

JAERI - M
88-162

原子力船「むつ」炉心管理基準システムの検証

1988年8月

鈴木 孝昌・板垣 正文・酒井 友宏*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

原子力船「むつ」炉心管理基準システムの検証

日本原子力研究所むつ事業所原子力船技術部

鈴木 孝昌・板垣 正文・酒井 友宏*

(1988年7月29日受理)

原子力船技術部では、原子力船「むつ」を対象として、船用炉の炉心管理を行うための計算コードシステム（炉心管理基準システム）の開発整備を行っている。開発された炉心管理基準システムは、以下のコードを中心とする数個のコード群で構成されている。

- ASSEMBLY-SHIP: 燃焼依存少数群核定数計算コード
- STEADY-SHIP : 3次元核熱水力詳細計算コード
- BURN-SHIP : 燃焼依存3次元核熱水力計算コード
- POSEIDON : キセノン過渡3次元核熱水力計算コード

本報告書では、炉心管理基準システムの検証のため、ASSEMBLY-SHIP、STEADY-SHIP及びBURN-SHIPコードを用いて、「むつ」炉心陸上臨界試験及び昭和49年に行われた「むつ」船上での零出力臨界試験から得られた実測データに対して検証計算を行ったので、その計算結果について述べる。出力分布、増倍率、制御棒等反応度曲線など、いずれも十分に精度の良い計算結果が得られており、「むつ」初期炉心に対して炉心管理基準システムの検証を得た。

Verification of Standard Core Management Code System
for Nuclear Ship MUTSU

Takayoshi SUZUKI, Masafumi ITAGAKI and Tomohiro SAKAI^{*}

Department of Nuclear Ship Engineering
Mutsu Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mutsu-city, Aomori-ken

(Received July 29, 1988)

The Department of Nuclear Ship Engineering has been developing a computer code system for the core management of marine reactors, including the MUTSU mainly subjected here. The developed code system, named Standard Core-Management Code System, consists of several codes. The main codes of the system are:

- ASSEMBLY-SHIP : burn-up dependent few group constant provision code
- STEADY-SHIP : three-dimensional detailed nuclear thermal-hydraulic code
- BURN-SHIP : burn-up dependent three-dimensional nuclear thermal-hydraulic code
- POSEIDON : Xe transient three-dimensional nuclear thermal-hydraulic code

The report describes verification of ASSEMBLY-SHIP, STEADY-SHIP and BURN-SHIP codes in Standard Core-Management Code System using the measured data from the land-loaded MUTSU-core critical experiments in 1970 and the hot-zero-power MUTSU critical test in 1974. The calculated results, such as the neutron flux distribution, the effective multiplication factor and the equivalent control-rod worth curves, agree well with the measured data, resulting in successful verification of

* Japan Information Service, Ltd.

the Standard Core-Management Code System for the MUTSU initial core.

Keywords: MUTSU, Standard Core-Management Code System, ASSEMBLY-SHIP,
STEADY-SHIP, BURN-SHIP

目 次

1. 序	1
2. 炉心管理基準システムの概要	1
3. 陸上臨界試験実測データによる検証計算	4
3.1 陸上臨界試験検証計算の概要	4
3.2 陸上臨界試験用核定数の作成	4
3.3 STEADY-SHIPコードによる陸上臨界試験に対する検証計算	5
3.3.1 対数微分値の検討	5
3.3.2 出力分布	6
3.3.3 積分反応度曲線	7
3.4 計算結果の検討	7
4. H Z P試験実測データによる検証計算	32
4.1 H Z P試験検証計算の概要	32
4.2 H Z P試験用核定数の作成	32
4.3 H Z P試験に対する検証計算	33
4.3.1 対数微分値の検討	33
4.3.2 STEADY-SHIPコードによる制御棒等反応度曲線解析	33
4.3.3 BURN-SHIPコードによる制御棒等反応度曲線解析	34
4.4 計算結果の検討	34
5. 結 論	48
謝 辞	48
参考文献	48
付録A 陸上臨界試験用核定数テーブル	49
付録B H Z P試験用核定数テーブル	65

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Standard Core-Management Code System	1
3. Calculation to Predict the Data Obtained from Land-loaded MUTSU-Core Critical Experiments	4
3.1 Summary of the Calculation to Predict Land-Loaded MUTSU-Core Critical Experiments	4
3.2 Provision of the Group Constant for Land-Loaded MUTSU-Core Critical Experimental Calculation	4
3.3 Verification of STEADY-SHIP by Land-Loaded MUTSU-Core Critical Experiments	5
3.3.1 Review of the Logarithmic Differential Value	5
3.3.2 Flux Distribution	6
3.3.3 Integral Control Rod Worth Curve	7
3.4 Discussion of Calculated Results	7
4. Calculation to Predict the Data Obtained from Hot Zero Power Test	32
4.1 Summary of the Calculation to Predict Hot Zero Power Test ...	32
4.2 Provision of the Group Constant for Hot Zero Power Test Calculation	32
4.3 Verification of the Code by Hot Zero Power Test	33
4.3.1 Reivew of the Logarithmic Differential Value	33
4.3.2 Equivalent Control-Rod Woth Curve Calculation by STEADY-SHIP	33
4.3.3 Equivalent Control-Rod Woth Curve Calculation by BURN-SHIP	34
4.4 Discussion of Calculated Resuts	34
5. Conclusion	48
Acknowledgement.....	48
References	48
Appendix A Group Constant for Land-Loaded MUTSU-Core Critical Experimental Calculation	49
Appendix B Group Constant for Hot Zero Power Test Calculation	65

1. 序

原子力船においては、タービン側の負荷変動に追従した原子炉の運転がなされる。そのため、船用炉の出力上昇率あるいは降下率は発電炉と比較して大きく、かつ即応性のある応答が要求される。この条件を満たすため、炉心の反応度制御は中性子吸収効果の大きい制御棒に負わせることにしており、制御棒を制御棒微分反応度値の大きい炉心中央部まで挿入して、これを上下させることにより炉心に必要な反応度を加えて原子炉の出力制御を行っている。

原子力船「むつ」においては、フォロワー付き十字型制御棒を採用し、これを炉内に挿入して原子炉の出力を制御する設計となっている。この炉内に挿入された制御棒の中性子吸収効果のため、炉内の中性子束分布は強い3次元特性を示すことになる。さらに「むつ」炉心には、陸上の発電用PWRにはみられない燃料集合体側板、充填材を始め、支持格子板、炉心隔板、バーナブル・ボイズンも存在しているため、これらの存在が炉内中性子束分布を一層複雑なものにしている。さらに「むつ」炉は、炉心の有効直径、有効半径ともに1m余の小型PWRであり、中性子の漏洩効果が大きいという特徴もある。

このように発電用PWRとは異なり、3次元的效果が強く現れる「むつ」炉の炉心特性を正確に計算するために、原子力船技術部では、中性子漏洩繰り返し法に基づく船用炉用3次元核熱水力計算コードSTEADY-SHIPを中心とした炉心管理基準システムの開発を行っている。同システムは現在完成段階に至っており、検証計算を行うとともに、「むつ」炉の炉物理予備解析その他に供している。

本報告書では、炉心管理基準システムの検証結果について述べる。第2章においてはまず炉心管理基準システムの概要を説明し、第3章及び第4章にて陸上臨界試験及び温態零出力試験に対する炉心管理基準システムの検証計算を記述し、最後に結論及び今後の方針について述べる。

2. 炉心管理基準システムの概要

炉心管理基準システムとは、主として原子力船「むつ」の炉心管理に使用するために開発された、少数群核定数作成から核熱水力計算に至るまでの処理を大型計算機を用いて行う炉心管理用総合計算コードシステムである。

炉心管理基準システムを構成する主要計算コード群とその役割は以下の通りである。また、計算のフローをFig.1に示しておく。

ASSEMBLY-SHIP : STEADY-SHIP, BURN-SHIP及びPOSEIDON コードの入力データとして必要な少数群核定数を作成する。詳細は、参考文献1)参照。

STEADY-SHIP : 炉心の核熱水力静特性を詳細に計算する3次元コードである。詳細は、参考文献2)参照。

1. 序

原子力船においては、タービン側の負荷変動に追従した原子炉の運転がなされる。そのため、船用炉の出力上昇率あるいは降下率は発電炉と比較して大きく、かつ即応性のある応答が要求される。この条件を満たすため、炉心の反応度制御は中性子吸収効果の大きい制御棒に負わせることとしており、制御棒を制御棒微分反応度値の大きい炉心中央部まで挿入して、これを上下させることにより炉心に必要な反応度を加えて原子炉の出力制御を行っている。

原子力船「むつ」においては、フォロワー付き十字型制御棒を採用し、これを炉内に挿入して原子炉の出力を制御する設計となっている。この炉内に挿入された制御棒の中性子吸収効果のため、炉内の中性子束分布は強い3次元特性を示すことになる。さらに「むつ」炉心には、陸上の発電用PWRにはみられない燃料集合体側板、充填材を始め、支持格子板、炉心隔板、バーナブル・ボイズンも存在しているため、これらの存在が炉内中性子束分布を一層複雑なものにしている。さらに「むつ」炉は、炉心の有効直径、有効半径ともに1m余の小型PWRであり、中性子の漏洩効果が大きいという特徴もある。

このように発電用PWRとは異なり、3次元的效果が強く現れる「むつ」炉の炉心特性を正確に計算するために、原子力船技術部では、中性子漏洩繰り返し法に基づく船用炉用3次元核熱水力計算コードSTEADY-SHIPを中心とした炉心管理基準システムの開発を行っている。同システムは現在完成段階に至っており、検証計算を行うとともに、「むつ」炉の炉物理予備解析その他に供している。

本報告書では、炉心管理基準システムの検証結果について述べる。第2章においてはまず炉心管理基準システムの概要を説明し、第3章及び第4章にて陸上臨界試験及び温態零出力試験に対する炉心管理基準システムの検証計算を記述し、最後に結論及び今後の方針について述べる。

2. 炉心管理基準システムの概要

炉心管理基準システムとは、主として原子力船「むつ」の炉心管理に使用するために開発された、少数群核定数作成から核熱水力計算に至るまでの処理を大型計算機を用いて行う炉心管理用総合計算コードシステムである。

炉心管理基準システムを構成する主要計算コード群とその役割は以下の通りである。また、計算のフローをFig.1に示しておく。

ASSEMBLY-SHIP : STEADY-SHIP, BURN-SHIP及びPOSEIDON コードの入力データとして必要な少数群核定数を作成する。詳細は、参考文献1)参照。

STEADY-SHIP : 炉心の核熱水力静特性を詳細に計算する3次元コードである。詳細は、参考文献2)参照。

- BURN-SHIP : 3次元核熱水力特性の燃焼に伴う時間変化を計算する。
STEADY-SHIP コードの燃焼追跡版である。
- POSEIDON : 運転中のキセノン生成消滅に伴う3次元核熱水力特性の時間変化を
計算する。STEADY-SHIP コードのキセノン過渡追跡版である。
- EXCORE : 炉心出力変更やキセノン過渡変化に伴う制御棒パターンの変更によ
り生じる炉外核計装の応答変化を計算する。

これらの計算コードを使用して炉心内部の挙動を予測計算し、原子炉の安全に係わる運転限界値（最大線出力及び最小DNBR）の担保や諸パラメータの予測計算あるいは制御棒操作計画の立案に資することができる。

また炉心管理基準システムは、船上計算機を使用する船上炉心管理システムに対する基準計算あるいは標準計算を提供する役割も担っている。船上炉心管理システムについては別報で述べる。

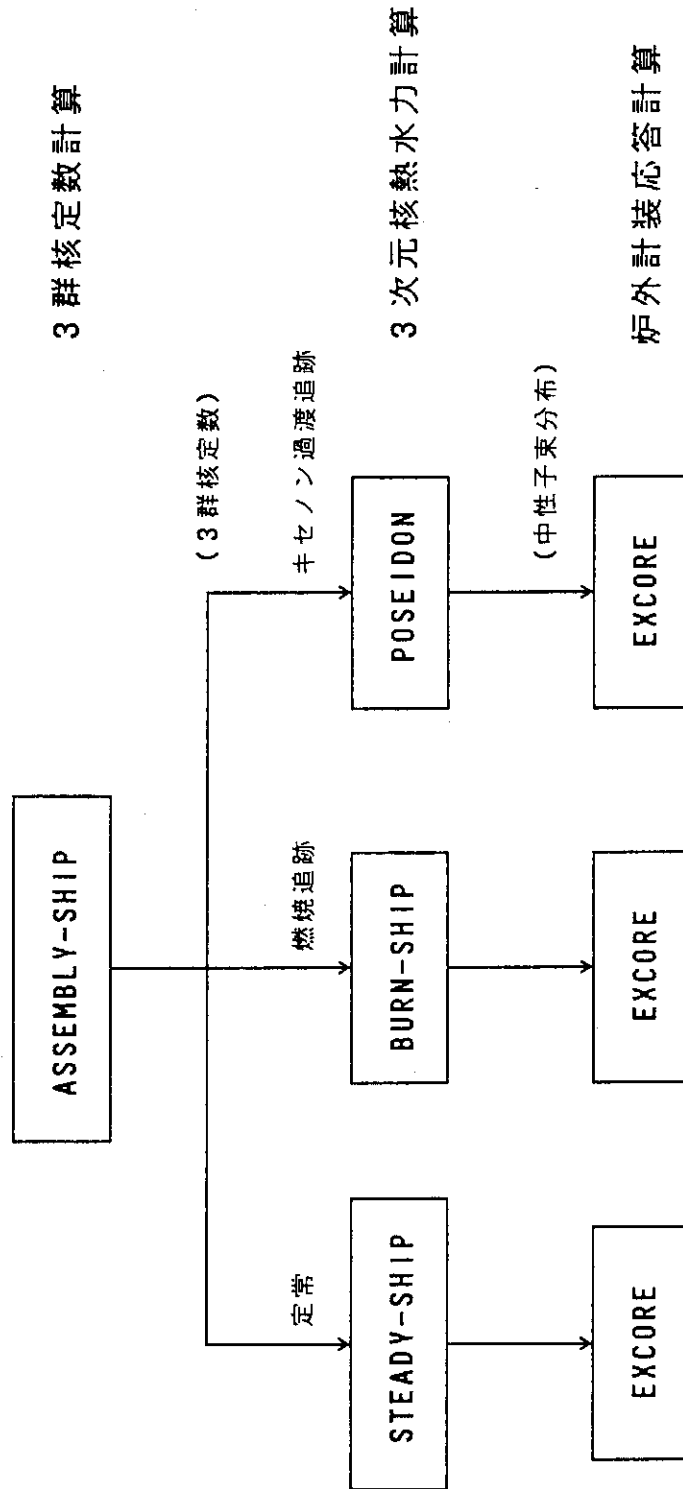


Fig. 1 炉心管理基準システムの計算フロー

3. 陸上臨界試験実測データによる検証計算

3.1 陸上臨界試験検証計算の概要

原子力船「むつ」炉心の陸上臨界（以下、陸臨と略称する）試験は、本船搭載予定炉心の核特性を最終的に確認し、この後に続く燃料装荷及び出力上昇試験に資するための試験であり、本船搭載用に製作した実燃料及び実制御棒を使用して、陸上施設に「むつ」炉心を模擬した臨界実験装置を作り、零出力炉物理試験を行ったものである。陸臨試験は、全部で11項目から成り、昭和46年、①燃料装荷試験、②最小臨界炉心に関する試験、③燃料集合体均一性試験、④制御棒均一性試験、⑤停止余裕度とスタック・ロッド余裕度の測定、⑥制御棒等価反応度の測定、⑦液体ポイズン反応度効果の測定、⑧減速材温度係数の測定、⑨余剰反応度の測定、⑩出力分布測定試験、⑪各制御棒パターンによる検出器応答特性の各試験が行われた³⁾。

「むつ」炉心の炉心構成をFig.2及びFig.3に示し、また燃料集合体及び制御棒の配置をFig.4に示しておく。これらは、陸上臨界実験装置あるいは実際の「むつ」炉心、いずれにも共通である。

炉心管理基準システム検証計算の対象としては、STEADY-SHIPコード等の計算機能を考慮に入れて、上記11項目の試験のうちまず代表的な出力分布測定試験を選んだ。この試験では、本船運転時の制御棒パターンを含めた典型的な3ケースの制御棒パターンについて半径方向及び軸方向の出力分布の測定が種々行われている。なお陸臨試験では、制御棒パターンを所定のものとするために生じる反応度の増減は、ボロン濃度の調整により補償した。検証計算の対象とした出力分布測定試験時制御棒パターンをTable 1に示す。

また制御棒等価反応度測定試験から得られている制御棒積分反応度曲線についても、検証計算の対象に加えた。この試験は、GI制御棒の反応度値を等価ボロン濃度により測定したものである。

検証計算手法は、次節以下で述べるようにASSEMBLY-SHIPコードを用いて陸臨試験用少数群核定数を作成し、STEADY-SHIPコードにより出力分布、実効増倍率等を計算する。このとき制御棒吸収部については、対数微分値で取り扱う。

3.2 陸上臨界試験用核定数の作成

少数群核定数の作成には、ASSEMBLY-SHIPコードを用いる。本コードは、高速群及び熱外群についてはGAMコードで構成され、熱群についてはTHERMOSコードで構成されている。使用している断面積ライブラリーはMGCLタイプのライブラリー及びTHERMOSライブラリーであり、これらはいずれもENDF/B-IVから作成している。群構造、使用可能核種その他の詳細はASSEMBLY-SHIPコードのマニュアルに譲る¹⁾。

核定数作成の手順としては、まず単位セル計算オプションで構造材の少数群(3)群核定数を求める。この計算では、燃料、被覆管、減速材、構造材の4領域から成る無限円柱単位セルモデルを

考えて計算を行い、スペクトルを求めた上で構造材領域についてエネルギー縮約を行ってマクロ核定数を求めている。

燃料領域3群マクロ核定数は、基本的には燃料棒及び可燃性吸収棒についての各単位セル計算結果をエネルギー縮約し、燃料領域を空間平均して求める。このとき、燃料棒や可燃性吸収棒には集合体内位置依存性があるため燃料ビンからの中性子リーク現象がみられるため、セル計算及び縮約計算に並行して、燃料棒、可燃性吸収棒及び構造材を含めた2次元x-y集合体少数群拡散計算を行い、セル計算及び集合体拡散計算間で燃料ビン中性子リーク量が等しくなるようにバックリング及びアルベドを調整しつつ反復計算を行い収束させている。

「むつ」炉心の場合、STEADY-SHIPコード入力用核定数は、燃料集合体軸方向の燃料等の組成の違いに対応してTable 2に示す8組が必要であるため、各ボロン濃度(371ppm, 464ppm及び544ppm)ごとにTable 2の8組、すなわち合計24ケースのASSEMBLY-SHIP計算を行い、3群核定数を準備した。

Table 2のタイプ1、ボロン濃度371ppmにつき作成した3群核定数をTable 3に例示する。

さらに、作成した全ケースの燃料集合体タイプごとの核定数と構造材その他の核定数をボロン濃度別に付録Aに示しておく。

また、ASSEMBLY-SHIP計算による各集合体のタイプごとの無限増倍率をTable 4に示す。濃縮度、可燃性吸収棒、グリッドスペーサの有無、ボロン濃度の効果により、増倍率がそれぞれ異なるが、増倍率の値及び大小関係はいずれも妥当である。

3.3 STEADY-SHIPコードによる陸上臨界試験に対する検証計算

3.3.1 対数微分値の検討

現在、STEADY-SHIPコードにおいては、制御棒は核定数ではなく対数微分値 $\gamma (= \phi_B / J_B)$ で扱っている。本節では、この対数微分値の計算について説明するとともに、使用する対数微分値について検討を加える。

(1) 対数微分値の計算

対数微分値は、一次元輸送コードANISNを用いて計算する。

「むつ」炉の制御棒は、被覆管付きのAg-In-Cd合金からなる吸収棒61本が十字型に配置されており、十字型の各翼の先端には吸収部の管径の異なる先端吸収棒がそれぞれ3本ある。先端吸収棒の吸収部の外径は6.9mmであり、標準吸収部の外径は7.3mmである。被覆管の外径は、どちらの吸収棒についても同じであり、8.0mmである。

今回ANISN向けに採用した形状モデル(Fig.5参照)では、並んでいる制御棒吸収部の面積を保存して十字型平板領域の厚さを決定し、一次元平板状吸収部の厚さとした⁴⁾。その外側の領域には、被覆管と減速材の均質化領域を設けることとした。この外側には、燃料集合体の側板及び減速材の均質領域をおき、さらに燃料セルの均質領域をおくこととした。燃料の濃縮度としては、G1及びG2制御棒に接する燃料の濃縮度即ち3.24w/oのみを考えればよい。

このモデルをベースにして、核定数はMGCL-26群を用い、ANISNコードにより、P1-S8条件にてSTEADY-SHIPコードに必要な1~3群の対数微分値を計算した。各メッシュご

との計算結果をFig.6に示す。STEADY-SHIPコードに使用すべき対数微分値は、被覆管及び減速材領域と燃料集合体構造材及び減速材領域との界面、すなわちFig.6の横軸が0.4 cmにおける値であり、

$$1 \text{ 群対数微分値} : r_1 = 74.899$$

$$2 \text{ 群対数微分値} : r_2 = 16.115$$

$$3 \text{ 群対数微分値} : r_3 = 3.442$$

となる。

(2) 領域分割の検討

ANISNの計算モデル上の領域分割について検討を行った。標準的な計算モデルは、Fig.5に示したように、制御棒吸収部、被覆管及び減速材、燃料集合体構造材及び減速材並びに燃料集合体の4領域から構成されているが、このうち被覆管及び減速材領域と、燃料集合体構造材及び減速材領域の2つの領域を均質化した3領域モデルで計算を行ってみた。その結果Table5に示すように、領域分割が対数微分値に与える影響は小さい(r_3 が重要であるが、差異は0.3%程度)とわかった。したがって、ここでは4領域モデルを基準に考えることとした。

(3) ボロン濃度の影響

ボロン濃度の違いによる対数微分値への影響も検討してみたが、Table 6に示すようにその効果は小さく、1群及び2群で0.1%、3群で0.2%に過ぎない。したがって、ここではボロン濃度544 ppmケースの対数微分値を採用し、ボロン濃度が変わっても対数微分値は同じ値とした。

(4) 使用すべき対数微分値

領域分割モデルやボロン濃度を変えても、対数微分値に与える影響は小さく、さらに後述する温態零出力試験用対数微分値感度解析結果も参考にして、ここで採用する陸臨試験解析用対数微分値は、

$$r_1 = 74.899$$

$$r_2 = 16.115$$

$$r_3 = 3.442$$

と最終的に決定した。

3.3.2. 出力分布

3.2節で述べた陸臨試験用核定数を、STEADY-SHIPコードに入力して、陸臨試験の代表的制御棒パターン3ケースについて、実効増倍率及び出力分布を計算した。Fig.7及びFig.8にSTEADY-SHIPコードの径方向及び軸方向メッシュ分割を示す。またTable 7に各ケースの解析条件と実効増倍率計算結果を示す。

