

鉛-ビスマス冷却炉の熱流動特性解析
— MSG-COPDコードによるプラントシステム解析 —
(研究報告)

2003年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

鉛-ビスマス冷却炉の熱流動特性解析

—MSG-COPD コードによるプラントシステム解析—

(研 究 報 告)

岩崎 隆*¹, 堺 公明*², 江沼 康弘*³

要旨

サイクル機構では、高速増殖炉の実用化戦略調査研究として、多様な冷却材を対象に革新技術を採用した高速炉プラントの実用化像に関する調査研究を進めている。そのフェーズ I 研究 (H11～12) の中で、鉛-ビスマス冷却材については、比較的・自然循環特性にすぐれるとともに水と急激に反応しないことから、自然循環による 2 次系を削除したタンク型炉が有望と評価された。フェーズ II 研究 (H13～) では炉心性能向上を目指し、強制循環方式も含めて検討が進められている。

一方、米国では Generation IV と称した次世代原子炉に関する調査研究が行われている。そこでは日本と同様に、鉛-ビスマス冷却自然循環方式でダクトレス炉心を採用した小型炉が検討されている。

本研究では、実用化戦略調査研究フェーズ II で設計が進められている鉛-ビスマス冷却強制循環炉、及び、鉛-ビスマス冷却自然循環炉の熱流動特性を把握することを目的として、統合型プラント動特性コード (MSG-COPD) による解析モデルを構築するとともに熱流動特性を検討した。

その結果、強制循環炉の手動トリップ事象について、炉上部プレナム内に温度成層化が生じるが、解消は比較的速いことを確認した。外部電源喪失事象について、トリップ時のポンプフローコーストダウン特性の炉心出口温度への影響を評価した。

また、ダクトレス炉心の小型自然循環炉は、ダクト付き炉心と比較して浮力による再流配効果が小さいことを確認するとともに、出力変動に対して十分な除熱応答が得られることが分かった。

*1 原子力システム株式会社 *2 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr

*3 同システム技術開発部 FBR システム Gr

Thermal-hydraulic Analysis for the Lead-Bismuth Eutectic Cooled Reactor

— System Analysis by MSG-COPD Code —

(Research Document)

Takashi Iwasaki¹, Takaaki Sakai², Yasuhiro Enuma³

ABSTRACT

The feasibility study for fast breeder reactors(FBRs) including related nuclear fuel cycle systems has been started from the 1999 fiscal year by Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). Phase 1 studies were finished at the end of March, 2000. Various options of FBRs plant systems was studied and concept of Lead-Bismuth Eutectic (LBE) cooled FBRs have been selected as one of these options.

In the United States, the LBE cooled reactor has been examined by Generation IV.

Plant dynamics analyses on 2 type of LBE-cooled reactors, forced circulation type which designed by JNC and natural circulation type which was designed by University of California, Berkeley, have been performed to understand the basic thermal-hydraulic characteristics of the reactors.

As a result of the analysis on JNC forced circulation reactor, it has been clarified that hot coolant remains in the upper plenum by the thermal stratification in case of a manual trip condition. And the characteristics of pump coast down influences core exit high-temperature in case of a loss of power condition.

In addition, as a result of analysis on the natural circulation reactor, the flow-redistribution effect in ductless core channels by the buoyancy force has been evaluated for a candidate duct core channels.

-
- 1) Nuclear Energy System Inc.
 - 2) Thermal-Hydraulics Research Group, OEC, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)
 - 3) FBR System Design Group, OEC, JNC

目次

1 緒言	1
2 強制循環炉の崩壊熱除去特性解析	2
2.1 目的と背景	2
2.2 強制循環炉の概要	2
2.3 解析モデル	2
2.3.1 主容器全体	2
2.3.2 炉心	2
2.3.3 蒸気発生器	3
2.3.4 ポンプ	3
2.3.5 崩壊熱除去系	3
2.4 解析事象及び解析ケース	3
2.5 解析結果	4
2.5.1 定常	4
2.5.2 手動トリップ	4
2.5.3 外部電源喪失	5
2.6 まとめ	7
3 小型自然循環炉の熱流動特性解析	8
3.1 目的と背景	8
3.2 炉の概要	8
3.3 解析モデル	8
3.3.1 炉心	9
3.3.2 中間熱交換器	9
3.3.3 蒸気発生器	9
3.3.4 伝熱式	9
3.3.5 圧力損失	10
3.4 解析事象及び解析ケース	10
3.5 解析結果	10
3.5.1 出力分布の影響	10
3.5.2 炉心再流配係数評価	11
3.5.3 ダクトレス炉心の特性	12
3.5.4 全系解析	12
3.6 まとめ	12
4 結言	13
参考文献	63
謝辞	64

表リスト

表 2.2	強制循環方式 LBE 冷却炉の運転条件-----	14
表 2.4	外部電源喪失解析ケース-----	15
表 3.2	Steady State Nominal Operating Conditions and Structures-----	16

図リスト

図 2.2-1	強制循環型 LBE 冷却中型炉の系統概念図	17
図 2.2-2	強制循環型 LBE 冷却中型炉の原子炉構造概念図(立面)	18
図 2.2-3	強制循環型 LBE 冷却中型炉の原子炉構造概念図(平面)	19
図 2.2-4	強制循環型 LBE 冷却中型炉の機器高低関係	20
図 2.2-5	キドニー型 SG 概念図	21
図 2.2-6	1 次系ポンプ概念図	22
図 2.2-7	PHX 概念図	23
図 2.3-1	解析モデルの概要	24
図 2.3-2	メッシュ分割図	25
図 2.3-3	崩壊熱除去系計算モデル	26
図 2.4-1	過渡変化事象推移概要(手動トリップ、外部電源喪失)	27
図 2.4-2	炉心崩壊熱変化条件	28
図 2.4-3	スクラム反応度変化条件	29
図 2.4-4	手動トリップ条件	30
図 2.4-5	外部電源喪失時ポンプ回転数変化条件	31
図 2.5.1-1	定常時の流況及び温度分布	32
図 2.5.1-2	定常時の SG 内部軸方向温度分布	33
図 2.5.1-3	ピーキング係数及び定常時の炉心出入口温度分布	34
図 2.5.2-1	手動トリップ時の温度分布	35
図 2.5.2-2	手動トリップ時の炉上部プレナム軸方向温度分布	37
図 2.5.3-1	炉心出入口温度(上図)及び炉心流量(下図) : case_nominal	38
図 2.5.3-2	ポンプ流量、回転数(上図)及び PHX1 次側出入口温度(下図) : case_nominal	39
図 2.5.3-3	PHX2 次側流量、温度(上図)及び AC 出入口温度、空気流量(下図) : case_nominal	40
図 2.5.3-4	外部電源喪失(解析ケース case_nominal)時の炉容器内温度分布	41
図 2.5.3-5	炉心出入口温度(上図)及び炉心流量(下図) : case_ac	43
図 2.5.3-6	ポンプ流量、回転数(上図)及び PHX1 次側出入口温度(下図) : case_ac	44
図 2.5.3-7	PHX2 次側流量、温度(上図)及び AC 出入口温度、空気流量(下図) : case_ac	45
図 2.5.3-8	炉心出入口温度(上図)及び炉心流量(下図) : case_pp22	46
図 2.5.3-9	ポンプ流量、回転数(上図)及び PHX1 次側出入口温度(下図) : case_pp22	47
図 2.5.3-10	PHX2 次側流量、温度(上図)及び AC 出入口温度、空気流量(下図) : case_pp22	48
図 2.5.3-11	外部電源喪失(解析ケース case_pp22)時の炉容器内温度分布	49
図 3.2	Reference module	51
図 3.3-1	Mesh arrangement for the cooling system	52

図 3.3-2	Calculation model-----	53
図 3.3.1	Power distribution of core-----	54
図 3.5.1-1	各解析ケースの流量と IHX 出入口温度差 -----	55
図 3.5.2-1	ピーキング係数と再流配係数の関係(非混合高さ未考慮) -----	56
図 3.5.2-2	ピーキング係数と再流配係数の関係(非混合高さ考慮) -----	56
図 3.5.3-1	径方向出口温度分布の比較 -----	57
図 3.5.3-2	軸方向温度分布の比較(Ch. No. 1)-----	58
図 3.5.3-3	各チャンネルの軸方向流速比の比較 -----	59
図 3.5.3-4	ダクトの有無が再流配係数に及ぼす影響 -----	60
図 3.5.4-1	急速起動時のプラント応答 -----	61
図 3.5.4-2	定常状態の温度及び流速分布 -----	62

1 緒言

サイクル機構は、1999年7月、電気事業者等の関係機関の参画を得て、オールジャパン体制でFBRの実用化戦略調査研究を開始し、2001年3月、フェーズI^[1]を終了した。フェーズIにおいては、革新技術を採用した幅広い技術選択肢の検討を行ない、安全性の確保を前提とし、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性の五つの視点から、FBRシステム及び燃料サイクルシステムの実用化候補概念を評価するとともに、フェーズIIの開発課題を抽出した。

フェーズI研究では、FBRシステムにおける冷却材の一つの候補として、重金属である鉛-ビスマス（以下LBE：Lead Bismuth Eutecticと記す）を検討している。LBEは比較的自然循環特性にすぐれる^[2]とともに水と急激に反応しないので大きな圧力上昇を生じないことから、自然循環による2次系を削除したタンク型炉^[3]が有望と評価された。次のフェーズII研究(H13～)では炉心性能向上を目指し、強制循環方式^[4]の検討が進められている。

米国では、GenerationIVと称した次世代原子炉に関する調査研究が実施されている。そこでは、日本と同様にLBEを冷却材とした小型炉^[5]が検討されている。炉の特徴は、ダクトレス炉心を採用した2次系を有する燃料密閉型の自然循環方式である。

本報告では、実用化戦略調査研究の一環として、LBEを冷却材とする上記2タイプの高速増殖炉の熱流動特性を把握することを目的に、2章では強制循環方式の崩壊熱除去特性を、3章では2次系を有する自然循環炉の応答特性を評価するとともに、ダクトレス炉心の浮力による炉心再流配特性について検討した。4章にてまとめについて述べる。

2 強制循環炉の崩壊熱除去特性解析

2.1 目的と背景

実用化戦略調査研究のフェーズ I における LBE 冷却炉の検討では、物量削減を通しての経済性追求を目的として、自然循環方式を選定し開発目標を達成できる見通しを得た。しかし、炉心性能に関しては、腐食を考慮した被覆管最高温度制限（650℃以下）や自然循環方式であることから、低出力密度とならざるを得ず、従来のナトリウム（以下 Na と記す）冷却炉と比べて必ずしも満足できるものとはなっていない。そのため、フェーズ II 研究では、炉心性能（増殖性、燃焼度）の追求の観点から、強制循環方式についても実用化戦略調査研究の中で検討が進められている。

本章では、LBE 冷却強制循環炉に関して、基本的な熱流動特性である原子炉停止後の崩壊熱除去特性を評価した。

2.2 強制循環炉の概要

表 2.2 に強制循環方式 LBE 冷却中型炉の主な仕様を示す。図 2.2-1～図 2.2-7 に系統概念図、原子炉構造概念図、機器高低概念図、キドニー型蒸気発生器 (SG) 概念図、1 次系ポンプ概念図及び崩壊熱除去系 (PRACS) 概念図を示す。

炉心で加熱された LBE は炉心上部プレナムを上昇後、内筒を越流しキドニー型 SG 内を流下して除熱される。SG 出口 LBE は機械式ポンプで吸い上げられてポンプ内を経由して炉心下部プレナムに流出する。

何らかの理由により原子炉がトリップし、さらに SG での除熱が不可能となった場合、崩壊熱除去系により炉心崩壊熱を除去する。崩壊熱除去系は 1 次系熱交換器 (PHX)、空気冷却器 (AC) ならびにそれらを連結する配管からなる。PHX は SG 上部に設置され管外には 1 次側 LBE、管内には 2 次側 LBE が流れて除熱を行う。PHX で加熱された 2 次側 LBE は AC で空気により除熱される。なお、崩壊熱除去系は自然循環により流動する。

2.3 解析モデル

解析に適用する MSG-COPD コード^{[6], [7], [8]}の座標体系は 2 次元円筒座標系である。そこで、解析対象は炉心、SG 1 基、PHX 1 基を含む主容器内の 180° セクタ、ならびに崩壊熱除去系 1 系統とする。モデル作成において考慮した項目を以下に示す。モデル化の概要を図 2.3-1 に示す。

2.3.1 主容器全体

炉心、PHX 及び SG を含む主容器全体を R-Z の円筒 2 次元座標系でモデル化した。UIS バッフルプレートには、多孔板の開孔率に応じた流動抵抗係数を与えた。メッシュ分割を図 2.3-2 に示す。

2.3.2 炉心

解析対象炉の炉心構成をリングモデルとして設定した。多次元熱流動計算モジュールでは、リングモデルの各流路を独立したチャンネルとして取り扱うことから、径方向の冷却材混合を防ぐため、パーミアビリティをゼロとし、径方向を 15 分割、軸方向を 21 分割し、炉心圧力損失係数を与えた。

炉心多チャンネル熱計算モジュールでも、同様に径方向 15 分割、軸方向を 21 分割でモデル化し、燃料及び被覆管温度、被覆管から冷却材へのヒートフラックスを計算して、多次元熱流動計算へ発熱量として引き渡すモデルとした。径方向ではブラケット、遮蔽体の 2 体を考慮した。軸方向では上部 3 メッシュ、下部 3 メッシュでガスプレナム部を模擬して非発熱部とした。炉心発熱量は、核計算モジュールで一点近似として扱った。

2.3.3 蒸気発生器

キドニ型 SG のモデル化は、径方向を 17 分割、軸方向を 31 分割して、パーミアビリティ、ポロシティ及び伝熱管束部の圧力損失係数を与えた。径方向メッシュ間に伝熱管を仮定して左右のメッシュと伝熱を考慮できるモデルとした。SG 外胴とスタンドパイプ間のスタグナント層については、鉛直方向の流れを抑制するためにパーミアビリティを用いて模擬した。

2.3.4 ポンプ

主循環ポンプ設置位置にポンプをモデル化した。その際のポンプ流路は、周方向メッシュを一つ追加して対応した。ポンプ特性は、ポンプ特性計算モジュールで計算するモデルとした。

2.3.5 崩壊熱除去系

崩壊熱除去系の熱流動計算モデルを図 2.3-3 に示す。崩壊熱除去系の PHX のモデル化は、径方向を 15 分割、軸方向を 3 分割して、パーミアビリティ、ポロシティ及び伝熱管束部の圧力損失係数を与えた。上部プレナムからの冷却材はすべて PHX コイル部に流入し、SG と同様に外胴とスタンドパイプ間のスタグナント層については、鉛直方向の流れを抑制するためにパーミアビリティを用いて模擬した。PHX、PHX～AC 間の配管及び AC のそれぞれの熱計算は、MSG-COPD コードの Super-COPD 側のモジュールで計算した。

2.4 解析事象及び解析ケース

代表的な崩壊熱除去事象として、

- ・ 手動トリップ (SG 除熱)
- ・ 外部電源喪失 (PRACS 除熱)

を解析対象として選定した。

解析の評価項目は、

- ・ 過渡特性(崩壊熱除去特性)
- ・ 炉心出口最高温度
- ・ 温度成層化

等である。特に、外部電源喪失では炉心出口最高温度を評価する観点から、ポンプの流量半減時間、及び崩壊熱除去系の起動時間をパラメータとして、表 2.4 に示す 3 ケースを設定した。過渡変化時の事象推移シーケンスは、実用化戦略調査研究での Na 冷却炉を参考に図 2.4-1 のように設定した。また、以下の過渡変化条件を設定した。

- ① 炉心崩壊熱変化条件 図 2.4-2
- ② スクラム反応度条件 図 2.4-3
- ③ 手動トリップ、外部電源喪失時の条件 図 2.4-4
- ④ 外部電源喪失時ポンプ回転数変化条件 図 2.4-5

2.5 解析結果

2.5.1 定常

定常時における主要器内温度及び流速分布を図 2.5.1-1 に示す。主要器内温度は、炉心入口温度 352°C から炉心出口温度 528°C の $\Delta T=176^\circ\text{C}$ の間で分布しており、特異な温度分布はみられない。炉心部出口流は UIS 下端より 1 段目のバッフルプレートに衝突した後、SG 外胴壁面に沿って上昇する流れと UIS 内を上昇する流れを形成している。その後、プレナム上端より PRACS 上部に流入し、SG で除熱されて炉心へ戻る流れを形成している。SG 出口部が絞られているため、SG 出口部付近のプレナムでは攪拌されている。炉心下部では、1 次系ポンプによる強制的な流入が形成されている。

SG 内部温度分布を図 2.5.1-2 に示す。SG 下端から 2.5m 付近で沸騰が開始している。LBE 側の最内層と最外層の径方向の温度差は約 30°C であり、その鉛直方向位置はコイル中央部である。

ピーキング係数と炉心出入口温度分布の関係を図 2.5.1-3 に示す。炉心出口温度はピーキング係数の傾向と一致している。

2.5.2 手動トリップ

図 2.4-1 に示す過渡変化事象推移概要に従い、手動トリップ事象の熱過渡解析を行った。

原子炉トリップ後 100～7200 秒時点における主容器内温度分布を図 2.5.2-1 に示す。

トリップ後 100 秒時点では、スクラムにより炉心出力は約 4% に低下し、炉心入口流量はポンプのコントロールコーストダウンにより 15% 流量となっている。SG 給水流量は約 25% 一定で SG 除熱が継続しているために、炉心出口温度は約 440°C まで低下している。また、SG 外胴及び炉心槽ではスタグナント域が発生し、低温冷却材が取り残されている。

トリップ後 600 秒時点では、PHX 上端部よりも上方に温度成層化が発生している。また、PHX 外胴では高温冷却材が取り残されるとともに、SG 外胴及び炉心槽ではスタグナントな低温域が 100 秒以降から継続している。

トリップ後 1200 秒以降、プレナム部の温度成層化は解消傾向を示し、トリップ後 7200 秒の時点では、SG 部を除いて主容器全体は約 290°C となっている。

以上の過渡変化において炉心上部プレナム上部では、高温冷却材が取り残され、温度成層化が発生していることが確認できる。温度成層化の程度を確認するために、炉心上部プレナムでの軸方向温度分布を図 2.5.2-2 に示す。図 2.5.2-2 に示すように、トリップ後 600 秒以降、炉心上部プレナムで厳しい温度勾配が発生するが、その位置は UIS バッフルプレート最上段より上部であり、約 7200 秒では、ほとんど解消されている。

2.5.3 外部電源喪失

1) ノミナル条件

図 2.4-1 に示す過渡変件事象推移概要に従い、表 2.4 に示す解析ケース case_nominal の外部電源喪失事象の熱過渡解析を行った。炉心出口温度、炉心流量を図 2.5.3-1、ポンプ流量／ポンプ回転数、PHX 1 次側出入口温度を図 2.5.3-2、PHX2 次側出入口温度及び流量、AC 出入口温度及び空気流量を図 2.5.3-3 に示す。

図 2.5.3-1 の下図に示す炉心流量はポンプコーストダウンに従って低下し、最初に径ブランケット及び中性子遮蔽体の外側チャンネルで逆流が生じる。トリップ後約 300 秒で全チャンネル逆流となり、約 400 秒から一部のチャンネルで正流化する。この逆流から正流に転じるときに図 2.5.3-1 の上図に示す炉心出口温度が大きく上昇する結果となっている。

図 2.5.3-3 の下図に示すように、崩壊熱除去系は空気冷却器空気流量がトリップ後 60 秒で定格流量に達して除熱を開始する。この除熱に伴い、図 2.5.3-3 の上図に示すように崩壊熱除去系の LBE 流量は自然循環により立ち上がり、PHX で除熱を開始する。

トリップ後の炉容器内部及びポンプ流路の温度分布を図 2.5.3-4 に示す。トリップ直後は流量低下より出力低下が急峻なので図 2.5.3-4(1/2)の中央図に示すように炉心出口プレナムは低温化する。一方でトリップ前の高温 LBE は内筒を越えて SG 側に越流しているため、一巡ヘッドが減少し流量が低下する。このため、図 2.5.3-4(1/2)の右図に示すように炉心は高温となる。さらに、一巡ヘッドが負に転じて炉心で逆流が発生し、図 2.5.3-4(2/2)の左図に示すように炉心入口プレナムに高温の LBE が流れ込む。その後、崩壊熱除去系による除熱により、正の一巡ヘッドとなり正流に転じる。このときに逆流時の炉心入口の高温 LBE が炉心を通過するため、図 2.5.3-4(2/2)の中央図に示すように炉心出口温度の高温化を招いている。その後は、炉容器内の流量は正流を維持し、PRACS による除熱により炉心出口温度は低下する。

外部電源喪失(解析ケース case_nominal)時には、一時的に炉心で逆流が発生し、炉心出口温度が高温となる。これを回避するには、

- ・ 崩壊熱除去系を早く起動する
- ・ ポンプ回転数コーストダウンを遅くする
- ・ SG 給水インベントリを利用した蒸気ブロー除熱を活用する

等の対策が必要と考えられる。

2) 崩壊熱除去系の早期起動条件

図 2.4-1 に示す過渡変件事象推移概要に従い、表 2.4 に示すケース case_ac (トリップ後瞬時に崩壊熱除去系を起動) の外部電源喪失事象の熱過渡解析を行った。炉心出口温度、炉心流量を図 2.5.3-5、ポンプ流量／ポンプ回転数、PHX 1 次側出入口温度を図 2.5.3-6、PHX2 次側出入口温度及び流量、AC 出入口温度及び空気流量を図 2.5.3-7 に示す。

図 2.5.3-7 の下図に示すように、崩壊熱除去系は空気冷却器の空気流量がトリップと同時に定格流量で除熱を開始する。また、崩壊熱除去系の LBE 流量もトリップと同時に定格流量となり、PHX で除熱を開始する。解析ケース case_nominal より崩壊熱除去系の起動が早くなったため、炉心出口温度

の上昇を留めることができているが、内筒を越流した高温 LBE を冷却するには時間を要し、図 2.5.3-5 に示すように、炉心での逆流を阻止できない。

3) ポンプ回転数コストダウンの遅延条件

次にポンプコストダウンを遅くした表 2.4 に示す解析ケース case_pp22 (ポンプ回転数半減時間 22 秒) の解析を行った。炉心出口温度、炉心流量を図 2.5.3-8、ポンプ流量/ポンプ回転数、PHX 1 次側出入口温度を図 2.5.3-9、PHX2 次側出入口温度及び流量、AC 出入口温度及び空気流量を図 2.5.3-10 に示す。トリップ後の炉容器内部温度分布を図 2.5.3-11 に示す。

図 2.5.3-8 の下図に示すように主冷却系では逆流が生じていない。また、図 2.5.3-8 の上図に示すように、炉心出口温度は 650℃以下に留まっている。この理由は、図 2.5.3-11(1/2)の右図及び図 2.5.3-11(2/2)の左図に示すように、ポンプコストダウンを遅くしたことにより、トリップ前の炉心出口プレナム高温 LBE が一巡して炉心入口まで到達するとともに、トリップ後の低温 LBE が内筒を越流し SG 領域まで到達することにより、正の一巡ヘッドが持続するためである。

2.6 まとめ

実用化戦略調査研究にて設計研究が進められている鉛-ビスマス冷却強制循環炉を対象として、MSG-COPD コードにより定常、手動トリップ及び全電源喪失解析を行った。以下に結果を示す。

(1) 定常事象について

- ① 主要器内温度は炉心入口温度 352℃から炉心出口温度 528℃の $\Delta T=176^\circ\text{C}$ の間で分布しており、炉心部及び SG 伝熱部を除き、特異な温度分布はない。
- ② 炉心部出口流は UIS 下端より 1 段目のバップルプレートに衝突した後、SG 外胴壁面に沿って上昇する流れと UIS 内を上昇する流れを形成する

(2) 手動トリップ事象について

- ① 炉心上部プレナム上部では、高温冷却材が取り残され、温度成層化が発生する。これらは、約 1200 秒で解消する。
- ② PHX 外胴、SG 外胴及び炉心槽ではスタグナント域が発生し、PHX 外胴では高温冷却材、SG 外胴及び炉心槽で低温冷却材が取り残される。
- ③ トリップ後 7200 秒の時点では、SG 部を除いて主容器全体は約 290℃に静定する。

(3) 外部電源喪失事象について

- ① ポンプコーストダウン時に炉心出口温度が低下して炉上部プレナムに堆積するとともに、初期にあった炉上部プレナム内の高温冷却材が SG 側に回り込む。このため、一巡ヘッドが負に転じて一巡流量が逆流となる。
- ② 崩壊熱除去系の起動により逆流から正流に転じる。
- ③ 炉心出口温度は、一巡流量の逆流から正流への復帰に伴って高温化する。
- ④ ポンプコーストダウンを遅くすることにより一巡流量の逆流を阻止し、炉心出口温度は 650℃以下に抑えることが可能である。
- ⑤ ポンプ停止により SG 出口プレナム下部プレナムを攪拌する効果が無く、温度成層化が発生する。

3 小型自然循環炉の熱流動特性解析

3.1 目的と背景

日本での実用化戦略調査研究と同様に、米国では Generation IV と称した次世代原子炉に関する調査研究が行われており、LBE 冷却炉も検討対象に挙がっている。

炉の特徴はダクトレス炉心を採用した 2 次系を有する燃料密閉型の自然循環方式である。LBE は水と急激に反応しないので大きな圧力上昇を生じないことから 2 次系を削除することが可能であるが、この炉は水と LBE の反応により生成される酸化物による炉心閉塞を防止する、及びビスマスが中性子を吸収してできる放射性物質(ポロニウム)が系外に放出されることを防止する、という安全上の観点から 2 次系を考慮していると考えられる。

自然循環方式の場合、炉心部流量は、浮力の影響によって配分される。そのため、燃焼特性にしたがって高出力チャンネルに高流量が配分されるような固有の流量配分特性が期待される。炉心特性を向上させる観点、廃棄物を削減する観点等から、ダクトレス炉心にも利点があると考えられるが、自然循環方式の場合、ダクト有無が流量配分に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、ダクトの有無が最高冷却材温度及び流量配分特性に及ぼす影響を確認すること、並びに 2 次系が有るタンク型炉の過渡応答特性を把握することを目的に、自然循環熱流動解析を実施した。

3.2 炉の概要

Fig. 3.2 に炉の概念図を示す。Table 3.2 に炉の主な仕様を示す。炉は熱出力 125 MWt、電気出力 50 MWe の小型タンク炉である。

燃料は可搬型の 1 次系冷却材円筒容器内に炉心寿命 20 年間密封され、アクセスが制限される。冷却材は鉛-ビスマスまたは鉛を用いる。これらの冷却材は水または蒸気と発熱をともなった反応が生じないとともに、漏洩しても燃焼しないことが利点である。

1 次系及び 2 次系の冷却材は自然循環に頼り、機械式ポンプが存在しない。1 次系と 2 次系の熱交換は 1 次系冷却材円筒容器内の環状型中間熱交換器 (IHX) で行う。IHX 内部は矩形平板チャンネルで構成されており、1 次系冷却材は矩形平板チャンネル内を下降し、2 次系冷却材は矩形平板チャンネル外を上昇する。炉心は 1 次系冷却材円筒容器の IHX の内側下部に設置される。2 次系冷却材と水/蒸気系の熱交換は、2 次系上部に設置した 8 基の蒸気発生器で行う。

炉心で加熱された 1 次系冷却材は、内筒内を上昇し炉心上部プレナムから IHX へ入り、IHX によって冷却され下降流となって IHX 内を流下し、下部プレナムにて再び炉心へ流入する。IHX で加熱された 2 次系冷却材は、SG 上部プレナムから SG へ入り、SG 出口プレナムで SG をバイパスした高温冷却材とミキシングして下降し、再び IHX へ流入する。1 次冷却系は炉心と IHX の伝熱中心差に依存した自然循環、2 次冷却系は IHX と SG の伝熱中心差に依存した自然循環により冷却が行われる。ここで、炉心と IHX の伝熱中心差は 8.05m、IHX と SG の伝熱中心差は 4.6m である。

3.3 解析モデル

解析に適用する MSG-COPD コードの座標体系は 2 次元円筒座標系である。炉は Fig. 3.2 で示したように周方向に 8 基の独立した SG が存在するので、2 次元円筒座標系に適用するために、周方向の全

での領域に SG が存在すると仮定した。

炉は 1 次系冷却材円筒容器内の環状熱交換器内で 1 次系と 2 次系に分離されている。2 系統の冷却システムは混合せずに中間熱交換器での熱計算で結ばれている。したがって、2 つに分離された Fig. 3.3-1 に示すような解析体系が必要となる。1 次系の解析体系には、炉心と IHX、2 次系の解析体系には、IHX と SG が存在する。IHX において 1 次系と 2 次系の熱計算を行う。Fig. 3.3-2 にメッシュ分割及び各計算モジュールの解析体系を示す。

3.3.1 炉心

多次元熱流動計算ジュールでは、径方向を 7 分割、軸方向を 15 分割して、パーミアビリティ、ポロシティ、炉心圧力損失係数を与えた。炉心多チャンネル熱計算モジュールでも、同様に径方向を 7 チャンネル、軸方向を 15 分割でモデル化し、燃料及び被覆管温度、被覆管から冷却材へのヒートフラックスを計算して、多次元熱流動計算ジュールでヒートソース項として扱った。各チャンネルの出力分布は平坦または Fig. 3.3.1 のように設定した。

