

分置

プラント動特性解析コードSuper-COPDの開発(II)

—もんじゅ試運転データによる自然循環解析機能の検証—

1995年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TN9410 96-054

1995年12月

プラント動特性解析コード Super-COPDの開発（II） —もんじゅ試運転データによる自然循環解析機能の検証—

大滝 明*

要 旨

自然循環による崩壊熱除去の評価に対するプラント動特性解析コードSuper-COPDの適用性を検討するため、1次／2次熱輸送系単独の場合及びそれらを組み合わせた場合を対象としたもんじゅ自然循環模擬試験の解析を実施した。1次系の解析では炉心部のモデル化及び系統の圧力損失特性を、2次系の解析ではオーバーフロー系の汲み上げの有無をパラメータにそれらの影響を検討した。

1次系及び2次系の自然循環解析では、炉心部流路のモデル化とともに、自然循環力を算出する流路の軸方向高さに関する入力データが重要である。また、過渡変化の開始から自然循環状態への移行過程において、熱輸送系の自然循環流量が定格値の1～2%と比較的小ない場合は、自然循環力の評価に対して配管部の温度成層化の影響がみられることから、成層化に対するモデル化の必要性が指摘された。自然循環移行過渡時に2次系蒸発器側流路に生じる流れ方向の順流／逆流の変化は、オーバーフロー系の考慮により再現できた。1次系と2次系とを組み合わせた総合解析結果と実測データは、±10%範囲内で一致しており、自然循環除熱特性評価に対するSuper-COPDコードの適用性及び系統全体解析モデルの妥当性が確認できた。

*大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

PNC TN9410 96-054

December, 1995

Development of Plant Dynamics Analysis Code : Super-COPD (II)
- Validation of Natural Circulation Analysis Function by MONJU Experimental Data -

Akira OHTAKI*

Abstract

In this paper analyses of natural circulation simulation tests in Monju were conducted to study the applicability of a plant dynamics analysis code (Super-COPD) to the evaluation of decay heat removal by natural circulation. At first basic characteristics of both primary and secondary heat transport systems were examined by separate analyses and then integral system analyses with primary and secondary systems were conducted to confirm the whole system behavior. A modeling of the reactor core and pressure loss characteristics were selected as analysis parameters in the primary system analyses. The effect of the overflow line on natural circulation characteristics were examined in the secondary system analyses.

By the separate analyses It was indicated that a precise modeling of core flow channels and input data of axial height for calculating natural circulation head were important for the evaluation of natural circulation characteristics. In addition in the case of low flow condition (about 1-2% of rated flow), the effect of thermal stratification in the horizontal pipe on natural circulation head was observed during the transition to natural circulation condition. Therefore, the need of modeling for thermal stratification in the piping system was pointed out. The switching of flow direction from forward flow to back flow observed at the evaporator side in the secondary system was successfully simulated by the consideration of the overflow line. The results of synthesis analyses with primary and secondary systems were agreed with the measured data in Monju within the accuracy of 10%. Thus it was confirmed that Super-COPD is applicable to the evaluation of decay heat removal by natural circulation.

* Thermal Hydraulics Research Section, O-arai Engineering Center

プラント動特性解析コード Super-COPD の開発 (II)
—もんじゅ試運転データによる自然循環解析機能の検証—

目 次

	Page
1. はじめに	1
2. コードの概要	2
2.1 熱流動計算モジュールの概要	2
2.2 自然循環解析による確認事項	4
3. 計算方法	6
3.1 評価用実機データ	6
3.2 計算手順	7
3.3 計算体系	7
4. 試運転データによる計算および考察	10
4.1 1次系部分モデル解析	10
4.1.1 1次系計算条件	10
4.1.2 1次系計算結果	11
4.1.3 1次系部分モデル解析のまとめ	14
4.2 2次系部分モデル解析	15
4.2.1 2次系計算条件	15
4.2.2 2次系計算結果	17
4.2.3 2次系部分モデル解析のまとめ	20
4.3 プラント全系モデル解析	22
4.3.1 プラント全系計算条件	22
4.3.2 プラント全系計算結果	23
4.3.3 全系モデル解析のまとめ	24
4.4 考察	25
5. おわりに	26

	Page
6. 謝辞	28
7. 参考文献	29
Appendix-A 「試験データ変換処理プログラム」	121
Appendix-B 「もんじゅ 2次主冷却系EMF流量指示値の温度補正用ライブラリ」	131
Appendix-C 「原子炉容器内の入力データ設定根拠」	149
Appendix-D 「ポンプ入熱量の算出方法」	161

表リスト

	Page
表4.1.1 監視用計器による温度測定値	30
表4.1.2 1次系圧力損失データ	31
表4.4 原子炉出入口水平配管での温度成層化	32

図リスト

	Page
図3.1.1 実機データの処理フロー	33
図3.3.1 1次系流動計算体系	34
図3.3.2 2次系流動計算体系 (Aループ)	35
図3.3.3 2次系流動計算体系 (Bループ)	36
図3.3.4 2次系流動計算体系 (Cループ)	37
図3.3.5 ACS空気側流動計算体系	38
図3.3.6 原子炉容器内計算体系	39
図3.3.7 炉容器上部プレナム計算体系	40
図3.3.8 1次系熱計算体系	41
図3.3.9 2次系熱計算体系 (Aループ)	42
図3.3.10 2次系熱計算体系 (Bループ)	43
図3.3.11 2次系熱計算体系 (Cループ)	44
図3.3.12 1次／2次系熱計算体系 (Aループ)	45
図3.3.13 1次／2次系熱計算体系 (Bループ)	46
図3.3.14 1次／2次系熱計算体系 (Cループ)	47
図3.3.15 1次系各種測定器出力	48
図3.3.16 2次系各種測定器出力 (Aループ)	49
図3.3.17 2次系各種測定器出力 (Bループ)	50
図3.3.18 2次系各種測定器出力 (Cループ)	51
図3.3.19 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系 (Aループ)	52

	Page
図3.3.20 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系（Bループ）	53
図3.3.21 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系（Cループ）	54
図3.3.22 ACS出口ナトリウム温度制御系（ACS起動後）	55
図3.3.23 ACS出口ナトリウム温度制御系（ACS起動後）	56
図3.3.24 ACS出口ナトリウム温度制御系（ACS起動後）	57
図3.3.25 ACS制御モード変更シーケンス	58
図4.1.1 1次系各部温度応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）	59
図4.1.2 1次系流量応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）	60
図4.1.3 2次系IHX出入口温度応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）	61
図4.1.4 2次系流量応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）	62
図4.1.5 1次主冷却系主配管熱電対ウェル取付位置	63
図4.1.6 実機流量と計算結果の比較（1次系流量）	64
図4.1.7 1次系流量の実測値と計算値の比較（フローコーストダウン応答）	65
図4.1.8 1次系流量の実測値と計算値の比較（自然循環発達過程）	66
図4.1.9 1次系流量の実測値と計算値の比較（準定常自然循環状態）	67
図4.1.10 1次系温度応答の計算結果（ケースP#1）	68
図4.1.11 1次系温度応答の計算結果（ケースP#2）	69
図4.1.12 1次系温度応答の計算結果（ケースP#3）	70
図4.1.13 原子炉容器出口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）	71
図4.1.14 温度成層化現象によるR V出口水平配管内の冷却材温度差（Aループ）	72
図4.1.15 温度成層化現象によるR V出口水平配管内の冷却材温度差（Bループ）	73
図4.1.16 温度成層化現象によるR V出口水平配管内の冷却材温度差（Cループ）	74
図4.1.17 IHX 1次側出口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）	75
図4.1.18 温度成層化現象によるIH X出口水平配管内の冷却材温度差（Aループ）	76
図4.1.19 温度成層化現象によるIH X出口水平配管内の冷却材温度差（Bループ）	77
図4.1.20 温度成層化現象によるIH X出口水平配管内の冷却材温度差（Cループ）	78
図4.1.21 原子炉容器入口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）	79

	Page
図4.1.22 IHX 2次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Aループ)	80
図4.1.23 IHX 2次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Bループ)	81
図4.1.24 IHX 2次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Cループ)	82
図4.2.1 1次系流量変化 (冷却系自然循環模擬試験)	83
図4.2.2 IHX 1次側出入口温度変化 (冷却系自然循環模擬試験)	84
図4.2.3 2次系とACSの各ナトリウム流量変化 (冷却系自然循環模擬試験)	85
図4.2.4 ACS出入口ナトリウム温度変化 (冷却系自然循環模擬試験)	86
図4.2.5 IHX 2次側出入口温度変化 (冷却系自然循環模擬試験)	87
図4.2.6 蒸気発生器周りナトリウム温度変化 (冷却系自然循環模擬試験)	88
図4.2.7 ACS出口流量の実測値と計算値との偏差 (計算値-実測値)	89
図4.2.8 ACS出口流量の実測値と計算値の比較 (Aループ)	90
図4.2.9 ACS出口流量の実測値と計算値の比較 (Bループ)	91
図4.2.10 ACS出口流量の実測値と計算値の比較 (Cループ)	92
図4.2.11 2次系流量の実測値と計算値の偏差 (計算値-実測値)	93
図4.2.12 2次系流量の実測値と計算値の比較 (Aループ)	94
図4.2.13 2次系流量の実測値と計算値の比較 (Bループ)	95
図4.2.14 2次系流量の実測値と計算値の比較 (Cループ)	96
図4.2.15 ACS出入口温度の実測値と計算値の比較	97
図4.2.16 ACS出入口温度の実測値と計算値の偏差 (計算値-実測値)	98
図4.2.17 IHX 2次側出入口温度の実測値と計算値の比較	99
図4.2.18 IHX 2次側出入口温度の実測値と計算値の偏差 (計算値-実測値)	100
図4.2.19 過熱器入口温度の実測値と計算値の比較	101
図4.2.20 蒸発器出入口温度の実測値と計算値の比較	102
図4.2.21 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較 (Aループ)	103
図4.2.22 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較 (Bループ)	104
図4.2.23 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較 (Cループ)	105
図4.2.24 SG側自然循環流量の補正結果	106

	Page
図4.2.25 蒸発器入口温度の実測値と計算値の比較	107
図4.2.26 ACS自然循環流量の実測値と計算値の偏差（計算値－実測値）	108
図4.2.27 補正後の2次系自然循環流量の偏差	109
図4.3.1 1次系流量の実測値と計算値の比較	110
図4.3.2 原子炉容器出口温度の実測値と計算値の比較	111
図4.3.3 IHX1次側出口温度の実測値と計算値の比較	112
図4.3.4 2次系流量の実測値と計算値の比較	113
図4.3.5 IHX2次側出入口温度の実測値と計算値の比較	114
図4.3.6 ACS出口流量の実測値と計算値の比較	115
図4.3.7 ACS出入口温度の実測値と計算値の比較	116
図4.3.8 SG側自然循環流量の比較	117
図4.3.9 2次系部分モデルと全系モデルによるSG側自然循環流量変化の相違	118
図4.3.10 蒸発器出入口温度の実測値と計算値の比較	119

1. はじめに

高速炉のプラント設計研究では、システム構成の検討をはじめ設計の妥当性や法的な指針・基準類との適合性を評価するため、計算コードによるシミュレーションが用いられる。とくにプラント動特性解析では、原子炉から水・蒸気系までの複雑かつ大規模なシステムを対象として、各種外乱に対する熱過渡特性、運転制御性、崩壊熱除熱特性などの観点から膨大な量のケーススタディが実施される。このため、プラント動特性解析コードには種々のプラント構成に対応できる汎用性、設計者が比較的容易に実行可能な利用性、計算規模に見合った適切な計算資源で運用できる経済性、等が基本性能として求められる。このような要求を背景に、プラントシステムの概念検討から設計評価、安全審査、性能評価に至る幅広いニーズに応える解析コードとして汎用プラント動特性解析コードSuper-COPDを開発している¹⁾。

Super-COPDは「もんじゅ」設計用解析コードCOPD²⁾をベースとして、熱流動計算モデルの汎用化を進める一方、各種解析モデルをそれぞれ単独で実行可能なモジュール構造とし、入力データでモジュールのインターフェースを指定することにより、任意のプラント体系の動特性解析を可能にしている。

高速炉の特徴の一つに自然循環能力の高さが挙げられる。自然循環除熱は動的機器を必要としないシステム構成であることから、長期にわたる崩壊熱除去に対する信頼性の向上や設備の簡素化を図るため、積極的な活用が期待されている重要な技術である。そのため動特性解析コードによる自然循環評価は、機器・設備間あるいは系統間に波及する長期的なプラント過渡挙動を定量化し、プラント冷却性能をはじめシステム設計や運転上の課題を把握するうえで不可欠である。そこでSuper-COPDコードの自然循環除熱に対する解析機能の検証として、「もんじゅ」試運転期間中に実施した自然循環試験データを用いて、以下の2項目に対する検討を実施した。

- (1)自然循環解析機能の適用性と改良点
- (2)「もんじゅ」性能試験における自然循環測定試験^{3), 4)}の評価手法としての妥当性

なお、ナトリウム系強制循環運転における解析モデルの妥当性については、「もんじゅ」総合機能試験データを用いた検証解析⁵⁾で既に確認している。ここで、Super-COPDの解析モデルおよび基本方程式については、コードシステム解説書等¹⁾に詳しく記述されているので参照されたい。

2. コードの概要

2.1 热流動計算モジュールの概要

(1) 热計算モジュール

ナトリウム流路に対する代表的な热計算モジュールには、混合要素(MN)・配管要素(LN)・炉容器下部プレナム(LW)・中間热交換器(HX)・蒸気発生器(SG)・空気冷却器(AC)等がある。各モジュールでは、流体の流量と流入温度がプール变数を介して境界条件として与えられ、流出温度および自然循環力、流体平均温度等を出力する。この出力値は、利用者が任意に指定するプール变数に格納され、同一变数を境界条件とする他のモジュールに伝達される。热交換器の伝熱部は、流れと直交方向（以後、径方向）にシェル・管外流体・伝熱管・管内流体を領域化した单チャンネルモデルとして扱っている。また、プレナムや管路に用いるMN・LN・LWについても、配管壁や冷却材、周辺流体を径方向に領域化している。各モジュールにおける伝熱計算は、前記の各領域を流体の流れ方向（以後、軸方向）に多数のノード分割した各温度点について、エネルギー保存則を連立させて解いている。なお、軸方向の热伝導は無視している。ある時刻における各モジュールの自然循環力 (ΔH) は、(2.1)式で表わされる。

$$\Delta H(t) = \int_z \rho(z,t) C dz \quad (2.1)$$

ここで、 $\rho(z,t)$: 流体密度(kg/m^3)

C : $= \sin \theta$ 、 θ は水平に対する流れ方向の角度(rad)

z : 区間の長さ(m)

(2) 流動計算モジュール

ここでは、ナトリウム流路に対する非圧縮性単相流動計算モジュール(FN)の概要について述べる。FNでは流路バスと圧力ノードで構成する流路網（フローネットワーク）により質量保存則ならびに運動量保存則を解き、流量および圧力分布を計算する。圧力ノードは流路バスの分岐点や合流点を対象にした代表圧力点と、自由液面空間を対象とした圧力バウンダリに分けられる。圧力バウンダリではカバーガス圧力、ナトリウム液位、流体圧およびオーバーフロー流量が計算される。

① 質量・運動量保存則

圧力ノード数M、代表圧力点の数MN、流路の数Nで構成される流路網を仮定すると、任意の代表圧力点jおよび流路iについての質量保存則および運動量保存則は、それぞれ(2.2)式および(2.3)式のように表わせる。

(質量保存則)

$$\sum_{m=1}^N A_{j,m} G_m = S_j \quad (j=1, 2, \dots, MN) \quad (2,2)$$

(運動量保存則)

$$\sum_{n=1}^M B_{i,n} P_n = F_i |G_i| G_i - \Delta H_i - e_i E_i + v_i V_i |G_i| G_i + \frac{L_i}{g} \left(\frac{dG_i}{dt} \right) \quad (2,3)$$

ここで、 $A_{j,i}, B_{i,j}$: 流路の結合フラグ(1 or 0) G_i : 流路*i*の流量(kg/sec) S_j : 代表圧力点*j*の涌出・消滅流量(kg/sec) P_j : 代表圧力点*j*の圧力(kg/m²) F_i : 流路*i*の圧力損失特性値(sec²/kgm²) ΔH_i : 流路*i*の自然循環力(kg/m³) [流体圧を含む流路*i*上の合計] E_i : 流路*i*のポンプ圧力(kg/m²) e_i : 流路*i*の駆動源存在フラグ(1 or 0) V_i : 流路*i*の弁抵抗特性値(sec²/kgm²) v_i : 流路*i*の弁存在フラグ(1 or 0) L_i : 流体慣性 (1/m) g : 重力加速度(9.8 m/sec²)

なお、自然循環力、ポンプ圧および弁抵抗特性値は、境界条件として他のモジュールの計算値が与えられる。

②圧力損失

形状損失および摩擦損失は(2.4)の回帰式で整理し、FNでは入力データで与える基準流量 G_0 、基準圧力損失 ΔP_0 、圧力損失指数 n_x に基づいて圧力損失特性値 F_i を(2.5)式にて設定している。また、圧力損失特性値 F_i が流量に依存して変化する場合、基準圧力損失 ΔP_0 および圧力損失指数 n_x は、流量範囲を最大3領域に分割した区間でそれぞれ異なった値が設定できる。

$$\Delta P = \Delta P_0 \left(\frac{G}{G_0} \right)^{n_x} \quad (2.4)$$

$$F_i = \Delta P_0 \frac{W^{(n_x+2)}}{W_0^2} \quad (2.5)$$

ここで、 ΔP : 圧力損失(kg/m²) ΔP_0 : 基準圧力損失(kg/m²) G : 質量流量(kg/sec) G_0 : 基準流量(kg/sec)

- n_x : 圧力損失指數(-)
 W : 流路の質量流量(kg/sec)
 W_0 : 流路基準流量(kg/sec)

2.2 自然循環解析による確認事項

プラントシステム一巡の自然循環特性は、ヒートソースとヒートシンクの伝熱中心差さと流体密度および系統の流動抵抗によって定まる。この自然循環特性に影響を及ぼす熱流動現象として、プレナムや配管内の温度成層化、炉心流量再配分、集合体間熱移行等が知られている⁶⁾。また、直接炉心冷却システム体系では、炉心ープレナム相互作用やインターラッパー現象が炉心の冷却性に影響を及ぼす課題として検討されている^{7),8)}。

Super-COPDは炉上部プレナムモデルの多領域化や炉心モデルのマルチチャンネル化により、炉上部プレナム内温度成層化および炉心流量再配分の考慮が可能である。本コードは流れ方向に流速一様と仮定する一次元コードであることから、プラントシステムを一巡するグローバルな自然循環特性の評価に用いられる。本コードを用いた自然循環解析では、系統あるいはプレナムにおける伝熱中心位置・プレナム有効混合体積・流動抵抗が支配因子となるため、これらに関する入力データについては高い精度が要求される。そこで、各項目の問題点と対処方法を以下に列記する。

(1) 伝熱部中心位置（自然循環力評価用）

- ① 実測値が得られていないため、図面上の設計寸法に基づいて設定。
- ② 液位変動が生じる蒸気発生器、ポンプ、ポンプオーバーフローコラムなどの高さを基準液位に固定。

(2) プレナム有効混合体積

- ① 原子炉トリップ時におけるプレナム出口温度応答の近似方法として、実験データに基づき冷却材の有効混合体積を実容量の約1/3に減じている。自然循環のように低流量でかつ温度変化が比較的緩慢な条件への適用性については今後検討する必要がある。プレナム有効混合体積は下流側の温度応答、すなわち自然循環力の評価に影響を及ぼすパラメータとして重要である。

(3) 流動抵抗

- ① (2.4) 式で与える形状損失と摩擦損失の温度依存性を無視。
- ② (2.4) 式で与える「もんじゅ」1次系と2次系の圧力損失データは、出力運転領域の流量条

件（30%～100%）で近似（2次系ではボニーモータ流量域に対しても適用可能であったが、さらに低流量条件に対する適用性については今後確認する必要があり）。なお、各系統の圧力損失データは以下の流量条件で近似し、圧損指数はこれまでの炉外実験データおよび機械工学便覧に基づいて設定している。

- ・ 1次系 100%と30%の2点近似
- ・ 2次系 100%と39%の2点近似

3. 計算方法

3.1 評価用実機データ

自然循環解析機能の確認解析では、1次冷却系自然循環予備評価試験⁹⁾ (SST-PP-1-2-1) と2次系について実施した冷却系自然循環模擬試験¹⁰⁾ (SKS-100-Na-10) を対象とした。境界条件および計算結果の比較データは、実機の運転データを図3.1.1に示す手順で、Super-COPDの入力形式と作図用出力形式に各々フォーマット変換して用いた。以下に、実機データを境界条件あるいは比較データとして用いる場合の留意点を示す。

(1)一次応答遅れ

1次／2次主冷却系の熱電対ウェルおよび2次主冷却系電磁流量計(EMF)は、下記の一次遅れ時定数を有することから、境界条件として使用する場合には一次応答遅れの逆変換処理を、判定条件と対比する場合には計算結果に一次応答遅れ処理をそれぞれ施した。なお、一次応答遅れの逆変換処理はAppendix-Aに示す変換処理プログラムで、一次応答遅れ処理はSuper-COPDの制御系モジュールで行った。

① 1次主冷却系温度計 17秒¹¹⁾

② 2次主冷却系温度計 16秒¹¹⁾

③ 2次主冷却系流量計 3秒

(2)2次主冷却系EMF流量指示値の温度補正

EMF流量計信号処理系の出力電圧と流量指示計との相関関係は、定格温度325℃のもんじゅEMF校正試験結果¹²⁾による校正曲線に基づいて設定されている。しかしながら、試運転時の系統温度は定格温度を下回ることが多く、またEMF出力電圧は運転温度の影響で変化することから、2次主冷却系流量を境界条件あるいは比較データとして用いる場合には温度補正を施して使用した。2次主冷却系EMF流量指示値の温度補正方法についてはAppendix-Bを参照されたい。

(3)測定誤差

計算結果と比較する試験データの測定誤差を以下に示す。なお、これらの測定誤差は設計評価によって定められた最大許容誤差であるが、この測定誤差以内で計器校正が行われている。

$$\epsilon_{T2o} : IHX\ 2\ 次側出口ナトリウム温度測定誤差 \pm 0.76\% (5\ ^\circ C)$$

$$\epsilon_{T1i} : RV\ 出口ナトリウム温度測定誤差 \pm 0.76\% (5\ ^\circ C)$$

ϵ_{T1o} : IHX 1次側出口ナトリウム温度測定誤差 $\pm 0.76\%$ (5°C)

ϵ_{F1} : 1次主冷却系ナトリウム流量測定誤差 $\pm 5.00\%$ ($300\text{m}^3/\text{h}$)

ϵ_{T2i} : IHX 2次側入口ナトリウム温度測定誤差 $\pm 0.76\%$ (5°C)

ϵ_{F2} : 2次主冷却系ナトリウム流量測定誤差 $\pm 5.10\%$ ($286\text{m}^3/\text{h}$)

3.2 計算手順

計算は1次主冷却系と2次主冷却系を個別に計算した後、双方の系統を統合したナトリウム系全系を計算する手順で実施した。計算した系統の範囲と試験名称は以下の通りである。

① 1次主冷却系 ; 1次冷却系自然循環予備評価試験

② 2次主冷却系 ; 冷却系自然循環模擬試験

③ ナトリウム系全系 ; 冷却系自然循環模擬試験

なお、1次冷却系自然循環予備評価試験ではプラント等温状態から補助冷却設備（ACS）によってホットレグとコールドレグの間に温度差を発生させた後、1次系循環ポンプを停止して自然循環流量を測定した。一方、冷却系自然循環模擬試験では1次系循環ポンプを運転した状態で2次系循環ポンプを停止し、その後自然通風モードのACS制御目標温度を 315°C から 240°C に変更して2次系自然循環流量の変化を測定した。

3.3 計算体系

1次主冷却系および2次主冷却系の計算体系として、「もんじゅ」性能試験の予測解析に用いたプラント全系解析用データを系統毎に分割した部分モデルを使用した。また、ナトリウム全系計算では、各系統毎の計算で整備した入力データを用いた。流動計算、熱計算および制御系計算の各計算体系を以下に示す。

(1) 1次系流動計算体系 [図3.3.1]

1次系流路のA系、B系およびC系の各ループは原子炉容器で合流・分岐することから、1つのフローネットワークで構成した。炉心部の流路バスは炉心燃料（径方向ブランケットを含む）、炉心バイパス（中性子遮蔽体、炉停止棒）および中間胴プレナムに分割している。また、各ループの炉容器入口部の流路バスにはポンプ（PP）および逆止弁（CK）を配置し、それぞれの動的機器モデルにより流動計算を行う。

(2) 2次系流動計算体系 [図3.3.2～図3.3.4]

A系、B系およびC系の各ループが独立している2次系については、各ループ毎にフローネットワークを構成した。各フローネットワークでは、主冷却系に加えてACS系およびオーバーフロー系の流動計算も行う。

(3) ACS空気側流動計算体系 [図3.3.5]

図3.3.5の空気側流動計算モジュール(FA)では、弁計算モジュール(VV)、ポンプモジュール(PP)および空気冷却器モジュール(AC)から与えられるペーン/ダンバ抵抗係数、プロアヘッドおよび自然循環力に基づいて空気流量を計算する。また、ペーン/ダンバおよびプロアの運転動作は、実機と同様に調節計(CL)あるいはインターロックシーケンス(LG)と連動させて模擬している。

(4) 原子炉容器内計算体系 [図3.3.6]

図3.3.6のa)側は熱出力がある場合の計算体系であり、一方、b)側は模擬燃料集合体を装荷した熱出力がない状態の計算体系である。計算は炉心部に熱輸送遅れ要素(LN)を用いたb)側の計算体系で実施した。

(5) 炉容器上部プレナム計算体系 [図3.3.7]

炉上部プレナムの熱流動計算は、軸方向対象モデルを用い、各ループ毎に径方向と鉛直方向に分割した各領域の流量および温度分布を計算する。図中の計算体系は、「もんじゅ」の炉上部プレナムと同じ内筒および2段フローホールを設置した条件で計算を行う。

(6) 1次系熱計算体系 [図3.3.8]

図3.3.8は、炉容器出口から配管および中間熱交換器を介して、炉容器入口に戻るまでの熱計算モジュールの構成を示す。2次系はIHX2次側入口温度計から出口温度計までを計算対象範囲とし、IHX2次側入口温度と2次系流量を境界条件として与えた。

(7) 2次系熱計算体系 [図3.3.9～図3.3.11]

2次系熱計算体系の1次系は、炉容器出口温度計からIHX1次側出口温度計までを計算対象範囲とし、炉容器出口温度と1次系流量を境界条件として与える。2次系についてはACS系を含めた全ての熱輸送設備についてモデル化しており、境界条件はACS入口空気温度とオーバーフロー系の汲上げナトリウム温度となる。

(8) ナトリウム系全系熱計算体系 [図3.3.12～図3.3.14]

A系、B系およびC系の1次系と2次系との各熱計算体系をカップリングした状況を図3.3.12～図3.3.14に示す。炉容器入口から出口まで区間は、前記(4)項の原子炉容器内計算体系に接続している。本計算体系の境界条件は、ACS入口空気温度とオーバーフロー系の汲上げ温度となる。

(9) 1次系各温度計出力 [図3.3.15]

実機の温度測定位置と一致する配管要素 (LN) 内のノード点でナトリウム温度を取り出し、熱電対ウェルの1次応答遅れ時定数 (17秒) で検出遅れを模擬している。

(10) 2次系各種測定器出力 [図3.3.16～図3.3.18]

温度計については1次系と同様に実機の温度測定位置と一致する配管要素 (LN) 内のノード点で温度を取り出し、熱電対ウェルの1次応答遅れ時定数 (16秒) で検出遅れを模擬している。また、流量計ではEMF信号処理系の1次応答遅れ (3秒) を計算している。

(11) ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系 [図3.3.19～図3.3.21]

ACS起動後、ナトリウム流量調節弁の開度調節により空気冷却器出口ナトリウム流量を一定に制御する。調節計内部の各種演算器の構成および制御定数は、実機を忠実に再現している。

(12) ACS出口ナトリウム温度制御系 (起動後) [図3.3.22～図3.3.24]

ACS起動後、空気冷却器出口ナトリウム温度を一定に制御するため、入口ペーン／出口ダンバの開度調節により空気流量を変更する。調節計内部の各種演算器の構成およびフィード／フォワード関数は実機と同一であるが、制御定数のうちBループの積分時間は280秒 (実機では240秒) を適用した。Bループの積分時間280秒は、ACS単体の検証解析⁵⁾によって得られた再現条件である。また、実機との差異については、調節計の積分時間設定器にレンジが粗いアナログ方式のボリュームを用いているため、実機側の設定値のズレあるいは読み取り誤差が考えられる。

(13) ACS制御モード変更シーケンス [図3.3.25]

図3.3.25は、ACSプロアの運転モード (高速、低速、待機) とACS出口Na温度制御系内のフィード／フォワード関数を切り替えるための論理回路である。この論理回路は、実機のシーケンスに基づいて作成している。

4. 試運転データによる計算および考察

4.1 1次系部分モデル解析

4.1.1 1次系計算条件

(1)入力データ

総合機能試験期間中の炉心は、内側炉心84体と外側炉心114体の計198体の模擬燃料集合体で構成されていた。この模擬燃料集合体は、ラッパー管の内部にステンレス製の案内管と多段式のオリフィスを内蔵した構造である。この内部構造の特徴から、模擬燃料集合体は熱輸送遅れ要素として仮定できるため、198体の模擬燃料集合体を1チャンネルの配管要素(LN)モジュールでモデル化した。また、炉心バイパス流路(径方向ブランケット集合体、中性子遮蔽体、制御棒)、中間プレナムおよび炉容器下部プレナムについては、熱容量および伝熱中心位置を見直した。これらの炉容器に関する各入力値および設定根拠については、Appendix-Cを参照されたい。

(2)採用試験データ

1次冷却系自然循環予備評価試験(SST-PP-1-2-1)の試験データは、試験条件の設定から試験終了まで延べ9時間20分にわたり収録されている。試験操作はデータ収録開始から約2時間後に行われ、温度や流量の変化は操作開始から約3時間記録されている。この試験データの分析を踏まえ、計算する時間帯は、データ収録開始7470秒後(約2時間後)から同じく17470秒後(約5時間後)までの10000秒間とした。この時間帯における1次系の温度変化を図4.1.1に、流量変化を図4.1.2に示す。また、2次系のIHX出入口温度変化を図4.1.3に、流量変化を図4.1.4に示す。また、データ収録装置による連続的なデータ採取の他に、監視用計器の温度データが15分～30分間隔で記録されている。このデータリストに記録されている原子炉容器出口温度と中間熱交換器1次側出口温度を表4.1.1に、各監視用熱電対の取付け位置を

図4.1.5に示す。なお、境界条件および比較データ位置は以下の通りとした。

(a)境界条件

- ・ 1次主冷却系循環ポンプトリップ信号(計算開始10秒後)
- ・ 同ポンニーモータトリップ信号(計算開始1810秒後)
- ・ 2次主冷却系流量(実機データ)
- ・ IHX 2次側入口温度(実機データ)

(b)比較データ位置

- ・ 1次系流量
- ・ 原子炉容器出入口温度
- ・ IHX 1次側出口温度

・ IHX 2 次側出口温度

(3) 計算パラメータ

1 次系自然循環試験の計算では、炉内熱計算体系と 1 次系圧力損失の違いが自然循環特性に及ぼす影響を把握するため、各入力値の組合せを次の通りとするパラメータ計算を行った。1 次系圧力損失には、設計値¹³⁾ならびに設計値を 1 次系循環ポンプヘッド比（実機ヘッド／設計ヘッド）で補正した設計補正值⁹⁾を用いた。各 1 次系圧力損失を表4.1.2に示す。

ケースNo	炉内熱計算体系	1 次系圧力損失
P # 1	模擬炉心体系	設計補正值
P # 2	模擬炉心体系	設計値
P # 3	実炉心体系	設計補正值

4.1.2 1 次系計算結果

ここでは、ケースP#1～P#3の各条件に対する計算結果を述べる。

(1) 1 次主冷却系流量

実機流量に対する計算結果の相対偏差を図4.1.6に示す。同図において、各ループの計算値と実測値の相対偏差は主モータトリップ時（計算開始約10秒後）、ボニーモータトリップ時（約1900秒後）および強制循環から自然循環への移行段階（約2500～3000秒後）で比較的大きい傾向にある。系統内の自然循環が十分に発達したと考えられる約5000秒以降の偏差は、解析ケースによって若干異なるが、P#1とP#2では概ね±5%以下である。各解析ケース間の偏差を比較すると、強制循環状態では 1 次系圧力損失に設計補正值を用いたP#1とP#3で共に-2%程度、設計値を適用したP#2では約-5%であった。一方、自然循環状態では、圧力損失条件が異なるものの同じ模擬炉心体系で計算したP#1とP#2の偏差はほぼ等しく、実炉心体系を適用したP#3の偏差は前者2ケースより大きい傾向を示している。P#1とP#2の偏差が自然循環状態では等しくなった定性的理由として、1 次系では系統一巡の自然循環力を決定する要因のうち、炉容器の熱容量（温度分布）および伝熱中心高さの影響度が流動抵抗より大きいためと考えられる。

計算の全般を通して測定値との差が比較的大きいボニーモータトリップ時と強制循環から自然循

環への移行過程、並びに測定値との差がそれより小さい自然循環状態の各モードにおける流量の実測値と計算値の比較結果を図4.1.7～図4.1.9に示す。これらの計算結果の概況を以下に記す。

①ボニーモータトリップ時（図4.1.7）

図4.1.7は、循環ポンプのボニーモータトリップからコーストダウン完了までの流量低下を示す。図中の破線は計算値を表わす。各計算値の流量変化は、50秒以降で計算値の低下が早いためループによって多少の差があるが、50～120秒の区間において計算値は実測値に対して過小評価となる傾向が見られる。また、ループ間におけるフローコーストダウン特性の差は、計算結果にはほとんど見られないが、実機ではCループの流量低下が他のループより遅い傾向がある。これらの計算値と実測値の差および実測値のループ間の差は、各ループのポンプ特性や圧力損失特性が起因していると考えられる。そのため、強制循環から自然循環への移行過程における流量変化を精度良く計算するには、ボニーモータの慣性トルクならびに摩擦トルク、低流量域の圧力損失特性を把握する必要がある。

②自然循環への移行過程（図4.1.8）

フローコーストダウン後から自然循環状態への移行過程について述べる。自然循環流量はフローコーストダウン後の流量低下(約40m³/h)から60～70m³/hまで約300秒で増加し、その後3500秒まではほぼ一定流量を保ち、約3500秒後に再び増している。また、2200秒から3500秒までの間では、流量が約±3m³/hの幅で増減している。このような実機の流量変化に対して、各解析ケースの計算値も概ね同様な変化を示している。しかしながら計算結果では、2200秒から3500秒における流量変化の周期が1.5倍程度に長くなっている。また、その時間帯におけるCループの流量は、AループおよびBループの計算値とほぼ同程度であるが、実測値は約5m³/h程度少ない。

③自然循環定常状態（図4.1.9）

図4.1.9における各計算結果の流量変化は実機と概ね一致している。各ケースの流量は、自然循環への移行過程ではP#3>P#1>P#2の順となっていたが、5000秒から計算終了(10000秒)までの時間帯ではP#1>P#2>P#3の順となっている。3ケースの中で自然循環流量が最も高めに計算されたP#1の実測値との偏差は±5%以内であり、電磁流量計の測定精度は±5%であることから、計算値は実測値とほぼ同程度の精度で計算されている。

(2) 1次主冷却系各部温度

各ケース毎の原子炉容器出口温度（RV出口）、中間熱交換器1次側出口温度（IHX 1次側出口）および原子炉容器入口温度（RV入口）の計算結果を、それぞれ図4.1.10、4.1.11および4.1.12に示す。これらの計算値と実測値との比較結果を以下に述べる。

①原子炉容器出口温度

実測値に対する各解析ケースの計算値の偏差を図4.1.13に示す。炉容器出口部における測定値と計算値との偏差は全般的に計算値の方が小さい傾向を示し、ケースP#1とP#2で約-3℃、P#3で約-10℃程度となっている。

また、各ケースの計算値と監視用熱電対で測定された温度データの比較結果を図4.1.14～図4.1.16に示す。図にはデータ収録装置で記録された実験値も併せて示している。この温度分布を計測している熱電対の先端部は、TE1AとTE2Aがホットレグ水平配管の底部から約2/3の高さに、TE1CおよびTE3は配管中心高さ、TE1Bは配管の底部から約1/3に各々位置する。配管内部の流体は自然循環への移行過程にあたる約3000秒の時点から断面内で温度差が拡大し、その温度分布は温度降下の傾きが急であると拡大傾向を、温度降下が緩慢になると縮小傾向を示している。各熱電対位置と流体温度を対比すると、配管内で温度勾配がついているのが判る。この原因としては配管内部流体の温度成層化現象が考えられる。P#1とP#2の各計算値は温度差のはば中間値を示しており、温度差によるバラつきや計測偏差等を考慮すると概ね妥当な結果といえる。

②中間熱交換器1次側出口温度

RV出口と同様に各ケースの実測値と計算値の偏差を図4.1.17に示す。クロスオーバーレグ配管における偏差は、約2500秒から約3000秒まで過小評価側（-8℃程度）に拡大し、その後は徐々に減少して約4500秒には±3℃程度に戻っている。自然循環状態へ移行した5,000秒～10,000秒までの偏差は、初期状態における偏差分を差し引くと、P#1とP#2で概ね±1℃以内である。一方、P#3では、ホットレグ配管においてP#1およびP#2に比べ-7℃程度差があったが、クロスオーバーレグ配管では-1℃程度である。コールドレグ配管内部の温度分布と各計算値を図4.1.18～図4.1.20に示す。コールドレグ配管では、配管内部の温度分布が約2500秒から徐々に拡大し、約3000秒でピークとなり約4500秒にはほぼ解消されている。この温度分布の変化は配管内部における温度成層化現象の発生と解消によるものである。この時間帯における計算値の偏差が大きくなるのは、この配管内温度成層化が要因になっているものと考えられる。

③原子炉容器入口温度

コールドレグ配管における実測値と計算値の偏差を図4.1.21に示す。計算値には約2000秒から実測値との偏差が大きくなる傾向が見られるが、P#1とP#2で概ね±2℃以下であり、他の測定点と同様に妥当な結果が得られている。また、約3500秒から約7000秒に見られる偏差の変動は、クロスオーバーレグ配管内温度成層化の影響が、輸送遅れ時間を持ってコールドレグ配管上に表われたためと考える。この時間帯の温度変化に対する予測精度の向上を図るには、配管内温度成層化モデルの導入が有効と考えられる。

(3) IHX 2次側出口温度

IHX 2次側出口温度の計算値と実測値を各ループ毎に図4.1.22～図4.1.24に示す。これらの図中には、境界条件として入力したIHX 2次側入口温度と同温度の実測値を併せてプロットしている。IHX 2次側出口温度については、約2200秒からの温度低下が各ループとも多少早めの傾向にある。この温度低下特性の差異は、2次系部分モデルを用いた強制循環除熱モードの検証解析⁵⁾では発生していない。考えられる原因としては、プラント全系モデルから部分モデルを構築する際に、IHX 2次側入口温度計からIHX本体までの配管長、あるいはIHX本体からIHX 2次側出口温度までの配管長が実機条件より短かったことがあげられる。また、IHX 2次側のプレナム混合効果の差も原因の一つとして考えられるが、2次系はボニーモータによる強制循環を行っていることから、プレナム混合効果による影響は小さいと思われる。また、IHX 2次側出口温度の偏差は、温度低下開始点と勾配の相違はあるもののP#1とP#2で概ね±3℃以内である。

4.1.3 1次系部分モデル解析のまとめ

炉内熱計算体系と1次系圧力損失特性値の組み合わせを変えて3ケースの計算値と実測値を比較した結果、自然循環流量および温度変化の再現性が良い組み合わせは、P#1>P#2>P#3の順であった。P#1およびP#2は同じ模擬炉心体系を採用し、圧力損失特性はP#1が設計条件より約10%低めの設計補正值を、P#2では設計条件を採用している。一方、P#3では炉内の熱計算に実炉心体系を適用し、圧力損失特性にはP#1と同じ設計補正值を用いている。各ケースの計算結果の比較から、圧力損失条件は自然循環特性を支配する重要なファクターの一つであるが、系統規模の自然循環解析では10%程度の差が存在しても、計算条件として熱容量（温度分布）や伝熱中心高さが

一致していれば計算結果への影響が小さいことが確認できた。Super-COPDでは熱容量や伝熱中心高さを熱計算体系の入力データとして設定するが、これらの入力値の正確さが自然循環時の流量および温度変化の予測に大きく寄与することが判った。

安定した自然循環状態において、実測値と計算結果の偏差を評価すると以下のようになる。

- (1) 1次系自然循環流量 ± 5 %以内
- (2) RV出口温度 -3℃程度 (但し、鉛直方向温度分布の概ね平均値)
- (3) IHX 1次側出口温度 ±1℃以内 (但し、鉛直方向温度分布の概ね平均値)
- (4) RV入口温度 ±2℃以内

4.2 2次系部分モデル解析

2次系部分モデルの解析対象範囲は、1次系についてはホットレグ配管上のRV出口温度計からクロスオーバーレグ配管上のIHX 1次側出口温度計までとし、2次系は主冷却系と補助冷却設備(ACS)の全てとしている。この2次系部分モデルを用いて、既に強制循環除熱モードの検証解析⁵⁾と、2次系自然循環除熱モードにおけるSG逆流現象のパラメータ解析¹⁴⁾が行われている。ここでは、前述のパラメータ解析と同じ総合機能試験(SKS)の自然循環模擬試験を計算対象としている。

4.2.1 2次系計算条件

(1) 入力データ

計算に用いた入力データは、強制循環除熱モードの検証解析ならびにSG逆流現象のパラメータ解析に用いた部分モデルに、運転初期条件の変更とオーバーフロー汲上げ系を追加して作成した。主な変更点と追加項目は次の通りである。

① 運転初期条件¹⁰⁾

- ・ 2次系初期流量 (2次系ポンピングモータ運転+オーバーフロー汲上げ系運転)

② オーバーフロー汲上げ系の追加

- a) 系統への汲上げ位置 (ポンプ入口側コールドレグ配管上)
- b) オーバーフロー位置 (2次系ポンプオーバーフローカラム)

c) 汎上げ系運転停止操作（試験データ収録開始72分後、計算開始19分後）

(2) 試験概要および試験データ

冷却系自然循環模擬試験10は、2次主冷却系およびACSの自然循環特性を確認する目的で行われた。試験では流体摩擦熱（ポンプ入熱）を熱源とするため1次系循環ポンプをメインモータで連続的に運転し、2次系はボニーモータの運転停止とACS入口ベーン／出口ダンバの全開動作により自然循環運転に移行させた。試験はACS出口ナトリウム温度が約315°Cから約230°Cに低下するまで11時間にわたり実施された。この試験において、自然循環状態で2次系コールドレグ配管内の低温流体がミキシングティから蒸発器（EV）出口側に逆流する現象が観測された。計算では自然循環移行にともなう熱過渡変化および流量変化、さらにSGへの逆流現象の再現性を評価するため、2次系ボニーモータの運転停止を起点に、それから約3時間後までを計算対象とした。この時間帯における1次系および2次系の運転状態を図4.2.1～図4.2.6に示す。また、境界条件および計算値と比較する実測データは次の通りとした。

① 境界条件

- a) 1次主冷却系流量（図4.2.1）
- b) RV出口温度（図4.2.2）
- c) 2次系ボニーモータトリップ信号（計算開始0.01秒後）
- d) ACS出口温度制御系制御目標値の設定変更（315°Cから240°Cへ）
 - ・Aループ（226秒後）、Bループ（257秒後）、Cループ（281秒後）
- e) ACS入口空気温度（試験開始時の初期条件を適用）
 - ・Aループ（28.6°C）、Bループ（29.4°C）、Cループ（28.8°C）
- f) オーバーフロー汎上げ系（流量10m³/hr、計算開始1141秒後に運転停止）

② 計算値と比較する実測データ

- a) 2次主冷却系およびACSの各ナトリウム流量（図4.2.3）
- b) ACS出入口ナトリウム温度（図4.2.4）
- c) IHX 2次側出入口温度（図4.2.5）
- d) EV出口ナトリウム温度（図4.2.6）

(3) 計算パラメータ

オーバーフロー汲上げ系の運転が、自然循環流量あるいは温度変化におよぼす影響を把握するため、次の2ケースについて計算した。

- ・S#1 ; オーバーフロー汲上げ流量 $10\text{m}^3/\text{hr}$ (但し、計算開始1141秒後に運転停止)
- ・S#2 ; オーバーフロー汲上げ流量 $0\text{m}^3/\text{hr}$

4.2.2 2次系計算結果

(1) 流量特性

①補助冷却設備（ACS）出口ナトリウム流量

ACS出口ナトリウム流量の実測値とS#1の計算値との偏差を図4.2.7に示す。計算結果の偏差はループ毎に異なるが、AループとCループでは $10\text{m}^3/\text{h}$ 程度、Bループでは $5\text{m}^3/\text{h}$ 程度それぞれ多めに計算されている。また、各ループにおける実測値と計算値との偏差は、強制循環から自然循環への移行過程で最も大きい傾向を示している。その原因としては、循環ポンプのコストダウン特性や系統圧力損失特性の差異が考えられる。図4.2.8～図4.2.10は、実測値と各解析ケースの計算値をループ毎に比較したものである。それぞれの図において、各解析ケースの流量は実測値より約 $5\sim 10\text{m}^3/\text{h}$ 程度多めに計算されているものの、全般的には実測値と概ね一致している。

②2次主冷却系流量

前項のACSと同様に、2次主冷却系流量の実測値に対するS#1の計算値との差を図4.2.11に示す。2次主冷却系流量の偏差は、ACSと同じように強制循環から自然循環への移行過程で最も大きい。しかしながらその差は、系統の自然循環が十分に発達したと考えられる約3000秒から約8000秒にかけて減少傾向（ $5\text{m}^3/\text{h}$ 程度低下）を示している。その後の偏差はループ間で若干異なるが、 $10\text{m}^3/\text{h}$ 程度多い。また、実測値と各解析ケースの 計算結果をループ毎に図4.2.12～図4.2.14に示す。各図において、計算結果の流量変化は全般的に実測値と概ね一致する傾向を示している。S#1とS#2を比較すると、両ケース間の相違が前述のACSに比べ大きく、計算開始当初の流量はS#1の方がわずかに高い傾向を示し、自然循環流量が最大となる直前からS#2の流量が多めに計算されている。

(2) 温度変化

①ACS出入口ナトリウム温度（図4.2.15、図4.2.16）

a. ACS入口温度

ACS入口温度については、S#1とS#2の両計算結果には有意な差がない。実測値と計算値の比較では、強制循環から自然循環への移行時に最大で約2℃程度の差が生じているが、約4000秒以上の定常状態においては概ね±1℃以内の差でよく一致している。

b. ACS出口温度

入口温度と同様に、S#1とS#2の間に有意な差はない。実測値と計算値を比較すると、計算開始直後における空気側入口ペーン／出口ダンバの開動作とACS出口ナトリウム流量低下による急峻な温度降下、さらに自然循環流量の変動や入口温度の低下にともなう緩やかな変化などの傾向がよく一致している。また、S#1の計算値と実測値との温度差は、自然循環への移行段階で最大-5℃程度となるが、定常状態では実測値の変動振幅の中心値から下限値の範囲内にある。

② IHX 2次側出入口温度（図4.2.17、図4.2.18）

a. IHX 2次側入口温度

S#1とS#2の計算結果は2次主冷却系流量と同様な傾向を示し、入口温度が急速に低下して最低温度に達するまではS#1の方がわずかに高く、その後の温度上昇の過程ではS#2の方が高めとなっている。各ケースの過渡応答は実測値に比べ変化率が大きく、そのため実測値とS#1の計算値との差は約-5℃～-9℃になっている。また、定常状態での差はループ間で異なるが、2次系全体を通して約-4℃～+2℃の範囲にある。過渡状態において計算値と実測値との差が大きくなった原因の一つとして、配管内の温度成層化やプレナム混合効果が考えられる。温度成層化はコールドレグ配管内在の高温流体とACS出口側から流入する低温流体によって生じる。それによる配管内に温度分布が形成され、平均的な流体温度が測定できずに実測値と計算値との差異が大きくなっているものと推定される。

b. IHX 2次側出口温度

IHX 2次側出口温度は1次系と2次系の流量比が大きいため、1次側入口温度に依存しており、S#1とS#2の各計算値の間にはほとんど差がない。また、計算値と実測値の温度差は約2℃程度である。

③ 過熱器入口ナトリウム温度（図4.2.19）

2ケースのうちS#1の計算結果が実測値に近い温度変化を示している。また、実測値とS#1

の計算値を比較すると、計算開始から5000秒までの温度変化は、初期の差を除けば±1°C以内で一致している。その差は約5000秒から計算終了（12000秒）にかけて徐々に大きくなり、計算終了時点では計算値が実測値を約4°C程度下回っている。5000秒以降の温度低下率は実機で約-4°C/hr、計算では約-5.5°C/hrであった。

④蒸発器出入口ナトリウム温度

蒸発器出入口ナトリウム温度の実測値とS#1およびS#2の計算結果を図4.2.20に示す。各計算結果を比較すると、S#1のケースが実機の温度変化に近いことが分かる。そこで、ここでは実測値に近いS#1の計算値と実測値との比較結果を述べる。

a. EV出口温度

試験結果に見られる台形状の温度変化は、通常運転時にEV出口側からミキシングティ方 向（順流）へ流れているナトリウムが、自然循環ではミキシングティ側からEV出口方向への流れ（逆流）、その後また順流に復帰するために発生していると考えられる。この温度変化とナトリウムの流れ方向の対応については、ナトリウム流量を入力条件とした機器単位の解析⁵⁾で既に確認されている。例えば、AループのEV出口温度変化と流動状況は、次のように対応している。

- (a) 約800秒～2600秒 低下／逆流
- (b) 約2600秒～5200秒 上昇／順流
- (c) 約5200秒～11000秒 低下／逆流

また、2次主冷却系流量とACS出口流量の差から暫定的に求めたSGナトリウム流量と、EV出口温度との対応関係を図4.2.21～図4.2.23に示す。各図にはS#1の計算結果も併せて記載した。まず、各図中の計算結果を見ると、EV出口温度の上昇および低下の時機は、流量が順流方向あるいは逆流方向に転じる時機と概ね一致している。試験結果では、流量は約200秒から11000秒まで逆流方向となっているが、EV出口温度変化に着目すると、実機の流れも計算結果と同様に逆流・順流を繰り返していると推定できる。図中に示した実機の流れ方向は、EV出口温度変化に基づいて推定したものである。この推定結果により流れ方向の境界点を流量0と仮定した場合、境界点と試験結果の流量差は4.9m³/h～5.8m³/h、平均で約5.3m³/hになる。この流量差5.3m³/hの補正を加えて再評価した結果を図4.2.24に示す。図中の補正を加えた実機流量には逆流と順流が表われている。補正した実機流量に対する計算結果の差は、2次系の自然循環が十分に発達した約3000

秒以降では $-3 \text{ m}^3/\text{h}$ ~ $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度である。また、約2000秒までの流量変化は、計算結果に比べ試験結果の方で逆流が少ない傾向を示している。この逆流に伴うEV出口温度の低下（前出の図4.2.21～図4.2.23参照）は試験結果の方に先に表われている。

一次元コードによる熱輸送遅れ時間は、流体が流路断面を一様な質量流速で流れると仮定して計算される。逆流が少ない実機でEV出口温度が先に低下した原因として、ミキシングティからEV出口までの水平配管において、温度成層化によりミキシングティ側の低温流体が配管断面下部を流れたために、一様流速の仮定が成立せず相対的に早い流速でEV出口に到達したため、計算に比べ短い輸送遅れ時間になったと考える。

さらに、計算では2次系への汲上げ停止（1140秒）と同時に流量が一旦 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度低下している。この流量低下は、汲上げによって平衡していたポンプオーバーフローコラム周辺の圧力バランスが、汲上げ停止により崩れたことに起因していると考えられる。

b. EV入口温度

試験結果とS#1のEV入口温度変化を図4.2.25に示す。計算結果の温度変化は試験結果の傾向と概ね一致している。両者間の温度差は、ナトリウムの流動方向が逆転する時間のズレに起因しており、計算方法あるいは入力データのミスによるものではない。

4.2.3 2次系部分モデル解析のまとめ

オーバーフロー汲上げ系の計算条件が異なる2ケースの解析結果と実測値を比較した結果、オーバーフロー汲上げ系の有無による解析結果の差は、汲上げ流量停止後に2次系流量とSG逆流時の温度変化の差として現われた。また、オーバーフロー汲上げ系を計算体系で考慮することにより、計算によるSKS自然循環模擬試験の再現性が改善されることが確認できた。2次系部分モデルで自然循環解析を行い、実測値と計算値を比較した結果を以下にまとめる。

(1) ACS自然循環流量

ACS自然循環流量は実測値より $5\sim10 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度過大評価となるが、過渡変化については実機とはほぼ一致した傾向を示す。また、実測値との差は約+5~10%程度であることを確認した。相対偏差の時間変化を図4.2.26に示す。

(2) 2次主冷却系自然循環流量

実測値と計算値を比較した結果、計算値は実測値に対して約 $10\sim 15\text{m}^3/\text{h}$ 程度過大評価するが、過渡変化についてはACS流量と同様に実機とほぼ一致した傾向を示す。実機では2次系流量とACS出口流量から求めたSG側流量が、実際より $5.3\text{m}^3/\text{h}$ 程度少ないことが、EV出口温度変化との比較対応によって推定された。この流量偏差を2次系流量に加算して求めた実機流量と計算結果とを比較すると、計算結果は $5\sim 10\text{m}^3/\text{h}$ 程度（+5~10%程度）実測値と差があることが確認できた。相対偏差の時間変化を図4.2.27に示す。

(3) ACS入口温度

4000秒～10000秒の定常状態では、実測値と計算値とは概ね±1℃以内の差でよく一致することが確認できた。

(4) ACS出口温度

実測値と計算値の温度差は、自然循環への移行過程において最大-5℃に達するが、定常状態では実測値の変動幅の中間値から下限値の範囲以内にあることを確認した。

(5) IHX 2次側入口温度

定常状態における実測値と計算値との差はループ間で多少異なるが、約-4℃～2℃の範囲にあり、温度応答については実機の傾向と概ね一致していることを確認した。

(6) IHX 2次側出口温度

IHX 2次側出口温度は、IHX 1次側入口温度の影響を大きく受けるため入口温度に比べ実測値との差が小さく、2℃程度以内で一致している。

(7) SH入口ナトリウム温度

計算値は約5000秒まで±1℃以内で実測値と一致しているが、その後は徐々に差が大きくなり、計算終了時点では約-4℃程度実測値より低くなった。

(8) EV入口ナトリウム温度

EV入口ナトリウム温度の変化は、ナトリウムの流れ方向が逆流あるいは順流に変わる時機のズレを除けば概ね一致している。

(9) EV出口ナトリウム温度

オーバーフロー汲上げ系の運用を考慮したケースS#1では、逆流あるいは順流による過渡的な温度変化に対する評価精度が大幅に改善された。より一層実測値に対する評価精度の向上を図るには、

ミキシングティからEV出口までの水平配管で発生していると考えられる冷却材の温度成層化の考慮が有効と考えられる。

4.3 プラント全系モデル解析

4.3.1 プラント全系計算条件

(1) 入力データ

プラント全系モデルの入力データは、1次系と2次系の各部分モデル解析で再現性が良好であった、P#1およびS#1の二つのデータセットを統合して作成した。また、1次系の初期条件には、SKS自然循環模擬試験の運転状態量を用いた。

(2) 境界条件

入力データとして与えた境界条件は次の通りである。

a) 1次主冷却系流量制御目標値の設定変更

時間 (sec)	0.0	5,100	6,400	10,000
目標値 (%)	100.0	100.0	49.0	49.0

b) 1次系ポンプ入熱（炉心部に配置したLNモジュールの内部発熱で模擬）

時間 (sec)	0.0	5,100	6,400	10,000
発熱量(kcal/ms)	1488.9	1488.9	562.5	562.5

なお、ポンプ入熱量の算出方法についてはAppendix-Dを参照されたい。

c) 2次系ポンーモータトリップ信号（計算開始0.01秒後）

d) ACS出口温度制御系制御目標値の設定変更（315°Cから240°Cへ）

- ・Aループ（226秒後）、Bループ（257秒後）およびCループ（281秒後）

e) ACS入口空気温度（試験開始時の初期条件を適用）

- ・Aループ（28.6°C）、Bループ（29.4°C）およびCループ（28.8°C）

f) オーバーフロー汲上げ系（流量10m³/hr、計算開始1141秒後に運転停止）

4.3.2 プラント全系計算結果

ここでは、SKS自然循環模擬試験の実測値とプラント全系モデルによる計算値との比較結果を示す。

(1) 1次主冷却系

① 1次系流量 (図4.3.1)

各ループにおいて、計算値は実測値の変動幅の中間値から下限値の範囲で一致している。

② RV出口温度 (図4.3.2)

計算値は実測値と比較して、約2000秒付近の極大値、約6000秒から計算終了までの降温特性などの温度変化を1℃程度の差で評価している。

③ IHX 1次側出口温度 (図4.3.3)

実測値に対してAループとCループの計算値は過大評価となる傾向を示し、Bループの計算値は逆に過小評価となる傾向がある。しかし、各ループの計算値と実測値との差は1℃程度であり良く一致しているといえる。

(2) 2次主冷却系

① 2次系流量 (図4.3.4)

計算値は2次系部分モデルの解析ケースと同様に実測値より約5~10m³/h程度大きいが、過渡変化特性については試験結果を良く再現している。

② IHX 2次側出入口温度 (図4.3.5)

全系モデルのIHX 2次側出口温度は、R/V出口温度が1℃程度高い影響で2次系部分モデルよりわずかに高めではあるが、実測値に対する差は最大で約3℃程度である。入口温度は2次系部分モデルとほとんど差がなく、実測値と比較しても定常状態において-4℃~2℃の範囲の差である。

(3) ACS系

① ACS出口ナトリウム流量 (図4.3.6)

計算値は2次系部分モデルの解析ケースと同様に、実測値より約5~10m³/h程度高めであるが、試験結果とほぼ一致した流量の過渡変化を示している。

② ACS出入口ナトリウム温度 (図4.3.7)

ACS入口温度は $-2^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$ 程度の差で計算されており、またACS出口温度の計算値は、一時的(1000秒~2000秒)に -4°C 程度低くなるが、定常状態では実測値の変動幅の中間値から下限値の範囲にある。

(4) SG周り

①EV出口ナトリウム流量 (図4.3.8)

EV出口ナトリウム流量に関する実測値と計算値の差は、3系統の中でAループが最も大きい傾向にある。その流量差は2次系の自然循環が十分に発達したと考えられる2000秒以降で $-2\text{m}^3/\text{h} \sim 4\text{m}^3/\text{h}$ 程度である。一方、各ループの流量変化は実測データと概ね一致している。2次系部分モデル解析では汲上げ停止によって 計算開始1140秒後に $10\text{m}^3/\text{h}$ 程度の一時的な流量低下が発生したが、プラント全系モデル解析では $\pm 0.3\text{m}^3/\text{h}$ 程度の流動振動が見られるのみである。プラント全系モデルと2次系部分モデルの流量変化の比較を図4.3.9に示す。

②EV出入口ナトリウム温度 (図4.3.10)

EV入口温度変化については、プラント全系モデルと2次系部分モデルの間で特に大きな差は見られない。EV出口温度については、プラント全系モデルでは、逆流の発生による温度低下が、2次系部分モデルのケースに比べ 2°C 程度高めになっている。この温度の差は、ミキシングティからSG出口側に逆流するナトリウムの流量の差によるものと考えられ、二つのモデルでSG周りの計算条件が異なっているためではない。

4.3.3 全系モデル解析のまとめ

プラント全系解析に用いた入力データは、1次系と2次系を個別にモデル化した二つのデータセットを統合して作成した。このプラント全系解析用データを用いて、2次系部分モデル解析と同じSKS自然循環模擬試験解析を実施した結果、1次系(強制循環運転)と2次系(自然循環運転)の冷却材流量がアンバランスな運転モードにおいても、温度計あるいは流量計の測定誤差範囲以内($\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 13\text{m}^3/\text{h}$)でプラント過渡挙動を予測できることを確認した。また、2次系部分モデル解析とプラント全系解析の計算値を比較すると、プラント全系解析で境界条件となる1次系ポンプ入熱量の影響により、2次系の系統温度が 1°C 程度高くなる点を除けば、系統全般の温度変化ならびにコールドレグとホットレグの温度差、流量変化等が2次系部分モデル解析とよく一致すること

を確認した。

4.4 考察

検証解析に用いた試験データを分析した結果、1次冷却系自然循環予備評価試験では原子炉容器出入口ならびにIHX 1次側出口の配管内で冷却材の温度成層化の発生が考えられた、また、SST冷却系自然循環模擬試験でもミキシングティから蒸発器出口までの水平配管で同様な温度成層化の発生が見られた。各試験の自然循環流量は定格流量の1～2%程度であり、配管内冷却材の平均流速も毎秒3cm～10cm程度である。また、原子炉容器出入口水平配管におけるリチャードソン数（Ri数）を配管内層化流動水試験の評価法¹²⁾により検討した結果、Ri数（出口側27、入口側6.2）は配管内冷却材の温度成層化のしきい値（Ri数>5）を超えていることから、温度成層化が発生していた可能性が極めて高い。この温度成層化の発生は自然循環流量が小さいためであり、実機条件では3～4%の流量となり、その影響は小さくなることが考えられる。なお、原子炉容器出入口水平配管のRi数の定義条件については表4.4を参照されたい。

原子炉容器やIHX容器あるいはポンプ容器を逆U字管で接続し、崩壊熱除去系に直接炉心冷却システム（DRACS）の採用を予定しているFBR実証炉では、崩壊熱除去系運転時の1次系自然循環流量は定格流量の1～2%程度になるとともに、逆U字管の上部流入出配管の水平部において温度成層の発生が予想される。よって、プラント動特性解析コードで自然循環特性を精度良く評価するには、配管内部の温度成層化現象の模擬が必要とされる。

