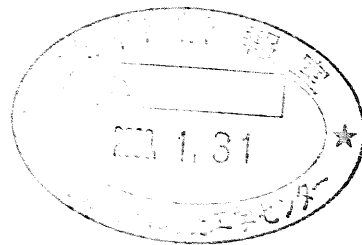


「常陽」MK-II炉心湾曲反応度解析コードの開発

(技術報告書)

1999年9月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

「常陽」MK-II炉心湾曲反応度解析コードの開発
(技術報告)

田淵士郎¹⁾、鳥丸忠彦²⁾、吉田昌宏¹⁾
青山卓史¹⁾、

要 旨

「常陽」では、高速炉の固有安全性の実証を目的とし、安全特性試験の実施に向けた研究を行っており、その一環として過渡時のフィードバック反応度の評価精度向上に関する検討を進めている。フィードバック反応度のうち、炉心湾曲反応度に関しては、時定数が短いこと、ATWS事象において支配的ではないが比較的大きな成分となること及び解析の不確かさが大きいことから、評価手法確立を目的とした研究を進めてきた。

これまで、「常陽」MK-II炉心の炉心管理コードシステムMAGI、ラッパ管温度計算コードTETRAS及び炉心湾曲解析コードBEACONを連動させることにより、全炉心構成要素の詳細な照射・交換履歴を考慮した湾曲解析を行い、集合体残留変位に着目し、計算手法の検証を進めてきた。平成8年度には上記システムによる湾曲量計算値と当該位置の反応度価値勾配から湾曲反応度を計算するAURORAコードを導入し、MK-II炉心の湾曲反応度解析を行った。しかし、2次元RZ計算による物質反応度価値マップを入力とするAURORAでは、実際の炉心構成と計算モデルが異なる部分については反応度価値マップを外挿するため、その誤差が計算精度に影響を与えることがわかった。

そこで、湾曲解析に用いたモデルと同等の3次元の物質反応度価値マップを基に湾曲反応度を計算する計算コードARCHCOM (Analysis of Reactivity Change due to Core Mechanics)を作成した。本コードにより、制御棒、照射リグ等燃料領域中に孤立して装荷される集合体及び反応度価値勾配の大きな燃料-反射体境界付近に装荷される集合体の湾曲反応度を適切に計算することが可能となった。

-
- 1) 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課
 - 2) 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課 (現NFD)

Development of the Joyo MK-II Core Bowing Reactivity Calculation Code

Shiro TABUCHI¹⁾, Tadahiko TORIMARU²⁾,
Akihiro YOSHIDA¹⁾ and Takafumi AOYAMA¹⁾

ABSTRACT

The study on the passive safety test by using the Experimental Fast Reactor Joyo has been performed to demonstrate the inherent safety of fast breeder reactors. In this study, emphasis was placed on the improvement on the accuracy of the feedback reactivity analysis. As a bowing reactivity might play a significant roll in ATWS analysis because of its effectively short time constant and relatively large magnitude, an emphasis was placed upon the evaluation of the analysis precision of bowing reactivity.

Taking into account of the refueling and irradiation history of the individual core component, the core bowing behavior in Joyo has been analyzed by using the MK-II core management code system MAGI, the interface code TETRAS which interpolate neutron flux and coolant temperature at the position of wrapper tube, and the core bowing calculation code BEACON. Calculation accuracy of above mentioned system was evaluated through the comparison of calculated and measured permanent distortion of subassemblies. In 1996, core bowing reactivity has been calculated by AURORA code using the above calculated bowing behavior of individual core component as input. But because an approximate two dimensional material reactivity worth map was utilized in AURORA, it was made clear that some amount of error caused by extrapolation could not be neglected.

Therefore calculation code ARCHCOM (Analysis of Reactivity Change due to Core Mechanics) which utilize three dimensional material reactivity worth map as input was developed for the Joyo MK-II core bowing reactivity calculation. This code reduces above mentioned extrapolation error that used to be occurred at isolated core component, such as control rod or irradiation rig and at the interface region of fuel and reflector where had sharp material reactivity worth gradient.

1) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC, JNC

2) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC, JNC(current NFD)

目 次

1. はじめに	1
2. 「常陽」MK-II 炉心の炉心湾曲反応度解析	2
2. 1 炉心湾曲解析	2
2. 2 湾曲反応度解析	2
3. 炉心湾曲反応度計算コード ARCHCOM の作成	8
3. 1 反応度値分布の作成	8
3. 2 炉心湾曲反応度の算出	9
4. 機能確認および検証計算	15
4. 1 機能確認	15
4. 2 コードの妥当性の確認	15
5. おわりに	26
謝辞	27
参考文献	28

表リスト

- 表 2 - 1 AURORA による炉心湾曲反応度
- 表 4 - 1 ARCHCOM による炉心湾曲反応度
- 表 4 - 2 検証計算用既知変位量
- 表 4 - 3 検証計算用既知変位方向
- 表 4 - 4 湾曲反応度の比較

図リスト

- 図 2 - 1 「常陽」における炉心湾曲反応度解析の流れ
- 図 2 - 2 AURORA の湾曲反応度算出法
- 図 2 - 3 ARCHCOM の入出力ファイル
- 図 3 - 1 燃料の物質反応度価値マップの比較
- 図 3 - 2 構造材の物質反応度価値マップの比較
- 図 3 - 3 冷却材の物質反応度価値マップの比較
- 図 3 - 4 ARCHCOM の湾曲反応度算出法
- 図 4 - 1 第 29 サイクル冷却材反応度価値計算体系図
- 図 4 - 2 「常陽」炉心の集合体番号
- 図 4 - 3 炉心湾曲計算における軸方向ノード番号
- 図 4 - 4 検証計算用炉心体系図 (湾曲前)
- 図 4 - 5 検証計算用炉心体系図 (湾曲後)

1. はじめに

高速炉心は最小臨界体系で構成されないため、動的な安全設備が機能しない設計外事象においても、受動的な安全方策により炉心が未臨界に移行し、安全に原子炉を停止できる固有の安全性を実証することは重要である。

「常陽」では高速炉の固有安全性の実証を目的とした安全特性試験の実施に向けた研究を行っており、その一環としてフィードバック反応度の評価精度向上に関する検討を進めている。これまでの検討より、炉心湾曲反応度は燃料集合体のラッパ管温度変化を起因とするため時定数が小さく、支配的因子ではないものの不確かさが大きいことから、評価方法によっては比較的大きな反応度効果となり、UTOP事象における初期の燃料温度ピーク値へ影響を与える¹⁾。

また、MK-III炉心では、冷却材の原子炉出入口温度差の増加、炉心燃料集合体の高燃焼度化による残留変位量の増加及び炉心外周への遮蔽集合体の装荷等、炉心湾曲及びそれによる反応度挙動に影響を与える変更が行われるため、MK-III炉心の湾曲反応度挙動評価につなげるためにも、現行のMK-II炉心において湾曲反応度発生メカニズムの解明を行い、解析精度を把握する必要がある。

これまで、MK-II炉心の炉心管理コードシステムMAGI、ラッパ管群温度計算コードTETRAS及び3次元炉心湾曲解析コードBEACONを連動させ、各炉心構成要素の詳細な交換・照射履歴を考慮した全炉心の湾曲解析を実施してきた²⁾。さらに実機データとの比較による評価手法の検証として照射後試験による残留変位との比較により、スエリング・クリープ式の見直し等を行ってきた³⁾。

上記計算結果から炉心湾曲反応度を計算するため、計算コードAURORAを導入した。AURORAでは、湾曲解析結果と2次元の物質反応度値マップから湾曲反応度を計算している。「常陽」の全炉心の解析に適用した場合、実際の体系とマップが一致しない箇所については物質反応度値を外挿しているため、制御棒位置や燃料と反射体の境界位置で外挿誤差が大きくなることがわかった。

これを踏まえ、本研究ではBEACONと同一の3次元体系について求めた物質反応度値マップを入力として、炉心湾曲反応度を計算するコードARCHCOM (Analysis of Reactivity Change due to Core Mechanics)を作成した。

2. 「常陽」MK-II炉心の炉心湾曲反応度解析

「常陽」MK-II炉心用に開発・整備した炉心湾曲反応度解析の流れを図2-1に示す。

2.1 炉心湾曲解析

現在、「常陽」MK-II炉心の湾曲解析コードとして、BEACONの整備・検証を進めている。BEACONでは、真直ビームモデルにより、ラッパ管面に垂直な3方向について熱膨張、スエリング、クリープによる変位を計算し、これをベクトル合成することにより各炉心構成要素の運転中の変位量、原子炉停止後の残留変位、接触荷重、引抜き荷重などを計算する。

BEACONを用いて「常陽」の詳細な炉心構成要素の交換及び照射履歴を考慮した全炉心の湾曲解析に必要な全炉心構成要素のラッパ管位置の中性子照射量と温度分布データについては、下記の方法により作成している。

