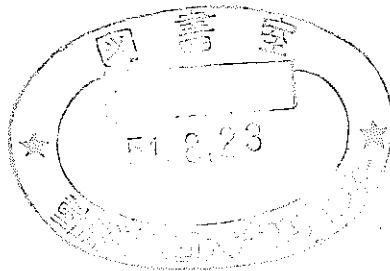


T N 241 74 - 18

区分変更	
変更前番号	118
決裁年月日	平成 18 年 7 月 31 日

高速炉核特性予測精度の現状



昭和49年7月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
	N 241 74-18
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

高速増殖炉開発本部

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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, 319-1184
Japan

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

高速炉核特性予測精度の現状

要 旨

高速炉核計算の現状精度を把握し、今後の炉物理研究開発項目を定量的基礎の上に立って抽出することを目的として、模擬実験解析にもとづいて「もんじゅ」の主要核特性量を予測する場合の不確かさを誤差要因別に検討した。

精度を評価するに当っては、不確かさを互いに独立な要因に分け、各要因からの不確かさが統計的な標準偏差として扱えるという前提に立っている。評価された主要核特性量の現状精度と設計要求およびR & D目標精度設定値を以下に示す。

		1973年現状 (±%)	設計要求 (±%)	R & D目標 (±%)
実効増倍率	初期炉心	0.7	0.5	0.5
	平衡炉心	1.0	(0.5)	0.7
出力分布	炉心	4~5	5	3
	ブランケットピーク	9	10	5
制御棒価値	調整棒	7	10	5
	安全棒	10	15	7
増殖比		5	—	3
ドブラー係数		17	20	10~11.5
ナトリウムボイド係数		23	20	10~15

精度評価の検討結果からさらに精度を向上させるために今後に残されたR & Dとしては燃焼炉心の実効増倍率、炉心・ブランケット境界の出力分布およびoff centerでのナトリウムボイド効果の評価が重要な問題である。

なお、本報告は日立、三菱、東芝の3社に委託した「実験解析に対する要求精度の評価^{1),2),3)}」を検討会を通してまとめたものである。数値自体はまだ第1段階のものであり、さらに詳細な評価研究が続けられる予定である。

昭和49年7月

小林節雄^{*}，金城勝哉^{*}

* 高速増殖炉開発本部

目 次

1. はじめに	1
2. 高速原型炉の設計要求およびR&D目標精度	3
3. 1971年時点の核計算精度	5
4. 実験解析に対する現状精度	7
4.1 誤差要因の分類	9
4.2 精度評価	9
4.3 ま と め	11
5. 模擬実験解析にもとづく設計値の予測精度	11
5.1 外挿プロセス	12
5.2 外挿精度の評価	12
5.3 設計体系自体の不確かさ	15
5.4 ま と め	17
6. 今後の高速炉物理R&D	18
参 考 文 献	21

1. はじめに

高速炉物理研究の主目的は、設計しようとする高速炉の物理パラメータを精度よく予測するための信頼できる基礎を与えることである。その予測精度は使用するデータおよび計算法の精度に強く依存しており、核データの測定・評価、模擬臨界実験・解析および解析手法の開発が炉物理分野における主要R&Dとして行なわれている(図1.1)。一方、これらの炉心核特性予測精度に対する設計側からの要求は、炉の安全性、経済性あるいは増殖性評価における必要性にもとづいている。安全性については反応度係数、すなわち燃料のドップラー係数や冷却材のボイド係数が動特性と事故解析に欠くことのできないデータであり、制御棒価値が炉を安全に運転・制御するに充分であるか否かが重要である。経済性については、臨界量が重要なことは云うまでもなく、出力分布を平坦化して局所的な出力のピークを抑え、比出力を改善するとともに燃料の長期燃焼を達成することが中心的な課題である。また長期の燃料サイクルから見ると増殖性が重要な問題となる。

現在ナショナルプロジェクトとして開発が進められている高速原型炉「もんじゅ」を一つのモデルとして、設計要求を満足するための核計算精度と、モックアップ実験解析から評価される現状精度とを比較することにより、今後必要な炉物理R&Dのターゲットを明確にすることを試みた。なおこれらの精度評価はA.モックアップ実験解析の不確かさ、B.設計体系への外挿にともなう不確かさ、C.設計体系自体の不確かさの3段階に分けて行なった。

以下、第2章では高速原型炉に対する要求精度を設定してこれらの要求がどのような設計条件、制限条件と関連しているかを明確にする。また第3章ではFCAV炉心の実験解析にもとづく高速実験炉「常陽」の設計予測値の精度を示す。これは高速原型炉「もんじゅ」の設計研究が本格的にスタートした時点(1970~1971年)での核計算現状精度に相当すると考えられ、現在までの精度向上の具合を評価する一つの目安となる。第4章では原型炉模擬臨界実験解析に対する現状精度を述べる。第5章では模擬実験解析にもとづく設計体系への外挿について述べ、主にC/Eによる外挿をベースにして予測精度を評価する。また設計体系自体の持つ不確かさについても言及する。最後に第6章では現状精度と目標精度の差をつめるために必要な今後のR&D項目について検討する。

