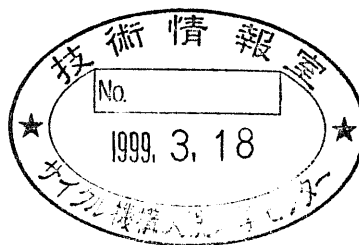


分冊

高速炉の冷却系に関する総合試験計画

－ 1次系及びDRACS系構造が動特性に与える影響の検討－

1998年10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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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 319-1194,

Japan

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

1998

高速炉の冷却系に関する総合試験計画
— 1次系及びDRACS系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

大型高速炉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、試験施設は大型高速炉の1/3縮尺2ループモデルとした。Naの加熱にはガスバーナによるNa加熱器を用いるため、1次系コールドレグ配管長やプレナム容量が大きくなり、熱過渡特性に対する実機模擬性が損なわれる可能性が考えられる。また、大型高速炉DRACS系の配管設計等が自然循環特性に及ぼす影響を確認しておく必要がある。

そこで、1次系コールドレグ配管長、プレナム容量及びDRACS系のEu数（流動抵抗）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。

その結果、熱過渡模擬性改善のためにはプレナム容量の縮小を図るべきであり、1次系コールドレグ配管長短縮の効果は小さいことが分かった。また、DRACS系のEu数を調節して1/3縮尺条件にすべきであること、空気冷却器の伝熱管寸法を縮小すべきであることが分かった。

試験方法の変更により熱過渡模擬性を改善する方策を検討するため、炉心部電気ヒータのみで初期定常を取り、1次系のホットレグとコールドレグの温度差（ ΔT ）を1/3とした解析を実施した。その結果、Na過熱器を用いた系統構成上、 ΔT を大型高速炉と一致させた試験では模擬できなかった原子炉容器回りの熱過渡初期の挙動を概ね模擬できることが分かった。

1次系ポンプ軸固着試験の模擬性について検討するため動特性解析を実施した結果、大型高速炉の熱過渡が概ね模擬できることが分かった。また、試験体ポンプの逆回転を強制的に停止させる装置の効果は小さいことが分かった。

* 元所属：大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

現所属：大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部原子炉二課

** 大洗工学センターナトリウム・安全工学試験部原子炉工学グループ

Large-scaled Thermohydraulic Tests Plan for Cooling Systems in Fast Reactors
— Effect of Primary System and DRACS System 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 fast reactor with power of 600MWe. The test facility consists of components from a reactor vessel to a steam generator.

Basic design of the large-scaled thermohydraulic test facility is 1/3 scale of the large scale fast reactor with two primary cooling loops. However the primary piping length and plenum volume are larger than those of the 1/3 scale of the fast reactor, because a sodium is heated by a gas burner which is placed between pump and reactor vessel. And, design of a direct reactor auxiliary cooling system (DRACS) in the test facility is also of interests.

Therefore, dynamics analyses of the thermal transition tests have been done in which parameters were the primary cold leg piping length, the plenum volume and Euler numbers of the DRACS system.

It was shown that the shortening of the primary cold leg piping length was not important to improve the transient response, and the reduction of the lower plenum volume in the reactor vessel was effective. And, it was found that the Euler numbers of the DRACS should be 1/3 scale condition, and the heat capacity of an air cooler, i.e. its tube size, reduction was of importance.

Analyses have been done in which only electrical heaters in the core were used and a temperature difference between hot and cold legs was set 1/3 of the fast reactor. It was shown that the thermal transition just after the scram agreed fairly well between the test facility and the reactor.

Analyses of the primary pump stick tests have been done. It was shown that the thermal transition of the fast reactor could be simulated roughly, and a prevention of reverse rotation of the primary pump due to the reverse flow was not very influential to improve the response.

* Previous affiliation : Reactor Engineering Section, O-arai Engineering Center

Current affiliation : JOYO Maintenance Section, O-arai Engineering Center

** Reactor Engineering Group, O-arai Engineering Center

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 設計条件	2
2.2 設計概要	2
2.2.1 系統設計	2
2.2.2 機器設計	2
3. 1次系コールドレグ配管長及びプレナム容量が動特性に与える影響	5
3.1 解析対象熱過渡	5
3.2 解析パラメータ	5
3.3 解析コード	6
3.4 解析モデル	6
3.5 解析結果	6
3.5.1 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果	6
3.5.2 自然循環試験（全電源喪失模擬試験）解析結果	8
3.6 まとめ	10
4. DRACS系Eu数が動特性に与える影響	12
4.1 解析対象熱過渡	12
4.2 解析パラメータ	12
4.3 解析コード	14
4.4 解析モデル	14
4.5 解析結果	14
4.6 まとめ	17
5. ΔT を1/3とした場合の熱過渡模擬性	18
5.1 解析対象熱過渡	18
5.2 解析条件	18
5.2.1 基本方針	18
5.2.2 ΔT を1/3とした場合の相似則	18
5.2.3 試験装置の制限を考慮した場合の初期条件	20
5.2.4 過渡時の条件	21
5.2.5 解析ケース	22
5.3 解析コード	22
5.4 解析モデル	22
5.5 解析結果	22

5.6 まとめ	26
6. 1次系ポンプ軸固着模擬試験の熱過渡模擬性	28
6.1 解析対象熱過渡	28
6.2 解析条件	28
6.3 解析コード	29
6.4 解析モデル	30
6.5 解析結果	30
6.6 まとめ	33
7. 結論	34
謝辞	36
参考文献	37

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
- 表3.2-1 1次系各部のNa重量比較
- 表3.2-2 1次系コールドレグ配管長及び1次系プレナム容量パラメータ設定値
- 表3.2-3 1次系定格運転時配管圧力損失設定値
- 表4.2-1 基本設計におけるDRACS系の圧力損失及び流量
- 表4.2-2 DRACS系圧力損失パラメータ設定値
- 表5.2.2-1 ΔT 1/3条件の相似則に基づく定格運転条件
- 表5.2.3-1 試験装置の制限を考慮した初期条件
- 表5.2.5-1 ΔT 1/3条件での解析ケース

図リスト

- 図2.2.1-1 主冷却系全体系統図
- 図2.2.1-2 機器高低関係図
- 図2.2.2-1 原子炉容器試験体構造図
- 図2.2.2-2 中間熱交換器構造図
- 図2.2.2-3 1次主冷却系コールドレグ配管配置図
- 図2.2.2-4 DHX構造図
- 図2.2.2-5 DRACS系空気冷却器構造図
- 図3.2-1 1次系各部のNa重量比較
- 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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1次系配管長パラメータ解析)

- 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、1次系配管長パラメータ解析)
- 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、1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、1次系配管長パラメータ解析)
- 図3.5.2-1 自然循環試験解析結果 (原子炉容器入口温度、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1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、1次系配管長パラメータ解析)
- 図3.5.2-15 自然循環試験解析結果 (1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)
- 図3.5.2-16 自然循環試験解析結果 (2次系流量、1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、1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、1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、1次系配管長パラメータ解析)
- 図4.5-1 自然循環試験解析結果 (DRACS 1次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-2 自然循環試験解析結果 (DRACS 2次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

- 図4.5-3 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-4 自然循環試験解析結果
(DHX 1次側出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-5 自然循環試験解析結果
(DHX 2次側出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-6 自然循環試験解析結果
(空気冷却器 2次Na出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-7 自然循環試験解析結果
(空気冷却器空気出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-8 自然循環試験解析結果 (1次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-9 自然循環試験解析結果 (2次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-10 自然循環試験解析結果 (原子炉容器入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-11 自然循環試験解析結果 (原子炉容器出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-12 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-13 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-14 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-15 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-16 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図4.5-17 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)
- 図5.2.4-1 過渡時の炉心ヒータ出力及び1次系流量
- 図5.2.4-2 過渡時の2次系流量
- 図5.5-1 自然循環試験解析結果 (原子炉容器入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-2 自然循環試験解析結果 (原子炉容器出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-3 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-4 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-5 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-6 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-7 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-8 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-9 自然循環試験解析結果
(空気冷却器またはSG入口Na温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-10 自然循環試験解析結果
(空気冷却器またはSG出口Na温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-11 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)
- 図5.5-12 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件)

- 図5.5-13 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側入口温度、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-14 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出口温度、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-15 自然循環試験解析結果 (1次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-16 自然循環試験解析結果 (2次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-17 自然循環試験解析結果 (DRACS 1次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-18 自然循環試験解析結果 (DRACS 2次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-19 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図5.5-20 IHX伝熱部 1次側Na軸方向温度分布 (自然循環、 ΔT 1/3縮尺条件)
- 図6.2-1 1次系ポンプB軸固着試験モード
- 図6.2-2 1次系ポンプB軸固着試験シーケンス
- 図6.2-3 試験装置弁動作条件 (1次系ポンプ軸固着試験)
- 図6.2-4 SG入口給水流量
- 図6.5-1 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (原子炉容器入口温度)
- 図6.5-2 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (原子炉容器出口温度)
- 図6.5-3 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (炉心入口温度)
- 図6.5-4 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (炉心出口温度)
- 図6.5-5 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 1次側入口温度)
- 図6.5-6 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 1次側出口温度)
- 図6.5-7 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 2次側入口温度)
- 図6.5-8 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 2次側出口温度)
- 図6.5-9 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG入口Na温度)
- 図6.5-10 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG出口Na温度)
- 図6.5-11 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG入口給水温度)
- 図6.5-12 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG出口蒸気温度)
- 図6.5-13 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (1次系流量)
- 図6.5-14 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (2次系流量)
- 図6.5-15 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG給水流量)

1. 序論

高速炉の実用化を目指し、大型高速炉で採用予定の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が模擬対象とする大型高速炉は、平成9年度の設計フェーズにおける実証炉^{[2][3][4][5][6]}である。模型縮尺比は1/3縮尺を基本としており、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、試験装置では、コールドレグナトリウムをNa加熱器に導いて加熱した後原子炉容器に導入する系統となっており、熱過渡開始後もNa加熱器バイパス系を用いる必要があることから、1次系配管コールドレグが1/3縮尺条件に比べて3倍程度長い設計となっている。また、原子炉容器入口がノズル構造となっているため、原子炉容器下部プレナム容量は1/3縮尺条件に比べて1.5倍程度大きい設計となっている。そのため、1次系配管コールドレグ及びプレナム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、1次系配管長及び1次系プレナム容量をパラメータとし、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、1次系配管長及び1次系プレナム容量削減の必要性等、試験装置の設計方針を検討する。

また、基本設計結果ではDRACS系のEu数が2次系、空気系ともに1/3縮尺条件に比べて小さくなっているが、DRACS 2次系に流動抵抗調節用の弁を設置しEu数を調節すると共に、空気系のダンパを用いてEu数を調節し1/3縮尺条件と一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施し、その効果を把握する。そして、DRACS系Eu数調節の必要性等、試験装置の設計方針を検討する。

また、相似則による条件設定のバリエーションとして、1次系のホットレグとコールドレグの温度差（ ΔT ）を1/3とした場合の相似則に基づいた熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討する。 ΔT を1/3とすることで、初期状態からNa加熱器バイパスを使用した炉心ヒータのみの加熱とすることができ、系統切り替えの影響を排除することができる。また、2次系は、条件設定の容易さから空気冷却器による除熱とする。

また、非対称事象である1次系ポンプB軸固着試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討する。実証炉は3ループ中1ループの軸固着を想定しているが、試験装置では2ループ中1ループの逆流となる。また、試験装置では瞬時の軸固着を模擬することは不可能であり、回転の拘束も行わない計画のため、1ループ停止（回転フリー）となる。すなわち、停止ループのポンプは逆流により逆回転することとなる。よって、この影響についても検討する。

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。基本設計結果の概要を参考文献[7]に示す。また、本報に関係する部分の概要を以下に示す。

2.1 設計条件

試験施設の主要な設計条件を以下に示す。

- ・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系) 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。

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2.2.1-2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。

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2.2.2-1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2.2.2-2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Na加熱器及びNa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2.2.2-3に示す。Na加熱器バイパス使用時の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。

空気冷却器は多管フィンチューブ式熱交換器であり、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を介さない冷却系統を構成する。

2.2.2.3 直接炉心冷却系機器

直接炉心冷却系（DRACS系）は炉内熱交換器、空気冷却器、電磁ポンプ等から構成される。

炉内熱交換器（DHX）は原子炉容器試験体デッキ上面に固定され、原子炉容器上部プレナムの1次ナトリウム中に直接浸漬される縦置き平行交流直管型の熱交換器であり、DRACS系1系統当たり1基で2基設置される。DHXの胴側は1次ナトリウム、管側はDRACS系の2次ナトリウムが流れ、伝熱管を介して高温の1次ナトリウムから低温の2次ナトリウムへ熱が伝えられる。DHXの構造図を図2.2.2-4に示す。

空気冷却器は多管フィンチューブ式熱交換器であり、DRACS系1系統当たり1基で2基設置される。伝熱管は Σ 型のフィンチューブであり、箱形の空気流路を形成するケーシング内に設置され、管内はDHXからの2次ナトリウムが流れ、伝熱管を介して2次ナトリウムから管外の空気へ熱が伝えられる。空気冷却器の構造図を図2.2.2-5に示す。

3. 1次系コールドレグ配管長及びプレナム容量が動特性に与える影響

1次系コールドレグ配管長、1次系プレナム容量及び1次系コールドレグ配管圧損をパラメータとし、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、1次系コールドレグ配管長及び1次系プレナム容量の縮小の必要性等、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）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1次系コールドレグ配管長及び1次系プレナム容量とするが、1/3縮尺条件を満足させる観点から配管長の変更と同時に配管圧損も変更する。表3.2-1及び図3.2-1に1次系各部のナトリウム重量の比較を示す。1次系プレナム容量の中で1/3縮尺条件との差異が大きいのはRV下部プレナム及びIHX下部プレナムであるため、RV下部プレナム容量及びIHX下部プレナム容量を解析パラメータとする。以下に変更項目を示す。

- ・ 1次系コールドレグ配管長
- ・ RV下部プレナム容量及びIHX下部プレナム容量
- ・ 1次系コールドレグ配管圧損

解析は、配管及びプレナムの片方または両方を実証炉の1/3縮尺条件として実施する。以下に、解析パラメータ及び設定値を示す。

(1) 1次系コールドレグ配管長

1/3縮尺条件は実証炉配管長の1/3となる。

2次系配管長パラメータの設定値を表3.2-2に示す。

(2) RV及びIHX下部プレナム容量

1/3縮尺条件は実証炉容量の1/27となる。

RV及びIHX下部プレナム容量パラメータの設定値を表3.2-2に示す。

(3) 1次系コールドレグ配管圧損

1/3縮尺条件は、Eu数一致の条件より実証炉圧損の1/3となる。ただし、定格運転条件が1/3縮尺条件の78.9%であることから、定格運転時における圧損は実証炉圧損

の $1/3 \times 0.7891^3$ となる。

1次系コールドレグ配管圧損パラメータの設定値を表3.2-3に示す。

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」^[8]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、配管及びプレナム $1/3$ 縮尺条件、配管のみ $1/3$ 縮尺条件、プレナムのみ $1/3$ 縮尺条件、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設計を基にしている。

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入口温度を示す。

図3.5.1-10に、SG出口温度を示す。

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

配管及びプレナム1/3縮尺条件、配管のみ1/3縮尺条件、プレナムのみ1/3縮尺条件及び基本設計結果を比較し、1次系配管及び1次系プレナム容量を縮小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。

c. 時間遅れへの影響

1/3縮尺条件とした場合でも時間遅れは基本設計からほとんど改善されず、実証炉からは大きく遅れている。実証炉との相違は、2次系熱過渡が実証炉熱過渡に対して大きく遅れるためであり（IHX 2次側入口温度（図3.5.1-7）参照）、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであること等によるものである。2次系熱過渡の実証炉との相違については関連資料[7]で詳細に述べられている。

d. 温度勾配への影響

試験体の炉心入口温度（図3.5.1-3）は、定格運転状態においてNa加熱器から炉心までの間に高温ナトリウムが存在するため、熱過渡開始直後535℃から395℃に低下する熱過渡が生じる。解析結果を見ると、1次系コールドレグ配管長を縮小しただけでは温度勾配はほとんど変化しないが、1次系プレナム容量を縮小した場合、温度勾配が急となり、実証炉の温度条件である395℃に早く到達してゐる。

その他の温度勾配については、1/3縮尺条件とした場合でも基本設計からほとんど改善されず、実証炉熱過渡より緩やかである。実証炉との相違は、2次系熱過渡が実証炉熱過渡に対して緩やかなためであり（IHX 2次側入口温度（図3.5.1-7）参照）、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであることによる。

e. 温度差への影響

1/3縮尺とした場合でも、温度差の変化はわずかであり、共に実証炉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、配管及びプレナム1/3縮尺条件、配管のみ1/3縮尺条件、プレナムのみ1/3縮尺条件、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次系及び2次系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3.5.2-5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入口温度を示す。

図3.5.2-10に、SG出口温度を示す。

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。

図3.5.2-16に、2次系流量を示す。

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

配管及びプレナム1/3縮尺条件、配管のみ1/3縮尺条件、プレナムのみ1/3縮尺条件及び基本設計結果を比較し、1次系配管及び1次系プレナム容量を縮小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3.5.2-15(2/2)）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縮尺条件とした場合でも流量は基本設計からほとんど改善されず、各条件とも実証炉に比べ1000～2600秒で流量が過大となっている。実証炉との相違は、2次系の影響によるものである。

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縮尺条件とした場合でも流量は基本設計からほとんど改善されず、各条件とも実証炉とは一致していない。実証炉との相違は、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであること等の影響により生じており、特に1000～2400秒において流量が過大となっている。

c. 時間遅れへの影響

原子炉容器入口温度（図3.5.2-1）低下の開始時刻（実証炉：約300秒、1/3縮尺条件：約300）及び温度上昇の開始時刻（実証炉：約900秒、1/3縮尺条件：約1600）は、1/3縮尺条件とすることにより実証炉に近づいているが一致はしない。実証炉との相違は、2次系熱過渡が実証炉熱過渡に対して大きく遅れるため

であり（IHX 2次側入口温度（図3.5.2-7）参照）、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであること等によるものである。

炉心出口温度（図3.5.2-4）における1000秒以降のピークについては、実証炉に比べて大きく遅れているが、これは1次系流量が1000～2400秒にかけて実証炉より過大となっているためである。

その他の時間遅れについては、1/3縮尺条件とした場合でも基本設計からほとんど改善されず、実証炉からは大きく遅れている。

d. 温度勾配への影響

試験体の炉心入口温度（図3.5.2-3）は、定格運転状態においてNa加熱器から炉心までの間に高温ナトリウムが存在するため、熱過渡開始直後535℃から395℃に低下する熱過渡が生じる。解析結果を見ると、1次系コールドレグ配管長を縮小しただけでは温度勾配はほとんど変化しないが、1次系プレナム容量を縮小した場合、温度勾配が急となり、実証炉の温度条件である395℃に早く到達してゐる。

その他の温度勾配については、1/3縮尺条件とした場合でも基本設計からほとんど改善されず、実証炉熱過渡より緩やかである。実証炉との相違は、2次系熱過渡が実証炉熱過渡に対して緩やかなためであり（IHX 2次側入口温度（図3.5.2-7）参照）、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであることによる。

e. 温度差への影響

定格運転状態においてNa加熱器から炉心までの間に存在する高温ナトリウムの影響により、試験体の原子炉容器出口温度（図3.5.2-2）は実証炉では発生しない温度上昇（0秒～約300秒）を生じる。プレナム容量を1/3縮尺とすることにより上記高温ナトリウム量が減少し、温度上昇幅が縮小して実証炉熱過渡に近づく。

その他の温度差については、1/3縮尺条件とした場合でも基本設計からほとんど改善されない。

3.6 まとめ

1次系コールドレグ配管長、1次系プレナム容量及び1次系コールドレグ配管圧損をパラメータとし、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

1次系コールドレグ配管及び1次系プレナム容量を1/3縮尺条件に縮小した場合でも熱過渡は基本設計からほとんど改善されず、実証炉とは大きな相違がある。

従って、手動トリップ熱過渡模擬試験に対しては、1次系コールドレグ配管及び1次系プレナム容量縮小による熱過渡改善の効果は小さいと言える。

(2) 自然循環試験について

1次系コールドレグ配管及び1次系プレナム容量を1/3縮尺条件に縮小した場合、原子炉容器入口温度の時間遅れが改善されるが2次系の影響により実証炉とは一致しない。また、Na加熱器から炉心までの間に存在する高温ナトリウムの量が減少することにより、実証炉では発生しない原子炉容器出口温度の初期上昇が緩和される。その他の熱過渡については基本設計からほとんど改善されない。

従って、自然循環試験に対しては、1次系コールドレグ配管及び1次系プレナム容量縮小によりNa加熱器から炉心までの間に存在する高温ナトリウムの量が減少し、実証炉では発生しない熱過渡が緩和される効果が現れる。この熱過渡の緩和には、RV下部プレナム容量の縮小が最も効果的である。

以上より、試験装置の設計方針の提案を以下に示す。

- ・ 1次系コールドレグ配管の縮小は熱過渡改善の効果が小さく、構造上可能な範囲に止めるべきである。
- ・ 1次系プレナム容量の縮小、特にRV下部プレナム容量の縮小は、Na加熱器から炉心までの間に存在する高温ナトリウムの影響による熱過渡を緩和する効果が有るため、1次系プレナム容量を縮小して1/3縮尺条件とすべきである。

4. DRACS系Eu数が動特性に与える影響

DRACS系のEu数（圧損係数）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、熱過渡に与える影響を把握する。そして、DRACS系の圧損係数調節の必要性等、試験装置の設計方針を検討する。

4.1 解析対象熱過渡

解析はDRACS系の自然循環除熱が行われる自然循環試験（全電源喪失模擬試験）を対象とする。

4.2 解析パラメータ

(1) 基本方針

解析パラメータは基本的にDRACS 1次系、2次系及び空気系のEu数とする。Eu数の変更は、各系統の圧損係数を調節することにより行う。以下に変更項目を示す。

- ・ DRACS 1次系圧損係数
- ・ DRACS 2次系圧損係数
- ・ DRACS空気系圧損係数

(2) 相似則

Eu数に関する相似則を以下に示す。

ここで、()は「試験体／実証炉」を示す。

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、温度成層化を特徴づけるRi数を一致させるには流速の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DHXと空気冷却器の伝熱中心差により発生する駆動力と一致する。

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

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

ΔP : 圧力損失

ξ : 圧力損失係数

ρ : 密度

v : 流速

L_H : DHXと空気冷却器の伝熱中心差

①式を代入して

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

従って、縮尺比 $(L)=(L_H)=1/3$ の場合、 $(\xi)=1$ となる。すなわち、相似条件を満足するためには試験体のEu数を実証炉と一致させる必要がある。試験体のEu数を実証炉と一致させた場合、 $(v)^2=(L)$ の相似流量条件における試験体の圧力損失は実証炉の1/3となる。

(3) 設定値

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。

基本設計における試験装置の圧力損失及び流量を表4.2-1に示す。

1/3縮尺条件においては、下式により圧力損失値を設定する。

$$\Delta P_M = \Delta P_P \times 1/3$$

ここで、 ΔP_M : 試験装置圧力損失

ΔP_P : 実証炉圧力損失

ここで、表4.2-1の流量は、DRACS系の定格運転時の交換熱量0.9MWに対応した値であるが、相似則を厳密に適用した場合、交換熱量及び流量は以下となる。

$$\text{交換熱量} : 11\text{MW} \times 1/3^{2.5} \times 4/3 = 0.941\text{MW}$$

$$1 \text{ 次系流量} : 39.7\text{kg/sec} \times 1/3^{2.5} \times 4/3 = 3.40\text{kg/sec}$$

$$2 \text{ 次系流量} : 45.9\text{kg/sec} \times 1/3^{2.5} \times 4/3 = 3.93\text{kg/sec}$$

$$\text{空気流量} : 59.7\text{kg/sec} \times 1/3^{2.5} \times 4/3 = 5.11\text{kg/sec}$$

上記式で算出される圧力損失値 ΔP_M は相似則を厳密に適用した場合であるため、定格運転時の圧力損失値を下式により補正して算出する。

$$\text{ナトリウム系} : \Delta P_M(\text{補正後}) = \Delta P_M \times (0.9\text{MW}/0.941\text{MW})^{1.9}$$

$$\text{空気系} : \Delta P_M(\text{補正後}) = \Delta P_M \times (0.9\text{MW}/0.941\text{MW})^{2.0}$$

表4.2-2に圧力損失値の設定値を示す。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。

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」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、4.2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。

4.5 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。

DRACS系Eu数をパラメータとしているため、まずDRACS系について示す。

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

図4.5-1に、DRACS 1次系流量を示す。

図4.5-2に、DRACS 2次系流量を示す。

図4.5-3に、DRACS空気系流量を示す。

図4.5-4に、DHX 1次側出入口温度を示す。

図4.5-5に、DHX 2次側出入口温度を示す。

図4.5-6に、空気冷却器 2次Na出入口温度を示す。

図4.5-7に、空気冷却器空気出入口温度を示す。

次に、主冷却系について示す。ただし、2次Naの挙動はDRACS系Eu数を変化させてもほぼ同じであるため、SG以降は省略する。

図4.5-8に、1次主冷却系流量を示す。

図4.5-9に、2次主冷却系流量を示す。

図4.5-10に、原子炉容器入口温度を示す。

図4.5-11に、原子炉容器出口温度を示す。

図4.5-12に、炉心入口温度を示す。

図4.5-13に、炉心出口温度を示す。

1次系及び2次系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4.5-14に、IHX 1次側入口温度を示す。

図4.5-15に、IHX 1次側出口温度を示す。

図4.5-16に、IHX 2次側入口温度を示す。

図4.5-17に、IHX 2次側出口温度を示す。

(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、DRACS系Eu数を増加させた場合の熱過渡の模擬性への影響について考察する。

a. DRACS 1次系流量

DRACS 1次系流量（図4.5-1）は、1/3縮尺条件とすることにより実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。しかし、初期の流量の立ち上がりが実証炉に比べて遅くなる。これは、後述するDRACS 2次系流量の立ち上がりが遅いことによるものである。

b. DRACS 2次系流量

DRACS 2次系流量（図4.5-2）は、1/3縮尺条件とすることにより実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

なお、試験装置では初期の流量の立ち上がりが実証炉に比べて遅い。これは、空気冷却器 2次Na出口温度（図4.5-6）の初期の低下が実証炉に比べて遅く、自然循環力の立ち上がりが遅いためである。これは、空気冷却器の伝熱管直径が実証炉と同等であるため、熱容量が相対的に大きいことによる。

c. 空気冷却器空気系流量

空気冷却器空気系流量（図4.5-3）は、1/3縮尺条件とすることにより実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

d. DHX 1次側出入口温度

DHX 1次側出入口温度（図4.5-4）は、1/3縮尺条件とすることにより、約3000秒以降の比較的安定した状態において実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

ただし、初期の入口温度上昇（約300秒～約1000秒）は、原子炉容器上部プレナム温度（原子炉容器出口温度（図4.5-11）参照）の影響により1/3縮尺条件の方が大きくなっている。

また、初期の出口温度降下（約200秒～約600秒）は、DRACS 2次系流量（図4.5-2）低下の影響により、1/3縮尺条件の方が遅くなっている。

e. DHX 2 次側出入口温度

DHX 2 次側出入口温度 (図4.5-5) は、1/3縮尺条件とすることにより、約3000秒以降の比較的安定した状態において実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

ただし、初期の出口温度上昇 (約300秒～約1000秒) は、原子炉容器上部プレナム温度 (原子炉容器出口温度 (図4.5-11) 参照) の影響により1/3縮尺条件の方が大きくなっている。

また、初期の入口温度降下 (約200秒～約600秒) は、DRACS 2 次系流量 (図4.5-2) 低下の影響により、1/3縮尺条件の方が遅くなっている。

f. 空気冷却器 2 次Na出入口温度

空気冷却器 2 次Na出入口温度 (図4.5-6) は、DHX 2 次側出入口温度 (図4.5-5) と同様である。

なお、初期の入口温度上昇 (約300秒～約1000秒) は、DRACS 2 次系流量 (図4.5-2) 低下の影響により、1/3縮尺条件の方が遅くなっている。

g. 空気冷却器空気出入口温度

空気冷却器空気出入口温度 (図4.5-7) は、1/3縮尺条件とすることにより実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

h. 1 次主冷却系流量及び 2 次主冷却系流量

1 次主冷却系流量 (図4.5-8) 及び 2 次主冷却系流量 (図4.5-9) は、各条件ともほぼ同じである。

i. 原子炉容器出口温度

原子炉容器出口温度 (図4.5-11) は、1/3縮尺条件とすることにより、約2000秒以降の比較的安定した状態において実証炉解析結果に近づき、模擬性が向上している。

ただし、原子炉容器入口側の高温Naの影響による初期の温度上昇 (約300秒～約1000秒) は1/3縮尺条件の方が大きくなっている。これは、DRACS系のEu数を一致させたため初期流量の立ち上がりが遅くなり、除熱量が低下したことによる。

j. 2 次主冷却系温度

IHX 2 次側入口温度 (図4.5-16) 及びIHX 2 次側出口温度 (図4.5-17) は、各条

件ともほぼ同じである。

4.6 まとめ

DRACS系のEu数（圧損係数）をパラメータとした自然循環試験解析を実施した結果、Eu数を実証炉の1/3縮尺条件（実証炉と一致）とすることにより約2000秒以降の比較的安定した状態において模擬性が向上することが確認された。ただし、空気冷却器の伝熱管直径が実証炉と同等であることにより熱容量が大きくなり、初期流量の立ち上がりが遅くなっているため、空気冷却器の伝熱性能確証が可能な範囲で伝熱管寸法の縮小を図ることが望ましい。

以上より、試験装置の設計方針の提案を以下に示す。

- ・ DRACS系の模擬性を向上させるため、弁及びダンパーによりDRACS系のEu数を調節して1/3縮尺条件（実証炉と一致）とすべきである。
- ・ 空気冷却器の伝熱性能確証が可能な範囲で伝熱管寸法の縮小を図ることが望ましい。

5. ΔT を1/3とした場合の熱過渡模擬性

1次系のホットレグとコールドレグの温度差 (ΔT) を1/3とした場合の相似則に基づいた熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討する。ここで、系統切り替えの影響を排除するため初期状態からNa加熱器バイパスを使用し、炉心ヒータのみの加熱とする。また、2次系は空気冷却器による除熱とする。

5.1 解析対象熱過渡

解析は系統切り替えの影響が強く現れる自然循環試験（全電源喪失模擬試験）を対象とする。

5.2 解析条件

5.2.1 基本方針

ΔT を1/3とした試験は、原則として基本設計結果に基づいた試験装置で実施し、試験装置の改造は行わないものとする。

温度条件は、1次系の模擬性を重視する観点から、1次系のホットレグとコールドレグの温度差が1/3になると共に1次系平均温度が実証炉と一致する様に設定する。2次系初期温度は以下の2ケースの設定方法を考える。

- ・ 2次系のホットレグとコールドレグの温度差を1/3とする。
- ・ 1次系と2次系の温度差を1/3とする観点から、1次系平均温度と2次系コールドレグ温度の温度差が1/3となるように2次系流量を調節する。

流量条件は、炉心ヒータ出力及び2次系空気冷却器除熱能力が5MWであることに基づいて設定する。

ポンプフローコストダウンは、実証炉熱過渡の流量が試験装置の初期条件に低下した時点でポンプをトリップすることとする。炉心ヒータ出力は、実証炉熱過渡の1次系流量が初期条件に低下するまでの間、炉心出力/1次系流量比が実証炉熱過渡と一致するように制御する。

また、2次系温度及び流量を境界条件と考え、IHX 2次側入口温度及び2次系流量を実証炉の相似条件にフィッティングさせたケースの解析も実施する。

5.2.2 ΔT を1/3とした場合の相似則

(1) 相似則

相似則として、温度成層化を特徴づけるRi数を一致させる必要がある。

以降、()は「試験体/実証炉」を示す。

$$(Ri) = \left(\frac{g\beta\Delta T L}{\nu^2} \right) = \frac{(\Delta T)(L)}{(\nu)^2} = 1$$

$$(\Delta T) = \frac{1}{n} \quad \text{及び} \quad (L) = \frac{1}{n} \quad \text{より、}$$

$$(v) = \frac{1}{n}$$

ここで、Ri : Ri数

g : 重力加速度

β : 体膨張係数

ΔT : 温度差

L : 代表長さ

v : 流速

n : 縮尺率

また、Ri数相似を採用するので、Eu数も一致させる。

1 ループ当たりの交換熱量は以下となる。

$$(Q)_{loop} = (\rho A v \Delta T C_p) = (A)(v)(\Delta T) = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n^4}$$

ここで、Q : 交換熱量

A : 流路断面積

C_p : 比熱

添字 loop : 1 ループ当たり

全体の交換熱量は以下となる。

$$(Q)_{all} = \frac{1}{n^4} \cdot \frac{2}{3}$$

ここで、添字 all : 全ループ

DRACS系 1 ループ当たりの交換熱量は、実証炉 4 ループの 2/3 を 2 ループで模擬しているため以下となる

$$(Q)_{DRACSloop} = \frac{1}{n^4} \cdot 4 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{n^4} \cdot \frac{4}{3}$$

ここで、添字 DRACSloop : DRACS系 1 ループ当たり

DRACS系全体の交換熱量は以下となる

$$(Q)_{DRACSall} = \frac{1}{n^4} \cdot \frac{2}{3}$$

ここで、添字 DRACSall : DRACS系全体

また、試験における時間スケールは以下となる。

$$(t) = \left(\frac{L}{v}\right) = \frac{\frac{1}{n}}{\frac{1}{n}} = 1$$

ここで、t : 時間

すなわち、試験体の時間スケールは実証炉と一致する。

(2) 相似則に基づく定格運転条件

相似則に基づく定格運転条件を表5.2.2-1に示す。

5.2.3 試験装置の制限を考慮した場合の初期条件

(1) 初期温度条件

初期温度条件は、以下の2ケースとする。

- a. 2次系のホットレグとコールドレグの温度差を1/3とし、1次系/2次系流量比を同じとした条件（2次系流量相似）
 - ・ 1次系のホットレグとコールドレグの温度差を1/3とし、平均温度を実証炉と同じ472.5℃とする。
 - ・ 2次系はホットレグとコールドレグの温度差を1/3とし、1次系/2次系流量比を同じとする。ただし、温度の絶対値はIHX伝熱性能により成り行きで決定される。IHXが交換熱量27MWtで設計されているにもかかわらず初期条件の交換熱量が5MWtであるため、2次系温度は1次系温度に近づく。
 - ・ 空気系温度及び流量は2次系温度が要求値となるように成り行きで決定される。
- b. 1次系平均温度と2次系コールドレグ温度の温度差を1/3とした条件（2次系コールドレグ温度相似）
 - ・ 1次系のホットレグとコールドレグの温度差を1/3とし、平均温度を実証炉と同じ472.5℃とする。
 - ・ 2次系コールドレグ温度は1次系平均温度との温度差が1/3となるように2次系流量をポンプ回転数により制御する。2次系ホットレグ温度はIHX伝熱性能により成り行きで決定される。IHXが交換熱量27MWtで設計されているにもかかわらず初期条件の交換熱量が5MWtであるため、2次系ホットレグ温度は1次系ホットレグ温度に近づき、2次系流量は減少する。
 - ・ 空気系温度及び流量は2次系温度が要求値となるように成り行きで決定される。

(2) 初期流量条件

ΔT 1/3試験は、炉心ヒータの出力のみで実施し、Na加熱器は使用しない。従って、初期条件の出力は5MWとなる。

試験装置出力及び温度条件に基づく初期条件を表5.2.3-1に示す。

5.2.4 過渡時の条件

過渡時の条件は、2次系の運用に関して3ケースとする。(表5.2.5-1参照)

(1) 炉心ヒータ出力及び1次系流量

炉心ヒータ出力が5MW(相似則の37.9%)であるため、初期出力及び1次系流量は相似則により定まる値の37.9%となっている。熱過渡直後、炉心ヒータ出力の低下率は流量の低下率より大きいいため、1次系流量が37.9%に低下するまでは1次系流量を37.9%で一定とし、炉心出力/1次系流量が実証炉条件と一致するように炉心ヒータ出力を設定する。実証炉熱過渡の1次系流量が37.9%となった時点で1次系ポンプをトリップし、以降はコストダウン及び自然循環力による流量を計算すると共に、炉心ヒータ出力(%)は実証炉条件と同一とする。

過渡時の炉心ヒータ出力及び1次系流量を図5.2.4-1に示す。

(2) 2次系流量

2次系流量は、2次系流量相似条件及び2次系コールドレグ温度相似条件ともに実証炉熱過渡の2次系流量(%)が初期条件と一致した時点で2次系ポンプをトリップし、フローコストダウンを計算する。

また、2次系温度及び流量を境界条件と考え、2次系ポンプ、2次系流調弁及び2次系空気冷却器を用いた制御により実証炉の相似条件に近づけることを想定し、IHX 2次側入口温度及び2次系流量を実証炉の相似条件にフィッティングさせたケースの解析も実施する。初期条件は2次系コールドレグ温度相似の条件とする。

過渡時の2次系流量を図5.2.4-2に示す。

(3) 2次系空気冷却器空気流量

(2)項に示すとおり、2次系流量は熱過渡初期に初期条件で維持される。この状態で空気流量を低下させた場合、2次ナトリウムと空気の流量バランスが大きくなる。そこで、2次系ナトリウム流量の低下開始時点から送風機を停止させダンパを閉とする。空気流量は10秒で0となるものとし、線形に変化させる。

(4) DRACS系空気冷却器空気流量

DRACS系空気冷却器においては、2次系Naと空気との温度差が実証炉と同等であるため、ダンパを全開にした場合、除熱量が過大となる。従って、DRACS系の除熱量が実証炉の解析結果の相似条件に近づくようにダンパ開度を調節する必要がある。ここでは、約2000秒以降の比較的安定した条件での除熱量が、実証炉の解析結果の相似条件に近づくようにダンパ開度を設定し、過渡開始後、全閉から設計開

度に移行する。

ここで、DRACS 2次系のEu数は弁による調節が行われるものとし、実証炉の1/3縮尺条件（実証炉と一致）とする。

5.2.5 解析ケース

Δ T 1/3条件における解析ケースをまとめて表5.2.5-1に示す。

5.3 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」を使用する。

5.4 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を使用する。ただし、DRACS 2次系のEu数は弁による調節が行われるものとし、実証炉の1/3縮尺条件（実証炉と一致）とする。

5.5 解析結果

(1) 解析結果

解析結果は、原則として、2次系フィッティング条件、2次系コールドレグ温度相似条件、2次系流量相似条件、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、5.2.2(1)項に示すとおり、Δ T 1/3試験と実証炉で一致するため、基本設計の方をΔ T 1/3試験及び実証炉に合わせて、 $\sqrt{3}$ 倍している。温度スケールは、472.5℃（1次系ホットレグとコールドレグの平均温度）を一致させ、Δ T 1/3試験の方を3倍している。

図5.5-1に、原子炉容器入口温度を示す。

図5.5-2に、原子炉容器出口温度を示す。

図5.5-3に、炉心入口温度を示す。

図5.5-4に、炉心出口温度を示す。

2次系コールドレグ温度相似条件及び2次系流量相似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、2次系フィッティング条件、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5.5-5に、IHX 1次側入口温度を示す。

図5.5-6に、IHX 1次側出口温度を示す。

図5.5-7に、IHX 2次側入口温度を示す。

図5.5-8に、IHX 2次側出口温度を示す。

図5.5-9に、空気冷却器またはSG入口温度を示す。

図5.5-10に、空気冷却器またはSG出口温度を示す。

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5.5-11に、DHX 1次側入口温度を示す。

図5.5-12に、DHX 1次側出口温度を示す。

図5.5-13に、DHX 2次側入口温度を示す。

図5.5-14に、DHX 2次側出口温度を示す。

2次系コールドレグ温度相似条件及び2次系流量相似条件ではループ間に差異が生じたため、流量をA Bループについて示す。一方、2次系フィッティング条件、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5.5-15に、1次系流量を示す。

図5.5-16に、2次系流量を示す。

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5.5-17に、DRACS 1次系流量を示す。

図5.5-18に、DRACS 2次系流量を示す。

図5.5-19に、DRACS空気系流量を示す。

図5.5-20に、IHX伝熱部 1次側Na軸方向温度分布を示す。

(2) 考察

2次系フィッティング条件、2次系コールドレグ温度相似条件、2次系流量相似条件及び基本設計を比較し、 ΔT を1/3とした場合の熱過渡の模擬性について考察する。

a. 1次系流量 (図5.5-15)

1次系流量 (図5.5-15(2/2)) 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。

ΔT 1/3条件では、フローコストダウンは基本設計とほぼ一致し、実証炉より遅れている。

約200秒以降の自然循環流量は基本設計より減少している。これは、 ΔT を1/3としたことによりIHXの伝熱性能が過剰となり、IHX伝熱部の1次系温度分布 (図5.5-20) が基本設計より高温側になるため、炉心との伝熱中心差が減少した

ことによる。IHX 2次側入口温度及び流量を実証炉熱過渡にフィッティングさせた2次系フィッティング条件においても、1次系流量は基本設計より減少しており、2次系条件を一致させた場合でもIHXの伝熱性能が過剰となっている影響が現れている。

約1800秒以降、2次系C/L温度相似条件及び2次系流量相似条件においてA、Bループ間で差異が生じている。これは、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することにより自然循環力が増加するため、ループ間流量のアンバランスが拡大することによる。2次系C/L温度相似条件の場合、約1800秒からBループのIHX容器1次側出口温度（図5.5-6）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5.5-15(2/2)）は約1800秒から約3500秒の間Bループ流量>Aループ流量である。一方、約3500秒以降はAループのIHX容器1次側出口温度（図5.5-6）の上昇が顕著となり、Aループの自然循環力が増加し、1次系流量（図5.5-15(2/2)）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。

b. 2次系流量（図5.5-16）

2次系流量（図5.5-16(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。

ΔT 1/3条件では、フローコストダウンは基本設計とほぼ一致し、実証炉より遅れている。

2次系C/L温度相似条件及び2次系流量相似条件では、2次系流量の停止が早い。これは、2次系空気冷却器の熱容量がSGに比べて小さいため、空気冷却器出口温度（図5.5-10）の上昇が著しく早く、2次系自然循環力の低下が早いことによる。なお、2次系フィッティング条件では、流量及び温度の制御を想定し、実証炉熱過渡に一致させている。

約3800秒以降、2次系C/L温度相似条件及び2次系流量相似条件においてループ間で流量の相違が生じているが、これは1次系ループ間の流量の相違の影響による。

c. 原子炉容器入口温度（図5.5-1）

各条件とも実証炉から大きく遅れている。これは、1次系コールドレグ配管長が1/3縮尺条件より長いためである。

d. 原子炉容器出口温度（図5.5-2）

0秒から約800秒の間実証炉温度を下回っている。これは、1次系流量（図5.5-

15) のコストダウンが実証炉より遅いためである。なお、基本設計においても 1 次系流量 (図5.5-15) のコストダウンが実証炉より遅いが、炉心上流側に高温ナトリウムが存在するため、実証炉温度を上回っている。

約800秒以降は実証炉温度を上回っている。これは、約200秒以降の 1 次系流量 (図5.5-15) が実証炉を下回っていること、及び 2 次系流量 (図5.5-16) の低下が実証炉より早いことによる。

e. 炉心入口温度 (図5.5-3)

各条件とも実証炉から大きく遅れている。これは、1 次系コールドレグ配管長及びRV下部プレナム容量が1/3条件より大きいことによる。

基本設計では炉心の上流側に存在する高温ナトリウムの影響を受け、熱過渡初期535℃から395℃まで温度が低下するが、 ΔT 1/3条件では高温ナトリウムが存在しないため挙動はおおむね実証炉を模擬できている。

f. 炉心出口温度 (図5.5-4)

0 秒から約200秒の間温度低下を生じるが、温度は実証炉を下回っている。これは、2 次系流量 (図5.5-16) のフローコストダウンが実証炉より遅れているためである。

約200秒以降は実証炉を上回っている。これは、約200秒以降の 1 次系流量 (図5.5-15) が実証炉を下回っていること、及び 2 次系流量 (図5.5-16) の低下が実証炉より早いことによる。

基本設計では炉心の上流側に存在する高温ナトリウムの影響を受け、熱過渡初期の温度低下が発生しないが、 ΔT 1/3条件では高温ナトリウムが存在しないため挙動はおおむね実証炉を模擬できている。

g. IHX 1 次側出口温度 (図5.5-6)

0 秒から約1200秒の間の温度低下幅は実証炉より小さい。これは、約200秒以降の 1 次系流量 (図5.5-15) が実証炉を下回っていること、及びIHX下部プレナム容量が1/3縮尺条件より大きいことによる。

約1200秒以降の温度上昇は、実証炉よりやや遅れている。これは、IHX下部プレナム容量が1/3縮尺条件より大きいことによる。

h. IHX 2 次側入口温度 (図5.5-7)

約800秒以降の温度上昇は、実証炉より早い時点から始まっている。これは、2 次系空気冷却器の熱容量がSGに比べて小さいため、空気冷却器出口温度 (図

5.5-10) の上昇が実証炉より早いためである

なお、2次系流量相似条件の初期温度はIHXの伝熱性能が過剰であるため、相似条件を上回っている。

i. 空気冷却器またはSG出口温度 (図5.5-10)

熱過渡初期の温度上昇は、実証炉より著しく早い時点から始まっている。これは、2次系空気冷却器の熱容量がSGに比べて小さいためである

j. DRACS系温度及び流量 (図5.5-11~14、図5.5-17~19)

初期条件では空気系ダンパが全閉となっているため、空気系の自然循環力を調節することができず、実証炉より流量及び温度差が大きくなっている。

熱過渡初期の温度挙動は1次系の影響により実証炉と異なるが、約2000秒以降の比較的安定した自然循環除熱条件においては、実証炉とほぼ同等の除熱量となっている。

5.6 まとめ

1次系のホットレグとコールドレグの温度差 (ΔT) を1/3とした場合の相似則に基づいた熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討した結果、以下の知見を得た。

- ・ 炉心上流側に高温ナトリウムが存在しないため、炉心出入口温度、原子炉容器出口温度等の熱過渡初期の挙動はおおむね実証炉を模擬できている。
- ・ IHXの伝熱性能が過剰となり、IHX伝熱部の1次系温度分布が基本設計より高温側になるため、炉心との伝熱中心差が減少し、1次系の自然循環流量は基本設計より減少する。
- ・ 2次系空気冷却器の熱容量がSGに比べて小さいため、空気冷却器出口温度の上昇が著しく早く、2次系自然循環力の低下が早いため、2次系流量の停止が実証炉より早い。
- ・ 1次系流量のコストダウンが実証炉より遅いため、熱過渡初期において1次系ホットレグ温度が実証炉温度を下回っている。

以上より、 ΔT 1/3条件で試験を行った場合、熱交換器の特性が相似則に一致していないこと及びポンプコストダウンが遅いこと等の影響により、長時間の過渡においては基本設計以上に実証炉熱過渡との相違を生じると考えられる。一方、炉心上流側に高温ナトリウムが存在しないため、基本設計では模擬できなかった炉心出入口温度、原子炉容器出口温度等の熱過渡初期の挙動について、おおむね実証炉を模擬でき

ている。従って、 $\Delta T 1/3$ 条件での試験を行うことにより、炉心出入口温度、原子炉容器出口温度等の熱過渡初期の挙動について基本設計での試験を補完するデータの取得が期待される。

6. 1次系ポンプ軸固着模擬試験の熱過渡模擬性

非対称事象である1次系ポンプB軸固着試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討する。実証炉は3ループ中1ループの軸固着を想定しているが、試験装置では2ループ中1ループのポンプ停止（逆流）となる。また、試験装置では瞬時の軸固着を模擬することは不可能であり、回転の拘束も行わない計画のため、1ループ停止（回転フリー）となる。

6.1 解析対象熱過渡

解析対象は非対称試験として計画されている試験の内、1次系ループ間で非対称となる1次系ポンプB軸固着試験とする。

6.2 解析条件

(1) 試験モード及びシーケンス

1次系ポンプB軸固着試験の試験モードを図6.2-1に示す。また、シーケンスを図6.2-2に示す。1次系ポンプB軸固着試験では、1次主ポンプBをトリップさせて軸固着を模擬した後、崩壊熱炉心出力、1次主循環ポンプA15%運転、2次主循環ポンプ4%運転（2次系Aループ8%運転）及び2次系Bループ停止となる。

(2) 弁操作時間

Na加熱器バイパス弁、Na加熱器止弁及びIHXB入口弁の切り替え操作を図6.2-3に示す。

実証炉の2次系事故ループは、2次系ポンプトリップの後自然循環となるが、本試験装置では2次系が2ループから1ループへ合流しておりBループのみの自然循環が模擬できないため、試験では2次系ポンプのフローコストダウンが終了した時点からIHXB入口弁の閉操作を行う。

(3) 1次主循環ポンプA最低回転数

1次主循環ポンプA最低回転数は手動トリップと同一とする。ただし、Bループが逆流するためAループ流量は15%より増加する。

(4) 2次主循環ポンプ最低回転数

2次主循環ポンプ最低回転数は、2次系流量が4%となるように調節する。BループはIHXB入口弁閉により流量0となっているため、2次系Aループの流量は8%となる。ただし、熱過渡初期等、自然循環力が強い条件では、流量は上記値より増加する場合がある。

(5) SG入口給水流量

給水流量は、再循環流量を手動トリップの1/2の12.5%とし、再循環流量まで手動トリップと同じ40秒で低下させるものとする。SG入口給水流量を図6.2-4に示す。

(6) 1次系ポンプB条件

1次系ポンプBは事故ループを模擬するため、ポンプ停止とする。1次系ポンプには固定装置等が設けられていないため、逆流が発生した場合、1次系ポンプは逆回転すると考えられるが、逆回転時のポンプ圧損特性は設定されていない。

そこで、以下の2ケースの条件で解析を実施する。

a. 試験体ポンプ回転停止条件

1次系ポンプ軸固着に比較的近い条件として、フローコストダウンの後ポンプが低回転になった時点でポンプの回転を強制的に停止させる装置を設置した条件を想定する。

試験体のポンプ回転停止時の抵抗係数が設定されていないため、ここでは、実証炉と同じとする。

1次系ポンプのフローコストダウンの後、ループ間の流量の差異が拡大し始める時点で、ポンプ回転を停止する条件とする。

b. 試験体ポンプ抵抗無し条件

逆流発生時に1次系ポンプは逆回転すると考えられるが、逆回転時のポンプ圧損特性は設定されていないため、逆流時のポンプの回転にともなう流動抵抗をゼロとする。

1次系ポンプのフローコストダウンの後、ループ間の流量の差異が拡大し始める時点で、ポンプの回転にともなう流動抵抗をゼロとする。

試験装置において、逆流時に1次系ポンプの逆回転が発生した場合は、上記a. 項とb. 項の間の条件になると考えられる。

6.3 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」を使用する。

6.4 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を使用する。

6.5 解析結果

(1) 解析結果

解析結果は、原則として、試験体ポンプ回転停止条件、試験体ポンプ抵抗無し条件及び実証炉の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6.5-1に、原子炉容器入口温度を示す。

試験体はBループが事故ループであるため、1次側の温度をABループについて示す。実証炉はCループが事故ループであるため、ACループについて示す。

図6.5-2に、原子炉容器出口温度を示す。

図6.5-3に、炉心入口温度を示す。

図6.5-4に、炉心出口温度を示す。

図6.5-5に、IHX 1次側入口温度を示す。

図6.5-6に、IHX 1次側出口温度を示す。

試験体は2次系Bループの弁を閉とするため、IHX 2次側の温度をAループのみについて示す。実証炉はCループが自然循環となるため、ACループについて示す。

図6.5-7に、IHX 2次側入口温度を示す。

図6.5-8に、IHX 2次側出口温度を示す。

実証炉は、試験体のSG回りの温度に対応するAループについて示す。

図6.5-9に、SG入口温度を示す。

図6.5-10に、SG出口温度を示す。

図6.5-11に、SG入口給水温度を示す。

図6.5-12に、SG出口蒸気温度を示す。

図6.5-13に、1次系流量を示す。

図6.5-14に、2次系流量を示す。

図6.5-15に、SG給水流量を示す。

(2) 考察

試験体ポンプ回転停止条件、試験体ポンプ抵抗無し条件及び実証炉を比較し、1次系ポンプB軸固着試験の熱過渡の模擬性について考察する。

a. 1次系流量 (図6.5-13)

実証炉においては、Cループに軸固着が発生した直後、事故ループ (Cループ) の吐出が瞬間的に無くなるためCループ流量が約-50%まで急速に減少し、健全ループ (A及びBループ) の流量は約120%まで上昇している。ただし、各ループ流量の合計となる炉心流量は単調に減少している。その後、健全ループのフローコーストダウンの後、ポニーモータ運転により健全ループは正流、事故ループは逆流となり、炉心部は約10%の正流が維持される。

一方、試験体においては瞬間的な軸固着を模擬することができないため、事故ループ (Bループ)、健全ループ (Aループ)、炉心部ともに同等のフローコーストダウンを生じる。その後、健全ループの流量が若干増加し、事故ループに逆流が発生し、炉心部は正流が維持される。なお、フローコーストダウンの後、事故ループと健全ループの流量の差異が拡大する部分の挙動が不自然であるが、これはポンプの特性式に簡易的な2次式を用いていることから事故ループにおいて特性式の切り替えが必要になるためである。今後、ポンプ設計の進捗にともない完全特性式を設定して解析に反映すれば挙動の不自然さは解消される。

ポンプ回転停止条件とポンプ抵抗無し条件を比較すると、ポンプ回転停止条件の方が実証炉に近づいている。ただし、実証炉と試験体ではループ数が異なるため、ポンプ回転停止条件においても実証炉と一致はしない。

また、軸固着直後の事故ループの急激な逆流 (約-50%) が模擬できず、ポンプのフローコーストダウン後も約15%の逆流に留まるため、この逆流により発生するIHX上部管板部コールドショックの温度勾配は実証炉より緩やかとなる。

b. 2次系流量 (図6.5-14)

実証炉においては、フローコーストダウンの後、事故ループ (Cループ) は自然循環流量に、健全ループ (A及びBループ) はポニーモータ流量になる。

一方、試験体においては、30秒以降2次系Bループの弁を閉めることによりBループを停止させ、Aループのみをポニーモータ流量としている。

c. 原子炉容器入口温度 (図6.5-1)

0秒から約1200秒の間、実証炉より高温となっている。これは、IHX 1次側出口温度 (図6.5-6) が高温となっているため、これは、除熱を行う健全ループが1ループであるため除熱力が実証炉より低いことによる。

d. 原子炉容器出口温度 (図6.5-2)

初期の温度低下の開始時点は実証炉より遅れている。これは、軸固着発生直後

の事故ループにおける逆流が模擬されていないため、事故ループ出口（逆流しているため炉容器に流れ込んでいる）の温度低下が遅れるためである。なお、ポンプ抵抗無し条件の方がポンプ回転停止条件より事故ループの逆流流量が多いため、初期の温度低下の開始時点が実証炉に近づいているが、1次系流量（図6.5-13）の絶対値はポンプ回転停止条件の方が実証炉により近い。

初期の温度低下幅（0秒～約600秒）は実証炉よりやや小さい。これは、IHX 1次側出口温度（図6.5-6）が高温となっているため、これは、除熱を行う健全ループが1ループであるため除熱力が実証炉より低いことによる。

e. 炉心入口温度（図6.5-3）

試験体では炉心の上流側に存在する高温ナトリウムの影響を受け、熱過渡初期に535℃から395℃まで温度が低下する。また、0秒から約1200秒の間、実証炉より高温となっている理由は、原子炉容器入口温度（図6.5-1）と同様である。

f. 炉心出口温度（図6.5-4）

試験体は実証炉より高温側となっている。これは、健全ループが1ループであるため炉心流量が実証炉より低いことによる。なお、ポンプ回転停止条件の方がポンプ抵抗無し条件より炉心流量が大きく実証炉に近いこと、温度も実証炉に近くなっている。

g. IHX 1次側入口温度（図6.5-5）

事故ループ（BまたはCループ）の温度低下の開始時刻（実証炉：0秒～、試験体：約100秒～）は、事故ループポンプのフローコストダウンの影響により約100秒遅れる。

h. IHX 1次側出口温度（図6.5-6）

0秒から約1200秒の間、実証炉より高温となっている。これは、除熱を行う健全ループが1ループであるため、除熱力が実証炉より低いことによる。

i. IHX 2次側入口温度（図6.5-7）

温度低下（実証炉：約50秒～約100秒、試験体：約300秒～約600秒）は実証炉より遅れている。これは、2次系配管長が1/3縮尺条件より長いことによる。また、温度上昇（実証炉：約600秒～約1200秒、試験体：約1800秒～約3600秒）も実証炉より遅れている。これは、SG入口給水温度（図6.5-11）の温度上昇（実証炉：約500秒～約1100秒、試験体：約1200秒～約2400秒）が遅いため、これ

は、SG及び再循環系が1/1縮尺の部分モデルであるため再循環流量の立ち上がりが遅いことによる。

6.6 まとめ

非対称事象である1次系ポンプB軸固着試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討した結果、以下の知見を得た。

- ・試験体では軸固着を模擬することができないため事故ループにもフローコストダウンが発生する。従って、軸固着直後の事故ループの急激な逆流（約-50%）が模擬できず、ポンプのフローコストダウン後も約15%の逆流に留まるため、この逆流により発生するIHX上部管板部コールドショックの温度勾配は実証炉より緩やかとなる。また、健全ループが1ループであるため、実証炉より炉心流量が低めとなり、この影響は温度変化にも現れている。これら構造上の相異により、熱過渡にも若干の相異が生じるものの、熱過渡全体の挙動は概ね実証炉と一致している。
- ・1次系流量及び炉心出入口温度については、試験体ポンプ回転停止条件の方が試験体ポンプ抵抗無し条件より実証炉に近づいている。しかし、その他の温度変化はほぼ同等であり、両者の差は比較的小さいと言える。試験体ポンプ抵抗無し条件はポンプの逆回転時の抵抗を0とした極端な条件であり、実際の試験体では試験体ポンプ回転停止条件に近づくことを考慮すれば、試験体ポンプの逆回転を強制的に停止させる効果は比較的小さいと言える。

