

高速炉の冷却系に関する総合試験計画

—2次系配管構造が動特性に与える影響の検討—

1998年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-1393, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

高速炉の冷却系に関する総合試験計画
— 2次系配管構造が動特性に与える影響の検討 —

飯塚 透*、西村 元彦*、上出 英樹*

要 旨

実証炉段階で採用される原子炉冷却系に係る新概念技術の確立を目的とし、原子炉容器から蒸気発生器（SG）までを総合的に模擬した大型ナトリウム試験（原子炉冷却系総合試験）計画を検討した。

これまでに基本設計を行い、試験施設は実証炉の1/3縮尺2ループモデルとした。SGについては水・蒸気側の模擬性を高めるため高さ方向1/1縮尺の部分モデルとし、2次系配管を1ループに集約して接続するものとした。このため、2次系配管が著しく長くなり、実機模擬性が損なわれる可能性が考えられる。また、2次系配管の途中で2ループを1ループに集約する構造のため、自然循環試験時にはループ間のアンバランスが助長されることも考えられる。

そこで、2次系配管長をパラメータとして動特性解析を実施し、模擬性に与える影響を把握した。また、IHX伝熱面積等にループ間で差異を与えた場合の予測解析を実施した。

その結果、SGが流れ方向に長く、熱容量も大きいことから、2次系配管長の影響は相対的に小さいことが分かった。また、片方のループにのみ選択的に自然循環が発達するような現象は見られなかった。

以上より、2次系配管長の短縮は制約条件が厳しい割に熱過渡の改善の効果が小さく、構造上可能な範囲で実施すべきことが分かった。また、ループ間に実証炉と同等の製作誤差があっても、試験の実施及び試験結果の評価に大きな影響を与えるような問題は生じないことが分かった。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

Large-scaled Thermohydraulic Tests Plan for Cooling Systems in Fast Reactors
— Effect of Secondary Piping Structure on Dynamics —

Toru Iitsuka*, Motohiko Nishimura*, Hideki Kamide*

Abstract

Large-scaled thermohydraulic tests are planned for new key technologies in the heat transport systems of a demonstration fast reactor. The test facility is consisted of components from a reactor vessel to a steam generator (SG).

Basic design of the large-scaled thermohydraulic test facility is 1/3 scale of the demonstration fast reactor with two primary cooling loops and two into one secondary loop. The secondary piping length of the test facility is longer than the 1/3 scale of the demonstration fast reactor. The tests facility has the branch and junction of the secondary piping because of two primary loops and one SG. There is a possibility of flow and temperature unbalance if a buoyancy force were large and pressure loss were small.

Therefore, dynamics analyses of the thermal transition tests had been done in which the secondary piping length. To examine the unbalance occurred or not, the natural circulation analysis had been performed providing different heat transfer area of the IHX or presser loss of the primary loop between A loop and B loop.

It was shown from the analyses that the temperature response during the transition was delayed in the test model compared to the real reactor. Main cause of the delay was due to the real scaled SG. Other parameters, the length of piping etc., were not very influential to the response. The analysis such predicted that there wasn't large difference of global behaviors between the loops. Therefore, it was shown that there would be no problem, if the difference were made between the loops due to a manufacturing error.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

目次

1. 序論	1
2. 原子炉冷却系総合試験施設基本設計結果の概要	2
2.1 設計方針及び設計条件	2
2.1.1 設計方針	2
2.1.2 設計条件	2
2.2 設計概要	3
2.2.1 系統設計	3
2.2.2 機器設計	3
3. 2次系配管長が動特性に与える影響	6
3.1 解析対象熱過渡	6
3.2 解析パラメータ	6
3.2.1 2次系配管長	6
3.2.2 2次系配管圧力損失	6
3.2.3 IHXとSGの伝熱中心差	8
3.2.4 2次主循環ポンプ最低回転数	9
3.3 解析コード	10
3.4 解析モデル	10
3.5 解析結果	10
3.5.1 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果	10
3.5.2 自然循環試験（全電源喪失模擬試験）解析結果	14
3.6 まとめ	19
4. ループ間アンバランスが動特性に与える影響	21
4.1 解析対象熱過渡	21
4.2 アンバランス発生機構	21
4.2.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合	21
4.2.2 1次系圧損係数に差異がある場合	22
4.3 解析コード	22
4.4 解析モデル	22
4.4.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合	22
4.4.2 1次系圧損係数に差異がある場合	23
4.5 解析結果	24
4.5.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合	24
4.5.2 1次系圧損係数に差異がある場合	25
4.6 まとめ	27
5. 結論	28
謝辞	29
参考文献	30

表リスト

表2.2.1-1	原子炉冷却系総合試験施設の系統主要仕様	31
表3.2.1-1	2次系配管長パラメータ設定値	32
表3.2.2-1	2次主冷却系の圧力損失およびEu数	32
表3.2.2-2	2次系配管圧力損失設定値(装置定格時)	33
表3.2.3-1	IHXとSGの伝熱中心差設定値	33
表3.2.4-1	2次主循環ポンプ最低回転数設定値	33
表3.5.1-1	2次系各部のNa重量比較	34
表3.5.1-2	2次系配管長短縮による時間遅れへの影響(手動トリップ熱過渡模擬試験)	35

図リスト

図2.2.1-1	主冷却系全体系統図	37
図2.2.1-2	装置定格出力運転ヒートマスバランス図(54MWt、78.9%出力条件)	39
図2.2.1-3	機器高低関係図	41
図2.2.2-1	模擬炉心集合体(ヒータ)構造図	43
図2.2.2-2	原子炉容器試験体構造図	45
図2.2.2-3	中間熱交換器構造図	47
図2.2.2-4	1次主循環ポンプ構造図	49
図2.2.2-5	1次主冷却系コールドレグ配管配置図	51
図2.2.2-6	蒸気発生器構造図	53
図2.2.2-7	空気冷却器構造図	55
図2.2.2-8	2次主冷却系ホットレグ配管配置図	57
図2.2.2-9	2次主冷却系ミドルレグ配管配置図	59
図2.2.2-10	2次主冷却系コールドレグ配管配置図	61
図3.5.1-1	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (原子炉容器入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	63
図3.5.1-2	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (原子炉容器出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	63
図3.5.1-3	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	64
図3.5.1-4	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	64
図3.5.1-5	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	65
図3.5.1-6	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	65
図3.5.1-7	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	66
図3.5.1-8	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	66
図3.5.1-9	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)	67
図3.5.1-10	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)	67

図3.5.1-11	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口給水温度、2次系配管長パラメータ解析)	68
図3.5.1-12	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口蒸気温度、2次系配管長パラメータ解析)	68
図3.5.1-13	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	69
図3.5.1-14	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	70
図3.5.1-15	手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG給水流量、2次系配管長パラメータ解析)	71
図3.5.1-16	2次系各部のNa重量比較	72
図3.5.2-1	自然循環試験解析結果(原子炉容器入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	73
図3.5.2-2	自然循環試験解析結果(原子炉容器出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	73
図3.5.2-3	自然循環試験解析結果(炉心入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	74
図3.5.2-4	自然循環試験解析結果(炉心出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	174
図3.5.2-5	自然循環試験解析結果(IHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	175
図3.5.2-6	自然循環試験解析結果(IHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	175
図3.5.2-7	自然循環試験解析結果(IHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	176
図3.5.2-8	自然循環試験解析結果(IHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	176
図3.5.2-9	自然循環試験解析結果(SG入口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)	177
図3.5.2-10	自然循環試験解析結果(SG出口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)	177
図3.5.2-11	自然循環試験解析結果 (DHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	178
図3.5.2-12	自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	178
図3.5.2-13	自然循環試験解析結果 (DHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)	179
図3.5.2-14	自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)	179
図3.5.2-15	自然循環試験解析結果(1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	180
図3.5.2-16	自然循環試験解析結果(2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	182
図3.5.2-17	自然循環試験解析結果(DRACS 1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	184
図3.5.2-18	自然循環試験解析結果(DRACS 2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)	184
図3.5.2-19	自然循環試験解析結果(DRACS空気系流量、2次系配管長パラメータ解析)	185
図3.5.2-20	IHX及びSGの設置レベル(基本設計)	186

図3.5.2-21	熱過渡時の2次系温度分布(基本設計)	87
図3.5.2-22	IHX及びSGの設置レベル(1/3縮尺条件)	88
図3.5.2-23	熱過渡時の2次系温度分布(1/3縮尺条件)	89
図4.5.1-1	ループ毎の1次側流量(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	90
図4.5.1-2	IHX容器1次側入口温度(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	91
図4.5.1-3	IHX容器1次側出口温度(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	91
図4.5.1-4	ループ毎の2次側流量(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	92
図4.5.1-5	IHX容器2次側入口温度(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	93
図4.5.1-6	IHX容器2次側出口温度(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	93
図4.5.1-7	IHX伝熱部軸方向温度分布(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	94
図4.5.1-8	SG伝熱部軸方向温度分布(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	101
図4.5.1-9	炉心軸方向温度分布(自然循環、IHX伝面アンバランス解析)	103
図4.5.2-1	ループ毎の1次側流量(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	105
図4.5.2-2	IHX容器1次側入口温度(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	106
図4.5.2-3	IHX容器1次側出口温度(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	106
図4.5.2-4	ループ毎の2次側流量(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	107
図4.5.2-5	IHX容器2次側入口温度(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	108
図4.5.2-6	IHX容器2次側出口温度(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	108
図4.5.2-7	IHX伝熱部軸方向温度分布(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	109
図4.5.2-8	SG伝熱部軸方向温度分布(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	115
図4.5.2-9	炉心軸方向温度分布(自然循環、1次系圧損アンバランス解析)	117

1. 序論

高速炉の実用化を目指し、実証炉段階で採用される原子炉冷却系に係る新概念技術の確立を目的として、原子炉容器から蒸気発生器までの1次系、2次系、水・蒸気系及び崩壊熱除去系を総合的に模擬した大型ナトリウム試験（原子炉冷却系総合試験）計画を検討した。⁽¹⁾

原子炉冷却系総合試験施設の基本設計は実証炉⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾の1/3縮尺2ループモデルを基本としており、熱流動上の模擬性の観点から、流路長、流路断面積等は可能な限り1/3縮尺に合わせることが望ましい。しかし、SGについては水・蒸気側伝熱流動の模擬性を高めるため、高さ方向1/1縮尺の部分モデルとし、2次系配管を2ループから1ループに集約してSGと接続するものとした。このため、2次系配管が1/3縮尺条件に比べて著しく長い設計となっており、2次系配管による輸送遅れが過大となり熱過渡試験の模擬性に悪影響を与える可能性がある。そこで、本報では、2次系配管長、2次系配管圧力損失及びIHXとSGの伝熱中心差をパラメータとし、1/3縮尺条件に一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡に与える影響を把握する。そして、2次系配管長短縮の必要性等、試験装置の設計方針を検討する。

また、試験装置の2次系には、実証炉には無い分岐合流配管が存在する。特に自然循環時にはループ間のアンバランスが助長され、2次系のSGと片方のIHXにのみ選択的に自然循環が発達することも考えられる。そのような試験体に特異な現象が発生しないこと、または影響が小さいことを確認するため、IHX伝熱面積及び2次系圧損係数または1次系圧損係数にループ間で差異を与えた場合の自然循環試験解析を各々実施し、試験に与える影響を評価する。

以上の検討により、試験施設が目的とする試験課題を達成する上で大きな問題のないことを確認する。

2. 原子炉冷却系総合試験施設基本設計結果の概要

本検討に先立ち、平成8年度に原子炉冷却系総合試験施設の基本設計を実施し、試験装置全体の基本構造を設定した。以下に基本設計結果の概要を示す。

2.1 設計方針及び設計条件

2.1.1 設計方針

- (1) 実証炉段階で採用される配管短縮化、原子炉構造を含む機器のコンパクト化、自然循環をより重視した崩壊熱除去など、原子炉冷却系に係わる新概念技術を原子炉冷却系総合試験施設を用いた試験により最終的に確立する。
- (2) 原子炉冷却系総合試験施設は、実証炉に対する「国への要望」に応えると共に、原子力長計に基づき「FBR固有の技術確立」の観点から、今後長期に渡りFBR実用化に必要な技術課題解決のための有力な総合試験装置と位置付ける。
- (3) 実証炉に反映する「国への要望」（下記4課題）の充足を前提とする。小課題についてもできるだけ充足するように努める。

[国への要望項目]

- No.1：原子炉冷却系総合試験
 - No.2：炉容器保護系性能試験
 - No.3：崩壊熱除去系除熱特性試験
 - No.8：蒸気発生器構造信頼性試験
- (4) その上で、FBR固有の技術確立の観点からの研究開発課題（含む、革新技術の適用）を可能な範囲で組み込めるよう柔軟な施設、今後長期に渡って使用できる施設とする。
 - (5) 総合試験の性格に見合った試験施設とする。すなわち、設計の妥当性確認や解析コードの総合的検証、複合事象の特性把握等に重点を置く。
 - (6) インターラッパーフロー試験については実用化研究と位置付ける。
 - (7) 効果的な試験データが採取できるよう、また、安全に試験が遂行できるよう十分な配慮をした試験施設とする。

2.1.2 設計条件

上記設計方針の元に試験施設の基本設計を実施するが、試験施設の主要な設計条件は以下の通りとする。

- ・発熱／除熱量 ：50MWtクラス
- ・最高使用温度 ：600℃
- ・温度変化率 ：実機条件を模擬（可変）
- ・流量変化率 ：実機条件を模擬（可変）（ポンプコーストダウンカーブ）

- ・試験対象部縮尺率：1/2.5～1/3程度
- ・原子炉容器：上部流出入方式（崩壊熱模擬ヒータ付き）
- ・中間熱交換器：管内1次／2次側斜交流縦型シェル&チューブ熱交換器
- ・蒸気発生器：ヘリカルコイル一体貫流型
- ・崩壊熱除去系：浸漬型DHXを用いたDRACS

2.2 設計概要

2.2.1 系統設計

原子炉冷却系総合試験施設の系統は、1次主冷却系2系統、2次主冷却系1系統、水・蒸気系1系統、冷水系1系統、直接炉心冷却系（DRACS）2系統及びLPG・ナトリウム加熱系1系統から構成している。全体系統構成図を図2.2.1-1に示す。また、全体系統の主要仕様を表2.2.1-1に示す。

本系統のヒートマスバランスは、平成9年度までのPhase1設計による実証炉を模擬したもので、装置定格熱出力54MWtで、温度条件は実証炉を模擬していることから、1次系ホットレグ550℃、2次系ホットレグ520℃、蒸気系497℃/175atgとしている。装置定格出力運転時のヒートマスバランス図を図2.2.1-2に示す。

試験施設の機器高低関係は、実証炉の自然循環除熱を模擬するため、試験施設の縮尺（約1/3）に合わせることを原則とし、1次主冷却系及びDRACS系は実証炉の機器高低関係を1/3の縮尺にしている。また、2次系は、2次系の自然循環力をパラメータにできるように、SGの設置位置を1/3縮尺よりも高めに設定している。主要機器の機器高低関係図を図2.2.1-3に示す。

2.2.2 機器設計

2.2.2.1 1次主冷却系機器

1次主冷却機器は、模擬炉心集合体、原子炉容器、中間熱交換器、1次主循環ポンプから構成される。

模擬炉心集合体は、模擬燃料集合体、模擬制御棒集合体及び模擬しゃへい体で構成される機器である。模擬燃料集合体は、炉心部の発熱及び流動状況を模擬するため、内部にヒータピンを含むバンドル構造とし、ラッパ管、エントランスノズル、内部オリフィス、ヒータピン及びケーブル等で構成される。模擬燃料集合体の構造図を図2.2.2-1に示す。

原子炉容器試験体は、円筒の縦型容器であり、2ループの炉内配管を180°回転対称な位置に配置している。実証炉は3ループであるが、構造上の試験課題に対応するため円筒の炉容器とする必要があり、対称性を満たす上で最小限の構成として2ループとした。炉壁保護構造としての炉壁冷却ライナ及びガス巻き込み防止を目的とした

リングプレートを設置している。原子炉容器試験体の構造図を図2.2.2-2に示す。また、炉心上部構造を模擬した構造物をデッキ上部から挿入しており、ヒータピンの交換等のメンテナンス時には引き抜ける構造としている。さらに、将来の模擬炉心の変更に対応可能とするため、模擬炉心支持板も引抜きできるように、デッキが取り外し可能な構造としている。

中間熱交換器 (IHX) は、IHX容器とIHX本体及び付属機器から構成され、IHX容器内に自由液面を有し、IHX本体は容器内に上部から吊り下げられた構造である。IHX容器は逆U字管型のホットレグ配管及びミドルレグ配管により、それぞれ原子炉容器及びポンプ容器に接続している。原子炉容器からホットレグ配管を介してIHX容器内に流入した1次系ナトリウムはIHXで熱交換を行い、低温となってミドルレグ配管を経てポンプ容器へ流出する。また、IHXの上部は2次主冷却系配管と接続しており、低温の2次系ナトリウムを1次系ナトリウムとの熱交換により加熱する。IHXの構造図を図2.2.2-3に示す。

1次主循環ポンプは、ポンプ容器、ポンプ本体、駆動装置及び付属機器から構成され、1次主冷却系1ループに1基ずつ合計2基設置する。ポンプ本体は機械式縦型自由液面遠心ポンプであり、羽根車 (インペラ)、ディフューザ、回転軸、静圧軸受け、軸封装置、熱遮蔽板等より構成され、1次主循環ポンプ容器デッキ上部に支持フランジにより固定される。駆動装置も同様にモータスタンドを介してデッキで支持され、保守が必要などき等にポンプ本体を引き抜くことができるようになっている。1次主循環ポンプの構造図を図2.2.2-4に示す。

1次主冷却系配管のホットレグとミドルレグは1/3縮尺でモデル化されるが、コールドレグはナトリウム加熱器及びナトリウム加熱器バイパスを使用することから実証炉の形状と大きく異なる。1次主冷却系コールドレグ配管配置図を図2.2.2-5に示す。コールドレグ配管長は実証炉の28.2m (1/3縮尺では9.4m) に対して31.2mとなっている。

2.2.2.2 2次主冷却系機器

2次主冷却系は蒸気発生器、空気冷却器、2次主循環ポンプ等から構成される。

蒸気発生器 (SG) は、ヘリカルコイル型伝熱管を有するナトリウムと水・蒸気の一体貫流型の熱交換器であり、胴側に2次系ナトリウムを流すことにより伝熱管内の水・蒸気を加熱し、加熱蒸気を水・蒸気系 (再循環系) へ供給し、蒸気を減温・減圧して冷却水系により大気へ放熱するものであり、2次主冷却系の1系統に対応して1基が設置される。水・蒸気側伝熱流動の模擬性の点で高さ方向1/1縮尺とした。径方向にも空間分布を模擬できるように最低5層の伝熱コイルが必要なことから規模が大きくなり、1次系2ループに対して2基設けることはせず、ループを集約してSGは

1 基とした。SGの構造図を図2.2.2-6に示す。

空気冷却器は、SG試験体を分離して1次系主体の試験を行うため、2次主冷却系ホットレグ配管からバイパスさせたナトリウムを空気で冷却して2次主冷却系コールドレグに戻すSGを介さない冷却システムを構成する。空気冷却器の構造図を図2.2.2-7に示す。

2次主循環ポンプは2次系ナトリウムを循環させるための機械式ポンプであり、既設ものを流用することとしている。

2次主冷却系配管は、2ループを1ループに集約する構造となっていること、及び分岐、合流、弁の存在により実証炉の形状と大きく異なる。2次主冷却系配管配置図を図2.2.2-8～図2.2.2-10に示す。2次系配管長は実証炉の108.9m（1/3縮尺では36.3m）に対して122.2mとなっている。

3. 2次系配管長が動特性に与える影響

2次系配管長、2次系配管圧力損失及びIHXとSGの伝熱中心差をパラメータとし、1/3縮尺条件に一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡に与える影響を把握する。そして、2次系配管長短縮の必要性等、試験装置の設計方針を検討する。

3.1 解析対象熱過渡

ポニーモータ引継ぎによる崩壊熱除去運転の代表として、手動トリップ熱過渡模擬試験の解析を実施する。また、自然循環除熱の代表として、自然循環試験（全電源喪失模擬試験）の解析を実施する。

3.2 解析パラメータ

解析パラメータは基本的に2次系配管長とするが、1/3縮尺条件を満足させる観点から2次系配管長の変更と同時に修正する必要がある項目が存在するため、併せて変更する。以下に変更項目を示す。

- ・ 2次系配管長
- ・ 2次系配管圧力損失
- ・ IHXとSGの伝熱中心差
- ・ 2次主循環ポンプ最低回転数

解析は、実証炉の1/3縮尺条件及び1/3縮尺条件と基本設計結果の中間の条件に対して実施する。以下に、解析パラメータ及び設定値を示す。

3.2.1 2次系配管長

1/3縮尺条件は実証炉配管長の1/3とする。中間条件は1/3縮尺条件と基本設計結果の算術平均値とする。

2次系配管長パラメータの設定値を表3.2.1-1に示す。

3.2.2 2次系配管圧力損失

(1) 基本方針

1/3縮尺条件における2次系配管圧損は、2次系全体の自然循環時の圧損が実証炉の1/3縮尺条件で設定される値となるように設定する。以下に設定手順を示す。

- ・ 実証炉の1/3縮尺条件から、試験体として設定すべき2次系全体の自然循環時の圧損を算出する。
- ・ 試験体構造から算出される機器圧損（IHX、SG）を上記2次系全体の圧損から差し引いた残りを配管圧損とする。

・実証炉の圧損分布に従い、ホットレグ、ミドルレグ及びコールドレグの圧損を設定する。

また、1/3縮尺条件と基本設計結果の中間の値としては、単純な算術平均値を採用する。

(2) 1/3縮尺における相似則一致の条件

自然循環試験時、Eu数を一致させる必要があるため、2次系全体の圧損係数を実機と試験体で一致させる必要がある。

ここで、()は「試験体／実証炉」を示す。

$$\Delta P = 0.5 \xi \rho v^2$$

ΔP : 圧力損失

ξ : 圧力損失係数

ρ : 密度

v : 流速

ここで、 $(\xi) = 1$ より、

$$(\Delta P) = (v)^2$$

温度成層化を特徴づけるRi数を一致させるため、2次系における代表温度差を実証炉と試験体で一致させたとき、流速は縮尺比の0.5乗に比例させる必要がある。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T L}{v^2}$$

$$(Ri) = \frac{(\Delta T)(L)}{(v)^2} = 1$$

$$(v) = (L)^{0.5}$$

Ri : Ri数

g : 重力加速度

β : 体膨張係数

ΔT : 代表温度差

L : 代表長さ

従って、

$$(\Delta P) = (L) = 1/3$$

すなわち、1/3縮尺における相似則一致の条件を満足するためには、自然循環時の2次系全体の圧力損失を実証炉の1/3とする必要がある。

(3) 設定値

表3.2.2-1に実証炉及び基本設計の2次主冷却系の圧力損失及びEu数を示す。基本設計ではケース1を用いている。1/3縮尺で実証炉とEu数を一致させるためには、

2次系全体の自然循環時の圧力損失を基本設計値の約1/2となる 0.0076kg/cm^2 (= $0.023\text{kg/cm}^2/3$) とする必要がある。2次系全体の圧力損失からIHX試験体 (0.0012kg/cm^2) 及びSG試験体 (0.0021kg/cm^2) の圧力損失を差し引いた残り (0.0043kg/cm^2) を実証炉の自然循環時と同じ比率でホットレグ (0.0014kg/cm^2)、ミドルレグ (0.0013kg/cm^2)、コールドレグ (0.0016kg/cm^2) に割り振り、基本設計の圧力損失値に基づく比例計算で定格時の圧損値を算出した。表3.2.2-2に、2次系配管圧損の設定値 (定格時) を示す。

3.2.3 IHXとSGの伝熱中心差

(1) 基本方針

基本設計においては、自然循環時のEu数が実証炉の約2倍であること及び圧損を試験パラメータとすることを考慮して、IHXとSGの伝熱中心差を1/3縮尺条件から設定される値の3倍としている。しかし、1/3縮尺条件の解析においては、自然循環時のEu数が実証炉のEu数と一致するように2次系配管圧損を調節しているため、IHXとSGの伝熱中心差を1/3縮尺条件と一致させることとする。

また、1/3縮尺条件と基本設計結果の中間の値としては、単純な算術平均値を採用する。

(2) 相似則

相似則に基づくEu数とIHXとSGの伝熱中心差の関係を以下に示す。

ここで、()は「試験体/実証炉」を示す。

温度成層化を特徴づけるRi数を一致させるため、2次系における代表温度差を実証炉と試験体で一致させたとき、流速の2乗を縮尺比に比例させる必要がある。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T L}{v^2}$$

$$(Ri) = \frac{(\Delta T)(L)}{(v)^2} = 1$$

$$(v)^2 = (L) \quad \dots\dots\textcircled{1}$$

Ri : Ri数

g : 重力加速度

β : 体膨張係数

ΔT : 代表温度差

L : 代表長さ

自然循環時、2次系全体の圧力損失値はIHXとSGの伝熱中心差により発生する駆動力と一致する。

$$\Delta P = 0.5 \xi \rho v^2 = g \rho \beta \Delta T L_H$$

$$(\xi)(v^2)=(L_H)$$

ΔP : 圧力損失

ξ : 圧力損失係数

ρ : 密度

v : 流速

L_H : IHXとSGの伝熱中心差

①式を代入して

$$(L_H)=(\xi)(L)$$

従って、縮尺比(L)=1/3の場合、 $(\xi)=1$ とすれば $(L_H)=1/3$ とすることで相似則が満足され、 $(\xi)=3$ とすれば $(L_H)=1$ とすることで相似則が満足される。

(3) 設定値

1/3縮尺条件の解析においては、自然循環時のEu数が実証炉のEu数と一致するように2次系配管圧損を調節しているため、IHXとSGの伝熱中心差を実証炉の1/3とする。

- ・実証炉のIHX～SG伝熱中心差；5.38 m
- ・1/3縮尺条件のIHX～SG伝熱中心差； $5.38 \times (1/3) = 1.79$ m

表3.2.3-1にIHXとSGの伝熱中心差の設定値を示す。

3.2.4 2次主循環ポンプ最低回転数

(1) 基本方針

基本設計においては、2次主循環ポンプの最低回転数を10.724rad/secとしており、ポニーモータ移行後相当の流量割合が実証炉解析結果とほぼ一致している。

1/3縮尺条件においては、2次系全体の圧損の低下を考慮し、最低回転数を低下させるものとする。

また、1/3縮尺条件と基本設計結果の中間の値としては、単純な算術平均値を採用する。

(2) 設定値

2次主循環ポンプのQ-H特性ネットワークデータは下式で表される。

$$H = -0.11891 G^2 + 0.066264 G N + 3.374 N^2 \quad \dots\dots\textcircled{1}$$

H : 吐出圧 (kg/m²)

G : 流量 (kg/sec)

N : 回転数 (rad/sec)

ポンプモータ移行後相当の流量は定格流量（1/3縮尺条件）の8%であることから以下となる。

$$825\text{ton/hr} \times 8\% / 78.9\% \times 1000 / 3600 = 23.24\text{kg/sec}$$

①式より10.724rad/sec（基本設計の最低回転数）、23.24kg/secにおいて、吐出圧は340kg/m²となる。

3.2.2項に示すように、1/3縮尺条件においては、圧力損失が基本設計の0.5倍（Eu数一致の条件）となった。そこで、吐出圧を340kg/m²×0.5=170kg/m²とし、流量を23.24kg/secとして、①式から得られる回転数8.11rad/secを最低回転数とする。

なお、中間条件は、基本設計と1/3縮尺条件の算術平均とし、9.42rad/secとする。表3.2.4-1に2次主循環ポンプ最低回転数の設定値を示す。

3.3 解析コード

解析コードは、「モジュール型プラント動特性解析コードSuper-COPD」⁽⁷⁾を使用する。

3.4 解析モデル

解析モデルは、基本設計結果に基づいたモデルに、3.2項に示す解析パラメータに関する変更を加えたモデルを使用する。

3.5 解析結果

3.5.1 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果

(1) 解析結果

解析結果は、原則として、1/3縮尺条件、中間条件、基本設計及び実証炉の各解析結果を重ねて表示する。実証炉の体系は平成9年度までのPhase1設計を元としている。

なお、時間の相似則はRi数一致条件より、以下となる。

ここで、()は「試験体/実証炉」を示す。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta TL}{v^2}$$

$$(Ri) = \frac{(L)}{(v)^2} = 1$$

$$(v) = \sqrt{(L)}$$

上記関係を $(t) = \frac{(L)}{(v)}$ に代入すれば、

$$(t) = \frac{(L)}{(v)} = \sqrt{(L)} = \sqrt{\frac{1}{3}}$$

t：時間

従って、試験施設の時間スケールは実証炉の時間スケールの $\sqrt{1/3}$ 倍となる。解析結果では、実証炉の時間スケールを $\sqrt{1/3}$ 倍して試験施設の時間スケールに一致させた。

図3.5.1-1に、原子炉容器入口温度を示す。

図3.5.1-2に、原子炉容器出口温度を示す。

図3.5.1-3に、炉心入口温度を示す。

図3.5.1-4に、炉心出口温度を示す。

手動トリップ熱過渡模擬試験解析では、1次系、2次系とも強制循環であるため、ループ間の差異は極わずかであった。そこで、IHX回りの温度は代表としてAループについて示す。

図3.5.1-5に、IHX 1次側入口温度を示す。

図3.5.1-6に、IHX 1次側出口温度を示す。

図3.5.1-7に、IHX 2次側入口温度を示す。

図3.5.1-8に、IHX 2次側出口温度を示す。

図3.5.1-9に、SG入口Na温度を示す。

図3.5.1-10に、SG出口Na温度を示す。

図3.5.1-11に、SG入口給水温度を示す。

図3.5.1-12に、SG出口蒸気温度を示す。

図3.5.1-13に、1次系流量を示す。

図3.5.1-14に、2次系流量を示す。

図3.5.1-15に、SG給水流量を示す。

(2) 考察

1/3縮尺条件、中間条件及び基本設計結果を比較し、2次系配管を短縮した場合の熱過渡の模擬性への影響について考察する。

a. 1次系流量への影響

1次系流量（図3.5.1-13）はフローコストダウンの後、1次系ポニーモータ流量で一定となっており、各条件とも実証炉熱過渡とほぼ一致している。

b. 2次系流量への影響

2次系流量（図3.5.1-14）はフローコストダウンの後、自然循環力の影響で2次系ポニーモータ流量以上の流量となるが、各条件とも実証炉熱過渡とほぼ一致している。このことから、2次系配管長が基本設計程度に長く圧力損失が大きい場合でも、IHXとSGの伝熱中心差及び2次主循環ポンプ最低回転数を適切に設定することにより、実証炉熱過渡の模擬が可能であると言える。

c. 時間遅れへの影響

b. 項に示すとおり2次系流量は実証炉熱過渡とほぼ一致しているため、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより、2次系配管の輸送遅れは実証炉熱過渡を模擬できるはずである。以下に、2次系配管長を短縮することの時間遅れへの影響を考察する。

参考として、基本設計と1/3縮尺条件について、2次系各部のNa重量を比較した結果を表3.5.1-1及び図3.5.1-16に示す。基本設計の2次系配管は1/3縮尺条件に比べてNa重量が大きい。また、SGは水・蒸気側伝熱流動の模擬性を高めるため、高さ方向1/1縮尺の部分モデルとしているため、1/3縮尺条件に比べてNa重量が大きくなる。2次ポンプは既設ポンプを流用する場合の値である。

2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることによる時間遅れへの影響を表3.5.1-3にまとめて示す。

(a) IHX 2次側入口温度 (図3.5.1-7)

温度低下の開始時刻(実証炉：約50秒、1/3縮尺条件：約50秒)は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡と一致している。これは、SG容器出口温度(図3.5.1-10)の低下(約0秒～)がIHX 2次側入口温度に現れるまでの時間遅れが一致するためである。

一方、温度上昇の開始時刻(実証炉：約450秒、1/3縮尺条件：約700秒)は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。これは、SG容器出口温度(図3.5.1-10)上昇の開始時刻(実証炉：約400秒、1/3縮尺条件：約650秒)が異なっているためである。この温度上昇は、再循環系が起動することにより生じるもので、再循環系が実証炉の高さ方向1/1縮尺の部分モデルとして設計されているため、再循環系が起動するまでの時間遅れは実証炉の実時間(約400秒 \times 30.5=約700秒)と一致する。従って、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させるだけでは温度上昇の開始時刻が実証炉と一致せず、気水分離器の設計を変更する必要があるが、気水分離器は性能要求の点から設計が制限される。

(b) IHX 2次側出口温度 (図3.5.1-8)

初期の温度上昇の開始時刻(約0秒)は、2次系配管長によらず実証炉熱過渡と一致している。この温度上昇は、流速の低下により2次Na温度が1次Na温度に近づくことにより生じるため、2次系配管長の影響は受けない。

一方、温度低下の開始時刻(実証炉：約100秒、1/3縮尺条件：約200秒)

は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させてもほとんど変化せず、実証炉熱過渡とも一致しない。これは、IHX 1次側入口温度（図3.5.1-5）低下の開始時刻（実証炉：約0秒、試験装置：約100秒）が異なっているためであり、結局、炉容器出口温度（図3.5.1-2）低下の開始時刻（実証炉：約0秒、試験装置：約100秒）が異なっているためである。試験装置におけるこの温度低下の遅れは、加熱器バイパスから炉心入口までに存在する高温Naが炉心に流れ込むことによるもので、2次系配管長にはほとんど無関係である。

また、温度上昇の開始時刻（実証炉：約900秒、1/3縮尺条件：約1400秒）は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。この温度変化は、再循環系の起動によるSG容器出口温度（図3.5.1-10）の上昇（実証炉：約400秒～、1/3縮尺条件：約650秒～）の影響が1次系を介して現れるためである。従って、実証炉との差異の原因はSG容器出口温度の上昇の開始時刻が異なっていること（(a)項「IHX 2次側入口温度」の温度上昇の説明参照。）、及び、1次系のNaインベントリが1/3縮尺条件より約30%大きいことによる。

(c) SG容器入口温度（図3.5.1-9）

初期の温度上昇の開始時刻（実証炉：約10秒、1/3縮尺条件：約10秒）は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡と一致している。これは、IHX 2次側出口温度（図3.5.1-8）の上昇（約0秒～）がSG容器入口温度に現れるまでの時間遅れが一致するためである。

一方、温度低下の開始時刻（実証炉：約150秒、1/3縮尺条件：約250秒）は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。これは、結局、炉容器出口温度（図3.5.1-2）低下の開始時刻（実証炉：約0秒、試験装置：約100秒）が異なっているためである。

（(b)項「IHX 2次側出口温度」の温度低下の説明参照。）

また、温度上昇の開始時刻（実証炉：約950秒、1/3縮尺条件：約1500秒）は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。（(b)項「IHX 2次側出口温度」の温度上昇の説明参照。）

(d) SG容器出口温度（図3.5.1-10）

初期の温度低下の開始時刻（約0秒）は、2次系配管長によらず実証炉熱過渡と一致している。この温度低下は、流速の低下により2次Na温度が給水温度に近づくことにより生じるため、2次系配管長の影響は受けない。

一方、温度上昇の開始時刻（実証炉：約400秒、1/3縮尺条件：約650秒）は、2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。（(a)項「IHX 2次側入口温度」の温度上昇の説明参照。）

(e) 1次系時間遅れへの影響

2次系配管長を1/3縮尺条件と一致させることにより、再循環系の起動によるSG容器出口温度（図3.5.1-10）の上昇（実証炉：約400秒～、1/3縮尺条件：約650秒～）の影響が現れる時点が実証炉熱過渡に近づくが、一致はしない。

d. 温度勾配への影響

基本設計の2次系配管長を1/3縮尺条件とした場合でも、温度勾配の変化はわずかである。ただし、SG及び再循環系が高さ方向1/1縮尺の部分モデルであること等により、試験装置の温度勾配は実証炉より緩やかになっている。これは、2次系配管長を1/3縮尺条件とした場合でも同様である。

e. 温度差への影響

基本設計の2次系配管長を1/3縮尺条件とした場合でも、温度差の変化は10℃以下であり、基本設計及び1/3縮尺条件とも実証炉熱過渡とほぼ一致している。

3.5.2 自然循環試験（全電源喪失模擬試験）解析結果

(1) 解析結果

解析結果は、原則として、1/3縮尺条件、中間条件、基本設計及び実証炉の各解析結果を重ねて表示する。なお、時間スケールは、3.5.1(1)項に示すように、実証炉の時間スケールを $\sqrt{1/3}$ 倍して試験施設の時間スケールに一致させた。

図3.5.2-1に、原子炉容器入口温度を示す。

図3.5.2-2に、原子炉容器出口温度を示す。

図3.5.2-3に、炉心入口温度を示す。

図3.5.2-4に、炉心出口温度を示す。

1/3縮尺条件及び中間条件ではループ間に差異が生じたため、IHX回りの温度をA Bループについて示す。一方、基本設計及び実証炉ではループ間の差異は極わずかであるため、代表としてAループについて示す。

図3.5.2-5に、IHX 1次側入口温度を示す。

図3.5.2-6に、IHX 1次側出口温度を示す。

図3.5.2-7に、IHX 2次側入口温度を示す。

図3.5.2-8に、IHX 2次側出口温度を示す。

図3.5.2-9に、SG入口Na温度を示す。

図3.5.2-10に、SG出口Na温度を示す。

DRACS系ループ間の差異は極わずかであった。そこで、DHX回りの温度は代表としてAループについて示す。

図3.5.2-11に、DHX 1次側入口温度を示す。

図3.5.2-12に、DHX 1次側出口温度を示す。

図3.5.2-13に、DHX 2次側入口温度を示す。

図3.5.2-14に、DHX 2次側出口温度を示す。

図3.5.2-15に、1次系流量を示す。なお、図3.5.2-15(1/4)及び(2/4)はA Bループ合計の流量であり、(3/4)及び(4/4)はループ間に差異を生じた1/3縮尺条件及び中間条件のループ毎の流量である。

図3.5.2-16に、2次系流量を示す。なお、図3.5.2-16(1/4)及び(2/4)はA Bループ合計の流量であり、(3/4)及び(4/4)はループ間に差異を生じた1/3縮尺条件及び中間条件のループ毎の流量である。

DRACS系ループ間の差異は極わずかであった。そこで、DRACS系流量は代表としてAループについて示す。

図3.5.2-17に、DRACS 1次系流量を示す。

図3.5.2-18に、DRACS 2次系流量を示す。

図3.5.2-19に、DRACS空気系流量を示す。

(2) 考察

1/3縮尺条件、中間条件及び基本設計結果を比較し、2次系配管を短縮した場合の熱過渡の模擬性への影響について考察する。

a. 1次系流量への影響

1次系全体の流量（図3.5.2-15(2/4)）はフローコストダウンの後、自然循環力による流量となり、徐々に低下している。2次系配管長を1/3縮尺条件とした場合、2次系流量低下が早いため、1次系流量の低下が早い時点から始まり、実証炉に近づいている。

1/3縮尺条件における1次系A Bループ毎の流量（図3.5.2-15(3/4)）は、約2800秒以降、差異を生じている。これは、2次系の1ループのみに逆流が生じることに起因し、2次系2ループを1ループに分岐合流している試験装置に特有の現象である。逆流の発生メカニズムは次項に示す。なお、中間条件の流量（図3.5.2-15(4/4)）及び基本設計の流量には、ループ間の差異はほとんど発生しなかった。

b. 2次系流量への影響

2次系全体の流量（図3.5.2-16(2/4)）はフローコストダウンの後、自然循環力による流量となり、徐々に低下している。1/3縮尺条件では基本設計の結果に比べ2次系流量の低下が早い時点から始まっている。また、全ての条件で間欠的な逆流が発生している。ただし、基本設計においてはわずかな逆流であるのに対し、1/3縮尺条件においては定格流量の5%に相当する逆流が発生し、ループ間には大きな流量差が生じている（図3.5.2-16(3/4)）。2次系流量の低下が早い理由及び逆流が発生する機構を以下に示す。

(a) 基本設計における逆流の発生状況

基本設計におけるIHX及びSGの設置レベルを図3.5.2-20に示す。IHXの伝熱部上端はSG伝熱部下端より下側となっており、実証炉の状態と同じである。

自然循環試験時の2次系温度分布の推移を図3.5.2-21に示す。SGの除熱力が失われた後、1次系が高温の間はIHX出口Na温度が高温となるため自然循環力により正流が維持され、2次系全体が高温となる。その後、DRACS系の除熱により1次系が低温となり、2次系がIHXにより除熱されるため逆流が発生する。ただし、コールドレグNaも高温となっているため、IHX回りが低温となった状態で安定となり逆流は停止する。

(b) 1/3縮尺条件における逆流の発生状況

1/3縮尺条件におけるIHX及びSGの設置レベルを図3.5.2-22に示す。IHXとSGの伝熱中心差が実証炉の1/3縮尺条件となる位置に長尺（高さ方向1/1縮尺）のSGを設置したため、IHXの伝熱部下端はSG伝熱部下端より上側となっており、実証炉の状態と異なっている。

自然循環試験時の2次系温度分布の推移を図3.5.2-23に示す。SGの除熱力が失われた後、1次系が高温の間はIHX出口Na温度が高温となるため自然循環力により正流が維持されるが、IHXの設置レベルが高いためSG下端まで高温Naが到達できず、コールドレグ配管内が低温の状態流動が停止する。従って、2次系流量の低下が基本設計より早い。

その後、DRACS系の除熱により1次系が低温となり、2次系がIHXにより除熱されるため、2次系全体に逆流が発生する。ここで、IHXから出てくるNaはコールドレグ配管内のNaより高温であるため、A BループのIHXで微少な流量差が発生するとループ間のバランスが崩れ、流量が大きい方の下降パス（逆流時は上昇パス）が高温となるため逆流する方向の自然循環力が大きくなり、ル

ープ間の流量差が拡大する方向（一時的にBループが逆流、Aループが正流となる）に推移する。その後、ABループのIHX入口をつなぐコールドレグ配管内の低温NaがIHXから流出したNaに入れ替わった段階で、ループ間の流量差は解消し、2次系全体のバランスが取れた状態で流動が停止する。

(c) 逆流の発生状況まとめ

IHXとSGの伝熱中心差を1/3縮尺条件と一致させた場合、IHX伝熱部下端がSG伝熱部下端より上側となるため、熱過渡初期、実証炉において2次系全体が高温となるところで、コールドレグ配管が低温のまま取り残される。さらに、2次系が分岐合流していることと相まって、ループ間に不安定な状態が形成され、1ループだけに10%流量に達する逆流が発生する。この現象は実証炉では発生しない。

なお、中間条件では、基本設計と1/3縮尺条件の中間的な挙動を示している。

2次系全体の過渡時の温度分布を一致させることは自然循環試験において重要なことであり、実証炉では発生しない1ループだけの逆流現象が発生しない試験体とする必要がある。そのためには、IHXの伝熱部上端をSG伝熱部下端より下側とする必要があり、これは、伝熱中心差を中間条件以上とすることに対応する。伝熱中心差を中間条件以上とした場合、自然循環力が1/3縮尺条件より増加するため、3.2.3(2)項に記載の相似則に従い、Eu数を1/3縮尺条件より増加させる必要がある。

c. 時間遅れへの影響

2次系配管長等を1/3縮尺条件とすることの時間遅れへの影響を考察する。

(a) IHX 2次側入口温度 (図3.5.2-7)

温度上昇の開始時刻（実証炉：約500秒、1/3縮尺条件：約700秒）は、実証炉熱過渡に近づくが一致はしない。これは、SG容器出口温度（図3.5.2-10）上昇の開始時刻（実証炉：約300秒～、1/3縮尺条件：約500秒～）が異なっているためである。この温度上昇は、SGでの除熱が停止することによるもので、SGが実証炉の高さ方向1/1縮尺の部分モデルであることから、開始時刻が実証炉熱過渡の相似条件より遅れている。

(b) SG容器出口Na温度 (図3.5.2-10)

SG容器出口Na温度（図3.5.2-10）上昇の開始時刻（実証炉：約300秒、1/3縮

尺条件：約500秒）は、(a)項に示す理由により実証炉熱過渡と一致しない。さらに、1/3縮尺条件の流量低下が早いため輸送遅れが大きくなり、1/3縮尺条件の方が実証炉熱過渡から離れる結果となっている。

(c) 1次系時間遅れへの影響

炉心出口温度（図3.5.2-4）上昇の開始時刻（実証炉：約1000秒、1/3縮尺条件：約1600秒）が実証炉に近づくが一致はしない。これは、1次系流量（図3.5.2-15(2/4)）低下の開始時刻（実証炉：約800秒、1/3縮尺条件：約1500秒）が異なるためである。これは、IHX 1次側出口温度（図3.5.2-6）上昇の開始時刻（実証炉：約600秒、1/3縮尺条件：約1000秒）が異なるためであり、結局、IHX 2次系流量（図3.5.2-16(2/4)）の低下が遅く、除熱が継続されること、及びIHX 2次側入口温度（図3.5.2-7）上昇の開始時刻（実証炉：約500秒、1/3縮尺条件：約700秒）が異なるためである。（(a)項「IHX 2次側入口温度」の説明参照。）

d. 温度勾配への影響

1/3縮尺条件ではSGの設置レベルを低下させているため、基本設計に比べて2次系流量の低下が早い時点から始まり、温度勾配が緩やかになる。また、SG容器出口Na温度（図3.5.2-10）の温度勾配が実証炉熱過渡より緩やかであるため、コールドレグの温度勾配は実証炉より緩やかである。これは、SGが実証炉の高さ方向1/1縮尺の部分モデルであり、輸送遅れの時間スケールが他の部分より遅いことによる。

e. 温度差への影響

2次系配管長等を基本設計から1/3縮尺条件とすることの温度差への影響を考察する。

(a) IHX 2次側入口温度（図3.5.2-7）

1/3縮尺条件とすることにより、温度上昇幅（実証炉：約500秒～、1/3縮尺条件：約700秒～）は低下し、実証炉から離れている。これは、SGの設置レベルを低下させたことにより、IHX伝熱部下端がSG伝熱部下端より上側となるため、2次系コールドレグが比較的低温の状態での2次系流量（図3.5.2-16(2/4)）が停止するためである。

(b) IHX 2次側出口温度 (図3.5.2-8)

1/3縮尺条件とすることにより、温度が上昇している。これは、SGの設置レベルを低下させたことにより、2次系流量 (図3.5.2-16(2/4)) の低下が早くから始まるため、2次側出口温度が1次側入口温度 (図3.5.2-5) 近傍まで上昇し、2次系の流動が停止することにより高温状態に維持されるためである。

(c) SG容器入口Na温度 (図3.5.2-9)

(b) 項「IHX 2次側出口温度」と同様である。

(d) SG容器出口Na温度 (図3.5.2-10)

(a) 項「IHX 2次側入口温度」と同様である。

(e) 1次系温度差への影響

基本設計の2次系配管長を1/3縮尺条件とした場合でも、温度差の変化は小さい (最大20℃程度)。

また、試験施設は実証炉よりコールドレグの温度上昇幅が小さいが、これは、2次系コールドレグのナトリウムインベントリが大きいいため、IHX 2次側が長時間低温に保たれることによる。

3.6 まとめ

2次系配管長、2次系配管圧力損失及びIHXとSGの伝熱中心差をパラメータとして、1/3縮尺条件に一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施した結果、以下の知見を得た。

(1) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析について

- ・ 2次系配管長を1/3縮尺条件とすることにより、熱過渡の時間遅れは200秒程度改善され、IHX 2次側入口温度の初期低下とSG容器入口温度の初期上昇の開始時刻は実証炉熱過渡の時間挙動と一致する。
- ・ 再循環系の起動によるSG容器出口温度の上昇に起因する温度変化の時間遅れは、再循環系が実証炉の高さ方向1/1縮尺の部分モデルとして設計されているため、配管長によらずSG出口において実証炉熱過渡から250秒程度遅れる。時間遅れを一致させるためには気水分離器の設計を変更する必要があるが、気水分離器は性能要求の点から設計が制限される。
- ・ 出力低下による炉容器出口温度の低下に起因する2次系の温度変化の時間遅れは、加熱器バイパスから炉心入口までに存在する高温Naが炉心に流れ込み、1次

系において100秒程度の遅れが生じるため、配管長によらず実証炉熱過渡から100秒程度遅れる。

- ・過渡変化の温度勾配は2次系配管長の変化に大きな影響を受けない。なお、SGが高さ方向1/1縮尺の部分モデルであることから、コールドレグの温度勾配は実証炉より緩やかとなっている。

以上より、2次系配管長を1/3縮尺条件に一致させることにより熱過渡の時間遅れは200秒程度改善され実証炉の相似条件に近づくが、再循環系の起動時間遅れ（約250秒）及び加熱器バイパスから炉心入口までに存在する高温Naの影響による時間遅れ（約100秒）は残る。

(2) 自然循環試験について

- ・2次系配管長、2次系配管圧力損失及びIHXとSGの伝熱中心差を1/3縮尺条件とした場合、IHX伝熱部下端がSG伝熱部下端より上側となることにより2次系コールドレグが比較的低温の状態では2次系の流動が停止する。そのため、コールドレグ側の温度上昇幅が減少し、実証炉との差異が拡大する。
- ・2次系コールドレグが比較的低温の状態では2次系の流動が停止することと、2ループを1ループに分岐合流させている2次系の系統構成のため、ループ間に不安定な状態が形成され、実証炉では発生しない1ループだけの逆流が発生する。
- ・2次系全体の温度分布を一致させ、実証炉では発生しない1ループだけの逆流が発生しない試験体とするために、IHXの伝熱部上端をSG伝熱部下端より下側とする必要がある。これは、伝熱中心差を1/3縮尺条件の2倍（解析での中間条件）以上とすることに対応する。この場合、自然循環力が1/3縮尺条件より増加するため、相似則に従ってEu数を1/3縮尺条件より増加させバランスをとる必要がある。
- ・流量変化及びコールドレグ熱過渡の時間遅れは若干改善され実証炉の相似条件に近づくが、コールドレグの温度勾配が緩やかになり実証炉から離れると共に、温度上昇幅が減少し、実証炉から離れている。これは、SGの設置レベルを低下させたことにより、2次系コールドレグが比較的低温の状態では2次系流量が停止するためである。

4. ループ間アンバランスが動特性に与える影響

試験装置の2次系には、実証炉には無い分岐合流配管が存在する。特に自然循環時にはループ間のアンバランスが助長され、2次系のSGと片方のIHXにのみ選択的に自然循環が発達することも考えられる。そのような試験体に特異な現象が発生しないこと、または影響が小さいことを確認するため、IHX伝熱面積及び2次系圧損係数または1次系圧損係数にループ間で差異を与えた場合の自然循環試験解析を各々実施し、試験に与える影響を評価する。

4.1 解析対象熱過渡

強制循環条件においては、ループ間に差異がある場合でも流量が安定して維持されることは明白であり、試験の実施にあたって大きな問題が生じるとは考えにくい。一方、自然循環条件においては、ループ間の流量及び温度の差異がどの程度に拡大するか予想が難しく、解析により確認する必要がある。

そこで、解析は1次系及び2次系が自然循環条件となる自然循環試験（全電源喪失模擬試験）を対象とする。

4.2 アンバランス発生機構

自然循環時に、ループ間のアンバランスが増大する機構としては、以下が考えられる。

4.2.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合

IHX伝熱面積に差異がある場合、定格運転時にループ間に生じる温度差を解消するためにはループ間に流量差を付ける必要がある。1次系は1次系ポンプ回転数を調節することにより対応が可能であるが、2次系は分岐配管部分の弁開度を調節してループ間に圧損係数差を発生させる必要がある。従って、IHX伝熱面積に差異がある場合には、必然的に2次系圧損係数にも差異が生じる。

(1) IHX 2次系出口ナトリウム温度が上昇する場合

- ・ 2次系圧損係数差により流量にアンバランスを生じている。（Aループの流量及び伝熱面積が大きいとする。）
- ・ IHX 2次系出口ナトリウム温度が上昇する熱過渡が加わる。
- ・ 流量が大きいAループの2次系ホットレグはBループより早く高温となるため、Bループ以上に自然循環力が発生する。
- ・ 自然循環力の増加により、Aループ2次系流量が更に増加する。

(2) IHX 2次系入口ナトリウム温度が低下する場合

- ・ 2次系圧損係数差により流量にアンバランスを生じている。(Aループの流量及び伝熱面積が大きいとする。)
- ・ A Bループ分岐部のナトリウム温度が低下する熱過渡が加わる。
- ・ 流量が大きいAループの2次系コールドレグはBループより早く低温となるため、Bループ以上に自然循環力が発生する。
- ・ 自然循環力の増加により、Aループ2次系流量が更に増加する。

4.2.2 1次系圧損係数に差異がある場合

- ・ 1次系圧損係数差により流量にアンバランスを生じている。(Aループの1次系圧損が大きく1次系流量が小さいとする。)
- ・ Aループ1次系流量が小さいため、AループIHX 2次系出口温度が低下し、自然循環力の低下によりAループ2次系流量が低下する。
- ・ Aループ2次系流量の低下により、AループIHX 1次系出口温度が上昇する。
- ・ 自然循環力の低下によりAループ1次系流量が更に低下する。

4.3 解析コード

解析コードは、「モジュール型プラント動特性解析コードSuper-COPD」⁽⁷⁾を使用する。

4.4 解析モデル

解析モデルは、基本設計結果に基づいたモデルに、以下の変更を加えたモデルを使用する。

4.4.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合

(1) IHX伝熱面積

IHX伝熱面積に製作誤差を考慮した差異を与える。差異は、実証炉IHXの伝熱面積余裕が5%であることから、±5%とする。伝熱計算モデルでは伝熱管長さを以下のように変更する。ただし、圧損係数値及び自然循環力計算時のレベルは変更しない。

- ・ AループIHXの伝熱管長さ；105% (1.953m)
 - ・ BループIHXの伝熱管長さ；95% (1.767m)
- (基本設計IHXの伝熱管長さ；1.86m)

(2) 1次主循環ポンプ回転数

IHX伝熱面積を変更したことにより、IHX 1次側及び2次側出口温度を定格運転条件に一致させるためには、1次系及び2次系流量を調節する必要がある。そこで、1次系については、1次主循環ポンプ回転数を調節することにより流量を調節する。

- ・ Aループ1次主循環ポンプ回転数；193.8rad/s、流量；144.5kg/s（105%）
 - ・ Bループ1次主循環ポンプ回転数；188.2rad/s、流量；130.8kg/s（95%）
- （基本設計1次主循環ポンプ回転数；191.0rad/s、流量；137.6kg/s）