5. おわりに

モジュール型汎用プラント動特性解析コードSuper-COPDの改良・検証の一環として、①自然循環解析への適用性、②「もんじゅ」性能試験の自然循環測定の評価手法としての妥当性を確認する目的で、「もんじゅ」試運転期間中に実施した自然循環試験データによる検証解析を行った。実施内容および検証解析の成果をまとめると以下のようになる。

(1) 実施内容

① 1次主冷却系システム入力データの整備

炉心部の構造データを模擬燃料集合体の設計・製作条件に基づいて見直した。また、径方向ブランケット集合体、中性子遮蔽体および制御棒の炉心バイパスチャンネル、中間胴プレナムおよび炉容器下部プレナムの熱容量および伝熱中心高さ等を検討し、その結果に基づいてシステム入力データを整備した。

② 1次系部分モデルによるパラメータ解析

1次冷却系自然循環予備試験解析では、中間熱交換器の2次側入口温度と2次系流量を境界条件する1次系部分モデルを用いて、炉内熱計算体系（模擬炉心体系、実炉心体系）と1次系圧力損失（設計条件、設計補正条件）の組み合わせ感度を把握するパラメータサーベイを行った。その結果、模擬炉心体系と設計補正条件を組み合わせた場合が計算値と実測値との差が小さく、体系の模擬と入力データの精度の高さの重要性が確認できた。

③ 2次系部分モデルによるパラメータ解析

SST自然循環模擬試験解析では、2次系オーバーフロー汲上げの有無をパラメータとして、それが2次系の自然循環流量や系統温度に及ぼす影響を評価した。このパラメータ解析は、中間熱交換器の1次側入口温度と1次系流量に実測値を境界条件する2次系部分モデルを用いて実施した。パラメータ解析の結果、オーバーフロー汲上げ系の運転を模擬したケースでは、汲上げ停止後の2次系自然循環流量やミキシングティから蒸発器出口側に向かって逆流する際の冷却材温度応答等が改善された。

④ プラント全系モデルによるSST自然循環模擬試験解析

原子炉容器から蒸気発生器までを計算対象とするプラント全系モデルを、1次系および2次系の各部分モデルを統合して作成した。このプラント全系モデルを用いてSST自然循環模擬試験解析を実施した結果、計算値は実測値を温度計および流量計の測定誤差範囲以内で予測できることを確認した。また、2次系部分モデルを用いた計算結果との比較では、境界条件として入力したポンプ入熱の影響でプラント全系の温度が1°C程度高くなった点を除けば、温度および流量変化

は2次系部分モデルの計算結果と良く一致することを確認した。

(2) 検証解析のまとめ

自然循環模擬試験結果を検証データとして、Super-COPDの自然循環解析への適用性ならびに「もんじゅ」自然循環測定試験の評価手法としての妥当性を検討した。プラントシステム内の温度および流量に対するコードの予測精度は、いずれも計測器の測定誤差範囲内であり、自然循環状態における実測値と計算値との差は以下の通りであった。

① 1次冷却系自然循環予備評価試験結果

- a) 1次系自然循環流量 ± 5 %以内
- b) 原子炉容器出口温度 - 3 ℃程度 (但し、鉛直方向温度分布の中間値)
- c) IHX 1次側出口温度 ± 1 ℃以内 (但し、鉛直方向温度分布の中間値)
- d) 原子炉容器入口温度 ± 2 ℃以内

② SST自然循環模擬試験結果 (プラント全系モデル解析ベース)

- a) ACS 自然循環流量 + 5 ~ 10%
- b) 2次系自然循環流量 + 5 ~ 10%
- c) SG側自然循環流量 - 2 ~ + 4 m³/h
- d) ACS 入口温度 ± 2 ℃以内
- e) ACS 出口温度 実測値の変動幅の下限値～中間値の範囲で一致
- f) IHX 2次側入口温度 - 4 ~ + 2 ℃以内
- g) IHX 2次側出口温度 + 3 ℃以内
- h) 蒸発器入口温度 + 3 ℃以内
- i) 蒸発器出口温度 熱輸送遅れ時間については、ミキシングティから蒸発器出口までの水平配管内で温度成層化現象が生じていると考えられるため、
1次元解析では十分な精度が得られない。

6. 謝辞

本コードの検証解析を遂行するにあたり、解析用入力データの修正、計算の実行、計算結果の転送およびファイル変換処理等を担当していただいた原子力システム（株）岩崎 隆氏に対して、ここに心から謝意を表わします。

7. 参考文献

- 1) 仲井、他；”モジュール型プラント動特性解析コードSuper-COPD 一コードシステム解説書－”
PNC N9520 88-019
- 2) 三菱原子力工業(株)；”もんじゅ設計用動特性解析コードの開発 動特性解析コードの開発1”
PNC SJ206 79-28(1)
- 3) 三菱原子力工業(株)；”もんじゅ自然循環解析コード(NATURAL)の整備(1) 成果報告書”
PNC SJ206 82-14
- 4) 江沼、他；”もんじゅ自然循環測定試験計画（その1）”, PNC ZN9410 94-278
- 5) 大滝、他；”モジュール型プラント動特性解析コードSuper-COPDの開発 一もんじゅ総合機能試験データによる検証－”, PNC ZN9410 95-060
- 6) 戸田、他；”高速炉における自然循環崩壊熱除去に関する研究（4）－集合体内流量再配分におけるばす集合体間熱移行効果－”, PNC TN9410 91-458
- 7) 小松崎、他；”炉心プレナム相互作用ナトリウム試験－集合体内への低温流体潜り込み現象－”
, PNC ZN9410 95-084
- 8) 桃井、他；”自然循環時のインターラッパフロー現象に関する研究－PLNDTL-DHXを用いたナトリウム過渡試験－”, PNC ZN9410 95-279
- 9) 大畑、他；”高速増殖原型炉「もんじゅ」性能試験報告書－1次冷却系自然循環予備評価（その1）－”, PNC PN2410 93-041
- 10) 平山、他；”高速増殖原型炉「もんじゅ」総合機能試験報告書－冷却系自然循環模擬試験(SKS-100-Na-10)－”, PNC PN2410 93-034
- 11) 石崎、他；”もんじゅ主冷却系ウェル型熱電対Na中応答特性試験”, PNC ZN9410 93-130
- 12) 払場、他；”原型炉「もんじゅ」電磁流量計校正試験報－二次主冷却系電磁流量計校正試験－”
PNC PN9410 91-354
- 13) FBEC、他；”原型炉総合機能試験予測解析のための入力データの整備（II）別冊：データ集”
PNC ZN2449 90-001(3)
- 14) 成田；”モジュール型プラント動特性解析コード(Super-COPD)の検証解析－もんじゅ2次系自然循環試験解析－”, PNC PN9450 95-011
- 15) 平尾、他；”「常陽」自然循環試験評価（III）配管内層化流動試験”, 日本原子力学会昭和58年秋の大会, D24

表4.1.1 監視用計器による温度測定値

ループ	採取日	採取時刻	原子炉容器出口温度 (°C)				IHX 1次側出口温度 (°C)			
			TE1A	TE1B	TE1C	TE3	TE4A	TE4B	TE4C	TE5
A	2/19	13:36	325.0	324.5	326.0	325.0	324.0	322.0	322.0	325.0
		14:00	322.0	320.9	323.0	322.0	309.0	307.0	307.0	309.0
		14:27	317.0	316.3	318.0	317.0	299.0	290.0	290.0	299.0
		14:50	316.0	312.6	316.0	315.0	288.0	286.0	286.0	290.0
		15:10	316.0	313.8	317.0	316.0	293.0	291.0	291.0	294.0
		15:25	315.0	312.9	316.0	315.0	290.0	288.0	288.0	291.0
		15:50	312.0	306.6	310.0	309.0	284.0	282.0	282.0	284.0
		16:09	309.0	303.9	307.0	307.0	279.0	278.0	278.0	280.0
		18:27	289.0	285.1	288.0	288.0	271.0	270.0	270.0	273.0
B	2/19	13:36	326.0	323.8	325.0	324.0	324.0	323.0	326.0	
		14:00	322.0	320.3	322.0	321.0	309.0	309.0	309.0	311.0
		14:27	318.0	315.7	317.0	317.0	301.0	293.0	293.0	303.0
		14:50	317.0	311.3	313.0	313.0	289.0	289.0	288.0	290.0
		15:10	317.0	313.2	315.0	314.0	291.0	291.0	291.0	292.0
		15:25	315.0	312.3	314.0	314.0	288.0	288.0	288.0	290.0
		15:50	312.0	307.6	310.0	309.0	283.0	283.0	283.0	285.0
		16:09	310.0	304.2	307.0	306.0	279.0	279.0	278.0	281.0
		18:27	290.0	285.1	288.0	287.0	271.0	270.0	270.0	273.0
C	2/19	13:36	324.0	323.8	326.0	324.0	324.0	322.0	318.0	324.0
		14:00	322.0	320.6	323.0	321.0	309.0	307.0	303.0	310.0
		14:27	317.0	315.7	318.0	317.0	300.0	290.0	287.0	301.0
		14:50	316.0	311.6	315.0	314.0	288.0	285.0	281.0	289.0
		15:10	315.0	312.9	316.0	315.0	291.0	289.0	286.0	292.0
		15:25	314.0	312.9	316.0	315.0	289.0	287.0	284.0	292.0
		15:50	311.0	307.0	310.0	309.0	283.0	281.0	278.0	284.0
		16:09	308.0	303.9	307.0	306.0	279.0	277.0	274.0	280.0
		18:27	289.0	284.8	288.0	288.0	270.0	268.0	265.0	271.0

表4.1.2 1次系圧力損失データ

	設計値		設計補正值		
	A系 0.90386	B系 0.89364	C系 0.89953		
ポンプヘッド比	1.0				
部 位	P_0 (kg/m ²)	指 指数	P_0 (kg/m ²)	P_0 (kg/m ²)	P_0 (kg/m ²)
出口ノズル	0.023E+4	2.00	0.021E+4	0.021E+4	0.021E+4
内筒フローホール	0.013E+4	1.97	0.012E+4	0.012E+4	0.012E+4
炉内構造物等	5.163E+4	1.97	4.667E+4	4.614E+4	4.644E+4
入口ノズル	0.782E+4	2.00	0.707E+4	0.699E+4	0.703E+4
R/V出口ノズル～IHX 1次入口ノズル	0.089E+4	1.97	0.080E+4	0.080E+4	0.080E+4
IHX 1次入口ノズル～同出口ノズル	0.250E+4	1.90	0.226E+4	0.223E+4	0.225E+4
IHX 1次出口ノズル～POFC戻合流	0.032E+4	1.97	0.029E+4	0.029E+4	0.029E+4
POFC戻り配管合流点～ポンプ	0.033E+4	1.97	0.030E+4	0.029E+4	0.030E+4
ポンプ～R/V入口ノズル	0.286E+4	1.97	0.259E+4	0.256E+4	0.257E+4
電磁流量計	0.018E+4	1.00	0.016E+4	0.016E+4	0.016E+4
逆止弁	0.409E+4	2.00	0.370E+4	0.365E+4	0.368E+4

(備考)

 P_0 ：基準流量 W_0 に対する基準圧力損失 (kg/m²)

Super-COPDコードでは、圧力損失を次式により計算する。

$$\Delta P = P_0 (W / W_0)^n$$

 ΔP : 圧力損失 (kg/m²) W : 流量 (kg/sec) n : 圧力損失指数 (-)

ポンプヘッド比 : 実機ポンプヘッド／設計ポンプヘッド

表4.4 原子炉出入口水平配管での温度成層化

項目	記号	単位	出口配管	入口配管	備考
内 径	D _i	m	0.7906	0.5906	
流路断面積	A _i	m ²	0.49091	0.27395	
流 量	Q	m ³ /hr	60	60	試験開始2500秒 ～3500秒までの Cループの平均
流 速	U	m/sec	3.4E-02	6.1E-02	
温度変化域		°C	325 → 310	310 → 295	
密度変化幅	Δ ρ	kg/m ³	3.5	3.5	
基準密度	ρ	kg/m ³	874.0	877.5	
リチャードソン数	Ri	—	27	6.2	

$$Ri = \Delta \rho \cdot g \cdot D_i / (\rho \cdot U^2)$$

g : 重力加速度 = 9.8 m/sec²

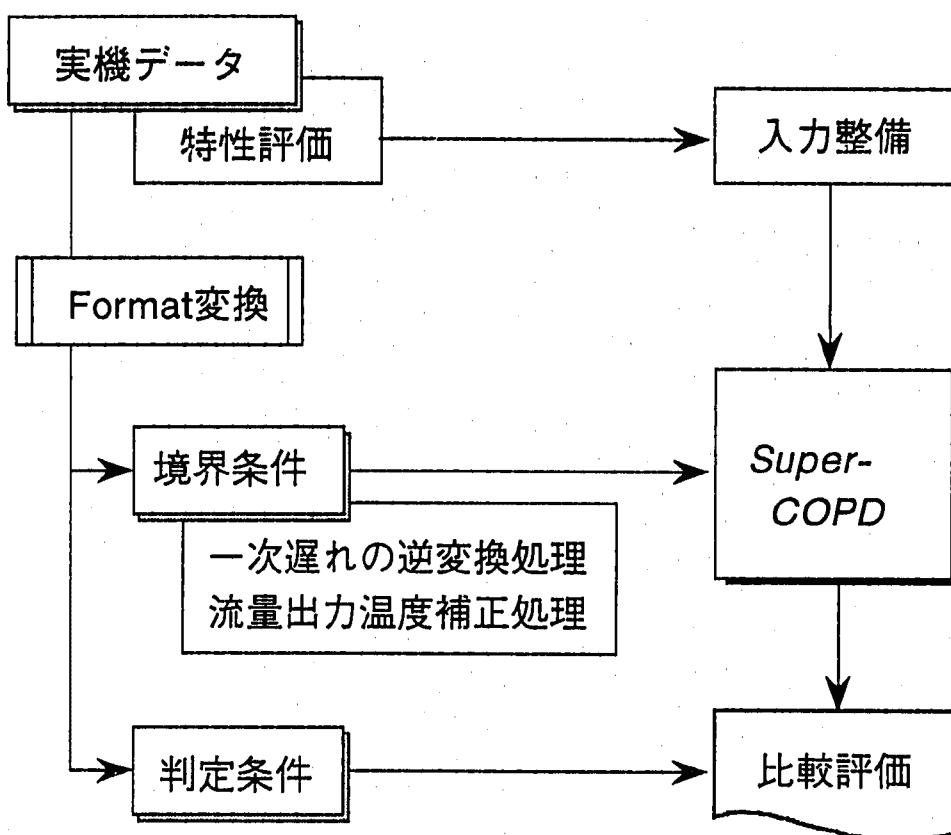


図 3.1.1 実機データの処理フロー

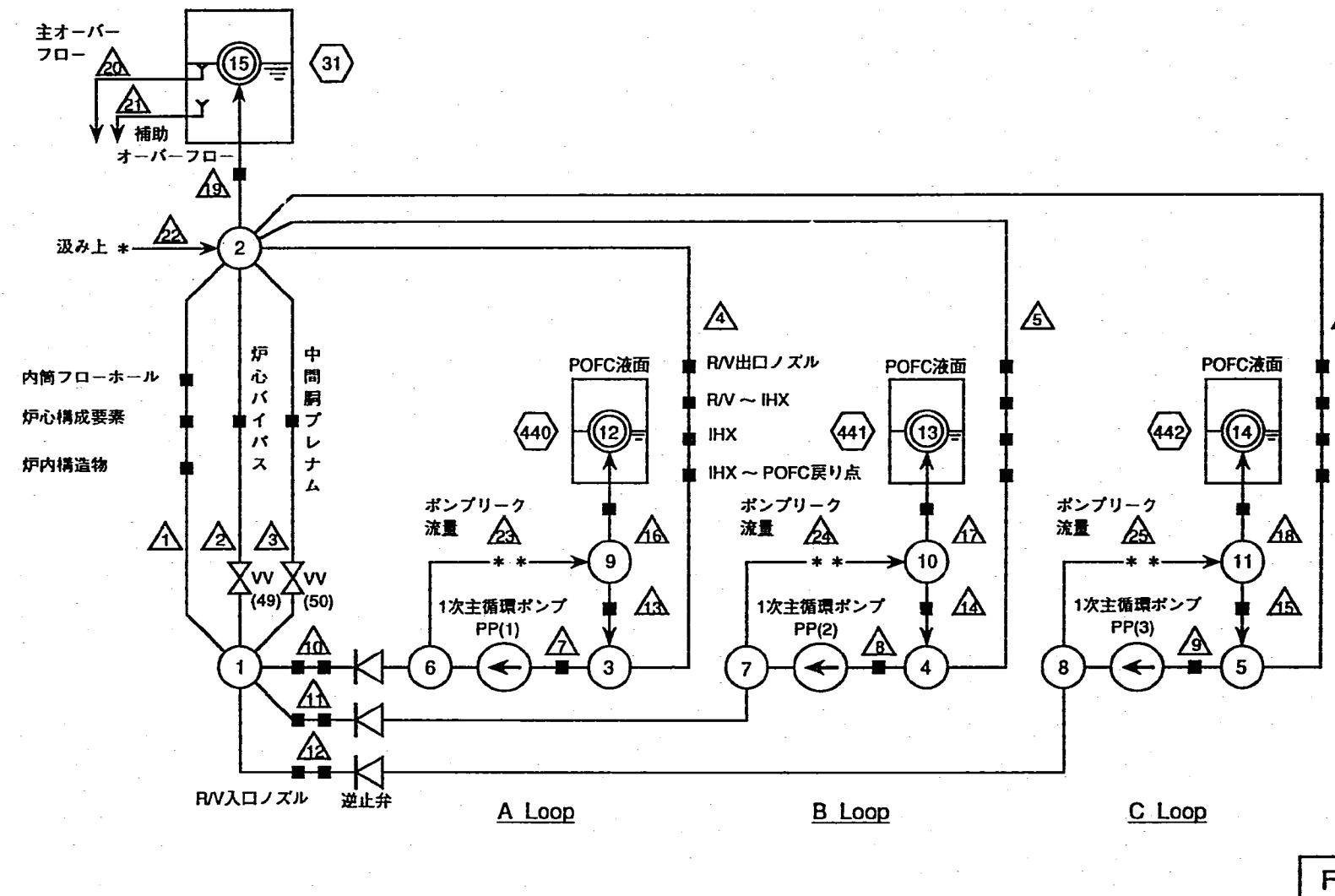


図3.3.1 1次系流動計算体系

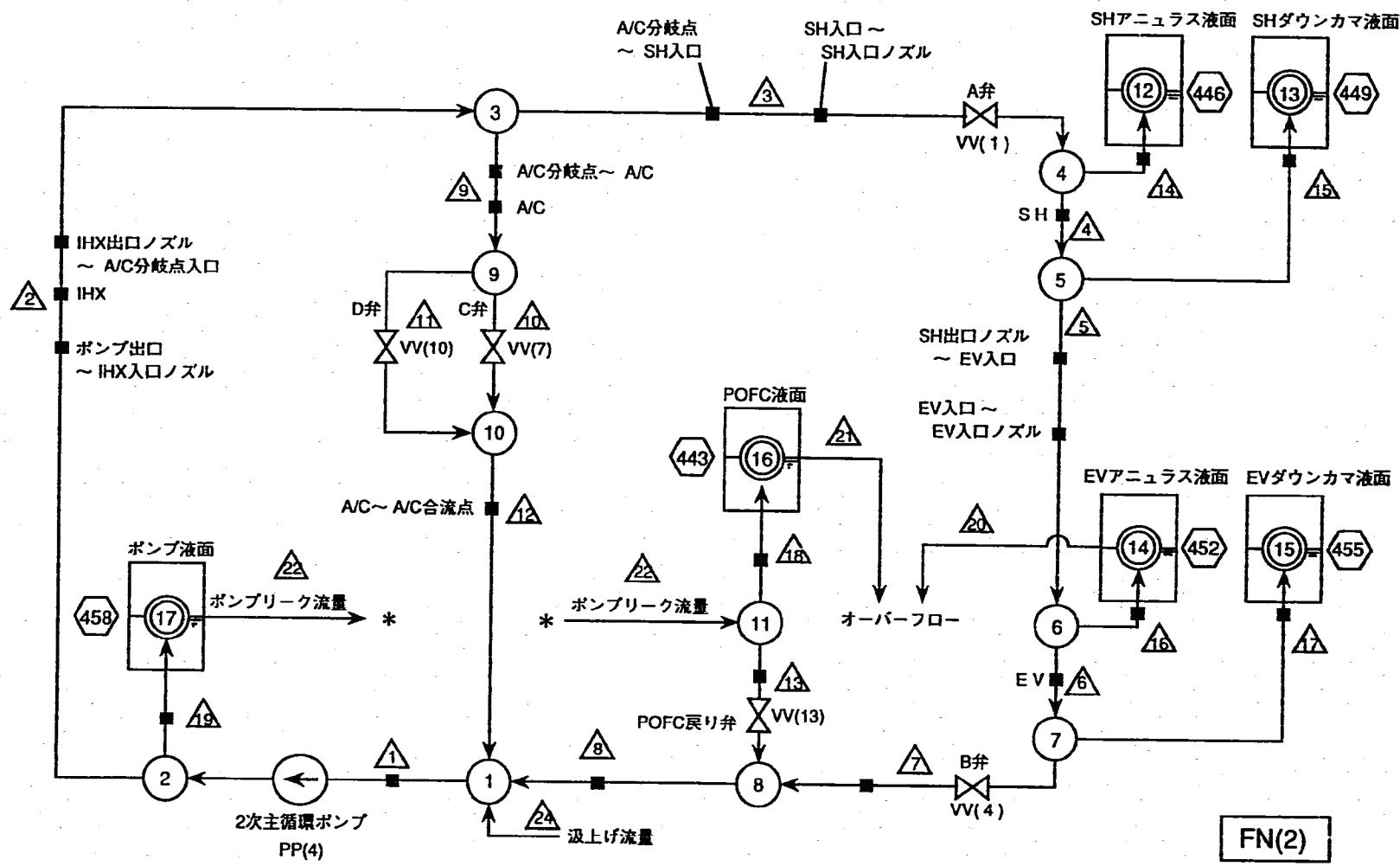


図3.3.2 2次系流動計算体系 (Aループ)

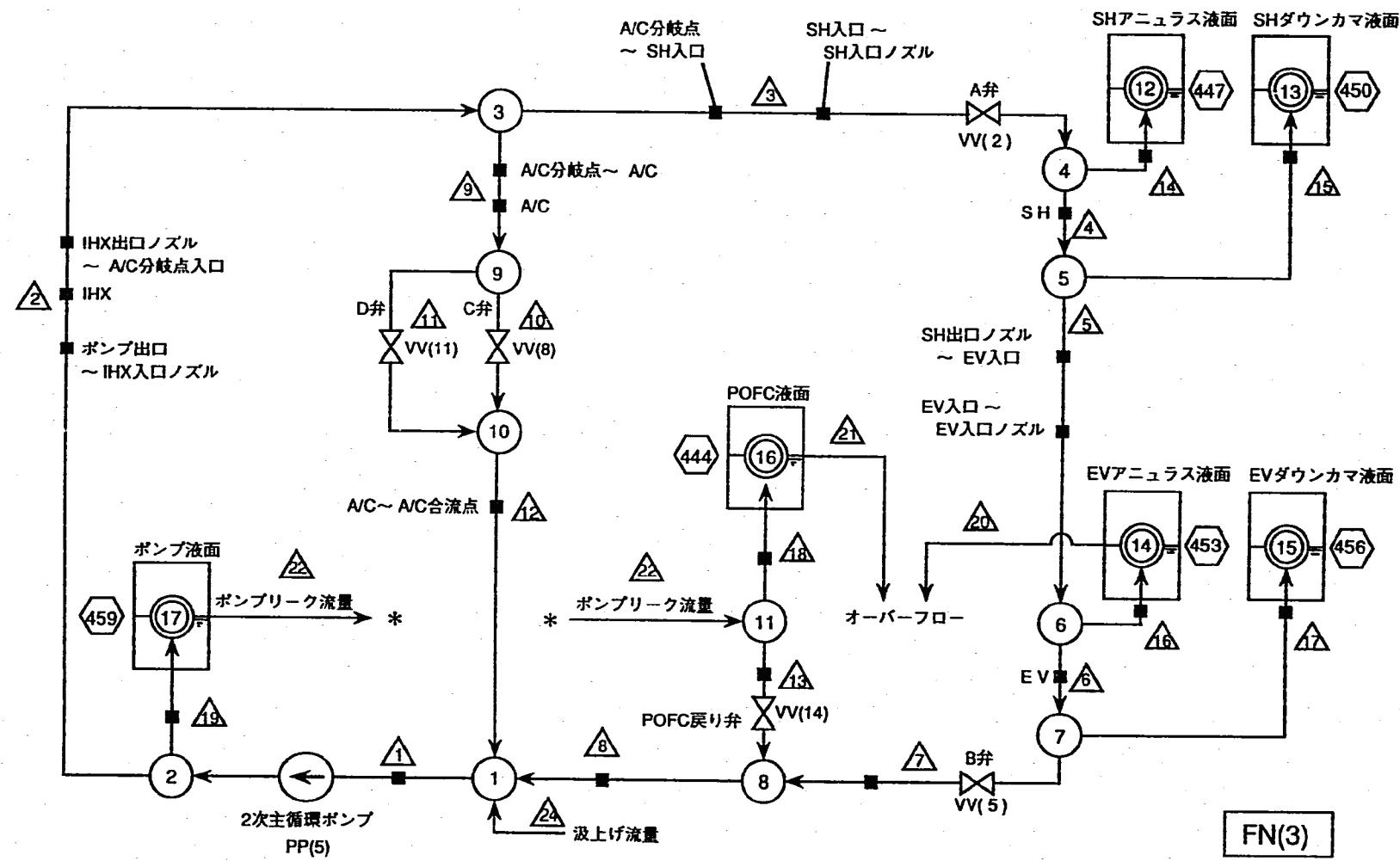


図3.3.3 2次系流動計算体系 (Bループ)

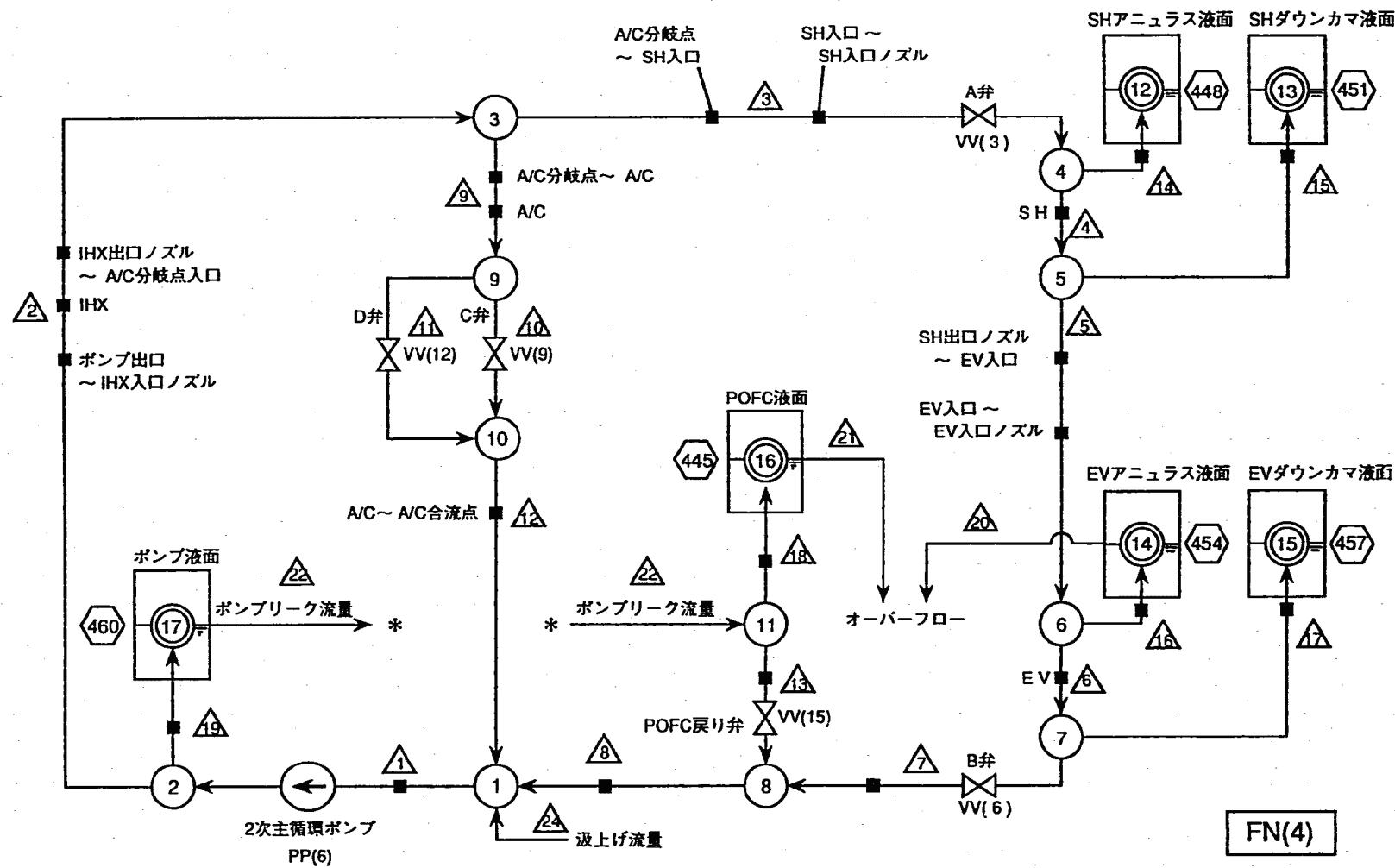


図3.3.4 2次系流動計算体系 (Cループ)

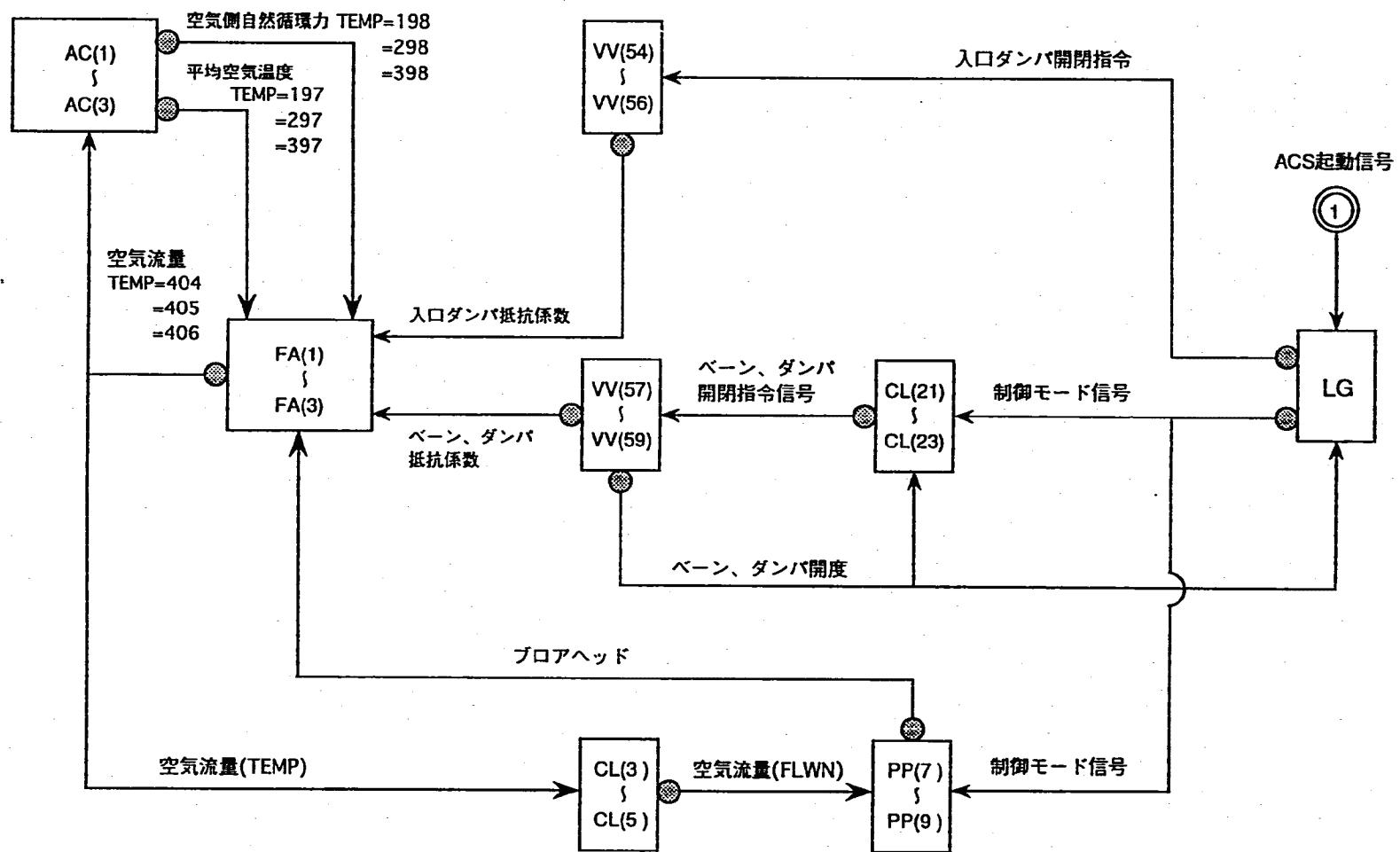


図3.3.5 ACS空気側流動計算体系

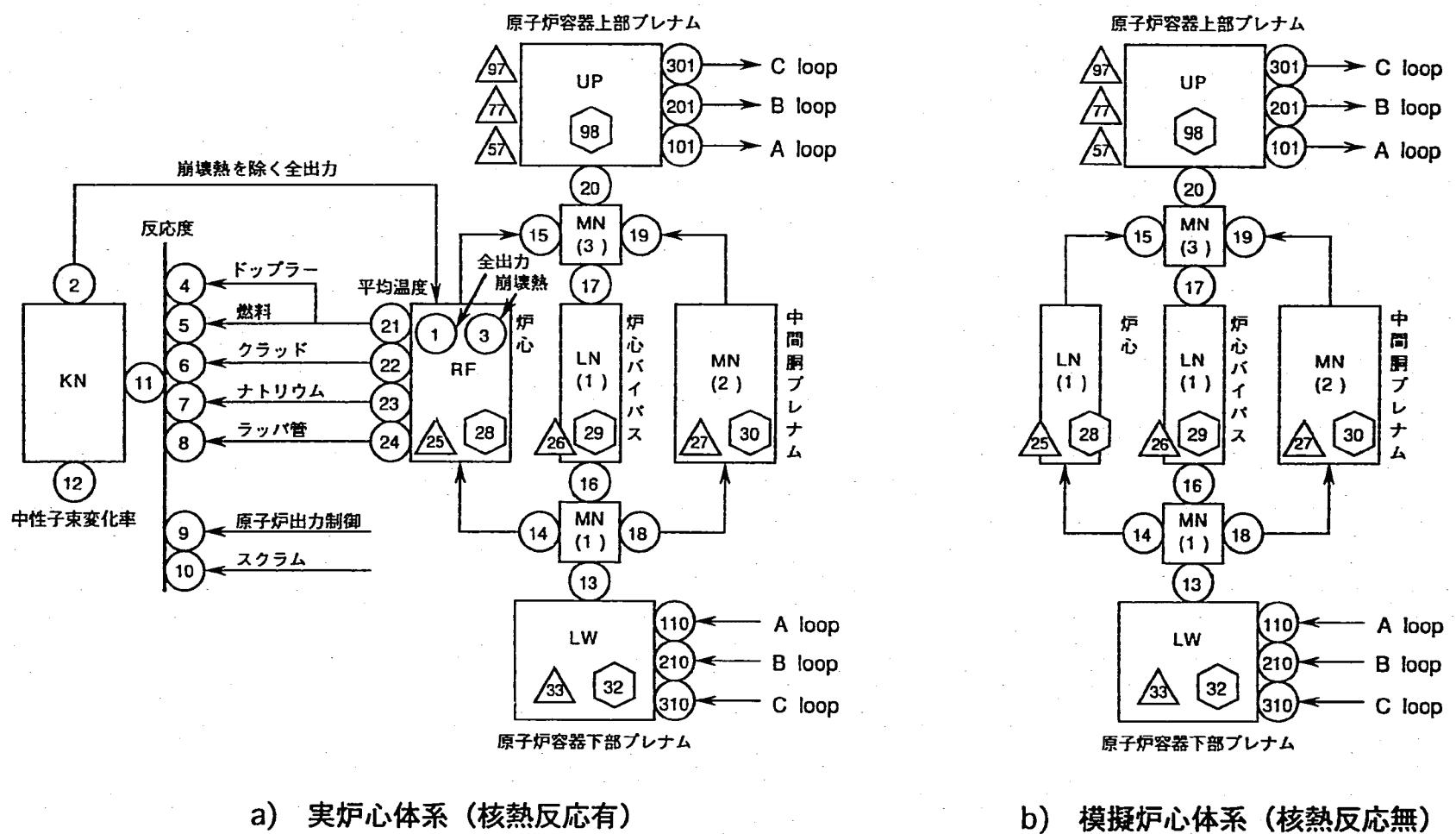


図3.3.6 原子炉容器内計算体系

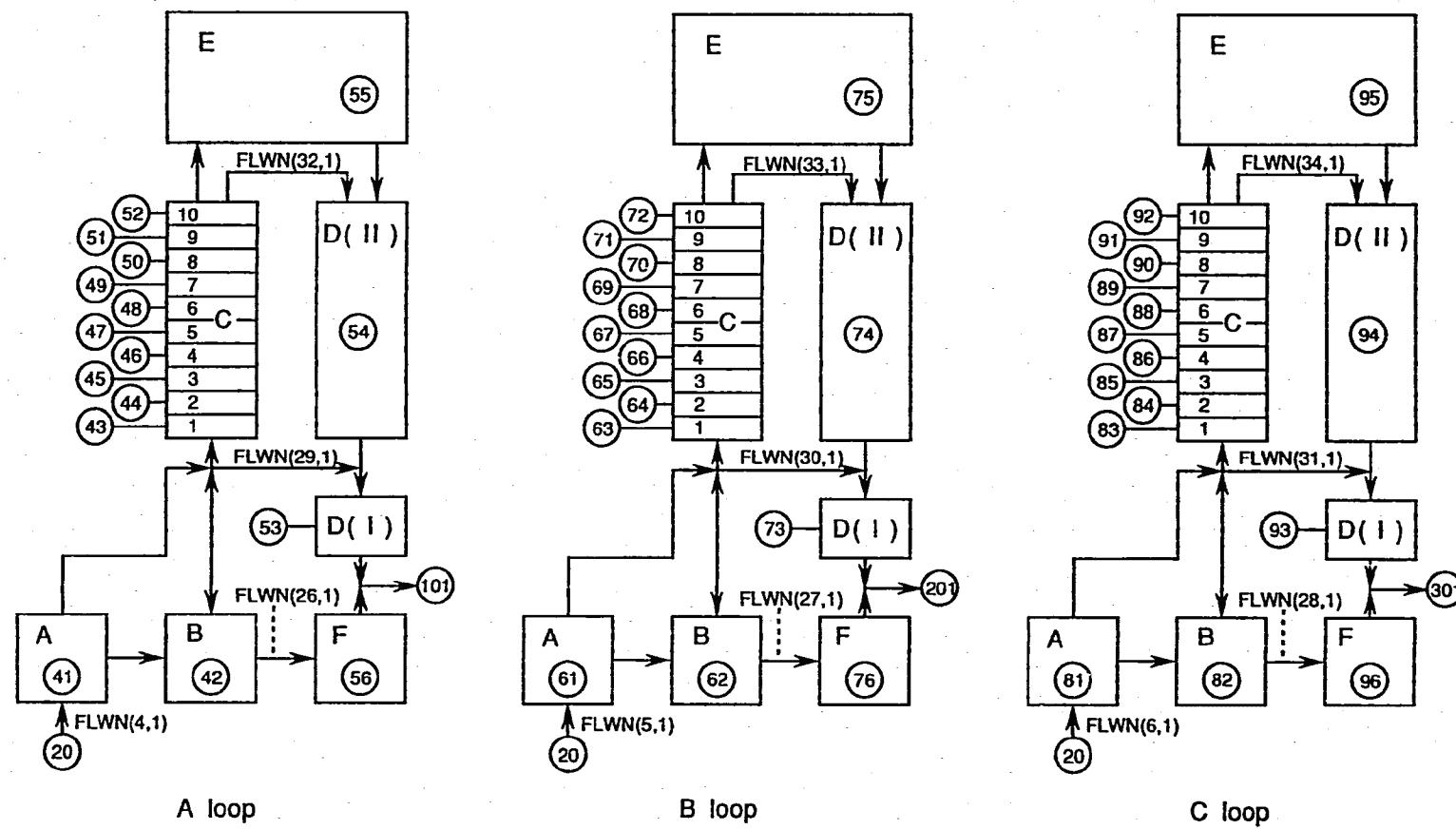


図3.3.7 炉容器上部プレナム計算体系

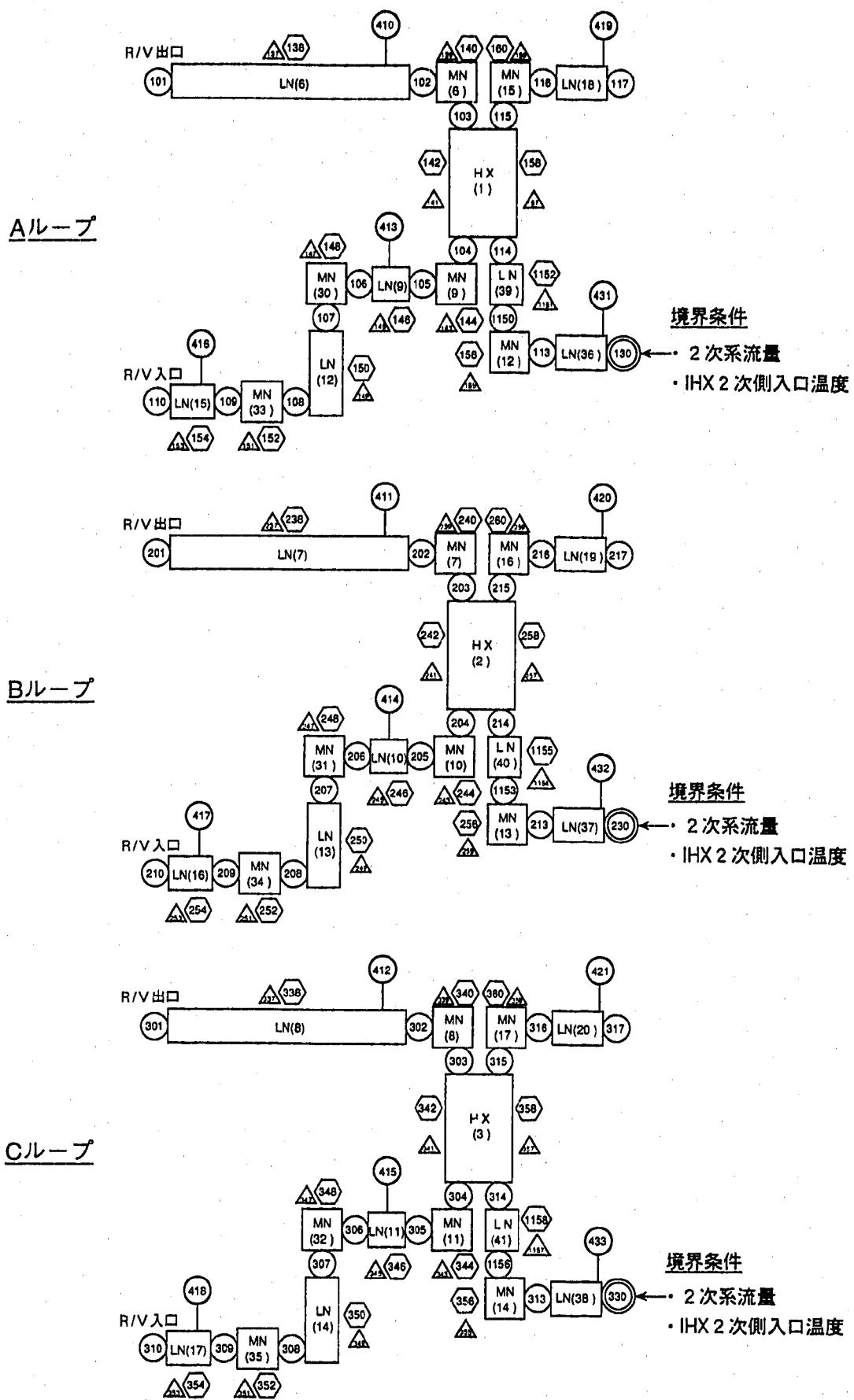


図3.3.8 1次系熱計算体系

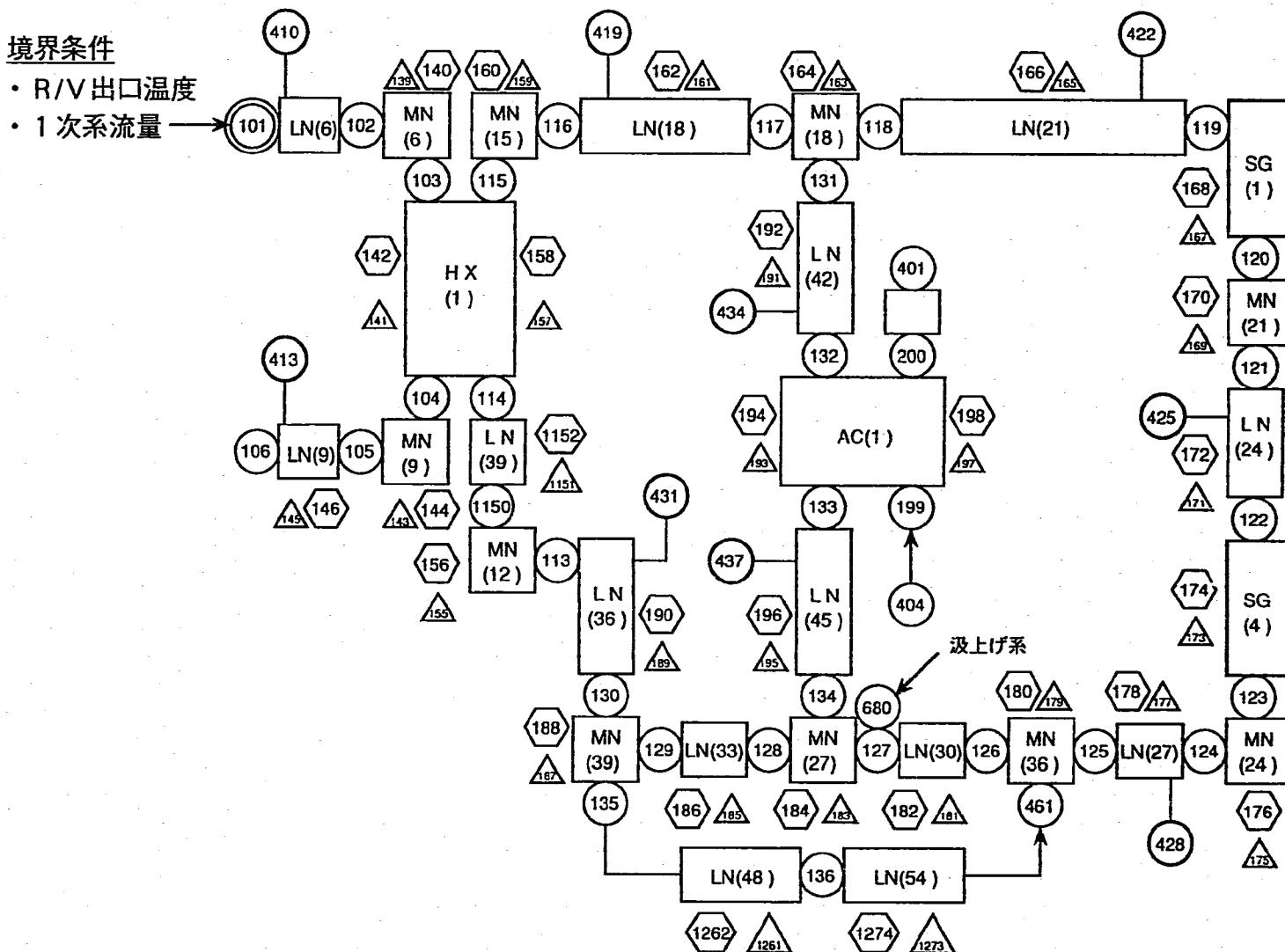


図3.3.9 2次系熱計算体系 (Aループ)

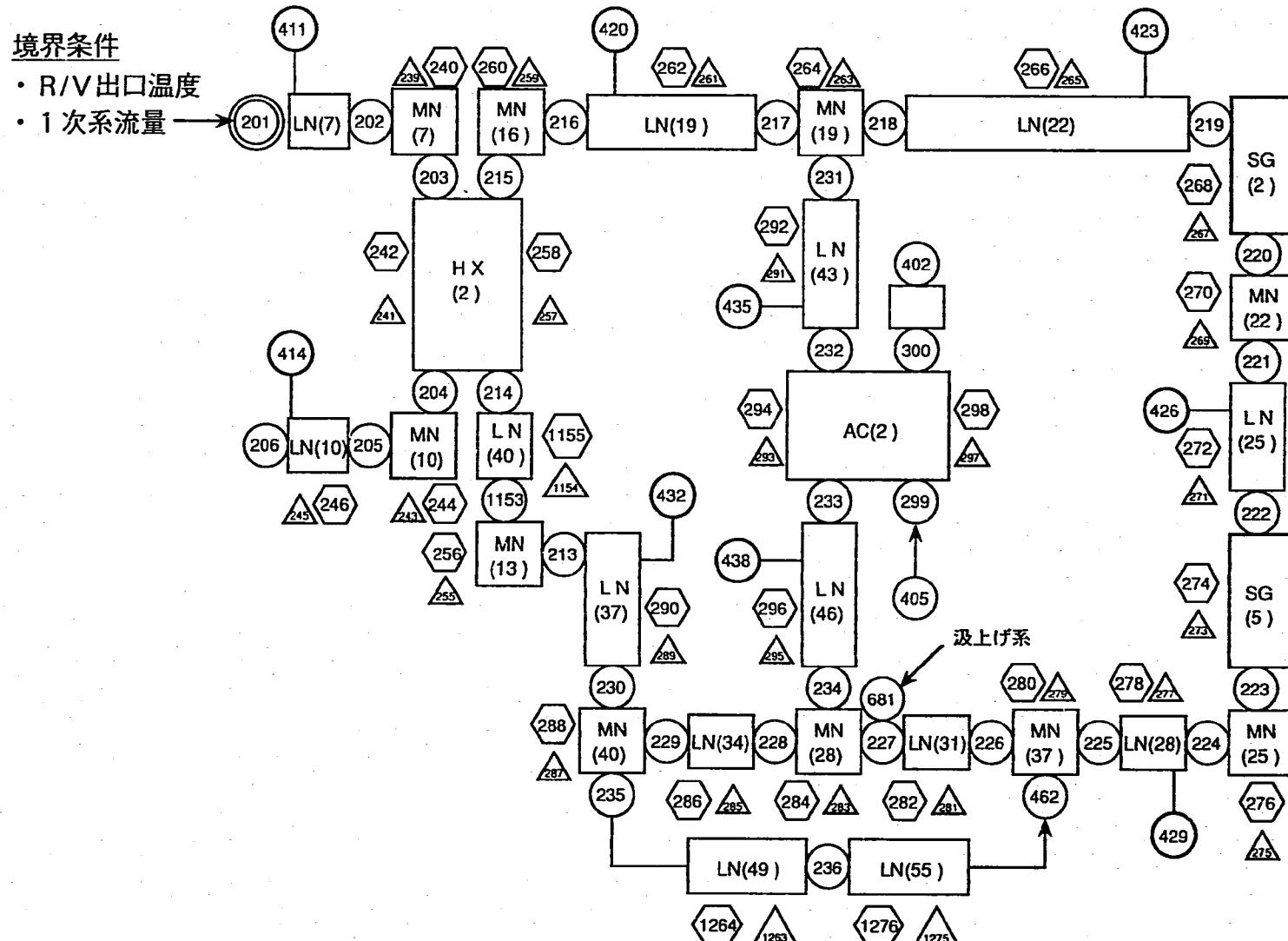


図3.3.10 2次系熱計算体系 (Bループ)

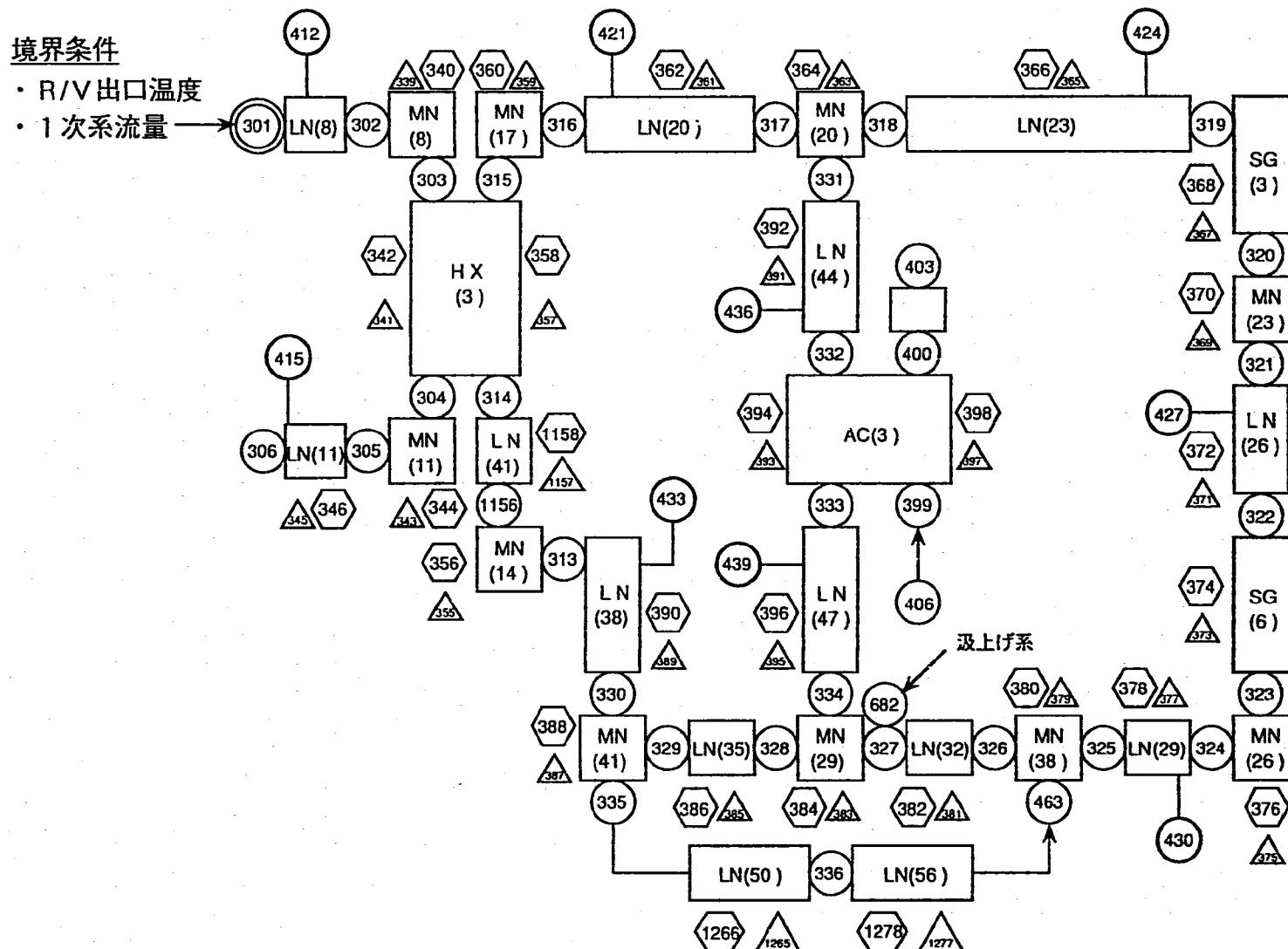


図3.3.11 2次系熱計算体系 (Cループ)

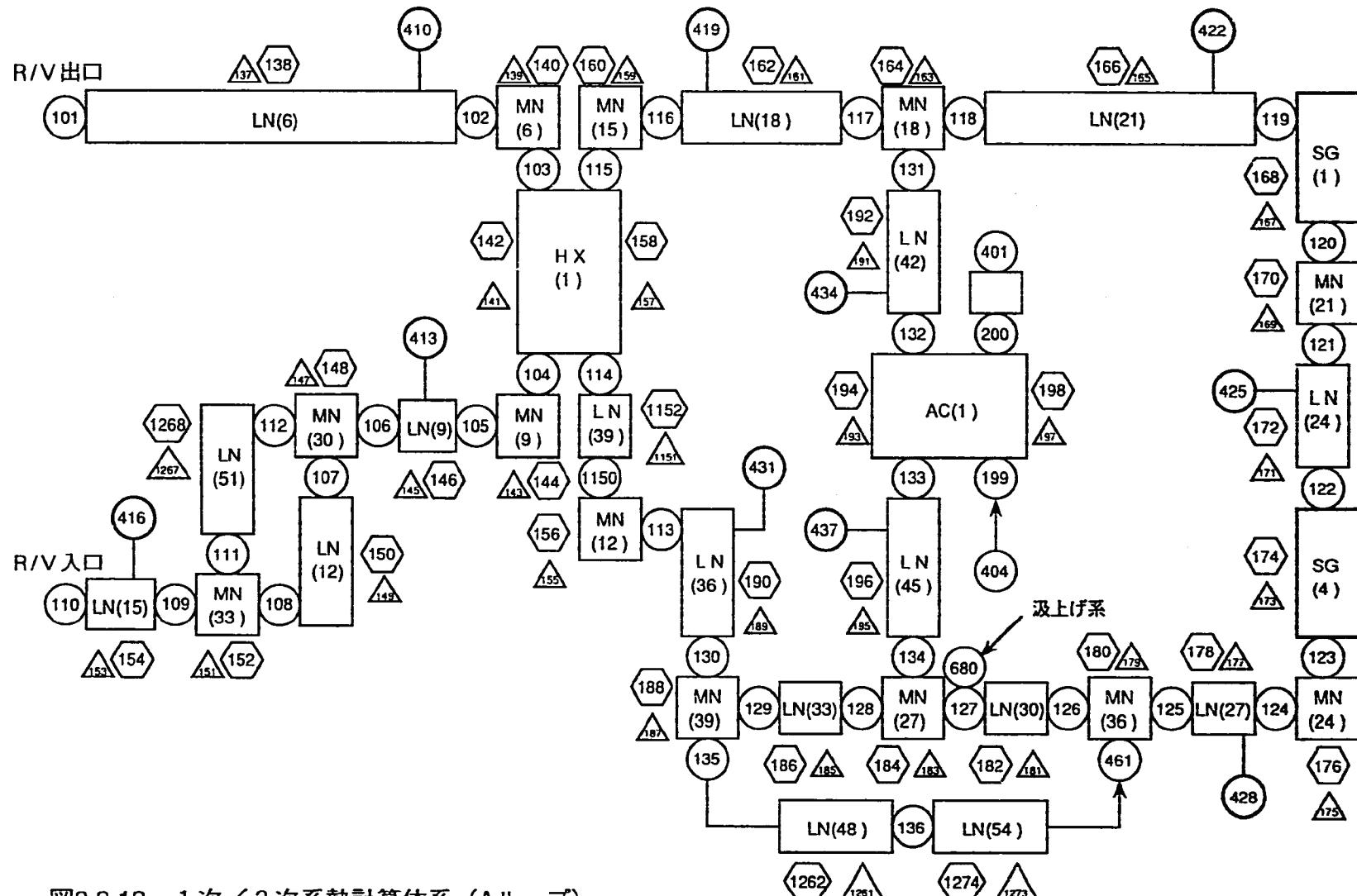


図3.3.12 1次／2次系熱計算体系 (AJループ)