基本となる入力データとしては、MK-II炉心の炉心管理コードシステムMAGI用に作成した炉心各領域の実効断面積を収納したLTAファイル、MAGI燃焼計算結果を反映した原子数密度を収納したRANDファイル及び中性子束、随伴中性子束、冷却材流量配分、各部温度分布等の核熱計算結果（3次元Hex-Z体系、中性子7群拡散計算）を収納したOUTPUTファイルを用いる。これらを入力とし、ラッパ管温度計算コードTETRASにより、全炉心構成要素のラッパ管位置の中性子照射量と温度分布を計算する。TETRASでは、炉心燃料集合体、反射体等の炉心構成要素毎に設定したPorous Body Modelを用いて集合体内熱流力解析を行い、集合体間熱移行を考慮したラッパ管部の温度を求めている。

2.2 湾曲反応度解析

2.1で求めた炉心湾曲挙動から湾曲反応度を算出するコードとしては、これまで「もんじゅ」、「常陽」用に開発されたAURORAを用いてきた。

AURORAは、2次元の物質反応度価値マップ（燃料、構造材及び冷却材）とBEACONの出力を入力とし、下記の式により個々の炉心構成要素の湾曲反応度を求め、それを全炉心で合計する。AURORAの湾曲反応度計算概念を図2-2に示す。

$$[\text{集合体の湾曲反応度}] = \text{装荷位置の物質反応度価値微分係数} \times \text{径方向変位量}$$

AURORAの解析例として、第29サイクル炉心の出力上昇時の湾曲反応度を表2-1に示す。ここで、物質反応度値はPERKY⁴⁾を用いて、一次摂動理論により第29サイクル炉心について求めたものを使用した。なお、表2-1の計算では、各炉心構成要素の初期変位を考慮せず、ゼロ出力時の変位をゼロとした。これより、AURORAについて下記の問題点が摘出された。

- 1) 反射体領域の構造材、冷却材の移動により、燃料集合体の湾曲反応度より大きな反応度が投入されることになる。
- 2) 制御棒等、燃料物質を含まない集合体の湾曲に伴い、燃料物質の移動による反応度が計算される。

AURORAでは、2次元の物質反応度値マップを使用する際、実際の体系とマップが一致しない箇所については物質反応度値を外挿する。その結果、燃料と反射体の境界など、物質反応度値の勾配の大きい位置で外挿誤差が大きくなり、1)で述べたように、燃料と隣接する反射体の湾曲反応度を過大評価する傾向があることがわかった。

また、2)は、AURORAが各炉心構成要素の原子数密度に応じた湾曲反応度を計算するのではなく、装荷位置に対応する2次元の物質反応度値マップから機械的に湾曲反応度を計算していることによるものであった。

以上の問題点は、過去、「常陽」において、AURORAが1/6セクター炉心や2次元体系のような簡略化した体系を対象に整備されてきたことによるものであり、本コードを全炉心の湾曲反応度解析に適用するには、コードの改造あるいは新たなコードの作成が必要であることがわかった。そこで、改造作業量や改善効果等を総合的に検討した結果、下記の方針に基づき、「常陽」の湾曲反応度解析用に新たなコードを作成することとした。

- 1) BEACONの計算体系と同じ体系について作成した3次元の反応度値マップを入力に使用する。
- 2) 反応度値マップは、主要核種について、単位体積あたり任意の数の核種が変化した時の摂動計算により求め、反応度を計算する際、炉心構成要素毎にその原子数密度を考慮する。

上記方針に基づき、H9年度に計算コードの設計を開始し、H9、10年度に「常陽」炉心湾曲反応度解析コードARCHCOMを作成した。図2-3にARCHCOMの入出力ファイルを示す。

表2-1 AURORAによる第29サイクル出力上昇時の炉心湾曲反応度

[% $\Delta k/kk'$]

原子炉出力 (MWt)	炉心燃料部				炉心燃料以外			
	燃料	構造材	冷却材	合計	燃料	構造材	冷却材	合計
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.027	-0.015	-0.047
50	-0.008	0.001	0.000	-0.007	-0.008	-0.051	-0.029	-0.088
75	-0.018	0.002	0.000	-0.016	-0.008	-0.071	-0.041	-0.120
100	-0.024	0.002	0.000	-0.022	-0.009	-0.087	-0.052	-0.148