(3) 2次系圧損係数

IHX伝熱面積を変更したことにより、IHX 1次側及び2次側出口温度を定格運転条件に一致させるためには、1次系及び2次系流量を調節する必要がある。そこで、2次系については、BループIHX入口配管に弁を追加し圧損係数を調節することにより流量を調節する。下記圧力損失はA Bループが分離している部分の値である。

- ・ Aループ圧損；2008kg/m²、流量；120.3kg/s（105%）
 - ・ Bループ圧損；2008kg/m²（弁圧損；347kg/m²）、流量；108.9kg/s（95%）
- （基本設計圧損；1830kg/m²、流量；114.6kg/s）

4.4.2 1次系圧損係数に差異がある場合

(1) 1次系圧損係数

1次系圧損係数に製作誤差を考慮した差異を与える。差異は、IHX伝熱面積と同様に±5%とする。なお、圧損係数に差異が生じる部分は、ホットレグ配管からコールドレグ配管合流部までであり、その他の炉心等は同一の圧損係数である。下記圧力損失はA Bループが分離している部分の値である。

- ・ Aループ圧損；3058kg/m²（105%）、流量；137.6kg/s
 - ・ Bループ圧損；2766kg/m²（95%）、流量；137.6kg/s
- （基本設計圧損；2912kg/m²、流量；137.6kg/s）

(2) 1次主循環ポンプ回転数

1次系圧損係数を変更したことにより、1次系流量を定格運転条件に一致させるためには、1次主循環ポンプ回転数を調節する必要がある。

- ・ Aループ1次主循環ポンプ回転数；191.1rad/s、流量；137.6kg/s
 - ・ Bループ1次主循環ポンプ回転数；190.9rad/s、流量；137.6kg/s
- （基本設計1次主循環ポンプ回転数；191.0rad/s、流量；137.6kg/s）

4.5 解析結果

4.5.1 IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合

(1) 解析結果

図4.5.1-1に、ループ毎の1次側流量を示す。

図4.5.1-2に、IHX容器1次側入口温度（1次系ホットレグ配管出口温度）を示す。

図4.5.1-3に、IHX容器1次側出口温度（1次系コールドレグ配管入口温度）を示す。

図4.5.1-4に、ループ毎の2次側流量を示す。

図4.5.1-5に、IHX容器2次側入口温度（2次側下降管入口温度）を示す。

図4.5.1-6に、IHX容器2次側出口温度（2次側上昇管出口温度）を示す。

図4.5.1-7に、IHX伝熱部軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

図4.5.1-8に、SG伝熱部軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

図4.5.1-9に、炉心軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

(2) 考察

IHX伝熱面積及び2次系圧損係数に差異がある場合、2次系の自然循環流量にはループ間で最大20%程度の差が生じているが、分岐合流配管引回しに起因して片側のループだけに選択的に自然循環が生じるようなことはない。1次系では、A Bループの流量が500~2000秒の周期でハンチングするが、トータルとしての炉心流量は振動することなく安定に推移している。

a. 1次系の挙動

(a) 約300秒から約2000秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

IHX容器1次側出口温度（図4.5.1-3）は、AループIHX伝熱面積>BループIHX伝熱面積のため、0秒から約1400秒の間Aループ温度<Bループ温度である。これによりAループの自然循環力が増加し、1次系流量（図4.5.1-1(2/3)）は、約300秒から約2000秒の間Aループ流量>Bループ流量である。

(b) 約2000秒から約2500秒の間、Aループ流量<Bループ流量の理由

上記(a)の間Aループ流量>Bループ流量であるため、約1400秒から約2200秒の間、IHX容器1次側出口温度（図4.5.1-3）はAループ温度>Bループ温度と

なり、上記(a)の状態と逆になっている。また、1次系Aループの流量が大きくなったことにより、AループIHX伝熱部の伝熱中心が低下する(図4.5.1-7(2/7)参照)。これらにより、Aループの自然循環力が低下し、約2000秒から約2500秒の間Aループ流量<Bループ流量となる。

(c) 約2500秒から約3000秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

上記(b)と逆の現象による。

(d) 約3500秒から約5000秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

3000秒の時点で、IHX容器1次側入口/出口温度(図4.5.1-2及び図4.5.1-3)は約410℃/約380℃であるが、IHX伝熱部には約460の部分が存在する(図4.5.1-7(5/7))。この、IHX伝熱部の高温ナトリウムがミドルレグの上昇管部分に流入し始めると、流入にともない自然循環力が増加するため、流入タイミングのわずかな差でループ間流量にアンバランスが発生する。今回の解析では、約3200秒からAループのIHX容器1次側出口温度(図4.5.1-3)が上昇するため、Aループの自然循環力が増加し、1次系流量(図4.5.1-1(2/3))は、約3500秒から約5000秒の間Aループ流量>Bループ流量である。

(e) 約5000秒から約7000秒の間、Aループ流量<Bループ流量の理由

約4800秒からBループのIHX容器1次側出口温度(図4.5.1-3)が上昇するため、ミドルレグへの高温ナトリウムの流入にともないBループの自然循環力が増加し、1次系流量(図4.5.1-1(2/3))は、約5000秒から約7000秒の間Aループ流量<Bループ流量である。

b. 2次系の挙動

(a) 0秒から約1800秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

基本的にAループ圧損係数<Bループ圧損係数のため、Aループ流量>Bループ流量となる。

なお、2次系には1次系で現れたような振動的現象は見られず、自然循環力の低下にともないA Bループとも流動が停止する。

4.5.2 1次系圧損係数に差異がある場合

(1) 解析結果

図4.5.2-1に、ループ毎の1次側流量を示す。

図4.5.2-2に、IHX容器1次側入口温度(1次系ホットレグ配管出口温度)を示す。

図4.5.2-3に、IHX容器1次側出口温度(1次系コールドレグ配管入口温度)を示す。

図4.5.2-4に、ループ毎の2次側流量を示す。

図4.5.2-5に、IHX容器2次側入口温度（2次側下降管入口温度）を示す。

図4.5.2-6に、IHX容器2次側出口温度（2次側上昇管出口温度）を示す。

図4.5.2-7に、IHX伝熱部軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

図4.5.2-8に、SG伝熱部軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

図4.5.2-9に、炉心軸方向温度分布を示す。なお、高さは定格運転時原子炉容器ナトリウム液位（NsL）を0としている。

(2) 考察

1次系圧損係数に差異がある場合、2次系の自然循環流量にはループ間で最大10%程度の差が生じているが、分岐合流配管引回しに起因して片側のループだけに選択的に自然循環が生じるようなことはない。1次系では、約3000秒以降、ループ間に逆位相の流量振動が見られるが、トータルとしての炉心流量は振動することなく安定に推移している。

a. 1次系の挙動

(a) 約300秒から約1700秒の間、Aループ流量<Bループ流量の理由

1次系流量（図4.5.2-1(2/3)）は、Aループ圧損係数>Bループ圧損係数のため、約300秒から約1700秒の間Aループ流量<Bループ流量である。

(b) 約1700秒から約2300秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

上記(a)の間Aループ流量<Bループ流量であるため、高温ナトリウムの流入によりBループIHX伝熱部の伝熱中心が低下することにより（図4.5.2-7(2/6)参照）Bループの自然循環力が低下し、Aループ流量>Bループ流量となる。

(c) 約3000秒から約4500秒の間、Aループ流量<Bループ流量の理由

3000秒の時点で、IHX容器1次側入口/出口温度（図4.5.2-2及び図4.5.2-3）は約410℃/約390℃であるが、IHX伝熱部には約460の部分が存在する（図4.5.2-7(4/6)）。この、IHX伝熱部の高温ナトリウムがミドルレグの上昇管部分に流入し始めると、流入にともない自然循環力が増加するため、流入タイミングのわずかな差でループ間流量にアンバランスが発生する。今回の解析では、約2800秒からBループのIHX容器1次側出口温度（図4.5.2-3）が上昇するため、Bループの自然循環力が増加し、1次系流量（図4.5.2-1(2/3)）は、約3000秒から約4500秒の間Aループ流量<Bループ流量である。

(d) 約4500秒から約7000秒の間、Aループ流量>Bループ流量の理由

約4200秒からAループのIHX容器1次側出口温度(図4.5.2-3)が上昇するため、ミドルレグへの高温ナトリウムの流入にともないAループの自然循環力が増加し、1次系流量(図4.5.2-1(2/3))は、約4500秒から約7000秒の間Aループ流量>Bループ流量である。

b. 2次系の挙動

(a) 0秒から約1600秒の間、Aループ流量<Bループ流量の理由

1次系のAループ流量<Bループ流量であるため(図4.5.2-1(2/3))、IHX容器2次側出口温度(図4.5.2-6)は0秒から約1700秒の間Aループ温度<Bループ温度である。このため、Bループの自然循環力が増加し、2次系流量(図4.5.2-4(2/3))は、0秒から約1600秒の間Aループ流量<Bループ流量である。

なお、2次系には1次系で現れたような振動的現象は見られず、自然循環力の低下にともないA Bループとも流動が停止する。

4.6 まとめ

IHX伝熱面積または1次系圧損係数にループ間で差異を与えた場合の自然循環試験解析を各々実施し、試験に与える影響を評価した結果、以下の結論を得た。

(1) 2次系に分岐合流配管がある構成に特異的な現象として、2次系のSGと片方のIHXにのみ選択的に自然循環が発達するような現象は見られなかった。

(2) 1次系ループ間には逆位相で流量が振動する現象が見られたが、その合計流量である炉心流量は安定に推移した。この振動現象は高温ナトリウムが上昇管部分に流入することにより発生するもので、試験体に特有な現象ではなく、実証炉構造に起因するものである。従って、実証炉の現象を模擬するためには、試験体のループ間の差異を実証炉の製作誤差程度にする必要がある。

5. 結論

原子炉冷却系総合試験施設の基本設計では2次系配管が1/3縮尺条件に比べて著しく長い設計となっているため、2次系配管による輸送遅れが過大となり熱過渡試験の模擬性に悪影響を与える可能性がある。そこで、2次系配管長、2次系配管圧力損失及びIHXとSGの伝熱中心差をパラメータとして、1/3縮尺条件に一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施した。また、試験装置の2次系には実証炉には無い分岐合流配管が存在するため、特に自然循環時にはループ間のアンバランスが助長されることも考えられる。そのような試験体に特異な現象が発生しないこと、または影響が小さいことを確認するため、IHX伝熱面積または1次系圧損係数にループ間で差異を与えた場合の自然循環試験解析を各々実施し、試験に与える影響を評価した。得られた知見を以下に示す。

(1) 2次系配管長が実機模擬性に与える影響

2次系配管を短縮し1/3縮尺条件に近づけることは熱過渡の時間遅れの改善に一定の効果があると言える。しかし、SG及び再循環系が高さ方向1/1縮尺であることから、熱過渡の時間遅れは実証炉と一致はせず、また温度勾配も実証炉に比べて緩やかとなるため、基本設計及び1/3縮尺条件ともに解析による実機評価が必要であることに変わりはない。

さらに、伝熱中心差は1/3縮尺条件の2倍以上とする必要があること、分岐合流があり弁を設置する必要があること、及びSG高さが実機と同等であることから、配管引回しが厳しく制限され1/3縮尺条件を達成することは困難である。

従って、2次系配管長の短縮は制約条件が厳しい割に熱過渡の改善の効果が小さく、構造上可能な範囲で実施すべきであると言える。

(2) ループ間アンバランスが実機模擬性に与える影響

試験施設のループ間に実証炉と同等の製作誤差があっても、試験の実施及び試験結果からの実機評価に大きな影響を与えるような問題は生じないことが分かった。すなわち、2次系に分岐合流配管があり2ループを1ループに集約する試験体特有な構造により、自然循環試験において実機と大きく異なる現象に結びつくことはないと考えられる。

謝辞

原子炉冷却系総合試験施設の検討に当たり、2次系配管構造等の議論について、三菱重工業（株）の戸田幹雄氏、菱田雅彦氏、新型炉技術開発（株）の渡辺収氏には大変有益な御助言を頂いた。また、解析コードの内容について、基盤技術開発部熱流体技術開発室の堺公明副主任研究員、原子力システム（株）の岩崎隆氏には大変有益な御助言を頂いた。さらに、解析の実施及び結果の整理には、原子力システム（株）の長沢一嘉氏に多大なる御協力、御尽力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 上出英樹他、「高速炉の冷却系に関する総合試験計画—炉容器および1次冷却系モデルの検討—」PNC TN9410 96-279 1996年8月
- (2) 久保重信他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究（Ⅱ）—(1)解析システム—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G37（Oct., 1997）
- (3) 渡辺収他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究（Ⅱ）—(2)炉心槽内の熱流動—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G38（Oct., 1997）
- (4) 梶原晃他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究（Ⅱ）—(3)集合体内の熱流動—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G39（Oct., 1997）
- (5) 藤又和博他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究（Ⅱ）—(4)原子炉冷却系—巡特性—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G40（Oct., 1997）
- (6) 戸田信一他、「大型FBRの自然循環特性評価手法に関する研究（Ⅱ）—(5)炉心-ブレナム相互作用—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G41（Oct., 1997）
- (7) 大滝明他、「プラント動特性解析コード(Super-COPD)の開発—動燃技報No.76号「コンピュータ利用技術」特集号—」PNC TN1340 90-004 1990年12月

表2.2.1-1 原子炉冷却系総合試験施設の系統主要仕様

項 目	仕 様	単 位
1次系システム型式	トップエントリ配管システム	—
試験設備縮尺率	約 1/3	—
系 統 数		
1次系	2	ループ
2次系	1	ループ
DRACS系	2	ループ
熱出力/除熱量		
装置定格熱出力	54	MW t
炉心模擬ヒータ熱出力	5	MW t
DRACS系除熱量	0.9	MWt/ループ°
Na加熱系最大熱出力	55	MW t
水-蒸気系最大除熱量	55	MW t
定格温度		
1次系 H/L/C/L	550/395	℃
2次系 H/L/C/L	520/335	℃
水・蒸気系 給水/蒸気	240/497	℃
定格流量 1次/2次/給水	4.95/8.25/0.875	×10 ⁵ kg/h
給水/蒸気圧力	189/175	kg/cm ² g

表3.2.1-1 2次系配管長パラメータ設定値

単位；m

	ホットレグ	ミドルレグ	コールドレグ	備考
1/3縮尺条件	15.3	11.7	9.3	実機長／3
中間	26.6	25.7	27.0	
基本設計結果	37.9	39.7	44.6	

表3.2.2-1 2次主冷却系の圧力損失及びEu数

項目	単位	実証炉		基本設計		
		定格 (534MW)	自然循環時 (6%流量)	定格 (54MW)	自然循環時 (6%流量)*1	
流量	ton/hr	8152	489	824	63	
圧力損失 *2	コールドレグ配管	kg/cm ²	0.380	0.0018	0.403	0.0028
	中間熱交換器	kg/cm ²	2.000	0.0126	0.183	0.0012
	ホットレグ配管	kg/cm ²	0.320	0.0015	0.767	0.0052
	蒸気発生器	kg/cm ²	0.840	0.0053	0.327	0.0021
	ミドルレグ配管	kg/cm ²	0.300	0.0014	0.520	0.0036
	合計	kg/cm ²	3.840	0.023	2.200	0.0148
Eu数	—	8.7	14.4	24.2	28.1	
試験体Eu／実証炉Eu	—	—	1.0	—	2.0	

*1：見かけの定格流量1046ton/hrに対する値を示す。

*2：圧力損失は弁全開時の値を示す。ただし、暫定値。

表3.2.2-2 2次系配管圧力損失設定値（装置定格時）

単位；kg/cm²

	ホットレグ	ミドルレグ	コールドレグ	備考
1/3縮尺条件	0.202	0.184	0.236	2次系全体の 圧損が一致
中間	0.484	0.352	0.320	
基本設計結果	0.767	0.520	0.403	

表3.2.3-1 IHXとSGの伝熱中心差設定値

	IHX～SG伝熱中心差
1/3縮尺	1.79 m
中間	3.59 m
基本設計	5.38 m
実証炉	5.38 m

表3.2.4-1 2次主循環ポンプ最低回転数設定値

	最低回転数（rad/sec）
1/3縮尺	8.11
中間	9.42
基本設計	10.724

表3.5.1-1 2次系各部のNa重量比較

番号	計算内容	モジュール名	実証炉 (kg)	1/3条件 (kg)	試験装置 (kg)	備考
2-..1	IHX 2次側伝熱部	HX(6)	8800	326	515	
2- 2	IHX出口上昇管	LN(21)	3650	135	113	
2- 3	2次系H/L配管	MN, LN	13300	491	1280	1 ループ分
2- 4	SG 2次側伝熱部	SG(1)	45000	1670	3345	1 ループ分
2- 5	SG出口Naプレナム	MN(41)	21800	806	1510	1 ループ分
2- 6	2次系M/L配管	MN, LN	10900	405	1230	1 ループ分
2- 7	2次ポンプ	MN(47)	4080	151	610	1 ループ分
2- 8	2次系C/L配管	MN, LN	10100	375	1510	1 ループ分
2- 9	IHX入口下降管	LN(36)	5430	201	253	
	2次系合計		123000	4560	10400	1 ループ分

表3.5.1-2 2次系配管長短縮による時間遅れへの影響（手動トリップ熱過渡模擬試験）

単位：秒（全て大まかな値）

温度変化部位	変化	変化開始時点			実証炉との差異		温度変化原因	1/3条件にて実証炉と差異が生じる理由
		実証炉	基本設計	1/3条件	基本設計	1/3条件		
IHX(A) 2次側入口温度 (図3.5.1-7)	低下	50	200	50	150	0	①流速低下によるSG容器出口温度の低下	実証炉と一致
	上昇	450	900	700	450	250	②再循環系起動によるSG容器出口温度の上昇	再循環系が1/1縮尺の部分モデルのため
IHX(A) 2次側出口温度 (図3.5.1-8)	上昇	0	0	0	0	0	③流速低下による温度上昇	実証炉と一致 (変化無し)
	低下	100	200	200	100	100	④出力低下による炉容器出口温度の低下	炉心入口側に高温Naが存在するため
	上昇	900	1600	1400	700	500	②再循環系起動によるSG容器出口温度の上昇	再循環系が部分モデル+1次系の時間遅れ
SG容器入口温度 (図3.5.1-9)	上昇	10	50	10	40	0	③流速低下によるIHX 2次側出口温度の上昇	実証炉と一致
	低下	150	300	250	150	100	④出力低下による炉容器出口温度の低下	炉心入口側に高温Naが存在するため
	上昇	950	1700	1500	750	550	②再循環系起動によるSG容器出口温度の上昇	再循環系が部分モデル+1次系の時間遅れ
SG容器出口温度 (図3.5.1-10)	低下	0	0	0	0	0	①流速低下による温度低下	実証炉と一致 (変化無し)
	上昇	400	700	650	300	250	②再循環系起動による温度上昇	再循環系が1/1縮尺の部分モデルのため
IHX(A) 1次側入口温度 (図3.5.1-5) (1次系)	上昇	800	1400	1200	600	400	②再循環系起動によるSG容器出口温度の上昇	再循環系が部分モデル+1次系の時間遅れ

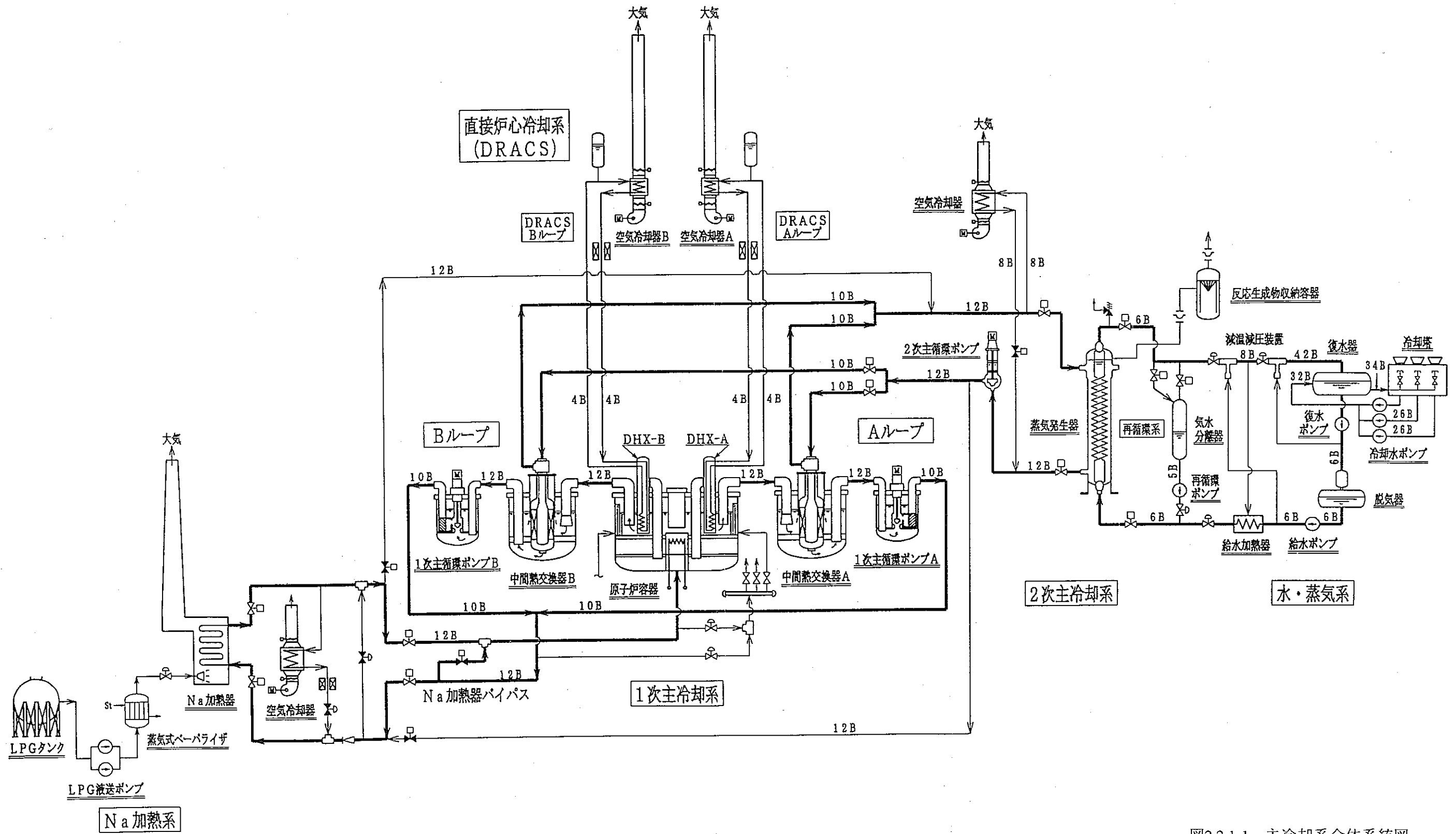


図2.2.1-1 主冷却系全体系統図

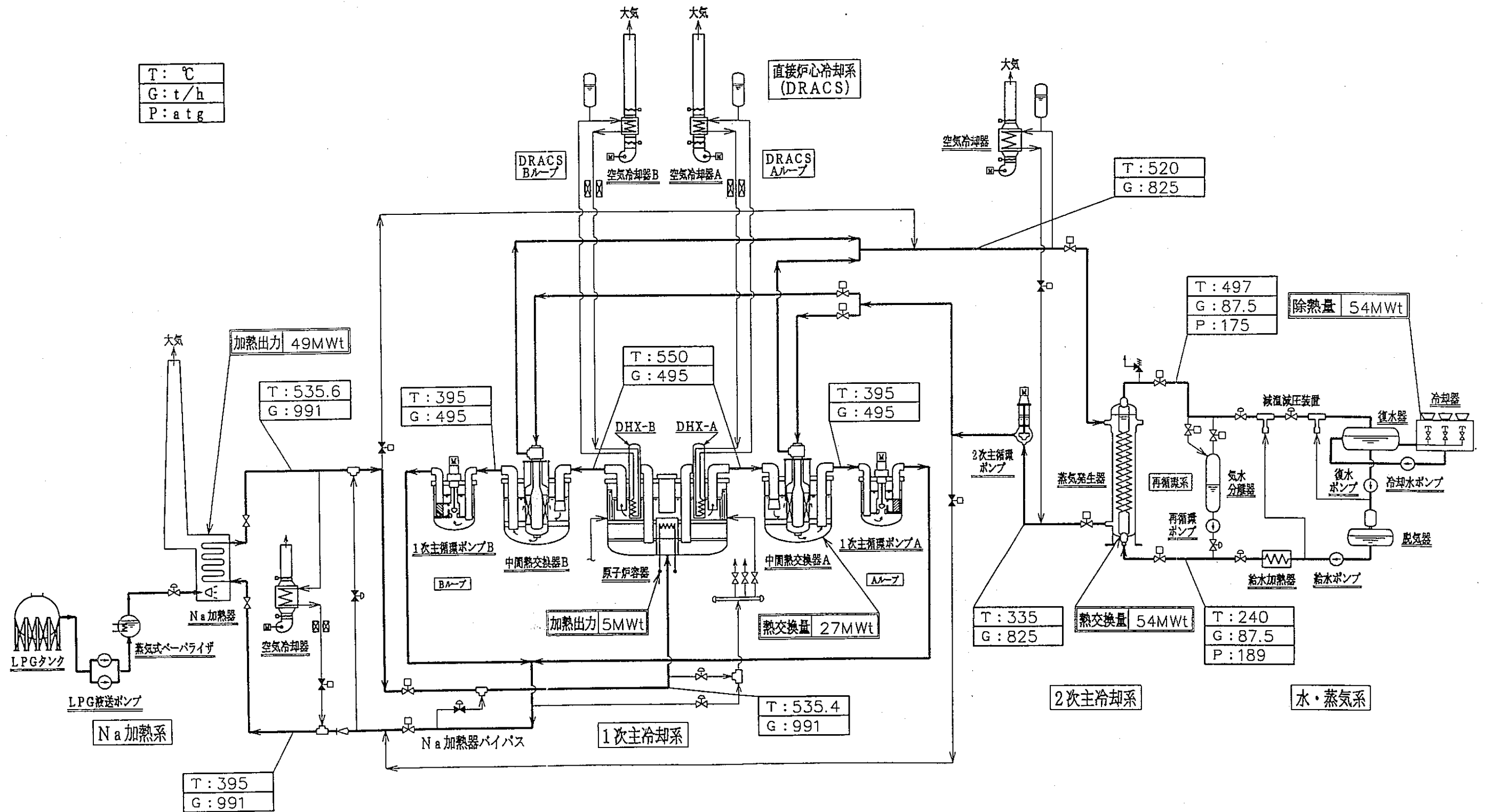
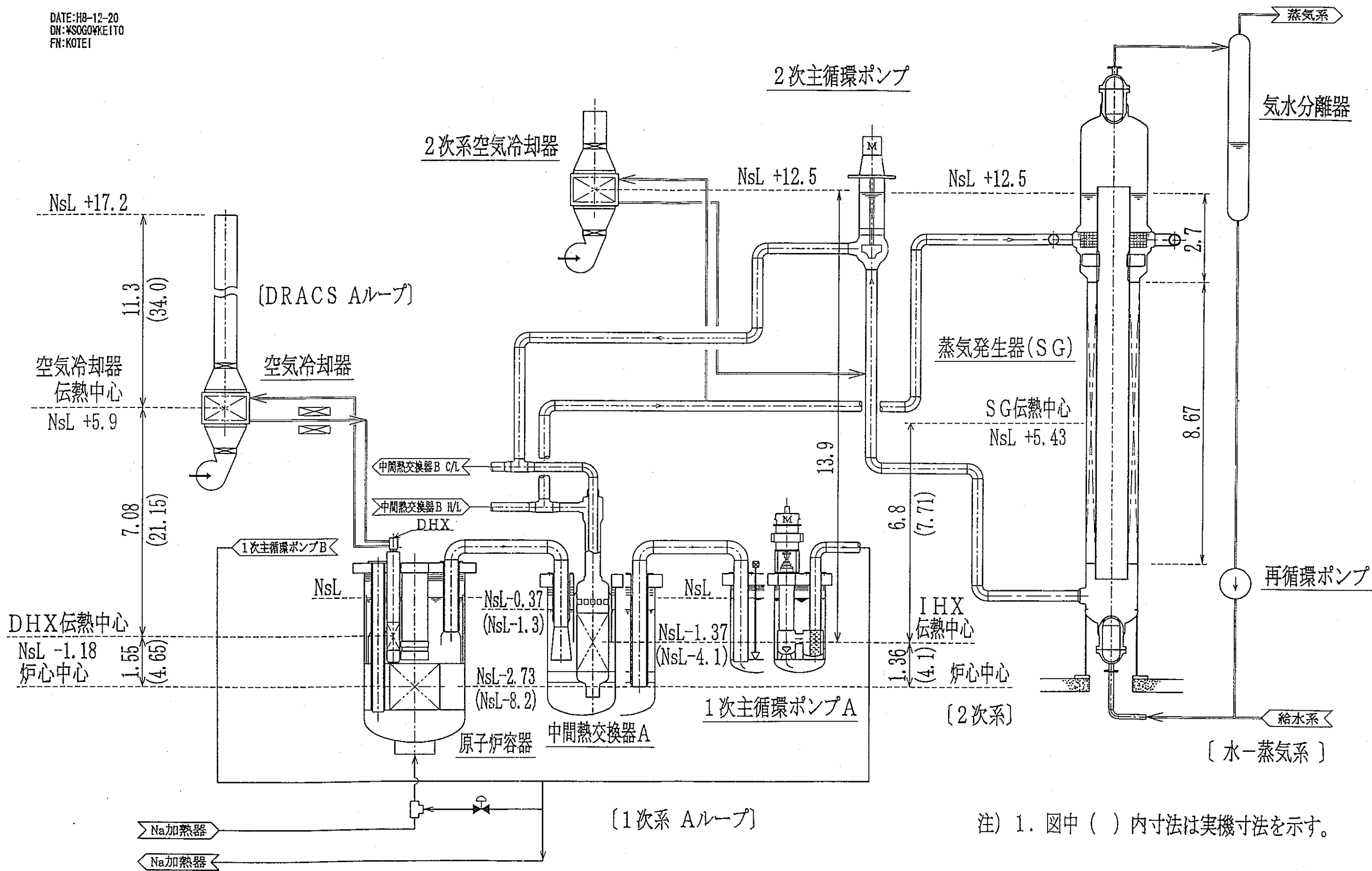


図2.2.1-2 装置定格出力運転ヒートマスバランス図 (54MWt、78.9%出力条件)

DATE: H8-12-20
 DN: *SOGOKYKAITO
 FN: KOTEI



注) 1. 図中 () 内寸法は実機寸法を示す。

図2.2.1-3 機器高低関係図

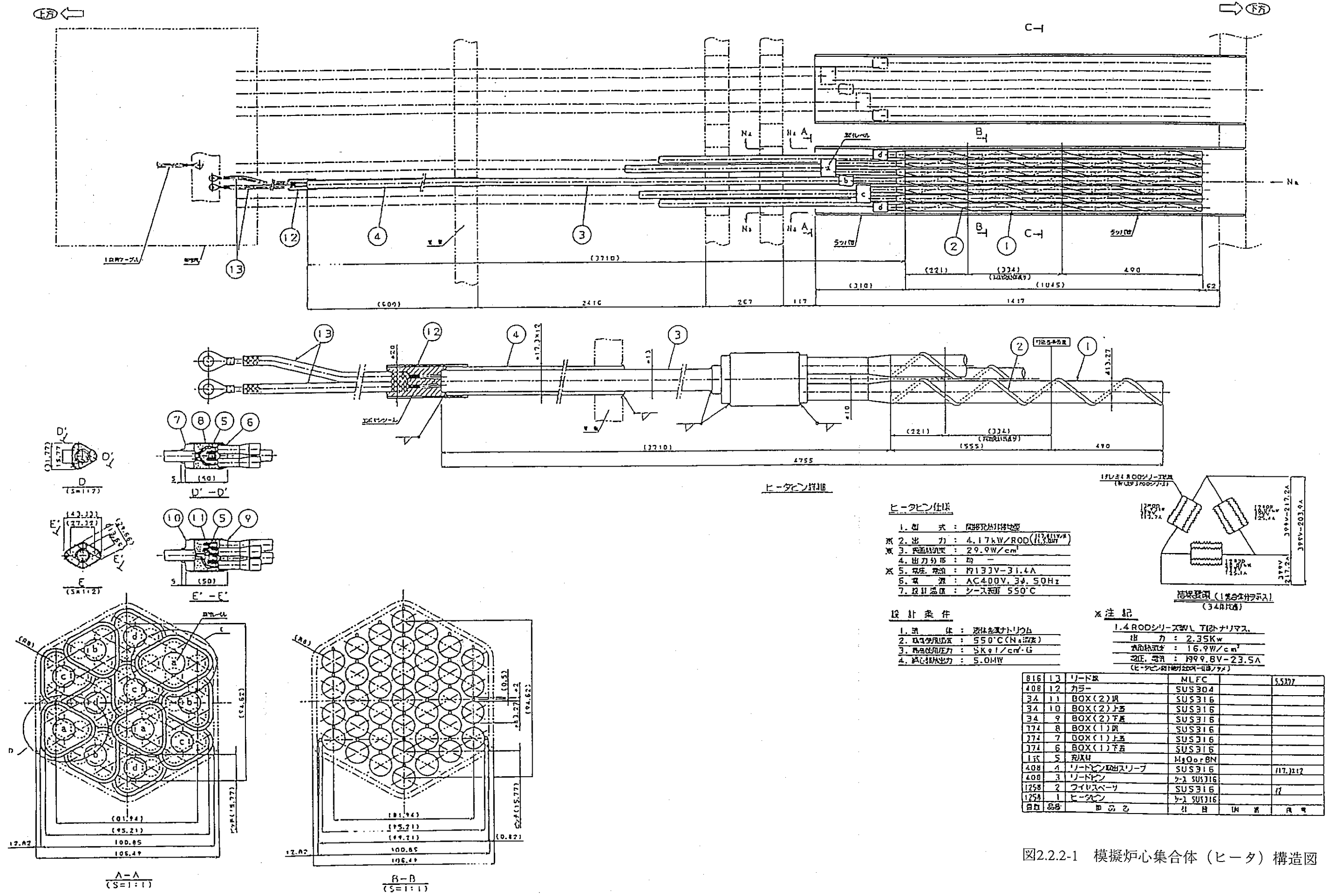
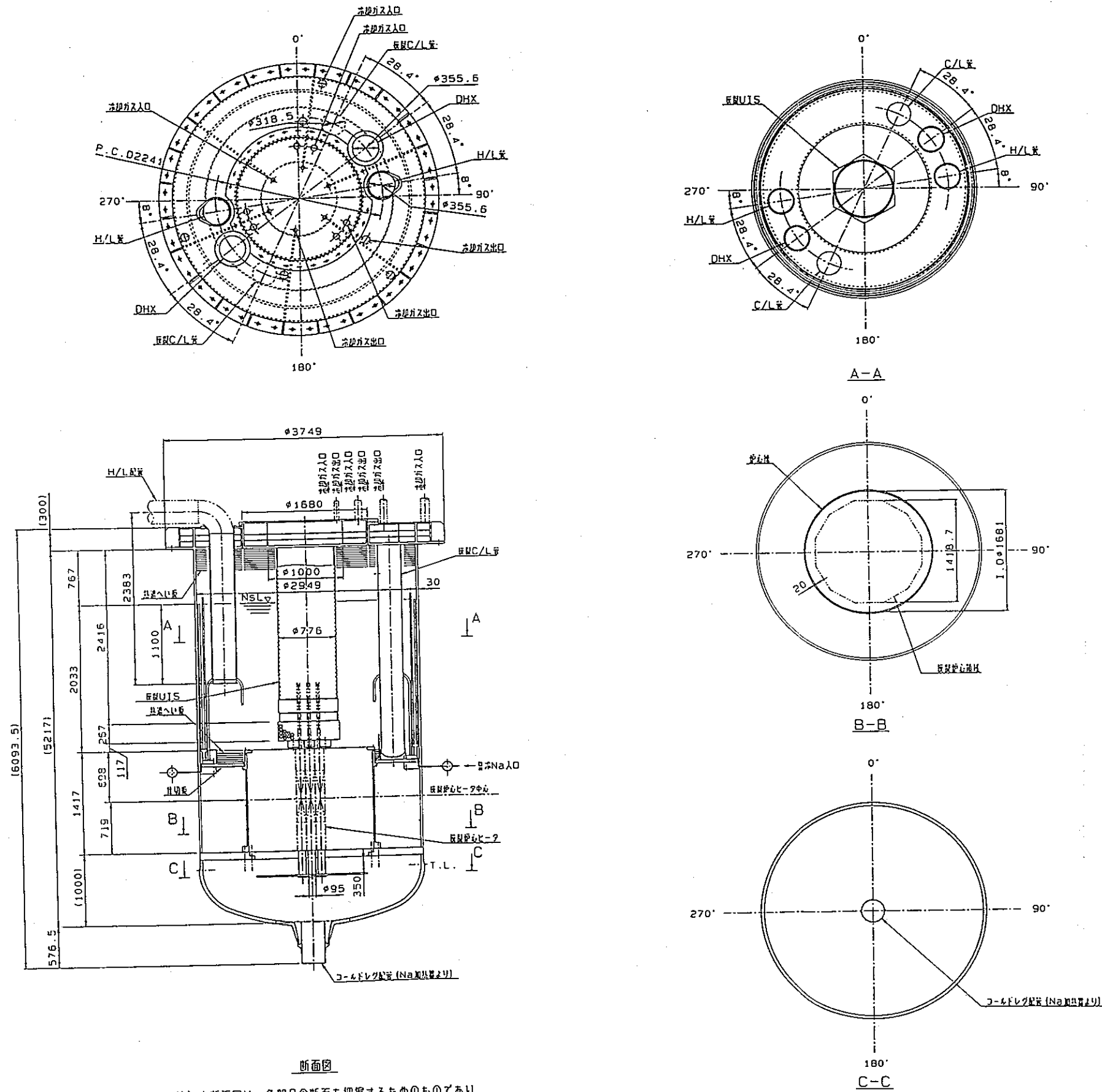


図2.2.2-1 模擬炉心集合体（ヒータ）構造図

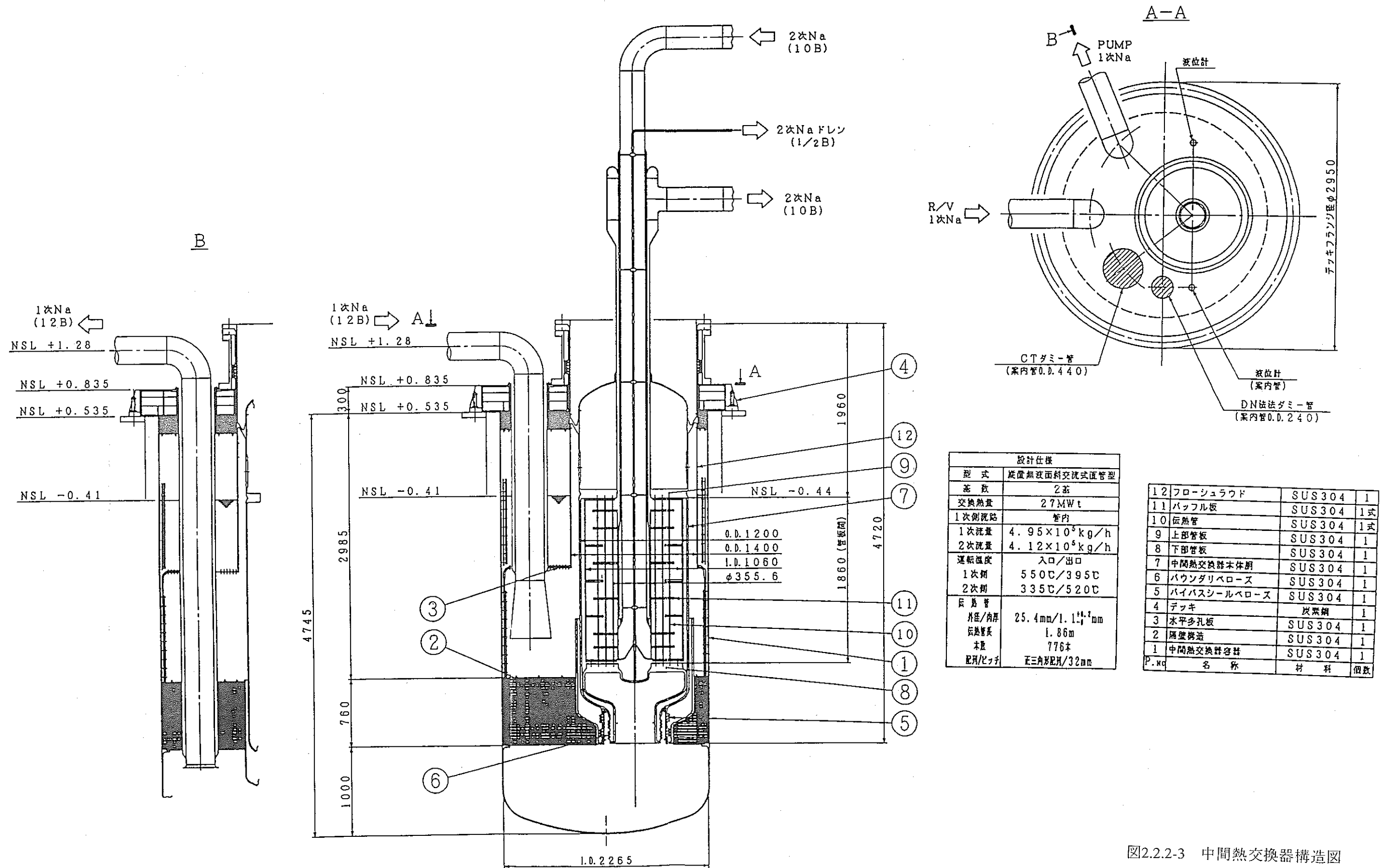


断面図

注) 本断面図は、各部分の断面を把握するためのものであり、位置関係は実際と異なる箇所がある。各部分の位置関係は、A~Cの断面図によること。

注) 1. 本図の基本寸法は、高さ方向は実物の1/3スケール、径方向は実物の1/3スケール容器の2/3セクターに相当する断面積を有する円筒形状を基準にしたスケールである。

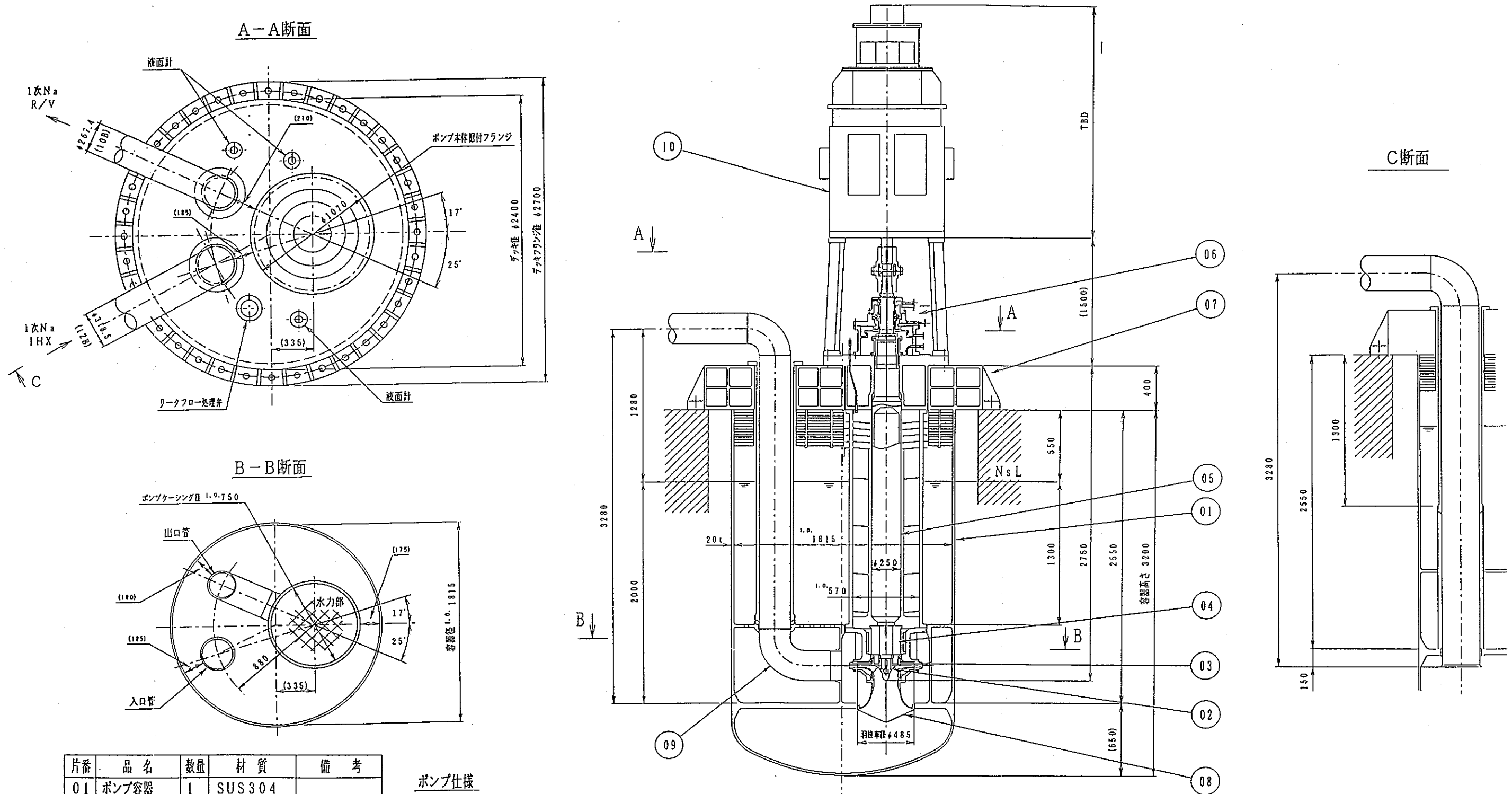
図2.2.2-2 原子炉容器試験体構造図



設計仕様	
型式	旋置無被面斜交流式匝管型
蒸気数	2蒸
交換熱量	27MWt
1次側流路	管内
1次流量	$4.95 \times 10^5 \text{ kg/h}$
2次流量	$4.12 \times 10^5 \text{ kg/h}$
運転温度	入口/出口
1次側	550℃/395℃
2次側	335℃/520℃
伝熱管	
外径/角厚	25.4mm/1.1 ^{1/2} mm
伝熱管長	1.86m
本数	776本
配列ピッチ	E三角配列/32mm

P. No	名称	材料	個数
12	フローシールド	SUS304	1
11	バフフル板	SUS304	1式
10	伝熱管	SUS304	1式
9	上部管板	SUS304	1
8	下部管板	SUS304	1
7	中間熱交換器本体胴	SUS304	1
6	バウンダリベローズ	SUS304	1
5	バイパスシールベローズ	SUS304	1
4	デッキ	炭素鋼	1
3	水平多孔板	SUS304	1
2	隔壁構造	SUS304	1
1	中間熱交換器容器	SUS304	1

図2.2.2-3 中間熱交換器構造図

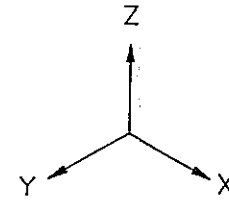
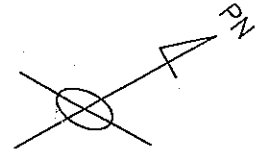


片番	品名	数量	材質	備考
01	ポンプ容器	1	SUS304	
02	羽根車	1	SCS	
03	案内羽根	1	SCS	
04	静圧軸受	1	SUS304	
05	主軸	1	SUSF304	
06	軸封装置	1式	SUS304	
07	ポンプデッキ	1	SS	
08	ベルマウス	1	SCS13	
09	吐出案内管	1	SUS304	
10	主モータ	1基		



ポンプ仕様

ポンプ型式	単段片吸込遠心型 (下吸込)
基数	2 基
定格流量	9.63 m ³ /min
定格揚程	98 mNa
定格回転数	1850 rpm
Av. NPSH	15 mNa
ポンプ比速度	193
吸込比速度	753
電動機出力	210 kW
定格温度	395 °C