STEADY-SHIP計算から得られた実効増倍率は、実測値に対して約0.1%以内の精度で一致しており、妥当な結果であると判断できる。

ケース1の径方向の出力分布実測値及び計算値比較図をFig.9～Fig.12に示す。また、ケース2の径方向の出力分布比較図をFig.13～Fig.18に示し、軸方向の出力分布比較図をFig.19～Fig.20に示す。さらにケース3の径方向の出力分布比較図をFig.21～Fig.28に示し、軸方向の出力

分布比較図を Fig. 29～Fig. 30 に示す。出力分布の実測は、ガンマスキニング法で行われたものである。実測値と計算値は、十分良好に一致しており、計算手法、計算結果の妥当性が示されている。

3.3.3 積分反応度曲線

ボロン濃度を 544 ppm とし、G2 制御棒引抜き距離を 490 mm に固定した状態で、G1 制御棒の引抜き距離を種々変えて実効増倍率を計算した。結果を Table 8 に示す。

さらに、これらの計算結果を実測計算値と比較して Fig. 31 に示す。実測計算値とは、G1 制御棒引抜き距離ごとに等価ボロン濃度で測定されている積分制御棒効果を、ボロン等価反応度実測値を使用して反応度に換算したものである。両者を比べると、相対値で 10 % 弱解析値が過大となっているが、実測値自体がボロン反応度効果で約 10 % の誤差を持っている³⁾ため、これを考慮すると両者の一致は良いと言える。

3.4 計算結果の検討

出力分布計算結果は、全般に実測値と良く一致している。なかでも、燃料集合体間のフラックス・ピーキングなどは良く再現されていると言えよう。ただしグリッドスペーサ部位の出力分布計算値が実測値よりも小さめの傾向を示すので、この部分での核定数あるいは STEADY-SHIP 計算モデルの検討を行う必要がある。また、同時に得られている実効増倍率計算結果も実測値に対して、0.1 % 程度の精度で良く一致している。ただし、計算値の方が大きくなる傾向が認められる。この点は、今後の検討課題である。

積分反応度曲線計算結果から得られている実効増倍率については 10 % 未満の誤差がみられるが、実測値自体の誤差もあり、現段階ではほぼ妥当な結果であると判断している。

Table 1 出力分布測定試験時制御棒パターン

ケース	G1制御棒引抜き距離 (mm)	G2制御棒引抜き距離 (mm)	ボロン濃度 (ppm)
1	200.0	0.0	371
2	440.0	290.0	464
3	462.5	460.0	544

Table 2 STEADY-SHIP入力用ASSEMBLY-SHIP計算条件

タイプ	^{235}U 濃縮度 (w/o)	BP(Burnable Poison)/SPACER	グリッドスペーサー の有無
1	3.24	BP	有
2	3.24	BP	無
3	3.24	SPACER	有
4	3.24	SPACER	無
5	4.44	BP	有
6	4.44	BP	無
7	4.44	SPACER	有
8	4.44	SPACER	無

Table 3 ASSEMBLY-SHIP計算3群核定数の例

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4059	3.2237E-3	4.3661E-3	4.5072E-2
2	0.52249	2.6744E-2	1.3770E-2	6.6707E-2
3	0.24501	1.2825E-1	1.5593E-1	0.0

Table 4 ASSEMBLY-SHIP計算無限増倍率

^{235}U 濃縮度 (w/o)	BP/SPACER	グリッド スペーサ	ボロン濃度 (ppm)		
			371	464	544
3.24	BP	有	1.0379	1.0275	1.0187
3.24	BP	無	1.1708	1.1563	1.1442
3.24	SPACER	有	1.1038	1.0918	1.0817
3.24	SPACER	無	1.2469	1.2302	1.2164
4.44	BP	有	1.1146	1.1054	1.0976
4.44	BP	無	1.2415	1.2277	1.2172
4.44	SPACER	有	1.2010	1.1901	1.1808
4.44	SPACER	無	1.3386	1.3238	1.3113

Table 5 領域分割数が対数微分値に与える影響

ボロン濃度 (ppm)	領域分割数	γ_1	γ_2	γ_3
544	4	74.899	16.115	3.442
544	3	71.988	16.056	3.454

Table 6 ボロン濃度が対数微分値に与える影響

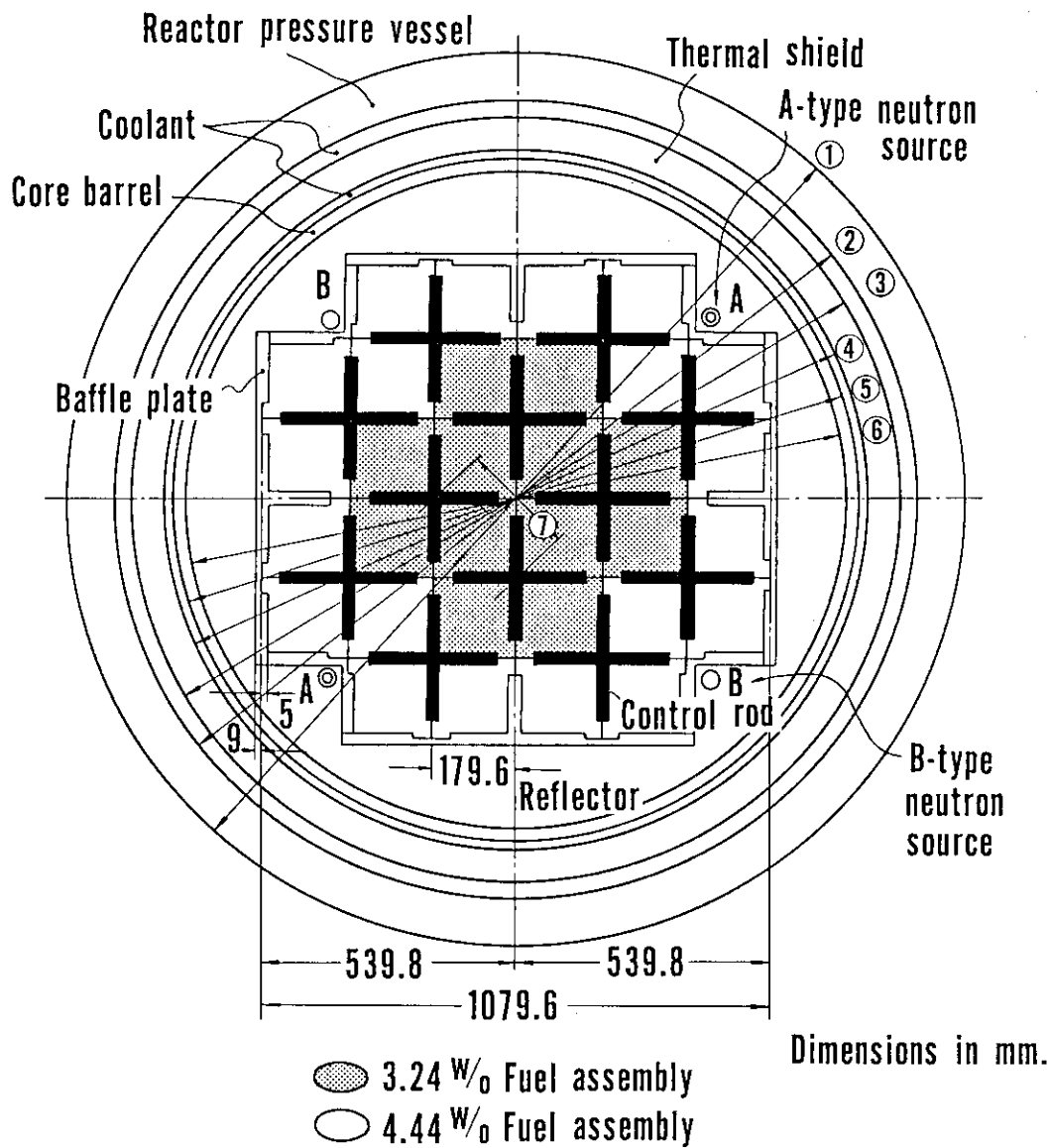
ボロン濃度 (ppm)	領域分割数	γ_1	γ_2	γ_3
544	4	74.899	16.115	3.442
464	4	74.861	16.124	3.445
371	4	74.807	16.131	3.447

Table 7 STEADY-SHIP 計算実効増倍率

ケース	ボロン濃度 (ppm)	G1制御棒引抜き距離 (mm)	G2制御棒引抜き距離 (mm)	実効増倍率
1	371	200.0	0.0	1.00071
2	464	440.0	290.0	1.00071
3	544	461.25	461.25	1.00111

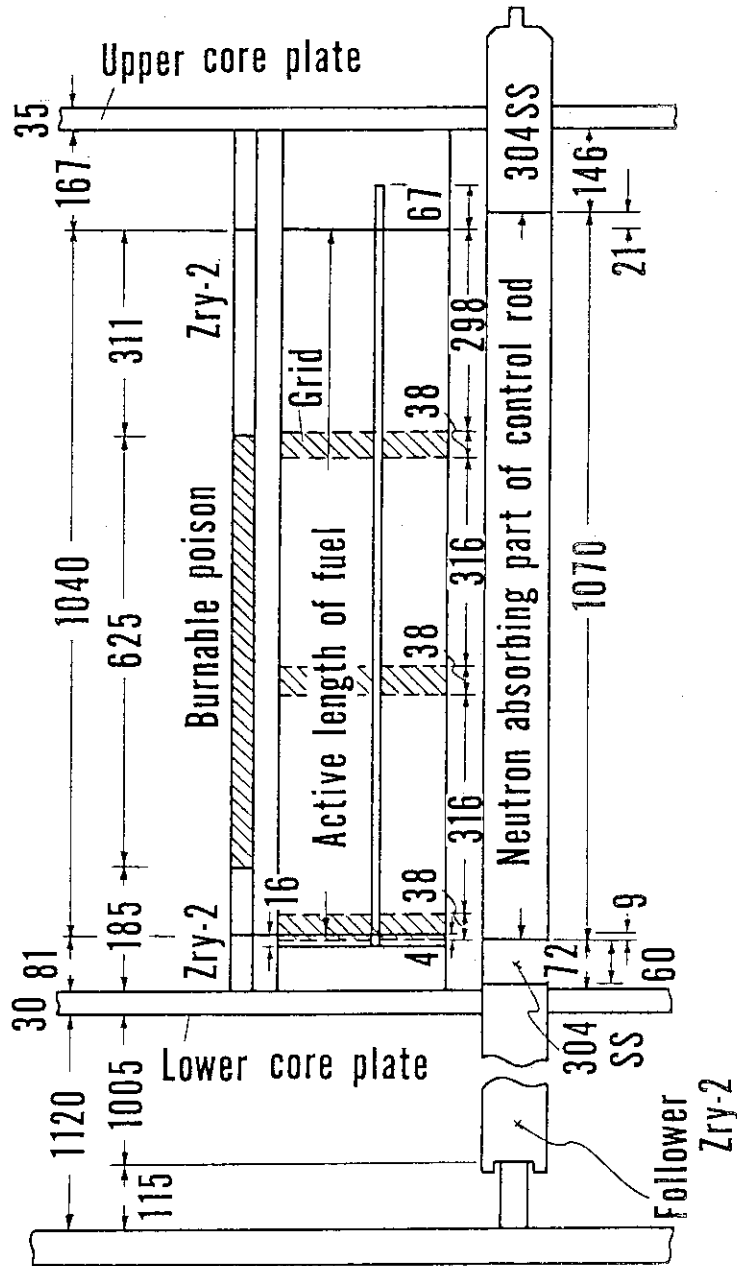
Table 8 制御棒積分反応度値計算結果

ボロン濃度 (ppm)	G1制御棒引抜き距離 (mm)	G2制御棒引抜き距離 (mm)	実効増倍率	反応度 (pcm)
544	Full In	490.0	0.98591	3491
544	104.0	490.0	0.98641	3439
544	208.0	490.0	0.98875	3199
544	312.0	490.0	0.99376	2690
544	416.0	490.0	0.99991	2071
544	520.0	490.0	1.00586	1479
544	624.0	490.0	1.01064	1009
544	729.0	490.0	1.01415	666
544	832.0	490.0	1.01699	391
544	936.0	490.0	1.01958	141
544	Full Out	490.0	1.02105	0



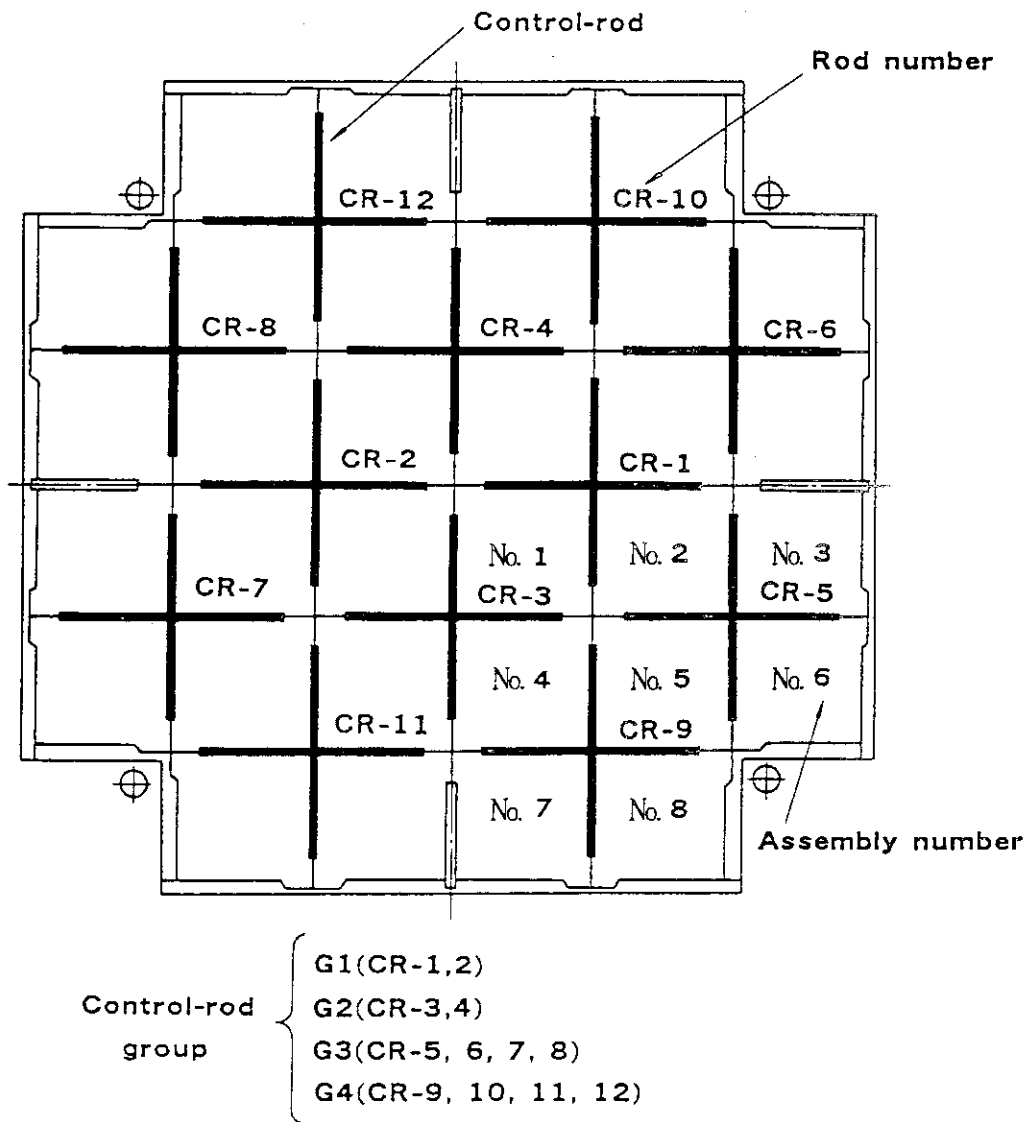
No.	Dia.(mm)	Material
①	1948	Carbon steel (304SS cladding)
②	1752	H ₂ O
③	1650	304SS
④	1500	H ₂ O
⑤	1480	304SS
⑥	1450	304SS
⑦	254	Control rod pitch

Fig. 2 水平方向炉心断面图



Dimensions in mm.

Fig. 3 垂直方向炉心断面图



The G3 and G4 are fully withdrawn at hot critical conditions.