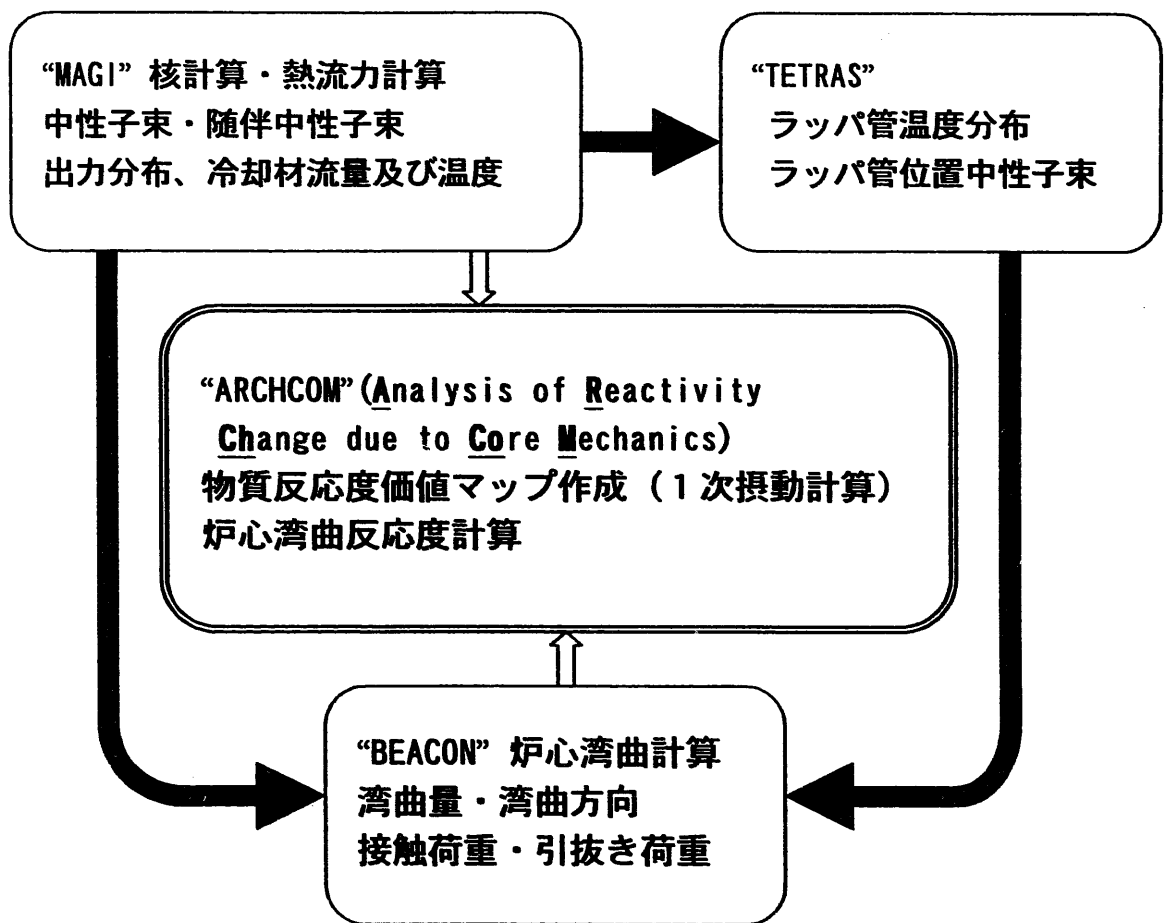


図 2 - 1 「常陽」における炉心湾曲反応度解析の流れ

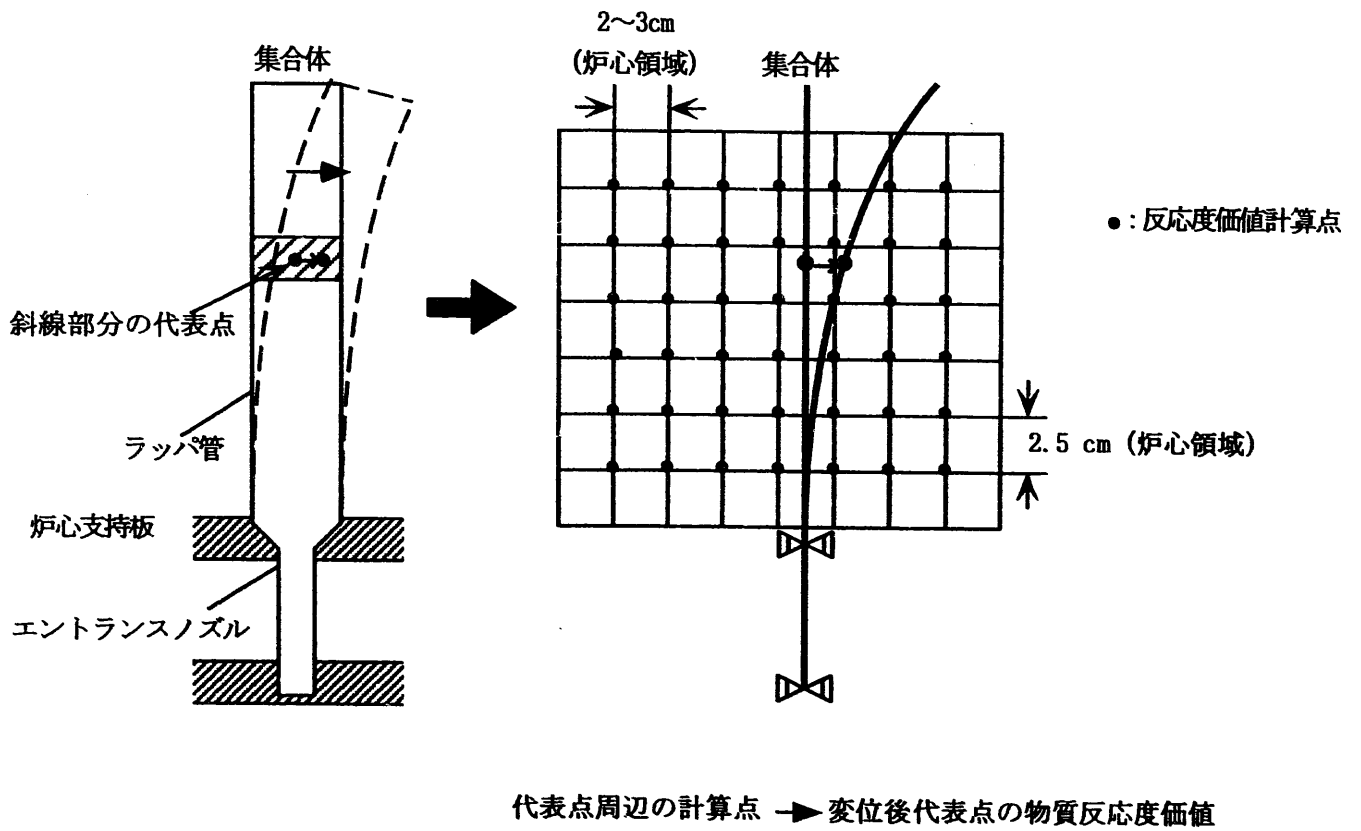


図2-2 AURORA の湾曲反応度算出法

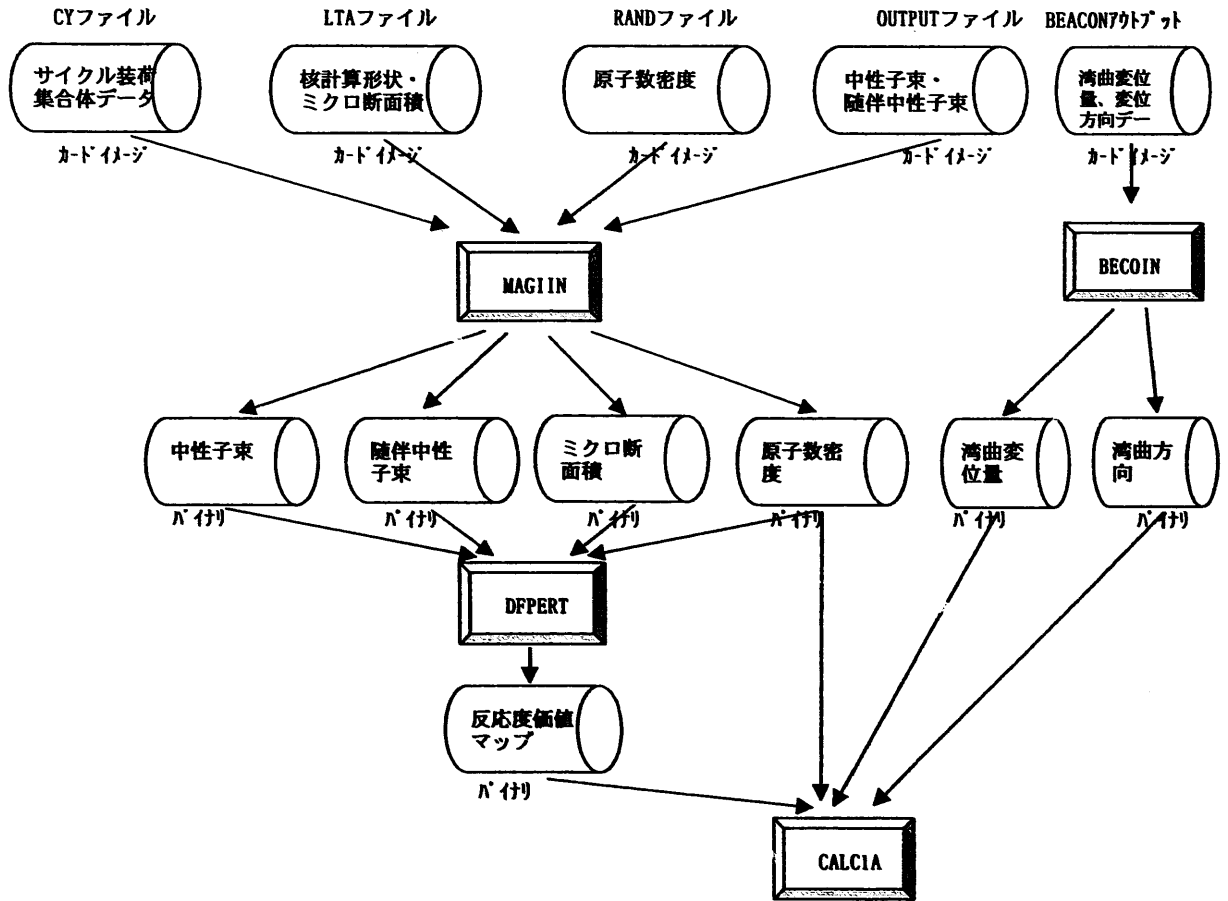


図2-3 ARCHCOMの入出力ファイル

3. 炉心湾曲反応度計算コード ARCHCOM の作成

3.1 反応度値分布の作成

ARCHCOM では、Hex-Z 体系により拡散近似一次摂動理論を用い、対象核種が単位体積当たり 10^{24} 個変化した場合の核種毎、メッシュ毎の反応度値成分を計算し、体系全体の反応度値分布を求め、これを用いて湾曲反応度を計算する。

対象核種の反応度値計算式を以下に示す。

$$\rho_{i,m,g} = C_{i,m,g} + F_{i,m,g} + S_{i,m,g} + L_{i,m,g} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、

C : 中性子捕獲

F : 核分裂中性子発生

S : 中性子散乱

L : 中性子漏洩

i : メッシュ点

m : 核種

g : 中性子エネルギー群

である。C、F、S、L の計算式を以下に示す。

$$C_{i,m,g} = - (\sigma_{c,i,m,g} \phi_{i,g} \phi_{i,g}^*) / I_p \quad \text{----- (2)}$$

σ_c : 捕獲断面積

ϕ : 中性子束

ϕ^* : 随伴中性子束

I_p は核分裂発生中性子インポートランスであり、以下の式により求める。

$$I_p = \frac{1}{k} \sum_m \sum_i V_i N_{i,m,g} \sum_g \nu \sigma_{f,i,m,g} \phi_{i,g} \sum_{g'} \chi_{m,g'} \phi_{i,g'}^* \quad \text{----- (3)}$$

ここで、V はメッシュの体積であり、N は核分裂核種の原子数密度である。

$$F_{i,m,g} = \left(\frac{1}{k} \nu_{m,g} \sigma_{f,i,m,g} \phi_{i,g} \sum_{g'} \chi_{m,g'} \phi_{i,g'}^* - \sigma_{f,i,m,g} \phi_{i,g} \phi_{i,g}^* \right) / p \quad (4)$$

σf : 核分裂断面積

ν : 核分裂中性子発生数

χ : 核分裂スペクトル

$$S_{i,m,g} = \left(\sum_{g'=1}^{g-1} \sigma_{s,i,m}^{g' \rightarrow g} \phi_{i,g'} - \sum_{g'=g+1}^N \sigma_{s,i,m}^{g \rightarrow g'} \phi_{i,g} \right) \phi_{i,g}^* / p \quad (5)$$

σs : 散乱断面積

$$L_{i,m,g} = -3D_{i,g}^2 \sigma_{tr,i,m,g} \int \nabla \phi \nabla \phi^* dV \quad (6)$$

D : 拡散係数

σtr : 輸送断面積

計算式(1)～(6)に基づき、MAGI 入出力ファイルに収納された中性子束、随伴中性子束、実効ミクロ断面積および原子数密度を用い、核種毎、計算メッシュ毎の反応度値を計算し、全計算体系における物質反応度値分布を作成する。

