

燃料集合体変形解析コード BAMB00 と熱流動解析コード

ASFRE-IV によるバンドル変形・熱流動連成解析

(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

燃料集合体変形解析コード BAMB00 と熱流動解析コード ASFRE-IV による
バンドル変形・熱流動連成解析

伊藤 昌弘^{*1}、今井 康友^{*2}
上羽 智之^{*3}、大島 宏之^{*4}

要旨

ナトリウム冷却高速炉のワイヤスペーサ型燃料集合体では、燃焼度が高くなると材料スエリングの発生により、燃料ピンバンドルとそれを収容しているダクトとの間で、機械的な相互作用が生じる場合がある。このような変形が生じた高速炉燃料集合体の健全性評価の手法確立に向けて、燃料集合体変形解析コード BAMB00 と熱流動解析コード ASFRE-IV およびそれらを結合し、両コードの相互作用を評価できるようにするための連成機能の整備を行なっている。今回は、連成アルゴリズム構築とその検証の一環として、原子炉起動直後の状態を対象とした燃料ピンバンドルの変形と熱流動の連成解析を実施した。連成解析では、熱流動と変形の反復計算が数値的に不安定な解を与える結果となった。この結果から、連成アルゴリズム構築にあたっては、変形解析と熱流動解析の反復計算過程における収束性を向上させるため、数値計算上の手法として、それぞれの解析結果の変動を抑制するように不足緩和を与えるなどの対策が必要であるという課題が得られた。

*1 株式会社 NESI

*2 株式会社エヌデーデー

*3 大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

*4 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

Coupling Analysis of Deformation and Thermal-Hydraulics in a FBR Fuel Pin Bundle
using BAMBOO and ASFRE-IV Codes

Masahiro ITO^{*1}, Yasutomo IMAI^{*2}
Tomoyuki UWABA^{*3}, Hiroyuki OHSHIMA^{*4}

Abstract

The bundle-duct interaction may occur in sodium cooled wire-wrapped FBR fuel subassemblies in high burn-up conditions. JNC has been developing a bundle deformation analysis code BAMBOO (Behavior Analysis code for Mechanical interaction of fuel Bundle under On-power Operation), a thermal hydraulics analysis code ASFRE-IV (Analysis of Sodium Flow in Reactor Elements - ver. IV) and their coupling method as a simulation system for the evaluation on the integrity of deformed FBR fuel pin bundles. In this study, the simulation system was applied to a coupling analysis of deformation and thermal-hydraulics in the fuel pin-bundle under a steady-state condition just after startup for the purpose of the verification of the simulation system. The iterative calculations of deformation and thermal-hydraulics employed in the coupling analysis provided numerically unstable solutions. From the result, it was found that improvement of the coupling algorithm of BAMBOO and ASFRE-IV is necessary to reduce numerical fluctuations and to obtain better convergence by introducing such computational technique as the optimized under-relaxation method.

*1 NESI Inc.

*2 NDD Inc.

*3 Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

*4 Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced technology Division, OEC, JNC

青色の項目をクリックすると当該ページへジャンプします

目 次

1 . はじめに	1
2 . 解析方法	2
2 . 1 解析条件	2
3 . 解析結果	4
3 . 1 熱流動解析	4
3 . 2 バンドル変形解析	5
4 . 今後の課題	7
4 . 1 連成解析の自動化	7
4 . 2 収束手法の検討	7
5 . おわりに	8
< 参考文献 >	9

図・表リスト

表 1	流路面積の変化が最も大きい軸方向位置と面積変化率	10
図 1-1	原子炉起動直後の冷却材温度分布の例	11
図 2-1	解析モデル概略図	12
図 2-2	ASFRE-BAMBOO 連成解析手順	13
図 2-3	軸方向発熱分布	14
図 3-1	流路面積変化率の軸方向分布	15
図 3-2	質量流量変化率の軸方向分布	15
図 3-3	熱流量変化率の軸方向分布	16
図 3-4	冷却材温度比較断面	17
図 3-5	燃料カラム上端における冷却材温度分布 (A-A'断面)	18
図 3-6	燃料カラム上端における冷却材温度分布 (B-B'断面)	18
図 3-7	燃料カラム上端における冷却材温度分布 (C-C'断面)	19
図 3-8	燃料カラム上端における冷却材温度分布 (D-D'断面)	19
図 3-9	燃料カラム上端における冷却材温度の変化 (手順 5 - 手順 3)	20
図 3-10	燃料カラム上端における冷却材温度の変化 (手順 7 - 手順 5)	20
図 3-11	燃料カラム上端における冷却材温度の変化 (手順 9 - 手順 7)	21
図 3-12	燃料カラム中央における冷却材温度分布 (A-A'断面)	21
図 3-13	燃料カラム中央における冷却材温度分布 (B-B'断面)	22
図 3-14	燃料カラム中央における冷却材温度分布 (C-C'断面)	22
図 3-15	燃料カラム中央における冷却材温度分布 (D-D'断面)	23
図 3-16	燃料カラム中央における冷却材温度の変化 (手順 5 - 手順 3)	23
図 3-17	燃料カラム中央における冷却材温度の変化 (手順 7 - 手順 5)	24
図 3-18	燃料カラム中央における冷却材温度の変化 (手順 9 - 手順 7)	24
図 3-19	手順 2 における縦断面変位プロファイル	25
図 3-20	手順 4 における縦断面変位プロファイル	25
図 3-21	手順 6 における縦断面変位プロファイル	26
図 3-22	手順 8 における縦断面変位プロファイル	26
図 3-23	手順 10 における縦断面変位プロファイル	27

図 3-24	流路面積比較断面	28
図 3-25	手順 2 と手順 4 における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)	29
図 3-26	手順 2 と手順 4 における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)	29
図 3-27	手順 4 と手順 6 における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)	30
図 3-28	手順 4 と手順 6 における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)	30
図 3-29	手順 6 と手順 8 における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)	31
図 3-30	手順 6 と手順 8 における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)	31
図 3-31	手順 8 と手順 10 における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)	32
図 3-32	手順 8 と手順 10 における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)	32
図 3-33	反復計算における流路面積変化率最大値の推移	33

1.はじめに

ナトリウム冷却高速炉のワイヤスペーサ型燃料集合体では、燃焼度が高くなると材料スエリングの発生により、燃料ピンバンドルとそれを収容しているダクトとの間で、機械的な相互作用（BDI：Bundle-Duct-Interaction）が生じる場合がある。このような状況になると、燃料ピンがワイヤスペーサ巻きピッチに沿って湾曲するようになるが、これによる冷却材流路の変形は熱流動場に変化をもたらし、その結果生じる温度分布は燃料ピンの変形に影響を与える。このように、ある時点における燃料ピンバンドルの変形と集合体内の温度分布は、ある平衡状態に落ち着いていると考えられる。

経済性向上を目指した高燃焼度燃料集合体の健全性評価においては、過度な保守性を排除した合理的な安全裕度を設定することが必要である。このため、サイクル機構では、変形と熱流動の相互作用を考慮した上で詳細な温度場および変形を評価することを目的として、集合体バンドル変形解析コード（BAMBOO）と熱流解析コード（ASFRE-IV）を連成解析させるための手法整備を進めている。平成14年度の成果として、これらのコードの入出力機能を改良し、コード間でサブチャンネルの変形情報と温度情報の受け渡しを行なえるようにした。開発した入出力インターフェース機能に対して、例題による機能検証を行なった結果、妥当な解が得られることを確認している^[1]。

今回は、連成アルゴリズムの構築および機能検証の一環として、上述のBAMBOOとASFRE-IVの連成機能を用いて、原子炉起動直後の状態に対し「変形-熱流動」連成解析を実施した。未使用の燃料集合体を、炉内に装荷し、原子炉を起動した時点で、集合体内には図1-1に示すように周辺サブチャンネルの温度が中心側に比べて低くなるという温度分布が生じ、その結果、微小なピンの熱湾曲が生じる。この起動直後の状態は、その後の照射変形に影響するため、バンドル変形と冷却材温度の平衡状態を解析することは重要である。

本報告書の構成は次のようになっている。第2章では解析方法の概要を、第3章では解析結果を示す。第4章では、この解析で明らかになった課題を示す。

2. 解析方法

原子炉起動直後のバンドル変形と冷却材温度の平衡状態を対象に、ASFRE-BAMBOO 連成解析機能を用いて、原型炉仕様の集合体について「変形-熱流動」連成解析を実施した。図 2-1 に解析モデル概略図を示す。

解析は、図 2-2 に示すように、まず始めに ASFRE コードによる直立バンドルの熱流動解析を行い、その結果から得られた温度データを用いて BAMBOO コードによるバンドル変形解析を実施した。その後、以下の(1), (2)の手順を 4 回反復計算するという方法で行なった。

- (1) 変形後流路形状を用いた、ASFRE コードによる変形バンドルの熱流動解析
- (2) 熱流動解析結果を用いた、BAMBOO コードによるバンドル変形解析

2.1 解析条件

本連成解析で使用した解析条件は次のとおりである。

ASFRE コード解析条件

集合体形状

燃料ピン本数	: 169 本
燃料ピン外径	: 6.50 [mm]
燃料ピン配列ピッチ	: 7.87 [mm]
ワイヤー外径	: 1.32 [mm]
ワイヤー巻き付けピッチ	: 307 [mm]
ワイヤー巻き始め位置	: 65.4167 [mm] (ピン下端から)
ワイヤー巻き始め方向	: 0 [deg]
ダクト内対面間距離	: 104.6 [mm]
燃料カラム長	: 930 [mm]
上/下ブランケット長	: 300 [mm] / 350 [mm]
上/下非発熱部	: 1185 [mm] / 48 [mm]
ピン全長	: 2813 [mm]

境界条件

集合体総発熱量	: 4.4005 [MW]
冷却材入口流量	: 21.35 [kg / s]
冷却材入口温度	: 397 [°C]
軸方向出力分布	: 図 2-3 参照

BAMBOO コード解析条件

集合体形状

ダクト肉厚 : 3.0 [mm]

他は ASFRE コード解析条件と同じ

ピン扁平化 : BAMB00 コードは、ピン断面の扁平化を解析に等方的縮径として取り扱っている。弾性変形によるピン外径減少量を D 、接触荷重を F としたとき、ピン扁平化剛性は次式で定義される。

$$\text{ピン扁平化剛性} = F / D \quad \dots(1)$$

剛性はヤング率と比例し、ヤング率=186.2(GPa)の時、ピン扁平化剛性は 544.0 となる。

ヤング率 (被覆管、ワイヤ、ダクト共通)

温度 ()	ヤング率 (GPa)
150	186.2
250	180.3
350	172.5
450	163.7
550	153.9
650	144.1

線熱膨張係数 (被覆管、ワイヤ、ダクト共通)

温度 ()	線熱膨張係数 (/)
150	1.712×10^{-5}
250	1.829×10^{-5}
350	1.924×10^{-5}
450	2.000×10^{-5}
550	2.059×10^{-5}
650	2.104×10^{-5}

3. 解析結果

3.1 熱流動解析

図 3-1、3-2、3-3 に、中心 / 周辺 / 全サブチャンネルにおける流路面積、質量流量、熱流量に関して、直立時と変形時を比較した変化率の軸方向分布をそれぞれ示す。図中の Z/L は、燃料カラム下端からの軸方向位置を燃料カラム長で規格化した値であり、燃料カラム下端が 0、燃料カラム上端が 1 となる。また、質量流量と熱流量は、次式から計算している。

$$\text{質量流量 [kg/s]} = \text{密度 [kg/m}^3\text{]} \times \text{軸方向流速 [m/s]} \times \text{流路面積 [m}^2\text{]} \quad \dots(2)$$

$$\text{熱流量 [kW]} = \text{比熱 [kJ/kg K]} \times \text{軸方向流量 [kg/s]} \times \text{冷却材上昇温度 [K]} \quad \dots(3)$$

【流路面積変化率】

図 3-1 に流路面積変化率の軸方向分布を示す。中心 / 周辺サブチャンネルの流路面積は、燃料ピンの熱湾曲の影響により、軸方向に対して不規則的な変化となるが、両者の和である総流路面積は、ラッパ管の外径増加の影響がより強く、燃料ピン下端を除いて概ね一様に約 2% 増加している。

【質量流量変化率】

図 3-2 に質量流量変化率の軸方向分布を示す。周辺サブチャンネルにおける質量流量の増減は、その流路面積の増減と密接に関連しており、それぞれの傾向は極めて良く一致している。また、総質量流量は直立時と変形時で等しいため、その変化率は常に零であり、従って、中心 / 周辺サブチャンネルにおける質量流量の増減は、正負を逆転させた分布曲線となる。

【熱流量変化率】

図 3-3 に熱流量変化率の軸方向分布を示す。燃料ピン下端から燃料カラム下部まででは、累積の発熱量が小さいため顕著な差は現れないが、それより上部では、質量流量の増減に追従して数%程度の差が現れる。また、総質量流量と同様に総熱流量も直立時と変形時で等しいため、その変化率は常に零である。

ここで、連成解析における熱流動解析の収束性を確認するため、各手順の変形バンドル熱流動解析での冷却材温度変化を整理した。

(比較 A-1) : 手順 3 と手順 5 の冷却材温度変化

(比較 A-2) : 手順 5 と手順 7 の冷却材温度変化

(比較 A-3) : 手順 7 と手順 9 の冷却材温度変化

比較したサブチャンネルの場所を図 3-4 に示す。図に示すように比較対象は、対角ピン列 3 方向のサブチャンネルと最外周サブチャンネルである。ラッパ管 5-6 面コーナーから 2-3 面コーナーのサブチャンネルを「A-A'断面」、4-5 面コーナーから 1-2 面コーナーのサブチャンネルを「B-B'断面」、3-4 面コーナーから 1-6 面コーナーのサブ

チャンネルを「C-C'断面」と定義した。また、最外周サブチャンネルは、ラッパ管1面と6面のコーナー方向を起点(0°)として、時計回りに整理し「D-D'断面」と定義した。

