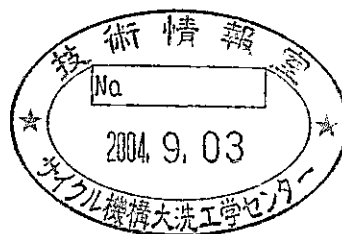


IHX組込型崩壊熱除去系冷却器の
熱流動に関する実験研究
— 伝熱管下方における温度変動特性 —
(研究報告)

2004年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

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

2004

IHX 組込型崩壊熱除去系冷却器の熱流動に関する実験研究

— 伝熱管下方における温度変動特性 —

(研究報告)

宮越 博幸*、上出 英樹*、

要 旨

実用化戦略調査研究において検討されているナトリウム冷却中型モジュール炉では崩壊熱除去系として IHX の入口プレナムに冷却用伝熱管を組み込んだ PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) を採用している。同大型炉では蒸気発生器に同様な崩壊熱除去用伝熱管を組み込んだ方式を採用している。このような機器に内挿するタイプの崩壊熱除去用冷却器において、その下流での温度変動は組み込まれた機器が複雑で溶接構造を有することから高サイクル熱疲労の観点で留意する必要がある。

本報告では、大洗工学センターに設置されているプラント過渡応答試験装置を用い PRACS 運転時の冷却コイル下流の熱流動現象について、ナトリウム試験を行った。実験条件は2次主冷却系の除熱をゼロとし、PRACS による崩壊熱除去を模擬した定常試験とした。1) IHX の1次側流量を固定して PRACS の除熱量をパラメータとした試験ケース、2) IHX 1次側出入口温度差 (PRACS による除熱分) を固定して1次側流量をパラメータとした試験ケース、3) 1次側入口温度、PRACS 2次側入口温度ならびに流量を一定として、1次側流量をパラメータとした試験ケースを各5点の条件でおこなった。試験の結果、PRACS 冷却コイル下流の温度変動強度は IHX 管板のコイル直下より離れた位置で大きく、その大きさは冷却コイルを含む1次側流路部分の流速に強く依存する。すなわち流速が大きいほど変動強度が増加する傾向がみられた。

本実験の範囲である流速 1~3cm/s では温度変動強度が流速の増加に従って増加することから、PRACS の設計サイジング条件である1次系6%流量での IHX 1次側 PRACS 伝熱管を含む流路の流速が7 cm/s、自然循環時に4 cm 程度、15%流量強制循環運転時には16cm/s 程度となる中型炉において、PRACS 運転時の温度変動強度の流速依存性に留意する必要があることがわかった。

Sodium Experiment for Temperature Fluctuation in IHX integrated with PRACS

Hiroyuki Miyakoshi*, Hideki Kamide*,

ABSTRACT

Sodium cooled fast reactor is designed in a feasibility study. PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) is adopted as a decay heat removal system of middle class reactor. In this system heat exchange tubes are installed in the IHX inlet plenum. During the decay heat removal operation cold fluid cooled by PRACS tubes and hot fluid which bypasses the tubes mixes in the inlet plenum and temperature fluctuation will occur. This temperature fluctuation is significant on a point of high cycle thermal fatigue (thermal striping) in a complex component which has a weld line.

Sodium experiment was carried out for such mixing phenomena in IHX with the PRACS cooling tubes using PLANDTL test loop in O-arai Engineering Center. Experimental parameters were flow rate in the primary side in IHX, temperature difference in IHX primary side, and removal heat of the PRACS. Temperatures at the cooling tubes of the PRACS and a upper tube plate of IHX were measured.

Following findings were obtained. 1) Temperature fluctuation intensity was large at the tube plate than at the PRACS tube. 2) Temperature fluctuation intensity depended on flow velocity in a IHX inlet plenum including the PRACS tubes, it increased as the flow velocity got larger (1 to 3 cm/s).

In the design of module type middle class reactor, average flow velocity in the inlet plenum of IHX is 16 to 4 cm/s during the decay heat removal system. It is needed to pay attention to the velocity dependency of temperature fluctuation at downstream region of PRACS tubes.

* New Technology Development Group,
Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

目次

1. 序論	1
2. 試験設備	2
2. 1 試験装置	2
2. 2 試験部	2
2. 3 データ収録システム	2
3. 試験条件および試験方法	4
3. 1 試験条件	4
3. 2 試験方法	4
4. 試験結果	6
4. 1 主要部の温度分布	6
4. 2 中間熱交換器上部管板近傍の温度変動特性	6
5. 考察	8
6. 結論	10
謝辞	11
参考文献	12

表リスト

表 3.1 試験条件一覧

表 4.1 試験結果一覧

図リスト

図 2.1 プラント過渡応答試験施設フローシート

図 2.2 機器内挿型冷却器特性試験部

図 4.1-1 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1)

図 4.1-2 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2)

図 4.1-3 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における
主要部の温度分布 (Case3)

図 4.2-1 中間熱交換器上部管板近傍の温度変動特性 (Case1)

図 4.2-2 中間熱交換器上部管板近傍の温度変動特性 (Case2)

図 4.2-3 中間熱交換器上部管板近傍の温度変動特性 (Case3)

図 5.1 管板部温度変動強度と除熱量の関係

図 5.2 管板部温度変動強度と1次側出入口温度差の関係

図 5.3 管板部温度変動強度と1次側平均流速の関係

図 5.4 1次側温度差で規格化した管板部温度変動強度

1. 序 論

高速炉の実用化を図る上で、高い経済性と安全性の両立が課題となっている。核燃料サイクル開発機構が実施している実用化戦略調査研究では、崩壊熱除去系に自然循環方式を採用することで動的機器を削減し、非常用電源等を簡素化することをナトリウム冷却炉におけるコストダウンの一方策として検討している。さらに、崩壊熱除去系の高信頼性を確保する観点からは、PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) と IRACS (Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System)、DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) と IRACS、RVACS (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System) と SG-ACS (Steam Generator Auxiliary Cooling System) 等の組み合わせが検討されている。^[1] これらの崩壊熱除去システムは、原子炉容器、中間熱交換器、蒸気発生器等の主要機器内に熱交換器を配置した構造を採ることから、機器内の冷却材には比較的大きな温度分布が生じるとともに、これらの流体が混合する過程で生ずる温度変動が機器内構造物に作用し、構造物に高サイクル熱疲労^[2]などを与える可能性がある。よって、実用化にあたっては、機器内部の熱流動特性を把握し、構造健全性に及ぼす影響を評価する必要がある。

本研究は、機器内挿型冷却器の熱流動現象の把握とともに、評価手法確立のための流動試験データを得ることを目的としている。ここでは、中間熱交換器 (IHX) の入口プレナムに崩壊熱除去系の熱交換器を配置した PRACS 体系を用いて、熱交換器伝熱管 (冷却コイル) の下方にどのような温度場が形成されるかを測定した。これにより、機器内に熱交換器がある場合の温度変動特性について基礎的な知見が得られる。

本報では、PRACS の除熱量及び IHX1 次側流量を変化させた場合の冷却コイル周囲、及び冷却コイル下流側構造物近傍の温度計測結果を示す。

2. 試験設備

2. 1 試験装置

図 2.1 に試験に使用したプラント過渡応答試験装置 (PLANDTL; Plant Dynamics Test Loop) のフローシートを示す。PLANDTL は、高速炉の炉心部、一次主冷却系、二次主冷却系及び崩壊熱除去系を模擬した機器等からなり、崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象について実験研究^[3]を行ってきた。

一次系主冷却系は、電磁ポンプ (最大ナトリウム流量 1200[L/min])、流量調節弁、電磁流量計、IHX (交換熱量 1500[kW]) 及び模擬炉心部から構成されている。模擬炉心部の上部プレナム容器には、一次主冷却系のナトリウム温度を調節するための、加熱器 (最大出力 680[kW])、電磁ポンプ (最大ナトリウム流量 500[L/min])、電磁流量計及び流量調節弁からなる補助系が接続されている。

二次系主冷却系は、電磁ポンプ (最大ナトリウム流量 1200[L/min])、流量調節弁、電磁流量計、空気冷却器から構成され、模擬炉心部で発生する熱 (最大出力 1200[kW]) の除去を行う。

崩壊熱除去系は、電磁ポンプ (最大ナトリウム流量 100[L/min])、電磁流量計、流量調節弁、空気冷却器 (除熱量 300[kW]) 及び熱交換器から構成されている。系統には、原子炉容器の上部プレナムに浸漬するタイプ (DRACS) と IHX 上部に内蔵するタイプ (PRACS) の熱交換器が設置されており、弁操作によりの何れかのタイプを選択できる構造としている。

本試験では、これらのうち一次主冷却系及び崩壊熱除去系 (PRACS) を用いて実施した。

2. 2 試験部

本試験では、IHX 及びこの上部空間に配置した PRACS 伝熱管を試験部として用いた。図 2.2 に試験部の概要を示す。IHX 入口配管から流入した冷却材は、PRACS 熱遮蔽板により周方向及び鉛直方向に流量配分された後、PRACS 伝熱管が配置された PRACS シュラウドと熱遮蔽筒の間隙 (以下、伝熱管アニュラス部という) を下降し、IHX 伝熱管の内部を通過して IHX 出口配管より流出する。伝熱管アニュラス部の軸方向 5 箇所 (TPS270IS01~05) 及び IHX 上部管板近傍の径方向 3 箇所 (TIX270TP01~03) には、温度測定用の熱電対が取り付けられている。

2. 3 データ収録システム

データ収録システムは、16bit の AD 分解能を有するデータロガー (HEWLETT PACKARD 社製 HP3852A) および収録を制御するためのホストコンピュータから

構成される。計測信号は、前述した温度、圧力、ヒータピン電圧、電流および電力計である。温度信号は熱電対からの起電力信号を零接点補償器に通し、直流アンプにより増幅した後に、データロガーにより収録を行った。その他の計測信号については信号変換器からの信号を直接ロガーに接続して収録した。

3. 試験条件および試験方法

3. 1 試験条件

表 3.1 に試験条件を示す。試験では、PRACS 伝熱管下流に位置する IHX 上部管板近傍の温度変動特性を、PRACS 除熱量及び 1 次主冷却系ナトリウム流量をパラメータとした、以下の 3 項目の試験により確認した。

1) 除熱量パラメータ試験 (Case1)

1 次主冷却系ナトリウム流量 (IHX 1 次側流量) 一定に保持した状態で、PRACS 除熱量を変化させ、PRACS 除熱量が IHX 上部管板近傍の温度変動特性に及ぼす影響を確認する。

2) 流量パラメータ試験 (Case2)

IHX 出入口平均温度差を一定に保持した状態で、IHX 1 次側流量を変化させ、1 次主冷却系流量が IHX 上部管板近傍の温度変動特性に及ぼす影響を確認する。

3) 1 次 2 次入口温度一定、流量パラメータ試験 (Case3)

IHX 入口温度及び PRACS 2 次側の入口温度・流量を一定に保持した状態で、1 次主冷却系流量を可変する。PRACS 除熱量はこれに応じて変化するが、Case2 に比べて変化は小さくなる。実機を考えた場合、PRACS 空気冷却器側の条件が大きく変化しない条件で、1 次主冷却系流量が自然循環の発達過程で変化する場合に相当する。PRACS 除熱量の変化が小さい範囲で 1 次主冷却系流量が IHX 上部管板近傍の温度変動特性に及ぼす影響を確認する。

3. 2 試験方法

本試験に先立ち、1 次主冷却系及び崩壊熱除去系に設置した電磁流量計の校正、並びに試験部熱電対の校正を行った。電磁流量計は、1 次主冷却系及び崩壊熱除去系に設置されている上部プレナム容器及び膨張タンクのナトリウムを自然落下させて、そのときの落下したナトリウムの体積と落下に要した時間から平均流量を求め、流量計の出力電圧と比較する方法 (容積法) により校正した。容積法により求めた流量校正曲線に基づき算出した流量と実流量との差は、最大 2.3[L/min]であった。

試験部の熱電対校正は、ループ内のナトリウム温度が一定となるように 1 次主冷却系、補助系、2 次主冷却系及び崩壊熱除去系を最大流量にて循環運転し、IHX 入口部に設置されている熱電対の指示値を基準として 300[°C]から 450[°C]の範囲を 50[°C]毎に変化させた 4 種類の温度条件で行った。温度校正結果を反映させて、校正時の収録データを処理したところ、基準温度と各熱電対との差は、最大 0.2[°C]であった。

電磁流量計及び熱電対の校正が終了した後、試験を開始した。以下に各試験の手順を示す。

1) 除熱量パラメータ試験 (Case1)

除熱量パラメータ試験では、IHX 1次側流量を 110[L/min]、PRACS 伝熱管入口温度及び流量を 300[°C]及び 90[L/min]に保持した状態で、PRACS 除熱量を 180[kW]から 60[kW]まで 30[kW] 刻みで変化させた 5 ケースの試験を実施する。なお、PRACS 除熱量は、試験条件に相当する量の入熱を、補助系に設置された加熱器から与えることにより設定した。

2) 流量パラメータ試験 (Case2)

流量パラメータ試験では、IHX 出入口温度差を 70[°C]に保持した状態で一次系ナトリウム流量を 140[L/min]から 40[L/min]の範囲で変化させた 5 ケースの試験を実施する。

3) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験 (Case3)

1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験では、IHX 1次側入口温度を 450[°C]、PRACS 2次側入口温度及び流量をそれぞれ 300[°C]及び 90[L/min]に保持した状態で、1次主冷却系流量を 120[L/min]から 40[L/min]まで 20[L/min]刻みで変化させた 5 ケースの試験を実施する。

各試験データは、一次主冷却系の流量と IHX 1次側出入口温度差から求まる熱量と、PRACS 2次側の流量、出入口温度差から求まる熱量がバランスしたことを確認した後、サンプリング周期 0.01 秒で 20000 点 (3分 20 秒間) 取得した。

4. 試験結果

4. 1 主要部の温度分布

各試験における伝熱管アニュラス部の軸方向温度分布 (①～⑤) 及び IHX 上部管板近傍の径方向温度分布 (⑥～⑦) を図 4.1-1～図 4.1-3 に示す。図中の誤差棒は、温度データの rms 値を示している。

PRACS 伝熱管アニュラス部の軸方向温度をみると、伝熱管の上方から 2 段目の軸方向位置を境として、上流側と下流側の温度変動特性に差異がみられるとともに、温度低下特性に不連続が認められる。PRACS 伝熱管アニュラス部の上流側には、下流側に比べて乱れが大きく、かつ、流路内に偏りをもった分布が形成されていることが、これらの温度計測結果から推測される。一方、伝熱管の上方から 2 段目より下流側では、温度は直線的な低下傾向を示すとともに、上流側に比べ温度変動は小さくなっており、安定した流れが形成されているものと推測される。

