなければならない。

分割例ではノード番号7はライザ部である。ノード番号8は蒸気ドーム部である。蒸気ドーム部とライザ部の分割数はそれぞれ1に固定されている。ノード番号9はダウンカマ部である。ダウンカマ部については分割数は入力データにより指定できる。蒸気ドーム部には主蒸気管が接続されており、気水分離された蒸気は各蒸気発生器に共通の主蒸気ヘッダに流入する。主蒸気ヘッダでは蒸気発生器とは別に圧力、エンタルピを計算する。

本シミュレーションシステムに付加した船体運動が蒸気発生器2次側に与える影響の模擬方法を表3.3.7に示す。本文及び表で使用する記号を表3.3.8に示す。尚、船体運動による水面変動およびスロッシング計算機能については表3.3.2(4/4)に示すとおりである。

#### (2)仮定

計算の高速化のために次の仮定を設けている。

- ①系内の圧力分布による水／蒸気の物性変化は無視できる。
- ②圧力の変化は瞬時に全系に波及する。

#### (3)基礎式

蒸気発生器計算プログラムでは、下記の質量保存式（式3.3.40）、エネルギー方程式（式3.3.41）、運動量方程式（式3.3.42）、体積保存式（式3.3.43）を適用する。使用する記号を表

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{\nu \in T_1} G_\nu - \sum_{\nu \in I_1} G_\nu \quad (3.3.40)$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{\nu \in T_1} G_\nu H_\nu - \sum_{\nu \in I_1} G_\nu H_\nu + Q_1 + \frac{\dot{P} V_1}{J} \quad (3.3.41)$$

$H_\nu$  : リンクの平均エンタルピ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{L G}{A} \right) = \Delta P_k - \Delta P_{f_k} + \Delta P_{e_k} \quad (3.3.42)$$

$\Delta P_k$  : ノード間の差圧

$\Delta P_{f_k}$  : 循環圧力損失

$\Delta P_{ek}$ : エレベーションによる差圧

$$\frac{dV_1}{dt} = 0 \quad (3.3.43)$$

ドリフトフラックスパラメータの分布パラメータ  $C_o$  および  $V_{g,i}$  は次式 (3.3.44), (3.3.45)により求める。<sup>12)</sup>

$$C_o = \min \{ C_{o1}, C_{o2} \} \quad (3.3.44)$$

ただし、

$$C_{o1} = 1.2 - 0.2(1.0 - e^{-18\alpha}) \sqrt{\frac{V_1}{V_g}} \quad (\text{churn-turbulent})$$

$$C_{o2} = 1 + \frac{1-\alpha}{\alpha + \sqrt{\frac{1+75(1-\alpha)}{\sqrt{\alpha}} (V_1/V_g)}} \quad (\text{annular})$$

$$V_{g,i} = \min \{ (V_{g,i})_1, (V_{g,i})_2 \} \quad (3.3.45)$$

ただし、

$$(V_{g,i})_1 = 1.54 \sqrt{(1/V_1 - 1/V_g)} g \sigma \cdot v_1^2 \quad (\text{dunurn-turbulent})$$

$$(V_{g,i})_2 = \frac{(1-\alpha) \sqrt{\frac{g D_h (1/V_1 - 1/V_g)(1-\alpha)}{0.015/V_1}}}{\alpha + \sqrt{\frac{1+75(1-\alpha)}{\sqrt{\alpha}} (V_1/V_g)}} \quad (\text{annular})$$

蒸気ドーム部出口リンクでは流れの向きが正のときには分布パラメータ  $C_o$  を蒸気ドーム部のコラプスト水位の関数として求める。分布パラメータ  $C_o$  は、コラプスト水位が定格水位以上のときに 0 であり、水位が極端に低くなった状態では 1.0 とする。

運動量保存の式は、一次冷却系統と同様に循環ループ一巡の運動方程式を解く。二次側流体ノード  $i$  での伝熱量は U 字管部における 1 次側との熱交換によるものと構造材等とのメタルとの熱交換によるものとを取り扱う。

すなわち、

$$Q_i = Q_{Ui} + \sum_{v \in I_{M,i}} Q_{Mv} \quad (3.3.46)$$

U 字管部は、一次冷却系統側に水位が存在する状況を想定して、図 3.3.15 に示すように 4 つの領域に分割してモデル化している。一次冷却系統側は上部が気相状態に、下部が液相状態に対応している。一次冷却系統が健全な状態では、気相領域は存在しない。各領域の名称は各領域は、高温側伝熱管上部（気相部に接触）、高温側伝熱管下部（液相部に接触）、低温側伝熱管上部（気相部）、低温側伝熱管下部（液相部）であり、各領域毎に伝熱量を計算する。各領域毎に計算した熱

通過率の和が蒸気発生器二次側ノード*i*の伝熱量となる。

すなわち、

$$Q_{ui} = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 u_{ik,j} (T_{pij,k} - T_i) \quad (3.3.47)$$

ただし

*j* = 1 ; 高温側伝熱管  
2 ; 低温側伝熱管

*k* = 1 ; 一次側ノード上部(気相部)  
2 ; 一次側ノード下部(液相部)

熱通過率は次式(3.3.48)により計算する。

$$U_{ik,j} = F_{SG} \frac{B_i}{2} L_{if} z_{ik,j} \left( \frac{1}{h_{pij,j}} + R_{tube} + R_f + \frac{1}{h_{ik,j}} \right) \quad (3.3.48)$$

蒸気発生器計算プログラムが対象とする主蒸気系統の概要を図3.3.16に示す。同図が示す以外の蒸気系統は、次節にて記す汎用演算要素プログラムにて各プラント毎に記述される。主蒸気隔離弁より上流側の主蒸気管は蒸気発生器の蒸気ドーム部を含めて模擬する。主蒸気隔離弁から主蒸気操縦弁等の各種分岐点までの領域を主蒸気ヘッダとして蒸気発生器とは独立に圧力、エンタルピを計算する。

主蒸気管には集合管より下流に主ダンプ弁を、集合部より上流の各ループ毎に主蒸気安全弁、主蒸気にがし弁を設置することを想定している。安全弁と逃がし弁の特性は制御系記述部で汎用演算要素にて記述する。また、主蒸気管破断を模擬する場合の破断口が予め用意されている。

主蒸気系統に設けられている各弁の流量は液相放出の時はHenry-Fauske<sup>6)</sup>で評価し、蒸気放出の時には次式で計算する。

$$G_{TBY} = k_{cv} \cdot C_{VTBY} (P_H - 1.0) \quad (3.3.49)$$

$$G_{SFTi} = k_{cv} \cdot C_{VSFTi} (P_{iso} - 1.0) \quad (3.3.50)$$

$$G_{RLFi} = k_{cv} \cdot C_{VRLFi} (P_{iso} - 1.0) \quad (3.3.51)$$

主蒸気ヘッダより上流側では、圧力損失はSG出口絞りと主蒸気隔離弁の2ヶ所に集中化している。この2つの圧損源に挟まれた領域の圧力をP<sub>iso</sub>と表す。主蒸気ヘッダへ流入する蒸気の流量は次式(3.3.52)で計算する。

$$G_{STi} = \frac{C_{Viso_1}}{C_{Viso_N}} \frac{G_{s,n}}{PSG_N - P_H_N} \frac{1}{f_{PH}} (P_{iso} - P_H) \quad (3.3.52)$$

一方、SGより流出する蒸気の流量は次式(3.3.53)により求める。

$$G_{ls} = G_{STi} + G_{SFTi} + G_{RLFi} + G_{MSPT} \quad (3.3.53)$$

以上の蒸気流量より主蒸気ヘッダ圧力P<sub>H</sub>を求める。

主蒸気管破断時の破断流量はMoodyの式<sup>7)</sup>により計算する。

構造材の熱伝導率、表面熱伝達率、比重、比熱は、入力データで与えられた一定値として取り扱う。

給水は蒸気ドーム部ノードとダウンカマ第1ノードに流入する。蒸気ドーム部への流入量G<sub>ipd</sub>とダウンカマへの流入量G<sub>idc</sub>の分配の比率は、蒸気ドーム部の

水位の関数として与える。

$$G_{iup} = (1.0 - F_{SGFWP}(h_{DOM})) G_{FW} \quad (3.3.54)$$

$$G_{idc} = F_{SGFWP}(h_{DOM}) G_{FW} \quad (3.3.55)$$

主給水管破断時等には、通常運転時とは逆に SG から給水系へと流出する。逆流時にも、流入時と同様に蒸気ドームノードとダウンカマ第1ノードから流出するものとするが、流出の分配比率は流入時とは別の関数により与える。

給水管破断時の流量は、蒸気発生器圧力および破断点のエンタルピ等から Henry-Fauskeの式<sup>6)</sup>により評価する。

一方、プローダウン水はダウンカマ部最終ノードより流出し、プローダウン水のエンタルピは、ダウンカマ最終ノードのエンタルピに等しいものとする。

狭域水位は、蒸気ドーム部のコラプスト水位より次式で求める。

$$LSGN = \begin{cases} 0 & \dots \dots (h_{DOM} \leq Z_{LTAP}) \\ \frac{V_{INN}}{V_i} \frac{h_{DOM} - Z_{LTAP}}{Z_{UTAP} - Z_{LTAP}} \times 100 & \dots \dots (Z_{LTAP} < h_{DOM} \leq Z_{UTAP}) \\ \frac{V_{INN}}{V_i} \times 100 & \dots \dots (h_{DOM} > Z_{UTAP}) \end{cases} \quad (3.3.56)$$

広域水位は、蒸気ドーム部とダウンカマ部のコラプスト水位およびダウンカマ部の流動圧損より次式で求める。

$$LSGW = \begin{cases} \left\{ \frac{V_{INW}}{V_i} \frac{h_{DOM} + \sum_{\varepsilon \in DC} (1-\alpha_\varepsilon) L_\varepsilon}{Z_{UTAP} + \sum_{\varepsilon \in DC} L_\varepsilon} - \sum_{v \in DC} f_{pv} |G_v| U_v \right\} \times 100 & \dots \dots (h_{DOM} \leq Z_{UTAP}) \\ \left\{ \frac{V_{INW}}{V_i} - \sum_{v \in DC} f_{pv} |G_v| U_v \right\} \times 100 & \dots \dots (h_{DOM} > Z_{UTAP}) \end{cases} \quad (3.3.57)$$

蒸気ドーム部のコラプスト水位は、入力データにより指定された水位容量曲線から求める。水面傾斜、スロッシングの影響は表3.3.2記載の手順により別途計算する。

#### (4) 計算手順

計算手順の概略を図3.3.17に示す。

- ①境界条件をグローバルコモンより読みとる。
- ②もし SG 単独計算ならば①の代わりに関数発生器により境界条件を設定する。
- ③主蒸気管、ヘッダの弁の合成Cu値、主蒸気管破断時の流量を計算する。
- ④給水を境界フローリングに割り当てる、給水管破断流量を計算する。
- ⑤SGTR流量を計算し境界フローリングに割り当てる。
- ⑥主蒸気管等の構造材温度、構造材と流体の交換熱量を計算する。
- ⑦SG単独計算であれば、SG1次側のエンタルピを計算する。
- ⑧SG2次側のエンタルピ、圧力を計算する。
- ⑨U字管部の熱通過量を計算する。

⑩主蒸気ヘッダの圧力、エンタルピおよび主蒸気系統の弁流量を計算する。

⑪初期定状計算であれば、狭域水位が入力値に一致するように蒸気ドーム部のエンタルピを補正する。

⑫旧タイムステップの状態量を、新タイムステップの状態量に置換する。

⑬計算結果をグローバルコモンへ書き出す。

⑭入力データにより指定されているならば、印刷出力する。

S G 2次側の未知数は、系の圧力とリンクの体積流量およびノードのエンタルピである。数値計算安定化のために本プログラムでは後退オイラー法により数値積分を行う。後退オイラ法を使用すると毎ステップの連立方程式を解かなければならない。連立方程式の求解に要する時間は一般に未知数の3乗に比例するが、スペース性を考慮したとしても2重対角行列以外では求解に求める時間が未知数に比例することはない。従って未知数全てを一度に解くより、複数回に分けて解いた方が速いことになる。この理由により、未知数を圧力、体積流量およびエンタルピの2つに分けて解く。後退オイラー法の差分化式では次式で定義される。

$$\frac{y_{(t+\Delta t)} - y_{(t)}}{\Delta t} = f(y_{(t+\Delta t)}) \quad (3.3.58)$$

上式の $\Delta t$ は圧力、体積流量あるいはエンタルピである。上式の右辺は $\Delta t$ についての非線形な関数であるのでNewton法により収束計算を行う。

上式の $k$ は $t + \Delta t$ タイムステップの繰返し回数を示している。繰返し計算は、 $|y_{(t+\Delta t)}^{k+1} - y_{(t+\Delta t)}^k|$ が入力により定められた許容誤差の範囲に収束するか、あるいは繰返し回数が入力により定めた繰返し回数の制限値に達するまで行う。収束計算はまず、圧力と体積流量について行い、その収束値を用いてエンタルピの計算を行う。エンタルピの積分では、単位質量当たりのエンタルピを積分するのではなく、単位体積当たりのエンタルピを積分することにより、2相または過熱蒸気時に顕著な非線形性による誤差を小さく抑えるよう工夫している。積分の結果得られたエンタルピと前回値の差が許容誤差範囲内であれば繰返し計算を終了する。前回値との差が許容誤差より大きければ、圧力体積流量の計算に戻る。この手続きを定め得られた許容誤差の範囲にエンタルピが収束するかあるいは繰返し回数が入力により定められた制限値に達するまで行う。

繰り返し計算の終了後は、温度、ボイド率等の従属変数と水位を計算しそのタイムステップでの計算を終了する。

主蒸気ヘッダ部の未知数は、圧力とエンタルピである。主蒸気ヘッダ部では、まず圧力を求め、得られた圧力を用いて弁の蒸気流量を計算し、最後にエンタルピを計算する。圧力を求める繰返し計算の時には、主蒸気管部の逆止弁の開閉を毎回調べる。

表3.3.7 船体運動が蒸気発生器2次側に与える影響の模擬機能

No. 1	船体運動が蒸気発生器の自然循環流量に与える影響の計算機能
内 容	船体運動計算プログラムより、蒸気発生器の傾斜、加速度を受け取り、自然循環力を計算する。 座標系は、船体に固定した座標系を用いる。
蒸気発生器計算プログラムでは蒸気発生器およびその流路は船体に固定した座標系にて直立していると仮定している。密度水頭の項は以下のように補正する。	
$P_{\text{ext}} = \frac{L_v}{v_v} \ddot{z}$	
ただし、 $\ddot{z}$ は重力加速度および船体運動を考慮した z 方向加速度 (m/s)	
No. 2	船体運動が蒸気発生器のドリフト速度に与える影響の計算機能
内 容	ドリフトフラックス相関式に表れる重力加速度項を船体運動を考慮した加速度に置き換えて、ドリフト速度 $V_{gj'}$ を計算し、z 方向成分をもってドリフト速度 $V_{gj}$ とする。 座標系は、船体に固定した座標系を用いる。
ドリフト速度の相関式に使用する加速度を次のように修正する。	
$a^* = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2}$	
ただし $\ddot{x}$ は重力加速度および船体運動を考慮した x 方向加速度 (m/s)	
$\ddot{y}$ は重力加速度および船体運動を考慮した y 方向加速度 (m/s)	
$\ddot{z}$ は重力加速度および船体運動を考慮した z 方向加速度 (m/s)	
a * を用いて求めたドリフト速度 $V_{gj'}$ の z 軸方向成分の大きさを計算する。	
$V_{gj} = \frac{\ddot{z}}{a^*} V_{gj'}$	
No. 3	船体運動が蒸気発生器の熱伝達率に与える影響の計算機能
内 容	熱伝達率を上下方向加速度の関数として計算する。
沸騰熱伝達係数について次式により補正する機能を与えた。	
$h^* = \left[ a \left\{ \left( \frac{\ddot{z}}{g} \right)^b - 1.0 \right\} + 1.0 \right] h$	
ただし、a, b ; 入力により指定する定数。	

表3.3.8 3.3.3 節の記号表

B	: 加熱漏れ縁長さ	[m]
C <sub>o</sub>	: 分布パラメータ	(-)
C <sub>v</sub>	: 弁C <sub>v</sub> 値	
F <sub>SG</sub>	: 伝熱面積の補正係数	(-)
G	: 質量流量	[kg/s]
g	: 重力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
H	: 加熱管領域のSG2次側ノードの集合 リンクの平均エンタルピー	[J/kg]
h	: エンタルピー	[J/kg]
	: 热伝達率	[W/m <sup>2</sup> ]
h <sub>DOME</sub>	: 蒸気ドームノードコラプスト水位	[m]
L	: 流路長	[m]
M	: 質量	[kg]
P	: 圧力	[Pa]
P <sub>H</sub>	: 主蒸気ヘッダ圧力	[Pa]
P <sub>loss</sub>	: SG出口～隔離弁圧力	[Pa]
ΔP	: 差圧	[Pa]
Q	: 交換熱量	[W]
R	: 热抵抗	[m <sup>2</sup> ·K/W]
T	: 温度	[°C]
Δt	: 積分の時間幅	[s]
U	: 体積流量	[m <sup>3</sup> /s]
V	: 体積	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>drift</sub>	: ドリフト速度	[m/s]
	: 状態変数を成分とする行ベクル	
Z <sub>LTAP</sub>	: 蒸気ドーム下端から下部水位タップまでの高さ	[m]
Z <sub>UTAP</sub>	: 蒸気ドーム下端から上部水位タップまでの高さ	[m]
a	: ボイド率	[1]
γ	: 比重率	[kg/m <sup>3</sup> ]
λ	: 热伝導率	[W/m <sup>2</sup> ·K]
σ	: 表面張力	[N/m]

添字

- e : エレベーションによる圧力差
- f : 摩擦による圧力損傷汚れ
- Fw : 給水
- Gv : ガバナ蒸気流量
- g : 飽和蒸気
- i : ノード番号
- k : リンク番号
- l : 飽和水
- N : 狹域or定格出力時の値
- P : 1次側
- RLF : 逃がし弁
- SFT : 安全弁
- S : 全蒸気流量
- ST : 主蒸気ヘッダ流入蒸気
- TBY : タービンバイパス弁
- U : 伝熱管
- v : リンクのインデックス
- $\xi$  : ノードのインデックス
- : 時間に関する全微分

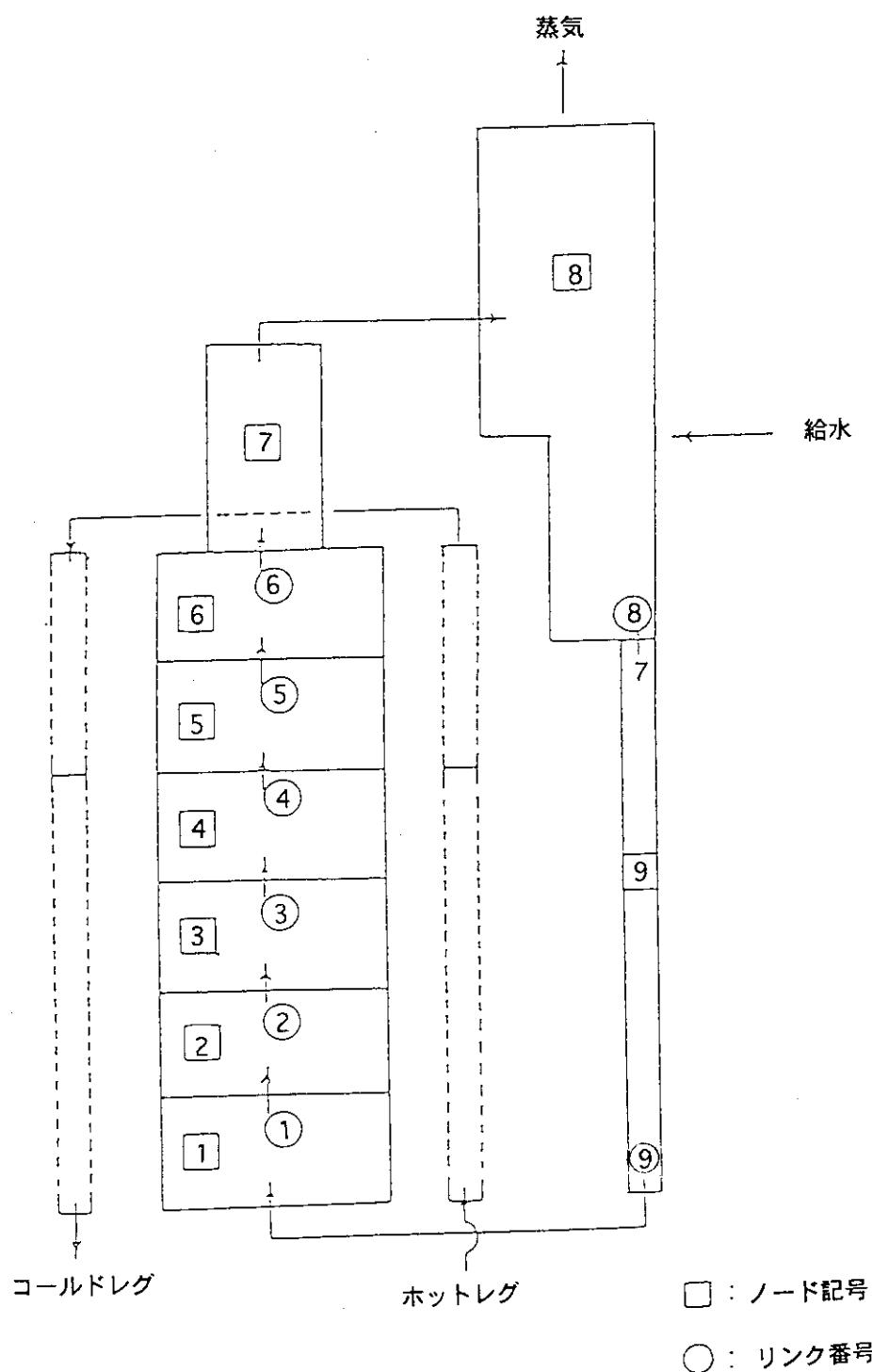
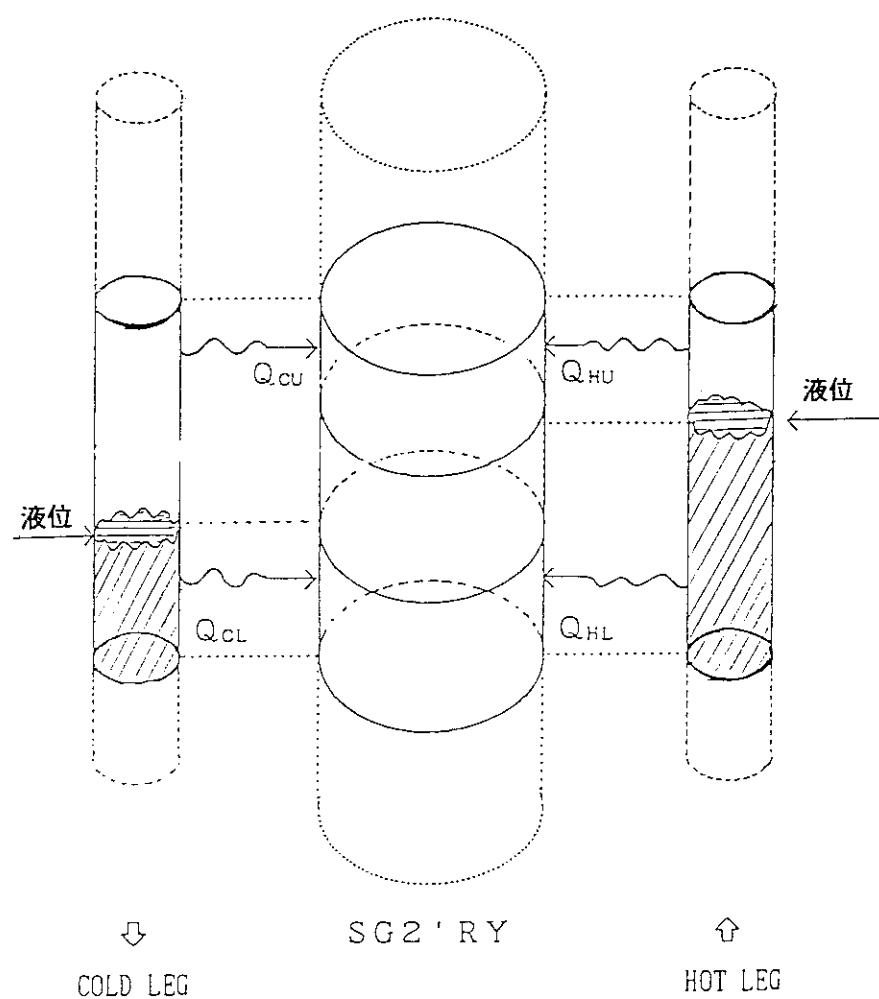


図 3.3.14 蒸気発生器二次側ノード分割例



記号  
Q：伝熱面  
添字  
H：高温側  
C：低温側  
U：上部  
L：下部

図 3.3.15 あるノード  $i$  における U 字管部伝熱モデルの概要

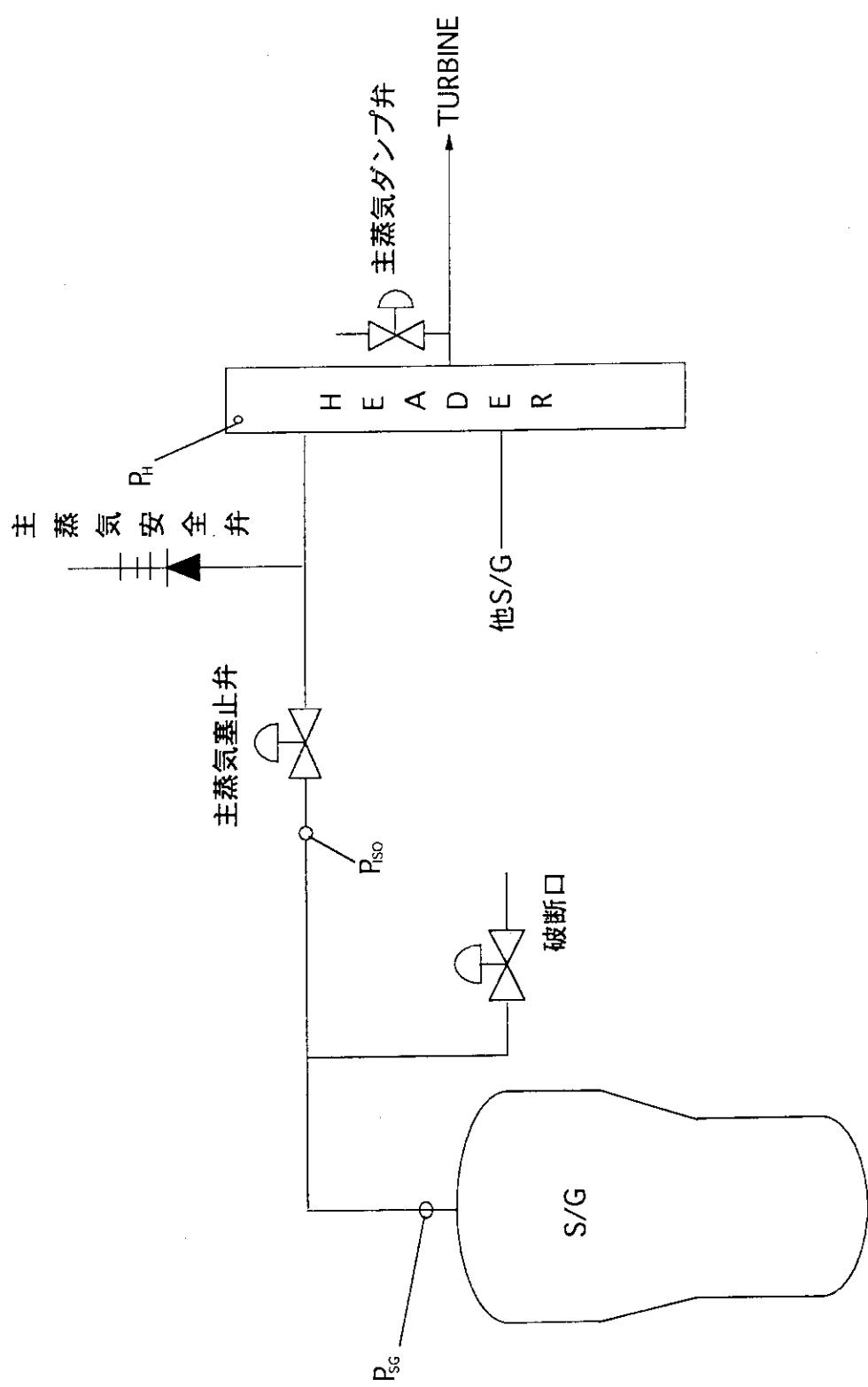


図 3.3.16 主 蒸 気 系 概 要

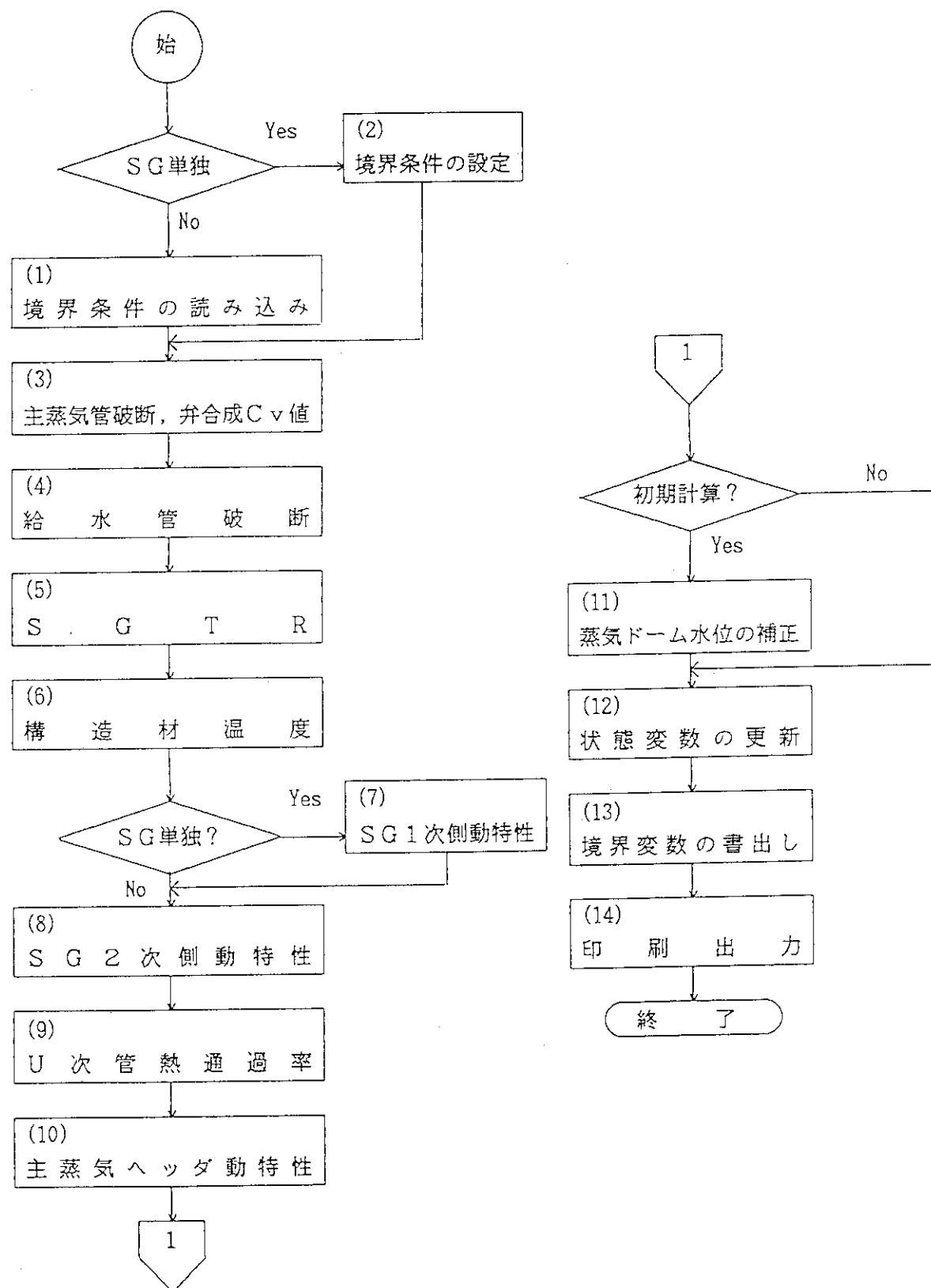


図3.3.17 計算手順の概略

### 3.3.4 汎用演算プログラム

原子炉補助系統、推進系統、安全保護系統、制御系統等の記述は、汎用演算要素プログラムを用いる。汎用演算要素プログラムは各種系統および制御系を構成するための演算要素（P O L）、およびノード・リンク（N／L）の要素のパッケージ化された汎用プログラム群より構成されている。モデルの構築は、テキストファイル上に各種演算要素およびノード・リンクを用いて、連結関係、諸元値を一定のフォーマットに従って入力することにより行う。従って、FORTRAN等に関する知識を必要とせずに、簡単にモデル構築が行える。

#### (1) 演算要素（P O L）

P O L (Problem Oriented Language)は、算術演算式、制御器、バルブ等を含む簡易言語パッケージである。

各要素の内部処理はFORTRANで記述されており、インプットデータで与えられた諸元値、結合関係に従って演算が実行される。これら要素の接続関係と時定数等のパラメータとからなるインプットデータを入力して、シミュレーションを行う。時定数、ゲイン等のパラメータは、シミュレーション中でも変更が可能である。

#### (2) ノード・リンク（N／L）

ノード・リンク(Node/Link)は、配管、ポンプ、タンク等の流体系の要素を含む簡易言語パッケージである。

各要素の内部処理はP O Lと同様にFORTRANで記述されており、インプットデータで与えられた諸元値と結合関係をもとに、流量、温度、圧力等の挙動を計算する。管路網の分岐・合流点をノード、ノードとノードを結ぶ流路をリンク、ノードとノードを結ぶ伝熱路を伝熱リンクと呼ぶ。

ノードは、エネルギー保存則と質量保存則の2つの式が成り立つ理想化された容器であり、容器の容積としての性質である熱容量および圧縮性を模擬する。

リンクは、運動量保存則が成り立つ理想化された流路であり、管路の流路としての性質である弁による絞り、ポンプによる昇圧等を模擬する。

伝熱リンクは、熱交換器内の伝熱面の伝熱路としての性質を模擬する。

(N／L) モデルは、これらのノードとリンクで表現された等価ネットワークに対する連立微分方程式を内部で構築してシミュレーションを行う。分布系を多点集中近似して取り扱うので、水撃現象などの圧力波およびエンタルピ、ほう素濃度のピストンフロー的な振る舞いを正確に解くことには適していない。

系の記述では、ブロック図を作成する感覚で、ノードをリンクで接続していくことで、数式モデルを構築することなく、任意の流動シミュレーションモデルを作成することができる。(N／L) の要素と機能を表3.3.9に示す。使用した記号の一般的なものを表3.3.10に示す。

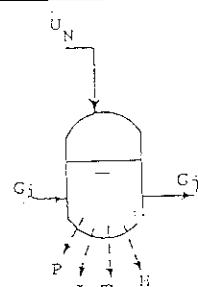
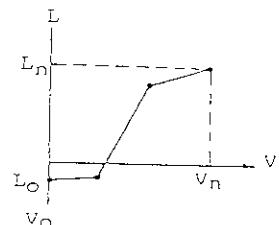
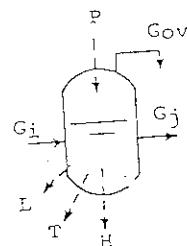
表 3.3.9 ノードリンクの要素と機能

No. 1	ノードタイプ	境界ノード	タイプラベル	BWNODE
機能		変数で指定された圧力、エンタルピ、ほう素濃度の流体ノードとして機能する。	$P = P_B, h = E_B, B = B_B$	
		但し、 $P_B$ :外部指定圧力 $E_B$ :外部指定エンタルピ $B_B$ :外部指定ほう素濃度		

No. 2	ノードタイプ	内部ノード	タイプラベル	WNODE
機能		次の基礎式による圧力、エンタルピ及びほう素濃度の計算を行う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 圧力計算</li> </ul> $\frac{dp}{dt} = \beta_w (\sum_i G_i - \sum_j G_j) \quad \dots \dots \dots (1)$	
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• エンタルピ計算</li> </ul> $\frac{dh}{dt} = \frac{v}{V} \left[ \frac{1}{3.6} \left\{ \sum_i G_i^* (h_i - h) - \sum_j G_j^* (h_j - h) \right\} + \frac{1}{3500} \left\{ \sum_i Q_i - \sum_j Q_j \right\} \right] \quad G_i^* = \max(G_i, 0), \quad G_j^* = \min(G_j, 0)$	
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• ほう素濃度計算</li> </ul> $\frac{dB}{dt} = \frac{v}{3.6V} \left\{ \sum_i G_i^* (B_i - B) - \sum_j G_j^* (B_j - B) \right\}$	
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• 溫度、比容積計算</li> </ul> $T = f_{STH\ell}(h), \quad v = f_{SVH\ell}(h)$	
			但し、 $\beta_w$ :定数, $G_i$ :流入リンク流量, $G_j$ :流出リンク流量, $h_i$ :流入リンクの上流ノードエンタルピ, $h_j$ :流出リンクの下流ノードエンタルピ, $Q_i$ :流入伝熱リンクの伝熱量, $Q_j$ :流出伝熱リンクの伝熱量, $f_{STH\ell}$ :飽和水エンタルピから飽和水温度を計算する蒸気関数, $f_{SVH\ell}$ :飽和水エンタルピから飽和水比容積を計算する蒸気関数	

No. 3	ノードタイプ	開放タンク	タイプラベル	OTNODE				
機能	<p>大気開放タンクのように器内圧力が外部から指定されるタンクを模擬する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>エンタルピ計算</li> </ul>							
$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{W} \left\{ \sum_i G_i^* (h_i - h) - \sum_j G_j^* (h_j - h) \right\}$ <p>但し、<math>G_i^* = \max(G_i, 0)</math>, <math>G_j^* = \min(G_j, 0)</math></p>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>ほう素濃度計算</li> </ul> $\frac{dB}{dt} = \frac{1}{3.6W} \left\{ \sum_i G_i^* (B_i - B) - \sum_j G_j^* (B_j - B) \right\}$								
<ul style="list-style-type: none"> <li>保有水量計算</li> </ul> $\frac{dW}{dt} = \begin{cases} \sum_i G_i^* - \sum_j G_j^* & \dots \text{下記条件以外} \\ 0 & \begin{cases} v \cdot W \geq V_n \text{ and } \sum G_i - \sum G_j > 0 \\ v \cdot W \leq V_{min} \text{ and } \sum G_i - \sum G_j < 0 \end{cases} \end{cases}$								
<ul style="list-style-type: none"> <li>温度、比容積</li> </ul> $T = f_{STH2}(h), \quad v = f_{SVH2}(h)$								
<ul style="list-style-type: none"> <li>水位計算</li> </ul> $L = f_{LV}(v \cdot W)$								
<ul style="list-style-type: none"> <li>オーバーフロー量計算</li> </ul> $G_{ov} = 0 \quad \dots \text{下記条件以外}$ $= \sum G_i - \sum G_j \quad \dots \text{v} \cdot W \geq V_n \text{ and } \sum G_i - \sum G_j > 0$								
No. 4	ノードタイプ	密閉タンク	タイプラベル	CTNODE				
機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>ノード圧力計算</li> </ul> $\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V_c} \left[ (P + 1) v \frac{dw}{dt} + 2.81 \times 10^{-4} U_s \right] \quad \dots \text{下記条件以外}$ $= 0 \quad \dots \quad \frac{dp}{dt} > 0 \text{ and } P \geq P_{max}$							
<ul style="list-style-type: none"> <li>エンタルピ計算</li> </ul> $\frac{dh}{dt} = \frac{1}{3.6W} \left\{ \sum_i G_i^* (h_i - h) - \sum_j G_j^* (h_j - h) \right\}$ <p>但し、<math>G_i^* = \max(G_i, 0)</math>, <math>G_j^* = \min(G_j, 0)</math></p>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>ほう素濃度計算</li> </ul> $\frac{dB}{dt} = \frac{1}{3.6W} \left\{ \sum_i G_i^* (B_i - B) - \sum_j G_j^* (B_j - B) \right\}$								



## • 保有水量計算

$$\frac{dW}{dt} = \left\{ \sum G_i - \sum G_j \right\} / 3.6 \quad \dots \dots \text{下記条件以外}$$

$$= 0 \quad \begin{cases} v \cdot W \geq V_n \text{ and } \sum G_i - \sum G_j > 0 \\ v \cdot W < V_{min} \text{ and } \sum G_i - \sum G_j < 0 \end{cases}$$

## • 温度、比容積

$$T = f_{STH2}(h), \quad v = f_{SVH2}(h)$$

## • 水位計算

$$L = f_{LV}(v \cdot W)$$

## • オーバーフロー量計算

$$G_{ov} = 0 \quad \dots \dots \text{下記条件以外}$$

$$= \sum G_i - \sum G_j \quad \dots \dots v \cdot W \geq V_n \text{ and } \sum G_i - \sum G_j > 0$$

## • 気相容積

$$V_c = V_n - v \cdot W$$

但し、 $V_n$ ：タンク容積 ( $m^3$ )

No.5	ノードタイプ	境界流体リンク	タイプラベル	BLINK
機能	変数で指定された流量の流体リンクとして機能する。			

$$G = \frac{1}{1 + \tau s} X_{set}$$

但し、 $\tau$ ：遅れ時間 (インプットデータで指定)

$S$ ：微分演算子

$X_{set}$ ：指定された流量

No.6	ノードタイプ	圧力損失から成るリンク	タイプラベル	ALINK
機能	又は			

圧力損失を伴う流体リンクとして機能する。

オプションとしてチェック弁の有無が指定できる。

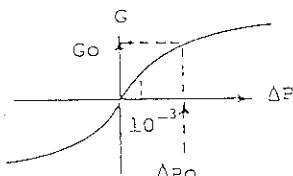
チェック弁有の時は、リンク順方向にのみ流れることができる。

圧力損失計算モデルは2種類用意されており、KTYPEで指定する。

KTYPE = 0

## • KTYPE = 0 のとき

$$G = G_0 \frac{v_0}{\Delta P_0} \sqrt{\nu \cdot \max(|P_u - P_o|, 10^{-3})}$$



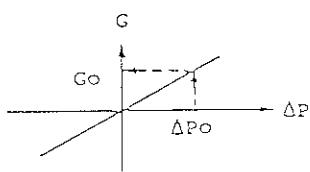
## • KTYPE=1のとき

$$G = G_0 \cdot \frac{v_0}{P_0} \cdot \frac{1}{v} (P_u - P_d)$$

## • チェック弁付きのとき

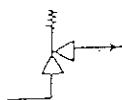
$$P_u < P_s \text{ で } G = 0$$

KTYPE = 1



No.7	ノードタイプ	安全弁リンク	タイプラベル	RLINK
機能				

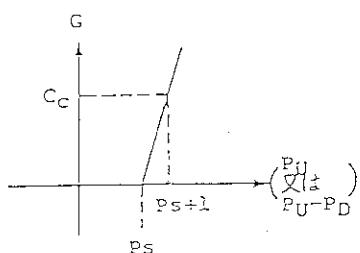
安全弁の機能を持つ。2種類のタイプがあり、上流圧力により作動するタイプと上流と下流の差圧で作動するタイプがある。



## • KTYPE=0のとき

$$G = \frac{C_L}{P_s} P_u \quad \dots \dots P_u \leq P_s$$

$$= C_c (P_u - P_s) \quad \dots \dots P_u > P_s$$



## • KTYPE=1のとき

$$G = \frac{C_L}{P_s - P_d} (P_u - P_d) \quad \dots \dots P_u - P_d \leq P_s$$

$$= C_c (P_u - P_d - P_s) \quad \dots \dots P_u - P_d > P_s$$

但し、 $P_u$ : 上流圧力 $P_d$ : 下流圧力 $P_s$ : 安全弁設定圧力 $C_L$ : 安全弁設定圧におけるシートリーアクション $C_c$ : 圧力増加に対する逃し流量の増加比