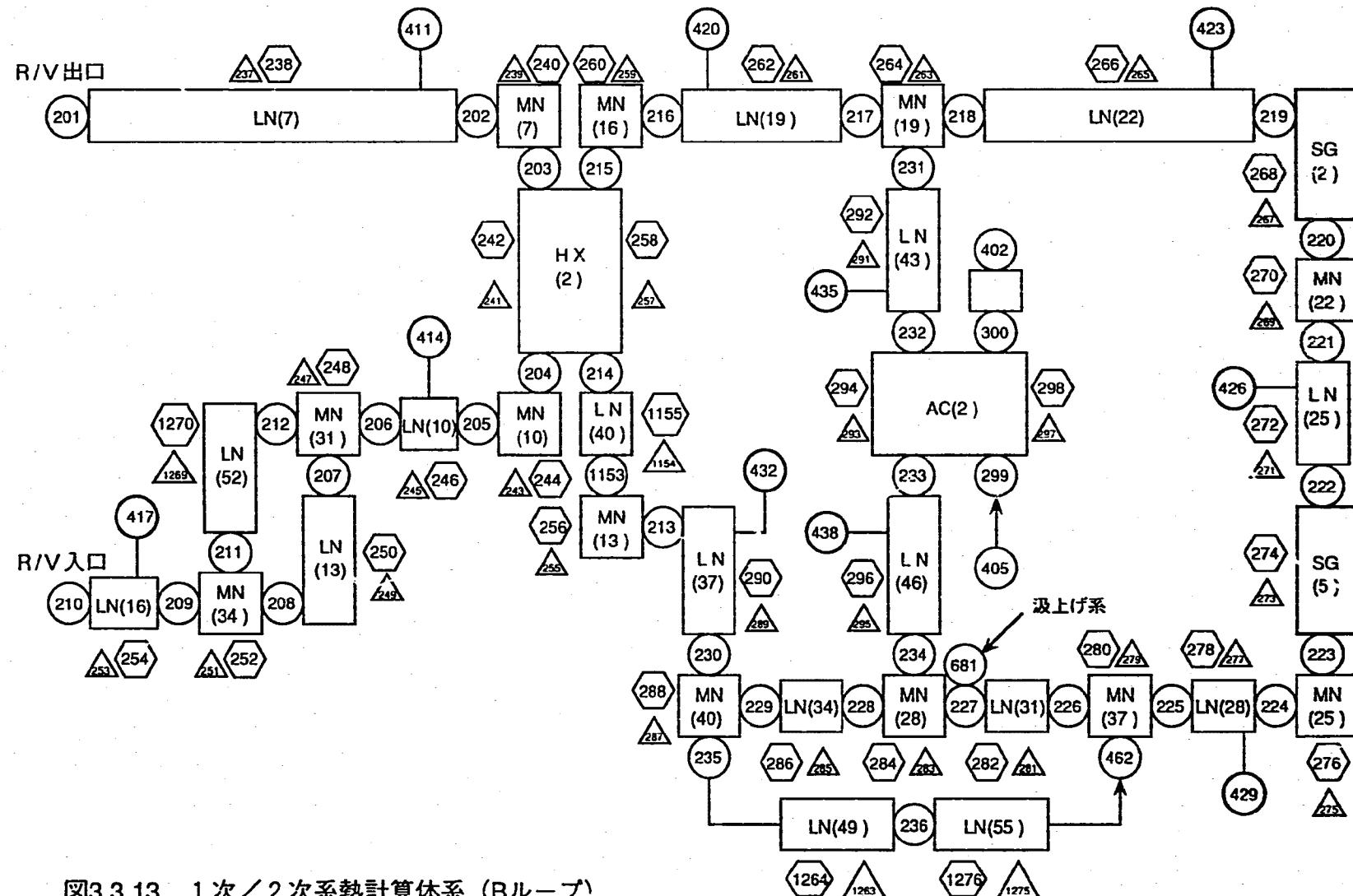


図3.3.13 1次／2次系熱計算体系 (Bループ)

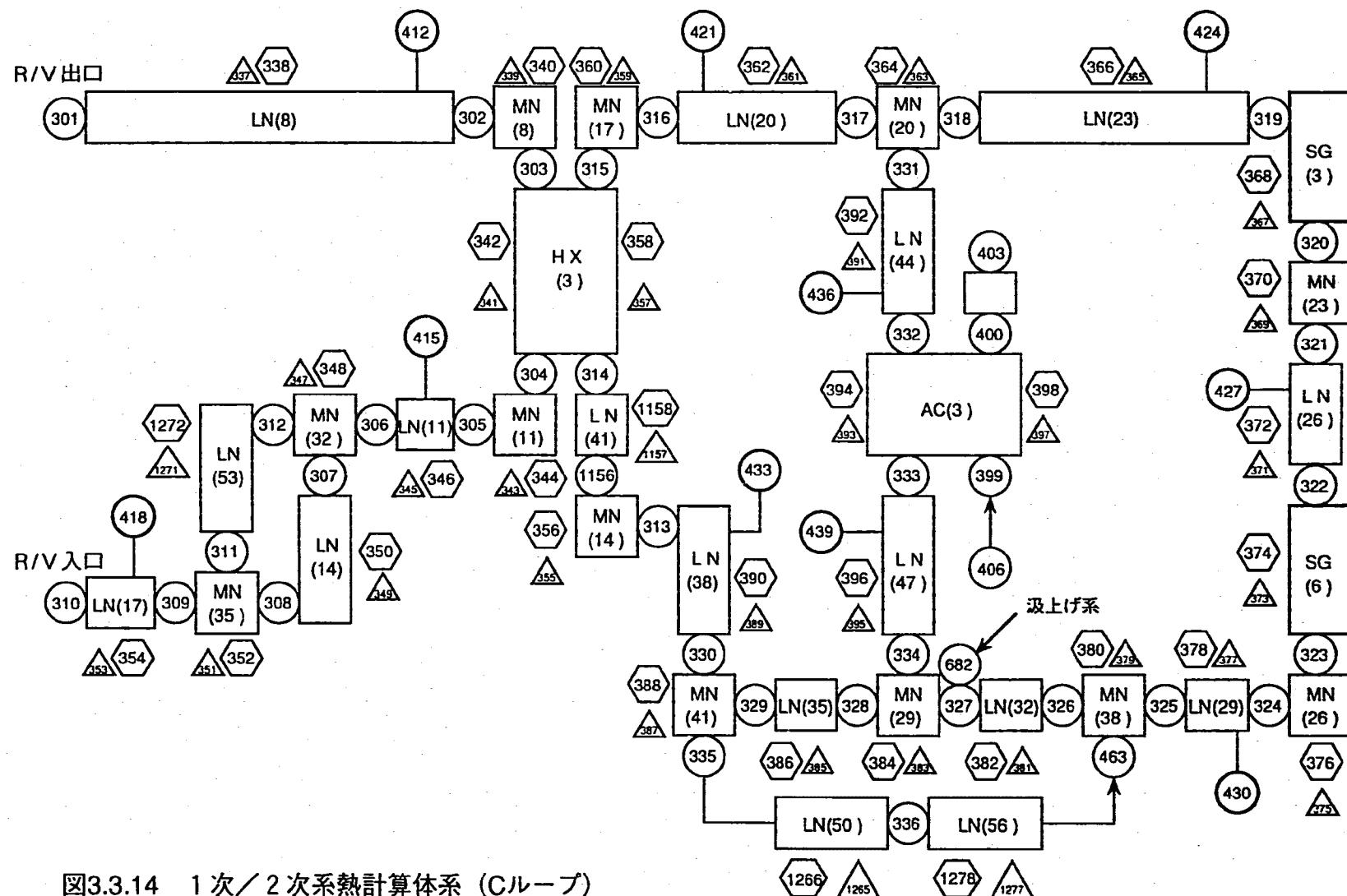


図3.3.14 1次／2次系熱計算体系 (Cループ)

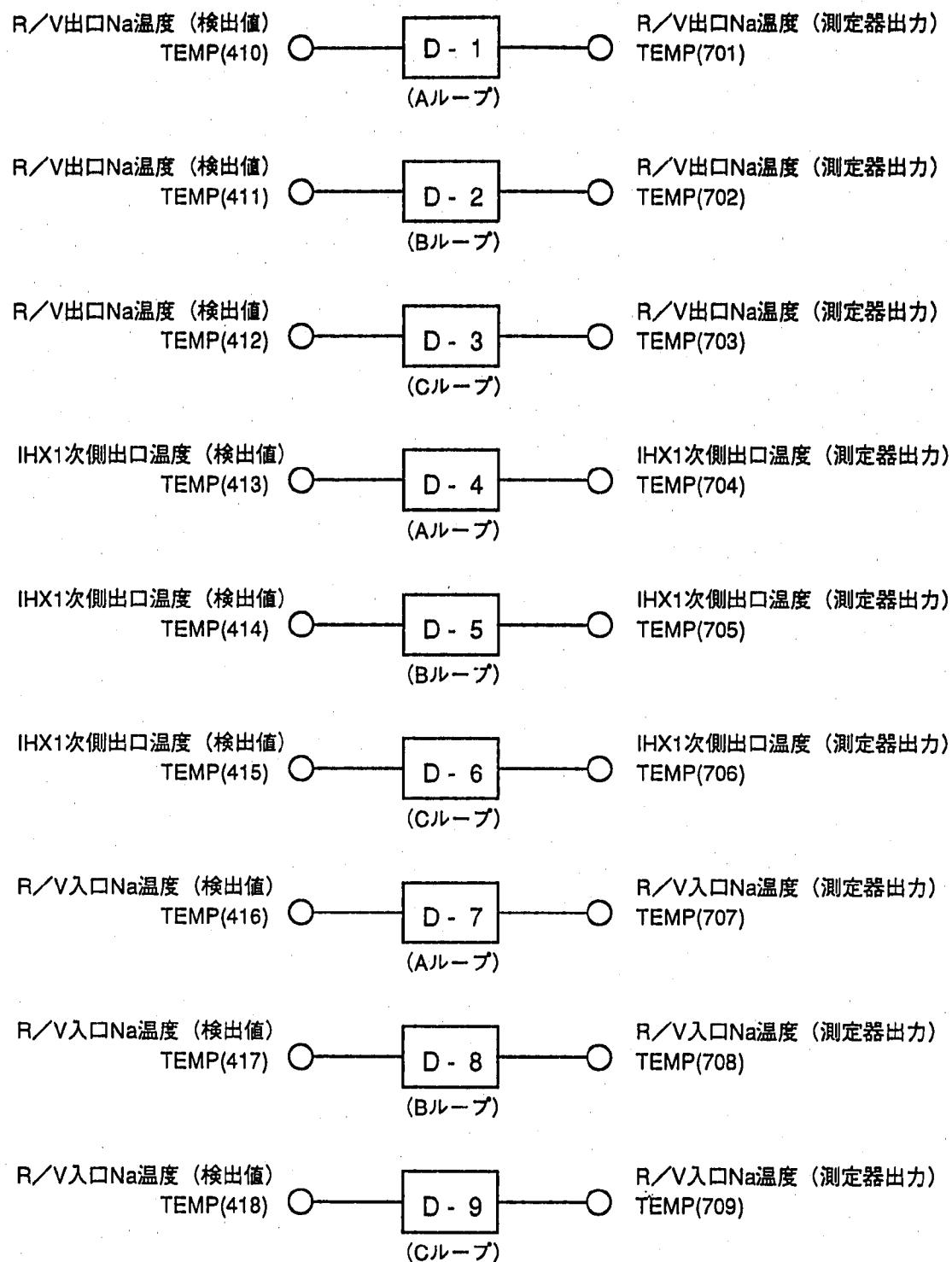
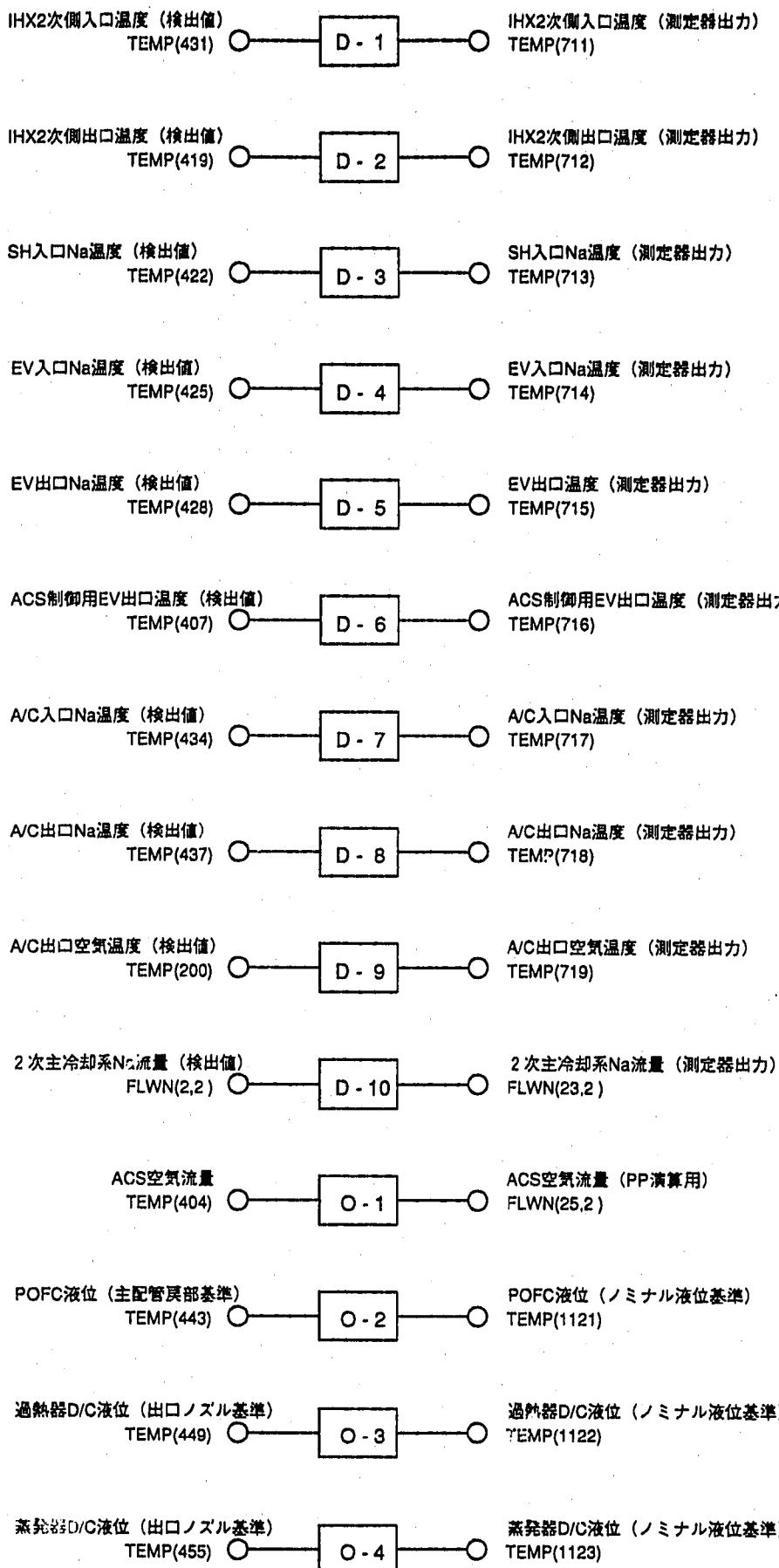


図3.3.15 1次系各種測定器出力



CL(3)

図3.3.16 2次系各種測定器出力 (Aループ)

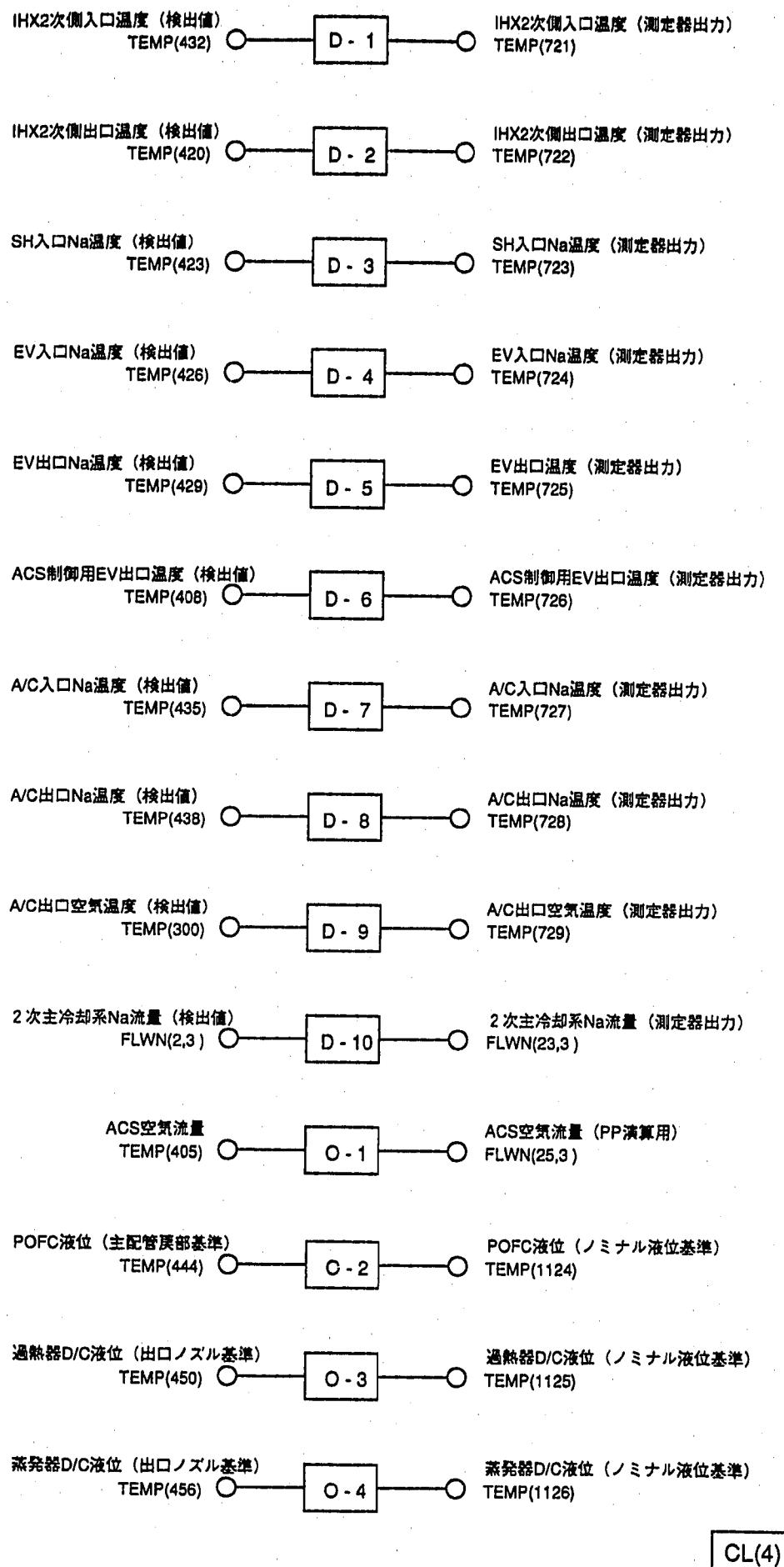


図3.3.17 2次系各種測定器出力 (Bループ)

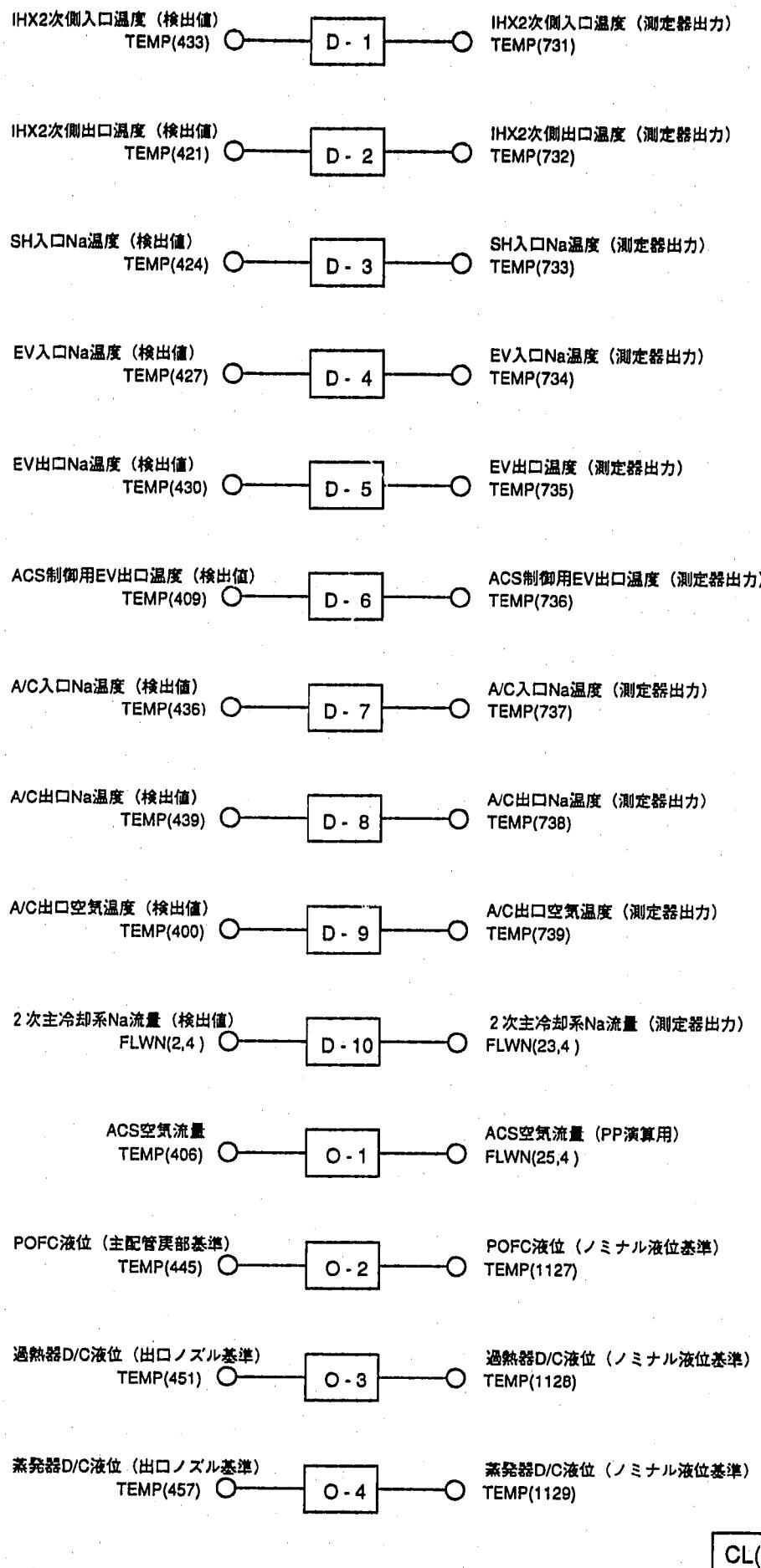


図3.3.18 2次系各種測定器出力 (Cループ)

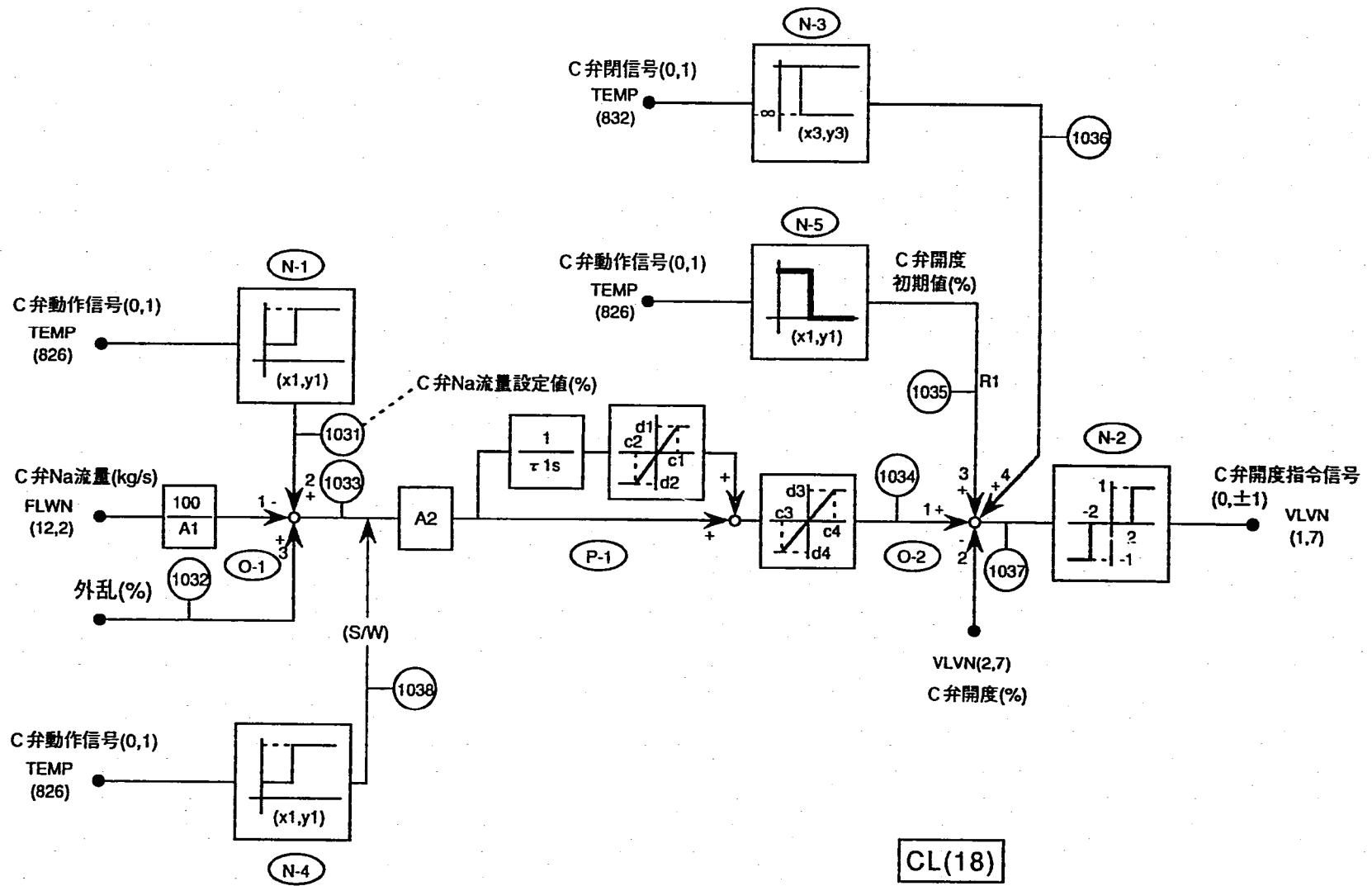


図3.3.19 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系 (Aループ)

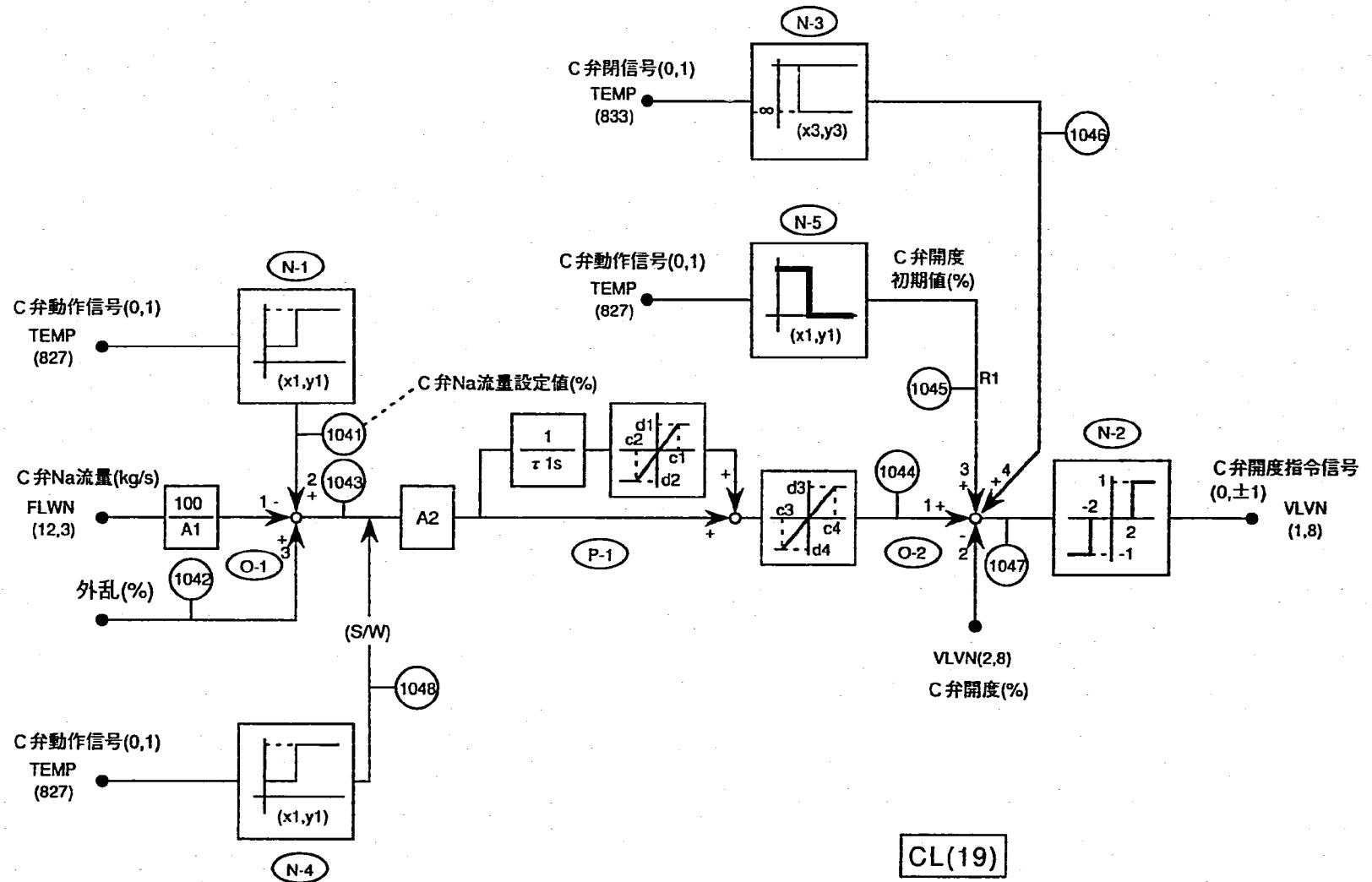


図3.3.20 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系 (Bループ)

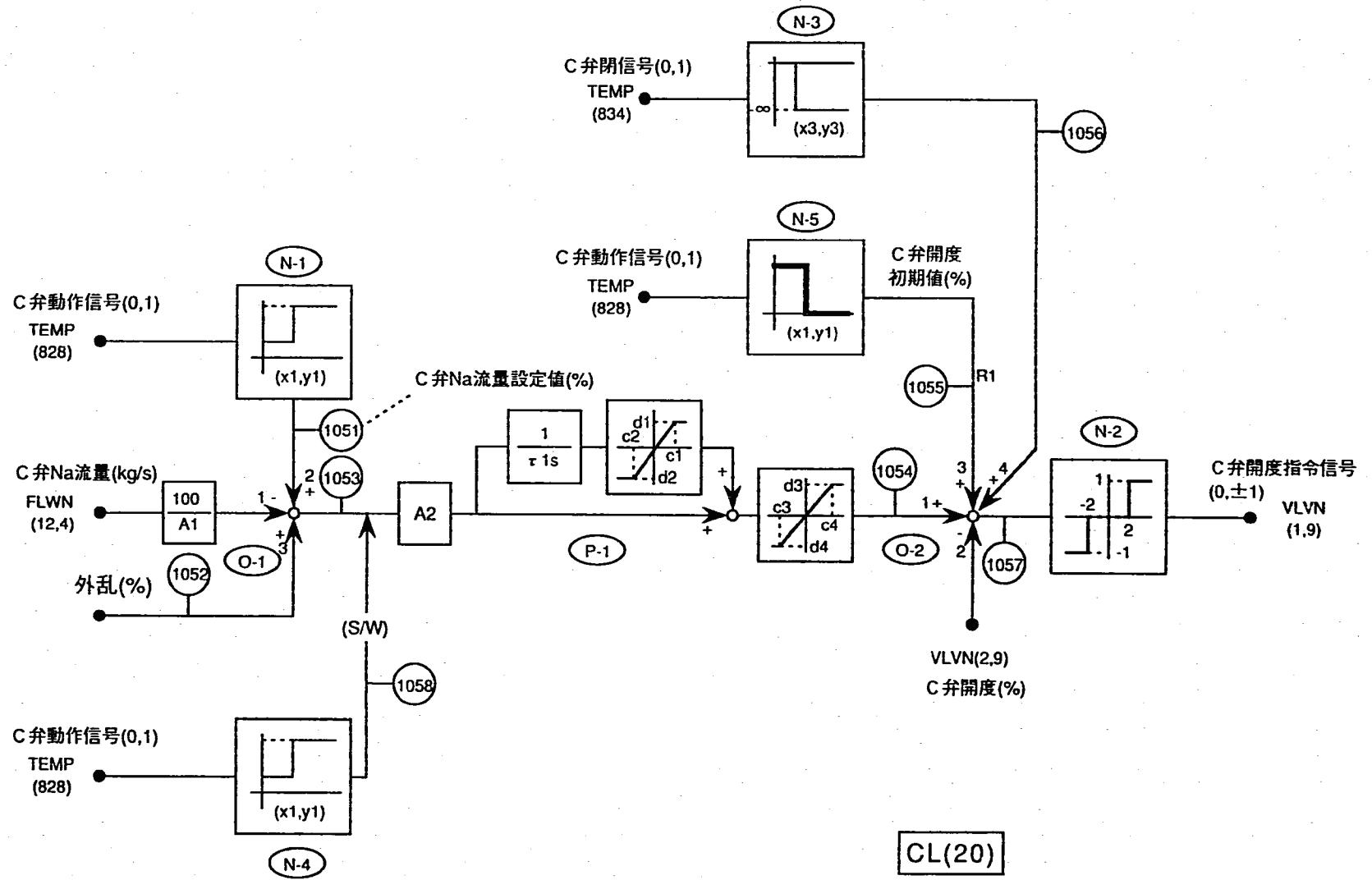


図3.3.21 ACS出口ナトリウム流量調節弁制御系 (Cループ)

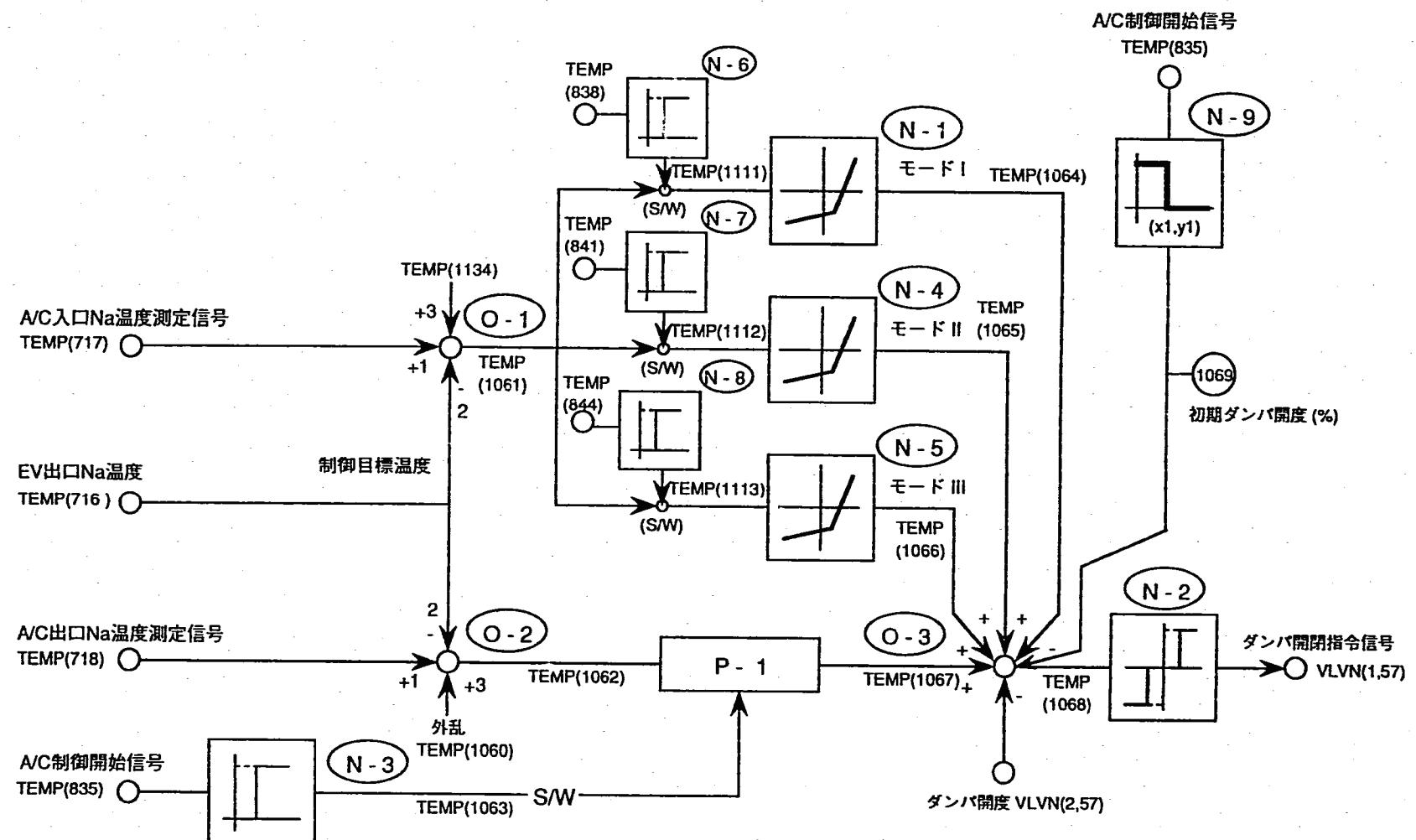
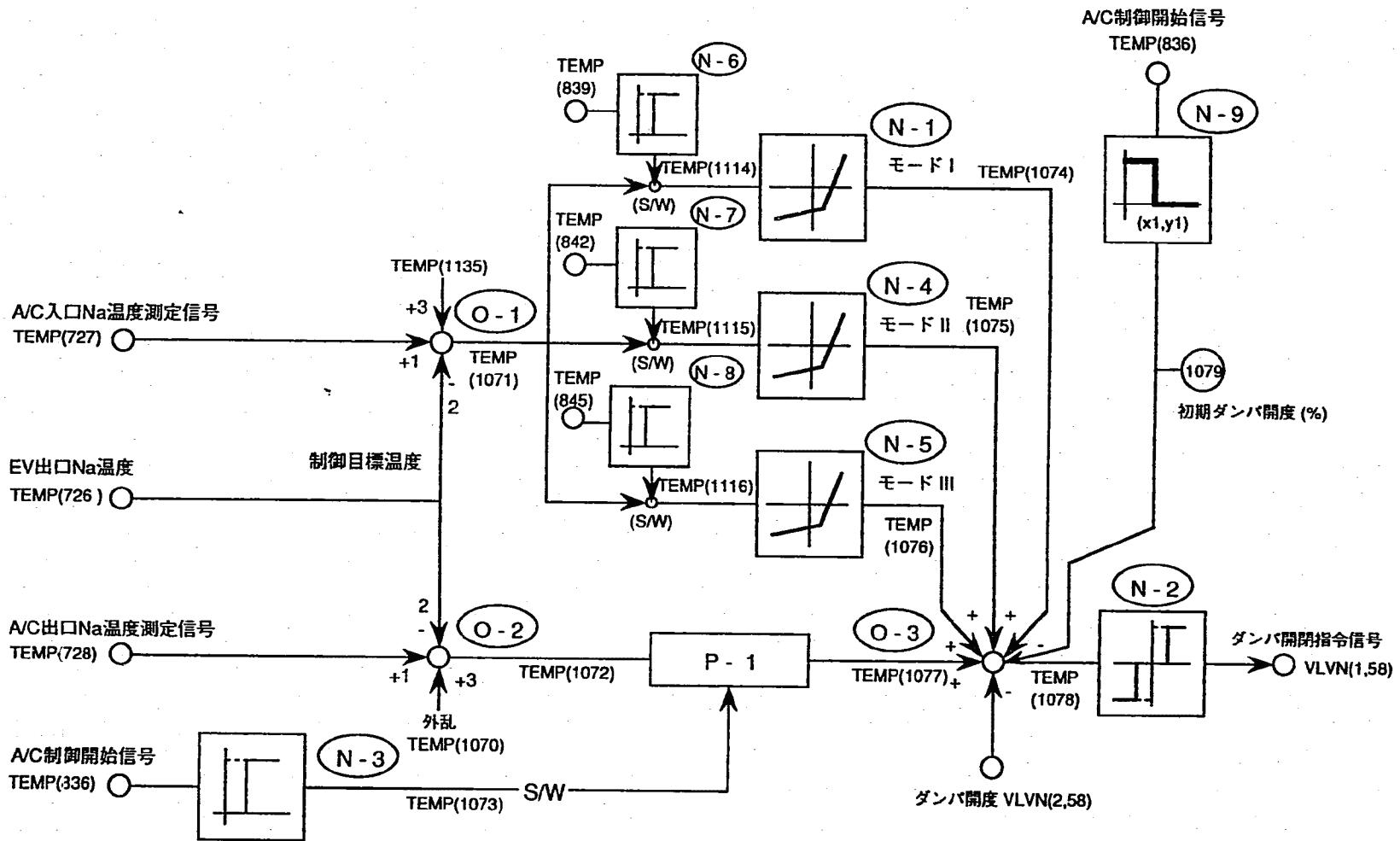


図 3.3.22 ACS出口ナトリウム温度制御系 (ACS起動後)

CL(21)

(備考)
 D : 検出要素
 O : 演算要素
 P : PID要素
 N : 非線形要素



(備考)
 D : 検出要素
 O : 演算要素
 P : PID要素
 N : 非線形要素

図 3.3.23 ACS出口ナトリウム温度制御系 (ACS起動後)

CL(22)

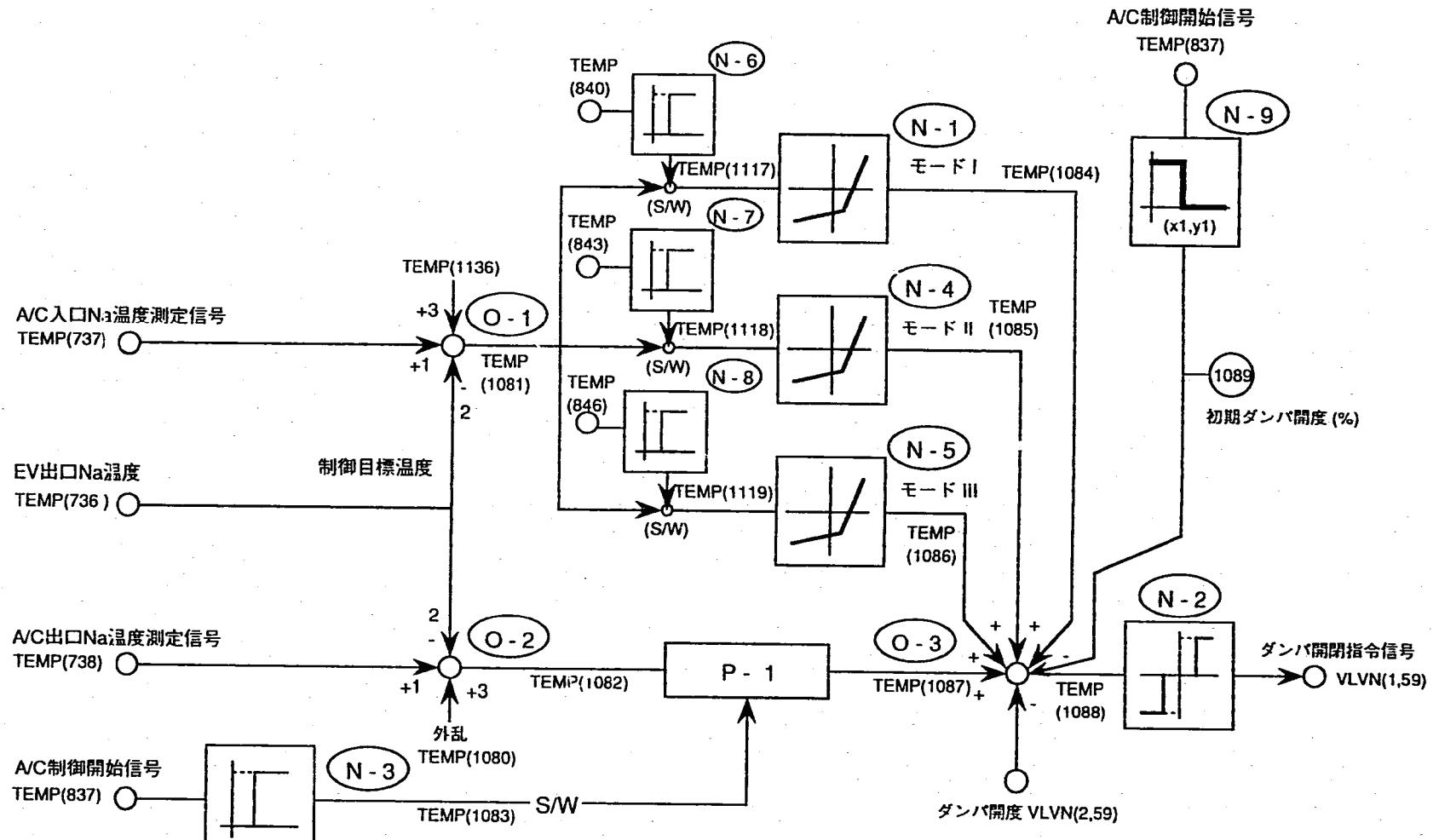


図 3.3.24 ACS出口ナトリウム温度制御系 (ACS起動後)

CL(23)

(備考)
 D : 検出要素
 O : 演算要素
 P : PID要素
 N : 非線形要素

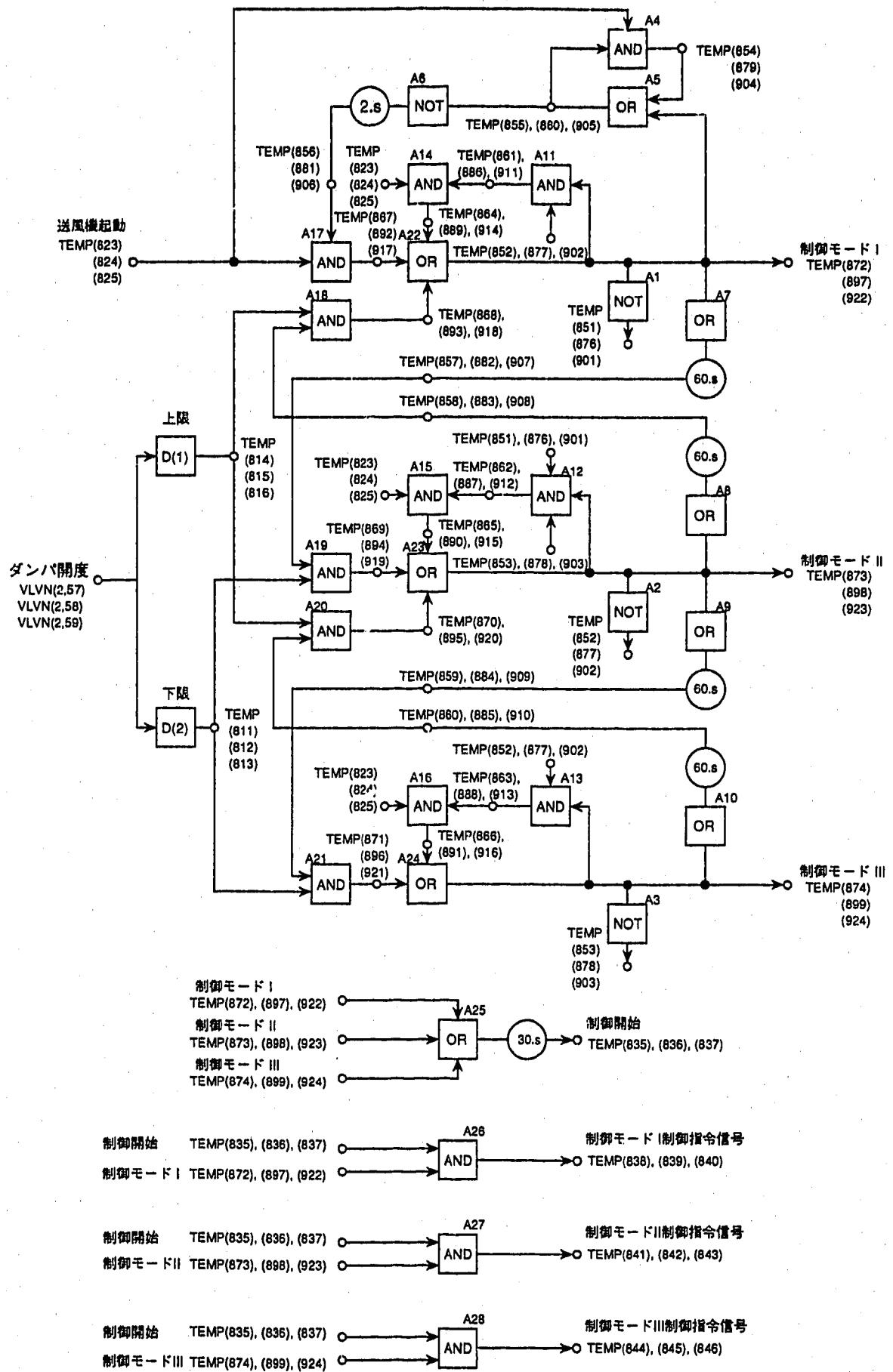


図3.3.25 ACS制御モード変更シーケンス

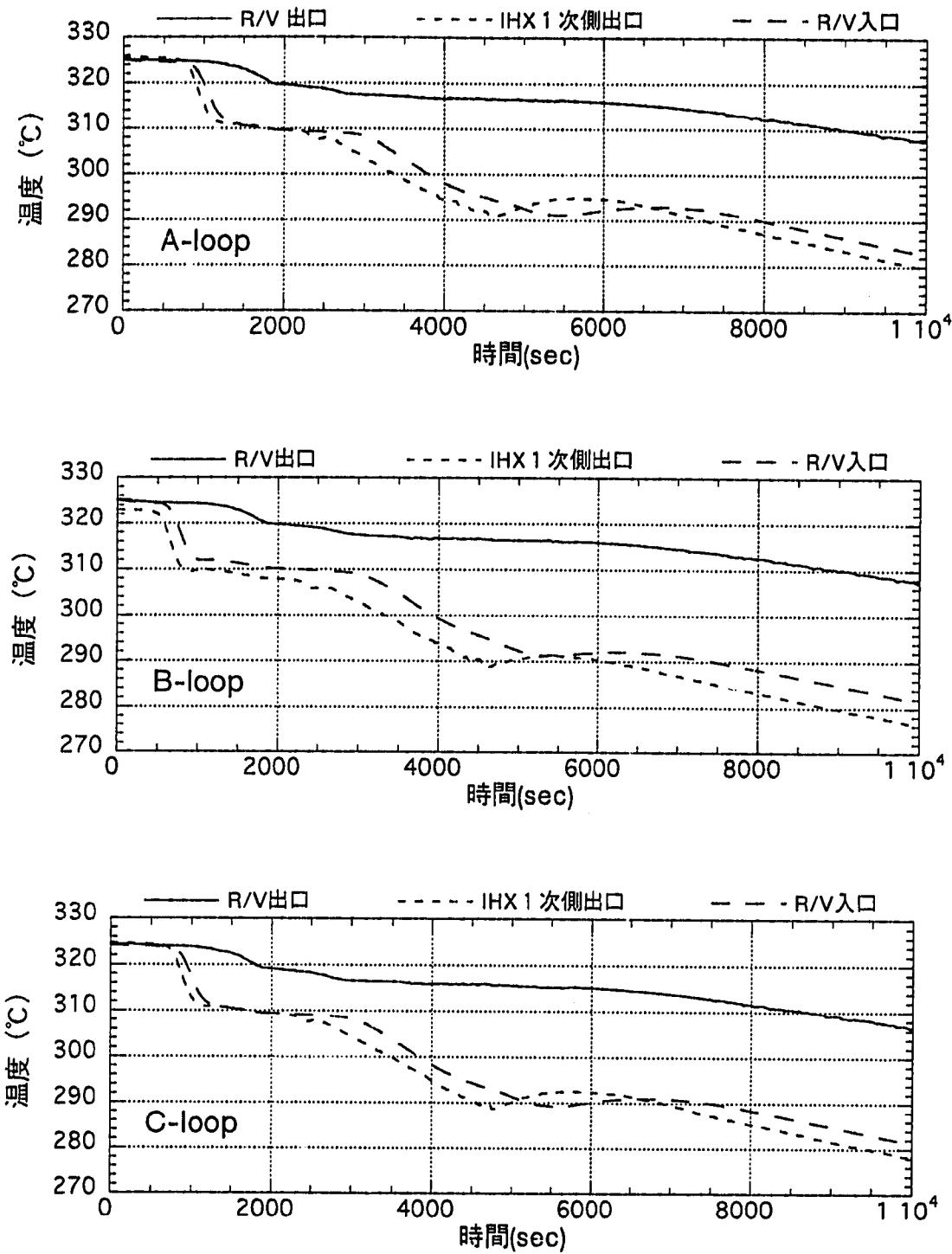


図4.1.1 1次系各部温度応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）

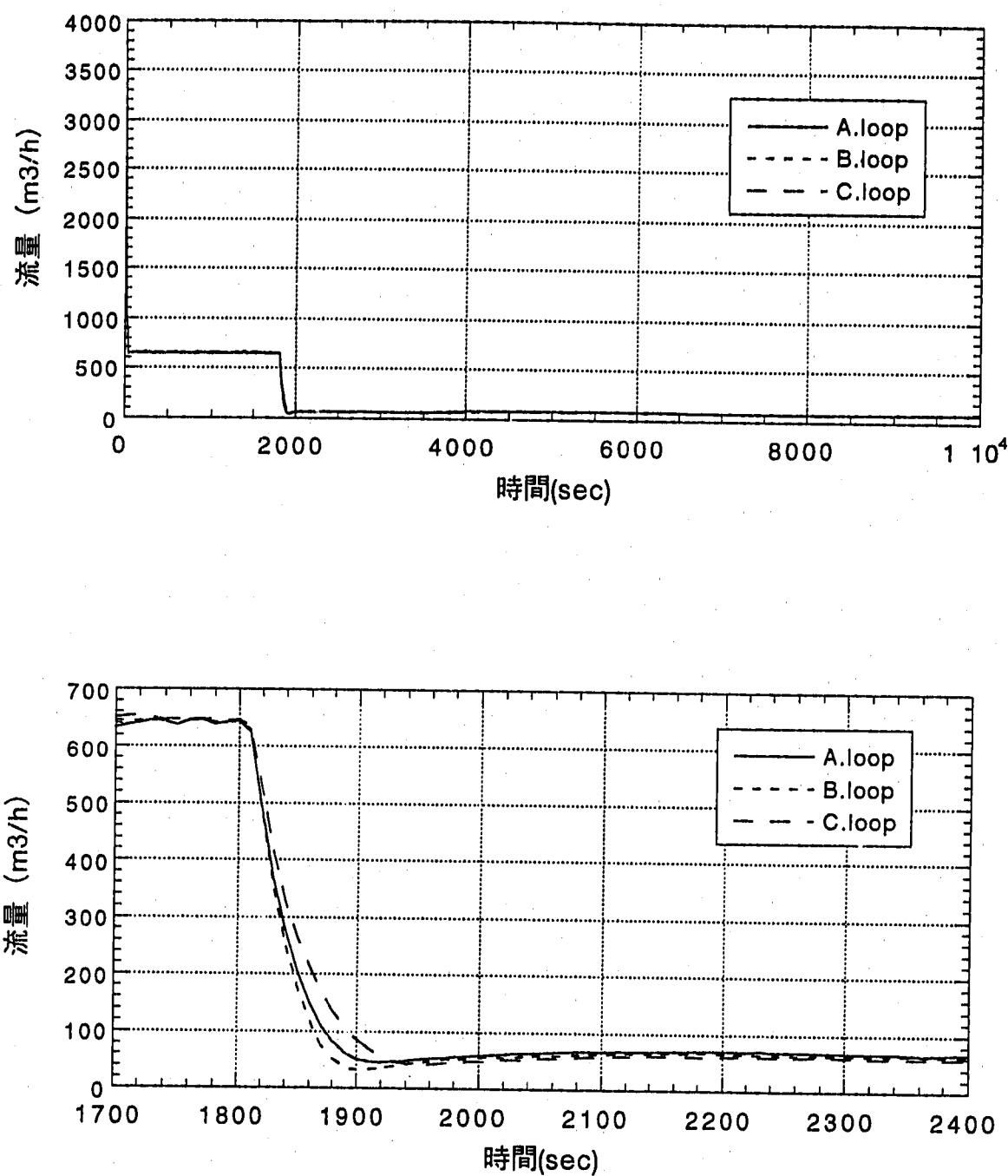


図4.1.2 1次系流量応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）

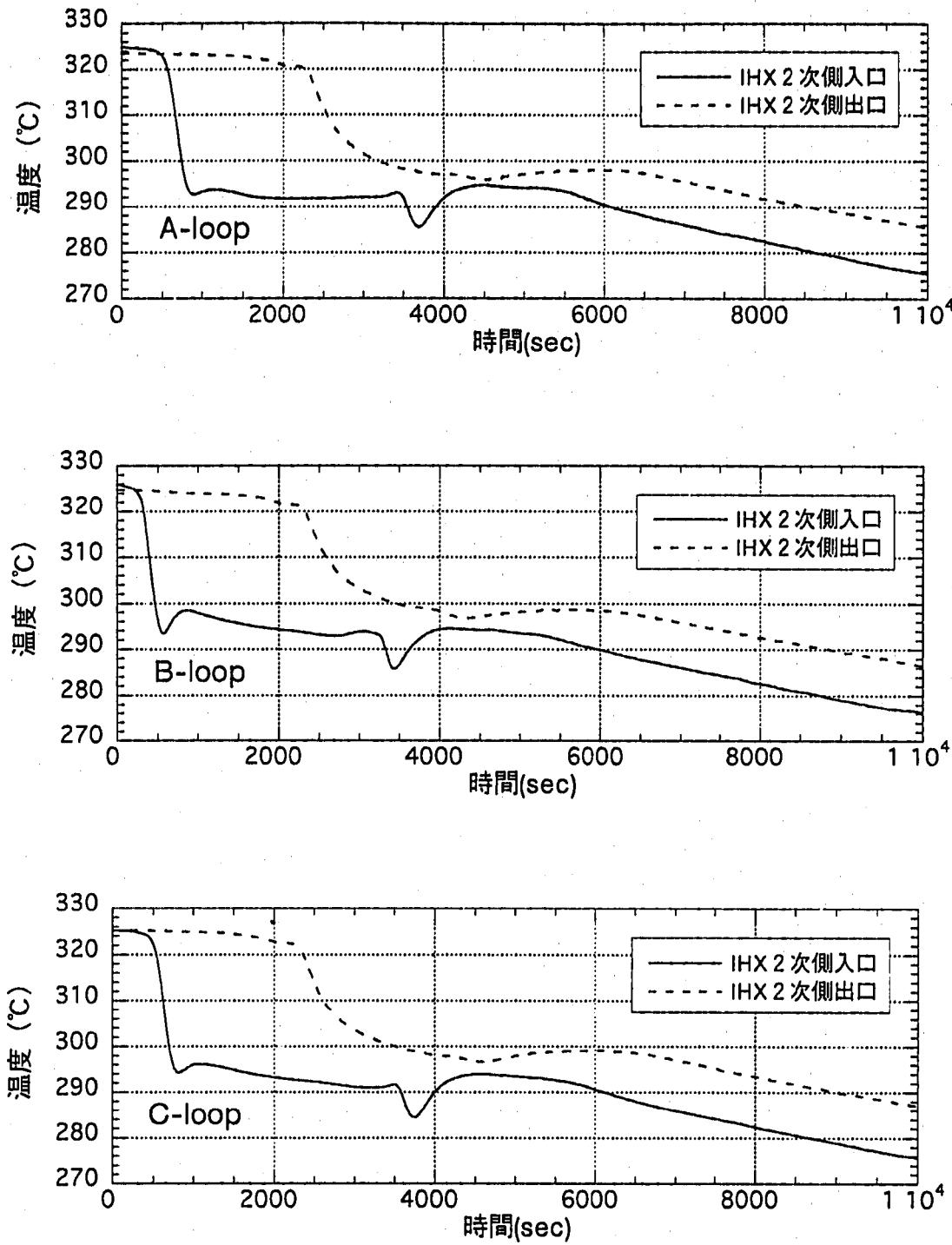


図4.1.3 2次系IHX出入口温度応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）

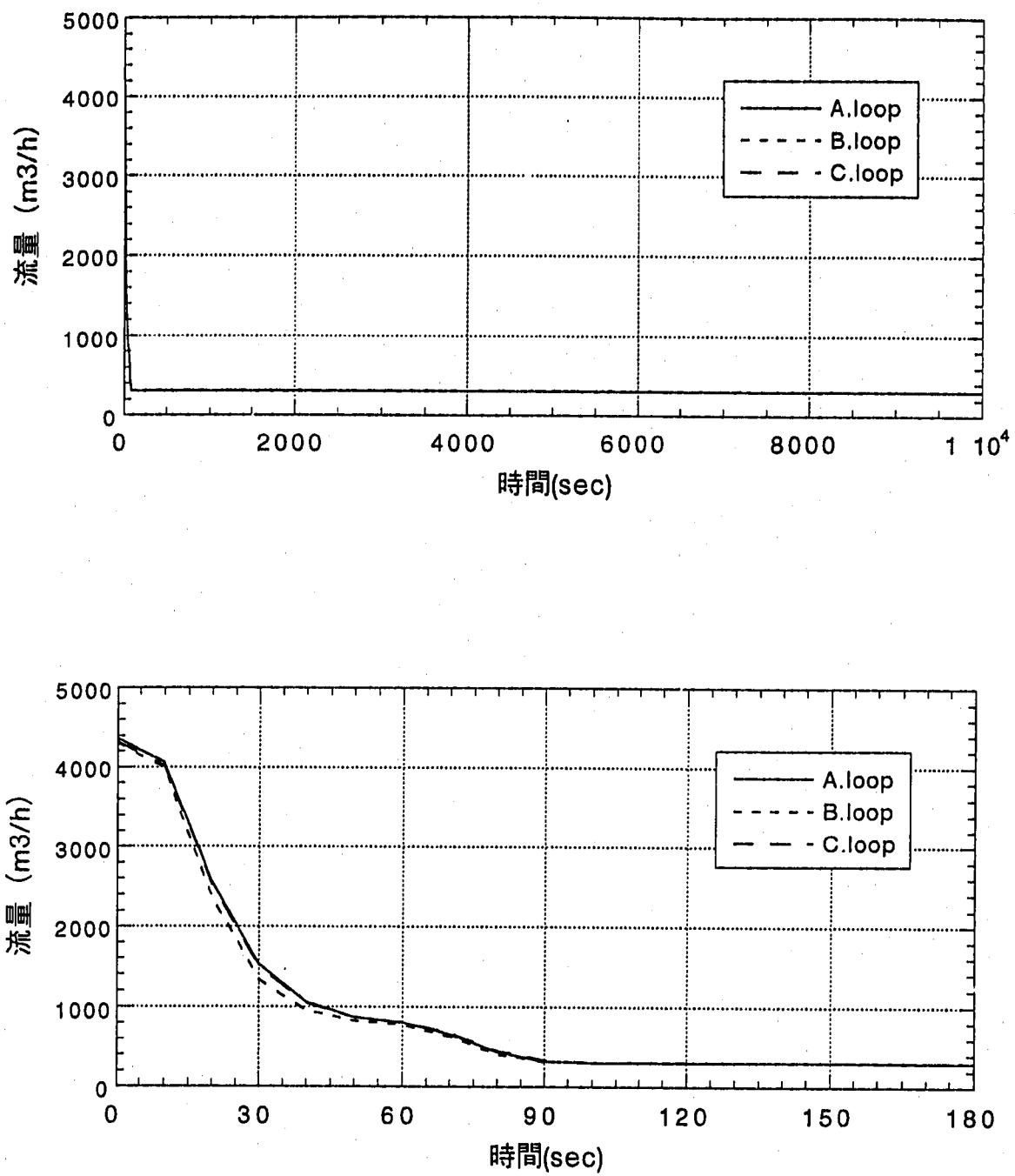
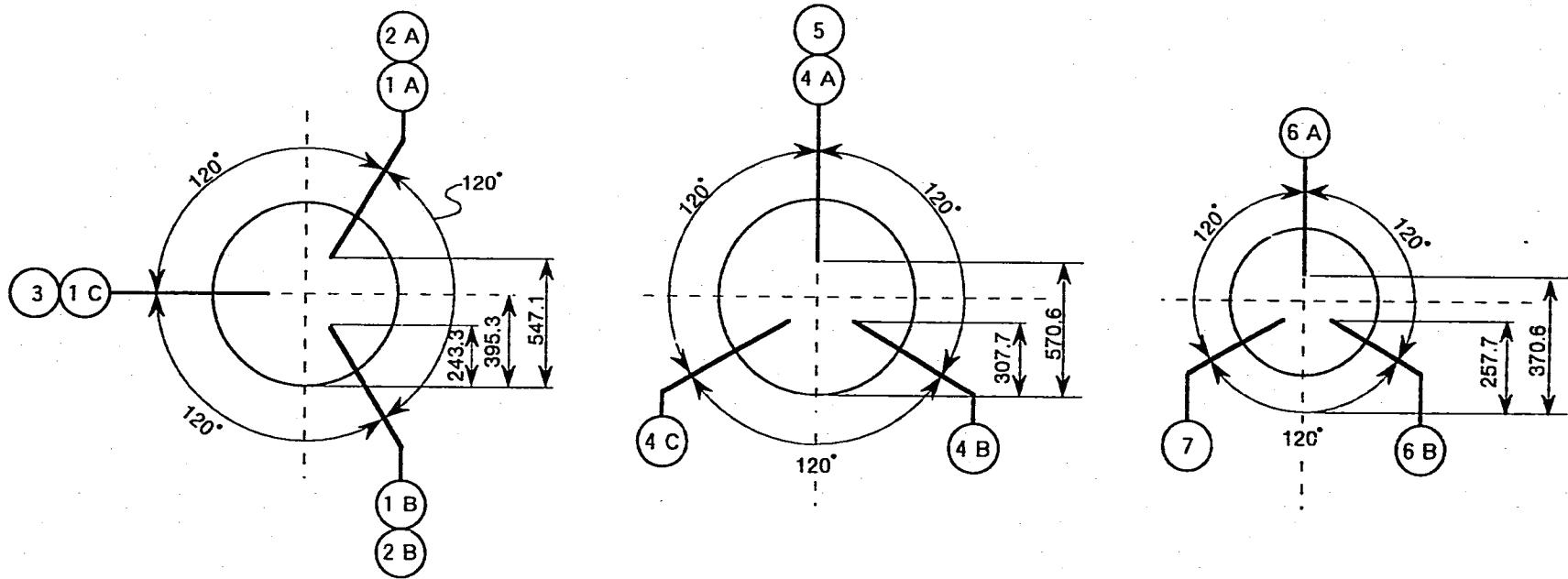