以上より、1次系ポンプB軸固着試験においては、事故ループにもフローコストダウンが発生すること及び健全ループが1ループであることの影響は生じるものの、実証炉の熱過渡が概ね模擬できることが分かった。また、試験体ポンプ回転停止条件と試験体ポンプ抵抗無し条件の差は比較的小さいため、試験体ポンプの逆回転を強制的に停止させる装置の効果は小さいと考えられる。

7. 結論

原子炉冷却系総合試験施設の基本設計では、1次系配管コールドレグが1/3縮尺条件に比べて3倍程度長い設計になっていると共に、原子炉容器下部プレナム容量が1/3縮尺条件に比べて1.5倍程度大きい設計となっている。そのため、1次系配管コールドレグ及びプレナム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、1次系配管長及び1次系プレナム容量をパラメータとし、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た。また、基本設計ではDRACS系のEu数が1/3縮尺条件に比べて小さくなっているが、DRACS 2次系及び空気系のEu数を1/3縮尺条件と一致させた場合等の熱過渡模擬試験解析を実施し、その効果を把握した。また、相似則の考え方を見直し、1次系のホットレグとコールドレグの温度差 (ΔT) を1/3とし、実証炉には無いNa加熱器を用いない条件とした場合の相似則に基づいた熱過渡模擬試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討した。また、非対称事象である1次系ポンプB軸固着試験解析を実施し、熱過渡模擬性を検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) 1次系コールドレグ配管長、1次系プレナム容量が実機模擬性に与える影響

1次系コールドレグ配管長の縮小は熱過渡改善の効果が小さく、構造上可能な範囲に止めるべきである。一方、1次系プレナム容量の縮小、特にRV下部プレナム容量の縮小は、Na加熱器から炉心までの間に存在する高温ナトリウムの影響による熱過渡を緩和する効果があるため、1次系プレナム容量を縮小して1/3縮尺条件とすべきである。

(2) DRACS系のEu数が実機模擬性に与える影響

DRACS系の模擬性を向上させるため、弁及びダンパーによりDRACS系のEu数を調節して1/3縮尺条件とすべきである。また、初期流量の立ち上がりの模擬性を高めるため、空気冷却器の伝熱性能確証が可能な範囲で伝熱管寸法の縮小を図ることが望ましい。

(3) 1次系のホットレグとコールドレグの温度差 (ΔT) を1/3とした場合の実機模擬性

炉心上流側に高温ナトリウムが存在しないため、基本設計では模擬できなかった炉心出入口温度、原子炉容器出口温度等の熱過渡初期の挙動について、おおむね実証炉を模擬できており、炉心出入口温度、原子炉容器出口温度等の熱過渡初期の挙動について基本設計での試験を補完するデータの取得が期待される。

(4) 1次系ポンプB軸固着試験の実機模擬性

1次系ポンプB軸固着試験により、実証炉の熱過渡が概ね模擬できることが分かった。また、試験体ポンプ回転停止条件と試験体ポンプ抵抗無し条件の差は比較的小さいため、試験体ポンプの逆回転を強制的に停止させる装置の効果は小さいと考えられる。

謝辞

原子炉冷却系総合試験施設の検討に当たり、1次系プレナム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、本岡直人氏、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、システム技術開発部熱流体技術開発グループ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, 1997年10月
- [3] 渡辺取他、「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, 1997年10月
- [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, 1997年10月
- [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, 1997年10月
- [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-プレナム相互作用—」、日本原子力学会1997年秋の大会、G41, 1997年10月
- [7] 飯塚透他、「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—」PNC TN9410 98-083, 1998年7月
- [8] 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
1- 1	RV上部プレナム	MN	108000	4010	4230	1 ループ分
1- 2	H/L配管	LN(1)	10600	392	487	
1- 3	IHX上部プレナム混 合部	MN, LN	70500	2610	2620	
1- 4	IHX入口管板部プレ ナム	MN(7)	17000	630	962	
1- 5	IHX 1次側伝熱部	HX(5)	8300	307	613	
1- 6	IHX下部プレナム	MN(13)	59000	2190	3730	
1- 7	M/L配管	LN(7)	14750	546	615	
1- 8	1次ポンプ	MN(16)	19300	715	1100	
1- 9	C/L配管	LN	10000	372	1130	1 ループ分
1-10	RV下部プレナム	MN(55)	33700	1250	1940	1 ループ分
1-11						
1-12	1次系合計		351000	13000	17400	1 ループ分 炉心除く

表3.2-2 1次系コールドレグ配管長及び1次系プレナム容量パラメータ設定値

	コールドレグ 配管長	RV下部 プレナム容量	IHX下部 プレナム容量	備考
単位	m	kg	kg	
配管長 : 1/3縮尺条件 プレナム : 1/3縮尺条件	9.40	2500	2190	
配管長 : 基本設計 プレナム : 1/3縮尺条件	31.15	2500	2190	
配管長 : 1/3縮尺条件 プレナム : 基本設計	9.40	3880	3730	
配管長 : 基本設計 プレナム : 基本設計	31.15	3880	3730	

表3.2-3 1次系定格運転時配管圧力損失設定値

単位 : kg/m²

	ホットレグ 配管	ミドルレグ 配管	コールドレグ 配管	備考
実証炉	0.122	0.157	1.42	
1/3縮尺条件	0.03	0.04	0.31	実証炉 / 3 × 0.789 ^{1.8}
基本設計	0.03	0.04	0.79	

表4.2-1 基本設計におけるDRACS系の定格運転時圧力損失及び流量

		単位	DRACS 1 次系	DRACS 2 次系	DRACS空気系
実証炉	圧力損失	kg/m ²	80	4510	150
	流量	kg/sec	39.7	45.9	59.7
試験装置	圧力損失	kg/m ²	24.1	176	29
	流量	kg/sec	3.28	3.75	4.86

表4.2-2 DRACS系圧力損失パラメータ設定値

	単位	DRACS 1 次系	DRACS 2 次系	DRACS空気系	備 考
1/3縮尺条件	kg/m ²	24.5	1381	45.7	実証炉×1/3× (0.9/0.941) ^{1.9} or 2.0
中間条件	kg/m ²	24.3	779	37.4	
基本設計	kg/m ²	24.1	176	29	
流量	kg/sec	3.28	3.75	4.86	試験装置定格

表5.2.2-1 ΔT 1/3条件の相似則に基づく定格運転条件

項目		単位	実証炉	ΔT 1/3条件 試験体	相似則	
1次系温度	ホットレグ	℃	550	498.3	・ $\Delta T = 1/3$ ・ 平均温度一致	
	コールドレグ	℃	395	446.7		
2次系温度	ホットレグ	℃	520	488.3	・ $\Delta T = 1/3$ ・ 1次系平均温度 との差1/3	
	コールドレグ	℃	335	426.7		
交換熱量	全体	MW	1600	13.2	$1/3^4 \cdot 2/3$	
	ループ	MW	534	6.6	$1/3^4$	
1次系流量	全体	kg/sec	8158	202	$1/3^3 \cdot 2/3$	
	ループ	kg/sec	2719	101	$1/3^3$	
2次系流量	全体	kg/sec	6793	168	$1/3^3 \cdot 2/3$	
	ループ	kg/sec	2264	84	$1/3^3$	
D R A C S 系 設 計 条 件	1次系 温度	ホットレグ	℃	550	498.3	・ $\Delta T = 1/3$ ・ 1次系平均温度 との差1/3
		コールドレグ	℃	333	426	
	2次系 温度	ホットレグ	℃	472	472.3	・ $\Delta T = 1/3$ ・ 1次系平均温度 との差1/3
		コールドレグ	℃	285	410	
	交換 熱量	全体	MW	44	3.62	$1/3^4 \cdot 2/3$
		ループ	MW	11	1.81	$1/3^4 \cdot 4/3$
	1次系 流量	全体	kg/sec	159	3.92	$1/3^3 \cdot 2/3$
		ループ	kg/sec	39.7	1.96	$1/3^3 \cdot 4/3$
	2次系 流量	全体	kg/sec	184	4.54	$1/3^3 \cdot 2/3$
		ループ	kg/sec	45.9	2.27	$1/3^3 \cdot 4/3$

表5.2.3-1 試験装置の制限を考慮した初期条件

項目		単位	実証炉	2次系 流量相似	2次系C/L 温度相似	備考
1次系温度	ホットレグ	℃	550	498.3	498.3	ΔT = 1/3
	コールドレグ	℃	395	446.7	446.7	
2次系温度	ホットレグ	℃	520	約497	約497	
	コールドレグ	℃	335	約435.3	426.7	
交換熱量	全体	MW	1600	5	5	炉心出力 A/C除熱力
	ループ	MW	534	2.5	2.5	
1次系流量	全体	kg/sec	8158	76.6	76.6	
	ループ	kg/sec	2719	38.3	38.3	
2次系流量	全体	kg/sec	6793	63.6	約56.2	
	ループ	kg/sec	2264	31.8	約28.1	

注) ・約と記載のある数値は成り行きで設定される。

・DRACS系はダンパ全閉条件での漏れ空気による成り行きで設定される。

表5.2.5-1 ΔT 1/3条件での解析ケース

項目		単位	2次系流量相似	2次系C/L温度相似	2次系フィッティング	
初期条件	1次系温度	ホットレグ	℃	498.3	498.3	498.3
		コールドレグ	℃	446.7	446.7	446.7
	2次系温度	ホットレグ	℃	約497	約497	約497
		コールドレグ	℃	約435.3	426.7	426.7
	1次系流量	全体	kg/sec	76.6	76.6	76.6
		ループ	kg/sec	38.3	38.3	38.3
	2次系流量	全体	kg/sec	63.6	約56.2	約56.2
		ループ	kg/sec	31.8	約28.1	約28.1
過渡条件	炉心出力（実証炉1次系流量が初期条件に低下するまで）			炉心出力 / 1次系流量が実証炉条件と一致		
	1次系流量			実証炉1次系流量が初期条件に低下した時点からコストダウンを計算		
	2次系流量			実証炉2次系流量が初期条件に低下した時点からコストダウンを計算	実証炉にフィッティングさせる	
	2次系IHX入口温度			2次系空気冷却器を考慮し計算で求める		実証炉にフィッティングさせる

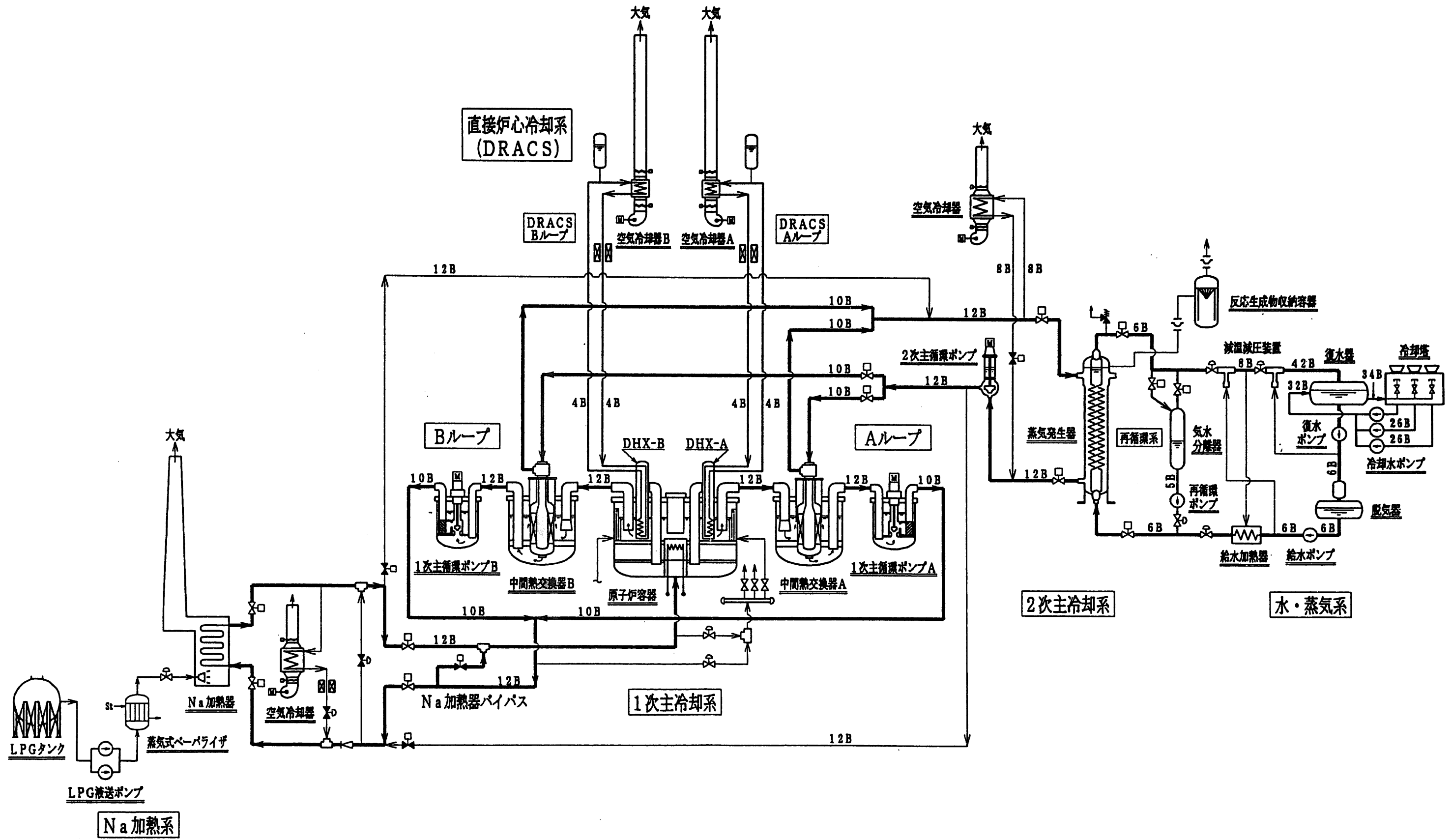
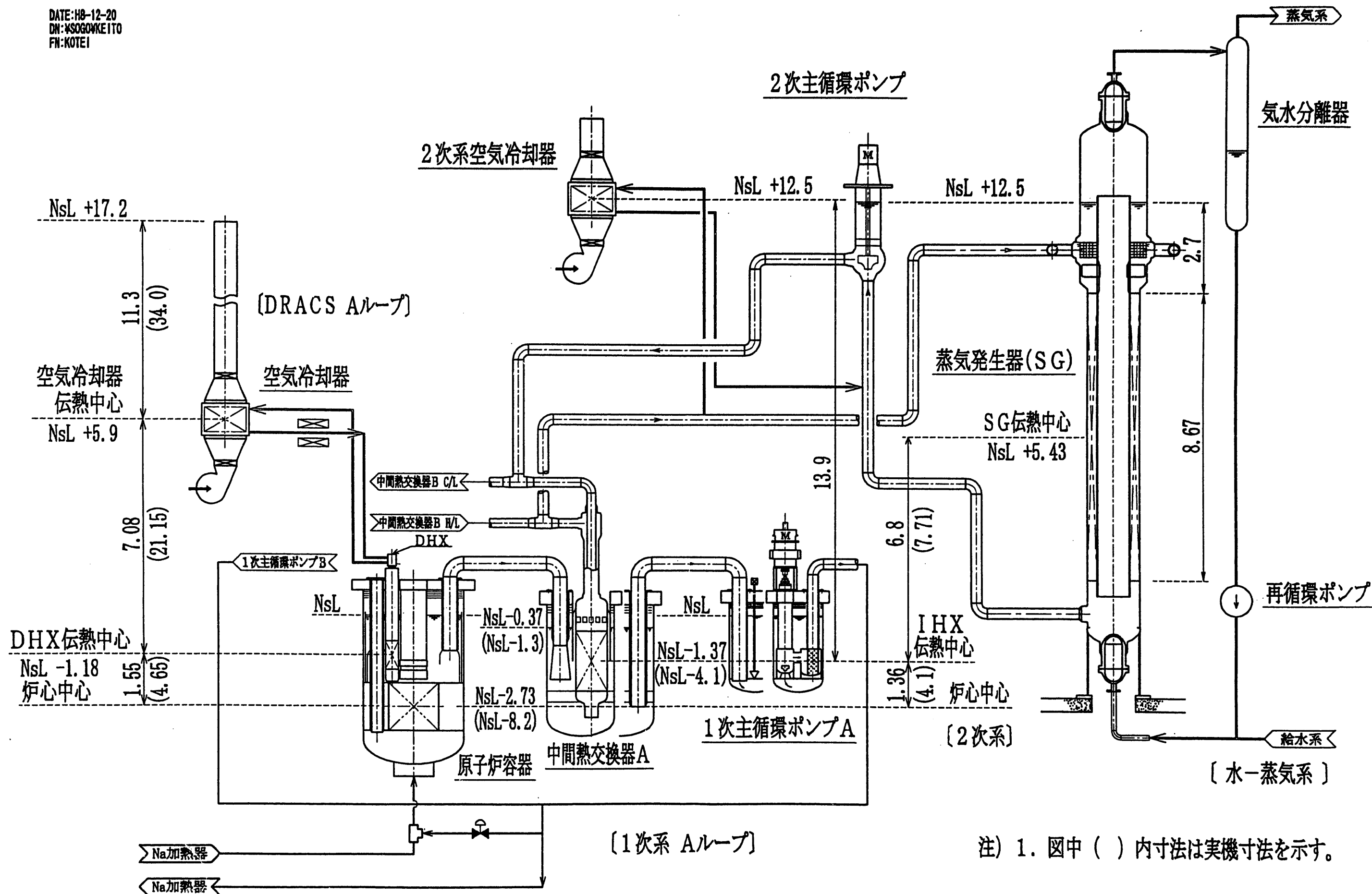


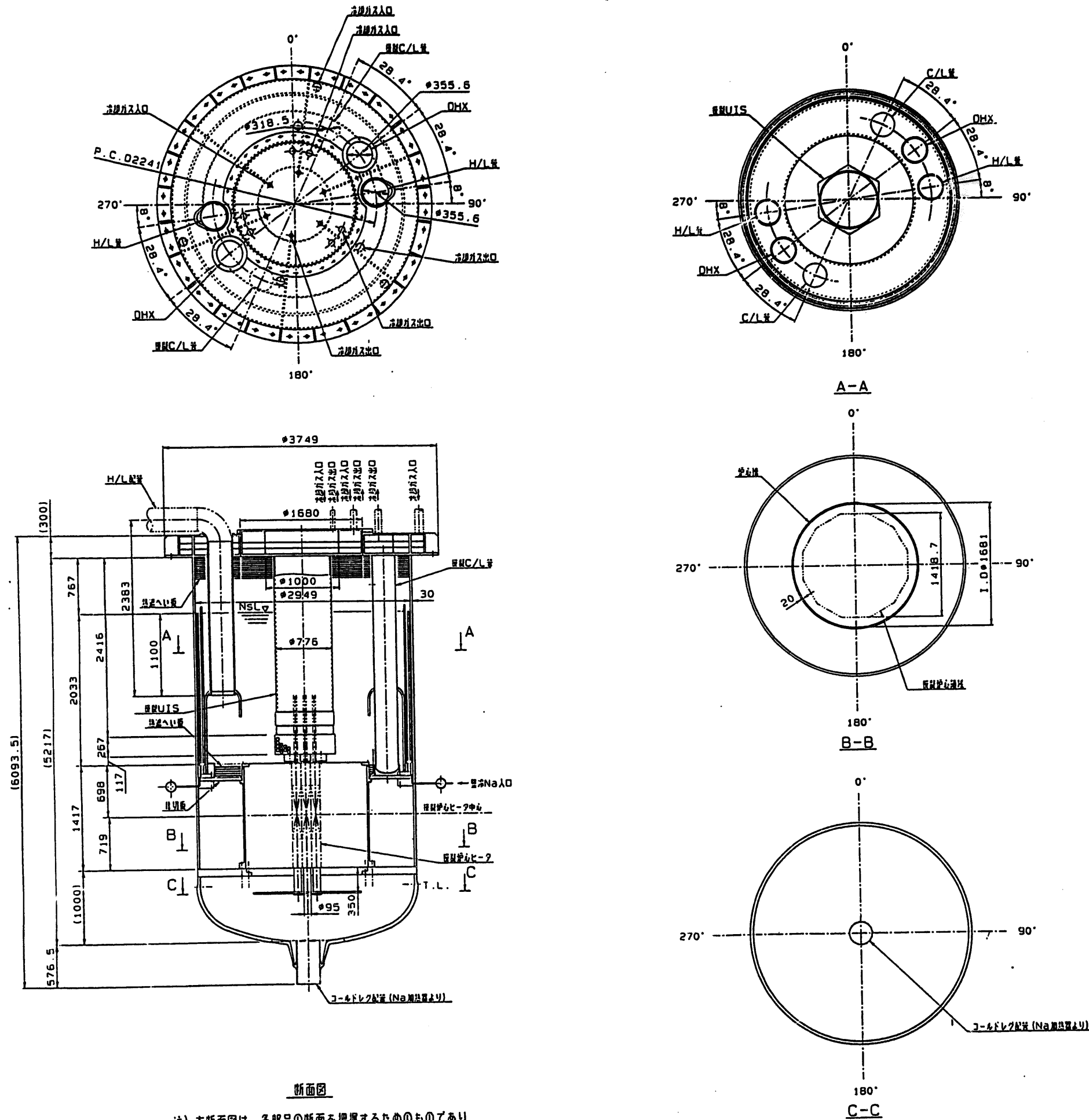
図2.2.1-1 主冷却系全体系統図

DATE: H8-12-20
 DN: KASOGOWKEITO
 FN: KOTEI



注) 1. 図中 () 内寸法は実機寸法を示す。

図2.2.1-2 機器高低関係図



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、高さ方向は実際の1/3スケール、
径方向は実際の1/3スケール容器の2/3セクターに
相当する断面幅を有する円筒形状を基準にしたスケールである。

図2.2.2-1 原子炉容器試験体構造図

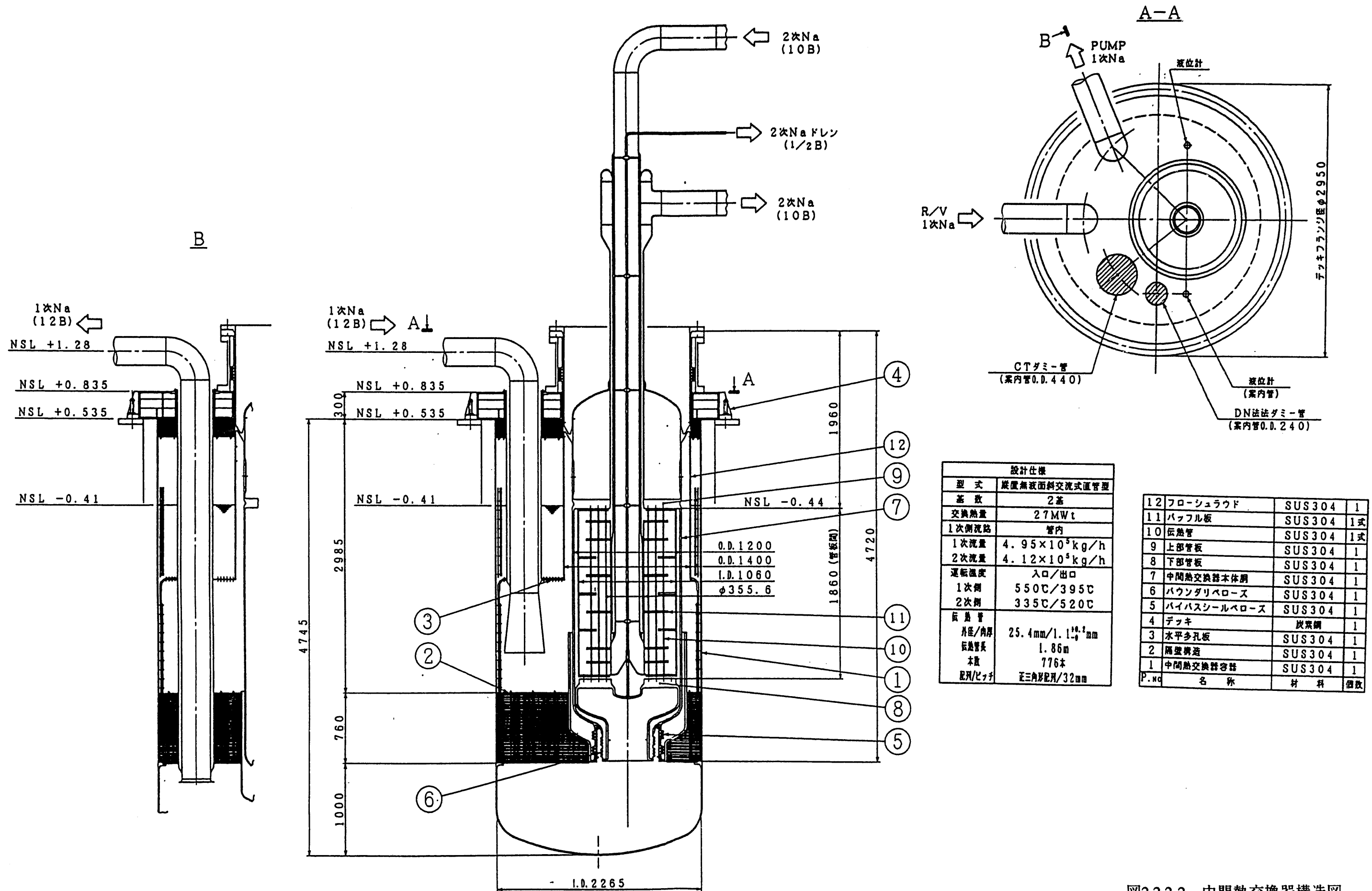
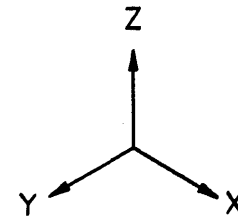
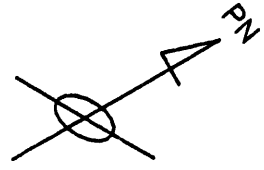


図2.2.2-2 中間熱交換器構造図



凡例

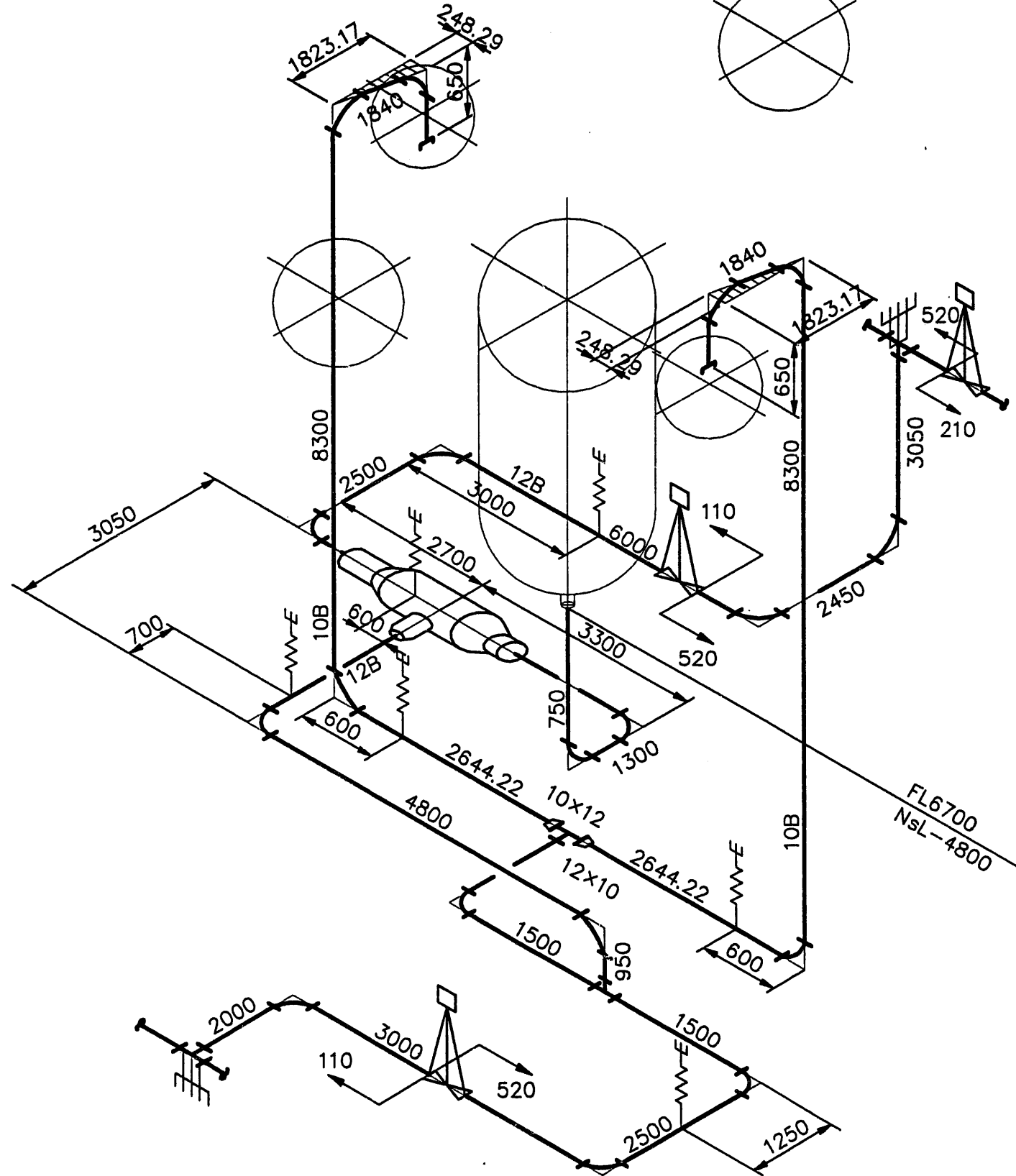
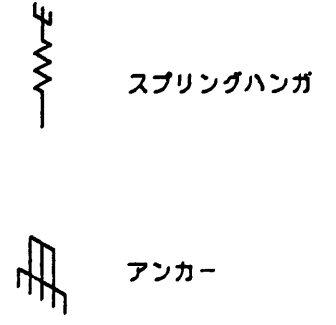
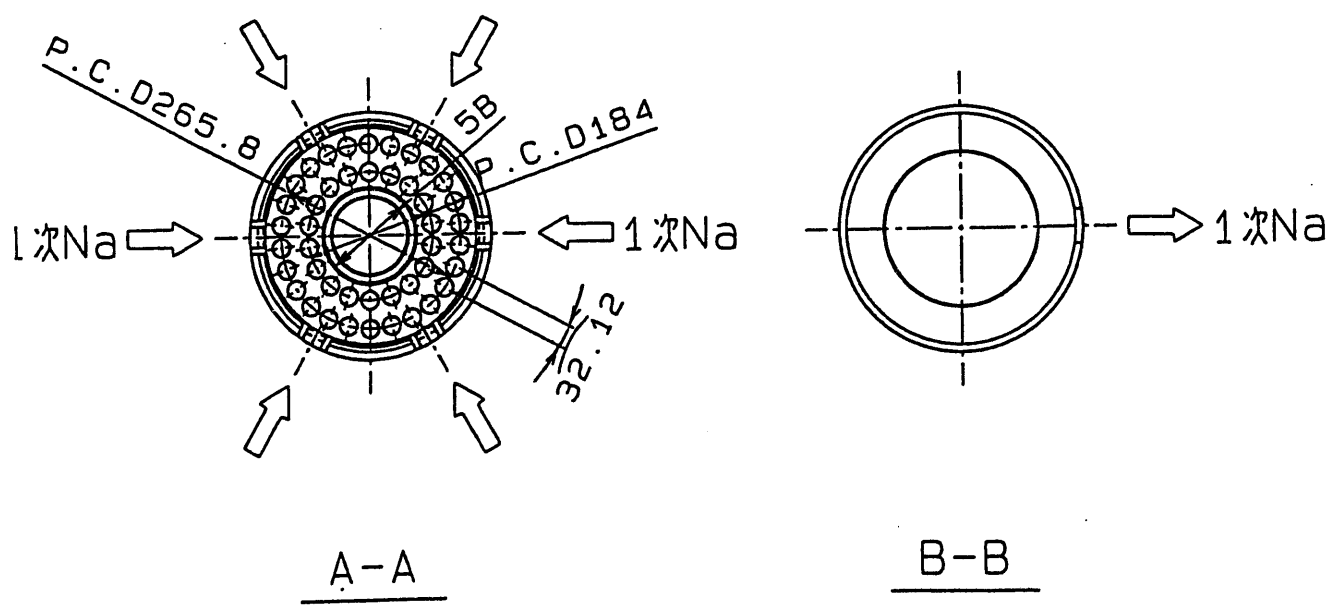
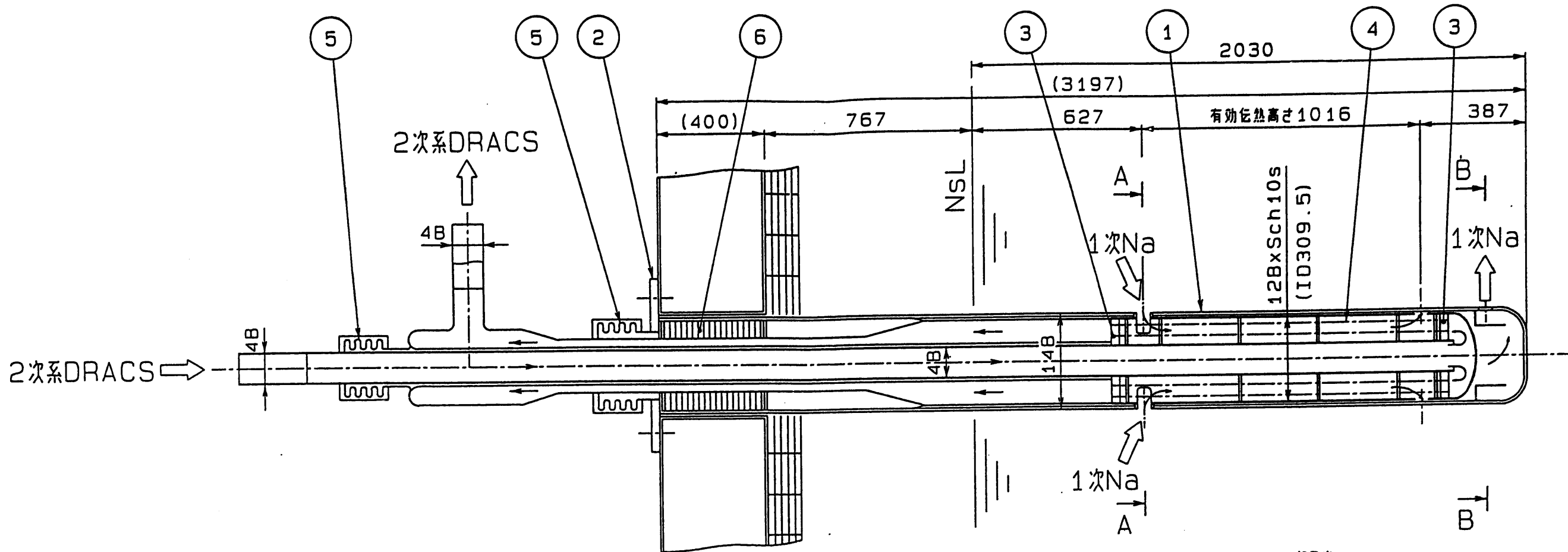


図2.2.2-3 1次主冷却系コールドレグ配管配置図



DHX主要目(強制循環時)

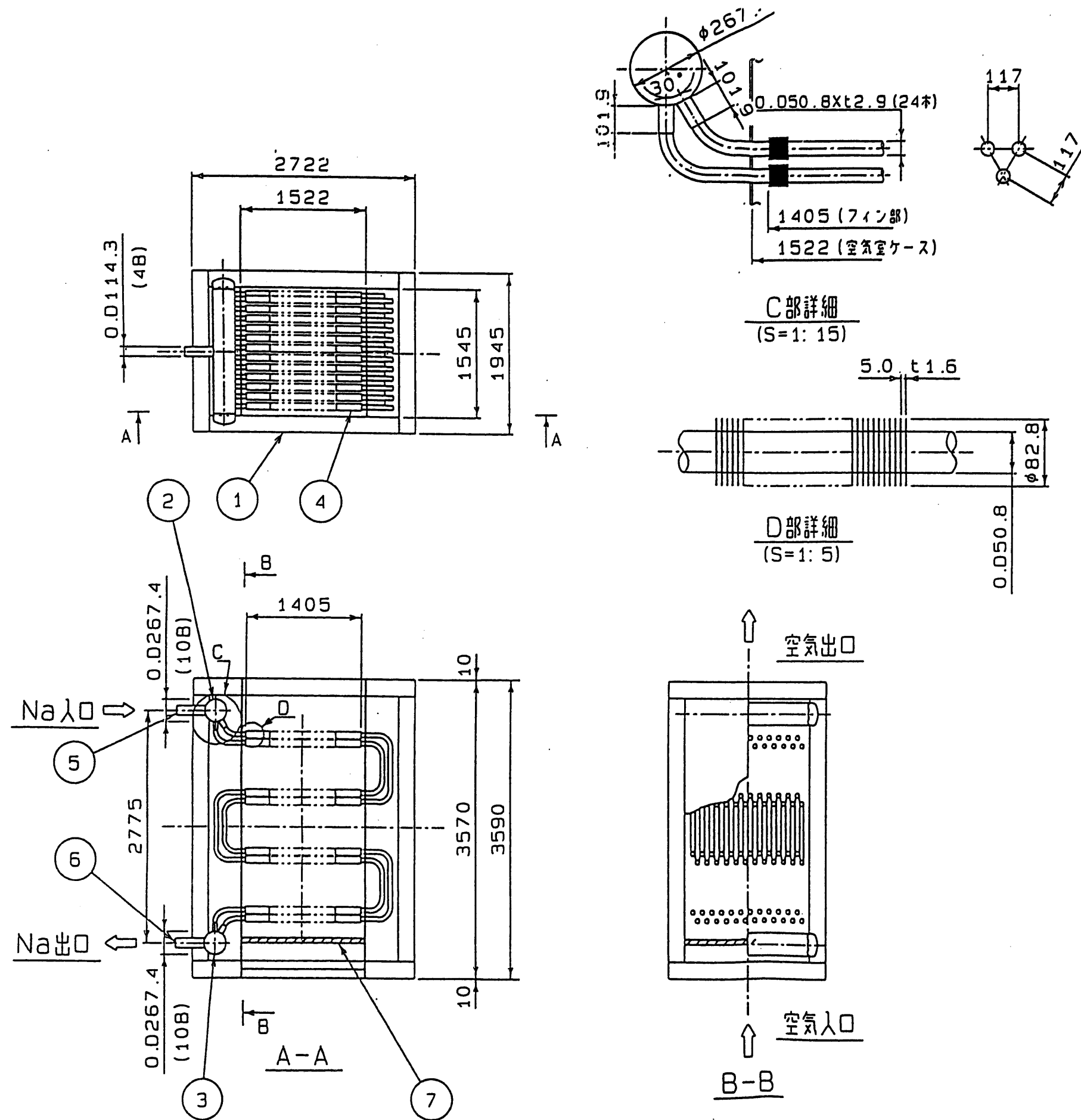
項目	仕様	単位
形式	縦置有液面平行流式直管型	-
基数	2	基
設計条件*) 交換熱量	0.9	MWt
運転条件 1次側	1.18	$\times 10^4 \text{kg/h}$
運転流量*) 2次側	1.35	$\times 10^4 \text{kg/h}$
運転温度*) 1次側入口/出口	550/333	$^{\circ}\text{C}$
2次側入口/出口	285/472	$^{\circ}\text{C}$
設計温度 1次側/2次側	570/510	$^{\circ}\text{C}$
設計圧力 1次側内圧/外圧	2.0/1	$\text{kg/cm}^2\text{g}$
2次側内圧/外圧	6.0/1	$\text{kg/cm}^2\text{g}$
設計結果 有効伝熱面積	3.57	m^2
有効伝熱高さ	1.016	m
伝熱管寸法 伝熱管外径/肉厚	25.4/1.0 ± 0.4	mm
伝熱管本数	44	本
伝熱管配列パターン	円周配列	-
伝熱管配列ピッチ	径40.9, 周32.1	mm
材質 伝熱管	SUS304	-

部品表

符号 ITEM	名称 TITLE	数量 NO.	材質 MATERIAL	備考 REMARK
1	DHX本体	1	SUS304	
2	本体フランジ	1	SUS304	
3	管板	2	SUS304	
4	伝熱管	44	SUS304	
5	ペローズ	2式	SUS304	
6	熱しゃへい体	1式	SUS304	

*) 機器サイジング用の運転条件を示す。

図2.2.2-4 DHX構造図



部品表

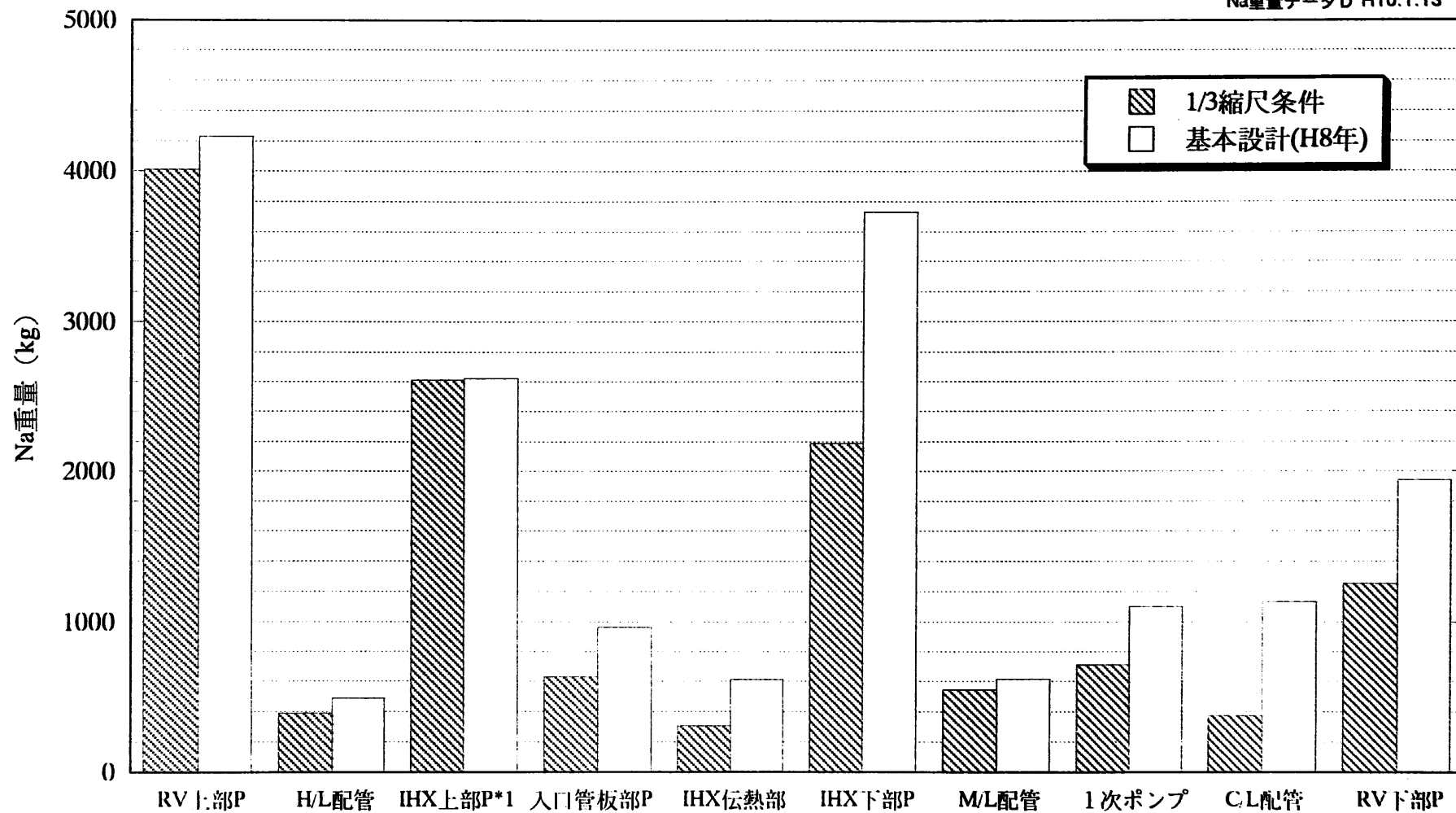
行号 ITEM	名 称 TITLE	数量 NO.	材 質 MATERIAL	備 考 REMARK
1	A/Cケーシング	1	SUS304	
2	Na入口ヘッド	1	SUS304	
3	Na出口ヘッド	1	SUS304	
4	フィンチューブ	24	SUS304	
5	Na入口ズル	1	SUS304	
6	Na出口ズル	1	SUS304	
7	予熱ヒータ	1式	-	

空気冷却主要目 (強制循環時)

形 式	項 目	仕 様	単 位
		多管フィンチューブ空冷式	-
基 数		2	基
設計条件	交換熱量	0.9	MWt
運転条件	Na側	1.35	x10 ⁴ kg/h
運転流量	空気側	1.75	x10 ⁴ kg/h
運転温度	Na側入口/出口	472/285	°C
	空気側入口/出口	50/231	°C
設計温度	Na側/空気側	570/570	°C
設計圧力	Na側/空気側	5.0/1.0	kg/cm ² g
設計結果	有効伝熱面積	204	m ²
	管束高さ (ヘッド間)	2.775	m
伝熱管寸法	伝熱管外径/肉厚	50.8/2.9	mm
	管長 (フィン部)	1.405	m/段
	伝熱管本数	24	本
	段 数	4	段
フィン寸法	伝熱管ピッチ	117	mm
	フィン外径/肉厚	82.8/1.6	mm
	フィンピッチ	5.08	mm
材 質	伝熱管	SUS304	-

図2.2.2-5 DRACS系空気冷却器構造図

Na重量データD H10.1.13



注) *1: IHX上部プレナムは混合部分のみ。

図3.2-1 1次系各部のNa重量比較

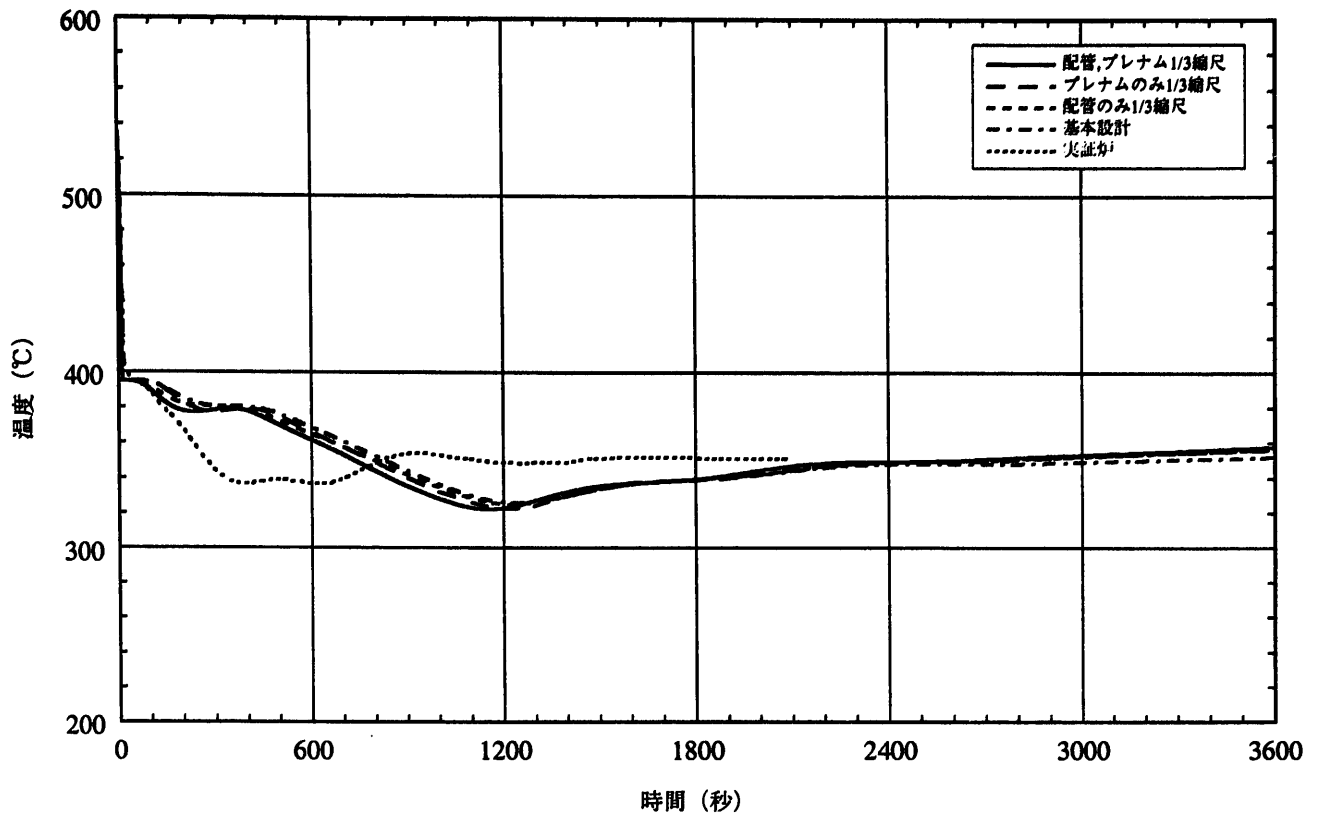


図3.5.1-1 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果（原子炉容器入口温度、1次系配管長パラメータ解析）

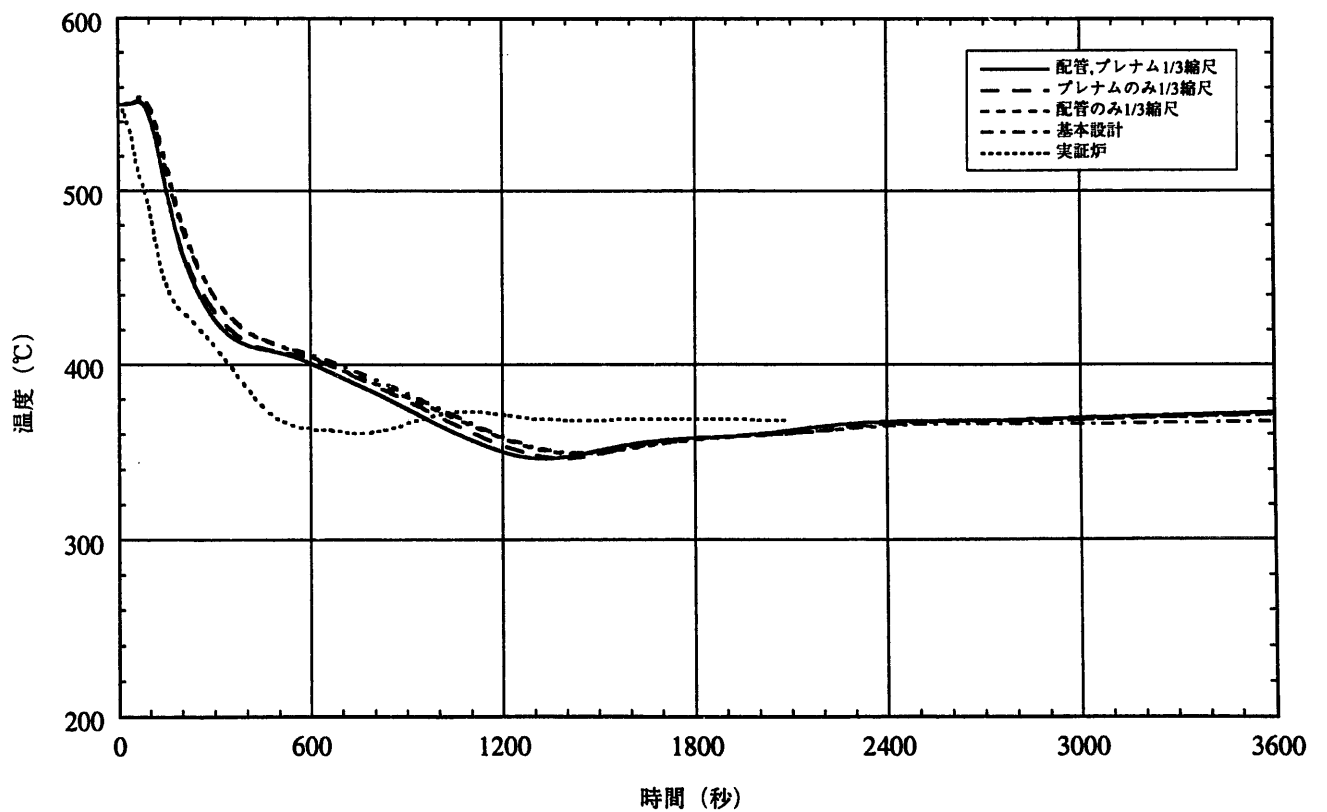


図3.5.1-2 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果（原子炉容器出口温度、1次系配管長パラメータ解析）

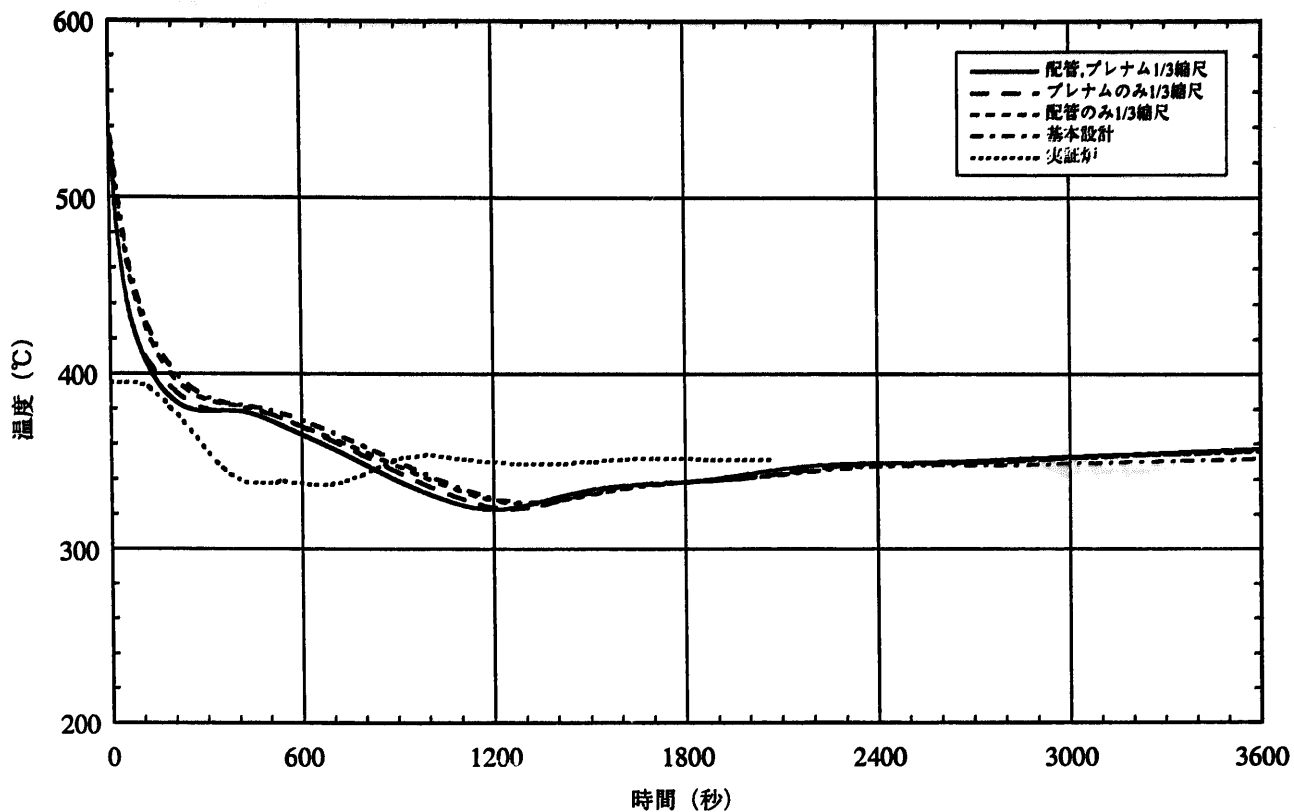


図3.5.1-3 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

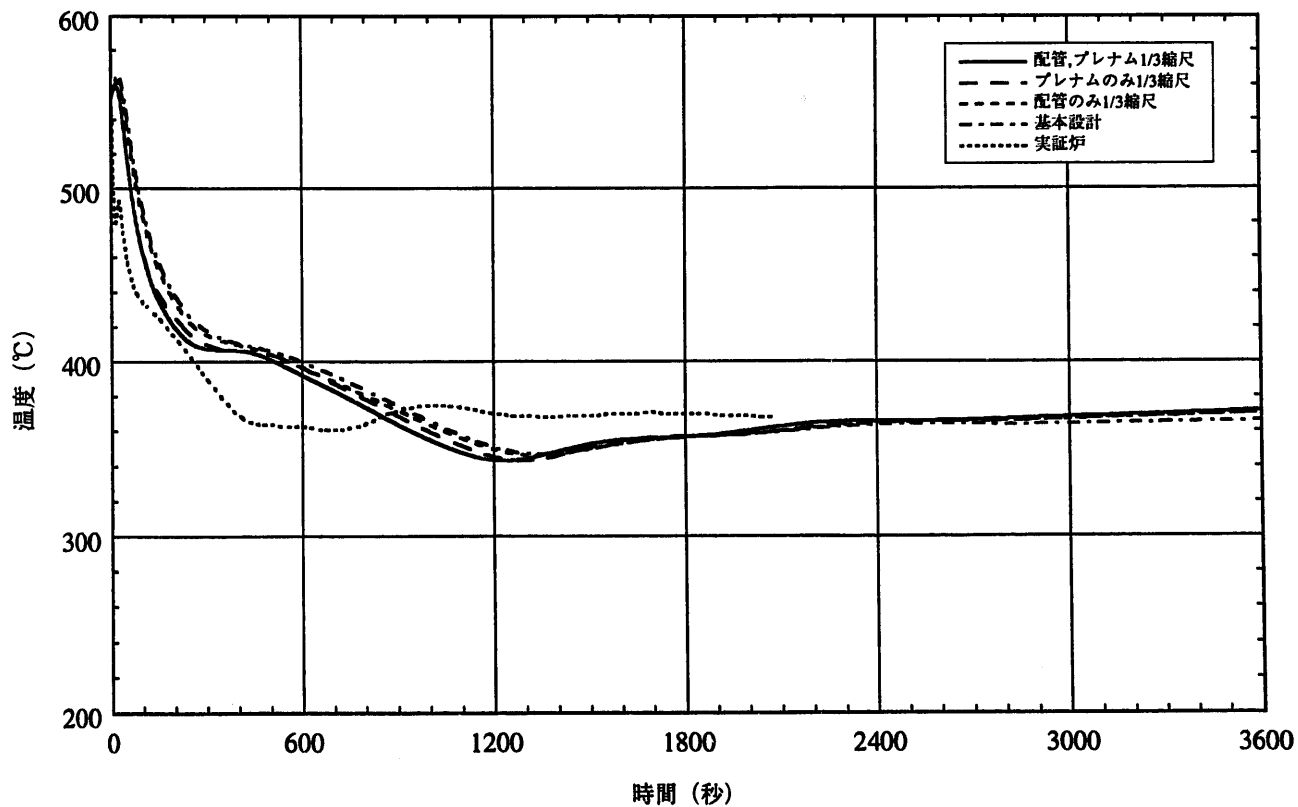


図3.5.1-4 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (炉心出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