AURORA で使用した PERKY による燃料、構造材及び冷却材の物質反応度値マップ (MK-II 第 29 サイクル炉心の値) と、AURORA 用に作成した物質反応度値マップと並べてそれぞれ図 3-1、3-2、3-3 に示す。PERKY では対象核種の原子数密度を 2 倍 (100%) に変化させた時の物質反応度値を求めていたため、燃料と反射体、燃料と制御棒等の領域境界は不連続な値となり、これが前述の内外挿誤差の原因となっていた。ARCHCOM では 3 次元 Hex-Z 体系で各物質の単位原子数密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$) あたりの物質反応度値を計算することとした。

3.2 炉心湾曲反応度の算出

ARCHCOM では、3.1 で述べた計算手法より得られた反応度値分布から反応度値勾配ベクトルを算出する。反応度値勾配ベクトルは、対象となる計算メッシュ点における物質 (燃料、構造材、冷却材、 B_4C) 毎に、対象メッシュ点とそれに隣接する 6 体の集合体のメッシュ点の中性子束、随伴中性子束から次に述べる方法により算

出する。

まず、対象メッシュ点を含む直線上の3点の反応度値を2次曲線にフィッティングし、その対象メッシュ点における微分係数を求めることにより、3方向の直線上の反応度値勾配を求め、これらを図 3-4 に示す方法でベクトル合成する。以下に反応度値勾配ベクトルの方向及び大きさの算出式を示す。

$$\left| \vec{J}_{JF} \right| = \sqrt{(J_{JF=1})^2 + \left(\frac{J_{JF=2} + J_{JF=3}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad \text{----- (7)}$$

$$\alpha_{JF} = \tan^{-1} \frac{J_{JF=2} + J_{JF=3}}{\sqrt{3} J_{JF=1}} \quad \text{----- (8)}$$

ここで、

α_{JF} : 合成ベクトルの方向

$|\vec{J}_{JF}|$: 勾配ベクトルの絶対値

$J_{JF=1}$ 、 $J_{JF=2}$ 、 $J_{JF=3}$: 3方向の変位成分

上記により求めた反応度勾配ベクトルと BEACON による湾曲変位ベクトルの内積を求め、これに原子数密度、メッシュの体積および冷却材割合（集合体全体の冷却材体積に対し、ラッパ管内側の冷却材が占める体積割合；冷却材以外は 1.0）を乗じることによりメッシュ毎の湾曲に伴う反応度を算出する。これを、全炉心構成要素の軸方向メッシュについて積算することにより、対象炉心の湾曲反応度を求める。各メッシュ位置での湾曲反応度計算式を以下に示す。

$$BR = \left| \vec{J}_{JF} \right| \left| \vec{B}_{JF} \right| \cos(|\alpha_{JF} - \theta_{JF}|) \cdot DN \cdot VM \cdot FN \quad \text{----- (9)}$$

ここで、

$|\vec{B}_{JF}|$: 湾曲変位量

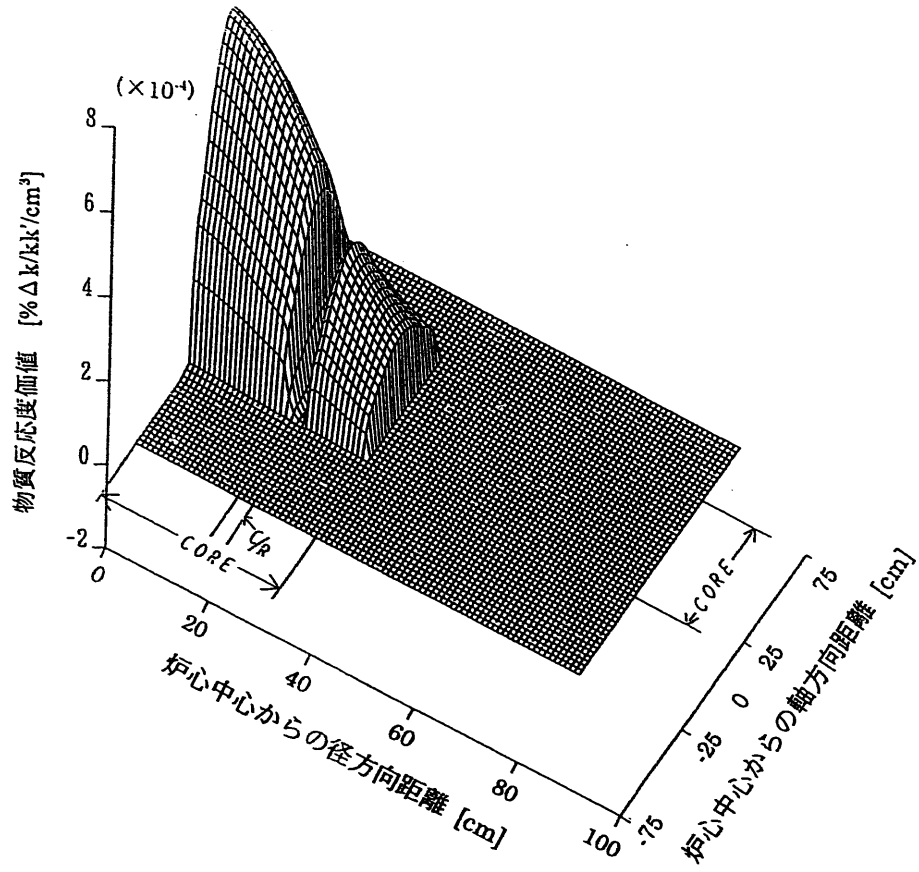
θ_{JF} : 湾曲変位方向

DN : 構成要素組成核種の原子数密度 ($\times 10^{24}$)

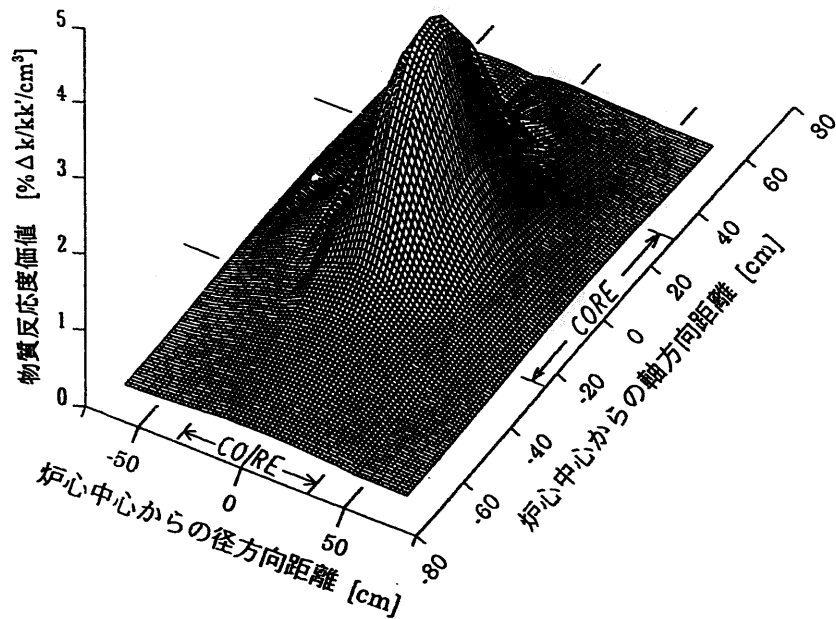
VM : メッシュ体積

FN : 冷却材割合

である。

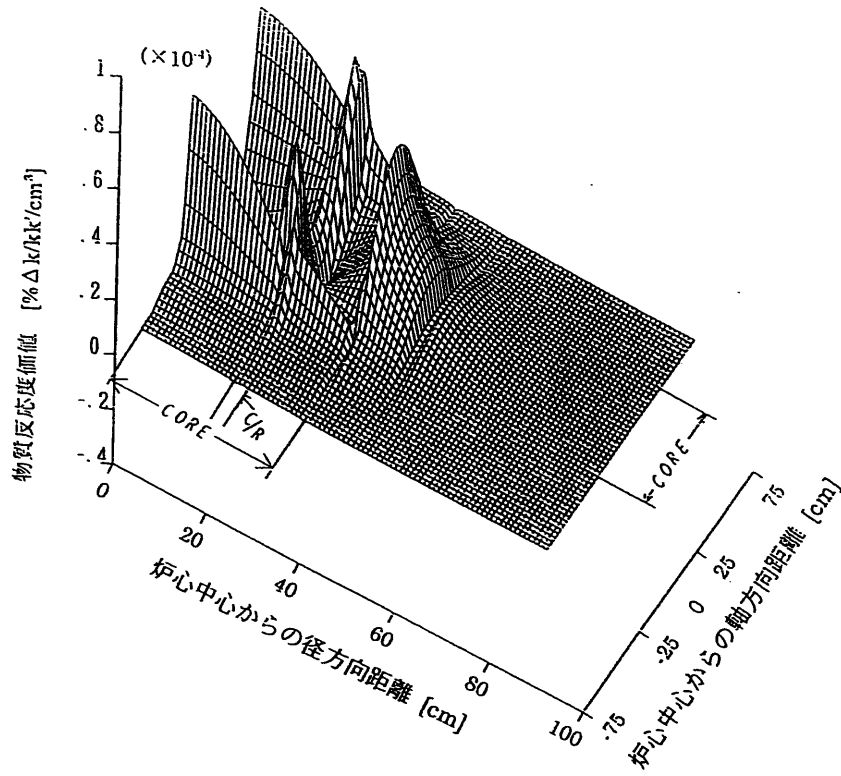


PERKY(AURORA)