No.8	ノードタイプ	制御弁リンク	タイプラベル	VLINK
機能				

制御弁が入っている流体リンクとして機能する。

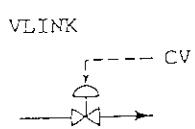
制御弁開度は  $C_v$  値で与える。

基本モデルは次のとおり。2種類のタイプがあり、一つは流量が差圧の平方根、一つは差圧に比例するものであり、後者はON/OFF弁などに用いる。

$$G = 0.027 \cdot C_v \cdot \frac{P_u - P_d}{\sqrt{v_u \cdot \max(|P_u - P_d|, 10^{-3})}} \quad \dots \dots \text{KTYPE} = 0$$

$$= 0.854 \cdot C_v (P_u - P_d) \quad \dots \dots \text{KTYPE} = 1$$

$$= 0 \quad \dots \dots \text{チェック弁付かつ } P_u < P_d$$

但し、 $C_v$ : 制御弁  $C_v$  値,  $P_u$ : 上流圧力,  $P_d$ : 下流圧力

No.9	ノードタイプ	複合リンク	タイプラベル	WML INK																			
機能	多数の制御弁、配管圧力損失の組合せ及び位置水頭を考慮した流体リンクとして機能する。 型式の指定は定数KTYPEで行う。																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>KTYPE</th> <th>型 式</th> <th>計算 式</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 又は 10</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = \left[ \sum_i^n C_{xi}^{-2} \right]^{-1/2}</math></td> </tr> <tr> <td>1 又は 11</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = \sum_i^n C_{xi}</math></td> </tr> <tr> <td>2 又は 12</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = C_{x5} + \left( C_{x1}^{-2} + (C_{x2}^{-2} + C_{x3}^{-2})^{-1/2} + C_{x4}^{-2} \right)^{-1/2}</math></td> </tr> <tr> <td>3 又は 13</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right)^{-1/2}</math></td> </tr> <tr> <td>4 又は 14</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = \left[ \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} \right) \div C_{x5}^{-2} \right]^{-1/2}</math></td> </tr> <tr> <td>5 又は 15</td> <td></td> <td><math>C_{v_{mix}} = \left[ \left\{ (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right\}^{-1/2} \right]</math></td> </tr> </tbody> </table>	KTYPE	型 式	計算 式	0 又は 10		$C_{v_{mix}} = \left[ \sum_i^n C_{xi}^{-2} \right]^{-1/2}$	1 又は 11		$C_{v_{mix}} = \sum_i^n C_{xi}$	2 又は 12		$C_{v_{mix}} = C_{x5} + \left( C_{x1}^{-2} + (C_{x2}^{-2} + C_{x3}^{-2})^{-1/2} + C_{x4}^{-2} \right)^{-1/2}$	3 又は 13		$C_{v_{mix}} = \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right)^{-1/2}$	4 又は 14		$C_{v_{mix}} = \left[ \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} \right) \div C_{x5}^{-2} \right]^{-1/2}$	5 又は 15		$C_{v_{mix}} = \left[ \left\{ (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right\}^{-1/2} \right]$		
KTYPE	型 式	計算 式																					
0 又は 10		$C_{v_{mix}} = \left[ \sum_i^n C_{xi}^{-2} \right]^{-1/2}$																					
1 又は 11		$C_{v_{mix}} = \sum_i^n C_{xi}$																					
2 又は 12		$C_{v_{mix}} = C_{x5} + \left( C_{x1}^{-2} + (C_{x2}^{-2} + C_{x3}^{-2})^{-1/2} + C_{x4}^{-2} \right)^{-1/2}$																					
3 又は 13		$C_{v_{mix}} = \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right)^{-1/2}$																					
4 又は 14		$C_{v_{mix}} = \left[ \left( (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} \right) \div C_{x5}^{-2} \right]^{-1/2}$																					
5 又は 15		$C_{v_{mix}} = \left[ \left\{ (C_{x1}^{-2} + C_{x2}^{-2})^{-1/2} + (C_{x3}^{-2} + C_{x4}^{-2})^{-1/2} + C_{x5}^{-2} \right\}^{-1/2} \right]$																					
<p>但し、<math>C_{xi} = (C_{xi}^{-2} + (\frac{\sqrt{v_o}}{0.027} G_{oi} / \sqrt{\Delta P_{oi}})^{-2})^{-1/2}</math></p>																							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• KTYPE&lt;10のとき</li> </ul> $G = 0.027 \cdot C_{v_{mix}} \frac{P_u - P_d + 10^{-4}H/v}{\sqrt{v \cdot \max( P_u - P_d + 10^{-4}H/v , 10^{-2})}}$																							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• KTYPE&gt;10のとき</li> </ul> $G = 0.854 \cdot C_{v_{mix}} (P_u - P_d + 10^{-4}H/v)$																							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• チェック弁付</li> </ul> $P_u - P_d + 10^{-4}H/v < 0 \text{ で } G = 0$																							
<p>但し、<math>P_u</math>:上流圧力、<math>P_d</math>:下流圧力、<math>H</math>:リンク上流と下流とのエレベーション差  <math>\Delta P_o</math>:圧力損失、<math>G_o</math>:圧損<math>\Delta P_o</math>が生じるときの流量、<math>v_o</math>:圧損<math>\Delta P_o</math>、流量<math>G_o</math>時の流体比容積</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_v</math>値変数が無指定の場合、並列接続については<math>C_v=0</math>（該当リンクがない）とし、直列接続については<math>C_v=\infty</math>（絞られない）とする。</li> <li>• 同様に<math>\Delta P_o</math>データが無指定の場合、並列接続については該当リンクがないとし、直列接続については絞られないみなす。</li> </ul>																							

No. 10	ノードタイプ	ポンプリング	タイプラベル	PLINK
機能				<p>ポンプが設けられている流体リンクとして機能する。 ポンプのQ-H特性、軸馬力特性は2次関数で近似する。回転数変化に対するポンプ特性の変化は相似則に従うものとする。 制御弁及びチェック弁を直列に入れることもできる。</p>
				<p>流量計算</p> $G = \left( \left( 0.027CV \right)^{-2} + \left( \frac{10^2}{\sqrt{a_H}} \right)^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\Delta P_x}{\sqrt{v \cdot \max( \Delta P_x , 10^{-3})}}$ <p>但し、<math>\Delta P_x = P_u - P_d + 10^{-4} \cdot \left( \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 b_H + H \right) / v</math></p> <p>但し、<math>a_H, b_H; H = -a_H Q^2 + b_H</math> とおき、標本データ <math>Q_i, H_i</math> より 最小二乗法で決定</p> <p>軸馬力計算</p> $E = 850 \cdot \left( \frac{N}{N_0} \right)^3 (a_E Q^2 + b_E), Q = 10^3 \cdot v G$ <p>但し、<math>a_E, b_E; E = a_E Q^2 + b_E</math> とおき、標本データ <math>Q_i, E_i</math> より 最小二乗法で決定</p> <p>但し、<math>Q</math>：体積流量、<math>P_u</math>：上流圧力、<math>P_d</math>：下流圧力、<math>N</math>：ポンプ回転数（任意単位） <math>N_0</math>：ポンプ定格回転数（<math>N</math>と同じ単位）、<math>Q_i</math>：定格時の体積流量の標本データ <math>H_i</math>：定格時のポンプ揚程の標本データ、<math>E_i</math>：定格時のポンプ軸馬力の標本データ</p>

No. 11	ノードタイプ	境界伝熱リンク	タイプラベル	BHLINK
機能				<p>外部からの変数又は定数で指定された伝熱を強制的に行う。</p> <p><math>Q_{ji} = Q_{set}</math></p> <p>但し、<math>Q_{set}</math>：指定伝熱量 (<math>K \cdot c \cdot a \cdot l / \ell</math>)</p>

No. 12	ノードタイプ	伝熱リンク	タイプラベル	HDLINK
機能				<p>熱交換器での伝热量の計算を行う。 熱交換器内での温度分布は流入点で流入流体温度、流出点でノード温度となる直線分布とする。また熱伝達率は重量流量の0.8乗で変化するものとし、零割り防止のため重量流量にはインプットデータで与えられる下限値GNAT1, GNAT2が設けられている。</p> <p>右図のように構成されており流れが順流（リンク定義方向に流れている場合）のとき、右図の各ノードの温度 <math>T_a</math>, <math>T_u</math>, <math>T_b</math>, <math>T_d</math> を使って、右の伝熱計算を行なう。</p> $Q_h = \frac{1}{2R} (T_a + T_u - T_b - T_d)$

但し、 $T_a : G_1 > 0$  のとき上流ノード温度、 $G_1 < 0$  のとき下流ノード温度  
 $T_b : G_2 > 0 \quad \text{ノ} \quad G_2 < 0 \quad \text{ノ}$   
 $T_a, T_b, T_u, T_d$  は伝熱リンクで  $h_a, h_b, h_u, h_d$  から蒸気表を用いて計算する。

熱交全体の伝熱抵抗  $R$  は次式で計算する。

$$R = R_1 + R_T + R_2$$

$$R_1 = \alpha_1 R \left( \frac{\theta}{\max(|G_1|, |G_{HAT1}|)} \right)^{\theta}$$

$$R_T = (1 - \alpha_1 - \alpha_2) R_1$$

$$R_2 = \alpha_2 R \left( \frac{\theta}{\max(|G_2|, |G_{HAT2}|)} \right)^{\theta}$$

定格時における伝熱抵抗  $R^0$  は次式で計算する。

$$R^0 = \frac{1}{2 Q_H^0} (T_a^0 + T_u^0 - T_b^0 - T_d^0) \quad \text{但し, } R_1 : \text{リンク上流側伝熱抵抗 } (\text{°Ch}/\text{kcal})$$

$R_2 : \text{リンク下流側伝熱抵抗 } (\text{°Ch}/\text{kcal})$

$R_0 : \text{定格時の伝熱抵抗 } (\text{°Ch}/\text{kcal})$

$\alpha_1 : \text{定格時のリンク上流伝熱抵抗割合 } (-)$

$\alpha_2 : \text{定格時のリンク下流伝熱抵抗割合 } (-)$

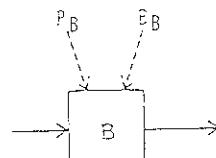
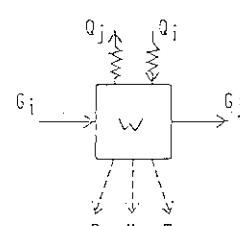
$G_1^0 : \text{定格時のリンク上流ノードの通過流量 } (t/h)$

$G_2^0 : \text{定格時のリンク下流ノードの通過流量 } (t/h)$

$T_a^0, T_u^0, T_b^0, T_d^0 : \text{定格時の温度 } (\text{°C})$

$h_a^0, h_u^0 : \text{定格時のエンタルピ } (\text{kcal}/\text{kg})$

$Q_H^0 : \text{定格時の伝熱時 } (\text{kcal}/\text{b})$

No. 13	ノードタイプ	蒸気が流れる境界ノード	タイプラベル	B S NODE
機能				
変数で指定された圧力、エンタルピの流量ノードとして機能する。				
$P = P_B, h = E_B$				
但し、	$P_B$ : 外部指定圧力 $E_B$ : 外部指定エンタルピ			
No. 14	ノードタイプ	蒸気が流れる内部ノード	タイプラベル	S NODE
機能				
次の基礎式による圧力、エンタルピの計算を行う。				
圧力計算				
$\frac{dp}{dt} = \beta_s \left( \sum_i G_i - \sum_j G_j \right) \quad \dots \dots (i)$				
				
エンタルピ計算				
$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{(\frac{1}{\gamma} + R_B)} \left[ \frac{1}{3.6} \left( \sum_i G_i (h_i - h) - \sum_j G_j (h_j - h) \right) \right]$				

$$\div \frac{1}{3600} (\Sigma Q_i - \Sigma Q_j) ] \quad G_i = \max (G_i, 0), \quad G_j = \min (G_j, 0)$$

## 温度、比容積計算

$$T = f_{GTPH}(P, h), \quad v = f_{SVGP}(P, h)$$

但し、 $B_s$ :定数、 $G_i$ :流入リンク流量、 $G_j$ :流出リンク流量、 $h_i$ :流入リンク流量の上流ノードエンタルピ、  
 $h_j$ :流出リンクの下流ノードエンタルピ、 $Q_i$ :流入伝熱リンクの伝熱量、 $Q_j$ :流出伝熱リンクの伝熱量  
 $f_{GTPH}$ :飽和蒸気エンタルピから飽和蒸気温度を計算する蒸気関数、  
 $f_{SVGP}$ :飽和水蒸気エンタルピから飽和蒸気比容積を計算する蒸気関数、 $W_m$ :メタルの水当量

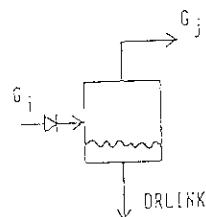
No. 15	ノードタイプ	気水分離ノード	タイプラベル	SPNODE
機能				

湿分分離を自動的に行う。

## 圧力計算

$$\frac{dp}{dt} = \beta_s (\sum_i x_i G_i - \sum_j G_j)$$

$$\text{但し}, x = \frac{h_i - h_t}{h_s - h_t}, \quad h_t = f_{SHLP}(P), \quad h_s = f_{SHCP}(P)$$



## 保有水量計算

$$\frac{dw}{dt} = \sum_i (1 - x_i) G_i - \sum_j G_{DRLINK}$$

## 水位計算

$$L = f_{Lv}(v, W), \quad \text{但し}, v = f_{SVLP}(P)$$

## ノードエンタルピ、ノード比容積

$$h = h_s, \quad v = v_s$$

## 流出液エンタルピ

$$h_w = h_s$$

No. 16	ノードタイプ	ドレンリンク	タイプラベル	DRLINK
機能				

SPNODEのドレンリンクを特定するため便宜上使用されるリンクであり、  
リンクの性質としては上流が圧力 $P$ 、エンタルピ $h_w$ のリニアな抵抗として  
扱われる。

$$G = \frac{G_o}{\Delta P_o} (P_o - P_w)$$

但し、 $P_o$ :上流圧力  
 $P_w$ :下流圧力

表 3.3.10 3.3.4 節の記号表

## 記号表

$P$ , 壓 力	(kg/cm <sup>2</sup> G)
$P_u$ , 上流圧力	(kg/cm <sup>2</sup> G)
$P_d$ , 下流圧力	(kg/cm <sup>2</sup> G)
$\Delta P$ , 差 圧	(kg/cm <sup>2</sup> )
$G$ , 重量流量	(t/h)
$Q$ , 体積流量	(m <sup>3</sup> )
又は	
伝熱量	(kcal/h)
$H$ , 高 さ	(m)
$C_v$ , 制御弁値	(—)
$v$ , 流体比容積	(m <sup>3</sup> /kg)
$h$ , エンタルピ	(kcal/kg)
$V$ , ノード容積	(m <sup>3</sup> )
$T$ , 溫 度	(°C)

### 3.3.5 船体運動計算プログラム

#### (1) 概要

船体運動計算プログラムは、広範囲な環境条件における種々の操舵および主機操作の下で、ストリップ法により、速度、傾斜、動搖加速度およびプロペラ負荷変動を計算し、船の重心の加速度、角加速度及びプロペラのトルク変動を原子炉プラント計算プログラムに与え、また、原子炉プラント計算プログラムからプロペラ回転数を受け取る。船体運動計算プログラムの計算の全体の流れ図を図3.3.18に示す。

本プログラムの特長は以下のとおりである。

- ① 操舵および主機操作によって生じる操縦運動と、波浪などの自然条件による船体運動とを統合して計算できる。
- ② 操舵機および主機操縦装置は、実航海の場合と同様にシミュレーション中の任意の時点で操作できる。また、オートパイロット機能により自動的に方位保持及びZ操舵、逆スパイラル操舵等の特殊な操舵を行うことができる。
- ③ 自然条件としては、波浪、風、潮流を与えることができる。波浪は所定のスペクトルをもつ不規則波で、同時に6つまでの平均周期、有義波高、波方向を入力することができ、これらが重ね合わされた不規則波中の船体運動のシミュレーションを行う。風および潮流の自然条件は短い周期で変動はないものとし、設定値が変更された場合には徐々に新しい設定値へ移行していく。

#### (2) 入力データ

入力データの一覧表を表3.3.11に示す。これらデータには、以下に述べるように、理論計算によって推定できないデータが含まれており、対象船型毎に予め実験を行ってデータを得ておくか、あるいは類似船のデータなどから推定しておく必要がある。

##### ① 船体要目関連

船体要目関連のデータとしては、船体要目、船体断面形状、船体水面上要目、ビルジキール要目、プロペラ要目、舵要目および操舵特性、操舵機定数およびオートパイロット定数に分類される各項目を入力する。

加速度を計算する船体上の位置の入力に用いる座標系は、図3.3.19に示すように船体中央を  $x_0 = 0$ 、中心線上を  $y_0 = 0$ 、船底竜骨を  $z_0 = 0$  とし、船首方向に  $x_0$  軸、右舷方向に  $y_0$  軸、船体上方に  $z_0$  軸をとるものとする。この座標系は入力のための便宜上の座標系であり、船体運動方程式を記述する座標系とは異なっている。

##### ② 有効馬力曲線

平水中における有効馬力(EHP)曲線で図3.3.20に示すように船速に対して与えられた曲線である。船体の喫水およびトリムが異なる毎に準備しておく必要がある。

③ プロペラ単独試験データ

プロペラ単体の特性に関する実験値で、プロペラ前進定数( $J$ )またはスリップ比( $s$ )に対して与えられたスラスト係数( $K_T$ )およびトルク係数( $K_Q$ )の値が必要である。通常はプロペラ正転で前進時のデータのみが与えられるが、本シミュレーションシステムでは出入港に伴う操船も模擬するため、図3.3.21に示すようにプロペラ正転で後進時、プロペラ逆転で前進時、プロペラ逆転で後進時を含むいわゆる4象限特性が必要である。なお、最近では理論計算によってプロペラ特性を推定できるようになってきている。

上記のデータはプロペラの没水深度が大きな場合のデータであるが、船尾喫水が小さいときは軽荷状態で波浪中を航行する場合などはプロペラが水面近くになり、ある場合には一部が露出した状態になる。このように極端に没水深度が減少した場合の計算のために図3.3.22に示すような没水深度に対するプロペラ特性の変化を求めた実験値が必要である。

④ 自航要素データ

プロペラと船体との干渉影響に関する実験値で模型・実船の相関を補正した値である。通常の馬力計算ではフルード係数( $F_n$ )に対してスラスト減少率( $1-t$ )、伴流係数( $1-w$ )およびプロペラ効率比( $\eta R$ )が与えられるが、それらのフルード数に対する変化は小さいので、ここでは計画速力における値を代表的に用いることにする。また、波浪中においても平水中の値をそのまま用いることとする。

⑤ 船尾における入射波高の減衰に関する実験データ

波浪中を航行する船体の船尾付近では船体運動によって入射波が変形され波浪が減衰する。波浪によるプロペラへの流入量の変動を評価するためにはこの減衰を評価する必要があるが、本プログラムはストリップ法を採用しているためこの影響は考慮されず、外部から与える必要がある。原子力船「むつ」については、船用炉研究委員会船体運動専門部会にて、模型実験結果に基づいて図3.3.23に示すような形の修正係数を用いることとした。

⑥ 操縦運動微係数の実験データ

操縦運動微係数については理論計算による推定方法が実用化されるまでには至っておらず、対象船型について模型実験を行い必要なデータを取得しておく必要がある。

⑦ 波漂流力の実験データ

船体運動のうち波浪との出会い周期で変動する成分についてはストリップ法による理論計算を用いることができる。また、通常、波浪中抵抗増加と呼ばれている波浪によって生じる定常的な前後力についても理論計算が可能である。しかし、通常、波漂流力と呼ばれている定常的な横力およびモーメントについては、斜め波中を航走する船体に船体に適用できる理論計算方法はないので、模型実験結果によらねばならない。波漂流力については図3.3.24に示すように波長と波方向をパラメータとしてデータを準備しておく必要がある。

### ⑧ 風圧力の実験データ

対象船の水面上の形状に対する風圧力およびモーメントについて図3.3.25に示すような実験データが必要である。なお、文献資料に示されている実験データを整理した結果を用いて推定する方法もある。

### (3) 波浪外乱の取扱い

#### 1) 波浪外乱の与え方

波浪外乱の与え方としては、内蔵スペクトラムを用いる方法と、実験にて計測した波浪スペクトラムを再現して用いる方法が用意されている。

##### ① 内蔵スペクトラム

一般的なシミュレーションシステムの利用では、波浪のスペクトルをその都度与えるのではなく、標準的なスペクトラムを内蔵しており、これを用いることとしている。

プログラムに内蔵している海洋波のスペクトラムはPierson-Moskowitz型のスペクトラムで、波浪統計データを用い易いように有義波高と平均波周期を与える形に書き換えた次のようなISSC(国際船体構造会議、1964年)型のスペクトラムである。ISSCスペクトラムは船舶の耐航性能の分野で最も広く使用されている。

$$S'(\omega) = 0.11H_v^2\omega_v^{-1}(\omega/\omega_v)^{-5}\exp[-0.44(\omega/\omega_v)^{-4}]$$

ただし、  $H_v$  : 観測波高 (有義波高とする) (m)  
 $\omega_v$  :  $\omega_v = 2\pi/T_v$  (1/sec)  
 $T_v$  : 観測波周期 (sec)

(3.3.59)

ISSCスペクトラムの形を図3.3.26に示す。与えられた波スペクトラムを基にシミュレーションにおいては次のように不規則波の時系列を発生させる。

$$\xi(t) = \sum \sqrt{2S'(\omega_i)\Delta\omega_i} \cos(\omega_i t + \epsilon_i)$$

ただし、 $\sqrt{2S'(\omega_i)\Delta\omega_i}$  : 成分波振幅  
 $\epsilon_i$  : 位相 (ランダムに設定)  
 $i$  : 成分波の番号

(3.3.60)

##### ② 計測した波浪の再現スペクトラム

シミュレーション手法の検証等に用いるために、実海面にて計測された波浪を再現して用いる手法を用意した。この場合には次のような手順にて実施する。

- a) 波高計または波浪計を用いて時々刻々の波面変位を連続的に記録する。
- b) 取得したデータをFFTアナライザ等を用いてスペクトル解析し、周波数領域で振幅と位相を得る。
- c) 得られたデータを適当な周波数に分割し、船体運動プログラムの入力とし

て前記の不規則波発生ルーチンにおける成分波振幅と位相を置き換えて波浪の時系列を得る。

すなわち、計測した波データを一旦周波数解析しそれを再合成して用いることになるので、シミュレーションの時系列波形と計測波形を時系列で一致させることはできないが、スペクトラムの形は一致させることができる。したがって、有義波高、平均波周期、スペクトラムのバンド幅などの統計的性質は一致する。

## 2) 多方向波および短波頂の取扱い

プログラムでは最大6方向波が入力できる。通常は、5種類の風浪と1種類のうねりに対してそれぞれの有義波高、平均周期、波方向を与えることとなる。短波頂波は次式のように多方向波の重ね合わせで表す。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sqrt{2S'(\omega_i, x_k) \cdot \Delta\omega_i \cdot \Delta x_k} \cdot \cos(\omega_i t + \epsilon(\omega_i, x_k)) \quad (3.3.61)$$

したがって、短波頂波に対応させる場合は、方向成分に対する重みを考慮して波高を与える必要がある。例えば、方向分布が $\cos^2 x$ の場合には方向スペクトラムは次式(3.3.62)による。

$$S'(\omega, x) = S'(\omega) \cdot (2/\pi) \cos^2 x \quad (3.3.62)$$

このとき $x_k$ 方向成分波に対する重みは次のように与える。

$$\sqrt{(2/\pi) \int \cos^2 x dx}, \text{ 積分区間 } [x_k - \Delta x_k/2, x_k + \Delta x_k/2] \quad (3.3.63)$$

## 3) 外乱変化への対応

環境外乱としてシミュレーションシステムに与えることができる項目は以下の通りである。

波浪：有義波高、波周期、波方向 を最大6組

風：風速、風向

潮流：流速、流向

これらの自然現象である環境外乱が短時間に急速に変化して、船体運動が不連続に変化することは考えにくい。環境外乱に変化が生じた場合にシミュレーションでは環境外乱を特徴づけるこれらの数値を段階的に変化させていく。

### ① 波浪条件の変化

波浪は有義波高、波周期、波方向で定義される1つの波浪がさらに25個の成分波により構成されている。波浪条件を変化させる場合には、シミュレーションの計算ステップ毎にある波浪の1つの成分波を順次入れ換えて新しい波状態に徐々に移行させる。従って、6組の波浪からなる波浪条件が完全に移行するためには150ステップを要する。

### ② 風および潮流の変化

風および潮流の条件の変化時間は、波浪条件の変化時間と同じとした。すなわち、現在値から150ステップ後に新しい設定値に到達する。

## (4) 船体運動シミュレーションに必要な前処理

## 1) 船体運動応答関数

シミュレーションでは不規則波中での船体運動の時系列を模擬しなければならないが、波浪中船体運動プログラムで船体断面に作用する流体力を逐一計算していくには、とてもリアルタイム性を確保することはできない。そこで、シミュレーション時に発生させる波浪時系列と、予め計算した船体運動の応答関数との線形重ね合わせによって不規則波中の船体運動応答を求める方法を用いた。予め用意する船体運動応答関数は、規則波中の船体運動応答関数であり船体運動専門部会で開発されたプログラム<sup>13)</sup>を用いて求め、ファイル化しておく。

この前処理段階での波浪中の船体運動の計算には、線形ストリップ法を用いる。線形ストリップ法は、物理的直感により導き出されもので、理論的な首尾一貫性にかける点はあるが、実験結果との対応も比較的良好であるため、実用的な方法として現在最も広く用いられている計算方法である。ストリップ法<sup>14), 15), 16), 17)</sup>は、船体を長手方向に輪切りにして多数個のストリップに分割し、それぞれのストリップは2次元柱状体から切り出されたものとしてその断面に作用する流体力を2次元的に求め、それらを船体の長手方向に積分して3次元船体の流体力とする方法である。2次元流体力の計算方法としては船体断面をルイスフォーム<sup>15)</sup>に近似して求める方法が一般的であるが、ルイスフォームでは断面の近似度が不十分な場合は2次元特異点分布法<sup>18)</sup>が用いられる。本シミュレーションプログラムではこの計算に必要な船型データを入力で与えている。当該部分の計算法の詳細は参考文献13)を参照されたい。

応答関数ファイルの内容は、6成分の船体運動の振幅および位相角、および抵抗増加係数である。これらの値を以下の範囲で求めておく必要がある。

船速 :  $F_n = 0 \sim \text{計画 } F_n$  [0.025~0.05刻みで 12点程度]

波長 :  $\lambda/L = 0.2 \sim 3.0$  [0.1 ~0.25刻みで 20点程度]

波高 :  $h_w/L = 1/50$  [線形計算なので代表値として 1点]

波方向 :  $\chi = 0 \sim 180 \text{ deg}$  [15~30 deg 刻みで 13点程度]

ただし、 $\lambda$  : 波長、  $h_w$  : 波高、  $L$  : 船長、  $F_n$  : フルード数、

$F_n = U/\sqrt{gL}$ 、  $U$  : 船速、  $g$  : 重力の加速度

## 2) 不規則波中抵抗増加および漂流力

不規則波中における船体の平均抵抗増加量は、実用的には次のような波スペクトラムと抵抗増加の応答関数の重ね合わせによって求めることができる。

(3.3.64)

$$\tilde{R}_{Av} = \int S'(\omega) \cdot (R_{Av}/h_w^2) d\omega$$

この計算は時々刻々行う必要はないので、シミュレーションに先立ち予め計算結果をファイルしておく。

波漂流力  $\text{YWD}$  およびモーメント  $\text{NWD}$  についても同様に計算してファイル化しておく。ただし、船速の影響までは考慮できないのでパラメータは平均波周期と波方向のみとする。

### (5) 原子炉プラント計算プログラムとの接続

#### 1) 加速度の原子炉モデルへの出力

船体運動の影響と重力加速度を考慮した加速度を計算したい船体上の任意の点  $P_B (x_{B0}, y_{B0}, z_{B0})$  の座標は図 3.3.27 (a) の座標系で与える。(a) の座標系は、船体の喫水やトリムに関係しないので船体上の位置を指定する場合に都合が良く、原子炉プラントプログラム側での機器および配管の位置はこの座標系で与えられている。

一方、波浪中の船体運動を計算する座標系は図 3.3.27 (b) であるので加速度の受け渡しのためには下記のように位置の変換を必要とする。

$$\left. \begin{array}{l} x_B = x_{B0} \\ y_B = y_{B0} \\ z_B = d_m - z_{B0} - \tau (x_{B0} / L) \end{array} \right\} \quad (3.3.65)$$

ただし  $d_m$  : Midship の喫水 (m)  
 $\tau$  : トリム (m)  
 $L$  : 船長 (m)

船体運動計算用の座標系における重心の座標を  $(x_G, 0, z_G)$  とし、 $i$  番目の船体上の  $(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$  における 3 軸加速度は次式により求められる。

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_{xi} = \{\ddot{\eta}_1 - y_{Bi} \cdot \ddot{\eta}_6 + (z_{Bi} - z_G) \cdot \ddot{\eta}_5\} \cdot \cos(\eta_5) \\ \qquad \qquad \qquad + g \cdot \cos(\eta_4) \cdot \sin(\eta_5) \\ \alpha_{yi} = \{\ddot{\eta}_2 + (x_{Bi} - x_G) \cdot \ddot{\eta}_6 - (z_{Bi} - z_G) \cdot \ddot{\eta}_4\} \cdot \cos(\eta_4) \\ \qquad \qquad \qquad - g \cdot \cos(\eta_4) \cdot \sin(\eta_4) \\ \alpha_{zi} = \{\ddot{\eta}_3 - (x_{Bi} - x_G) \cdot \ddot{\eta}_5 + y_{Bi} \cdot \ddot{\eta}_4\} \cdot \cos(\eta_4) \\ \qquad \qquad \qquad - g \cdot \cos(\eta_4) \cdot \cos(\eta_5) \end{array} \right\} \quad (3.3.66)$$

ただし、 $\ddot{\eta}_j$  : 船体重心の動搖加速度 ( $j=1 \sim 6$ )

$(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$  : 指定点  $i$  の座標

$(x_G, y_G, z_G)$  : 船体重心の座標 ( $y_G=0$ )

$g$  : 重力加速度

指定位置における横揺れ、縦揺れ、船首揺れは重心におけるそれらの値  $\eta_4, \eta_5,$

$\eta_6$  と同じである。

表 3.3.11 船体運動計算に必要な入力データ

(1)船体要目関連	
船体要目	全長、垂線間長、型幅、最大型幅、型深、喫水、トリム、排水量、浸水面積、方形係数、重心位置、重心高さ、メタセンター高さ、横搖周期、横搖の等価線形減衰係数、縦搖慣動半径、船首搖慣動半径、横搖慣動半径
船体断面形状	船体断面形状データの入力個数、オーディネイト座標、断面の分割個数、水線面半幅、断面の喫水、水面下断面積
船体水面上形状要目	水線上正面投影面積、水線上側面投影面積、上部構造物の側面投影面積、船首から側面投影図図心までの距離、ALの水線を除く周長
ビルジキール要目	ビルジキール幅、ビルジキール後端、ビルジキール前端
プロペラ要目	プロペラ直径、プロペラピッチ、APからプロペラ中心までの長さ、プロペラ位置
舵要目および舵特性	舵高さ、舵幅、舵位置
操舵機定数およびオートパイロット定数	操舵機の時定数、最大操舵追従時間、オートパイロット時の設定方位、オートパイロットゲイン、デッドバンド
(2)実験データ	
有効馬力曲線	図 3.3.20 参照
プロペラ単独試験データ	図 3.3.21、図 3.3.22 参照
自航要素データ	
船尾における入射波の減衰に関する実験データ	図 3.3.23 参照
操縦運動微係数の実験データ	
波漂流力の実験データ	図 3.3.24 参照
風圧力の実験データ	図 3.3.25 参照

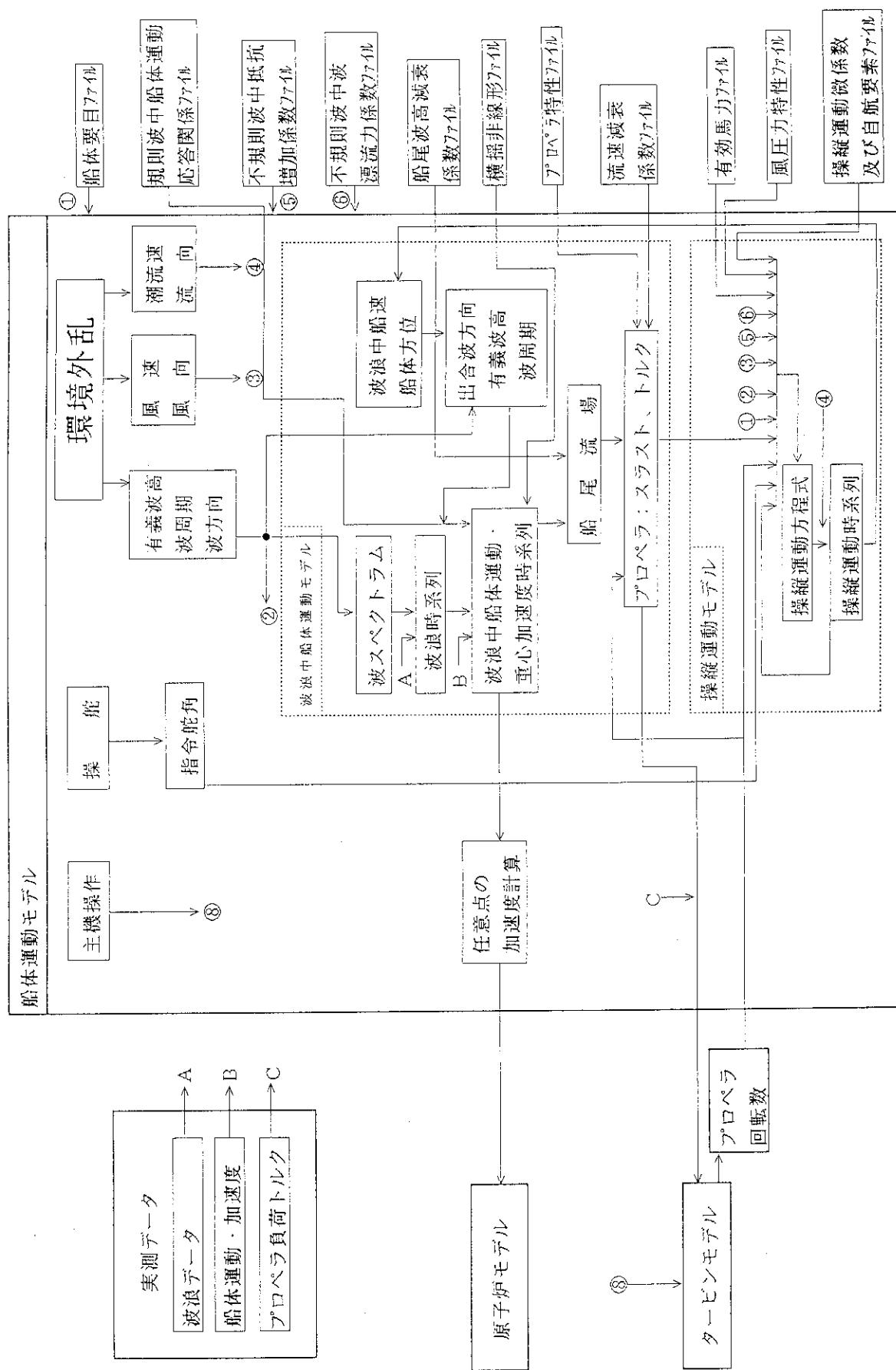


図 3.3.18 船体運動プログラムフローーチャート

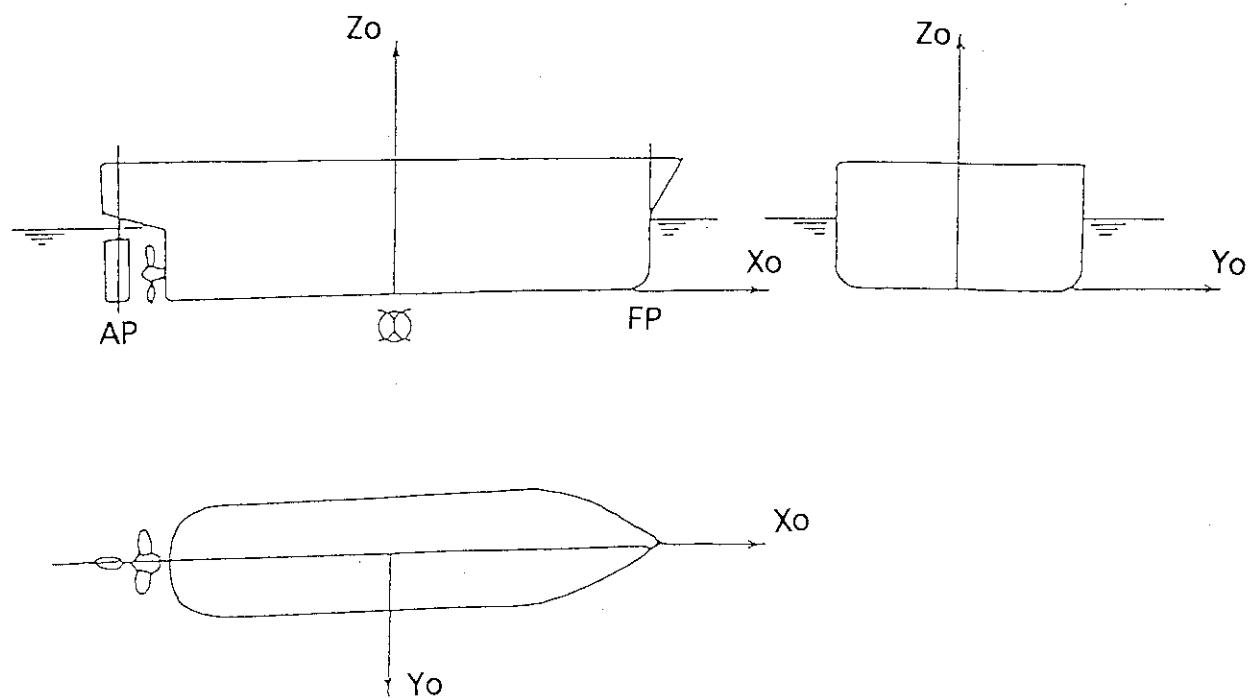


図 3.3.19 船体要目データ入力用座標系

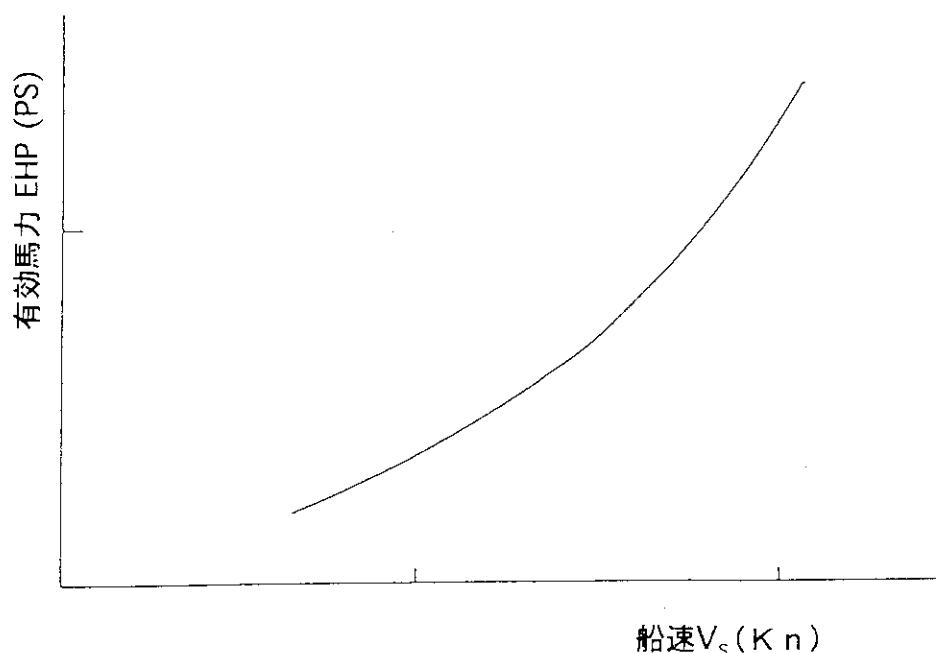


図 3.3.20 船速・有効馬力曲線

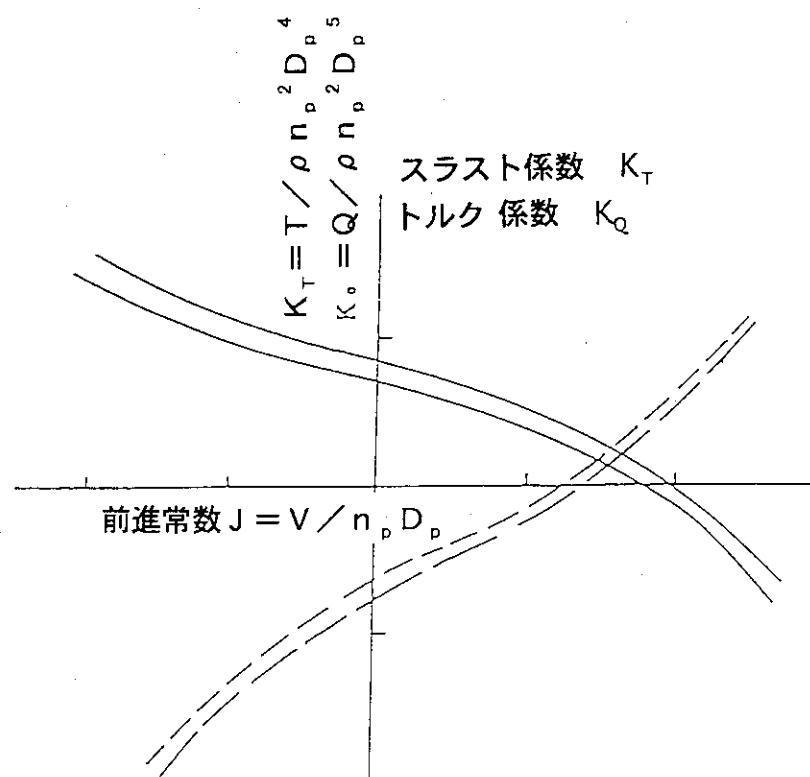


図 3.3.21 プロペラ単独試験データ

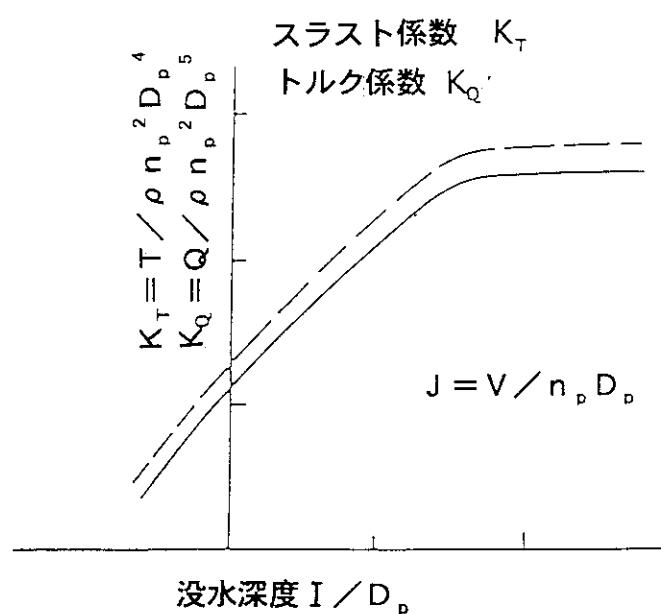
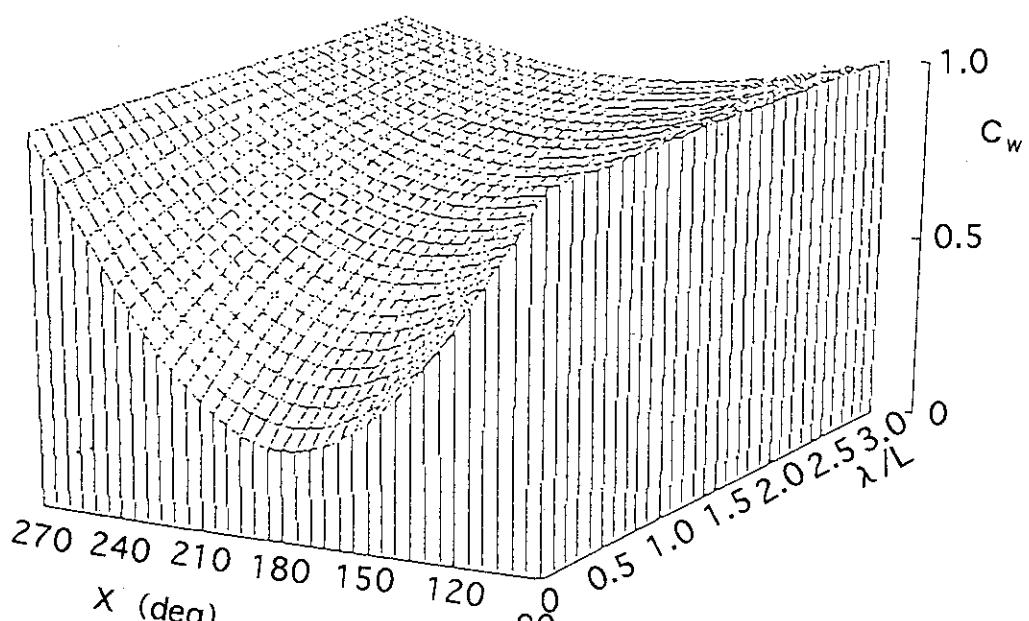
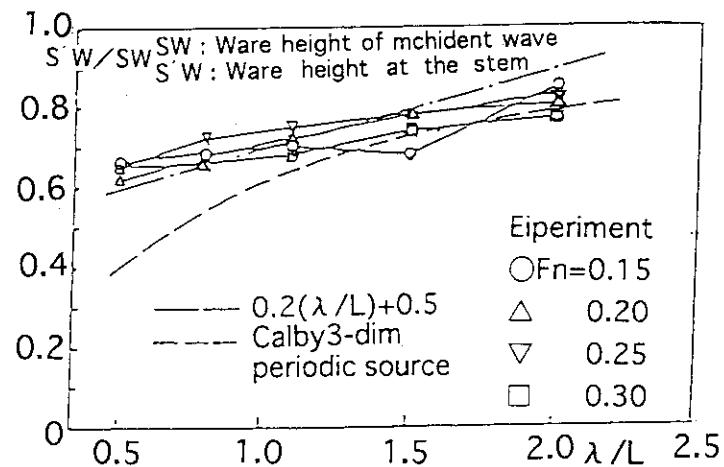