Fig. 4 燃料集合体及び制御棒配置図

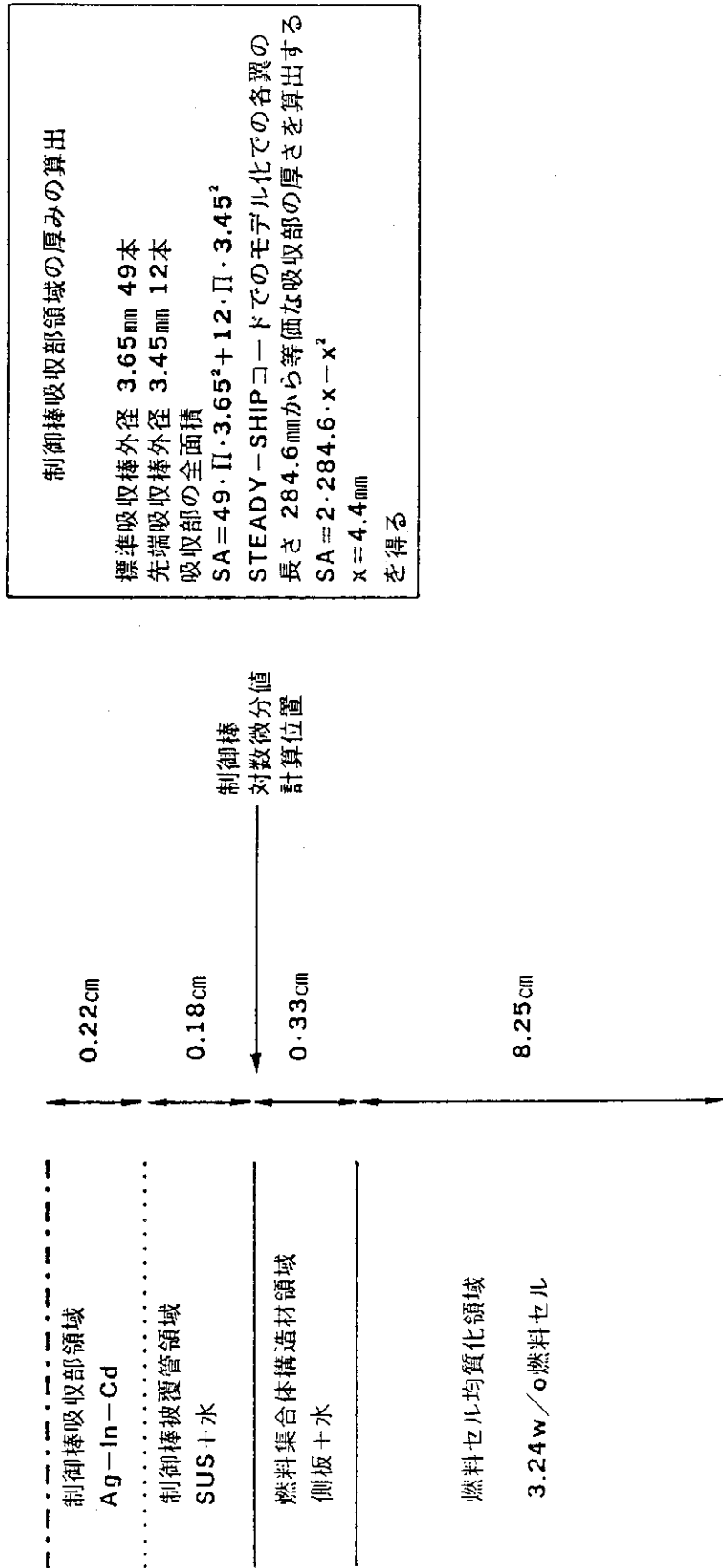


Fig. 5 ANISN 形状モデル

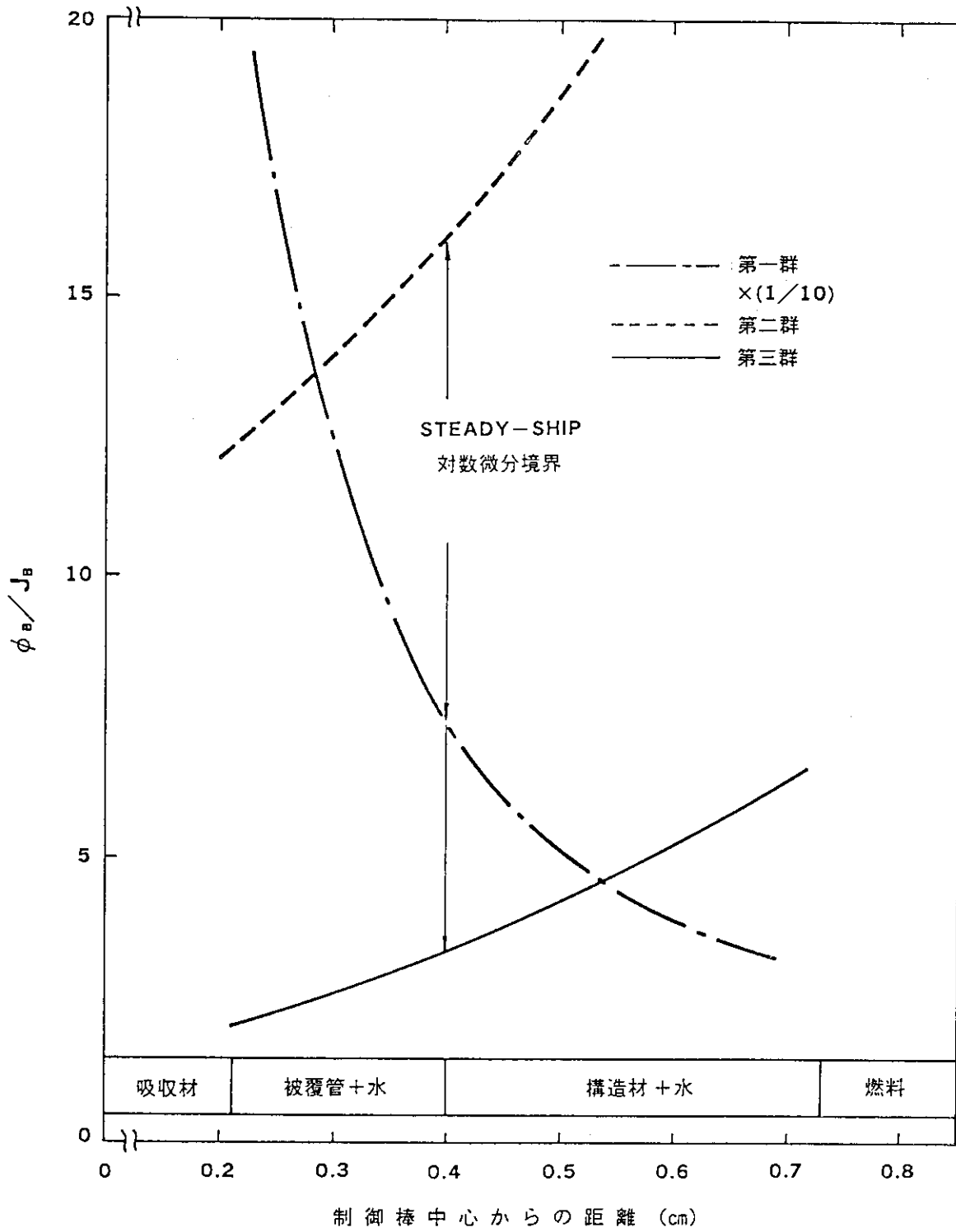
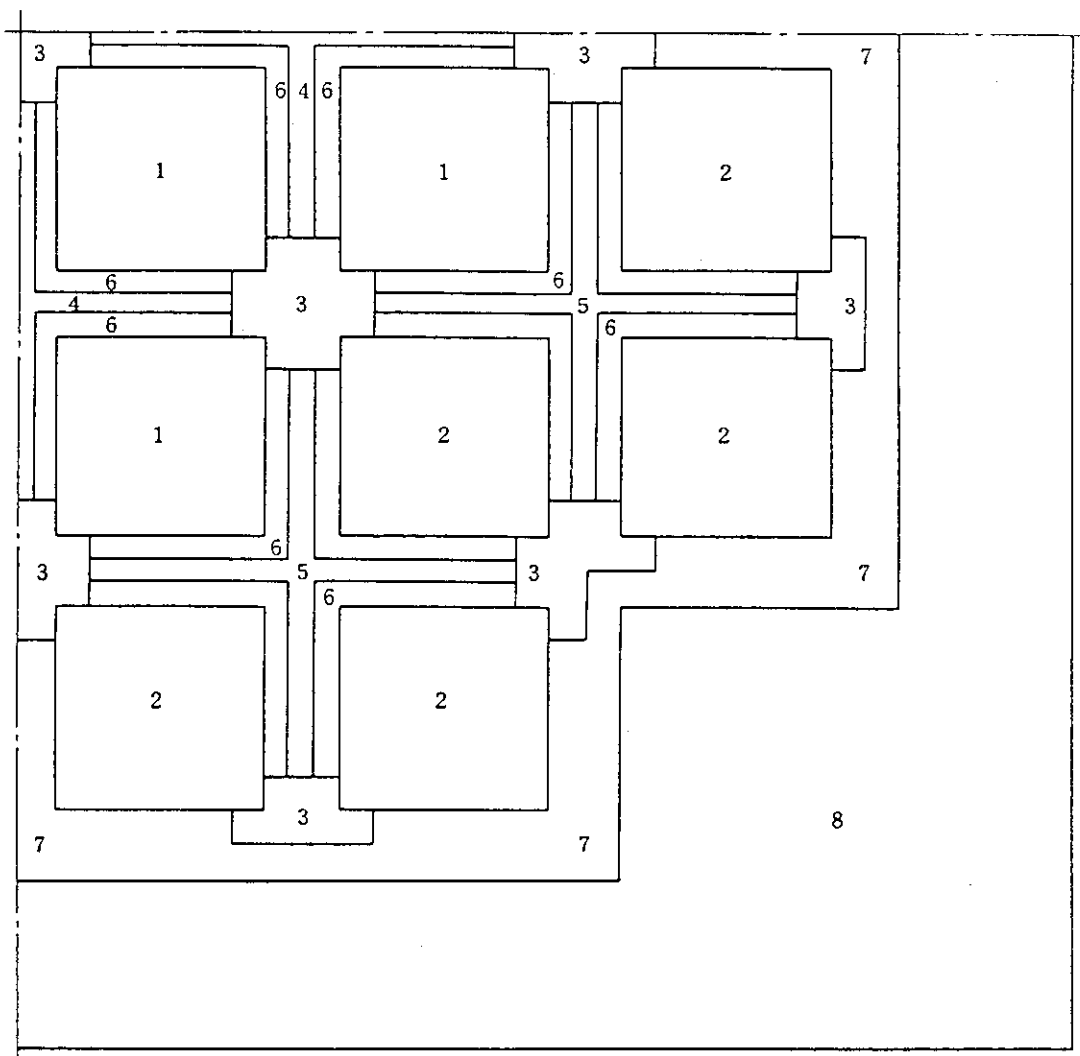


Fig. 6 陸臨試験用対数微分値計算結果



1. 3.24w/o fuel rod, burnable poison rod and water
2. 4.44w/o fuel rod, burnable poison rod and water
3. Zry-2 filler, canning-box and water
4. Control rods (G1 & G2), or Zry-2 follower
5. Control rods (G3 & G4), or Zry-2 follower
6. Canning-box, water and control-rod cladding
7. Stainless steel baffle plate
8. Reflector

Fig. 7 STEADY-SHIPコード径方向メッシュ分割

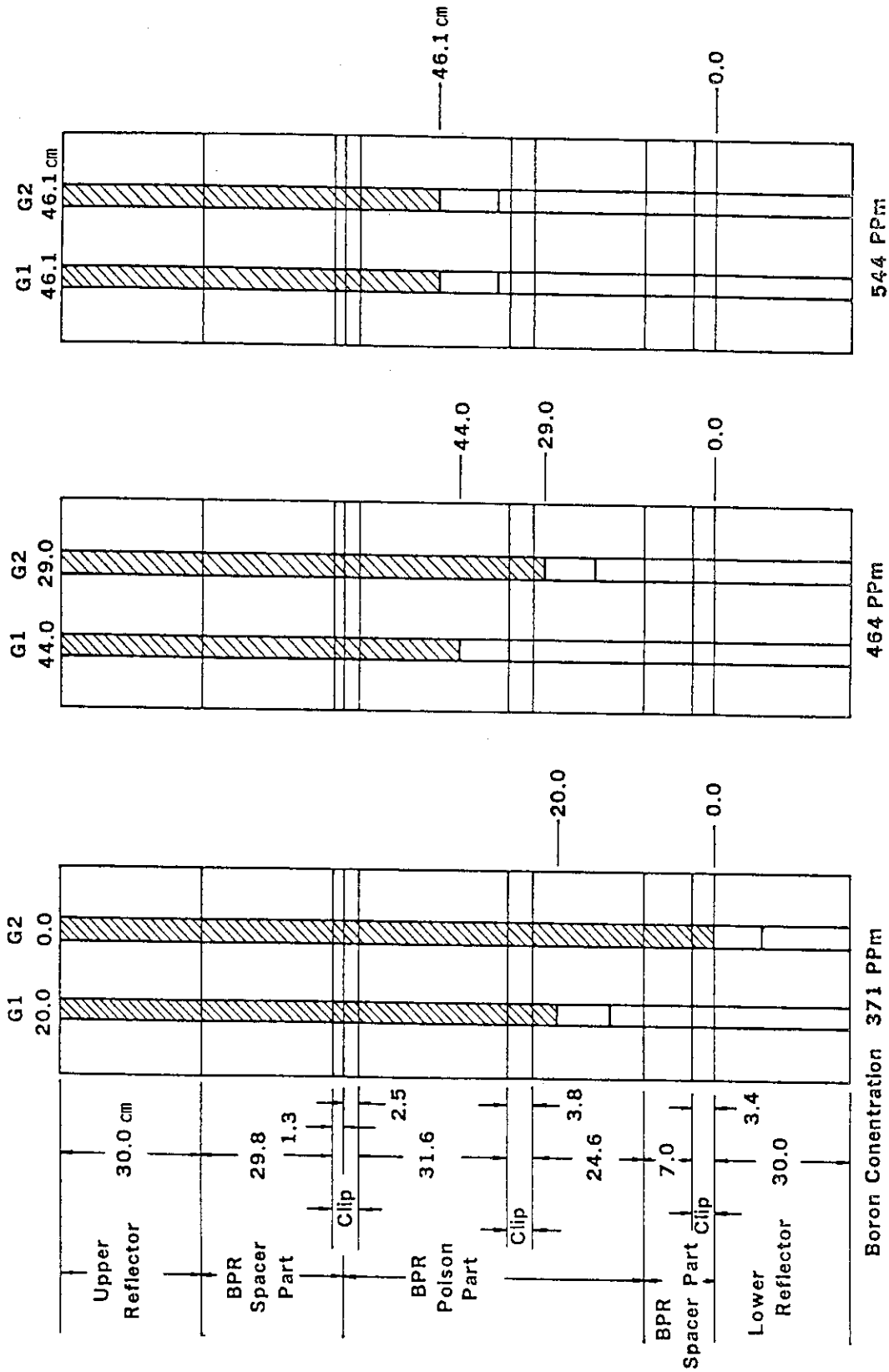


Fig. 8 STEADY-SHIPコード軸方向メッシュ分割

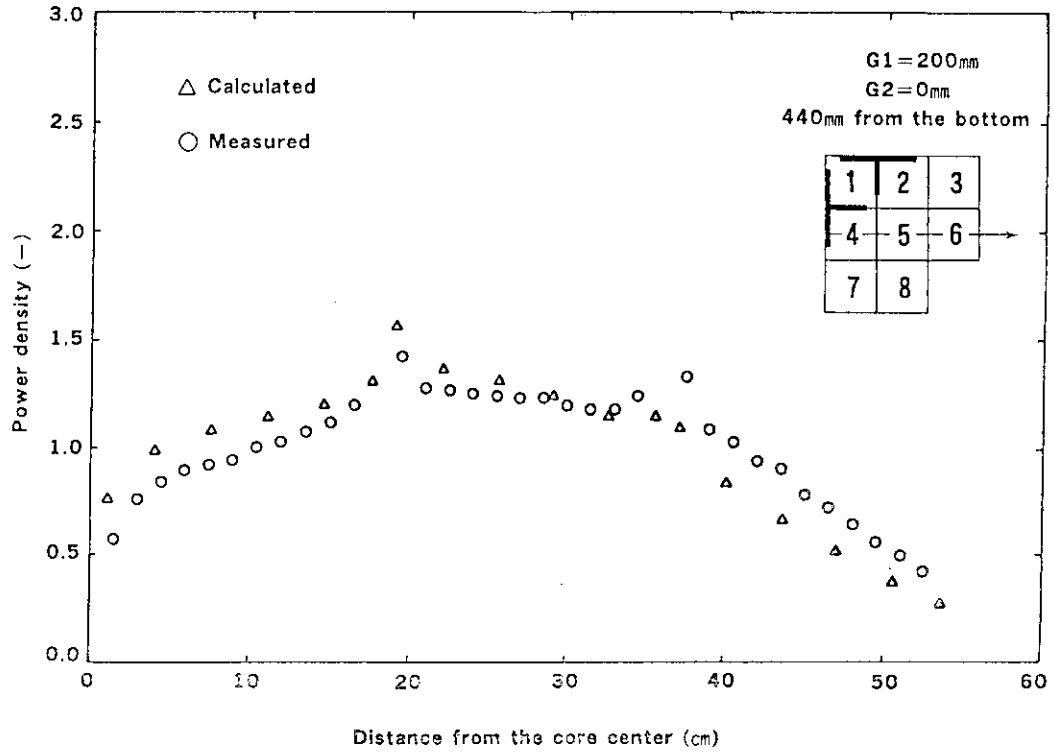


Fig. 9 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=200\text{mm}$, $G2=0\text{mm}$; 炉心下端より440mm 水平断面その1)

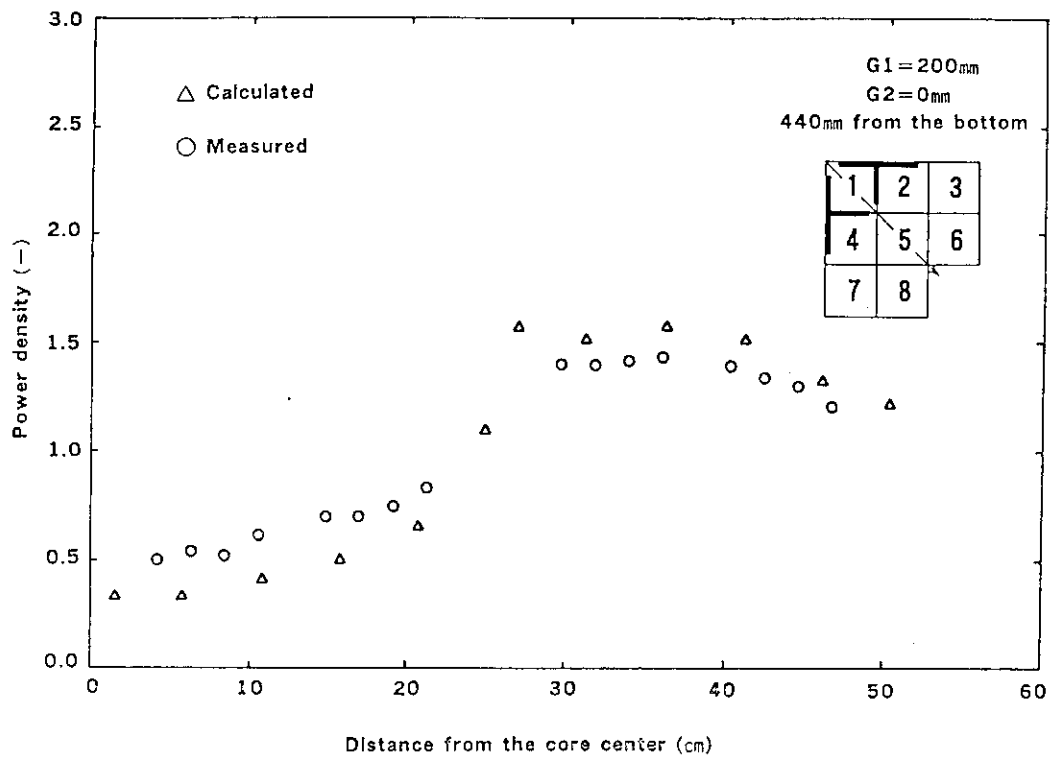


Fig. 10 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=200\text{mm}$, $G2=0\text{mm}$; 炉心下端より440mm 水平断面その2)

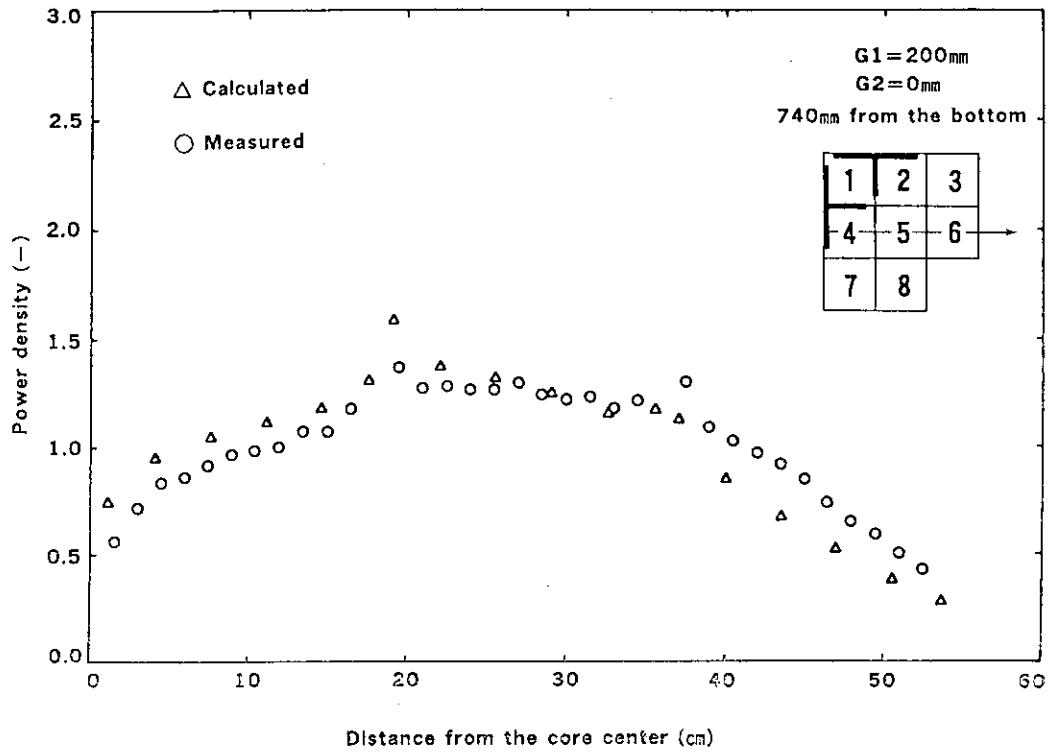


Fig. 11 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=200\text{mm}$, $G2=0\text{mm}$; 炉心下端より740mm 水平断面その1)

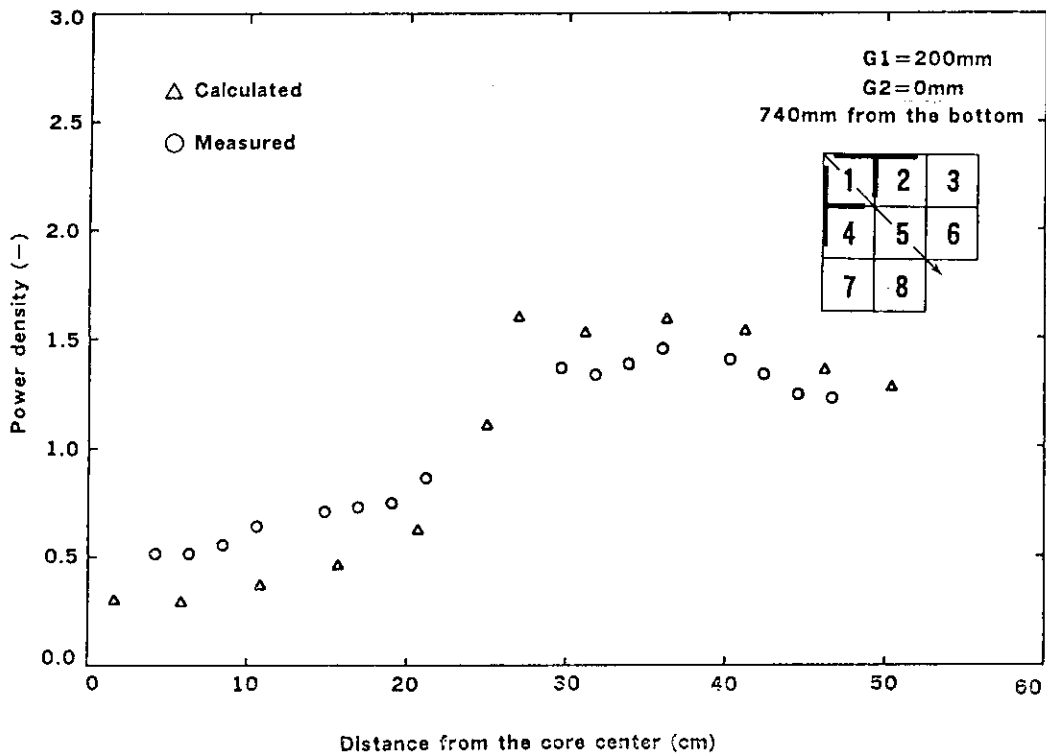


Fig. 12 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=200\text{mm}$, $G2=0\text{mm}$; 炉心下端より740mm 水平断面その2)

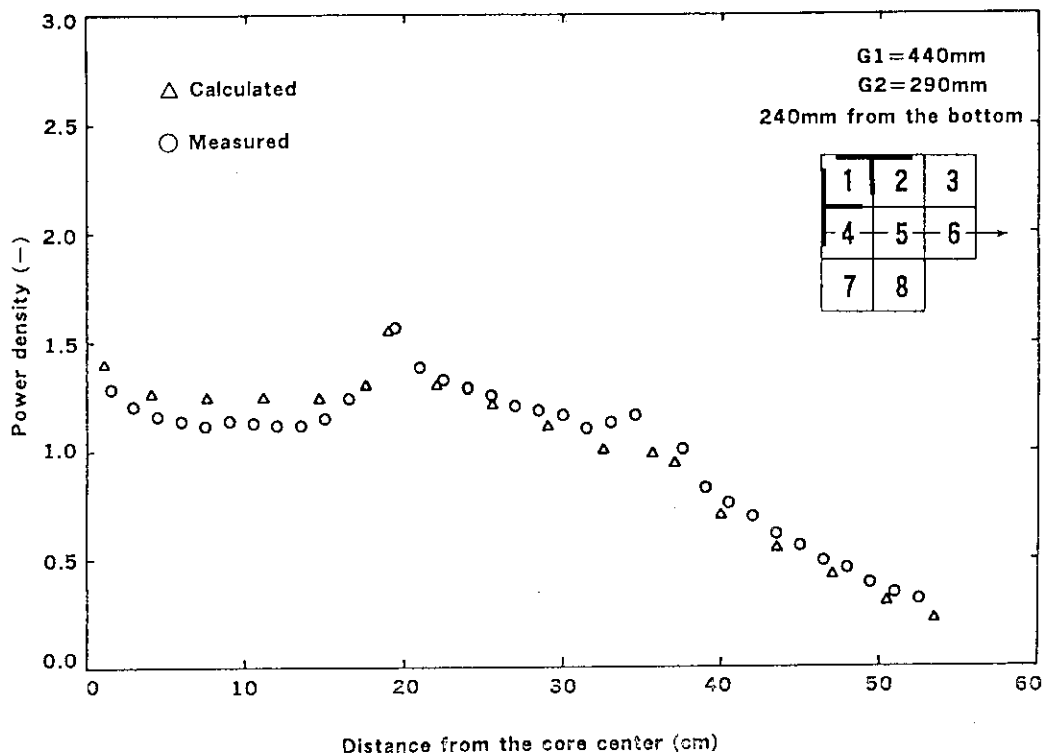


Fig. 13 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より240mm 水平断面その1)