【燃料カラム上端】

図3-5～3-8、および、図3-9～3-11に燃料カラム上端における各断面の冷却材温度、および、各手順間での温度変化の分布を示す。中心ピンの周辺では、手順3～9の結果は最大でも1しか変わらず、特に、手順5以降は殆ど変化していない。また、ラッパ管の周辺では、手順3から手順5にかけて3程度の温度変化が見られたが、それ以降は1以内の変化に留まっている。それ以外の領域では、依然として2以内の温度変化が見られるが、反復計算が進むにつれて変化幅は小さくなっている。

【燃料カラム中央】

図3-12～3-15、および、図3-16～3-18に燃料カラム中央における各断面の冷却材温度、および、各手順間での温度変化の分布を示す。各手順間での温度変化は、燃料カラム上端よりも燃料カラム中央において顕著である。例えば、手順7から手順9への過程では、燃料カラム上端では2以内の温度変化に留まっているにもかかわらず、燃料カラム中央では最大4の温度変化が見られる。また、燃料カラム上端と燃料カラム中央で温度変化の傾向は変わらないため、燃料カラムの下部で変形により生じた温度変化が上部にそのまま影響していると思われる。

これらの結果から、燃料カラム中央の温度変化は依然として大きく、この影響は上部に影響することから、バンドル変形と冷却材温度の平衡状態には達していないと考えられる。

3.2 バンドル変形解析

図3-19～3-23に各手順のバンドル対角ピン列の縦断面変位プロファイルを示す。これらは、図3-4に示す「A-A'断面」のピンとダクトの変位と接触荷重をプロットしたものである。図に示すように、熱湾曲によって外周ピンが変形している状態が解析されていることが分かる。ピン周囲のサブチャンネルに温度差がほとんどないピン下端の非発熱部から燃料カラム下部にかけてもピンの変位が生じているが、これは他の軸位置(燃料カラム)で生じた接触荷重の影響と熱膨張による膨れによって生じたピン下端の接触荷重の影響が重なったものである。縦断面変位プロファイルを手順毎に比較してみると、接触荷重の発生箇所が変化しており、これによる影響でピンの変位も変化している。

このようなピンの変位の変化が、熱流動解析結果に及ぼす影響を確認するため、流路面積の各手順での変化率を、以下のように整理した。

$$\text{変化率}[\%] = (\text{手順Mの面積} - \text{手順Nの面積}) / \text{手順Nの面積} \times 100 \quad \dots(4)$$

(N < M)

- (比較 B-1) : 手順 2 と手順 4 の流路面積変化率
- (比較 B-2) : 手順 4 と手順 6 の流路面積変化率
- (比較 B-3) : 手順 6 と手順 8 の流路面積変化率
- (比較 B-4) : 手順 8 と手順 10 の流路面積変化率

流路面積の比較箇所は、冷却材温度変化が顕著であったバンドル中心から 3 列目と 6 列目のサブチャンネルを対象とし、図 3-24 に示すようにそれぞれ「E-E' 断面」、「F-F' 断面」と定義した。図 3-25 ~ 3-32 は、E-E' 断面、F-F' 断面における流路面積変化率の最大値・最小値・平均値を軸方向位置で整理したものである。

比較 B-1 : 手順 2 と手順 4 の比較

図 3-25、3-26 より流路面積の変化が最も大きいところは、E-E' 断面では約 2%、F-F' 断面では約 10%である。手順 2 と比較して手順 4 の流路面積が大きくなる傾向がみられる。

比較 B-2 : 手順 4 と手順 6 の比較

図 3-27、3-28 より流路面積の変化が最も大きいところは、E-E' 断面では約 5%、F-F' 断面では約 11%である。E-E' 断面では手順 4 と比較して手順 6 の流路面積が大きくなる傾向がみられるが、F-F' 断面では逆に小さくなっている。

比較 B-3 : 手順 6 と手順 8 の比較

図 3-29、3-30 より流路面積の変化が最も大きいところは、E-E' 断面では約 6%、F-F' 断面では約 12%である。E-E' 断面では手順 6 と比較して手順 8 の流路面積が小さくなる傾向がみられるが、F-F' 断面では逆に大きくなっている。

比較 B-4 : 手順 8 と手順 10 の比較

図 3-31、3-32 より流路面積の変化が最も大きいところは、E-E' 断面では約 4%、F-F' 断面では約 13%である。両断面とも手順 8 と比較して手順 10 の流路面積が大きくなる傾向がみられる。

表 1 は各手順間における流路面積の変化が最も大きい軸方向位置とその位置の流路面積変化率を整理したものである。流路面積は、燃料カラム下部側の変化が大きく、F-F' 断面では反復計算の各過程において 10%以上変化している。また、図 3-33 は反復計算における流路面積変化率の最大値の推移をプロットした図であるが、反復計算が進んでも流路面積の変化が大きく、変化の仕方に振動傾向がみられる。これらの結果から、温度場とバンドル変形の平衡状態を解析するためには、反復計算回数を増やすとともに、振動を抑制するための収束手法の検討が必要である。

4. 今後の課題

4.1 連成解析の自動化

原子炉起動直後における集合体の変形と冷却材温度の平衡状態を対象として、ASFRE-BAMBOO 連成解析機能を用いて、熱流動-バンドル変形解析の反復計算を実施した。今回は、反復計算を4回行なったが、4回目の反復時においても、冷却材温度・流路面積とも前回値に対して変化しており、平衡状態を得るには反復計算回数を増やす必要がある。しかし、現在は、両コード間で必要となる入出力データの受け渡しを手動で行なっているため、解析コード切換え時のタイムラグやヒューマンエラーの可能性など、反復計算回数が増えるほど処理効率は悪くなる。このため、連成解析時のデータ受け渡しを自動化する必要があると考えている。

連成解析の自動化手法については、現在検討中であるが、両コードの実行環境を同じプラットフォーム上に移植し、シェルスクリプトで制御する方法や両コードを制御する専用プログラムを開発するなどの方法が考えられる。

4.2 収束手法の検討

今回、ASFRE-BAMBOO 連成解析機能を用いて、熱流動解析とバンドル変形解析の反復計算を行なった結果、解析結果に振動傾向がみられた。この状態で反復計算を継続した場合、収束 (=温度場とバンドル変形の平衡状態) までに必要な反復計算回数が多くなり処理効率が悪く、最悪の場合、解が発散してしまう可能性もある。このようなことから、ASFRE-BAMBOO 連成解析の反復計算時には何らかの収束手法が必要である。

このような解析結果の振動が発生する原因は、反復計算過程において互いのコードの解析結果をそのまま参照しているため、反復計算前後の解析結果 (温度場やバンドル変形) の変動が大きくなったからであると考えられる。このため、収束手法としては、反復計算の過程でそれぞれの解析結果に不足緩和を与え、受け渡しするデータの変動を抑制するなどの方法が考えられる。前述の連成解析自動化とともに最適な方法を検討する必要がある。

5. おわりに

原子炉起動直後における集合体の変形と冷却材温度の平衡状態を対象として、ASFRE-BAMBOO 連成解析機能を用いて「熱流動-変形」連成解析を実施した。連成解析では熱流動と変形の解析の反復を4回行なったが、反復計算前後の温度と変形の解析結果に振動が生じ、平衡状態への収束傾向が得られないことが分かった。これは、反復計算過程において互いのコードの解析結果をそのまま参照しているため、反復計算前後の温度場や変形の変動が大きくなったことが原因と考えられる。改善策としては、反復計算の過程で、数値計算上の手法としてそれぞれの解析結果の変動を抑制するように不足緩和を与えるなどの方法が挙げられ、これによって平衡状態の収束解が得られると考えられる。

今後は、このような収束改善手法を連成解析に適用するとともに、現在手動で行なっているデータの受け渡しを自動化し、効率的な解析を行なえるように整備する予定である。

参考文献

- [1] 上羽智之、伊藤昌弘、大島宏之、今井康友、「バンドル変形解析コード ” BAMB00 ” と熱流解析コード ” ASFRE-IV ” の連成解析のためのコード整備 (研究報告)」、JNC レポート TN9400 2003-026、2003.

表 1 流路面積の変化が最も大きい軸方向位置と面積変化率

	E-E'断面	F-F'断面
手順 2 ~ 4	2.1% (Z/L=0.11)	10.2% (Z/L=0.33)
手順 4 ~ 6	4.6% (Z/L=0.33)	-11.2% (Z/L=0.19)
手順 6 ~ 8	-6.0% (Z/L=0.33)	11.8% (Z/L=0.06)
手順 8 ~ 10	4.2% (Z/L=0.06)	12.6% (Z/L=0.33)

