

分置

サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの検証

1996年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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) 1996

サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの検証

大高 雅彦*、大島 宏之*
二ノ方 寿**、成田 均*

要旨

本研究では、ASFRE-IIIコードの燃料集合体内冷却材温度分布に関する評価精度の検証を目的として、動燃が実施した2種類の模擬燃料集合体ナトリウム実験によって得られたデータを用い検証解析を実施した。検証解析の対象とした実験は、高速炉の崩壊熱除去運転時（低レイノルズ数領域）及び定格運転時（高レイノルズ数領域）に相当する条件で実施したナトリウム実験である。これらの実験条件をASFRE-IIIコードの入力条件として与え、燃料集合体内の熱流動解析を行い、燃料集合体内の冷却材温度データと比較した。

本検証解析により、ASFRE-IIIコードの冷却材最高温度に関する解析値は、発熱部における冷却材温度上昇に対し、低レイノルズ数領域では5%以内、高レイノルズ数領域では6%以内で実験値と一致することを確認した。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

** 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室 非常勤嘱託（東京工業大学 原子炉工学研究所）

Validation of Single-Phase Subchannel Analysis Code **ASFRE-III**

Masahiko OTAKA*, Hiroyuki OHSHIMA*
Hisashi NINOKATA**, and Hitoshi NARITA*

Abstract

A single phase subchannel analysis code ASFRE-III has been developed at PNC for predicting behavior of coolant and fuel pin temperature distributions in a fast reactor fuel subassembly under various operation and accident conditions such as a local flow blockage event. Salient features of the code are: a distributed resistance model of wire-wrap spacers, a porous blockage model, and an efficient matrix solver suitable for a large vector/parallel computation.

In this study, ASFRE-III was applied to the thermal-hydraulic analysis of the two out-of-pile experiments using sodium performed at PNC for the purpose of the code validation. The one was performed around rated flow and heat flux conditions and the other was decay heat removal conditions.

The computational results obtained under various flow and heat flux conditions were compared with the experimental data. The predicted coolant temperatures in subassemblies were agreed well with the measured data within 5~6% in the wide range from low to high Reynolds number regions.

* Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center,
PNC
** Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology.

目 次

1 章 緒言	1
2 章 実験概要及び解析条件	2
2. 1 実験概要	2
2. 2 解析条件	2
2. 3 メッシュ分割	3
3 章 解析結果と実験値との比較	4
3. 1 比較位置	4
3. 2 高流量条件 (PLANDTL実験)	4
3. 2. 1 冷却材最高温度	4
3. 2. 2 径方向温度分布	4
3. 3 低流量条件 (CCTL-CFR実験)	5
3. 3. 1 冷却材最高温度	5
3. 3. 2 径方向温度分布	5
4 章 検討及び考察	7
4. 1 解析値と実験値との差の要因	7
4. 2 放熱 (または入熱) を仮定した解析	7
4. 2. 1 高流量条件	7
4. 2. 2 低流量条件	8
4. 3 考察	8
5 章 結言	10
6 章 謝辞	12
参考文献	13

表 リ ス ト

表2.1 PLANDTL模擬燃料集合体主要仕様	14
表2.2 CCTL-CFR模擬燃料集合体主要仕様	14
表2.3 高流量実験条件－PLANDTL－	15
表2.4 低流量実験条件－CCTL-CFR－	15
表2.5 高流量条件入力値	16
表2.6 低流量条件入力値	16
表2.7 軸方向メッシュ分割（高流量条件）	17
表2.8 軸方向メッシュ分割（低流量条件）	17
表3.1 高流量条件時冷却材最高温度の比較	18
表3.2 低流量条件時冷却材最高温度の比較	18

図 リ ス ト

図2.1 PLANDTL実験装置概略図	19
図2.2 CCTL-CFR実験装置概略図	20
図2.3 PLANDTL体系37本模擬燃料ピンバンドルのサブチャンネル分割図	21
図2.4 CCTL-CFR体系61本模擬燃料ピンバンドルのサブチャンネル分割図	22
図3.1 実験値と解析値の径方向断面内比較位置（PLANDTL）	23
図3.2 実験値と解析値の径方向断面内比較位置（CCTL-CFR）	24
図3.3 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH1）	25
図3.4 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH1）	26

図3.5 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH2）	27
図3.6 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH2）	28
図3.7 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH3）	29
図3.8 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH3）	30
図3.9 低流量条件径方向温度分布（ケースL1）	31
図3.10 低流量条件径方向温度分布（ケースL2）	32
図3.11 低流量条件径方向温度分布（ケースL3）	33
図4.1 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH2、放熱条件考慮）	34
図4.2 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH2、放熱条件考慮）	35
図4.2 低流量条件径方向温度分布（ケースL1、入熱条件考慮）	36

1章 緒 言

単相サブチャンネル解析コードASFRE-IIIコードは、高速炉燃料集合体内の熱流力現象評価を目的として、熱流体技術開発室にて開発・整備を進めている解析コードである¹⁾。数値計算法としては有限差分法、座標系に三角座標、対流項離散化法には一次風上差分を用いている。流体は温度依存の非圧縮性流体として取扱い、乱流モデルはTodreas & Turiの乱流相関式を組込んでいる²⁾。ワイヤスペーサの効果についてはDistributed Resistance Model (D.R.M.:分布抵抗モデル) が組込まれており、ワイヤスペーサによる冷却材クロスフローの効果が考慮されている³⁾。また、燃料ピン及びラッパ管の熱伝導モデルにより、燃料被覆管やラッパ管の温度も評価可能である。さらに、ポーラス状閉塞モデルにより、平板状やポーラス状の様々な形態の閉塞物を想定した事故解析も可能である⁴⁾。

これまでASFRE-IIIコードの整備としては、高速炉の実用化に向けた大型燃料集合体の熱流力特性評価を対象とした高速大規模行列解法の適用による計算速度の向上⁵⁾、パラメータ解析のための計算時間短縮を目的とする圧力損失及び熱拡散相関式 (Cheng&Todreasモデル) の組込みが実施されている。これらによりASFRE-IIIコードは、燃料集合体熱流力設計及び安全評価解析コードとして大型燃料集合体への適用が可能となっている。

本研究では、上述のように整備を進めてきたASFRE-IIIコードの評価精度の検証を目的として、動燃が実施した2種類の模擬燃料集合体を用いたナトリウム実験データによる検証解析を実施した。ここでは、CCTL-CFR装置を用い低流量条件（低レイノルズ数領域）で実施された実験⁶⁾、PLANDTL装置を用い高流量条件（高レイノルズ数領域）で実施された実験⁷⁾のデータを用いた。

2章 実験概要及び解析条件

2. 1 実験概要

ASFRE-IIIコードの検証に使用した実験データは、大洗工学センター原子炉工学室が実施した2種類の模擬燃料集合体ナトリウム実験により得られたものである⁶⁾⁷⁾。

実機定格運転時をカバーする流量条件（高流量条件）に対する検証に用いた実験データは、図2.1に示すPLANDTL試験装置により得られた。PLANDTLのテストセクションは2体の37本ピンバンドル模擬燃料集合体で構成され、集合体内冷却材の沸騰現象評価及びLOPI（Loss of Piping Integrity：一次主冷却系配管大口径破損）事象評価のための実験データが採取された⁷⁾。本報告の検証解析では、後者のLOPI実験の初期定常状態として取得された実験条件が異なる3つのケース（以降ケースH1～H3とする）のデータを用いた。模擬燃料集合体の主要仕様を表2.1に示す。

一方、自然循環崩壊熱除去時に相当する流量条件（低流量条件）の実験データは、図2.2に示すCCTL-CFR試験装置により得られた。CCTL-CFRのテストセクションは、61本ピンバンドル模擬燃料集合体1体と19本ピンバンドル模擬燃料集合体2体の3集合体で構成されており、低流量条件での集合体間熱移行などの炉内熱流動現象の把握を目的として設置された。本検証解析には、61本ピンバンドルの試験データを用い、前述の高流量条件と同様に3つの実験ケース（以降ケースL1～L3とする）を選定した。61本ピンバンドル模擬燃料集合体の主要仕様を表2.2に示す。

検証解析に用いた各々の実験ケースの高流量条件（ケースH1～H3）及び低流量条件（ケースL1～L3）の具体的内容を、それぞれ表2.3及び表2.4に示す。

2. 2 解析条件

本検証解析には、ワイヤスペーサモデルとしてD.R.M.及びCheng&Todreasモデルを使用した。Cheng&Todreasモデルでは計算領域及び時間が少ない1/12セクター体系での解析が可能である。以下に本解析の主な解析条件を示す。

（1）壁面摩擦モデル：

- ・分布抵抗モデル (D.R.M.) ³⁾

- ・Cheng&Todreasモデル⁸⁾

(2) 圧力方程式解法

- ・ILUBCG法 : 分布抵抗モデル (D.R.M.) 使用時

- ・直接法 : Cheng&Todreasモデル使用時

(3) 燃料ピンから冷却材への熱伝達

- ・FFTF相関式

(4) 境界条件

- ・集合体入口条件 : 流量境界条件 (集合体入口冷却材温度一定)

- ・集合体出口条件 : 圧力境界条件 (圧力一定)

具体的なASFRE-IIIコードの入力条件は、表2.3及び2.4に示した実験条件を基に換算作成した。それらを高流量条件及び低流量条件に対して表2.5及び表2.6に示す。

(5) 定常判定条件

- ・冷却材温度と流速について計算ステップ間の相対変動値の最大値が10E-8以下となつた場合に設定

2. 3 メッシュ分割

ASFRE-IIIコードでは、燃料集合体の水平方向断面のメッシュ分割（サブチャンネル分割）と、軸方向のメッシュ分割により解析体系がモデル化される。

サブチャンネル分割については、高流量条件及び低流量条件についてそれぞれ図2.3及び図2.4に示す。軸方向メッシュ分割は、発熱領域の上下に非発熱領域を設定し、分割プロック数は高流量条件8プロック及び低流量条件9プロックとした（プロックとは単位メッシュ高さが等しく軸方向に連続した複数メッシュの集合を意味し、ASFRE-IIIコードでは軸方向全体で10プロック以下という制約がある）。単位メッシュ高さは、ワイヤスペーサの巻きピッチの1/12以下になるように設定した（D.R.M.使用時の制限）。軸方向メッシュ分割を高流量条件及び低流量条件について、それぞれ表2.7及び2.8に示す。

3章 解析結果と実験値との比較

3. 1 比較位置

実験値と解析値との比較を行った模擬燃料集合体の位置は、高流量及び低流量条件とともに、集合体軸方向の発熱中央部及び発熱上端部とした。それらの軸方向位置における集合体水平方向断面内の位置と方向を、高流量及び低流量条件に対してそれぞれ図3.1及び図3.2に示す。

3. 2 高流量条件 (PLANDTL実験)

3. 2. 1 冷却材最高温度

3ケースの最高温度に関する実験値と解析値の比較を表3.1に示す。発熱下端部と発熱上端部の温度差に対してD.R.M.を用いた解析値と実験値とを比較すると、解析値は実験値より3%～6%で最高温度を高く評価することが分かる。一方、Cheng & Todreasモデルを用いた1/12セクターを対象とした解析では、ケースH3については実験値より3%高く、他の2ケースでは0.5%以内で実験値より低く予測した。Cheng & Todreasモデルは、わずかであるが冷却材最高温度を過小評価する傾向が見られる。なお、最高温度発生位置については全てのケースで実験値と解析値は良く一致している。

3. 2. 2 径方向温度分布

集合体軸方向の発熱中央部と上端部で、3.1節に示した位置における集合体径方向の温度分布を実験値と解析値に対して比較した結果を図3.3～3.8に示す。

(1) 温度分布の傾向

図3.3に示す発熱中央部のA-A断面、B-B断面（図3.1参照）の温度分布実験結果には、ワイヤスペーサ効果と考えられる温度分布が右方向へシフトする傾向が表れている。D.R.M.を使用したモデルによる解析結果も、実験と同様な傾向であることが確認できた。

発熱上端部では発熱中央部と比較して、実験値の温度分布に非対称性が見られず、D.R.M.による温度分布もその傾向と同様である。ある径方向断面での温度場は、ワイヤスペーサの巻き周期に対応した非対称性があると考えられるが、発熱上端部で温度分布の非

対称性が小さいのは、上端部測定ライン上に最高温度点がないためと考えられる。これからASFRE-IIIコードは冷却材最高温度だけでなく、その発生位置についても評価できることが分かる。

(2) 実験値と解析値の冷却材温度比較

最高温度が現れる模擬燃料ピンバンドル中心領域では、発熱中央部及び上端部とともにD.R.M.及びCheng & Todreasモデルによる両者の解析値はほぼ実験値と一致しているが、バンドル周辺領域では両モデルの解析値とも実験値を上回る傾向がある。バンドル中心領域における実験値と解析値との差は10°C程度であるのに対して、バンドル周辺領域ではその2倍の20°C程度の差が見られる。

(3) D.R.M.とCheng & Todreasモデルの差異

全てのケースにおいて、Cheng & Todreasモデルによる解析値の方が、わずかにD.R.M.による解析値よりもバンドル中心領域（燃料ピン3層以内）で低く、かつ周辺領域では高く、温度を評価する傾向が見られる。すなわちCheng & Todreasモデルの方が温度分布を平坦に評価する傾向がある。

3. 3 低流量条件 (CCTL-CFR実験)

3. 3. 1 冷却材最高温度

3ケースの実験値と解析値の比較を表3.2に示す。D.R.M.による解析では、3°Cの範囲で低く予測し、これは、1/12セクターCheng & Todreasモデルによる解析についても同様であった。なお、最高温度発生点については全てのケースで実験値と解析値は一致した。