図2.2.2-4 1次主循環ポンプ構造図



凡例

-  スプリングハンガ
-  アンカー

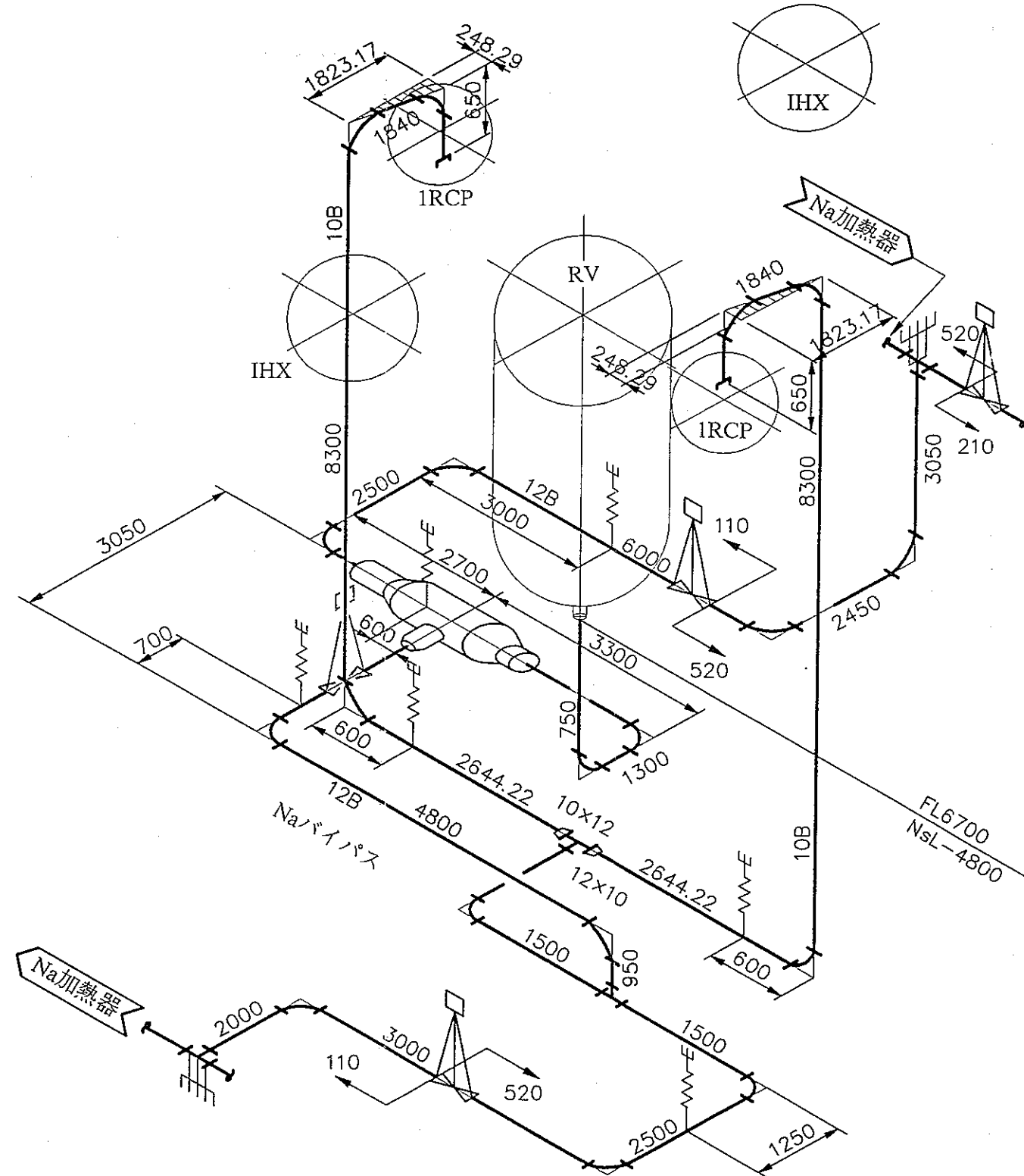
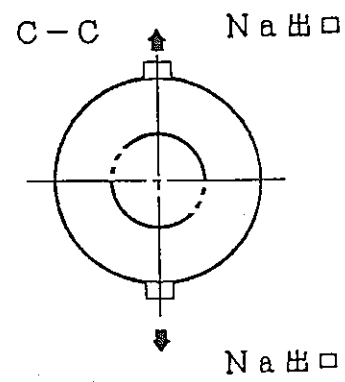
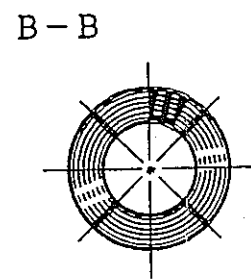
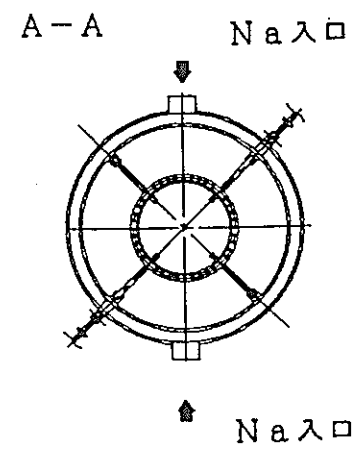
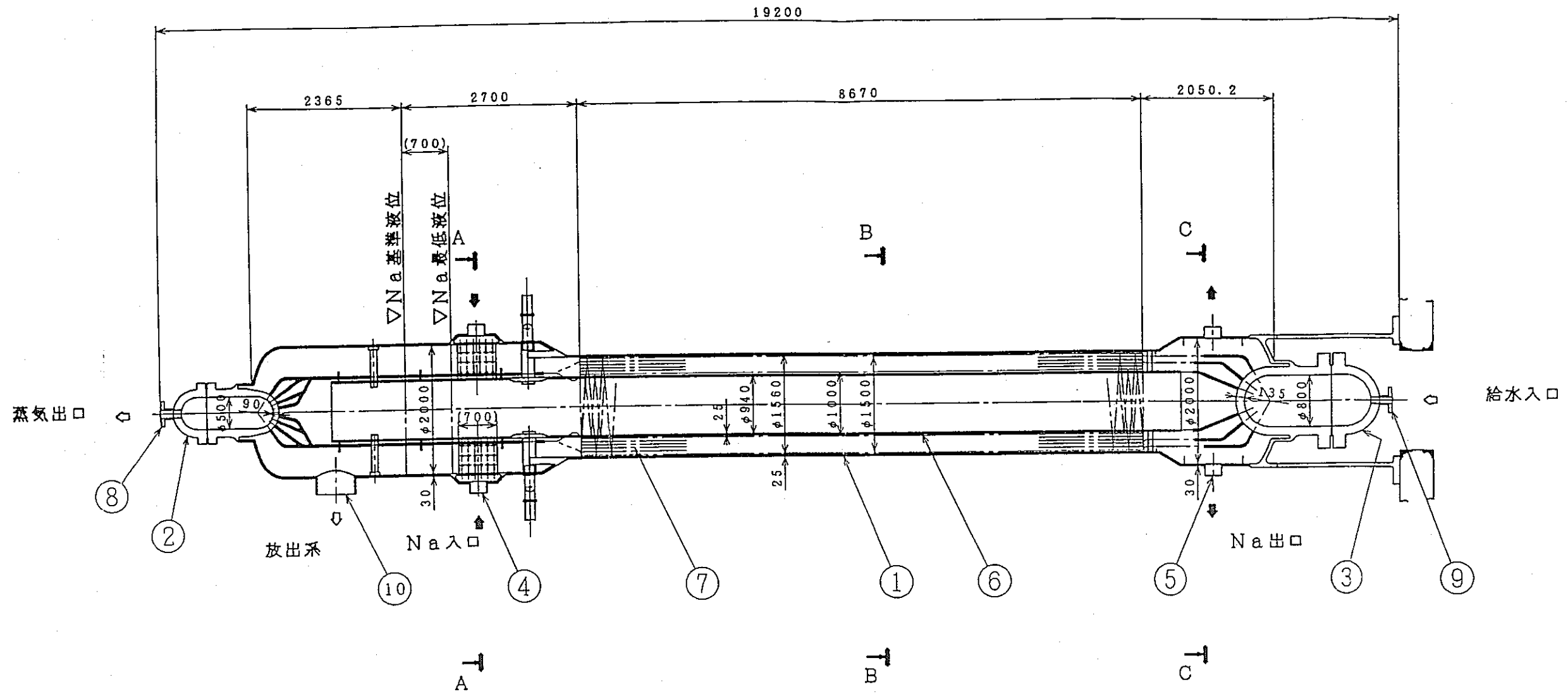
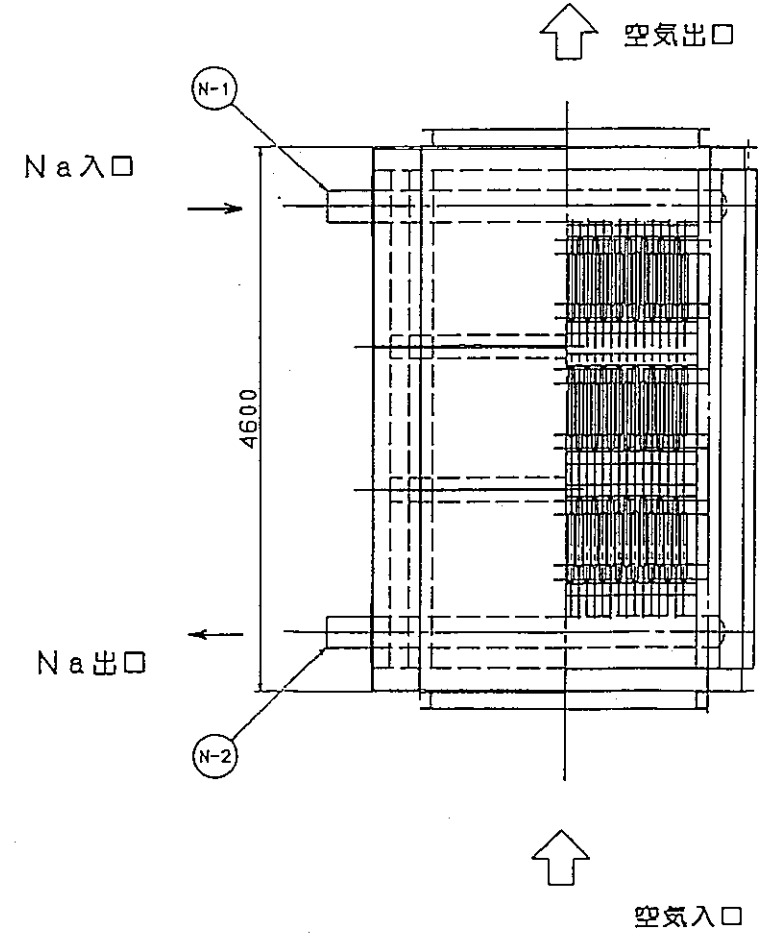
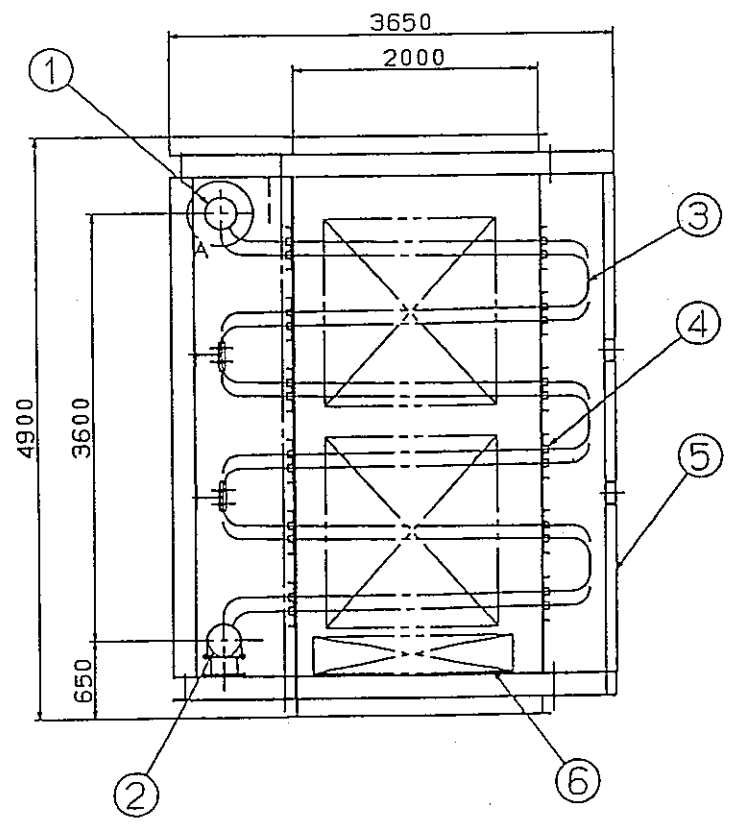
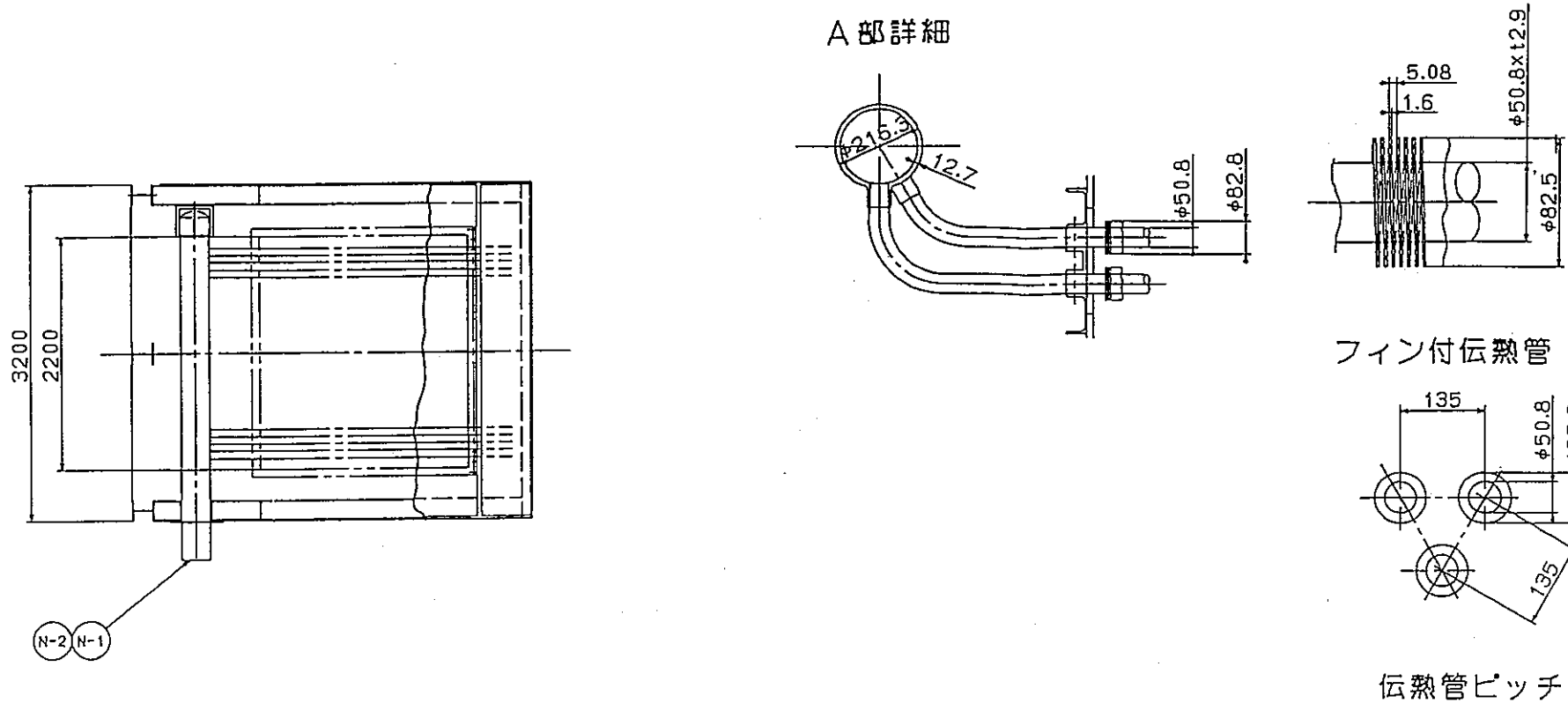


図2.2.2-5 1次主冷却系コールドレグ配管配置図



品番	名称	員数	材質	備考
1	銅体	1	Mod. 9Cr-1Mo鋼	
2	蒸気出口水室	1	"	
3	給水入口水室	1	Mod. 9Cr-1Mo鋼	
4	Na入口ノズル	2	SUS304	10 B
5	Na出口ノズル	2	SUS304	10 B
6	内筒	1	Mod. 9Cr-1Mo鋼	
7	伝熱管	36	"	
8	蒸気出口ノズル	1	"	6 B
9	給水入口ノズル	1	"	5 B
10	放出系ノズル	1	Mod. 9Cr-1Mo鋼	24 B

図2.2.2-6 蒸気発生器構造図



N-2	ナトリウム出口	8B	
N-1	ナトリウム入口	8B	
番号	名称	呼び径	長さ
管台一覧表			

番号	名称	材料
6	予熱ヒータ	
5	ケーシング	SUS304
4	伝熱管サポート	SUS304
3	伝熱管	SUS304
2	出口分配管	SUS304
1	入口分配管	SUS304
部品表		

図2.2.2-7 空気冷却器構造図

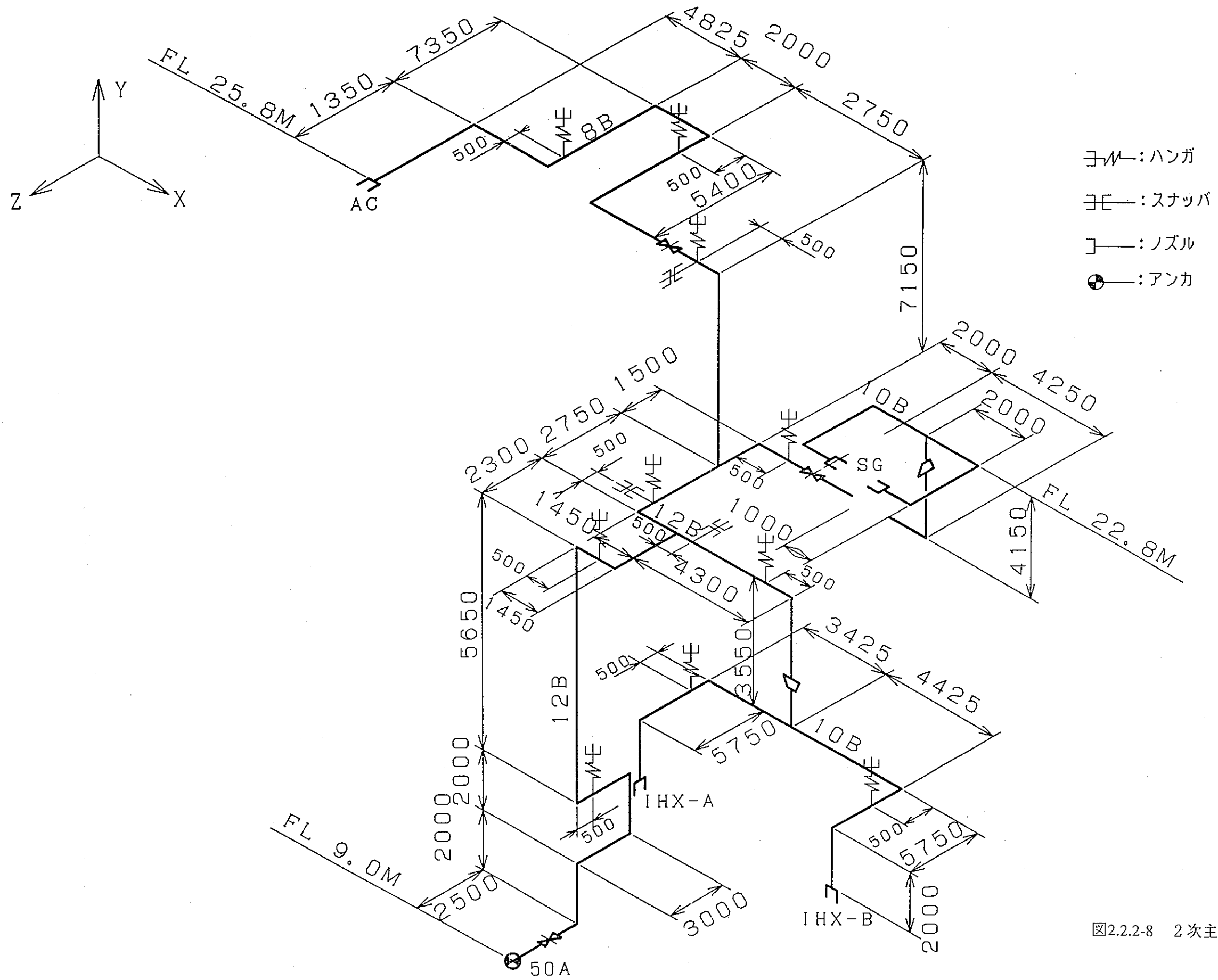
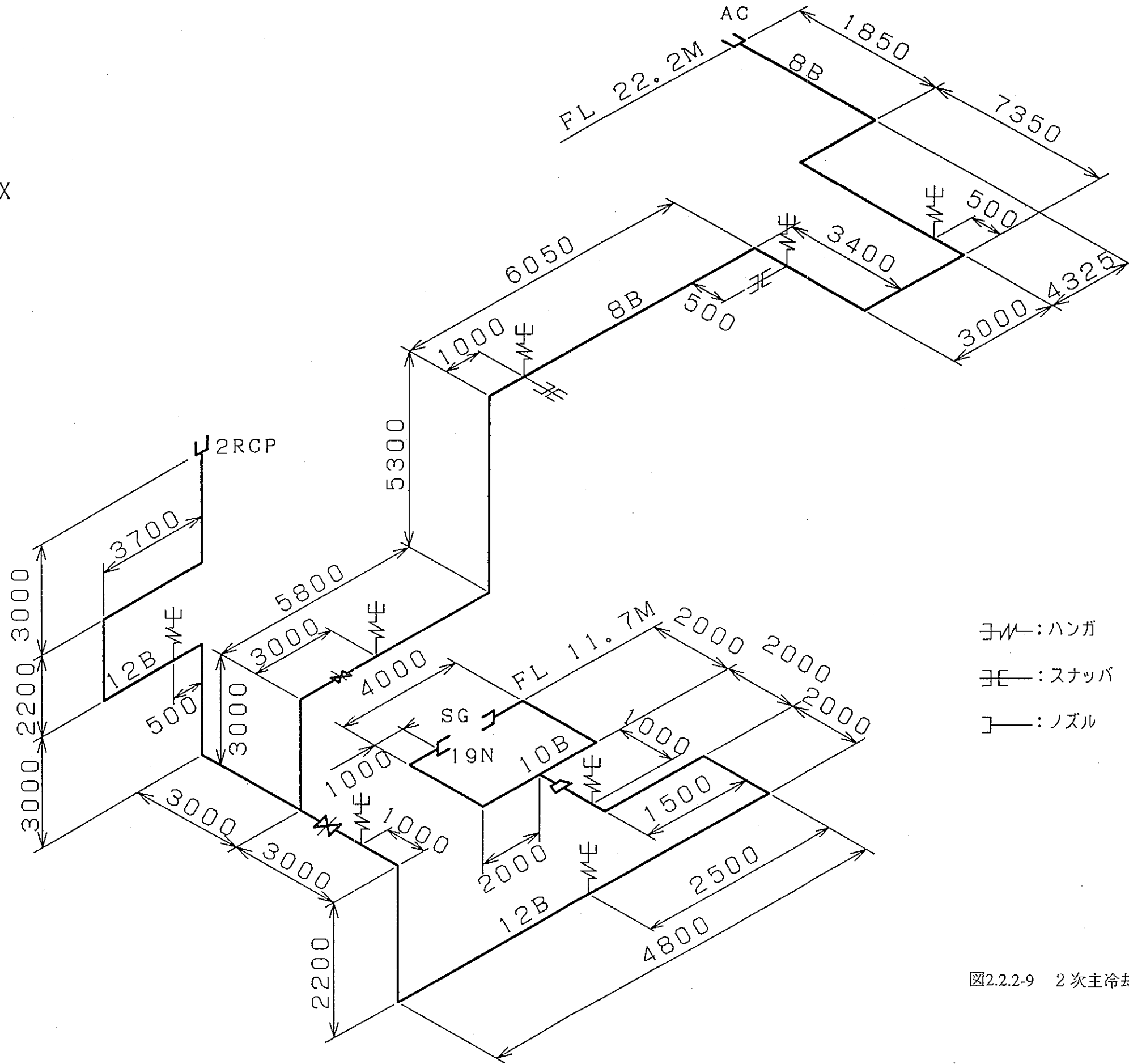
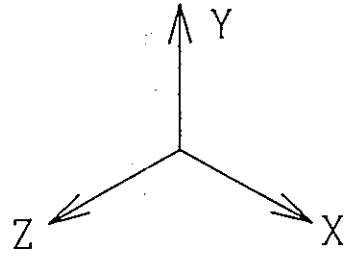


図2.2.2-8 2次主冷却系ホットレグ配管配置図



- ☞: ハンガ
- ☞: スナッパ
- ☞: ノズル

図2.2.2-9 2次主冷却系ミドルレグ配管配置図

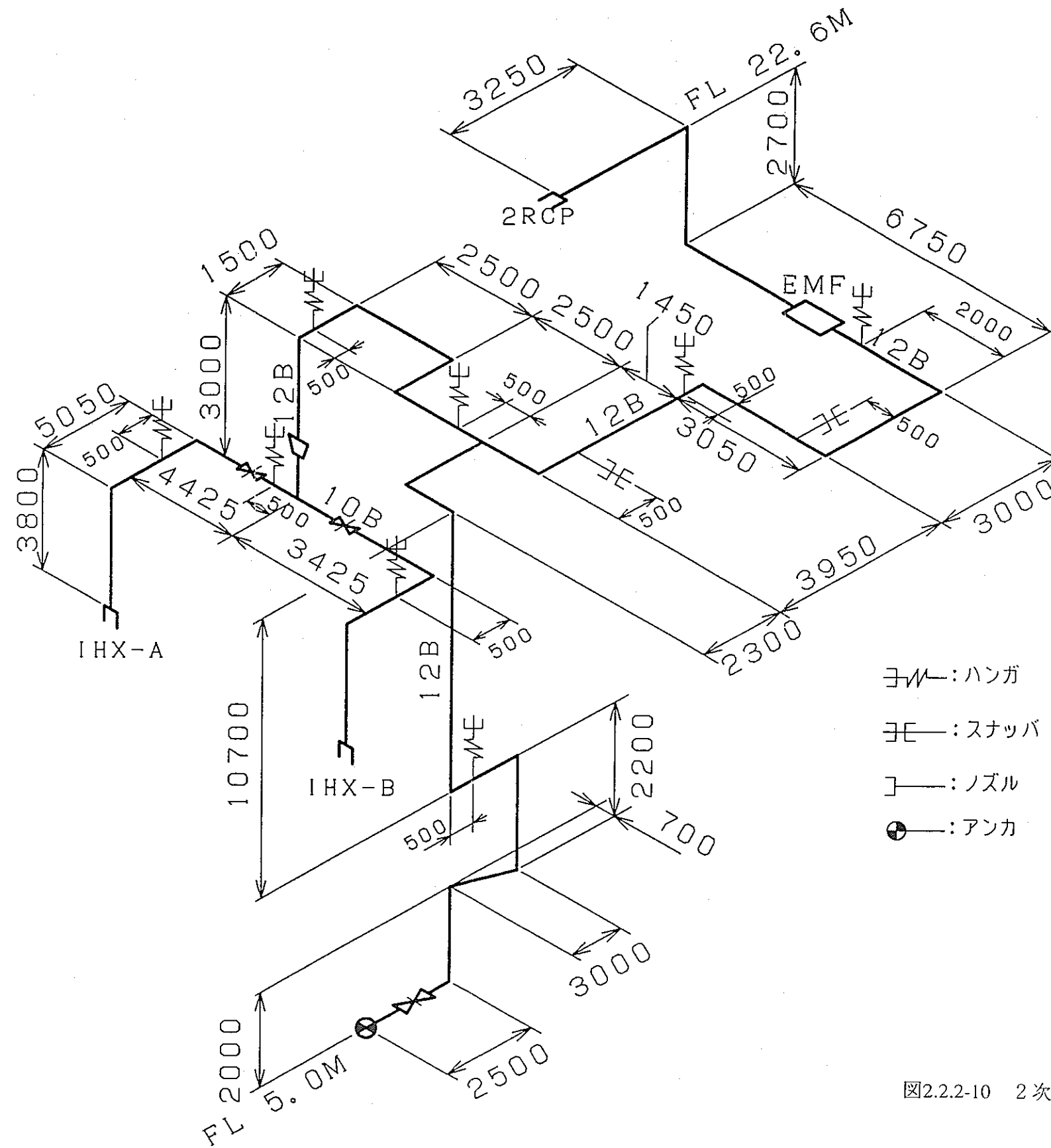
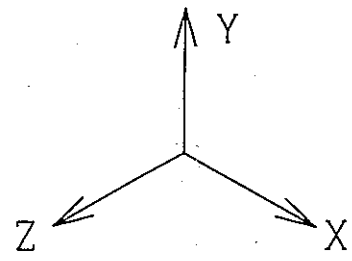


図2.2.2-10 2次主冷却系コールドレグ配管配置図

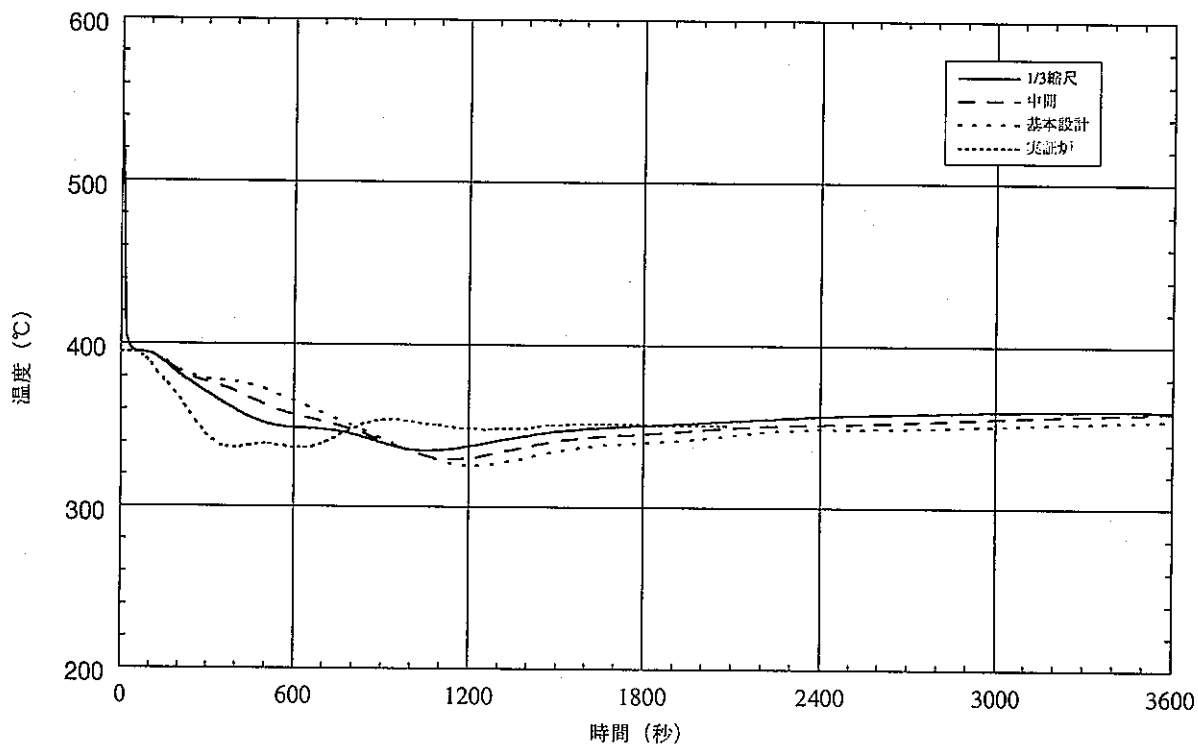


図3.5.1-1 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (原子炉容器入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

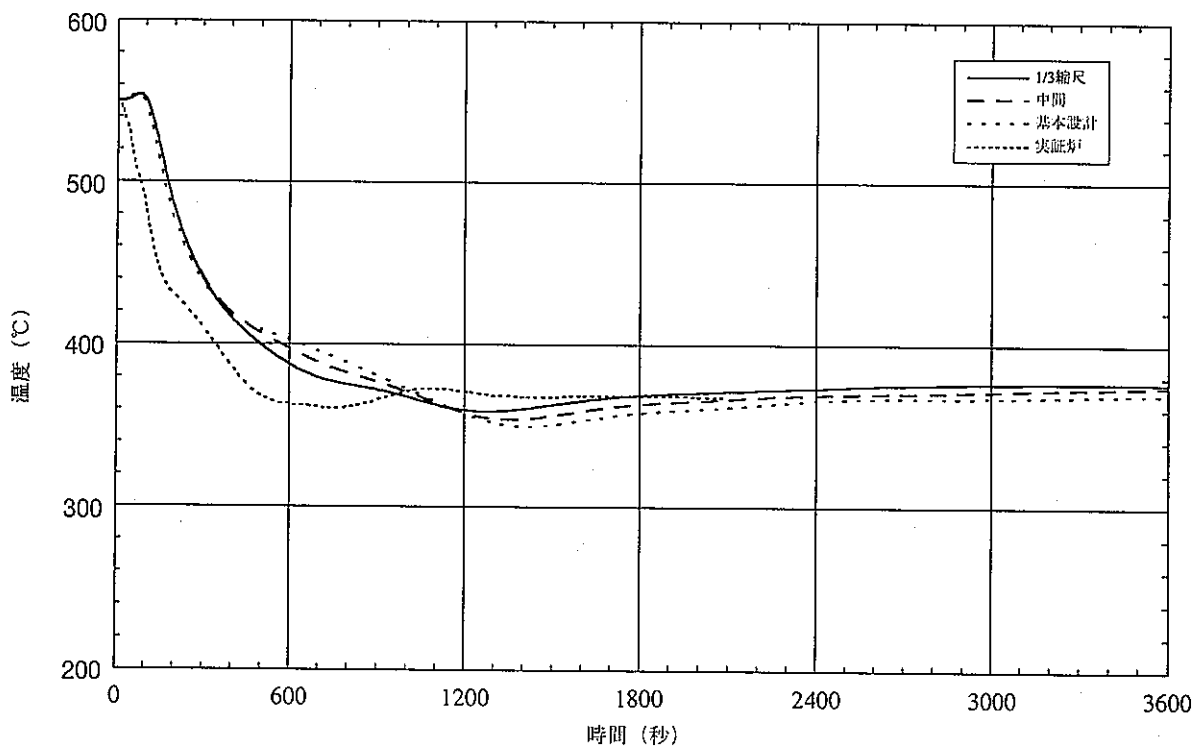


図3.5.1-2 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (原子炉容器出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

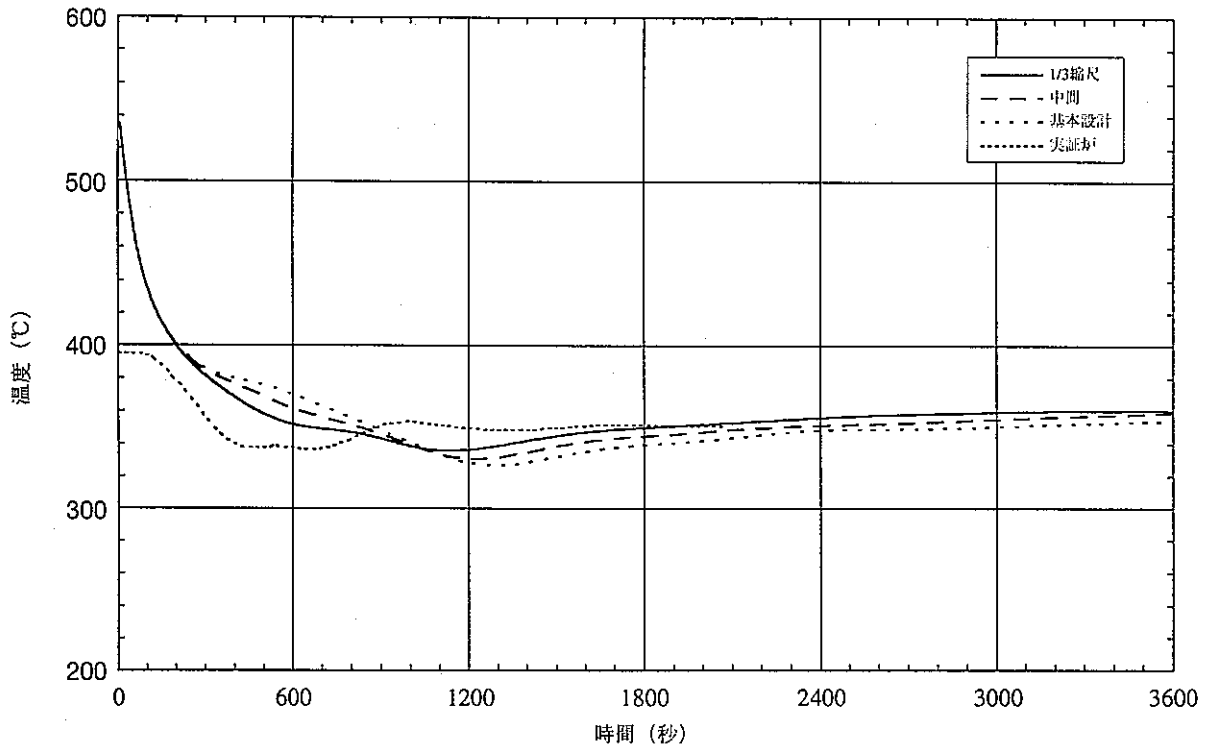


図3.5.1-3 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

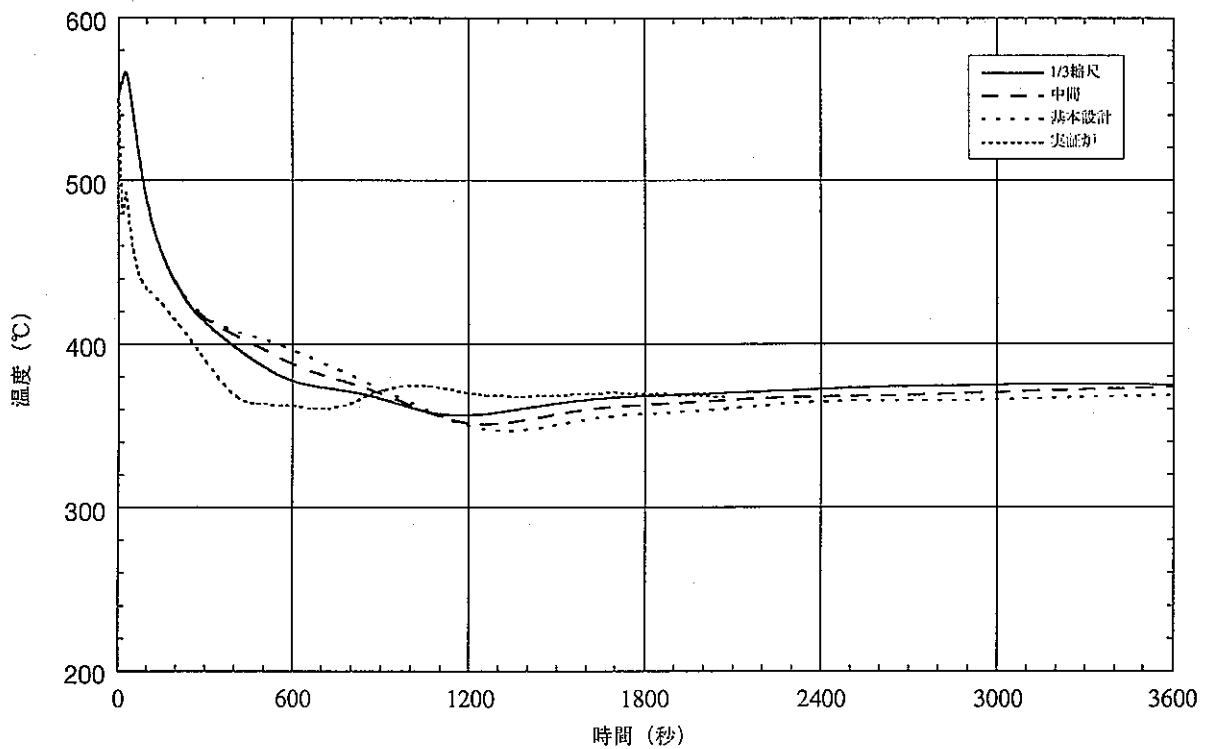


図3.5.1-4 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

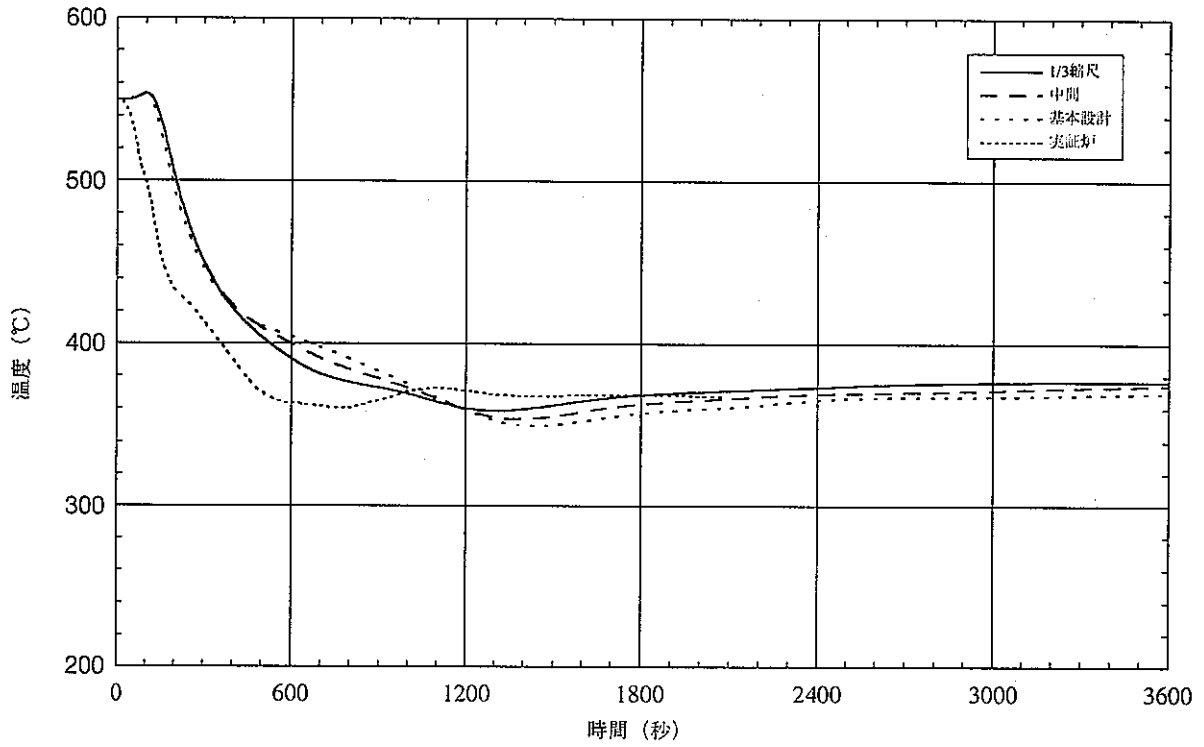


図3.5.1-5 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

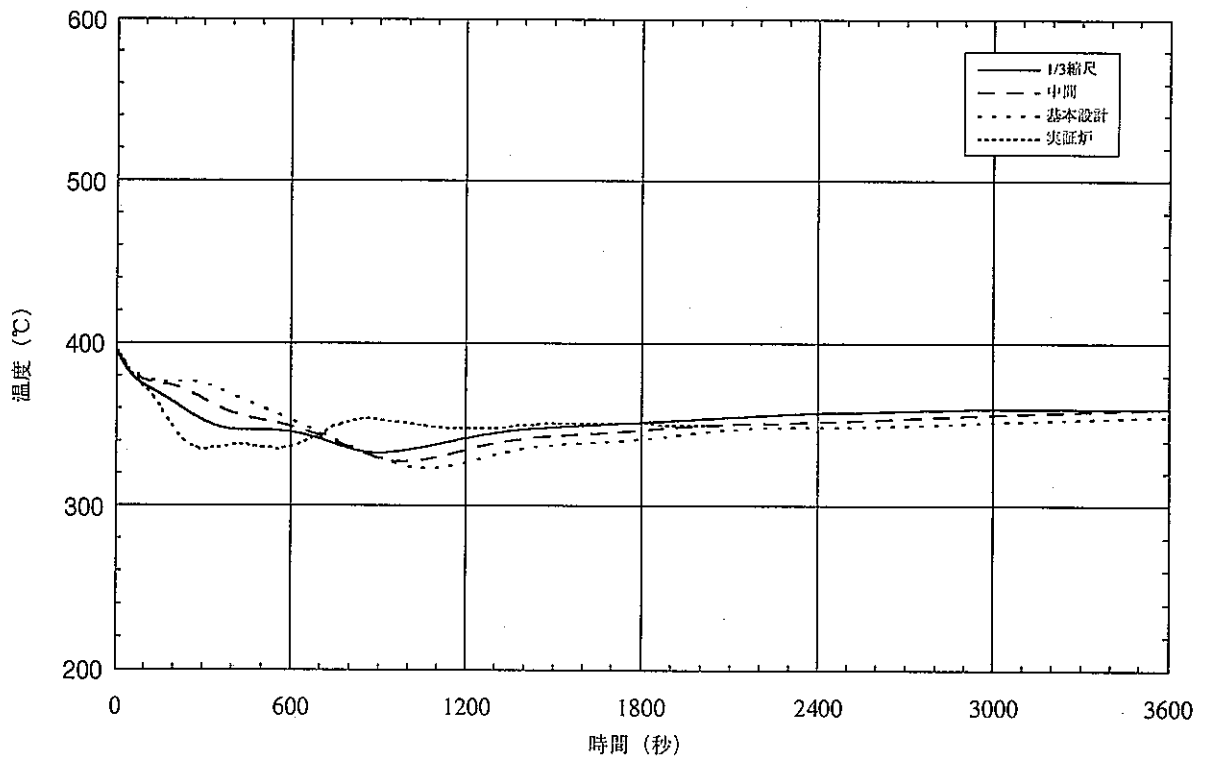


図3.5.1-6 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

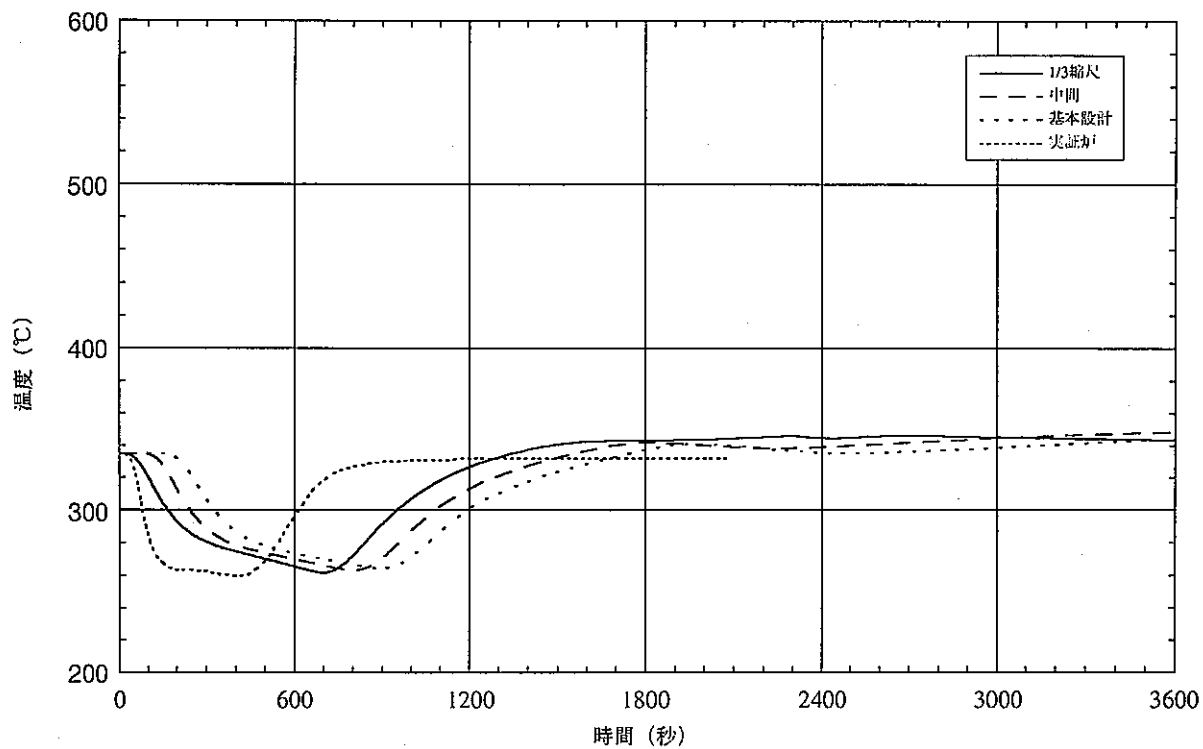


図3.5.1-7 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

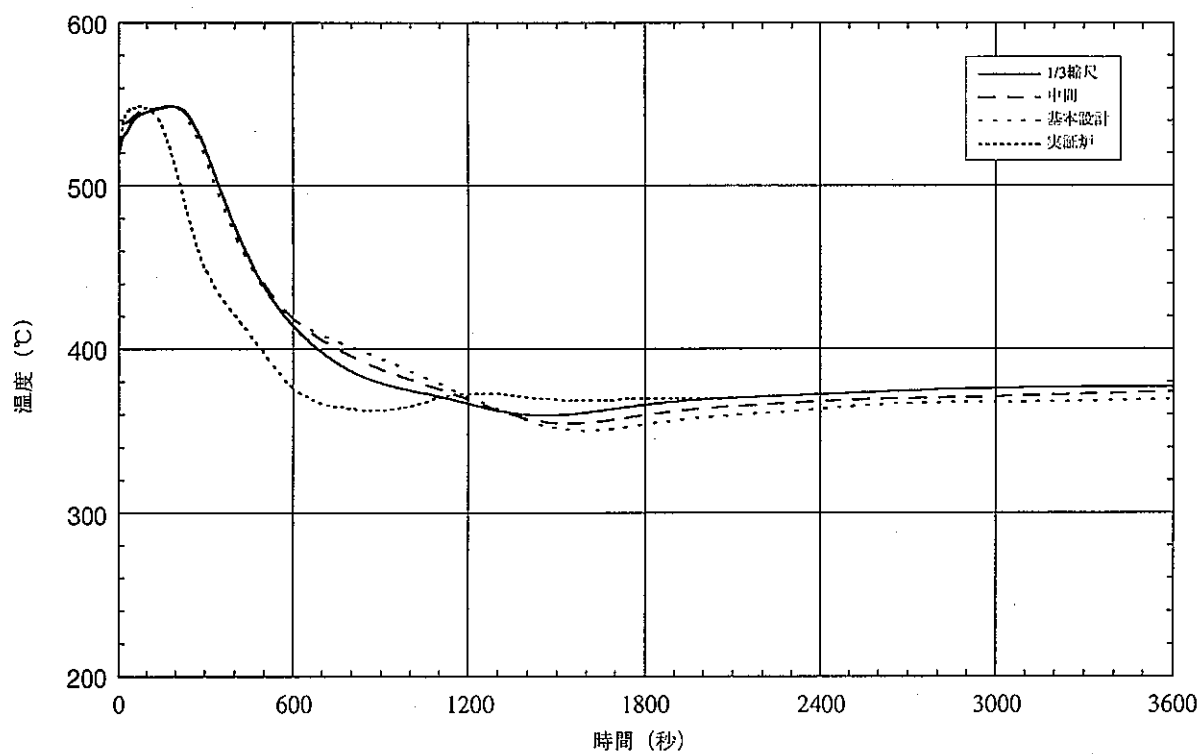


図3.5.1-8 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

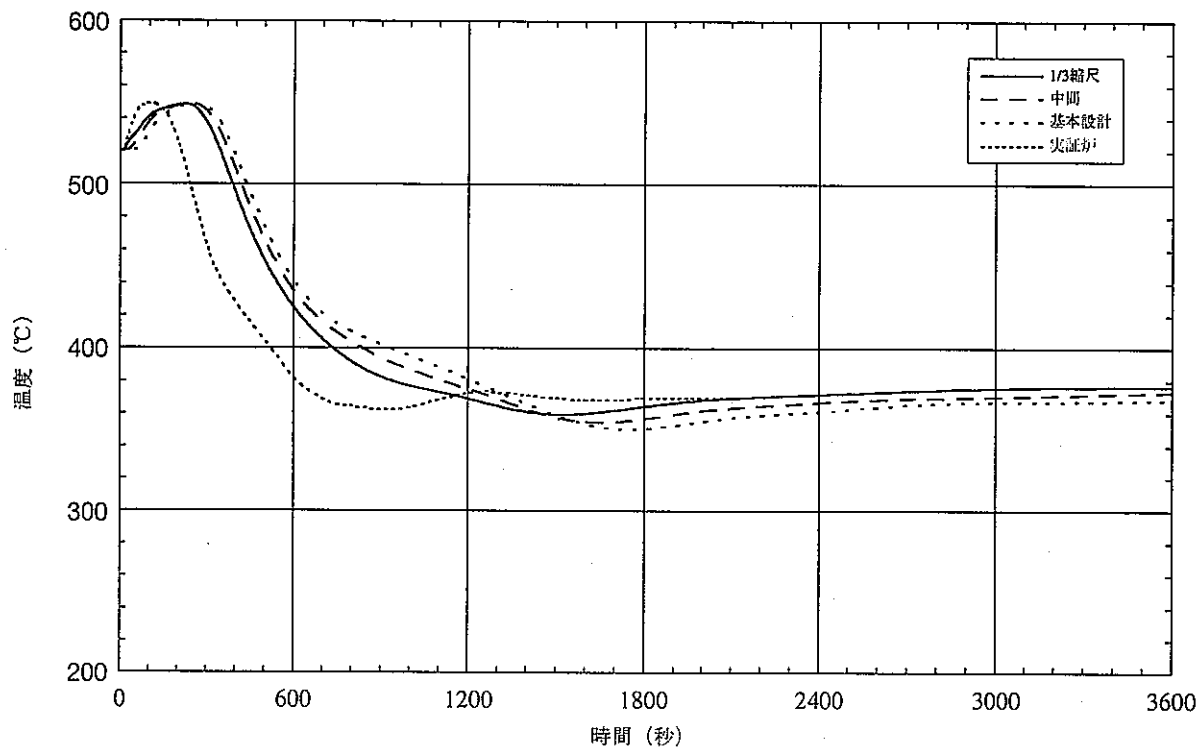


図3.5.1-9 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)

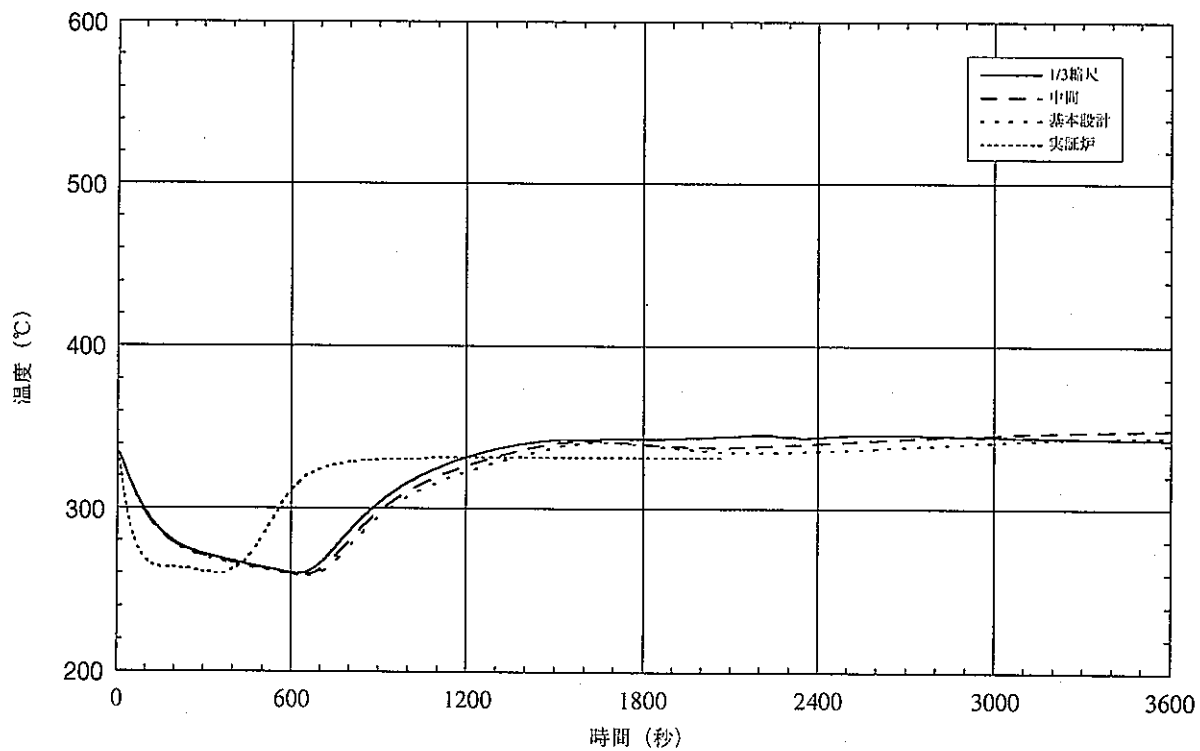


図3.5.1-10 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)

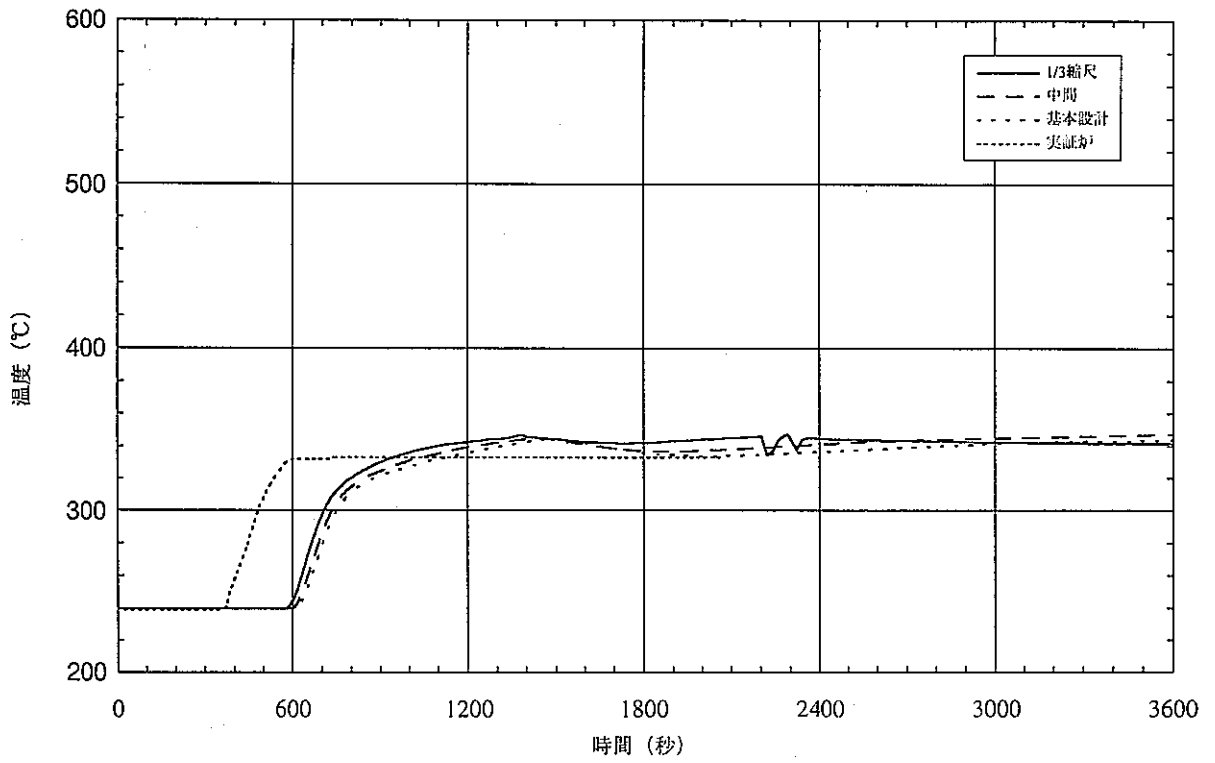


図3.5.1-11 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口給水温度、2次系配管長パラメータ解析)

