

## HTTR 燃料セルモデルにおける 可燃性毒物周辺のメッシュ効果

Mesh Effect around Burnable Poison Rod of Cell Model for HTTR Fuel Block

藤本 望 福田 航大 本多 友貴 栃尾 大輔

Hai Quan HO 長住 達 石井 俊晃 濱本 真平

中野 優美 石塚 悦男

Nozomu FUJIMOTO, Kodai FUKUDA, Yuki HONDA, Daisuke TOCHIO

Hai Quan HO, Satoru NAGASUMI, Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO

Yumi NAKANO and Etsuo ISHITSUKA

高速炉・新型炉研究開発部門

大洗研究所

高温ガス炉研究開発センター

高温工学試験研究炉部

Department of HTTR

HTGR Research and Development Center

Oarai Research and Development Institute

Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

June 2021

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (include data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

HTTR 燃料セルモデルにおける可燃性毒物周辺のメッシュ効果

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門  
大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター  
高温工学試験研究炉部

藤本 望<sup>\*1</sup>、福田 航大<sup>\*2</sup>、本多 友貴<sup>+</sup>、栃尾 大輔、Hai Quan HO、  
長住 達、石井 俊晃、濱本 真平、中野 優美<sup>\*3</sup>、石塚 悦男

(2021 年 4 月 8 日受理)

SRAC コードシステムを用いて可燃性毒物棒周辺のメッシュ分割が HTTR 炉心の燃焼計算に与える影響を調べた。この結果、可燃性毒物棒内部のメッシュ分割は燃焼計算に大きな影響を与えないこと、実効増倍率は可燃性毒物棒周辺の黒鉛領域をメッシュ分割することで従来計算より測定値に近い値が得られることが明らかとなった。これにより、HTTR 炉心の燃焼挙動をより適切に評価するには、可燃性毒物棒周辺黒鉛領域のメッシュ分割が重要になることが明らかとなった。

---

本研究は日本原子力研究開発機構と九州大学との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+ 高温工学試験研究炉部(2018 年 3 月まで)

\*1 九州大学

\*2 東京工業大学

\*3 株式会社ソフィアシステム

Mesh Effect around Burnable Poison Rod of Cell Model for HTTR Fuel Block

Nozomu FUJIMOTO\*<sup>1</sup>, Kodai FUKUDA\*<sup>2</sup>, Yuki HONDA<sup>+</sup>, Daisuke TOCHIO,  
Hai Quan HO, Satoru NAGASUMI, Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO,  
Yumi NAKANO\*<sup>3</sup> and Etsuo ISHITSUKA

Department of HTTR, HTGR Research and Development Center  
Oarai Research and Development Institute  
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 8, 2021)

The effect of mesh division around the burnable poison rod on the burnup calculation of the HTTR core was investigated using the SRAC code system. As a result, the mesh division inside the burnable poison rod does not have a large effect on the burnup calculation, and the effective multiplication factor is closer to the measured value than the conventional calculation by dividing the graphite region around the burnable poison rod into a mesh. It became clear that the mesh division of the graphite region around the burnable poison rod is important for more appropriately evaluating the burnup behavior of the HTTR core.

Keywords : HTTR Core, Burnable Poison, SRAC, Cell Calculation, Diffusion Calculation

---

This work has been performed in JAEA as a joint research with Kyushu University.

+ Department of HTTR until March, 2018

\*1 Kyushu University

\*2 Tokyo Institute of Technology

\*3 SOFIA SYSTEM Co.,LTD'.

目次

1. 序論 .....	1
2. セル燃焼計算 .....	1
2.1 計算条件 .....	2
2.2 計算結果 .....	3
3. 二次元炉心燃焼計算 .....	4
3.1 計算条件 .....	4
3.2 計算結果 .....	5
4. 結論 .....	6
謝辞 .....	6
参考文献 .....	6

Contents

1. Introduction .....	1
2. Cell burnup calculations .....	1
2.1 Calculation condition .....	2
2.2 Calculation results .....	3
3. Two-dimensional core burnup calculations .....	4
3.1 Calculation condition .....	4
3.2 Calculation results .....	5
4. Conclusion .....	6
Acknowledgement .....	6
References .....	6

This is a blank page.

## 1. 序論

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)<sup>1)</sup>は、1998年11月に初臨界に達して以来、燃焼に伴う臨界制御棒位置(過剰反応度)、炉停止余裕、炉心温度係数等の核特性に関するデータを取得してきた。HTTRの炉心設計は、燃料温度を制限値以下に維持しつつ、かつ高い出口温度を得るために、濃縮度の異なる燃料ブロックを適切に配置することによって出力分布の最適化が行なわれている。また、この最適化の条件を維持させるためには、燃焼期間を通して制御棒の位置変化を可能な限り小さくする必要があり、このために可燃性毒物(BP)が採用されている。

BPは、ペブル型高温ガス炉には採用されていないが、HTTRの様なブロック型高温ガス炉では過剰反応度を抑制するために導入されている。このため、BPの燃焼挙動を詳細に再現できるモデルの開発は、ブロック型高温ガス炉の核特性評価精度向上の観点から重要なものとなっている。

これまでの炉心設計では、セル燃焼計算コード DELIGHT-7<sup>2)</sup>と拡散計算コード CITATION<sup>3)</sup>を用いた核特性解析コードシステムが採用され、臨界試験結果を元に解析モデルの改良が行われてきた<sup>4)</sup>が、核データライブラリが古いこと、断面積セットの計算においてBP棒位置の影響を正確に評価できないことが問題として挙げられていた。BP棒位置の影響に関しては、BP棒周辺の詳細な中性子束分布を解析できるモデルを採用することにより、臨界試験時の過剰反応度の予測精度を向上できることが明らかになった<sup>4)</sup>が、全炉心燃焼計算では、計算で求めた臨界制御棒位置が測定値を再現できるものの、その燃焼挙動については乖離が見られる<sup>5)</sup>。これらの計算値と測定値との差異は、設計時に十分な安全余裕を設けていることから問題とならないが、より経済性の高い実用高温ガス炉を設計するためには解析コードシステムの高度化が必要となり、この一環としてSRACコードシステム<sup>6)</sup>による解析を進めている。

SRACコードシステムを用いて予備的な燃焼計算を進めた結果、従来の核特性解析コードシステムと同様に測定値との乖離が明らかになり、この原因の1つとしてBPの燃焼による変化が適切にモデル化できていない可能性が考えられる。このため、本報告書では、BP棒周辺のメッシュ効果が燃焼計算に及ぼす影響について検討した。

## 2. セル燃焼計算

燃料ブロックの概念図をFig. 2.1に示す。燃料ブロックは、六角柱状の黒鉛ブロックに33本もしくは31本の燃料棒が装荷されている。また、炉心の出力分布を最適化するため、濃縮度の異なる燃料ブロックを配置し、燃焼による反応度補償のために2本のBP棒が燃料ブロックの外周部に装荷されている。HTTR炉心の濃縮度配分とBPの配置図をFig. 2.2に示す。

HTTR設計時の核特性評価は、セル燃焼計算コード DELIGHT-7と拡散計算コード CITATIONを用いた核特性解析コードシステムで行われてきており、燃料はピンセルモデル、BPについては二次元r-Zモデルを用いて実効断面積を作成するシステムとなっていた。これに対して、SRACコードシステムでは、六角柱状ブロック内で燃料棒とBP棒の配置をモデル化して取扱うことができる。本報告では、燃

料及びBP棒の配置をモデル化したセルモデルを用いて、BP棒周辺のメッシュ分割を変えた場合の燃焼解析を行い、メッシュ分割の影響を調べた。

## 2.1 計算条件

### (1) 解析モデル

解析は、以下の分割モデルで実施した。

#### 1) モデル A(メッシュ分割なし)

本モデルの概要を Fig. 2.3 に示す。本モデルは、他のモデルの効果を評価するための基準となるものであり、BP棒内部、BP棒周辺ともメッシュ分割を行わない構造とした。

#### 2) モデル B(BP棒内部詳細分割)

本モデルの概要を Fig. 2.4 に示す。本モデルは、BP棒内部のメッシュ分割の効果を確認することを目的とし、BP棒内部を半径方向に1 mmごとに7つの領域に分割し、BP棒周辺の黒鉛部は分割しない構造とした。

#### 3) モデル C(BP棒周辺黒鉛部1領域分割)

本モデルの概要を Fig. 2.5 に示す。本モデルは、BP棒周辺の黒鉛部のメッシュ分割の効果を確認することを目的とし、BP棒内部はメッシュ分割を行わず1領域とし、BP棒周辺の黒鉛部を半径28 mmの環状領域を1領域とした構造とした。

#### 4) モデル D(BP棒周辺黒鉛部詳細分割)

本モデルの概要を Fig. 2.6 に示す。本モデルは、モデル C で分割した半径28 mmの領域内部を詳細に分割したモデルであり、BP棒周辺の黒鉛部のメッシュ分割の効果を確認することを目的とし、BP棒内部はメッシュ分割を行わず1領域としている。BP棒周辺の黒鉛部は、BP棒の半径に相当する7 mmの位置から半径28 mmの位置まで1 mm間隔で分割した構造とした。

#### 5) モデル E(BP棒周辺黒鉛部3領域分割)

本モデルの概要を Fig. 2.7 に示す。本モデルは、BP棒周辺部のメッシュ分割において、モデル C より細かく、かつモデル D より荒くしたモデルであり、メッシュ分割の程度の効果を確認することを目的とした。BP棒内部はメッシュ分割を行わず1領域とし、BP棒周辺の半径28 mmの内側を、幅3 mm、10 mm、8 mmの環状に分割した構造とした。

#### 6) モデル F(BP棒内及び周辺黒鉛部詳細分割)

本モデルの概要を Fig. 2.8 に示す。本モデルは、BP棒内部及び周辺部を同時にメッシュ分割した場合の効果を確認することを目的とし、BP棒内部を幅1 mmで7領域に分割し、BP棒の半径に相当する7 mmの位置から半径28 mmの黒鉛領域を21領域に分割した構造とした。

### (2) その他の解析条件

解析条件は以下の通りである。

- ・ 燃料の濃縮度は炉心平均の5.8 wt%とする。
- ・ BPの濃縮度は2.5 wt%(天然ボロン含有量)とする。
- ・ 被覆燃料粒子、燃料ブロック等の寸法及び物性値は設計値を用いる。

- ・中性子エネルギー群は 107 群とする。解析に用いたエネルギー群構造を Table 2.1 及び Table 2.2 に示す。
- ・30 MW 出力運転時を想定して出力密度は 3 W/cc、温度条件も 30 MW 状態を想定して Table 2.3 のように定めた。
- ・燃焼解析では、燃焼開始時の Xe 及び Sm は存在しないとした。

## 2.2 計算結果

### (1) BP 棒の分割

BP 棒内部は、中性子束の大きい外周部での  $^{10}\text{B}$  の燃焼が進み、実効的な BP 棒の太さが細くなる、いわゆるオニオンスキン効果が現れることが予想される。この効果を確認するため、BP 棒内を詳細に分割したケース B において BP 棒内の中性子束分布と物質質量変化を調べた。

BP 棒内中性子束分布(第 6 群)の変化を Fig. 2.9 示す。中性子束分布は、全体的に外側で高く、内側で低くなっており、燃焼が進むにつれて BP 棒中心部での中性子束の落ち込みが小さくなっていることが分かる。燃焼に伴う  $^{10}\text{B}$  原子数密度分布の変化を Fig. 2.10 に示す。同図から、燃焼初期では平坦な分布であるが、燃焼が進むにつれて外側の  $^{10}\text{B}$  が減少することが分かる。

BP 棒分割がないモデル A と BP 棒分割があるモデル B における無限増倍率の比較を Fig. 2.11 に示す。同図から、モデル A とモデル B での実効増倍率の差がほとんどないことが明らかになった。この原因は、モデル B において燃焼が進むにつれて外側の  $^{10}\text{B}$  が減少して分布が変化するものの、その影響が少ないためと考えられる。この結果、BP 棒内部のメッシュ分割の効果はそれほど解析結果に影響しないことが明らかとなった。なお、解析では初期条件として Xe 及び Sm が存在しないとしているため、燃焼開始後数日で無限増倍率の落ち込みが見られる。

### (2) 黒鉛部の分割

#### 1) 分割の影響

黒鉛部の中性子束は、BP 棒に近づくにつれ低くなることが予想されるが、黒鉛の吸収断面積が小さく、中性子の平均自由行程も長いことから中性子束の低下はそれほど大きくない可能性があるため、黒鉛部を分割しないモデル A と BP 棒周りを半径 28 mm の位置で分割したモデル C とを比較した。燃焼 0 日における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較を Fig. 2.12 に示す。同図から、BP 棒周りを分割したモデル C では黒鉛部及び BP 棒内部の中性子束が低下していることが明らかとなった。燃焼中期に相当する燃焼 300 日及び燃焼末期に相当する燃焼 600 日における中性子束分布(第 6 群)の比較を Fig. 2.13 及び Fig. 2.14 に示す。この結果から、燃焼が進むにつれて黒鉛部における中性子束の差は小さくなっているが、モデル C は A より小さな値を示している。

無限増倍率に関するモデル A と C の比較を Fig. 2.15 に示す。燃焼 0 日におけるモデル C は A より大きい無限増倍率を示している。これは、BP 棒周りでメッシュ分割を行うことにより、BP 部での中性子束が低下し反応度値が低下したことを示している。また、両モデルとも燃焼が進むにつれて BP が減少するため無限増倍率は増加していくが、モデル C は A より変化が小さくなっている。これは、BP 棒内部の中性子束が低いモデル C において、BP の燃焼がモデル A より緩やかになってい

ることを意味している。以上の結果から、BP 棒周りの黒鉛部のメッシュ分割は、燃焼挙動に影響を与えることが明らかとなった。

## 2) 分割数の影響

BP 棒周りのメッシュ分割の効果について更に検討するため、BP 棒周りを半径 28 mm の位置まで詳細に分割したモデル D とモデル C の比較を行った。

燃焼 0、300 及び 600 日におけるモデル C 及び D の BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較を Fig. 2.16 から Fig. 2.18 に示す。モデル D の中性子束分布は、モデル C よりメッシュ分割が細かくなったことにより滑らかな分布となり、BP 棒内部中性子束の値は小さくなった。また、モデル D における BP 棒近くの黒鉛部の中性子束は、モデル C に比べて低くなった。両モデルにおける燃焼による無限増倍率変化の比較を Fig. 2.19 に示す。同図から、モデル D は、モデル C より無限増倍率で 0.01 程度高くなっており、燃焼による BP 反応度価値の変化がモデル C より小さくなることを意味している。これらの結果から、BP 棒周辺の黒鉛部の分割数は、BP の反応度価値及びその燃焼挙動に大きく影響を与えることが明らかとなった。

## 3) 分割の最適化

これまでの検討結果から、BP 棒周りの黒鉛部の分割は、BP 反応度及び BP の燃焼挙動に影響を与えることが明らかとなった。しかし、モデル D のように分割を 1 mm 間隔とした場合、計算時間が長くなる。このため、最適な分割方法を調べる目的で BP 棒周辺の半径 28 mm の内側を幅 3 mm、10 mm、8 mm の間隔で分割したモデル E を作成し、モデル D と比較した。燃焼 0、300 及び 600 日におけるモデル D 及び E の BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較を Fig. 2.20 から Fig. 2.22 に示す。また、無限増倍率の変化の比較を Fig. 2.23 に示す。比較の結果、分割を粗くしたモデル E でも中性子束分布は多少凸凹するがモデル D と同等の計算結果が得られた。

BP 棒内部及び周辺部を細かく分割したモデル F を作成し、燃焼による無限増倍率をモデル D と比較した結果を Fig. 2.24 に示す。比較の結果、両モデルの計算結果は、ほぼ同じ値を示していることから、モデル A とモデル B との比較と同様に BP 棒内部のメッシュ分割の効果は小さいことが明らかとなった。

## 3. 二次元炉心燃焼計算

本章では、セル計算により得られたマクロ断面積を用いて二次元炉心計算を行い、BP 棒周りのメッシュ分割の効果を調べた。

### 3.1 計算条件

解析は、HTTR 炉心を二次元 r-Z で表した簡易的モデルを用いて実施した。二次元モデルにおける BP 配置の概念図を Fig. 3.1 に示す。BP 棒周りのモデル化に関しては、実際の構造が①の様な構造になっているが、今回の解析ではメッシュ分割の効果を確認することが目的であるため、②に示す様な簡易モデルを採用した。

二次元 r-Z モデルの概念図を Fig. 3.2 に示す。モデル化は以下の方針で行い、制御棒はモデル化していない。

- ・ HTTR 炉心は、燃料体及び制御棒案内ブロックからなる 37 カラムにより構成されているが、本解析では、簡略化のために 30 カラムとしてモデル化した。このため、炉心モデルの半径は、円筒近似して 115 cm とした。炉心モデルの高さは、58 cm の燃料体を 5 段積み上げたときの高さである 290 cm とした。なお、燃料体はすべて 33 ピンの燃料体とし、BP 濃度も 2.5 wt% の 1 種類とした。
- ・ 燃料体モデルは、上部 40 cm を BP を含む領域、下部 18 cm を BP を含まない領域とし、軸方向に 2 つの領域に分離した。また、軸方向のメッシュ分割は、上部 40 cm の BP を含む領域を 4 分割、下部 18 cm の BP を含まない領域を 2 分割とし、径方向のメッシュ分割は 10 分割とした。
- ・ 可動反射体モデルとして、炉心の上下にはそれぞれ高さ 116 cm(燃料体 2 体分に相当)の黒鉛ブロックを、炉心の外側には幅 36 cm(燃料体 1 体分に相当)の黒鉛ブロックを巻きつけるように配置した。また、固定反射体モデルとして、可動反射体の外側に幅 100 cm の黒鉛ブロックを巻きつけるように配置した。
- ・ 炉心の上下に配置した可動反射体は、軸方向に 5 分割、径方向に 10 分割とした。また、炉心の外側に巻きつけるように配置した可動反射体は、軸方向には 40 分割、径方向に 3 分割とした。さらに、固定反射体は、軸方向に 40 分割、径方向に 5 分割とした。

解析は、熱出力 30 MW 相当の出力とし、燃焼期間は現在の HTTR の燃焼データが得られている期間を参考に 360 日とした。また、炉心温度は、燃料コンパクト部が 1600K、それ以外の黒鉛はすべて 1200K とした。

解析は、BP 棒周辺の分割の影響を調べるため、BP 棒内部及び周辺の黒鉛部のメッシュ分割を行わない均質モデル、BP 棒周辺の黒鉛部を 3 領域に分割した分割モデルについて計算した。なお、分割モデルの BP 棒周辺のメッシュ分割は、2 章のモデル E と同じである。

### 3.2 計算結果

二次元 r-Z モデルによる実効増倍率の計算結果を Fig. 3.3 に示す。解析では、燃焼初期の Xe 及び Sm が無いものとして計算しているため、燃焼開始直後は Xe 及び Sm の蓄積の効果で大きく実効増倍率が低下している。Xe は燃焼開始後数日、Sm も燃焼開始後 50 日以下で飽和するため、燃焼 10 日以降は滑らかな曲線となっている。均質モデルでは、Xe 及び Sm の飽和後に実効増倍率が上昇し、燃焼 200 日以降に平坦になっている。これに対し分割モデルでは、Xe 及び Sm の飽和後に実効増倍率は増加するもののその増加は緩やかであり、燃焼期間を通じた実行増倍率の変化は緩やかとなっている。また、均質モデルでは燃焼初期の実効増倍率が分割モデルより低くなっている。これは、「BP 棒周辺黒鉛部を分割しないと BP の反応度値を高めに評価してしまう」という前章と同様の結果となった。

従来の HTTR 核特性解析コードシステム及び SRAC コードシステムによる HTTR の燃焼解析は、Fig. 3.3 に示す均質モデルと同様な解析結果となっていたが、実効増倍率の測定結果は、分割モデルに近い値となっている。以上の結果から、SRAC コードシステムで解析を行う際は、BP 棒周辺黒鉛部のメッシュ分割が重要となることが確認できた。

#### 4. 結論

SRAC コードシステムを用いて BP 棒周辺のメッシュ分割が燃焼計算に与える影響をセル燃焼計算及び二次元 r-Z モデルによる炉心計算により検討した。この結果、以下が明らかとなった。

- (1) BP 棒内部の分割は、燃焼挙動に大きな影響を与えない。
- (2) BP 棒周辺黒鉛部を分割しないと BP の反応度値を高めに評価してしまう。
- (3) BP 棒周辺黒鉛部の分割は、BP の反応度値を低めに評価するが、燃焼による実効増倍率の変化は緩やかになった。
- (4) BP 棒周辺黒鉛部の分割数は、3 領域程度で十分である。
- (5) 二次元 r-Z モデルによる炉心計算でも、BP 棒周辺黒鉛領域を分割することにより燃焼による実効増倍率の変化は緩やかになった。
- (6) BP 棒周辺黒鉛部を分割した二次元 r-Z モデルは、従来の HTTR 核特性解析コードシステムや分割しないモデルより、測定結果に近い結果となった。

以上の結果から、SRAC コードシステムにおいては、BP 棒周辺黒鉛部をメッシュ分割することによって燃焼挙動をより適切に評価できることが明らかとなった。今後、SRAC コードシステムを用いて 3 次元燃焼計算を行い、BP 棒周辺黒鉛部のメッシュ分割の効果を確認する予定である。

#### 謝辞

本報告書をまとめるに当たり、高速炉・新型炉研究開発部門大洗研究所高温ガス炉研究開発センター高温工学試験研究炉部 伊与久達夫氏に貴重なご意見を頂いた。以上、記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) S. Saito, et al., “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, JAERI 1332(1994), 247p.
- 2) 新藤 隆一, 山下 清信, 村田 勲, “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), 225p.
- 3) 原田 裕夫, 山下 清信, “高温工学試験研究炉の炉心核特性解析コード CITATION-1000VP”, JAERI-M 89-135 (1989), 83p.
- 4) N. Fujimoto, et al., “Nuclear design”, Nuclear Engineering and Design, Vol 233, pp.155-162(2004).
- 5) Y. Honda, et al., “Burn-up dependency of control rod position at zero power criticality in the High Temperature Engineering Test Reactor”, Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol.3(1), 011013, <https://doi.org/10.1115/1.4033812> (2017).
- 6) K. Okumura, et al., “SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System”, JAEA-Data/Code 2007-004 (2007), 313p.

Table 2.1 高速中性子エネルギー群構造

(A: Condensed group, B: Multi group)

Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)	Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)	Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)
A	B			A	B			A	B		
1	1	$7.7880 \times 10^6$	0.25	2	17	$1.4264 \times 10^5$	4.25	3	38	$7.4852 \times 10^2$	9.50
	2	$6.0653 \times 10^6$	0.50		18	$1.1109 \times 10^5$	4.50		39	$5.8295 \times 10^2$	9.75
	3	$4.7237 \times 10^6$	0.75		19	$8.6517 \times 10^4$	4.75		40	$4.5400 \times 10^2$	10.00
	4	$3.6788 \times 10^6$	1.00		20	$6.7380 \times 10^4$	5.00		41	$3.5358 \times 10^2$	10.25
	5	$2.8650 \times 10^6$	1.25		21	$5.2475 \times 10^4$	5.25		42	$2.7536 \times 10^2$	10.50
	6	$2.2313 \times 10^6$	1.50		22	$4.0868 \times 10^4$	5.50		43	$2.1445 \times 10^2$	10.75
	7	$1.7377 \times 10^6$	1.75		23	$3.1828 \times 10^4$	5.75		44	$1.6702 \times 10^2$	11.00
	8	$1.3534 \times 10^6$	2.00		24	$2.4788 \times 10^4$	6.00		45	$1.3007 \times 10^2$	11.25
	9	$1.0540 \times 10^6$	2.25		25	$1.9304 \times 10^4$	6.25		46	$1.0130 \times 10^2$	11.50
	10	$8.2085 \times 10^5$	2.50		26	$1.5034 \times 10^4$	6.50		47	$7.8893 \times 10$	11.75
	11	$6.3928 \times 10^5$	2.75		27	$1.1709 \times 10^4$	6.75		48	$6.1442 \times 10$	12.00
	12	$4.9787 \times 10^5$	3.00		28	$9.1188 \times 10^3$	7.00		49	$4.7851 \times 10$	12.25
	13	$3.8774 \times 10^5$	3.25		29	$7.1017 \times 10^3$	7.25		50	$3.7266 \times 10$	12.50
	14	$3.0197 \times 10^5$	3.50		30	$5.5308 \times 10^3$	7.50		51	$2.9023 \times 10$	12.75
	15	$2.3518 \times 10^5$	3.75		31	$4.3074 \times 10^3$	7.75		52	$2.2603 \times 10$	13.00
	16	$1.8316 \times 10^5$	4.00		32	$3.3546 \times 10^3$	8.00		53	$1.7604 \times 10$	13.25
				33	$2.6126 \times 10^3$	8.25	54	$1.3710 \times 10$	13.50		
				34	$2.0347 \times 10^3$	8.50	55	$1.0677 \times 10$	13.75		
				35	$1.5846 \times 10^3$	8.75	56	8.3153	14.00		
				36	$1.2341 \times 10^3$	9.00	57	6.4759	14.25		
				37	$9.6112 \times 10^2$	9.25	58	5.0435	14.50		
							59	3.9279	14.75		
							60	3.0590	15.00		
							61	2.3824	15.25		
							62	1.8554	15.50		

Table 2.2 熱中性子エネルギー群構造

(A: Condensed group, B: Multi group)

Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)	Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)	Group		Energy (Lower, eV)	Lethargy (Lower)
A	B			A	B			A	B		
4	1	1.6374	15.625	5	9	$6.0236 \times 10^{-1}$	16.625	6	29	$9.7080 \times 10^{-2}$	18.450
	2	1.4450	15.750		10	$5.3158 \times 10^{-1}$	16.750		30	$8.5297 \times 10^{-2}$	18.580
	3	1.2752	15.875		11	$4.6912 \times 10^{-1}$	16.875		31	$7.4276 \times 10^{-2}$	18.718
	4	1.1253	16.000		12	$4.1399 \times 10^{-1}$	17.000		32	$6.4017 \times 10^{-2}$	18.867
	5	$9.9312 \times 10^{-1}$	16.125		13	$3.8925 \times 10^{-1}$	17.062		33	$5.4520 \times 10^{-2}$	19.027
	6	$8.7643 \times 10^{-1}$	16.250		14	$3.6528 \times 10^{-1}$	17.125		34	$4.5785 \times 10^{-2}$	19.202
	7	$7.7344 \times 10^{-1}$	16.375		15	$3.4206 \times 10^{-1}$	17.191		35	$3.7813 \times 10^{-2}$	19.393
	8	$6.8256 \times 10^{-1}$	16.500		16	$3.1961 \times 10^{-1}$	17.259		36	$3.0602 \times 10^{-2}$	19.605
					17	$2.9792 \times 10^{-1}$	17.329	37	$2.4154 \times 10^{-2}$	19.841	
					18	$2.7699 \times 10^{-1}$	17.402	38	$1.8467 \times 10^{-2}$	20.110	
					19	$2.5683 \times 10^{-1}$	17.477	39	$1.3543 \times 10^{-2}$	20.420	
					20	$2.3742 \times 10^{-1}$	17.556	40	$9.3805 \times 10^{-3}$	20.787	
					21	$2.1878 \times 10^{-1}$	17.638	41	$5.9804 \times 10^{-3}$	21.237	
					22	$2.0090 \times 10^{-1}$	17.723	42	$3.3423 \times 10^{-3}$	21.819	
					23	$1.8378 \times 10^{-1}$	17.812	43	$1.4663 \times 10^{-3}$	22.643	
					24	$1.6743 \times 10^{-1}$	17.905	44	$3.5238 \times 10^{-4}$	24.069	
					25	$1.5183 \times 10^{-1}$	18.003	45	$1.0000 \times 10^{-5}$	27.631	
					26	$1.3700 \times 10^{-1}$	18.106				
					27	$1.2293 \times 10^{-1}$	18.214				
					28	$1.0963 \times 10^{-1}$	18.329				

Table 2.3 解析に用いた温度条件

物質	温度 [K]
燃料コンパクト	1500
黒鉛スリーブ	1350
黒鉛ブロック	1200
ヘリウム(冷却材)	1150
BP	1200

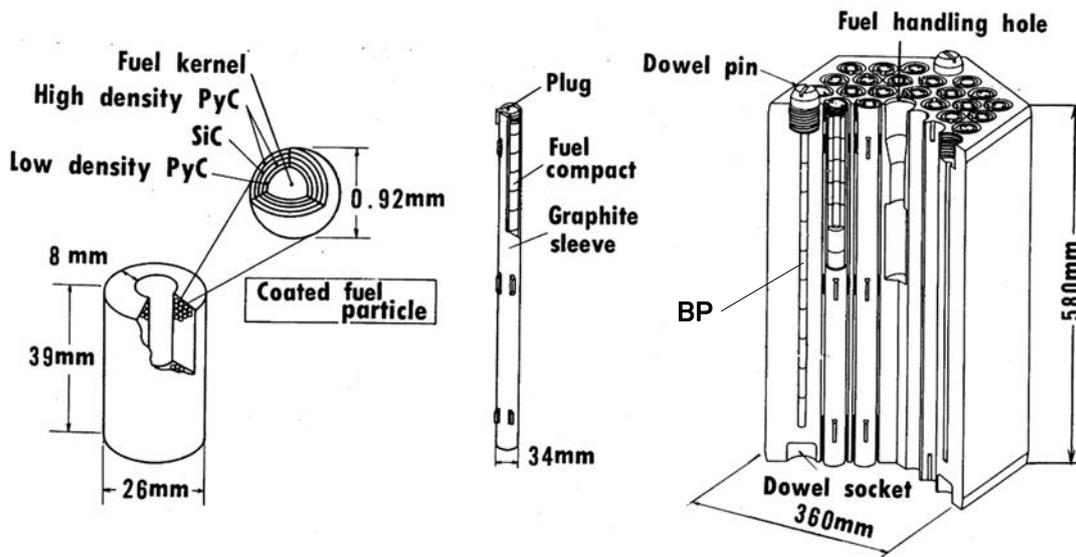
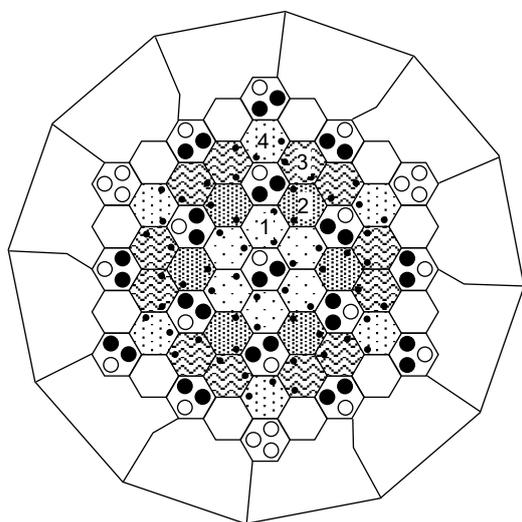


Fig. 2.1 燃料ブロックの概念図



N: Fuel region number  
 ●: Burnable poison (BP)

<sup>235</sup>U enrichment and BP density distribution  
 (Unit: wt%)

Layer number	Fuel region number				BP density
	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

Fig. 2.2 HTTR 炉心の濃縮度配分と BP 配置図

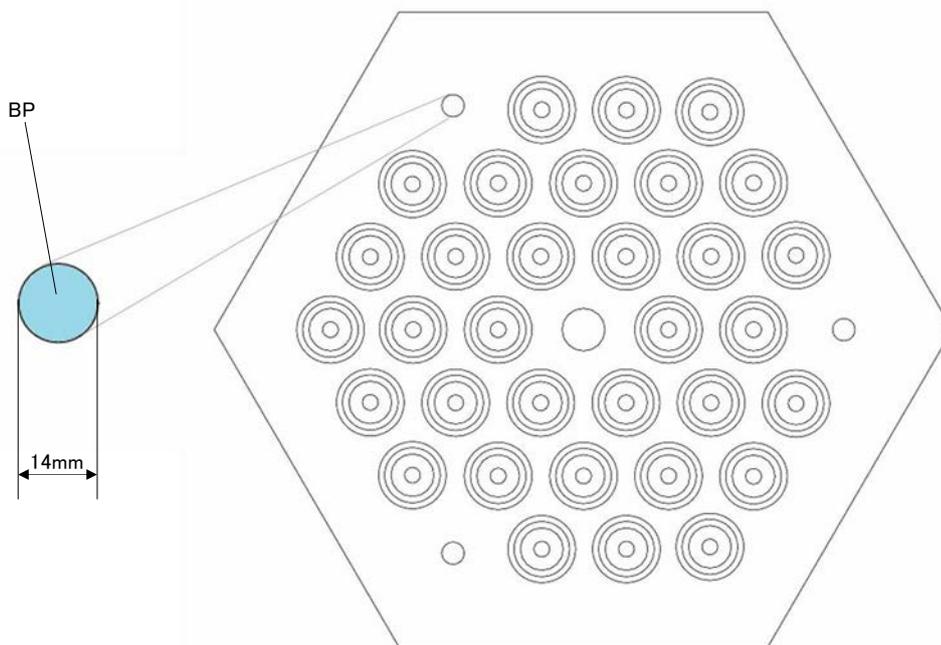


Fig. 2.3 モデル A(メッシュ分割なし)の概要

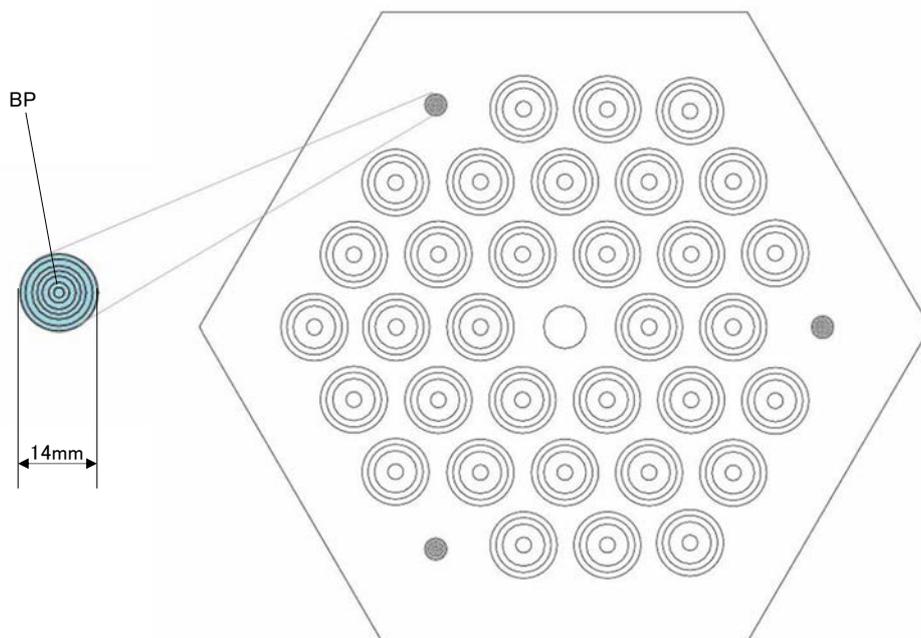


Fig. 2.4 モデル B(BP 棒内部詳細分割)の概要

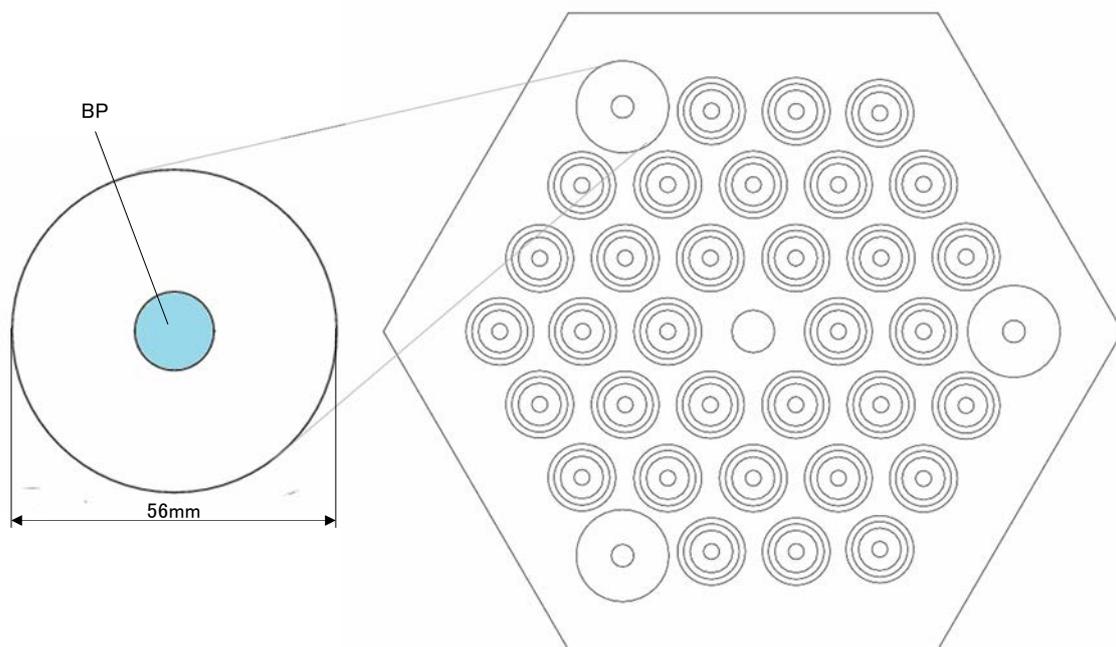


Fig. 2.5 モデル C (BP 棒周辺黒鉛部 1 領域分割) の概要

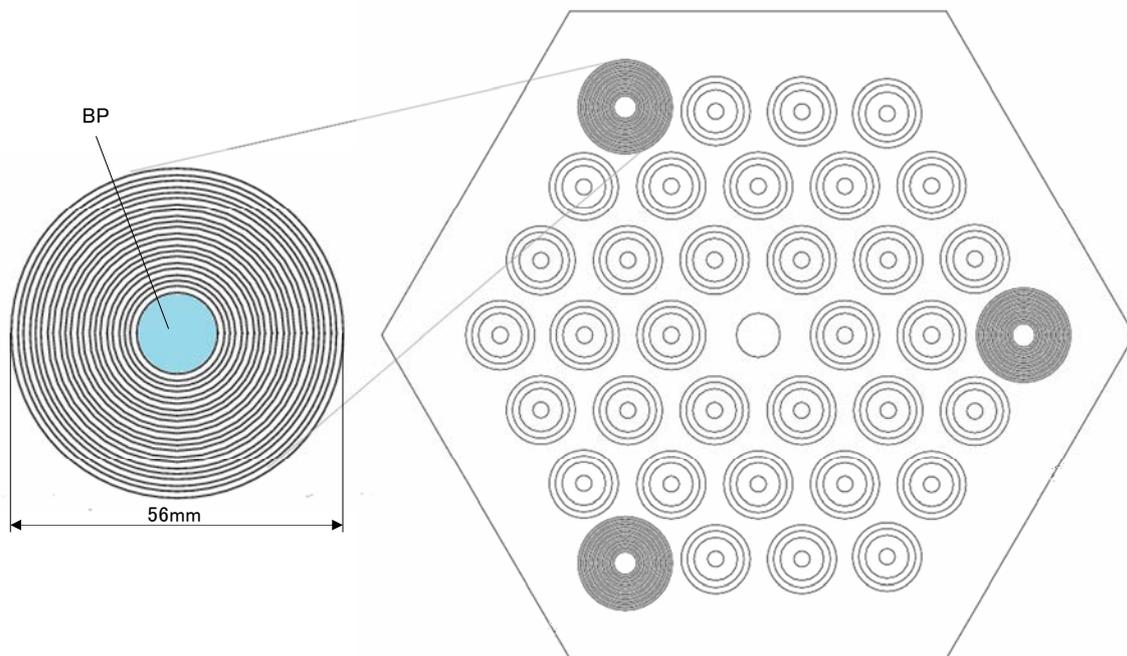


Fig. 2.6 モデル D (BP 棒周辺黒鉛部詳細分割) の概要

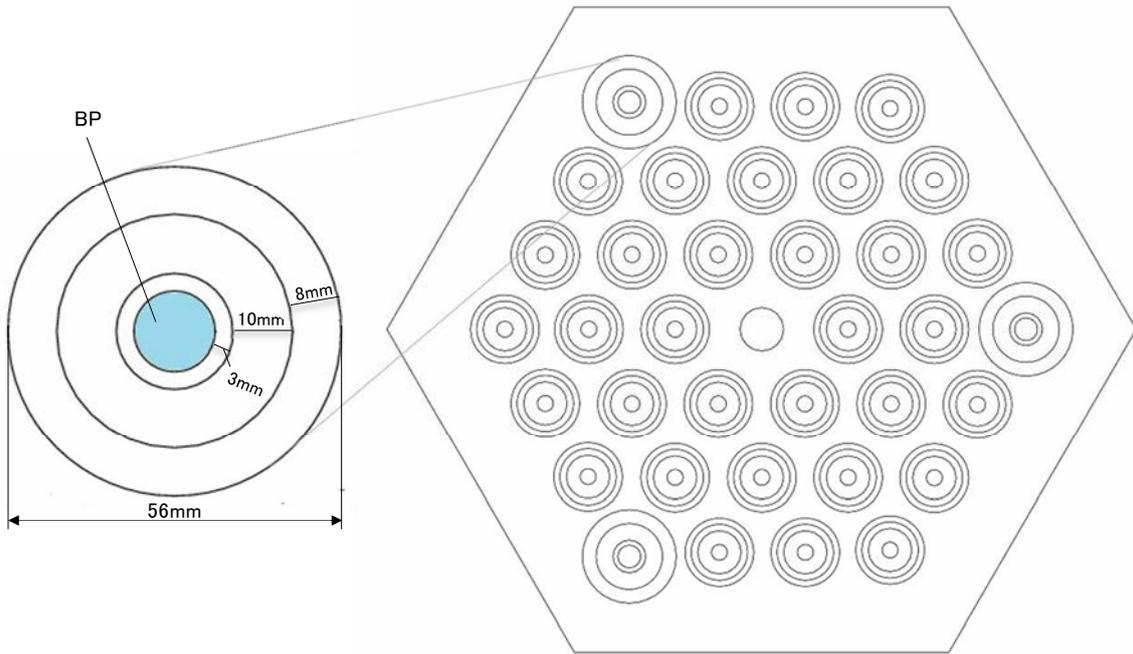


Fig. 2.7 モデル E(BP 棒周辺黒鉛部 3 領域分割)の概要

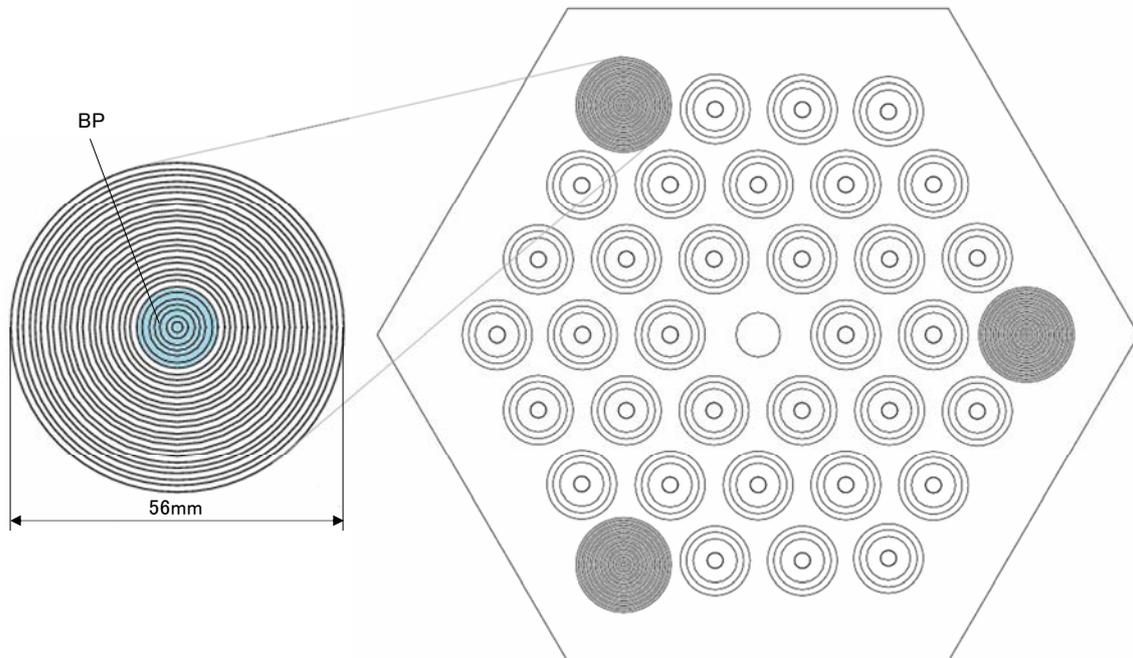


Fig. 2.8 モデル F(BP 棒内及び周辺黒鉛部詳細分割)の概要

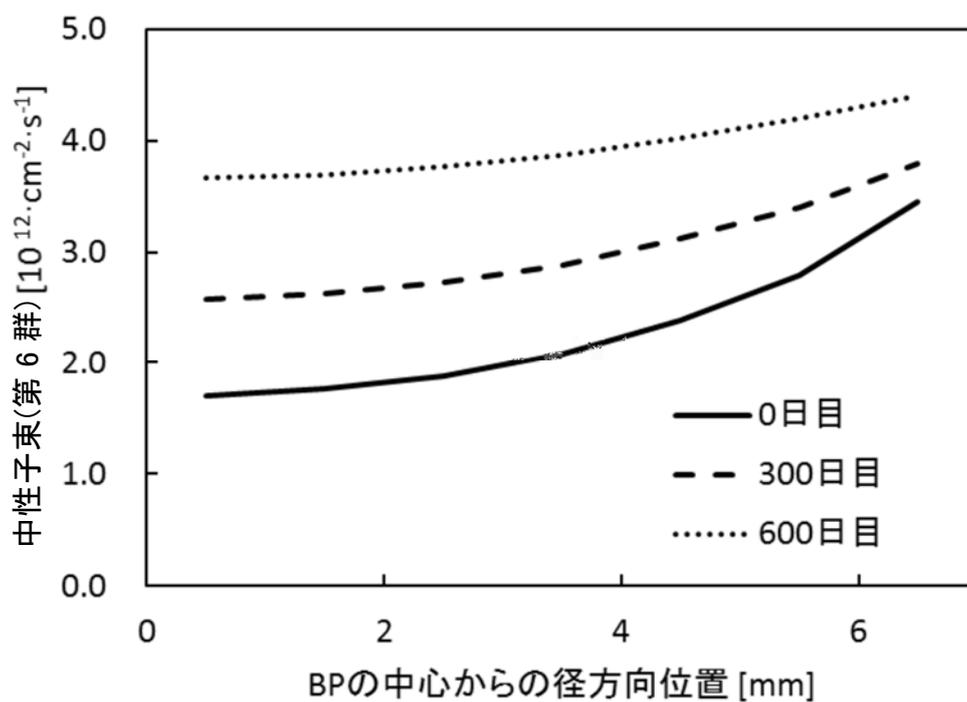


Fig. 2.9 モデル B における BP 棒内中性子束分布(第 6 群)の変化

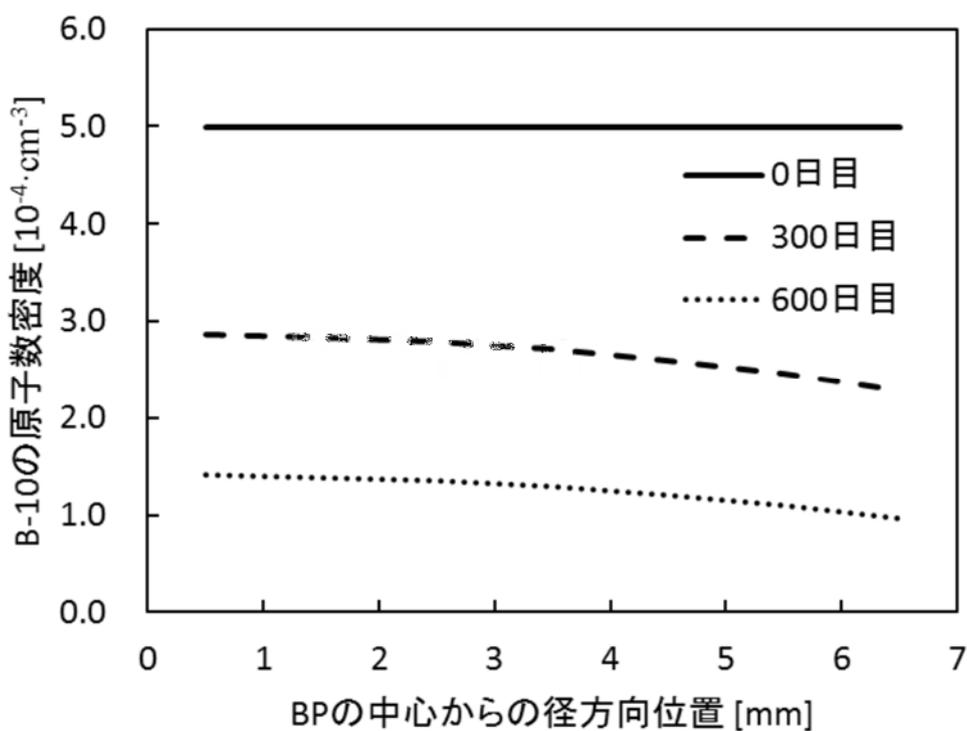


Fig. 2.10 モデル B における  $^{10}\text{B}$  原子数密度分布の変化

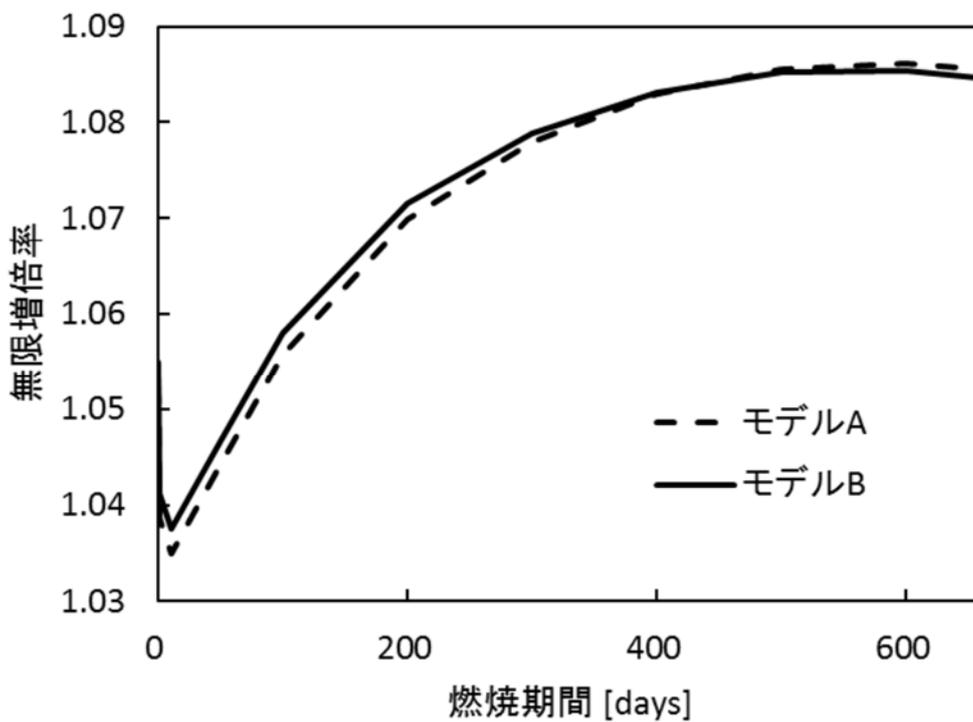


Fig. 2.11 モデル A とモデル B における燃焼による無限増倍率の比較

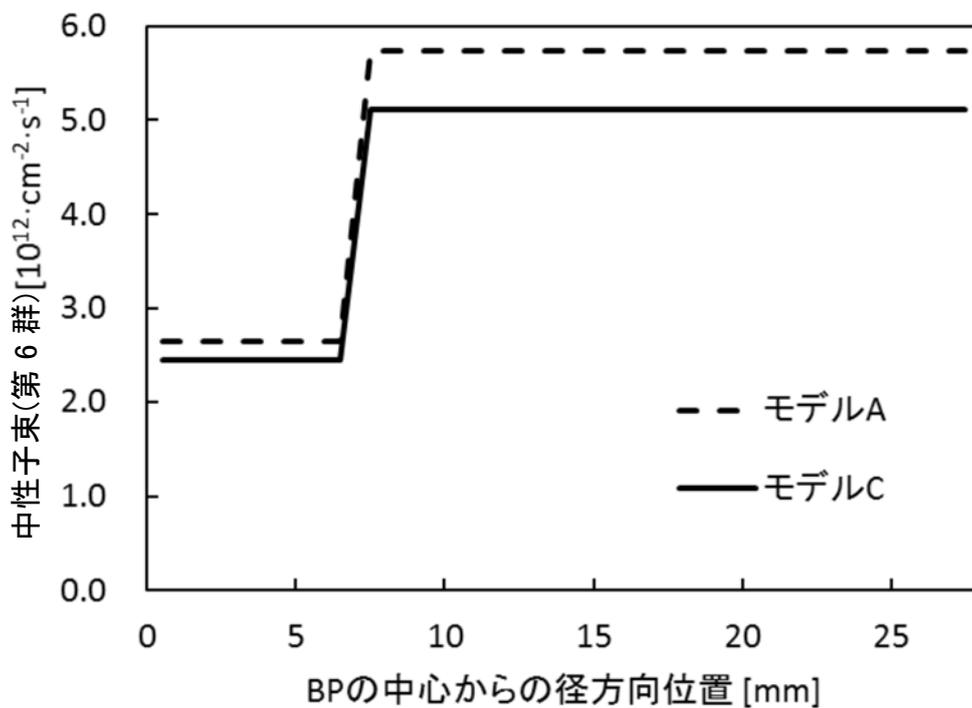


Fig. 2.12 モデル A とモデル C における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第6群)の比較  
(燃焼 0 日)

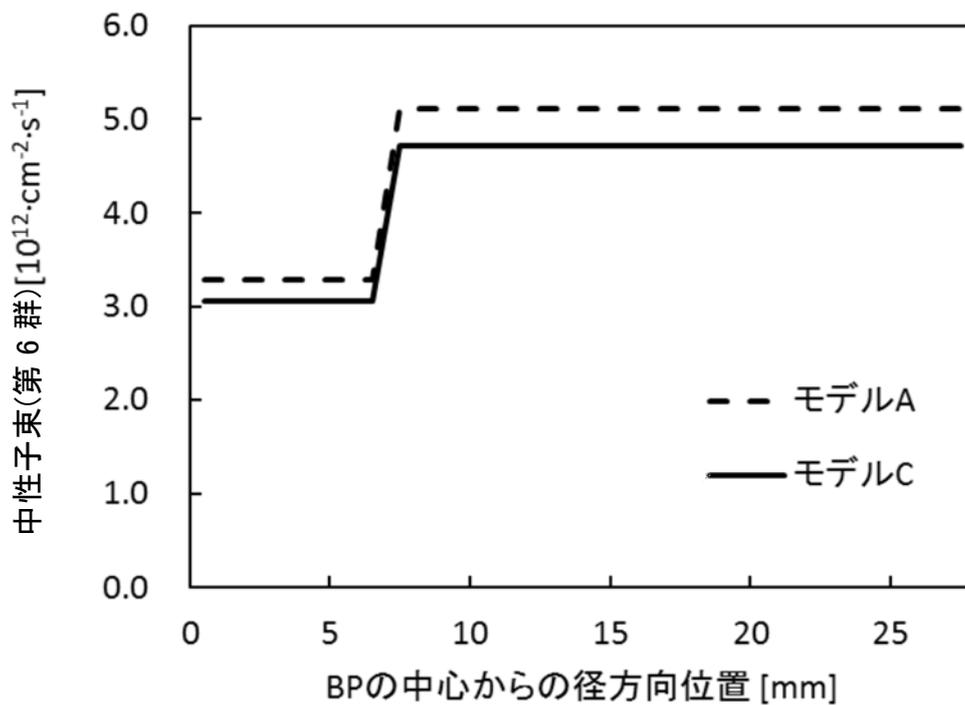


Fig. 2.13 モデル Aとモデル C における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較  
(燃焼 300 日)

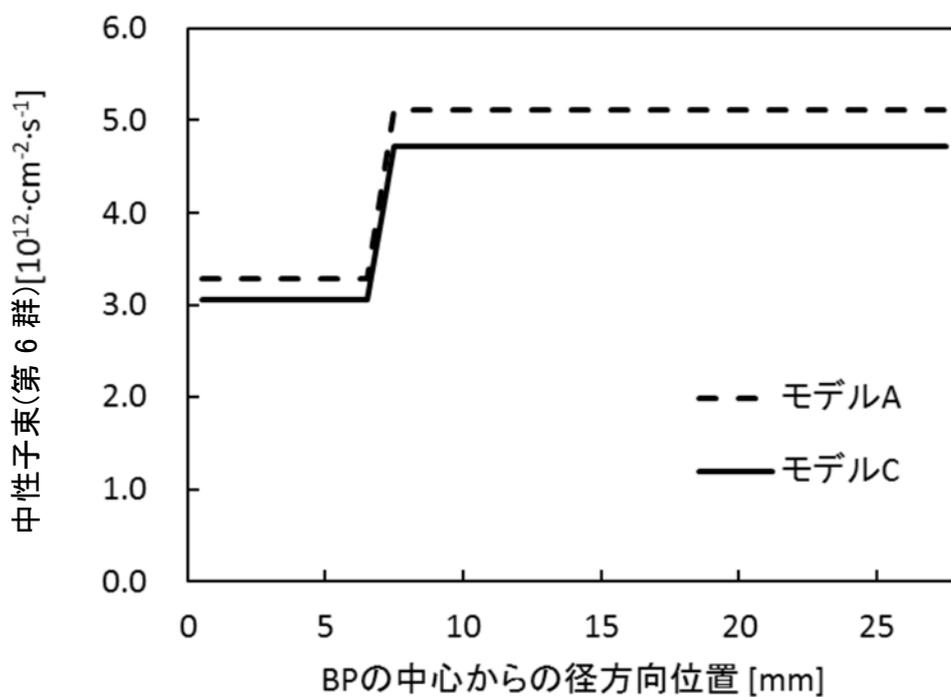


Fig. 2.14 モデル Aとモデル C における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較  
(燃焼 600 日)

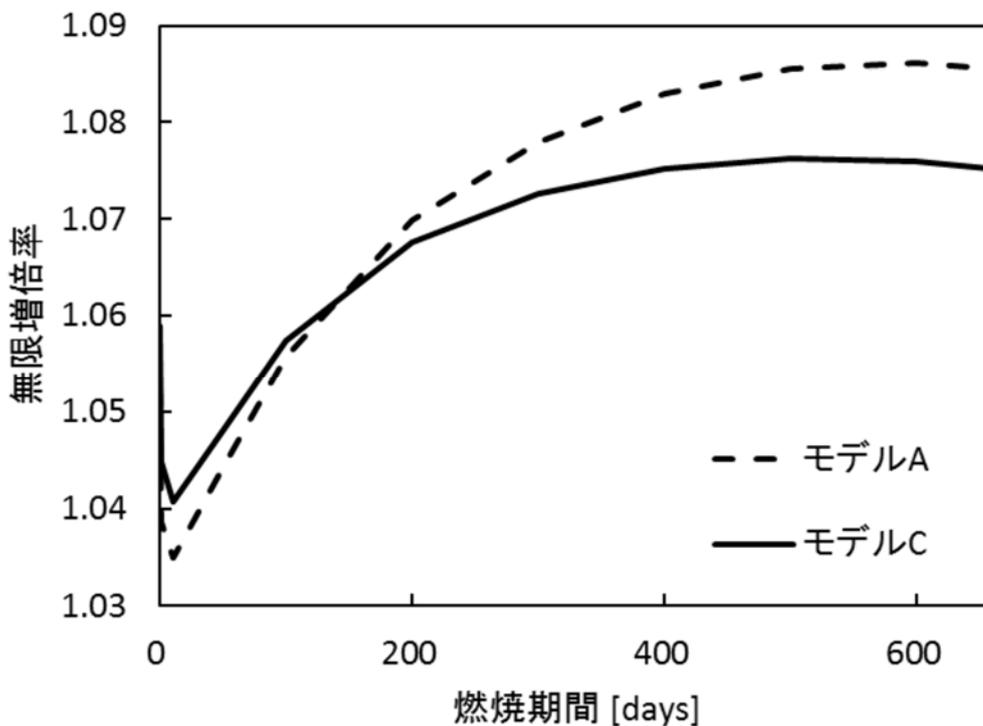


Fig. 2.15 モデル A とモデル C における燃焼による無限増倍率の変化の比較

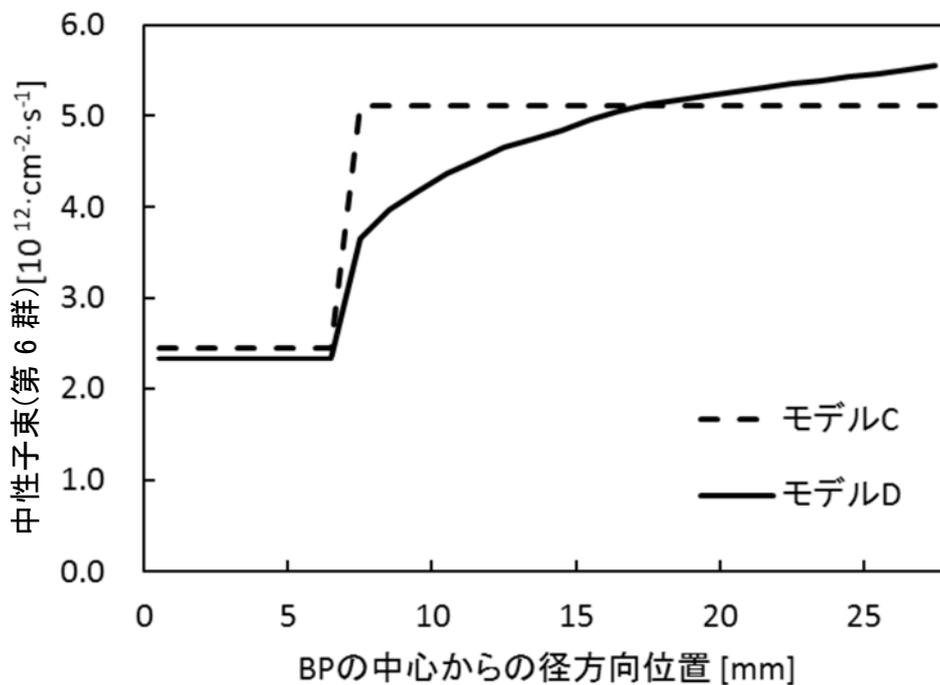


Fig. 2.16 モデル C とモデル D における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較  
(燃焼 0 日)

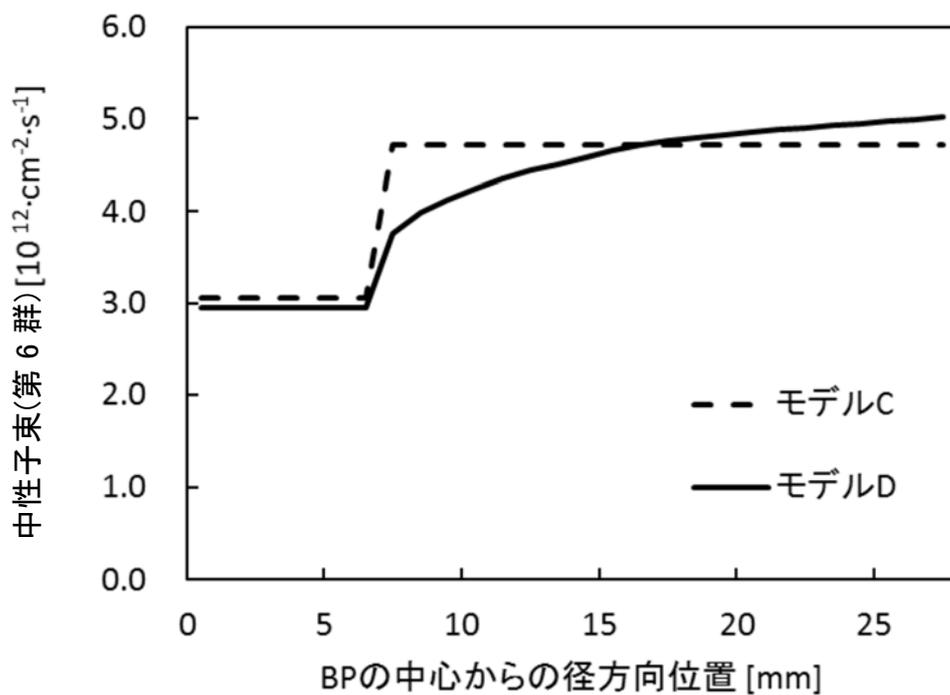


Fig. 2.17 モデル Cとモデル D における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較  
(燃焼 300 日)

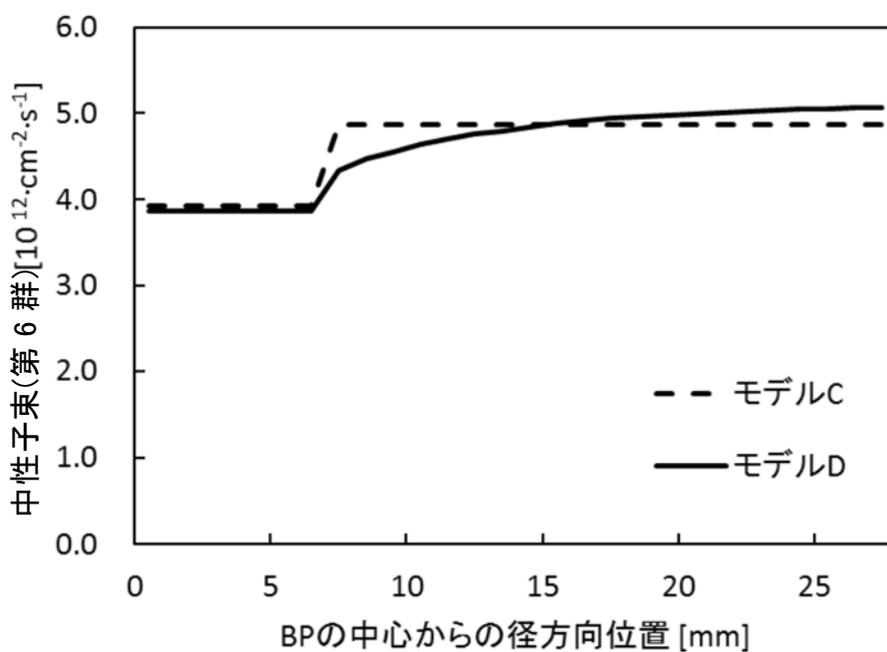


Fig. 2.18 モデル Cとモデル D における BP 棒周辺の熱中性子束分布(第 6 群)の比較  
(燃焼 600 日)

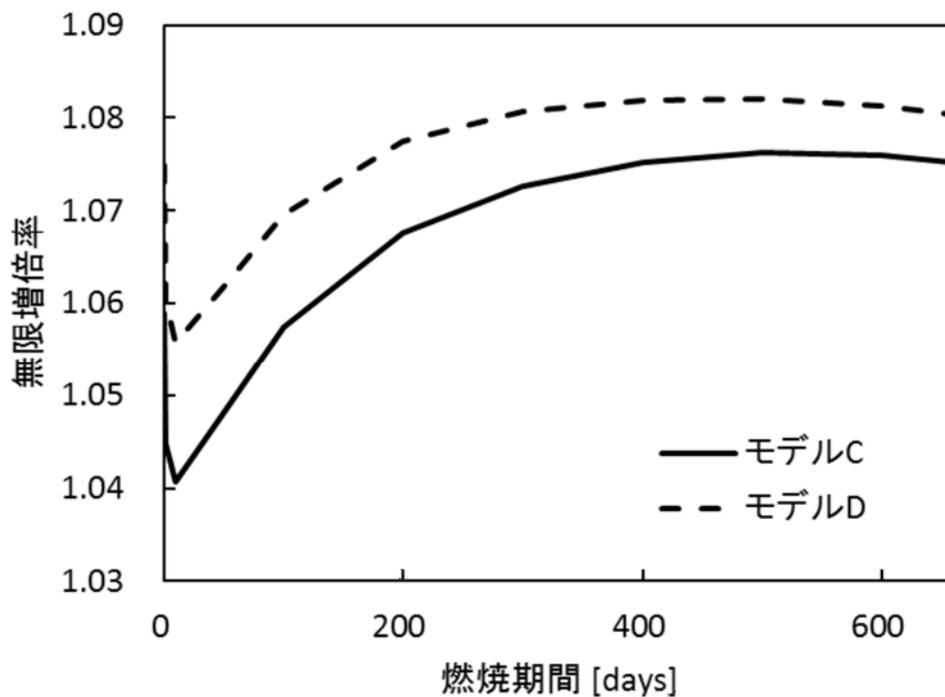


Fig. 2.19 モデル C とモデル D における燃焼による無限増倍率変化の比較

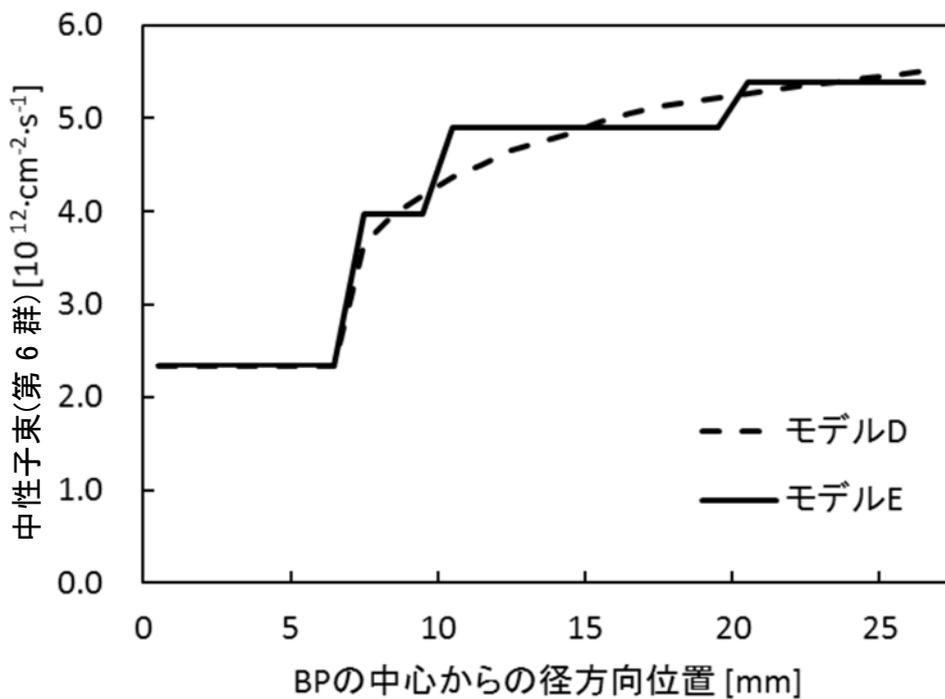


Fig. 2.20 モデル D とモデル E における BP 棒周辺の熱中性子束分布 (第 6 群) の比較 (燃焼 0 日)

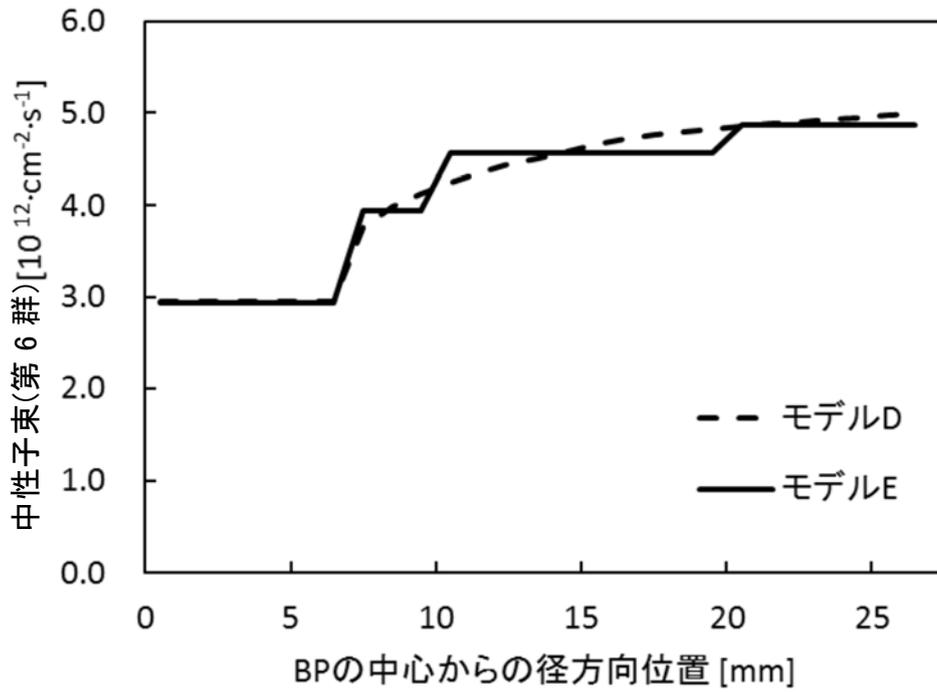


Fig. 2.21 モデルDとモデルEにおけるBP棒周辺の熱中性子束分布(第6群)の比較  
(燃焼 300 日)

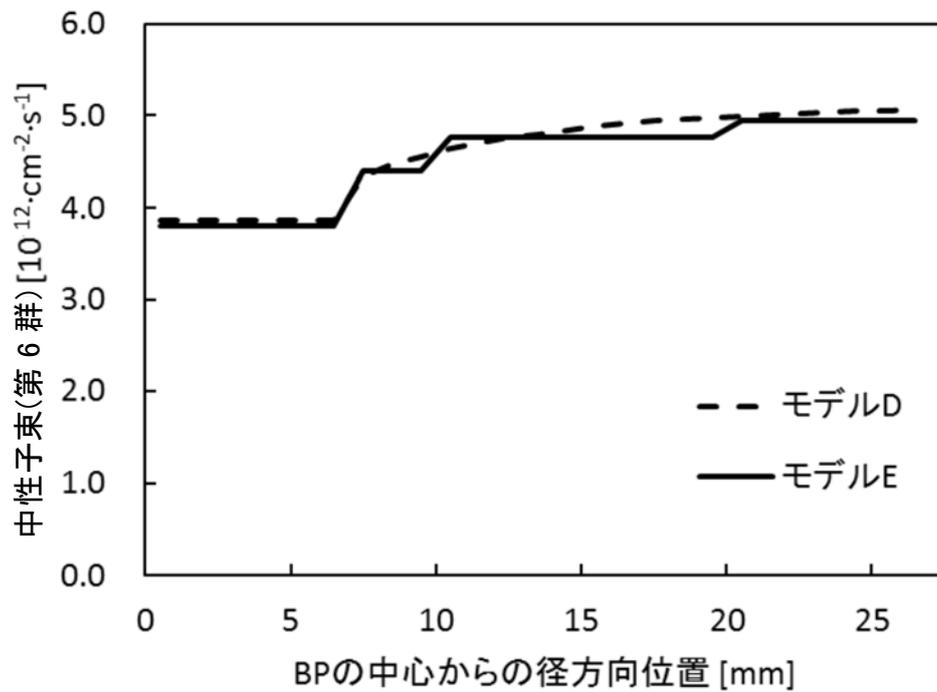


Fig. 2.22 モデルDとモデルEにおけるBP棒周辺の熱中性子束分布(第6群)の比較  
(燃焼 600 日)

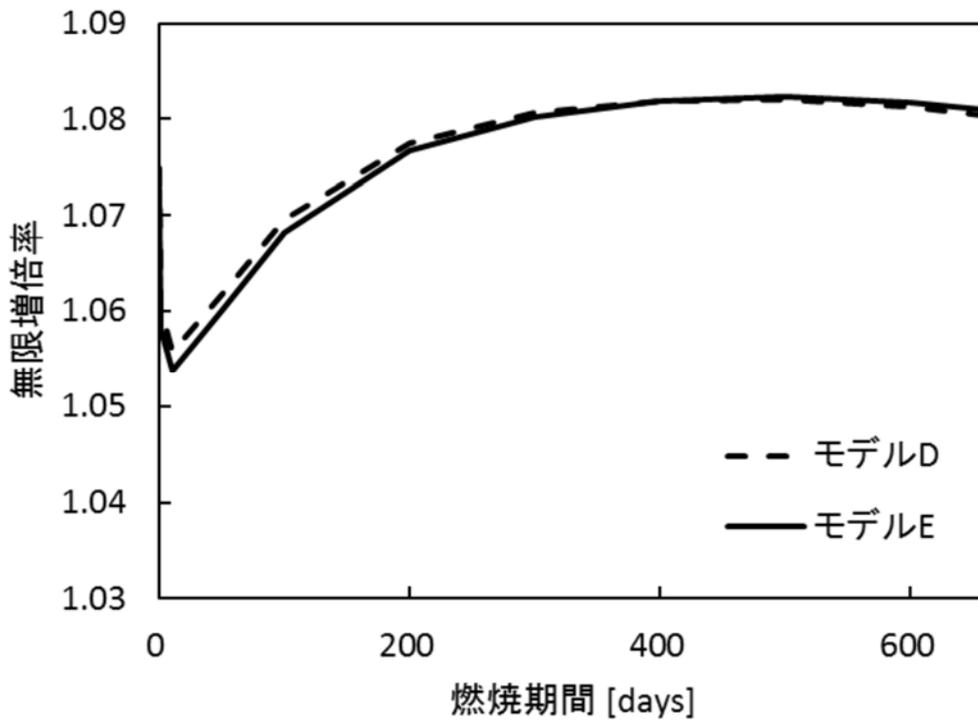


Fig. 2.23 モデル D とモデル E における燃焼による無限増倍率の変化の比較

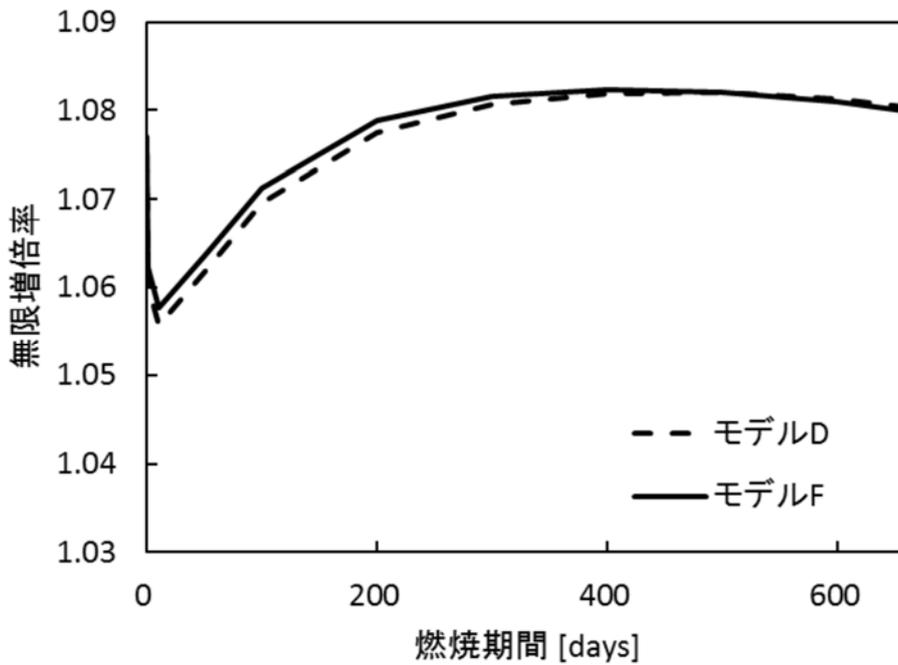


Fig. 2.24 モデル D とモデル F における燃焼による無限増倍率の変化の比較

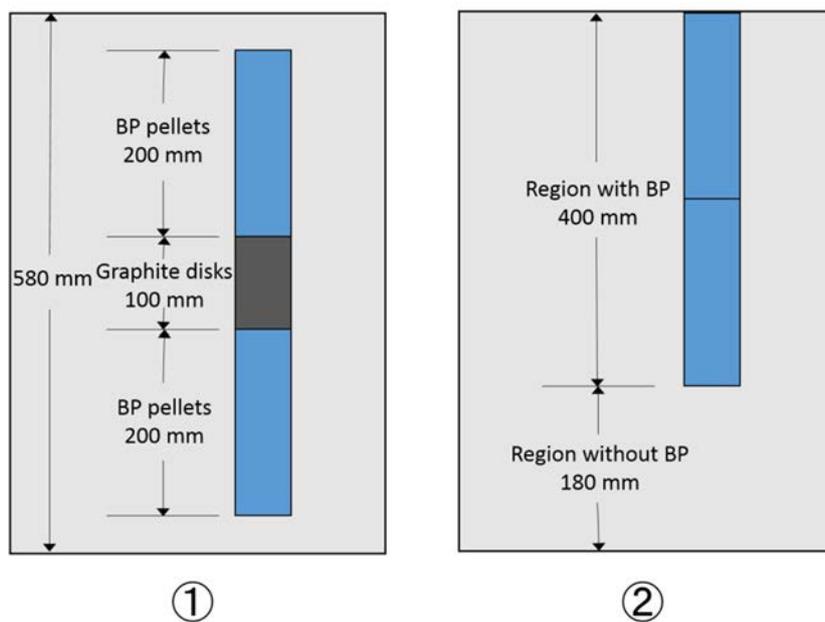


Fig. 3.1 二次元モデルにおけるBP配置の概念図

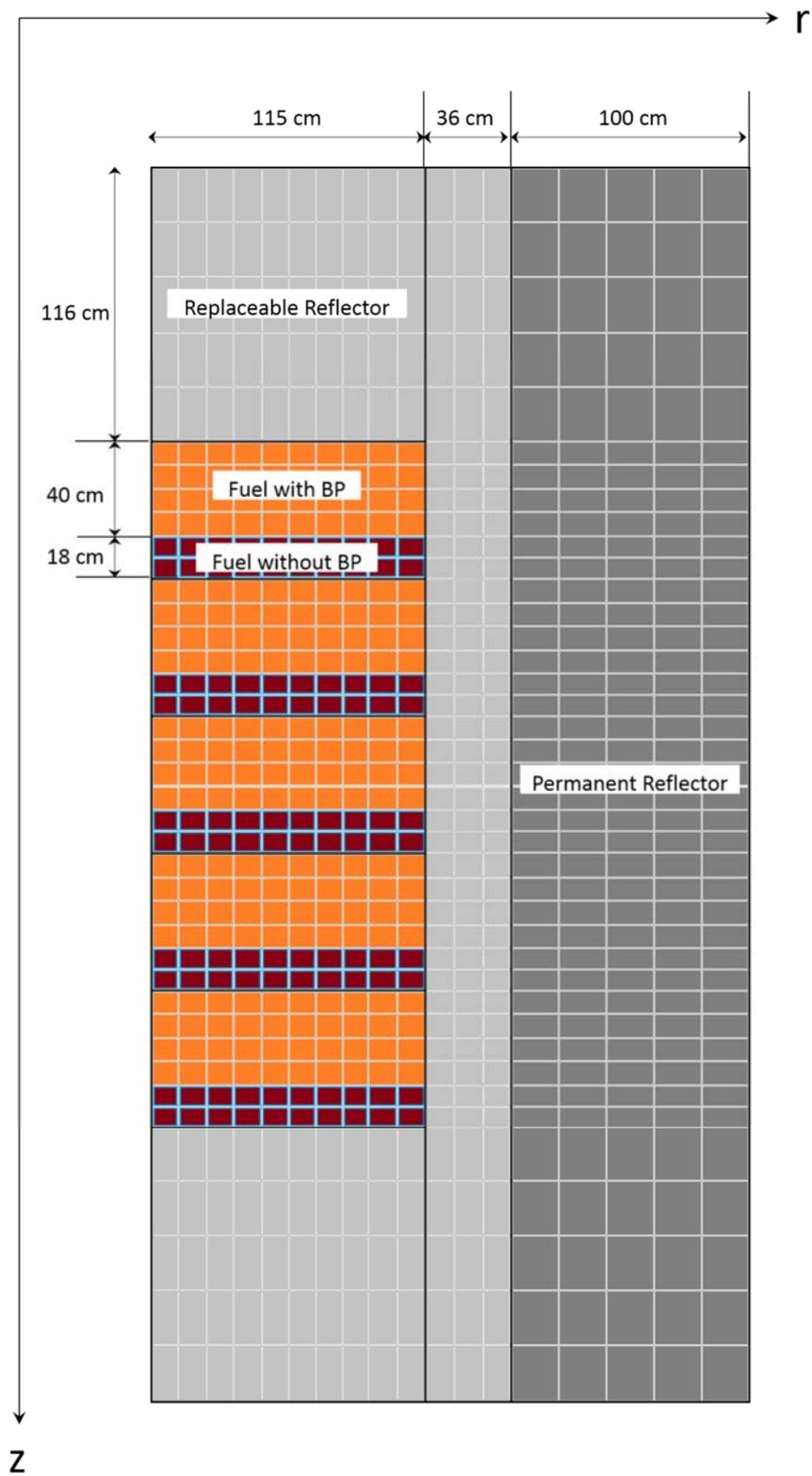


Fig. 3.2 二次元  $r$ - $Z$  モデルの概念図

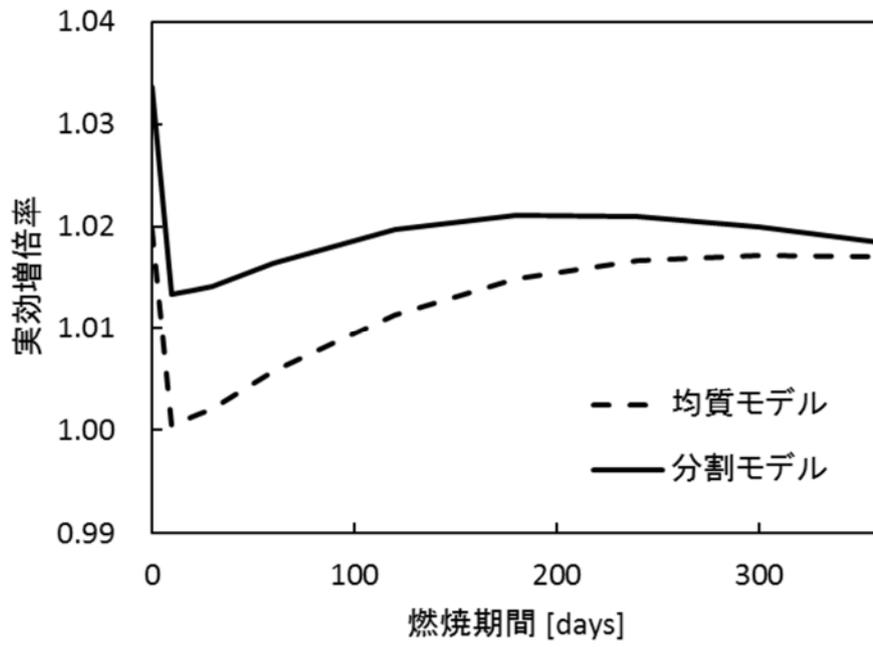


Fig. 3.3 均質モデル及び分割モデルにおける実効増倍率の変化

This is a blank page.