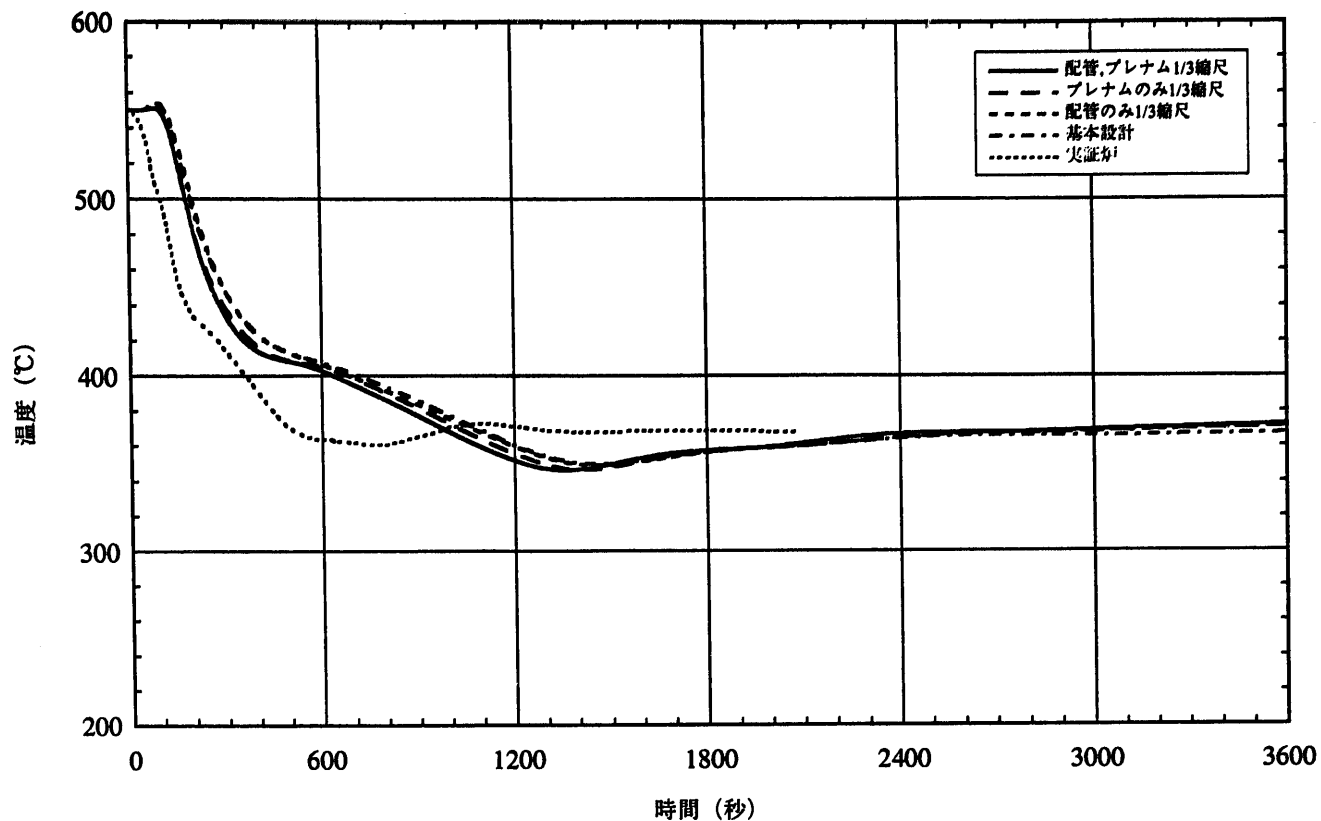


図3.5.1-5 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

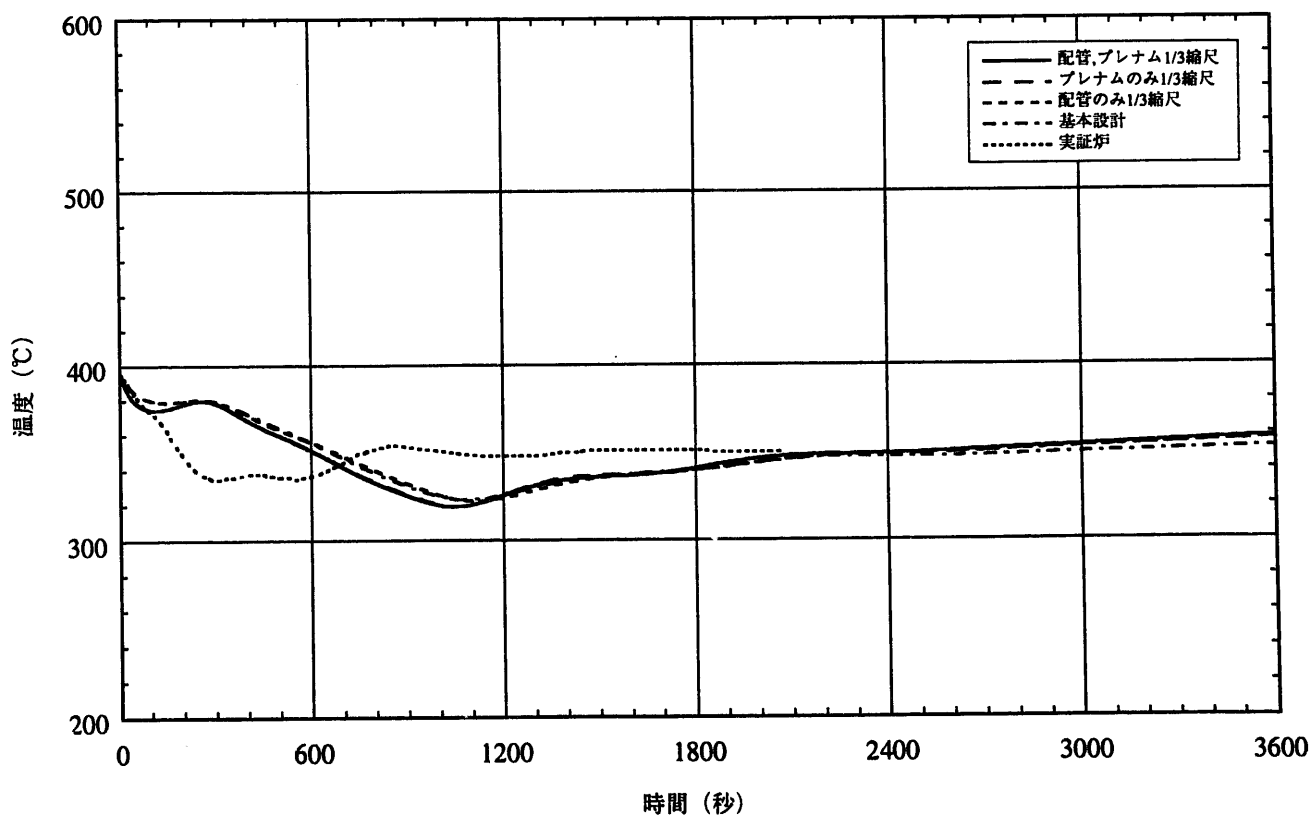


図3.5.1-6 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

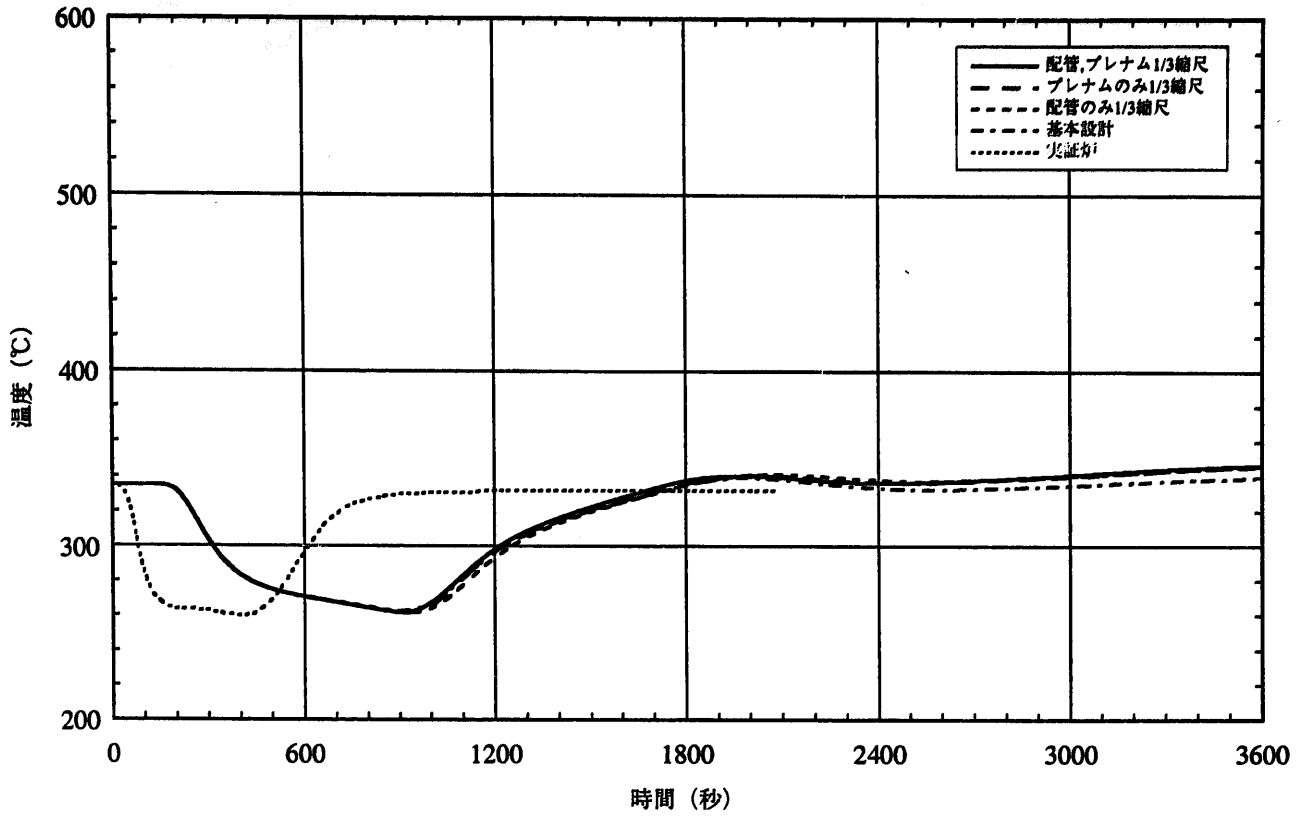


図3.5.1-7 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

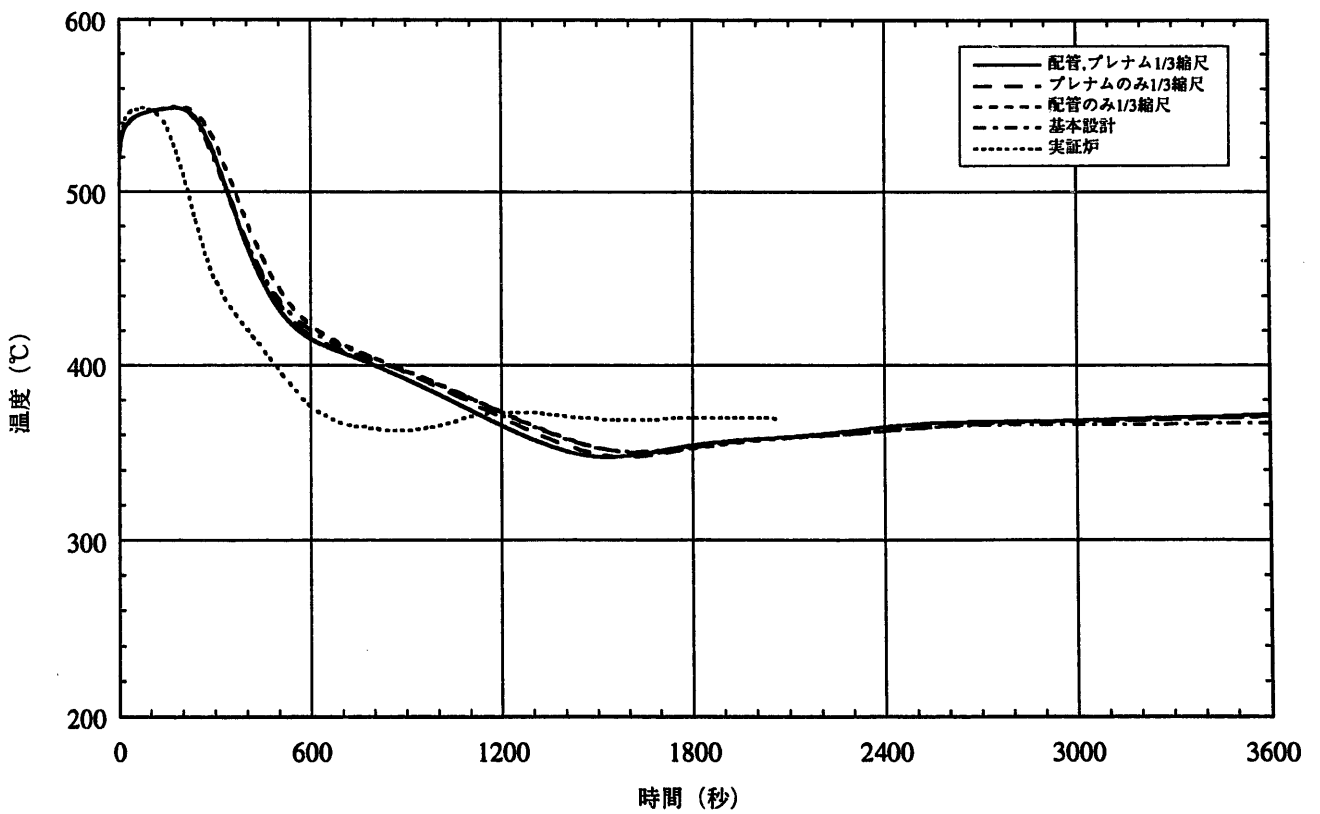


図3.5.1-8 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

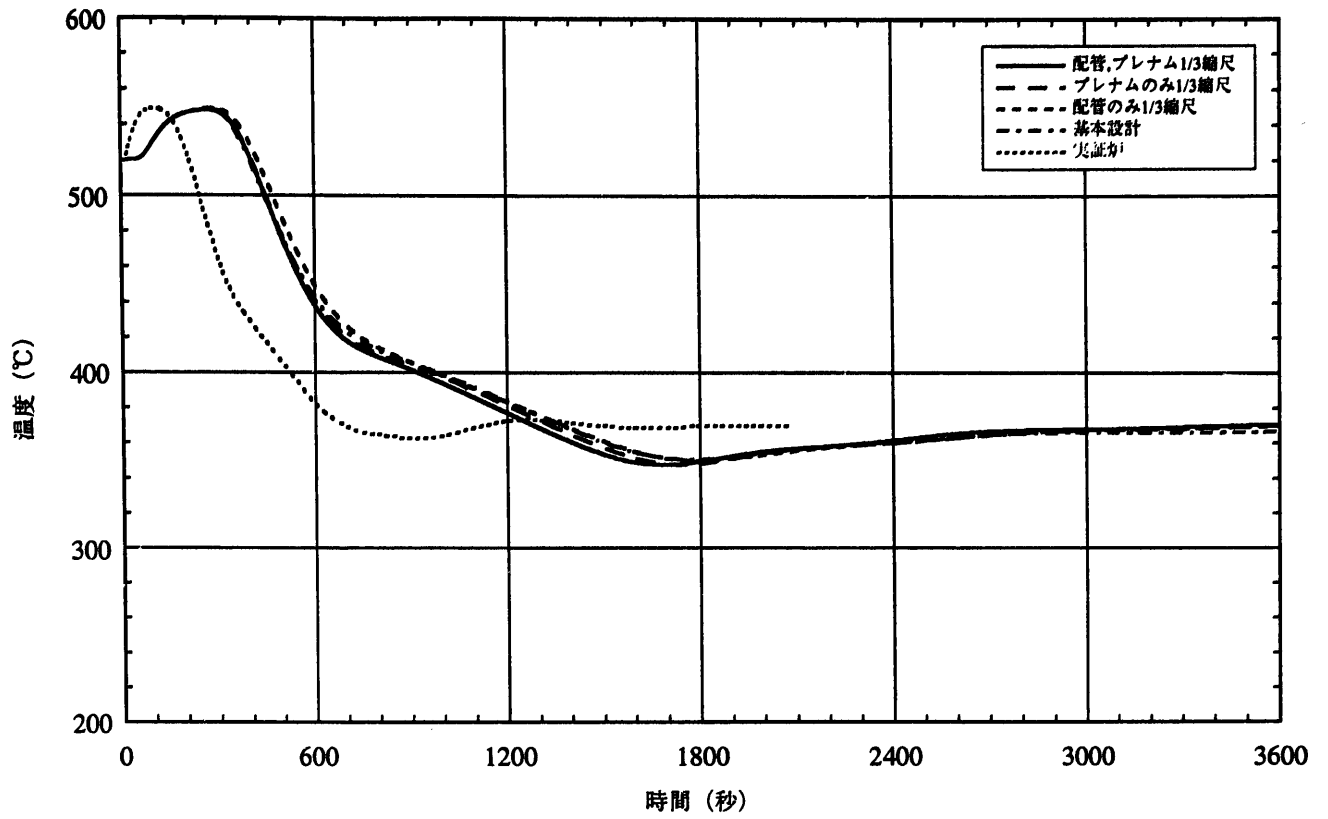


図3.5.1-9 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口Na温度、1次系配管長パラメータ解析)

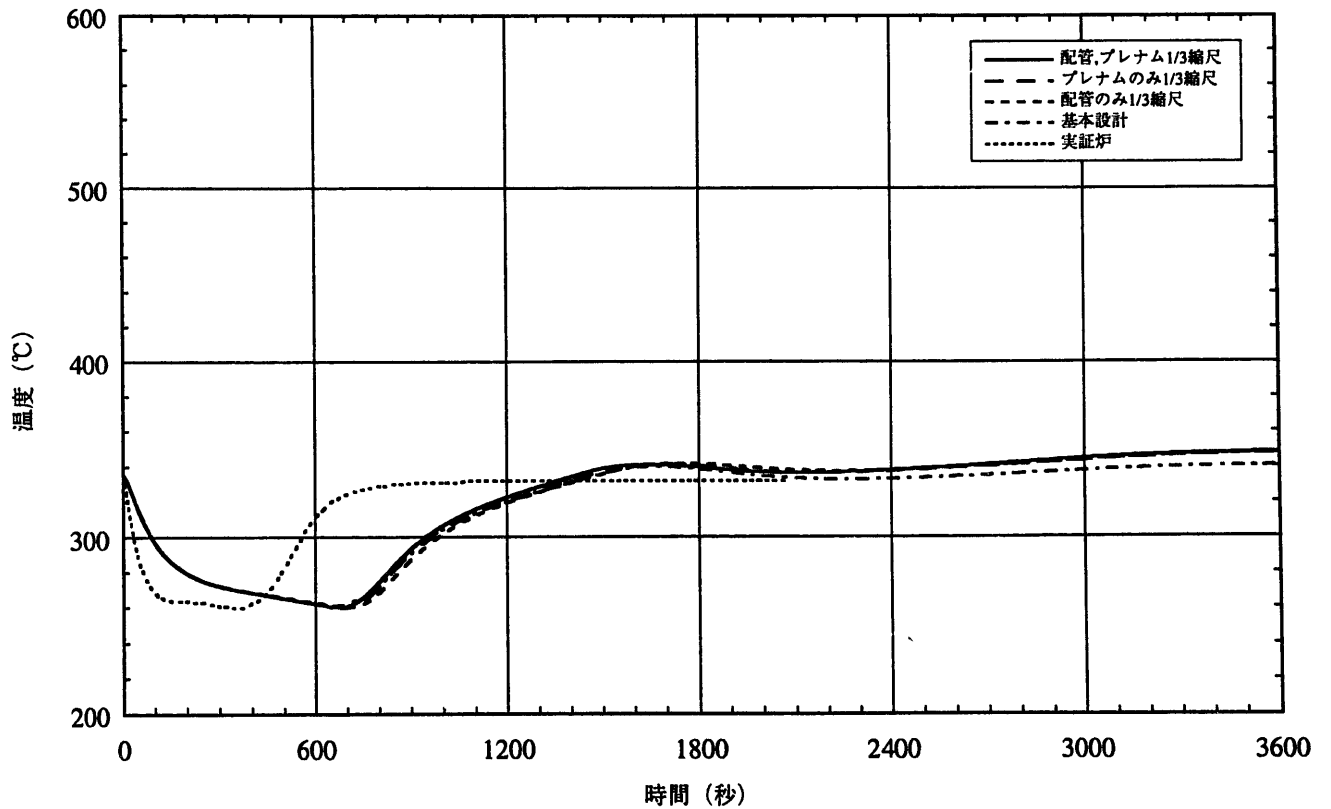


図3.5.1-10 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口Na温度、1次系配管長パラメータ解析)

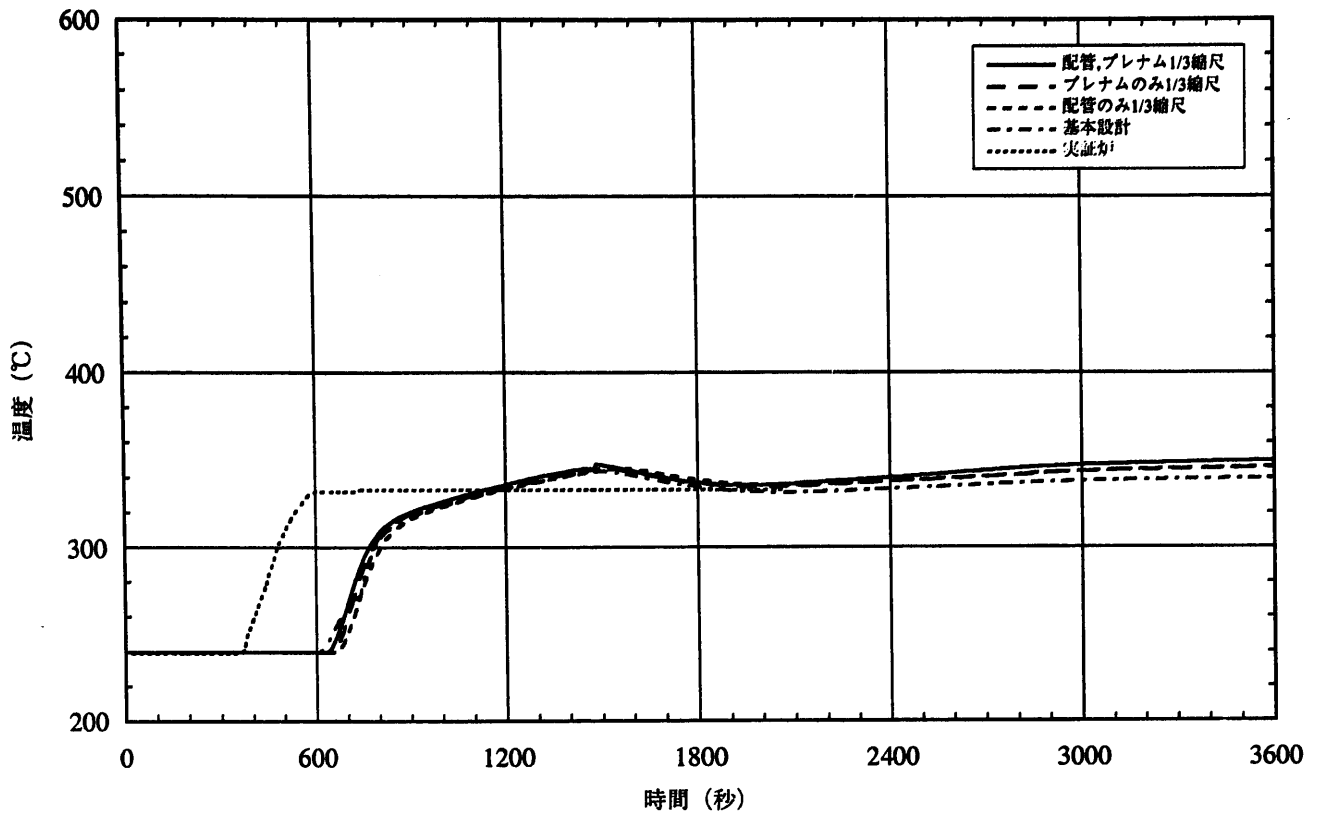


図3.5.1-11 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG入口給水温度、1次系配管長パラメータ解析)

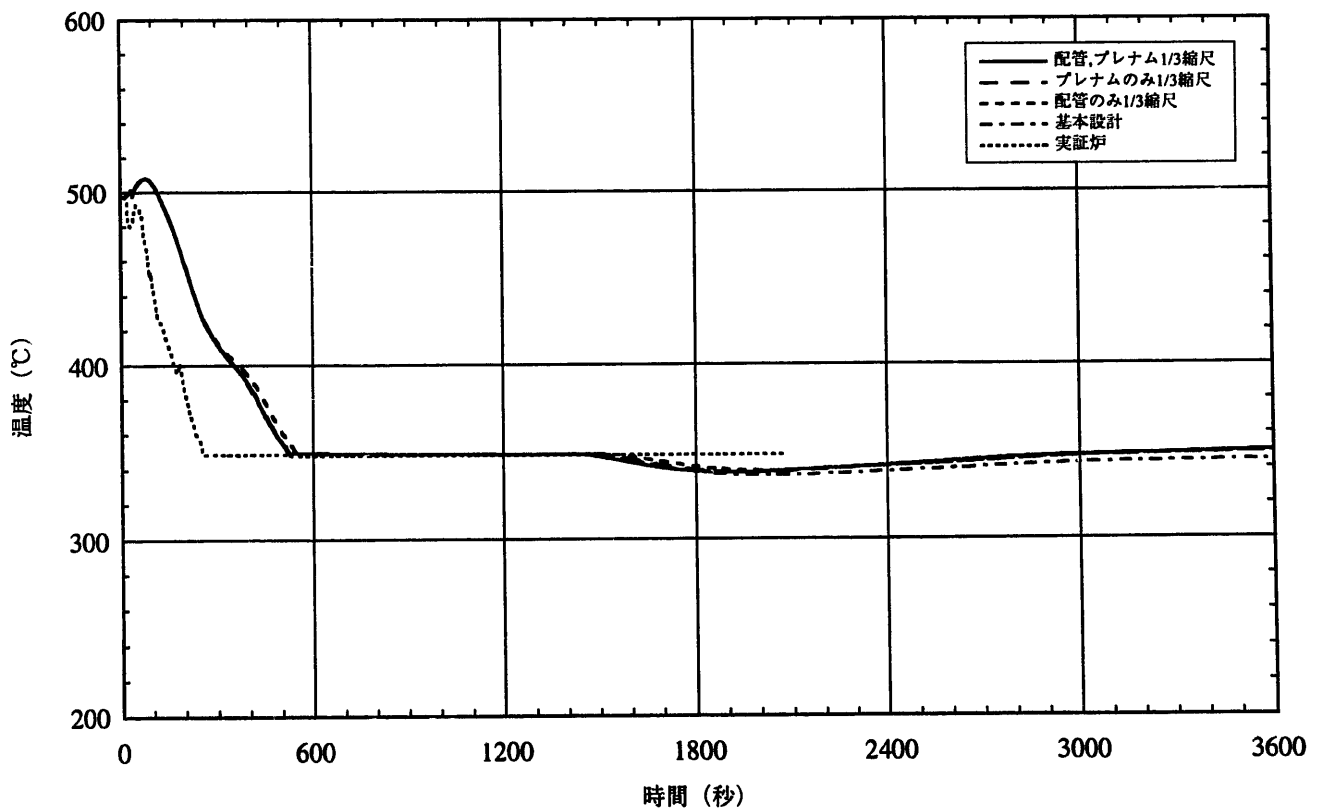


図3.5.1-12 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG出口蒸気温度、1次系配管長パラメータ解析)

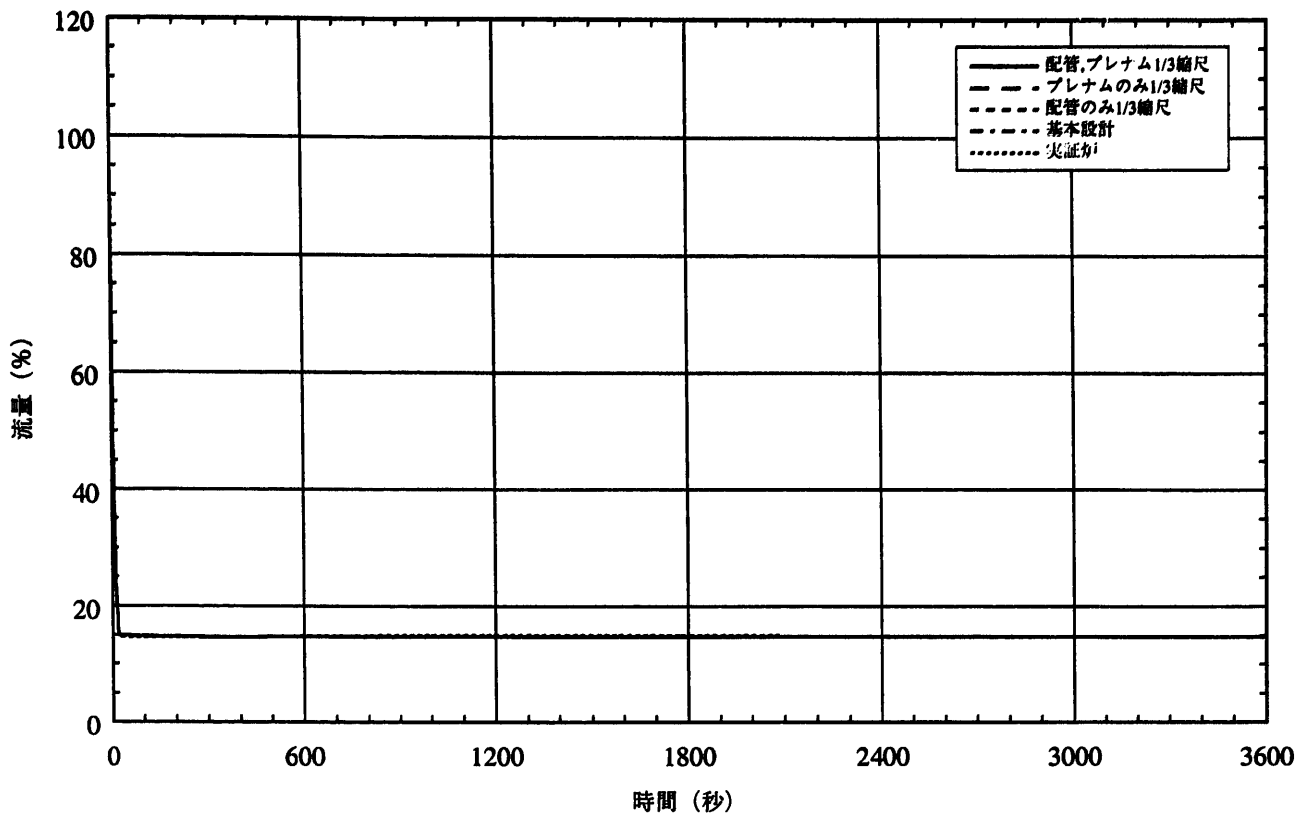


図3.5.1-13(1/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

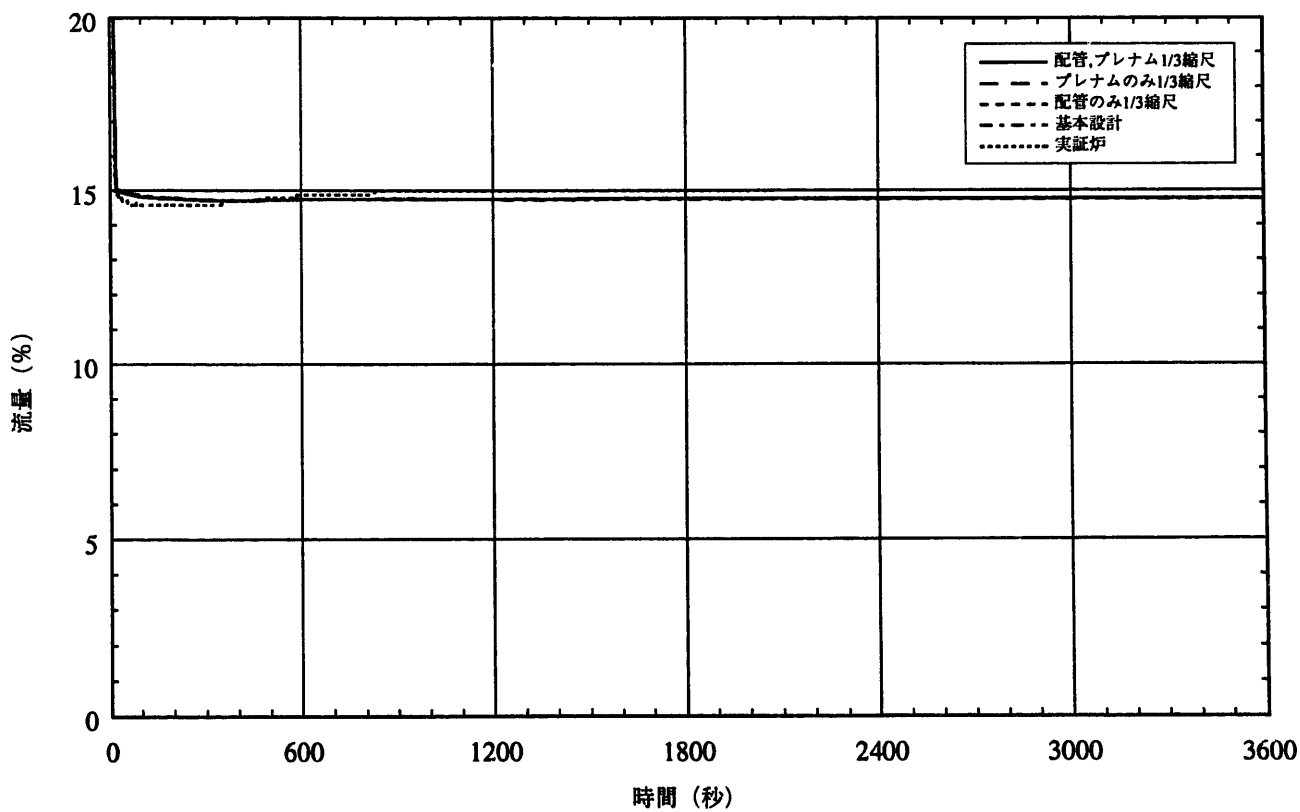


図3.5.1-i3(2/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

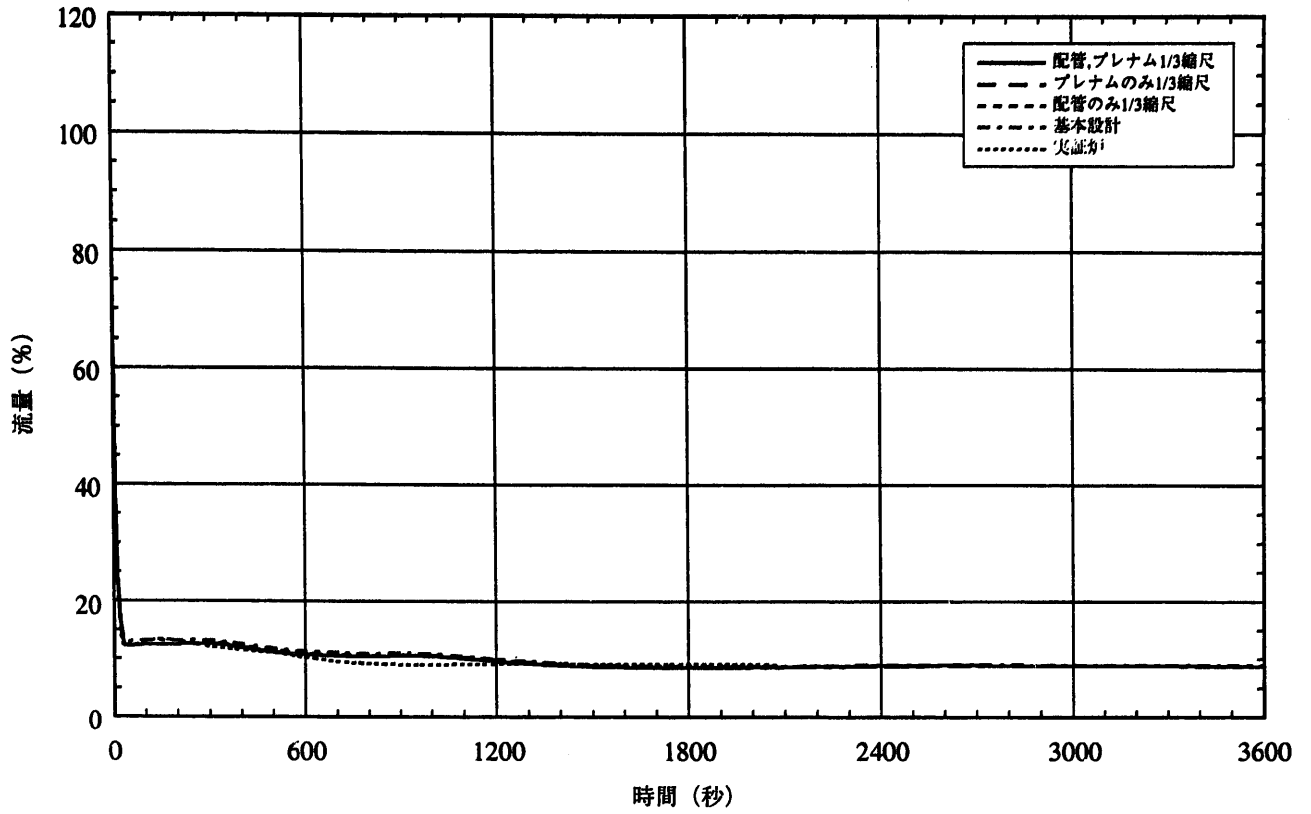


図3.5.1-14(1/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (2次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

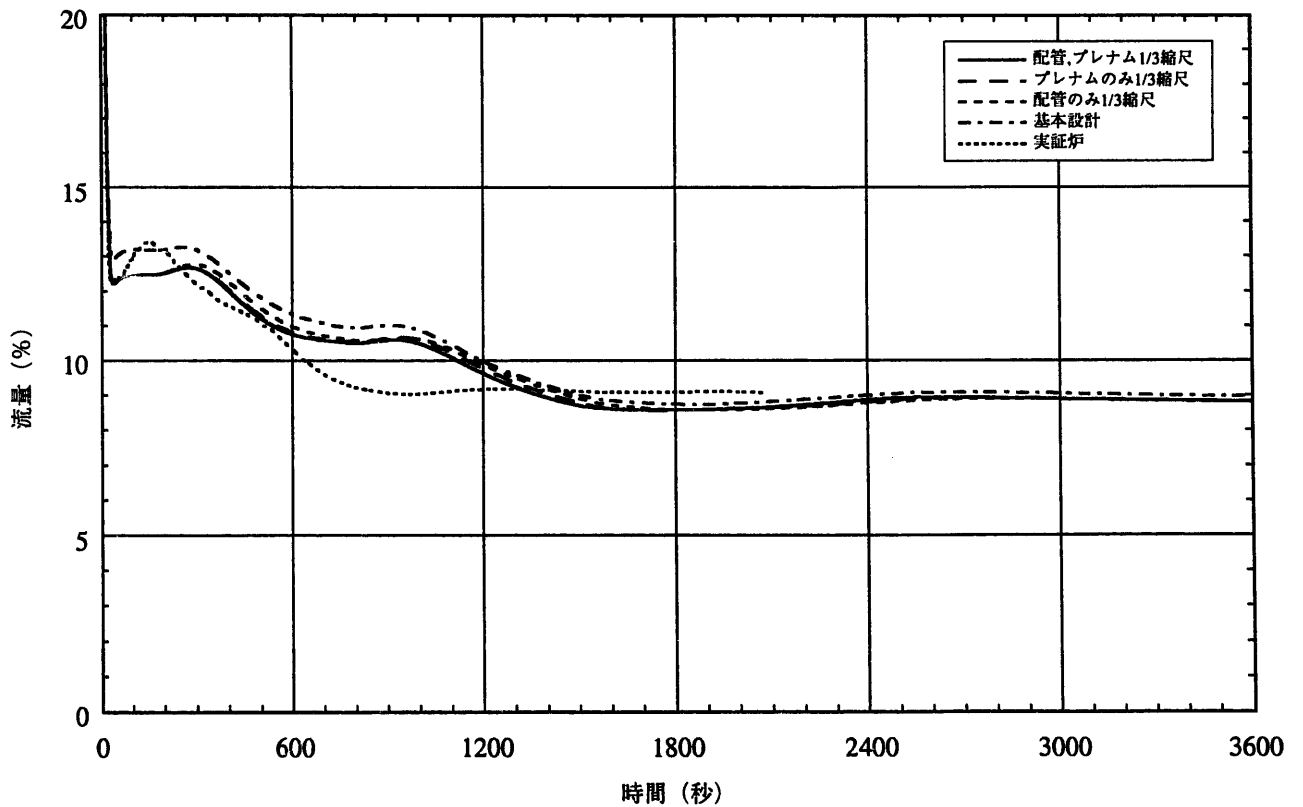


図3.5.1-14(2/2) 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (2次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

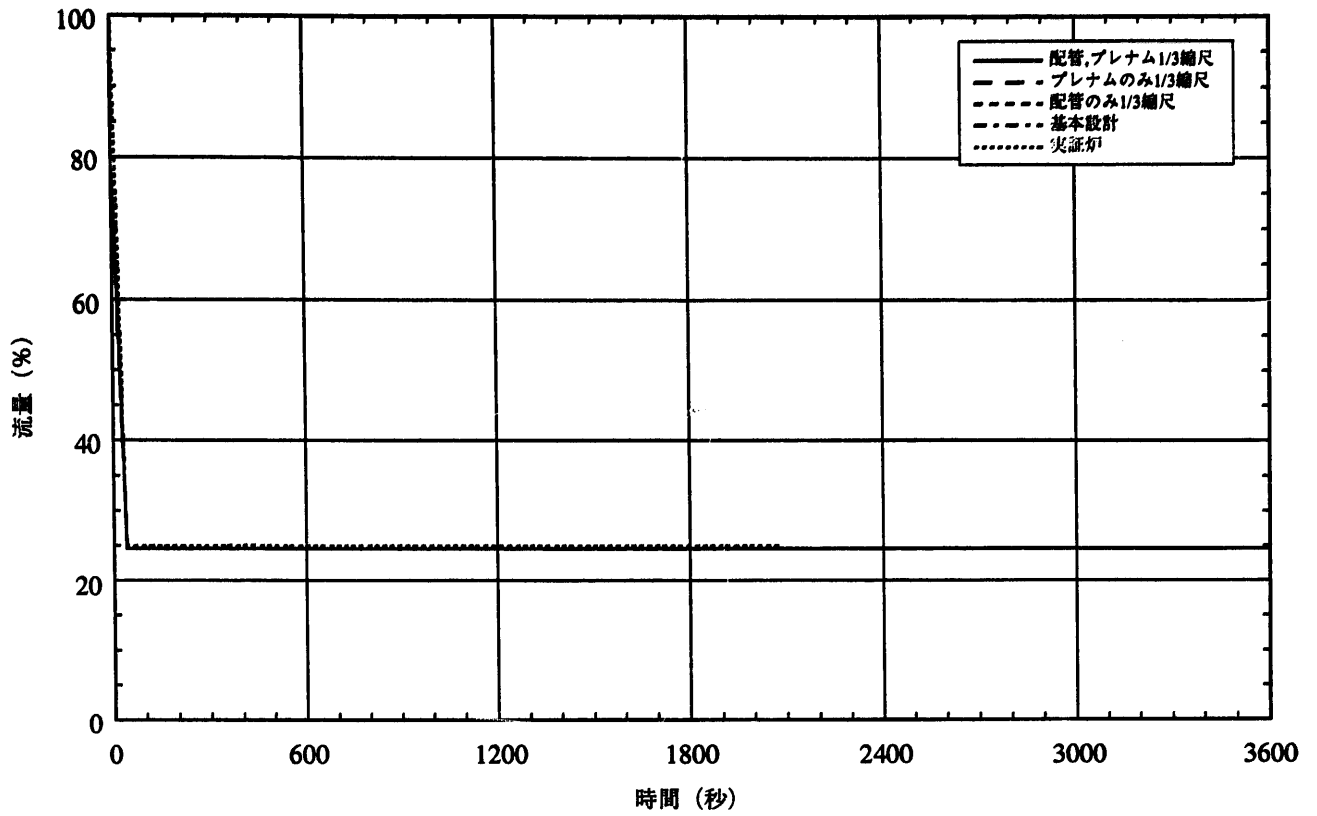


図3.5.1-15 手動トリップ熱過渡模擬試験解析結果 (SG給水流量、1次系配管長パラメータ解析)