IHX 上部管板近傍の径方向温度分布は、PRACS 伝熱管の最下点の下流側に位置する IHX 中央部⑦で最も低く、IHX 外側⑥で最も高くなる傾向を示している。この傾向は、除熱量の増大とともに顕著となっており、Case1、Case2 及び Case3 の各試験ケースにおいて IHX 上部管板近傍の径方向には最大で、それぞれ 11.6[°C]、12.4 [°C]及び 12.7[°C]の温度差が生じている。これらの温度差は、PRACS 2 次側の出入口温度差と流量から求まる除熱量に基づき算出される IHX 1 次側出入口温度差の、それぞれ 13.1[%]、17.9 [%]及び 18.1[%]に相当する。

4. 2 中間熱交換器上部管板近傍の温度変動特性

PRACS 伝熱管の下流に位置する中間熱交換器 (IHX) 上部管板近傍の温度変化を図 4.2-1～図 4.2-3 に示す。

除熱量をパラメータとした Case1 (図 4.2-1) では、PRACS による除熱量が低下するに従い各部の温度変動は減衰する傾向を示している。径方向位置の温度を比較すると、IHX 中央⑦及び IHX 中心⑧では比較的大きな温度変動を示すものの、IHX 外側⑥の温度変動は前者に比べ大幅に減衰しており、温度変動の大きな領域は PRACS 伝熱管の直下から少し離れた位置に限定されることがわかる。

1 次主冷却系流量をパラメータとした Case2 (図 4.2-2) では、1 次主冷却系流量が減少するに従い各部の温度変動は減衰する傾向を示している。1 次主冷却系流量が 40[L/min]まで低下すると、各部の温度に顕著な変動は認められず、IHX 上部管板に達するまでに冷却材の混合はほぼ収束することがわかる。また、径方向位置における温度変動特性は、Case1 と同様に、PRACS 伝熱管の直下から少し離れた位置での温度変動が大きくなる傾向を示している。

IHX 1 次側入口温度及び PRACS 2 次側境界条件を一定に保持し、1 次主冷却系流量をパラメータとした Case3 (図 4.2-3) では、流量が減少し、PRACS による除熱

量が減少するに従い各部の温度変動は減衰する傾向を示している。各部の温度変動特性をほぼ同一流量条件を示す Case2 の結果と比較すると、径方向位置に生じる温度差及び温度変動強度は、除熱量が大きくなる Case3 でわずかに大きいことがわかる。

5. 考 察

これまでに示したように温度変動強度は PRACS 伝熱管部では比較的小さく、IHX 管板部（測定点は伝熱管の中）での強度が高い。特に PRACS 伝熱管の直下から離れた管板中心での変動強度が最も高かった。これは、PRACS 伝熱管で低温となったナトリウムと PRACS 伝熱管から離れて流下した高温のナトリウムとの混合が PRACS 伝熱管から離れた部位で生じるためと考えられる。

ここでは、最も高い強度を示す管板中心での温度変動強度について、試験パラメータとした PRACS の除熱量や 1 次系流量との関係について考察する。図 5.1 に、温度変動強度として RMS 値をとり、除熱量を横軸として各試験ケースの結果を示す。ここで、各試験ケースの意味を再度確認すると、以下の通りである。

- Case 1： 除熱量パラメータ試験（図中 Power/V）は IHX 1 次側流速を一定として PRACS の除熱量をパラメータとしている。すなわち 1 次側の温度差は除熱量の増大にほぼ比例して大きくなる。
- Case 2： 流量パラメータ試験（図中 $V/\Delta T_1$ ）は 1 次側の温度差を一定として 1 次側流速をパラメータとしている。すなわち 1 次側の除熱量は流速の増大にほぼ比例して大きくなる。
- Case 3： 1 次 2 次入口温度一定、流量パラメータ試験（図中 $V/\Delta T_{in}$ ）は、1 次側および PRACS 2 次側の入口温度、さらに 2 次側流量を固定して 1 次側流速をパラメータとしている。除熱量は流速の変化に対して比較的变化は小さい。

図より、各ケースともに除熱量が大きいほど温度変動強度が大きくなる傾向を示している。温度変動強度が大きくなる要因として、混合前の温度差すなわち PRACS 伝熱管にて冷却される低温流体と PRACS 伝熱管から離れて元の高温のまま管板に到達する流体との温度差が大きいことが挙げられる。そこで、IHX 1 次側の出入口温度差すなわち、PRACS 伝熱管での平均的な温度低下幅を横軸として変動強度を比較した結果を図 5.2 に示す。図より、必ずしも 1 次側温度差が大きい場合に変動強度が大きいとは限らないことがわかる。特に Case 3（図中 $V/\Delta T_{in}$ ）では温度差の増大に伴って変動強度が低下している。Case 3 で温度変動の小さいデータは 1 次側流速を小さくした場合の結果である。これから PRACS 伝熱管部を流下する流速の影響があると考えられる。

図 5.3 に 1 次側平均流速を横軸として整理した結果を示す。図より温度変動強度が流速に強く依存していることがわかる。但し、白抜きの○で示した除熱量パラメータ試験の結果は、他のケースに比べてばらつきが大きい。このケースでは 1 次側流速を一定にして除熱量を変えており、1 次側の温度差が大きく変化している。そこで温度変動強度を 1 次側出入口温度差で規格化した結果を図 5.4 に示す。規格化することで除熱量パラメータ試験の結果も他のケースのデータと良くまとまることわかる。1 点のみ外れて比較的高い値を示しているデータは除熱量が小さく 1 次側温度差、変動強度ともに最も小さい条件である。

以上の検討により、PRACS 伝熱管の下流にある IHX 管板部には、温度揺らぎが

発生し、その変動強度は主として PRACS 伝熱管を含むアニュラス流路の流速に依存する。すなわち流速が大きいほど変動強度は大きくなる。また、変動強度は混合前温度差に相当する IHX 1 次側温度差が大きいほど大きくなる傾向を示すことがわかった。

ここで、実用炉として検討が進められている 75 万 kWe 出力ナトリウム冷却中型モジュール炉における除熱条件をみると、中型炉では崩壊熱除去系として PRACS (11MW) 2 系統+DRACS (10MW) 1 系統の組み合わせを採用している。PRACS により除熱される条件は主給水ポンプトリップなど 1 次主冷却系が主ポンプの強制循環 (定格運転時の 15% 流量) となる場合と外部電源喪失などのように自然循環となる場合がある。PRACS の 2 次系はポンプをもたず自然循環で運転され、空気側は非常用電源に属さないブローを有している。1 次系が定格運転時の 6% 流量となる場合を PRACS の設計用サイジング条件としており、その場合の IHX 1 次側は PRACS 伝熱管を含む流路の平均流速が 7 cm/s、1 次側温度差 32°C となる。自然循環時にはループ流量を例えば 4% と考えると同流速は 4 cm/s となり、除熱量を保存した単純計算で 1 次側温度差は 51°C となる。強制循環時には流速は 16 cm/s 程度となる。先の図 5.2、5.4 をみると試験条件は中型炉の条件からそれほど遠くないことがわかる。PRACS 伝熱管の型式は本試験装置ではスパイラル状のコイルであるのに対し、中型炉では鉛直方向の直管であるなど流路形状が異なることから温度変動強度や変動幅の絶対値は議論できない。しかし 1 次側流速が大きい条件で温度変動強度が大きくなる傾向を有する点は共通と考えられ、この点に留意すべきである。

6. 結 論

プラント過渡応答試験装置を用い PRACS 運転時の冷却コイル下流の熱流動現象について、特に高サイクル熱疲労の原因となる温度変動に着目してナトリウム試験を行った。実験は1) IHX の1次側流量を固定して除熱量をパラメータとした試験ケース、2) IHX 1次側出入口温度差を固定して1次側流量をパラメータとした試験ケース、3) 1次2次側入口温度ならびに2次側流量を一定として、1次側流量をパラメータとした試験ケースを各5点の条件でおこなった。各試験において、冷却コイル部、コイル下流の IHX 管板部の温度を熱電対を用いて計測した。試験の結果以下の知見が得られた。

- 1) 温度変動強度は PRACS 伝熱管部では比較的小さく、IHX 上部管板部で大きい。特に PRACS 伝熱管直下より離れた場所に変動強度が大きくなる傾向が見られた。
- 2) 管板部での温度変動強度は IHX 1次側の PRACS 伝熱管を含むアニュラス流路の流速に強く依存し、流速が大きいほど変動強度が増加する。また、混合前の温度差に相当する IHX 1次側温度差が大きいほど変動強度は大きくなる傾向がみられた。
- 3) 本試験の結果から、実用化炉として検討されているナトリウム冷却中型炉での PRACS 下流の温度変動を直接予測することはできないが、本実験範囲である流速 1~3cm/s では温度変動強度が流速の増加に従って単調に増加することから、崩壊熱除去時において、PRACS サイジング条件の1次系6%流量で PRACS 伝熱管を含む流路の流速が 7 cm/s、自然循環時に 4 cm/s、強制循環時に 16cm/s 程度となる中型炉において、温度変動強度の流速依存性に留意することが必要である。

以上。

謝 辞

本試験の実施にあたり、常陽産業（株）の運転員の方々にはナトリウムループの運転および試験データの収録に多大な御協力を頂いた。また、試験データ処理に関して原子力システム（株）長澤一嘉氏に協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Y. Shimakawa, S. Kasai, An Innovative Concept of the Sodium-Cooled Reactor to Pursue High Economic Competitiveness, *Nuclear Technology*, **140**, pp.1-17 (2002)
- [2] 村松壽晴、笠原直人、上出英樹、サーマルストライピングに関する研究の現状と今後の研究計画、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2000-010 (2000)
- [3] M. Nishimura, H. Kamide, K. Hayashi, Transient experiments on fast reactor core thermal hydraulics and its numerical analysis (Inter-subassembly heat transfer and inter-wrapper flow under natural circulation conditions), *Nuclear Engineering and Design* **200** pp.157-175 (2000)

表3.1 試験条件一覧

試験名称	1次側条件			PRACS条件		
	IHX入口温度 [°C]	IHX入口流量 [L/min]	伝熱部平均流速 [m/s]	入口温度 [°C]	流量 [L/min]	除熱量 [kW]
Case1a	—	110	0.022	300	90	180
Case1b	—	110	0.022	300	90	150
Case1c	—	110	0.022	300	90	120
Case1d	—	110	0.022	300	90	90
Case1e	—	110	0.022	300	90	60
Case2a	450	140	0.028	—	90	*1
Case2b	450	100	0.020	—	90	*1
Case2c	450	80	0.016	—	90	*1
Case2d	450	60	0.012	—	90	*1
Case2e	450	40	0.008	—	90	*1
Case3a	450	120	0.024	300	90	—
Case3b	450	100	0.020	300	90	—
Case3c	450	80	0.016	300	90	—
Case3d	450	60	0.012	300	90	—
Case3e	450	40	0.008	300	90	—

*1 IHX出入口温度差が70[°C]となるよう除熱量を設定

表4.1 試験結果一覧

試験名称	1次側条件					PRACS条件				IHX上部管板近傍温度の平均値			IHX上部管板近傍温度のrms値		
	IHX入口温度 [°C]	IHX出口温度 [°C]	IHX入口流量 [L/min]	伝熱部平均流速 [m/s]	レイノルズ数 [-]	入口温度 [°C]	出口温度 [°C]	流量 [L/min]	除熱量 [kW]	TIX270TP01 [°C]	TIX270TP02 [°C]	TIX270TP03 [°C]	TIX270TP01 [°C]	TIX270TP02 [°C]	TIX270TP03 [°C]
Case1a	474.4	385.6	110.5	0.022	8492	302.1	407.0	90.3	176.4	385.9	381.9	393.5	3.7	3.0	0.6
Case1b	449.5	374.2	110.2	0.022	8279	301.3	390.2	90.5	150.5	373.1	369.2	380.3	3.3	2.5	0.6
Case1c	423.5	362.7	110.4	0.022	8081	301.0	374.7	88.6	122.7	361.3	358.7	368.0	2.5	1.9	0.6
Case1d	391.6	348.1	112.5	0.022	7958	301.1	354.7	89.5	90.6	345.0	345.3	352.2	2.2	1.6	0.4
Case1e	365.1	334.9	110.3	0.022	7559	301.2	338.4	88.1	62.1	332.7	332.3	336.9	1.9	1.5	0.4
Case2a	449.3	379.8	140.9	0.028	10617	284.5	389.9	89.6	177.3	375.3	375.1	387.6	4.6	3.2	0.6
Case2b	451.1	380.7	103.1	0.021	7786	318.0	396.8	89.6	131.4	380.0	378.0	386.6	2.6	1.8	0.4
Case2c	448.0	377.8	78.8	0.016	5924	335.5	396.8	88.3	100.3	378.6	375.7	382.4	1.9	1.1	0.3
Case2d	449.3	380.0	62.5	0.012	4710	352.5	401.1	87.6	78.5	382.2	380.3	385.2	0.8	0.6	0.3
Case2e	450.0	379.3	40.2	0.008	3034	366.7	399.1	86.5	51.6	381.1	381.3	383.1	0.3	0.1	0.1
Case3a	449.0	378.4	120.2	0.024	9051	301.2	391.5	91.0	153.6	377.0	372.3	385.1	3.5	2.9	0.9
Case3b	449.0	370.2	103.8	0.021	7772	301.2	387.9	91.5	148.5	369.8	367.0	376.8	2.8	2.1	0.4
Case3c	449.3	356.7	80.5	0.016	5973	301.3	382.7	88.9	135.6	358.6	354.4	363.5	1.9	1.2	0.3
Case3d	448.9	340.5	62.4	0.012	4575	301.4	374.7	89.7	123.5	345.0	342.3	349.2	1.1	0.8	0.2
Case3e	448.6	320.6	41.7	0.008	3018	301.1	359.3	89.3	97.9	326.2	326.1	329.7	0.4	0.2	0.1

