

「FFTF」炉心の湾曲反応度解析

1992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)

「FFTF」炉心の湾曲反応度解析

山岡光明*, 林 秀行*

要 旨

米国の高速実験炉「FFTF(Fast Flux Test Facility)」においては、高速炉の受動的安全性に関わる反応度フィードバック、特に炉心変形に伴う反応度効果の確認・予測精度向上のため、受動的安全性試験(フェーズ IIB試験)が計画されている。その予備解析作業の一環として、炉心湾曲による反応度効果の解析を行った。

湾曲反応度は30%流量からのULOF事象を想定して評価された炉心湾曲量をもとにして計算した。(炉心湾曲計算は実験炉技術課で実施) 本計算では、二次元RZ体系において基準炉心の燃料反応度分布を関数形表示し、一次摂動近似を適用して湾曲反応度を求めた。報告書では、出力・流量比と湾曲反応度の関係を、集合体間のパッドギャップや炉心拘束機構と炉心間のギャップなどをパラメータとしてまとめた。主な結果は以下のとおりである。

- ① 出力流量比の増加に伴う炉心変形により、集合体間のパッドギャップがとじるまでは正の反応度が印加される。これは集合体頂部の相互作用の反力により、燃料部が内側へ変位するためである。
- ② 集合体間のパッドギャップがとじた後は、逆に燃料部が外側へ変位を始め、負の反応度が印加される。
- ③ 最外周炉心集合体では、湾曲量及び単位湾曲量当たりの反応度効果ともに大きいために、その湾曲挙動が湾曲反応度を支配する。

また、本計算作業にあたり湾曲反応度計算コードを作成・整備した。その計算内容と使用方法についても報告する。

*技術開発部プラント工学室

Bowing Reactivity Analysis of FFTF Core

M. Yamaoka* and H. Hayashi*

Abstract

A passive safety test phase IIB is planned at the FFTF (Fast Flux Test Facility) core to assess the reactivity feedback effect related to passive safety feature of FBRs, especially the effect due to core deformation. For pre-test analyses of the test, a bowing reactivity analysis has been carried out for FFTF core.

The bowing reactivity is analyzed based on core displacement data evaluated postulating ULOF (Unprotected Loss of Flow) event at 30% rated flow. In the analysis, fuel reactivity worth distribution is expressed as function on the reference core without deformation and the bowing reactivity is calculated based on the first-order perturbation theory. This report summarizes the relationships between power to flow ratio and the bowing reactivity with clearance between subassembly load pads and that between the core and the core restraint system as parameters. Followings are main results.

- ① As the power to flow ratio increases, a positive reactivity is added to the core by the core deformation until clearance between subassembly load pads closes. This is due to the inward displacement of active core caused by mechanical interactions of subassemblies.
- ② After the closure of clearance between subassembly load pads, the active core begins to move outwards, and a negative reactivity is added to the core.
- ③ The deformation behavior of the outermost subassemblies of the core dominates the bowing reactivity since both the magnitude of deformation and the reactivity effect for unit displacement are large compared with those of others.

For the analysis, a code for bowing reactivity calculation has been developed. The calculation method and the manual are also presented in this report.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, OEC

目 次

1. 緒言	1
2. 湾曲反応度解析コードの作成	3
2.1 コードの計算内容	3
2.2 コードの使用方法和注意事項	13
2.2 サンプル計算結果	21
2.4 まとめ	24
3. FFTF炉心の湾曲反応度解析	25
3.1 炉心の設定	25
3.2 解析結果	31
3.2 追加解析結果	45
2.4 まとめ	53
4. 結言	54
5. 謝辞	55
6. 参考文献	55
付録A FFTF炉心湾曲解析結果	56
付録B FFTF湾曲反応度解析入力データ	62

表 リ ス ト

- 表3.1.1 各領域の物質体積比
- 表3.2.1 出力・流量比(P/F)と湾曲反応度の関係
- 表3.3.1 暫定のFFTF炉心組成
- 表3.3.2 FFTF側から送付されたFFTF炉心組成(詳細組成)
- 表3.3.3 反射体組成の比較(%)
- 表3.3.4 炉心組成の違いによる集合体移動反応度の違い
- 表3.3.5 湾曲反応度の再評価(pad間gap=1.0mm,P/F=1.4)
- 表3.3.6 湾曲反応度の再評価(pad間gap=0.4mm,P/F=1.0)
- 表3.3.7 湾曲反応度の再評価(pad間gap=0.4mm,P/F=2.6)

図 リ ス ト

- 図2.1.1 湾曲反応度解析計算フロー
- 図2.1.2 BEACON及び核計算コードの軸方向メッシュの対応関係
- 図2.1.3 ϕ, ϕ^* の内挿説明図
- 図2.3.1 集合体径方向位置と移動反応度の関係(60万kWe)
- 図3.1.1 FFTF炉心配置図
- 図3.1.2 二次元RZ体系図
- 図3.1.3 FFTF燃料集合体・軸方向寸法図
- 図3.2.1 燃料反応度値の径方向分布
- 図3.2.2 集合体径方向位置と移動反応度の関係
- 図3.2.3 集合体径方向位置と移動反応度の関係
- 図3.2.4 集合体径方向位置と移動反応度の関係(参考;反射体がSUSの場合)
- 図3.2.5 出力・流量比対湾曲反応度のパッド間ギャップ依存性
- 図3.2.6 出力・流量比対湾曲反応度のYokeギャップ依存性
- 図3.2.7 出力・流量比対湾曲反応度の支持板ギャップ依存性
- 図3.2.8 集合体列ごとの湾曲反応度(I)
- 図3.2.9 集合体列ごとの湾曲反応度(II)

図3.3.1 中性子束分布の比較

図3.3.2 集合体出力分布の比較(暫定組成及び詳細組成)

図3.3.3 出力・流量比対湾曲反応度のパッド間ギャップ依存性

図A.1 P/F対変位量のパラメータ依存性(パッド間ギャップ)

図A.2 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心拘束機構とのギャップ)

図A.3 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心支持板ギャップ)

図A.4 集合体ごと径方向変位(パッド間ギャップ0.4mm)

図A.5 集合体ごと径方向変位(パッド間ギャップ1.0mm)

1. 緒 言

高速炉の受動的な安全特性を高めるには、種々の受動的反応度フィードバック効果を十分活用することが不可欠である。反応度フィードバック効果のなかで、炉心変形に起因する反応度効果は現状、評価の不確かさが大きいもののひとつである。米国の高速実験炉「FFTF(Fast Flux Test Facility)」においては、受動的安全性試験(フェーズ I 試験)が1986年に実施されたが、炉心変形に起因する反応度をより精度よく測定するためにフェーズ II 試験が計画された。このうち、反応度効果実験をフェーズ IIB 試験と称している。(フェーズ IIA 試験はGEM(Gas Expansion Module)の検証)

動燃事業団では、国際ワーキンググループのもとでフェーズ IIB 試験の解析を行うこととなり、タスク・フォース(FFTF-PST検討会)が組織され、平成3年度から平成4年度にかけて試験条件の検討・評価を目的とする予備解析を行った。FFTF-PST検討会における解析作業の項目と担当課室を以下に示す。

- 炉心湾曲計算 実験炉技術課及び機器構造開発部構造工学室
- 湾曲反応度計算 技術開発部プラント工学室
- 炉心・プラント動特性解析 安全工学部原子炉工学室及び高速炉安全工学室

本報告書はこの中の湾曲反応度計算の結果をまとめたものである。計算作業にあたり、湾曲反応度計算コードを整備したのでそれについても報告する。炉心湾曲計算のうち、実験炉技術課で実施されたものについては報告書が既に発行されている(1)。

湾曲反応度は30%流量からのULOF事象を想定して評価された炉心湾曲量をもとにして計算した。本計算では、二次元RZ体系において基準炉心の燃料反応度分布を関数形表示し、一次摂動近似を適用して湾曲反応度を求めた。報告書では、出力・流量比と湾曲反応度の関係を、集合体間のパッドギャップや炉心拘束機構と炉心間のギャップなどをパラメータとしてまとめた。

以下、第2章で湾曲反応度計算コードの作成・整備について、第3章で「FFTF」炉心の湾曲反応度解析についてそれぞれ述べる。付録には、実験炉技術課による

炉心湾曲量解析結果の一部を参考として添付した他、湾曲反応度計算の代表ケースの入力データを添付した。

2. 湾曲反応度解析コードの作成

2.1 コードの計算内容

(1) 基本方針

炉心変形解析コードBEACON(2)からの変位量を受取り、湾曲反応度は二次元RZモデルにて一次摂動により集合体ワースの変位前後での差をとることにより求める。

コードの中核となる摂動計算部分には、既存の摂動計算コードPERKY(3)を利用するが、PERKYそのものには手を入れず、 ϕ 、 ϕ^* の変換コードを作成し、変換前及び変換後の ϕ 、 ϕ^* を用いてPERKYを2ケース実行し、その結果(反応度)の差から湾曲反応度を得るものとする。 ϕ 、 ϕ^* の変換とは各集合体ごとに変位後の位置での ϕ 、 ϕ^* を内挿により求めてこれをもとにした仮想的な分布へと変換することである。(計算方法の項参照) 基準体系(変位前)の ϕ 、 ϕ^* は拡散計算コードCITATION(4)により求めておく。

当面、一連の実行で1タイムステップ、集合体列では一種類の集合体(組成や変位の観点からひとまとめとした集合体)の計算ができるようにする。1つのタイムステップでの反応度を求めるには、集合体の指定を変えながら(断面積も変えて)複数ケースを実行して、装荷割合に応じて結果の重みをとることとなる。

軸方向の変位は扱わないものとする。

(2) 反応度計算方法

$$\text{湾曲反応度} = \int \phi_b \delta \Sigma \phi_b^* dv / I_p - \int \phi_a \delta \Sigma \phi_a^* dv / I_p \quad \text{--- (A)}$$

ここで、 $\delta \Sigma$ は燃料が体系に加わることによる断面積変化(～燃料の断面積)、 I_p は摂動分母、 ϕ_a ・ ϕ_b はそれぞれ変位前、変位後の ϕ を示す。*は随伴を示す。 $\int \phi \delta \Sigma \phi^* dv$ は単純化表示しているが、実際には摂動理論に基づく表式になる。

(A)式の第1項、第2項はそれぞれ変位後、変位前の集合体ワースを示す。今回は燃料の原子数密度を2倍したマクロ断面積ともとの断面積との差をとる従来の密度係数の考え方で(A)式の各項を求めた。変位に伴うNa排除による効果は小さいと仮定して扱わない。

尚、(A)式の第1項、第2項それぞれを燃料と真空またはNaとの置換反応度で求める方法も考えられるが、どちらも拡散係数の点から問題がある。即ち、真空では拡散係数が発散し、また、Naでは拡散係数が非常に大きくなりこれと集合体との断面積差をとる方法では非物理的な集合体ワースが計算された。(漏洩項の減少が主たる置換反応度となった) このようなきわめて薄い物質との置換については拡散理論や一次摂動の適用に無理があるためである。

実際の摂動コードの使い方としては、一次摂動のオプションにより(A)式の第1項、第2項をそれぞれ摂動計算で求め、両者の差を取るようになる。両者の差を自動的に取るにはPERKYの実行を外部で制御する必要があるが、今回はそこまで行わず両者の差は計算者が手計算するものとする。

(3) 計算の流れ

データの受渡しを含めた計算の流れを図2.1.1に示す。ここでは、マクロ断面積と基準体系(変位前の体系)での ϕ 、 ϕ^* が既に得られているとしている。計算の中核となる既存の摂動計算コードPERKYを手を入れずに利用するため、全体を一つのコードとしてまとめずに各計算部分をモジュール化するとともに、データの受け渡しを円滑にすることとした。

計算コードごとの計算項目を以下に示す。§2以降が今回作成したコードに関わる部分である。§5では既存のPERKYをそのまま使い、§1,2,3,4についてはデータ変換のための小コードを作成することとする。これらコード間ではファイルによりデータを受け渡す。このようなモジュール化により、計算作業はステップが多くなるが、PERKYをまったく手をいれず

に利用できるとともに、コード全体がみわたしやすくなり、保守や部分的な改良が容易となる。

§1. 基準体系のマクロ断面積及び ϕ 、 ϕ^* 作成(従来と同じ)

- ① マクロ断面積作成(SLAROM等)
- ② ϕ 、 ϕ^* 計算(CITATION)

§2. 密度計算用マクロ断面積作成(PDSCHG)

- ① 基準体系のマクロ断面積読み込み及び原子数密度2倍化

§3. 変位置の変換(EDIT)

- ① 変位データの読み込み(変位絶対値・方位)
- ② R方向変位への変換
- ③ 列ごとの変位の平均化(指定集合体のみ)
- ④ 核計算軸方向メッシュへの内挿
- ⑤ FCHGの入力データの作成

§4. ϕ 、 ϕ^* 分布の変換(FCHG)

- ① ϕ 、 ϕ^* 分布の読み込み
- ② ϕ 、 ϕ^* の多項式近似、係数を求める。
- ③ 変位後の位置での ϕ 、 ϕ^* の計算(内挿)
- ④ 変位後の ϕ 、 ϕ^* 分布をファイルへ書く

§5. 摂動計算(PERKY)

- ① ワース1計算(変位後 ϕ 、 ϕ^*)
- ② ワース2計算(変位前 ϕ 、 ϕ^*)
- ③ (ワース1)-(ワース2)

当面、③は手計算としている。§2のPDSCHGは原子数密度を2倍した組成のマクロ断面積を作成するものであり、密度係数として燃料ワースを求めるために必要である。

(4) 軸方向メッシュの内挿について

BEACONの軸方向メッシュ分割は核計算のメッシュ分割とは必ずしも一致しない。一般的には核計算のメッシュ分割の方がこまかい。従って、どちらかのメッシュに統一して計算を行う必要がある。

BEACONの軸方向メッシュ分割に統一した場合、軸方向のマクロ断面積の割当てがむずかしくなる場合がある。即ち、軸方向にマクロ断面積が変わる場合、(燃焼により組成の違いが生じた場合など)マクロ断面積の軸方向分割がBEACONの軸方向メッシュ分割と一致するとは限らない。

このように考えると、核計算のメッシュ分割に統一する方が良いと思われる。この場合、BEACONの変位を核計算のメッシュ分割点に内挿することとなる。正確には核計算のメッシュ中心へ内挿する。

尚、BEACONでは下端メッシュの番号を1としている。核計算では慣例に従い、上端からメッシュを数えることを前提とする。

以上の考えに基づいたBEACON、核計算のメッシュの関係を図2.1.2に示す。

(5) ϕ 、 ϕ^* の変換方法(a) ϕ 、 ϕ^* の多項式近似

変位前の体系の ϕ 、 ϕ^* を多項式近似することにより、どの位置の(メッシュ点以外でも) ϕ 、 ϕ^* も求められるように準備する。

多項式近似はCubic Spline関数により行う。

即ち、 X_i をflux計算点、 $F(X)$ をfluxとして以下のように $F(x)$ を表す。

尚、 $F_i = F(X_i)$ とする。

$$\begin{aligned} F(x) &= F_1 + B_1(X-X_1) + C_1(X-X_1)^2, & \text{for } X < X_1 \\ &= F_i + B_i(X-X_i) + C_i(X-X_i)^2 + D_i(X-X_i)^3, & \text{for } X_i \leq X \leq X_{i+1}, \\ & & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ &= F_n + B_n(X-X_n) + C_n(X-X_n)^2, & \text{for } X > X_n \end{aligned}$$

各 X_i での $F(X)$ の2階微分(但し、両端 $i=1$ 及び n では1階微分)までの連続性からすべての係数が決まる。

(b)計算操作

計算操作を以下に示す。図2.1.3はその説明図である。

①変位後の集合体内のメッシュ点位置を決定する。変位前の集合体の各メッシュ点がBEACONからの変位量に等しいだけ移動するとする*。また、対応するメッシュ点を含む各要素の体積を変位前後で保存する。(変位後の体積要素は変位前の体積要素そのままを用いるので自動的に保存される。)

*RZモデルのため、R方向に移動した場合、各メッシュ体積を保存すると各メッシュの間隔が移動前と異なってくる。そのため、各メッシュの移動量を異ならせる必要がある。但し、移動量が数mmではこの効果は小さいので無視する。

②あらかじめ求めておいた多項式の係数により、変位後の集合体内の各メッシュ点(破線)での ϕ 、 ϕ^* を計算する。

③各集合体列の ϕ 、 ϕ^* を変位後の ϕ 、 ϕ^* で置き換える。

注)上記の操作を、集合体列、軸方向メッシュ点ごと、群ごとに行う。

④変位後の ϕ 、 ϕ^* ファイルを同一のフォーマットで作成する。

(c)注意点

移動反応度計算によく用いられる方法、即ち、となりの集合体のワースとの差から反応度勾配を求めておき移動距離を乗じる方法と違って、実際に移動した位置でのワースを求めることとなる。このため移動距離が小さく、メッシュ点間隔が大きいと、内挿誤差がでやすい。即ち、移動位置での ϕ 、 ϕ^* が精度良く求まる程度にメッシュ点間隔を十分細かくとる必要がある。

制御棒のモデル化は一考を要する。現状、以下の二つが考えられる。
正確なモデル化には三次元モデルが必要となる。

①薄いリング状にモデル化する。列内メッシュ数は燃料とは異なってもよいものとする。制御棒のとなりの集合体列では、制御棒側へ変位するとその列に含まれる全燃料集合体が制御棒内の中性子束場へ移動することになる。燃料集合体の多くは実際には制御棒と隣接していないが、RZモデルゆえやむをえない。

②同一の集合体列の燃料と混合させる。この場合、核計算への影響が避けられない。特に、制御棒が挿入状態にある場合は影響が大きいと考えられる。

●また、RZモデル化すると必ずしも1リングが1列に対応するとは限らない。制御棒以外でも1列分に満たない薄いリングとすることも許容する。(内外炉心境界や制御棒を含む列等)

(6) 径方向変位の平均化操作について

基本的には1回の摂動計算により、各集合体列では(現実の)1集合体の計算を行うものとする。しかし、この場合計算ケース数が多くなるので、いくつかの集合体をひとまとめにして計算したい場合もありうる。