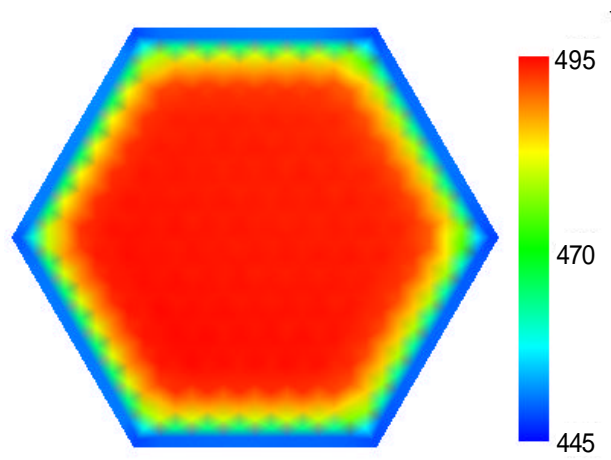


図1-1 原子炉起動直後の冷却材温度分布の例

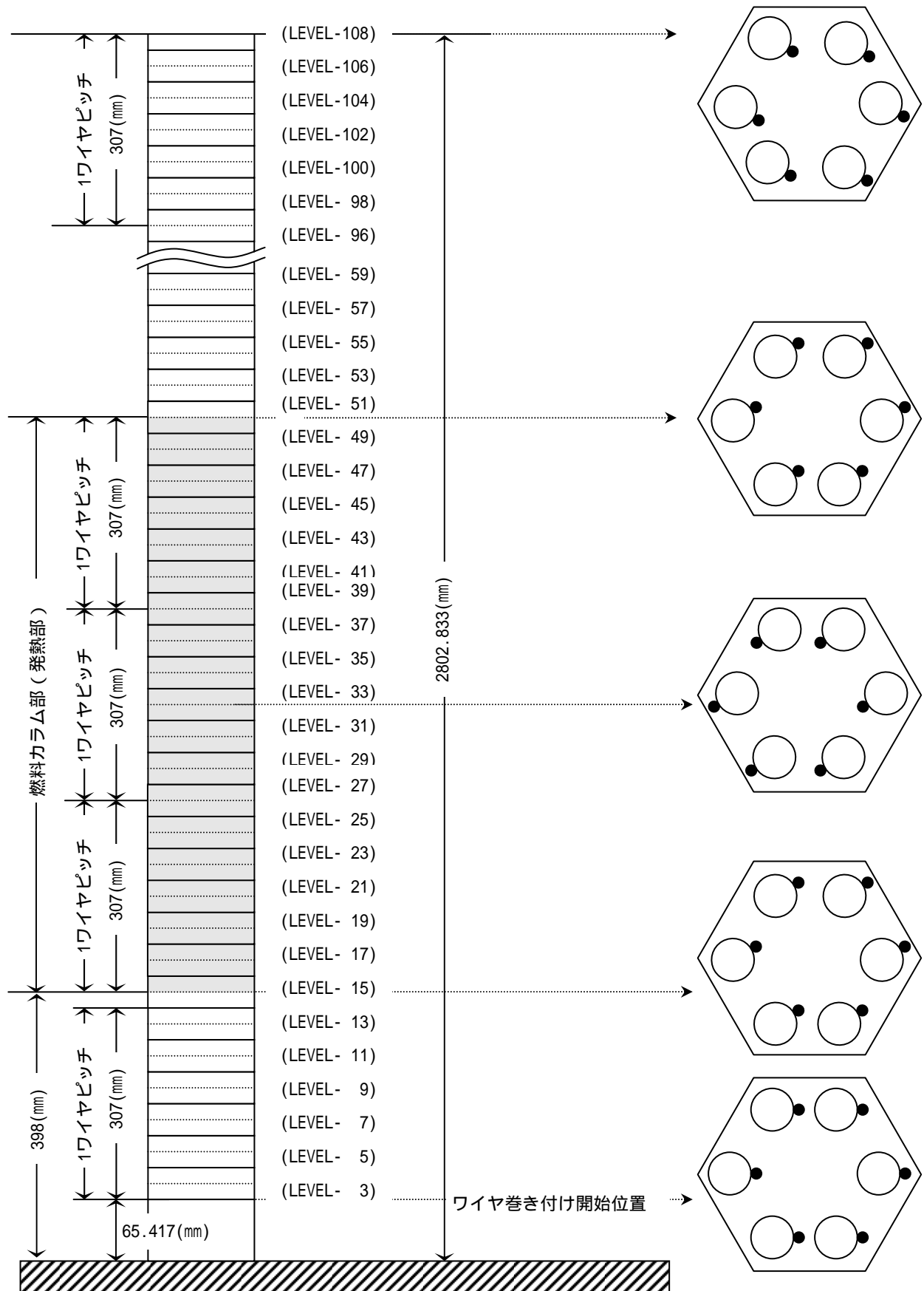


図2-1 解析モデル概略図

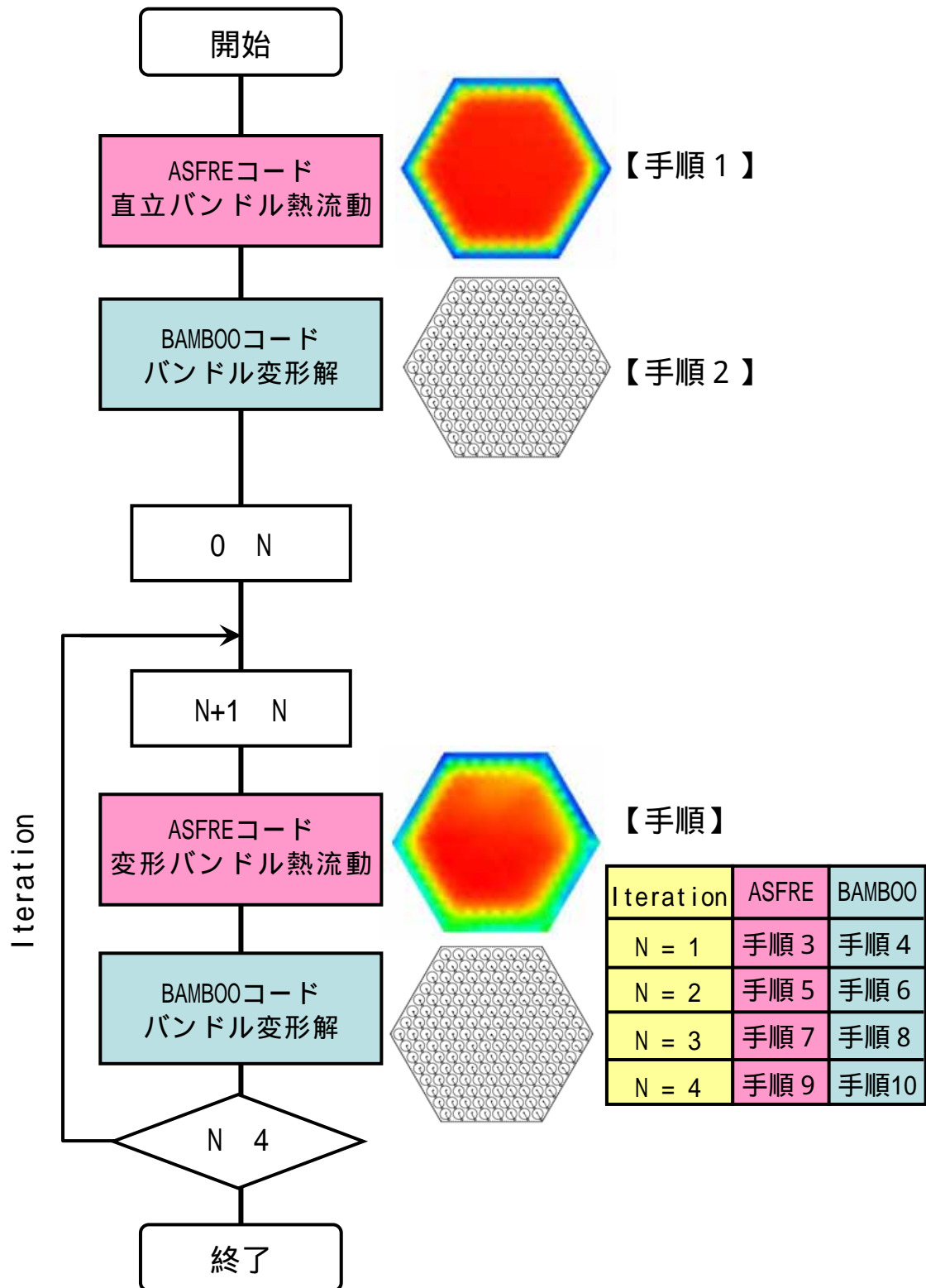


図2-2 ASFRE-BAMBOO連成解析手順

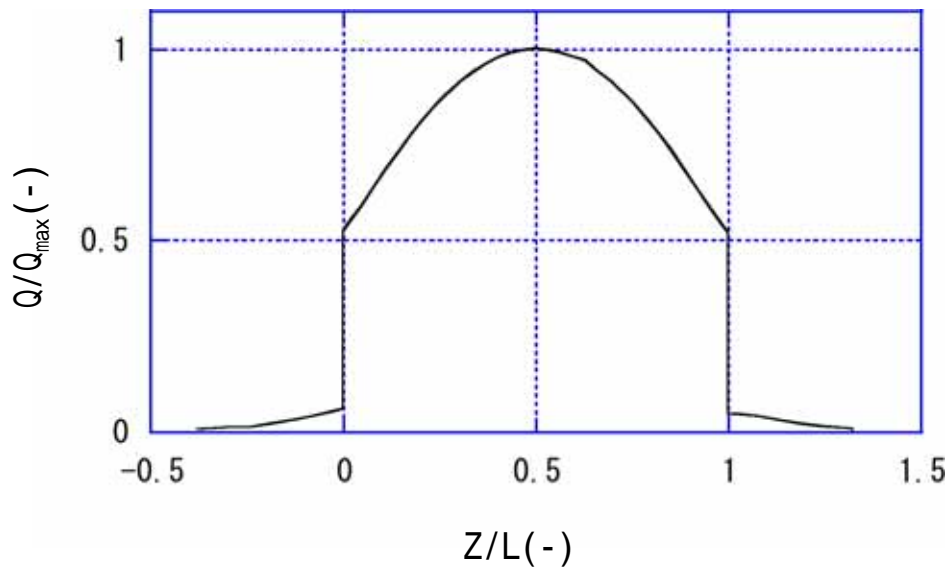


図2-3 軸方向発熱分布

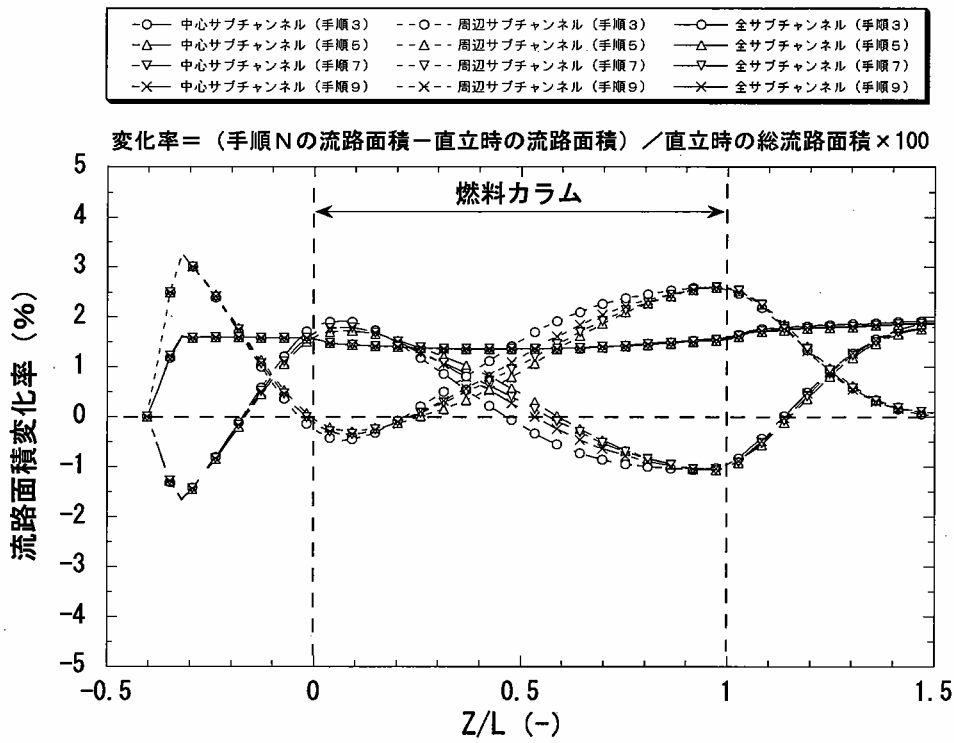


図3-1 流路面積変化率の軸方向分布

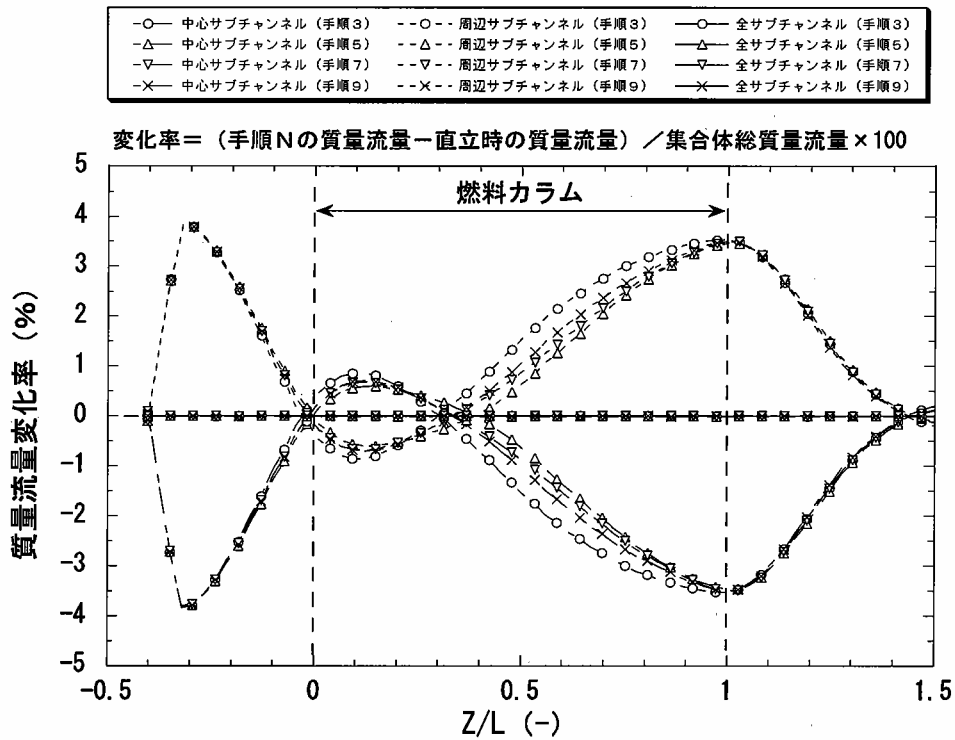


図3-2 質量流量変化率の軸方向分布

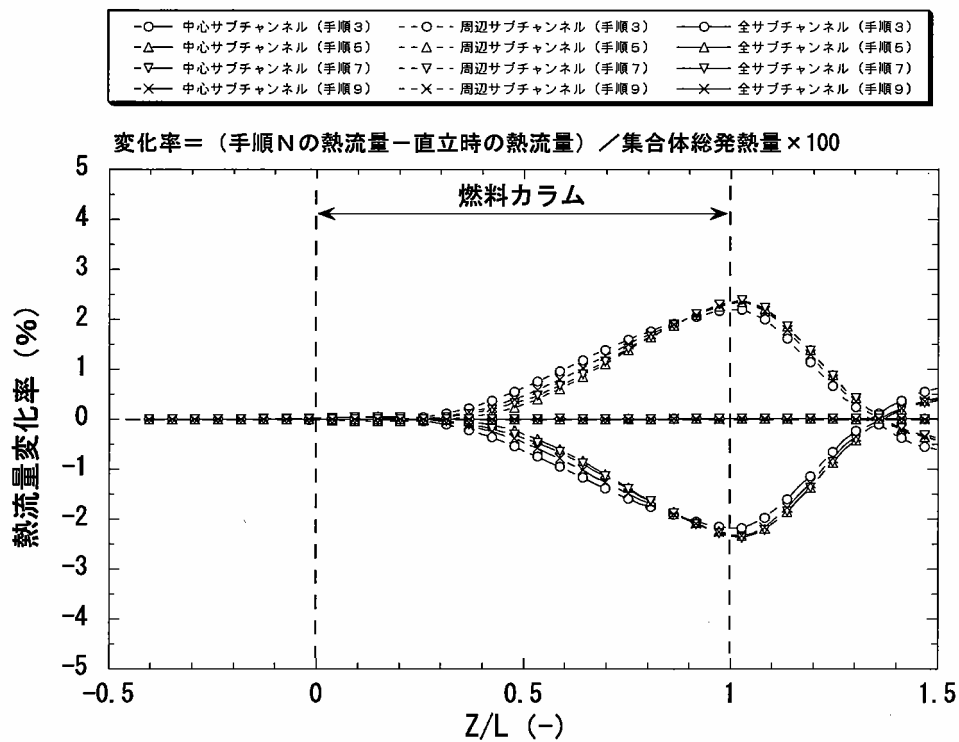