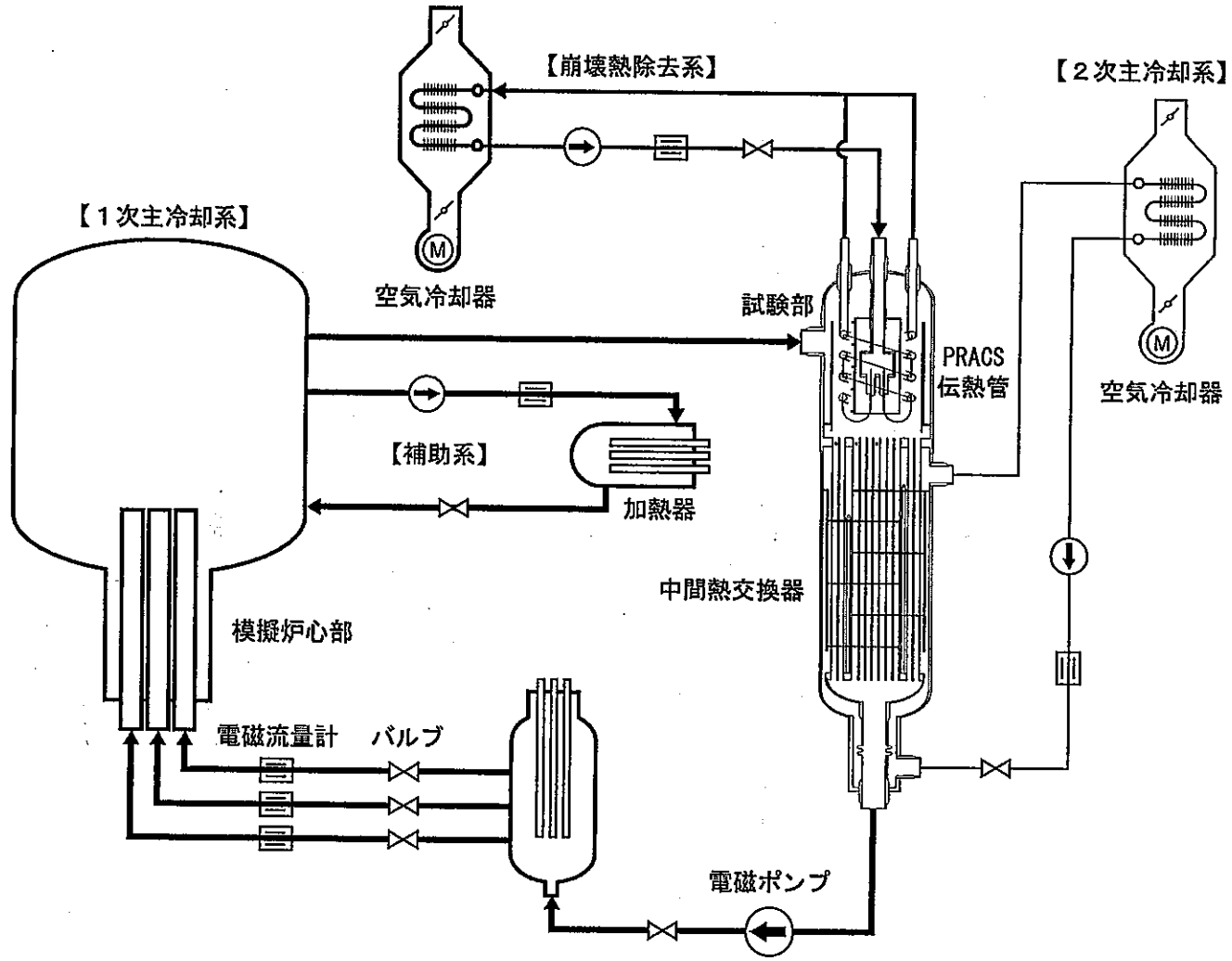


図2.1 プラント過渡応答試験施設フローシート

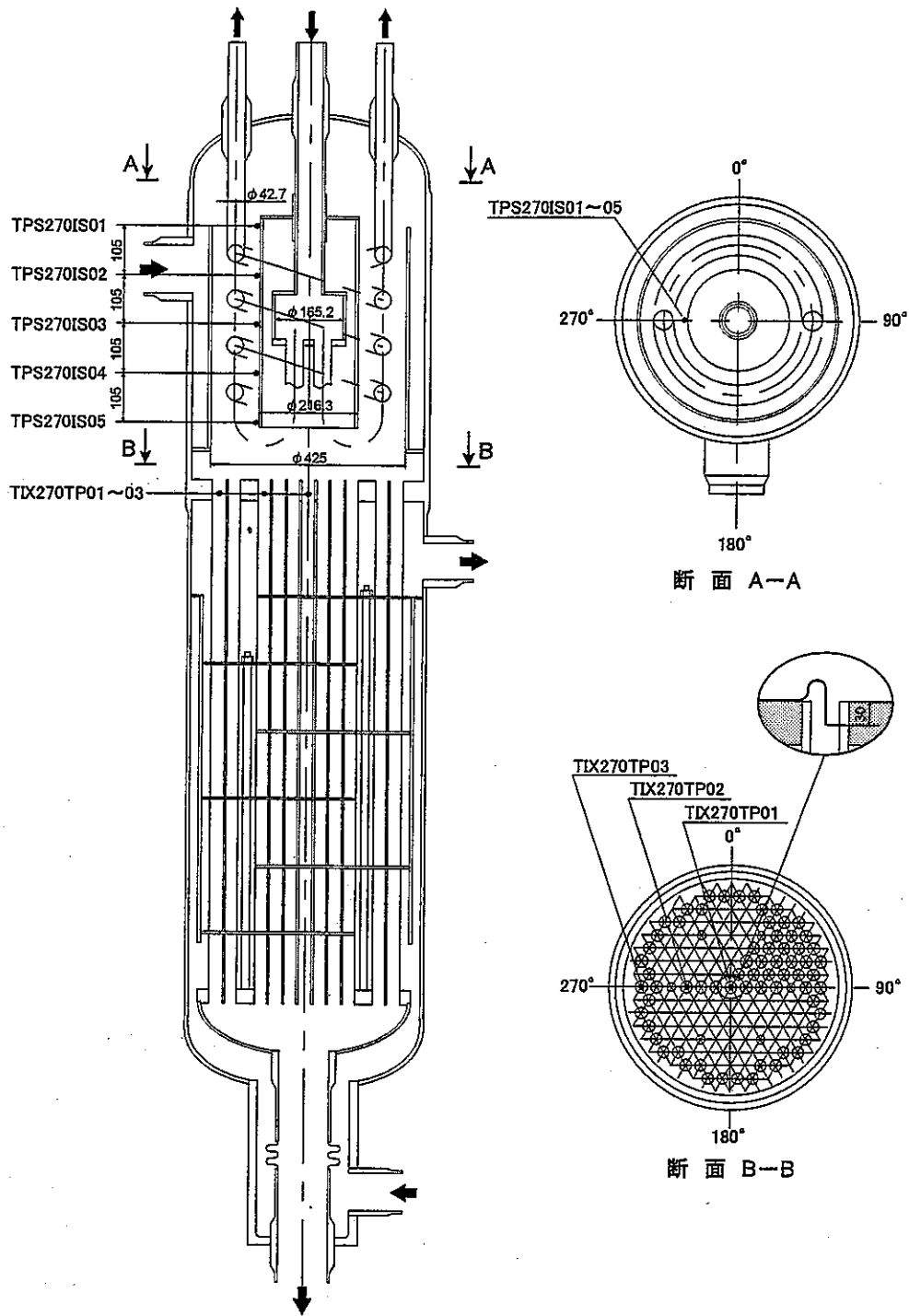


图2.2 機器内挿型冷却器特性試験部

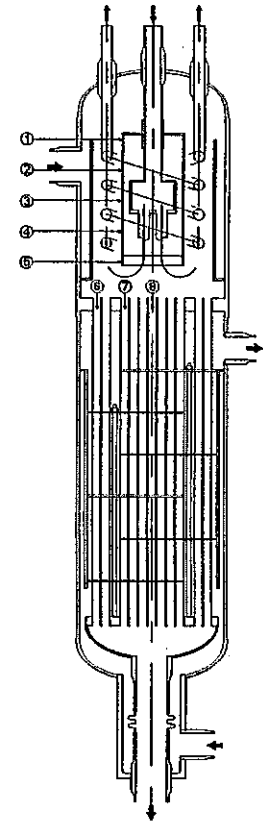
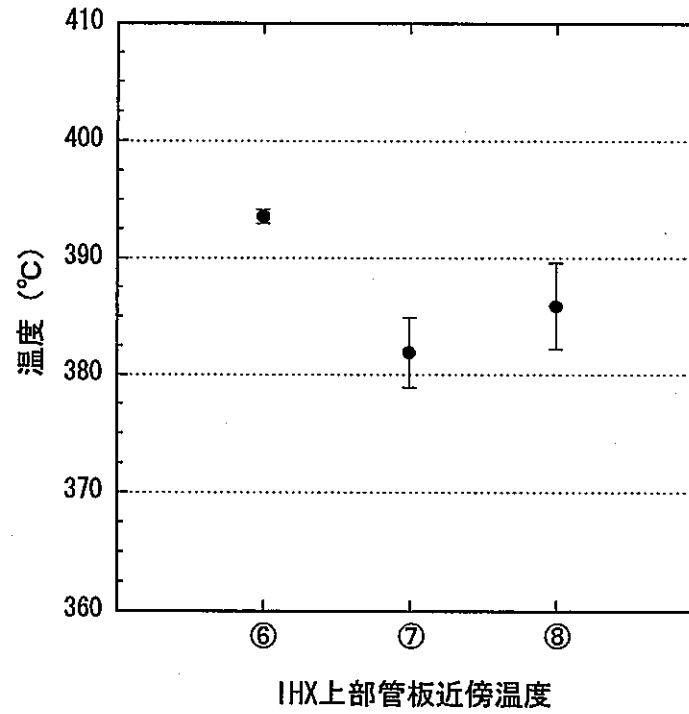
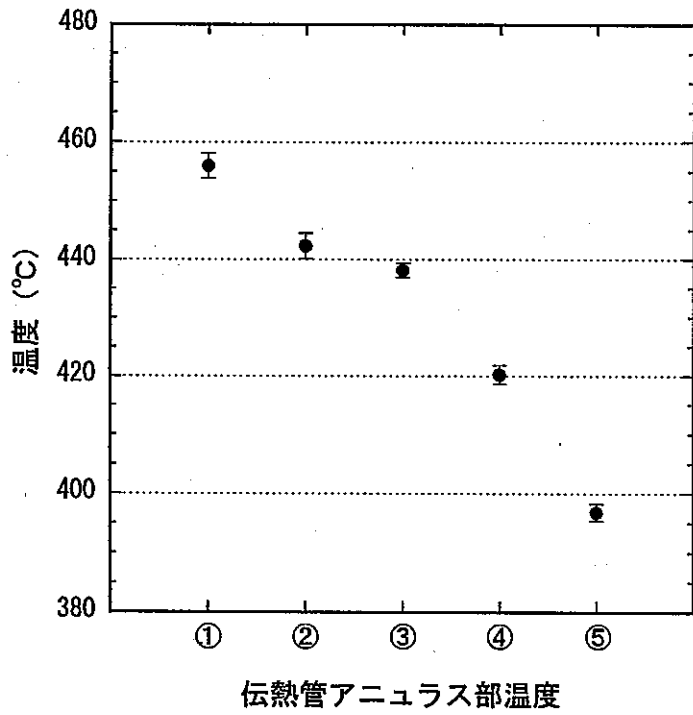


図 4.1-1(a) 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1a)

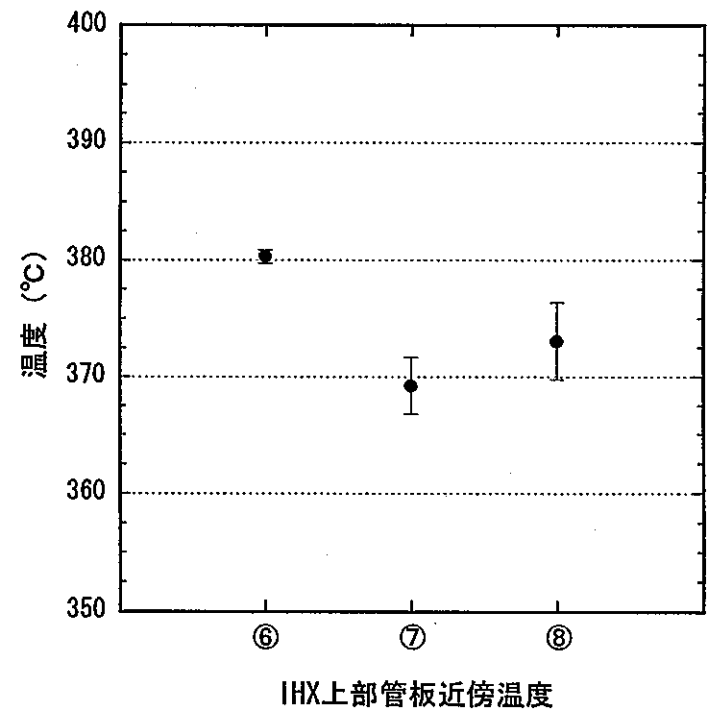
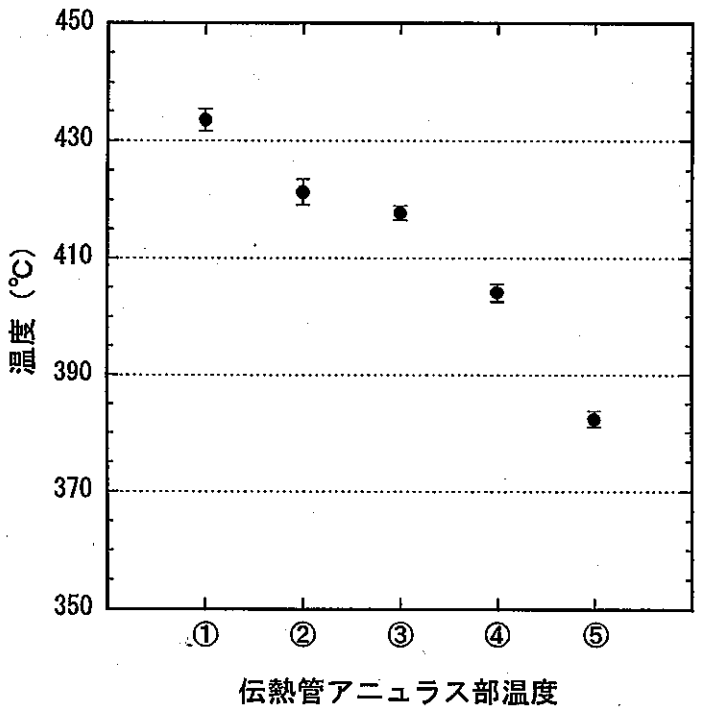
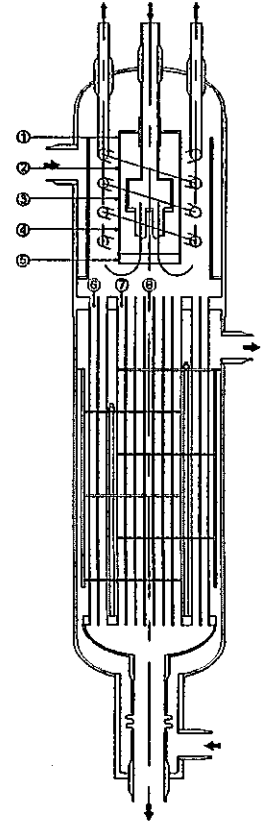


図 4.1-1(b) 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1b)