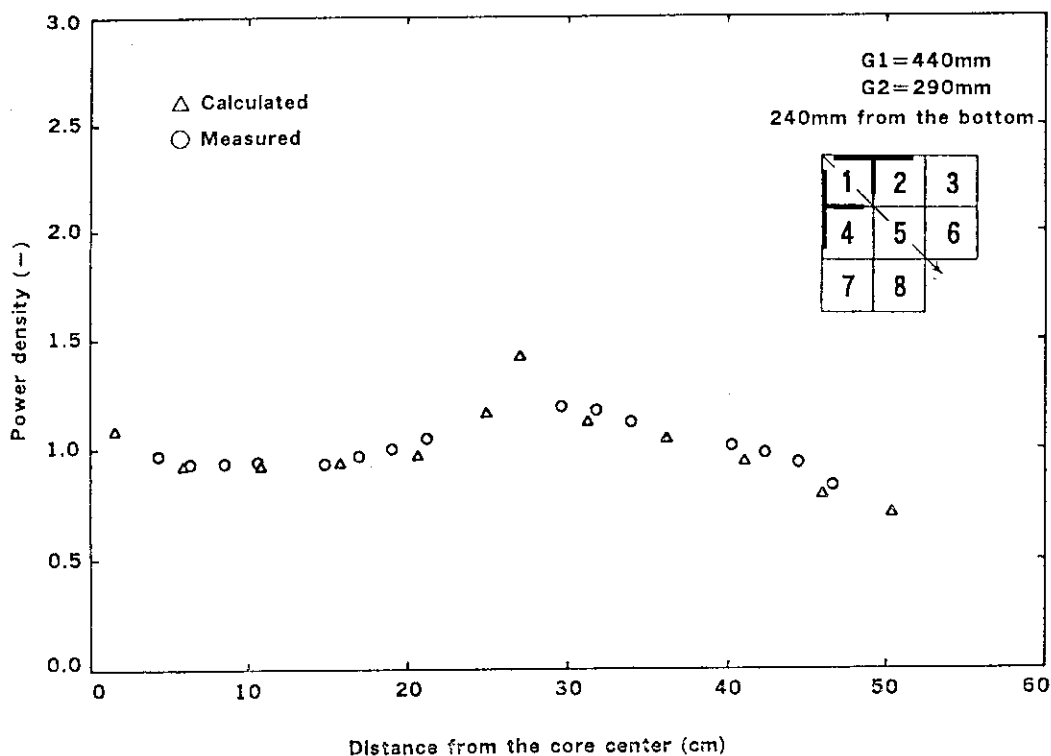


Fig. 14 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より240mm 水平断面その2)

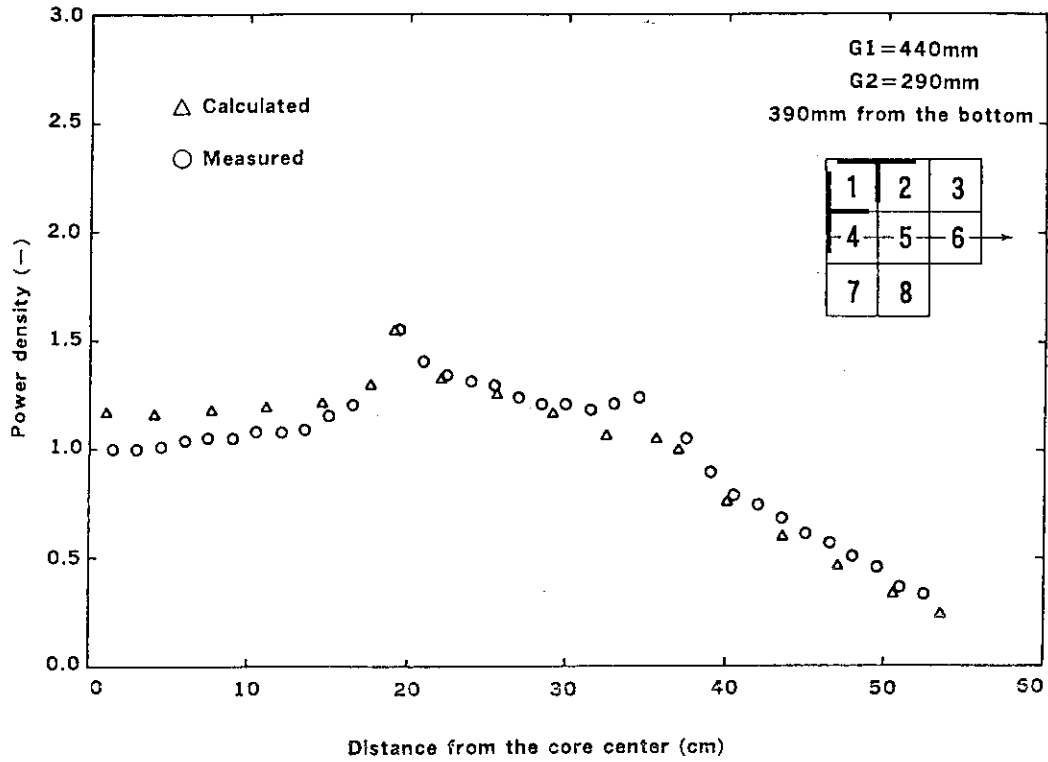


Fig. 15 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
(G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より390mm 水平断面その1)

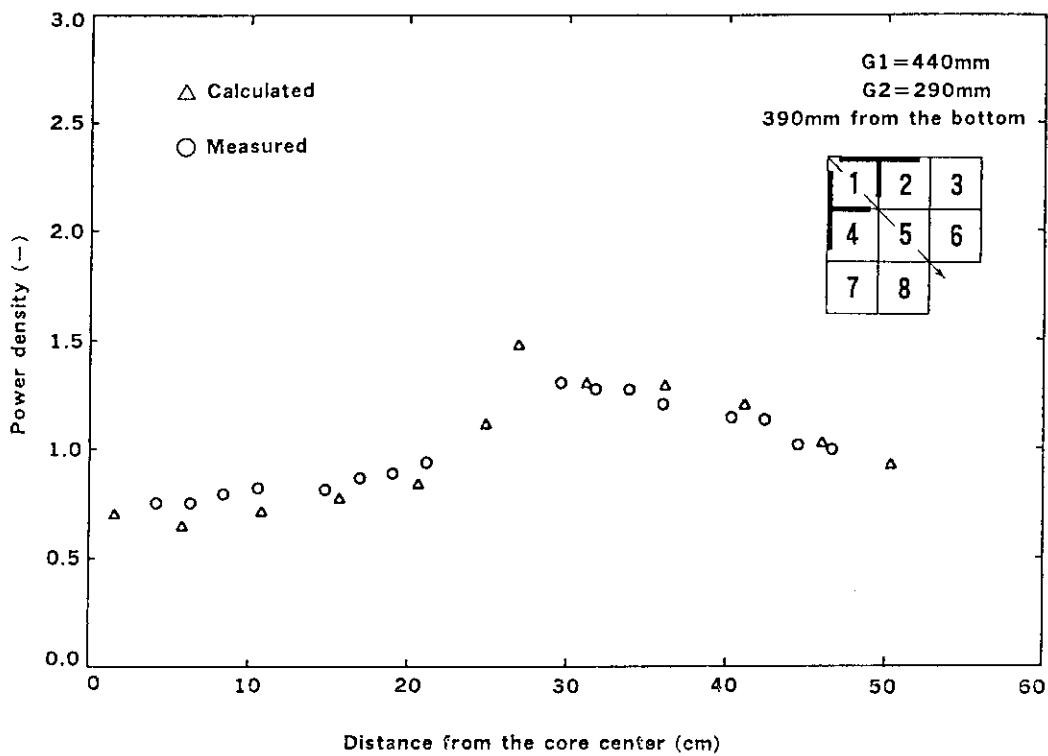


Fig. 16 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
(G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より390mm 水平断面その2)

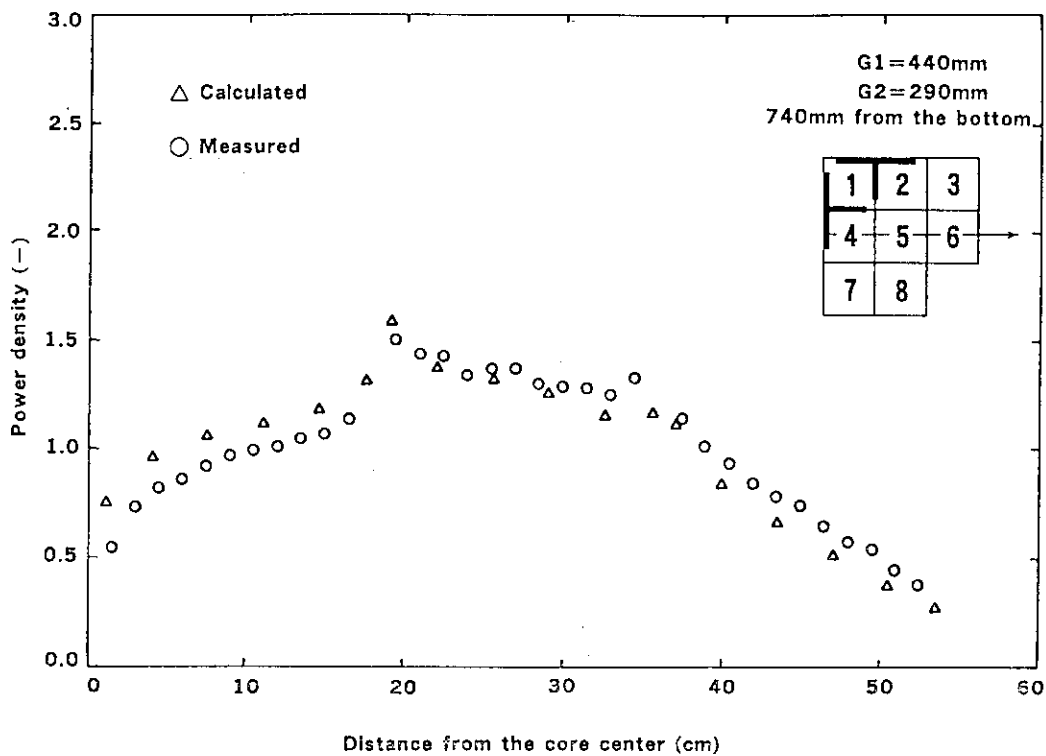


Fig. 17 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より740mm 水平断面その1)

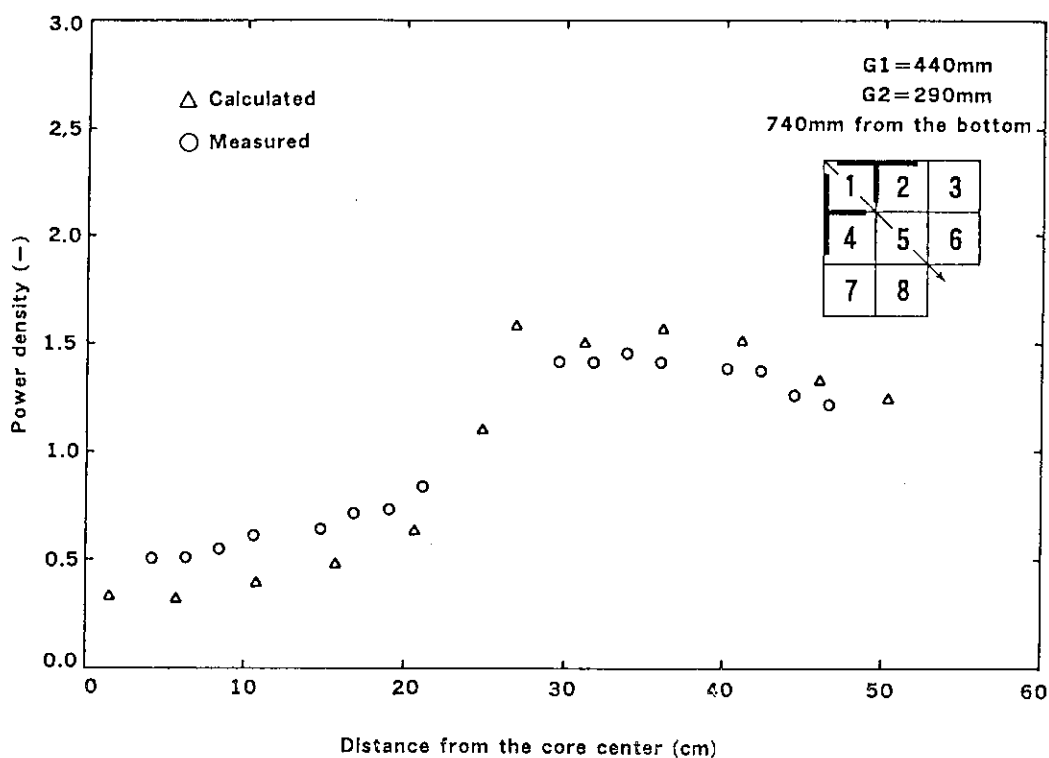


Fig. 18 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=440mm, G2=290mm; 炉心下端より740mm 水平断面その2)

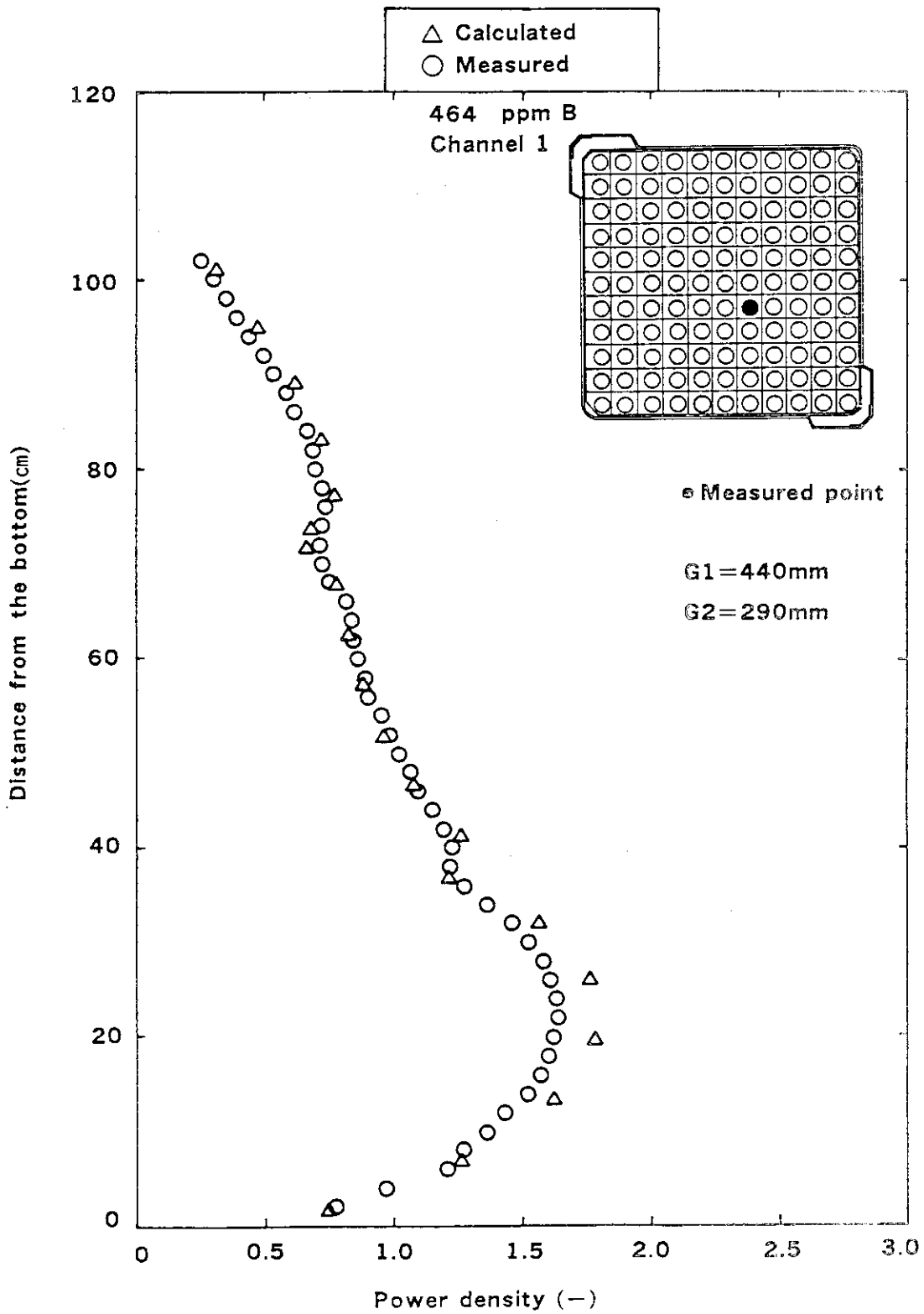


Fig. 19 STEADY-SHIP 計算軸方向出力分布と実測値との比較
(G1=440mm, G2=290mm; No.1 チャンネル)

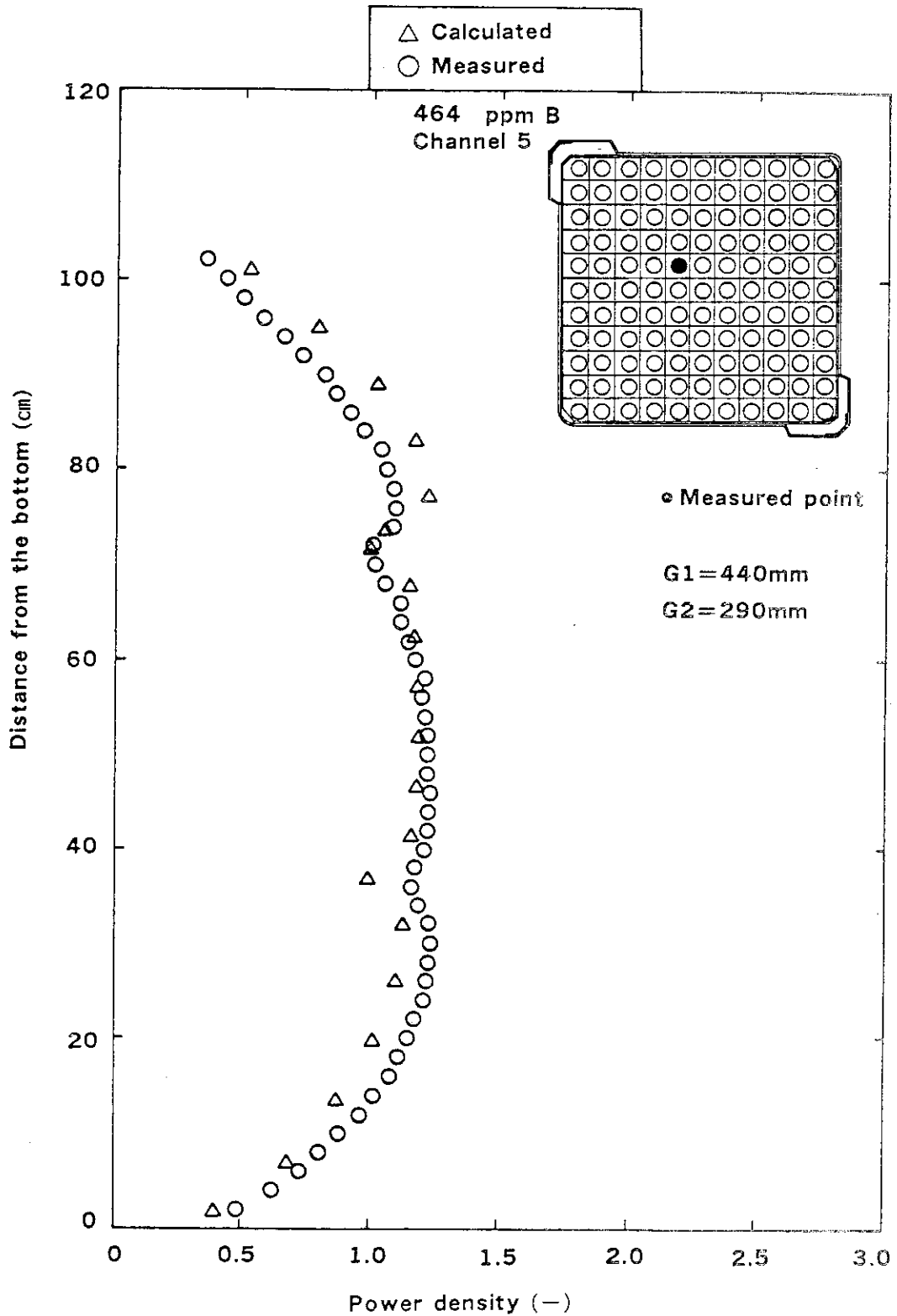


Fig. 20 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
(G1=440mm, G2=290mm; No. 5 チャンネル)

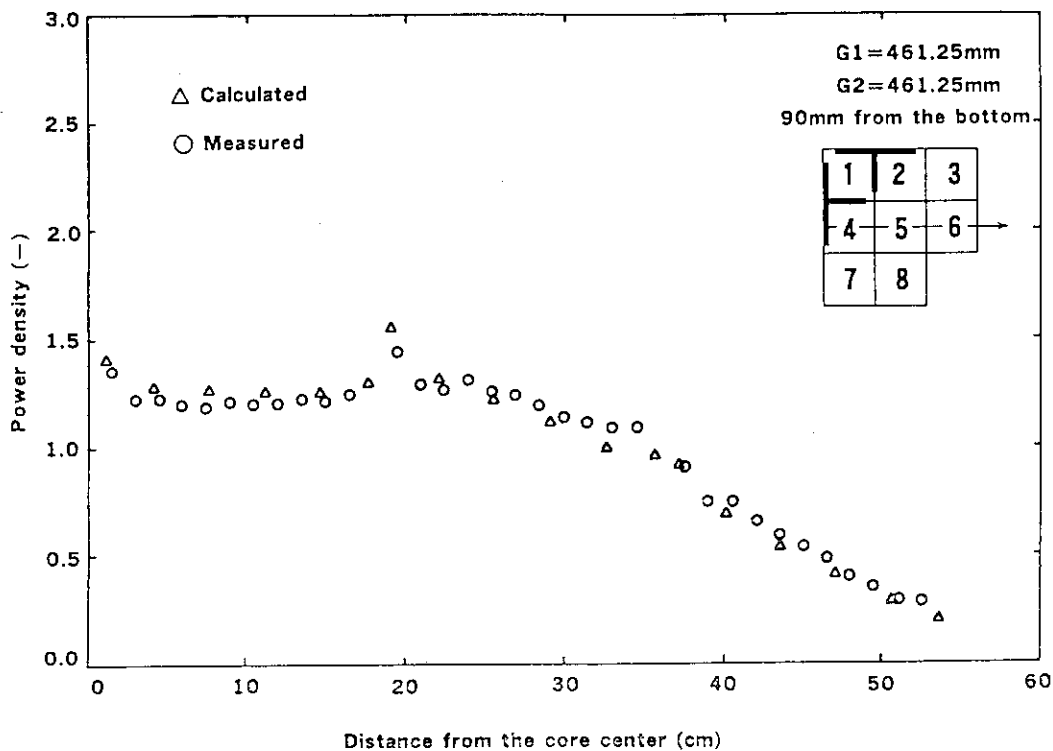


Fig. 21 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=G2=461.25mm; 炉心下端より 90 mm 水平断面その1)