図3-3 熱流量変化率の軸方向分布

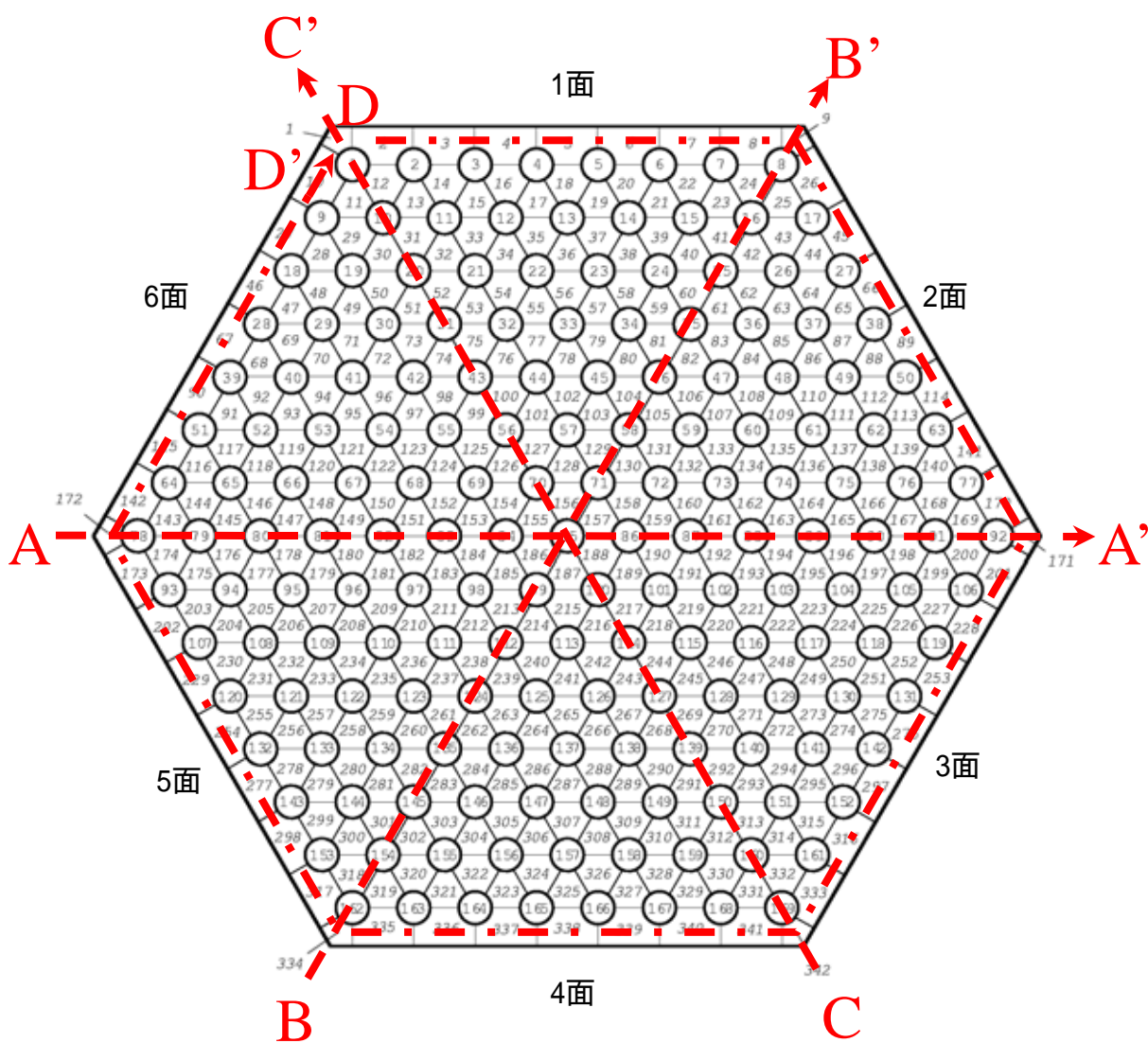


図3-4 冷却材温度比較断面

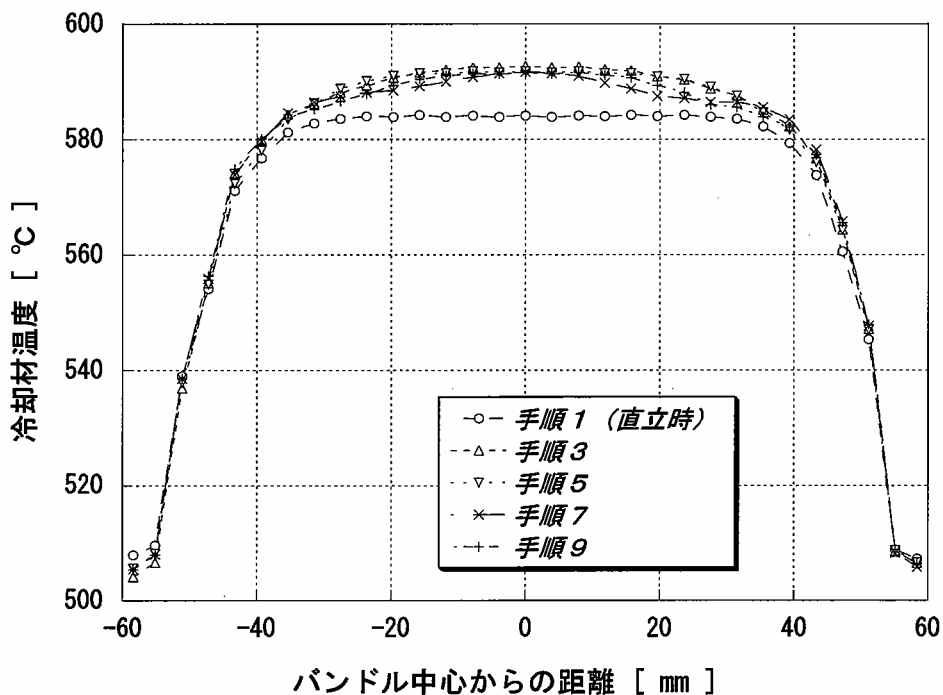


図3-5 燃料カラム上端における冷却材温度分布 (A-A' 断面)

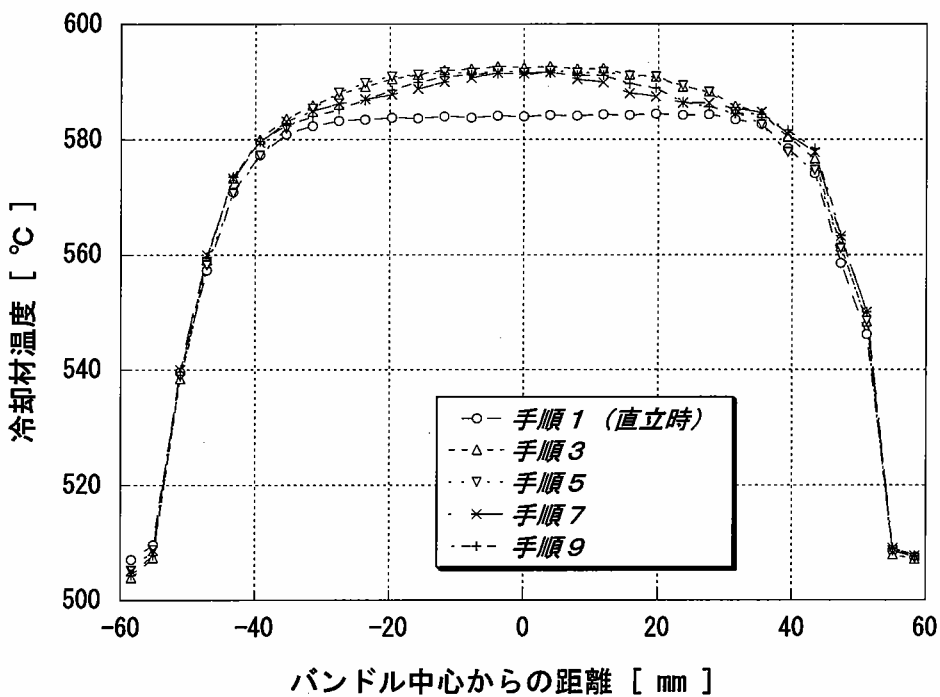


図3-6 燃料カラム上端における冷却材温度分布 (B-B' 断面)

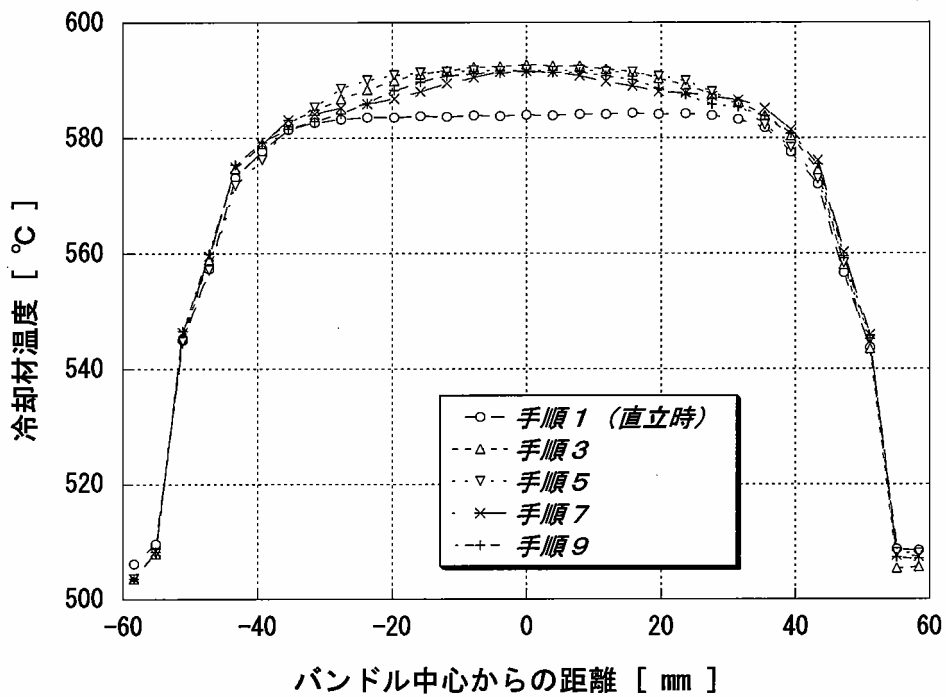


図3-7 燃料カラム上端における冷却材温度分布 (C-C' 断面)

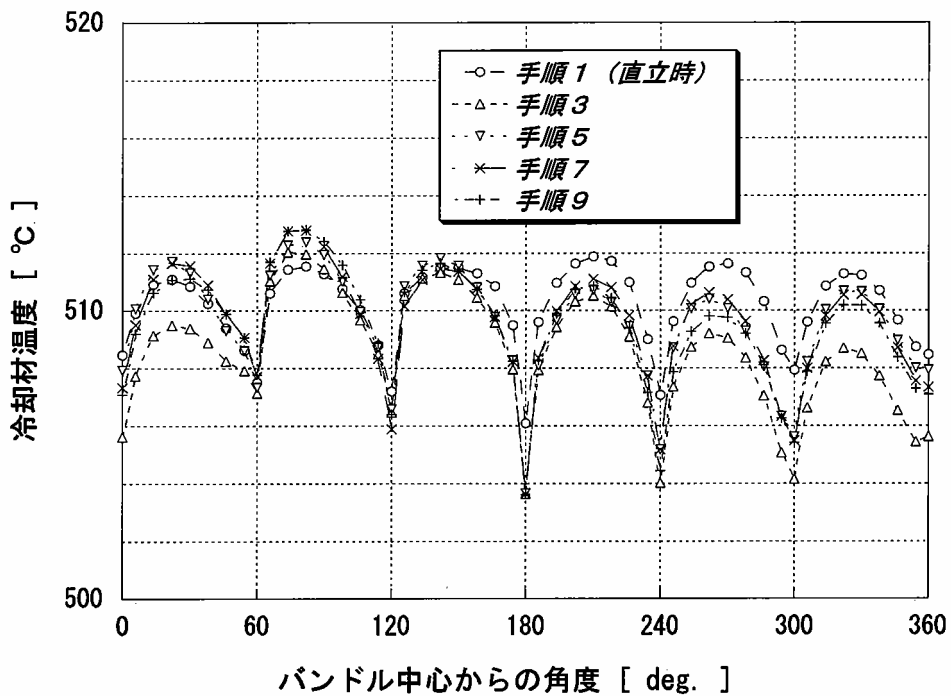


図3-8 燃料カラム上端における冷却材温度分布 (D-D' 断面)

