

## 小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅱ）

—核設計—

Conceptual Design of Small-sized HTGR System (II)  
- Nuclear Design -

後藤 実 関 靖圭 稲葉 良知 大橋 弘史  
佐藤 博之 深谷 裕司 橘 幸男

Minoru GOTO, Yasuyoshi SEKI, Yoshitomo INABA, Hirofumi OHASHI  
Hiroyuki SATO, Yuji FUKAYA and Yukio TACHIBANA

原子力水素・熱利用研究センター  
小型高温ガス炉研究開発ユニット

Small-sized HTGR Research & Development Division  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

June 2012

本レポートは独立行政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。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

## 小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅱ）

### －核設計－

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター  
小型高温ガス炉研究開発ユニット

後藤 実、関 靖圭<sup>※</sup>、稲葉 良知、大橋 弘史、佐藤 博之、深谷 裕司、橘 幸男

(2012年3月30日受理)

日本原子力研究開発機構は、2030年代の開発途上国等への導入を目指し、商用もしくは実証炉の初号機と位置付けられる小型高温ガス炉システム HTR50S の概念設計を開始した。HTR50S の設計は、建設コストの抑制と 2030 年代の導入を可能とするために、実証試験を必要とする新たな技術はできるだけ用いず、実証された HTTR の設計技術を改良して用いることを方針とした。その中で、核設計については、出力密度の向上および燃料濃縮度数の削減を主な改良項目として検討を進めた。その結果、HTR50S の核設計では、出力密度を HTTR の 1.4 倍に向上させるとともに、燃料濃縮度数を HTTR の 12 種類から 3 種類に大幅に削減させることに成功した。

## Conceptual Design of Small-sized HTGR System (II)

### - Nuclear Design -

Minoru GOTO, Yasuyoshi SEKI<sup>※</sup>, Yoshitomo INABA, Hirofumi OHASHI, Hiroyuki SATO,  
Yuji FUKAYA and Yukio TACHIBANA

Small-sized HTGR Research & Development Division,  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center,  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 30, 2012)

Japan Atomic Energy Agency has started a conceptual design of a small-sized HTGR with 50 MW thermal power (HTR50S), which is a first-of-a-kind commercial or demonstration plant of a small-sized HTGR to be deployed in developing countries in the 2030s. The design policy of the HTR50S is to construct it without development of new technologies, which require additional demonstration tests, to suppress the construction cost and deploy it in 2030s. Accordingly, the nuclear design of the HTR50S was performed by upgrading the proven design technology of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). In the nuclear design of the HTR50S, we challenged to increase the power density and decrease the number of the fuel enrichments compared with the HTTR. As a result, the nuclear design was completed successfully by increasing the power density by 1.4 times of the power density of the HTTR and reducing the number of the fuel enrichment to only three from twelve of the HTTR.

Keywords : HTR50S, HTTR, HTGR, Nuclear Design, Enrichment, Power Density

---

<sup>※</sup> Collaborating Engineer

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. HTTR からの改良点 .....	2
2.1 HTTR の運転を反映した改良 .....	2
2.2 設計上の改良 .....	2
2.2.1 炉心性能の向上 .....	2
2.2.2 濃縮度数の削減 .....	2
2.2.3 出力分布最適化のための工夫 .....	2
2.3 解析の高度化 .....	3
3. 原子炉の概要 .....	4
3.1 構造 .....	4
3.2 燃料 .....	4
3.3 反応度制御機構 .....	4
3.3.1 制御棒 .....	5
3.3.2 可燃性毒物 .....	5
3.3.3 後備停止系 .....	5
4. 核設計 .....	10
4.1 核計算 .....	10
4.2 出力分布の最適化 .....	10
4.3 出力分布の維持 .....	11
4.4 目標値及び制限値 .....	11
4.4.1 核特性 .....	11
4.4.2 燃料温度 .....	12
5. 解析 .....	19
5.1 核特性 .....	19
5.1.1 過剰反応度 .....	19
5.1.2 炉停止余裕 .....	19
5.1.3 反応度温度係数 .....	19
5.1.4 残存濃縮度 .....	20
5.2 燃料温度 .....	20
6. まとめ .....	26
参考資料 .....	27
付録 A.1 炉心重金属収支 .....	28
付録 A.2 燃焼度分布 .....	28
付録 A.3 燃料最高温度 .....	29