図 3.3.22 プロペラ没水深度変更試験データ



$$C_w = 1 - 0.754 \cdot |\cos X| \cdot e^{-0.634 \lambda/L}$$

図 3.3.23 船尾波高および流速減衰実験データ

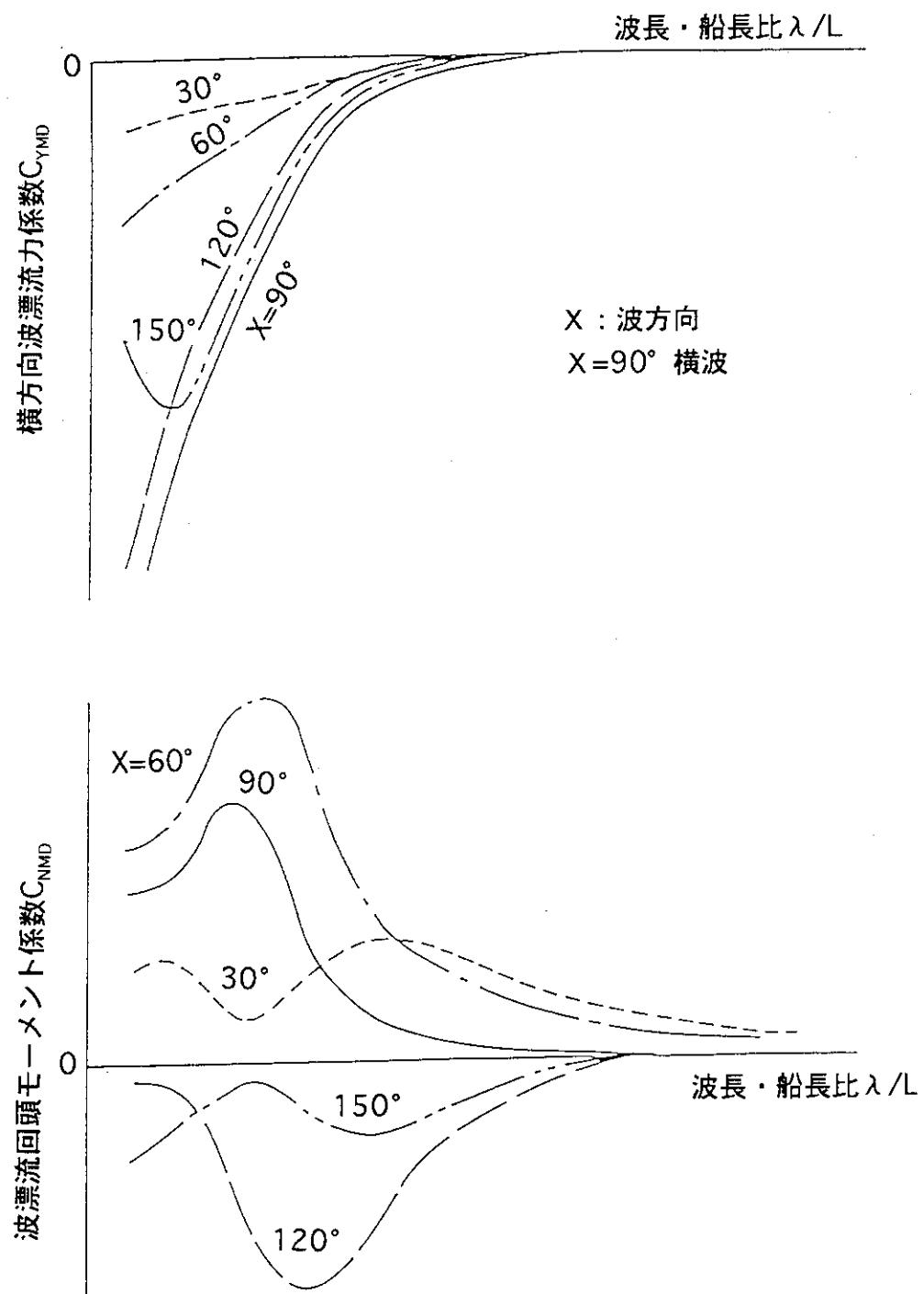


図 3.3.24 波漂流力係数実験データ

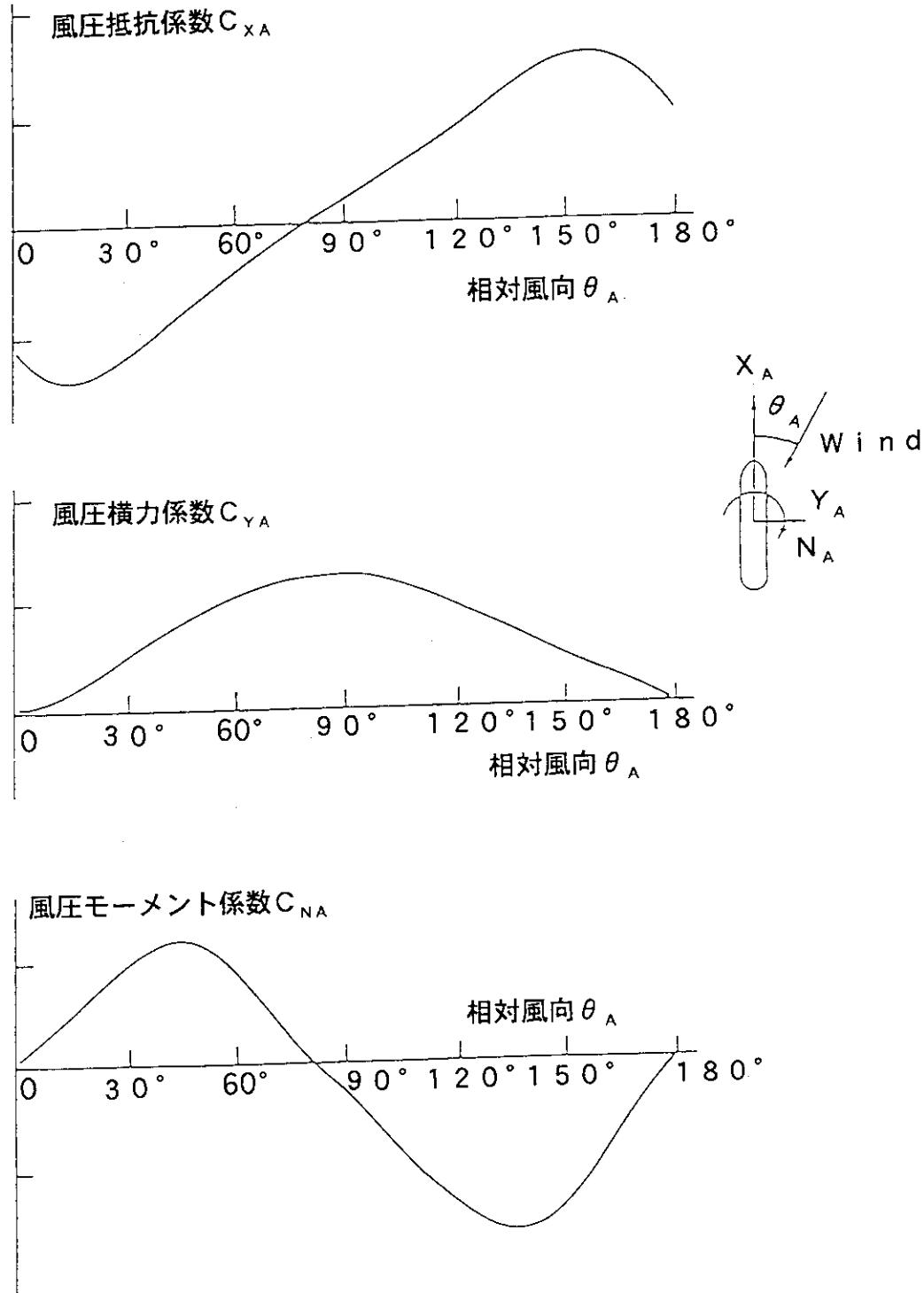


図 3.3.25 風 壓 力 実 験 デ 一 タ

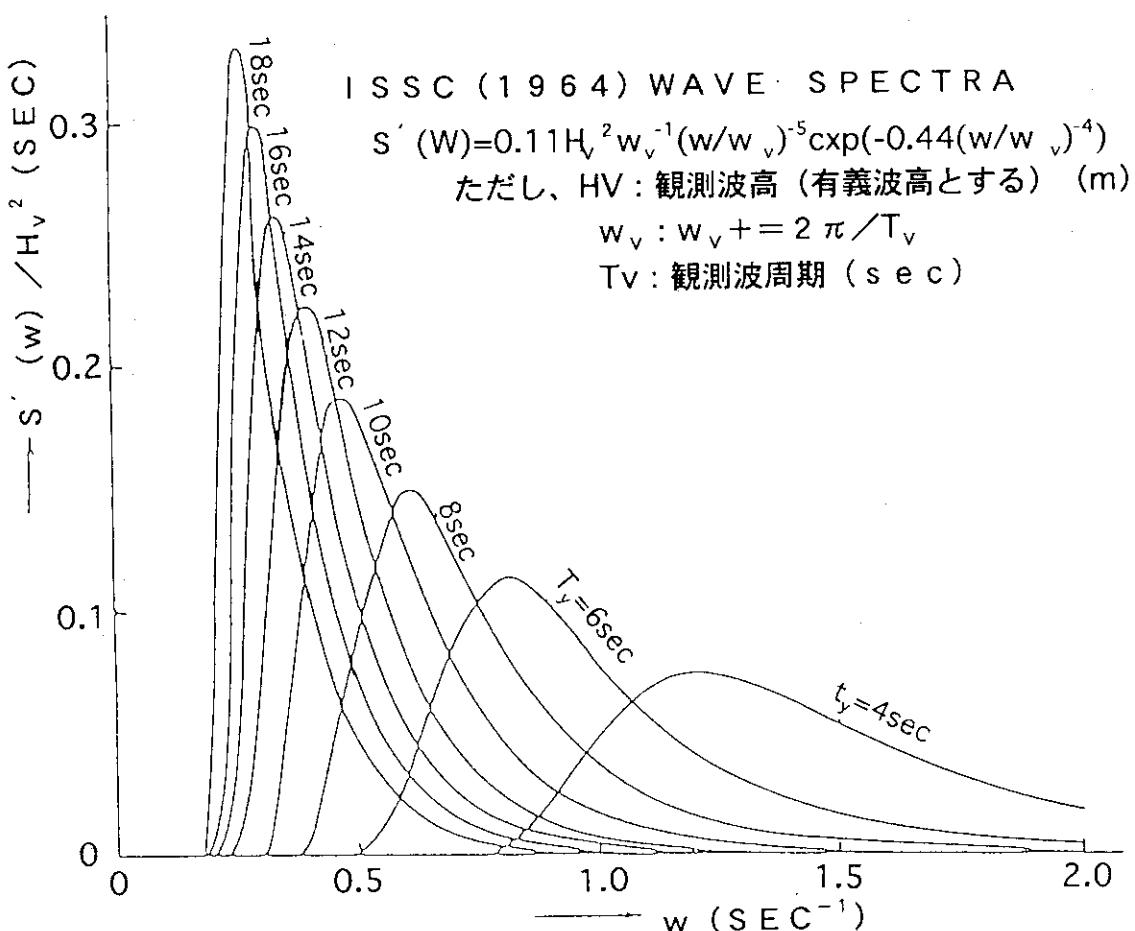


図3.3.26 ISSC スペクトラム

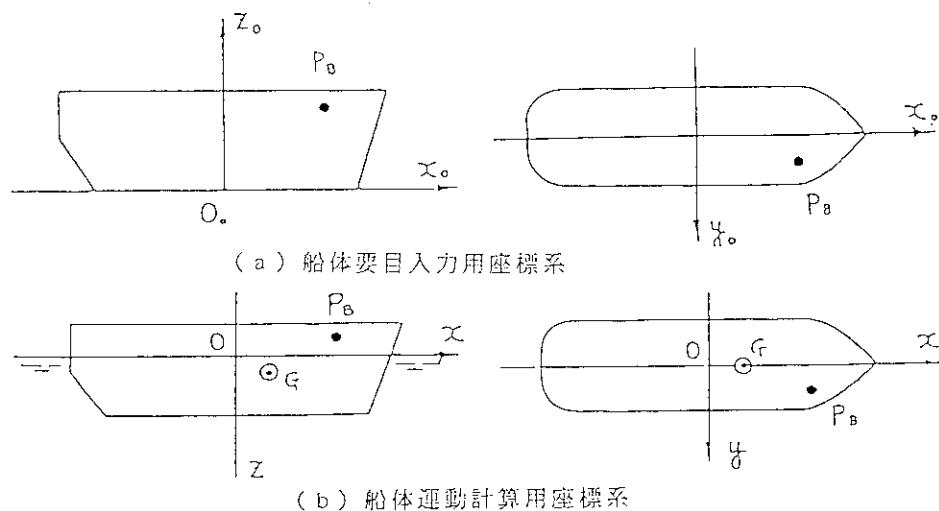


図 3.3.27 船体要目入力用座標系と船体運動計算用座標系

## 2) プロペラ負荷変動のタービンモデルへの出力

船体運動モデルと原子炉プラントモデル間のプロペラ軸部でのデータ交換の概念を図 3.3.28 に示す。船体運動モデルから原子炉プラント側のタービンモデルへはプロペラ負荷トルク  $Q_p$  を出力する。タービンモデルから船体運動モデルへはプロペラ回転数  $n$  を出力する。プロペラ軸回転数はタービンモデル部の軸回転運動方程式により決定される。

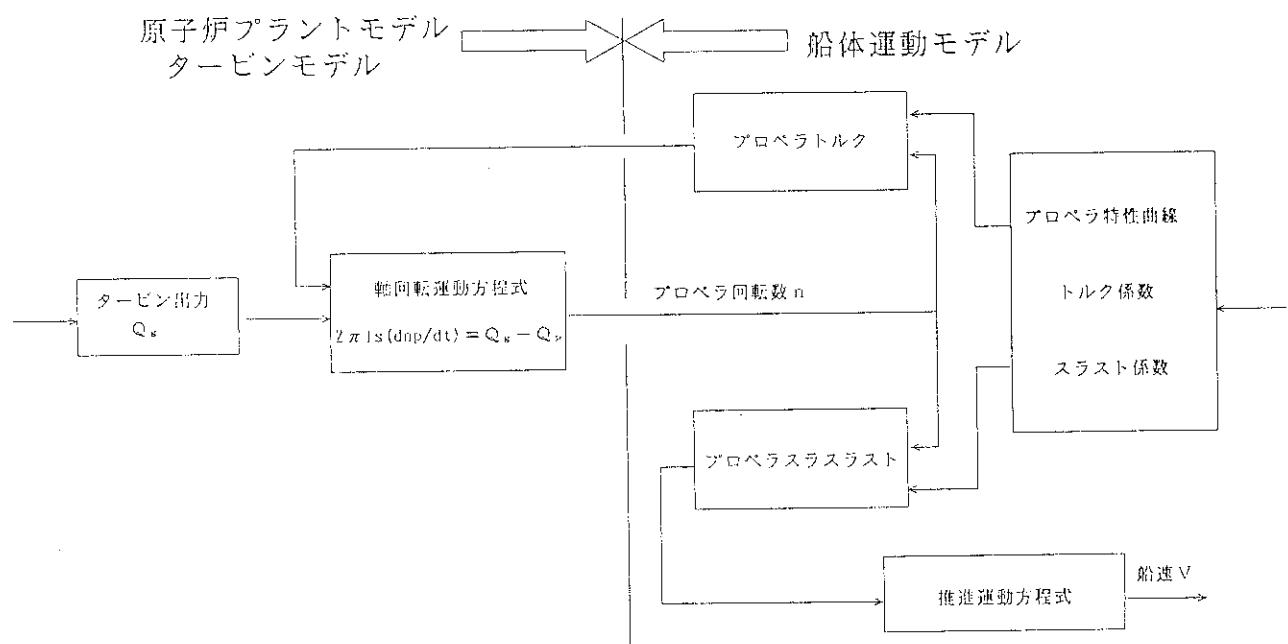


図 3.3.28 プロペラ負荷変動とプロペラ回転数のモデル間でのデータ交換概念

### 3.3.6 大LOCA計算時一次冷却系モデル

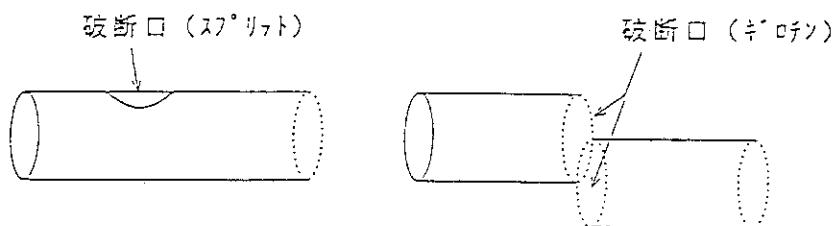
#### (1) モデルの概要

シミュレータの一次冷却系モデルは、一次冷却配管の大きな破断が生じたときには、原子炉プラントの挙動を正しく計算することができないので、破断口径がある一定値を超えた場合には特別な調整を施した大LOCA専用計算に切り替えている。本シミュレータは基本的な方針として物理モデルに基づくモデル化を行い、結果をあわせるための調整は行わないが、大LOCAに限って詳細計算プログラムによる計算結果に調整した特殊なシミュレーションを行うこととした。ここでは「むつ」専用の大LOCA計算用モデルについて記述する。

「むつ」モデルでは破断のサイズによりLOCAを次のように分類し、大LOCAに相当する88.9mm以上の破断サイズが与えられた場合に大LOCA専用の計算手法を用いる。陸上PWRの安全解析、実験等では $0.0929\text{m}^2(1\text{ft}^2)$ をしきい値としてこれ以上の破断事故を大LOCAとして扱う場合が多い。本シミュレータでは一般的な陸上PWRの一次冷却水保有量としきい値破断面積の比を保存するように「むつ」プラントの破断面積のしきい値を定めた。

破断サイズ < 88.9mm : 小・中LOCA 形状 スプリット

破断サイズ  $\geq 88.9\text{mm}$  : 大LOCA 形状 ギロチン両端破断



また、「むつ」大LOCA専用計算は計算の安定性を確保するために一次冷却系の炉心部分を1ノードとした分割モデルを用いる。このため、他の通常シミュレーションモデルとは別の初期状態を用意している。

大LOCA計算では、事象をプローダウン過程と再冠水過程とに分けてモデル化を行った。ここで、原子炉設置許可申請書に記載されている「むつ」炉の大LOCA時の事象の流れを簡単に示す。まず、破断事故発生後、炉心圧力は急速に

低下して、格納容器内圧力とほぼ等しくなり、プローダウンが終了する。プローダウン後の過渡変化は緩やかで、高圧注入系及び低圧注入系からの注水により原子炉容器下部プレナム部に冷却水がたまり始め、やがて炉心底部まで水位が上昇する（リフィル期間）。これ以後は、炉心は下部から再冠水を始め水滴を巻き込んだ蒸気流により冷却される。大破断計算のフローを図3.3.29に示す。

### (2) プローダウン過程

プローダウン過程は、破断発生から炉心ノードの液位がゼロ以下となり、ダウンカマーに冷却水が存在する状態までとした。基本的には、3.3.2一次冷却系統計算プログラムで示した計算方法と同じであるが、ループの運動方程式の扱いが異なる。通常のモデルでは一次系は閉ループとし仮定してループの運動方程式を解いているが、ここでいう大LOCAは、一次冷却系配管のギロチン破断を想定しており、破断点を境にして一次冷却系は開ループとなるので、破断ループの運動方程式は解かない。破断ループの流量は、ギロチン破断配管両端からの破断流量をHenry-Fauske<sup>6)</sup>の相関式を用いて計算し、この流量を境界条件として体積流量保存式から計算する。健全側ループの流量は通常モデルと同様にして求める。

### (3) 再冠水過程（リフィル及び再冠水）

プローダウン過程終了後、冷却水が炉心下部に到達し、炉心が再冠水して低圧注入系による崩壊熱の除去が準定常的に行える段階までの過程を再冠水過程とした。具体的には、以下の条件を満たした時に再冠水過程に移行する。

- ・圧力が20.0kg/cm<sup>2</sup>g以下である。
- ・炉心液位グループの液面が下部プレナムにある。
- ・下部ダウンカマ平均ボイド率が0.8以下である。

#### ① 再冠水流量

通常、一次冷却系圧力と格納容器圧力がほぼ均衡した状態から再冠水過程に入る。このため、ループの流れは破断流支配から、安全注入によって生じたダウンカマと炉心との間の静水圧支配へ変化する。この前提のもとに再冠水流量は破断ループの静水圧差の関数として求める。

ダウンカマ部と下部プレナム間の再冠水流量は次式(3.3.67)より計算する。

$$C \frac{\zeta G c, in^2}{2 g \gamma A} = \Delta P \quad (\text{破断ループの静水圧差}) \quad (3.3.67)$$

$\zeta$  : 破断ループの抵抗係数

$G c, in$  : ダウンカマ部 → 下部プレナム流量

$\gamma$  : ダウンカマ部水比重量

$A$  : ダウンカマ部 → 下部プレナムパス面積

ここで、Cを詳細な大LOCA計算結果から得られた再冠水速度を近似するよう調整した。

## ②破断流量

破断流量の計算に用いる一次冷却系圧力は破断配管口径分の静水圧を考慮する。

再冠水過程の破断蒸気流量は一次冷却系圧力と格納容器圧力との差の関数としてHenry-Fauske相関式テーブルから求める。このテーブルは $2\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ 以下の圧力差においてはHenry-Fauske相関式からの外挿である。

破断水流量は注入流量、再冠水流量及び破断蒸気流量のバランスより以下のように求める。

- $G BL, calc$  : 破断流量計算値。この値は一次冷却系破断点圧力と格納容器圧力との差の関数として破断蒸気流量と同様の方法で求める。

- $G BL, calc >$  全注入水流量の場合。破断水流量は、注入流量と再冠水流量、破断蒸気流量のバランスから以下のように決まる。

$$\text{破断水流量} = G_{in,L} - G_{BG} - G_{c,in}$$

$G_{in,L}$  : 注入流量

$G_{BG}$  : 破断蒸気流量

$G_{c,in}$  : 再冠水流量

$$\text{ただし、 } G_{c,in} = \text{Min}(G_{c,in}, G_{in,L})$$

- $G_{calc} <$  全注入量の場合。

$$\text{破断水流量} = \text{Min}(G_{in,L} - G_{BG} - G_{c,in}, G_{BL, calc})$$

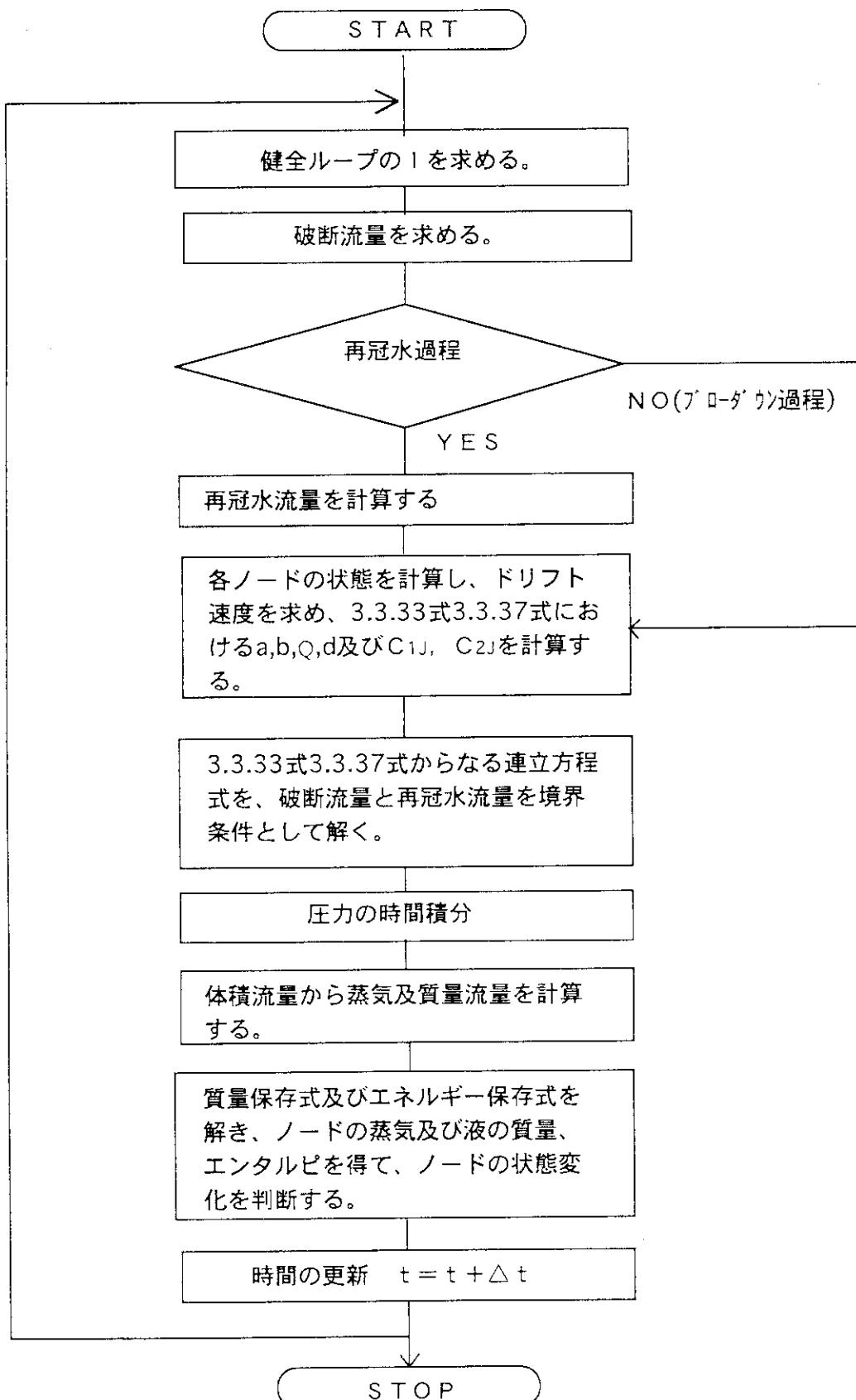


図 3.3.29 大破断 LOCA 計算フロー

### 3.4 原子力船「むつ」プラントデータ

原子力船「むつ」原子炉プラントを模擬するためのプログラムの全体概念図を図3.4.1に示す。原子炉プラントプログラムは、9つのグループに分類して記述され、互いに関連しあっている。前述したように、炉心、一次冷却系統および蒸気発生器は、固有のプログラムによって計算し、他の系統は原則的に汎用演算要素で記述するが、格納容器と電気系統は、汎用演算要素による記述に適さないため、FORTRAN言語で記述され、「むつ」シミュレーションモデルに固有のプログラムとして存在する。

一次冷却系統プログラムは、主要な機器とこれらを接続する配管より構成される。一次冷却系統に接続される他の系統は補助系統プログラムにまとめた。

一次冷却系統計算プログラムと蒸気発生器計算プログラムの境界は、蒸気発生器伝熱管の一次側が一次冷却系統に属し、二次側が蒸気発生器に属する。

蒸気発生器計算プログラムには、蒸気発生器二次側と蒸気発生器安全弁、主ダンプ弁までを含み、これらを除いた主蒸気管系統以降の各機器および各系統ならびにプロペラ軸を含めた推進系統は、二次系統・推進系統モデルで取り扱う。

格納容器プログラムは、漏洩した一次冷却材または二次側の蒸気および水の状態量を各プログラムから受け取り、格納容器内圧力を計算する。

一次系統、二次系統および推進系統における温度、圧力、水位、流量等の状態変数は以上の系統計算プログラムで計算するが、これに関連する各種プロセスの制御に係る動作は、プロセス制御系プログラムおよび安全保護系統プログラムで扱う。この2つのプログラムは、汎用演算要素POLで記述される。

この他に、各主発電機の起動、停止による発電状況、船の運航状態による消費電力の計算等を電気系統プログラムが管理する。

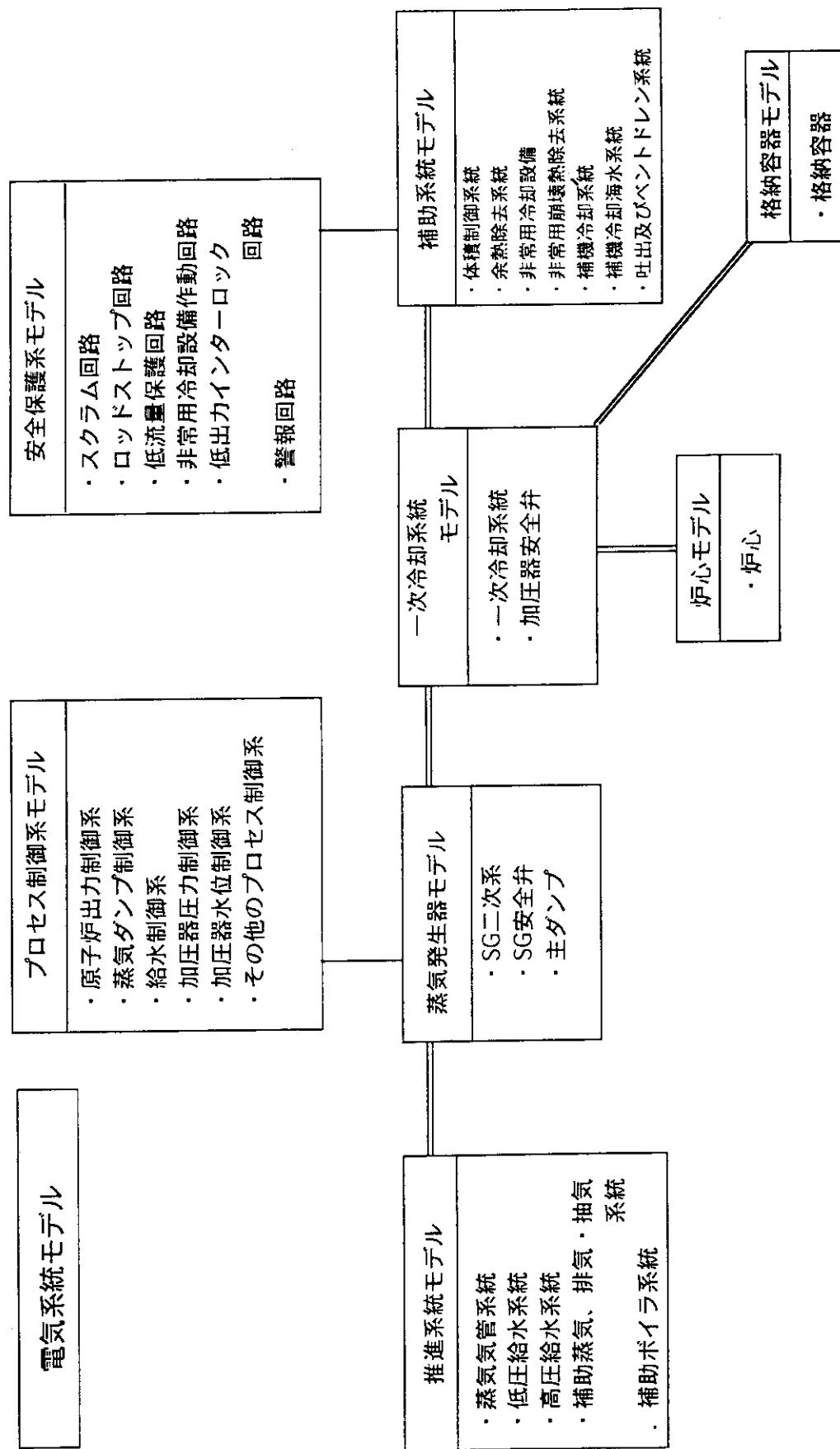


図 3.4.1 原子炉プラントプログラムの全体概念図

### 3.4.1 炉心

#### (1) 基本構成

炉心計算プログラムは基本的に軸方向1次元2群拡散方程式である。原子力船「むつ」炉心を軸方向に30分割した。このうち、上下それぞれ2要素は上下部反射体領域に対応しており、残りの26要素は燃料有効長に対応している。メッシュ幅は約4cmの幅で概ね等間隔である。メッシュ幅が完全に等間隔でない理由は、部分長バーナブルポイズンの末端部とメッシュ境界を一致させるためである。

2群エネルギー分割は高速中性子と熱中性子に対応している。高速群と熱群の境界は0.625eVである。

#### (2) 基本核定数

炉心モデルに与えられる基本核定数は炉心横方向の中性子束分布を軸方向に反映させるために、予め求められた横方向中性子束分布を重みとして横方向に縮約された断面積が用いた。

横方向バックリングは予め求めた横方向中性子束分布より計算されるが、最終的にはシミュレーションシステムにより計算される臨界制御棒位置が実測値と一致するように調整した。

#### (3) 核定数の補正

##### ① 制御棒の挿入

制御棒挿入量に応じて、制御棒が挿入される軸方向メッシュの吸収断面積 $\Sigma a_1$ および $\Sigma a_2$ を補正した。補正量は、制御棒挿入時および引抜き時の横方向2次元計算を実施して制御棒価値を求め、これに横方向計算による当該制御棒の全挿入時の価値が一致するよう定めた。

##### ② 減速材密度

減速材密度による巨視的断面積補正量は、軸方向減速材密度分布より水分子の数密度分布 $N_w$ を計算し、 $N_w$ の基準値からの偏差 $\Delta N_w$ に水の微視的断面積 $\sigma$ を乗じることにより求める。 $N_w$ の基準値は基準冷却材平均温度(273.5°C)における数密度とした。

##### ③ ドップラ効果

ドップラ効果による高速群吸収断面積の補正是、出力 $P$ の関数として以下の式により計算される。

$$\Delta \Sigma a_1 = a_1 (\sqrt{P} - 1) + a_2 (P - 1)$$

ここで $a_1$ および $a_2$ はドップラ効果補正係数であり、以下の値に設定した。

$$a_1 = 2.000e-4, \quad a_2 = 1.454e-4$$

また、過渡変化の状態にある炉出力と燃料温度には時間的な遅れが生じることから、各メッシュのドップラ反応度計算用の出力である $P$ は15秒の時定数を持つ一次遅れを考慮して求める。

##### ④ キセノン濃度分布

キセノン濃度による巨視的断面積補正量は、軸方向キセノン数密度分布にキセノンの微視的吸収断面積 $\sigma a$ (高速群および熱群)を乗じて求めた。

## 4) 疑似三次元出力分布

疑似3次元出力分布計算では、軸方法1次元と水平方向2次元に変数分離を行い、その積にて燃料集合体単位で出力分布を求める。水平方向2次元の出力分布は詳細な核計算プログラムSTEADY-SHIP<sup>19)</sup>により得られた水平方向出力分布に基づき定められた定数行列A(x,y)を用いて計算した。「むつ」用に用意した定数行列による簡易計算結果と詳細な核計算プログラムSTEADY-SHIPの結果の差は最大で±4%である。

出力領域中性子束検出信号は、得られた出力分布に基づき、核計装応答特性を考慮して計算する。

## 5) 売心DNBR計算

本シミュレータで用いいる炉心DNBR計算は、詳細熱水力計算プログラムTHINC-Ⅲの多数の計算結果を整理して得られる「エンタルピ上昇補正係数」及び「質量速度補正係数」を用いて高温水路の熱水力特性を求める。今回用いた「むつ」用の「エンタルピ上昇補正係数」及び「質量速度補正係数」を図3.4.2及び3.4.3に示す。図の補正係数の上限を包絡する実線を補正係数として使用した。この結果、簡易計算結果と詳細熱水力計算プログラムTHINC-Ⅲの計算結果の差は+1%~-2%の範囲に収まった。

### 3.4.2 一次冷却系

#### (1) 概要

原子力船「むつ」の一次冷却系統ループの概略配置図を図3.4.4及び図3.4.5に示す。「むつ」プラントは2ループ構成であり、各ループに蒸気発生器および一次冷却水ポンプが設備されている。また、一方のループには加圧器が接続され、一次冷却系の圧力を制御している。加圧器と一次冷却系の高温側配管はサージ管で連結されている。また、一次冷却系の低温配管から分岐したプレイ系が加圧器気相部に接続されている。1号蒸気発生器は船首側に、2号蒸気発生器は船尾側に配置され、加圧器は左舷側に配置されている。

一次冷却系統および主要構成の設計主要目は表3.4.1に示すとおりである。

#### (2) 一次冷却系統の分割

一次冷却系統の分割を図3.4.6に示す。一次冷却系統の分割は流体ノードと流体リンクにより行う。各ノードには船体に固定した座標系でのノード代表点の3次元位置が与えられ、各リンクの位置は接続する2つのノードの接続点の3次元座標が与えられている。

一次冷却系統の構造材の分割を図3.4.7に示す。構造材の分割はメタルノードを設定することで行う。燃料は、被覆管を1領域で、燃料を2領域で扱った。

#### (3) 各部のデータ

##### 1) 流体リンク

ドリフトフラックスモデルとしては、垂直管モデルを配管部分に適用する。垂直管の流動マップは図3.3.11に示す。各種相関式と適用範囲は表3.3.5に示す。炉心ではYehのボイド上昇モデル<sup>4)</sup>から計算されるドリフト速度、ダウンカマではWilsonのボイド上昇モデル<sup>5)</sup>から計算されるドリフト速度を用いる。原子炉圧力容器とホットレグ、原子炉圧力容器とコールドレグとの結合は水平分離流モデルによるドリフト速度を用いる。

##### 2) 一次冷却水ポンプ

一次冷却水ポンプの特性データを表3.4.2に、吐出流量-吐出水頭曲線を図3.4.8に、吐出流量-損失トルク曲線を図3.4.9に示す。

##### 3) メタルノード

原子炉容器の構造材は流体ノードにあわせて、上部プレナム、上部ダウンカマ、下部ダウンカマ、下部プレナム、トップヘッドの5領域に分割した。

炉内構造物は、原子炉圧力容器のトップヘッドの炉内構造物をメタルノード63で、上部プレナムの制御棒をメタルノード62で、下部プレナムの炉内構造物をメタルノード61で表現する。

配管部の構造材分割も流体ノードと同一の分割とする。

燃料棒は、軸方向には流体ノードと一致した分割とし、径方向には3分割とする。外側から被覆管、酸化ウラン外周部、酸化ウラン中心部とする。燃料領域の外周部と中心部は体積が等しくなるように分割した。被覆管と燃料とのギ

ヤップは接触熱抵抗で与える。

#### 4) 伝熱リンク

燃料棒表面の熱伝達を表す伝熱リンクは限界熱流束を考慮した流动マップによる熱伝達相関式を用いる。

燃料以外の構造材と流体との伝熱は、表3.3.5で示すように単相熱伝達を Dittus Boelterの式、沸騰熱伝達を Thomの式<sup>8)</sup>、凝縮熱伝達を HTGRの式を用いて計算する。

#### 5) 加圧器安全弁

加圧器モデルには加圧器安全弁が装備されている。加圧器安全弁モデルの仕様は表3.4.3に示すとおりである。

表3.4.1 原子力船「むつ」設計主要目

一次冷却設備	
冷却回路数	2
一次冷却水全流量	約1,800t/h
運転圧力	10.89 MPa
一次冷却水平均温度	273.5°C (プラント初期)
蒸気発生器	
形 式	豎型U字管式熱交換器
基 数	2
主蒸気圧力(定格時)	4.02 MPa
発生蒸気量(定格時)	約30t/h/基
伝熱管外径	約19mm
伝熱管厚さ	約1.4mm
一次冷却水ポンプ	
形 式	豎型キャンドモータポンプ
基 数	2
揚 程	35m
加圧器	
形 式	立置円筒形
台 数	1
容 積	2.6m <sup>3</sup>
ヒータ出力	130kW
一次冷却系統	
主配管内径	203mm
管 厚	14.0mm

表 3.4.2 一次冷却水ポンプモデルの特性データ

定格回転数	1770 rpm
定格揚程	37.49 m
定格流量	990 t/h
定格時モータトルク	525.05 N·m
定格時流体非容積	0.001287 m <sup>3</sup> /kg
回転体 G D <sup>2</sup>	13.451 kg m <sup>2</sup>

表 3.4.3 加圧器安全弁モデルの特性データ

No. 1安全弁開設定値	13.34 MPa
" 閉設定値	12.81 MPa
No. 2安全弁開設定値	13.63 MPa
" 閉設定値	13.10 MPa
安全弁シート面積	$5.307 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
放出量	Henry-Fouskeの臨界流モデル <sup>6)</sup> による