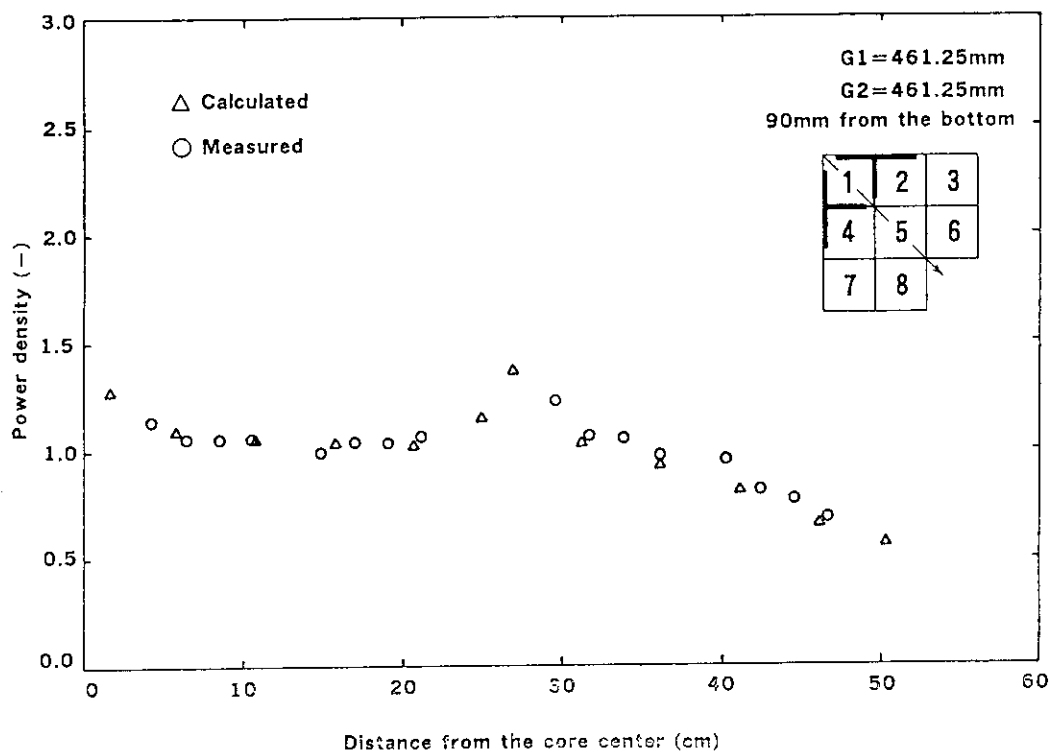


Fig. 22 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 (G1=G2=461.25mm; 炉心下端より 90 mm 水平断面その2)

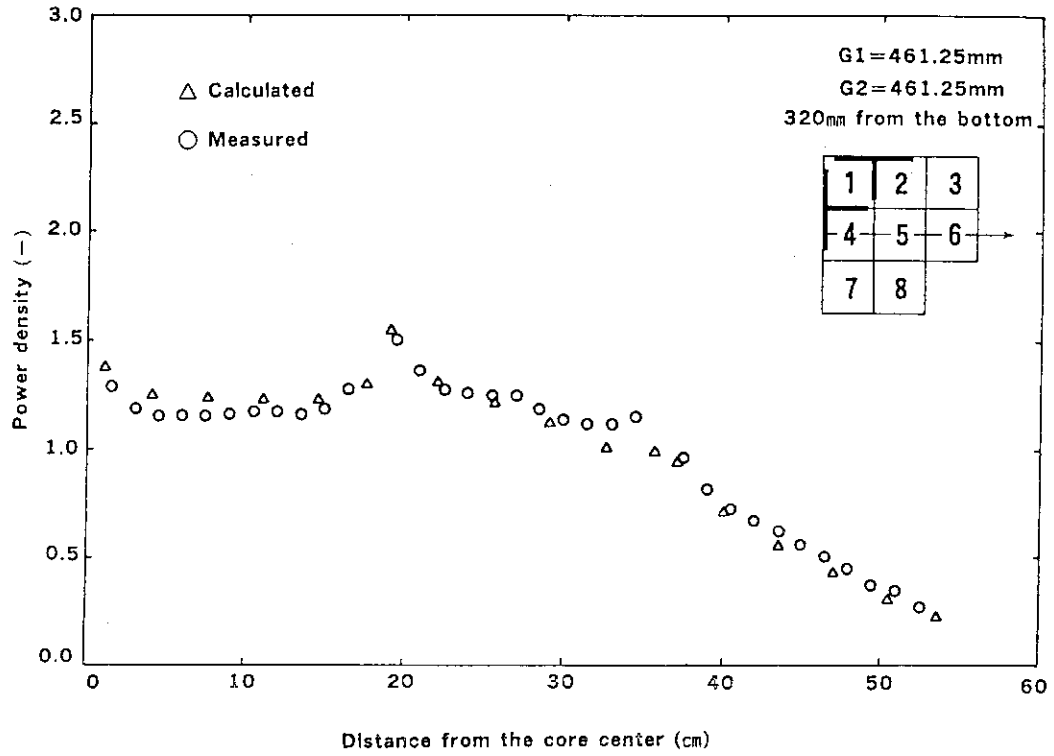


Fig. 23 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より320mm 水平断面その1)

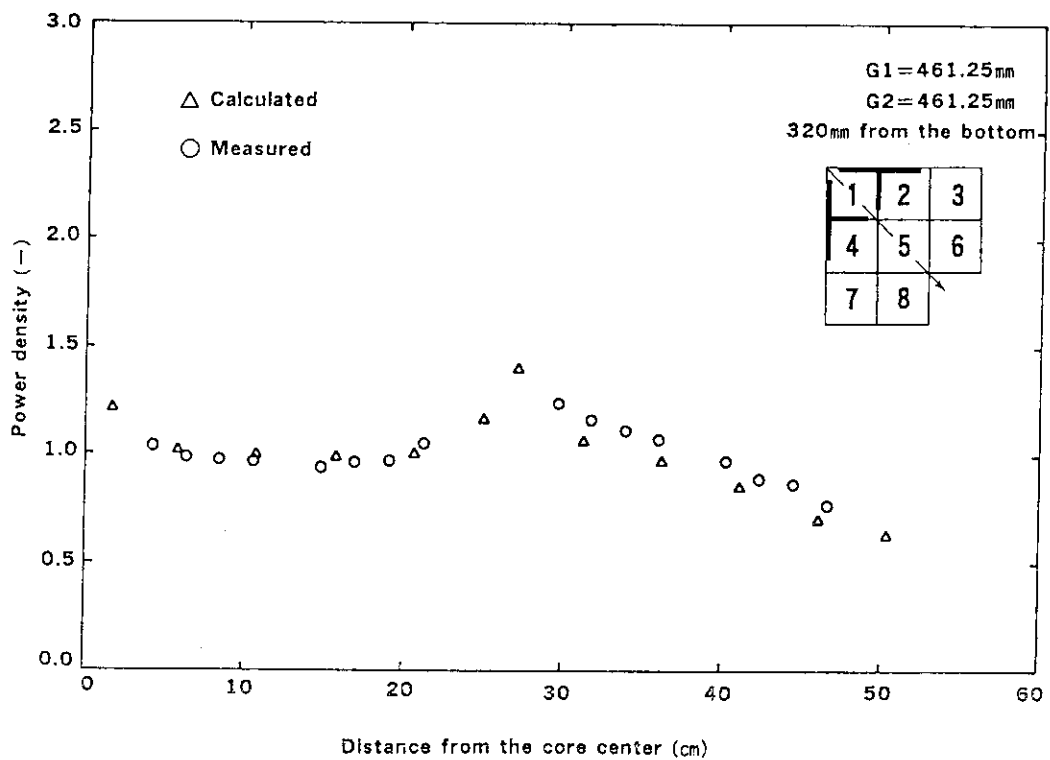


Fig. 24 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より320mm 水平断面その2)

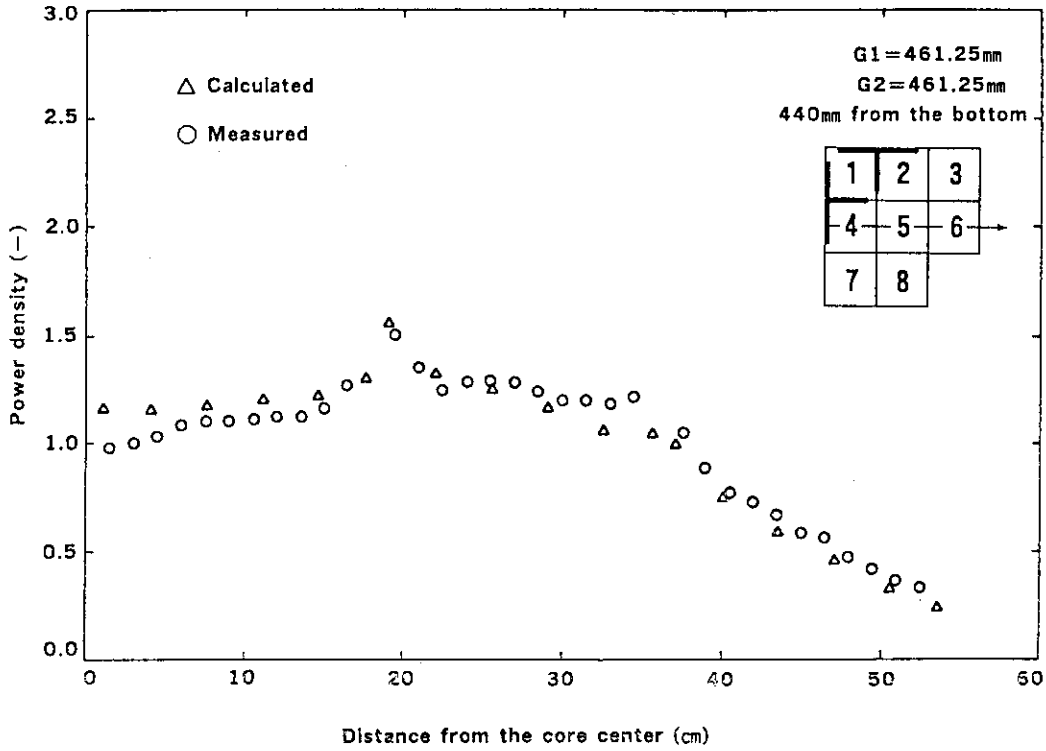


Fig. 25 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より440mm 水平断面その1)

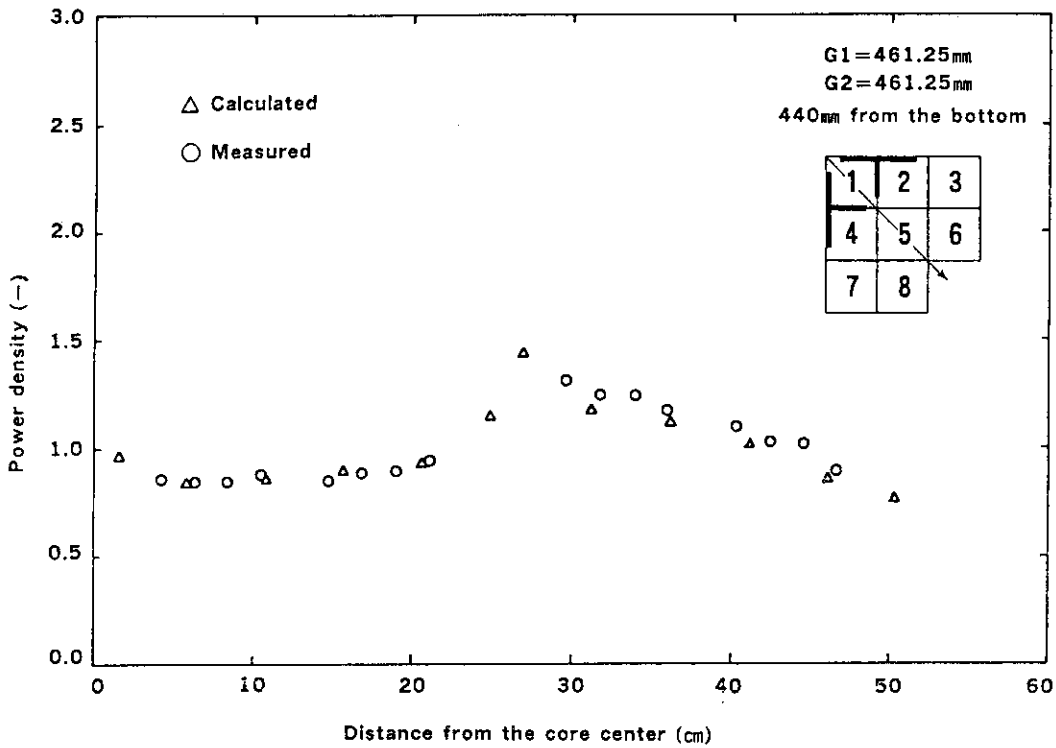


Fig. 26 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より440mm 水平断面その2)

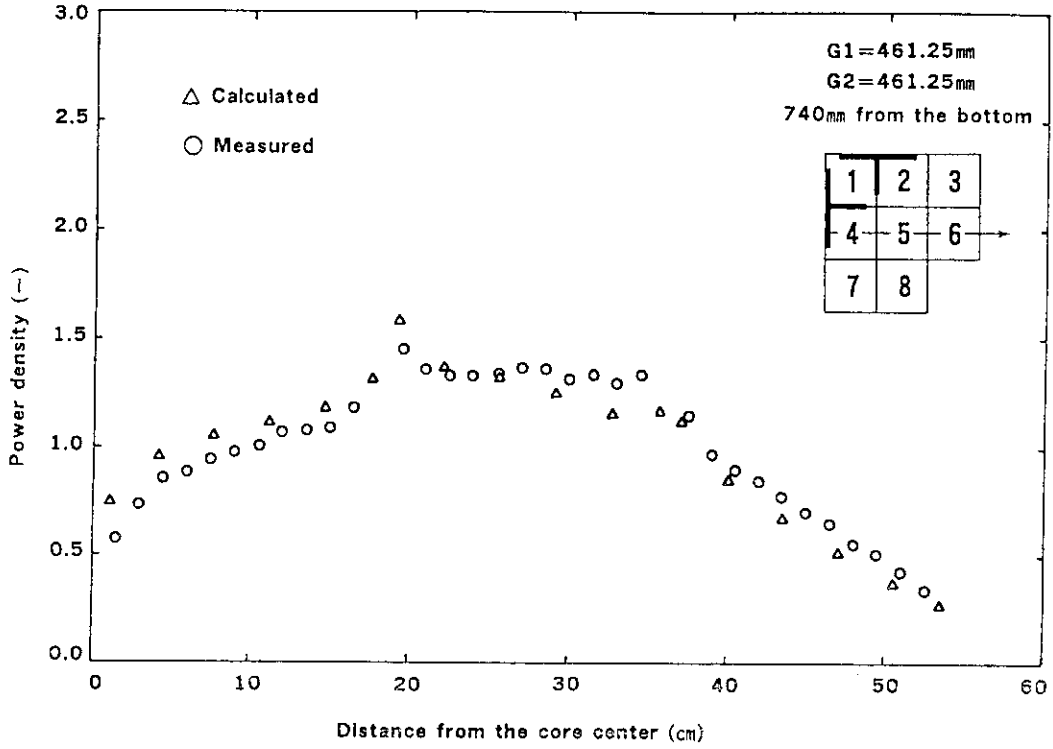


Fig. 27 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より740mm 水平断面その1)

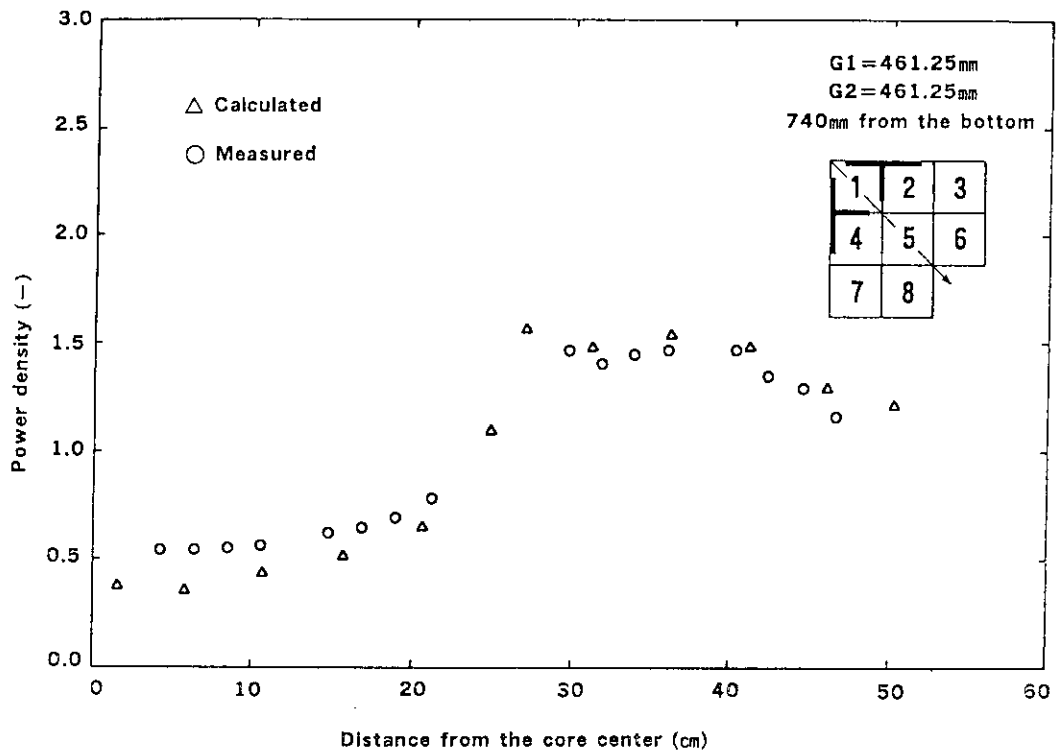


Fig. 28 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
 ($G1=G2=461.25\text{mm}$; 炉心下端より740mm 水平断面その2)

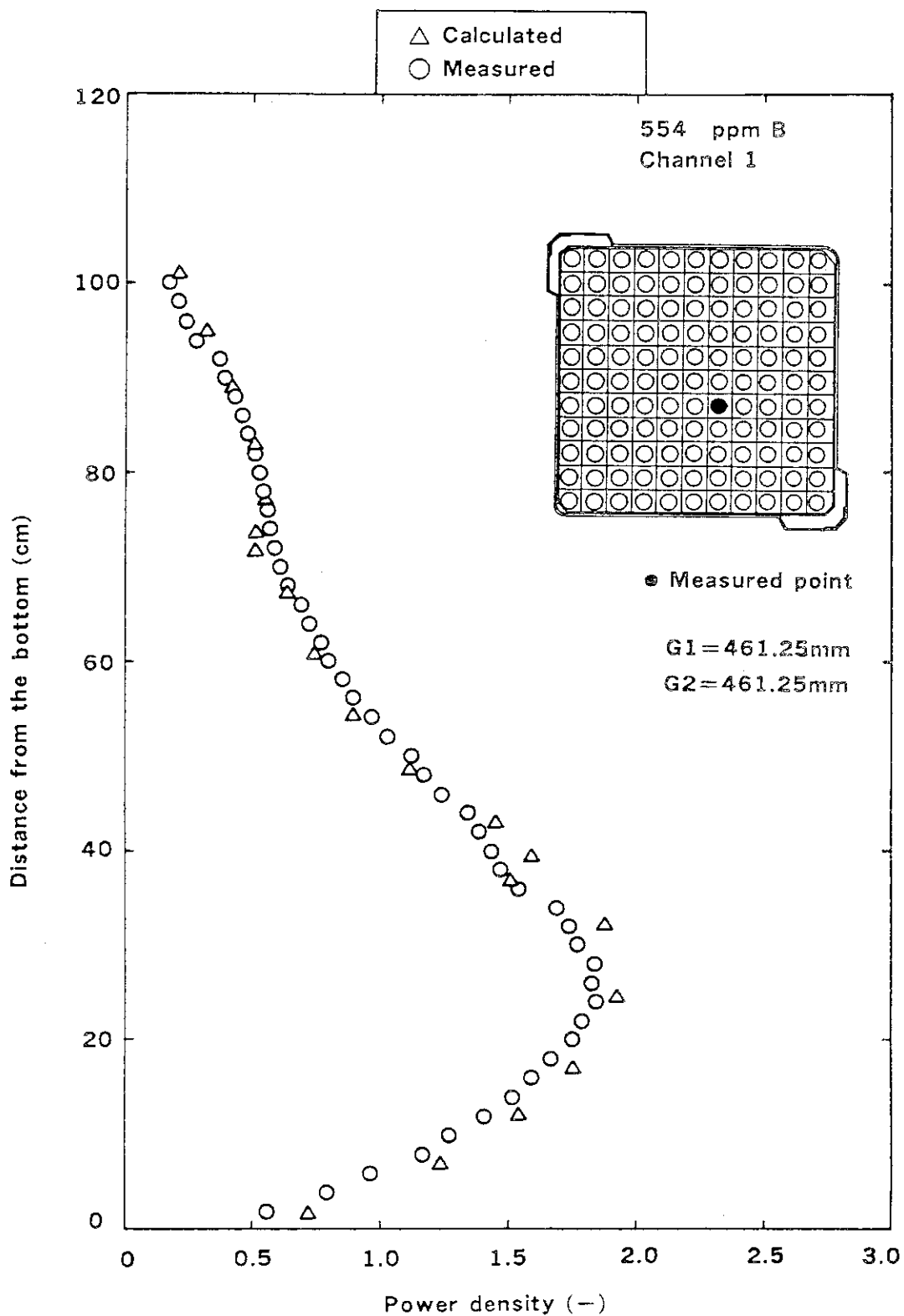


Fig. 29 STEADY-SHIP 計算軸方向出力分布と実測値との比較
(G1=G2=461.25mm ; No.1チャンネル)