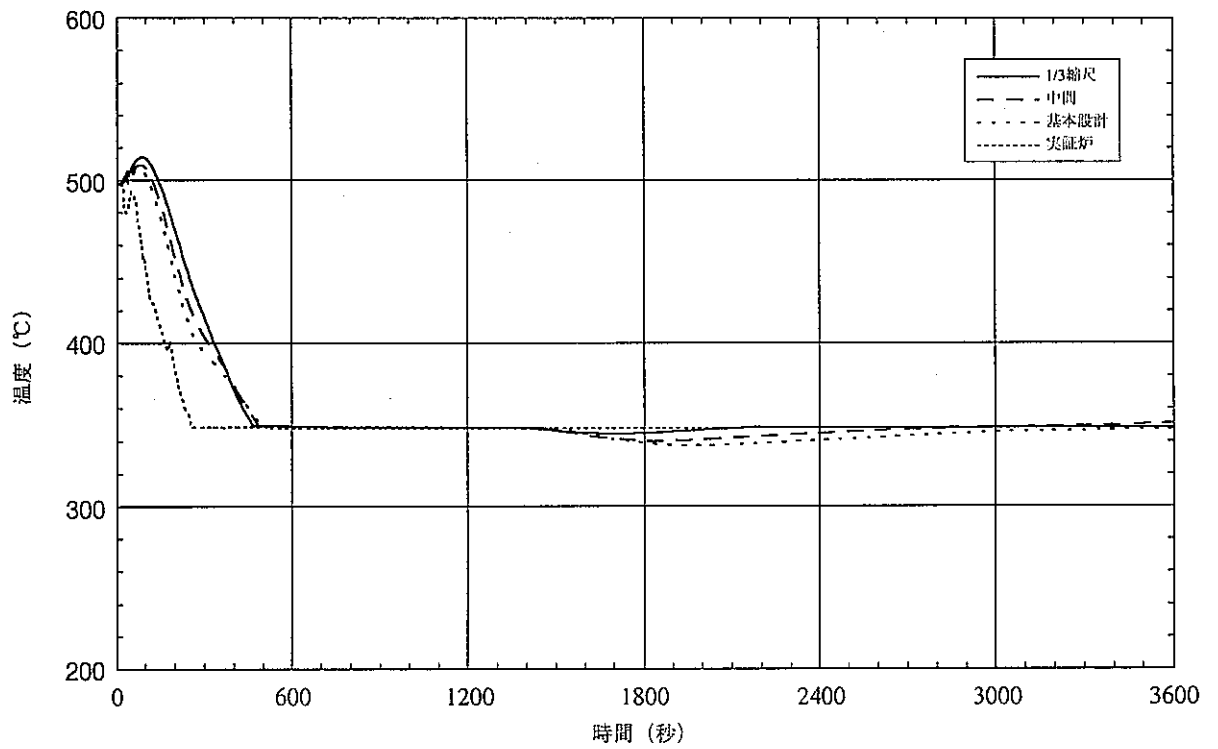


図3.5.1-12 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口蒸気温度、2次系配管長パラメータ解析)

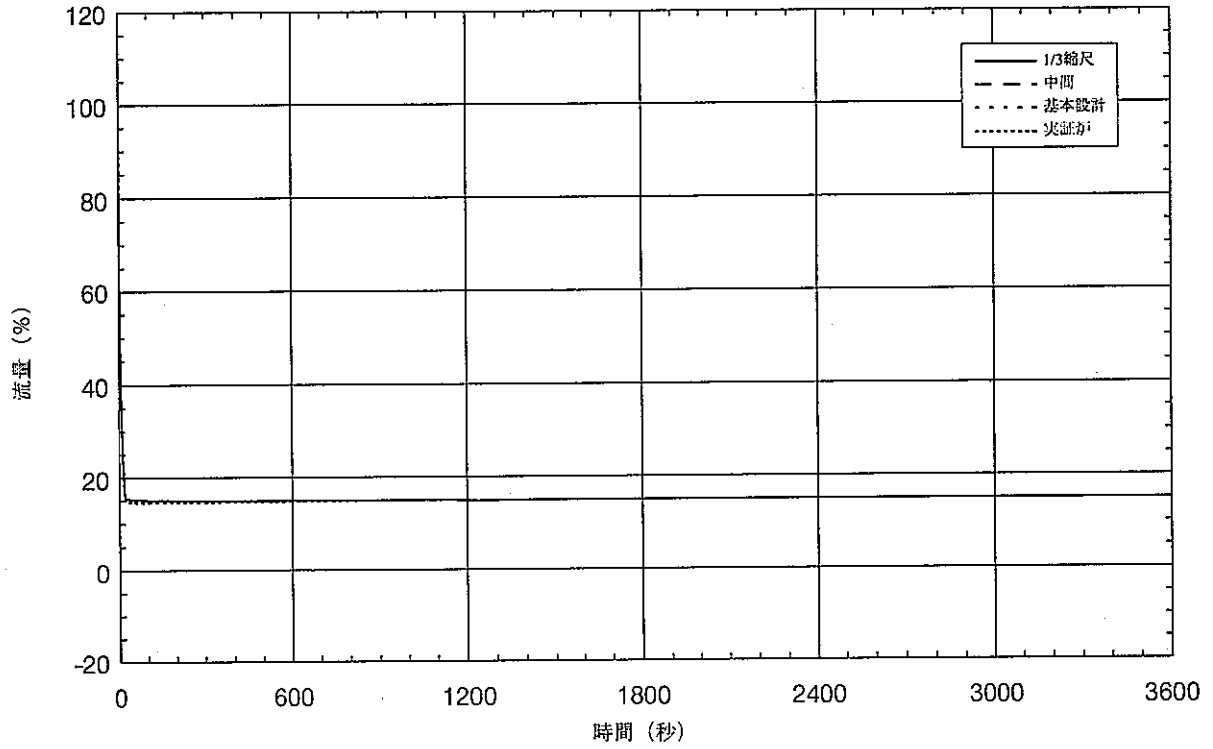


図3.5.1-13(1/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

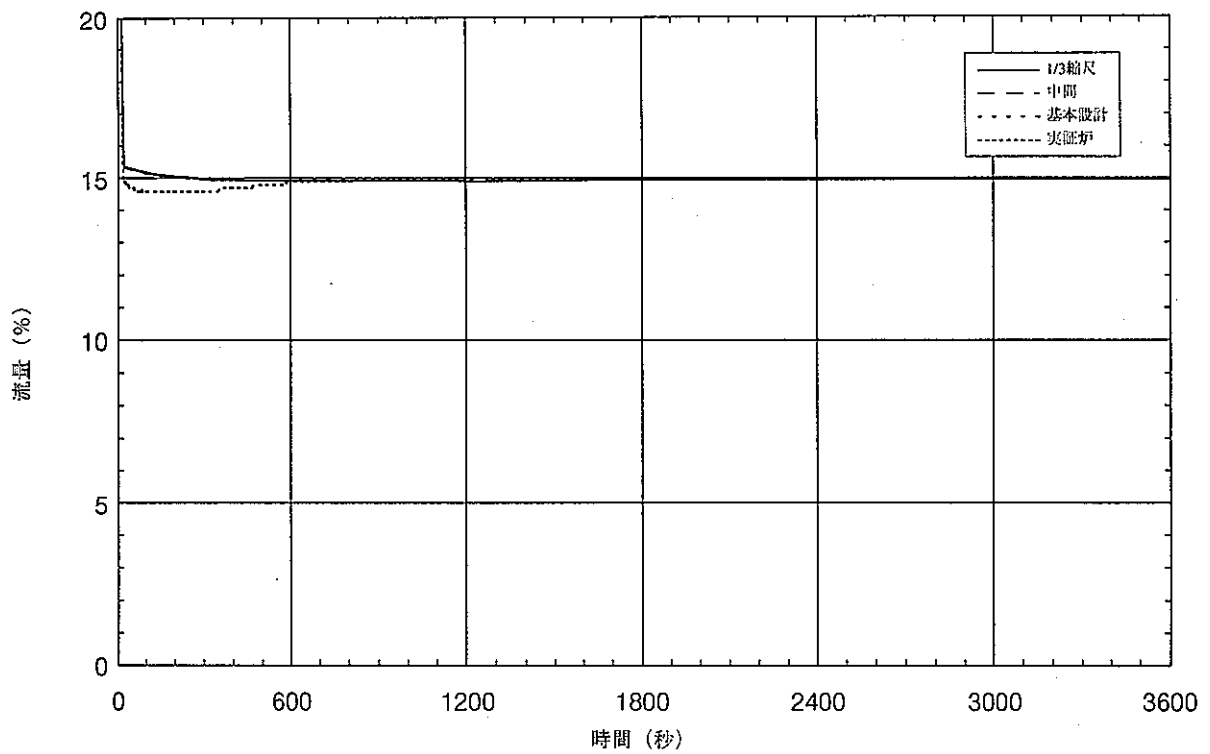


図3.5.1-13(2/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

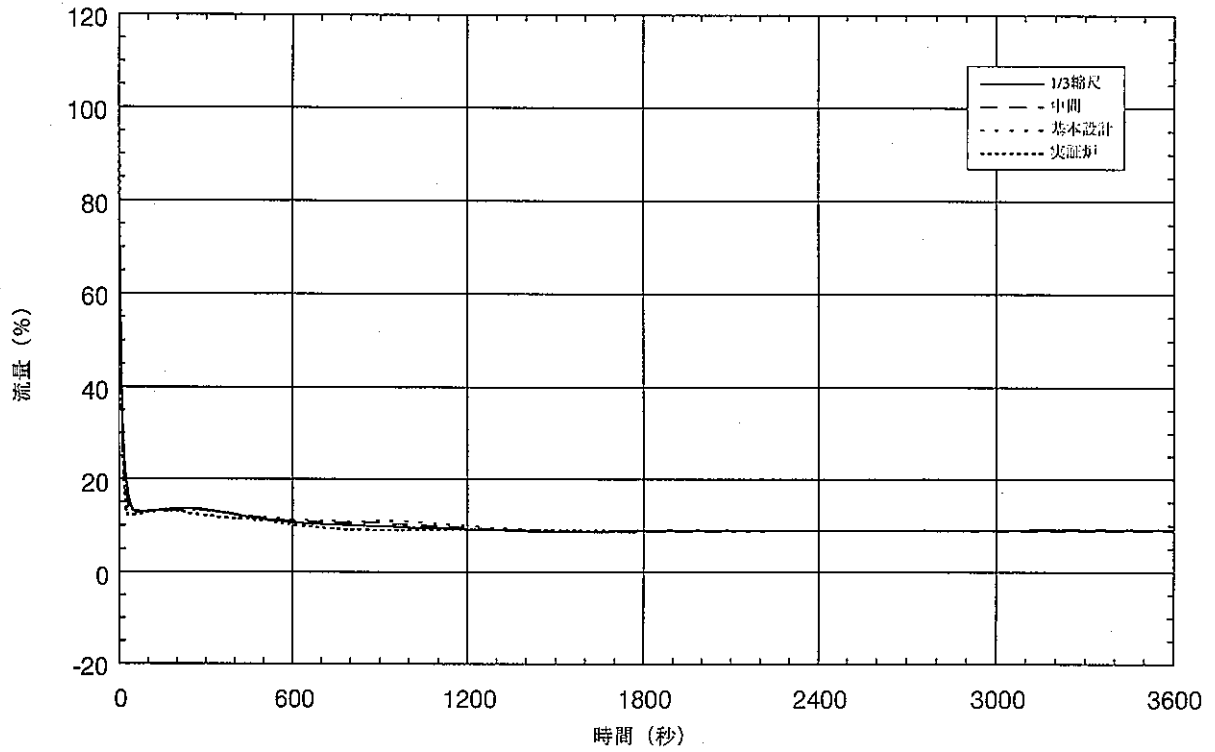


図3.5.1-14(1/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

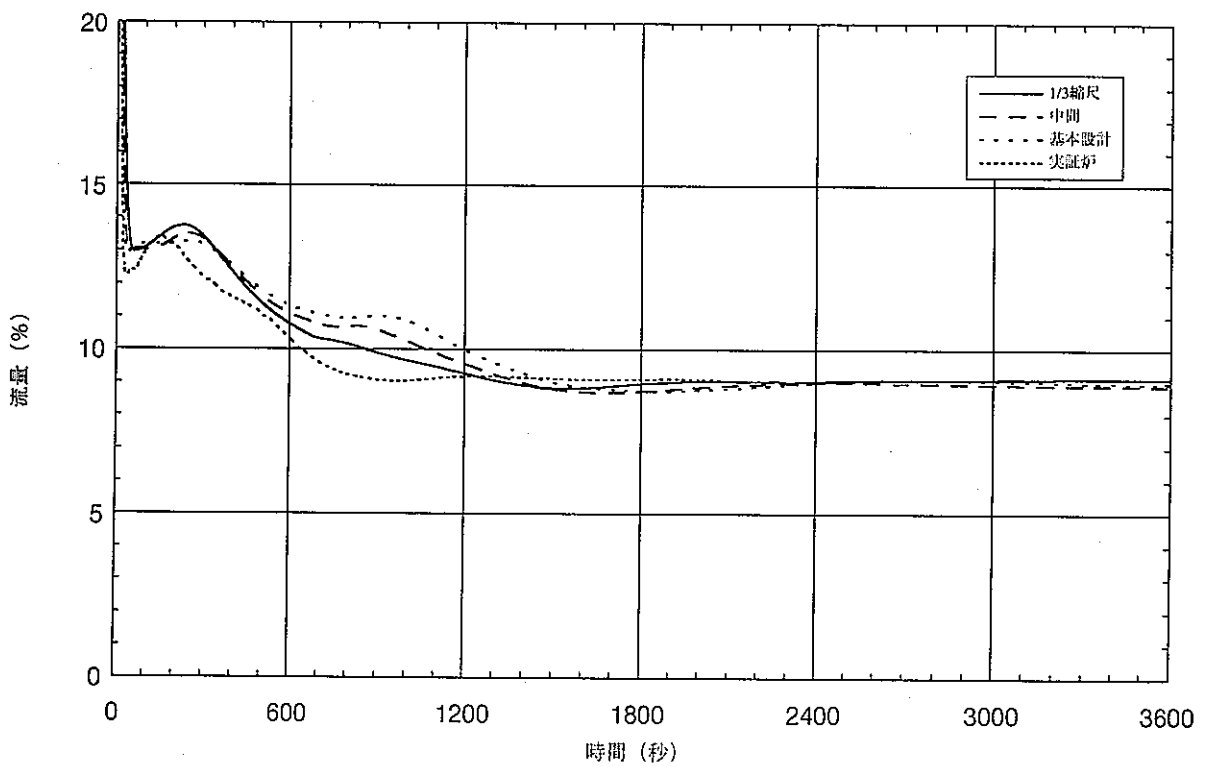


図3.5.1-14(2/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

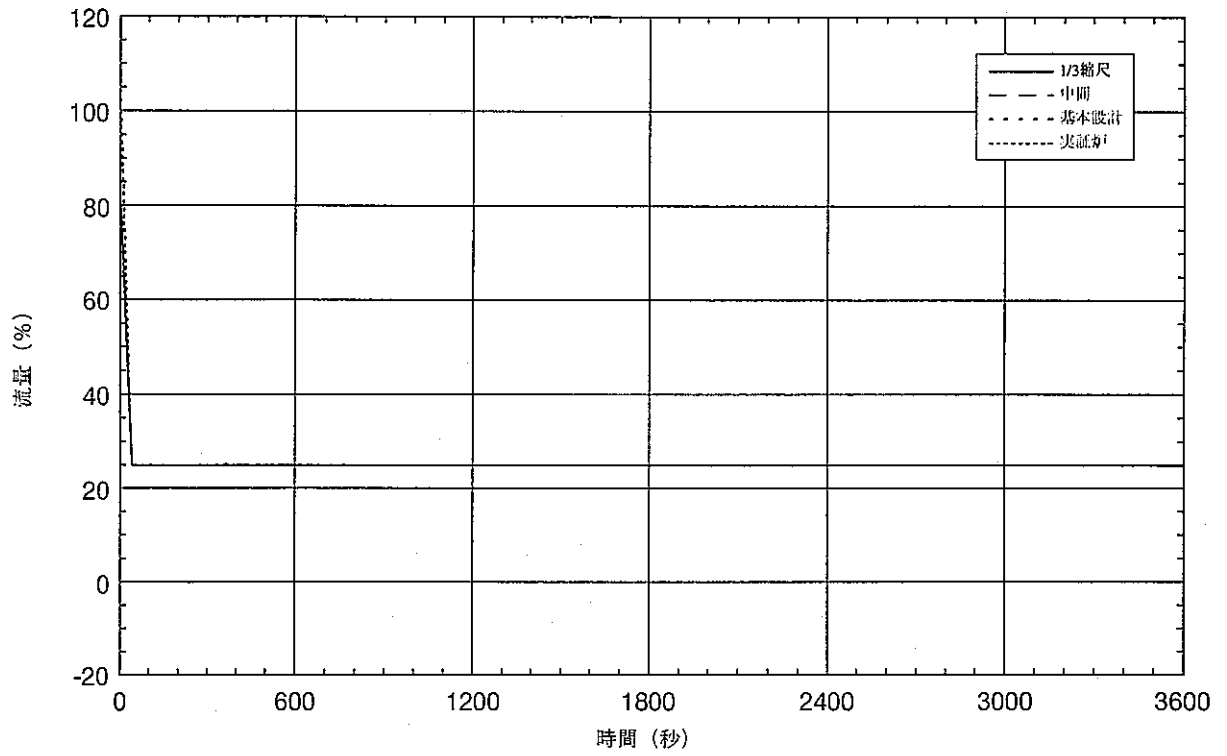


図3.5.1-15 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG給水流量、2次系配管長パラメータ解析)

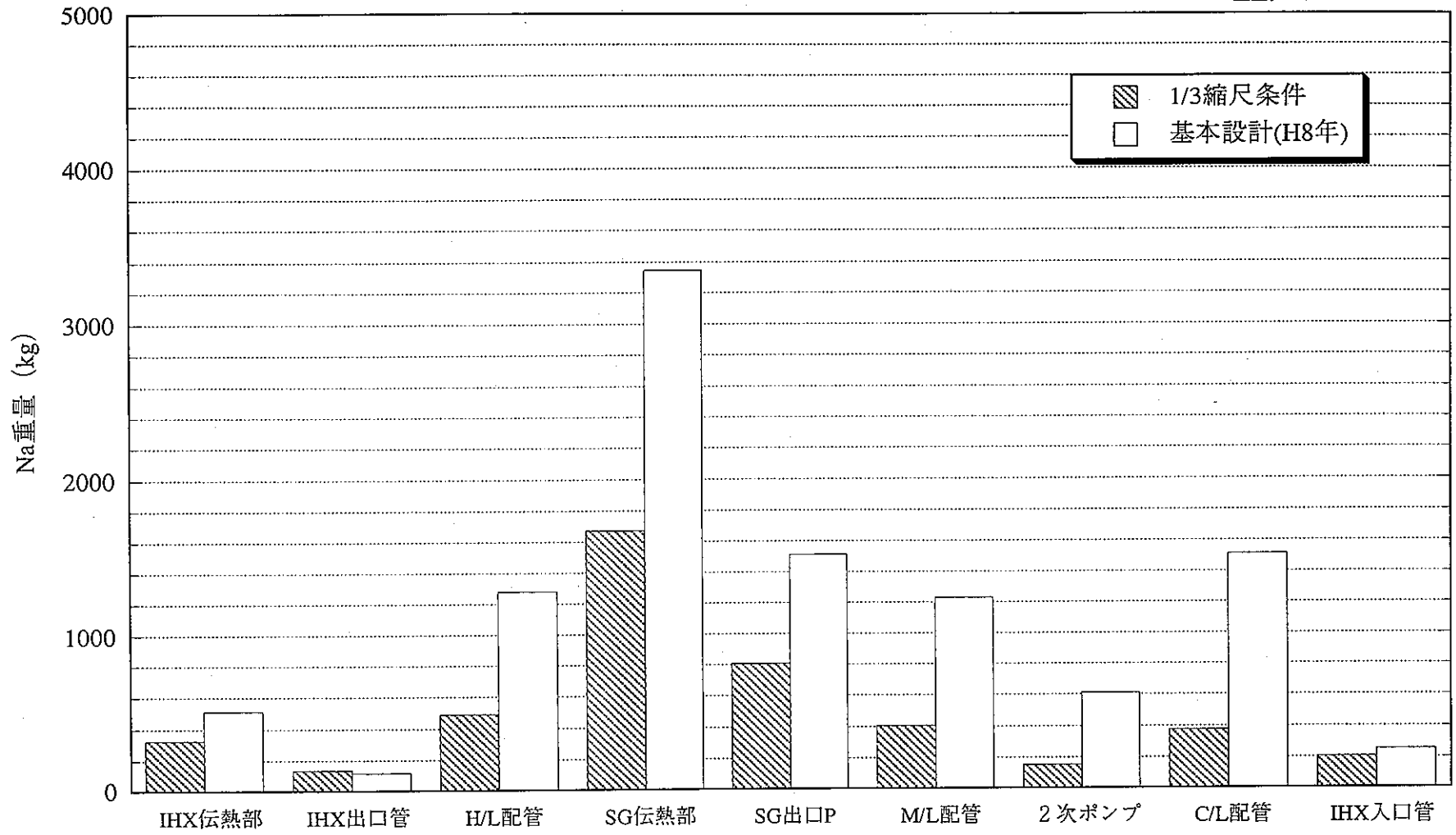


図3.5.1-16 2次系各部のNa重量比較

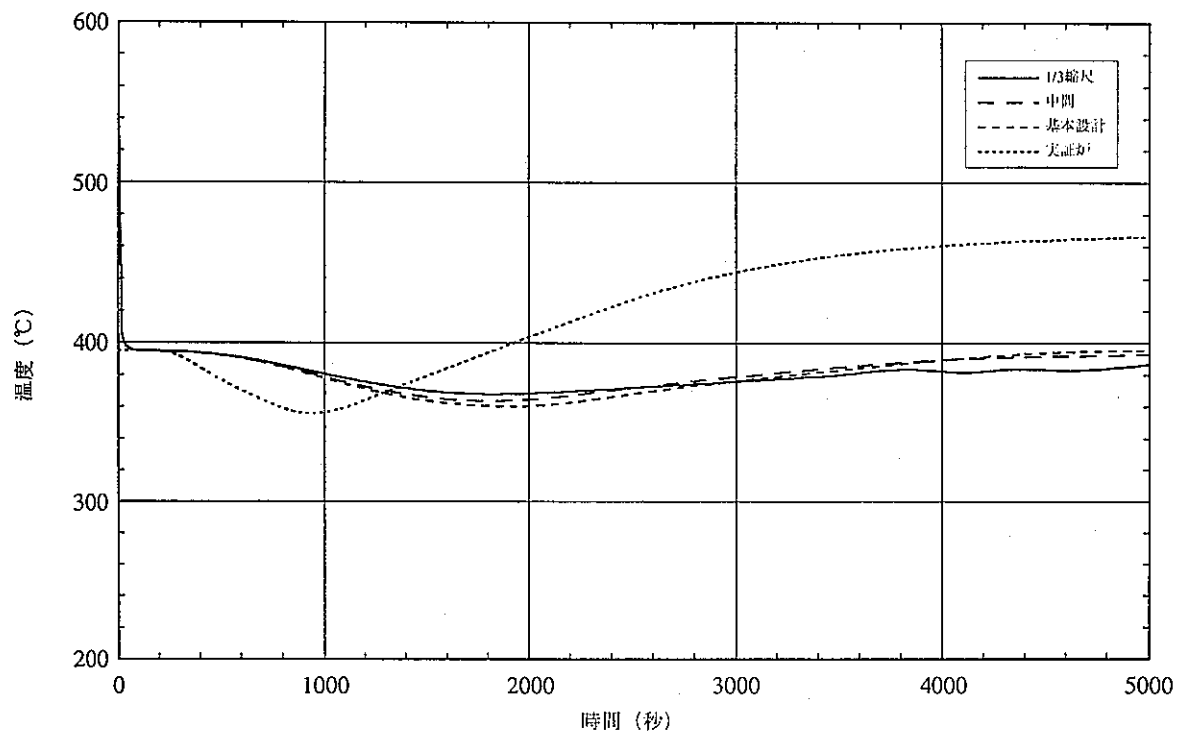


図3.5.2-1 自然循環試験解析結果（原子炉容器入口温度、2次系配管長パラメータ解析）

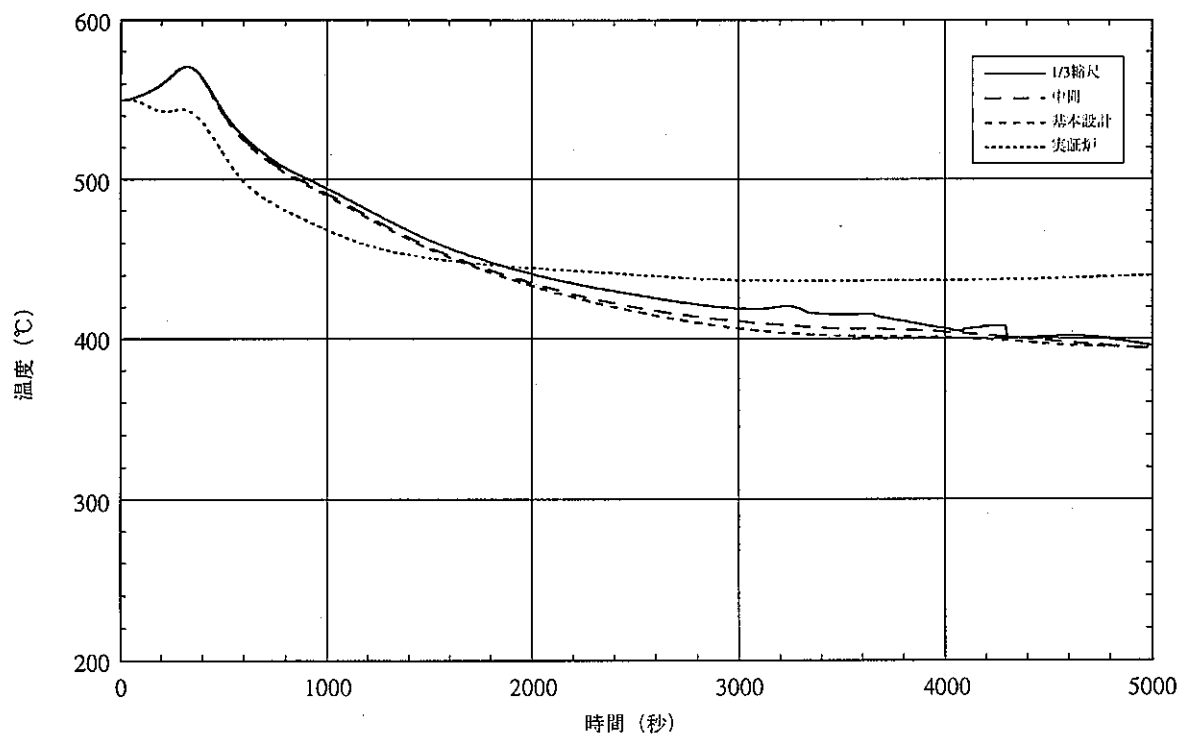


図3.5.2-2 自然循環試験解析結果（原子炉容器出口温度、2次系配管長パラメータ解析）

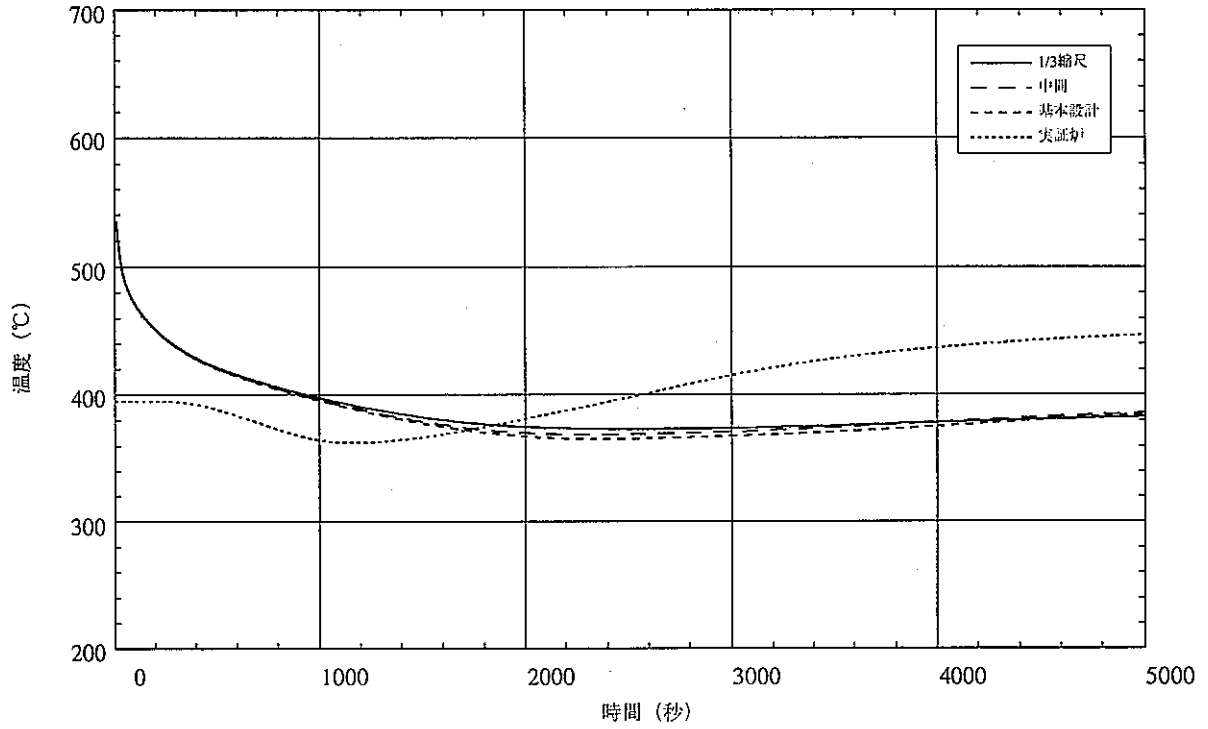


図3.5.2-3 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

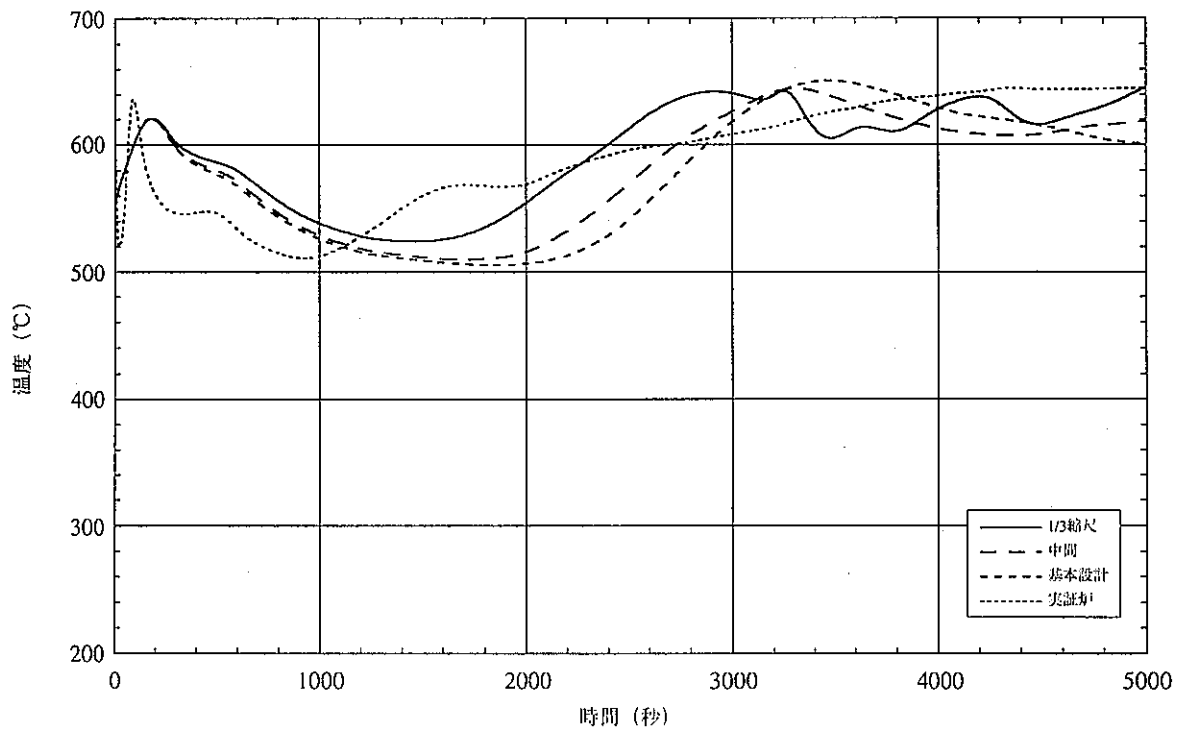


図3.5.2-4 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

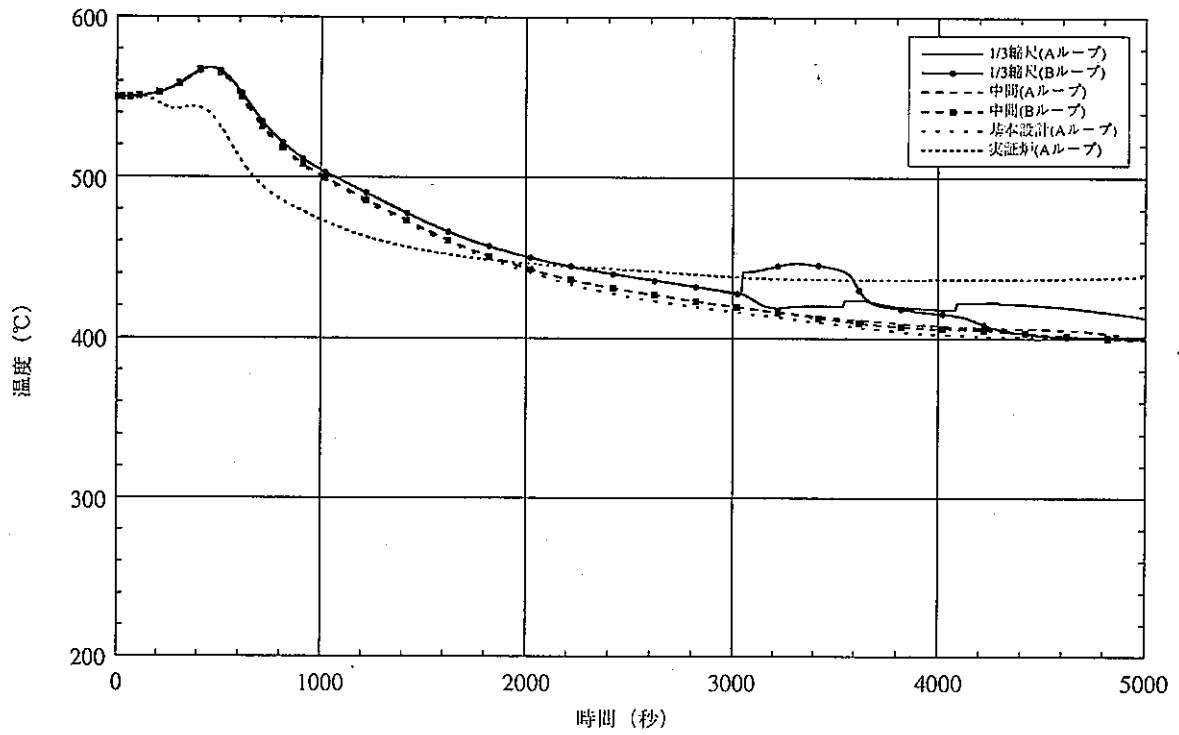


図3.5.2-5 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

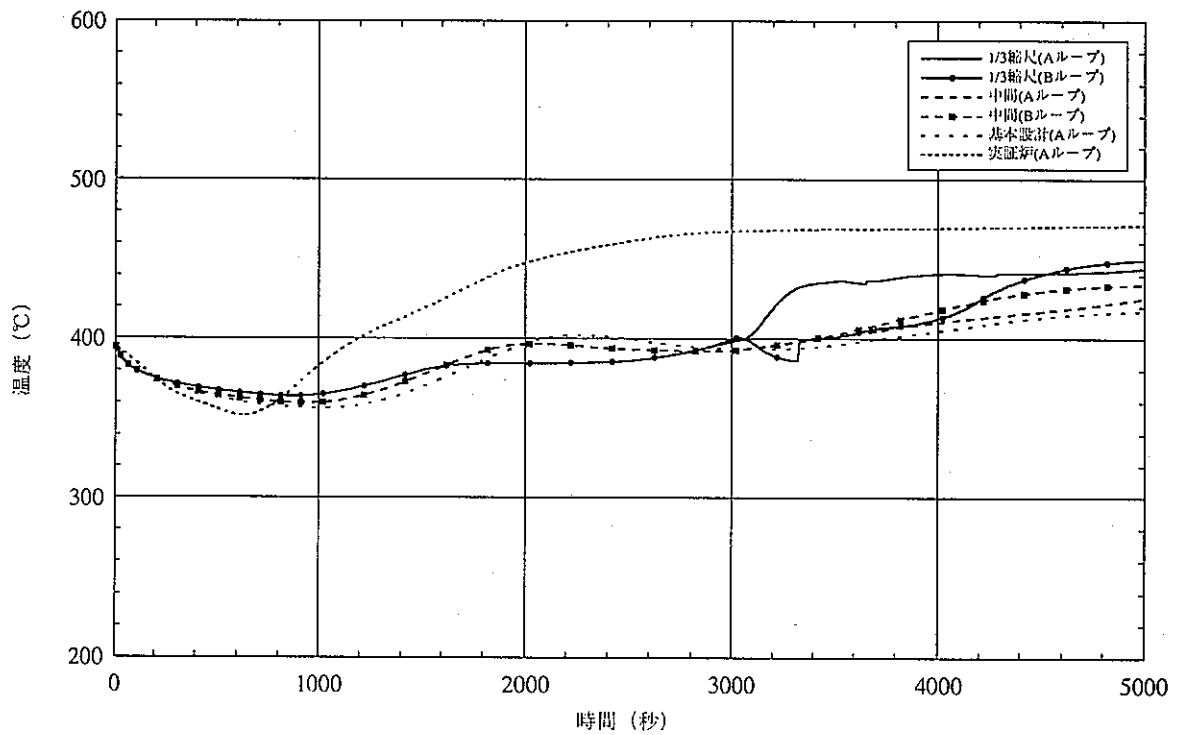


図3.5.2-6 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

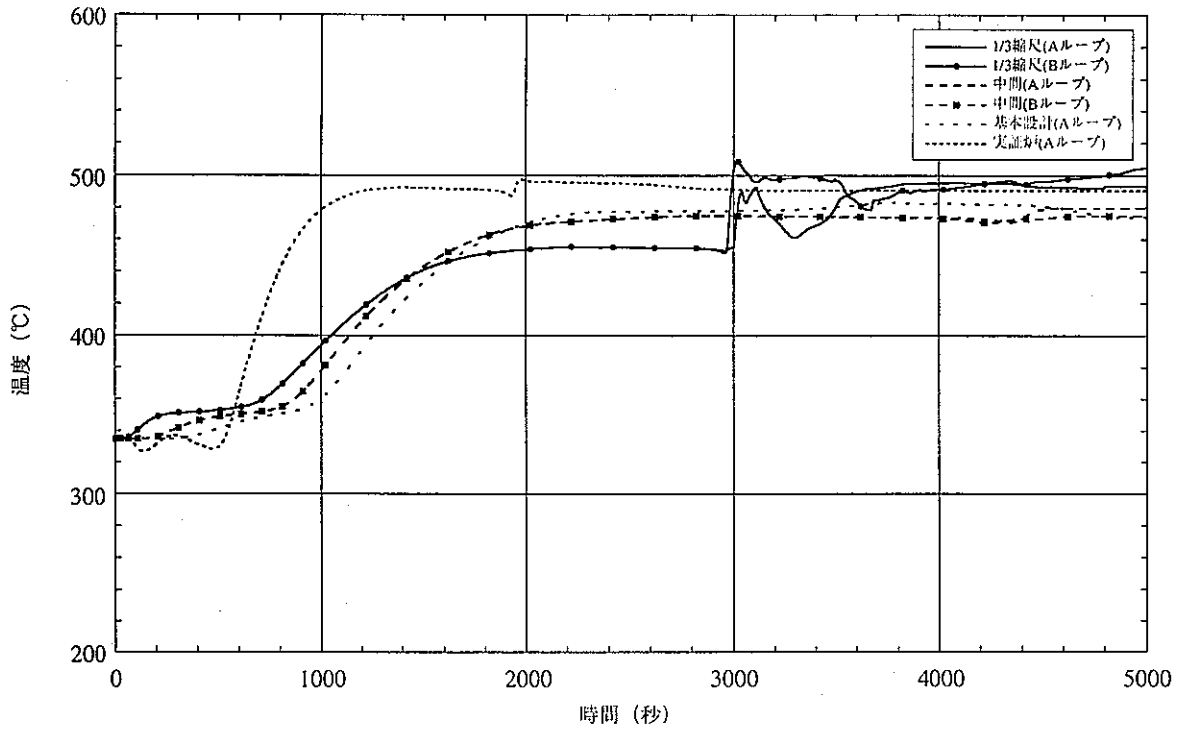


図3.5.2-7 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

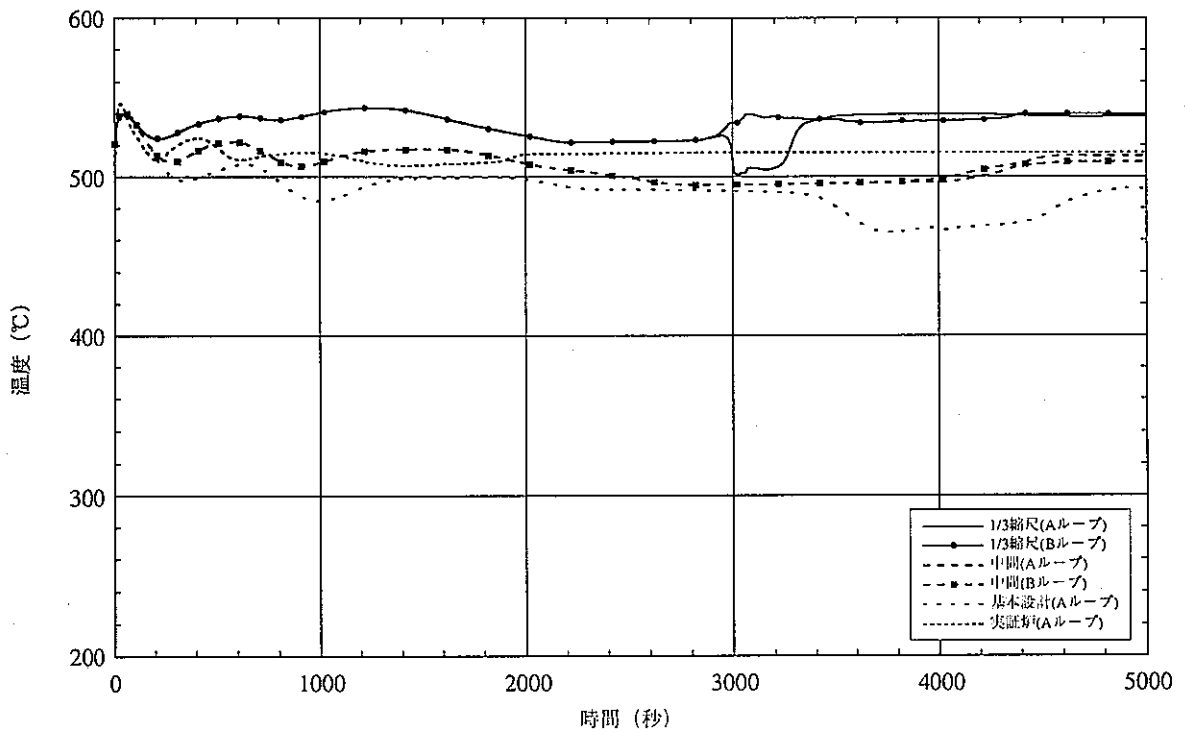


図3.5.2-8 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

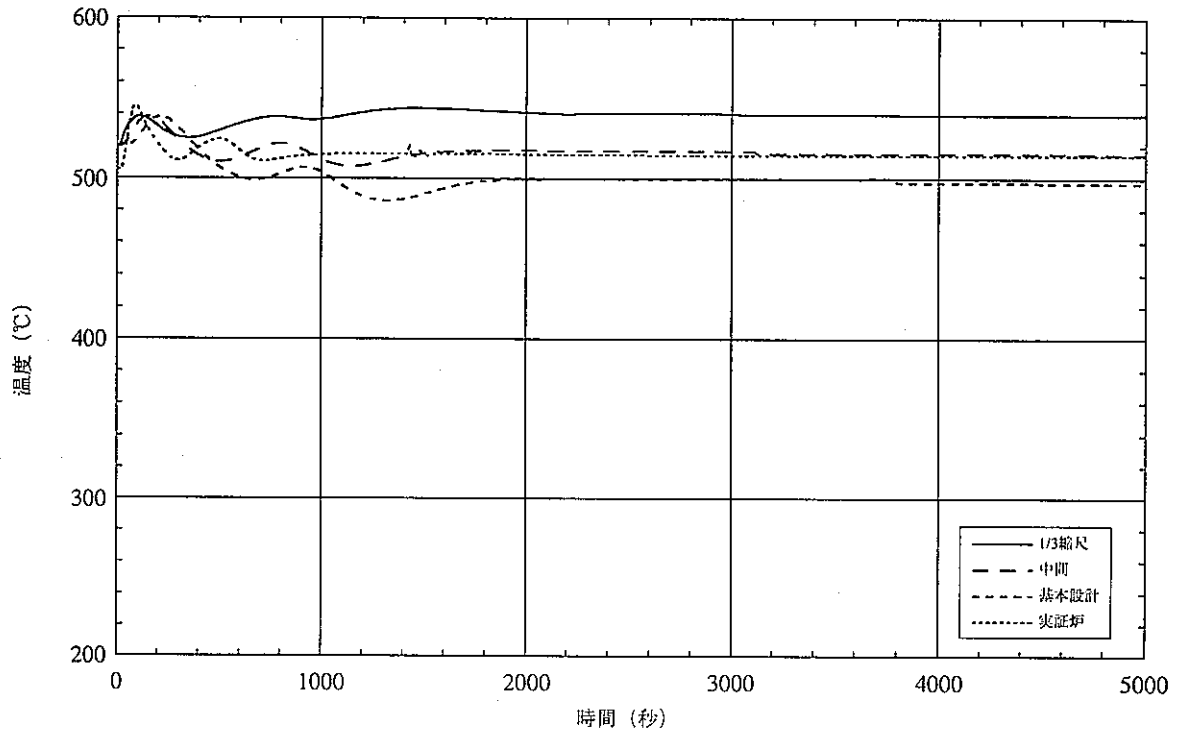


図3.5.2-9 自然循環試験解析結果 (SG入口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)

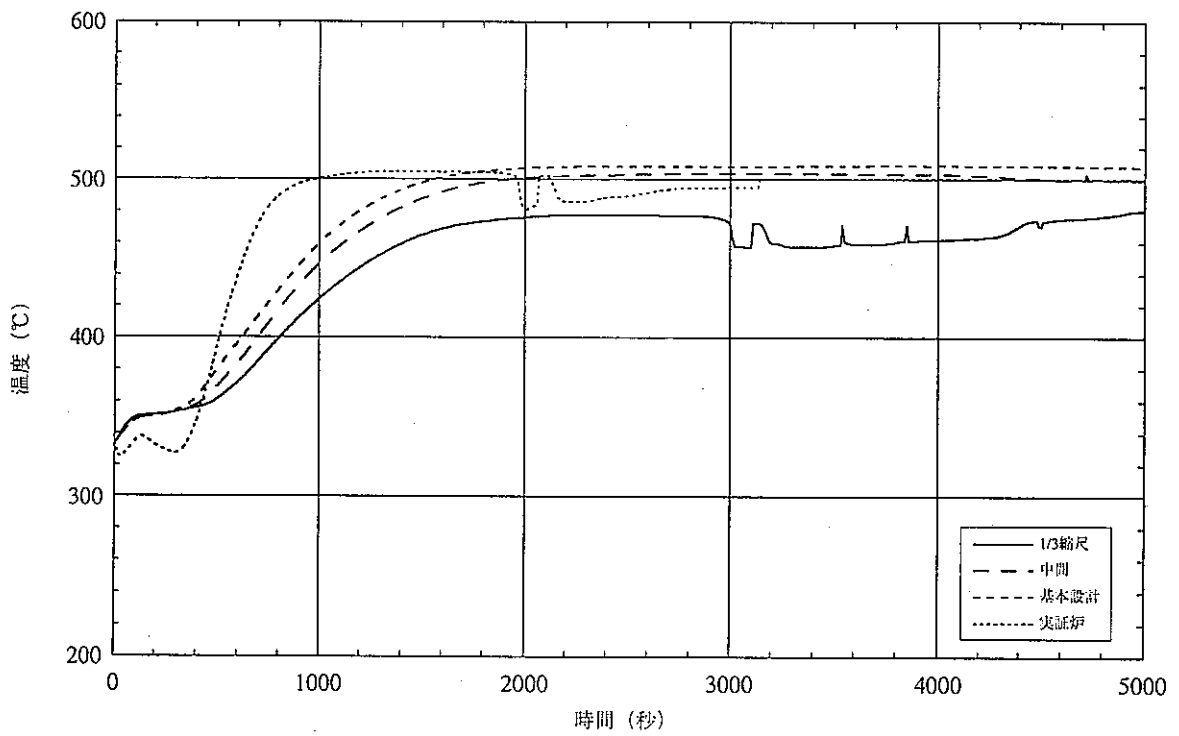


図3.5.2-10 自然循環試験解析結果 (SG出口Na温度、2次系配管長パラメータ解析)

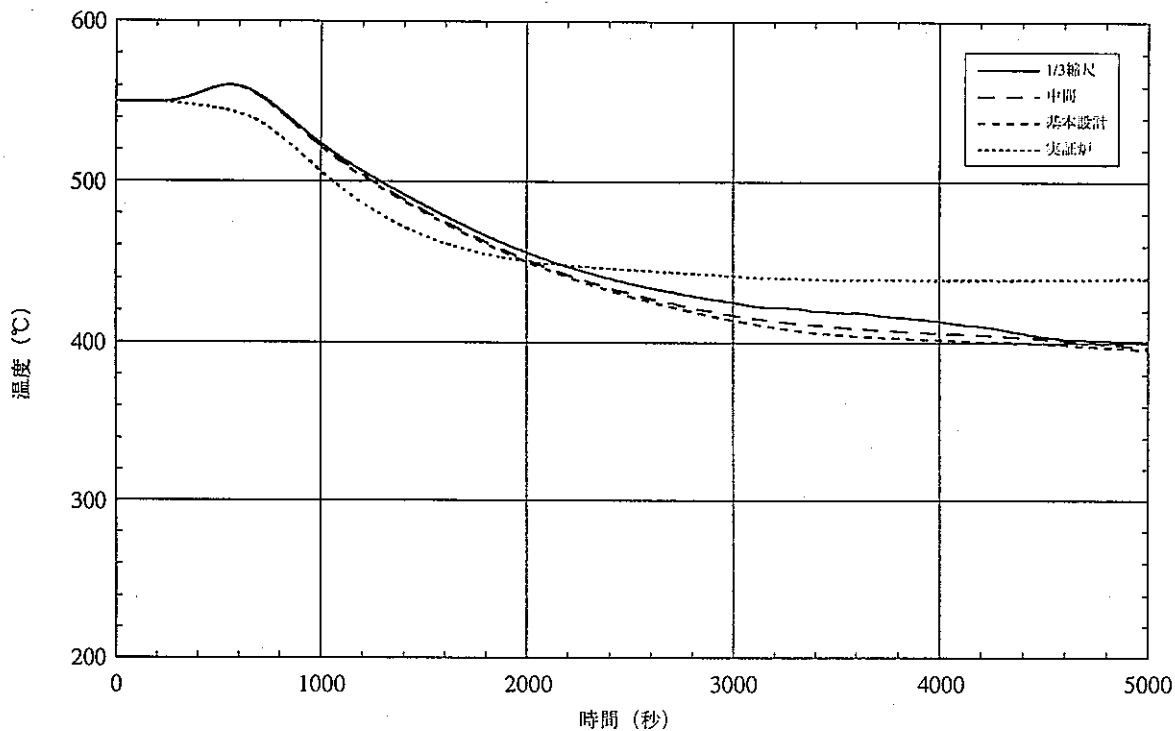


図3.5.2-11 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

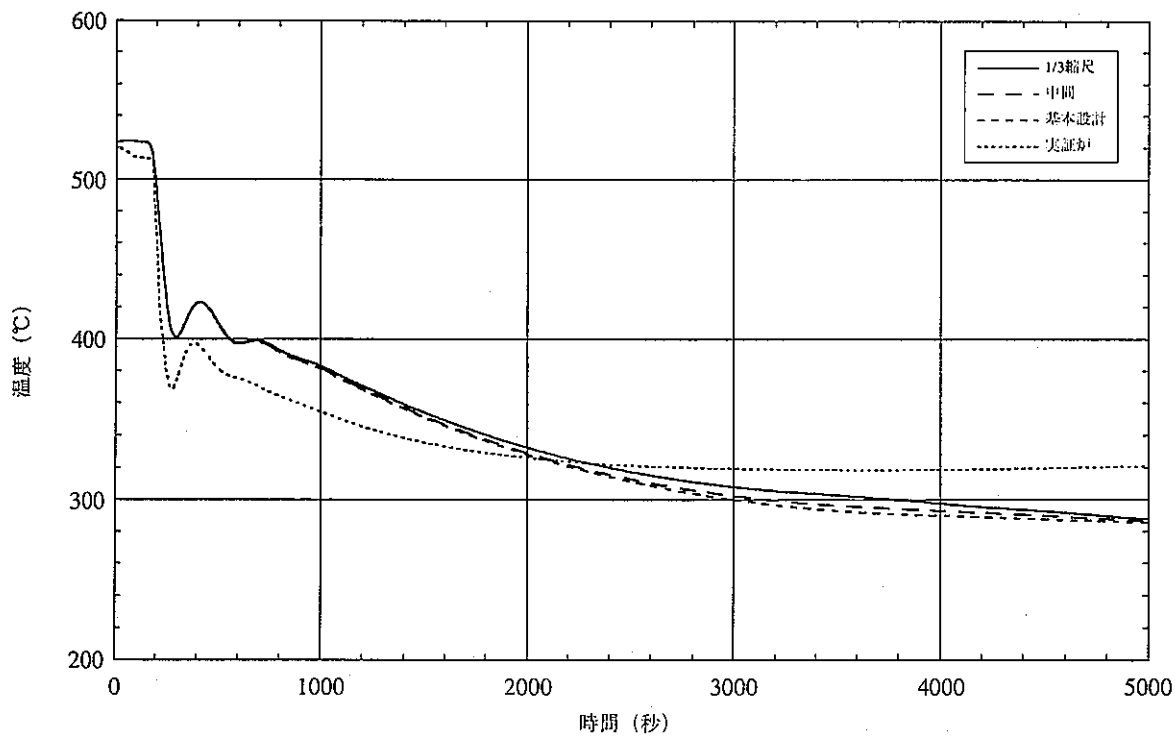


図3.5.2-12 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

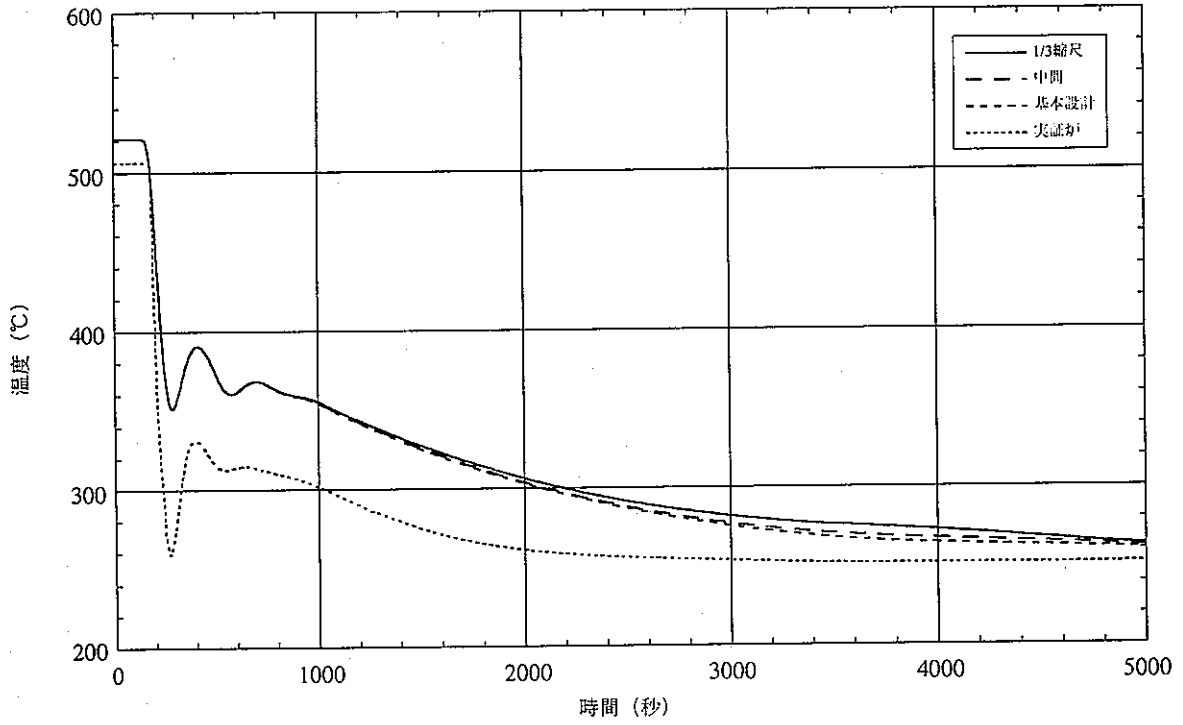


図3.5.2-13 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側入口温度、2次系配管長パラメータ解析)

