PNC TN9410 97-104

公開資料

サブチャンネル解析コードASFRE-Ⅲの整備

―燃料ピン伝熱モデルおよび圧力損失モデルの検証解析―

1997年11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。
〒311-1393　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
I nquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Nareta-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 Nuclwar Fuel DevelopmentCorporation) 1996

公　開　資　料
PNC TN9410 97-104
１９９７年７月

サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの整備
－燃料ピン伝熱モデルおよび圧力損失モデルの検証解析－

成田　均*　　大島　宏之*

要　旨

単相サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの整備の一環として、燃料ピン伝熱モデルおよび圧力損失モデルの検証解析を実施した。

燃料ピン伝熱モデルの検証では、構造解析コードFINASによる解析を行い、ASFREコードの解析結果との比較を実施した。これらの比較より、ASFRE燃料ピン伝熱モデルの結果は燃料ピン内部において、FINASによる解析結果と最大で１％未満の差であったことから、燃料ピン伝熱モデルにおける熱伝導計算の妥当性を確認した。

圧力損失モデルの検証解析では、ASFREコードにおけるワイヤスペーサモデル（Distributed Resistance Model（D.R.M.））を用いて、169本および127本ピンバンドル燃料集合体を用いた流動試験結果との比較を実施した。軸方向差圧については、定格流領域において両試験ともに解析結果と実験結果はほぼ一致した傾向となった。また、周方向圧力分布については試験結果の傾向とASFREコードの解析結果の間にピーク値となる位置に違いが生じた。この原因を調べるため実施した、SPIRALコードによる解析結果や周方向圧力分布を測定した他の試験との比較ではASFREコードの傾向は非常に良く一致することを確認した。従って、D.R.M.による周方向圧力分布予測は妥当であり、周方向分布についての差の原因は燃料バンドルの偏り、ワイヤ巻き誤差および測定位置におけるワイヤの影響であると考えられる。

＊大洗工学センター　基盤技術開発部　熱流体技術開発室

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC TN9410 97-104
July, 1 9 9 7

Improvement of Single-phase Subchannel Analysis Code ASFRE-III

- Verification Analysis of Fuel Pin Heat Transfer Model and Pressure Loss Model -

Hitoshi NARITA*, Hiroyuki OHSHIMA*

Abstract

As the part of the improvement of single-phase subchannel analysis code ASFRE-III, verification study about fuel-pin heat transfer model and flow resistance model of the code was carried out.

Temperature distributions in a fuel pin predicted by the fuel-pin heat transfer model of ASFRE-III were compared with those calculated by the structure analysis code FINAS, which has been well validated and applied to various structure analyses, using the same boundary conditions. The comparison showed that the results by these two codes agreed with maximum difference of 1 %. and therefore the validity of the model was confirmed.

With respect to the flow resistance model, distributed resistance model (DRM), which can enhance the consistent description of the fluid flow and wire-spacer interaction, was examined through analyses of two hydraulic simulation tests using the fifth mock-up fuel subassembly for the prototype LMFBR and the second mock-up fuel subassembly for the experimental rector. The calculated pressure difference between pressure measurement taps whose positions were near the top and the bottom of the fuel-pin bundle agreed with the measured data of both tests. The predicted pressure distribution in a horizontal cross section was also compared with the calculational result by the finite element analysis code SPIRAL and agreement was good.

*Thermal-Hydraulics Research Section, O-arai Engineering Center

目次

1. はじめに ---------- 1

2. 燃料ピン伝熱モデルの検証 ---------- 2
2.1 燃料ピン伝熱モデルの概要 ---------- 2
2.1.1 ASFRE コードによる解析 ---------- 3
2.1.2 解析結果 ---------- 3
2.2 FINAS コードによる解析 ---------- 4
2.2.1 解析体系 ---------- 4
2.2.2 境界条件 ---------- 4
2.2.3 物性値 ---------- 5
2.2.4 その他の条件 ---------- 5
2.2.5 解析結果 ---------- 5

3. 圧力損失検証解析 ---------- 7
3.1 D.R.M.について ---------- 7
3.2 燃料集合体 169 本ピンバンドル体系の解析 ---------- 11
3.2.1 169 本ピンバンドル燃料集合体流動試験 ---------- 11
3.2.2 解析方法 ---------- 12
3.2.3 解析結果 ---------- 13
3.3 燃料集合体 127 本ピンバンドル体系の解析 ---------- 15
3.3.1 127 本ピンバンドル燃料集合体流動試験 ---------- 15
3.3.2 解析方法 ---------- 16
3.3.3 解析結果 ---------- 16

4. まとめ ---------- 22

5. 謝辞 ---------- 23

6. 参考文献 ---------- 24

図表リスト

表２.１－１　集合体形状データ ……25
表２.１－２　軸方向メッシュ分割 ……25
表２.１－３　閉塞部設定条件 ……26
表２.１－４　解析条件 ……26
表２.２－１　体積発熱率 ……27
表３.１－１　摩擦係数定数項 ……28
表３.２－１　169本ピンバンドル体系解析ケース一覧 ……29
表３.２－２　D.R.M.およびCheng-Todreas モデルの比較 ……29
表３.３－１　127本ピンバンドル体系解析ケース一覧 ……30
表３.３－２　各ケースの軸方向差圧(127本ピンバンドル体系) ……30
表３.３－３　19本ピンバンドル体系形状 ……31
表３.３－４　解析条件 ……31
表３.３－５　他の試験における集合体形状 ……32
表３.３－６　解析条件 ……32

図２.１－１　燃料集合体７本ピンバンドル体系 ……33
図２.１－２　径および軸方向メッシュ分割 ……33
図２.１－３　軸方向発熱割合 ……34
図２.１－４　燃料ピンⅣにおける各セクタ毎の軸方向温度分布(径方向メッシュ２) ……35
図２.１－５　ASFRE閉塞領域上端における周方向温度分布 ……36
図２.２－１　燃料ピン概要 ……37
図２.２－２　ASFREおよびFINAS軸方向メッシュ分割 ……38
図２.２－３　FINASの解析体系を構成する要素 ……39
図２.２－４　温度定義点の比較 ……40
図２.２－５　各断面における周方向温度分布の比較(1) ……41
図２.２－６　各断面における周方向温度分布の比較(2) ……42

図２.２－７　各断面における周方向温度分布の比較(3) ……43
図２.２－８　各断面における周方向温度分布の比較(4) ……44
図２.２－９　各断面における周方向温度分布の比較(5) ……45
図２.２－10　各断面における周方向温度分布の比較(6) ……46
図２.２－11　セクタ毎の軸方向温度分布の比較(1) ……47
図２.２－12　セクタ毎の軸方向温度分布の比較(2) ……48
図３.１－１　燃料ピンおよびワイヤにかかる力 ……49
図３.２－１　燃料集合体169本ピンバンドル燃料集合体 ……50
図３.２－２　軸方向圧力タップ取り付け位置 ……51
図３.２－３　サブチャンネル分割図(169本ピンバンドル体系) ……52
図３.２－４　軸方向差圧の比較 ……53
図３.３－１　燃料集合体127本ピンバンドル燃料集合体 ……54
図３.３－２　周方向圧力タップ取り付け位置 ……55
図３.３－３　圧力測定断面におけるワイヤ位置 ……56
図３.３－４　周方向圧力分布の比較(流量11.6kg／sec) ……57
図３.３－５　周方向圧力分布の比較(流量7.0kg／sec) ……58
図３.３－６　周方向圧力分布の比較(流量6.3kg／sec) ……59
図３.３－７　19本ピンバンドル体系サブチャンネル分割図 ……60
図３.３－８　軸方向長さ(メッシュ分割) ……61
図３.３－９　圧力分布比較断面におけるワイヤ位置 ……61
図３.３－10　サブチャンネルおよびメッシュ分割 ……62
図３.３－11　ASFREおよびSPIRALの周方向圧力分布比較 ……63
図３.３－12　燃料バンドルの偏り ……65
図３.３－13　周方向圧力分布比較(面への偏りを考慮) ……60
図３.３－14　周方向圧力分布比較(コーナーへの偏りを考慮) ……67
図３.３－15　SPIRAL周方向圧力比較断面 ……68
図３.３－16　他の試験とASFREによる解析結果との比較 ……69

1. はじめに

単相サブチャンネル解析コードASFRE-III[1]は、定格から過渡時に至るまで燃料集合体内における冷却材の流動現象および燃料ピン内部温度の予測を可能とすることを目的として開発・整備を進めているコードである。本研究はASFREコードの整備の一環として、燃料ピン伝熱モデル[2]およびワイヤスペーサモデル[3]による圧力損失に関する検証を行ったものである。

燃料ピン伝熱モデルは、昨年度、1次元から3次元熱伝導を取り扱えるように改良しており、燃料集合体局所異常事象や変形バンドル内熱流動現象の評価において燃料ピンの健全性を判断するために必要な、被覆管を含む燃料ピンの詳細な温度分布を求めることを可能とするモデルである。本研究では、改良した燃料ピン伝熱モデルを用いて7本ピンバンドル体系の解析を実施し、その結果を構造解析コードFINAS[4]による熱伝導の解と比較することにより、改良したモデルの妥当性を確認した。

一方、ワイヤスペーサモデルは、流路に存在するワイヤの効果を詳細にモデル化し、これを運動量保存式に組み込むことにより、従来サブチャンネルレベルでは不可能であった燃料ピンまわりの旋回流を再現することができるものである。ここでは、これまでに動燃にて実施された水流動試験の結果とワイヤスペーサモデルを用いた解析結果を比較することにより、燃料集合体内における圧力分布予測の妥当性を確認した。

第2章において、燃料ピン伝熱モデルの概要と検証解析およびその結果について記述する。第3章においてはワイヤスペーサモデルの概要および2つの流動試験を対象として行った解析の検証結果を示す。

2. 燃料ピン伝熱モデルの検証

ASFRE コードの燃料ピン伝熱モデルは、従来、径方向について１次元熱伝導方程式を用いていたが、詳細な燃料ピン内の温度評価を可能とするために、昨年度、周および軸方向の熱伝導の効果を加えた３次元熱伝導方程式を組み込む改良を行った。ここでは改良したモデルの妥当性を確認するため、燃料ピン伝熱モデルによる解析結果と構造解析コード FINAS による燃料ピン内熱伝導解析の結果との比較を行った。

2.1 燃料ピン伝熱モデルの概要

ASFRE コードでは、燃料集合体における燃料ピンもしくはラッパ管に囲まれた流路をサブチャンネルとして定義している。図２.１－１は燃料集合体７本ピンバンドル体系をサブチャンネル分割したもので、燃料ピンのみに囲まれたサブチャンネルを中心サブチャンネル、ラッパ管のコーナー部に面したサブチャンネルをコーナーサブチャンネル、その他のラッパ管に面したサブチャンネルを周辺サブチャンネルと称している。燃料ピン伝熱モデルにおいて燃料ピンの周方向分割は、燃料ピンに接するサブチャンネル毎に分割される。周方向分割数は燃料ピンに隣接するサブチャンネルによって異なり、中心サブチャンネルのみに囲まれた燃料ピン（図中の燃料ピン IV）の場合は６分割、周辺およびコーナーサブチャンネルが接する場合には５分割される。従来の伝熱モデルでは周方向分割された燃料ピン部分（以下セクタ）毎に径方向の１次元熱伝導方程式を用いて温度計算を行っていた。このモデルは保守側の解析結果を与えることになるが、さらに周方向および軸方向の熱伝導効果を加えることにより、燃料ピン内部の温度分布および隣接する冷却材温度予測の精度を向上させた。

３次元熱伝導方程式の組み込み方法および伝熱モデルの詳細については、参考文献[2]を参照されたい。

2.1.1 ASFREコードによる解析

改良した燃料ピン伝熱モデルを用い、7本ピンバンドル体系における燃料ピン内部の温度分布を求めた。集合体形状条件を表2.1－1に示す。燃料ピン径（被覆管を含む）は6.5mm、ピンピッチは7.87mmとした。助走区間については、非発熱部下端にワイヤスペーサ1巻ピッチ分を付加した。図2.1－2に径方向および軸方向メッシュ分割を示す。表2.1－2は軸方向メッシュ分割におけるメッシュ幅を示したもので、軸方向メッシュを8つのブロックに分けている。燃料ピンの軸方向発熱分布については、燃料ピン全体における発熱割合の平均値に対して規格化し、軸方向発熱割合として解析に用いた。解析に用いた発熱割合を図2.1－3に示す。今回の解析では周方向および軸方向への温度差を強調するために軸方向発熱中心に4サブチャンネル閉塞（図2.1－1の斜線部分）を表2.1－3に示した条件で設定した。閉塞物の厚さは3メッシュ分に相当する76.7mmとした。その他、解析に用いた条件について表2.1－4に示す。

2.1.2 解析結果

7本ピンバンドル体系の中心に位置する燃料ピンⅣの径方向メッシュ2（図2.1－2参照）における軸方向温度分布を図2.1－4に示す。閉塞領域に相当する0.85mから0.93mの温度は各セクタとも前後のメッシュの温度に比べて高くなる。閉塞領域以外の位置における各セクタの温度の違いについては、閉塞部からの影響が周方向および軸方向熱伝導を考慮したことにより現われたものである。図2.1－5は軸方向温度分布において最高温度となった閉塞領域上端の周方向温度分布（径方向メッシュ2）を示したものである。最高温度は閉塞領域に囲まれたセクタ2となり、その反対側に位置するセクタ5は閉塞領域から最も離れることから、他のセクタに比べ低い温度となる。このとき、径方向メッシュ2におけるセクタ2およびセクタ5の温度差は約130℃となった。

2.2 FINASコードによる解析

燃料ピン伝熱モデルを用いた7本ピンバンドル体系の解析結果と構造解析コードFINAS（有限要素法）の解析結果を比較し、燃料ピン伝熱モデルの熱伝導計算の妥当性を確認する。FINASの解析は、ASFREによって解析を実施した7本ピンバンドル体系の中から燃料ピンIVを対象として実施した。

2.2.1 解析体系

図2.2－1は燃料ピンの断面を示したもので、FINASによる解析では燃料ペレット部分について解析を実施した。ASFREの解析では軸方向長さを約1630mm、軸方向メッシュ分割を68メッシュとしたが、FINASによる解析では図2.2－2に示したように、ASFREの解析において軸方向の温度差が大きくなった閉塞領域と上下4メッシュ分に相当する255.75mmを解析対象とした。

この解析では解析対象体系の模擬性を考慮して2次要素の6面体20節点要素を用いることとした。燃料ピンの一部について6面体20節点要素により模擬したものを図2.2－3に示す。

2.2.2 境界条件

FINASにおける各断面の節点およびASFRE温度定義点の位置について比較したものを図2.2－4に示す。各断面の0.0°における各節点が伝熱モデルにおけるセクタ3の各温度定義点に相当する。FINASの解析では、ASFREの解析結果より得られた温度分布をFINASの解析体系表面（上下端面および中心空孔を含む）に与えることとした。ASFREの温度定義点およびFINASの節点がそれぞれ対応した位置となるようにしたが、図中のz=25.575のような面では中間節点だけの面であることから、周方向の節点は三つとなる。径方向の外側および内側の温度境界条件については、ASFREの径方向メッシュ1および5における温度を与えた。

2.2.3 物性値

FINASにおける物性値（熱伝導率、密度、比熱）の入力としては、温度毎の各物性値を与える方法と多項式で与える方法があるが、今回の解析ではASFREの物性値計算ルーチンを用いて300～3000[K]の物性値を算出し、それぞれの温度毎の物性値に関するデータテーブルを作成した。

2.2.4 その他の条件

解析の対象となった部分が燃料ペレットであることから、解析では発熱計算としなければならない。ASFREの解析条件と同様とするため、FINASの解析では要素を構成する節点に対して体積発熱率を与えることで内部発熱として計算を行った。解析体系各断面における節点は、図2.2－2および図2.2－4に示したようにASFREの定義点に対応した位置としている。ASFREの解析では燃料ピンの径方向発熱割合を一定としていることから、FINASにおける体積発熱率も同一断面において各節点の値を一定とした。体積発熱率はASFREの解析に用いた軸方向発熱割合と体積発熱量から求めた。節点に与えた体積発熱率を表2.2－1に示す。

2.2.5 解析結果

図2.2－5～10はASFREおよびFINASの軸方向各断面における径方向メッシュ3の位置における周方向温度分布を表わしたものである。解析体系の上端および下端（z=0.0, 255.75）については、境界条件としてASFREの解析結果より得られた温度を境界条件として与えていることから、FINASの温度分布はASFREの温度分布と全く同じとなる。その他の軸方向各断面については、周方向の位置によって多少の違いはあるもののASFREおよびFINASの温度差はFINASの解析結果に対して約0.5%以下の差となっており良く一致している。FINASの解析結果において、解析体系の下端（z=0.0）からz=51.15, 102.3, 153.45のような一つおきの断面では、ASFREの解析結果に近い傾向となる。これは周方向に境界条件を与えた節

点が多く存在するため、ASFREの解析結果と近い傾向となる。逆に境界条件を与えた節点が少ない中間節点のみの面では、ASFREの解析結果との差が若干大きくなる。

燃料ピンIVの各々のセクタに相当する周方向位置における径方向メッシュ３の軸方向温度分布を図２.２－１１、１２に示す。閉塞物に最も囲まれているセクタ２では、閉塞領域上端に相当する位置でASFREおよびFINASの温度差はFINASの温度に対して約0.5%となっており、このセクタの反対側に位置するセクタ５においても、ASFREおよびFINASの解析結果は良く一致している。

ASFREおよびFINASの比較として、周および軸方向温度分布の比較を行った結果、閉塞領域のような周および軸方向に大きな温度差が生じる位置においても両者の差は１%未満であった。このような結果から、改良した燃料ピン伝熱モデルの周および軸方向熱伝導計算による燃料ピン内部温度予測の妥当性を確認した。

3. 圧力損失検証解析

燃料集合体内熱流動解析用詳細ワイヤスペーサモデル－ Distributed Resistance Model （以下 D.R.M.）の圧力損失予測に関する検証を行うため、これまで動燃にて実施された水バンドル試験（対象：169 本ピンバンドルおよび 127 本ピンバンドル燃料集合体）の結果と D.R.M.による解析結果との比較を実施した。

3.1 D.R.M.について

D.R.M.は、燃料集合体内の燃料ピンやワイヤスペーサが冷却材から受ける局所的な drag force をサブチャンネル解析の control volume 単位でモデル化したものである。そのため、ワイヤスペーサが及ぼす熱流動現象に対する影響を詳細に評価することが可能である。

D.R.M.において流体から固体表面上で受ける力$\vec{F}_{DR}$は、燃料ピン$\vec{F}_R$およびワイヤ$\vec{F}_W$が受ける力として（1）式によって表わされる。

$$\vec{F}_{DR}=\vec{F}_R+\vec{F}_W \tag{1}$$

その際、F_RおよびF_Wについては、図3.1－1に示すようにそれぞれピンの軸方向と横方向、ワイヤの接線方向と垂直方向の計4つの成分に分解される。

$$\vec{F}_R=\vec{F}_R^A+\vec{F}_R^L \tag{2}$$

$$\vec{F}_W=\vec{F}_W^T+\vec{F}_W^N \tag{3}$$

各 drag force の流速や幾何形状などとの相関は、それぞれ次に示す式で与えられる。

$$F_R^A=\frac{f_A}{8}A_W\rho V^2\cos(\theta) \tag{4}$$

$$F_R^L=\frac{f_L}{8}A_W\rho|u|u \tag{5}$$

$$F_W^T=\frac{f_A}{8}(A'_W-A_W)\rho V^2\cos(\phi-\theta) \tag{6}$$

$$F_W^N=\frac{1}{2}CD_W\frac{\Delta Z}{\cos(\phi)}\rho|V_N|V_N \tag{7}$$

ここで、A_W、A'_W、ρ、D_W、ΔZは、それぞれ、サブチャンネルまたはギャップの濡れ面積、ワイヤを含んだサブチャンネルやギャップの濡れ面積、流体密度、ワイヤの直径および軸方向メッシュ長さを示す。C は実験により決定されたパラメータで、ϕ、θは、それぞれ、ピンとワイヤのなす角度、合成流 V がピンとなす角度を示す。また、f_Aおよびf_Lについては、それぞれ軸および横方向の friction factor である。D.R.M.開発当初において軸方向 friction factor については、（8）式に示した BLASIUS の式が使われていた。

$$\begin{aligned} f_A &= a/\mathrm{Re}_V && ;\mathrm{Re}_V<600 \\ f_A &= 0.316/\mathrm{Re}_V^{0.25} && ;\mathrm{Re}_V>2000 \\ f_A &= a/600(1-\psi)+0.316/2000^{0.25}\psi && ;600<\mathrm{Re}_V<2000 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、

$$\psi=\frac{\mathrm{Re}_V-600}{1400},\ \mathrm{Re}_V=D\rho|V|/\mu \tag{9}$$

a は、層流に対する Rehme[6]の定数、μは動粘性係数を表わす。

現在のD.R.M.における軸方向friction factorについては、Cheng-Todreas[7]の式の一部（ベアバンドルの軸方向friction factorのみ）が用いられている。Cheng-Todreasの相関式は、数多くの実験から導き出されたものであり、燃料集合体内の流動解析において広く用いられている。

Cheng-Todreasの相関式における中心、周辺およびコーナーサブチャンネルに対するベアバンドル軸方向friction factorは、以下の式で定義される。

（1） 中心サブチャンネル

層流域 ： $$f_{1L} = \frac{1}{\mathrm{Re}_1} \times C_{f1L}\left(\frac{P'_{w1}}{P_{w1}}\right) \quad (10)$$

乱流域 ： $$f_{1T} = \frac{1}{\mathrm{Re}_1^{0.18}} \times C_{f1T}\left(\frac{P'_{w1}}{P_{w1}}\right) \quad (11)$$

ここで、P_{W1}およびP'_{W1}はそれぞれベアバンドルおよびワイヤの存在するバンドルの中心サブチャンネル濡れぶち長さを示す。これらの値は(11a)および(11b)式で表わされる。

$$P_{W1} = P'_{W1} + \pi D_W / (2\cos\theta) \quad (11a)$$

$$P'_{W1} = \pi D / 2 \quad (11b)$$

（2） 周辺サブチャンネル

層流域 ： $$f_{2L} = \frac{C_{f2L}}{\mathrm{Re}_2} \quad (12)$$

乱流域 ： $$f_{2T} = \frac{C_{f2T}}{\mathrm{Re}_2^{0.18}} \quad (13)$$

（３）　コーナーサブチャンネル

層流域　：　$$f_{3L} = \frac{C_{f3L}}{\mathrm{Re}_3} \quad (14)$$

乱流域　：　$$f_{3T} = \frac{C_{f3T}}{\mathrm{Re}_3^{0.18}} \quad (15)$$

（１）～（３）のC'は層流および乱流の摩擦項の定数であり、その定義を表３．１－１に示す。層流域と乱流域の間の遷移領域における摩擦係数および各領域のしきい値となる臨界レイノルズ数を以下に示す。

(a)　臨界レイノルズ数

層流と遷移領域の境界となる臨界レイノルズ数

$$\mathrm{Re}_L = 300 \times 10^{1.7(P/D-1.0)} \quad (16)$$

遷移領域と乱流の境界となる臨界レイノルズ数

$$\mathrm{Re}_T = 10000 \times 10^{0.7(P/D-1.0)} \quad (17)$$

ここで、ＰおよびＤはバンドルのピンピッチおよび燃料ピン径を示す。

(b)　遷移領域における摩擦係数

$$f = f_i = f_{iL}(1-\psi_i)^r + f_{iT}\psi_i^r \quad (18)$$

ここで、

$$\psi_i = \frac{\log \mathrm{Re}_i - \log \mathrm{Re}_L}{\log \mathrm{Re}_T - \log \mathrm{Re}_L} \qquad (\mathrm{Re}_L < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_T) \quad (19)$$
$$\gamma = 1/3$$