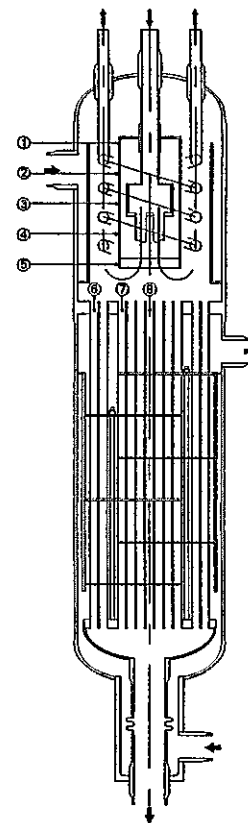
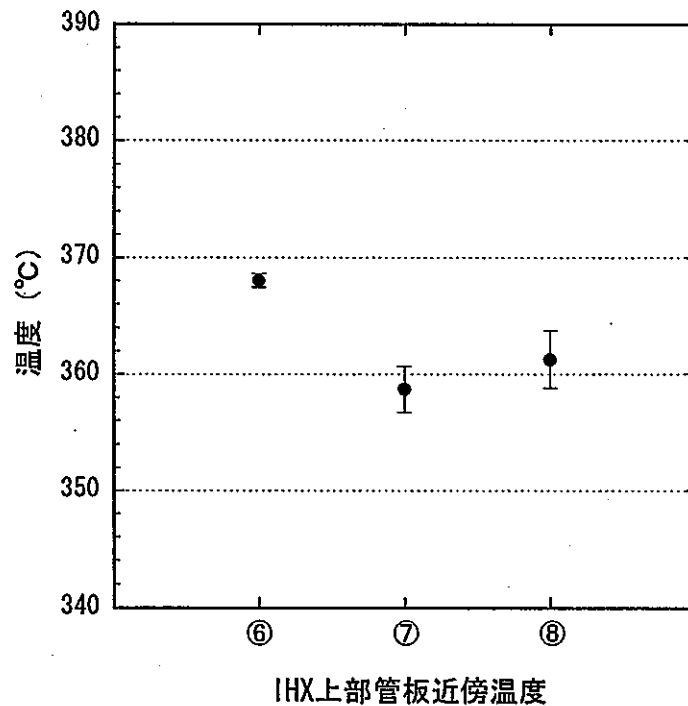
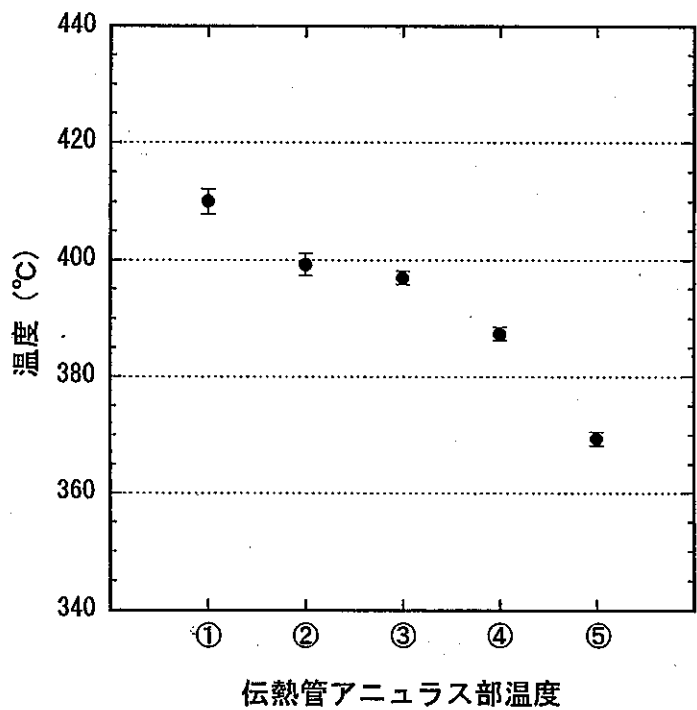


図 4.1-1(c) 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1c)

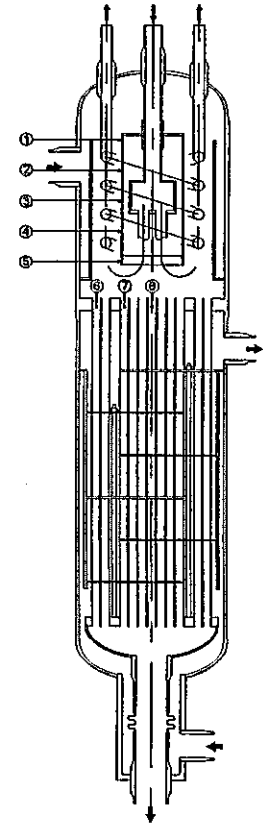
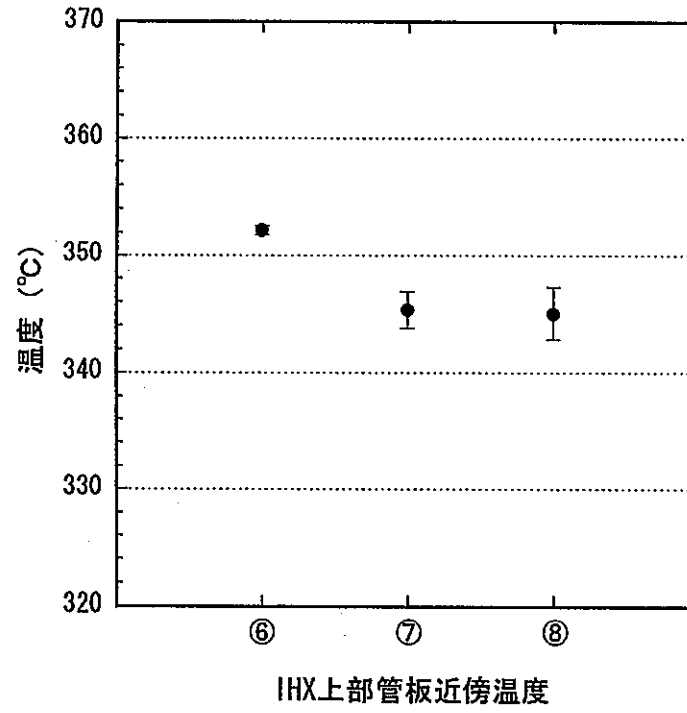
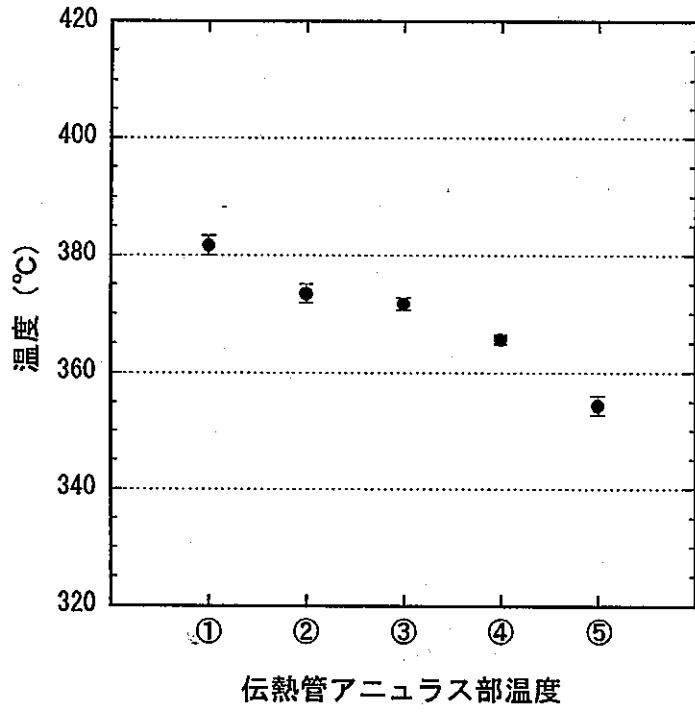


図 4.1-1(d) 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1d)

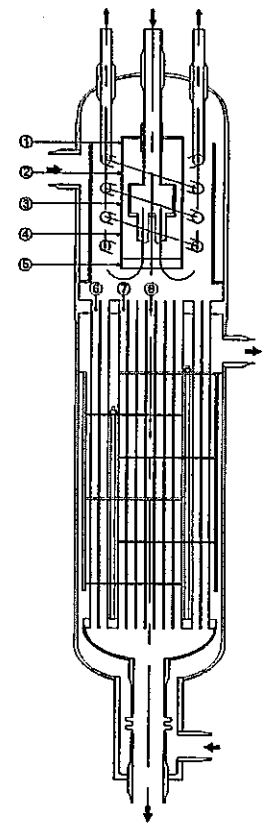
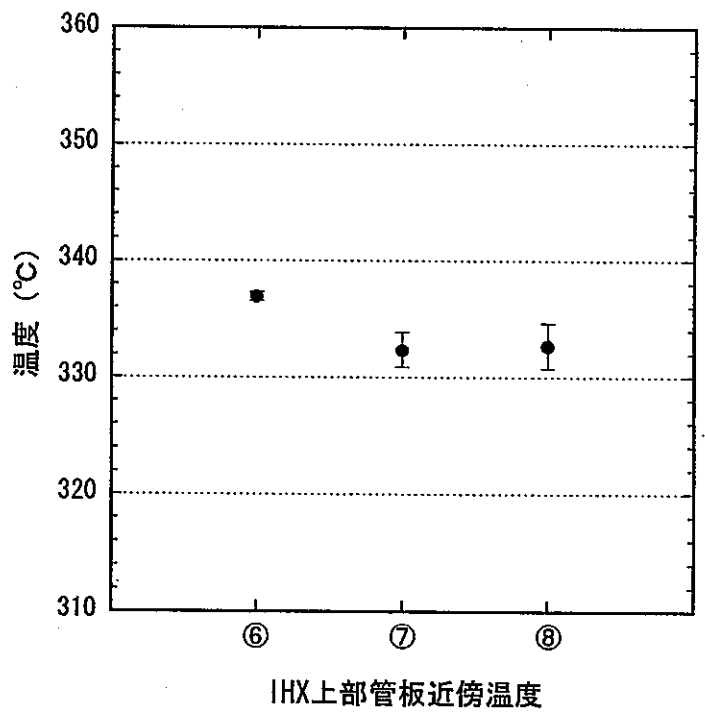
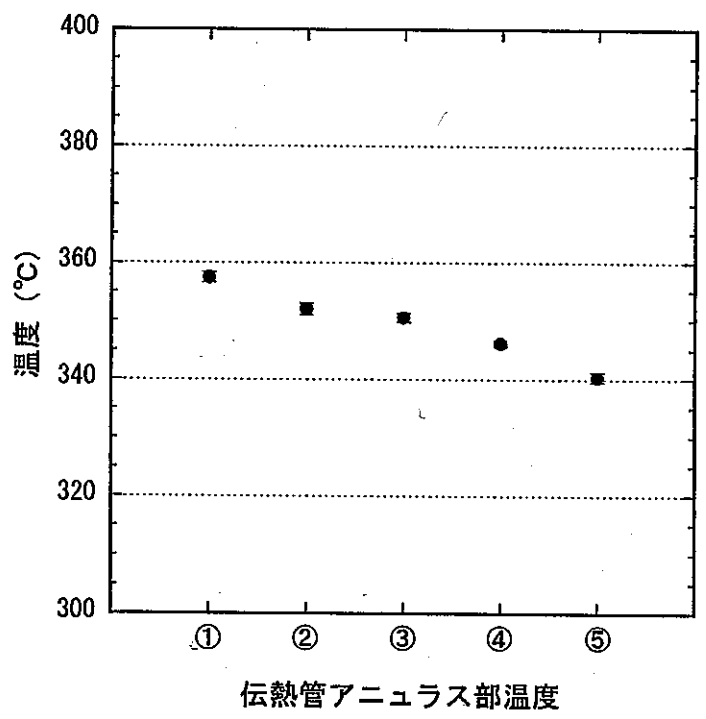


図 4.1-1(e) 除熱量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case1e)

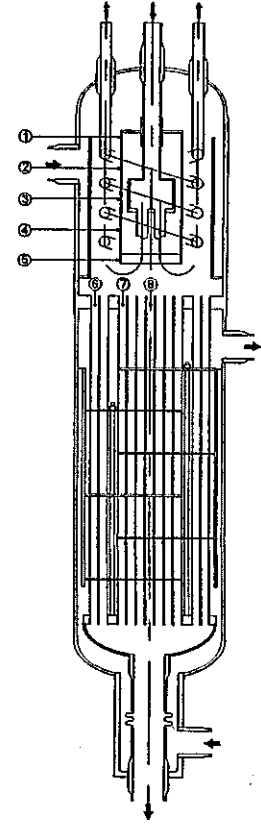
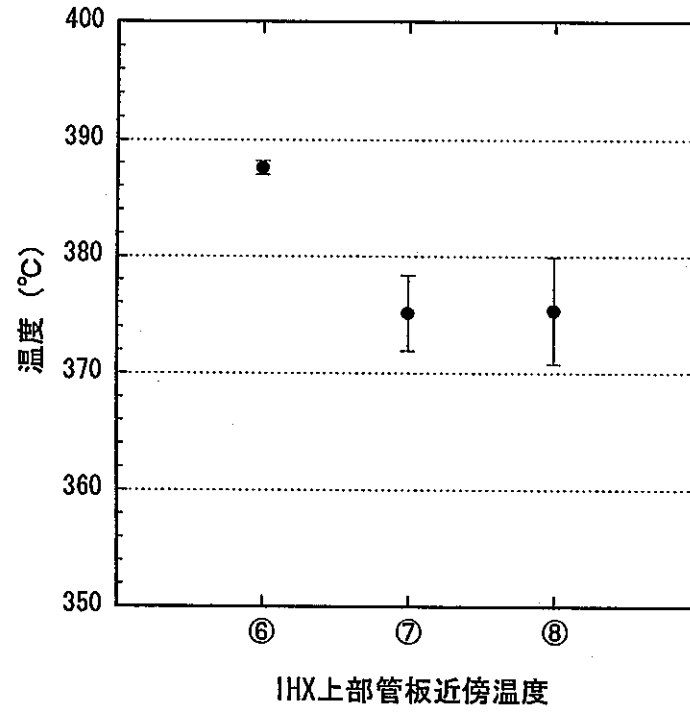
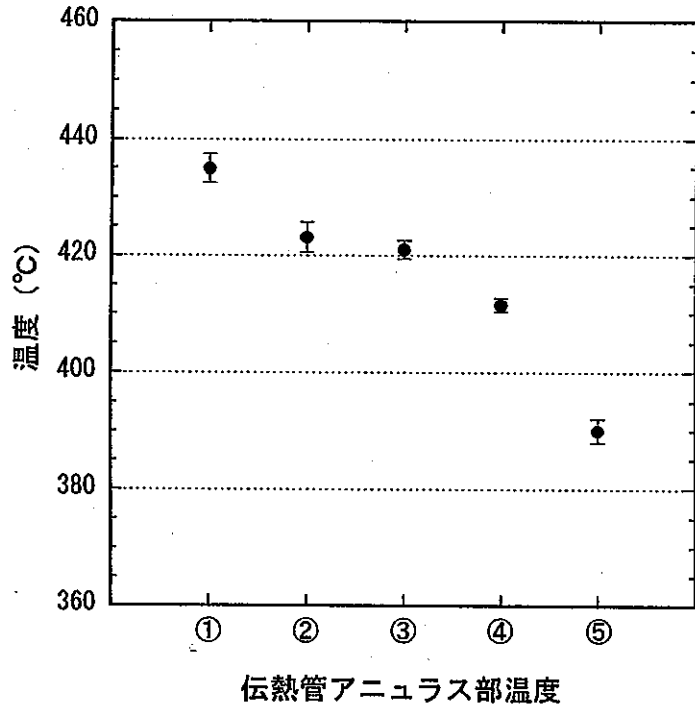