3.3.2 中間熱交換器

多次元熱流動計算ジュールでは、径方向を 5 分割、軸方向を 65 分割して、パーミアビリティ、ポロシティ、伝熱管管束部の圧力損失係数を与えた。1 次側から 2 次側へのヒートフラックスは、中間熱交換器熱計算モジュールで計算し、多次元熱流動計算ジュールでヒートソース項として扱った。多次元熱流動計算ジュールから中間熱交換器熱計算モジュールへの境界条件となる LBE 流量は各入口メッシュ流量の合計、温度は各入口メッシュ流量と温度の加重平均より計算した。

3.3.3 蒸気発生器

多次元熱流動計算ジュールでは、径方向を 8 分割、軸方向を 15 分割して、パーミアビリティ、ポロシティ、伝熱管管束部の圧力損失係数を与えた。水側の熱流動及び伝熱管へのヒートフラックスは、蒸気発生器熱計算モジュールで計算し、多次元熱流動計算ジュールでヒートシンク項として扱った。多次元熱流動計算ジュールから蒸気発生器熱計算モジュールへの境界条件となる LBE 流量は各入口メッシュ流量の合計、温度は各入口メッシュ流量と温度の加重平均より計算した。給水流量及び出口蒸気圧力は境界条件で与えた。

3.3.4 伝熱式

1) IHX 伝熱式

矩形伝熱管を直管相当に置き換えた下式を適用した。

$$\alpha = \frac{k}{d} (5.0 + 0.025Pe^{0.8}) \quad \text{Subbotin の式}$$

2) SG 伝熱式

SG の明確な設計条件が得られないこと、また MSG-COPD コードにバイヨネット型 SG の計算機能がな
いこと等の理由により、ヘリカルコイルの伝熱式を採用し、設計相当の交換熱量が得られるように伝

熱面積を調整している。このため伝熱式の提示は省略する。

3.3.5 圧力損失

炉心部及び IHX、SG 伝熱部の摩擦損失係数の算出においては、同等の水力等価直径を有する円管と見なし、以下に示す滑らかな円管流路に適用される以下の Blasius の相関式を適用する。

$$\lambda = 0.3164 \text{Re}^{-1/4} \quad (3.0 \times 10^3 < \text{Re} < 3.0 \times 10^5)$$

3.4 解析事象及び解析ケース

設定した解析ケースを表 5 に示す。

自然循環炉では、炉心と熱交換器の伝熱中心高さが駆動源の浮力に影響するために自然循環特性を評価する上で重要な項目となる。そこで、IHX の 2 次側を境界条件として与え、1 次系の自然循環特性を評価することを目的に、

- NLP4C1NQ : 炉心出力分布無し、ダクト炉心
- NLP4C1 : 炉心出力分布有り、ダクト炉心
- NLP4C1ND : 炉心出力分布有り、ダクトレス炉心

の 3 ケースを設定した。

自然循環炉では浮力の効果により高出力チャンネルに流量が配分される^[9]。炉心での高出力チャンネルへの流量再配分効果を評価することを目的に、

- NLP4C1 : 炉心出力分布有り、ダクト炉心
- NLP4C1ND : 炉心出力分布有り、ダクトレス炉心

の 2 ケースを設定した。

炉では矩形伝熱管の IHX を採用し、2 次系を有するタンク型を採用している。このため、炉心出力変化に対応する蒸気発生器による自然循環除熱が十分に応答することを確認する必要がある。そこで、出力変化と除熱の追従性を評価することを目的に

- NLP4ND : 炉心出力分布有り、ダクト炉心、2 次系有り

を設定した。解析ケース一覧を下表に示す。

ケース	1 次系	2 次系	炉心出力分布	炉心ダクト
NLP4C1NQ	有	無	無	有
NLP4C1	有	無	有	有
NLP4C1ND	有	無	有	無
NLP4ND	有	有	有	無

3.5 解析結果

3.5.1 出力分布の影響

IHX の 2 次側を境界条件として与え、炉心の出力分布が平坦なケース NLP4C1NQ、炉心の出力分布を与えたケース NLP4C1、炉心の出力分布を与え、さらに炉心ダクトが無いケース NLP4C1ND で得られ

た1次系の流量及び IHX 出入口温度差と設計値を比較して図 3.5.1-1 に示す。

炉心の出力分布が平坦なケースは設計のヒートバランスと比較的一致した結果が得られた。炉心の出力分布が有るケース NLP4C1 は、出力分布が無いケース NLP4C1NQ と比較すると、流量が減少し温度差が増大している。これは、炉心の出力分布を与えることにより高出力チャンネルの流量が増大し、炉心部の圧力損失が増大したためと考えられる。炉心ダクトが無く出力分布が有るケース NLP4C1ND では、炉心ダクトが有り出力分布が有るケース NLP4C1ND とほとんど同じ結果となっている。

3.5.2 炉心再流配係数評価

図のような自然循環炉体系の炉心再流配係数は、簡易的に次に示す3次方程式で表す^[9]ことができる。

$$f_w^3 - \left(1 - \frac{f_h}{f_p}\right) f_w - \frac{f_h}{f_p} f_Q = 0$$

ここで、

- f_w : 再流配係数 (-)
- f_Q : ピーキング係数 (-)
- f_h : 炉心発熱中心から出口までの長さ
炉心中心から IHX 伝熱中心長さの比 (-)
- f_p : 炉心部圧力損失と
ループ一巡圧力損失の比 (-)
- Δh : 炉心発熱中心から IHX 伝熱中心までの長さ (m)
- Δh_{core} : 炉心発熱部長さ (m)
- Δh^* : 混合長さ (m)
- $\Delta h_{core, eq}$: 炉心発熱中心から出口混合部長さ (m)
- Δh_{upper} : 炉心上部非加熱部長さ (m)
- W_{max} : 最大ピーキングチャンネル流量 (kg/s)
- W_0 : 平均ピーキングチャンネル流量 (kg/s)
- Q_{max} : 最大ピーキングチャンネル出力 (W)
- Q_0 : 平均ピーキングチャンネル出力 (W)

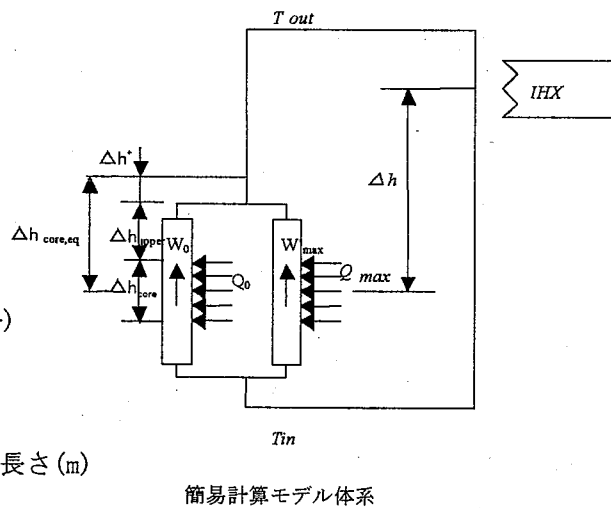


図 3.5.2-1 に IHX の 2 次側を境界条件として、炉心の出力分布を与えたケース NLP4C1 の再流配係数と径方向ピーキング係数の関係を簡易計算式とともに示す。簡易計算式は最大出力チャンネルの再流配係数を 2.0% 小さく評価し、最小ピーキングチャンネルの再流配係数を 3.4% 大きく評価している。

簡易計算式は、集合体出口までの非加熱部での密度差を考慮して浮力を評価しているが、集合体出口から冷却材が混合せずに上昇する場合、高温チャンネルにはより浮力が働くことが考えられる（チムニー効果）。その効果を考慮するために、炉心部浮力に関する高さ $\Delta h_{core, eq}$ に非混合高さ Δh^* を考慮する。 $\Delta h^* = 0.625\text{m}$ とした場合の解析結果と簡易計算式の比較を図 3.5.2-2 に示す。簡易計算式は、

ほぼ全ピーキング領域について再流配係数を精度よく評価しており、非混合高さを考慮することにより、簡易計算式の精度が上がることを確認された。

3.5.3 ダクトレス炉心の特性

IHXの2次側を境界条件として、炉心の出力分布を与えたケース NLP4C1、炉心の出力分布を与え、さらに炉心ダクトが無いケース NLP4C1ND の炉心各チャンネル出口温度の比較を図 3.5.3-1 に示す。チャンネル No.1 の軸方向温度分布を図 3.5.3-2 に示す。各チャンネルの軸方向流速分布を図 3.5.3-3 にそれぞれ示す。図 3.5.3-1 に示すように、チャンネル間ダクトを削除した場合、炉心出口での径方向温度分布はより急峻となり、冷却材最高温度は上昇している。これは、図 3.5.3-3 に示す各チャンネルの軸方向流速分布から分かるように、ダクトレス炉心の場合は、高出力チャンネルでの煙突効果が減少し、ダクト炉心より流速が小さくなるためである。図 3.5.3-4 に各チャンネルのピーキング係数と再流配係数の関係を整理した。この図からも確認できるように、ダクトレス炉心の場合、高出力チャンネルへの再流配効果が小さいことが確認できる。これらより、自然循環炉の場合、ダクト炉心にメリットがあることが分かる。

3.5.4 全系解析

図 3.5.4-1 に 1000 秒で炉心出力を 100% に上昇させた急速起動時の応答を示す。上段に示す図では、炉心出力の上昇に対応して IHX 及び SG の除熱が追従している。同様に中段の図では、炉心出力の上昇に追従して 1 次系及び 2 次系の流量が立ち上がっている。下段の図では、炉出力の急速な上昇でも冷却系温度は過渡に上昇していない。これらにより、自然循環方式で 2 次系が有る場合でも、炉心出力の上昇に対して十分に流量が立ち上がり、蒸気発生器による除熱が追従できることが確認できた。急速起動後の定常状態での温度及び流速分布を図 3.5.4-2 に示す。図より、

- ・炉心中央部の制御棒領域及び 1 次系容器内側の反射体領域の低温 LBE が炉心出口の高温 LBE と混合している。
- ・SG をバイパスする高温 LBE が SG 出口の低温 LBE と混合している。
- ・炉心出口プレナムでは出力分担率の高い内チャンネル側で流れが発達し、出力分担率の低い外チャンネル側で下降流が発生している。

ことが分かる。

3.6 まとめ

2 次系が有る小型タンク型炉の自然循環特性及びダクトレス炉心の流量再配分特性を把握することを目的に熱流動特性解析を実施した。

その結果、以下の成果が得られた。

- (1) ダクトレス炉心では煙突効果が得られず、ダクト炉心より炉心の再流配効果が期待できない。
- (2) 2 次系が有る自然循環炉でも、炉心出力の上昇に対して十分に流量が立ち上がり、蒸気発生器による除熱が追従し、十分に除熱応答が得られることが分かった。

4 結言

タンク型高速炉用の多次元プラント動特性解析コードを（MSG-COPD）用いて、強制循環中型炉及び自然循環小型炉を対象として熱流動解析を実施した。

その結果、以下の成果が得られた。

強制循環中型炉に関して

- (1) 手動トリップ時には、炉心上部プレナム上部で高温冷却材が取り残され、温度成層化が発生する。これらは、約 7200 秒で解消する。トリップ後 7200 秒の時点では、SG 部を除いて主容器全体は約 290℃に静定する
- (2) 外部電源喪失時には、一巡ヘッドのバランスにより炉心流量が正流→逆流→正流となる。これに伴い、炉心出口温度が高温となるが、ポンプコーストダウンを遅くすることにより一巡流量の逆流を阻止し、炉心出口温度は 650℃以下に抑えることが可能である。

自然循環小型炉に関して

- (1) チャンネル間ダクトを削除した場合、炉心出口での径方向温度分布はより急峻となり、冷却材最高温度は上昇する。したがって、炉心冷却の観点からは、自然循環炉の場合、ダクト有炉心にメリットが存在する。
- (2) 自然循環方式で 2 次系が有る場合でも、炉心出力の上昇に対して十分に流量が立ち上がり、蒸気発生器による除熱が追従可能である。

表 2.2 強制循環方式 LBE 冷却炉の運転条件

項目	単位	値	
原子炉運転条件			
熱出力	MWt	750	
入口 LBE	°C	352	
出口 LBE	°C	520	
流量	kg/h	2.75E+08	
SG 運転条件			
基数	基	2	
交換熱量	MWt/基	937.5	
温度	入口給水	°C	240
	出口蒸気	°C	452.7
	入口 LBE	°C	520
	出口 LBE	°C	352
圧力	水/蒸気側	MPa	6.5
流量	給水	kg/h基	1.5605E+06
	LBE	kg/h基	1.3760E+08
ポンプ運転条件			
基数	基	2	
ポンプ流量	m ³ /min	222.6	
ポンプ回転数	rpm	260	
PHX 運転条件			
基数	基	2	
交換熱量	MWt/基	12	
温度	1次側入口 LBE	°C	630
	1次側出口 LBE	°C	608.45
	2次側入口空気	°C	320
	2次側出口空気	°C	535
流量	1次側	kg/h基	1.373E+07
	2次側	kg/h基	1.376E+06
AC 運転条件			
基数	基	2	
交換熱量	MWt/基	12	
温度	1次側入口 LBE	°C	535
	1次側出口 LBE	°C	320
	2次側入口空気	°C	50
	2次側出口空気	°C	400
流量	1次側 LBE	kg/h	1.376E+06
	2次側空気	kg/h	1.198E+05

表 2.4 外部電源喪失解析ケース

	case_nominal	case_ac	case_pp22
ポンプ回転数半減時間	8 秒	8 秒	22 秒
崩壊熱除去系の起動時間	60 秒	瞬時	60 秒
ポンプ回転数コストダウン	図 2.4-5	図 2.4-5	図 2.4-5

Table 3.2 Steady State Nominal Operating Conditions and structures

Coolant	Lead-Bismuth	Unit
Fuel Material	UN	
Power	125	MWt
Core inlet/outlet Temperature	400/545	C
Core Coolant Flow-rate	5883	kg/s
IHX Primary inlet/outlet Temperature	545/400	C
IHX Primary Coolant Flow-rate	5883	kg/s
IHX Secondary inlet/outlet Temperature	358/515	C
IHX Secondary Coolant Flow-rate	5433	kg/s
Steam Generator LBE inlet/outlet Temperature	515/331	C
Steam Generator LBE Coolant Flow-rate	578	kg/s
Steam Generator Feed Water Inlet Temperature	240	C
Steam Generator Steam Outlet Temperature	482	C
Steam Generator Feed-water Flow-rate	6.9	kg/s
Active Core Height	1.25	m
Core Diameter	1.978	m
Cladding Outer Diameter	1.2	cm
Fuel Pellet Diameter	1	cm
Fuel Rod Triangular Pitch to Diameter Ratio	1.208	—
IHX inner diameter	2.248	m
IHX outer diameter	3.148	m
IHX length	13	m
Steam Generator Tube Height	3	m
Number of Steam Generators	8	—

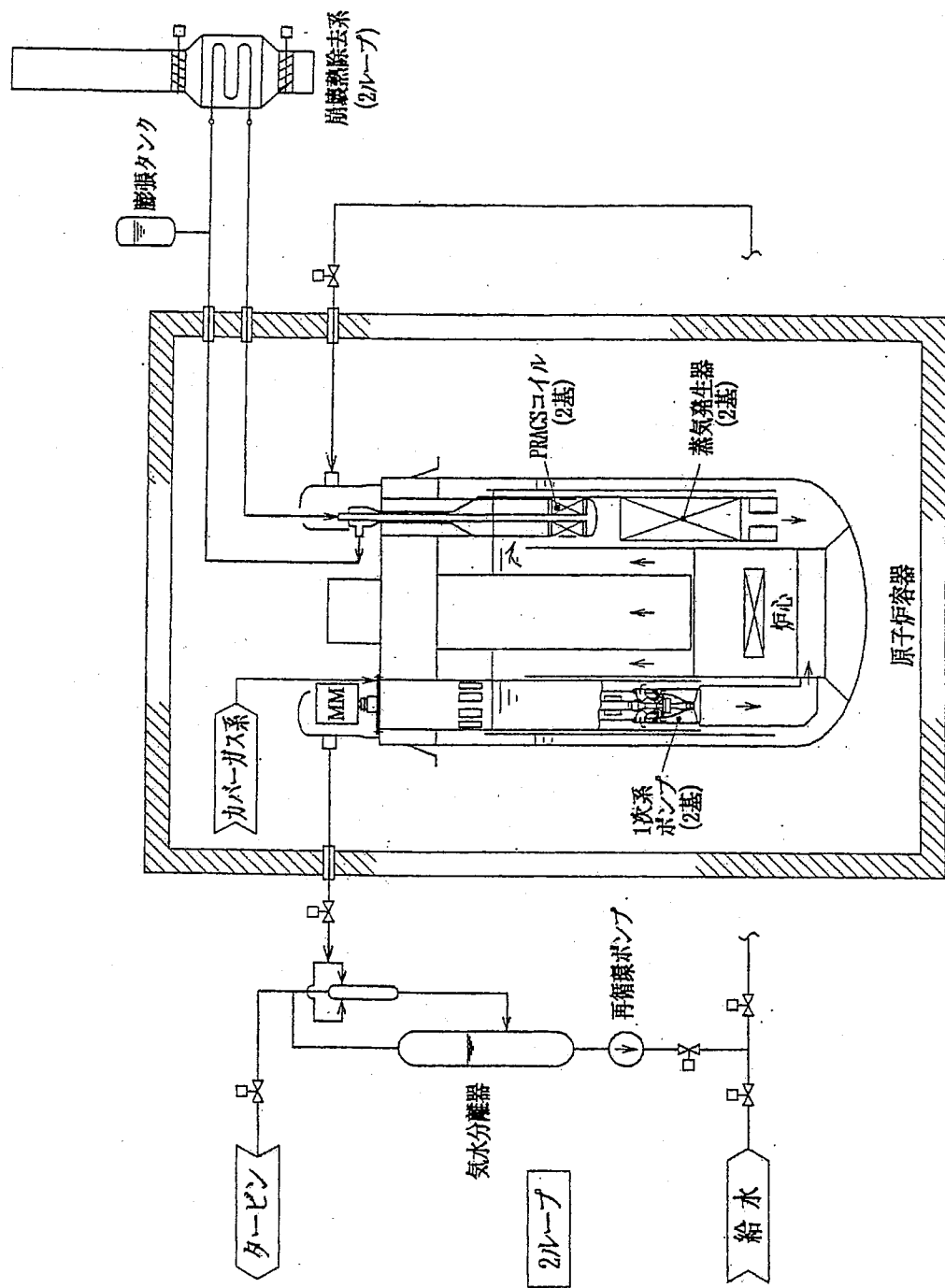


図 2.2-1 強制循環型 LBE 冷却中型炉の系統概念図

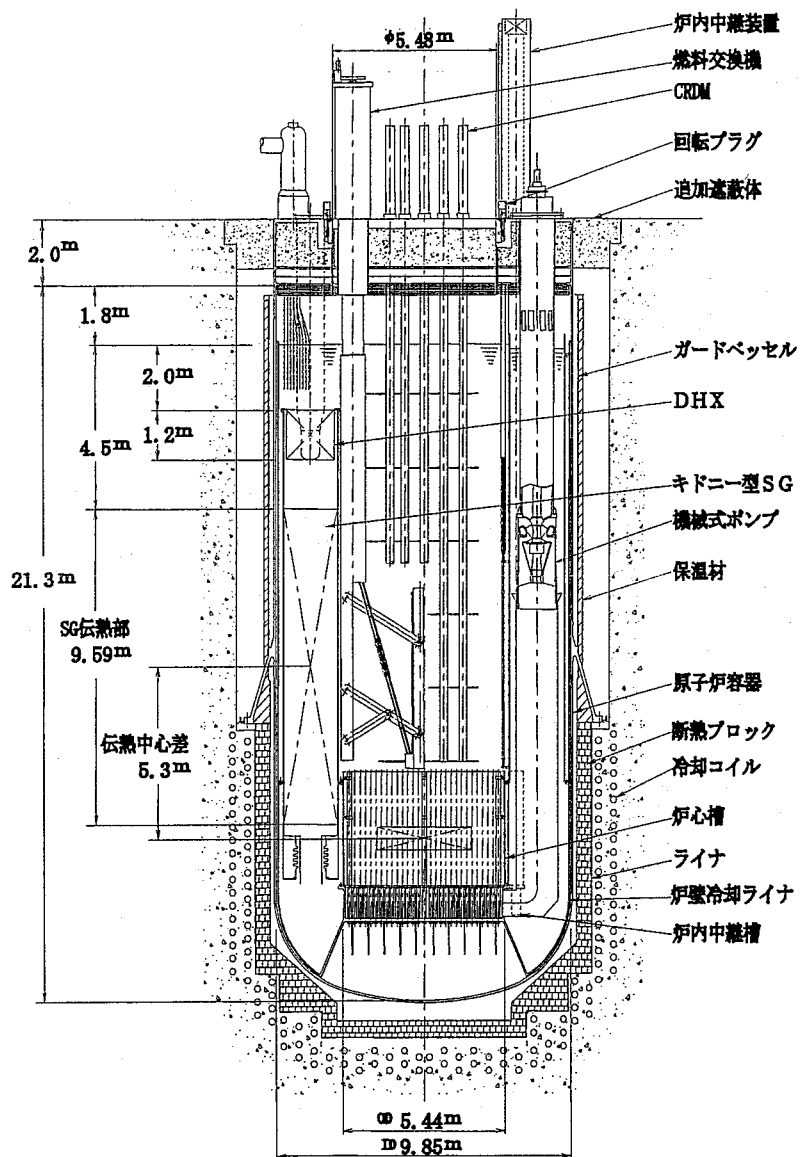


図 2.2-2 強制循環型 LBE 冷却中型炉の原子炉構造概念図(立面)

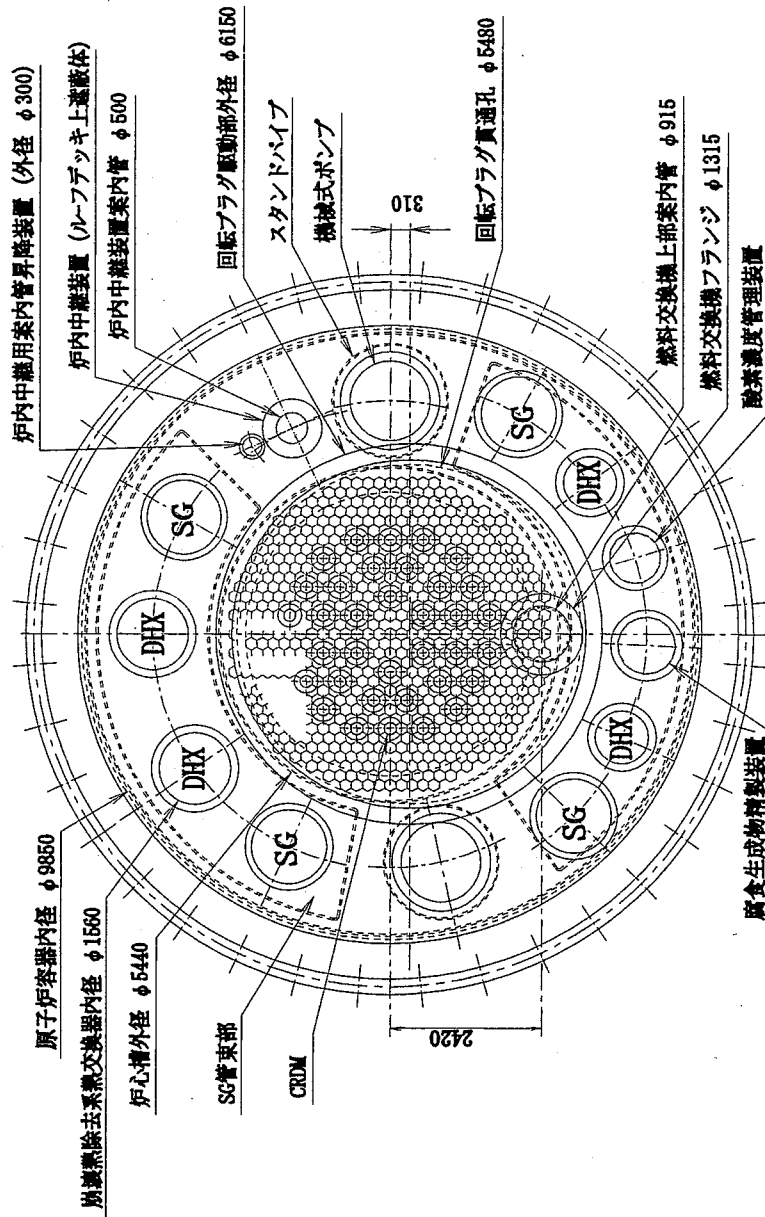


図 2.2-3 強制循環型 LBE 冷却中型炉の原子炉構造概念図(平面)

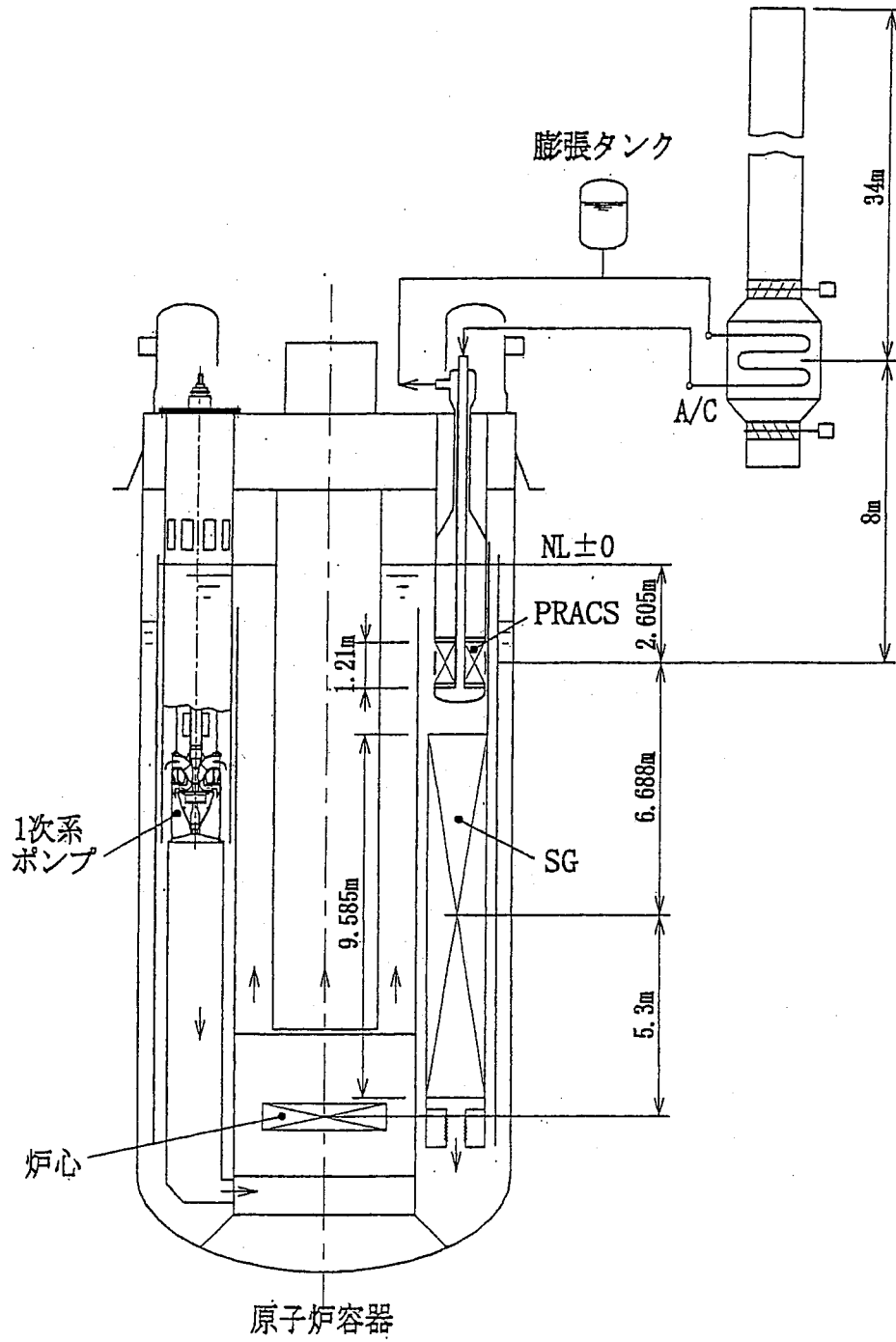


図 2.2-4 強制循環型 LBE 冷却中型炉の機器高低関係

製作仕様	
SG形式	キド二一型
鋼材種別	炭素鋼
鋼材規格	SP45C, SUS316L
厚さ	3, 5
塗装処理	SUS316L: 塗装 無 SUS316L: 塗装 有
外寸	φ1600 2500
内径	φ1300
重量	2500kg
材質	炭素鋼
仕様	圧力: 0.2MPa 温度: 250℃
検査仕様	検査圧力: 0.3MPa 検査温度: 250℃ 検査時間: 30分
組立仕様	組立圧力: 0.1MPa 組立温度: 25℃
組立場所	組立工場
組立時期	2003.10
組立人員	組立班
組立監督	組立班長
組立確認	組立班長
組立完了	2003.10.15
組立完了場所	組立工場
組立完了人員	組立班
組立完了監督	組立班長
組立完了確認	組立班長
組立完了完了	2003.10.15
組立完了完了場所	組立工場
組立完了完了人員	組立班
組立完了完了監督	組立班長
組立完了完了確認	組立班長