３．２　169本ピンバンドル体系の解析

検証解析の対象とした流動試験は、169本ピンバンドル体系の燃料集合体を用いて水流動試験装置により測定したものである。これらの試験データの中から燃料集合体の圧損のうち大きな割合を占める燃料バンドル部の圧損とD.R.M.による解析結果との比較により圧力損失モデルに関する検証を行った。

３．２．１　169本ピンバンドル燃料集合体流動試験

図３．２－１に169本ピンバンドルの炉心燃料集合体を示す。検証解析の対象とした169本ピンバンドル燃料集合体水流動試験における燃料ピンバンドル部の形状は以下の通りである。

燃料ピン本数	：	169本	
ラッパ管体面間距離	：	104.6	[mm]
燃料ピン径	：	6.5	[mm]
ピンピッチ	：	7.87	[mm]
ワイヤスペーサ直径	：	1.32	[mm]
ワイヤ巻ピッチ	：	308	[mm]
最外周ピンからラッパ管までの距離	：	3.73	[mm]

試験はレイノルズ数範囲230～82000の広い範囲で行われている。試験水温は、流体の粘性を変えることによりレイノルズ相似則の成立を確認および測定の信頼性を増加させるために、30℃および75℃において行われている。水温30℃の場合には10～120m^3／hの流量範囲を5m^3／h間隔で測定し、75℃の場合については30～130m^3／hの流量範囲を試験している。

軸方向圧力損失測定タップは、図３．２－２に示した取り付け位置となっている。実験では各圧力タップの組み合わせにより以下の圧損を測定している。

①－⑨　　全体圧力損失

①－②　エントランス・ノズル圧力損失
②－③　下部遮蔽体圧力損失
③－④　組枠および燃料バンドル入口（下部端栓まで）圧力損失
④－⑤　燃料バンドル上流側圧力損失（測定区間長さ 609mm、流入部助走区間）
⑤－⑥　燃料バンドル圧力損失（測定区間長さ 1540mm）
⑥－⑦　燃料バンドル下流側圧力損失（測定区間長さ 601mm、流入部助走区間）
⑦－⑧　燃料バンドル出口（上部端栓部）
⑧－⑨　上部遮蔽体、ハンドリング・ヘッドおよび集合体出口圧力損失

今回の検証解析では燃料バンドル部の圧力損失について比較することから⑤－⑥の試験データを用いた。

3.2.2　解析方法

解析体系の軸方向長さについては、測定区間 1540mm（5 巻ピッチに相当）について上下端に対してそれぞれ 1 巻ピッチ（308mm）の助走区間を加えた 2156mm とした。軸方向メッシュ分割については D.R.M の制限からワイヤ巻ピッチの 1/12 である 25.667mm を 1 メッシュの幅としてトータル 84 メッシュとした。図 3.2－3 はサブチャンネル分割を示したものである。燃料ピン本数は 169 本でサブチャンネル数は 342 である。

試験においては入口の流量を与えていたことから、解析においても同様に入口流量を固定し出口圧力一定の境界条件とした。解析を実施する流量範囲については、D.R.M.の乱流域に相当する Re＞14,000 とした。解析ケース一覧を表 3.2－1 に示す。解析は流体温度約 75℃について 7 ケース、流体温度約 30℃について 3 ケースの計 10 ケースについて実施した。

通常、ASFRE による解析ではナトリウムを流体としているが、解析の対象となった流動試験は流体として水を用いていることから、解析では水物性計算ルーチン（WAPRO）を用いた。

３．２．３　解析結果

ケース１～１０までの燃料バンドル部差圧ΔＰについて図３．２－４に試験値および解析結果の比較を示す。流体温度７５℃のケース１～７では、レイノルズ数の大きいケース１（Re=82400）からケース３（Re=60350）において試験値と解析結果が良く一致していることから、定格運転時においてD.R.M.を用いた評価は妥当な結果が得られるものと考えられる。その他のケースについてはレイノルズ数が小さくなるにつれて試験値と解析結果との差は大きくなり、ケース７（Re=18150）では試験値と解析結果の差は約40%となる。また、流体温度３０℃のケース８～１０は７５℃の傾向と同様にレイノルズ数が小さくなるにつれて試験値と解析結果との差は徐々に大きくなるが、解析した流量条件では１０％以内の誤差となった。

このように試験値および解析結果の傾向の異なる要因として、軸方向 friction factor を求める相関式の誤差が考えられる。参考文献[7]によれば乱流域において、軸方向 friction factor の式を用いた場合、バンドル部の平均摩擦係数の精度は±14%以内と記されていることから、その誤差の影響が軸方向差圧に現われた可能性がある。また、比較した試験値の傾向がその試験特有のものであることも考えられる。

ケース７の解析結果と試験値との差は約40%となったが、このような傾向となることがD.R.M.特有の問題であるかどうかを確認するため、Cheng-Todreas モデルによる解析を行った。Cheng-Todreas モデルは、ベアバンドル friction factor についてはD.R.M.と同じ式を使用しているが、ワイヤによる drag loss についてはD.R.M.ではコントロールボリューム単位で考慮しているのに対し、Cheng-Todreas モデルでは全て軸方向に平均化されている。そのため、局所的な drag force を考慮することはできないが、マクロ的な流動特性は十分評価できる。Cheng-Todreas モデルによる解析はケース７および１０について行った。両ケースの解析結果を表３．２－２に示す。Cheng-Todreas モデルによる解析結果は、流体温度が30℃のとき試験結果に比べ差圧は低くなるが、その誤差はD.R.M.の解析結果よりも試験値に近い結果となっている。一方、流体温度が75℃のときには試験結果に比べて差圧は大

きくなり、D.R.M.の傾向と同様に試験値と異なった結果となる。これらの結果より、レイノルズ数が約 18,000（流体温度 75℃）の条件では、Cheng-Todreas モデルを用いた解析結果は、D.R.M.を用いた解析結果とほぼ同じ傾向となり、試験結果との差は約 40%となる。

ケース７および１０における試験値および解析結果の比較では、レイノルズ数がほぼ同じでありながら、流体の温度が異なることで両ケースの試験値と解析結果の差は大きく違っている。このような傾向の違いが生じる要因として、物性値の不整合が考えられることから、ASFRE において用いた物性値（密度および粘性率）と伝熱工学資料における水の物性値を比較した。しかし、その差は約１％未満であり両者は良く一致しており、水物性値ルーチン（WAPRO）に問題はない。

3.3 127本ピンバンドル体系の解析

127本ピンバンドル燃料集合体を用いた流動試験から得られた軸方向差圧とD.R.M.の解析結果との比較を行った。試験では軸方向差圧の他に周方向圧力分布を測定していることから、周方向圧力分布についても試験および解析結果との比較を行った。

3.3.1 127本ピンバンドル燃料集合体流動試験

127本ピンバンドル燃料集合体を用いた流動試験における燃料ピンバンドル部の形状は以下の通りである。

ラッパ管体面間距離	:	74.7	mm
燃料ピン本数	:	127	本
燃料ピン径	:	5.5	mm
ピンピッチ	:	6.47	mm
ﾜｲﾔｰｽﾍﾟｰｻ直径	:	0.9	mm
ﾜｲﾔｰ巻ピッチ	:	293	mm
最外周ピンからラッパ管までの距離	:	3.73	mm

試験では燃料集合体における軸方向差圧が測定されている。燃料バンドル部の軸方向圧力損失を測定するための圧力タップは、図3.3－1に示したように軸方向3ヵ所であった。これらの測定位置は①－③を燃料バンドル全体差圧、①－②を燃料バンドル下側差圧、②－③を燃料バンドル上側差圧として測定している。その際、燃料バンドル部においては約7～65m^3／hの流量範囲で測定が行われている。また、この試験ではワイヤ巻き始め位置から230mm上側の位置において周方向圧力分布を測定するため、図3.3－2に示した位置に対して圧力タップが取り付けられている。周方向圧力分布の測定されたケースは流量をそれぞれ23, 33, 43 m^3/h とした3ケースであった。このとき、流体温度については各ケースとも75℃である。

3.3.2 解析方法

試験において軸方向差圧の測定区間長さは4巻ピッチに相当する1172mmであったことから、助走区間として2巻ピッチを加え軸方向長さ6巻ピッチ分に相当する1758mmを解析領域とした。軸方向メッシュ分割は、解析モデルの制限によりワイヤ巻ピッチの1/12である24.417mmを1メッシュの幅として72メッシュとした。解析対象となった試験では周方向圧力分布を測定している。このため、試験から得られた周方向圧力分布と解析結果を比較するにはワイヤの存在する位置を両者とも同じにする必要がある。試験体ではワイヤ巻き始め位置から230mm下流側の位置において図3.3－3に示したワイヤの配置となっていた。ASFREコードの解析オプションでは、ワイヤ巻き始め位置を任意に変えることができることから、解析では周方向圧力分布測定位置において、同様のワイヤ位置となるよう巻き始め位置を調節した。

試験では流量を与えていたことから、解析においては入口流量、出口圧力境界条件とした。表3.3－1に解析ケース一覧を示す。解析は軸方向差圧を比較するために5ケース(周方向圧力分布について測定している3ケース＋軸方向差圧測定条件の最大および最小流量となる2ケース）について実施した。

3.3.3 解析結果

試験において軸方向差圧を測定した区間と同じ位置における解析結果の差圧について比較したものを表3.3－2に示す。軸方向差圧を測定した試験範囲の最大流量である18.6kg/secのとき、試験値と解析結果との差は約2％となり良く一致している。最小値（5.1kg/sec）においても試験値と解析結果の差は約10%以内となっている。このような結果より、試験の流量範囲（約5.0～18.0kg/sec）においてD.R.M.を用いたASFREの解析結果と試験値は約10%以内の差で一致する結果となった。

次に、周方向圧力分布の比較について示す。試験における周方向圧力分布測定の整理方法は以下の通りである。

$$平均値=\frac{\Delta P_{AB}+\Delta P_{AC}+\Delta P_{AD}+\Delta P_{AE}+\Delta P_{AF}+\Delta P_{AA}}{6}$$

試験では圧力タップAを基準とした差圧ΔP_{AB}、ΔP_{AC}、ΔP_{AD}、ΔP_{AE}、ΔP_{AF}を測定し、その平均値を基準として各圧力タップの差圧についてまとめられている。解析結果についても各圧力タップ取り付け位置に相当するサブチャンネルの値を同様の方法で整理した。試験データおよびASFRE解析結果の周方向圧力分布について各流量毎に比較したものを図3.3－4～6に示す。周方向圧力分布を測定したケースにおいて流量が最大（11.6kg/sec）である試験の結果では、B～C間で周方向圧力分布が最大となっているが、解析結果ではC～Dの間となっている。また、周方向圧力分布における解析結果の最大値は試験結果の値に対して約1／2であった。これらの傾向については流量を小さくした他の2ケースにおいても同様となっている。

周方向圧力分布の比較において、ASFREによる解析結果と試験結果との傾向が異なることから、ASFREによる解析結果と解析手法の異なる燃料集合体内解析コードSPIRAL[8]（有限要素法）による解析結果との比較を行い、その傾向の違いを確認することとした。SPIRALはASFREにおけるサブチャンネルについて細かくメッシュ分割することが可能であり、ワイヤ近傍や燃料ピンとラッパ管が最も接近する位置等における複雑な流れについて詳細に評価することができる。SPIRALとの比較においては計算時間を考慮して、図3.3－7に示した19本ピンバンドル体系について解析を実施した。19本ピンバンドル体系の形状を表3.3－3に示す。境界条件については両者とも出入口圧力境界条件を用いた。解析において用いたその他の解析条件を表3.3－4に示す。軸方向長さについては図3.3－8に示したようにSPIRALおよびASFREともにワイヤ1巻きピッチに相当する307mmとした。その際、SPIRALおよびASFREのワイヤ巻き位置は図3.3－9に示したように同じ配置としている。図3.3－10は集合体水平断面におけるSPIRALおよびASFREのメッシュ分割を示したものである。ASFREではサブチャンネルを一つの

メッシュとするが、SPIRALではサブチャンネルを細かくメッシュ分割して解析を実施した。

図3.3－11にSPIRALおよびASFREの軸方向中心位置における圧力分布を示す。SPIRALではワイヤがラッパ管に最も接近する位置より約60°ワイヤ巻方向手前となるラッパ管のA面で最大値となる。これは、この位置での軸方向上側（下流側）においてワイヤが存在するため、流路面積の減少に伴う圧損の増加により相対的に圧力が大きくなると考えられる。逆にワイヤがラッパ管に最も近づいた位置よりワイヤ巻方向に60°進んだC面では、流路にワイヤが存在せず、下流側で流れを抑えることが無いことから、圧力は最小値となっている。このように物理的に妥当と思われるSPIRALの解析結果に対して、ASFREの解析結果の傾向も良く一致している。

ASFREの解析結果における周方向圧力分布とSPIRALによる解析結果の周方向圧力分布を比較した結果、同様の傾向となることが確認できた。しかし、試験結果と解析結果との間には違い（周方向圧力分布における最大値およびその最大値となる位置）が生じる。その要因として考えられるのは、

①燃料バンドルの偏り

②ワイヤ巻ピッチ誤差

③測定位置におけるワイヤの影響

が挙げられる。

①については燃料バンドル全体がラッパ管のどちらかに偏り、図面上の位置と異なっていることを想定したものだが、燃料バンドルの最外周ピンとラッパ管の距離が均一でない場合は、燃料集合体内の流況に大きな影響を与える可能性があると考えられる。そこで、燃料ピンバンドルの偏った場合の解析を実施した。燃料バンドルの偏り方については図3.3－12に示したように、ラッパ管の面およびラッパ

管のコーナー部に対する偏りの２ケースについて解析を行った。ラッパ管コーナー部に偏ったケースについては燃料ピン間のギャップを与えていない。また、解析における偏りの模擬方法としては、偏りによって生じる流路断面積の増減についてそれぞれのサブチャンネルの水力等価直径を変えることで対応した。図３．３－１３に面への偏りを考慮したケースの周方向圧力分布を示す。面への偏りでは、燃料ピン間のギャップをそのままとして燃料バンドルを平行に移動した条件ではあるが、解析結果は試験値の最大値に近づく傾向となった。ラッパ管コーナー部への偏りを考慮した解析結果である図３．３－１４では、最大値はほぼ試験値と同じとなる。このケースでは、偏るコーナーの位置を変えて解析を行ったが、最大値となる位置に変化は見られなかった。また、偏る位置を固定してワイヤの位置を変えて解析を行ったところ、最大値となる位置が変わることから、周方向圧力分布については燃料バンドルの偏りによる影響よりもワイヤによる影響が支配的であると思われる。しかし、燃料ピンバンドルの偏りを考慮することで、周方向圧力分布における最大値については解析結果と試験結果はほぼ同じとなった。

②については試験体の製作時において一巻ピッチあたりのワイヤ巻き誤差が約20mm 以内となっている。このことから、一巻ピッチに対し約 20mm の誤差が生じたとすると一巻ピッチの長さに対して約７％の誤差となる。ワイヤの正規の位置に対して７％の誤差が生じるということは、周方向の位置において約 25°の違いが生じることとなる。

③は試験において測定位置（圧力タップ取り付け位置）の近傍にワイヤが存在する場合、測定値は流体がワイヤから受ける力の影響を含んだ値となることから、解析結果との間に違いが生じる可能性がある。ASFRE ではサブチャンネル内の代表点の値をサブチャンネルの値として計算することから、ワイヤ近傍の詳細な値を評価することはできない。 SPIRAL ではサブチャンネルに相当する部分を詳細にメッシュ分割を行えるため、ワイヤ近傍の圧力変動を評価することが可能である。そこで、SPIRAL の周方向圧力分布が ASFRE の傾向と同様になっていたことから、

SPIRALの解析結果の中からワイヤ近傍の影響を調査した。調査の対象としたSPIRALの解析結果は、周方向圧力分布についてASFREとの比較を行った解析ケースと同一のものである。SPIRALでは各燃料ピンの周辺毎にメッシュ分割し、周方向（I）の分割数は24、径方向（J）の分割数は3、軸方向（K）の分割数は25である。SPIRALの解析体系の各断面におけるワイヤの位置を図３．３－１５に示す。比較位置がワイヤの下となるのはK=7、ワイヤの上に位置するのがK=9の断面であることから、ワイヤの上下の位置における軸方向差圧をK=7および9の断面における比較位置の値から求めた。その結果、ワイヤの上下の位置における軸方向差圧はワイヤ１巻きピッチ分の軸方向差圧に対して約10%であった。周方向圧力分布における最大値と最小値の差はワイヤ１巻きピッチ分の軸方向差圧に対して約2%であることから、測定点とワイヤの相対位置が幾分ずれることによって測定された周方向圧力分布のピーク位置が変わることは有り得る。また、検証に用いた実験の流量は、SPIRALの解析条件の流量よりも多いことから、流量の増加に伴い測定位置におけるワイヤの影響がさらに大きくなると考えられる。

①～③を検討したことにより、燃料バンドル部においてこれらの要因が周方向圧力分布について及ぼす影響を確認した。しかし、周方向圧力分布の最大値となる位置については、解析の対象とした試験の特有の傾向であることが考えられる。そこで、他の試験における周方向圧力分布の傾向と比較するために、表３．３－５および表３．３－６に示した形状条件および解析条件を用いてASFREによる解析を実施した。比較した試験の周方向圧力分布はワイヤ位置が210°となる辺に面する圧力タップの値を基準として、各圧力タップの値との差でまとめられていることから、ASFREによる解析結果も同様の方法で整理した。両者の比較を図３．３－１６に示す。他の試験の周方向圧力分布における最大値および最小値となる位置はASFREの解析結果と非常に良く一致する。周方向の変動については最小値となる位置において試験との差が最大となるが、その違いは試験の周方向圧力分布の最大値および最小値の差に対して約２割であったことから、前述した試験における燃料バンドル

の偏りや測定位置近傍におけるワイヤの影響等の要因を考慮すれば妥当な結果と考えられる。

このような結果から、検証解析の対象とした常陽模擬燃料集合体を用いた流動試験の比較ではASFREの解析結果と試験の周方向圧力分布に違いが生じたが、SPIRALおよび他の試験との比較ではASFREの解析結果は非常に良く一致していることから、ASFREによる周方向圧力分布予測が妥当であることを確認した。

4. まとめ

高速炉燃料集合体内熱流動解析コードASFRE-IIIの整備の一環として、改良した燃料ピン伝熱モデルおよびワイヤースペーサモデルによる圧力損失に関する検証を行った。

改良した燃料ピン伝熱モデルの計算精度を把握するための比較対象となる実験データがないことから、燃料ピン伝熱モデルおよび構造解析コードFINASによる解析を実施し、解析結果の比較を行った。その結果、燃料ピン伝熱モデルとFINASの温度分布はほぼ一致し、温度勾配の最も大きくなる閉塞領域上端付近においても両コードの温度差はFINASの温度に対して1%未満であった。このことから、改良した燃料ピン伝熱モデルにおける熱伝導計算が妥当であることを確認した。

ワイヤスペーサモデルの圧力損失に関する検証として、動燃において実施された169本および127本ピンバンドル燃料集合体流動試験の結果と解析結果の比較を行った。軸方向差圧を比較したところ、乱流域の定格流量付近では、169本ピンバンドル体系において約4%、127本ピンバンドル体系では10%以下の差となり、定格流領域においてASFREによる圧力予測が妥当であることを確認できた。しかしながら、169本ピンバンドル体系において流量が最も小さいケースでは、実験値との差が約40%、127本ピンバンドル体系では10%以下であり、解析対象の違いによって流量の減少に伴い実験値との差の増加の仕方に大きな差が発生した。この原因については、局所的な現象を含めより詳細な分析が今後の課題として残る。周方向圧力分布については、比較対象とした試験結果と解析結果の間に最大値となる位置に違いが生じたが、原因を調べるため実施したSPIRALコードによる解析結果との比較および他の試験結果との比較では、ASFREによる解析結果はこれらの周方向圧力分布と良く一致することから、D.R.M.による周方向圧力分布予測が妥当であることを確認した。周方向圧力分布の差の原因については、燃料バンドルの偏り、ワイヤ巻き誤差および測定位置におけるワイヤの影響などが考えられることから、燃料集合体における周方向圧力分布予測では実際の形状に即した燃料バンドルの変形を考慮することが重要となる。今後、変形した燃料バンドルに対しても精度の良い予測評価が可能となるよう、ASFREコードのモデル開発を継続して行う予定である。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、株式会社エヌデーデーの橋本昭彦氏にはワイヤスペーサモデルに関する多くのアドバイスを、カストマシステム株式会社の木村尚史氏にはSPIRALの計算作業について多大なる御協力を頂いた。また、VE室長 佐藤和二郎氏および熱流体室長代理 山口彰氏より流動試験および解析方法に関する有意義なコメントを頂いた。ここに併せて謝意を表わす。

6. 参考文献

[1] H.Ninokata et al., "ASFRE-III: A Computer Program for Triangular Rod Array Thermohydraulic Analysis of Fast Breeder Reactors," PNC N941 85-106, July 1985.

[2] 成田 均、大島 宏之、「サブチャンネル解析コード ASFRE-III の整備－燃料ピン熱伝導モデルの改良－」 PNC TN9410 96-116 1996 年 4 月

[3] 大島 宏之、「サブチャンネル解析コード ASFRE-III の整備－ワイヤースペーサの改良および乱流モデル等の組み込み－」 PNC TN9410 95-194 1995 年 7 月

[4] 岩田 耕司、「汎用非線形構造解析システム FINAS」使用説明書 PNC TN9520 92-006 1993 年 3 月

[5] 大島 宏之、「サブチャンネル解析コード ASFRE-III の整備・改良－ポーラス状閉塞モデルの高度化－」 PNC TN9410 96-128 1996 年 4 月

[6] K. Rehme, "Simple Method of Prediction Friction Factors of Turbulent Flow in Non-Circular Channels," Int. J. of Heat and Mass Transfer, 16, pp.933 (1973).

[7] 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(1986).

[8] T. Shimizu, H. Ninokata and H. Shishido, "Distributed Parameter Analysis for The Prediction of The Fine Structure of Flow and Temperature Fields in Wire-Wrapped Fuel Pin Bundle Geometries," Nucl. Eng. and Design, 120, pp.369(1990).