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Improved points from HTTR .....	2
2.1 Improvement based on HTTR operation .....	2
2.2 Improvement in design .....	2
2.2.1 Increase in reactor performance .....	2
2.2.2 Reduce in number of fuel enrichment .....	2
2.2.3 Consideration for optimization of power distribution .....	2
2.3 Improvement in analysis .....	3
3. Outline of HTR50S .....	4
3.1 Structure .....	4
3.2 Fuel .....	4
3.3 Reactivity control equipment .....	4
3.3.1 Control rod .....	5
3.3.2 Burnable poison .....	5
3.3.3 Reserved shutdown system .....	5
4. Nuclear design .....	10
4.1 Nuclear calculations .....	10
4.2 Optimization of power distribution .....	10
4.3 Keeping power distribution .....	11
4.4 Target value and limitation value .....	11
4.4.1 Nuclear characteristics .....	11
4.4.2 Fuel temperature .....	12
5. Analysis .....	19
5.1 Nuclear characteristics .....	19
5.1.1 Excess reactivity .....	19
5.1.2 Shutdown margin .....	19
5.1.3 Temperature coefficient of reactivity .....	19
5.1.4 Residual enrichment .....	20
5.2 Fuel temperature .....	20
6. Summary .....	26
References .....	27
Appendix A.1 Core heavy metal balance .....	28
Appendix A.2 Burn-up distribution .....	28
Appendix A.3 Maximum fuel temperature .....	29

## 1. はじめに

近年、高温ガス炉は、その高い熱利用効率および二酸化炭素の排出を伴わない水素製造の熱源利用等により<sup>1)</sup>、第四世代原子炉の有力な炉型の一つとして注目されており、多くの国や地域で設計研究が精力的に行われている。<sup>2,3)</sup> その中で、日本では、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と言う。）が、高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）<sup>4)</sup>および水素製造とガスタービン発電を行う電力水素併産型高温ガス炉システム（GTHTR300C）<sup>4)</sup>の設計研究を行ってきた。GTHTR300 および GTHTR300C は、2040 年頃からの商用展開を目指したもので、その核設計においては、燃料の除熱性能の向上を図った一体型燃料棒の採用およびより一層の高い安全性を図った環状炉心の採用等、先進的な技術が用いられている。これらのシステムとは別に、原子力機構は、実証炉または商用炉初号機としての 2020 年代の建設を目指し、熱出力 50 MWt の小型高温ガス炉システム（HTR50S）の概念設計を開始した。<sup>5)</sup> HTR50S の設計方針は、建設コストの低減および比較的近い将来における導入を可能とするために、新たな実証試験等を必要とする先進的な技術はできるだけ用いず、既存の高温工学試験研究炉（HTTR）の設計技術をベースとした点が、GTHTR300 および GTHTR300C の設計方針と異なる。

HTTR は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化を目的として原子力機構大洗研究開発センターに建設された日本初の高温ガス炉であるとともに<sup>6,7)</sup>、現時点において世界で唯一稼働中のブロック型高温ガス炉である。HTTR は 1998 年に初臨界達成後、定格運転（原子炉出口冷却材温度 850℃）の出力上昇試験<sup>8,9)</sup>および高温試験運転（原子炉出口冷却材温度 950℃）の出力上昇試験<sup>8,9)</sup>を経て供用運転を開始し、高温ガス炉固有の安全性を確認するための安全性実証試験等を行っている。<sup>10,11)</sup> さらに、2010 年には 50 日の全出力運転連続運転に成功し、安定的に高温の熱を供給できることを実証した。

HTR50S の核設計は、HTTR の設計技術をベースとしつつも、燃料濃縮度数の大幅な削減、出力密度の向上、残存濃縮度の低減等、改良を加えて行った。また、本設計では、被覆燃料粒子の仕様は HTTR のものと同じとした。本報告書は、HTR50S の HTTR からの改良点、炉心概要、核設計、核特性および燃料温度の解析結果についてとりまとめたものである。