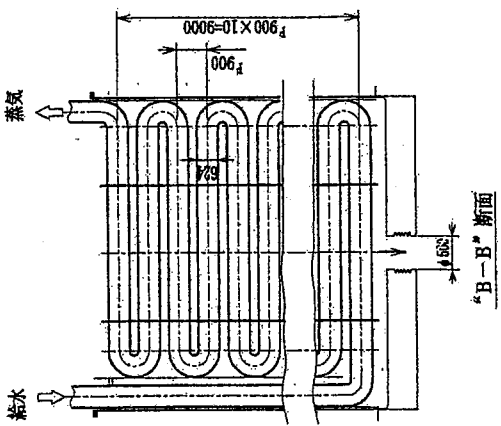
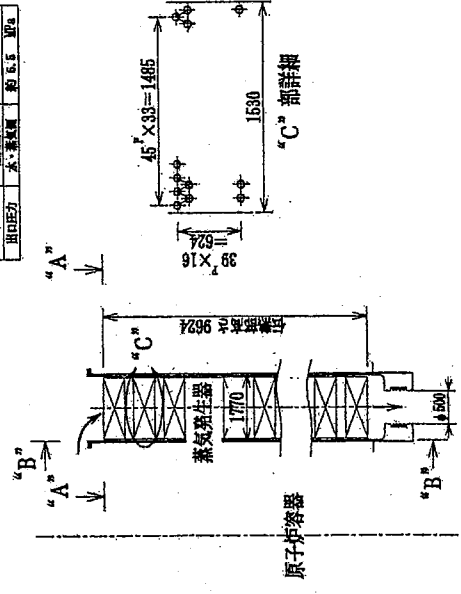
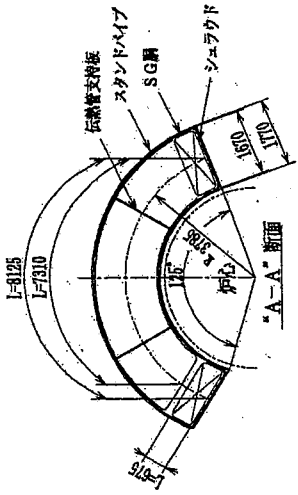


図 2.2-5 キド二一型 SG 概念図

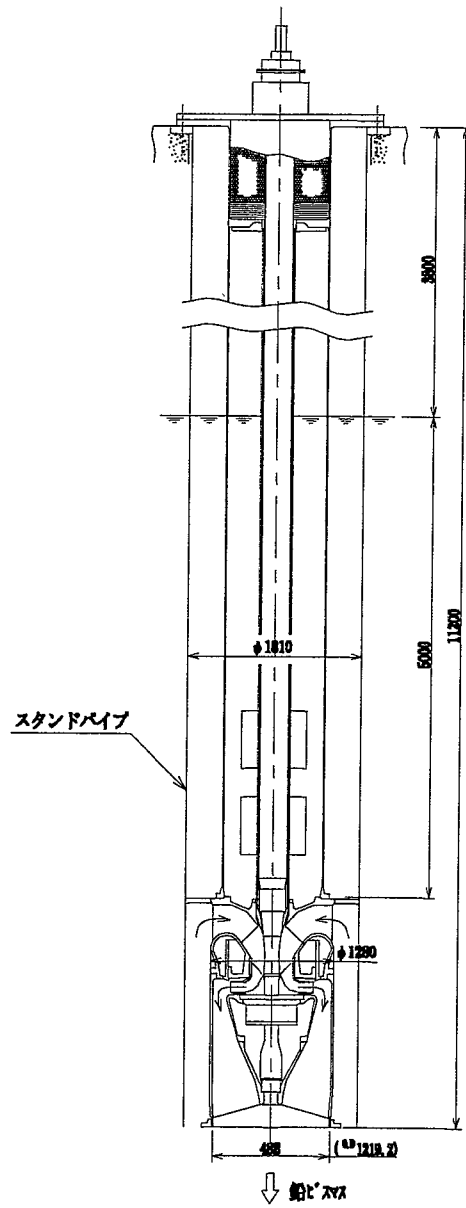
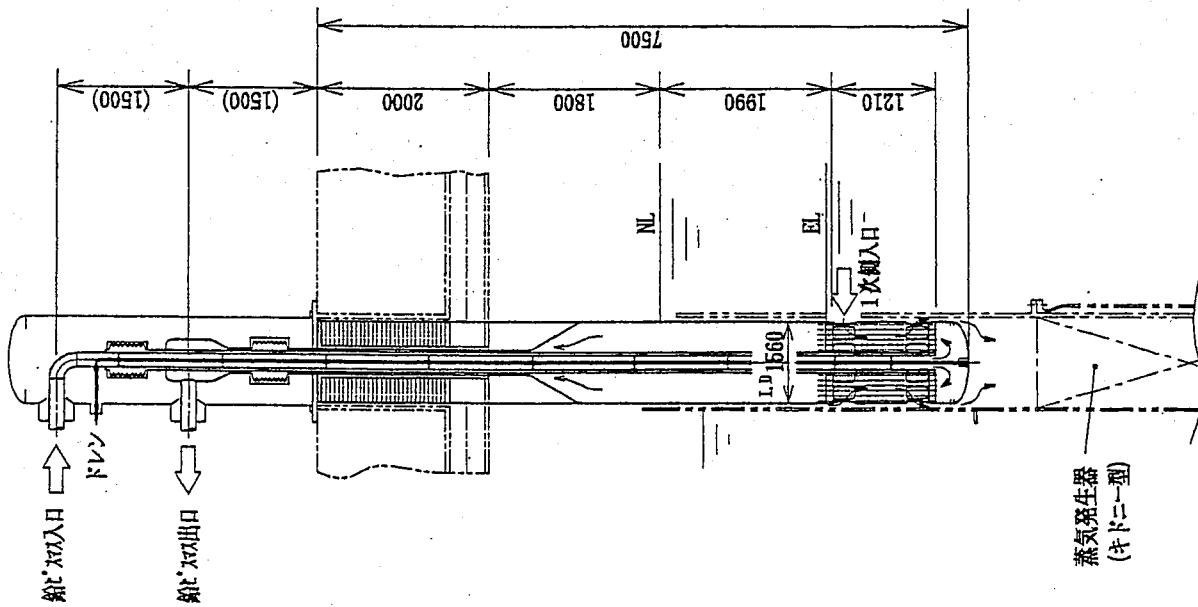


図 2.2-6 1次系ポンプ概念図



設計仕様

型式	平行流式直管型	
交換熱量	12	MWe
基数	2	基
伝熱面積	74	m ² /基
温度	1次側(入口/出口)	630/608.46 °C
	2次側(入口/出口)	320/535 °C
流量	1次側	1.373×10 ⁷ kg/h
	2次側	1.376×10 ⁶ kg/h
伝熱管	本数	481 本
	材質	12Cr
	寸法	φ31.8×t1.2 mm
	コイル高さ	1210 mm
	伝熱管配列	円周配列
圧力損失	配列ピッチ(径/周)	60mm/61mm
	管内	1.05 kPa
	管外	0.1 kPa

図 2.2-7 PHX 概念図

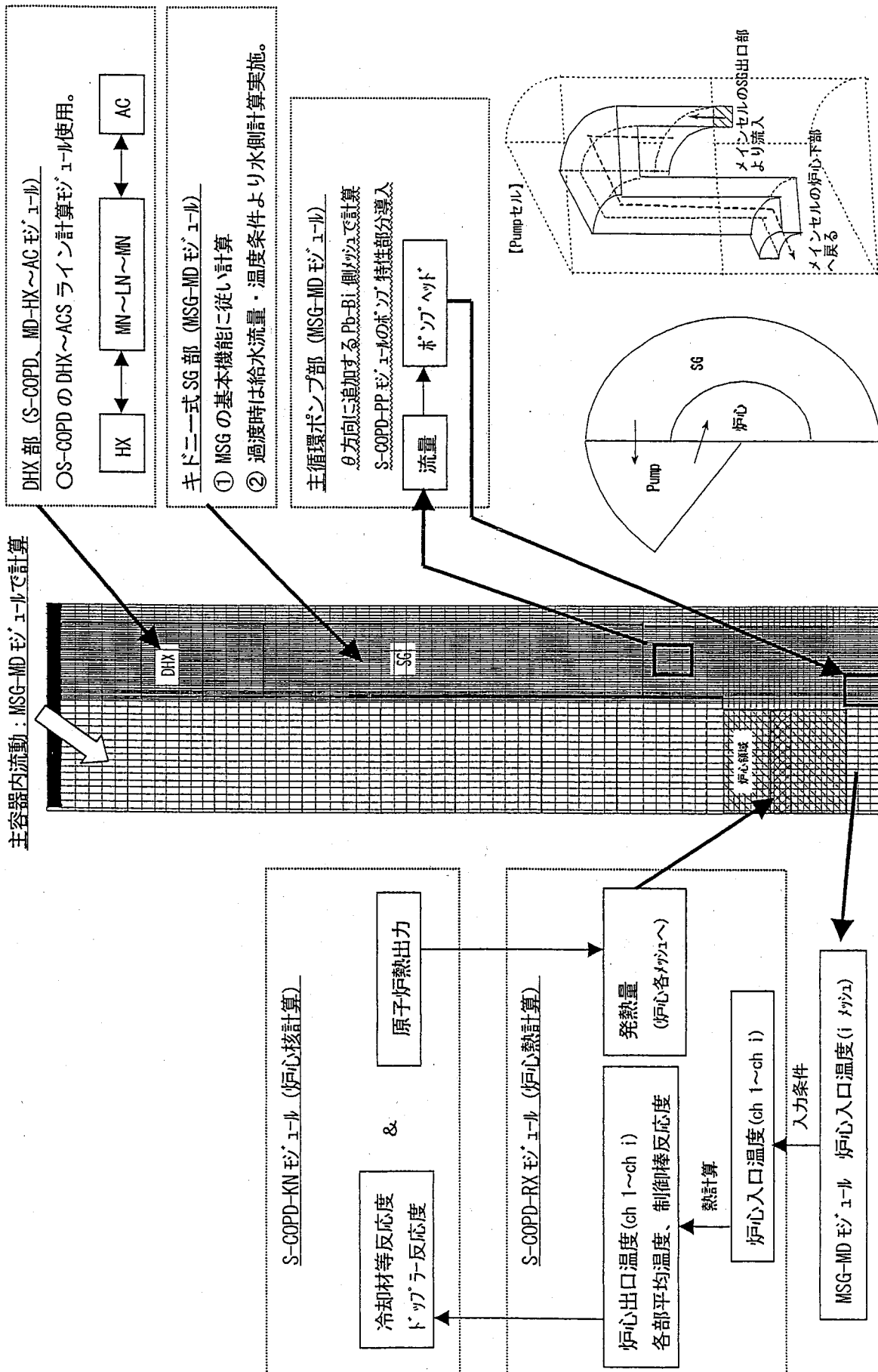


図 2.3-1 解析モデルの概要

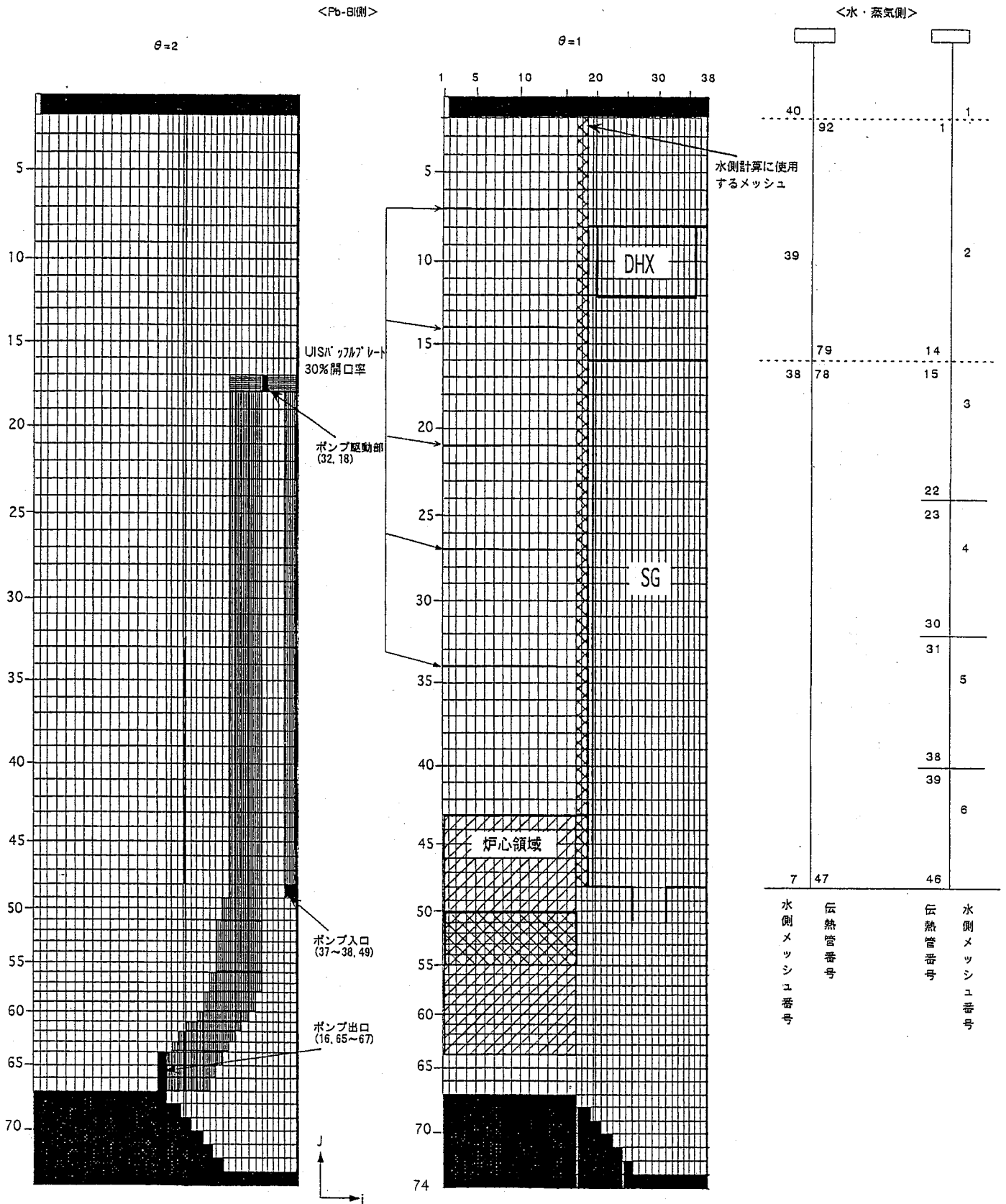


図 2.3-2 メッシュ分割図

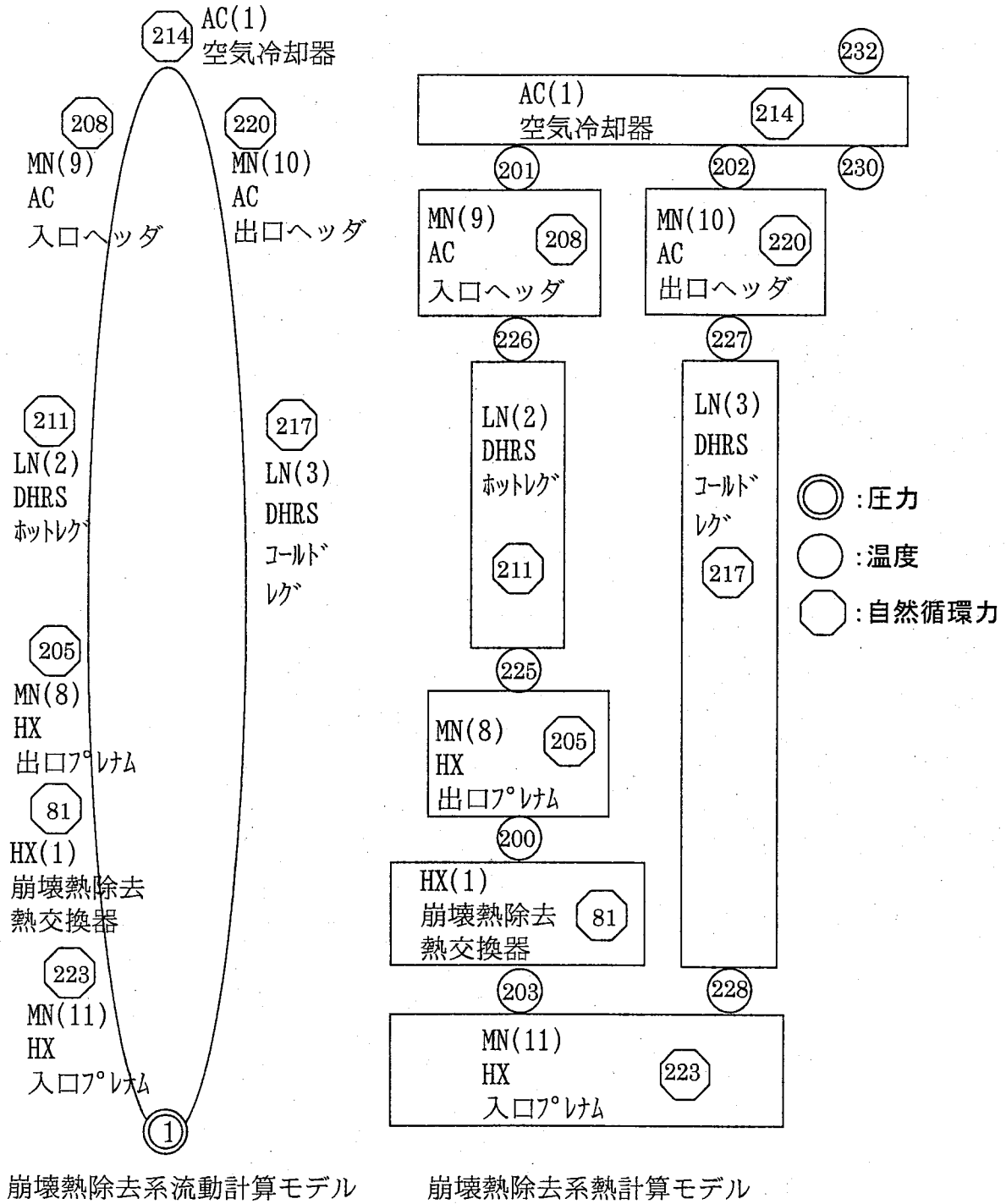
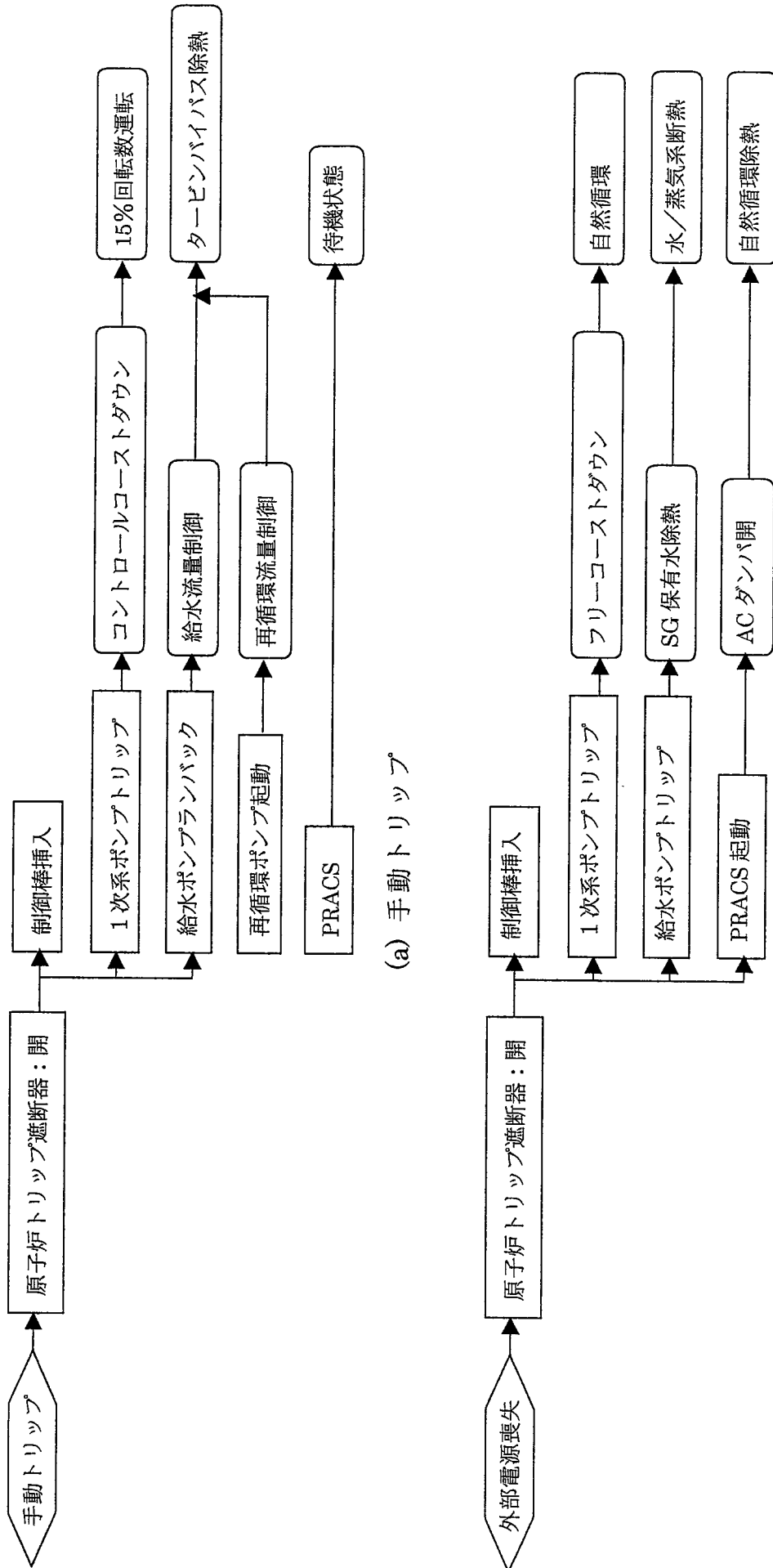


図 2.3-3 崩壊熱除去系計算モデル



(a) 手動トリップ

(b) 外部電源喪失

図 2.4-1 過渡変化事象推移概要(手動トリップ、外部電源喪失)

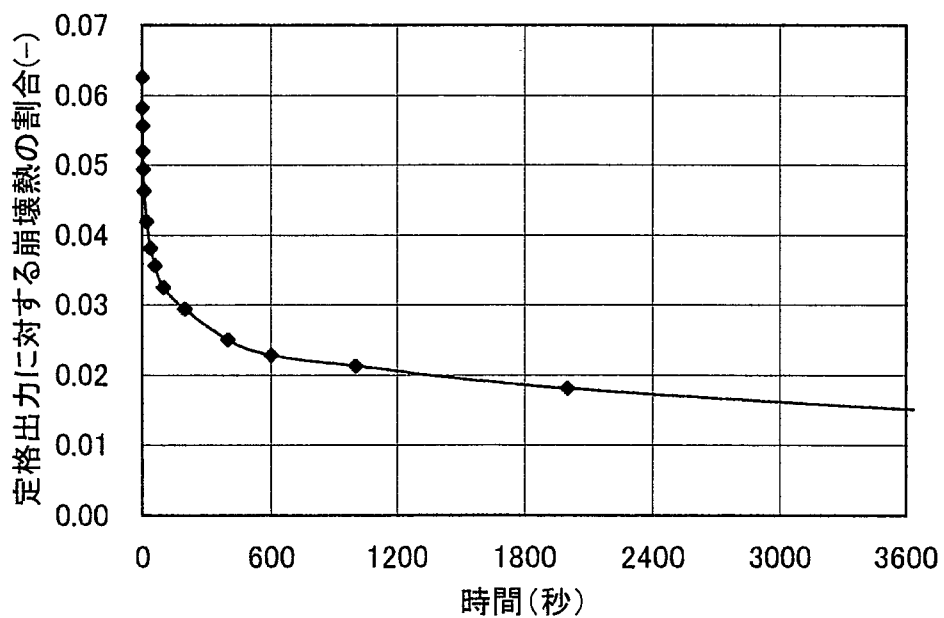
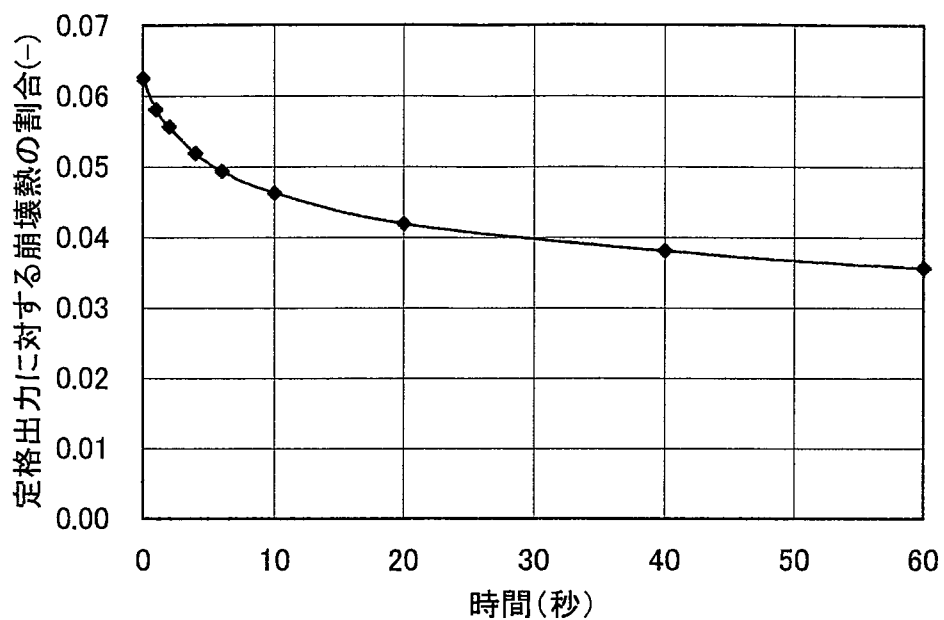


