

JAERI-Tech
2003-081



JP0350710



HTTR 出力密度分布評価における拡散計算モデルの検討

2003 年 10 月

高松 邦吉・島川 聡司・野尻 直喜・藤本 望

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR 出力密度分布評価における拡散計算モデルの検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
高松 邦吉・島川 聡司・野尻 直喜・藤本 望

(2003年9月2日受理)

HTTR 炉心において、燃料最高温度の評価を精度良く行うためには、HTTR 炉心出力密度分布の解析精度が重要となる。これにより炉心管理コードとして用いられる拡散燃焼計算モデルの改良を図ることができる。

拡散計算による HTTR 炉心の出力密度分布解析について、可燃性反応度調整材(BP)を燃料体内に均質に分布させたモデル(BP混合モデル)とBP領域を分離したモデル(BP分離モデル)の解析結果を、グロス γ 線による出力密度分布測定結果及び連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP の計算値と定量的に比較した。その結果、BP 混合モデルでは、炉心の軸方向出力密度分布に対する予測精度が不十分であること、BP 分離モデルを用いることにより、予測精度が大幅に改善されることがわかった。

Evaluation for the Models of Neutron Diffusion Theory
in Terms of Power Density Distributions of the HTTR

Kuniyoshi TAKAMATSU, Satoshi SHIMAKAWA, Naoki NOJIRI and Nozomu FUJIMOTO

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 2, 2003)

In the case of evaluations for the highest temperature of the fuels in the HTTR, it is very important to expect the power density distributions accurately; therefore, it is necessary to improve the analytical model with the neutron diffusion and the burn-up theory.

The power density distributions are analyzed in terms of two models, the one mixing the fuels and the burnable poisons homogeneously and the other modeling them heterogeneously. Moreover these analytical power density distributions are compared with the ones derived from the gross gamma-ray measurements and the Monte Carlo calculational code with continuous energy. As a result the homogeneous mixed model isn't enough to expect the power density distributions of the core in the axial direction; on the other hand, the heterogeneous model improves the accuracy.

Keywords : HTTR, HTGR, Neutron Diffusion Theory, Effective Multiplication Factor,
Power Density Distribution, CITATION-1000VP, DELIGHT-7, TWOTRAN-II,
Monte Carlo Method

目 次

| | |
|---|----|
| 1. 序 論..... | 1 |
| 2. 出力密度分布解析手法..... | 2 |
| 2.1 核計算フロー..... | 2 |
| 2.2 群定数の作成..... | 2 |
| 2.3 炉心計算..... | 3 |
| 3. グロス γ 線測定データとの比較方法..... | 4 |
| 3.1 測定手法..... | 4 |
| 3.2 出力密度分布からグロス γ 線分布への変換方法..... | 4 |
| 4. 計算結果及び測定データとの比較..... | 6 |
| 4.1 燃料体からのグロス γ 線相対出力強度..... | 6 |
| 4.2 BP 混合モデルと BP 分離モデルの半径方向出力ピーキング係数..... | 6 |
| 4.3 拡散計算と MVP コード計算値の軸方向出力密度分布の比較..... | 6 |
| 5. 考 察..... | 7 |
| 5.1 BP 格子計算における燃料-黒鉛領域モデルの影響..... | 7 |
| 5.2 炉心計算における BP 領域の取扱いによる影響..... | 7 |
| 6. 結 論..... | 9 |
| 謝 辞..... | 9 |
| 参考文献..... | 10 |
| 付 録..... | 46 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Analytical Methods for Power Density Distributions..... | 2 |
| 2.1 Neutronic Calculation Flow | 2 |
| 2.2 Group Constant Set Processing | 2 |
| 2.3 Reactor Calculation | 3 |
| 3 Gross Gamma-ray Measurement Data | 4 |
| 3.1 Methods of Measurement..... | 4 |
| 3.2 Conversion Method from Neutronic Calculation to Gross Gamma-ray | 4 |
| 4. Comparison between Calculation Results and Measurement..... | 6 |
| 4.1 Relative Gross Gamma-ray Distributions from Fuel Assemblies..... | 6 |
| 4.2 Radial Peaking Coefficients of Power Density Distributions on Homogeneous Mixed Model or Heterogeneous Model | 6 |
| 4.3 Comparison of Calculation Results Derived from Neutron Diffusion Theory and Monte Carlo Method..... | 6 |
| 5. Consideration..... | 7 |
| 5.1 Effect of the Fuel-graphite Region Model in BP Cell Calculation | 7 |
| 5.2 Effect of BP Region Model in Reactor Calculation..... | 7 |
| 6. Conclusion | 9 |
| Acknowledgement | 9 |
| References | 10 |
| Appendix | 46 |

1. 序 論

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR、原子炉熱出力 30MW)は我が国初の高温ガス炉であり、原子炉出口冷却材温度 850℃(定格運転)、950℃(高温試験運転)を可能とするよう設計し、建設された。2001年12月7日に単独運転で定格出力 30MW 及び原子炉出口冷却材温度約 850℃を達成した。その後、HTTR は運転モードを切り替え、並列運転で定格出力 30MW を達成し、2002年3月6日に全ての試験検査を終え、定格運転の使用前検査合格証を取得した¹⁾。

図 1-1 に HTTR 炉心部の垂直断面図を示す。表 1-1 に示すように、運転時に炉内温度は 1000℃以上の高温となる。また、燃料体が積層構造となっているため、炉心部に計測機器を設置することができない。そのため燃料体の温度、炉内中性子束等を直接測定することは困難であり、燃料体からのグロス γ 線測定による出力密度分布評価は必要である²⁾。

出力密度分布評価に関連する HTTR 燃料体の特徴として、

- 1) 被覆燃料粒子と燃料棒による 2 重の非均質効果
- 2) 燃料温度低下のために最適なウラン濃縮度配分
- 3) 可燃性反応度調整材(BP)の使用及び局所的な配置が挙げられる。

1)に関しては、使用する燃料格子計算コード(DELIGHT-7)が被覆燃料粒子と燃料棒の 2 重の非均質性を扱えるよう、VHTRC 実験等で得られたデータに基づいて改良されている。

2)に関しては、HTTR では燃料温度の低減のため、表 1-2 に示すように軸方向及び径方向に 12 種類のウラン濃縮度の燃料の配分を行い出力密度分布の最適化を図っている。

3)に関しては、図 1-2 に示すように平面が六角形の燃料体の角に 2 本の BP 棒が挿入されており、BP 格子計算を行う際に無限配列を仮定できる格子を取り難い。

本報告では、拡散計算による HTTR 炉心の出力密度分布解析について、可燃性反応度調整材(BP)を燃料体内に均質に分布させたモデル(BP 混合モデル)と BP 領域を分離したモデル(BP 分離モデル)の解析精度を比較評価した。

これまでに、HTTR の設計や臨界試験に用いた BP 混合モデルは過剰反応度を過大に評価することが明らかになっている³⁾。この原因の検討として、BP 分離モデルの作成、XY 平面でのメッシュ分割数の増加及び燃料と BP の格子計算モデルの見直しが行われたが、それらの妥当性を評価するための測定データは低温状態(約 300K)における過剰反応度の測定値(燃料追加法)しかなく、総合的な検証は困難であった。そこで、30MW 出力到達後に実施したグロス γ 線による出力密度分布測定結果及び連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP の計算値を比較対象とした。これにより、拡散計算モデルの解析精度に関する定量的な検討を行うことができた。

2. 出力密度分布解析手法

2.1 核計算フロー

解析に用いた計算コードの流れを図 2-1 に示す。中性子スペクトル計算と縮約群定数の作成には、高温ガス炉用燃料格子計算のために開発された DELIGHT-7 を使用する。制御棒の遮蔽効果の計算及び縮約群定数の作成には、2次元 S_N 計算を行う TWOTRAN-II を使用する。これらの計算コードによって得られた炉心計算用縮約群定数セットを使用し、多次元拡散燃焼計算コード CITATION をベクトル化して計算速度を高めた CITATION-1000VP を用いて炉心特性解析を行う。

2.2 群定数の作成

(1) DELIGHT-7 コード

炉心の 3次元拡散計算に必要な群定数を作成するため、HTTR の燃料ブロックの格子計算に DELIGHT-7 コード⁴⁾を用いた。図 2-2 に DELIGHT-7 コードによる燃料格子計算モデル及び BP 格子計算モデルを示す。本コードは、共鳴吸収計算、中性子スペクトル計算、燃料格子計算、可燃性反応度調整材格子計算、エネルギー群縮約計算、燃焼計算等を行うためのルーチン群で構成されている。なお、同コードは被覆燃料粒子を用いることによって生じる高温ガス炉燃料特有の二重非均質性の効果を考慮している。

今回の計算条件を以下に示す。

- 1) 格子計算は、衝突確率法を用いた 1次元モデル円筒モデルで行った。燃料格子計算及び BP 格子計算を 111 群(速中性子領域 61 群、熱中性子領域 50 群)で行った後、6 群に縮約し、炉心計算で用いる小数群定数を作成した。
- 2) 核データ・ライブラリには ENDF/B-IV をベースにした断面積セットを用いた。黒鉛の熱中性子散乱断面積計算には THRUSH コード⁵⁾を用いた。散乱過程は非干渉散乱近似、黒鉛の格子振動は吉森-北野モデル、振動数分布は Young-Koppel 等方振動数分布モデル⁶⁾を採り入れたものである。黒鉛の散乱カーネルは 300K~1800K の温度範囲において 20K 毎のデータを使用した。
- 3) 速中性子領域(10MeV~2.38eV)の 61 群スペクトル及び熱中性子領域(1×10^{-5} eV~2.38eV)の 50 群スペクトルはそれぞれ P_1 近似で計算した。
- 4) 共鳴吸収反応には IR 近似を用い、燃料格子の二重非均質性(被覆燃料粒子と燃料棒)を考慮した。BP の吸収反応は衝突確率法を用いた。

(2) TWOTRAN-II コード

HTTR の燃料体は図 2-3 に示すように 2本の反応度調整材(BP 棒)が非対称な位置に局所的に装荷されており、BP 棒は BP ペレットと黒鉛ディスクを組み合わせ、炉心の軸方向に周期的に配列されている。

後述する BP 混合モデルでは BP 格子計算を DELIGHT-7 コードで行ったが、1次元円筒セルモデルでは軸方向の BP 棒の形状を模擬できない。よって図 2-4 に示すように、BP 分離モデルで

は中性子輸送計算コードである TWOTRAN-II コードを用いて 2次元 r-z モデルにより BP 格子モデルを作成し、BP 中の ^{10}B の実効断面積を求め小数群定数を作成した。BP 格子モデルは半分の長さの BP 棒の周りに黒鉛及び均質化燃料を巻き付けた 1/2 ブロック体系とした。

制御棒格子計算については図 2-5 に示すように BP 混合、BP 分離モデルとも TWOTRAN-II コードを用い、S₄P₁ の条件で行った。制御棒が制御棒案内ブロック内に挿入されている状態の制御棒格子モデル内の中性子束分布を求め、この中性子束分布を重みとして制御棒挿入状態の黒鉛ブロック内の小数群定数を作成した。

2.3 炉心計算

(1) CITATION-1000VP

拡散計算には、燃料格子計算、BP 格子計算及び制御棒格子計算より得られた燃料体、反射体並びに制御棒の群定数及び炉心形状データを用いた。その際、燃料体に挿入された BP 棒の取り扱いで区別した BP 混合モデル、BP 分離モデルを作成した。

BP 混合モデルは図 2-6 に示すように 1つの燃料体を平面で 6 メッシュに分割し、軸方向は 4 分割している。ここで、燃料体内の物質は全て均質に分布させている。一方、BP 分離モデルは図 2-7 に示すように 1つの燃料体を平面で 24 メッシュに分割し、軸方向は 4 分割している。ここで図 1-2 に示すように、BP 棒 1本に平面で 2 メッシュを割り当てることにより、燃料体内での BP 位置をモデル化できるようにしている。また燃料体を燃料部と BP 部に分け、 ^{10}B と ^{11}B は BP 部の 4 メッシュ(2 本分)にのみ存在する。燃料のウラン等は燃料部のみに存在し、黒鉛は燃料部及び BP 部に均質に存在している。

BP 混合モデルは BP 棒を軸方向に均一としたため、BP の断面積セットは DELIGHT-7 コードの 1次元円筒セルモデルで近似した。しかし BP 分離モデルでは反応度調整のため BP 棒の軸方向配置をモデル化するため、TWOTRAN-II コードを用いて 2次元 r-z モデルにより BP 中の ^{10}B の実効断面積を作成した。

HTTR の炉心には、制御棒挿入孔、後備停止系の炭化ホウ素ペレット挿入孔、上部及び下部可動反射体の冷却孔がある。BP 混合モデルに於いて孔のあるブロックは均質化して取り扱った。

(2) MVP

計算機の発達により実用的になった連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP の計算値を拡散計算との比較に用いた。これにより拡散計算の体系近似及び中性子エネルギー分割効果を吟味することができる。断面積は JENDL-3.2、熱中性子散乱断面積は ENDF/B-III の S(α , β)データを使用した。モデル化した領域は、拡散計算モデルと同様に垂直方向は上部可動反射体上端から下部可動反射体下端まで、径方向は固定反射体までの全炉心体系である。燃料体は冷却孔、燃料スリーブ、燃料コンパクトまで出来る限り詳細にモデル化している。また、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロックなどについてはストリーミング効果の大きい制御棒挿入孔、冷却孔などを詳細にモデル化している。

3. グロスγ線測定データとの比較方法

3.1 測定手法

HTTR では、炉心内の出力密度分布を平坦化し燃料温度の低減を図ることを目的として、軸方向及び径方向にウラン濃縮度配分を行っている。図 3-1 に示すように、出力密度分布測定は炉心のウラン濃縮度配分の対称性を考慮して 4 カラムについて行い、1 カラムに 5 体の燃料体が含まれるため、合計で 20 体の燃料体について行った。

図 3-2 に燃料交換機の運転の概要、図 3-3 に出力密度分布測定概念図を示す。燃料交換機による燃料体の取出中は全ての燃料体が床上ドアバルブを通過するため、ここにグロスγ線検出器を設け、燃料体相互のグロスγ線強度比を評価した。また、この方法に拠れば炉心内の軸方向について情報を得ることができた。

測定したカラムの燃料体 20 体は、それぞれバックグラウンド測定、燃料体取り出し時の測定の 2 種類の測定を行った。バックグラウンド測定は既に燃料交換機が取り込んでいる燃料体及び炉内に残っている燃料体からのグロスγ線の影響を確認するために用いた。

GM 管は 1 秒間隔で計測を行っており、燃料体は 0.09m/min(1.5mm/sec)の速度で上昇するので燃料体 1 体(燃料体長さ 580mm)当たり約 400 点のデータが取得される。燃料体と GM 管が正対している時のデータを燃料体から放出されるグロスγ線とした。また、不感時間及び測定誤差の処理を行った。不感時間による数え落としの補正の方法は以下の式である。

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

ここで、 n :真の計数率(counts/sec)

m :測定された計数率(counts/sec)

τ :不感時間(sec)

測定誤差は 1 秒間隔に測定された計測数が正規分布に従うものとして、標準偏差の 2σ を測定誤差とした。

本測定作業は、燃料交換機の移動等の準備作業も含め平成 14 年 10 月 10 日から平成 14 年 12 月 5 日まで約 2 ヶ月かけた。そのうち測定は出力上昇試験(1)~(4)、第 1 サイクル、安全性実証試験の後、冷却期間 110 日目と 130 日目に当たる 10 月 20 日(カラム D02),21 日(カラム D01)及び 11 月 8 日(カラム B01),9 日(カラム C02)日の 4 日間行った。

3.2 出力密度分布からグロスγ線分布への変換方法

測定からグロスγ線分布、計算から出力密度分布が得られる。よって図 3-4 に示すように、計算では測定と同じように燃料体のグロスγ線分布を求めるため、各燃料体の出力密度分布及び照射時間、冷却時間から同位体生成・消滅計算コード ORIGEN-2 を用いて 20 体の燃料体別に放出グロスγ強度を算出した。実際の原子炉の運転で経験する様々な熱出力パターンを模擬するため、出力密度分布は 9,15,20,24,30MW の 5 パターンに近似し、実際の出力上昇試験(1)~(4)、第 1 サイクル、安全性実証試験(1)における運転履歴から、出力の上昇及び下降過程を含め燃焼度を保持するようにステップ状の運転パターンを設定した。

計算の条件としては、それぞれ 10 日燃焼して Xe が飽和した状態の原子数密度を計算値に用いた。また、臨界制御棒位置は測定で得られたものを使用し、制御棒による出力密度分布への影響を考慮した。

グロス γ 線強度と出力密度分布の関係について ORIGEN2 による予備解析を行った⁵⁾。一般に、燃焼度の指標として用いられる比較的半減期の長い ^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ からの放出 γ 線と積算出力は比例関係が成立する。 ^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 放出 γ 線のみ測定すれば、その γ 線分布は積算出力分布を示すことがわかる。一方、グロス γ 線強度については積算出力との比例関係が成立しないため、グロス γ 線測定値より積算出力分布[GWD]や燃焼度[GWD/t]の絶対値を得ることは困難である。ただし、積算出力比(ある同じ時期に受けた異なる出力密度の比)とグロス γ 線強度比に直線関係が成立すれば出力密度分布の相対値を取得することができる。今回の計算では積算出力比とグロス γ 線強度比は、ほぼ直線関係が成立することがわかった。従って、グロス γ 線測定法により出力密度分布の相対値を得ることが可能である。

γ 線の発生源は、FP 核種以外に放射化生成物とアクチナイド核種がある。放射化生成物については、金属材料を含む軽水炉燃料集合体と異なり、高温ガス炉燃料体は放射化し難い高純度黒鉛が用いられていることから、燃料以外の部分での放射化による γ 線強度の寄与は小さい。また、測定した燃料体の燃焼度が約 4000MWd/t と低いので、アクチナイド核種による γ 強度の寄与も小さい。ORIGEN2 による予備計算結果では、グロス γ 線に対する放射化生成物やアクチナイド核種からの寄与は、全体の 0.01%以下であり、測定される γ 線の殆どは被覆燃料粒子中の FP 核種から発生したものである。

HTTR で実施した出力上昇試験における熱出力の履歴がグロス γ 線強度に与える影響を明らかにするため、各出力上昇試験を冷却に置き換えた計算の結果を図 3-5～図 3-12 に示す。図中の実線は今までの熱出力の履歴を全て含んだ結果であり、図中の点線は各出力上昇試験を冷却に置き換えた結果である。出力上昇試験 1～3 までは実線と点線は一致するが、出力上昇試験 4 以降の運転は測定時のグロス γ 線強度に与える寄与が大きいことがわかる。以上の結果より、熱出力 20～30MW の運転がグロス γ 線に最も寄与していることが明らかになった。

また、グロス γ 線強度に対する熱出力 30MW の影響を明らかにするため、出力上昇試験中の 30MW 期間を冷却に置き換えた計算の結果を図 3-13 に示す。グロス γ 線強度に対する 30MW の運転の寄与が約 80%と大きいことがわかった。

野尻ら⁷⁾により、今回のグロス γ 線測定結果は熱出力 22MW 時の出力密度分布とほぼ同等と見なして良いことが明らかになっている。

4. 計算結果及び測定データとの比較

4.1 燃料体からのグロス γ 線相対出力強度

B01 燃料体からのグロス γ 線を積算し、その平均値との比を軸方向の相対出力強度として示した。また BP 混合モデル、BP 分離モデル、MVP コード計算値との比較を図 4-1 に示す。測定値と BP 分離モデル、MVP コード計算値はほぼ一致しており、拡散計算でも出力密度分布を精度良く評価していることがわかる。しかし、BP 混合モデルは燃料 1,2 段目(0~1160mm)で出力密度を過大評価し、燃料 3,4,5 段目(1160~2900mm)では出力密度を最大 20%過小評価することが示されており、BP 領域を均質化することの問題点が把握できた。

4.2 BP 混合モデルと BP 分離モデルの半径方向出力ピーキング係数

熱計算等で熱水路係数として使用される半径方向出力ピーキング係数(P1)は炉内平均出力密度に対する着目するカラム平均出力密度の比である。BP 混合モデルと BP 分離モデルの燃焼 0 日、136 日の P1 比較を図 4-2 に示す。両モデルとも C02 のピーキングが大きく、BP 混合モデルは BP 分離モデルよりピーキングが大きい。BP 混合モデルの燃焼 136 日の P1 が、BP 分離モデルの燃焼 0 日の P1 と一致し、燃焼が進むにつれ B01,C02 の P1 は大きくなり、D01,02,03 の P1 は小さくなる。

4.3 拡散計算と MVP コード計算値の軸方向出力密度分布の比較

熱出力 9,15,20,25,30MW 及び制御棒全引抜き状態の拡散計算、MVP コード計算値の軸方向出力密度分布を図 4-3~図 4-8 に示す。熱出力 9MW では燃料上部から 580mm の位置まで制御棒が挿入されており、熱出力が増すほど制御棒効果が薄れ、BP 混合モデルは燃料 1,2 段目(0~1160mm)で出力密度を過大に、燃料 3,4,5 段目(1160~2900mm)で出力密度を過小に表す。一方、BP 分離モデルと MVP コード計算値の出力密度分布は一致する。