## 2. HTTR からの改良点

HTR50S の核設計は、HTTR の設計技術をベースとしつつも、いくつかの改良を加えて行った。以下にそれらの概要を述べる。

### 2.1 HTTR の運転を反映した改良

HTTR では炉心最外周に設置された 3 対の制御棒は、二段階スクラム時にのみ使用し、通常運転時は全引き抜き状態にして使用しない。二段階スクラムは、制御棒の高温条件下での繰り返し使用による寿命低下を避けるためのものであるが、HTR50S の炉心出口温度は、HTTR に比べて 200℃程度低いことから、本設計ではスクラム時の二段階挿入を採用しない合理的な仮定ができる。また、通常運転時においても、HTTR の運転実績から、炉心最外周に 3 対の制御棒を設置しなくても、十分に安全な運転ができると判断した。そこで、本設計では、HTTR の炉心最外周に設置された制御棒に相当する箇所は可動反射体とし、HTTR に比べて制御棒を 3 対削減した。

### 2.2 設計上の改良

#### 2.2.1 炉心性能の向上

HTR50S は、熱出力 50 MWt、出力密度 3.5 MW/m<sup>3</sup>、運転期間 2 年、平均燃焼度 33 GWD/t であり、HTTR に比べて、それぞれ、1.7 倍、1.4 倍、1.1 倍、1.5 倍炉心性能を向上させた。一方で、平均濃縮度は 6.1 wt% であり、HTTR に比べて 0.2 wt% の増加に留めることができた。これらにより、核分裂性物質当たりのエネルギー発生量は 481.1 GWD/t となり、HTTR の 1.3 倍に向上した。

#### 2.2.2 濃縮度数の削減

HTTR の設計では、12 種類の燃料濃縮度を用いて出力分布の最適化が行われた。多数の濃縮度の燃料の製造は、燃料コストの上昇を招くことから、本設計では、燃料濃縮度数の削減を試みた。適切な燃料濃縮度の配置と BP の設計により、燃料濃縮度数を 3 種類に大幅に削減することができた。

#### 2.2.3 出力分布最適化のための工夫

炉心の出力分布を、燃料最高温度を最も低く抑えることができる理想的な出力分布曲線に近づけるために、本設計ではレイヤ 1 の燃料ブロックには BP を装荷せず (HTTR では全燃料ブロックに BP を装荷)、ここでの出力密度を高くする工夫を施した。また、レイヤ 1 に BP を装荷しないことで、レイヤ 1 の反応度は BP を装荷する場合に比べて大きくなり、ここでの制御棒価値も大きくなる。その結果、運転中の制御棒の炉心への挿入量が少なくなり、燃料の温度負荷の低減が期待できる。



### 2.3 解析の高度化

炉心計算に用いる少数群断面積の作成において、HTTR の設計では一本の燃料棒とそれを取り囲む減速材を単位セルとしたが、本設計では中性子の減速過程をより正確に取り扱うために燃料ブロックを単位セルとする改良を行った。<sup>12)</sup>

HTTR の設計では、核計算に用いる断面積セットの作成に ENDF/B-III および IV が用いられたが、これらの核データライブラリは 1970 年代以前に公開されたもので古い。本設計では、より新しい知見が反映されている JENDL-3.3 を用いた。<sup>13)</sup>

### 3. 原子炉の概要

HTR50S の主な仕様を Table 1 に示す。HTR50S は、熱出力 50MWt、原子炉入口冷却材温度 325°C、原子炉出口冷却材温度 750°C のブロック型高温ガス炉で、燃焼期間は 2 年である。

#### 3.1 構造

炉心の構造を Fig. 1 に示す。炉心は 3 種類の六角柱ブロック（燃料ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック）を積み上げて構成され、それらは固定反射体で囲まれている。燃料領域は、30 燃料カラム（燃料ブロックを 6 段積み上げたもの）、すなわち 180 体の燃料ブロックで構成される。六角柱ブロックは高純度の黒鉛（IG-110）製で、面間距離 36 mm および高さ 58 mm は、3 種類のブロックで同じである。