図 2.4-2 炉心崩壊熱変化条件

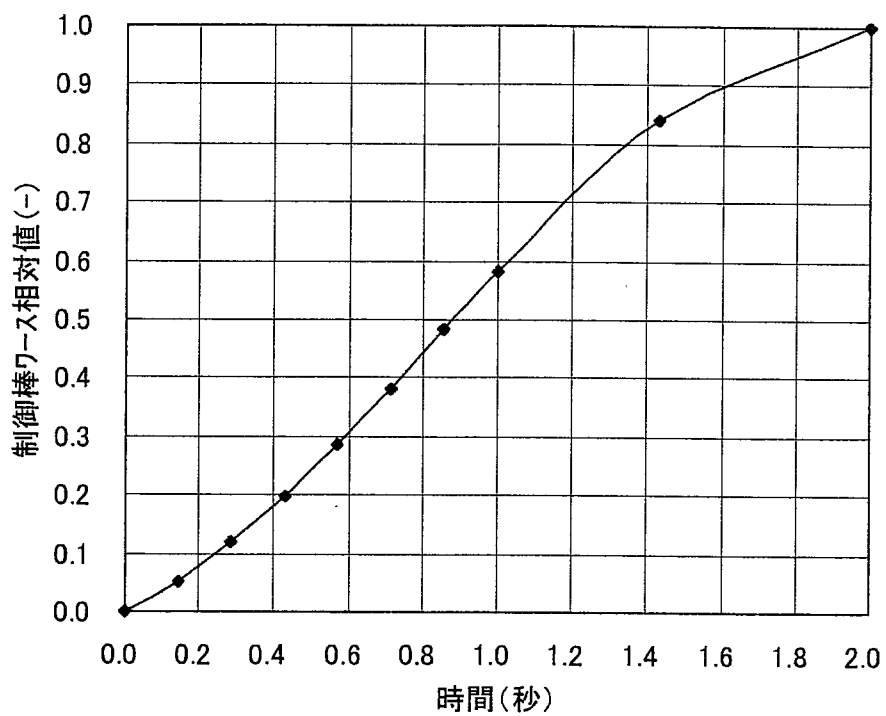


図 2.4-3 スクラム反応度変化条件

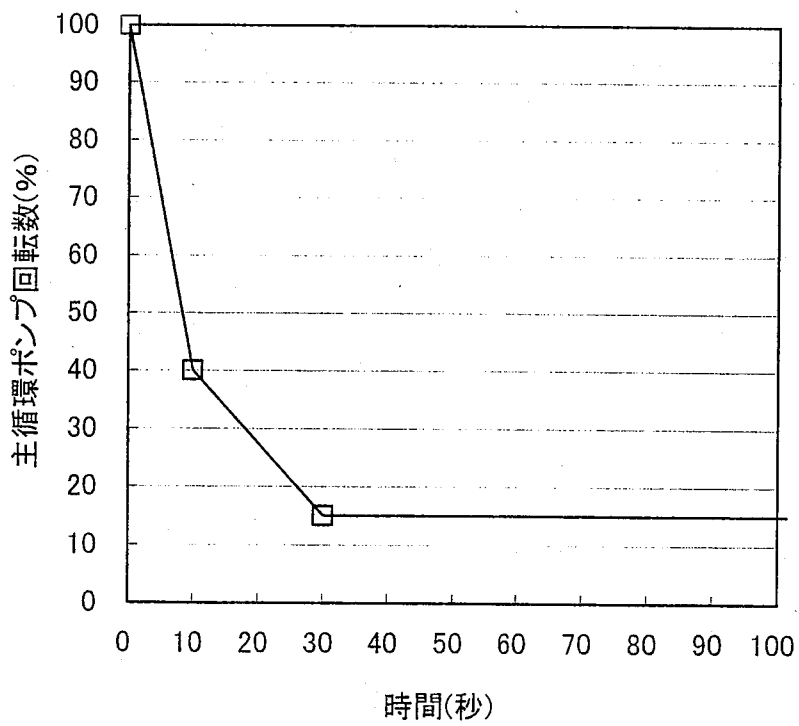
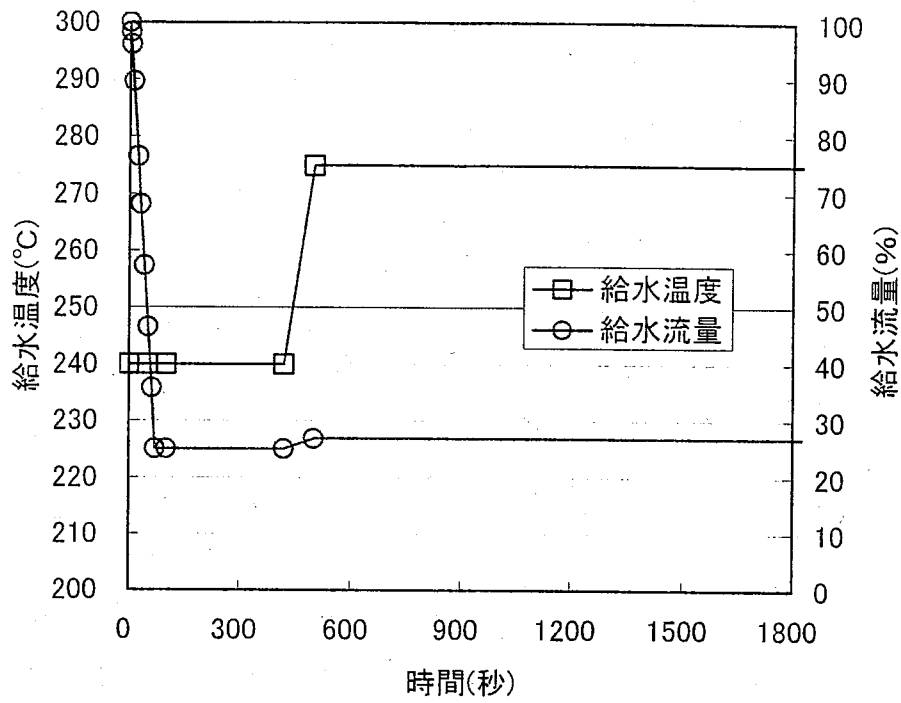


図 2.4-4 手動トリップ条件

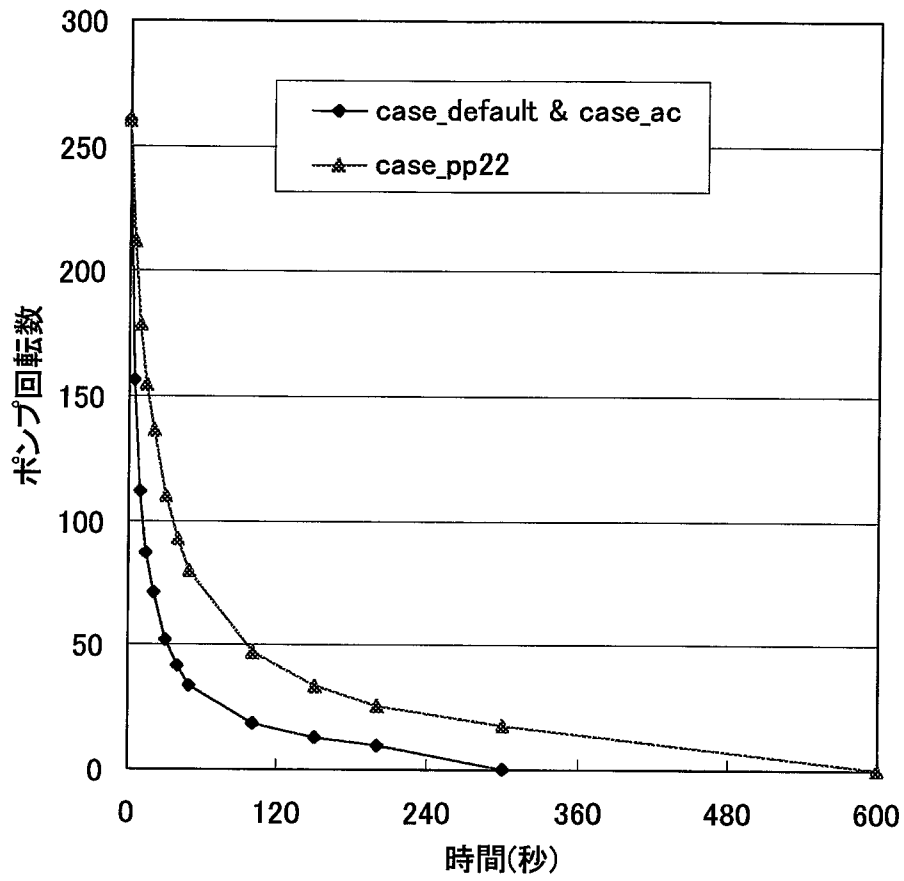


図2.4-5 外部電源喪失時ポンプ回転数変化条件

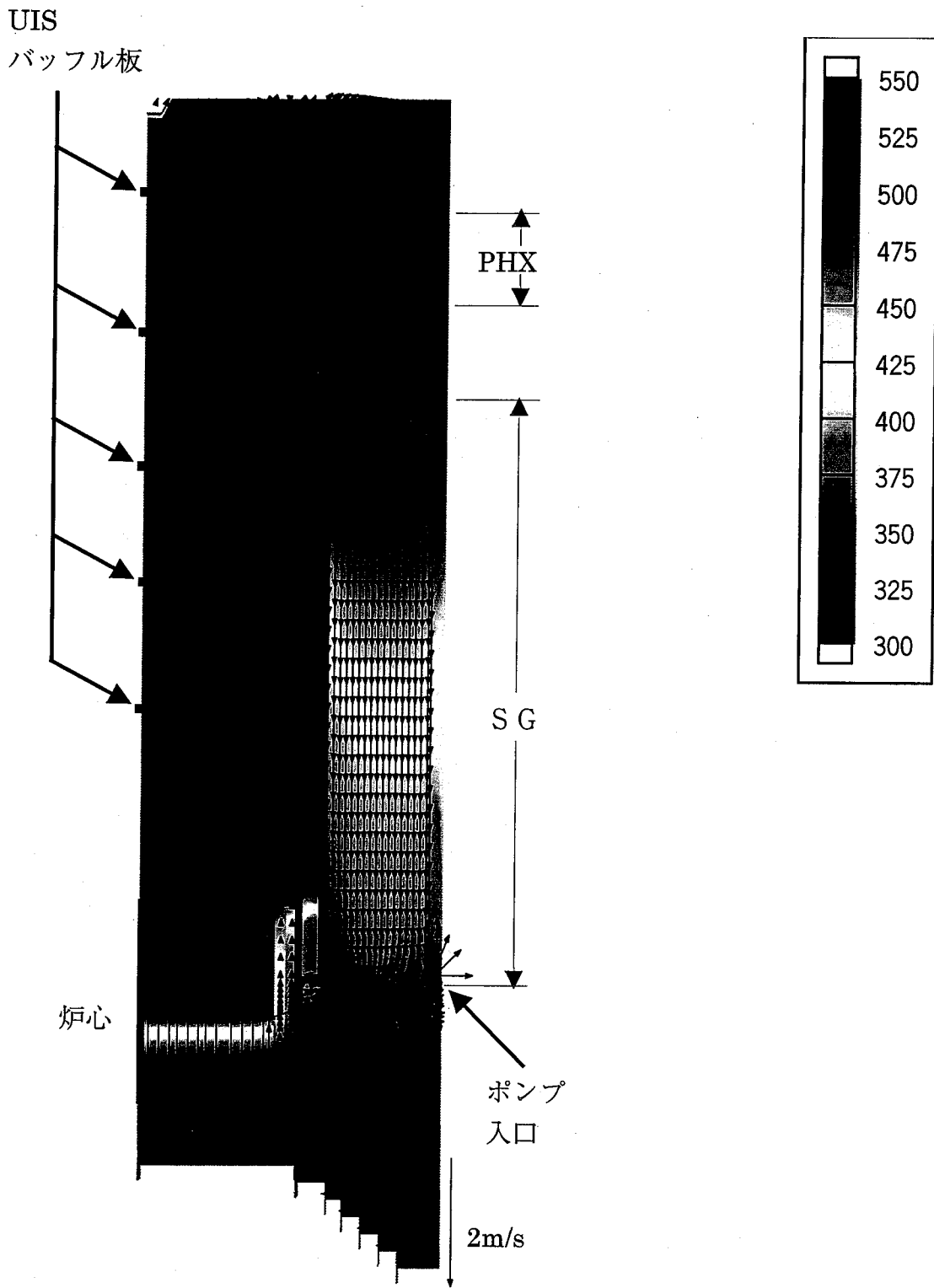


図 2.5.1-1 定常時の流況及び温度分布

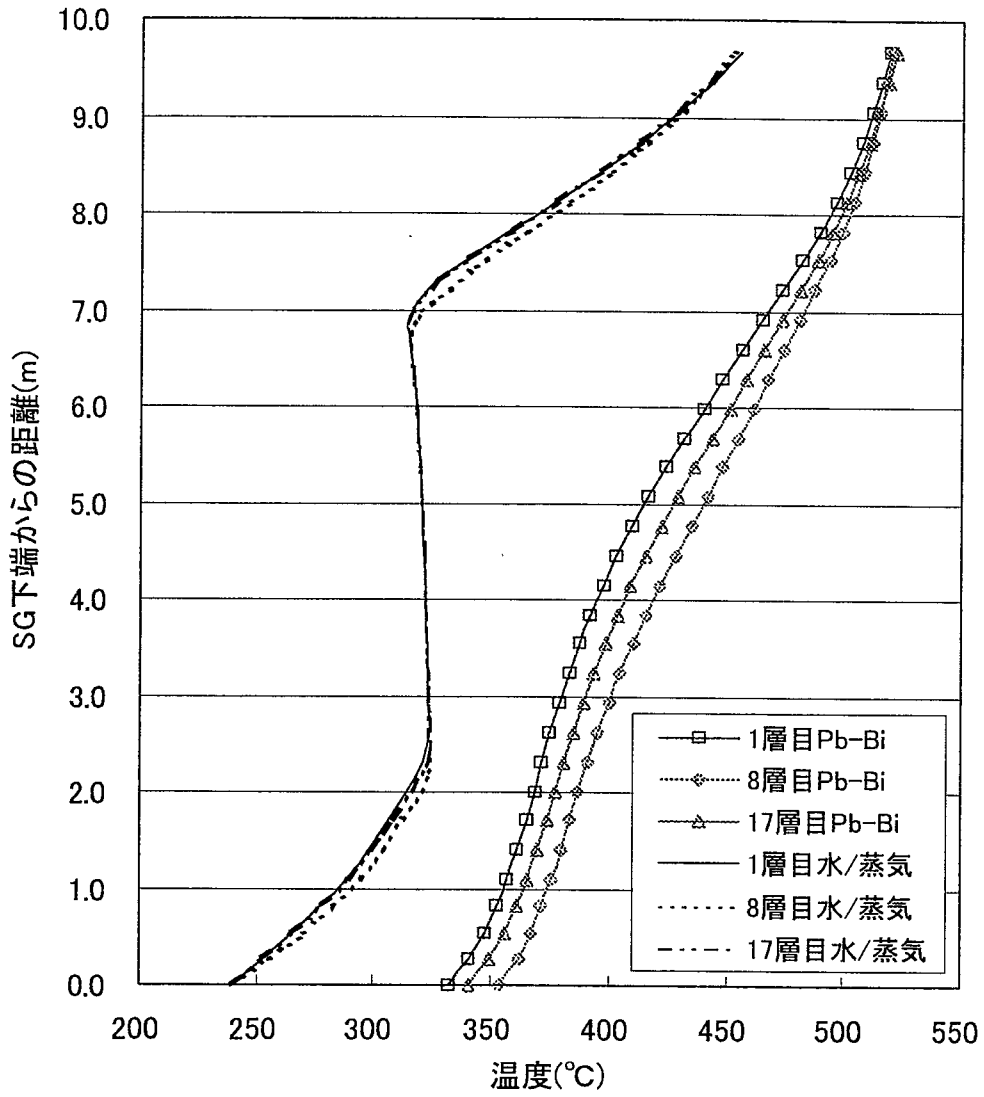


図2.5.1-2 定常時のSG内部軸方向温度分布

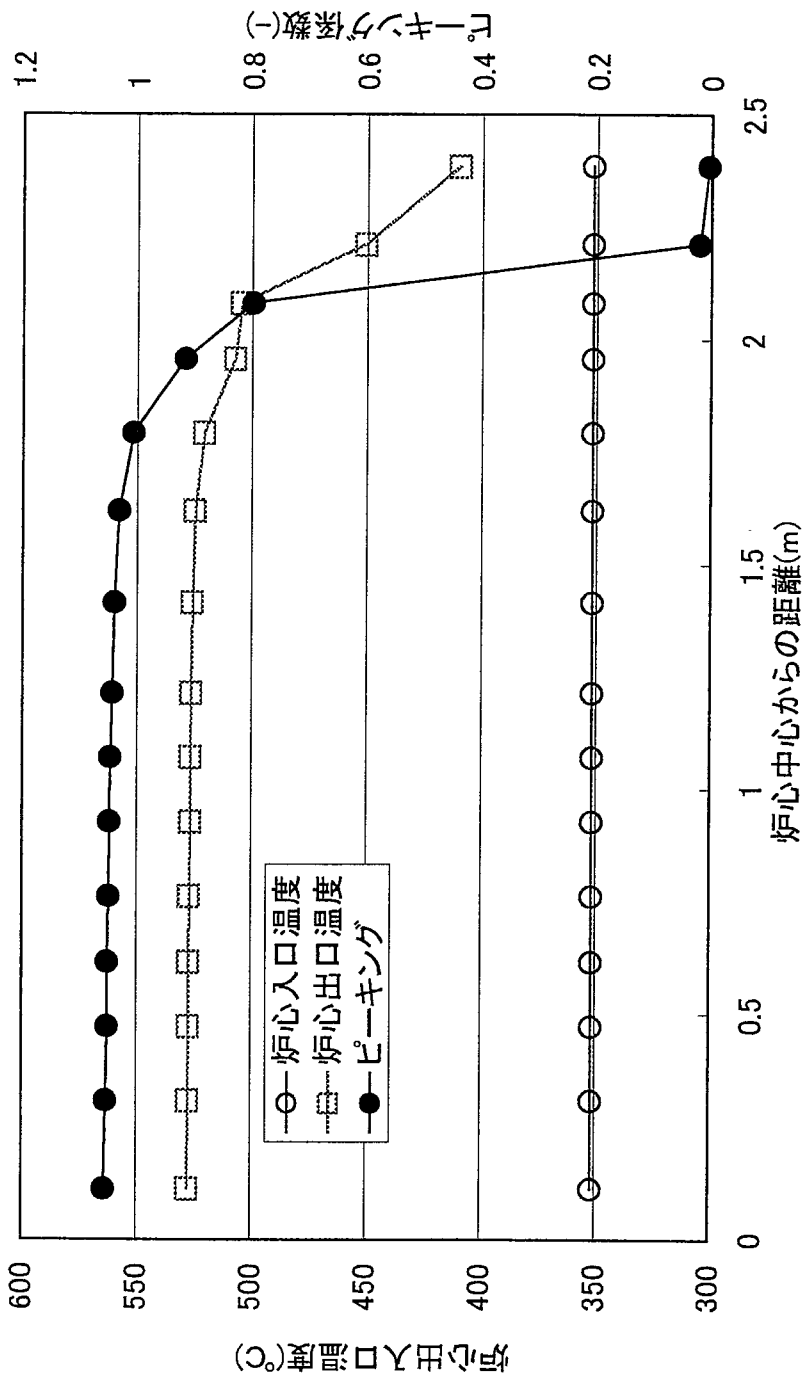


図2.5.1-3 ピーキング係数及び定常時の炉心出入口温度分布

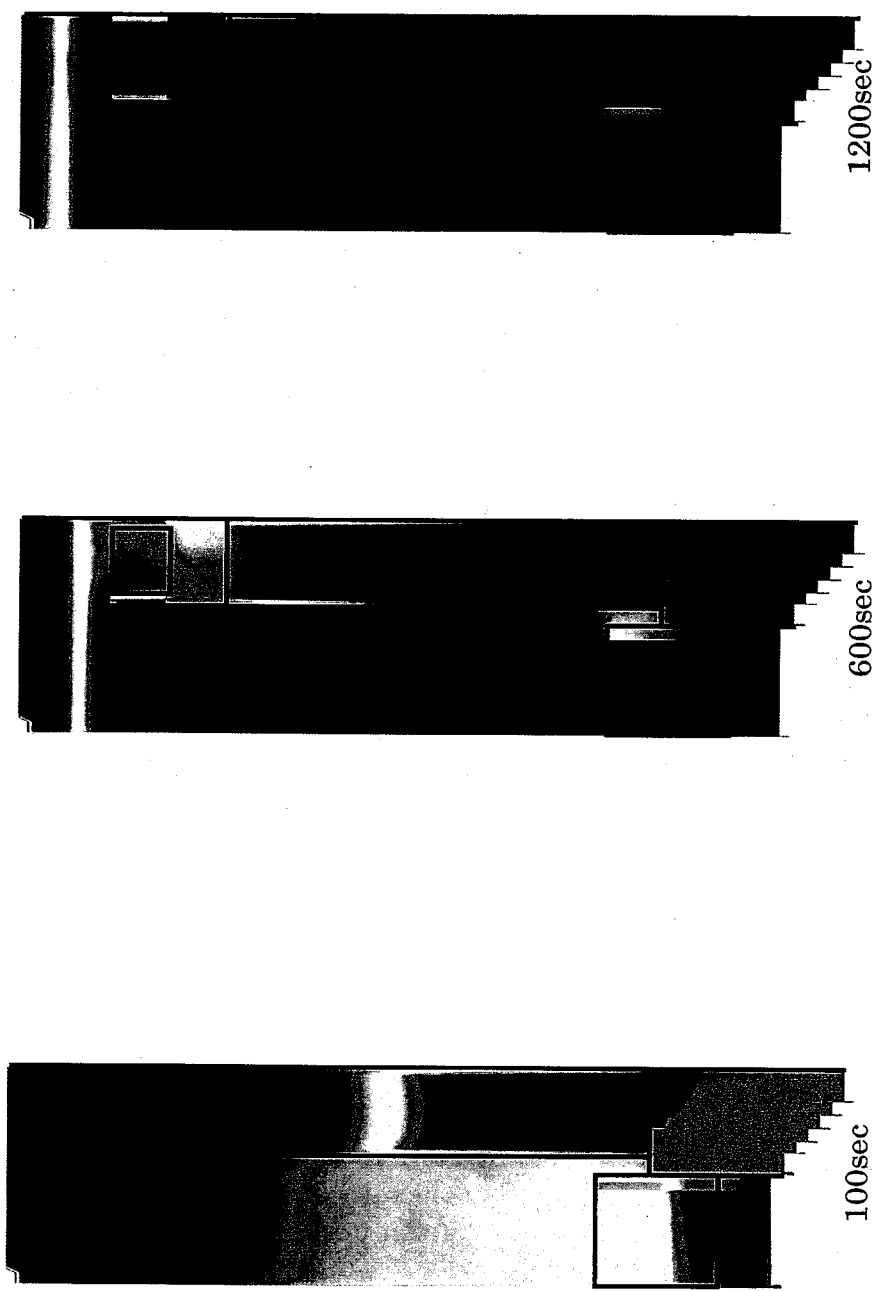
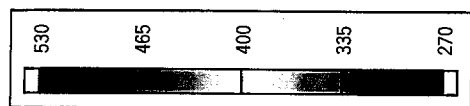


図2.5.2-1 手動トリップ時の温度分布 (1/2)

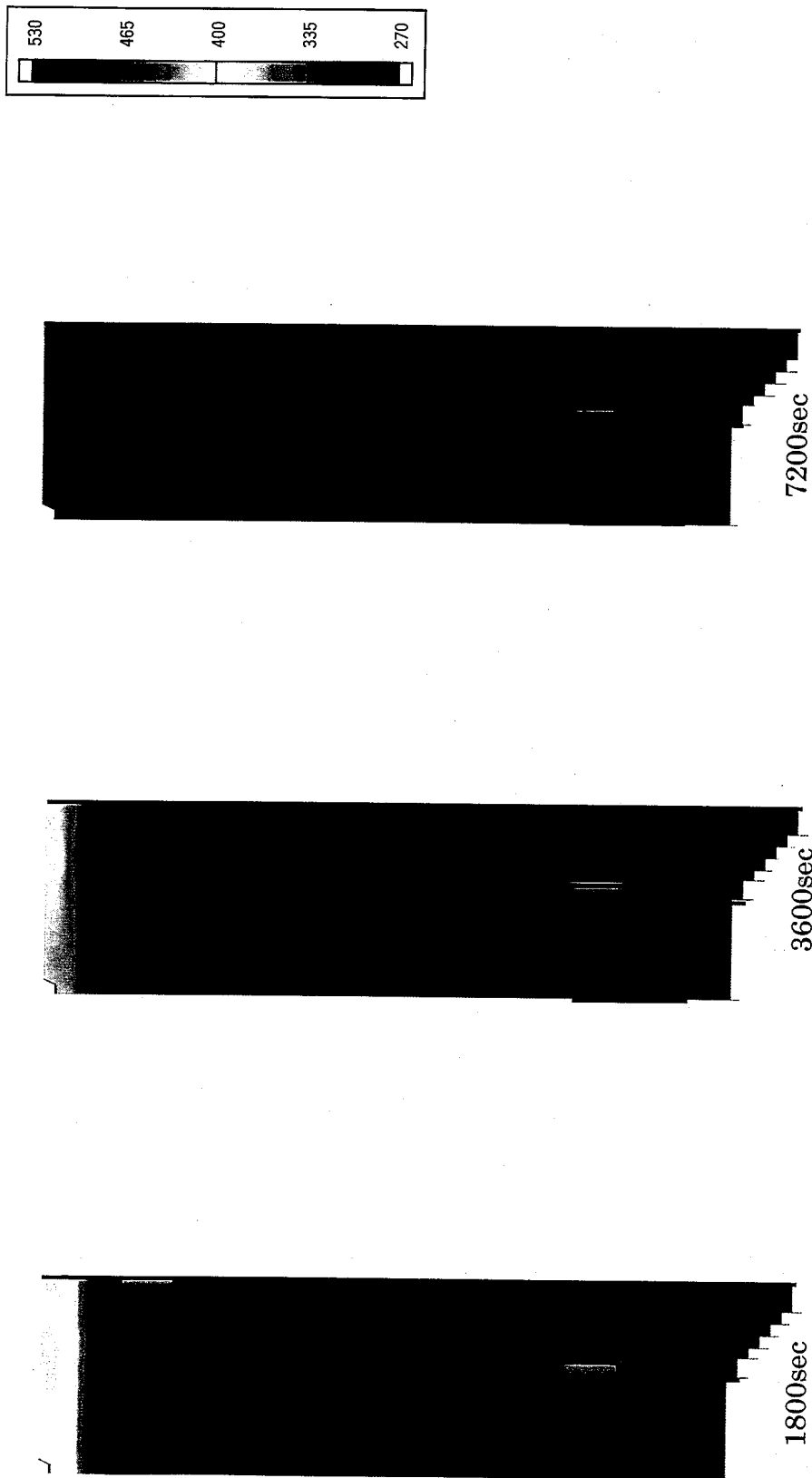


図2.5.2-1 手動トリップ時の温度分布 (2/2)