そこで、ひとつの集合体列に複数の集合体が定義されれば、その集合体について変位を平均化する機能を持たせることとする。

平均化を行う集合体としては、変位や組成が同様なものが考えられる。

(7) 入力すべき制御データ

(a) 変位量及び ϕ 、 ϕ^* の変換のためのデータ

●各集合体列に含まれる集合体の定義

核計算RZモデルでの各集合体列に含まれる集合体の番号
(BEACONでの定義)を入力する。同一集合体列に複数の集合体が定

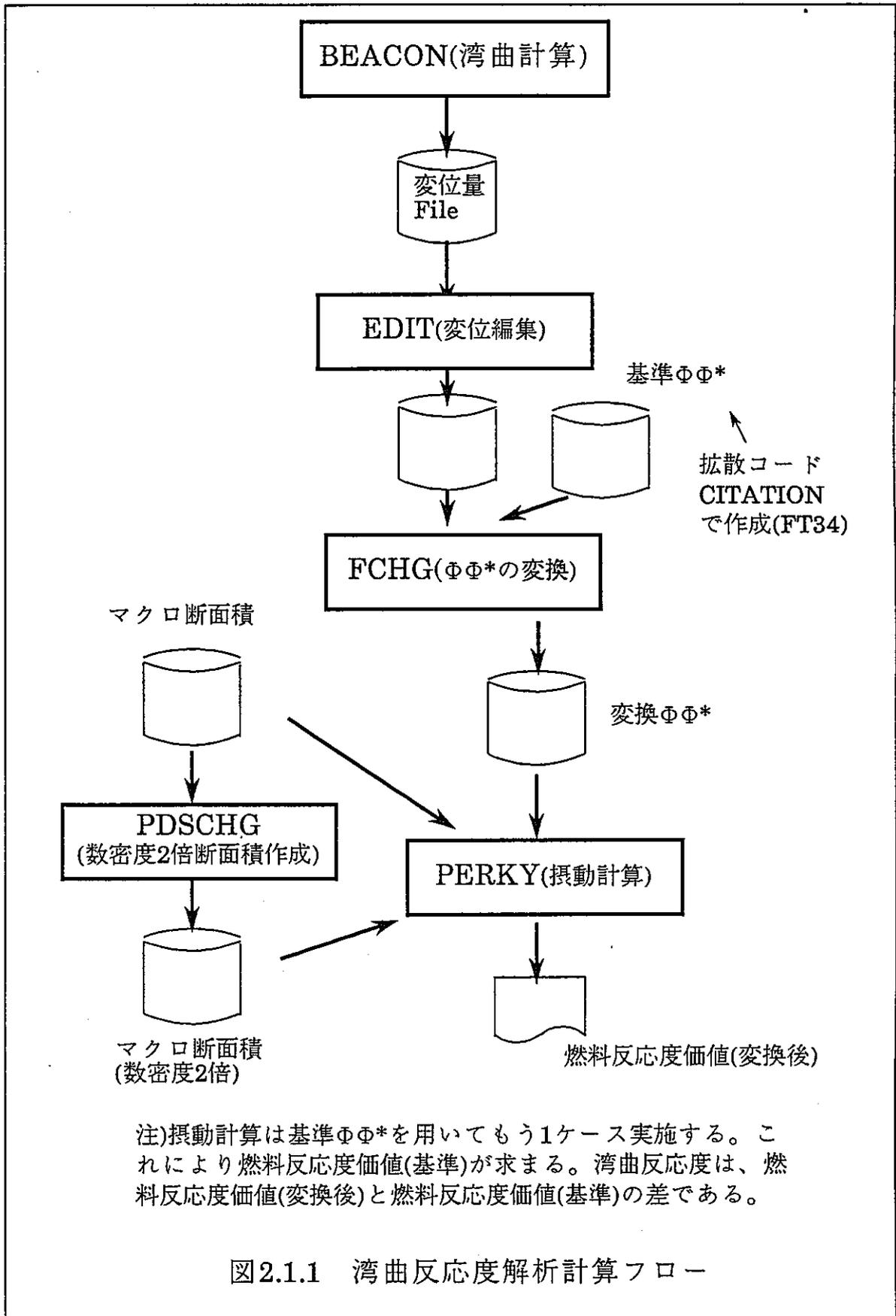
義されるとそれらの変位は平均化される。全集合体の番号を定義しなくてもよいとする。定義されたもののみ計算の対象となる。

- 各集合体列に含まれる径方向メッシュ番号の範囲(核計算における)
- BEACONと核計算の軸方向レベルの対応(核計算の $Z=0$ がBEACONの Z ではいくらか)

(b)振動計算のためのデータ

- 各集合体列、各軸方向領域のマクロ断面積番号
- そのほか振動計算に必要なデータ(PERKYのデータ)

マクロ断面積は各集合体列、各軸方向領域で種類定義できるものとする。従って、同一領域であっても別のマクロ断面積をもつ集合体の計算は別ケースで扱う。



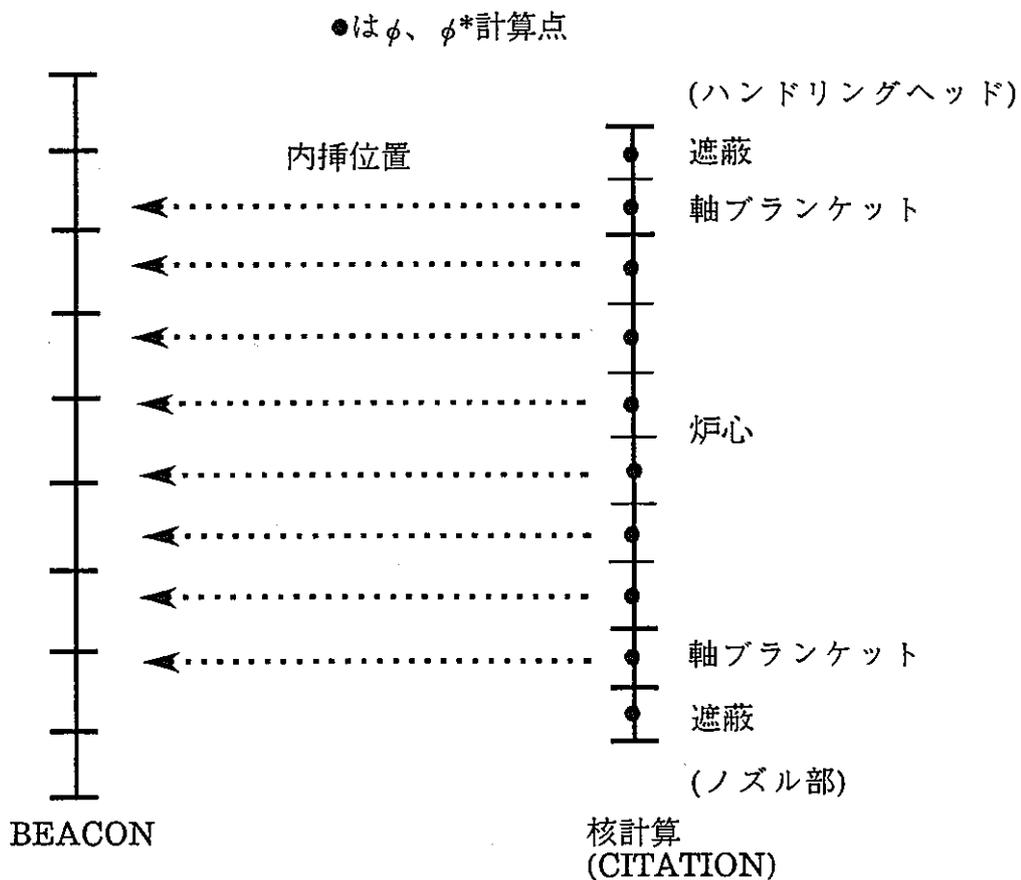


図2.1.2 BEACON及び核計算コードの軸方向メッシュの対応関係

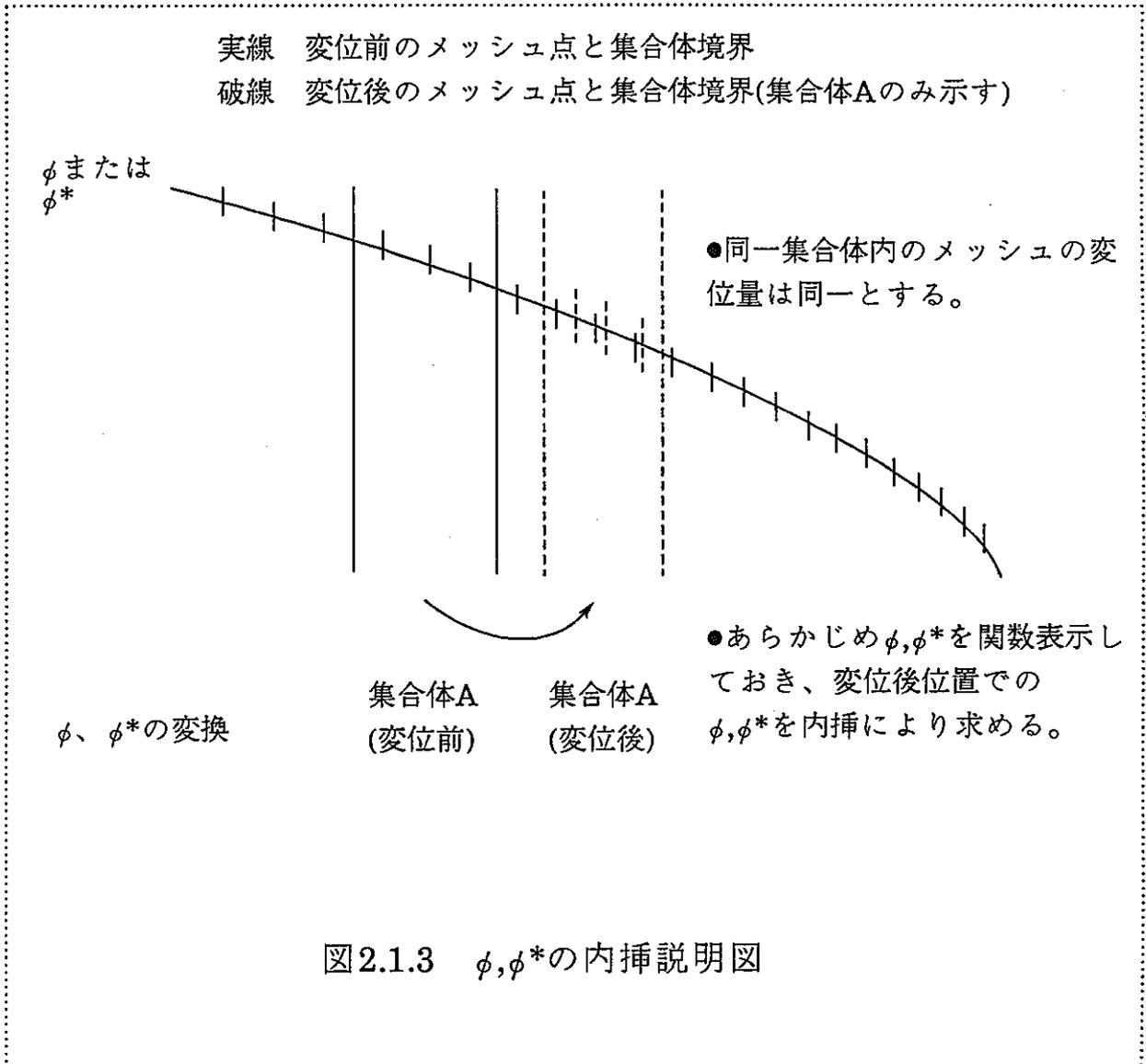


図2.1.3 ϕ, ϕ^* の内挿説明図

2.2. コードの使用方法和注意事項

コードの使用方法を§2.2.1に示す。また、注意事項を§2.2.2に示す。使用方法を誤らないためと、計算精度に影響するメッシュ選定などを適切に行うため計算コードの計算内容を熟知している必要があるため、使用に際しては§2.2.1・§2.2.2の他、§2.1も同時に読むことを勧める。

2.2.1 使用方法

計算の流れは図2.1.1に示したとおりである。(§2.1参照) PERKYについては計算の流れを良く知った上で本来の入力マニュアルに従ってデータを作成すればよい。ここでは、あらたに作成したEDIT, FCHG, PDSCHG, DUMP, DUMPFT15の使用法を示す。DUMP, DUMPFT15はデータ確認・デバッグ用であり通常は必要ない。

- EDIT BEACON変位量ファイルの編集(§2.1参照)
- FCHG $\phi\phi^*$ の変換(§2.1参照)
- PDSCHG 原子数密度2倍の断面積作成(§2.1参照)
- DUMP CITATIONからの $\phi\phi^*$ ファイル(FT34)のdump
- DUMPFT15 BEACONの変位量ファイルのdump

次ページ以降に、各プログラムの使用方法、データセット名等を示す。

ユーティリティ・プログラム

プログラム名 : EDIT				
概要と 実行方法	BEACON変位ファイルを読み込んで、 $\Phi\Phi$ *変換プログラム'FCHG'の入力データを作成する。 実行は下記CLISTファイルをEDIT状態としてEXECコマンドを打つ			
データセット				
Source	POC3B13.FFTFPST.DATA(EDITV)			
Load	—			
JCL	—			
CLIST	POC3B13.FFTFPST.DATA(≠EDITV)			
ファイル番号	備考	入出力		
FT05F001	入力データ	入		
FT15F001	BEACON変位ファイル	入		
FT34F001	CITATION $\Phi\Phi$ *ファイル	入		
FT01F001	FCHG入力データファイル	出		
入力データの説明				
<u>RECORD No.</u>	<u>FORMAT</u>	<u>変数名</u>	<u>内 容</u>	<u>備 考</u>
1	*	ICMAX	炉心径方向最大 メッシュ数	CITATION定義
		MS	開始軸方向メッシュNo.	CITATION定義
		ME	終了軸方向メッシュNo.	CITATION定義
2	*	ITIME	BEACON抽出ステップ	
		NTAS	集合体総数	BEACON定義
		LDMAX	軸方向メッシュ数	BEACON定義 (≤ 30)
3	*	Z0	BEACONのZ=0.0と 核計算下端との距離	(cm)
4	*	DZ	BEACONの軸方向 メッシュ幅	(cm)
*5	*	IRS	開始径方向メッシュNo.	CITATION定義
		IRE	終了径方向メッシュNo.	CITATION定義
		NASM	IRS~IREに含まれる 集合体数	BEACON定義 (≤ 50)
		NUMB(i)	IRS~IREに含まれる 集合体No.	BEACON定義 (NASM個必要)
		i=1,NASM		
注)レコード5は必要なだけ繰り返す。レコード5で指定しないメッシュでは 変位は零となる。				

改

ユーティリティ・プログラム

プログラム名 : FCHG	
概要	集合体変位前のΦΦ*ファイルを集合体変位後のΦΦ*ファイルへ変換する。
データセット	
Source	POC3B13.FFTFPST.DATA(FCHG)
Load	—
JCL	—
CLIST	POC3B13.FFTFPST.DATA(¥ FCHG)
ファイル番号	備考 入出力
FT05F001	入力データ(EDITの出力ファイルFT01をattach†) 入
FT34F001	変位前 ΦΦ*ファイル 入
FT35F001	変位後 ΦΦ*ファイル 出
入力データの説明	
<u>RECORD No.</u>	<u>FORMAT</u> <u>変数名</u> <u>内 容</u> <u>備 考</u>
1	* ICMAX 炉心径方向最大メッシュ数 CITATION定義
2	* IRS 開始径方向メッシュNo. CITATION定義 IRE 終了径方向メッシュNo. CITATION定義 IZS 開始軸方向メッシュNo. CITATION定義 IZE 終了軸方向メッシュNo. CITATION定義 ST 変位量 (cm)
注) レコード2を必要なだけ繰り返す。	
実行方法はEDITプログラムと同様	
†あるいは、任意に作成したデータでもよい。	

ユーティリティ・プログラム

プログラム名 : PDSCHG		
概要	PDSマクロ断面積ファイルから原子数密度を2倍にした同一形式のPDSマクロ断面積ファイルを作成するプログラム	
	データセット	
Source	POC3AA3.LIB.FORT(PDSCHG)	
Load	-	
JCL	-	
CLIST		
ファイル番号	備考	入出力
FT01F001	PDSマクロ断面積ファイル	入出
FT06F001		
<p><u>使用方法</u></p> <p>TSSでつぎのように打ち込む</p> <p style="text-align: center;">ALLOC DA(PDSマクロ断面積ファイル名) F(FT01F001) FORT (上記Sourceファイル名)</p> <p>注意) ①入出力ファイルが同じであり、<u>新しい断面積を上書きするので</u>、 あらかじめもとのファイルをコピーして新しい断面積用のファイル を作っておくこと</p> <p>②<u>原子数密度2倍の断面積のPDS名は自動的に変わらないので</u>、 <u>TSS上で変更すること、(PDS名の第6文字目を一定のものに変えるの</u> <u>が簡単である。</u></p> <p>③1つの摂動計算で、もとの断面積と新しい断面積の両方を用いる。 JCLでは両方のファイルをならべて指定する。</p>		

改

ユーティリティ・プログラム

プログラム名 : DUMP		
概要	CITATION ΦΦ*ファイルのDUMPプログラム	
	データセット	
Source	POC3B13.FFTFPST.DATA(DUMP)	
Load	-	
JCL	-	
CLIST	POC3B13.FFTFPST.DATA(¥ DUMP)	
ファイル番号	備考	入出力
FT34F001	CITATION ΦΦ*ファイル	入
FT06F001	NLP	出

改

ユーティリティ・プログラム

プログラム名 : DUMPFT15		
概要	BEACON FT15ファイルのDUMPプログラム	
	データセット	
Source	POC3B13.FFTFPST.DATA(DUMPFT15)	
Load	-	
JCL	-	
CLIST	-	
ファイル番号	備考	入出力
FT15F001	BEACON FT15(変位量)ファイル	入
FT06F001	ターミナルorNLP	出
<p>実行方法</p> <p>FT15F001にBEACON FT15(変位量)ファイルをALLOCATEして、 上記プログラムを実行する。</p> <p>例) FORT 'POC3B13.FFTFPST.DATA(DUMPFT15)'</p> <p>注) メッセージにしたがって、下記データを入力する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 抽出ステップ数 ・ 集合体数(≦500) ・ 軸方向メッシュ数(≦30) ・ 軸方向メッシュ幅(cm) 		

改

2.2.2 注意事項

(1) CITATIONでの $\phi\phi^*$ 作成

BEACON軸方向モデルとの関係から、CITATIONでの軸方向モデルは以下の条件で作成する必要がある。

- 軸方向はfullモデルであること、中心対称性を考慮した上部または下部のみのモデルは本システムでは受け入れられない。
- メッシュ番号は集合体上部からつけること
- 範囲は反応度に寄与する炉心部のみでもかまわない。

(2) PERKYでの摂動計算

(a) 断面積の作成

集合体の密度係数は一般にはマイクロ定数と原子数密度を用いて原子数密度を変化させて(2倍に)求めるが、現状PERKYでのマイクロ定数による摂動の経験が少なく満足に実行できない場合があること、集合体1体ごとに扱う場合のように集合体の数が多いとマイクロ定数による摂動は入力膨大となること(元の原子数密度と2倍の原子数密度を入力する必要があるため)から考えると、マクロ定数による摂動の方が望ましい。

マクロ定数による摂動のためにはあらかじめ2倍の原子数密度によるマクロ定数をも用意しておくことが必要となる。そこで、同じマイクロを用いて2倍の原子数密度によるマクロ定数を作成するサブプログラムPDSCHGを作成した。この使用法は§2.2.1に示した。尚、2倍の原子数密度による自己遮蔽の違いまで立ち戻ったマクロ定数の作成は行わない。(一次摂動の範囲とするため)

(b) 燃料ワース計算値への補正(きわめて重要)

湾曲反応度は前述のように、変位前後の燃料ワースの差で求める。この時、変位前と変位後では変位の大きさに応じて摂動分母が

異なってくる。これは $\phi\phi^*$ そのものの変化以外に変位後の体系でワースが再規格化される効果が加わることを意味している。従って、一次摂動の範囲で $\phi\phi^*$ そのものの変化によるワースの変化をみるという前提が崩れることになる。

そこで、PERKYから計算された変位後のワースには下記の係数を乗じる必要がある。

補正係数 = 変位後の摂動分母 / 変位前の摂動分母

湾曲反応度は微小量なので上記補正の影響が大きく、試計算結果では補正ありとなしでは符号が変わる場合もあった。

2.3 サンプル計算結果

60万kWe炉心を対象として湾曲量をあたえ反応度変化を計算した。計算は以下の2通り行った。このサンプルについては入力データ例は示さない。入力データ例については付録BのFFTFの例を参照のこと。