5. 考 察

5.1 BP 格子計算における燃料-黒鉛領域モデルの影響

BP 格子計算において、BP 混合モデルでは DELIGHT-7 コードを用いて燃料体単位で扱い、燃料棒と BP を均質化した群定数として求めている。一方、BP 分離モデルでは TWOTRAN-II コードを用いて BP 棒単位で扱い、孤立した BP 部の群定数として求めている。

計算では BP 部の中性子の自己遮蔽因子(SFX)を用いて、実効マイクロ断面積を求めている。BP 分離の効果を見るため、式(1)で定義した SFX を TWOTRAN-II コード及び DELIGHT-7 コードで比較し、表 5-1 に示す。

$$\text{SFX} = \frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_a} = \frac{\frac{\int_{\text{BP}} \phi dv}{V_{\text{BP}}}}{\frac{\int_{\text{Cell}} \phi dv}{V_{\text{Cell}}}} \quad (1)$$

σ_a : 無限希釈のマイクロ吸収断面積、 σ_{eff} : 実効マイクロ吸収断面積、 ϕ : 中性子束

BP : BP 部、Cell : 燃料体(BP 部+燃料部)

ウラン濃縮度 3.4% の SFX の値は、TWOTRAN-II コードでは 0.41、DELIGHT-7 コードでは 0.37 となり、その比は 1.13 である。一方、ウラン濃縮度 9.9% の SFX の値は、それぞれ 0.47、0.36 となり、その比は 1.30 である。つまりウラン濃縮度が高い燃料体ほど SFX の値に差が生じ、BP 混合モデルと BP 分離モデルの BP 部の吸収反応率の違いが大きくなる。

図 5-1 に TWOTRAN-II コードで作成した BP 分離モデルの第 6 群中性子束をウラン濃縮度が高い場合(9.9%)とウラン濃縮度が低い場合(3.4%)について示す。BP 周りの黒鉛部で第 6 群中性子束はウラン濃縮度が低い場合に比べ、ウラン濃縮度が高い場合は盛り上がっている。その理由は、ウラン濃縮度 3.4% ではウラン 235 による中性子の吸収量が少なく、燃料部の黒鉛の量が減速に対して十分に存在し、BP 部周りの黒鉛部による中性子の減速が第 6 群中性子束に与える影響は少ないためである。逆に、ウラン濃縮度 9.9% では燃料部のウラン 235 による中性子の吸収量が大きいいため、BP 部周りの黒鉛部の第 6 群中性子束は相対的に大きくなる。

図 5-2 に示す DELIGHT-7 コードで作成した BP 混合モデルの場合、BP が直接燃料に取り巻かれ黒鉛部を設けていないため、TWOTRAN-II による結果とは異なり、第 6 群中性子束は BP 部周りの盛り上がり効果を与えない。また、濃縮度の違いによる中性子束の差も見られない。

以上の結果より、BP 格子計算において BP 周りの黒鉛部をモデル化しないと、ウラン濃縮度の変化による BP 部の SFX の変化が正確に評価できず、結果として BP 部の反応度効果に対する解析誤差が生ずることが明らかになった。

5.2 炉心計算における BP 領域の取扱いによる影響

BP 分離モデルにおける $\phi_{\text{BP}}(6 \text{ 群})/\phi_{\text{Fuel}}(6 \text{ 群})$ の変化を図 5-3 に示す。熱出力 9MW では、制御棒を燃料 1 段目下部と燃料 2 段目上部の境まで挿入した状態で、熱出力 30MW では制御棒を全

引き抜き状態で計算した。炉心下部から上部に向かってウラン濃縮度が徐々に高くなるにつれ、BP 部の中性子束は燃料部の中性子束より高くなる。これは図 5-1 に示す TWOTRAN-II による格子計算において、BP 部(BP+黒鉛)の中性子束が燃料部の中性子束より高い傾向と同じである。また、熱出力が低い場合、BP 分離の効果が燃料 1 段目までの制御棒挿入により打ち消されている。

一方、BP 混合モデルにおける $\phi_{BP}(6 \text{ 群})/\phi_{Fuel}(6 \text{ 群})$ の値は、元々定義できないためウラン濃縮度や炉内温度に関係なく 1.0 となる。

図 4-3~4-5 から、熱出力 20MW までの出力密度分布に対する BP 分離の効果が燃料 2 段目までの制御棒の挿入により打ち消されている。しかしながら、図 4-6 及び 4-7 に見られるように熱出力 25,30MW になると出力密度分布に対する BP 分離効果が大きく現れる。

また、図 4-1 に示すように、BP 混合モデルに比べ、BP 分離モデルは測定値及び MVP コード計算値と近い出力密度分布となった。

以上の結果から、BP 領域モデルの影響は、制御棒が引抜かれた体系ほど大きく、制御棒が挿入されるほど、構造材である B₄C の影響で BP の歪み評価誤差が小さくなると解釈できる。また、BP 分離モデルが BP 混合モデルに比べて、予測精度が良好であることが明らかになった。

6. 結 論

拡散計算による出力密度分布評価における BP 領域の取扱いに関して、燃料体内に BP を均質に分布させたモデル(BP 混合モデル)と、燃料と BP を分離したモデル(BP 分離モデル)について比較評価した。その際、グロス γ 線測定値及び MVP コード計算値を参考とした。

それらの結果、

- 1) BP 分離モデルによる出力密度分布は、測定値や MVP コード計算値と 5%以内で良く一致する傾向が見られた。
- 2) BP 混合モデルでは、出力密度分布の予測精度は不十分であり、最大 20%程度の解析誤差を生ずる可能性がある。
- 3) 制御棒挿入体系よりも制御棒引抜体系の方が、BP 領域モデル化の影響がより顕著となる。

以上より、拡散計算でも BP 分離モデルを用いることにより、出力密度分布を精度良く評価できることがわかった。計算機が高速化していることから、今後の炉心管理においては、BP 分離モデルをベースとして、実機燃料をより直接的にモデル化した軸方向メッシュを採用する予定である。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり多大な助言を頂いた、藤川正剛高温工学試験研究炉開発部部長、林秀行高温工学試験研究炉開発部次長、中澤利雄高温工学試験研究炉開発部次長及び HTTR 試験室長、伊与久達夫 HTTR 技術開発室長に深く感謝いたします。

また、本報告中で用いた出力密度分布測定を行うにあたり、燃料の取り扱い、燃料交換機及び制御棒交換機の運転にご協力頂いた HTTR 試験室の皆様、富士電気(株)の関係各位、測定作業等にご協力頂いた HTTR 技術開発室の皆様、作業に関する放射線管理を行って頂いた放射線管理課 HTTR 系の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) (編)高温工学試験研究炉開発部、“HTTR(高温工学試験研究炉)の試験運転と技術開発”、JAERI-Review 2003-013(2003)
- 2) 藤本 望、他、“HTTR 出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数-中間報告-”、JAERI-Tech 2000-091(2000)
- 3) 藤本 望、他、“高温工学試験研究炉炉心解析モデルの改良-過剰反応度に関する検討-”、JAERI-Research 99-059(1999)
- 4) 新藤 隆一、他、“高温ガス冷却炉・格子燃焼特性解析コード-DELIGHT-7-”、JAERI-M 90-048(1990)
- 5) 角谷 浩享 “熱中性子散乱核計算コード-THRUSH (コードマニュアル)”、JAERI-memo 4211
- 6) James A. Young and Juan U. Koppel “Photon Spectrum of Graphite”、J. Chem. Phys. 42-357(1965)
- 7) 野尻 直喜、他 “燃料体からのグロスガンマ線計測による HTTR 炉心の出力分布評価”、JAERI-Data/Code 投稿中

表 1-1 定格運転、100%出力(30MW)時の解析用炉内温度分布

| | 燃料体 | 制御棒案内 ブロック | 可動反射体 | 固定反射体 |
|------|---------------------|---------------|-------|-------|
| 上部 | 680 | | 680 | 680 |
| 1 段目 | T _f 1050 | 840 | | |
| | T _m 900 | | | |
| 2 段目 | T _f 1230 | 1020 | 740 | 740 |
| | T _m 1060 | | | |
| 3 段目 | T _f 1300 | 1160 | | |
| | T _m 1180 | | | |
| 4 段目 | T _f 1320 | 1260 | | |
| 5 段目 | T _m 1280 | | | |
| 下部 | 1260 | | 740 | 740 |

(単位：K)

T_f：燃料温度T_m：減速材温度

表 1-2 燃料濃縮度と BP 濃度の配分

| 上からの段 数 | 燃料領域番号 | | | | BP 濃度* |
|------------|--------|-----|-----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 6.7 | 7.9 | 9.4 | 9.9 | 2.0 |
| 2 | 5.2 | 6.3 | 7.2 | 7.9 | 2.5 |
| 3 | 4.3 | 5.2 | 5.9 | 6.3 | 2.5 |
| 4 | 3.4 | 3.9 | 4.3 | 4.8 | 2.0 |
| 5 | 3.4 | 3.9 | 4.3 | 4.8 | 2.0 |

(単位：wt%)

*BP：可燃性反応度調整材

表 5-1 中性子の自己遮蔽因子に対するセル計算モデルの効果

| ウラン濃縮度 | TWOTRAN-II (BP 分離) | DELIGHT-7 (BP 未分離) | TWOTRAN-II と DELIGHT-7 の比 |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 3.4% | 0.414 | 0.365 | 1.13 |
| 9.9% | 0.470 | 0.362 | 1.30 |

(熱出力 30MW)

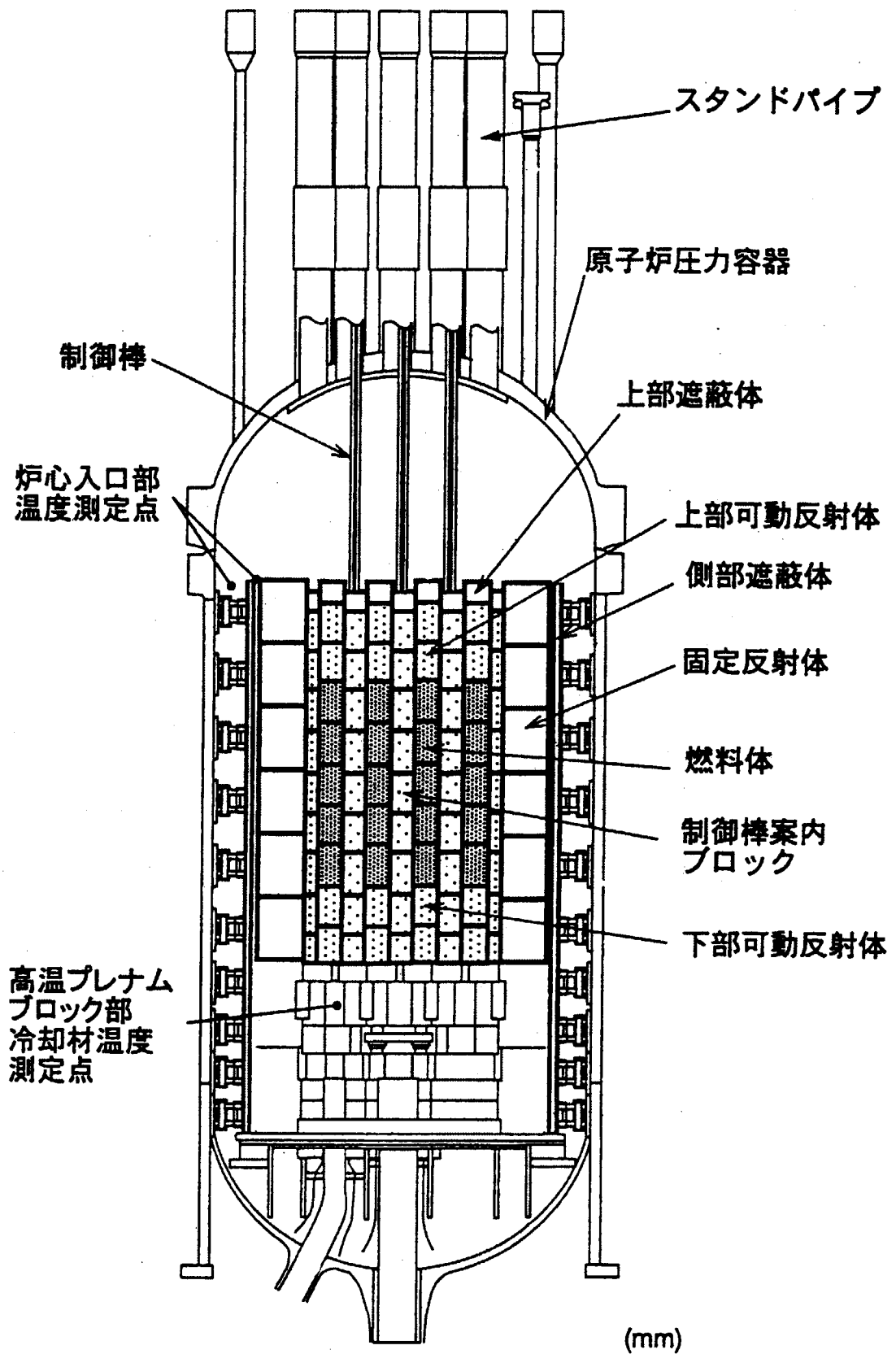
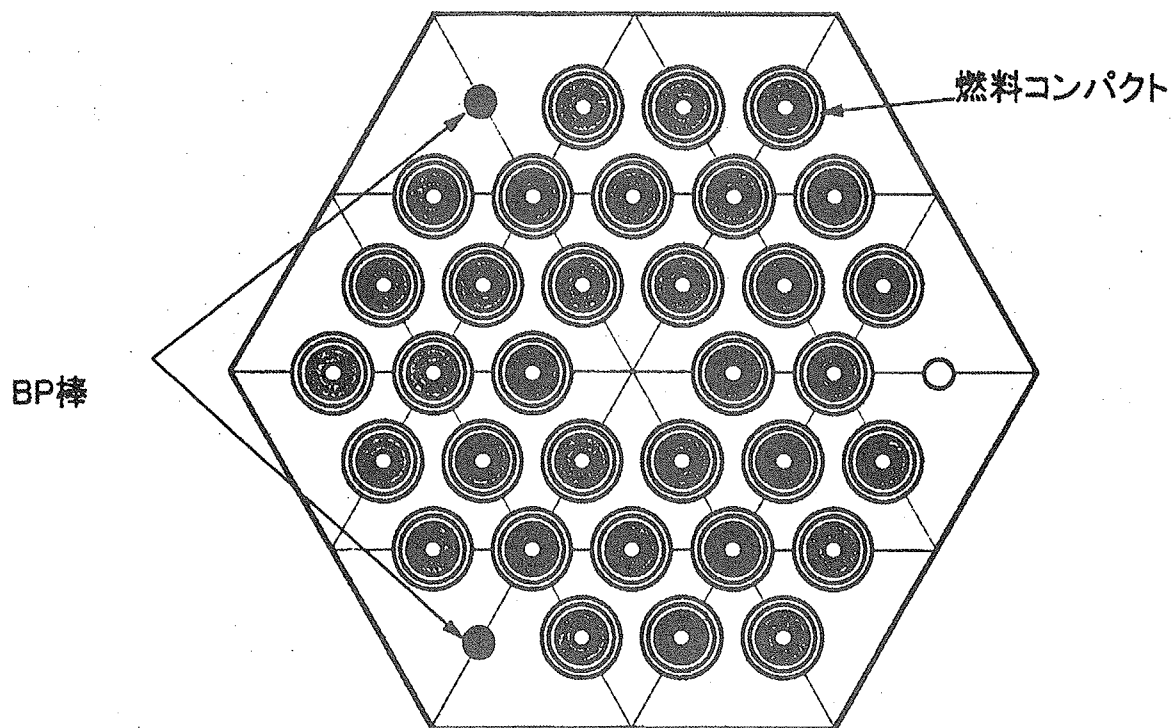
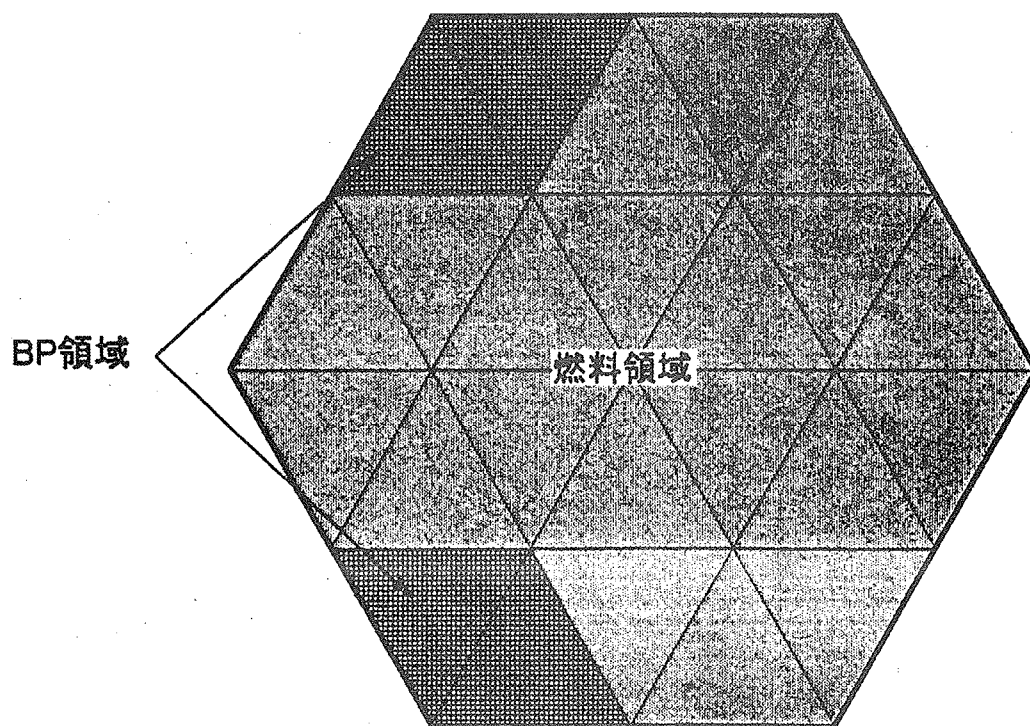


図 1-1 HTTR 炉心部の垂直断面図



33ピン燃料ブロック



CITATIONでのメッシュ分割と領域配置

図 1-2 BP分離モデルによる燃料ブロックの領域配置図

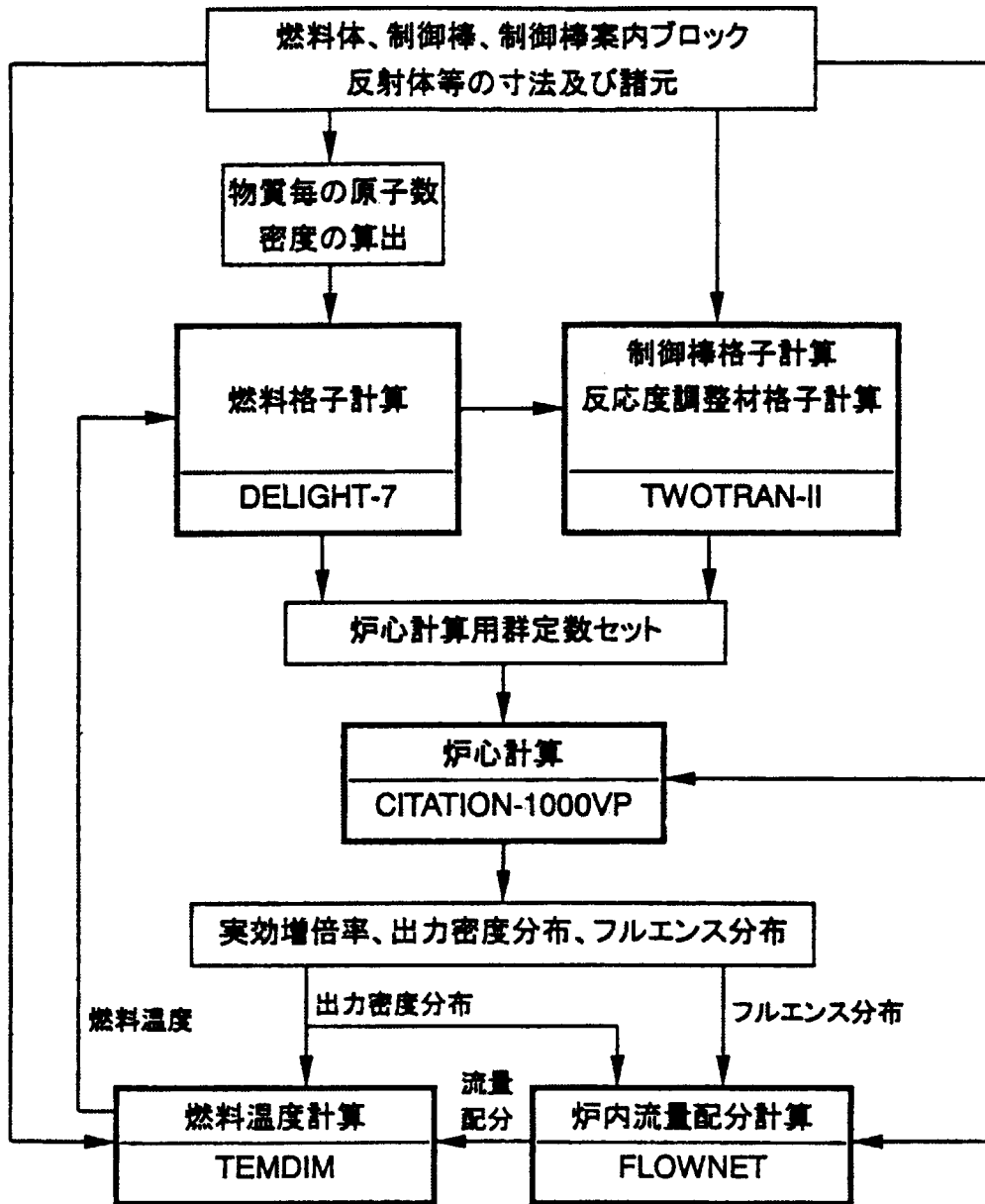
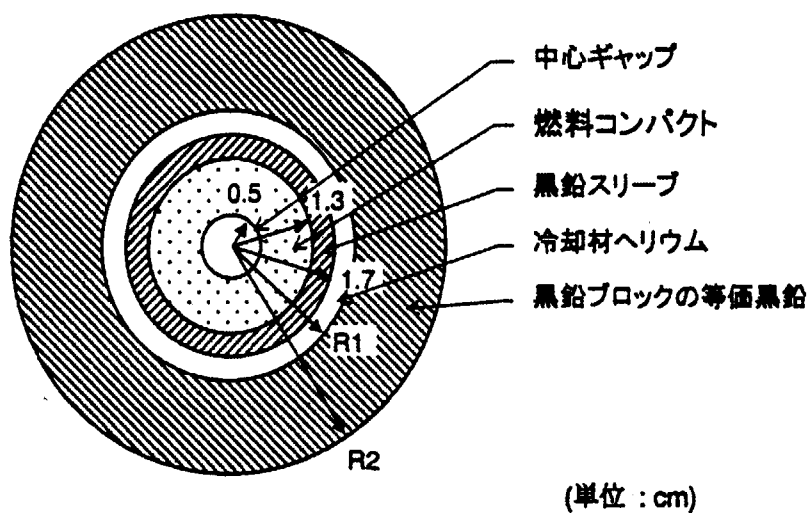