図 4.1-2(a) 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2a)

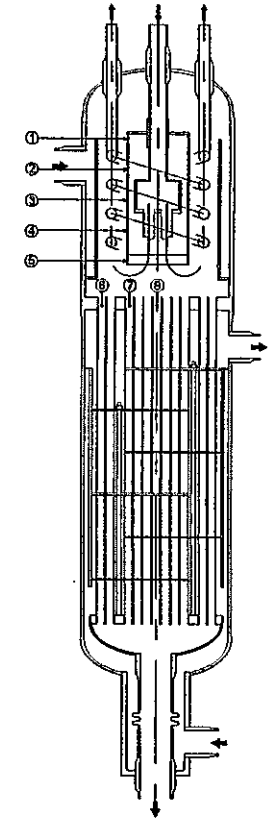
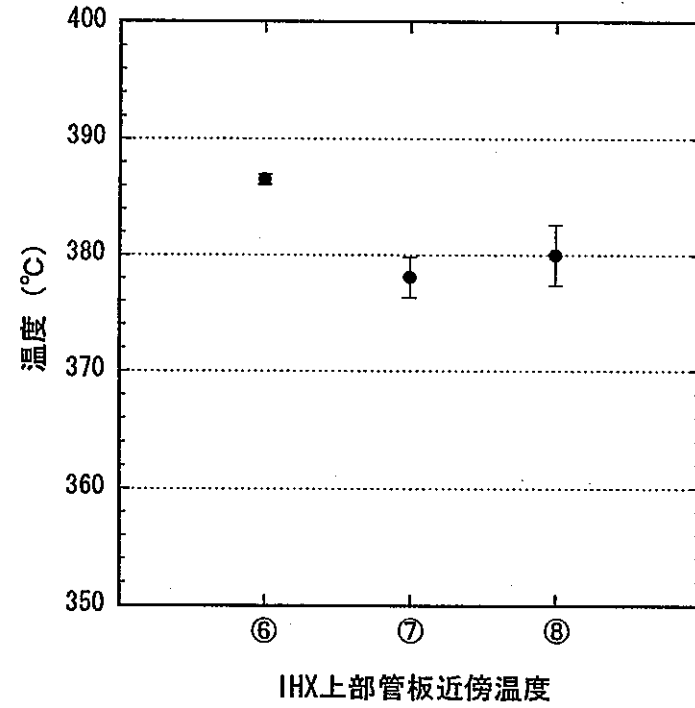
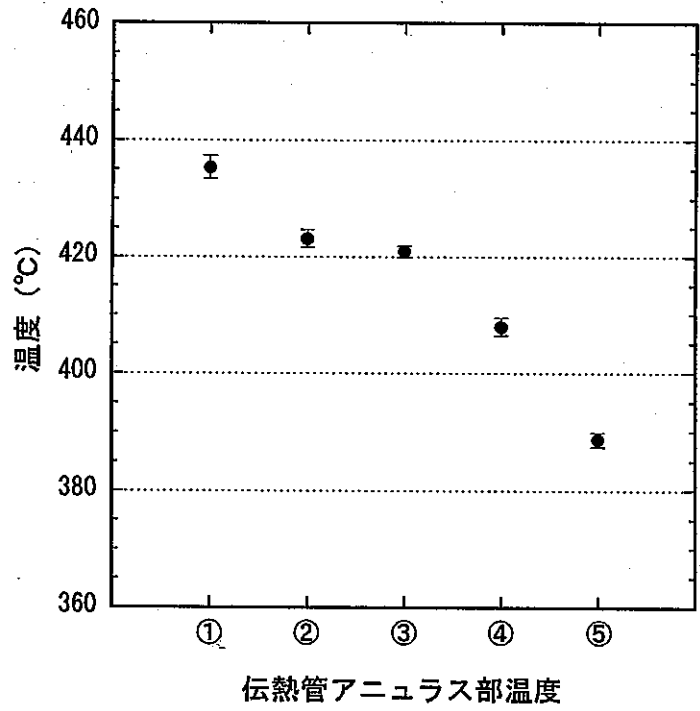


図 4.1-2(b) 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2b)

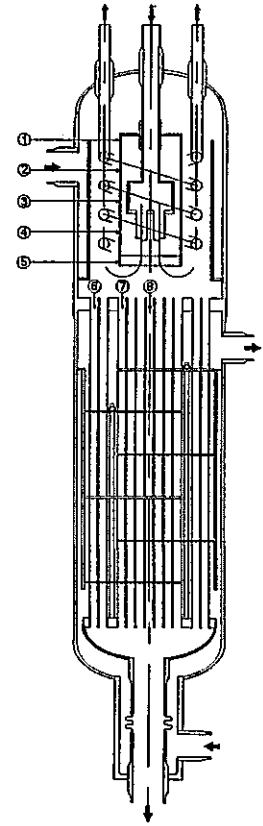
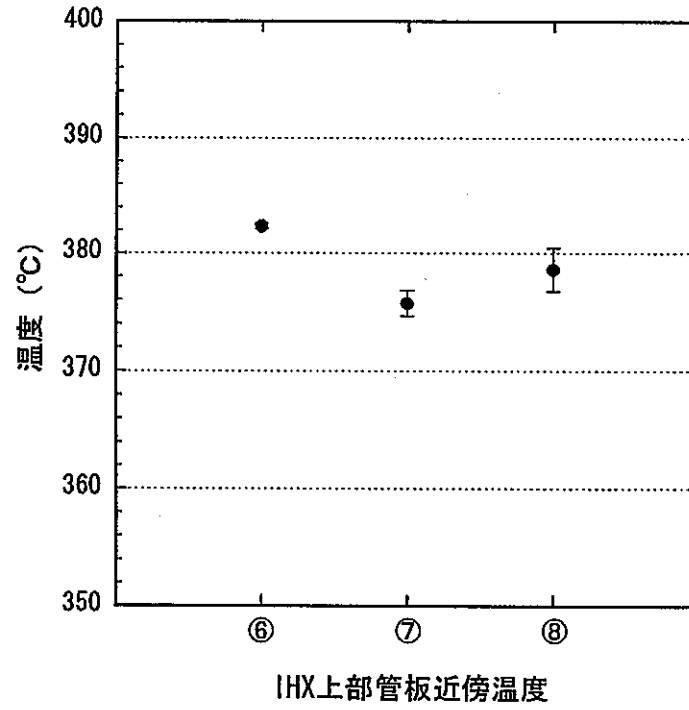
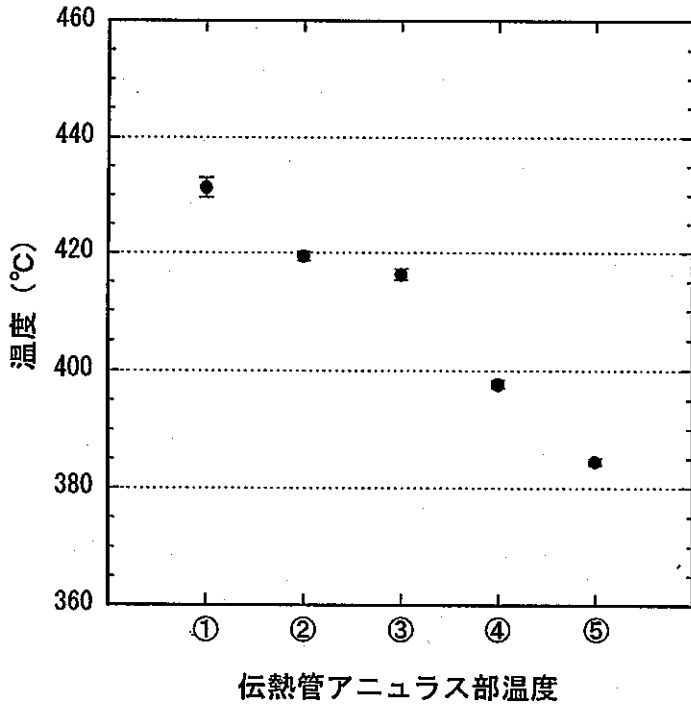


図 4.1-2(c) 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2c)

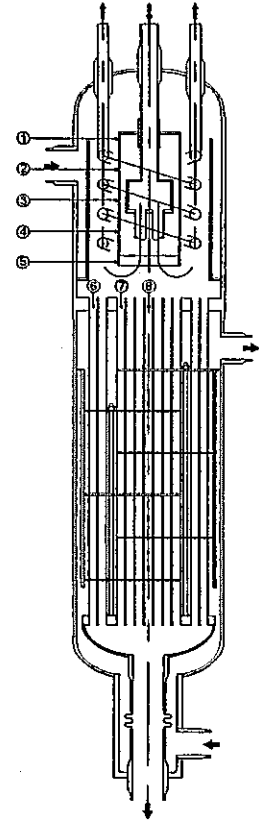
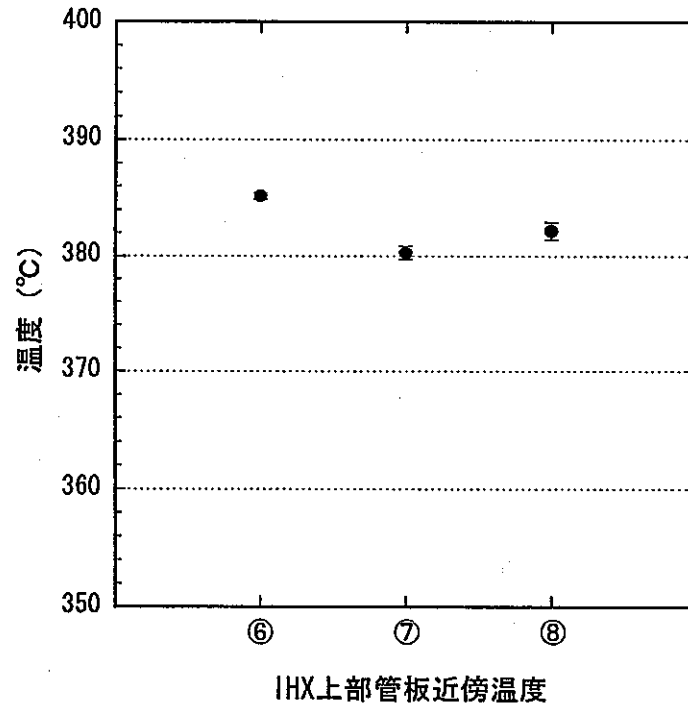
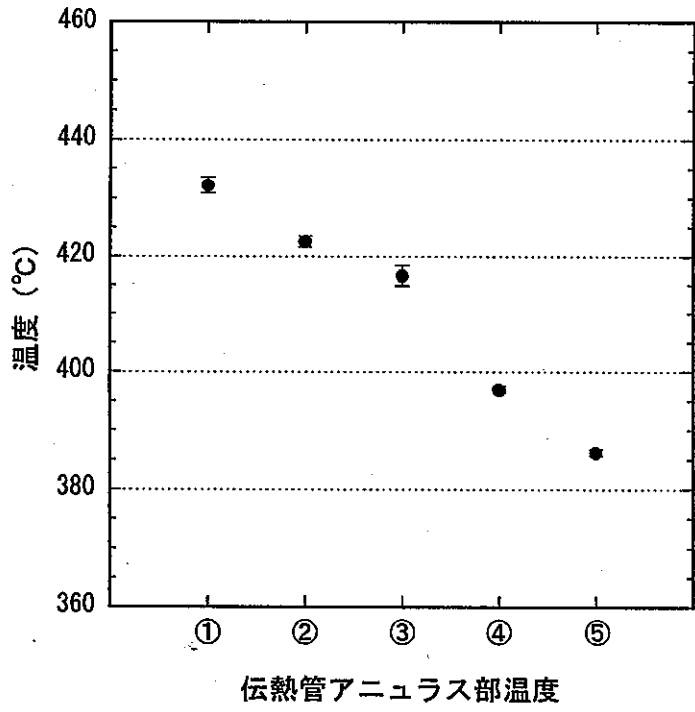


図 4.1-2(d) 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2d)

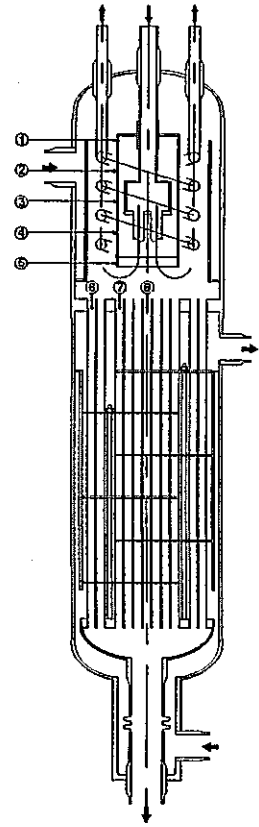
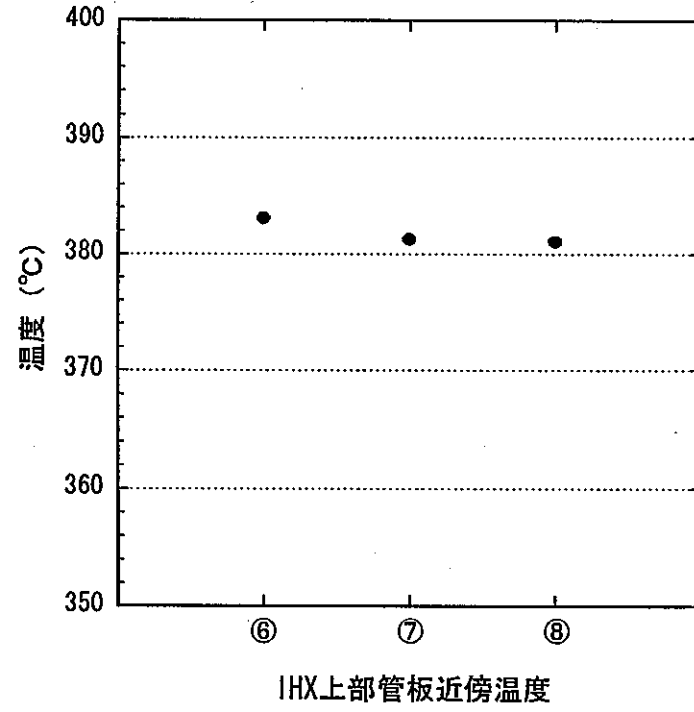
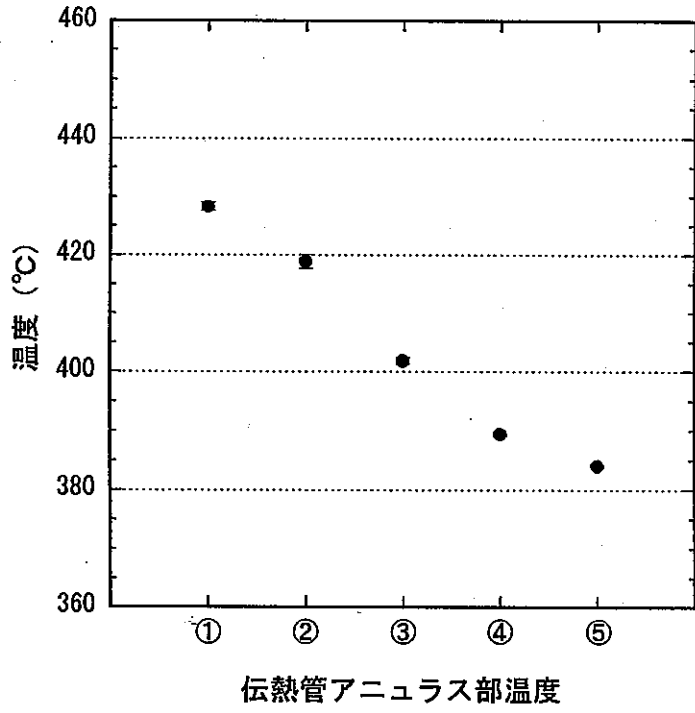