図4.1.4 2次系流量応答（1次冷却系自然循環予備評価試験）



ホットレグ配管
(内径Φ790.6)

クロスオーバーレグ配管
(内径Φ790.6)

コールドレグ配管
(内径Φ590.6)

- 寸法はウエル挿入深さ、○内の数字は T E - N o を示す
- (2A) (5) (6A) を S K S データ収録装置で測定

図4.1.5 1次主冷却系主配管熱電対ウエル取付位置

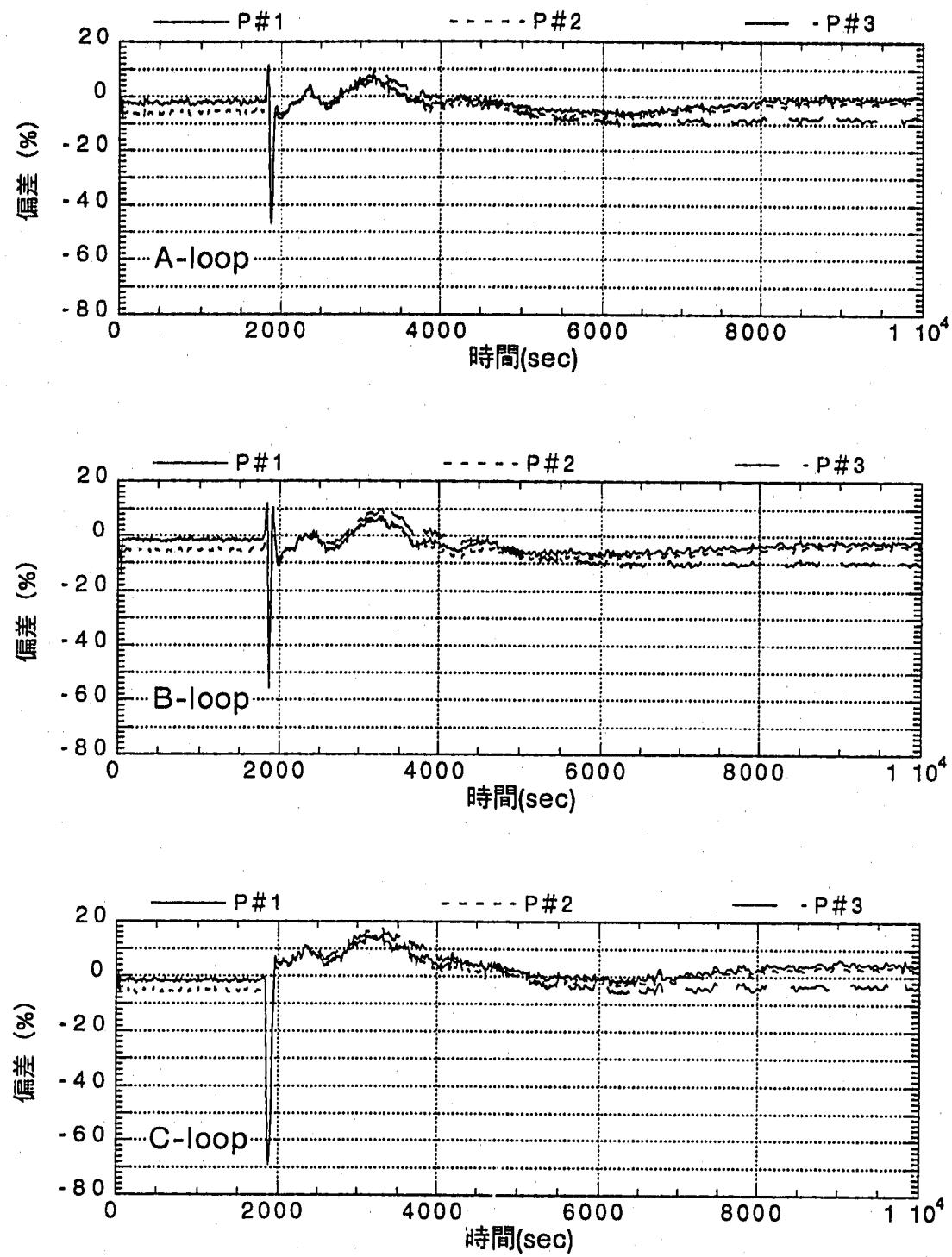


図4.1.6 実機流量と計算結果の比較（1次系流量）

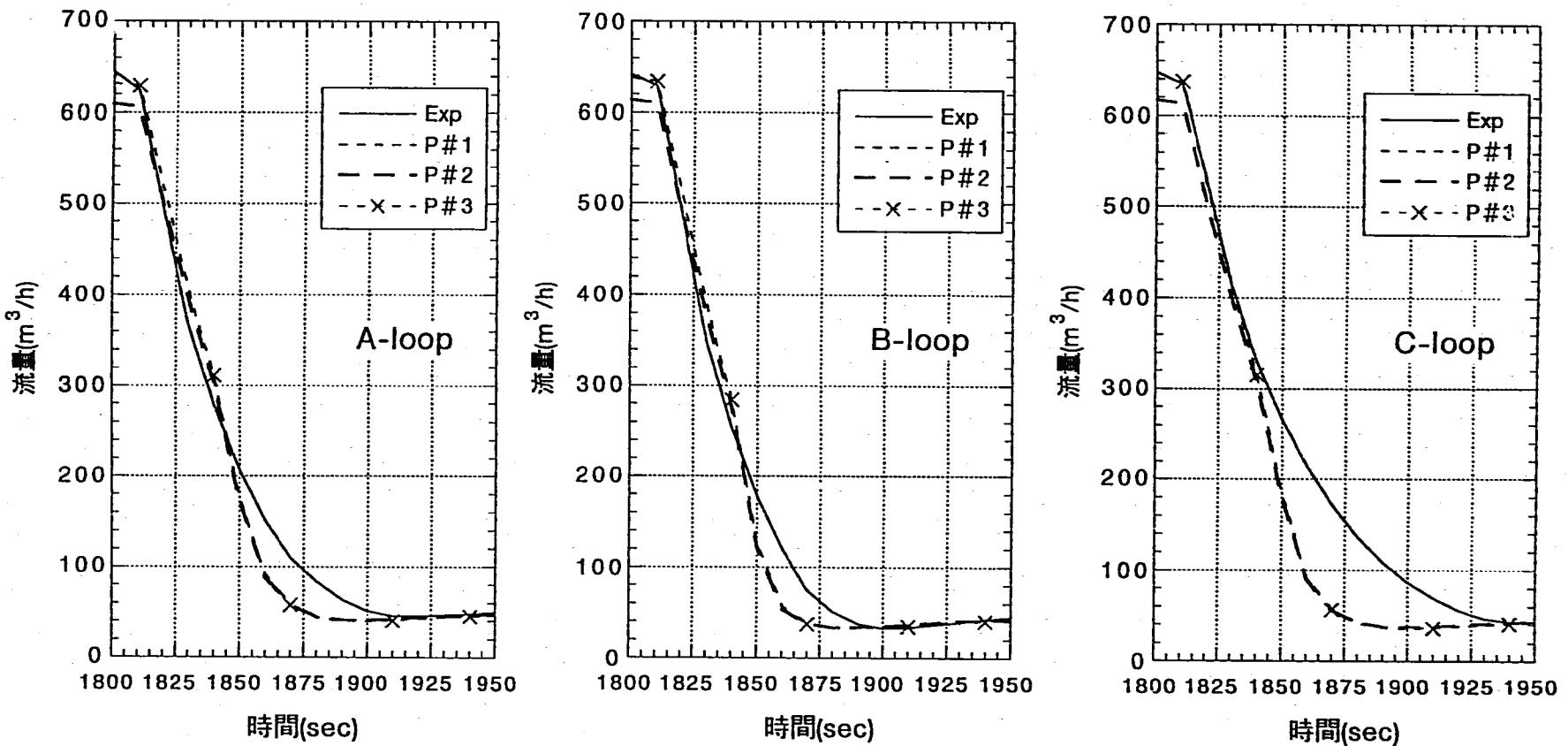


図4.1.7 1次系流量の実測値と計算値の比較（フローコーストダウン応答）

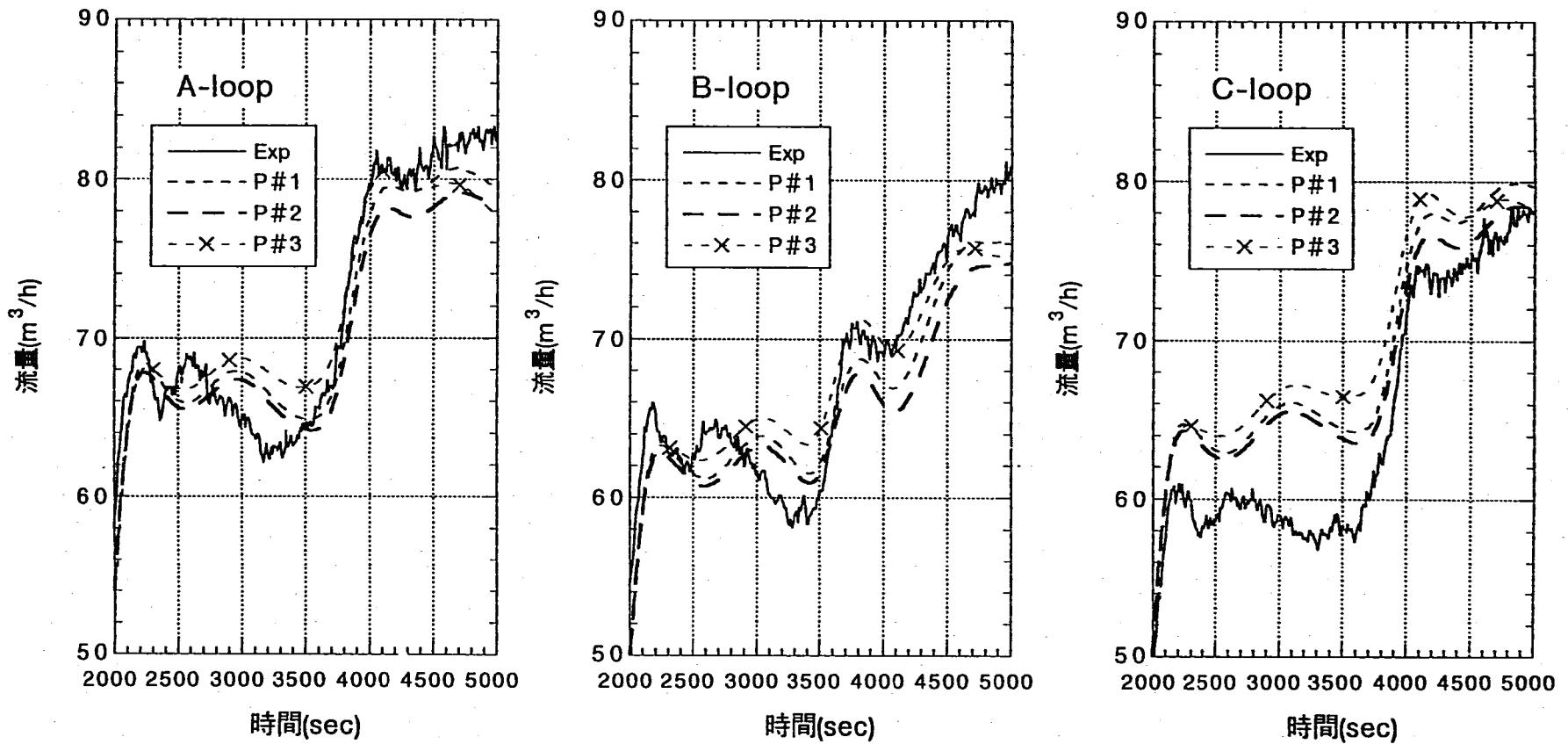


図4.1.8 1次系流量の実測値と計算値の比較（自然循環発達過程）

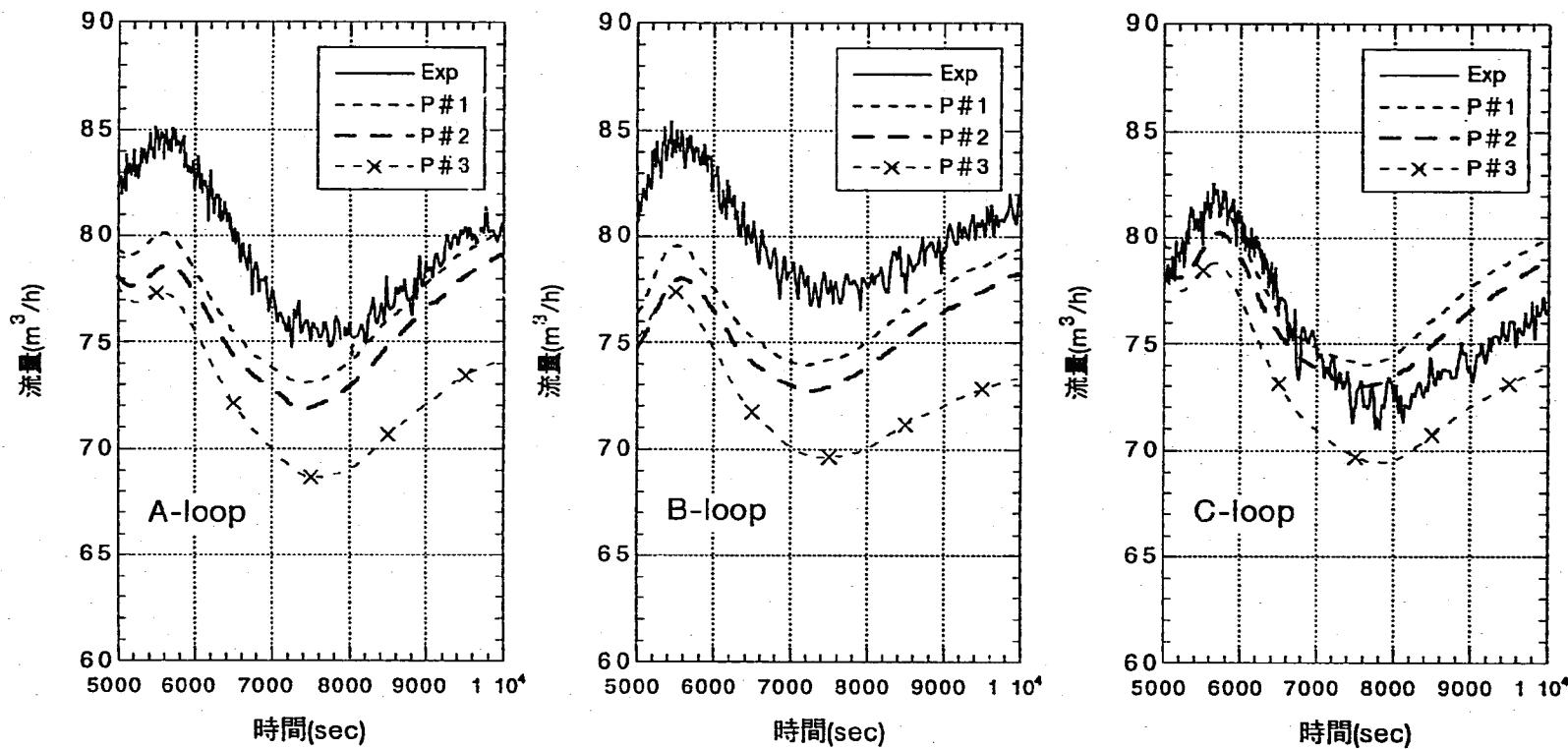


図4.1.9 1次系流量の実測値と計算値の比較（準定常自然循環状態）

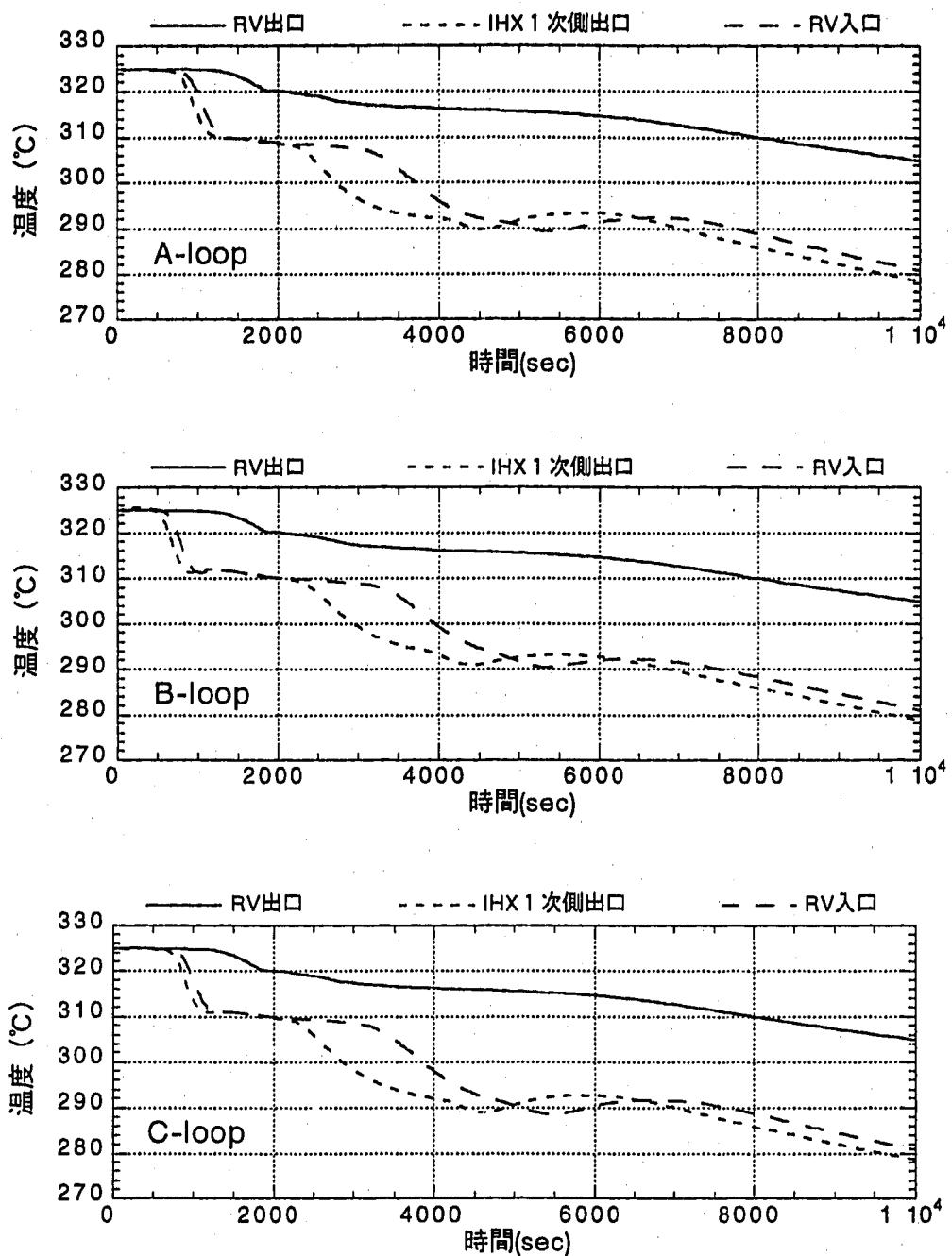


図4.1.10 1次系温度応答の計算結果（ケースP#1）

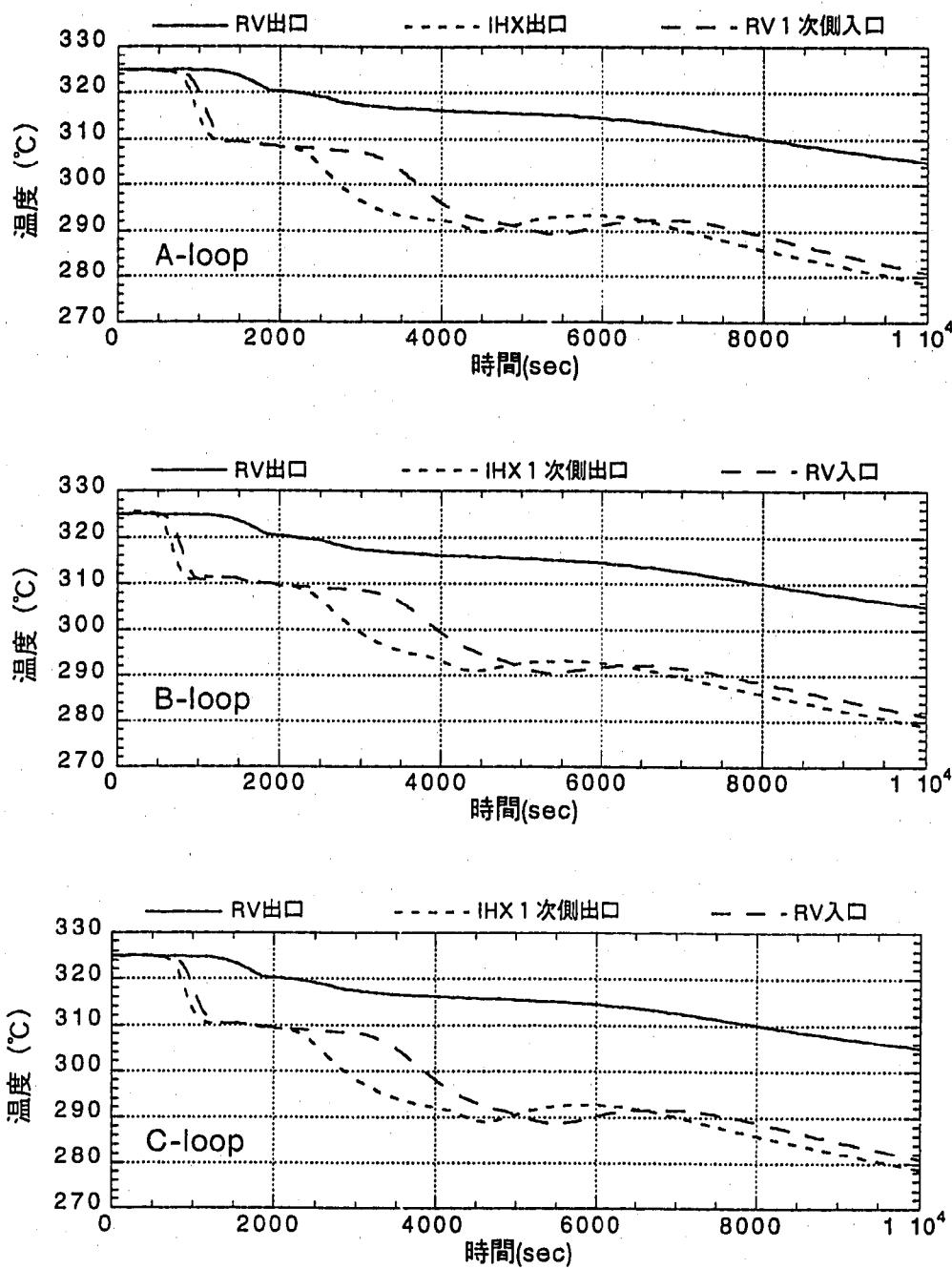


図4.1.11 1次系温度応答の計算結果（ケースP#2）

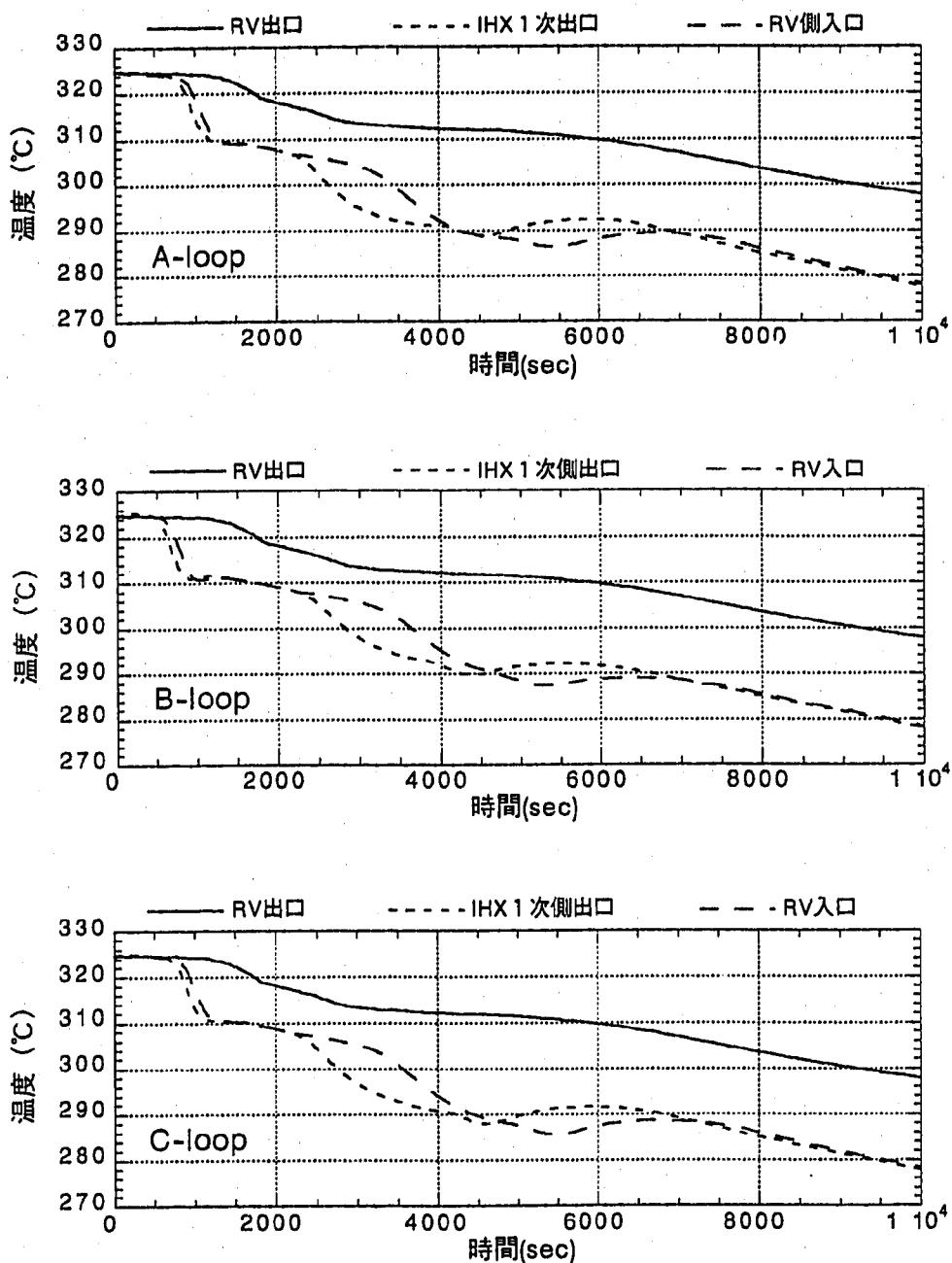


図4.1.12 1次系温度応答の計算結果（ケースP#3）

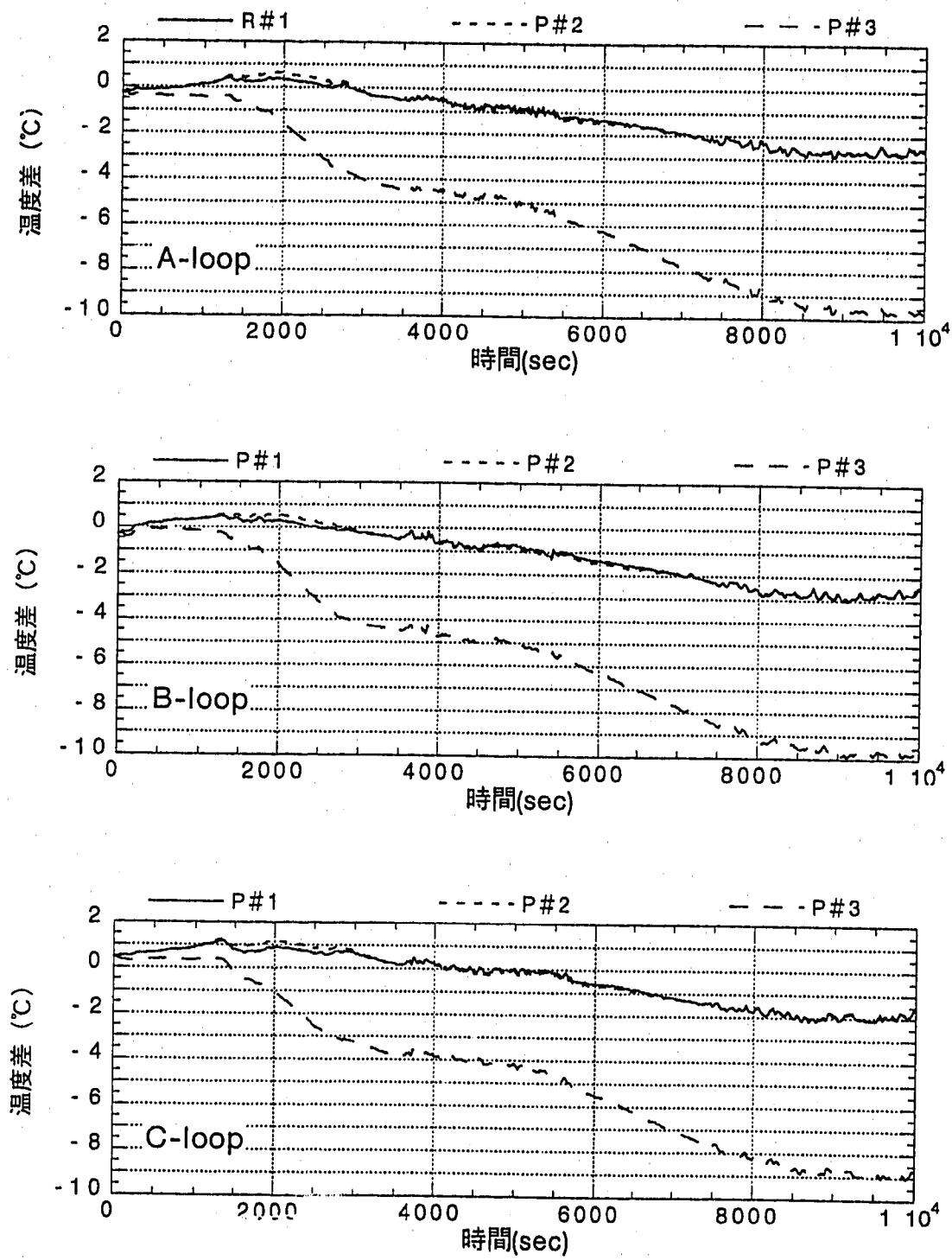


図4.1.13 原子炉容器出口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）

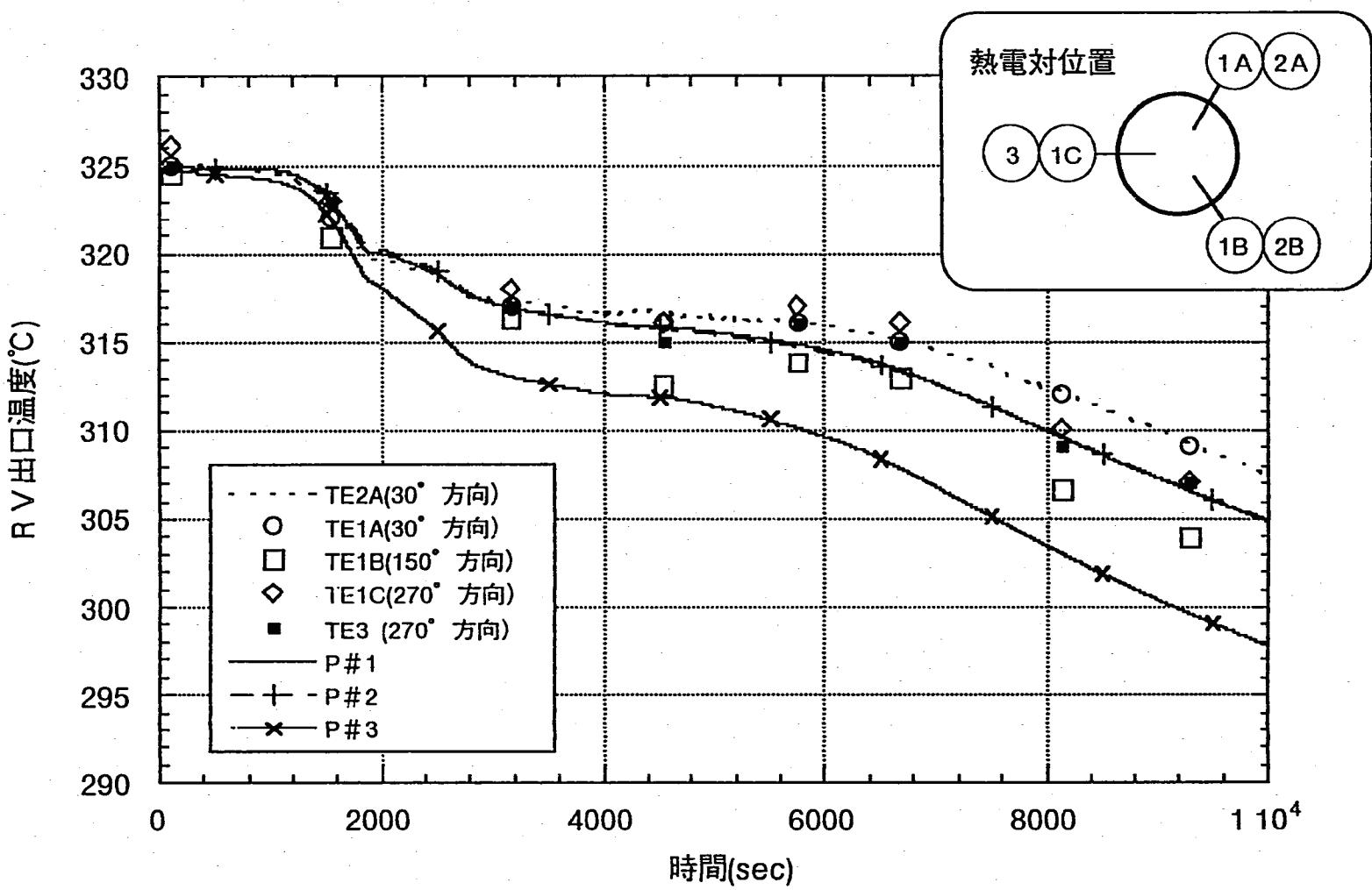


図4.1.14 温度成層化現象によるRV出口水平配管内の冷却材温度差（ループ）

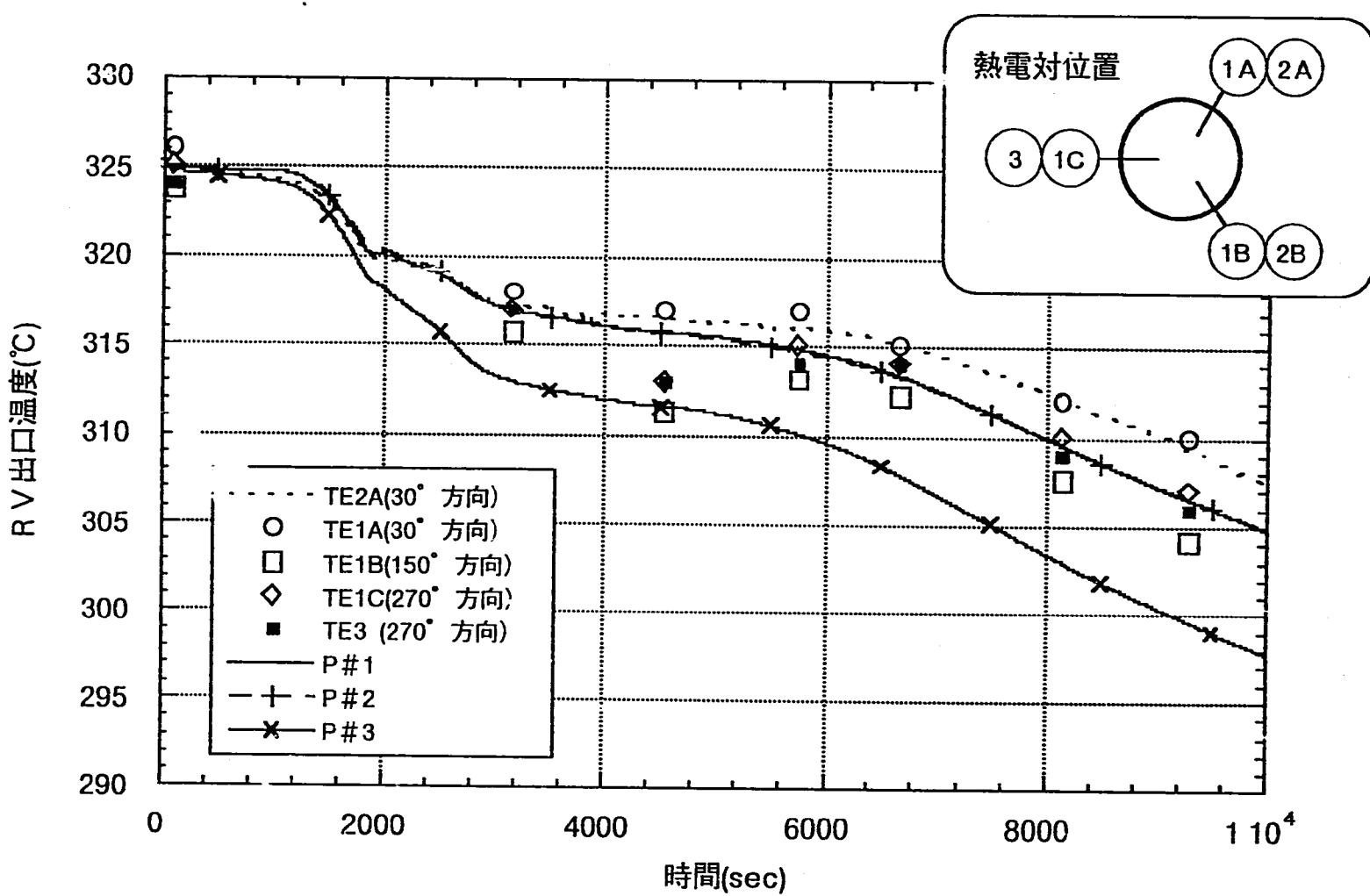


図4.1.15 温度成層化現象によるRV出口水平配管内の冷却材温度差 (Bループ)

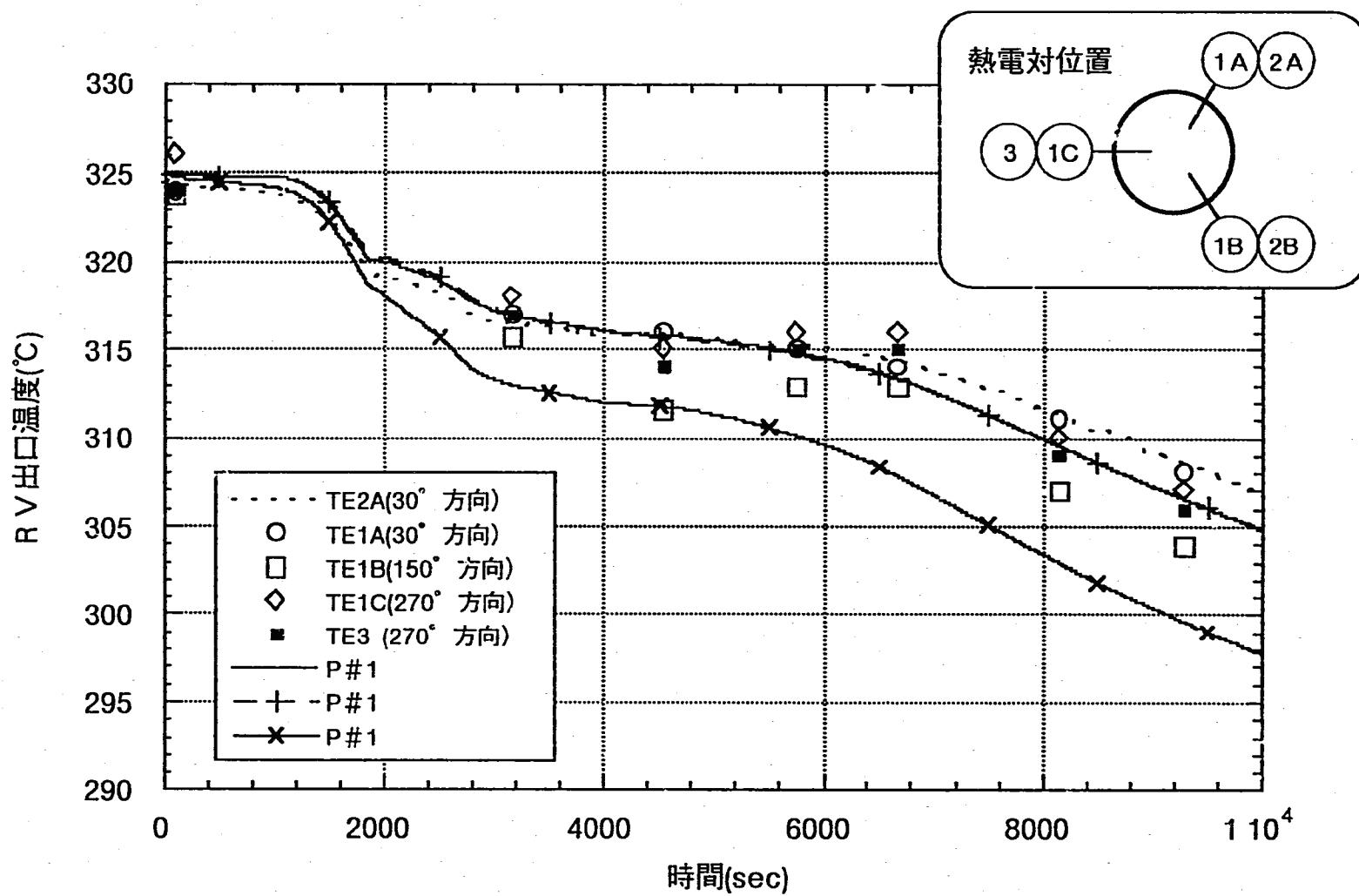


図4.1.16 温度成層化現象によるRV出口水平配管内の冷却材温度差 (Cループ)

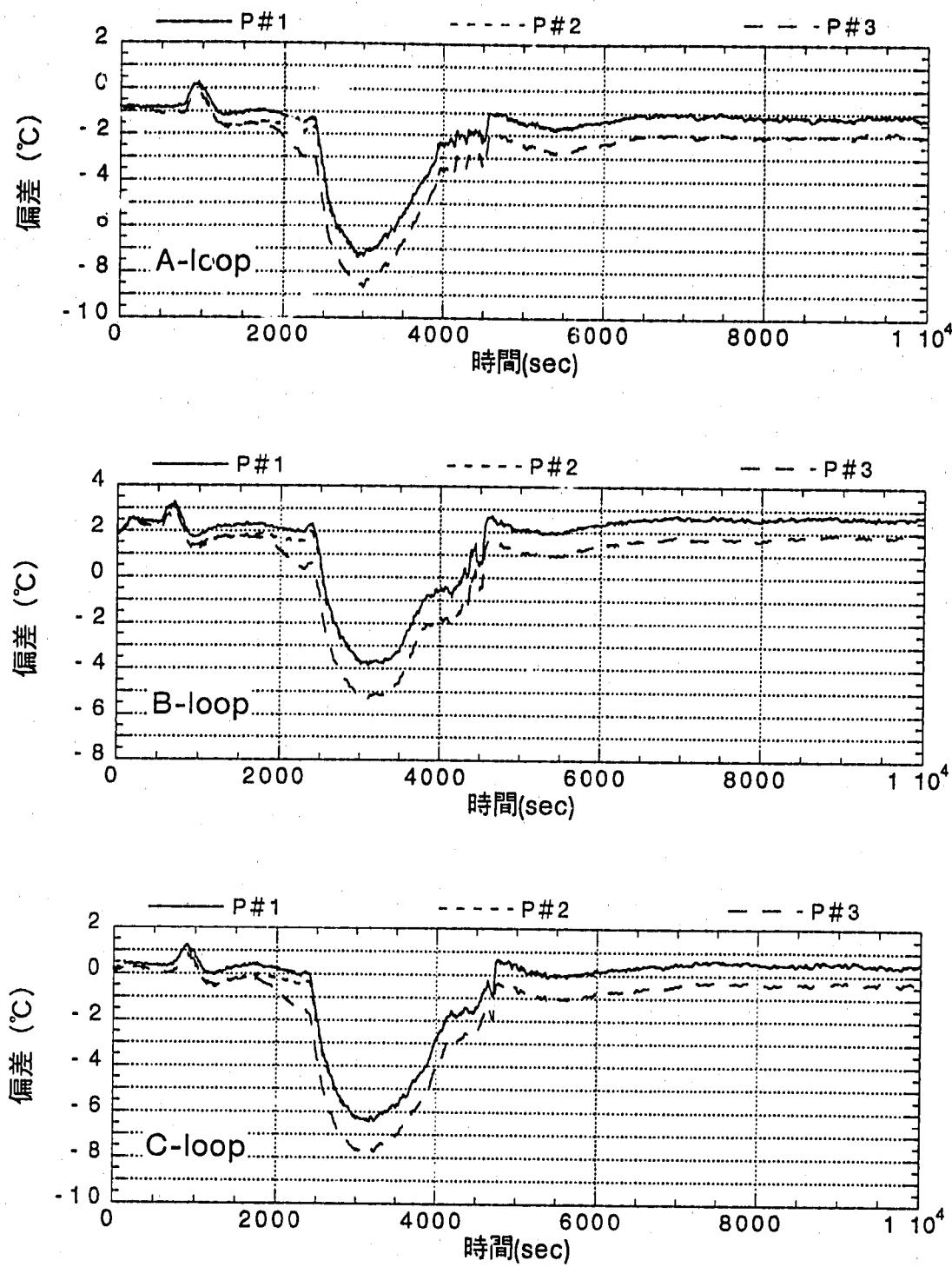


図4.1.17 IHX 1次側出口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）

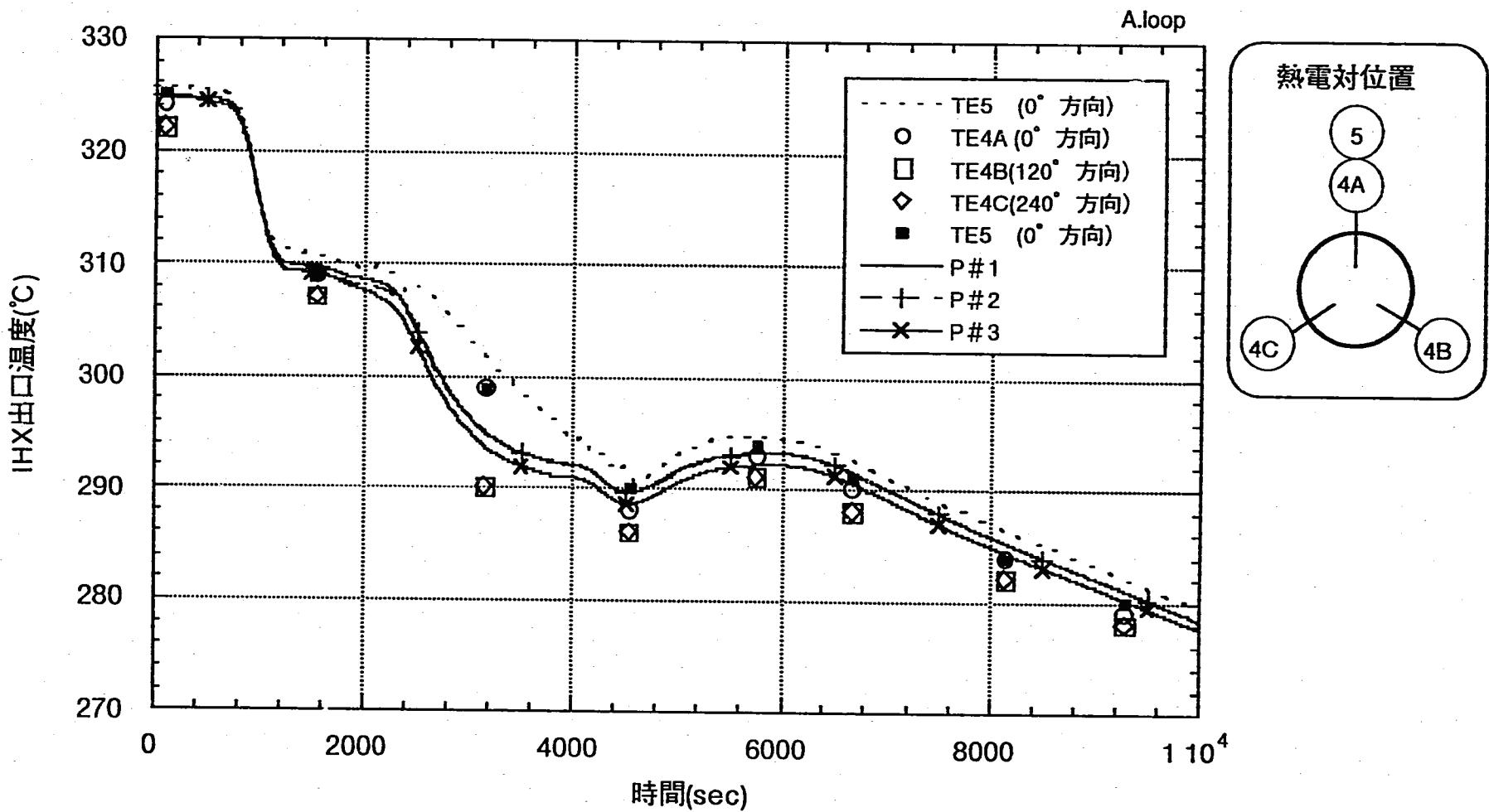


図4.1.18 温度成層化現象によるIHX出口水平配管内の冷却材温度差 (Aループ)

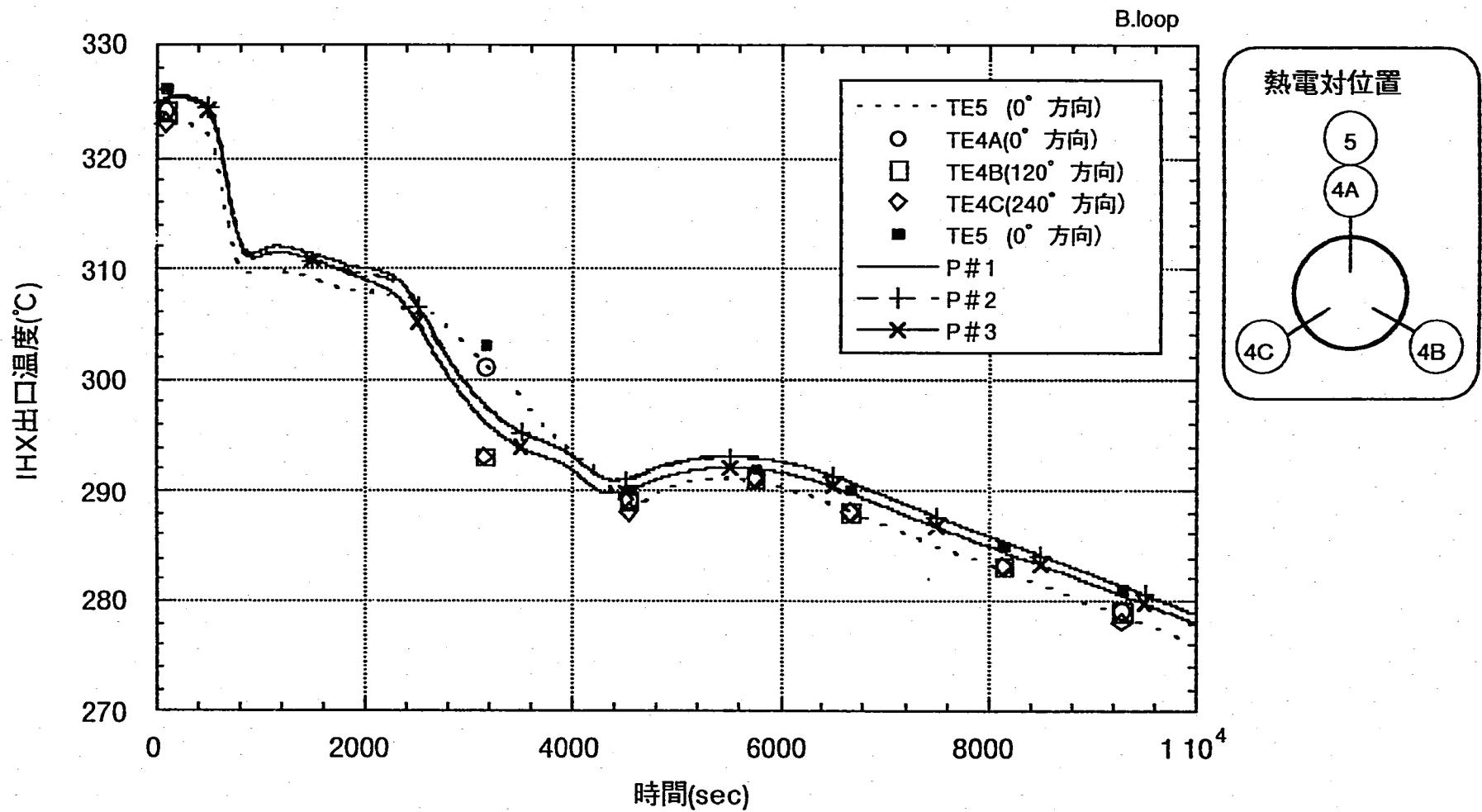


図4.1.19 温度成層化現象によるIHX出口水平配管内の冷却材温度差 (Bループ)

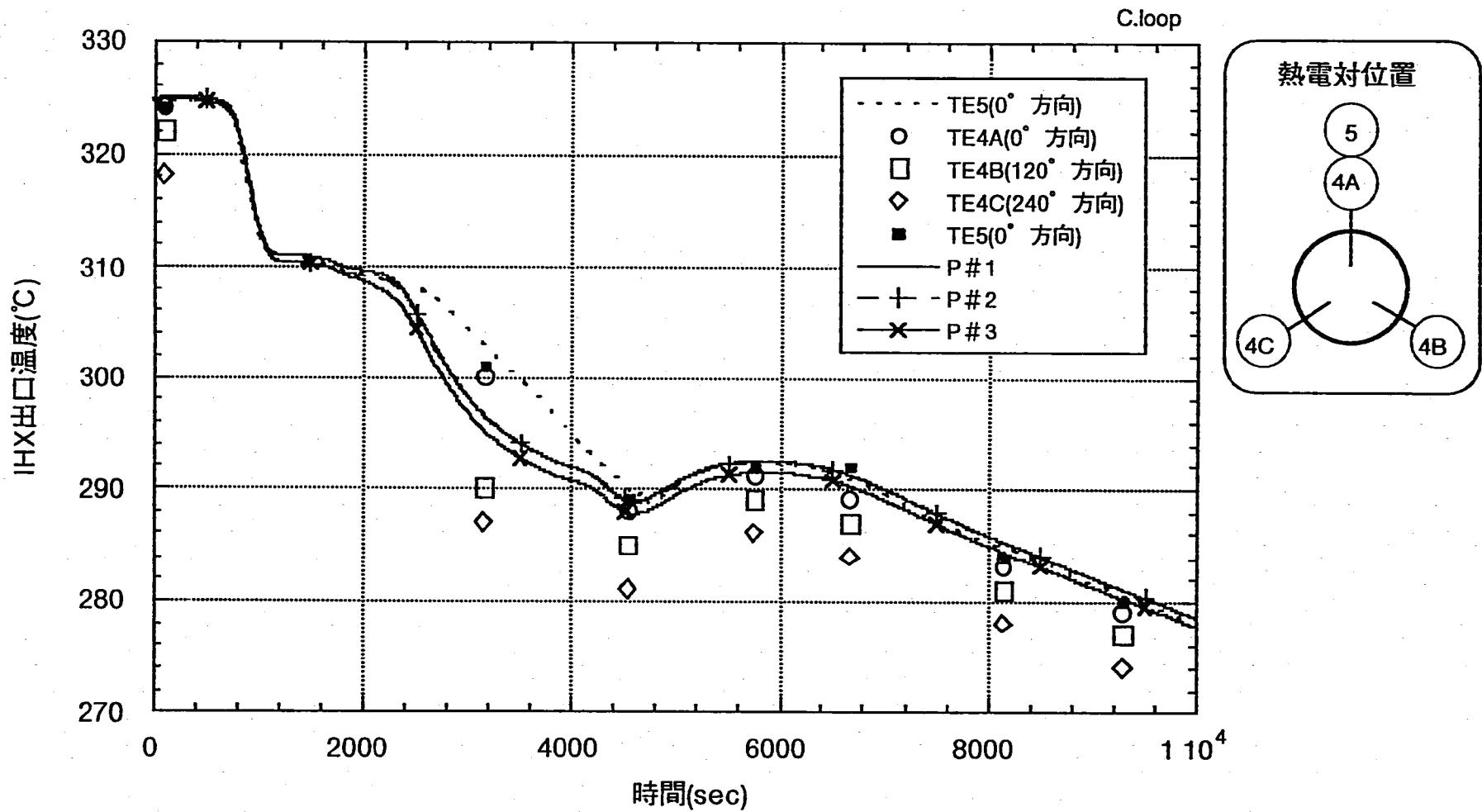


図4.1.20 温度成層化現象によるIHX出口水平配管内の冷却材温度差 (Cループ)