HTR50S の炉心の構造は、径方向については、HTTR の照射ブロックおよび R3 制御棒案内ブロックを可動反射体ブロックにした以外、HTTR と同じである（Fig. 2）。軸方向については、HTTR の燃料領域が 5 段で構成されるのに対し、HTR50S は 6 段で構成され 1 段多い。これは、熱出力が HTTR の約 1.7 倍大きい HTR50S の平均出力密度を、燃料の除熱の観点から HTTR の 1.4 倍程度（3.5 MW/m<sup>3</sup> 程度）に抑える必要があることおよび燃料の有効利用を目的とした燃料シャッフリングを将来実施した場合、段数を偶数にする必要があるためである。

#### 3.2 燃料

燃料の構成を Fig. 3 に示す。燃料には、4 層のセラミックス被覆が核分裂生成物の閉じ込め機能を持つ被覆燃料粒子を用いる。被覆燃料粒子は体積充填率 30 % で燃料コンパクトに充填される。14 個の燃料コンパクトが黒鉛製スリーブに格納され燃料棒を構成する。33 本の燃料棒が六角柱黒鉛ブロックに施された冷却孔に挿入され燃料ブロックを構成する。

上記の被覆燃料粒子、燃料コンパクト、燃料棒、燃料ブロックの寸法は HTTR と同じである。HTTR の燃料領域は、燃料棒が 31 本格納された 31 ピン燃料ブロックと、33 本格納された 33 ピン燃料ブロックで構成されるが、HTR50S の燃料領域は 33 ピン燃料ブロックのみで構成する。

#### 3.3 反応度制御機構

反応度制御は、制御棒と可燃性毒物(BP : Burnable Poison)を用いて行う。制御棒の炉心への挿入量が大きくなると、炉内の出力分布が歪み、その結果燃料温度が熱的制限値 (1495°C) を超える。そのため、制御棒の炉心への挿入量を、燃焼期間を通してできるだけ少なく保つ必要がある。そこで、燃焼に伴う反応度変化の補償は、燃焼期間を通して主に BP を用いて行う。

### 3.3.1 制御棒

制御棒の挿入位置を Fig. 1 に示す。制御棒は、燃料領域に 7 対（計 14 本）、可動反射体領域に 6 対（計 12 本）装荷する。制御棒の吸収体は炭化ホウ素である。

制御棒の長さは約 3700 mm で、制御棒案内ブロックに施された縦方向の孔を通して炉心上部から挿入され、最大で燃料領域の下端部まで挿入される。各制御棒案内ブロックには、3 つの縦方向の孔が施されており、2 つが制御棒用で、残りの 1 つは後備停止系（RSS : Reserved Shutdown System）用である。

HTTR のスクラムに伴う原子炉停止においては、制御棒の高温における繰り返し使用による寿命の低下を避けるため、まず可動反射体領域の制御棒を挿入して原子炉を未臨界にし、次いで炉心温度が下がるのを待って、あるいは所定の時間をおいて燃料領域へ制御棒を挿入して低温で未臨界を維持する二段階挿入方式が採用されている。HTTR の制御棒は、燃料領域に挿入される C 制御棒および R1 制御棒、可動反射体領域に挿入される R2 制御棒および R3 制御棒で構成される（Fig. 2）。このうち、最外周にある R3 制御棒価値は反応度価値が小さいため、通常運転時の反応度制御には使用せず、スクラム時の二段階挿入時にのみ使用する。

HTR50S では、C 制御棒、R1 制御棒および R2 制御棒を用いて炉停止余裕を確保できるとともに、原子炉出口冷却材温度が 750℃と HTTR に比べて低い。予備解析結果から、原子炉出口冷却材温度が約 600℃の状態、R2 制御棒のみで未臨界にできることから、本設計ではスクラム時の二段階挿入は採用しないと仮定した。また、これまでの HTTR の運転実績から、HTR50S の通常運転時の反応度制御においても R3 制御棒は不要と考えられる。以上より、本設計においては、HTTR の R3 制御棒に相当する制御棒は設置しないこととし、HTTR に比べて制御棒を 3 対削減した。更に、照射試験は行わないことから、HTTR の照射カラムに相当する箇所は可動反射体とした。