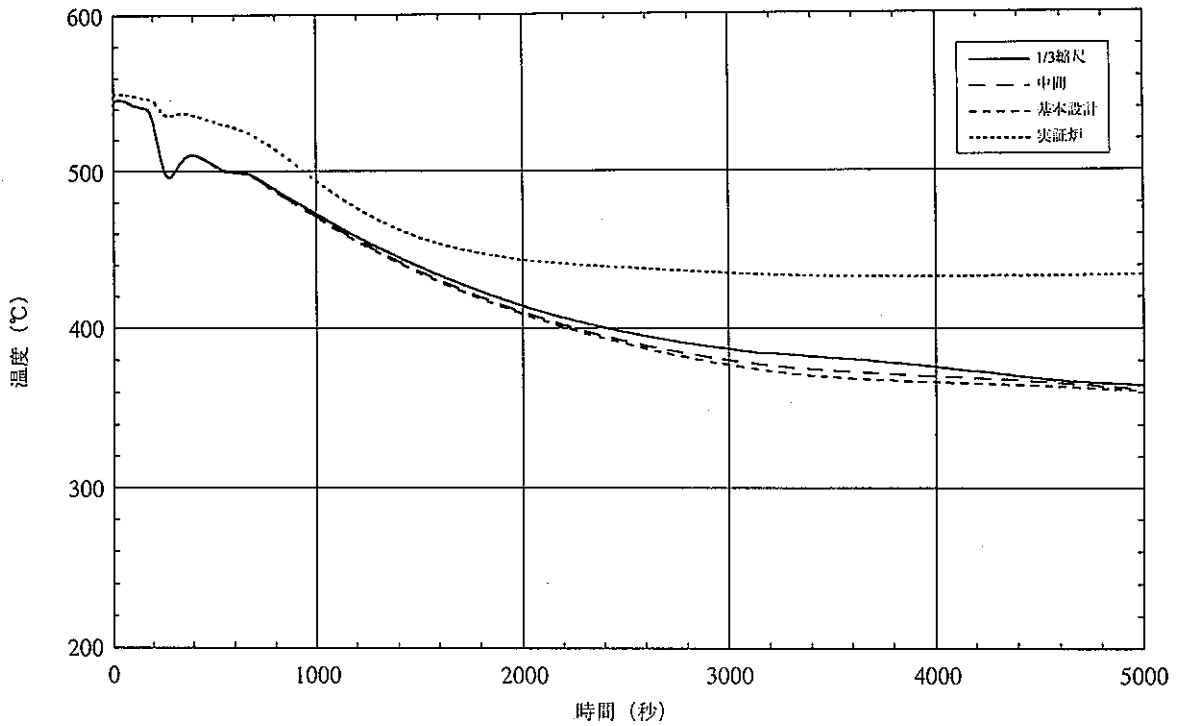


図3.5.2-14 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出口温度、2次系配管長パラメータ解析)

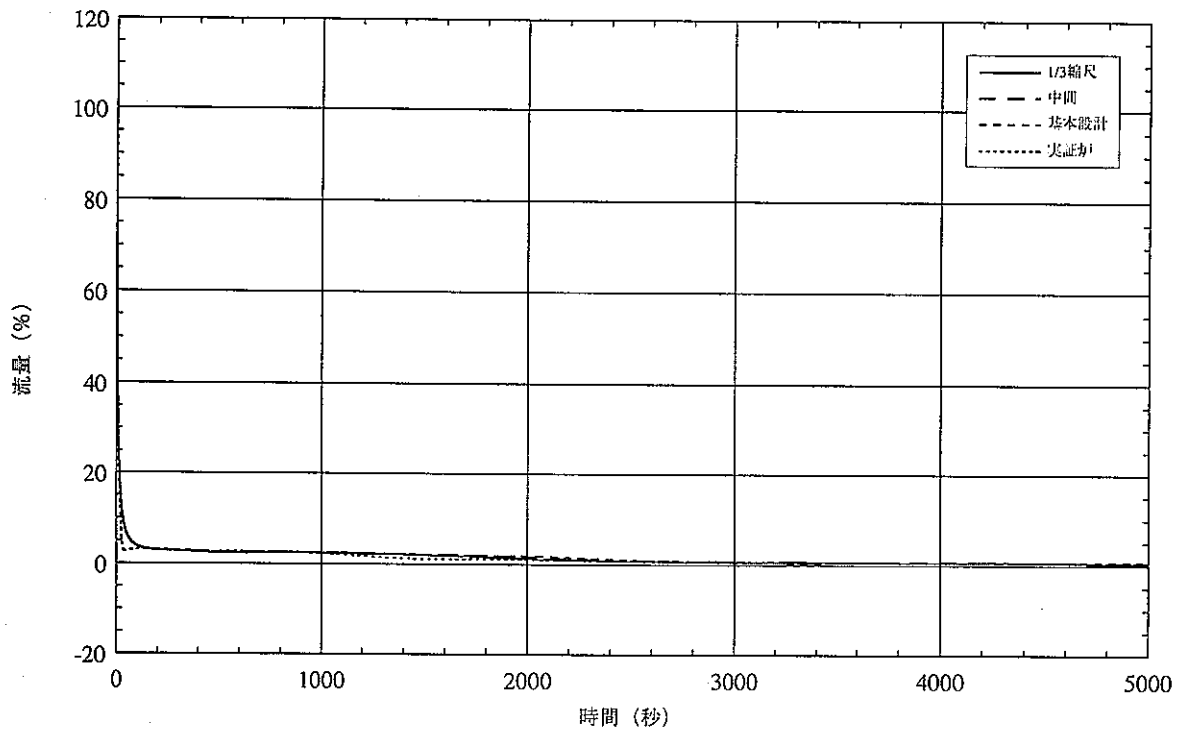


図3.5.2-15(1/4) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

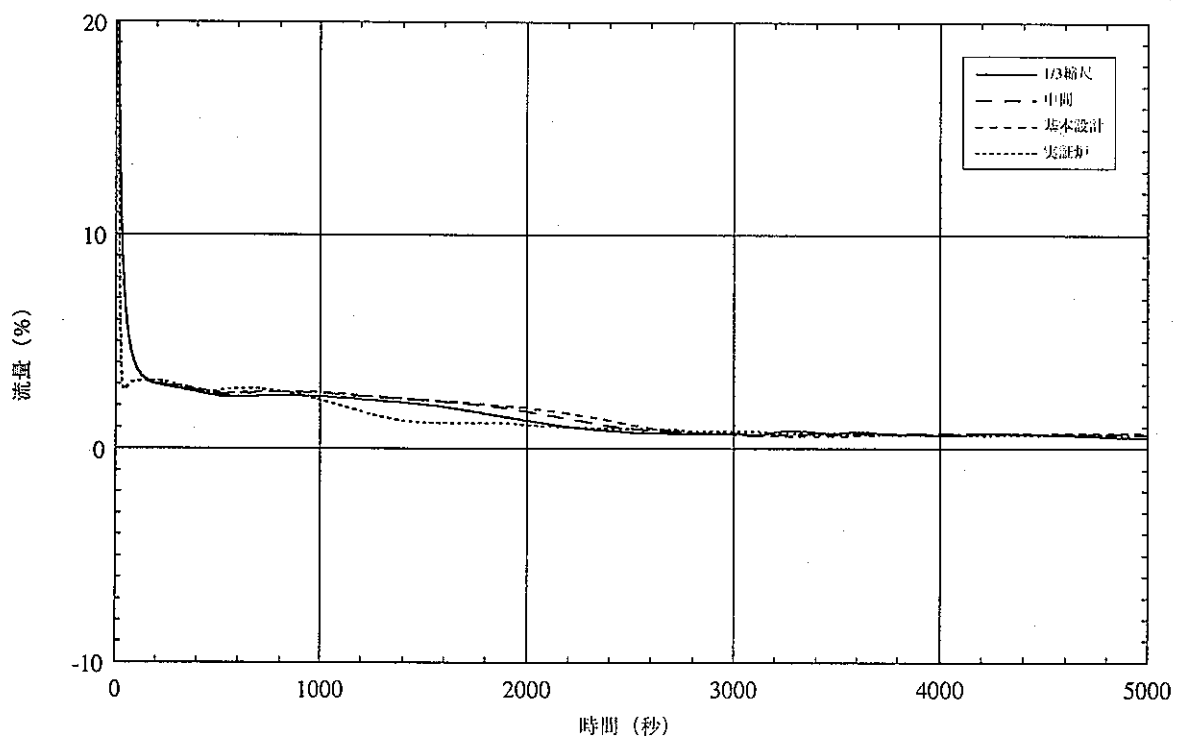


図3.5.2-15(2/4) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

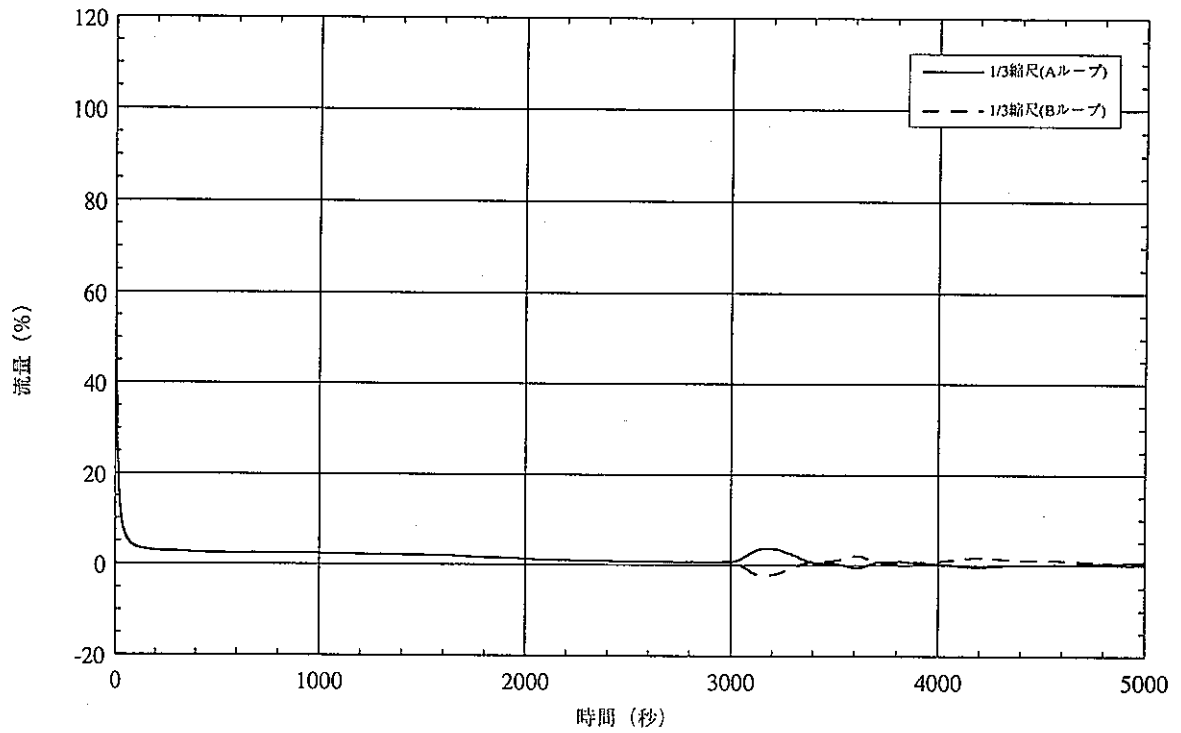


図6.2-15(3/4) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

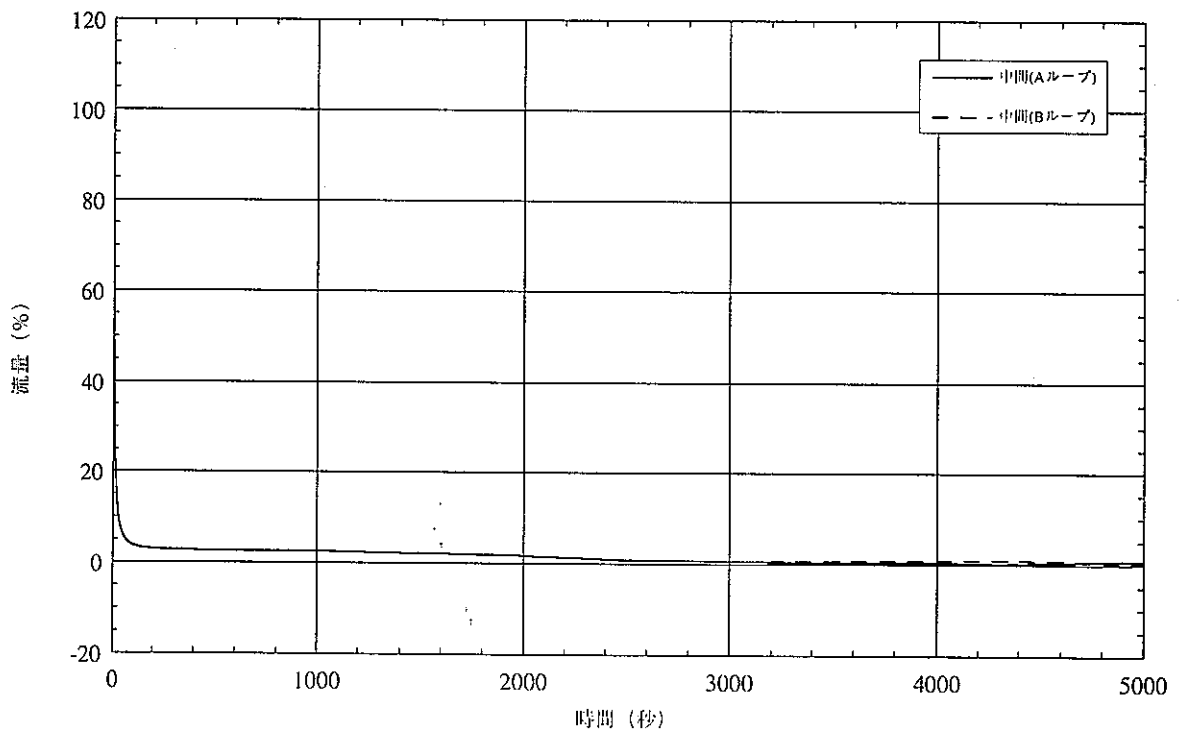


図3.5.2-15(4/4) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

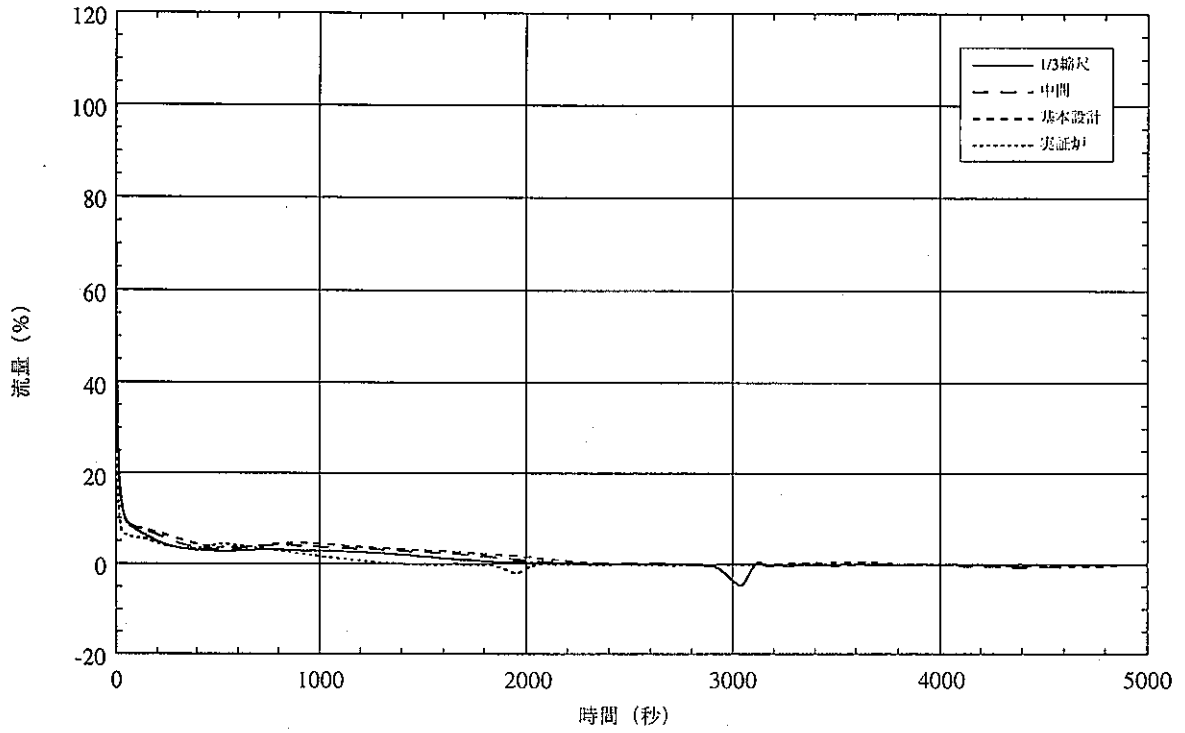


図3.5.2-16(1/4) 自然循環試験解析結果（2次系流量、2次系配管長パラメータ解析）

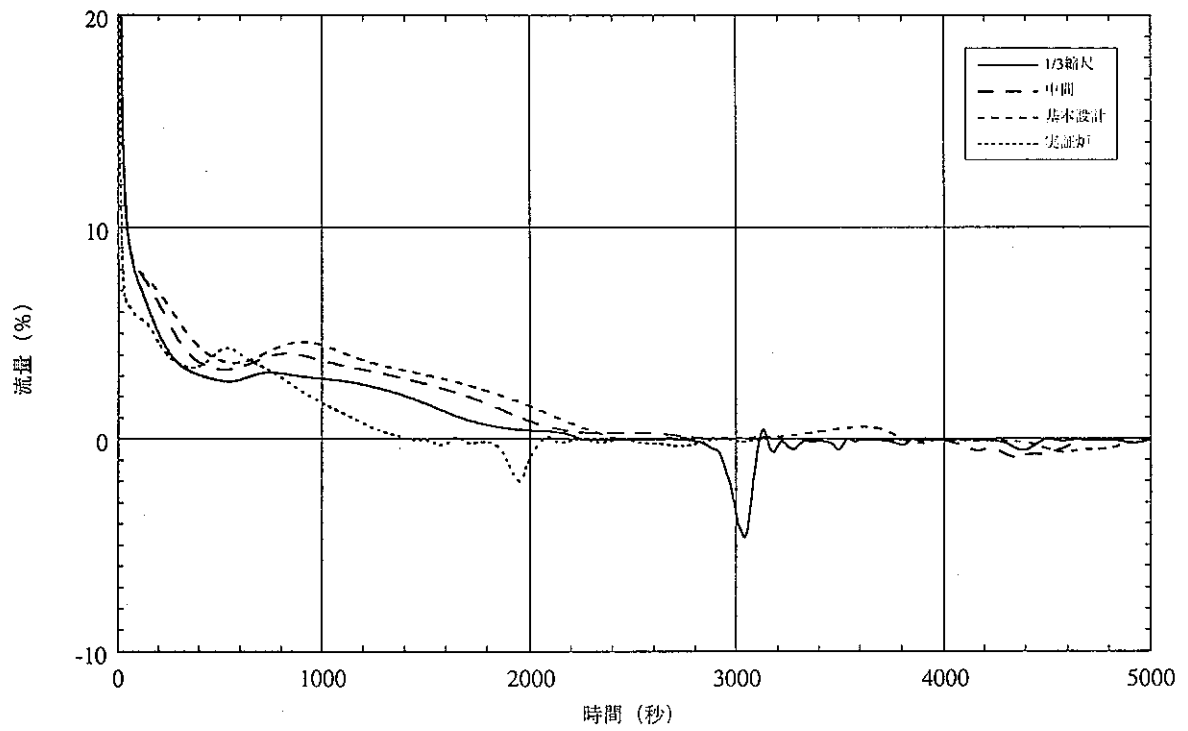


図3.5.2-16(2/4) 自然循環試験解析結果（2次系流量、2次系配管長パラメータ解析）

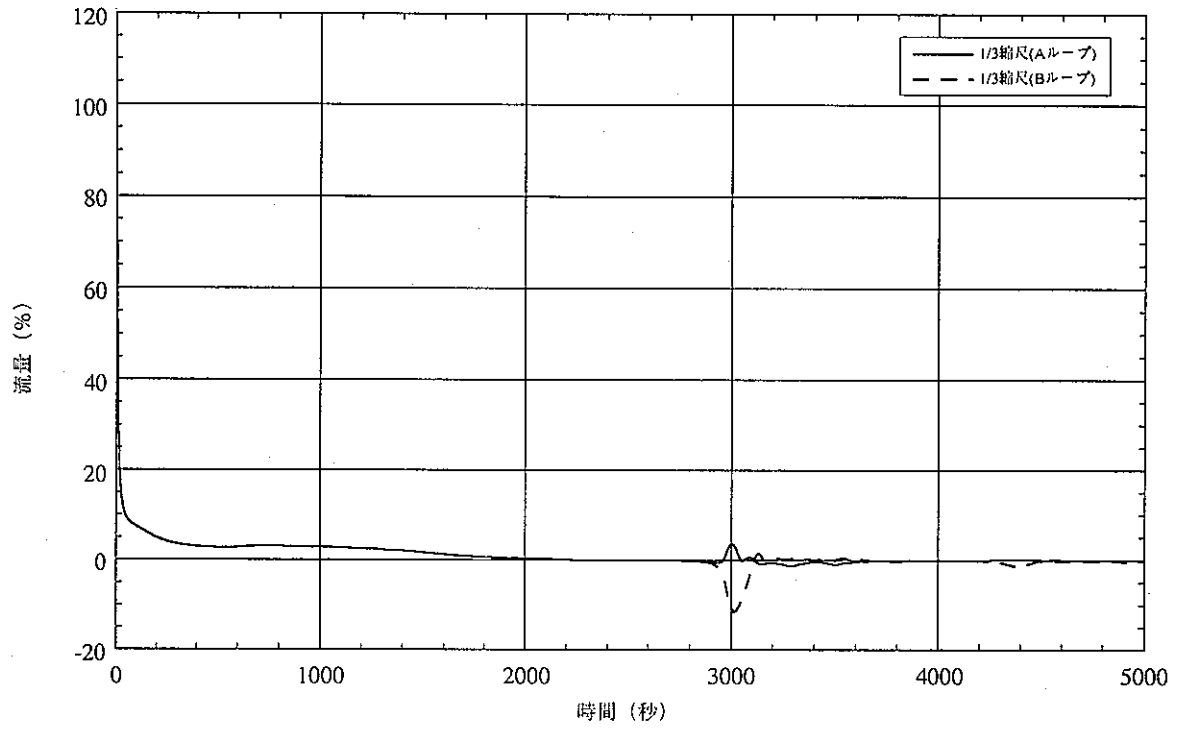


図3.5.2-16(3/4) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

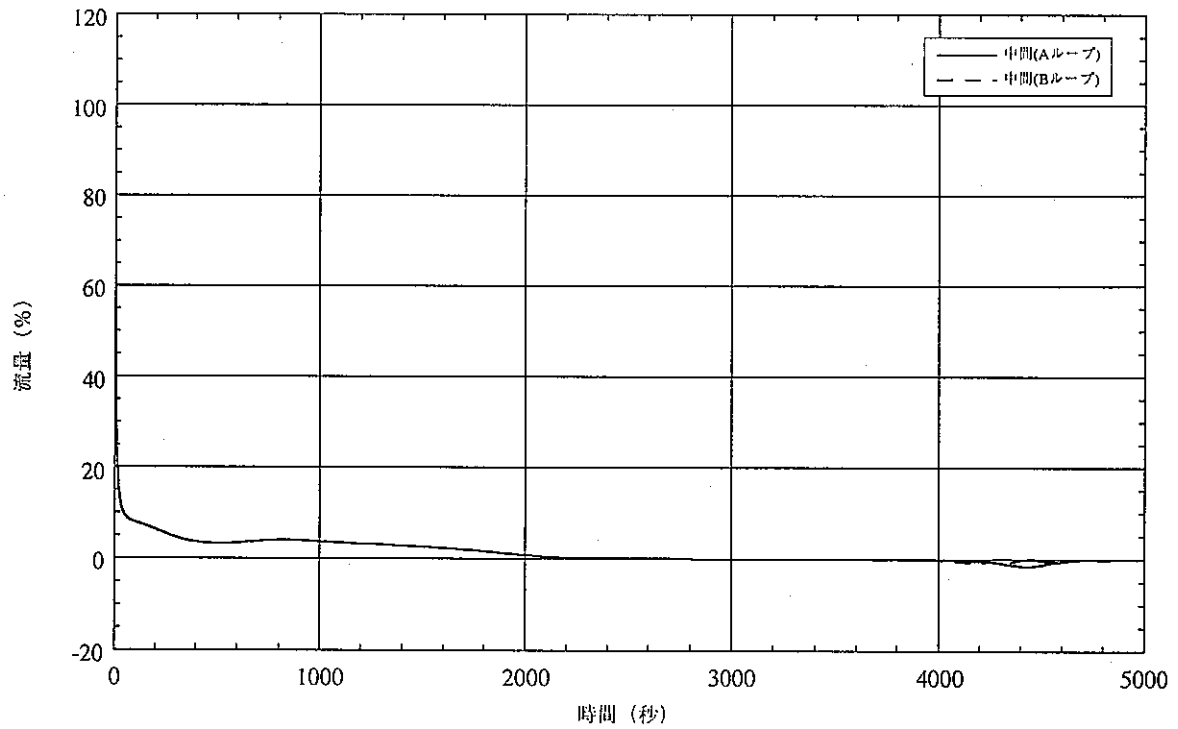


図3.5.2-16(4/4) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

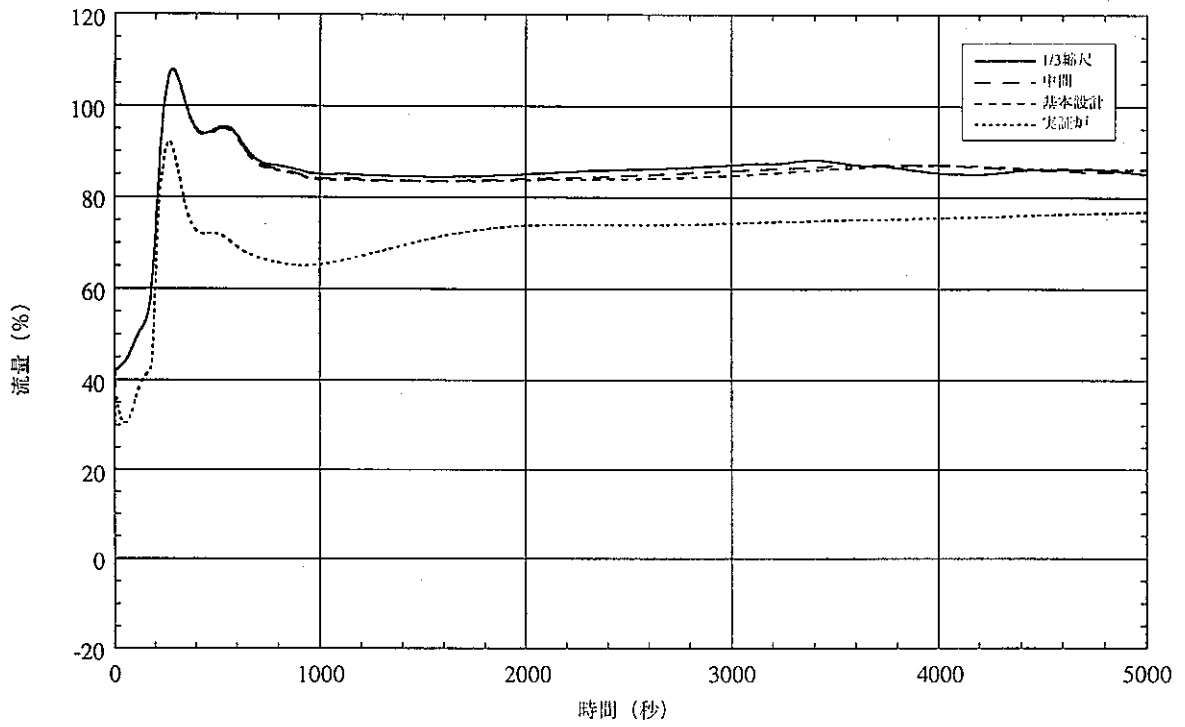


図3.5.2-17 自然循環試験解析結果 (DRACS 1次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

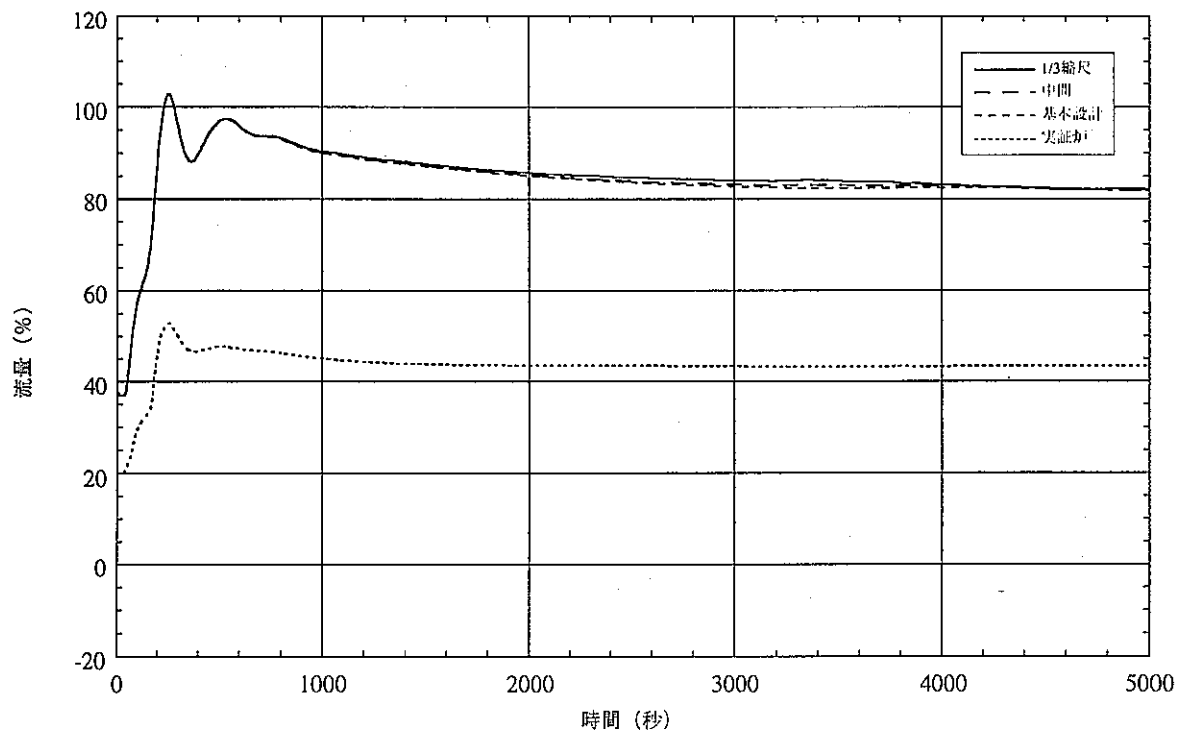


図3.5.2-18 自然循環試験解析結果 (DRACS 2次系流量、2次系配管長パラメータ解析)

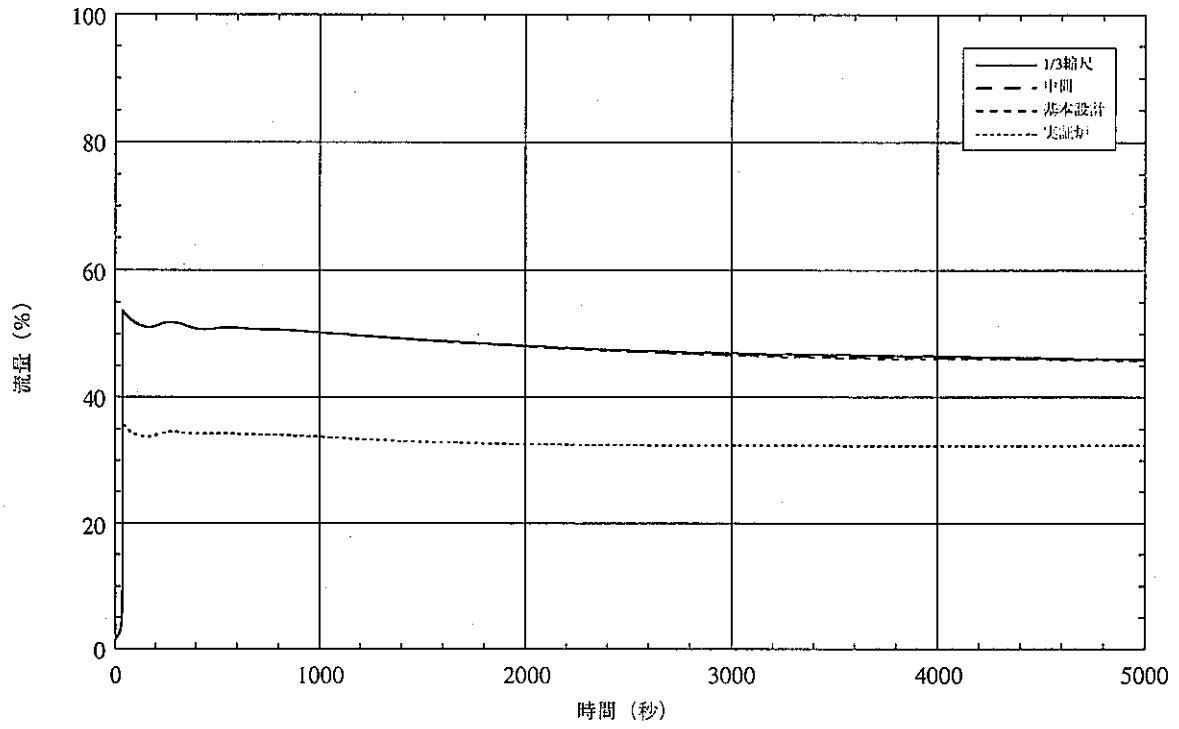
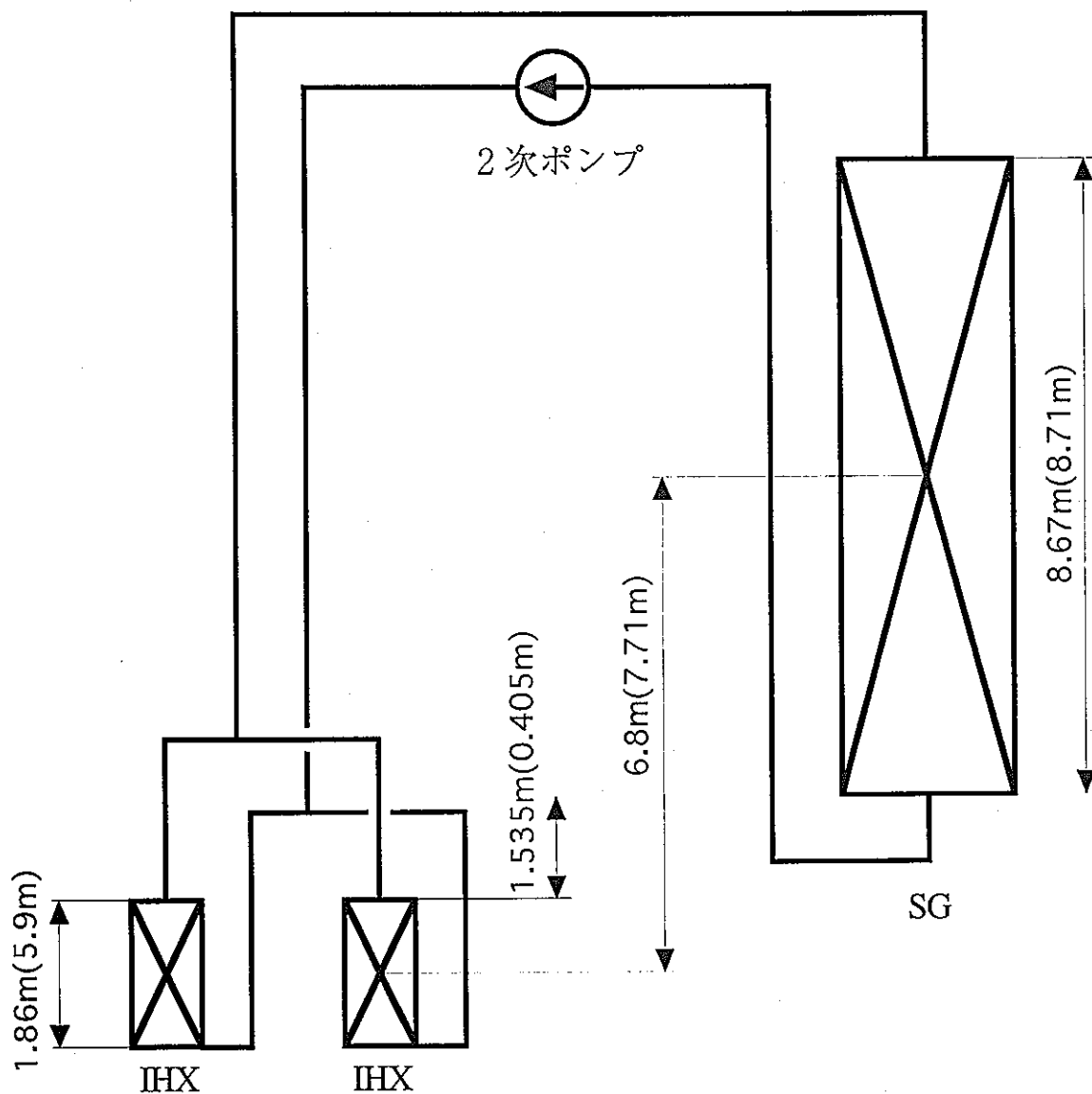


図3.5.2-19 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、2次系配管長パラメータ解析)



注) 図中 () 内寸法は実証炉寸法を示す。

図3.5.2-20 IHX及びSGの設置レベル (基本設計)

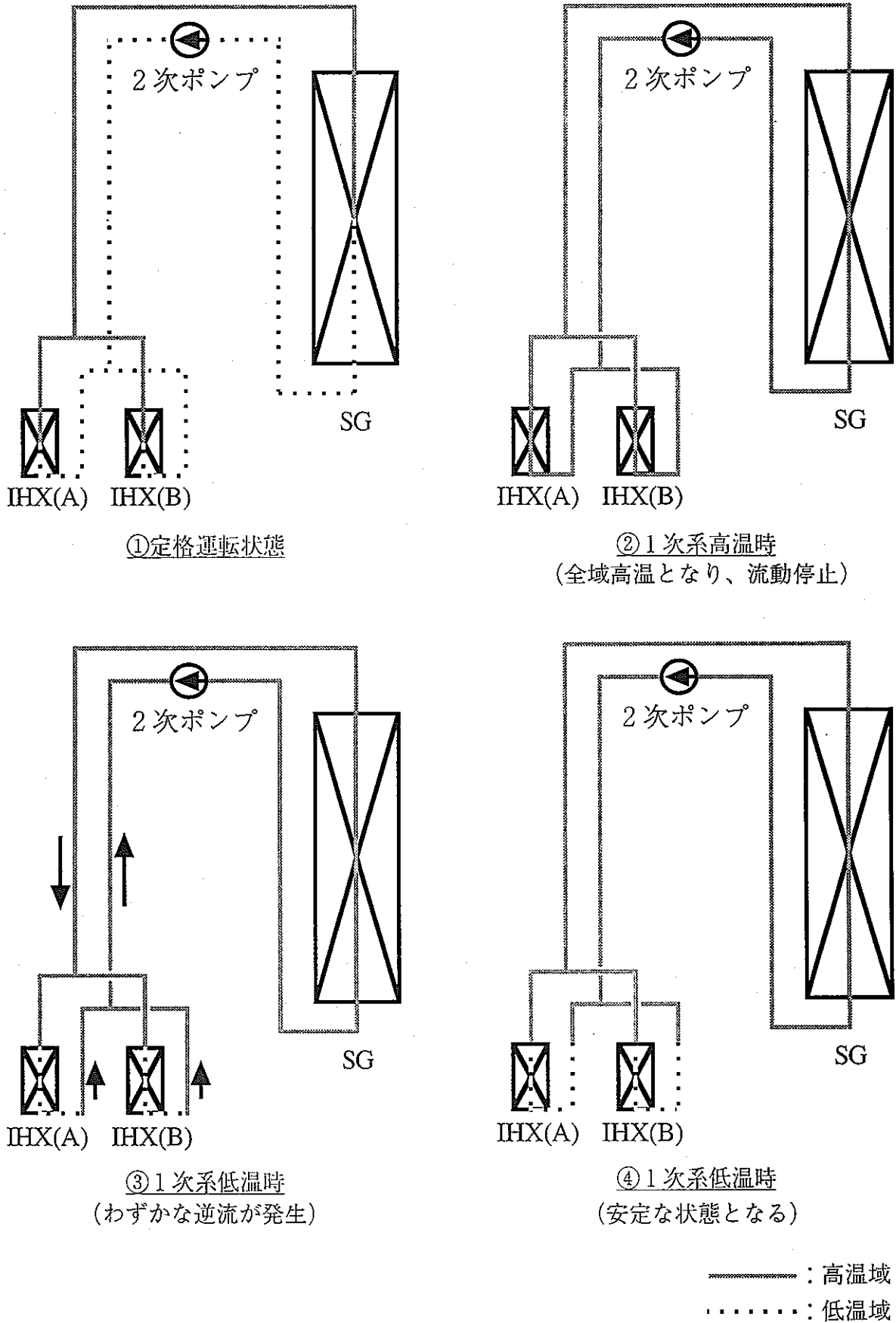


図3.5.2-21 熱過渡時の2次系温度分布 (基本設計)

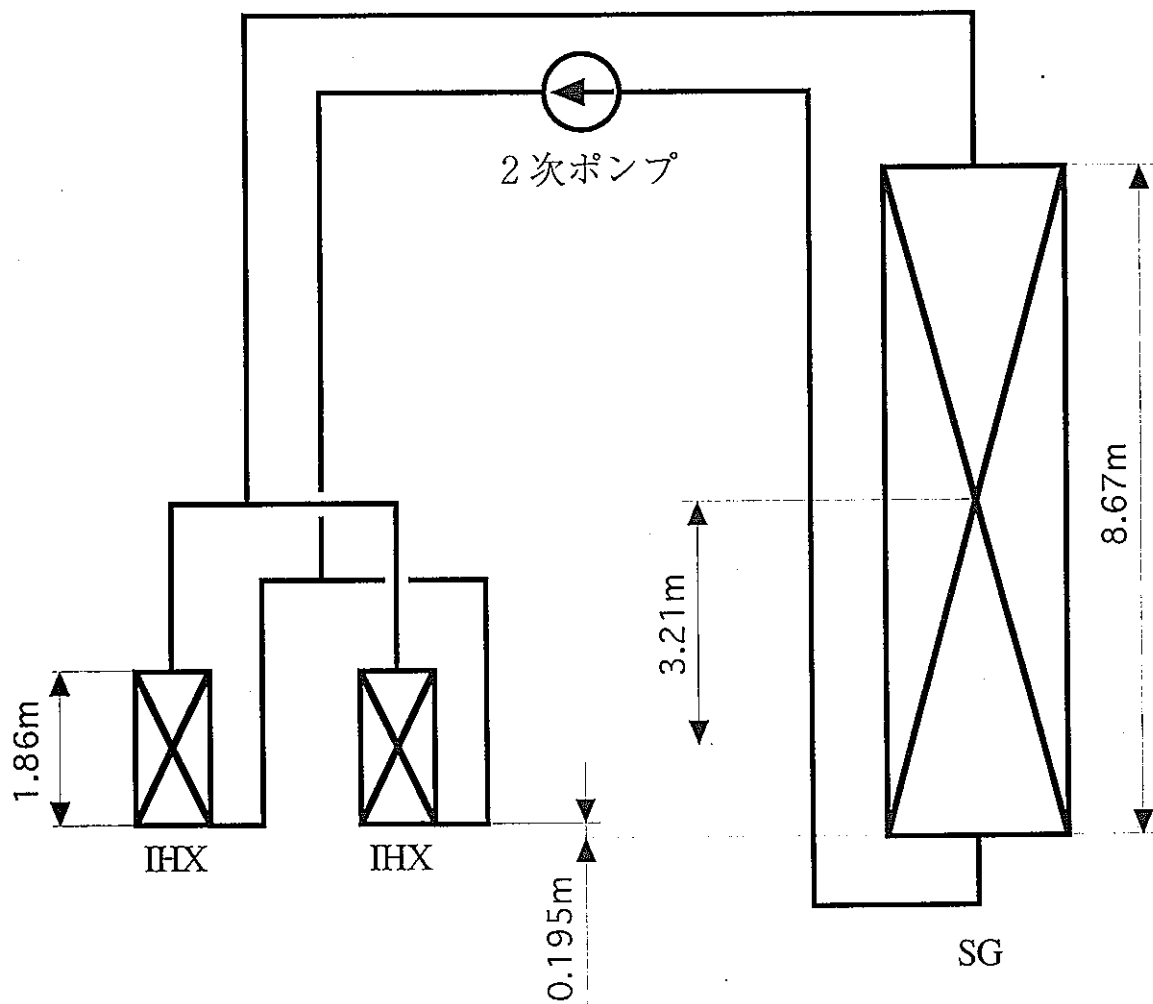
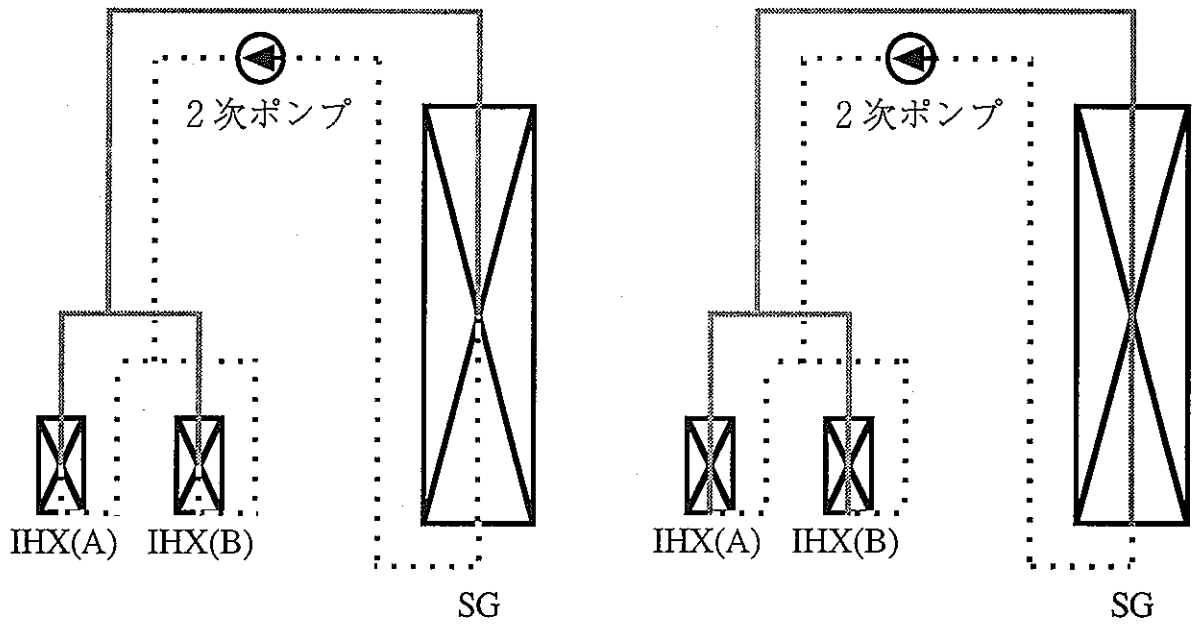
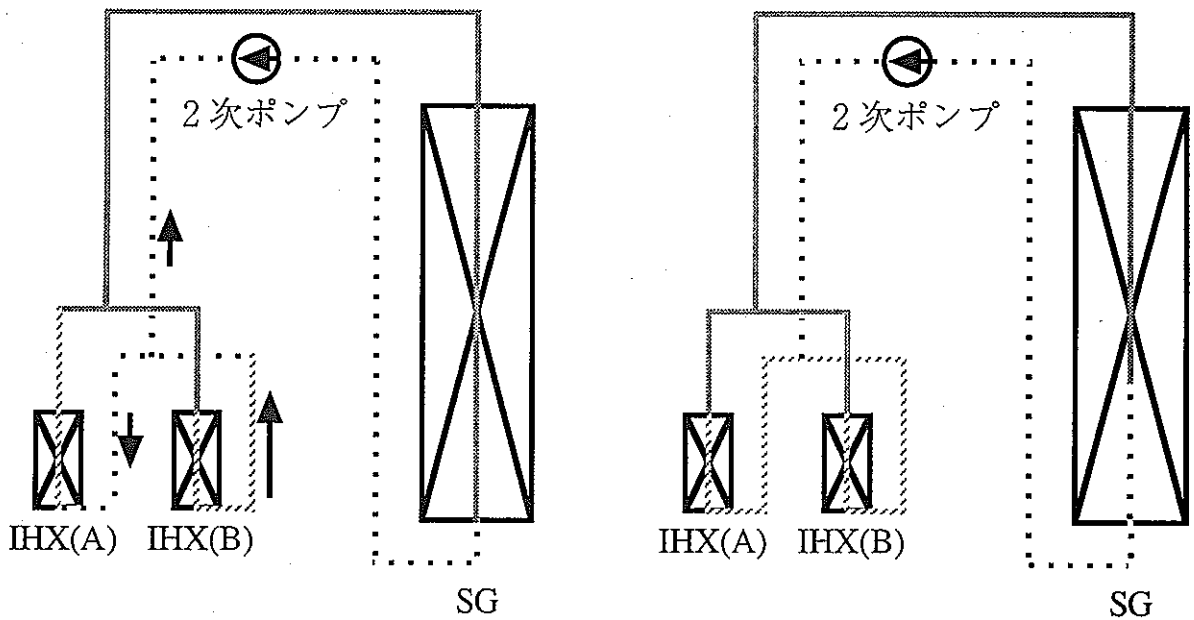


図3.5.2-22 IHX及びSGの設置レベル (1/3縮尺条件)



① 定格運転状態

② 1次系高温時
(SGまで高温域となり、流動停止)



③ 1次系低温時
(A Bループ間のバランスが崩れることにより、短時間に強い逆流が発生)

④ 1次系低温時
(安定な状態となる)

————— : 高温域
 : 中温域
 : 低温域

図3.5.2-23 熱過渡時の2次系温度分布 (1/3縮尺条件)