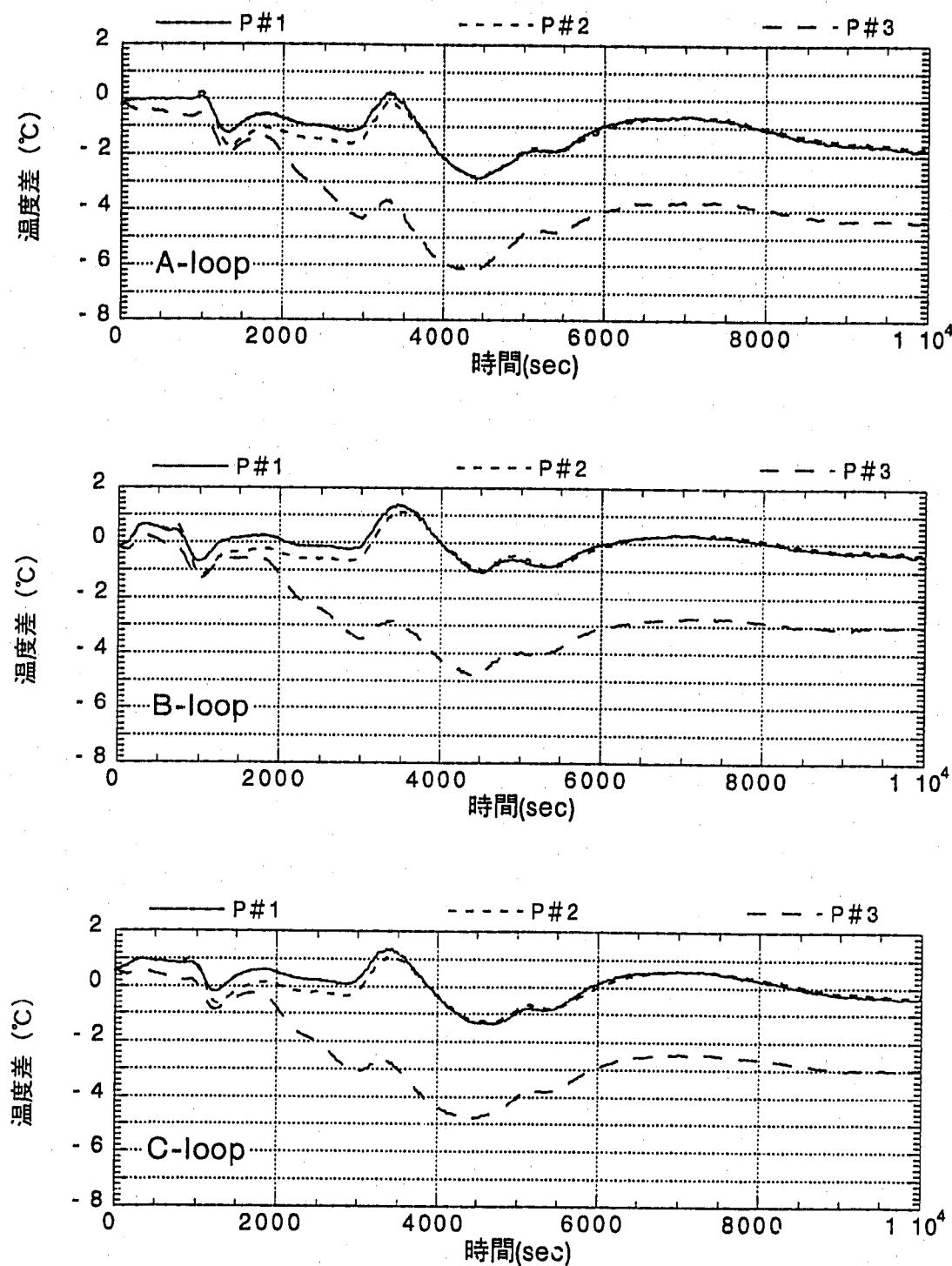


図4.1.21 原子炉容器入口温度の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）

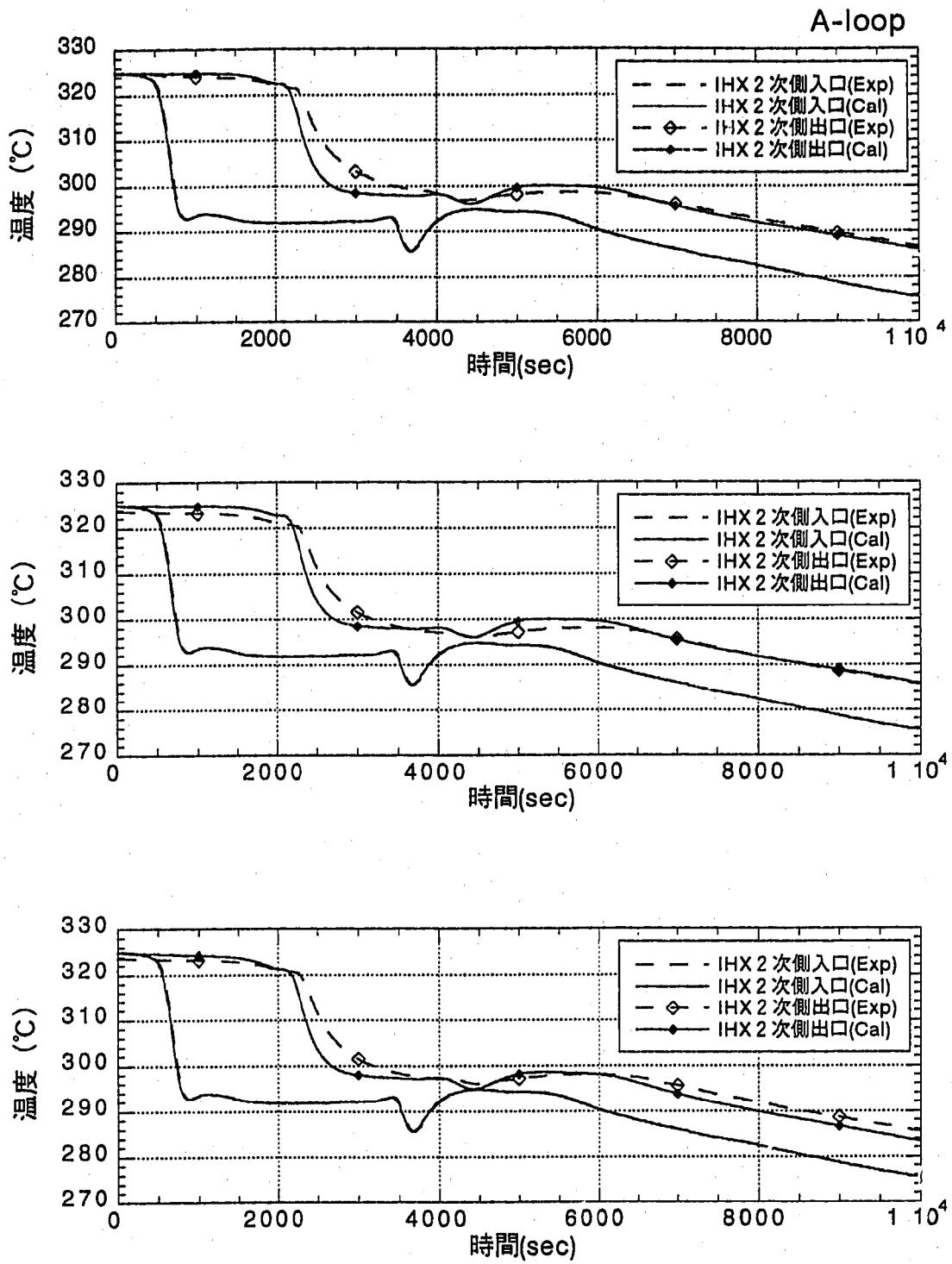


図4.1.22 IHX 2 次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Aループ)

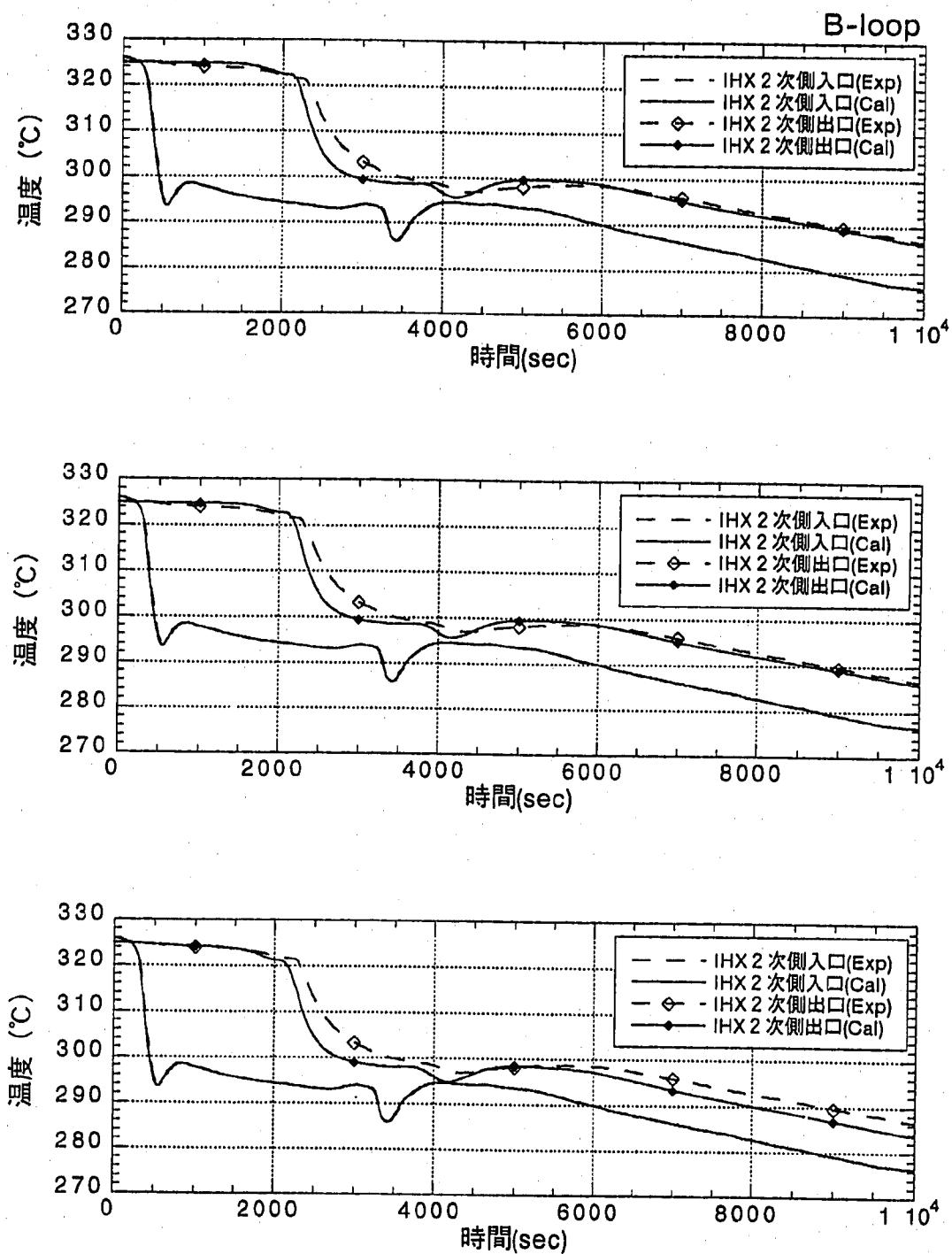


図4.1.23 IHX 2 次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Bループ)

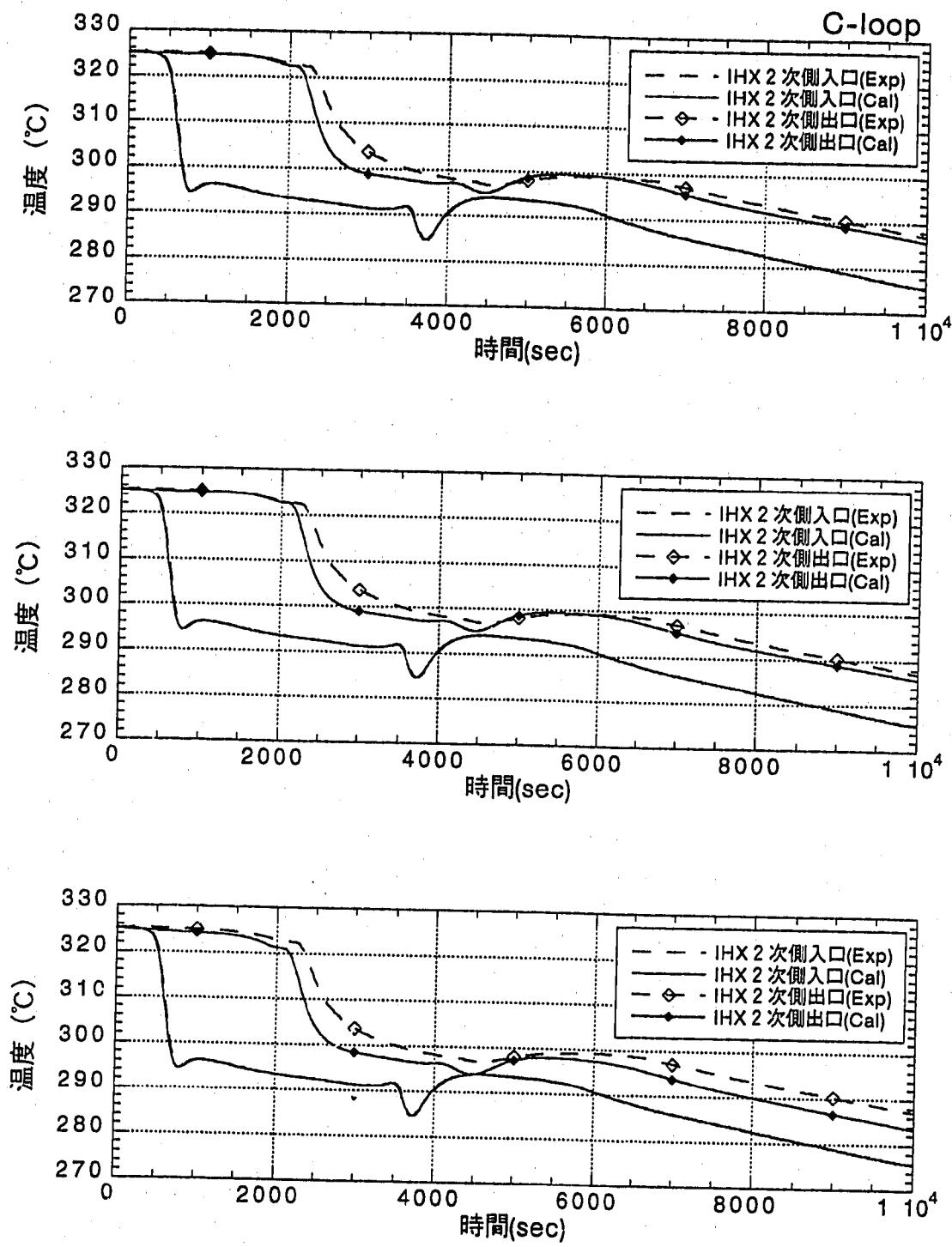


図4.1.24 IHX 2 次側出口温度の実測値と計算値の比較 (Cループ)

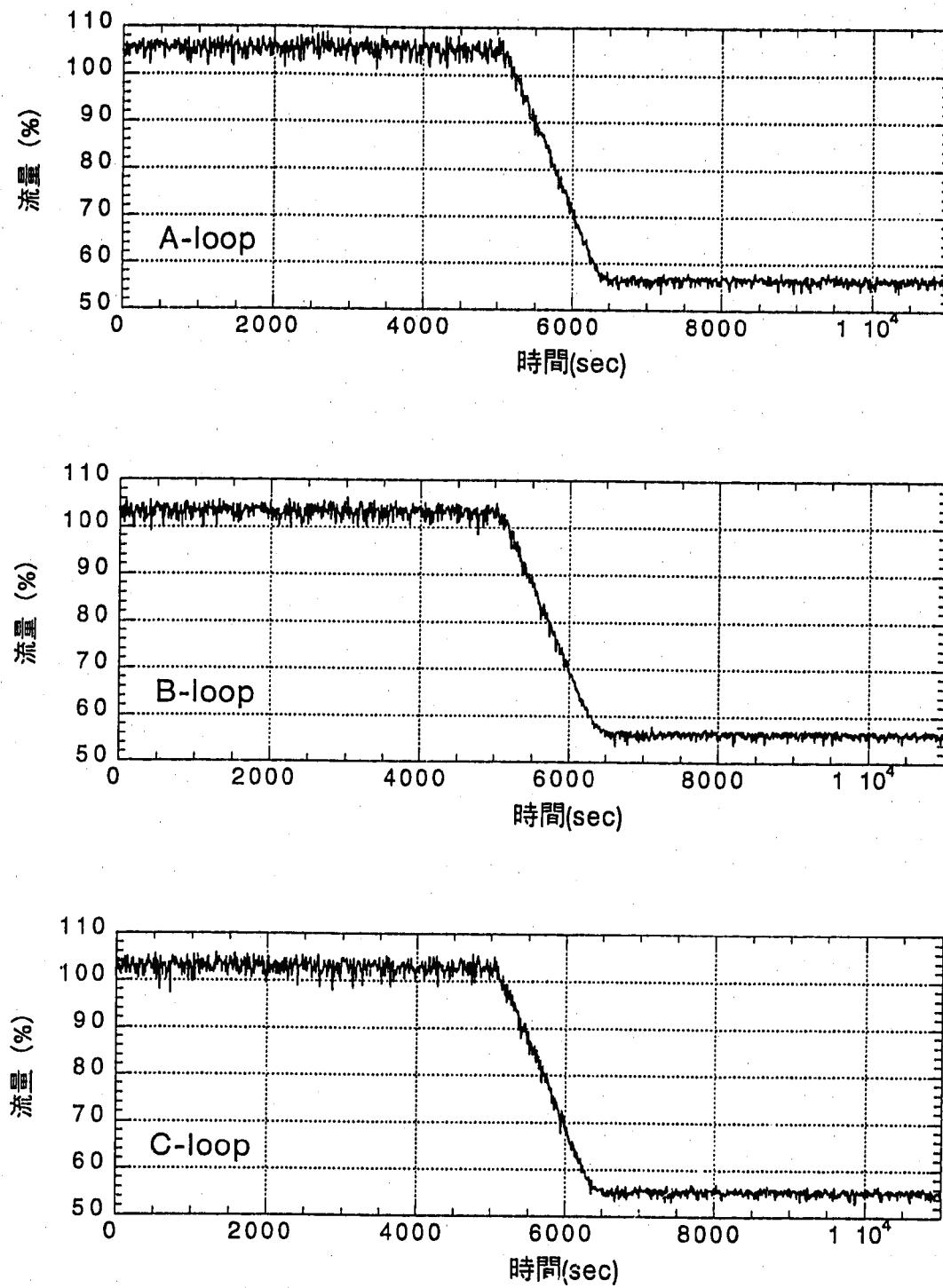


図4.2.1 1次系流量変化（冷却系自然循環模擬試験）

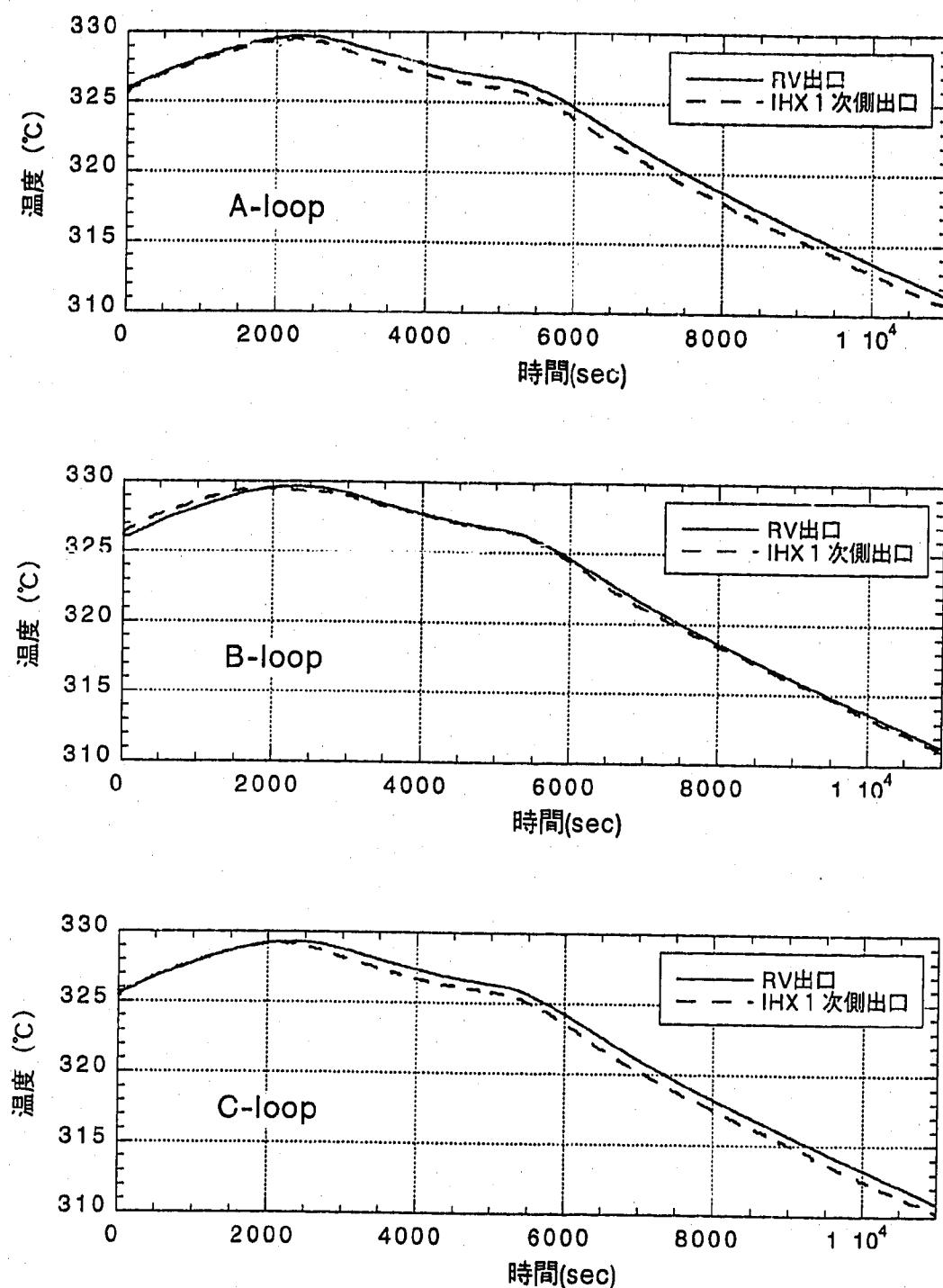


図4.2.2 IHX 1次側出入口温度変化（冷却系自然循環模擬試験）

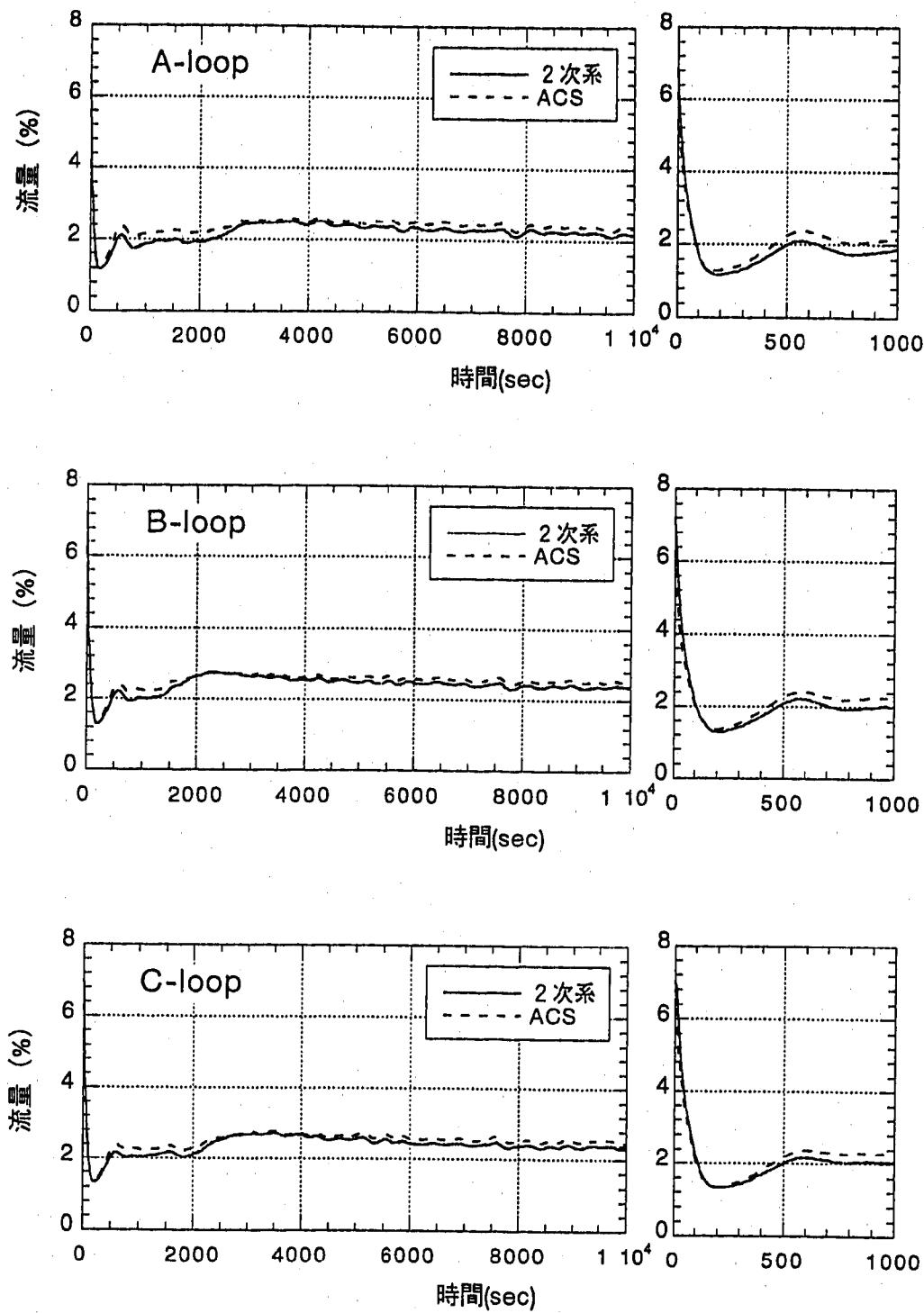


図4.2.3 2次系とACSの各ナトリウム流量変化（冷却系自然循環模擬試験）

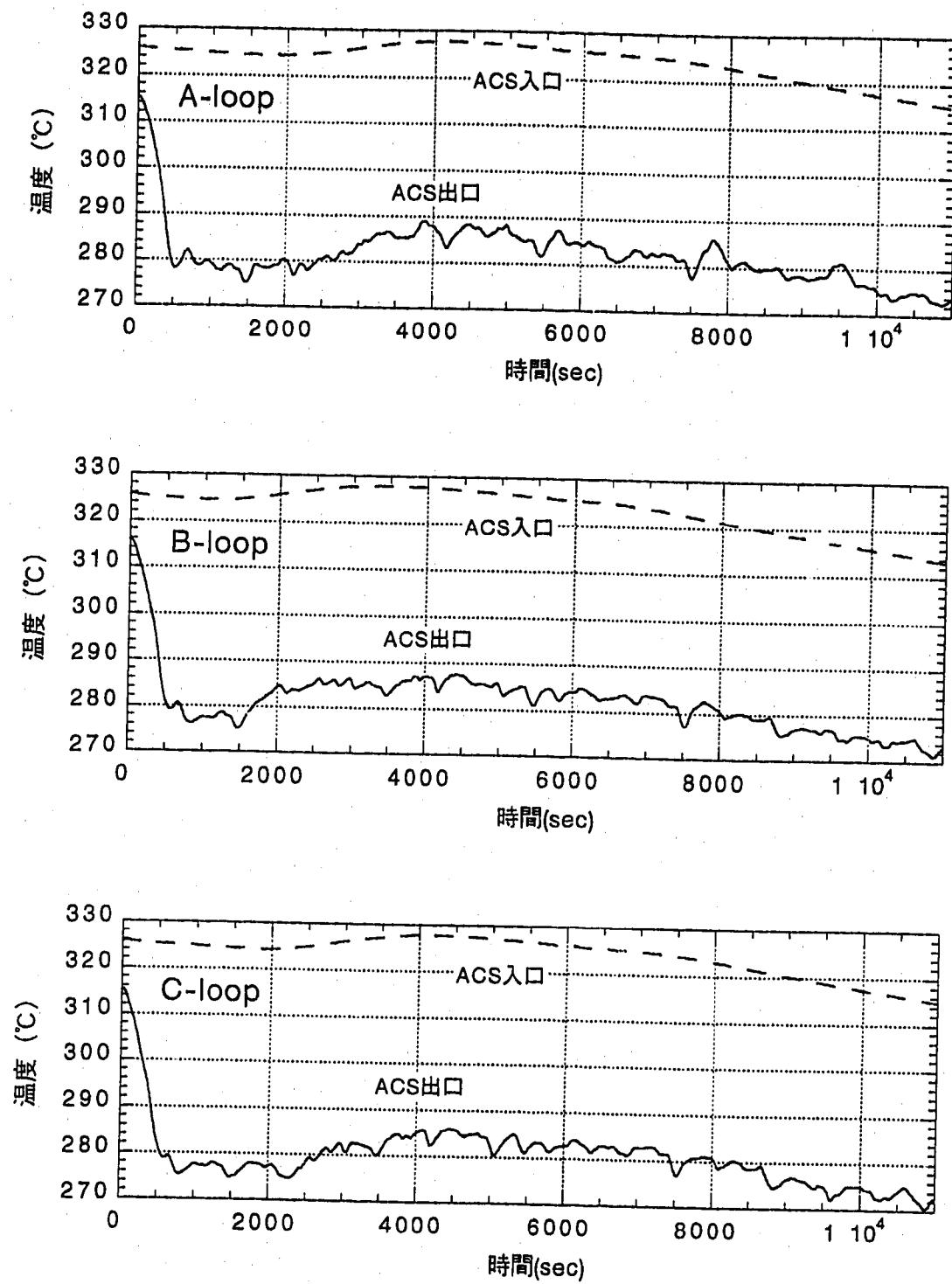


図4.2.4 ACS出入口ナトリウム温度変化（冷却系自然循環模擬試験）

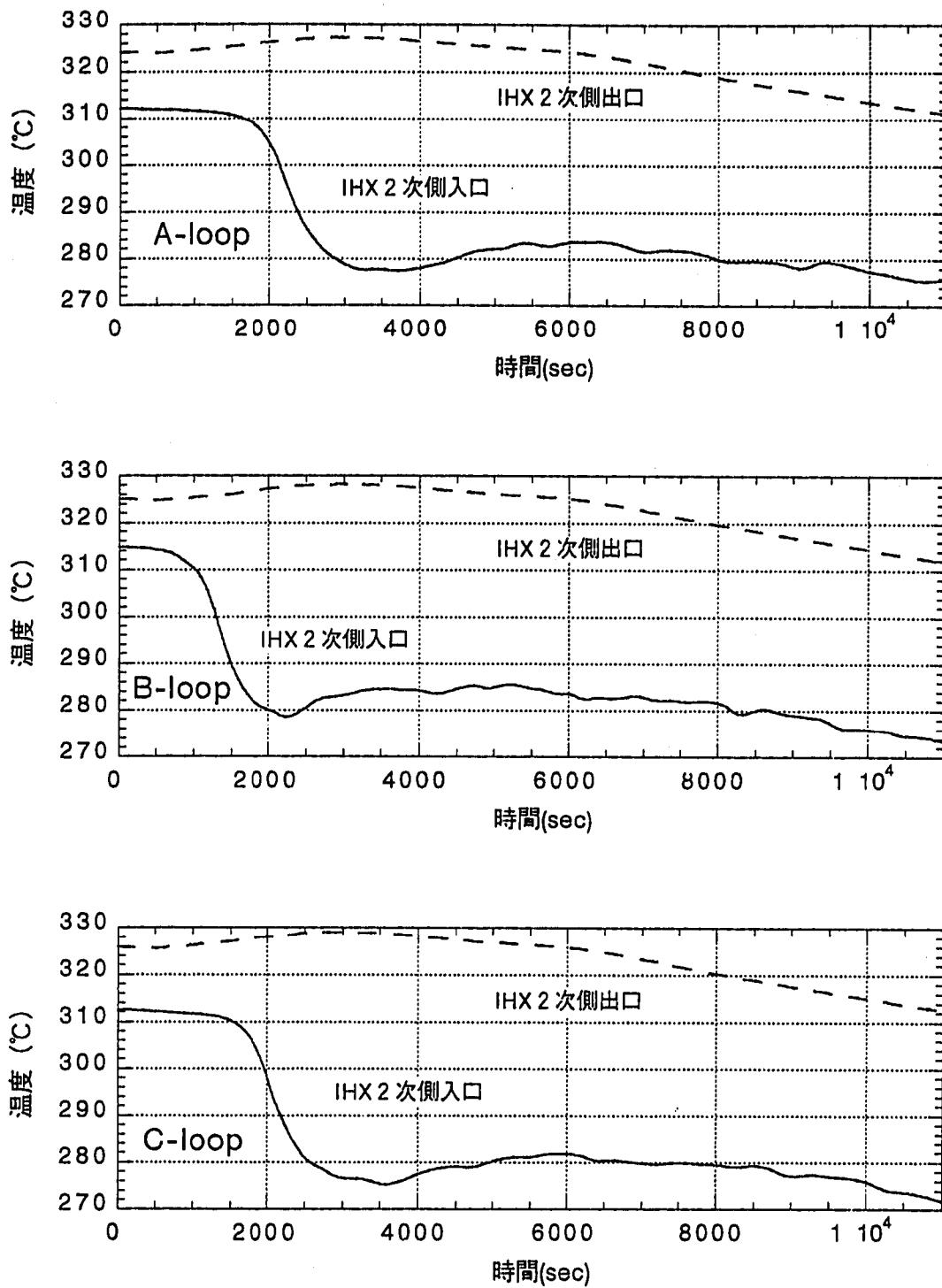


図4.2.5 IHX 2次側出入口温度変化（冷却系自然循環模擬試験）

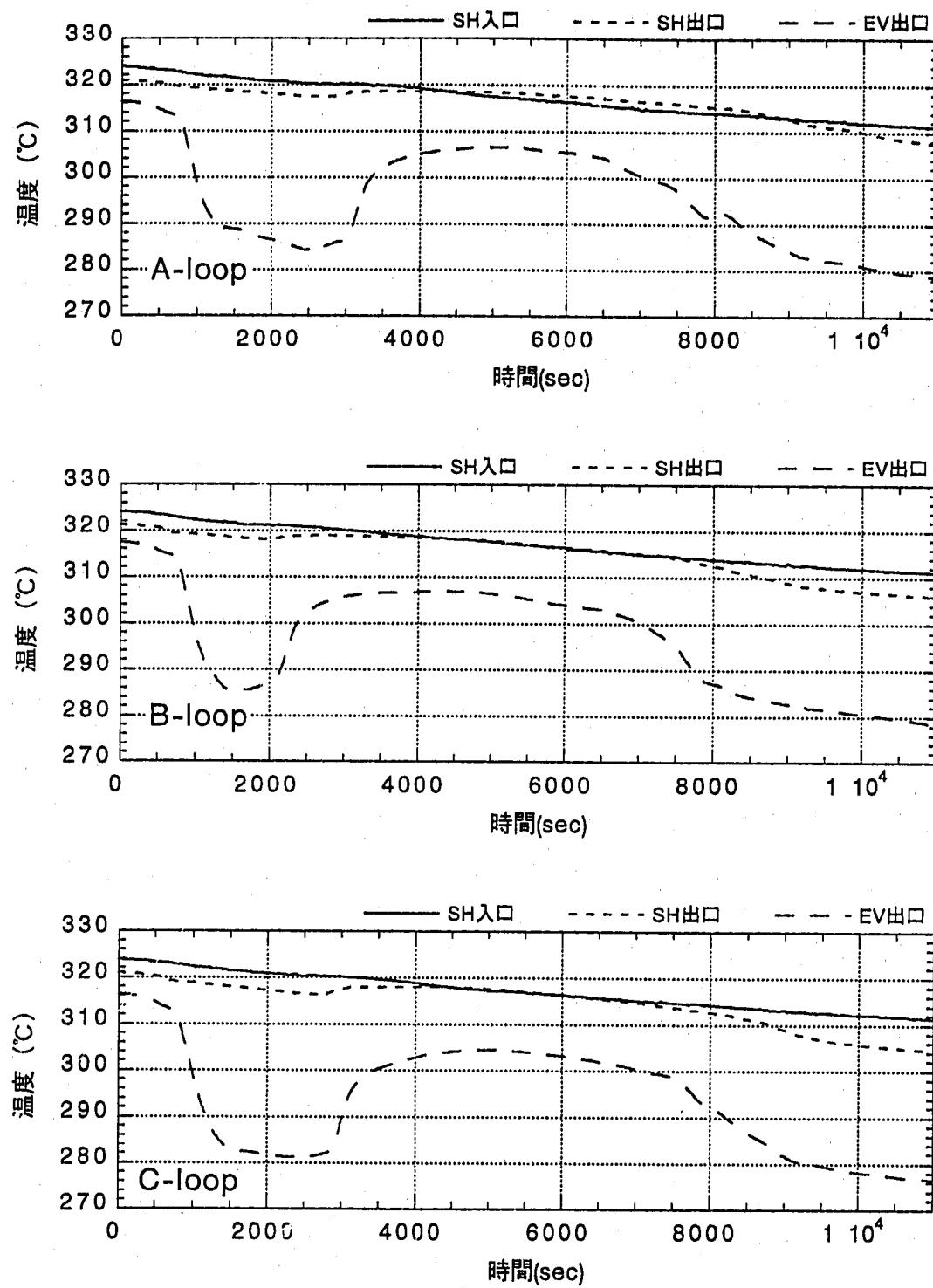


図4.2.6 蒸気発生器周りナトリウム温度変化（冷却系自然循環模擬試験）

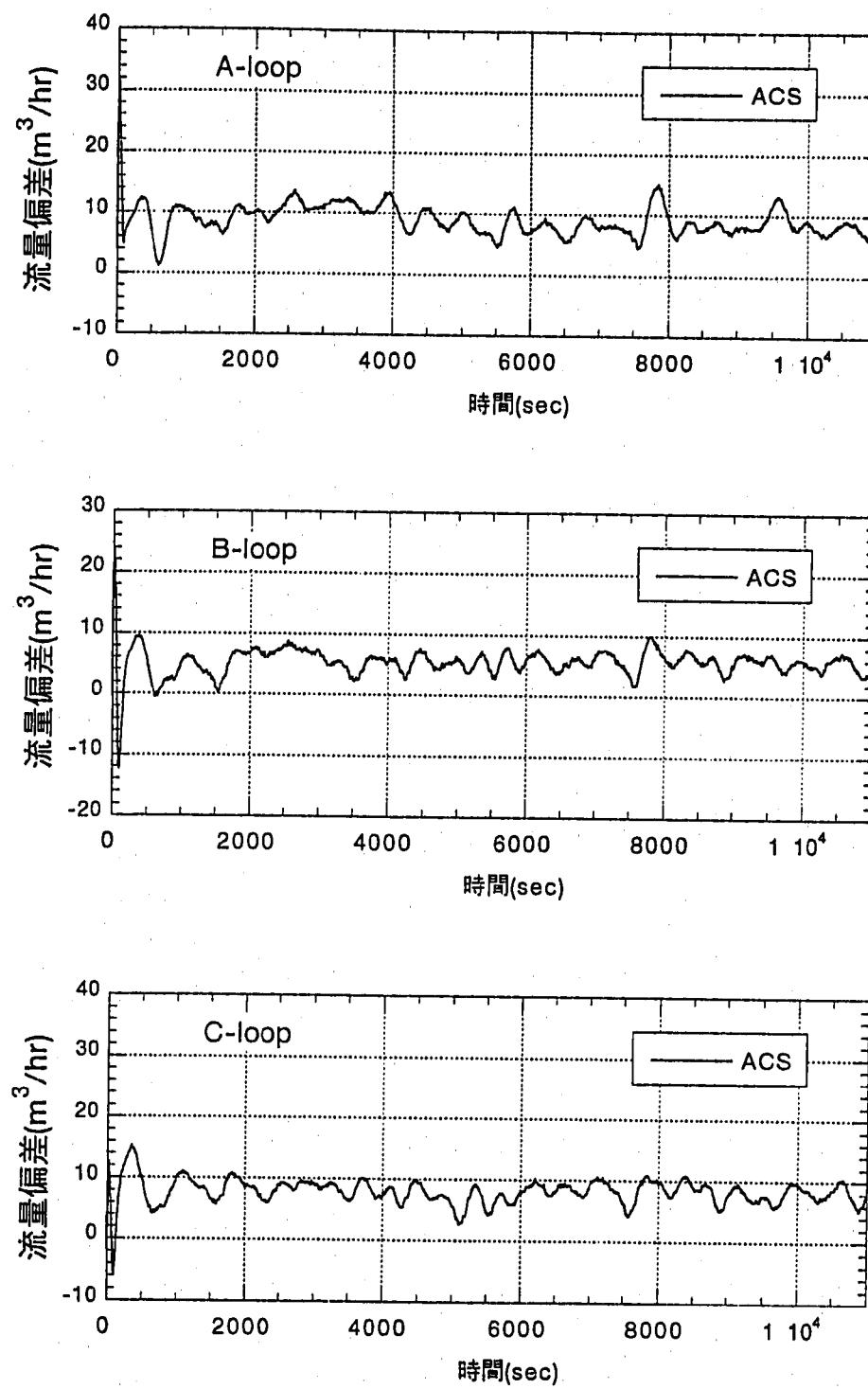


図4.2.7 ACS出口流量の実測値と計算値との偏差（計算値－実測値）

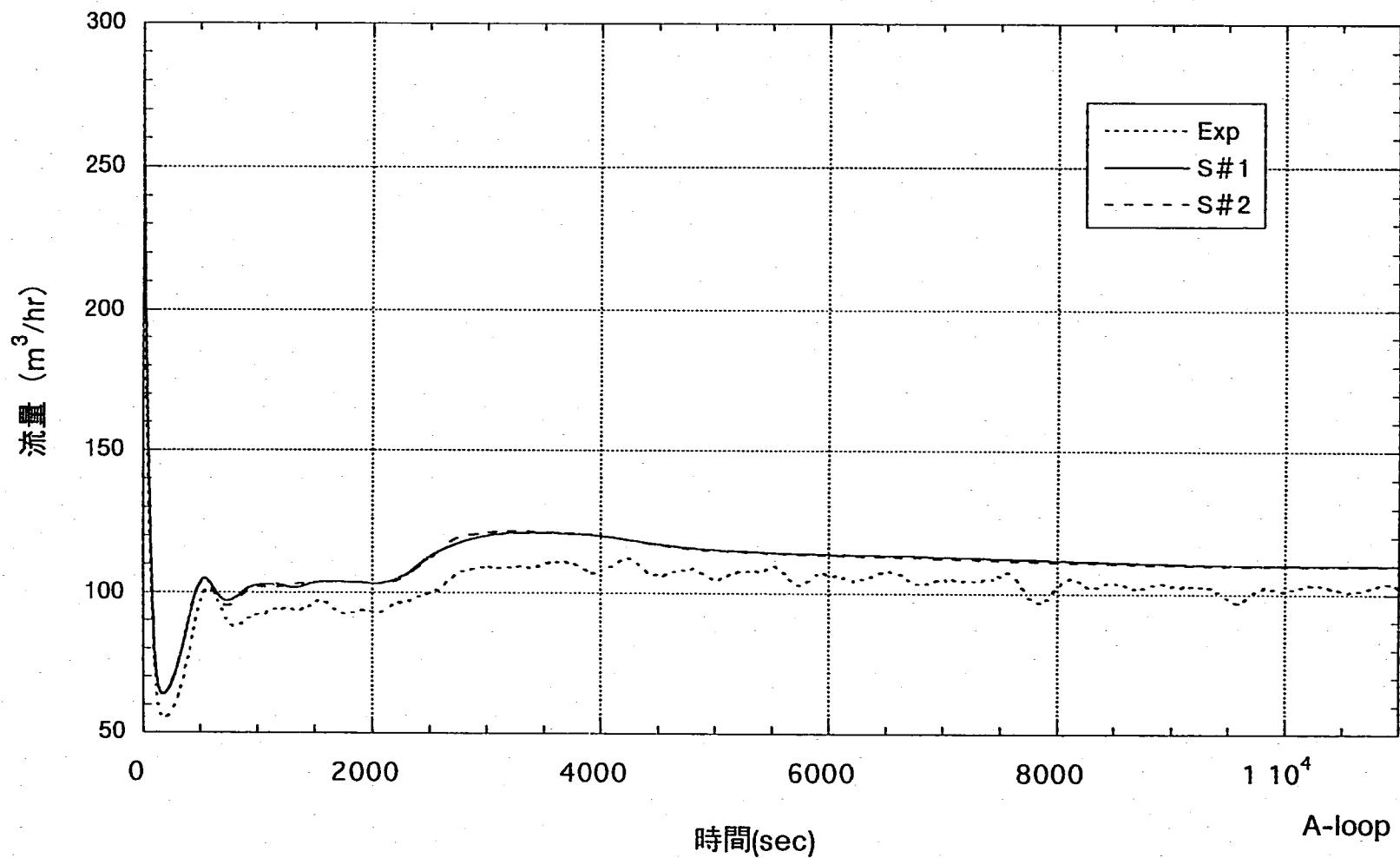


図4.2.8 ACS出口流量の実測値と計算値の比較（Aループ）

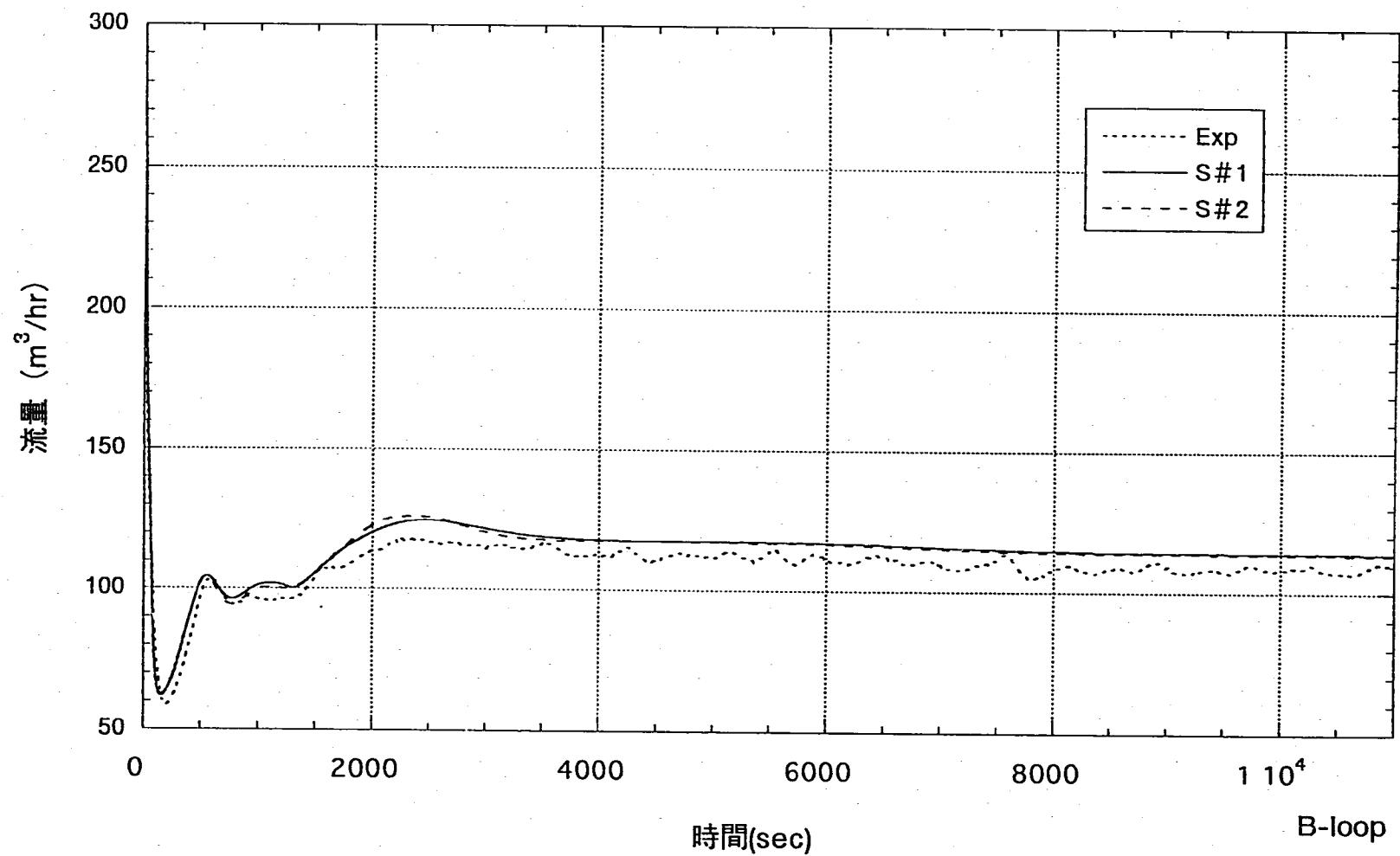


図4.2.9 ACS出口流量の実測値と計算値の比較（Bループ）

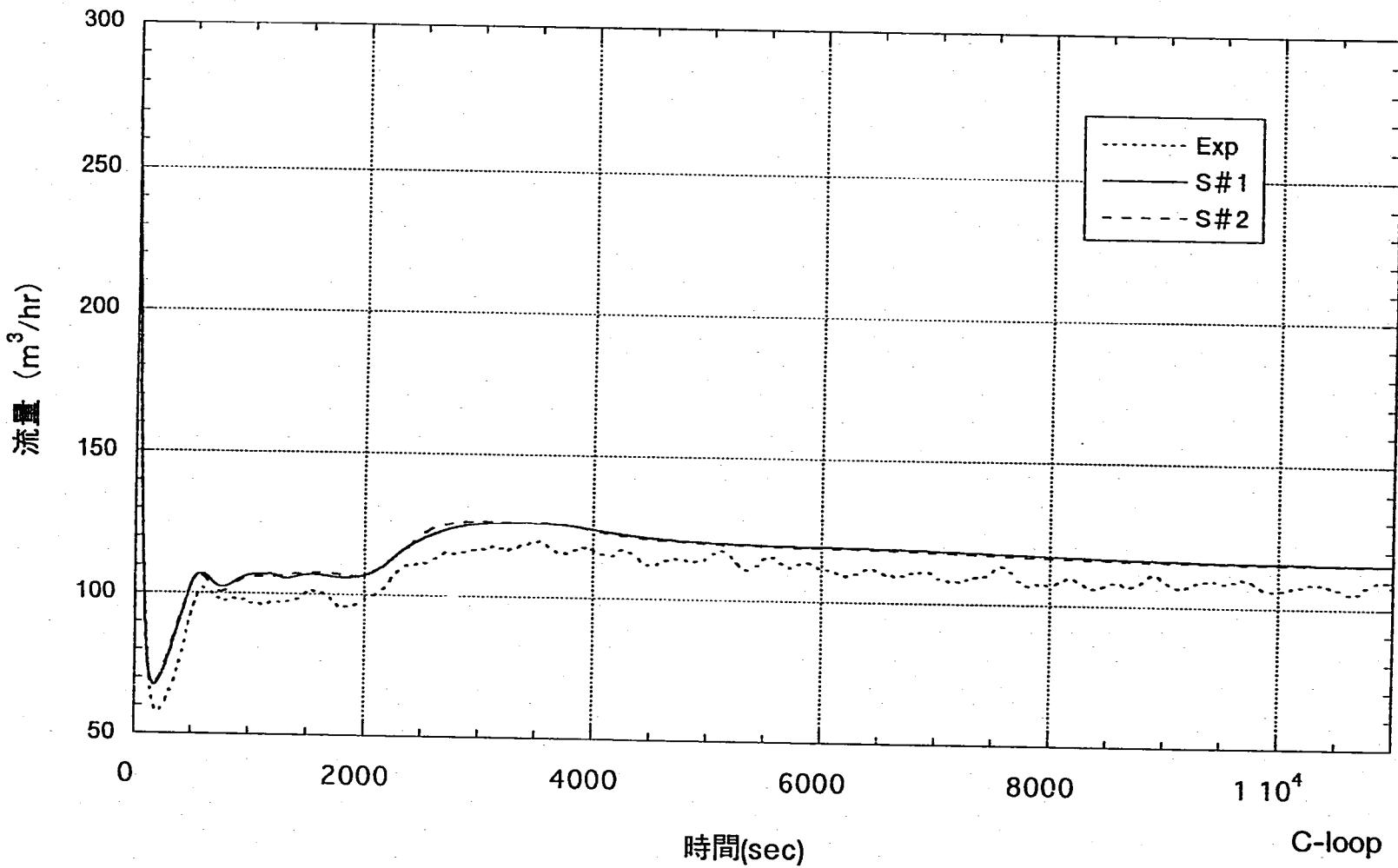


図4.2.10 ACS出口流量の実測値と計算値の比較 (Cループ)

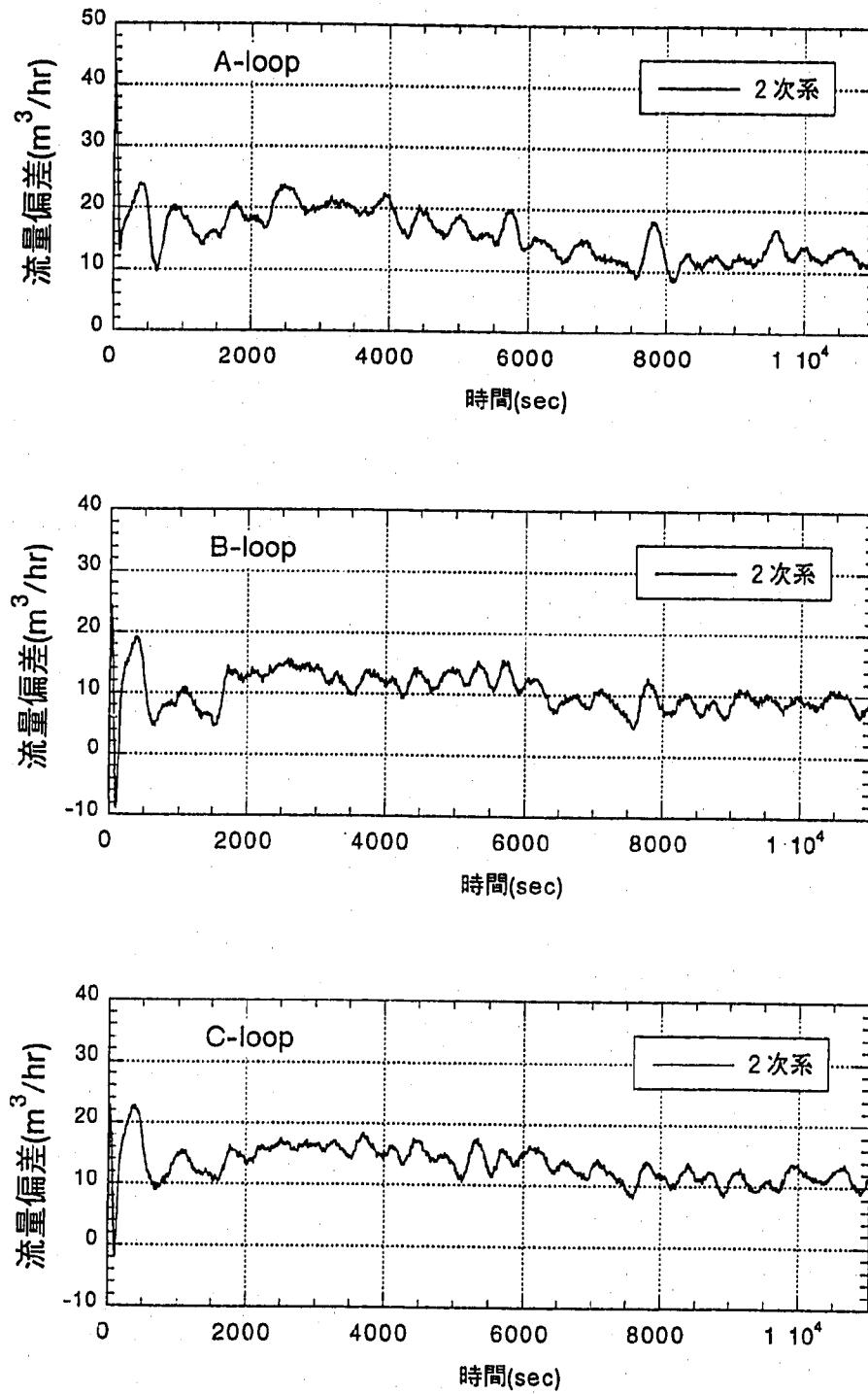


図4.2.11 2次系流量の実測値と計算値の偏差（計算値－実測値）

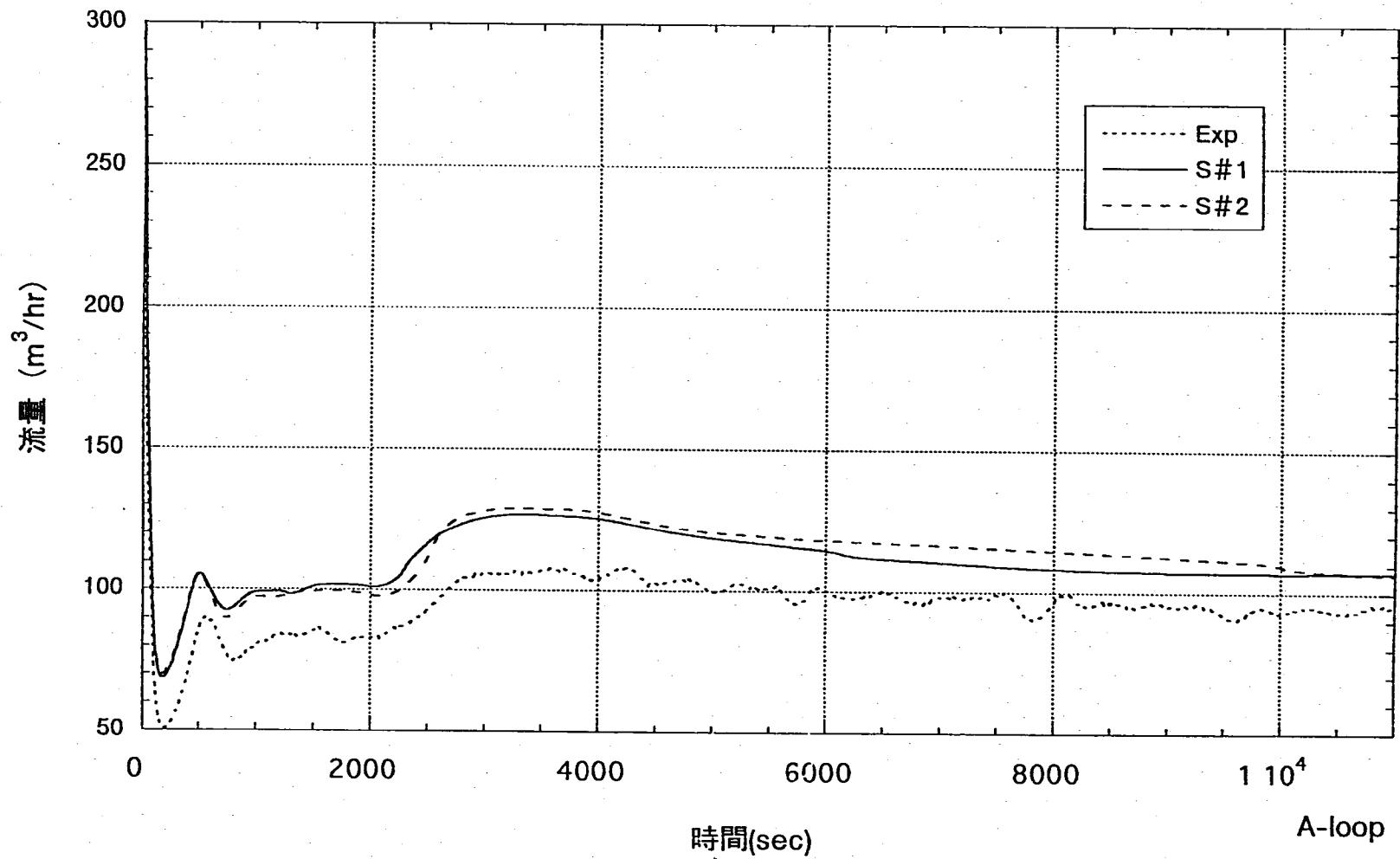


図4.2.12 2次系流量の実測値と計算値の比較 (Aループ)