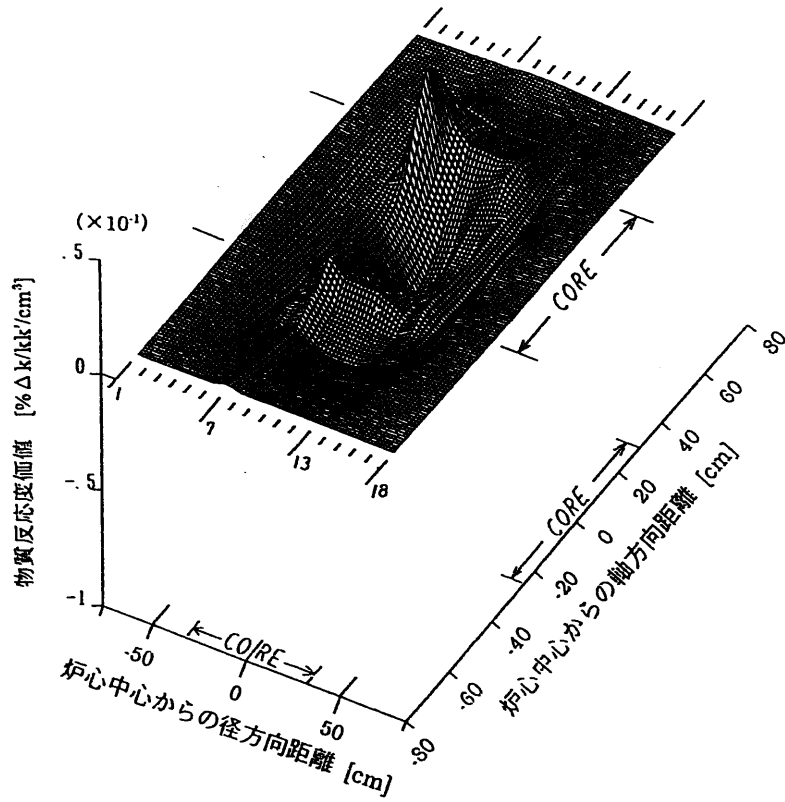


ARCHCOM

図3-1 燃料の物質反応度値マップの比較

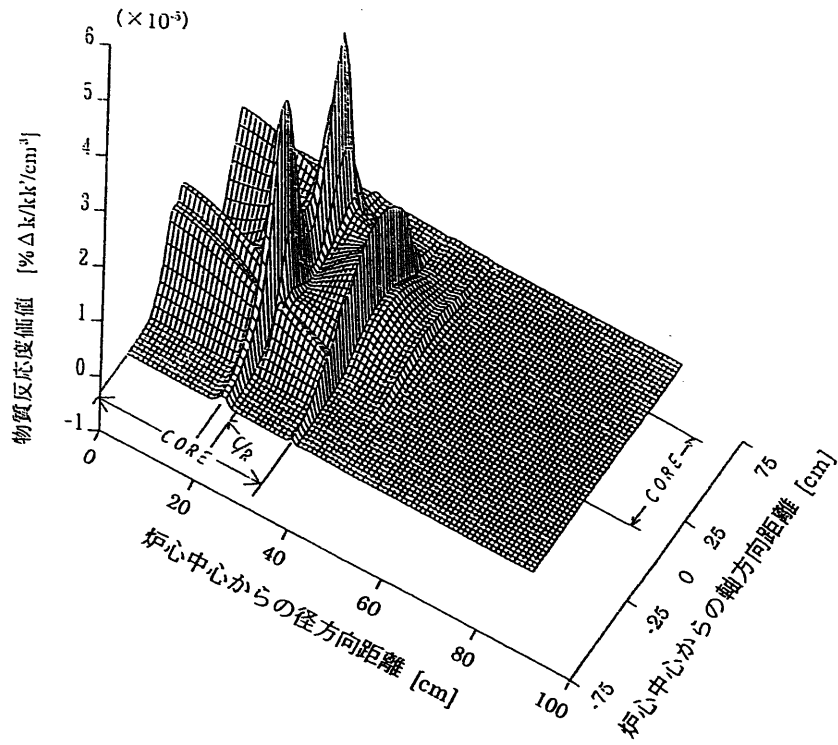


PERKY(AURORA)

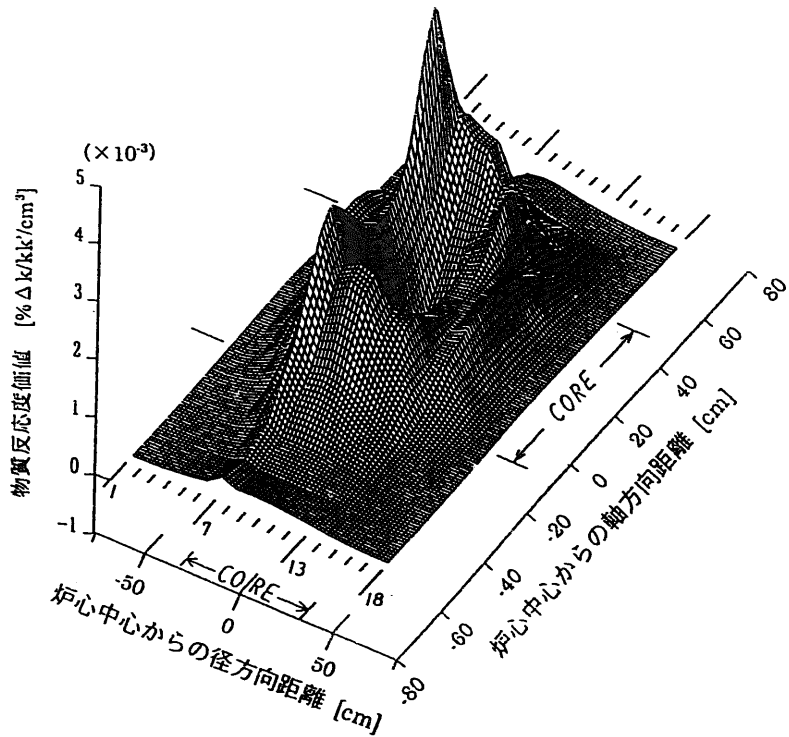


ARCHCOM

図 3 - 2 構造材の物質反応度価値マップの比較

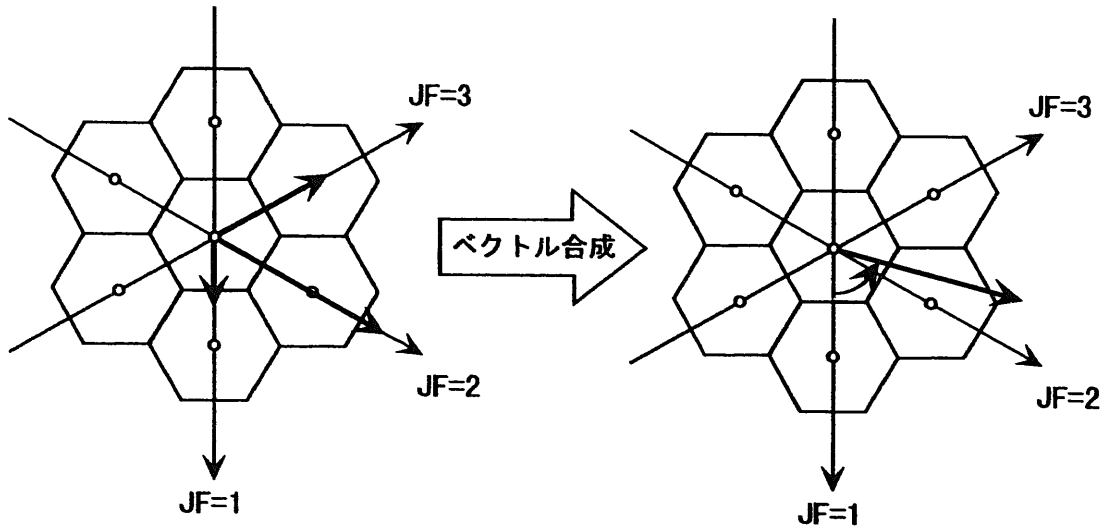


PERKY(AURORA)



ARCHCOM

図 3 - 3 冷却材の物質反応度値マップの比較



物質反応度価値勾配 3 方向ベクトル 物質反応度価値勾配ベクトル

$$|\bar{J}_{JF}| = \sqrt{(J_{JF=1})^2 + \left(\frac{J_{JF=2} + J_{JF=3}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{ここで} \quad \alpha_{JF} = \tan^{-1} \frac{J_{JF=2} + J_{JF=3}}{\sqrt{3}J_{JF=1}}$$

湾曲反応度 $BR = |\bar{J}_{JF}| |\bar{B}_{JF}| \cos(\alpha_{JF} - \theta_{JF}) \cdot DN \cdot VM \cdot FN$

ここで、 $|\bar{B}_{JF}|$: 湾曲変位量 θ_{JF} : 湾曲変位

図 3 - 4 ARCHCOM の湾曲反応度算出法

4. 機能確認および検証計算

4.1 機能確認

ARCHCOM で MAGI 及び BEACON から出力されるファイルを読み込み、「常陽」MK-II 炉心の任意のサイクルについて一連の炉心湾曲反応度の解析ができることを確認するため「常陽」MK-II 第 29 サイクル炉心の出力上昇時の炉心湾曲反応度を求めた。

BOC 0 MW、25 MW、50 MW、75 MW、100MW 時の 5 点について湾曲反応度を計算し、計算結果をまとめた。

AURORA 及び ARCHCOM による全体系での湾曲反応度を表 4-1 に示す。図 4-1 に第 29 サイクルの 2 次元 R Z 計算体系図を、図 4-2 に湾曲反応度計算時の集合体番号を示す。

4.2 コードの妥当性の確認

「常陽」MK-II 炉心において 2 次元 R Z 体系で模擬できる仮想的な湾曲を与えたときの湾曲反応度を CITATION による直接計算及び PERKY による 1 次摂動計算により求め、その結果を ARCHCOM と比較した。

・計算方法

まず、表 4-2 に示す湾曲変位量および表 4-3 に示す湾曲変位方向を ARCHCOM に入力し、湾曲反応度を求めた。なお、表 4-2 の軸方向ノード番号と炉心湾曲計算の対応を図 4-3 に示し、表 4-3 の集合体番号及び湾曲変位方向は、図 4-2 に示す集合体番号及び原点位置より、基準線と各集合体と中心集合体【000】のなす角度とした。

次に湾曲前後の 2 次元 R Z 計算体系をそれぞれ図 4-4、図 4-5 に示す。直接計算では、湾曲後の組成は表 4-6 の湾曲変位量を図 4-4 の CITATION 2 次元 R-Z 炉心計算体系における軸方向 20 ノード、径方向 10 列に対応する湾曲量（径方向成分）となるように密度変化に焼き直して求めた。以下に領域毎の原子数密度の算出式を示す。

$$\rho 1' = (\rho 1 \cdot V 1 - \rho 1 \cdot \Delta V 1) / V 1$$

$$\rho 2' = (\rho 2 \cdot V 2 + \rho 1 \cdot \Delta V 1) / V 2$$

$$\Delta V 1 = 2 \pi \cdot R 1 m \cdot \Delta r 1 \cdot Z$$

ここで、

- $\rho 1', \rho 2'$: 着目列およびその前・後の変位後原子数密度
- $\rho 1, \rho 2$: 着目列およびその前・後の変位前原子数密度
- $V 1, V 2$: 着目列およびその前・後の変位前体積
- $R 1 m$: 着目列の体積を2分する半径
- $\Delta r 1$: 着目列の径方向変位
- Z : ゾーン高さ

である。

実効断面積は SLAROM により求めた。計算条件を下記に示す。

- 計算モデル : 均質
- 炉定数セット : JFS-3-J2 (89年版)

CITATION の計算条件を以下に示す。

- 計算体系 : 2次元 RZ 体系
- エネルギー群数 : 70群
- 制御棒 : 全引き抜き (パーク位置)

・計算結果

計算結果を表 4-4 に示す。

燃料領域高さについて、第5列までの一部内側反射体を含む領域を比べると、PERKYとARCHCOMによる反応度の比は、0.97となった。しかし、全炉心で比較すると、PERKYとARCHCOMの比は0.93となり、ずれが大きくなる傾向がみられた。ARCHCOMによる炉心湾曲反応度はCITATIONとPERKYの値の間にあり、概ね妥当な結果が得られたといえる。

表4-1 ARCHCOMによる第29サイクル出力上昇時の炉心湾曲反応度

[% $\Delta k/kk'$]

原子炉出力 (MWt)	炉心部				炉心以外			
	燃料	構造材	冷却材	合計	燃料	構造材	冷却材	合計
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	-0.023	0.000	0.000	-0.022	0.000	-0.009	-0.002	-0.012
50	-0.044	0.000	-0.001	-0.044	0.000	-0.018	-0.004	-0.023
75	-0.057	0.000	-0.001	-0.058	0.000	-0.026	-0.006	-0.033
100	-0.070	0.000	-0.001	-0.070	0.000	-0.031	-0.008	-0.039

表 4 - 2 検証計算用既知変位量

(CM)

NODE 列	0	1	2	3 (IN)	C/R	3 (OUT)	4	5	6	7	8	9	10
1	0.0000	0.1348	0.2583	0.4590	0.2085	0.4590	0.9473	1.5886	1.7510	1.2915	0.6150	-0.0196	-0.0081
2	0.0000	0.0872	0.1491	0.3442	0.1649	0.3442	0.7795	1.1928	1.2636	0.9450	0.4050	-0.0163	-0.0063
3	0.0000	0.0500	0.0780	0.2763	0.1342	0.2763	0.6331	0.8640	0.8510	0.6794	0.2475	-0.0095	-0.0045
4	0.0000	0.0291	0.0504	0.2565	0.1198	0.2565	0.5576	0.6931	0.6768	0.5712	0.1745	-0.0080	-0.0030
5	0.0000	0.0182	0.0415	0.2349	0.1132	0.2349	0.5040	0.6072	0.5760	0.4809	0.1495	-0.0059	-0.0012
6	0.0000	0.0097	0.0406	0.2061	0.1092	0.2061	0.4536	0.5455	0.4896	0.3755	0.1448	-0.0030	0.0015
7	0.0000	0.0017	0.0409	0.1779	0.1050	0.1779	0.4027	0.4896	0.4080	0.2730	0.1380	0.0001	0.0046
8	0.0000	-0.0025	0.0515	0.1556	0.1047	0.1556	0.3585	0.4872	0.3984	0.2331	0.1170	0.0049	0.0067
9	0.0000	-0.0067	0.0620	0.1332	0.1038	0.1332	0.3142	0.4840	0.3852	0.1911	0.0968	0.0098	0.0091
10	0.0000	-0.0090	0.0756	0.1143	0.1034	0.1143	0.2795	0.4822	0.3708	0.1613	0.0717	0.0144	0.0104
11	0.0000	-0.0090	0.0756	0.1143	0.1034	0.1143	0.2795	0.4822	0.3708	0.1613	0.0717	0.0144	0.0104
12	0.0000	-0.0067	0.0620	0.1332	0.1038	0.1332	0.3142	0.4840	0.3852	0.1911	0.0968	0.0098	0.0091
13	0.0000	-0.0025	0.0515	0.1556	0.1047	0.1556	0.3585	0.4872	0.3984	0.2331	0.1170	0.0049	0.0067
14	0.0000	0.0017	0.0409	0.1779	0.1050	0.1779	0.4027	0.4896	0.4080	0.2730	0.1380	0.0001	0.0046
15	0.0000	0.0097	0.0406	0.2061	0.1092	0.2061	0.4536	0.5455	0.4896	0.3755	0.1448	-0.0030	0.0015
16	0.0000	0.0182	0.0415	0.2349	0.1132	0.2349	0.5040	0.6072	0.5760	0.4809	0.1495	-0.0059	-0.0012
17	0.0000	0.0291	0.0504	0.2565	0.1198	0.2565	0.5576	0.6931	0.6768	0.5712	0.1745	-0.0080	-0.0030
18	0.0000	0.0500	0.0780	0.2763	0.1342	0.2763	0.6331	0.8640	0.8510	0.6794	0.2475	-0.0095	-0.0045
19	0.0000	0.0872	0.1491	0.3442	0.1649	0.3442	0.7795	1.1928	1.2636	0.9450	0.4050	-0.0163	-0.0063
20	0.0000	0.1348	0.2583	0.4590	0.2085	0.4590	0.9473	1.5886	1.7510	1.2915	0.6150	-0.0196	-0.0081

表 4 - 3 検証計算用既知変位方向

(度)

集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向	集合体 番号	方向
1	0.0	2	120.0	3	60.0	4	0.0	5	300.0	6	240.0	7	180.0	8	120.0
9	90.0	10	60.0	11	30.0	12	0.0	13	330.0	14	300.0	15	270.0	16	240.0
17	210.0	18	180.0	19	150.0	20	120.0	21	100.9	22	79.1	23	60.0	24	40.9
21	100.9	22	79.1	23	60.0	24	40.9	25	19.1	26	0.0	27	340.9	28	319.1
29	300.0	30	280.9	27	340.9	28	319.1	29	300.0	30	280.9	31	259.1	32	240.0
33	220.9	34	199.1	35	180.0	36	160.9	37	139.1	38	120.0	39	106.1	40	90.0
41	73.9	42	60.0	43	46.1	44	30.0	45	13.9	46	0.0	47	346.1	48	330.0
49	313.9	50	300.0	51	286.1	52	270.0	53	253.9	54	240.0	55	226.1	56	210.0
57	193.9	58	180.0	59	166.1	60	150.0	61	133.9	62	120.0	63	109.1	64	96.6
65	83.4	66	70.9	67	60.0	68	49.1	69	36.6	70	23.4	71	10.9	72	0.0
73	349.1	74	336.6	75	323.4	76	310.9	77	300.0	78	289.1	79	276.6	80	263.4
81	250.9	82	240.0	83	229.1	84	216.6	85	203.4	86	190.9	87	180.0	88	169.1
89	156.6	90	143.4	91	130.9	92	120.0	93	111.1	94	100.9	95	90.0	96	79.1
97	68.9	98	60.0	99	51.1	100	40.9	101	30.0	102	19.1	103	8.9	104	0.0
105	351.1	106	340.9	107	330.0	108	319.1	109	308.9	110	300.0	111	291.1	112	280.9
113	270.0	114	259.1	115	248.9	116	240.0	117	231.1	118	220.9	119	210.0	120	199.1
121	188.9	122	180.0	123	171.1	124	160.9	125	150.0	126	139.1	127	128.9	128	120.0
129	112.4	130	103.9	131	94.7	132	85.3	133	76.1	134	67.6	135	60.0	136	52.4
137	43.9	138	34.7	139	25.3	140	16.1	141	7.6	142	0.0	143	352.4	144	343.9
145	334.7	146	325.3	147	316.1	148	307.6	149	300.0	150	292.4	151	283.0	152	274.7
153	265.3	154	256.1	155	247.6	156	240.0	157	232.4	158	223.9	159	214.7	160	205.3
161	196.1	162	187.6	163	180.0	164	172.4	165	163.9	166	154.7	167	145.3	168	136.1
169	127.6	170	120.0	171	113.4	172	106.1	173	98.2	174	90.0	175	81.8	176	73.9
177	66.6	178	60.0	179	53.4	180	46.1	181	38.2	182	30.0	183	21.8	184	13.9
185	6.6	186	0.0	187	353.4	188	346.1	189	338.2	190	330.0	191	321.8	192	313.9
193	306.6	194	300.0	195	293.4	196	286.1	197	278.2	198	270.0	199	261.8	200	253.9
201	246.6	202	240.0	203	233.4	204	226.1	205	218.2	206	210.0	207	201.8	208	193.9
209	186.6	210	180.0	211	173.4	212	166.1	213	158.2	214	150.0	215	141.8	216	133.9
217	126.6	218	120.0	219	114.2	220	107.8	221	100.9	222	95.6	223	84.4	224	79.1
225	72.2	226	65.8	227	60.0	228	54.2	229	47.8	230	40.9	231	35.6	232	24.4
233	19.1	234	12.2	235	5.8	236	0.0	237	354.2	238	347.8	239	340.9	240	335.6
241	324.4	242	319.1	243	312.2	244	305.8	245	300.0	246	294.2	247	287.8	248	280.9
249	275.6	250	264.4	251	259.1	252	252.2	253	245.8	254	240.0	255	234.2	256	227.8
257	220.9	258	215.6	259	204.4	260	199.1	261	192.2	262	185.8	263	180.0	264	174.2
265	167.8	266	160.9	267	155.6	268	144.4	269	139.1	270	132.2	271	125.8	272	120.0
273	114.8	274	109.1	275	103.0	276	98.4	277	90.0	278	81.6	279	77.0	280	70.9
281	65.2	282	60.0	283	54.8	284	49.1	285	43.0	286	38.4	287	30.0	288	21.6
289	17.0	290	10.9	291	5.2	292	0.0	293	354.8	294	349.1	295	343.0	296	338.4
297	330.0	298	321.6	299	317.0	300	310.9	301	305.2	302	300.0	303	294.6	304	289.1
305	283.0	306	278.4	307	270.0	308	261.6	309	257.0	310	250.9	311	245.2	312	240.0
313	234.8														

角度は"000"を中心とし"000"→"1C1"方向を基準に反時計回りとした。

表4-4 湾曲反応度の比較

	CITATION	[% $\Delta k/kk'$]	
		PERKY	ARCHCOM
炉心部+C/R+内側反射体	-	-0.754	-0.781
軸方向反射体		-0.133	-0.053
外側反射体		0.029	-0.091
全炉心	-1.01	-0.86	-0.93

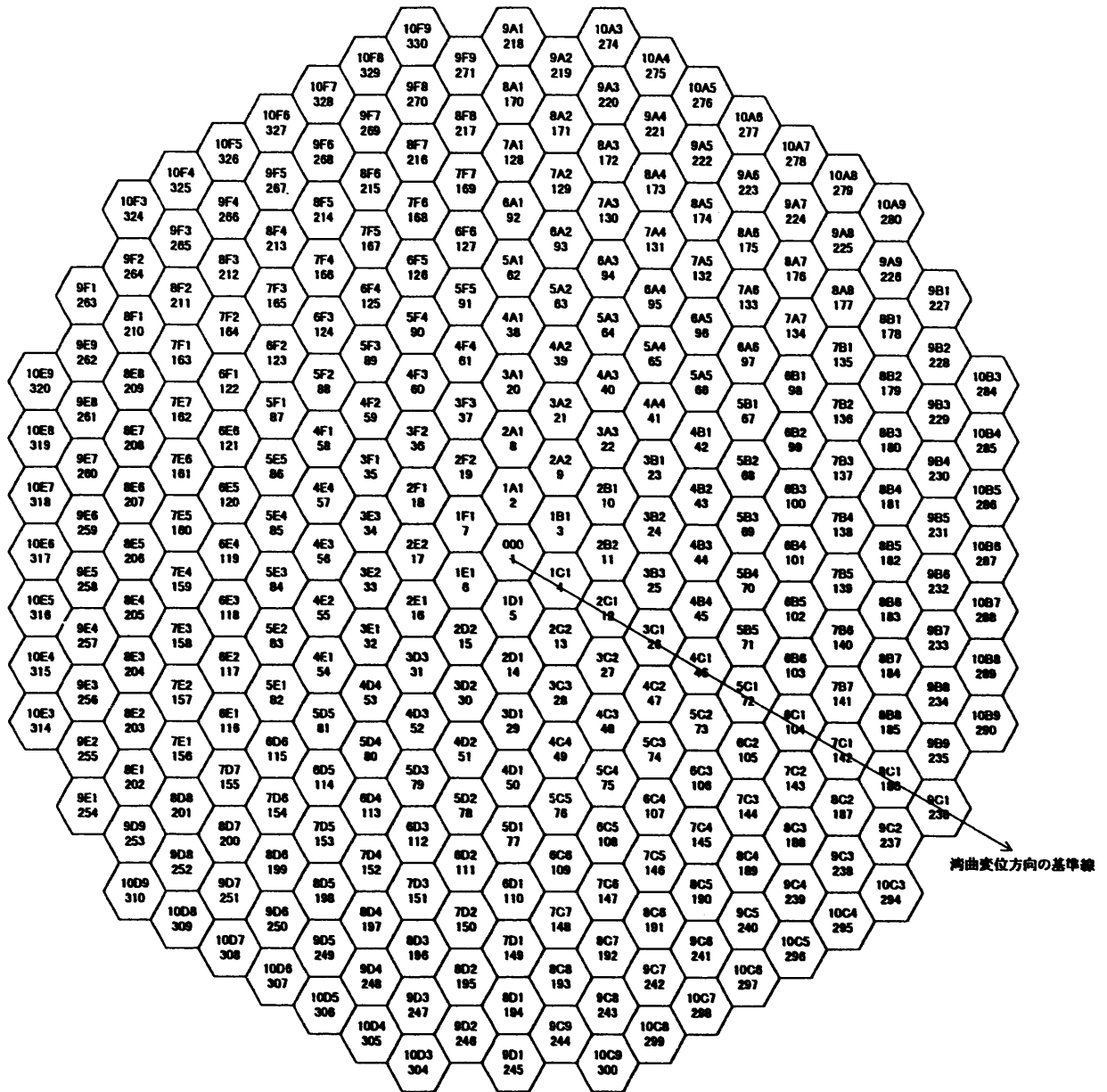


図4-2 「常陽」炉心の集合体番号

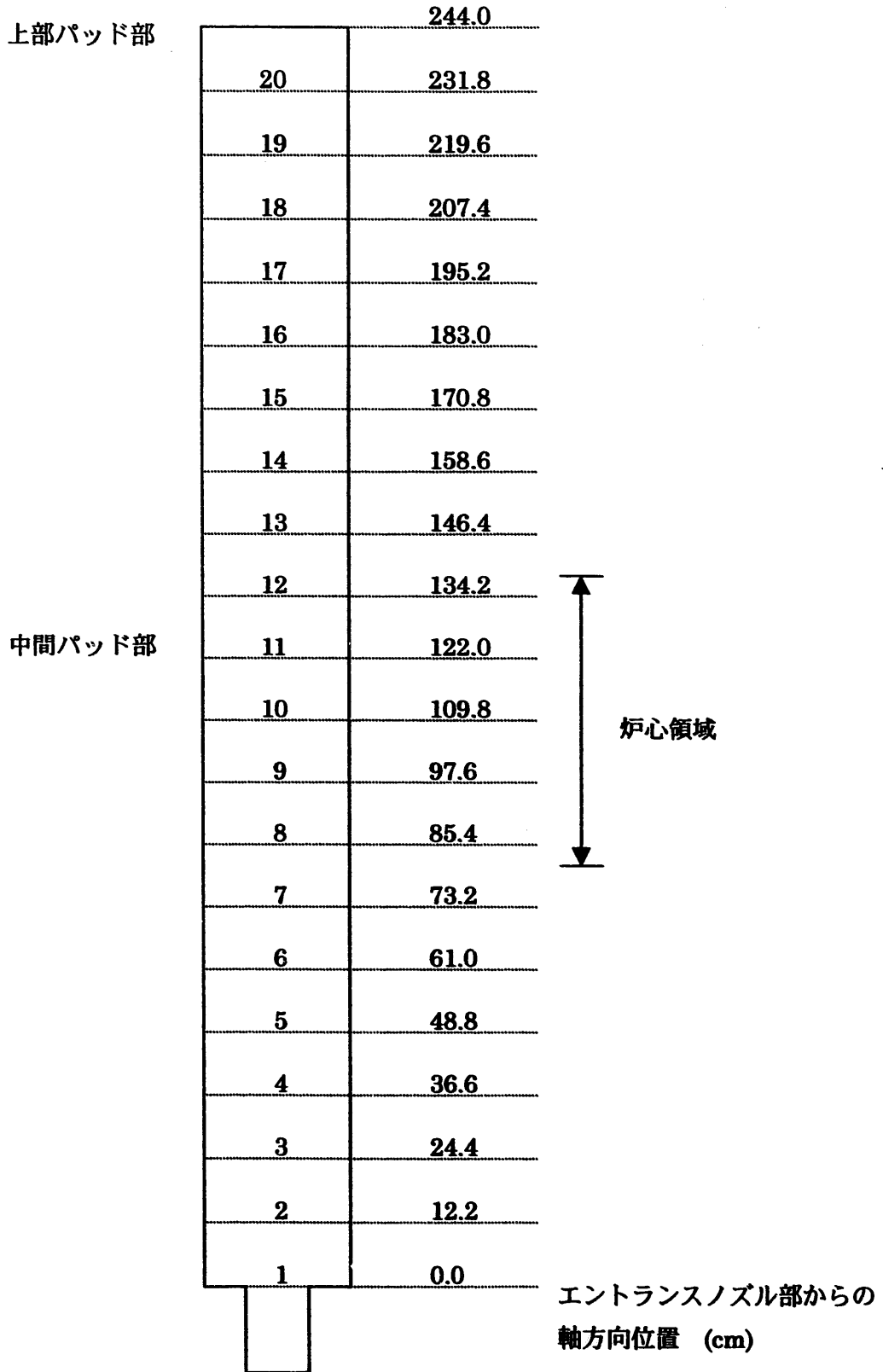


図 4 - 3 炉心湾曲計算における軸方向ノード番号

0.0	列	0	1	2	3IN	C/R	3OUT	4	5	6	7	8	9	10	
10.0 (1)	1									13					
20.0 (1)	2	9	9	9	9	11	9	9	9						
30.0 (1)	3														
35.0 (1)	4	8	8	8	8		8	8	8						
40.0 (1)	5	7	7	7	7		7	7	7						
45.0 (2)	6														
50.0 (2)	7														
55.0 (2)	8														
60.0 (2)	9														
65.0 (2)	10	1	1	1	1	2	1	1	3	4	5	5	5	6	
70.0 (2)	11														
75.0 (2)	12														
80.0 (2)	13														
85.0 (1)	14	7	7	7	7		7	7	7						
90.0 (1)	15														
95.0 (1)	16	8	8	8	8		8	8	8						
110.0 (2)	17	10	10	10	10		10	10	10						
120.0 (1)	18					12									
130.0 (1)	19	9	9	9	9		9	9	9	13					
140.0 (1)	20														
計(30) (メッシュ分割)		0.0	4.27906 (3)	11.32132 (4)	18.65198 (2)	21.39529 (2)	23.82479 (2)	26.02850 (4)	33.42052 (4)	36.56030 (4)	47.06965 (3)	55.62778 (3)	63.03449 (3)	69.65804 (5)	92.66902

計(43)
(メッシュ分割)

1	炉心(0~4列)
2	C/Rアダプタ
3	炉心(5列)
4	内側反射体
5	外側(A)反射体
6	外側(B)反射体
7	炉心(Z方向)
8	インシュレータ
9	上・下部反射体
10	下部空間
11	C/R B4C
12	C/R OUT
13	内側反射体上・下部反射体

単位 : cm

図4-4 検証計算用炉心体系図(湾曲前)

0.0	列	0	1	2	3IN	C/R	3OUT	4	5	6	7	8	9	10
(1)	1													
10.0		97	98	99	100	161	101	102	103	132				
(1)	2										141	146	151	156
20.0														
(1)	3	104	105	106	107	162	108	109	110	125				
30.0														
(1)	4	83	84	85	86		87	88	89					
35.0														
(1)	5	55	56	57	58	43	59	60	61	126				
40.0														
(2)	6	62	63	64	65		66	67	68		142	147	152	157
45.0														
(2)	7	1	2	3	4		5	6	48					
50.0														
(2)	8	7	8	9	10	44	11	12	49	127				
55.0														
(2)	9	13	14	15	16		17	18	50					
60.0														
(2)	10	19	20	21	22	45	23	24	51	128	143	148	153	158
65.0														
(2)	11	25	26	27	28		29	30	52					
70.0														
(2)	12	31	32	33	34		35	36	53					
75.0														
(2)	13	37	38	39	40	46	41	42	54	129				
80.0														
(2)	14	69	70	71	72		73	74	75		144	149	154	159
85.0														
(1)	15	76	77	78	79	47	80	81	82	130				
90.0														
(1)	16	90	91	92	93		94	95	96					
95.0														
(2)	17	134	135	136	137	163	138	139	140	131				
110.0														
(1)	18	111	112	113	114		115	116	117		145	150	155	160
120.0														
(1)	19					164	122	123	124	133				
130.0														
(1)	20	118	119	120	121									
140.0														
計(30)														
(メッシュ分割)														
0.0		(3)												
4.27906		(4)												
11.32132		(4)												
18.65198		(2)												
21.39529		(2)												
23.82479		(2)												
26.02850		(4)												
33.42052		(4)												
36.56030		(4)												
47.06965		(3)												
55.62778		(3)												
63.03449		(3)												
69.65804		(5)												
92.66902														

1~42	炉心(0~4列)
43~47	C/Rアダプタ
48~54	炉心(5列)
125~131	内側反射体
141~155	外側(A)反射体
156~160	外側(B)反射体
55~82	炉心(Z方向)
83~96	インシュレータ
97~124	上・下部反射体
134~140	下部空間
161~162	C/R B4C
163~164	C/R OUT
132~133	内側反射体上・下部反射体

計(43)
(メッシュ分割)

単位：cm

図4-5 検証計算用炉心体系図(湾曲後)

5. おわりに

計算コードAURORAを「常陽」全炉心の炉心湾曲反応度解析に適用した場合の問題点を踏まえ、3次元の物質反応度価値マップを用いて炉心湾曲反応度を計算するARCHCOMを作成した。AURORAとARCHCOMによるMK-II炉心第29サイクル出力上昇時の炉心湾曲反応度計算結果を比較し、AURORAにみられた計算結果の問題がARCHCOMで解決されていることを確認した。また、2次元RZ体系で表現可能な仮想的な湾曲を与えた場合について、汎用コードCITATION、PERKYによる物質反応度価値から算出した湾曲反応度とARCHCOMによる値を比較し、両者がよく一致することを確認した。

以上より、「常陽」MK-II炉心を対象に、全炉心構成要素の詳細な照射・交換履歴を考慮した湾曲反応度解析に必要なツールの整備を終了した。今後、ARCHCOMを用いてMK-II炉心の出力変化に伴う炉心湾曲反応度を解析し、MK-II炉心の出力係数データとの比較を行い、これまで実機で観察されてきた原子炉出力変化に伴う出力係数絶対値の変化と炉心湾曲の関係について検討を進める予定である。

謝 辞

炉心湾曲解析コード ARCHCOM のプログラム作成にあたっては C R C 総合研究所志子田恵治氏ならびに奈良昭穂氏に多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 前田幸基他 :『VII.「常陽」の高度化と利用計画』、動燃技報 No.104、特集「常陽」20周年 p83、JNC TN1340 97-004 (1997)
- (2) 福家 賢他 :「常陽」MK-II 炉心の機械的挙動評価、PNC ZN9410 95-239(1991)
- (3) 鳥丸忠彦他 : 炉心構成履歴を考慮した「常陽」炉心の機械的挙動評価(2)、日本原子力学会「1997 春の年会」(1997年3月)
- (4) 飯島 進他 : 高速炉設計用計算プログラム・2、JAERI - M 6993 (1977)