なおこれらの精度評価は1 σ ベースで行なうことを原則としたが、実際には信頼巾(confidence level)を明確にすることは困難であった。

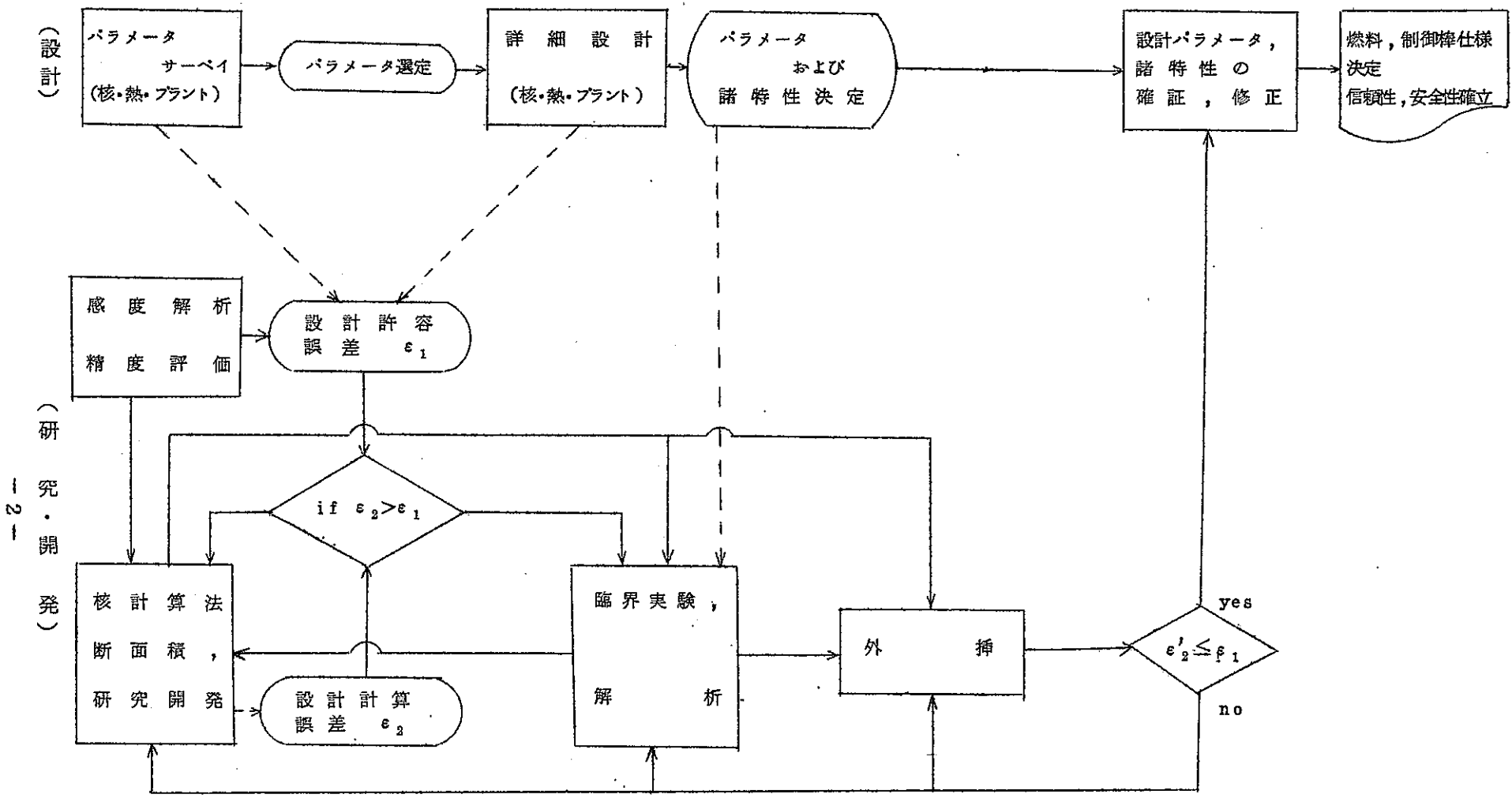


図 1.1 炉物理 R & D の流れ

2. 高速原型炉の設計要求およびR & D目標精度

高速原型炉「もんじゅ」に対する研究開発は1968年度「原型炉予備設計」を行なって基本的仕様を固め、1970年度には「もんじゅ1次設計」がスタートして本格的な設計研究段階に入った。すでに「3次設計」まで終了しており、「調整設計(I)」は1974年前半に終了する予定である。現在までに得られている「もんじゅ」の基本概念は次の通りである。

「もんじゅ」は熱出力714MW、電気出力で約300MWのナトリウム冷却高速増殖炉で、原子炉の型式はループ型である。炉心はプルトニウム富化度の違いにより2領域に分かれており、燃料にはU-Pu混合酸化物を、また被覆材にはSUS316を使用する。燃料要素は密封型燃料で、ガスペナムを炉心上部軸方向ブランケットの上におく。また平衡炉心での取出し燃料の平均燃焼度を80,000MWD/Tとし、増殖比は1.2以上を目標としている。

以下、各設計パラメータに対する設計条件、設計要求、およびR & D目標精度について述べる。

(1) 実効増倍率

初期炉心の臨界量に関しては、初期全出力運転時の炉の k_{eff} が燃焼余裕(2.5% $\Delta k/k$ と不確かさ0.5% $\Delta k/k$)、および微調整棒のバイト分(0.1% $\Delta k/k$ 以下)の余剰反応度を持つという条件から装荷燃料のPu富化度を設定している。初装荷燃料のPu同位体比は ^{239}Pu ： ^{240}Pu ： ^{241}Pu ： ^{242}Pu が75：20：5：0、また平衡炉心に用いるPu燃料の同位体比は、58：24：14：4となっているが、その変動巾についてはまだ明確な基準が固まっていない。

実効増倍率に対する設計精度は初期炉心及び平衡炉心とも $\pm 0.5\% \Delta k/k$ を目標としているが、特に平衡炉心に対しては現状では厳し過ぎる値であると考えられる。

3次設計では k_{eff} の不確かさのすべてを制御棒で負担するのは制御棒設計上困難であると判断し、次の対策を想定している。

k_{eff} の誤差範囲(% $\Delta k/k$) 〔実機 - 予測計算値〕	対 策
+ 0. ~ + 0.5	粗調整棒で吸収する
+ 0.5 以上	固定吸収材集合体を炉心内に挿入する
- 0. 以下	炉心を拡大する。

(2) 出力分布

出力分布には運転基準を考慮し、運転サイクル中に生じる最大の出力値を推定している。炉心出力分布はサイクル初期に制御棒挿入パターンを考慮して評価する。ブランケット出力

分布はサイクル末期で局所的発熱の他に炉心からブランケットへ流入する中性子の減速による発熱寄与および γ 線の輸送を考慮して評価する。

最終的な設計値としてはこれらの計算値に実験解析からのC/E補正因子を適用し、さらに次の誤差巾を見込んで決めている。

	炉 心	径方向ブランケット
ホット・スポット	± 5 %	—
チャンネル積分出力	± 2.5 %	± 5 %

(3) 制御棒反応度価値

実験解析を行っていない時点では計算値（輸送効果、非均質効果、メッシュ効果等を含めたもの）に対して±20%の不確かさを考慮して設計しているが、現在制御棒実験値の解析が行なわれており、C/E値による補正後の最終的な不確かさとしては±10%以内に入ることを目標としている。

また安全棒ワースが十分に取れない場合を想定して、調整棒にスクラム機能をもたせるための設計研究も進められている。

(4) 増 殖 比

原型炉に対しては、燃料サイクルを考えた明確な設計要求はでていないが、暫定的な値として±3%の精度を目標としている。

(5) 反応度係数

制御棒設計においてはホット零出力から全出力までの温度補償に対して、計算値に±20%の不確かさを見込んでいる。これは主要な寄与成分であるドブラー係数に対して±20%の不確かさを見込んでいる事となる。