### 3.3.2 可燃性毒物

耐熱性と経済性に優れる炭化ホウ素を BP として用いる。BP は棒状にして燃料ブロックのダウエルピンの下に施された孔に挿入する（Fig. 4）。HTTR の場合と同様に、1 燃料ブロックに 2 本の棒状 BP を装荷するが、BP の仕様（毒物濃度と直径）は HTTR のものとは異なる。

### 3.3.3 後備停止系

制御棒案内ブロックには 3 つの孔を施し、そのうちの 1 つを後備停止系用とする。制御棒が何らかの理由で炉心に挿入できなくなった場合、多数の炭化ホウ素ペレットを、重力により孔に落下させることで、原子炉を停止することができる。

Table 1 HTR50S の主な仕様

	HTR50S	HTTR
Power	50 MWt	30 MWt
Power density	3.5 MW/m <sup>3</sup>	2.5 MW/m <sup>3</sup>
Inlet coolant temperature	325°C	395°C
Outlet coolant temperature	750°C	850°C / 950°C
Burn-up period	2 years	660 days
Core		
Type	Prismatic / Pin-in-block	<=
Height	3500 mm	2900 mm
Equivalent diameter	2300 mm	2300 mm
Structure material	Graphite	<=
Fuel		
Type	Coated fuel particle (CFP)	<=
Averaged enrichment	6.1 wt%	5.9 wt%
CFP diameter	0.92 mm	<=
Kernel diameter	0.60 mm	<=
Fuel compact		
Height	39 mm	<=
Inner diameter	10 mm	<=
Outer diameter	26 mm	<=
CFP packing ratio	30 %	<=