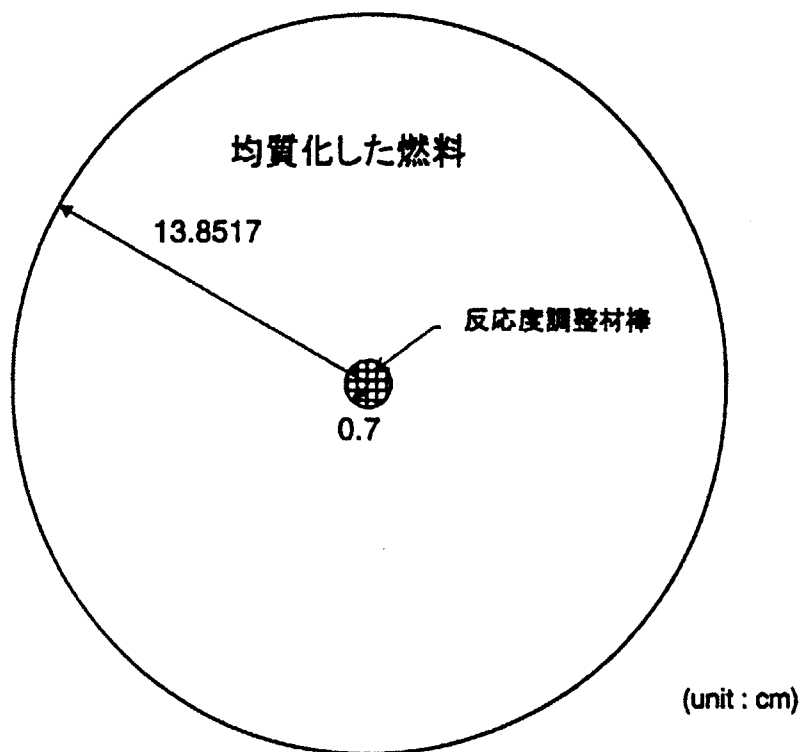
図 2-1 解析に用いたコードの流れ図



33ピンブロック: $R1=2.0941\text{cm}$ 、 $R2=3.4100\text{cm}$

31ピンブロック: $R1=2.0970\text{cm}$ 、 $R2=3.5183\text{cm}$

DELIGHTコードでの燃料格子計算モデル



DELIGHTコードでのBPセルモデル

図 2-2 DELIGHT-7コードによる格子計算モデル

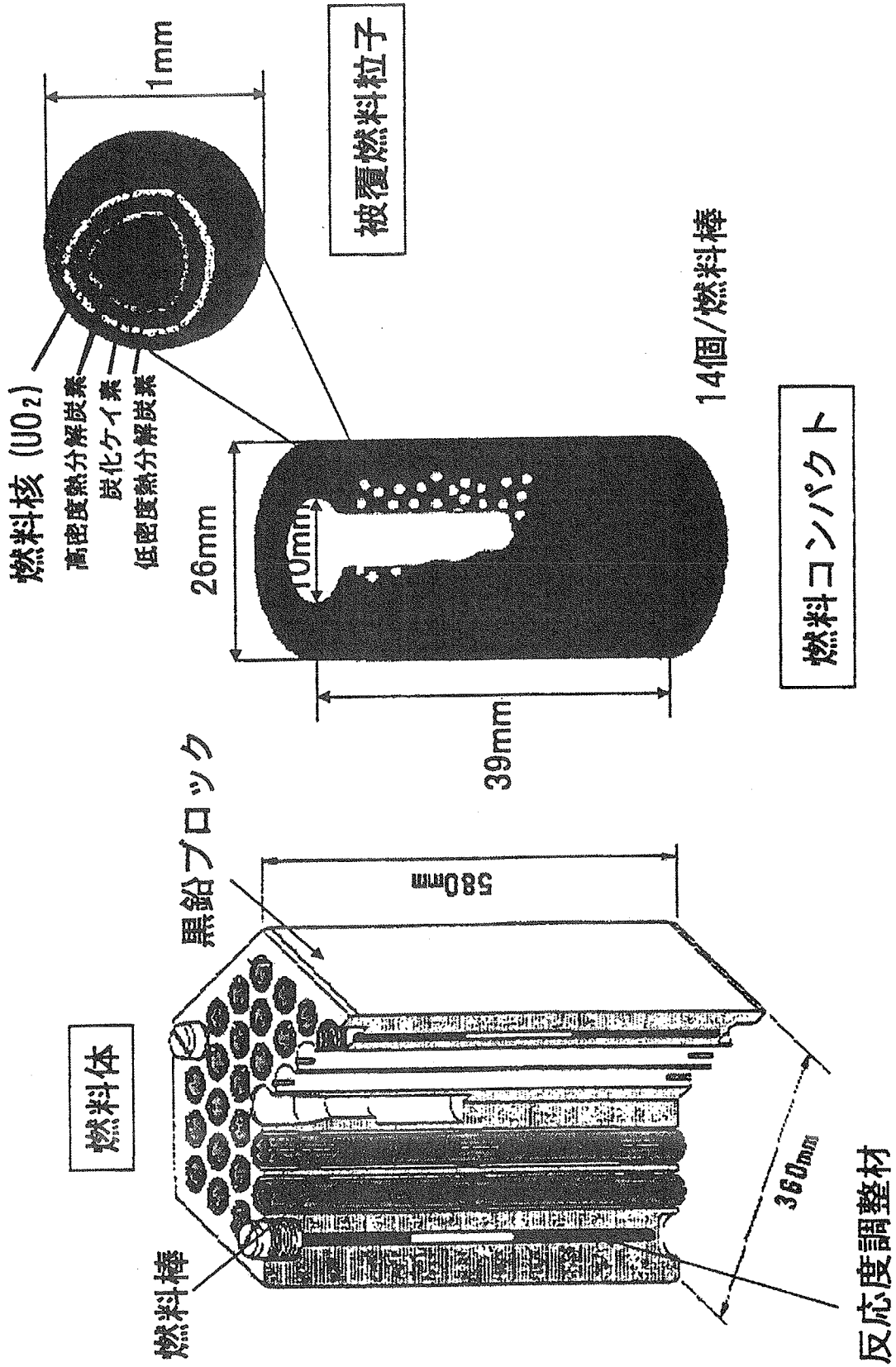


図 2-3 燃料体の構造

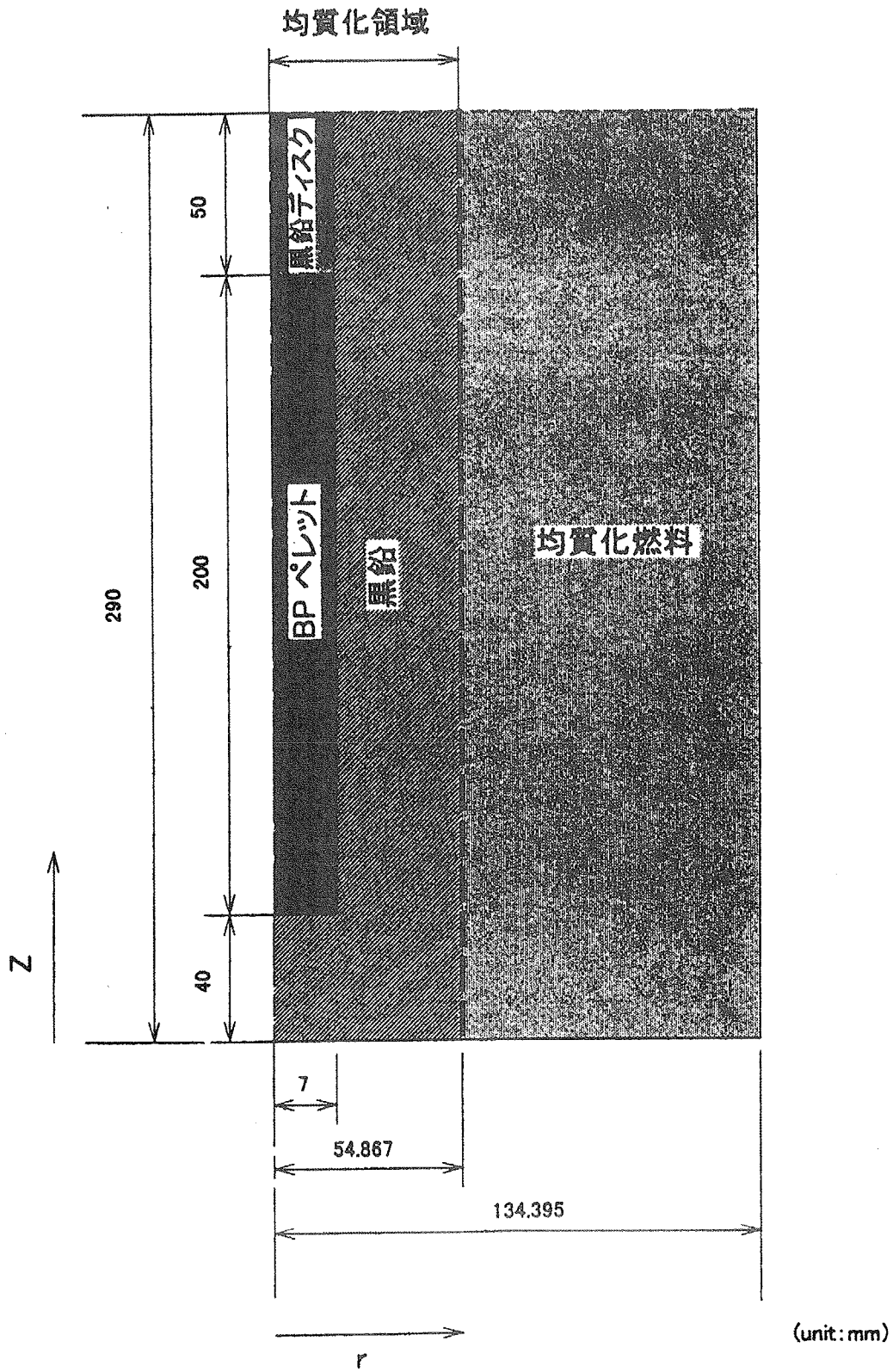


図 2-4 BP 分離モデルでの BP セルモデル

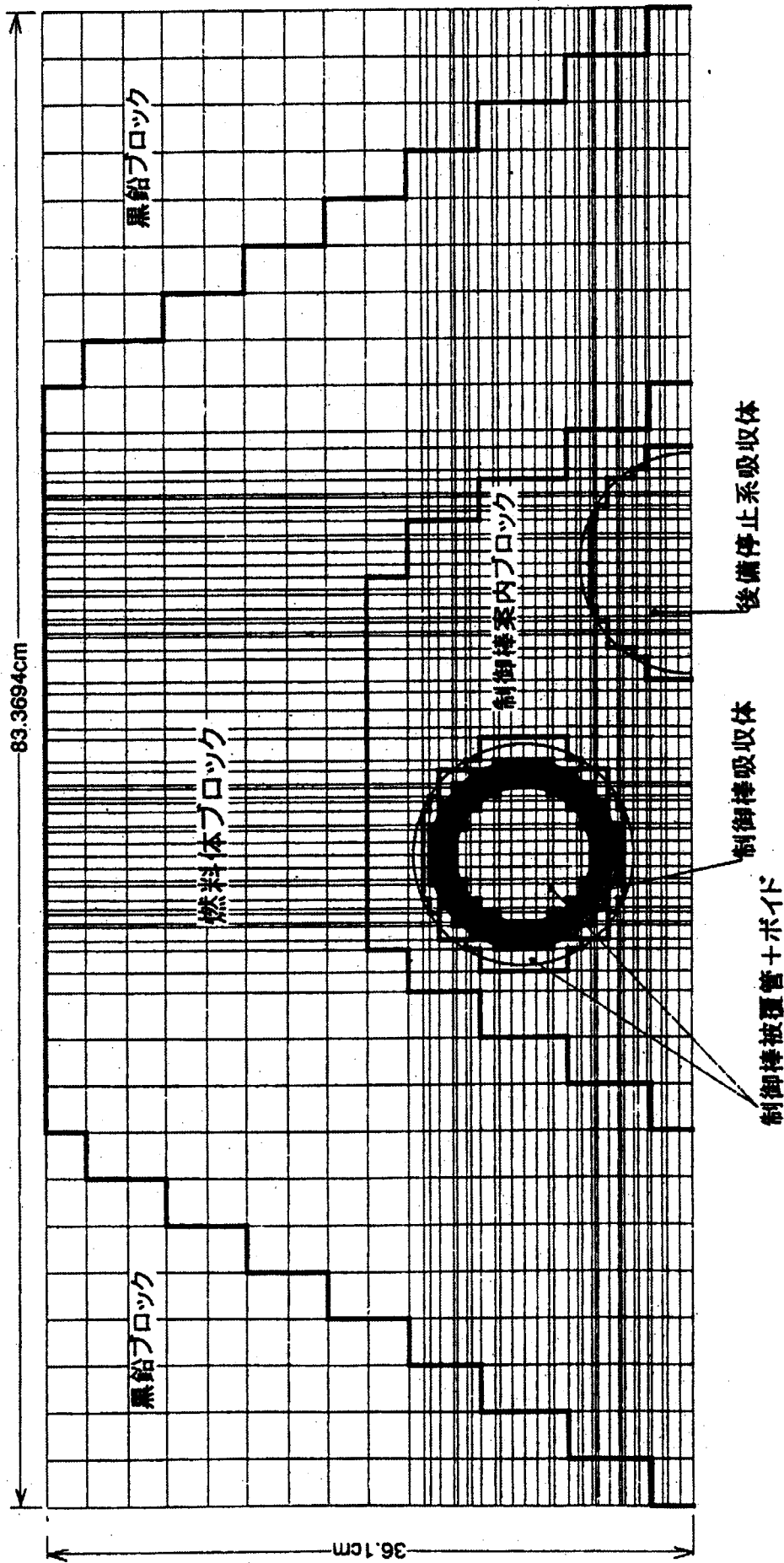


図 2-5 TWOTRAN-II コードによる制御棒格子計算モデル

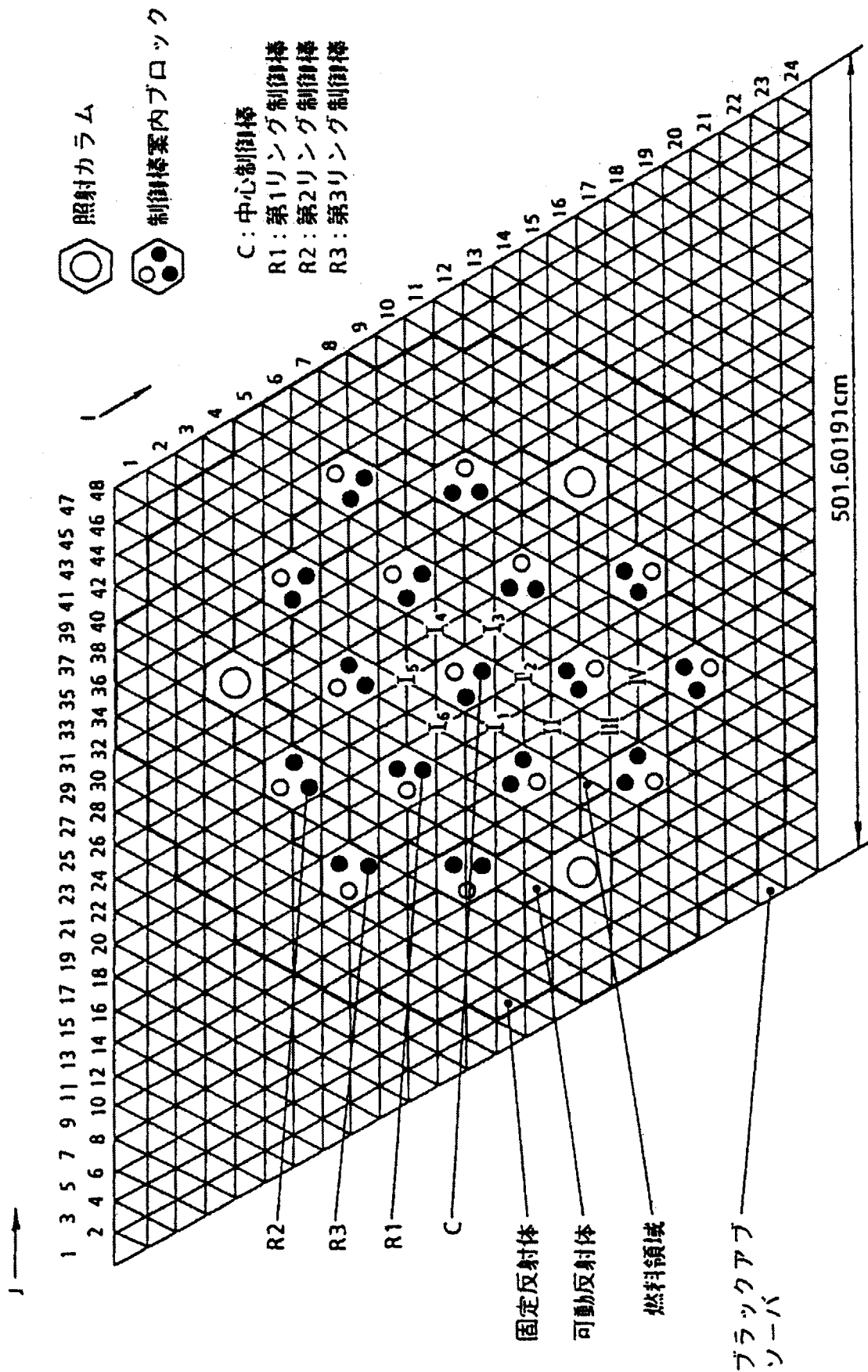


図 2-6 BP 混合モデルによる全炉心径方向メッシュ分割図

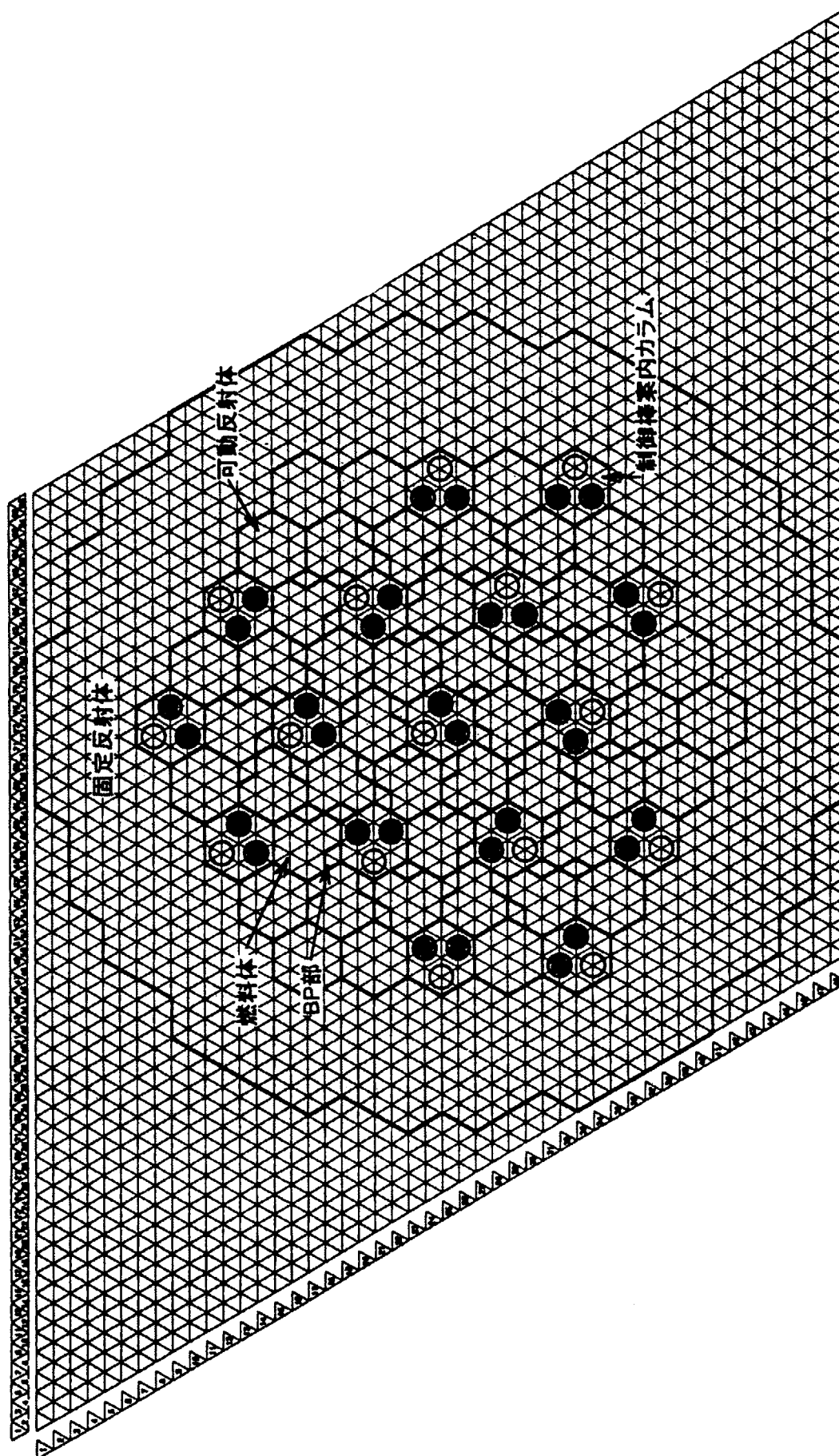
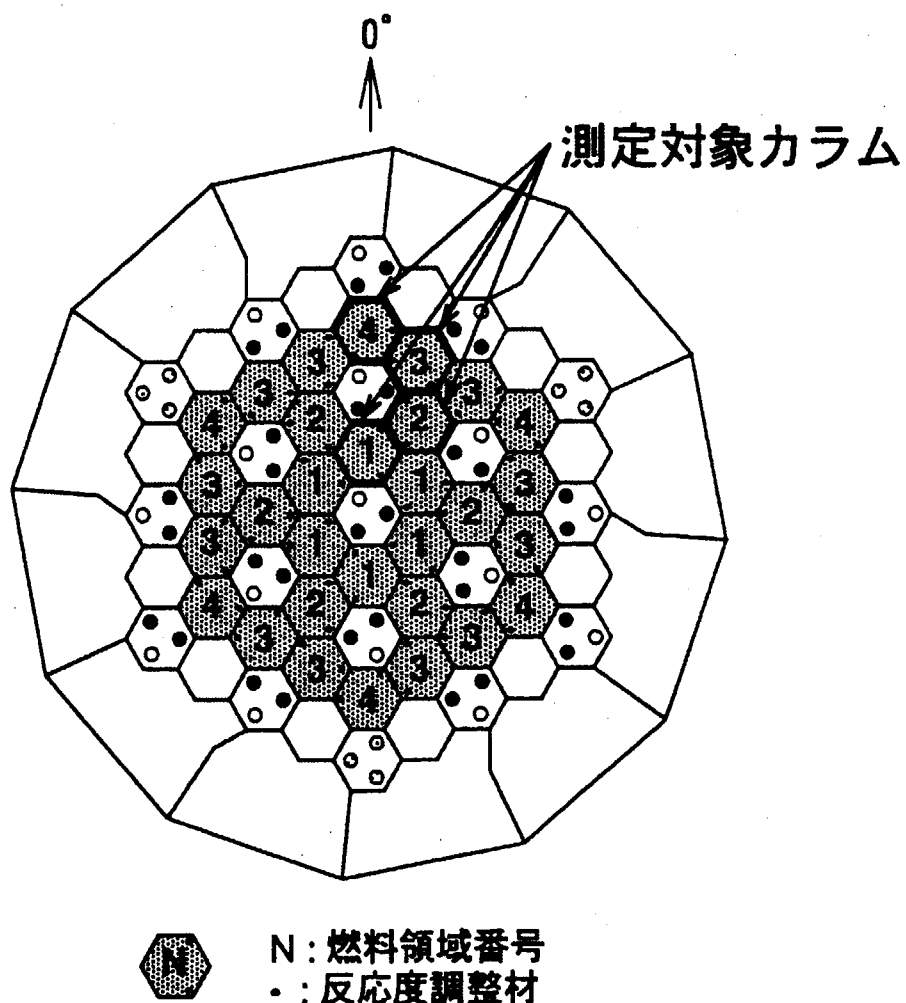


図 2-7 BP 分離モデルによる全炉心径方向メッシュ分割図



炉心内の燃料濃縮度配分 (単位 : wt%)

| 上からの 段数 | 燃料領域番号(カラム名) | | | |
|------------|--------------|--------|--------|--------|
| | 1(B01) | 2(C02) | 3(D02) | 4(D01) |
| 1 | 6.7 | 7.9 | 9.4 | 9.9 |
| 2 | 5.2 | 6.3 | 7.2 | 7.9 |
| 3 | 4.3 | 5.2 | 5.9 | 6.3 |
| 4 | 3.4 | 3.6 | 4.3 | 4.8 |
| 5 | 3.4 | 3.6 | 4.3 | 4.8 |