一方、安全解析に用いる反応度係数については計算値（燃焼効果、制御棒挿入効果、ナトリウムボイド発生効果等を考慮したもの）に対し次の不確かさを見込んでいる。

- (a) ドブラー係数……………± 30 %
- (b) 燃料，冷却材，構造材，炉心支持板等の膨張による反応度係数
……………± 80 %
- (c) ナトリウムボイド係数……………± 30 %
- (d) 動特性パラメータ β/l_p ……± 20 %

但し、安全解析ではモデルの設定や、有効破壊エネルギー放出量等に今後つめるべき問題

があって、上記の精度巾は必ずしも安全解析上必要な精度の限界を示すものではない。

(6) ま と め

以上の考察にもとづいて設定した、主要設計パラメータに対する要求精度およびR&D目標精度を表2.1に示す。

表2.1 高速原型炉に対する設計要求およびR&D目標精度

設計パラメータ	設計要求	R & D 目標
(1) 実効増倍率：初期	0.5	0.5
平衡	(0.5)	0.7
(2) 出力分布：炉心	5	3
ブランケット	10	5
(3) 制御棒価値：調整棒	10	5
安全棒	15	7
(4) 増殖比		3
(5) トップラー係数	20	10~15
(6) ナトリウムボイド係数	20	10~15

3. 1971年時点の核計算精度⁴⁾

高速炉核特性の予測精度は、核データおよび計算法の精度によって大巾に制限されてしまうので、炉心設計のさい臨界集合体によるモックアップ実験によって計算値を補正することが是非とも必要になる。我国で初めて建設されている高速実験炉「常陽」の場合には、原研のFCAを用いたモックアップ実験が行なわれたが、この実験はFCAの第V炉心シリーズと呼ばれている。

これらの実験解析は「常陽」の設計計算に用いた手法を標準計算法として、これにもう少し精密な計算法を加えたもので行なわれた。標準計算法は体系を領域毎に均質化し、2次元6群拡散計算を主体とし、必要に応じて1次元25群 S_4 計算で輸送理論補正を行なう方法をとっている。

表3.1は主要核特性についてFCA-V炉心集合体の実験値と計算値の比較をまとめたものである。C/E値の誤差は主に異なる測定値によるC/E値のバラッキの大きさを表わしているが、実効増倍率と B_4C 制御棒反応度については計算方法の誤差(メッシュサイズ効果、 S_4 補正

の不確かさ等)と測定誤差の和を示している。

表3・2は「常陽」核特性の設計目標精度と、モックアップ実験以前の推定精度とFCA-V炉心集合体のモックアップ実験解析を経た後の推定精度を示している。実際の設計作業では、目標精度の以前に安全性の条件、運転および燃焼余裕の条件、熱出力や流量配分の考慮などから設計許容精度が設定されている。ここで云う設計目標精度はこまでは到達したいという、設計者の少し欲張った要求である。1970年の推定精度は、モックアップ以前のFCAおよび諸外国の臨界集合体実験の解析結果から推定したものであり、1971年の値は表3・1の結果にもとづいている。「常陽」の設計値は、モックアップ解析のさい最善と考えられた方法と同じ手法で計算を行ない、それにモックアップ解析によるE/C値を補正係数として乗じて得られるものとしている。なおそのさい、モックアップ体系と「常陽」との差にもとづく「常陽」への外挿にともなう誤差を考慮した。

表3・1 FCAによる「常陽」モックアップ実験の解析結果

項 目	計算値/実験値	FCA第V炉心実験項目
(1) 実効増倍率	0.995 ± 0.005	V-1, -2, -3 集合体臨界量
(2) 90%濃縮B ₄ C制御棒 反応度	1.05 ± 0.07	V-1, -2, -3 模擬B ₄ C制御棒反応度
(3) 出力分布：炉心 フランケット	1.00 ± 0.02 10~20%過小評価	V-1, -2, -3 集合体核分裂率分布
(4) Doppler 反応度	1.1 +0.2 -0.1	V-1, -2 中心サンプルDoppler反応度
(5) 物質反応度：燃料 : S U S	1.15 +0.2 -0.05 0.80 ± 0.15	V-1, -2 中心反応度, ドロワー置換 反応度
(6) Naボイド反応度： 炉心中心	0.6 ± 0.2	V-1 集合体中心反応度, Naボイド
炉心広領域	0.75 ± 0.2	反応度, V-2 集合体中心反応度