表2.1－1　集合体形状データ

燃料ピン本数	7本
被覆管肉厚	0.47 mm
燃料ペレット外径	5.4 mm
燃料ピン径	6.5 mm
ピンピッチ	7.87 mm
中心空孔直径	1.2 mm
上部ブランケット部長さ	300.0 mm
燃料部長さ	930.0 mm
下部ブランケット部長さ	398.0 mm
ワイヤ径	1.32 mm
ワイヤ巻ピッチ	307.0 mm
最外周ピンからラッパ管までの距離	4.65 mm

表2.1－2　軸方向メッシュ分割

軸方向ブロック番号	軸方向ブロック長さ[mm]	メッシュ番号	メッシュ長さ[mm]	領域範囲[mm]
1	14.77	1	14.77	0.0～14.77
2	22.15	2	22.15	14.77～36.92
3	398.08	3～18	24.88	36.92～435.00
4	17.44	19	17.44	435.00～452.44
5	895.30	20～54	25.58	452.44～1347.74
6	17.44	55	17.44	1347.74～1365.18
7	300.00	56～67	25.00	1365.18～1665.18
8	25.00	68	25.00	1665.18～1690.18

表2.1－3　閉塞部設定条件

圧損相関式	Ergunの式[5]	
熱伝達相関式	等価熱伝導モデル[5]	
閉塞物粒子径	0.5	mm
閉塞物熱伝導率	20.0	W/mK
閉塞部内ポロシティー	0.4	
閉塞物厚み	76.7	mm
閉塞サブチャンネル番号	2、5、6、7	

表2.1－4　解析条件

入口境界条件	流量（0.73kg/sec）	
出口境界条件	圧力（3.0×10^5Pa）	
冷却材入口温度	395.73 ℃	
総発熱量	217.3	kW
燃料ペレット－被覆管（ｷﾞｬｯﾌﾟｺﾝﾀﾞｸﾀﾝｽ）	4054.28	W/m^2K

表2.2－1　体積発熱率

軸方向断面位置 (Z=)	軸方向発熱割合 (燃料ピン全体の平均値に対して規格化)	体積発熱率[W/m^3]
0.0	1.156	1.7426×10^9
25.575	1.173	1.7689×10^9
51.15	1.187	1.7894×10^9
76.725	1.197	1.8041×10^9
102.3	1.202	1.8130×10^9
127.875	1.204	1.8159×10^9
153.45	1.202	1.8130×10^9
179.025	1.197	1.8041×10^9
204.6	1.187	1.7894×10^9
230.175	1.173	1.7689×10^9
255.75	1.156	1.7426×10^9

表3.1－1　摩擦係数定数項

$C'_{fi} = a + b_1(P/D-1) + b_2(P/D-1)^2$ ただし、C'_{f2}, C'_{f3} に対してはP/Dの代わりにW/Dを使用する W：D+（ピンとラッパー管間のギャップ）						
C'_{fi}	$1.0 \le P/D < 1.1$			$1.0 \le P/D \le 1.5$		
	a	b_1	b_2	a	b_1	b_2
C'_{f1L}	26.00	888.2	-3334.0	62.97	216.9	-190.2
C'_{f2L}	26.18	554.5	-1480.0	44.40	256.7	-267.6
C'_{f3L}	26.98	1636.0	-10050.0	87.26	38.59	-55.12
C'_{f1T}	0.09378	1.398	-8.664	0.1458	3.632×10^{-2}	-3.333×10^{-2}
C'_{f2T}	0.09377	0.8732	-3.341	0.1430	4.199×10^{-2}	-4.428×10^{-2}
C'_{f3T}	0.1004	1.625	-11.85	0.1499	6.706×10^{-3}	-9.567×10^{-3}

表3.2－1　169本ピンバンドル体系解析ケース一覧

case No.	Re	体積流量 [m³/h]	平均流速 [m/sec]	流体温度[℃]	密度[kg/m³]	質量流量 [kg/sec]
1	82400	127.0	9.72	77.4	973.2	34.3
2	70100	108.4	8.29	77.1	973.3	29.3
3	60350	93.4	7.15	77.0	973.4	25.3
4	51170	79.1	6.05	77.2	973.3	21.4
5	41260	64.4	4.93	76.4	973.8	17.4
6	31120	49.1	3.76	75.5	974.3	13.3
7	18150	28.4	2.17	76.3	973.8	7.7
8	33140	106.5	8.42	30.4	995.6	29.5
9	22820	73.5	5.62	30.3	995.6	20.3
10	18260	58.8	4.50	30.4	995.6	16.3

表3.2－2　D.R.M.およびCheng-Todreasモデルの比較

Re	流体温度[℃]	試験結果[Pa]	解析結果D.R.M.[Pa]	解析結果Cheng[Pa]
18150	76.3	3.07×10^4	4.43×10^4	4.15×10^4
18260	30.4	1.343×10^5	1.460×10^5	1.333×10^5

表３.３－１　「常陽」解析ケース一覧

case	流体温度[℃]	密度[kg/m³]	流量[m³/h]	流量[kg/sec]	平均流速[m/sec]	Re数
1	75	974.63	42.9	11.614	6.977	43760
2	75	974.63	33.1	8.961	5.383	33764
3	75	974.63	23.1	6.254	3.757	23563
4	75	974.63	68.8	18.613	11.181	70129
5	75	974.63	18.8	5.076	3.049	19126

表３.３－２　各ケースの軸方向差圧（「常陽」）

case	Re	試験値[Pa]	解析値[Pa]	誤差[%]
1	43760	2.517×10^5	2.543×10^5	3.7
2	33764	1.549×10^5	1.628×10^5	5.0
3	23563	8.238×10^4	8.992×10^4	9.2
4	70129	5.737×10^4	5.854×10^4	2.0
5	19126	5.884×10^4	6.504×10^4	10.0

表３.３－３　１９本ピンバンドル体系形状

燃料ピン本数	19　本
燃料ピン径	6.5　mm
ピンピッチ	7.87　mm
ワイヤ径	1.32　mm
ワイヤ巻きピッチ	307　mm

表３.３－４　解析条件

動粘性係数	2.0×10^{-4}　m^2/sec
入口圧力	2.94×10^{5}　Pa
出口圧力	0.0　Pa
密度	1000　kg/m^3

表3.3－5　他の試験における集合体形状

燃料ピン本数	169　本
燃料ピン径	6.5　mm
ピンピッチ	7.9　mm
ワイヤ径	1.3　mm
ワイヤ巻きピッチ	400　mm

表3.3－6　解析条件

入口境界条件	流量（32.7kg/sec）
出口境界条件	圧力（3.0×10^5Pa）
流体温度	75　℃
発熱	なし

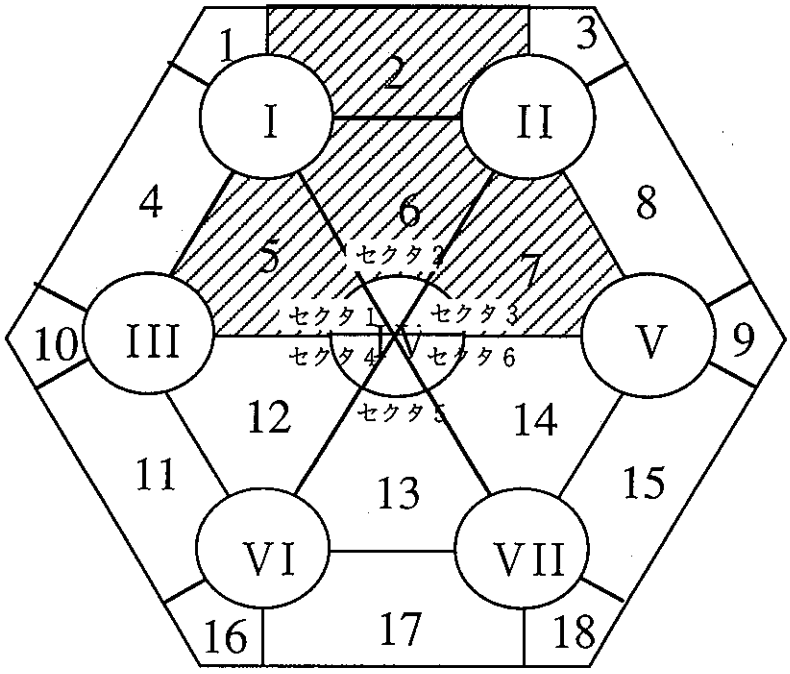


図2.1－1　燃料集合体7本ピンバンドル体系

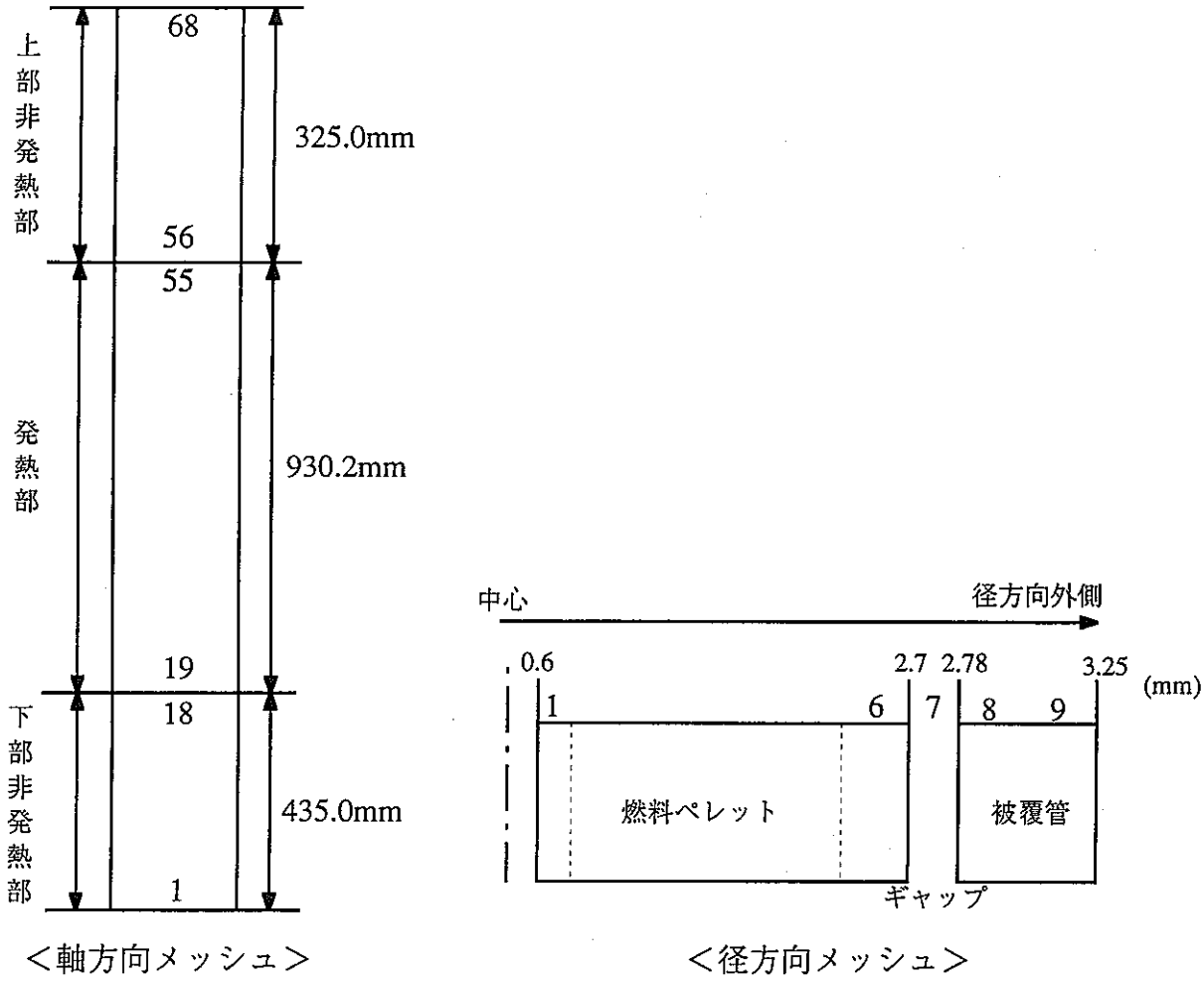


図2.1－2　径および軸方向メッシュ分割

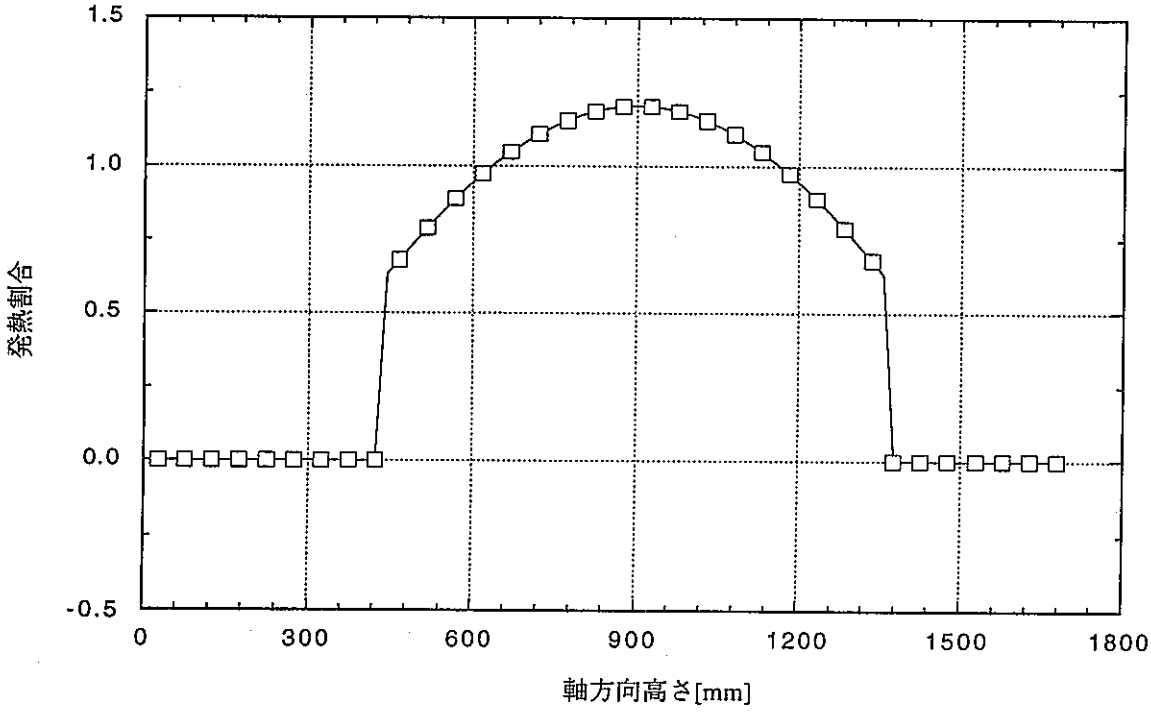


図2.1－3　軸方向発熱割合

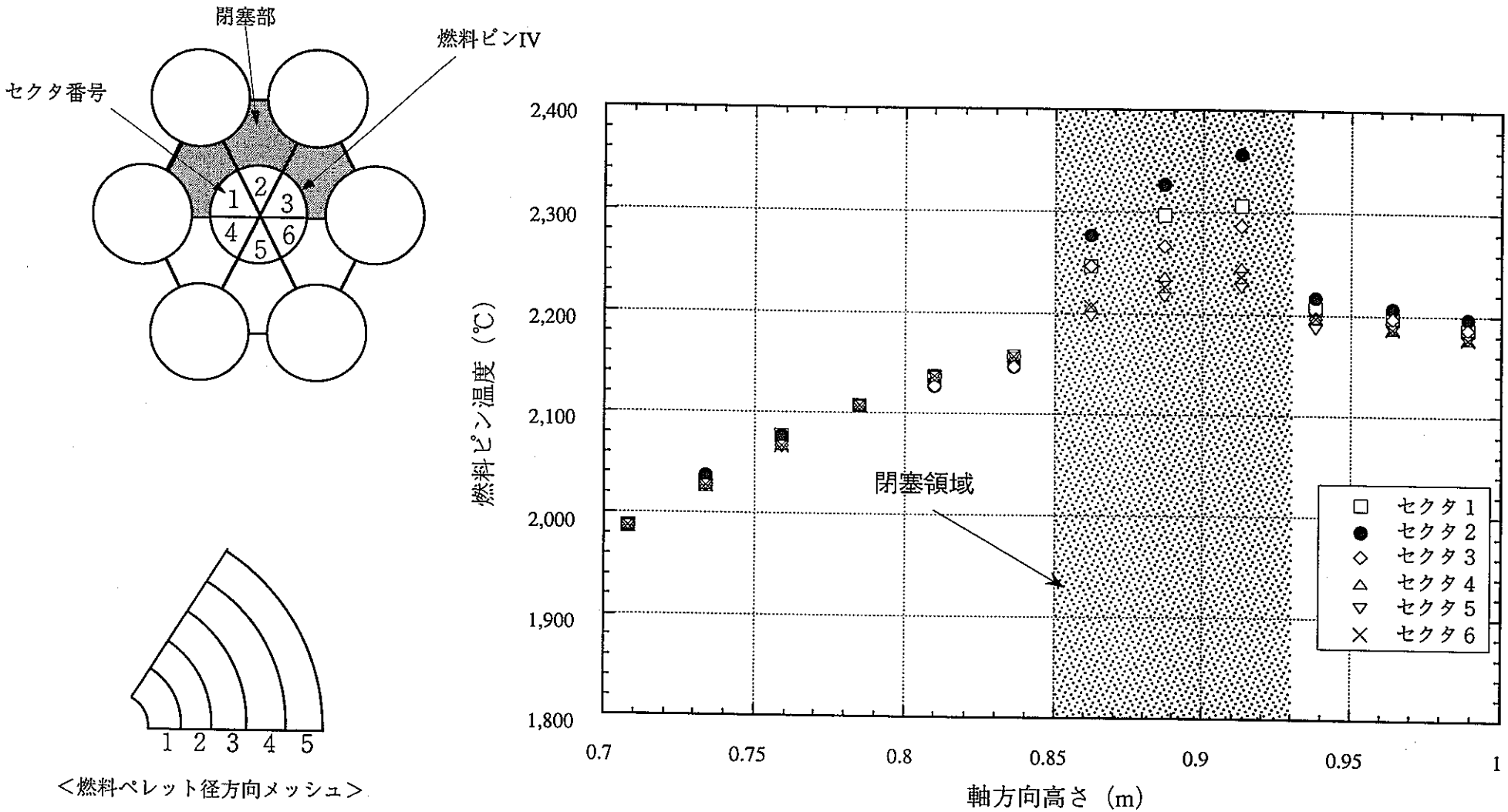


図２．１－４　燃料ピンIVにおける各セクタ毎の軸方向温度分布（径方向メッシュ２）

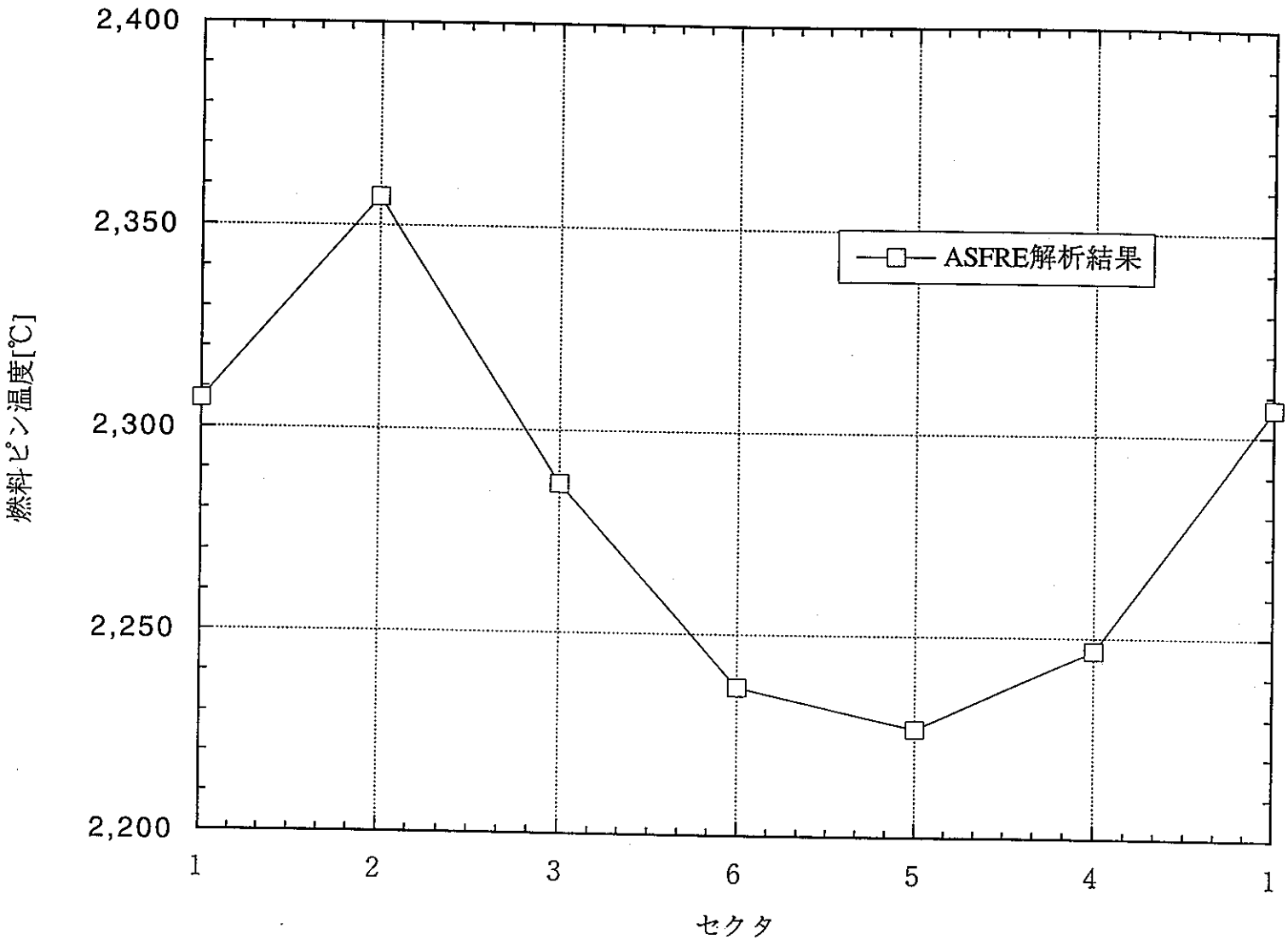


図2.1－5　ASFRE閉塞領域上端における周方向温度分布

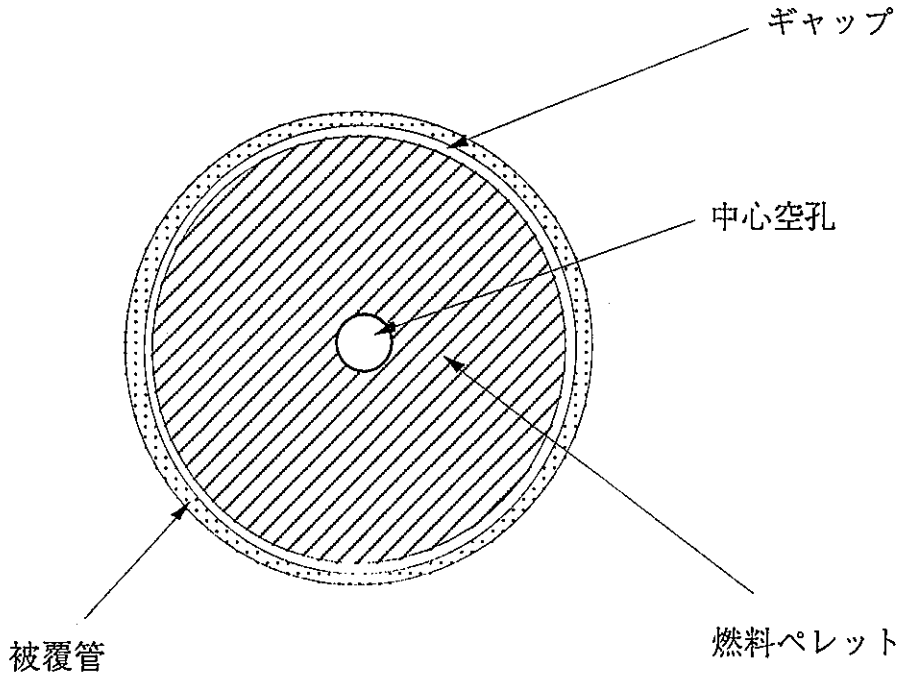


図2.2－1　燃料ピン概要

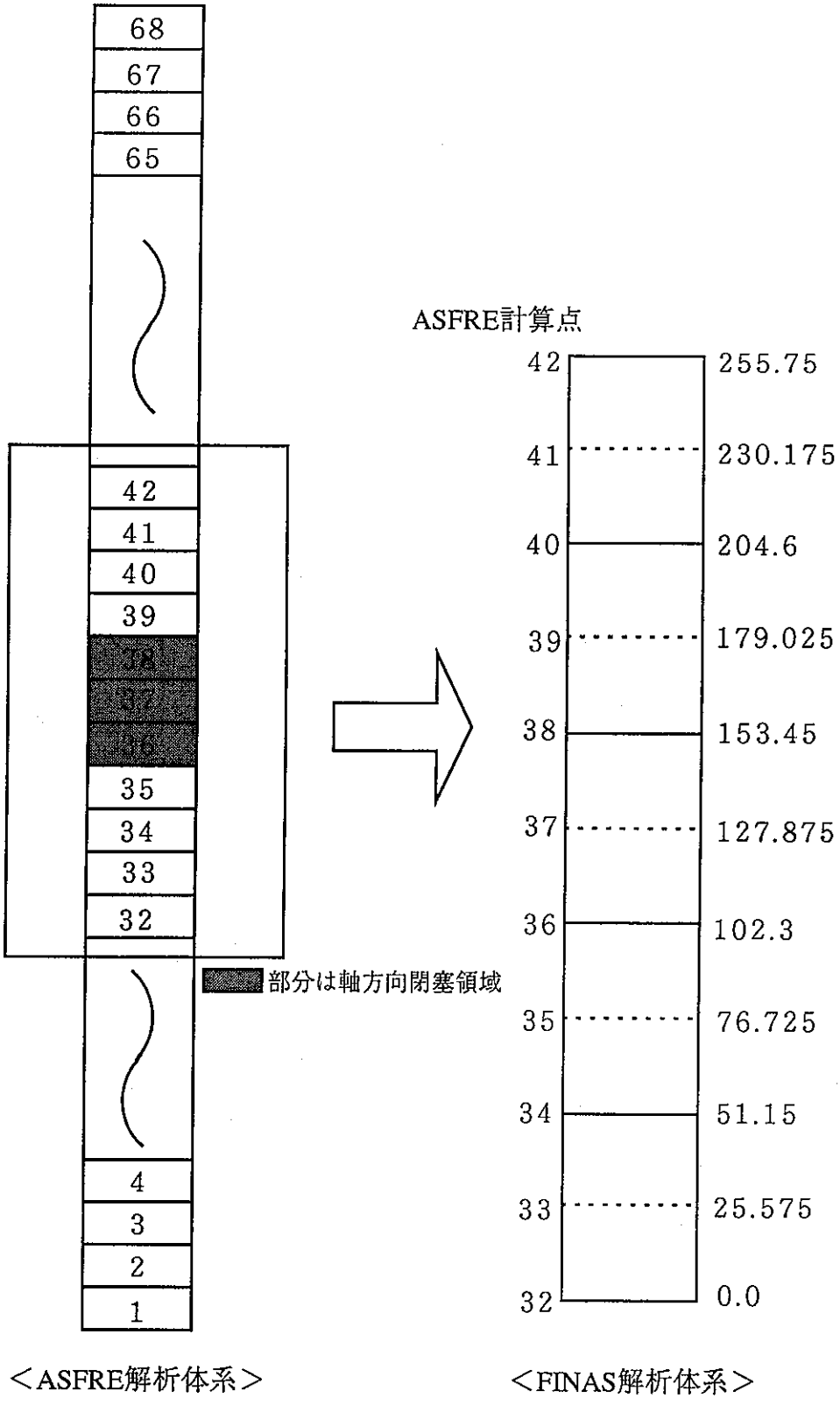


図２.２－２　ASFREおよびFINAS軸方向メッシュ分割

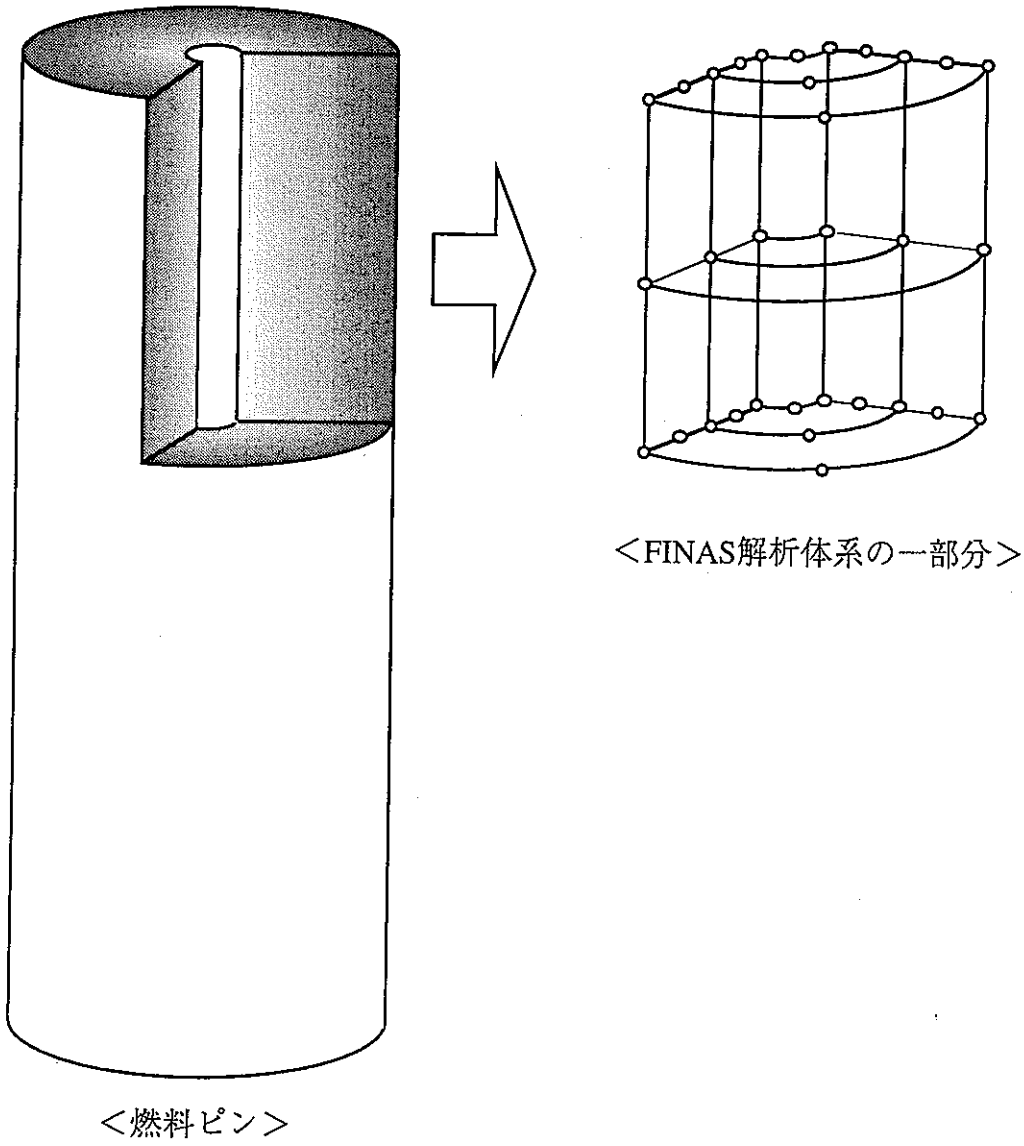


図2.2－3　FINASの解析体系を構成する要素

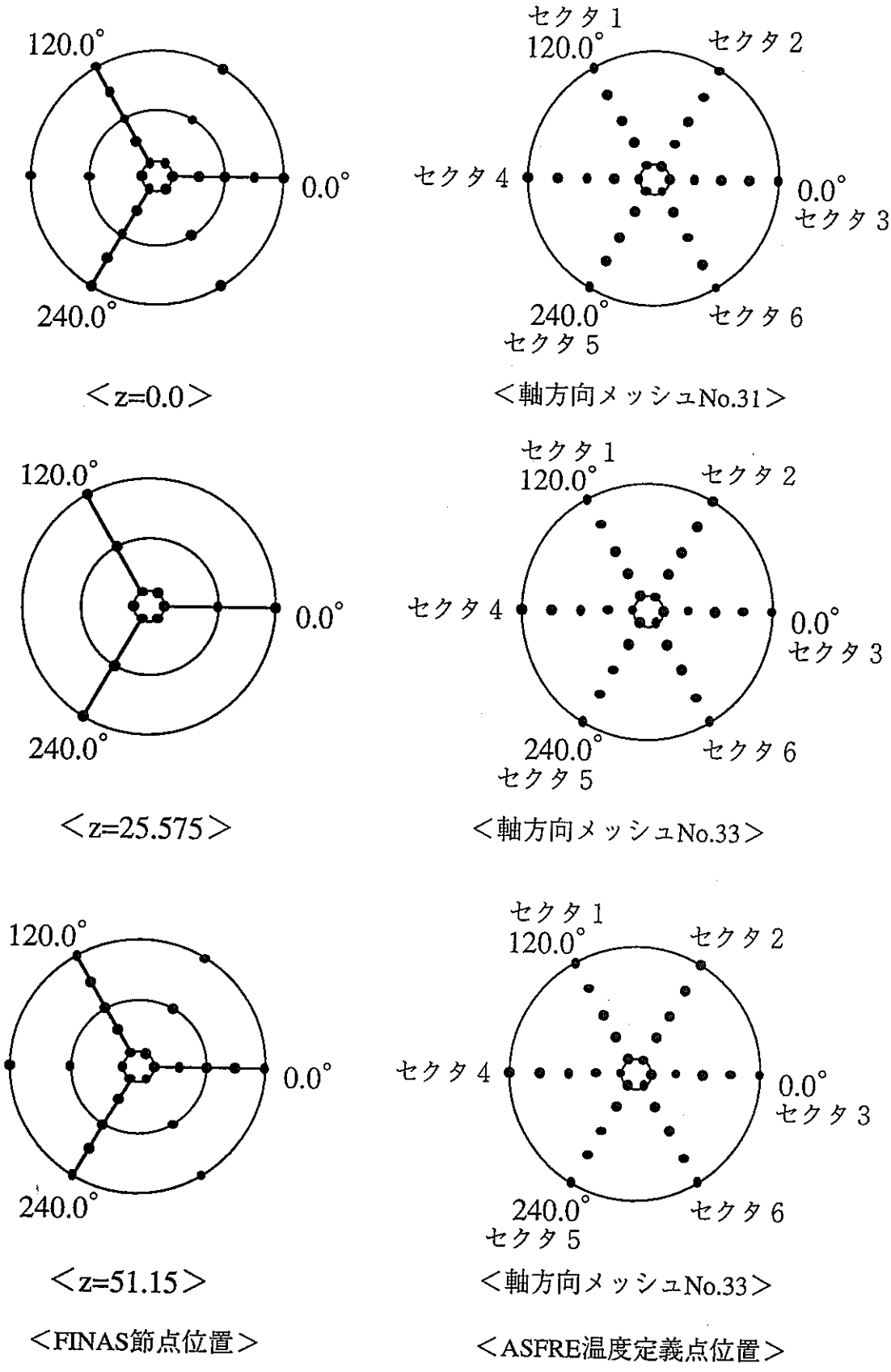
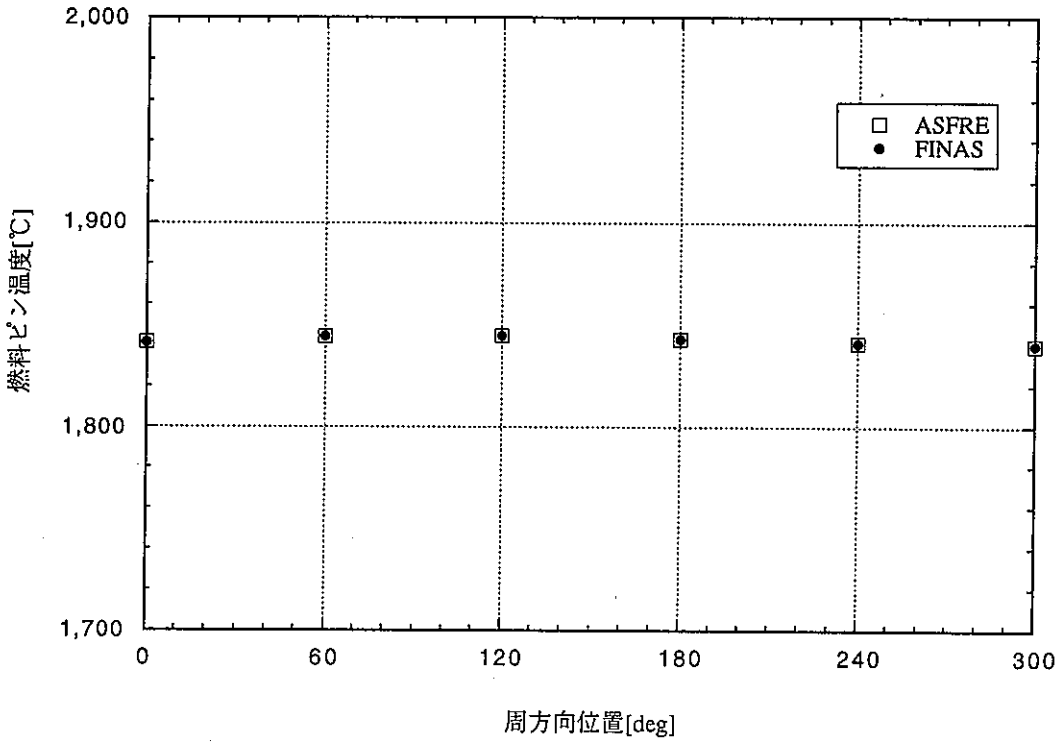
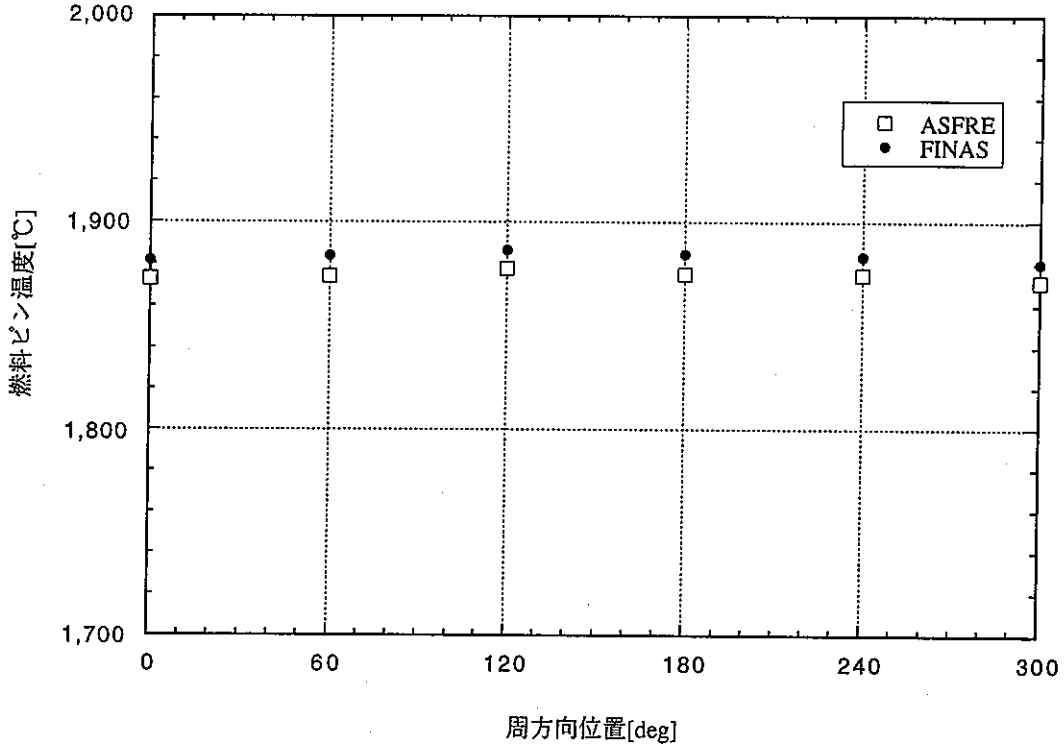


図2.2－4　温度定義点の比較

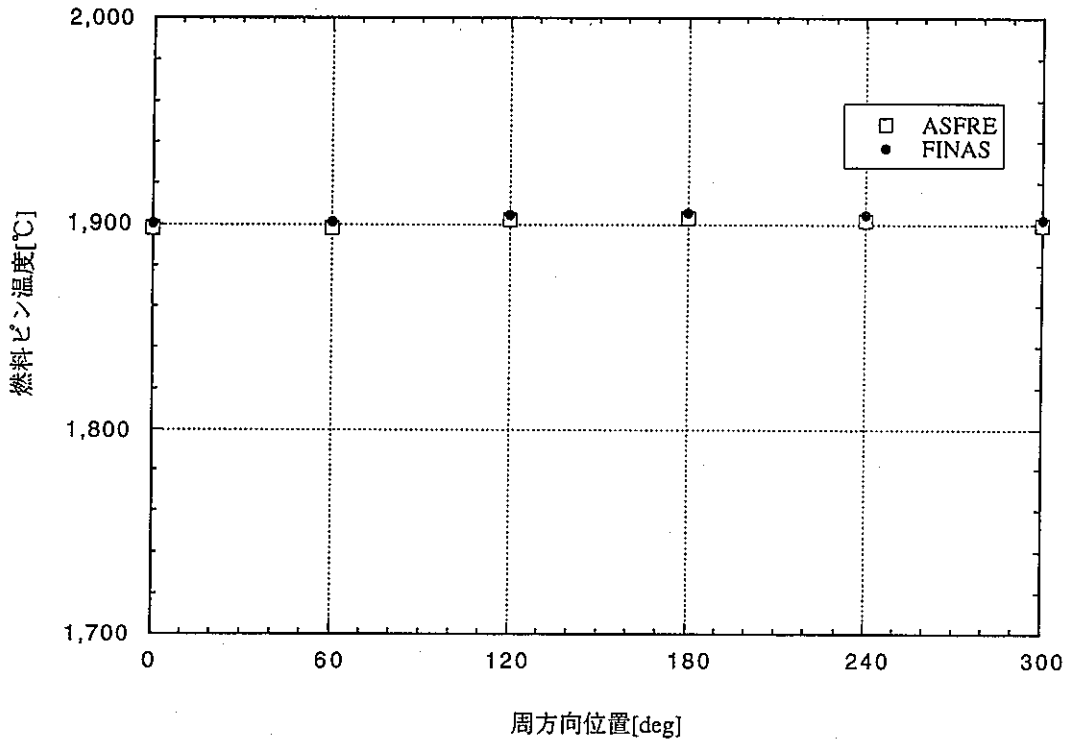


軸方向高さ0.0mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

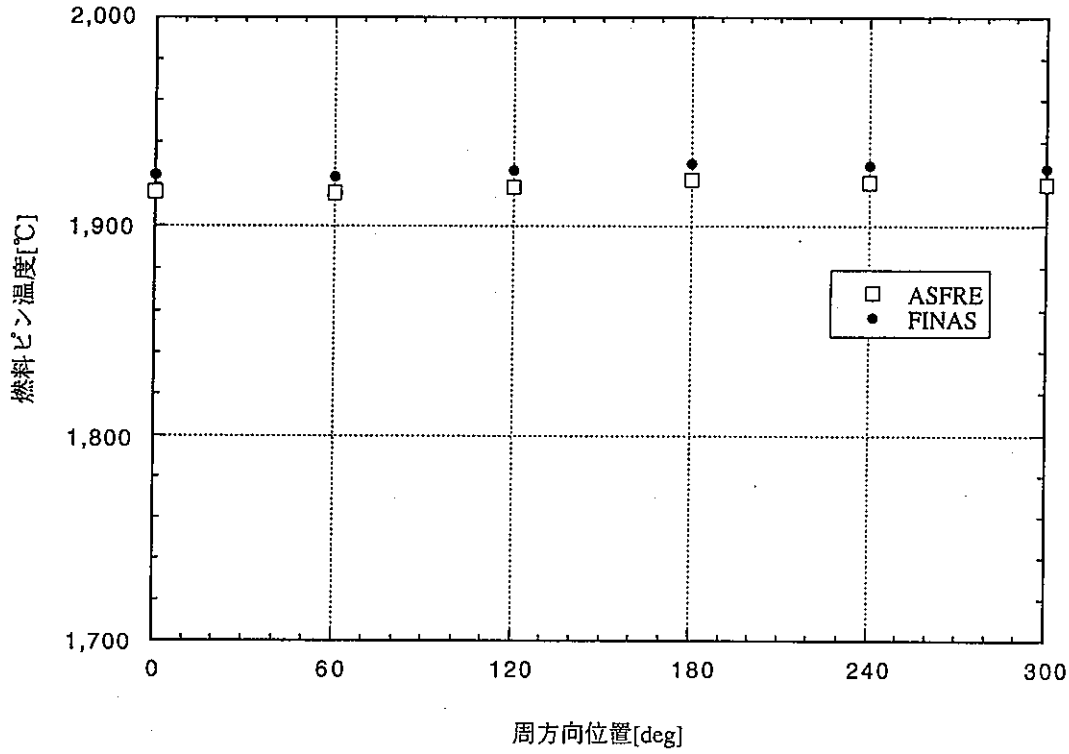


軸方向高さ25.575mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

図２.２－５　各断面における周方向温度分布の比較（１）

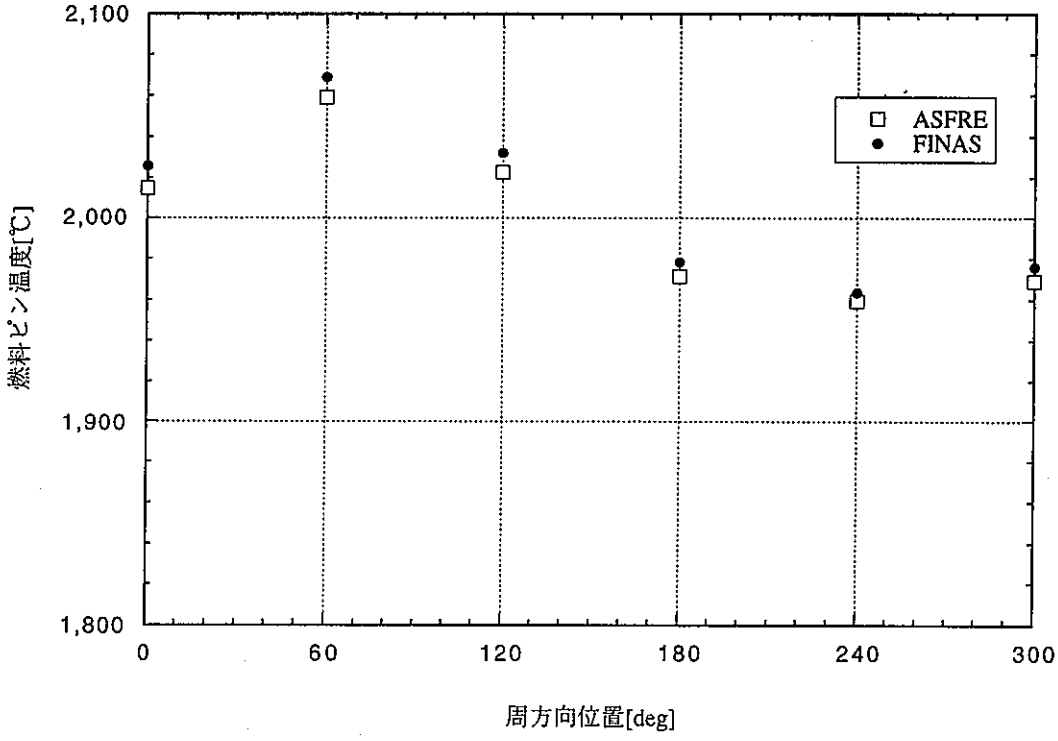


軸方向高さ51.15mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

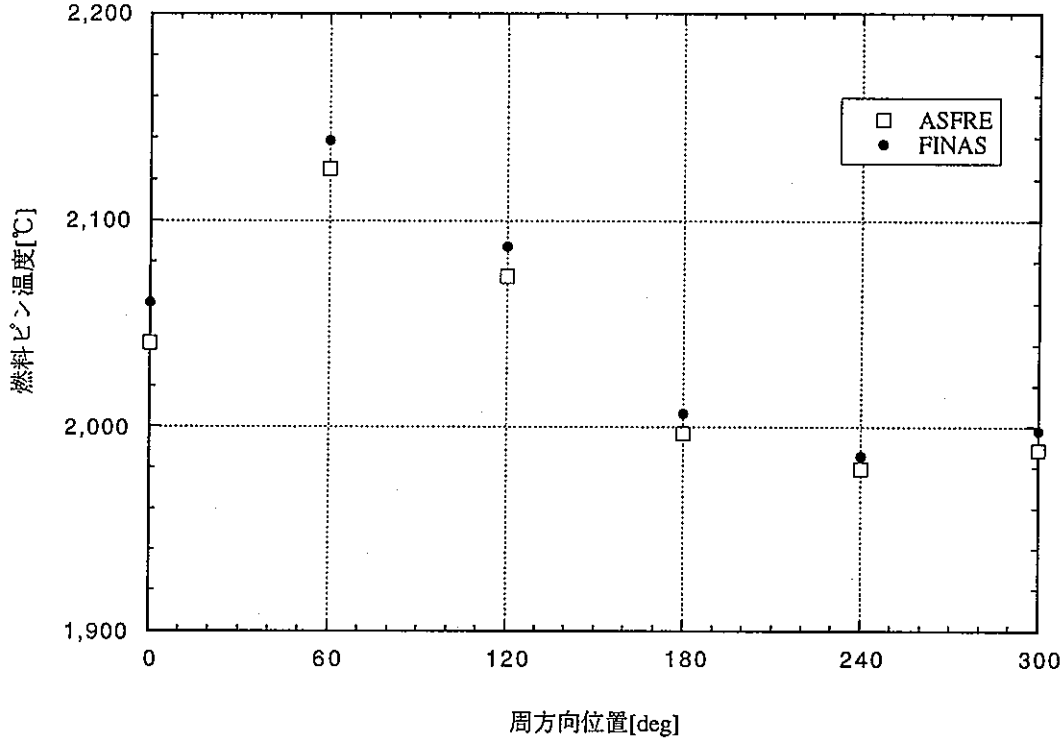


軸方向高さ76.725mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

図２.２－６　各断面における周方向温度分布の比較（２）

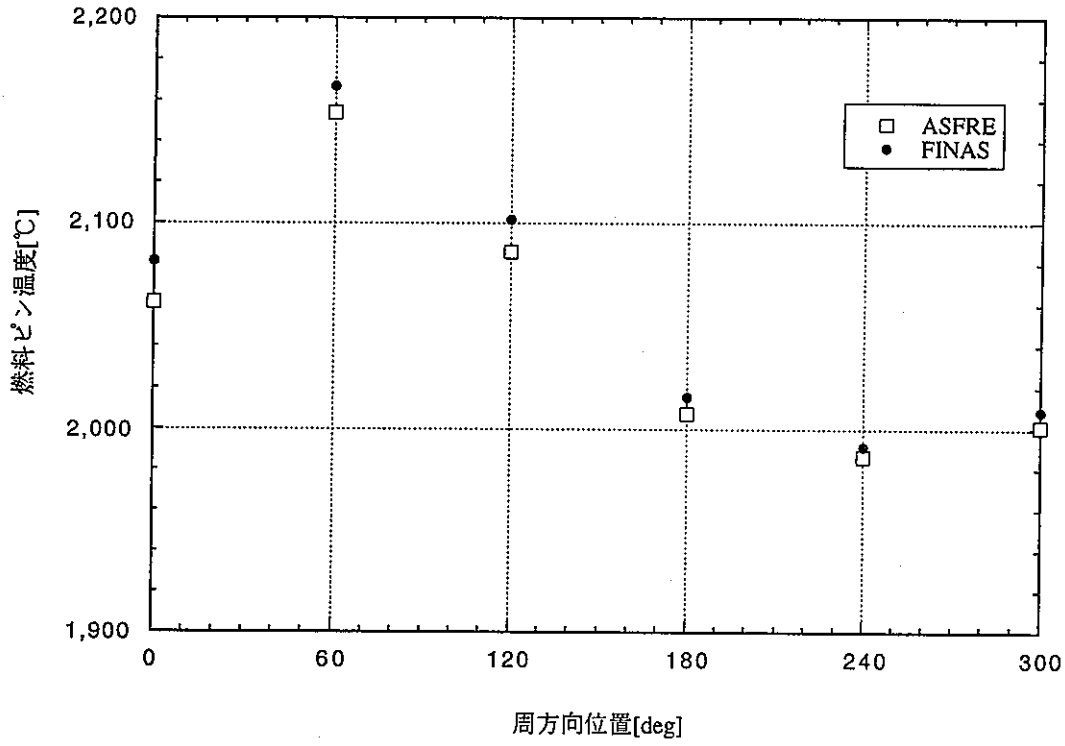


軸方向高さ102.3mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

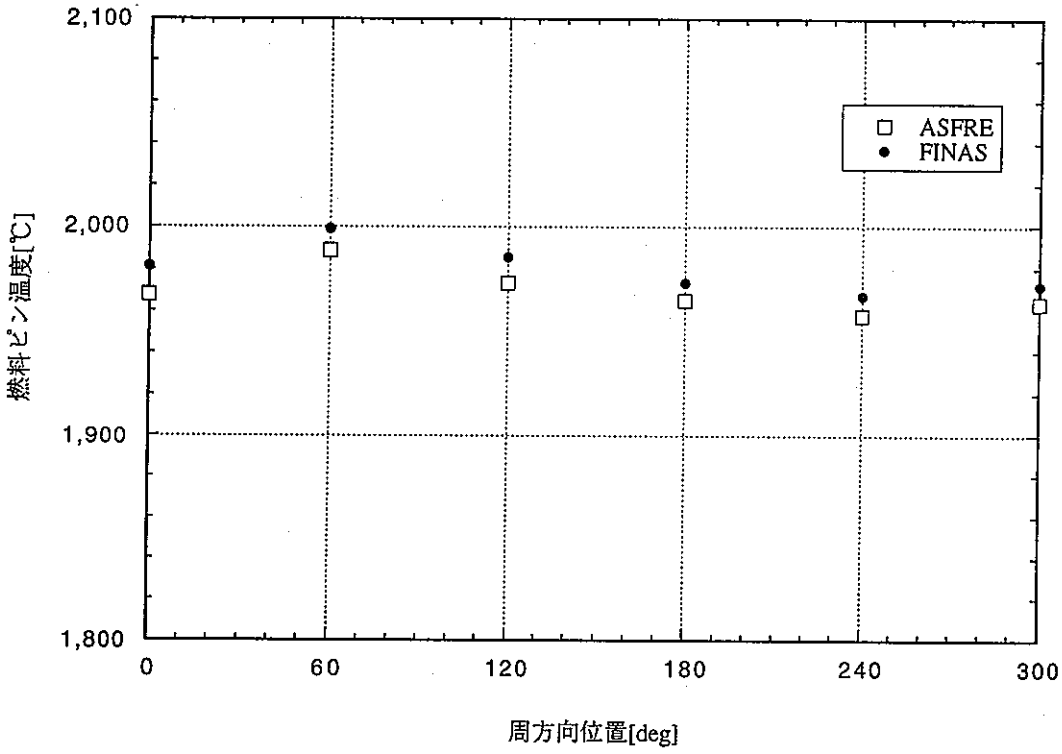


軸方向高さ127.875mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

図２.２－７　各断面における周方向温度分布の比較（３）

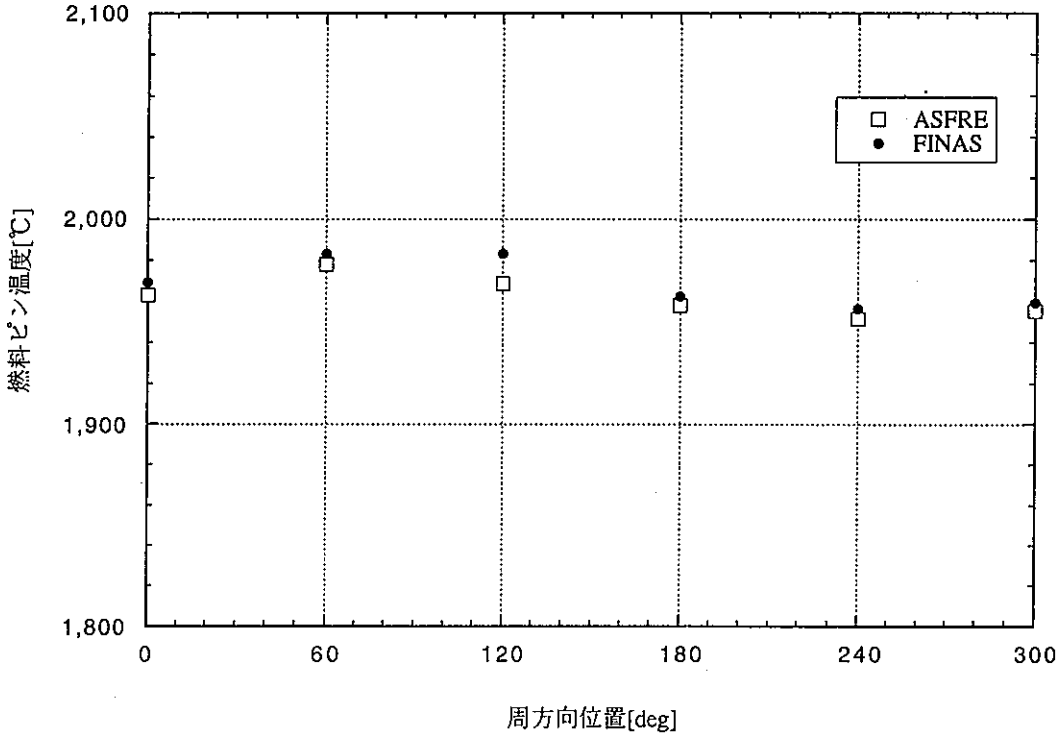


軸方向高さ153.45mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

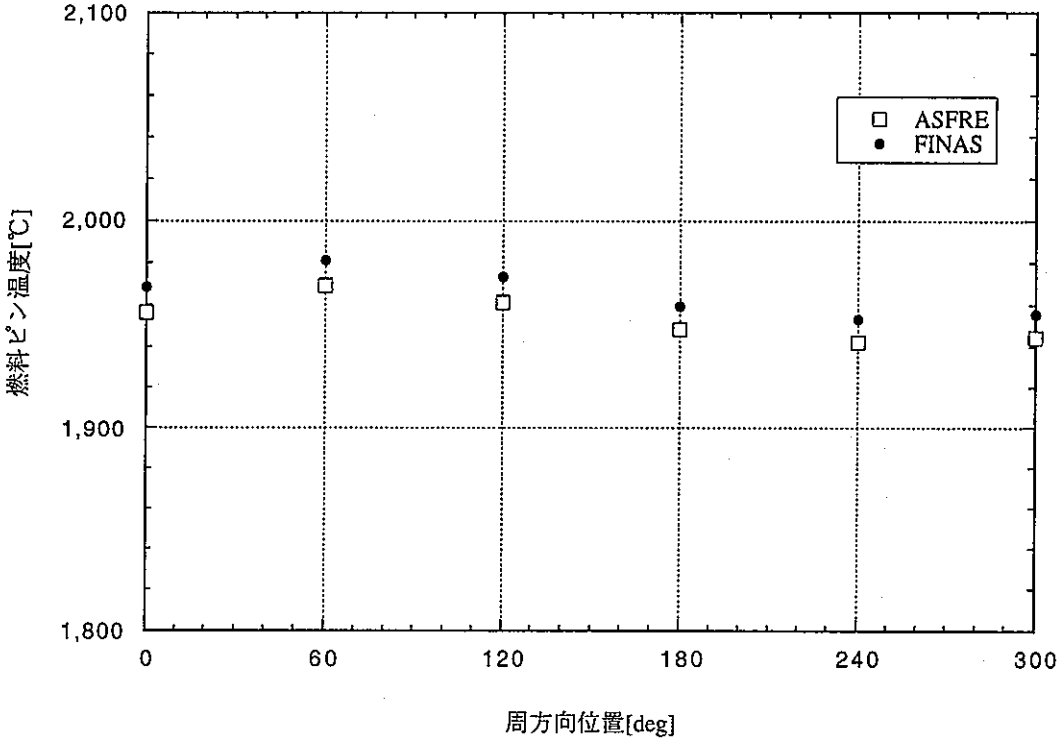


軸方向高さ179.025mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

図２.２－８　各断面における周方向温度分布の比較（４）



軸方向高さ204.6mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布



軸方向高さ230.175mmにおける径方向メッシュ３の周方向温度分布

図２.２－９　各断面における周方向温度分布の比較（５）

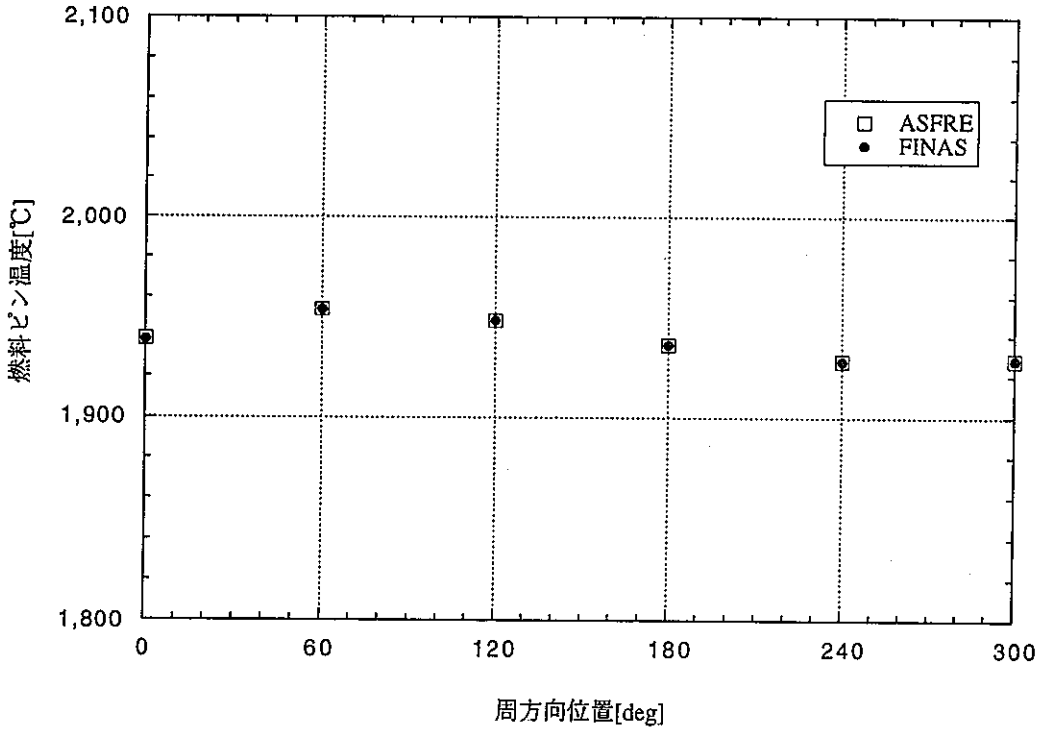
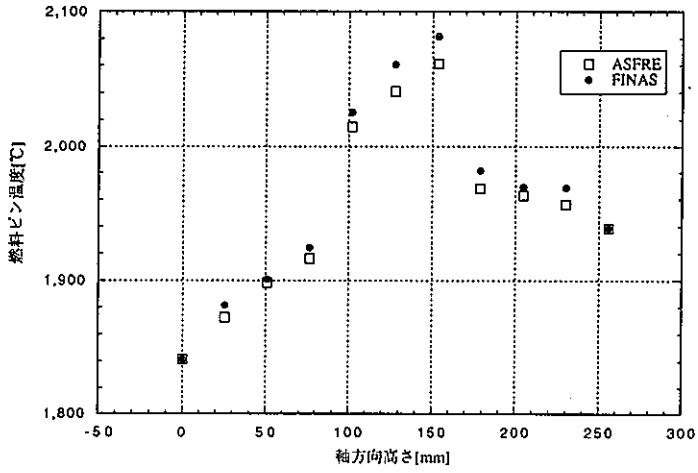
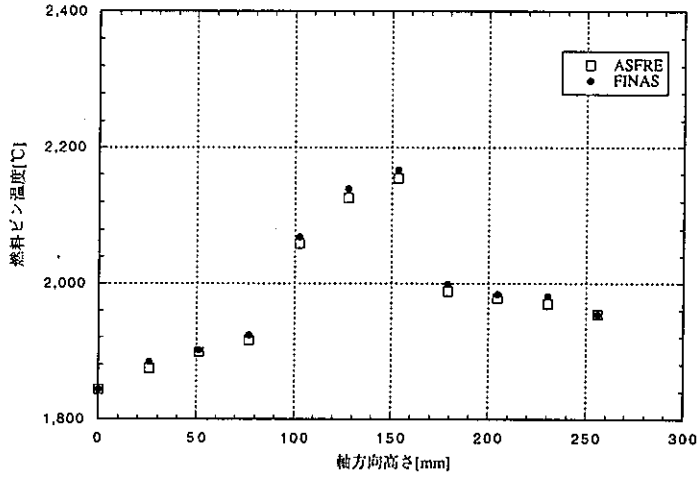


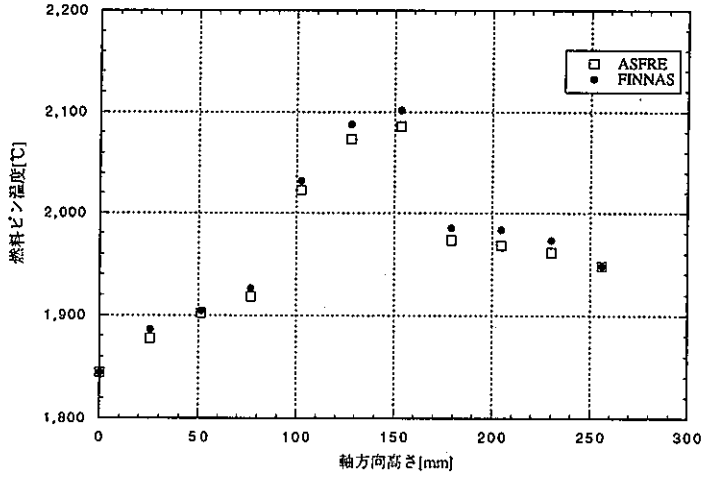
図２.２－１０　各断面における周方向温度分布の比較（６）



セクタ１における軸方向温度分布の比較

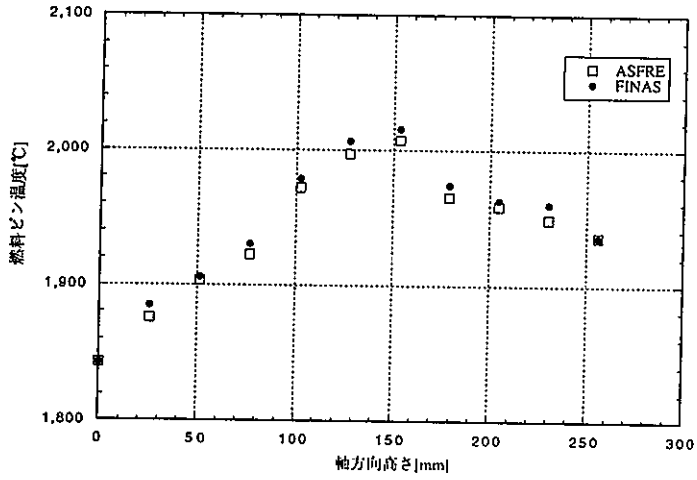


セクタ２における軸方向温度分布の比較

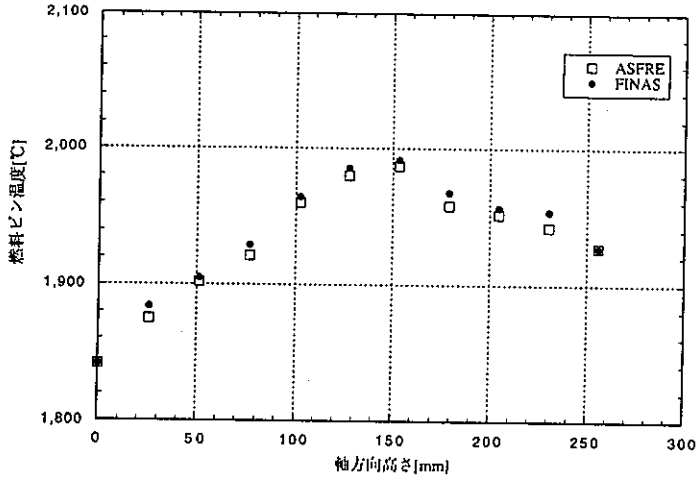


セクタ３における軸方向温度分布の比較

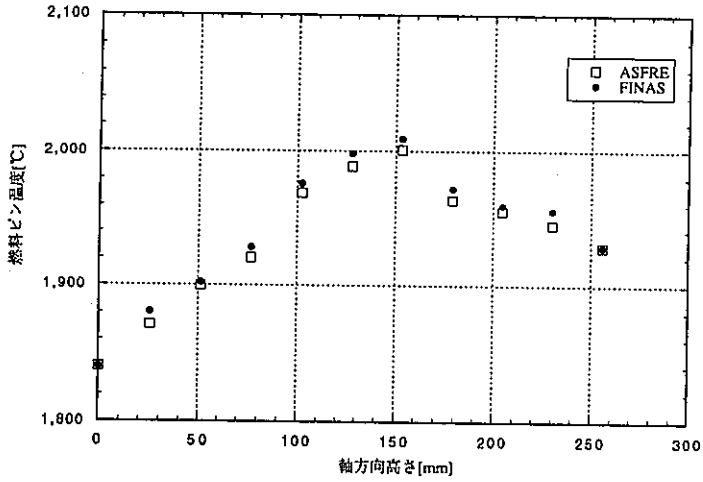
図２.２－１１　セクタ毎の軸方向温度分布（１）



セクタ4における軸方向温度分布の比較



セクタ5における軸方向温度分布の比較



セクタ6における軸方向温度分布の比較

図2.2－12　セクタ毎の軸方向温度分布（2）

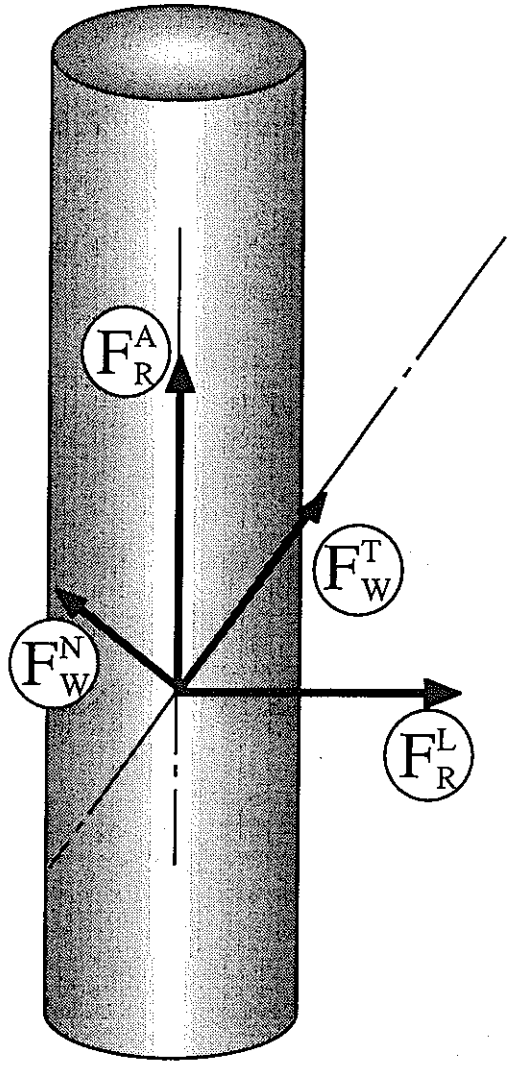


図3.1－1　燃料ピンおよびワイヤにかかる力

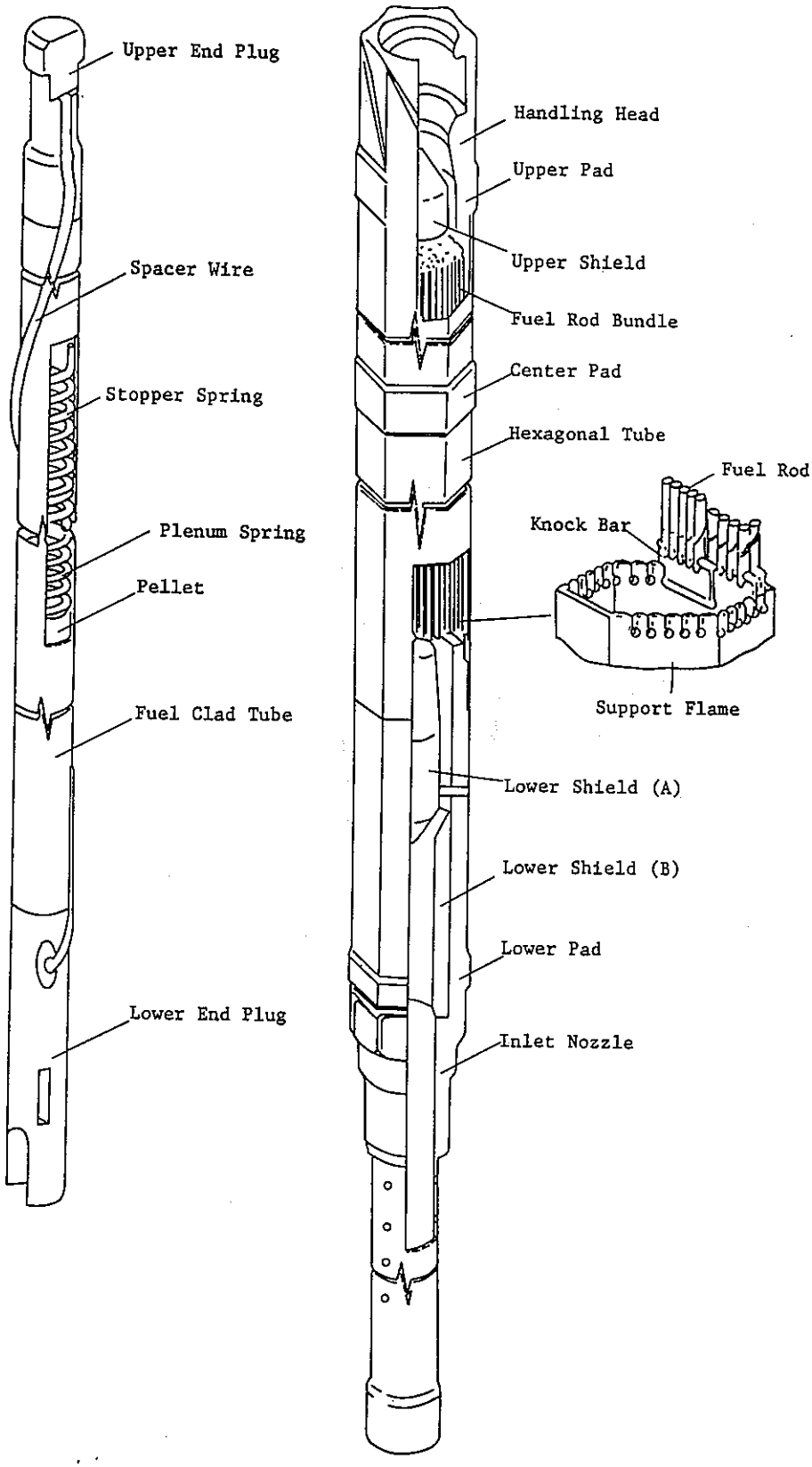


図3.2－1　169本ピンバンドル燃料集合体

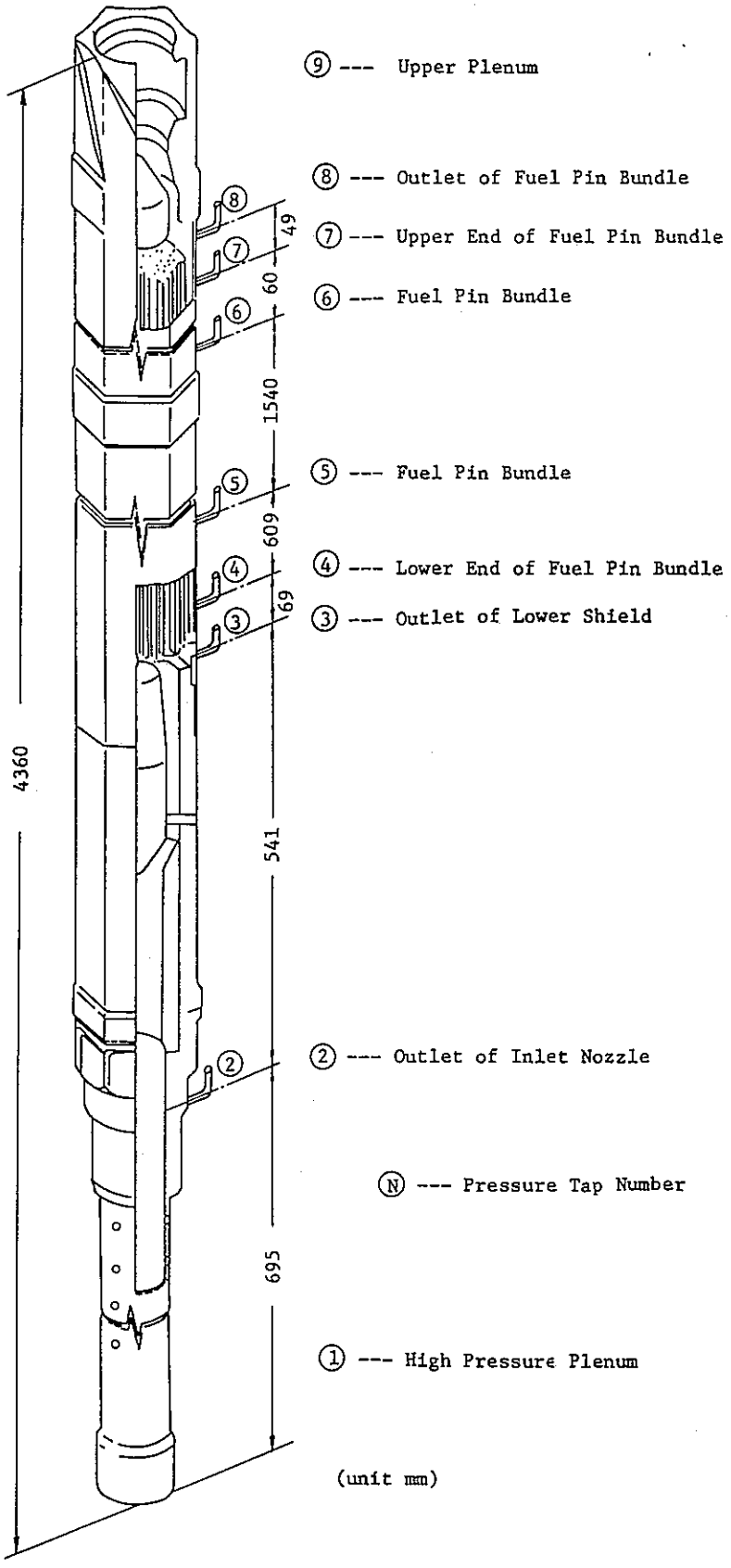


図３．２－２　軸方向圧力タップ取り付け位置

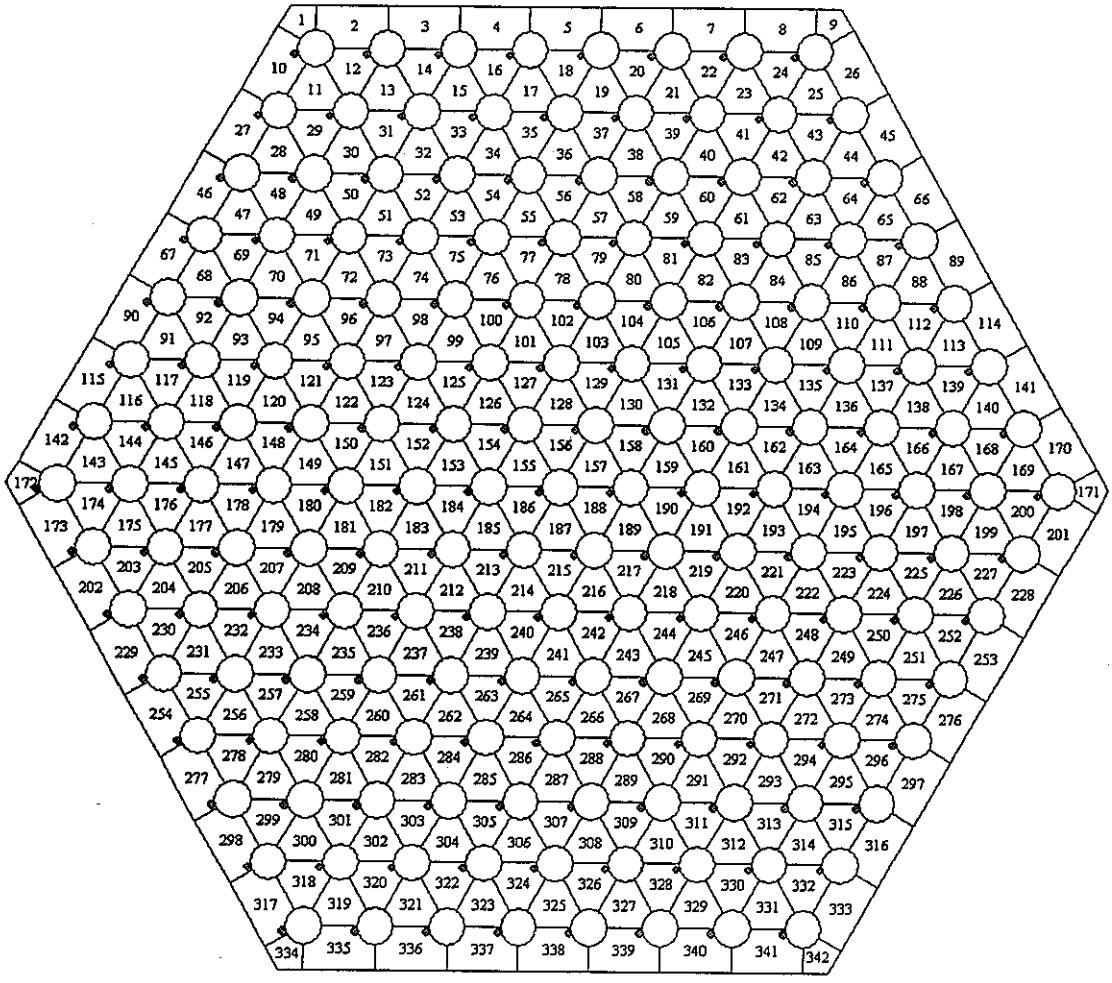


図3.2－3 サブチャンネル分割図（169本ピンバンドル体系）

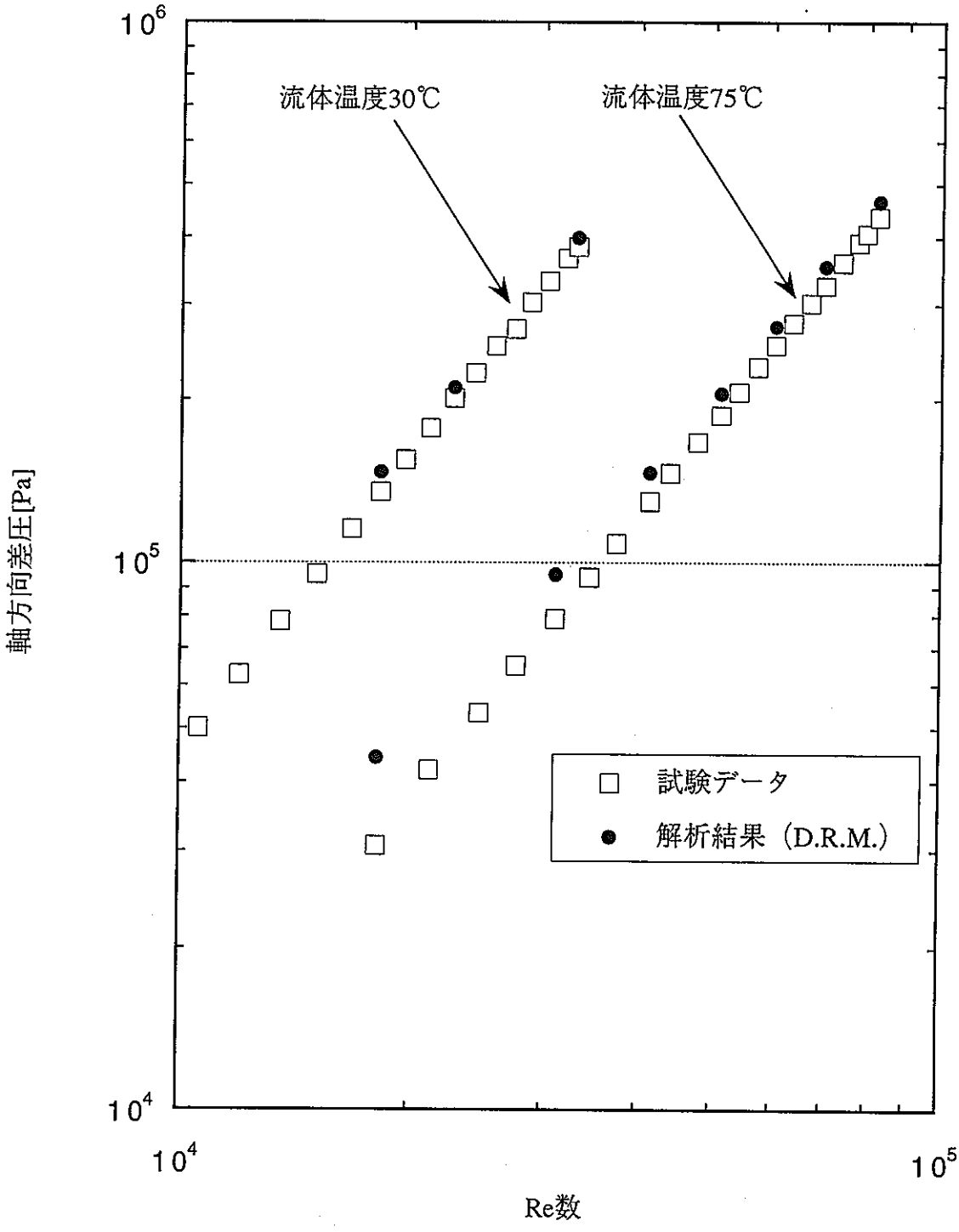


図３.２－４　軸方向差圧の比較

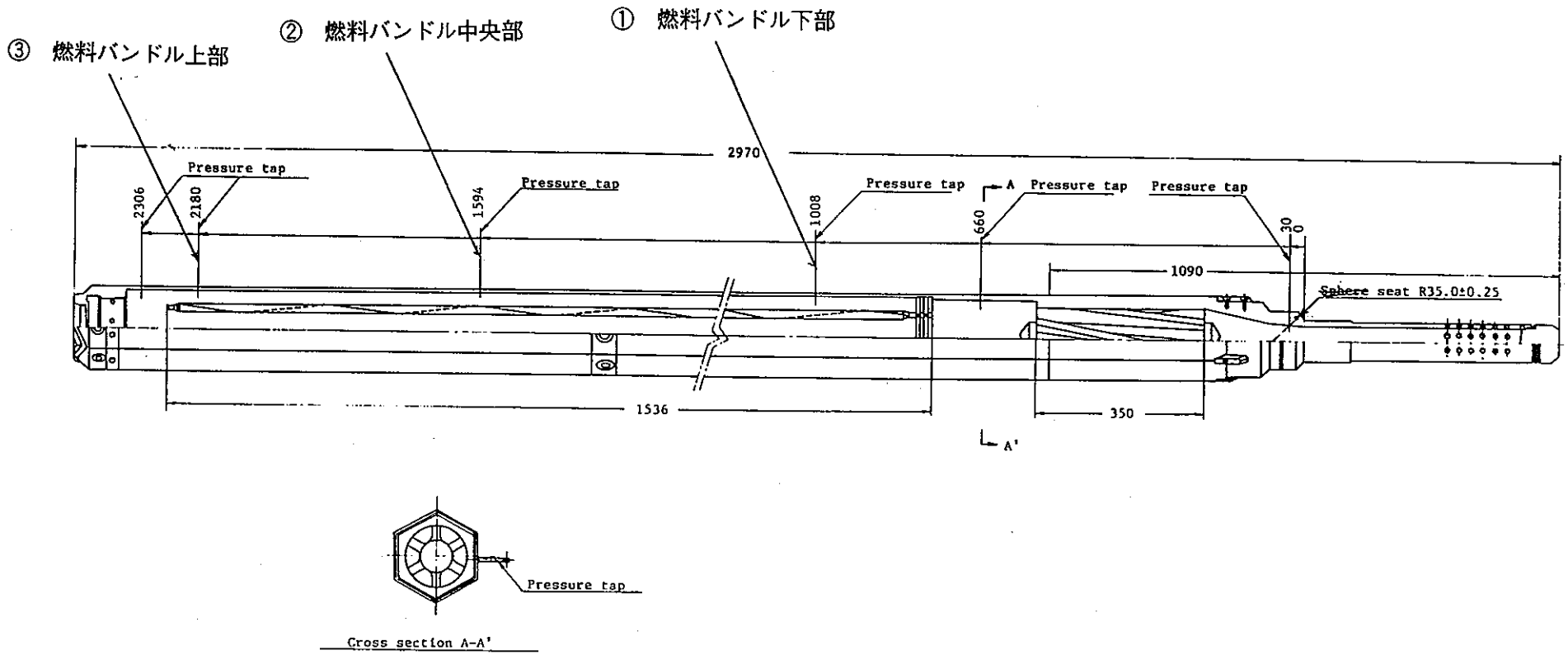


図3.3－1　127本ピンバンドル燃料集合体

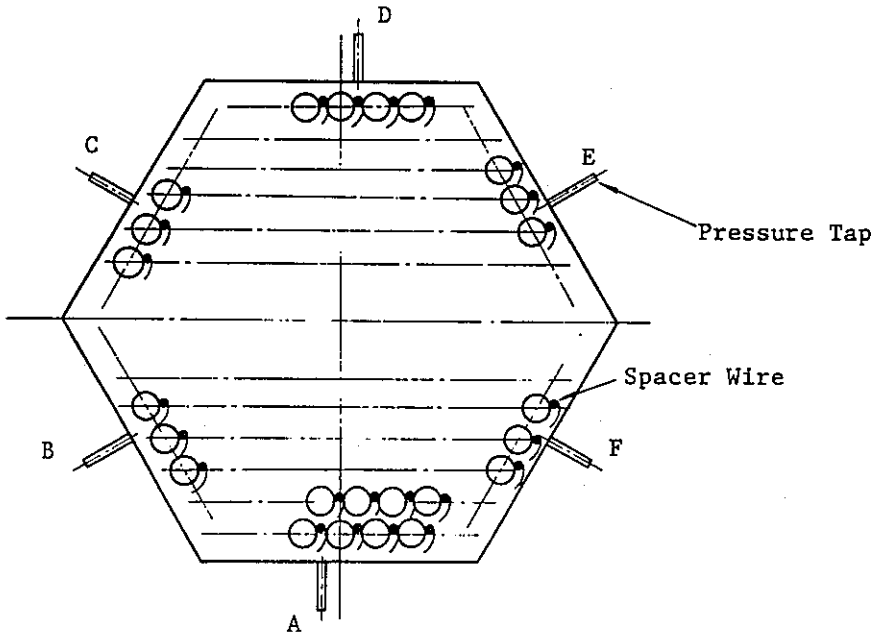


図３．３－２　周方向圧力タップ取り付け位置

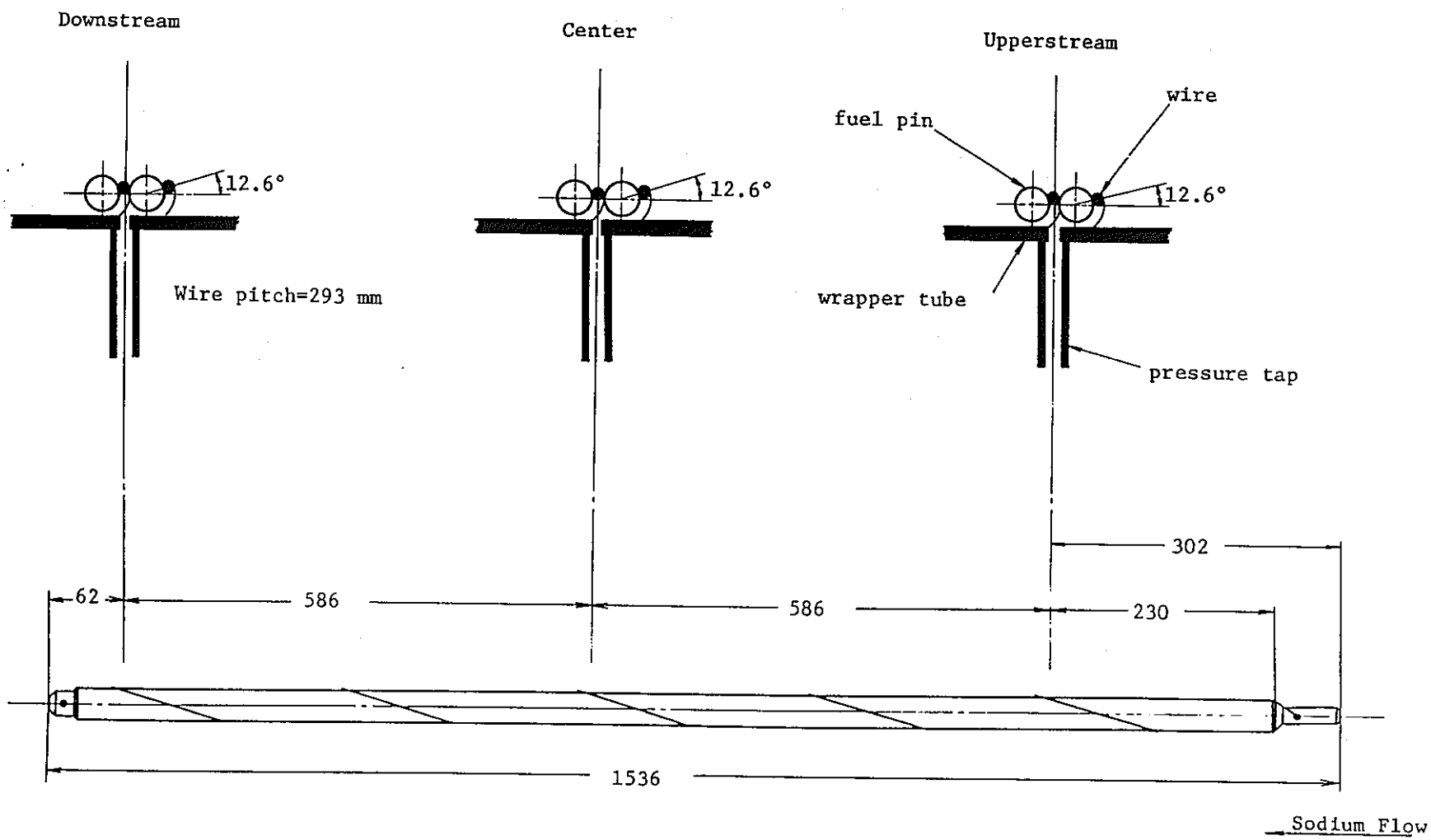


図3.3－3　圧力測定断面におけるワイヤの位置

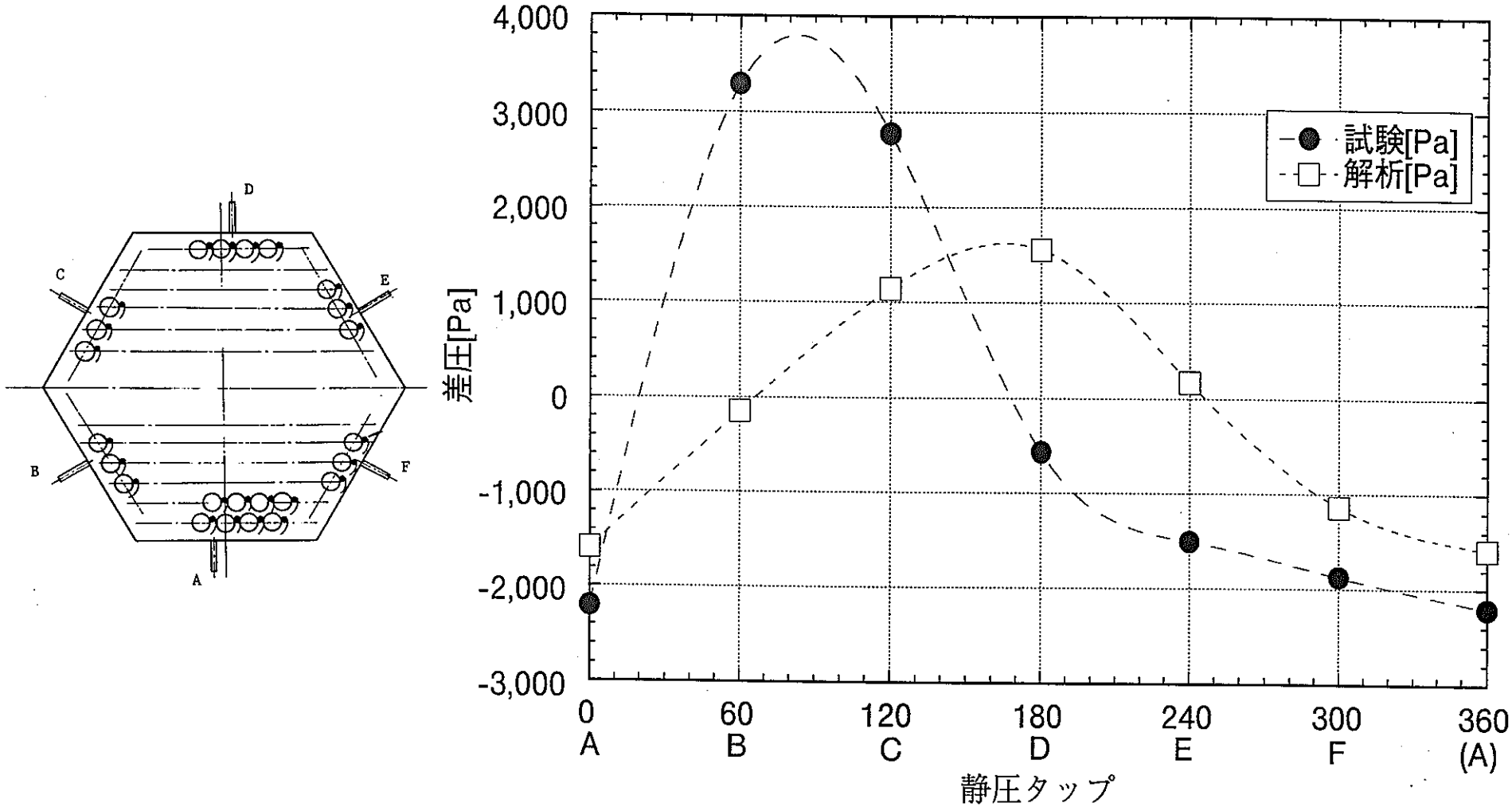


図3.3－4　周方向圧力分布の比較（流量 11.6kg/sec）

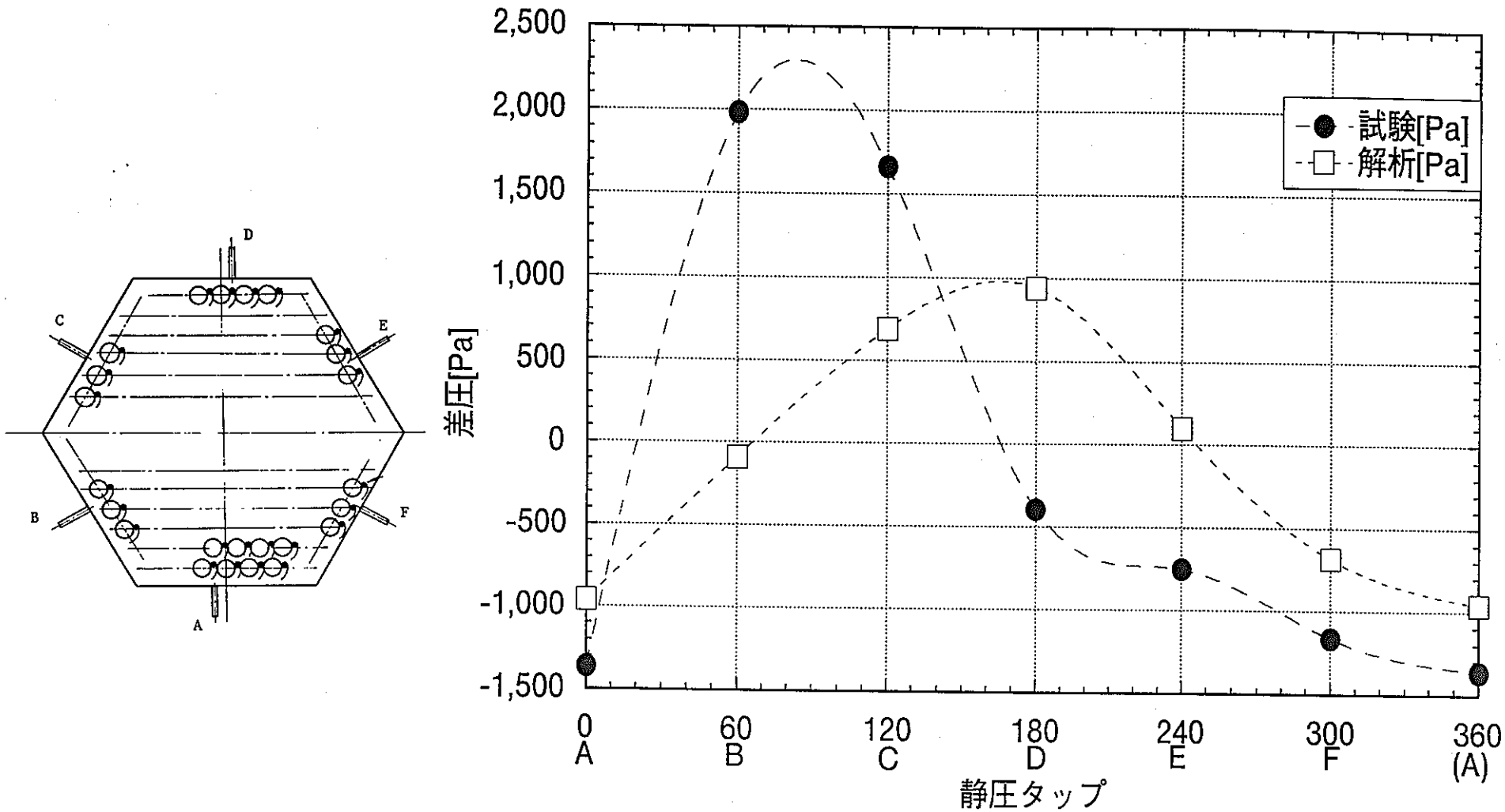


図３.３－５　周方向圧力分布の比較（流量 7.0kg/sec）

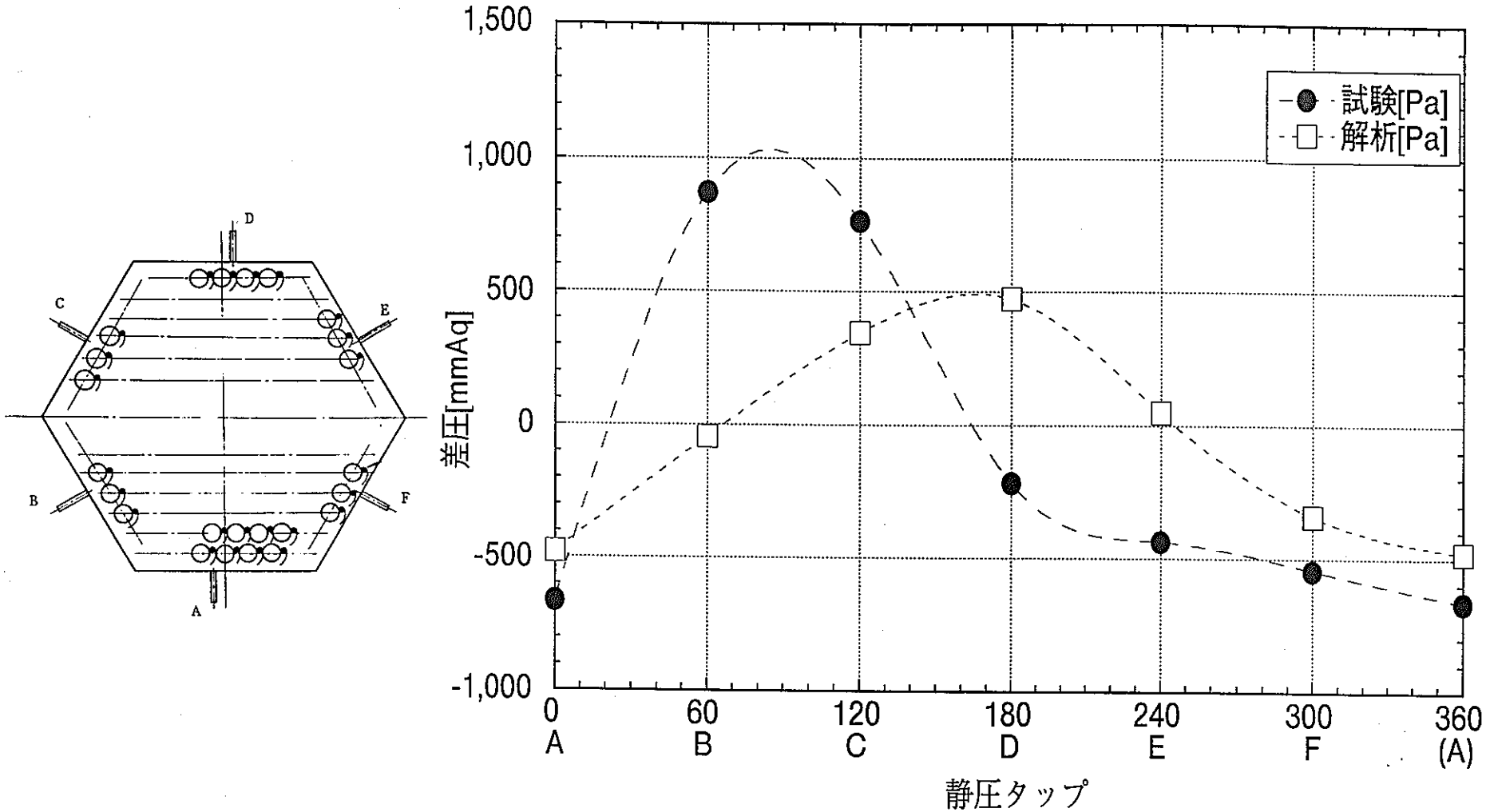


図3.3－6　周方向圧力分布の比較（流量 6.3kg/sec）

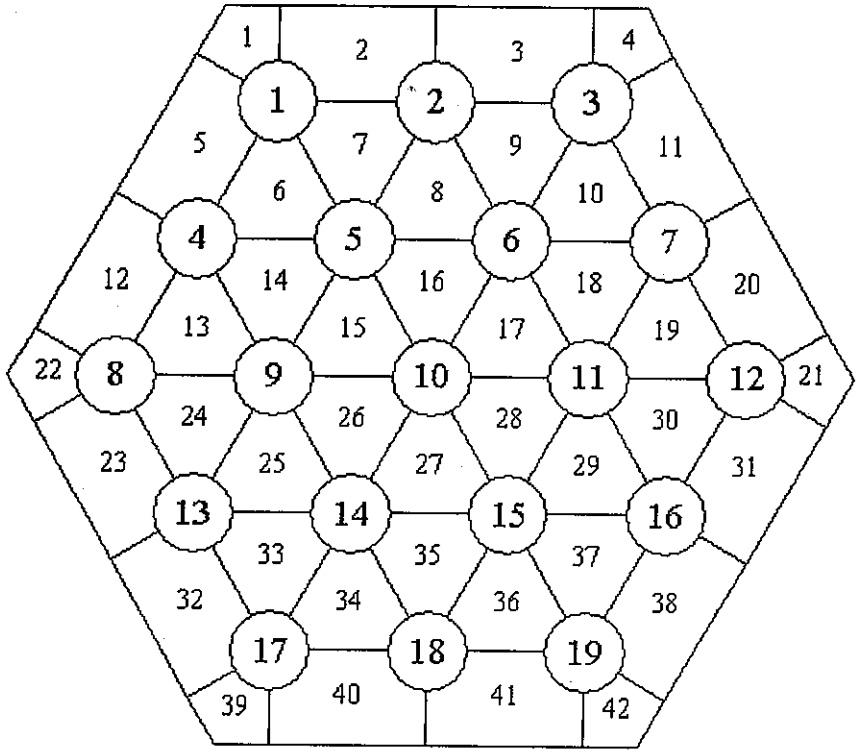


図3.3－7　１９本ピンバンドル体系サブチャンネル分割図

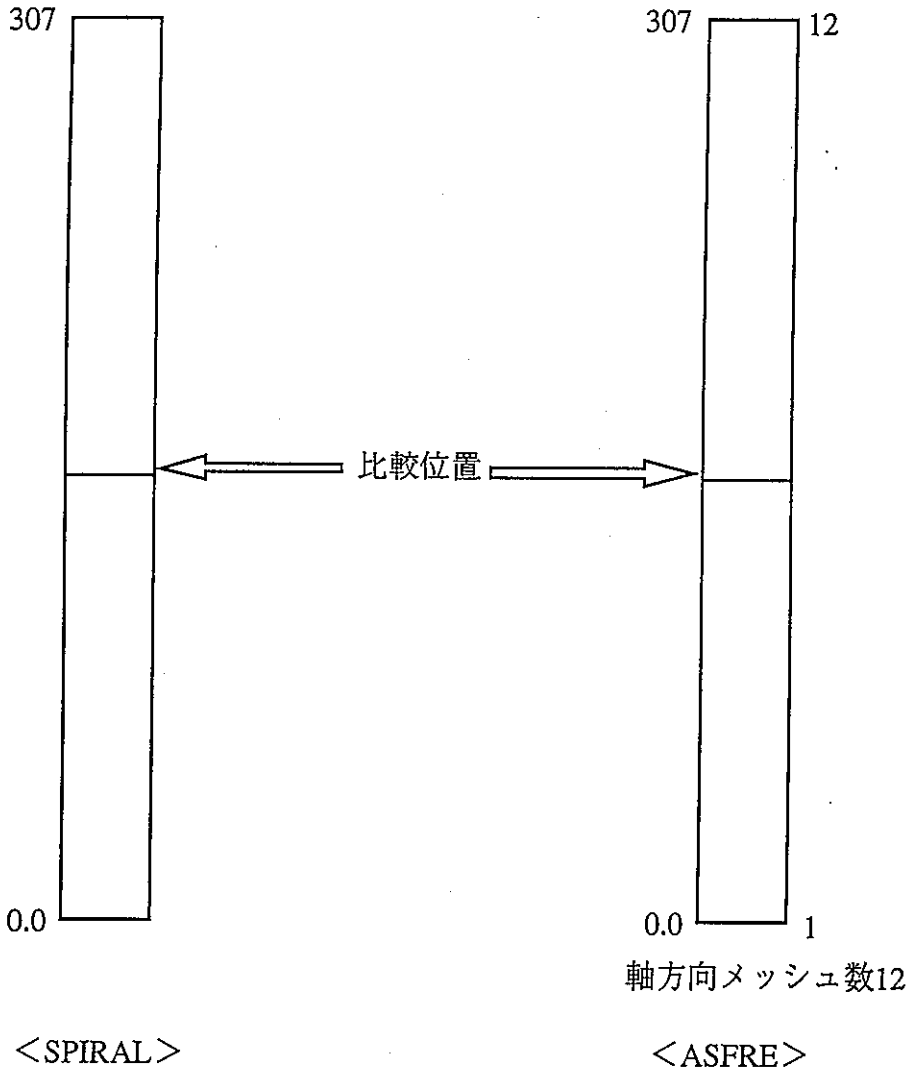


図3.3－8　軸方向長さ（メッシュ分割）

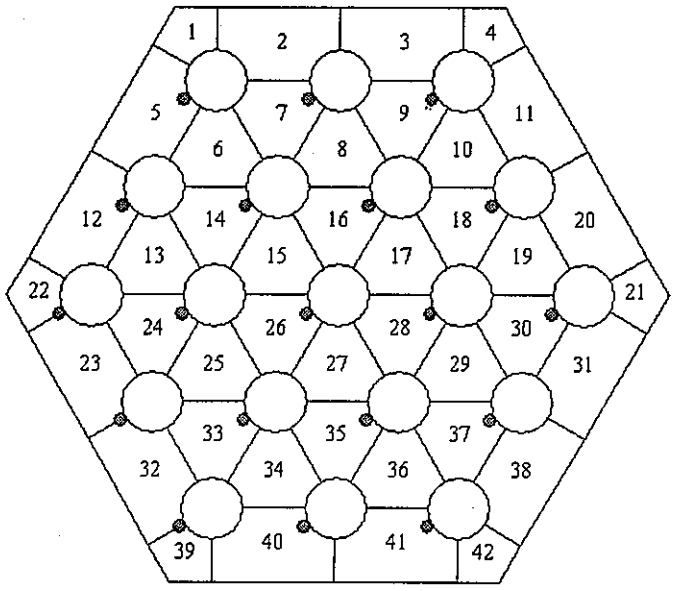
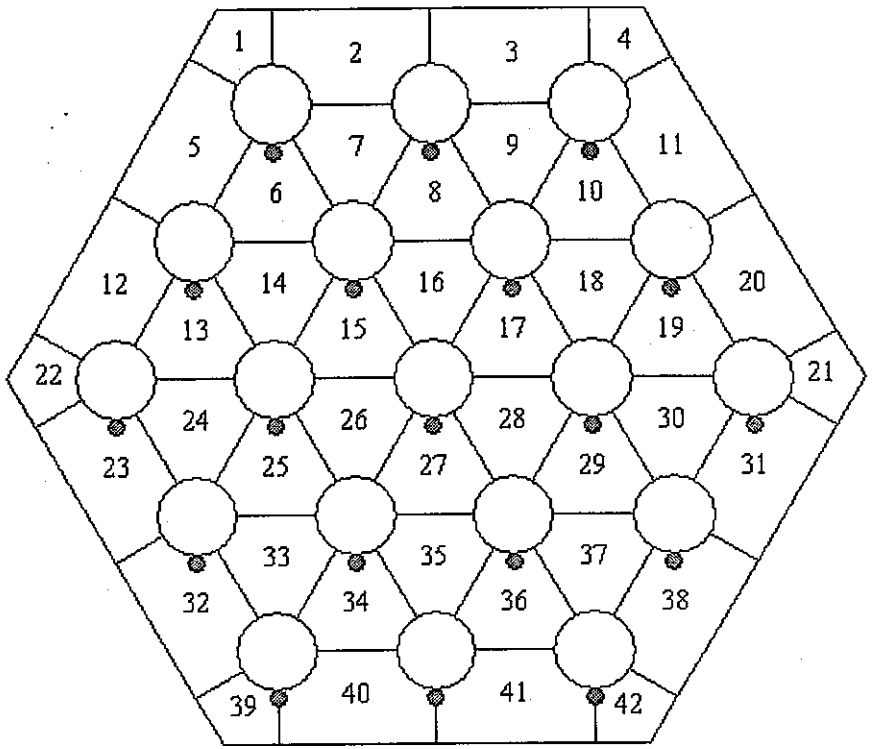
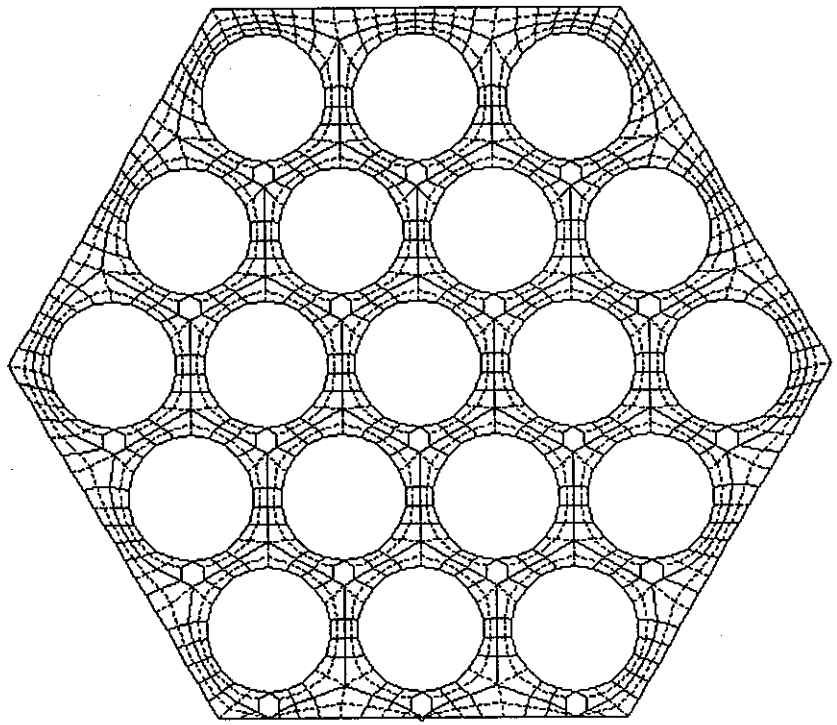


図3.3－9　圧力分布比較断面におけるワイヤ位置



<ASFRE サブチャンネル分割>



<SPIRAL メッシュ分割>

図3.3—10 サブチャンネルおよびメッシュ分割

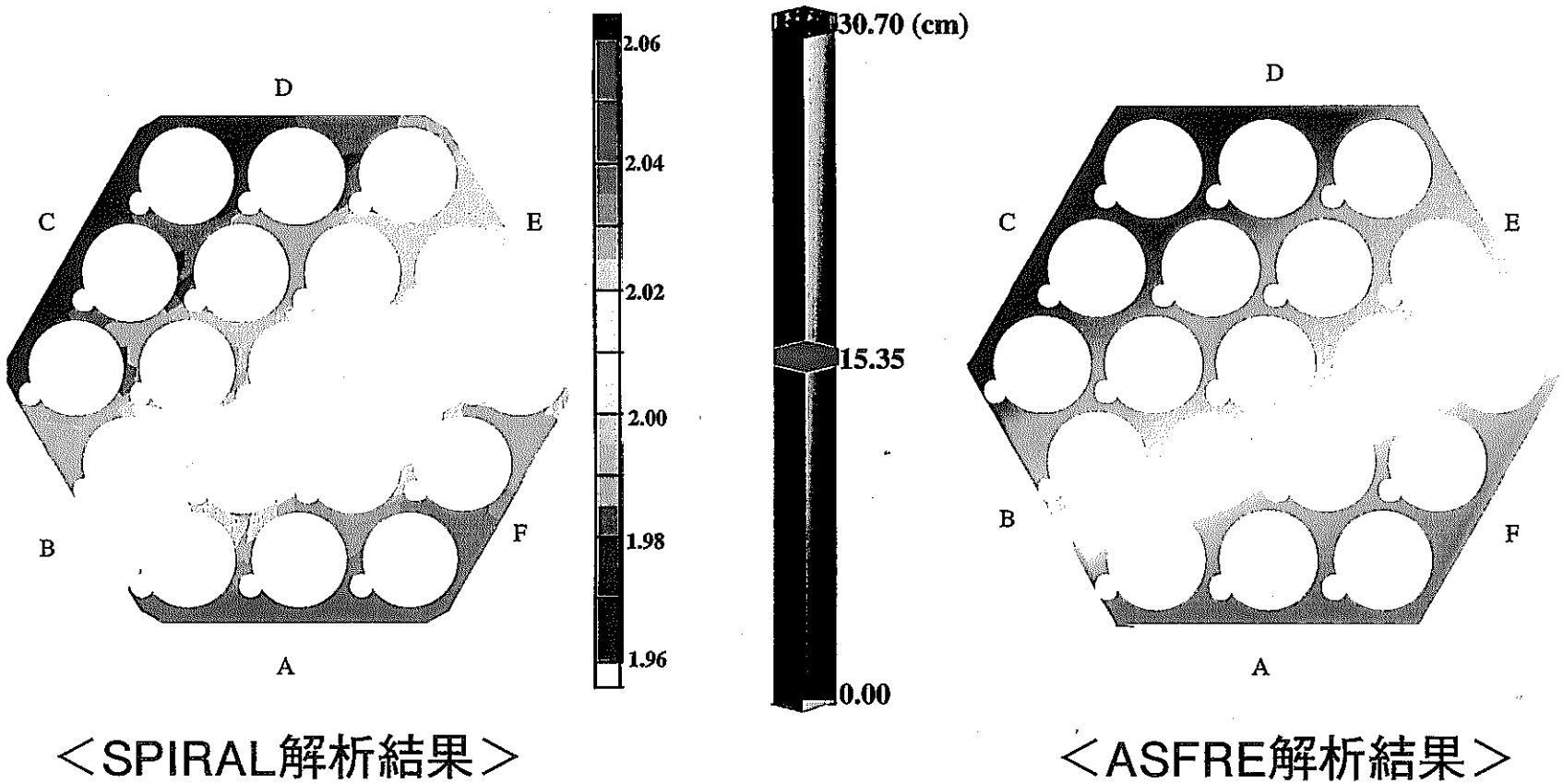
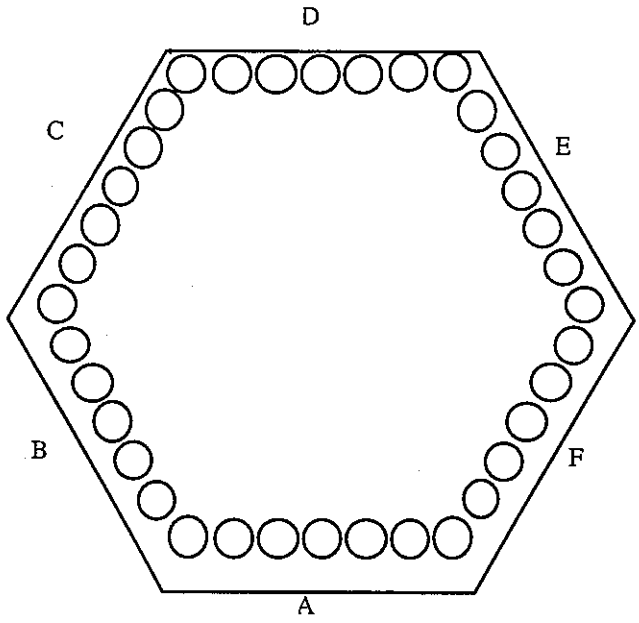
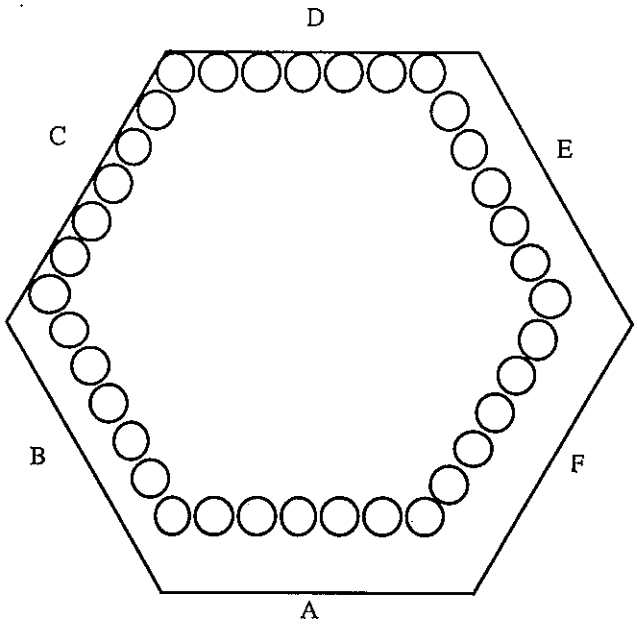


図３．３－１１　ASFRE および SPIRAL の周方向圧力分布比較



＜　面への偏り　＞



＜　コーナーへの偏り　＞

図３．３－１２　燃料バンドルの偏り

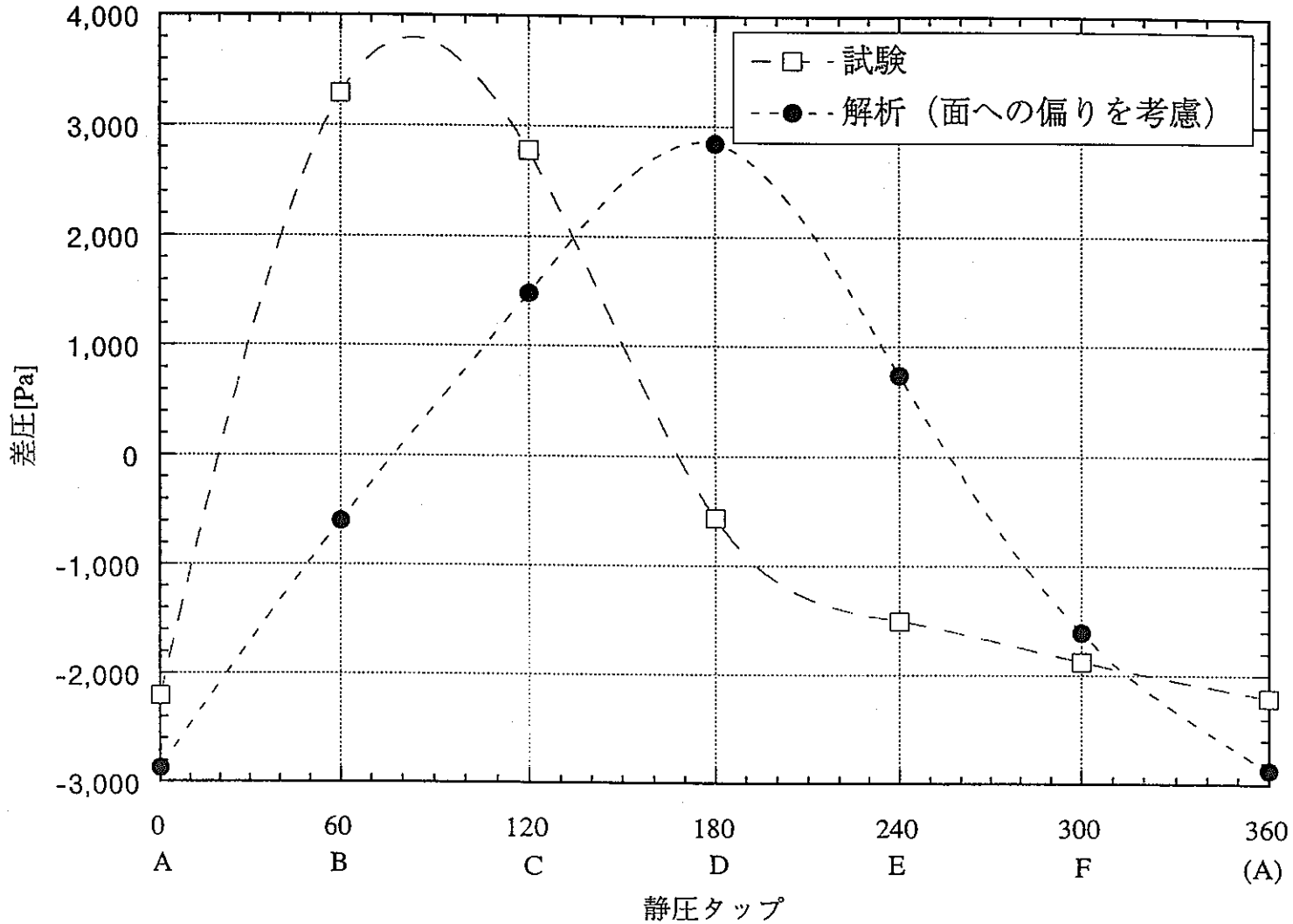


図３.３－１３　周方向圧力分布比較（面への偏りを考慮）

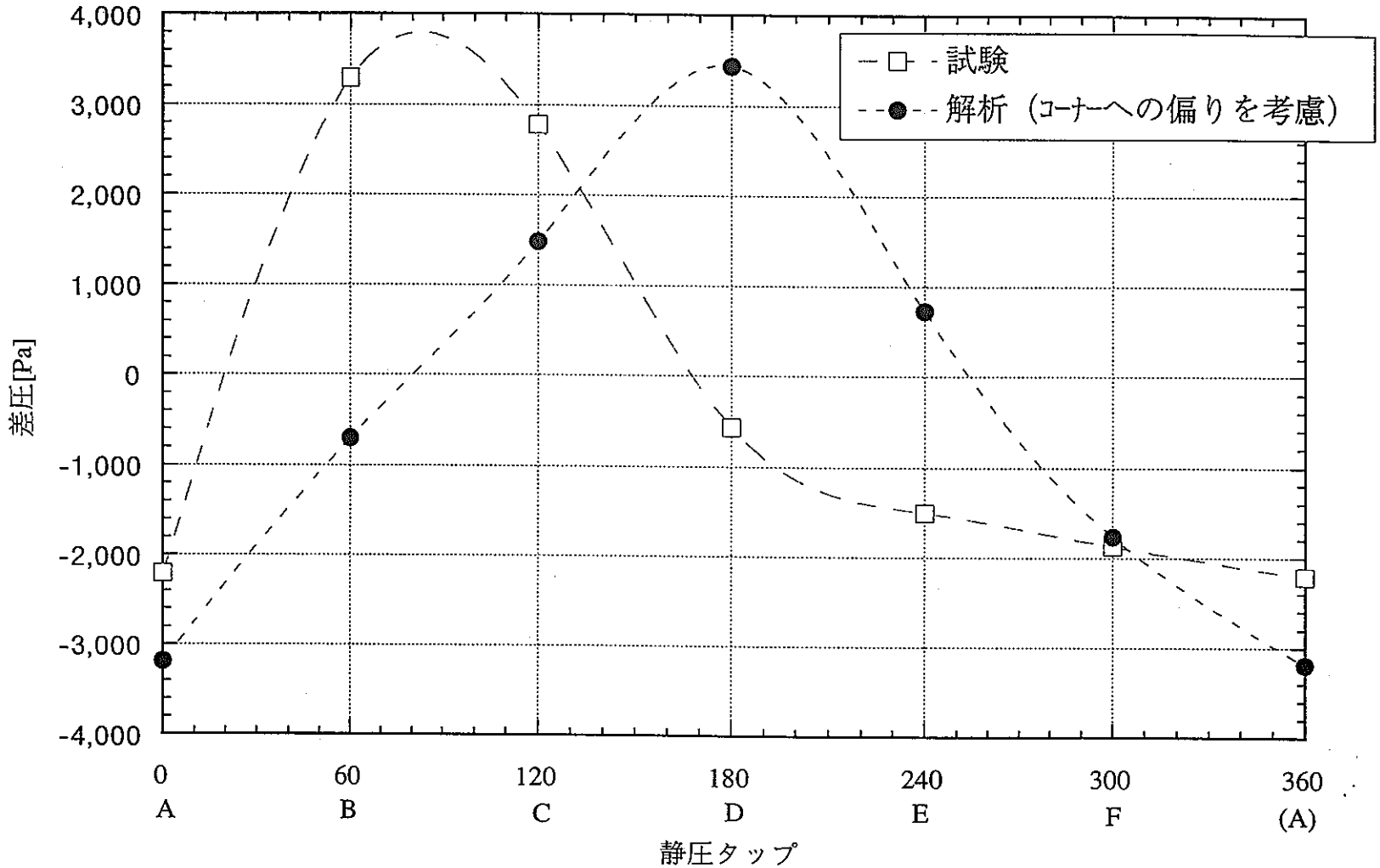
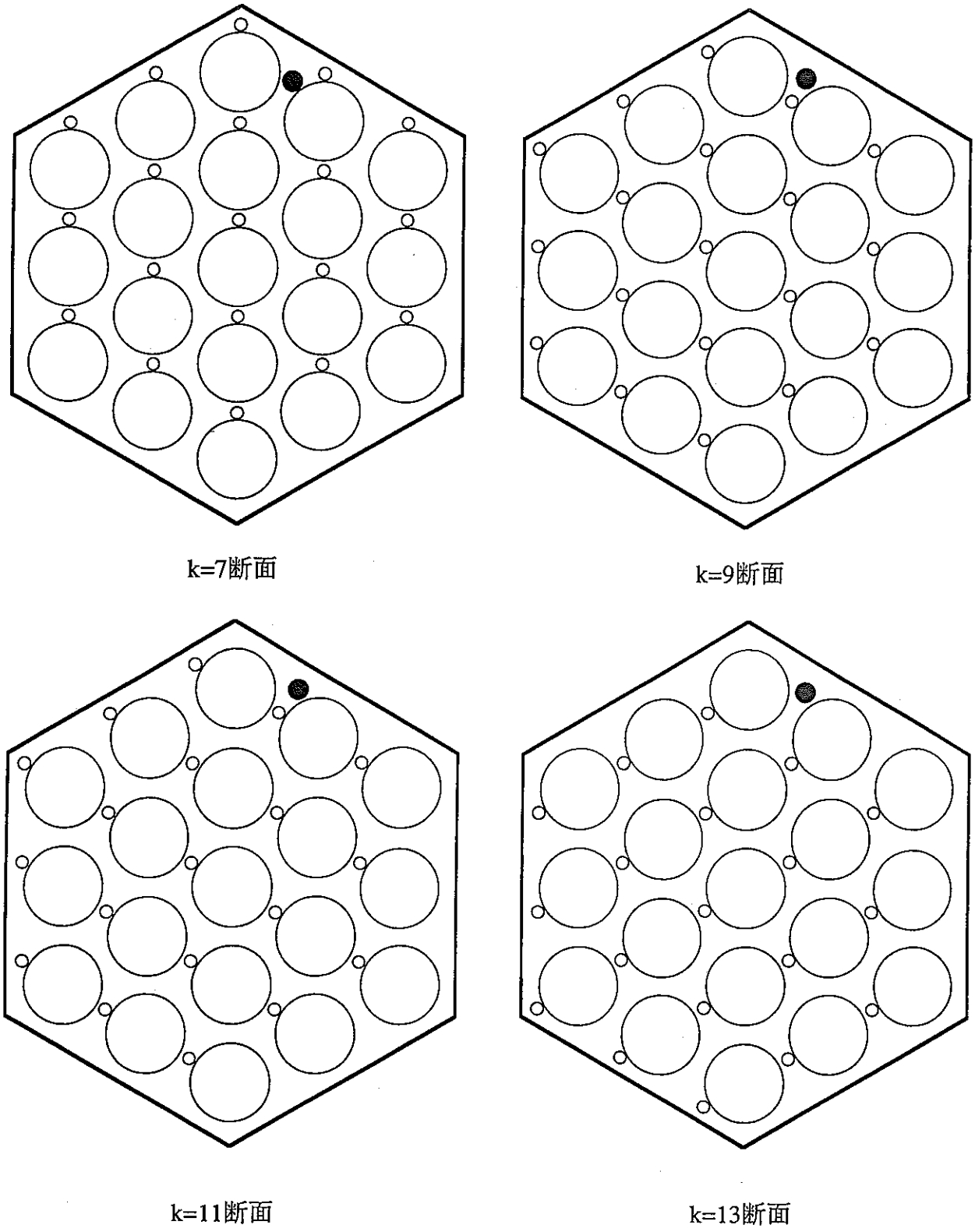
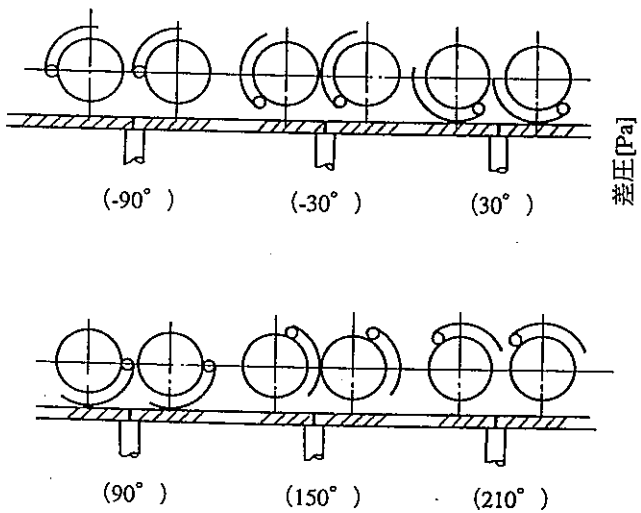


図３.３－１４　周方向圧力分布比較（コーナーへの偏りを考慮）



●：比較位置

図3.3－15　SPIRAL周方向圧力断面比較位置



<圧力タップとワイヤの位置関係>

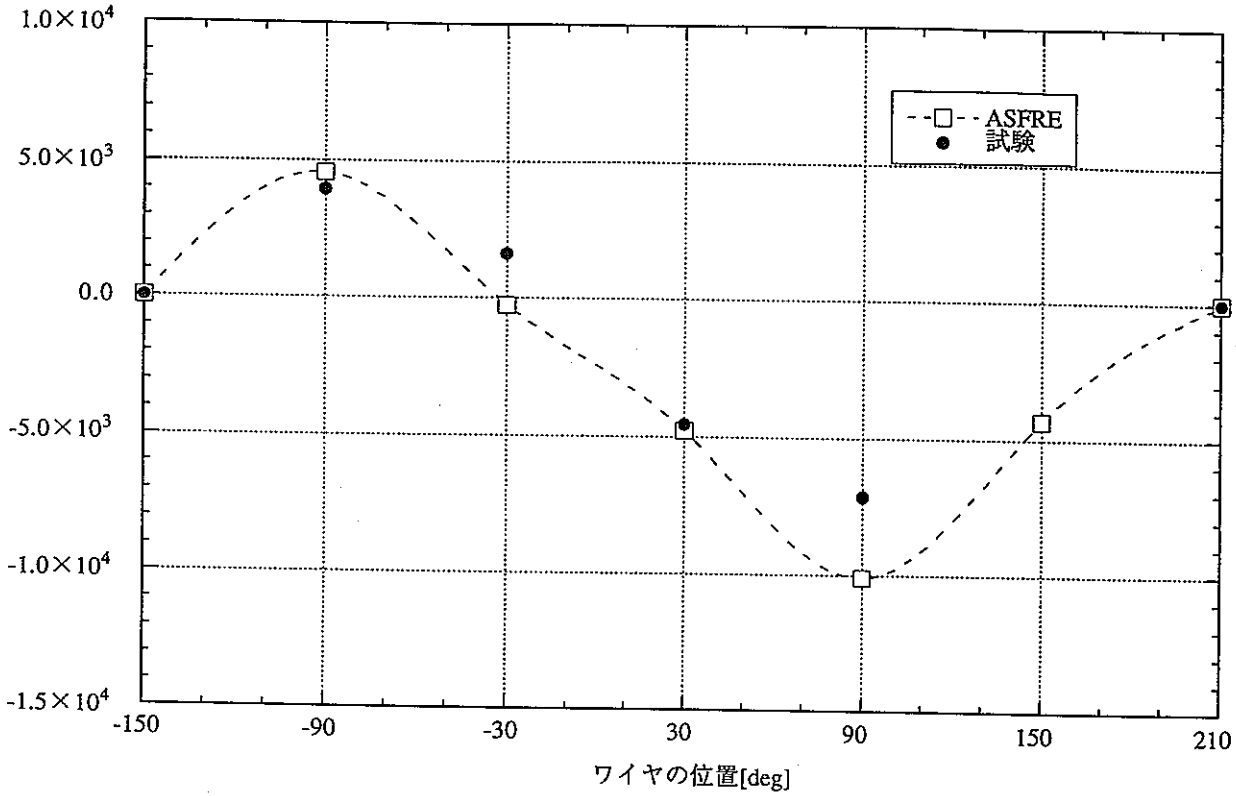


図3.3－16　他の試験結果とASFREによる解析結果との比較