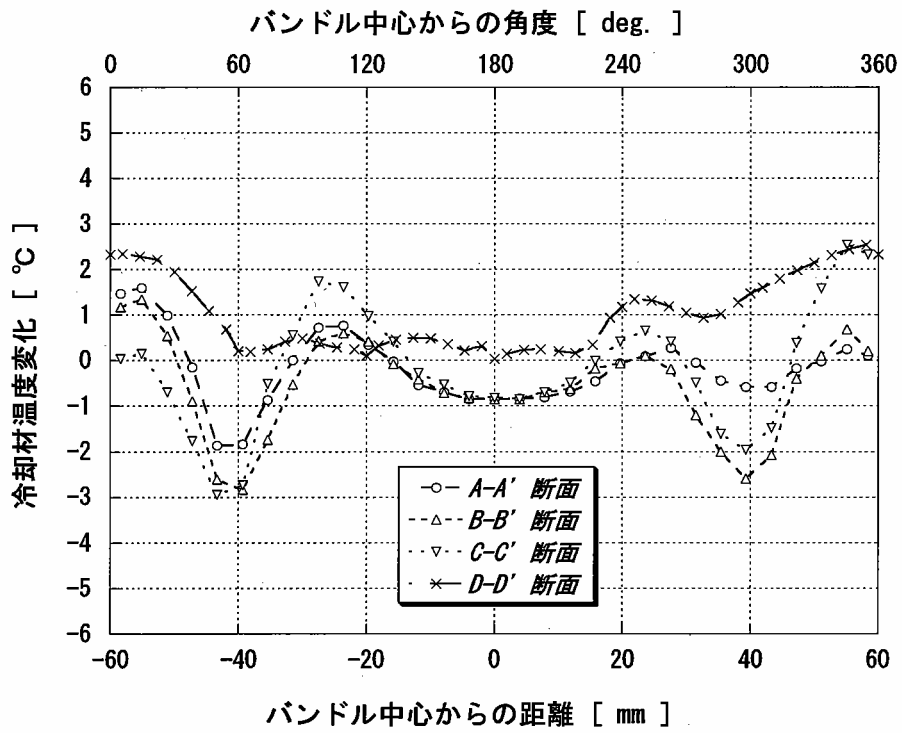


図3-9 燃料カラム上端における冷却材温度の変化（手順5-手順3）

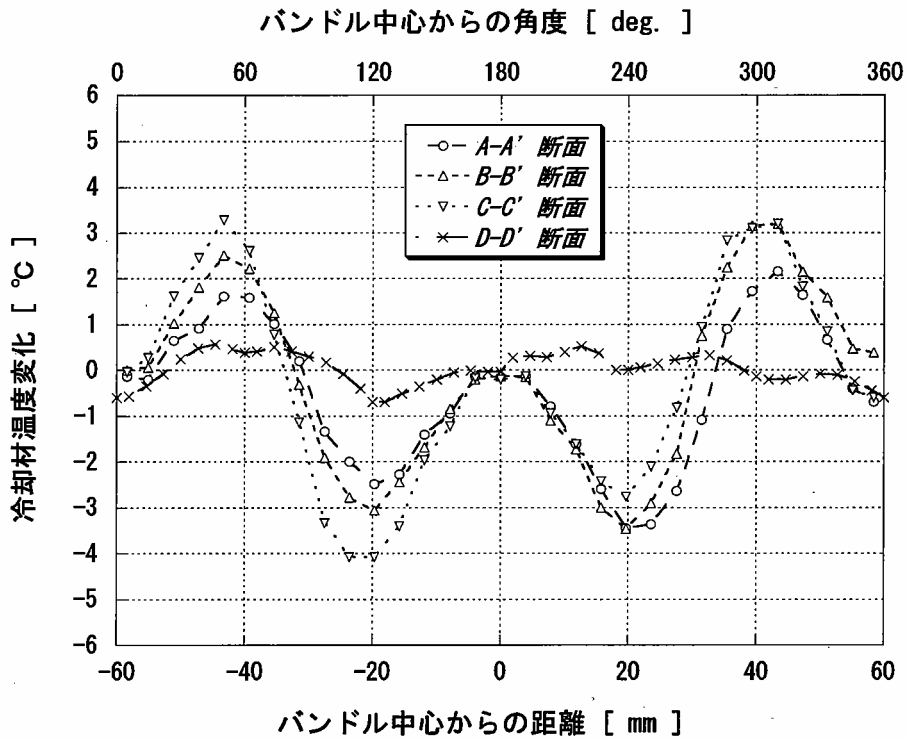


図3-10 燃料カラム上端における冷却材温度の変化（手順7-手順5）

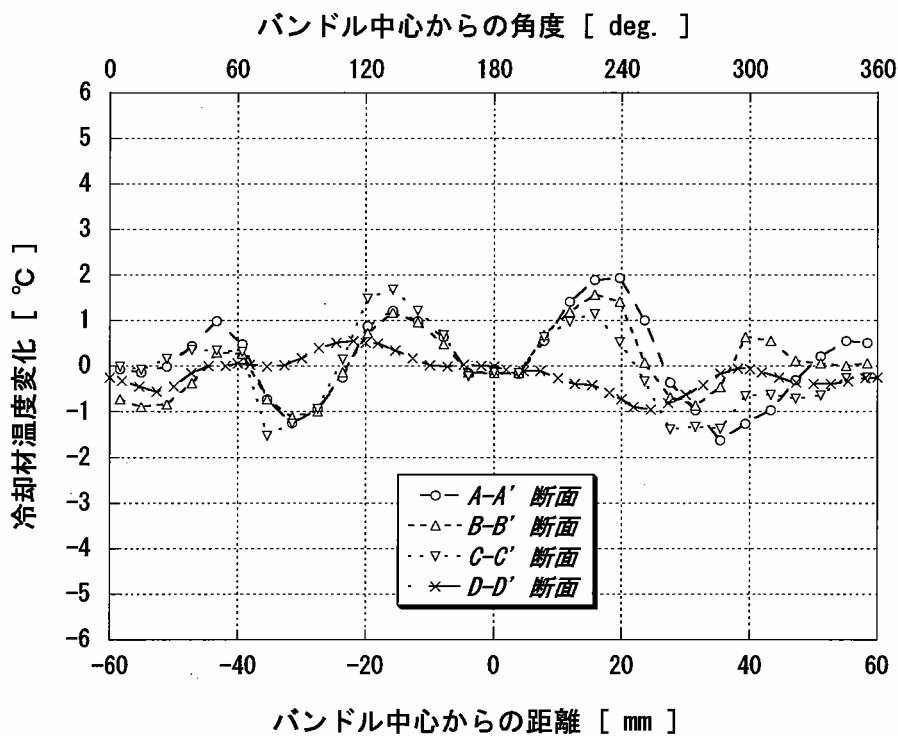


図3-11 燃料カラム上端における冷却材温度の変化（手順9-手順7）

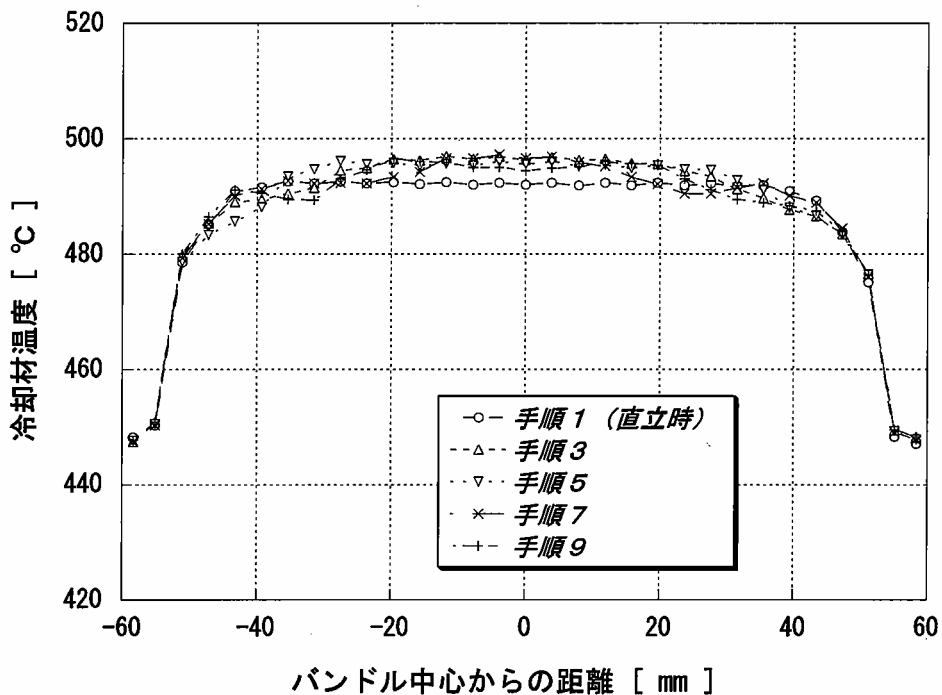


図3-12 燃料カラム中央における冷却材温度分布（A-A'断面）

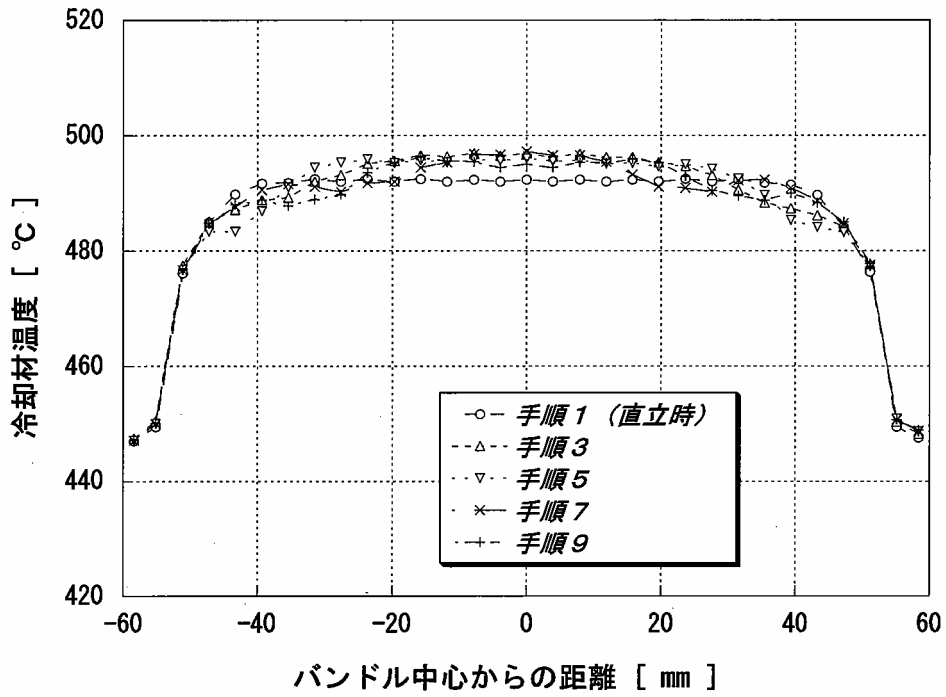


図3-13 燃料カラム中央における冷却材温度分布 (B-B' 断面)

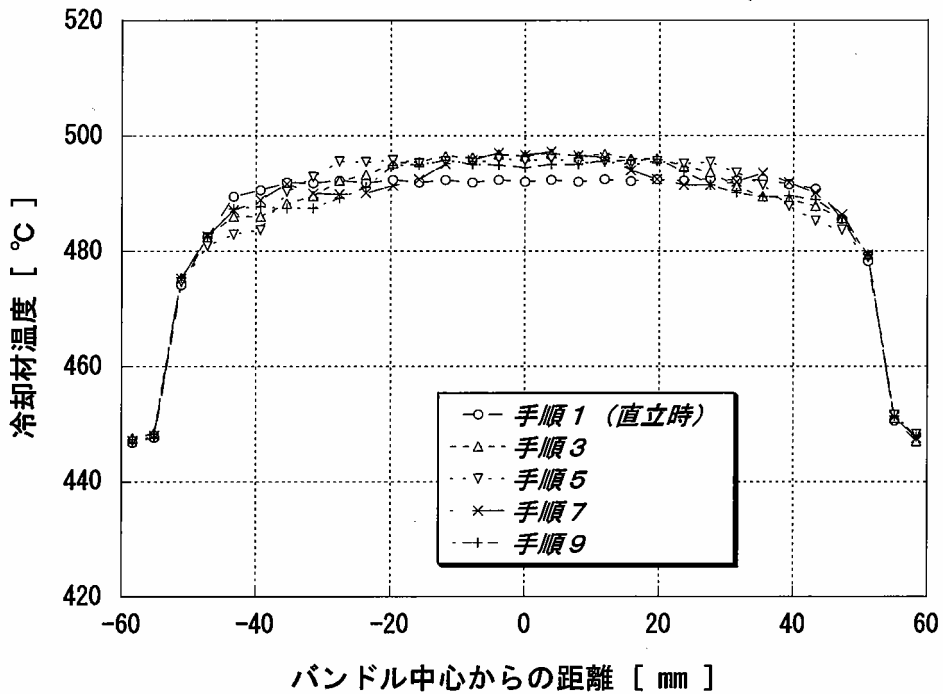


図3-14 燃料カラム中央における冷却材温度分布 (C-C' 断面)

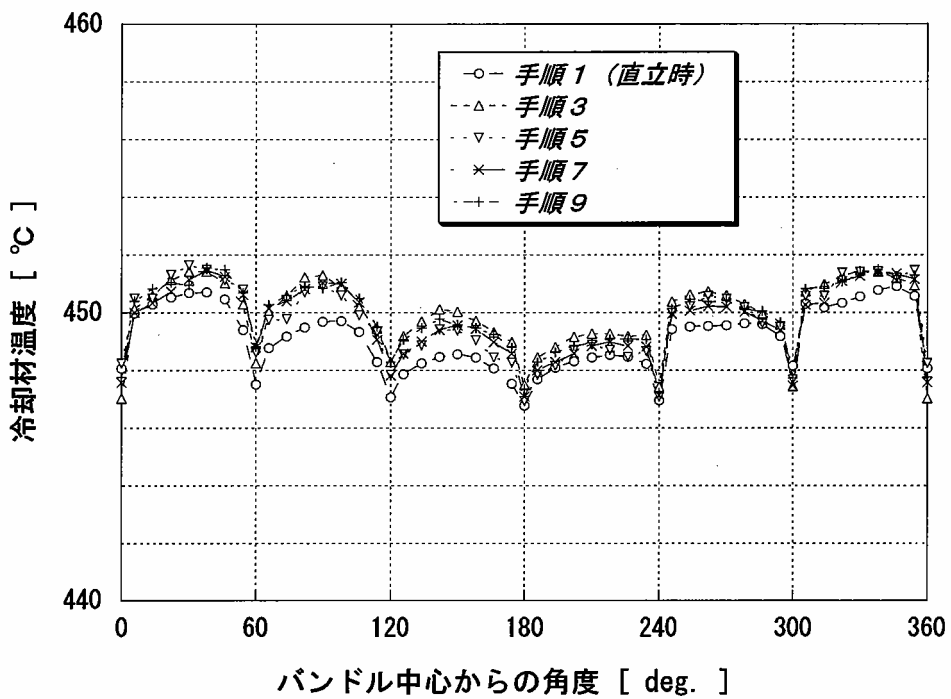


図3-15 燃料カラム中央における冷却材温度分布 (D-D' 断面)

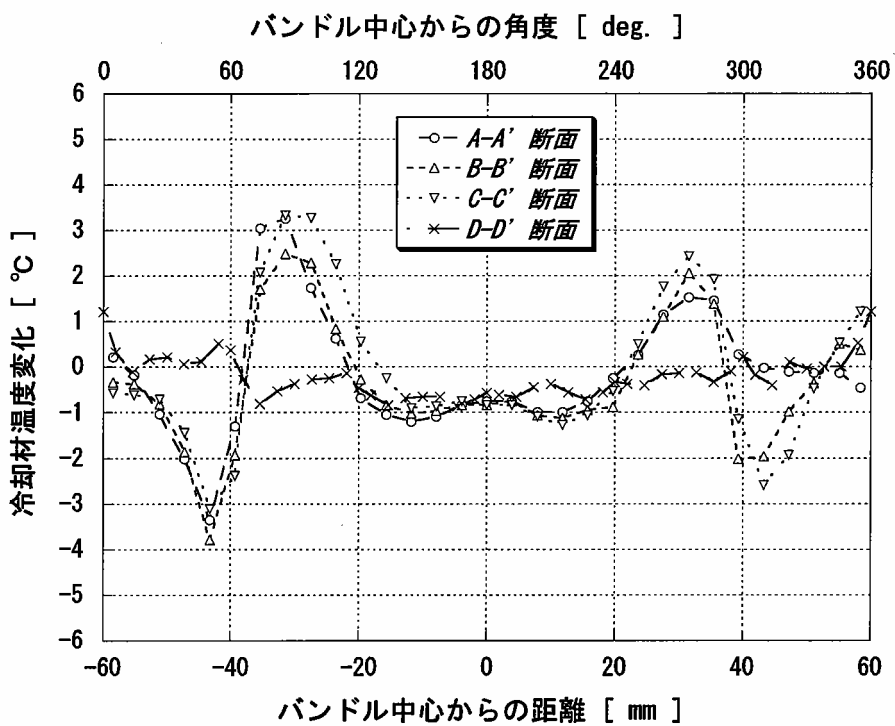


図3-16 燃料カラム中央における冷却材温度の変化 (手順 5-手順 3)