図 3-1 炉心内ウラン濃縮度配分と測定対象カラムの位置

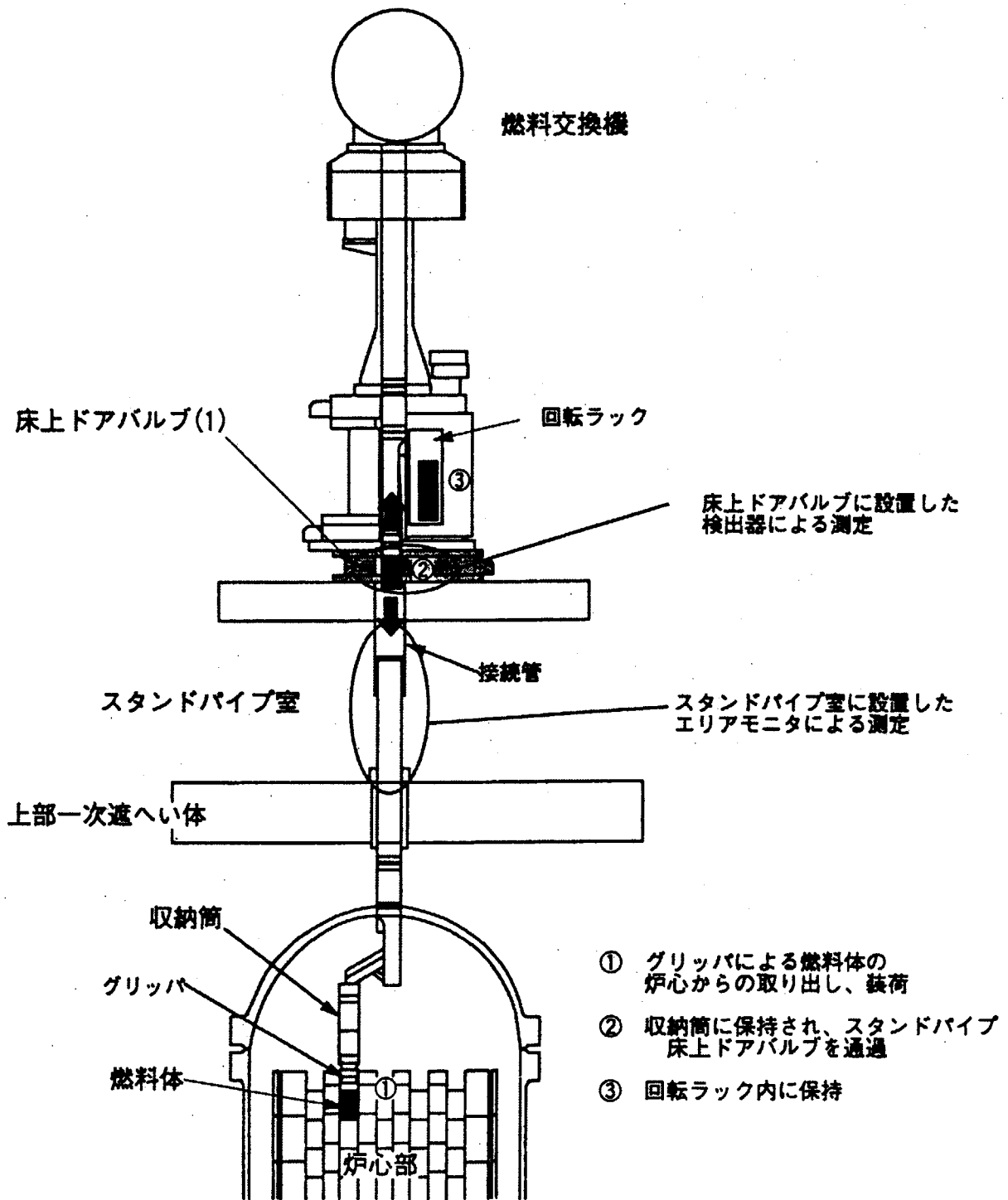


図 3-2 燃料交換機の運転の概要

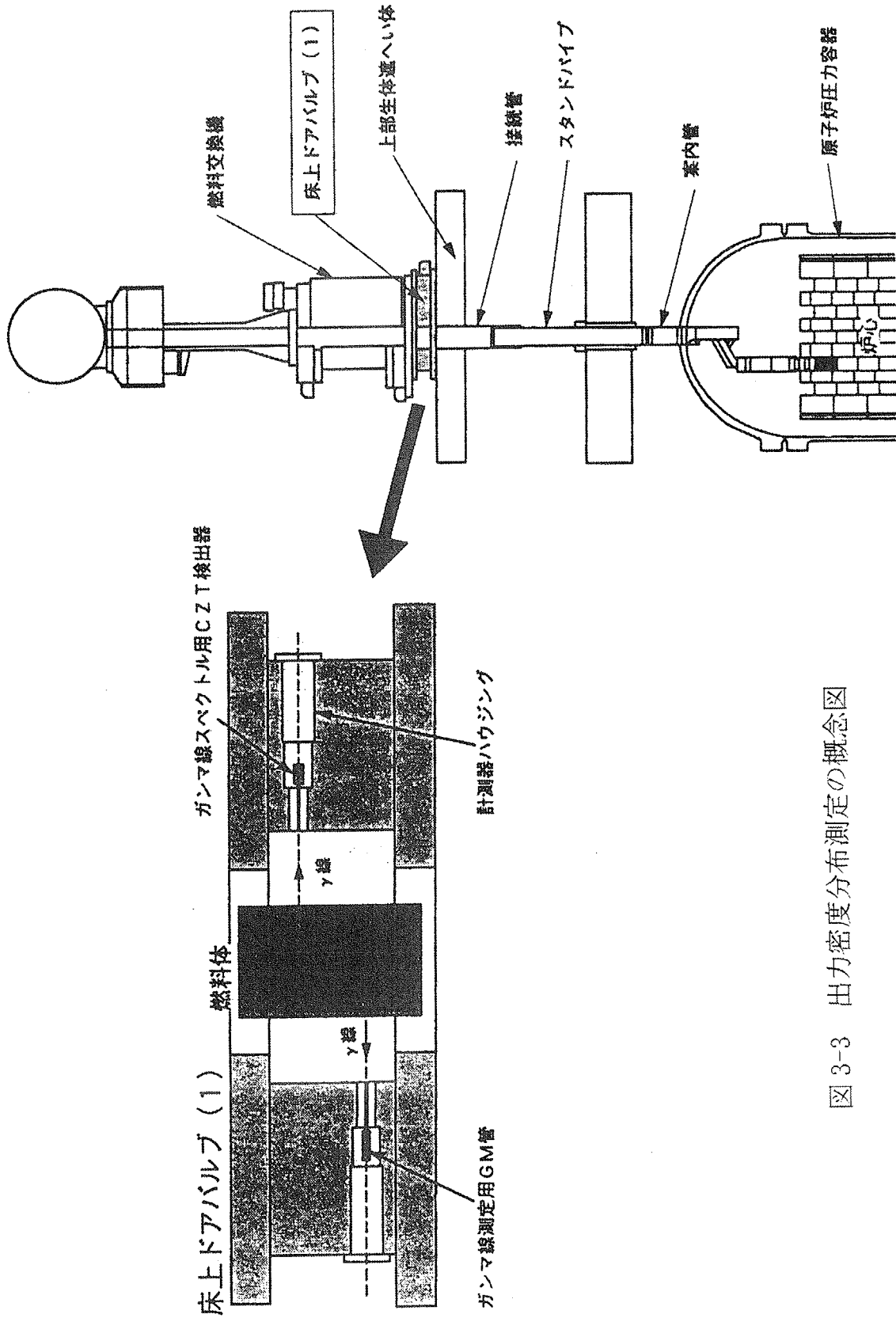


図 3-3 出力密度分布測定のご概念図

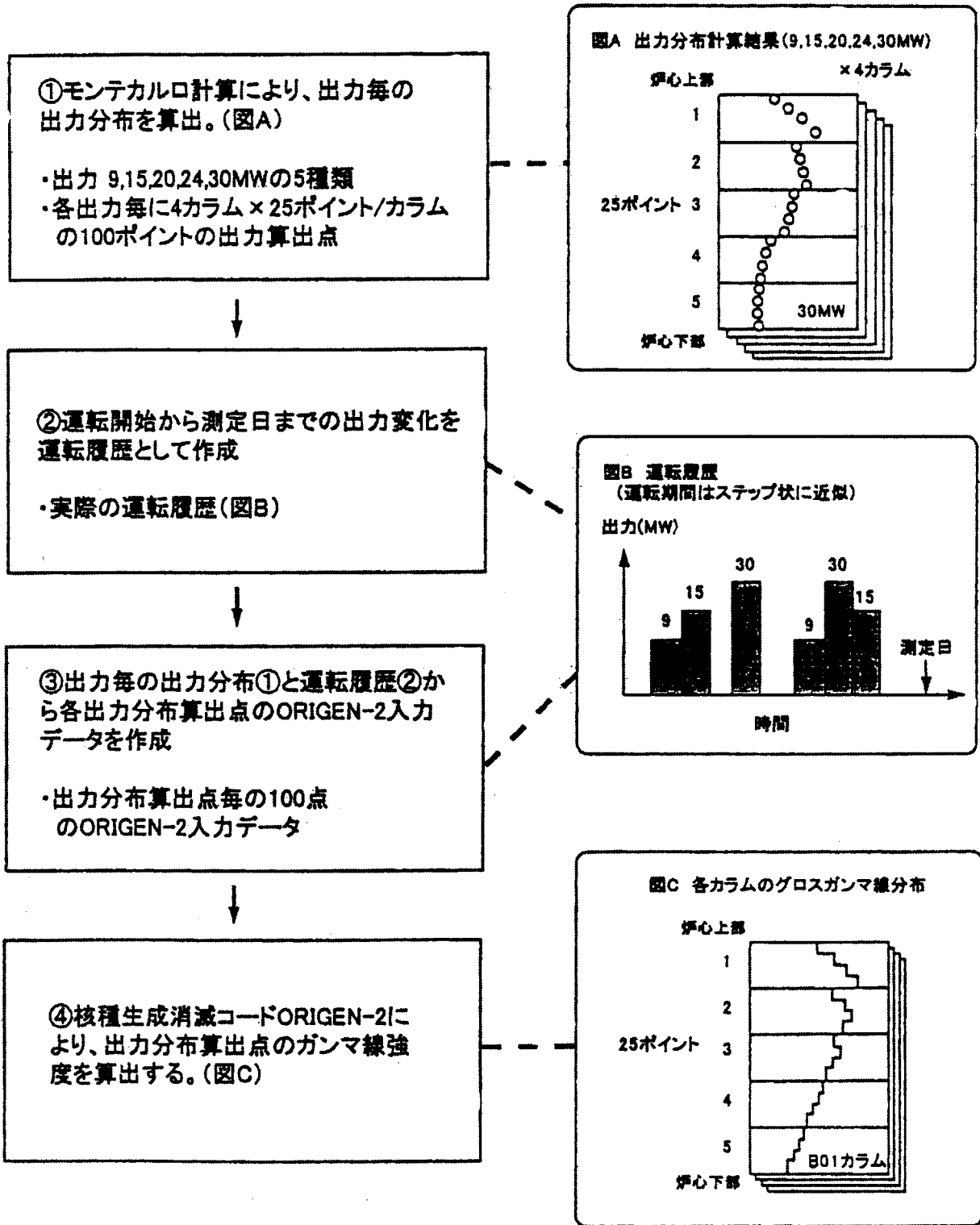


図 3-4 出力密度分布からガンマ線分布への変換

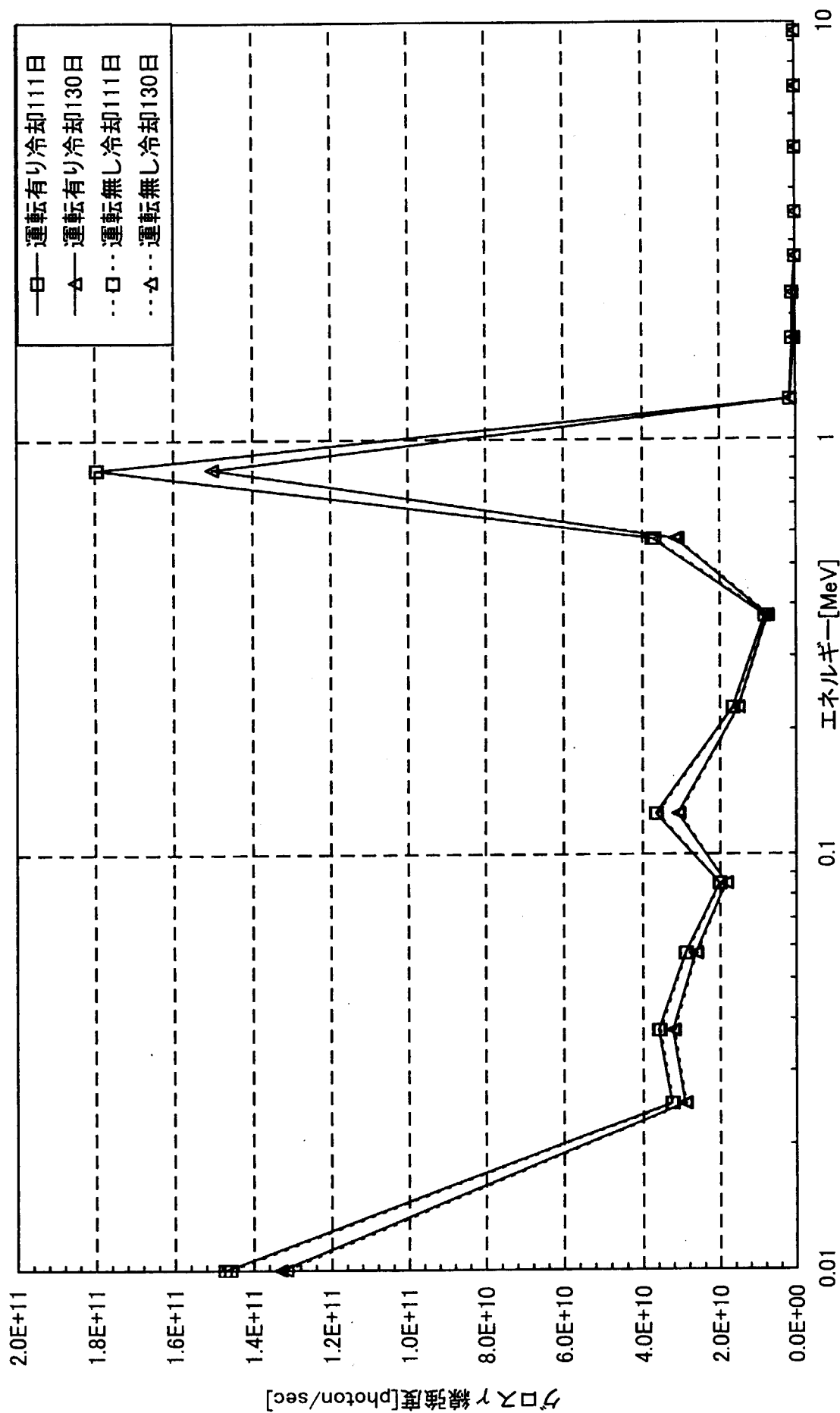


図3-5 グロスγ線強度に対する出力上昇試験1の寄与

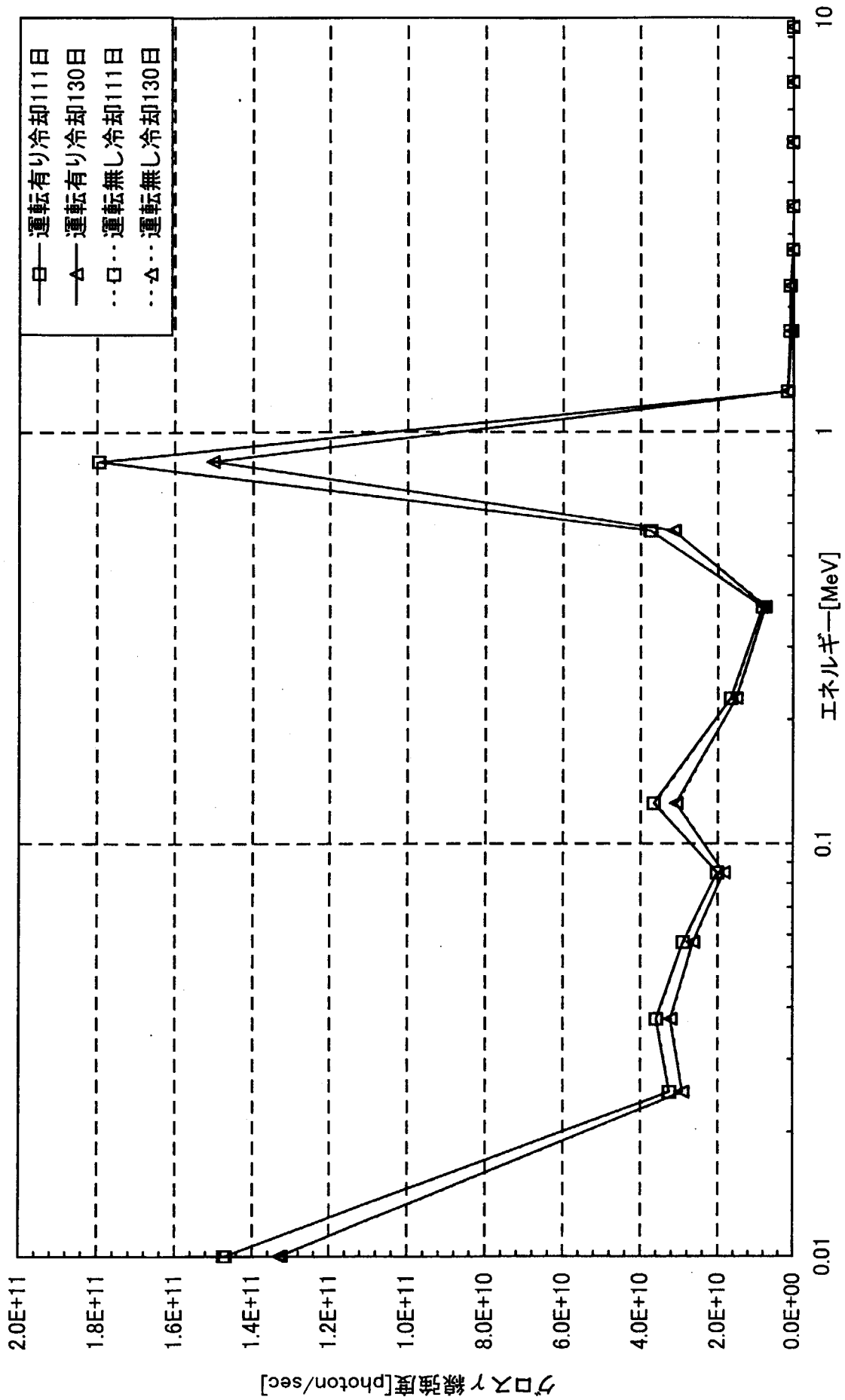


図3-6 グロスγ線強度に対する出力上昇試験2-1の寄与

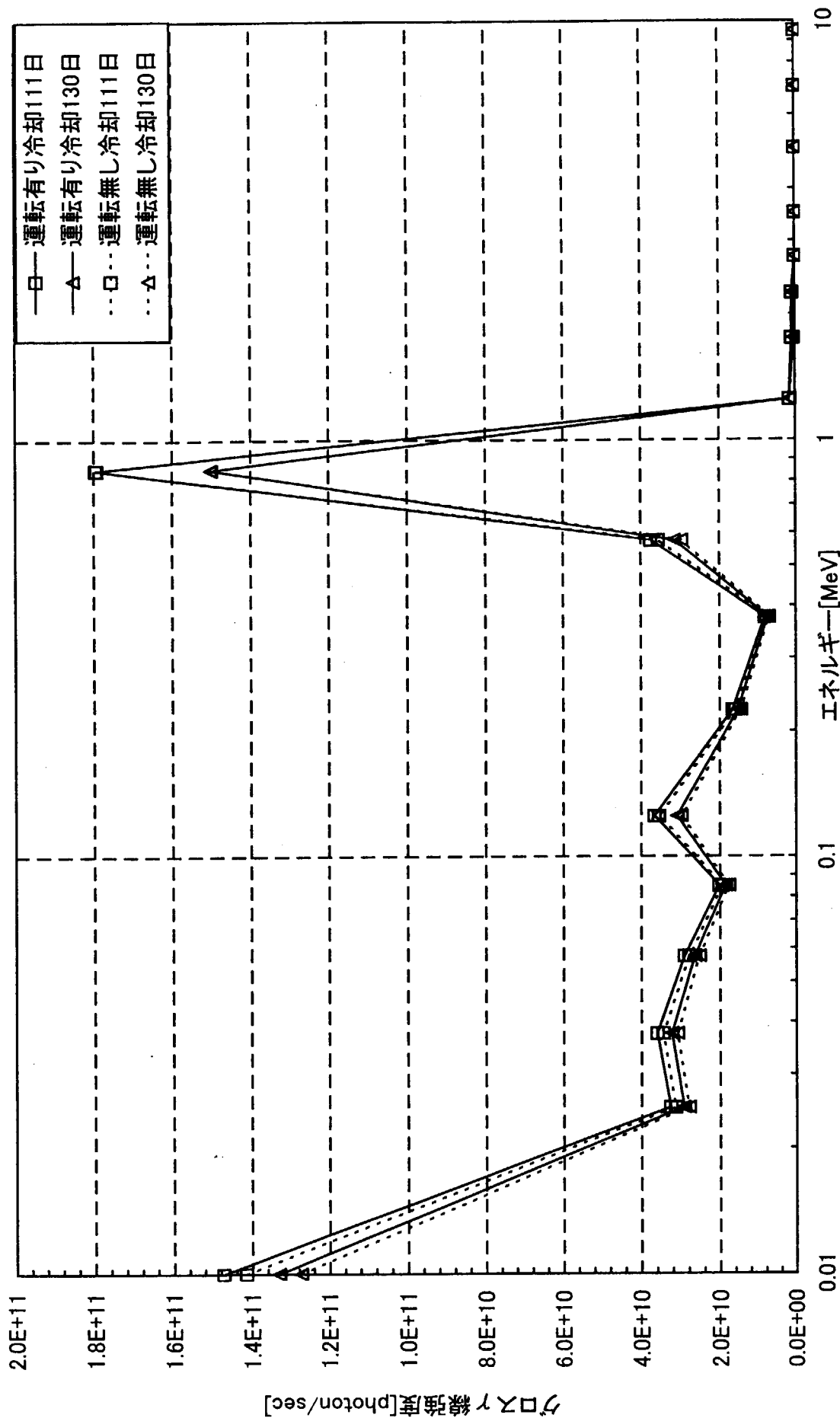


図3-7 グロスγ線強度に対する出力上昇試験2-2の寄与

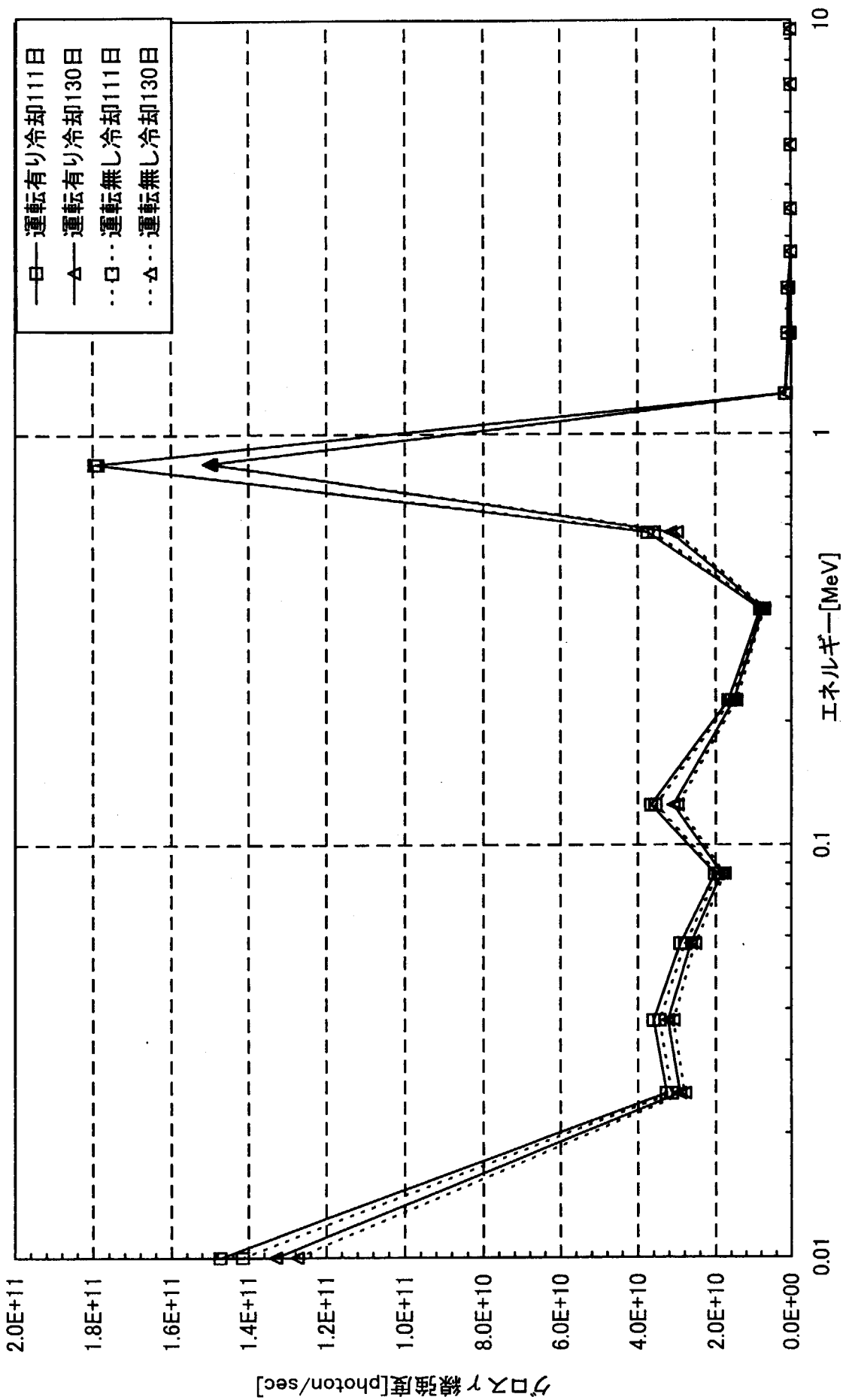


図3-8 グロスγ線強度に対する出力上昇試験3(単独)の寄与

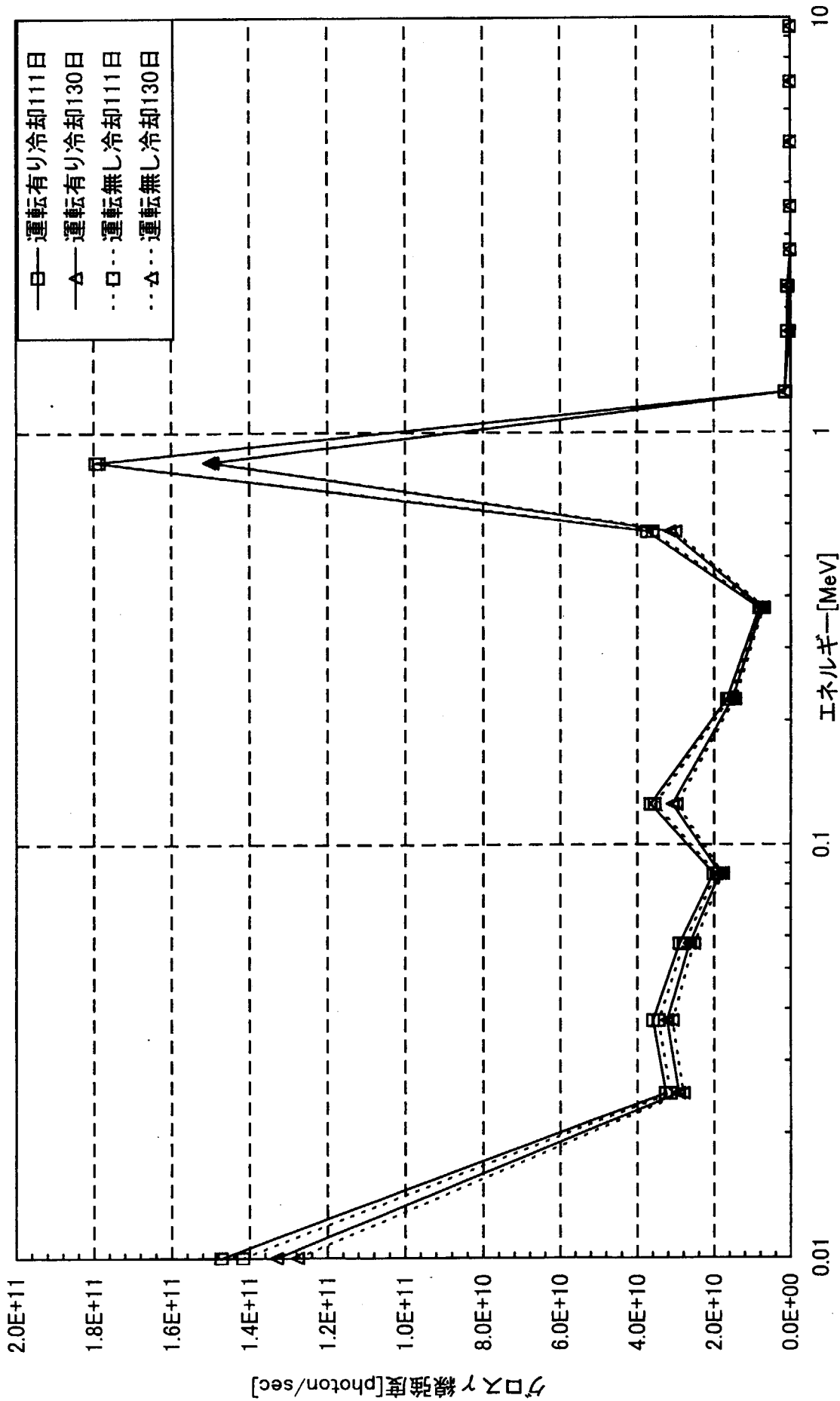


図3-9 グロスγ線強度に対する出力上昇試験3(並列)の寄与

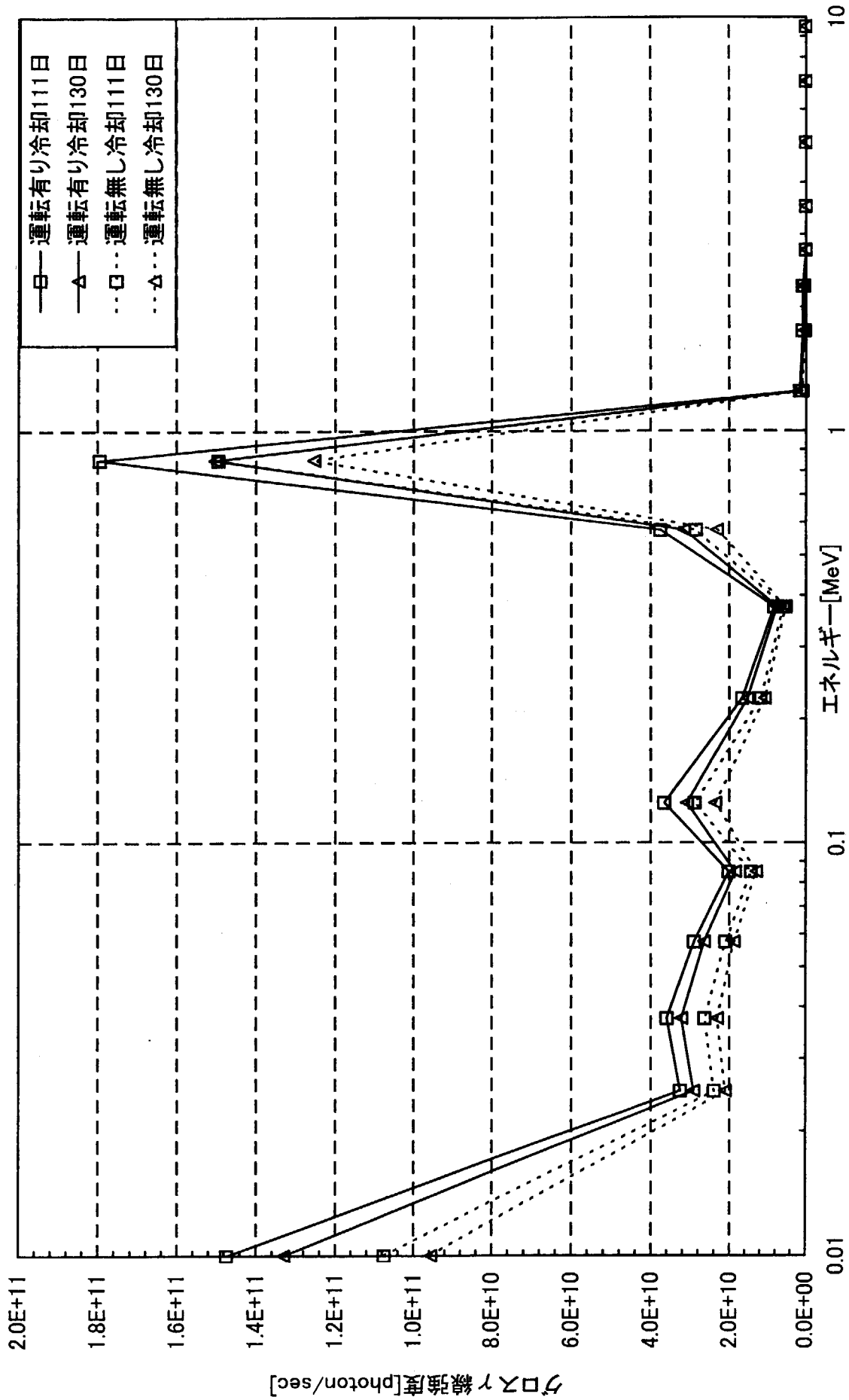


図3-10 グロスγ線強度に対する出力上昇試験4(単独)の寄与

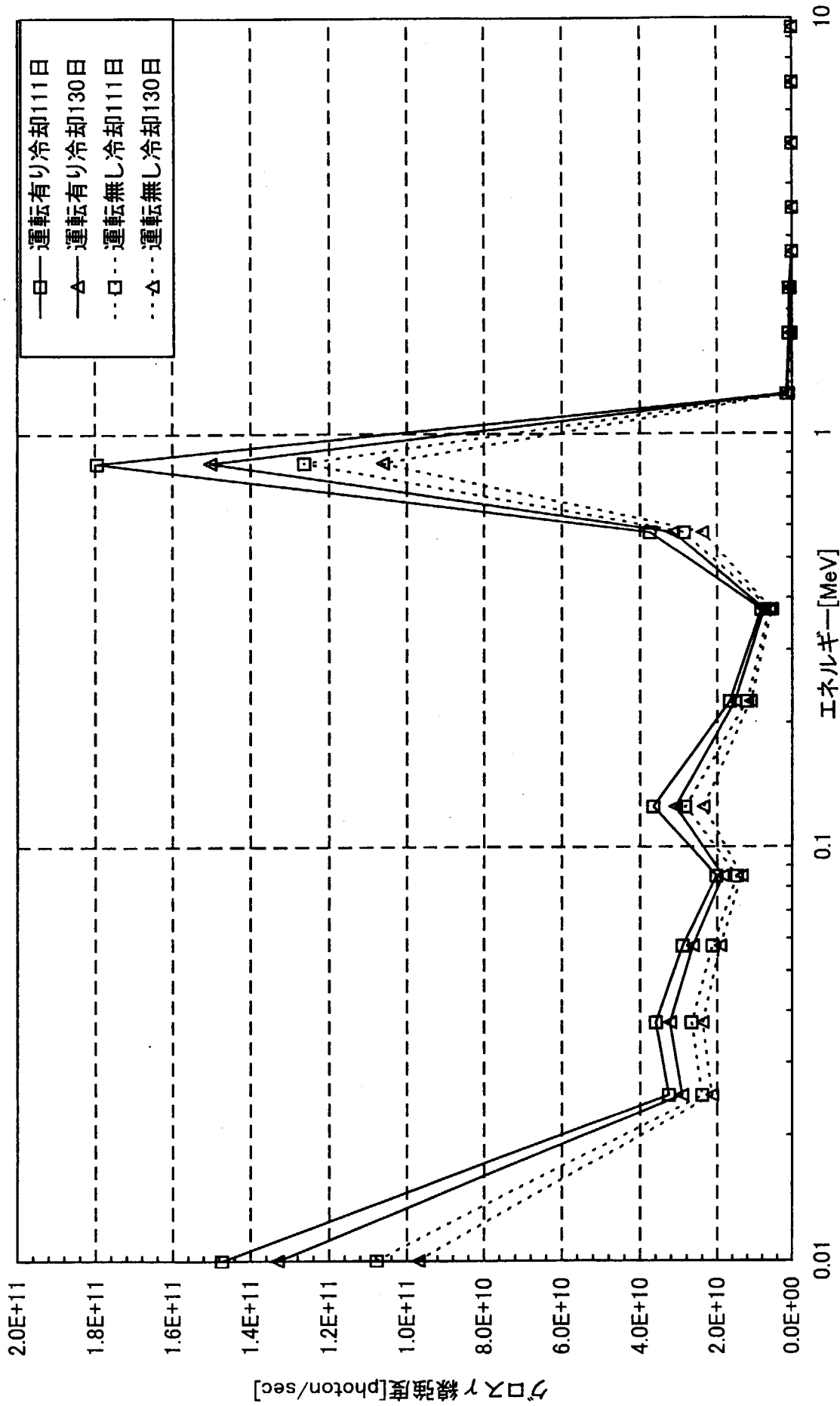


図3-11 グロスγ線強度に対する出力上昇試験4(並列)の寄与

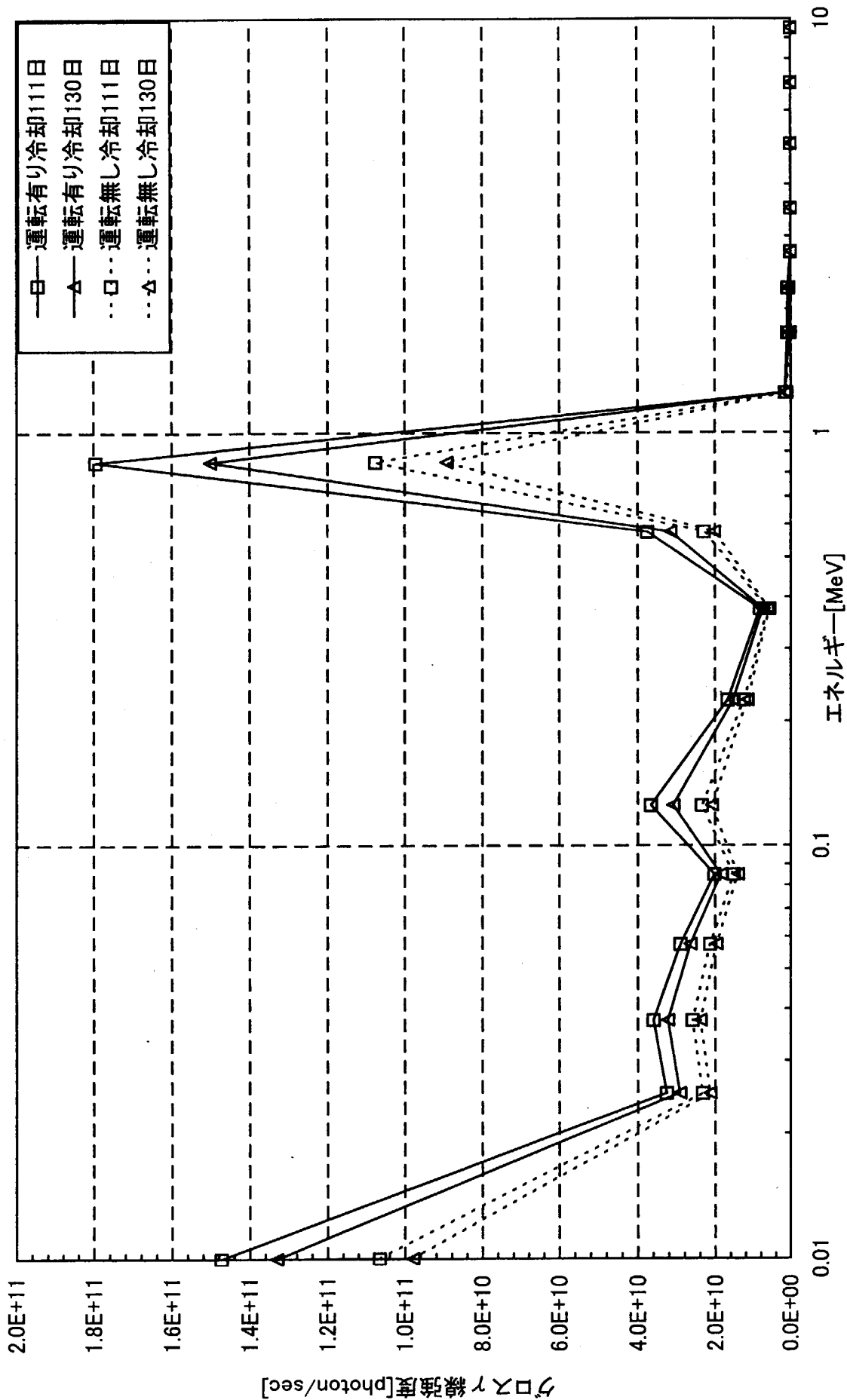


図3-12 グロスγ線強度に対する第1サイクルの寄与

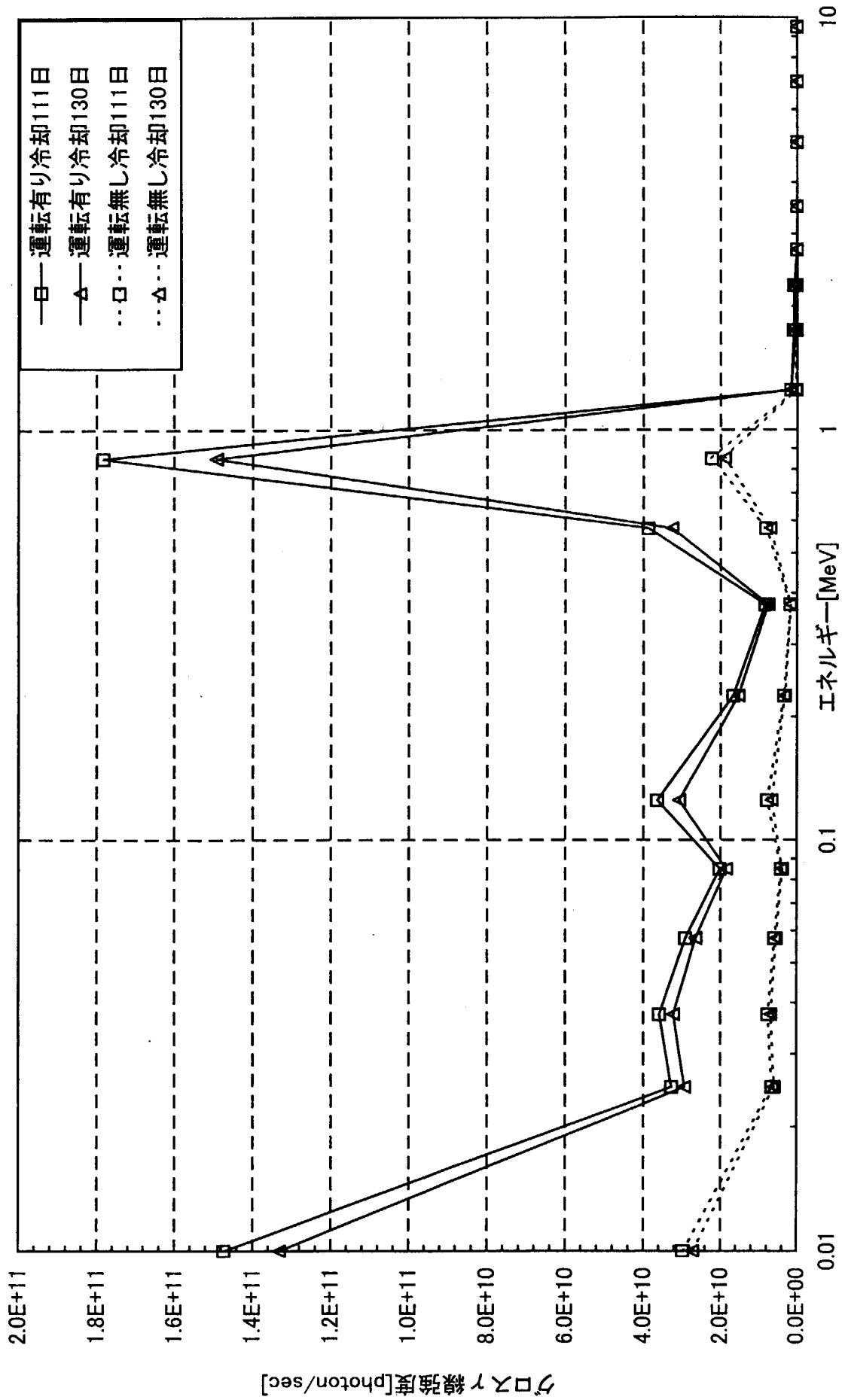


図3-13 グロスγ線強度に対する30MW運転の寄与