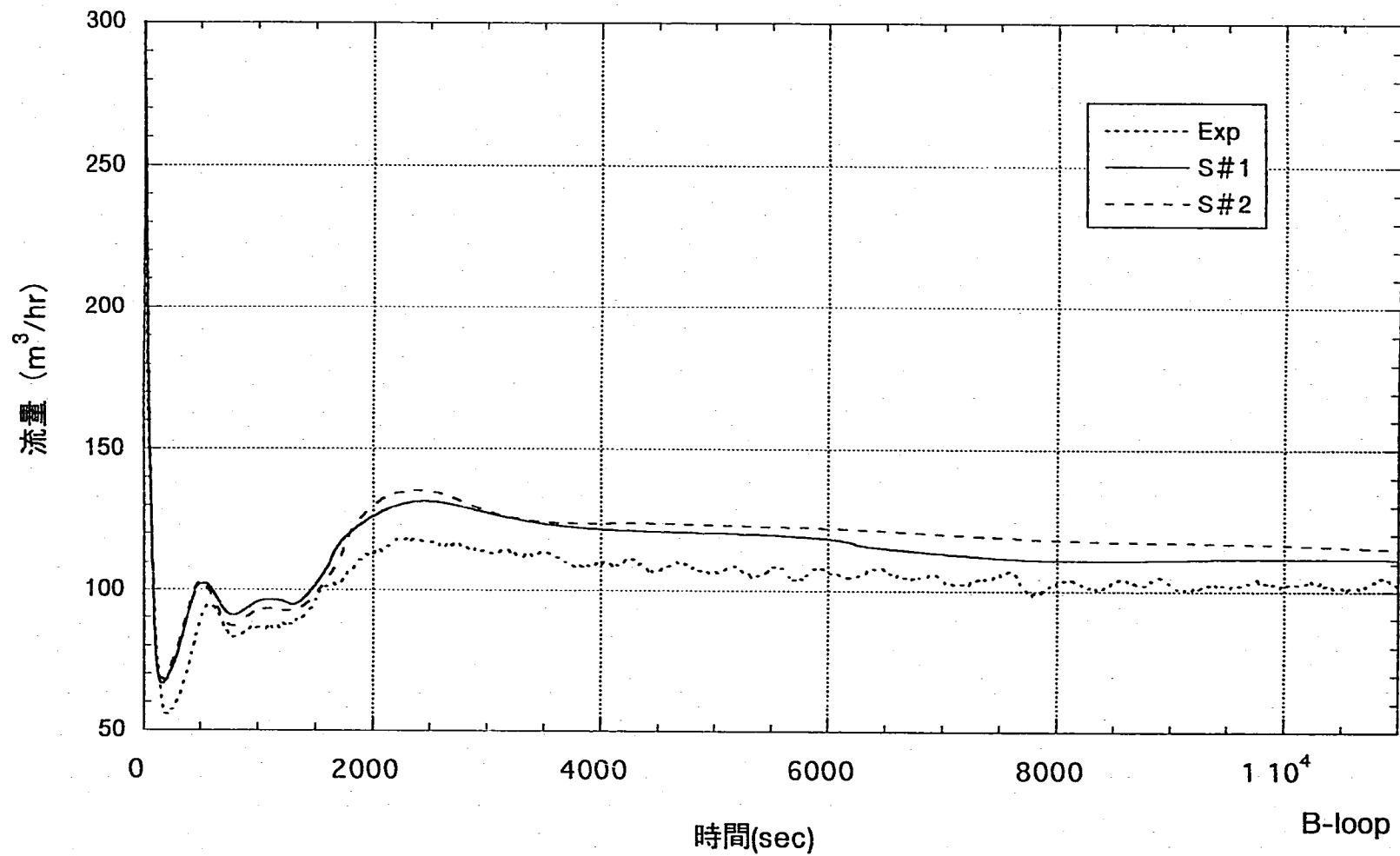


図4.2.13 2次系流量の実測値と計算値の比較（Bループ）

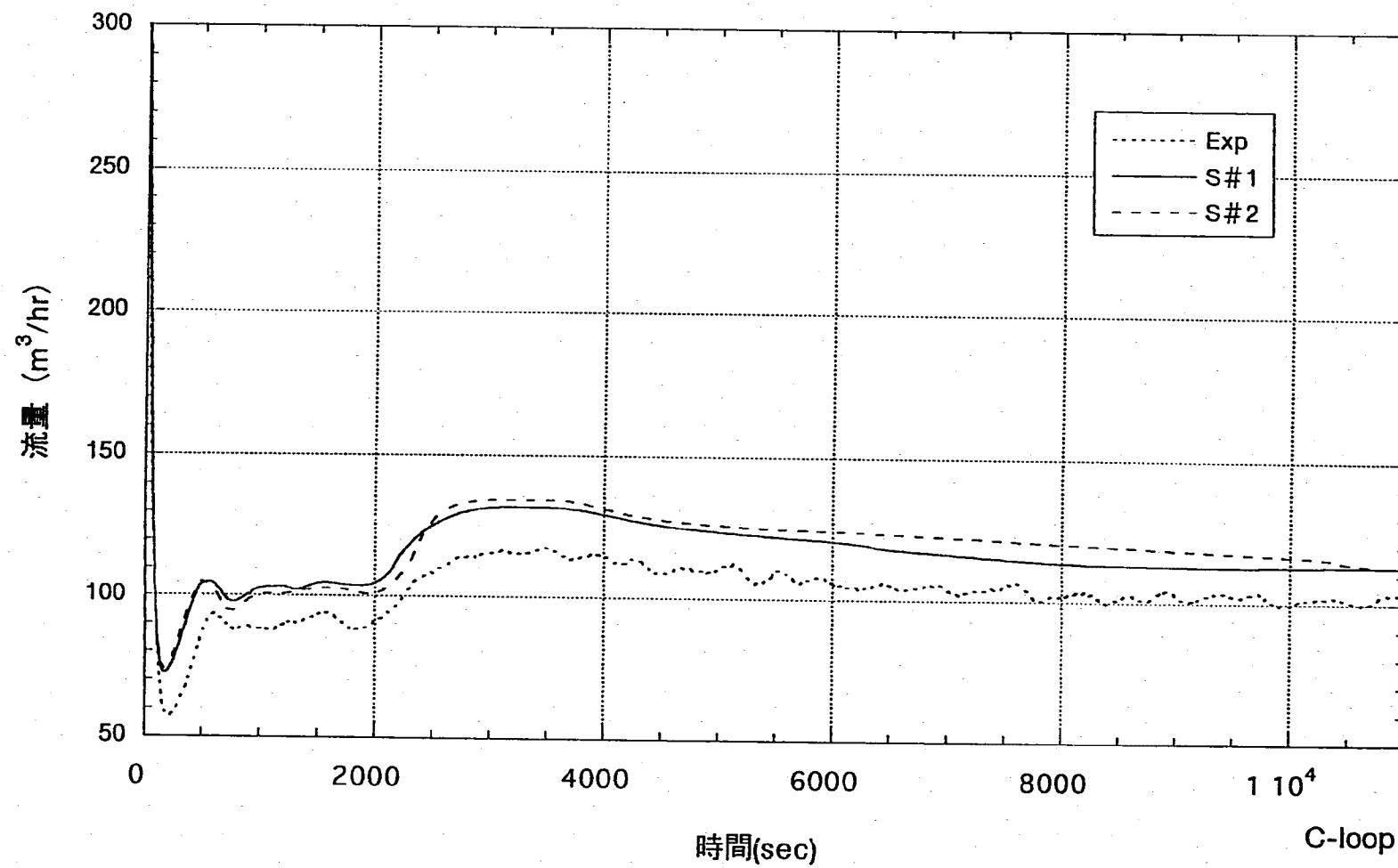


図4.2.14 2次系流量の実測値と計算値の比較 (Cループ)

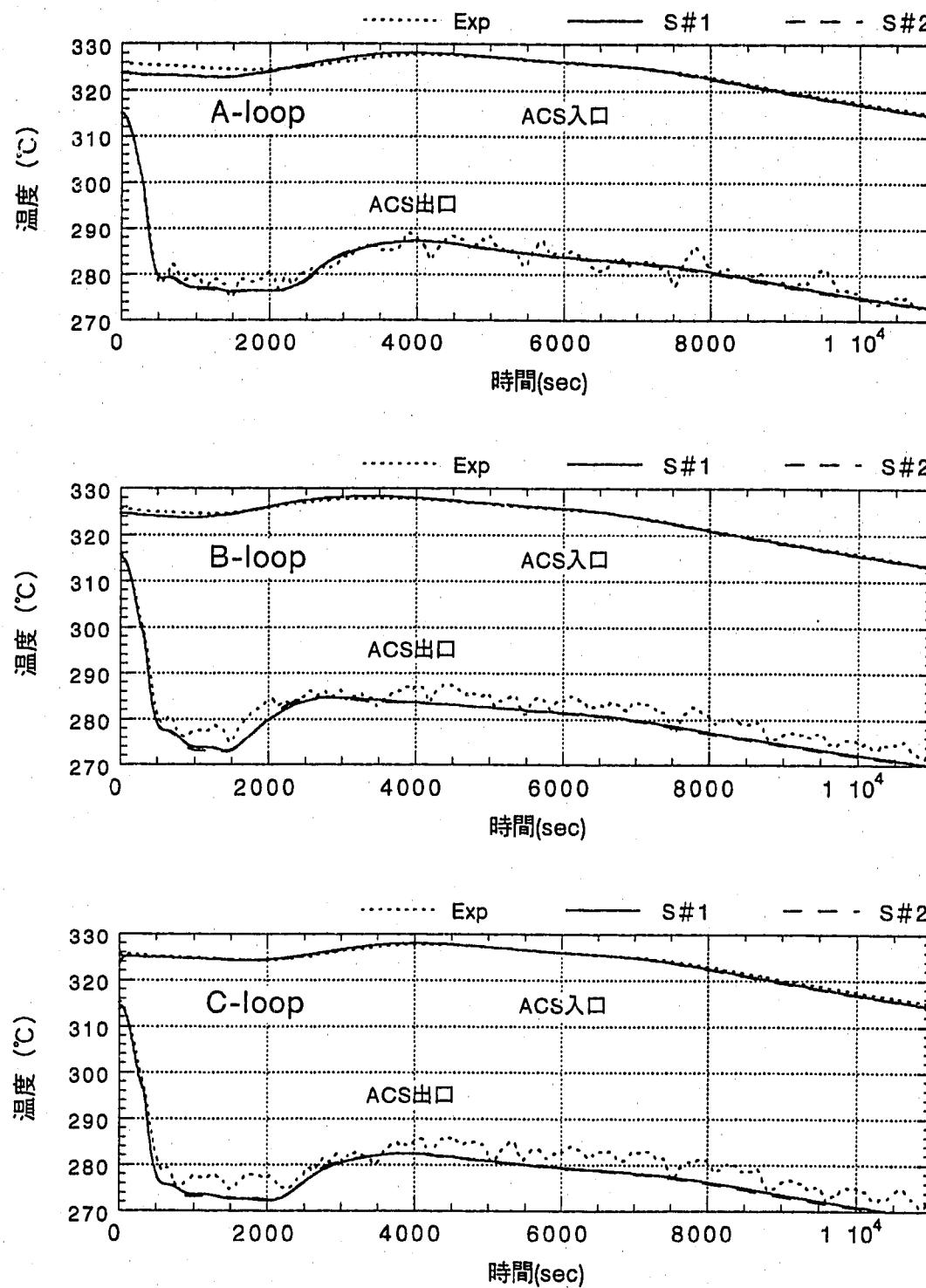


図4.2.15 ACS出入口温度の実測値と計算値の比較

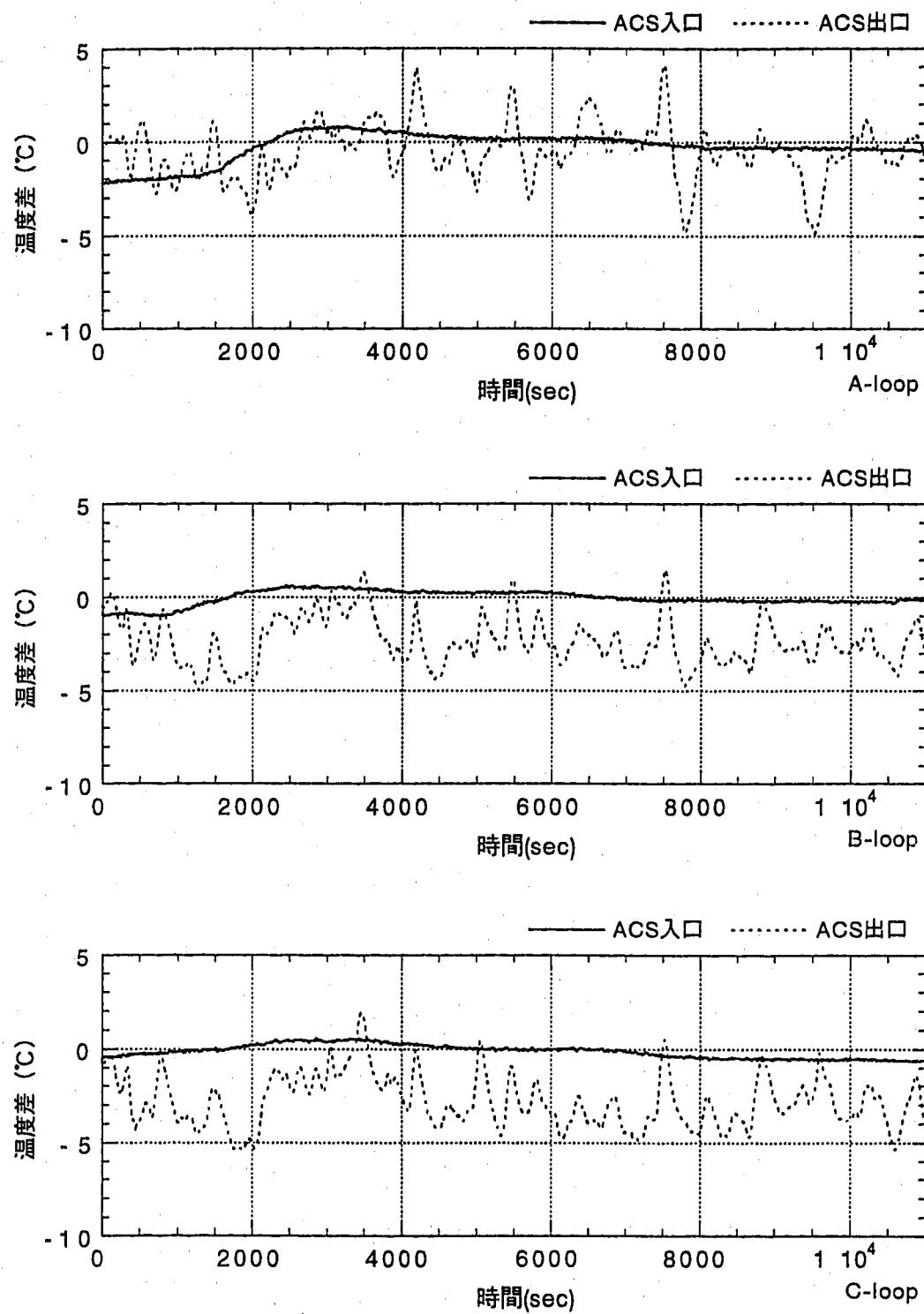


図4.2.16 ACS出入口温度の実測値と計算値の偏差（計算値－実測値）

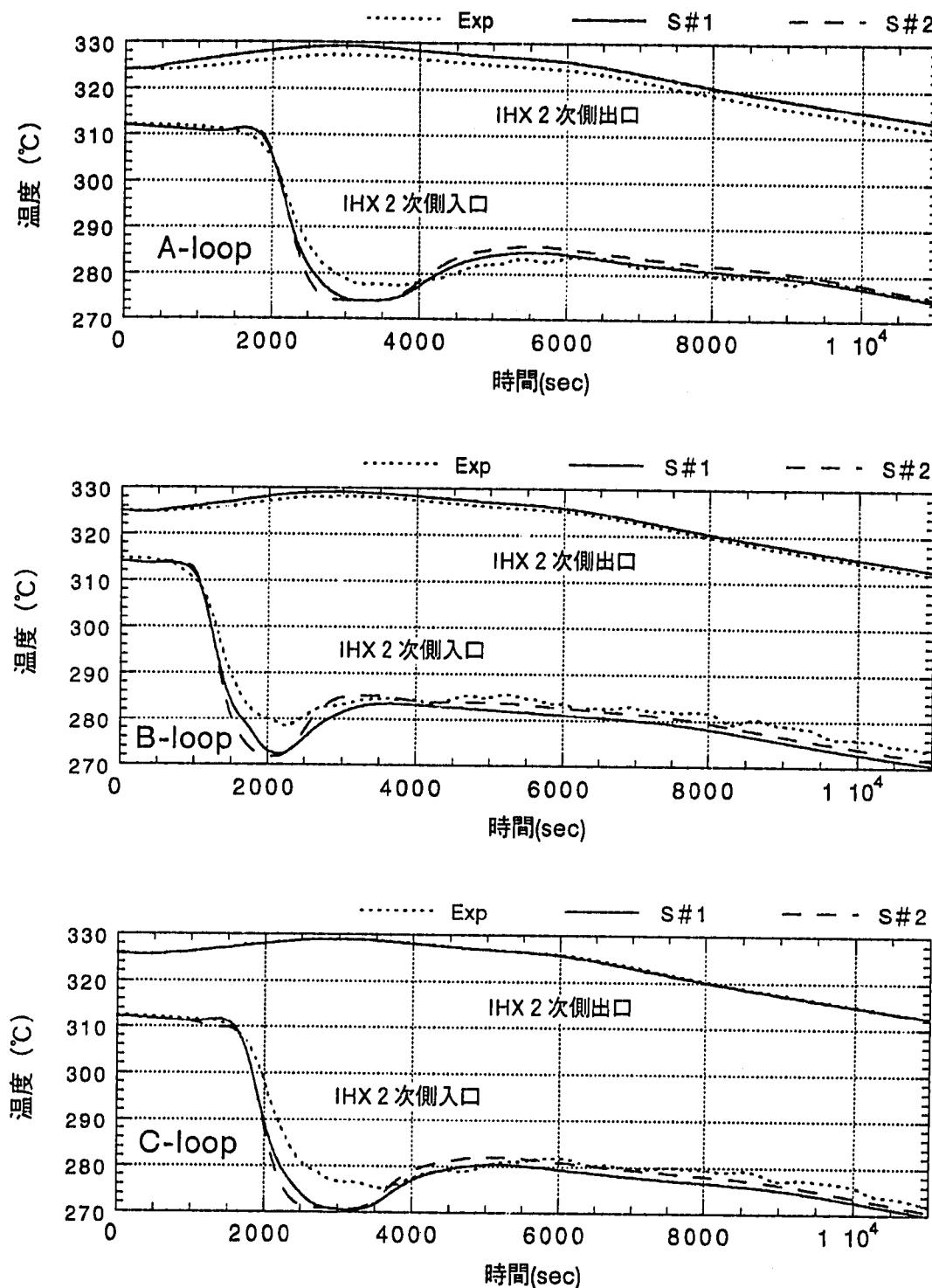


図4.2.17 IHX 2 次側出入口温度の実測値と計算値の比較

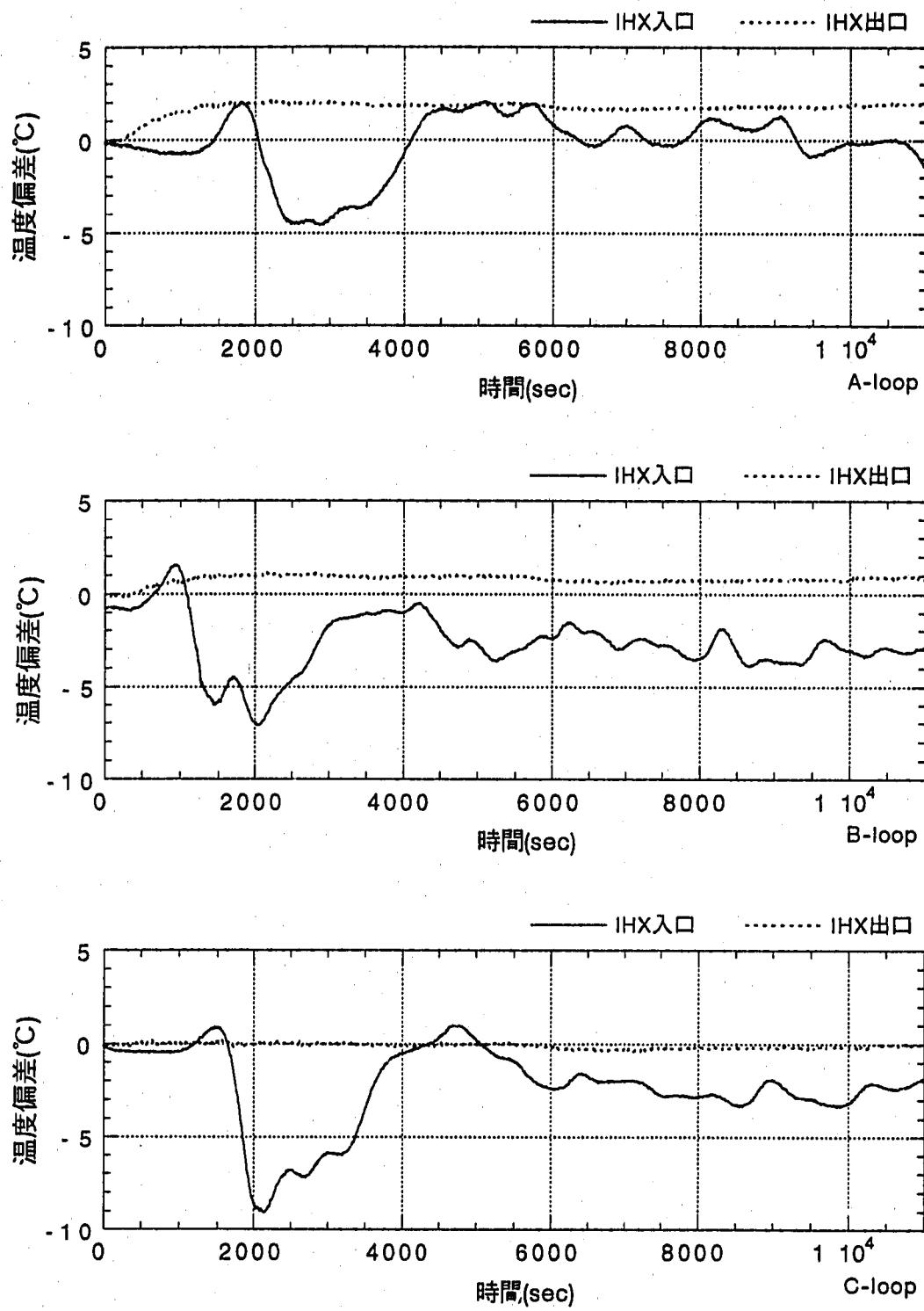


図4.2.18 IHX 2次側出入口温度の実測値と計算値の偏差（計算値－実測値）

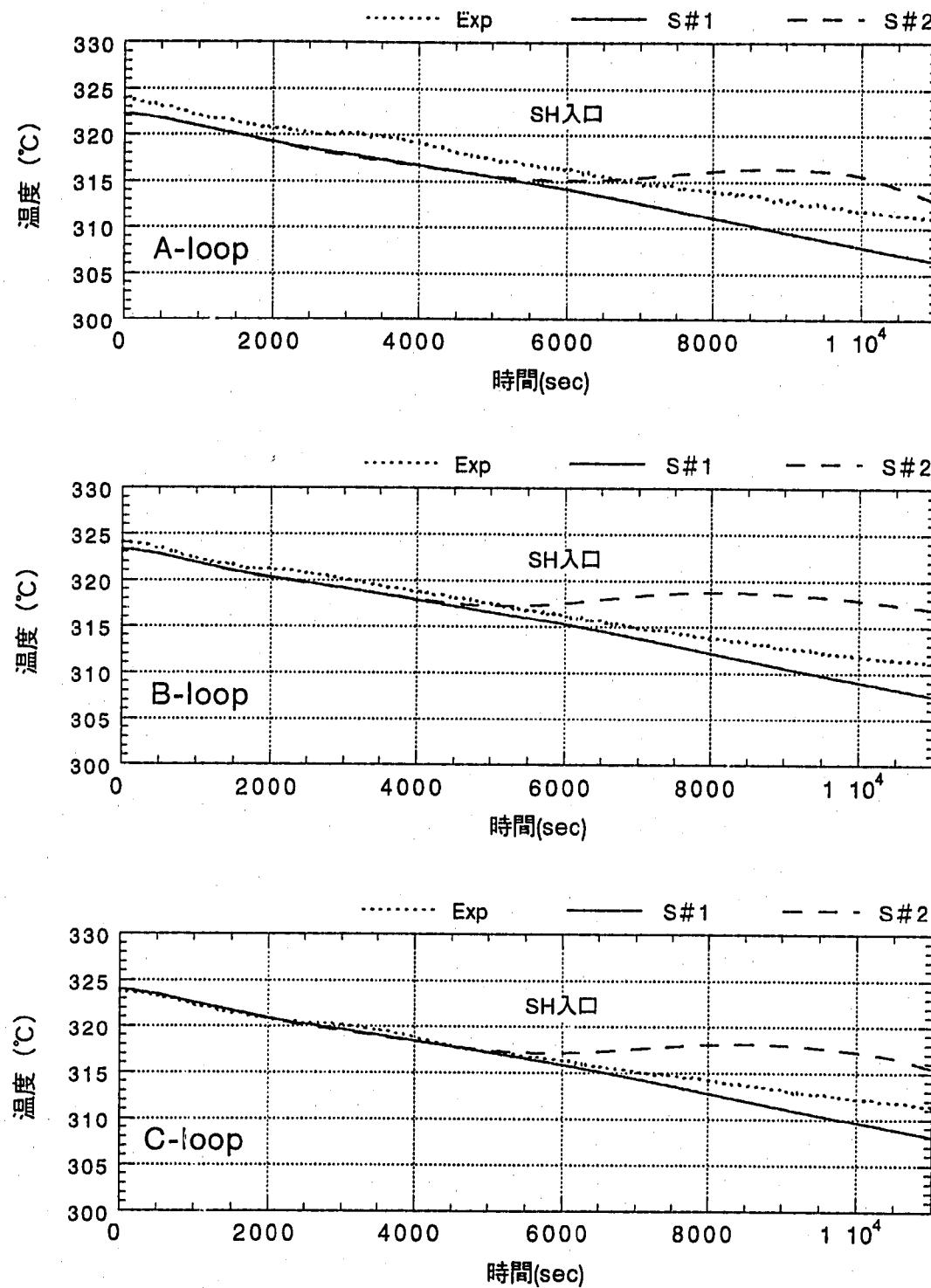


図4.2.19 過熱器入口温度の実測値と計算値の比較

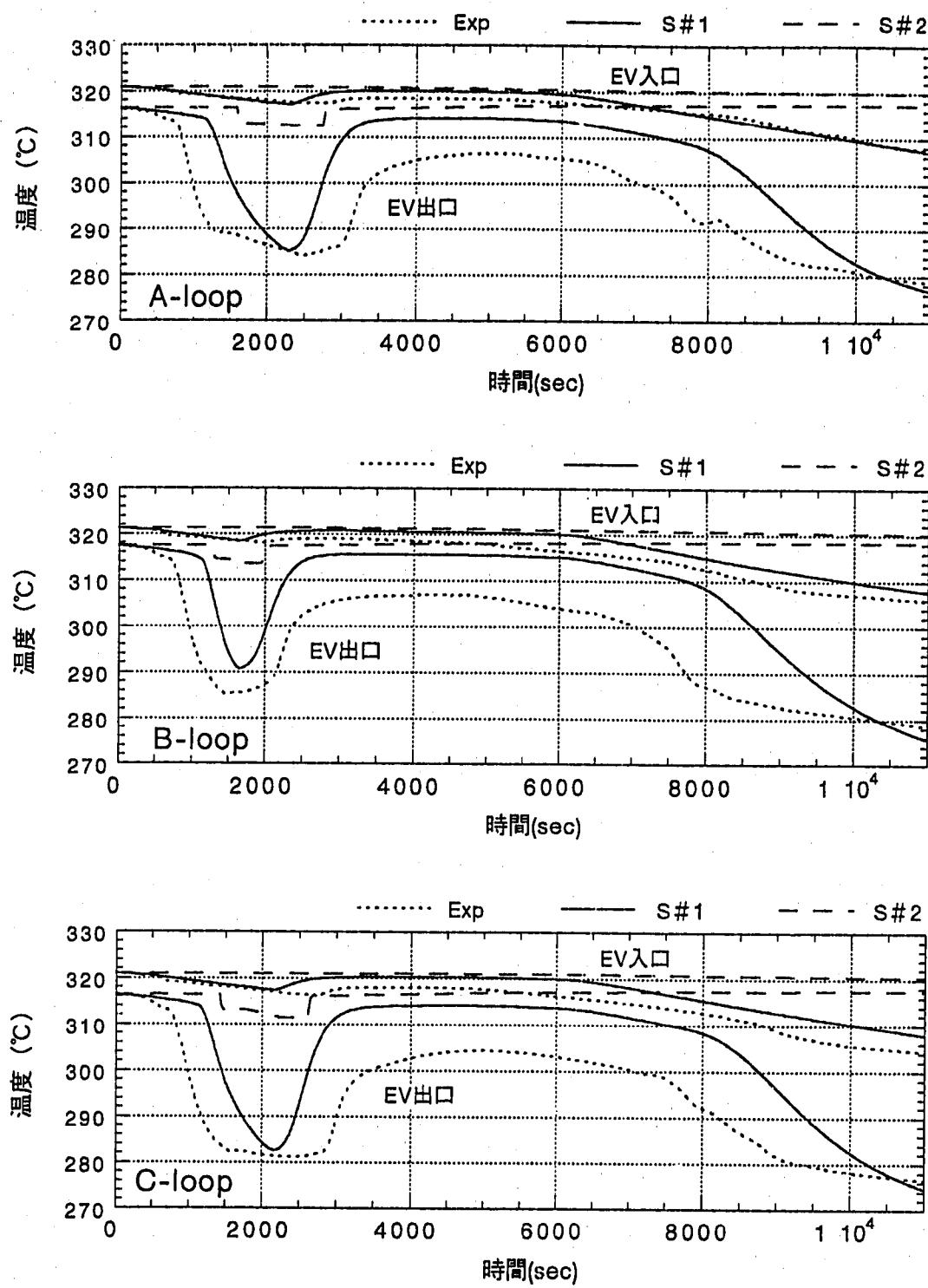


図4.2.20 蒸発器出入口温度の実測値と計算値の比較

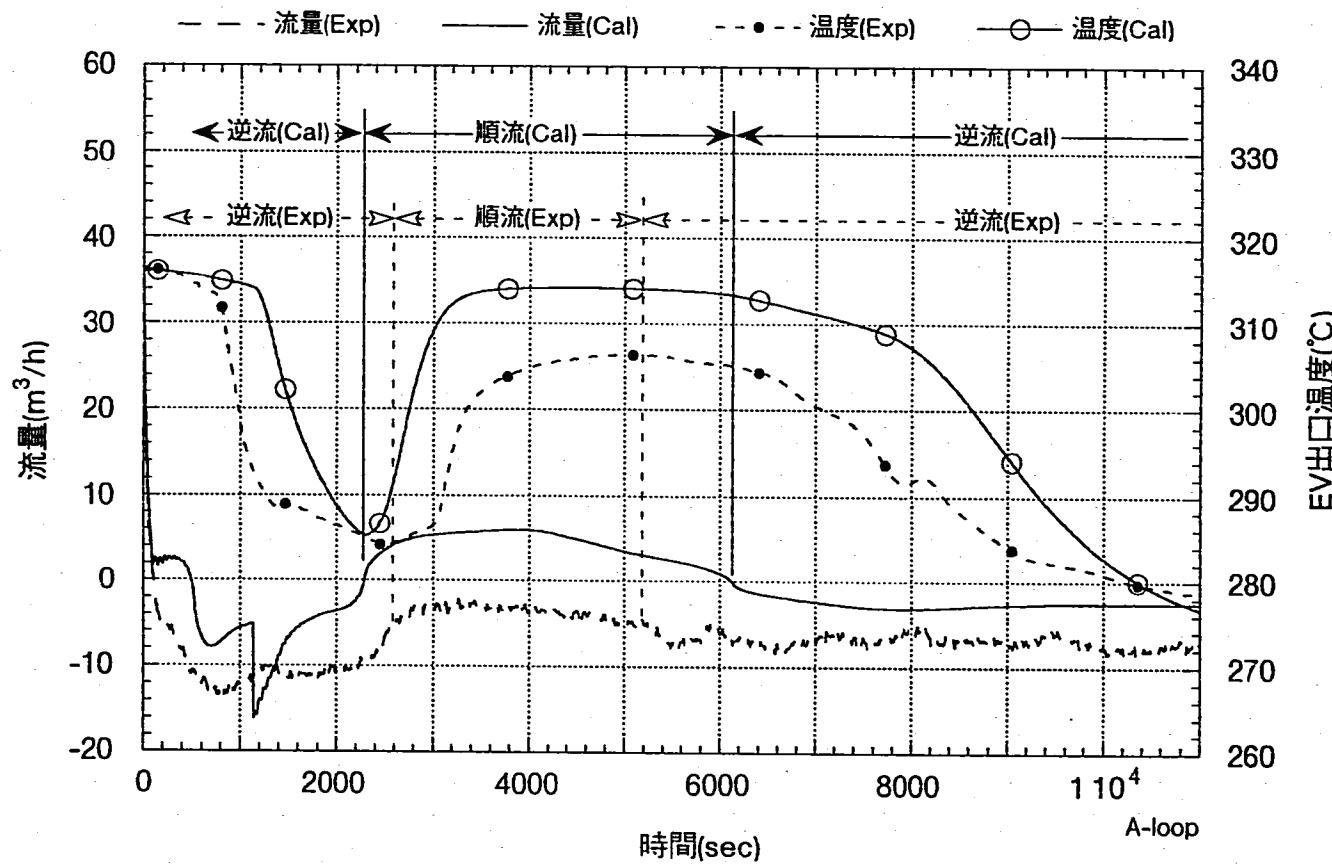


図4.2.21 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較（Aループ）

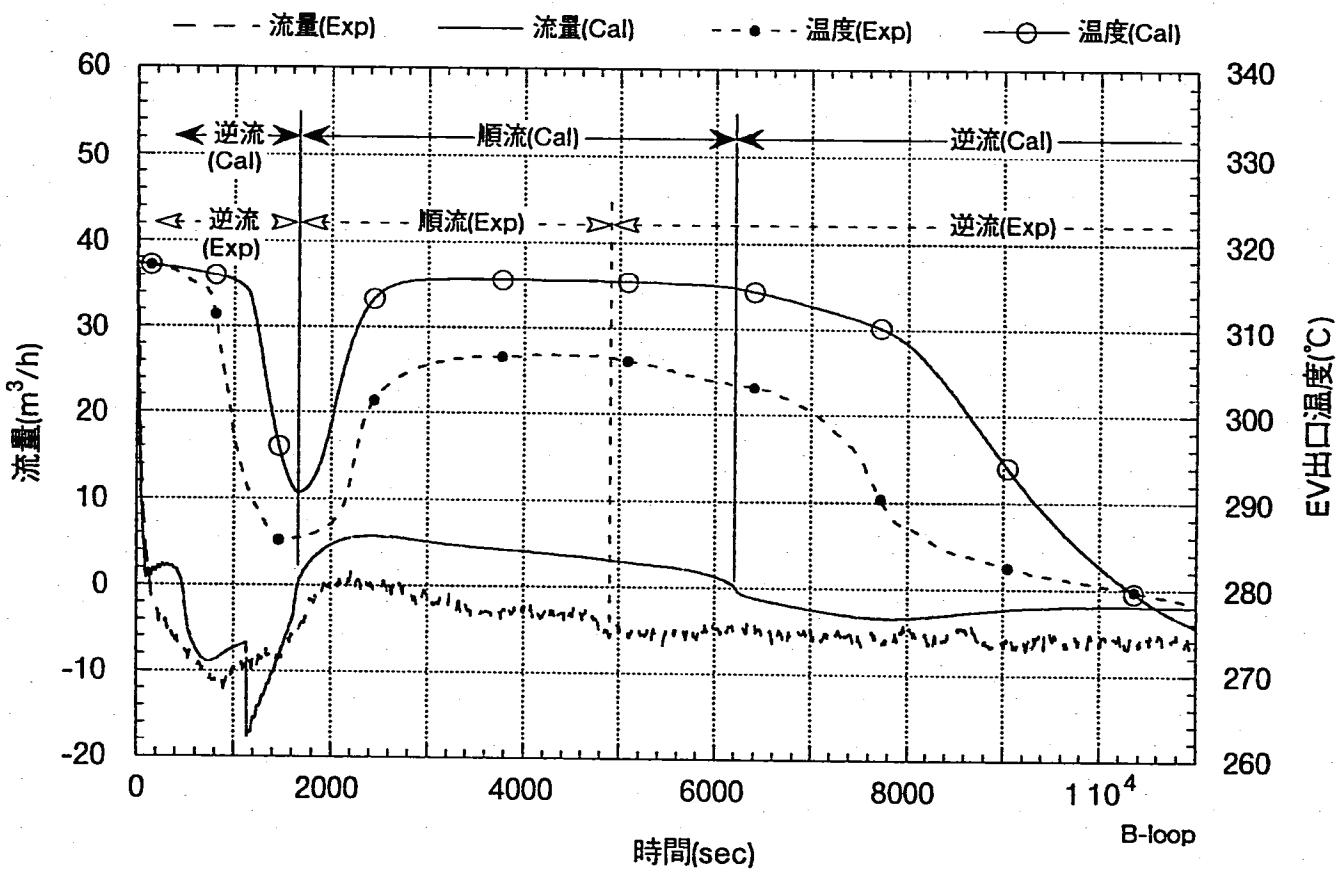


図4.2.22 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較 (Bループ)

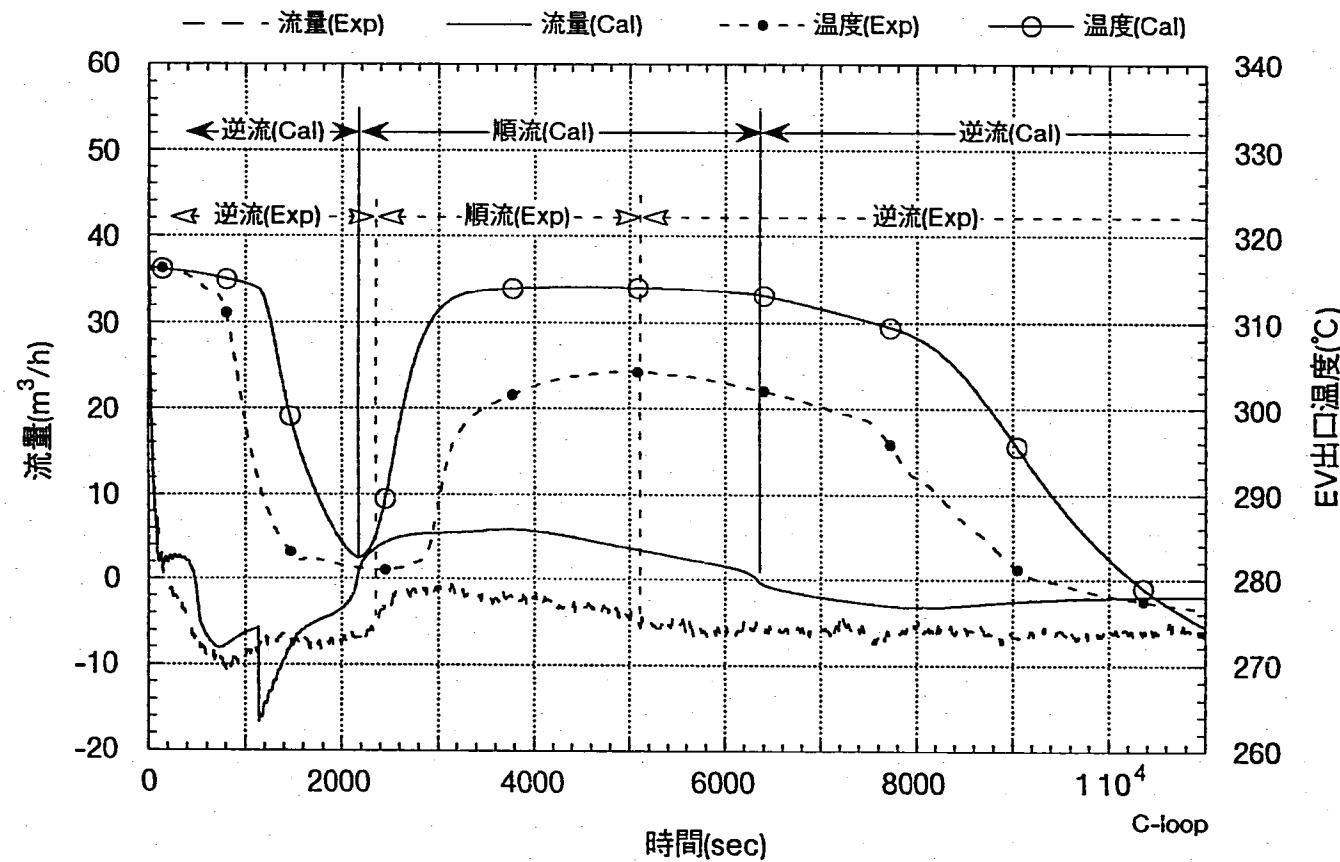


図4.2.23 蒸発器出口温度変化と流量変化の比較 (Cループ)