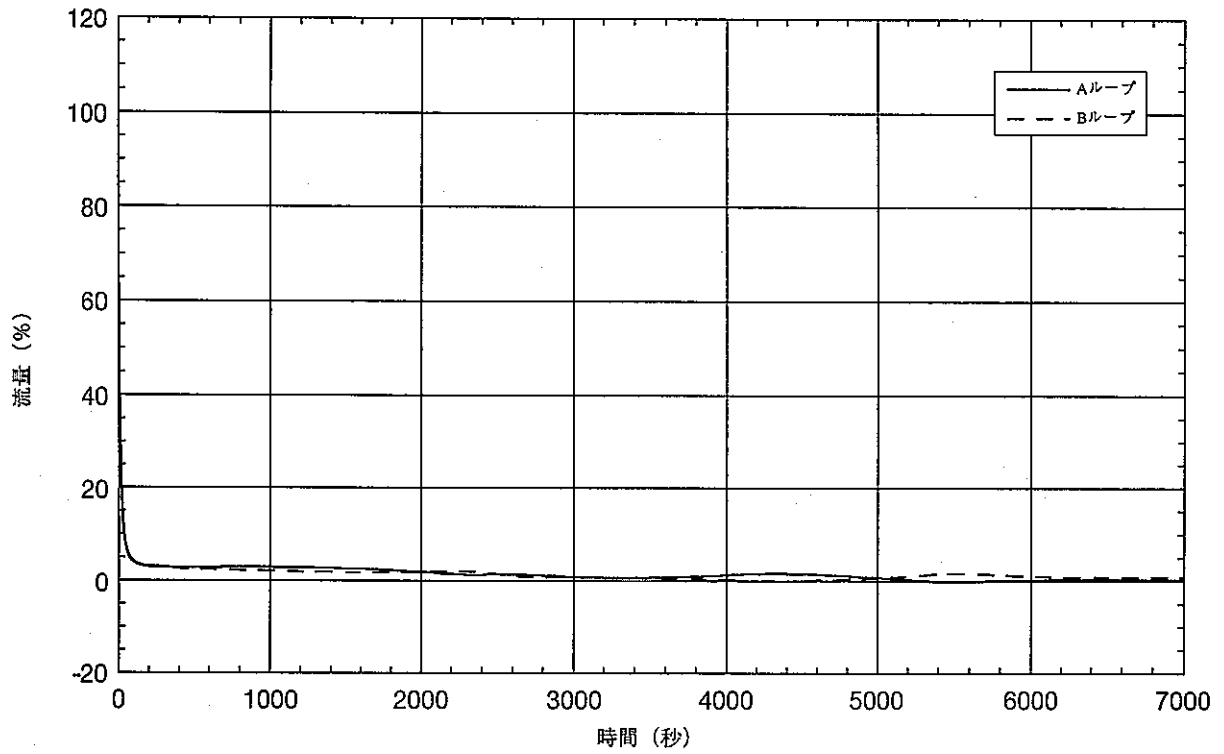


図4.5.1-1(1/2) ループ毎の1次側流量 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

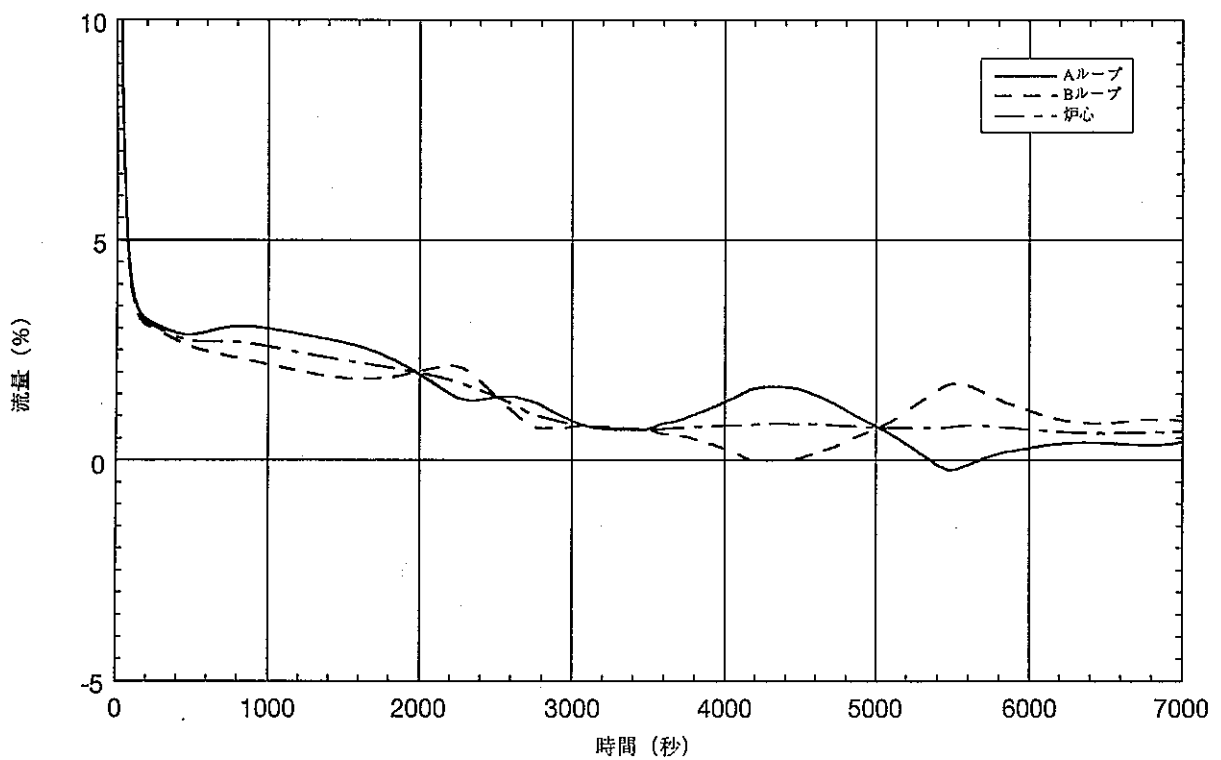


図4.5.1-1(2/2) ループ毎の1次側流量 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

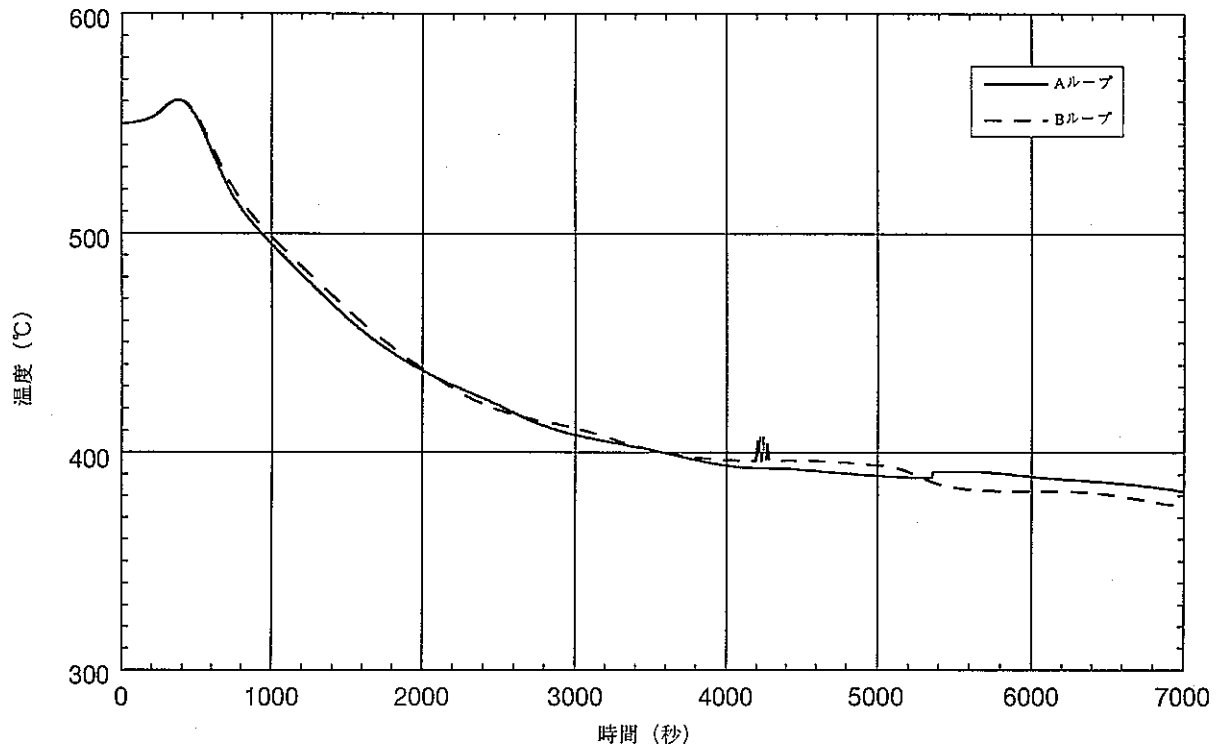


図4.5.1-2 IHX容器1次側入口温度 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

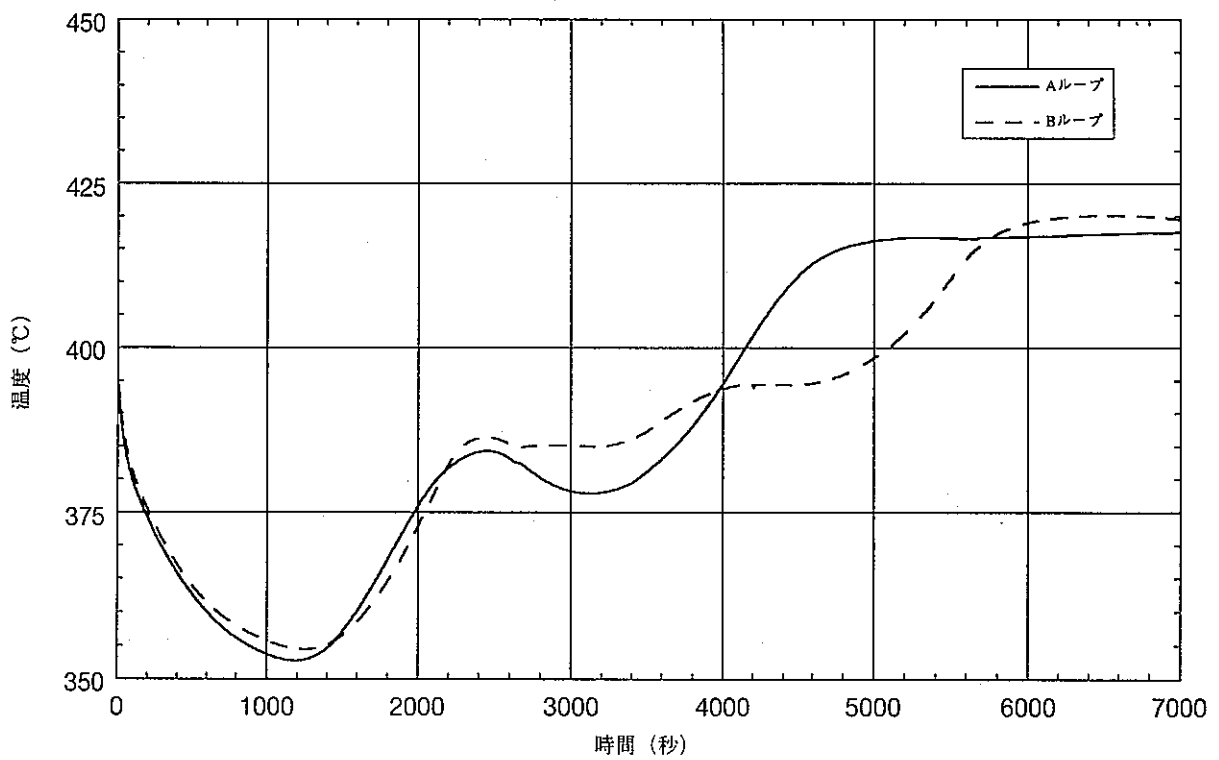


図4.5.1-3 IHX容器1次側出口温度 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

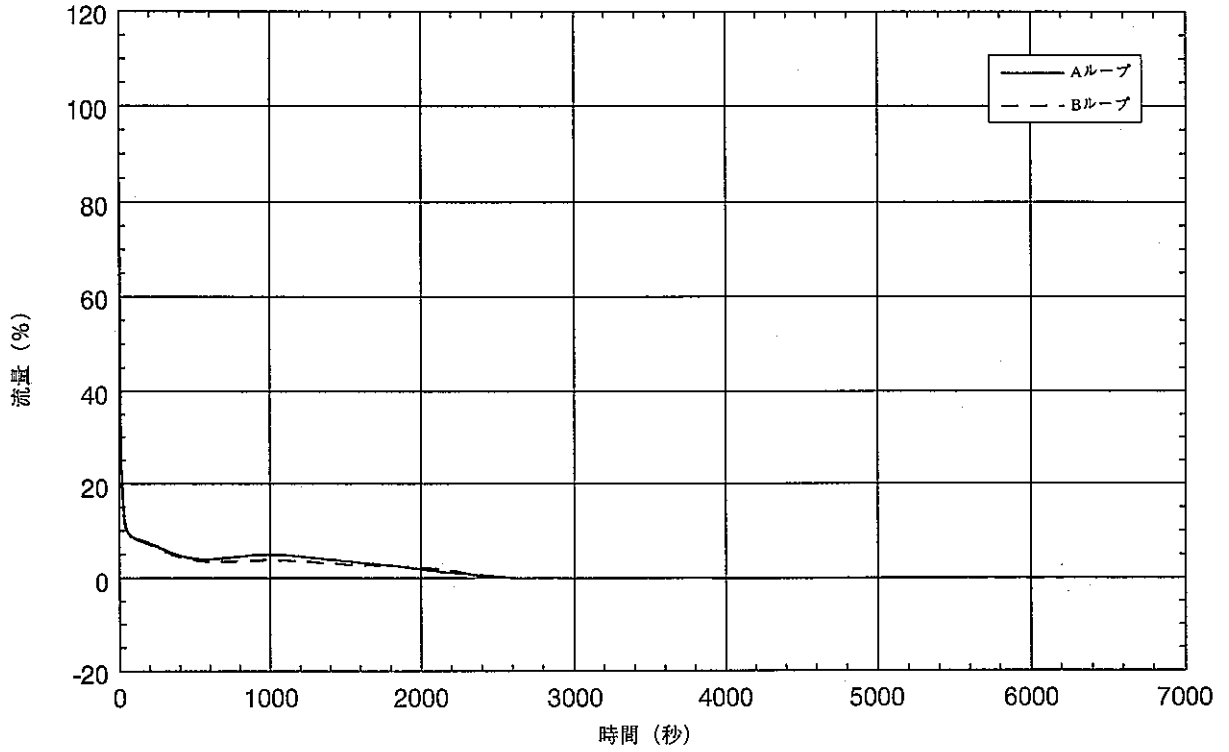


図4.5.1-4(1/2) ループ毎の2次側流量 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

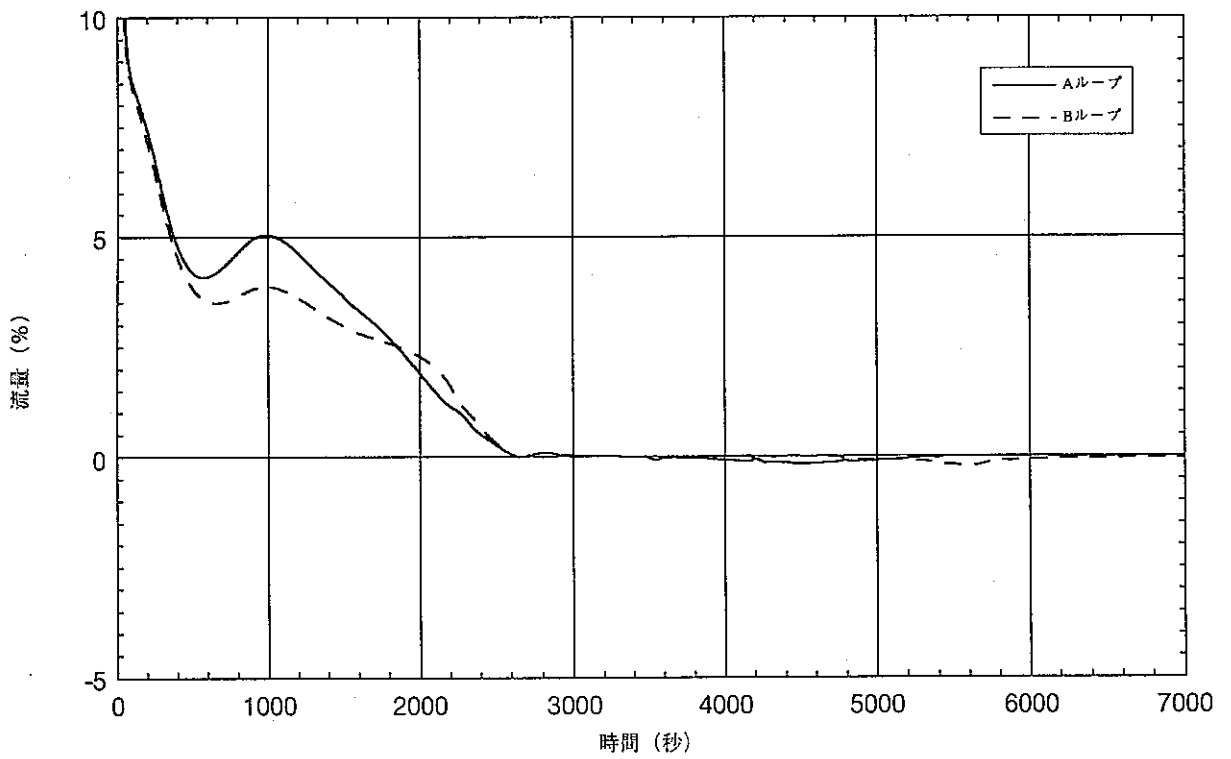


図4.5.1-4(2/2) ループ毎の2次側流量 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

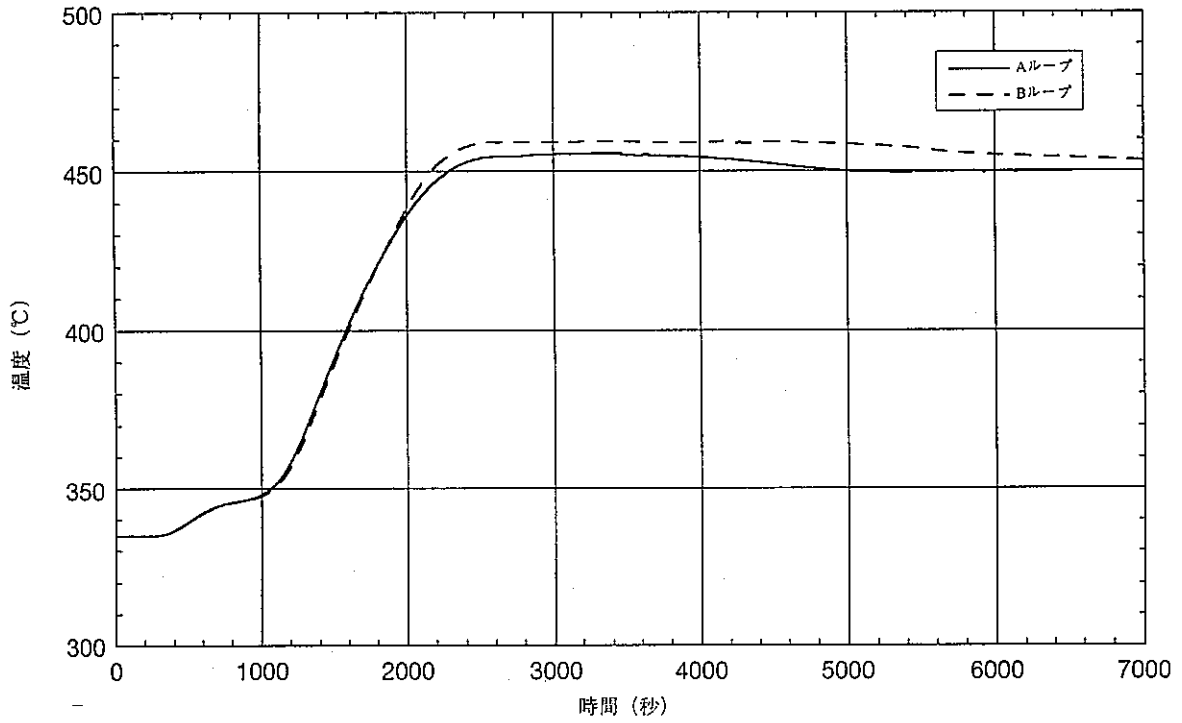


図4.5.1-5 IHX容器2次側入口温度 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

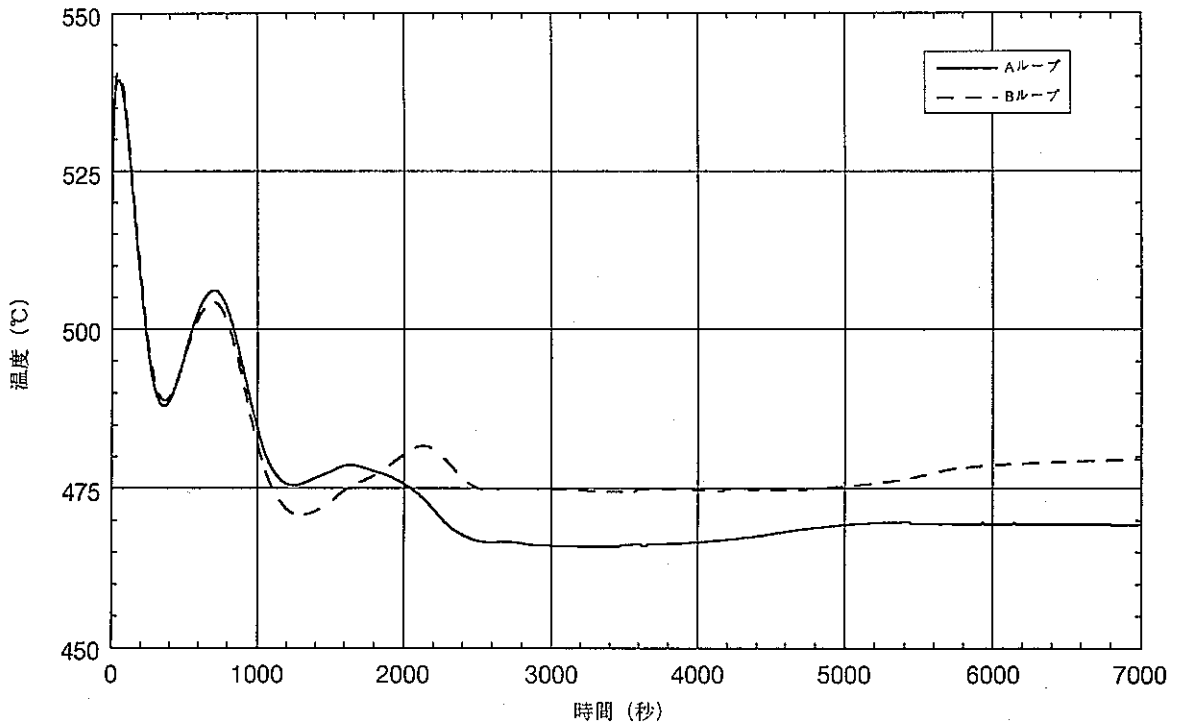


図4.5.1-6 IHX容器2次側出口温度 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

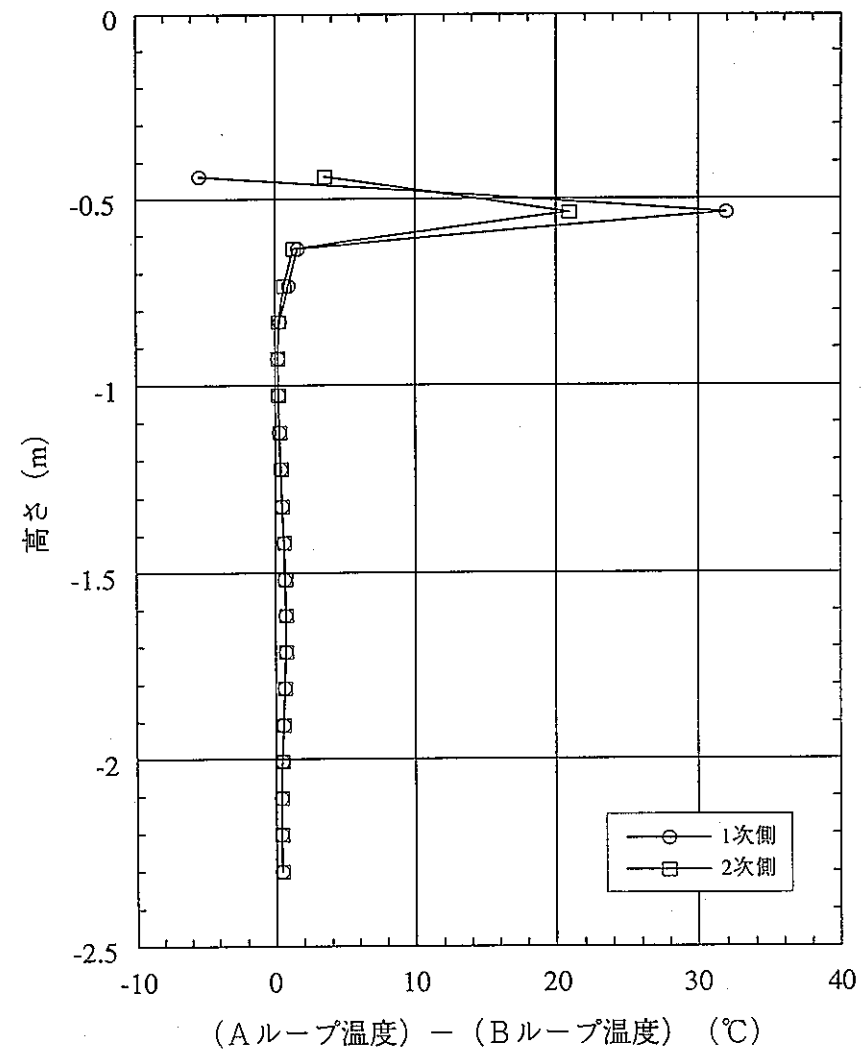
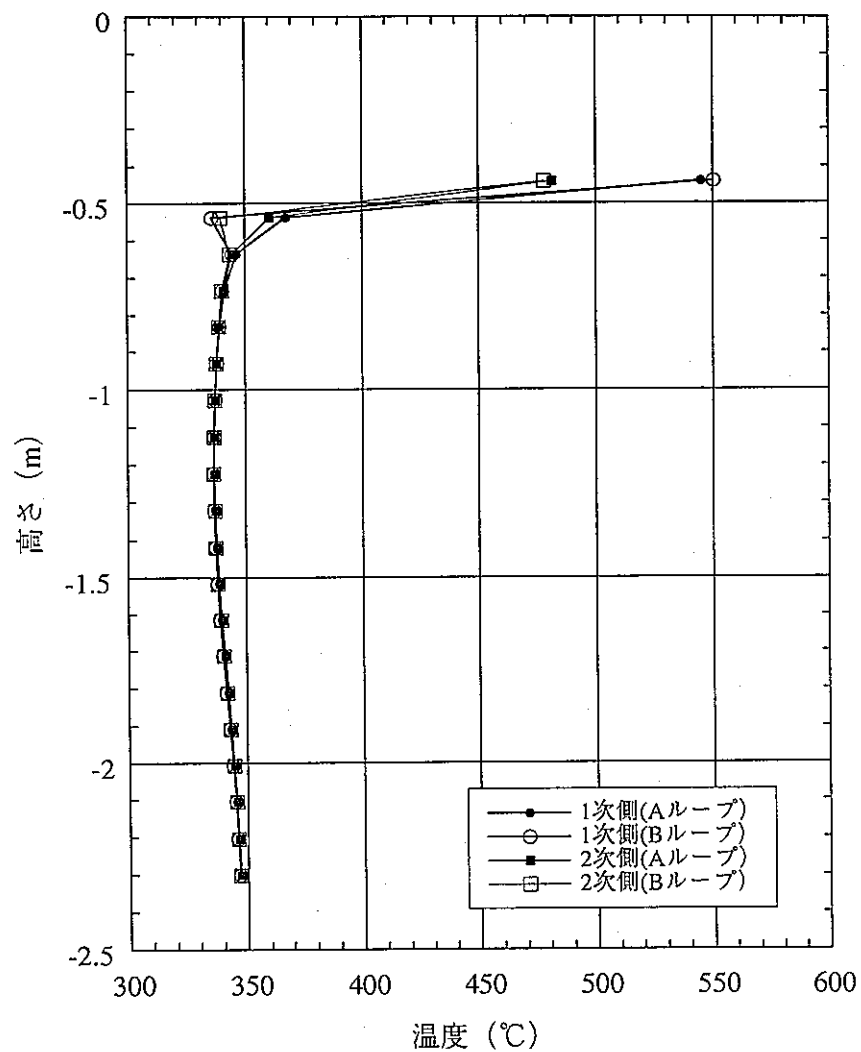


図4.5.1-7(1/7) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析: 1000sec)

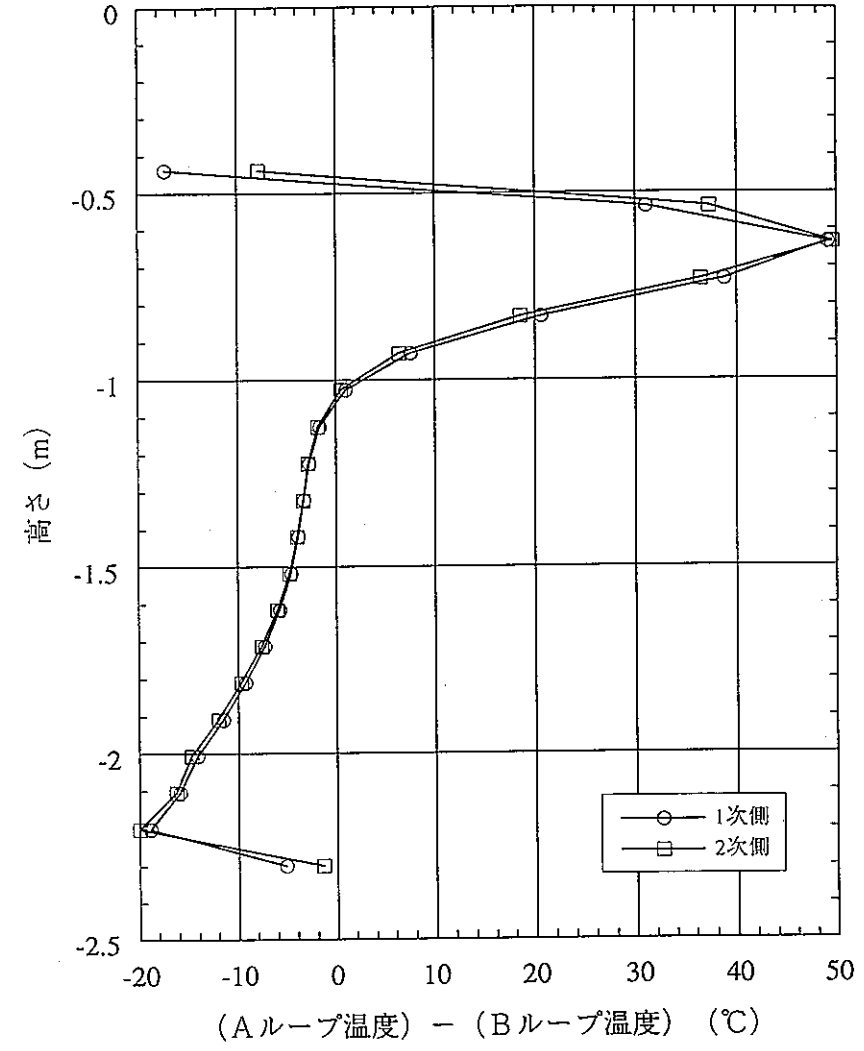
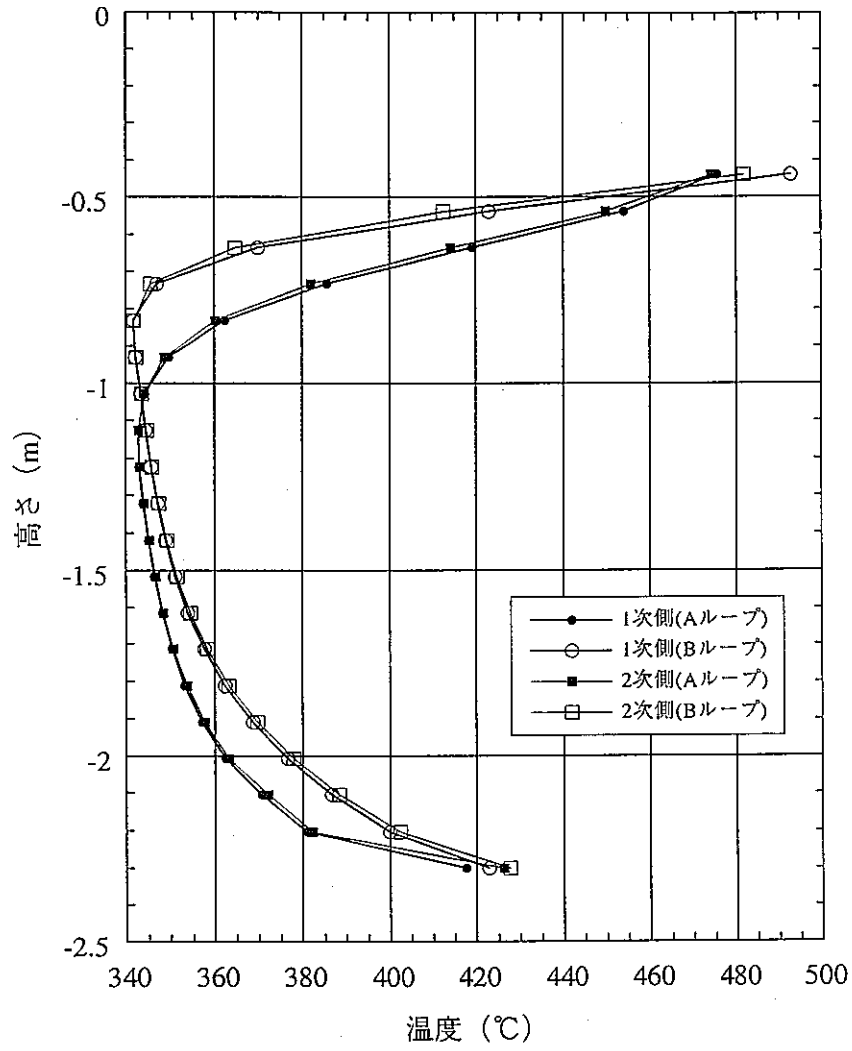


図4.5.1-7(2/7) I H X伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析:2000sec)

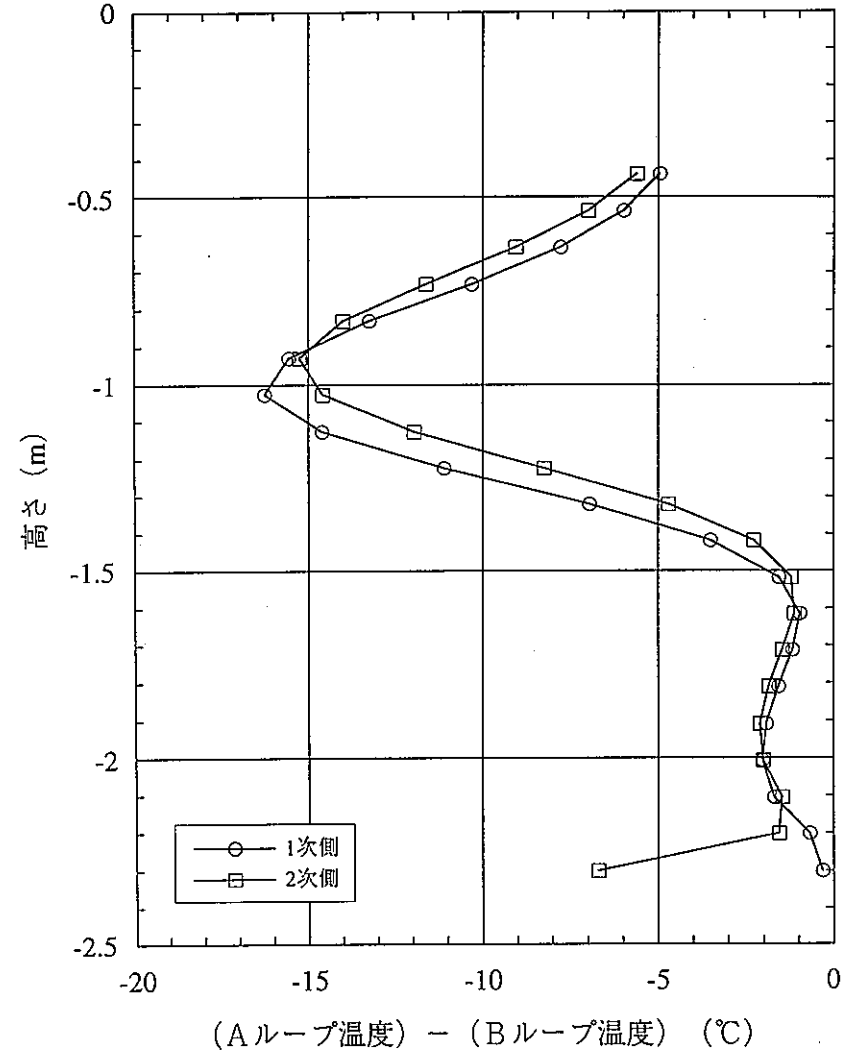
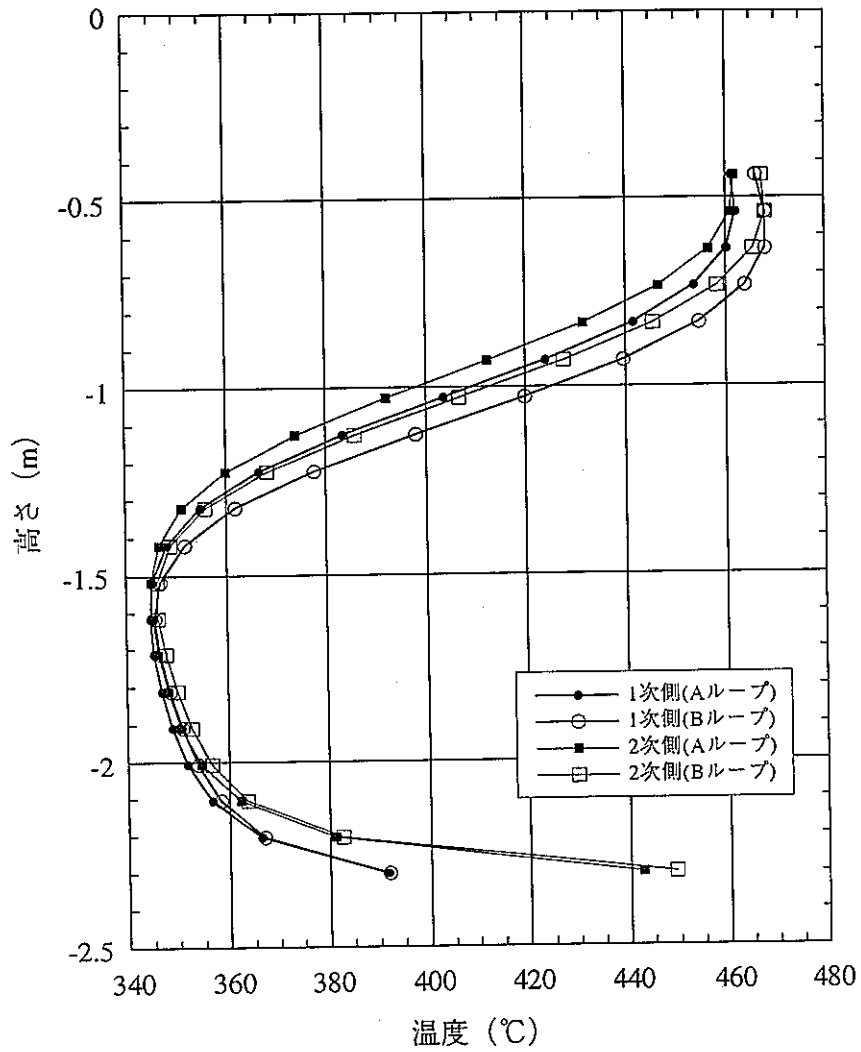


図4.5.1-7(3/7) IHX伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析: 2400sec)

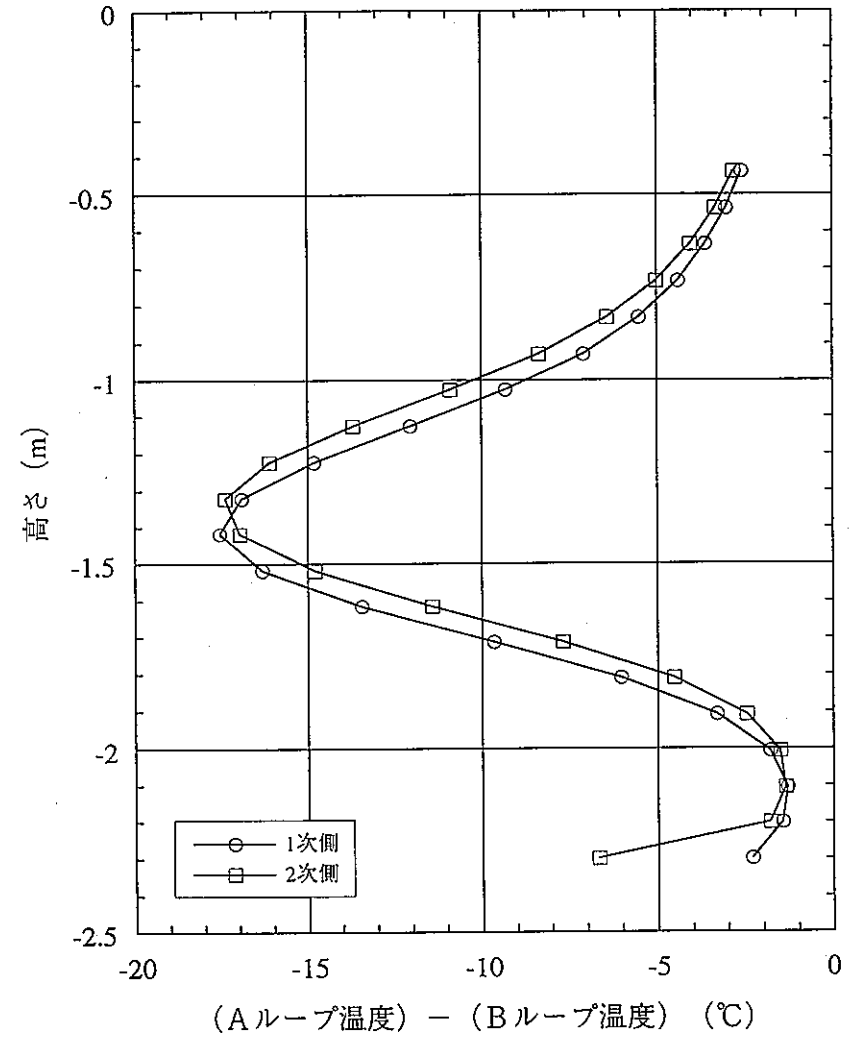
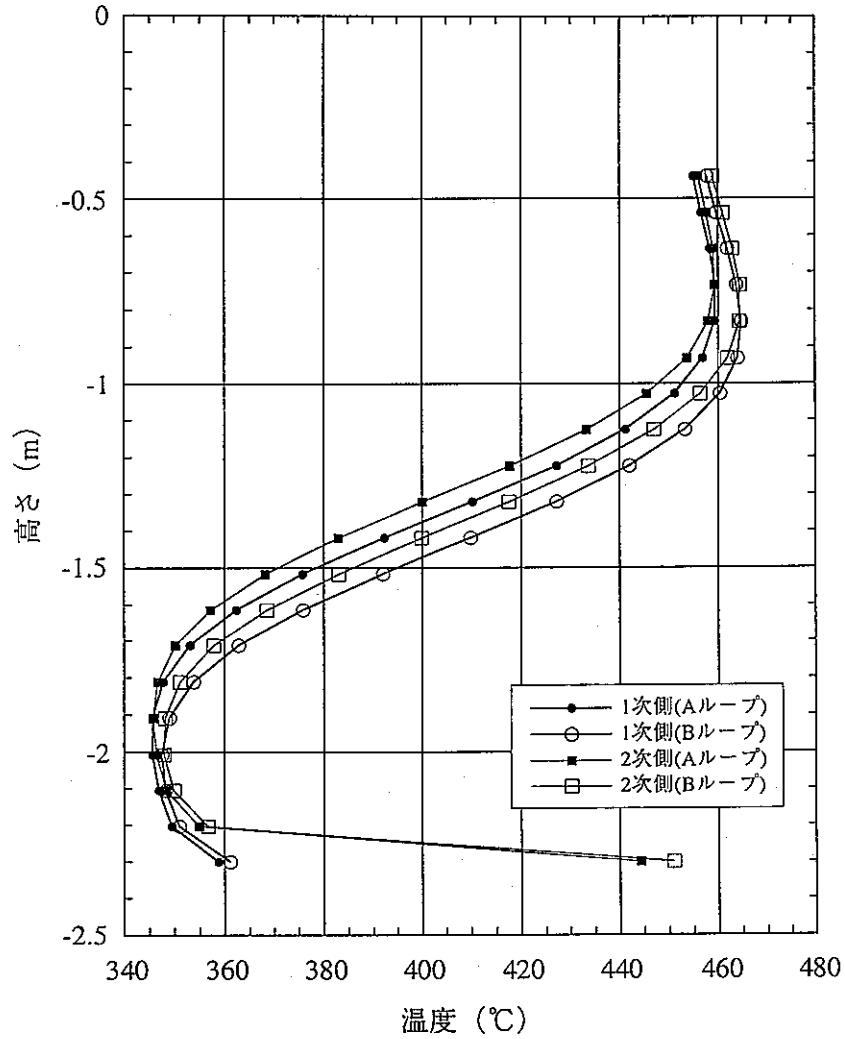


図4.5.1-7(4/7) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析: 2600sec)

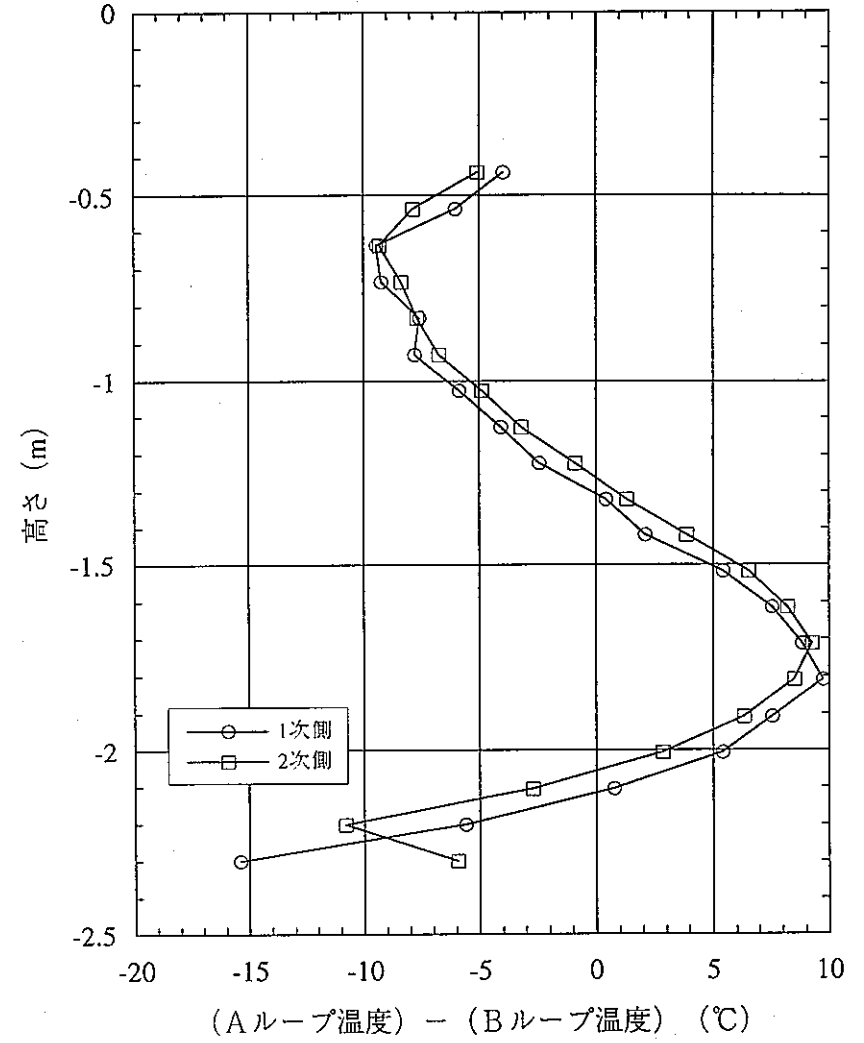
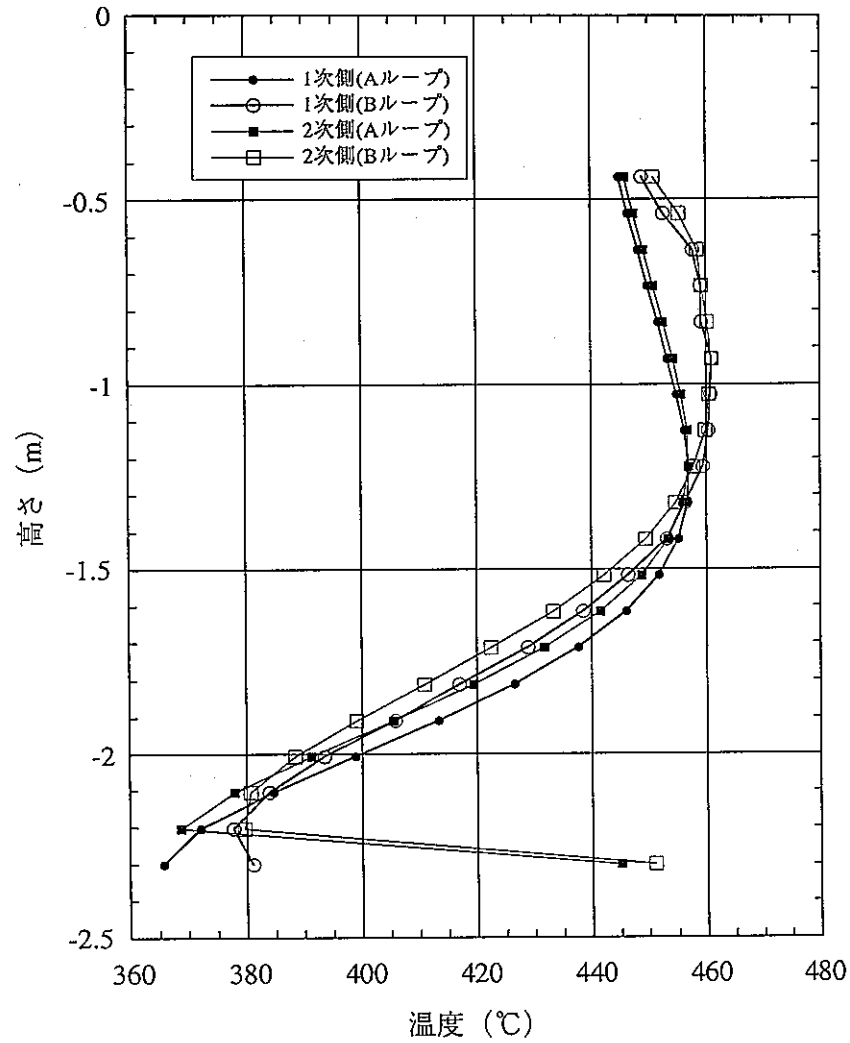


図4.5.1-7(5/7) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析：3000sec)

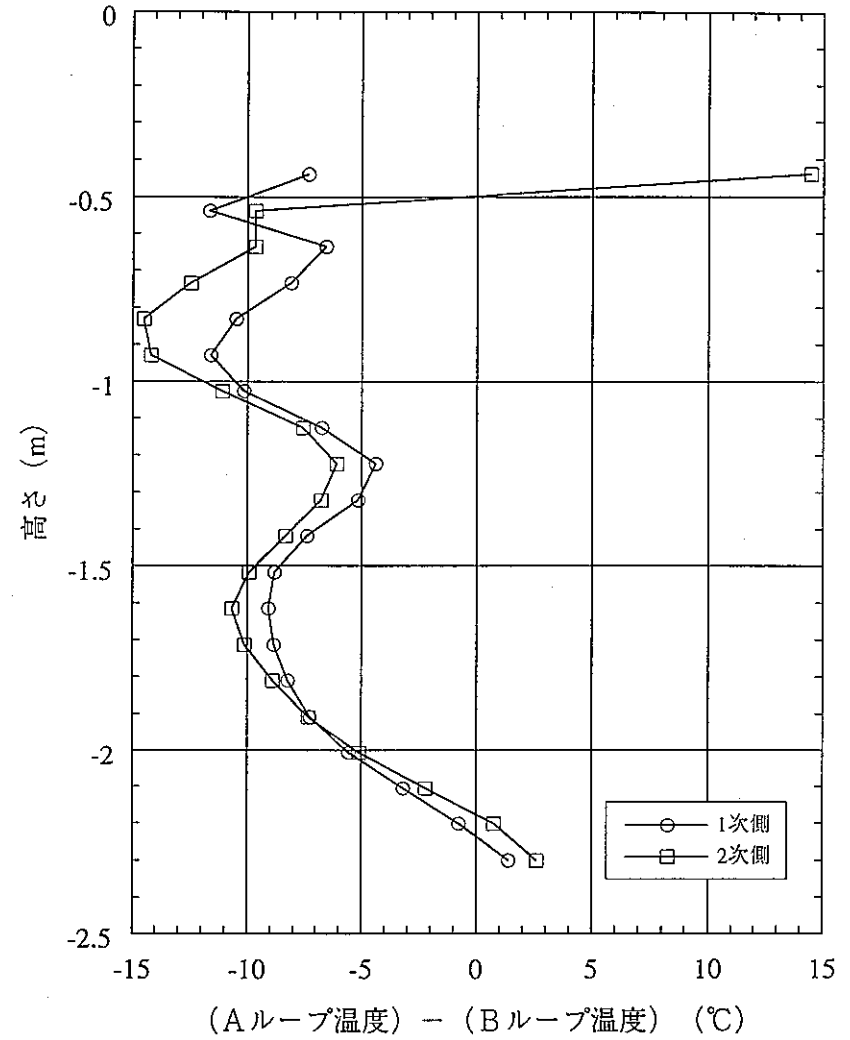
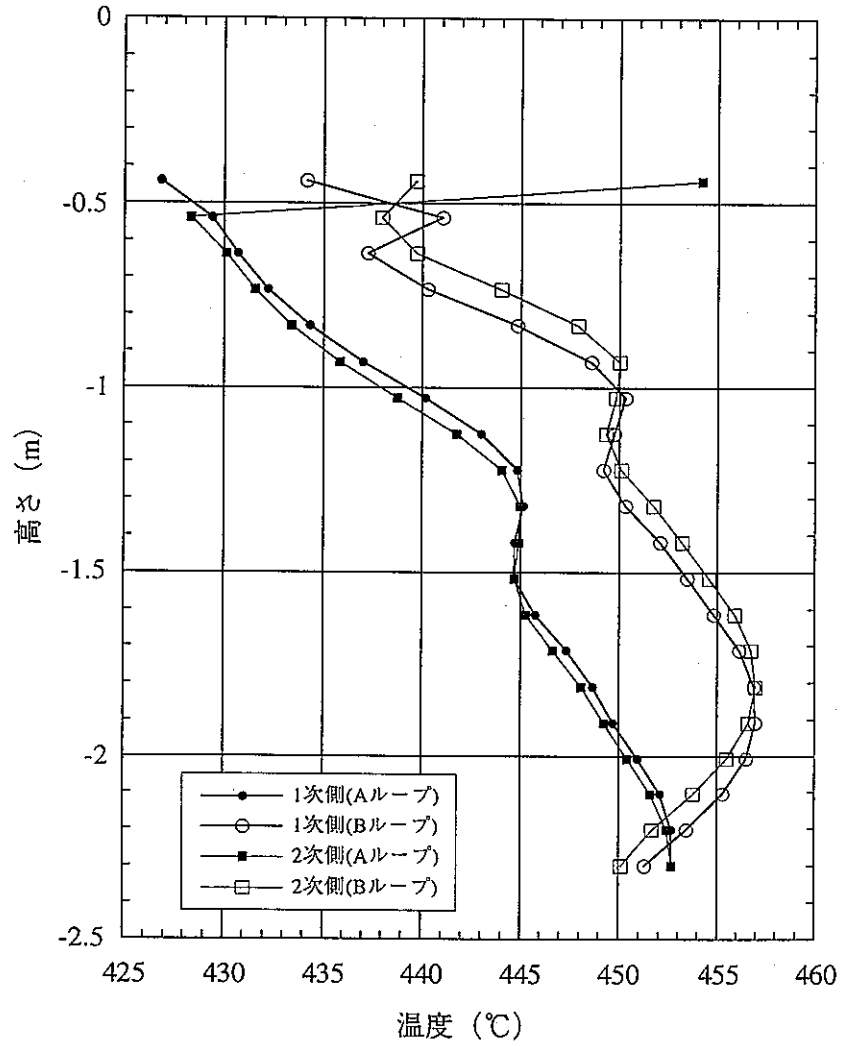