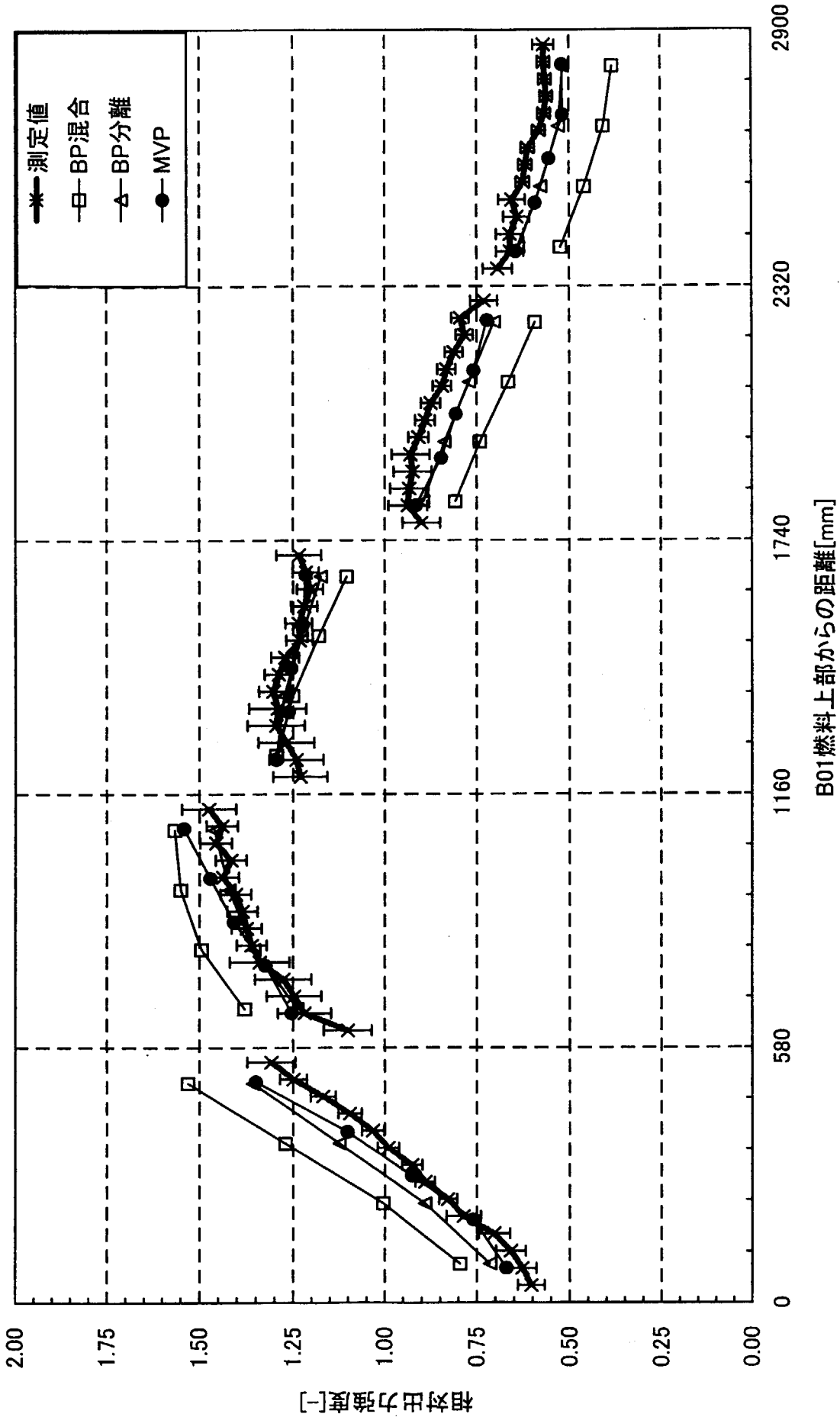


図4-1 グロスγ線の測定値と解析値の比較

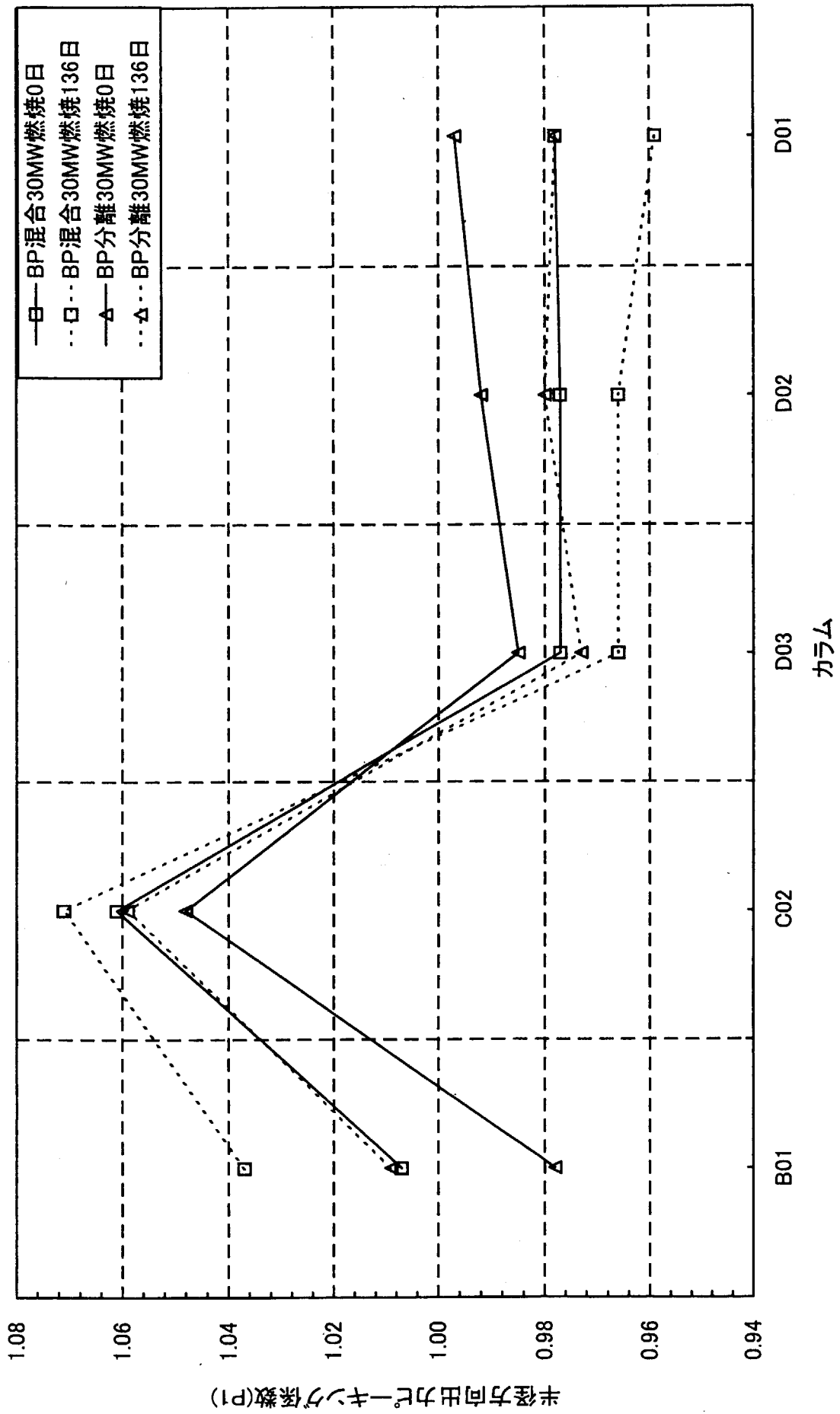


図4-2 半徑方向出力ピーキング係数(P1)に対するBP分離の効果

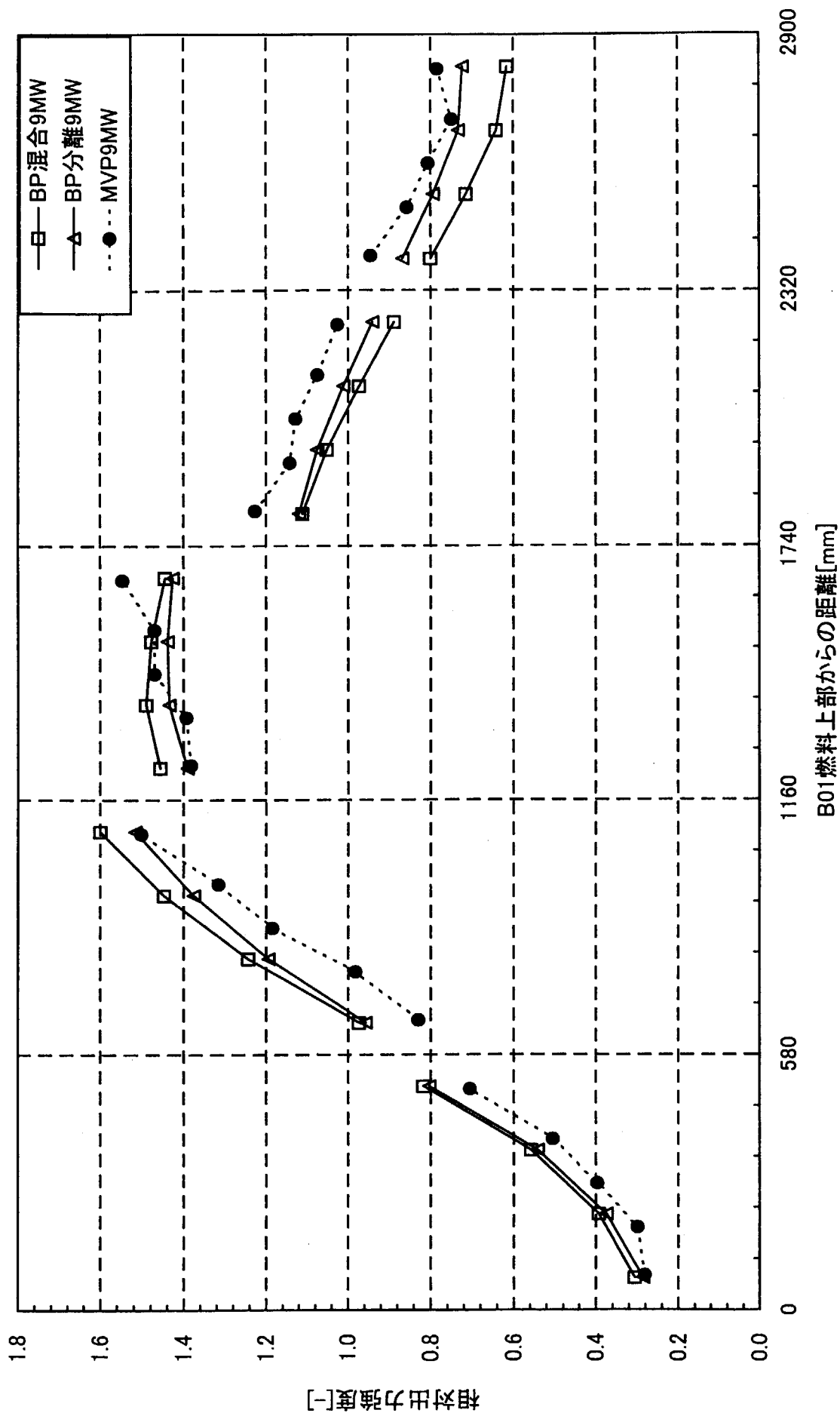


図4-3 熱出力9MWの出力密度分布に対するBP分離の効果

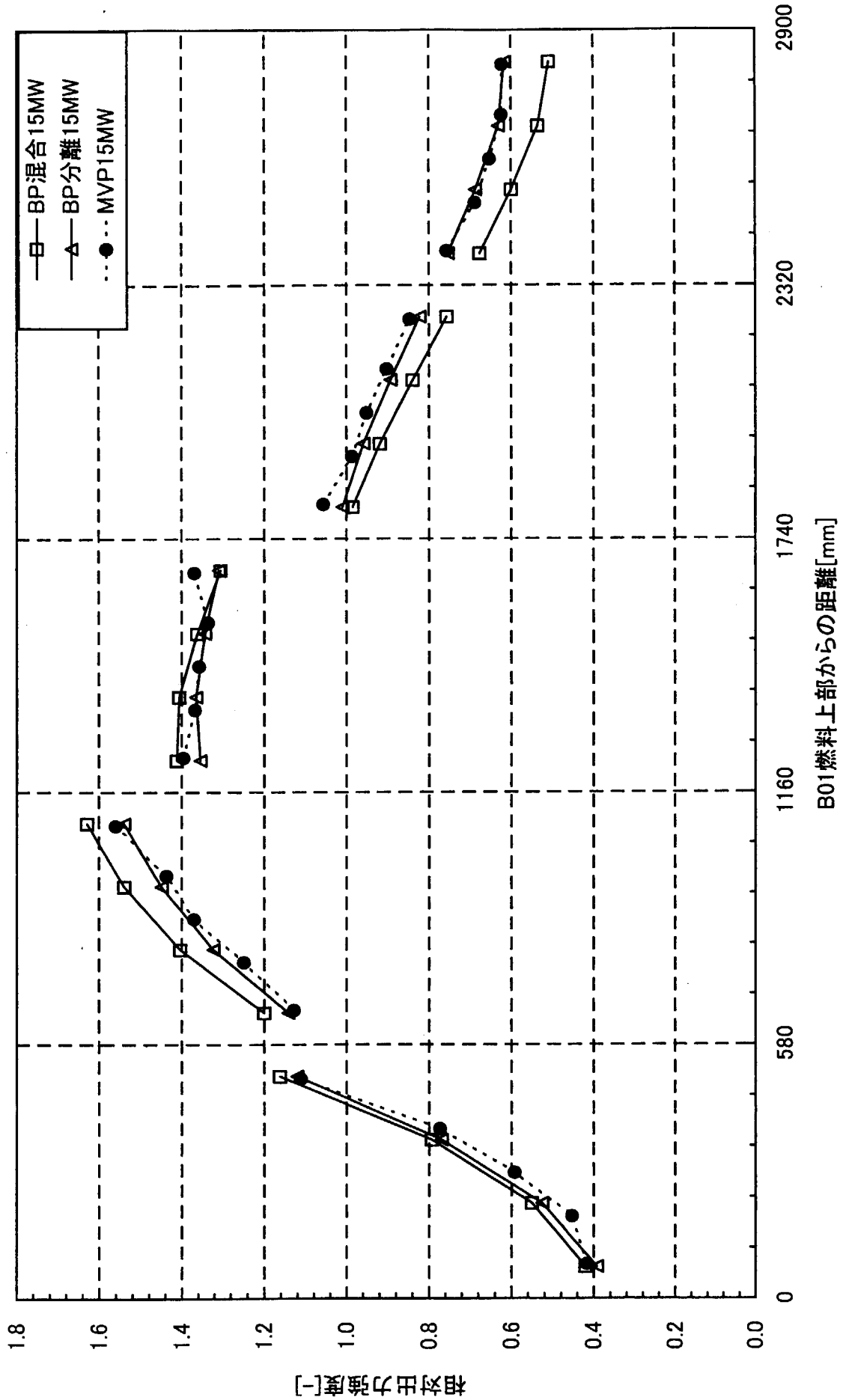


図4-4 熱出力15MWの出力密度分布に対するBP分離の効果

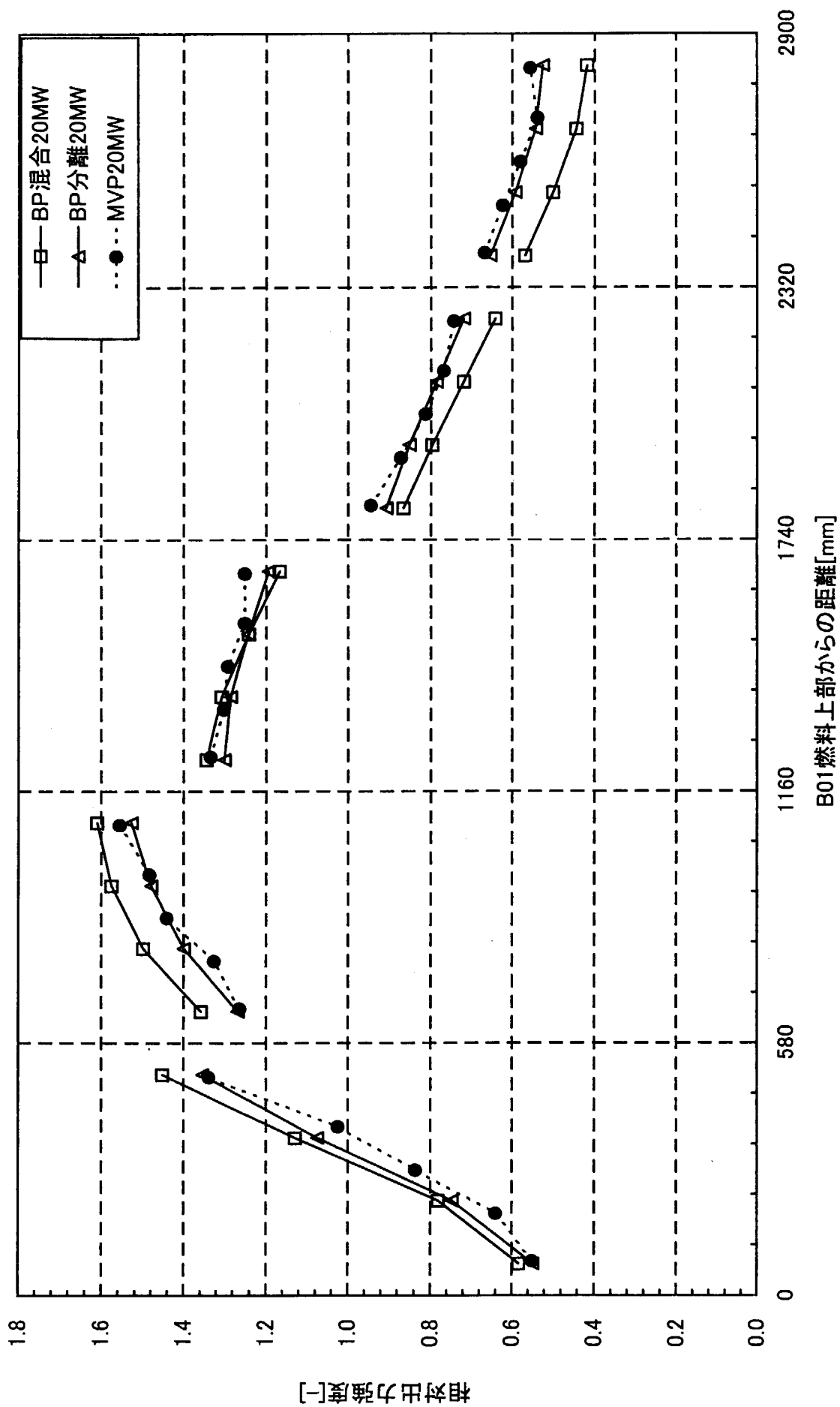


図4-5 熱出力20MWの出力密度分布に対するBP分離の効果

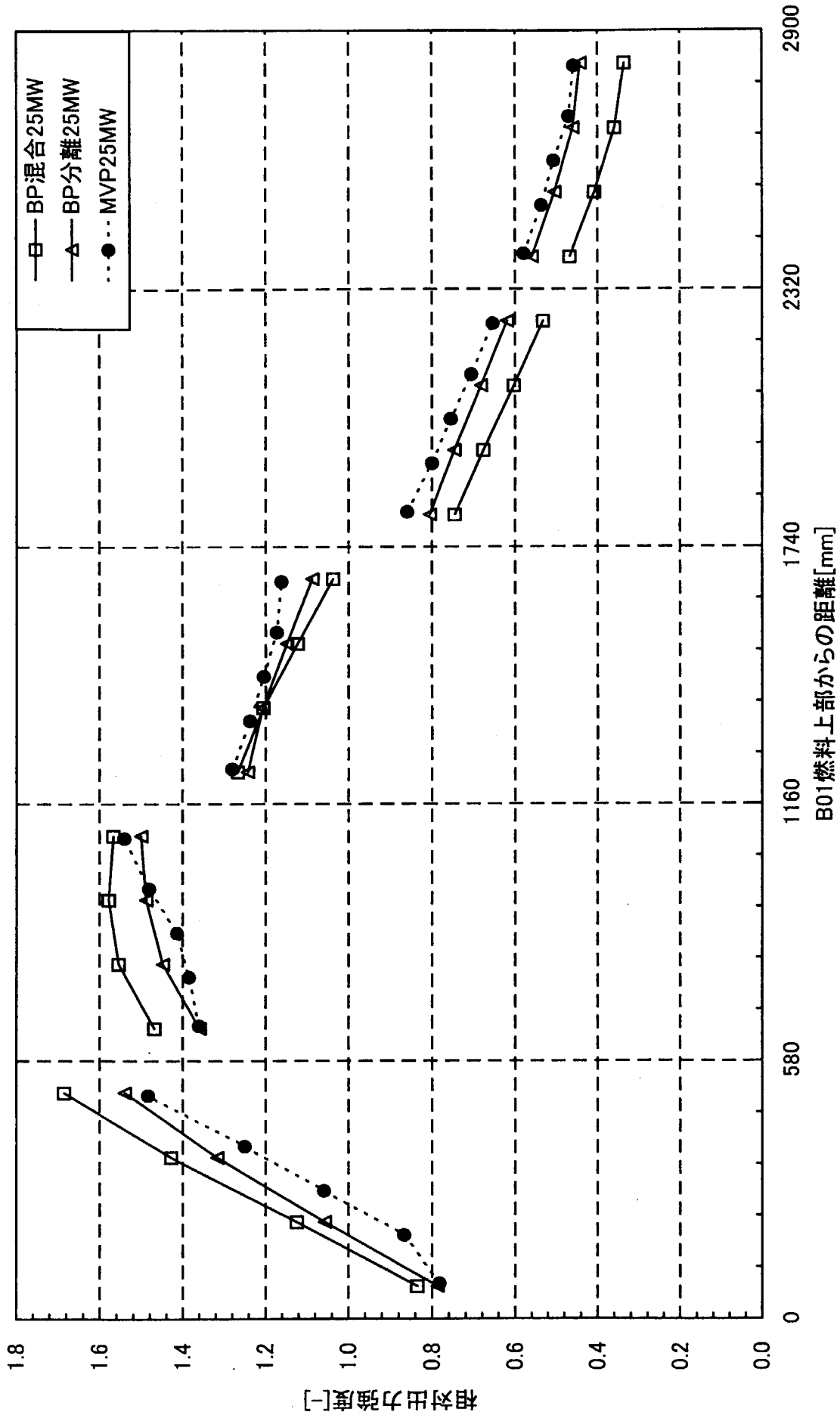


図4-6 熱出力25MWの出力密度分布に対するBP分離の効果

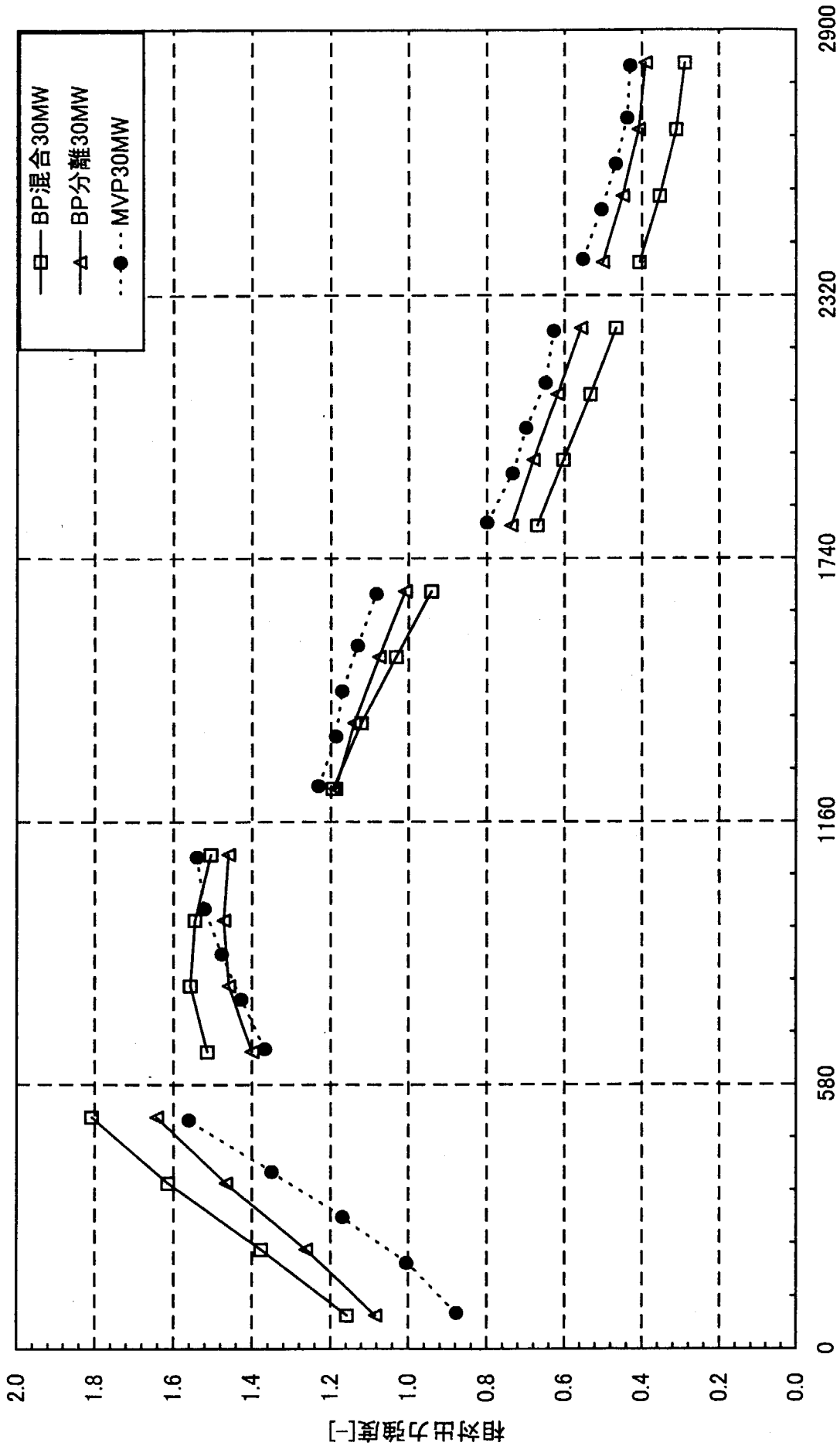


図4-7 熱出力30MWの出力密度分布に対するBP分離の効果

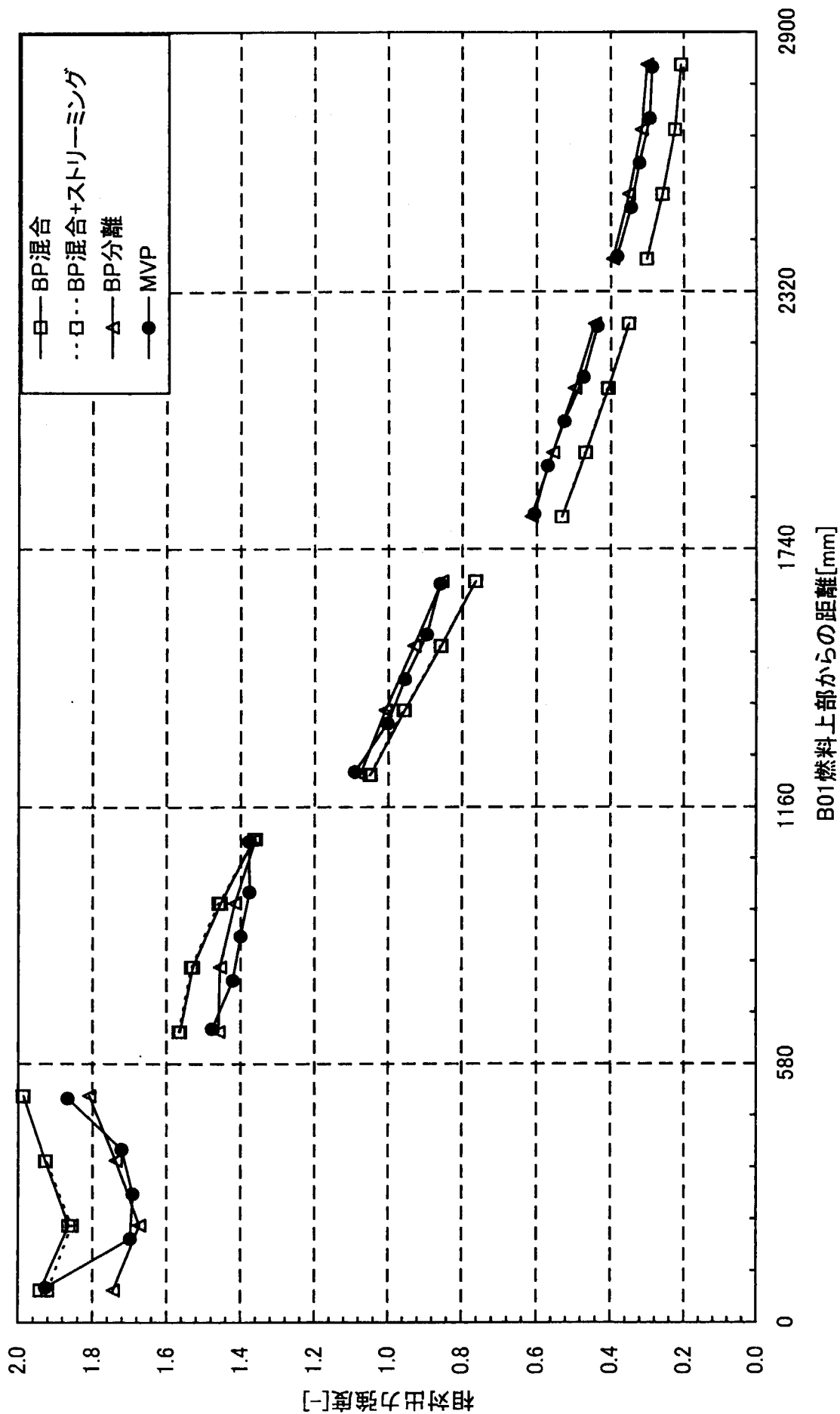


図4-8 制御棒全引抜状態の出力密度分布に対するBP分離の効果

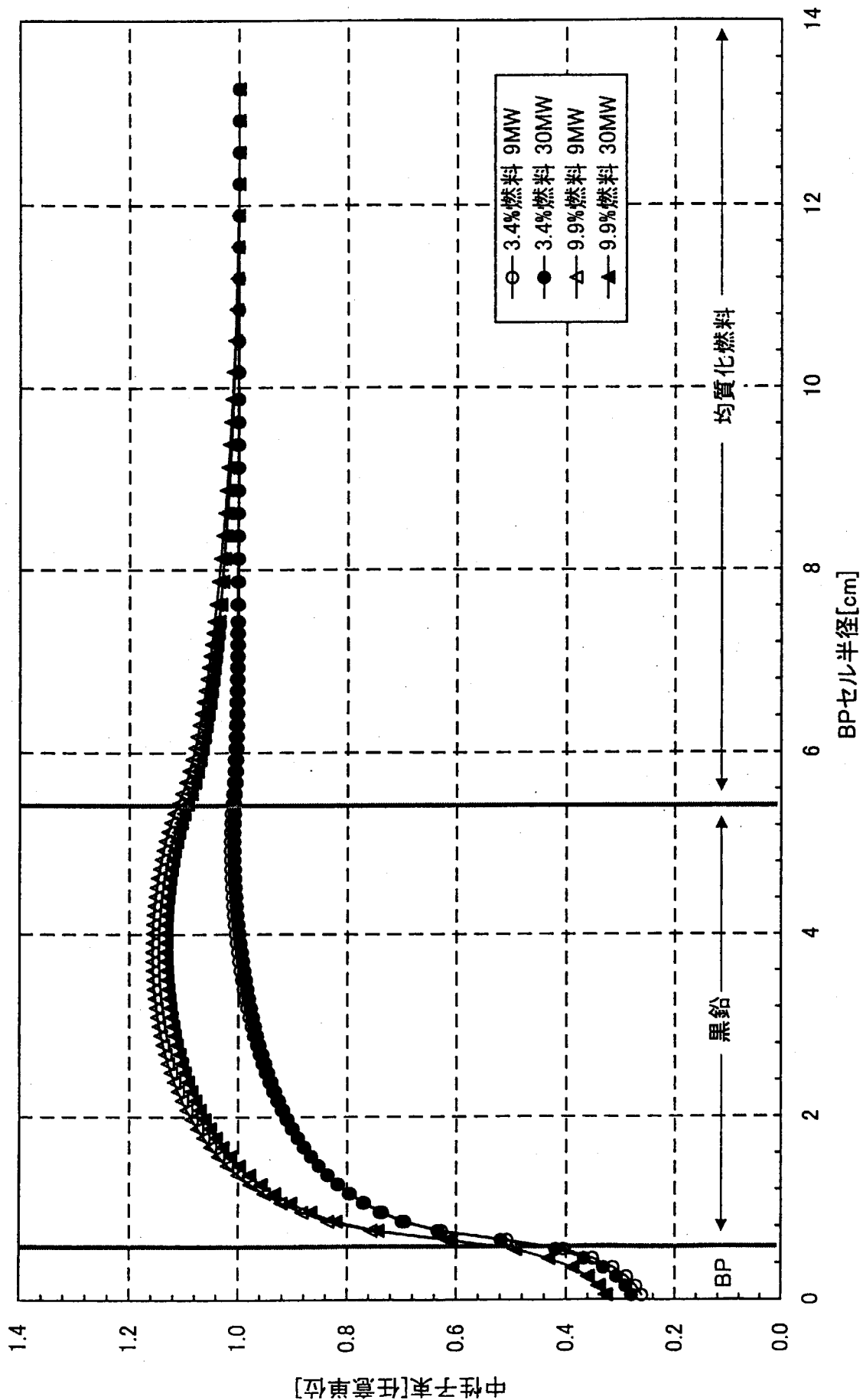


図5-1 TWOTRAN 9,30MW 燃焼0日 第6群の比較

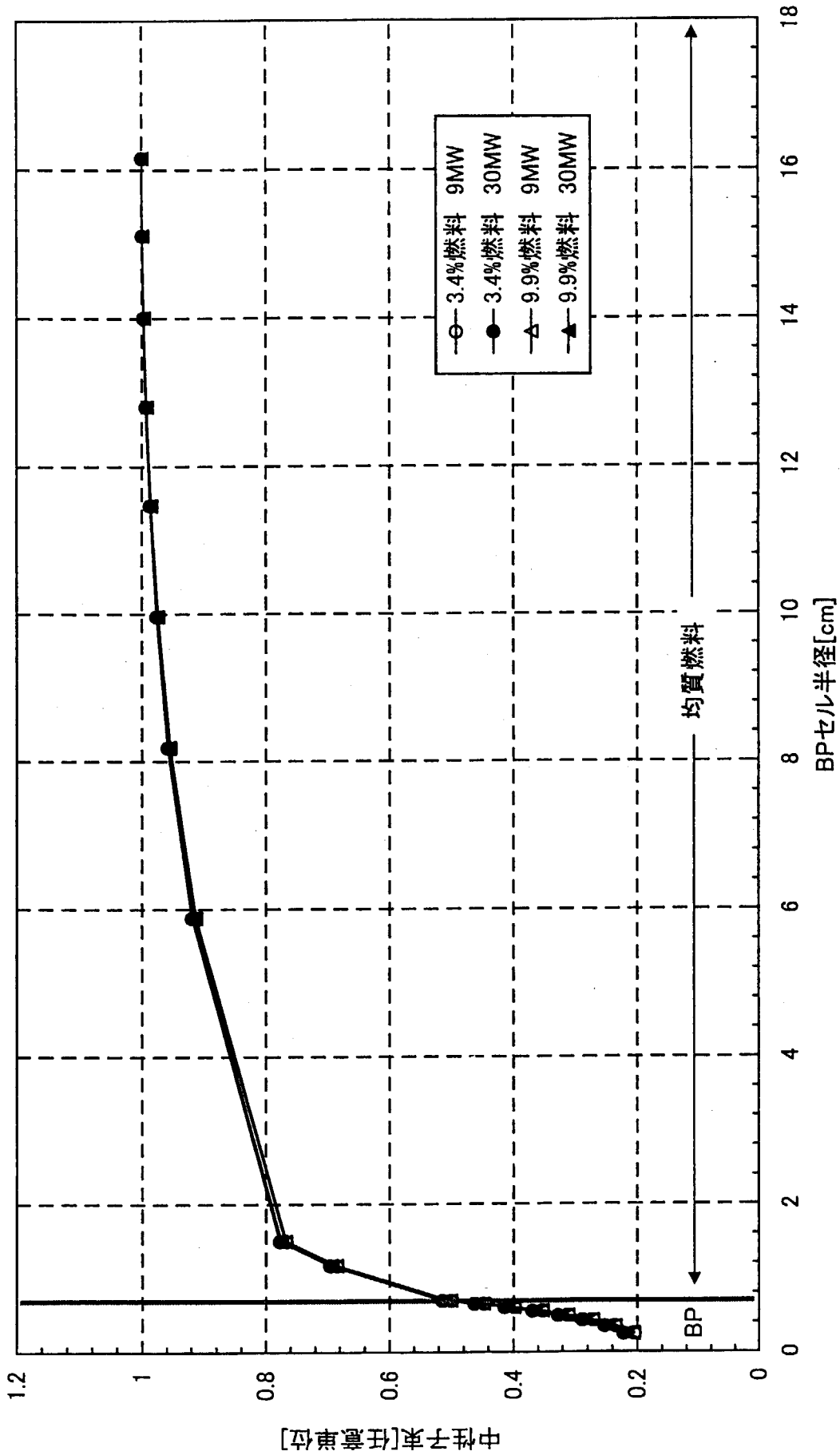
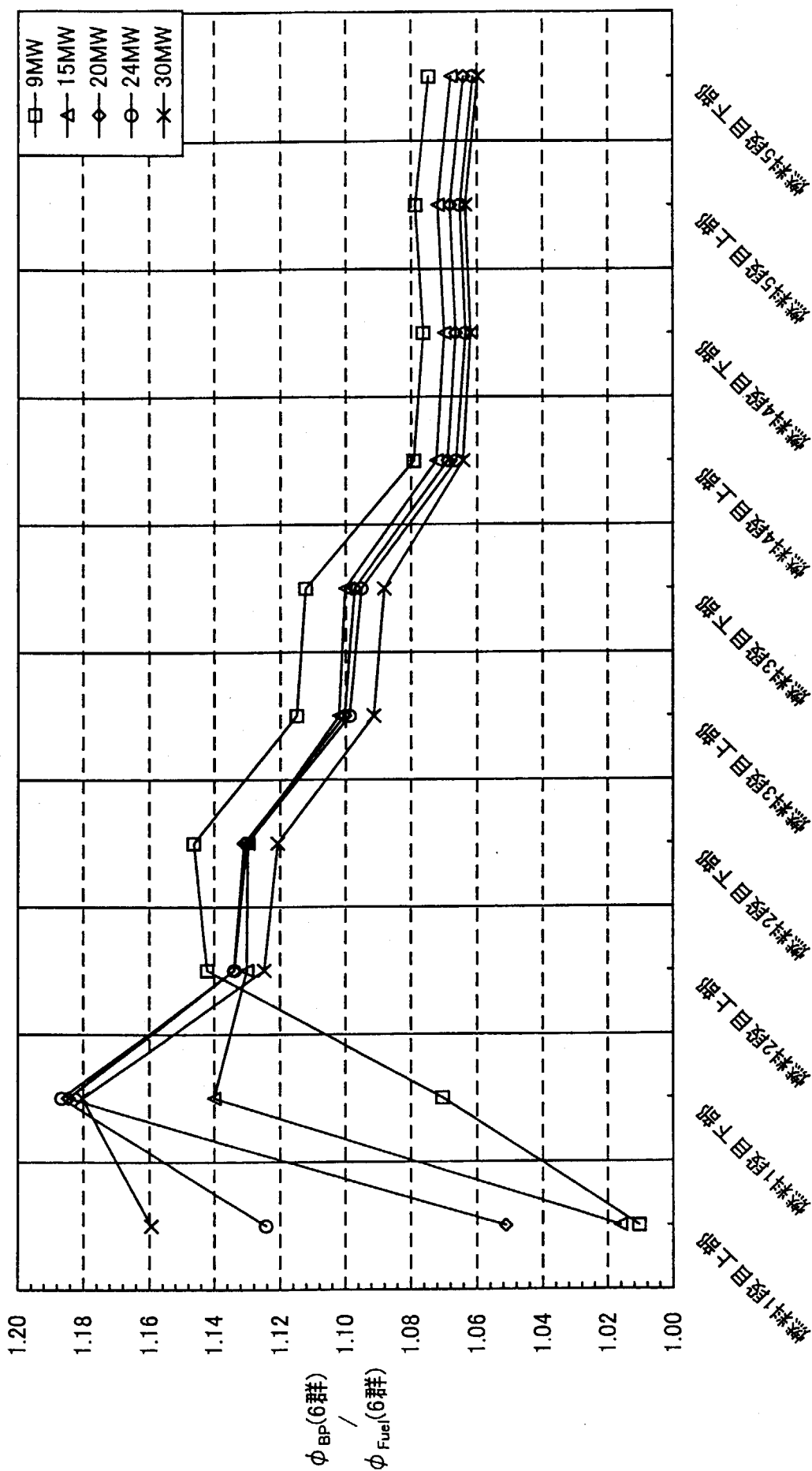


図5-2 DELIGHT 9,30MW 燃焼0日 第6群の比較



B01燃料上部からの段数

図5-3 BP分離モデルにおける6群BP部中性子束 ϕ_{BP} と燃料部中性子束 ϕ_{Fuel} の比

付録 実効増倍率