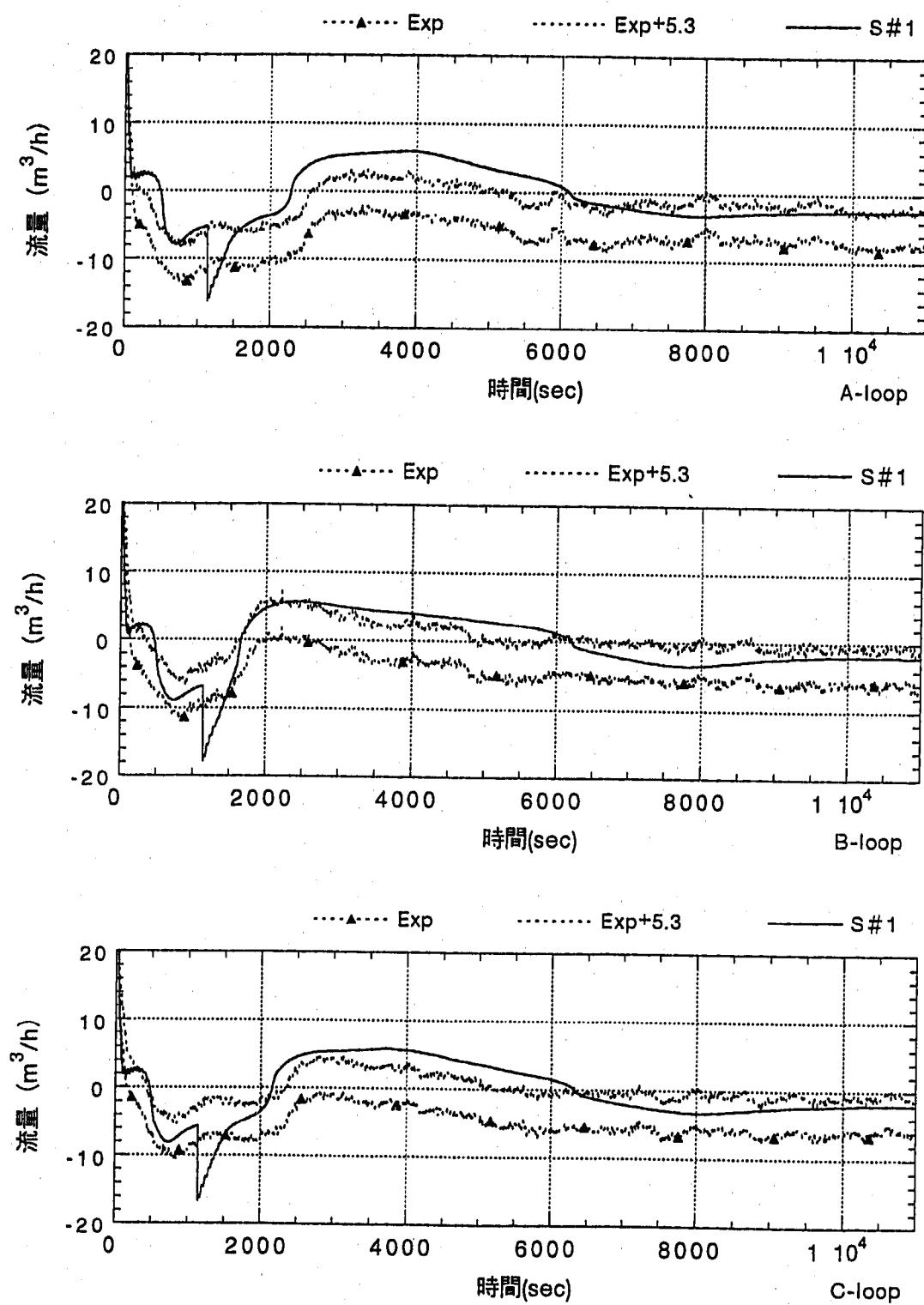


図4.2.24 SG側自然循環流量の補正結果

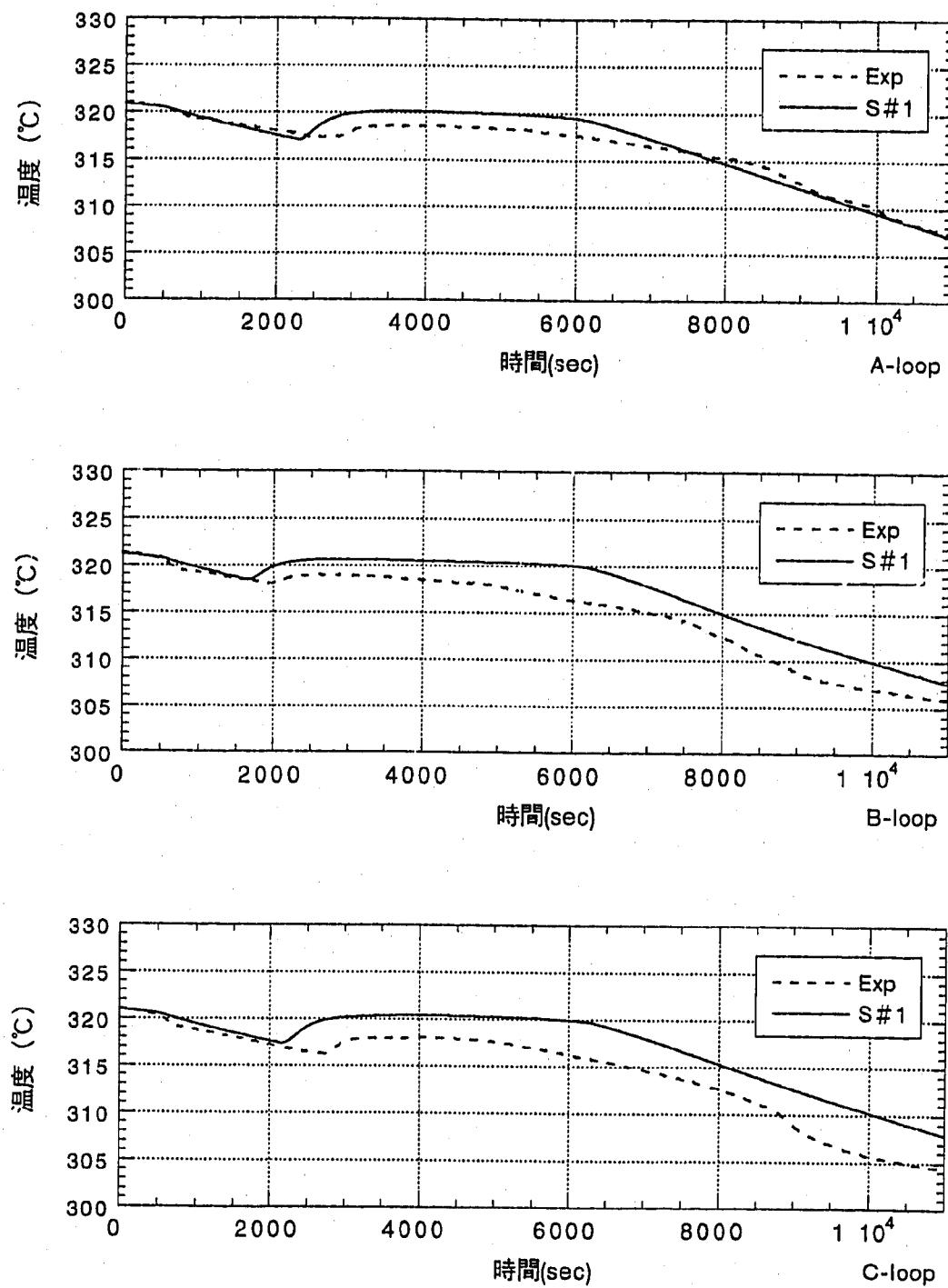


図4.2.25 蒸発器入口温度の実測値と計算値の比較

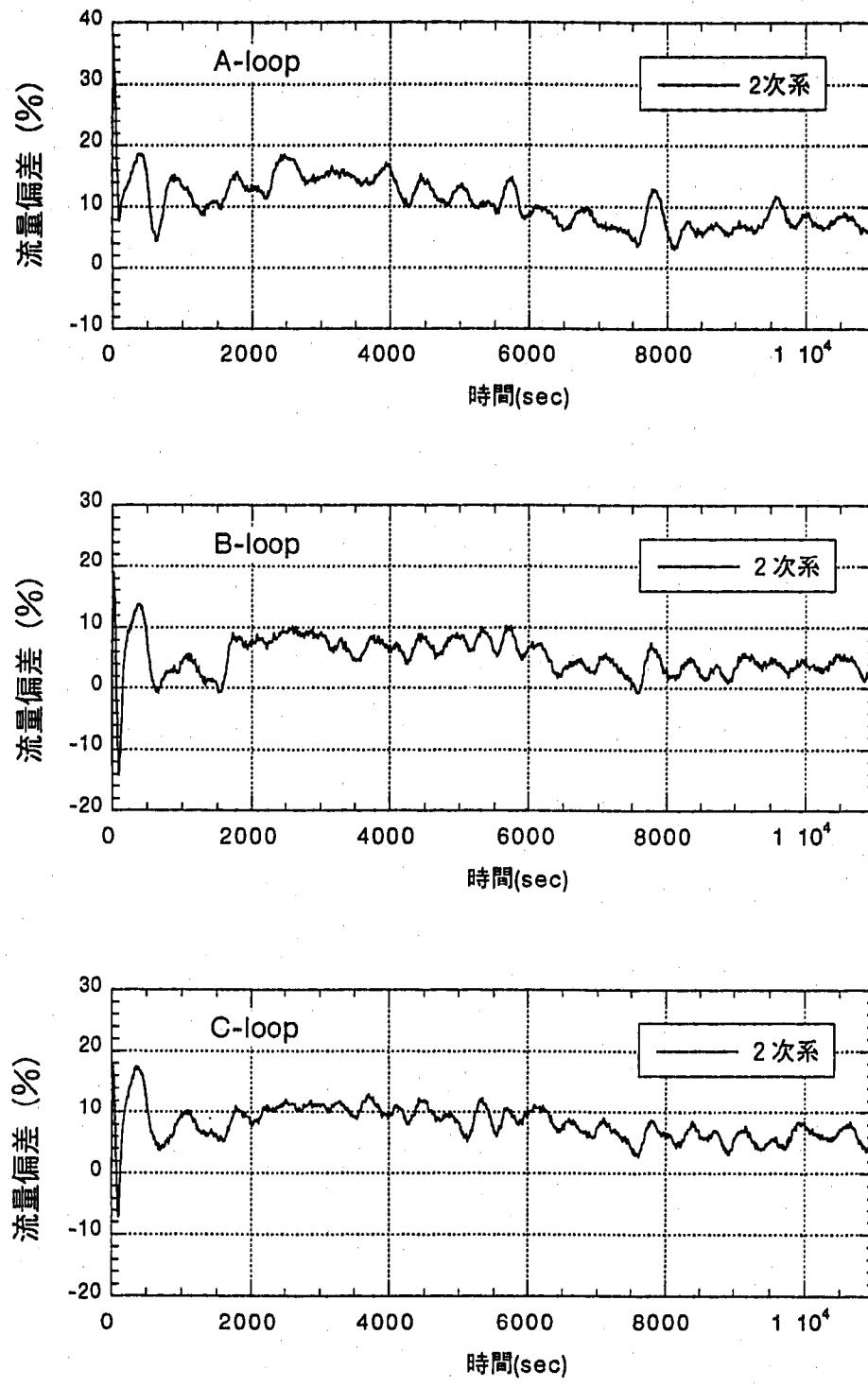


図4.2.26 ACS自然循環流量の実測値と計算値の偏差（計算値－実測値）

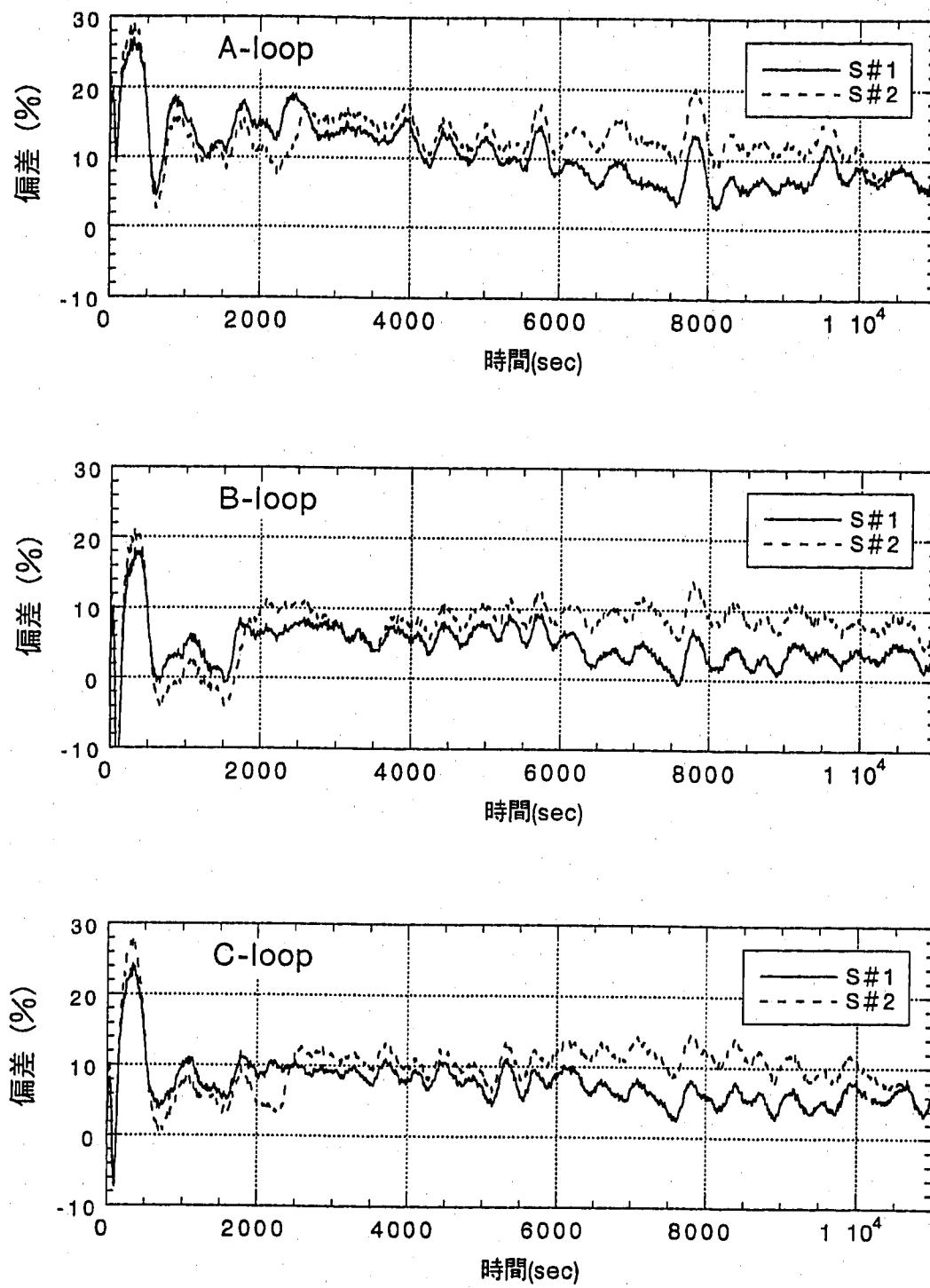


図4.2.27 補正後の2次系自然循環流量の偏差

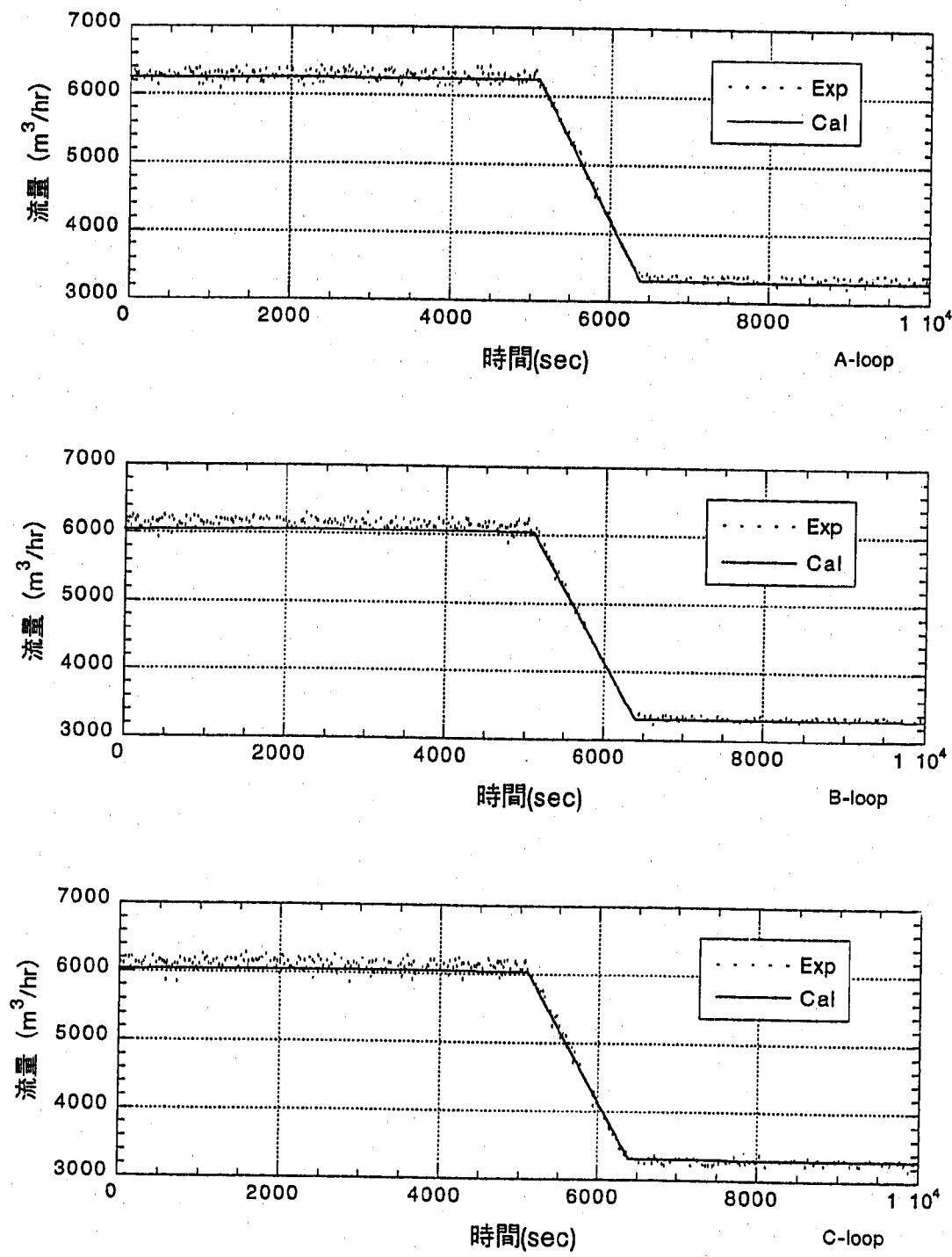


図4.3.1 1次系流量の実測値と計算値の比較

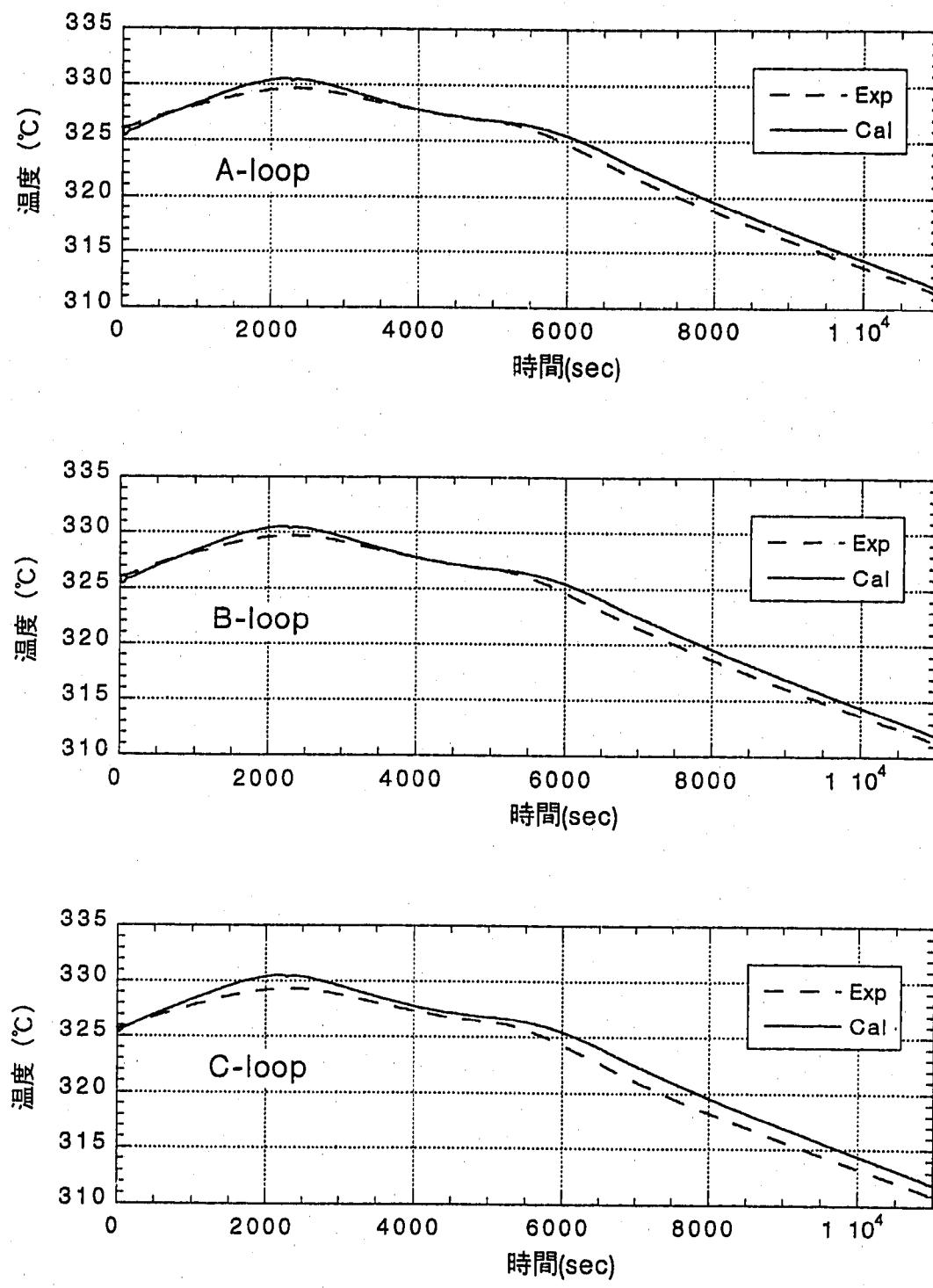


図4.3.2 原子炉容器出口温度の実測値と計算値の比較

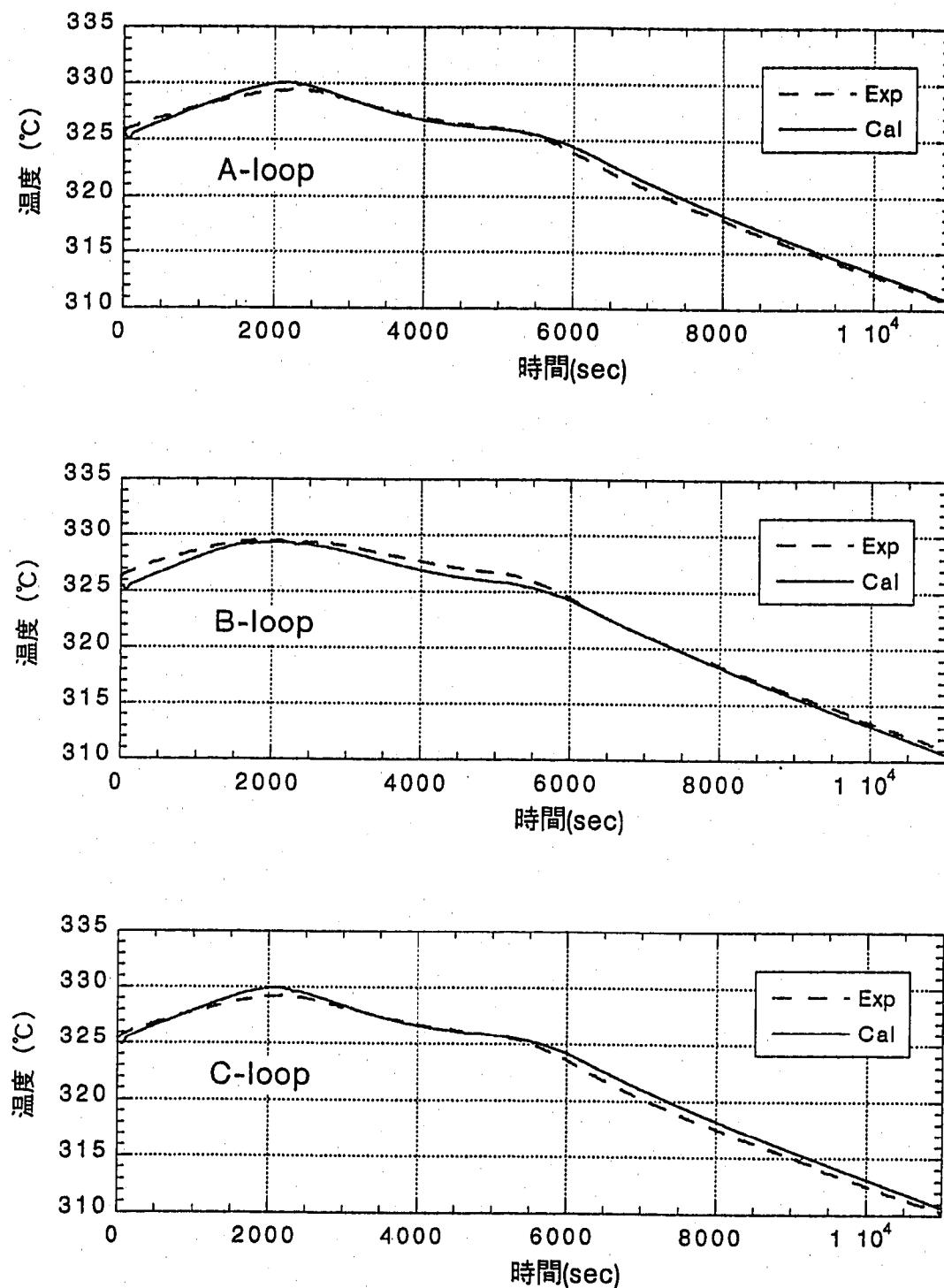


図4.3.3 IHX 1次側出口温度の実測値と計算値の比較

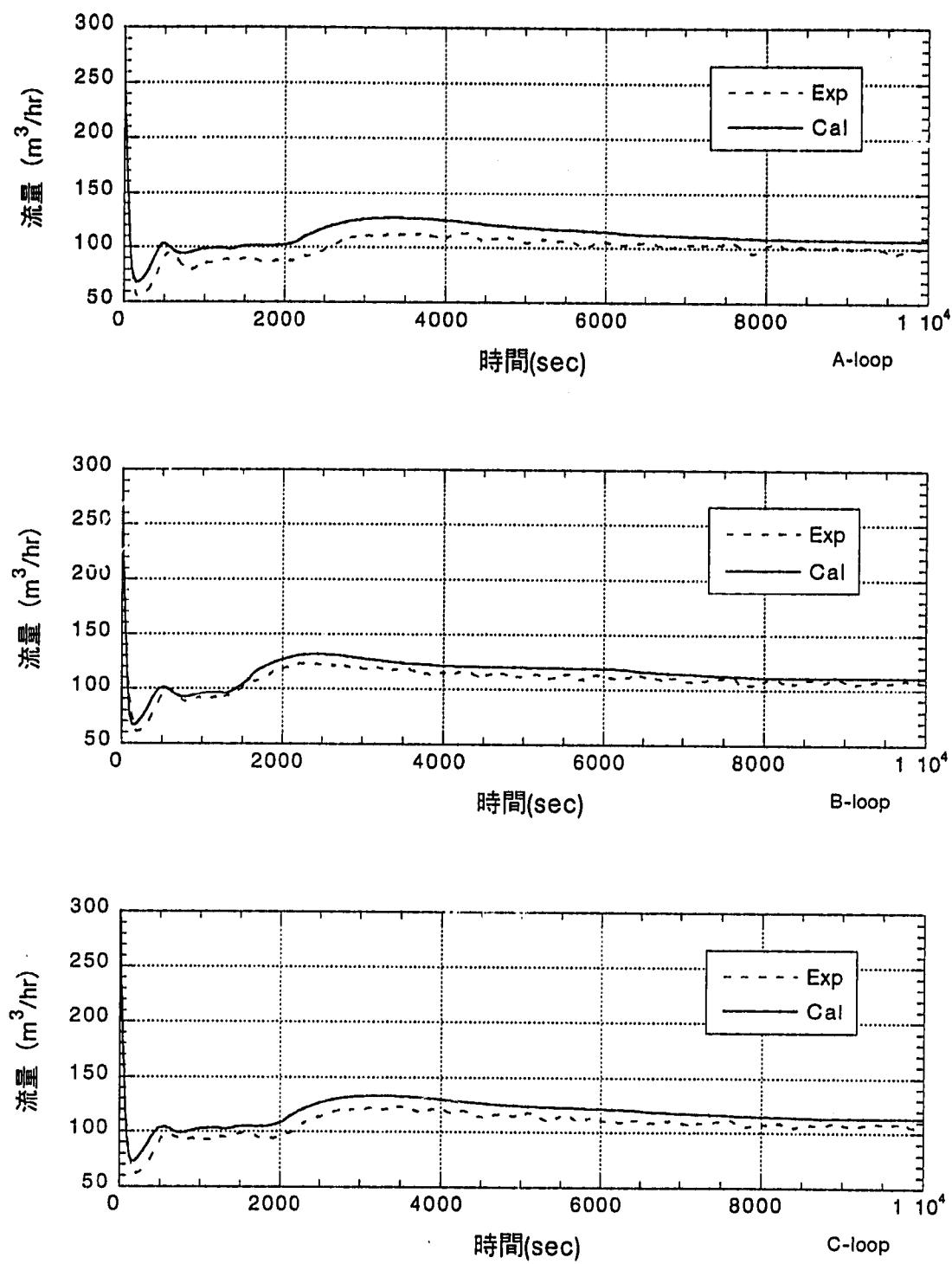


図4.3.4 2次系流量の実測値と計算値の比較

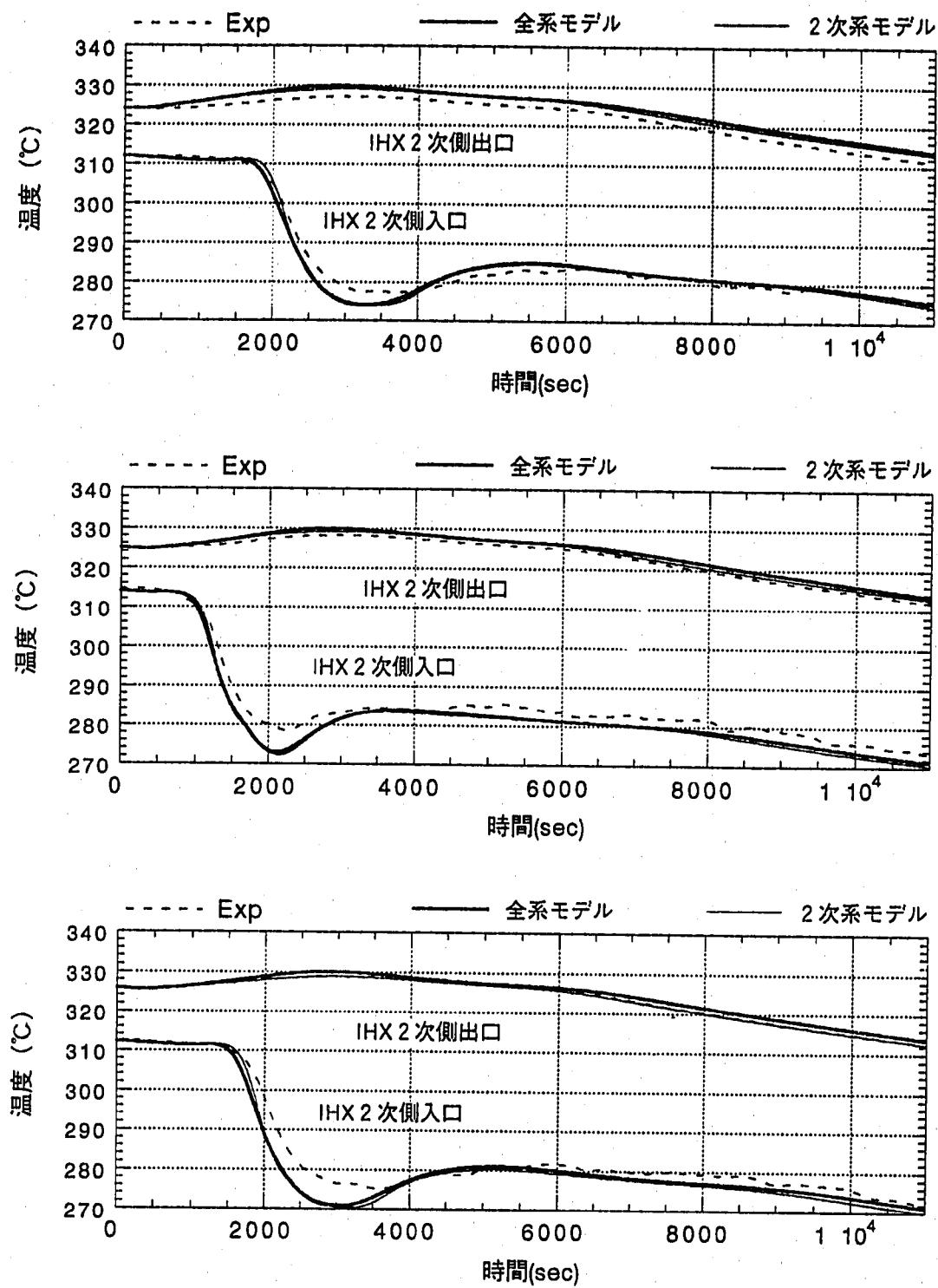


図4.3.5 IHX 2次側出入口温度の実測値と計算値の比較

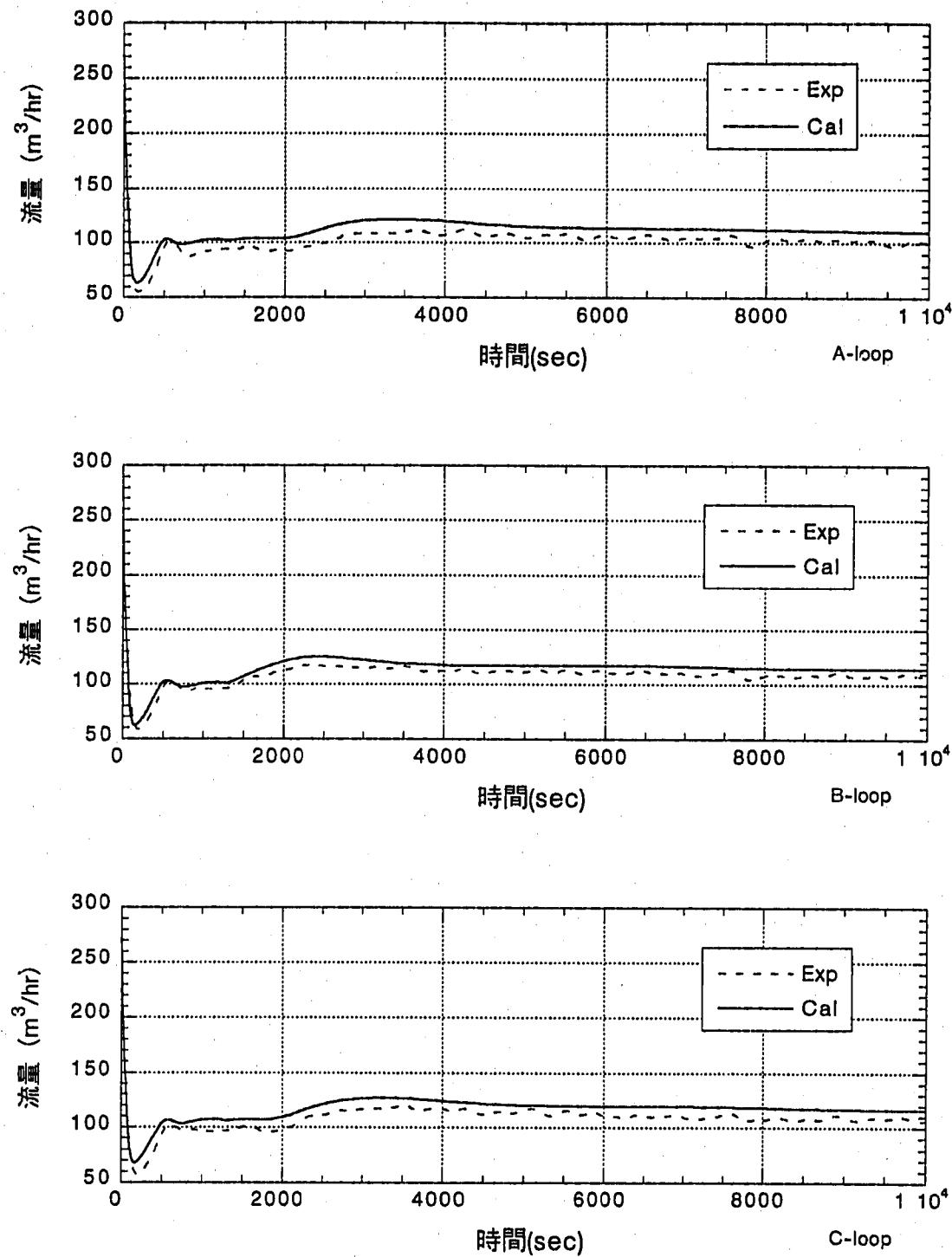


図4.3.6 ACS出口流量の実測値と計算値の比較

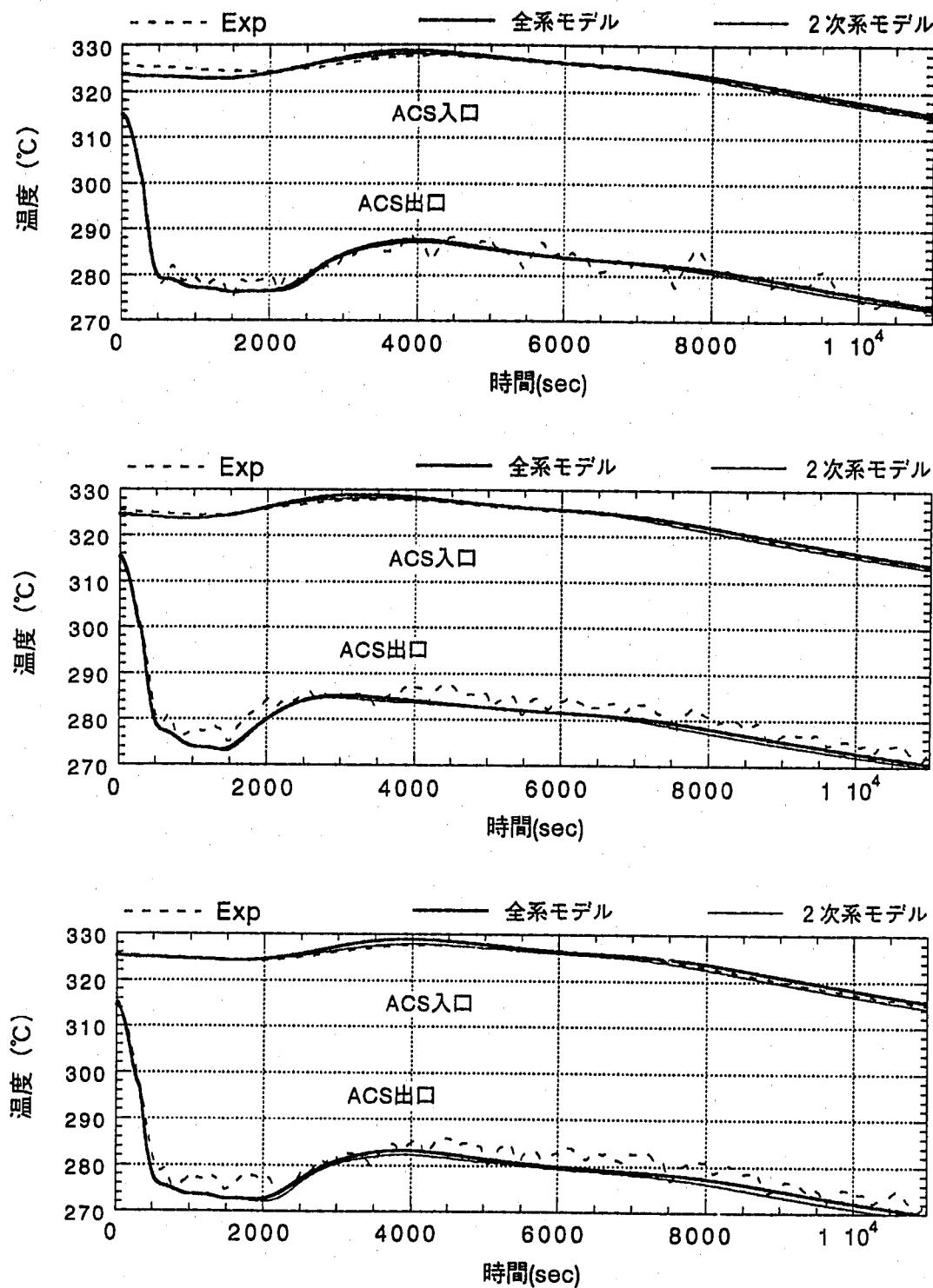


図4.3.7 ACS出入口温度の実測値と計算値の比較

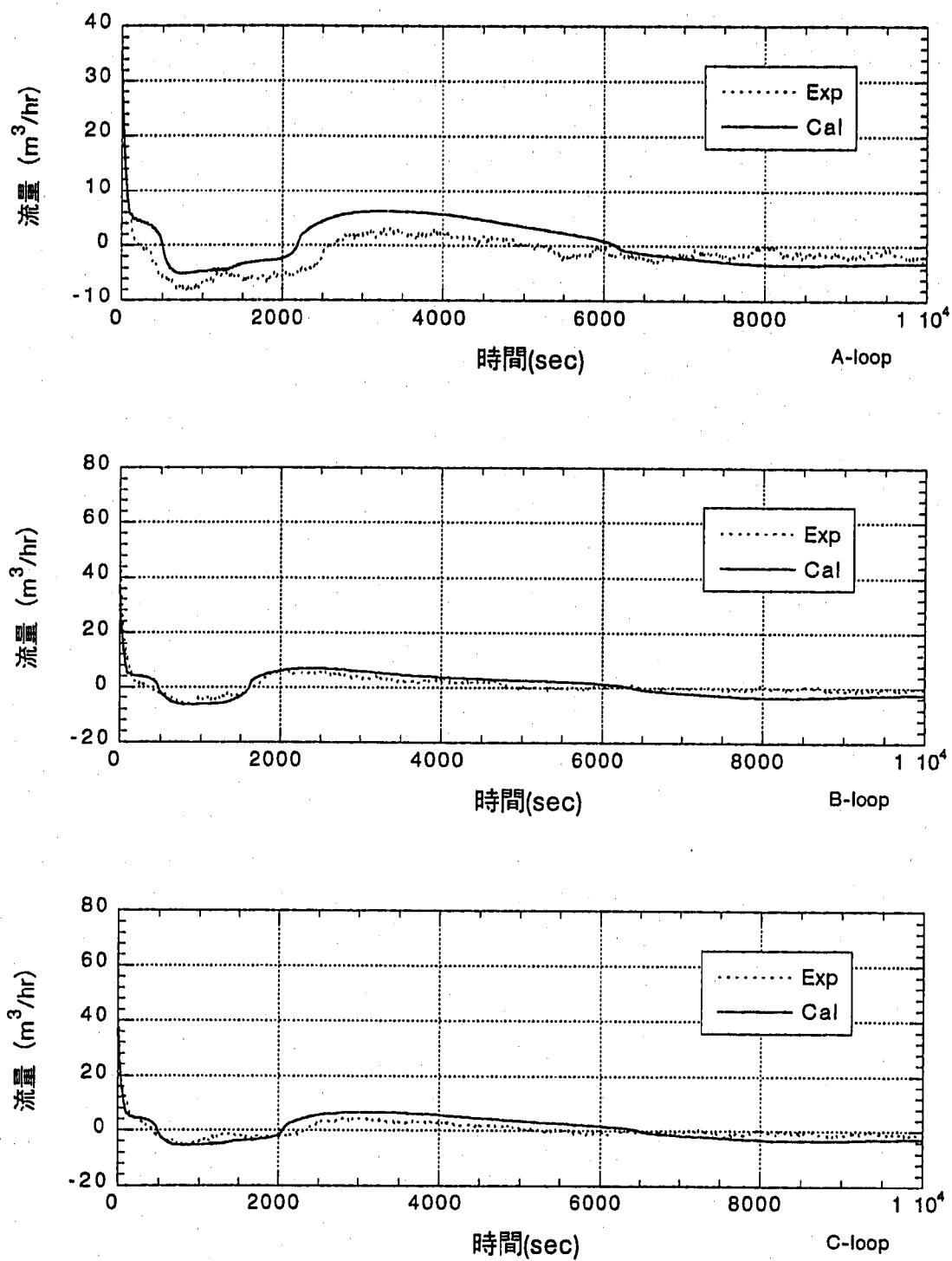


図4.3.8 SG側自然循環流量の比較

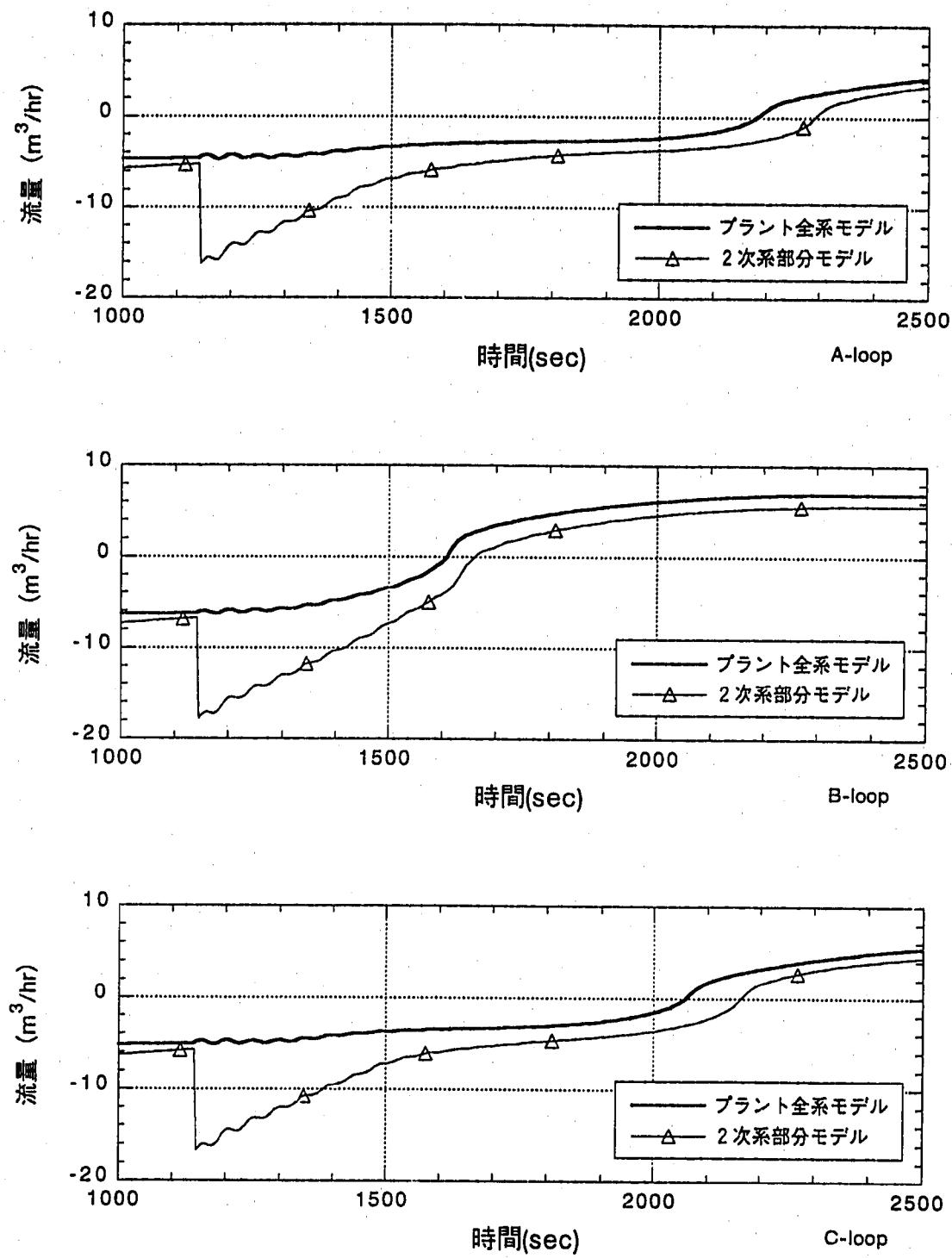


図4.3.9 2次系部分モデルと全系モデルによるSG側自然循環流量変化の相違

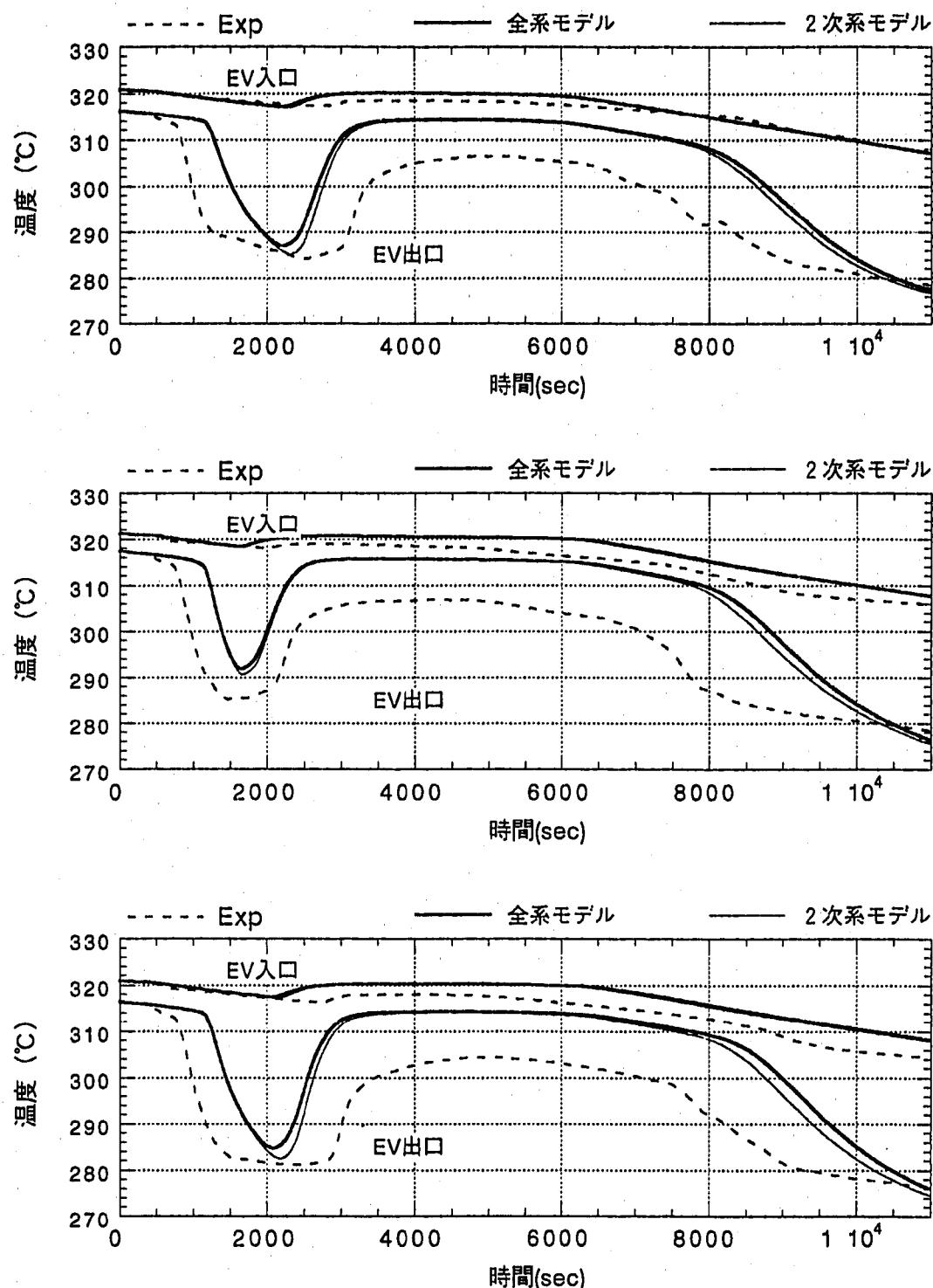


図4.3.10 蒸発器出入口温度の実測値と計算値の比較

Appendix-A

試験データ変換処理プログラム

1. 機能

「もんじゅ」で収録した運転データを、Super-COPDで使用できるように変換する。

- ①Super-COPDのテーブル形式の時系列入力データに変換。
- ②出力処理コードEDITの入力様式に変換。

2. Super-COPDの境界条件入力データ変換

2.1 変換処理用入力データ

(1) LANによるデータ転送

ローカルコンピュータから大型計算機のハードディスクに転送する運転データのサンプルを表A-1に示す。転送するデータの左から第1列は時間情報、2列目以降はプロセス量である。ファイル中のデータは10桁の実数型とし、任意の区分記号1ヶで区切る。

(2) 制御データ

制御データの内容を表A-2に示す。各制御データの様式および意味はSuper-COPDの入力データに一致させている。

2.2 変換処理後のデータ

変換後のデータは、Super-COPDのネームリストNAMAA2と同じ形式で大型計算機の機番6に出力される。変換後の時間データは、サンプリング時刻がリセットされ0秒が起点となる。また、変換後の温度データは、熱電対の一次応答遅れを逆変換処理によって補正している。なお、データ数に応じて、Super-COPDのネームリストNAMAA2に属する変数の配列数を増やす必要がある。

2.3 変換処理ツール

- (1) データ変換処理プログラム POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.FORT(INTERM2S)
- (2) ロードモジュール POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.LOAD(INTERM2S)
- (3) 実行用コマンドプロジェクト POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.CLIST(EXINTM2S)

3. EDITコードの入力データ変換

3.1 入力データ

(1) LANによる転送データ

前記2.1の(1)項と同一内容である。

(2) 制御データ

制御データの内容を表A-3に示す。各制御データの様式および意味はSuper-COPDの入力データに一致させている。

3.2 変換処理後のデータ

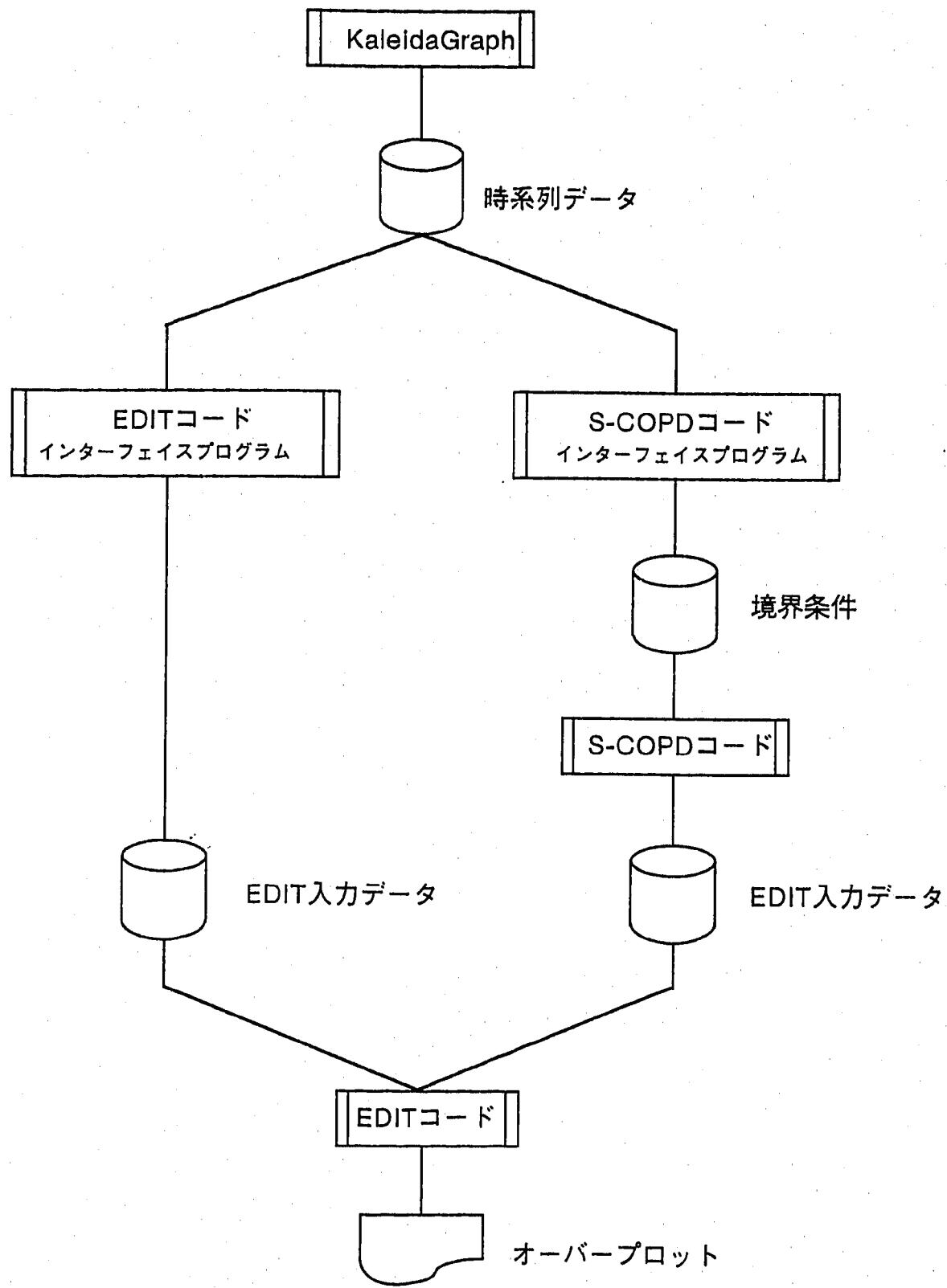
変換後のデータは、Super-COPDの計算結果出力用ファイルと同じ様式で出力される。時間データはリセットされ0秒が起点となる。

3.3 EDIT用入力データ変換ツール

- | | |
|--------------------|--|
| (1) EDIT用変換処理プログラム | POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.FORT(INTERM2E) |
| (2) ロードモジュール | POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.LOAD(INTERM2E) |
| (3) 実行用コマンドプロシジャー | POD1GA3.NATURAL.FLOWLN.CLIST(EXINTM2E) |

4. 処理フロー

フロー図を図A-1に示す。図中の右側がSuper-COPDの入力データ変換、左側がEDIT用のデータ変換処理である。



図A-1 データ処理フロー

表A-1 LANによる転送データリスト

8,
 0.000E+00, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 4.082E+03, 4.311E+03, 3.246E+02
 1.000E+01, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 4.109E+03, 4.335E+03, 3.246E+02
 2.000E+01, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.249E+02, 4.127E+03, 4.311E+03, 3.246E+02
 3.000E+01, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 4.047E+03, 4.261E+03, 3.246E+02
 4.000E+01, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.249E+02, 4.041E+03, 4.355E+03, 3.246E+02
 5.000E+01, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.236E+02, 3.249E+02, 3.998E+03, 4.347E+03, 3.246E+02
 6.000E+01, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.248E+02, 4.061E+03, 4.304E+03, 3.246E+02
 7.000E+01, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.236E+02, 3.249E+02, 3.941E+03, 4.355E+03, 3.246E+02
 8.000E+01, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.970E+03, 4.332E+03, 3.246E+02
 9.000E+01, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.710E+03, 4.365E+03, 3.246E+02
 1.000E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.904E+03, 4.309E+03, 3.246E+02
 1.100E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.248E+02, 3.866E+03, 4.380E+03, 3.246E+02
 1.200E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.248E+02, 3.774E+03, 4.347E+03, 3.246E+02
 1.300E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.250E+02, 3.822E+03, 4.348E+03, 3.246E+02
 1.400E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.248E+02, 3.625E+03, 4.331E+03, 3.246E+02
 1.500E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.248E+02, 3.765E+03, 4.330E+03, 3.246E+02
 1.600E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.249E+02, 3.694E+03, 4.311E+03, 3.246E+02
 1.700E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.616E+03, 4.315E+03, 3.246E+02
 1.800E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.541E+03, 4.357E+03, 3.246E+02
 1.900E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.678E+03, 4.286E+03, 3.246E+02
 2.000E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.668E+03, 4.321E+03, 3.246E+02
 2.100E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.642E+03, 4.370E+03, 3.246E+02
 2.200E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.679E+03, 4.289E+03, 3.246E+02
 2.300E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.540E+03, 4.332E+03, 3.246E+02
 2.400E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.591E+03, 4.325E+03, 3.246E+02
 2.500E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.646E+03, 4.324E+03, 3.246E+02
 2.600E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.567E+03, 4.324E+03, 3.246E+02
 2.700E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.236E+02, 3.250E+02, 3.586E+03, 4.343E+03, 3.246E+02
 2.800E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.630E+03, 4.347E+03, 3.246E+02
 2.900E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.547E+03, 4.317E+03, 3.246E+02
 3.000E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.634E+03, 4.374E+03, 3.246E+02
 3.100E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.493E+03, 4.350E+03, 3.246E+02
 3.200E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.528E+03, 4.347E+03, 3.246E+02
 3.300E+02, 3.250E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.532E+03, 4.378E+03, 3.246E+02
 3.400E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.619E+03, 4.350E+03, 3.246E+02
 3.500E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.248E+02, 3.587E+03, 4.337E+03, 3.246E+02
 3.600E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.510E+03, 4.337E+03, 3.246E+02
 3.700E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.517E+03, 4.363E+03, 3.246E+02
 3.800E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.236E+02, 3.250E+02, 3.519E+03, 4.350E+03, 3.246E+02
 3.900E+02, 3.251E+02, 3.257E+02, 3.235E+02, 3.250E+02, 3.542E+03, 4.355E+03, 3.246E+02
 4.000E+02, 3.251E+02, 3.256E+02, 3.235E+02, 3.249E+02, 3.459E+03, 4.365E+03, 3.246E+02

表A-2 制御データ(1/2)

変数名	意味	単位	備考
NTEMP	フィッティングするプール変数TEMPの数(MAX. 10)	—	
NTMP(i)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPの番号	—	
NFLWN	フィッティングするプール変数FLWNの数(MAX. 10)	—	
NFNNET(i)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNの流路網番号	—	
NFNPAS(i)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNの流路番号	—	
NPRSN	フィッティングするプール変数PRSNの数(MAX. 10)	—	
NPNNET(i)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNの流路網番号	—	
NPNNOD(i)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNの圧力ノード番	—	
NPMVN	フィッティングするプール変数PMPNの数(MAX. 10)	—	
NHPMPN(i)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNのポンプ番号	—	
NHNNUM(i)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNのプロセス量番	—	
NVLVN	フィッティングするプール変数VLVNの数(MAX. 10)	—	
NVNVLV(i)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNのバルブ番号	—	
NVNNUM(i)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNのプロセス量番	—	
	i=10		

表A-2 制御データ(2/2)

変数名	意味	単位	備考
IBTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
TMTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データの時定数	-	
IBFLWN(I)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INFLWN(I)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBPRSN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INPRSN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBPMPN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INPMPN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBVLVN(I)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INVLVN(I)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
		-	
		-	
		-	
	i=10		

表A-3 制御データ(1/2)

変数名	意味	単位	備考
NOTEMP	出力するプール変数TEMPの項数(max. 10)	-	
NPTEMP(i)	i項目に出力するプール変数TEMPの数	-	
NQTEMP(j,i)	i項目に出力するプール変数TEMPの番号	-	
NOFLWN	出力するプール変数FLWNの項数(max. 10)	-	
NPFLWN(i)	i項目に出力するプール変数FLWNの数	-	
NQFLWN(j,i)	i項目に出力するプール変数FLWNの流路網番号	-	
NRFLWN(j,i)	i項目に出力するプール変数FLWNの流路番号	-	
NOPRSN	出力するプールPRSN変数の項数(max. 10)	-	
NPPRSN(i)	i項目に出力するプール変数PRSNの数	-	
NQPRSN(j,i)	i項目に出力するプール変数PRSNの流路網番号	-	
NRPRSN(j,i)	i項目に出力するプール変数PRSNの圧力ノード番号	-	
NOPMPN	出力するプールPMPN変数の項数(max. 10)	-	
NPPMPN(i)	i項目に出力するプール変数PMPNの数	-	
NQPMMPN(j,i)	i項目に出力するプール変数PMPNのポンプ番号	-	
NRPMMPN(j,i)	i項目に出力するプール変数PMPNのプロセス量番号	-	
NOVLVN	出力するプールVLVN変数の項数(max. 10)	-	
NPVLVN(i)	i項目に出力するプール変数VLVNの数	-	
NQVLVN(j,i)	i項目に出力するプール変数VLVNのバルブ番号	-	
NRVLVN(j,i)	i項目に出力するプール変数PRSNのプロセス量番号	-	

表A-3 制御データ(2/2)

変数名	意味	単位	備考
IBTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
TMTEMP(I)	i番目にフィッティングするプール変数TEMPに対応するもんじゅ時系列データの時定数	-	
IBFLWN(I)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INFLWN(I)	i番目にフィッティングするプール変数FLWNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBPRSN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INPRSN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PRSNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBPMPN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INPMPN(I)	i番目にフィッティングするプール変数PMPNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
IBVLVN(I)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNに対応するもんじゅ時系列データのブロック番号	-	
INVLVN(I)	i番目にフィッティングするプール変数VLVNに対応するもんじゅ時系列データのブロック内の位置	-	
		-	
		-	
		-	
	i=10		

Appendix-B

「もんじゅ」 2次主冷却系EMF流量指示値の温度補正用ライブラリ

「もんじゅ」2次主冷却系EMF流量指示値の温度補正用ライブラリ

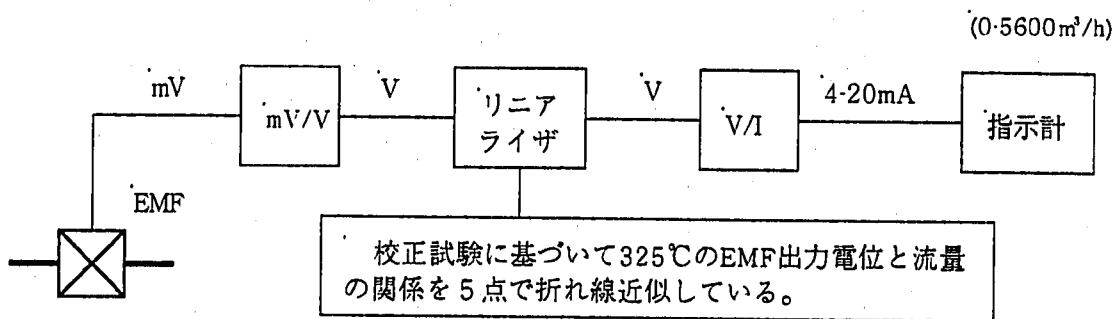
1. 概要

温度補正ライブラリは、SKSデータファイルの2次主冷却系EMF流量指示値を温度補正する目的で作成した。ライブラリでは、流量指示値からEMF出力電位を算出し、ナトリウム温度に依存する出力電位と流量の関係を、もんじゅEMF校正試験結果から求めた近似式で温度補正後流量を計算する。

2. 2次流量信号処理系

2.1 計器構成

EMFから流量指示計までの計器構成を図B-1に示す。



図B-1 2次主冷却系EMF計器構成

2.2 EMF校正データ

2次系EMFの第5番電極の出力電位と流量の関係を図B-2～図B-4に示す。各図中の近似式（3次曲線）は、各試験温度における出力電位をナトリウム流量から求めるためのものである。また、前述のリニアライザの入出力カーブは325°Cの試験結果に基づいて設定されている。

3. 温度補正用ライブラリ

本ライブラリは、KaleidaGraphの"Formula-Entry"の外部ライブラリとして使用する。利用にあたっての入出力条件を以下に記す。

- (1) オリジナル流量 : C1～C3 (A, B, Cループの順)
- (2) IHX 2 次側入口温度 : C4～C6 (A, B, Cループの順)
- (3) A ループ補正流量 : C12
- (4) B ループ補正流量 : C18
- (5) C ループ補正流量 : C24
- (6) 中間出力(補正後消去) : C7～C11、C13～C17、C19～C23

3.1 温度補正方法

ライブラリの記述内容を図B-5に示す。各演算内容は次の通りである。

(1) EMF出力電位の算出

C7,C13およびC19は、EMF出力電位の演算結果である。EMF出力電位の算出式には、前述の図B-2～図B-4に記載した近似式（試験温度325℃）を用いている。

(2) EMF出力電位／ナトリウム流量換算係数の温度近似

C8～C11,C14～C17およびC20～C23は、各ループのEMF出力電位からナトリウム流量を導くための換算係数であるが、各係数はIHX 2次側入口温度の関数として整理した近似式より求める。なお、換算係数は図B-6～図B-8に示す各試験温度の出力電位／流量近似係数(M0～M3)を、試験温度で再度近似（図B-9～図B-11）することにより温度補正值が得られる。

3.2 ライブラリの使用方法

(1) 計算用カラムおよび補正演算結果格納用カラムの確保

データテーブル上に計算カラム（15）と演算結果を格納するカラム（3）を新規に作成する。

(2) KaleidaGraph "Formula Entry"

MenuのFormula Entryを開き、F1ソフトキーの左のリクエストキーでライブラリを呼び出す。

(3) 入力カラムの確認

デフォルトではC1～C3までがオリジナル流量、C4～C6がナトリウム温度に割り当てているが、これらのカラムとデータテーブルが整合するようにライブラリあるいはデータテーブルを修正する。

(4) 補正計算の実行

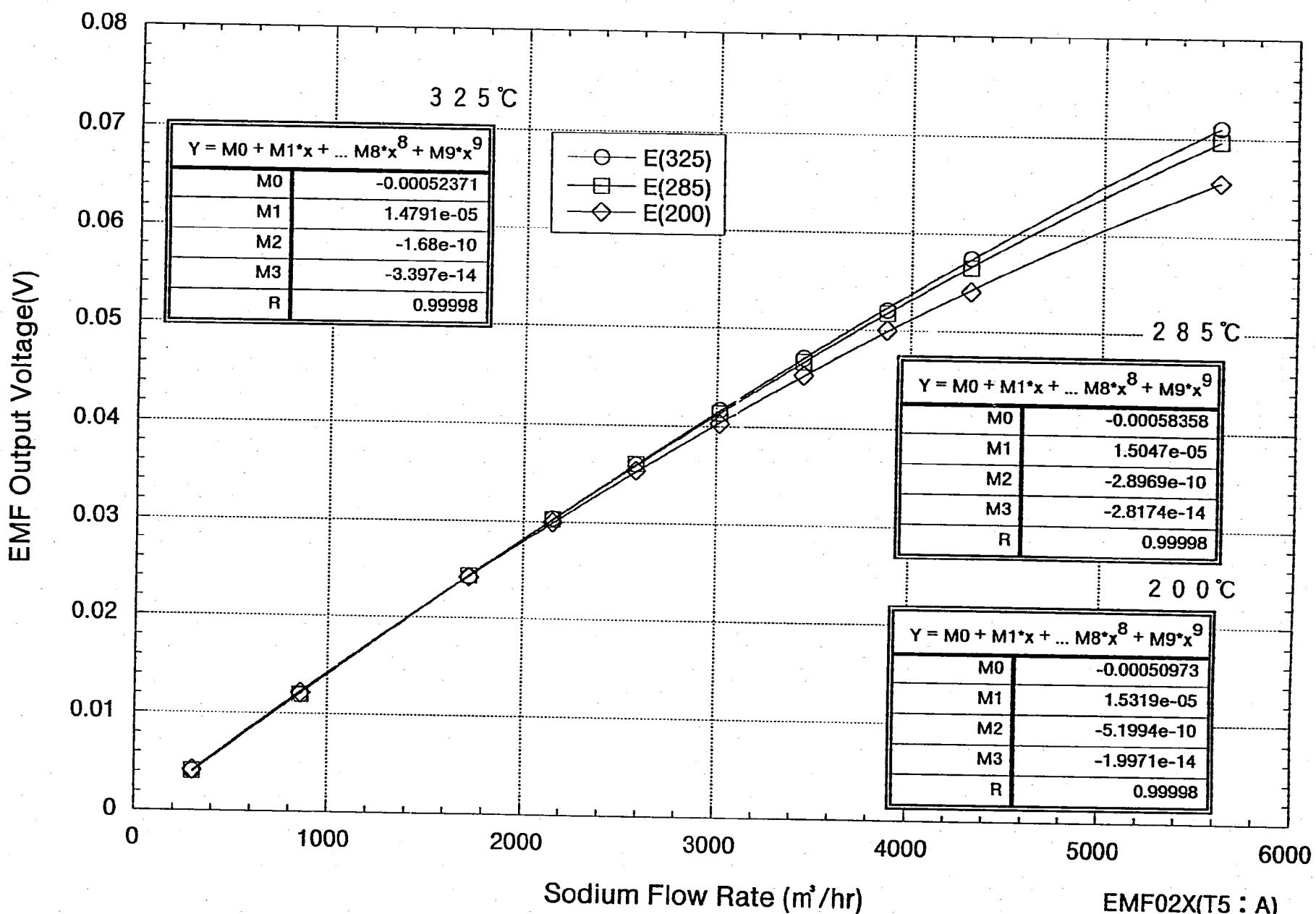
Formula EntryのRUNをクリックすることによって、C12,C18およびC24に温度補正流量が計算される。

(5) 中間出力の削除

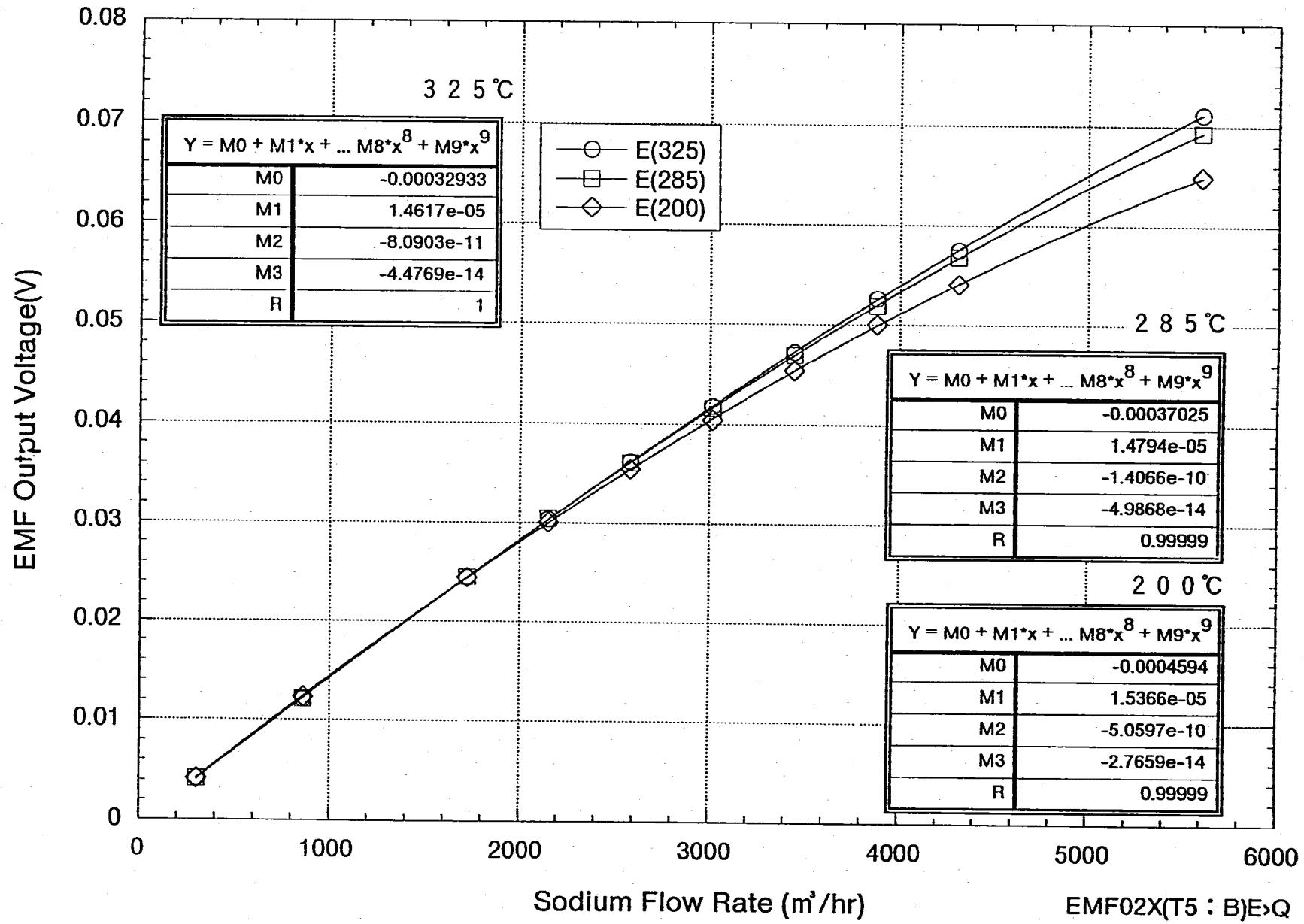
EMF出力電圧および換算係数等の中間出力をカラム単位で削除する。

3.3 補正結果

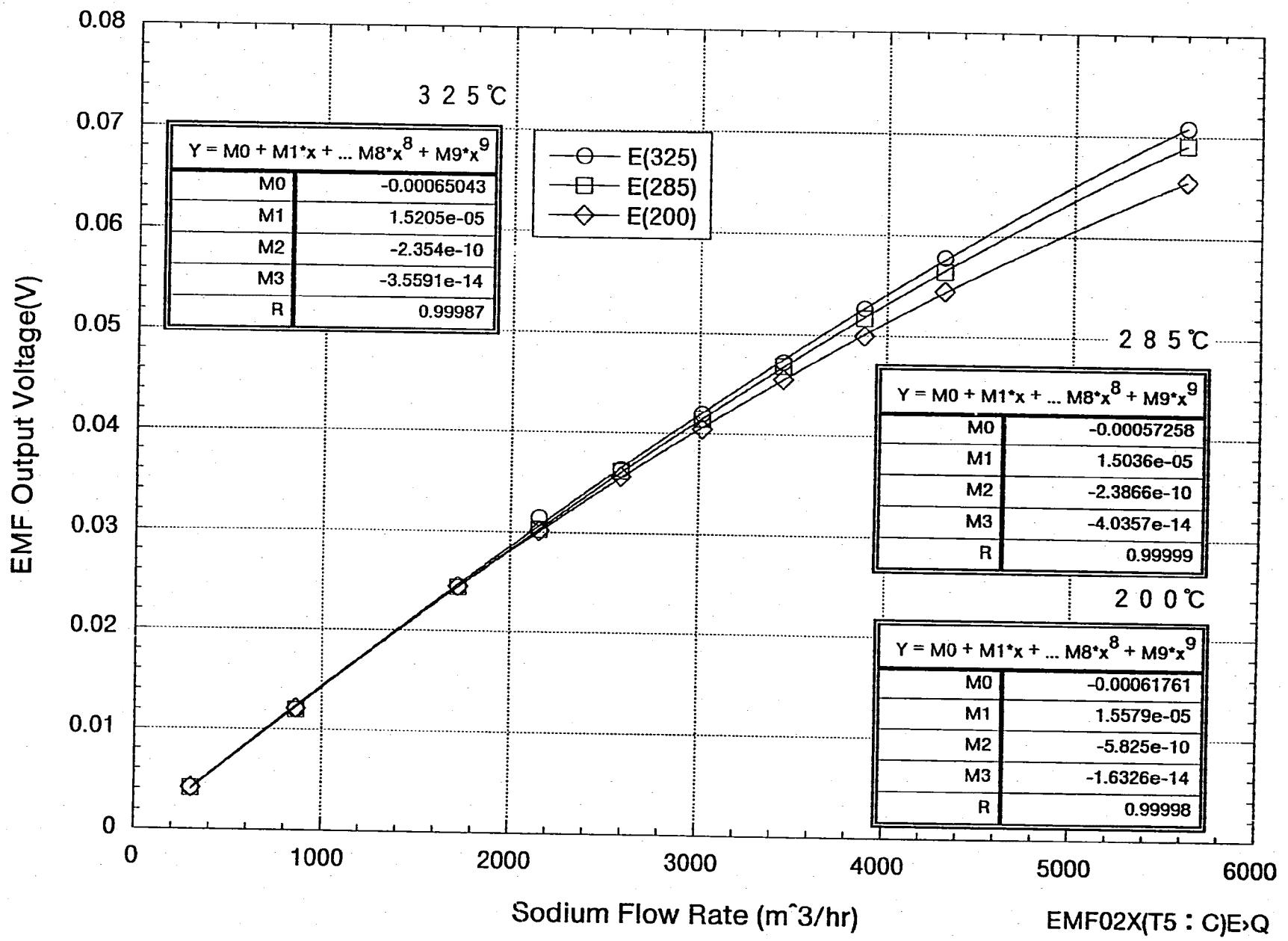
添付のグラフ（図B-12～図B-14）は、系統昇温時における2次主冷却系ナトリウム流量とIHX 2次側入口ナトリウム温度の経時変化を示したものである。補正前のオリジナル流量は温度上昇に対応して徐々に上昇しているが、温度補正を施した流量は概ね一定値を示す。



図B-2 EMF校正試験データと近似式 (Aループ)



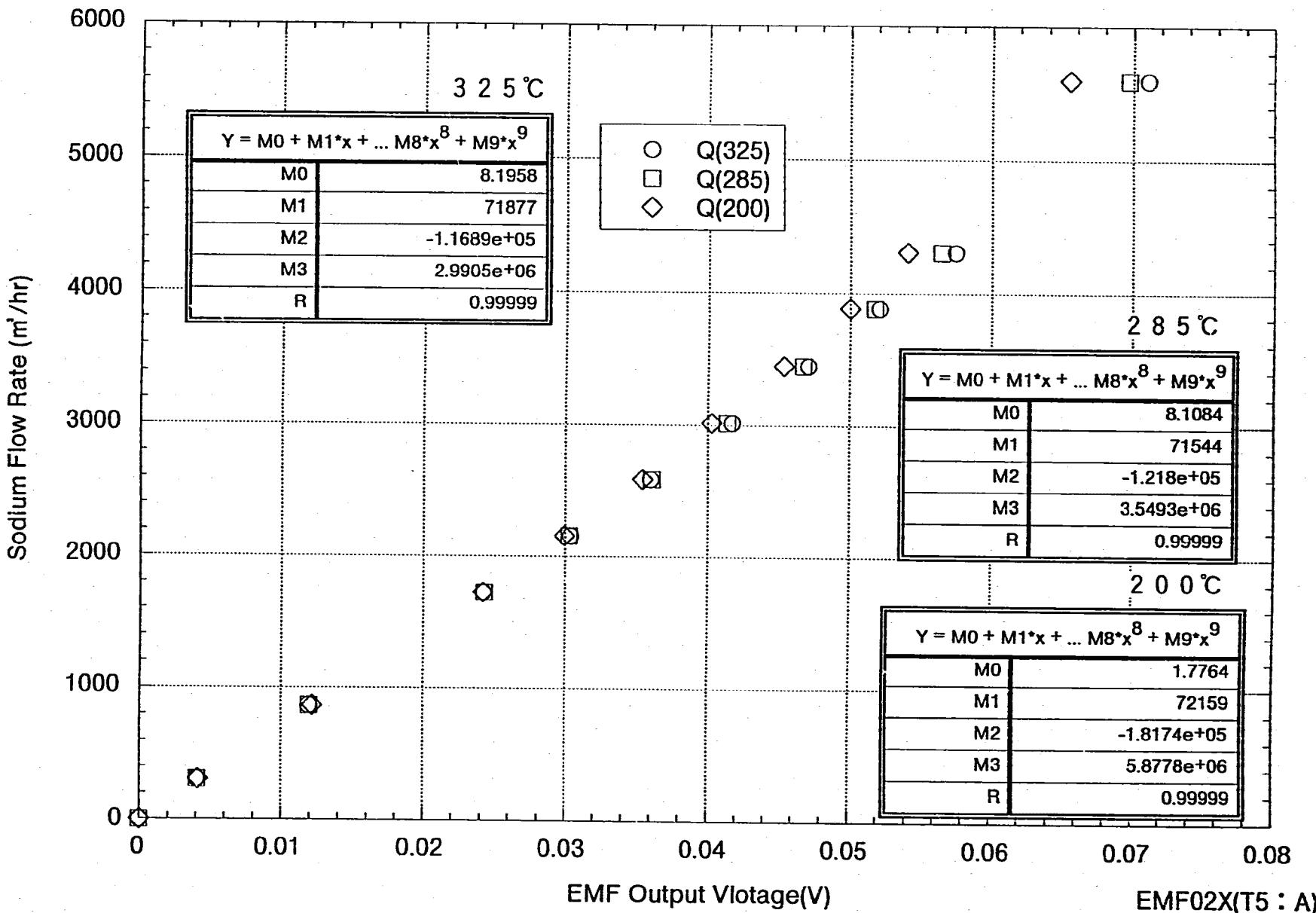
図B-3 EMF校正試験データと近似式(Bループ)