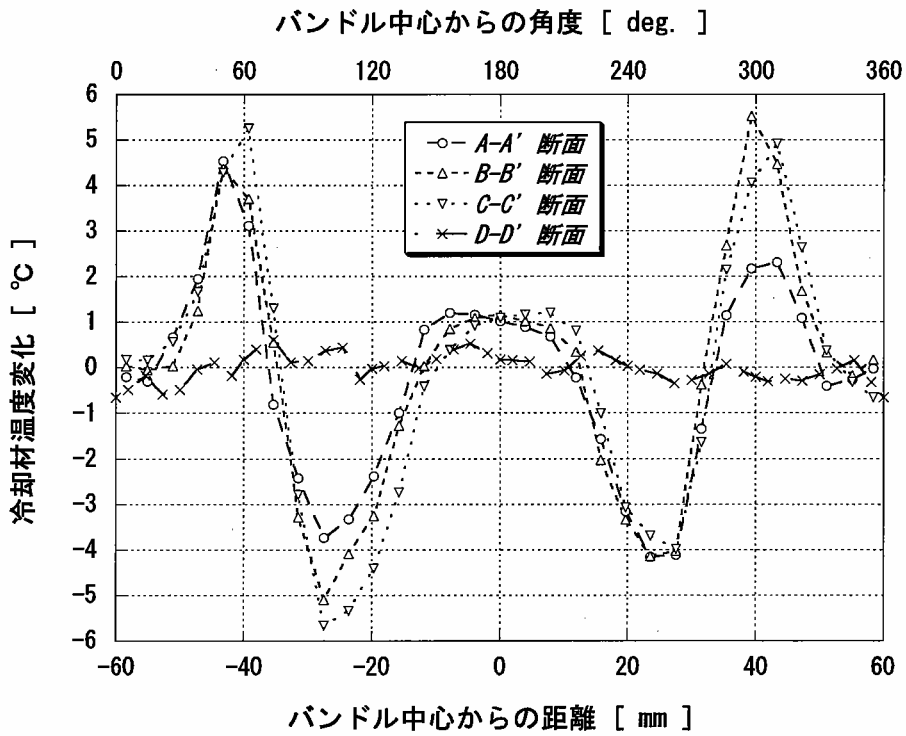


図3-17 燃料カラム中央における冷却材温度の変化（手順7-手順5）

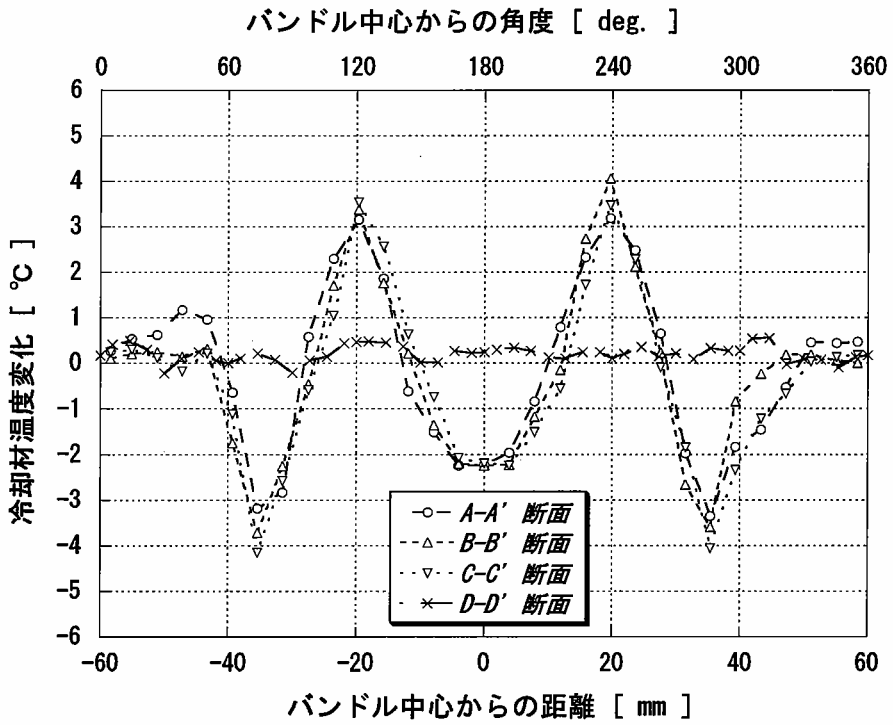


図3-18 燃料カラム中央における冷却材温度の変化（手順9-手順7）

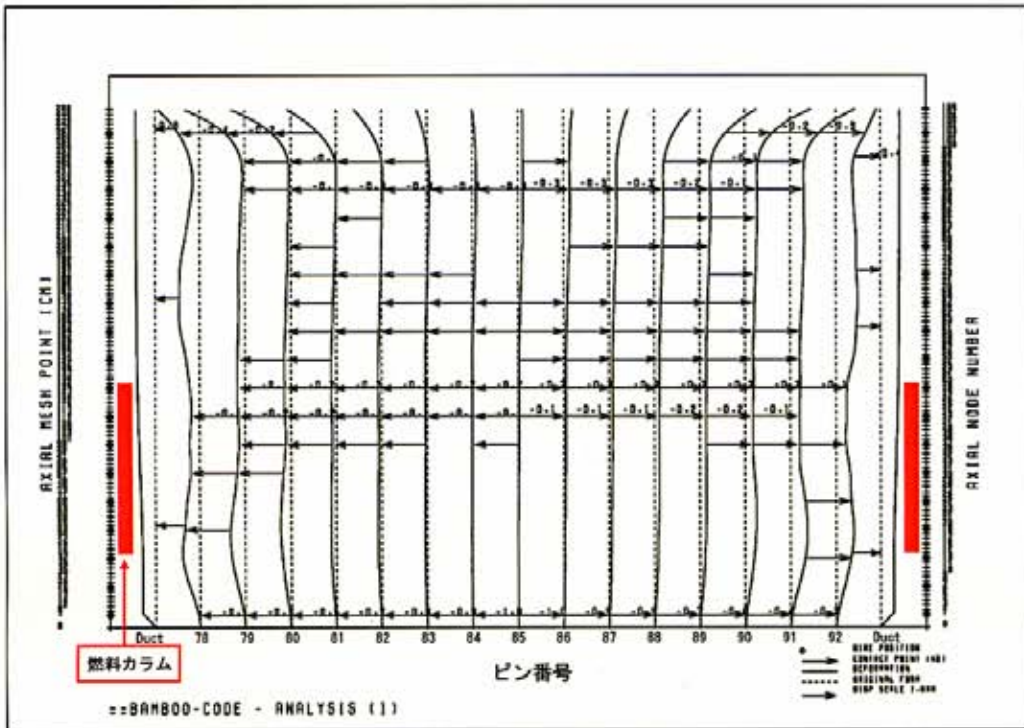


図3-19 手順2における縦断面変位プロファイル

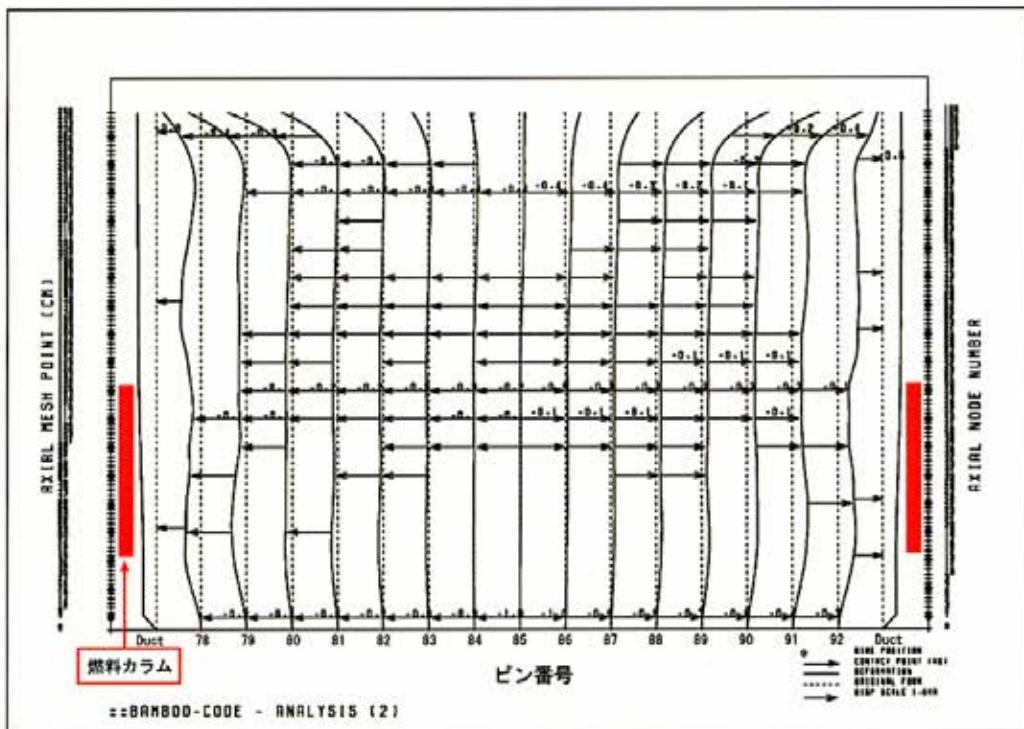


図3-20 手順4における縦断面変位プロファイル

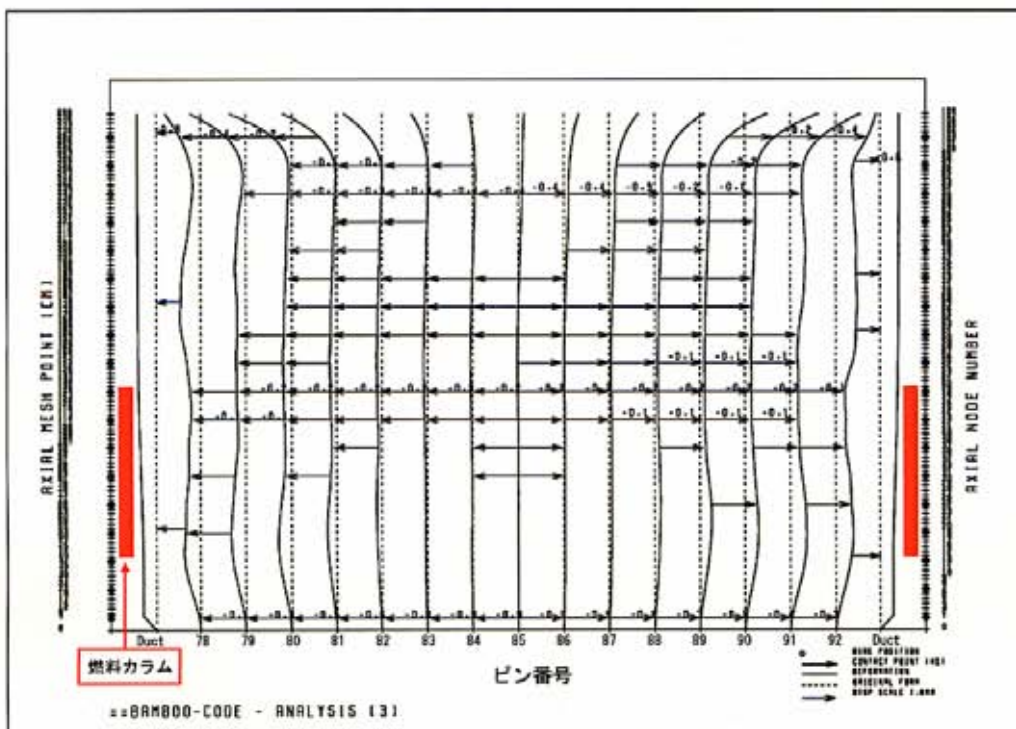


図3-21 手順6における縦断面変位プロファイル

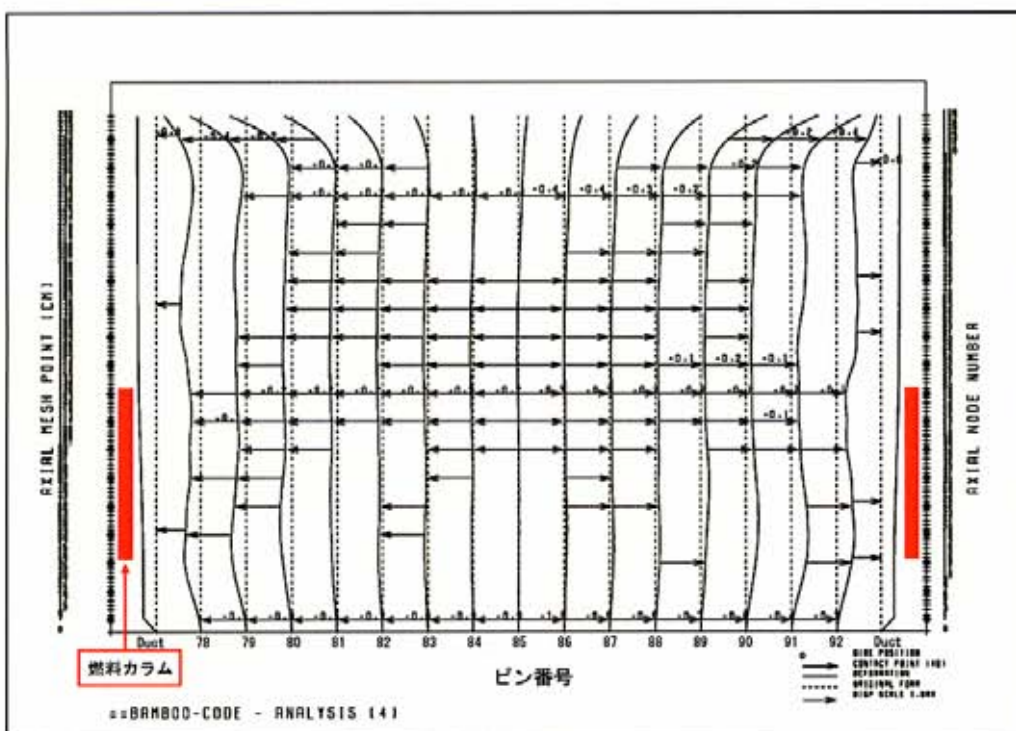


図3-22 手順8における縦断面変位プロファイル

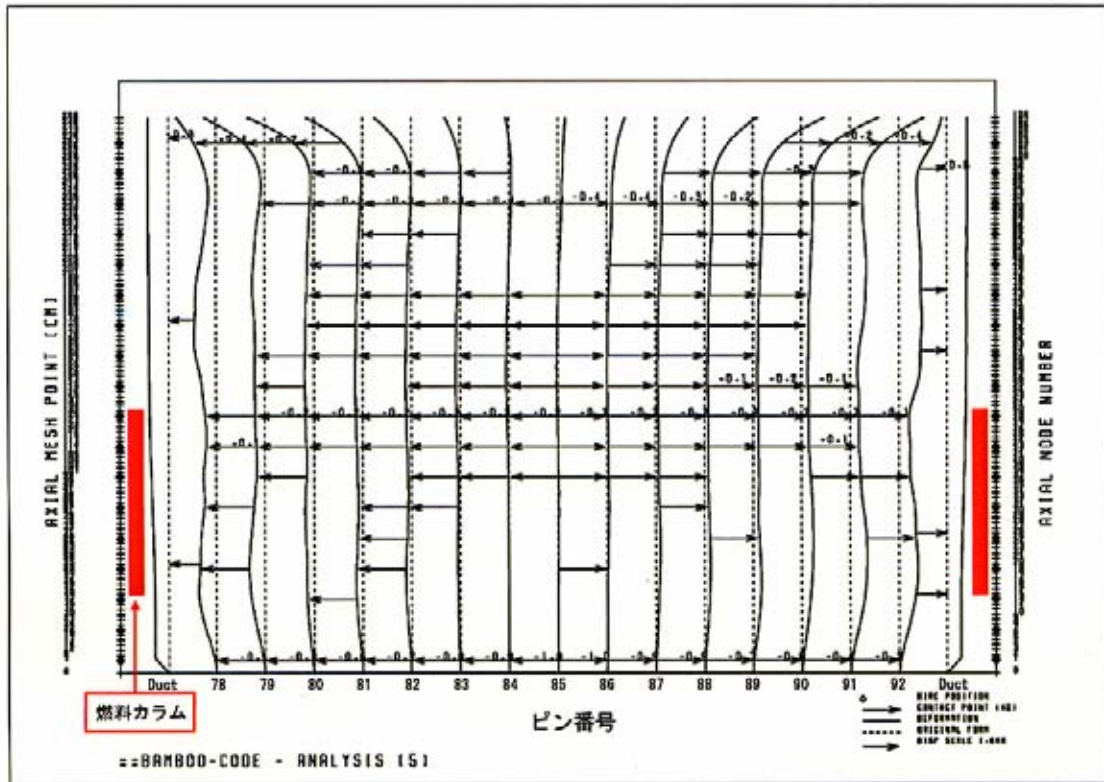