図 4.1-2(e) 流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case2e)

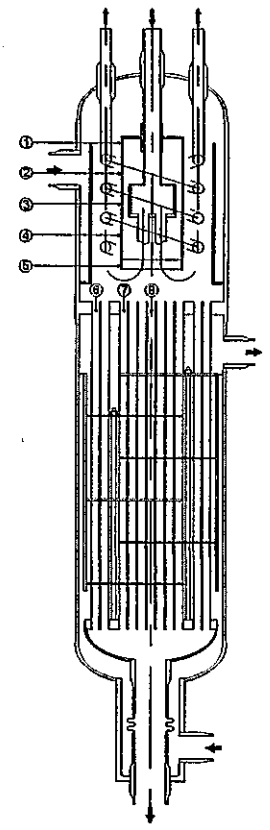
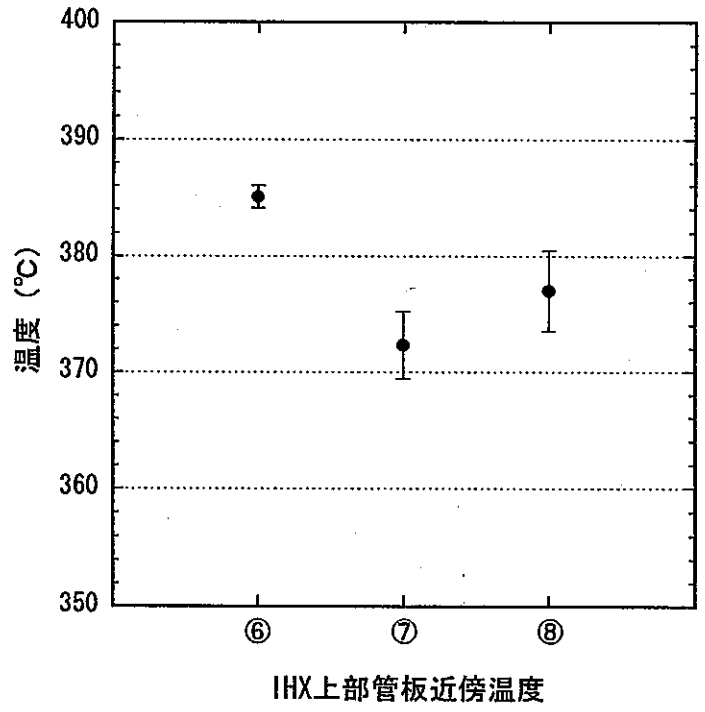
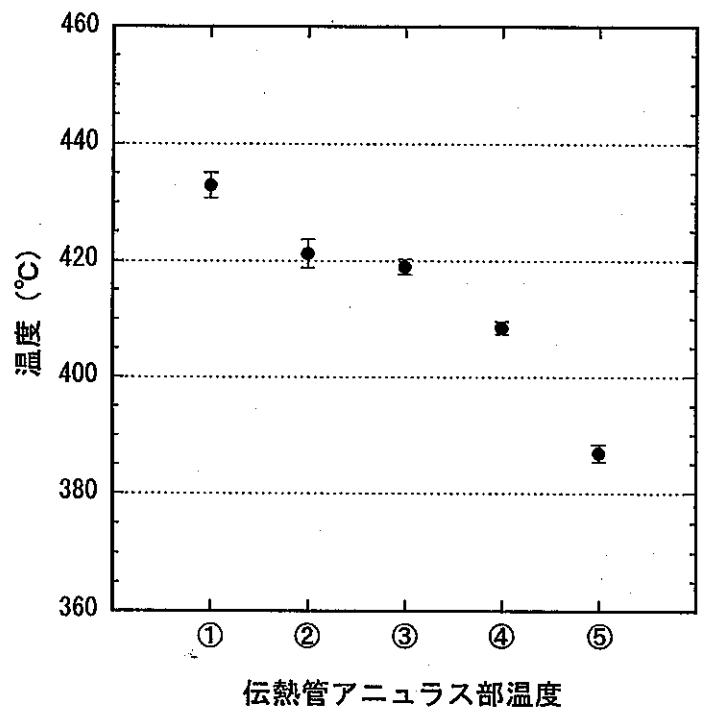


図 4.1-3(a) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case3a)

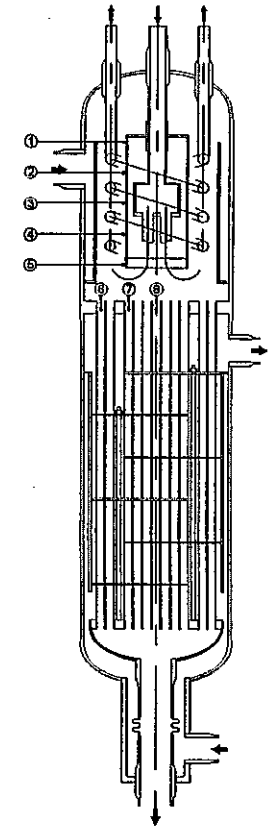
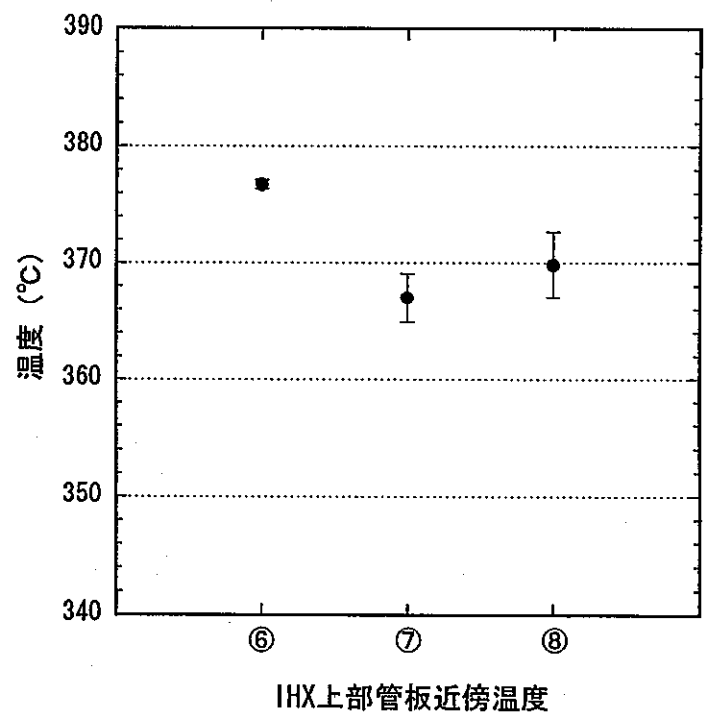
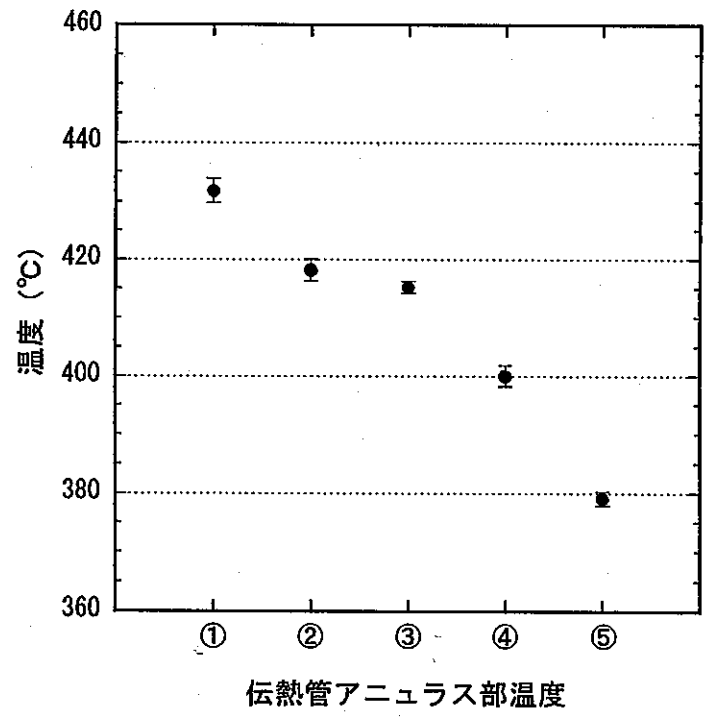


図 4.1-3(b) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case3b)

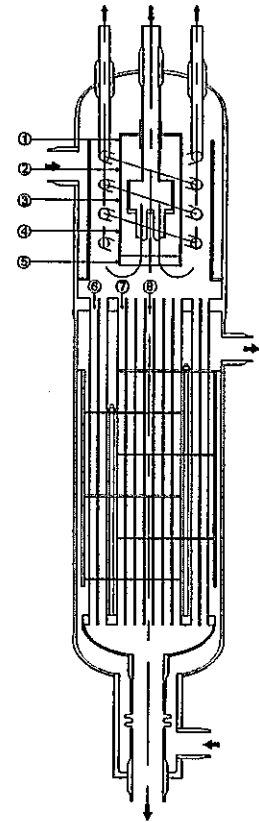
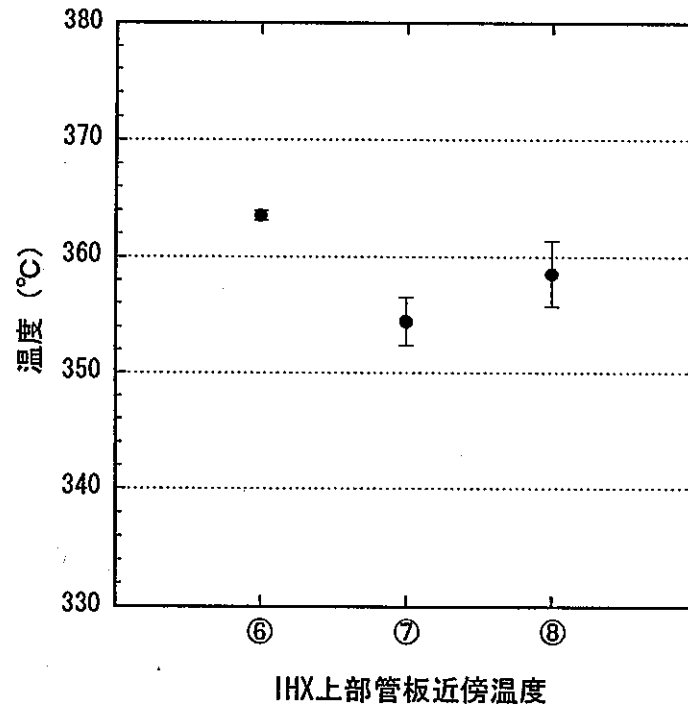
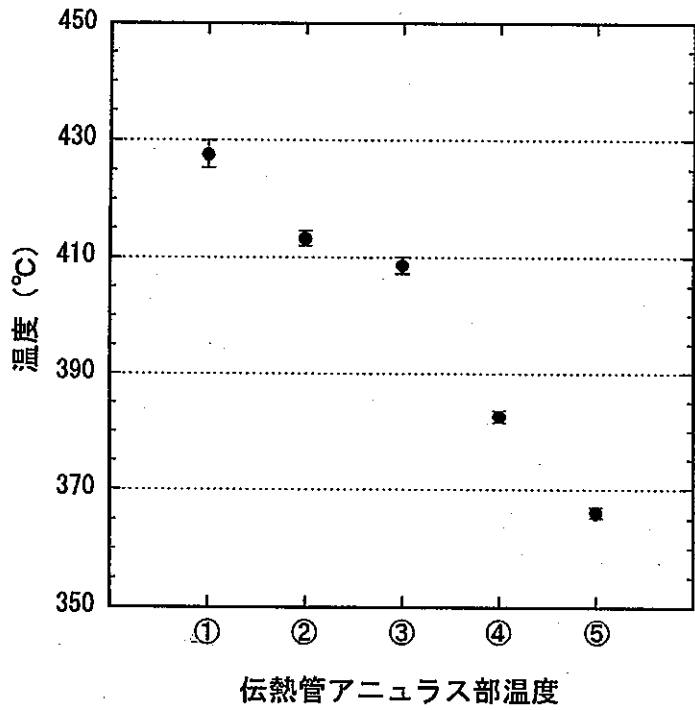


図 4.1-3(c) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case3c)