ケース1 各集合体列が一様に外側へ5mm変位する。

ケース2 炉心支持板膨張を模擬する。即ち、集合体の径方向距離Rが以下のように変位したとする。

$$R' = R \times (1 + \alpha \times \Delta T) \quad \alpha: \text{SUS膨張係数}, \Delta T: \text{支持板温度変化}$$

$\Delta T = 200$ 程度では変位は炉心外周部($R = 140$)で約4.5mmとなる。

径方向の計算モデルは次ページに示すとおり

ケース1による各集合体列ごとの1cmあたり反応度(1体あたり)を図2.3.1に示す。制御棒の湾曲は扱っていない。単位変位による反応度は最外周とその内側の列が大きく、最外周で $-1\text{ }\rho/\text{cm}$ 程度である。制御棒に隣接した集合体については、制御棒の方向へ変位すると負、制御棒から離れると正の反応度が入っているが、これらは物理的に予想できる結果である。但し、これら制御棒と制御棒隣接の燃料は二次元RZ体系ゆえのモデル化であり、正確には三次元解析が必要である。

ケース2による炉心全体の反応度は $-0.126\% \Delta k$ (約 $-33\text{ }\rho$)であった。この時 $\Delta T = 200^\circ\text{C}$ とした。炉心支持板膨張温度係数は約 $-8.2 \times 10^{-6} \Delta k$ であるから 200°C の温度変化に対し反応度変化は約 $-0.164\% \Delta k$ となる。湾曲として求めた反応度の方が(絶対値が)小さいが、本質的に膨張による密度の減少を扱っておらず炉心全体が大きくなるような場合には適用できないためと考えられる。

60万kWe炉心計算モデル(径方向モデル)

(集合体ピッチ=16.07)

列	領域	集合体数	総集合体数	半径(cm)	幅(cm)	メッシュ数
1	CR	1	1	8.437	8.437	3
2	IC1	6	7	22.323	13.886	3
3	IC2	12	19	36.778	14.455	3
4	IC31	6	25	42.187	5.409	3
5	CR	6	31	46.977	4.790	3
6	IC32	6	37	51.322	4.345	3
7	IC4	24	61	65.898	14.576	3
8	IC5	30	91	80.487	14.589	3
9	IC61	12	103	85.630	5.143	3
10	CR	12	115	90.481	4.851	3
11	IC62	12	127	95.084	4.603	3
12	OC1	42	169	109.686	14.602	3
13	OC2	48	217	124.290	14.604	3
14	OC3	48	265	137.350	13.06	3
15	SUS	126	391	166.838	29.488	7
16	SUS	150	541	196.248	29.410	5

●IC1は内側炉心第1層を示す。制御棒を含む列は制御棒をはさむ2つの列に分けた。(内側炉心第3層はIC31、IC32の2層)

●軸方向はメッシュ幅5cmである

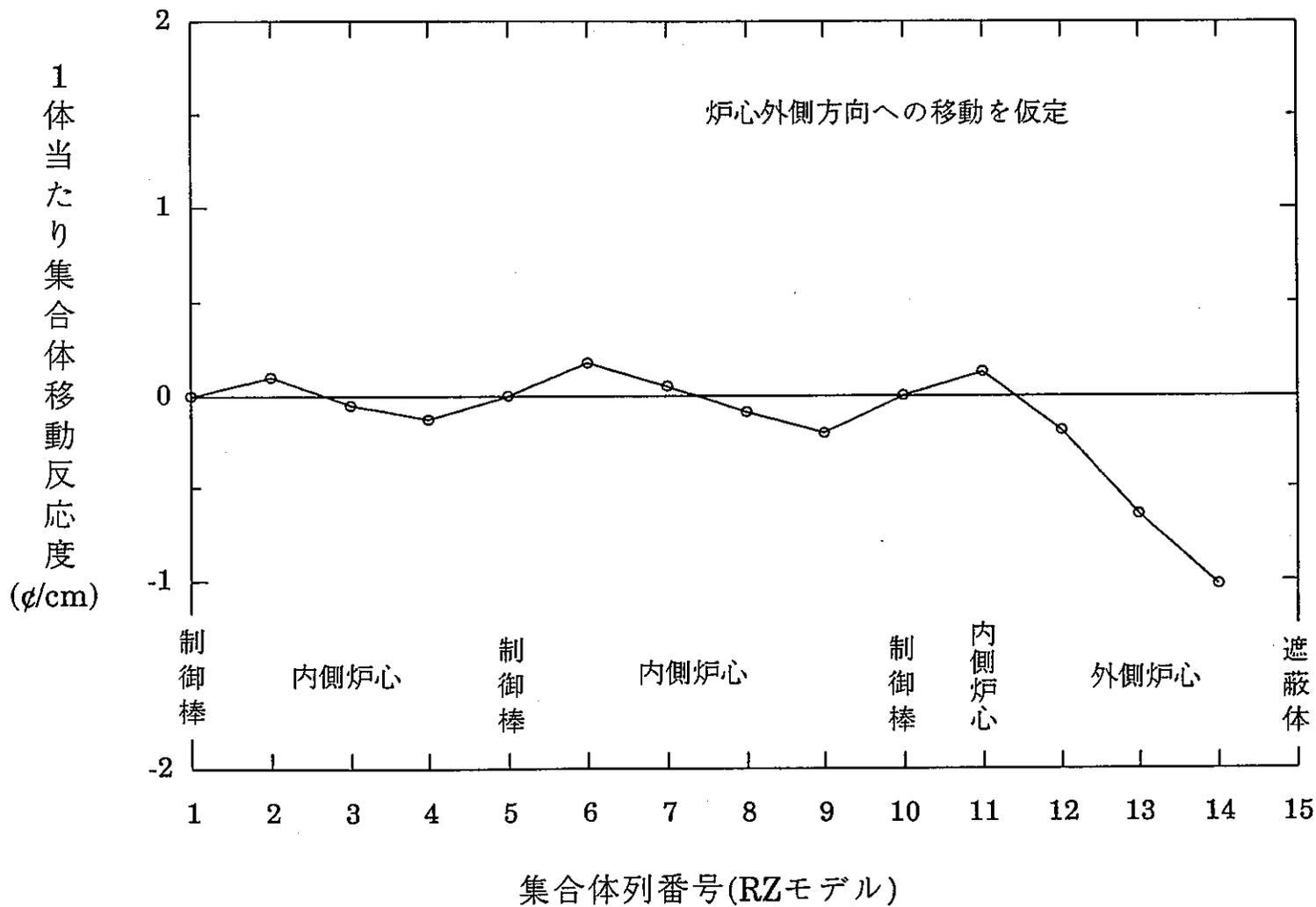


図2.3.1 集合体径方向位置と移動反応度の関係(60万kW)

2.4 まとめ

高速炉の湾曲反応度計算コードを作成・整備した。本計算コードでは炉心内の燃料反応度分布を3次関数でスムーズに表示し、二次元RZ体系・一次摂動近似の範囲で湾曲に伴う反応度を精度よく求めるアルゴリズムを採用した。本計算コードは「FFTF」以外の炉心にも適用可能である。

本計算コードは二次元RZ体系用に作成した。当然、同一径方向領域内では $\phi\phi^*$ は同一であるが、燃料組成の違いは反応度へ反映できるようにした。(例えば、同一径方向領域内にある新旧燃料の扱いができる。) 但し、制御棒の影響など三次元効果は扱えない。従って、次のステップは本アルゴリズムを三次元体系に拡張することであろう。

3. FFTF炉心の湾曲反応度解析

本解析では、当初受動安全試験の対象炉心の原子数密度が入手できなかったの
で、プラント工学室で原子数密度を設定して主要な解析を行った。その後、
FFTF側から原子数密度が送付され、追加解析を行った。本章では、前者の解析結
果を中心に述べ、後者の解析結果については、追加解析として最後に述べる。
尚、代表ケースの入力データを付録Bに示す。

3.1 炉心の設定

(1) 炉心体系

典型的なFFTF炉心配置を図3.1.1に示す。これを図3.1.2のように二次元
RZモデル化した。制御棒はリング化して2列にわけた。集合体の軸方向寸
法を図3.1.3に示す。

本解析の手法では燃料ワース径方向分布をスプライン関数フィッティン
グして内挿するため、径方向のメッシュ幅は十分小さくする必要がある。
当初、一集合体列(約10cm幅)あたり3メッシュとして反応度を求めた。燃料
ワースが炉心外側の方が小さくなっているにも拘わらず、外側への湾曲量
に対して正の反応度が得られたケースがあった。これはメッシュ幅が大き
いために関数フィッティングがうまくいかなかったためと考えられる。

結局、一集合体列(約10cm幅)あたり7メッシュとして反応度を求めたと
ころ予想される反応度が得られた。このように、径方向のメッシュ幅は十
分小さくする必要がある。

(2) 炉心組成

FFTFからの炉心原子数密度データが入手できなかったので、炉心組成
を以下のように設定した。

- 炉心の各物質の体積比は文献(5)より表3.1.1のとおりとした。

- 炉心は内外炉心の均質2組成とする。燃焼はさせず新燃料とする。Pu同位元素比は58/24/14/4(Pu239/240/241/242)

- 実効増倍率=1.002とする。また、炉心内の集合体出力はBEACONで使
用した炉心出力分布をもとに、内外炉心の集合体出力のピーク比を合わせる
ように内外炉心のPu富化度を決めた。

この結果、Pu富化度比は内外炉心=21.64/23.00.(w/o)となった。得られた中
性子束分布や出力分布は、詳細炉心組成(後日FFTF側から送付されたもの)によ
る結果と比較した方が良いので、後述の§3.3(詳細炉心組成による解析結果)に
示した。

表3.1.1 各領域の物質体積比(%)

領域	燃料	冷却材	構造材 (特記なきものはSS)
炉心	35.0*	41.0	24.0
ガスペナム		41.0	24.0
内側反射体		14.0	(Inconel 600) 62.0 (SS) 24.0
外側反射体		13.0	(Inconel 600) 54.0 (SS) 33.0
径方向遮蔽		30.0	70.0
軸方向遮蔽		41.0	54.0
制御棒		90.0	10.0

*スミヤ密度86%

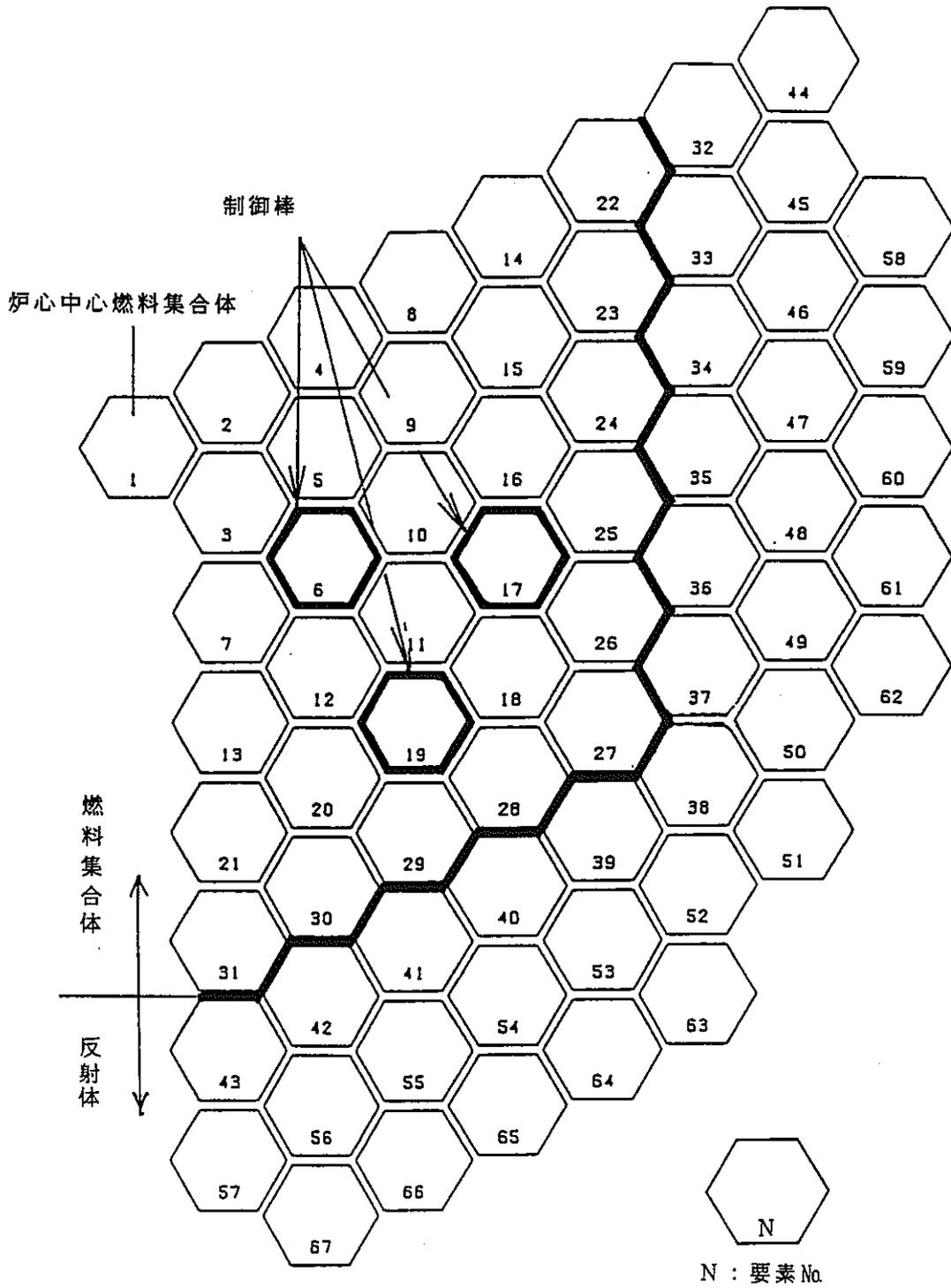


图3.1.1 FFTF炉心配置图

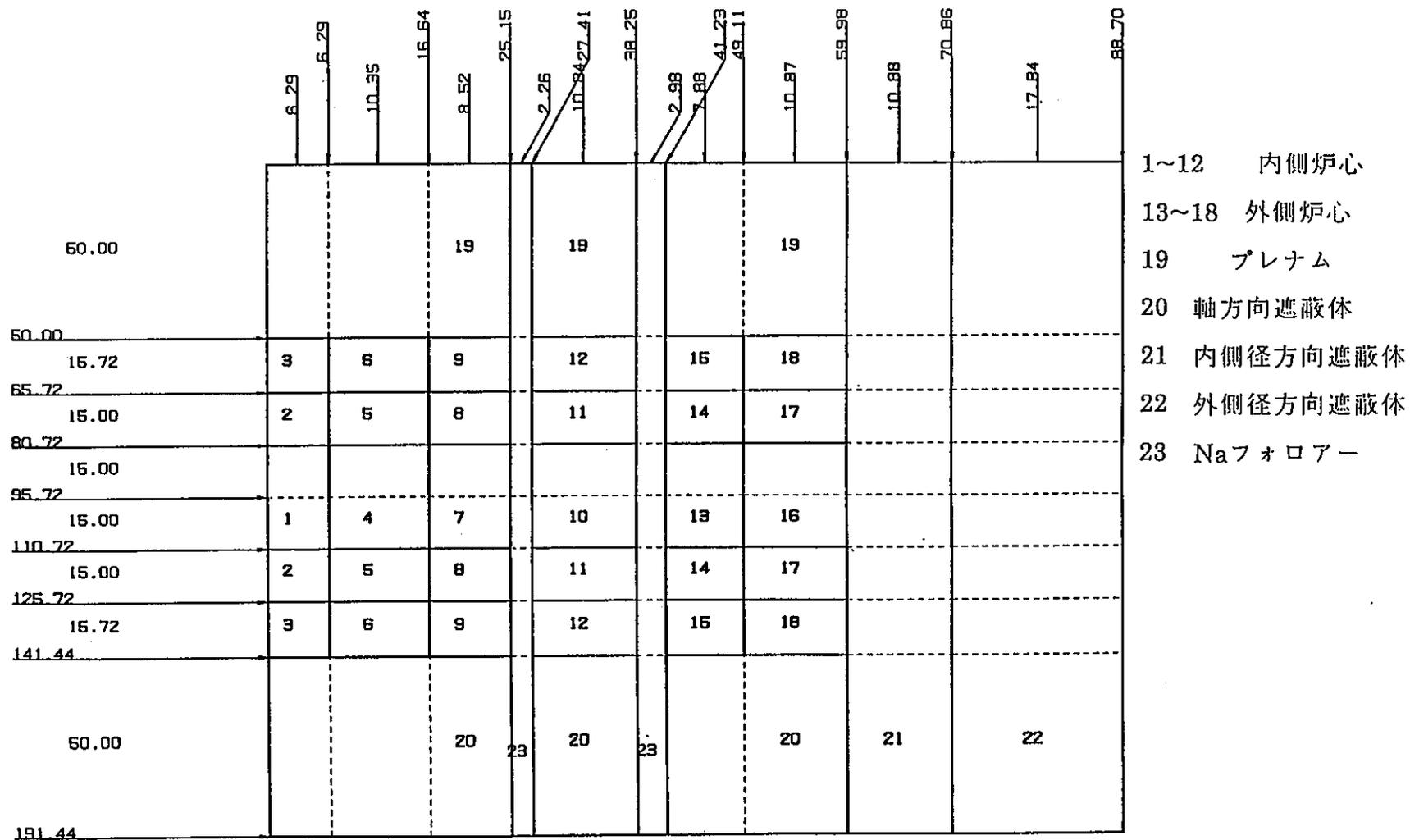


図3.1.2 二次元RZ体系図

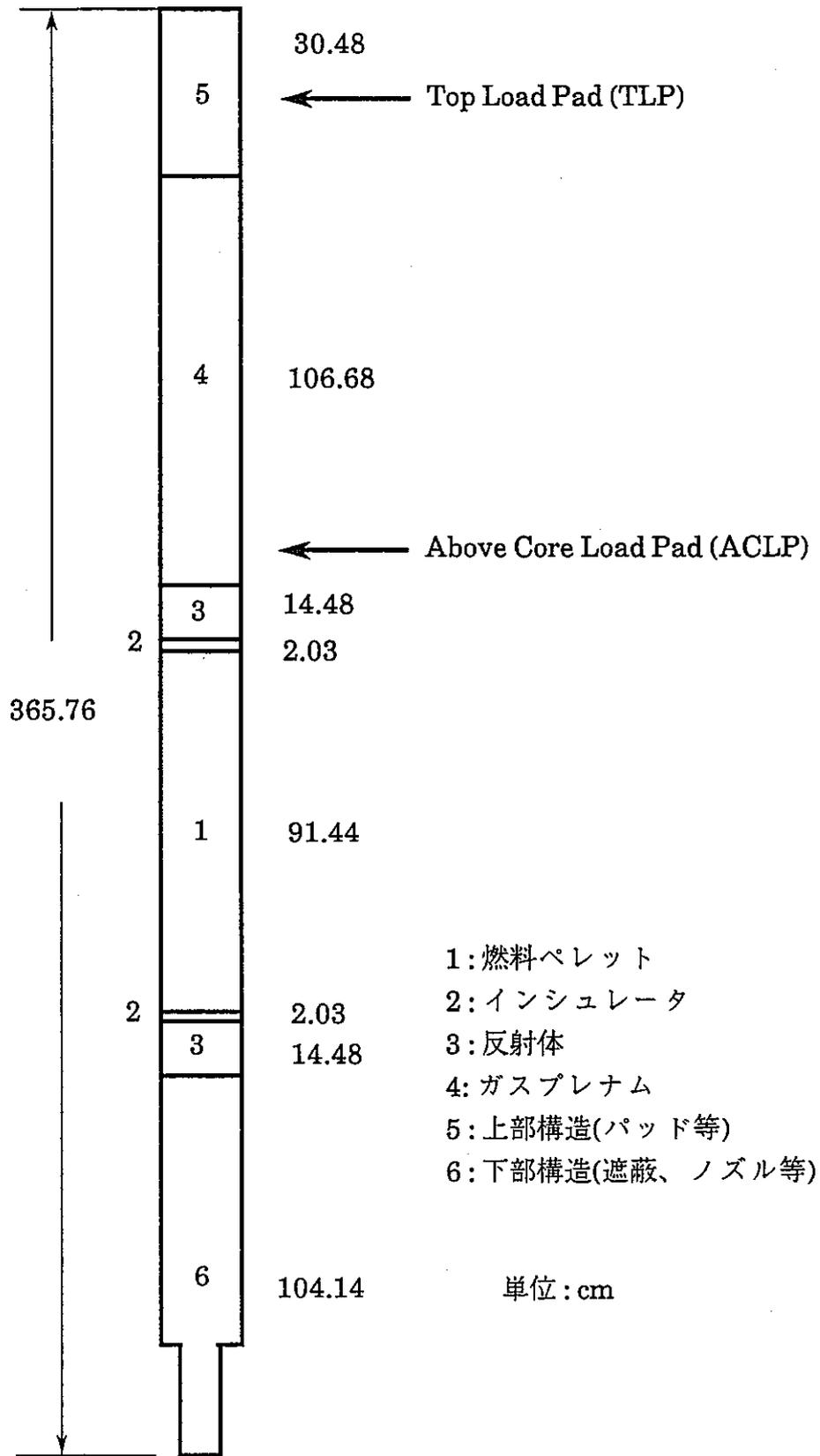


図 3.1.3 FFTF燃料集合体・軸方向寸法図

3.2 解析結果

(1)燃料ワース分布

径方向の燃料ワース分布を図3.2.1に示す。この勾配が移動反応度に比例する。特徴としては炉中心近辺を除き、内側炉心でも勾配が大きいことである。これは大型炉にはない特徴で、小型炉の特徴である。最外周集合体で勾配があまり大きくなっていないのは、Niが主成分で中性子反射効果の大きいインコネルを反射体を使用しているためであろう。(次の(2)参照)