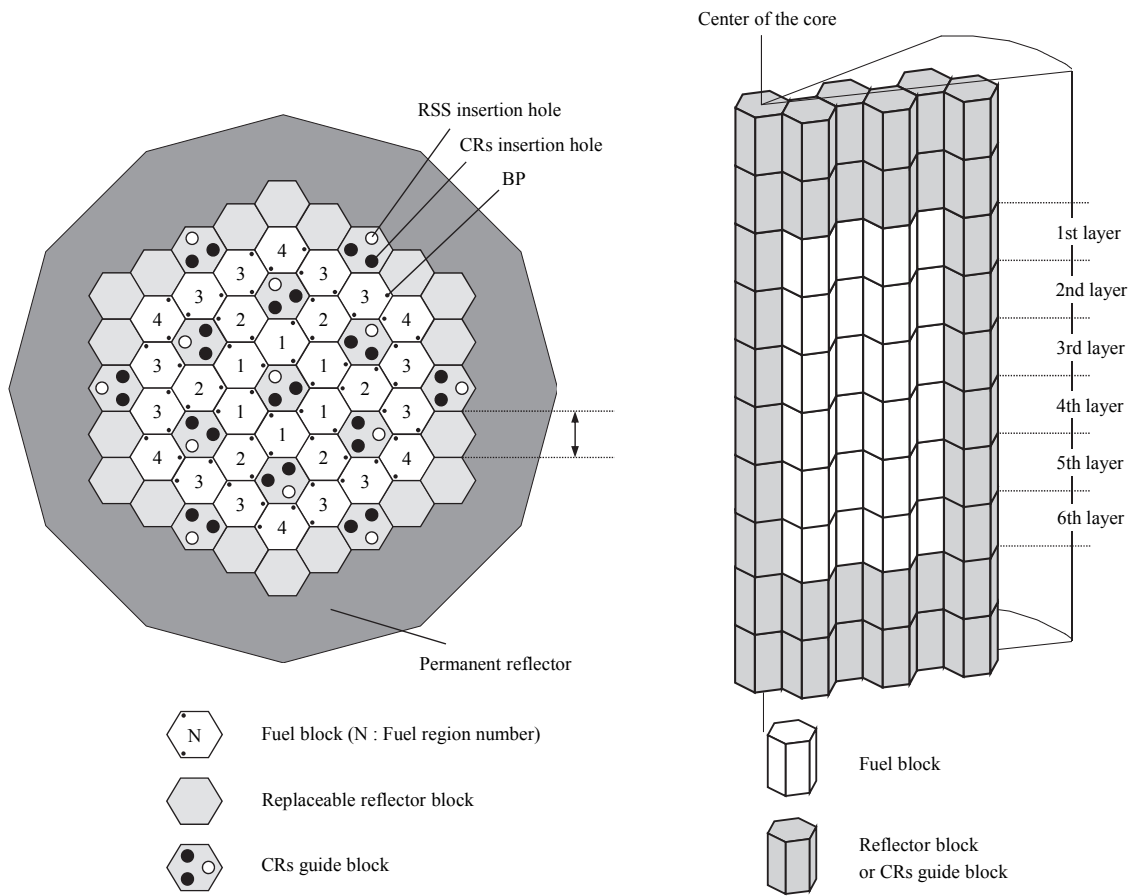
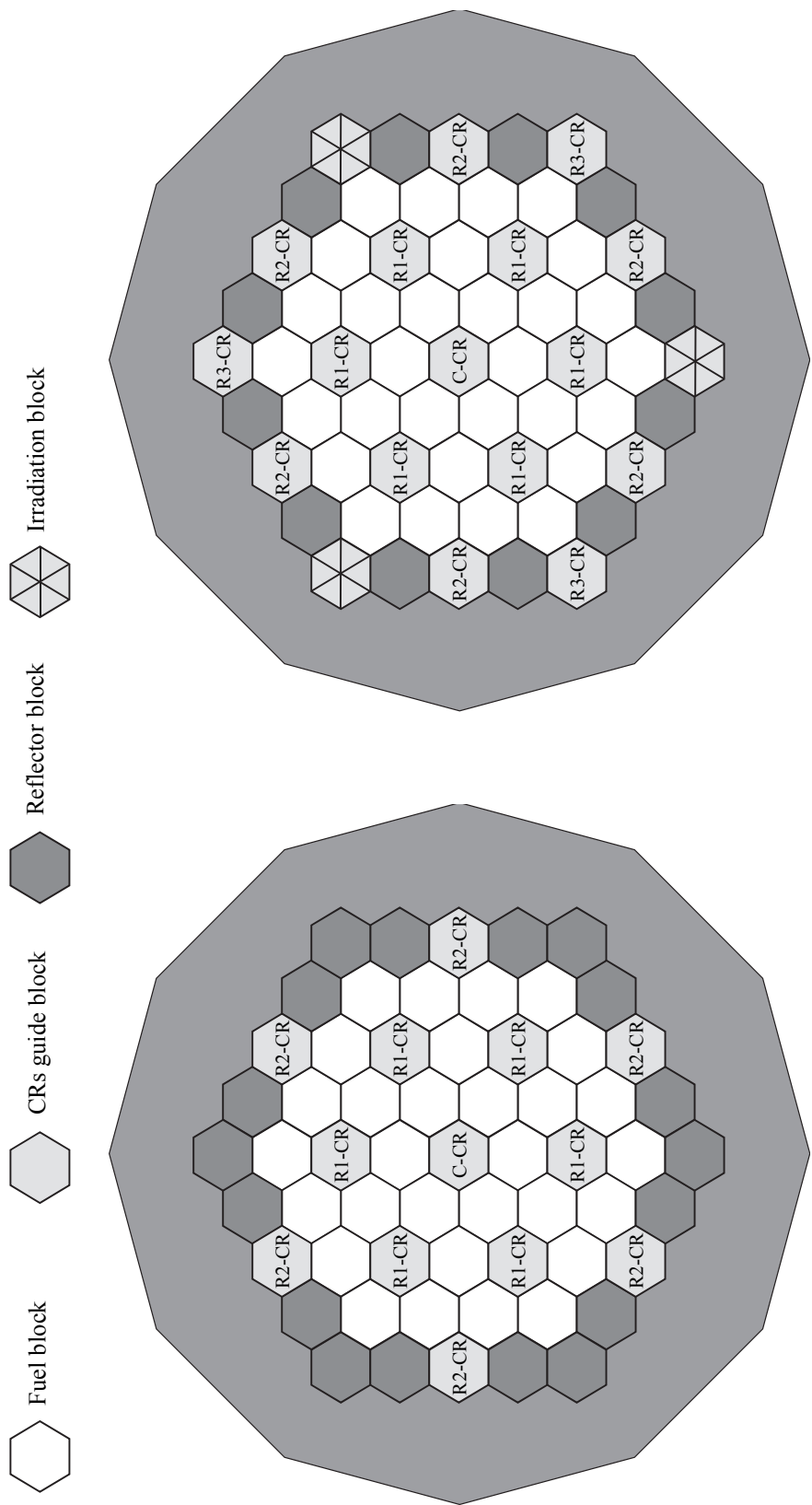