実効増倍率の予測精度については1次元格子計算の妥当性を言うもので、本論文の出力密度分布の予測とは独立に考慮する必要がある。今後の検討課題として以下にまとめて示す。

1. BP 混合モデルと BP 分離モデルの実効増倍率への影響

制御棒効果を除いた制御棒全引き状態でのBP混合モデル、BP分離モデル及びMVPコード計算値の実効増倍率の比較を付表-1に示す。BP混合モデルからBP分離モデルへの移行で実効増倍率が低下した。また、BP混合モデルでは中性子ストリーミングの効果、燃料格子計算における黒鉛領域寸法の効果で実効増倍率が各々0.71% Δk 及び1.47% Δk 低下した。

BP分離モデルとMVPコード計算値を比較すると、拡散計算は実効増倍率を1.31% Δk 高めに評価することがわかった。

さらに、実効増倍率及び出力密度分布に対するメッシュ分割効果を明らかにするため、6メッシュ混合モデルを24メッシュに再分割した。マイクロ断面積はBP混合モデル用にDELIGHT-7コードで計算したものを両者に使用した。付図-1に示すように熱出力30MWでのメッシュ分割数の違いによる出力密度分布は一致するが、実効増倍率は1.031(6メッシュ)から1.029(24メッシュ)へ0.2% Δk 減少する。

以上の結果から、BP混合モデル及びBP分離モデルでの実効増倍率の差(2.04% Δk)の大部分は、体系計算においてBP領域をモデル化したことによるものであり、実効増倍率に対するメッシュ分割効果は小さいことがわかった。

また、BP分離モデルの実効増倍率は解析モデル誤差が無視できるMVPコード計算値に近づくものであり、同モデルの妥当性が確認できた。

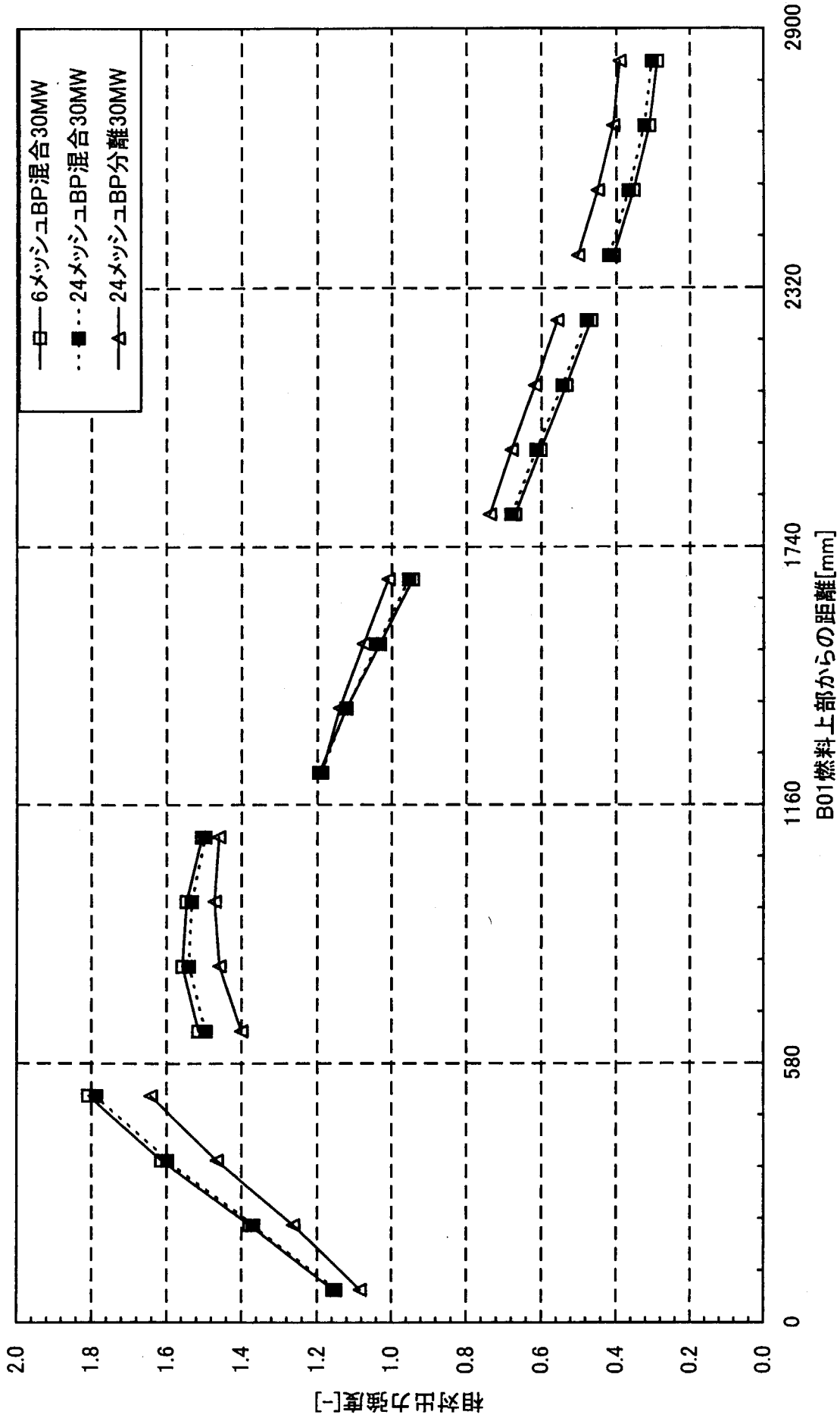
2. 燃料格子計算における黒鉛領域寸法の影響

DELIGHT-7コードによる燃料格子計算は、1次元円筒形状の燃料棒単位で行っている。BP混合モデルでは六角形の燃料体の水平断面積を燃料棒本数で割った値の等価直径を、BP分離モデルでは燃料棒ピッチに基づいた値を、燃料格子外径の寸法に設定している。