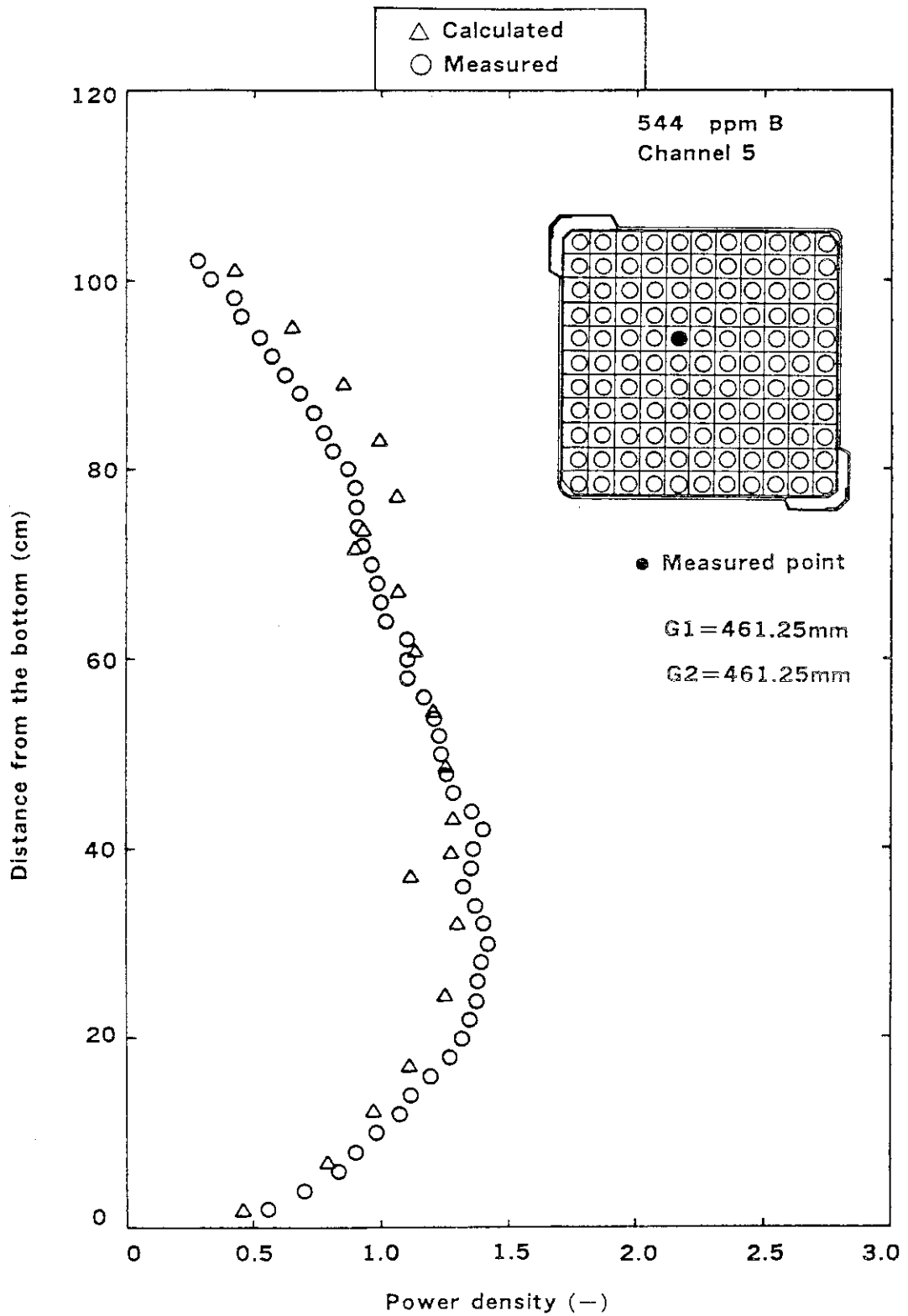


Fig. 30 STEADY-SHIP 計算径方向出力分布と実測値との比較
(G1=G2=461.25mm ; No.5 チャンネル)

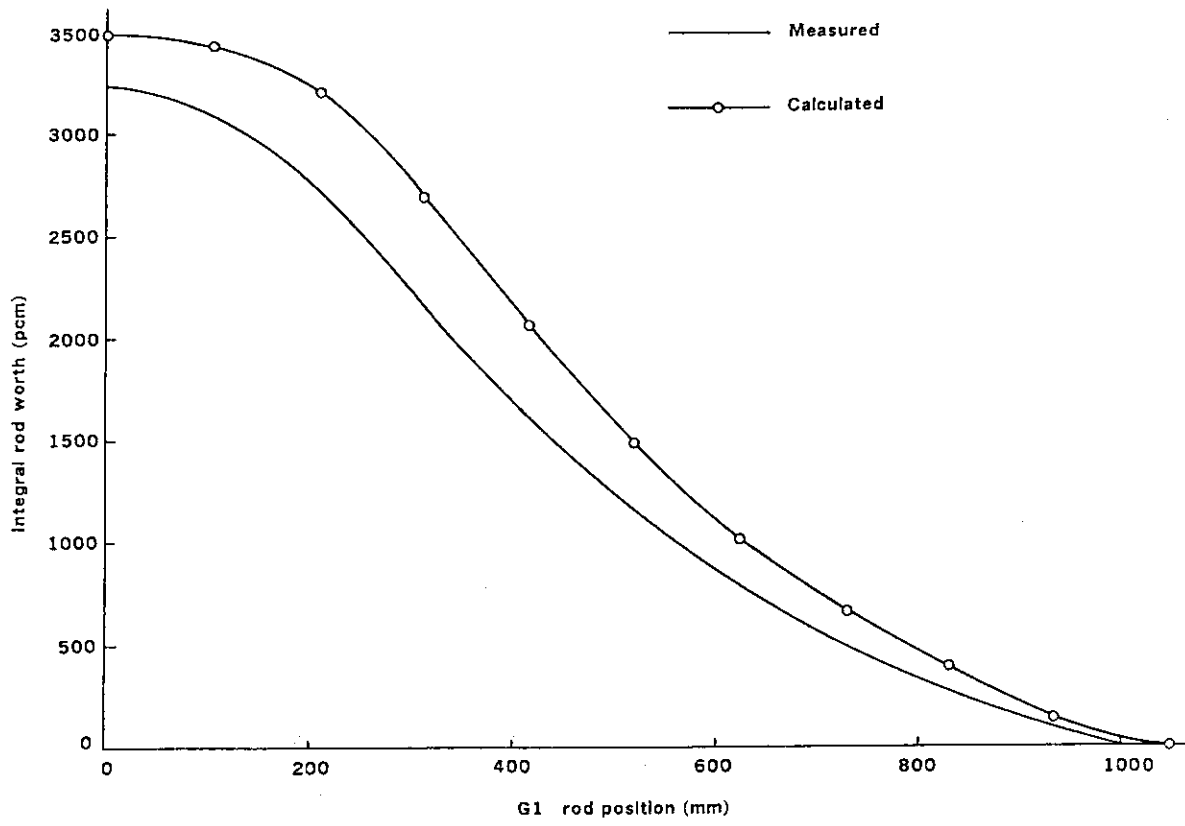


Fig. 31 STEADY-SHIP 計算 G1 制御棒反応度値計算結果と実測値との比較

4. HZP試験実測データによる検証計算

4.1 HZP試験検証計算の概要

昭和49年に行われた「むつ」出力上昇試験 Phase-0 (以下便宜上 HZP 試験と称する) においては、初回臨界試験、核計装オーバーラップ試験、冷態零出力上限値測定試験、停止余裕度測定試験、減速材温度係数及び圧力係数測定試験、臨界制御棒位置測定試験、温態零出力上限値測定試験の各試験がそれぞれ行われた。⁵⁾

炉心管理基準システムの検証計算としては、G1, G2 制御棒の反応度等価性を試験した臨界制御棒位置測定試験を選び、これを ASSEMBLY-SHIP, STEADY-SHIP 及び BURN-SHIP コードの検証にあてることとした。臨界制御棒位置測定試験の試験結果のうち、検証計算に使用したものを Table 9 に示す。

検証計算手法は、陸臨試験の場合と同様 ASSEMBLY-SHIP コードを使用して HZP 試験用少数群核定数を作成し、これを用いて STEADY-SHIP 及び BURN-SHIP コードにより一種の制御棒位置サーチ計算を行う。制御棒吸収部については、やはり対数微分値で取り扱う。

4.2 HZP試験用核定数の作成

少数群核定数の作成手順は、陸臨試験の場合と同様であり、ASSEMBLY-SHIP コードを用いて STEADY-SHIP 及び BURN-SHIP コードに入力する核定数を作成した。ただし、ボロン濃度は当然 0 である。また STEADY-SHIP コード入力用核定数は、Table 10 に示す燃料集合体軸方向 8 組が必要であるのに対し、BURN-SHIP コードのそれは Table 11 に示す 4 組でよい。これは、BURN-SHIP コードの計算モデルではグリッドスペースを均質化して扱っているためである。

Table 10 のタイプ 1 につき、作成した 3 群核定数を Table 12 に例示する。

さらに作成した燃料集合体タイプごとの核定数と、構造材その他の核定数を付録 B に示す。ま

また、STEADY-SHIP コード向け ASSEMBLY-SHIP 計算から得られた、集合体タイプごとの無限増倍率を Table 13 に示す。さらに BURN-SHIP コード向け ASSEMBLY-SHIP 計算から得られた、集合体タイプごとの無限増倍率を Table 14 に示す。増倍率の計算結果は、その値あるいは大小関係からみていずれも妥当である。

いずれも妥当である。

4.3 HZP 試験に対する検証計算

4.3.1 対数微分値の検討

STEADY-SHIP 及び BURN-SHIP コードで使用する制御棒の対数微分値は、以下の議論を基にして決定した。

(1) 対数微分値の計算

対数微分値は、ANISN コードを用いて計算した。計算上の仮定及びモデルは、陸臨試験の場合と同様である。各メッシュごとの計算結果を Fig. 32 に示す。使用すべき対数微分値は、Fig. 32 の横軸が 0.4 cm における値であり、

$$r_1 = 88.386$$

$$r_2 = 15.713$$

$$r_3 = 3.139$$

となる。

(2) 領域分割の検討

陸臨試験の場合と同様、領域分割数について検討を行うこととし、4 領域モデルに加えて 3 領域モデルでも対数微分値を計算してみた。その結果、Table 15 に示すように、領域分割数が対数微分値に与える影響は比較的小さい (r_3 が重要であるが、差異は 4.8 % 程度) ことが分かった。

(3) 対数微分値の感度解析

(2) でみたように、 r_3 の差異は小さいものの、4.5 % 程度存在している。したがって、その効果を見るために、対数微分値を振って実効増倍率に対する感度解析を行ってみた。すなわち、第 2 群及び第 3 群の対数微分値を $\pm 10\%$ 変化させて STEADY-SHIP コードに入力し実効増倍率をそれぞれ計算した。STEADY-SHIP 計算での制御棒引抜き距離は、G1、G2 とも 368 mm である。結果を Table 16 に示す。いずれの場合も、実効増倍率に与える影響は 0.1 % 以下と小さい。

(4) 使用すべき対数微分値

領域分割モデルを変えても対数微分値に与える影響は比較的小さく、また対数微分値を変化させた感度解析を行っても結果に与える影響は小さいため、ここで使用する HZP 試験解析用対数微分値は、

$$r_1 = 88.386$$

$$r_2 = 15.713$$

$$r_3 = 3.139$$

と最終的に決定した。

4.3.2 STEADY-SHIP コードによる制御棒等反応度曲線解析

付録 B に示す ASSEMBLY-SHIP 計算核定数を STEADY-SHIP コード入力して、種々の制御棒パターンについて実効増倍率を計算した。このときの軸方向メッシュ分割の例を Fig. 33 に示し、計算条件の制御棒引抜き距離と得られた実効増倍率計算結果を Table 17 に示す。

上記の計算上の実効増倍率は、ちょうど臨界である 1.0 から若干ずれている。よって G1 制御棒の引抜き距離を変え、ちょうど臨界になる引抜き距離を求めることとする（要するに、臨界制御棒位置サーチである）。この補正には、制御棒の微分反応度値 $\Delta\rho/\Delta h$ をあらかじめ別に計算で求め、Table 17 の臨界からの差 $\Delta\rho$ をこの $\Delta\rho/\Delta h$ で除して必要とする補正 Δh を決めることにした。制御棒微分反応度値 $\Delta\rho/\Delta h$ 計算結果を Table 18 に示し、さらに実測データも加えて Fig. 34 に示す。

制御棒等反応度曲線は、以下のようにして作成する。すなわち G1 及び G2 制御棒がそれぞれ 4 mm 及び 606 mm 引き抜かれたときの実効増倍率計算値 0.99738 を臨界と仮定し、これ以外の制御棒引抜き距離での $\Delta\rho$ を、Fig. 34 の制御棒微分反応度値 $\Delta\rho/\Delta h$ で除して補正 Δh を決め、これから G1 制御棒引抜き距離補正値を求め、G2 制御棒引抜き距離とともにプロットする。G1 制御棒について補正した制御棒の引抜き距離を Table 19 に示すとともに、実際に得られた制御棒等反応度曲線を実測値とともに Fig. 35 に示す。

4.3.3 BURN-SHIP コードによる制御棒等反応度曲線解析

次に、BURN-SHIP コードに、付録 B に示す ASSEMBLY-SHIP 計算少数群核定数を入力して、種々の制御棒パターンについて実効増倍率を計算した。このときの軸方向メッシュ分割の例を Fig. 36 に示し、計算条件の制御棒引抜き距離と得られた実効増倍率計算結果を Table 20 に示す。

BURN-SHIP 計算についても計算上の実効増倍率は、ちょうど臨界である 1.0 から若干ずれている。よって G1 制御棒の引抜き距離を変え、ちょうど臨界になる引抜き距離を求めることとする。この補正には、やはり制御棒の微分反応度値 $\Delta\rho/\Delta h$ を計算で求め、必要とする Δh を決めることとした。制御棒微分反応度値計算結果を Table 21 に示し、さらに実測データも加えて Fig. 37 に示す。

STEADY-SHIP の場合と同様に制御棒等反応度曲線は、G1 及び G2 制御棒がそれぞれ 4 mm 及び 606 mm 引き抜かれたときの実効増倍率 0.99976 を臨界と仮定し、これ以外の制御棒引抜き距離での実効増倍率を、Fig. 37 の制御棒微分反応度値で補正して作成した。G1 制御棒について補正した制御棒の引抜き距離を Table 22 に示すとともに、G2 制御棒引抜き距離及び G1 制御棒引抜き距離をプロットして得られる制御棒等反応度曲線を実測値とともに Fig. 38 に示す。

4.4 計算結果の検討

Fig. 35 及び Fig. 38 に示したように、STEADY-SHIP 及び BURN-SHIP コードによる制御棒等反応度曲線解析結果は、H2P 試験結果と比べて良く合っていると見える。

実効増倍率計算結果についても、G1、G2 制御棒引抜き距離が相互に大きく変わらない限り、STEADY-SHIP コード、BURN-SHIP コードいずれも誤差 0.2% 以下の精度を持っている。ただし計算値の方がわずかに小さめである。

Fig. 34 及び Fig. 37 に制御棒微分反応度値を H2P 試験結果と比べて示したが、計算値の方が 10%~20% 大きめである。この点に関しては、対数微分値あるいは STEADY-SHIP 及

びBURN-SHIPコードのメッシュ分割の検討などが更に望まれる。

最後にSTEADY-SHIP及びBURN-SHIPコードによる出力分布の計算結果の比較の例をFig. 39に示す。STEADY-SHIPでは、グリッドスペーサの効果が解析で表わされていることがわかる。両者の一致は概して良い。

Table 9 臨界制御棒位置測定結果

ケース	G1制御棒引抜き距離(mm)	G2制御棒引抜き距離(mm)
1	4	606
2	153	576
3	199	551
4	230	527
5	252	499
6	277	477
7	296	451
8	314	429
9	332	407
10	351	385

Table 10 STEADY-SHIP入力用ASSEMBLY-SHIP計算条件

タイプ	^{235}U 濃縮度(w/o)	BP/SPACER	グリッドスペーサ
1	3.24	BP	有
2	3.24	BP	無
3	3.24	SPACER	有
4	3.24	SPACER	無
5	4.44	BP	有
6	4.44	BP	無
7	4.44	SPACER	有
8	4.44	SPACER	無

Table 11 BURN-SHIP入力用ASSEMBLY-SHIP計算条件

タイプ	^{235}U 濃縮度(w/o)	BP/SPACER	グリッドスペーサ
1	3.24	BP	均質化して扱う
2	3.24	SPACER	
3	4.44	BP	
4	4.44	SPACER	

Table 12 ASSEMBLY-SHIP計算3群核定数の例

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5788	3.1319E-3	4.1870E-3	3.5620E-2
2	0.60783	2.6302E-2	1.3615E-2	4.8664E-2
3	0.31819	1.0040E-1	1.3010E-1	0.0

Table 13 STEADY-SHIP向けASSEMBLY-SHIP計算無限増倍率

タイプ	^{235}U 濃縮度 (w/o)	BP/SPACER	グリッド スペーサ	無限増倍率
1	3.24	BP	有	1.0482
2	3.24	BP	無	1.2050
3	3.24	SPACER	有	1.1187
4	3.24	SPACER	無	1.2930
5	4.44	BP	有	1.1149
6	4.44	BP	無	1.2597
7	4.44	SPACER	有	1.1738
8	4.44	SPACER	無	1.3714

Table 14 BURN-SHIP向けASSEMBLY-SHIP計算無限増倍率

タイプ	^{235}U 濃縮度 (w/o)	BP/SPACER	グリッド スペーサ	無限増倍率
1	3.24	BP		1.1864
2	3.24	SPACER	均質化して扱う	1.2726
3	4.44	BP		1.2405
4	4.44	SPACER		1.3524

Table 15 領域分割数が対数微分値に与える影響

領域分割数	γ_1	γ_2	γ_3
4	88.386	15.713	3.139
3	80.588	16.167	3.280

Table 16 r を変えた実効増倍率感度解析結果

領域分割数	変化させた対数微分値	実効増倍率
4	基準値	0.99914
4	γ_2 を1.1倍	0.99977
4	γ_2 を0.9倍	0.99840
4	γ_3 を1.1倍	0.99991
4	γ_3 を0.9倍	0.99835

Table 17 臨界制御棒位置 STEADY-SHIP 計算結果

ケース	G1制御棒引抜き距離 (mm)	G2制御棒引抜き距離 (mm)	実効増倍率
1	4	606	0.99738
2	153	576	0.99765
3	199	551	0.99813
4	230	527	0.99849
5	252	499	0.99831
6	277	477	0.99896
7	296	451	0.99901
8	314	429	0.99908
9	332	407	0.99936
10	351	385	0.99973
11	368	368	0.99914

Table 18 制御棒微分反応度値STEADY-SHIP計算結果

ケース	G1制御棒 引抜距離 (mm)	G2制御棒 引抜距離 (mm)	実効増倍率	$\Delta \rho$ (pcm)	Δh (mm)	$\Delta \rho / \Delta h$ 計算値 (pcm/mm)
1	4	606	0.99738	33	60	0.54
1'	69	606	0.99770			
2	153	576	0.99765	279	60	4.64
2'	213	576	1.00043			
4	230	527	0.99849	458	60	7.64
4'	290	527	1.00308			
9	332	407	0.99936	530	65	8.15
9'	397	407	1.00468			

Table 19 STEADY-SHIP計算臨界制御棒位値の補正結果

G1制御棒 引抜距離 (mm)	G2制御棒 引抜距離 (mm)	実効増倍率	$\Delta \rho$ (pcm)	$\Delta \rho / \Delta h$ (pcm/mm)	補正 Δh (mm)	G1制御棒 引抜距離 補正值(mm)
4	606	0.99738	0		0	4
153	576	0.99765	-27	3.45	-8	145
199	551	0.99813	-75	5.25	-14	185
230	527	0.99849	-111	6.95	-16	214
252	499	0.99831	-93	7.50	-12	240
277	477	0.99896	-159	7.80	-20	257
296	451	0.99901	-164	8.00	-20	276
314	429	0.99908	-171	8.10	-21	293
332	407	0.99936	-199	8.15	-24	308
351	385	0.99973	-236	8.15	-29	322
368	368	0.99914	-177	8.15	-22	346

Table 20 臨界制御棒位置 BURN-SHIP 計算結果

ケース	G1制御棒引抜き距離(mm)	G2制御棒引抜き距離(mm)	実効増倍率
1	4	606	0.99976
2	153	576	0.99763
3	199	551	0.99825
5	252	499	0.99864
6	277	477	0.99938
7	296	451	0.99932
8	314	429	0.99949
9	332	407	0.99940
10	351	385	0.99925
11	368	368	0.99919

Table 21 制御棒微分反応度値 BURN-SHIP 計算結果

ケース	G1制御棒引抜き距離(mm)	G2制御棒引抜き距離(mm)	実効増倍率	$\Delta \rho$ (pcm)	Δh (mm)	$\Delta \rho / \Delta h$ 計算値 (pcm/mm)
1'	39	606	0.99433	33	30	1.11
1''	69	606	0.99466			
2	153	576	0.99492	311	60	5.18
2'	213	576	0.99801			
4	230	527	0.99622	488	60	8.13
4'	290	527	1.00109			
9	332	407	0.99693	519	60	8.65
9'	392	407	1.00212			

Table 22 BURN-SHIP計算臨界制御棒位置の補正結果

G1制御棒 引抜距離 (mm)	G2制御棒 引抜距離 (mm)	実効増倍率	$\Delta \rho$ (pcm)	$\Delta \rho / \Delta h$ (pcm/mm)	補正 Δh (mm)	G1制御棒 引抜距離 補正值 (mm)
4	606	0.99976	0		0	4
153	576	0.99763	214	4.00	53	206
199	551	0.99825	151	6.05	25	224
252	499	0.99864	112	8.15	14	266
277	477	0.99938	38	8.30	5	282
296	451	0.99932	44	8.50	4	300
314	429	0.99949	27	8.60	3	317
332	407	0.99940	36	8.60	4	336
351	385	0.99925	51	8.65	6	357
368	368	0.99919	57	8.65	7	375