図3-23 手順10における縦断面変位プロファイル

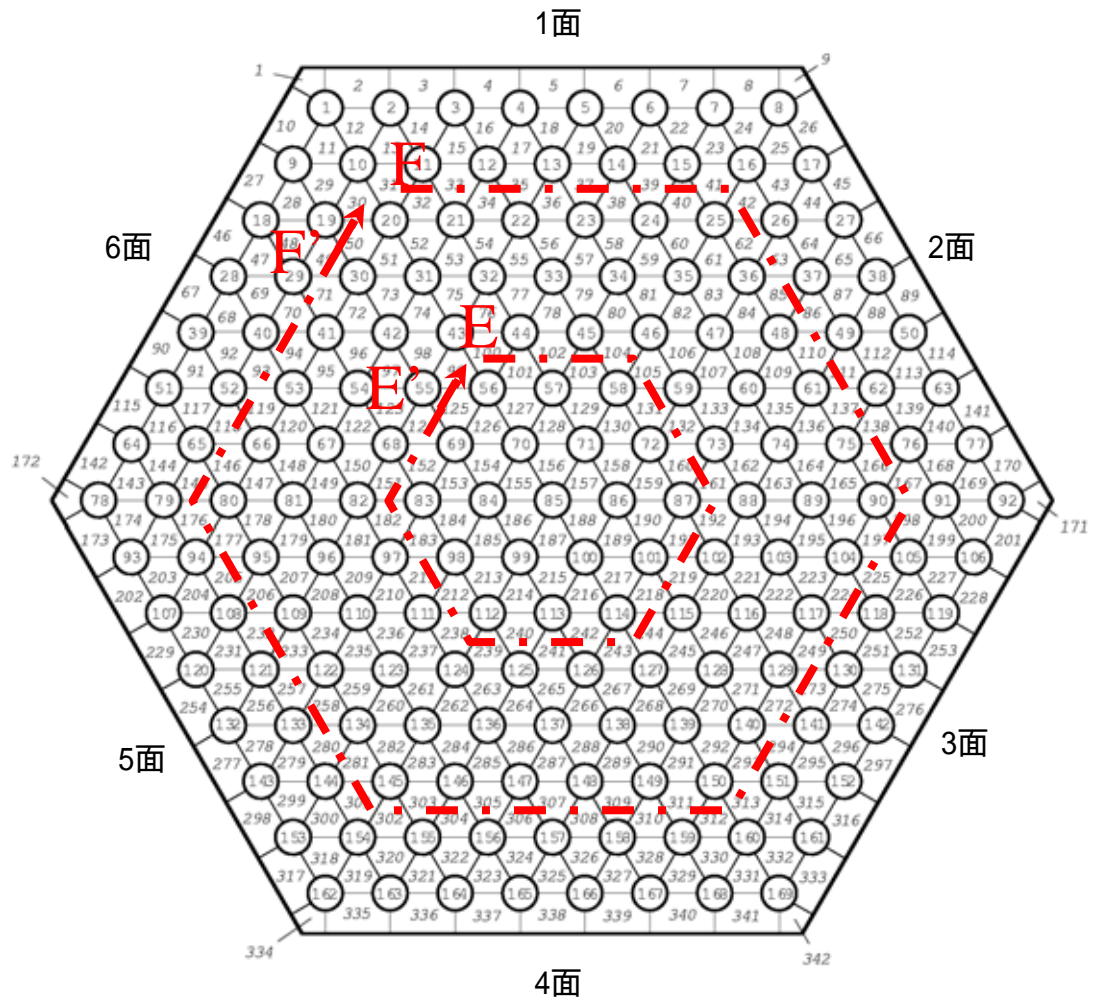


图3-24 流路面積比較断面

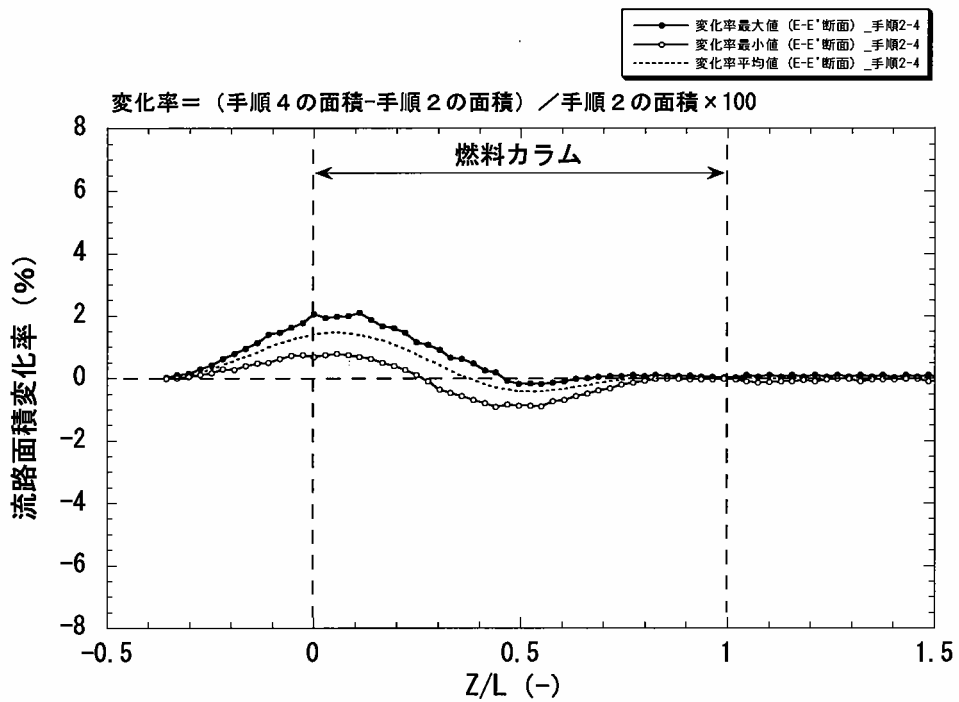


図3-25 手順2と手順4における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)

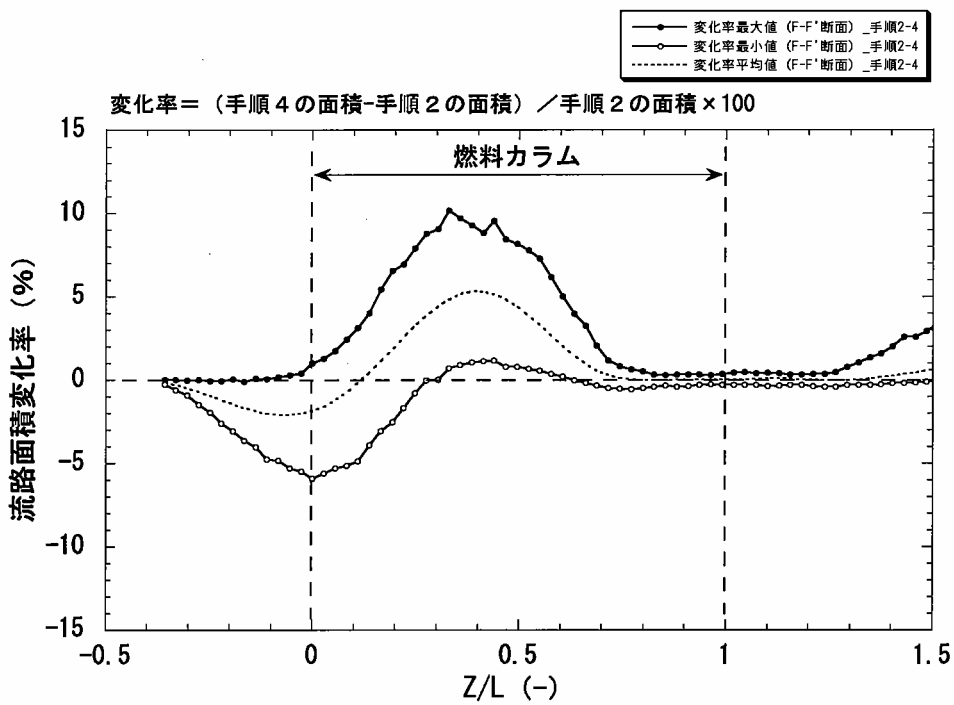


図3-26 手順2と手順4における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)

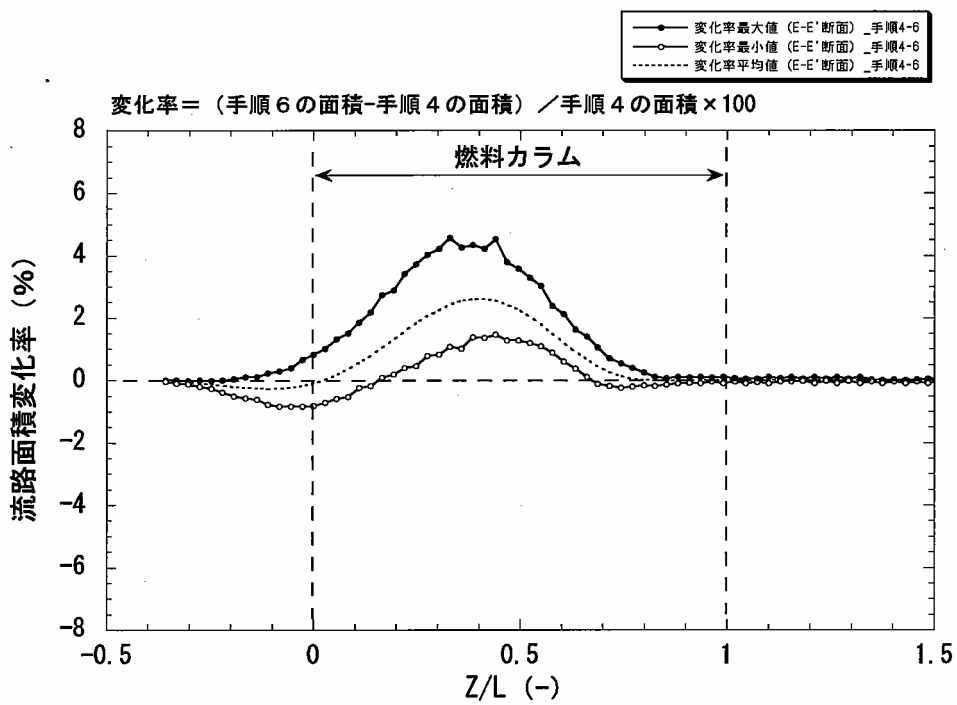


図3-27 手順 4 と手順 6 における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E' 断面)

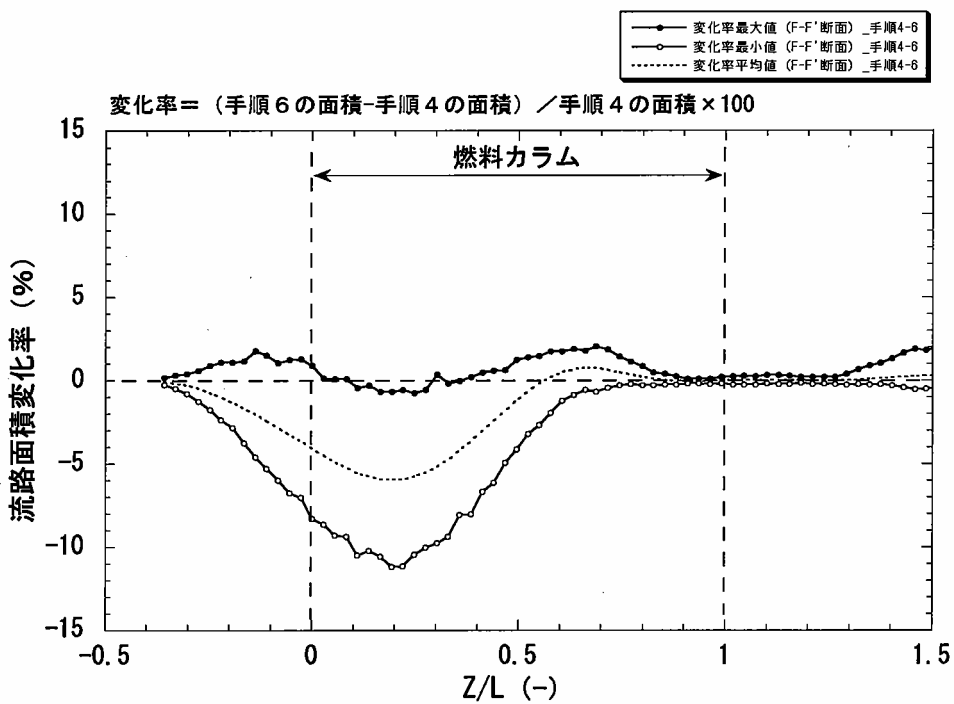


図3-28 手順 4 と手順 6 における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F' 断面)

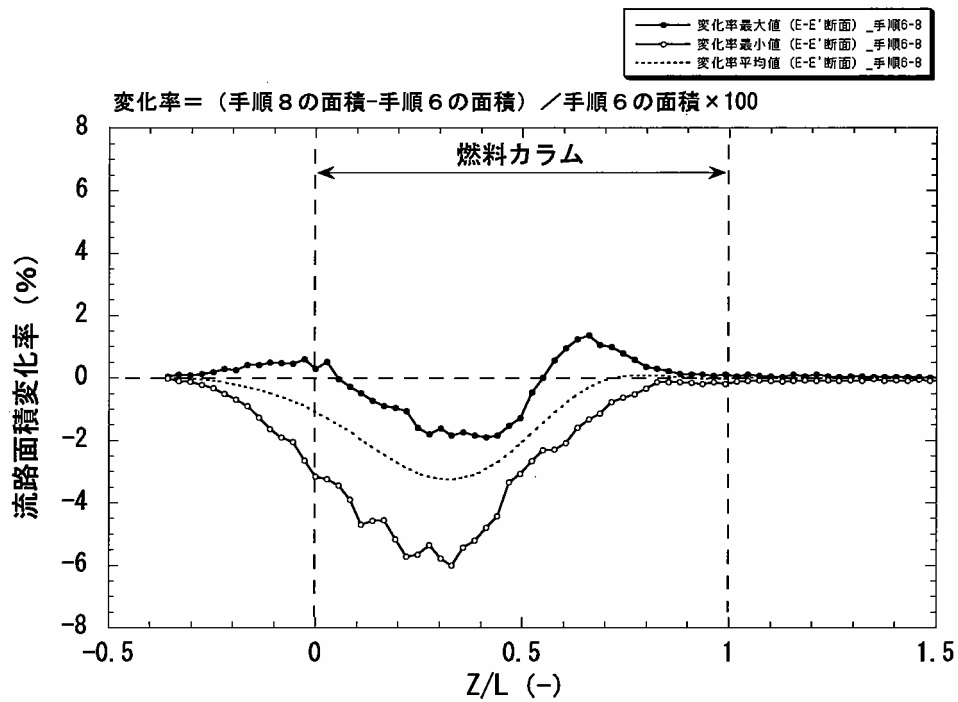


図3-29 手順6と手順8における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E'断面)

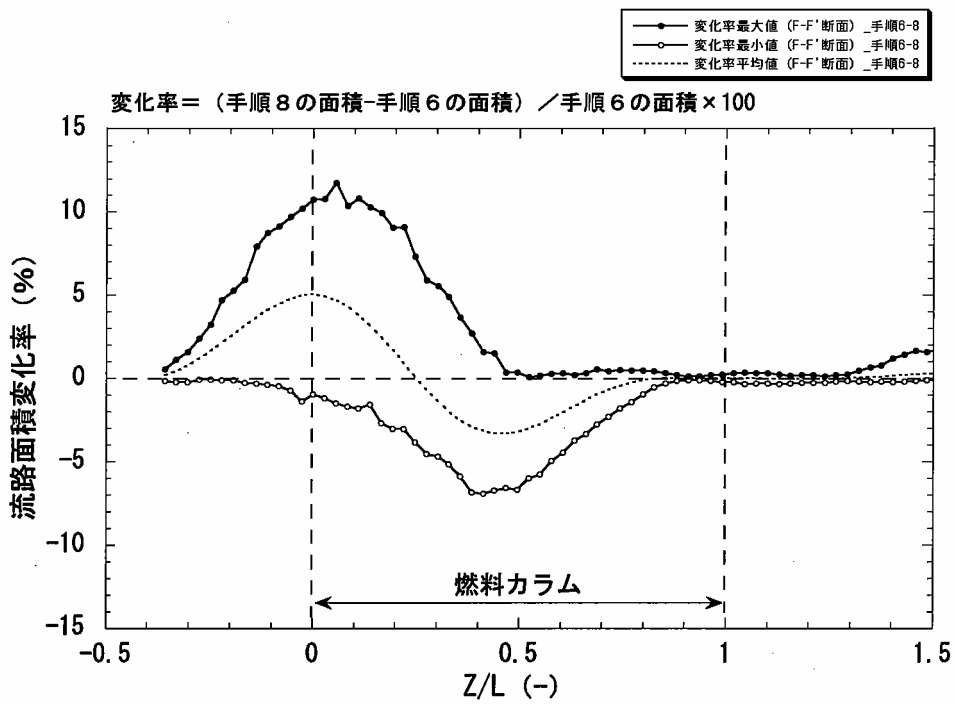


図3-30 手順6と手順8における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F'断面)

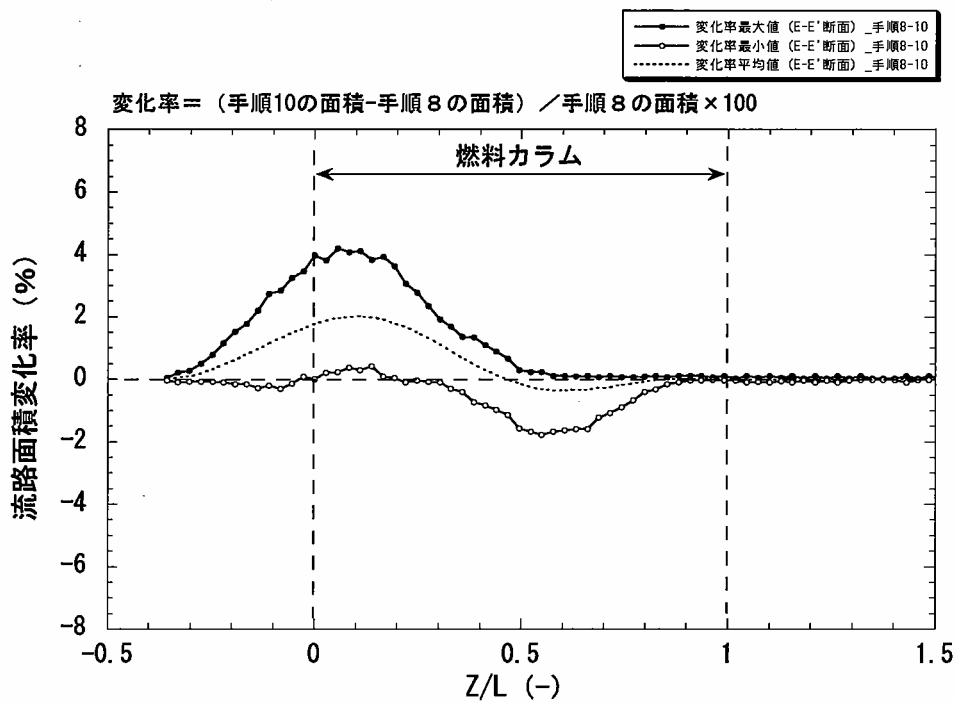


図3-31 手順8と手順10における流路面積変化率の軸方向分布 (E-E' 断面)

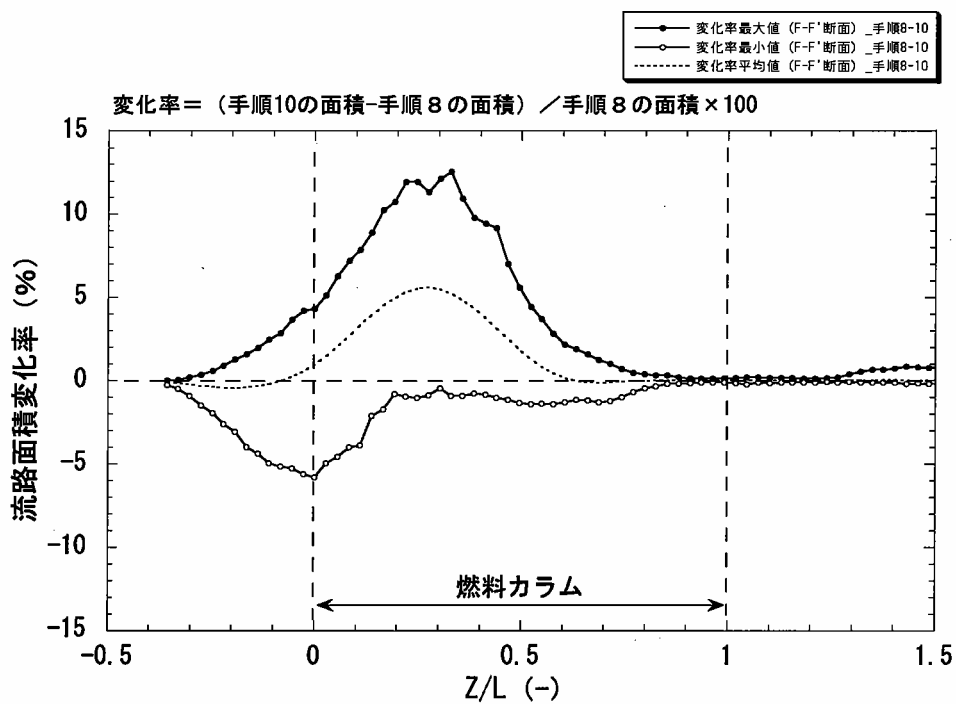


図3-32 手順8と手順10における流路面積変化率の軸方向分布 (F-F' 断面)

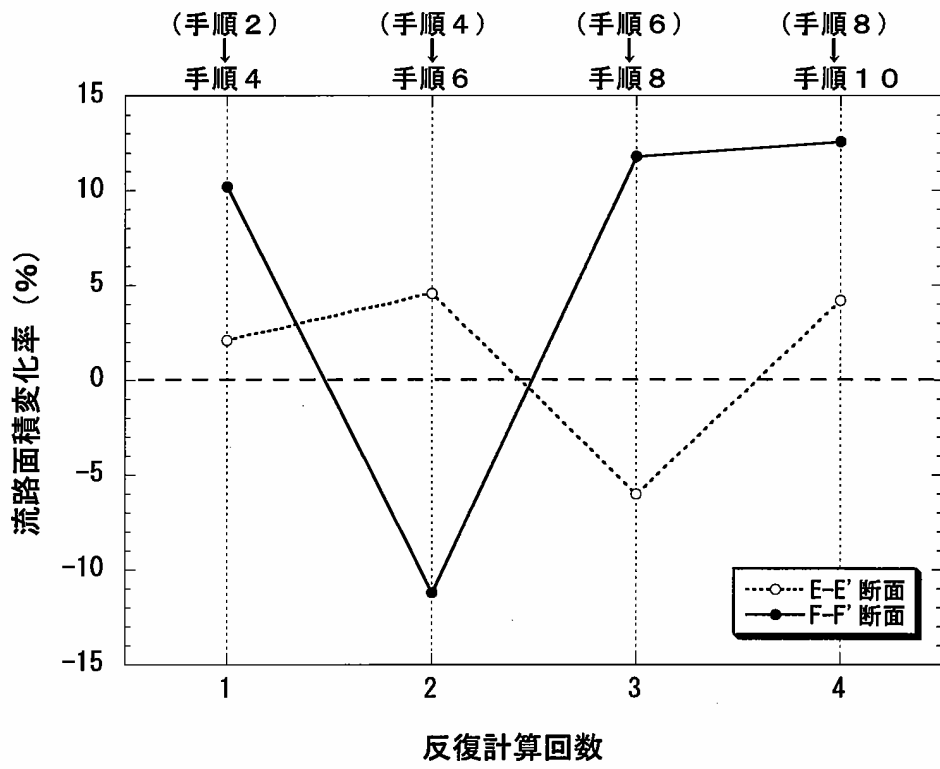


図3-33 反復計算における流路面積変化率最大値の推移