表3・2 「常陽」核特性計算値の推定精度

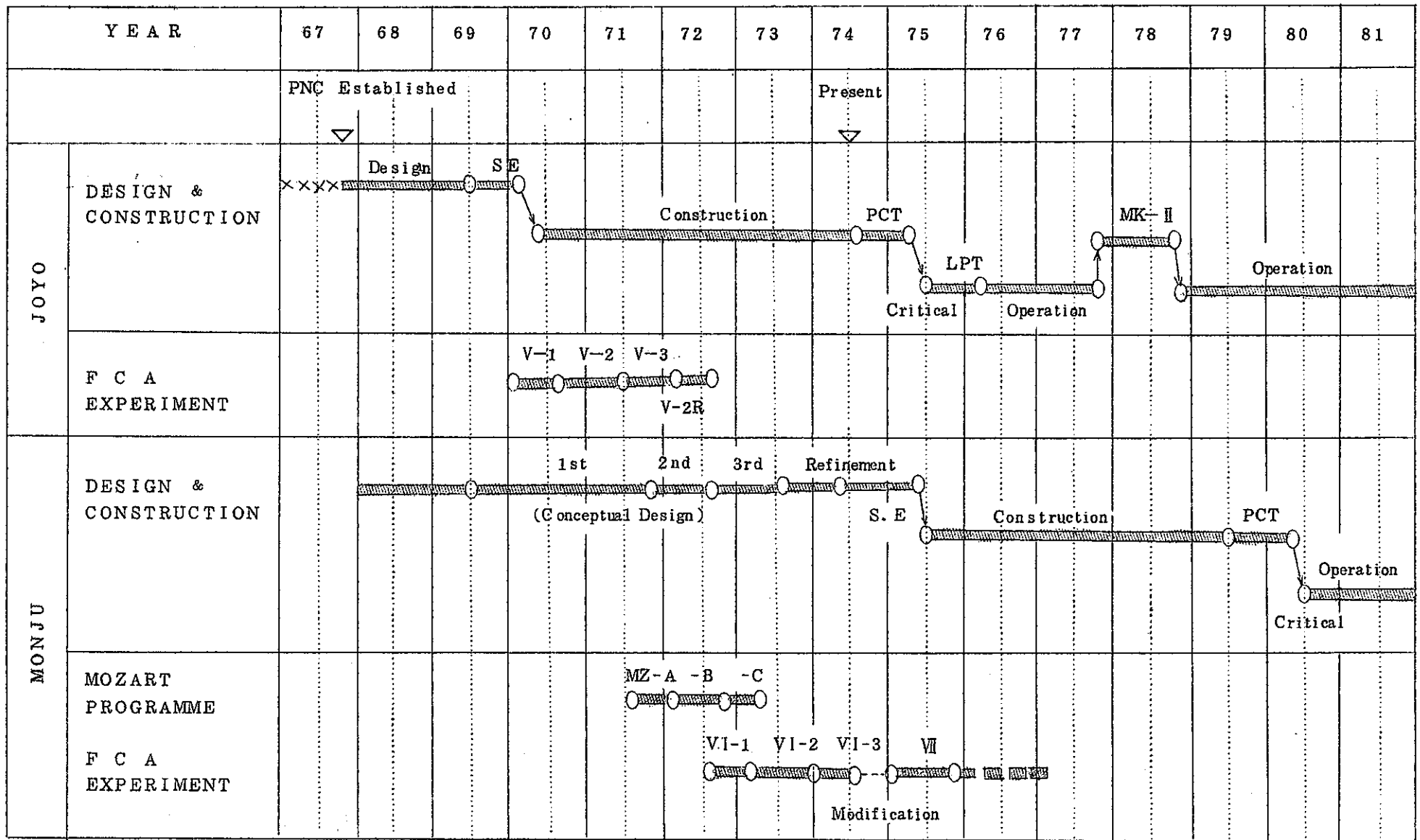
項 目	1970 推定精度	1971		設計目標精度
		補正係数	推定精度	
(1) 実効増倍率	1.5	1.005	± 1.5	0.5
(2) B ₄ C 制御棒反応度	20	0.95	±20	10
(3) 出力分布：炉 心	10	1.00	± 3	5
ブランケット	10	1.0	+20 - 0	10
(4) Doppler 反応度	30	0.85	+40 -20	20
(5) 物質反応度：燃 料	30	0.85	±20	10
構 造 材	30	1.1	±30	10
(6) Na ボイド反応度：				
炉心中心領域	Factor 2	1.6	±30	20
炉心広領域	40	1.3	±30	20
(7) 動特性パラメータ	20	1.0	±20	10

4. 実験解析に対する現状精度

高速原型炉の設計研究をサポートするための臨界実験は、まずフルサイズの炉心模擬実験が、英国の高速臨界実験装置「ZEBRA」を用いて1971年から1973年前半まで約1年半にわたって行なわれた。この実験は日英の共同研究として実施されたもので「MOZART」と呼ばれており、「もんじゅ」の初期炉心を模擬した3種類の炉心集合体(MZ-A, -B, -C)が組まれた。一方これと相補なり形でFCAでも「もんじゅ」初期炉心組成を模擬した部分模擬実験が1972年よりスタートし、1974年7月に終了する予定になっている。これはFCA第Ⅵ炉心集合体シリーズと呼ばれている。その後FCA炉心マトリックスの拡張を行ない、1975年には第Ⅶ炉心集合体シリーズがスタートする。これには一部、工学的模擬実験も含まれる予定である。これらのスケジュールを図4・1に示す。

これらの模擬実験に対する解析はすでに始められており、反応率分布、制御棒ワース、ナトリウムボイド効果の解析を中心に実施されている。実験解析の結果得られるC/E値に対する不確かさは基本的には以下のような立場で評価している。

- a. 各項目は誤差を統計的に独立として扱えるように分類する。
- b. 誤差は原則としてone standard deviationで考える。



SE = Safety Evaluation.

LPT = Low Power Test

PCT = Pre-Critical Test

MK-II = Modification to Mark-II Core

4.1 LMFBR development and reactor physics programmes

4.1 誤差要因の分類

モックアップ実験解析にともなう不確かさは

- (i) 実験誤差
- (ii) 実験体系に固有な量の評価にともなう不確かさ
- (iii) 核計算誤差

の三つに大別される。

(i)の実験誤差の中には測定誤差そのもの、実験値の解釈、変換により生ずる誤差(例えば TLD の測定値の解釈, Doppler 出力係数から温度係数の導出等)が含まれる。ただし μ_{eff} の問題は系統的なバイアスとして別に扱う。(ii)の実験体系に固有な量の不確かさの中には、体系の非均質性、不純物や特殊構造の取扱い、個数密度および温度補正等の不確かさに起因するものが含まれる。(iii)の核計算誤差は主に計算の近似法(群数, メッシュサイズの効果, バックリングの取り方等)にもとづくものである。

なお、設計上必要な特性量; A が複数個の積分実験値; X_i と結びついている場合

$$A = A(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots) \quad (1)$$

には不確かさ ΔA_{ex} を

$$\Delta A_{ex} = \left\{ \sum_i \left(\frac{\partial A}{\partial X_i} \cdot \Delta X_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ΔX_i : X_i の実験誤差

で考える(例えば出力分布, 増殖比などがその例である)。

以下、個々の特性量に対する現状の解析精度を評価する。

4.2 精度評価

(1) 実効増倍率

臨界性に関しては体系の実効増倍率が `direct` に測定量と対応しており, MOZART 実験から評価される実験誤差は無視できる程度に小さい($\pm 0.04\%$)。実験体系に固有な量の評価の中では非均質補正に対する不確かさが最も大きく($\pm 0.3\%$)、他の補正量の不確かさは無視できる。また核計算誤差は実験量と設計量とが一对一に対応し、しかも同一の計算手法、計算条件を用い設計計算値に対して E/C 値で補正を行なう場合には二次的な影響しか及ぼさない($\pm 0.1\%$)。

以上をまとめると実験解析の不確かさは約 $\pm 0.3\%$ となる。

(2) 出力分布

出力分布に対応する実験測定量としては中心反応率比、および反応率分布がある。(1)、(2)式にもとづき中心反応率比、反応率分布の測定誤差から出力分布に換算した実験誤差を評価すると炉心部分で $\pm 0.4\%$ 、ブランケット部分で $\pm 4.6\%$ となる。また plate の非均質補正の不確かさ ($\pm 30\%$ と想定) はブランケットの出力分布に対して $\pm 1.5\%$ の寄与をするが、炉心では無視できる程度に小さい。