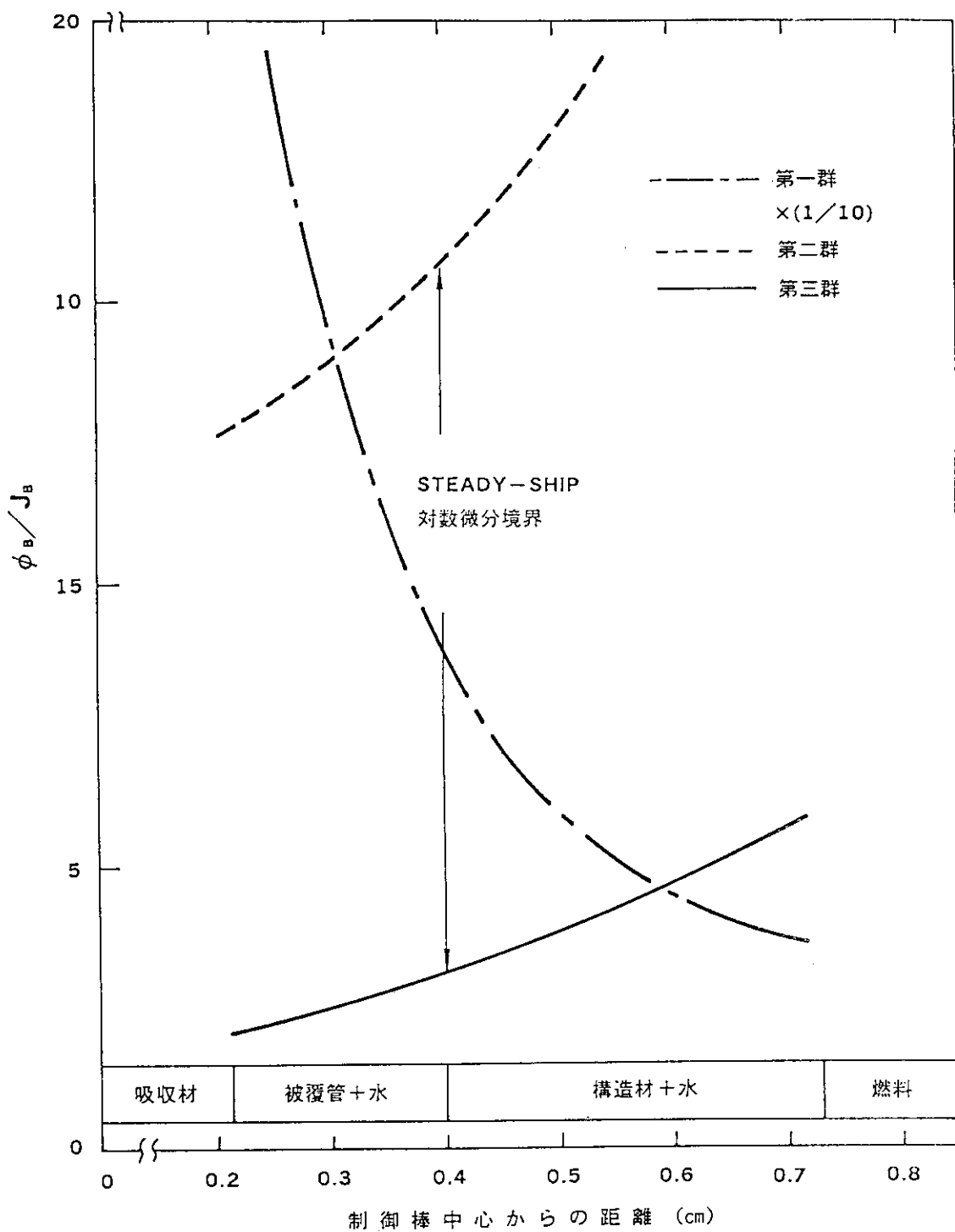


Fig. 32 H Z P 試験用対数微分値計算結果

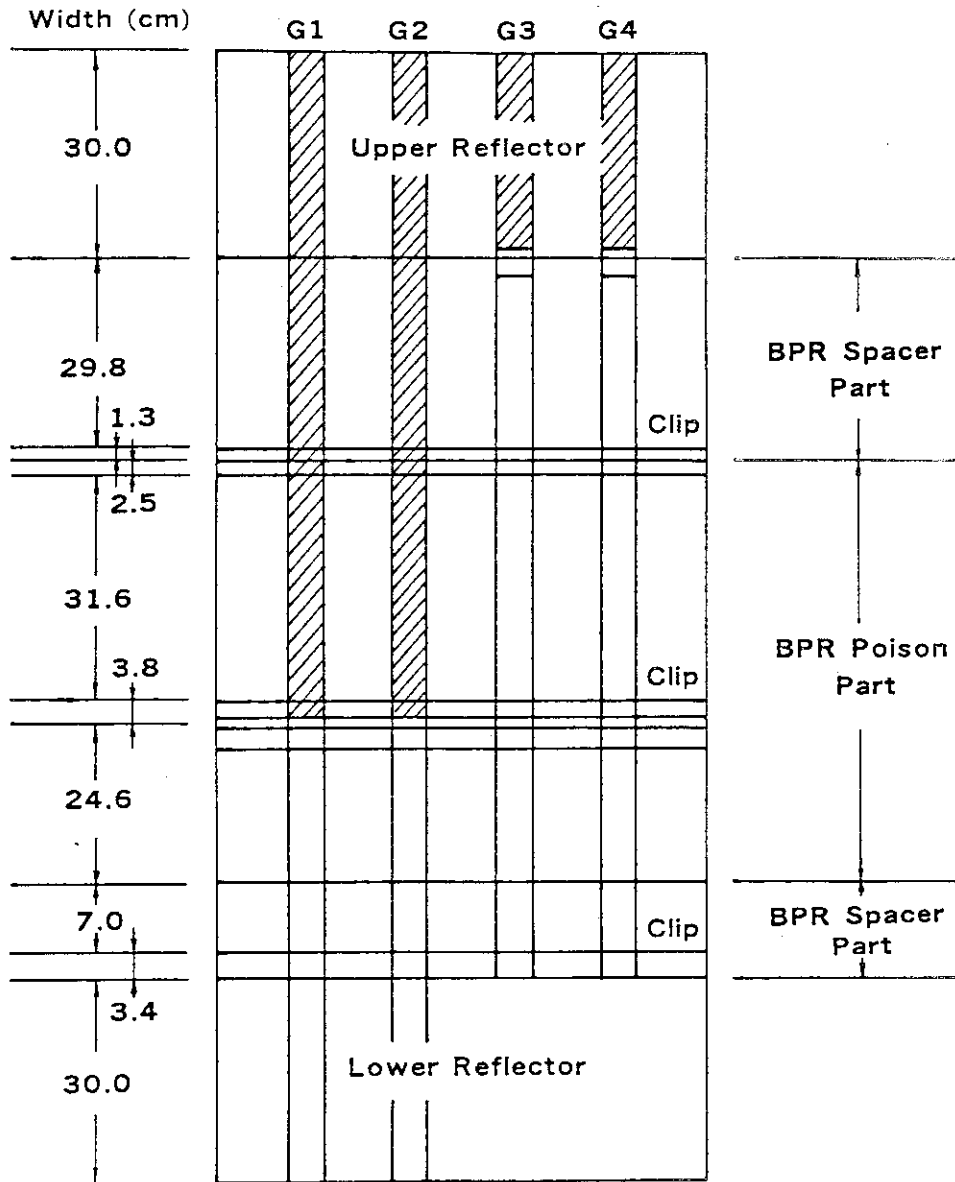


Fig. 33 STEADY-SHIP コード軸方向メッシュ分割

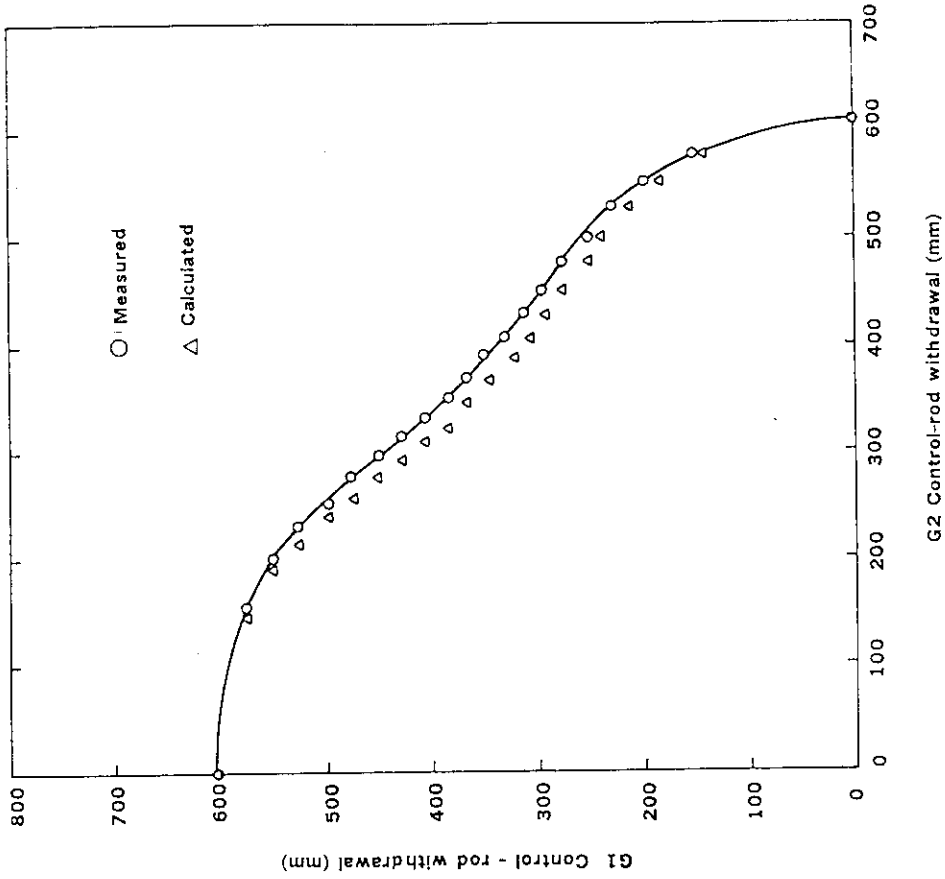


Fig. 35 STEADY-SHIPコード計算G1-G2制御棒等反応度曲線と実測値との比較

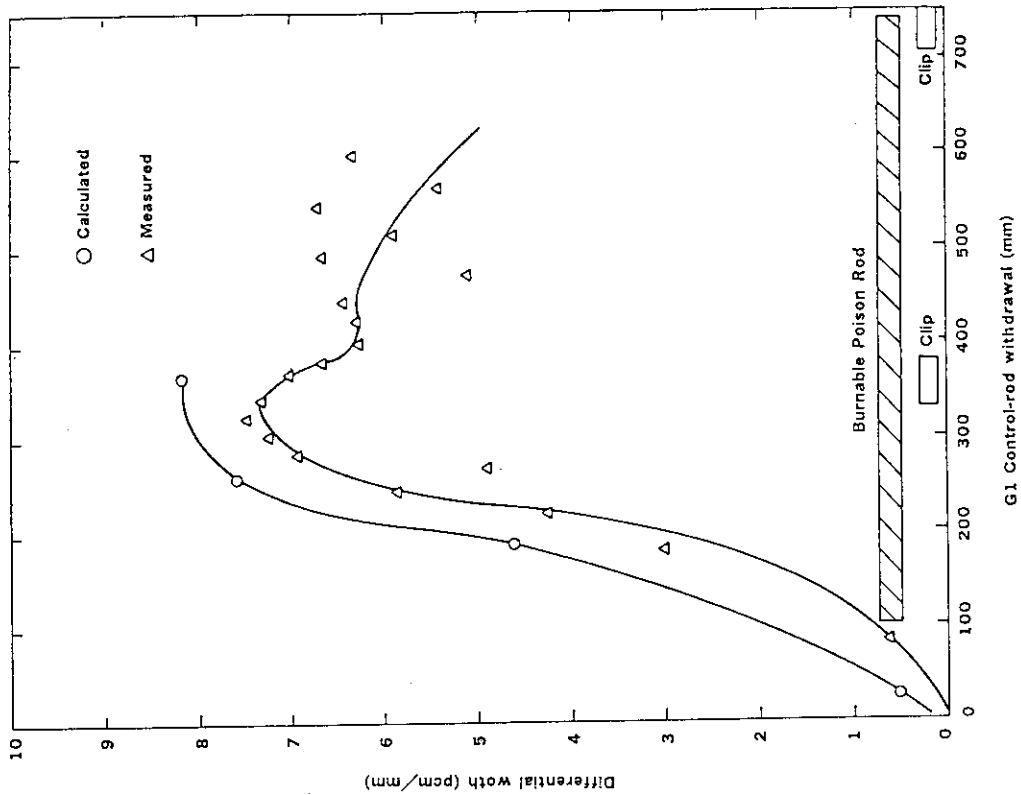


Fig. 34 STEADY-SHIPコード計算G1制御棒微分反応度値値と実測値との比較

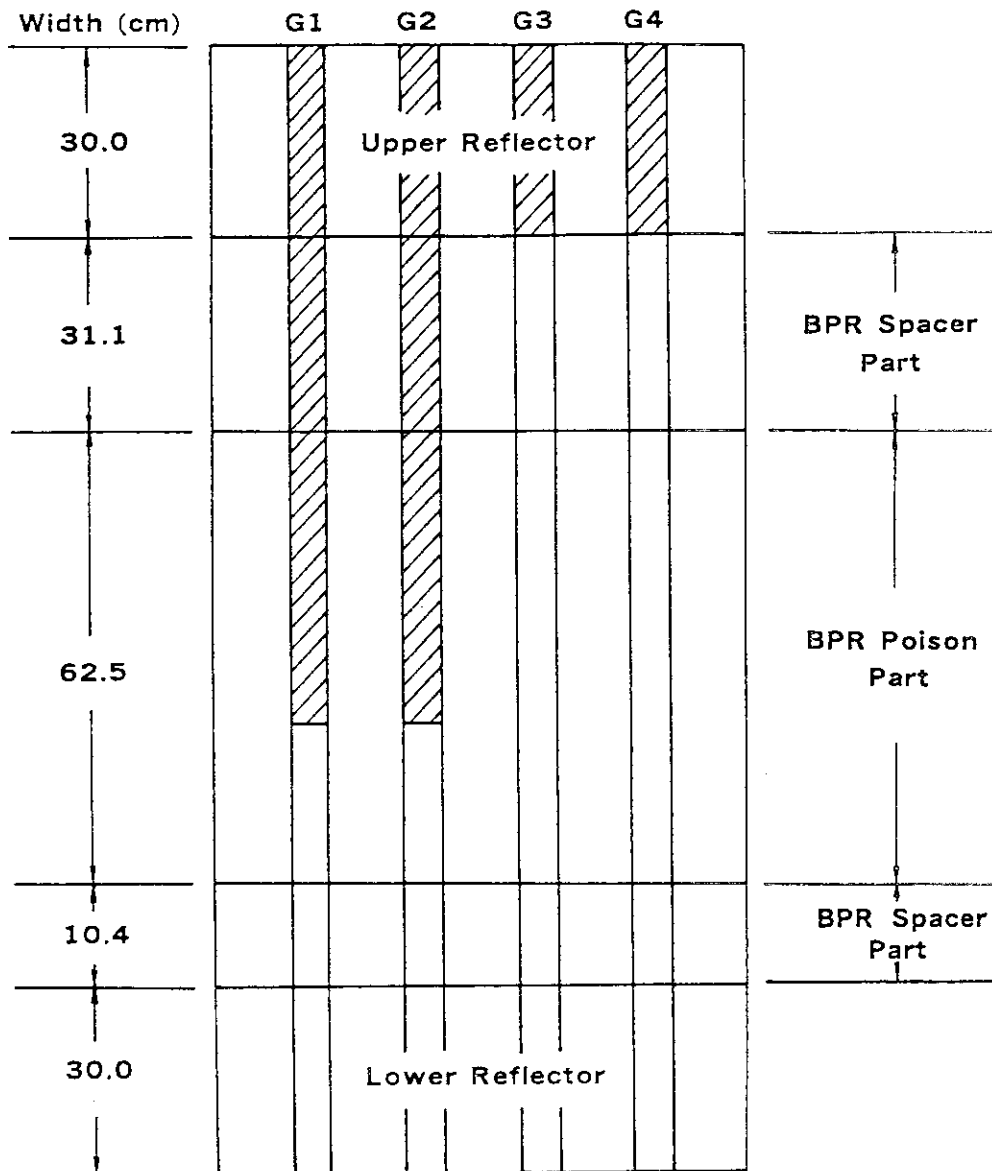


Fig. 36 BURN-SHIP コード軸方向メッシュ分割

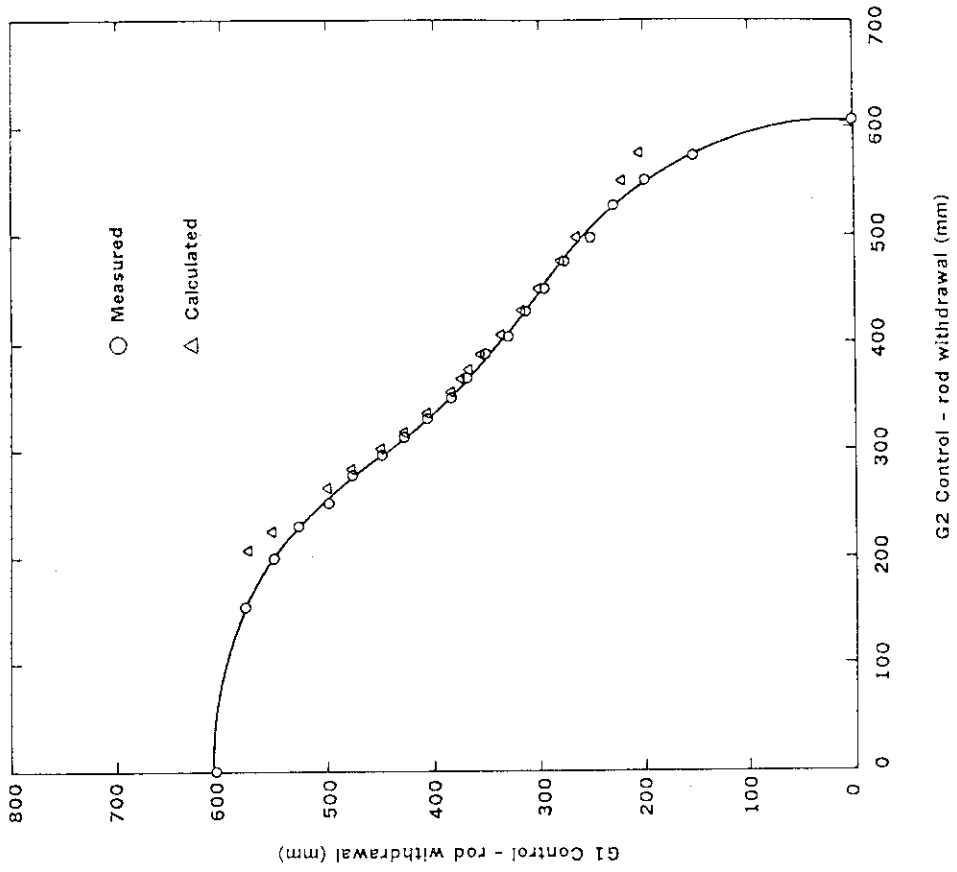


Fig. 38 BURN-SHIP コード計算G1-G2制御棒等反応度曲線と
実測値との比較

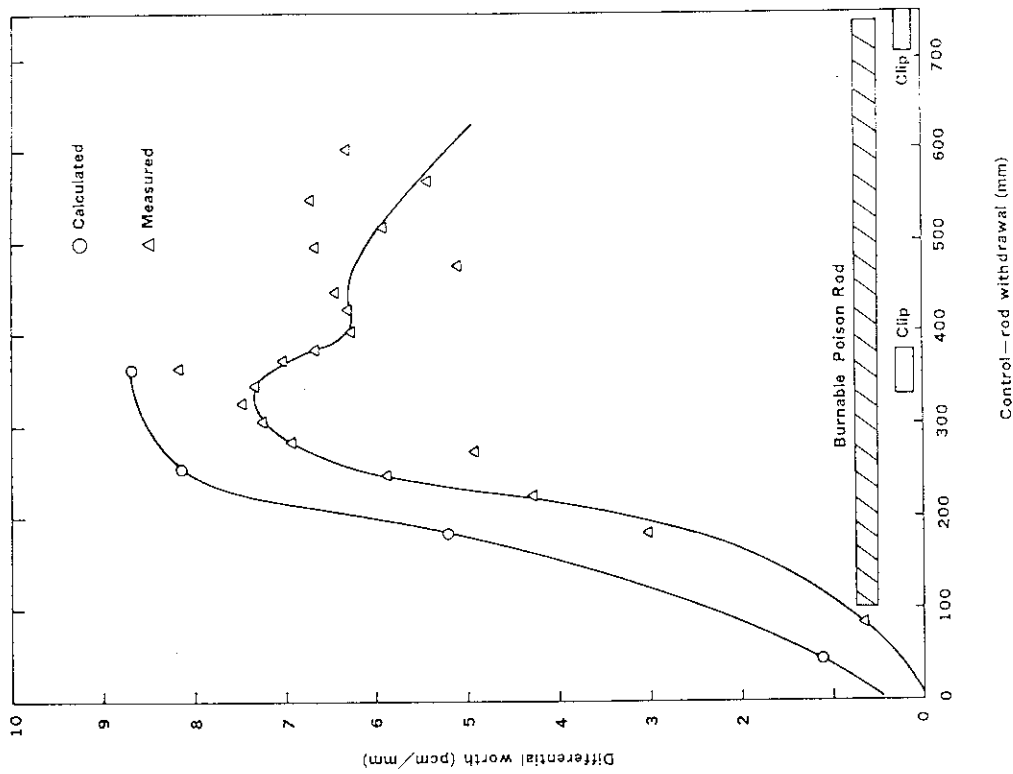


Fig. 37 BURN-SHIP コード計算G1制御棒微分反応度値と
実測値との比較

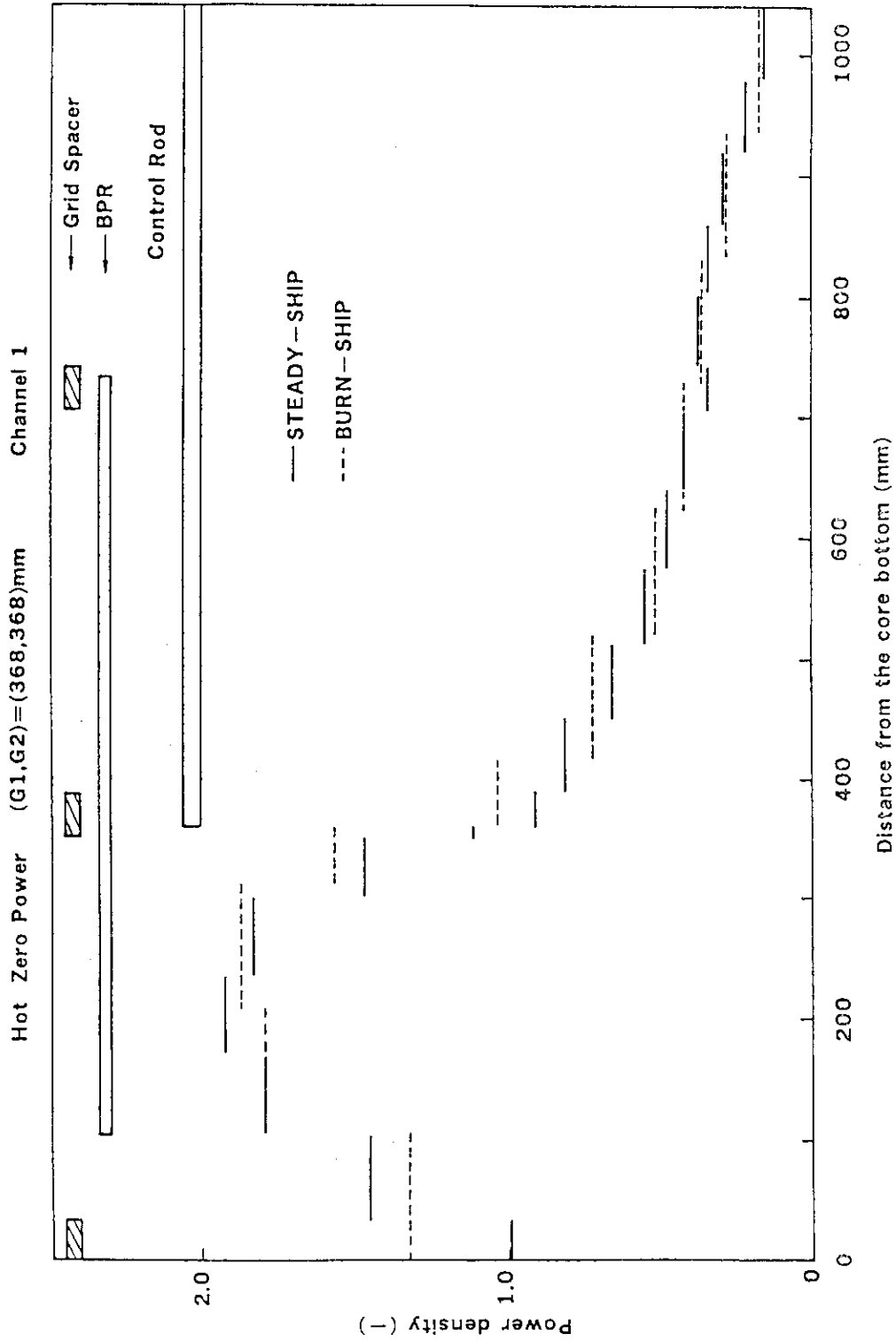


Fig. 39 STEADY-SHIP及びBURN-SHIPコード計算軸方向出力分布の比較

5. 結 論

炉心管理基準システムを構成する重要コードであるASSEMBLY-SHIP, STEADY-SHIP及びBURN-SHIPコードの検証を、陸臨試験及びHZP試験の実測データを用いて行った。その結果、出力分布、増倍率、制御棒反応度値、制御棒等反応度曲線いずれも実測データに近い解析結果が得られ、炉心管理基準システムは十分な精度を有していると判断できる。