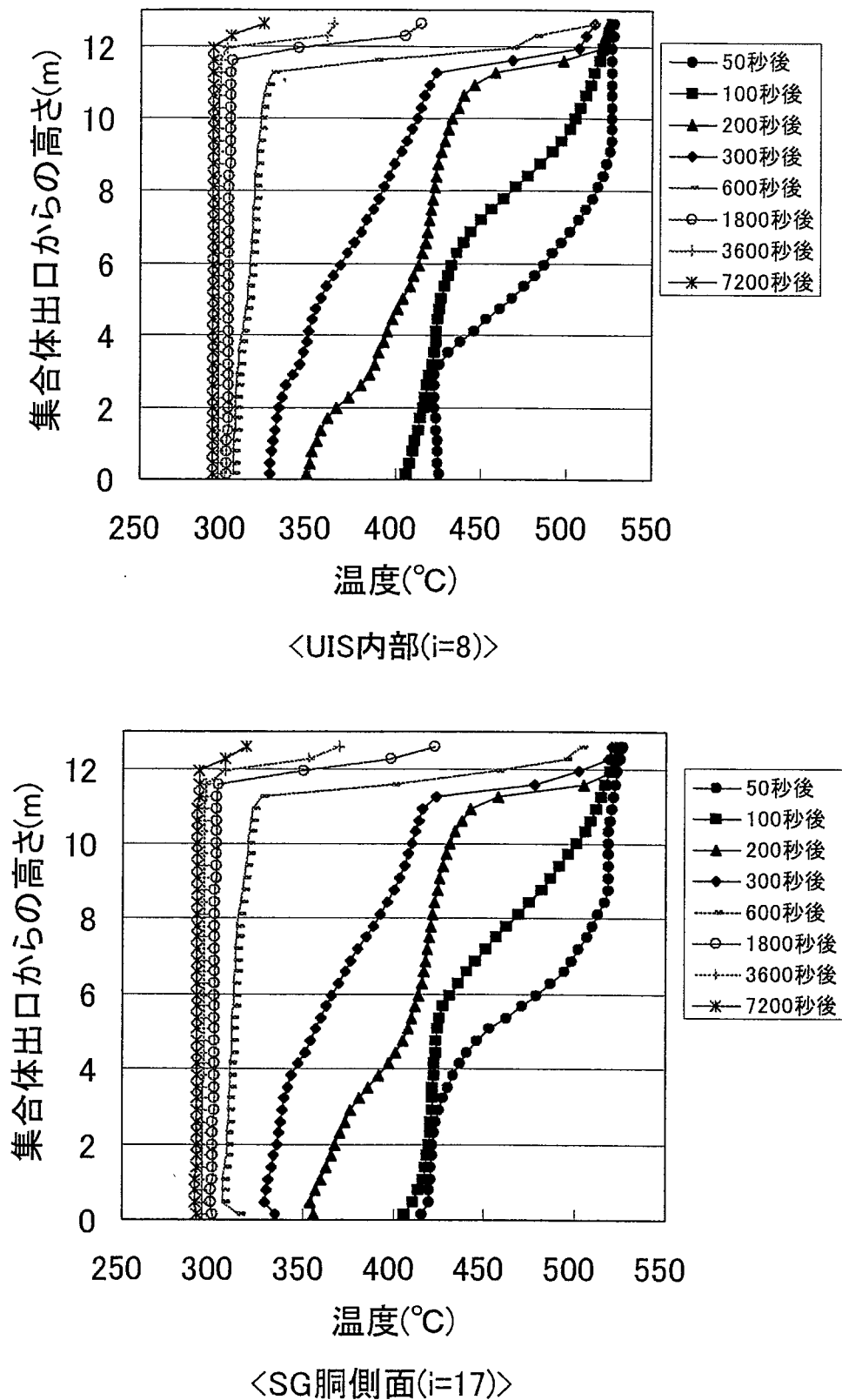


図 2.5.2-2 手動トリップ時の炉上部プレナム軸方向温度分布

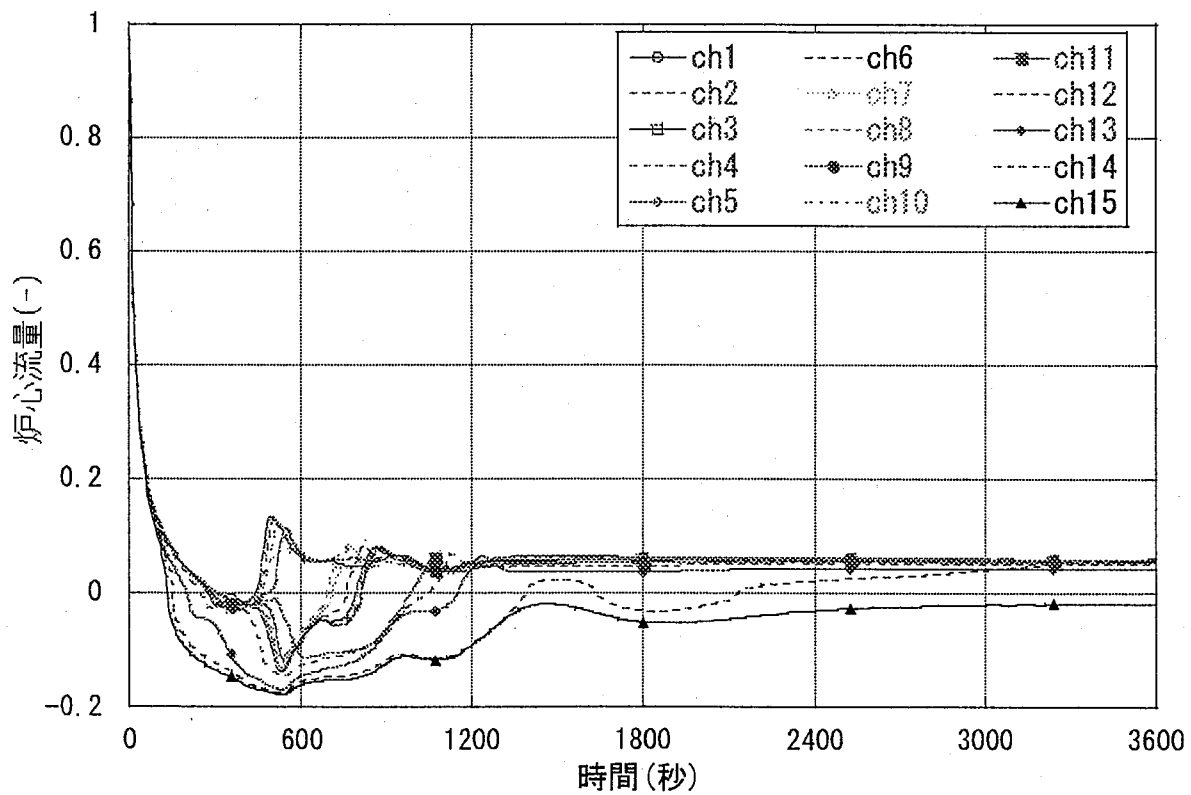
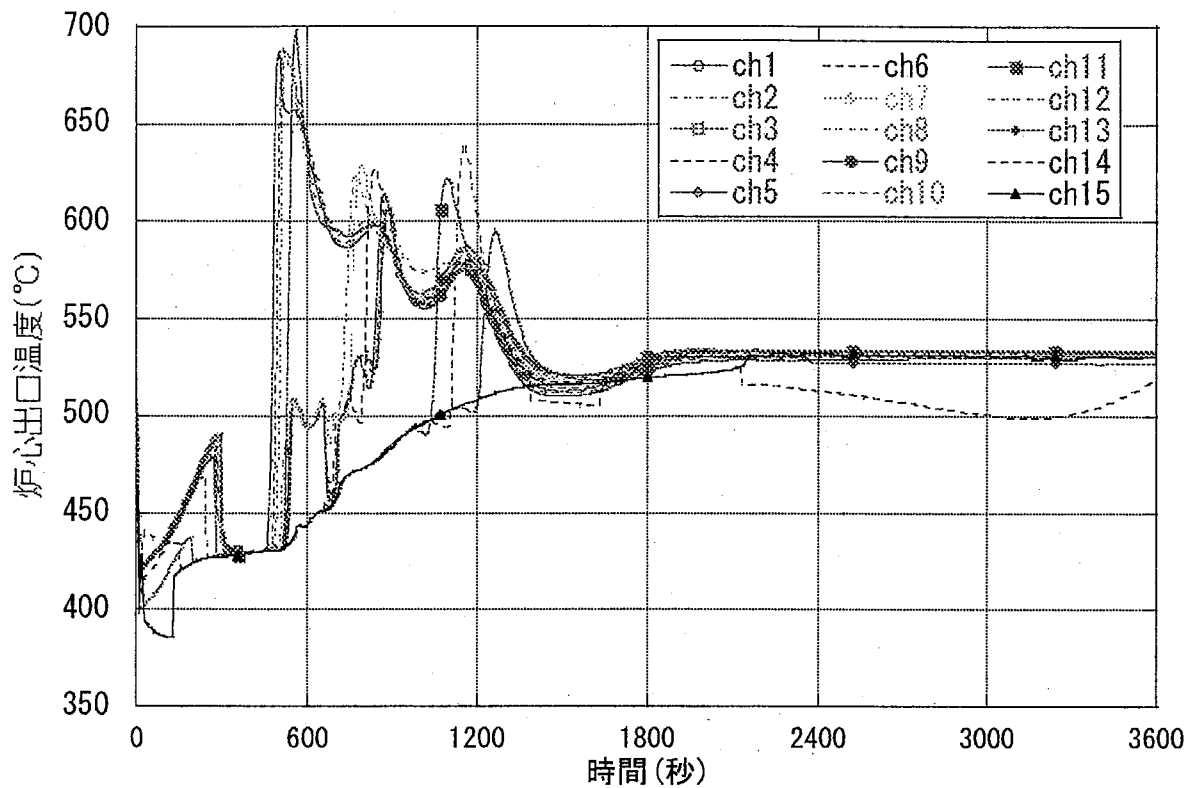


图 2.5.3-1 炉心出入口温度(上图)及び炉心流量(下图) : case_nominal

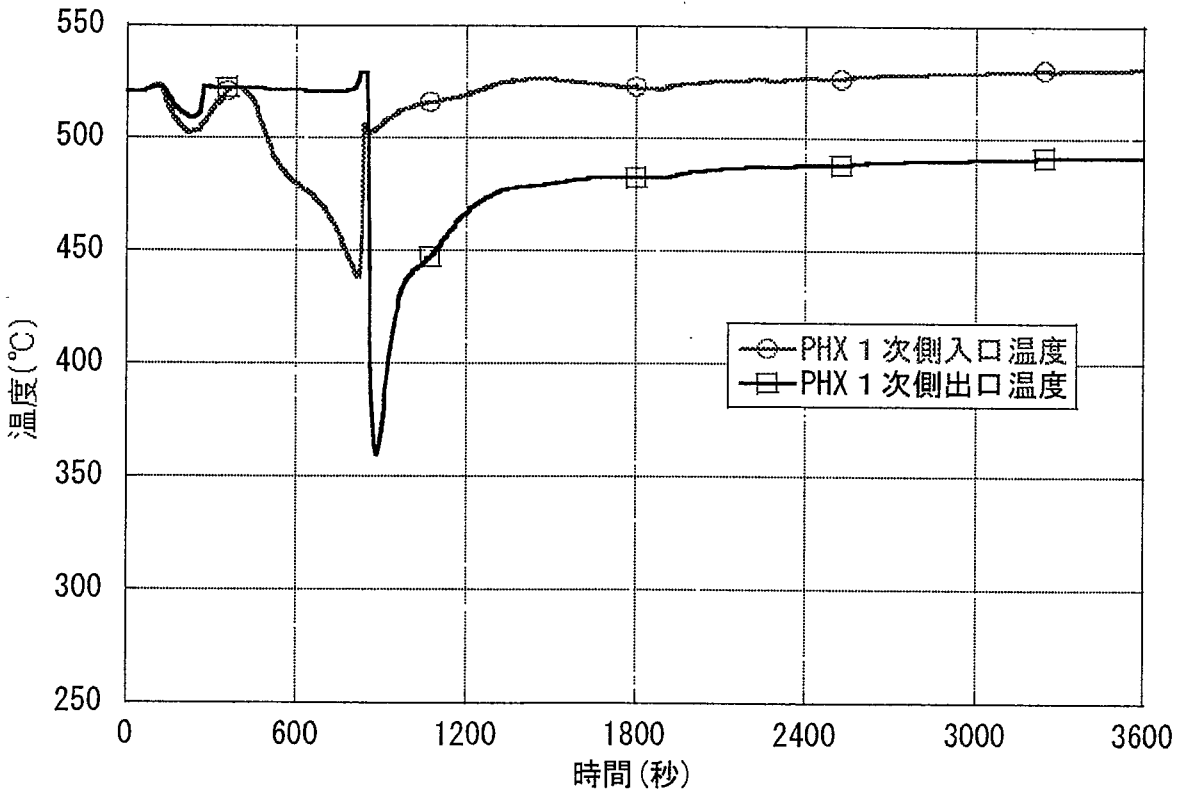
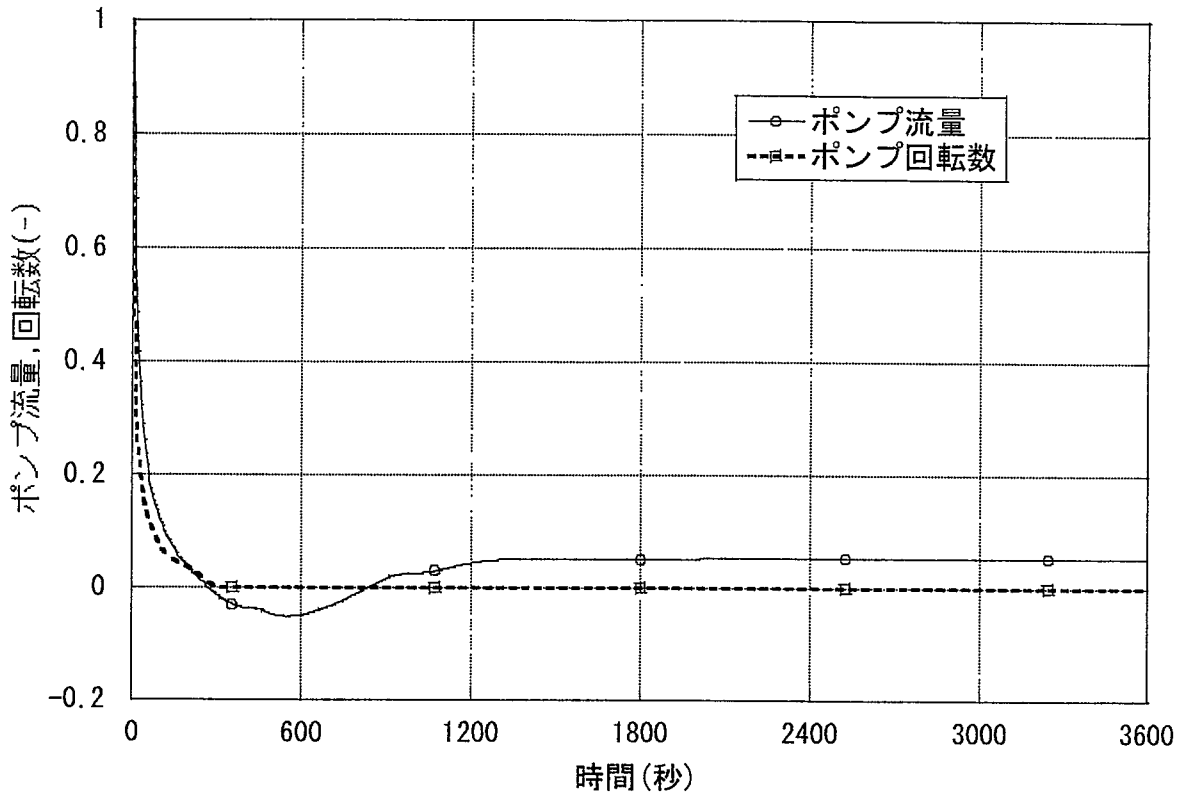


図 2.5.3-2 ポンプ流量、回転数(上図)及び PHX1 次側出入口温度 (下図) : case_nominal

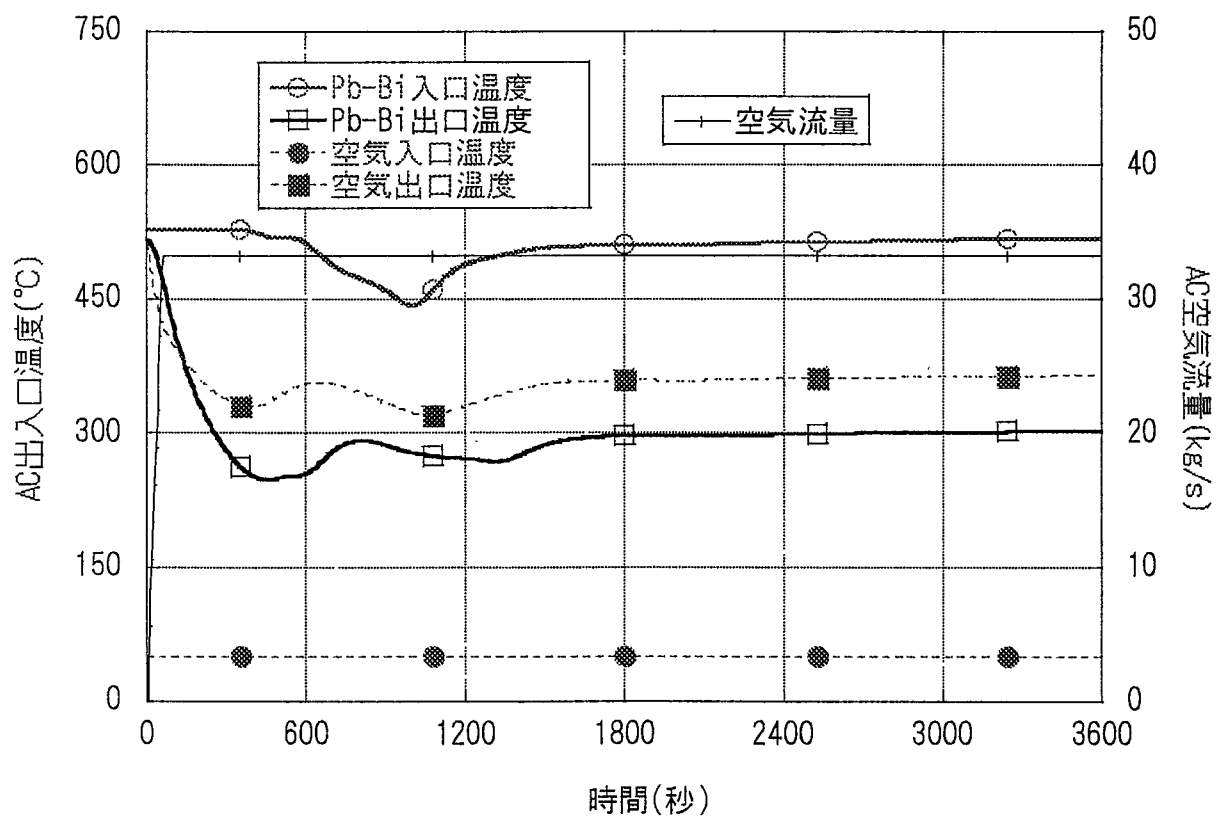
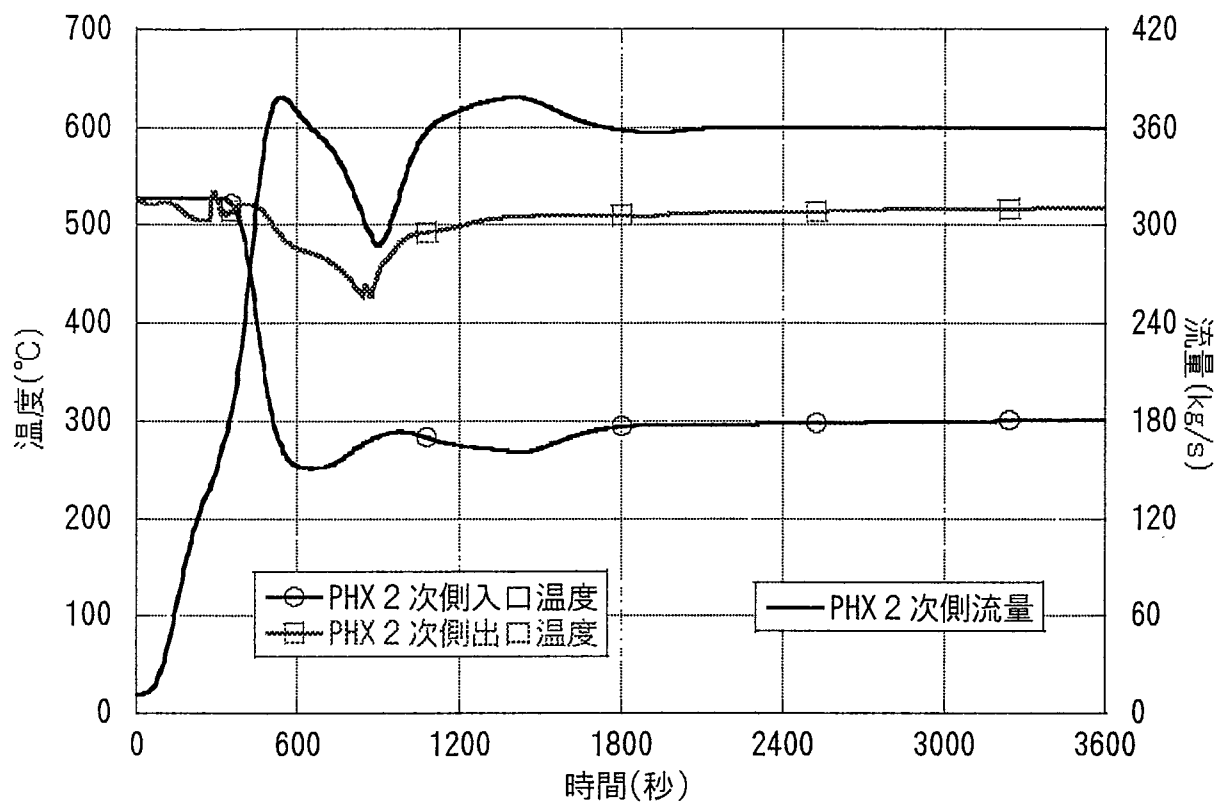


図 2.5.3-3 PHX 2 次側流量、温度(上図)及び AC 出入口温度、空気流量(下図) : case_nominal

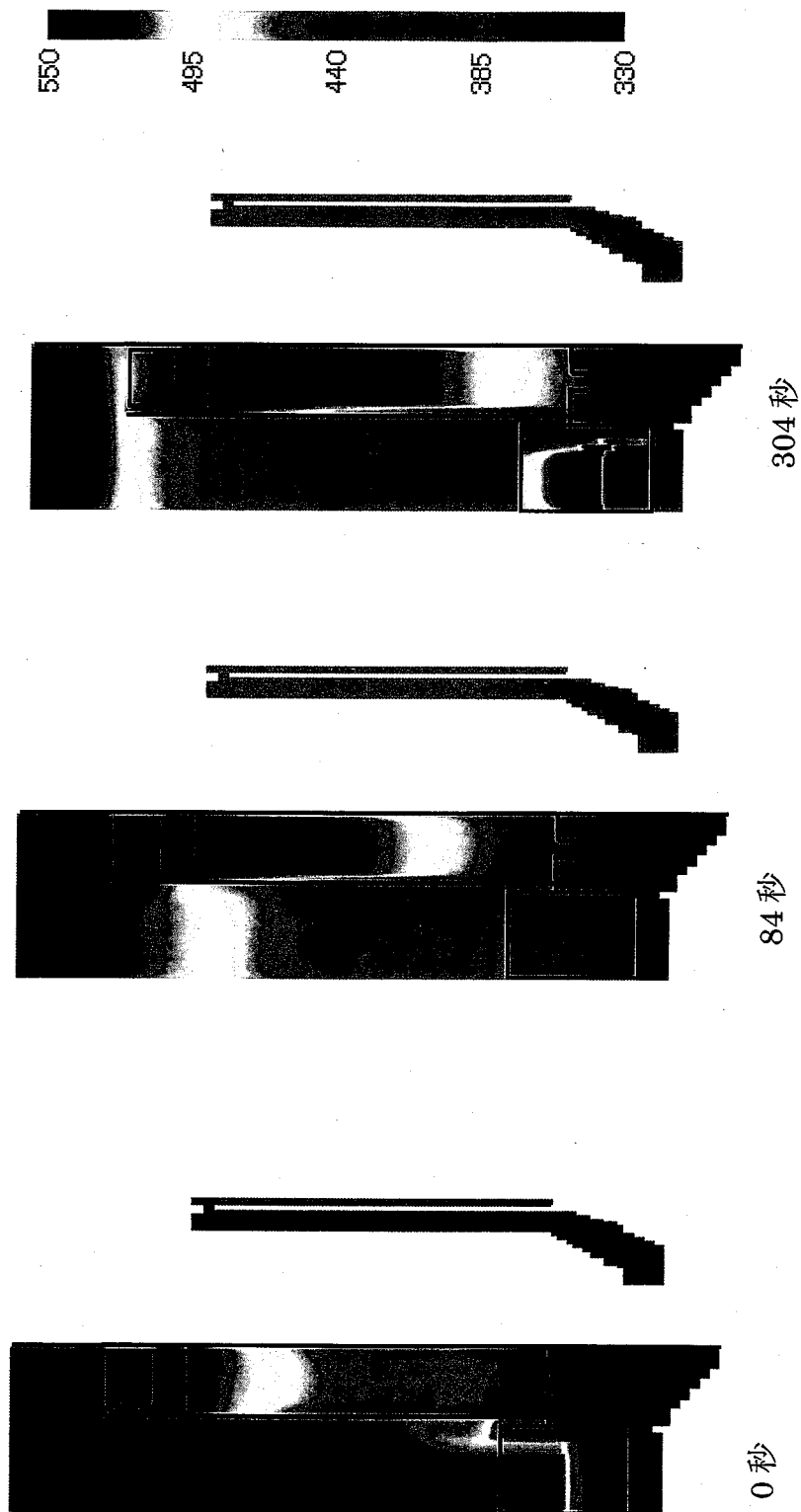


図 2.5.3-4 外部電源喪失(解析ケース case_nominal)時の炉容器内温度分布 (1/2)

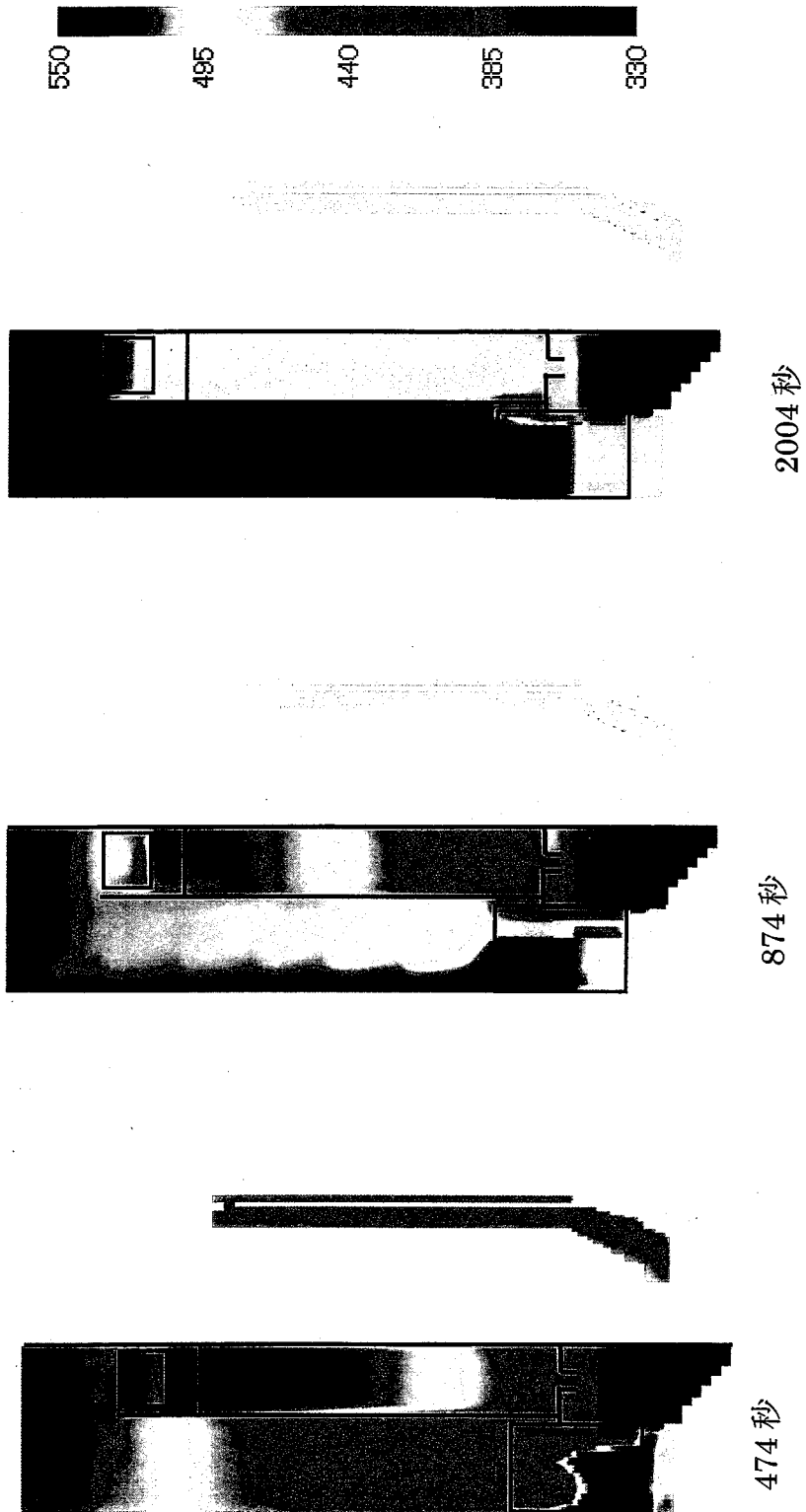


図 2.5.3-4 外部電源喪失(解析ケース case_nominal)時の炉容器内温度分布(2/2)

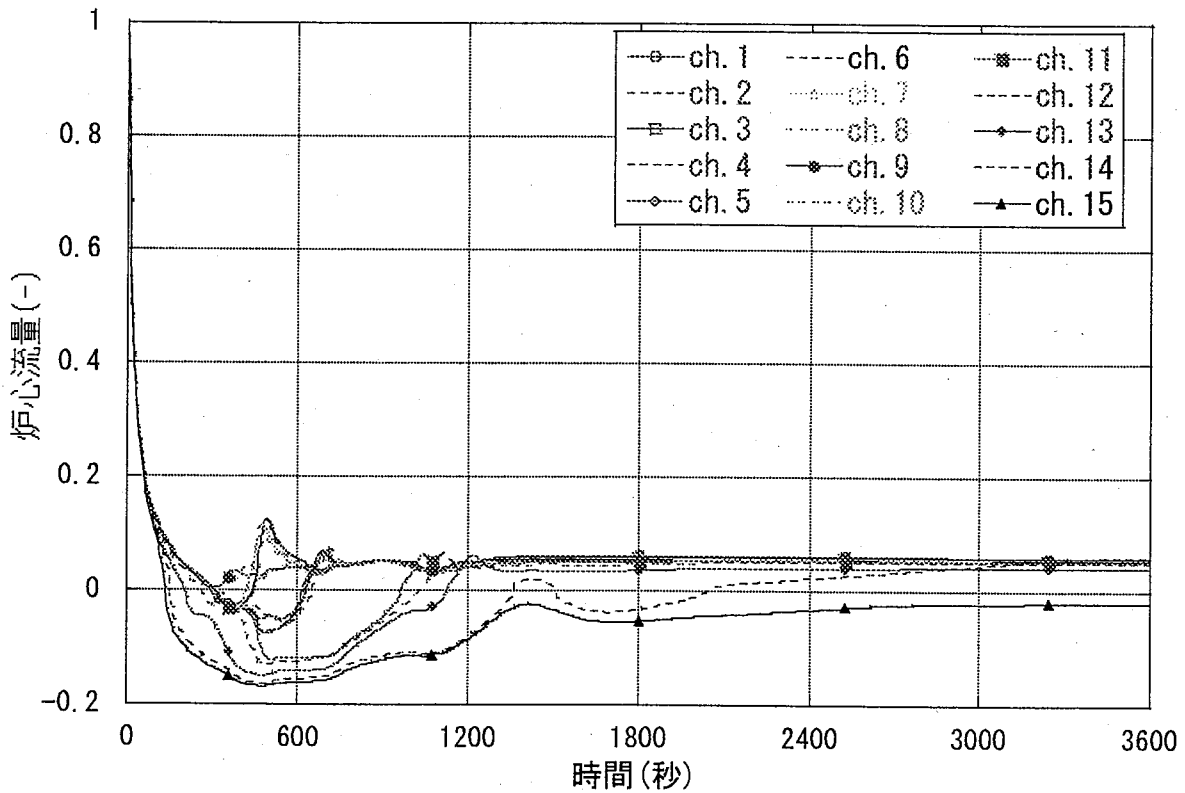
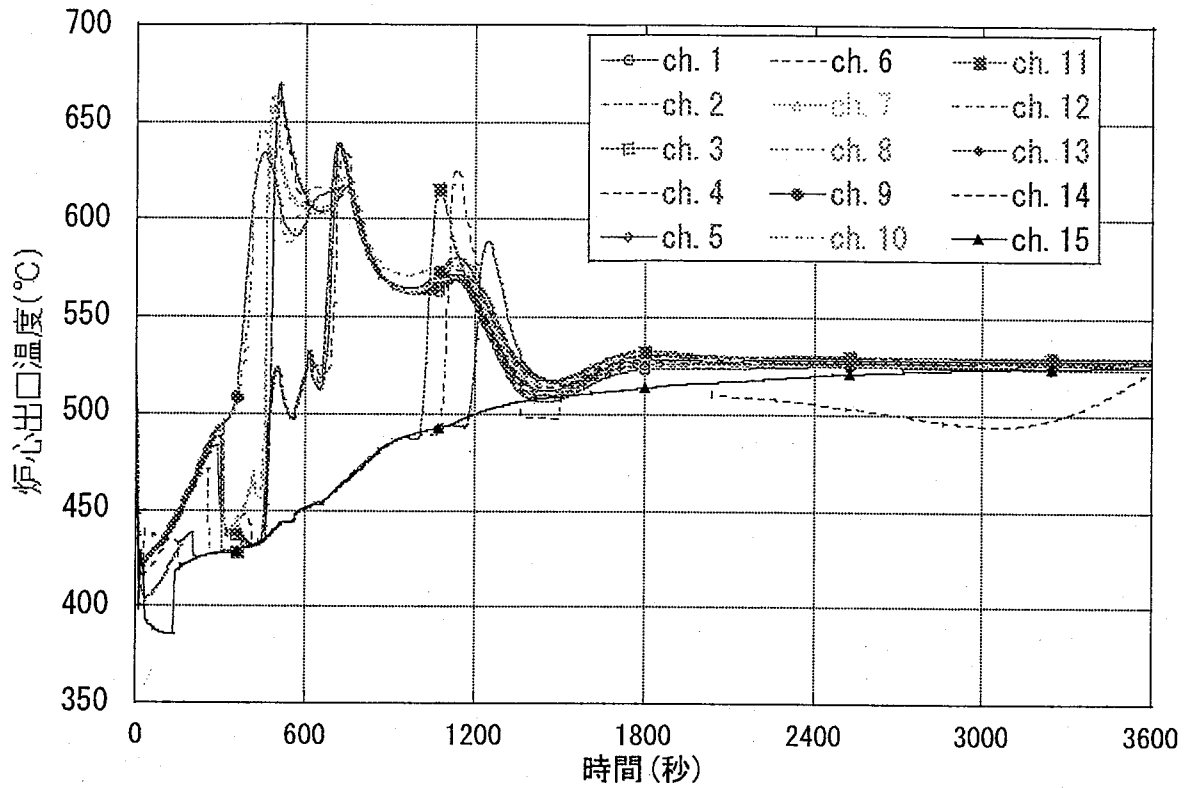


图 2.5.3-5 炉心出入口温度(上图)及び炉心流量(下图) : case_ac

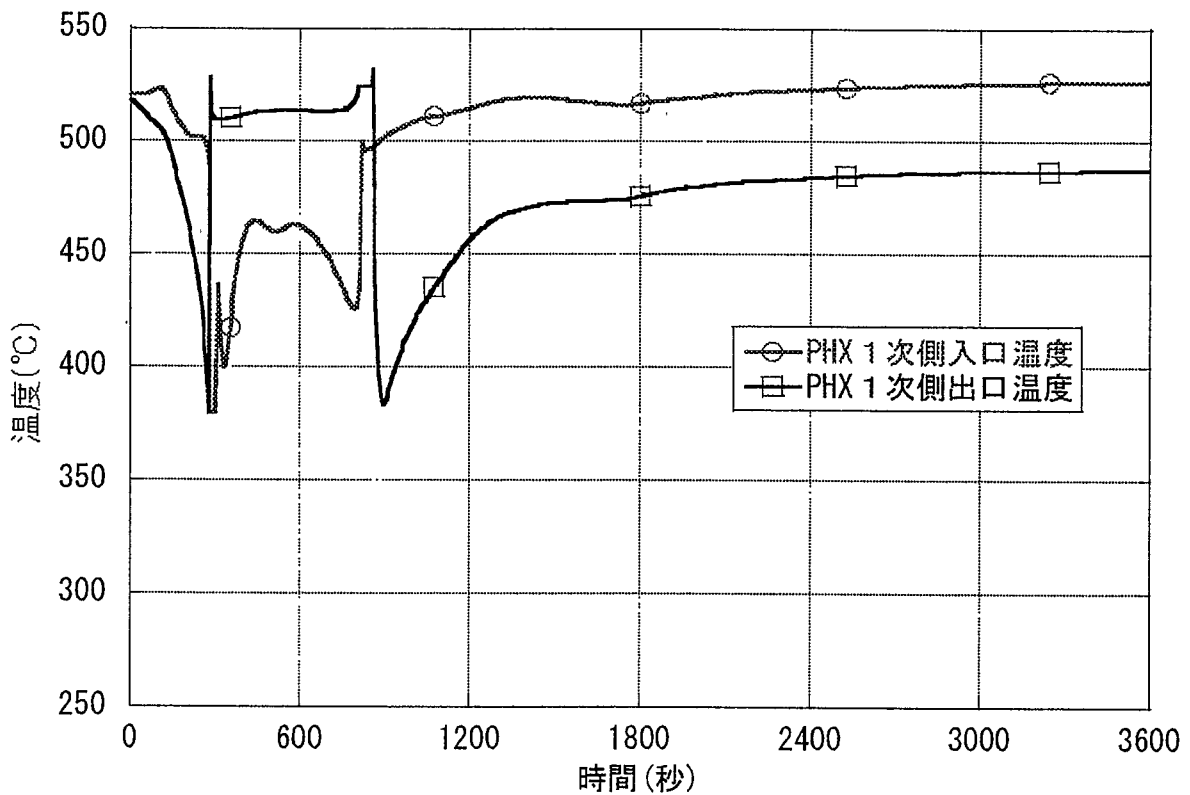
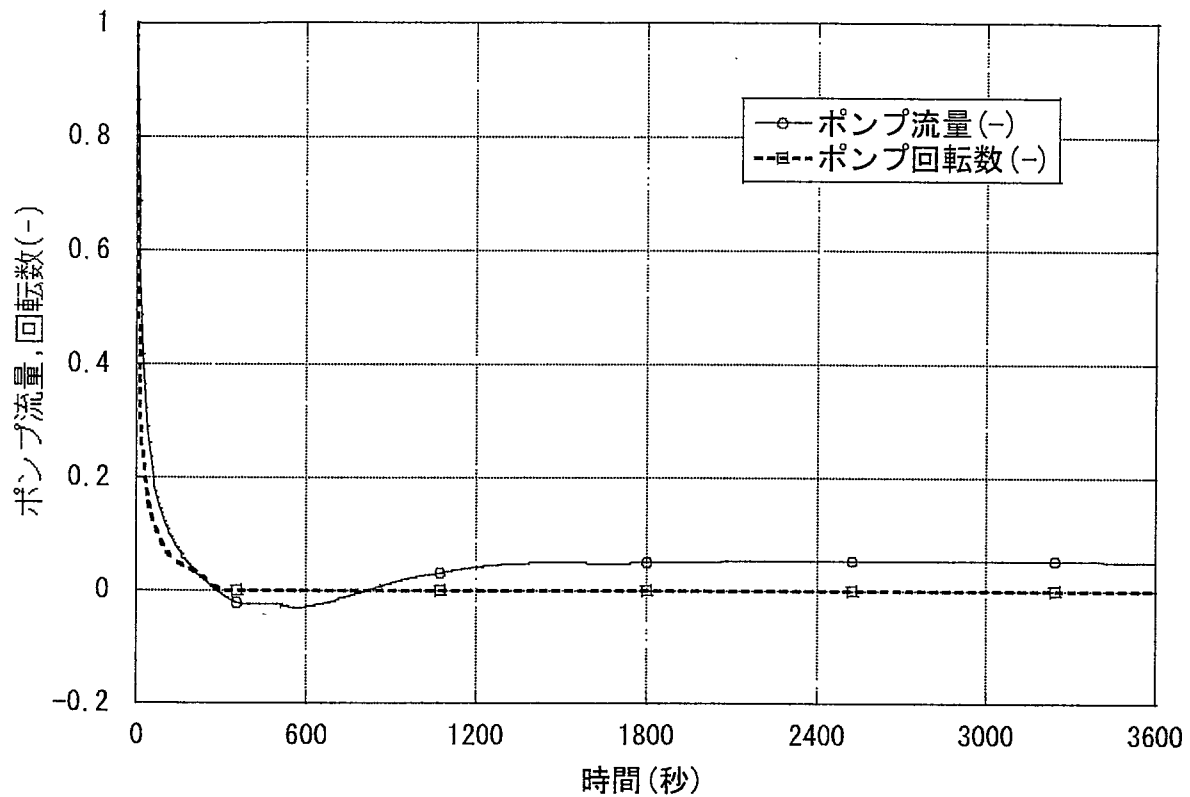


図 2.5.3-6 ポンプ流量、回転数(上図)及び PHX1 次側出入口温度 (下図) : case_ac

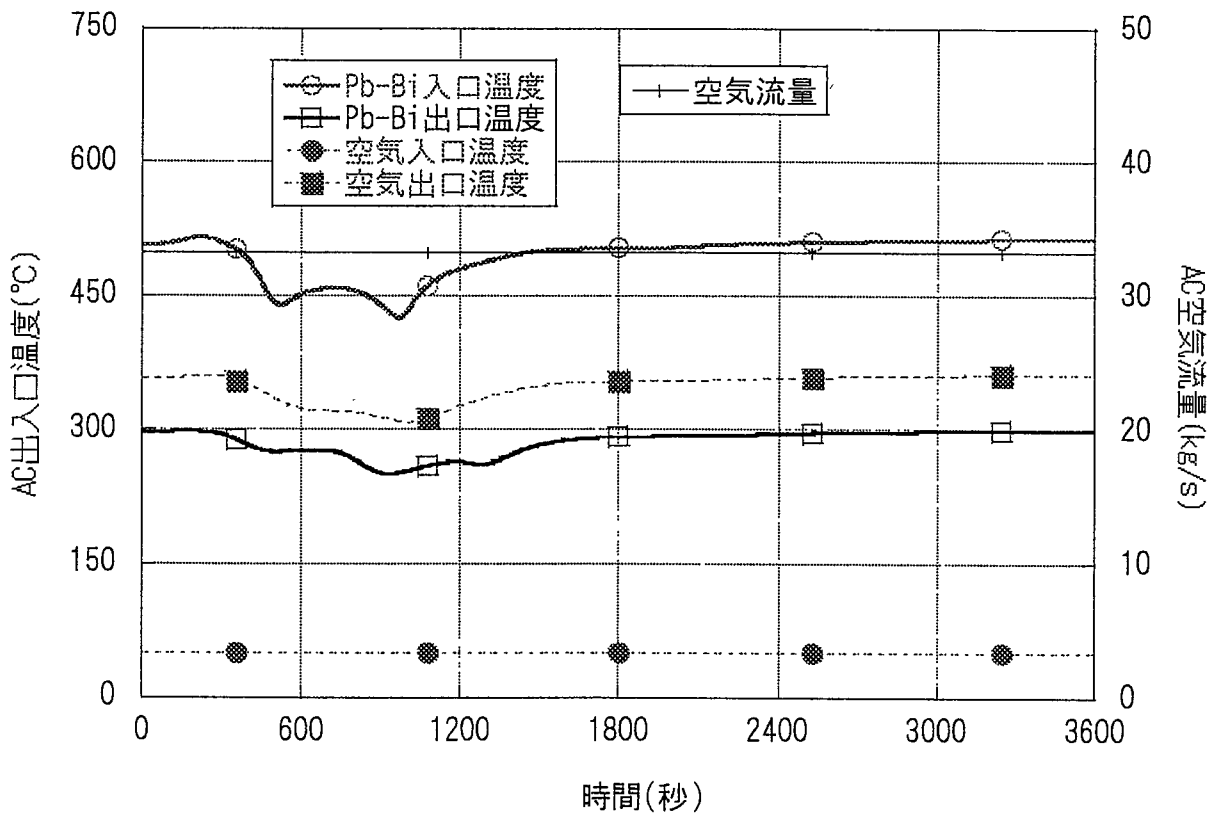
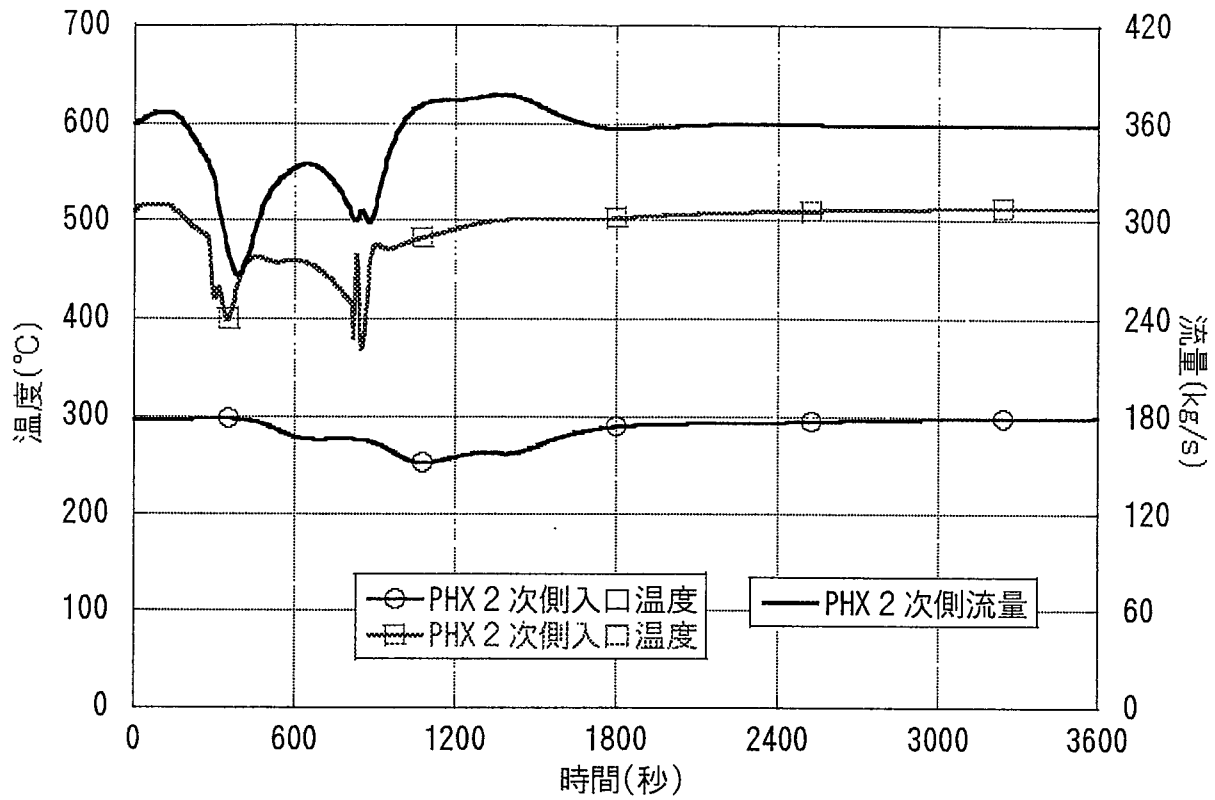


図 2.5.3-7 PHX 2次側流量、温度(上図)及びAC 出入口温度、空気流量(下図) : case_ac

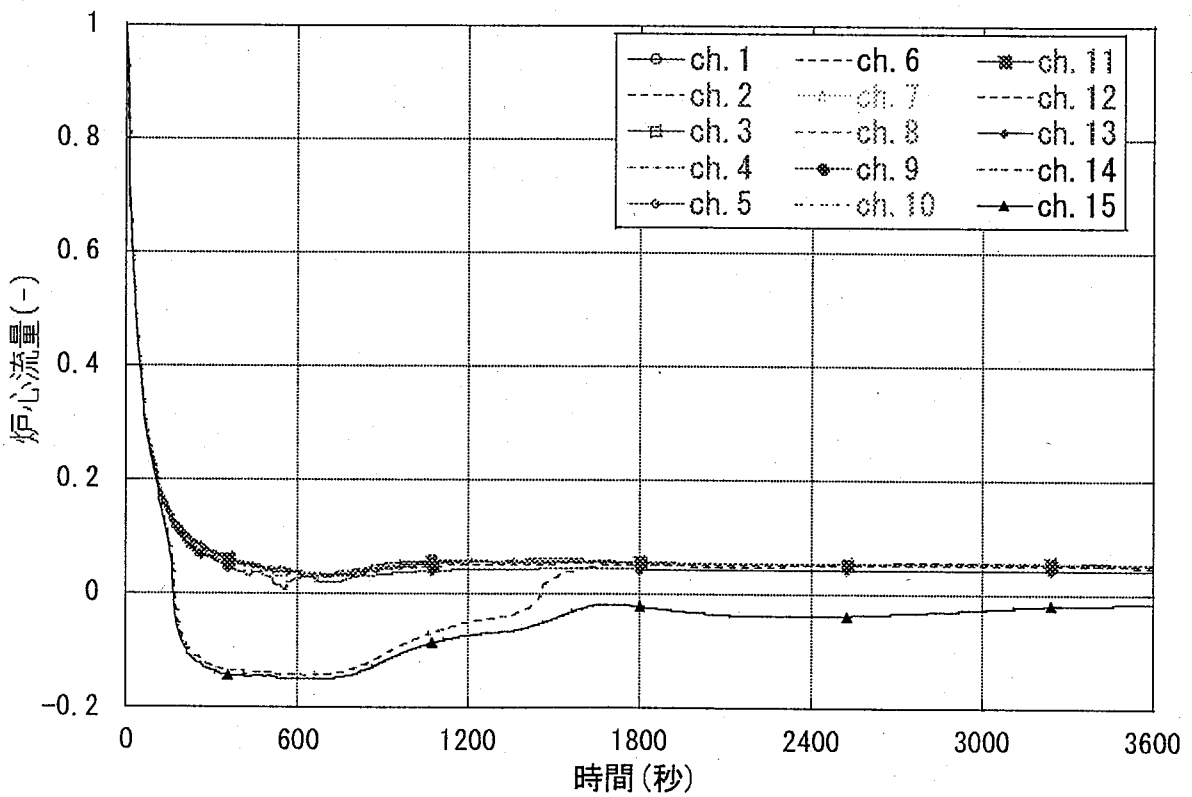
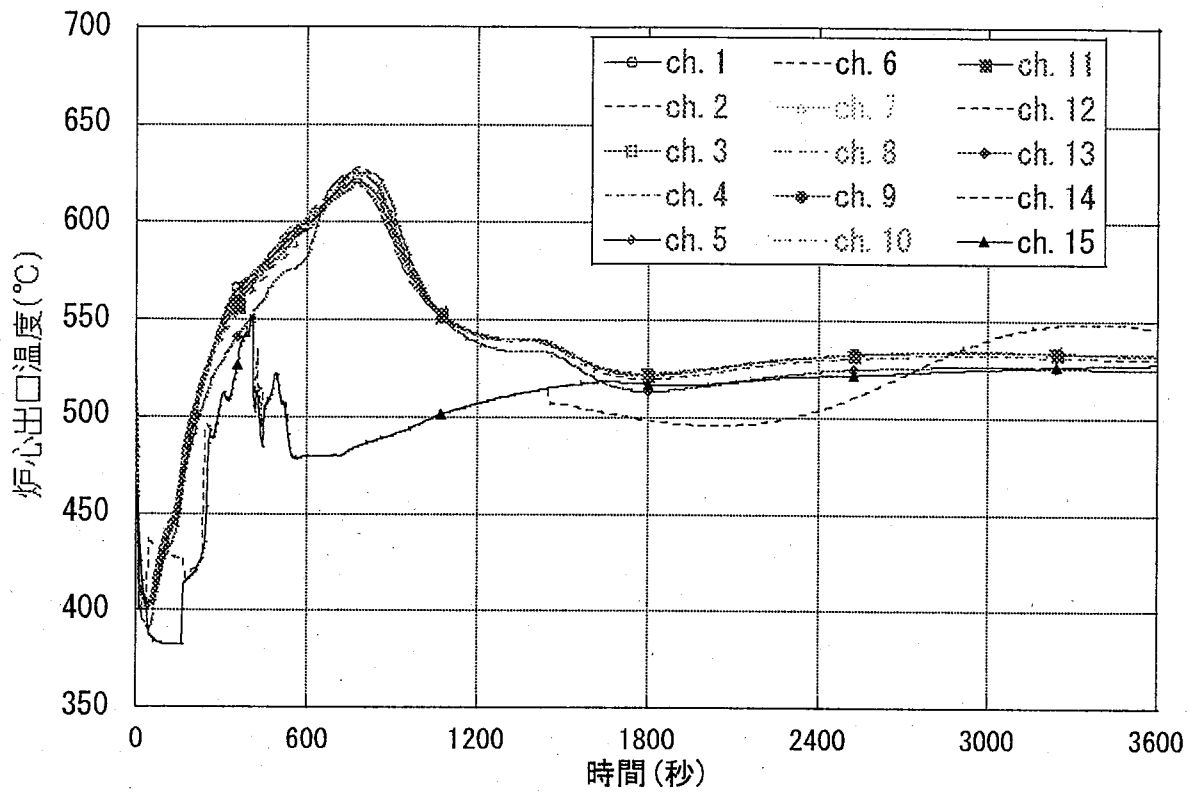


図 2.5.3-8 炉心出入口温度(上図)及び炉心流量(下図) : case_pp22

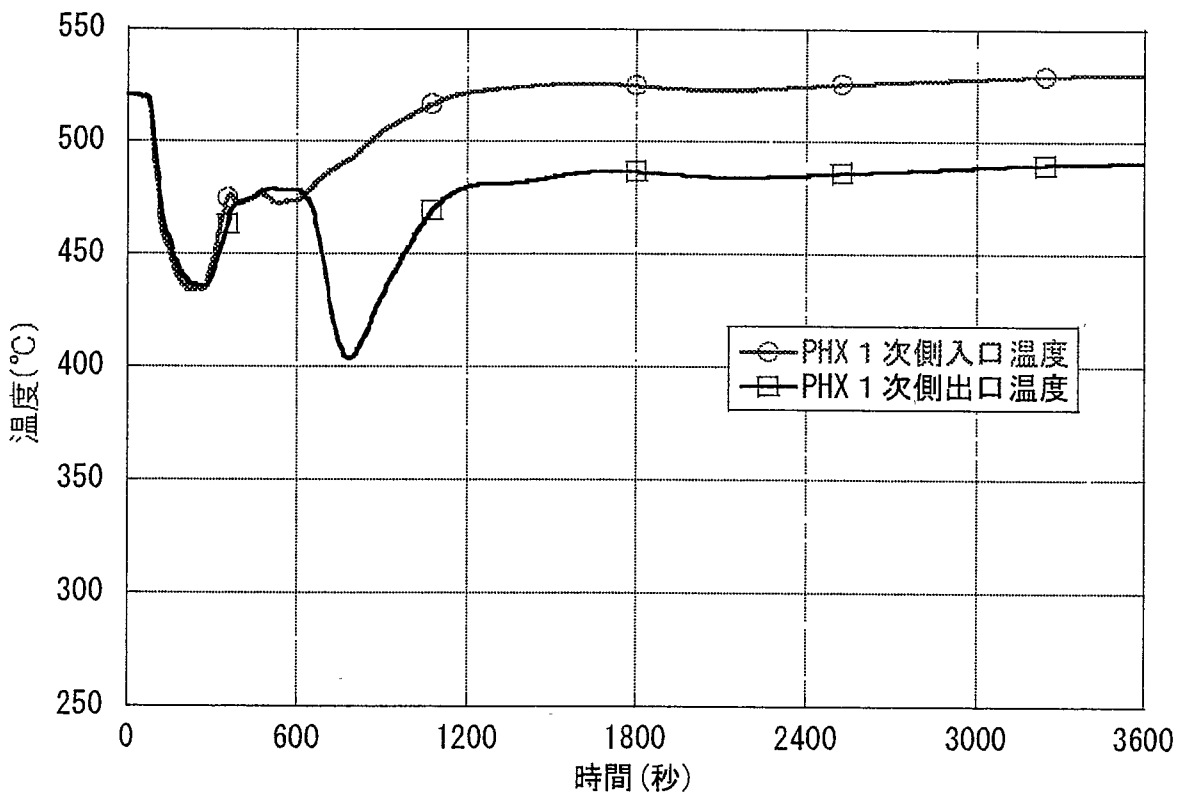
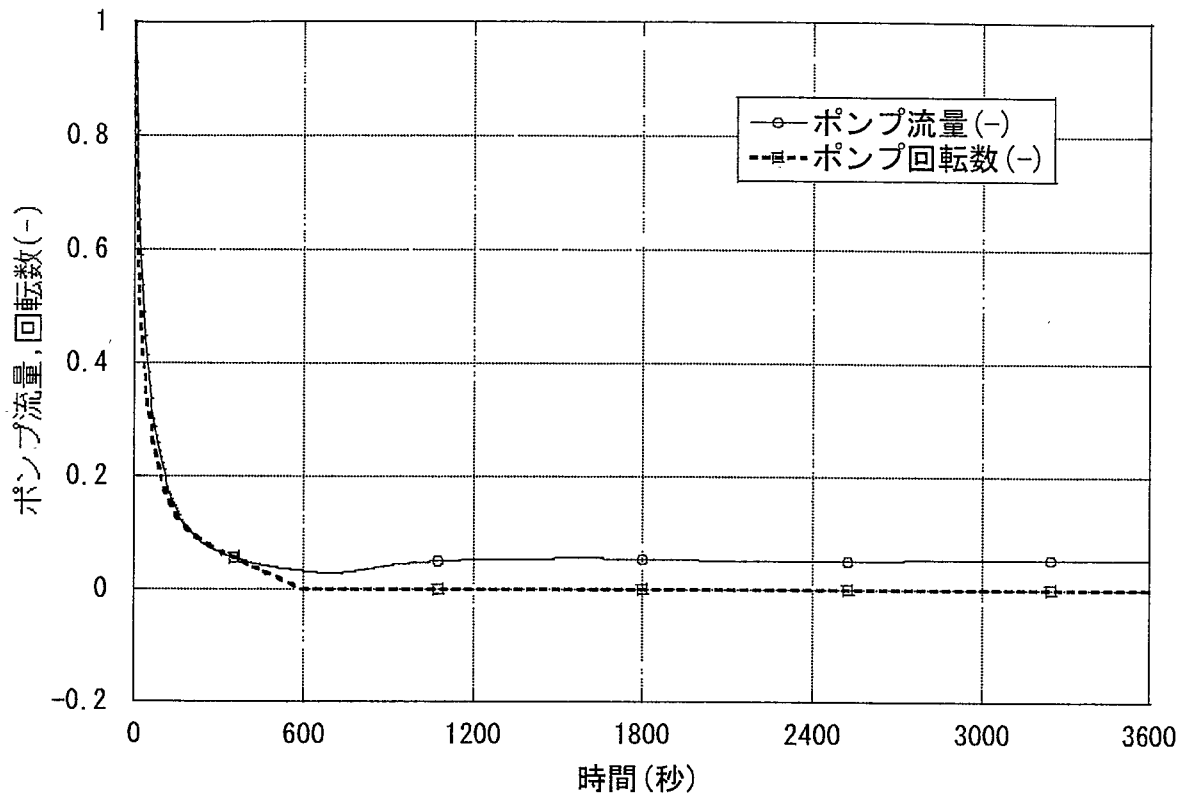


図 2.5.3-9 ポンプ流量、回転数(上図)および PHX1 次側出入口温度 (下図) : case_pp22

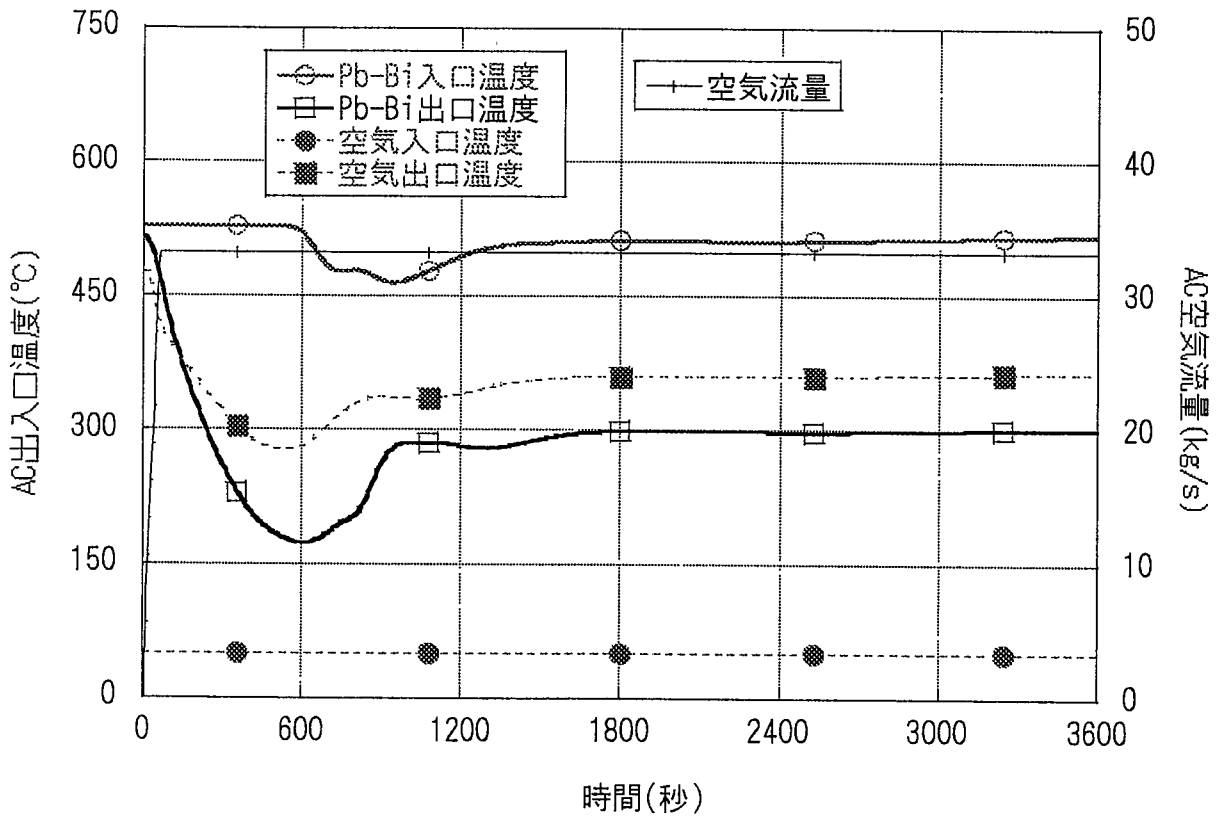
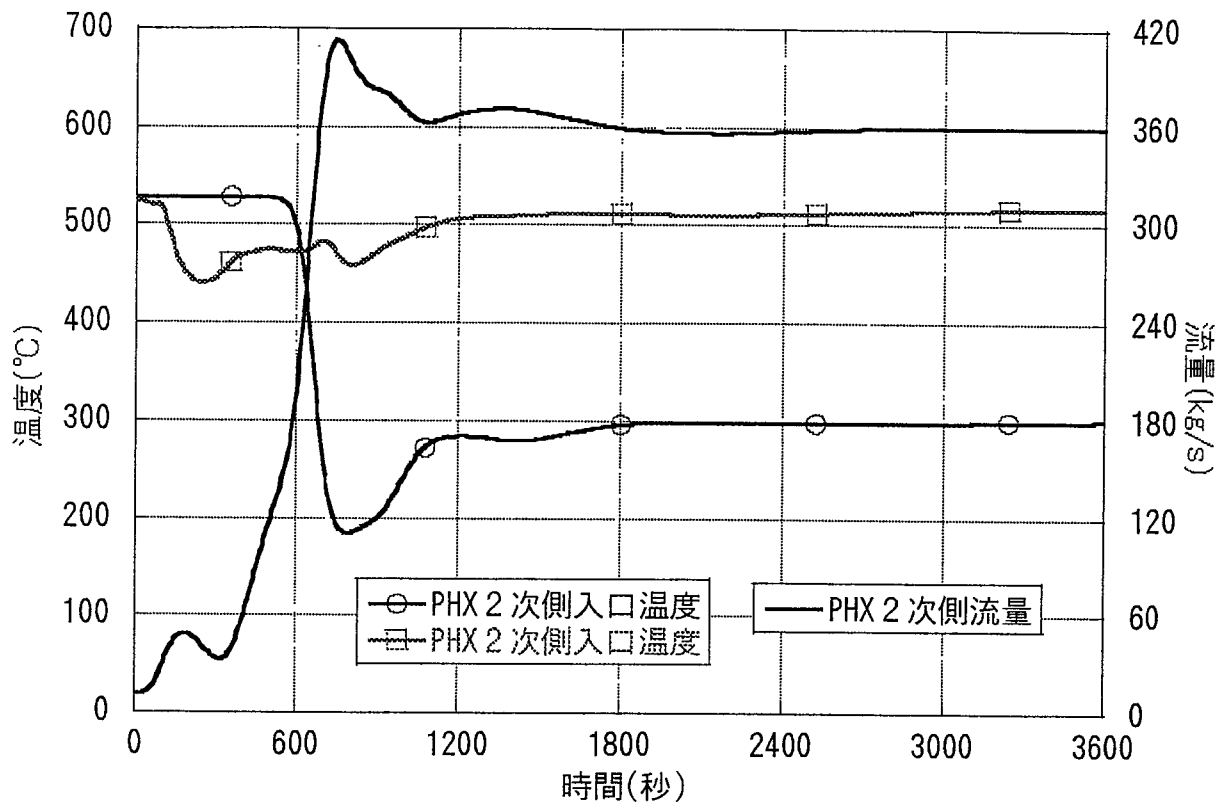


図 2.5.3-10 PHX 2 次側流量、温度(上図)及び AC 出入口温度、空気流量(下図) : case_pp22

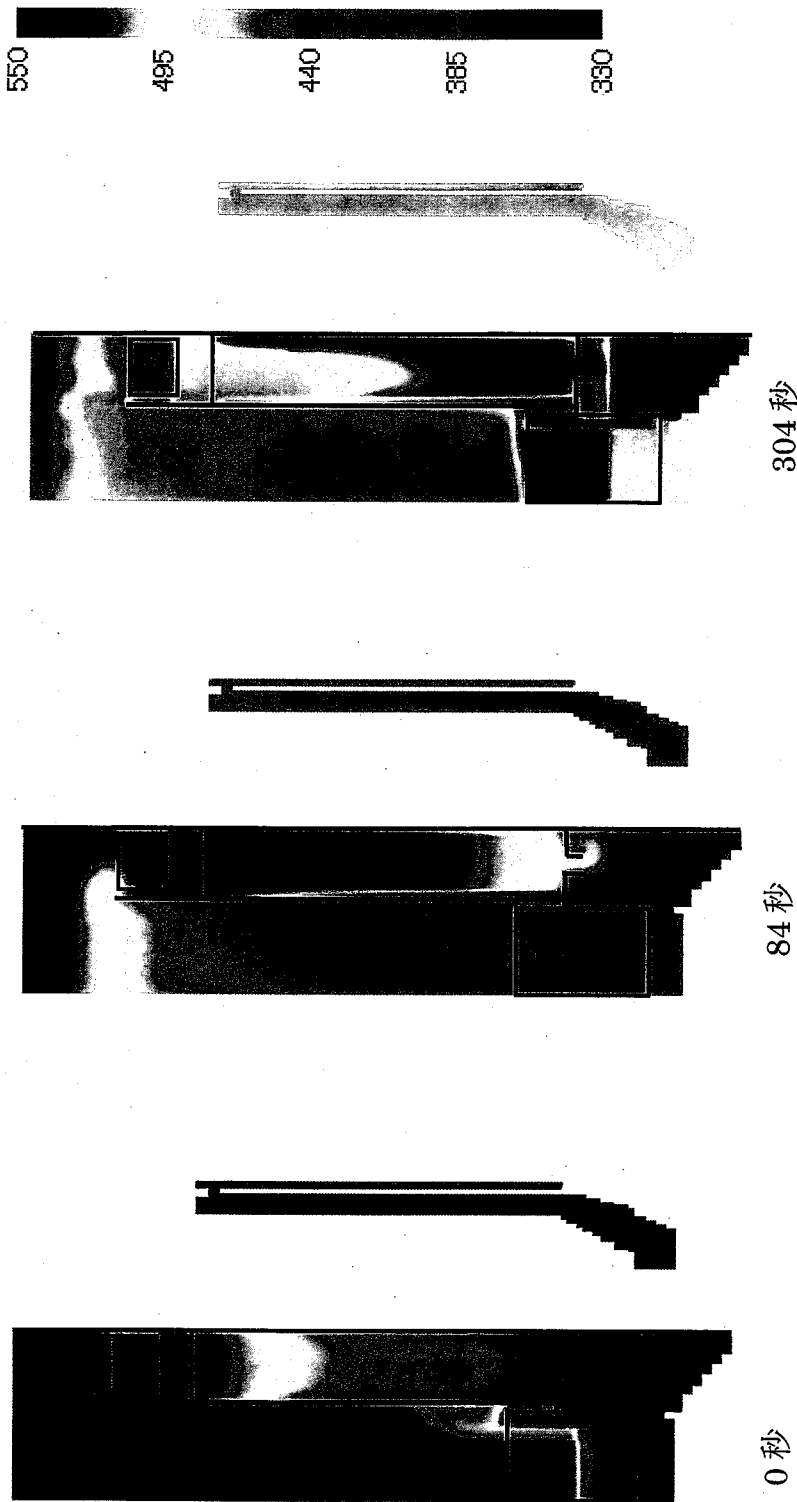


図 2.5.3-11 外部電源喪失(解析ケース case_pp22)時の炉容器内温度分布(1/2)

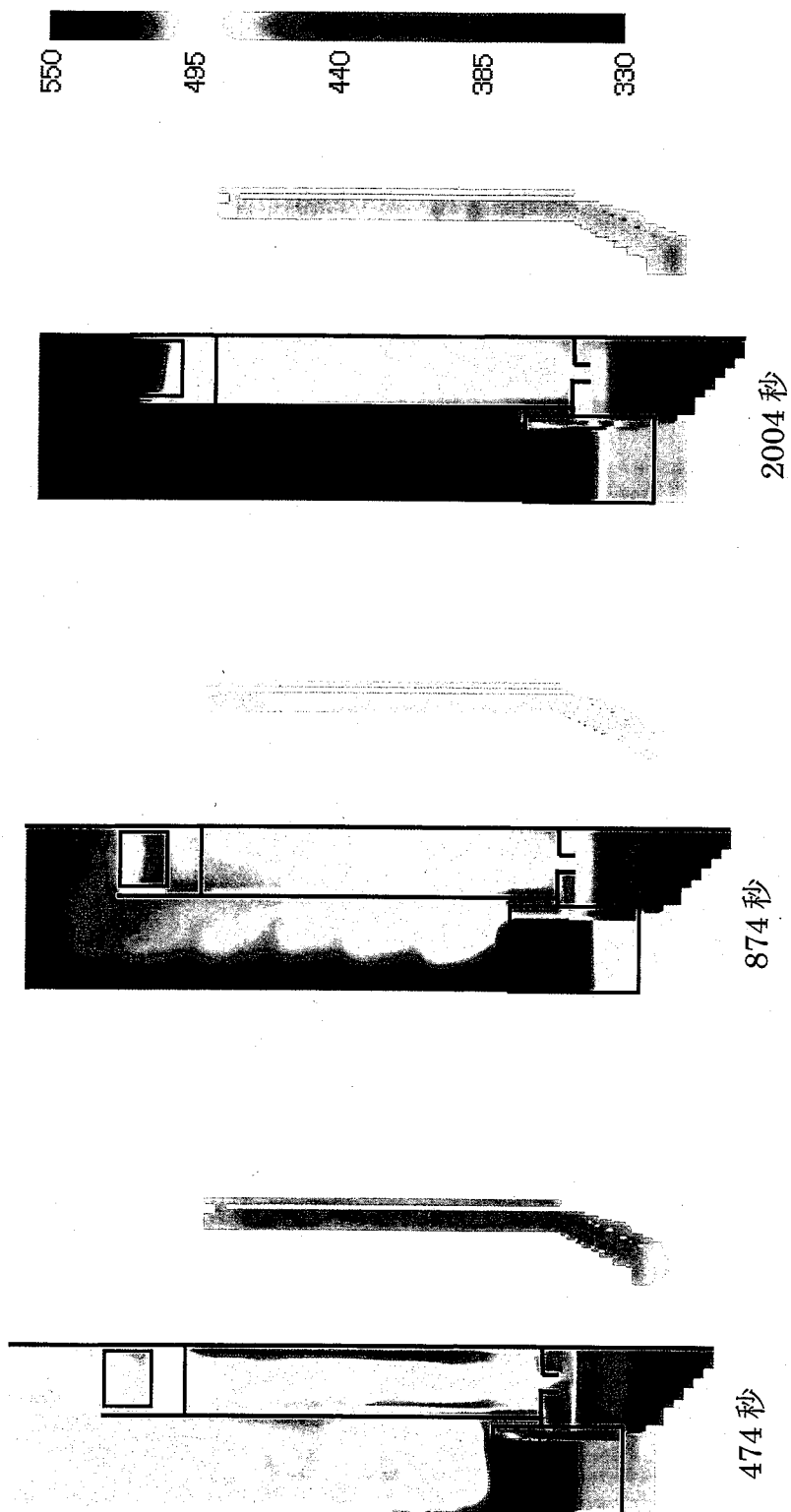


図 2.5.3-11 外部電源喪失(解析ケース case_pp22)時の炉容器内温度分布(2/2)

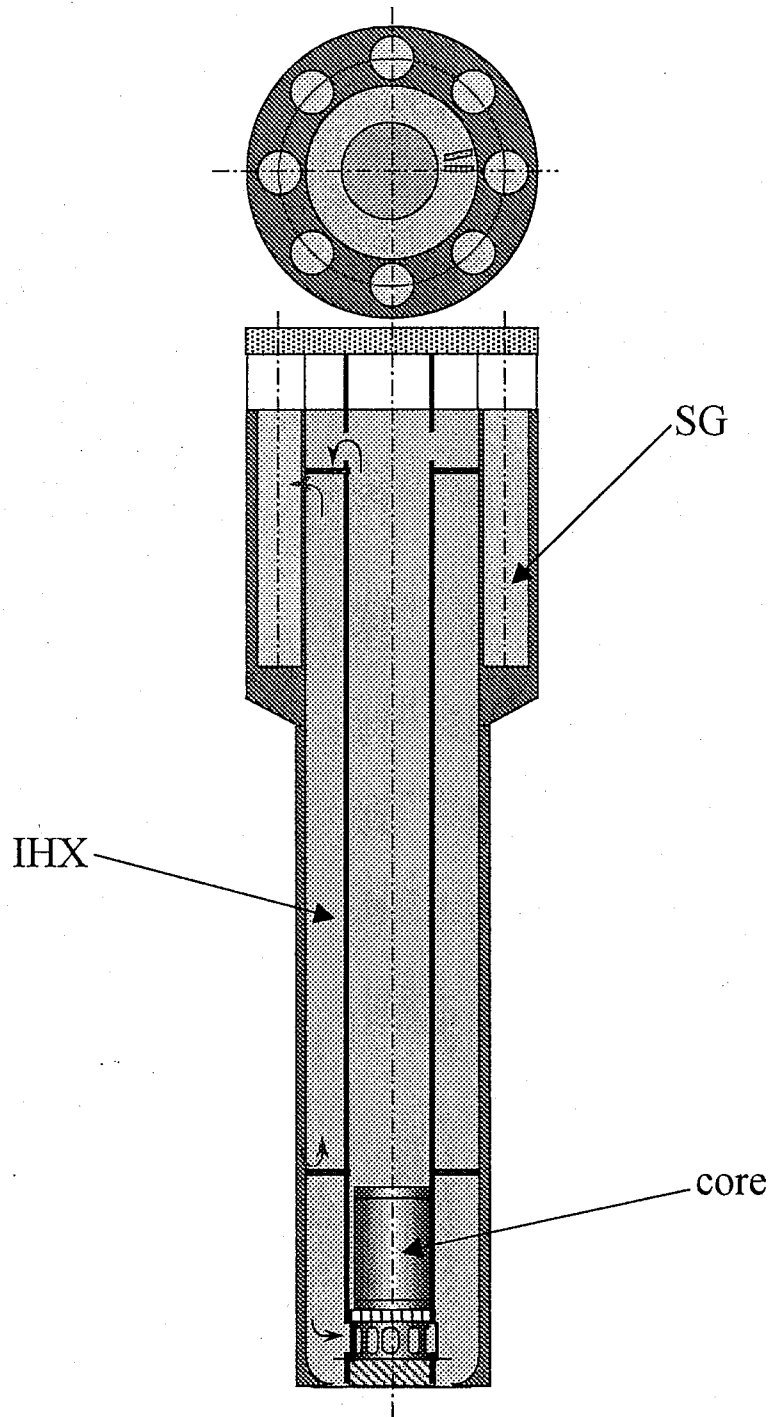


Fig. 3.2 Reference module^[5]

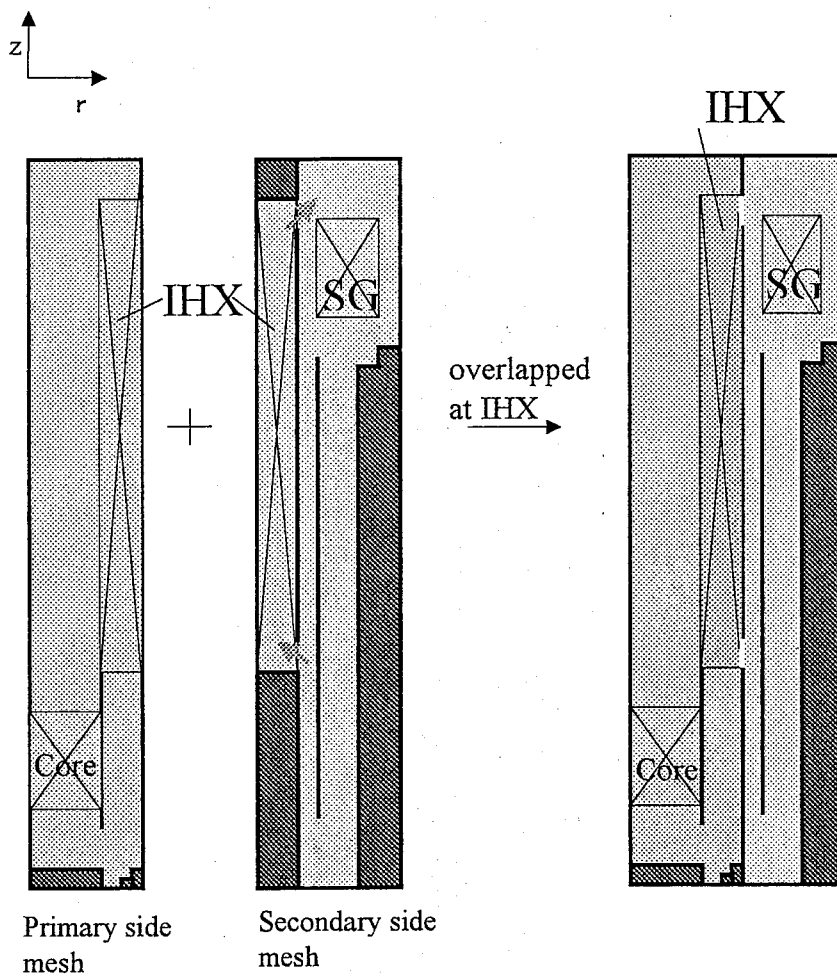


Fig. 3.3-1 Mesh arrangement for the cooling system

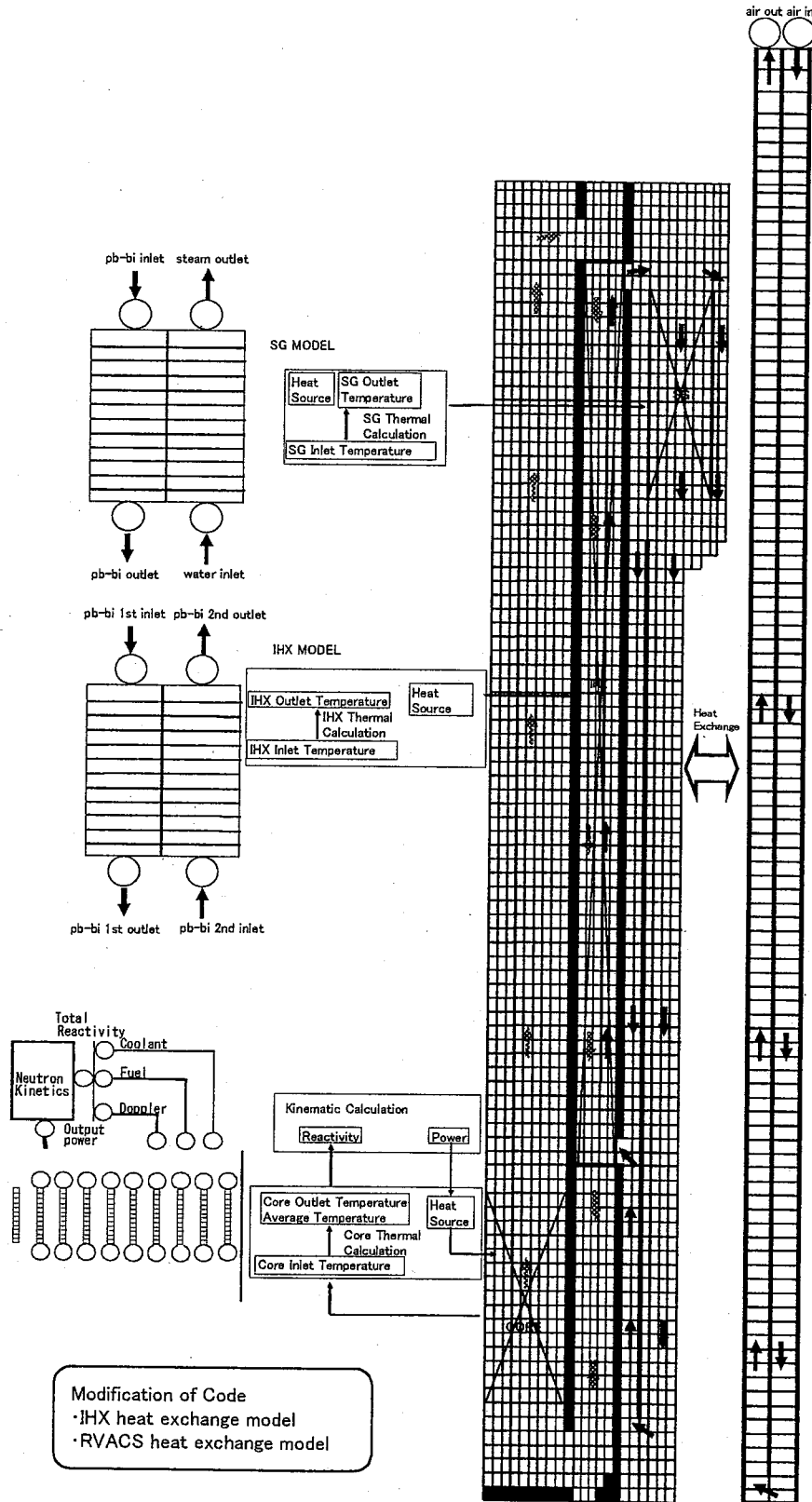


Fig. 3.3-2 Calculation Model

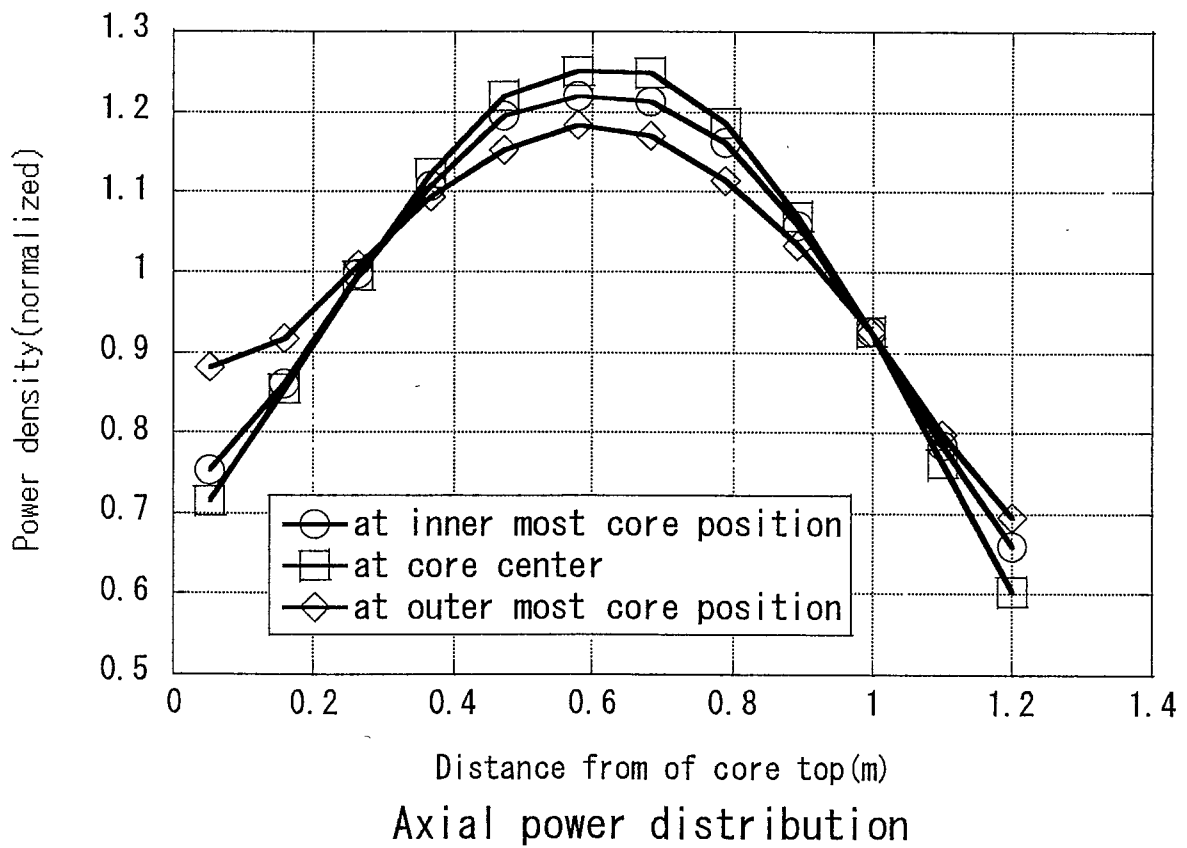
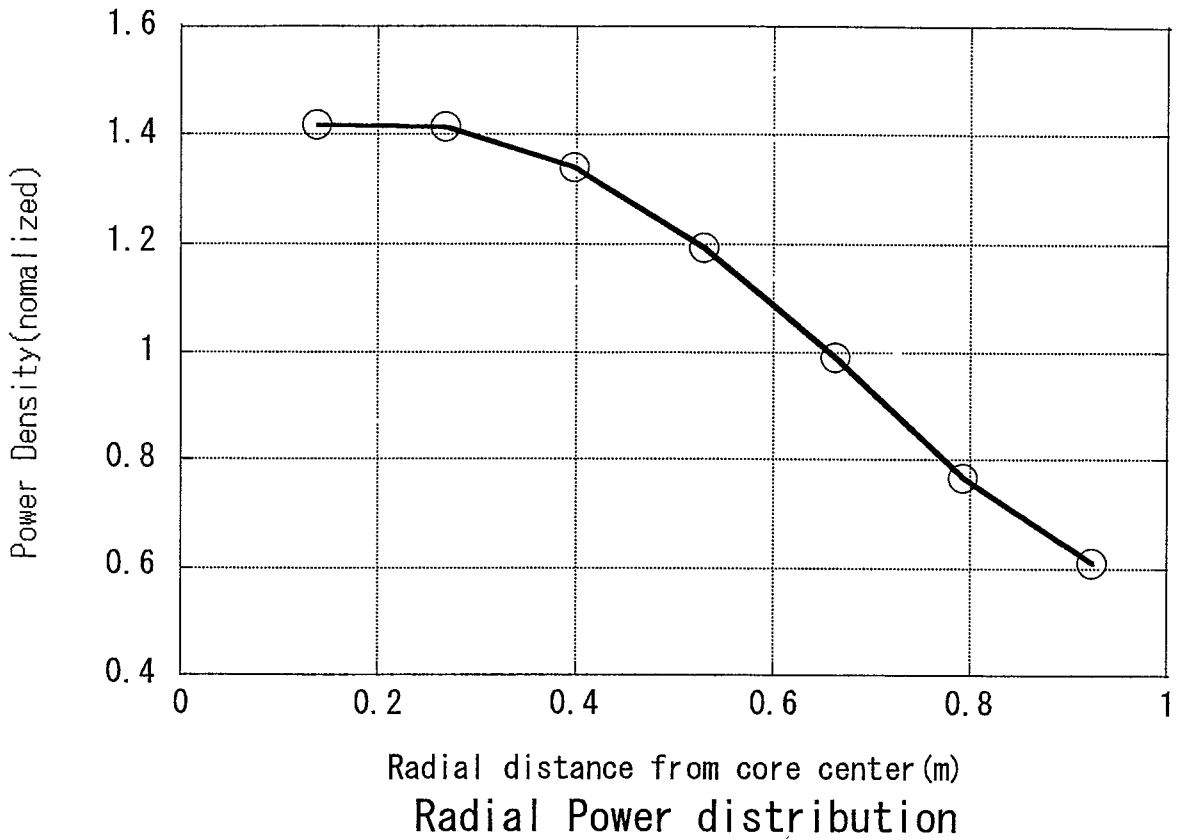


Fig. 3.3.1 Power distribution of core^[12]

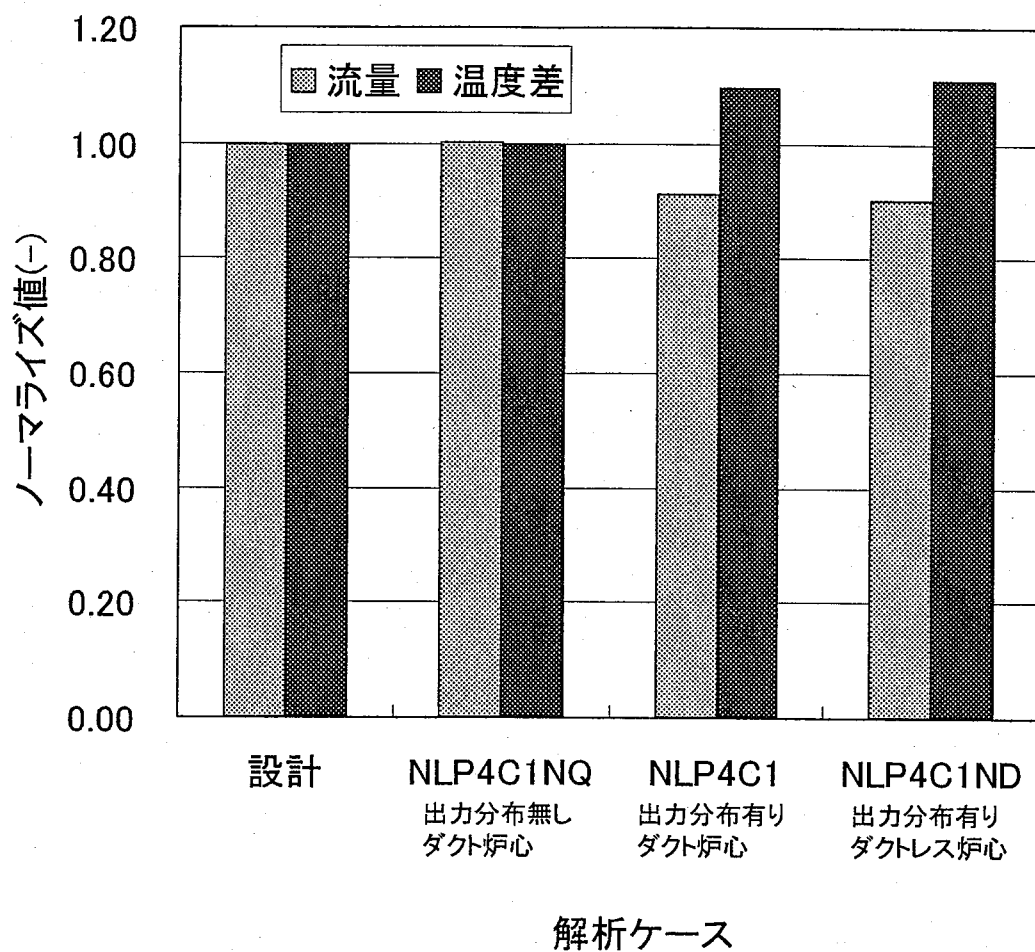


図3.5.1-1 各解析ケースごとの流量とIHX出入口温度差

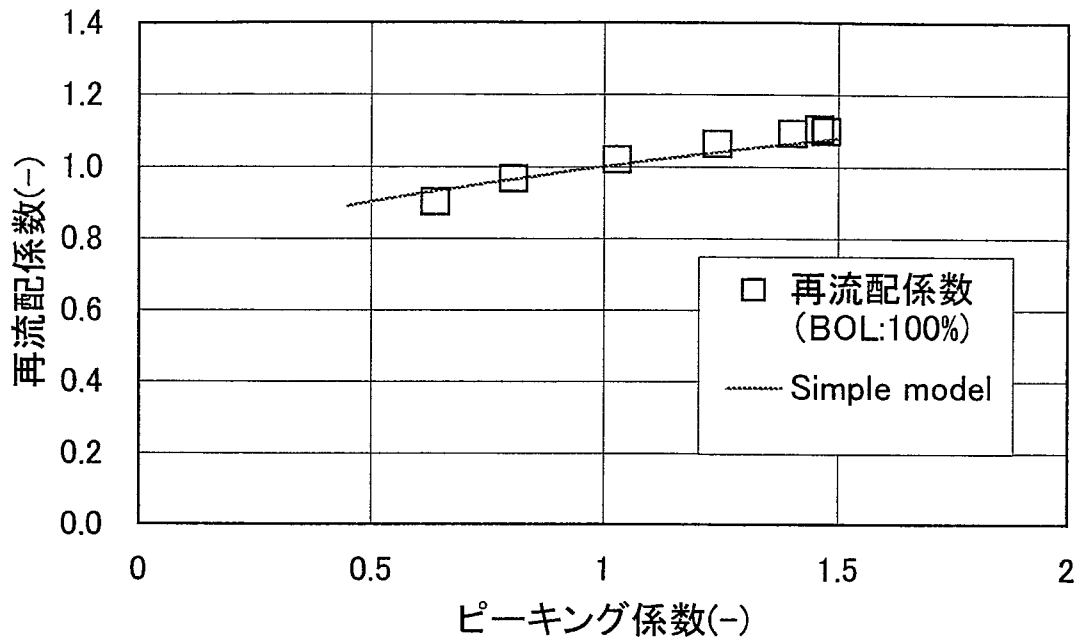


図3.5.2-1 ピーキング係数と再流配係数の関係
(非混合高さ未考慮)

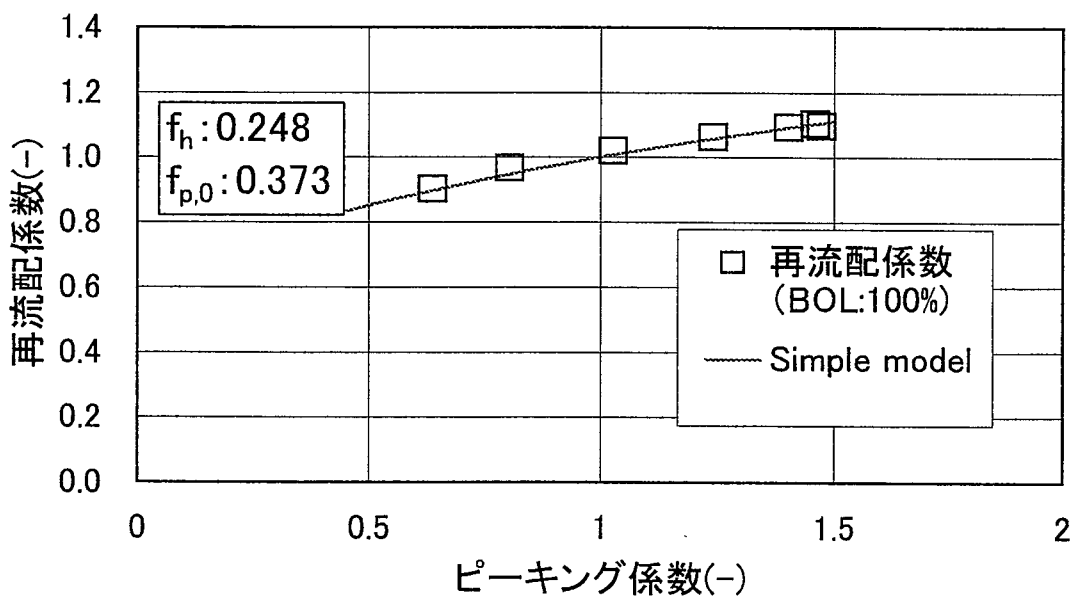


図3.5.2-2 ピーキング係数と再流配係数の関係
(非混合高さ考慮)

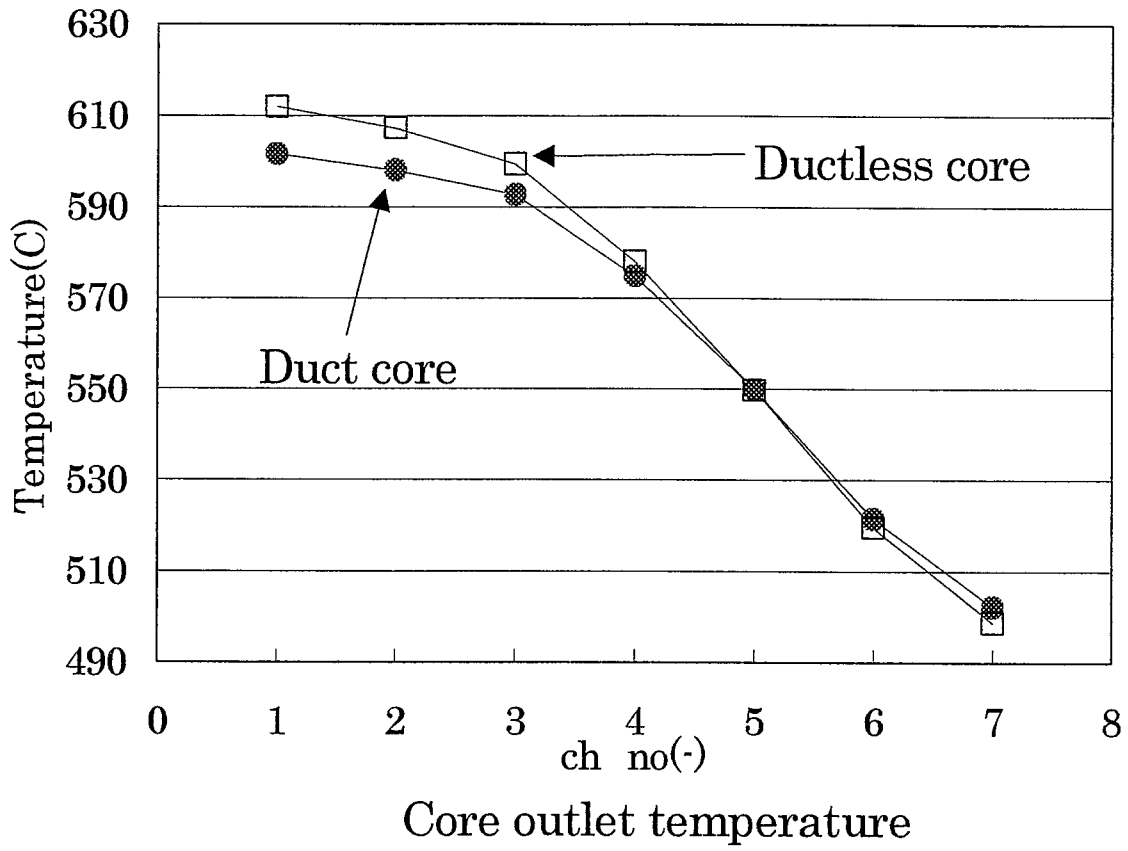


図 3.5.3-1 径方向出口温度分布の比較

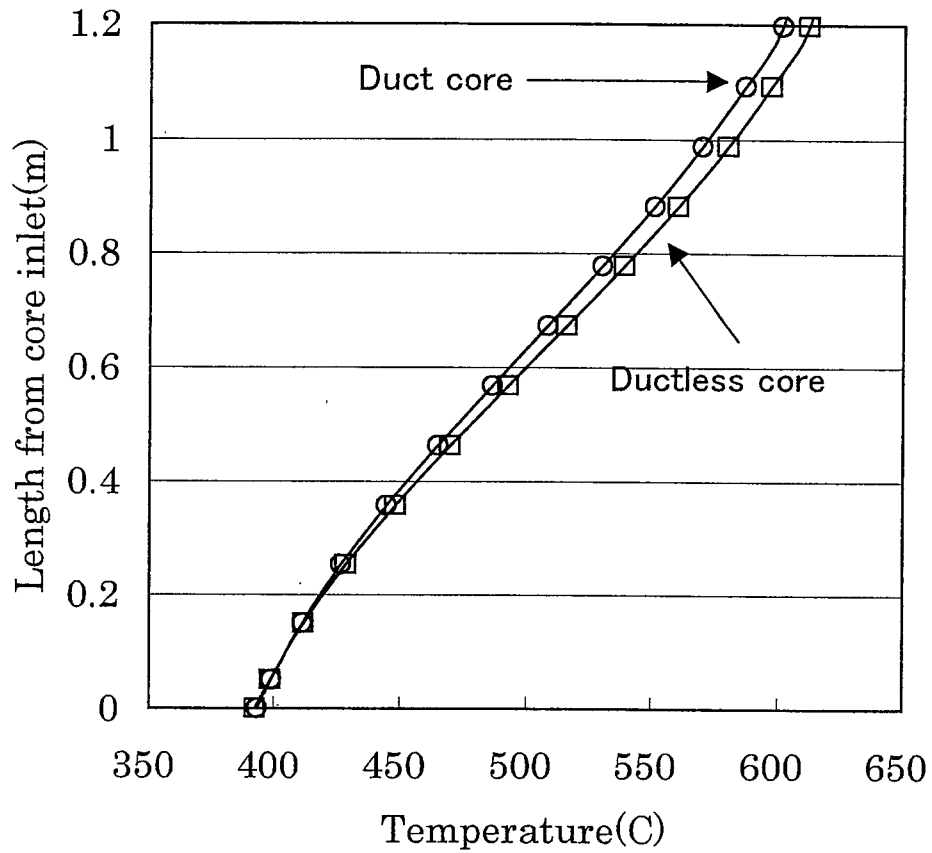
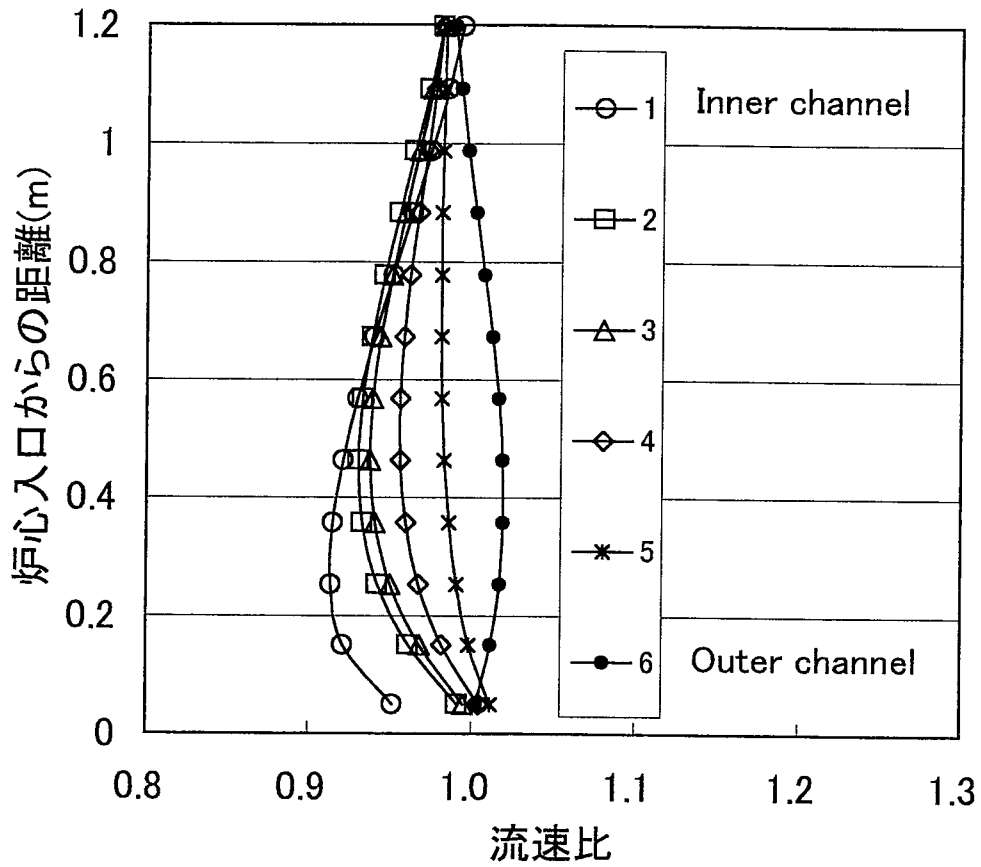


図 3.5.3-2 軸方向温度分布の比較(Ch. No. 1)



各チャンネルの流速比(ダクトレス炉心/ダクト炉心)

図 3.5.3-3 各チャンネルの軸方向流速比の比較

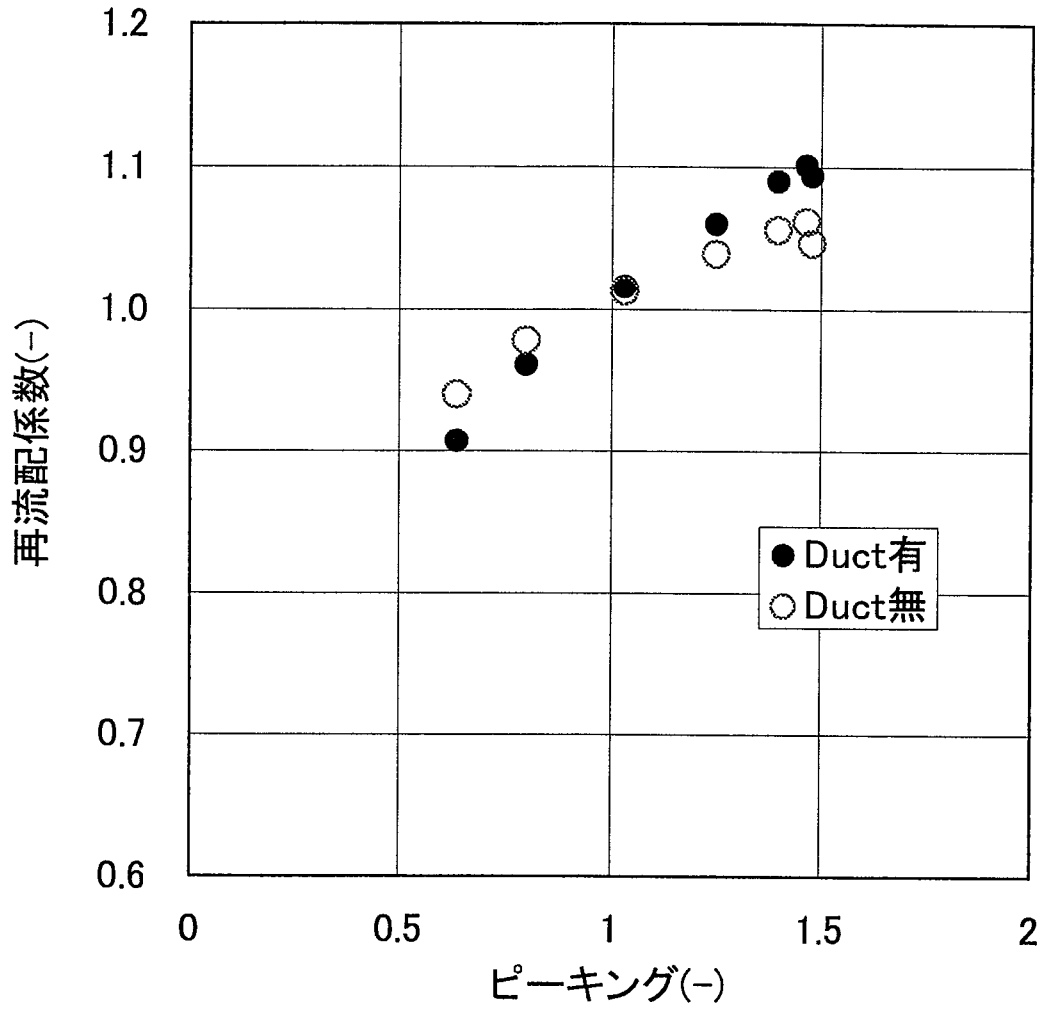


図 3.5.3-4 ダクトの有無が再流配係数に及ぼす影響

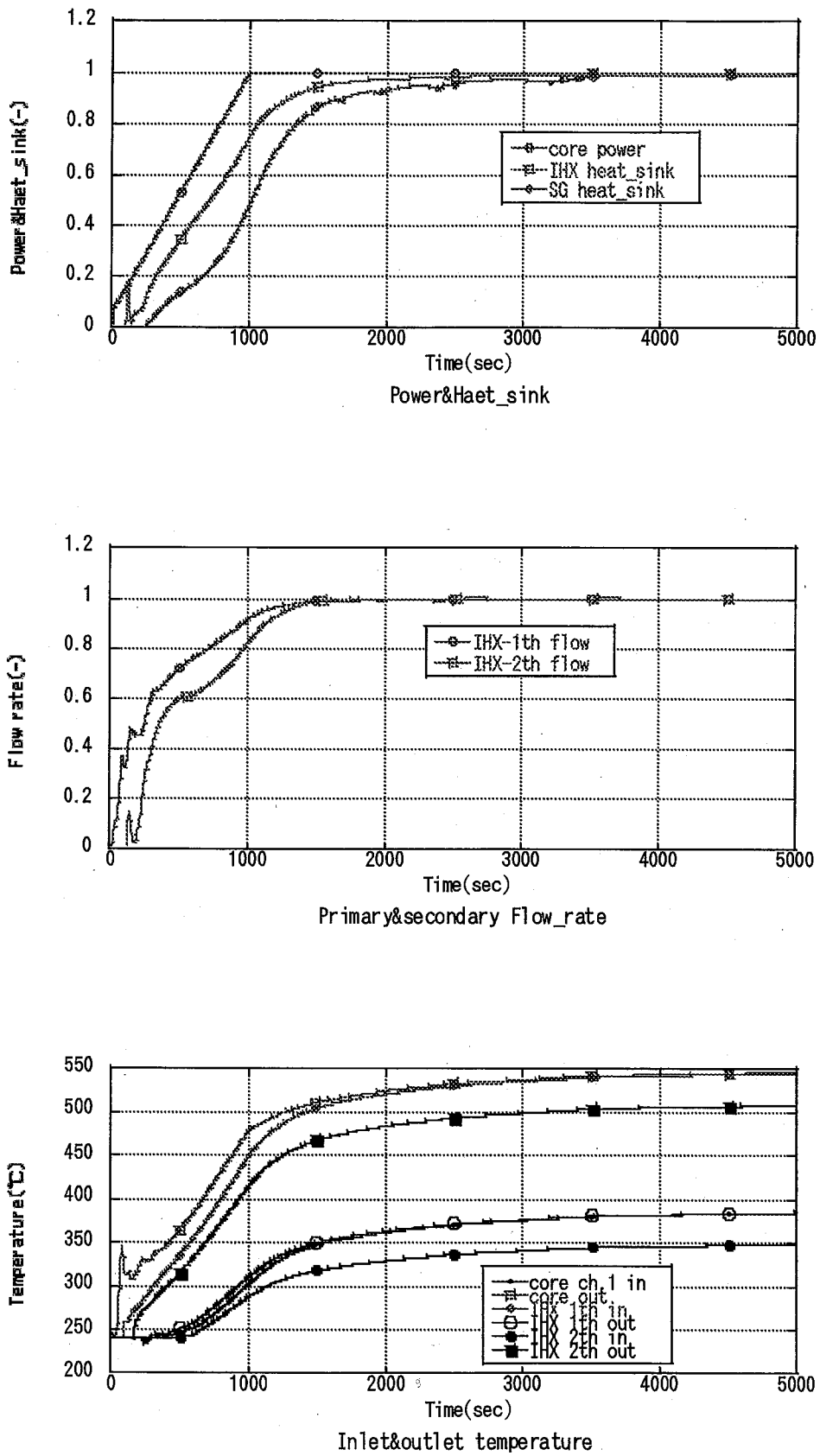


図 3.5.4-1 急速起動時のプラント応答

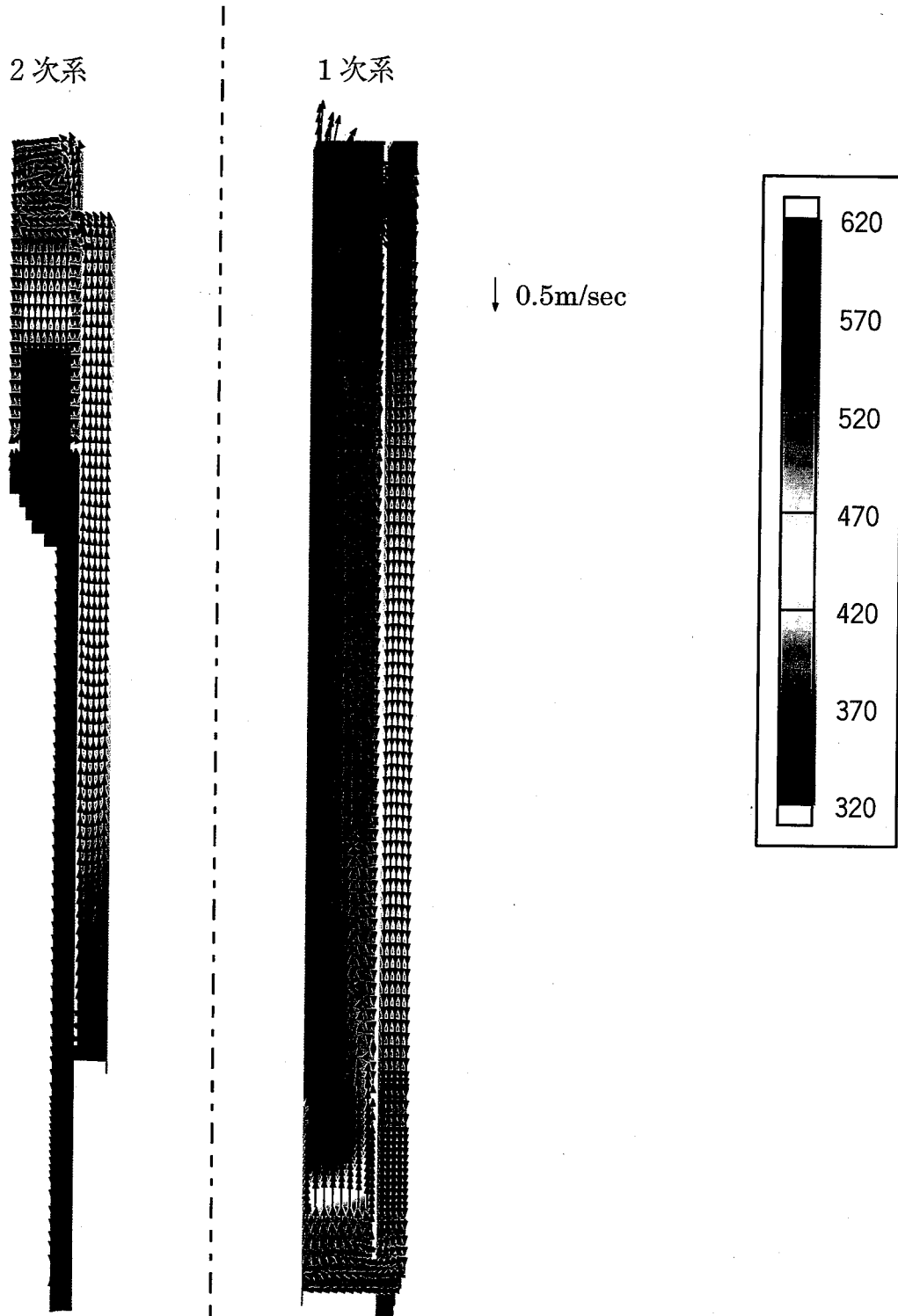


図 3.5.4-2 定常状態の温度及び流速分布

参考文献

- [1] 鈎 孝幸, 佐藤 和次郎, 他 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の概要」, 2001年3月, サイクル機構技報 No. 12 別冊
- [2] 堺 公明, 岩崎 隆, 他 「重金属冷却炉の崩壊熱除去特性解析 -鉛、鉛-ビスマス、ナトリウム冷却炉の比較評価-」, 2000年4月, JNC TN9400 2000-033
- [3] 此村 守, 江沼 康弘, 他 「サイクル機構技報 -各種冷却材を有する高速増殖炉に関するプラント設計評価(1)-」, 2001年8月, JNC TN1340 2001-008
- [4] Y. ENUMA, et. al., "CONCEPTUAL DESIGN OF A MEDIUM SCALE LEAD-BISMUTH COOLED FAST REACTOR", ICONE11-36598, Tokyo, JAPAN, (2003).
- [5] Ehud Greenspan et al., "THE ENCAPSULATED NUCLEAR HEAT SOURCE - A GENERATION IV REACTOR", GLOBAL 2001 Sep. 9-13, 2001, Paris, France
- [6] 堺 公明, 江沼 康弘, 他 「重金属冷却高速増殖炉の崩壊熱除去特性解析(1) -LBE 冷却自然循環炉のプラント動特性解析手法の開発-」, 日本原子力学会 2001年秋の大会
- [7] Takaaki SAKAI, Yasuhiro ENUMA, Takashi IWASAKI, et al., "System Analysis for Decay Heat Removal in Lead Bismuth Cooled natural circulated Reactors ", ICAPP, June 9-13, 2002, Florida, USA, Paper#1061. (2002)
- [8] 堺 公明, 「モジュール型プラント動特性解析コード(MSG-COPD) -コード使用説明書(マニュアル)-」, 2002年11月, JNC TN9520 2002-003
- [9] 堺 公明, 水野 朋保, 他 「LBE 冷却自然循環炉の炉心内流量配分特性」, 日本原子力学会 2002年春の年会
- [10] 堺 公明, 江沼 康弘, 岩崎 隆, 「重金属冷却炉プラントの検討(7) -LBE 冷却強制循環炉の崩壊熱除去特性-」, 日本原子力学会 2003年春の年会, G5.
- [11] Takaaki SAKAI, Yasuhiro ENUMA, Takashi IWASAKI, Tomoyasu MIZUNO, "System Analysis for Lead Bismuth Cooled Natural circulation Reactors ", ICONE11-36076, Tokyo, JAPAN, (2003).
- [12] Ser Gi Hong, Ehud Greenspan, et al., "A ONCE FOR LIFE CORE DESIGN FOR THE ENCAPSULATED NUCLEAR HEAT SOURCE(ENHS) REACTOR", PHYSOR 2002, Seoul, Korea. (2002)