3. 3. 2 径方向温度分布

高流量条件の場合と同様に、集合体軸方向で発熱中央部と上端部について、集合体径方向2列（発熱中央部は1列）における温度分布の比較を行った。結果を図3.9～図3.11に示す。

(1) 温度分布の傾向

発熱中央部及び上端部の両方で、D.R.M.とCheng & Todreasモデルの解析値は、3ケースとも実験値の温度分布と良い一致を示した。低流量条件であるためワイヤスペーサの効果と考えられる温度分布の非対称性は高流量条件時より小さい。図3.10の発熱上端部のG-G

断面を見ると、わずかではあるが温度分布の非対称性があることが分かる。解析値の温度分布についても実験値の傾向と同様に、ピーク温度位置が右にずれており、低流量条件においてもD.R.M.はワイヤスペーサの影響を適切に評価していることが確認された。

(2) 実験値と解析値の冷却材温度比較

ケースL2では発熱中央部及び上端部の全領域で実験値と解析値は良く一致している（実験値と解析値の温度差2°C程度）。一方、ケースL1及びL3には発熱中央部において最大3°C程度の温度差が見られ、発熱上端部では温度差がさらに大きくなり実験値が解析値よりも最大8°C程度高くなつた。

L1及びL3の両ケースとも発熱中央部では、解析値と実験値の断面平均温度は、ほぼ一致していると見なせるが、発熱上端部の、断面平均温度は実験値が解析値を上回っている。さらに3ケースに共通してF-F断面のサブチャンネル番号61側、G-G断面ではサブチャンネル番号125側の隣接集合体に接する側の温度が高くなっていることが分かる。これから実験値と解析値の差の原因としては、燃料ピン中央部から上部付近までの放熱量を補償するガードヒータの発熱量が多少大きくなり、集合体外壁からの入熱が影響していることが考えられる。第2章でも示したように、CCTL-CFRのテストセクションは3集合体で構成されており、検証データが採取された61本ピンバンドル集合体ラッパ管の側面には、19本ピンバンドル集合体（2体）と空気冷却流路が接している。実験データ計測時にはできるだけ断熱状態を模擬するため隣接集合体は発熱状態としたため、隣接集合体からの熱移行による入熱の可能性は大きいと考えられる。

(3) D.R.M.とCheng & Todreasモデルの差異

流量条件が最も低いケースL1の実験値には、ワイヤスペーサによる温度分布の非対称性は見られず、D.R.M.による解析値とCheng & Todreasモデルによる解析値は、発熱中央部及び上端部の両方でほぼ同じ値となった。流量がケースL1と比較し大きいケースL2とケースL3では、発熱上端部のB-B断面においてD.R.M.による解析値の温度ピーク位置は、実験の温度分布と同様に右にずれておりCheng & Todreasモデルとの相違が確認できた。

4 章 検討及び考察

4. 1 解析値と実験値との差の要因

冷却材温度の解析値と実験値との差の要因としては、以下の項目が挙げられる。

(1) 温度分布に影響を及ぼす要因

- ・ラッパ管壁からの放熱または入熱
- ・試験体の製作時または実験中の熱変形によるサブチャンネル内流路面積の変化
- ・集合体入口ナトリウム温度と流量及びヒータピン発熱量の計測誤差

(2) 集合体断面内の局所的位置の冷却材温度に影響を及ぼす要因

- ・熱電対設置位置のずれ（軸方向及び周方向）による温度差

高流量条件と低流量条件の全ケースを通して、燃料ピンバンドル周辺部の冷却材温度の実験値と解析値との差が、バンドル中心部と比較して大きい結果となっている。これは、上記に示す要因の中で、ラッパ管壁からの放熱または入熱条件が及ぼす影響が大きいことを示唆するものと考えられる。この放熱または入熱の影響を確認するため、以下に非断熱状態を設定した場合の試解析を実施した。

4. 2 放熱（または入熱）を仮定した解析

4. 2. 1 高流量条件

(1) 放熱条件の設定

高流量条件での3ケースの解析結果は、発熱中央部のバンドル周辺領域と発熱上端部の全領域で、解析値が実験値より大きくなっている。PLANDTL実験装置の試験部は、2章でも述べたように、集合体のラッパ管周辺部に断熱材を取り付け周辺を支持筒で覆った試験体である。試験装置は六角管周辺にはガードヒータが設置され、ラッパ管外壁温度と支持筒内壁温度との温度差をできるだけ小さくなるように温度制御されている。これによりラッパ管壁の断熱条件を設定している。しかし、完全な断熱条件を作ることは不可能であるため、実験値と解析値の熱収支のバランスから放熱条件を設定した解析を実施した。

(2) 放熱条件の解析

実験値と解析値の差が最も大きかったケースH2を対象とし、熱収支バランスから発熱領域のラッパ管壁から均一に総発熱量に対し約7%に相当する放熱条件（実験実施時の放熱量に相当）を設定した解析を実施した結果を図4.1及び図4.2に示す。

図に示した放熱条件の温度プロファイルと断熱条件で行った解析結果とを比較すると、最高温度発生点は変化していないことが分かる。また、放熱条件での解析結果から、放熱の影響はラッパ管に近い周辺部の冷却材温度低下として現れており、ピーク温度への影響は比較的小さいことが分かる。図4.2の発熱上端部を見ると、周辺部の冷却材温度が大きく下がる傾向を含めて、放熱を考慮することにより、解析値と実験値の温度分布は一致するようになることが分かる。

4. 2. 2 低流量条件

(1) 入熱条件の設定

19本燃料ピン集合体側と、61本燃料ピン集合体側のラッパ管壁温度データと解析値との差が最も大きいケースL1について見ると、ラッパ管を境界として発熱中央部では2°C程度19本燃料ピン集合体側のラッパ管壁表面温度が高く、発熱上端部では約0.5°C低いことが示されているので、発熱中央部と発熱上端部での温度差を平均して、外側ラッパ管壁が内側ラッパ管壁に対して0.8°C一樣に高いと仮定し、それを熱流束に換算してケースL1について解析した結果を図4.3に示す。

(2) 入熱条件での解析

発熱中央部及び上端部を見ると、入熱条件の解析値は断熱条件の場合と比較し、低流量であるため熱伝導が支配的となり全体的に温度が高くなることが分かる。また、19本燃料ピン集合体ラッパ管壁温度が高いため、冷却材温度のピークは高温側に移動し、その結果温度分布は実験値に若干近づく傾向を示す。しかし、実験値と解析値の温度差は断熱条件の場合と大きく変わらず、実際にはここで仮定した入熱量よりも多い熱移行があった可能性が考えられる。

4. 3 考察

前節に示したラッパ管からの入熱や放熱を仮定した解析を通して、燃料集合体周辺の熱的境界条件の設定によって、バンドル周辺側の冷却材温度が比較的に強く影響を受け、バンドル中心側では影響が小さい傾向を持つことが分かった。今回用いた実験データにも入熱や放熱の影響がみられるが、バンドル中心部で発生するピーク温度に対する影響は小さいためそれらの影響が多少あったとしてもASFRE-IIIコードの検証は十分に高い精度で実施できたと考えられる。

5章 結 言

動燃が実施したナトリウム実験データを用いて、サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの燃料集合体内冷却材温度の評価精度について検証解析を行った。本解析により得られた成果を以下に示す。

(1) 高流量条件

- ・冷却材ピーク温度に対する評価精度は、発熱部における温度上昇値200°C~290°Cに対して6%以内であった。
- ・径方向断面の温度分布については、実験値に見られるワイヤスペーサの影響による非対称性の傾向を含めて良く再現できていることが確認された。

(2) 低流量条件

- ・今回用いた検証データについては、冷却材ピーク温度に対する評価精度は発熱部における温度上昇値25°C~75°Cに対して5%以内であった。
- ・径方向断面の温度分布については、前述の高流量条件と同様に解析値は実験値の傾向を良く再現している。

(3) D.R.M.とCheng & Todreasモデルの差異

- ・冷却材ピーク温度に対する評価精度は、高流量条件ではCheng & Todreasモデルの方がD.R.M.よりも3%程度実験値に近く、低流量条件では両者とも同様であった。
- ・径方向断面の温度分布については、D.R.M.ではピーク温度発生位置が実験値と一致し、且つ傾向も良く再現している。Cheng & Todreasモデルでも、モデルの性格上、D.R.M.と比較し平坦なものとなるが、傾向を良く再現している。

以上の検証解析により、低流量領域から高流量領域の幅広い流量条件下で、且つ燃料集合体の形状を特徴付ける燃料ピン配列ピッチ、ワイヤスペーサ巻きピッチ、燃料ピン径等様々な形状パラメータの差異に依存すること無く、ASFRE-IIIコードは集合体内冷却材ピーク温度及び温度分布を精度良く評価できることを確認した。本研究により得られた結果から、

ASFRE-IIIコードは大型燃料集合体の熱流力設計及び安全評価コードとして十分適用し得る。

ASFRE-IIIコードの今後の開発・整備としては、検証面においては局所閉塞時の解析機能・精度の検証が、解析モデルの開発においては、高燃焼度燃料集合体内熱流力評価に対応するための燃料被覆管や、ラッパ管の熱膨張等による変形時の解析機能を追加していく予定である。後者の解析機能をASFRE-IIIに対し付加するには、流路変形が生じた場合の圧力損失式及び熱伝達相関式を、サブチャンネル流路に対し与えることが必要である。従来は実験によって相関式を求め適用していたが、近年、サブチャンネル流路を更に微細にメッシュ分割した詳細解析コードによって、複雑な流路変形時の圧力損失等を求めることが可能となりつつある。この計算科学的手法とのリンクにより、実験が困難な部分を補間しながら解析精度の向上を目指す予定である。

6章 謝辞

本検証解析を実施するにあたり、試験データを提供していただいた原子炉工学室の磯崎正研究員及び上出英樹副主研、ASFRE-IIIコードの計算実施にご協力いただいた株式会社エヌ・ティー・ティーの橋本昭彦氏、及び三宅康洋氏に謝意を表す。また、本研究をまとめるにあたり、熱流体技術開発室の佐藤室長及び山口担当役には多くの助言を頂いたことに対して、謹んでここに謝意を表す。

参考文献

- 1) H. Ninokata, A. Deguchi, K. Baba, ASFRE-III A Computer Program for Triangular Rod Array Thermohydraulic Analysis of Fast Breeder Reactors: PNC N941 85-106 (1985)
- 2) N.E. Todreas, J.A. Turi, Interchannel Mixing in Wire Wrapped Liquid Metal Fast Reactor Fuel Assemblies: Nucl. Tech., vol.13, (1972)
- 3) H. Ninokata, A. Efthimiadis, N.E. Todreas, Distributed Resistance Modeling of Wire-Wrapped Rod Bundles: Nucl. Eng. and Design, 104, p93(1987)
- 4) 大島宏之, 高速炉における燃料集合体局所異常に関する研究—ポーラス状閉塞事象に対するASFRE-IIIコードの適用—: 日本原子力学会1994年秋の大会予稿集, D38, (1994)
- 5) 大島宏之, サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの並列計算機への適用: 日本原子力学会1996年春の年会予稿集, C21, (1996)
- 6) 家田芳明他, 高速炉における自然循環崩壊熱除去に関する研究(I)—ナトリウム試験により解明すべき炉心部熱流動現象—: 日本原子力学会1993年春の年会予稿集, D10, (1993)
- 7) 早船浩樹他, FBR燃料集合体内ナトリウム沸騰試験・解析: 日本原子力学会1993年春の年会予稿集, D15, (1993)
- 8) S. Cheng and N. E. Todreas, Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters,: Nucl. Eng. and Design, 92, pp, 227~251, (1986)

表 2.1 PLANDTL模擬燃料集合体主要仕様

燃料ピン本数	(本)	37
燃料ピン被覆管外径	(mm)	6.5
燃料ピン配列ピッチ	(mm)	7.87
ラッパ管内対面距離	(mm)	50.2
ラッパ管壁肉厚	(mm)	0.47
ワイヤスペーサ直径	(mm)	1.32
ワイヤスペーサ巻きピッチ	(mm)	307
発熱部長	(mm)	930
発熱分布形態：チョップドコーサイン分布		

表 2.2 CCTL-CFR模擬燃料集合体主要仕様

燃料ピン本数	(本)	61
燃料ピン被覆管外径	(mm)	16.0
燃料ピン配列ピッチ	(mm)	17.4
ラッパ管内対面距離	(mm)	140.0
ラッパ管壁肉厚	(mm)	10(15)
ワイヤスペーサ直径	(mm)	1.4
ワイヤスペーサ巻きピッチ	(mm)	200.0
発熱部長	(mm)	1700.0
発熱分布形態：均一分布		

表 2.3 高流量試験条件 - PLANDTL -

試験ケース	H1	H2	H3
試験番号	16042	16079	16097
流量 (l/min)	135.26	138.05	187.75
入口温度 (°C)	395.63	406.25	396.09
発熱量 (kW)	706.59	543.71	735.82
入口部平均レイノルズ数	24900	25400	34500

表 2.4 低流量試験条件 - CCTL-CFR -

試験ケース	L1	L2	L3
試験番号	164	174	176
流量 (l/min)	9.54	29.38	15.13
入口温度 (°C)	251.04	251.23	251.23
発熱量 (kW)	14.49	15.29	15.47
入口部平均レイノルズ数	448	1370	706

表 2.5 高流量条件入力値

試験ケース	H1	H2	H3
試験番号	16042	16079	16097
集合体入口温度(K)	668.78	679.15	669.24
集合体出口温度(K)	950.05	882.44	880.28
集合体入口流量(kg/s)	1.9324	1.9666	2.6820
集合体入口流量(kg/s) 1/12ヶ月	1.6103e-1	1.6388e-1	2.2350e-1
集合体入口流速(m/s)	2.3614	2.4102	3.2779
集合体入口流速(m/s) 1/12ヶ月	1.9678e-1	2.0085e-1	2.7316e-1
ヒートフラックス(W/m ²)	1.0056e6	7.7378e5	1.0472e6

表 2.6 低流量条件入力値

試験ケース	L1	L2	L3
試験番号	164	174	176
集合体入口温度(K)	524.19	524.38	524.38
集合体出口温度(K)	599.35	550.13	574.98
集合体入口流量(kg/s)	1.4175e-1	4.3653e-1	2.2480e-1
集合体入口流量(kg/s) 1/12ヶ月	1.1813e-2	3.6378e-3	1.8734e-2
集合体入口流速(m/s)	3.4475e-2	1.0617e-1	5.4676e-2
集合体入口流速(m/s) 1/12ヶ月	2.8729e-3	8.8477e-3	4.5563e-3
ヒートフラックス(W/m ²)	2.7798e3	2.9333e3	2.9679e3

表 2.7 軸方向メッシュ分割（高流量条件）

軸方向ブロックNo.	含有メッシュNo.	メッシュ数	単位メッシュ長()	軸方向ブロック長()	備考
1	1	1	14.766	14.766	非発熱部（下部）
2	2	1	22.150	22.150	非発熱部（下部）
3	3~18	16	24.875	398.00	非発熱部（下部）
4	19	1	17.438	17.438	発熱部1
5	20~54	35	25.575	895.13	発熱部2
6	55	1	17.438	17.438	発熱部3
7	56~67	12	25.000	300.00	非発熱部（上部）
8	68	1	25.000	25.000	非発熱部（上部）

表 2.8 軸方向メッシュ分割（低流量条件）

軸方向ブロックNo.	含有メッシュNo.	メッシュ数	単位メッシュ長()	軸方向ブロック長()	備考
1	1~29	29	10	290	非発熱部（下部）
2	30~31	2	7.5	15	非発熱部（下部）
3	32	1	10	10	発熱部1
4	33~87	55	15	825	発熱部2
5	88~89	2	10	20	発熱部3
6	90~144	55	15	825	発熱部4
7	145~146	2	10	20	発熱部5
8	147~159	13	15	195	非発熱部（上部）
9	160	1	10	10	非発熱部（上部）

表3.1 高流量条件時冷却材最高温度の比較

試験ケース	実験値 (°C)	解析値 (°C) (D.R.M.)	解析値 (°C) (Cheng & Todreas)
H1	773.92	783.06 (+9.14)	772.54 (-1.38)
H2	692.12	698.66 (+6.54)	692.08 (-0.04)
H3	676.51	688.16 (+11.65)	679.50 (+2.99)

()内は実験値との差

表3.2 低流量条件時冷却材最高温度の比較

試験ケース	実験値 (°C)	解析値 (°C) (D.R.M.)	解析値 (°C) (Cheng & Todreas)
L1	336.14	333.20 (-2.94)	333.10 (-3.04)
L2	285.02	284.60 (-0.42)	284.60 (-0.42)
L3	312.17	309.90 (-2.27)	309.90 (-2.27)

()内は実験値との差

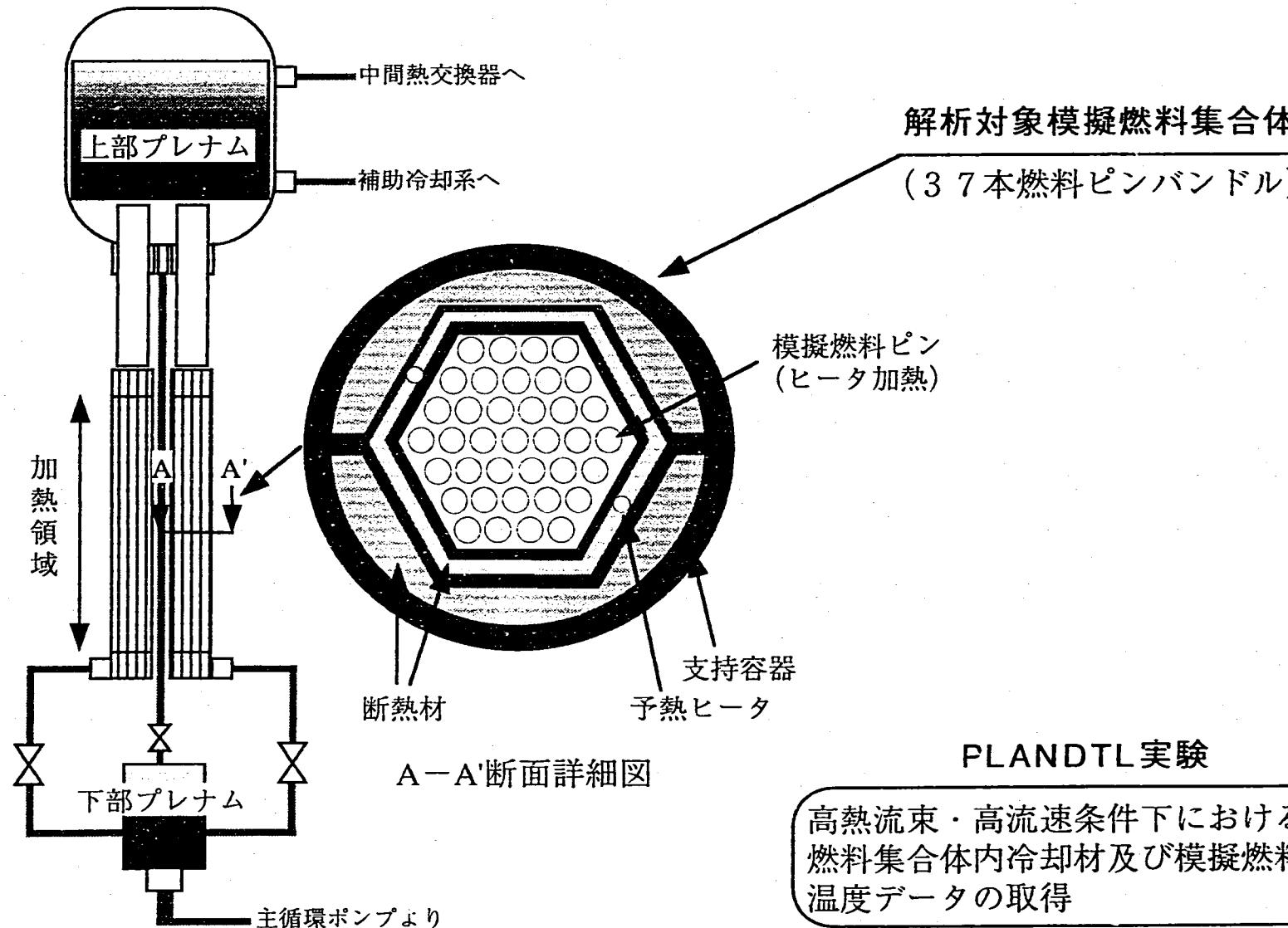


図 2.1 PLANDTL実験装置概略図

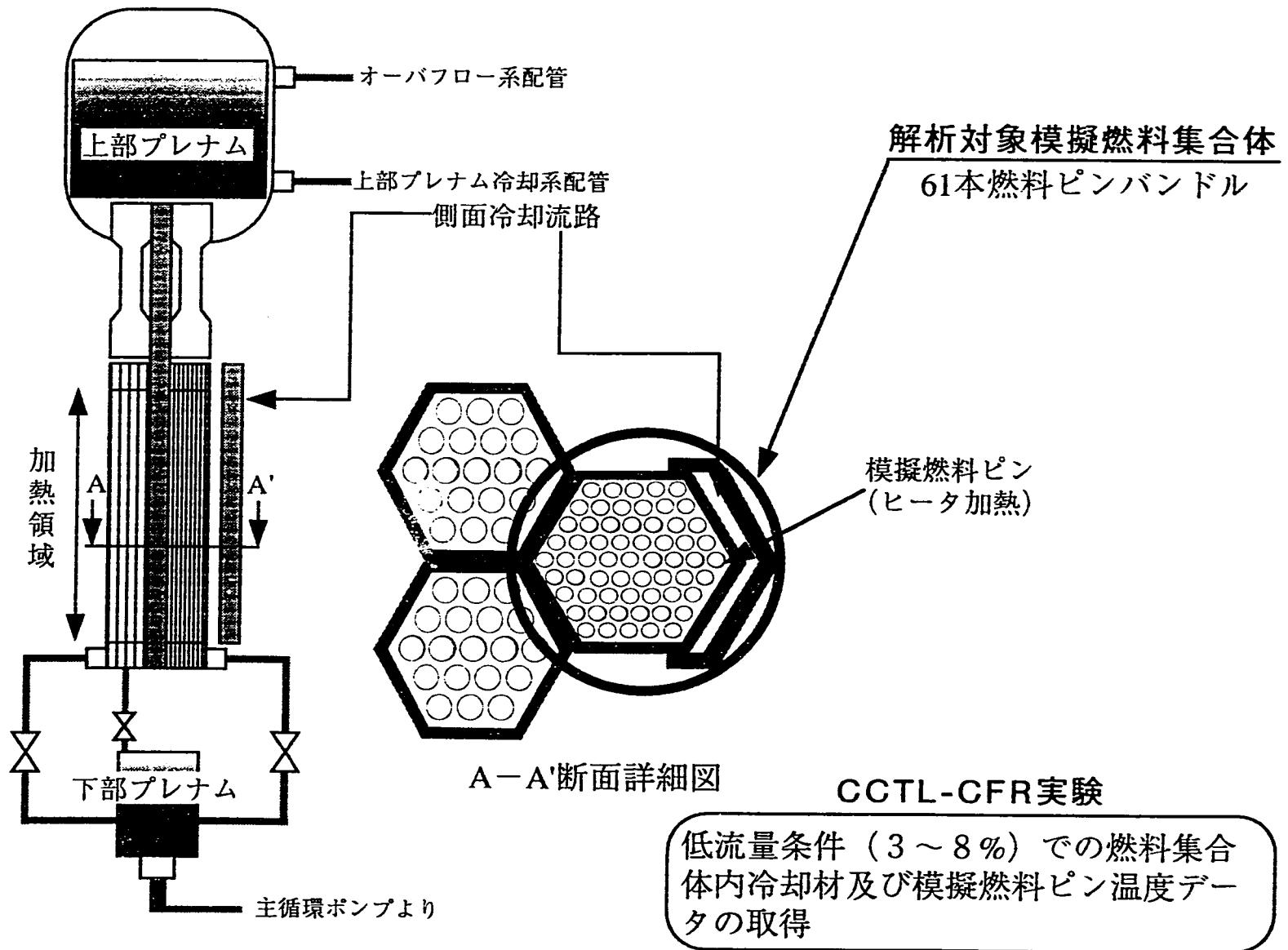
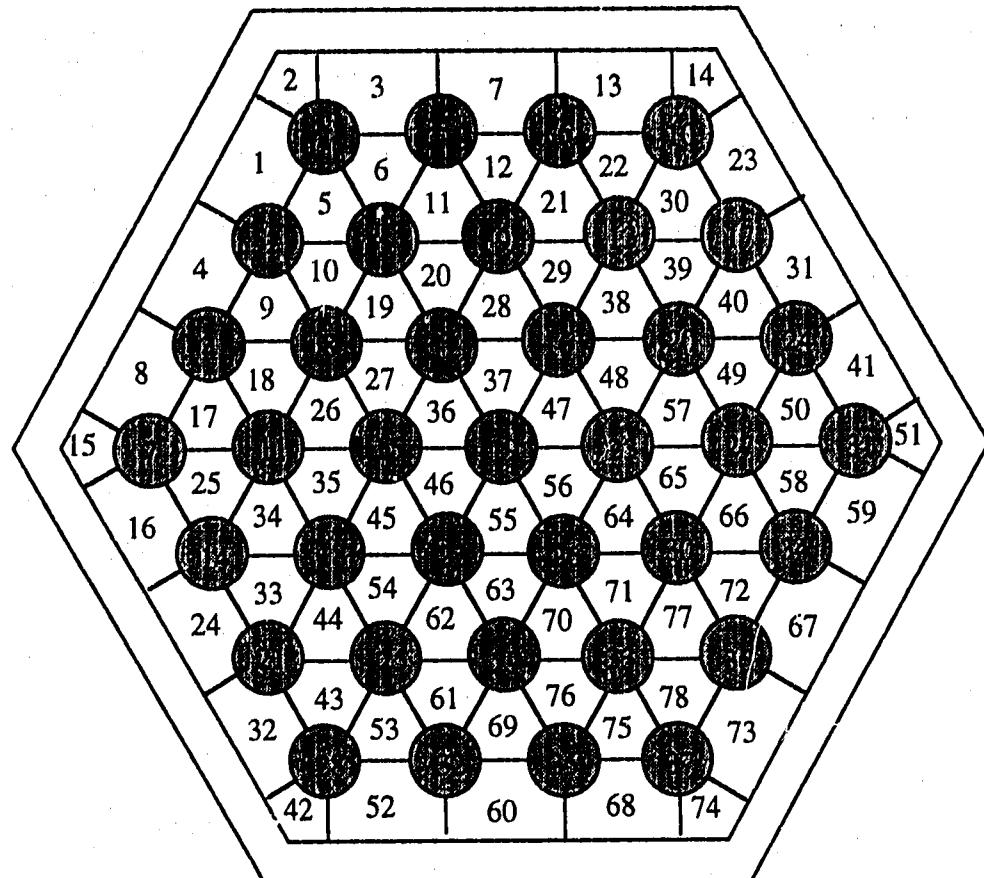
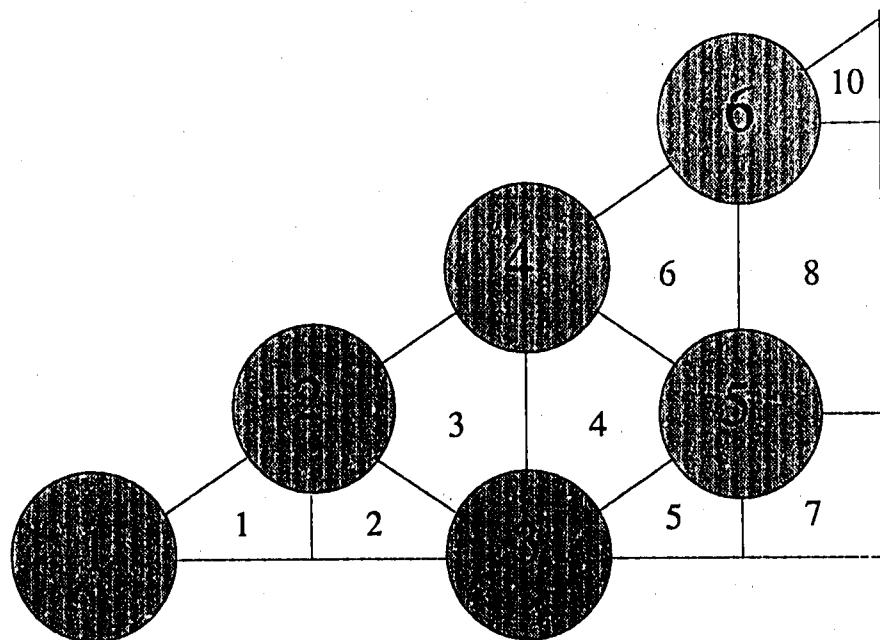