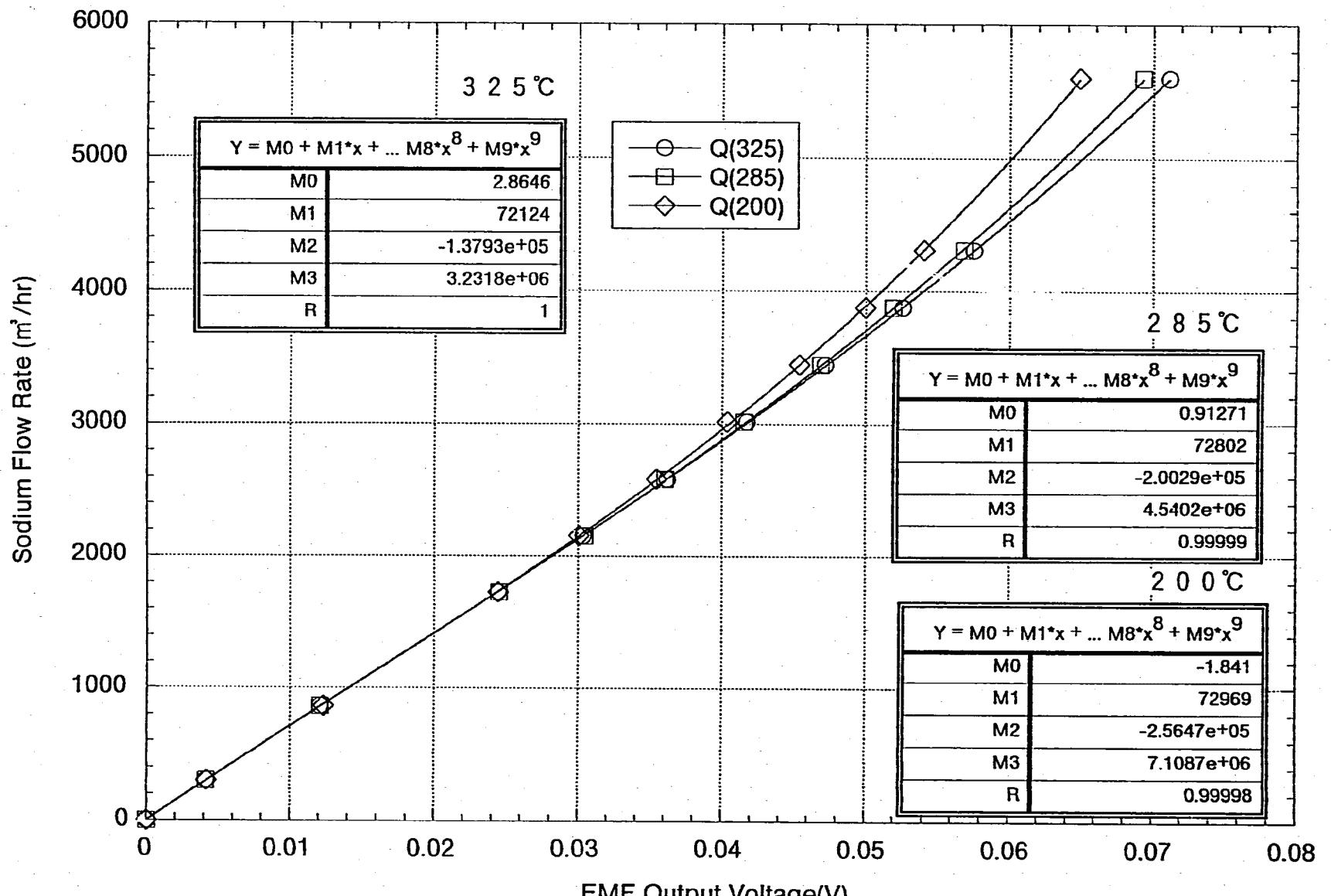
図B-4 EMF校正試験データと近似式(Cループ)

```
;  
c7=-5.2371e-4+1.4791e-5*c1-1.68e-10*c1^2-3.397e-14*c1^3;  
c8=-46.095+0.35505*c4-5.7847e-4*c4^2;  
c9=80702.-67.60900*c4+0.1244800*c4^2;  
c10=-5.88360e5+2965*c4-4.6594000*c4^2;  
c11=1.7478e7-79480*c4+107.39000*c4^2;  
c12=c8+c9*c7+c10*c7^2+c11*c7^3;  
;  
c13=-3.2933e-4+1.4617e-5*c2-8.0903e-11*c2^2-4.4769e-14*c2^3;  
c14=-0.84162-0.031238*c5+1.3121e-4*c5^2;  
c15=66529.00+56.17800*c5-0.1198800*c5^2;  
c16=20857.00-2823.500*c5+7.1845000*c5^2;  
c17=1.2016e7-20547.00*c5-19.939000*c5^2;  
c18=c14+c15*c13+c16*c13^2+c17*c13^3;  
;  
c19=-6.5043e-4+1.5205e-5*c3-2.354e-10*c3^2-3.5591e-14*c3^3;  
c20=29.192-0.23262*c6+5.2584e-4*c6^2;  
c21=51606.0+164.22*c6-0.31827*c6^2;  
c22=2.0596e5-3412.9*c6+7.0674*c6^2;  
c23=8.7854e6-9298.7*c6-19.445*c6^2;  
c24=c20+c21*c19+c22*c19^2+c23*c19^3;
```

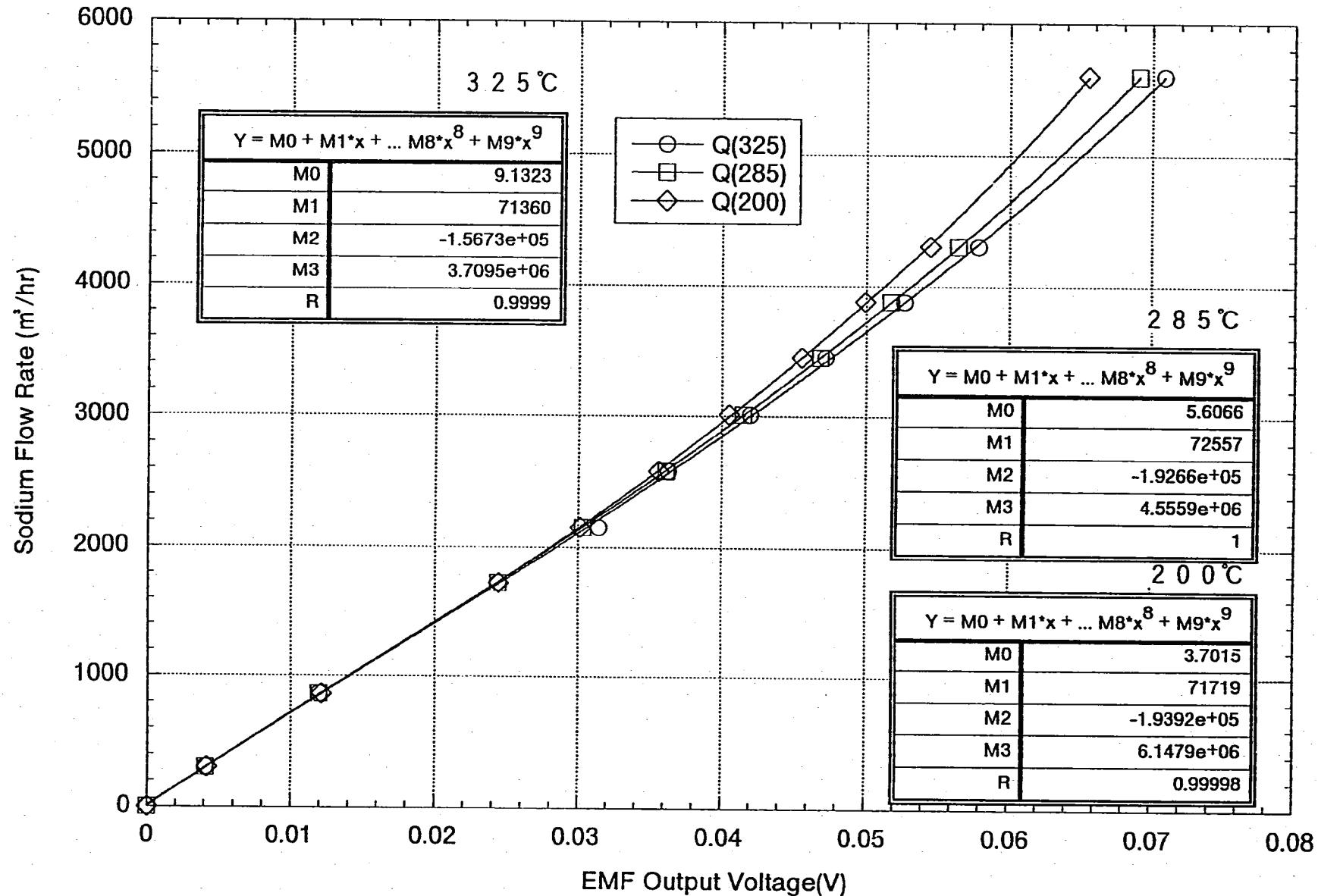
図B-5 溫度補正用ライブラリ内容



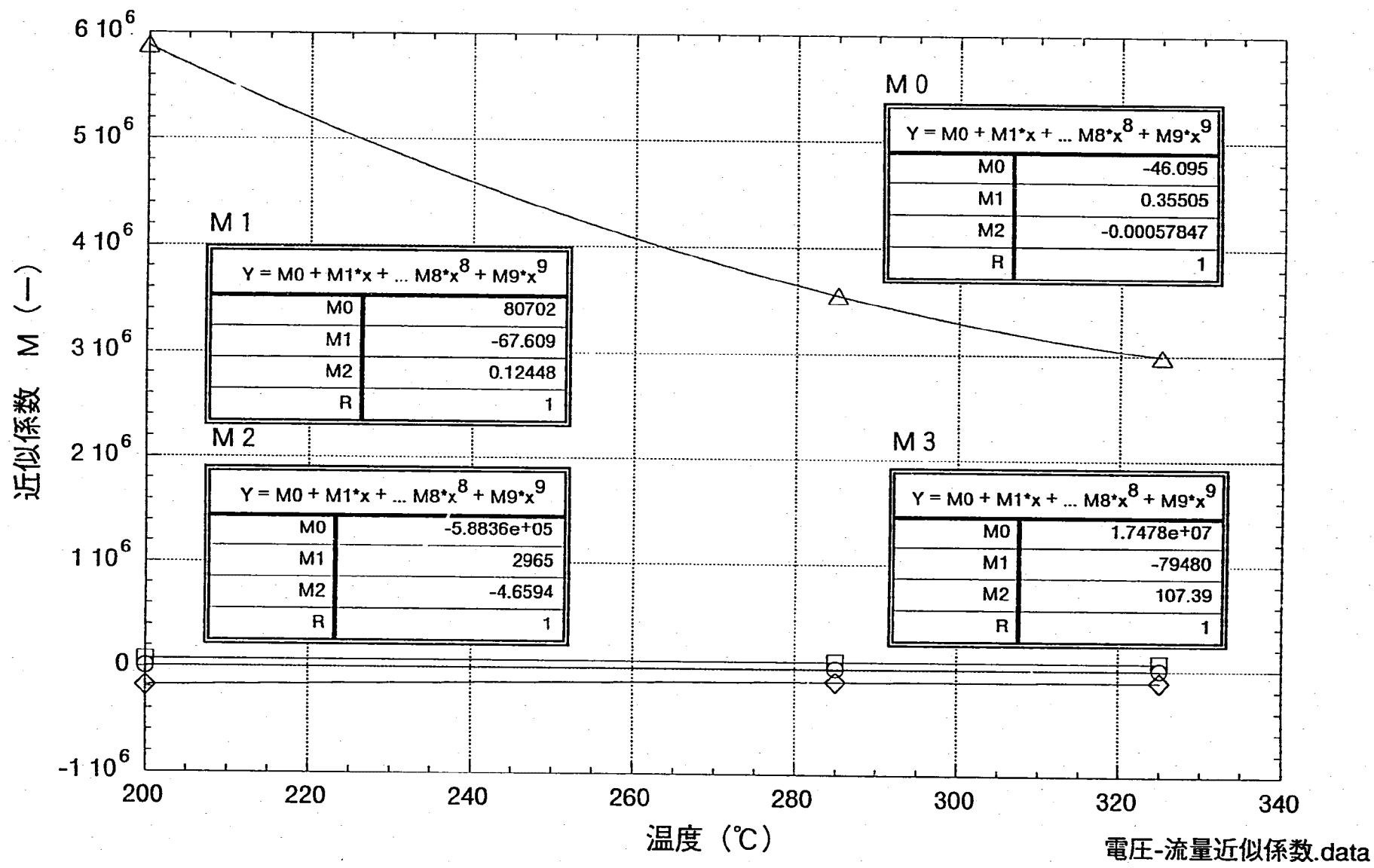
図B-6 出力電位-流量特性 (Aループ)



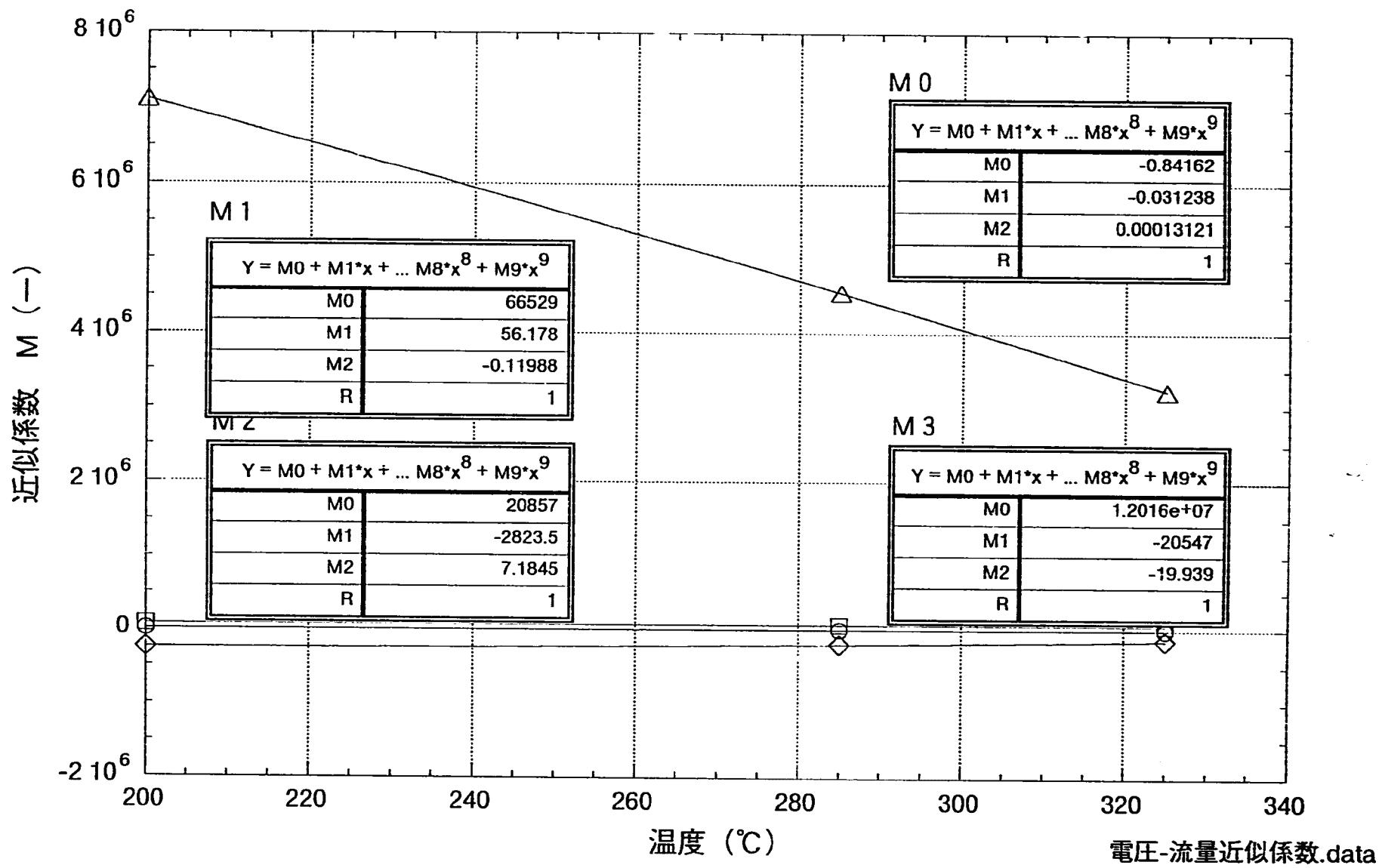
図B-7 出力電位-流量特性（Bループ）



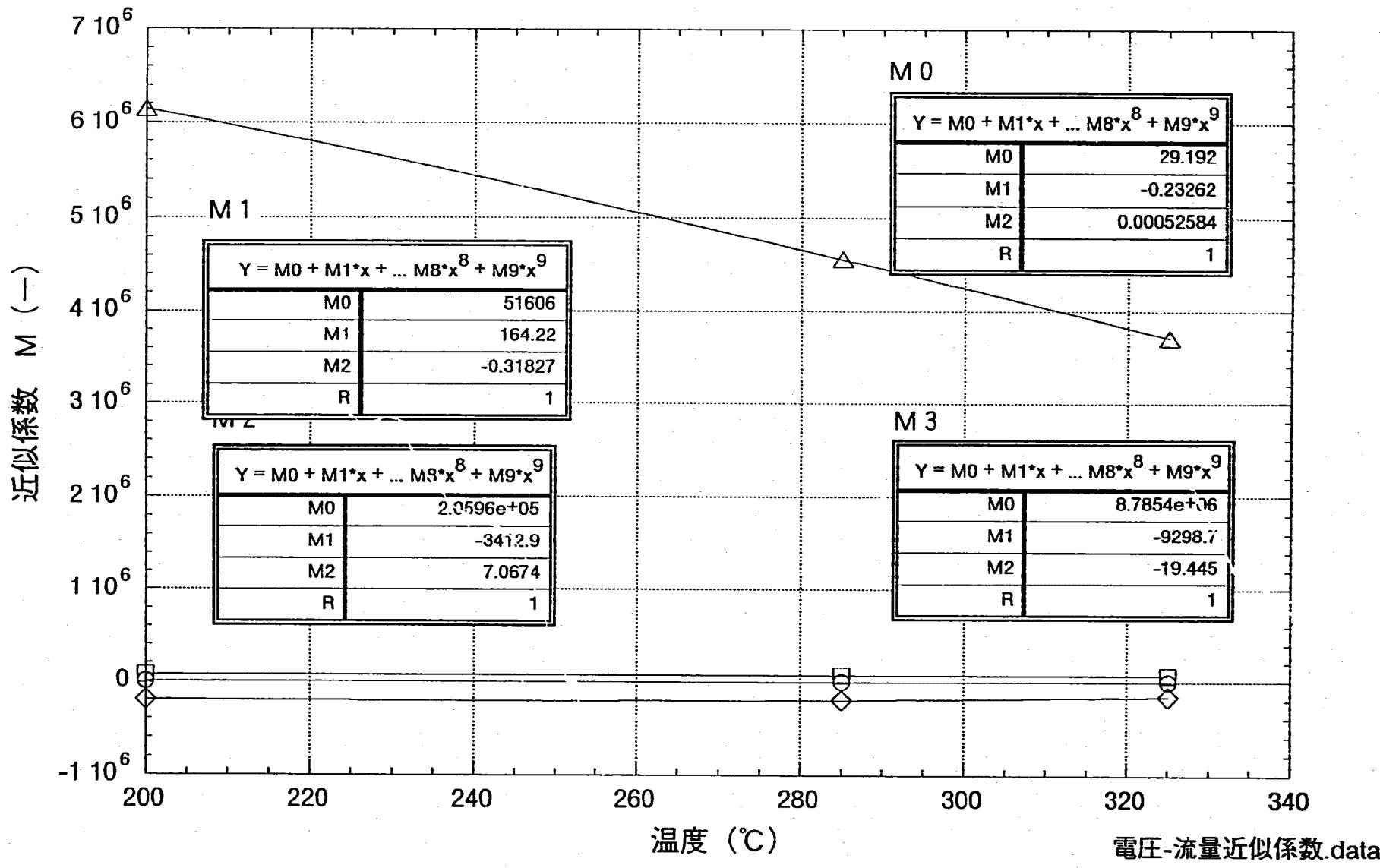
図B-8 出力電位-流量特性 (C ループ)



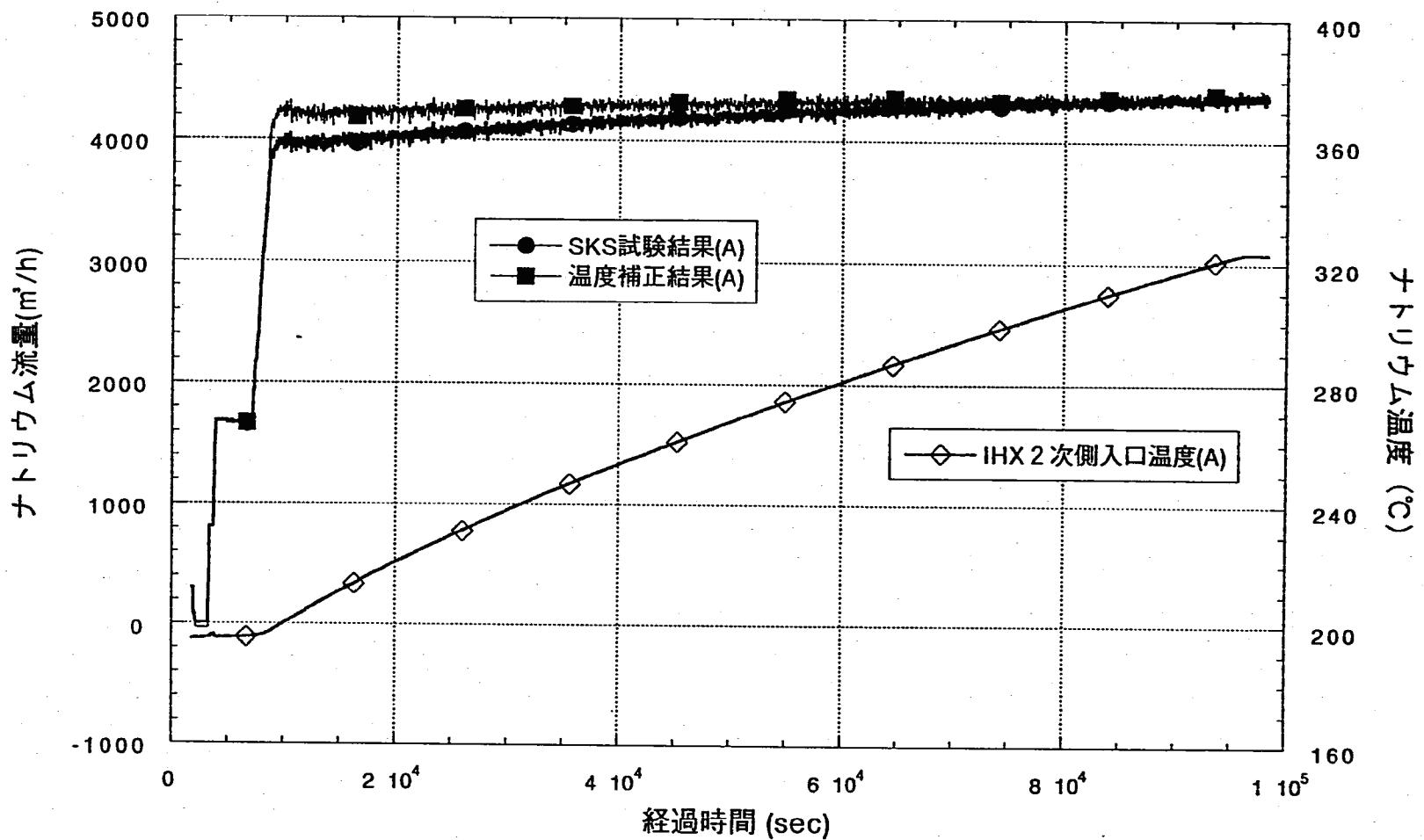
図B-9 出力電位一流量近似係数の温度近似 (A ループ)



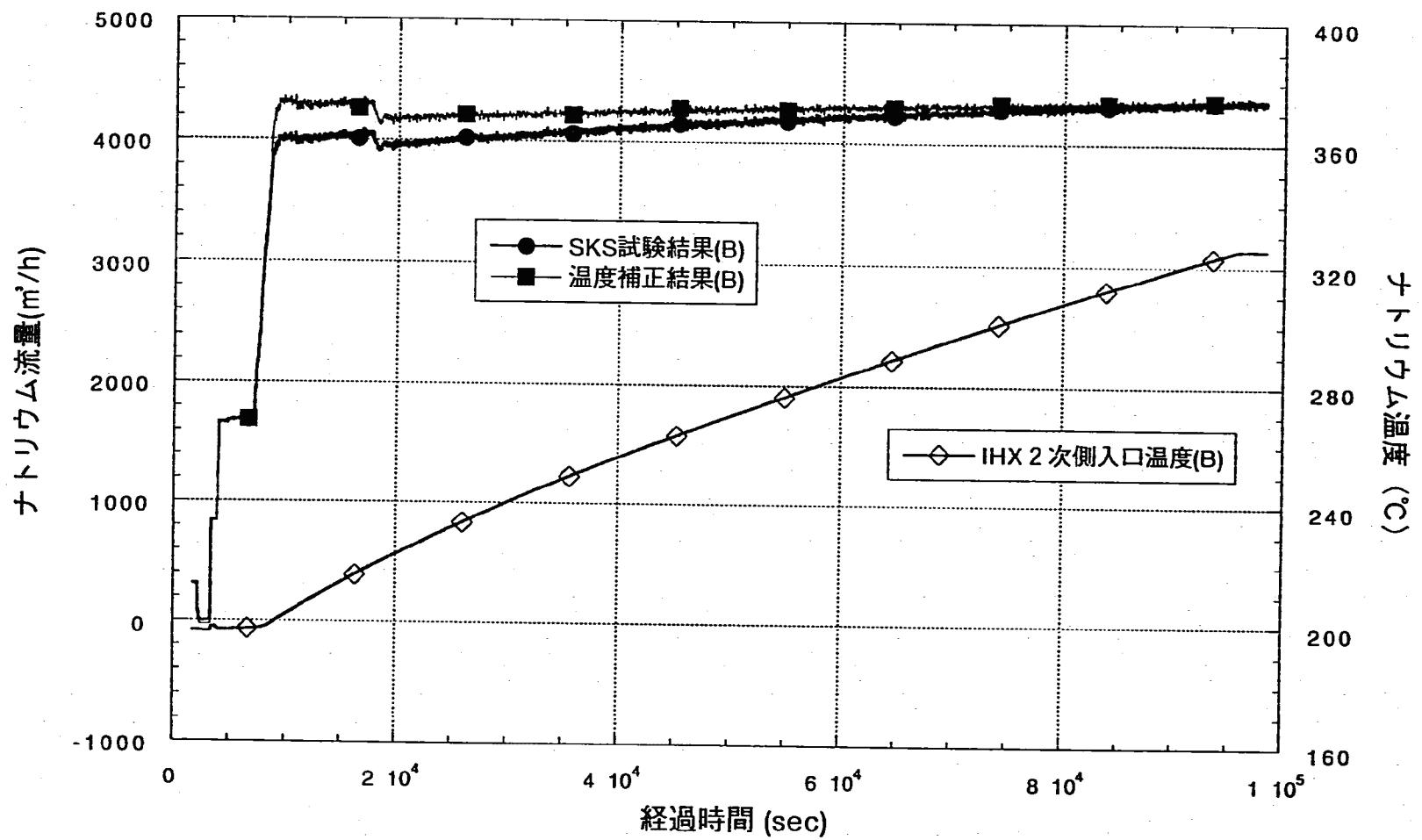
図B-10 出力電位-流量近似係数の温度近似 (B ループ)



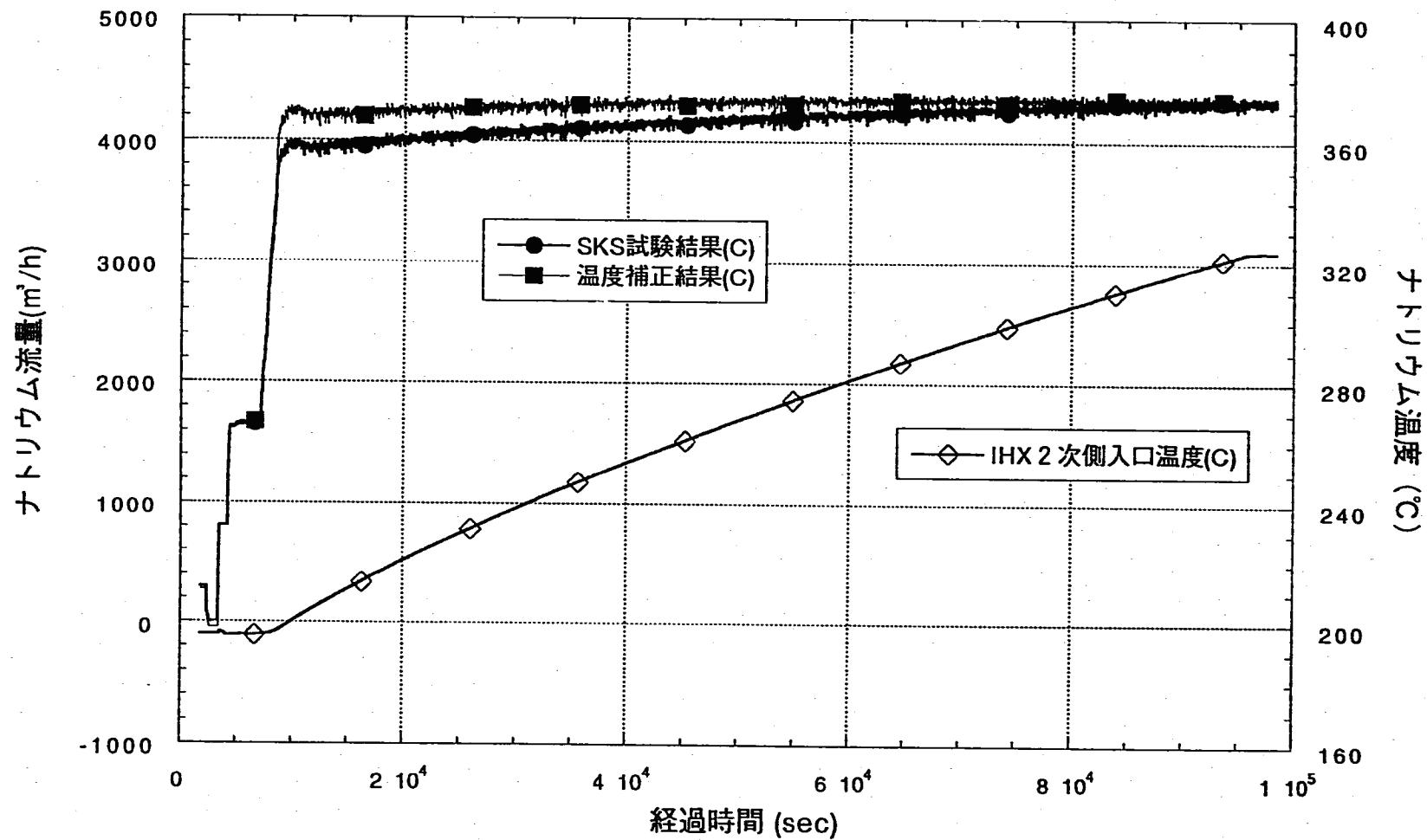
図B-11 出力電位一流量近似係数の温度近似 (C ループ)



図B-12 温度補正流量と実測値の対比 (Aループ)



図B-13 温度補正流量と実測値の対比 (B ループ)



図B-14 温度補正流量と実測値の対比 (C ループ)

Appendix-C

原子炉容器内の入力データ設定根拠

1. 概要

検証解析の準備として、実炉心体系の入力データを用いて1次冷却系自然循環予備評価試験の再現計算を試みた。試計算では、自然循環移行後の1次主冷却系流量の挙動は実機の流量変化と概ね一致した。温度については、IHX 1次側出口温度ならびに炉容器入口温度は実測値より変化の時機が早い傾向を示したが、計算値は温度成層化によって生じた配管内冷却材温度分布の範囲内であった。炉容器出口温度については、計算値は実測値より温度低下速度が早く、温度成層化による配管内冷却材温度分布の最低温度より低い傾向となった。炉容器出口温度の計算値と実測値との差は、計算終了時点（ポンプトリップから10,000秒後）では約8℃であった。また、炉容器出口部で温度差が生じた原因を検討した結果、①炉容器内熱容量の過少評価、②ポンプ入熱即ち流体摩擦熱を熱源とした場合の代表高さの不整合が考えられた。

以上の考察から、検証解析では模擬燃料集合体をモデル化した計算体系と試計算に用いた実炉心体系とを比較することにした。模擬炉心体系としての主な変更と確認の内容を以下に記す。

1次冷却系自然循環予備評価試験および冷却系自然循環模擬試験は、炉心構成要素としてオリフィス構造の模擬燃料集合体が使用された。そこで、原子炉出力運転時には核熱計算モジュール（RF）で計算する炉心部を、今回の計算ではLNモジュールを用いて熱輸送遅れ要素でモデル化した。炉心バイパス（径方向プランケット集合体、中性子遮蔽体、制御棒）、中間胴プレナムおよび炉容器下部プレナムについては、実炉心体系と同じLNモジュールと混合要素（MNモジュール）でモデル化した。また、各部の熱容量については、炉心部は模擬燃料集合体構造図から新たに設定し、炉心バイパスは径方向プランケット集合体と中性子遮蔽体の設計仕様に基づく入力値を再計算して求めた。中間胴プレナムと炉容器下部プレナムについては、ナトリウム重量および構造材重量の入力値と総合機能試験予測解析データ集¹⁾の記載値を照合するとともに、中間胴プレナムでは炉容器壁重量を熱容量に含めた。各熱計算モジュールの高さあるいは長さについては、炉心部の代表高さは、実炉心体系（RFモジュール使用）では軸方向プランケットとドライバーを対象とした発熱領域高さで設定していたが、LNモジュールを用いた模擬炉心体系ではC/I取付台上面から炉心頂部までの流路長さを適用した。また、炉心バイパスと中間胴プレナムについても、炉心部と同様にそれぞれの流路長さを代表高さとした。なお、実炉心体系および模擬炉心体系における炉容器内部の熱計算モジュール構成を図C-1に示す。

2. 入力データ変更内容

2.1 対象部位と計算モジュール

- (1) 炉心部 : LN(2) (但し、通常の原子炉出力運転時にはRFで計算)
- (2) 炉心バイパス : LN(1)
- (3) 中間胴プレナム : MN(2)
- (4) 炉心出口合流点 : MN(3)
- (5) 炉容器下部プレナム : LW

2.2 各部位の変更内容

前項で紹介した各部位の入力データの変更値を表C-1に示す。各変更値の設定根拠を以下に示す。

2.2.1 炉心

各試験時の炉心は、内側炉心84体と外側炉心114体の計198体の模擬燃料集合体で構成されていた。この模擬燃料集合体はバンドル構造の実炉心と異なり、ラッパー管内部にステンレス製の案内管と多段式のオリフィスを内蔵している。この内部構造の特徴から、模擬燃料集合体は一般的な熱輸送遅れ要素として考えられるため、198体の模擬燃料集合体を1チャンネルのLNモジュールでモデル化した。ここでは、模擬燃料集合体に用いたLNモジュールの入力データの流体重量密度および流路高さの設定について記載する。なお、模擬燃料集合体の概略図については図C-2に示した。

(1) 流体重量密度 (AHFL)

1) 各部ナトリウム重量 ($\rho_{Na} = 873.98 \text{ kg/m}^3$, at 325°C)

- ① $0.25 \pi (0.08)^2 \times 0.03 \times \rho_{Na} = 0.1318 \text{ (kg)}$
- ② $0.25 \pi (0.099)^2 \times 0.075 \times \rho_{Na} = 0.5046 \text{ (kg)}$
- ③ $0.25 \pi (0.075)^2 \times 0.192 \times \rho_{Na} = 0.7413 \text{ (kg)}$
- ④ $[Si (3.17+0.21+0.013) - 0.25 \pi (0.1)^2 \times (3.17+0.21)] \rho_{Na} = 4.8972 \text{ (kg)}$
- ⑤ $0.25 \pi (0.056)^2 \times (3.17+0.21-0.8) \times \rho_{Na} = 5.5538 \text{ (kg)}$
- ⑥ $5 \times 0.25 \pi (0.0451)^2 \times 0.01 \times \rho_{Na} = 0.0698 \text{ (kg)}$
- ⑦ $4 \times 0.25 \pi (0.072)^2 \times (0.2-0.01) \times \rho_{Na} = 2.7044 \text{ (kg)}$

上記①～⑦の小計は $W_{Na} = 14.6029 \text{ kg}$ 、炉心の合計は $W'_{Na} = W_{Na} \times 198 = 2891.36 \text{ kg}$ である。

2) 構造材重量 ($\rho_{SUS} = 7902.3 \text{ kg/m}^3$, at 20°C)

- (a) $[So - 0.25 \pi (0.08)^2] \times 0.03 \times \rho_{SUS} = 1.3198 \text{ (kg)}$
- (b) $[So - 0.25 \pi (0.099)^2] \times 0.075 \times \rho_{SUS} = 1.7163 \text{ (kg)}$
- (c) $[So - 0.25 \pi (0.075)^2] \times 0.192 \times \rho_{SUS} = 9.3699 \text{ (kg)}$
- (d) $(So - Si) (3.17 + 0.21 + 0.013) \rho_{SUS} = 29.9812 \text{ (kg)}$
- (e) $0.25 \pi (0.1^2 - 0.056^2) (3.17 + 0.21 - 0.8) \times \rho_{SUS} = 109.9108 \text{ (kg)}$
- (f) $0.25 \pi (0.1^2 - 0.072^2) \times 0.8 \times \rho_{SUS} = 23.9122 \text{ (kg)}$
- (g) $5 \times 0.25 \pi (0.072^2 - 0.0451^2) \times 0.01 \times \rho_{SUS} = 0.9775 \text{ (kg)}$

上記(a)～(g)の小計は $W_{SUS} = 177.19 \text{ kg}$ 、炉心の合計は $W'_{SUS} = W_{SUS} \times 198 = 35083 \text{ kg}$ である。

3) 混合重量および流体重量密度

$$\textcircled{1} \text{ 混合重量 } W = W'_{Na} + W'_{SUS} (C_{pSUS} / C_{pNa}) = 17760 \text{ (kg)}$$

ここで、 C_{pSUS} : SUS304の比熱 (0.13129 kcal/kg°C, at 20°C)

C_{pNa} : ナトリウムの比熱 (0.30985 kcal/kg°C, at 325°C)

$$\textcircled{2} \text{ 流体重量密度 (AHFL) } AHFL = W / DZL = 4566 \text{ (kg/m)}$$

ここで、DZL : C/I 取付台上面(EL+23.16)から炉心頂部(EL+27.05)までの高さ = 3.89 (m)

(2) 代表流路高さ (FLZL)

FLZLの入力値は、C/I取付台上面(EL+23.16)から炉心頂部(EL+27.05)までの高さ 3.89mとした。

2.2.2 炉心バイパス

炉心バイパス流路の対象範囲は、従来の入力データでは径方向ブランケット集合体のみであったが、今回の入力データでは径方向ブランケット集合体に加えて中性子遮蔽体、制御棒、中性子源および低圧プレナムを含めた。対象機器の寸法データは、主に総合機能試験予測解析データ集¹⁾より算出した。ここでは、炉心部と同様に炉心バイパス部の流体重量密度および流路高さの設定について記載する。

(1) 流体重量密度 (AHFL)

1) 各部ナトリウム容積および重量

$$\textcircled{1} \text{ 径方向ブランケット集合体 } 0.0156 (\text{m}^3) \times 172 = 2.68 (\text{m}^3)$$

② 中性子遮蔽体	$0.0124 (\text{m}^3) \times 316 = 3.90 (\text{m}^3)$
③ 制御棒、中性子源	$0.0156 (\text{m}^3) \times 26 = 0.33 (\text{m}^3)$
④ 低圧プレナム	$4.3 (\text{m}^3)$
⑤ その他	$0.7 (\text{m}^3)$

上記①～⑤の小計 V_{Na} は $11.91 (\text{m}^3)$ 、ナトリウム重量 W_{Na} は $10.41 \times 10^3 \text{ kg}$ (325°Cの比重で換算) である。

2) 径方向ブランケット集合体構造材重量

① SUS部分	$108.29 (\text{kg}/\text{体}) \quad (C_{\text{PSUS}} = 0.13129 \text{ kcal/kg°C, at } 20^\circ\text{C})$
② ベレット	$83.43 (\text{kg}/\text{体}) \quad (C_{\text{PBLK}} = 0.04361 \text{ kcal/kg°C, at } 325^\circ\text{C})$

同集合体172体のSUS部総重量 W_{BSUS} は 18626 kg 、同じくベレットの総重量 W_{BP} は 14350 kg 。

3) 中性子遮蔽体構造材重量は

① SUS部分	$264.30 (\text{kg}/\text{体}) \quad (C_{\text{PSUS}} = 0.13129 \text{ kcal/kg°C, at } 20^\circ\text{C})$
---------	---

同集合体316体のSUS部総重量 W_{NSUS} は 83519 kg 。

4) その他

① 制御棒および中性子源	ブランケットと同一条件とする。
--------------	-----------------

両炉心構成要素21体のSUS部重量 W_{CSUS} は 2274.1 kg 、同じくベレットの重量 W_{CP} は 1752 kg 。

② 受皿内プレナムから低圧プレナム間の板厚	$W_{\text{SUS}} = 18 \times 10^3 (\text{kg})$
-----------------------	---

5) 混合重量

$$\text{① SUS部分 } W'_{\text{SUS}} = C_{\text{PSUS}} / C_{\text{Na}} \times (W_{\text{BSUS}} + W_{\text{NSUS}} + W_{\text{CSUS}} + W_{\text{SUS}}) = 51.872 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{② ベレット } W'_{\text{P}} = C_{\text{PBLK}} / C_{\text{Na}} \times (W_{\text{BBLK}} + W_{\text{CP}}) = 2.2663 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{③ 混合重量 } W'_{\text{Na}} = W_{\text{Na}} + W'_{\text{SUS}} + W'_{\text{P}} = 64.55 \times 10^3 \text{ kg}$$

6) 流体重量密度 (AHFL) $AHFL = W'_{\text{Na}} / DZL = 16.60 \times 10^3 (\text{kg/m})$

ここで、DZL : C/I 取付台上面(EL+23.16)から炉心頂部(EL+27.05)までの高さ = 3.89 (m)

(2) 代表流路高さ (FLZL)

FLZLの入力値は、C/I取付台上面(EL+23.16)から炉心頂部(EL+27.05)までの高さ 3.89mとした。

2.2.3 中間胴プレナム

(1) MN内混合重量 (VMIX)

1) ナトリウム容積および重量

$$\textcircled{1} \text{ 容積 } V_{Na} = 70 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 重量 } W_{Na} = V_{Na} \times \rho_{Na} = 61.179 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

2) 原子炉容器炉壁重量

$$\textcircled{1} \text{ 重量 } W_{SUS} = 0.25 \pi (7.16^2 - 7.06^2) \times (26.18 - 23.24) \times \rho_{SUS} = 26 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

3) 混合重量

$$VMIX = C_{SUS} / C_{Na} \times W_{SUS} + W_{Na} = 72.81 \times 10^3 \text{ kg}$$

(2) 代表流路高さ (ZNFM)

炉心および炉心バイパスと同様に、C/I 取付台上面(EL+23.16)から炉心頂部(EL+27.05)までの高さ 3.89 mとした。

2.2.4 炉心出口合流点

炉心出口合流点の代表流路高さ (ZNFM) は、炉心出口頂部 (EL27.05) から炉容器出口ノズル中心位置 (EL27.75) までの高さ 0.7 mを適用した。

2.2.5 炉容器下部プレナム

炉容器下部プレナムについては、1 ループあたりのプレナム内ナトリウム重量 (VMXLP1) 、構造材重量と等価なナトリウム重量 (混合重量相当構造材重量 : VMXLP2) 、代表流路高さ (DZEL) を総合機能試験予測解析データ集¹⁾の原子炉構造データに基づいて見直した。

(1) プレナム内ナトリウム重量 (VMXLP1)

$$\textcircled{1} \text{ ナトリウム容積 } V_{Na} = 152.1 + 4.6 - 4.3 = 152.4 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\textcircled{2} \text{ ナトリウム重量 } VMXLP1 = V_{Na} \times \rho_{Na} / 3 = 152.4 \times 873.98 / 3 = 44.40 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

(2) 混合重量相当構造材重量 (VMXLP2)

$$\textcircled{1} \text{ 下部プレナム構造材重量 } W_{SUS} = 125.9 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

② プレナム内構造物重量 (高圧プレナム含む)

$$W'_{in} = 129 \times 10^3 - 18 \times 10^3 = 111 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

$$\textcircled{3} \text{ VMXLP2 } VMXLP2 = C_{SUS} / C_{Na} \times (W_{SUS} + W'_{in}) = 100.4 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

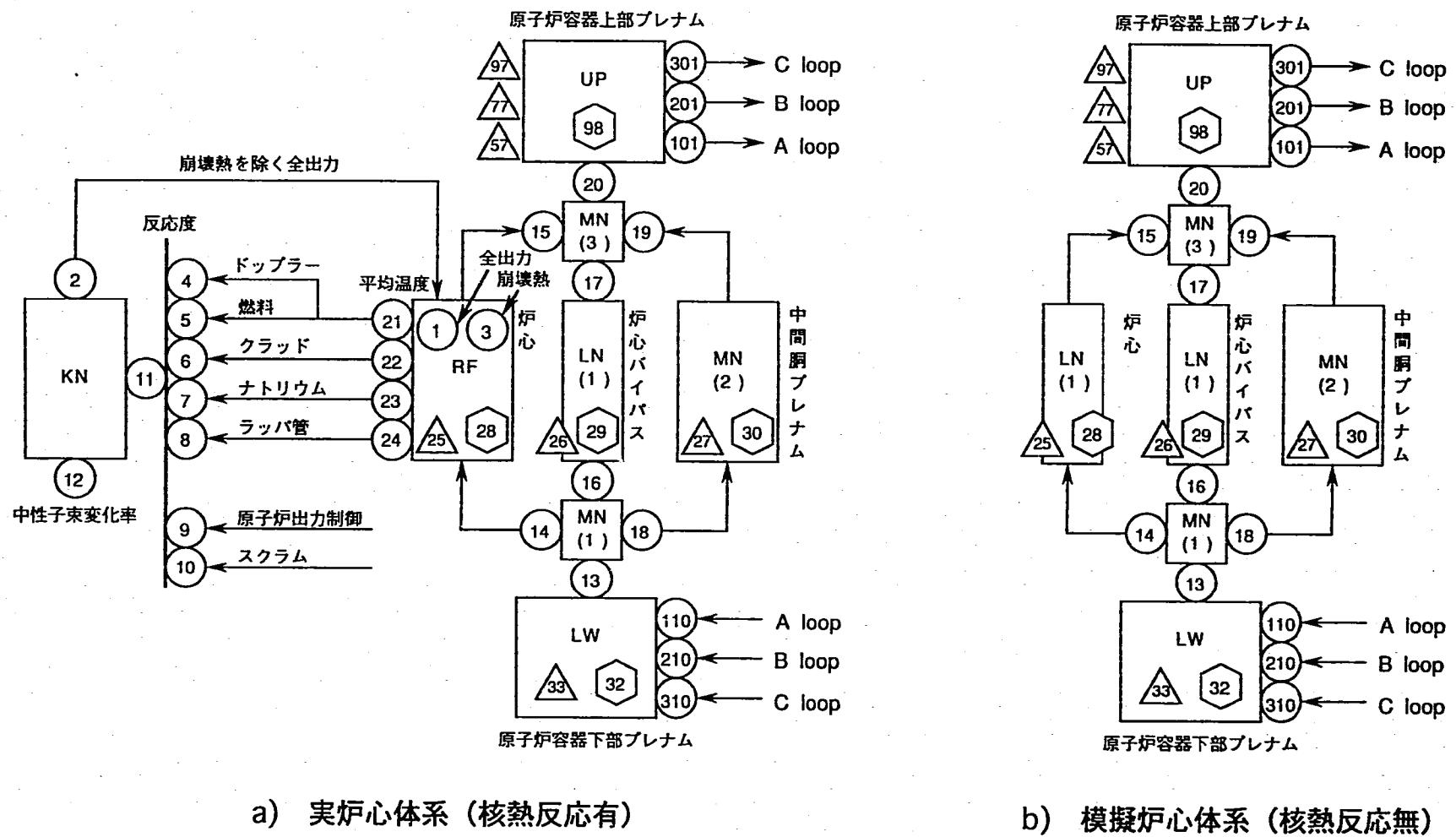
(3) 代表流路高さ (DZEL)

炉容器入口ノズル中心位置(EL+21.35)からC/I 取付台上面(EL+23.16)までの高さ 1.81 mとした。

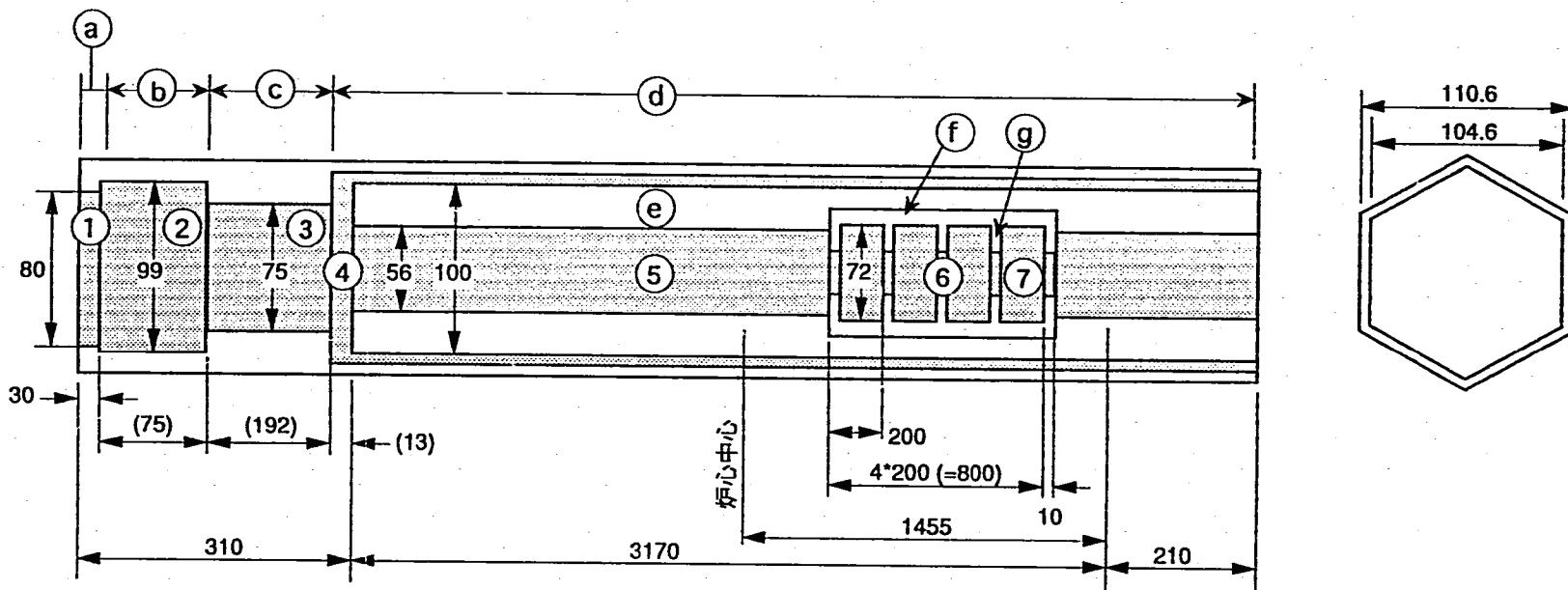
3. 参考資料

1) FBEC他、"原型炉総合機能試験予測解析のための入力データの整備(II) 別冊:データ集"、

PNC ZJ2449 90-001(3)



図C-1 原子炉容器内計算体系



図C-2 模擬燃料集合体構造概略図

表C-1 炉容器内入力データ変更内容一覧

No	部 位	モジュール名	変数名	旧入力	新入力	計算式
1	炉心	LN(2)	AHFL		4.566E+03	
			DZL		3.89	
			FLNL		3.89	
2	炉心バイパス	LN(1)	AHFL	10.20E+03	16.60E+03	
			DZL	1.58	3.89	
			FLNL	1.0	3.89	
3	中間胴プレナム	MN(2)	VMIX	104.447E3	72.81E+03	
			ZNFM	1.58	3.89	
4	炉心出口合流点	MN(1)	ZNFM	2.17	0.7	
5	炉容器下部プレナム	LW	VMXLP1	42.60E+03	44.40E+03	
			VMXLP2	106.3E+03	100.4E+03	
			DZEL	2.65	1.81	

(備考)

- ① AHFL : 流体重量密度 (kg/m)
- ② DZL : 輸送遅れ長さ (m)
- ③ FLNL : 代表高さ (m)
- ④ VMIX : MN内混合重量 (kg)
- ⑤ ZNFM : MN内代表高さ (m)
- ⑥ VMXLP1 : 1 ループあたりのプレナム内ナトリウム重量 (kg)
- ⑦ VMXLP2 : RV入口プレナム混合重量相当構造材重量 (kg)
- ⑧ DZEL : RV入口プレナム内代表高さ (m)

Appendix-D

ポンプ入熱量の算出方法

ポンプ入熱の算出方法

1. 基礎式

(1) ポンプ入熱

$$H_p = H_{r0} * \left(\frac{n}{100} \right)^3 \quad (1.1)$$

ここで、 H_p (Kcal/hr); ポンプ入熱(3ループ分)

H_{r0} (Kcal/hr); 100%回転時(837rpm)のポンプ入熱量

$n(\%)$; ポンプ回転数

$$H_{r0} = H_p' * \frac{r'}{r} \quad (1.2)$$

ここで、 H_p' ; 定格運転時における3ループ合計のポンプ入熱量=4.09*10⁶ (Kcal/hr)

r ; ナトリウム比重、892 (Kg/m³) at 250°C

r' ; ナトリウム比重、857 (Kg/m³) at 397°C

(2)t=0の時のポンプ入熱量

$$\begin{aligned} H_{r0} &= H_p' * \frac{r'}{r} \\ &= 4.09 * 10^6 \frac{874}{857} \\ &= 4.17 * 10^6 \text{ (Kcal / hr)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_p &= H_{r0} * \left(\frac{n}{100} \right)^3 \\ &= 4.17 * 10^6 * \left(\frac{100}{100} \right)^3 \\ &= 4.17 * 10^6 \text{ (Kcal / hr)} \end{aligned}$$

(3)t=8000の時のポンプ入熱量

ポンプ回転数 50(rad/sec) ≈ 475 rpm

$$n = 475 / 837 \cdot 100 = 57(\%)$$

$$H_{r0} = H_p' \cdot \frac{r'}{r}$$

$$= 4.09 \cdot 10^6 \frac{874}{857}$$

$$= 4.17 \cdot 10^6 \text{ (Kcal / hr)}$$

$$H_p = H_{r0} \cdot \left(\frac{n}{100} \right)^3$$

$$= 4.17 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{57}{100} \right)^3$$

$$= 7.72 \cdot 10^5 \text{ (Kcal / hr)}$$

(4)入力データ形式への換算

$$DZL = 3.89 \text{ m}, NENDL} = 10$$

2メッシュで発熱するので

① t = 0 のとき

$$Q = \frac{4.17 \cdot 10^6}{0.389 \cdot 2 \cdot 3600}$$

$$= 1488.9 \text{ (Kcal / m.sec)}$$

② t = 8000 のとき

$$Q = \frac{7.72 \cdot 10^5}{0.389 \cdot 2 \cdot 3600}$$

$$= 275.6 \text{ (Kcal / m.sec)}$$

2. 適正ポンプ入熱量のパラメータサーベイ

2.1 目的

SKS自然循環模擬試験の計算において、1次系の温度応答が実験結果にはほぼ等しくなるポンプ入熱量を把握し、その結果を全系モデルの入力データに反映する。

2.2 計算パラメータ

4 9 %流量時のポンプ入熱量 (Q_x) として、以下の発熱条件を与える。

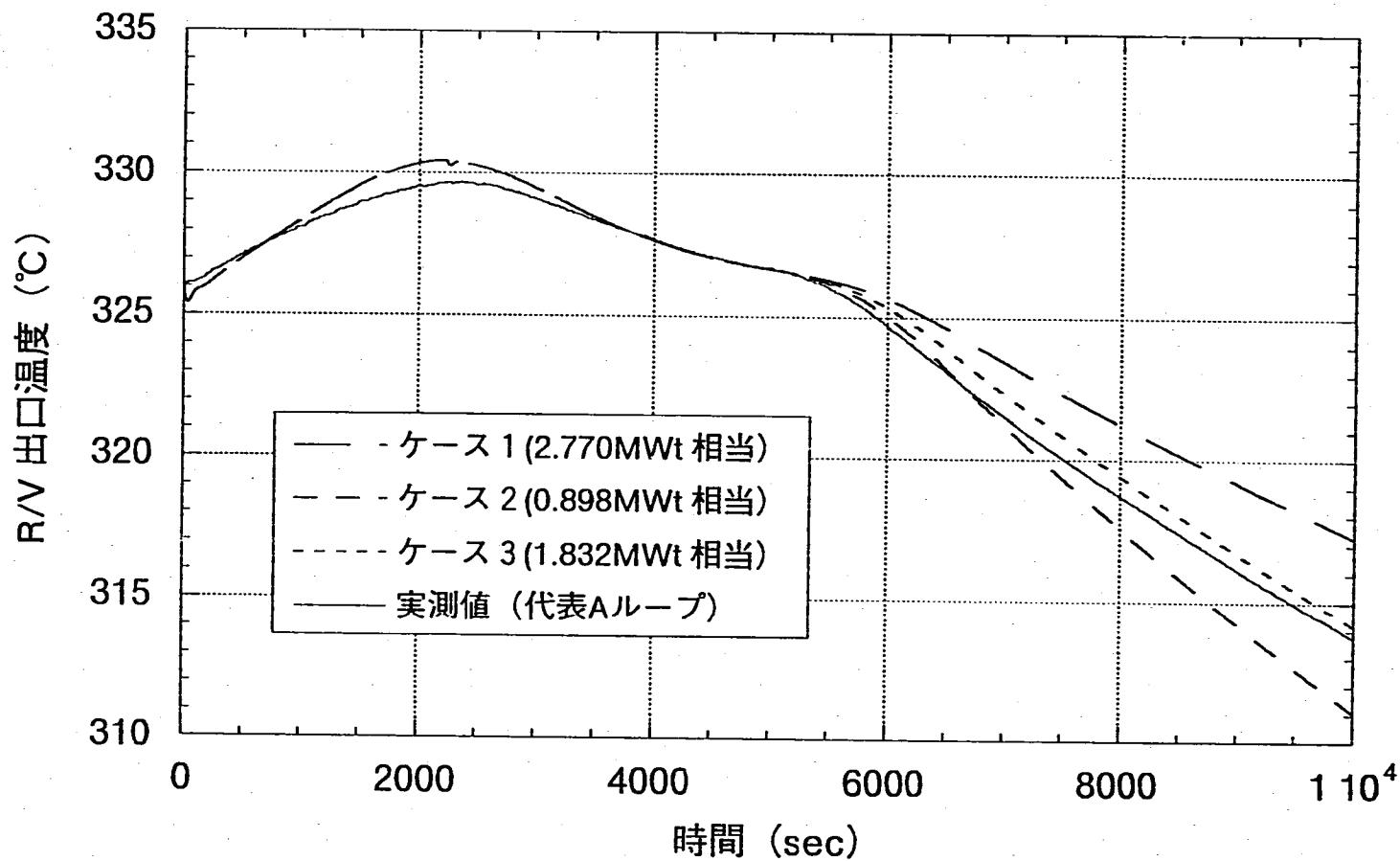
- (1) ケース 1 850.0 (kcal/m.sec) / 2.770 MWt 相当 (回転数比)
- (2) ケース 2 275.6 (kcal/m.sec) / 0.898 MWt 相当 (回転数の三乗比)
- (3) ケース 3 562.5 (kcal/m.sec) / 1.832 MWt 相当 (ケース 1 とケース 2 の平均)

また、ポンプ入熱量は 1488.9 (kcal/m.sec) を初期条件とし、次のように時間変化させて計算する。

時間 (sec)	0.0	5100.0	6400.0
発熱量(kcal/ms)	1488.9	1488.9	Q_x

2.3 計算結果

各発熱条件で計算したR/V出口温度変化（代表Aループ）を図D-1に示す。図によれば、ケース3の温度特性が実測値と比較的よく一致している。よって、4 9 %流量時のポンプ入熱量 (Q_x) としてケース3の発熱条件を用いる。



図D-1 ポンプ入熱量のパラメータ解析結果