図4.5.1-7(6/7) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析: 4000sec)

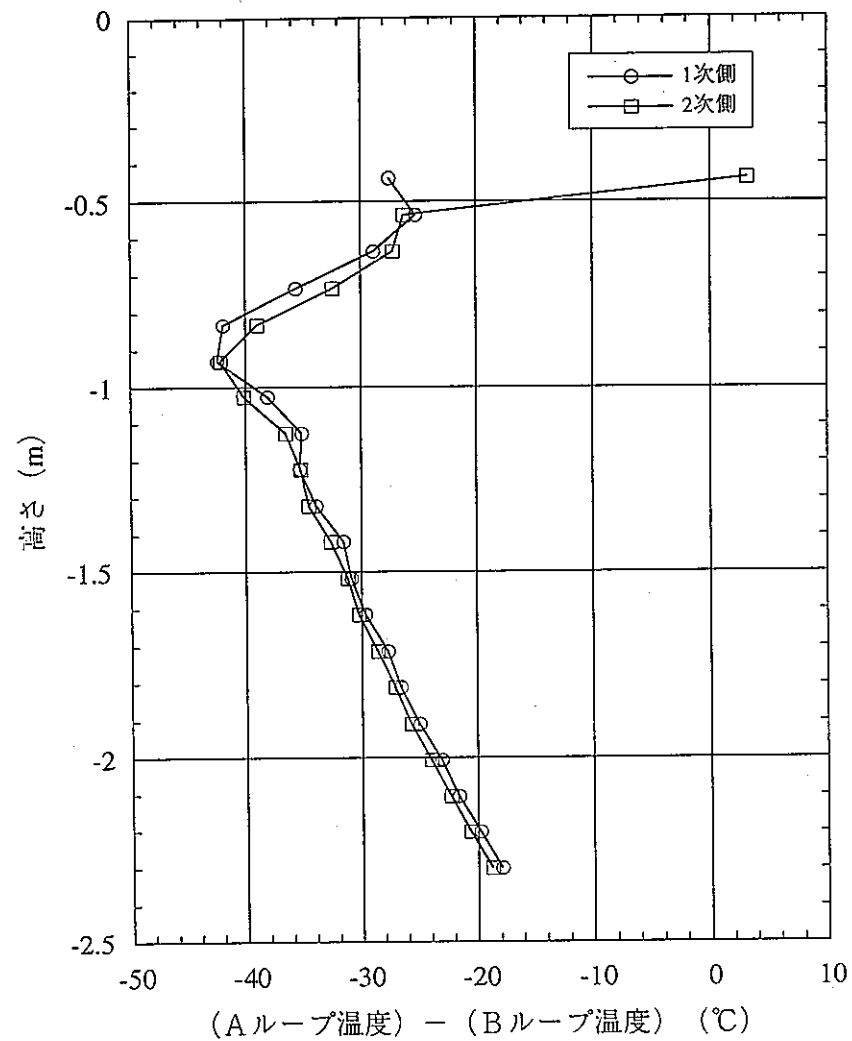
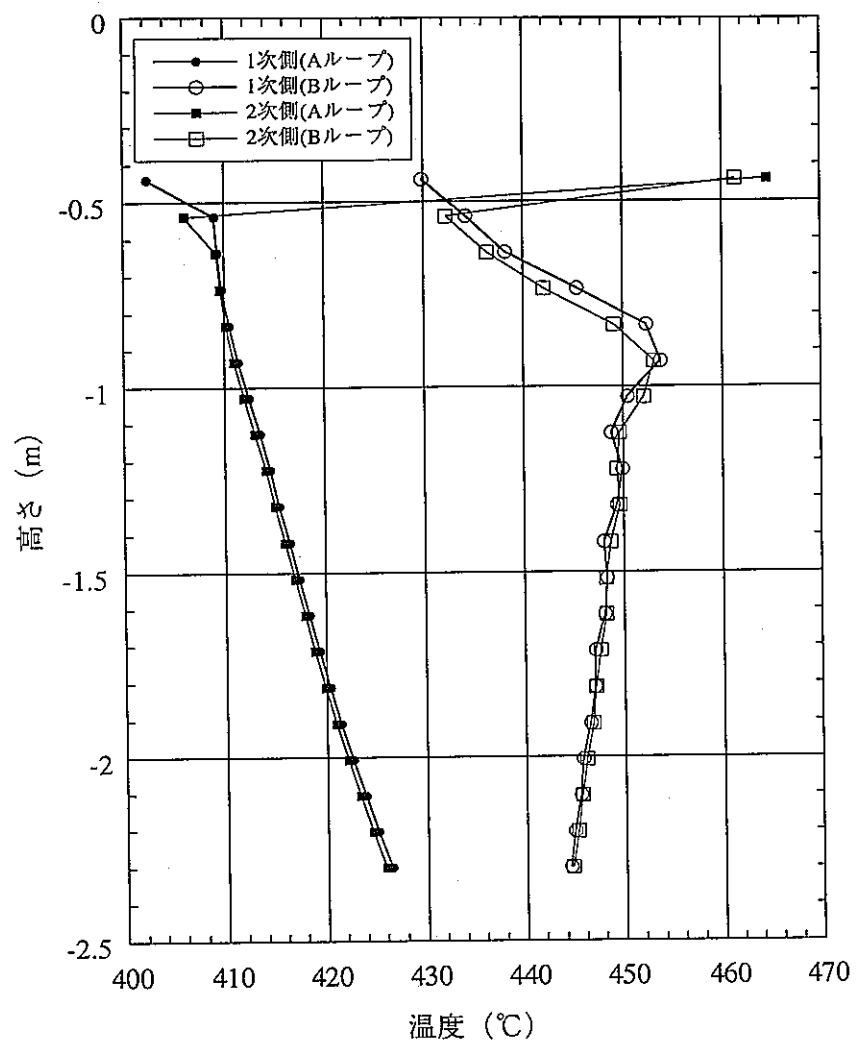
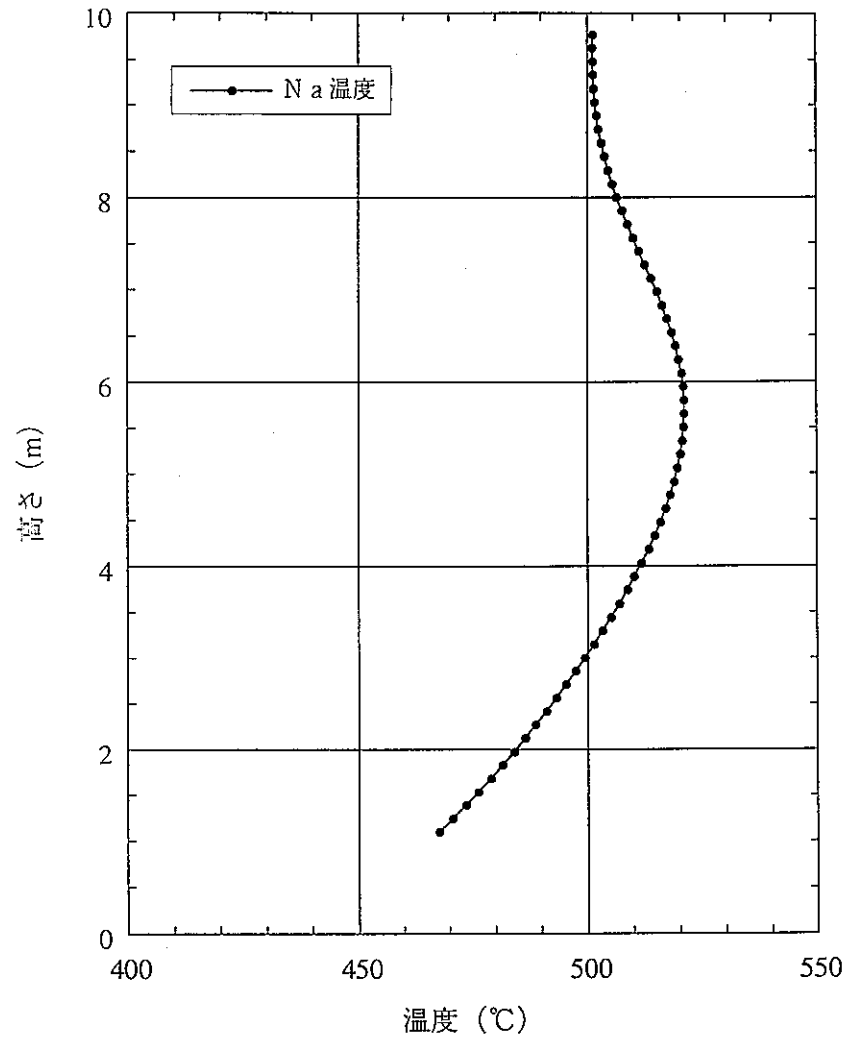
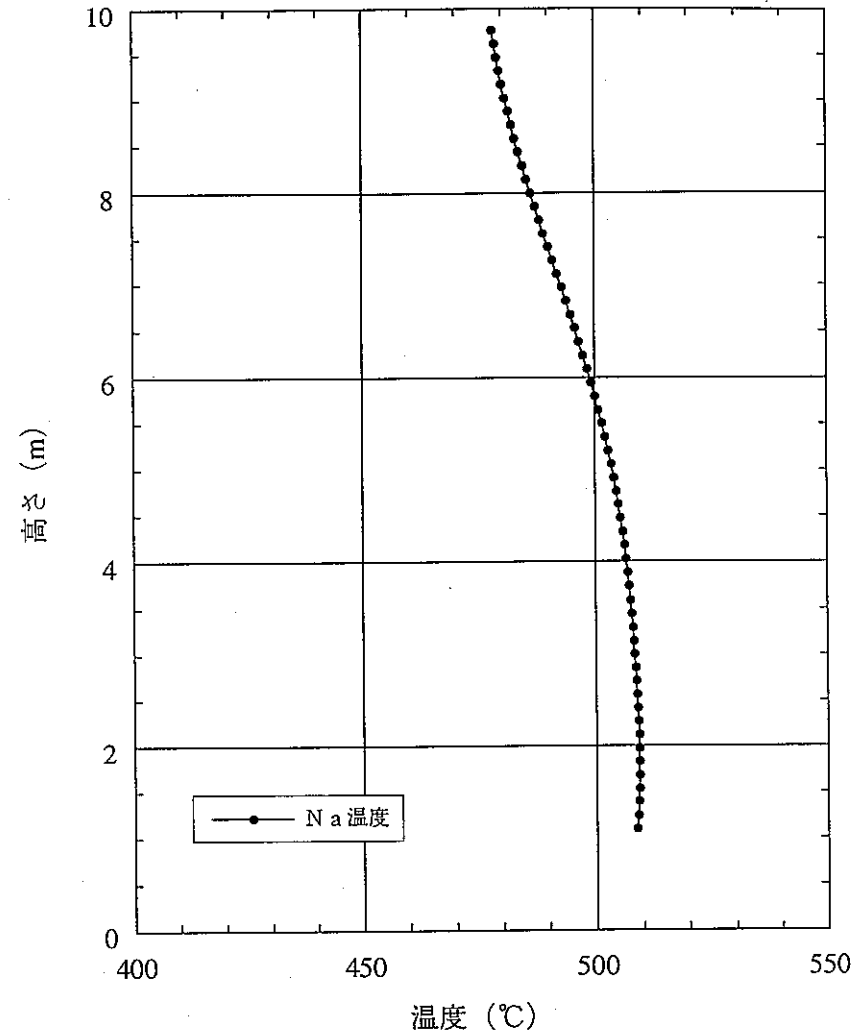


図4.5.1-7(7/7) I H X伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析: 5000sec)

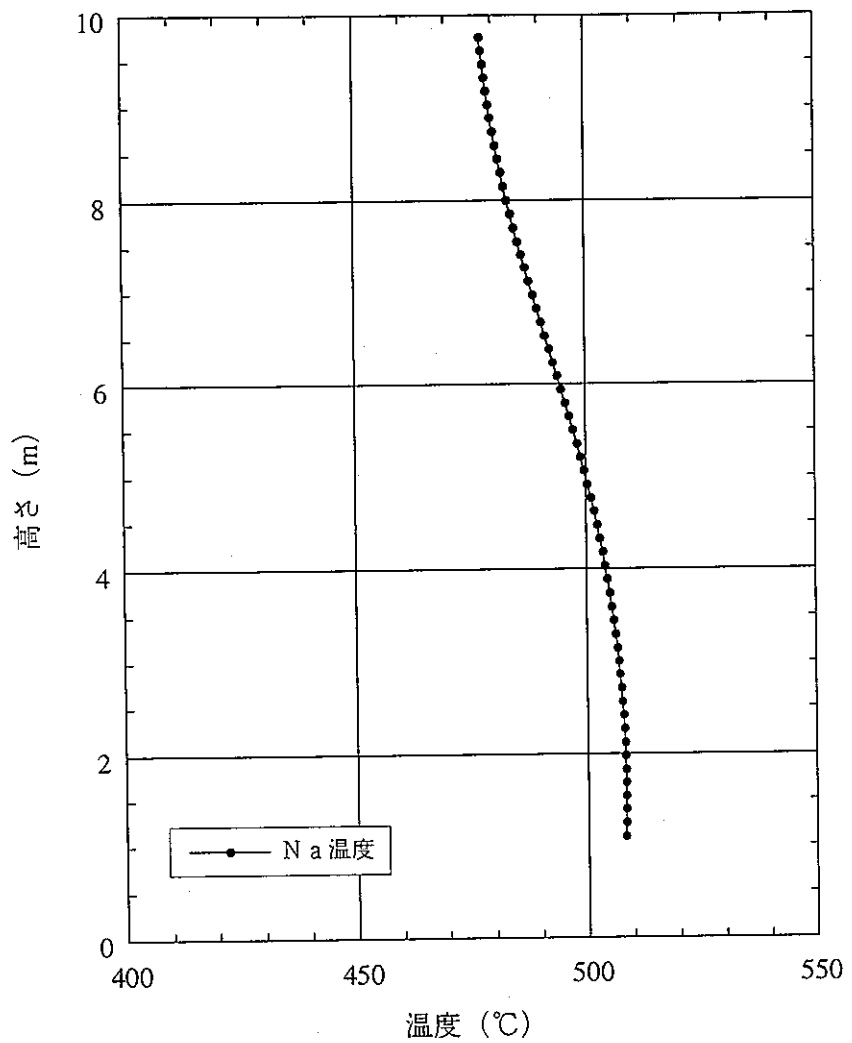


(1000 sec)

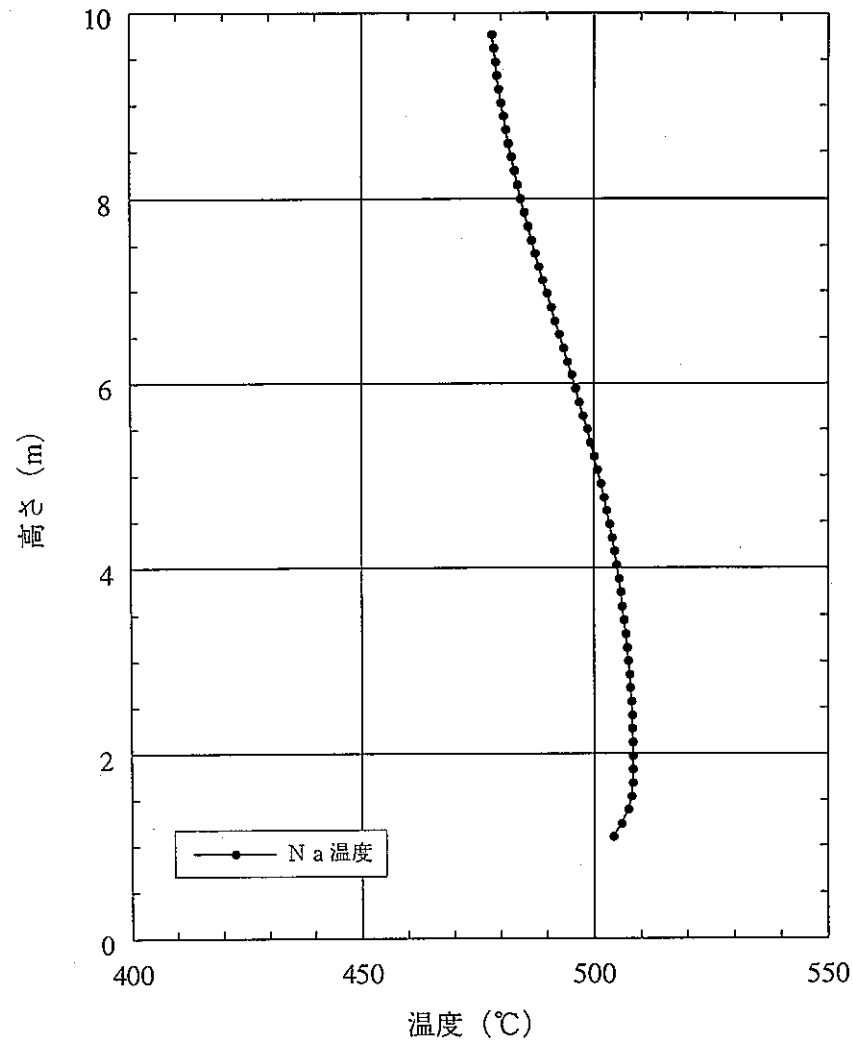


(2000 sec)

図4.5.1-8(1/2) S G 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

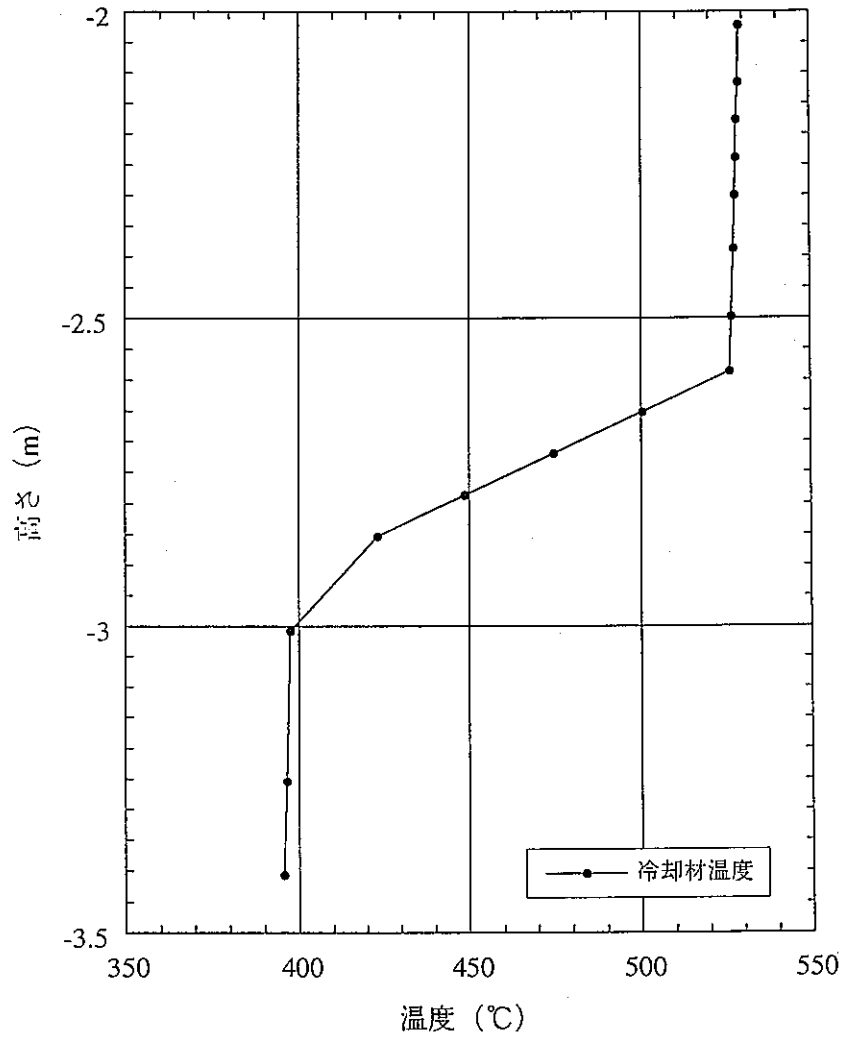


(3 0 0 0 sec)

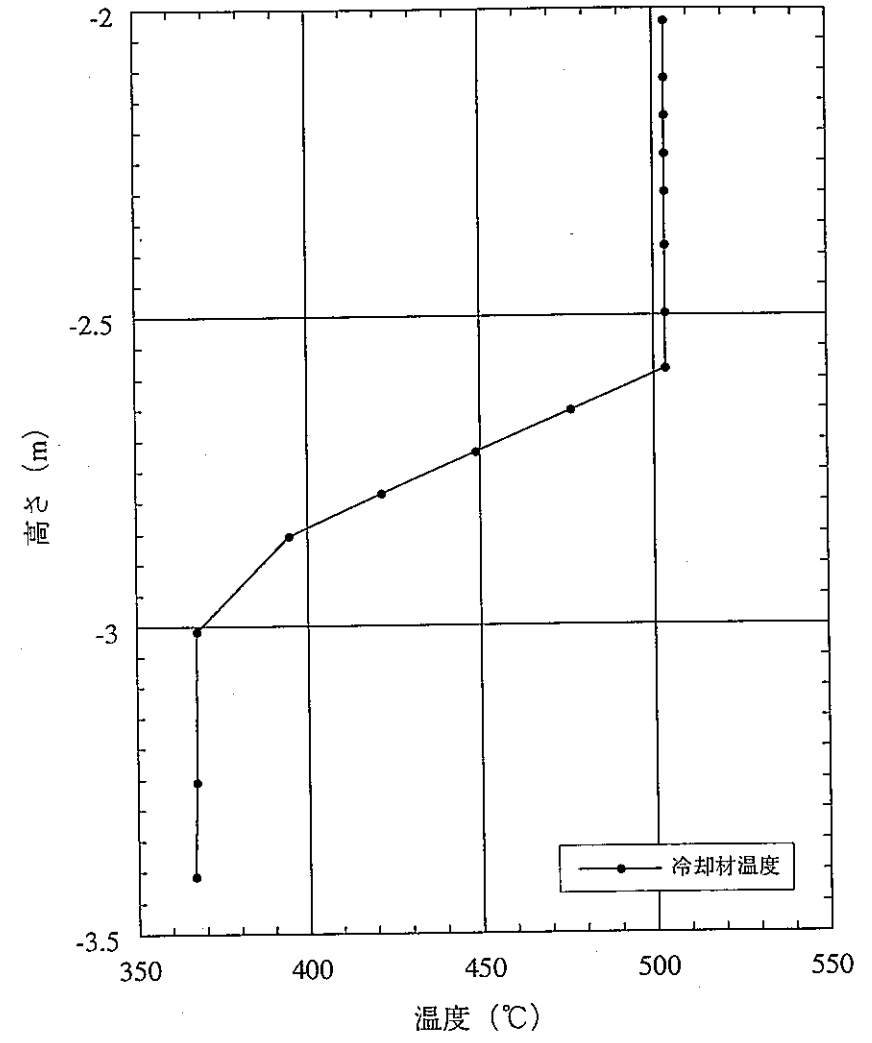


(5 0 0 0 sec)

図4.5.1-8(2/2) S G 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

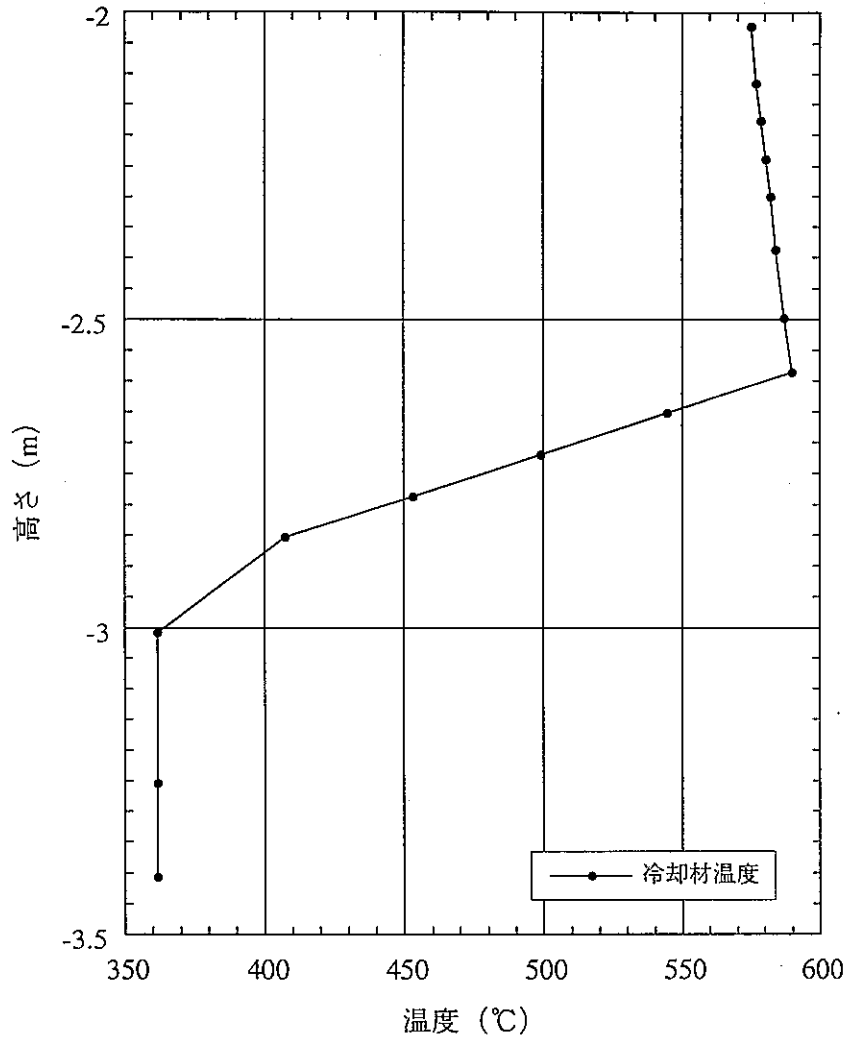


(1 0 0 0 sec)

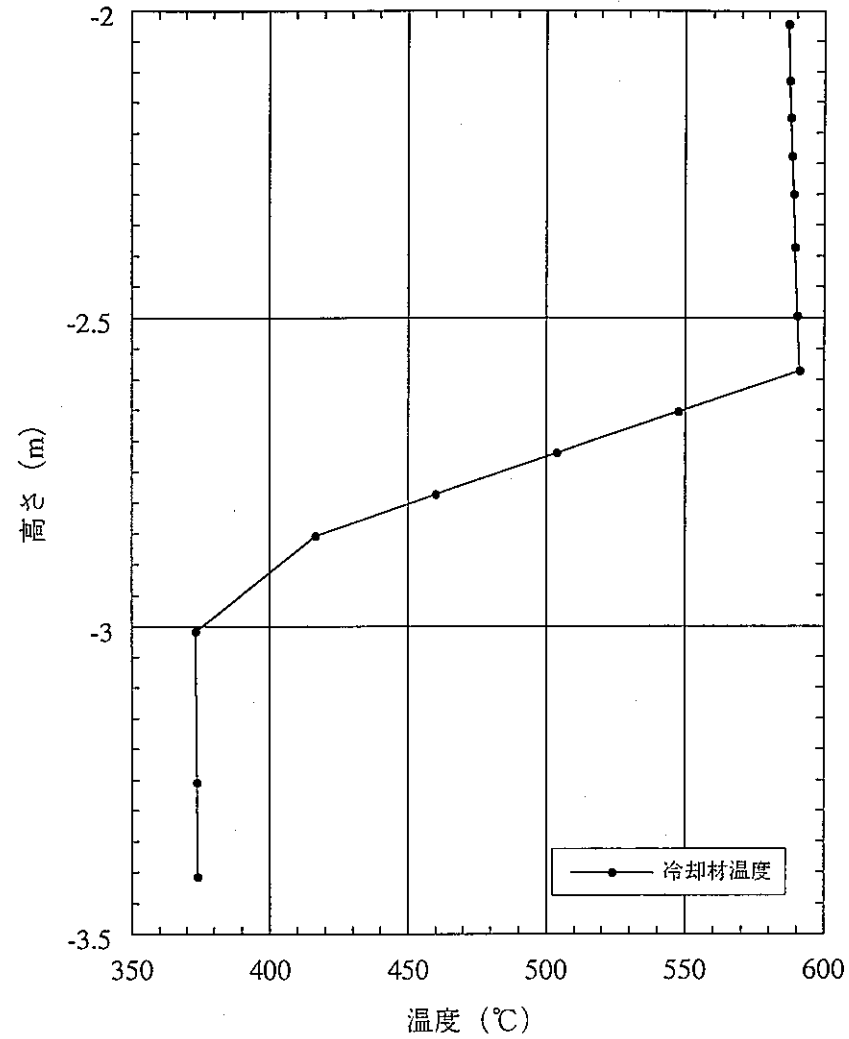


(2 0 0 0 sec)

図4.5.1-9(1/2) 炉心軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)



(3000 sec)



(5000 sec)

図4.5.1-9(2/2) 炉心軸方向温度分布 (自然循環、IHX伝面アンバランス解析)

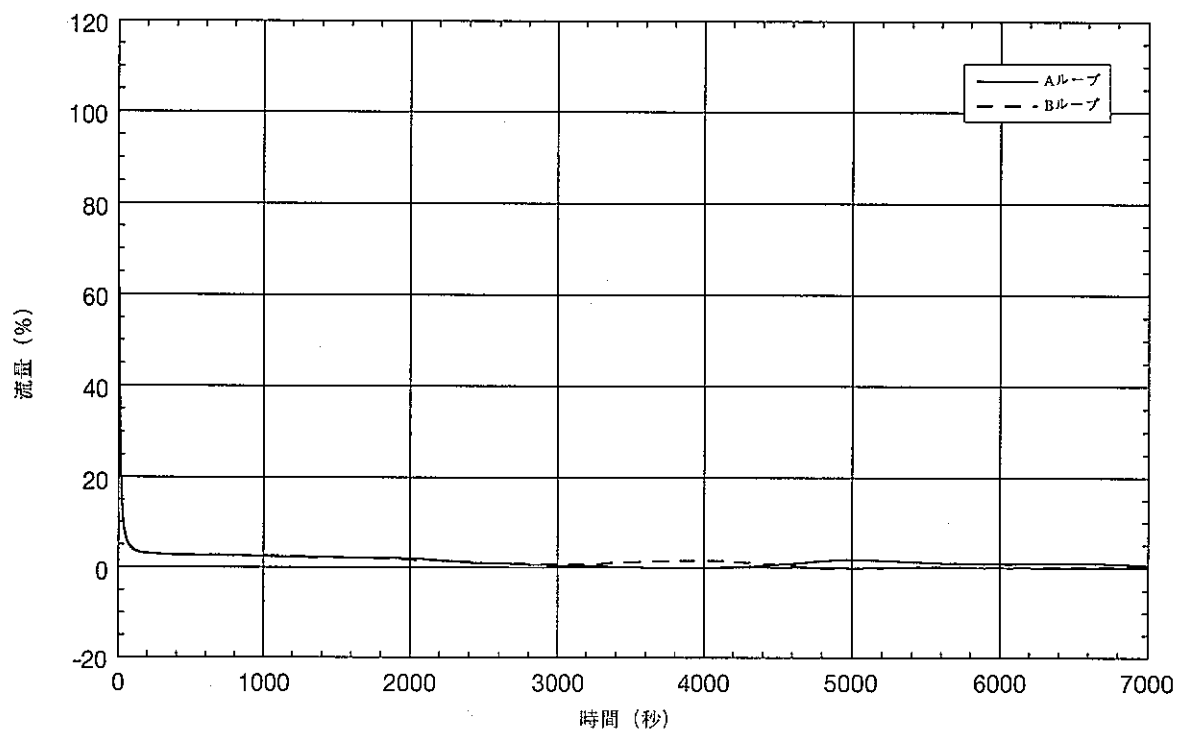


図4.5.2-1(1/2) ループ毎の1次側流量 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

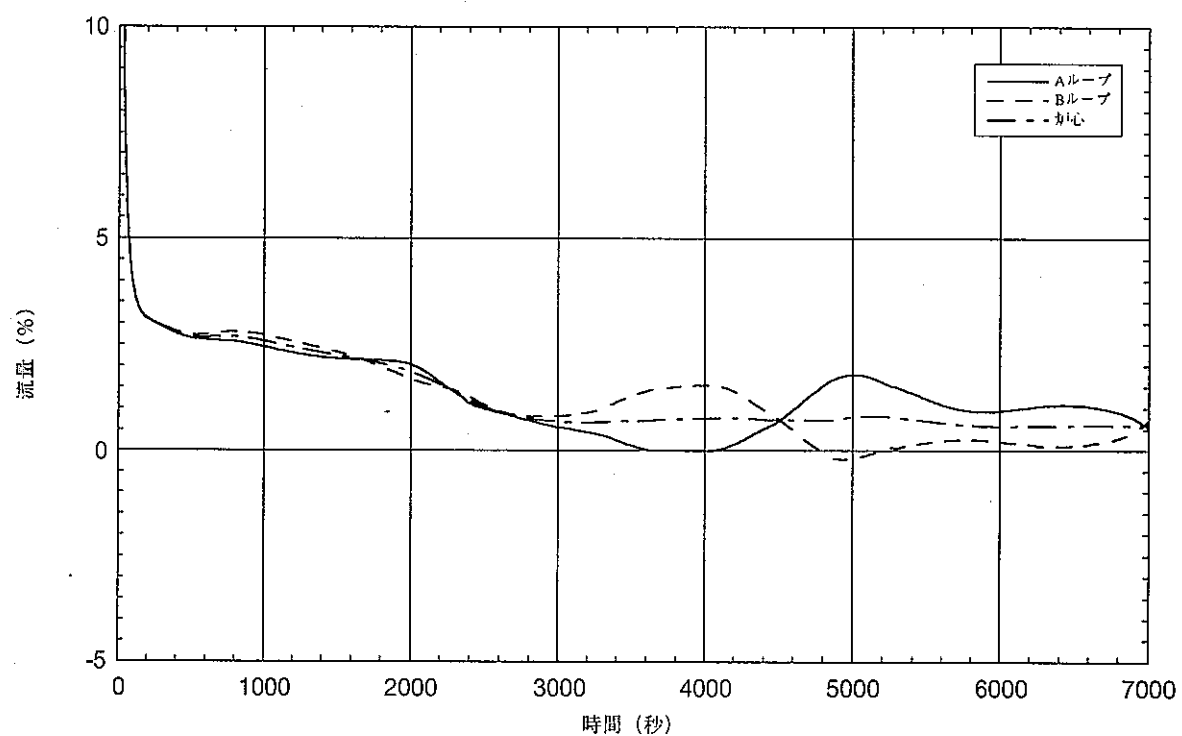


図4.5.2-1(2/2) ループ毎の1次側流量 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

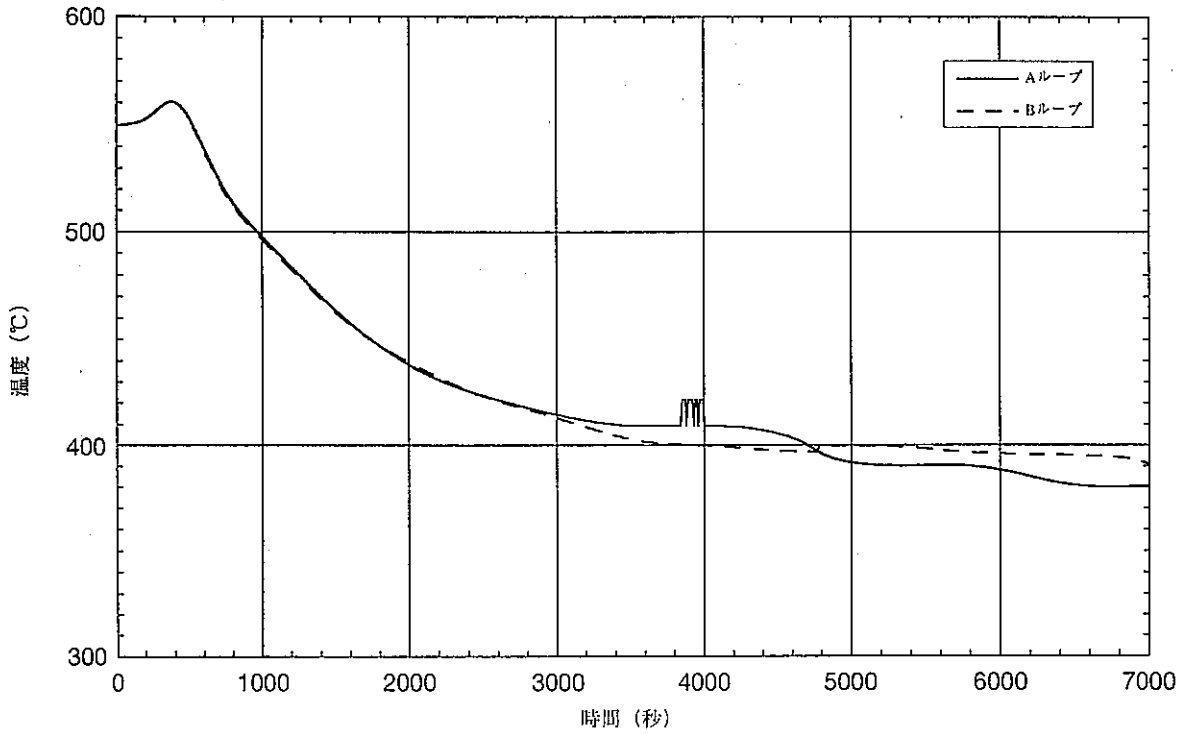


図4.5.2-2 IHX容器1次側入口温度 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

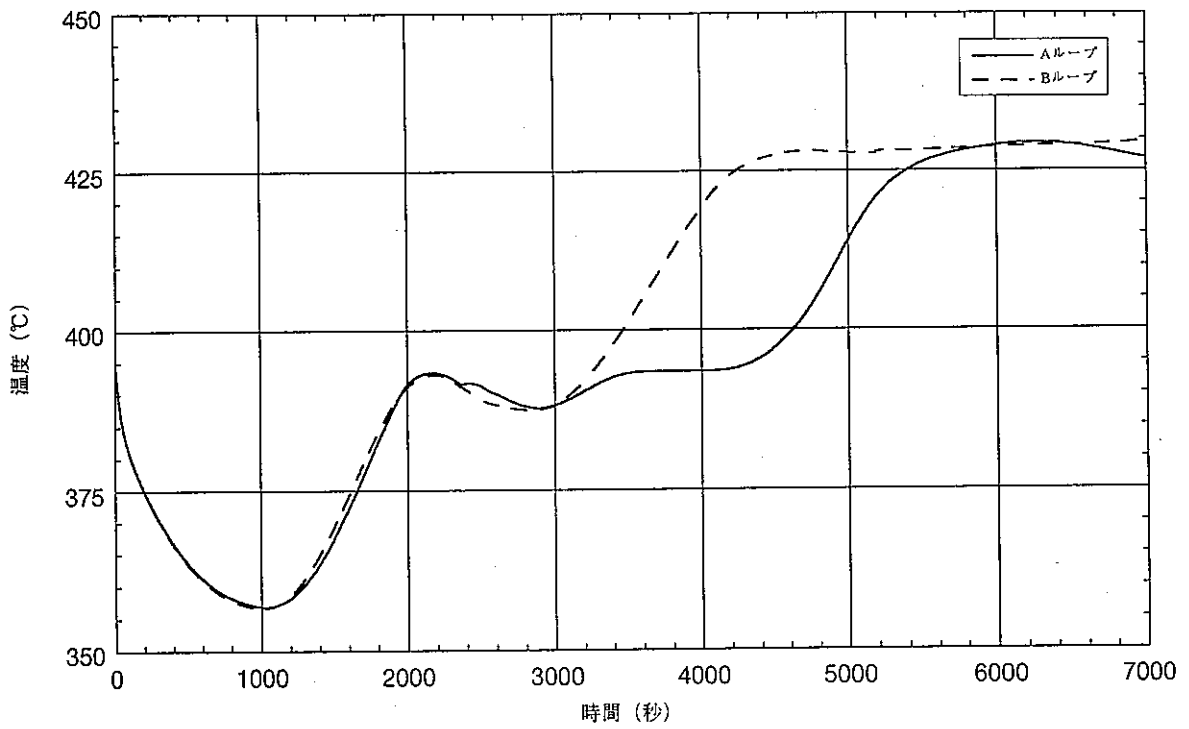


図4.5.2-3 IHX容器1次側出口温度 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

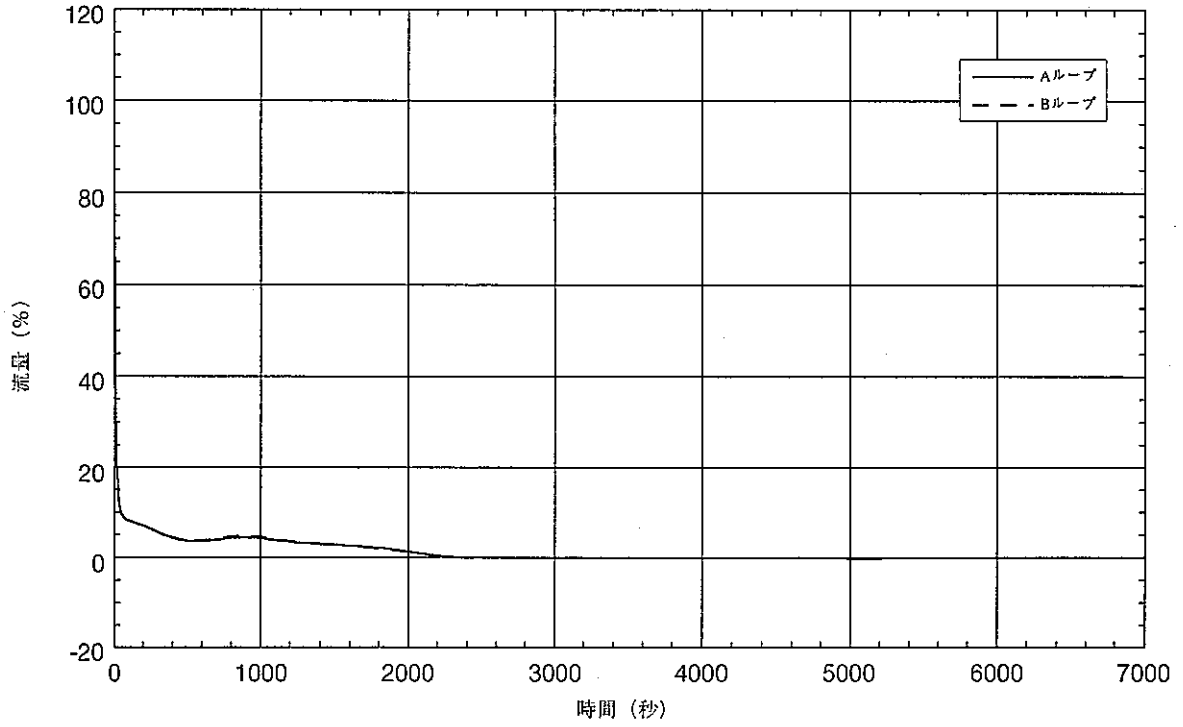


図4.5.2-4(1/2) ループ毎の2次側流量 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

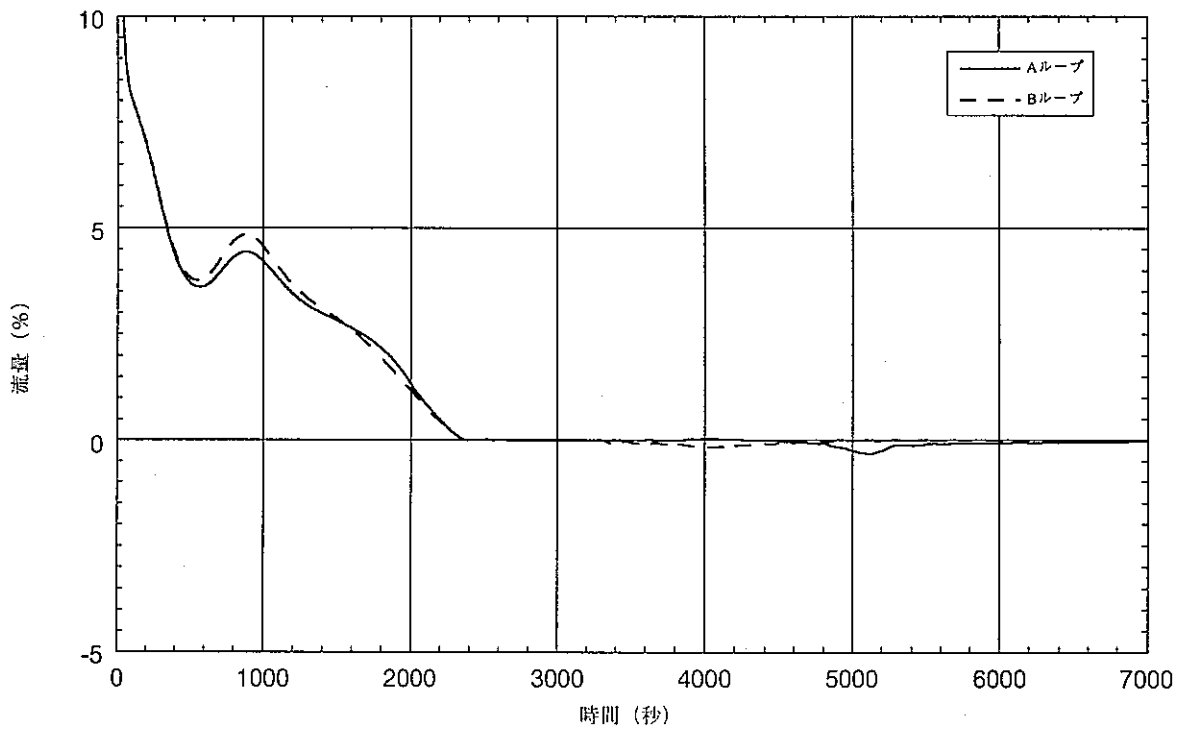


図4.5.2-4(2/2) ループ毎の2次側流量 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

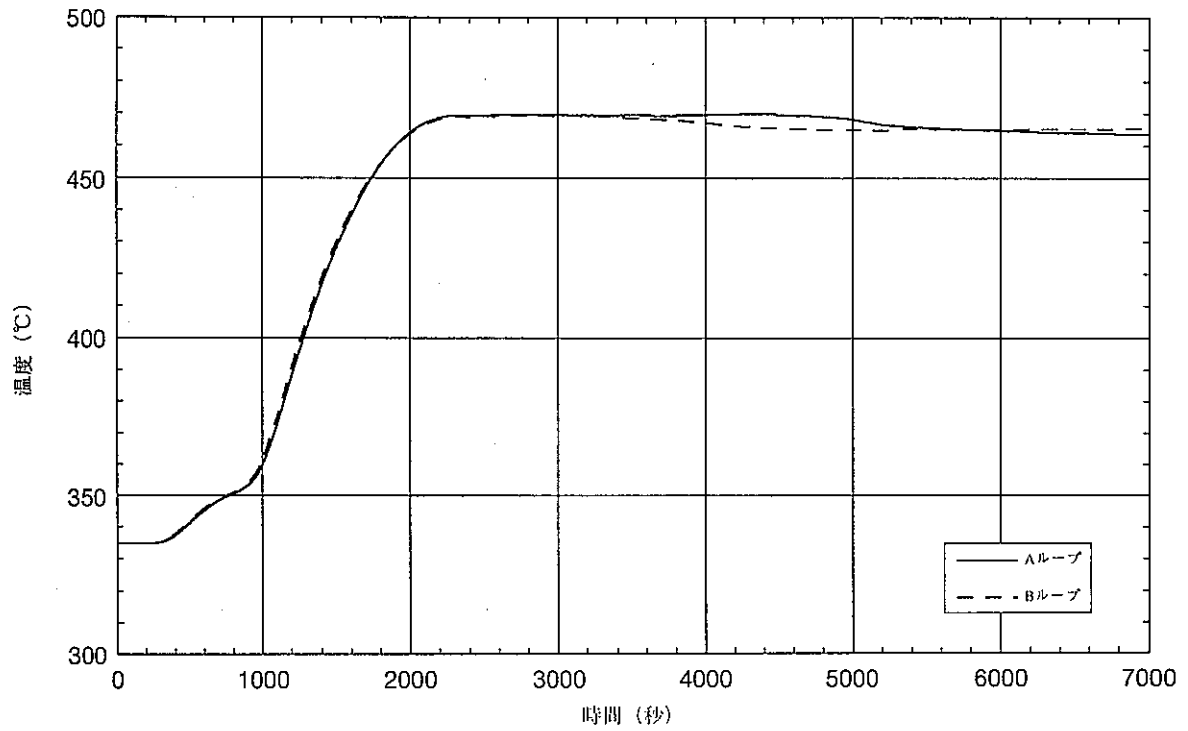


図4.5.2-5 IHX容器2次側入口温度 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

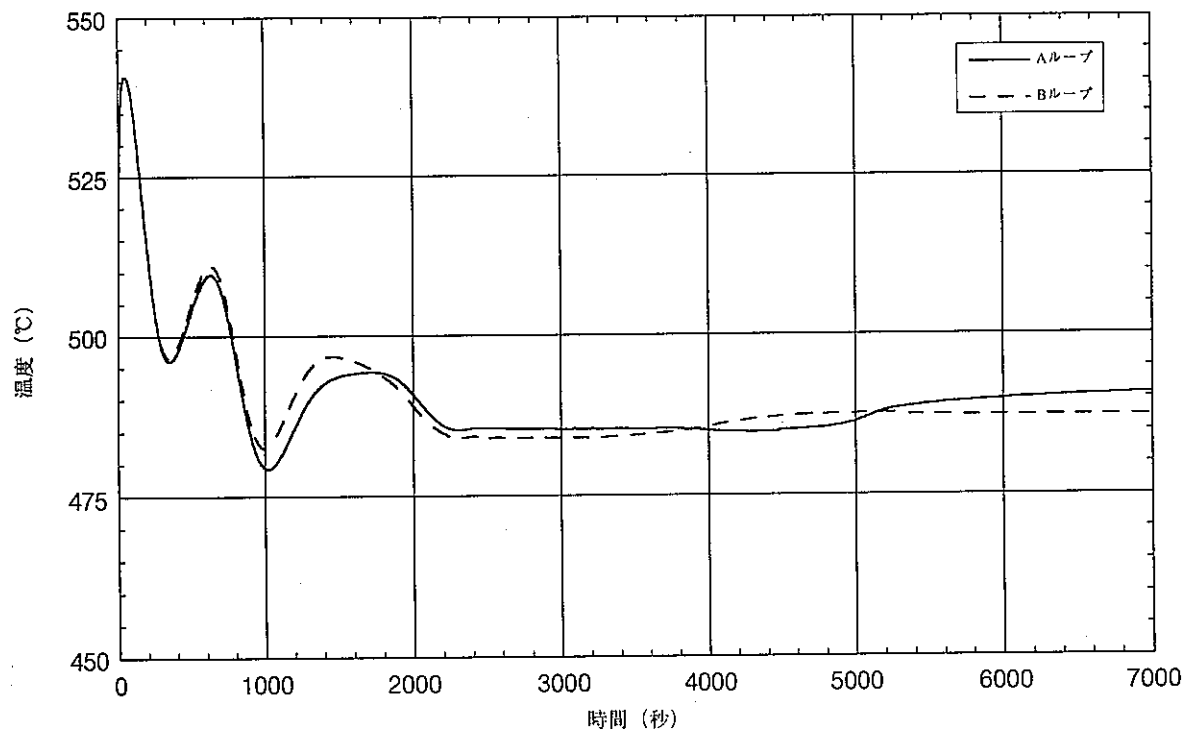


図4.5.2-6 IHX容器2次側出口温度 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

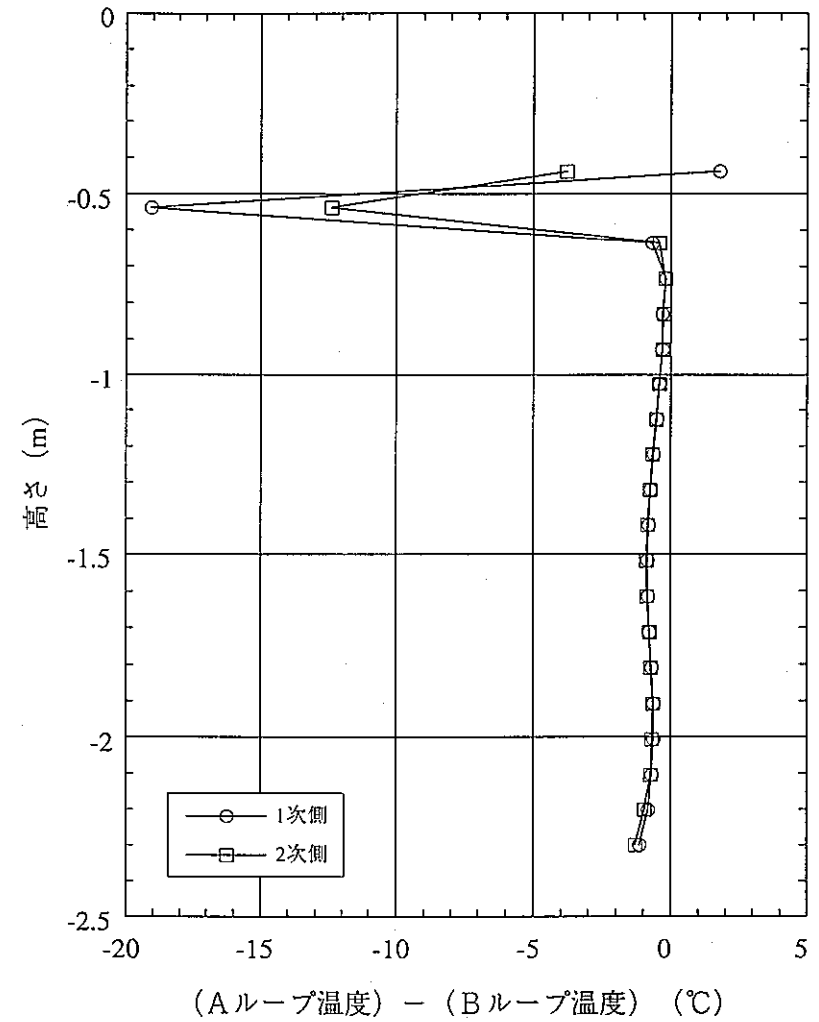
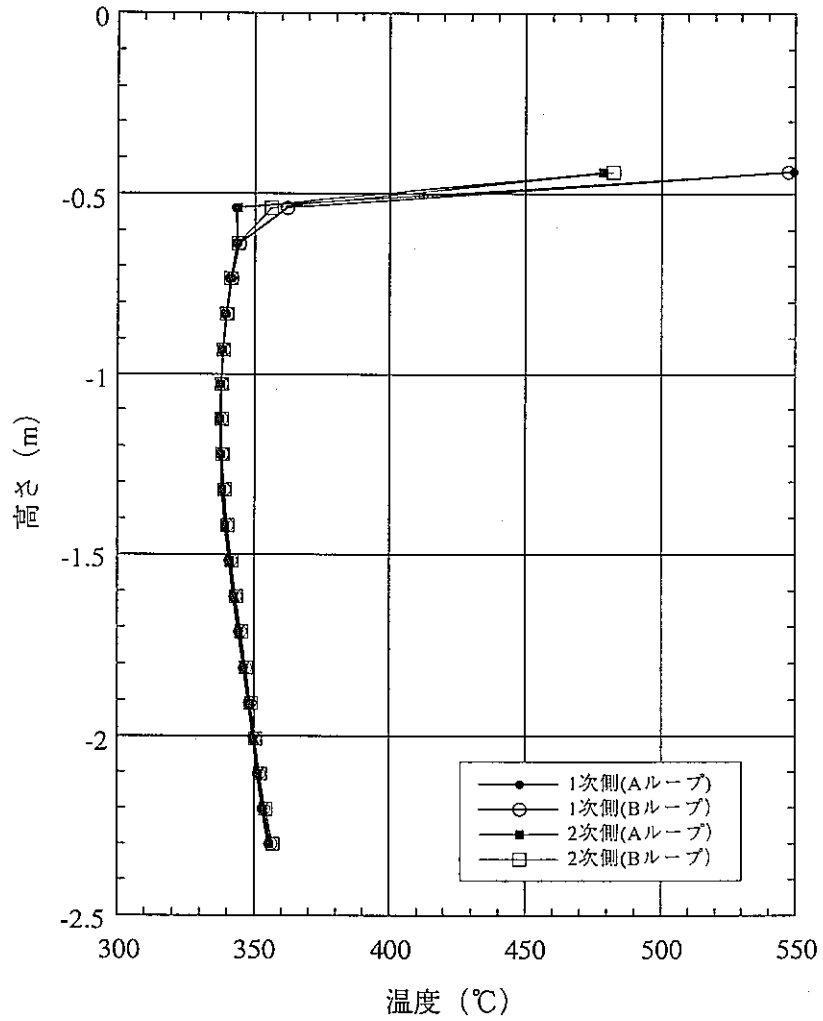


図4.5.2-7(1/6) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析: 1000sec)

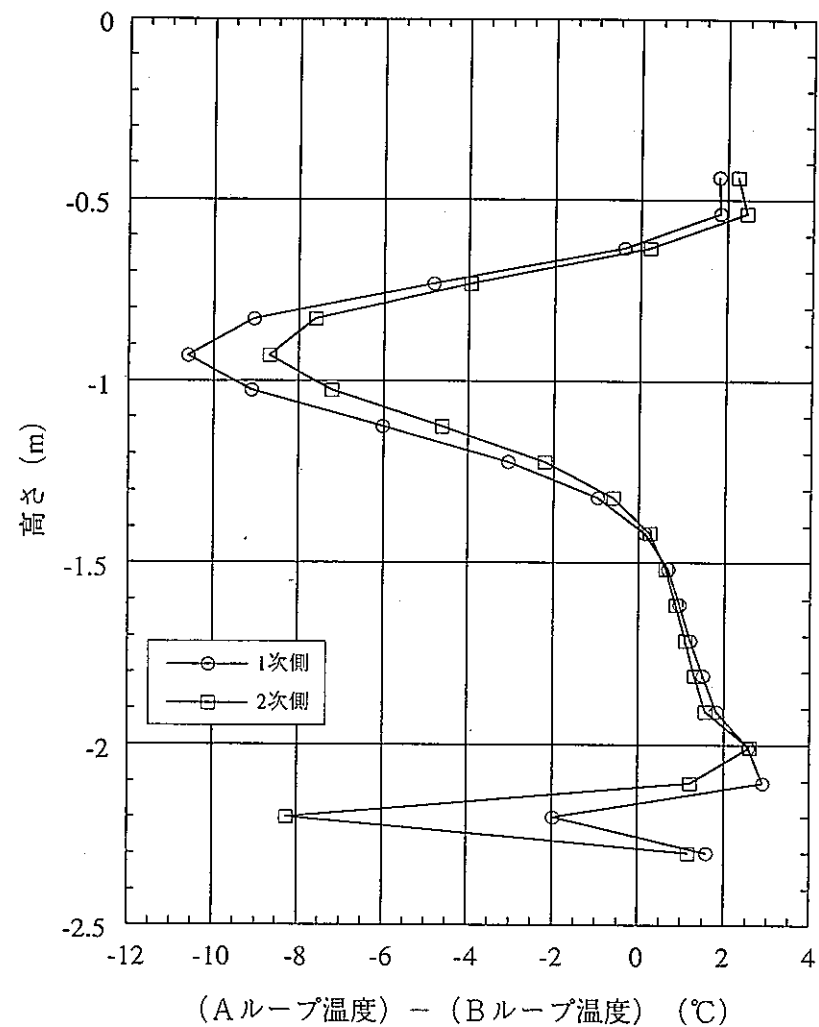
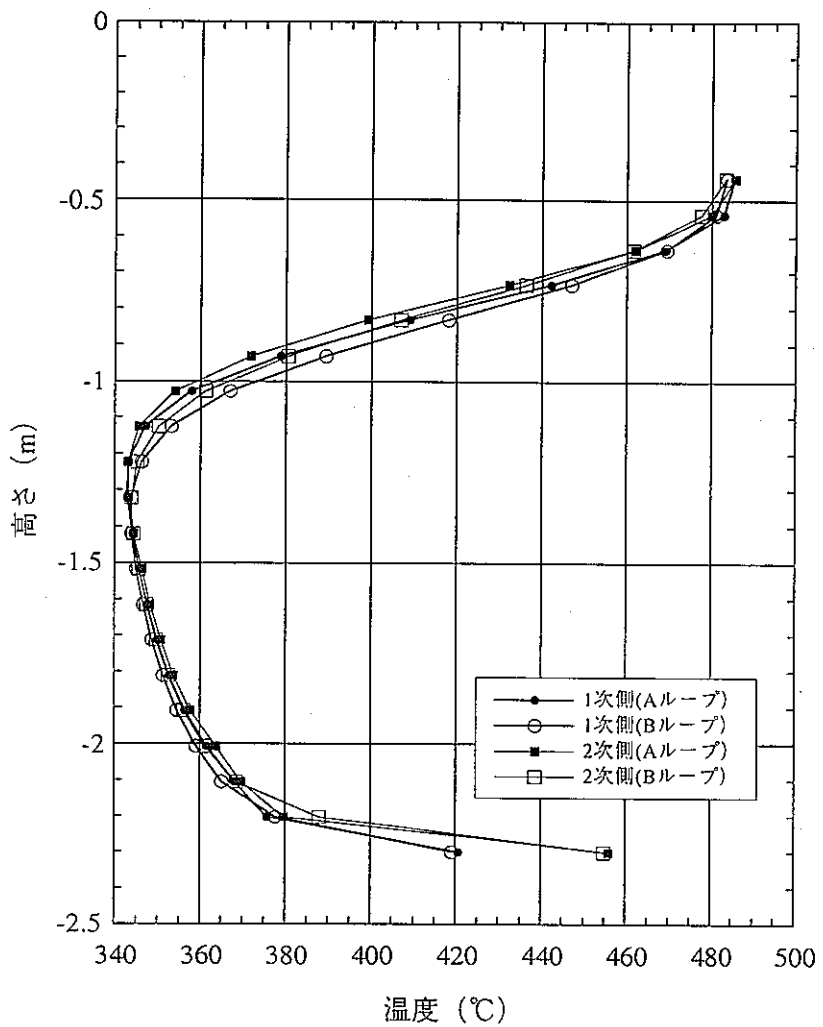


図4.5.2-7(2/6) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析:2000sec)

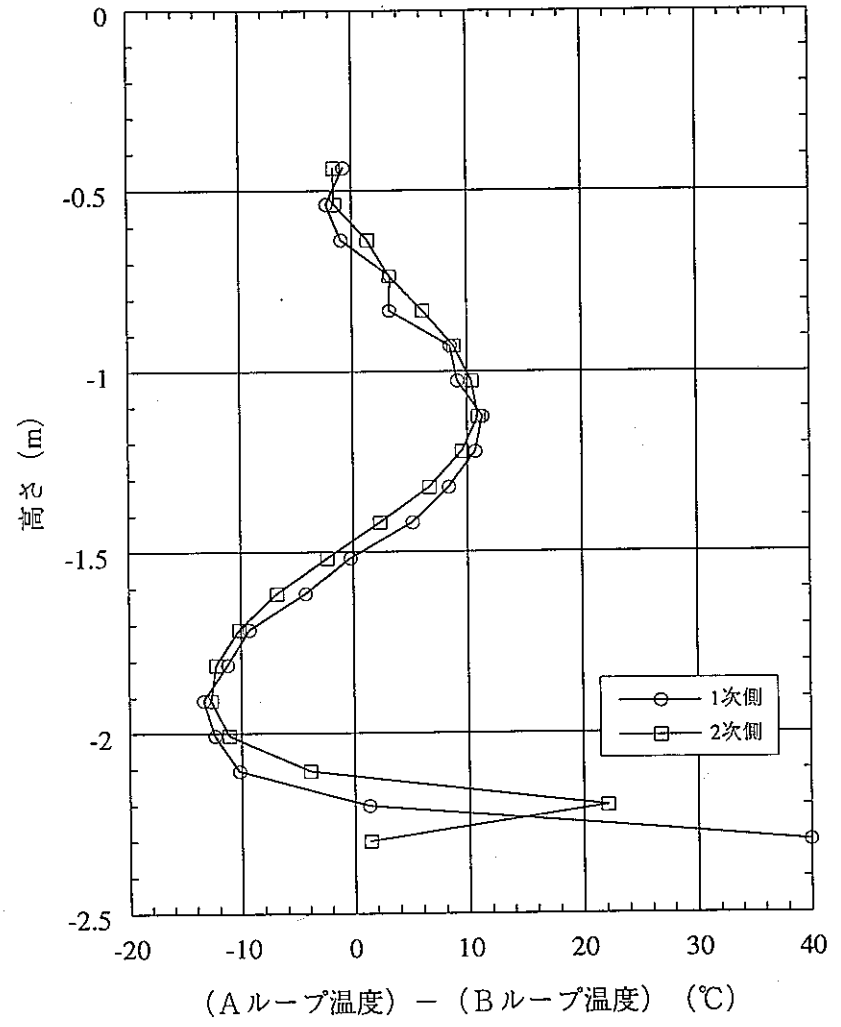
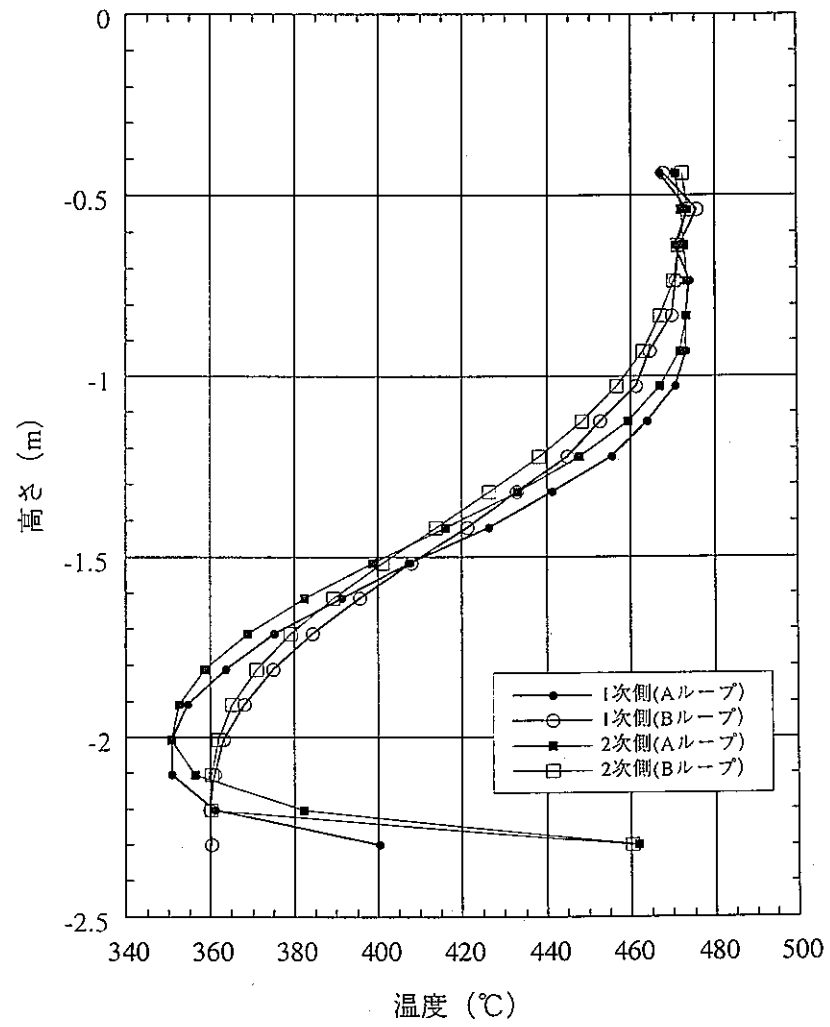


図4.5.2-7(3/6) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析: 2400sec)

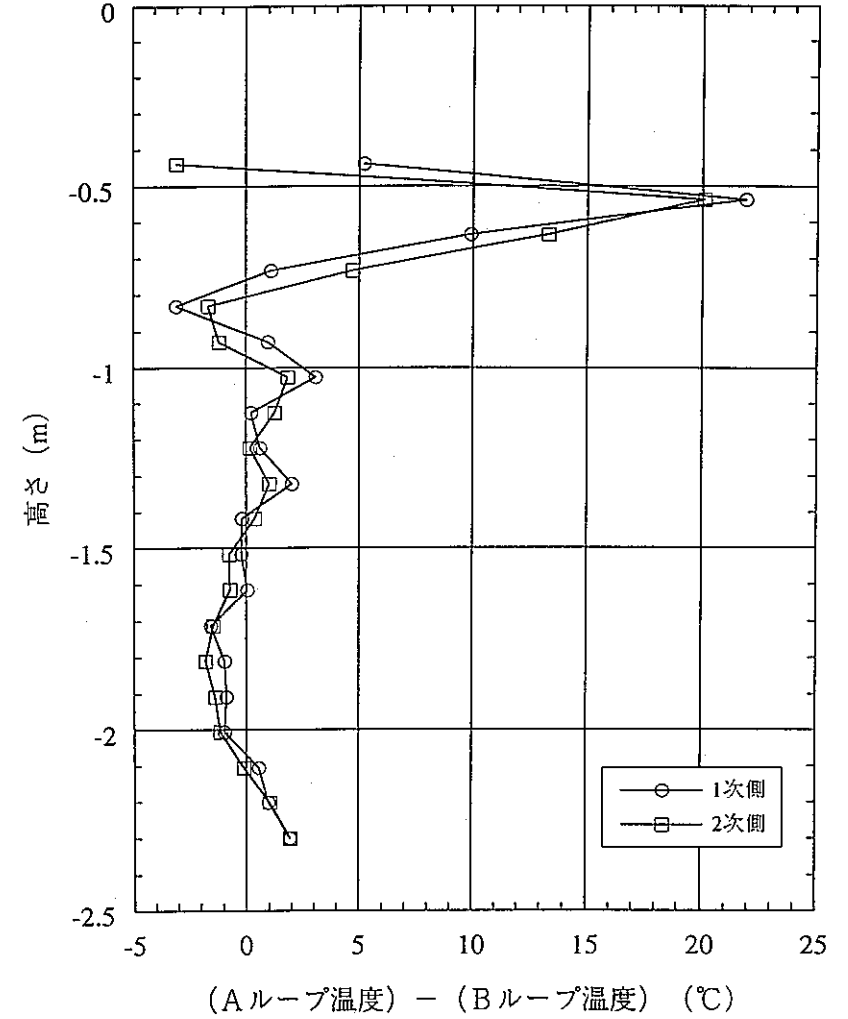
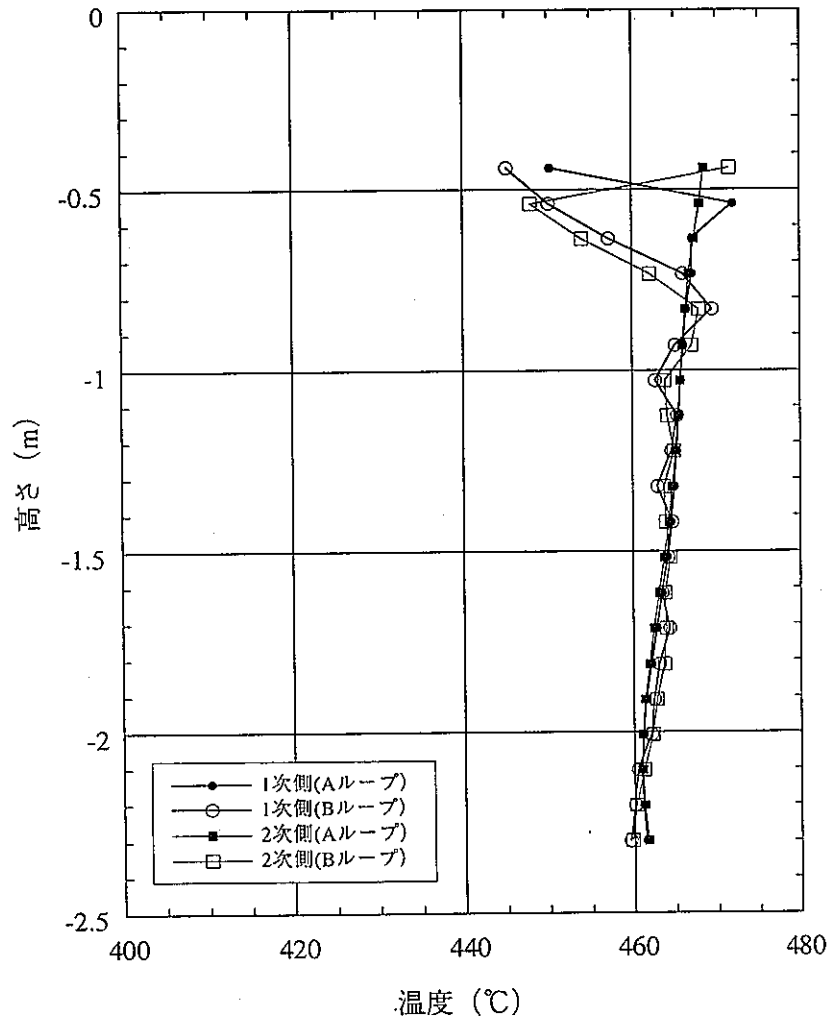


図4.5.2-7(4/6) I H X伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析: 3400sec)

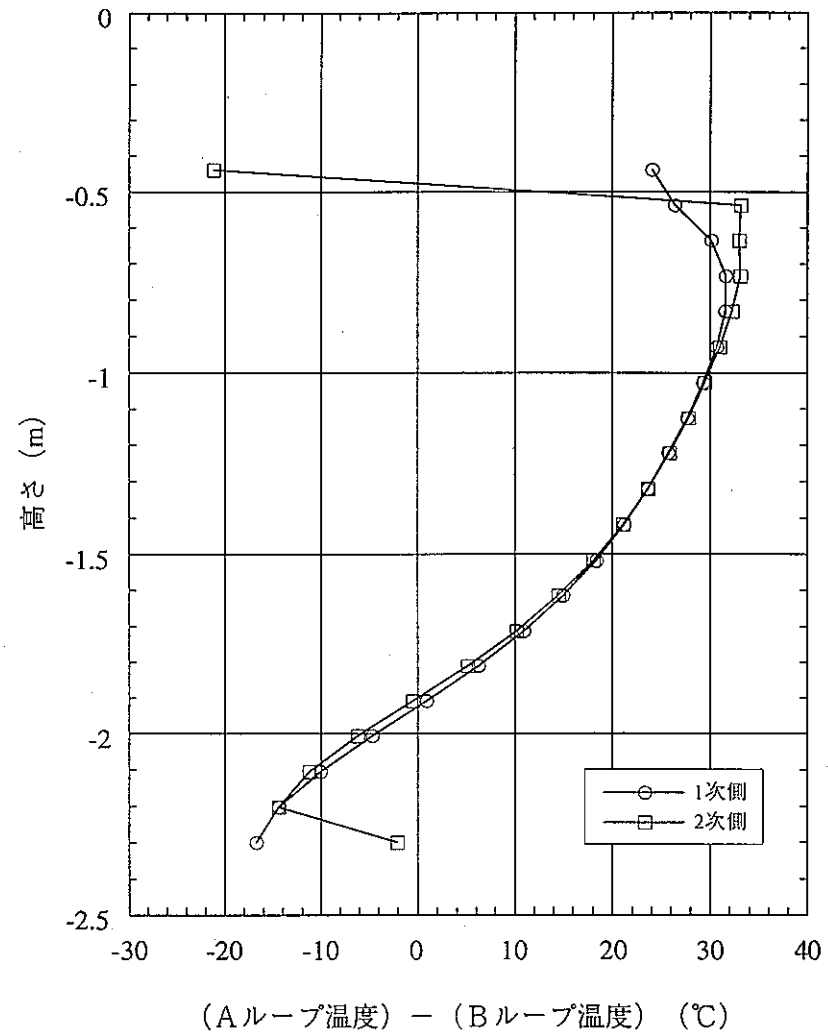
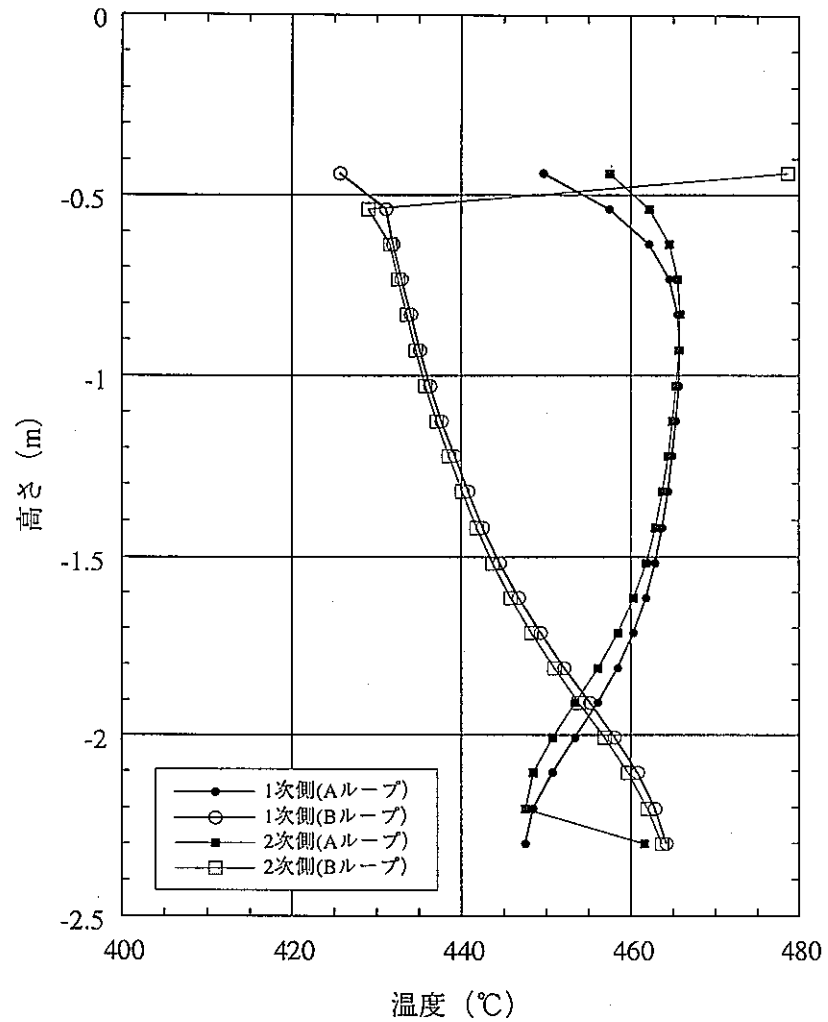


図4.5.2-7(5/6) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析: 4000sec)

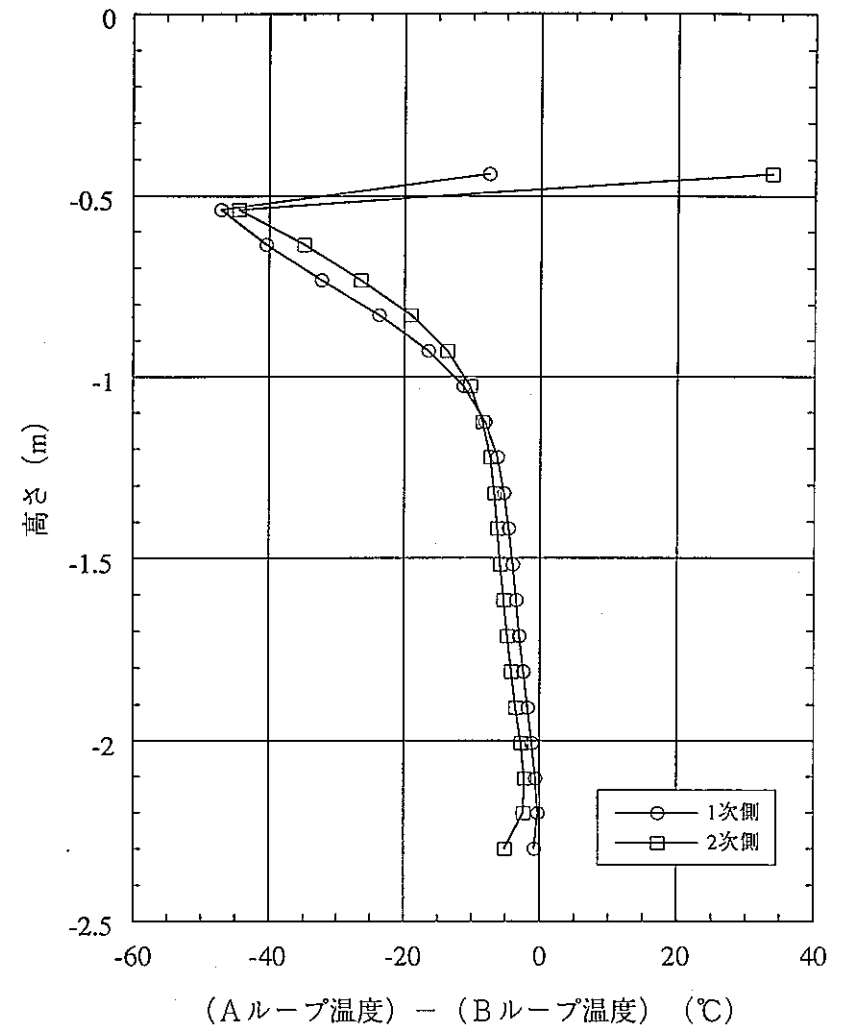
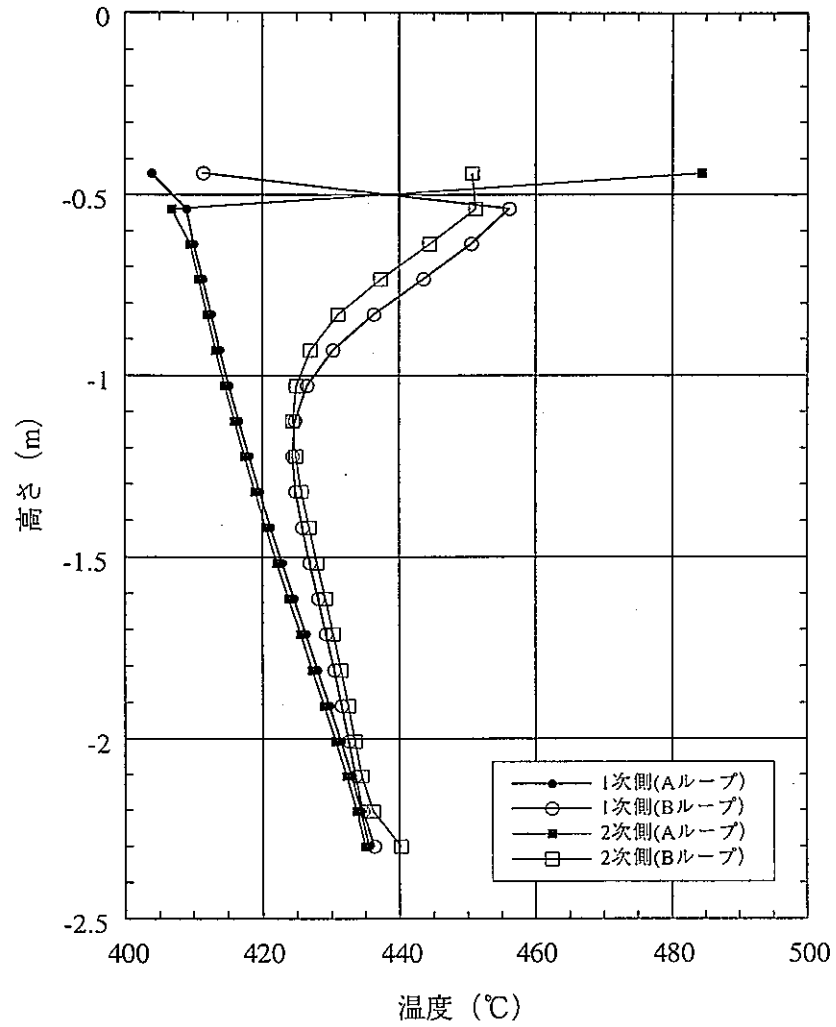
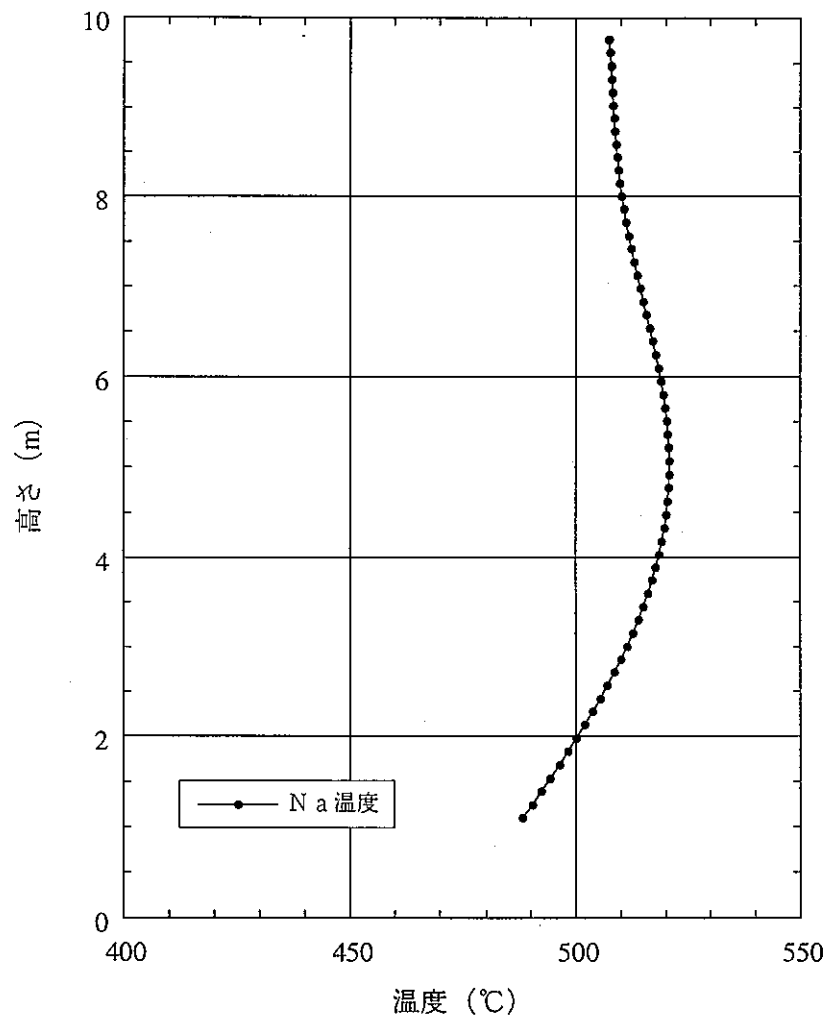
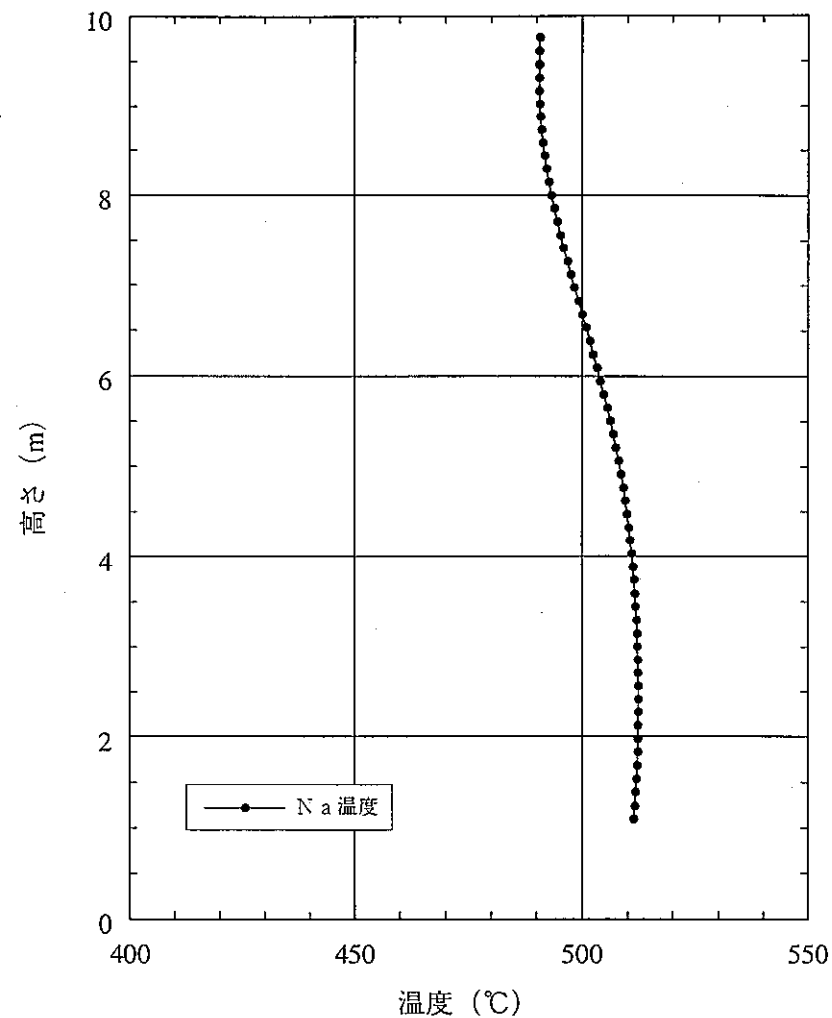


図4.5.2-7(6/6) I H X 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析: 5000sec)

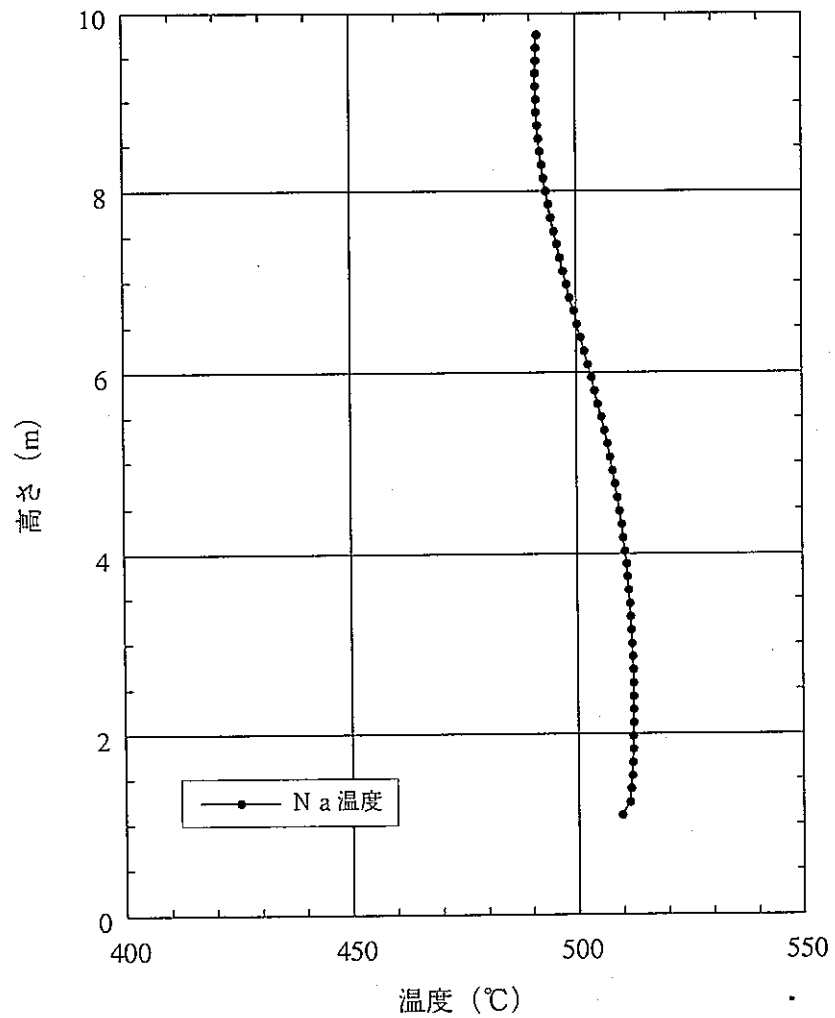


(1 0 0 0 sec)

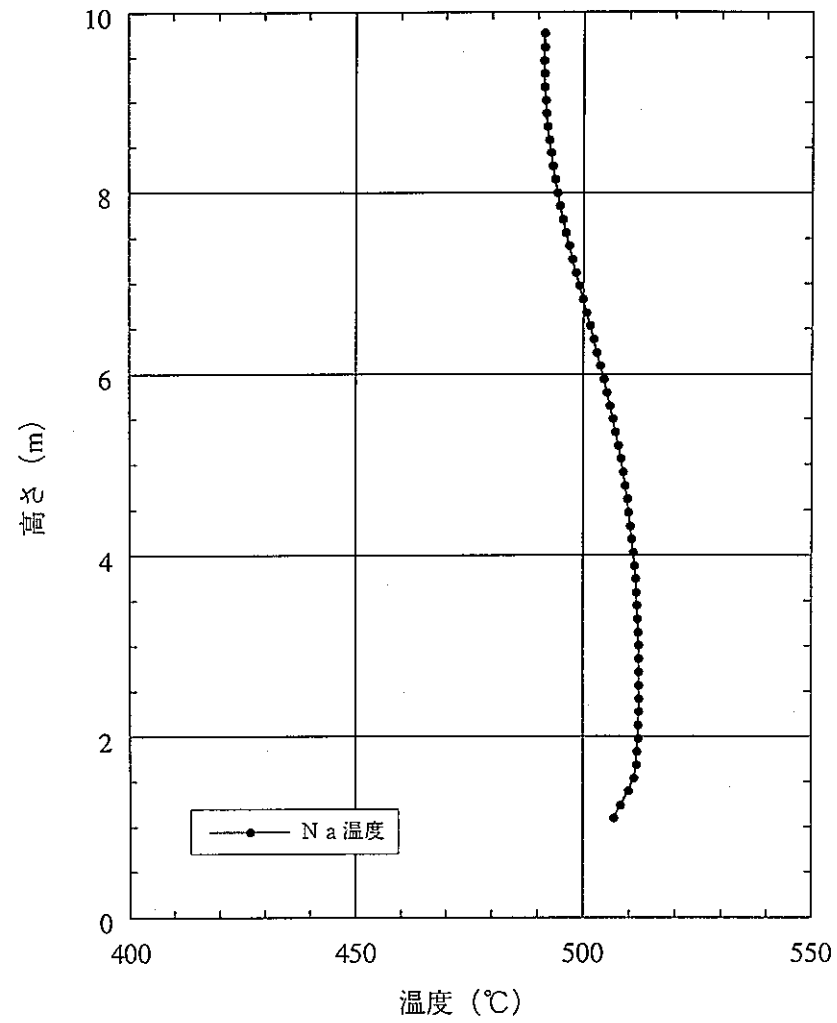


(2 0 0 0 sec)

図4.5.2-8(1/2) S G 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

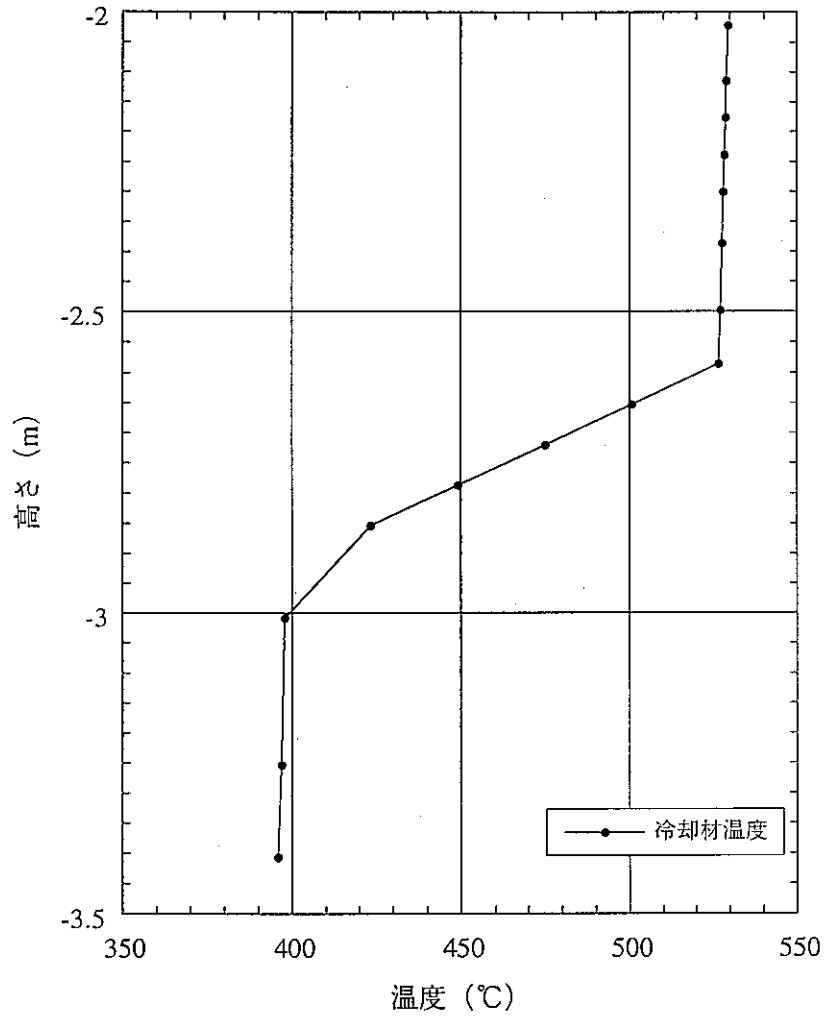


(3000 sec)

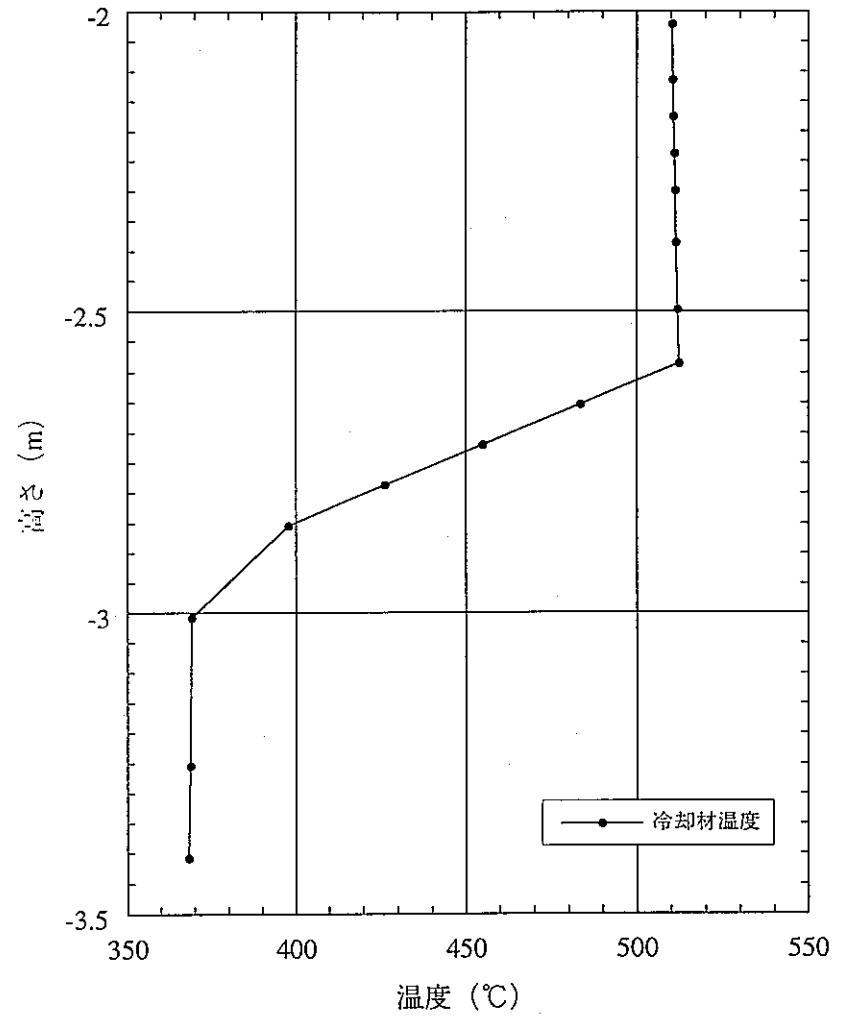


(5000 sec)

図4.5.2-8(2/2) S G 伝熱部軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)

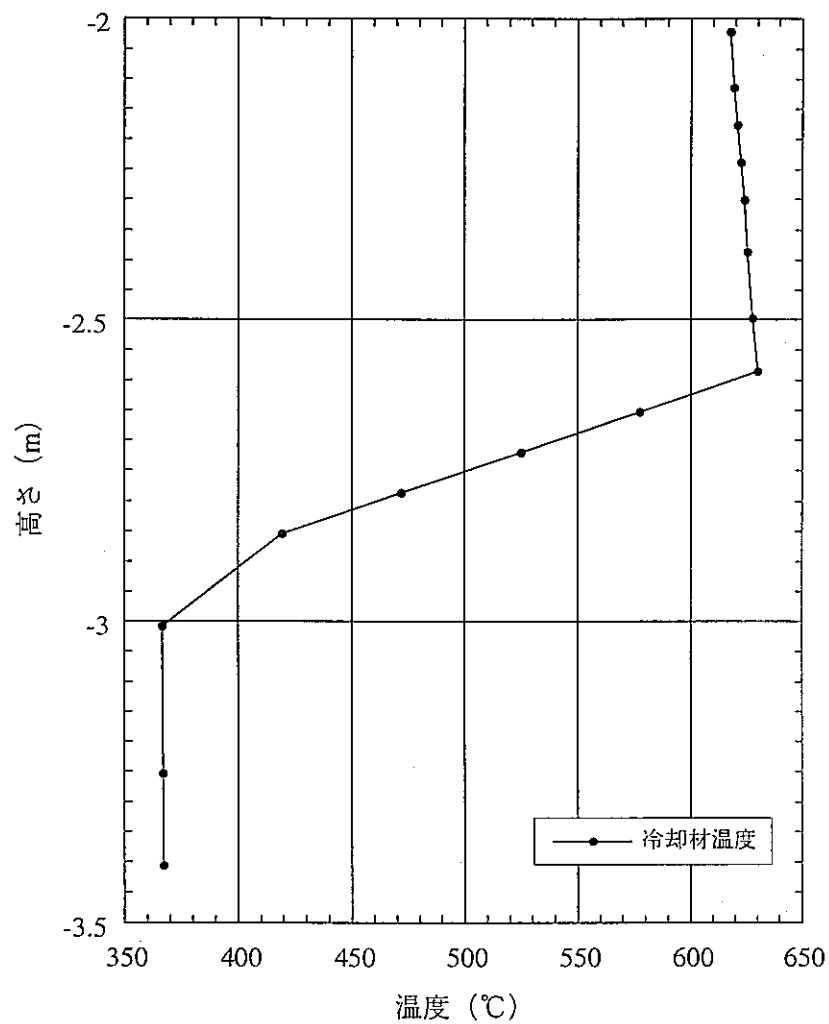


(1000 sec)

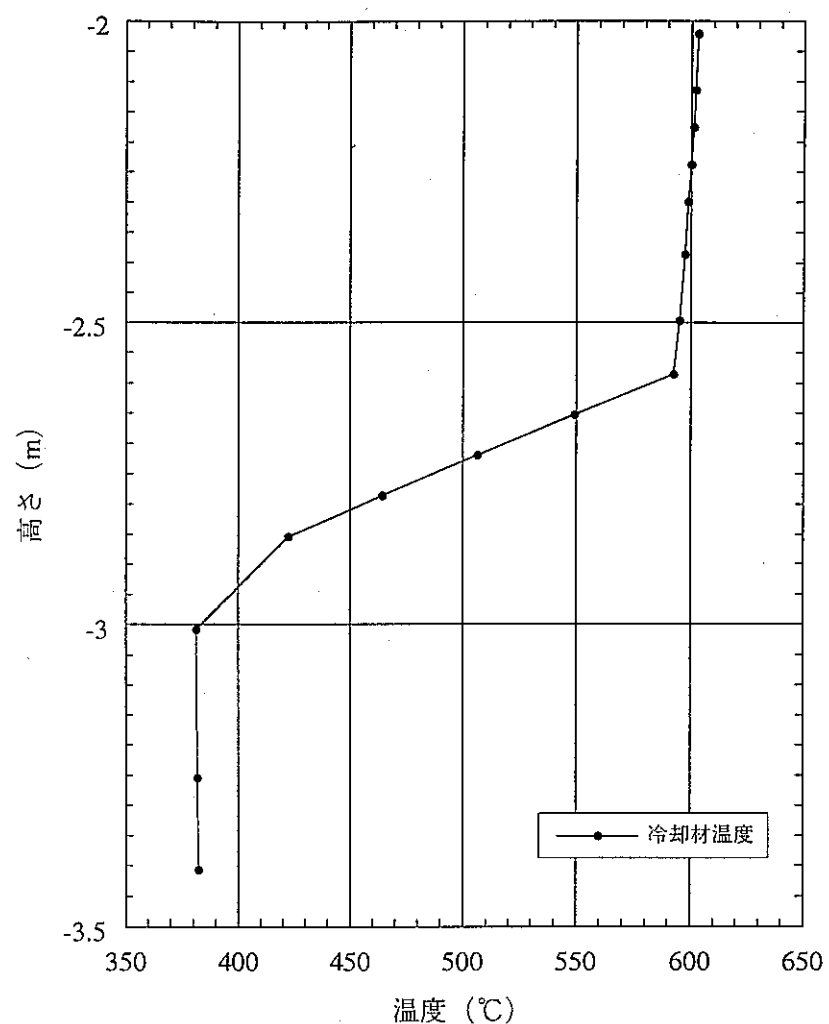


(2000 sec)

図4.5.2-9(1/2) 炉心軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)



(3 0 0 0 sec)



(5 0 0 0 sec)

図4.5.2-9(2/2) 炉心軸方向温度分布 (自然循環、1次系圧損アンバランス解析)