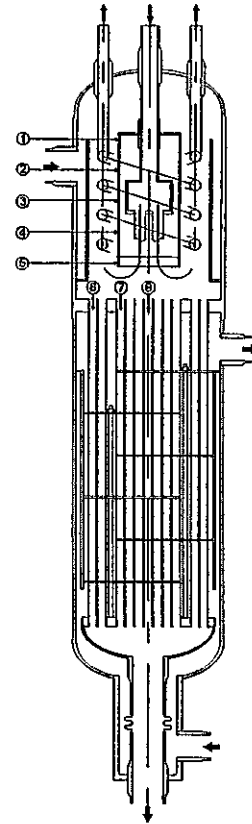
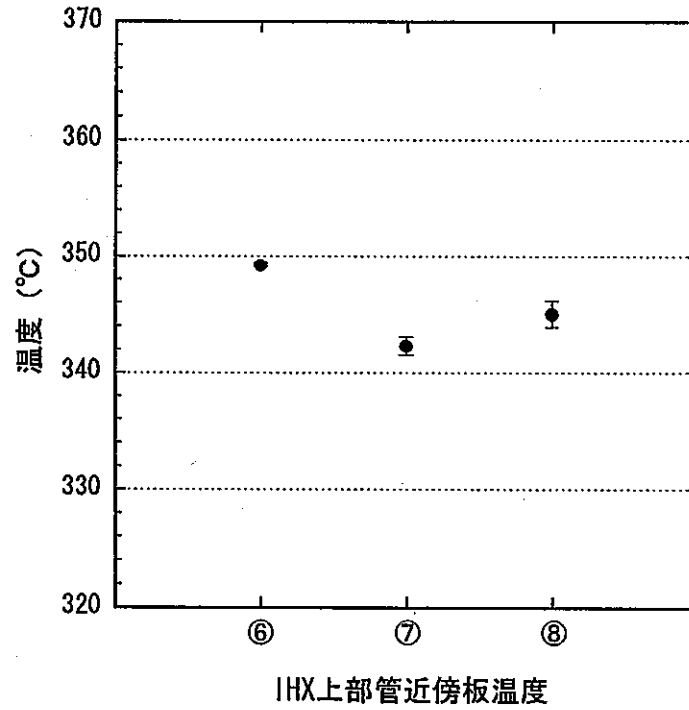
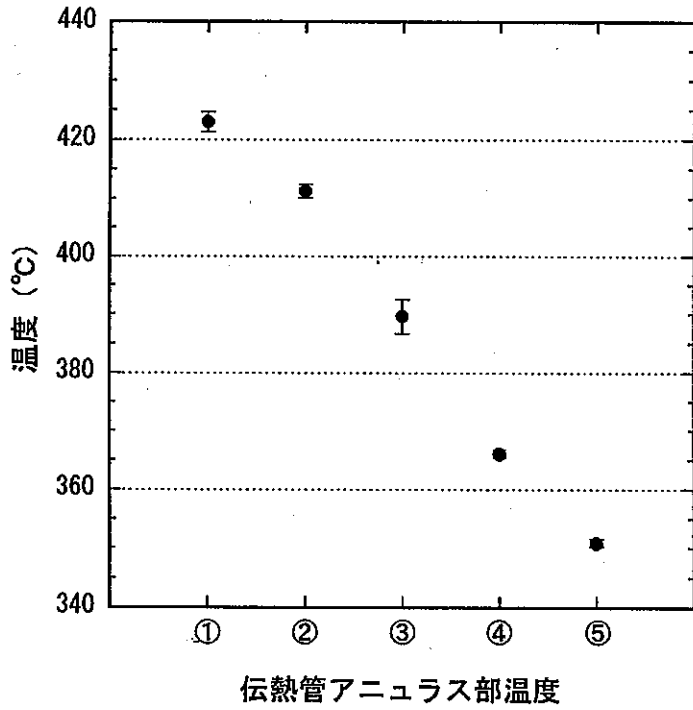


図 4.1-3(d) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case3d)

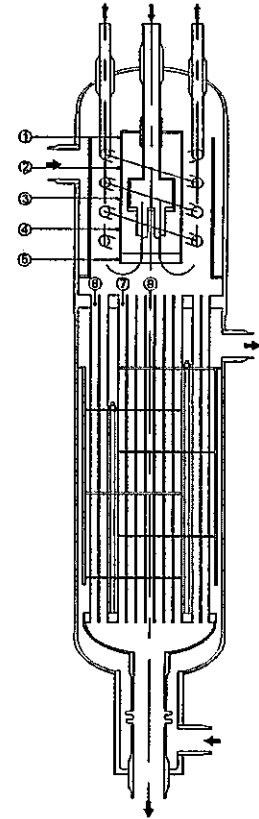
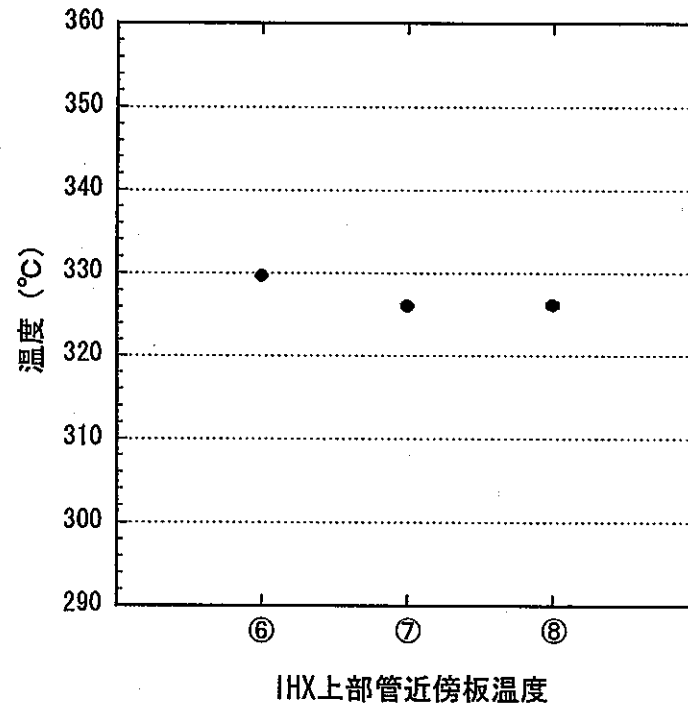
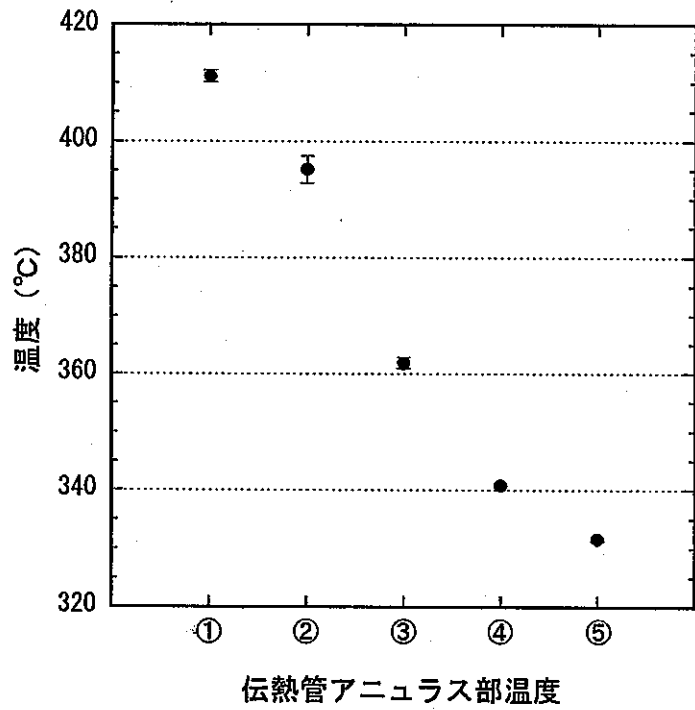


図 4.1-3(e) 1次2次入口温度一定、流量パラメータ試験における主要部の温度分布 (Case3e)

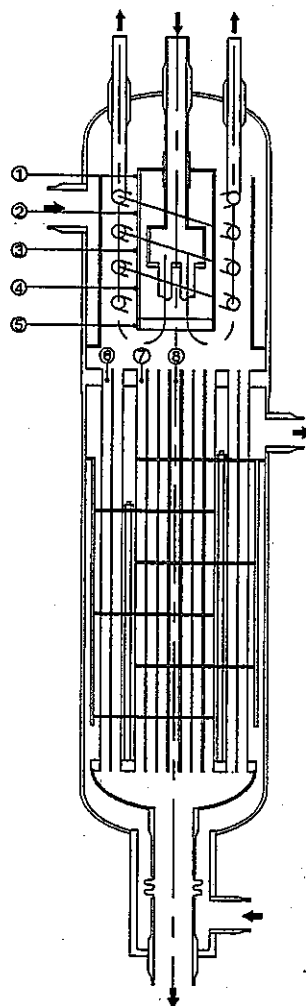
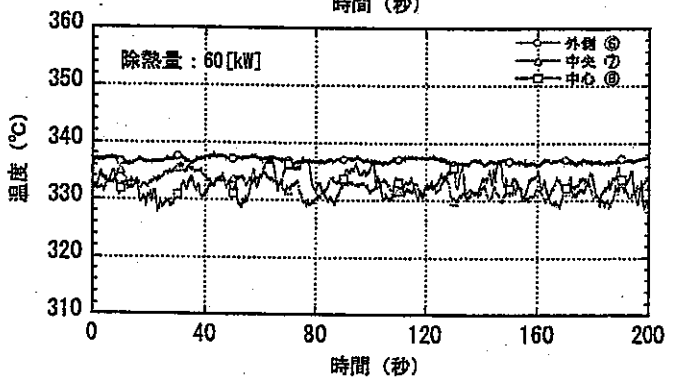
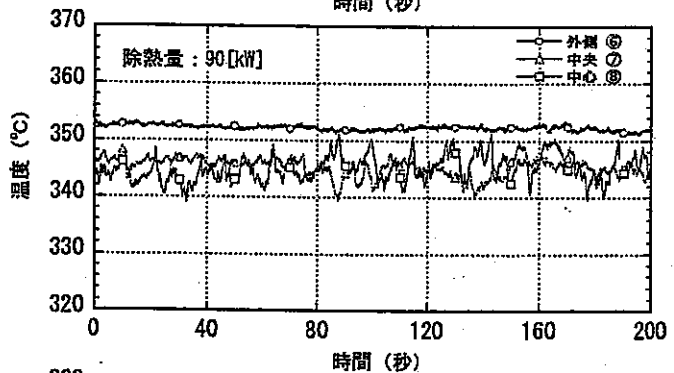
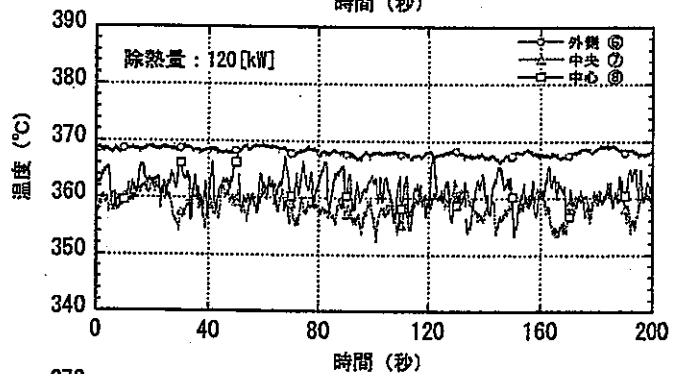
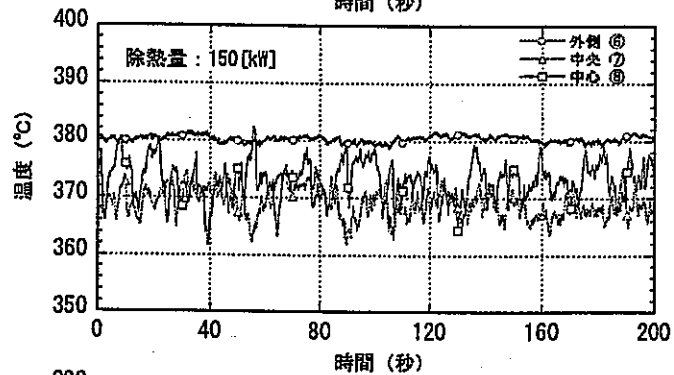
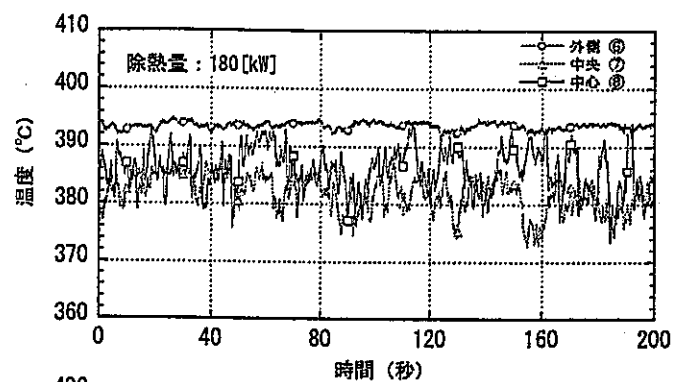


図 4.2-1 IHX 上部管板近傍の温度変動特性 (Case1)

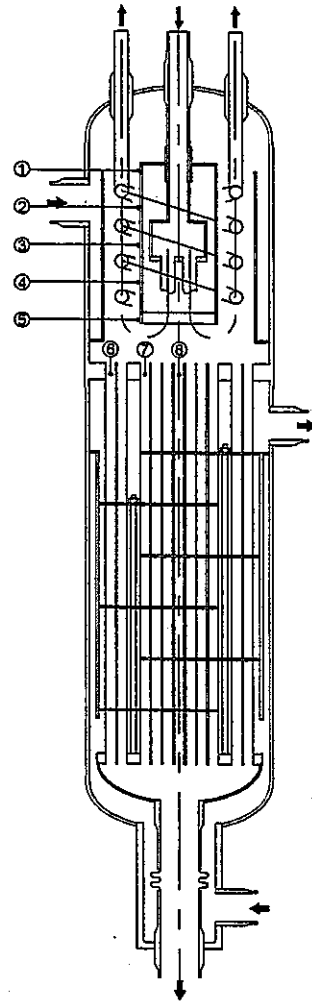
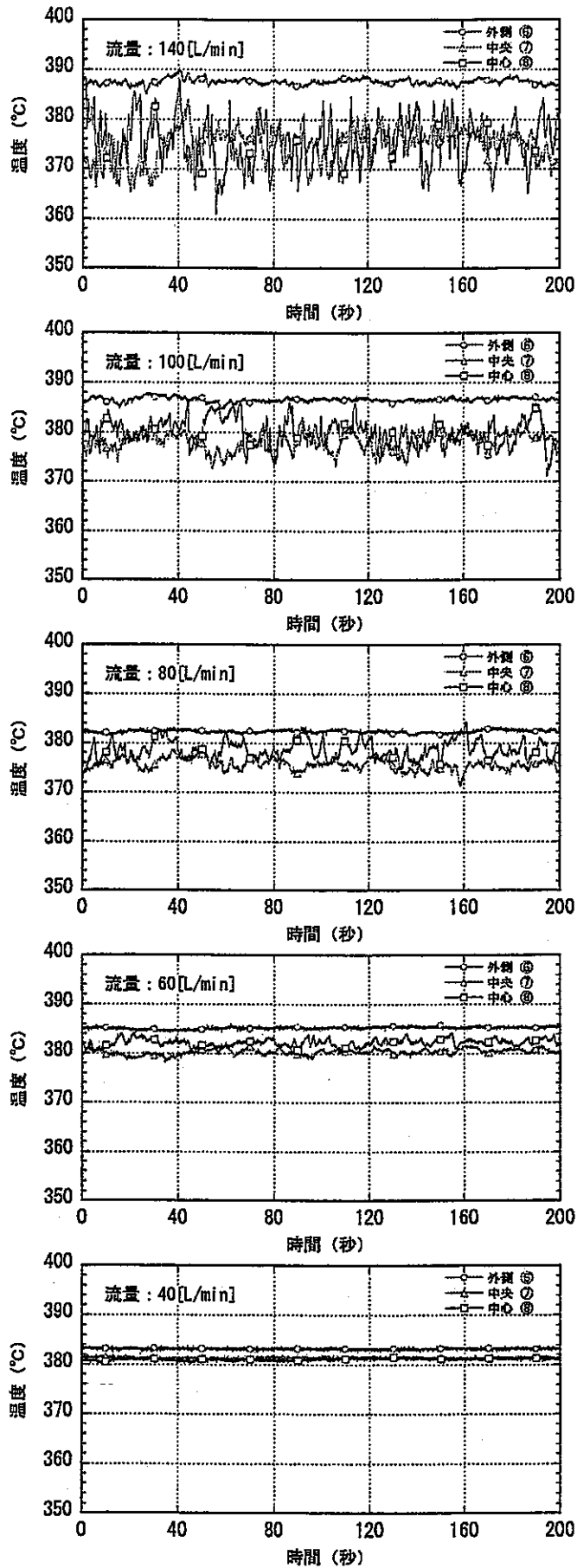