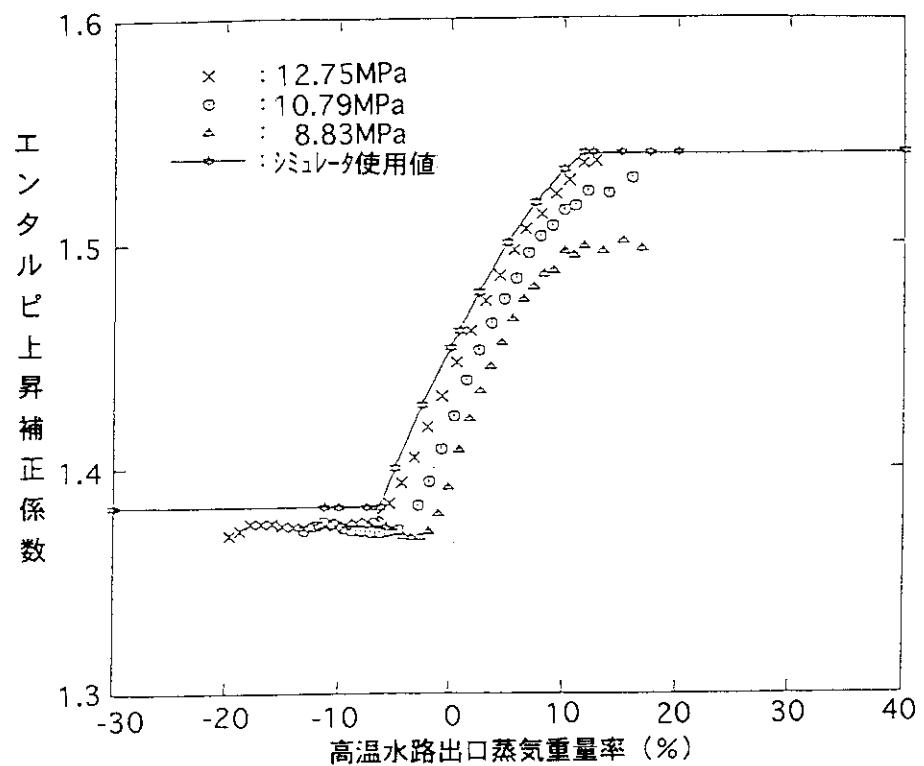


図 3.4.2 エンタルピ上昇補正係数（対象炉心：原子力船むつ）

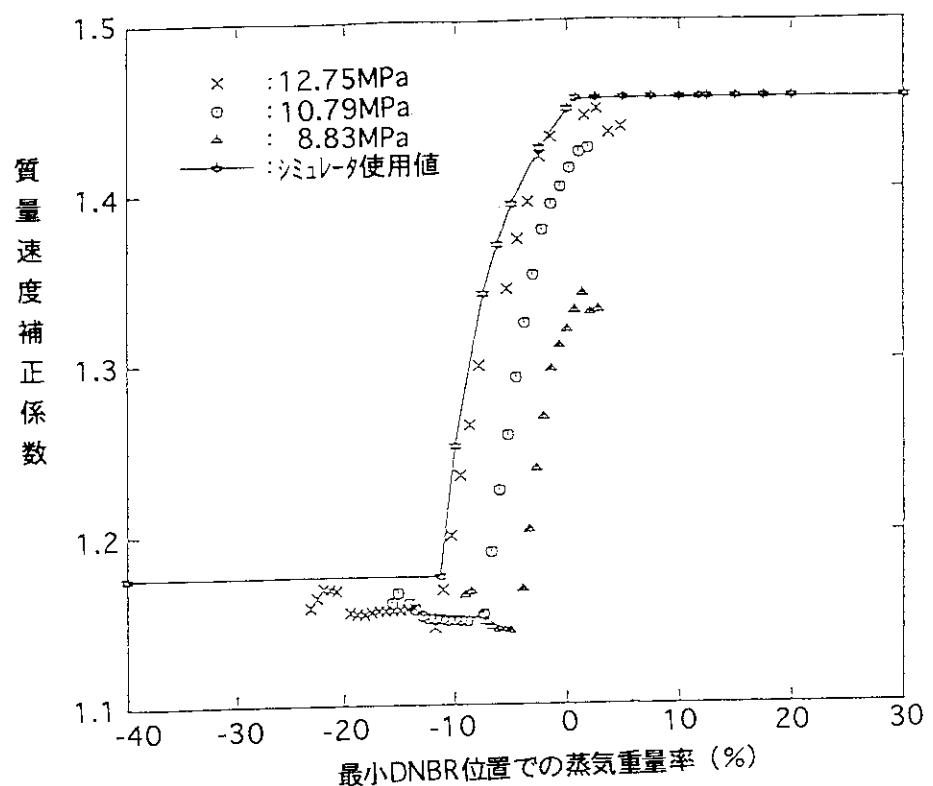


図 3.4.3 質量速度補正係数（対象炉心：原子力船むつ）

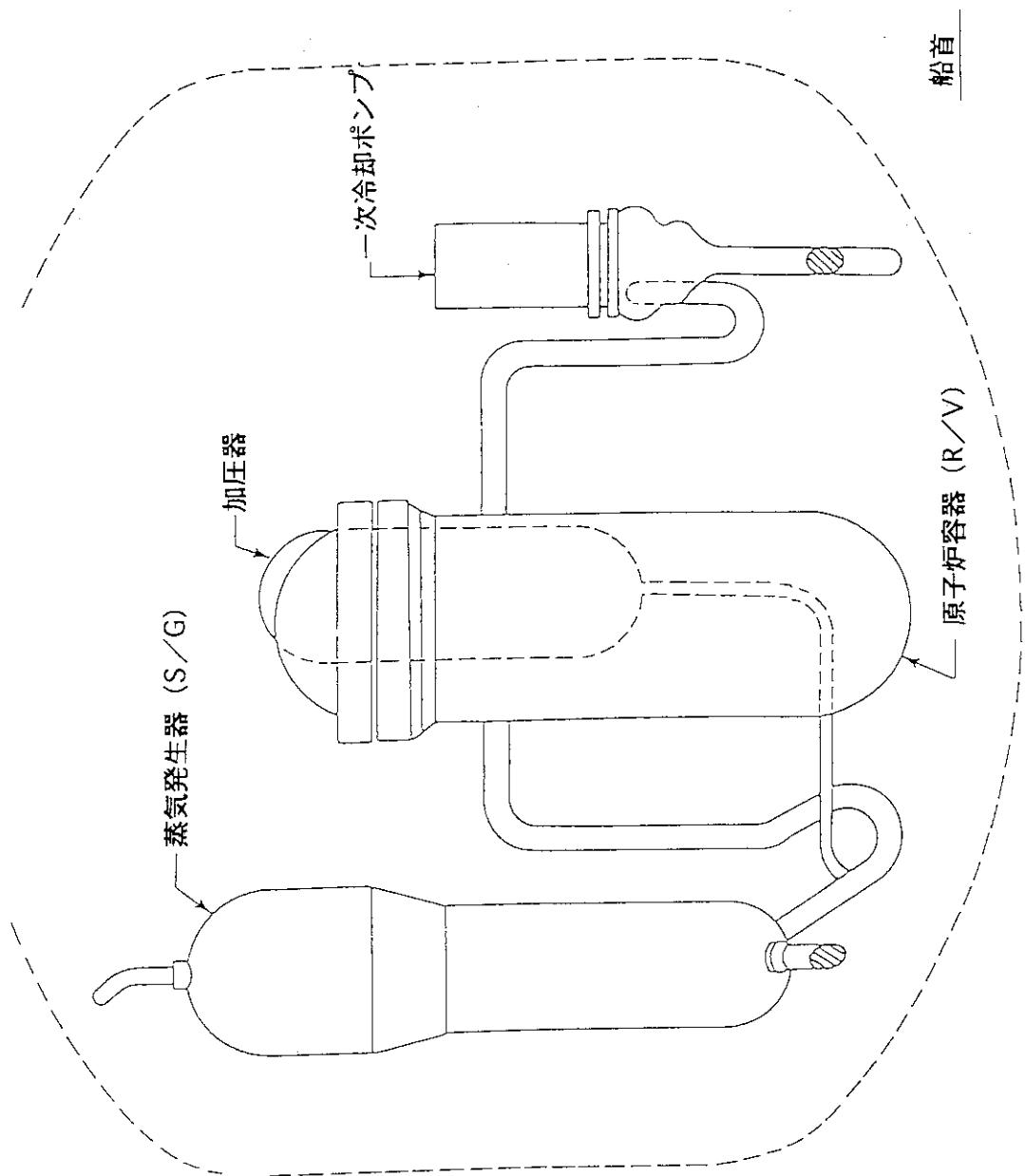


図 3.4.4 原子力船「むつ」一次冷却系統概略配置図（側面図）

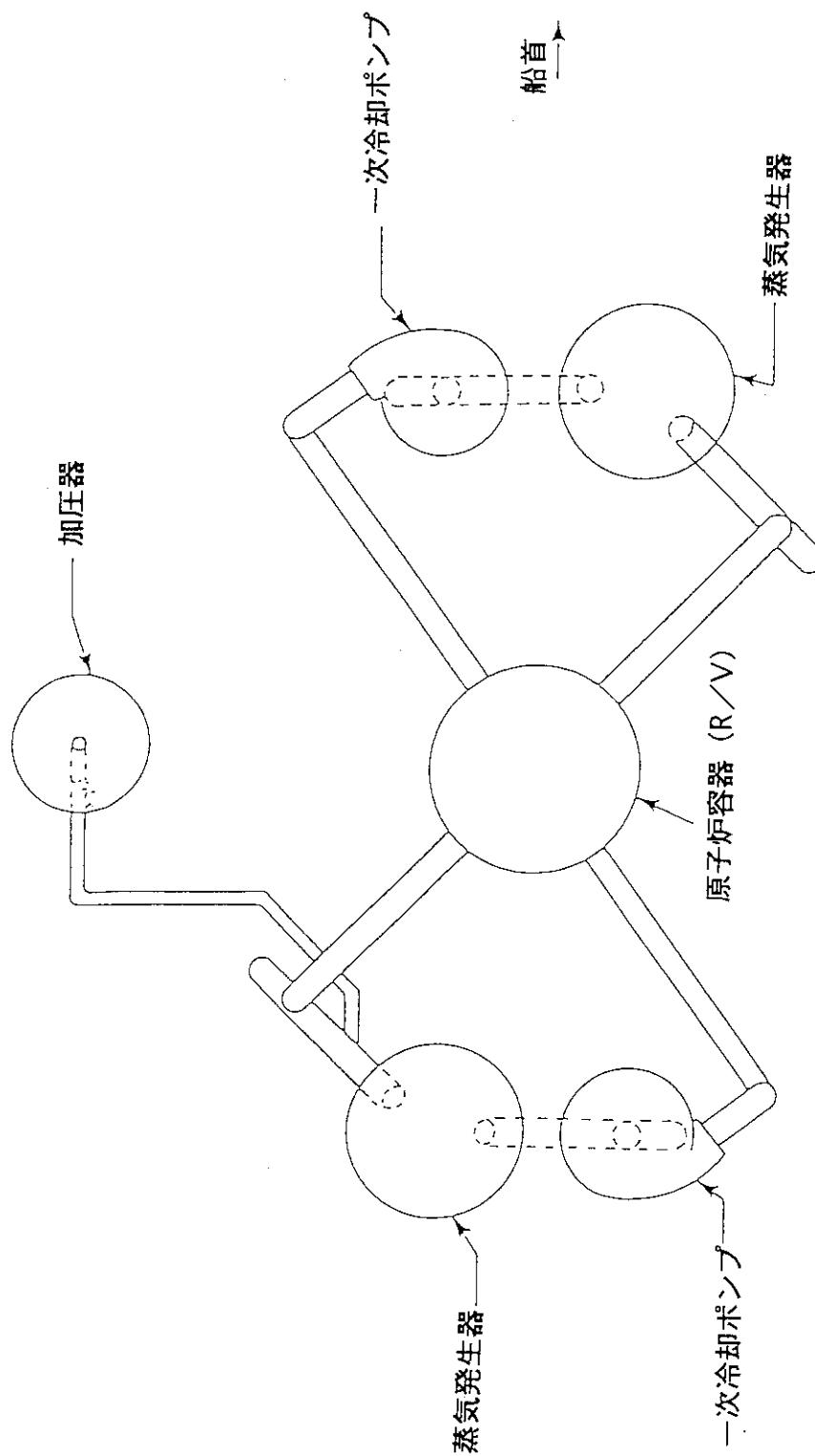


図3.4.5 原子力船「むつ」一次冷却系統概略配置図（上面図）

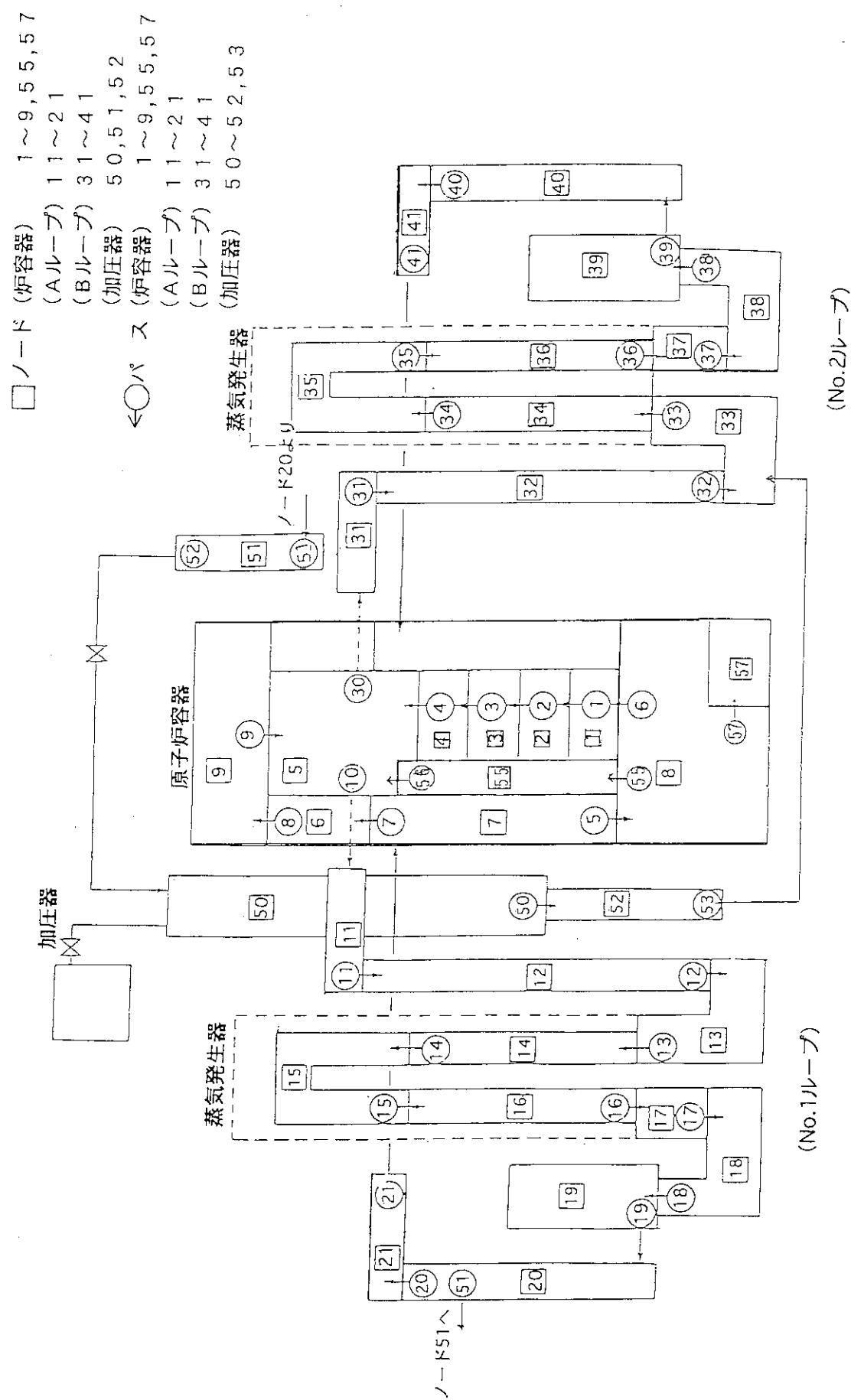


図 3.4.6 「むつ」一次冷却系統モデルの流体系の分割

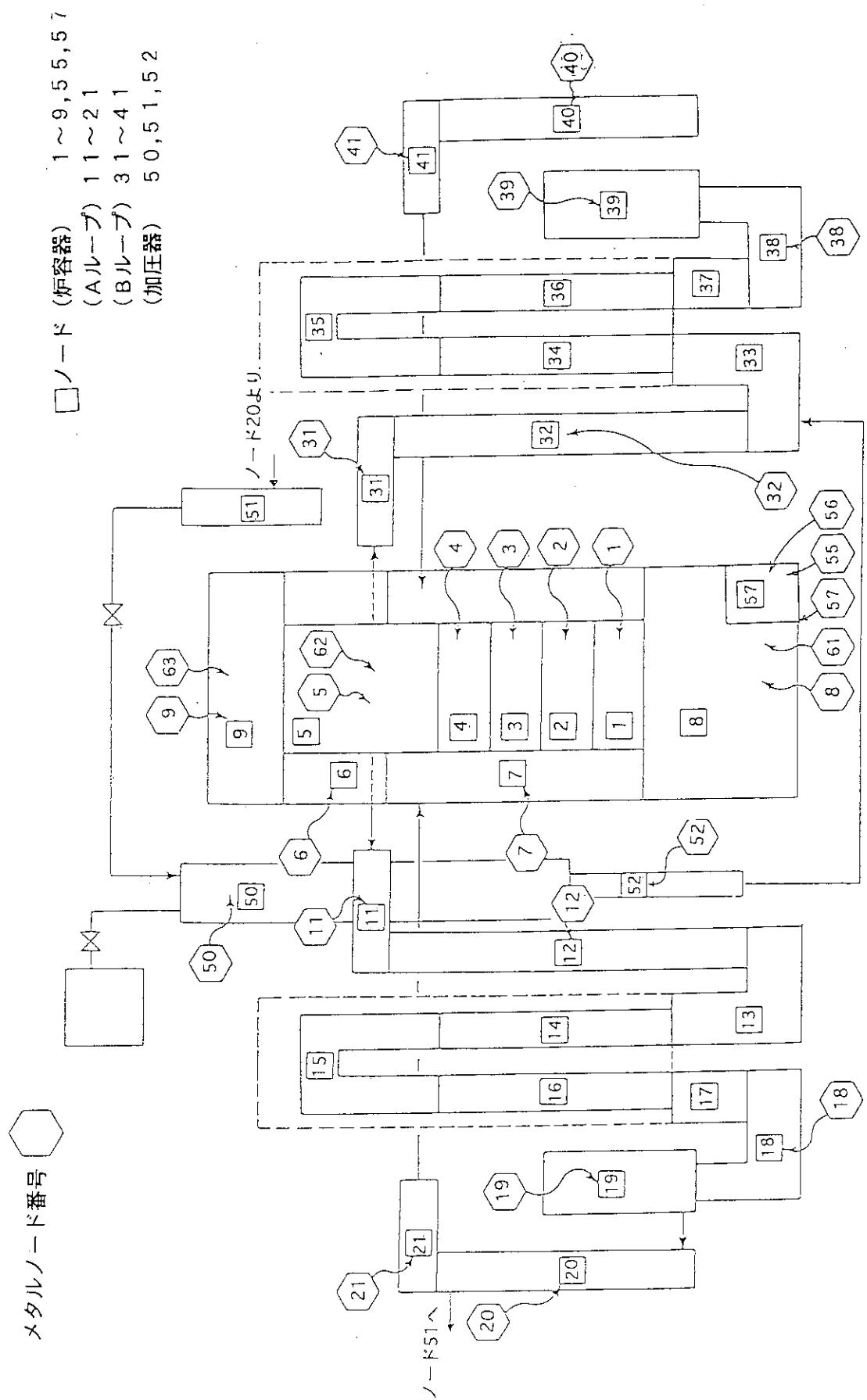


図 3.4.7 「むつ」一次冷却系統モデルの構造材の分割

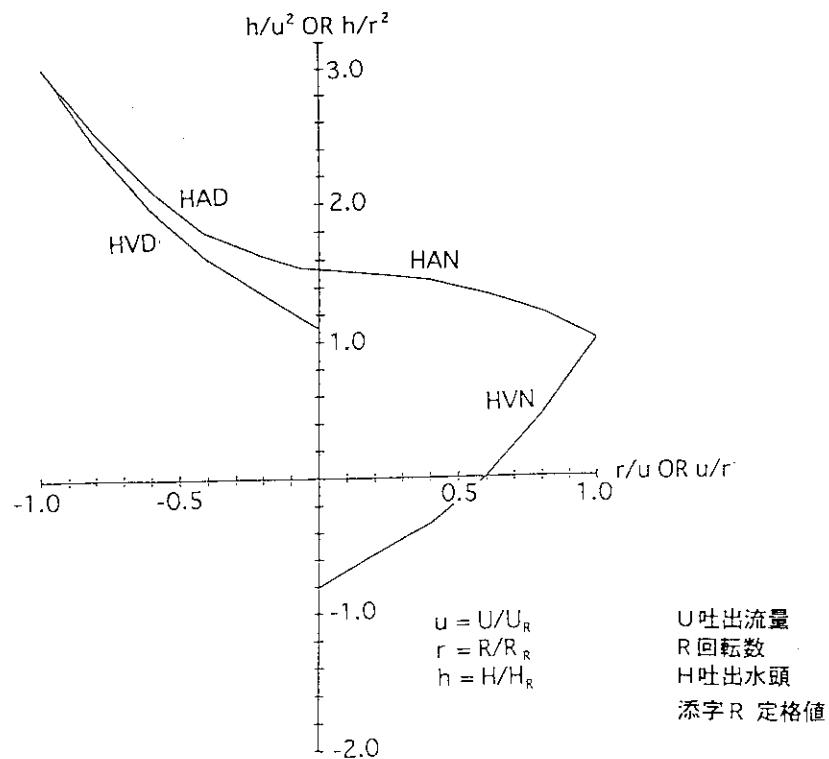


図 3.4.8 一次冷却水ポンプ 吐出流量 - 吐出水頭曲線

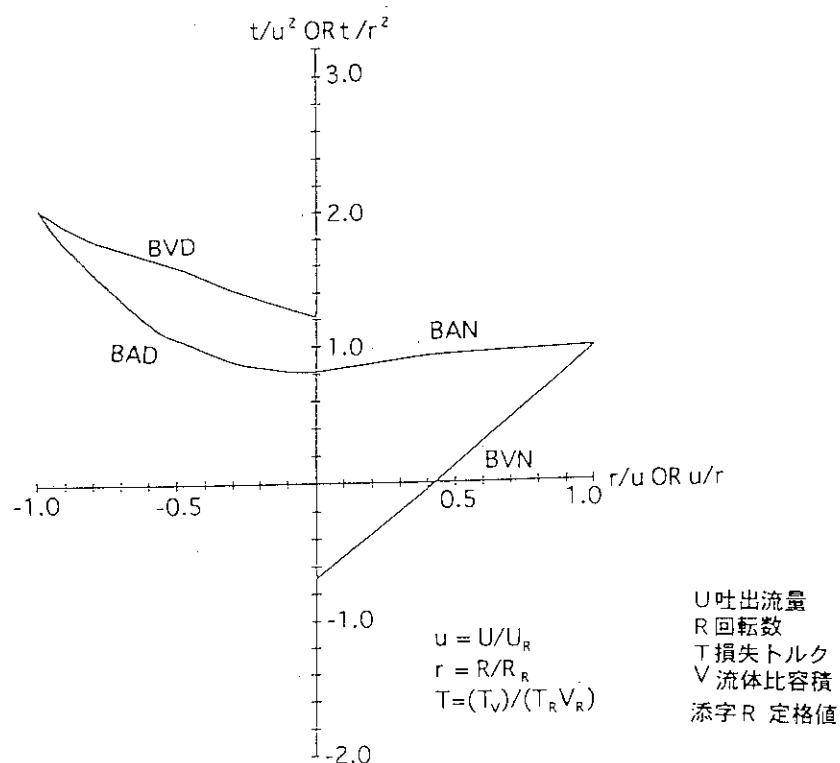


図 3.4.9 一次冷却水ポンプ 吐出流量 - 損失トルク曲線

### 3.4.3 蒸気発生器

#### (1) 概要

原子力船「むつ」の蒸気発生器の概略形状を図3.4.10に示す。蒸気発生器は、立型Uチューブ式熱工交換器で半球形の下部鏡板、皿型の上部鏡板、円筒形胴、管板及び伝熱管よりなる。一次冷却水は、下部一次冷却水水室を経て伝熱管中を流れ、再び下部水室より流出する。胴部二次側では自然循環によって蒸気を発生し、湿分分離器を経て主蒸気管に送られる。二次側の水質制御のためにプローダウンを行う。下部水室には一次冷却水の出入口ノズルがあり、胴部に給水、プローダウン、計器取付用ノズルがあり、上部鏡板には主蒸気ノズルがある。また、下部水室及び上部鏡板にはマンホールがある。図中のNARROWおよびWIDEはそれぞれ狭域水位計および広域水位系のタップ位置である。蒸気発生器二次側は大きく、加熱管部、ライザ部、蒸気ドーム部、ダウンカマ部の4つの領域に分けられる。

No.1蒸気発生器とNo.2蒸気発生器の形状は同一で、原子炉圧力容器を中心軸として対称に配置されている。蒸気発生器の配置は一次冷却系統とともに図3.4.4および図3.4.5に、設計主要目は表3.4.1に示す。

#### (2) 蒸気発生器各部の扱い

##### 1) 分割

蒸気発生器二次側の流体系モデルの分割を図3.4.11に示す。蒸気発生器計算プログラムが対象とする範囲は図3.4.12である。各蒸気発生器出口には、主蒸気塞止弁が、その下流には主蒸気安全弁が各ループに1基設けられている。主蒸気塞止弁および主蒸気安全弁は格納容器内にある。格納容器をでた後に両ループの主蒸気管は合流する。合流点のやや下流に主蒸気ダンプ弁が設けられている。

##### 2) 流体ノード

蒸気発生器二次側流体ノードのうち、蒸気ドーム部は気水分離を考慮した要素となっており、他の領域は完全混合を仮定した要素となっている。

##### 3) 流体リンク

蒸気ドーム出口とダウンカマを接続する流体リンクには、気体と液体を分離するしてダウンカマ部には気体と分離した水を再循環させている。他の流体リンクでは蒸気発生器専用ドリフトフラックスモデルにより各流体リンクにおけるドリフトフラックスパラメータを計算する。

蒸気発生器専用ドリフトフラックモデルでは、分布パラメータとドリフト速度はいずれもAnnular流とChurn-Turbulent流について計算し、得られた結果を比較して、絶対値の小さい方をそれぞれ使用する。

##### 4) 熱伝達率

蒸気発生器伝熱管表面の熱伝達率は、一次側、二次側ともに表3.3.5に示す熱伝達相関式を用いている。

##### 5) 主蒸気塞止弁

主蒸気塞止弁は、手動操作による開閉の他に、非常注水信号による自動開、

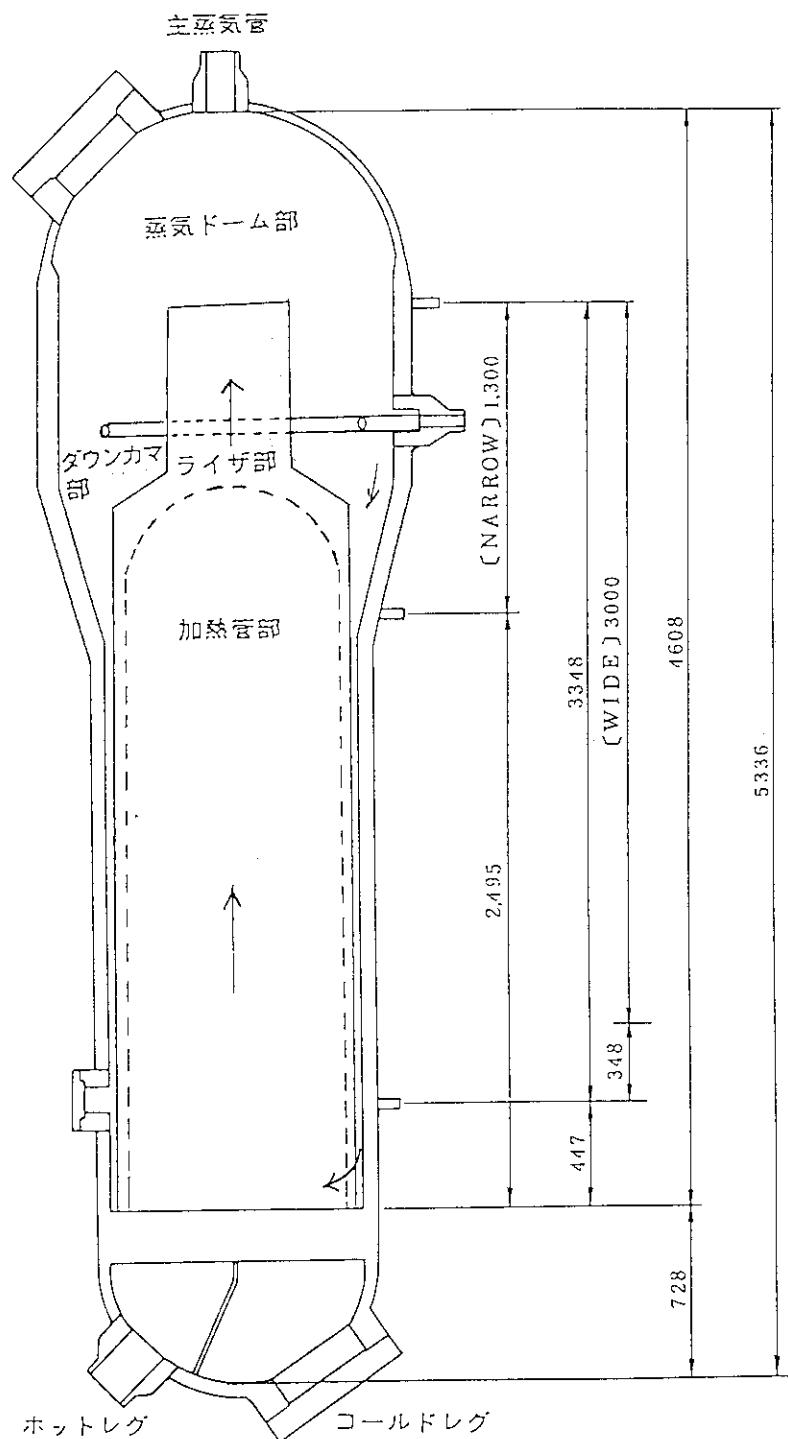
主ループ流量低下信号による流量低下ループの弁の自動閉のシーケンスがモデル化されている。

#### 6) 主蒸気安全弁

各主蒸気管には主蒸気安全弁が備えられている。主蒸気安全弁の設定を表3.4.4に示す。安全弁への入力は主蒸気ヘッダ圧力である。主蒸気ヘッダ圧力が安全弁開の設定値を超えると、安全弁は開となり流量係数  $C_v$  値により蒸気発生器モデルでは流量を計算する。主蒸気ヘッダ圧力が安全弁閉の設定値を下回ると閉となり  $C_v$  値は 0 となる。

表 3.4.4 主蒸気安全弁の特性データ

No. 1 主蒸気安全弁 開 設定点	6.77 MPa
〃 閉 設定点	6.31 MPa
No. 2 主蒸気安全弁 開 設定点	6.77 MPa
〃 閉 設定点	6.31 MPa
安全弁流量	6.77 MPa 時に 8.95 kg/s

容積: 3.85 (m<sup>3</sup>)

内高: 4.608 (m)

Upp.Tap : 3.795 (m)

Low.Tap(narrow) : 2.495 (m)

" " (wide) : 0.447 (m)

図 3.4.10 原子力船「むつ」蒸気発生器概略図

□：第1ループノード番号（第2ループは10を加える）

○：第1ループリンク番号（第2ループは10を加える）

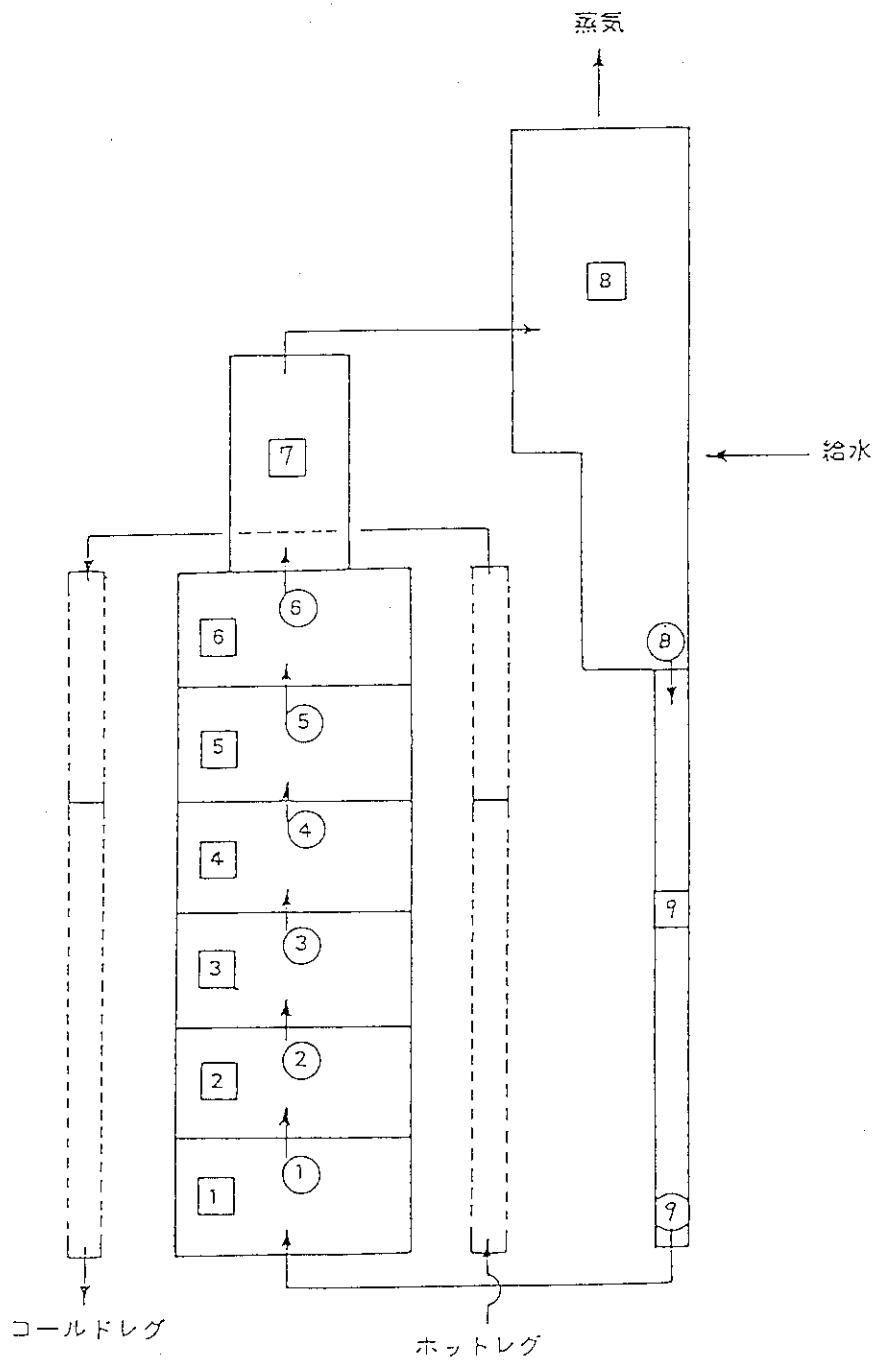


図3.4.11 「むつ」蒸気発生器二次側モデルの流体系の分割

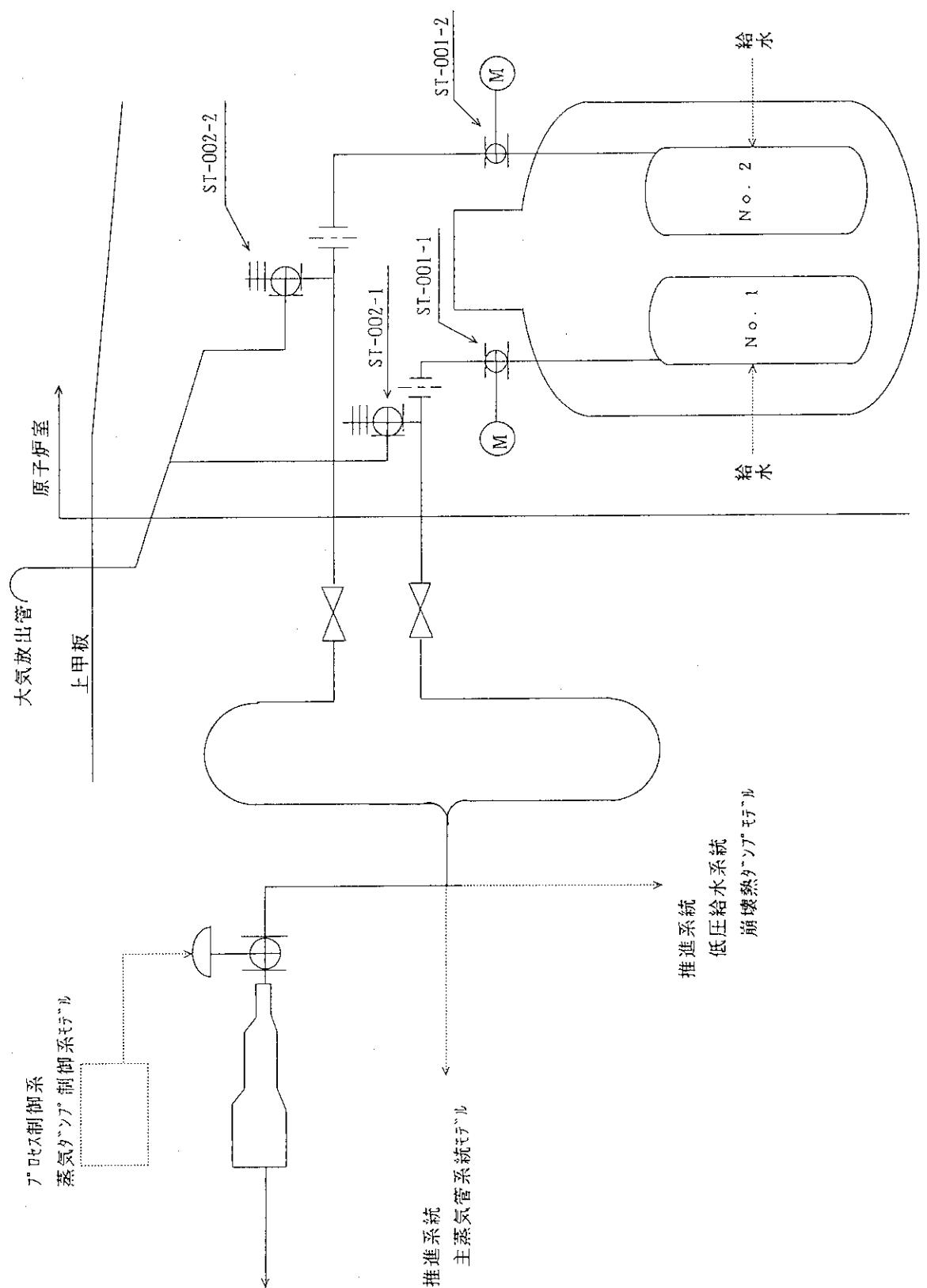


図 3.4.12 蒸気発生器プログラムの対象範囲

### 3.4.4 格納容器

#### (1) 概要

原子力船「むつ」の格納容器の概略形状および内部構造物の概略配置を図3.4.13に示す。格納容器は上部に円筒状開口蓋を有する立置円筒型で、内径約10.0m、高さ約10.6mで設計内圧1.28MPa、設計外圧0.40MPaで設計されている。本シミュレーションシステムでは図3.4.14に示すように格納容器内を簡略化して扱った。

格納容器プログラムは、格納容器へ一次冷却水または二次水が流出した場合に、格納容器内のサンプ水と空気、蒸気について質量収支、エネルギー収支を解くためのプログラムである。流体の流出がない場合には、格納容器圧力は一定である。本プログラムは汎用演算要素での記述に適さないためFORTRANにより記述している。

#### (2) 格納容器のモデル化

格納容器内の自由空間の体積は460m<sup>3</sup>とした。格納容器内圧解析に重要な、格納容器のヒートシンクの諸元値を表3.4.5及び3.4.6に示す。

計算の高速化のために以下の仮定を設けている。

- ① 空中の水／蒸気と空気の温度は等しい。
- ② 空気は理想気体として取り扱う。
- ③ 格納容器のスプレイ水は瞬時にサンプに落下する。

表3.4.5 格納容器のヒートシンクデータ

メタルノード番号	ロケーション	伝熱面積(m <sup>2</sup> )	厚さ(mm)	分割数	材料コード	備考
1	格納容器構造材	147.0	43.0	4	1	
2	燃料交換水槽	66.0	12.0	2	1	
3	歩廊(1)	61.5	3.0	2	1	
4	余熱除去ポンプ	38.0	34.0	5	1	
5	プロア	79.0	8.0	2	1	
6	余熱除去熱交換器	18.0	5.0	2	1	
7	格納容器胴部	116.0	75.0	5	1	
8	一次遮蔽タンク	142.0	23.0	4	1	
9	温調器	47.0	4.0	1	1	

表3.4.6 格納容器のヒートシンク物性値データ

材料番号	材料名	比重(kg/m <sup>3</sup> )	熱伝導率(W/m·K)	比熱(KJ/kg·K)
1	炭素鋼	7850.0	53.49	0.460

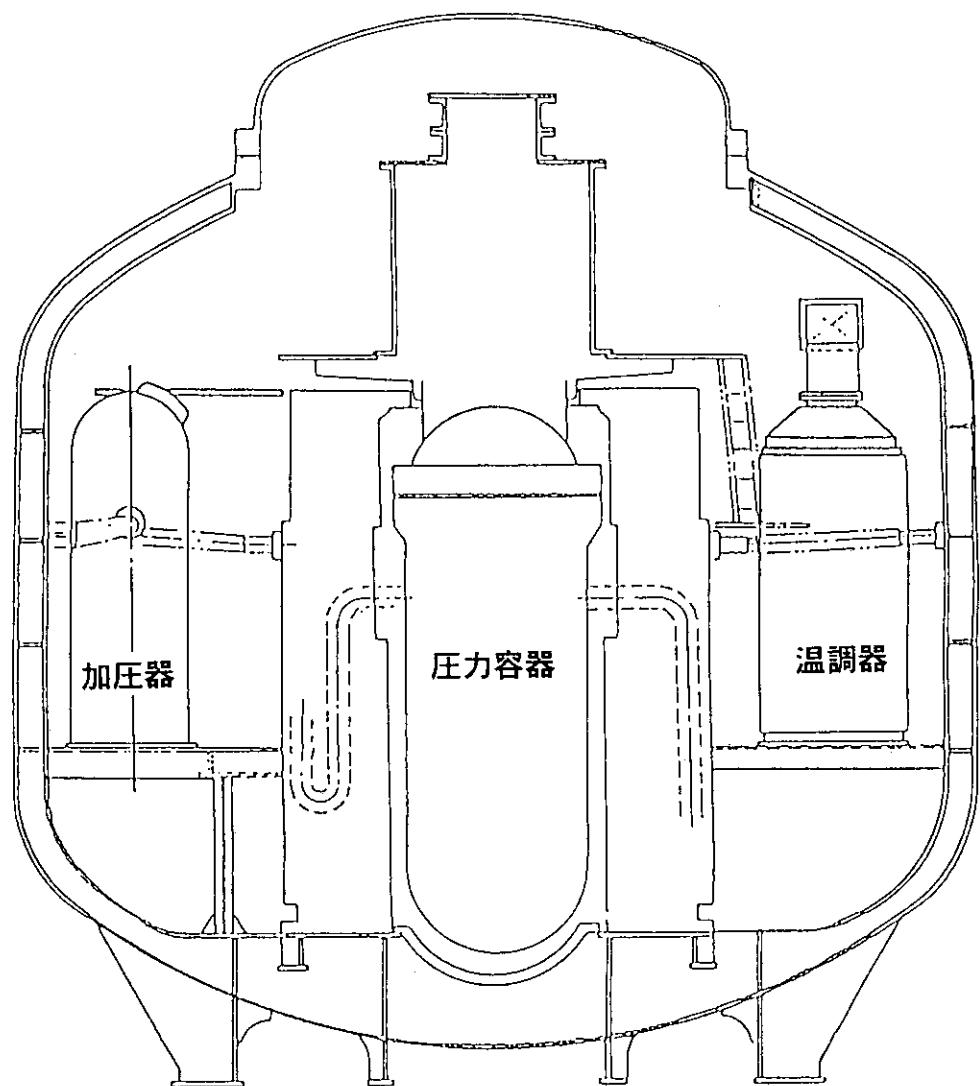


図 3.4.13 原子力船「むつ」格納容器概略図

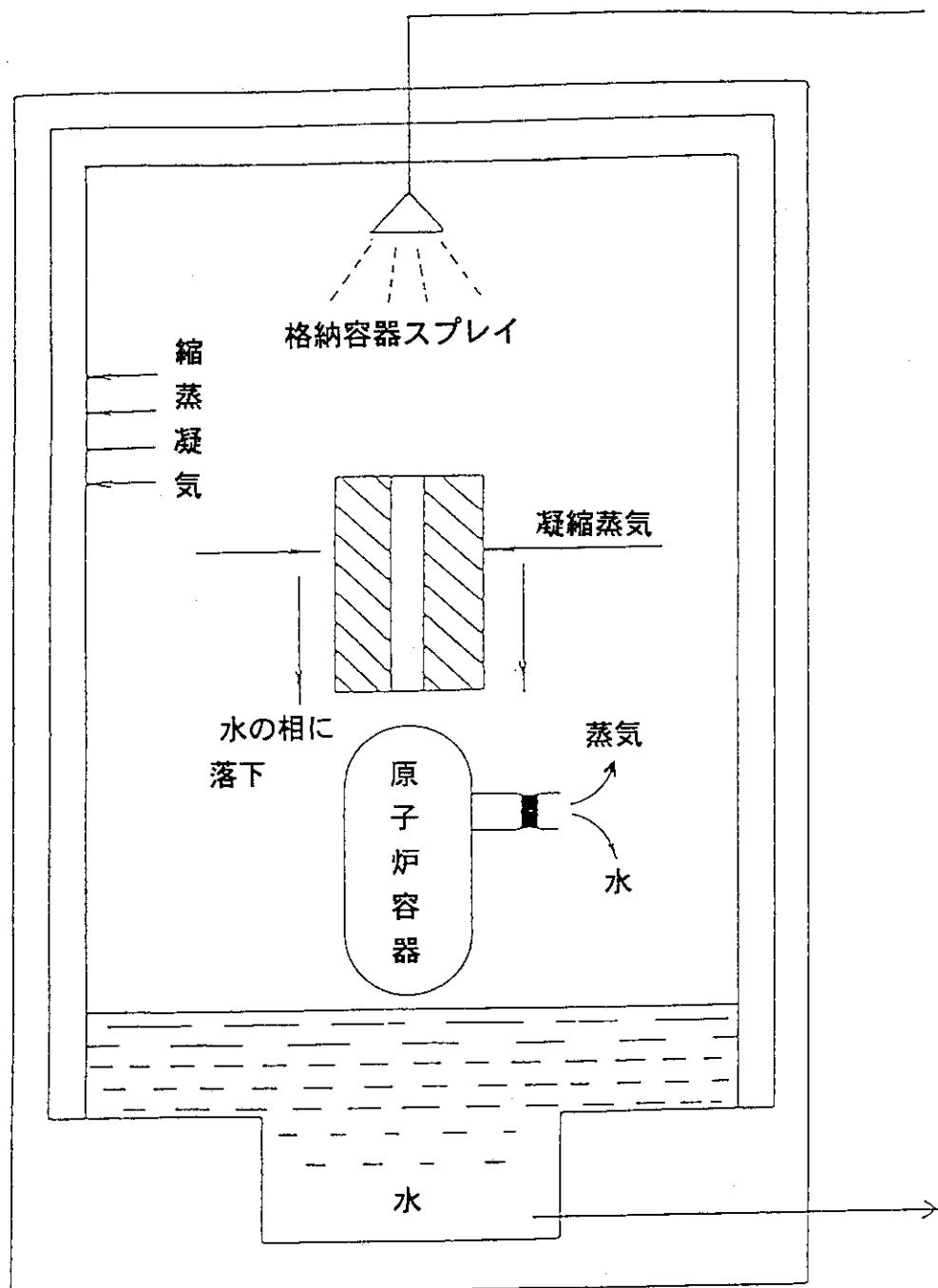


図3.4.14 格 納 容 器 解 析 モ デ ル

### 3.4.5 原子炉補助系統

本シミュレーションシステムの原子力船「むつ」モデルでは原則的に、全ての原子炉補助系統を模擬している。モデル化を行った原子炉補助系統は以下の通りである。各系統は、汎用演算要素プログラムNODE/LINKおよびPOLで記述している。

- ① 体積制御系統
- ② 余熱除去系統
- ③ 非常用冷却設備
- ④ その他の系統
  - ・非常用崩壊熱除去系統
  - ・補機冷却系統
  - ・補機冷却海水系統
  - ・吐出およびベントドレン系統
  - ・蒸気発生器プローダウン系統
  - ・制御用空気系統

各系統のモデルを以下に簡単に示す。

#### (1) 体積制御系統

##### 1) 概要

体積制御系の機能は以下の通りである。

- ・一次冷却設備の一次冷却水保有量を適正に保持する。
- ・一次冷却水の核分裂生成物、腐食生成物などの不純物を除去し、一次冷却水を浄化する。
- ・一次冷却設備の腐食を防止するための一次冷却水中腐食抑制剤濃度を適切に保つ。
- ・制御棒駆動装置へ軸封水を供給する。
- ・原子炉非常停止用のほう酸を注入する。
- ・原子炉冷却設備へ補給水を供給する。

体積制御系統は、再生熱交換器、余熱除去熱交換器、浄化イオン交換塔、体積制御サージタンク、充填ポンプ、ほう酸注入タンク、ヒドラジン注入タンク等から構成される。

体積制御系統の模擬範囲として薬品添加系統と制御棒駆動装置封水系統の一部を含む。体積制御系統及び余熱除去系統模擬範囲を示したシミュレータの画面を図3.4.15に示す。

##### 2) 各部のモデル化

モデル化にあたっては、簡略化のために以下の仮定を設けた。これらの仮定はいずれもシミュレーション結果に与える影響は小さい。

- ① 体積制御タンク補給水弁(LC-102)の流量は一定とする。
- ② 充填ポンプによる充填流量は設計流量2t/h一定とする。したがって、充填ポンプは境界流体リンク(BLINK)を用いて記述する。
- ③ 制御棒駆動装置封水戻りの温度変化は模擬しないが、封水温度高スクラム

信号を充填ポンプ全台停止60秒後に発信する。

- ④ほう酸タンクへの補給は、ほう酸補給弁(CA-021)開により、一定流量流れる。

## (2) 余熱除去系統

### 1) 概要

余熱除去系統は、原子炉を停止する場合に、一次冷却水の温度、圧力がそれぞれ、160°C、2.06MPaまで下がった後の余熱（顯熱+崩壊熱）を除去する。また、通常運転中、余熱除去熱交換器は、体積制御設備の抽出水冷却用非再生熱交換器として使用され、抽出水の温度を規定値まで減温する。

余熱除去系統は余熱除去熱交換器、余熱除去ポンプ各2基等により構成される。余熱除去系統は原子炉停止時に、体積制御系統の一部として運転される。

余熱除去系統模擬範囲を示したシミュレータの画面を図3.4.15に示す。

### 2) 各部のモデル化

余熱除去系統各部は、以下のようなモデル化を行った。

- ①余熱除去熱交換器計算部では、補機冷却水との熱交換計算を行う。また、本熱交換器は体積制御系統の一部として通常運転中の抽出水の冷却に使用される。
- ②余熱除去ポンプの主要目は以下の通りである。余熱除去ポンプはポンプリンク(PLINK)を用いて吐出流量-吐出水頭曲線を与えている。

名 称	型 式	流量 m <sup>3</sup> /h	揚程 mAq	回転数 rpm
余熱除去ポンプ	キャットモータ 横置渦巻型	10	50	3600

## (3) 非常用冷却設備

### 1) 概要

非常用冷却設備は、非常用炉心冷却設備と格納容器スプレー設備から成る。

非常用炉心冷却設備は想定される小口径配管破断から最大口径配管の両端破断により一次冷却水喪失事故及び蒸気発生器の細管破断事故時に炉心に冷却水を注入して、燃料及び燃料被覆の重大な損傷を防止し、かつ燃料被覆の金属と水の反応を十分小さな量に制限する機能を持つ。

格納容器スプレー設備は、一次冷却水喪失事故や主蒸気管破断事故等に際して格納容器内ピーク圧力を最高使用圧力以下に抑制し、再び格納容器内圧力を大気圧程度に減少するとともに、格納容器内の放射性ヨウ素を除去する機能を持つ。非常用炉心冷却設備は、高圧注水系、低圧注水系および再循環のための系統より構成される。高圧注入系統には高圧注水ポンプが、低圧注入系統には非常用注水ポンプが備えられている。

一次冷却水喪失事故が起こった時には、非常用水タンクおよび予備タンクの水を高圧注水ポンプを用いて高圧注水系統により、また、下部一次遮蔽水タン

クの水を非常用注水ポンプを用いて低圧注入系により原子炉に注入し、炉心の冷却を行う。

破断面積が小さい場合には、非常注水信号発信により非常用炉心冷却設備が作動するし、高圧注入ポンプによる冷却水の注入は行われるが、原子炉圧力が高いために非常用注水ポンプでは注水することができない。破断口径が大きい場合には、原子炉圧力の低下は大きく、高圧注入ポンプと非常用注水ポンプの両方から注水される。

破断口径の大きなLOCAの場合にはこの後、これらの水源の貯留水がなくなる前に、格納容器に溜まった水を、格納容器サンプポンプおよび原子炉部ドレンポンプを使用して、再循環熱交換器で冷却後、高圧注入配管系を経て炉心に入るとともに、格納容器スプレイ配管を利用して格納容器内にスプレイする再循環モードに移行する。

非常用冷却設備は図3.4.16のシミュレータ画面に示すように、高圧注水系、低圧注水系および格納容器スプレー設備を模擬範囲とする。格納容器サンプポンプおよび原子炉ドレンポンプを含む再循環のために系統は本節(7)吐出およびベントドレン系統に示す。

## 2)各部のモデル化

非常用冷却設備各部は、以下のようにモデル化を行った。

- ①非常用水タンクへの清水補給は境界流体リンク(BLINK)を用いて、清水補給弁開時に一定流量を流すようとする。
- ②高圧注水ポンプの主要目は以下の通りである。高圧注水ポンプはポンプリンク(PLINK)を用いて吐出流量 - 吐出水頭曲線を与えている。

名 称	型 式	流量 $m^3/h$	揚程 mAq	回転数 rpm
高圧注水ポンプ	横軸輪切型 多段ターピン	24	924	3580

- ③非常用注水ポンプの主要目は以下の通りである。非常用注水ポンプモデルはポンプリンク(PLINK)を用いて吐出流量 - 吐出水頭曲線を与えている。

名 称	型 式	流量 $m^3/h$	揚程 mAq	回転数 rpm
非常用注水ポンプ	横置渦巻式	100	45	3480

## (4) その他の系統

### 1)非常用崩壊熱除去系統

非常用崩壊熱除去系統は、通常の崩壊熱除去設備が使用不能となった場合、原子炉補機室にある非常用崩壊熱除去ポンプを作動させて、非常用水槽、予備タンクの水を2台の蒸気発生器二次側に給水して、発生蒸気を大気放出ラインを経て大気中に放出して崩壊熱除去を行う。

非常用崩壊熱除去系統は、本来二次系に含まれる系統であるが、本シミュレータでは、シミュレーションモデルの作成の便宜上、原子炉補助系統に含めた。

非常用崩壊熱除去系統の模擬範囲を示したシミュレータの画面を図3.4.17に示す。

非常用崩壊熱除去ポンプは、境界流体リンクを用いて一定流量 $3.6\text{m}^3/\text{h}$ で扱う。

## 2)補機冷却系統

補機冷却系統は、補機冷却ポンプ、補機冷却熱交換器で構成され、一次冷却水ポンプ、余熱除去熱交換器、温調器、吐出タンク、下部一次遮蔽水タンク、サンプル熱交換器、プローダウンサンプル熱交換器等の各機器に冷却水を供給している。

シミュレーションモデルではサンプル系統を模擬していない。補機冷却水の供給先は余熱除去熱交換器、余熱除去ポンプの冷却コイル、一次冷却水ポンプの冷却コイル、下部一次遮蔽タンクの冷却コイル、吐出タンクの冷却コイル、格納容器温調器の冷却コイル及び再循環熱交換器とした。

補機冷却系統及び補機冷却海水系統の模擬範囲を図3.4.18のシミュレータ画面に示す。

補機冷却系統各部は、以下のようにモデル化を行った。

- ①補機冷却熱交換器、余熱除去熱交換器及び再循環熱交換器は NODE/LINKにより熱交換器のモデル化を行った。
- ②下部一次遮蔽水タンク、吐出タンクおよび格納容器温調器は境界伝熱リンク(BHLINK)を用いて冷却水止弁が全開の時のみ一定の入熱を計算する。
- ③余熱除去ポンプおよび一次冷却水ポンプはポンプを運転しているときのみ境界伝熱リンク(BHLINK)により一定の入熱を考慮する。
- ④補機冷却サージタンク補給系は、補給弁CC-004弁開時のみ一定流量が流れれる。

## 3)補機冷却海水系統

補機冷却海水系統は、補機冷却海水ポンプ、補機冷却熱交換器および冷却材補給水熱交換器より構成される。

補機冷却海水系統の模擬範囲は図3.4.18のシミュレータ画面に示される。

補機冷却海水系統各部は、以下のようにモデル化を行った。

- ①補機冷却熱交換器の入口弁は、いずれの熱交換器へも冷却海水を流せるように配管構成を模擬する。
- ②冷却材補給水に関する系統は、系統としては模擬していないので、通水はするが熱交換は行わない。
- ③海水取水温度は気象・海象条件の一部であり、シミュレーションモデルでは入力により温度変更を可能とする。

## 4)吐出およびベントドレン系統

吐出およびベントドレン系統は格納容器内の安全弁、逃がし弁からの吹出し蒸気、機器のドレンを処理する。格納容器サンプタンク、再循環熱交換器、原

子炉ドレンポンプ、吐出タンク、原子炉ドレンタンクから構成される。格納容器サンプタンク、再循環熱交換器、格納容器サンプタンク、原子炉ドレンポンプは一次冷却水喪失事故時の再循環のための系統としても利用される。

吐出およびベントドレン系統の模擬範囲を図3.4.19に示す。

吐出およびベントドレン系統各部は、以下のようにモデル化を行った。

- ①格納容器サンプタンクの水位は一定水位とした。
- ②再循環熱交換器は伝熱リンク(HDLINK)を用いて記述し、格納容器サンプタンクから供給された水は補機冷却水により冷却される。
- ③吐出タンクの圧力モデルは、常時  $0.7 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  の  $\text{N}_2$ ガスが供給されており、タンク圧力上昇時にベント弁(DC-021-1)を開け大気に放出するものとする。
- ④格納容器サンプタンク圧力モデルは、タンク圧力と格納容器圧力との差圧によりガスがタンク内に流入するものとする。
- ⑤加圧器逃し弁／安全弁出口温度は弁作動後に一次遅れで上昇するものとする。

#### 5)蒸気発生器プローダウン系統

蒸気発生器二次側水の水質保持のために連続または間欠的にプローダウンを行うために系統で、各蒸気発生器からでた水は、船外に放出する。

蒸気発生器プローダウン系統の模擬範囲を図3.4.20に示す。

#### 6)制御用空気系統

制御用空気は制御用空気圧縮器から各系統の空気作動弁のアクチュエータに供給される。

制御用空気系統の模擬範囲を図3.4.21に示す。

制御用空気系統各部は、以下のようにモデル化を行った。

- ①各空気作動弁への供給ライン止め弁（または隔離弁）が閉止した場合には各空気作動弁をFAIL状態とする。
- ②空気圧縮器は境界流体リンク(BLINK)で構成し、常に一定の空気量を流す。

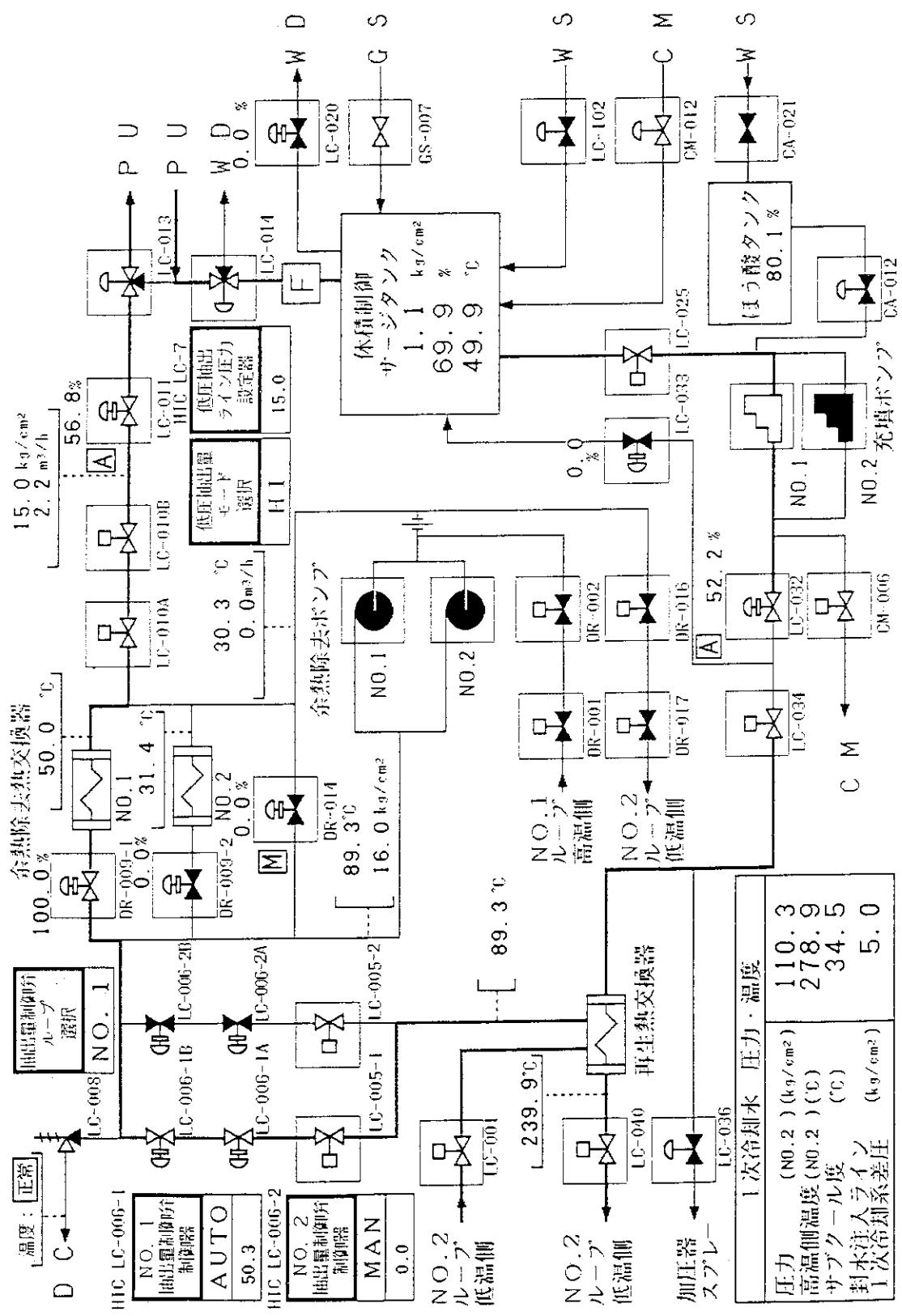
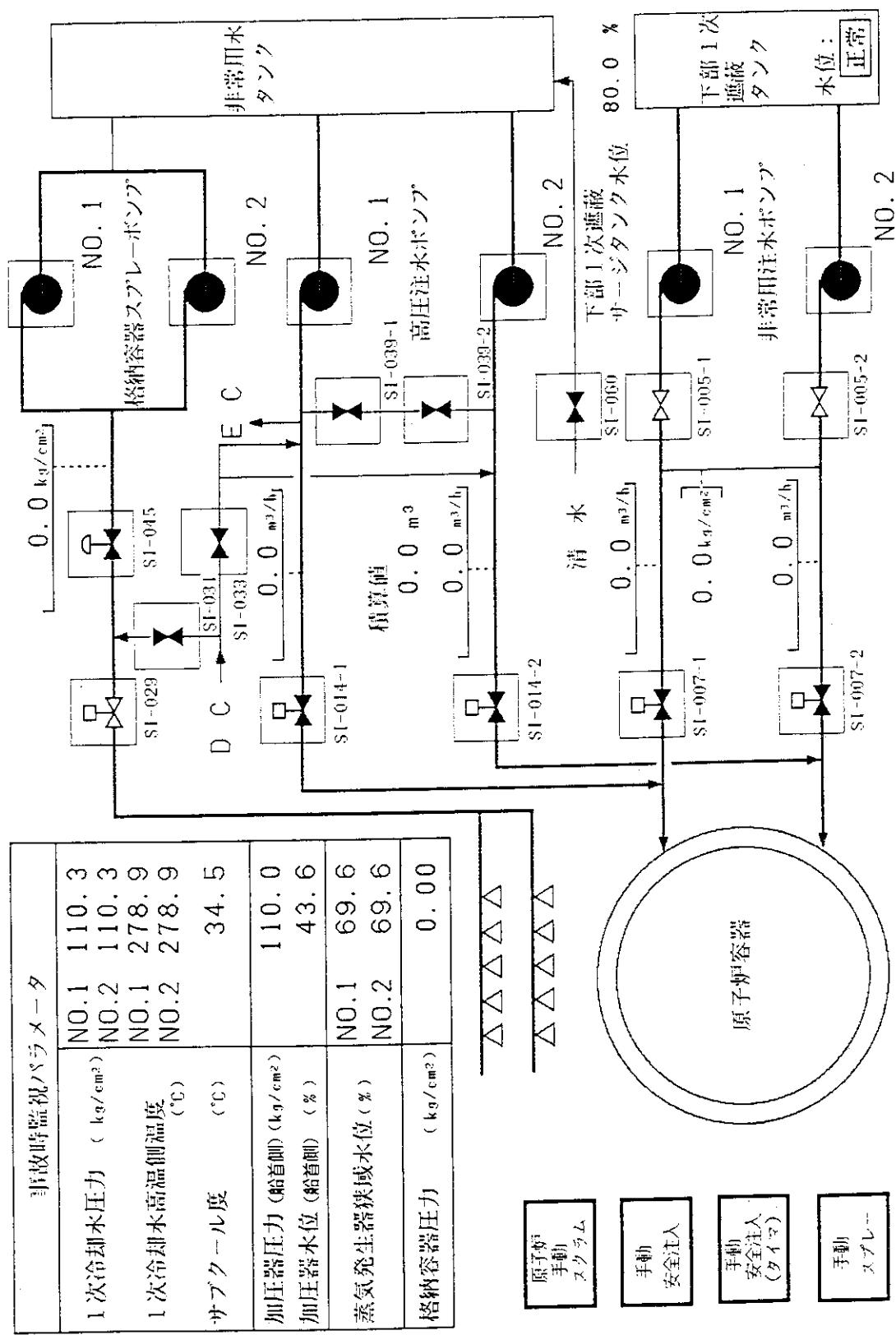


図 3.4.15 体積制御系統・余熱除去系統構成範囲



圖範擬模備設却冷用常非圖3.4.16

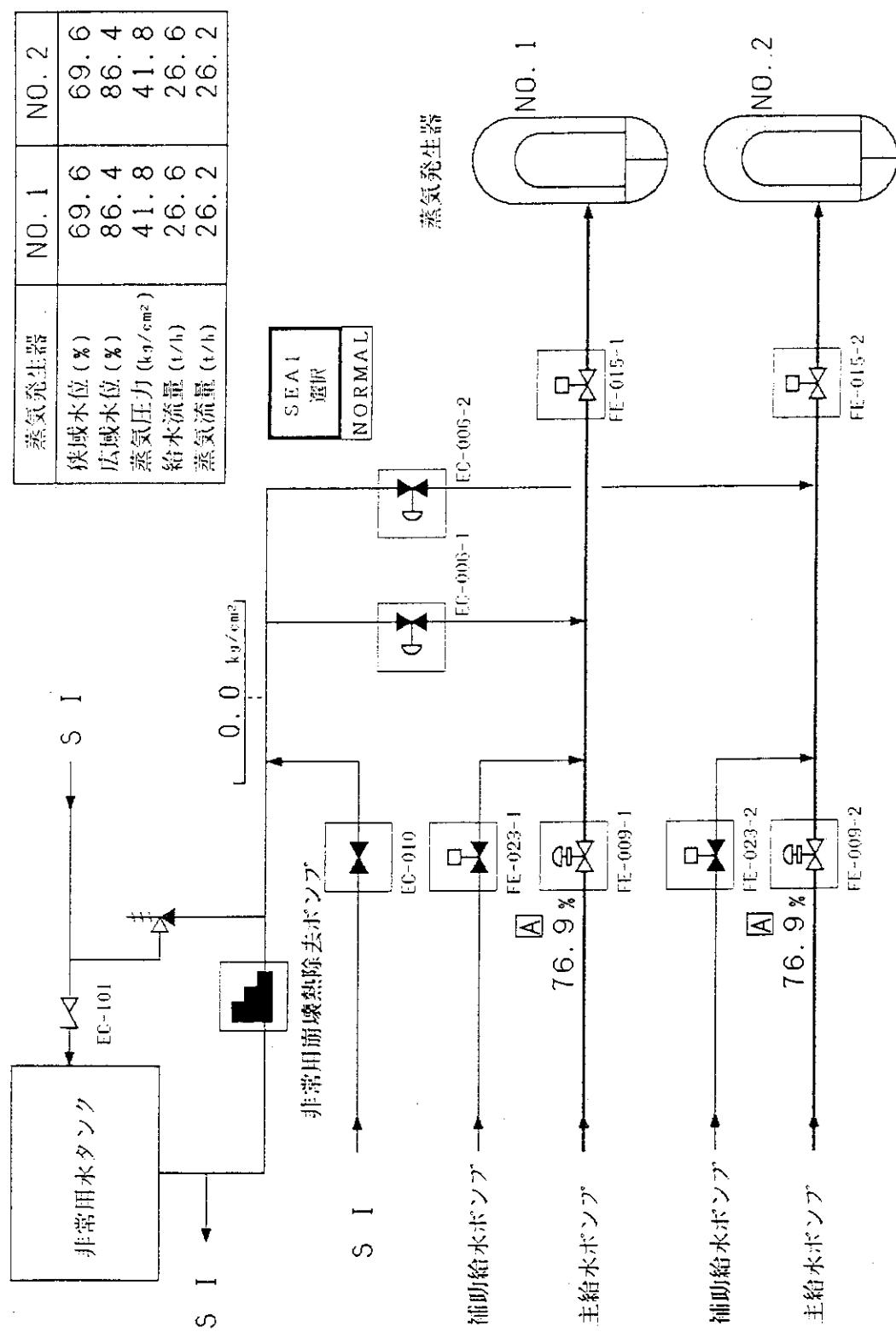


図 3.4.17 非常用崩壊熱除去系統模擬範囲

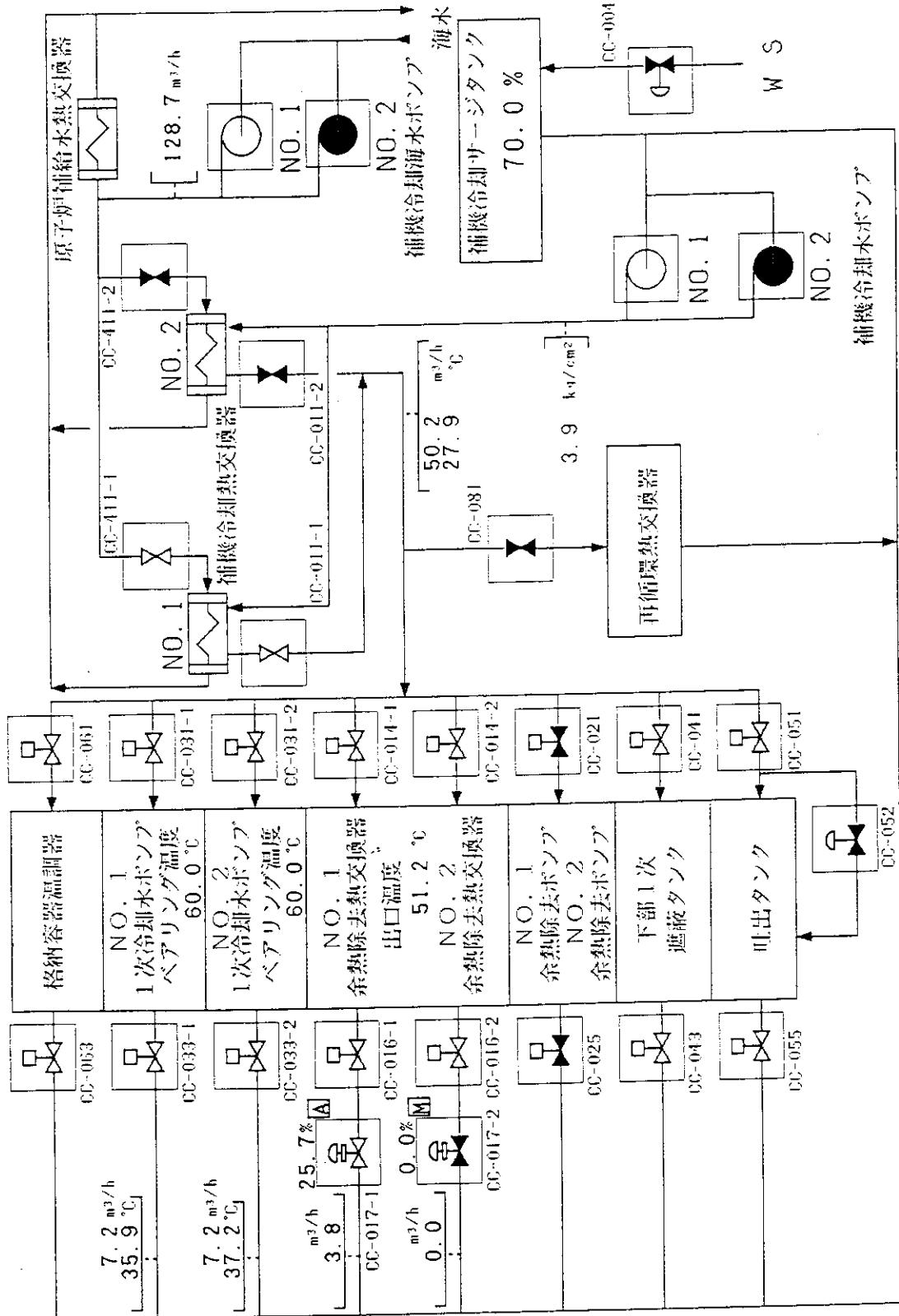


圖 3.4.18 補機冷卻系統・補機冷卻海水系統模擬範圍

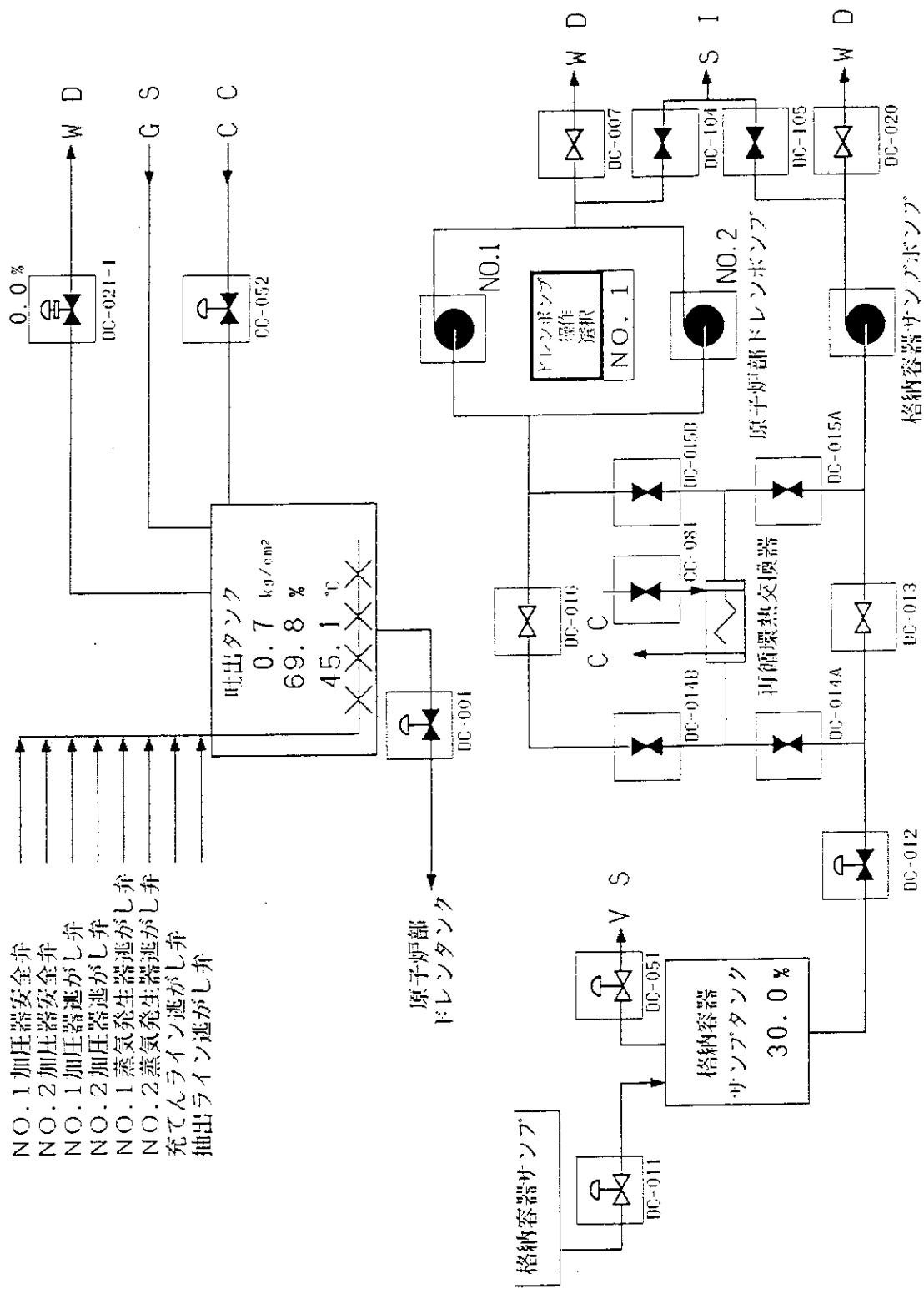


図 3.4.19 吐出およびベントドレン系統構成範囲概念図

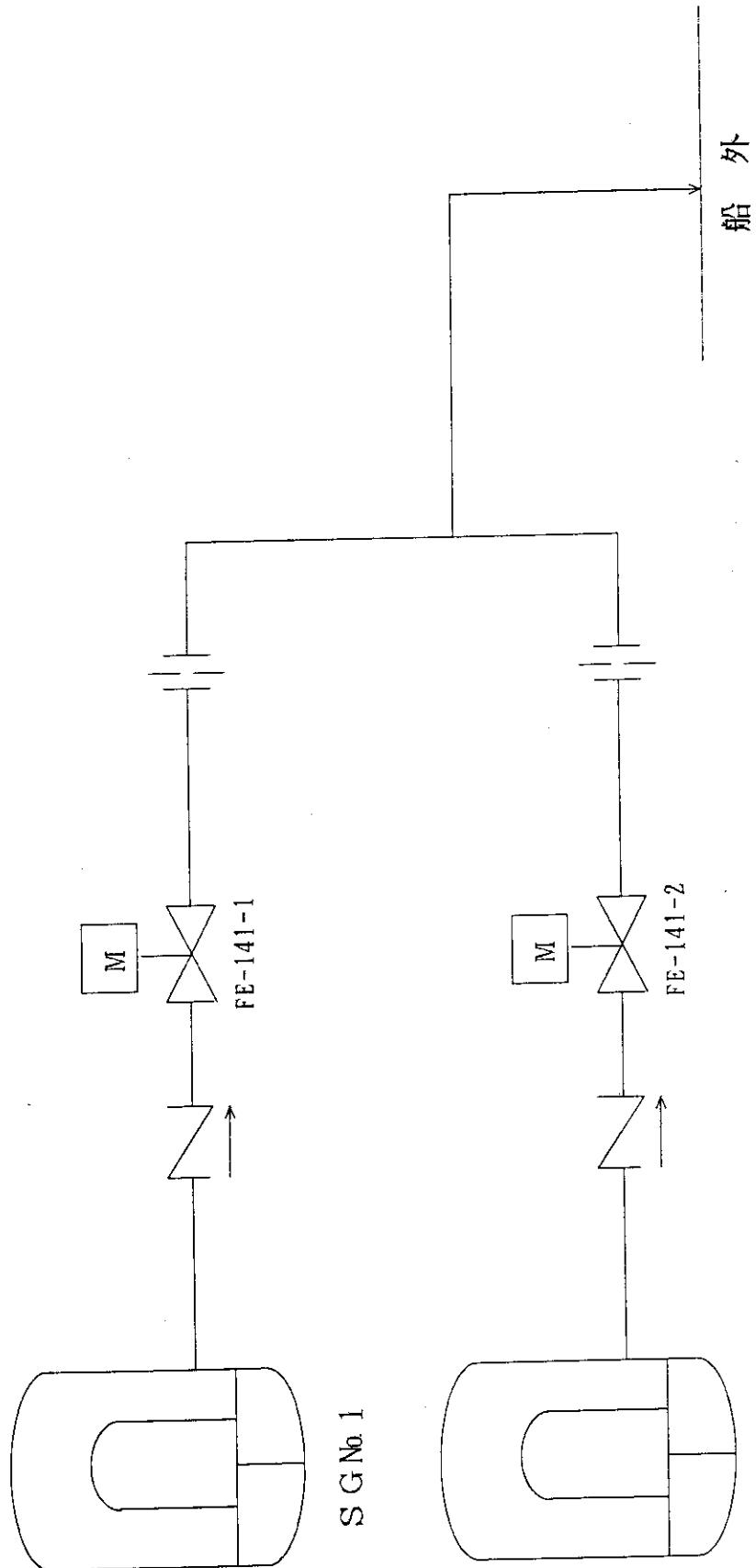


図 3.4.20 蒸気発生器プローダウン系統構成範囲概念図

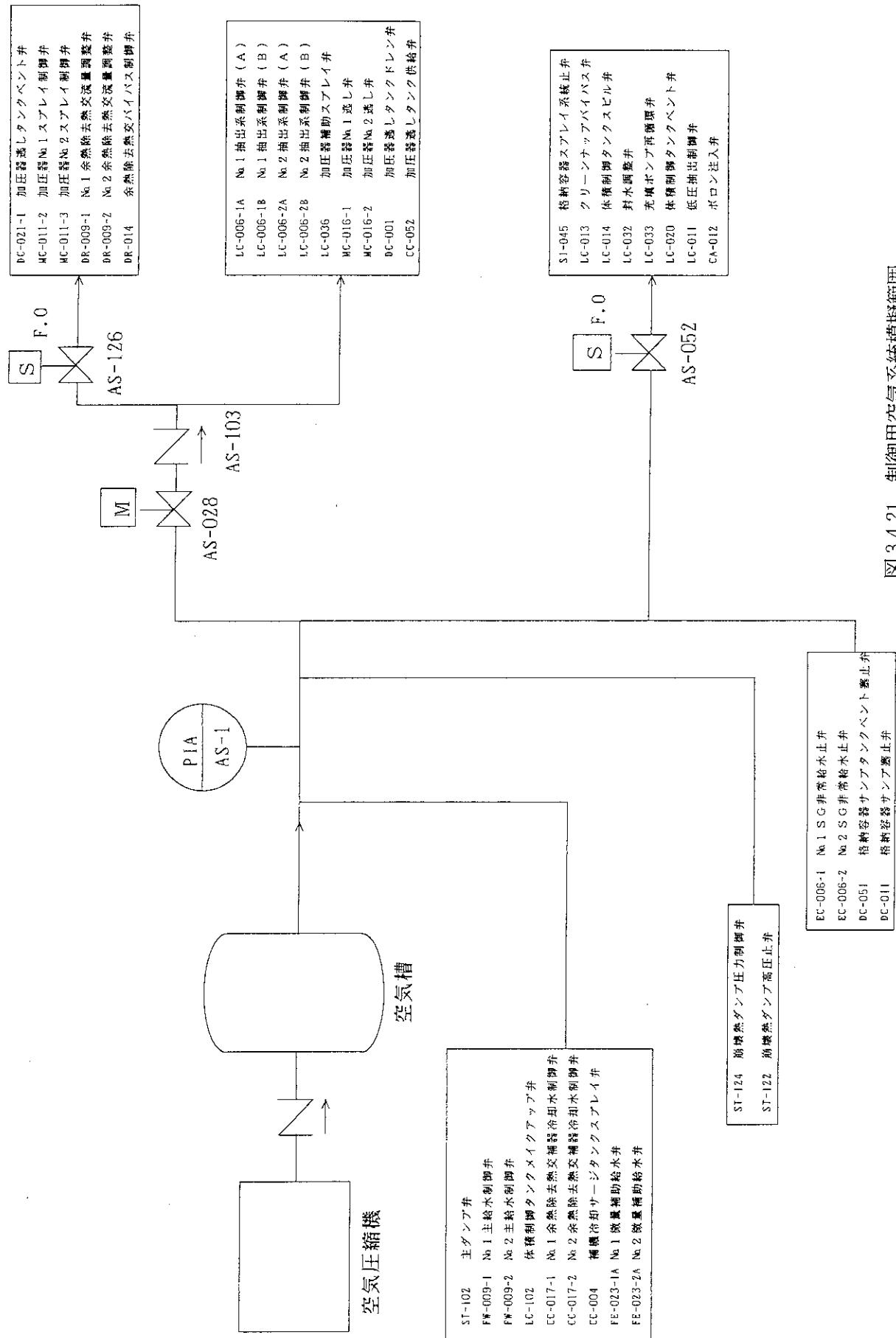


図 3.4.21 制御用空気系統模擬範囲

### 3.4.6 二次系統・推進系統

二次系推進モデルでは、主機、主発電機、主給水ポンプ等の二次系主要機器ならびにプロペラ軸を取り扱っている。

二次系・推進系統モデルの全体概念図を図3.4.22に示す。推進系統はさらに5つのグループに分類されている。各グループの名称と各グループが扱うモデルを表3.4.7に示す。

#### (1) 主蒸気管系統

##### 1) 概要

主蒸気管系統は主蒸気管部と主機部より構成される。

主蒸気管部の系統図を図3.4.23に示す。

主蒸気管に接続される種々の系統とは接続する弁流量で取り合う。すなわち、各系統モデルとの取り合いは以下の通りである。

- ①崩壊熱ダンプ流量は低圧給水系統で計算し本系統は計算結果を参照する。
- ②図3.4.23のST-057およびST-271流量は補助ボイラ系統で計算する。
- ③主発タービンガバナ弁流量(ST-267-1, ST-267-2)は低圧給水系統で計算する。
- ④ST-141弁流量は、補助蒸気系統で計算する。
- ⑤No.1およびNo.2主給水ポンプタービンガバナ弁流量(ST-256-1, ST-256-2)は高圧給水系統にて計算する。
- ⑥本系統で得られた蒸気流量を蒸気発生器モデルへ受け渡す。

主機部は、高圧タービン、低圧タービンおよび後進タービンの動力、抽気流量、グランドリーク流量、主機付湿分分離器ドレン流量及び主機操縦弁制御系による操縦弁開度を計算する。減速装置をモデル化した部分では、主機動力およびプロペラ負荷トルクより、主機タービンおよびプロペラの回転数を求めている。

本系統で求められた抽気流量とエンタルピは補助蒸気系統へ、タービン排気流量とエンタルピは低圧給水系統へ入力される。

##### 2) 主機および主機回転数

主機のモデル作成にあたって以下の仮定を設けた。

- ①高圧タービンを第1段より第4段と、第5段より第7段までの2領域で代表し、各領域毎に負荷に対する断熱効率を考慮する。
- ②低圧タービンを第1段より第2段と、第3段より第7段までの2領域で代表し各領域毎に負荷に対する断熱効率を考慮する。
- ③タービン軸馬力の算出に際して、高圧タービン、低圧タービン各々に負荷に対する効率を考慮する。
- ④各段の湿分分離および捕獲は考慮せず、①および②で示した4つの領域にまとめて断熱効率および抽気流量として考慮する。
- ⑤4つのブロックは最上流ブロックを除いて常にチョーキングしているものとして、流量は入口圧力に比例するものとする。ただし、主復水器真空度の変化に伴う流量変動の補正是行う。
- ⑥調速段流量は、ノズルの式の飽和蒸気に対する近似式を用いる。

$$G = 0.00623 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \cdot Y_s$$

P 2

G	: 蒸気流量	kg/s
P 1	: 入口圧力	MPa
P 2	: 出口圧力	MPa
v 1	: 入口比容積	m³/kg
A	: ノズル面積	cm²

Y s : 飽和蒸気に対して近似した場合の補正係数

一般に  $P_2/P_1 < 0.5$  では、  $Y_s = 1.0$  である。「むつ」は常用出力時に  $P_2/P_1 = 約 0.4$  であるので、  $Y_s = 1.0$  に固定した。

⑦各抽気弁流量は抽気弁閉時はゼロ、開時は第1および第2抽気は脱気器内圧力と各々の配管での摩擦損失より抽気弁出口圧力と抽気弁入口圧力より抽気流量を求める。同様に第3抽気は復水器圧力より摩擦損失を考慮して求める。臨界係数は0.5とする。

⑧主機付湿分分離気出口乾き度は熱平衡線図（表3.4.8）より一定とする。

⑨グランドリークは低圧タービン排気部よりリークするものとして、リーク量は熱平衡線図より一定とする。

本モデルを用いて作成したタービン性能曲線を図3.4.24に示す。

### 3) 主機制御モデル

主機制御モデルは実機の主機タービンリモートコントロール装置を模擬している。主機制御モデルは、操作器モデル、制御モデルにより構成されており、主機タービンモデル、主機回転数モデルと密接に関連している。主機制御は、コントロールレバーにより起動、停止、前進、後進、主軸回転数フィードバックONまたはOFF等を設定することにより行う。主軸回転数フィードバック回路は主機タービンの即応性を高め、良好な回転数制御を行うための回路で船舶には一般的に装備されている。主機制御モデルのブロックダイアグラムを図3.4.25に示す。

「むつ」主機タービンリモートコントロール装置は以下のようにモデル化を行っている。

- ①回転数設定は、テレグラフモードでは操作盤のFULL、HALF等を操作することにより、連続モードでは上矢印または下矢印を操作することで行う。
- ②テレグラフモードでの各オーダーに対する回転数は表3.4.9の通りとした。
- ③シミュレーションシステムでは、タイムスケジュール機能を設けている。この機能は「むつ」にはないので、通常の「むつ」シミュレーションではこれをバイパスして使用する。
- ④タービン停止スイッチは主機タービン危急停止スイッチである。

## (2) 低圧給水系統

## 1) 概要

低圧給水系統でモデル化されるプラント構成機器は表3.4.7に示した各機器である。

各構成機器の関係を図の二次系・推進系統全体概念図3.4.22に示す。各要素は主蒸気管系統、高圧給水系統、補助蒸気・抽気・排気系統および補助ボイラ系統と連結される。

## 2) 主復水器モデル

主復水器モデルでは以下の仮定を設けてモデル化した。

- ① 復水器内は飽和状態とする。
- ② 空気成分は考慮しない。
- ③ 蒸気部エネルギーは無視する。
- ④ 比重量は一定とする。

## 3) 主抽気エゼクタモデル

主抽気エゼクタのモデル化では以下の仮定を設けた。

- ① 主蒸気元弁(ST-141)が開の場合には減圧調整弁(ST-222)が理想的に圧力制御を行い、常時 214kg/h の加熱用蒸気が得られるものとする。また、補助蒸気元弁(ST-229)が開の場合には減圧調整弁(ST-222)が同様に理想的に働くものとする。
- ② 加熱用蒸気は大気圧ドレンタンクと主復水器に 1/2 づつ流入しドレンとして回収される。
- ③ ドレンエンタルピは一定とする。(大気圧ドレンタンク側 251kJ/kg、主復水器側 209kJ/kg)
- ④ 空気成分は考慮しない。
- ⑤ ドレンのレベルは一定とする。
- ⑥ 蒸気と給水系統との熱交換は一次遅れで近似する。

## 4) 総合熱交換器モデル

総合熱交換器は低圧給水加熱器、グランド復水器およびドレン冷却器より構成される。

総合熱交換器モデルは以下の仮定を設けてモデル化した。

- ① ドレンレベルは一定とする。
- ② グランド復水器のドレンのエンタルピは、荷役中(低圧加熱器の加熱蒸気なし)は 251kJ/kg 一定、通常航海中は 209kJ/kg 一定とする。
- ③ 給水との熱交換は一次遅れで伝わるものとする。
- ④ グラントドリークエンタルピは主機出力によらず一定とする。

## 5) 大気圧ドレンタンクモデル

大気圧ドレンタンクのモデル化では以下の仮定を設けた。

- ① 完全混合とする。
- ② 大気への放熱は考慮しない。

## 6) 脱気器モデル

脱気器のモデル化では以下の仮定を設けた。

- ① グランド復水器への蒸気流量は常時  $0.02\text{t}/\text{h}$  で一定とする。
- ② 一次補給水は荷役時  $0.045\text{t}/\text{h}$ 、通常航海時  $0.04\text{t}/\text{h}$ 、補助動力時  $0\text{t}/\text{h}$  とする。
- ③ 脱気器内は常に飽和として、水面上の蒸気部のエネルギーは無視する。
- ④ 脱気器内空気成分は無視する。

## 7) 上部蒸留水タンクモデル

上部蒸留水タンクのモデル化は以下のように行った。

- ① No.1、No.2上部蒸留水タンクは1つのタンクとして扱う。
- ② タンク内流体温度、エンタルピはそれぞれ  $35^\circ\text{C}$ 、 $147\text{kJ/kg}$  一定と仮定する。

## 8) 主発電機タービンモデル

主発電機タービンモデルの熱平衡線図を表3.4.10に示す。

- ① 無負荷運転時の消費蒸気流量は最小蒸気消費量を  $25\text{kW}$  出力時の消費量とすることで模擬する。

## 9) 補助復水器モデルおよび補助復水ポンプモデル

補助復水器モデルおよび補助復水ポンプモデルには以下の仮定を設けた。

- ① 復水器内は常時  $0.0067\text{MPa}$  に維持されているものとする。
- ② 補助復水ポンプ流量は、ポンプ停止中は  $0\text{t}/\text{h}$ 、ポンプ稼働中は補助復水器への流入量に等しいものとする。

## 10) 補助抽気エゼクタモデル

補助抽気エゼクタモデル化では以下の仮定を設けた。

- ① エゼクタドレンは、大気圧ドレンタンク側  $251\text{kJ/kg}$ 、補助復水器側  $209\text{kJ/kg}$  で一定とする。
- ② 蒸気側の失った熱が、瞬時に復水器側に伝達されるものとする。

## 11) 崩壊熱復水器モデル

崩壊熱復水器モデル化では以下の仮定を設けた。

- ① 冷却水への放出熱量は一定とする。
- ② 大気圧への流出量は崩壊熱復水器のレベルヘッド差に比例する。
- ③ 崩壊熱復水器の蒸気部のエネルギーは無視する。
- ④ 復水器内は飽和状態とする。

## (3) 高圧給水系統

## 1) 概要

高圧給水系統で模擬される機器および要素は表3.4.7に示す通りである。

高圧給水系統モデルの系統を図3.4.26に示す。構成要素の一つである高圧給水加熱器に関し、蒸気発生器給水の状態量の計算は本モデルで行うが、温度調節に使用する蒸気の流量制御は、補助蒸気・排気・抽気系統で扱う。

## 2) 主給水ポンプモデル

- ① 主給水ポンプモデルの特性曲線は図3.4.27に示す。

## 3)補助給水ポンプモデル

①補助給水ポンプモデルの流量は5.655t/hで一定とする。

## 4)主給水ポンプガバナ弁モデル

主給水ポンプタービンのガバナ弁は、主給水流量制御弁の前後差圧を一定とすることにより制御される。主給水ポンプ制御系は以下のようにモデル化した。

①手動操作を必要とする「むつ」の吐出圧制御器および差圧設定器を忠実に模擬するのではなく、自動投入を指示すればプログラムが給水弁差圧一定制御に移行させるモデルとする。

②主給水ポンプ並列運転用のバイパスコックは用意せず、2台を起動すれば自動的に並列運転状態となる設定とする。

## (4) 補助蒸気・排気・抽気系統

## 1)概要

補助蒸気系統は、主蒸気を主蒸気管から分岐して減圧した1.57MPa及び0.833 MPa蒸気と、低圧蒸気発生器で発生する三次蒸気を供給する系統である。

1.57MPa蒸気系統は、主抽気エゼクタ、補助抽気エゼクタおよび造水装置エゼクタの駆動蒸気系で、減圧弁(ST-226)を経て供給される。

0.833MPa蒸気は、高圧給水加熱器の加熱蒸気補給系および補助ボイラウインドラスボックス消火系ならびに主機、主発電機タービンのパッキン蒸気系へ供給される。三次蒸気は主に厨房、浴槽、室内暖房等の居住区での使用に供する。

主機タービンからの抽気系統は、高圧タービンから2系統、低圧タービンから1系統が設けられている。第1段抽気蒸気は高圧給水加熱器の給水加熱に、第2段抽気蒸気はデアレータの給水加熱に、第3段抽気は低圧給水加熱器および造水装置の加熱蒸気にそれぞれ使用されている。

このほかに、排気系統を含めてシミュレーションシステムでは1グループとして扱っている。

## 2)造水装置モデル

造水装置に関連する部分のモデル化は以下のように行った。

①加熱器出口ドレンエンタルピは常に368/kJ/kgとする。

②ドレンレベルは一定とする。

③加熱蒸気の流量および物性値は主機出力の関数として求める。本蒸気は主機第3段抽気よりES-055弁を経て流入する。第3段抽気弁が閉の場合または第3段抽気から流入する蒸気だけでは不足の場合には主蒸気管より供給する。

④エゼクタ用蒸気は100kg/h一定とする。

## 3)高圧給水加熱器加熱蒸気系統モデル

高圧給水加熱に使用する加熱用蒸気の系統は以下のようにモデル化した。

①高圧給水加熱器温度調節弁(ES-034)の設定温度は150°Cとする。温度調節用の蒸気は、第1抽気弁が開の場合には第1段抽気より流入するものとする。第1段抽気弁が閉でST-141弁が開の場合には、第1段抽気補給弁

(ST-156、圧力調整弁)を経て0.539MPaに制御された蒸気が供給される。第1抽気弁が開の状態では、常にST-156弁下流圧力が0.539MPaを超えていいると仮定している。

#### 4)低圧給水加熱器加熱蒸気系統モデル

低圧給水加熱器で使用する加熱用蒸気の系統は以下のようにモデル化した。

- ①第3段抽気はES-055弁を経て低圧給水加熱器及び造水装置に供給される。低圧給水加熱器への加熱用蒸気は第3段抽気から造水装置で使用された蒸気をさしひいた量とする。
- ②低圧給水加熱器の加熱蒸気は、第3段抽気弁が閉の場合、または第3抽気だけでは不足する場合で、ST-141弁が開ならば減圧弁(ST-152, ST-160)を経て0.493MPaに制御された蒸気が供給される。

#### 5)グランド復水器加熱蒸気系統モデル

- ①グランド復水器加熱蒸気は、主機タービン、主発電機タービン、主給水タービンのグランドリーグ量の合計である。

#### 6)エゼクタ駆動蒸気系統モデル

主蒸気エゼクタ用蒸気弁(ST-243)、補助蒸気エゼクタ用蒸気弁(ST-241-1,2)、造水装置エゼクタ用蒸気弁(ST-246)の各モデルは以下のように扱う。

- ①1.57MPa圧力調整弁(ST-222)および0.833MPa圧力調整弁(ST-226)は理想的に下流圧力を制御する。従って、ST-243, ST-241-1, ST-241-2, ST-246弁の流量は各々、215, 130, 130, 100kg/hで一定とする。

#### 7)補助蒸気系統モデル

- ①補助蒸気系統の蒸気流量はST-141弁での流量とする。

#### 8)脱気器圧力制御蒸気系統モデル

- ①第2段抽気弁により圧力を0.196MPaに制御する。
- ②第2段抽気が十分に得られない場合には排気補給蒸気弁(ST-143)により圧力を調節する。

#### 9)排気主管モデル

排気主管に関連する部分は以下のようにモデル化を行った。

- ①排気補給蒸気弁(ST-143)は排気主管圧力を設定値以上に調整するものであるがモデルではST-143弁と脱気器との間の圧損を一定と仮定して脱気器圧力を0.196MPa以上となるようにP-I制御を行う。
- ②背圧調整弁(ES-022)は排気主管の圧力の設定値以下に調整するものであるがモデルではES-022弁と脱気器との間の圧損を一定と仮定して脱気器圧力を0.198MPa以下となるようにP-I制御を行う。ES-022弁を流れた蒸気はES-025-1, ES-025-2A, ES-025-2BまたはES-025-3弁により主復水器、No.1, No.2補助復水器、または崩壊熱復水器へ回収される。

#### 10)ブローダウンタンクより脱気器への蒸気

- ①ブローダウンタンクより脱気器への流体エンタルピは2722kJ/kgで一定とする。
- ②ブローダウンタンク内では、マスバランスおよびエネルギーバランスが静

的に保たれている。

### (5) 補助ボイラ系統

#### 1) 概要

補助ボイラ系統は、原子炉蒸気発生器による蒸気の供給を行えない場合に、蒸気を供給するための設備である。主蒸気発生器からの蒸気圧力は約4.02MPaから約5.99MPaまでの範囲で変化するが、補助ボイラからの蒸気は約3.04MPa一定で供給される。両者の蒸気の並列使用は行わない。

補助ボイラは原子炉スクラム時などに急速起動できるように、原子炉運転中は原子炉主蒸気蒸気発生器からの蒸気で常時暖機している。

本シミュレーションシステムでは補助ボイラを用いた運転模擬は主たる目的ではないので、実機にはない自動化を取り入れ運転操作を大幅に簡略化した。

#### 2) 補助ボイラモデル

補助ボイラについては以下のようにモデル化した。

- ① 熱交換器として節炭器と蒸発管の2つに分割して扱う。
- ② ボイラ出力（重油流量）に対するボイラ効率を考慮して節炭器と蒸発管への入熱を計算する。
- ③ 補助ボイラへの給水設備は、補助給水ポンプとNo.1主給水ポンプの2系統を模擬する。この2系統の並列運転はしない。

#### 3) 補助ボイラ蒸気系統モデル

補助ボイラ蒸気系統、低圧蒸気発生器および補助ボイラ暖機系統については以下のようにモデル化した。

- ① 補助ボイラダンプ弁は補助ボイラ蒸気管を所定の圧力になるようにPI制御を行う。
- ② 低圧給水発生器およびドレン冷却器では、加熱蒸気のみをモデルの対象とする。給水および発生蒸気は模擬しない。
- ③ 低圧蒸気発生器系統モデルではST-271弁、またはST-292弁およびST-051弁のいずれかが開の場合に低圧蒸気発生器への流量は常に1230kg/hとする。
- ④ 補助ボイラ暖機系統モデルは、ST-171弁が開で補助ボイラが運転中でなければ常に補助ボイラ暖機に160kg/hの流量があるものとする。
- ⑤ 脱気器への回収ドレンのエンタルピは、ドレン冷却器出口が、239kJ/kg、補助ボイラ暖機用ドレン1013kJ/kgで一定とする。

#### 4) 補助ボイラ制御モデル

補助ボイラの運転制御に関しては以下のようにモデル化した。

- ① 補助ボイラの起動時制御に関して、給水確立操作のみを模擬し、一切の点火前処理は模擬しない。また、バーナ点火要求を指令すれば、直ちに点火され、昇温・昇圧が開始されるものとする。
- ② 自動燃焼制御装置(ACC)入前の運転員による燃料投入、ドレン弁操作等は全てプログラム内部処理により自動化する。

③ ドレン弁は、ボイラ蒸気管出口ドレン弁(ST-056)のみを模擬する。本弁はST-057弁全開にて自動的に全閉とする。本弁のドレン回収は模擬しない。

表3.4.7 推進系統モデル一覧

系統名称	扱う機器モデル
主蒸気系統	主蒸気管モデル 主機モデル 主機回転数モデル 主機制御モデル
低圧給水系統	主復水泵モデル 主復水泵ポンプモデル 主抽氣エゼクタモデル 総合熱交換器モデル 脱気器モデル 蒸留水タンクモデル 大気圧ドレンタンクモデル ドレンポンプモデル 主発電機タービンモデル 補助復水泵モデル 補助復水泵ポンプモデル 補助抽氣エゼクタモデル 崩壊熱ダンプ系統モデル 崩壊熱復水泵モデル
高圧給水系統	No.1, No.2主給水ポンプモデル No.1, No.2補助給水ポンプモデル 高圧給水加熱器モデル 主給水ポンプガバナ弁モデル 補助給水ポンプ再循環弁モデル
補助蒸気・排気系統	造水装置モデル 高圧給水加熱器加熱蒸気系統モデル 低圧給水加熱器加熱蒸気系統モデル グランド復水泵加熱蒸気系統モデル エゼクタ駆動蒸気系統モデル 補助蒸気系統モデル 脱気器圧力制御蒸気系統モデル 排気主管モデル
補助ボイラ系統	補助ボイラモデル 補助ボイラ蒸気系統モデル 補助ボイラ制御モデル

表 3.4.8 「むつ」主機タービンの熱平衡線図

項目	図の記号	単位	最大出力	常用出力	補助動力
流入圧力	P0	MPa	3.77	3.97	2.89
第一抽気圧力	P1	MPa	0.892	0.794	—
高圧タービン排気圧力	P2	MPa	0.348	0.307	0.0784
低圧タービン入口圧力	P3	MPa	0.319	0.285	0.0774
第三抽気圧力	P4	MPa	0.142	0.127	—
低圧タービン排気圧力	P4	MPa	0.0510	0.0510	0.0510
高圧タービン流入流量	GA	kg/h	45543	39902	9648
第一抽気流量	G1	kg/h	4896	4500	—
第二抽気流量	G2	kg/h	1304	935	—
主機付湿分分離器ドレン流量	Gd	kg/h	4387	4039	380
低圧タービン流入流量	GC	kg/h	34957	30428	9268
第三抽気流量	G3	kg/h	3582	3236	—
グランドリーグ流量	Ggl	kg/h	170	170	170
低圧タービン排気流量		kg/h	31205	27022	9098
高圧タービン流入エンタルピ	h0	kJ/kg	2790	2789	2791
第一抽気エンタルピ	h1	kJ/kg	2600	2572	—
高圧タービン排気エンタルピ	h2	kJ/kg	2466	2448	2556
低圧タービン流入エンタルピ	h3	kJ/kg	2711	2705	2646
第三抽気エンタルピ	h4	kJ/kg	2600	2600	—
低圧タービン排気エンタルピ	h4	kJ/kg	2266	2257	2430
主機付湿分分離器乾き度	x2	%	0.993	0.993	0.993

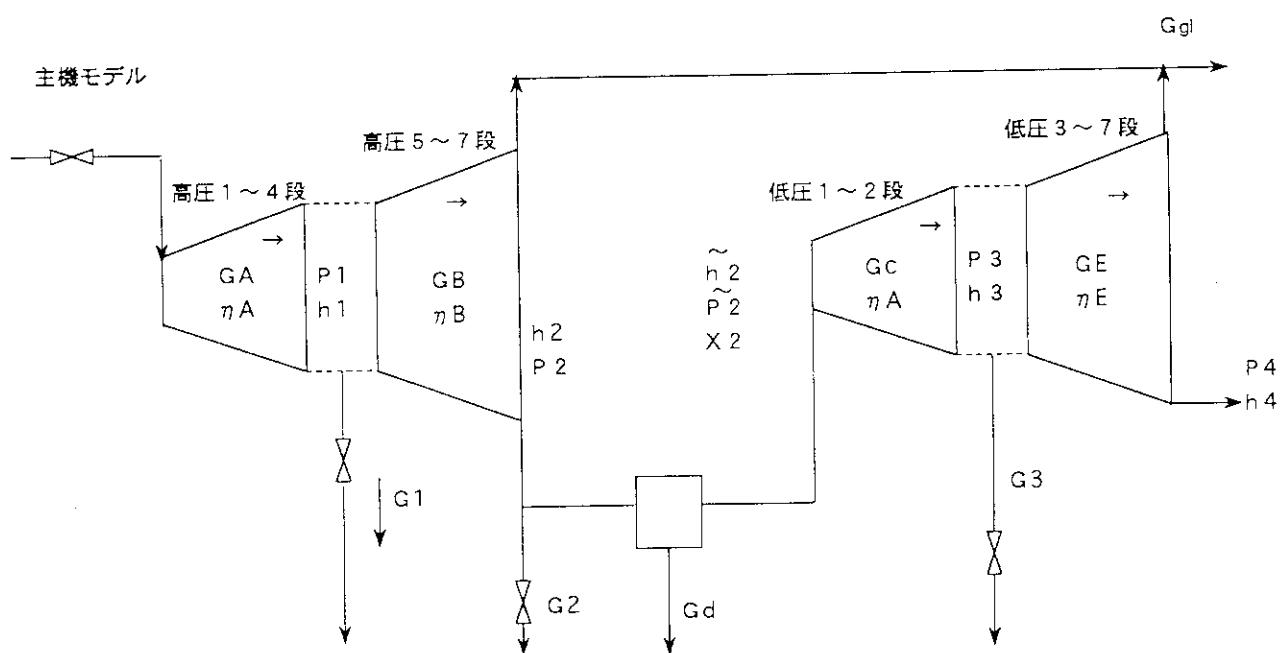


表 3.4.9 主機制御モデルのテレグラフ設定

ENGINE TEREGRAPH	AHEAD	ASTERN
	RPM	RPM
DEAD SLOW	50	50
SLOW	70	70
HALF	85	85
FULL	100	100

表 3.4.10 「むつ」主発電機駆動用タービンの熱平衡線図

項目	図の記号	単位	最大出力	常用出力	荷役
主発タービン蒸気流量	G	kg/h	4934	4994	5197
入口エンタルピ	H <sub>in</sub>	kJ/kg	2790	2789	2781
入口圧力	P <sub>in</sub>	MPa	3.77	3.97	5.18
出口圧力	P <sub>out</sub>	MPa	0.00666	0.00666	0.00666
主発タービン出力	M <sub>g</sub>	kW	640	640	600
出口エンタルピ	H <sub>out</sub>	kJ/kg	2323	2327	2365
熱効率	η	%	52.34	51.42	45.00

&lt;モデル式&gt;

$$S_{in} = S(P_{in}, H_{in})$$

$$H_n = H(P_{out}, S_{in})$$

$$H_{out} = H_{in} - \eta \cdot (P_{in} - H_{in})$$

$$G = \frac{\max(Mg, 25)}{K \cdot (H_{in} - H_{out})}$$

S : エントロピー (kJ/kg · K)

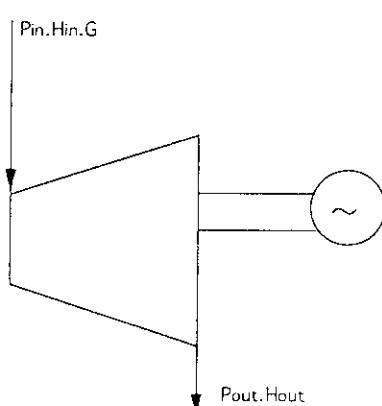
H : エンタルピー (kJ/kg)

P : 圧力 (MPa)

Mg : 発電機出力 (kW)

η : 効率 (%)

G : 流量 (kg/hr)



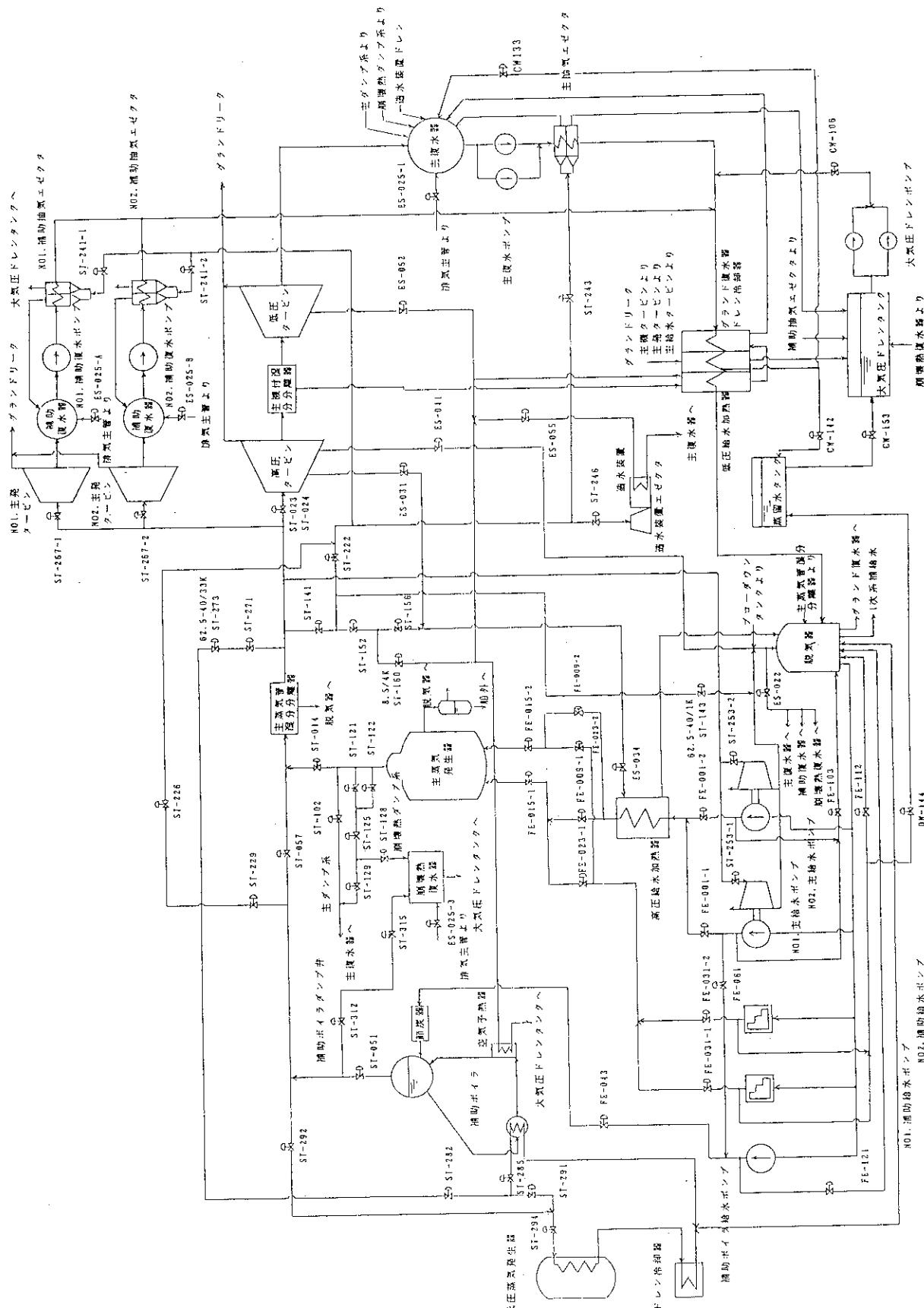


図 3.4.22 二次系・推進系統モデル全体概念図

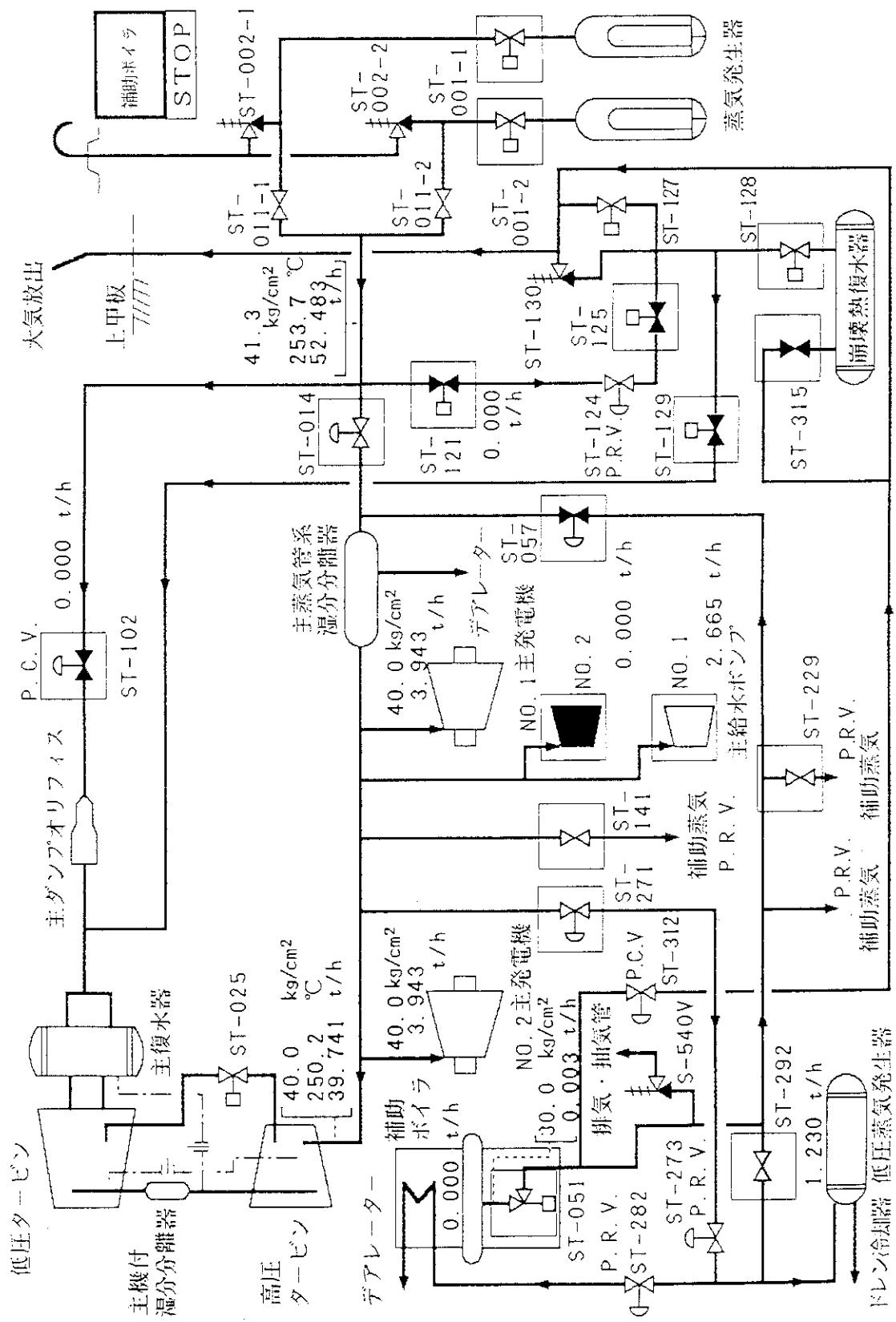


図 3.4.23 主蒸気管系系統図

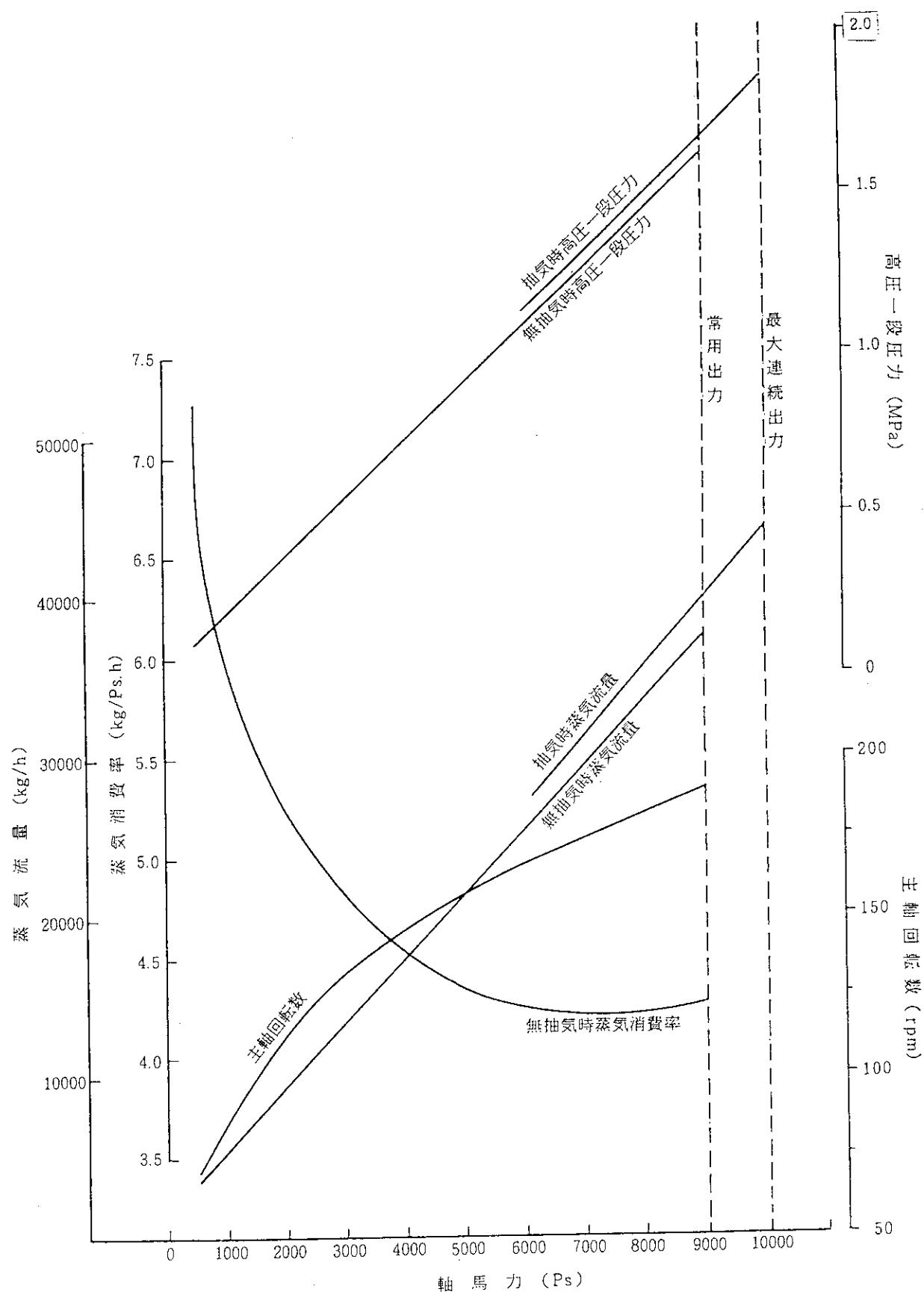


図 3.4.24 主機タービンモデル性能曲線

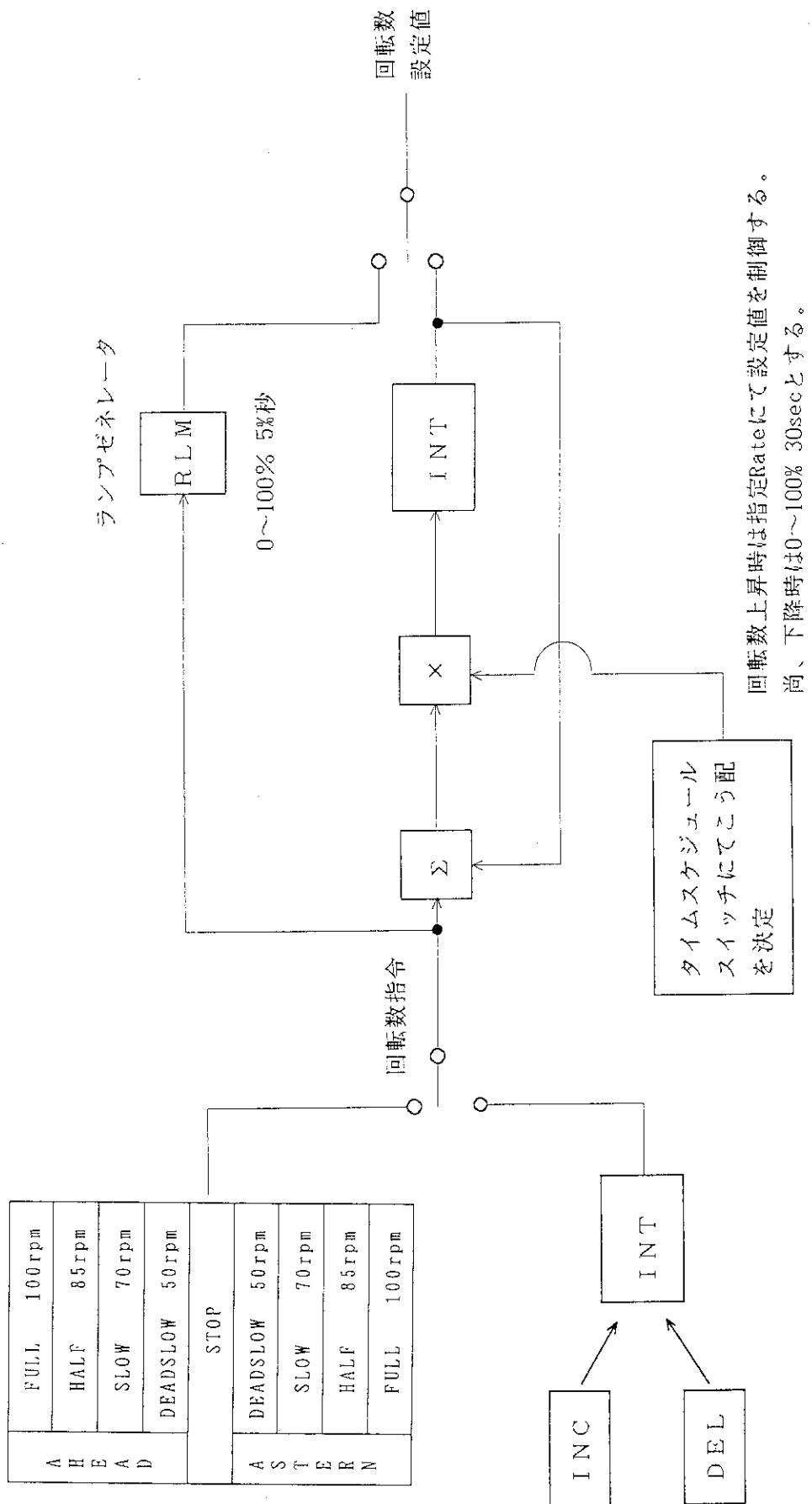


図3.4.25 主機制御モデル展開図 (1/3)

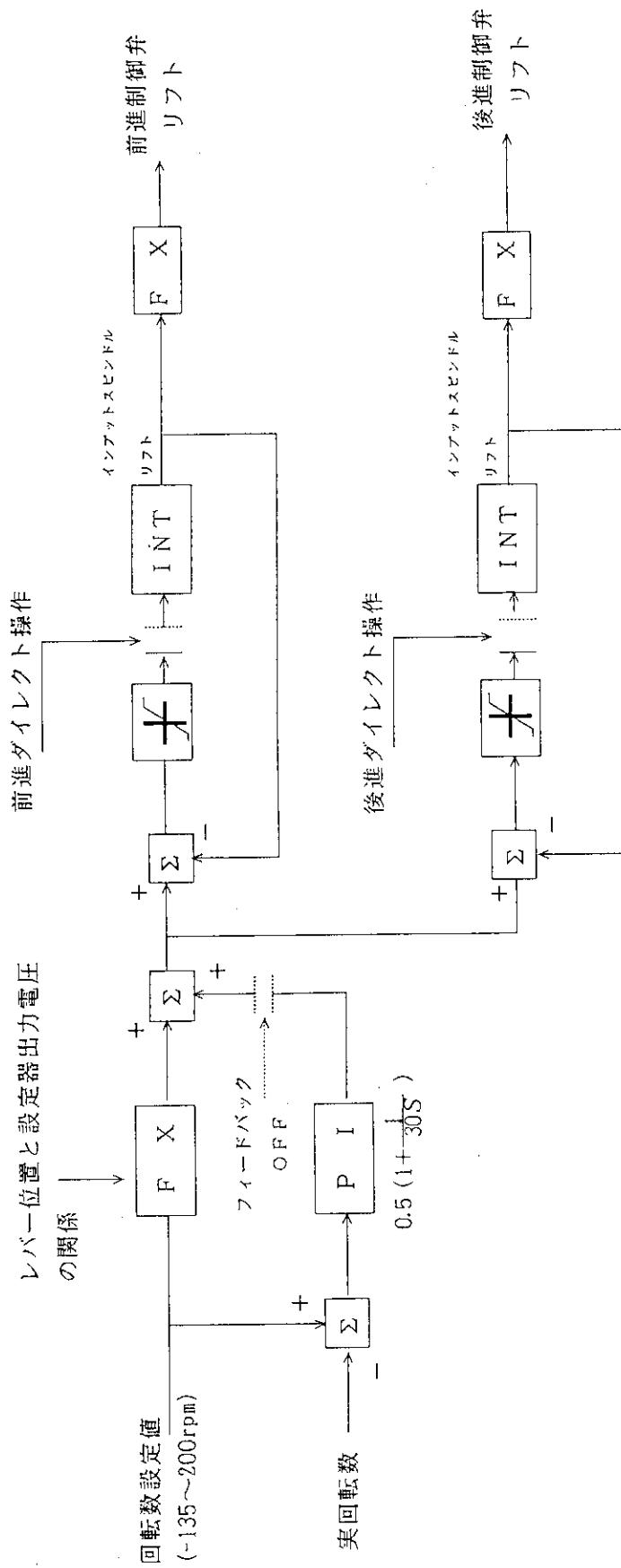
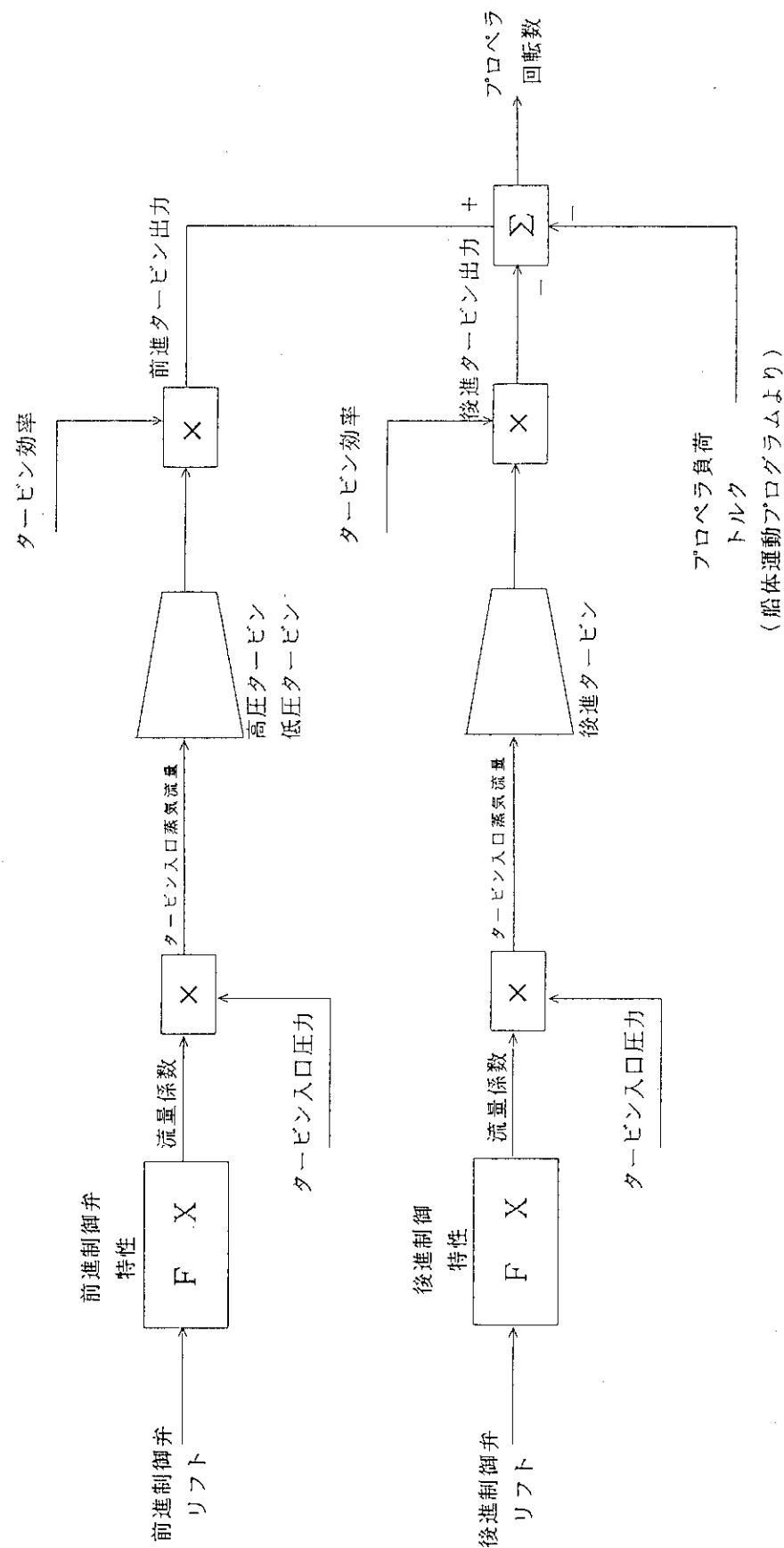


図 3.4.25 主機制御モデル展開図 (2/3)

図3.4.25 主機制御モデル展開図(3/3)  
(船体運動プログラムより)

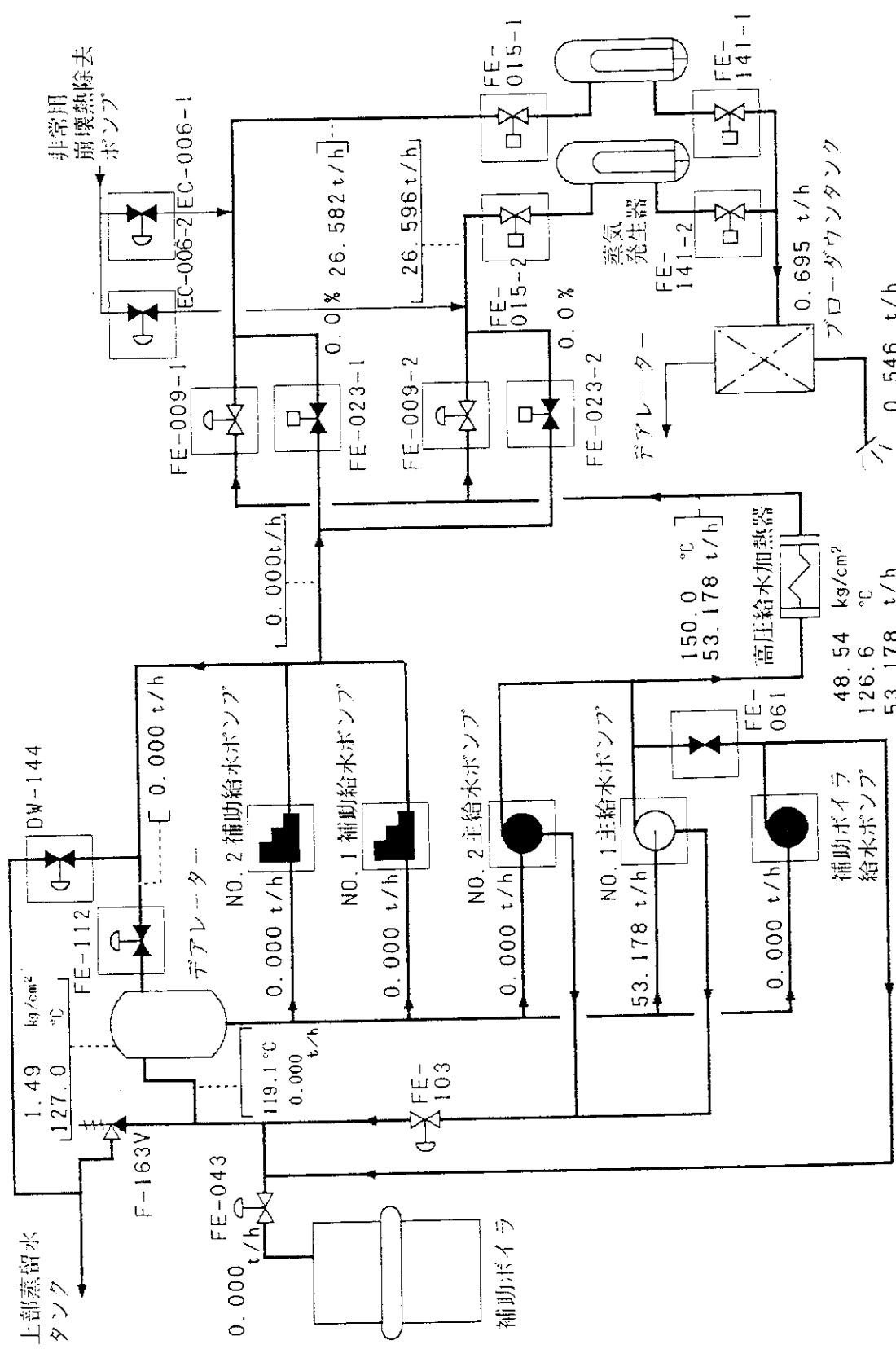


図 3.4.26 高 壓 水 給 水 管 系 統 図

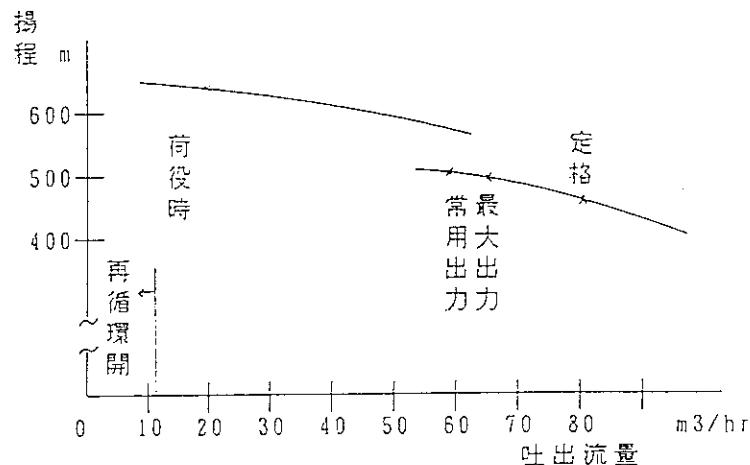


図3.4.27 主給水ポンプモデル特性曲線

### 3.4.7 電気系

本船には、船及び原子炉の安全に必要な負荷へ電力を連続して供給できるよう主発電機2台、補助発電機2台、非常発電機1台及び制御計装用蓄電池の各電源が装備されている。

主発電機は原子炉または補助ボイラより蒸気を得て運転され、船内の全電力をまかなう。使用台数は通常航海中2台である。水冷ディーゼルの補助発電機は補助ボイラ室に装備され、原子炉スクラムの場合あるいは主発電機が使用不能の場合等に使用され、原子炉及び船の安全に必要な負荷、機器の保全に必要な負荷等への電力を確保する。補助発電機は原子炉スクラム時に2台とも自動起動され、その内1台が選択自動投入される。「むつ」における補助発電機は一般の陸上発電プラントの非常用発電機に相当する。空冷ディーゼルの非常発電機は非常発電機室に装備され、主発電機及び補助発電機がすべて使用不能の場合に使用され、原子炉の安全に必要な負荷への最小限の電力を確保する。制御計装用電源は、制御計装用蓄電池、制御計装用配電盤、制御計装用等で構成される。計測制御負荷すなわち、核計装、原子炉プロセス計装、放射線監視計装等の負荷への電力は、制御計装用配電盤より電動発電機を経て計装用分電盤より供給される。制御計装用配電盤への電力は主配電盤、非常配電盤及び制御計装用蓄電池のいずれからでも供給できる。計測用蓄電池は、他の使用している電源が不意に停電した場合も直ちに自動的に切り換わり、瞬時の停電もなく制御計装負荷に給電できる。

電気系統のプログラムは、電力積算処理プログラムと発電機制御処理プログラムから構成される。電力積算処理プログラムはFORTRAN言語で、発電機制御処理プログラムは演算要素プログラムPOLで記述されている。

電力積算処理プログラムでは、各種発電機の稼働状況と電力負荷状況を計算している。

発電機制御プログラムでは、発電機制御および電気系統インターロックを模擬している。各発電機と母線との関係を図3.4.28に示す。原子炉スクラム時等に補助発電機と非常用発電機を自動起動させて電力を確保する非常給電指令の概略の流れを示す非常給電指令盤を図3.4.29に示す。

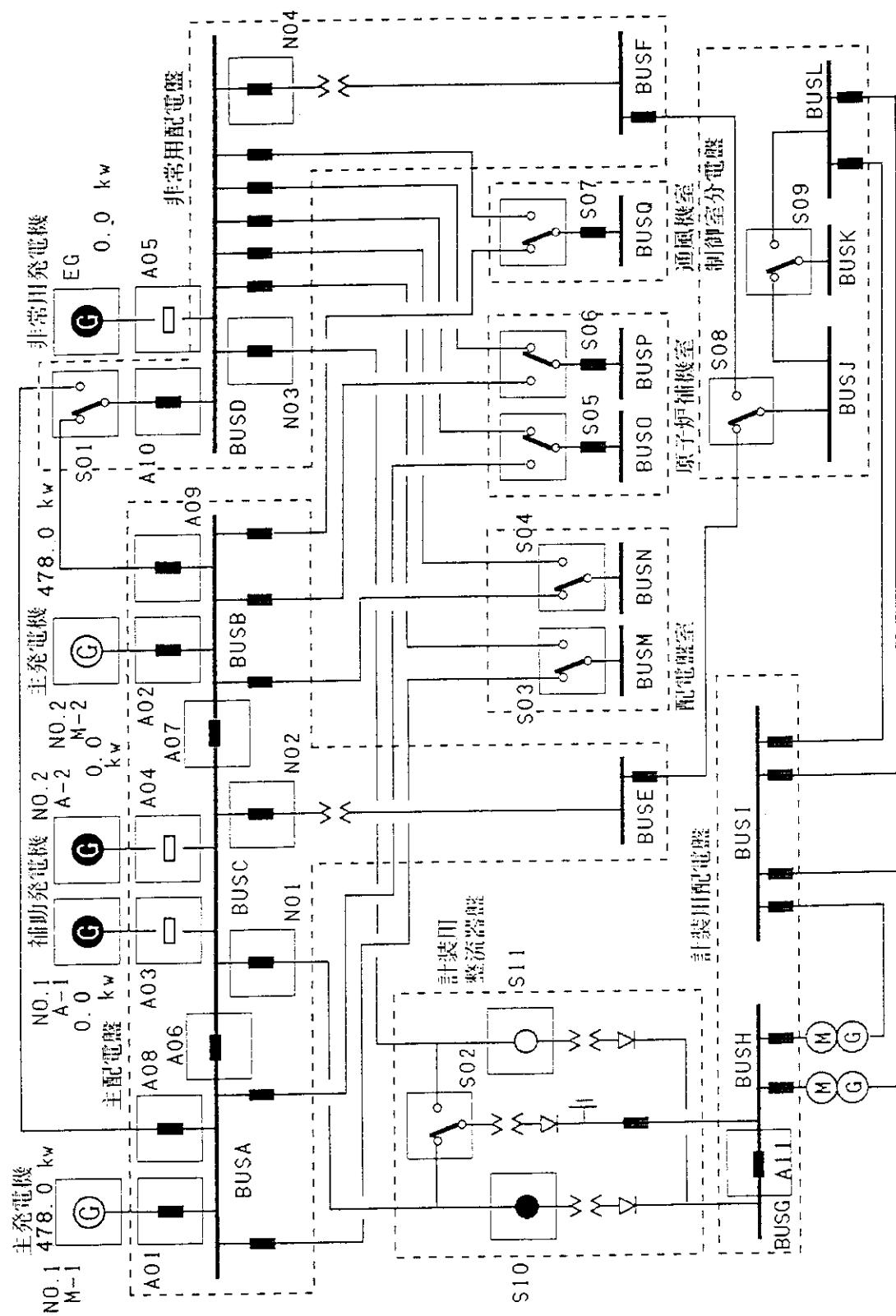


図 3.4.28 船内電源系統モル

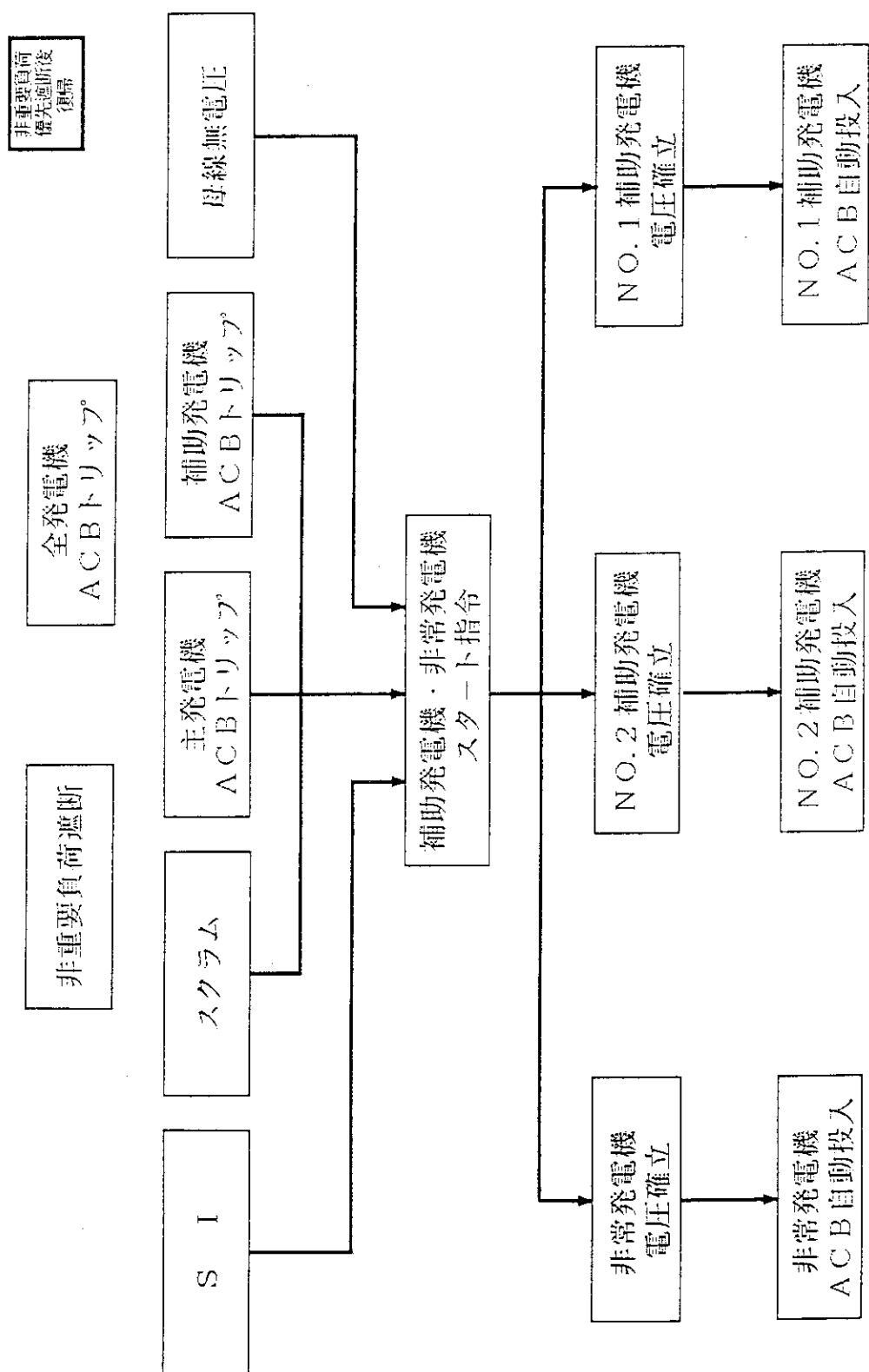


図 3.4.29 非常給電指令盤

### 3.4.8 プロセス制御系

本シミュレーションモデルでは、汎用演算プログラムを用いて原子力船「むつ」のプロセス制御系を忠実に模擬している。

#### (1) 原子炉出力制御系

原子炉出力制御系は、一次冷却水平均温度を設定範囲に制御しつつ原子炉出力を負荷に追従制御させるための設備で、一次冷却水温度と設定値の偏差と、平均中性子束と蒸気和流量の不完全微分を温度換算した値との和を制御棒制御系の偏差信号としている。

原子炉出力制御系モデルのロジック図および設定値を図3.4.30に示す。また、偏差信号による自動制御棒の動作を図3.4.31に示す。

制御棒駆動速度は80mm/minである。

原子炉出力制御系の自動投入条件および手動復帰条件を表3.4.11に示す。

原子炉起動時には、表3.4.12に示す条件が満足されなければ、制御棒の引き抜きを阻止する起動インターロックモデルが組み込まれている。

#### (2) 蒸気ダンプ制御系

蒸気ダンプ系は、原子炉運転中における急激な負荷減少の際、蒸気発生器の圧力信号により主ダンプ弁を開き、約18t/hの蒸気を直接復水器へ流して、蒸気発生器の圧力上昇ならびに一次冷却系の圧力および温度上昇を緩和する。

蒸気ダンプ制御系モデルのブロック図と設定値を図3.4.32に示す。操作スイッチにより手動で弁を開くときには、インターロック1には関係なく、インターロック2および3が満たされていれば良い。ダンプ弁が一旦開となるとインターロック3はバイパスされる。これはダンプ弁が開いたことにより蒸気流量が設定値以上となって弁が閉となることを防止するためである。

#### (3) 給水制御系

蒸気発生器水位制御設備は、給水ポンプ、給水制御弁およびこれらの制御設備から構成される。制御設備は、蒸気発生器水位、蒸気流量および給水流量を検出して給水弁の開度を制御する給水制御系と給水弁の前後差圧を検出し給水ポンプガバナ弁の開度を制御する給水弁差圧一定制御の系統が組み合わされている。ここでは、前者の給水制御系のモデル化を記述する。

給水制御モデルのブロック図と設定値を図3.4.33に示す。

#### (4) 加圧器圧力制御系

加圧器圧力制御設備は、加圧器ヒータ、加圧スプレイ、加圧器逃がし弁およびそれらの制御設備から構成され、一次冷却水圧力を一定に保持するための設備である。

加圧器圧力制御系モデルの各機器作動条件を表3.4.11～3.4.16に、加圧器圧力制御動作図を図3.4.34に示す。

### (5) 加圧器水位制御系

加圧器水位制御設備は、抽出制御弁、充填ポンプ、低圧抽出調整弁およびそれらの制御設備で構成され、抽出流量を制御することにより炉出力に応じて定められた水位を保持するほか、起動時の加圧器が満水の状態では主冷却系統の圧力制御を行う。

加圧器水位制御系モデルの全体ブロック図を図3.4.35に示す。また、加圧器圧力制御系作動設定値を表3.4.17に示す。加圧器水位を制御する抽出流量制御系は3つの制御モードをもつ。各モードの概略を以下に示す。シミュレーションモデルでは、各運転モードを忠実に再現している。

#### 1) OFFモード

主冷却系統満水時の圧力制御を行うモードである。原子炉起動時に加圧器に気相を生成するまでの運転モードで、低圧抽出ライン圧力調節計PIC LC-7により低圧抽出流量制御弁LC-011を自動調整し、主冷却系統圧力を一定とする。

本モードにおける抽出流量制御機能線図を図3.4.36に示す。

#### 2) LOW PRESSモード

主冷却系統低圧時の加圧器水位制御モードである。原子炉起動時および停止時の主冷却系統圧力が低い場合の運転モードで、加圧器水位偏差信号は制御信号一致演算器を経て低圧抽出ライン圧力調節計PIC LC-7の設定値となり、同調節計で低圧抽出流量を自動制御し、加圧器水位を一定に維持する。

本モードにおける抽出流量制御機能線図を図3.4.37に示す。

#### 3) HIGH PRESSモード

主冷却系統高圧時の加圧器水位制御モードである。原子炉通常運転時に抽出流量制御弁LC-006-1A,BまたはLC-006-2A,Bのいずれか一方を自動制御し、加圧器水位のプログラム制御を行う。また、低圧抽出量制御弁は低圧抽出ライン圧力が一定となるように自動制御される。

本モードにおける抽出流量制御機能線図を図3.4.38に示す。

### (6) その他のプロセス制御系モデル

上記(1)～(5)に含まれなかった各種プロセス制御系モデルの設定値は本報告書では省略する。

表 3.4.11 原子炉出力制御系モデルの自動制御可能条件

	条 件
自動投入条件 右の条件を全て満足した時に自動投入が可能となる	① $T_{avg}$ 自動制御上下限内 ② 中性子束レベル 10% 以上 ③ 蒸気流量 10% 以上 ④ 非スクラム ⑤ 制御棒自動制御上下限内 ⑥ 自動制御棒指定切換スイッチとグループ選択スイッチが同一グループを選択している
手動復帰条件 右のいずれかの条件が発生した時に手動に復帰する	① 手動復帰ボタン作動 ② 蒸気流量 10% 以下 ③ 自動制御に選択されているグループが、制御棒自動制御上下限内より逸脱した ④ グループ選択スイッチの切換 ⑤ 全挿入スイッチ作動 ⑥ スクラム

表 3.4.12 原子炉起動時インターロックモデル

	条 件
① ② ③ ④	線源領域計数率が 2 チャンネルとも設定値以上 モード選択スイッチが "START" 位置 全制御棒下限位置 スクラム状態ではない

表 3.4.13 「むつ」モデル定常ヒータ作動設定値

調 節 計	設 定 値
PIC MC-18B	10.89 MPa

表 3.4.14 「むつ」モデル過渡ヒータ作動設定値

過渡ヒータは、次に掲げる条件によりONとなり、条件が解除されれば、OFFとなる。

項 目	設 定 器	制 御	設 定 値
加圧器圧力（低）	P C MC-18B	ヒータ Gr 1～4	10.40 MPa
	P C MC-17B	ヒータ Gr 5～8	
加圧器水位（高）	L C MC-26C	HEATER ALL ON	60 %
	L C MC-27C		
定常ヒータ全出力	(電圧調整器付の上限リミットスイッチによる作動)		

また、過渡ヒータは、次に掲げる条件によりEMERGENCY CUT OFFとなる。

項 目	設 定 器	制 御	設 定 値
スクラム信号			*
非重要負荷遮断信号			*
ヒータの接地		接地したグループのみ CUT OFF	**
加圧器水位低	L C MC-26B	HEATER CUT OFF (荒天)	29.5 %
	L C MC-27B	HEATER CUT OFF (晴天)	17.7 %

注) \* バックアップヒータ選択スイッチで選択されたグループ (Gr 5～8 のうち 1 グループ) は、スクラム及び非重要負荷遮断信号では CUT OFF されない。  
 \*\* 定常ヒータも CUT OFF される。

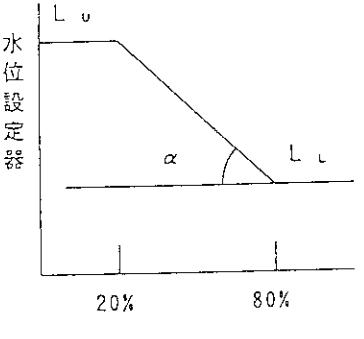
表 3.4.15 「むつ」モデル加圧器スプレイ弁作動設定値

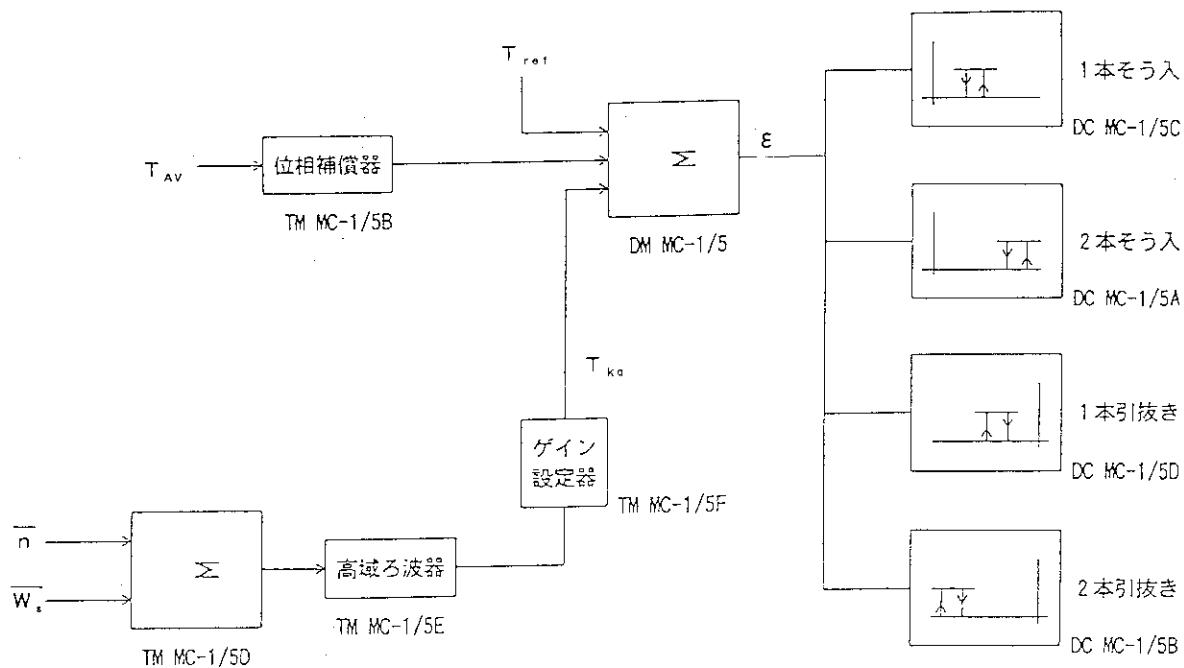
調 節 計	設 定 値
PIC MC-17 及び PIC MC-18A	11.13 MPa (PIC MC-17) 11.53 MPa (PIC MC-18A)

表 3.4.16 「むつ」モデル加圧器逃がし弁作動設定値

設 定 器	制 御	設 定 値
P C MC - 17 A	弁 MC - 016 - 2 開	12.36MPa
	弁 MC - 016 - 2 閉	12.07MPa
P C MC - 18 A	弁 MC - 016 - 1 開	12.36MPa
	弁 MC - 016 - 1 閉	12.07MPa

表 3.4.17 「むつ」モデル加圧器水位制御系作動設定値

項 目	設 定 器・調 節 計	設 定 値
加圧器水位	F M S T - 1 C / S T - 2 C  水位設定器 炉出力 (蒸気和流量) 20% 80%	炉出力 20% 時水位 55% (L_u) 炉出力 80% 時水位 43.6% (L_L) 水位変化率 ( $\alpha$ ) -0.19%/%
抽出量制御 一次調節	L I C MC - 27	P B = 25%, T = 25 min
抽出量制御 カスケード制御	F I C L C - 11	P B = 300%, T = 1.3 min
低圧減圧抽出 制御	P I C L C - 7	設定圧力 手動設定器 HIC LC-7 による : OFFモード LIC MC-27 による カスケード入力 : LO.P モード 手動設定器 HIC LC-7 による : HI.P モード
充填ポンプ 2 台目起動及び 弁LC-001閉	L C MC - 26 C L C MC - 27 C	設定水位 20%



入 力	演 算 器	名 称	出 力	設 定 値
$T_{av}$	TM MC-1/5B	位相補償器 $T_{av}$	$\tilde{T}_{av}^* = \frac{1}{1 + \tau_1 s} \left( 1 + K \frac{\tau_2 s}{1 + \tau_2 s} \right) T_{av}$	$K = 1.0$ $T_1 = 1.8$ $T_2 = 2.0$
$n - W_s$	TM MC-1/5E	高域炉波器	$(n - W_s) \frac{\tau_2 s}{1 + \tau_2 s}$	$T_g = 4.0$
$(n - W_s) \frac{\tau_2 s}{1 + \tau_2 s}$	TM MC-1/5F	ゲイン設定器	$T_{kw} = (n - W_s) \frac{\tau_2 s}{1 + \tau_2 s} \cdot K_g$	$K_g = 0.3^\circ C / \%$
	TM MC-1/5C	手動設定器 基準温度信号	$T_{ref}$	$273.5^\circ C$
$T_{kw}, \tilde{T}_{av}^*, T_{ref}$	DM MC-1/5	演算器 $\epsilon$	$\epsilon = T_{kw} + \tilde{T}_{av}^* - T_{ref}$	
$\epsilon$	DC MC-1/5A	調節器	rod 2 本挿入	$5.0^\circ C$
$\epsilon$	DC MC-1/5C	調節器	rod 1 本挿入	$1.2^\circ C$
$\epsilon$	DC MC-1/5B	調節器	rod 2 本引抜	$-5.0^\circ C$
$\epsilon$	DC MC-1/5D	調節器	rod 1 本引抜	$-1.2^\circ C$

図 3.4.30 原子炉出力制御系モデルブロック図

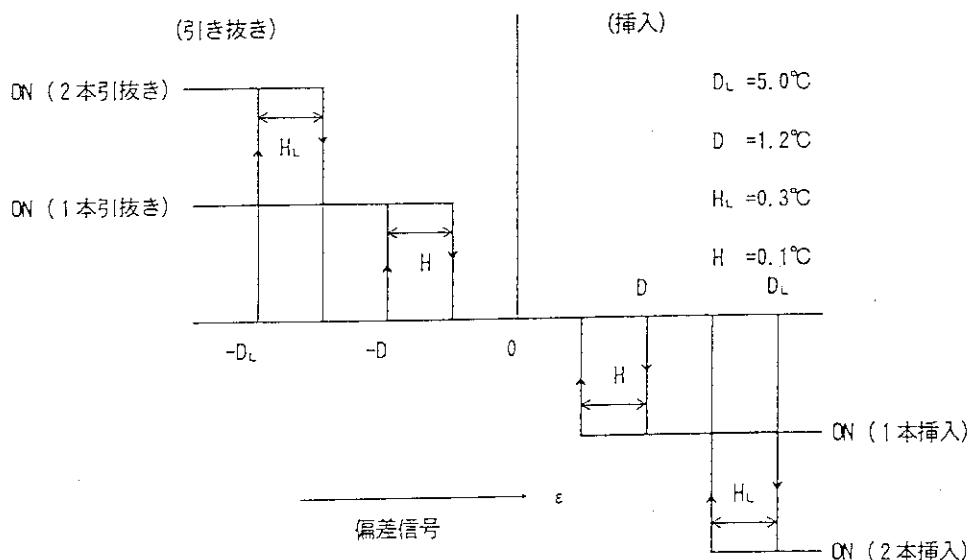
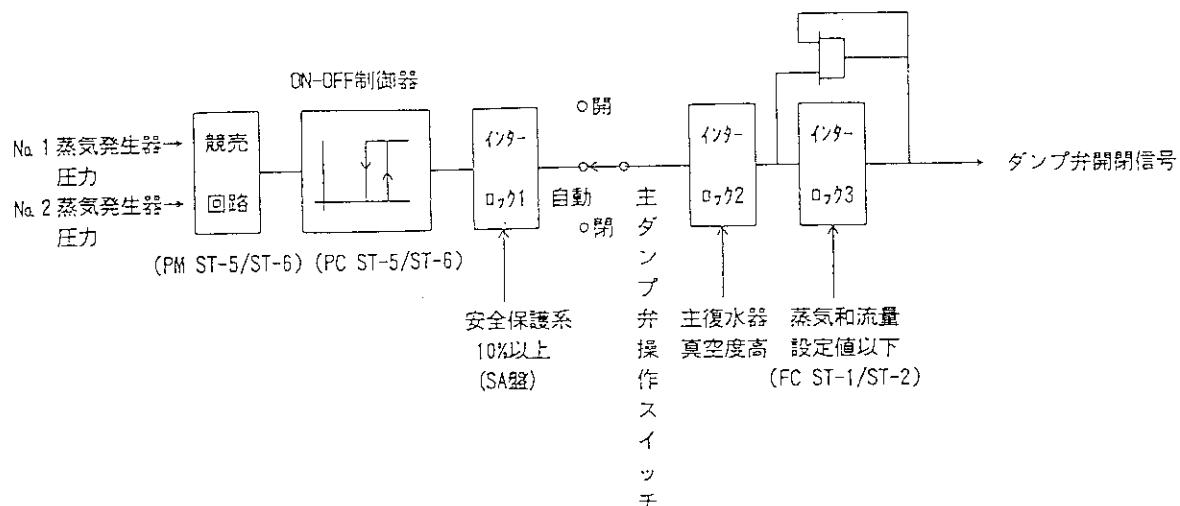
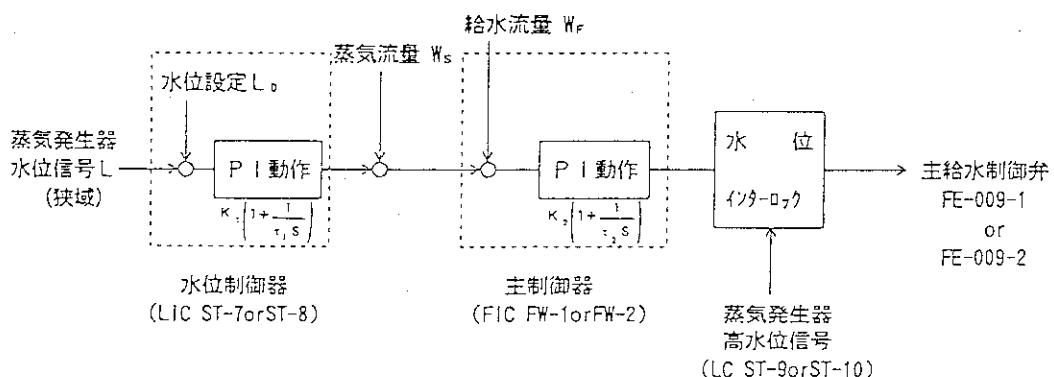


図 3.4.31 原子炉出力制御系モデル自動制御棒の動作



主ダンプ弁(ST-102)の作動設定値	
主蒸気ダンプ弁開	6.23MPa
主蒸気ダンプ弁閉	5.84MPa
インタ-ロック設定値、以下の条件で許可	
原子炉出力(SA盤)	10%以上
主復水器圧力	0.017MPa以下
蒸気和流量	16t/h以下

図 3.4.32 蒸気ダンプ制御系モデルブロック図



項目	設定器	設定値
蒸気発生器水位	LIC ST-7 LIC ST-8	基準水位 70 % (NARROW) $K_1 = 0.75\% \text{ 格定流量} / \% \text{ 水位偏差}, \tau_1 = 150\text{秒}$
給水流量	FIC FW-1 FIC FW-2	$K_2 = 1.0\% \text{ 弁開度} / \% \text{ 流量偏差}, \tau_2 = 20\text{秒}$
蒸気流量	FM ST-1B FM ST-2B	
高水位インターロック (主及び補助給水制御弁閉)	LC ST-9 LC ST-10	設定水位 98.3% (WIDE)
高水位インターロック (給水塞止弁閉)	LC ST-7 LC ST-8	設定水位 96.1% (NARROW)

図 3.4.33 給水制御系モデルブロック図

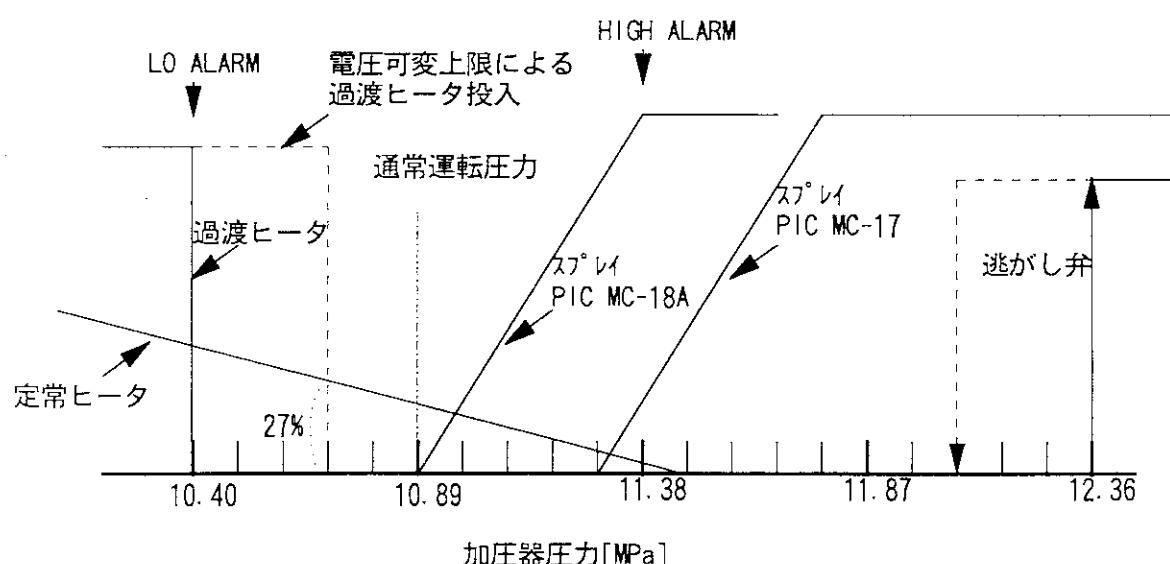


図 3.4.34 加圧器圧力制御動作図

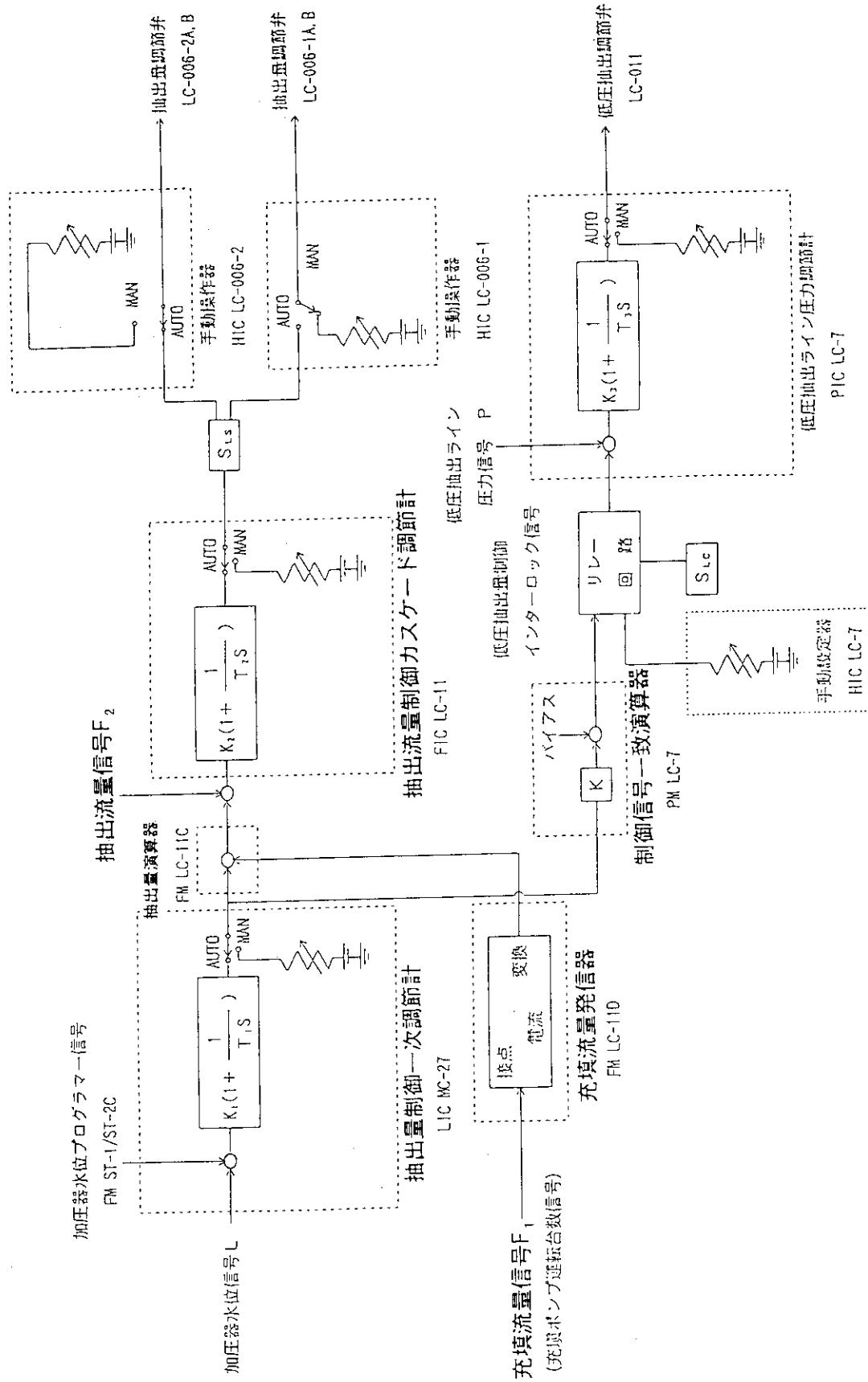


図 3.4.35 加圧器水位制御系モデル全体ブロック図

## 操作器の位置

LOOP SELECT SW S <sub>Ls</sub>	MODE SELECT SW S <sub>lc</sub>	操作器 HIC LC-006-1	操作器 HIC LC-006-2	操作器 PIC LC-7	手動設定器 HIC LC-7
No. 1 又は No. 2	OFF	MAN	MAN	AUTO	1.18 MPa

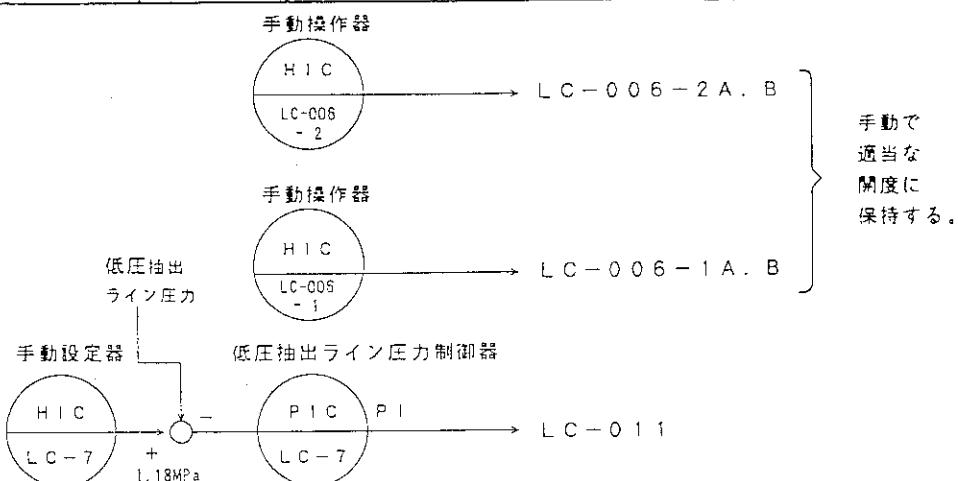


図 3.4.36 OFF モード抽出流量制御機能線図

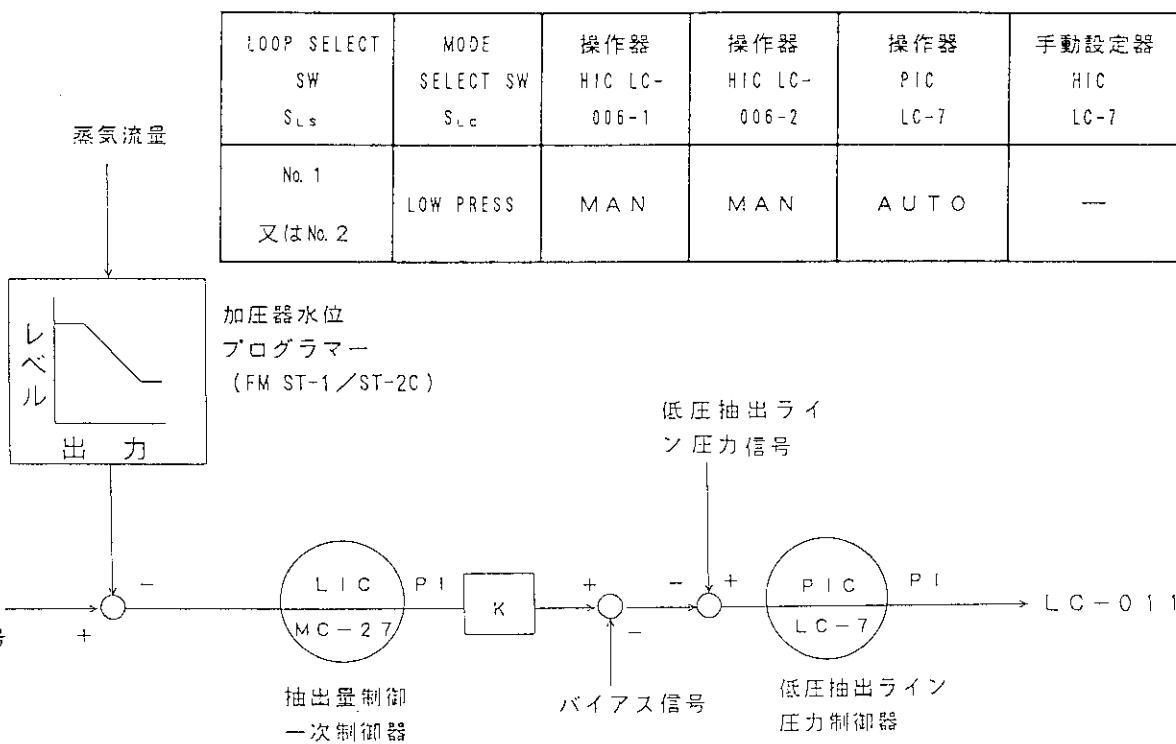


図 3.4.37 LO PRESS モード抽出流量制御機能線図

LOOP SELECT SW S <sub>Ls</sub>	MODE SELECT SW S <sub>Lo</sub>	操作器 HIC LC-006-1	操作器 HIC LC-006-2	操作器 PIC LC-7	手動設定器 HIC LC-7
No. 1 又は No. 2	HIGH PRESS	AUTO (又は MAN)	MAN (又は AUTO)	AUTO	1.57 MPa

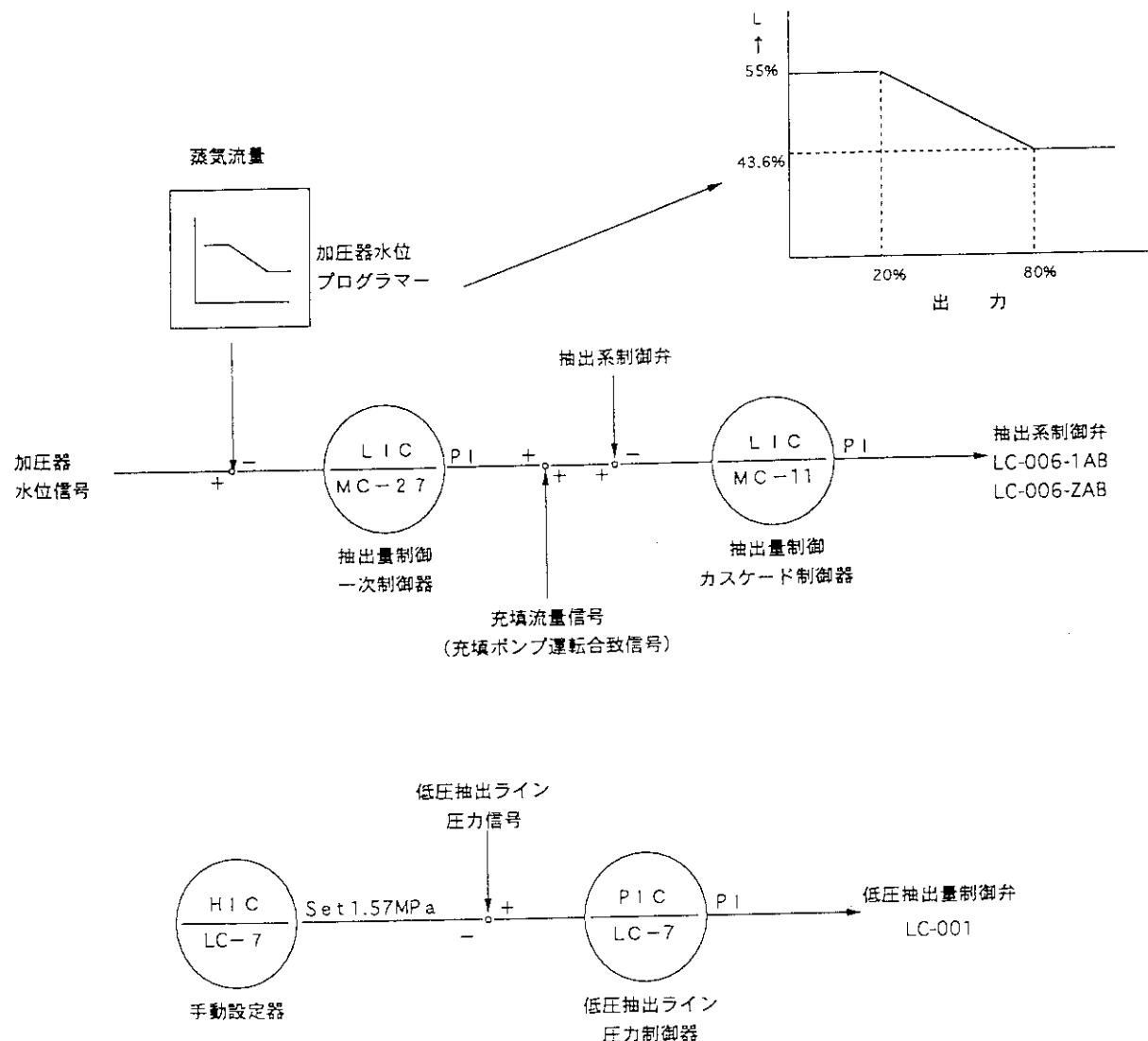


図 3.4.38 HI PRESS モード抽出流量制御機能線図

### 3.4.9 安全保護系統

#### (1) 概要

安全保護系統モデルは、原子炉およびプラントの安全を確保するため、原子炉が異常状態に近づいたときに制御棒引き抜き禁止、スクラム等の安全処置を行う系統を模擬する。

安全保護系統モデルは大きく分けてつきの5つの機能から構成される。

- ①スクラム回路
- ②ロッドストップ回路
- ③低流量保護回路
- ④非常用冷却設備作動回路
- ⑤低出力インターロック回路
- ⑥警報回路

これらの回路は高度の安全性を確保し、また不必要的停止を避けるために、独立性、FAIL SAFE、多重性を考慮した設計となっている。本シミュレーションモデルはこの回路を忠実に再現している。

以下の各回路モデルの概要を示す。

#### (2) スクラム回路モデル

スクラム回路モデルは、全制御棒の電磁クラッチの電源を切り、スクラムスプリングにより制御棒を急速に炉心内に挿入するための信号を発生する回路を模擬している。スクラム条件は表3.4.18に示す通りである。スクラム回路のブロック図を図3.4.41に示す。図に示すように同一内容の独立したXトレイン回路、Yトレイン回路の2回路よりなり、いずれか一方の回路のスクラム信号により原子炉スクラムが発生する。

#### (3) 低出力インターロック回路モデル

低出力インターロック回路モデルは、スクラム回路、ロッドストップ回路、蒸気ダンプ制御回路等に10%以上、あるいは10%以下のインターロック信号を出す回路を模擬している。インターロックの設定値を表3.4.19に、モデルブロック線図を図3.4.42に示す。

#### (4) ロッドストップ回路モデル

原子炉起動時および運転時の事故を防止するために制御棒の引き抜きを禁止する回路を模擬している。制御棒引き抜き禁止の作動条件は、表3.4.20に示す。また、ロッドストップ回路モデルのブロック図を図3.4.43に示す。

#### (5) 低流量保護回路モデル

一次冷却水流量が低下した場合の保護回路を模擬している。低流量保護回路モデルの作動条件を表3.4.21に、ブロック図を図3.4.44に示す。

(6) 非常用炉心冷却設備作動回路モデル

非常用炉心冷却設備作動回路モデルは、一次冷却水喪失事故時に炉心に冷却水を注入し燃料および被覆管の重大な損傷を防ぐための設備を作動させる回路を模擬している。本回路モデルの作動条件を表3.4.22に、同回路の簡略化したブロック図を図3.4.45に示す。

(7) 格納容器スプレイ設備作動回路モデル

格納容器スプレイ設備作動回路モデルは、一次冷却水喪失事故時の格納容器の減圧およびよう素の除去を目的としたスプレイ設備の作動信号を発生する回路を模擬している。同回路モデルの作動条件を表3.4.23に示す。

表 3.4.18 原子炉スクラム回路モデル設定値

スクラム信号の種類	設 定 値	スクラムに要する検出器の数	
中間領域起動率 (高)	5 D. P. M	1 / 2	**
出力領域出力 (高)	START モード 25% RUN モード 115% 単ループ運転 60%	2 / 4	
一次冷却水圧力 (低) (低圧スクラム)	$P_{sc} \geq P$ (測定値) 注) $P_{sc}$ については 図 3. 4. 39 による。	1 / 2	*
一次冷却水圧力 (高) (高圧スクラム)	$T_{sc} \geq T_c^2$ (測定値) 注) $T_{sc}$ については 図 3. 4. 40 による。	1 / 2	*
非常用炉心冷却設備 (動作)	表 3. 4. 22 による。		
加圧器水位 (高)	80%	2 / 2	*
一次冷却水流量 (低)	測定範囲の 72% 両ループの一次冷却水流量(低) 又は、両ループの高速側電源喪失	2 / 2	*
	測定範囲の 36% No. 1 ループについて、一次冷却水流量(低)又は高速側・低速側とも電源喪失、かつ、No. 2 ループについて、一次冷却水流量(低)又は高速側・低速側とも電源喪失	2 / 2	**
蒸気発生器水位 (低)	WIDE RANGE 62. 1% NARROW RANGE 12. 5%	1 / 2	*

スクラム信号の種類	設定値	スクラムに要する検出器の数
制御棒 (落下)	1本下限位置	1／12
制御棒グループ内 位置差 (過大)	100 mm	1／10
船体傾斜 (過大)	60° (60秒以内)	2／3
制御棒駆動装置 封水戻り温度 (高)	90°	1／12
手動スクラム	スクラムボタンを押したとき	

\*印 出力領域核計装及び蒸気和流量が同時に定格値の10%以下の場合はブロックされる。

\*\*印 出力領域核計装及び蒸気和流量が定格値の10%以上の場合はブロックされる。

表 3.4.19 低出力インターロック回路モデル設定値

インターロック信号	設定値	作動条件	
蒸気和流量	10%	1／1	同時信号 10%以下
出力領域核計装平均出力		1／1	

表 3.4.20 ロッドストップ回路モデル設定値

インターロック信号	設 定 値	設 定 器	作動条件	補 足
線源領域起動率 (高)	1.5 D. P. M	N I - 1 (N M 1 1 5)  N I - 2 (N M 1 1 5)	1台の信号設定値を超えた ならば制御棒 の引抜禁止	蒸気和流量及び 出力領域核計裝 平均出力が同時 に定格値の10% 以下のとき
中間領域起動率 (高)	1.5 D. P. M	N I - 3 (N M 2 1 1)  N I - 4 (N M 2 1 1)		
出力領域核計裝出力 (高)		N I - 7 (N M 3 0 4)		
START モード時	17%	N I - 8 (N M 3 0 4)		
RUN モード時	111%	N I - 9 (N M 3 0 4)		
単ループ運転時	56%	N I - 10 (N M 3 0 4)		
起動インターロック	線源領域計数率	2 C P S	N I - 1 (N M 1 1 4)  N I - 2 (N M 1 1 4)	一方の信号が 設定値以下
	制御棒位置	全制御棒下限位置以外		
	運転モード	START モード以外		
	スクラム信号	発 信		