核計算誤差については γ 線源分布推定および γ 線輸送計算の不確かさと、制御棒挿入体系での実験解析誤差を考え、炉心部で $\pm 3\%$ 、ブランケットで $\pm 4.2\%$ と評価した。

以上を総合すると出力分布に対する実験解析精度は

炉心	$\pm 3\%$
ブランケット	$\pm 6.4\%$

となる。

(3) 制御棒反応度価値

制御棒ワースに対する測定誤差はだいたい $\pm 3\%$ 程度である。またワースを $\Delta k/k$ 単位に変換する際に β_{eff} の影響が約 4% 見込まれるが、これは不確かさの中に含めない。実験体系に固有な量の評価に対する不確かさは上記実験誤差に比べると無視できる程度に小さく $\pm 0.5\%$ 程度に過ぎない。

制御棒実験解析にもとづく C/E 値を設計計算値に対する補正 factor として適用する場合の一つの approach として、 B^{10} 含有量、制御棒位置、制御棒本数が異なるすべての実験解析結果の C/E 値の平均を用いることにする。ただし調整棒と安全棒は区別して考える。この場合の C/E 値の平均のまわりのバラツキはすべて核計算誤差と考えると調整棒に対して $\pm 5\%$ 、安全棒に対して $\pm 7\%$ となる。現在進められている制御棒実験解析が終了する時点では、さらに小さくなることが期待できる。以上を総合すると実験解析の現状精度は調整棒…… $\pm 5.8\%$ 、安全棒…… $\pm 7.6\%$ となる。

(4) 増殖比

増殖比については、出力分布の場合と同じように中心反応率比と反応率分布の結合として実験解析精度を評価することが可能と思われるが、現状では α^{41} 、 C^{40} 等の実験情報が不足している。近似的に $BR \approx \frac{C8}{F9} / (1 + \alpha^{49})$ と表現でき、C8/F9に対する実験誤差として $\pm 1\%$ 、非均質効果による不確かさとして $\pm 1.5\%$ を考える。また計算誤差としては α^{49} による 3.3% 、C8の分布による $\pm 2\%$ の不確かさを考えている。

(5) 反応度係数

ドップラー反応度係数に対する現状解析精度はSEFORのドップラー実験解析の経験から±11%と評価している。

ナトリウムボイド反応度に対しては、プレート及びピン状アセンブリーの実験に対して、実験誤差±2%、非均質効果に対する不確かさ±6%、および核計算誤差として、central component ±10%、leakage component ±15%を考えている。

4.3 まとめ

以上の検討結果をまとめ実験解析に対する現状精度を表4-1に示す。

表4-1 モックアップ実験データ解析精度の現状

項 目	実験誤差	体系固有量の 不確かさ	(±%)	
			核計算誤差	合 計
(1) 実効増倍率	0.04	0.3	0.1	0.3
(2) 出力分布：炉 心	0.4	—	3	3
：ブランケット	4.6	1.5	4.2	6.4
(3) 制御棒価値：調整棒	3	0.5	5	5.8
安全棒	3	0.5	7	7.6
(4) 増殖比	1	1.5	4	4.3
(5) ドップラー係数	6	9	3	11
(6) ナトリウムボイド係数	2	5	10~14	16

5. 模擬実験解析にもとづく設計値の予測精度

模擬実験解析の結果にもとづいて設計体系の特性量を予測する場合、実験値と解析値の比(E/C)を補正係数として用いる方法(以下Bias法と呼ぶ)が、初歩的ではあるが従来広く行われてきた。この方法は予測しようとするすべての特性量についてE/Cを求めるための実験、解析が要求されるという欠点を持っているが、実験体系と設計体系の相関が強ければ強いほど信頼のおける、精度のよい外挿法となり得る。

ここでは、MOZART実験およびFCAにおける原型炉模擬実験の解析結果からBias法を適用して原型炉の核特性量を予測した場合の外挿にもなう不確かさと、原型炉体系自体が持つ不確かさについて評価する。

5.1 外挿プロセス

外挿手段として Bias 法を適用するに当たり、ベースとなる実験体系および外挿しようとする設計体系に対し次のような仮定をおく。

- (i) E/C 値を評価する実験体系はプレート非均質効果等の体系に固有な量の補正を行なった理想的な均質体系とする。
- (ii) E/C 値を適用する設計体系も均質、常温の理想体系とし、ピン非均質性、運転温度への補正等は E/C 値の適用後に加える。