BP混合モデルの燃料格子の外径は3.41cm、BP分離モデルは2.70cmであり、黒鉛領域の厚みはそれぞれ1.32cm及び0.65cmである。当然ながら燃料棒の直径は同じ2.6cmである。BP混合モデルでは燃料体の黒鉛量を保存するよう燃料格子の外径を決めていることから、燃料体の外周部分(リガメント部)の黒鉛まで燃料棒に巻き付けていることになり、燃料部と接する黒鉛領域寸法を大きく見積もっている。一方、BP分離モデルは、燃料格子外径の寸法が燃料棒ピッチに基づいた値なので格子内の黒鉛量が前者に比べて少ない。

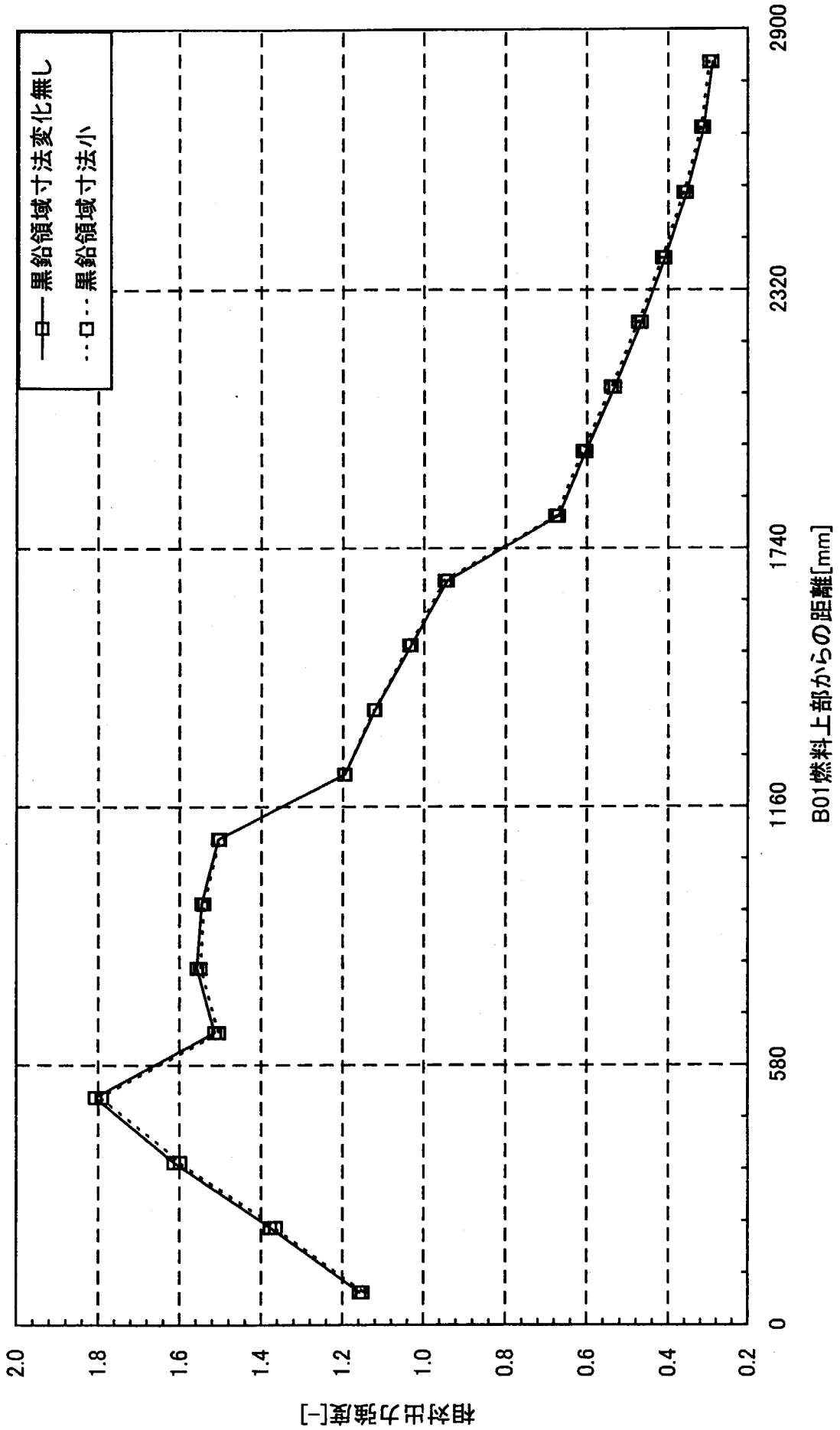
付表-1に示すように、この黒鉛領域寸法を1.32cmから0.65cmに半減すれば、制御棒全引き状態での実効増倍率は1.5% Δk ほど減少する。また、BP混合モデルにおいて上記2種類の黒鉛領域寸法に対する熱出力30MWの出力密度分布を付図-2に示す。この結果から、燃料格子における黒鉛領域寸法の効果は最大でも3%以下であり、出力密度分布には影響を与えないことがわかった。

付表-1 制御棒全引抜き状態での実効増倍率の比較

| | 実効増倍率 | 分離と混合の差 | 燃料格子における黒鉛領域寸法 | 備考 |
|----------|---------|---------|----------------|-----------|
| BP 混合モデル | 1.06274 | 0.02035 | 1.32cm | — |
| | 1.05567 | 0.01328 | 1.32cm | ストリーミング考慮 |
| | 1.04801 | 0.00562 | 0.65cm | 黒鉛領域寸法小 |
| BP 分離モデル | 1.04239 | — | 0.65cm | 黒鉛領域寸法小 |
| モンテカルロ計算 | 1.02930 | — | — | 黒鉛領域は実寸 |



付図-1 熱出力30MWの出力密度分布に対する径方向メッシュ分割数の影響



付図-2 BP混合モデルの熱出力30MWの出力密度分布に対する黒鉛領域寸法の効果

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|-------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力、応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率、放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量、電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位、電圧、起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|--------|-----------|
| 分、時、日 | min, h, d |
| 度、分、秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バ | b |
| バール | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N (=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|--------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg (Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal (計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 |

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

HTTR出力密度分布評価における拡散計算モデルの検討



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています