

JAERI-Tech
2000-039



JP0050378



原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの整備
一体型炉シミュレータの開発

2000年3月

高橋照雄・島崎潤也・中澤利雄・藪内典明
福原彬文・楠 剛・落合政昭

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの整備 一体型炉シミュレータの開発

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

高橋 照雄・島崎 潤也・中澤 利雄⁺・藪内 典明

福原 彬文・楠 剛・落合 政昭

(2000年3月9日受理)

原研は、将来の原子力船の動力源として、軽量・コンパクトで受動的安全性の高い原子炉として出力100Mw_{th}の一体型炉について設計研究を実施し、工学設計を完了した。

この一体型炉の設計性能および運転性能を確認するとともに、一体型炉の運転操作の自動化研究に使用するため、リアルタイムの一体型炉シミュレータを開発した。

一体型炉シミュレータは、原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システム NESSY (Nuclear ship Engineering Simulation System) の一部として、原子力船「むつ」シミュレータと同一のハードウェアを使用し、切り換えによりそれぞれのシミュレータの運転が可能である。

「むつ」シミュレータでは、シミュレータの総合評価として模擬結果を「むつ」の運転データと比較することにより、十分高い精度での模擬が可能であることを検証済である。

一体型炉シミュレータにおいても、「むつ」シミュレータで使用した計算コードおよび基本的なモデル化手法を採用している点、およびRELAP5/MOD2 による解析結果と照合し概ね一致している(解析結果との照合結果については別途「一体型炉シミュレータによる計算結果」で報告予定)点から判断し、将来実機の運転結果あるいは実験結果との照合による検証が必要であるが、エンジニアリングシミュレータとして利用の見通しが得られた。

本報告書は、一体型炉の構造的な特徴部分に対して設計・製作した解析プログラムの内容を重点に報告する。

Building of Nuclear Ship Engineering Simulation System
Development of the Simulator for the Integral Type Reactor

Teruo TAKAHASHI, Junya SHIMAZAKI, Toshio NAKAZAWA⁺, Noriaki YABUUCHI
Yosifumi FUKUHARA, Takeshi KUSUNOKI and Masaaki OCHIAI

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

(Received March 9, 2000)

JAERI had carried out the design study of a light-weight and compact integral type reactor of power 100 MW_{th} with passive safety as a power source for the future nuclear ships, and completed an engineering design.

To confirm the design and operation performance and to utilize the study of automation of the operations of reactor, we developed a real-time simulator for the integral type reactor.

This simulator is a part of Nuclear Ship Engineering Simulation System (NESSY) and on the same hardware as "Mutsu" simulator which was developed to simulate the first Japanese nuclear ship "Mutsu".

Simulation accuracy of "Mutsu" simulator was verified by comparing the simulation results with data got in the experimental voyage of "Mutsu".

The simulator for the integral type reactor uses the same programs which were used in "Mutsu" simulator for the separate type PWR, and the simulated results are approximately consistent with the calculated values using RELAP5/MOD2(The later points are reported seperately). Therefore simulation accuracy of the simulator for the integral type reactor is also expected to be reasonable, though it is necessary to verify by comparing with the real plant data or experimental data in future.

We can get the perspectives to use as a real-time engineering simulator and to achieve the above-mentioned aims.

This is a report on development of the simulator for the integral type reactor mainly focused on the contents of the analytical programs expressed the structural features of reactor.

Keywords: Integral Type Reactor, Marine Reactor, Real-time Engineering Simulator,
Passive Safety, Nuclear Ship

⁺ Department of HTTR Project

目 次

1.はじめに	1
2.一体型炉シミュレータ開発の位置づけ	2
3.ハードウェア構成	3
4.ソフトウェア構成	5
5.一体型炉の構造的な特徴	7
6.一体型炉固有部分のシミュレーションプログラムの製作	8
6.1 一次系熱水力解析プログラムの機能拡張	8
6.2 貫流型蒸気発生器解析プログラムの製作	10
6.3 水張り式格納容器解析プログラムの製作	16
6.4 事故事象解析プログラムの製作	27
6.5 炉心解析プログラムの製作	32
7.おわりに	37
謝 辞	38
参考文献	39

C o n t e n t s

1. Introduction	1
2. Development of the Integral Type Reactor	2
3. Hardware Structure	3
4. Software Structure	5
5. Main Features of the Integral Type Reactor	7
6. Simulation Programs for Main Components Special	8
to the Integral Type Reactor	
6.1 Simulation Program for Primary system	8
6.2 Simulation Program for Once-through Type Steam Generator	10
6.3 Simulation Program for Water-filled Containment Vessel	16
6.4 Simulation Program for Malfunctions and Accident	27
6.5 Simulation Program for Reactor Core	32
7. Conclusions	37
Acknowledgement	38
References	39

1. はじめに

原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システム（以下、原子力船シミュレータと称する）の開発は、昭和63年度より進め、平成4年度に総合評価として「むつ」の開発を通して得られた実験航海データ等を用いて原子力船シミュレータの模擬精度を確認し、「むつ」シミュレータを完成させた。

1). 2)

「むつ」シミュレータにより得られた成果は以下の通りである。

- (1)「むつ」実験航海の際、実験内容の事前検討に役立てた。
- (2)「むつ」シミュレータを構築し、実験航海データとシミュレータ計算値を比較した総合評価の結果、計算値が実験航海データに概ね一致したことにより、原子炉プラントおよび原子力船の動特性解析手法を確立した。
- (3)既に解役された原子力船「むつ」のあらゆる挙動をコンピュータ上で再現できるシステムを確立した。これにより、別途整備中の原子力船データベースシステムが実験データ等の技術情報を主とした静的なデータベースであるのに対し、「むつ」シミュレータはいわば動的なデータベースとして利用できる。
- (4)シミュレータを使って異常時の運転員の挙動を把握するヒューマンインターフェース研究に利用し、異常時の運転員の挙動解析に成果を得た。³⁾（原子炉安全工学部人的因子研究室）
- (5)原子力船自動運転システムの開発に利用し、運転員知識ベース構築に成果を得た。^{4). 5)}

これらの成果を踏まえ、平成5年度からは、改良船用炉として設計研究を進めている一体型の船用炉プラントMR X (Marine Reactor X)⁶⁾をモデルにしたシミュレータの開発を進め、設計支援ツールとしてソフトウェアおよびハードウェア両面について整備した。

ソフトウェア面では、新たな原子炉構造部分に対する模擬ニーズに対応するためのソフトウェア開発、またハードウェア面では新たなソフトウェアを処理するためのハードウェア能力の増強等、技術進歩の速いハードウェアの老朽化対策も含め実施した。これらの開発状況を表1.1に示す。

一体型炉シミュレータ開発の目的は、一体型炉としての固有な設計・運転性能の確認、および一体型炉の高度自動化研究およびヒューマンインタフェース研究に利用することにある。

本報告書では、MR X対応の一体型炉シミュレータ用に新たに製作した解析プログラムの内容およびその性能確認結果を重点に報告する。

2. 一体型炉シミュレータ開発の位置づけ

原研は、原子力船シミュレータとして、分離型炉である「むつ」モデルとともに、一体型炉の模擬および運転自動化研究等ができるよう、ハードウェアおよびソフトウェアの整備を進めている。

今回、次期船用炉として軽量・コンパクトで安全性の高い一体型炉の設計を実施し、設計仕様を定め一体型炉の仕様最適化、運転特性の把握、運転手順の検討および自動化研究等のため、一体型炉シミュレータを開発した。

一体型炉シミュレータが原子力船シミュレータの一部として上記の目的を満たすため、原子力船シミュレータとして次のような点に留意して整備した。

- (1) 「むつ」と一体型炉の2つのモデルを同一のハードウェア上で模擬できること。

2つのモデルを模擬できるよう、ハードウェア面ではシミュレーション計算機およびCRT計算機を中心とした機器の更新による処理能力の増強を行った。

- (2) 設計段階から使える支援ツールであること。

「むつ」シミュレータは原子力船「むつ」の設計と製作が完了後に製作した。従って、その開発目的は、「むつ」の運転支援とともに、モデル化手法および解析プログラムの妥当性検証にあった。一方、一体型炉については基本設計作業がほぼ完了した段階から、一体型炉シミュレータの構築を進めた。(図2.1) 設計段階からの支援ツールの性格を持たせるため設計仕様の検討が容易に行えるよう入出力機能を強化した。

- (3) 高度自動化研究、運転時のマンマシンインタフェース研究等に利用しやすいこと。

これらの研究にあたっては、別のワークステーション上に、汎用のソフトウェアによって自動化プログラムを製作し、その動きをシミュレータ上で確認したり、逆にシミュレータ側からの情報を受けてそれらを加工し新たに指示情報を出す等、コンピュータ間でリアルタイムに双方向の通信を行いたいという要求が強い。したがって、シミュレータと他のコンピュータとをネットワーク結合し、それらの間を通信プログラムによりシミュレータのプラントの監視や運転操作のデータのやりとりが行えるように整備した。

3. ハードウェア構成

原子力船シミュレータを構成するハードウェアおよびネットワーク構成について述べる。これらは、「むつ」シミュレータおよび一体型炉シミュレータに共通のものである。

3.1 全体構成

原子力船シミュレータのハードウェア構成は図3.1に示す通りである。主要な機器とそれらの基本仕様について述べる。

3.1.1 シミュレーション計算機

シミュレーション計算機は、「むつ」および一体型炉のリアルタイムシミュレーションを行い、その結果を記録・再現する。また、CRT計算機上で動作するプログラムを含めた全プログラムの管理を行う。

1)機種 日本DEC社(現COMPAQ社)のAlphaServer2100シリーズ 5/250

2)基本仕様

- ・CPU 2CPU方式 アプリケーションソフトウェア有効利用のため
- ・OS Open-VMS
- ・主記憶容量 512MB
- ・補助記憶容量(ディスク) 4ユニットで計8.4GB

3.1.2 CRT計算機

CRT計算機は、システムの制御および運転操作に関する画面表示データを管理する。システムの管理体系では、ソースの保管、実行モジュールの生成はすべてシミュレーション計算機で行うため、シミュレーション計算機と同一のアーキテクチャとOSを有する。

1)機種 日本DEC社(現COMPAQ社)のデスクトップ型ワークステーション

Alphastation 250 4/266

2)基本仕様

- ・OS Open-VMS
- ・主記憶容量 128MB
- ・補助記憶容量 4.2GB

3.1.3 画面表示システム

(1)シミュレータコントロール用およびプラント運転操作作用のCRTプロセッサ

1)機種 デジタル社 DP1000 各1台

2)基本仕様

- ・画像メモリ

シミュレータコントロール用	2MB
プラント運転操作作用	4MB
- ・表示文字数, 表示文字種類および表示色
シミュレータコントロール用・プラント運転操作作用共通
128文字×64行, JIS-158種漢字第一水準, 同時64色

- ・インタフェース
- シミュレータコントロール用 RS-232C
- プラント操作用 TCP-IP

(2)シミュレータコントロール用およびプラント運転操作用ディスプレイ

1)機種 デジタル社

- シミュレータコントロール用 DP-1000-20
- プラント運転操作用 DP-1000-20T

2)基本仕様

- ・スクリーンサイズ, 表示方式および走査方式
- シミュレータコントロール用・プラント運転操作用共通
- 20インチ, ラスタースキャン, ノンインターレス
- ・その他
- プラント運転操作用のみ光学式タッチセンサー付き

3.2 ネットワーク構成

ネットワーク構成は以下の通りである。(図3.1)

(1)シミュレータネットワーク

シミュレーション計算機を中心とした原子力船シミュレータの機器から構成される。

(2)原研ネットワーク

シミュレーション計算機を通して原研ネットワークのEWSと接続する。
シミュレータの運転情報をブロードキャストでEWSに転送し、逆にEWSからシミュレータに運転操作情報をポイントツーポイントで送信する。

(3)ネットワークルータ

ネットワーク負荷の適正化とプログラムのセキュリティ管理のためシミュレーション計算機をルータとして設定している。

4. ソフトウェア構成

一体型炉シミュレータのソフトウェア開発に際しての基本的な考え方は次の通りである。

- (1)「むつ」シミュレータで使用し、実績のあるソフトウェアを最大限有効に活用し、必要な部分のみ改造することにより、一体型炉シミュレータのソフトウェアを製作する。
- (2)複数のモデル(当面「むつ」シミュレータと一体型炉シミュレータ)を一つのハードウェア(原子力船シミュレータ)上で扱えるものとする。
- (3)入出力機能の増強とネットワーク化により、設計仕様の検討、プラント性能の確認及び高度自動化研究等、設計支援ツールとして利用できるものとする。

4.1 全体構成

原子力船シミュレータのソフトウェア構成を以下の通りである。

- (1)原子力船シミュレータは図4.1に示すように「むつ」シミュレータと一体型炉シミュレータからなる。
- (2)各シミュレータのソフトウェア構成概念は図4.2に示す通りである。
 - 1)シミュレータの運転操作機能に関するシステムコントロールソフトウェア
 - 2)プラントモデル関連のソフトウェア
 - 3)入出力および外部通信関連のソフトウェア
- (3)一体型炉シミュレータのソフトウェア詳細構成図は図4.3に示す通りである。

4.2 プログラムの記述方式

プログラムの記述方式は図4.4に示す通りであり、①プログラム言語、②物理現象を解析するための解析プログラム、③設計仕様であり解析プログラムへの入力値としてのプラントデータ、の3つからなる。

原子力船シミュレータで使用する解析プログラムは次の2つである。

(1)CANAC (Computer Analysis of Natural Circulation in RCS of PWR)

一次元の二温度一速度モデルで、原子力船シミュレータでは一次冷却系統の熱水力解析に用いている。エネルギー収支式および質量収支式についてはノード毎に解くが、運動量収支式についてはリンク毎の収支ではなく、管路を構成する閉ループ毎の一巡運動量を以て計算する簡易方法を採用している。

なお、CV-CANACは、一体型炉ではLOCA時一次冷却水が流出しても炉心冠水が維持できるよう、CV水が一次側に流れ込むことを期待しており、CANACをCVの特性に合わせ模擬できるように次の2点を変更した解析プログラムである。

- 1)窒素ガスの存在を考慮した収支計算式に変更する。
- 2)LOCA時、一次系統とCV間で流入出量を計算できるようにする。

(2)PRETTY (Program of Real Time Plant Simulation System)

原子力船シミュレータでは一次冷却系統以外の原子炉補助系統、二次系の熱水力解析および制御系のロジックの構築に用いている。一次元の一温度モデルであるNODE/LINKと、算術演算言語POL(Problem-Oriented Language)からなる。NODE/

LINKはエネルギー収支式および質量収支式についてはノード毎に解くが、リンク流量は両端のノードの圧力差によって計算する。

4.3 入出力および外部通信のソフトウェア

シミュレータを設計支援ツールとして、設計仕様の検討、高度自動化研究およびマンマシンインタフェース研究に利用するため、シミュレータの入出力機能の増強と、通信プログラムの製作によるネットワーク化を実現した。

これらは、「むつ」シミュレータおよび一体型炉シミュレータに共通なソフトウェアである。

(1) 入出力機能の増強

1) プラントデータグラフィック入力システム

系統および制御回路のモデルを系統図あるいは制御ブロック図の形式でグラフィック画面上で入力できるシステムである。従来はテキストデータ形式で入力する必要があったため、キーパンチャが入力できるようデータをテキスト形式にまとめる等の作業が必要であった。

本システムにより、プラント設計者自身が設計作業を行いながら設計仕様データを入力することができるようになり、キーパンチャが入力する作業を省くことができ、効率化とともにデータの信頼性を向上させることが可能となった。

また、設計仕様を変更することが容易になり、シミュレータでその影響を確認できるようになった。さらに、モニター機能としてシミュレータを運転中に各変数の変化の状態を観察できるので、シミュレーション中に設計仕様を変更することにより制御設定値等をパラメトリックに変化させ、運転状況を確認することにより最適設定を行うことができる。

2) プラント状態表示システム

原子炉プラントの内部状態および原子力船の主要な運転状態が一目してわかるようにアニメーション形式の状態表示を行う。すなわち、従来から利用されているグラフ表示あるいは系統図表示だけではなく、実際のプラントの状態（温度の変化および水位変位等）を視覚的に表現することによって、プラント全体の状態を迅速かつ的確に把握することが可能となる。作画機能および表示機能を有するので、必要な画面を任意に作画することができ、ヒューマンインターフェース機器として表示に工夫を要する運転操作盤等の機器を設計したり、その効果を確認することに利用できる。

(2) ネットワーク利用環境の整備

原子力船シミュレータ単体でのシミュレーションだけでなく、シミュレータの利用範囲をより広くするため、ワークステーション等の機器とネットワーク結合し、リアルタイムにシミュレータの情報をワークステーションに送信したり、逆にワークステーションからシミュレータに運転情報を送ってシミュレータを操作できるよう、外部通信プログラムを製作した。

シミュレータからワークステーションへは、UDP/IPを使ったブロードキャスト通信により、約15,000点の変数を、「むつ」シミュレータでは0.52秒、一体型炉シミュ

レータでは0.48秒周期で転送している。

また、ワークステーションからシミュレータにはポイントツーポイント通信で自動化情報等を送ることにより、例えばシミュレータの弁をワークステーションから開閉操作することができる。

本プログラムは高度自動化研究等に利用する。

5. 一体型炉の構造的な特徴

一体型炉は、分離型炉である「むつ」の原子炉と異なるタイプの原子炉である。図5.1に示すように、小型軽量化と安全性確保のため構造面で、貫流型蒸気発生器と水張り式格納容器を採用している。

貫流型蒸気発生器は、原子炉容器内に設置され、二次側はスパイラル管を通過することにより暖められ、「むつ」の蒸気発生器のように一次側がU字管内部を通過するのに比して二次側のインベントリが小さいことが特徴である。従って、負荷変動に対し二次冷却水の状態変化が激しいことが予測される。

水張り式格納容器は、通常運転時は遮蔽と冷却の機能を担っているが、LOCA等の事故時には炉心の冷却機能を担う。これまでの分離型の原子炉にはない機能であり、高温・高圧の一次冷却水が格納容器水中に噴出する状態を模擬する必要がある。

また一体型のため、分離型原子炉に比して各機器は扁平形状をとらざるを得ず、船用炉として傾斜・動揺を受けた場合、加圧器および格納容器については水面の挙動を考慮する必要がある。

6. 一体型炉固有部分のシミュレーションプログラムの製作

一体型炉シミュレータの模擬範囲は、現段階においては搭載する原子力船の基本仕様が定かではないので当面原子炉プラントを中心としてタービン入り口までとする。(図6.1)

「むつ」シミュレータの総合評価の結果、そこで採用した解析手法が概ね妥当であることが確認できたので、「むつ」モデルで使用した解析プログラムをできるだけ有効に利用することとする。但し、一体型炉は「むつ」の分離型炉とは異なる一体型特有の構造部分を有するので、「むつ」シミュレータで使用した解析プログラムでは解析が不可能な部分がある。そのため、解析プログラムの機能拡張あるいは機能追加を行う必要がある。

機能拡張あるいは機能追加としてのプログラムの製作は以下の通りである。

- (1)一次系熱水力解析プログラムの機能拡張
- (2)貫流型蒸気発生器解析プログラムの製作
- (3)水張り式格納容器解析プログラムの製作
- (4)事故事象解析プログラムの製作
- (5)炉心解析プログラムの製作

以下に機能拡張およびプログラムの製作の概要を記す。なお、炉心については固有な構造ではないが、「むつ」シミュレータの炉心解析プログラムを参考に簡易モデルを製作したのでその内容を記す。

6.1 一次系熱水力解析プログラムの機能拡張

一体型炉シミュレータに必要とされる機能を明らかにし、それらを「むつ」シミュレータで使用している一次系熱水力解析プログラムCANACの機能拡張により対応する。

6.1.1 一体型炉に必要とされる機能

(1)一体型炉に特有な機能

- 1)貫流型蒸気発生器との接続ができるようにする。

「むつ」は一次側がU字管タイプの蒸気発生器を使用しており、貫流型蒸気発生器は一体型炉に固有な蒸気発生器で新たな機器モデルであるため。

- 2)制御棒駆動装置および駆動装置冷却管を扱えるようにする。

一体型炉では内装型の制御棒駆動装置を採用しておりその冷却が必要である。その部分の伝熱計算をできるようにする。

- 3)円筒分割型の加圧器を扱えるようにする。

一体型炉の加圧器は円筒形状で偏平型であり、それらの構造上の違いを反映し、一次冷却水熱水力解析コードについて改造する必要がある。

- 4)加圧器スプレイポンプを扱えるようにする。

- 5)非常用崩壊熱除去設備を1次系ノードとして扱えるようにする。

- 6)LOCAを扱えるようにする。

「むつ」プラントでは、LOCA時、一次系冷却水がCV内の空気中に噴出するが、一体型炉プラントでは水張り式CV内の水中に噴出するので、破断流の状態が異なるこ

とおよびCV水の逆流を扱うため機能拡張が必要である。

- (2)一体型炉シミュレータで扱う一次系ノードを液面を有する二温度（液体温度と蒸気温度）ノードとする。

「むつ」シミュレータの場合、二温度モデルを適用している部分は一次系でも原子炉容器および加圧器のノードのみである。一体型炉シミュレータでは、液面を持つ構造部分が多く、また計算機の更新により能力面での問題がないことから、模擬精度向上のため原子炉容器内および格納容器内の全てのノードを全二温度モデルとする。

6.1.2 機能拡張の内容

(1)全般

上記の機能拡張の必要性のナンバーを、機能拡張内容別に整理すると以下の通りである。

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| (a)一次系熱水力モデルで扱える各データの上限值を変更 | 1), 4) |
| (b)入力データフォームの修正 | 1), 3), 4), 5), 6) |
| (c)アナログ変数との入出力の修正 | 2), 4), 6), |
| (d)非常用崩壊熱除去設備の入口弁、出口弁の機能追加 | 6) |
| (e)定格、初期計算の修正 | 1) |

(2)加圧器部分

加圧器の構造上の違いを反映し、一次冷却水熱水力解析プログラムについて以下の点を改造する。

- (a)円筒形状であり、他機器と隣接しているため、内筒および下部仕切り板を介しての熱移動を模擬できること。
- (b)円周上に配置される12個のスプレーノズルの水没状態を模擬できること。
- (c)リング状のヒータの露出状態を模擬できること。
- (d)円筒形状加圧器内の水位を演算できること。

6.2 貫流型蒸気発生器解析プログラムの製作

6.2.1 貫流型蒸気発生器の特性

貫流型SGの特徴は「むつ」のU字管タイプのSGとは異なり、2次側のインベントリが小さい点で、インベントリの大きさを〔SGの2次側体積/定格蒸発量〕と定義すると一体型炉の場合は「むつ」の8%弱程度しかない(表6.1)。したがって、貫流型SGは負荷変動の影響を受けやすいと考えられる。

本貫流型SGはヘリカルコイルを採用している。ヘリカルコイルは直管に比して製造性および保守性の面では劣るが、性能面では次のような利点を有している。

- (1)伝熱管を長くとることができるので(約42m)、二次側のインベントリが小さいにもかかわらず、比較的広範囲の負荷変動に対してサブクール・沸騰・過熱の各領域が安定して存在し、性能面で安定性が高い。
- (2)二次冷却水はヘリカル状の伝熱管内を上昇していくので、蒸気発生器内の状態は円周方向に均一性が保持される。

6.2.2 貫流型蒸気発生器解析プログラム化の基本的な考え方

貫流型SGは、原子力船「むつ」原子炉プラントのU字管タイプのSGとは構造的に異なるため、別の解析プログラムが必要である。船用炉プラントの貫流型SGを解析プログラム化する上で、考慮すべき特性は以下の通りである。

- (1)船用炉に一般的な現象として、船体動揺のため管内を流れる流体に加速度が発生する。
- (2)伝熱管部分にヘリカルコイルを採用しているため管内流体に遠心力が発生する。
- (3)貫流型SGの二次側インベントリが小さい。

ここでは、モデル化に際しこれらの特性をそれぞれ以下のように取り扱う。

(1)船体動揺による熱伝達率の変化の取り扱い

沸騰熱伝達率は重力の影響を受けるので、船体動揺によって生ずる加速度により変化すると考えられる。重力加速度による補正項を沸騰領域の熱伝達率に組み込む。

(2)遠心力の影響の取り扱い

ヘリカルコイル管内の熱伝達率は、遠心力による管断面内の二次流れの影響により円周方向に分布を持つ。現象として、熱伝達率はコイルの外側で高く、内側で低い傾向を持つ。したがって、管路の断面積方向の分布を考慮した平均熱伝達率相関式を用いる。

(3)二次側インベントリが小さいことの影響の取り扱い

二次側のインベントリが小さいため、船用炉の特性である負荷変動に対して二次側の管内の冷却水の挙動は急激である。その場合、「むつ」シミュレータのSG計算モデルで採用したノード分割法では刻み時間を小さくすることにより計算精度を維持するが、刻み時間を小さくすればするほど計算時間が多くかかり、リアルタイムシミュレーションが困難になる。特に主蒸気管破断事故等の事象を模擬する場合、流速が大きくなるため、クーラン条件*を満たしつつ、リアルタイムに計算を行うには、通常の刻み時間よりもさらに小さな刻み時間が要求されるため、計算機に対する負荷が高くなる。

注) *クーラン条件：線形の差分方程式を対象にした演算安定条件。

刻み時間はノードを流体が通過する時間より小さく

なければならないことを指す。

以上の理由から、本計算モデルではノード分割法ではなくSG二次側を一つのノードとし、ノードの中を領域に分けて領域境界の動きをとらえる Moving Boundary法⁷⁾ (以下、MB法と称する)を採用する。MB法は、圧力に関する微係数が解析的に導出可能なため、二次冷却水の挙動の解析のためのコードPRETTYで実施する給水系、蒸気系と連成した二次系全体の陰的積分が可能である。

「むつ」シミュレータでは、SGの二次側のインベントリが大きく挙動が緩慢であるため、蒸気系、SGおよび給水系について別々に陰的積分を実施しても問題はなかった。

MB法では、SG二次側部分を一つのノードで対応することにより、給水系と蒸気系を含めた一つのまとまりとして陰的積分を実施することが可能となる。(図6.2)

6.2.3 解析プログラム構築の際の仮定

(1)伝熱管路を単管とみなす。

実際の貫流型SGは複数の管路からなるが、SGの詳細内部状態の解析よりプラント全体の応答をリアルタイムに解析することを主眼においているため、管路の横断面方向の分布は無視できるものとし、単管を仮定する。また、SG領域のトータル長 Z_{SG} 、二次側流路断面積 A_s は一定とする。

(2)領域の順序は一定とする。

SG二次側はサブクール領域、沸騰領域、過熱領域で構成され、予め定められた流れ方向(下から上へ)に従って、その順序に並んでおり、その順序は変化しないものとする。

(3)沸騰領域におけるクオリティの分布を有理式で近似する。

沸騰領域の流体構造はクオリティ分布 $x(z)$ [蒸気と水の質量流量比]に従うとする。

$$x(z) = \frac{G_g(z)}{G_g(z) + G_l(z)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$x(z)$ の分布を一次式として仮定。

(4)単相領域(サブクール及び過熱)における温度分布を有理式で近似する。

一般に温度とエンタルピの関係は次式で与えられる。

$$dh = c_p dT - \{T(\partial v / \partial t)_p - v\} dP$$

この場合 $dP \approx 0$ なので、 $dh \approx c_p dT$ となる。即ち、温度分布が一次式で表されるならばエンタルピ分布も近似的に一次式で表される。この関係から、サブクール領域のエンタルピは、SG入口エンタルピとサブクール・沸騰領域の境界エンタルピの平均値として求められる。

$$h_{sub} = \frac{h_i + h_{f,w}}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

過熱領域についても同様である。

(5)SG内部の状態として次の3つのモードを設定する。

1)サブクール領域のみ、沸騰領域のみ、あるいは過熱領域のみからなる単領域モード

- 2) サブクール領域と沸騰領域、あるいは沸騰領域と過熱領域からなる2領域モード
- 3) サブクール領域、沸騰領域および過熱領域からなる3領域モード (図6.3)

6.2.4 貫流型蒸気発生器解析プログラムの定式化

貫流型SG内の現象を解析するため、次の3種類の式により表現する。すなわち、質量保存およびエネルギー保存を表す基本式、変数の相互関係を表す制約条件式、および現象モデルを単純化するための仮定式の3つの式である。

なお、定式化に際して使用する主要パラメータを図6.4に表す。なお、使用するパラメータの記号の意味および単位系については、巻末の記号表を参照のこと。

(1) 基本式

基本式とは、貫流型SGというノード内で一般的に成立する質量保存則およびエネルギー保存則を指す。ノード内には、サブクール、沸騰および過熱の3領域が存在する。

1) 各領域における質量保存則

(a) サブクール領域

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{V_{sub}}{v_{sub}} \right) = \frac{u_{fw}}{v_{fw}} - \frac{1}{v_l} \left[u_{sub} - A_s \frac{dZ_{sub}}{dt} \right] \dots\dots\dots (3)$$

(b) 沸騰領域

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{V_{bub}}{v_{bub}} \right) &= \frac{1}{v_l} \left[u_{sub} - A_s \frac{dZ_{sub}}{dt} \right] \\ &- \frac{1}{v_g} \left[u_{spr} - A_s \frac{dZ_{spr}}{dt} \right] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

(c) 過熱領域

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{V_{spr}}{v_{spr}} \right) = \frac{1}{v_g} \left[u_{spr} - A_s \frac{dZ_{spr}}{dt} \right] - \frac{u_{stm}}{v_{stm}} \dots\dots\dots (5)$$

2) 各領域におけるエネルギー保存則

(a) サブクール領域

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{V_{sub} e_{sub}}{v_{sub}} \right) &= \frac{h_{fw} u_{fw}}{v_{fw}} - \frac{h_l}{v_l} \left[u_{sub} - A_s \frac{dZ_{sub}}{dt} \right] \\ &+ Q_{sub} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

(b) 沸騰領域

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{V_{bub} \bar{e}_{bub}}{v_{bub}} \right) &= \frac{h_l}{v_l} \left[u_{sub} - A_s \frac{dZ_{sub}}{dt} \right] \\ &- \frac{h_g}{v_g} \left[u_{spr} - A_s \frac{dZ_{spr}}{dt} \right] + Q_{bub} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

(c)過熱領域

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{V_{spr} e_{spr}}{V_{spr}} \right] = \frac{h_g}{V_g} \left[u_{spr} - A_s \frac{dZ_{spr}}{dt} \right] - \frac{h_{stm} u_{stm}}{V_{stm}} + Q_{spr} \dots \dots \dots (8)$$

(2)制約条件式

制約条件式とは変数間の関係を表したものである。適宜微積分等を使って式を変形し、所要の変数で表現できるように展開する。例えば、沸騰領域の平均ボイド率を求め、次にそれを時間微分によって変化速度を求める等である。

(3)仮定式

仮定式とは、解析が容易になるように物理現象の解析に無理のない範囲で簡単な仮定を設けるものである。本貫流型SG計算では次のような仮定を設ける。

- (a)SG領域の全体長さ Z_{sg} 、二次側流路面積 A_s が一定とする。
- (b)沸騰領域における蒸気と水の流量比クオリティ $x(z)$ を有理式で表示する。ここでは次の一次式とする。

$$x(z) = G_g(z) / \{ G_g(z) + G_l(z) \} \dots \dots \dots (9)$$

$G_g(z)$: 蒸気質量流量, $G_l(z)$: 水の質量流量

(c)サブクール・過熱領域における温度分布およびエンタルピ分布は一次式で表される。

6.2.5 貫流型蒸気発生器解析プログラムの計算方法

過程式を適宜使用して制約条件式を基本式に代入できるような式をし、SG内の状態量に関する連立方程式を解く。次に一次側からの伝熱量の計算を上記の連立方程式の中に取り込む。さらに、SGノードに隣接する給水・蒸気ノードを含めた連立方程式に表示する。以上の計算の流れを図6.5に示す。

6.2.6 貫流型蒸気発生器解析プログラムの性能確認

(1)確認の目的

貫流型SG解析プログラムについてもシミュレータ完成段階で全体としての評価が必要であるが、各プログラムの完成度をできるだけ高めておくため、性能確認を実施する。

(2)確認モデル

「むつ」シミュレータで使用した一次冷却水熱水力モデルを別途改造し、貫流型SGモデルと結合して図6.6に示すような確認用のモデルを構成する。また、計算の際の境界条件を表6.2のように設定する。

(3)確認方法と確認基準

1)確認方法

まず、解析プログラムが正しく動作しているか熱収支計算結果で確認する。次に、貫流型SGの挙動と合わせ熱水力挙動が妥当なものか確認する。確認するパラメータを表

表6.3に示す。

(a)貫流型SG解析プログラムの妥当性確認

対象とする系の熱収支が正しく計算されているかを確認する。具体的には次の2項目を確認対象とする。

- 1)一次系及び二次系の熱収支
- 2)一次系と二次系との熱のやりとり

(b)貫流型SG解析プログラムを含めた熱水力挙動解析結果の妥当性確認

一体型炉貫流型SGの設計値は、制御系でプロセス値を制御した結果得られたものなので、貫流型SG計算モデルにも蒸気ヘッド圧力一定とする簡単な仮の制御系を設定して確認する。制御系の関連ブロック図を図6.6の確認モデルの中に示す。

(c)確認時のプラント条件

一体型炉貫流型SGの設計値は100%出力の定常状態のデータなので、確認に際しても同一の条件とする。

2)確認基準

確認基準として「An American National Standard/American Nuclear Society(ANSI/ANS-3.5-1993)の炉心熱出力の規範」に規定されている、主要パラメータについて誤差率±1%以下を準用する。

(4)確認結果

1)貫流型SG解析プログラムの妥当性確認

表6.4に示す通り、1%以内の差の範囲に入っている。

2)貫流型SG解析プログラム

表6.3に示す通り、蒸気ヘッド圧力は、1%以下に収まっている。その他のパラメータ値で誤差率1%を越えるものについては以下に考察を加える。

(a)加圧器圧力 炉心出口温度が高いため一次冷却水が膨張し、インサージが起り、サブクール水が一時的に流れ込むことによって設計値よりも低く計算している。加圧器ヒータを制御することによって設計値に近づくと考えられる。

(b)加圧器水位 加圧器圧力における考察と同様に、一次冷却水の膨張によるインサージにより、充填流量を一定としているため設計値より高く設定している。充填制御を行うことによって設計値に近づくと考えられる一次冷却水の保有水量54tonとし、膨張量を計算すると0.2 m³となり、加圧器の容積(10 m³)の2%程度で計算結果と一致している。

(c)ΔT 炉心発熱量が100MWで原子炉容器から格納容器への放熱を0.7%と仮定したところ、設計値より約1度高く計算した。格納容器への放熱量を見直し、制御棒制御系を組み込むことで設計値に近づくと考えられる。

(d)炉心通過流量 設計値より2%小さく計算している。流路抵抗を見直すことで設計値に近づくと考えられる。

- (e)過熱度 ΔT の部分と同様に格納容器への放熱量の仮定値が小さいため設計値よりも高く計算している。格納容器への放熱量を見直し、制御棒制御系を組み込むことにより設計値に近づくと考えられる。

6.3 水張り式格納容器解析プログラムの製作

6.3.1 水張り式格納容器の特性

小型・軽量化を狙った一体型炉MRXは、水張り式格納容器を採用している。表6.5にその主要仕様を、また図6.7にその断面構造図を示す。

格納容器は縦置円筒型であり、内部には事故時に炉心冠水を維持するために自由水面を有する格納容器水を保有する。また、格納容器水の上部には不活性ガスとして窒素ガスが封入されている。

断熱材で覆われた原子炉容器は完全に水没しており、格納容器内の水は遮蔽材ならびにLOCA時のヒートシンクと炉心冷却水として機能するように設計されている。

格納容器の上部にはバッフルプレートが設けられており、これによって船体動揺による格納容器水面の揺らぎの抑制とLOCA時の噴流が格納容器の上部空間を直撃することを防止している。

格納容器水の冷却のため、格納容器水浄化冷却設備、非常用格納容器水冷却設備および非常用崩壊熱除去設備がある。それぞれ次の機能を有する。

(1) 格納容器水浄化冷却設備

通常運転時、格納容器内機器・配管からの放熱分を除去し、格納容器水を冷却する。

(2) 非常用崩壊熱除去設備

- 1) 1次冷却材喪失事故に対して原子炉を冷却し、燃料および燃料被覆の重大な損傷を防止でき、かつ、燃料被覆材と水との反応を十分小さな量に制限する。
- 2) 非常用炉心冷却設備作動信号隔離弁の開放のみで作動を開始する非常用崩壊熱除去設備は原子炉容器内の水または蒸気を格納容器内に設置した冷却器に導き、格納容器水との熱交換によって冷却する。1次冷却材はループ内の密度差によって自然循環する。

(3) 非常用格納容器水冷却設備

格納容器水浄化冷却設備の補助的役割と事故時に格納容器水中に放出された熱を最終的な熱の逃し場である大気に放出、格納容器水温度を長期にわたって一定の温度に保つ機能を持っている。

以上のような水張り式格納容器の機能から、原子力船シミュレータとしてはLOCA時の熱水力挙動の評価が重要となる。

水張り式格納容器は格納容器内に水が充填されているため、原子炉の冷却性および格納容器の健全性の評価の面からの熱流動解析が重要であり、ここでは解析に必要なプログラムの開発を行う。

6.3.2 解析プログラム構築上の考慮点

6.3.1で明らかにした船用炉としての特性および水張り式格納容器の構造上の特性を解析プログラムの構築に際して以下のように考慮する。

(1) 船用炉としての特性

船用炉は常に動揺条件下で運転されることから、自然循環力、自由表面変動を考慮する必要がある。特に、受動的な安全系は自然循環を期待して設計されているため、プログラム化に配慮が必要である。

- 1) 格納容器水は、原子炉容器等の熱により容器内で上昇流を形成し、冷却系統で冷却されて下降流を形成するが、船体の動揺・傾斜はこの循環に影響を与える。
- 2) 格納容器水の水面の変動により、格納容器水の水没部が変化する。船体の傾斜により冷却設備の伝熱条件に差が発生しうる。
- 3) 非常用格納容器水冷却設備はヒートパイプを方式を採用しているが、フロン閉ループ系で発生する自然循環流の影響がある。
- 4) 沸騰熱伝達率は重力の影響をうけるので、船体動揺によって生じる加速度により沸騰熱伝達率が変化する。

(2) 水張り式格納容器の構造上の特性

1) 格納容器水の円周方向の不均質性

バッフルプレートより上部の格納容器水は船体動揺による攪拌や自然対流により半径方向の均質化が促進されやすいと考えられる。

一方、バッフルプレートより低い部分の格納容器水は原子炉容器が存在するため、円筒状を形成しており、LOCA時に発生する噴流によっても円周方向に混合し均質化するとは考えにくく、円周方向に温度分布が存在すると考えられる。

(a) LOCA時に円周方向の温度分布が大きいと放出部分の温度が上昇して噴出した蒸気の凝縮量が減少するとか、格納容器気相部に上昇した蒸気は格納容器圧力変動に大きな影響を与える可能性がある。

(b) 非常用崩壊熱除去設備の一部の故障も円周方向の温度分布の要因となり、それがさらに非常用崩壊熱除去設備の性能に影響を与えることになる。

2) バッフルプレートの効果

バッフルプレートはLOCA時に発生する噴流が気相部を直撃することを軽減する。また、LOCA時に発生した気泡がバッフルプレートで上昇を阻害されて周方向に広がることによって円周方向の温度分布を均質化する作用も期待できる。

また、船体動揺による水面の揺らぎを抑制する効果も期待でき、この効果をプログラムに反映する必要がある。

3) 窒素ガスの影響

格納容器上部には窒素ガスが充満した空間がある。LOCAが発生し、格納容器水の一部が二相流になった時、蒸気分圧と窒素ガス分圧の和が格納容器の圧力を決定する。したがって、プログラムとして蒸気系の二相流が扱えるだけでなく、非凝縮性ガスを扱える必要がある。

なお、高温蒸気が低温のサブクール水中へ大量に吹き出した時、気泡の消滅過程で圧力振動の発生が予想されるが、短時間の事象でありプラント全系統のリアルタイムシミュレーションを目的とする本シミュレータでは、解析の時間メッシュが大きく模擬困難なため計算モデルからは除外する。

6.3.3 解析プログラムへの反映

(1) 解析プログラム構築上の考慮点への対応

6.3.2で述べた解析プログラムでの考慮点に対応するためには、計算コードの改良によ

らねばならないもの、ノーディングの工夫により対応可能なもの、あるいはパラメータの調整により対応可能なものがある。

ここでは、後者の2つの対応方法について述べ、解析プログラムの改造については、(2)項に述べる。

1) 船体の傾斜・動揺の影響

(a) 非常用崩壊熱除去設備周辺の格納容器水の挙動

異常時、非常用崩壊熱除去設備で加熱された格納容器水は上昇流を形成し、格納容器水浄化・冷却設備および非常用格納容器水冷却設備で冷却された水が下降流を形成できる、すなわち、格納容器内の水の対流を模擬できるものとする。具体的には、サブチャンネル部分を半径方向に2分割し、一方にのみ冷却設備を設置し、他方を下降流の流路とする。(図6.8)

流体リンクでの重力による駆動力は、「むつ」シミュレータで実施したと同様、船体の傾きや加速度を考慮し計算する。

(b) 格納容器上部の水面挙動

水面挙動は、「むつ」シミュレータで加圧器や蒸気発生器の水面挙動を計算したスロッシングモデルを使用する。冷却器の平面配置を考慮して冷却器毎の水没割合を模擬できるモデルとする。対象部分はバッフルプレートの上全体とし、この部分を一つの自由液面を持つタンクととらえてスロッシングモデルを適用する。

(c) 熱伝達率への影響

「むつ」シミュレータで実施したと同様、重力補正を行う。

2) 構造上の特性

(a) 格納容器水の円周方向不均質性

円周方向に温度の不均質性が予想されるが、実際の分布状況については現段階では明確ではないので、今後実験等で得られる知見を反映できるようなモデルを構築しておくこととする。

流路を複数のチャンネルで表現し、チャンネルの大きさ(分割の粗さ)で噴出水の拡散・混合に等価な混合領域を近似する。チャンネルの適当な大きさは、破断口のサイズ、位置、クォリティ、一次系冷却水温度等、多くの要因に左右されると考えられるが適切な推定が困難なため、ここでは円周方向に多分割したモデルとする。この部分をサブチャンネルと称する。

拡散が複数のチャンネルにおよぶ場合を考慮して、破断流が複数のチャンネルに放出される状況も模擬できるようにする。

ここでは、格納容器冷却系統および非常用崩壊熱除去系統の個数と配置を考慮し、円周方向に4分割した4チャンネル構成とする。破断流を複数チャンネルで分散させる場合、分配割合に応じた破断面積を有する破断リンクを各チャンネルを表現する流体ノードに結合する。これらの関係を図6.9に示す。

さらに破断流の円周方向への拡散を模擬するため、上述の流体リンクで結合する。それらの状況を図6.10に示す。サブチャンネルを構成するノードの結合は図6.11のよ

うに3次元的になる。

(b)バッフルプレートの効果

バッフルプレートの混合効果と液面変動抑制効果により、円周方向の温度分布を均質化する作用を期待できる。

a)混合効果

バッフルプレート上の空間ノーディングを円周方向に4分割し、サブチャンネルの円周方向分割数に一致させる。複数のノードを一つのサブチャンネルに流体リンクで結合し、リンクの圧力損失データを調整することによって上方向へ流れる流体の分散を模擬する。これらの関係を図6.12に示す。

b)液面変動抑制効果

液面変動を計算するモーダル方程式のダンピングファクターを調整することにより模擬する。

2)窒素ガスの影響

LOCAが発生し、格納容器水の一部が二相流になった時、蒸気分圧とガス分圧の双方が格納容器の圧力を決定する。したがって、水蒸気系の二相流を扱えるだけでなく、非凝縮ガスも扱える計算プログラムとする。

(2)解析プログラムの改造

一体型炉の一次冷却系熱水力挙動解析のため、「むつ」シミュレータで使用した一次冷却系解析プログラムCANACを基本として以下の点を改造する。

- 1)非凝縮性ガスが混在する状況を模擬できるよう機能追加する。
- 2)LOCA時、一次系統から格納容器への流れおよび格納容器から一次系統への流れの双方向の流れを模擬できるようにする。(図6.13)
- 3)格納容器上部にスロッシングモデルを適用するため、複数ノードにまたがるモデルの定義を扱えるようにする。また、スロッシングモデルの液面に対応した伝熱リンクを扱えるようにする。

上記の3点について以下に述べる。

6.3.4 非凝縮性ガスの扱い

(1)仮定の設定

非凝縮性ガスを扱えるようにするために以下の仮定をおく。

- ①水の飽和物性は全圧支配とする。但し、気相における水蒸気物性は分圧支配とする。
- ②非凝縮性ガスと水蒸気の混合状態となる上部相では、ガスおよび蒸気ともに同一温度とする。
- ③非凝縮性ガスは完全気体とする。
- ④非凝縮性ガスの成分は、窒素、希ガスの2成分からなるとする。
- ⑤非凝縮性ガスの水への溶け込み量は微量であり無視できるものとする。
- ⑥非凝縮性ガスと水との速度差はドリフトフラックスモデルで扱い、ドリフト速度は全圧に対する水の飽和物性から決定したもので近似する。

⑦下部相（液相）に流入した非凝縮性ガスは瞬間的に上部相に移動するものとする。

なお、CANACでは水-蒸気について以下の仮定を設けているので参考までに記す。

⑧上部相（気相）に流入する水は瞬間的に下部相に落下し、流入水がサブクール水である時は流入水が飽和温度まで加熱され、その顕熱で蒸気を凝縮して流入水とともに下部相へ落下する。

⑨減圧等により蒸気中に発生した水滴は、蒸気中に浮遊し、時間をかけて落下するがその落下速度は一定とする。

⑩下部相に流入した蒸気は、下部相がサブクール状態であれば流入蒸気が飽和温度まで降温され、その顕熱により水を蒸発させて瞬間的に上部へ移動する。

⑪下部相に流入した蒸気は、下部相が飽和状態であれば、下部相で完全混合し、所定の気泡上昇速度で上部相へ移動する。

(2)基礎式

流体ノードにおいては、上部相および下部相について次のエネルギー収支・質量収支が成り立つ。

1) 上部混合気体のエネルギー収支

$$\frac{\partial E_G}{\partial t} = \sum_j (hG)_{Gj} + (hG)_B - (hG)_C + Q_G - Q_x - P \frac{\partial V_G}{\partial t} \quad (10)$$

2) 上部混合気体の質量収支

$$\frac{\partial M_G}{\partial t} = \sum_j G_{Gj} + G_B - G_C \quad (11)$$

3) 上部混合気体中における非凝縮性ガスの合計量の質量収支

$$\frac{\partial}{\partial t} (\eta M_G) = \sum_j (\eta G)_{Gj} \quad (12)$$

4) 下部相のエネルギー収支

$$\frac{\partial E_L}{\partial t} = \sum_j ((1-\eta)hG)_{Lj} - (hG)_B + (hG)_C + Q_L - Q_x - P \frac{\partial V_L}{\partial t} \quad (13)$$

5) 下部相の質量収支

$$\frac{\partial M_L}{\partial t} = \sum_j ((1-\eta)G)_{Lj} - G_B + G_C \quad (14)$$

ここで、記号の意味はそれぞれ次の通りである。

E : 内部エネルギー	J	P : 圧力	kg/cm ²
t : 時間	sec	V : 容積	m ³
h : 比エンタルピ	J/kg	M : 流体質量	kg
G : 質量流量	kg/sec	η : 非凝縮ガスの重量比率	
Q : 伝熱量	J/sec		

また、添え字の意味はそれぞれ次の通りである。

B : 沸騰	g : 飽和蒸気
C : 凝縮	j : リンク番号
G : 上部相流体	l : 飽和水
L : 下部相流体	SH : 過熱蒸気
X : 気液界面	gas : 非凝縮性ガス

また、流体リンクについては、既存の計算プログラムと同様リンク毎の運動方程式を積分する方法ではなく、閉ループ内のリンク毎の運動方程式を周積分するによって、ループ一巡運動量を求める。

(3)数式への展開

流体ノードについて成立する体積収支の式(15)に、エネルギー収支・質量収支の式(10)～(14)を代入する。

$$\partial V / \partial t = 0 \quad \text{----- (15)}$$

それらを、(1)で設定した仮定を考慮して整理すると、質量流量に関する式が得られる。質量流量Gに関する式に、次のドリフトフラックスモデルの関係式(16)と(17)を代入する。

$$G_G = f (C_0 U + A V_{gj}) / v_G \quad \text{----- (16)}$$

$$G_L = \{ (1 - f C_0) U - A f V_{gj} \} / v_L \quad \text{----- (17)}$$

ここで、 f : ボイド率 A : 流路面積 U : 体積流量
 C_0 : 分布定数 V_{gj} : ドリフトフラックス速度
 v_L : 飽和水の比容積

C_0 および V_{gj} については、相関式を用いる。

これらの式を整理すると、次のように体積流量 U と圧力の微係数 (dP/dt) を未知数とする関係式(18)が得られる。

$$\sum_{j \in J} a_j U_j = b \frac{dP}{dt} + cQ + d \quad \text{----- (18)}$$

ここで、 J はあるノードに接続するリンクの集合を表す。左辺はノードに接続するリンク j の体積流量の和、ま第右辺第1項は系の圧力 P の変化にともなうノードの流体変化、第2項はヒートシンクあるいはソースにともなう流体体積の変化、第3項はノード内における上流流体と下流流体との質量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。また、 a_j , b , c は、 U , (dP/dt), Q の係数を表す。この体積流量の関係式はノードの状態によって異なる。

水張り式格納容器で取り扱う流体ノードとして図6.14に示すように6つのタイプがあり、上部相と下部相との間では液面を介しての熱交換、気泡上昇および液滴の落下による質量交換を考慮する。非凝縮性ガスは分離モデルとし、液中への溶け込みは考慮しない。例えば、サブクール水ノード中に非凝縮性ガスが流入した場合、図6.14-(f)の状態から図6.14-(b)の状態に示す気水分離状態となるものとする。

さらにこれら6つの状態毎に、式(18)の形式の関係式が求められている。

次に、運動方程式については閉ループにおける一巡運動方程式としてとらえ、それを積分することによって、ループ一巡運動量を求める。一方一巡運動量は閉ループ内の流体リンクの質量流量の和として表されるから、質量流量をドリフトフラックスモデル関係式(16)と(17)を用いて体積流量に変換することができる。この一巡運動量と体積流量との関係式と体積流量と圧力微係数の式(18)から、体積流量と圧力微係数を求めることができる。

6.3.5 異なる圧力系の処理

本処理のためには異なる圧力系をつなぐ破断リンクを計算プログラムに設ける必要がある。ここで、破断リンクは開口部面積および外部圧力より流出のみを計算する。このリンクを使って双方向の流入・流出ともに計算できるようにするためには、相手側の状態を把握する必要がある。このため格納容器モデルと一次系モデルとの破断リンクの接続は破断リンクと境界リンクをそれぞれ2つ設け、圧力の高い方が破断流量を計算し、その流量を境界リンクで受け取る方法をとる。この方法は、格納容器モデル側ではそのような入力データを作成することで模擬可能である。2つの系の扱い方を図6.15に示す。

なお、一次系熱水力モデル側では、窒素ガスの流入を考えなければアナログ変数で対応できるため、プログラムの変更は必要ない。

6.3.6 複数流体ノードへのスロッシングモデルの適用

スロッシングモデルの適用が必要な部分として、バッフルプレート上部空間液面とそれに接する非常用崩壊熱除去設備及び非常用格納容器冷却設備について述べる。

(1) バッフルプレート上部空間液面のスロッシングモデル

バッフルプレート上部空間に対しては、この部分を一つの自由液面を持つタンクと考えスロッシングモデルを適用する。バッフルプレート上部空間を4つのノードに分割したがその状態でスロッシング計算が行えるよう改良する。

一次系熱水力モデルでは、スロッシング液位を考慮した流体リンクを加圧器スプレーラインで模擬している。本モデルにおいてもバッフルプレート上部ノード間をつなぐ流体リンクについてスロッシングを考慮する必要があるが、接続面は配管というより開口面なので本リンクは通常の流体リンクとして扱う。ただし、注入・抽出配管などの流体リンクでは、スロッシングによる液位の影響を模擬できる仕様とする。また境界流体リンクについても同様の仕様とする。(図6.16)

(2) 非常用格納容器水冷却設備のスロッシングモデル

非常用格納容器水冷却設備による除熱量は格納容器水温度と外気温度との関係から設定された除熱量グラフ(図6.17)により計算する。

その場合、伝熱量は格納容器水のスロッシング現象の影響を受けるので、非常用格納容器水冷却設備の水没状況を模擬する必要がある。流体ノードが二相の場合、接続するメタルノードを代表する座標値でスロッシング変動液位を計算し、メタルの水没割合で気相・液相別の伝熱面積を割り振る仕様とする。(図6.18)

(3)非常用崩壊熱除去設備のスロッシングモデル

非常用崩壊熱除去設備との伝熱は境界伝熱リンクとして気相・液相別に伝熱量を受け取るモデルとする。現状のコード仕様では総伝熱量のみ定義可能なので、気相・液相別に伝熱量を定義できる機能を追加し、選択可能な仕様とする。(図6.19)

総伝熱量の場合、気相・液相での伝熱量の配分は水没量の割合で配分する。配分の際には伝熱面の接続有効高さも考慮できるようにする。

6.3.7 水張り式格納容器解析プログラムの計算方法

(1)水張り式格納容器のノード・リンク表現

水張り式格納容器をノード・リンクにより図6.20のように表現した。

(2)定式化

図6.20のノード・リンク図に基づいて、解析プログラムを使用して計算を行う。

運動量収支についてはCANACプログラムの場合、リアルタイム計算処理のため個々の流体リンク毎に運動量収支の式をたて、それらを流体ノード毎に成立するエネルギー・質量収支の式と連立させて解くのではなく、運動量を一つのループ(ノード・リンクから構成される循環する流路)単位にまとめた式(これをループ一巡運動量と称する)を使用する。本計算では、図6.21に示す36個のループを採用した。

(3)計算の進め方

計算は、データ入力処理、初期状態計算、および過渡状態計算の3つのルーチンからなる。

1)データ入力処理ルーチン(図6.22)

2)初期状態計算ルーチン

流体ノード、流体リンクおよびメタルノードの状態量を計算するとともに、過渡計算の前処理を行う。(図6.23)

3)過渡状態計算ルーチン

本ルーチンは計算時間刻み毎に呼び出され、その時の状態について図6.24に示す内容の計算を行う。

(4)計算諸元値

計算に際し使用した諸元値を表6.6～6.13と図6.25に示す。

6.3.8 水張り式格納容器解析プログラムの性能確認

(1) 確認の目的

水張り式格納容器解析プログラムの完成度を高め、一体型炉シミュレータに円滑に結合できるように単体段階でその性能を確認する。

(2) 確認の方法

確認対象ケースの設定と確認の方法について述べる。

1) 確認対象ケースの設定

プラントの静特性、動特性について確認する。静特性としてプラント静定時の主要プロセス値、質量・エネルギーバランスを正しく計算していることを設計値と比較して確認する。

また動特性として、非常用崩壊熱除去設備1器分の伝熱が格納容器にあった時の主要プロセス値および質量・エネルギーバランスを正しく計算していることを確認する。

2) 確認項目

設計値あるいは解析結果（安全解析コードによる）と計算モデルでの計算結果との差が、10%程度以下であることを目安とするが、それぞれの差が妥当なものかどうかを検討する。プラントの質量・エネルギーバランスを評価するための主要パラメータとして以下の5つ項目を確認する。

- ① 気相部圧力
- ② 保有水量
- ③ 保有ガス量（窒素）
- ④ 気相部温度
- ⑤ 液相部温度

(3) 確認のためのモデル

水張り式格納容器計算モデルに一体型炉プラントデータと境界条件を設定し、以下のモデル構成で実施する。

1) 水張り式格納容器モデル

図6.20に示したモデルを使用する。

2) 境界条件

境界条件としては以下のものがある。

- (a) 原子炉容器壁面との伝熱量として、一定熱流束を仮定する。
- (b) 格納容器壁面との伝熱量として、一定外気温度を仮定する。
- (c) 非常用崩壊熱除去設備との伝熱量として、一定熱流束を仮定する。

ただし、動特性評価時には時間の関数として与える。

- (d) 非常用格納容器水冷却器との伝熱量として、格納容器頂部温度の関数とする熱流束を計算する。

- (e) 格納容器水浄化冷却設備との充填・抽出ラインは、充填量が流量・温度を境界条件として抽出は流量を境界条件とする。

格納容器モデルと境界条件との関係を図6.26に示す。

(3)確認結果

1)静特性の評価

(a)初期状態

格納容器圧力	0.1 Mpa
格納容器温度 (気相=液相)	55°C
気相容積	27 m ³

(b)境界条件

a)原子炉容器壁面との伝熱量

原子炉容器壁面との伝熱量は、1.0 MWとする。

b)格納容器壁面との伝熱量

格納容器壁面温度は、35°C (=外部温度) とする。

c)非常用崩壊熱除去設備との伝熱量

非常用崩壊熱除去設備は本運転していないとするため、0 MWとする。

d)非常用格納容器水冷却設備との伝熱量

格納容器の上部温度の一次関数として以下のように除熱量を定義する。

上部温度	除熱量	
55°C	0.25MW	下限値
150°C	1.60MW	上限値

e)格納容器水浄化冷却設備との間の充填及び抽出流量

充填流量=抽出流量=68.4t/h

充填水温度 = 55°C

(c)計算時間 プラントが概ね整定すると考えられる、20時間実施した。

(d)計算結果の確認

結果は表6.14、図6.27、図6.28および図6.29に示す通りである。気相部・液相部温度を除き、設計値(概算値)と概ね一致していることが確認できた。また、熱収支も図6.30のようにとれている。

2)動特性の評価

(a)初期状態

格納容器圧力	0.1 Mpa
格納容器温度 (気相=液相)	55°C
気相容積	27 m ³

(b)境界条件

a)原子炉容器壁面との伝熱量

静特性の条件と同一とする。

b)格納容器壁面との伝熱量

静特性の条件と同一とする。

c)非常用崩壊熱除去設備との伝熱量

非常用崩壊熱除去設備1台による伝熱と同程度を想定し1 MWとする。

d)非常用格納容器水冷却設備との伝熱量

静特性の条件と同一とする。

e)格納容器水浄化冷却設備との間の充填及び抽出流量

格納容器水浄化冷却設備は停止しているものとし、充填流量・抽出流量ともに0とする。

(c)計算時間

境界条件変更後、整定すると考えられるまで約100 時間実施した。

(d)計算結果の確認

結果は表6.15、図6.31、図6.32および図6.33に示す通りである。予め計算した概算値と概ね一致していることが確認できた。また、熱収支も図6.34のようにとれている。相違点については、検討点として整理した。

6.4 事故事象解析プログラムの製作

はじめに、本シミュレータでとりあげる事故事象を特に重要と考えられる配管破断事故の3事象に絞った点に触れる。

配管破断事故の場合、破断流量をいかに精度よく計算するかが重要である。解析プログラムにおいて使用する破断流量の計算方法について述べる。次に破断流量の計算方法を組み込んだ破断流量の解析プログラムについて述べる。

これらの事故事象解析プログラムを使った事故事象の模擬は、一体型炉シミュレータとしてのシミュレーション結果（別途報告予定）に譲り、ここでは省く。

6.4.1 対象とする事故事象

事故事象のモデル化対象として代表的な事象である、LOCA、SGTRおよび主蒸気管破断(Steam Line Break, 以下SLBと称する。)の3事象を選定した。選定理由は以下の通りである。

(1)3事象により、一体型炉の主要系統が網羅されること。

一体型炉の系統は大きく一次側、二次側およびCVの3つに分類できるがこれら3つの事象を選定することにより、それらの組み合わせが網羅される(表6.16)。

(2)一体型炉の特長である事故(LOCA)時の受動的安全性を確認できること。

一体型炉の構造的な特質である水張り式格納容器の機能およびEDRSの機能を確認できる。

- ・一次冷却水が流出しても炉心冠水が維持されること。(CV水の注入)
その場合、CV内の圧力が設計限度4MPaを越えないこと。
- ・破断後、EDRSにより崩壊熱が除去されること。

(3)一体型炉の構造的な特徴である貫流型蒸気発生器での事故(SGTRおよびSLB)の状況を確認できること。

1) SGTR

- ・一次冷却水が二次側に流れることにより放射能汚染が心配されるが、二次側が隔離されること。
- ・破断後、EDRSにより崩壊熱が除去されること。
- ・炉心冠水が維持されること。

2) SLB

- ・CVの圧力と温度が規定範囲内におさまること。
- ・破断後、EDRSにより崩壊熱が除去されること。

6.4.2 破断流量の計算方法

破断流量を計算する仕組みは図6.35および図6.35の通りである。破断部分から流出し、破断リンクを通じて流入ノードに流れ込む。破断リンクは破断部分と流入ノードの状態により破断流量を計算する。

計算方法として、従来提案されている代表的な方法^{12), 13), 14), 15), 16)}の中から、表6.17のように流出側上流の状態により、選択適流の状態により、選択適用する方式をとる。

6.4.3 事故事象解析プログラムの内容

事故事象解析プログラムとは、流出・流入側ノードを破断リンクで接続し、破断径と流出および流入側各ノードの状態に応じて破断流量をリアルタイムに計算するものである。

そのためには、系統における対象配管、破断ループ、破断箇所（ノード・リンク図における流出・流入ノードに相当）および破断サイズ、すなわち解析プログラムの基本仕様を設定する必要がある。ここでは、それぞれについて次のように設定した。

(1)破断リンクの仕様

1) LOCAの場合

LOCAのように一次冷却水とCV水間で使用する破断リンクは、破断側からの流量のみ計算するので、双方向の流量計算のため、図6.35に示すように2本の破断リンクを設けて計算する仕組みとする。

2) SGTR・SLBの場合

それぞれ一次系と二次系の間、二次系とCV系間の破断流の流出・流入の場合である。一次冷却水用の破断リンクはCANACでは流出方向のみ計算するので、二次系から流出あるいは二次系への流入の計算は二次系(PRETTY)用に双方向の流量を計算する破断リンクを用意する。(図6.36)

SGTRおよびSLBの事故事象の場合、一方のノードは二次側インベントリーの小さな貫流型蒸気発生器のため、破断発生後の急激な変化に対し、安定した計算を行うには、調整が必要になる可能性がある。その場合、SG等の周辺ノードと同じコード(この場合二次系 PRETTY)側に双方向の流量を計算できる破断リンクを設ける方が調整が容易である。

(2)事象のモデル化と解析プログラムの入力仕様

3つの事故事象についてそれぞれの入力仕様を設定する。

1) LOCA

(a)破断時の現象

一体型炉の安全上重要な現象として一次系の配管が破断し一次冷却水がCV内に流出する場合を想定し、プラント状態の推移を追うと、およそ次の通りである。

- ①原子炉は一次系圧力低(8.3MPa)でスクラムし、破断流の流れ込みによりCV圧力が次第に上昇し、一次冷却水の圧力と均圧状態となる。
- ②非常用崩壊熱除去装置が作動し、炉心崩壊熱をCVに放熱する。
- ③均圧後、CV水がヘッド差により一次側に流れ込み、炉心冠水が維持される。

(b)基本モデル

高温高圧の一次冷却水が、CV内に噴出し蒸気となって上昇する場合、CV水の上面に到達する以前に凝縮してしまい、CV内の気相部分に蒸気が噴出することはないことが実験結果によって確かめられている。¹⁷⁾

モデル化する上で、次の2点を仮定している。

- ①CV圧力は、一次冷却水の破断量分がCV内の気相部分を圧縮することによって上昇する。

②CV水温度は、一次冷却水の破断量分の持つエンタルピーによってCV水温度が上昇する。その場合、CVの各ノードにエンタルピーを図6.37のように重み付け配分する。

(c)プログラム入力仕様の設定

事故時、崩壊熱除去に関し、原子炉にとって最も厳しい状態を想定し、3系統ある非常用崩壊熱除去設備の配管自身が破断し、健全な残りの2系統の除去設備のうち、1系統のみ除熱できる場合を対象として選定する。また、破断箇所はその高温側とする。

最大破断サイズは、高温側配管の径50mmとし、破断径25mm以上をギロチン破断、また25mm未満をスプリット破断とする。

以上を整理すると表6.18のようになる。

2) SGTR

(a)破断時の現象

SGTRの場合のプラント状態の予想される推移を追うと、次の通りである。

- ①一次側のサブクール水が二次側に流れる。
- ②破断直後においては、破断流は臨界流としてSG上下のヘッダー部に流れ込み、ここで混合すると考えられる。一次側と二次側の圧力差が小さくなると位置的に下のSG入口部に全て流れ込むと考えられる。
- ③原子炉運転中は、伝熱管5本から一次側のサブクール水が流出してもSG出口エンタルピーが飽和蒸気エンタルピー以下になることはない。
- ④原子炉停止後、SG出口エンタルピーが減少するとサブクール状態になり主蒸気配管にサブクール水が流れることも考えられるが、その時点では一次側の圧力と二次側の圧力が大分近づいてきて、流れとしては下流方向と考えられる。

(b)基本モデル

模擬方法として、破断流量はSGの圧力と温度および1次側の圧力と温度から求める。破断直後はSG上部（出口部）と下部（入口部）にはほぼ均等に流れると考えられ、ここでは以下の式により配分する。式中の分母第二項平方根内の ε は、下部への流量調整用のパラメータである。

$$\begin{aligned} \text{上部流量} &= \text{全破断流量} \times \frac{\sqrt{P_1 - P_2}}{\sqrt{P_1 - P_2} + \sqrt{P_1 - P_2 + \varepsilon}} \\ \text{下部流量} &= \text{全破断流量} - \text{上部流量} \end{aligned}$$

ここで、 P_1 、 P_2 はそれぞれ一次側および二次側圧力で単位は kg/cm^2 である。適用範囲は $P_1 \geq P_2$ の時である。

本式によれば、

$\varepsilon = 0$ の時、常に上下に均等に流れる。

$\varepsilon = 10$ の時は、 $P_1 - P_2 = 80 \text{ kg/cm}^2$ とすると上方向に48.5%、下方向に51.5%流れる。均圧状態（ $P_1 = P_2$ ）になると、下方向の

みの流れとなる。

ここでは、均圧状態に近づくとつれ下部への流量が増加するものとして、暫定値として $\varepsilon=10$ とするが、今後実験等により実際の挙動を確認の上設定する必要がある。

(c)プログラム入力仕様の設定

本事故の模擬は、蒸気発生器の二次側の給水および蒸気部分への影響を確認することが目的なため、破断箇所を蒸気発生器A系統およびB系統の上部と下部に限定した。

破断径は、一時に破断する伝熱管本数はたかだか5本程度と考え、5本までの破断を模擬できるが、本SGモデルでは、伝熱管A、Bの2系統それぞれを一本の伝熱管として模擬しているため、破断径は、0～500%の間で指定する。

以上を整理すると表6.19のようになる。

3) SLB

(a)破断時の現象

SLBの場合のプラント状態の予想される推移を追うと、次の通りである。

- ①主蒸気管破断により、蒸気がSGからCVへ流れる。
- ②CV圧力・温度が上昇傾向となる。
- ③タービン側への蒸気流量は低下する。
- ④蒸気流量の低下にともない、給水制御機能により給水流量も低下する。
- ⑤原子炉は炉心出口温度高（310℃以上）でトリップし、主給水ポンプは停止し、主給水隔離弁および主蒸気隔離弁は閉となる。
- ⑥非常用崩壊熱除去装置が作動する。

(b)基本モデル

破断初期はSGからCVへ蒸気が流れる。次第にSG圧力とCV圧力が均圧し、均圧後はヘッド差でCVからSGへ流れると考えられる。低温のCV水が伝熱管内部を流れる際、伝熱管内を上方に向かって流れる蒸気を凝縮しつつ、また伝熱管壁面と熱交換しながら下方へ流れると考えられる。その割合についてはその時の破断逆流量およびSG圧力等により異なる。但し、本SGモデルでは前者の模擬はできず、後者の壁面と熱交換現象のみである。その結果、本プログラムでは蒸気の凝縮によるSG圧力の低下とSGへの流入量は実際より少なく計算すると予測される。

CVからSLへの逆流の発生環境として、以下の状態が考えられる。

- ①主給水ポンプあるいは補助給水ポンプが運転状態の時、CV側に加圧源がないため、逆流は生じない。
- ②主給水ポンプおよび補助給水ポンプいずれも停止状態の時、一次系からの入熱がSG側の加圧源となる。一方、CV側については、非常用崩壊熱除去設備が起動状態の場合、ここからの入熱が加圧源となる。したがって、CV圧力がSG圧力を越えて逆流が発生しうる。

なお、SG内がサブクール水で満たされさらに蒸気配管部を流れる状態は、本プロ

グラムの模擬範囲外である。

(c)プログラム入力仕様の設定

SLBの事故事象として関心が高いのはCV内に蒸気が漏れる場合であり、その場合に代表させる。破断はSG-AおよびBシステムのいずれか1系統とし、破断径100mm未満の場合スプリット破断、100mm以上の場合ギロチン破断とする。以上を整理すると表6.20のようになる。

6.5 炉心解析プログラムの製作

一体型炉の炉心性能を模擬する炉心解析プログラムの製作について述べる。

6.5.1 炉心解析プログラム製作の基本的な考え方

一体型炉に特有な構造あるいはシステムの安全性および性能を確認するためのシミュレータと位置づけているので、炉心については制御棒の本数・形状等、異なるものの「むつ」プラントの炉心と大きな相違点はない。一体型炉と「むつ」の炉心特性を表6.21に示す。したがって、「むつ」の核定数を調整することにより一体型炉シミュレータ炉心の模擬が可能と考えられる。制御棒の操作により出力調整操作が行えること等、基本的な性能確認が可能な範囲に限定し、本プログラムを製作するために新たに炉心の設計計算を行うことは避け、「むつ」シミュレータの炉心プログラムを最大限活用する。

具体的には、炉心動特性を軸方向1次元で取り扱うこととし、またDNBR計算機能も省いた。

6.5.2 「むつ」シミュレータの炉心解析プログラムの変更点

炉心解析プログラムの構成を図6.38に示す。図6.38に示すサブプログラム毎の基本的計算内容と「むつ」シミュレータからの変更点について述べる。

(1) 炉心核定数設定サブプログラム

燃焼テーブル（基準マクロ定数を燃焼度で整理したテーブルで入力データ）から、軸方向燃焼度分布（サイクル初期、中期、末期の3点について与える入力データ）にしたがって、軸方向核計算メッシュ毎に2群基準マクロ定数（高速群および熱群）を設定する。「むつ」シミュレータからの変更点は以下の通り。

制御棒本数：13本 制御棒グループ分け：停止Gp.、制御Gp. A及びB
 制御棒全長：1400mm 制御棒グループオーバーラップシーケンス組込

(2) 初期状態計算サブプログラム

初期状態計算を行い、シミュレーション開始時点出力、中性子束、制御棒位置を決定する。「むつ」シミュレータからの変更点は、(1)炉心核定数設定サブプログラムと同様である。

(3) 動特性計算サブプログラム

炉心軸方向1次元動特性計算を行い、各時点での炉心出力、中性子束、制御棒位置を設定する。「むつ」シミュレータからの変更点はない。

(4) 核定数補正サブプログラム

計算メッシュ毎に、減速材密度、出力（燃料温度）、制御棒、キセノンの状態に対応して基準マクロ定数を補正する。一体型炉では冷態状態でのミクロ核定数の補正を行っている。

(5) 中性子動特性サブプログラム

軸方向1次元にモデル化した炉心体系において、以下の時間依存2群1次元中性子拡散方程式を解いて、軸方向中性子束分布を計算し、炉心動特性を把握する。「むつ」シミュレータからの変更点はない。

(6) キセノン動特性サブプログラム

計算メッシュ毎に、ヨウ素およびキセノン濃度を計算する。「むつ」シミュレータからの変更点はない。

(7)崩壊熱モデル

6群近似により崩壊熱先行核の計算を行う。「むつ」シミュレータからの変更点はない。

(8)炉出力サブプログラム

中性子束から炉出力（発熱量）を計算する。「むつ」シミュレータからの変更点はない。

(9)疑似3次元出力分布サブプログラム

「むつ」シミュレータからの変更点は以下の通りである。

- ・一体型炉炉心は六角集合体炉心であり、横方向出力分布計算に使用するデータが得られていないので横方向出力分布計算は行わず、横方向出力分布は一様とする。
- ・N I S 応答を規定する応答係数は、炉心とN I S間の距離を補正した上で、「むつ」炉心のものを使用する。
- ・出力分布等に関しては、炉心形状の違いを考慮して、一体型炉炉心の座標系に変更する。

6.5.3 入力核定数の変更点

炉心核計算には、表6.22に示す核定数が必要である。通常これらの値は炉心設計計算の際副産物として求められるが、設計計算時求められなかったため、「むつ」炉心の定数を一部修正して使用する。

なお、入力核定数の調整にあたっては動特性計算時の挙動が不安定とならないよう配慮する。

(1)基準状態マクロ断面積

1次元動特性計算（時間依存拡散計算）に必要なデータであり、核定数設定サブプログラム等で使用する。「むつ」炉心の定数を使用する。

(2)補正用核定数

1次元動特性計算に使用するマクロ断面積の補正に必要なデータであり、核定数補正サブプログラムで使用する。「むつ」炉心の定数を使用するが、制御棒定数（マクロ断面積）については原研が実施した一体型炉炉心設計計算の結果得られた制御棒値を再現できるよう調整する。

(3)動特性パラメータ

1次元動特性計算に必要なデータであり、中性子動特性サブプログラムで使用する。「むつ」炉心の定数を使用する。

(4)横方向バックリング

軸方向1次元計算では横方向の炉心からの中性子漏れを直接取り扱うことができず、中性子漏れの量を定めるパラメータであるバックリングを用いて疑似中性子吸収計算に含める。

横方向バックリングは、炉心の持つ反応度に対する補正因子として働くことから初期

状態に適切な位置で臨界が達成できるように調整する。

また、軸方向にバックリング分布を持たせることで炉心軸方向出力分布の調整を行えることから、一体型炉炉心の軸方向出力分布が再現できるように、必要に応じて軸方向位置で横方向バックリング分布を持たせる。

6.5.4 炉心解析プログラムの調整

炉心核計算モデルに要求される機能は、炉心挙動として、(a)炉心の状態を正しく表現すること、(b)炉心出力の変化を正しく表現すること、の2点にある。ここでは「むつ」シミュレータで使用した炉心核定数を代用するが、一体型炉プラントでわかっている以下の項目について比較し調整する。

(1) 炉心の状態を正しく表現すること

1) 炉心出力分布

(a) 軸方向出力分布

横方向バックリングを主要な調整因子とし、MRX炉心の軸方向出力分布を再現する。

(b) 横方向出力分布

炉心モデルの計算結果（炉出力）は、一次冷却水熱水力計算コードCANACで使用されるが、CANACでは次元（軸方向）計算処理を行っており、横方向出力分布を特に必要としない。

一体型炉シミュレーターでは、横方向出力分布計算データを全て1.0とする。

2) N I S 応答

炉心外周部の出力に応答係数0.16を乗じて求める。

(2) 炉心出力の変化を正しく表現すること

1) 反応度係数

減速材温度係数、ドップラー温度係数等のマクロ核定数を表6.23に示すように適宜調整する。

2) 制御棒価値

制御棒バンク数を一体型炉のものに変更し、一体型炉炉心の末期制御棒価値（制御グループA 3体合計：4.12% Δk ）を再現できるよう制御棒定数（制御棒吸収断面積）を調整する。

3) 臨界制御棒位置

解析結果の軸方向出力分布を再現できるよう横方向バックリングを調整する。

4) 遅発中性子定数

ある反応度が与えられた場合の出力変動の時間変化を規定するパラメータであり、これは主に燃料濃縮度によって決まる一体型炉と「むつ」の炉心では燃料濃縮度に大きな差はなく「むつ」炉心の遅発中性子定数を使用しても問題はないと考えられる。

6.5.5 炉心解析プログラムの確認

以上の一体型炉炉心モデルを一体型炉シミュレータの調整段階であるが、模擬結果から確認すると以下のようになり、「むつ」炉心モデルをベースにした一体型炉炉心解析プロ

グラムを適宜調整することによって、模擬可能である。

(1) 臨界制御棒位置

臨界制御棒位置については、一般に低温時および高温時の臨界状態が対象となる。

1) 低温時の臨界制御棒位置

燃料棒の初期状態において確認した結果、C_sバンク735mm引き抜き時に実行増倍率が1となり臨界状態に達した。(温度 102°C, 3.8MPa)

なお、C_A および C_B バンクは全挿入状態である。

2) 高温時の臨界制御棒位置

原子炉出力約 100%においてほぼ妥当な位置で臨界となることを確認した。

C_A バンク=1322mm, C_B バンク= 522mm, C_s バンク=1400mm

(2) N I S 関連指示値

設計値との比較が必要であるが、適切な設計値がなく確認できなかった。

(3) 軸方向出力分布

初期状態での出力アキシシャルオフセットは(-4.3%)であり、一体型炉の設計値と比べると(但し、制御棒位置は異なる)、出力分布は上部にややスキューしているので調整の必要があり、横方向バックリングを主要な調整因子とし、一体型炉炉心の軸方向出力分布を再現した。(図6.39)

なお、炉心プログラムの計算結果(炉出力)は、一次冷却水熱水力計算コード CANAC で使用するが、CANAC では次元(軸方向)計算処理を行っており、横方向出力分布を特に必要としないこともあり、一体型炉シミュレーターでは、横方向出力分布計算データを全て1.0としている。

(4) 制御棒価値

制御グループA総計(3体, 全挿入)の制御棒価値の積分値は、サイクル初期で 3.5%Δk である。一方、サイクル末期の設計値は 4.13%Δk であり、一般に制御棒価値はサイクル末期になるにしたがって大きくなるので妥当な値と判断できる。

1) 測定条件

- ① 高温ゼロ出力状態(減速材温度 266.2°C)
- ② 定格運転状態から一旦原子炉をトリップさせ、ゼロ出力状態とする。
- ③ 一時冷却系の計算部分を停止し、炉心内の減速材圧力および温度を固定する。
- ④ キセノンゼロ状態とする。

2) 測定方法

(a) 制御バンク A, B

- ① 制御バンク A, B および停止バンクをすべて引き抜き状態で、冷却材中ボロン濃度を調整し、臨界状態とする。
- ② 制御バンク A を 100mm ずつ挿入し、制御棒反応度の変化より、添加反応度を求める。
- ③ 適宜ボロン濃度を調整し、臨界近傍を保つ。
- ④ 制御バンク A が全挿入となれば、続いて制御バンク B を同様に挿入していき、測

定を実施する。

(b)停止バンク

- ①制御バンク A, B および停止バンクをすべて引き抜き状態で、冷却材中ボロン濃度を調整し、臨界状態とする。
- ②停止バンクを 100mm ずつ挿入し、制御棒反応度の変化より、添加反応度を求める。
- ③停止バンクが約 500mm 付近でボロン濃度が 0 ppm となるが、以降炉心は未臨界となるが続けて停止バンクを挿入する。

3)測定結果

制御バンク A, B および停止バンクの測定結果をそれぞれ表 6.24~26、図 6.40~42 に示す。

測定結果で留意すべき点は以下の通りである。

- ①本測定方法のように、制御バンク A の挿入に続いて制御バンク B を挿入する場合、一般には制御バンク A の水平方向出力分布変化の影響により制御棒値が異なるものになるが、シミュレータの炉心プログラムは一次元モデルであるため、水平方向出力分布の影響は反映されない。何れにしても、制御バンク A, B の値を合計した値は影響を受けない。
- ②停止バンクの値は、制御バンク A, B の値に比して非常に大きな値となっているが、これは低温臨界制御棒位置を調整するために制御棒定数を調整した結果である。バンク間の値を含め、全ての炉心特性を整合させるためには詳細な炉心解析を行う必要がある。

7. おわりに

「むつ」シミュレータの実績をベースに、一体型炉シミュレータに対しても同様な解析手法を適用することによって、リアルタイム性を維持しつつ、適正な模擬精度の確保が可能であるとの見通しの上になつて、今回一体型炉シミュレータを開発した。

模擬精度については、別途実施された安全解析コードRELAP/MOD2を使用した解析結果と部分的な照合を行い、傾向的に一致していることを確認した。また一致しなかった場合にはその原因を明確にした。しかし、解析結果と境界条件等を全く同じに設定できているかまで確認できない部分もあり、今後実験等により確認する必要がある。

現状、一体型炉の搭載船建造の計画が定かでないため、一体型炉シミュレータの開発は原子炉プラントの部分に対象を絞らざるを得なかったが、一体型炉プラントの基本的機能および性能についての模擬が初めて可能になった意義は大きいものとする。

今後設計仕様評価のツールとして、一体型炉の特長である受動的安全性解析あるいは船用炉に特有な動揺時の挙動解析および高度自動化研究等、広範囲に利用していく予定である。

原子力船部門での利用をさらに進めるとともに、原子炉安全工学部人的因子研究室での「むつ」シミュレータの利用事例のように、原子力船部門以外での利用がより進むよう努力したいと考えている。

最後に本シミュレータの今後の課題について述べる。

(1)ハードウェアについて

一体型炉シミュレータの開発にともない従来使用していた計算機では能力不足となることから、平成7年度シミュレーション計算機およびCRT計算機を更新した。また、高度自動化研究に使用するため、スタンドアロンなシステムから周辺のワークステーションとネットワーク結合し、シミュレータの利用環境を整備してきた。

しかし、最近のハードウェアの著しい能力向上から、今後のシミュレータのハードウェアシステムとして、特にマンマシンインターフェース部分として重要であり、平成7年度更新時も基本的にそのままとした監視・操作システムについて更新の必要がある。

現状、監視・操作システムはCRT計算機、CRTプロセッサ(DP1000)およびCRTモニターを使用しているが、今後は分散型システムを指向し、単体で演算処理、画像情報処理および画像処理できるワークステーション(以下EWSと称する)構成あるいは最近性能向上が著しいパソコン(以下PCと称する)構成に移行していくべきであろう。(図7.1)

これらの方式にした場合、以下のような期待ができる。

1)画面構築自由度の向上

CRT画面をPC上に構築することにより、例えば高度自動化研究で使用する監視系および運転操作系をマルチウィンドウ等の新たな形で制作することが可能となる。

2)拡張性の向上

PC上にCRTプログラム以外のソフトウェアを構築することにより、例えば、運転制御検討ツールとしてシミュレータからある制御系を切り離し、その制御系を監視画面と操作画

面を使って、シミュレータの初期ファイルに影響させずにPCの範囲内で独自に検討を行うことができる。

3) ソフトウェアの可搬性の向上

PCで使用するソフトウェアは、Windows NTベースとなり可搬性が向上する。

(2) ソフトウェアについて

一体型炉シミュレータのソフトウェアに関する今後の課題について以下に述べる。

1) 炉心

炉心解析プログラムは、「むつ」の炉心プログラムを改造し、出力分布は軸方向一次元・横方向一様という簡易化したモデルを採用している。熱出力の供給およびその制御を行う上では問題ないが、炉心特性に直接依存する模擬を行うためには、一体型炉炉心核定数値を求め、それらのデータをベースにプログラムを新たに製作する必要がある。

2) 二次冷却水系統

二次冷却水系統は、PRETTYという単相の計算プログラムで製作した。現モデルではSGの入口側（給水系統）はサブクール水のみが、また出口側（蒸気系統）は過熱蒸気のみが流れることとしている。従って、例えば冷態停止過程で、一次系の降温中にSGの二次側流量が操作不具合のため過大となり、満水状態になった場合には出口側の模擬が困難となる。今後、タービン系統を含めて模擬する場合、問題となるので何らかの対策が必要である。

3) 貫流型蒸気発生器

SG解析プログラムでは、移動境界法を採用しているが、この方法の場合蒸気発生器の出口温度を解析的に求めることが困難であるため、沸騰領域と過熱領域の境界での温度変化率（勾配）を使った一次近似により、一次冷却水の原子炉出口温度を越えない範囲で、出口温度を求めている。傾向としてSGの出口温度が高めに出る傾向にある。一例として100%出力時のSG二次側出口温度は、設計値が294℃であるのに対し、シミュレータ計算値は297℃である。どのような近似方法が適当かケーススタディーが必要であるが、一次近似以外の方法について検討すべきである。

謝 辞

本システムの整備は計算科学技術推進センター等所内各部門の御協力により進められたものであり、はじめに謝意を表する次第である。

また、原子力船エンジニアリング・シミュレーション・システムの開発にあたり、「むつ」シミュレータの開発から一体型炉シミュレータの開発まで一貫して協力してくれた、菅沼氏をはじめとする三菱重工業Kの関係者のみなさんには謝意を表す。今回の一体型炉シミュレータの製作に際し、一体型炉の工学設計仕様だけでは十分でない部分もあり、陸上発電用PWRプラント等で培った設計技術力および運転経験に基づく適切なアドバイスを受けた。

参 考 文 献

- 1) 楠 他:
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
- 2) 京谷 他:
JAERI-M 94-079 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
- 3) Yamaguchi Y. and Tanabe F.: "Development of Ecological Interface for Operating NPP AND Its Preliminary Evaluation", Proceedings of Enlarged HPG Meeting on Man-Machine Systems Research and High Burn-up Fuel Performance, Safety and Reliability and Degradation of In-Core Materials Water Chemistry Effects. HPR-352 (1999)
- 4) 中澤 他:
JAERI-Tech 99-008 原子力船の高度自動化運転システムの開発(1)
通常時の全自動化運転システムの開発
- 5) 藪内 他:
JAERI-Tech 97-057 原子力船の高度自動化運転システムの開発(2)
— 原子炉スクラム後の完全自動化 —
- 6) 原子力船研究開発室:
JAERI-Tech 97-045 改良船用炉MRXの工学設計
- 7) Berry G.: "Model of a Once-through Steam Generator with Moving Boundaries and a variable number of Nodes", Presented at the American Society of Mechanical Engineers Annual Mfg. paper 83-WA/HT-19(1983)
- 8) Dittus F.W. and Boelter L.M.K.: "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type." Univ. of California Publication in Engineering Vol.2 (1947)
- 9) Thom J.R.S. et al.: "Boiling in Subcooled Water during Flow up Heated Tubes or Annuli." Proc. Inst. Mech. Engrs. 180. Pt 3C. (1966)

- 1⁰⁾ Zuber N. and Findlay J. A. : "Average Volumetric Concentration in Two-phase Flow System" Trans. ASME J. Heat Transfer 87 (1965)
- 1¹⁾ Ishii, M. : "One-dimensional Drift-flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-phase Flow Regimes" ANL 77-47 (1977)
- 1²⁾ Henry, R. E. and Fauske, H. K. "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes", Journal of Heat Transfer, Vol. 93, No. 2, May 1971, pp. 179-187
- 1³⁾ F. J. Moody, "Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture", Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87, No. 1, Feb. 1965 pp. 134-142
- 1⁴⁾ F. R. Zaloudek, "Steam-water Critical Flow from High Pressure system - Interim Report", HW-80535, January 1964
- 1⁵⁾ F. R. Zaloudek, "The Critical Flow of Hot Water through Short Tubes", HW-77594, May 1963
- 1⁶⁾ J. G. Burnell, "Flow of Boiling Water through Nozzles, Orifices and Pipes" Engineering, December 1947
- 1⁷⁾ 楠 他
JAERI-Tech 97-046 改良船用炉MRXのLOCA時の格納容器圧力及び炉心冠水維持機能解析

記号表

アルファベット記号

(記号表 その1)

記号	意味	使用単位系	SI単位系
A A _p A _s A _{SG}	面積 一次側流路断面積 二次側流路断面積 伝熱面積	m ²	同 左
A	仕事の熱当量 (国際蒸気表cal 4.1868 J/cal)	cal / J	—
C C ₀	各種定数 ドリフトフラックスモデルの分布定数	— —	— —
C _m C _p	構造体の比熱 定圧比熱	kcal/kg °C	= 4186.05 J/kgK
D D _p D _i D _o	直径 伝熱管コイル代表径 伝熱管内径 伝熱管外径	m m m m	同 左 同 左 同 左 同 左
E e ē	内部エネルギー 比内部エネルギー 平均比内部エネルギー (沸騰領域)	J J/kg	同 左
F	函数	—	—
f — f̄	ボイド率 [流路断面内の蒸気 (気相) が存在する面積割合] 平均ボイド率 (沸騰領域)	—	—
G G _{in} G _{out} G _{WR}	質量流量 流入質量流量 流出質量流量 水の重量速度	kg/s kg/s kg/s kg/s	同 左 同 左 同 左 同 左
G _s	質量速度	kg/m ² s	同 左
g ₀ g	重力の加速度 船体加速度とg ₀ との合成ベクトルの 鉛直成分加速度	m/s ² m/s ²	同 左 同 左

アルファベット記号

(記号表 その2)

記号	意味	使用単位系	SI単位系
h	比エンタルピー	J/kg	同 左
h_{sub}	サブクール領域比エンタルピー	J/kg	同 左
h_{spr}	過熱領域比エンタルピー	J/kg	同 左
h_{bub}	沸騰領域比エンタルピー	J/kg	同 左
h_l	飽和水比エンタルピー	J/kg	同 左
h_g	飽和蒸気比エンタルピー	J/kg	同 左
h_{gl}	潜熱 ($=h_g - h_l$)	J/kg	同 左
h_{stm}	蒸気 (SG出口) 比エンタルピー	J/kg	同 左
h_{fw}	給水 (SG入口) 比エンタルピー	J/kg	同 左
h	平均比エンタルピー (沸騰領域)	J/kg	同 左
L	長さ	m	同 左
M	質量	kg	
P	ゲージ圧力	Pa	同 左
p	絶対圧力	Pa bar	同 左 $=10^5$ Pa
P_r	プラントル数	—	—
Q	伝熱量	J/s	= W
q	熱流束	J/m ² s	=W/m ²
R	気体定数 (窒素ガス)	$3.0286 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{m}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{K})$	296.8J/(kg・K)
r	半径	m	m
R_e	レイノルズ数	—	—
T	温度	K	同 左
t	時間	second 略して s	同 左
U	体積流量	m ³ /s	同 左
U_D	熱通過率	kcal/m ² h°C	= 1.16279 W/m ² K
u	流体流速	m/s	同 左

アルファベット記号

(記号表 その3)

記号	意味	使用単位系	SI単位系
V V _{SG}	容積・体積 SG管内容積	m ³	同 左
V _{gi}	ドリフト速度	m ³ /kg	同 左
V V _{sub} V _{bub} V _{spr} V _l V _g \bar{V}	比容積 サブクール領域の比容積 沸騰領域の比容積 過熱領域の比容積 沸騰領域飽和水の比容積 沸騰領域飽和蒸気の比容積 平均比容積	m ³ /kg m ³ /kg m ³ /kg m ³ /kg m ³ /kg m ³ /kg m ³ /kg	同 左 同 左 同 左 同 左 同 左 同 左 同 左
W W _{sub} W _{bub} W _{spr} W _g W _l	重量 サブクール領域の重量 二相(沸騰)領域の重量 過熱領域の重量 飽和蒸気の重量 飽和水の重量	kg kg kg kg kg kg	同 左 同 左 同 左 同 左 同 左 同 左
X X _{DNB}	クオリティ(蒸気と水の質量流量比) DNBクオリティ	— —	— —
Z Z _{SG} Z _{sub} Z _{spr}	境界高さ SGの実質高さ SG内のサブクール水と二相の境界高さ SG内の二相と過熱蒸気の境界高さ	m m m m	同 左 同 左 同 左 同 左

ギリシャ文字記号

(記号表 その4)

記号	意味	使用単位系	SI単位系
α α_P α_S α_{Ssub} α_{Sbub} α_{SFbub} α_{SNbub} α_{SSpr}	熱伝達率 一次側熱伝達率 二次側熱伝達率 サブクール領域の熱伝達率 沸騰領域の熱伝達率 核沸騰領域の熱伝達率 膜沸騰領域の熱伝達率 過熱領域の熱伝達率	$J/m^2 s K$ $J/m^2 s K$ $J/m^2 s K$ $kcal/m^2 h ^\circ C$ $kcal/m^2 h ^\circ C$ $kcal/m^2 h ^\circ C$ $kcal/m^2 h ^\circ C$ $kcal/m^2 h ^\circ C$	$=W/m^2 K$ $= 1.16279$ $W/m^2 K$
α_F	汚れ係数	$J/m^2 s K$	$=W/m^2 K$
β	蒸気ノード弾性率	$1/m s^2$	同左
γ	密度	kg/m^3	同左
δ	厚さ	m	同左
ε	SGTR時、一次冷却破断水がSGの下部に流れ込む流量の調整用係数	—	同左
η	重量比率	kg/kg	同左
λ λ_t	熱伝導率 伝熱管熱伝導率	$J/m s K$ $kcal/m h ^\circ C$	$=W/mK$ $=1.16279$ W/mK
μ μ_g μ_l ρ_g ρ_l	粘性係数 飽和蒸気の粘性係数 飽和水の粘性係数 飽和蒸気の比重量 飽和水の比重量	$kg/m s$ $kg/m s$ $kg/m s$ — —	$= Pa s$ $= Pa s$ $= Pa s$ — —
χ_{tt}	核沸騰領域の熱伝達率算出のための係数	—	—

表1.1 一体型炉シミュレータの構築経過

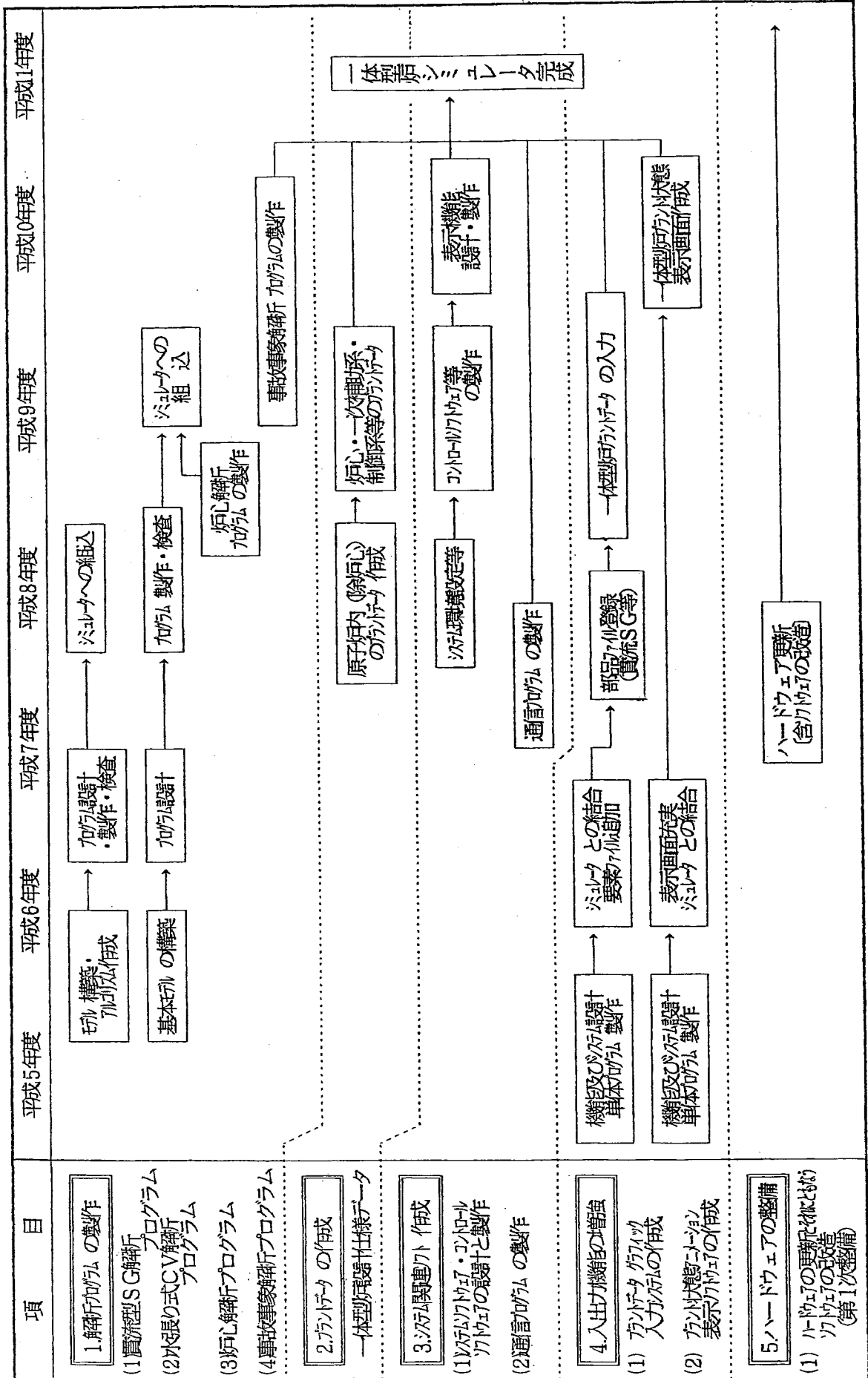


表6.1 インベントリの大きさの試算

算出項目	「むつ」プラントのSG	MRXプラントのSG
SGの 二次側体積 A	内径 1400mm 内高 5145mm 本数 406本 伝熱管外径 19mm	本数 194本 伝熱管内径 14.8mm 伝熱管最外径 3295mm 伝熱管最内径 2095mm 伝熱管配列 25列, 77層
	U字型の伝熱管内部を一次冷却水が流れるので二次側体積Aを求めるため、全体積Tと一次側体積Cを求めて差し引く。 ・全体積 T $1400 \times 1400 \times 3.14 \times 5145 / 4 = 7.92 \text{ m}^3$ ・一次側体積 C $19 \times 19 \times 3.14 \times 406 \times 2 \times 5145 / 4 = 1.18 \text{ m}^3$ $A = T - C = 7.92 - 1.18 = 6.74 \text{ m}^3$	二次側のヘリカの伝熱管内部の体積を求めるため、まず伝熱管の平均長さを求める。 ・伝熱管平均ヘリカ径 $(3295 + 2095) / 2 = 2695 \text{ mm}$ ・伝熱管の層数/本・列 $388 / 25 \text{ 列} = 15.5 \text{ 本/列}$ $77 \text{ 層} / 15.5 \text{ 本/列} = 5 \text{ 層/本・列}$ ・伝熱管平均長さ $2.695 \times 3.14 \times 5 = 42.3 \text{ m/本}$ $A = 0.0148^2 \times 3.14 \times 42.3 \times 194 / 4 = 1.41 \text{ m}^3$
蒸発量 B	30.6 ton/h	84 ton/h
インベントリの 大きさ* A/B	$\triangleright 6.74 \text{ m}^3 / 30.6 \text{ ton/h} = 0.22 \text{ h}$	$\triangleright 1.41 \text{ m}^3 / 84 \text{ ton/h} = 0.0168 \text{ h}$
「むつ」とMRXとでインベントリの大きさを比較すると、MRXのインベントリは「むつ」の約7.6%程度と小さい。		
* インベントリの大きさを次のように定義する。 インベントリの大きさ = [SGの二次側体積 / 蒸発量] = 時間		

表6.2 境界条件

境界条件値	定格設計値	境界条件値	定格設計値
・炉心発熱量	100MWt	・給水流量	168 t/h
・原子炉格納容器水温度	40 °C	・給水温度	185 °C
・抽出流量	0 t/h	・蒸気流量	168 t/h
・充填流量	0 t/h	・加圧器ヒータ発熱量	35 kw

表6.3 パラメータ値の計算結果

パラメータ値	定格設計値 A	計算結果 B	誤差率(A-B)/Ax100
・加圧器圧力	12 MPa	11.0	-8.33
・加圧器水位	62.4 %	64.5	3.37
・炉心出口温度	297.5°C	298.6	0.37
・炉心入口温度	282.5°C	283.3	0.28
・ ΔT	15.0	15.3	2.0
・炉心通過流量	4297.5 t/h	4203	-2.20
・蒸気ヘッド圧力	4 MPa	4.0	0
・蒸気温度	289°C	291.0	0.69
・過熱度	40°C	42.0	5.0
・二次側除熱量	100MWt	99.4	-0.6
・原子炉容器からCVへの放熱量	0.5~1 MWt	0.7	—
・給水流量	168t/h	168.0	0

表6.4 熱収支の計算結果

	入	出	誤差率(A-B)/Ax100
1)一次系及び二次系の熱収支	100.35	99.80	0.002
2)一次系と二次系との熱のやりとり	99.05	99.70	-0.007

表6.5 水張り式格納容器の主要仕様

型式	: 湿式耐圧型	内径	: 7,300 mm
運転時圧力	: 大気圧	全高	: 13,350 mm
運転時格納容器水温度	: 60℃	肉厚	: 100 mm
最高使用圧力	: 4 MPa	単体重量	: 560 t
最高使用温度	: 200℃		

表 6.6 初期値データ

	入力値	設計値
初期圧力	1.033 kgf/cm ²	大気圧
初期温度	55.0 °C	55.0°C
初期ガス（窒素）体積 液面高さ（格納容器最下部からの値）	- 12.067 m	27.0m ³

諸元値を求めるために使用した値

原子炉格納容器	: 内 径	7300mm	
	内部高さ	13000mm	
	肉 厚	100mm	
	容 積	482.8 m ³	(推定)
	内 面 積	334.4m ²	(推定)
水密容器 (中性子遮蔽体含む)	: 外 径	5890mm	
	全 高	10850mm	(推定)
	容 積	180.3 m ³	(推定)
非常用崩壊熱除去設備	: 容 積	0.504m ³	(一台当り推定)
非常用格納容器水冷却設備	: 容 積	0.724 m ³	(推定)

表 6.7 流体ノードデータ

ノード 番号	ロケーション	体積 [m ³]	低レベル [m]	頂レベル [m]	代表径 [m]	代表流路 面積 [m ²]	界面伝熱 経路番号	ノード代表点座標値		
								x	y	z
1	上部空間									
2	左舷-船首	19.960	10.242	13.000	3.650	10.463	4	1.729	-1.729	12.950
3	船首-右舷	19.960	10.242	13.000	3.650	10.463	4	1.729	-1.729	12.950
4	右舷-船尾	19.960	10.242	13.000	3.650	10.463	4	-1.729	-1.729	12.950
5	船尾-左舷	19.960	10.242	13.000	3.650	10.463	4	-1.729	1.729	12.950
	ポンプ上									
11	外周 左舷-船首	9.056	7.290	10.242	0.603	3.169	4	2.368	2.368	8.766
12	船首-右舷 (No.1崩壊熱)	8.602	7.290	10.242	0.603	3.169	4	2.368	-2.368	8.766
13	右舷-船尾 (No.2崩壊熱)	8.752	7.290	10.242	0.603	3.169	4	-2.368	-2.368	8.766
14	船尾-左舷 (No.3崩壊熱)	8.752	7.290	10.242	0.603	3.169	4	-2.368	2.368	8.766
15	内周 左舷-船首	7.372	7.290	10.242	0.603	2.599	4	1.942	1.942	8.766
16	船首-右舷	7.422	7.290	10.242	0.603	2.599	4	1.942	-1.942	8.766
17	右舷-船尾	7.572	7.290	10.242	0.603	2.599	4	-1.942	-1.942	8.766
18	船尾-左舷	7.572	7.290	10.242	0.603	2.599	4	-1.942	1.942	8.766
	ポンプ下									
21	外周 左舷-船首	7.070	4.930	7.290	0.603	3.169	4	2.368	2.368	6.110
22	船首-右舷	7.329	4.930	7.290	0.603	3.169	4	2.368	-2.368	6.110
23	右舷-船尾	7.179	4.930	7.290	0.603	3.169	4	-2.368	-2.368	6.110
24	船尾-左舷	7.229	4.930	7.290	0.603	3.169	4	-2.368	2.368	6.110
25	内周 左舷-船首	7.096	4.930	7.290	0.833	3.138	4	1.861	1.861	6.110
26	船首-右舷	7.255	4.930	7.290	0.833	3.138	4	1.861	-1.861	6.110
27	右舷-船尾	7.180	4.930	7.290	0.833	3.138	4	-1.861	-1.861	6.110
28	船尾-左舷	7.230	4.930	7.290	0.833	3.138	4	-1.861	1.861	6.110
	中性子遮蔽体側部									
31	左舷-船首	17.735	1.610	4.930	1.100	5.357	4	2.192	2.192	3.270
32	船首-右舷	18.345	1.610	4.930	1.100	5.357	4	2.192	-2.192	3.270
33	右舷-船尾	17.895	1.610	4.930	1.100	5.357	4	-2.192	-2.192	3.270
34	船尾-左舷	18.095	1.610	4.930	1.100	5.357	4	-2.192	2.192	3.270
40	中性子遮蔽体下部	20.864	0.000	1.610	0.760	12.325	4	0.000	0.000	0.350

△ 液面上昇時の静水頭を反映するため代表点を上げた（フローリンクも同様）

表 6.8 流体リンクデータ

リンク 番号	ロケーション	構成ノード		接続径 [m]	接続面積 [m ²]	インサム/A [m ²]	ターナル/A [m ²]	ドリフト係数 番号	圧力損失 Δ[kg/cm ²]	接続点座標値 (m)		
		始点	終点							x	y	z
上部空間水平接続												
1	船首	1	2	5.416	6.713	0.2832	0.2832	3	0.0010	2.445	0.000	12.950
2	右舷	2	3	5.416	6.713	0.2832	0.2832	3	0.0010	0.000	-2.445	12.950
3	船尾	3	4	5.416	6.713	0.2832	0.2832	3	0.0010	-2.445	0.000	12.950
4	左舷	4	1	5.416	6.713	0.2832	0.2832	3	0.0010	0.000	2.445	12.950
ポンプ上水平接続												
外周周方向												
11	船首	11	12	2.952	1.779	1.4784	1.4784	3	0.0010	3.349	0.000	8.766
12	右舷	12	13	2.952	1.779	1.4784	1.4784	3	0.0010	0.000	-3.349	8.766
13	船尾	13	14	2.952	1.779	1.4784	1.4784	3	0.0010	-3.349	0.000	8.766
14	左舷	14	11	2.952	1.779	1.4784	1.4784	3	0.0010	0.000	3.349	8.766
内周周方向												
15	船首	15	16	2.952	1.779	1.2124	1.2124	3	0.0010	2.746	0.000	8.766
16	右舷	16	17	2.952	1.779	1.2124	1.2124	3	0.0010	0.000	-2.746	8.766
17	船尾	17	18	2.952	1.779	1.2124	1.2124	3	0.0010	-2.746	0.000	8.766
18	左舷	18	15	2.952	1.779	1.2124	1.2124	3	0.0010	0.000	2.746	8.766
ポンプ下水平接続												
外周周方向												
21	船首	21	22	2.360	1.422	1.8496	1.8496	3	0.0010	3.349	0.000	6.110
22	右舷	22	23	2.360	1.422	1.8496	1.8496	3	0.0010	0.000	-3.349	6.110
23	船尾	23	24	2.360	1.422	1.8496	1.8496	3	0.0010	-3.349	0.000	6.110
24	左舷	24	21	2.360	1.422	1.8496	1.8496	3	0.0010	0.000	3.349	6.110
内周周方向												
25	船首	25	26	2.360	1.769	1.1682	1.1682	3	0.0010	2.631	0.000	6.110
26	右舷	26	27	2.360	1.769	1.1682	1.1682	3	0.0010	0.000	-2.631	6.110
27	船尾	27	28	2.360	1.769	1.1682	1.1682	3	0.0010	-2.631	0.000	6.110
28	左舷	28	21	2.360	1.769	1.1682	1.1682	3	0.0010	0.000	2.631	6.110
上部空間とポンプ上 垂直接続												
外周												
41	左舷-船首	1	11	0.050	3.169	0.4352	0.4658	1	0.0010	2.368	2.368	10.242
42	船首-右舷	2	12	0.050	3.169	0.4352	0.4658	1	0.0010	2.368	-2.368	10.242
43	右舷-船尾	3	13	0.050	3.169	0.4352	0.4658	1	0.0010	-2.368	-2.368	10.242
44	船尾-左舷	4	14	0.050	3.169	0.4352	0.4658	1	0.0010	-2.368	2.368	10.242
内周												
45	左舷-船首	1	15	0.050	2.599	0.5306	0.5679	1	0.0010	1.942	1.942	10.242
46	船首-右舷	2	16	0.050	2.599	0.5306	0.5679	1	0.0010	1.942	-1.942	10.242
47	右舷-船尾	3	17	0.050	2.599	0.5306	0.5679	1	0.0010	-1.942	-1.942	10.242
48	船尾-左舷	4	18	0.050	2.599	0.5306	0.5679	1	0.0010	-1.942	1.942	10.242
ポンプ上下間 垂直接続												
外周												
51	左舷-船首	11	21	0.050	3.169	0.4658	0.3724	1	0.0010	2.368	2.368	7.290
52	船首-右舷	12	22	0.050	3.169	0.4658	0.3724	1	0.0010	2.368	-2.368	7.290
53	右舷-船尾	13	23	0.050	3.169	0.4658	0.3724	1	0.0010	-2.368	-2.368	7.290
54	船尾-左舷	14	24	0.050	3.169	0.4658	0.3724	1	0.0010	-2.368	2.368	7.290
内周												
55	左舷-船首	15	25	0.050	2.599	0.5679	0.4540	1	0.0010	1.942	1.942	7.290
56	船首-右舷	16	26	0.050	2.599	0.5679	0.4540	1	0.0010	1.942	-1.942	7.290
57	右舷-船尾	17	27	0.050	2.599	0.5679	0.4540	1	0.0010	-1.942	-1.942	7.290
58	船尾-左舷	18	28	0.050	2.599	0.5679	0.4540	1	0.0010	-1.942	1.942	7.290
ポンプ下-遮載体側部 垂直接続												
外周												
61	左舷-船首	21	31	0.050	3.169	0.3724	0.5238	1	0.0010	2.368	2.368	4.930
62	船首-右舷	22	32	0.050	3.169	0.3724	0.5238	1	0.0010	2.368	-2.368	4.930
63	右舷-船尾	23	33	0.050	3.169	0.3724	0.5238	1	0.0010	-2.368	-2.368	4.930
64	船尾-左舷	24	34	0.050	3.169	0.3724	0.5238	1	0.0010	-2.368	2.368	4.930
内周												
65	左舷-船首	25	31	0.050	2.187	0.5396	0.7590	1	0.0010	1.979	1.979	4.930
66	船首-右舷	26	32	0.050	2.187	0.5396	0.7590	1	0.0010	1.979	-1.979	4.930
67	右舷-船尾	27	33	0.050	2.187	0.5396	0.7590	1	0.0010	-1.979	-1.979	4.930
68	船尾-左舷	28	34	0.050	2.187	0.5396	0.7590	1	0.0010	-1.979	1.979	4.930
遮載体側部と下部 垂直接続												
71	左舷-船首	31	40	0.050	3.081	0.5388	0.9737	1	0.0010	1.824	1.824	1.610
72	船首-右舷	32	40	0.050	3.081	0.5388	0.9737	1	0.0010	1.824	-1.824	1.610
73	右舷-船尾	33	40	0.050	3.081	0.5388	0.9737	1	0.0010	-1.824	-1.824	1.610
74	船尾-左舷	34	40	0.050	3.081	0.5388	0.9737	1	0.0010	-1.824	1.824	1.610
外周と内周との水平接続												
ポンプ上												
81	左舷-船首	11	15	2.952	14.131	0.02132	0.02132	3	0.0001	2.155	2.155	8.766
82	船首-右舷	12	16	2.952	14.131	0.02132	0.02132	3	0.0001	2.155	-2.155	8.766
83	右舷-船尾	13	17	2.952	14.131	0.02132	0.02132	3	0.0001	-2.155	-2.155	8.766
84	船尾-左舷	14	18	2.952	14.131	0.02132	0.02132	3	0.0001	-2.155	2.155	8.766
ポンプ下												
85	左舷-船首	21	25	2.360	11.297	0.02667	0.03685	3	0.0001	2.155	2.155	6.110
86	船首-右舷	22	26	2.360	11.297	0.02667	0.03685	3	0.0001	2.155	-2.155	6.110
87	右舷-船尾	23	27	2.360	11.297	0.02667	0.03685	3	0.0001	-2.155	-2.155	6.110
88	船尾-左舷	24	28	2.360	11.297	0.02667	0.03685	3	0.0001	-2.155	2.155	6.110

△ 高さ、径はノードの変更に対応。圧力損失は 100m³/h の流量時の値。

表6.9 境界流量リンクデータ

リンク 番号	ロケーション	分割		接続高さ [m]	接続径 [m]	接続面積 [m ²]	備 考
		始側	終側				
101	格納容器水浄化冷却設備 抽出側	21 内部	101 境界	7.290	0.0932	0.006822	
102	充填側	102 境界	23 内部	7.290	0.0932	0.006822	

表6.10 メタルノードデータ

ノード 番号	ロケーション	分割 1			備 考	
		材質	体積 [m ³]	肉厚 [m]		
201	格納容器外壁 上部空間	左舷-船首	鋼鉄	5.388	0.100	
202		船首-右舷	鋼鉄	5.388	0.100	
203		右舷-船尾	鋼鉄	5.388	0.100	
204		船尾-左舷	鋼鉄	5.388	0.100	
211	ポンプ上	左舷-船首	鋼鉄	1.716	0.100	
212		船首-右舷	鋼鉄	1.716	0.100	
213		右舷-船尾	鋼鉄	1.716	0.100	
214		船尾-左舷	鋼鉄	1.716	0.100	
221	ポンプ下	左舷-船首	鋼鉄	1.372	0.100	
222		船首-右舷	鋼鉄	1.372	0.100	
223		右舷-船尾	鋼鉄	1.372	0.100	
224		船尾-左舷	鋼鉄	1.372	0.100	
231	遮蔽体側部	左舷-船首	鋼鉄	1.930	0.100	
232		船首-右舷	鋼鉄	1.930	0.100	
233		右舷-船尾	鋼鉄	1.930	0.100	
234		船尾-左舷	鋼鉄	1.930	0.100	
240	中性子遮蔽体下部		鋼鉄	8.750	0.100	

表6.11 メタル物性値データ

物性値 番号	材質名称	比重量	温度-T°K [kcal/mh°C]		温度-T°K [kcal/kg°C]		備 考
			温度 [°C]	熱伝導率	温度 [°C]	比熱	
1	鋼鉄	7830.0	0.0	44.64	75.0	0.124	
			100.0	43.90	225.0	0.127	
			200.0	42.11	275.0	0.129	
			300.0	39.58	325.0	0.138	
			400.0	36.75	375.0	0.144	

表6.12 伝熱リンクデータ

リンク 番号	ロケーション	内部流体 ノード番号	伝熱面積 [m ²]	熱伝達率 番号	メタル ノード番号	伝熱面積 [m ²]	熱伝達率 番号	境界メタル ノード番号	備 考
201	格納容器外壁の放熱 上部空間 左舷船首	1	20.287	3	201	25.816	5	500	境界メタルノード番号 500 は 外気温度を定義する。
202		2	20.287	3	202	25.816	5	500	
203		3	20.287	3	203	25.816	5	500	
204		4	20.287	3	204	25.816	5	500	
211	ポンプ上 左舷船首	11	16.925	3	211	17.389	5	500	
212		12	16.925	3	212	17.389	5	500	
213		13	16.925	3	213	17.389	5	500	
214		14	16.925	3	214	17.389	5	500	
221	ポンプ下 左舷船首	21	13.531	3	221	13.902	5	500	
222		22	13.531	3	222	13.902	5	500	
223		23	13.531	3	223	13.902	5	500	
224		24	13.531	3	224	13.902	5	500	
231	遮蔽体側部 左舷船首	31	19.035	3	231	19.556	5	500	
232		32	19.035	3	232	19.556	5	500	
233		33	19.035	3	233	19.556	5	500	
234		34	19.035	3	234	19.556	5	500	
240	中性子遮蔽体下部	40	55.264	3	240	60.935	5	500	
301	非常用格納容器水冷却設備	1	-	-	-	-	-	-	直接除熱量を受取る
302		2	-	-	-	-	-	-	
303		3	-	-	-	-	-	-	
304		4	-	-	-	-	-	-	
212	非常用崩壊熱除去	No.1	11	-	-	-	-	-	直接放熱量を受取る
213		No.2	12	-	-	-	-	-	
214		No.3	13	-	-	-	-	-	

表6.13 ドリフトフラックスモデルおよび熱伝達率モデル

モデル番号	ドリフトフラックスモデル				備考
1	ドリフトフラックスモデル I *)				
3	水平分離流モデル *)				
熱伝達率モデル					
熱伝達率 モデル番号	凝縮熱伝達	水单相強制 対流熱伝達	蒸気单相強制 対流熱伝達	沸騰熱伝達	
1	HTRIの式**)	Dittus and Boelter の式 8)	Dittus and Boelterの式	Thom の式 9)	今回の単体計算モデルでの計算では使用していない。
2	伝熱マップ I				
3	伝熱マップ I ***)				格納容器内壁面と流体の伝熱に使用
4	一定熱伝達率 100.0kcal/(m ² hr °C)				界面熱伝達率として使用。
5	一定熱伝達率 10.0kcal/(m ² hr °C)				格納容器外壁面の放熱に使用。

*) 垂直管流動様式については、図6.25のようにボイド率と流量から流動様式が定められ、それに該当する相関式よりドリフト速度および分布パラメータを求める。
相関式はZuber¹⁰⁾あるいはIshii¹¹⁾の式をベースにしている。
水平管についても流動様式マップがあり、同様にドリフト速度および分布パラメータが求められる。

**) 非公開資料

***) 熱伝達率モデル番号の1と同様に流動様式および熱伝達の形式毎に相関式を用意し、伝熱量を求めるもの。熱伝達率モデル番号2と同一マップを使用するが、モデル番号3は限界熱流束と温度を計算しない場合を表す。

表6.14 静特性の計算結果の要約

評価項目	設計値	計算値	検討点	図番
格納容器気相部圧力 [MPa]	0.1	0.109	(検討1)	図6.25
保有水量 [Ton]	264.6 (注1)	264.6	(検討2)	図6.26
保有ガス量 [kg]	27.2 (注2)	27.9	(検討3)	
気相部温度 [°C]	55.0	60.9	(検討4)	図6.27
液相部温度 [°C]	55.0	60.9		
格納容器水浄化冷却設備 抽出流量 [t/h]	68.4	68.4	—	—

(注1) 保有水量は、格納容器全空間体積 295.4 m^3 から気相部体積 27.0 m^3 を除いた体積に 55°C の水の密度 985.7 kg/m^3 をかけて求めた。なお、設計値は 268.4 Ton である。

(注2) 保有ガス量は、気相部体積 27.0 m^3 にガスの密度 1.0062 kg/m^3 をかけて求めた。

(検討1) 温度上昇によって液相部が膨張することにより圧力も上昇したと考えられる。 0.1 MPa の圧力の下で比容積は蒸気表(機械学会1968)によれば次の通りである。

$$55^\circ\text{C} \text{ ----- } 0.0010146 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$61^\circ\text{C} \text{ ----- } 0.0010177 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

したがって、液相部の膨張量は次式から求められる。

$$(295.4 - 27.0) \times (0.0010177 - 0.0010146) / 0.0010146 = 0.8201 \text{ m}^3$$

液相部の膨張により気相部が圧縮されたことによる圧力変化を気体の状態方程式から計算すると、 0.1071 MPa となり、計算モデルによる計算結果とほぼ一致している。

(検討2) 計算過程での保有水量は一定であり、概ね妥当な数値である。概算値計算に用いた水の密度 985.7 kg/m^3 、一方計算モデル内で参照・使用している密度は 985.8 kg/m^3 である。

(検討3) 計算過程での保有水量は一定であり、概ね妥当な数値である。概算値を求めたガス密度 (1.0062 kg/m^3) と、プログラム内で参照しているガス密度(1.034 kg/m^3) との差により保有ガス量に差が生じたと考えられる。

(検討4) 図6.31の熱収支から、格納容器への入熱と格納容器からの放熱との差により、格納容器内に蓄積された熱量はおよそ $0.2 \text{ MW} \times 10 \text{ Hr} = 1,720,000 \text{ kcal}$ である。これを保有水量(295.4 ton)で割ると 5.8 kcal/kg となり、約 5.8°C の温度上昇となる。計算結果では 5.9°C 上昇しており一致している。格納容器外壁部の初期温度と格納容器内液相の初期温度の設定の差によるものと考えられる。

表6.15 動特性の計算結果の要約

評価項目	概算値	計算値	検討点	図番
格納容器気相部圧力 [MPa]	0.137 上昇 (注1)	0.109	(検討1)	図6.29
保有水量 [ton]	268.4	264.6	静特性の 検討2, 3 に同じ	図6.30
保有ガス量 [kg]	27.2	27.9		
気相部温度 [°C]	107.8 (注2)	120.8	(検討2)	図6.31
液相部温度 [°C]	107.8 (注2)	119.7		
非常用格納容器水冷却設備 除熱量 [MW]	1.0	1.186	(検討1)	—

(注1) 単純化するためにここではポンプを含むノードの高さより上は対流により液相・気相とも107.7°Cの均一温度になると考え、ポンプ高さより下のノードは対流の影響が及ぼす55°Cのままであるとした。このとき伝熱により格納容器水温度が上昇することにより膨張し圧力が上昇する。ポンプを含むノードの高さより上の容積は144.94m³であり、気相容積の初期値から初期の水の容積は117.94m³である。また、0.1MPa、55°Cの水の比容積は、0.0010146 m³/kg である。整定した後の状態を107.8°Cの飽和状態と仮定するとその圧力は0.135 MPa となる。ここで0.135 MPa、107.8°Cの飽和水の比容積は0.0010499 m³/kg である。このとき水の膨張する容積は4.1m³で、気相部は27m³から22.9m³に圧縮される。気相部の状態方程式より、気体定数をR、整定後の圧力をPとすると、次の2式が得られる。

$$0.1 \times 27 = nR \times (273.15 + 55) \quad P \times 22.9 = nR \times (273.15 + 107.8)$$

これを解いて、 $P = 0.137\text{MPa}$ 。

(注2) 整定状態では上部空間ノードの気相部と液相部との温度は等しく、かつ非常用格納容器水冷却設備から除熱するものと考え、境界条件から上部空間の温度をTとすると次式が成立する。

$$0.25 + (1.6 - 0.25) / (150 - 55) \times (T - 55) = 1$$

これより、 $T = 107.8^\circ\text{C}$

(検討1) 非常用崩壊熱除去設備からの伝熱量が加わる前は68.4t/hの充填・抽出流量が流れる条件下で整定しており、非常用崩壊熱除去設備からの伝熱量が加わった後は充填・抽出流量は0t/hの条件である。このため、非常用格納容器水冷却設備からの放熱が概算値よりも大きくなっており(1.186MW)、したがって上部空間ノードの温度は条件を満たす120°C程度まで上昇する。なお、気相部と液相部との温度差(1.1°C)は流量の計算上の誤差が生じた時、上部空間ノードの水・蒸気の質量を補正して全体質量を一定とする処理を実施しており、このためガスが膨張(もしくは収縮)することによるものと考えられる。

(検討2) またポンプ高さより下の部分においても実際には対流が生じており(若干流れるのは当然であり概算値を計算するときの条件が単純過ぎた)温度が上昇している。結果として上部空間ノードだけでなく格納容器全体の水が膨張しており、圧力も概算値より高い出力となっている。格納容器全体の水が0.1 MPa、55℃の状態から0.23MPa、120℃の状態になった時の膨張量は次のように算出できる。

$$(295.4 - 27.9) \times (0.0010606 - 0.0010146) / 0.0010146 = 12.13 \text{ m}^3$$

気相部の状態方程式よりガス部の圧力は、0.22MPaとなる。非常用崩壊熱除去設備と接するノードの温度は125℃程度であり、さらに圧力は上昇すると考えられる。これらの膨張を考慮すると圧力の上昇は妥当と考えられる。

表6.16 事故事象と流出・流れ込み側の系統の関係

事故事象	流出側	流入側
LOCA	一次冷却水(CANAC)	⇔ CV水(CV-CANAC)
SGTR	一次冷却水(CANAC)	⇔ 二次冷却水(PRETTY)
SLB	二次冷却水(PRETTY)	⇔ CV水(CV-CANAC)

()内は使用計算コード

表6.17 流出側の状態と適用モデルの関係

流出側の状態	適用モデル
①サブクール水	(Zaloudek+Burnell)モデル
②二相	Henry-Fauskeモデル
③過熱蒸気	理想気体臨界流モデル

表6.18 LOCA解析プログラムの入力仕様

項目	入力仕様
破断対象配管	非常用崩壊熱除去設備配管 (A系統、B系統、C系統の3系統有り)
破断箇所	高温側配管
破断系統	A系統、B系統、C系統のいずれか1つ
破断サイズ	・高温側配管の破断径指定(mm)：0～50mm スプリット破断(径25mm未満の小破断) 又は、ギロチン破断(径25mm以上の大破断)

表6.19 SGTR解析プログラムの入力仕様

項目	入力仕様
対象配管	蒸気発生器 SG-A系統側 (何れも外径19mm 伝熱管 SG-B系統側 肉厚2.1mm)
破断箇所	伝熱管のヘリカルコイル上部と下部の2カ所
破断系統	SG-A系統あるいはB系統のいずれか1系統を選択
破断サイズ	伝熱管最大5本までの破断とし、破断サイズは1本を100%として、0~500%の範囲で指定する。 なお、破断面積は次式により求める。 $[14.8/2]^2 \times \pi \times 2 \times [(破断サイズ\%) / 100] \text{ mm}^2$

表6.20 SLB解析プログラムの基本仕様

項目	基本仕様
対象配管	主蒸気管格納容器内配管 SG-A系統側 (何れも 200A Sch80) SG-B系統側
破断箇所	格納容器貫通部内側取付部分 流れ込み側ノードは、格納容器のポンプ下外側 ノード 図5 参照
破断ループ	SG-A系統あるいはB系統のいずれか1系統を選択
破断サイズ	主蒸気管の破断径指定(mm) スプリット破断 (径100mm 未満の小破断) 又は、ギロチン破断 (径100mm 以上の大破断)

表6.21 一体型炉プラントと「むつ」プラントの炉心特性比較

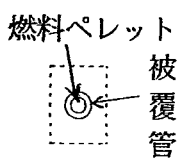
項 目	一体型炉方の炉心	「むつ」方の炉心
運転圧力	1.2 MPa	10.8 MPa
温度	290℃	278℃
燃料被覆管材料	Zr	SUS
減速材/燃料体積比 	1.6	1.9
燃料材料	UO ₂	同 左
濃縮度	4.3/2.5	4.44/3.24
可燃性毒物	ガドリニア	ほう珪酸ガラス
格子形状	六角格子	四角格子

表6.22 炉心プログラムに必要な核定数

項目	高速群	熱群	その他
基準状態での (基準圧力・ 基準温度) マクロ断面積	<ul style="list-style-type: none"> 高速群拡散係数 高速群吸収断面積 高速群核分裂断面積 中性子除去断面積 	<ul style="list-style-type: none"> 熱群拡散係数 熱群吸収断面積 熱群核分裂断面積 	
補正用定数 ミクロ断面積	<ul style="list-style-type: none"> 減速材の 高速群吸収断面積 高速群輸送断面積 中性子除去断面積 キセノンの 高速群吸収断面積 	<ul style="list-style-type: none"> 減速材の 熱群吸収断面積 熱群輸送断面積 キセノンの 熱群吸収断面積 	
制御棒 マクロ 核定数	<ul style="list-style-type: none"> 高速群吸収断面積 (同時に移動するグループ毎に) 	<ul style="list-style-type: none"> 熱群吸収断面積 	<ul style="list-style-type: none"> マクロ 高速群吸収断面積に対して出力の関数として補正するための係数 中性子スペクトルの変化に伴うマクロ断面積補正因子
ドップラー 補正用係数			
スペクトル 変化 補正因子			
動特性パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 高速群中性子速度 	<ul style="list-style-type: none"> 熱群中性子速度 	<ul style="list-style-type: none"> 遅発中性子発生割合及び先行核崩壊定数(6群) 遅発中性子インポートランス
横方向バッキング			<ul style="list-style-type: none"> 軸方向マッシュ毎
その他			<ul style="list-style-type: none"> 燃料領域及び反射材料域マッシュでの減速材割合

表6.23 一体型炉プラントと「むつ」プラントの反応度係数の比較

反応度係数	一体型炉	「むつ」	備考
減速材温度係数 (pcm/°C)	-3.7	-2.5	<ul style="list-style-type: none"> 一体型炉の方が減速材対燃料体積比が小さいことによる影響
ドップラー温度係数 (pcm/°C)	-2.7	-2.1	<ul style="list-style-type: none"> 出力密度の違いによるもの。

表6.24 制御バンクA 制御棒価値

制御棒位置			添加反応度 $\Delta \rho$	積分価値 IRW	微分価値 DRW
挿入前 L1 (mm)	挿入後 L2 (mm)	平均位置 L3 (mm)			
1400	1300	1350	119.8	119.8	1.20
1300	1200	1250	138.8	258.6	1.39
1200	1100	1150	174.5	433.1	1.75
1100	1000	1050	194.9	628.0	1.95
1000	900	950	206.9	834.9	2.07
900	800	850	221.9	1056.8	2.22
800	700	750	248.7	1305.5	2.49
700	600	650	294.3	1599.8	2.94
600	500	550	336.0	1935.8	3.36
500	400	450	365.1	2300.9	3.65
400	300	350	359.4	2660.3	3.59
300	200	250	301.3	2961.6	3.01
200	100	150	216.4	3178.0	2.16
100	0	50	136.1	3314.2	1.36

上記において、 $L3_i = (L1_i + L2_i) / 2$

$$IRW(L2_i) = \sum_{k=1}^i \Delta \rho_k, \quad DRW(L3_i) = \Delta \rho_i / (L2_i - L1_i)$$

表6.25 制御バンクB制御棒価値(制御バンクA挿入状態)

制御棒位置			添加反応度 (pcm)	積分価値 (pcm)	微分価値 (pcm/mm)
挿入前 (mm)	挿入後 (mm)	平均位置 (mm)			
1400	1300	1350	116.4	116.4	1.16
1300	1200	1250	128.9	245.3	1.29
1200	1100	1150	161.5	406.8	1.62
1100	1000	1050	179.8	586.6	1.80
1000	900	950	192.3	778.8	1.92
900	800	850	208.0	986.9	2.08
800	700	750	236.2	1223.0	2.36
700	600	650	285.5	1508.6	2.86
600	500	550	331.9	1840.4	3.32
500	400	450	370.6	2211.0	3.71
400	300	350	378.0	2588.9	3.78
300	200	250	326.8	2915.8	3.27
200	100	150	239.6	3155.4	2.40
100	0	50	153.8	3309.1	1.54

表6.26 停止バンク制御棒価値

制御棒位置			添加反応度 (pcm)	積分価値 (pcm)	微分価値 (pcm/mm)
挿入前 (mm)	挿入後 (mm)	平均位置 (mm)			
1400	1300	1350	781.7	781.7	7.82
1300	1200	1250	388.0	1169.8	3.88
1200	1100	1150	245.2	1414.9	2.45
1100	1000	1050	140.6	1555.5	1.41
1000	900	950	196.1	1751.6	1.96
900	800	850	303.2	2054.8	3.03
800	700	750	389.7	2444.5	3.90
700	600	650	616.9	3061.3	6.17
600	500	550	835.1	3896.5	8.35
500	400	450	1184.3	5080.8	11.84
400	300	350	2122.9	7203.6	21.23
300	200	250	5441.8	12645.4	54.42
200	100	150	9781.1	22426.5	97.81
100	0	50	11167.0	33593.5	111.67

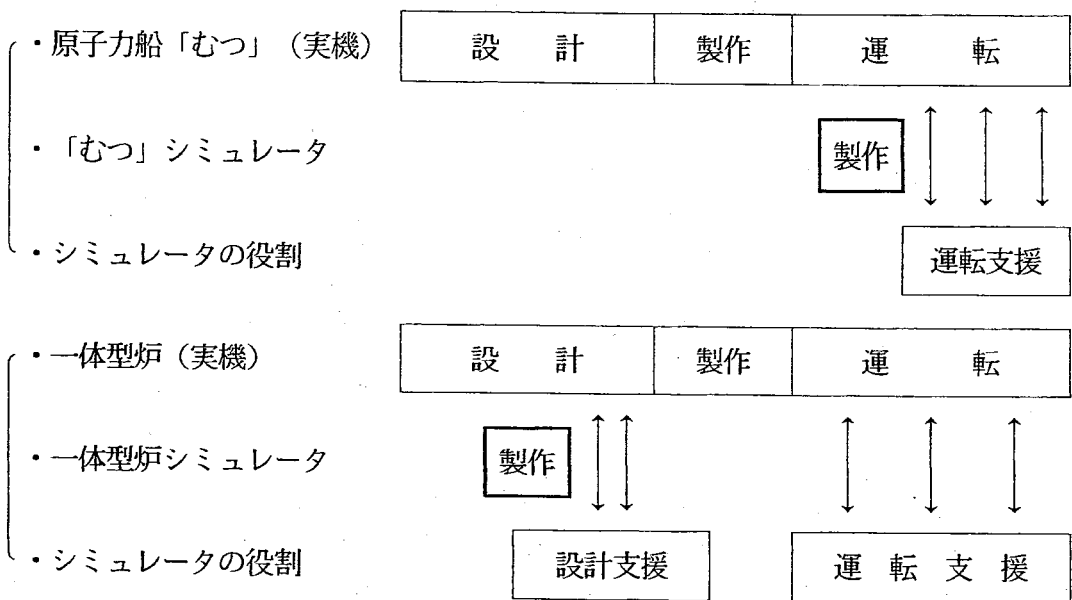


図2.1 「むつ」シミュレータとMRXシミュレータの開発段階における役割の違い

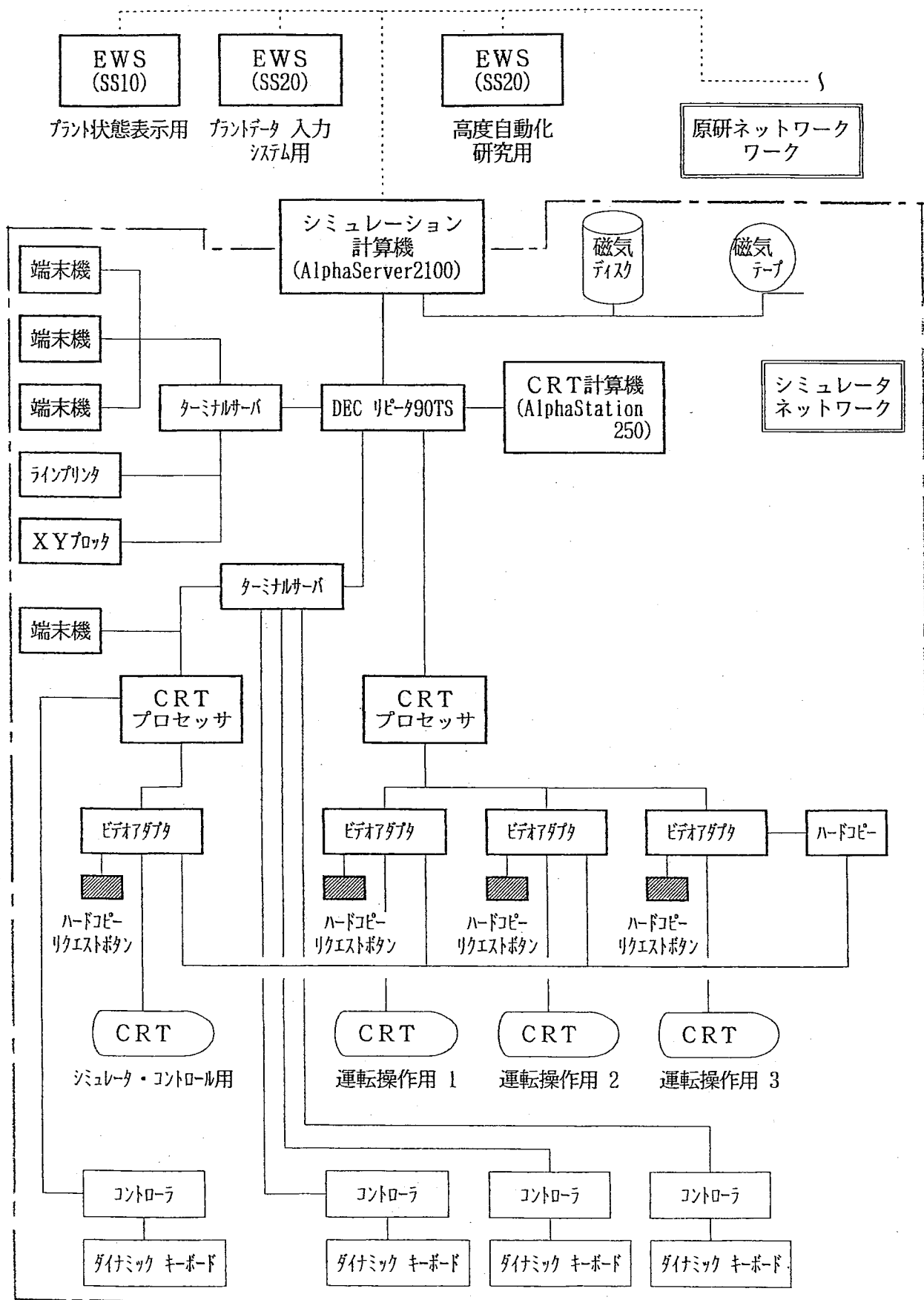


図3.1 原子力船シミュレータのハードウェア構成図

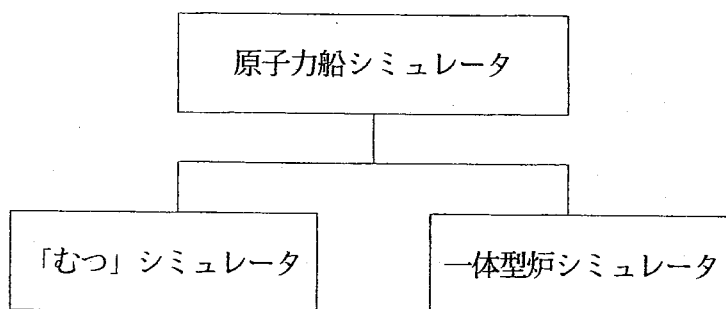


図4.1 原子力船シミュレータのソフトウェア構成

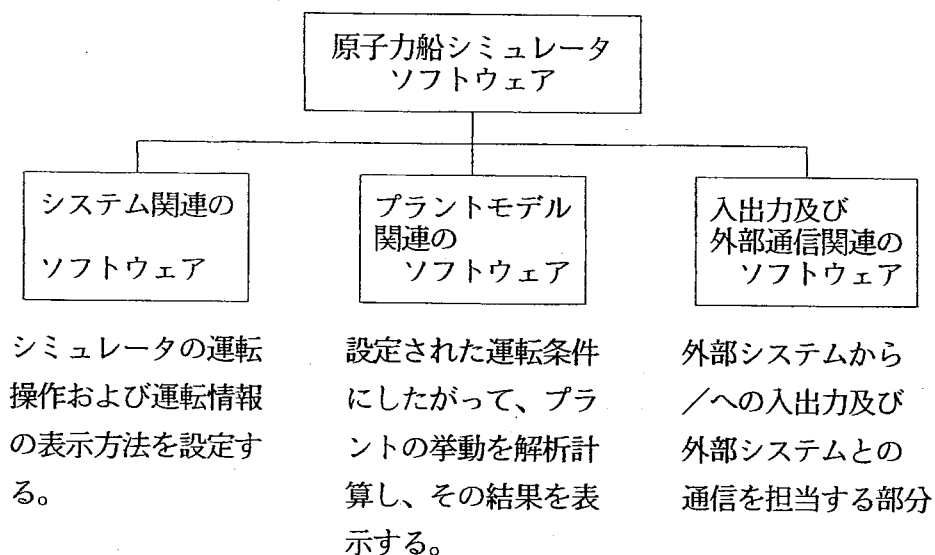


図4.2 原子力船シミュレータの構成

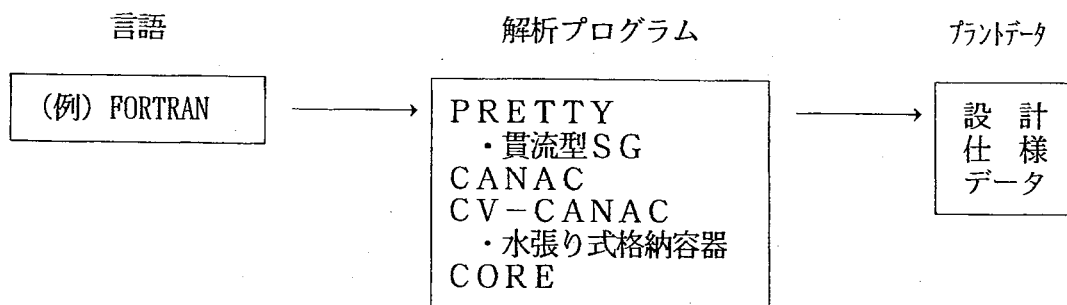


図4.4 言語、解析プログラムおよびプラントデータの関係

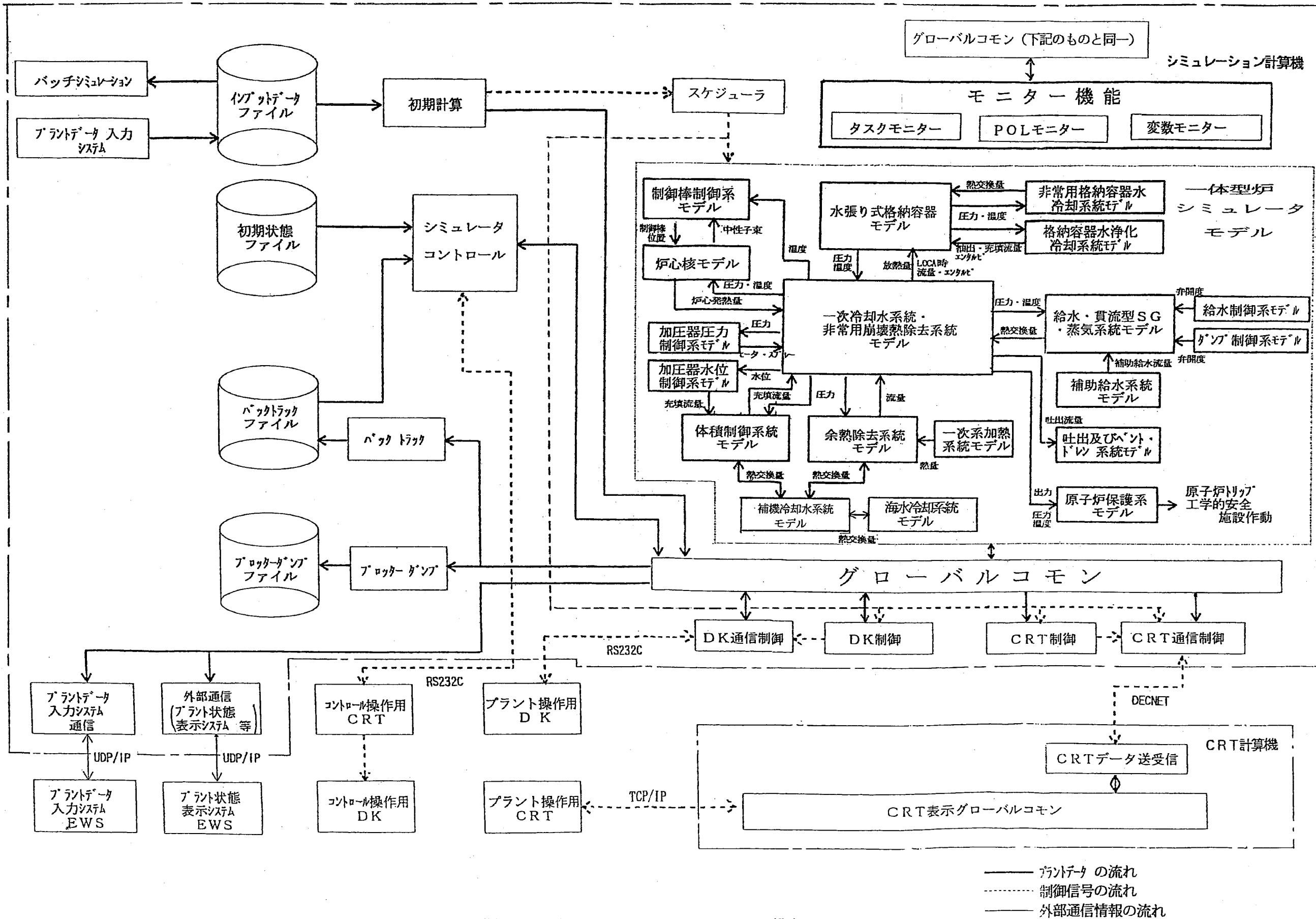


図4.3 一体型炉シミュレータのソフトウェア構成図

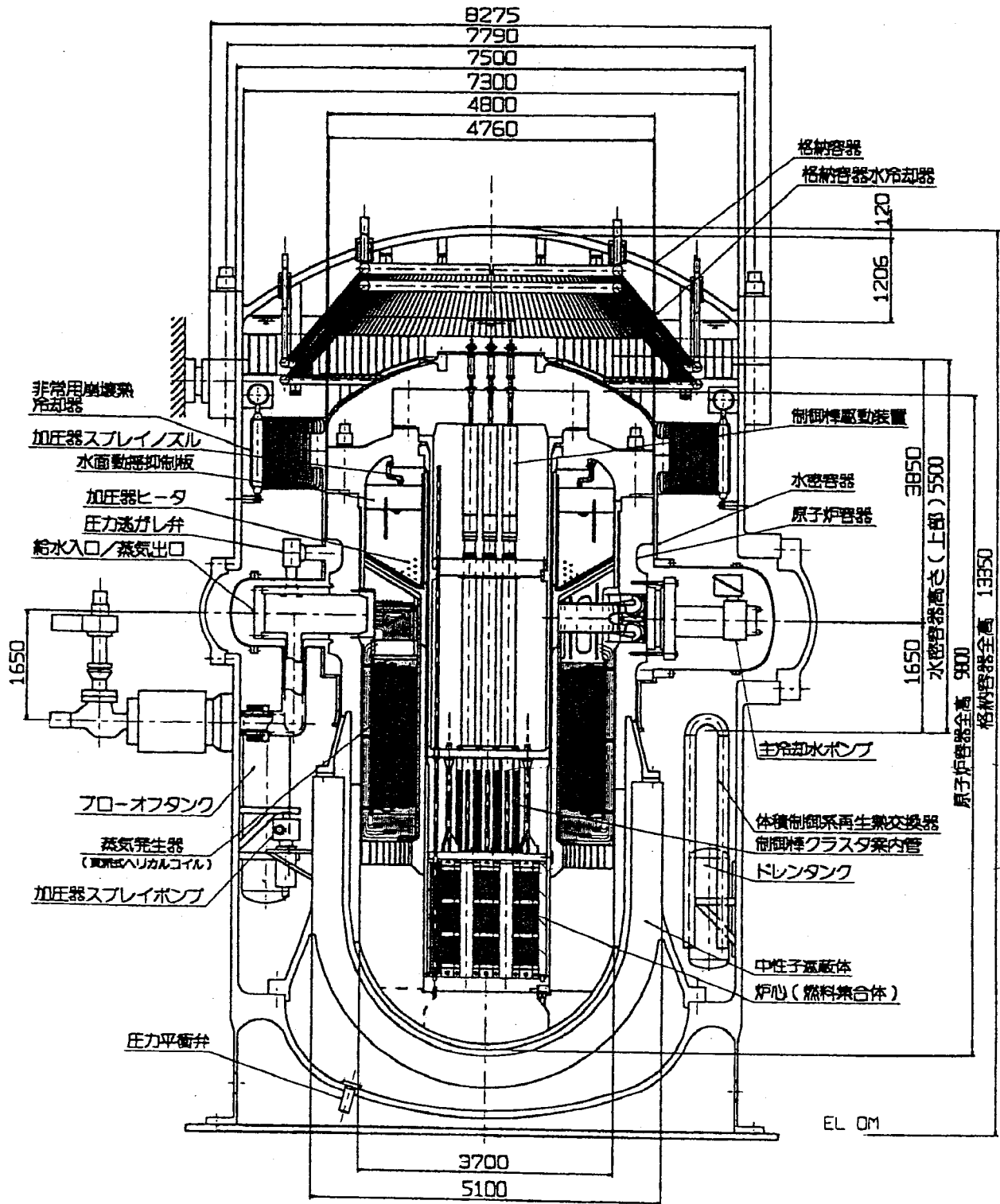


図5.1 一体型炉 (MRX) の全体配置図

This is a blank page.

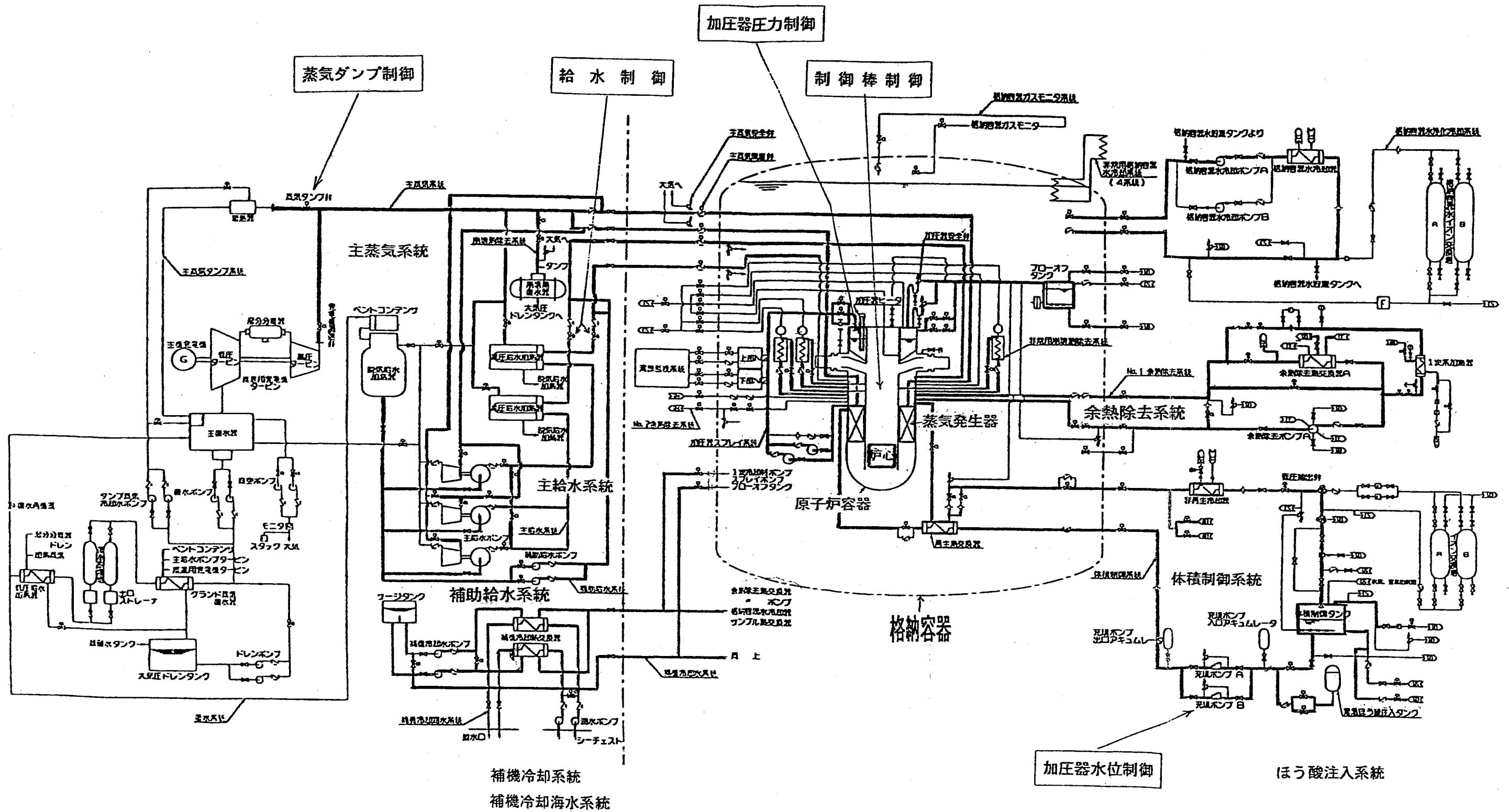


図6.1 一体型シミュレータの模擬範囲 (太線部)

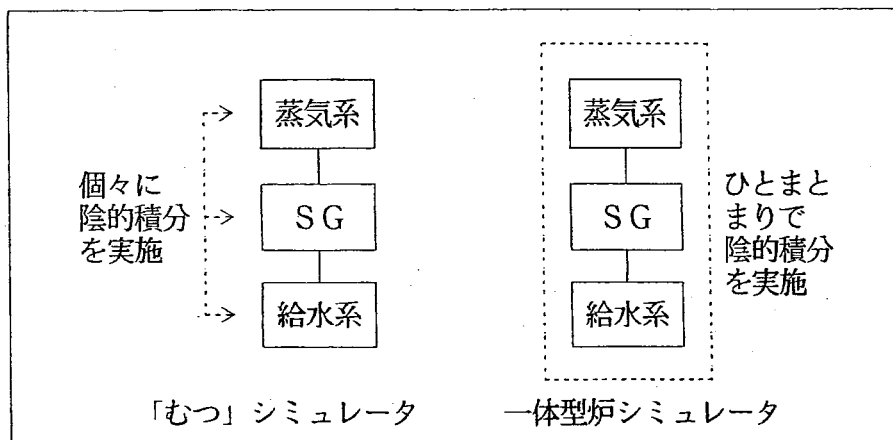


図6.2 「むつ」と一体型炉のSG部分計算方法の相違点

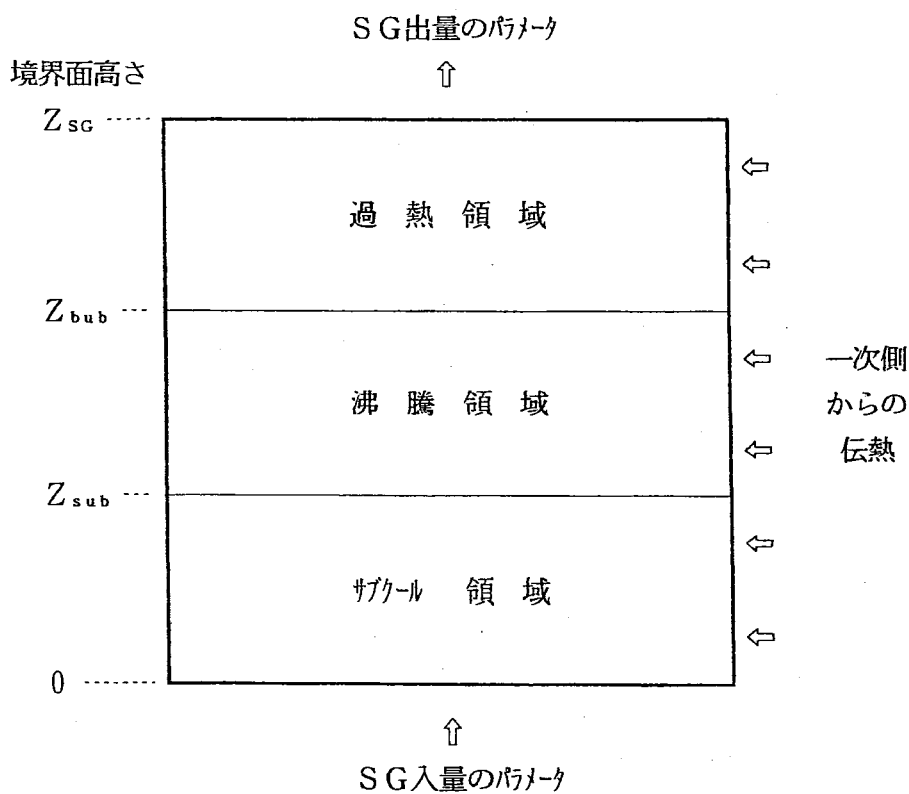
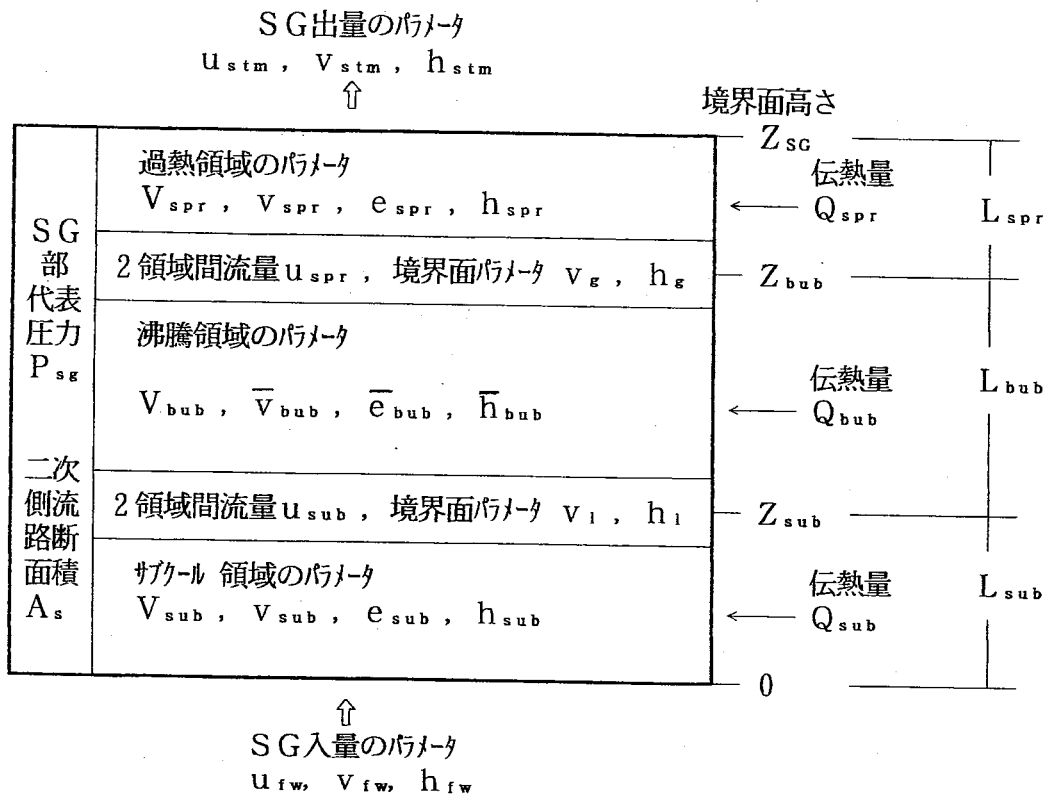


図6.3 貫流型SGモデル概念図(3領域モード)



- | | |
|------------------------------------|---------------------|
| V : 容積 [m ³] | h : 比エンタルピー [J/kg] |
| v : 比容積 [m ³ /kg] | e : 内部エネルギー [J/kg] |
| P_{sg} : 圧力 [Pa] | Q : 一次系からの伝熱量 [J/s] |
| u : 流体体積流量 [m ³ /s] | Z : 境界高さ [m] |
| A_s : 2次側流路断面積 [m ²] | L : 長さ [m] |

図6.4 貫流型SG計算における主要パラメータ

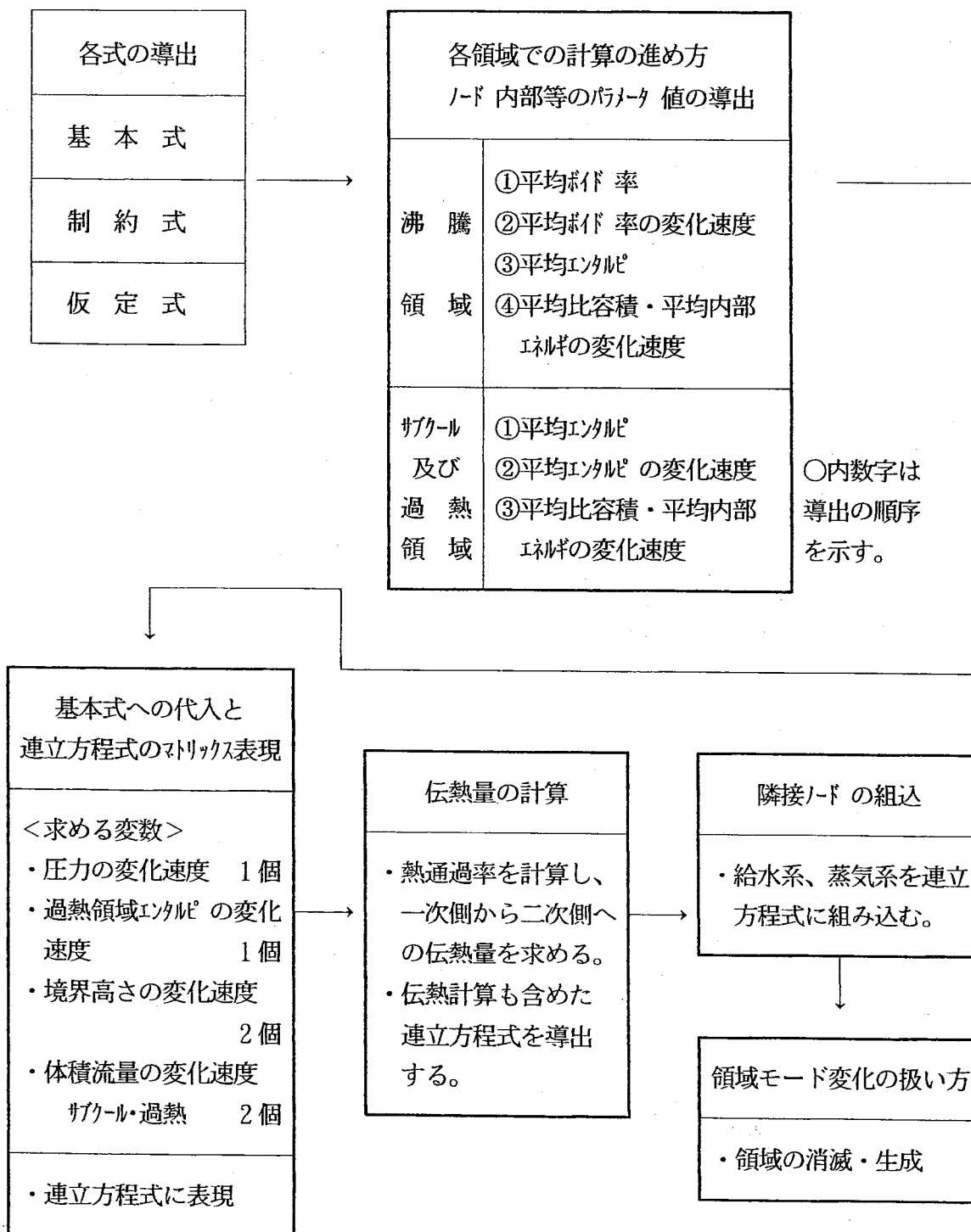
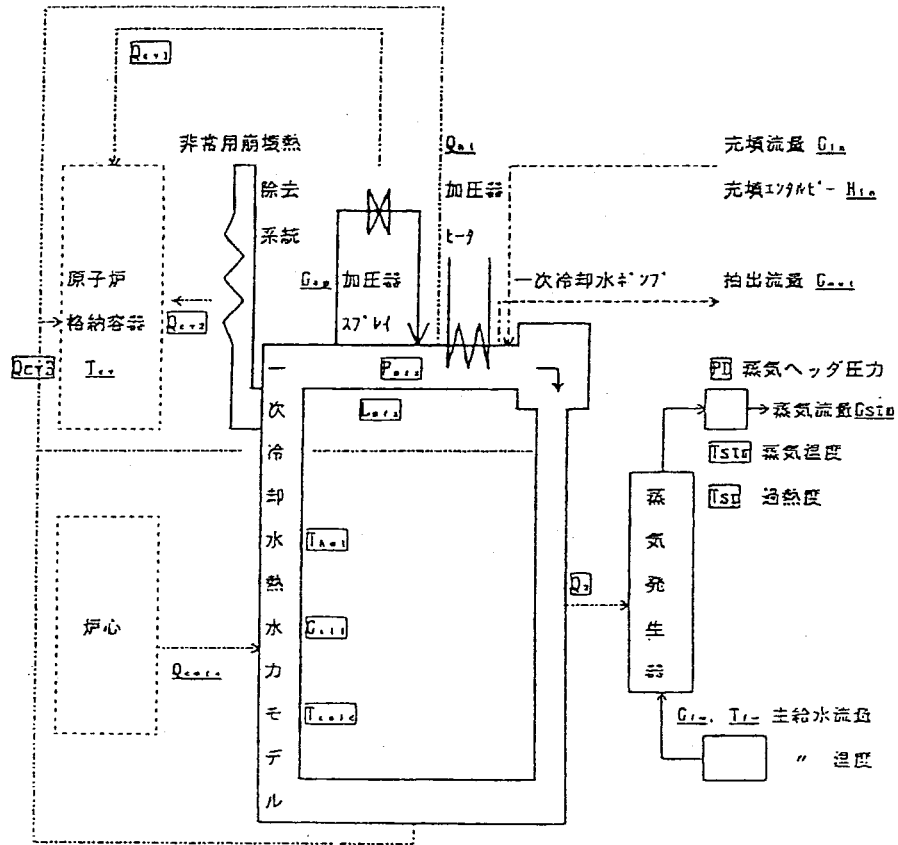
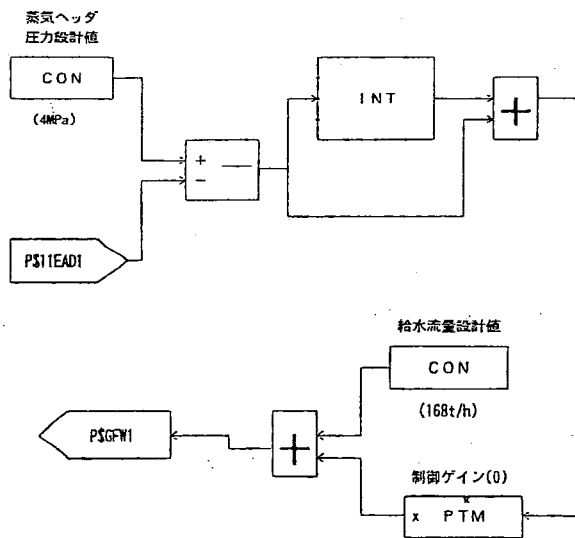


図6.5 貫流型SG解析プログラムにおける計算の流れ



一点鎖線：他の系との流体の流れ
 二点鎖線：他の系との熱の流れ



給水流量簡易PI制御ブロック図

図6.6 貫流型SG性能確認のための計算モデル

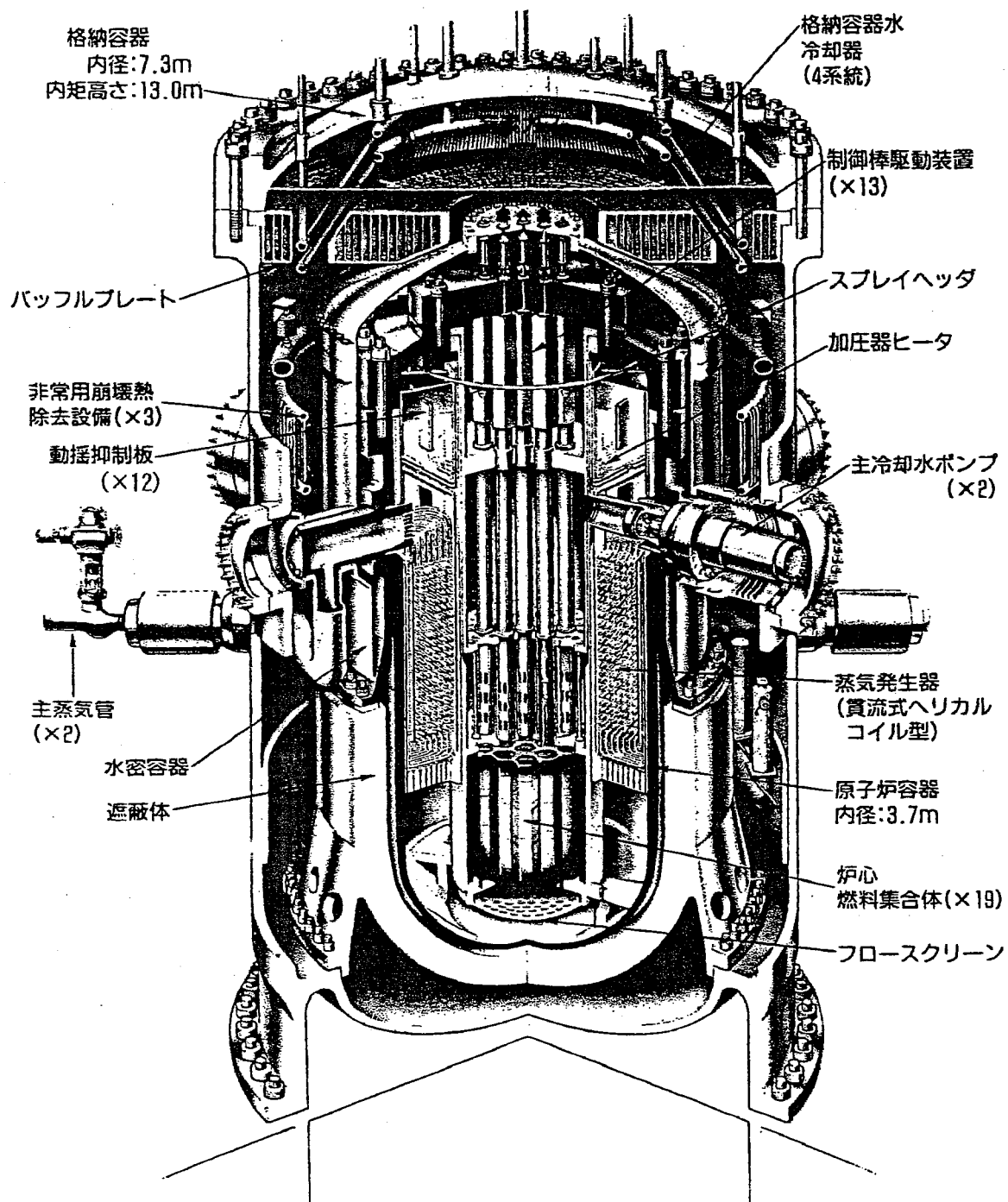
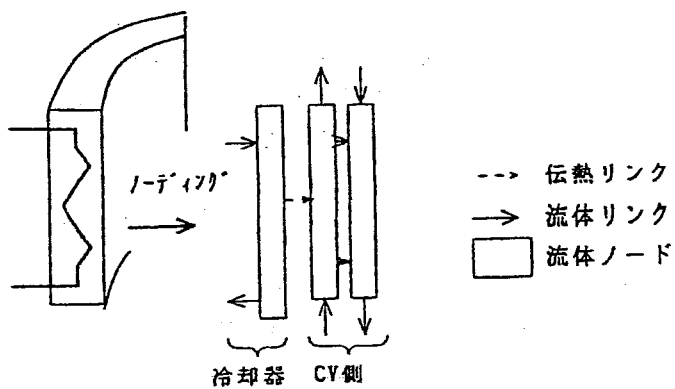


図6.7 水張り式格納容器の断面構造図



冷却器

冷却器部分のモデル

図6.8 非常用崩壊熱除去設備の冷却器のモデル化

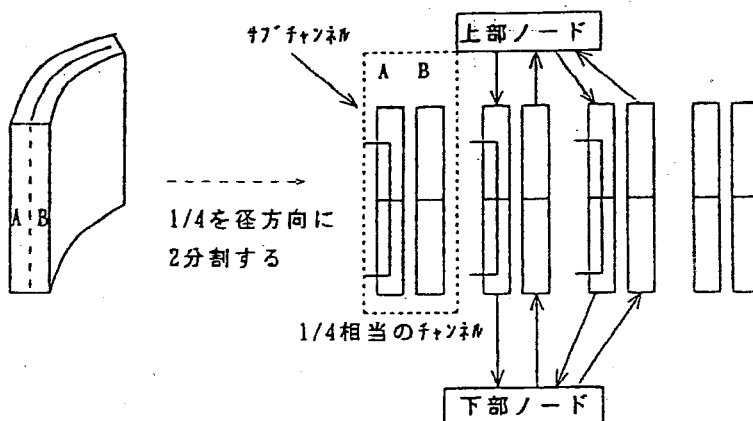


図6.9 格納容器側面から見たノーディング図

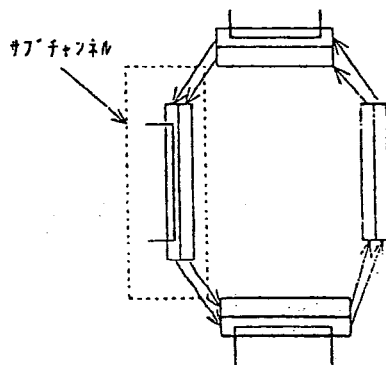


図6.10 格納容器上部から見たノーディング図

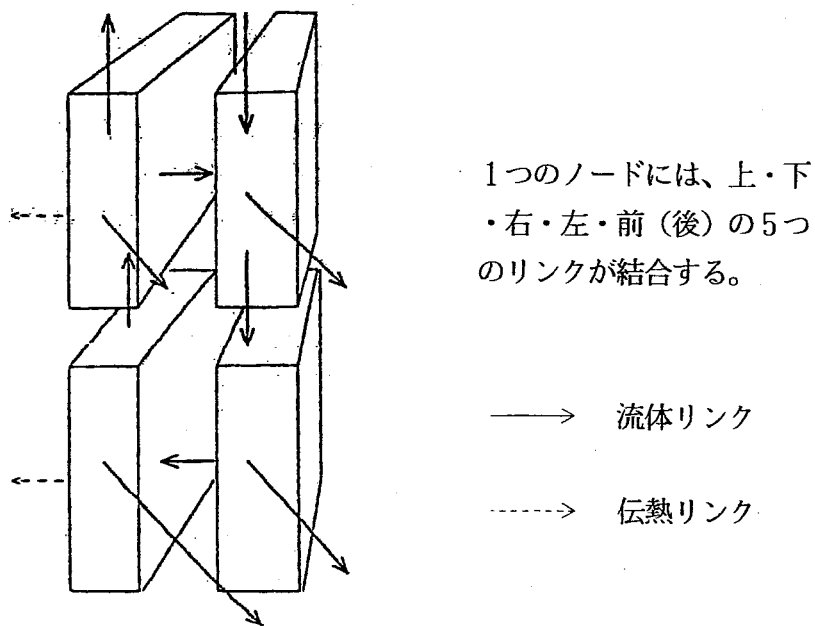


図6.11 1個のサブチャンネルのモデル

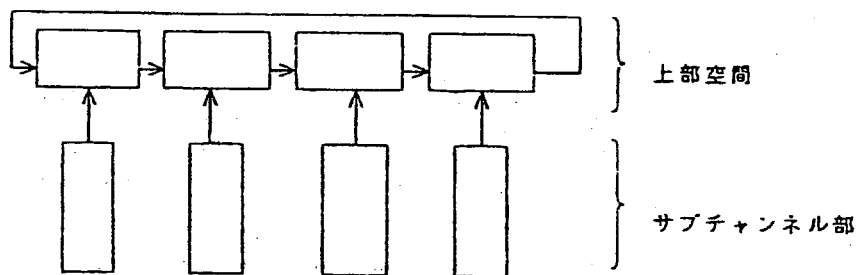


図6.12 上部空間の分割方法

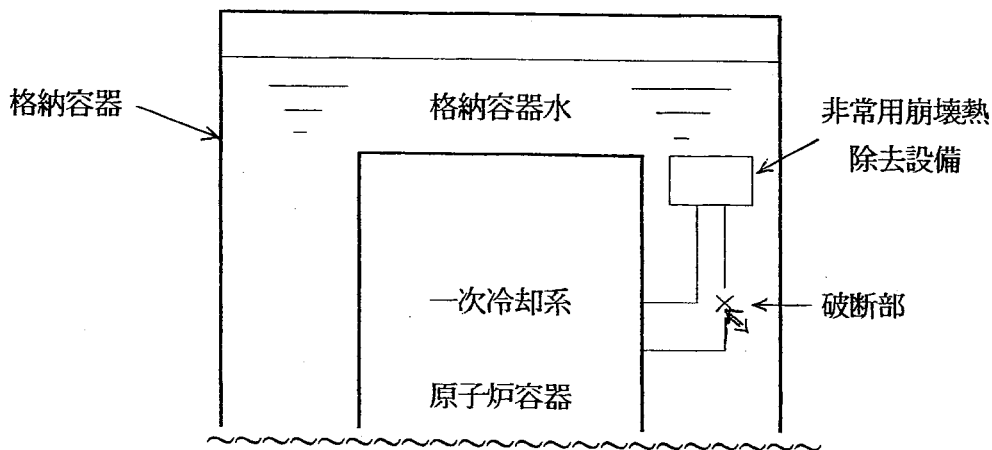


図6.13 LOCA時の双方向の流れの例

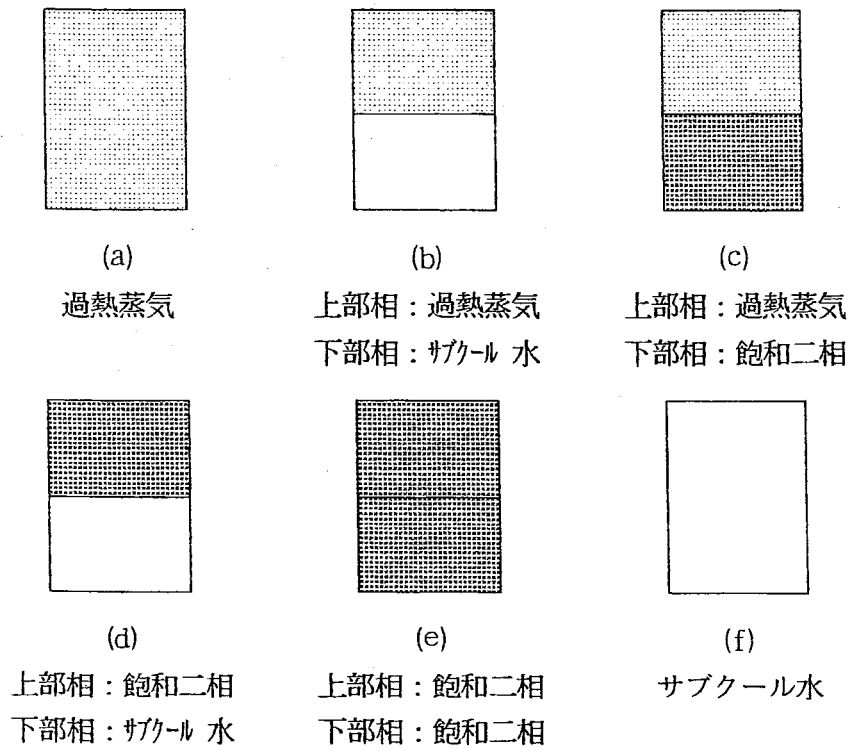


図6.14 流体ノード内の状態

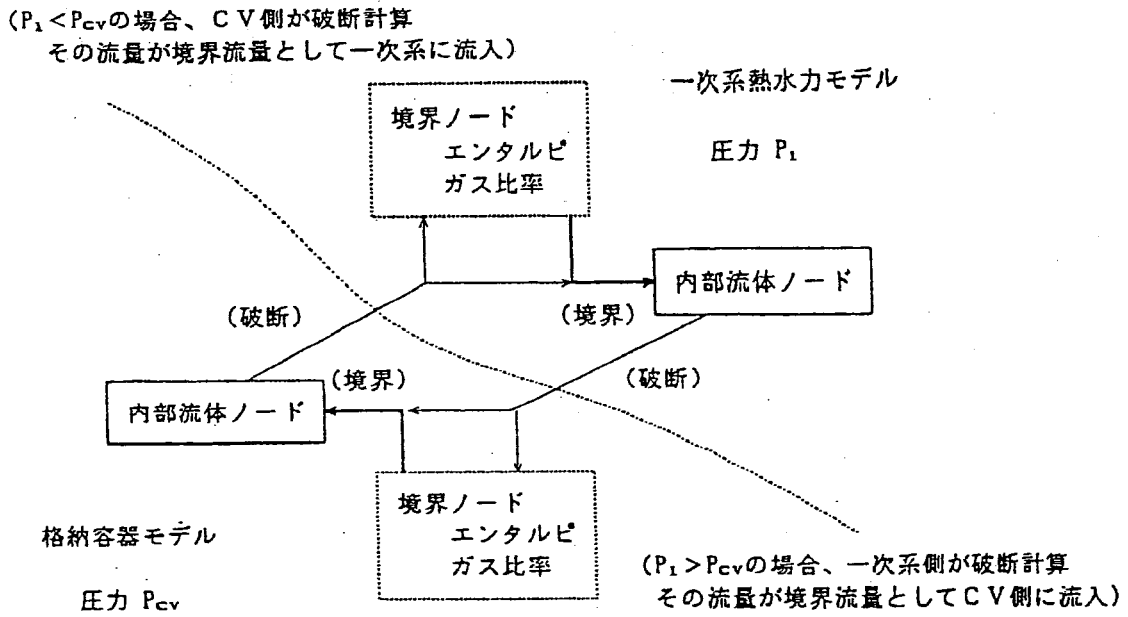
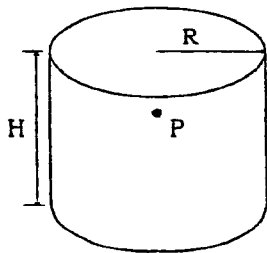


図6.15 圧力の異なる2つの系の扱い方

スロッシングモデルデータ



入力

- ・ 形状データ
 - R : モデル半径
 - H : モデル高さ
 - P : モデル中心加速度計算点座標
- ・ 対応する流体ノード番号 n_1, n_2, n_3, \dots

液位、液体圧力を計算するための基準水位、液比重量は対応ノードの容積重み付きの平均値を使用する。

図6.16 バッフルプレート上部空間液面のスロッシングモデル

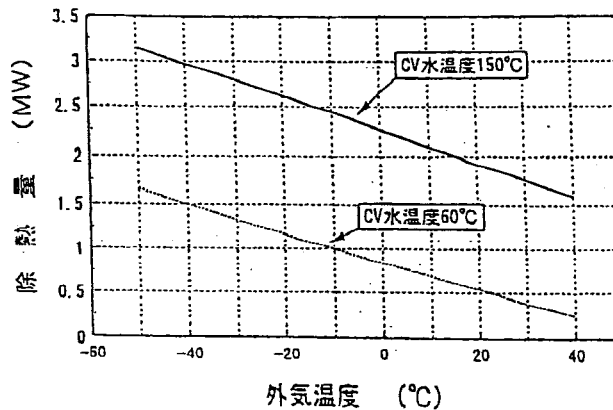


図6.17 非常用格納容器水冷却設備の除熱量グラフ

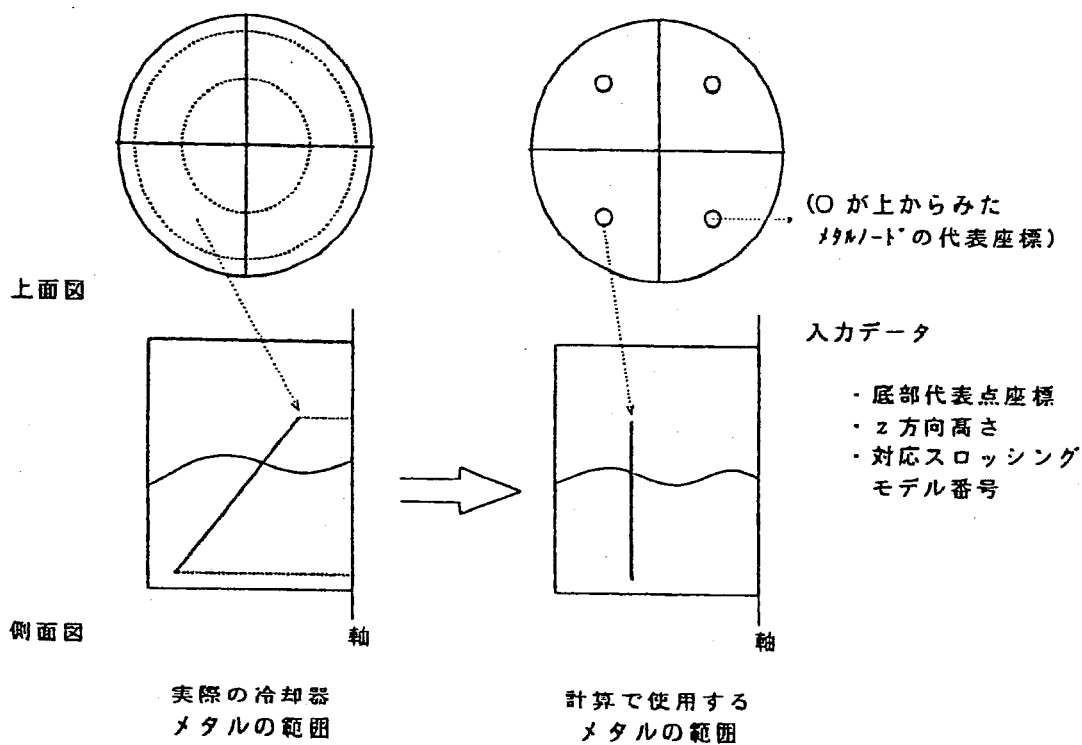
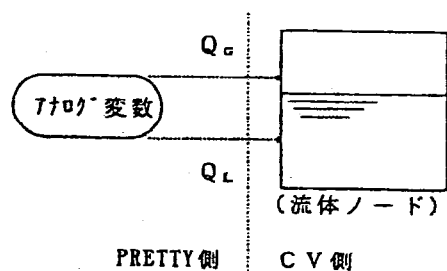


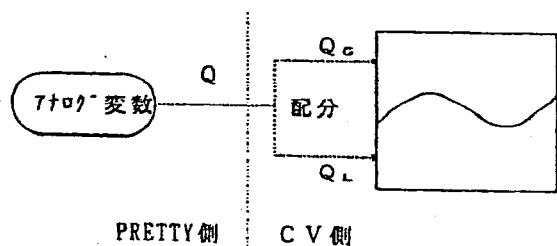
図6.18 非常用格納容器水冷却設備のスロッシングモデル

(気相・液相別の伝熱量指定)



ノードから伝熱量計算コードへ温度、流量、液位、ボイド率等の情報を渡す。

(一つの伝熱量のみ指定)



水没率でQを配分

図6.19 非常用崩壊熱除去設備のスロッシングモデル

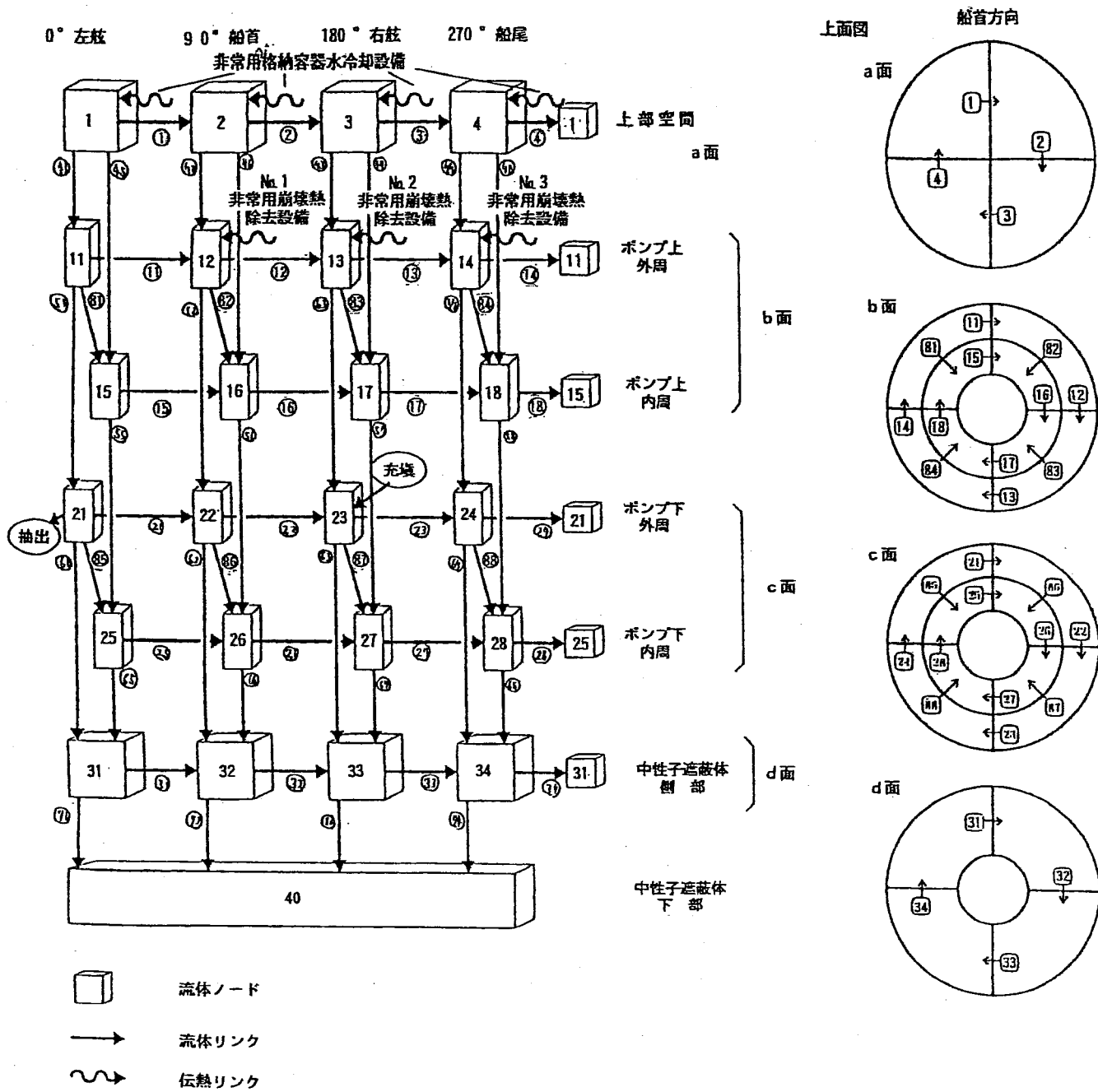


図6.20 水張り式格納容器のノード・リンク図

流体ノード数 25個 }
 流体リンク数 60個 } だから、
 流体ノードと流体リンクの数より、必要な
 閉ループ数は36個 ($= 60 + 1 - 25$)

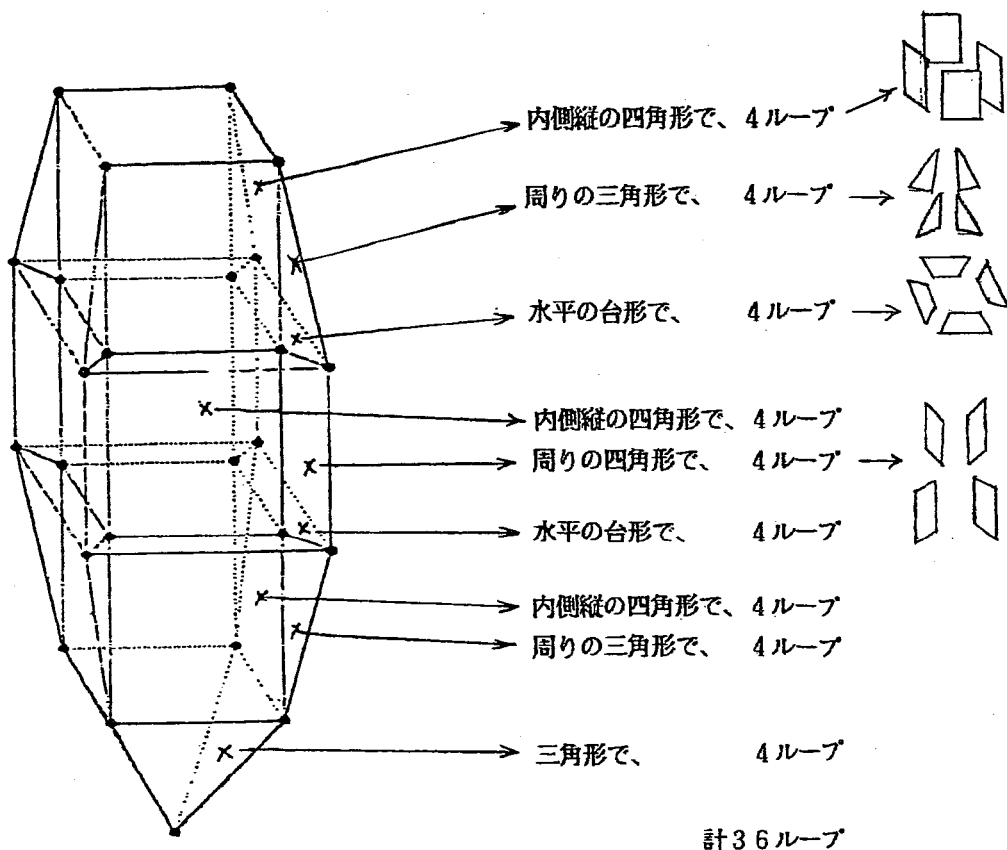


図6.21 水張り式格納容器での閉ループの取り方

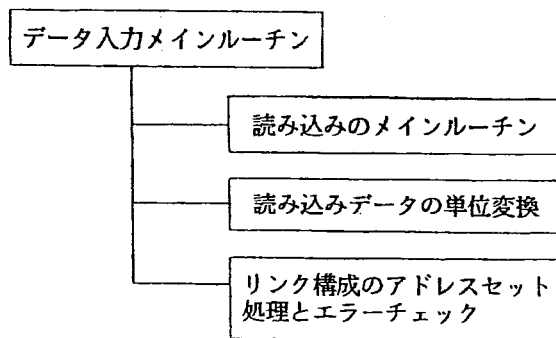


図6.22 データ入力処理ルーチン

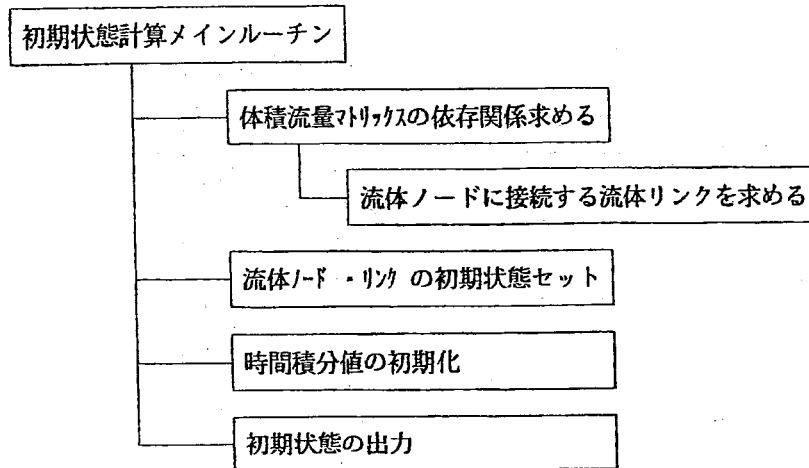


図6.23 初期状態計算ルーチン

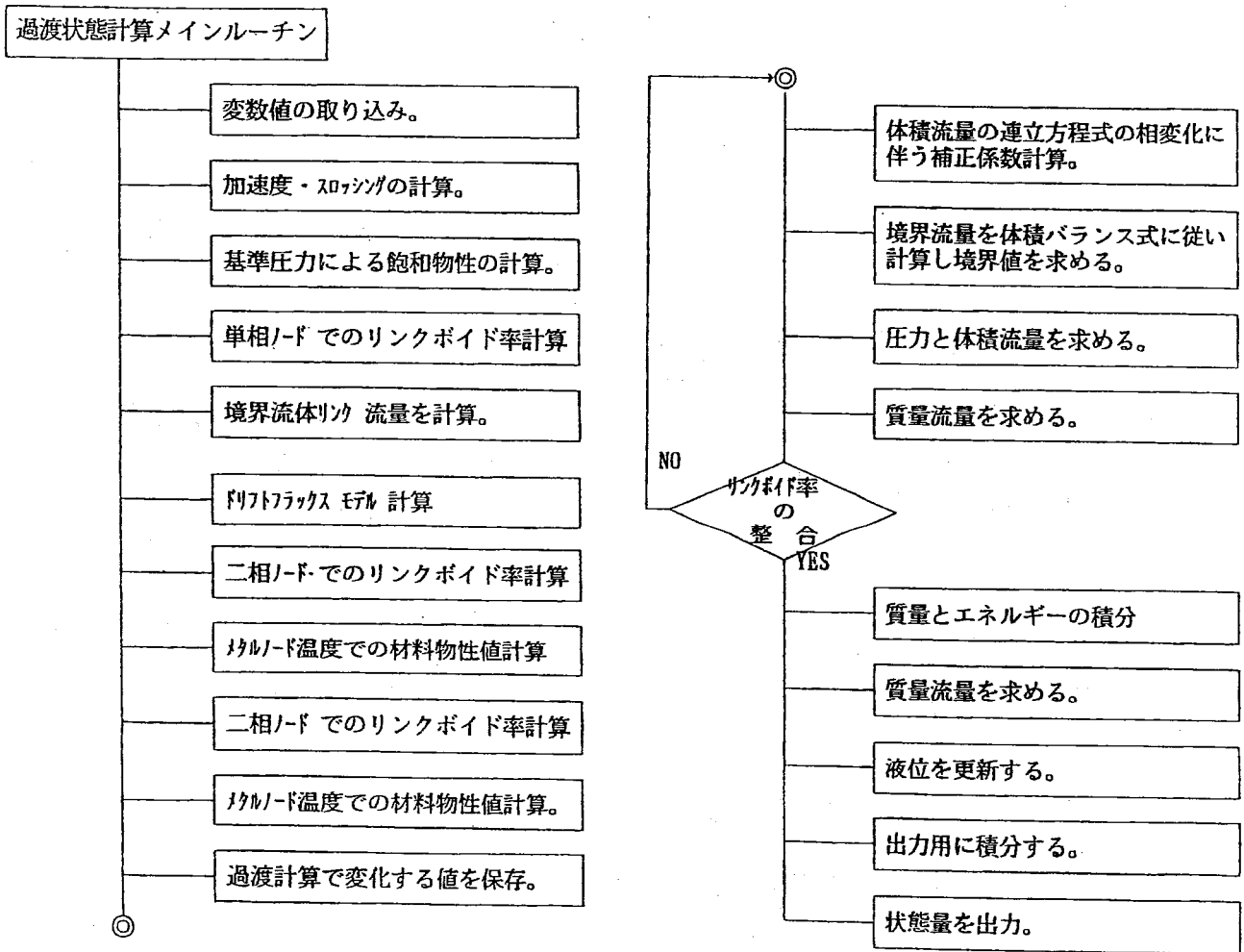


図6.24 過渡状態計算ルーチン

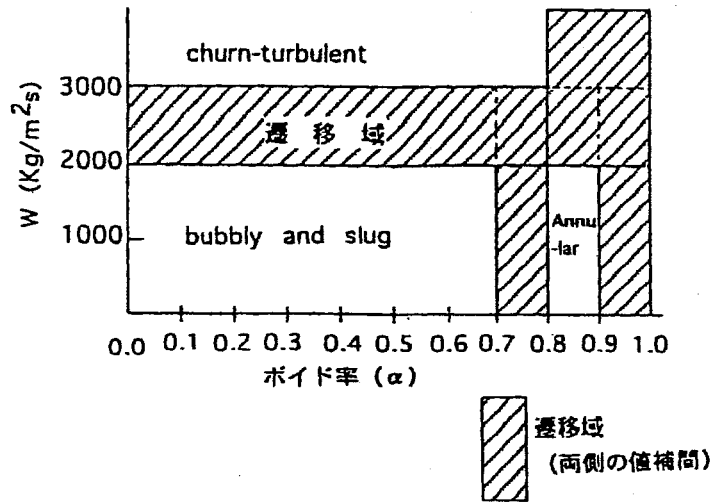


図6.25 垂直管流動様式マップ

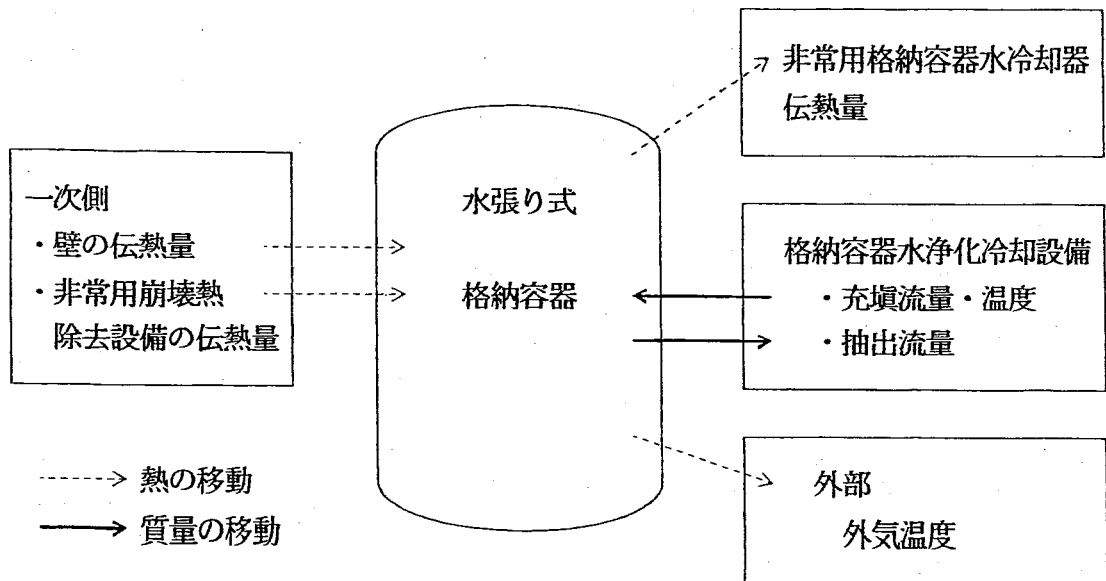


図6.26 水張り式格納容器モデルと境界条件との関係

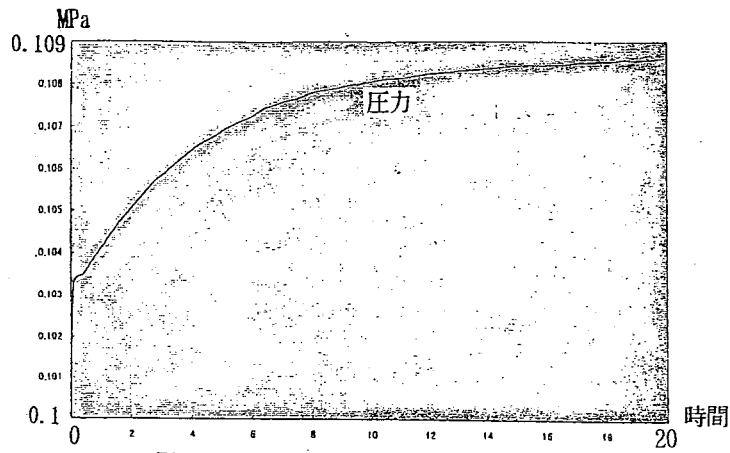


図6.27 静特性—格納容器圧力の変化

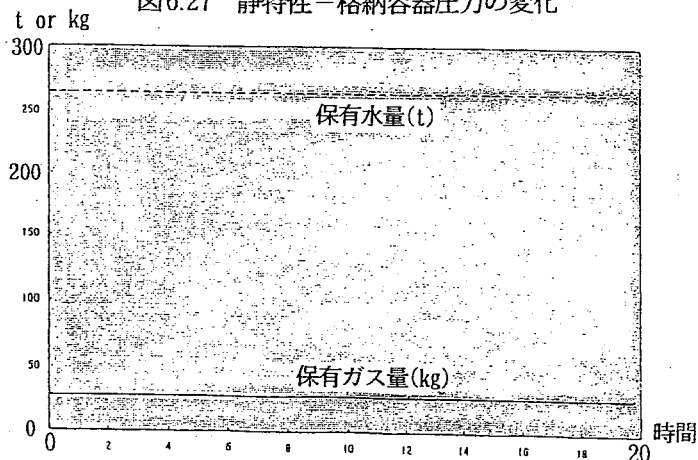


図6.28 静特性—格納容器保有水量・ガス量の変化

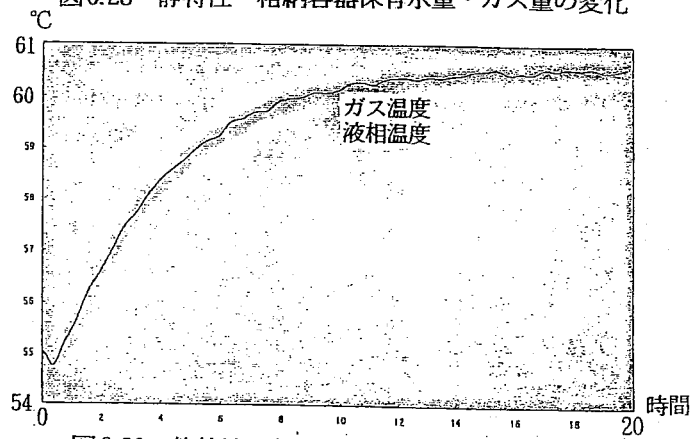


図6.29 静特性—気相温度・液相温度の変化

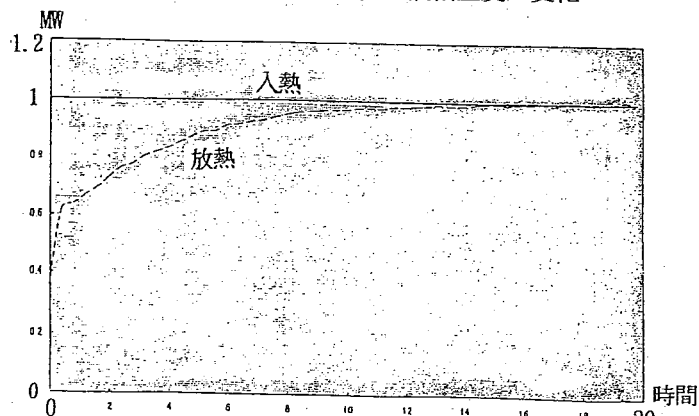


図6.30 静特性—格納容器の熱収支

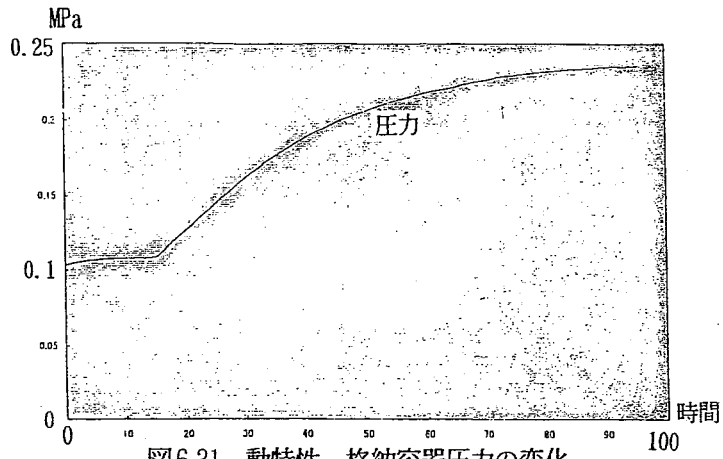


図6.31 動特性—格納容器圧力の変化

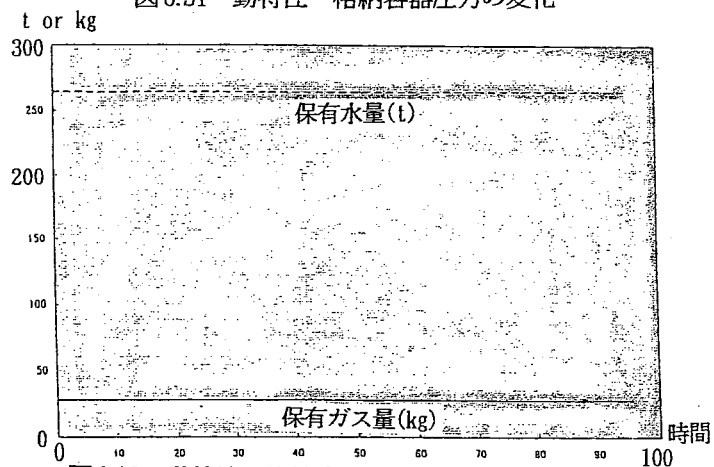


図6.32 動特性—格納容器保有水量・ガス量の変化

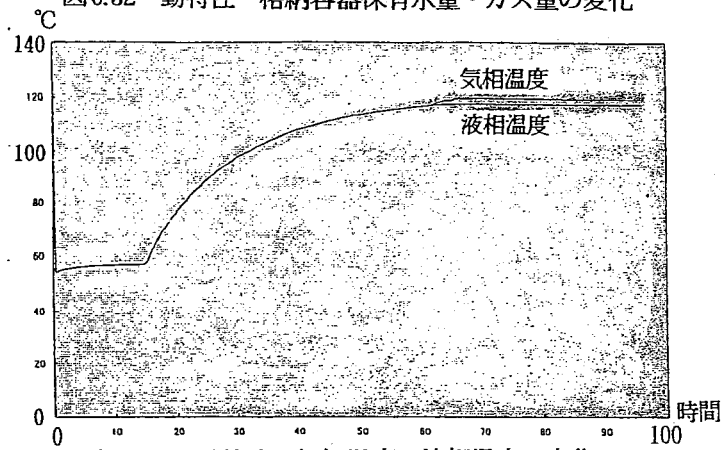


図6.33 動特性—気相温度・液相温度の変化

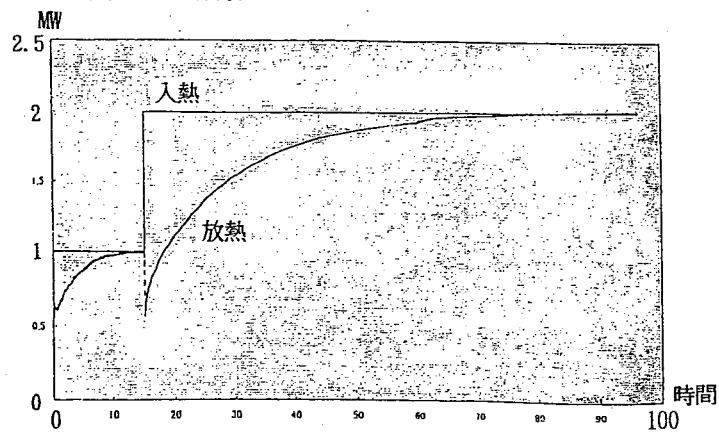


図6.34 動特性—格納容器の熱収支

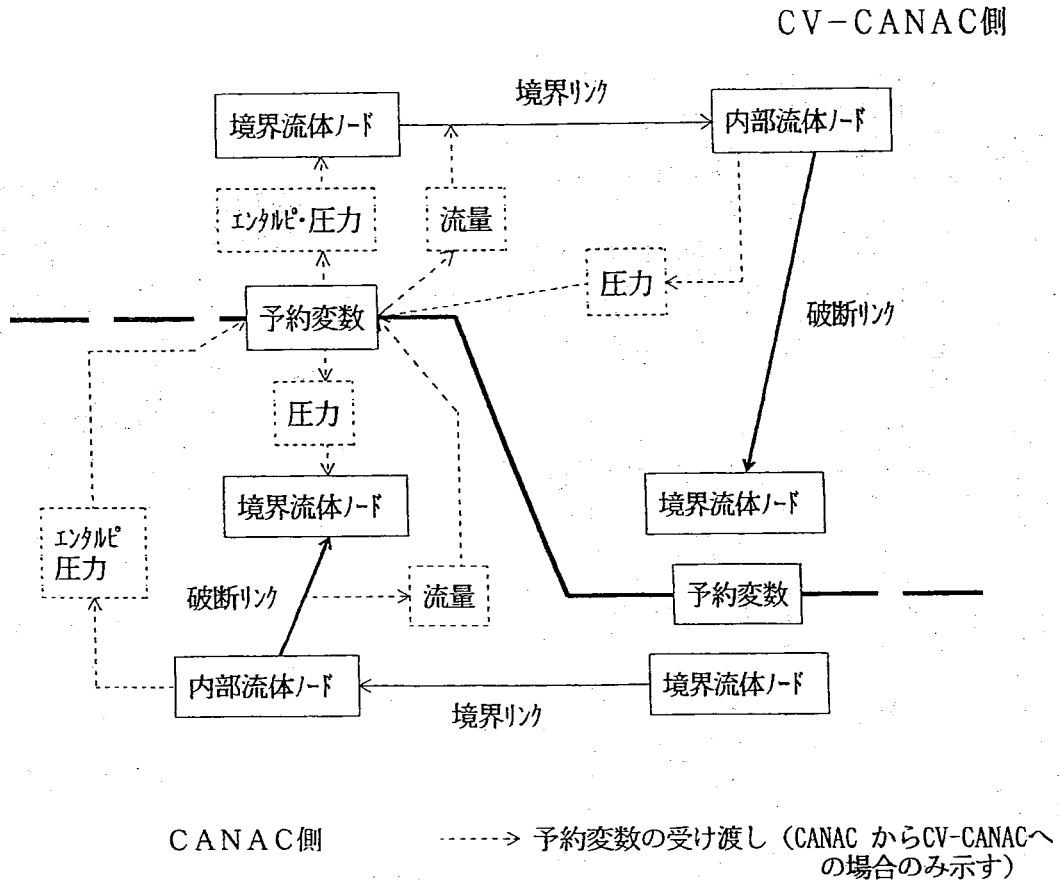


図6.35 双方向破断流量計算構成図
(CANAC および CV-CANAC コード間)

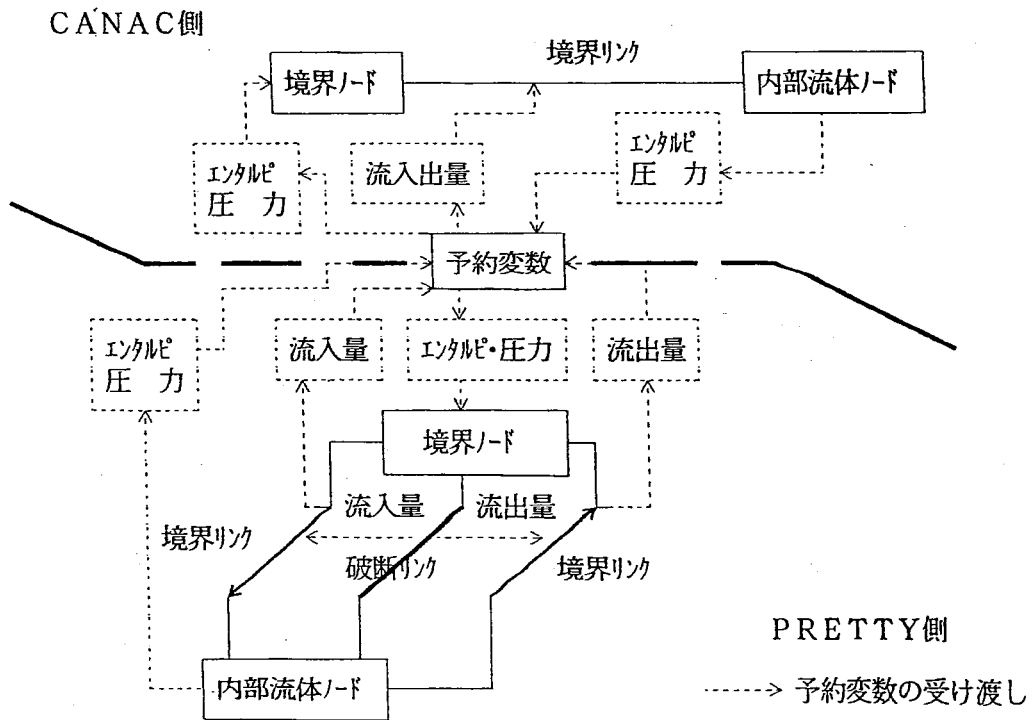
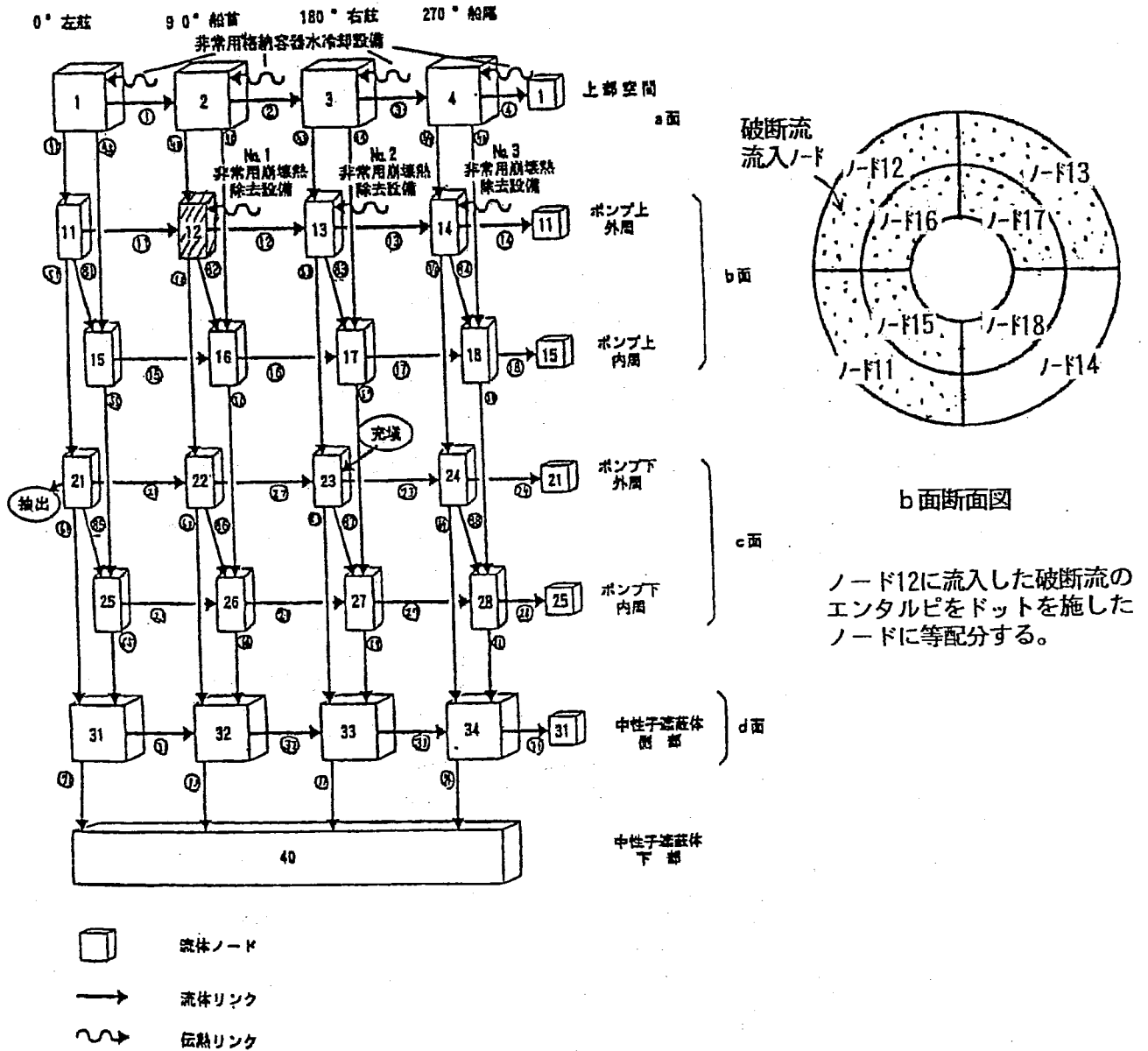


図6.36 双方向破断流量計算構成図
(PRETTYコードとCANAC およびCV-CANACコード間)



水張り式格納容器のノード・リンク図

図6.37 LOCA時破断流のCVノードへのエンタルピー配分

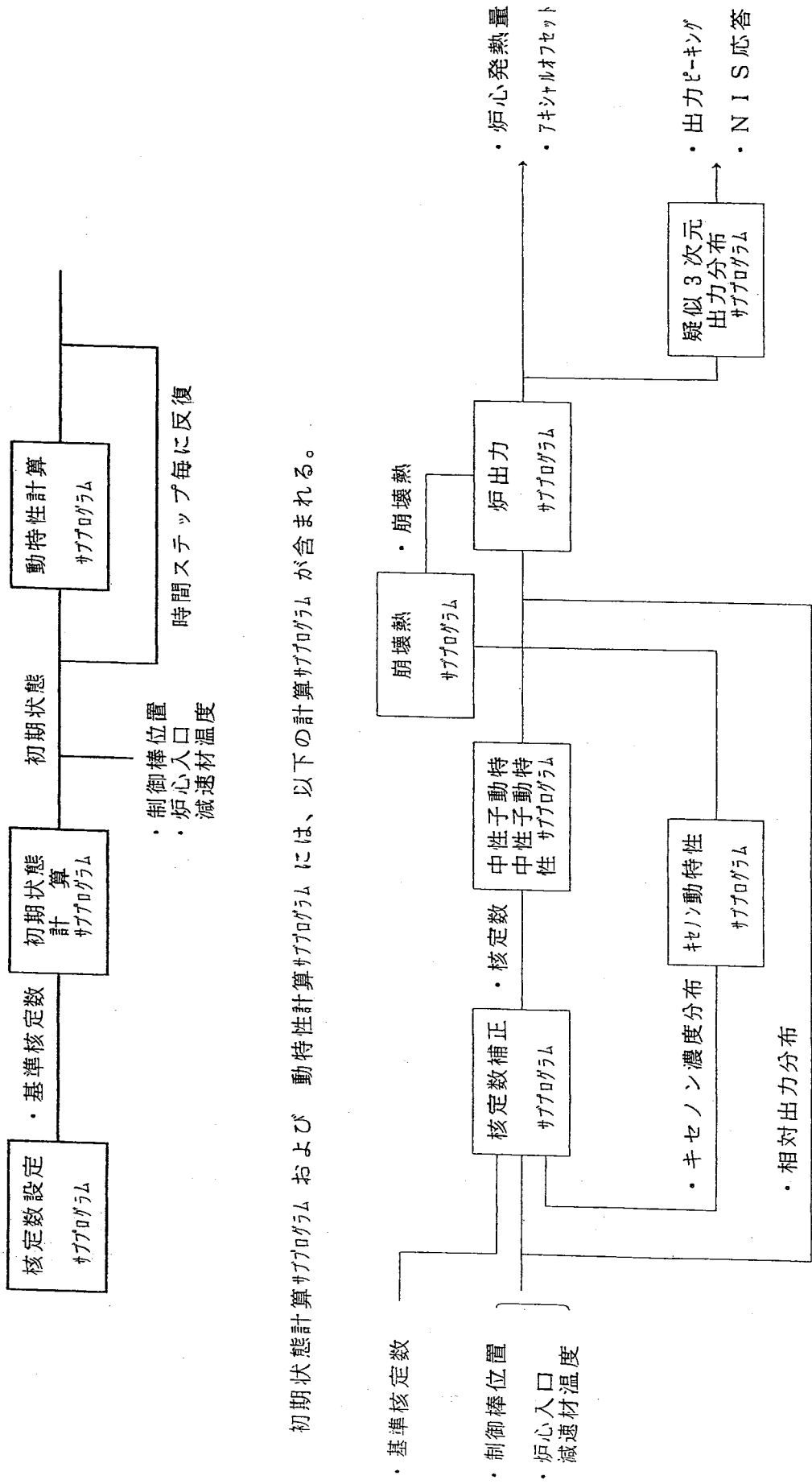


図6.38 炉心解析プログラムの構成

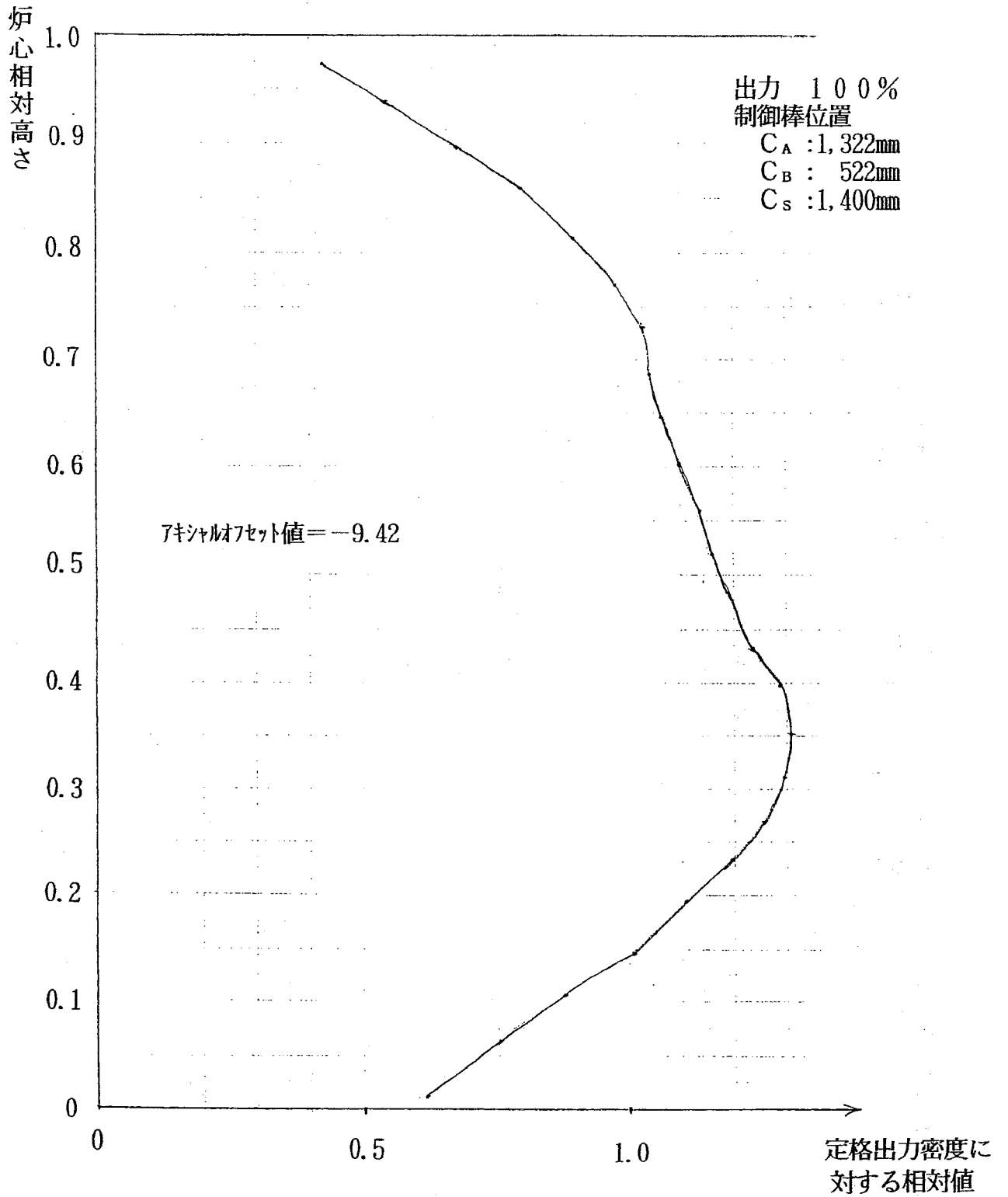


図6.39 軸方向出力分布

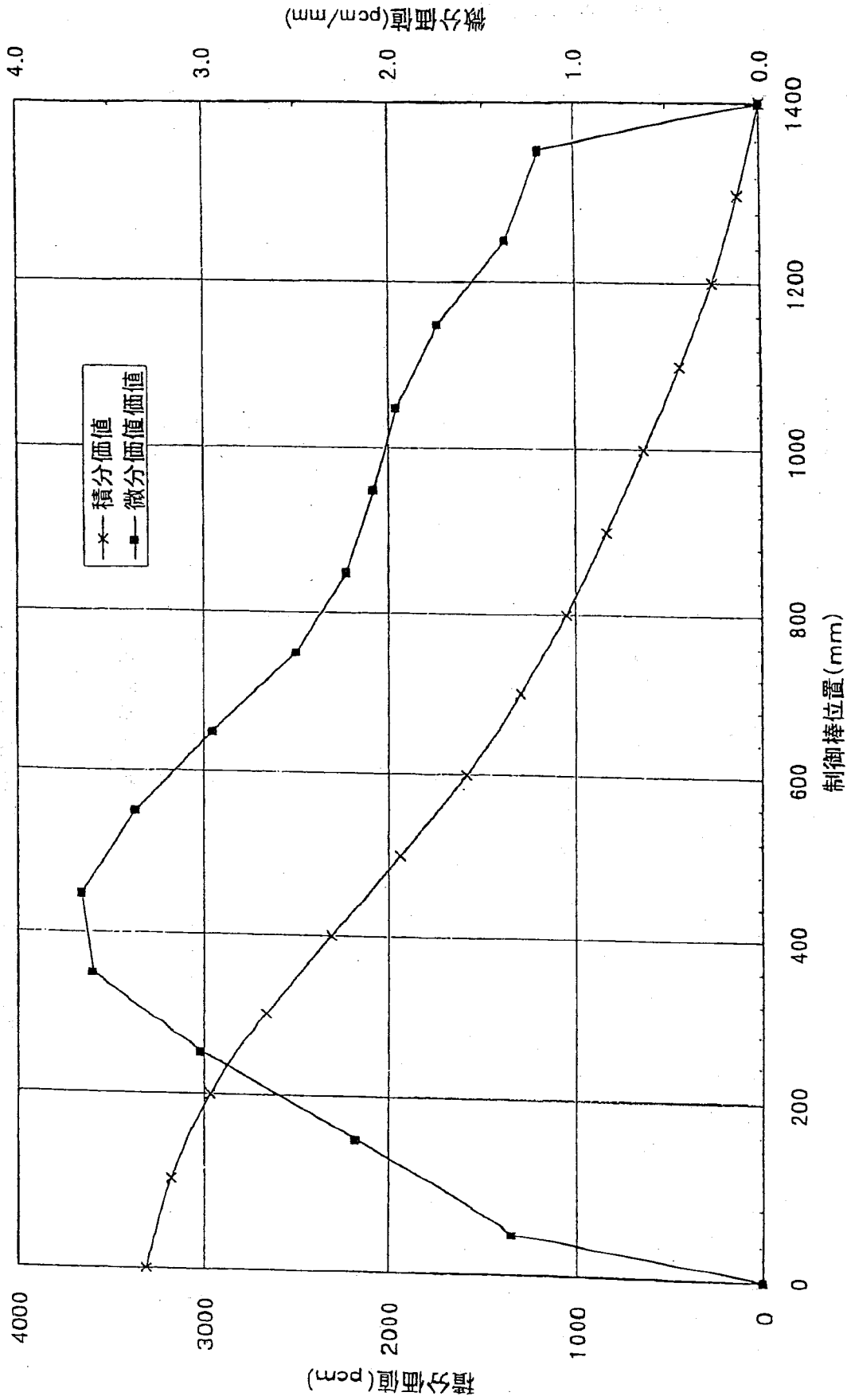


図6.40 制御バンクA制御棒値(高温零出力、全制御棒引き抜き状態)

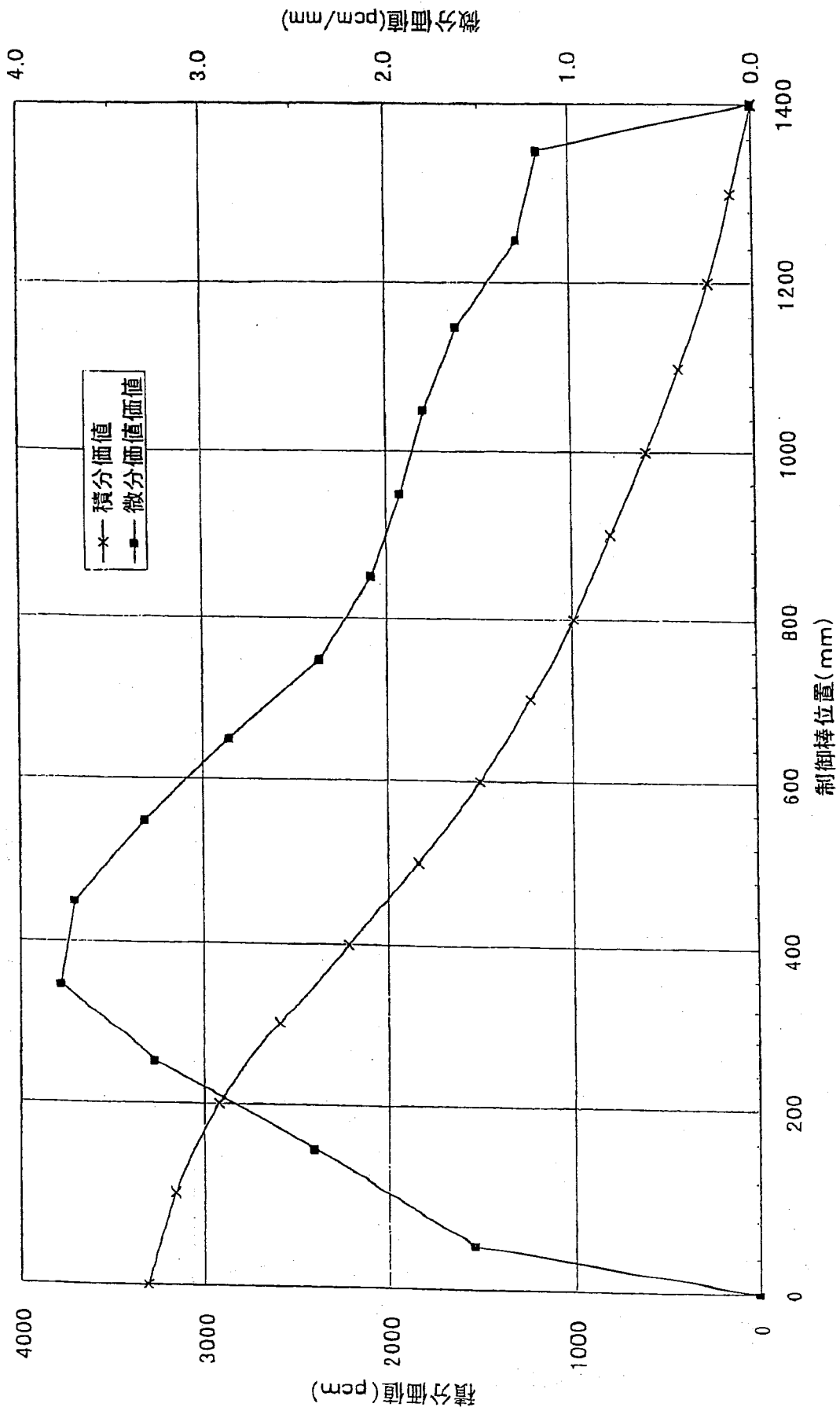


図6.41 制御バンクB制御棒値(高温露出力、制御バンクA挿入状態)

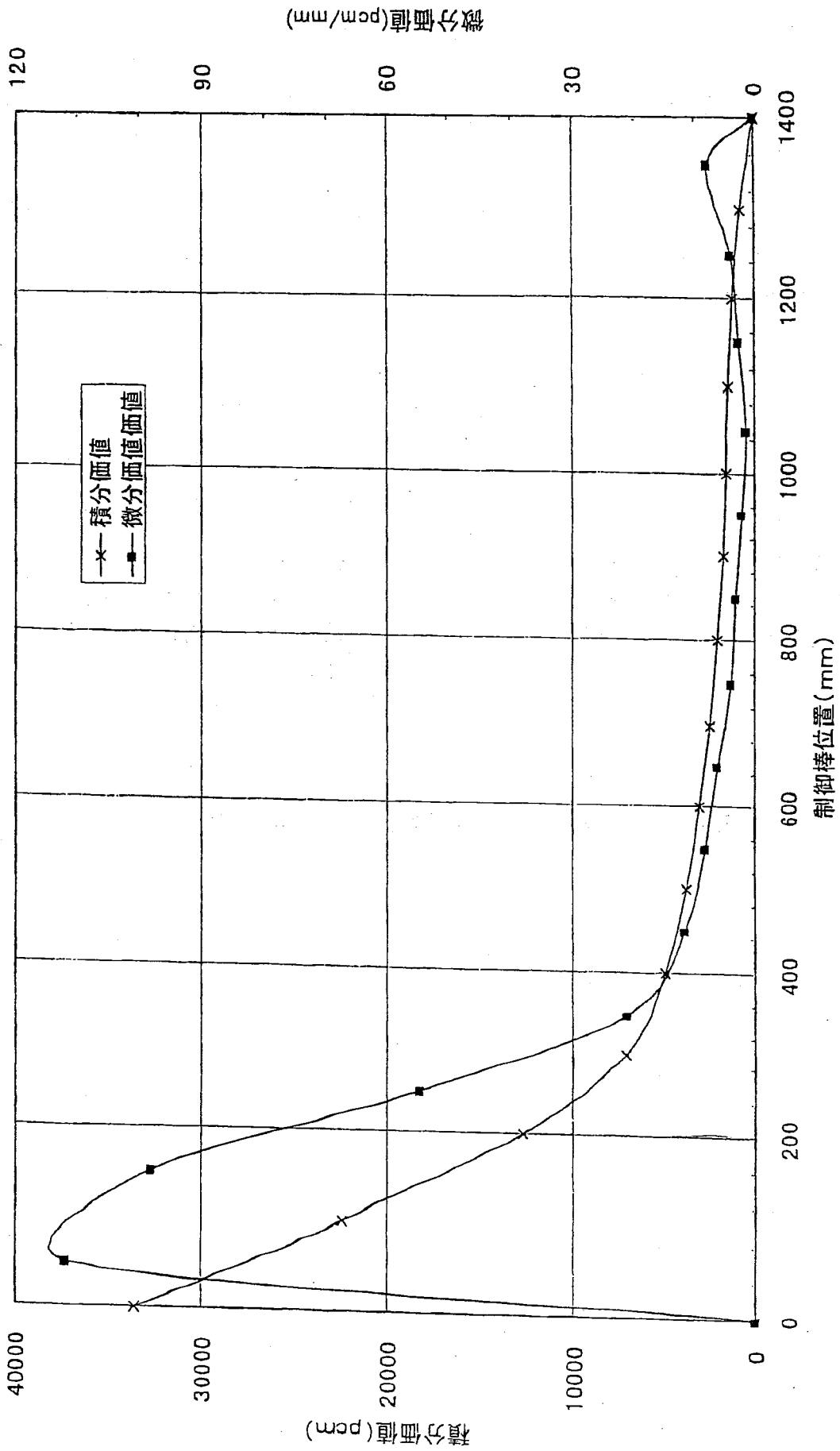


図6.42 停止バンク制御棒値(高温零出力、全制御棒引き抜き状態)

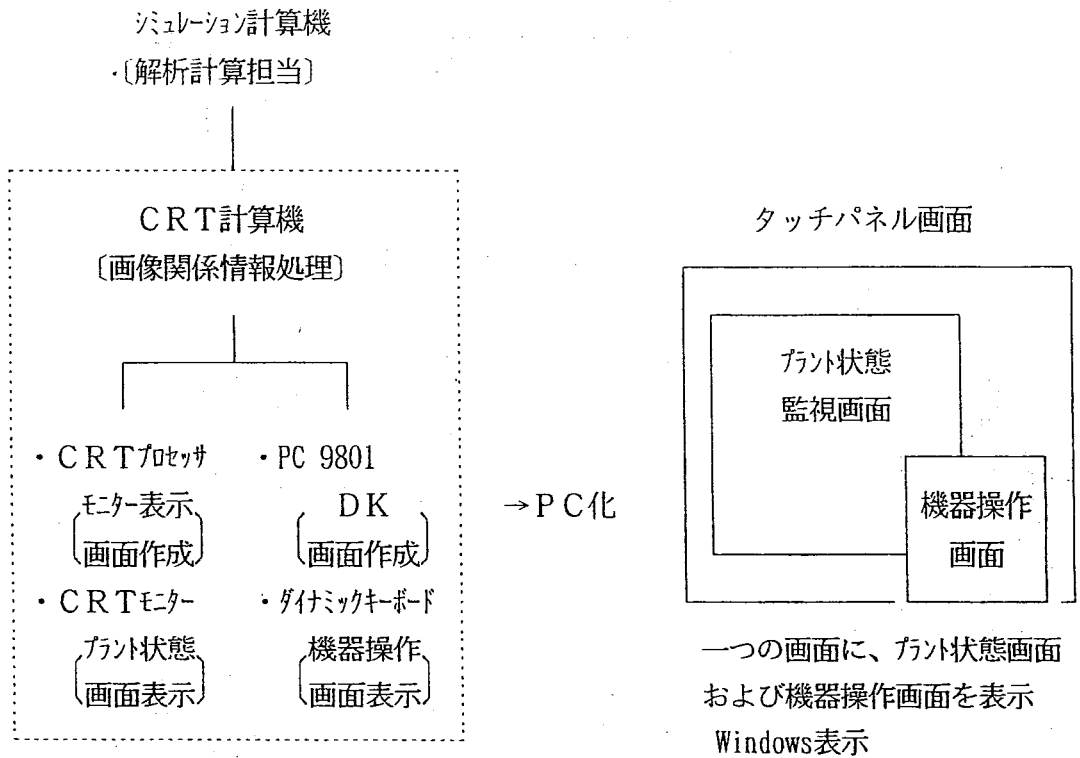


図7.1 監視・操作システム部分のPCへの置き換え例

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量当量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
放射線量当量	グレイ	Gy	J/kg
放射線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

原子力船エンジン・アリンク・シミュレーション・システムの整備 一体型炉シミュレータの開発