これらの外挿プロセスは図 5-1 のように図式化されるが、最終的な予測値に見込まれる不確かさ ϵ は図中の記号を借りると次のように表わされる。

$$\epsilon = \pm \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2}$$

5.2 外挿精度の評価

設計体系への外挿にもとなり不確かさを分類すると次の 3 つに大別される。

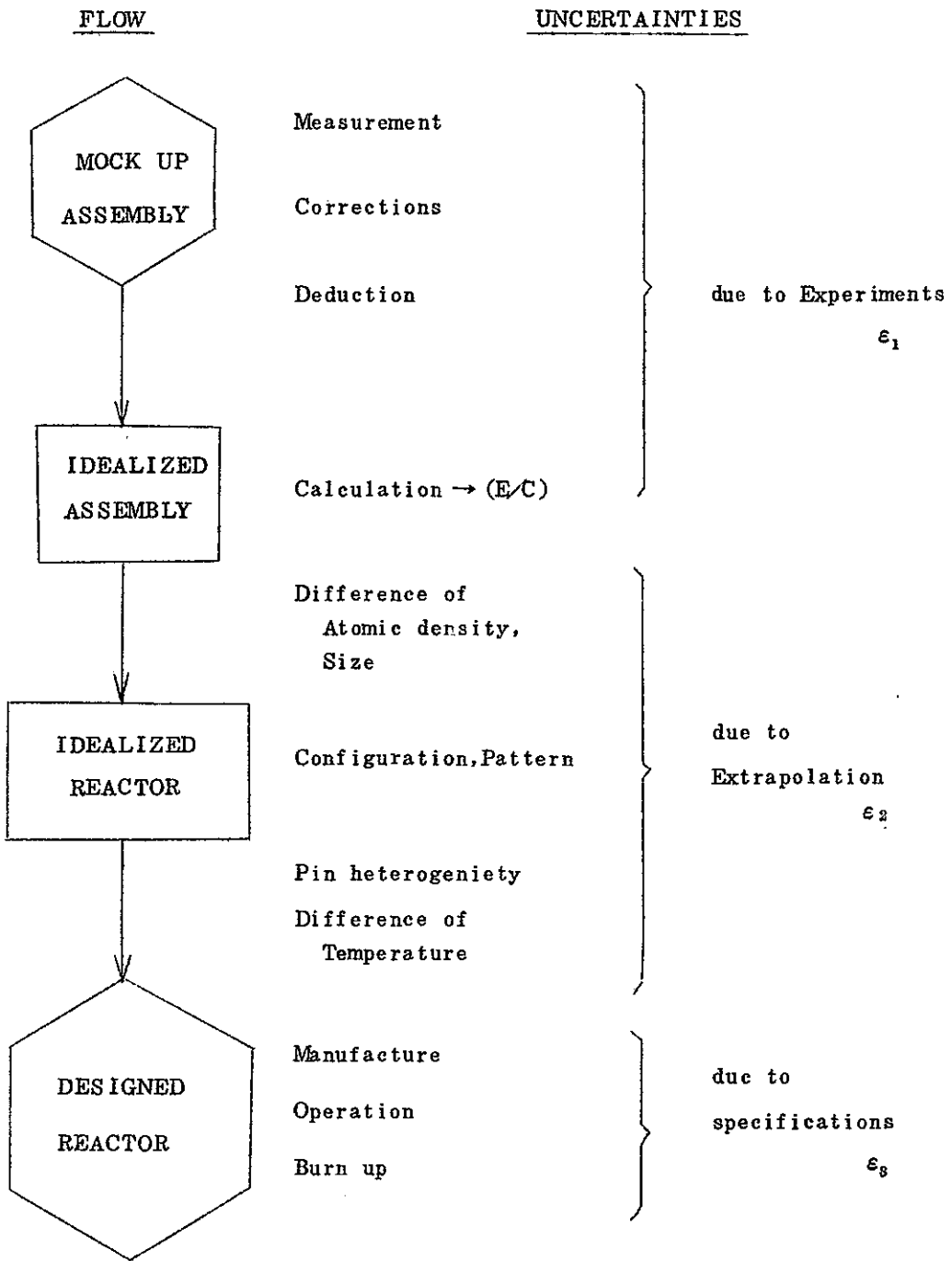
- (i) モックアップ体系との組成の違いにもとづくもの
- (ii) 寸法、構造の違いにもとづくもの
- (iii) 温度条件の違いにもとづくもの

このうち(i)に関しては使用する核定数の不確かさによるものが主であり(ii)に関しては Pin の非均質効果、制御棒および Na チャンネルの存在、周辺構造、寸法の違い等が影響する。また(iii)に関してはドブラー効果によるものが主である。

(1) 実効増倍率

実験解析結果にもとづいて設計体系の実効増倍率を予測しようとする場合、最も大きな不確かさの原因となるものは、モックアップ体系と設計体系の個数密度の違いである。特に平衡炉心を予測する場合、高次 Pu 同位体、および F.P の断面積の不確かさが大きく影響する。

FCA で行なわれた“密度係数”の実験解析結果(C/E 値とその不確かさ)および MOZART 実験体系と原型炉設計体系の個数密度の差から不確かさを評価した。初期炉心に対する外挿上の不確かさは $\pm 0.3\% \Delta k/k$ で ^{238}U と ^{241}Pu の寄与が大きい。また平衡炉心に対しては $\pm 0.6\% \Delta k/k$ で、特に ^{241}Pu と F.P の寄与が大きい(平衡炉心用の取換え燃料は軽水炉から出てくる高次 Pu 同位体割合の多い燃料である)。ここで F.P に関しては密度係数の測定結果がないため断面積に平均して $\pm 30\%$ の不確かさがある



☒ 5.1 Flow diagram of extrapolation and relevant uncertainties

ものと仮定して評価している。

一方、寸法、構造等の違いによる不確かさはビン非均質効果に関するものが $\pm 0.1\%$ 、制御棒、Naチャンネルの存在によるものが $\pm 0.3\%$ 程度と評価している。また温度条件の違いによる不確かさとしては、コールドからホット全出力の反応度変化に $\pm 0.1\%$ $\Delta k/k$ 程度の不確かさを見込んでいる。

以上を合計すると外挿にともなう不確かさは初期炉心については $\pm 0.4\% \Delta k/k$ 、平衡炉心については $\pm 0.7\% \Delta k/k$ となる。

(2) 出力分布

出力分布に対する外挿上の不確かさはモックアップ体系との寸法、構造等の違いによるものが大きく、制御棒、Naチャンネルの存在による不確かさが炉心、ブランケットとも $\pm 1\%$ 、新・旧燃料の混在によるものが 2% 見込まれる。また組成の違いにもとづく不確かさとして、ブランケットについては特に平衡炉心の場合Pu build upの効果により $\pm 2\%$ 程度の不確かさを予想している。

したがって外挿にともなう不確かさは炉心では $\pm 2.2\%$ 、ブランケットでは $\pm 3.6\%$ となる。

(3) 制御棒反応度価値

制御棒ワースの外挿にともなう不確かさは、制御棒本数、挿入位置などの問題についてはすでに実験解析によるC/E値のパラッキの中に含めてあるが、実験情報の不足から3本安全棒のワースを予測するのに $\pm 5\%$ の不確かさを見込んでいる。また炉心サイズの違いによるものが $\pm 3\%$ 、組成の違いによるものが調整棒で $\pm 1\%$ 、安全棒で $\pm 2.2\%$ と評価される。

(4) 増殖比

増殖比に対する検討はまだ十分に行われていないが ^{238}U および ^{239}Pu の反応率分布に対する評価から、外挿上の不確かさを $\pm 2\%$ 程度と見込んでいる。

(5) 反応度係数

反応度係数に関しては測定値の不足および模擬実験解析が現在進行中なために計算の信頼度はまだ十分ではない。一応の目安として

- i) ドブラー反応度に対して外挿にともなう不確かさは組成の違いにもとづくものとして、初期と平衡炉心のドブラー効果の差に $\pm 20\%$ の誤差を考慮して $\pm 3\%$ 、寸法、構造上の違いによる不確かさとして制御棒挿入による変化の $\pm 20\%$ を考慮して $\pm 6\%$ と