図 4.2-2 IHX 上部管板近傍の温度変動特性 (Case2)

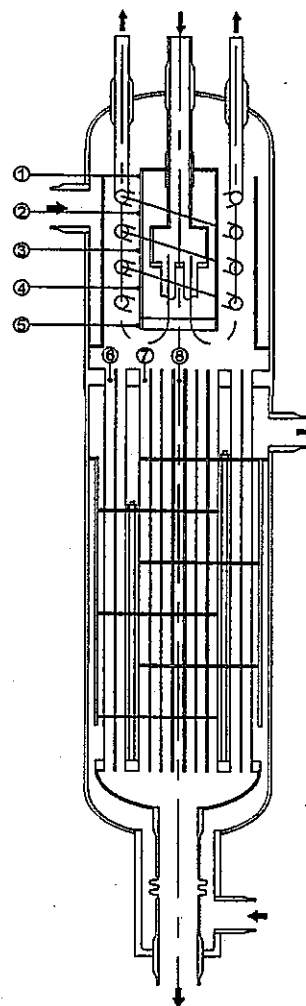
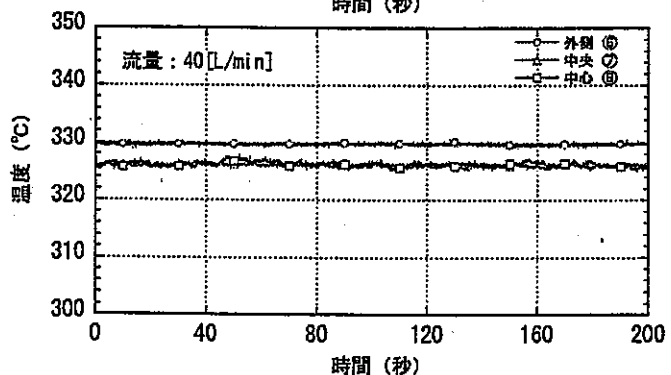
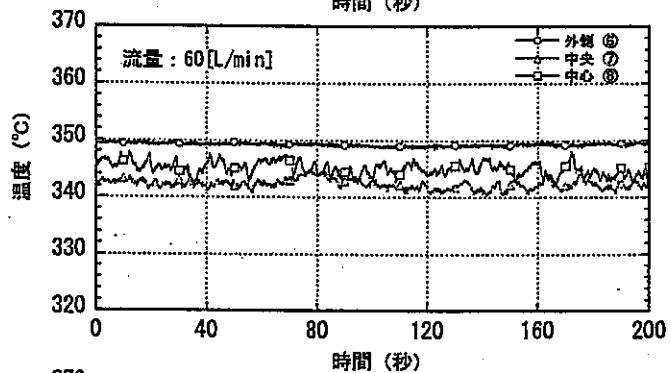
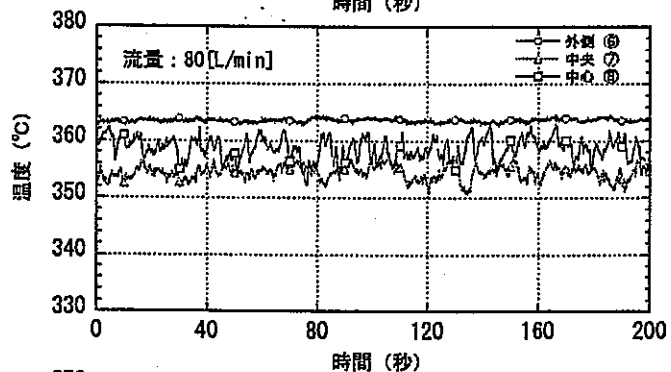
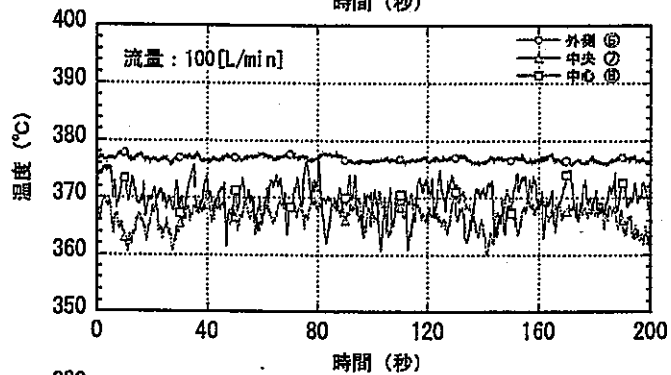
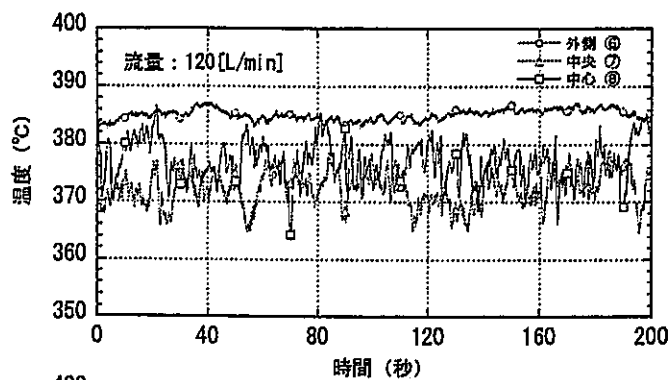


図 4.2-3 IHX 上部管板近傍の温度変動特性 (Case3)

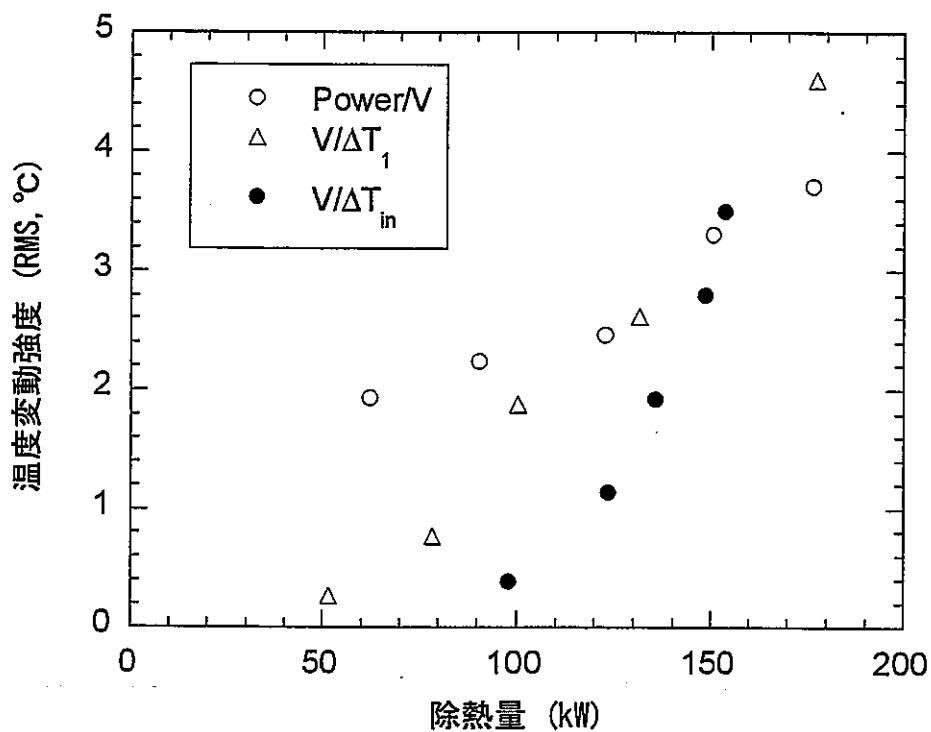


図5.1 管板部温度変動強度と除熱量の関係

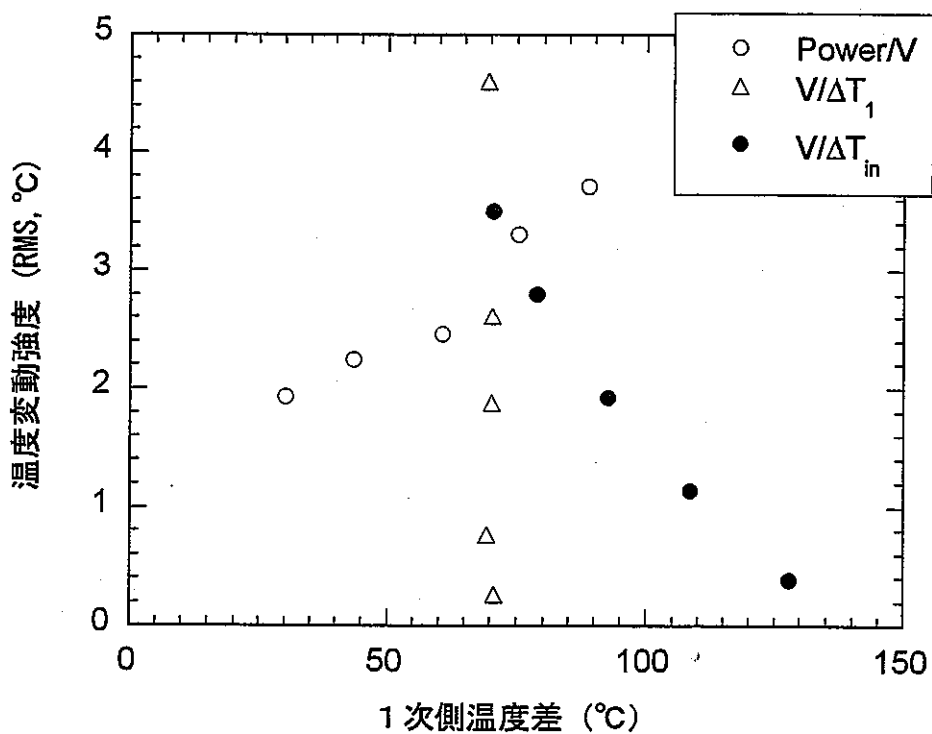


図5.2 管板部温度変動強度と1次側出入口温度差の関係

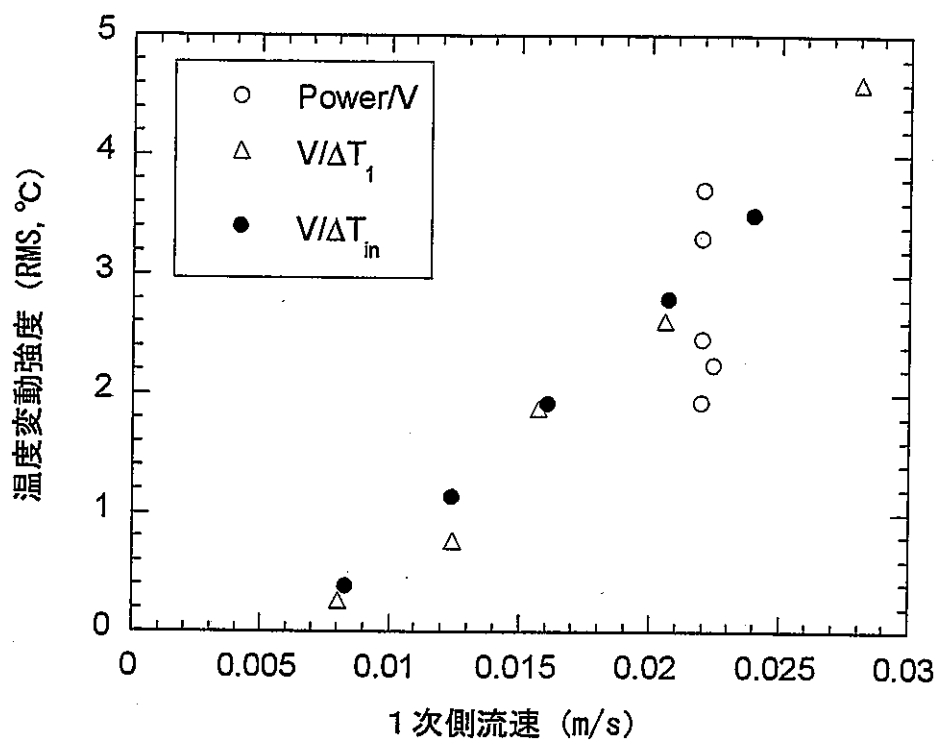


図5.3 管板部温度変動強度と1次側平均流速の関係

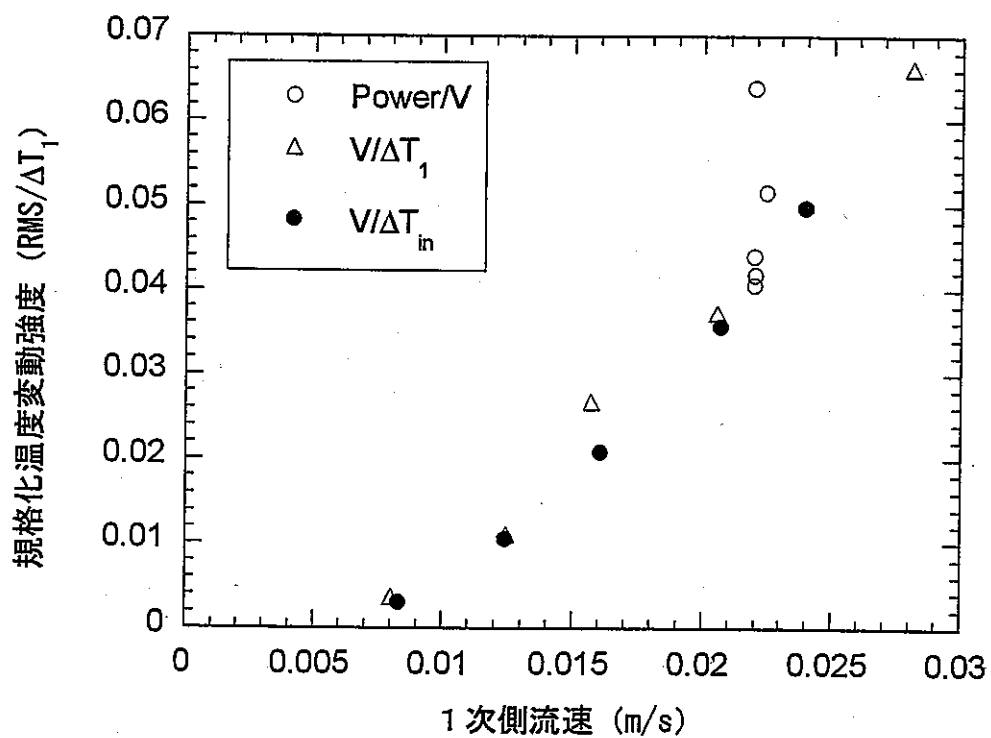


図5.4 1次側温度差で規格化した管板部温度変動強度