今後は、同計算コードシステムを使用して、昭和46年度に計画されている出力上昇試験あるいはその後の実験航海の炉物理解析を行ってゆくとともに、更にコードの整備改良を進める予定である。

謝 辞

炉心管理基準システムの整備及び計算の過程で多くの手助けを頂いた日本情報サービス株式会社の各位にお礼申し上げます。また、本研究の実施に当たり、終始激励を戴いた日本原子力研究所むつ事業所の石塚信副所長、八巻治恵技術部次長、落合政昭元試験課長に深く感謝致します。さらに石田紀久試験課長代理には、本稿の懇切なる閲読をして頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 板垣, 内藤, 飯島, 井上, “船用炉の燃料集合体平均少数群核定数計算コード: ASSEMBLY-SHIP” JAERI-M 87-150 (1987)
- 2) 板垣, 内藤, 徳野, 松井, “船用炉の3次元核熱水力計算コード: STEADY-SHIP” JAERI 1309 (1988)
- 3) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」炉心陸上臨界試験報告書” JNS-10 (1973)
- 4) Makino, Fukai, “Calculation of Reactivity Worth of a Control Rod Array” Journal of Nuclear Energy, Vol. 23, PP187-204 (1969)
- 5) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」出力上昇試験報告書” JNS-13-2 (1974)

5. 結 論

炉心管理基準システムを構成する重要コードであるASSEMBLY-SHIP, STEADY-SHIP及びBURN-SHIPコードの検証を、陸臨試験及びHZP試験の実測データを用いて行った。その結果、出力分布、増倍率、制御棒反応度価値、制御棒等反応度曲線いずれも実測データに近い解析結果が得られ、炉心管理基準システムは十分な精度を有していると判断できる。

今後は、同計算コードシステムを使用して、昭和46年度に計画されている出力上昇試験あるいはその後の実験航海の炉物理解析を行ってゆくとともに、更にコードの整備改良を進める予定である。

謝 辞

炉心管理基準システムの整備及び計算の過程で多くの手助けを頂いた日本情報サービス株式会社の各位にお礼申し上げます。また、本研究の実施に当たり、終始激励を戴いた日本原子力研究所むつ事業所の石塚信副所長、八巻治恵技術部次長、落合政昭元試験課長に深く感謝致します。さらに石田紀久試験課長代理には、本稿の懇切なる閲読をして頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 板垣, 内藤, 飯島, 井上, “船用炉の燃料集合体平均少数群核定数計算コード: ASSEMBLY-SHIP” JAERI-M 87-150 (1987)
- 2) 板垣, 内藤, 徳野, 松井, “船用炉の3次元核熱水力計算コード: STEADY-SHIP” JAERI 1309 (1988)
- 3) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」炉心陸上臨界試験報告書” JNS-10 (1973)
- 4) Makino, Fukai, “Calculation of Reactivity Worth of a Control Rod Array” Journal of Nuclear Energy, Vol. 23, PP187-204 (1969)
- 5) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」出力上昇試験報告書” JNS-13-2 (1974)

5. 結 論

炉心管理基準システムを構成する重要コードであるASSEMBLY-SHIP, STEADY-SHIP及びBURN-SHIPコードの検証を、陸臨試験及びHZP試験の実測データを用いて行った。その結果、出力分布、増倍率、制御棒反応度値、制御棒等反応度曲線いずれも実測データに近い解析結果が得られ、炉心管理基準システムは十分な精度を有していると判断できる。

今後は、同計算コードシステムを使用して、昭和46年度に計画されている出力上昇試験あるいはその後の実験航海の炉物理解析を行ってゆくとともに、更にコードの整備改良を進める予定である。

謝 辞

炉心管理基準システムの整備及び計算の過程で多くの手助けを頂いた日本情報サービス株式会社の各位にお礼申し上げます。また、本研究の実施に当たり、終始激励を戴いた日本原子力研究所むつ事業所の石塚信副所長、八巻治恵技術部次長、落合政昭元試験課長に深く感謝致します。さらに石田紀久試験課長代理には、本稿の懇切なる閲読をして頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 板垣, 内藤, 飯島, 井上, “船用炉の燃料集合体平均少数群核定数計算コード: ASSEMBLY-SHIP” JAERI-M 87-150 (1987)
- 2) 板垣, 内藤, 徳野, 松井, “船用炉の3次元核熱水力計算コード: STEADY-SHIP” JAERI 1309 (1988)
- 3) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」炉心陸上臨界試験報告書” JNS-10 (1973)
- 4) Makino, Fukai, “Calculation of Reactivity Worth of a Control Rod Array” Journal of Nuclear Energy, Vol. 23, PP187-204 (1969)
- 5) 日本原子力船開発事業団, “原子力船「むつ」出力上昇試験報告書” JNS-13-2 (1974)

付録 A 陸上臨界試験用核定数テーブル

陸上臨界試験用核定数 (371 ppm)

3.24w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4059	3.2237E-3	4.3661E-3	4.5072E-2
2	0.52249	2.6744E-2	1.3770E-2	6.6707E-2
3	0.24501	1.2825E-1	1.5593E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4172	3.0821E-3	4.5138E-3	4.7314E-2
2	0.54350	2.3704E-2	1.3943E-2	7.8160E-2
3	0.23234	1.2635E-1	1.6710E-1	0.0

3.24w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3828	3.2168E-3	4.3671E-3	4.4887E-2
2	0.52190	2.6039E-2	1.3759E-2	6.6428E-2
3	0.24768	1.1968E-1	1.5607E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3937	3.0763E-3	4.5146E-3	4.7117E-2
2	0.54466	2.2982E-2	1.3928E-2	7.8172E-2
3	0.23372	1.1748E-1	1.6643E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (371 ppm)

4.44w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3853	3.3356E-3	4.6382E-3	4.4588E-2
2	0.51886	2.9824E-2	1.8391E-2	6.5137E-2
3	0.24132	1.5083E-1	1.9796E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3984	3.1940E-3	4.7820E-3	4.6874E-2
2	0.58296	2.6870E-2	1.8649E-2	7.6398E-2
3	0.22935	1.4979E-1	2.1127E-1	0.0

4.44w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3635	3.3244E-3	4.6419E-3	4.4300E-2
2	0.51960	2.8690E-2	1.8373E-2	6.4833E-2
3	0.24516	1.3844E-1	1.9769E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BP spacer.

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3760	3.1837E-3	4.7850E-3	4.6584E-2
2	0.55727	2.5699E-2	1.8606E-2	7.6509E-2
3	0.23161	1.3701E-1	2.0963E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (371 ppm)

上部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5199	4.9417E-4	5.5515E-2
2	0.48147	4.4606E-3	1.0690E-1
3	0.20005	5.8732E-2	0.0

下部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4446	5.0838E-4	5.8974E-2
2	0.45121	4.4053E-3	1.1352E-1
3	0.18861	6.3992E-2	0.0

側部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5713	3.2697E-4	6.9110E-2
2	0.48430	1.7774E-3	1.4419E-1
3	0.16634	3.1825E-2	0.0

バッフル板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1813	1.5755E-3	2.4167E-3
2	0.32343	1.5282E-2	3.5565E-3
3	0.30751	2.0706E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (371 ppm)

3.24w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4537	6.1375E-4	3.0401E-2
2	0.64880	4.2825E-3	5.0286E-2
3	0.35664	2.5717E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4544	6.1360E-4	3.0372E-2
2	0.64978	4.2897E-3	4.9431E-2
3	0.36138	2.4928E-2	0.0

3.24w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4494	3.6200E-4	6.7534E-2
2	0.48551	3.1116E-3	1.0988E-1
3	0.19884	4.2673E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4502	3.6208E-4	6.7470E-2
2	0.48674	3.0838E-3	1.0798E-1
3	0.20209	4.1346E-2	0.0

陸上臨界試験用核定数 (371 ppm)

3.24w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6662	6.9032E-4	3.8211E-4
2	1.0961	3.9746E-3	7.4748E-4
3	1.2576	6.0273E-3	0.0

4.44w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6671	6.9003E-4	3.8163E-4
2	1.0960	4.0063E-3	7.3065E-4
3	1.2585	5.8393E-3	0.0

SUS連結板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1530	1.3655E-3	2.6671E-3
2	0.33656	1.4057E-2	3.1412E-3
3	0.31763	1.7382E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (464 ppm)

3.24w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4083	3.2256E-3	4.3663E-3	4.5151E-2
2	0.52342	2.6841E-2	1.3771E-2	6.6735E-2
3	0.24493	1.2947E-1	1.5558E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4206	3.0841E-3	4.5138E-3	4.7419E-2
2	0.54389	2.3809E-2	1.3943E-2	7.8165E-2
3	0.23228	1.2782E-1	1.6668E-1	0.0

3.24w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3852	3.2185E-3	4.3668E-3	4.4976E-2
2	0.52249	2.6137E-2	1.3761E-2	6.6483E-2
3	0.24753	1.2093E-1	1.5571E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3969	3.0782E-3	4.5142E-3	4.7229E-2
2	0.54353	2.3092E-2	1.3931E-2	7.8228E-2
3	0.23367	1.1895E-1	1.6598E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (464 ppm)

4.44w/o, with grid spacer, BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3872	3.3371E-3	4.6378E-3	4.4666E-2
2	0.51865	2.9918E-2	1.8393E-2	6.5159E-2
3	0.24123	1.5202E-1	1.9757E-1	0.0

4.44w/o, without grid spacer, BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4006	3.1958E-3	4.7820E-3	4.6961E-2
2	0.54385	2.6973E-2	1.8637E-2	7.6463E-2
3	0.22926	1.5127E-1	2.1062E-1	0.0

4.44w/o, with grid spacer, BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1.	1.3654	3.3259E-3	4.6412E-3	4.4384E-2
2	0.51931	2.8786E-2	1.8376E-2	6.4891E-2
3	0.24500	1.3965E-1	1.9728E-1	0.0

4.44w/o, without grid spacer, BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3784	3.1853E-3	4.7843E-3	4.6680E-2
2	0.54970	2.5809E-2	1.8611E-2	7.6575E-2
3	0.23154	1.3844E-1	2.0914E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (464 ppm)

上部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5192	4.9528E-4	5.5545E-2
2	0.48121	4.5984E-3	1.0687E-1
3	0.20007	6.0877E-2	0.0

下部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4439	5.0955E-4	5.9005E-2
2	0.45096	4.5516E-3	1.1349E-1
3	0.18863	6.6248E-2	0.0

側部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5704	3.2839E-4	6.9148E-2
2	0.48396	1.9615E-3	1.4414E-1
3	0.16642	3.4981E-2	0.0

バッフル板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1814	1.5755E-3	2.4168E-3
2	0.32345	1.5276E-2	3.5517E-3
3	0.30784	2.0591E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (464 ppm)

3.24w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4534	6.1434E-4	3.0417E-2
2	0.64856	4.3490E-3	5.0273E-2
3	0.35650	2.6717E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4542	6.1418E-4	3.0387E-2
2	0.64953	4.3554E-3	4.9419E-2
3	0.36121	2.5902E-2	0.0

3.24w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4486	3.6331E-4	6.7569E-2
2	0.48520	3.2575E-3	1.0985E-1
3	0.19873	4.4919E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4495	3.6338E-4	6.7504E-2
2	0.48643	3.2281E-3	1.0795E-1
3	0.20197	4.3531E-2	0.0

陸上臨界試験用核定数 (464 ppm)

3.24w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6663	6.9032E-4	3.8211E-4
2	1.0961	3.9754E-3	7.4662E-4
3	1.2577	6.0108E-3	0.0

4.44w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6671	6.9003E-4	3.8163E-4
2	1.0960	4.0072E-3	7.2982E-4
3	1.2586	5.8247E-3	0.0

SUS連結板領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1530	1.3655E-3	2.6671E-3
2	0.33656	1.4053E-2	3.1376E-3
3	0.31776	1.7337E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (544 ppm)

3.24w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4102	3.2272E-3	4.3664E-3	4.5208E-2
2	0.52562	2.6924E-2	1.3772E-2	6.6743E-2
3	0.24490	1.3051E-1	1.5528E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4232	3.0857E-3	4.5140E-3	4.7490E-2
2	0.54221	2.3908E-2	1.3948E-2	7.8221E-2
3	0.23232	1.2902E-1	1.6626E-1	0.0

3.24w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3874	3.2200E-3	4.3665E-3	4.5042E-2
2	0.52311	2.6220E-2	1.3763E-2	6.6512E-2
3	0.24745	1.2199E-1	1.5539E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3998	3.0797E-3	4.5138E-3	4.7312E-2
2	0.54282	2.3187E-2	1.3933E-2	7.8257E-2
3	0.23367	1.2020E-1	1.6560E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (544 ppm)

4.44w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3888	3.3384E-3	4.6375E-3	4.4720E-2
2	0.51855	2.9999E-2	1.8394E-2	6.5163E-2
3	0.24119	1.5303E-1	1.9722E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.4027	3.1972E-3	4.7817E-3	4.7028E-2
2	0.54244	2.7065E-2	1.8639E-2	7.6476E-2
3	0.22925	1.5245E-1	2.1018E-1	0.0

4.44w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3671	3.3271E-3	4.6405E-3	4.4446E-2
2	0.51914	2.8868E-2	1.8377E-2	6.4922E-2
3	0.24490	1.4069E-1	1.9692E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.3806	3.1865E-3	4.7836E-3	4.6755E-2
2	0.54664	2.5903E-2	1.8614E-2	7.6603E-2
3	0.23151	1.3966E-1	2.0871E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (544 ppm)

上部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5188	4.9617E-4	5.5559E-2
2	0.48105	4.7167E-3	1.0683E-1
3	0.20013	6.2707E-2	0.0

下部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4435	5.1051E-4	5.9020E-2
2	0.45081	4.6771E-3	1.1344E-1
3	0.18868	6.8173E-2	0.0

側部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5699	3.2954E-4	6.9167E-2
2	0.48376	2.1195E-3	1.4407E-1
3	0.16653	3.7669E-2	0.0

バッフル板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1815	1.5755E-3	2.4168E-3
2	0.32347	1.5272E-2	3.5476E-3
3	0.30813	2.0496E-1	0.0

陸上臨界試験用核定数 (544 ppm)

3.24w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4532	6.1481E-4	3.0424E-2
2	0.64841	4.4060E-3	5.0251E-2
3	0.35644	2.7570E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4540	6.1466E-4	3.0395E-2
2	0.64938	4.4117E-3	4.9398E-2
3	0.36111	2.6735E-2	0.0

3.24w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4482	3.6437E-4	6.7586E-2
2	0.48502	3.3828E-3	1.0980E-1
3	0.19868	4.6837E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.4490	3.6444E-4	6.7521E-2
2	0.48625	3.3518E-3	1.0791E-1
3	0.20189	4.5399E-2	0.0

陸上臨界試験用核定数 (544 ppm)

3.24w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6664	6.9032E-4	3.8211E-4
2	1.0961	3.9761E-3	7.4586E-4
3	1.2578	5.9967E-3	0.0

4.44w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6672	6.9003E-4	3.8164E-4
2	1.0960	4.0079E-3	7.2908E-4
3	1.2587	5.8121E-3	0.0

SUS連結板領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1531	1.3656E-3	2.6670E-3
2	0.33657	1.4050E-2	3.1343E-3
3	0.31789	1.7299E-1	0.0

付録 B HZP 試験用核定量テーブル

H2P 試験用核定数 (STEADY-SHIP)

3.24w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5788	3.1319E-3	4.1870E-3	3.5620E-2
2	0.60783	2.6302E-2	1.3615E-2	4.8664E-2
3	0.31819	1.0040E-1	1.3010E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.6172	2.9970E-3	4.3601E-3	3.7127E-2
2	0.64469	2.3345E-2	1.3830E-2	5.8212E-2
3	0.31059	9.6700E-2	1.3754E-1	0.0

3.24w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5517	3.1266E-3	4.1940E-3	3.5413E-2
2	0.60620	2.5616E-2	1.3608E-2	4.8197E-2
3	0.32174	9.3200E-2	1.3055E-1	0.0

3.24w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5877	2.9922E-3	4.3665E-3	3.6897E-2
2	0.64644	2.2634E-2	1.3815E-2	5.8176E-2
3	0.31281	8.9220E-2	1.3739E-1	0.0

HZP 試験用核定数 (STEADY-SHIP)

4.44w/o,with grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5615	3.2477E-3	4.4666E-3	3.5248E-2
2	0.60243	2.9341E-2	1.8173E-2	4.7248E-2
3	0.31223	1.2128E-1	1.6782E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.6016	3.1121E-3	4.6341E-3	3.6809E-2
2	0.64268	2.6486E-2	1.8475E-2	5.6628E-2
3	0.30518	1.1835E-1	1.7683E-1	0.0

4.44w/o,with grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5357	3.2379E-3	4.4768E-3	3.4939E-2
2	0.60319	2.8239E-2	1.8162E-2	4.6284E-2
3	0.30573	1.1490E-1	1.6848E-1	0.0

4.44w/o,without grid spacer,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5734	3.1024E-3	4.6428E-3	3.6486E-2
2	0.64959	2.5345E-2	1.8451E-2	5.6664E-2
3	0.30882	1.0727E-1	1.7633E-1	0.0

H2P 試験用核定数 (STEADY-SHIP)

上部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7947	4.2716E-4	4.2617E-2
2	0.58346	3.7048E-3	8.2194E-2
3	0.27366	3.5809E-2	0.0

下部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7096	4.3761E-4	4.5354E-2
2	0.54592	3.6064E-3	8.7364E-2
3	0.25758	3.9389E-2	0.0

側部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.9608	2.4045E-4	5.2595E-2
2	0.62942	7.9725E-4	1.1149E-1
3	0.24025	1.0871E-2	0.0

バッフル板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1346	1.5501E-3	2.3882E-3
2	0.32333	1.5288E-2	3.8865E-3
3	0.32120	1.6033E-1	0.0

HZP 試験用核定数 (STEADY-SHIP)

3.24w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5536	5.8384E-4	2.3627E-2
2	0.73908	3.9528E-3	3.7586E-2
3	0.45575	1.6124E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5547	5.8364E-4	2.3600E-2
2	0.74018	3.9675E-3	3.6741E-2
3	0.46015	1.5727E-2	0.0

3.24w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7635	2.9467E-4	5.2382E-2
2	0.60701	2.2884E-3	8.1831E-2
3	0.27093	2.4288E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7647	2.9474E-4	5.2321E-2
2	0.60882	2.2649E-3	7.9961E-2
3	0.27436	2.3683E-2	0.0

HZP 試験用核定数 (STEADY-SHIP)

3.24w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6230	6.9172E-4	3.8000E-4
2	1.1024	4.0226E-3	7.2039E-4
3	1.2632	4.8636E-3	0.0

4.44w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6239	6.9139E-4	3.7942E-4
2	1.1020	4.0632E-3	6.9893E-4
3	1.2638	4.7417E-3	0.0

SUS連結板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1332	1.3274E-3	2.6749E-3
2	0.33859	1.3780E-2	3.2423E-3
3	0.32759	1.4117E-1	0.0

HZP 試験用核定数 (BURN-SHIP)

3.24w/o,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.6136	3.0120E-3	4.3423E-3	3.6979E-2
2	0.63975	2.3706E-2	1.3808E-2	5.7148E-2
3	0.31148	9.7133E-2	1.3671E-1	0.0

3.24w/o,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5843	3.0072E-3	4.3488E-3	3.6751E-2
2	0.64057	2.2997E-2	1.3794E-2	5.7064E-2
3	0.31396	8.9660E-2	1.3663E-1	0.0

4.44w/o,BPR

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5975	3.1270E-3	4.6169E-3	3.6650E-2
2	0.63751	2.6835E-2	1.8444E-2	5.5580E-2
3	0.30602	1.1868E-1	1.7583E-1	0.0

4.44w/o,BP spacer

エネルギー群	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Σ_R
1	1.5702	3.1175E-3	4.6252E-3	3.6347E-2
2	0.64300	2.5674E-2	1.8402E-2	5.5412E-2
3	0.30974	1.0778E-1	1.7566E-1	0.0

HZP 試験用核定数 (BURN-SHIP)

上部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.8007	4.2607E-4	4.2376E-2
2	0.58573	3.7100E-3	8.1742E-2
3	0.27518	3.5630E-2	0.0

下部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7154	4.3647E-4	4.5099E-2
2	0.54802	3.6134E-3	8.6886E-2
3	0.25901	3.9201E-2	0.0

側部反射体

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.9698	2.3898E-4	5.2287E-2
2	0.63291	7.9261E-4	1.1088E-1
3	0.24181	1.0774E-2	0.0

バッフル板

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.1335	1.5496E-3	2.3872E-3
2	0.32333	1.5289E-2	3.9468E-3
3	0.32129	1.5967E-1	0.0

HZP 試験用核定数 (BURN-SHIP)

3.24w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5557	5.8362E-4	2.3500E-2
2	0.74113	3.9759E-3	3.7220E-2
3	0.45798	1.6030E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の充填材領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.5566	5.8343E-4	2.3474E-2
2	0.74225	3.9914E-3	3.6764E-2
3	0.46232	1.5641E-2	0.0

3.24w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7707	2.9355E-4	5.2098E-2
2	0.61031	2.2834E-3	8.1810E-2
3	0.27267	2.4131E-2	0.0

4.44w/o燃料集合体の(側板+水)領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.7724	2.9377E-4	5.2033E-2
2	0.61209	2.2602E-3	7.9168E-2
3	0.27601	2.3548E-2	0.0

H2P 試験用核定数 (BURN-SHIP)

3.24w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6220	6.9290E-4	3.8006E-4
2	1.1012	4.0939E-3	7.1760E-4
3	1.2633	4.8422E-3	0.0

4.44w/o燃料集合体の制御棒フォロワー領域

エネルギー群	D	Σ_a	Σ_R
1	1.6234	6.9256E-4	3.7953E-4
2	1.1007	4.1359E-3	6.9625E-4
3	1.2639	4.7244E-3	0.0