している。また安全性用としてはさらに温度条件の違いによる不確かさ $\pm 10\%$ を考慮に入れる。

- ii) Naボイド反応度に対しては組成の違いに起因するもの $\pm 10\%$ 、寸法、構造の違い（特に制御棒、Naチャンネルの存在）によるもの $\pm 11\%$ を考えている。さらに温度条件の違いによる不確かさとして $\pm 5\%$ を見込んだ。

(6) ま と め

以上をまとめると設計体系への外挿にもなり不確かさは表5.1のようになる。

表5.1 外挿にもなり不確かさ (±%)

項 目	組成の違い	寸法, 構造等の違い	温度条件の違い	合 計
(1) 実効増倍率：初 期	0.3	0.3	0.1	0.4
平 衡	0.6	0.3	0.1	0.7
(2) 出力分布：炉 心	—	2.2	—	2.2
ブランケット	2	3	—	3.6
(3) 制御棒価値：調整棒	1	3	—	3.2
安 全 棒	2.2	5.8	—	6.2
(4) 増 殖 比	1	2	—	2.2
(5) ドブラー係数	3	6	10	12
(6) ナトリウムボイド係数	10	11	5	15

5.3 設計体系自体の不確かさ

炉心の設計計算は定められた設計条件およびモデルにもとづいて行なわれるが、実機の製作に見込まれる誤差、および平衡炉心の場合の燃焼予測の不確かさにもない、設計体系自体に組成の不確かさが生じる。さらに原子炉の運転も種々の不確かさを生む原因となる。これら設計体系自体の不確かさを

- (i) 設計、製作にもなり不確かさ
(ii) 運転、燃焼にもなり不確かさ

に大別して評価する。

(1) 実効増倍率

実効増倍率に対する設計体系自体の不確かさとしては、組成の不確かさによるものが最も大きい。燃料製作上の仕様からすべての製作公差が実効増倍率を増加（又は減少）

させる方向に動くとは仮定した場合の影響は $\pm 4\% \Delta k/k$ 以上にもなるが、最終的には製作された個々の集合体についてPu fiss.量がおさえられると考えている。Pu富化度を定める上での一応の目安として製作にともなり不確かさを $\pm 0.5\% \Delta k/k$ と評価した。

次に平衡炉心を設計対象とする場合には運転にともなり燃焼組成変化の不確かさがさらに実効増倍率に影響する。平衡炉心の平均燃焼度を $50,000 \text{ MWD/T}$ として燃焼による組成変化の不確かさを燃料元素の中性子吸収断面積 σ_a および中性子束 ϕ の不確かさ(各 $\pm 5\%$ と想定)から $\pm 7\%$ と評価すると実効増倍率に対する影響は $\pm 0.3\% \Delta k/k$ となる。一方F.Pの生成量は近似的に照射量(運転出力の時間積分値)に比例すると考えられるので、その不確かさは中性子束の不確かさ(核分裂当りの放出エネルギーの不確かさから $\pm 5\%$ と評価)にほぼ等しい。平衡炉心でのF.Pの寄与は約 $\pm 2\% \Delta k/k$ であるので不確かさは $\pm 0.1\% \Delta k/k$ となる。

また運転にともなり不確かさの原因となるものとして他に熱的な炉心変形、およびスエリングが考えられる。これらの変形量を推定するモデルに現在 $\pm 50\%$ 程度の不確かさがあるものと仮定し、実効増倍率に対する不確かさをそれぞれ $\pm 0.1\% \Delta k/k$ 、 $\pm 0.2\% \Delta k/k$ と評価している。

(2) 出力分布

燃焼予測の不確かさが出力分布におよぼす影響は平衡炉心の炉心部最大燃焼位置に対して $\pm 2\%$ 、ブランケットに対して $\pm 5\%$ となる。これは燃焼による出力分布の変化にそれぞれ $\pm 20\%$ の不確かさを想定して評価したものである。

一方運転にともなり問題として、平衡炉心に持って行くまでの制御棒運転履歴によって燃焼状態が影響を受け、出力分布にも違いがでてくるものと予想される。現状では運転計画そのものが未定であり、また特に問題となる炉心部は前述のように初期炉心に注目しているのでここでは問題点の摘出だけにとめておく。

(3) まとめ

増殖比、制御棒ワース、反応度係数等についても同様の不確かさが見込まれるが、まだ十分な検討が進んでおらず、表5.2に暫定的な値をかかげておく。

表5.2 設計体系自体の不確かさ

(±%)

項目	製作上の不確かさ	運転にともなう不確かさ	合計
(1) 実効増倍率：初期	0.5	0.1	0.5
平衡	0.5	0.4	0.6
(2) 出力分布：炉心	—*	2.2	2.2
ブランケット	—*	5	5
(3) 制御棒価値	—	1	1
(4) 増殖比	0.5	0.7	0.9
(5) ドップラー係数	—	—	—
(6) ナトリウムボイド係数	—	3	3

* 熱設計の際にホット・スポットファクターの一因子として考慮される。

5.4 まとめ

以上の精度評価結果をまとめて、各設計パラメータに対する現状の精度を表5.3に示す。

あわせて設計側からの要求、および将来のR&D目標をかかげた。

表5.3 設計パラメータの精度評価値

(±%)

設計パラメータ	現 状 精 度				設計要求	R&D目標
	実験解析 精 度	外挿による 不 確 かさ	設計体系自体 の不確かさ	合 計		
実効増倍率：初期	0.3	0.4	0.5	0.7	0.5	0.5
平衡	0.3	0.7	0.6	1.0	(0.5)	0.7
出力分布：炉心	3	2.2	2.2	4.4	5	3
ブランケット	6.4	3.6	5	8.9	10	5
制御棒価値：調整棒	5.8	3.2	1	6.7	10	5
安全棒	7.6	6.2	1	9.9	15	7
増殖比	4.3	2.1	0.9	5		3
ドップラー係数	11	12	—	17	20	10~15
ナトリウムボイド係数	16	15	3	23	20	10~15

6. 今後の高速炉物理 R & D

表5.3 から明らかなように、炉物理分野から見た炉心核特性精度は設計上の要求をほぼ満足できる現状にあるといえるが、精度の評価値自体が必ずしも十分に吟味した値ばかりではなく、今後変更される可能性もある。さらに R & D 目標を達成するためには次のような問題点を解決する必要がある。