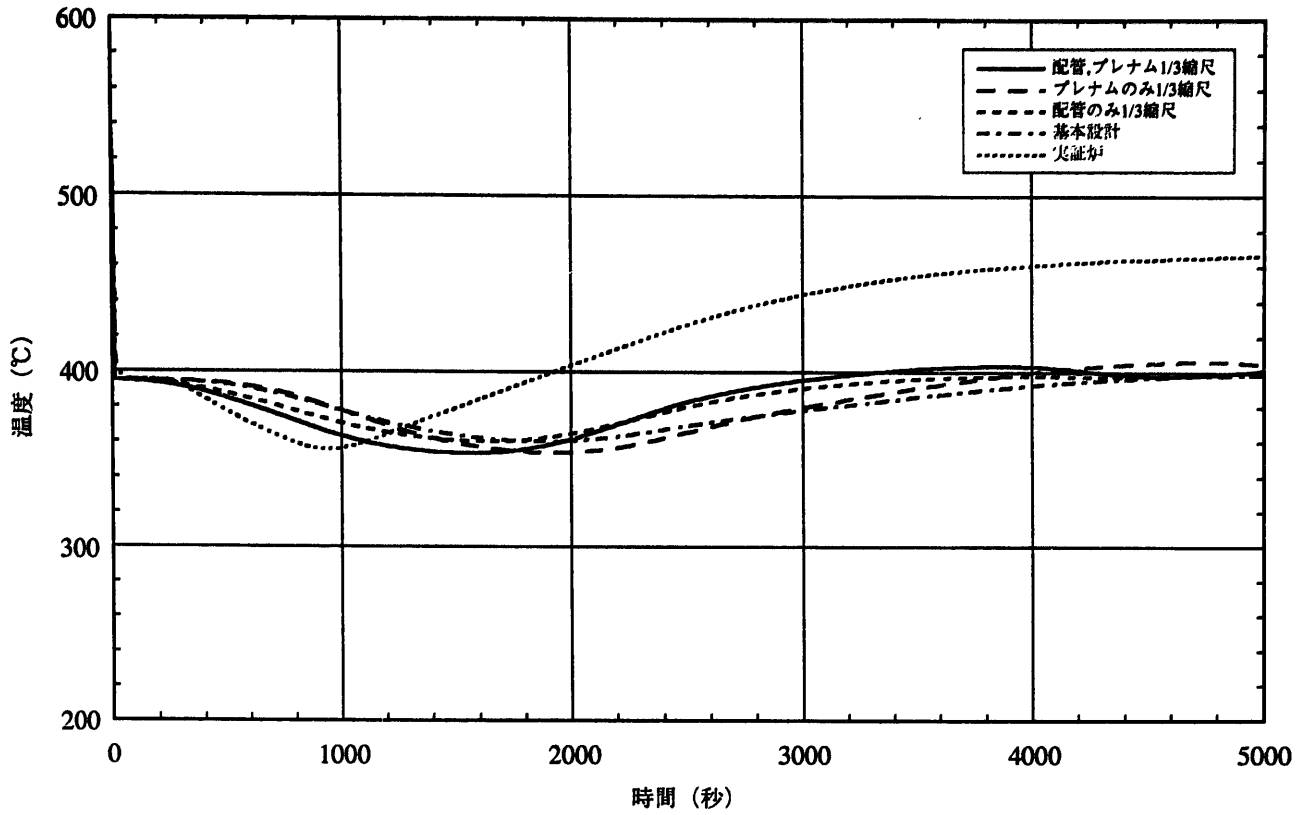


図3.5.2-1 自然循環試験解析結果（原子炉容器入口温度、1次系配管長パラメータ解析）

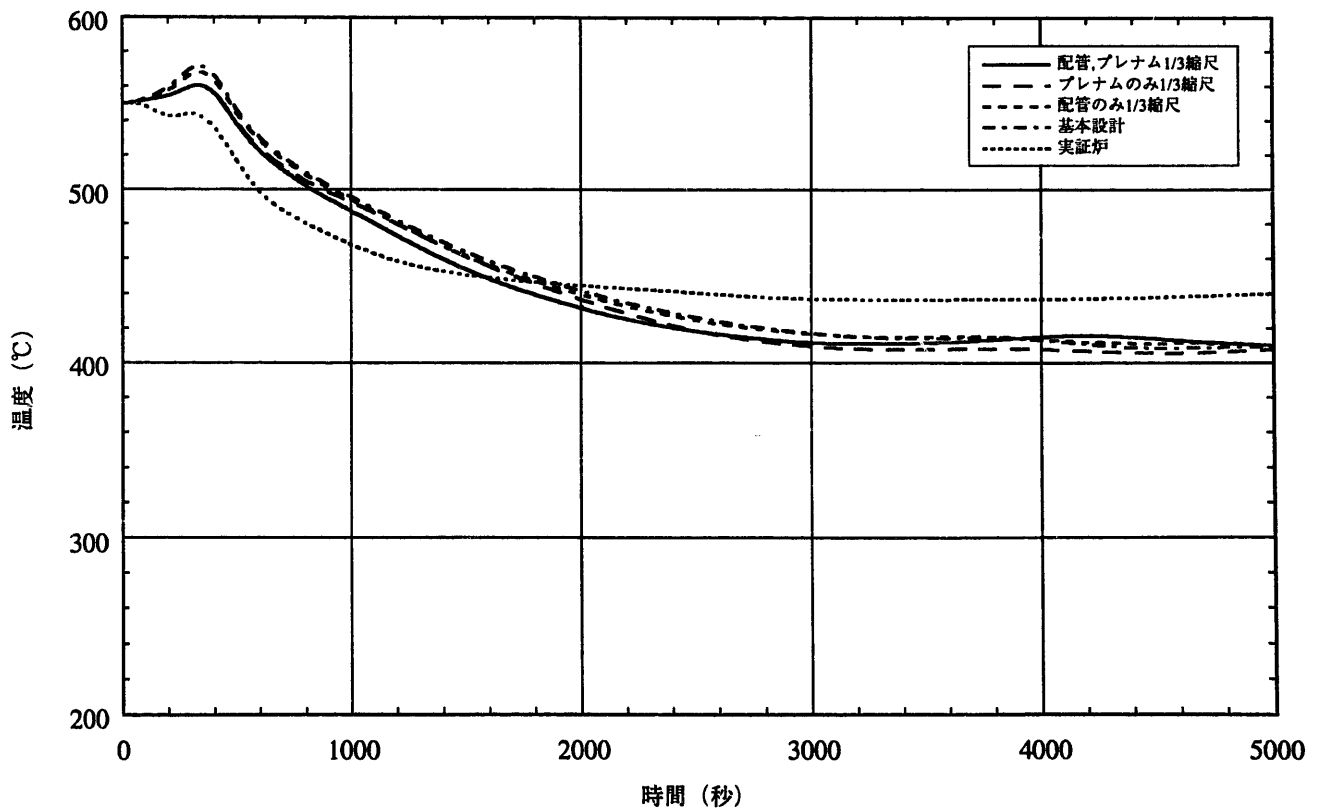


図3.5.2-2 自然循環試験解析結果（原子炉容器出口温度、1次系配管長パラメータ解析）

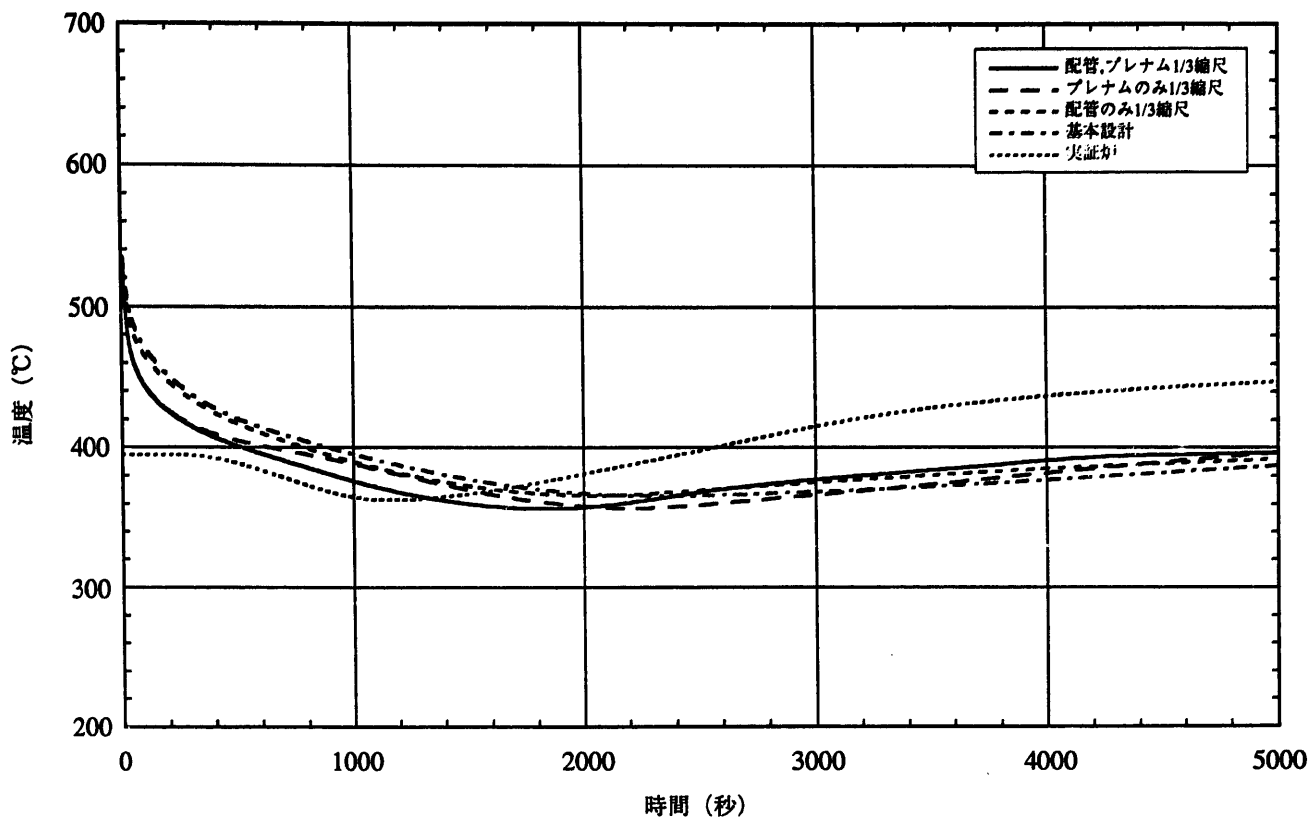


図3.5.2-3 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

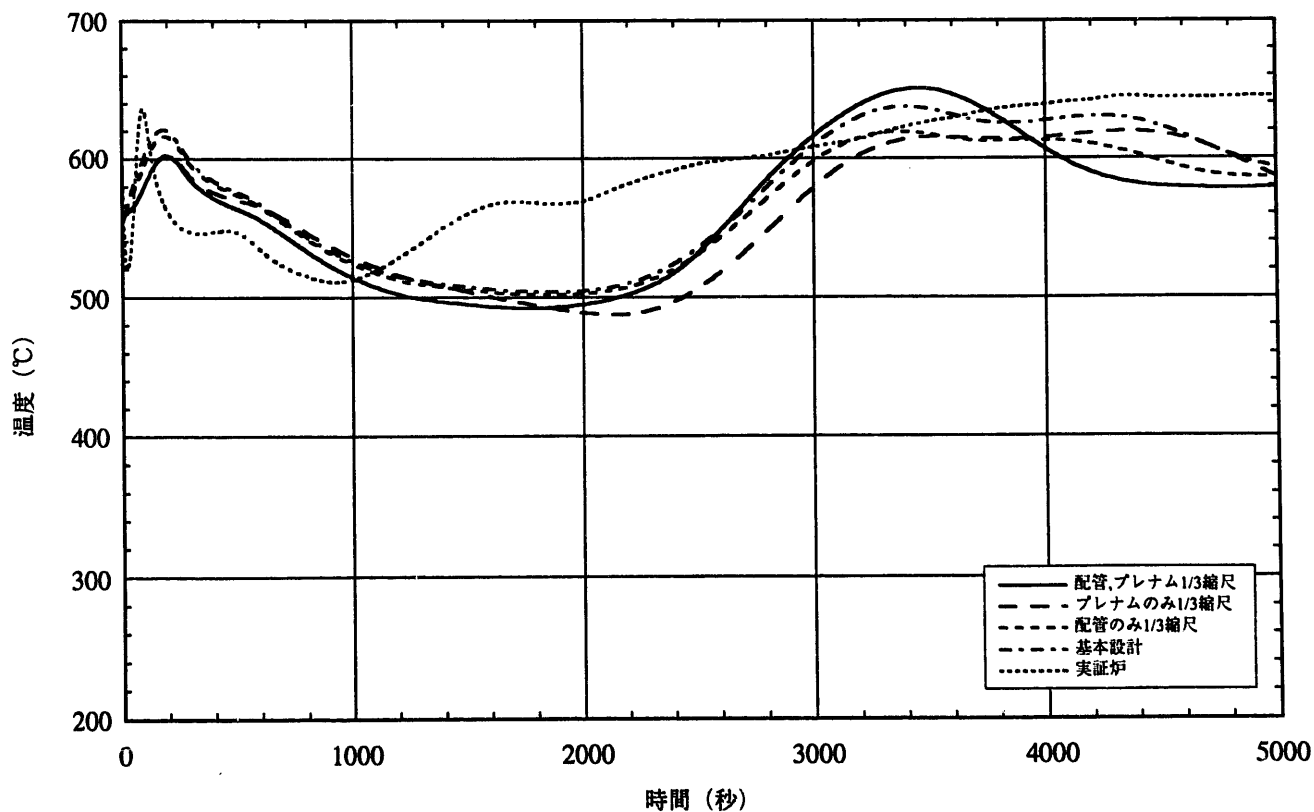


図3.5.2-4 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

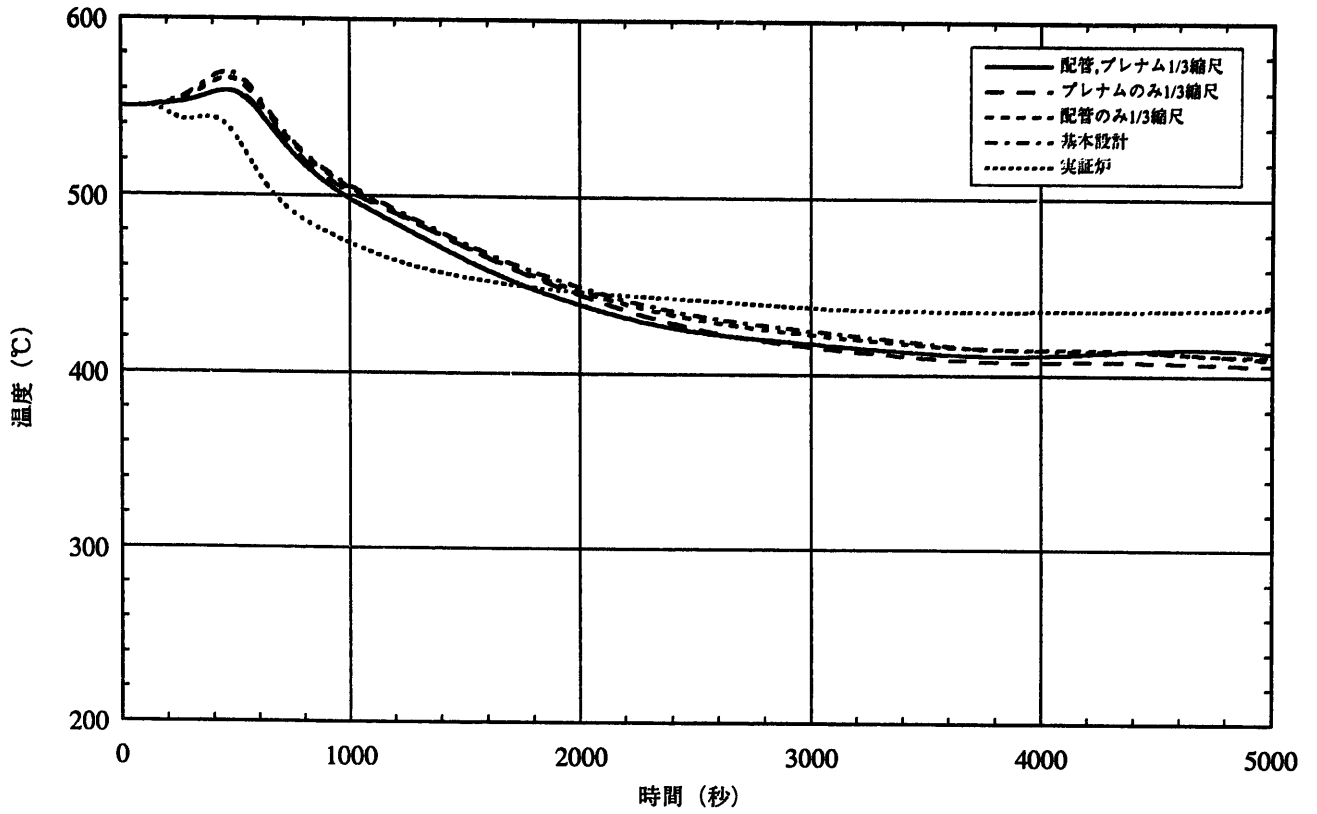


図3.5.2-5 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

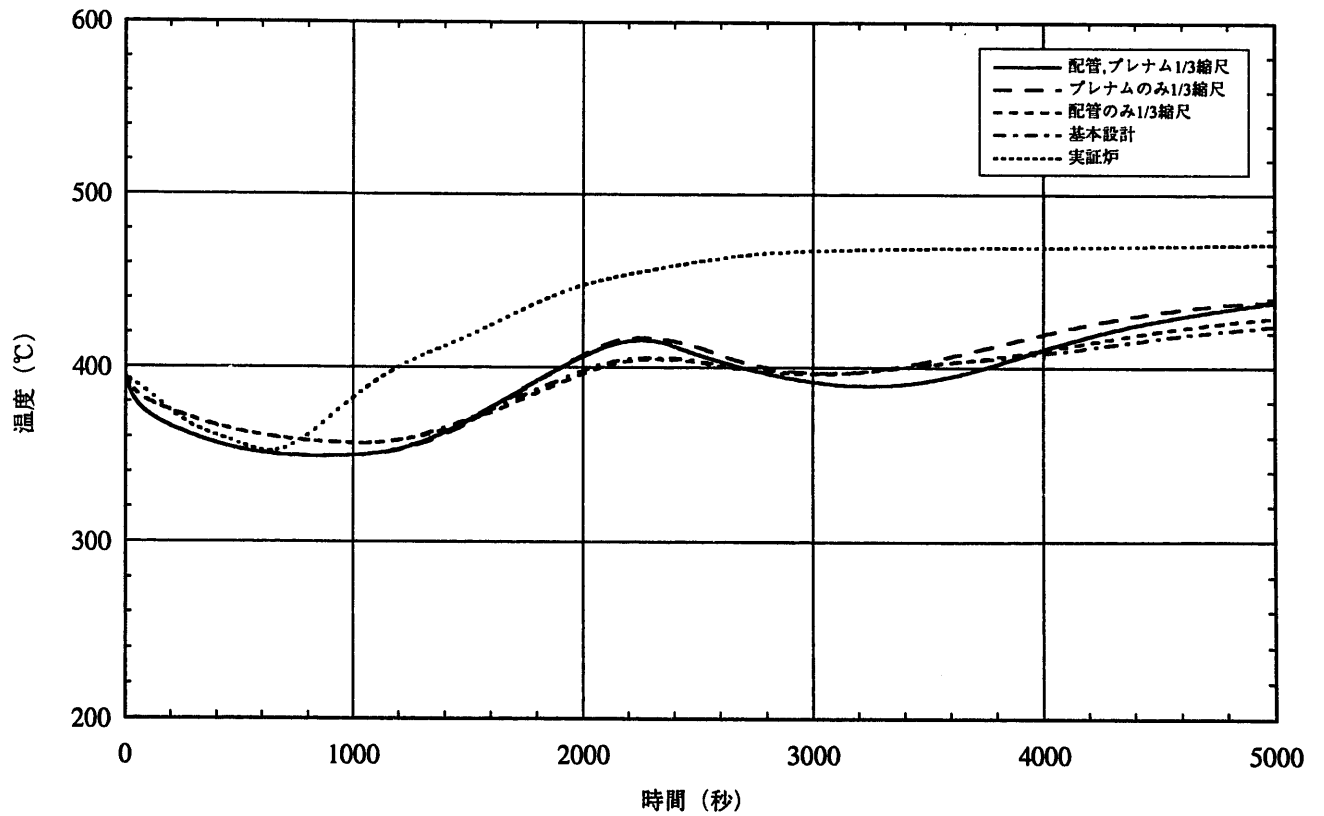


図3.5.2-6 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

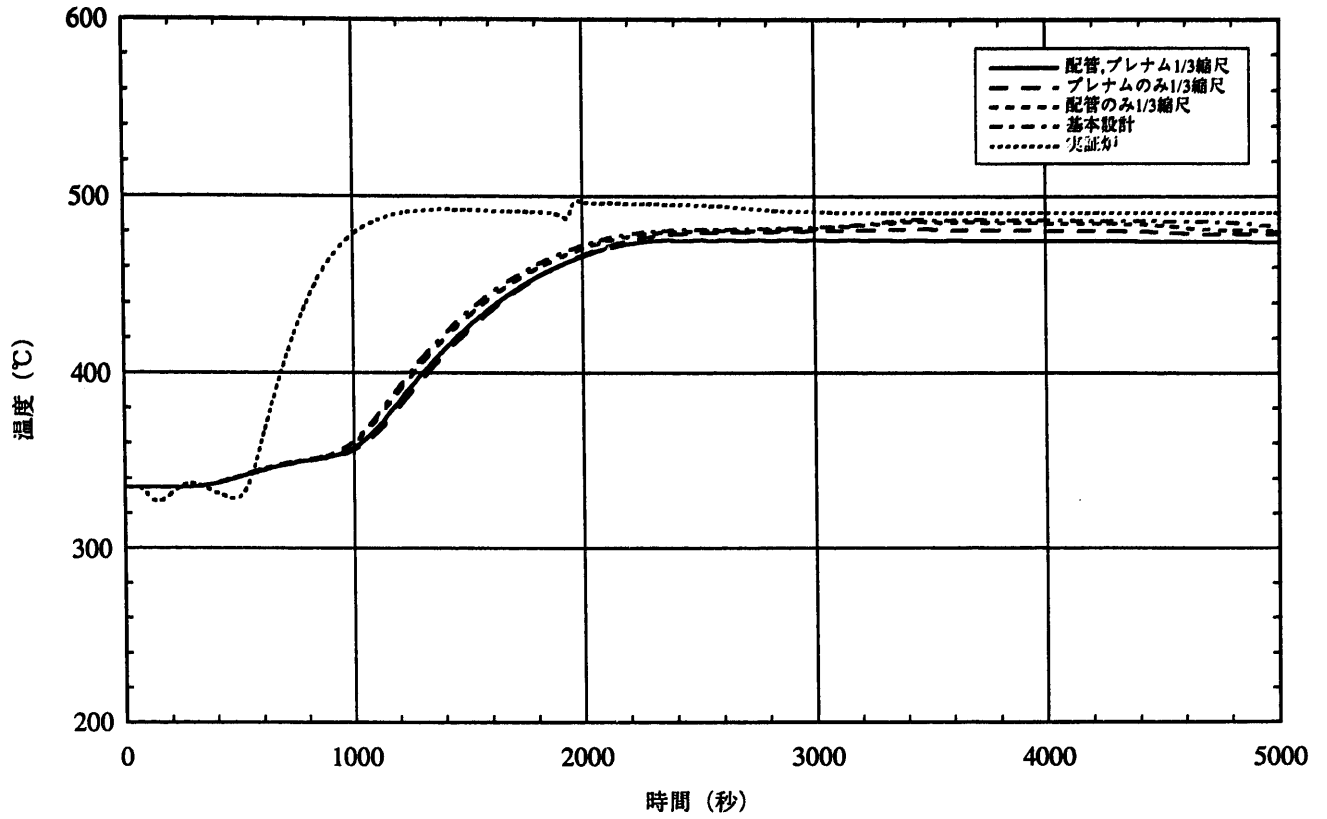


図3.5.2-7 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

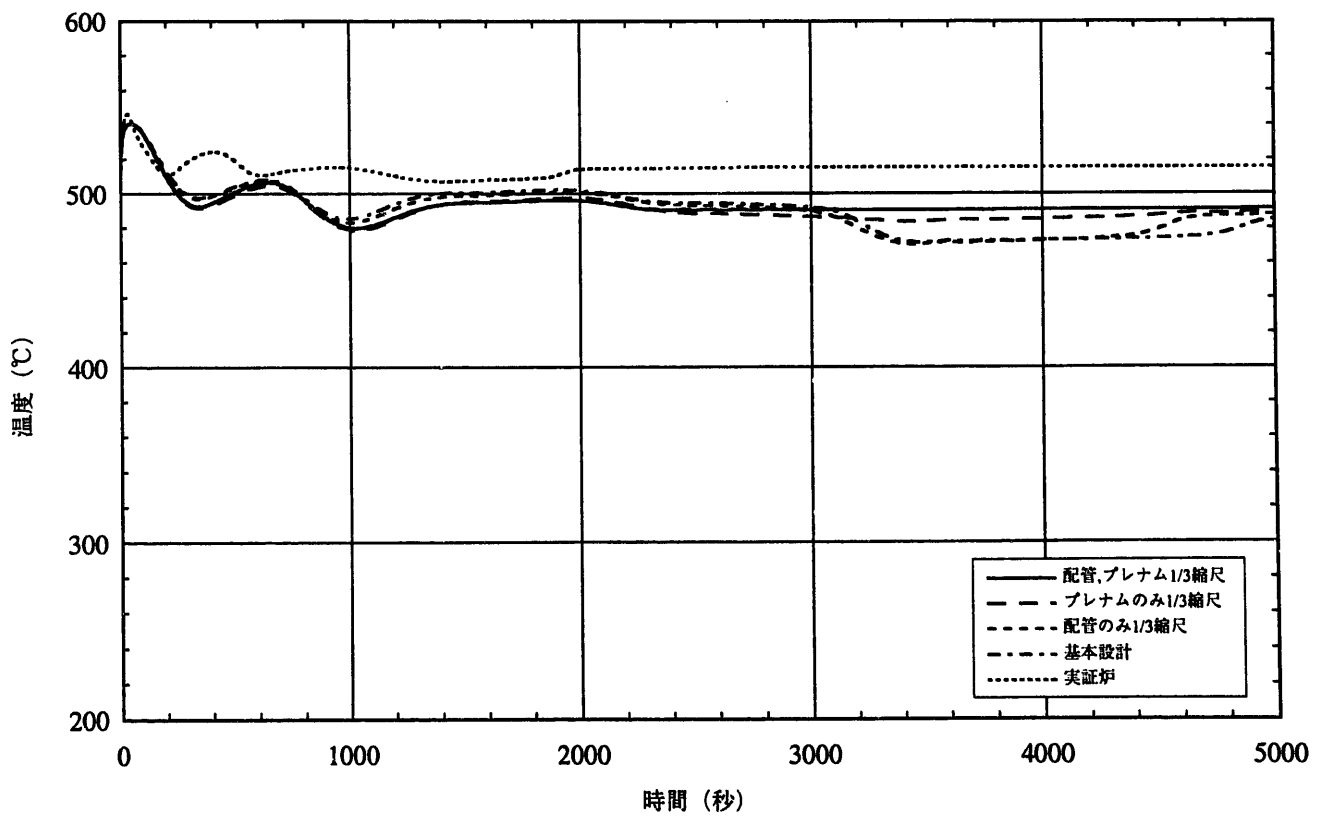


図3.5.2-8 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

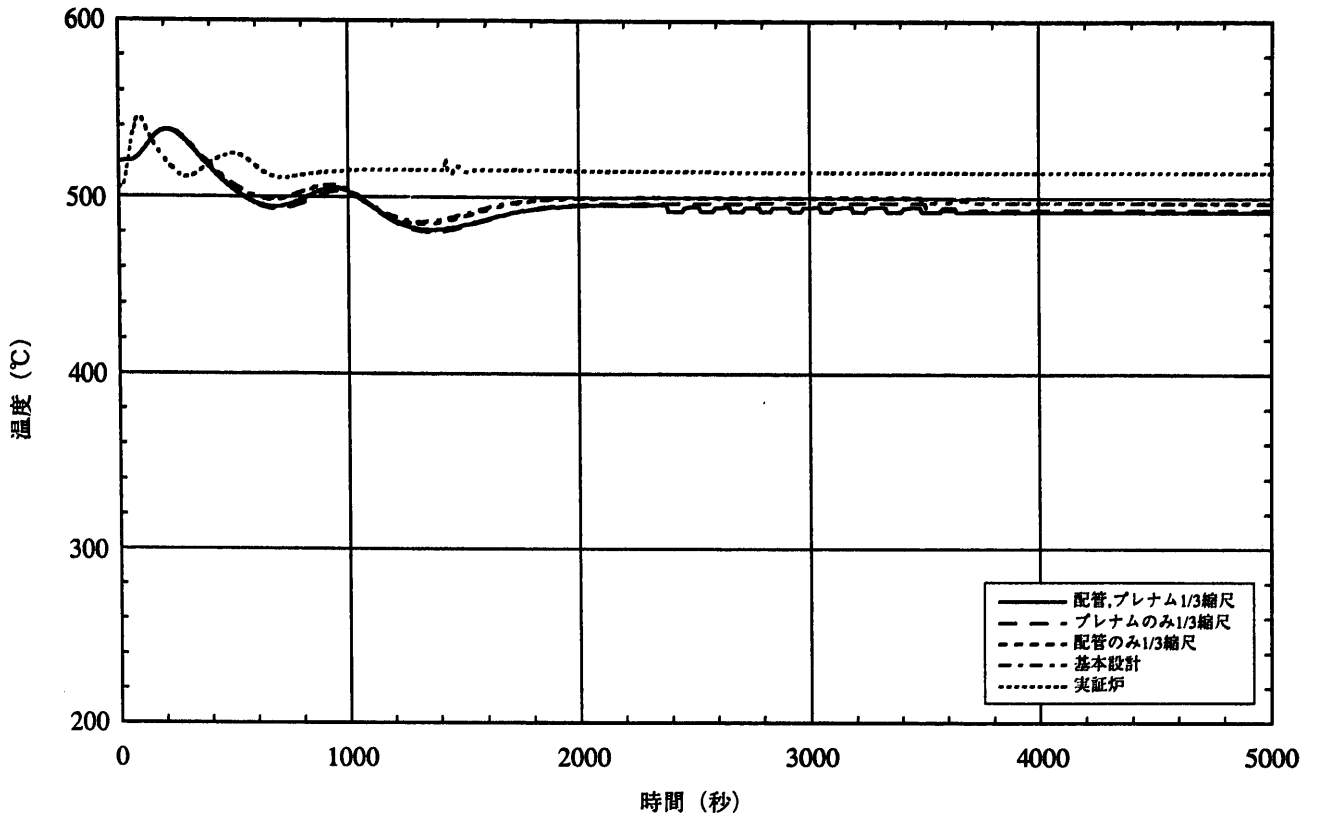


図3.5.2-9 自然循環試験解析結果 (SG入口Na温度、1次系配管長パラメータ解析)

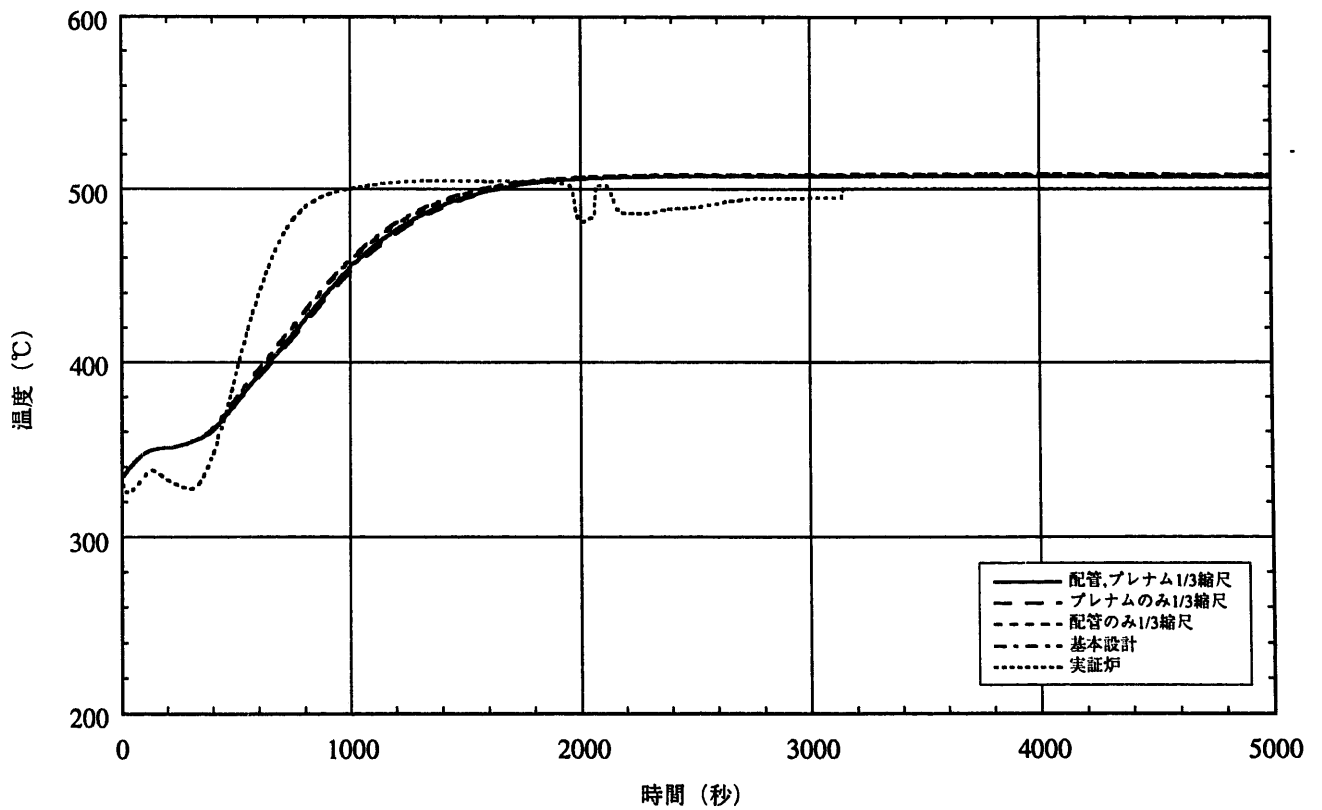


図3.5.2-10 自然循環試験解析結果 (SG出口Na温度、1次系配管長パラメータ解析)

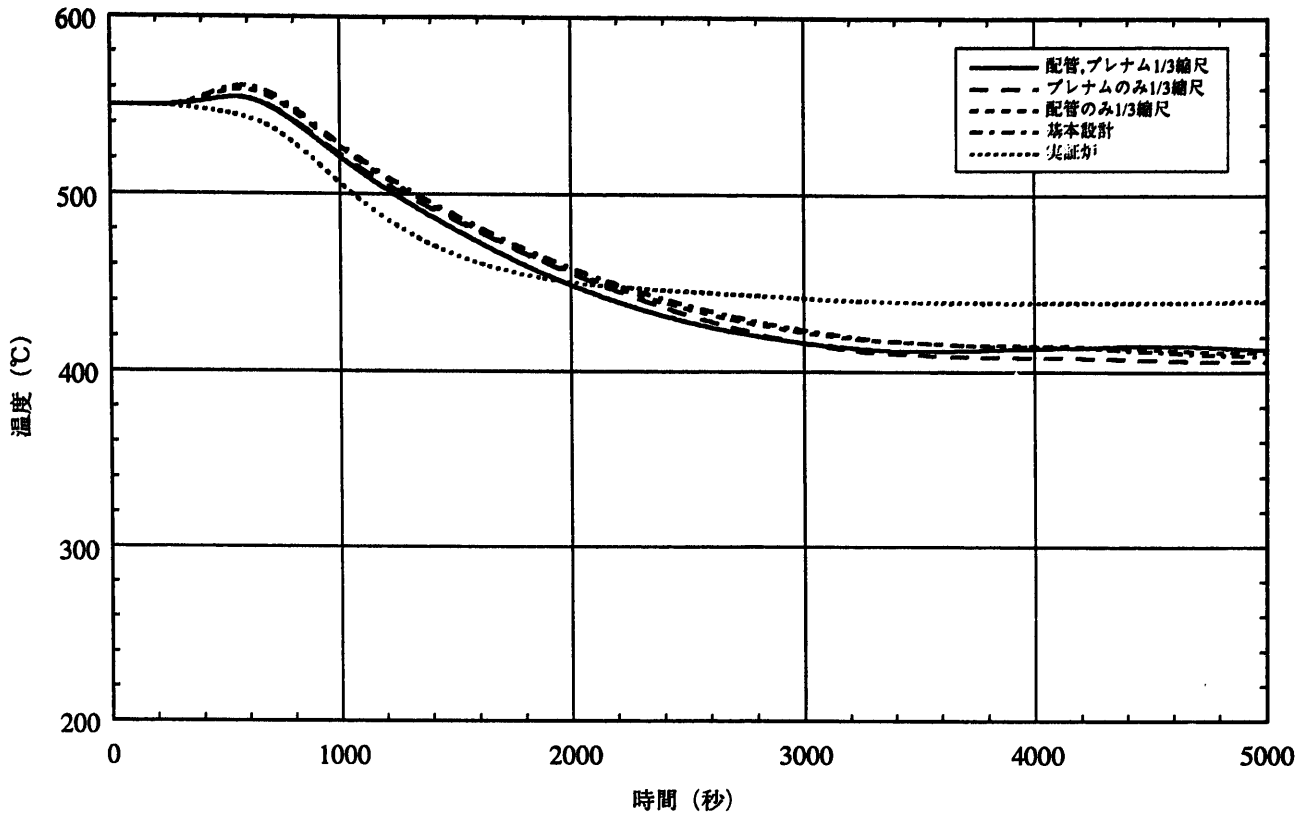


図3.5.2-11 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

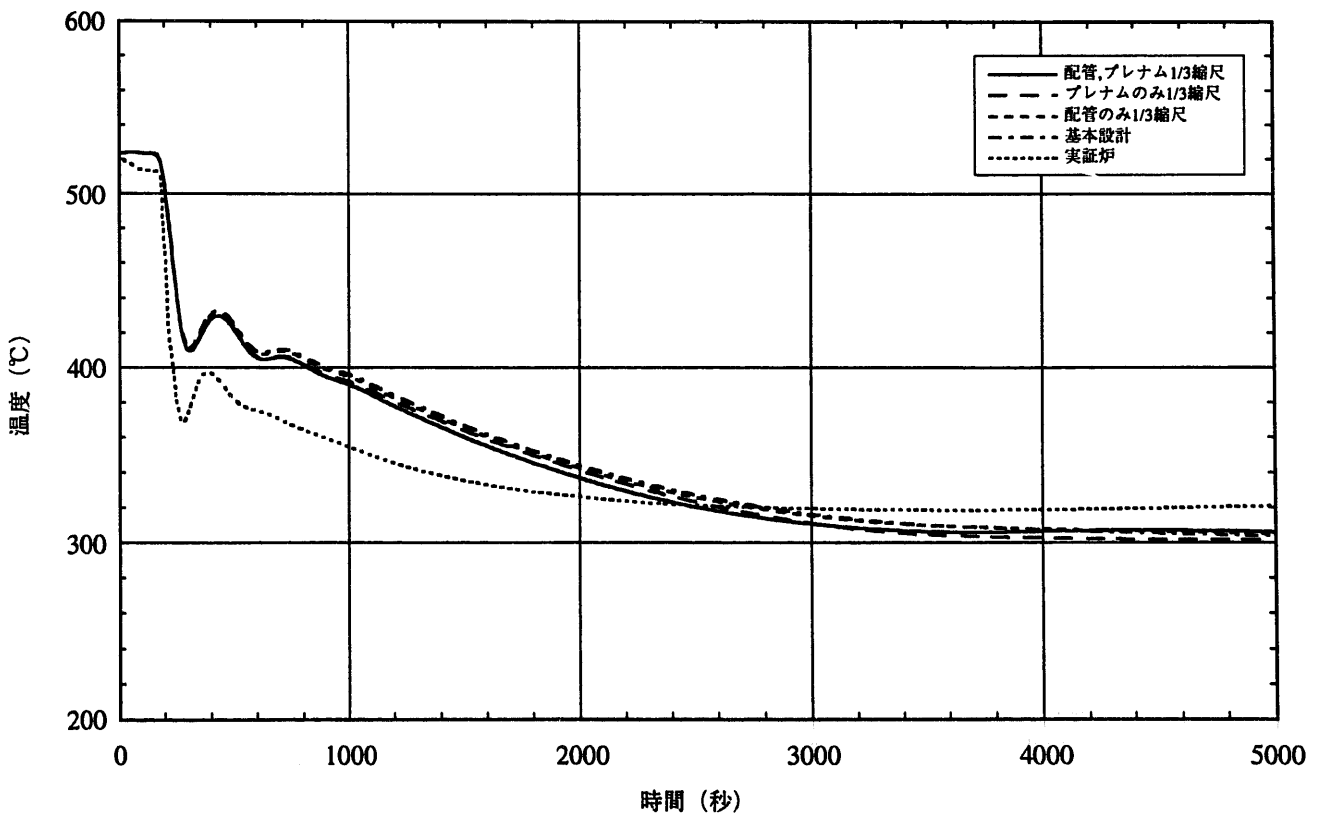


図3.5.2-12 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

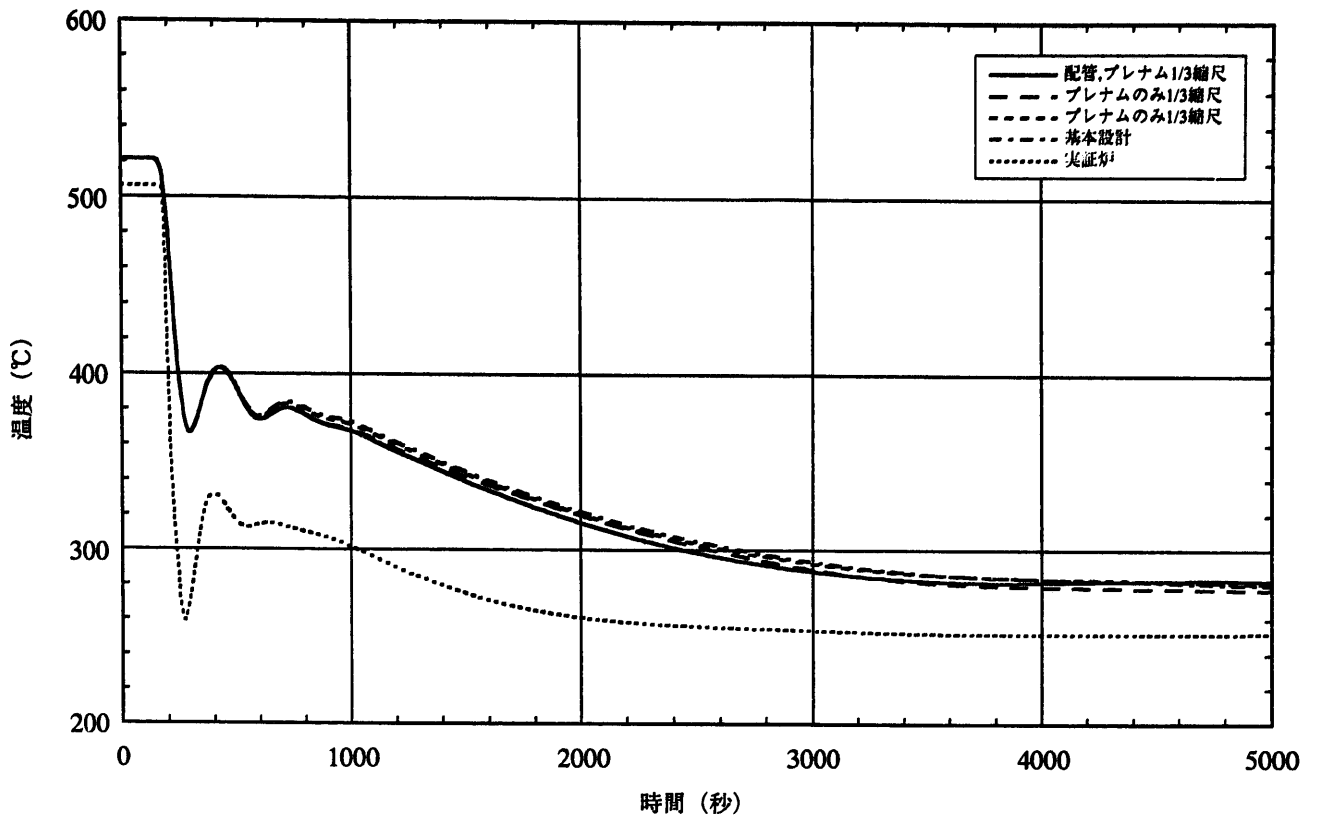


図3.5.2-13 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側入口温度、1次系配管長パラメータ解析)

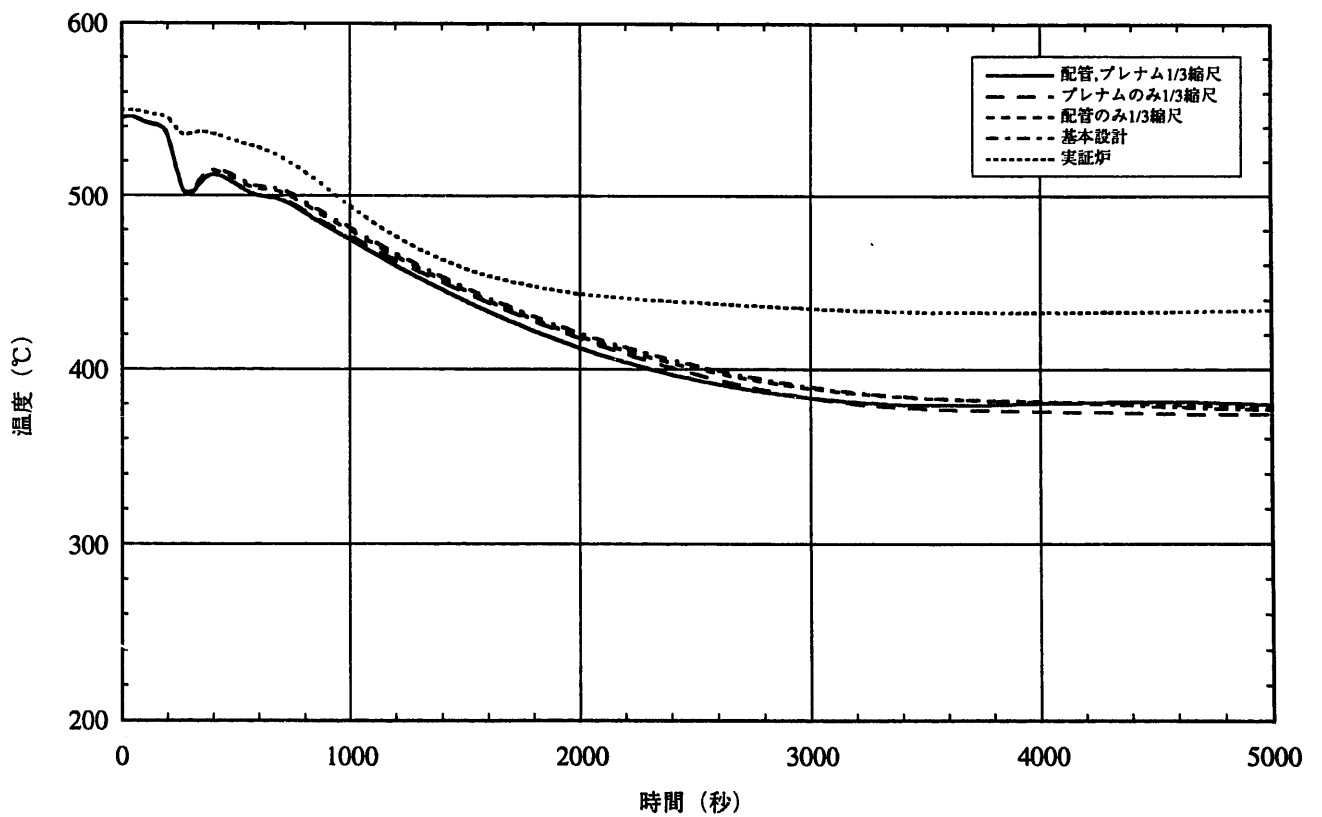


図3.5.2-14 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出口温度、1次系配管長パラメータ解析)

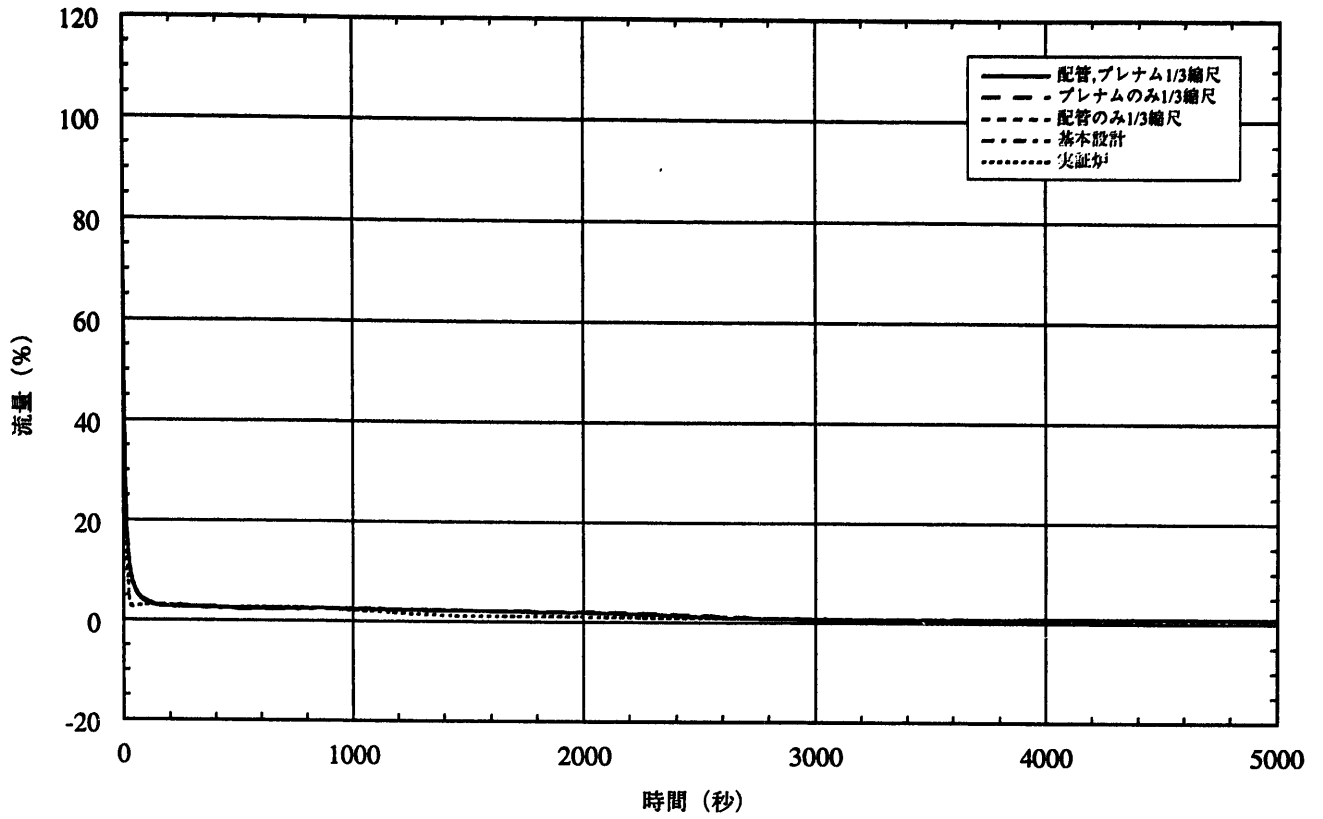


図3.5.2-15(1/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

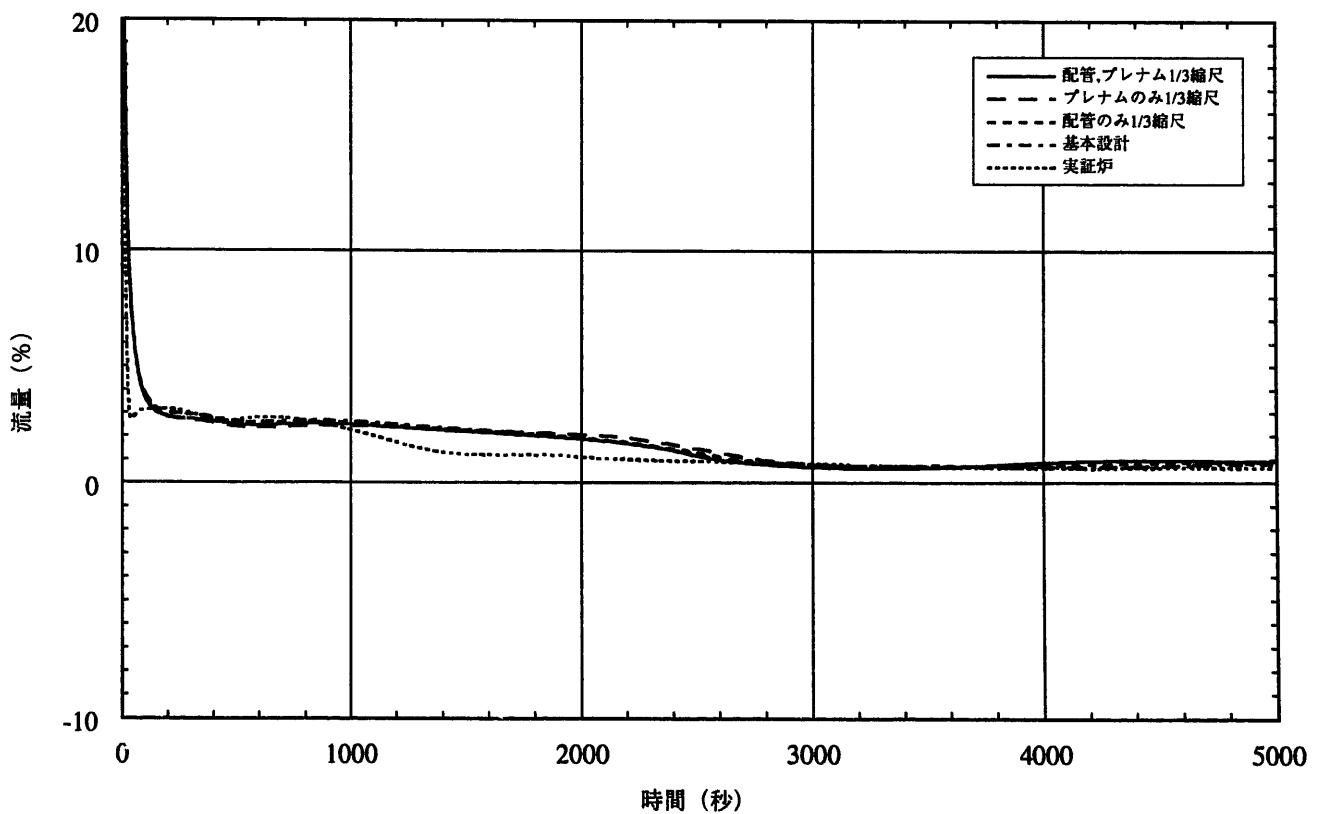


図3.5.2-15(2/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

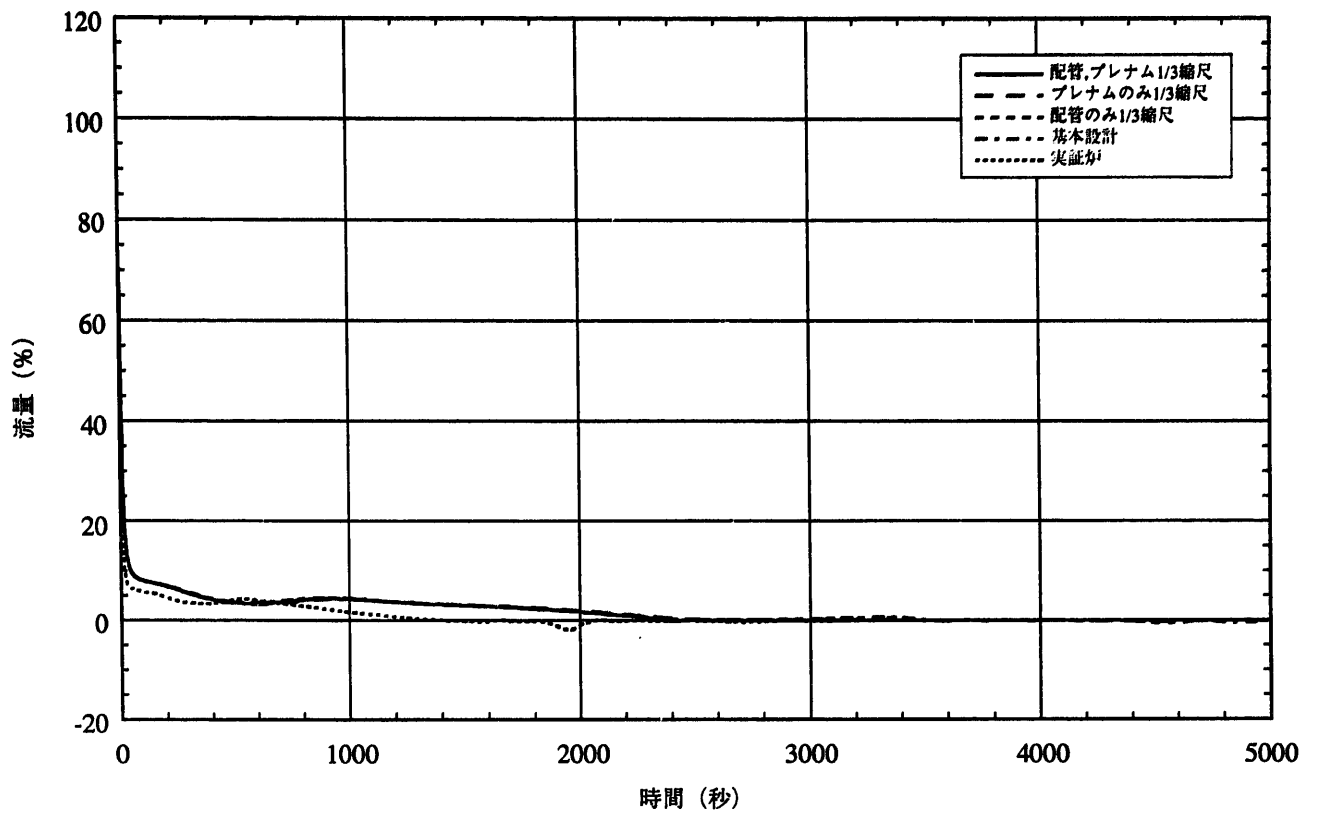


図3.5.2-16(1/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

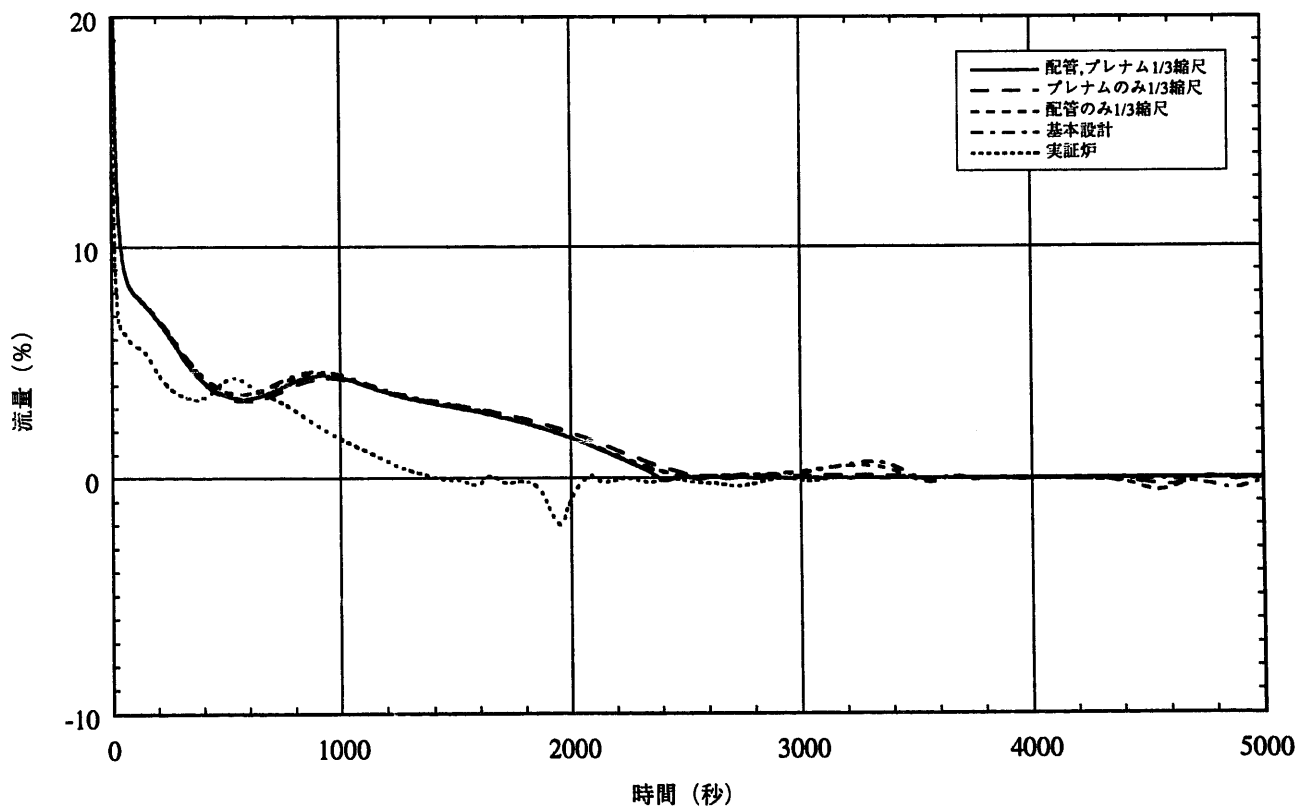


図3.5.2-16(2/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

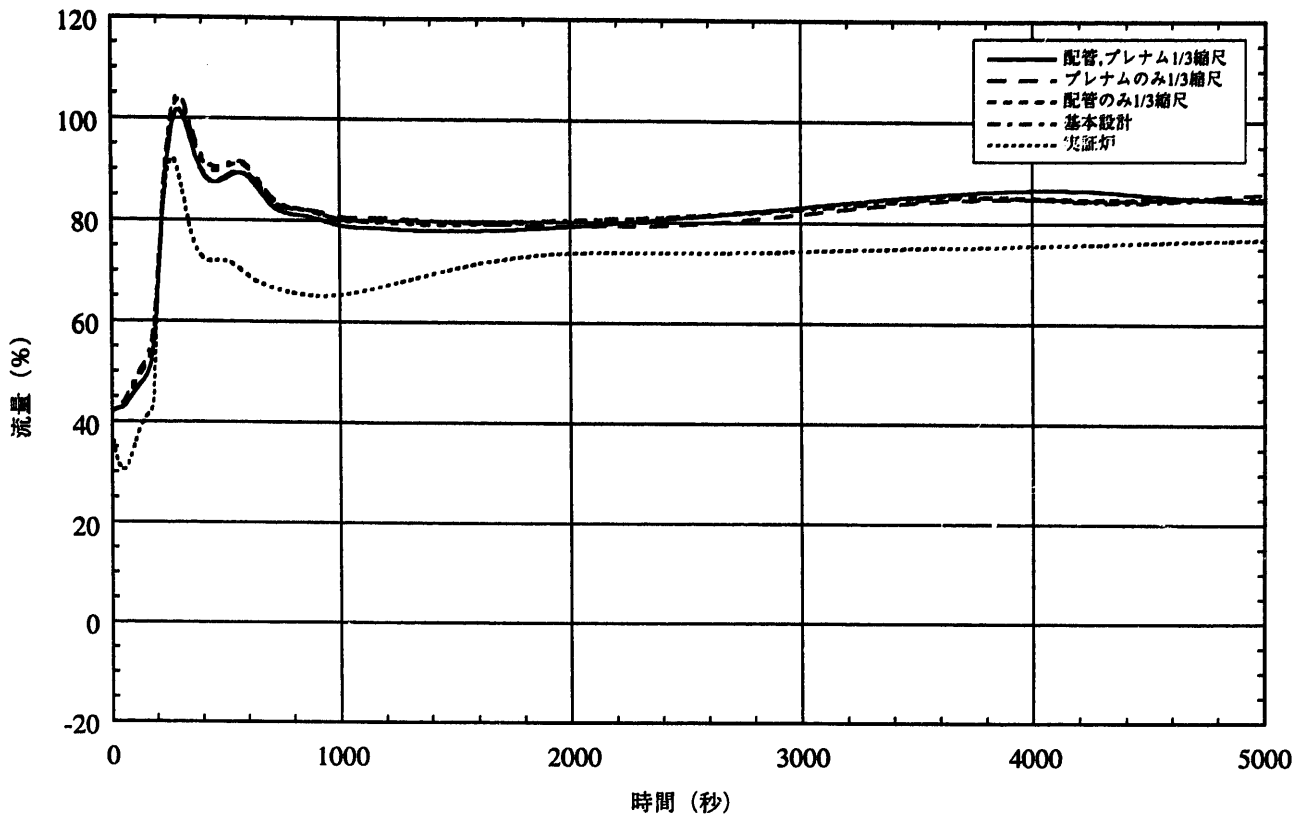


図3.5.2-17 自然循環試験解析結果 (DRACS 1次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

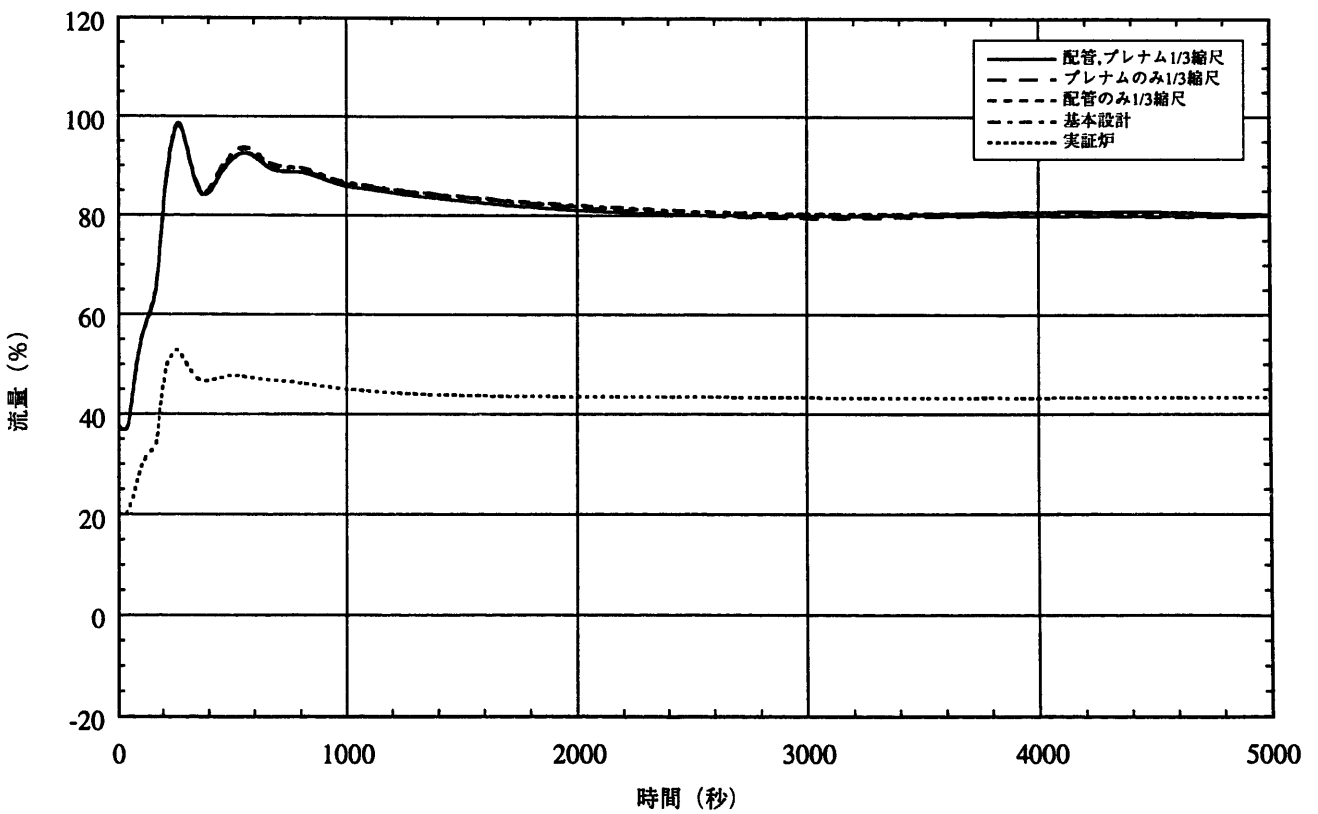


図3.5.2-18 自然循環試験解析結果 (DRACS 2次系流量、1次系配管長パラメータ解析)

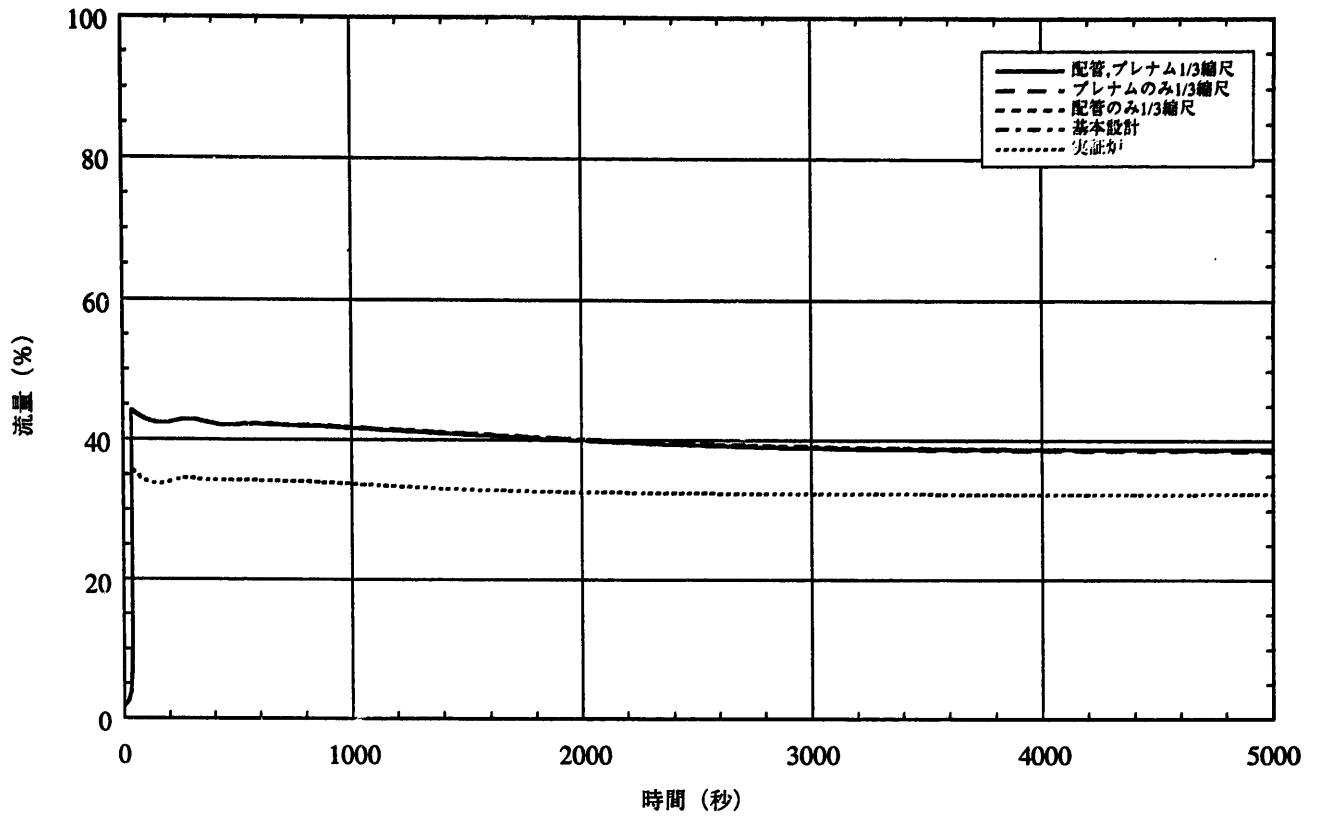


図3.5.2-19 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、1次系配管長パラメータ解析)

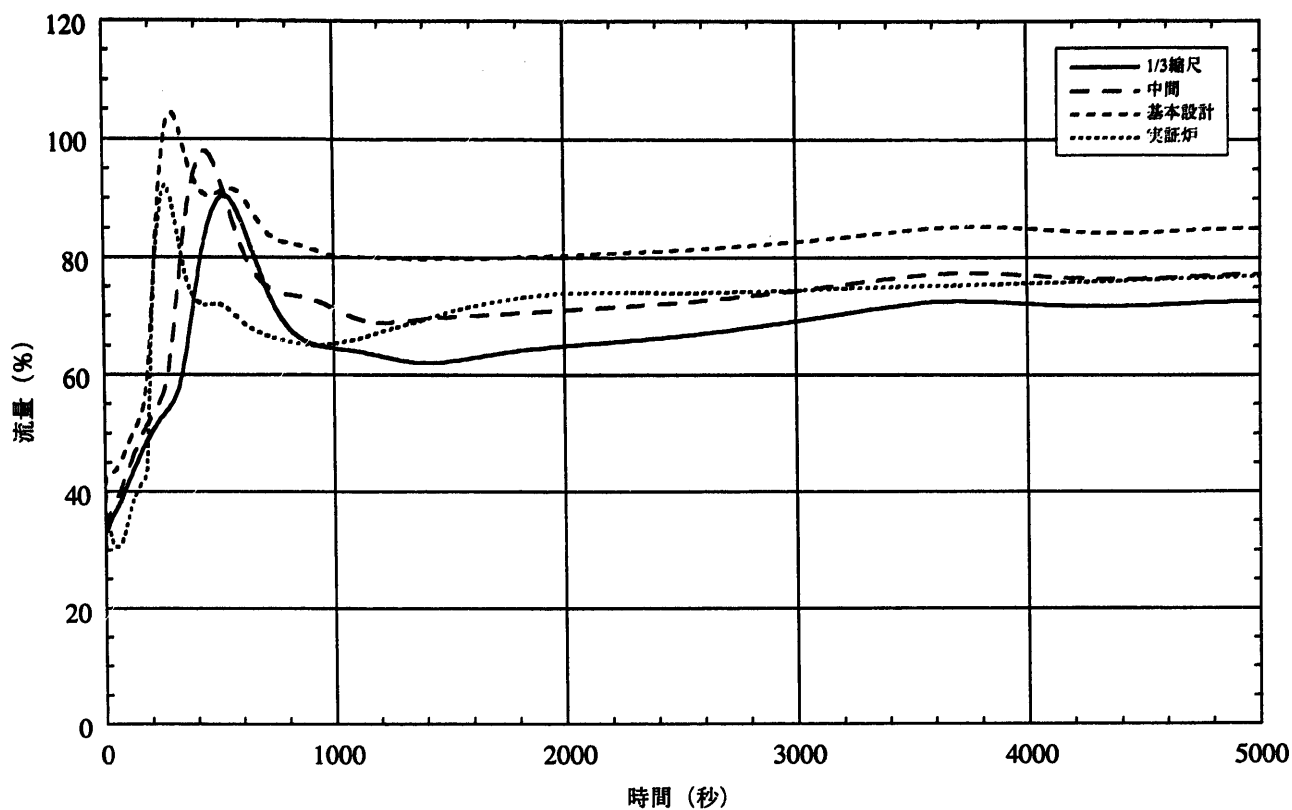


図4.5-1 自然循環試験解析結果 (DRACS 1 次系流量、DARCS系Eu数パラメータ解析)

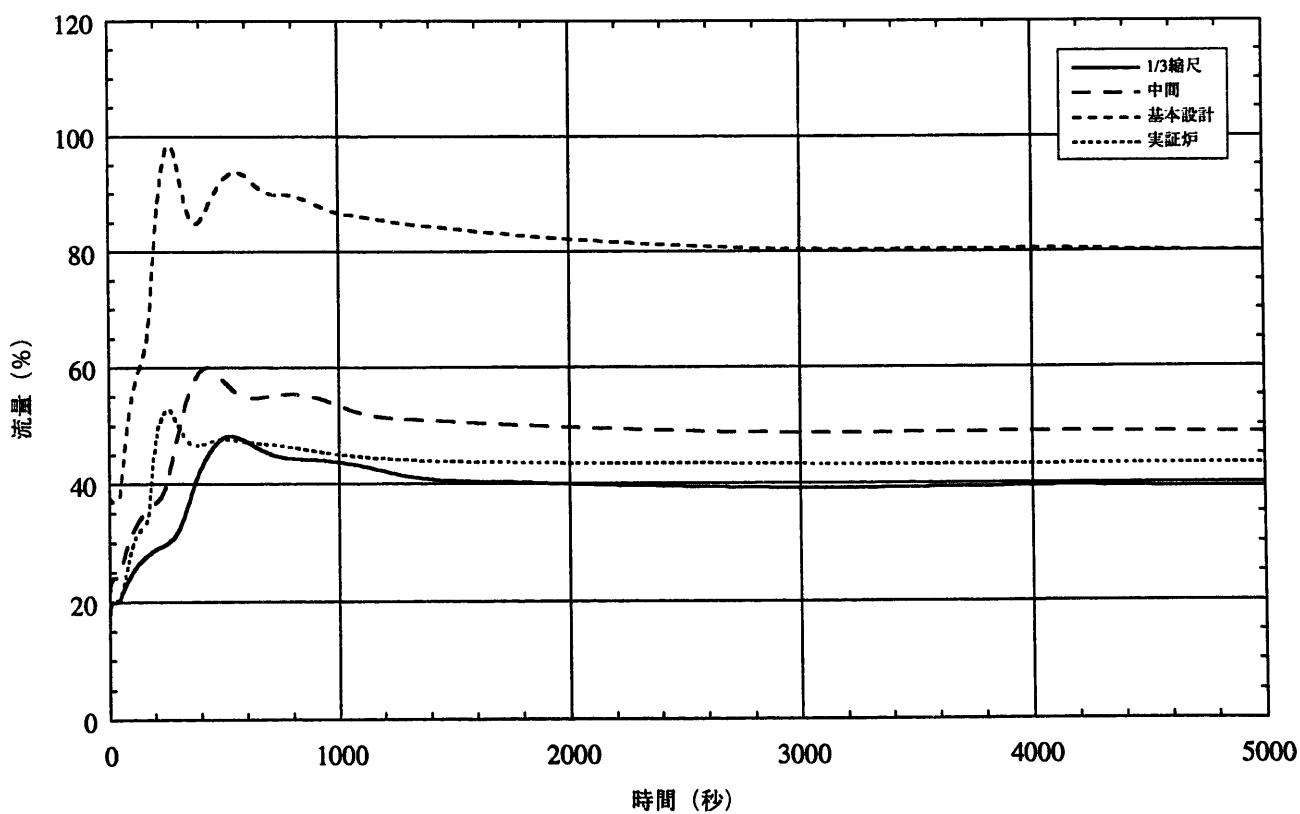


図4.5-2 自然循環試験解析結果 (DRACS 2 次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

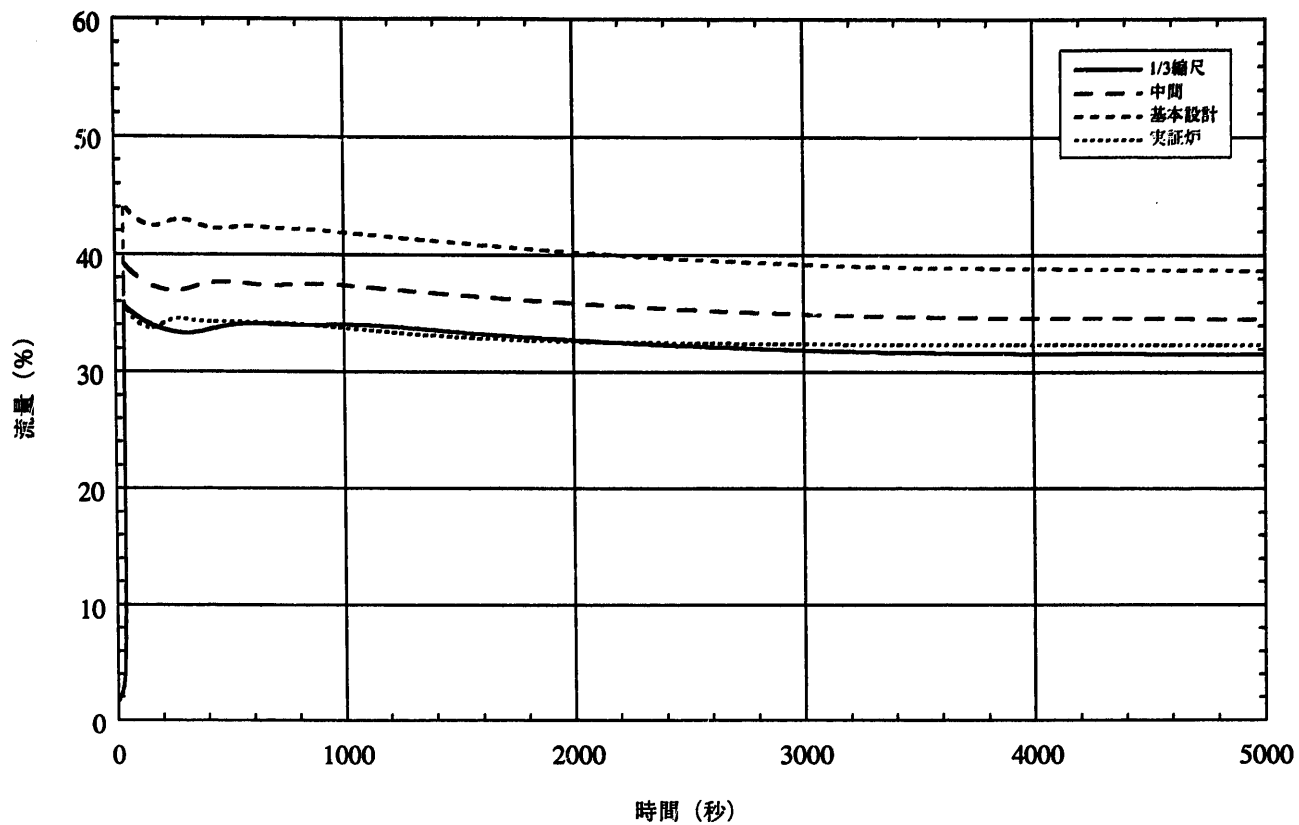


図4.5-3 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

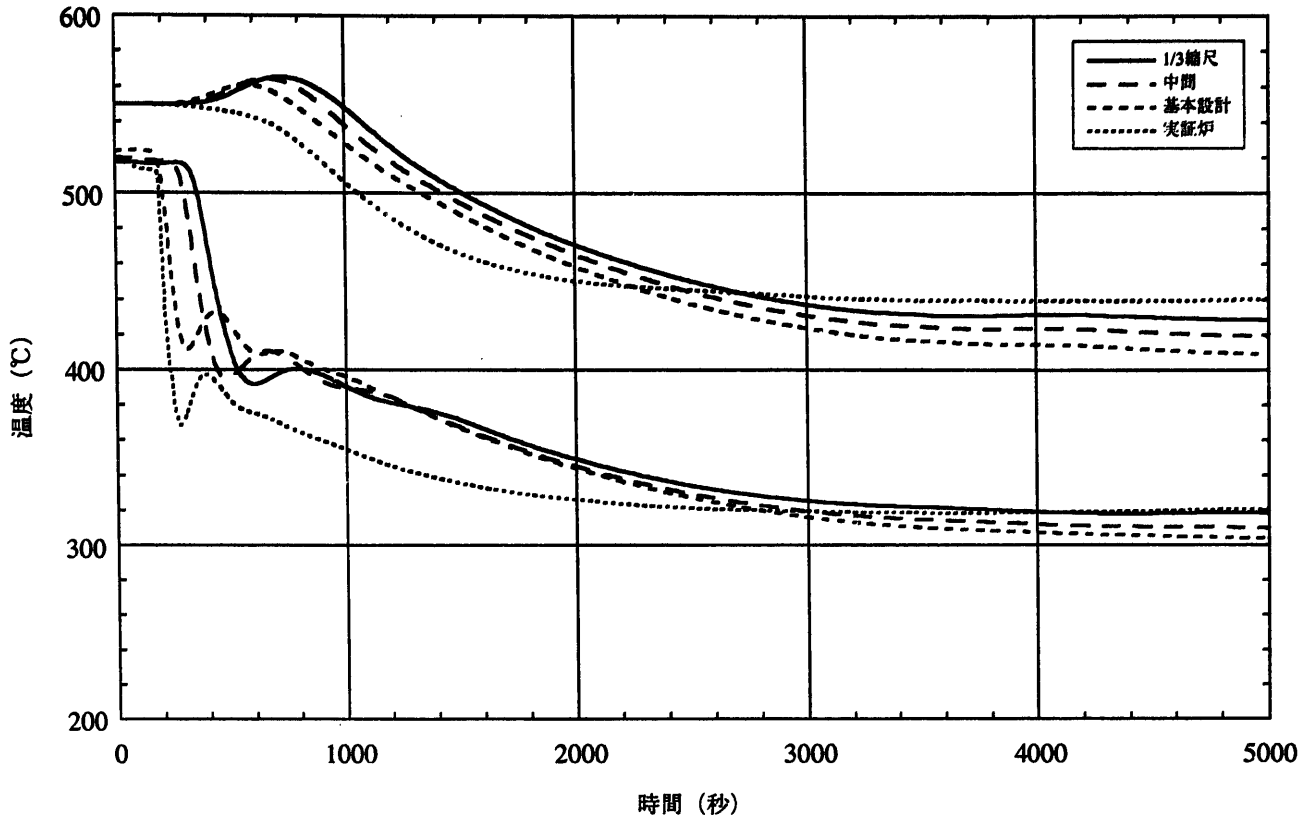


図4.5-4 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

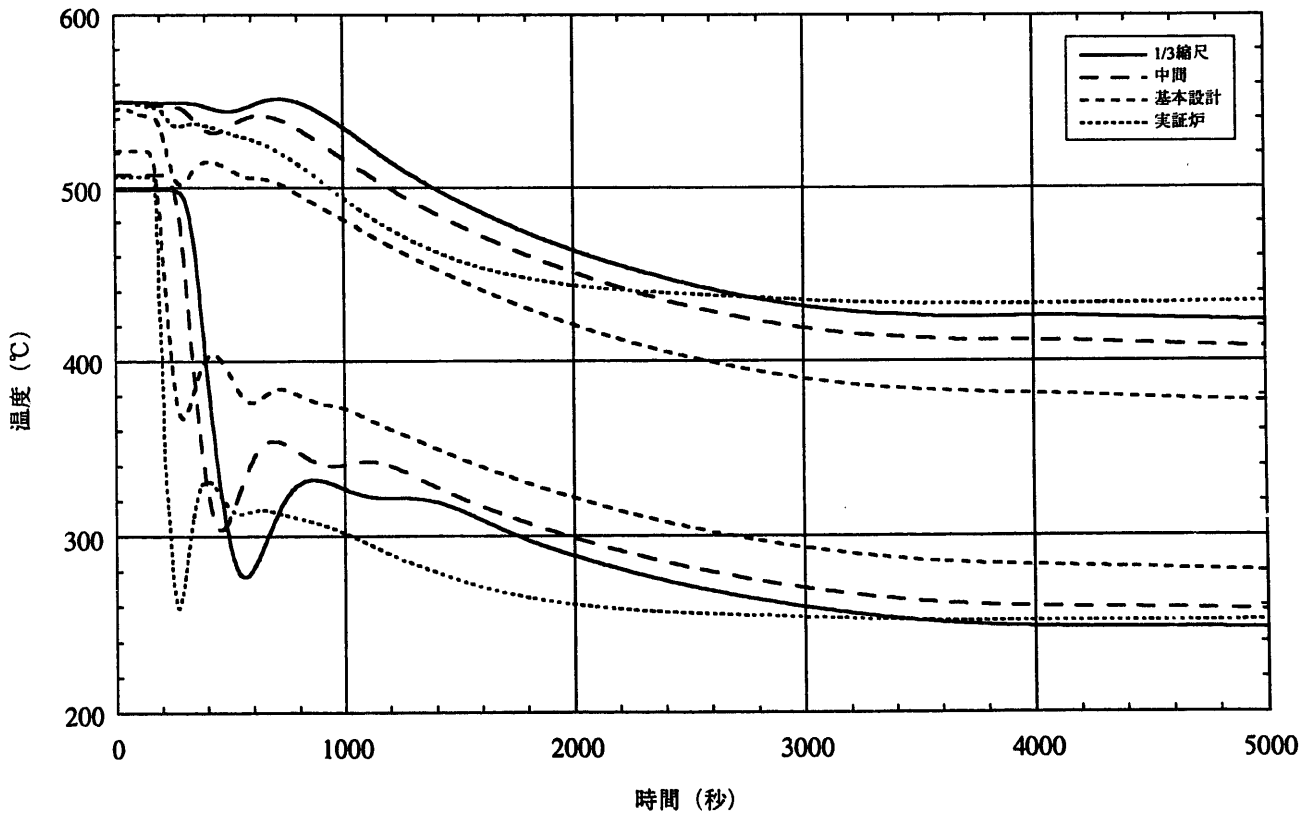


図4.5-5 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

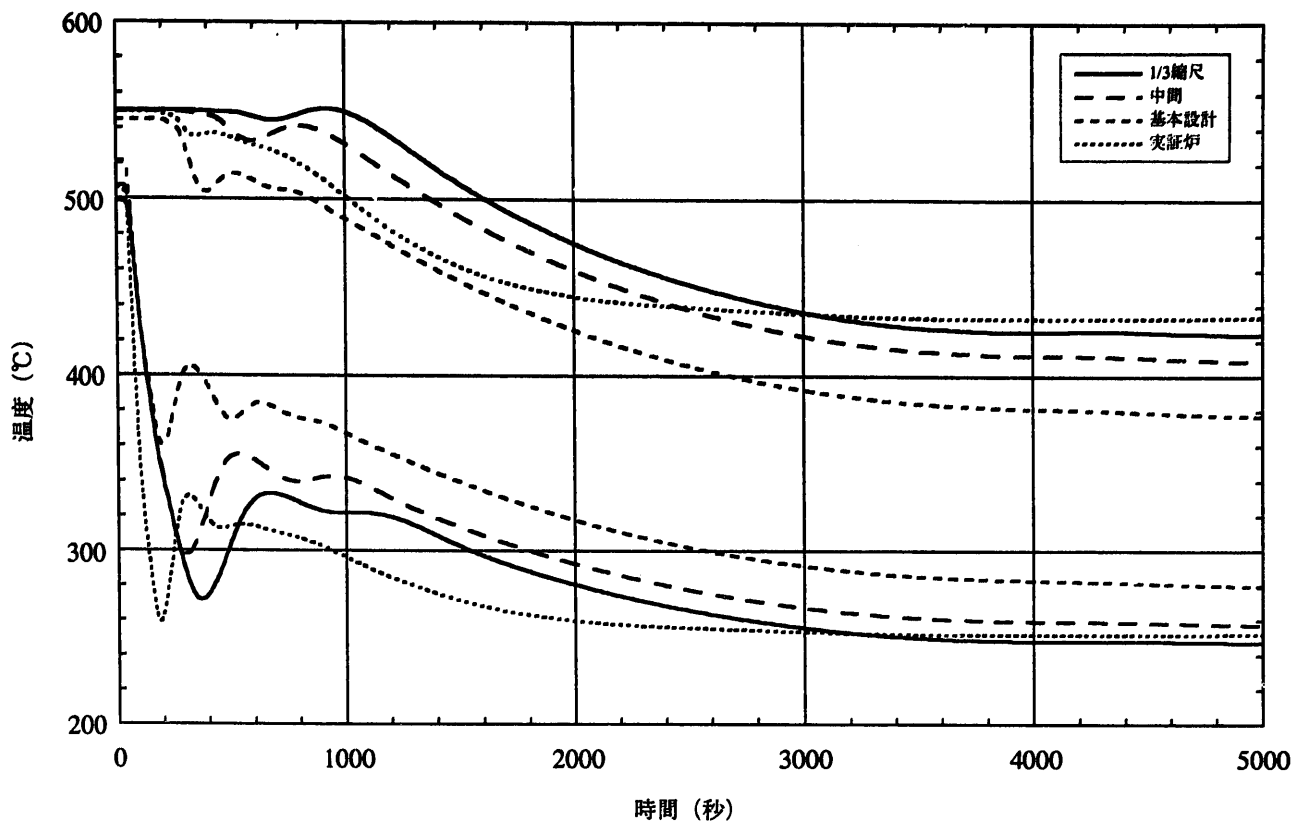


図4.5-6 自然循環試験解析結果（空気冷却器2次N a 出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析）

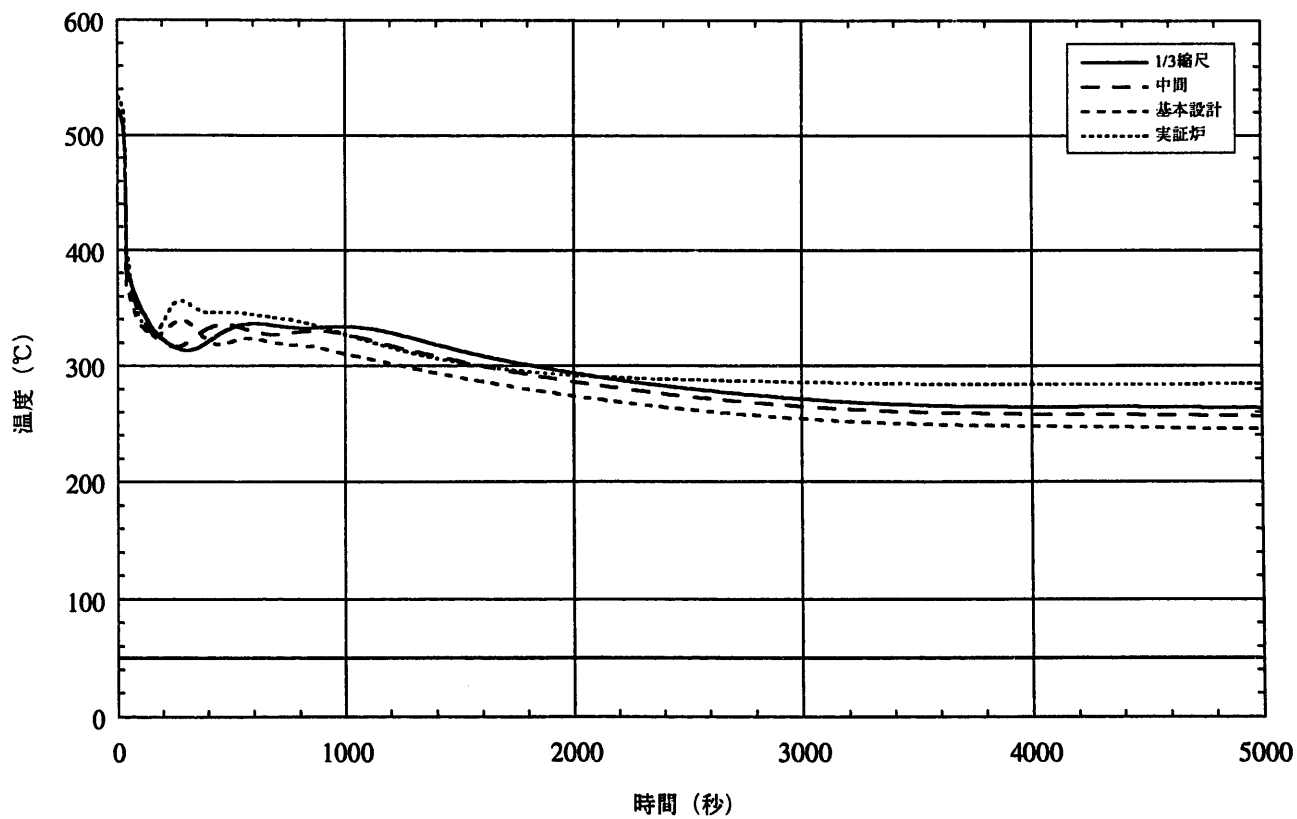


図4.5-7 自然循環試験解析結果（空気冷却器空気出入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析）

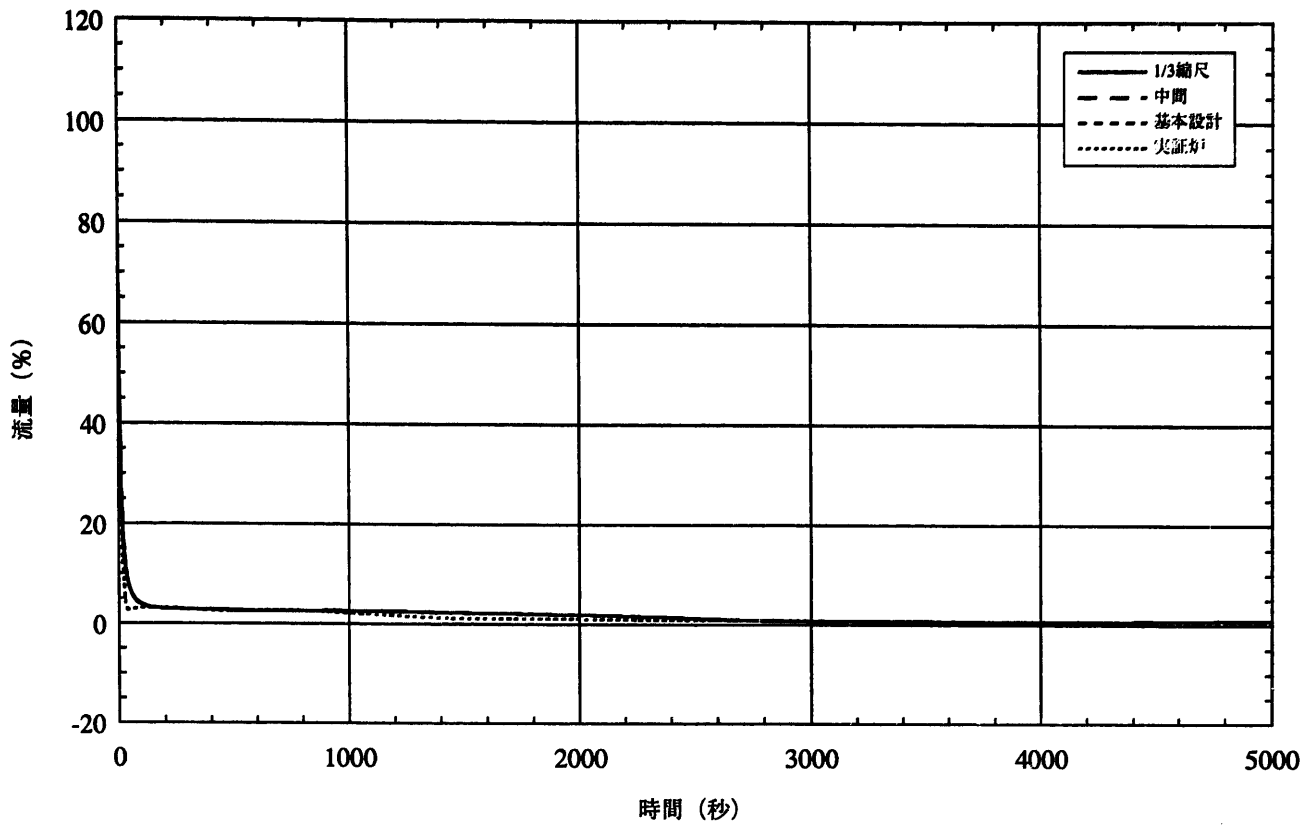


図4.5-8(1/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

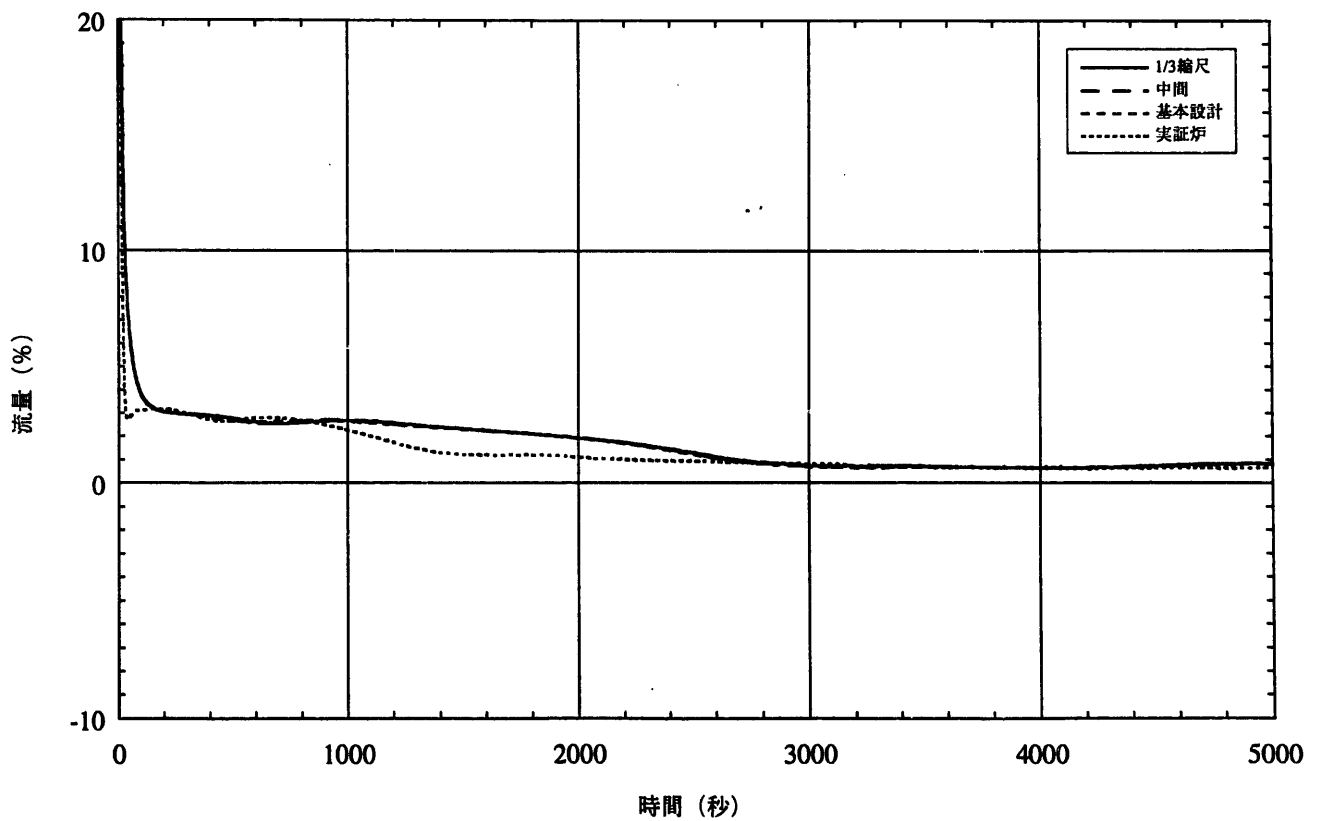


図4.5-8(2/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

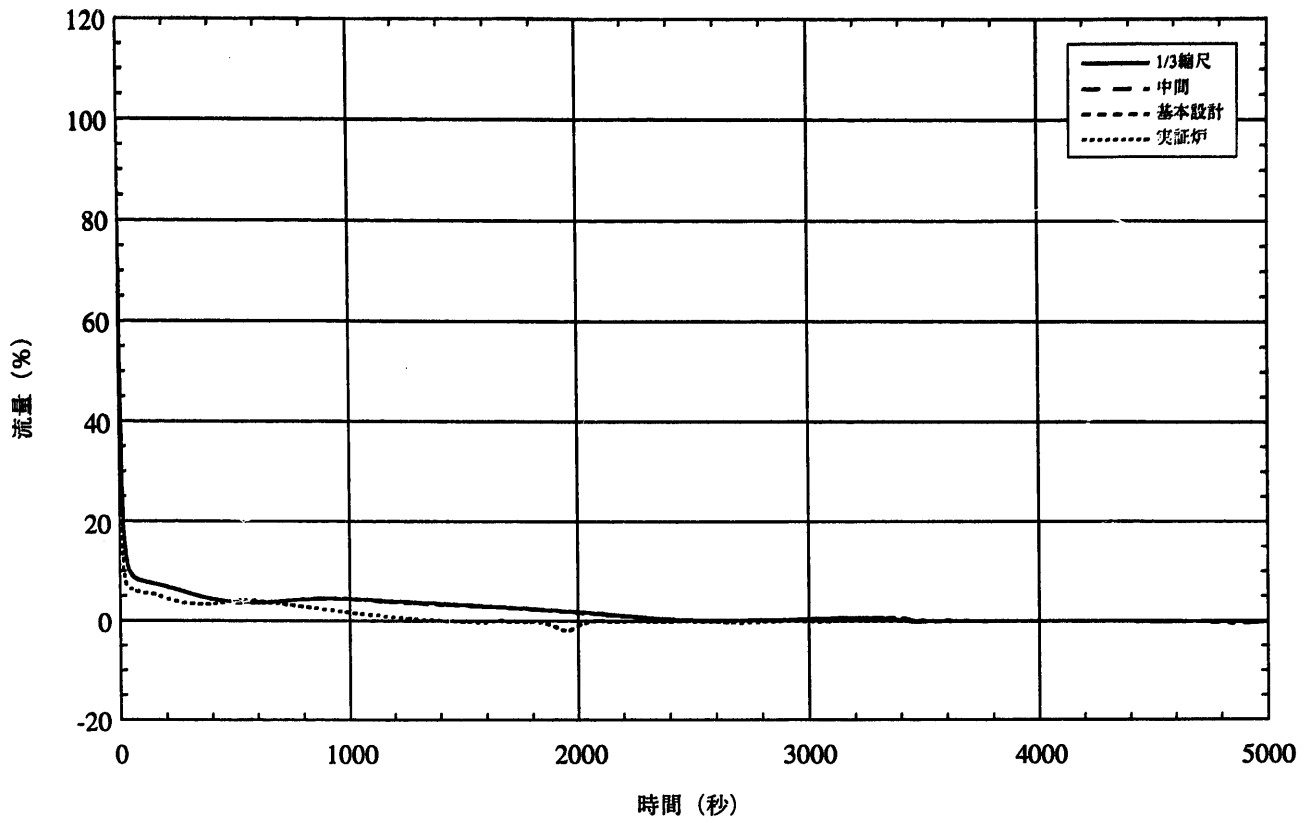


図4.5-9(1/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

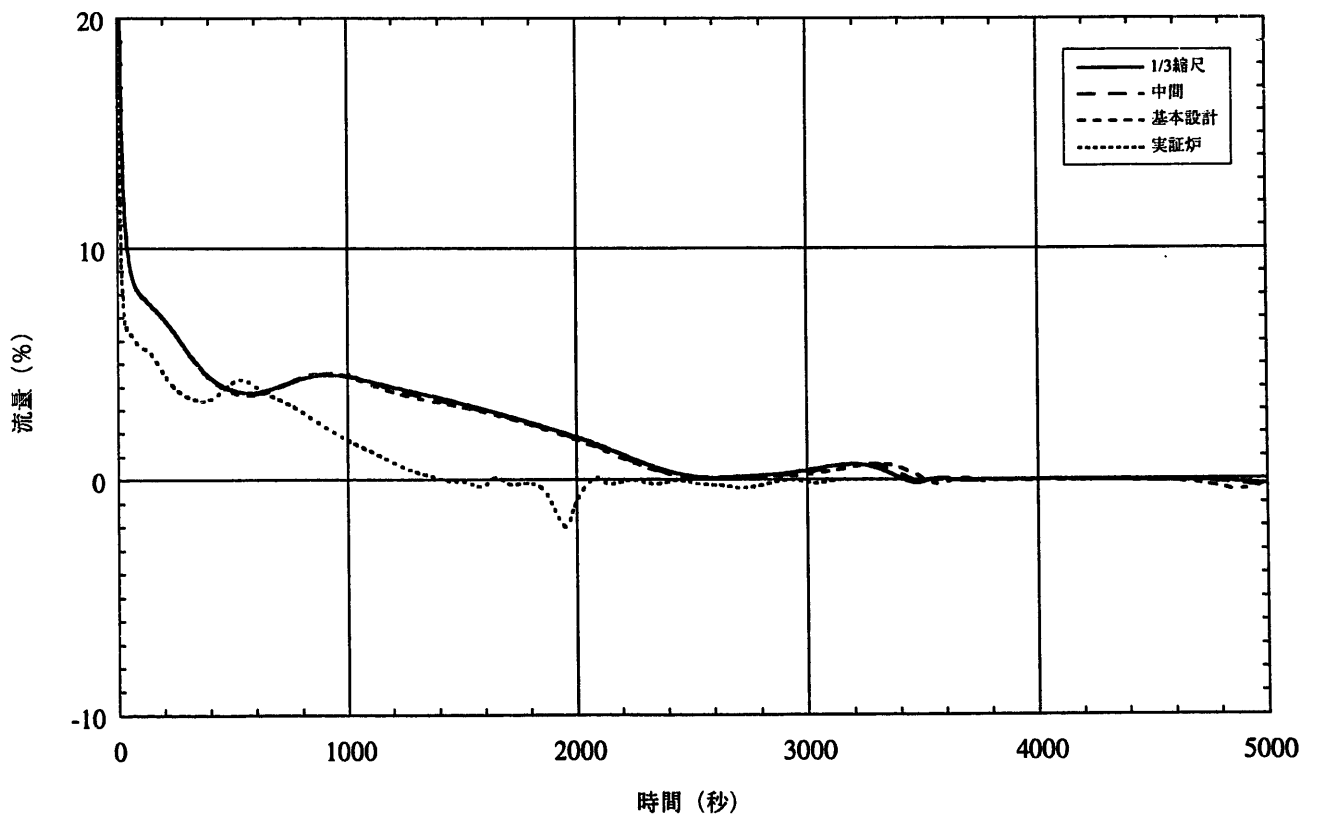


図4.5-9(2/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、DRACS系Eu数パラメータ解析)

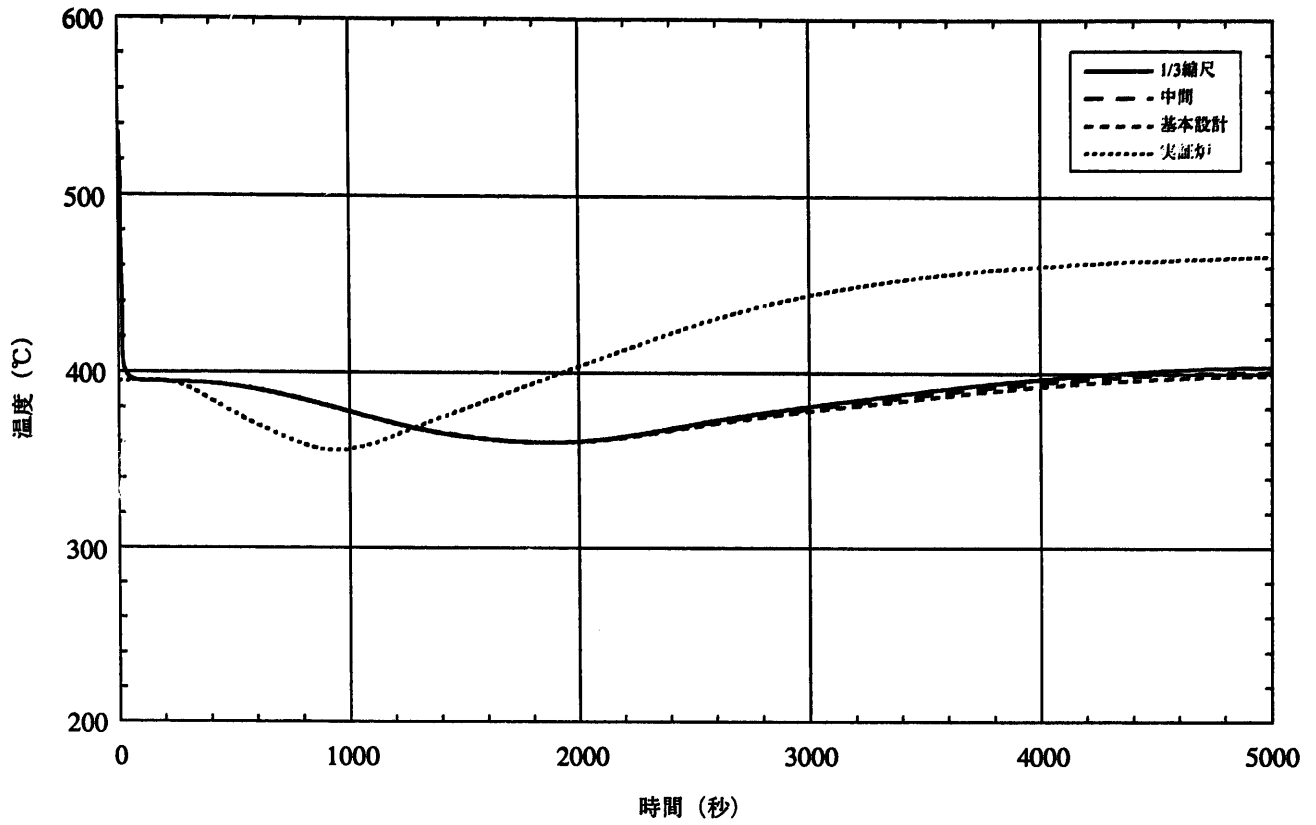


図4.5-10 自然循環試験解析結果（原子炉容器入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析）

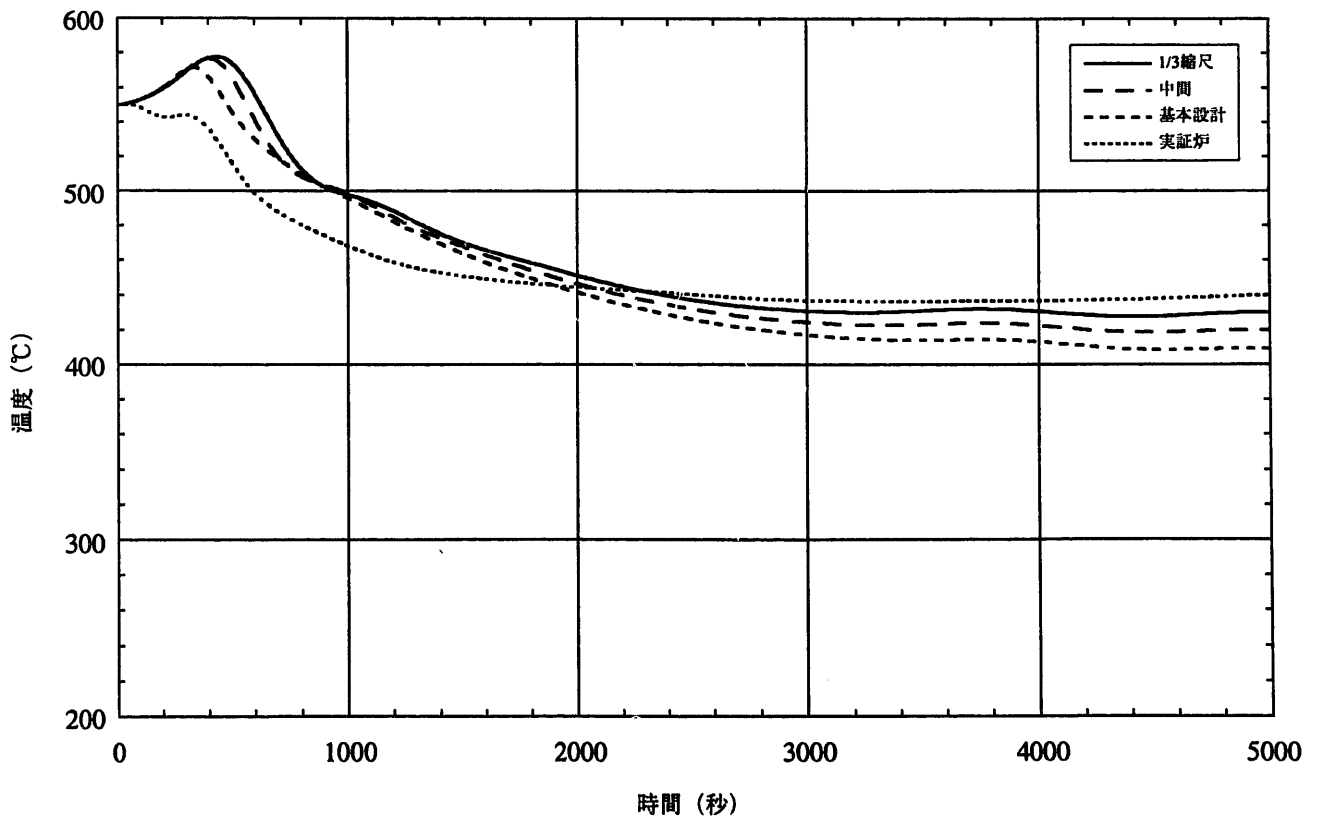


図4.5-11 自然循環試験解析結果（原子炉容器出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析）

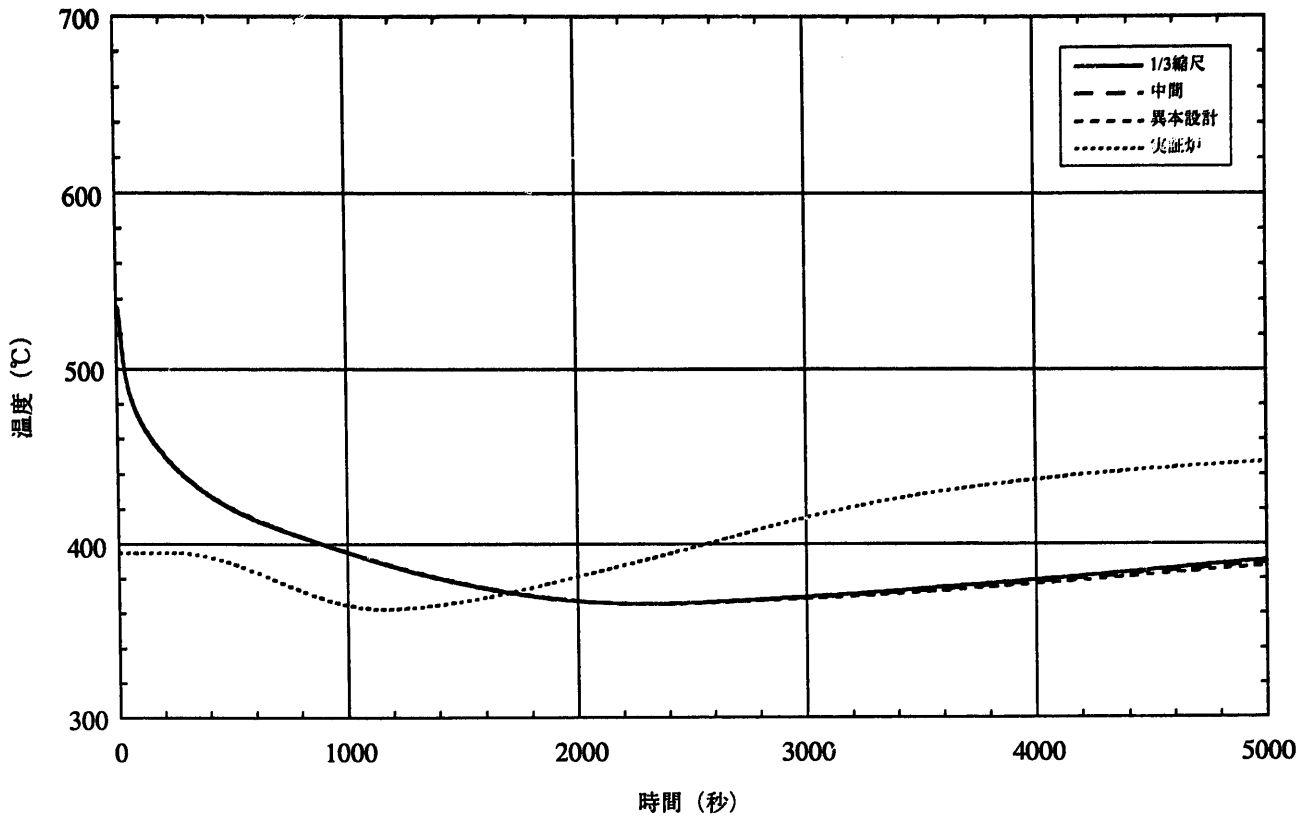


図4.5-12 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

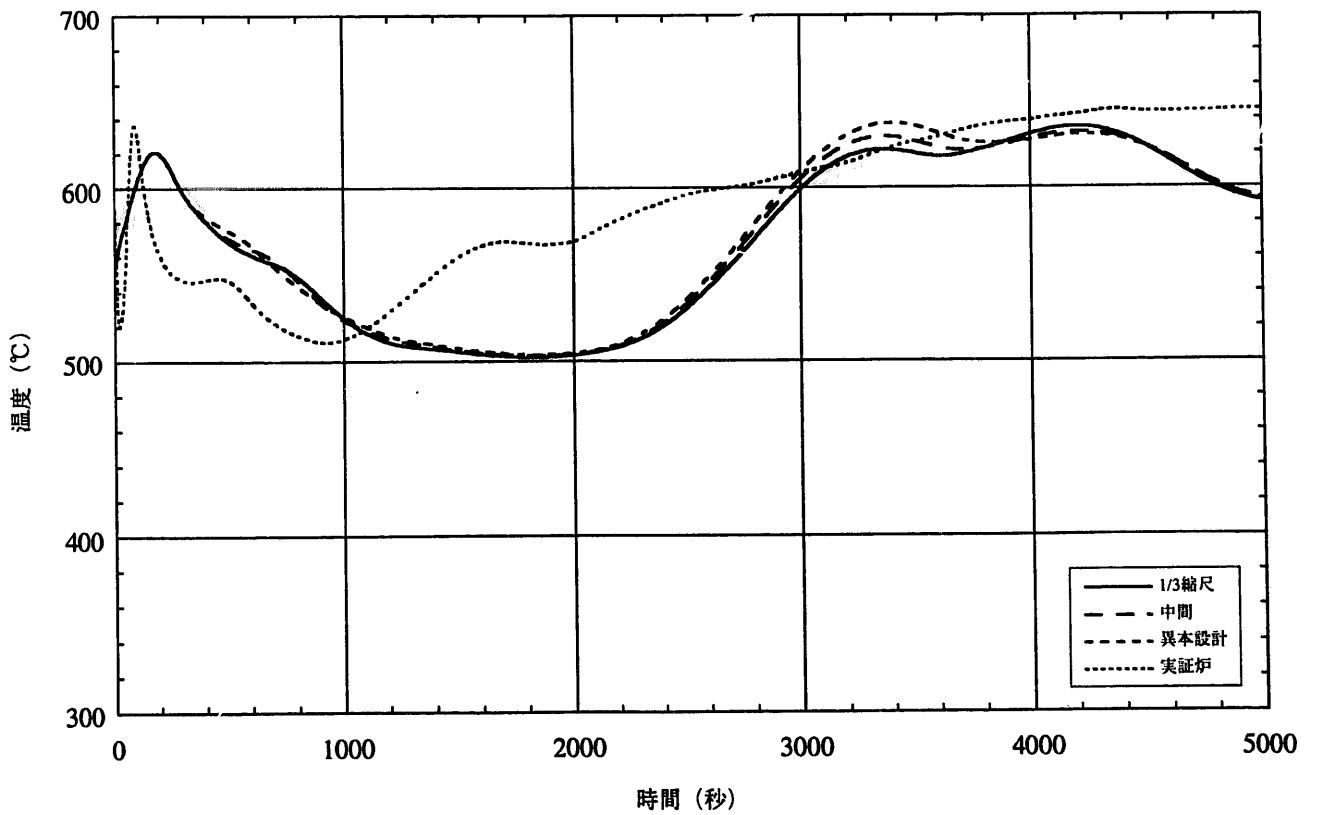


図4.5-13 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

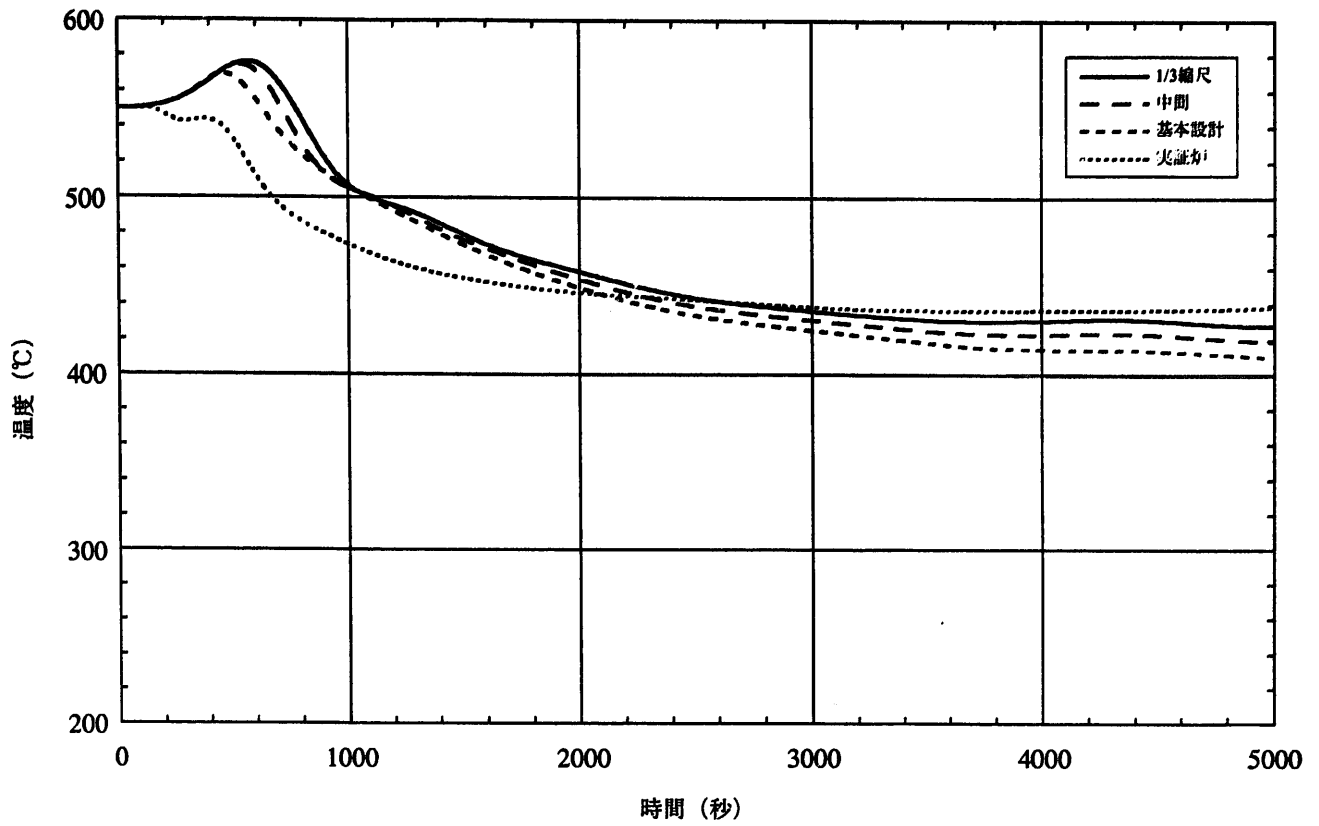


図4.5-14 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

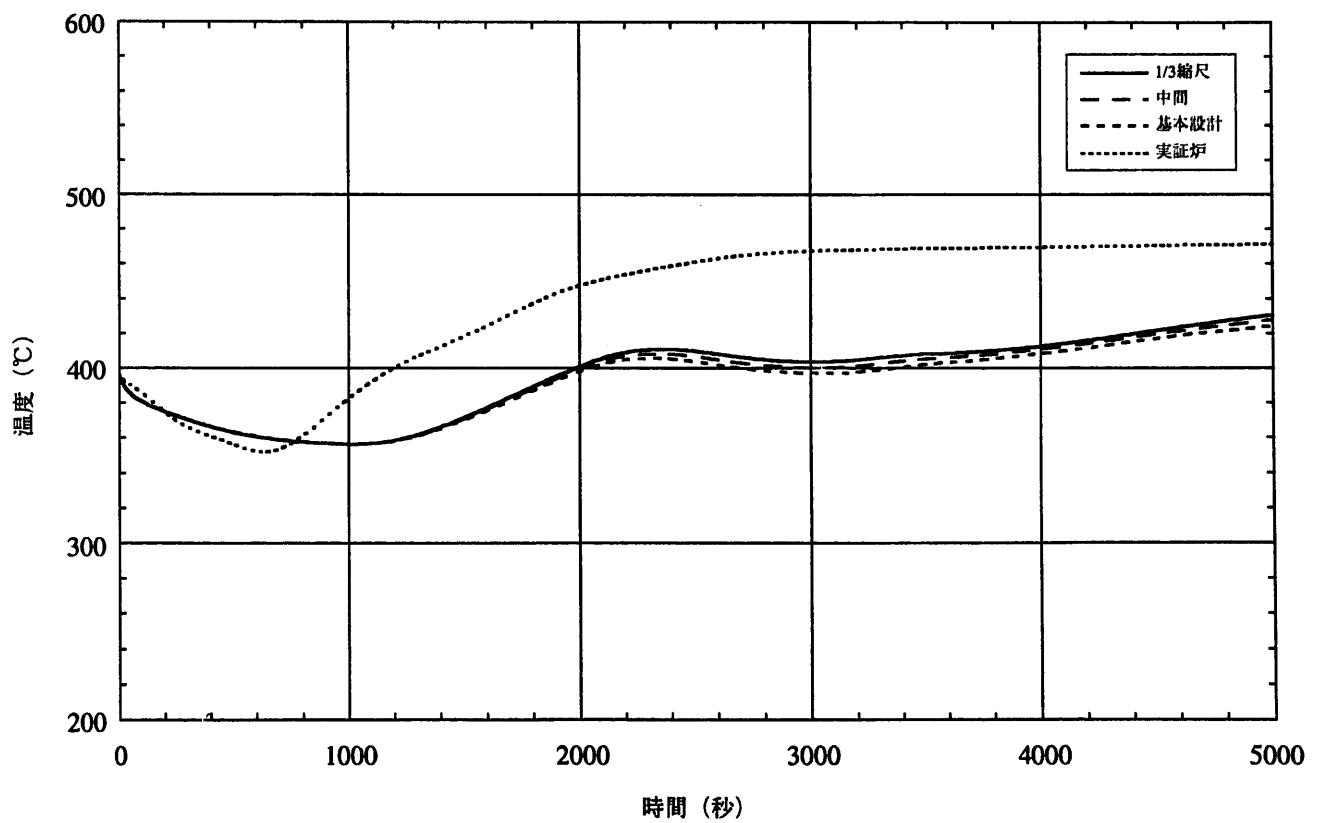


図4.5-15 自然循環試験解析結果 (IHX 1次側出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

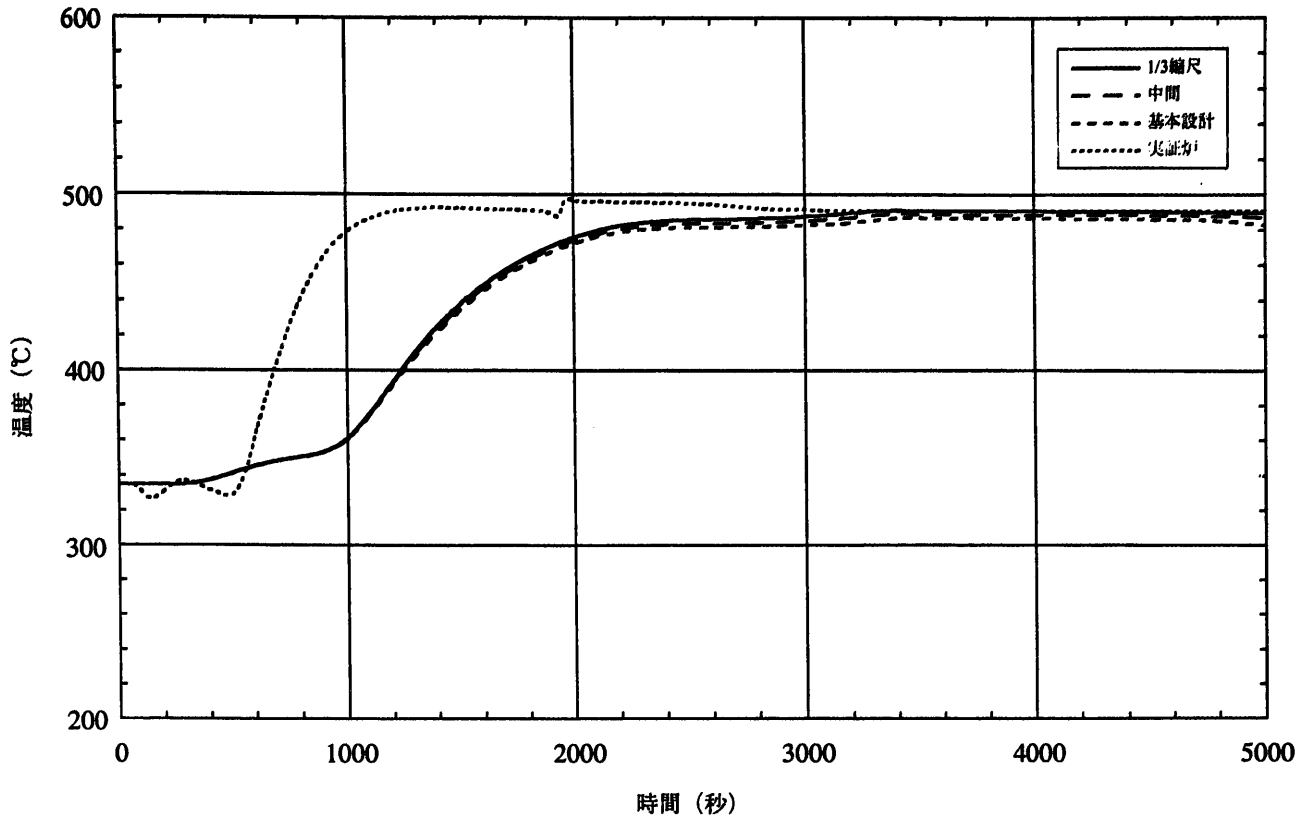


図4.5-16 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

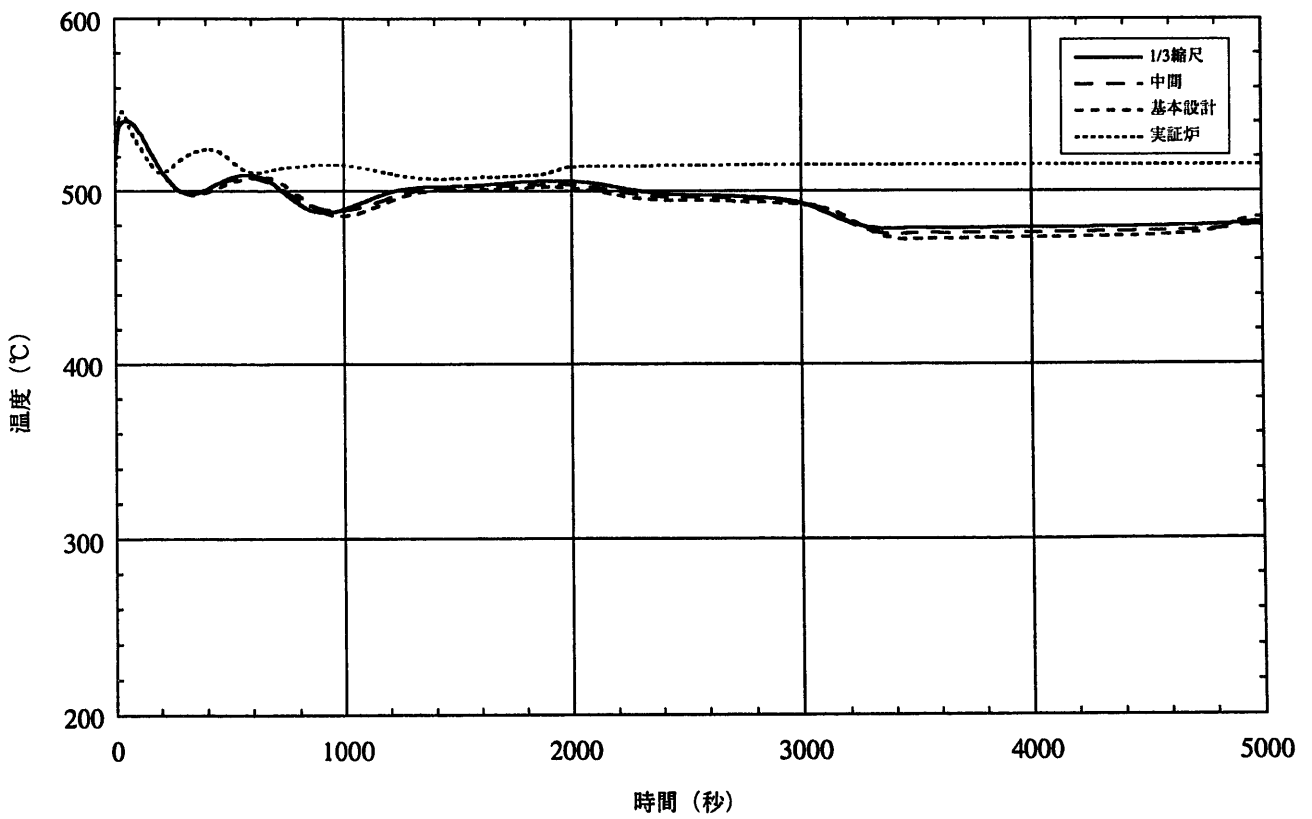


図4.5-17 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、DRACS系Eu数パラメータ解析)

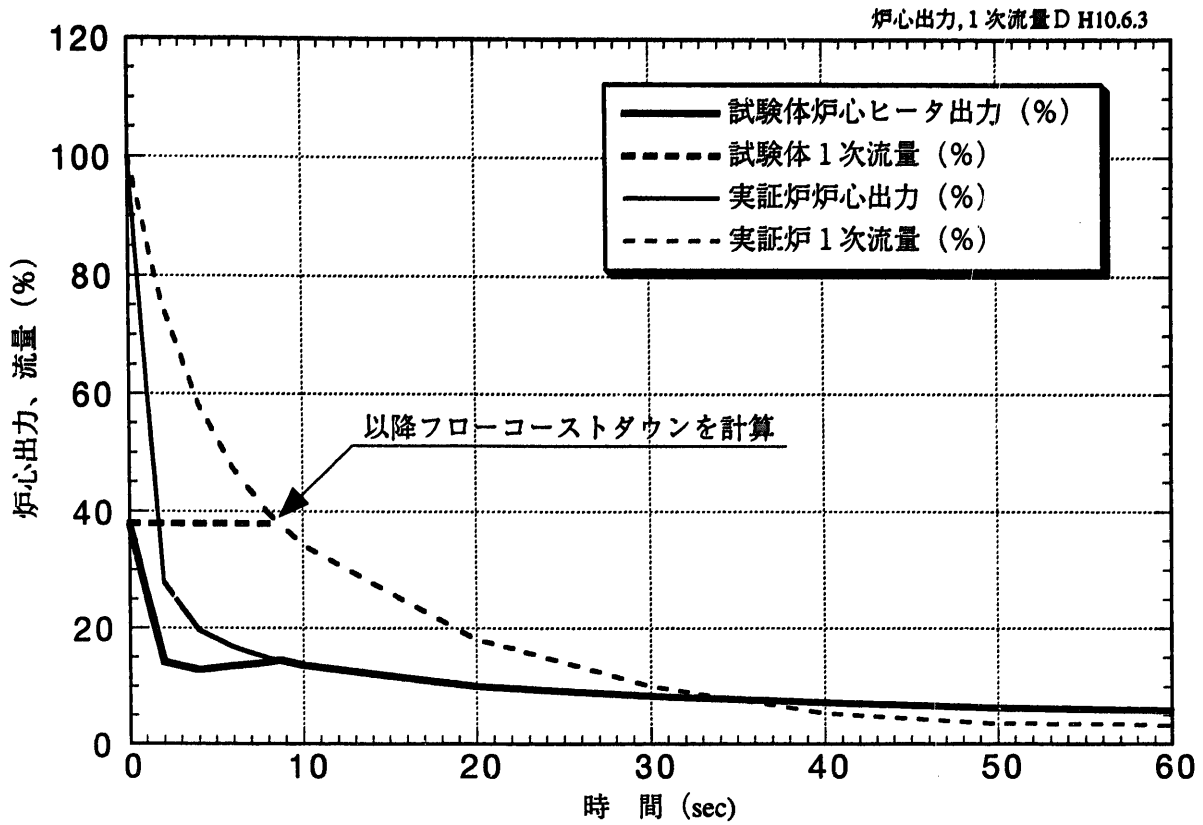


図5.2.4-1 過渡時の炉心ヒータ出力及び1次系流量

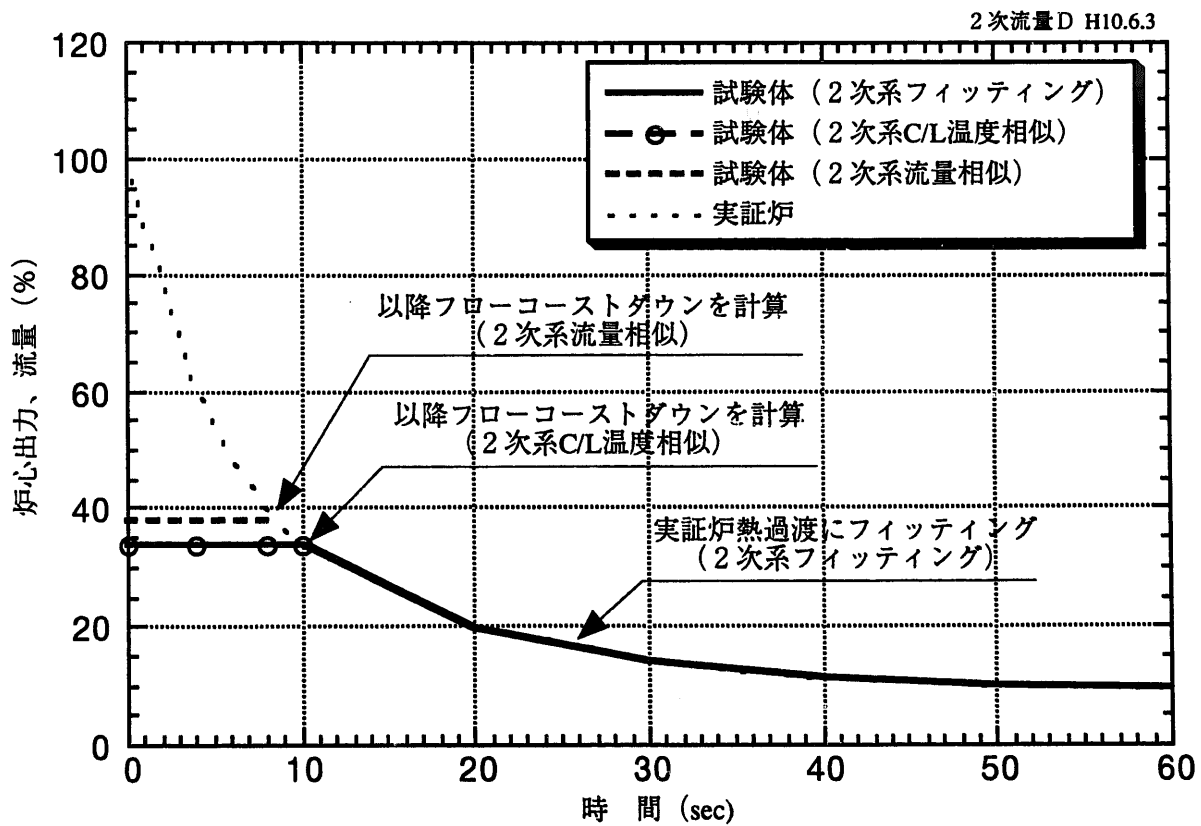


図5.2.4-2 過渡時の2次系流量

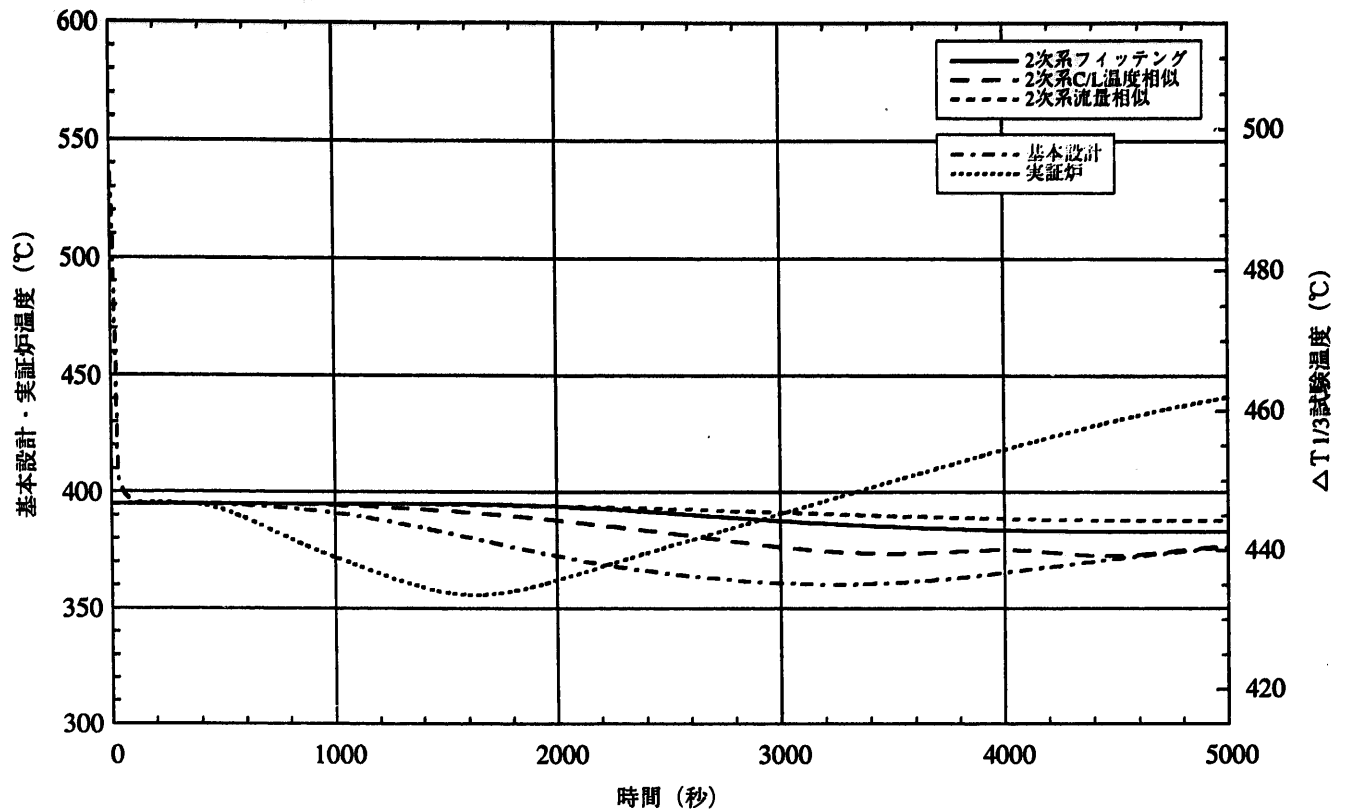


図5.5-1 自然循環試験解析結果（原子炉容器入口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件）

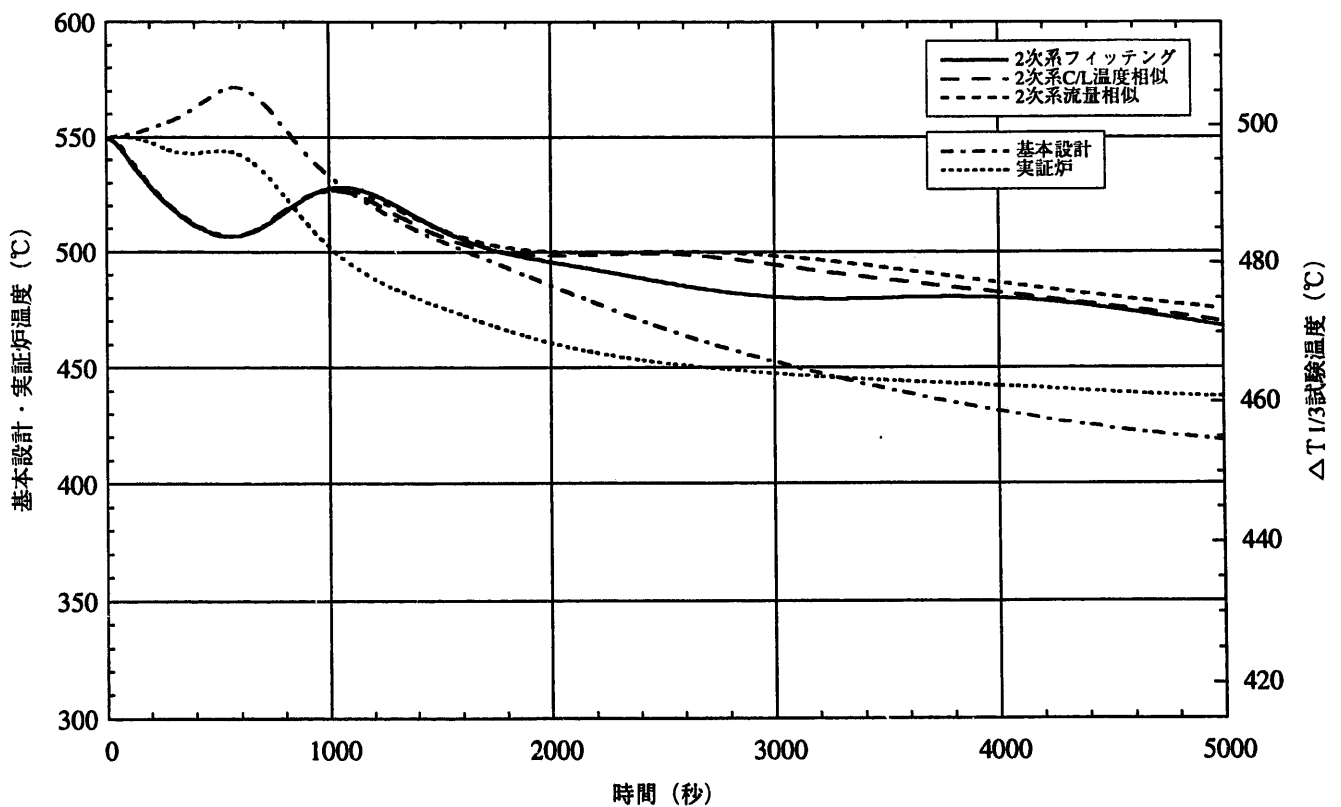


図5.5-2 自然循環試験解析結果（原子炉容器出口温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件）

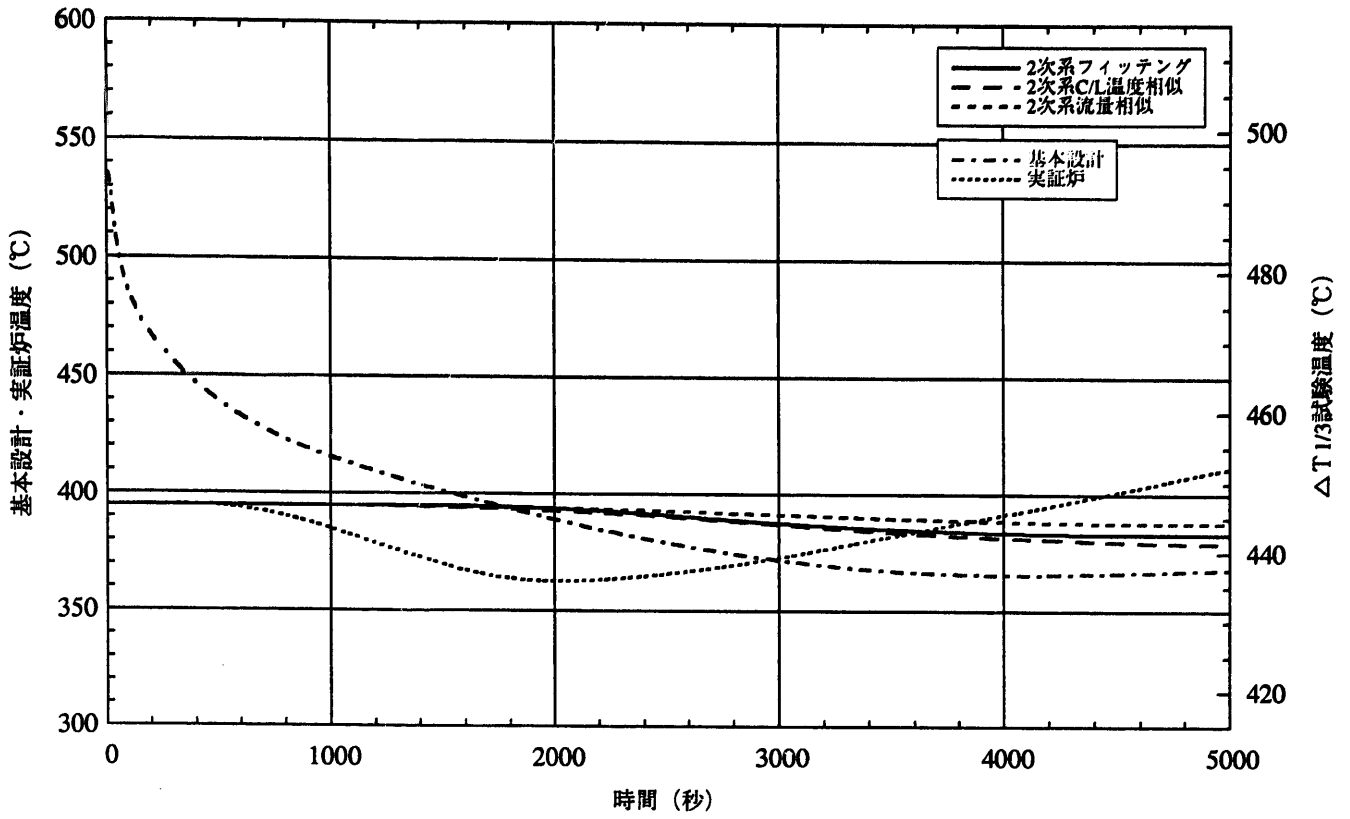


図5.5-3 自然循環試験解析結果 (炉心入口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

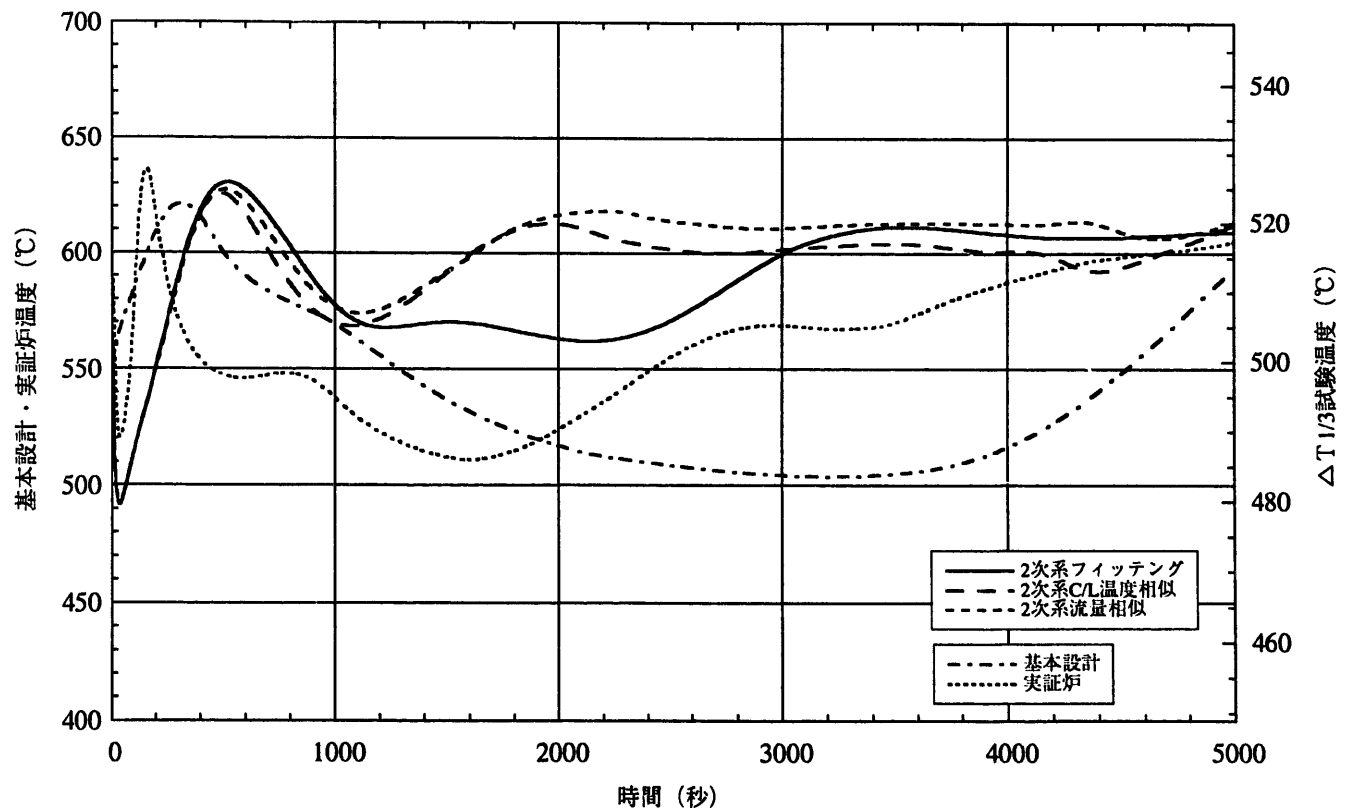


図5.5-4 自然循環試験解析結果 (炉心出口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

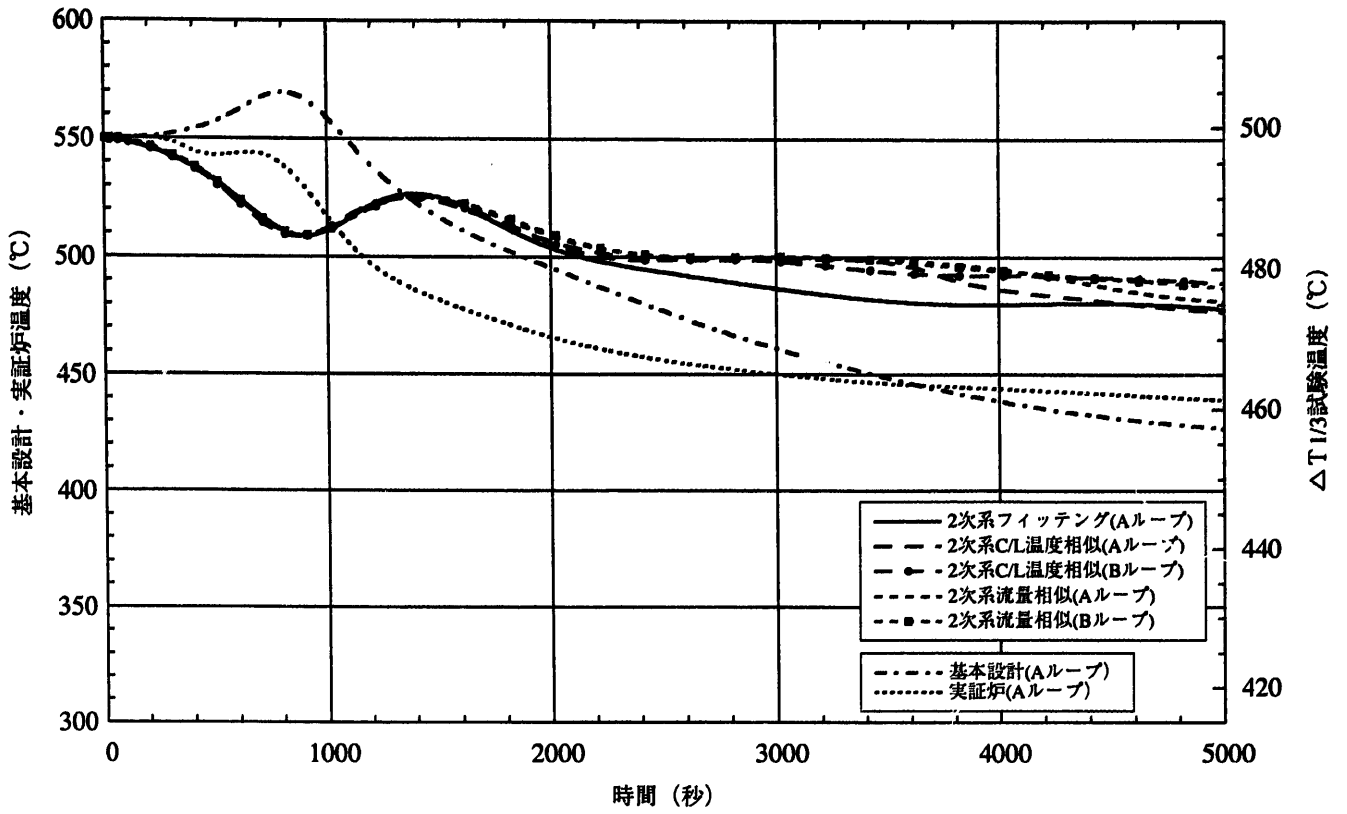


図5.5-5 自然循環試験解析結果 (IHX 1 次側入口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

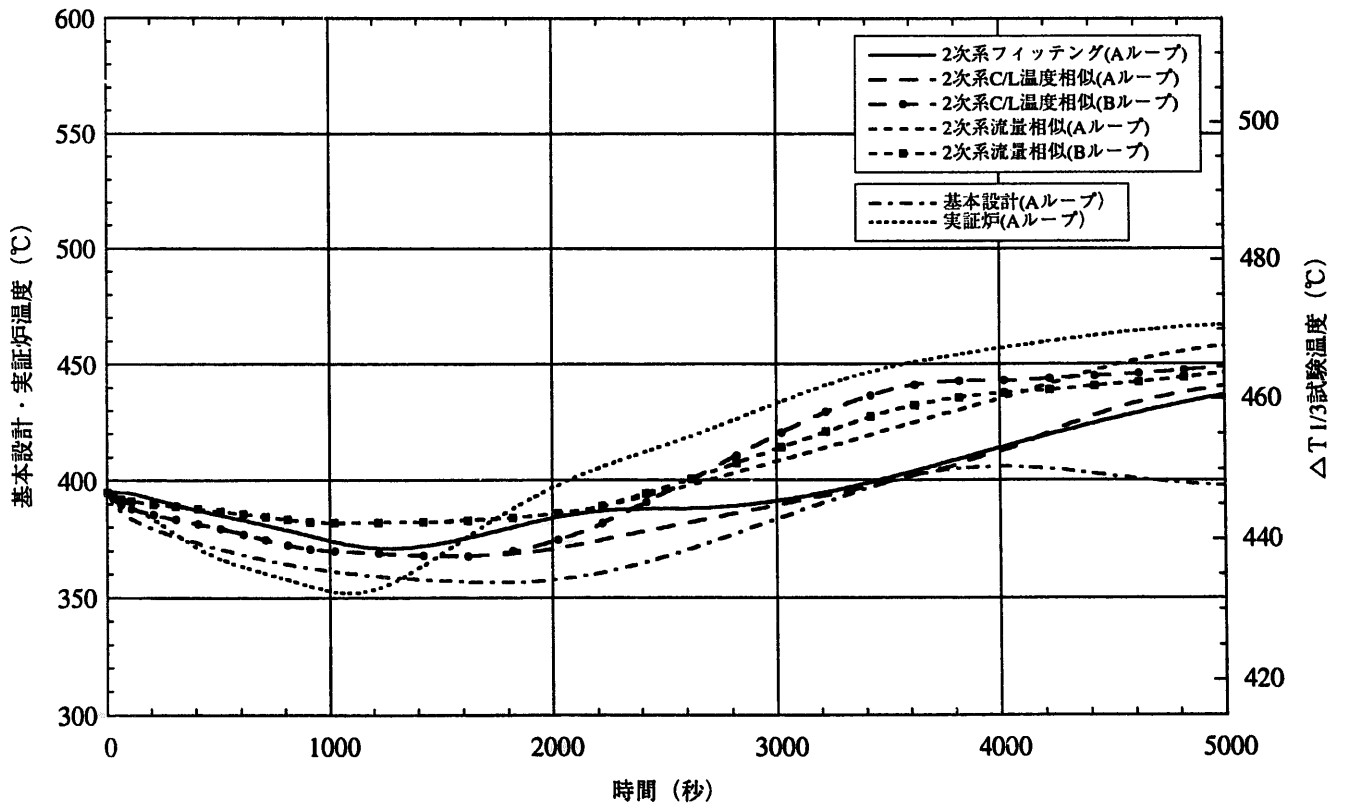


図5.5-6 自然循環試験解析結果 (IHX 1 次側出口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

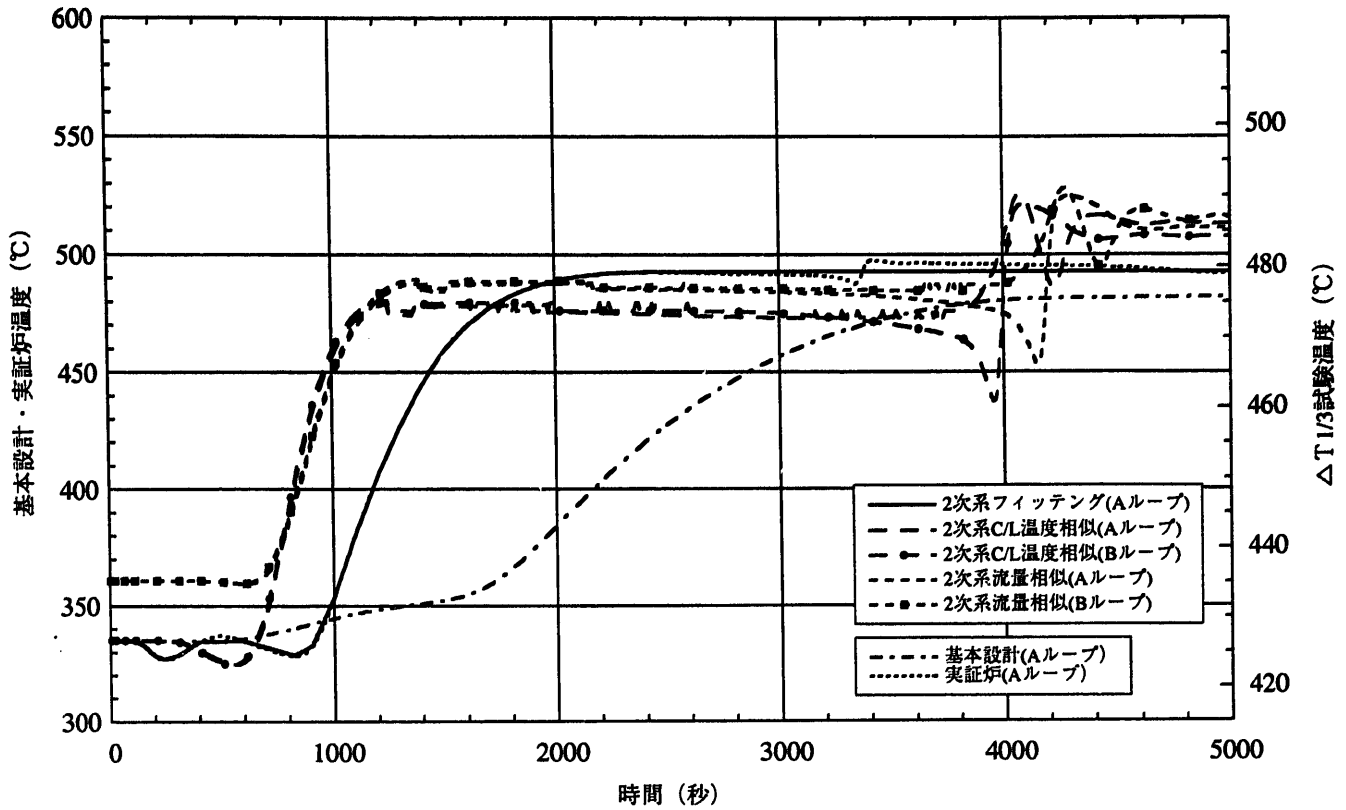


図5.5-7 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側入口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

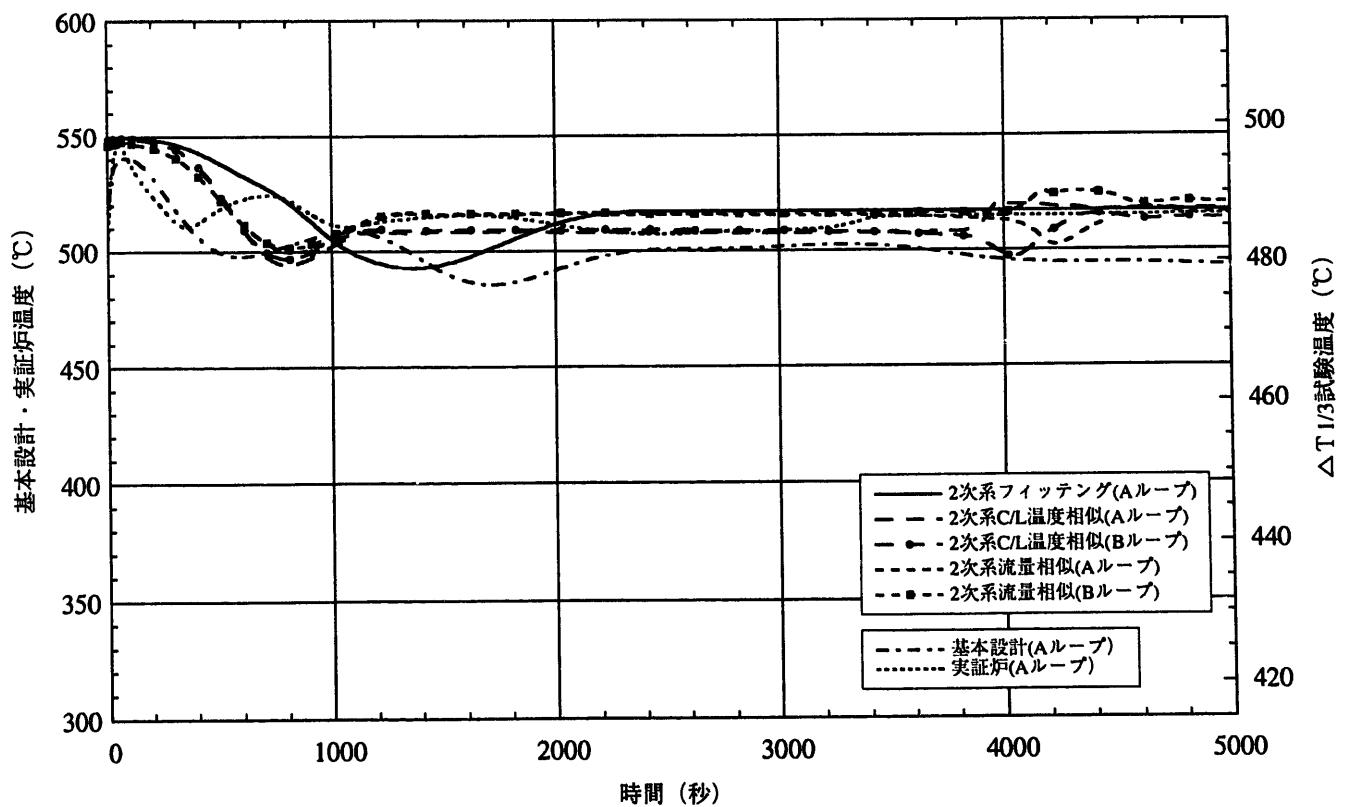


図5.5-8 自然循環試験解析結果 (IHX 2次側出口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

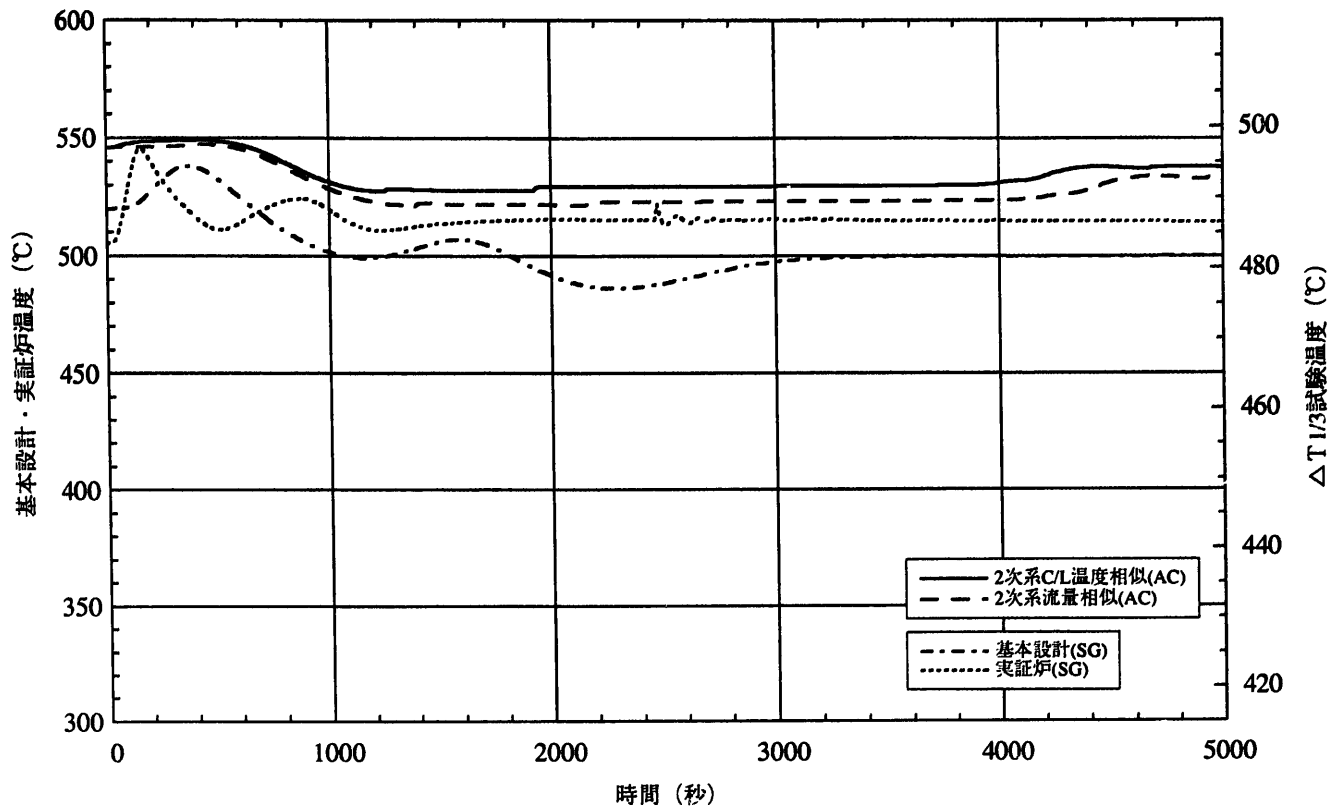


図5.5-9 自然循環試験解析結果（空気冷却器またはSG入口Na温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件）

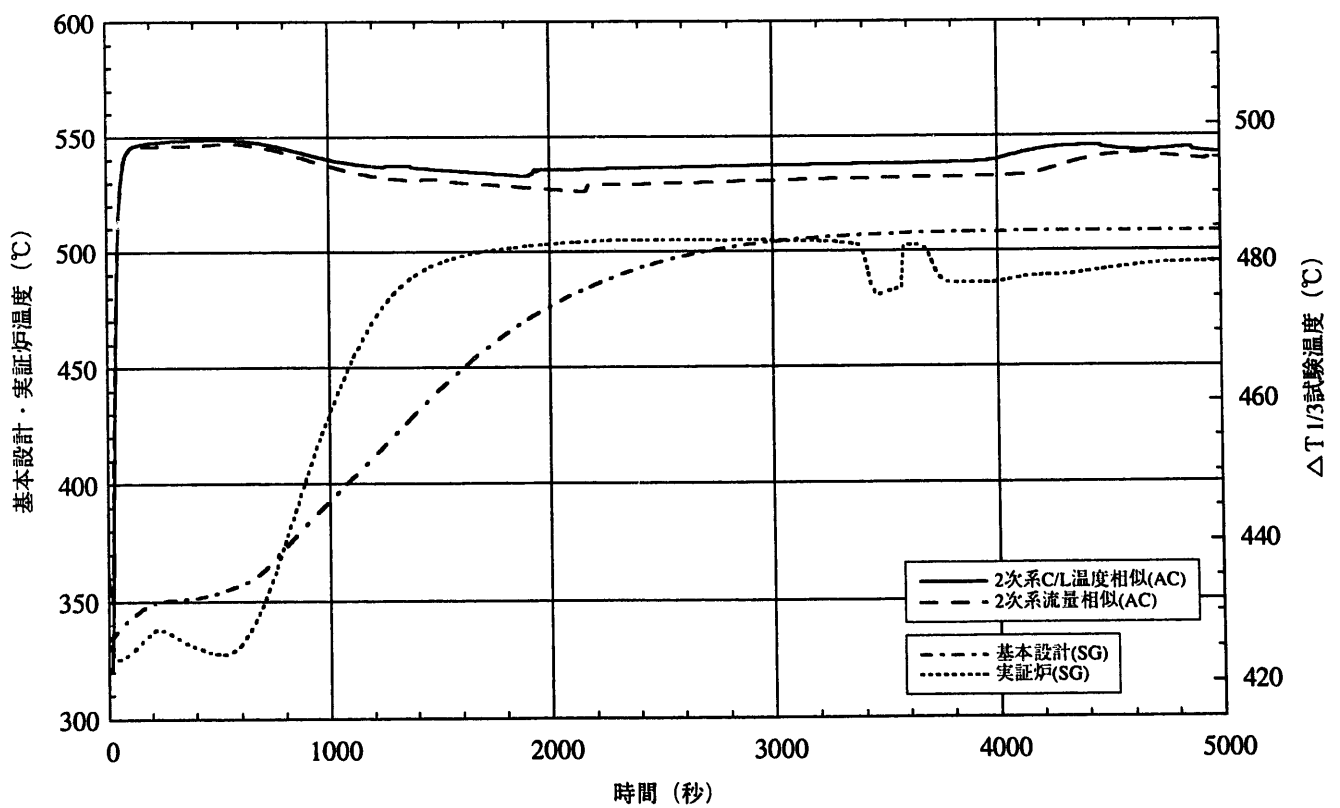


図5.5-10 自然循環試験解析結果（空気冷却器またはSG出口Na温度、 $\Delta T_{1/3}$ 縮尺条件）

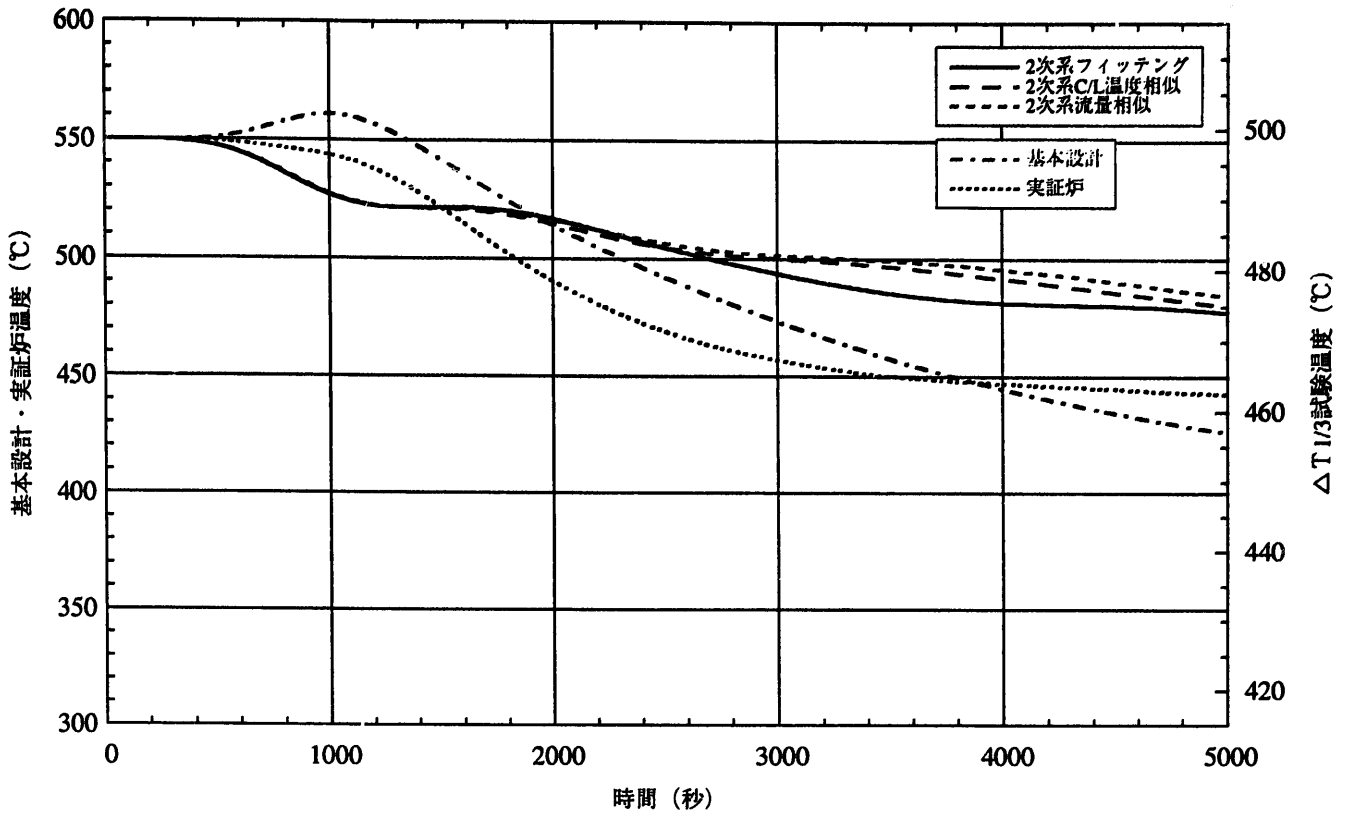


図5.5-11 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側入口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

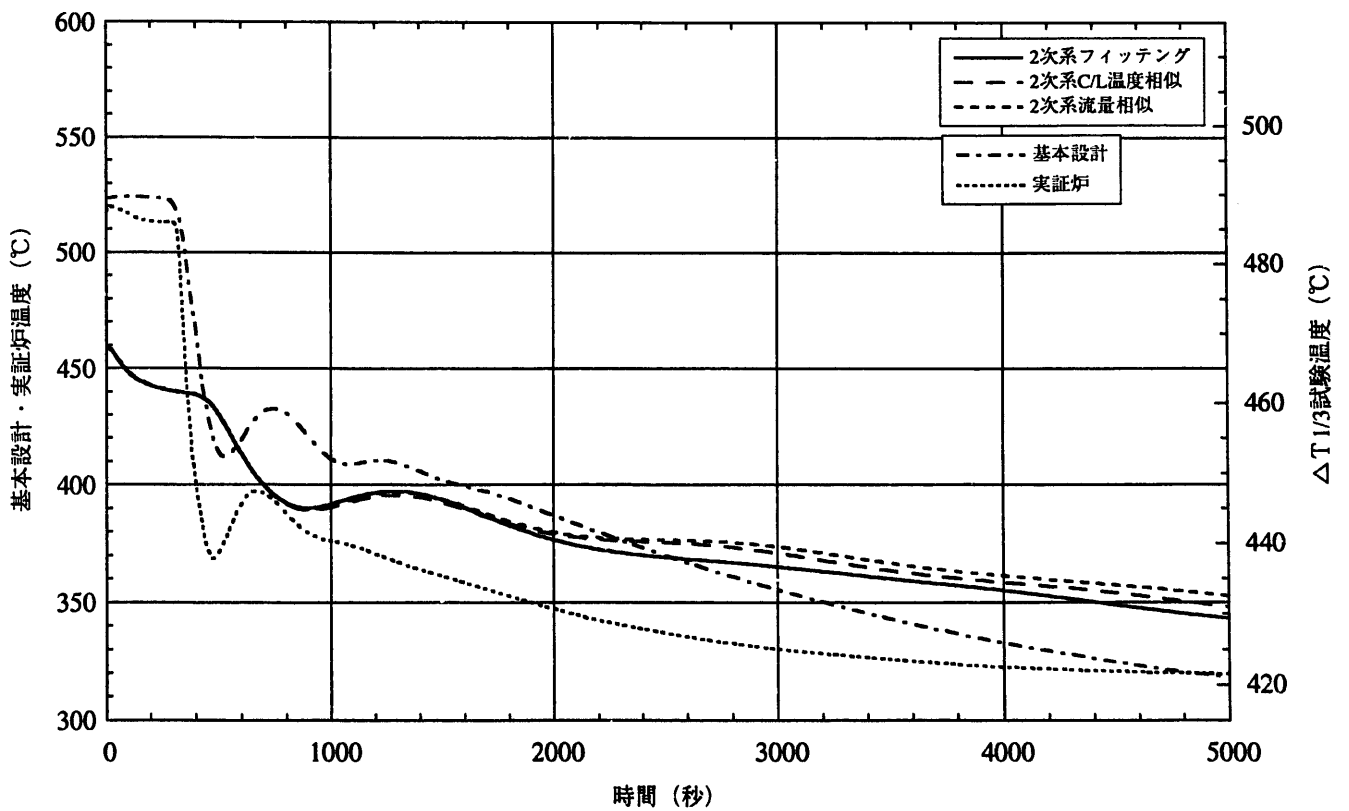


図5.5-12 自然循環試験解析結果 (DHX 1次側出口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

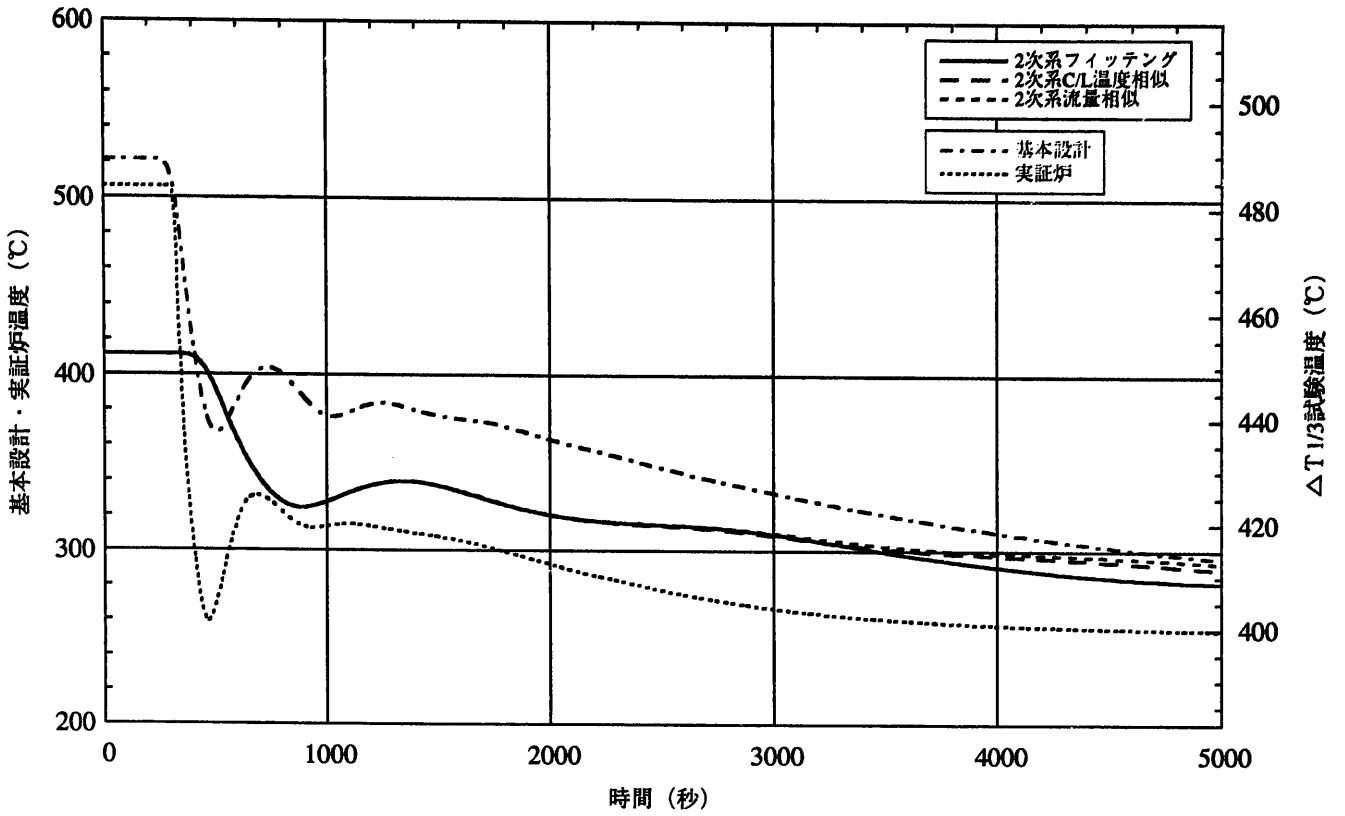


図5.5-13 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側入口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

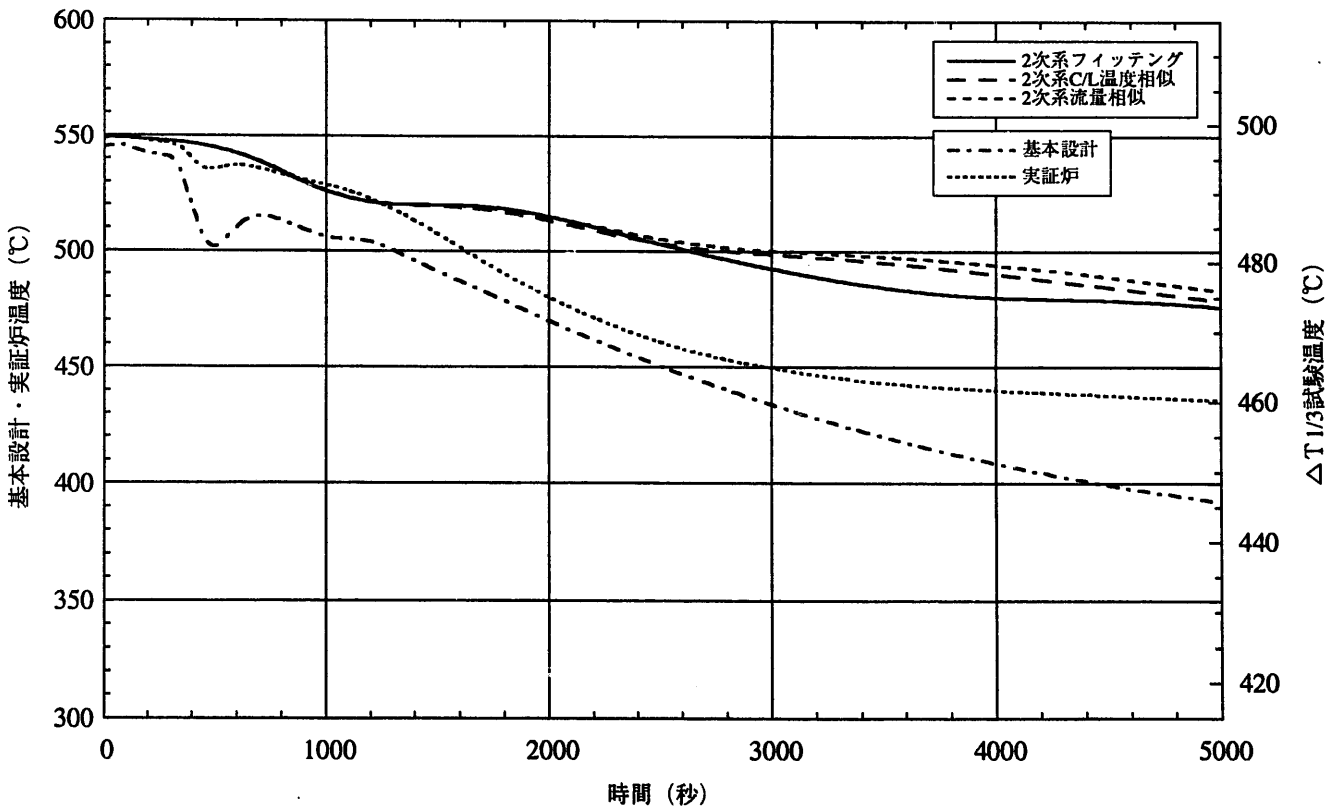


図5.5-14 自然循環試験解析結果 (DHX 2次側出口温度、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

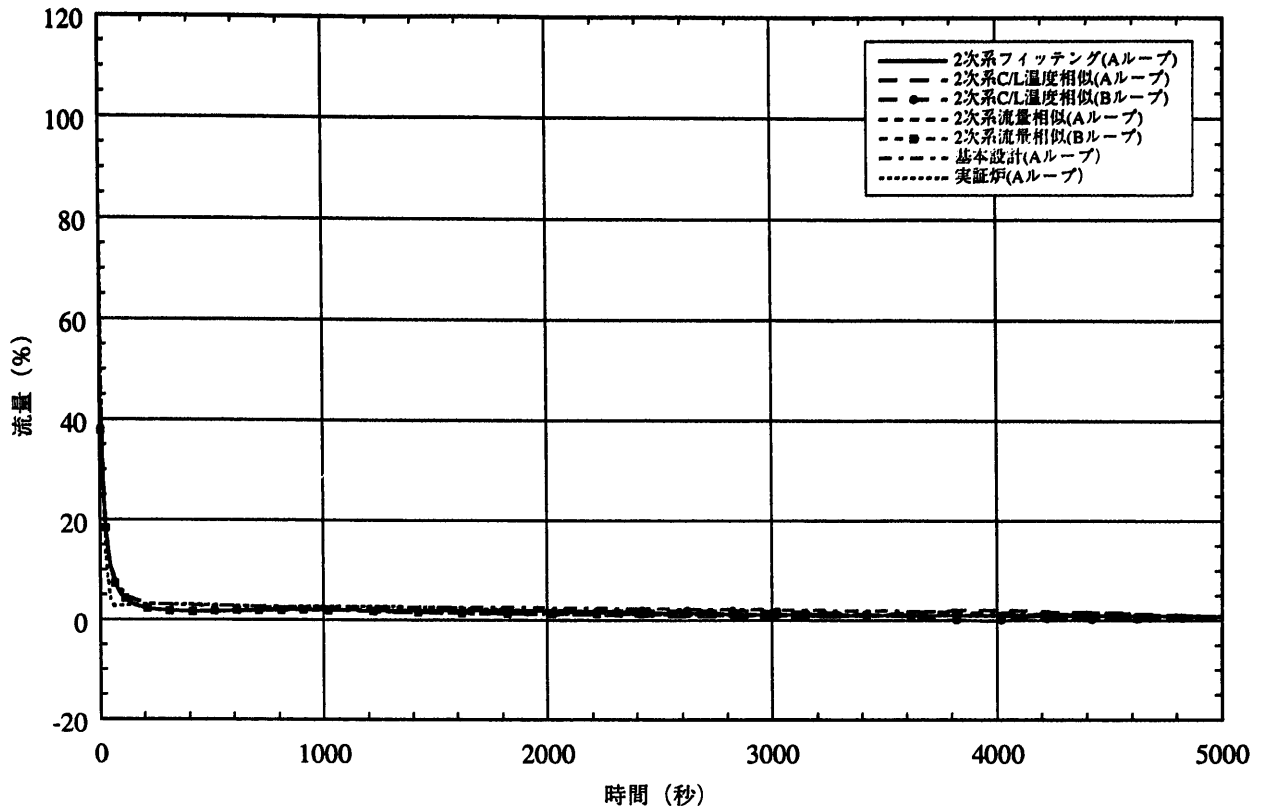


図5.5-15(1/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

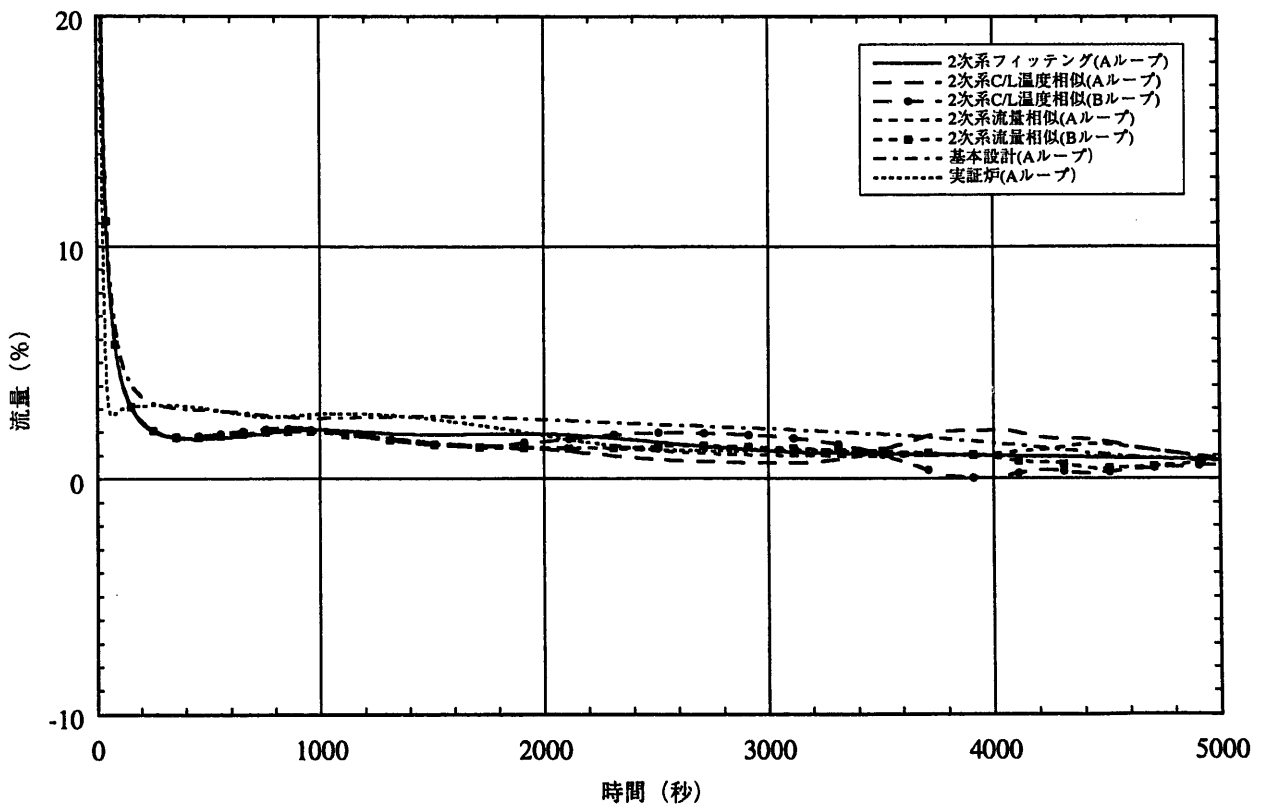


図5.5-15(2/2) 自然循環試験解析結果 (1次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

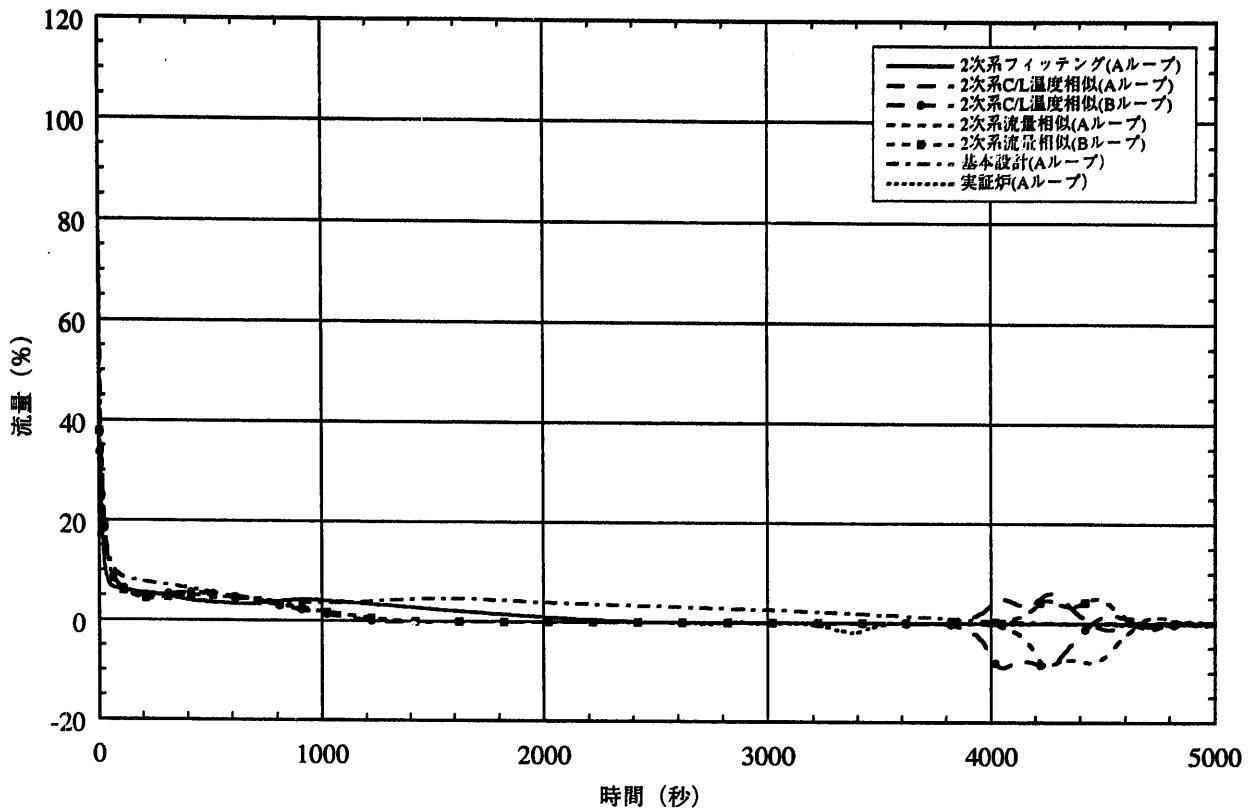


図5.5-16(1/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

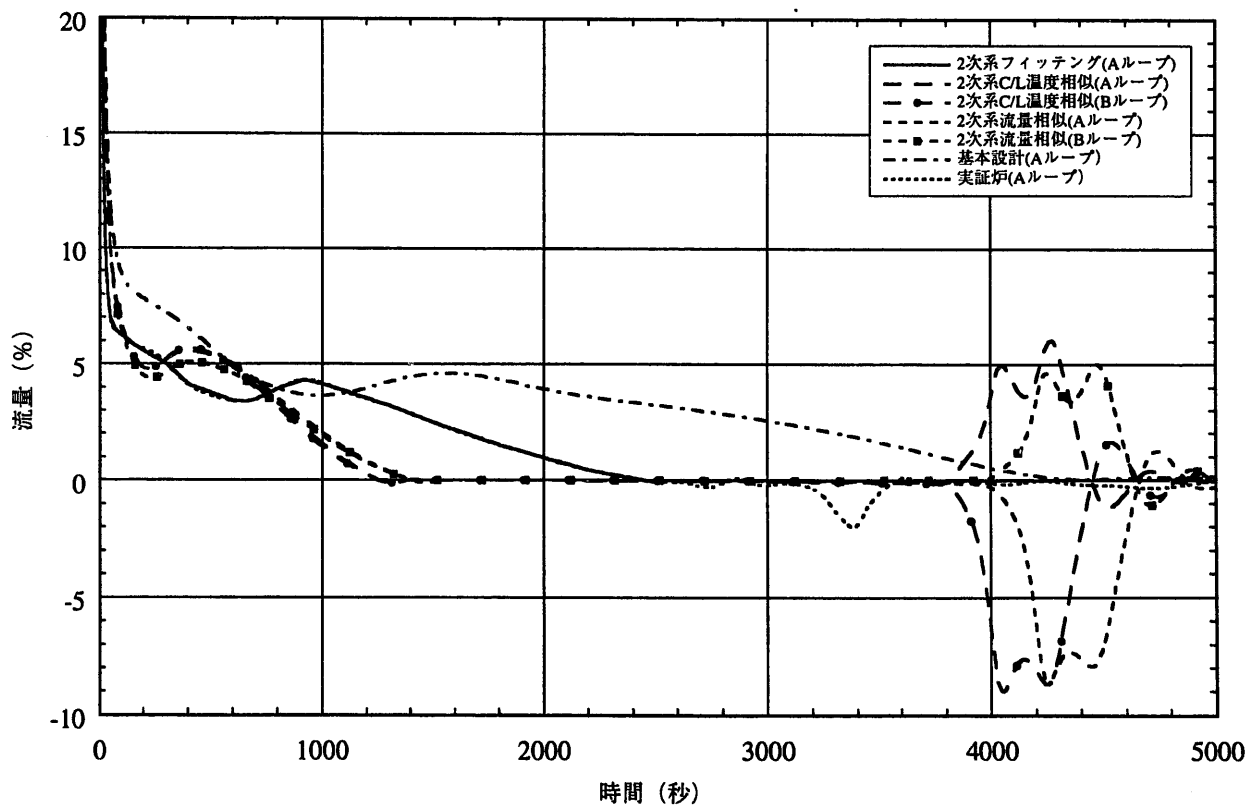


図5.5-16(2/2) 自然循環試験解析結果 (2次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

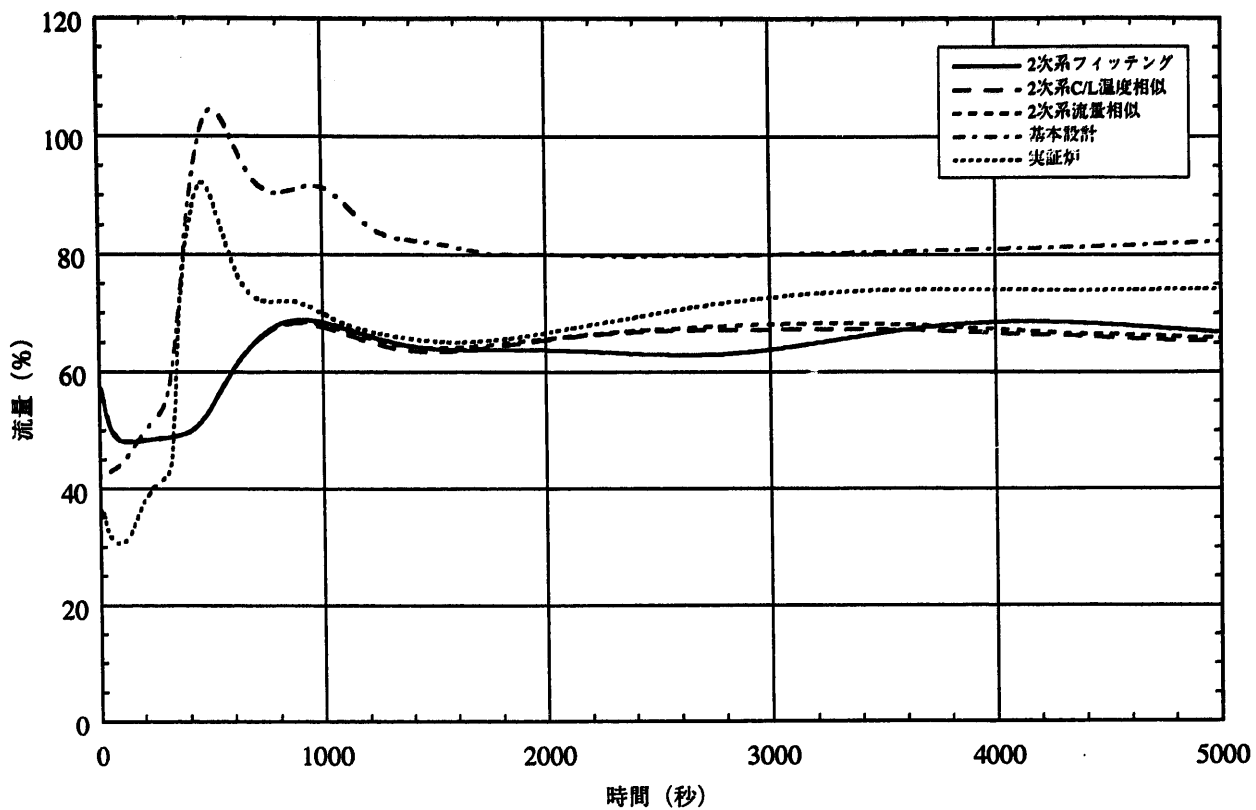


図5.5-17 自然循環試験解析結果 (DRACS 1 次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

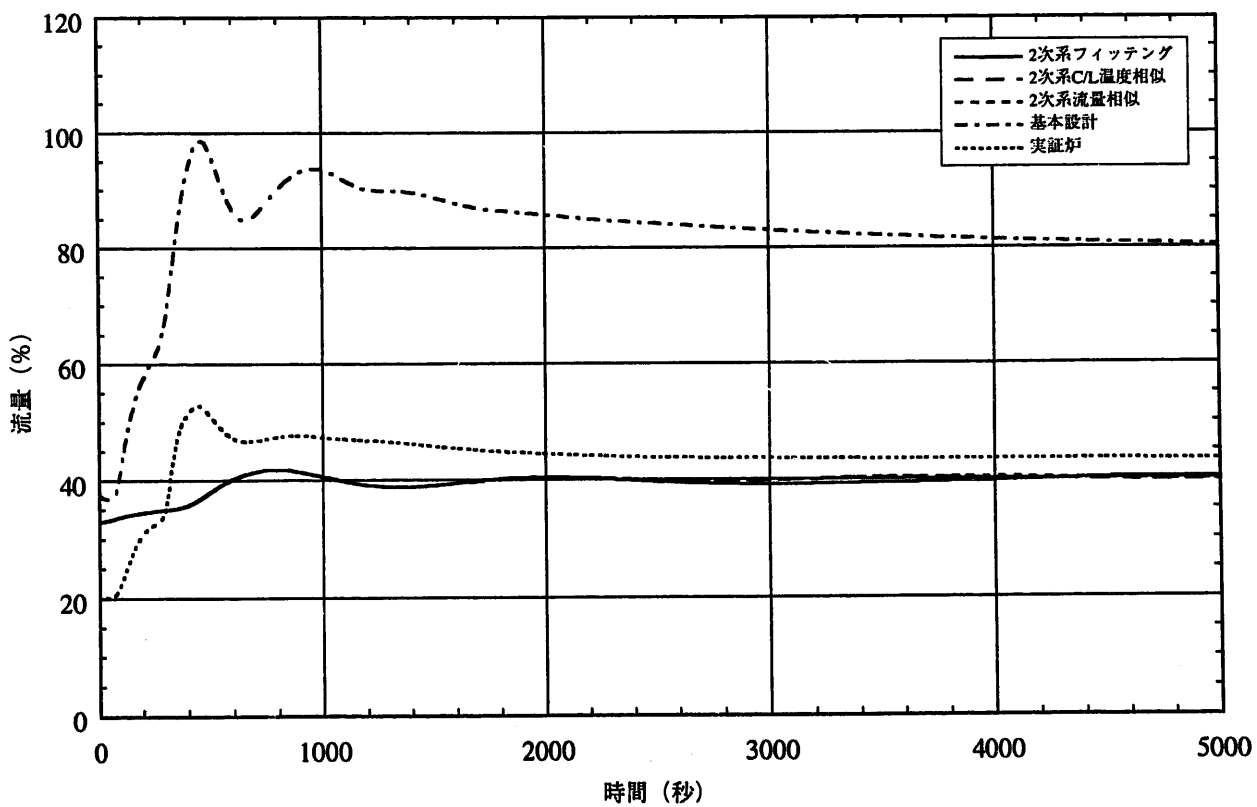


図5.5-18 自然循環試験解析結果 (DRACS 2 次系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

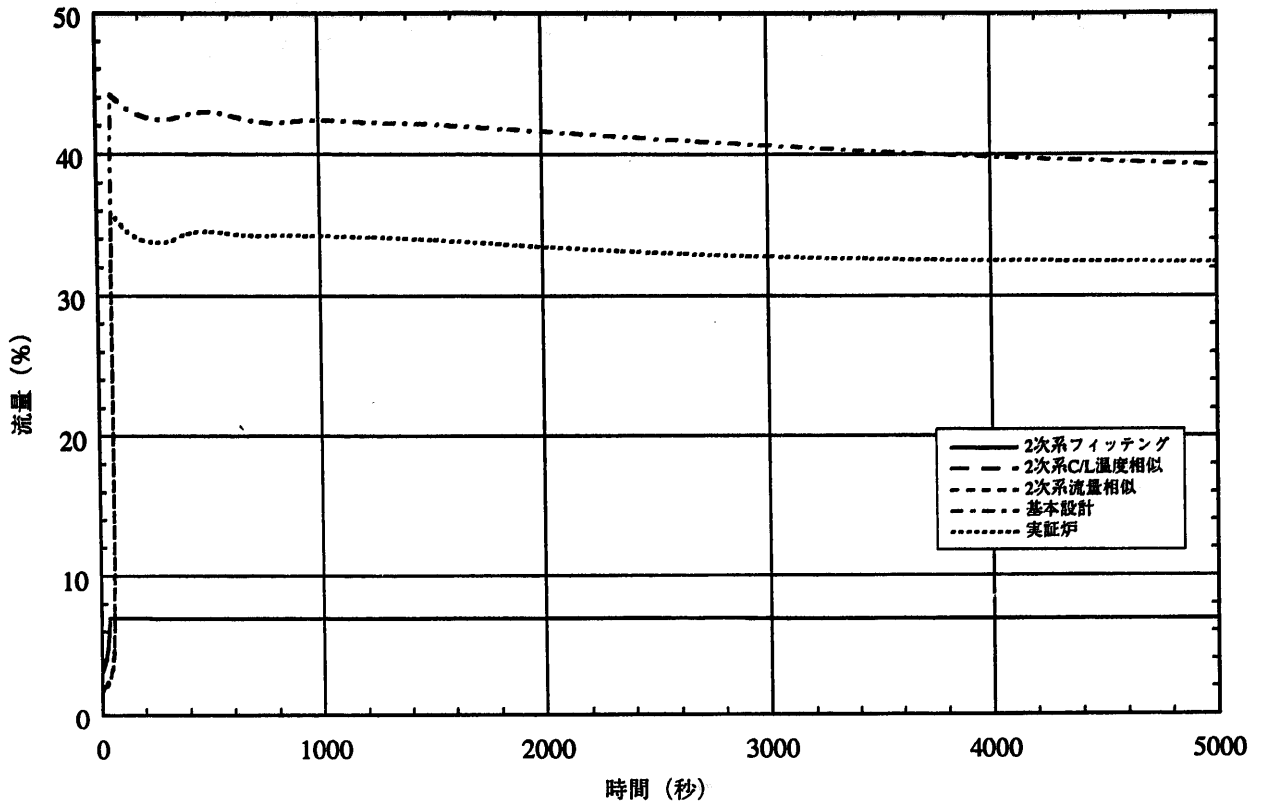


図5.5-19 自然循環試験解析結果 (DRACS空気系流量、 ΔT 1/3縮尺条件)

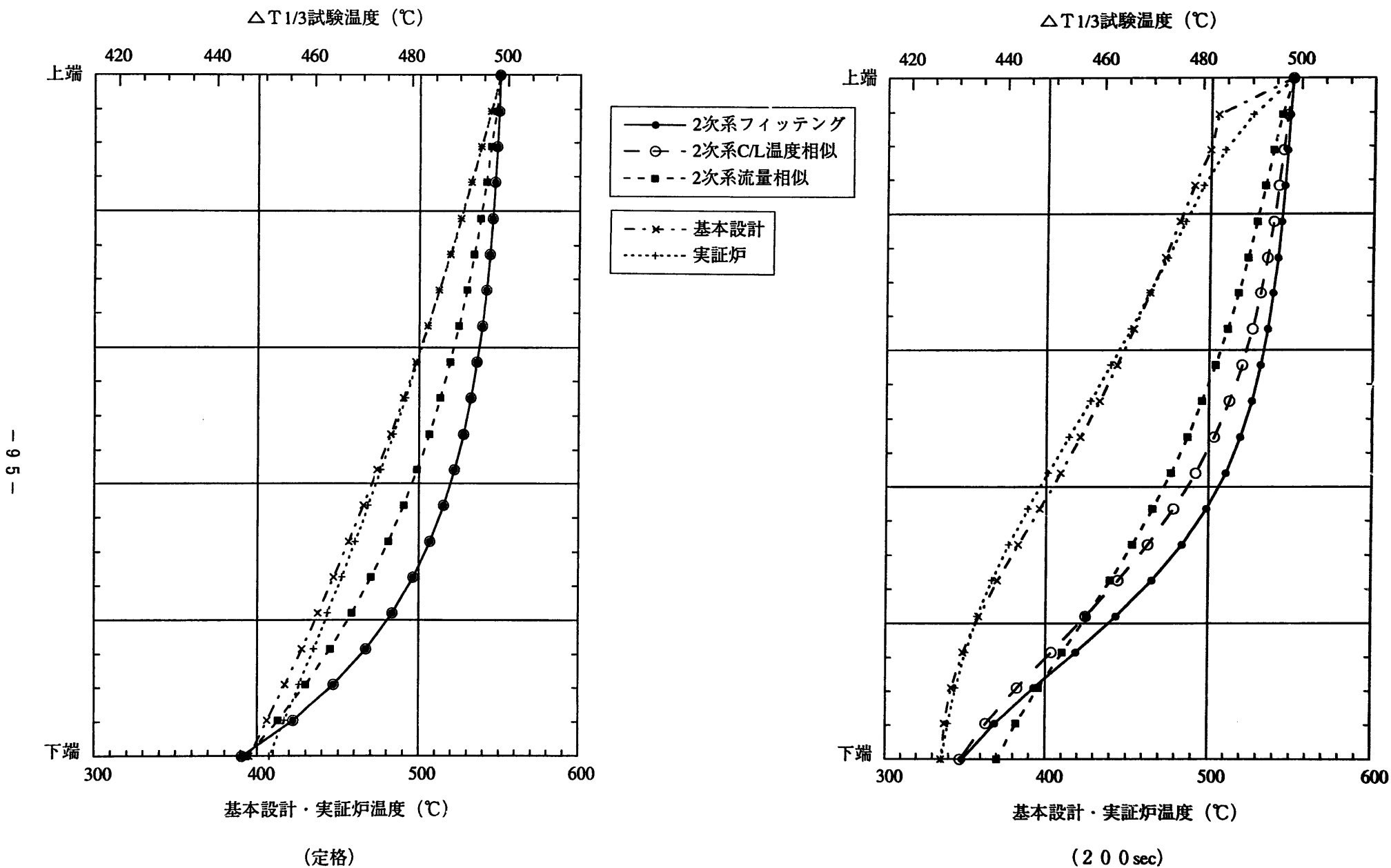
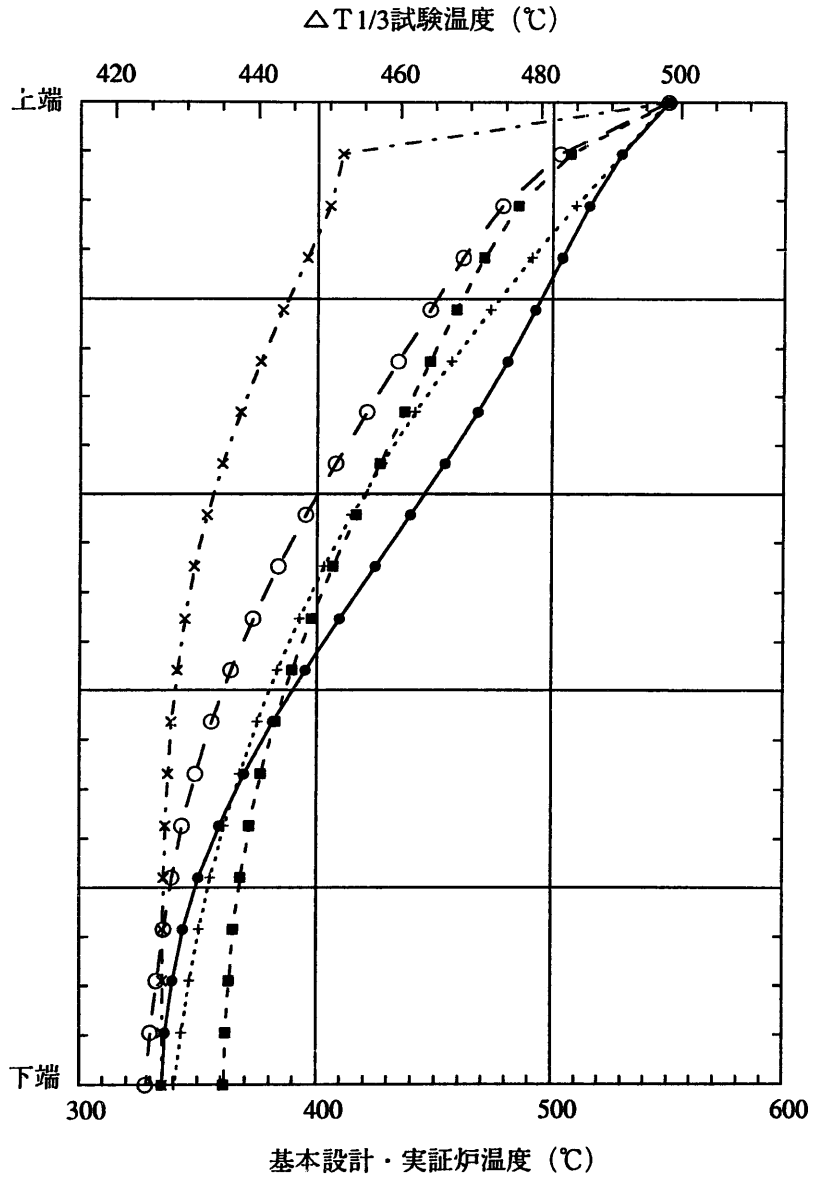
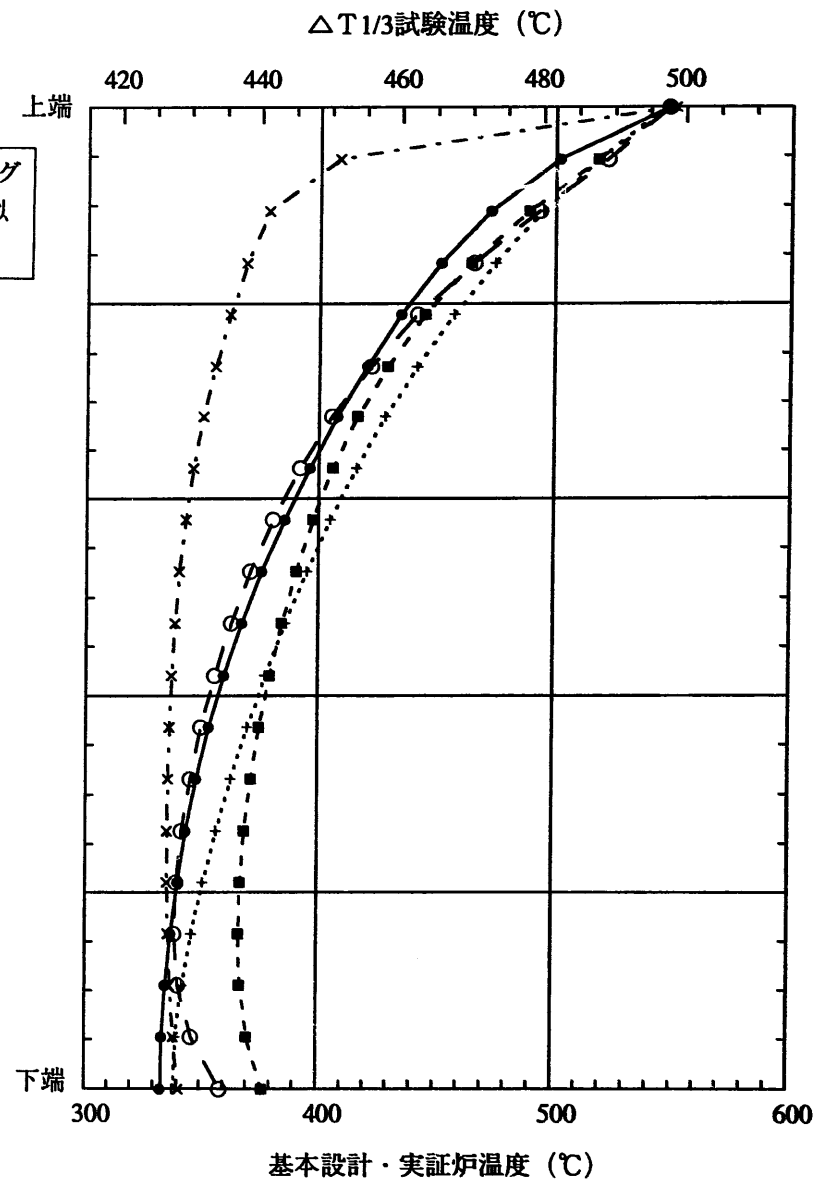


図5.5-20(1/2) I H X 伝熱部 1 次側 N a 軸方向温度分布 (自然循環、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)



(600 sec)



(1000 sec)

図5.5-20(2/2) I H X 伝熱部 1 次側 N a 軸方向温度分布 (自然循環、 $\Delta T 1/3$ 縮尺条件)

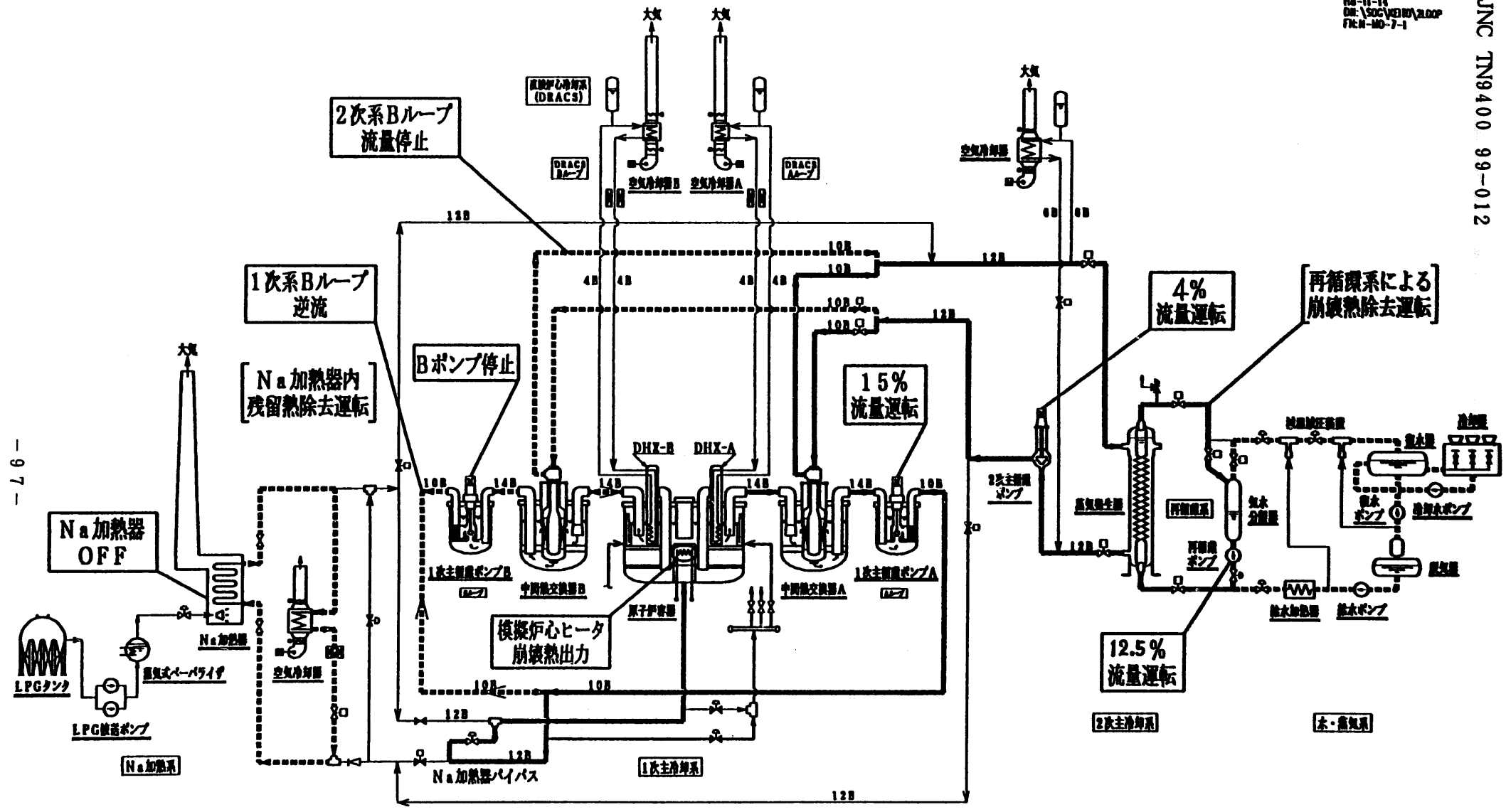


図6.2-1 1次系ポンプB軸固着試験モード

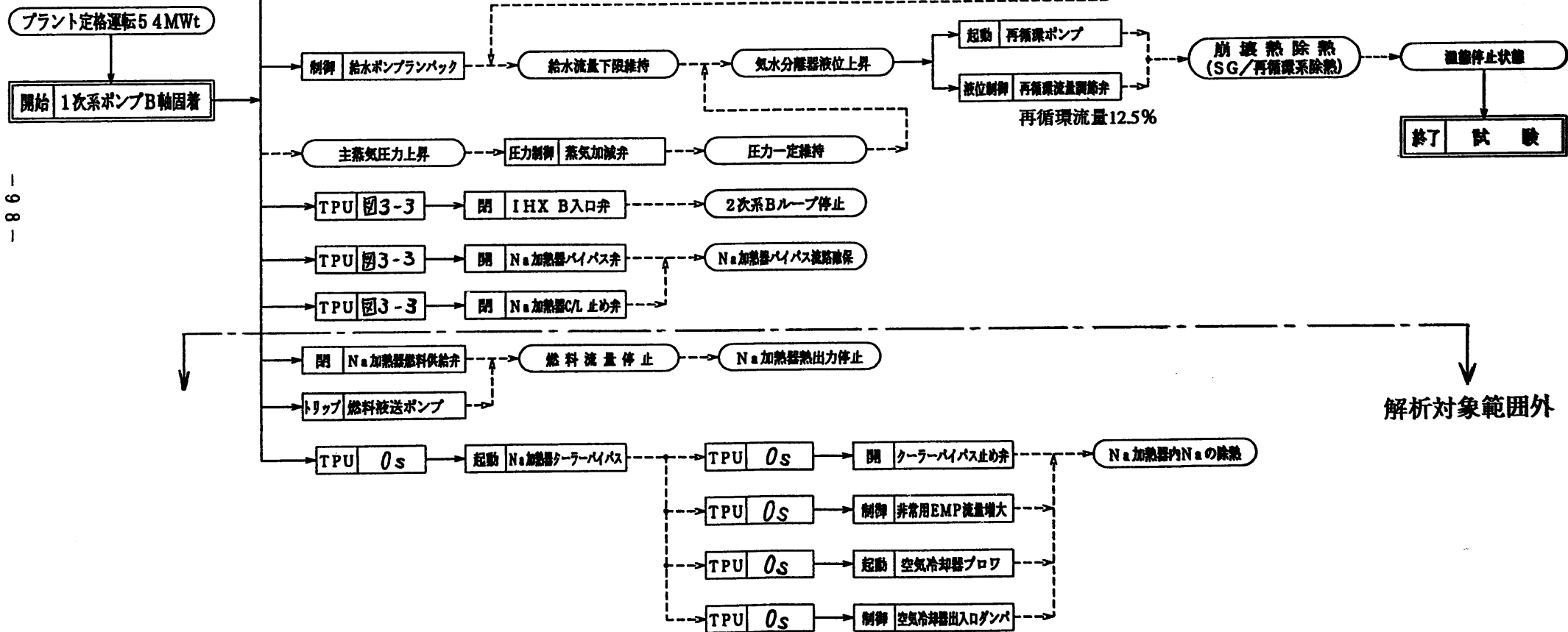


図6.2-2 1次系ポンプB軸固着試験シーケンス

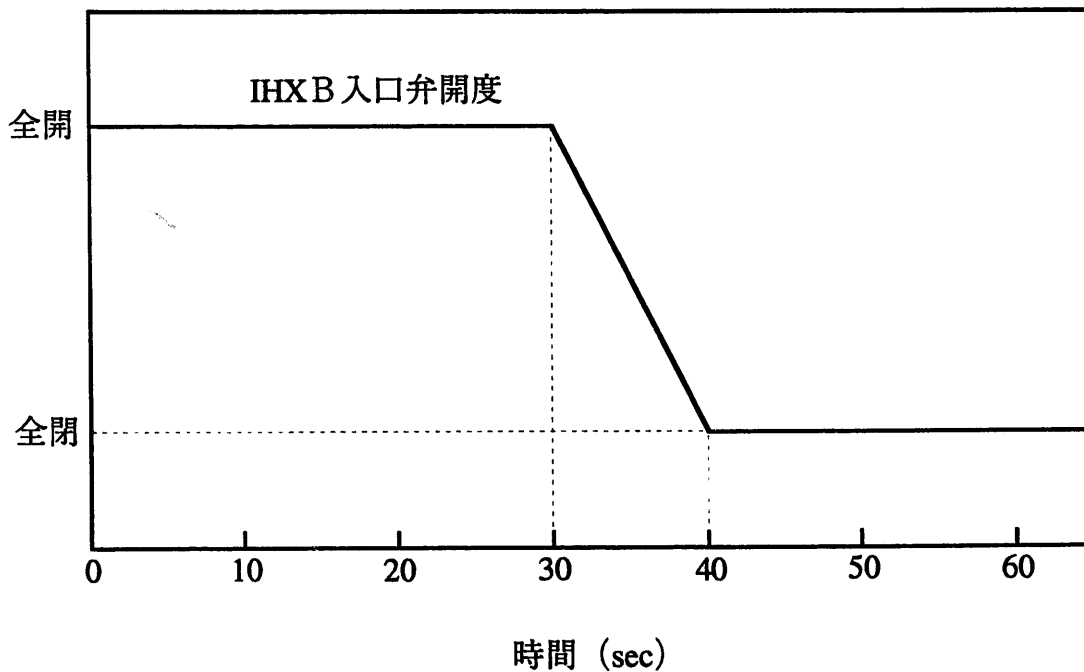
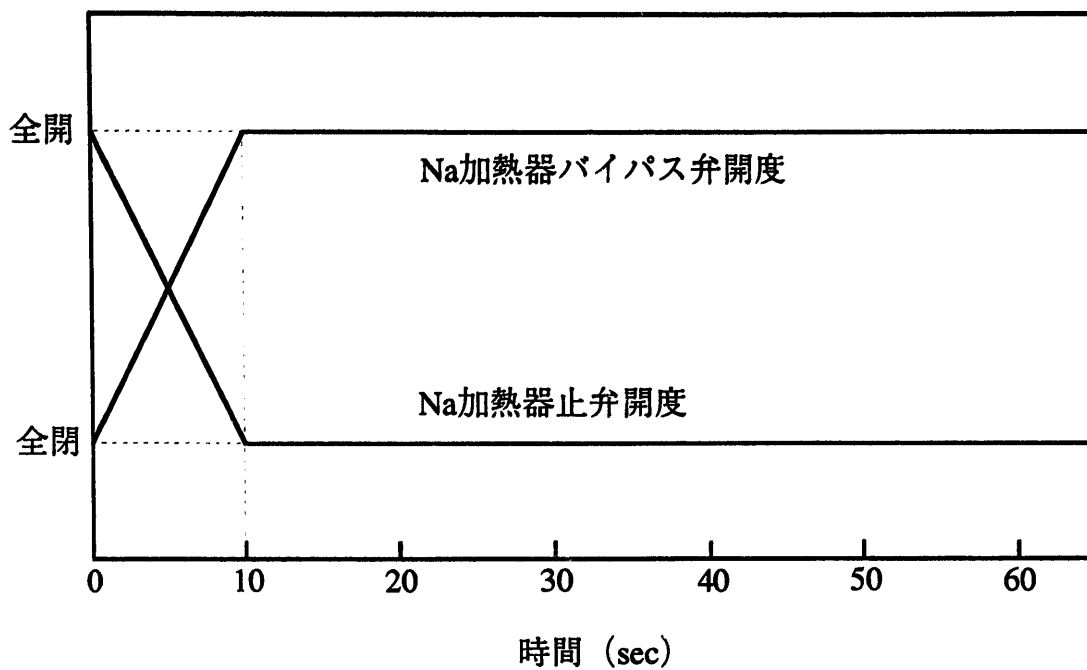


図6.2-3 試験装置弁動作条件 (1次系ポンプ軸固着試験)

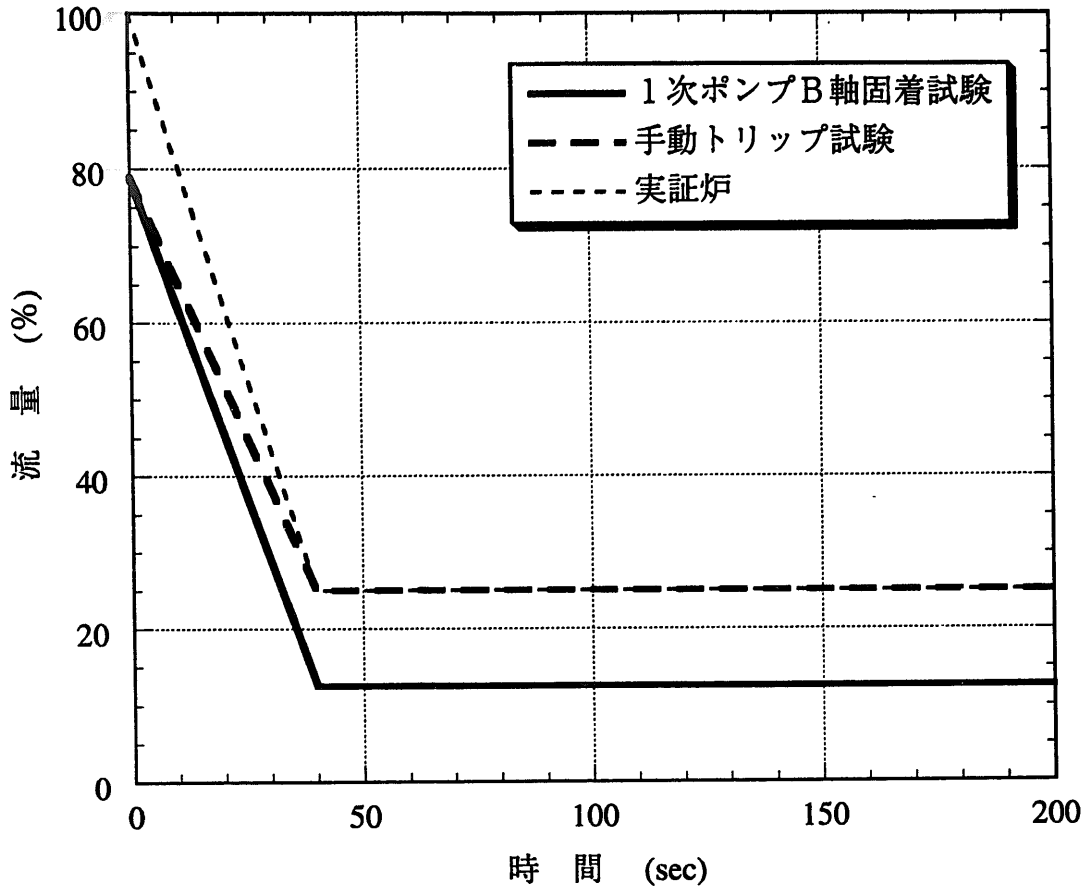


図6.2-4 SG入口給水流量

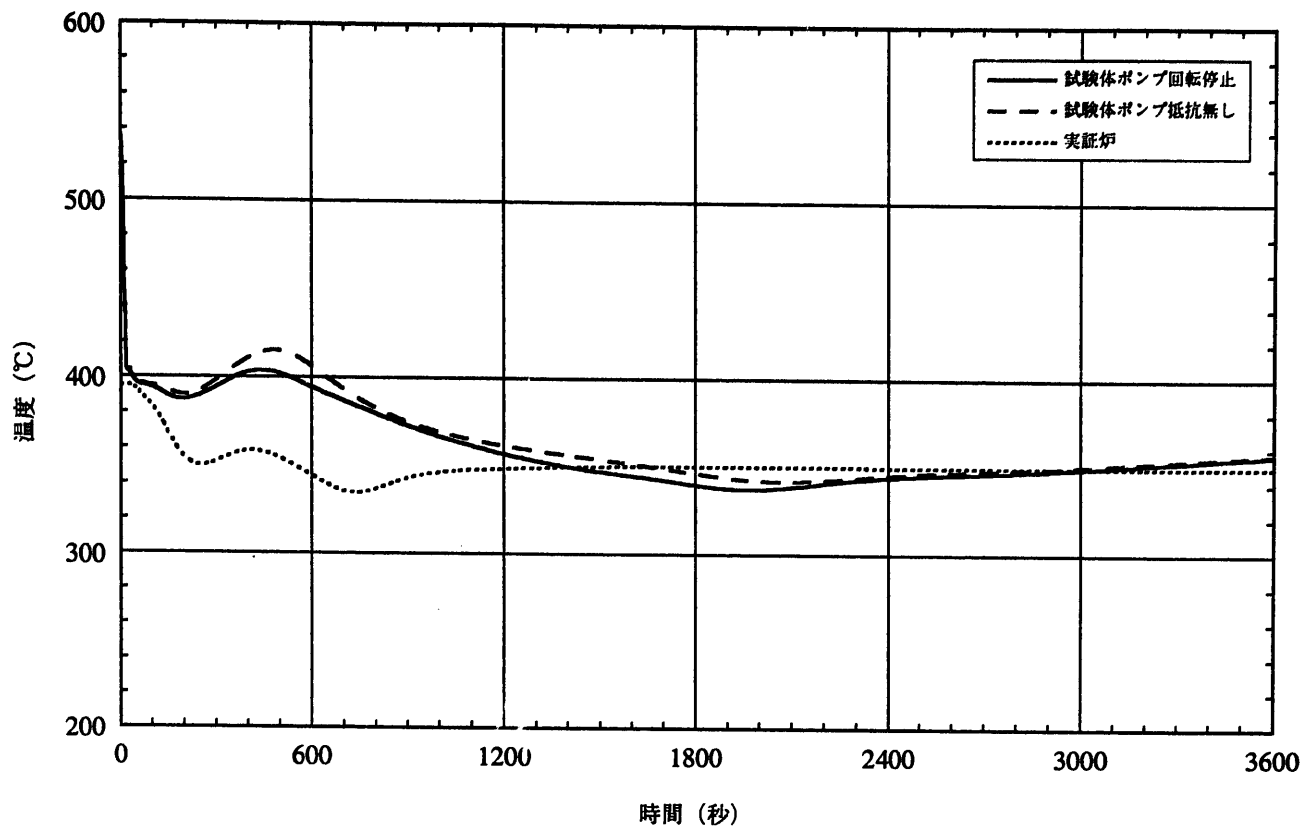


図6.5-1 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (原子炉容器入口温度)

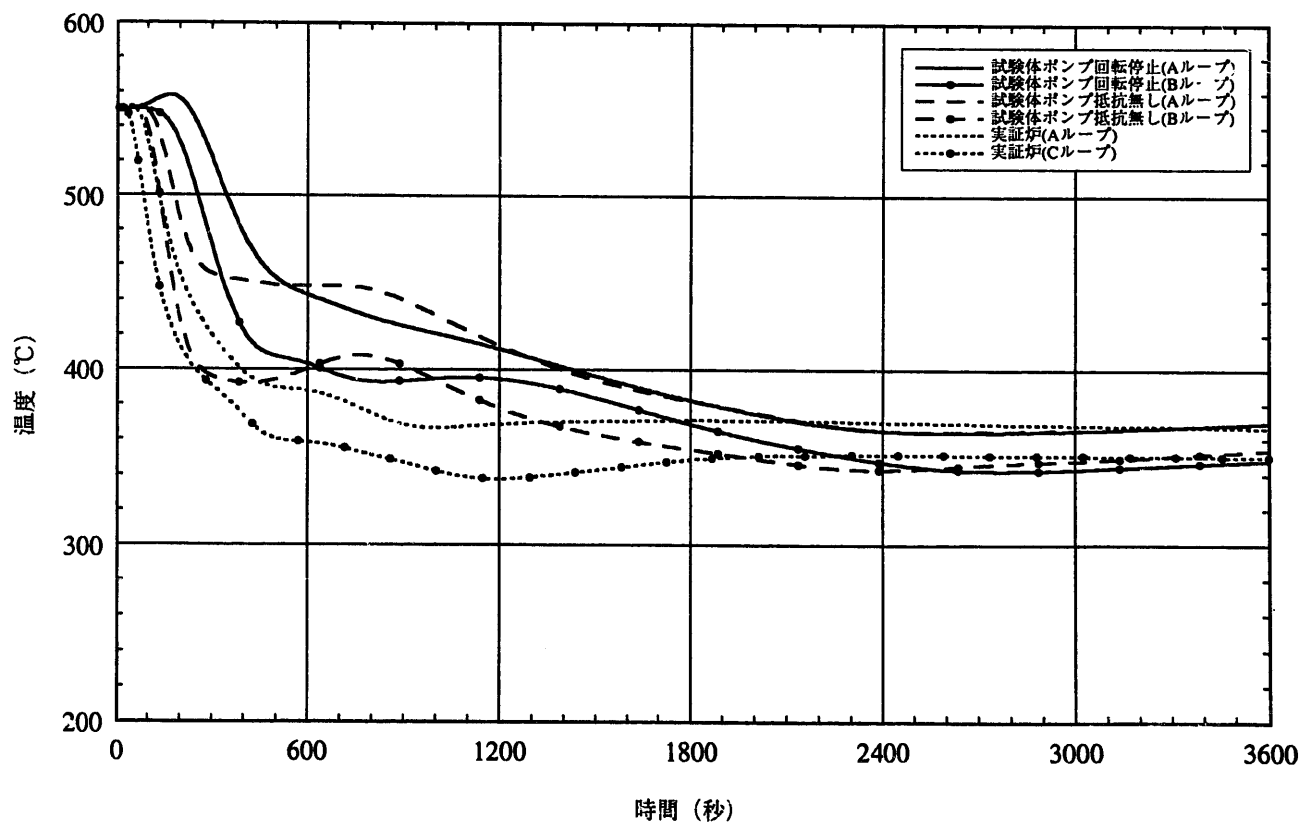


図6.5-2 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (原子炉容器出口温度)

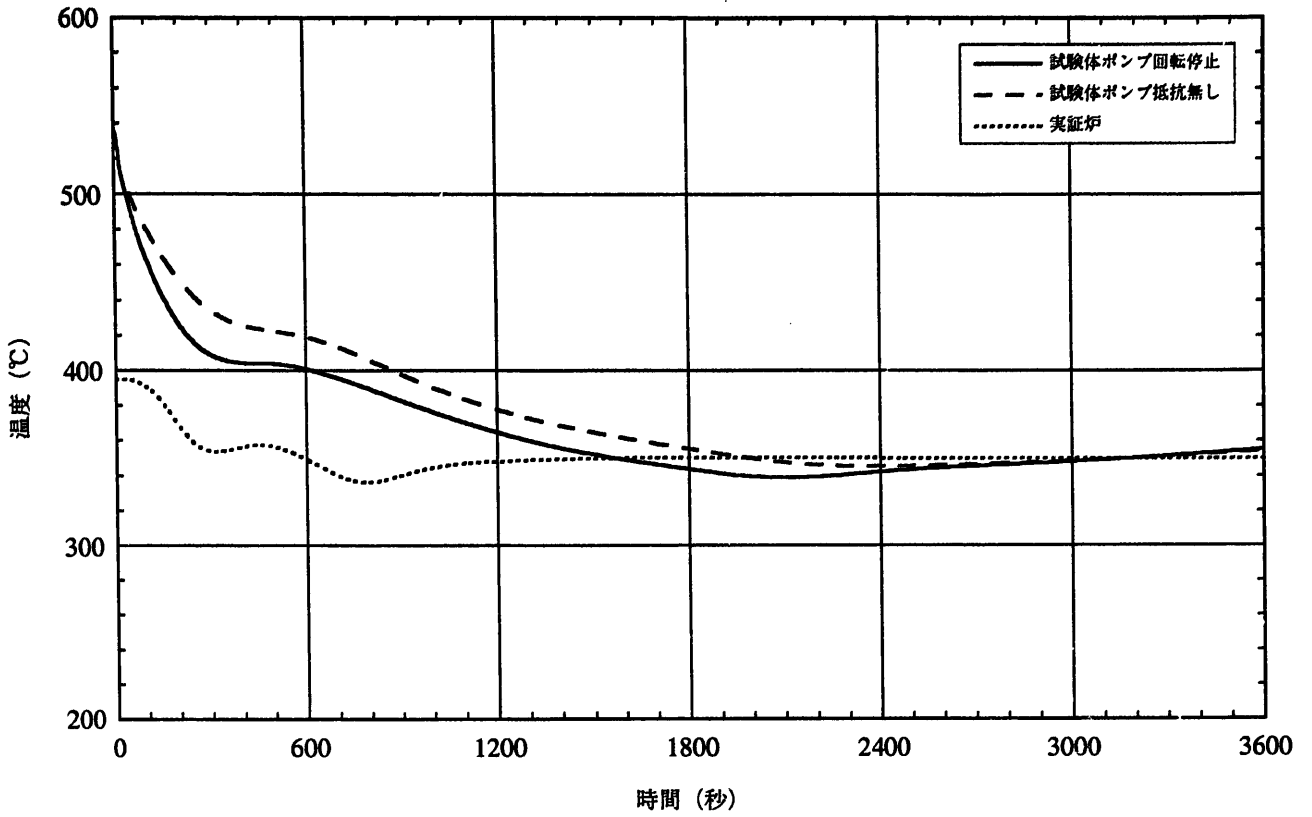


図6.5-3 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (炉心入口温度)

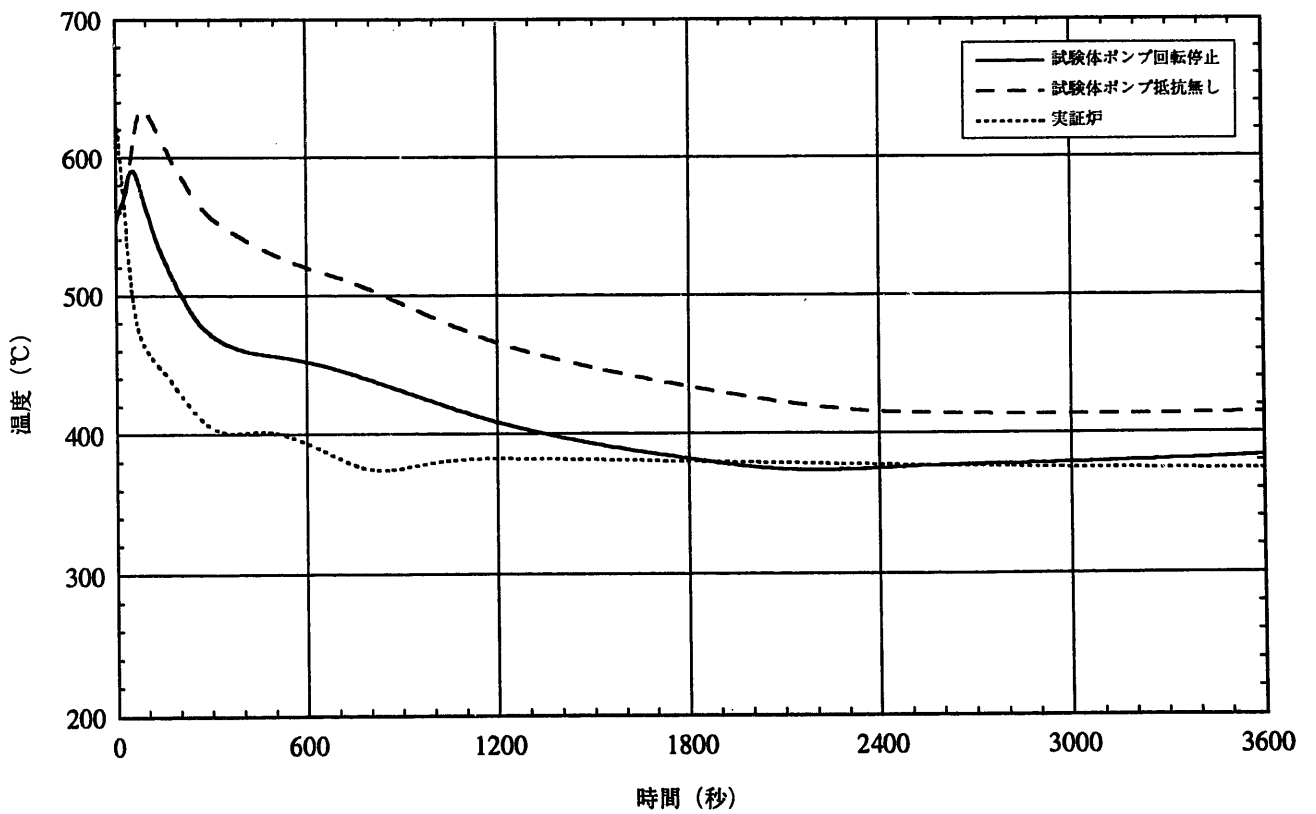


図6.5-4 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (炉心出口温度)

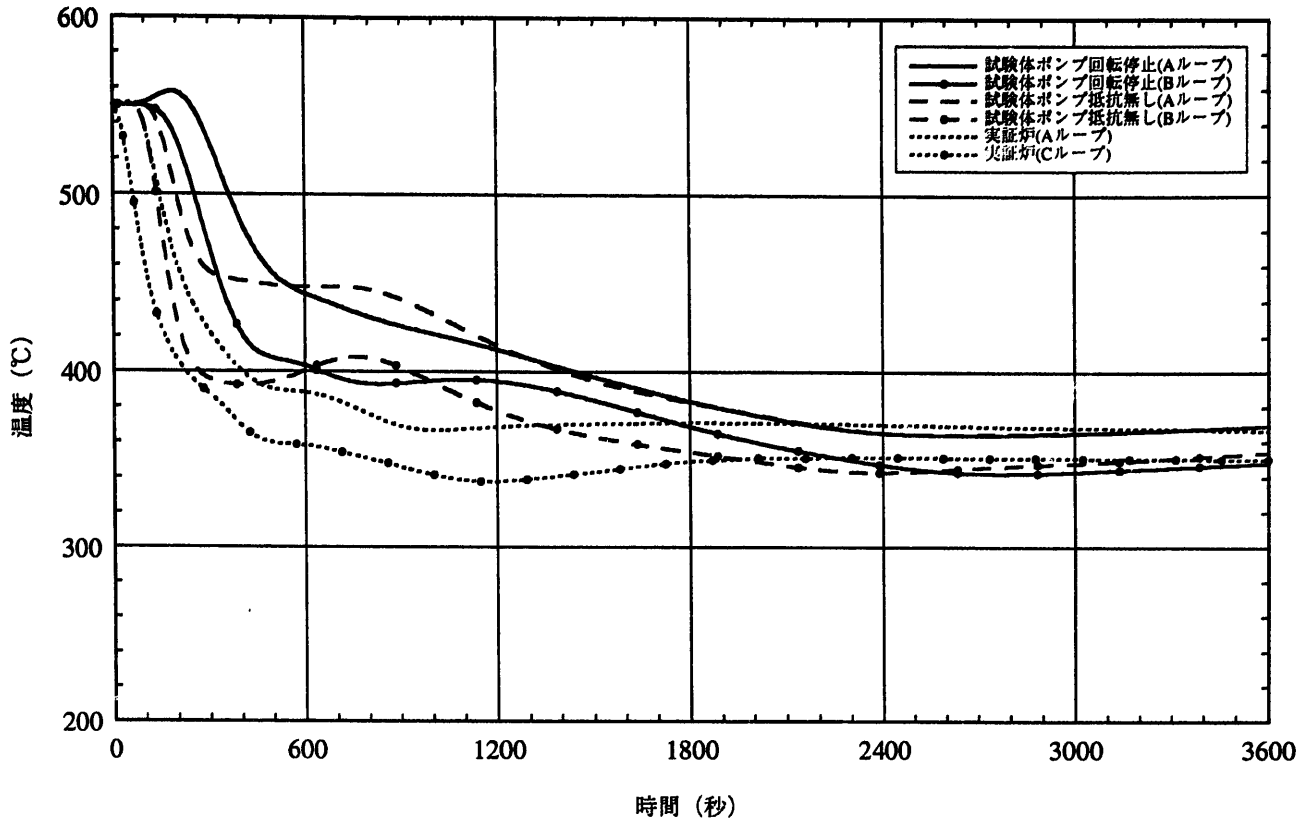


図6.5-5 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 1次側入口温度)

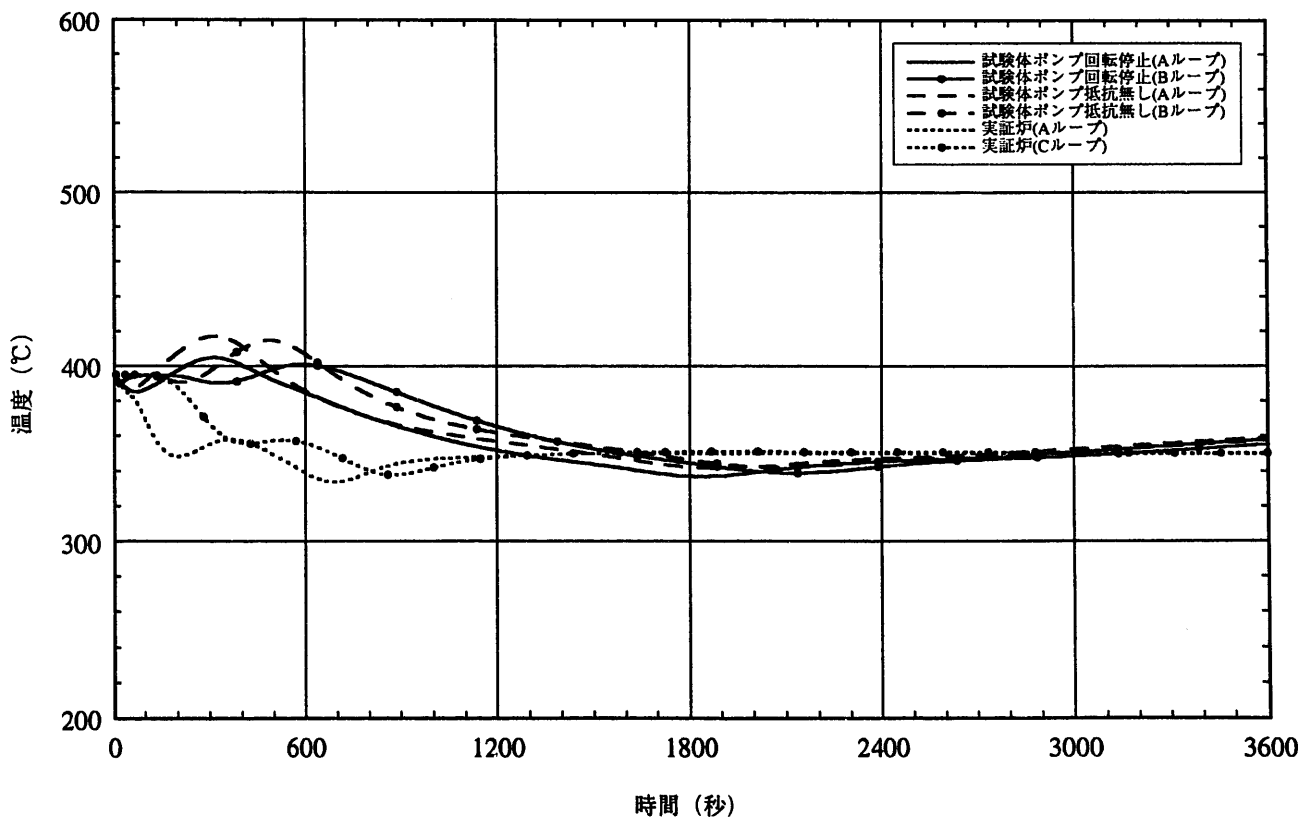


図6.5-6 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 1次側出口温度)

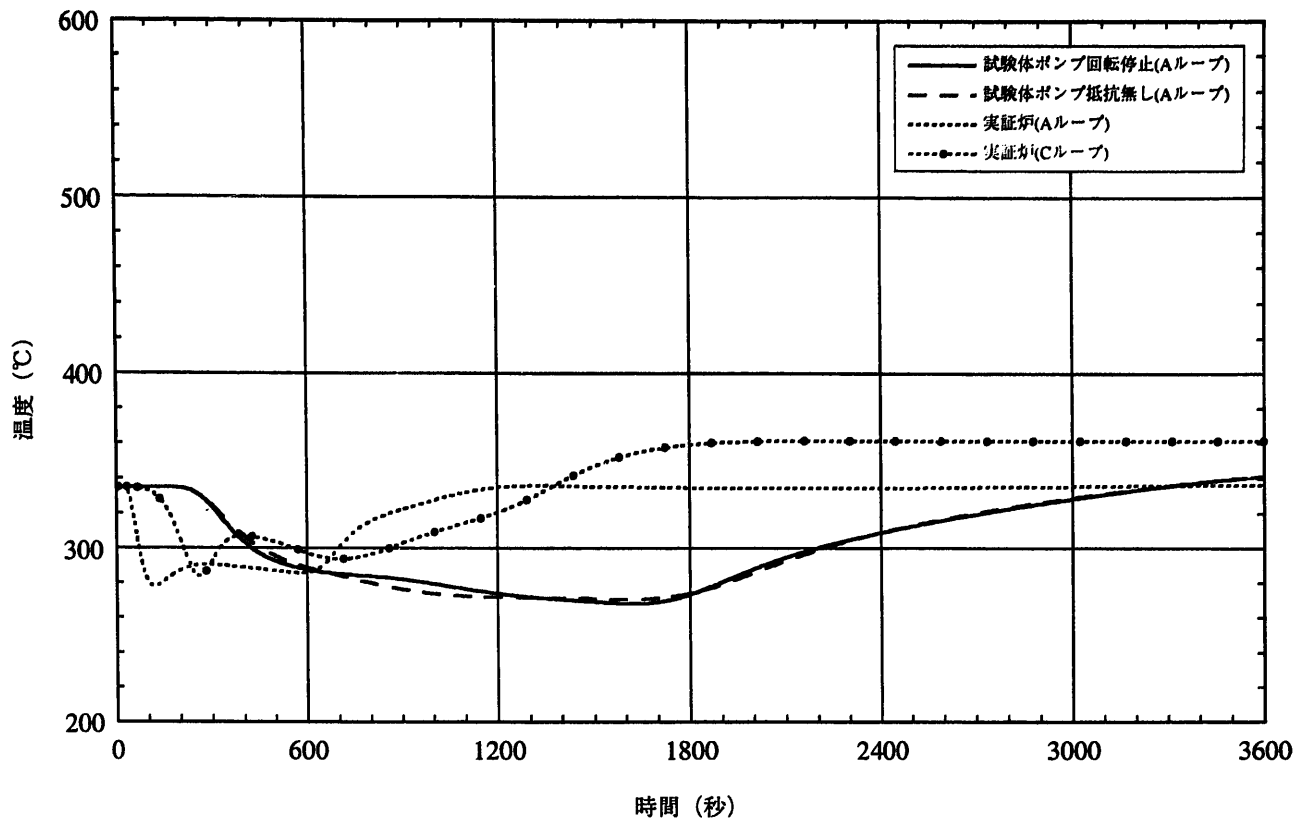


図6.5-7 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 2次側入口温度)

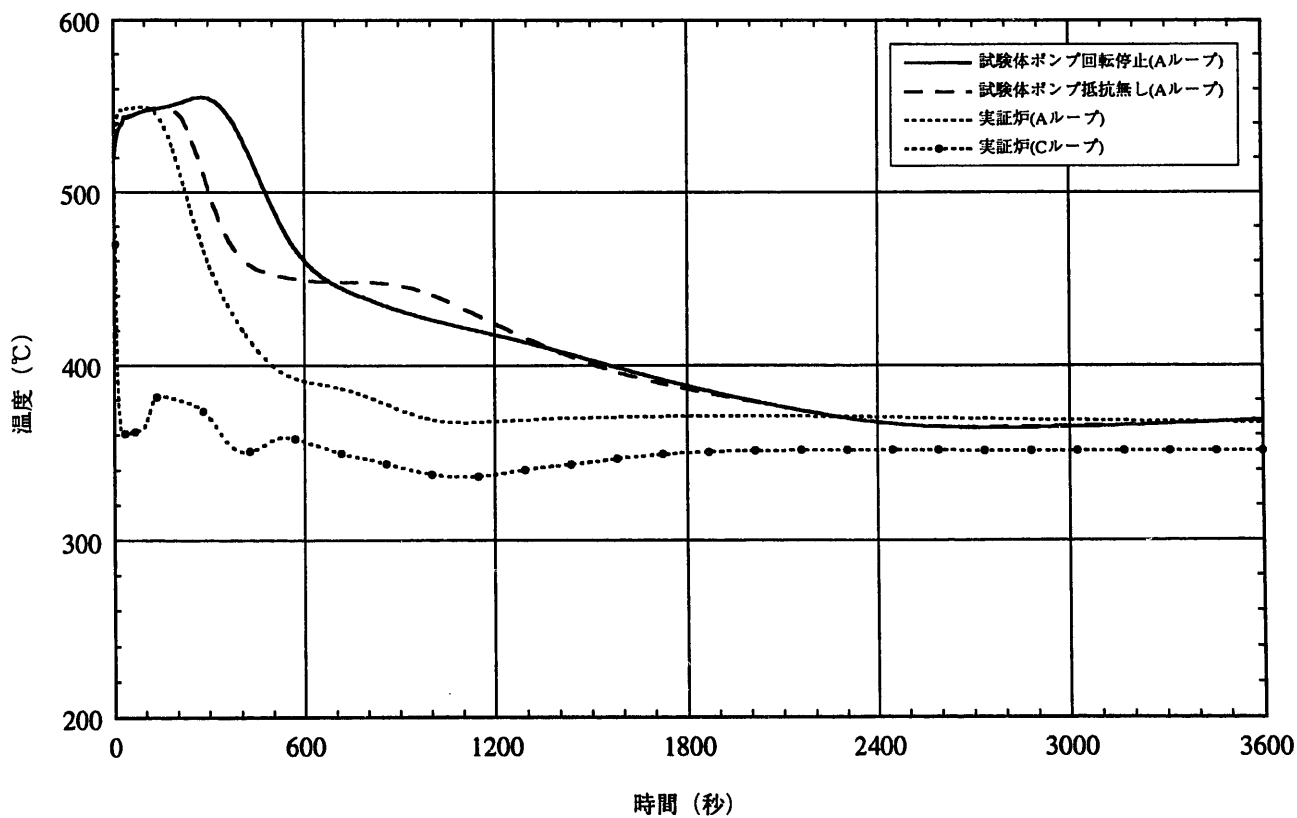


図6.5-8 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (IHX 2次側出口温度)

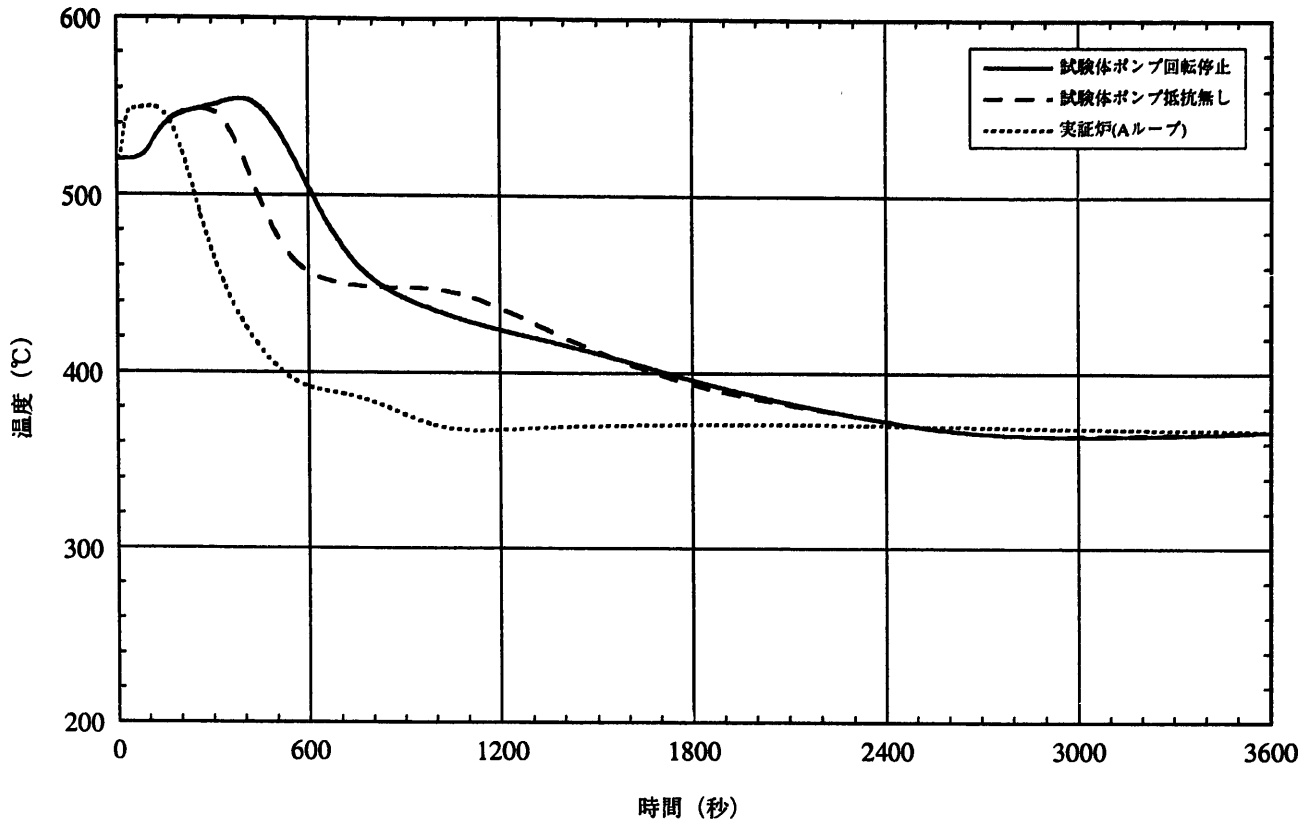


図6.5-9 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG入口Na温度)

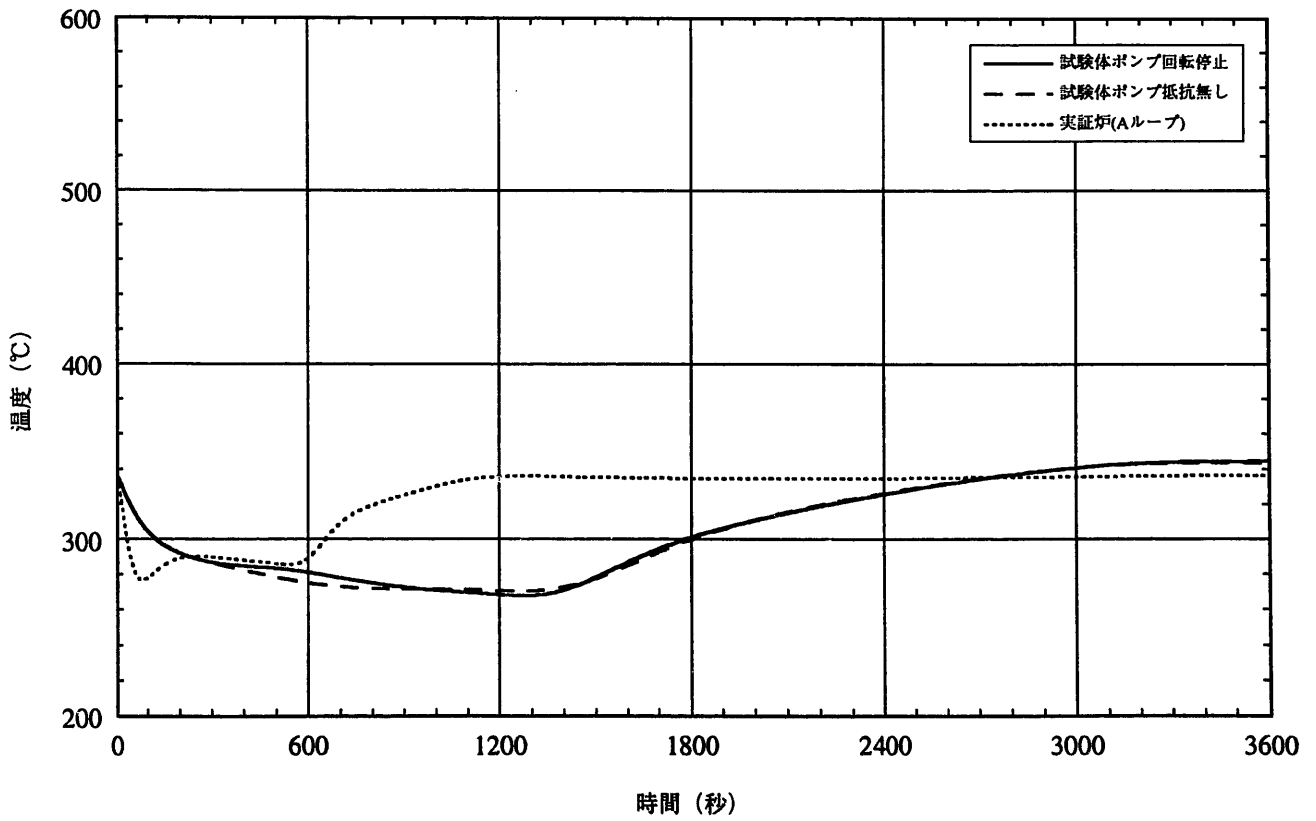


図6.5-10 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG出口Na温度)

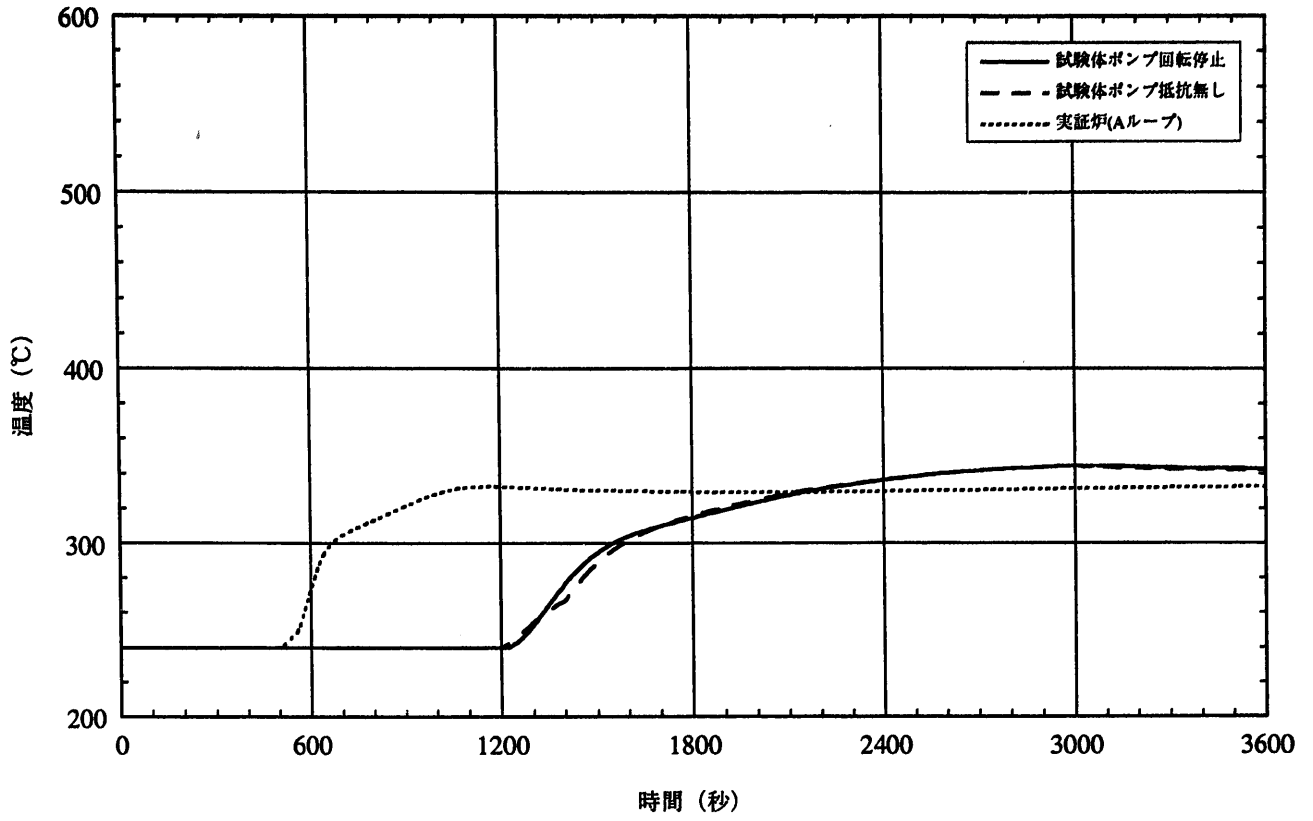


図6.5-11 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG入口給水温度)

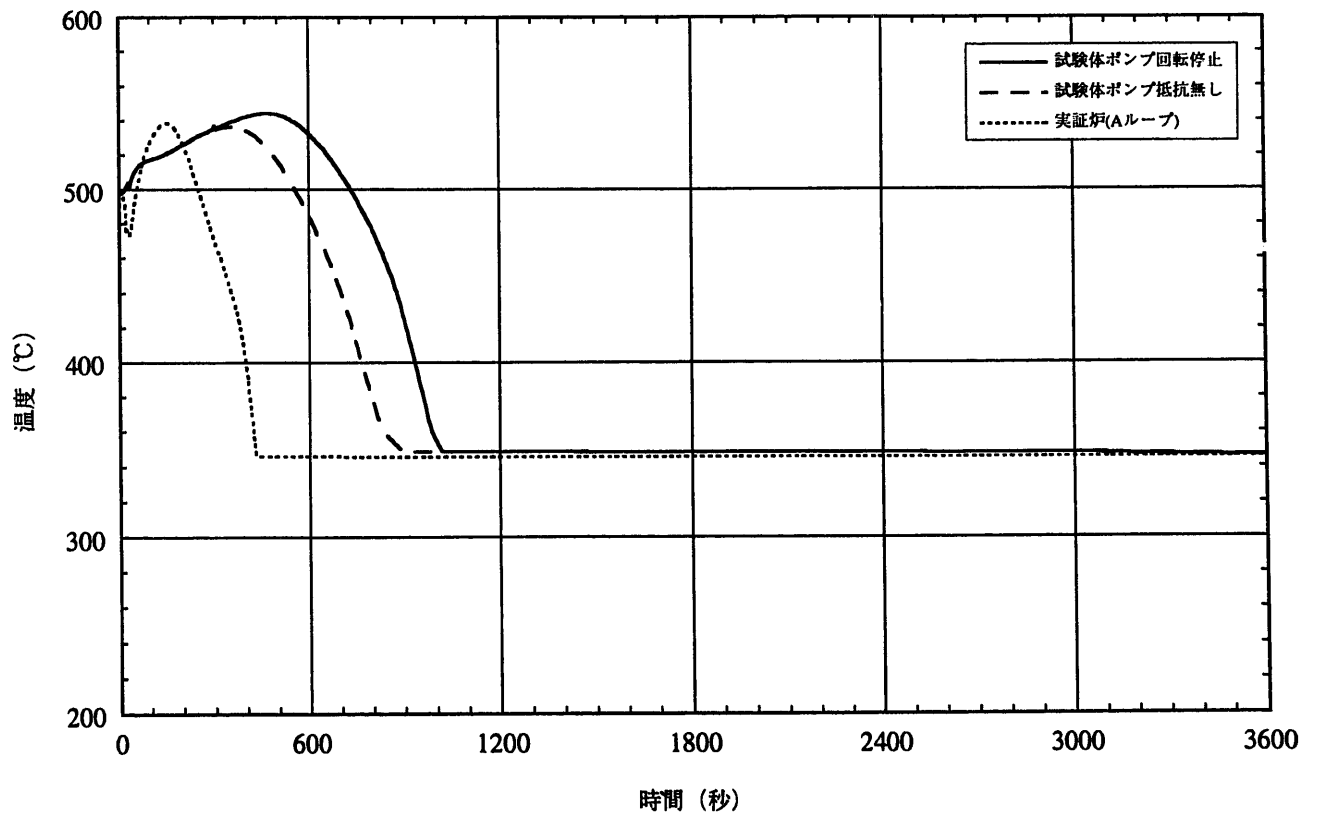


図6.5-12 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG出口蒸気温度)

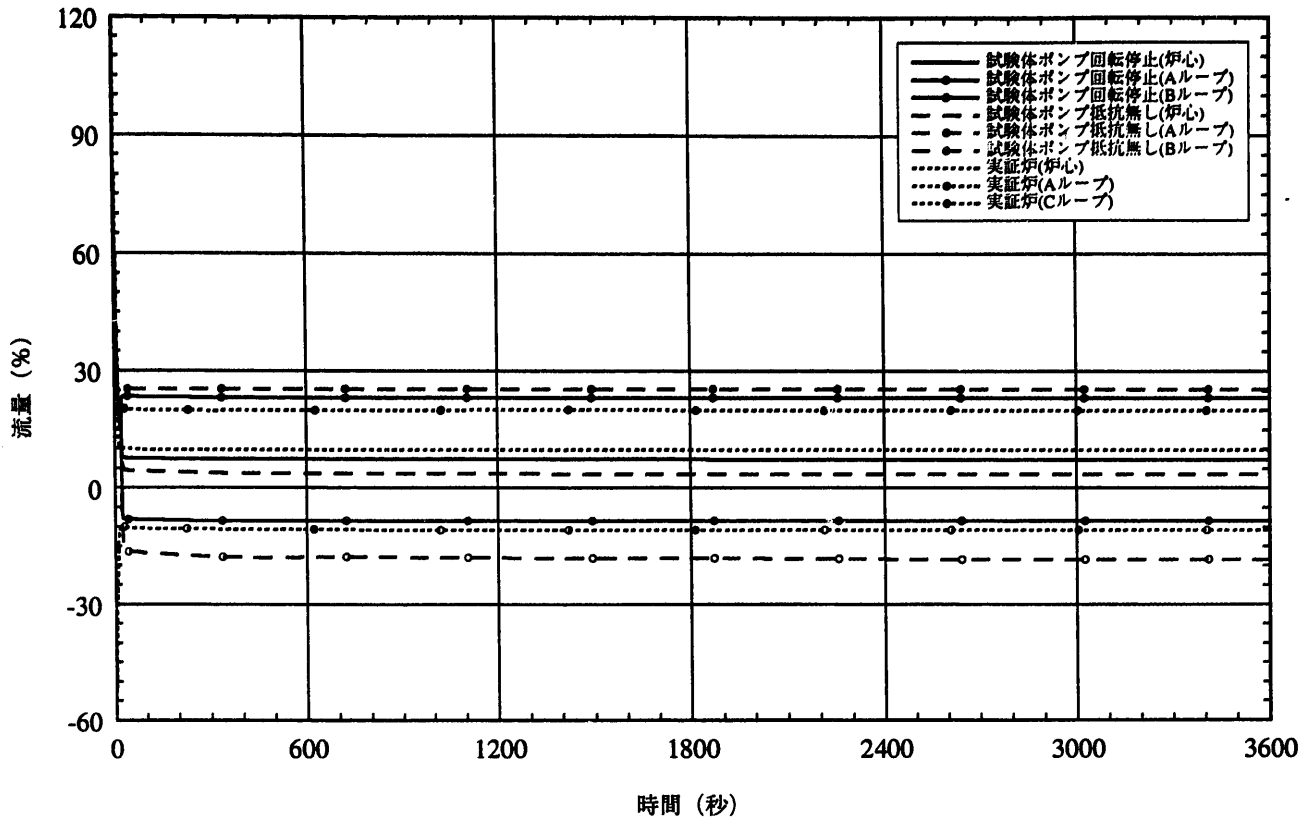


図6.5-13(1/2) 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (1次系流量)

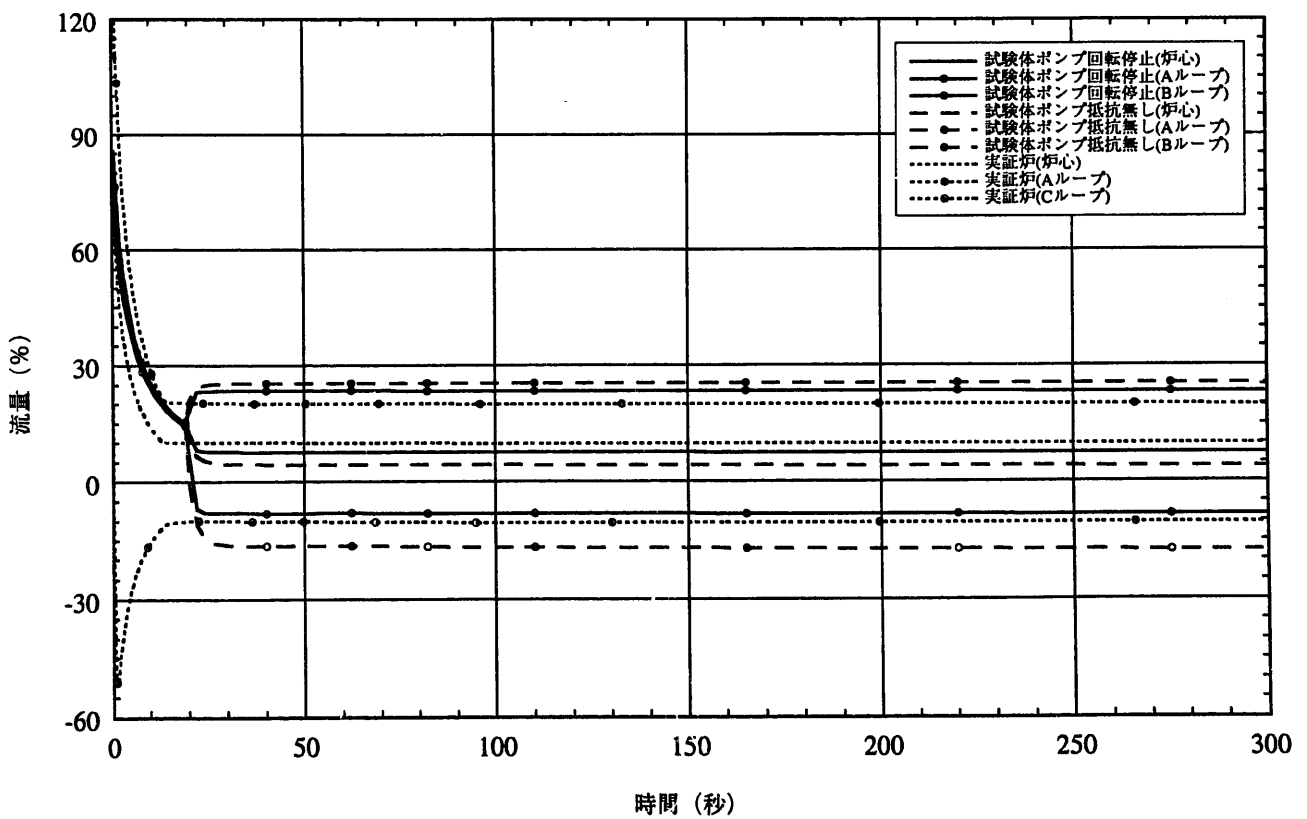


図6.5-13(2/2) 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (1次系流量)

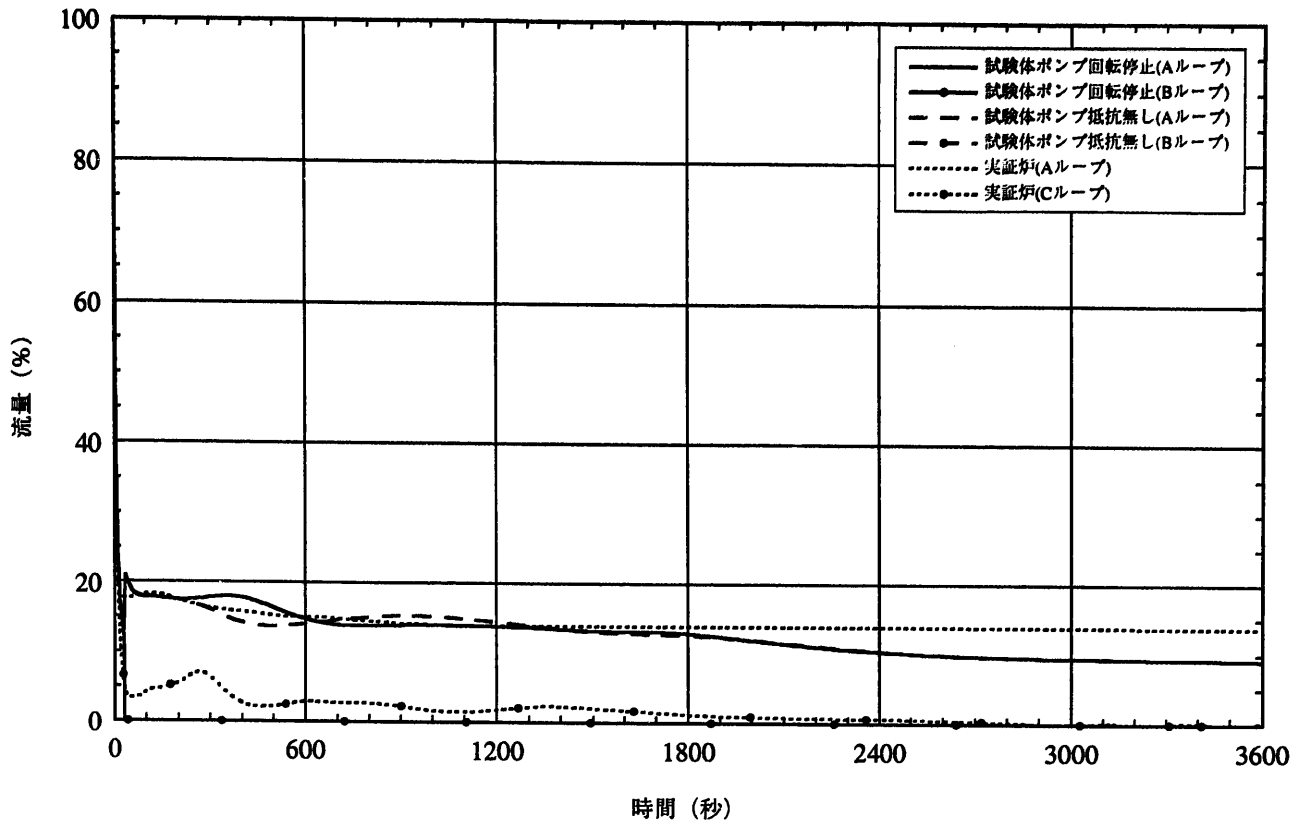


図6.5-14(1/2) 1次系ポンプB軸固着試験解析結果(2次系流量)

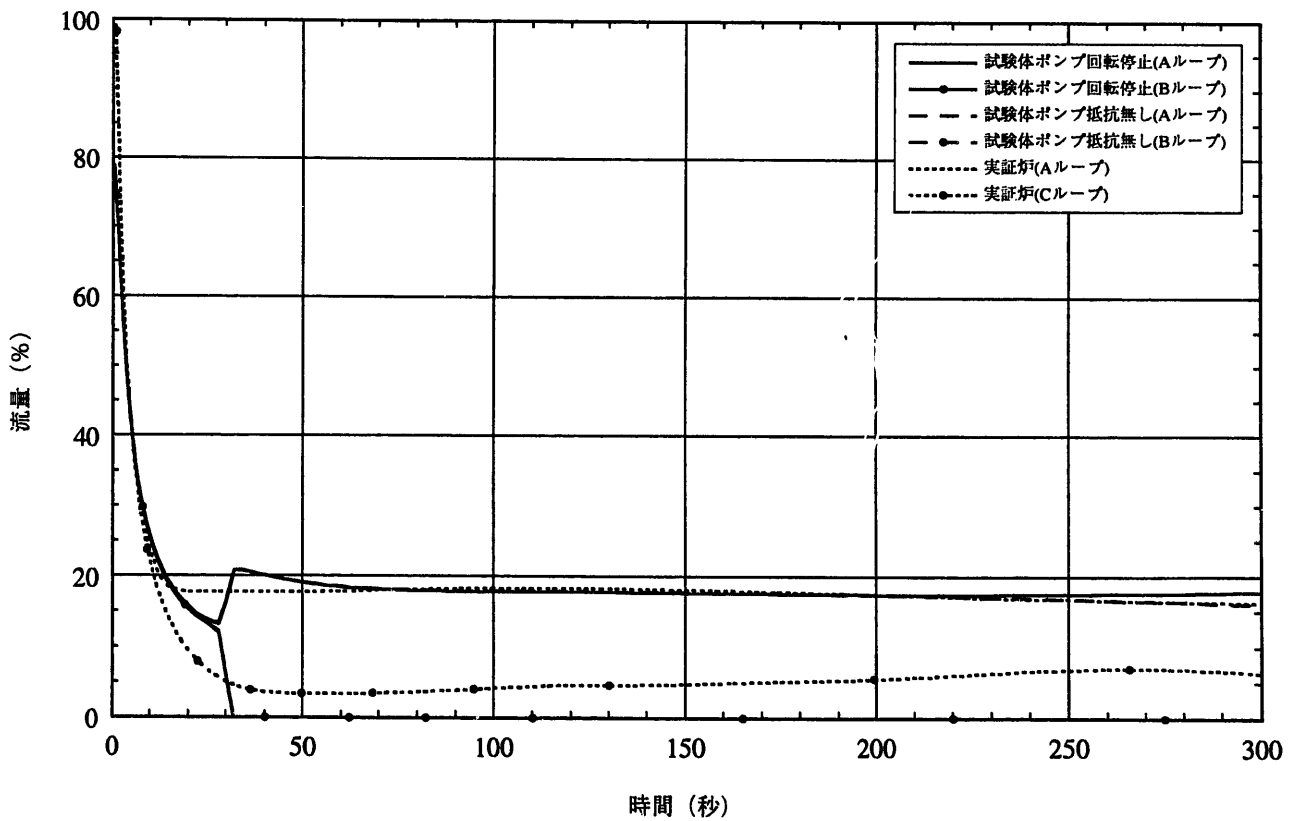


図6.5-14(2/2) 1次系ポンプB軸固着試験解析結果(2次系流量)

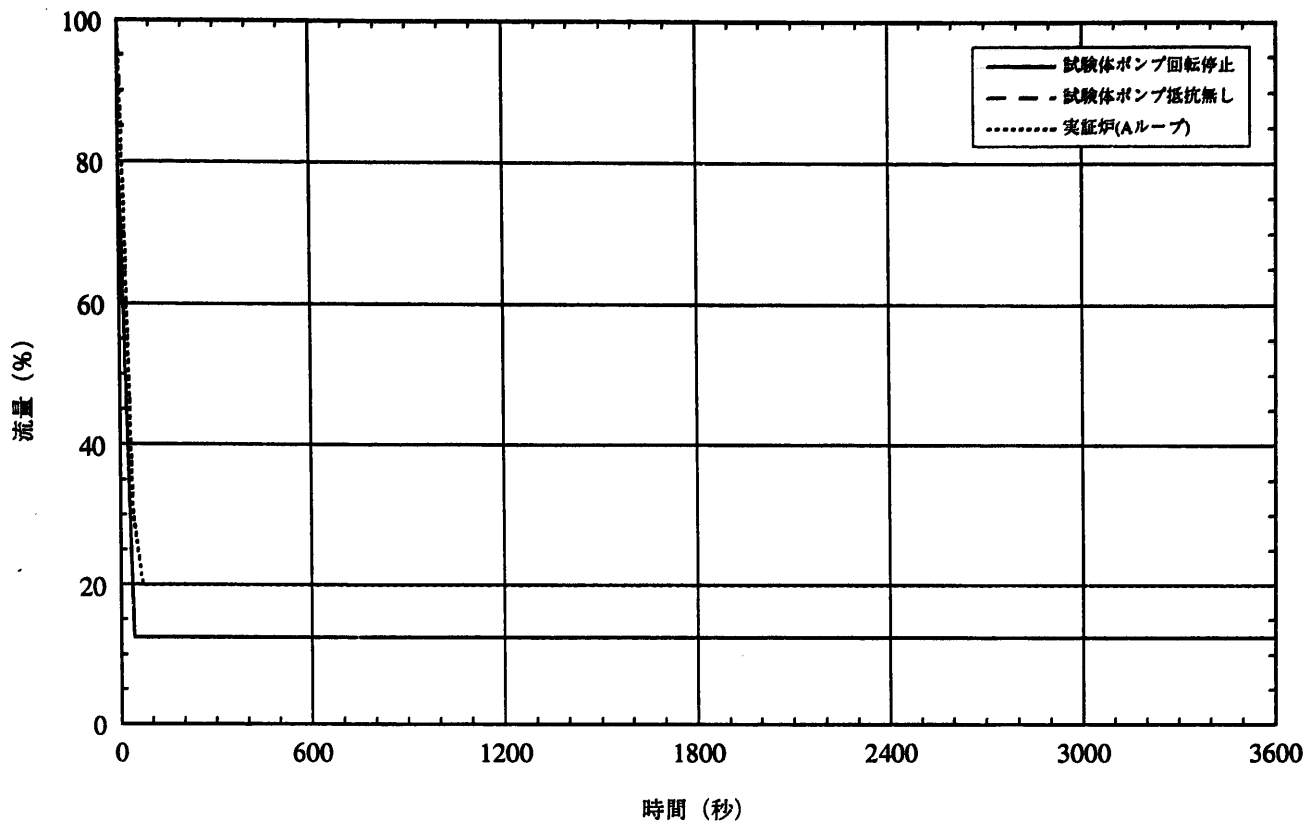


図6.5-15 1次系ポンプB軸固着試験解析結果 (SG給水流量)