(2)単位移動量当たり燃料反応度

単位移動量当たり燃料反応度を、集合体1体当たり及び集合体1列当たりについて径方向にプロットしたのが、図3.2.2と3.2.3である。集合体1体当たりでは最外周集合体より内側炉心の3列4列が単位移動あたりの反応度が大きい。参考として、反射体にSUSを用いた場合の集合体1体当たり移動による反応度を図3.2.4に示す。(炉心組成がやや異なっているものを用いたが大差はない) この場合は最外周集合体の移動による反応度がもっとも大きくなっている。従って、反射体の組成が大きく移動反応度へ寄与することがわかる。

列単位で見ると外側ほど集合体数が多いため相対的に外側集合体の反応度が大きくなるものの、やはり内側炉心の最外周集合体がもっとも大きい。

(3)湾曲反応度解析結果

出力流量比(P/F)と湾曲反応度の関係を、集合体間ギャップ及びYokeギャップをパラメータとして解析した。参考としてBEACONの解析結果(集合体変位量)を抜粋して付録に示す。(図A.1~3) パラメータの範囲は下記のとおり、下線は基準値。尚、BEACONではパッド圧縮剛性もパラメータとしているが、効果が小さいため反応度への影響は検討していない。

●集合体間ギャップ 0.0mm, 0.4mm, 0.7mm, 1.0mm

●集合体/Yokeギャップ 0.0/0.0mm, 3.5/2.5mm(TLP/ACLP位置)

●支持板ギャップ 0.0mm, 0.5175mm

集合体間ギャップをパラメータとした場合の出力流量比(P/F)と湾曲反応度の関係(他のパラメータは基準値)を図3.2.5に、集合体とYokeギャップをパラメータとした場合の出力流量比(P/F)と湾曲反応度の関係(他のパラメータは基準値)を図3.2.6に、支持板ギャップをパラメータとした場合の出力流量比(P/F)と湾曲反応度の関係(他のパラメータは基準値)を図3.2.7に示す。全結果を表3.2.1にまとめた。

(a)集合体間ギャップの影響

湾曲反応度は初期の集合体間ギャップに大きく依存する。これは出力流量比が大きくなるほど顕著である。出力流量比が2程度の場合、初期ギャップが1.0mmの場合、初期ギャップなしの場合より約70%大きい反応度が入ることがわかる。

図3.2.5からわかるように、初期の集合体間ギャップが零の場合、計算したP/Fの範囲では湾曲反応度はほぼ零か負であり、P/Fが大きくなるほど大きな負の反応度が添加される。

初期の集合体間ギャップが零でない場合、P/Fを0.2~0.4近辺から大きくすると、いったん正の湾曲反応度が入り、その値はP/Fとともに大きくなるが、あるP/F以上になると減少に転じる。反応度が最大となるP/F値と最大の湾曲反応度は初期の集合体間ギャップが大きいほど大きい。

付録に示すBEACON解析結果(図A.1)とも照合すると、以上のことは次のように説明できる。

初期に集合体間ギャップが存在する場合、P/Fの増大により炉心部はいったん炉心中心方向へ変位する。これは集合体の湾曲により始めに集合体頂部のパッドギャップが閉じるために、その反力により引き起こされる。これに対応して正の反応度が入る。この場合、初期のパッド

ギャップが大きいほど内側への変位が大きくなり、正の湾曲反応度も大きくなる。内側への変位は中間パッド(ACLP)が閉じるまで続き、これが閉じた後は、その反力により炉心部は逆に外側へ変位を始める。これにより反応度は減少する。初期のパッドギャップが零の場合、途中で中間パッドギャップが閉じた後と同様の挙動となり反応度が減少すると考えられる。

付録の図A.1と比較するとわかるように、湾曲反応度は最外周炉心集合体の変位ときわめてよく整合している。但し、詳細にみると湾曲反応度が最大となった後、減少に転じた時の減少傾向は変位量と反応度とで異なる。即ち、BEACONによる最外周炉心集合体の変位の減少割合に比べて、湾曲反応度の減少割合は緩やかである。これは、最外周炉心集合体と他の炉心集合体との変位挙動の違いによる。このことから、湾曲反応度が最外周炉心集合体に支配されるとは定量的にはいえない。

図3.2.8, 3.2.9は初期のパッド間ギャップが0.4mm及び1.0mmの場合の、代表的な出力流量比についての、集合体列ごとの湾曲反応度である。最外周集合体(第6列)の寄与がもっとも大きい、第4、5列の寄与も小さくないことがわかる。

(b)集合体パッドとYoke間ギャップの影響

(a)の結果は集合体とYoke間のギャップが3.5/2.5mm (TLP/ACLP位置)の場合のものであり、P/Fが小さいある範囲では、集合体頂部が自由に湾曲できるため、この間は反応度はほとんど入らない。しかし、初期にこれらのギャップがない場合には、集合体頂部の曲がりの反力が、P/Fの小さい早い時期に生じる。この後の挙動は初期ギャップがあり途中で閉じた後の挙動とほぼ同じである。従って、初期ギャップが0の場合、初期ギャップがある場合と比べて、P/Fを小さい方へずらすと挙動はほぼ同じになると考えられる。付録のBEACONの解析(図A.2)は

これを示している。また、図3.2.6の湾曲反応度の結果はそれを反映した反応度変化を示している。

(c)支持板ギャップの影響

図3.2.7の湾曲反応度の結果より、支持板ギャップが大きいと同一の出力流量比に対して反応度が大きい。これは、付録A.3より示されるように支持板ギャップが大きいほど同一のP/Fに対して湾曲量は大きいためである。従って、支持板ギャップが存在すると、同一の湾曲状態となるための出力流量比が小さい方へずれる。

表3.2.1 出力・流量比(P/F)と湾曲反応度の関係(単位 q , $\beta_{\text{eff}}=0.00318$ (FFTFからの提示値))

P/F	パッド間ギャップ*					Yoke ギャップ=0*	支持板 ギャップ =0.5175mm*
	1.0mm	0.7mm	0.4mm	0.2mm	0.0mm		
0.2			-1.2				
0.4	-3.6		1.6		-4.7	5.9	
0.6	5.8		13.1				32.6
0.8			14.7				
1.0	29.5	28.5	13.4	1.5	-14.5	43.7	
1.2			11.7				48.7
1.4	42.7		9.9				
1.6	42.5	25.6	6.3	-14.0	-31.2		
1.8			-0.08				
2.0			-7.3				
2.2	38.0	17.5	-13.7	-33.2	-37.8	30.0	
2.4			-20.5				26.0
2.6	31.9		-27.0				