(1) 実効増倍率

体系の実効増倍率に対しては燃料製作公差からくる不確かさ ($0.5\% \Delta k/k$ と見込んでいる) が大きな問題の一つであるが、これは炉物理上の問題というよりも、むしろ設計方針の中でその取扱いを明確にしていく必要がある。炉物理の分野として残された問題は、特に平衡炉心に対する高次 Pu 同位体及び F.P の反応度寄与の不確かさである。

これらの改善を図るためには燃焼炉心に対する臨界実験を行なうことが直接的な解決法であると考えられるが、より現実的な approach として注目核種の密度係数、サンプルワースの測定、解析による断面積データの評価、修正、あるいは照射データからの同様の評価が重要である。

(2) 出力分布

炉心出力分布で特に問題となるのは制御棒、Na チャンネルの存在による中性子束分布の歪の効果であり、必要な計算精度を得るためには、さらに、実際の炉心形状、配列を模擬した Non-uniform な体系における反応率分布の測定、解析を行なって計算手法を確証することが必要である。

一方、ブランケットの出力分布に関しては、燃焼にともなう Pu の蓄積の不確かさが最も大きく影響し、 γ dose および ^{238}U , ^{239}Pu の反応率分布に関する測定、解析上の不確かさも無視できない。これらの精度を改善するためには、ブランケットおよびその外側の実際の形状 (燃料貯蔵ラック、反射体、中性子源等) を模擬した工学的な臨界実験、バーンアップ実験解析による Pu build up 効果の評価および測定技術の開発等が必要とされる。

(3) 制御棒反応度値

制御棒ワースに対する現状の問題点は、制御棒の位置、B-10 含有量、本数の違いによる C/E 値のバラツキである。特に B-10 含有量に対する C/E の勾配、3~4 本安全棒挿入に対する実験解析の不足等、今後解決すべき問題が残されている。また解析上の問題として、off center の Na フォロワーに対する輸送計算の取扱いが重要である。

(4) 増殖比

増殖比の精度に対する設計側からの要求、目標は現時点ではあまり明確になっていないが、精度に大きく影響するのは ^{239}Pu の α 値、 ^{238}U の σ_c 等核データの不確かさである。これらの精度向上には照射データの解析による核データのIntegral checkが有効であろう。

増殖比の重要性に対する現状の認識は精度よりもむしろ絶対値そのものにあると思われる。今後の問題として、炭化物燃料を模擬した炉心実験、およびブランケットの組成、形状をいろいろ変えた実験から増殖性能を向上させるためのR&Dが必要であろう。

(5) 反応度係数

反応度係数の中ではNaボイド効果、特にストリーミングの寄与が大きくなるof centerでのボイド効果の解析に問題が残っている。精度を向上させるためには3次元計算モデルの確立、輸送効果の評価が重要である。また制御棒挿入、燃料のバーンアップがボイド効果に及ぼす影響については実験的な評価が必要である。

ドブラー効果については安全解析上必要になる高温($\sim 3000\text{°K}$)での評価が今後に残された問題である。

以上の議論をまとめ表6.1に今後必要な炉物理R&D項目を示す。また現状の精度と目標精度の比をあわせて示した。()の数値は目標精度に占める誤差要因の割合を示している。

なお、精度評価上の大きな問題点は、不確かさをすべて統計的誤差と見なそうとする点にある。特に外挿にともなう不確かさは非常に漠然とした雑多な要因にもとづいており経験やカンにたよった評価が多い。

またここで精度評価は原則として1 σ ベースでの値を考え、個々の要因を統計処理しているが信頼巾のとり方は必ずしも明確ではなく、これらの数値を現実の設計値に適用する場合には、各炉物理パラメータに対して設計上必要な信頼巾を明確にして評価する必要がある。安全性評価に関する炉物理パラメータに対しては、統計処理が妥当な方法であるかどうか問題であり、より安全側の評価方法として累積的な処理をする必要があるかもしれない。これらの観点からさらに詳細な精度評価の研究が49年度以後も続けられる予定である。

表6.1 Further research activities in fast reactor physics

Physics parameter	Estimated accuracy Target accuracy	Further research activities
<u>keff (fresh)</u>	1.4	systematic estimation of manufacturing allowance experiments on bunched core and their analyses criticality of nonuniform core with control rod channel
Pu mass	(1.0)	
heterogeneity	(0.6)	
control rod channel effect	(0.6)	
<u>(burn up)</u>	1.5	integral check of heigher Pu and F.P. cross section) experiments on confirmation of burn up calculation) burn up assemblies
heigher Pu, F.P. effects operation	(0.9) (0.6)	
<u>Power dist. (core)</u>	1.5	confirmation of calculation method for flux tilting with off center control rods experiments on uniform and nonuniform cores especially with irregularity confirmation of burn up calculation with partially inserted control rod
calculation	(1.0)	
extrapolation operation	(0.7) (0.7)	
<u>(blanket)</u>	1.8	confirmation of burn up calculation in the blanket region development of measurement techniques for γ dose and ^{238}U , ^{239}Pu reaction rate distributions experiments for γ -heating, control rod effect
operation	(1.0)	
measurements	(0.9)	
calculation	(0.8)	
<u>Control rod worth (regulating)</u>	1.4	confirmation of 2-D transport and 3-D diffusion calculation, experiments of control system worth
calculation	(1.0)	
<u>(safety)</u>	1.4	study for B-10 enrichment effect, shadow and anti-shadow effects experiments of safety rod system worth
calculation extrapolation	(1.0) (0.8)	
<u>Breeding ratio</u>	1.7	integral check of α^{49} and C28
calculation	(1.3)	
<u>Doppler coefficient</u>	1.5	Doppler measurement of ^{238}U to high temperature ($\sim 3,000^\circ\text{K}$) evaluation of thermal properties; e.g.: thermal conductivity, gap conductance
extrapolation	(0.9)	
deduction	(0.8)	
<u>Na-void coefficient</u>	2.0	evaluation of streaming effects especially at off center by 2-D transport calculation experiments of control rods, higher Pu, F.P. effects
calculation	(1.3)	
control rod effects burn up effects	(0.9) (0.9)	

参 考 文 献

- 1) 核設計外挿法の研究 — 実験解析に対する要求精度の評価
(日立) SJ 202 74-09
- 2) 同 上(三菱) SJ 206 74-14
- 3) 同 上(東芝) SJ 201 74-18
- 4) 原子炉核設計の精度 ; 原子力学会誌 Vol.14, No.1
- 5) The accuracy in the prediction of physics parameters of fast breeder reactor .SN. 241 74-04