表 3.4.21 低流量保護回路モデル設定値

信 号 の 種 類	設 定 値	設 定 器	備 考
No. 1 一次冷却水ポンプ電源喪失	高速側電源の喪失		原子炉出力 10% 以上の場合
No. 2 一次冷却水ポンプ電源喪失			
No. 1 一次冷却水流量低	7 2 %	F C M C - 2 1	
No. 2 一次冷却水流量低		F C M C - 2 3	
No. 1 一次冷却水ポンプ電源喪失	高速、低速電源の喪失		原子炉出力 10% 以下の場合
No. 2 一次冷却水ポンプ電源喪失			
No. 1 一次冷却水流量低	3 6 %	F C M C - 2 1	
No. 2 一次冷却水流量低		F C M C - 2 3	

上記条件のうち、どれか一つ入れば下記の作動が行われる。

- ・当該ループの主蒸気塞止弁 (S T - 0 0 1) 閉
- ・炉出力制御回路
- ・高温スクラム回路
- ・低温スクラム回路
- ・出力領域高中性子束スクラム設定値の変更 (115%→60%)

表 3.4.22 非常用炉心冷却設備作動回路モデル設定値

盤	No.	項 目	設 定 値	作 動 条 件		
SA	1	加圧器水位 (低)	17 %	1 / 1	同 時 信 号	
		一次冷却系圧力 (低)	7. 95 MPa	1 / 1		
	2	一次冷却系圧力 (異常低)	7. 46 MPa	2 / 3		
SB	3	格納容器圧力 (高)	0. 13 MPa	2 / 3 注 1		
	1	加圧器水位 (低)	17 %	1 / 1	同 時 信 号	
		一次冷却水圧力 (低)	7. 95 MPa	1 / 1		
SB	2	一次冷却系圧力 (異常低)	7. 46 MPa	2 / 3		
	3	格納容器圧力 (高)	0. 13 MPa	2 / 3 注 2		
手動		手動スイッチを操作した時				

注 1 一次冷却水圧力 (PC MC-16A) が設定値 (7.95MPa) 以上で自動ブロック

注 2 一次冷却水圧力 (PC DR-6A) が設定値 (7.95MPa) 以上で自動ブロック

表 3.4.23 格納容器スプレイ設備作動回路モデル設定値

項 目	設 定 値	作 動 条 件	
格納容器圧力 (異常高)	0. 30 MPa	2 / 3	同 時 信 号
S 1 信 号	発 信 済		
手動	手動スイッチ を操作した時	中央制御盤スイッチ 操舵室非常制御盤スイッチ	

①  $T_{sc} \leq T_c^*$

②  $P_{sc} = \begin{cases} P_{sc}^* & (P_{sc}^* \geq P_{min}) \\ P_{min} & (P_{sc}^* < P_{min}) \end{cases}$

③  $P_{sc} = K_s \left\{ \frac{1}{1+r_s S} \left( 1 + K \frac{r_s S}{1+r_s S} \right) T_u - \frac{1}{1+r_c S} T_c + 5 \right\} + K_s \left\{ \frac{1}{1+r_c S} T_c - 235 \right\} + 15 - K_s$

$T_{sc}^* = -K_s \left\{ \frac{1}{1+r_s S} \left( 1 + K \frac{r_s S}{1+r_s S} \right) T_u - \frac{1}{1+r_c S} T_c - 15 \right\} + K_s + 235$

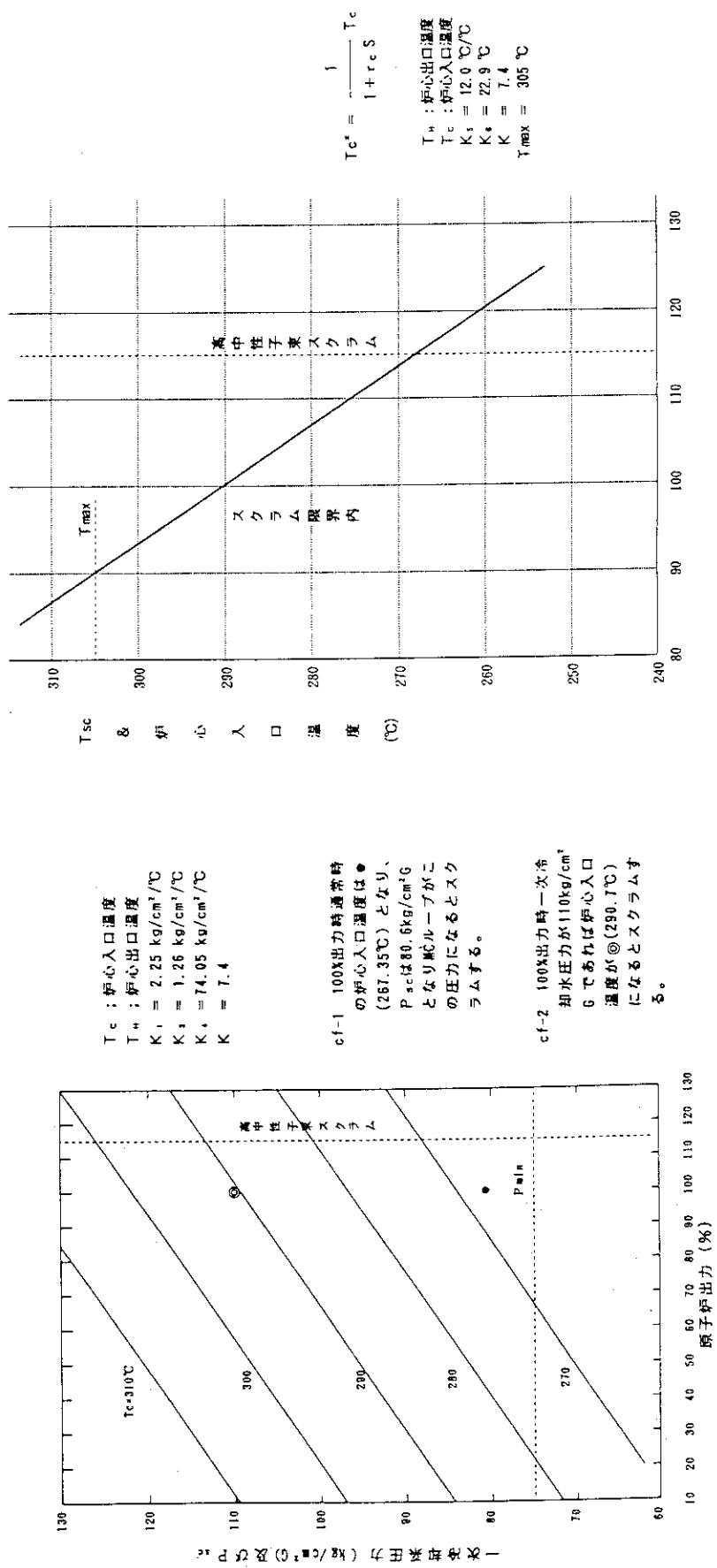
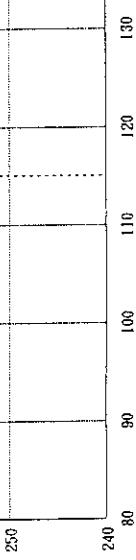


図 3.4.39 低圧スクラム説明図

図 3.4.40 高温スクラム説明図

原子炉出力 (%)



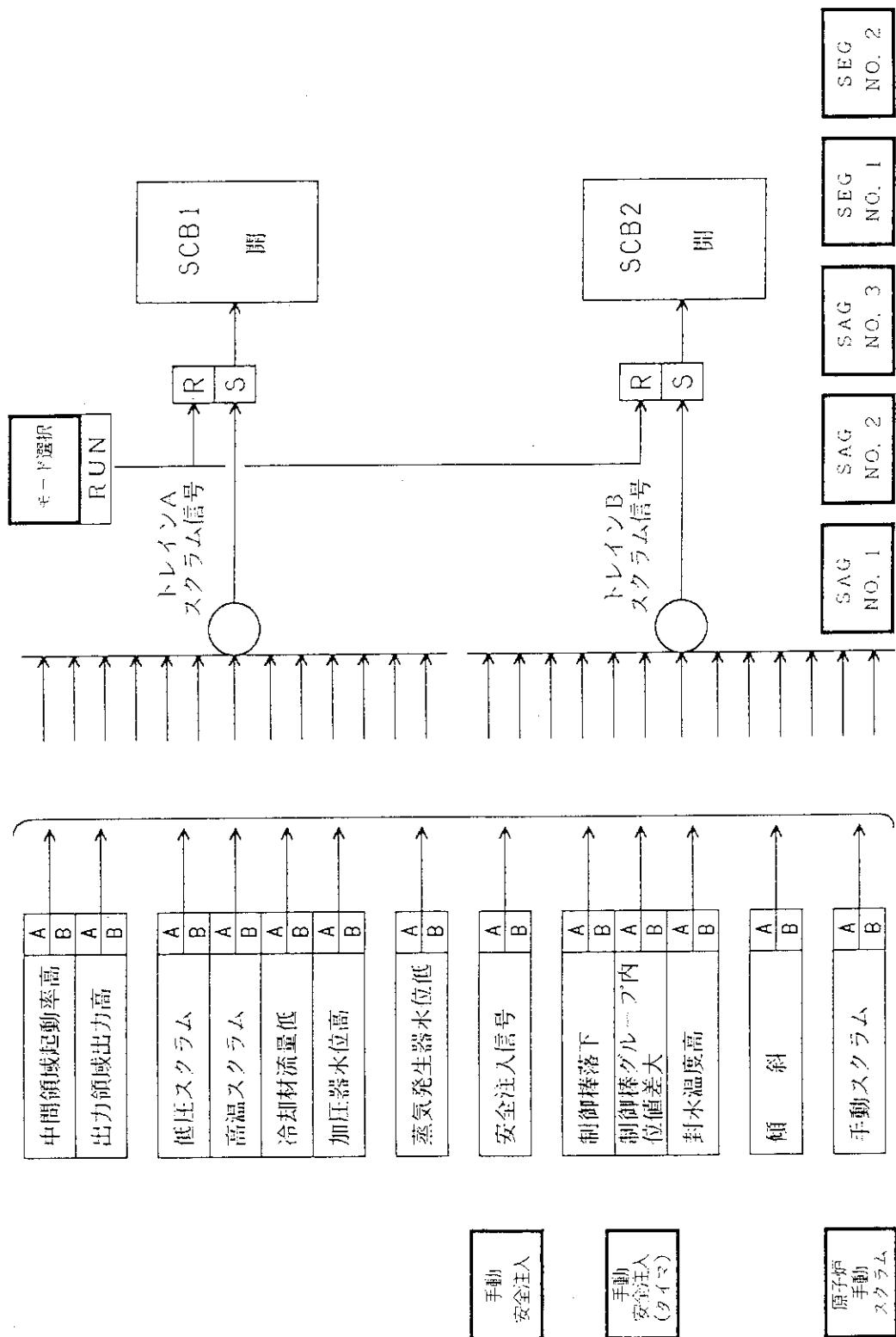


図 3.4.41 スクラム回路モデルブロック図

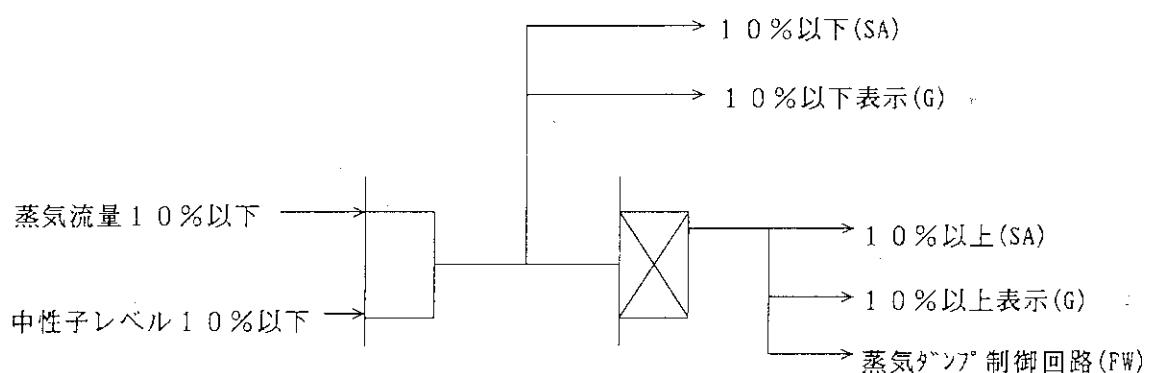


図 3.4.42 低出力インターロック回路モデルブロック線図

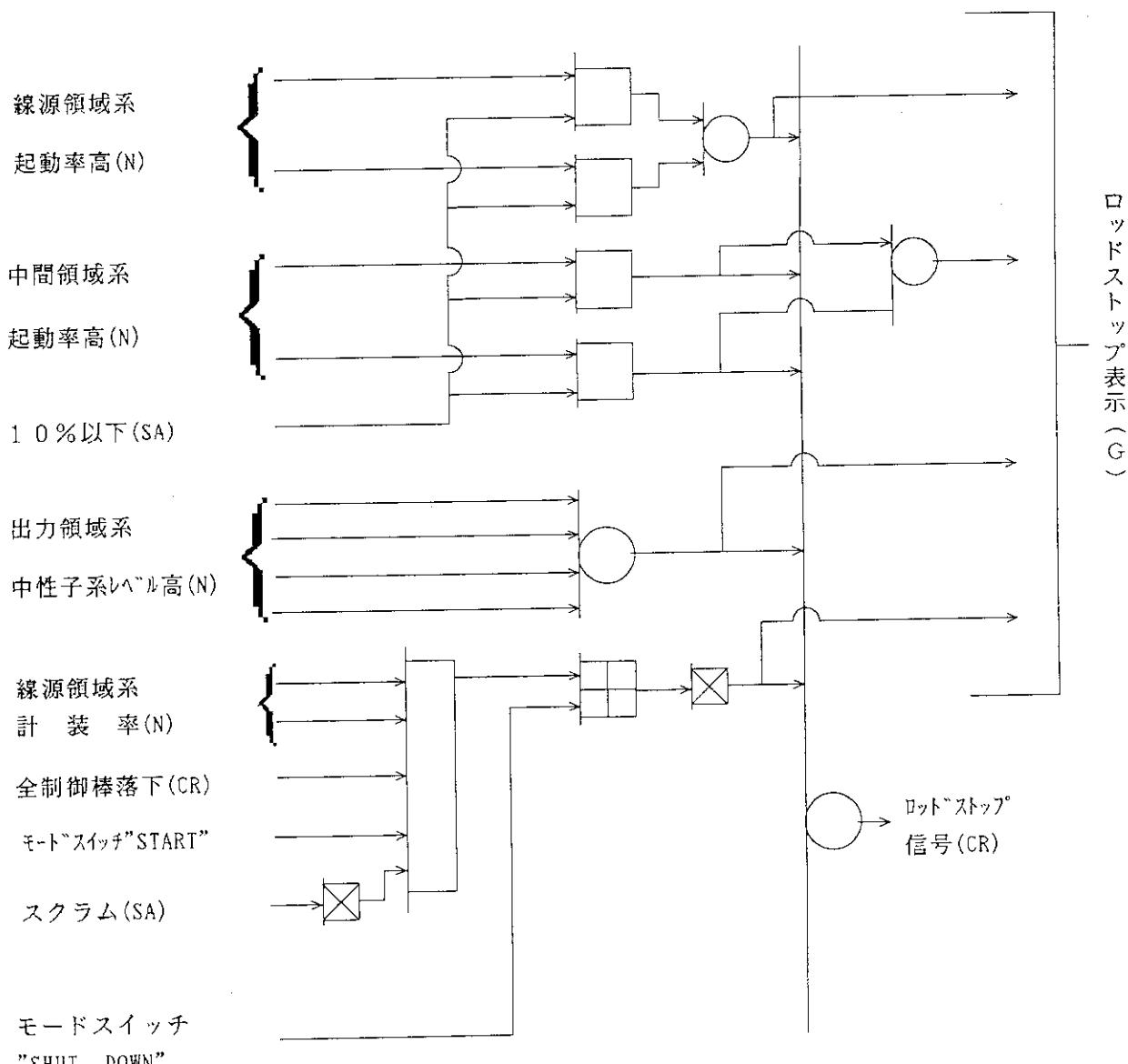


図 3.4.43 ロッドストップ回路モデルブロック線図

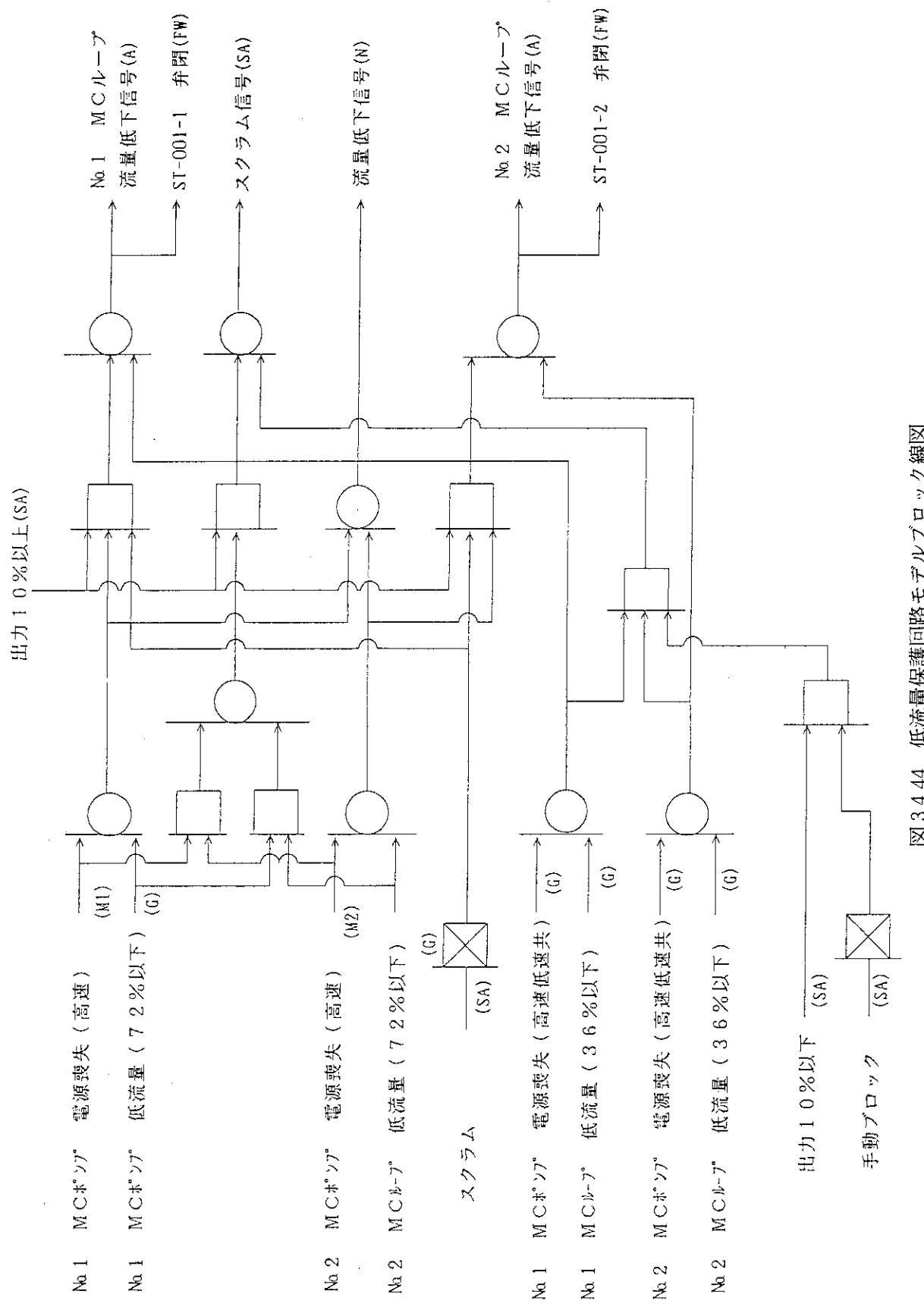
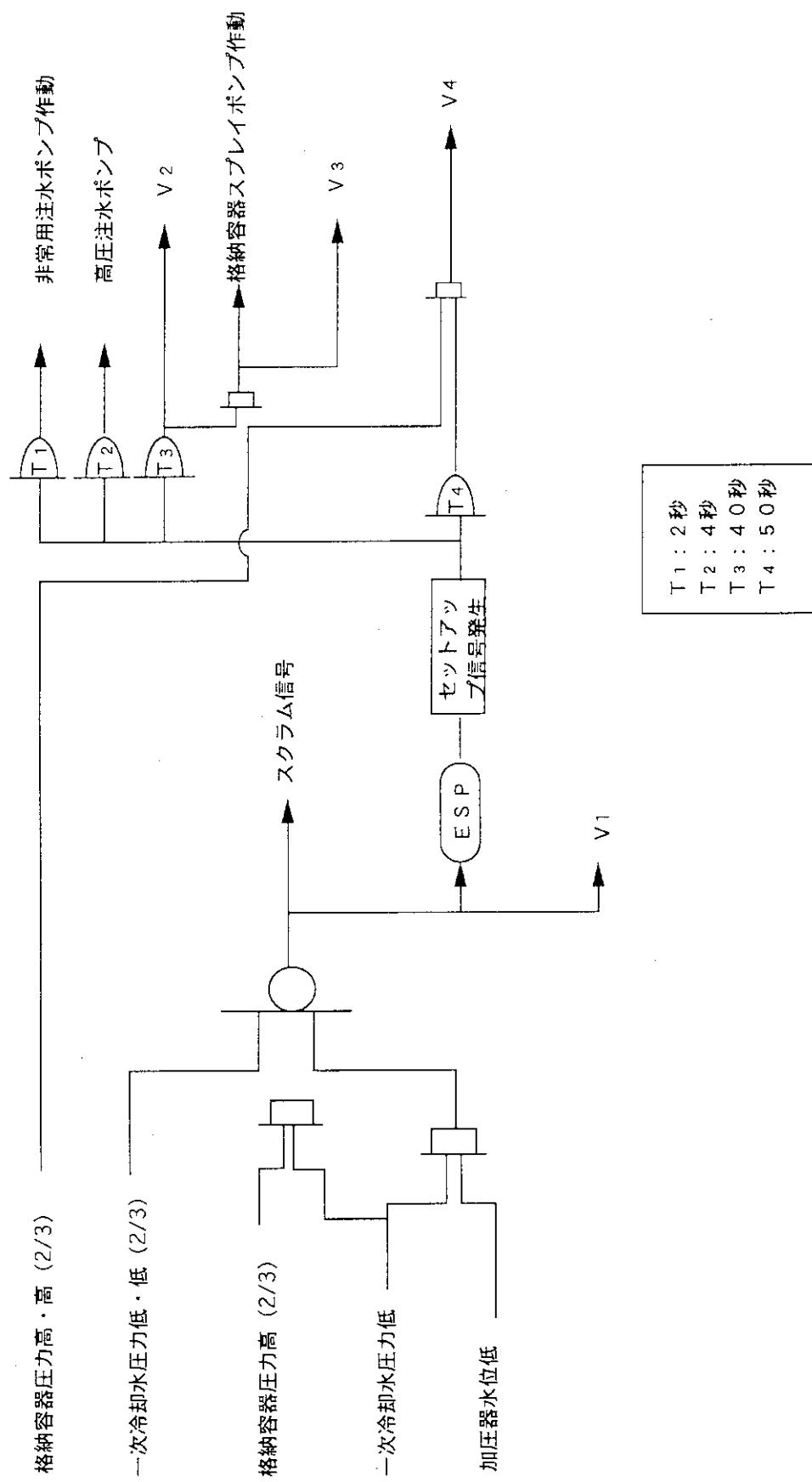


図 3.4.44 低流量保護回路モデルプロック線図



$V_1 \sim V_4$  信号の発生により図3.4.47非常用炉心冷却設備作動回路  
路モデルプロック線図(2/2) の弁が作動する。

図 3.4.45 非常用炉心冷却設備作動回路モデルプロック線図 (1/2)

信号	弁番号	弁名 称	動作	信号 弁番号	弁名 称	動作	
V1	S1-007-1	NO. 1 低圧非常用注水弁	☒	V3	S1-029 S1-045	格納容器スプレー弁 格納容器スプレー中間弁	☒ ☒
	S1-007-2	NO. 2 低圧非常用注水弁	☒				
	S1-014-1	NO. 1 高圧注水ライン格納容器隔離弁	☒	V4	CC-014-1 CC-014-2 CC-016-1 CC-016-2	NO. 1 余熱除去熱交換器冷却水入口弁 NO. 2 余熱除去熱交換器冷却水入口弁 NO. 1 余熱除去熱交換器冷却水出口弁 NO. 2 余熱除去熱交換器冷却水出口弁	☒ ☒ ☒ ☒
	S1-014-2	NO. 2 高圧注水ライン格納容器隔離弁	☒				
	S1-045	格納容器スプレー中間弁	☒				
	DC-011	格納容器サンドレンシングルポート弁	☒				
	DC-021-1	吐出タンクベント弁	☒				
	DC-051	格納容器サンドタンクベント隔離弁	☒				
V2	ST-001-1	NO. 1 蒸気発生器主蒸気塞止弁	☒				
	ST-001-2	NO. 2 蒸気発生器主蒸気塞止弁	☒				
	FE-141-1	NO. 1 蒸気発生器プローブワントン塞止弁	☒				
	FE-141-2	NO. 2 蒸気発生器プローブワントン塞止弁	☒				
	CM-006	封水注入ライン格納容器隔離弁	☒				
	CM-012	封水高压リーコフライン	☒				
	AS-028	格納容器外隔離弁	☒				
	LC-010A	制御用空気格納容器隔離弁	☒				
	LC-010B	抽出ライイン格納容器内側隔離弁	☒				
	LC-034	充填ライイン格納容器隔離弁	☒				
	LC-040	充填ライイン隔離弁	☒				
	CC-051	吐出タンク冷却水入口弁	☒				
	CC-055	吐出タンク冷却水出口弁	☒				

図3.4.45 非常用炉心冷却設備作動回路モデルプロック線図 (2/2)

### 3.4.10 船体モデル

本シミュレーションシステムに搭載した船体運動計算プログラムの内容は、3.3章に示した通りである。船体運動プログラムの全体の流れは図3.3.18に示している。本章では船体運動計算プログラムを用いて原子力船「むつ」シミュレーションを行うために準備した入力データをまとめた。

「むつ」の積み付け状態は、船用炉研究委員会・船体運動専門部会の検討に基づき、表3.4.24に示した冬季満載出港状態を想定した。この状態は以下の積みつけを仮定している。

- ①DEEP TK(C)は飲料水満載とする。
- ②No.1 BWT OR RES. W.Tは予備清水を積む。
- ③FOTは85%とする。
- ④BWはすべて清水とする。
- ⑤満載排水量は北太平洋冬季満載喫水線を超えない10,032TONとする。

用意した入力データ各項目について以下に概要を示す。

#### (1) 船体要目データ

冬季満載出港状態での船体要目ファイルを表3.4.25に示す。

#### (2) 規則波中船体運動応答関数ファイル

船用炉研究委員会・船体運動専門部会で開発されたプログラムを用いて上記状態の原子力船「むつ」の規則波中船体運動応答関数をファイル化した。計算条件を表3.4.26に示す。

#### (3) 船尾波高減衰係数ファイル

船尾波高減衰係数は、船体運動専門部会での検討に基づき次式によって得られる数値を用いた。

$$\begin{aligned} \chi &= 90 \text{ deg } \sim 180 \text{ deg } \sim 270 \text{ deg のとき} \\ \gamma &= 1.0 - \{0.5 - 0.2(\lambda/L)\} \cdot |\cos \chi| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi &= 0 \text{ deg } \sim 90 \text{ deg, } 270 \text{ deg } \sim 360 \text{ deg のとき} \\ \gamma &= 1.0 \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda$ ：波長 (m)、L：船長 (m)

#### (4) プロペラ単独特性ファイル

プロペラ単独特性は、理論計算結果を自航試験結果で補正したデータを設定した。プロペラの没水深度影響は類似船の試験データを修正して使用した。

#### (5) 流速減衰係数ファイル

船尾波高減衰係数は、船体運動専門部会での検討に基づき次式によって得られる数値を用いた。

$$\begin{aligned} \chi &= 90 \text{ deg } \sim 180 \text{ deg } \sim 270 \text{ deg のとき} \\ C_w &= 1.0 - 0.754 \cdot |\cos \chi| \cdot e^{-0.634 \cdot \lambda/L} \end{aligned}$$

$\chi = 0 \text{ deg} \sim 90 \text{ deg}, 270 \text{ deg} \sim 360 \text{ deg}$  のとき

$$C_w = 1.0$$

ここで、 $\lambda$ ：波長（m）、L：船長（m）

#### (6) 横揺非線形ファイル

横揺非線形データは、船舶技術研究所報告第16巻第5号の模型実験データを用いて横揺れ角非線形修正値を設定した。

#### (7) 船速・有効馬力ファイル

実験航海における速力試験結果に基づき算定された平水中における有効馬力曲線を船速を基準として設定した。

#### (8) 操縦運動微係数ファイル

船体運動専門部会の検討に基づいた。

#### (9) 風圧力係数ファイル

船体運動専門部会の検討に基づいた。

#### (10) 不規則波中抵抗増加係数ファイル

規則波中抵抗増加の応答関数を基に、表3.4.27に示す条件で不規則波中抵抗増加の計算を行いファイルを作成した。

#### (11) 不規則波中波漂流力係数ファイル

規則波中波漂流力の応答関数を基に、表3.4.28に示す条件で不規則波中波漂流力の計算を行いファイルを作成した。

表 3.4.24 原子力船「むつ」モデル積み付け状態（冬季満載出港状態）

Item	%	Weight (t)	L.C.G. (m)	Moment (t-m)		KG (m)	Moment (t-m)	I (t-m)
				Aft	Fore			
貨物	No.1 Cargo Hold		12	-42.23		507	6.50	78
	No.2 Cargo Hold			-28.36	0		0	
	No.3 Cargo Hold	8	43.13	345		9.20	74	
	Sum		20		345	507		152
燃料油	No.6 F.O.T. (P&S)	85	80	23.40	1,872		0.69	55 409
	No.7 F.O.T. (P&S)	85	275	37.23	10,238		2.86	787 334
	No.9 F.O.T. (P&S)	85	153	47.17	7,217		6.48	991 410
	F.O.Sett.T. (P)	85	29	40.09	1,163		11.78	342 37
	No.8 F.O.T. (P&S)	85	157	42.60	6,688		4.77	749 265
	Aux.Gen.F.O.Serv.T.	85	14	40.02	560		11.80	165 4
	Sum		708		27,738			3,089 1,459
清水	No.1 BW. or Res.FWT (P&S)	100	168	-41.57		6,984	1.89	318 121
	No.2 Fr.W.T. (P&S)	0	0	-27.34		0		0
	Deep tank (C)	100	135	-28.56		3,856	3.11	420
	Deep tank (P&S)	100	525	-27.66		14,512	3.25	1,706
	Cooling W.T.	100	17	51.72	879		3.40	58
	No.1 UP. Dist.W.T. (S)	100	28	38.61	1,081		11.75	329 5
	No.2 UP. Dist.W.T. (S)	100	31	40.10	1,243		11.78	365 32
	No.5 Low. Dist.W.T. (P&S)	100	83	17.81	1,478		0.66	55 389
	Sum		987		4,681	25,352		3,251 547
淡水	Fore Peak Tank (C)	0	0	-52.57			4.82	
	No.1 BW. or Res.FWT. (P&S)	0	0	-41.57			2.94	
	No.4 B.W.T. (P&S)	0	0	-9.80			0.72	0
	Bilge T. (P&S)	20	20	29.81	596		0.41	8 0
	Sum		20		596			8 0
原子炉	Emerg.W.Res.T. (C)	100	133	-16.46		2,189	0.75	100 0
	Emerg.W.T.	100	100	-6.26		626	4.55	455
	Dead Weight		10	12.97	130		5.94	59 54
	Sum		243		130	2,815		614 54
	Provision		15	-16.44		247	6.06	91
	Constant		104	1.95	203		8.09	841
	Dead Weight		1,978		33,490	28,674		7,114 2,060
	Light Weight		7,935	6.32	50,149		7.73	61,338
	Displacement		10,032	5.47	83,842	28,921		6.92 69,384 2,006

Draft (m)	do	6.77	TKM (m)	8.43	Max. Bending moment in still water	at Fr.	t-m
	df	5.43	KG (m)	6.92			
	da	7.94	GM (m)	1.51			
	dm	6.74	GGM (m)	0.21			
Trim (m)	2.51	GoM (m)	1.30				
MTC (t-m)	129.79	L.C.G.(m)	5.47				
TPC (t)	18.71	LCB (m)	2.22				
I/D (%)	183	LCF (m)	3.43				

表 3.4.25 船 体 要 目 フ ァ イ ル

データ名	設定値	データ名	設定値
全長 $L_{OA}$ (m)	130.000	水線上正面投影面積 $A_T$ ( $m^2$ )	319.000
垂線間長 $L_{PP}$ (m)	116.000	水線上側面投影面積 $A_L$ ( $m^2$ )	1324.00
型幅 $B$ (m)	19.028	プロペラ直徑 $D_P$ (m)	4.100
最大型幅 $B_{max}$ (m)	19.028	プロペラピッチ $P_P$ (m)	3.177
型深 $D$ (m)	13.500	APから加ペラ中心までの長さ $\ell_P$ (m)	2.460
船首端高さ $D_{FOR}$	9.400	加ペラ位置のx座標 $x_P$ (m)	-55.540
契水 $d$ (m)	6.725	加ペラ位置のz座標 $z_P$ (m)	2.500
ヒール $\phi$ (deg)	0.000	舵高さ $h$ (m)	5.300
トリム $\tau$ (m)	2.510	舵幅 $b$ (m)	3.375
排水量 $\Delta$ (ton)	10032.0	舵位置のx座標 $x_R$ (m)	-58.000
浸水面積 $S_a$ ( $m^2$ )	2748.00	舵位置のz座標 $z_R$ (m)	2.950
方形係数 $C_B$ (non)	0.663	操舵機の時定数 $T_s$ (sec)	1.000
重心位置 $LCG$ (m)	-5.470	最大操舵追従速度 $\delta_{max}$ (deg/sec)	3.000
重心高さ $KG$ (m)	6.910	最大舵角 $\delta_{max}$ (deg)	45.000
メセンタ-高さ $GH$ (m)	1.310	オートペリットゲイン $C$ (non)	5.000
横搖周期 $T_\phi$ (sec)	13.300	オートペリットゲイン $C_r$ (sec)	50.000
横搖の等価線形減衰係数 $\kappa_e$ (non)	0.2300	逆スパイル時の回頭角速度幅 $\Delta r$ (deg/sec)	0.050
縦搖慣動半径/ $L_{PP}$ $k'_{yy}$ (non)	0.2190	チップポイント巾 $\Delta \delta$ (deg)	1.0
船首搖慣動半径/ $L_{PP}$ $k'_{zz}$ (non)	0.2190		
横搖慣動半径/ $B$ $k'_{xx}$ (non)	0.3000		

表 3.4.26 規則波中船体運動応答関数計算条件 (1/2)

船速		波方向 $\chi$ (deg)	波周期		波高 $hw$ (m)
$F_n$	$V_s$ (knot)		$\lambda/L$	$\omega$ (rad/sec)	
12 種類			20 種類		
0.000	0.000	0	0.2	1.630	2.32
0.025	1.638	15	0.3	1.331	$(hw/L = 1/50)$
0.050	3.278	30	0.4	1.152	
0.075	4.917	45	0.5	1.031	
0.100	6.556	60	0.6	0.941	
0.125	8.195	75	0.7	0.871	
0.150	9.834	90	0.8	0.815	
0.175	11.473	105	0.9	0.768	
0.200	13.112	120	1.0	0.729	
0.225	14.751	135	1.1	0.695	
0.250	16.389	150	1.2	0.665	
0.275	18.028	165	1.3	0.639	
		180	1.4	0.616	
			1.6	0.576	
			2.0	0.515	
			2.5	0.461	
			3.0	0.421	
			3.5	0.390	
			4.0	0.364	
			5.0	0.326	

表 3.4.26 規則波中船体運動応答関数計算条件 (2/2)

横揺れ減衰係数 $\kappa_{\text{roll}}$	船速	
	$F_n$	$V_s$ (knot)
0.23	0.175 ~ 0.275	11.475 ~ 18.028
0.18	0.15	9.834
0.14	0 ~ 0.125	0 ~ 8.195

表 3.4.27 不規則波中抵抗增加係数計算条件

計算フラグ = 0				
船速		波方向	波周期	波高
Fn	Vs (knot)	$\chi$ (deg)	Tv (sec)	Hv (m)
8 種類		7 種類	8 種類	
0.05	3.278	0	4	2.32
0.10	6.557	30	6	(hw/L=1/50)
0.15	9.835	60	8	
0.175	11.474	90	10	
0.20	13.113	120	12	
0.225	14.753	150	14	
0.25	16.392	180	16	
0.275	18.031		18	

表 3.4.28 不規則波中波漂流力係数計算条件

計算フラグ = 1				
船速		波方向	波周期	波高
Fn	Vs (knot)	$\chi$ (deg)	Tv (sec)	Hv (m)
8 種類		7 種類	8 種類	
0.0	0.0	0	4	2.32
		30	6	(hw/L=1/50)
		60	8	
		90	10	
		120	12	
		150	14	
		180	16	
			18	

#### 4. おわりに

以上、本シミュレータのハードウェアおよびソフトウェアについて述べた。特にソフトウェアについては、基本モデルおよびプラントモデルの内容を詳細に報告した。

今後改良船用炉MRX (Marine Reactor X) 設計研究の支援ツールとして活用するための開発・整備を行っていく計画である。

具体的には、平成5年度の開発内容として、

- ① MRXに採用する貫流型ヘリカルタイプの蒸気発生器計算モデルに係わる基本モデルの構築
- ② シミュレータへのインプットの手間を削減し、系統設計等が効率的に進められるようプラントデータ入力システムの作成
- ③ シミュレーション結果を分かりやすく内容表示できるよう、プラント状態アニメーション表示ソフトウェアの作成

現状の時系列表示を中心とした機能から実際の波浪中の船体運動、蒸気発生器等の水位運動、一次冷却水破断事故時の原子炉容器及び格納容器内の挙動等に関するアニメーションによる表示ができるようにする。

平成5年度に引き続き、次のような開発計画を持っている。

- ④ MRXの特徴の一つである水張り方式の格納容器計算モデルに係わる基本モデルの構築
- ⑤ 操作者がシミュレータをより使い易いようにヒューマンインターフェースの観点から運転支援ガイダンス等のための大画面表示装置の整備

以上の開発・整備により、開発・設計段階から運転段階まで一貫して使えるシミュレータとしての機能を具備させる考えである。

物理現象モデルをベースとした本シミュレータの導入により、設計段階では目標とする機能・性能の設定および確認が、また運転段階では諸事象の事前把握が可能となる。

現シミュレータでは、例えば、一次冷却水の熱流動解析のためには管寸法、配管といったデータをシミュレータにインプットする必要がある。上述のように、平成5年度の開発計画の中でプラントデータ入力システムを作成し入力を容易化する計画であるが、これらのデータは設計支援ツールであるCAD (Computer-aided Design) システムの基本情報の一つである。したがって、改良船用炉設計に際し、CADシステムとつなぎ、形状・寸法・配置情報を本シミュレータに取り込めば、インプットの手間を省くことができる。さらにこれらのCADデータの使い方によっては、当該設計構造が製造段階でつくりやすいかどうか、また運転段階で保守がしやすいかどうか、等の検討に使用することも可能である。

軽量・小型化を狙う一体型改良船用炉については、従来の分離型炉に比し、つくりやすさおよび運転段階での保守（燃料交換、定期点検および故障時）の容易さを設計段階から検討しておくことがより大きな課題といえる。

将来、現システムに図形情報を取り込み、より総合的なシミュレータとして整備していくことは、今後の改良船用炉設計研究の検討課題である。

## 謝　　辞

原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムは、原子力船「むつ」のシミュレータとして完成し、開発整備の第1段階の目標を達成した。昭和63年に本計画を開始して以来、多くの方々のご指導、ご協力があってここにいたることができた。本報告書を作成するに当たって、これらの方々への謝意を以下に述べる。

船用炉研究委員会（委員長：竹村数男東京商船大学教授（当時））船体運動専門部会（部会長：藤野正隆東京大学教授）では、船体運動及び操縦運動に関する計算手法を提案していただき、これに基づいて原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの基本計算モデルを作成しました。また、同委員会の動特性専門部会（部会長：住田健二大阪大学教授）では、本シミュレーション・システムの原子炉関係の性能について、種々の検討を頂きました。両部会長を初めとする専門委員の方々に深く感謝する次第であります。

本シミュレーション・システムには、高橋雄氏（船体運動）、桑原耕治氏（熱水力）、石黒明氏（事故解析）などの三菱重工の方々の多くの研究成果が反映されております。特に、それらをとりまとめ、リアルタイム・シミュレーション・システムとしての構築を担当した同社の菅沼真一郎氏の献身的な努力には心より感謝申し上げます。

本シミュレーション・システムは、情報システムセンター、研究炉部、原子炉工学部等の所内各部の協力により完成させることができました。管理部門も含め、関係して頂いた多くの方々に感謝いたします。

軽量・小型化を狙う一体型改良船用炉については、従来の分離型炉に比し、つくりやすさおよび運転段階での保守（燃料交換、定期点検および故障時）の容易さを設計段階から検討しておくことがより大きな課題といえる。

将来、現システムに図形情報を取り込み、より総合的なシミュレータとして整備していくことは、今後の改良船用炉設計研究の検討課題である。

### 謝　　辞

原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムは、原子力船「むつ」のシミュレータとして完成し、開発整備の第1段階の目標を達成した。昭和63年に本計画を開始して以来、多くの方々のご指導、ご協力があってここにいたることができた。本報告書を作成するに当たって、これらの方々への謝意を以下に述べる。

船用炉研究委員会（委員長：竹村数男東京商船大学教授（当時））船体運動専門部会（部会長：藤野正隆東京大学教授）では、船体運動及び操縦運動に関する計算手法を提案していただき、これに基づいて原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの基本計算モデルを作成しました。また、同委員会の動特性専門部会（部会長：住田健二大阪大学教授）では、本シミュレーション・システムの原子炉関係の性能について、種々の検討を頂きました。両部会長を初めとする専門委員の方々に深く感謝する次第であります。

本シミュレーション・システムには、高橋雄氏（船体運動）、桑原耕治氏（熱水力）、石黒明氏（事故解析）などの三菱重工の方々の多くの研究成果が反映されております。特に、それらをとりまとめ、リアルタイム・シミュレーション・システムとしての構築を担当した同社の菅沼真一郎氏の献身的な努力には心より感謝申し上げます。

本シミュレーション・システムは、情報システムセンター、研究炉部、原子炉工学部等の所内各部の協力により完成させることができました。管理部門も含め、関係して頂いた多くの方々に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1)横村等、「加速度変動時の限界熱流速について」、第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集、1987-5
- 2)K.Kawanishi, et al. "Small break LOCA experiments and verification of CANAC-II code", Nuclear Engineering and Design 120, (1990)
- 3)Zuber, N. and Findlay, J.A. "Average volumetric concentration in Two-phase flow system", Trans ASME, J. Heat Transfer, 87(1965), 435-468
- 4)H.C.Yeh et al., "Experiments and void correlation for PWR small break LOCA conditions", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.17, (1973)
- 5)Wilson et al., "Primary separation of steam by natural separation", Allischalmers Report No. ANCP-65002, (1973)
- 6)R.E.Henry and H.E.Fauske, "The two-phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices, and short tubes", J. Heat transfer, Trans., ASME, Vol. 94, May(1971)
- 7)Moody, F.J Trans. ASME. Ser.C. 87-1, (1965)
- 8)Thom, J.R.S et al, Proc. Inst. Mech. Engr., 180-3, (1966)
- 9)Chen, J.c. "A correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", ASME Paper 63-HT-34 (1963)
- 10)Groeneveld, D.C. "Post dryout heat transfer, physical mechanisms and a survey of prediction methods", Nucl. Engng. Design, 32(1975), 283-294
- 11)W.M.Rohsenow, "A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids", Trans. ASME, Vol. 74, P969(1952)
- 12)W.Wulff, H.S.Cheng, S.V.Lekach, and A.N.Mallen. "The BWR plant analyzer FINAL REPORT", NUREG/CR--3943, T185 006746, (1984)
- 13)数理計画：船体運動計算プログラムの作成、(1988)
- 14)高石敬史、黒井昌明：波浪中船体運動の実用計算法、第2回耐航性に関するシンポジウムテキスト、日本造船協会、(1977)
- 15)田才福造、高木又男：規則波中の応答関数理論および計算法、耐航性に関するシンポジウム（第1回）、日本造船協会、(1969)

- 16)小林正典ほか：船舶の耐航性に関する理論計算プログラム（その1）、三井造船技報82号、(1973)
- 17)Salvesen, N., Tuck E.O. and Faltinsen O.: Ship motions and sea load, TSNAME, Vol. 78, (1970)
- 18)前田久明：任意船型に及ぼす波の強制力について、船論126、(1969)
- 19)板垣正文ほか：「船用炉の3次元核熱水力計算コード：STEADY-SHIP」、JAERI 1309、(1988)