*基準値は パッド間ギャップ:1.0mm、Yokeギャップ=2.5/3.5mm(ACL/TLP)、
支持板ギャップ:0mm

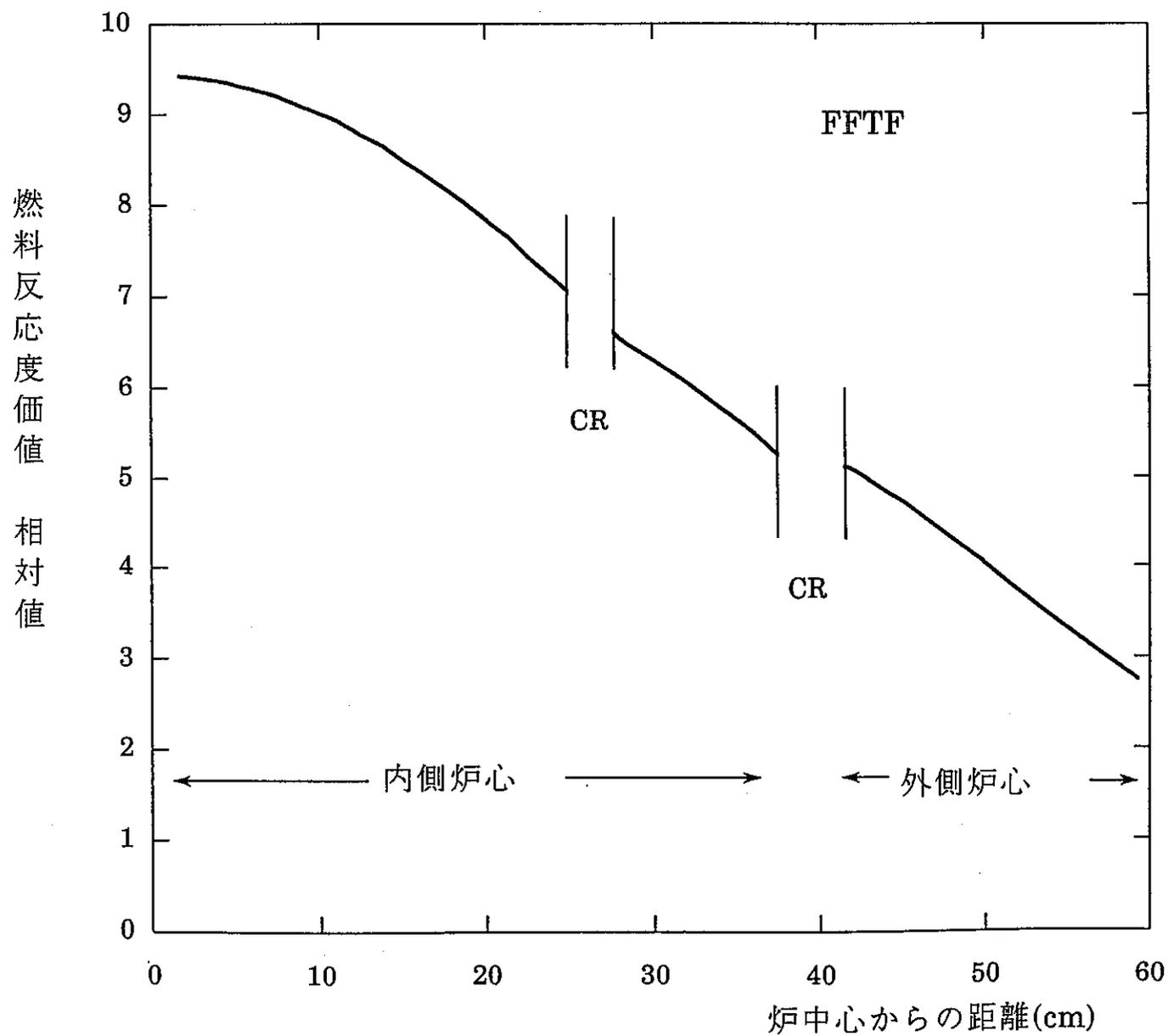


図3.2.1 燃料反応度値の径方向分布

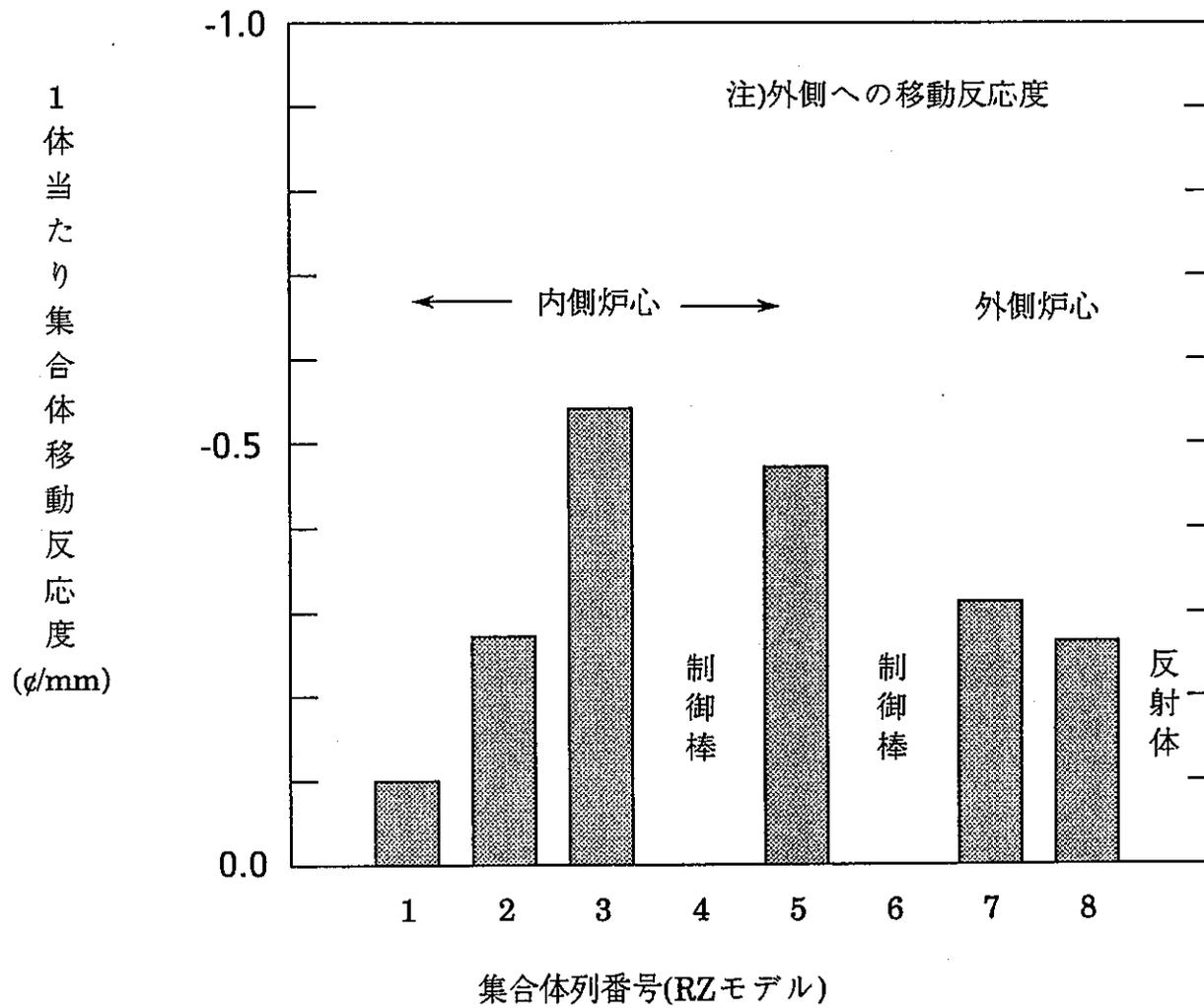


図3.2.2 集合体径方向位置と移動反応度の関係

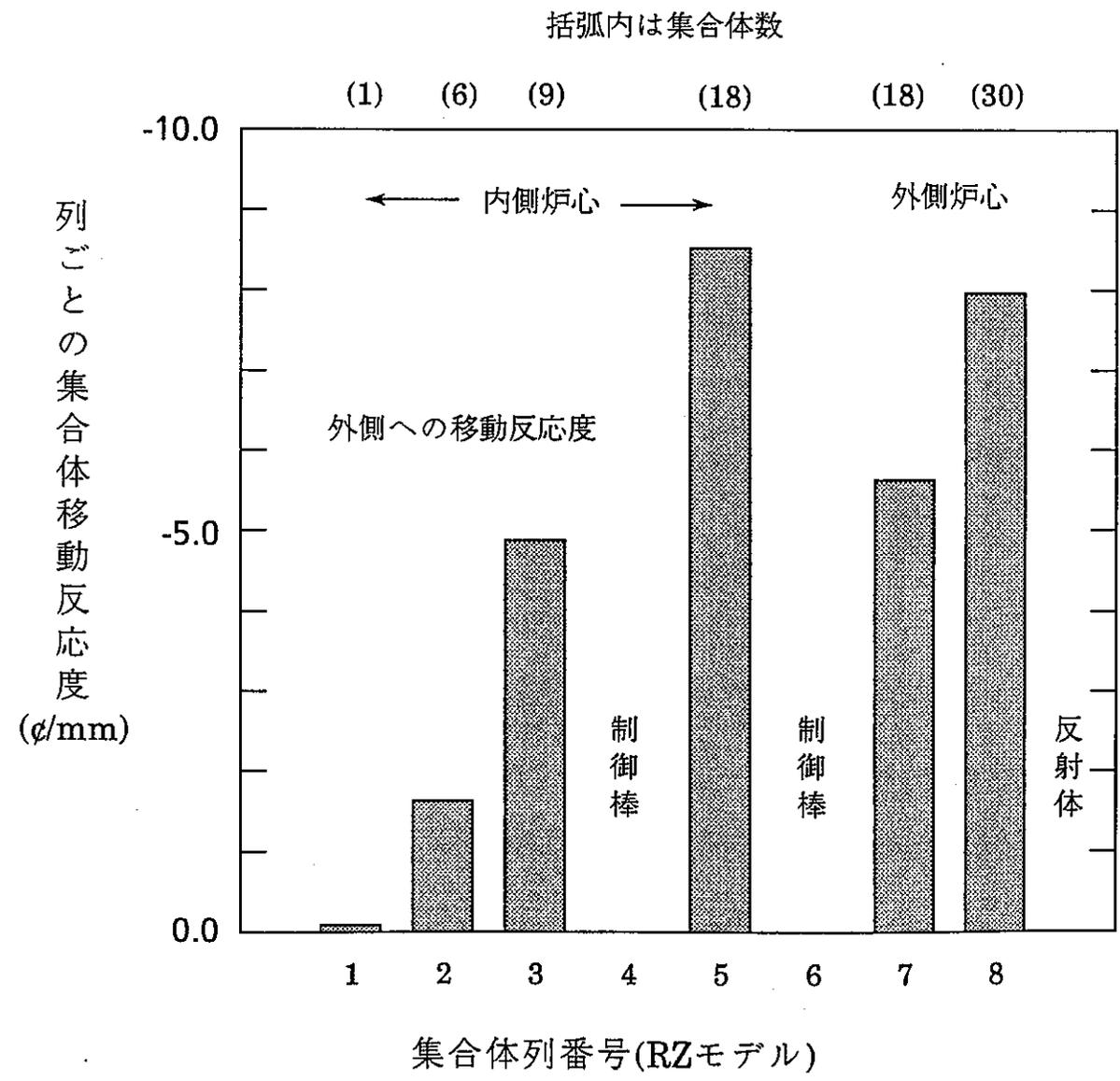


図3.2.3 集合体径方向位置と移動反応度の関係

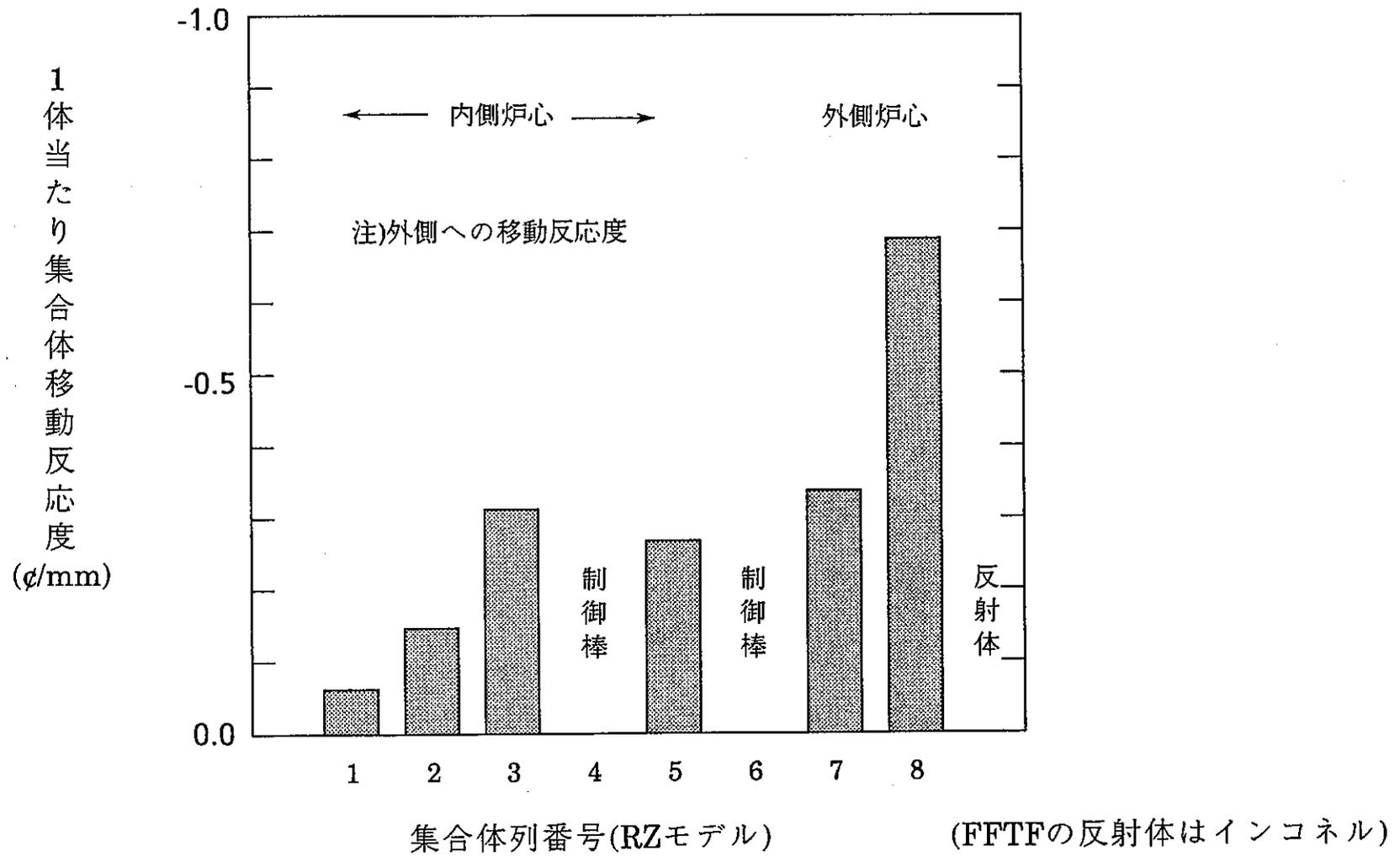


図3.2.4 集合体径方向位置と移動反応度の関係(参考;反射体がSUSの場合)

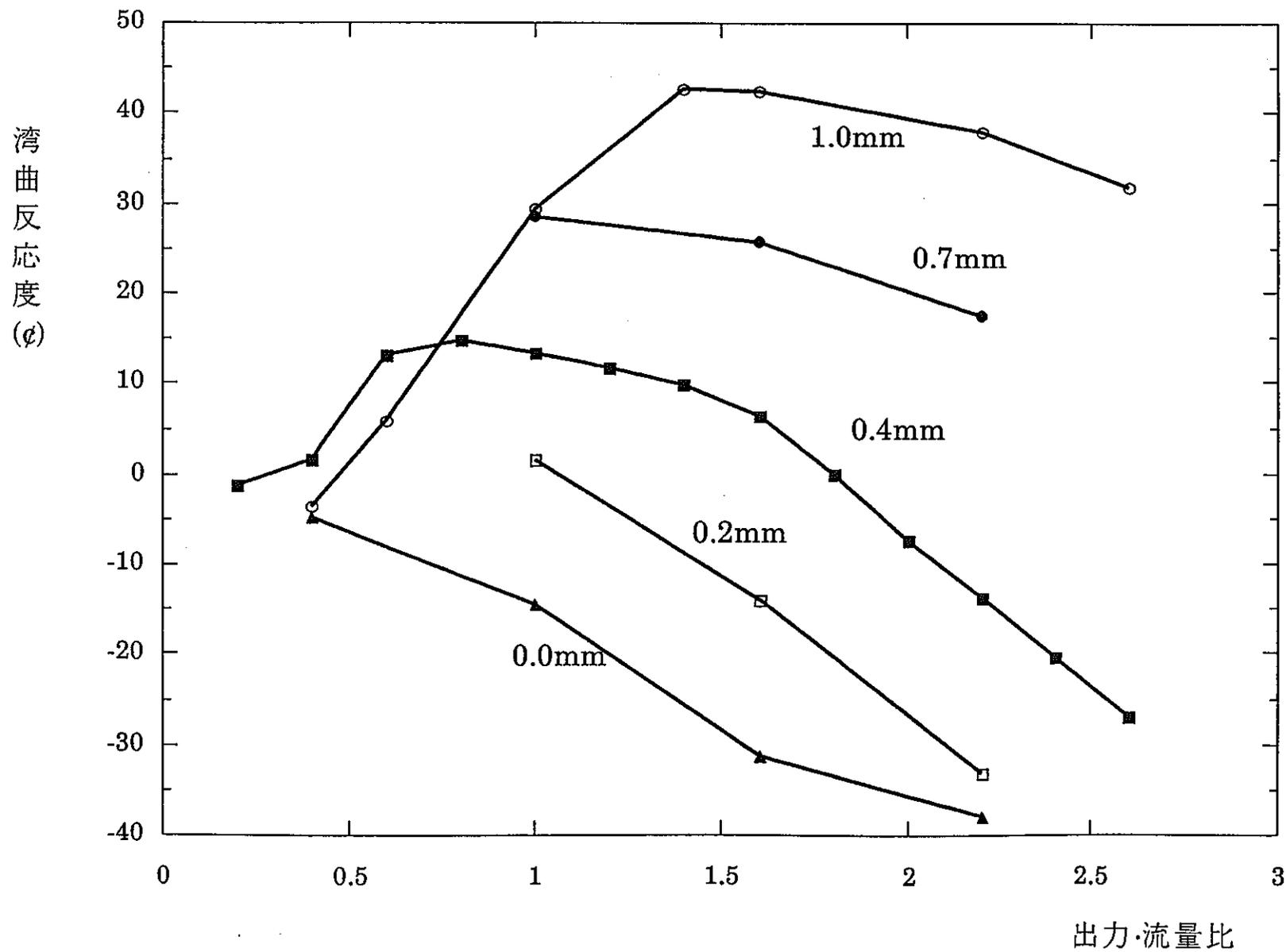


図3.2.5 出力・流量比対湾曲反応度のパッド間ギャップ依存性
(ACLP/TLP高さ位置 Yokeギャップ=2.5/3.5mm、支持板ギャップ=2.5/3.5mm)

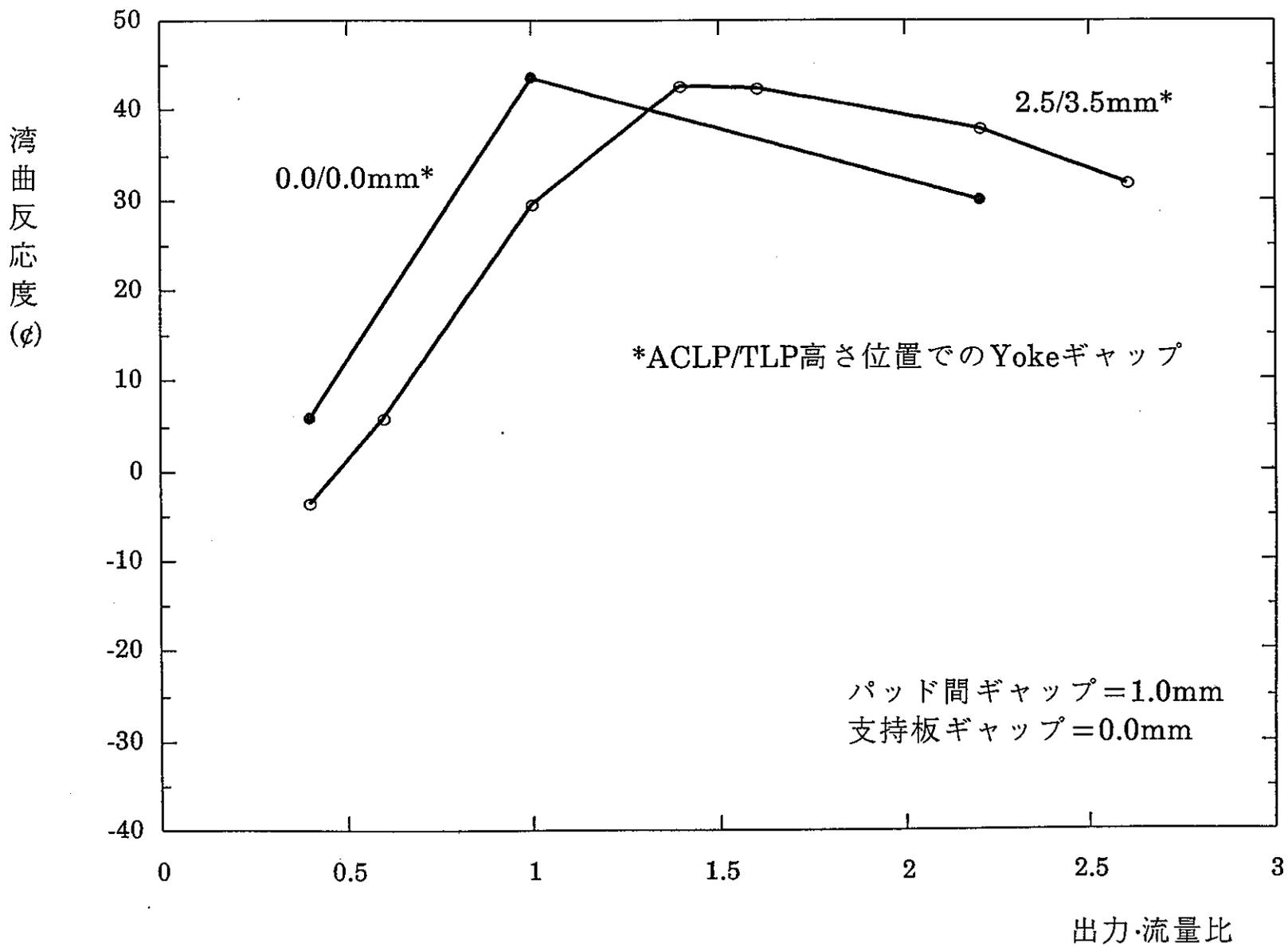


図3.2.6 出力・流量比対湾曲反応度のYokeギャップ依存性

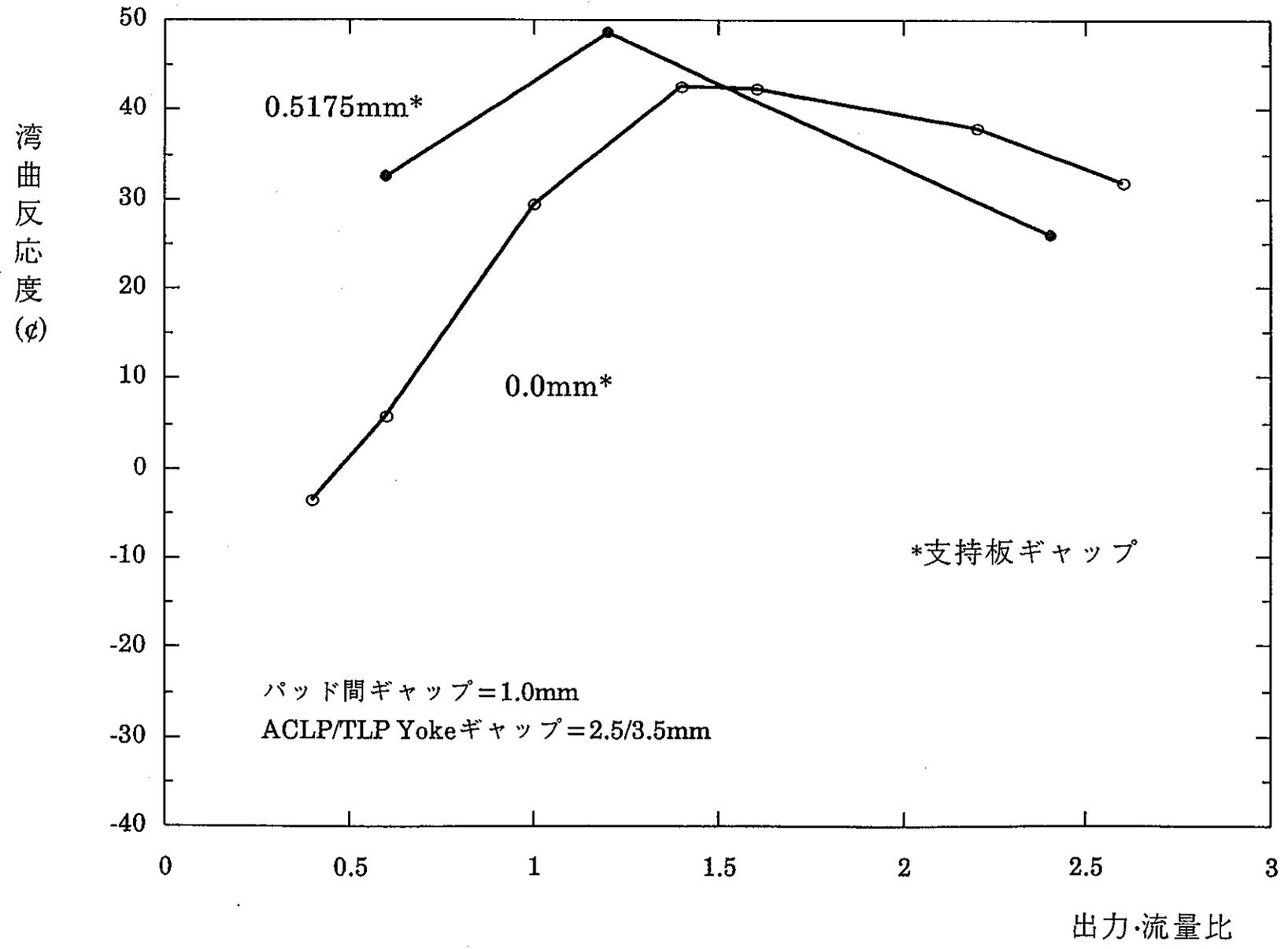


図3.2.7 出力・流量比対湾曲反応度の支持板ギャップ依存性

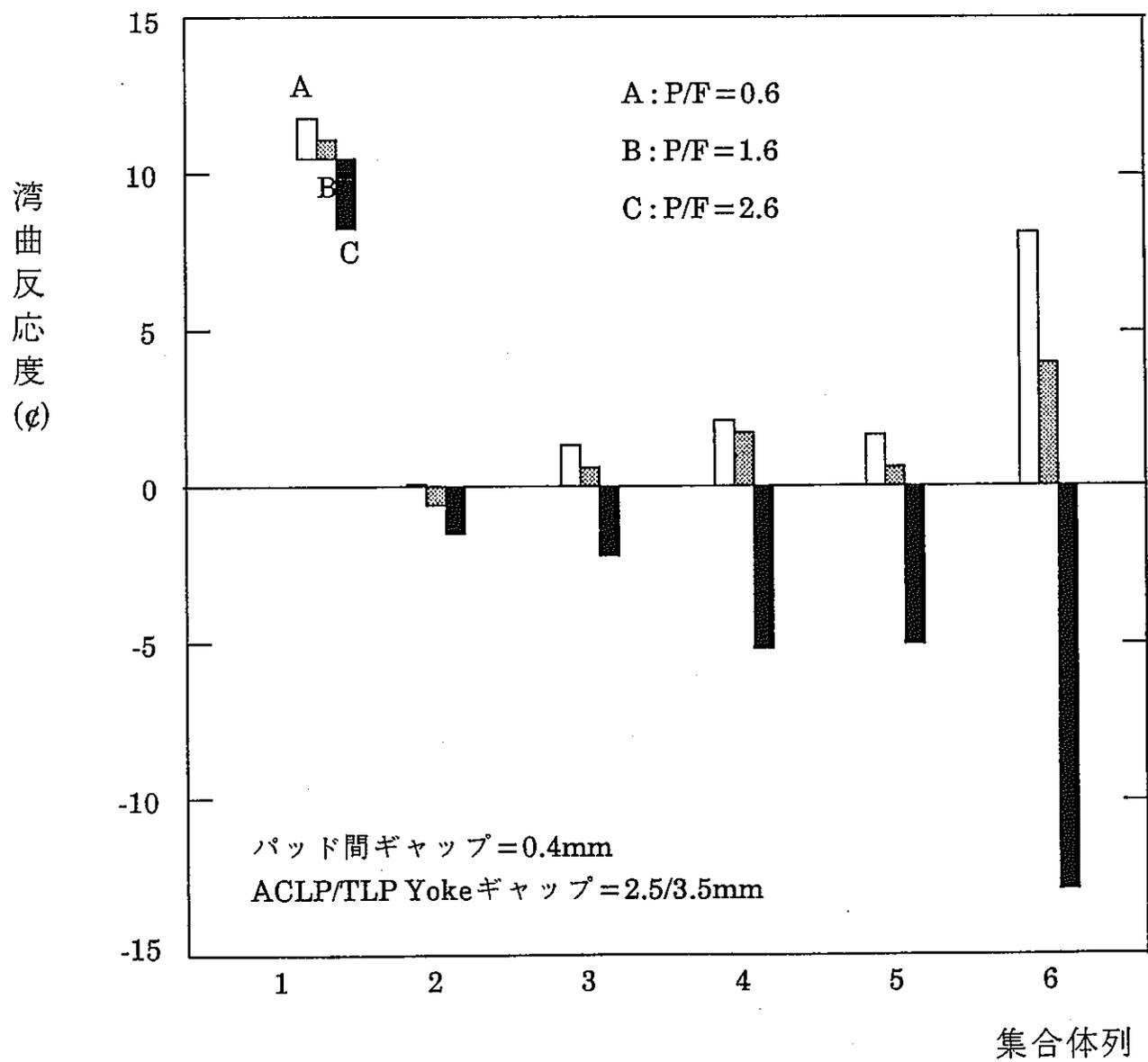


図3.2.8 集合体列ごとの湾曲反応度(I)

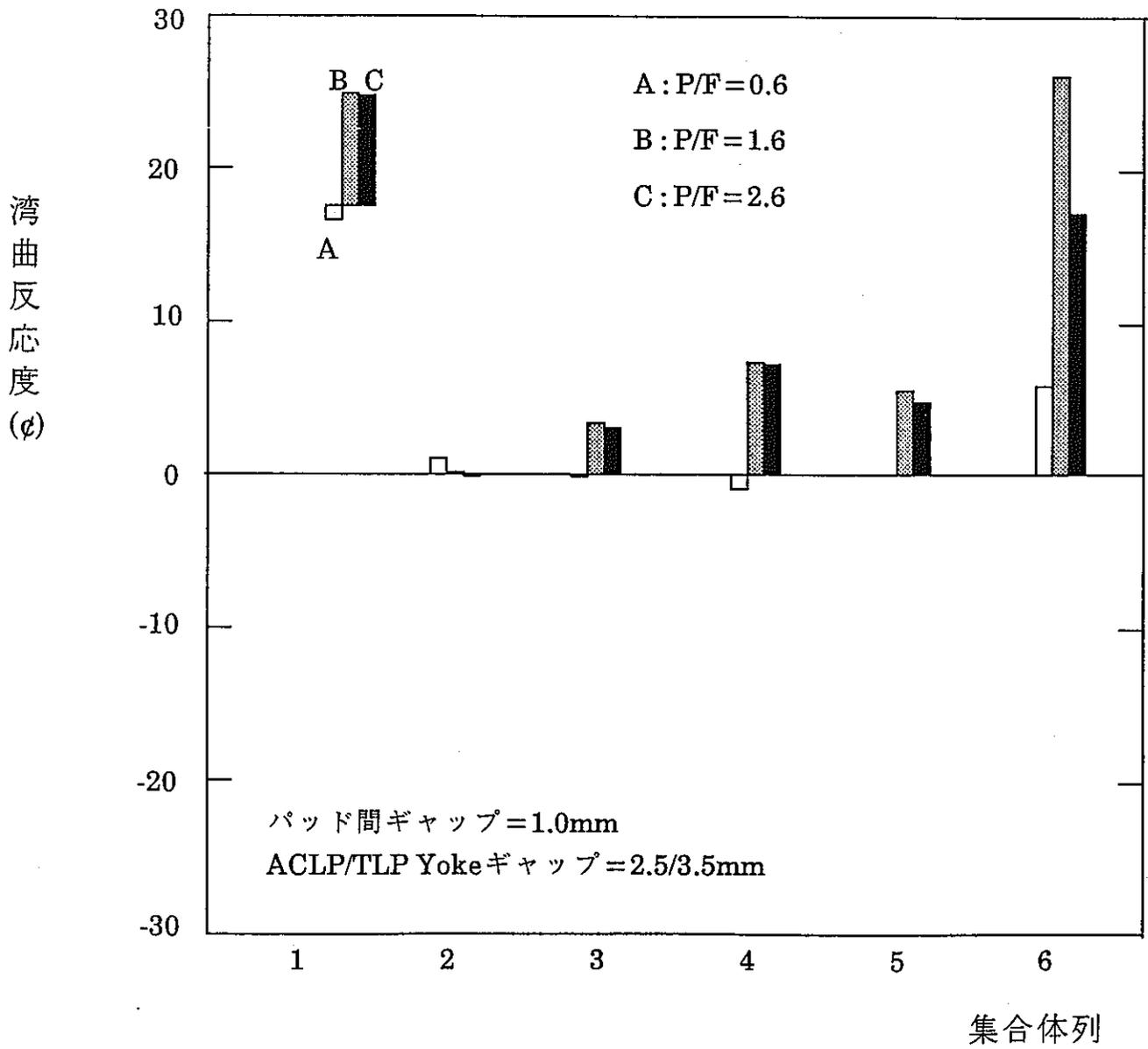


図3.2.9 集合体列ごとの湾曲反応度(II)

3.3 追加解析結果

これまでに述べた一連の解析作業の後、FFTF側から詳細なFFTF炉心組成が送付された。そこで、この炉心組成に変更することの影響について検討を行った。

(1) 詳細炉心組成について

FFTF側から送付された炉心組成(6)は、同封された資料にはPhaseIIB testのためのpreliminary core loadingの炉心組成と記されている。この詳細炉心組成と暫定炉心組成(これまでの炉心組成)をPu富化度やPu同位元素比などに着目して整理した。これを表3.3.1と表3.3.2に示す。もとの詳細炉心組成では集合体ごと、軸方向ごとに組成が与えられているが、今回の目的に十分な集合体列ごとの平均組成に直している。

Pu富化度は内外炉心ともに詳細炉心組成の方が高いが、これは燃焼度の差やPu同位元素比の差からくるものである。但し、これは炉心内中性子束分布に対しては二次的な影響しかない。重要なのは、同一領域内でのPu富化度の差や内外炉心での比である。表3.3.2より同一領域内でのPu富化度の差はあまりない。一方、内外炉心での比は暫定炉心組成で $23.0/21.64=1.063$ 、と詳細炉心組成で $26.6/23.6=1.127$ となり、やや詳細炉心組成の方が高くなっている。

次に、反応度に大きく関わる径方向の反射体組成を比較した。これを表3.3.3に示す。ステンレスの割合がやや異なるが、主成分のインコネルの割合は両組成でほぼ同一である。

(2) 湾曲反応度への影響評価

(a) 中性子束分布・出力分布の比較

初めに、中性子束分布の比較を図3.3.1に示す。Pu富化度比の違いや反射体組成の差の違いが反映されている。次に、出力分布の比較を図3.3.2

に示す。Pu富化度比の違いにより内外炉心の出力の関係が異なり、詳細組成の方が外側炉心の出力が相対的に大きい。

(b)集合体一様移動時の反応度比較

表3.3.2の組成を用いて、集合体一様移動時の反応度を求め、暫定組成の場合との比較を行った。

集合体一様移動時の反応度を表3.3.4に示す。詳細組成では、暫定組成に比べて外側炉心の相対的な反応度が高い。これはPu富化度比の傾向を反映したものと考えられる。反応度は、内側炉心では詳細組成の方が10%~30%小さく、外側炉心では逆に詳細組成の方が15%~40%大きい。全集合体が同一量変位した場合、内外炉心での相殺により、両組成による反応度は3%程度の差となる。実際の湾曲においては外側炉心の反応度の寄与が大きいのでこの差は広がる方向である。

(3)FFTF湾曲反応度の再評価

これまでに実施したFFTF湾曲反応度の解析結果への影響を代表ケースについて検討した。検討ケースは以下の3ケースである。

- パッド間ギャップ1.0mm, P/F=1.4
- パッド間ギャップ0.4mm, P/F=1.0
- パッド間ギャップ0.4mm, P/F=2.6

結果を表3.3.5, 3.3.6, 3.3.7及び図3.3.3に示す。どのケースも今回の結果の方が反応度の絶対値が大きい。前回の結果との比は各列の寄与の程度に応じて異なるが、おおむね20%程度である。一般にP/Fが大きくなるほど内側炉心の寄与が大きくなるので、差は小さくなる方向である。

内側炉心と外側炉心が逆の方向へ湾曲しない限り、他のケースにおいても上記と同じ傾向と考えられる。

表3.3.1 暫定のFFTF炉心組成

領域	Pu富化度 (重量%)	Pu同位元素比 239/240/241/242 (重量%)	平均燃焼度 (重量%)
内側炉心	21.64	58/24/14/4	0
外側炉心	23.00	58/24/14/4	0

表3.3.2 FFTF側から送付されたFFTF炉心組成(詳細組成)

領域	径方向列	Pu富化度 (重量%)	Pu同位元素比 239/240/241/242 (重量%)	平均燃焼度 (重量%)
内側炉心	中心	23.7	80.2/18.3/1.3/0.3	7.1
	1列	23.6	78.7/19.3/1.6/0.4	9.1
	2列	23.8	81.1/17.3/1.3/0.3	6.0
	3列	23.5	83.1/15.5/1.2/0.2	4.5
外側炉心	4列	26.8	82.8/15.8/1.2/0.2	5.2
	5列	26.4	81.1/17.3/1.4/0.3	5.8

表3.3.3 反射体組成の比較(%)

領域	内側反射体		外側反射体	
	暫定	詳細	暫定	詳細
インコネル	62	62.8	54	58.9
SS	24	14.7	33	30.6
Na	14	22.5	14	10.5

表3.3.4 炉心組成の違いによる集合体移動反応度の違い

領域	径方向列	移動反応度* (ρ /mm)		反応度の比 (B/A)
		暫定組成(A)	詳細組成(B)	
内側炉心	中心	-0.10	-0.09	0.90
	1列	-1.64	-1.18	0.72
	2列	-4.86	-4.11	0.85
	3列	-8.52	-6.70	0.79
外側炉心	4列	-5.63	-6.47	1.15
	5列	-7.96	-11.12	1.40
合計		-28.7	-29.7	1.03

*一様な外側への変位の場合

表3.3.5 湾曲反応度の再評価(pad間gap=1.0mm,P/F=1.4)

領域	径方向列	湾曲反応度 (ρ)	
		暫定組成	詳細組成
内側炉心	中心	0.00	0.00
	1列	0.27	0.19
	2列	3.65	3.10
	3列	7.01	5.54
外側炉心	4列	5.69	6.54
	5列	26.13	36.58
合計		42.8	52.0 (1.21)*

*暫定組成による結果との比

表3.3.6 湾曲反応度の再評価(pad間gap=0.4mm,P/F=1.0)

領域	径方向列	湾曲反応度 (ϕ)	
		暫定組成	詳細組成
内側炉心	中心	0.00	0.00
	1列	-0.0094	-0.007
	2列	1.10	0.94
	3列	2.36	1.86
外側炉心	4列	1.23	1.41
	5列	8.69	12.17
合計		13.37	16.38 (1.23)*

*暫定組成による結果との比

表3.3.7 湾曲反応度の再評価(pad間gap=0.4mm,P/F=2.6)

領域	径方向列	湾曲反応度 (ϕ)	
		暫定組成	詳細組成
内側炉心	中心	0.00	0.00
	1列	-1.51	-1.09
	2列	-2.22	-1.89
	3列	-5.21	-4.12
外側炉心	4列	-5.11	-5.88
	5列	-12.93	-18.10
合計		-27.0	-31.1 (1.15)*

*暫定組成による結果との比

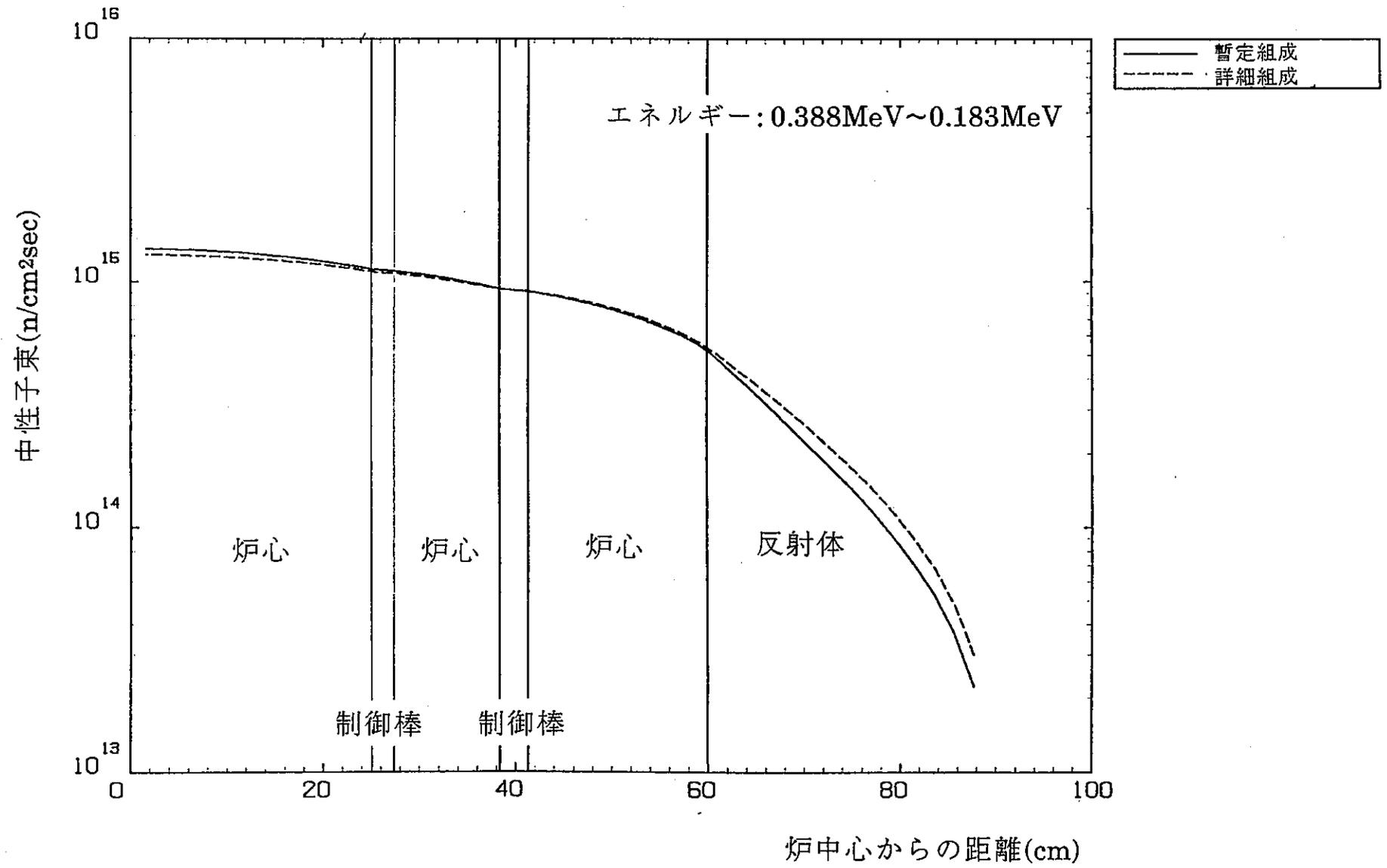


図3.3.1 中性子束分布の比較

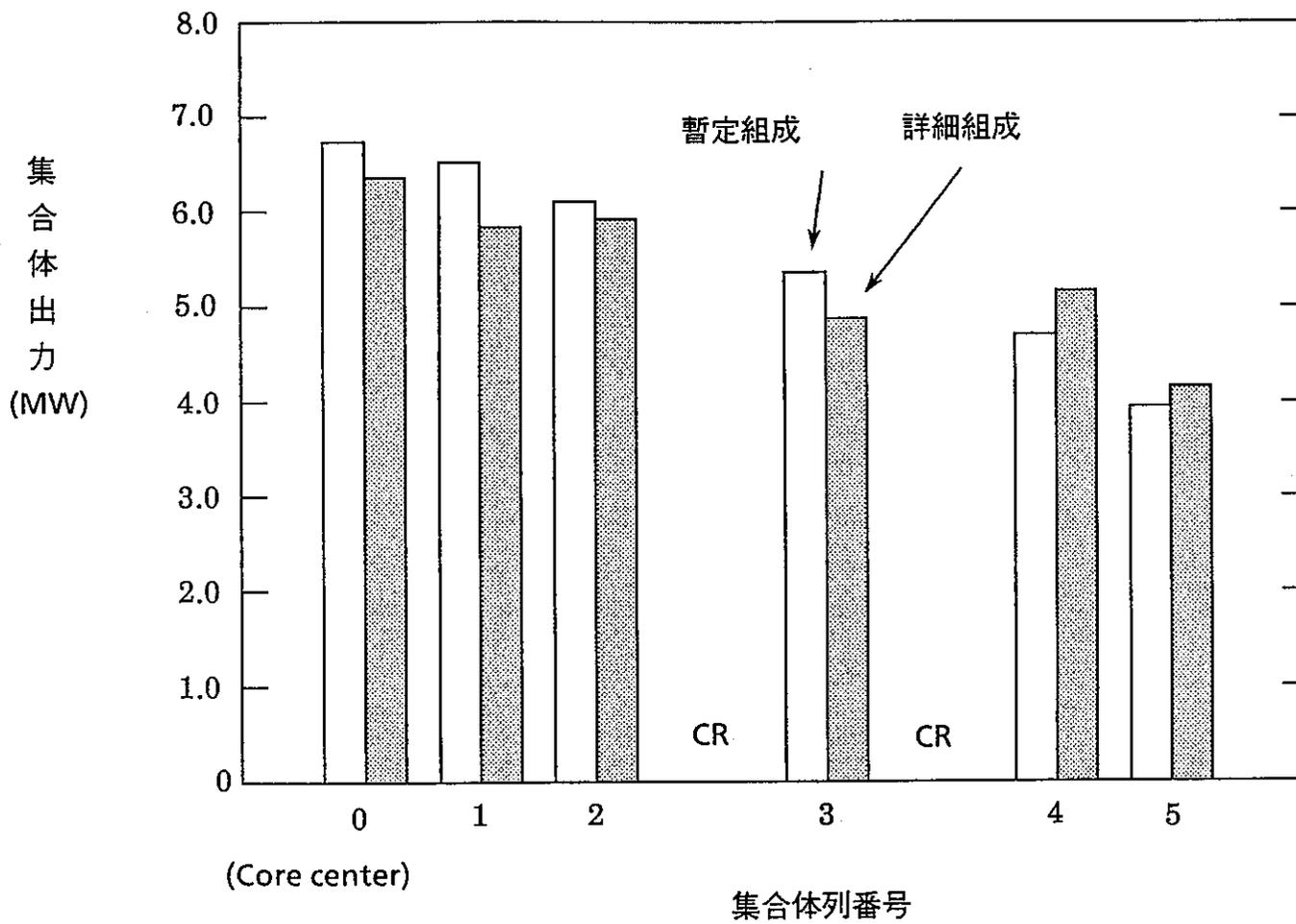


図3.3.2 集集体出力分布の比較(暫定組成及び詳細組成)

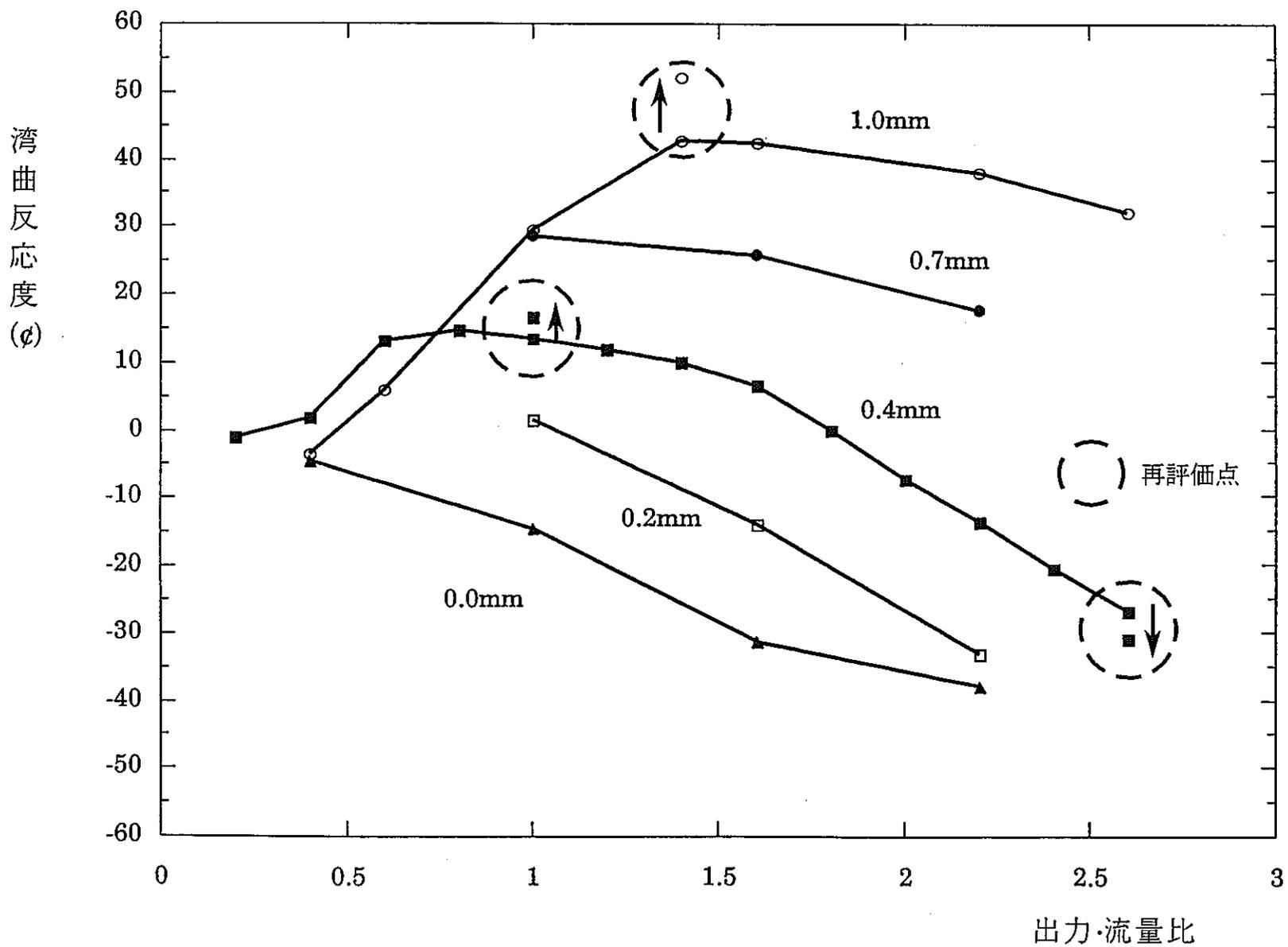


図3.3.3 出力・流量比対湾曲反応度のパッド間ギャップ依存性

3.4.まとめ

FFTFによる受動的安全性試験PhaseIIBの試験条件の検討のための予備解析の一環として、湾曲反応度解析を実施した。出力・流量比と湾曲反応度の関係を、集合体間のパッドギャップや炉心拘束機構と炉心間のギャップなどをパラメータとしてまとめた。主な結果は以下のとおりである。

- ① 出力流量比の増加に伴う炉心変形により、集合体間のパッドギャップがとじるまでは正の反応度が印加される。これは集合体頂部の相互作用の反力により、燃料部が内側へ変位するためである。
- ② 集合体間のパッドギャップがとじた後は、逆に燃料部が外側へ変位を始め、負の反応度が印加される。
- ③ 最外周炉心集合体では、湾曲量及び単位湾曲量当たりの反応度効果ともに大きいため、その湾曲挙動が湾曲反応度を支配する。
- ④ 集合体間のパッドギャップや炉心拘束機構と炉心間のギャップなどの初期形状が湾曲反応度へ大きく影響する。

本解析は、当初FFTFの炉心組成が入手できなかったため、公開文献などに基づき炉心組成を暫定して行った。その後FFTFから入手した炉心組成により再解析を行ったが、炉心組成変更の影響はおおむね湾曲反応度を約20%程度大きくする方向であるものの、出力流量比への依存性等の基本的な反応度の挙動には変わりがないことがわかった。

4. 結 言

米国の高速実験炉「FFTF」で実施が計画されている受動的安全性試験(フェーズII B試験)の予備解析の一環として、湾曲反応度計算を行った。

湾曲反応度は30%流量からのULOF事象を想定して評価された炉心湾曲量をもとにして計算した。(炉心湾曲計算は実験炉技術課で実施) 本計算では、二次元RZ体系において基準炉心の燃料反応度分布を関数表示し、一次摂動近似を適用して湾曲反応度を求めた。報告書では、出力・流量比と湾曲反応度の関係を、集合体間のパッドギャップや炉心拘束機構と炉心間のギャップなどをパラメータとしてまとめた。主な結果は以下のとおりである。

- ① 出力流量比の増加に伴う炉心変形により、集合体間のパッドギャップが閉じるまでは正の反応度が印加される。これは集合体頂部の相互作用の反力により、炉心燃料部が内側へ変位するためである。
- ② 集合体間のパッドギャップが閉じた後は、逆に炉心燃料部が外側へ変位を始め、負の反応度が印加される。
- ③ 最外周炉心集合体では、湾曲量及び単位湾曲量当たりの反応度効果ともに大きいために、その湾曲挙動が湾曲反応度を支配する。

また、本計算作業にあたり湾曲反応度計算コードを作成・整備した。本計算コードでは炉心内の燃料反応度分布を3次関数でスムーズに表示し、二次元RZ体系・一次摂動近似の範囲で湾曲に伴う反応度を求めるアルゴリズムを採用した。本計算コードは「FFTF」以外の炉心にも適用可能である。

5. 謝 辞

本研究の実施にあたり、本社動力炉開発推進本部相澤主研及び安全工学部二ノ方部長代理をリーダーとするFFTF-PST検討会のメンバー各位との討議を通じて有益な示唆を頂いた。ここに謝意を表する。

6. 参 考 文 献

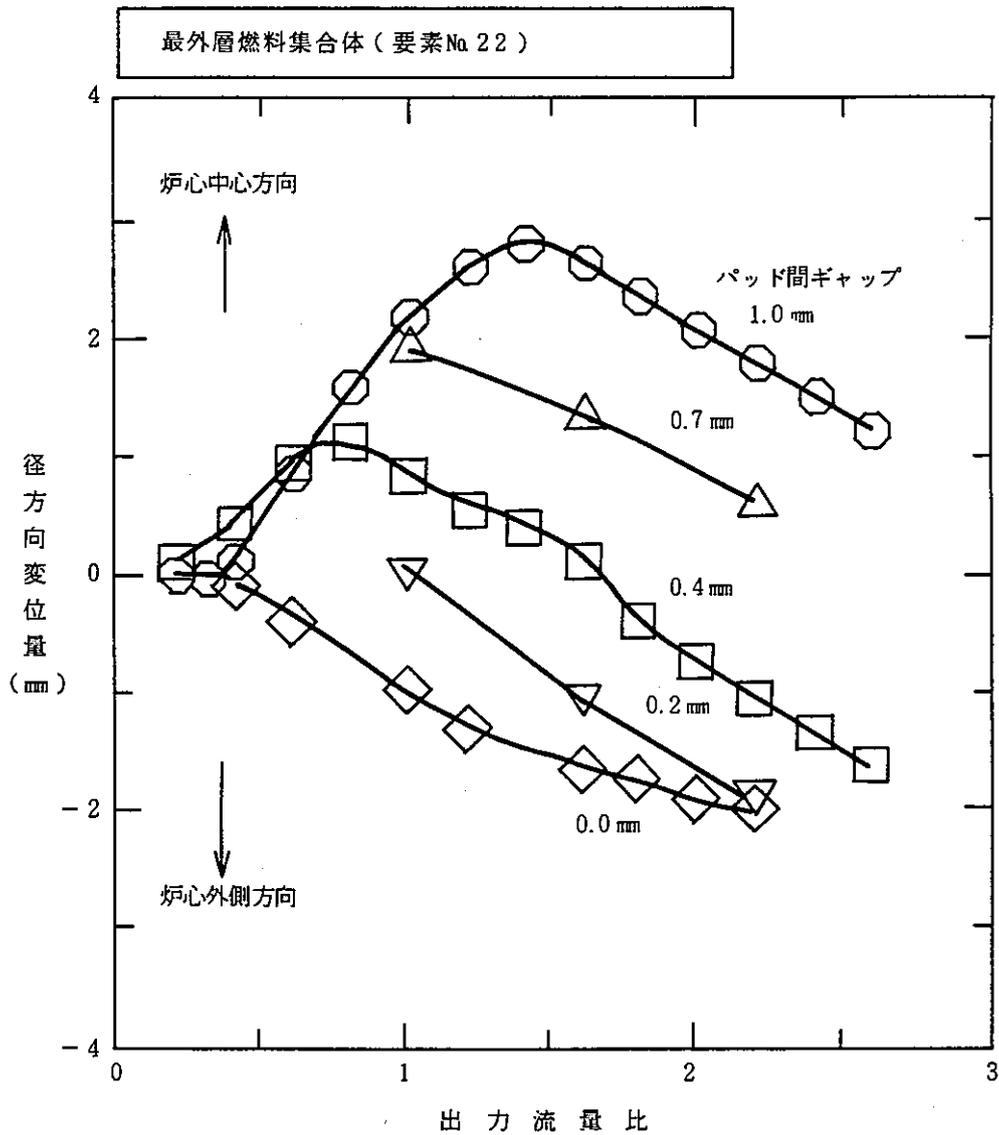
- (1) PNC ZN9410 92-245 「FFTF」炉心の炉心湾曲計算、実験炉部技術課、1992年8月
- (2) PNC PJ9124 91-002 炉心湾曲解析コードの改良、日立製作所、1991年3月
- (3) 飯島他、高速炉設計用計算プログラム・2(2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY)、JAERI-M 6993、1977年2月
- (4) T.B.Fowler, et al., Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION, RNL-TM-2496 July(1969).
- (5) A.E.Waltar and A.B.Reynolds, "Fast Breeder Reactors", Pergamon Press
- (6) P.K.Shen, "Passive Safety Tests Preliminary Analytical Model Additions", private communication, June, 1992.

付録A FFTF炉心湾曲解析結果(実験炉技術課による)

実験炉技術課で実施されたFFTF炉心湾曲解析結果の一部を下記の図に示す。
尚、詳しい結果については次の報告書参照

PNC ZN9410 92-245「FFTF」炉心の炉心湾曲計算、実験炉技術課、1992年8月

- 図A.1 P/F対変位量のパラメータ依存性(パッド間ギャップ)
- 図A.2 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心拘束機構とのギャップ)
- 図A.3 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心支持板ギャップ)
- 図A.4 集合体ごと径方向変位(パッド間ギャップ0.4mm)
- 図A.5 集合体ごと径方向変位(パッド間ギャップ1.0mm)



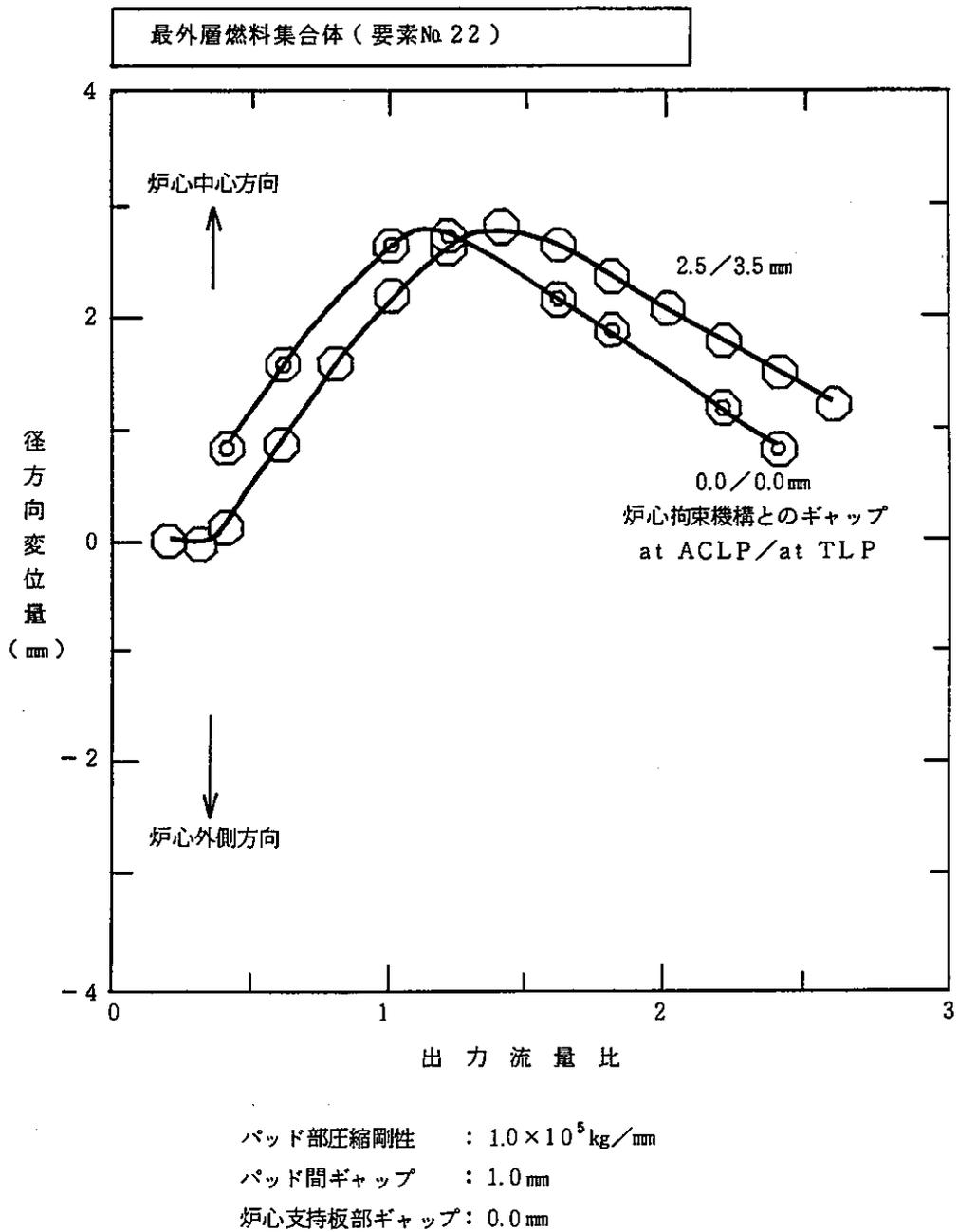
パッド部圧縮剛性 : $1.0 \times 10^5 \text{ kg/mm}$
 炉心拘束機構とのギャップ: 2.5mm (at ACLP), 3.5mm (at TLP)
 炉心支持板部ギャップ : 0.0mm

図A.1 P/F対変位量のパラメータ依存性(パッド間ギャップ)

本解析結果は実験炉技術課による。

報告書:

PNC ZN9410 92-245「FFTF」炉心の炉心湾曲計算、実験炉技術課、1992年8月

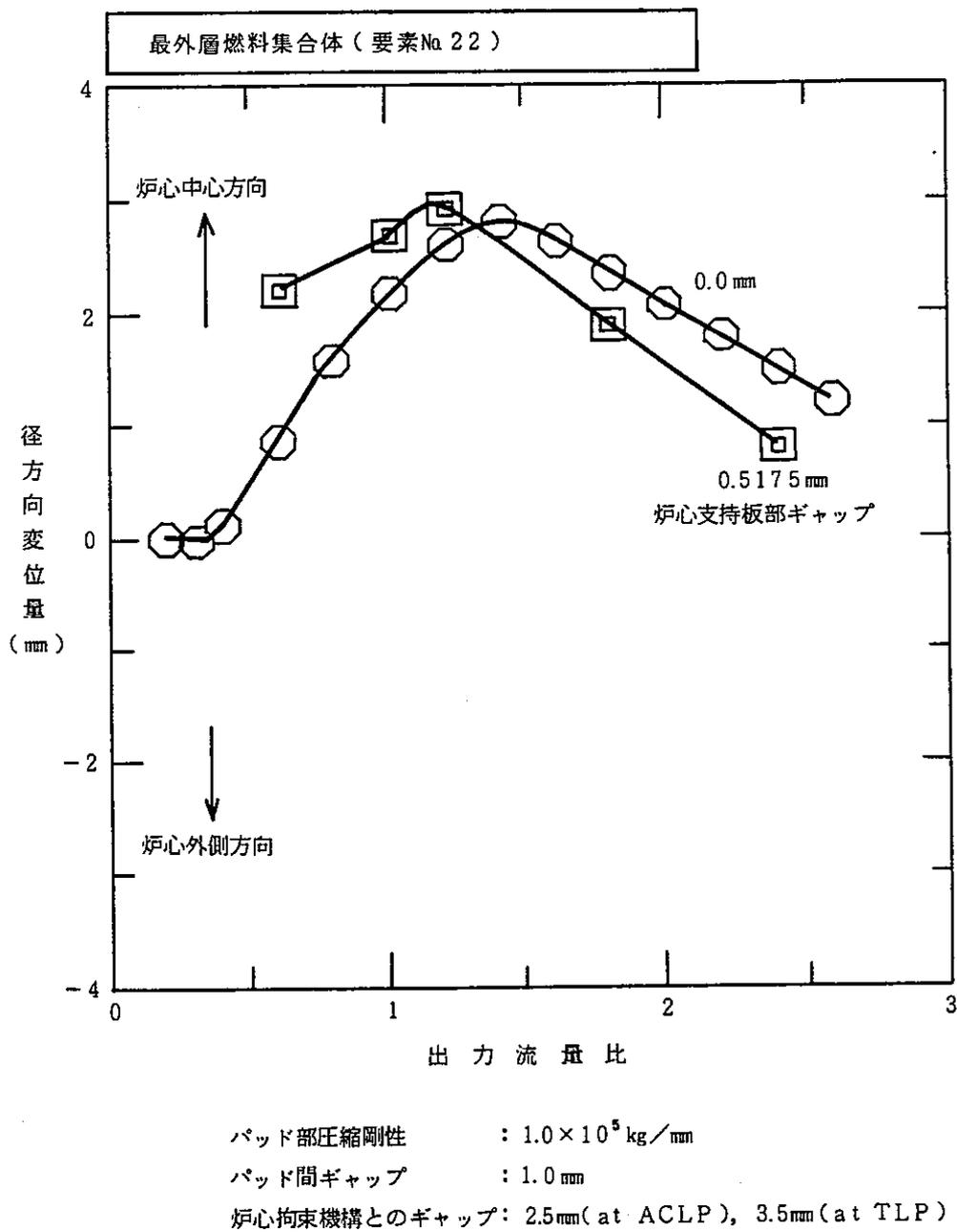


図A.2 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心拘束機構とのギャップ)

本解析結果は実験炉技術課による。

報告書:

PNC ZN9410 92-245「FFTF」炉心の炉心湾曲計算、実験炉技術課、1992年8月

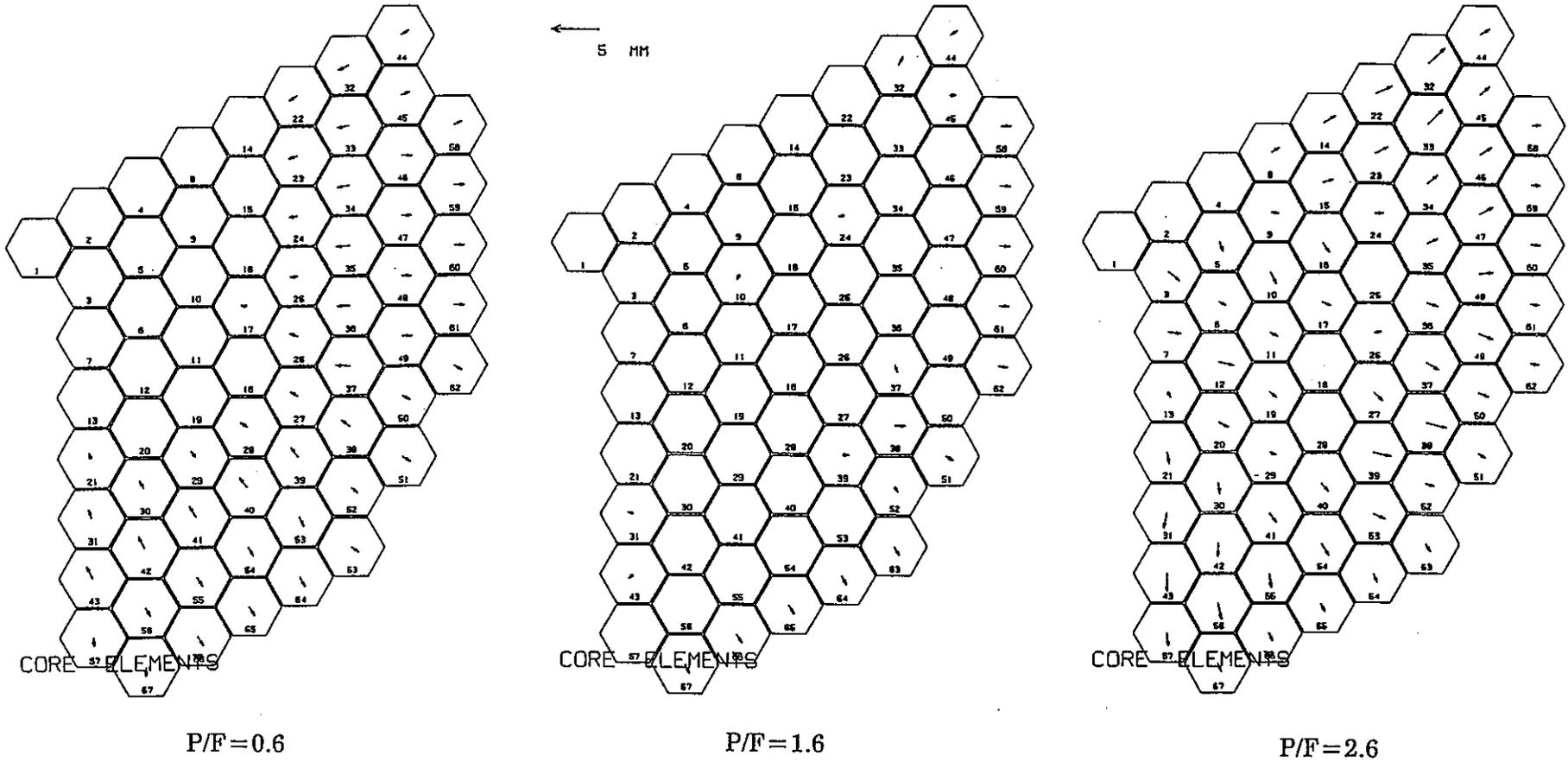


図A.3 P/F対変位量のパラメータ依存性(炉心支持板ギャップ)

本解析結果は実験炉技術課による。

報告書:

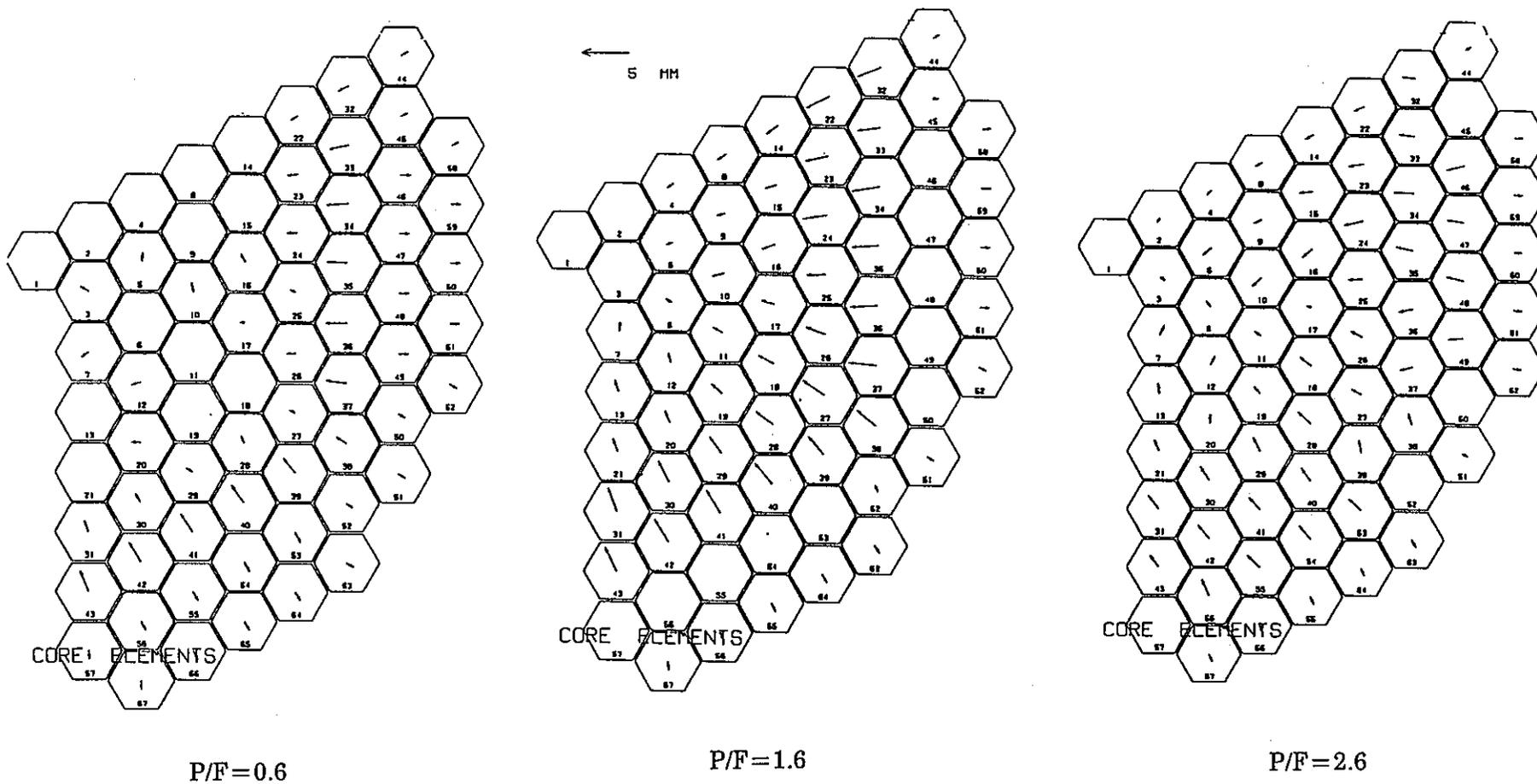
PNC ZN9410 92-245「FFTF」炉心の炉心湾曲計算、実験炉技術課、1992年8月



炉心中心高さ部分の変位、Yokeギャップ=2.5/3.5mm(ACLP/TLP)

本解析結果は実験炉技術課による。

図A.4 集合体ごとの径方向変位(パッド間ギャップ0.4mm)



炉心中心高さ部分の変位、Yokeギャップ=2.5/3.5mm(ACLP/TLP)

本解析結果は実験炉技術課による。

図A.5 集合体ごとの径方向変位(パッド間ギャップ1.0mm)

付録B FFTF湾曲反応度解析入力データ

次ページ以降、FFTF湾曲反応度解析の代表ケースについて、入力データを示す。下記は補足説明である。あわせて主要データセット名を下表に示す。

①CITATION入力データ

ϕ 計算の後、 ϕ^* 計算を引き続いて行い、 $\phi\phi^*$ ファイルを作成する。

②EDIT入力データ

BEACONからのFFTF湾曲量を編集し、FCHG入力データを作成する。

③FCHG入力データ(=EDITの出力データ)

$\phi\phi^*$ の変換を行う。(変位後の位置での $\phi\phi^*$ へ変換) 軸方向の1メッシュごとに変位が処理されているので、約400行の長いデータである。(途中省略)

④PERKY入力データ

燃料ワース計算を行う。変位前、変位後の燃料ワース計算に共通である。断面積の名で、末尾が「X」のものは末尾が「E」の基準断面積を原子数密度について2倍したものである。例えば、INCOCXはINCOCEの原子数密度を2倍したものである。

主要データセット名

コード		データセット名
CITATION	入力データ	POC3B13.FFTFMKX4.DATA(CASE4)
CITATION	$\phi\phi^*$	POC3B13.FFTF.CASE47.FT34
EDIT	入力データ	POC3B13.FFTFPST.DATA(EDIT7)
PERKY	入力データ	POC3A13.FFTF.DATA(PERKYC4)
PERKY	JCL	POC3A13.FFTF.DATA(¥ PERKY)
PERKY	断面積	POC3B13.FFTF.CASE4.PDS18G POC3B13.FFTF.CASE4X.PDS18G

(1)CITATION入力データ(その1)

```

BURN-UP DATE   OD
BURNUP CALC. (R-Z: 399METH)  PIN: 5.8/1.40 CORE: 91CM ((PU,U)02)
001
0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1 0 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

003
0 0 0 0 7 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1.0000E-4 1.0000E-5
0.0 0.0 400.0

004
7 6.28785 7 10.34823 7 8.51532 7 2.25670 7 10.83939 7 2.98471
7 7.87747 7 10.87260 7 10.87817 8 17.84058
20 50.00000 6 15.72000 6 15.00000 6 15.00000 6 15.00000
6 15.72000 20 50.00000

005
19 19 19 23 19 23 19 19 21 22
3 6 9 23 12 23 15 18 21 22
2 5 8 23 11 23 14 17 21 22
1 4 7 23 10 23 13 16 21 22
1 4 7 23 10 23 13 16 21 22
2 5 8 23 11 23 14 17 21 22
3 6 9 23 12 23 15 18 21 22
20 20 20 23 20 23 20 20 21 22

012
1 1 3 1 0 1 0 INNER CORE1
2 2 3 1 0 2 0 INNER CORE1
3 3 3 1 0 3 0 INNER CORE1
4 4 3 1 0 4 0 INNER CORE2
5 5 3 1 0 5 0 INNER CORE2
6 6 3 1 0 6 0 INNER CORE2
7 7 3 1 0 7 0 INNER CORE3
8 8 3 1 0 8 0 INNER CORE3
9 9 3 1 0 9 0 INNER CORE3
10 10 3 1 0 10 0 INNER CORE4
11 11 3 1 0 11 0 INNER CORE4
12 12 3 1 0 12 0 INNER CORE4
13 13 3 2 0 13 0 OUTER CORE1
14 14 3 2 0 14 0 OUTER CORE1
15 15 3 2 0 15 0 OUTER CORE1
16 16 3 2 0 16 0 OUTER CORE2
17 17 3 2 0 17 0 OUTER CORE2
18 18 3 2 0 18 0 OUTER CORE2
19 19 0 4 0 19 -1 U-PLENUM (SUS)
20 20 0 4 0 20 -1 L-SHIELD (SUS)
21 21 0 5 0 21 -1 R-SHIELD (INNER)
22 22 0 5 0 21 -1 R-SHIELD (OUTER)
23 23 0 7 0 22 -1 CR-ADP
    
```

(1)CITATION入力データ(その2)

020

1 12 0 0
19.18338-4 23.78419-4 32.19819-4 46.25461-5 50.0 61.74937-5
70.0 85.74022-3 91.45269-2 109.31389-3 111.22522-2 123.24837-3
133.72880-3 142.93611-4 154.02431-4 200.0 210.0 230.0
190.0 220.0

13 18 0 0
19.76642-4 24.02444-4 32.33775-4 46.65171-5 50.0 61.72004-5
70.0 85.64400-3 91.45343-2 109.31389-3 111.22522-2 123.24837-3
133.72880-3 142.93611-4 154.02431-4 200.0 210.0 230.0
190.0 220.0

19 19 0 0
109.11930-3 111.25766-2 123.33434-3 133.82764-3 143.01404-4 154.13090-4

20 20 0 0
109.11930-3 112.82973-2 127.50227-3 138.61219-3 146.78159-4 159.29453-4

21 21 0 0
103.09000-3 112.14600-2 121.47500-2 134.77300-2 143.51500-4 153.15700-4

22 22 0 0
102.86900-3 112.67000-2 121.48900-2 134.24600-2 144.77100-4 152.71900-4

23 23 0 0
102.00180-2 115.24025-3 121.38931-3 131.59485-3 141.25585-4 151.72121-4

040

0 0 0 0 0 0 0 2
999

(3)FCHG入力データ(その1)

67				
1	7	21	21	-0.00001
1	7	22	22	-0.00001
1	7	23	23	-0.00001
1	7	24	24	-0.00001
1	7	25	25	-0.00001
1	7	26	26	-0.00001
1	7	27	27	-0.00001
1	7	28	28	-0.00001
1	7	29	29	-0.00001
1	7	30	30	-0.00001
1	7	31	31	-0.00001
1	7	32	32	0.00000
1	7	33	33	0.00000
1	7	34	34	0.00000
1	7	35	35	0.00000
1	7	36	36	0.00000
1	7	37	37	0.00000
1	7	38	38	0.00000
1	7	39	39	0.00000
1	7	40	40	0.00000
1	7	41	41	0.00000
1	7	42	42	0.00000
1	7	43	43	0.00000
1	7	44	44	0.00000
1	7	45	45	0.00000
1	7	46	46	0.00000
1	7	47	47	0.00000
1	7	48	48	0.00000
1	7	49	49	0.00000
1	7	50	50	0.00000
1	7	51	51	0.00000
1	7	52	52	0.00000
1	7	53	53	0.00000
1	7	54	54	0.00000
1	7	55	55	0.00000
1	7	56	56	0.00000
8	14	21	21	0.06598
8	14	22	22	0.06540
8	14	23	23	0.06500
8	14	24	24	0.06467
8	14	25	25	0.06434
8	14	26	26	0.06402
8	14	27	27	0.06389
8	14	28	28	0.06394
8	14	29	29	0.06398
8	14	30	30	0.06403
8	14	31	31	0.06413

(途中略)

(3)FCHG入力データ(その2)

(途中略)

50	56	44	44	0.06324
50	56	45	45	0.06217
50	56	46	46	0.06110
50	56	47	47	0.06003
50	56	48	48	0.05896
50	56	49	49	0.05789
50	56	50	50	0.05683
50	56	51	51	0.05574
50	56	52	52	0.05463
50	56	53	53	0.05362
50	56	54	54	0.05273
50	56	55	55	0.05185
50	56	56	56	0.05096
57	67	21	21	0.01965
57	67	22	22	0.01881
57	67	23	23	0.01805
57	67	24	24	0.01731
57	67	25	25	0.01658
57	67	26	26	0.01584
57	67	27	27	0.01531
57	67	28	28	0.01496
57	67	29	29	0.01461
57	67	30	30	0.01426
57	67	31	31	0.01399
57	67	32	32	0.01413
57	67	33	33	0.01427
57	67	34	34	0.01440
57	67	35	35	0.01454
57	67	36	36	0.01506
57	67	37	37	0.01567
57	67	38	38	0.01629
57	67	39	39	0.01690
57	67	40	40	0.01768
57	67	41	41	0.01868
57	67	42	42	0.01968
57	67	43	43	0.02067
57	67	44	44	0.02169
57	67	45	45	0.02290
57	67	46	46	0.02412
57	67	47	47	0.02533
57	67	48	48	0.02655
57	67	49	49	0.02776
57	67	50	50	0.02897
57	67	51	51	0.03021
57	67	52	52	0.03148
57	67	53	53	0.03264
57	67	54	54	0.03364
57	67	55	55	0.03465
57	67	56	56	0.03565

(4)PERKY入力データ

POC3A13.FFTF.DATA(PERKYC4)

```

PERKY
INCOCE SLAROM
  FFTF RADIAL EXPANSION
001
  1 18 41 1 0 0 0
003
  1 0 0
  41 41 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
  21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41
INCOCE SLAROM
  18 18 0 3 0 0 2 3 3
INCOCE SLAROM
INCOCE SLAROM
INCOCE SLAROM
INCO1E SLAROM
INCO1E SLAROM
INCO1E SLAROM
INCO2E SLAROM
INCO2E SLAROM
INCO2E SLAROM
INCO3E SLAROM
INCO3E SLAROM
INCO3E SLAROM
OTCO4E SLAROM
OTCO4E SLAROM
OTCO4E SLAROM
OTCO5E SLAROM
OTCO5E SLAROM
OTCO5E SLAROM
PLENUM SLAROM
UPSHID SLAROM
RISHID SLAROM
ROSHID SLAROM
CRADAP SLAROM
INCOCX SLAROM
INCOCX SLAROM
INCOCX SLAROM
INCO1X SLAROM
INCO1X SLAROM
INCO1X SLAROM
INCO2X SLAROM
INCO2X SLAROM
INCO2X SLAROM
INCO3X SLAROM
INCO3X SLAROM
INCO3X SLAROM
OTCO4X SLAROM
OTCO4X SLAROM
OTCO4X SLAROM
OTCO5X SLAROM
OTCO5X SLAROM
OTCO5X SLAROM
004
  4
008
  1 0 1 18 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
INCOCE SLAROM
  1 24 2 25 3 26 4 27 5 28 6 29 7 30 8 31 9 32 10 33 11 34 12 35
  13 36 14 37 15 38 16 39 17 40 18 41
999

```