図 2.2 CCTL-CFR実験装置概略図



<フルセクター>

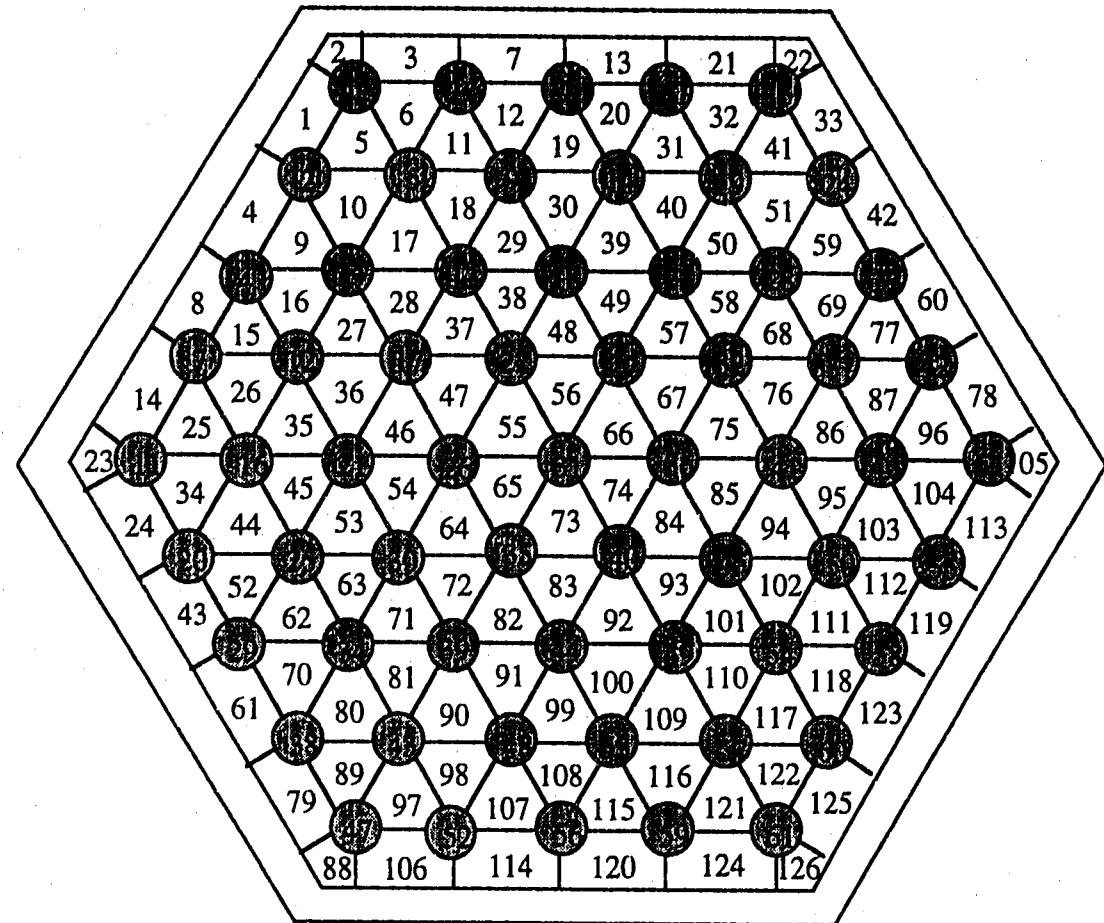
※D.R.M.使用時



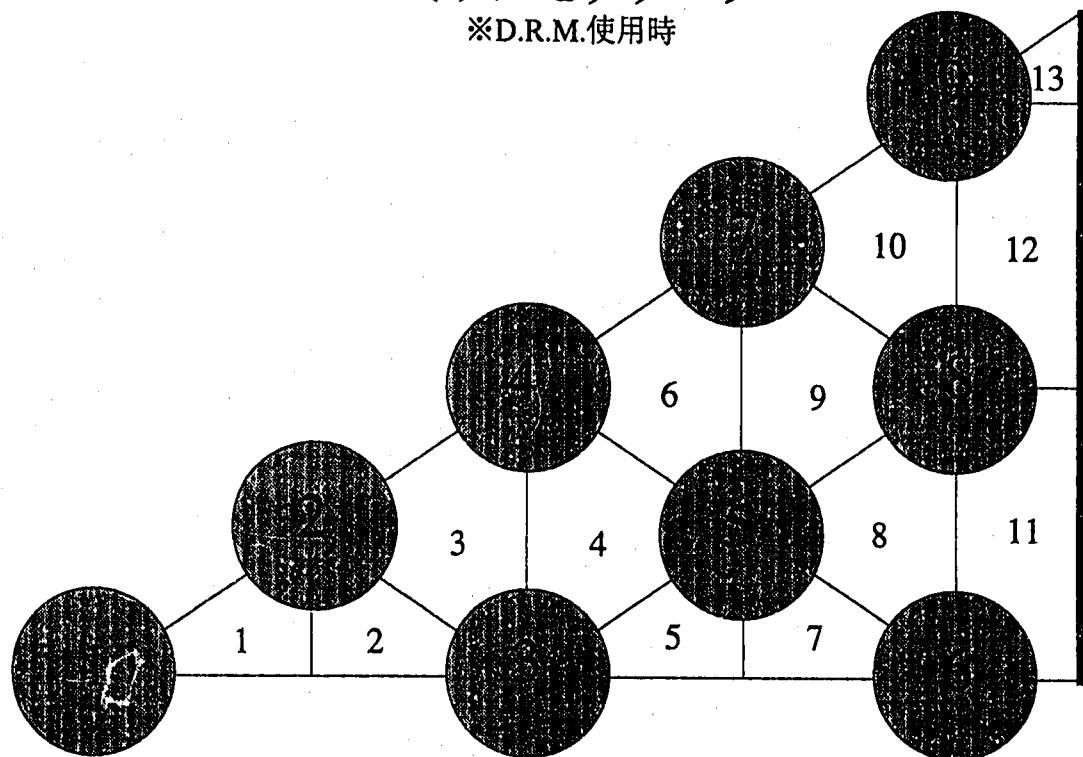
<1/12セクター>

※Cheng&Todreasモデル使用時

図2.3 PLANDTL体系 37本模擬燃料ピンバンドルの
サブチャンネル分割図

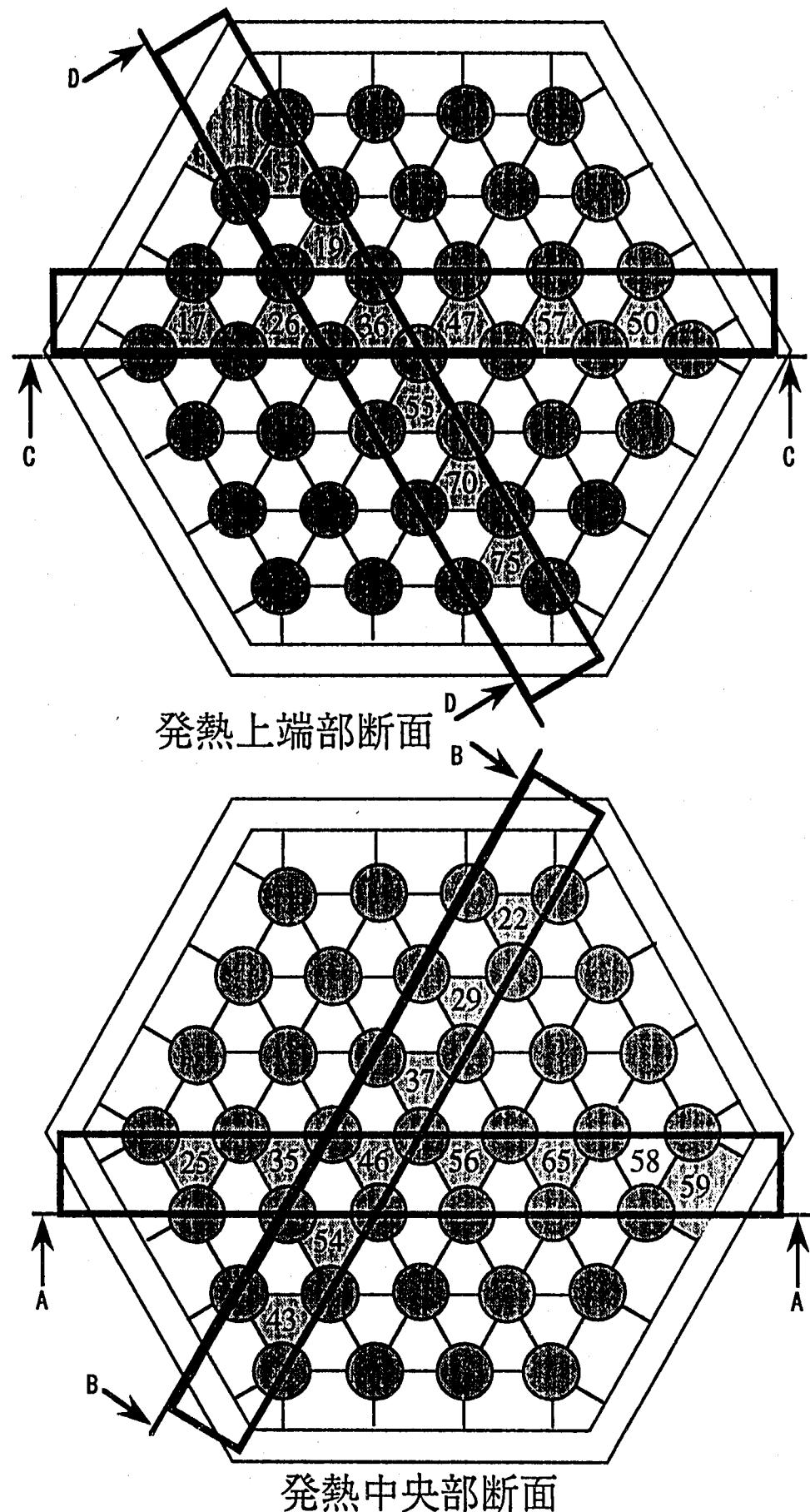


<フルセクター>
※D.R.M.使用時



<1/12セクター>
※Cheng&Todreasモデル使用時

図2.4 CCTL-CFR体系61本模擬燃料ピンバンドルの
サブチャンネル分割図

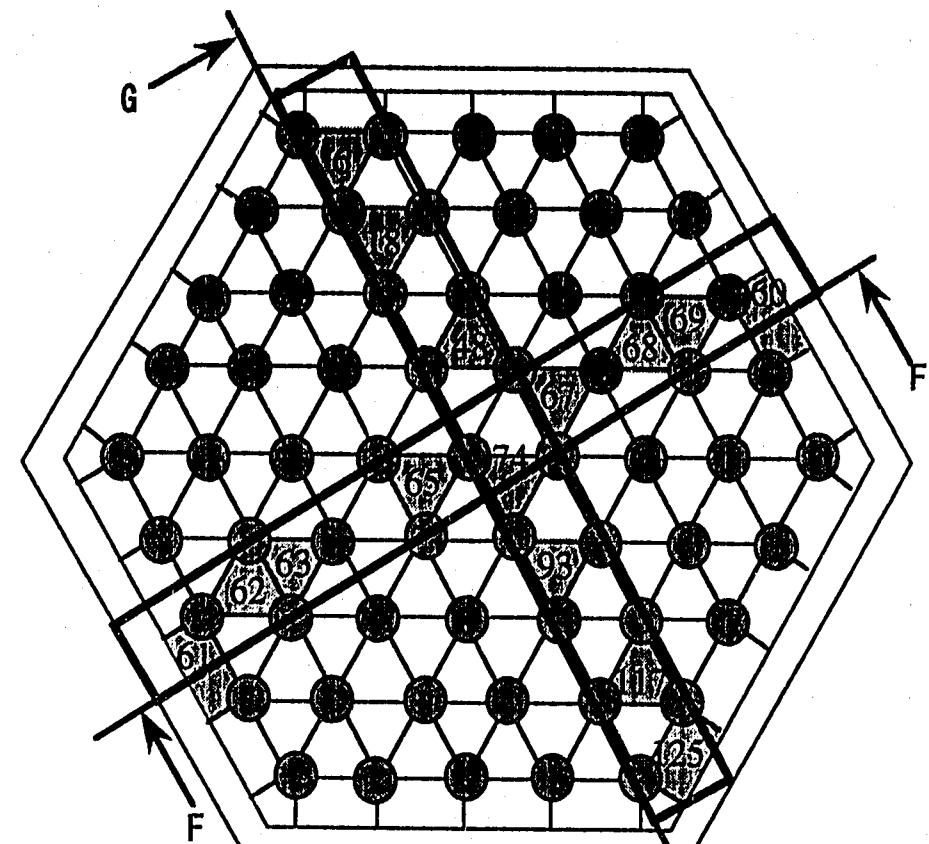


: 比較を行ったサブチャンネル列

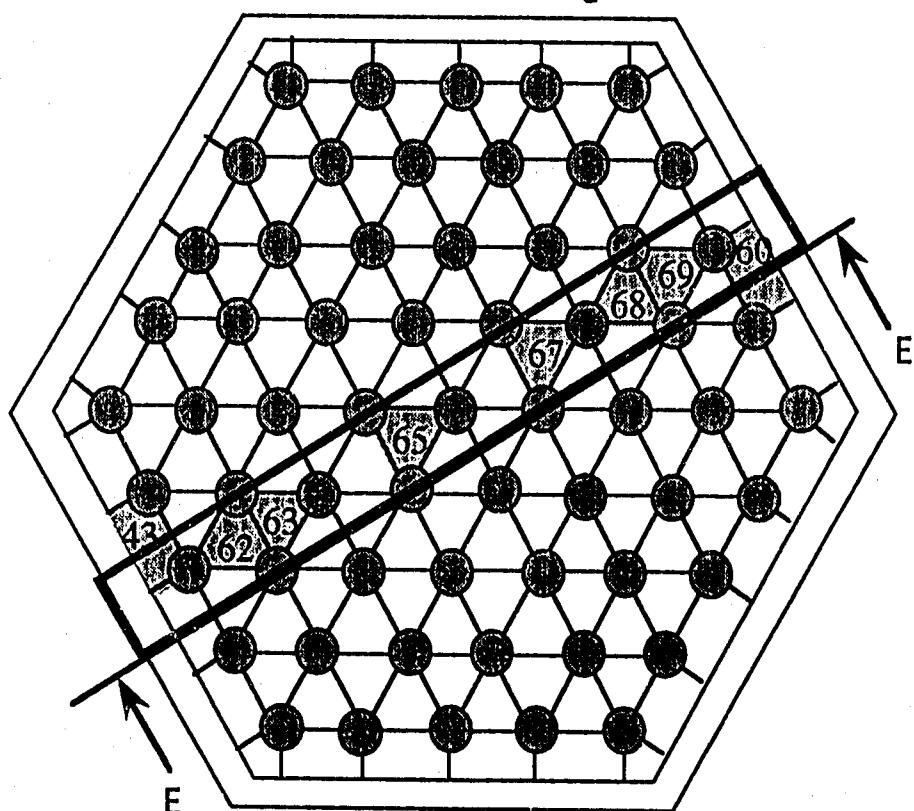
: 热電対設置サブチャンネル

※ 上に示した断面はサブチャンネル分割図と同じ方向から見たものである。

図 3.1 実験値と解析値の径方向断面内比較位置 (PLANDTL)



発熱上端部断面



発熱中央部断面

: 比較を行ったサブチャンネル列

: 热電対設置サブチャンネル

※ 上に示した断面はサブチャンネル分割図と同じ方向から見たものである

図 3.2 実験値と解析値の径方向断面内比較位置 (CCTL-CFR)

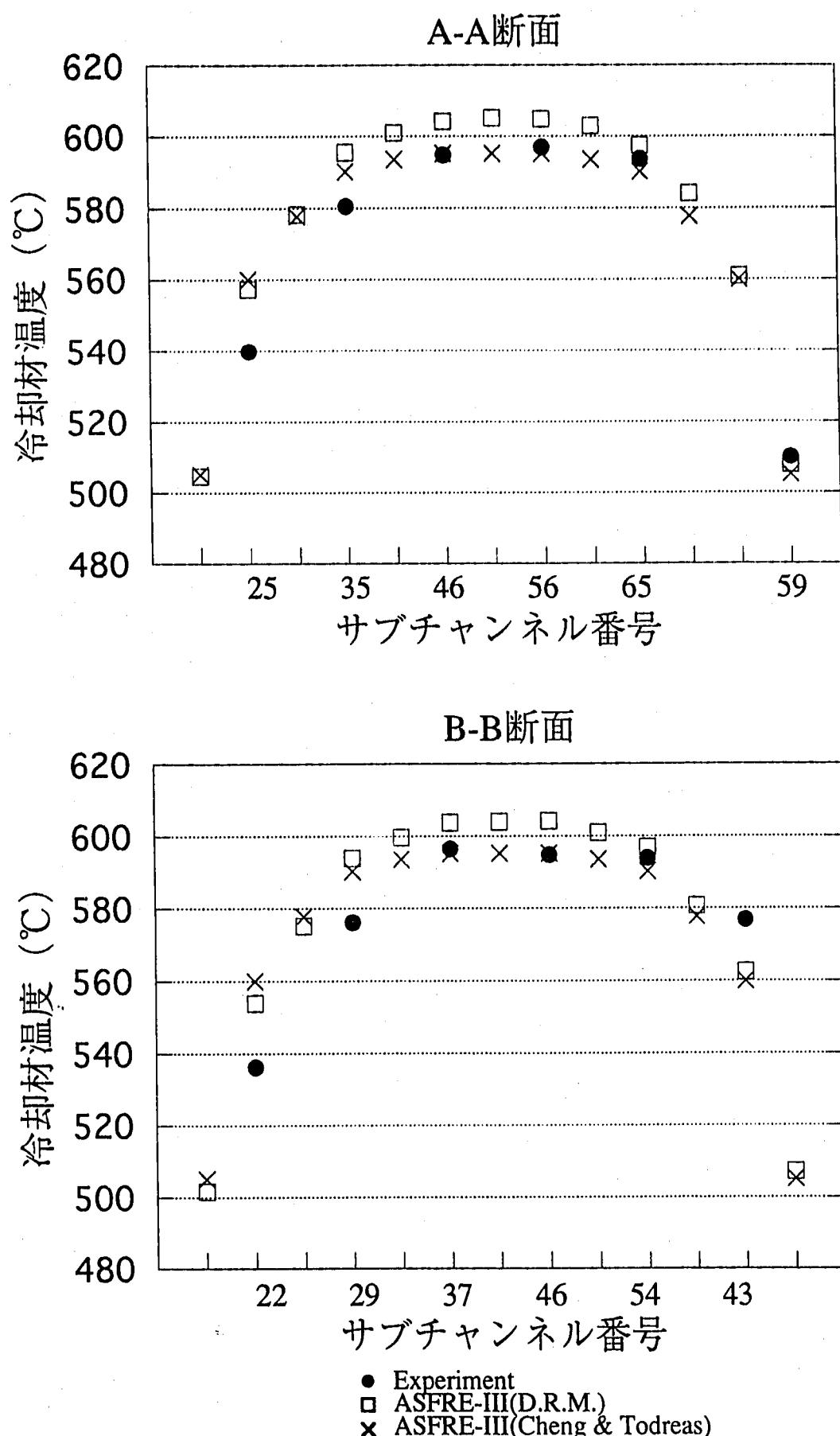


図 3.3 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH1）

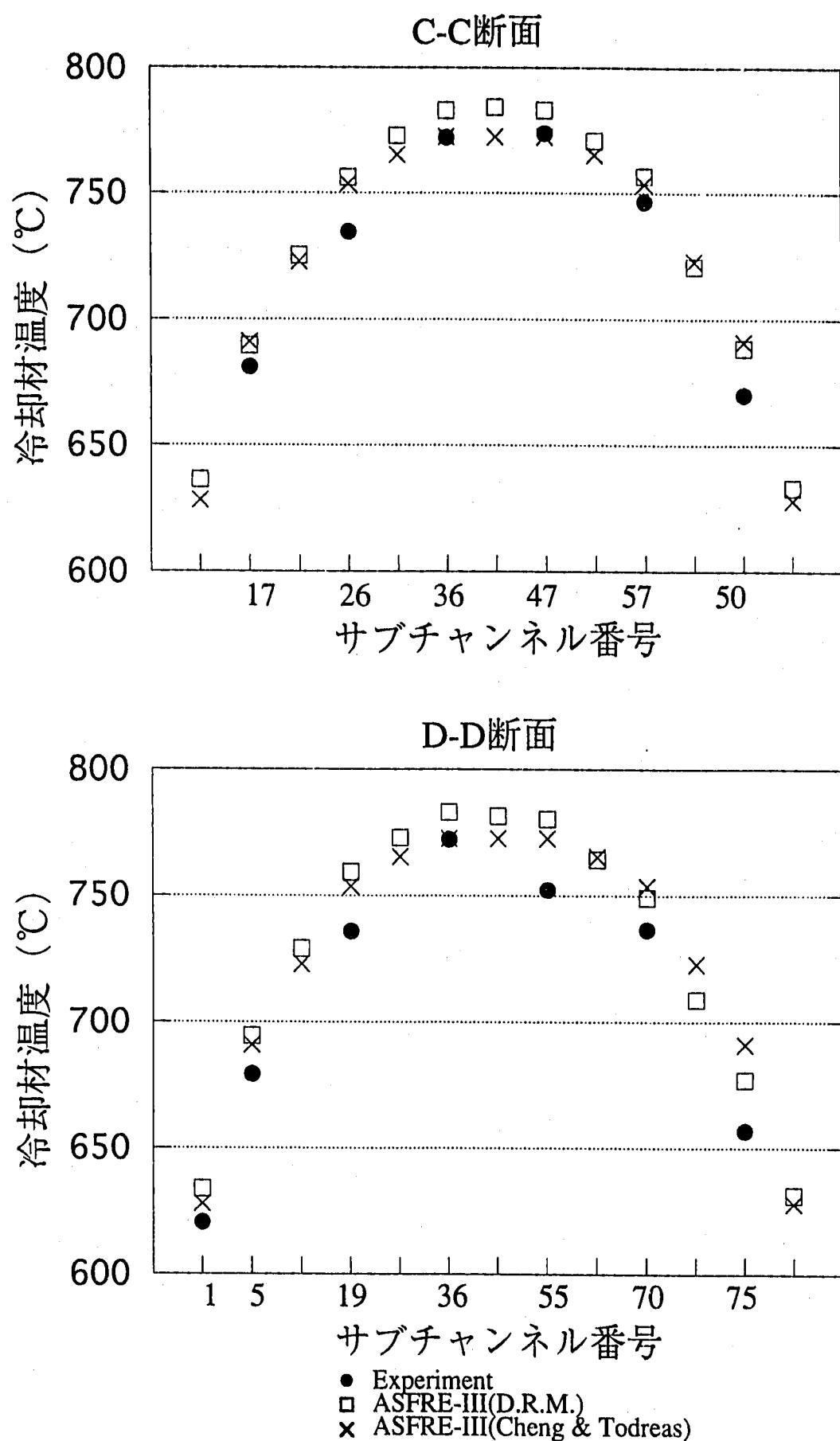


図 3.4 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH1）

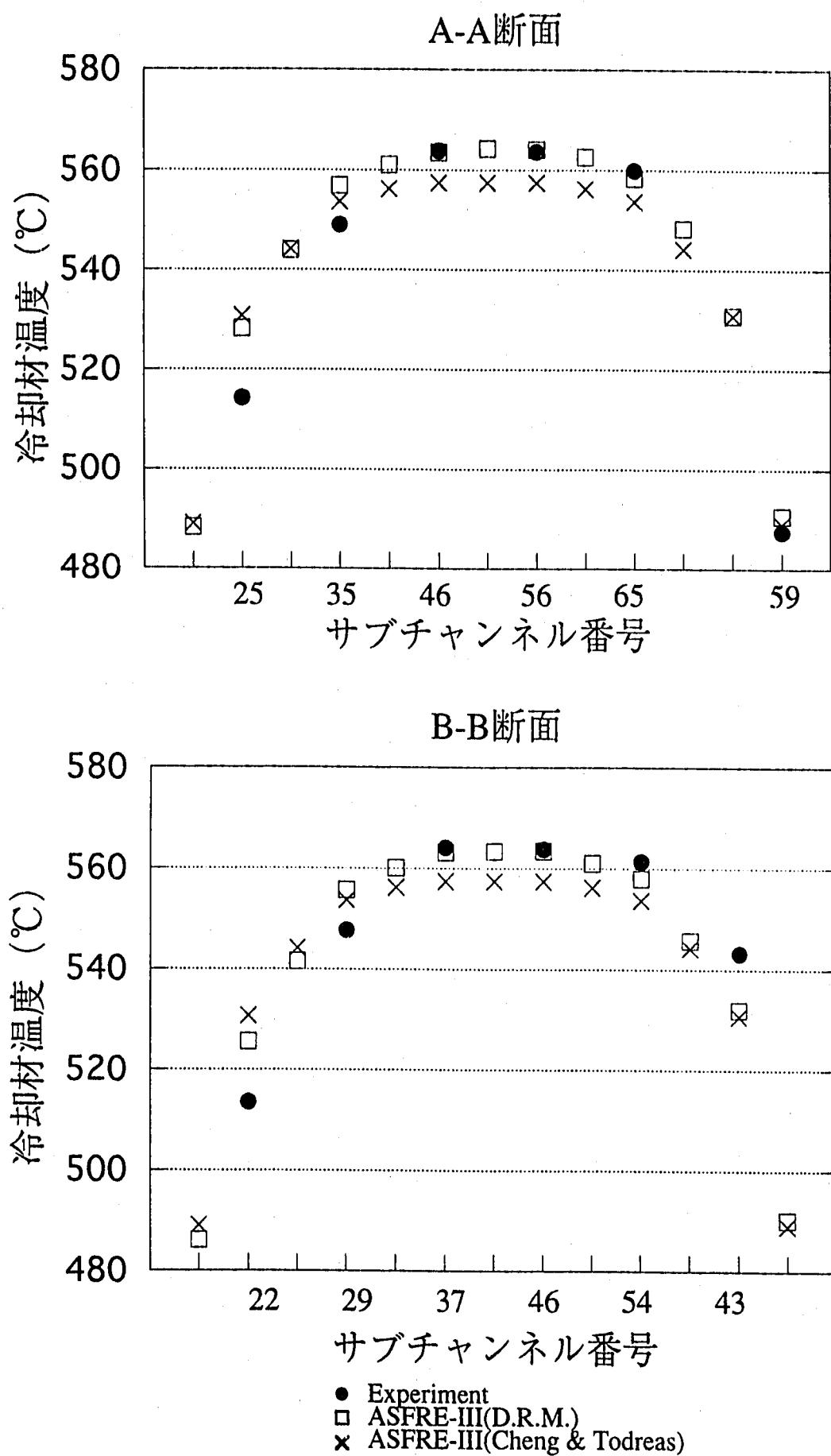


図 3.5 高流量条件発熱中央部径方向温度分布（ケースH2）

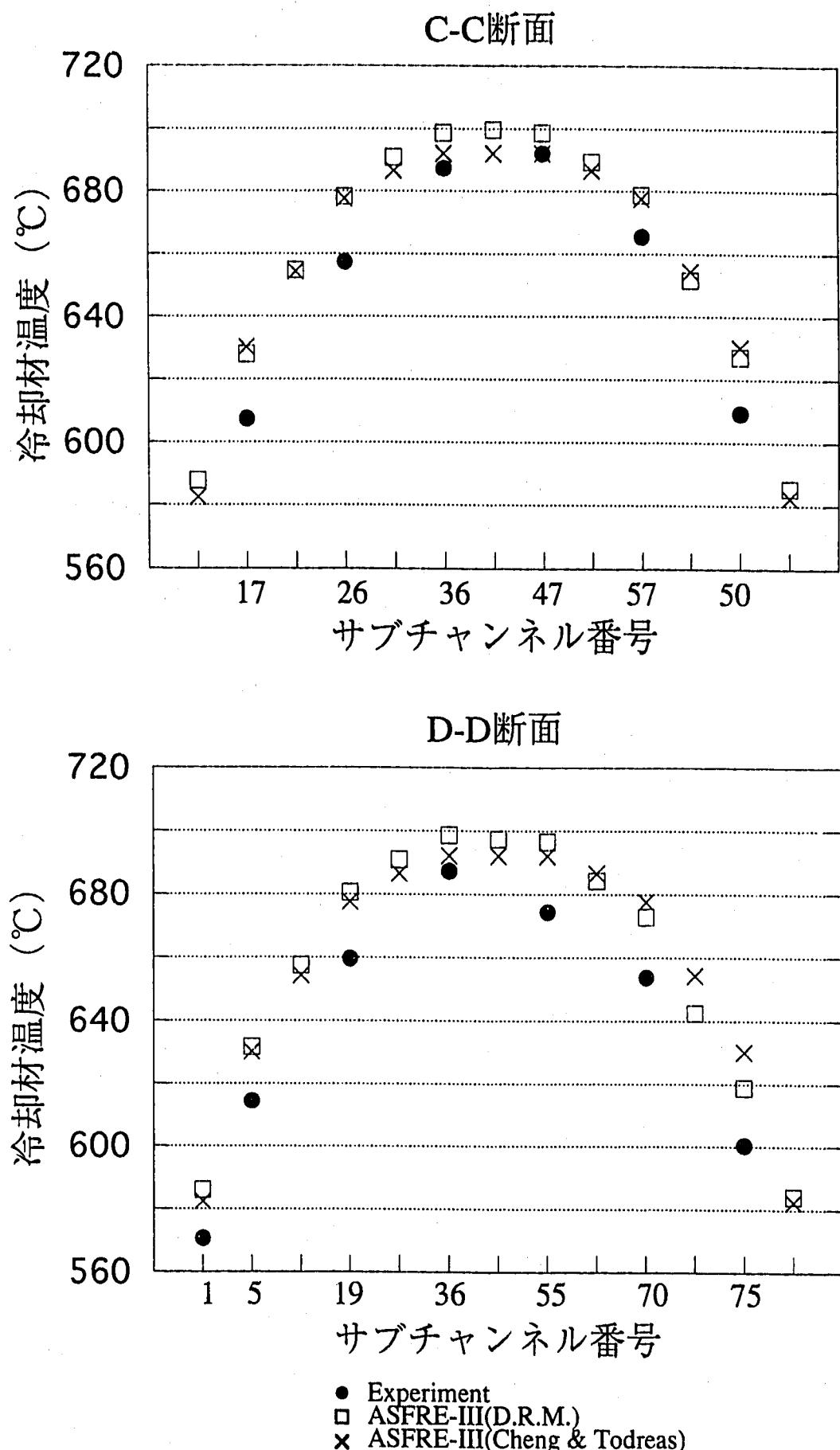


図3.6 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH2）

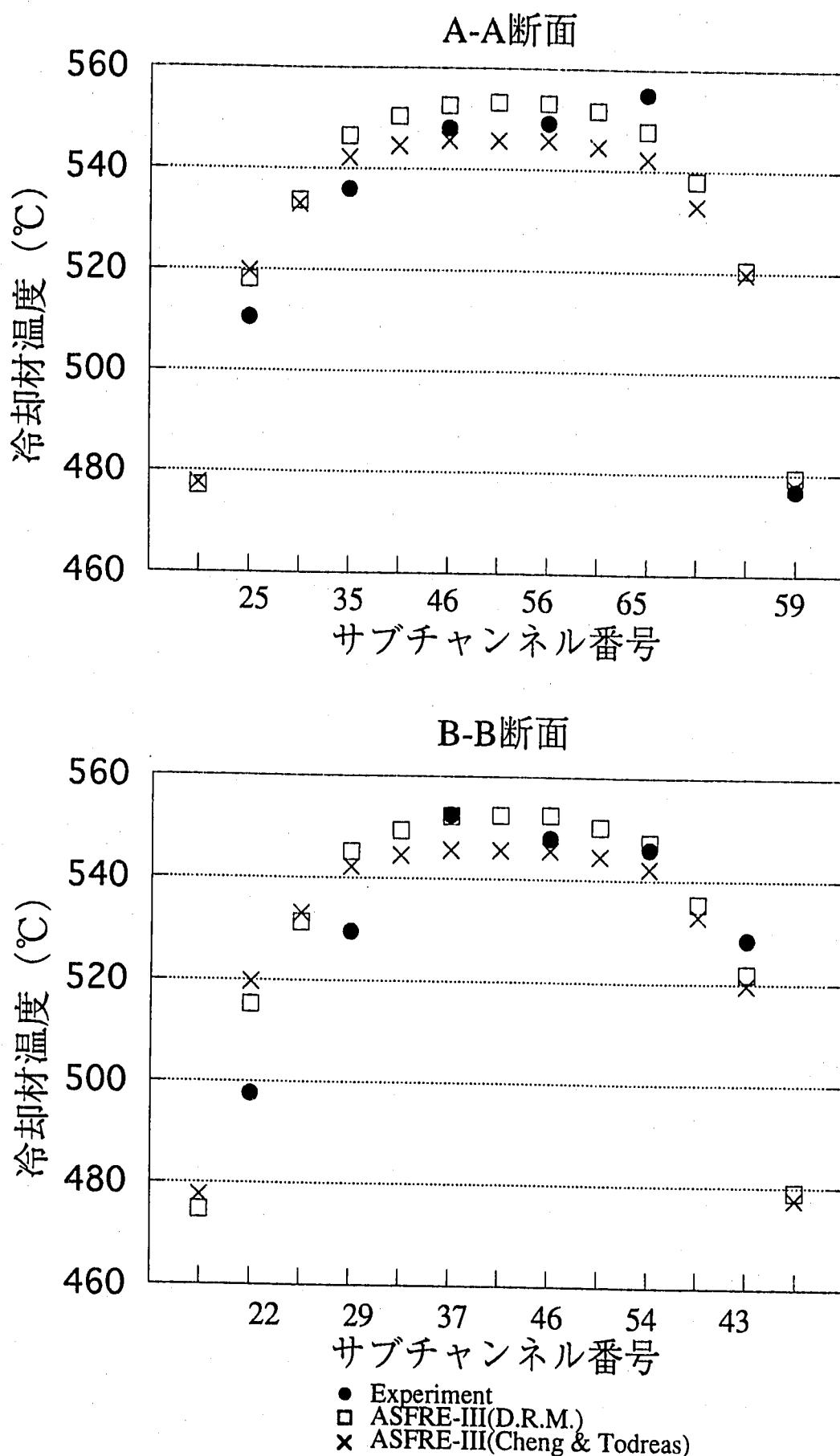


図 3.7 高流量条件発熱中央部径方向温度分布 (ケースH3)

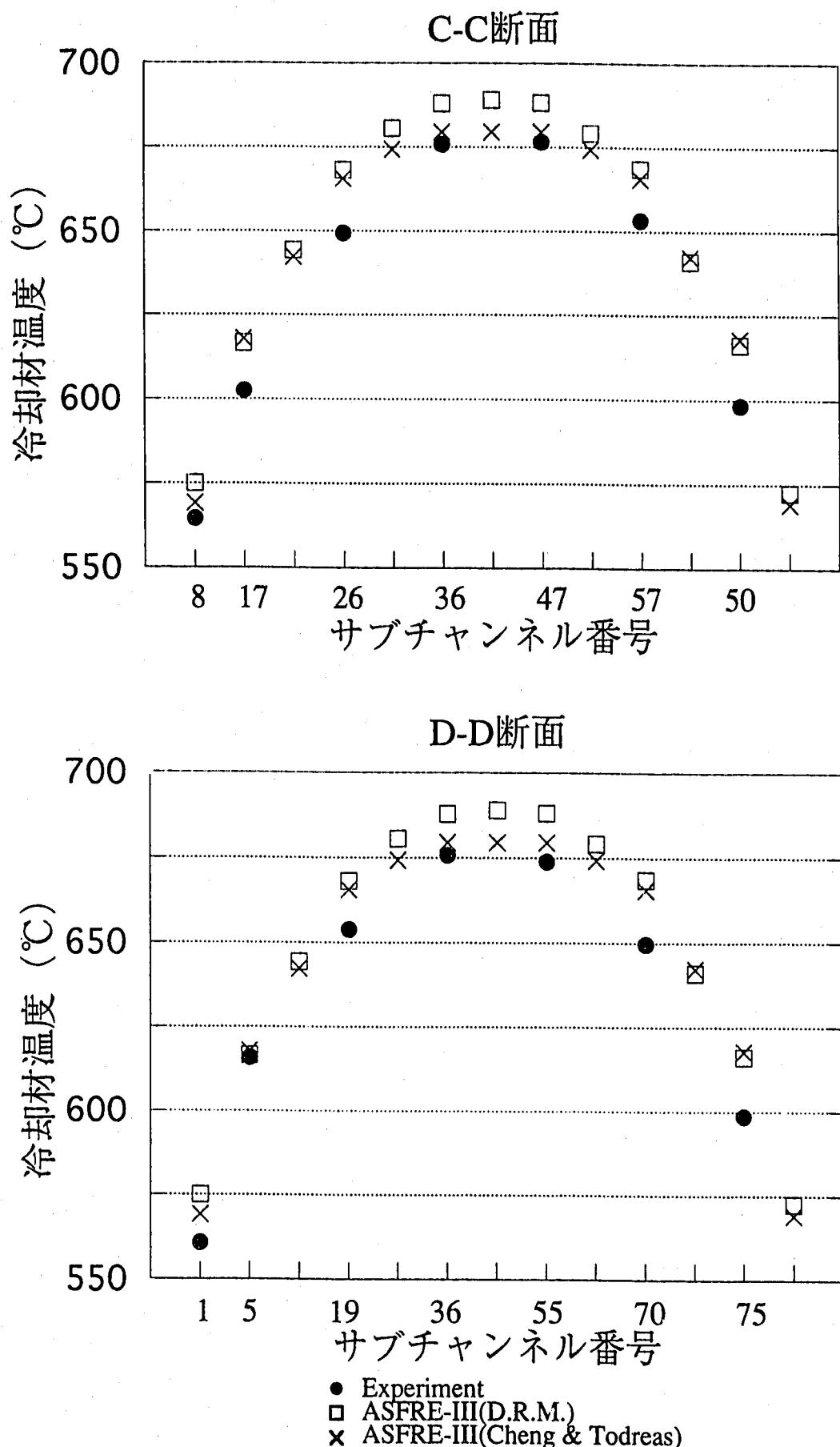


図3.8 高流量条件発熱上端部径方向温度分布（ケースH3）

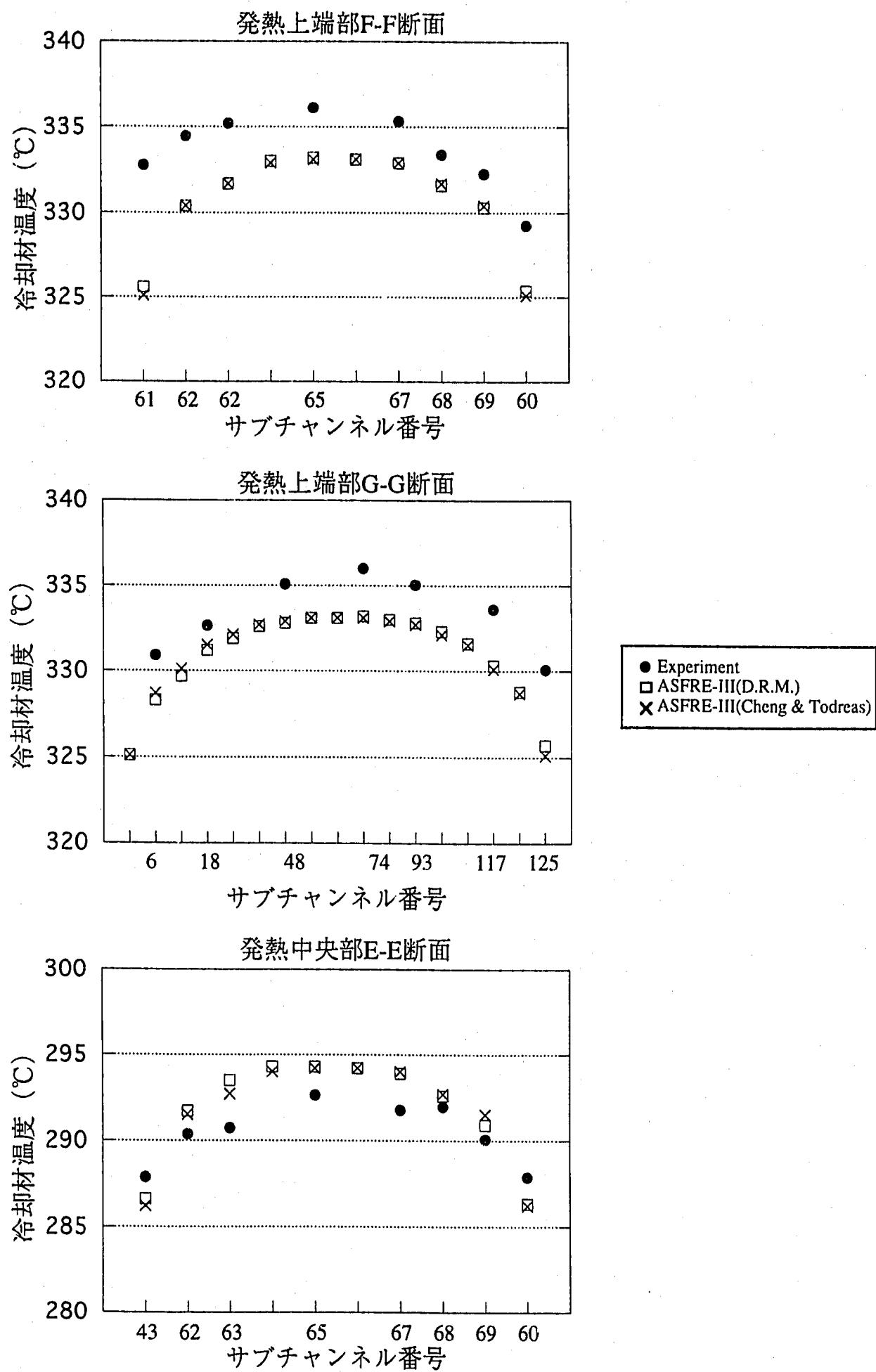


図3.9 低流量条件径方向温度分布（ケースL1）

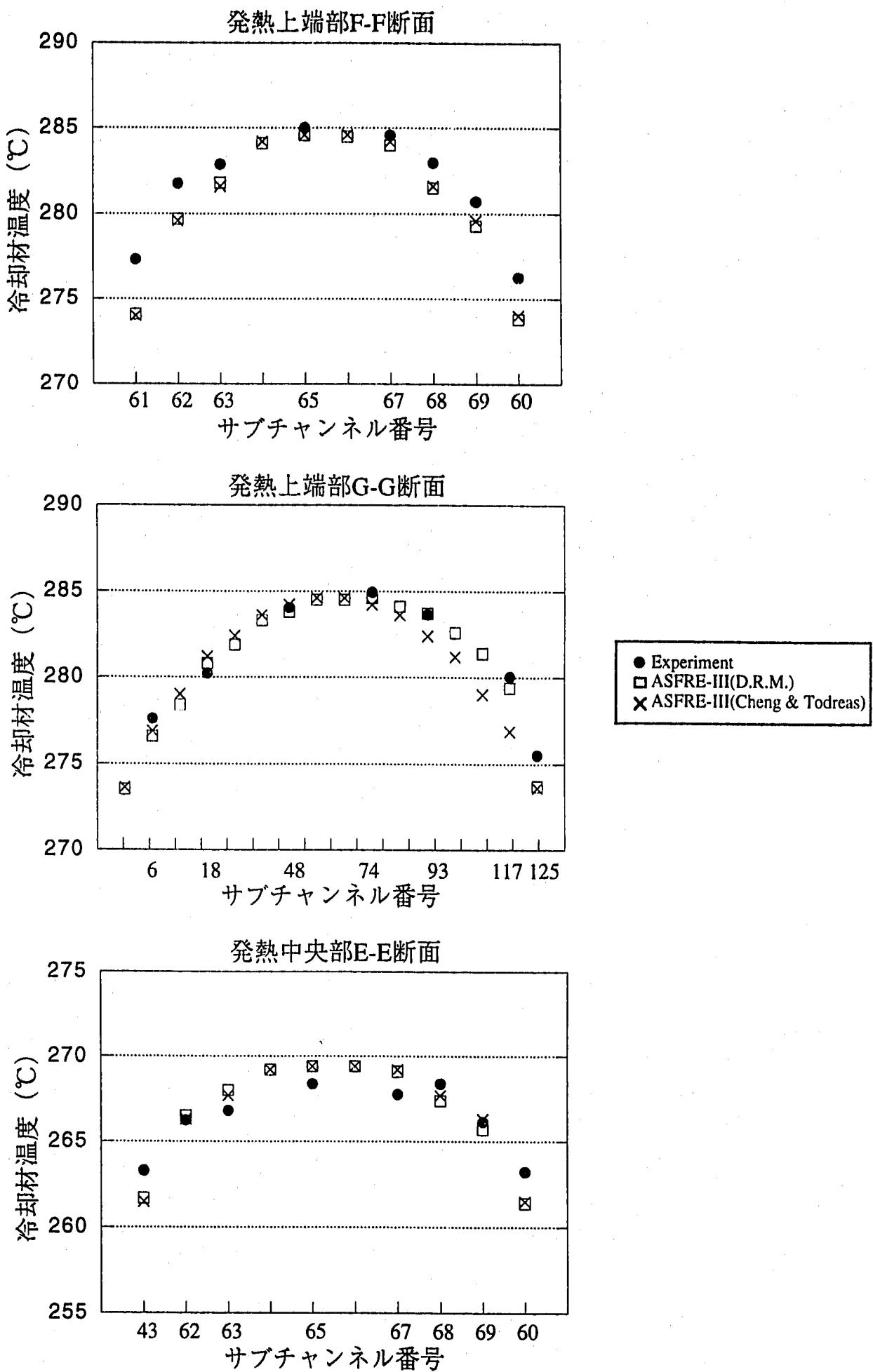
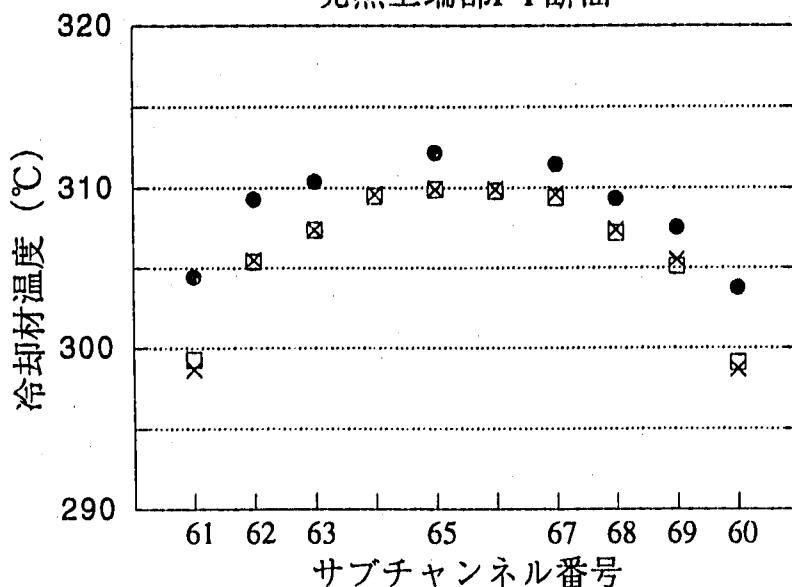
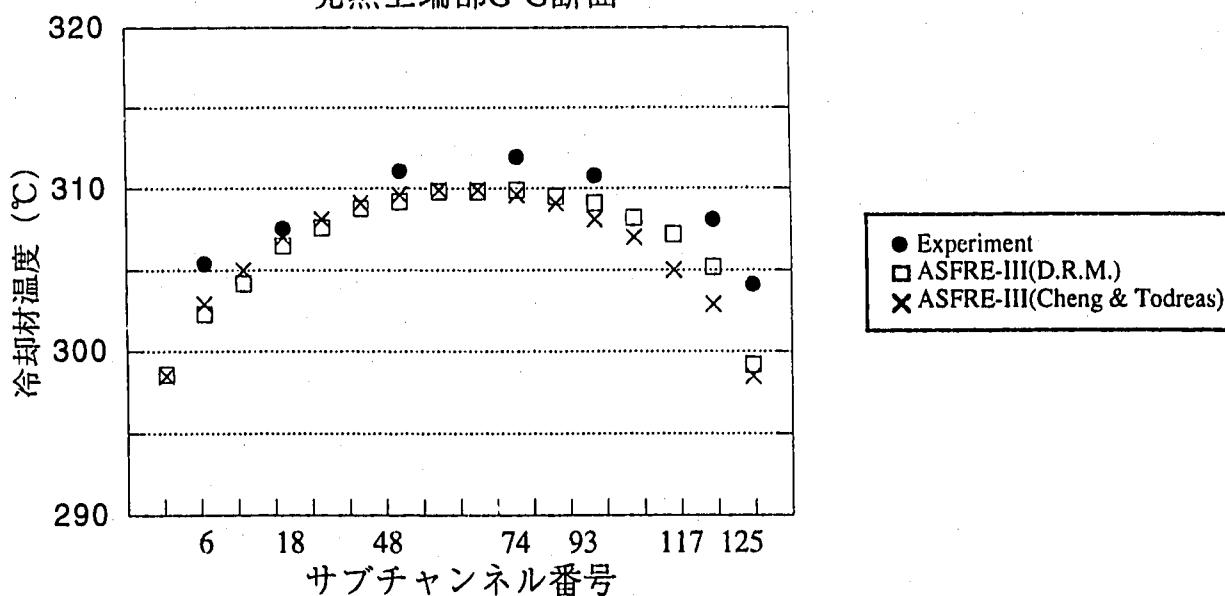


図 3.1.0 低流量条件径方向温度分布（ケースL2）

発熱上端部F-F断面



発熱上端部G-G断面



発熱中央部E-E断面

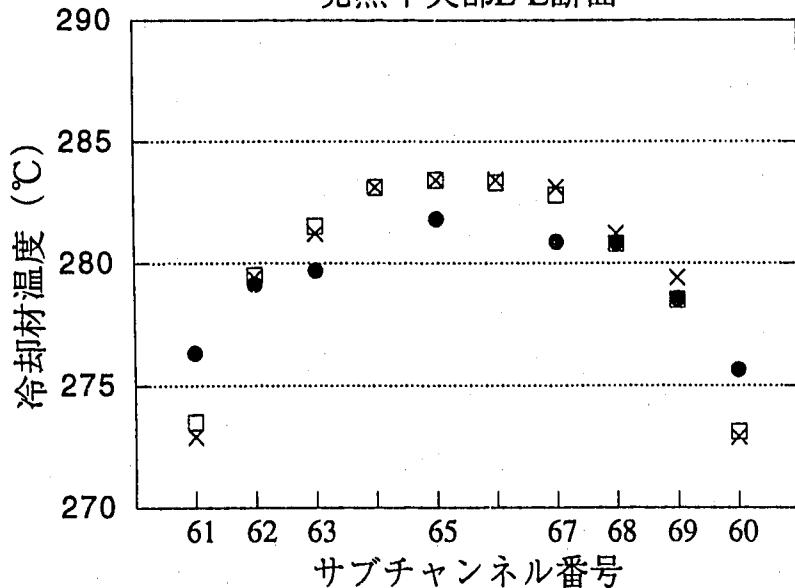


図3.1.1 低流量条件径方向温度分布（ケースL3）

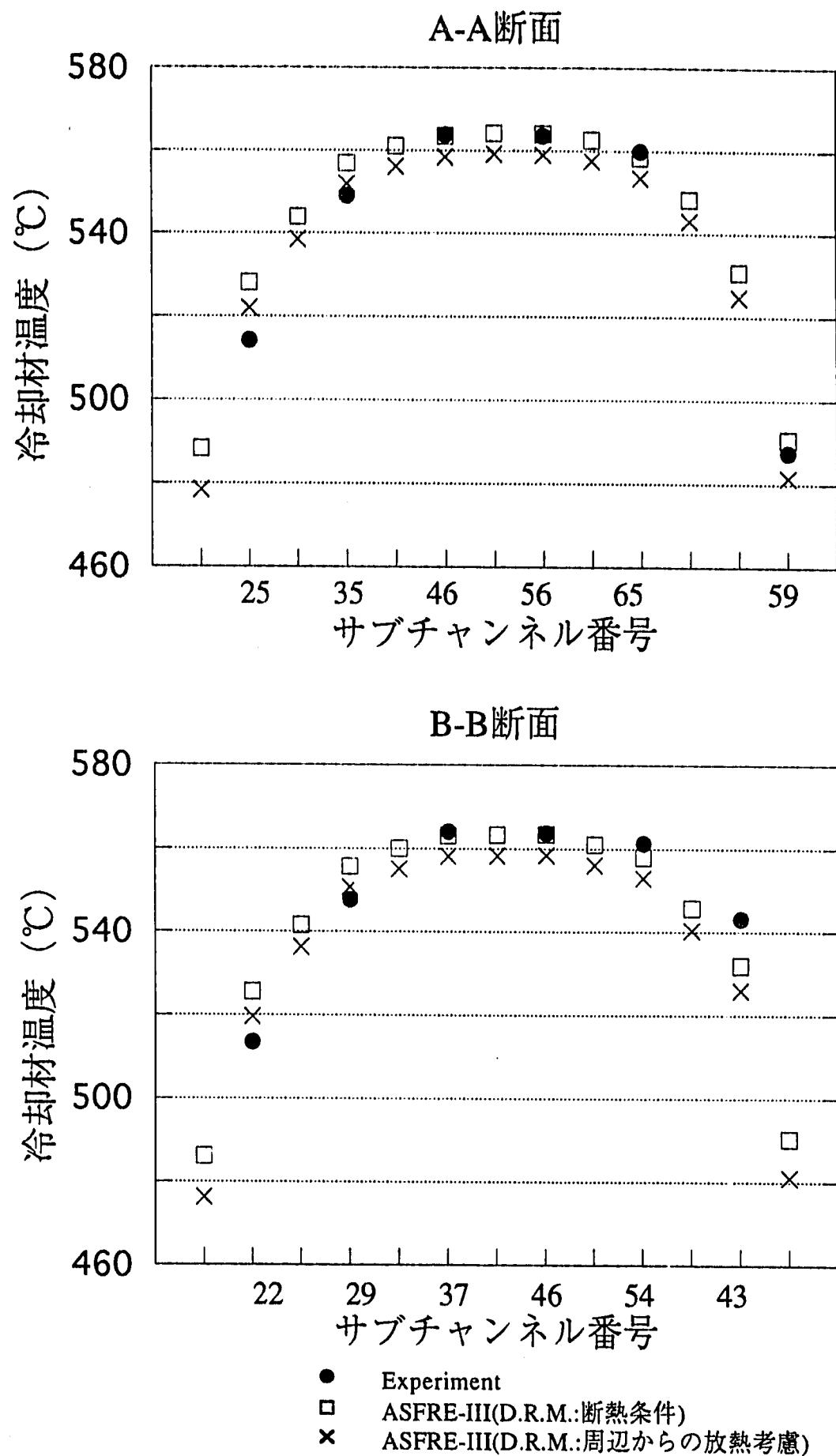


図 4.1 高流量条件発熱中央部径方向温度分布
(ケースH2、放熱考慮)

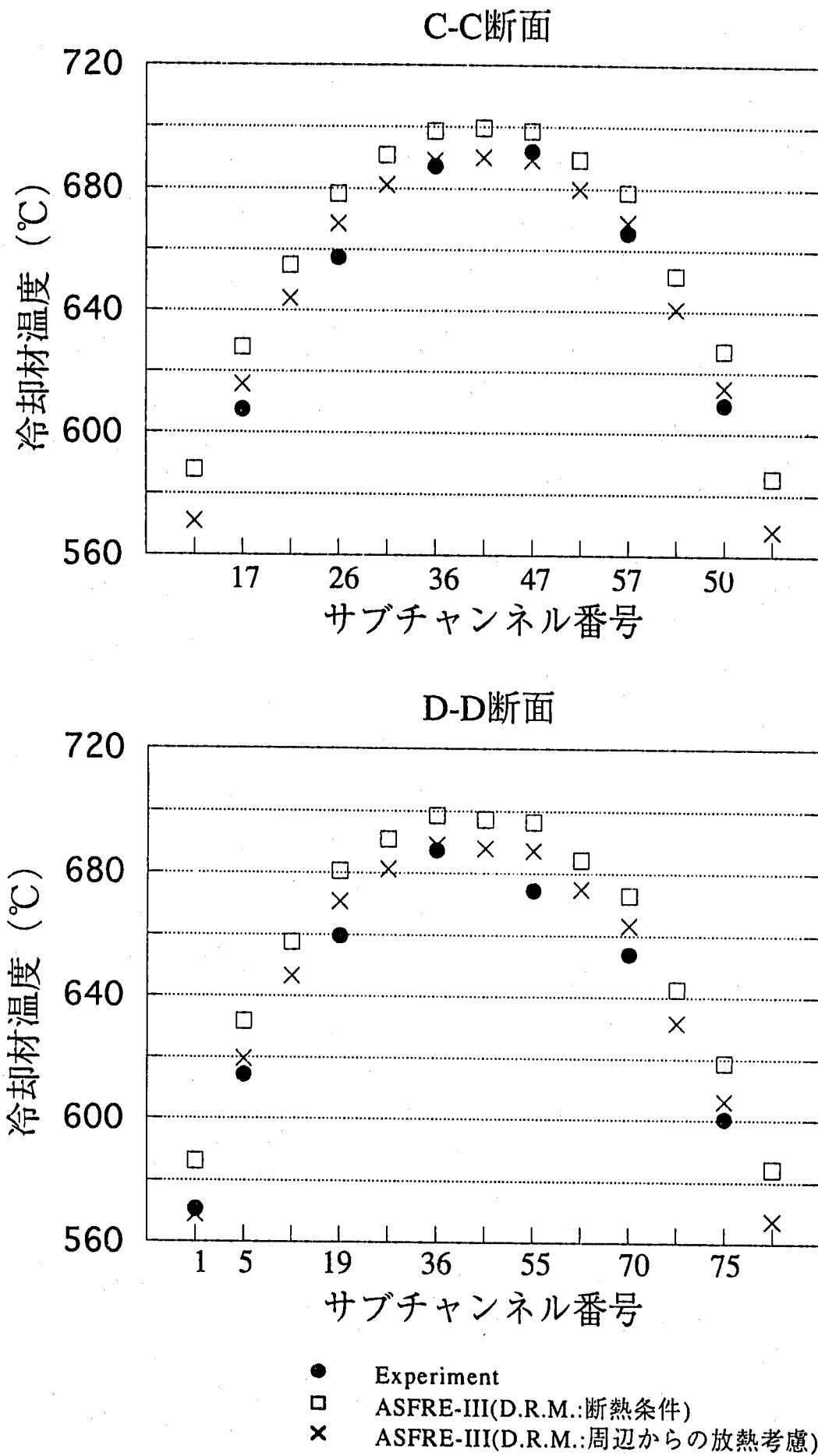


図4.2 高流量条件発熱上端部径方向温度分布
(ケースH2、放熱考慮)

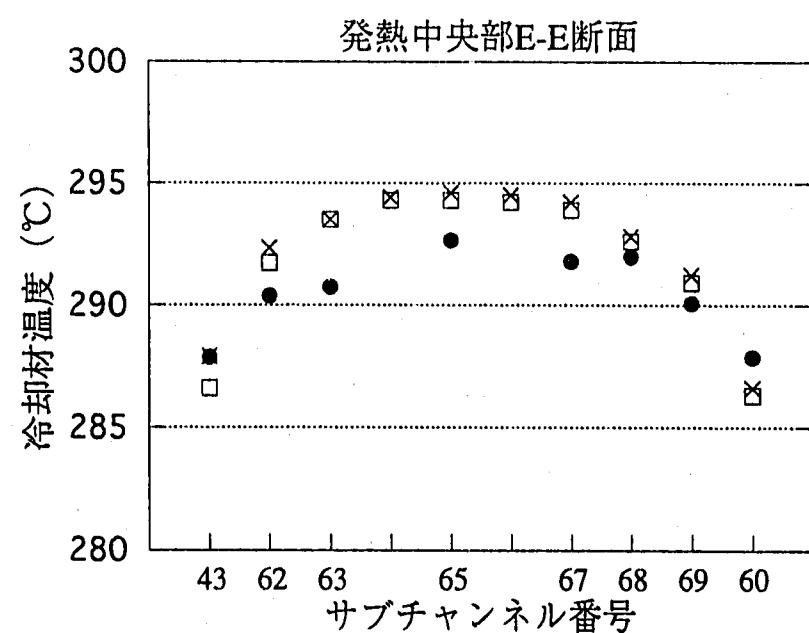
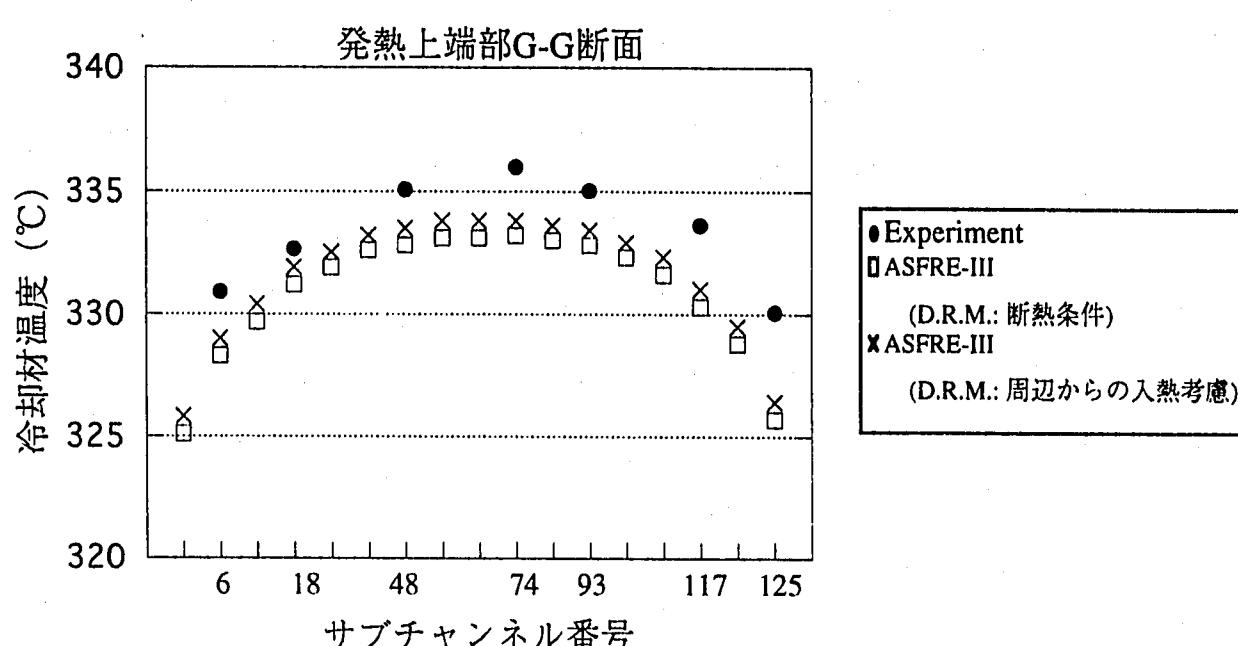
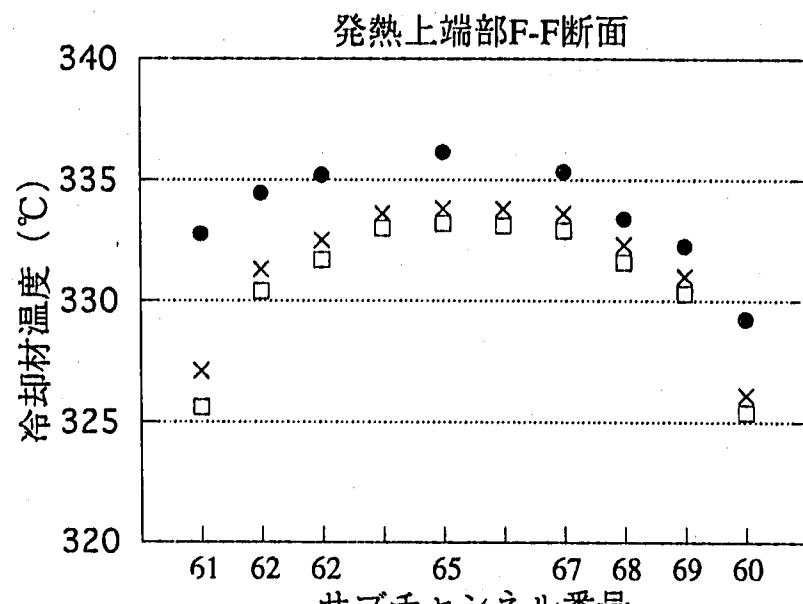


図 4.3 低流量条件径方向温度分布（ケースL1、入熱考慮）