Fig. 1 HTR50S 炉心の概略図



HTTR

HTR50S

Fig. 2 HTR50S と HTTR の炉心断面

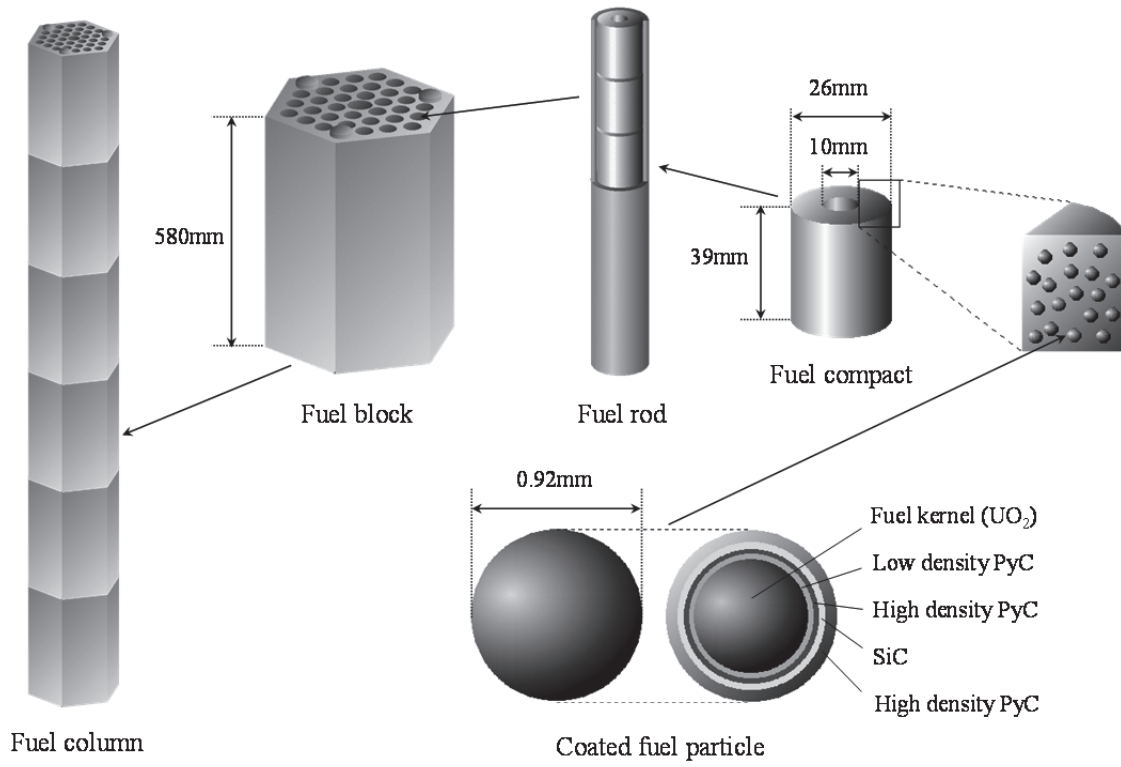


Fig. 3 燃料の構成

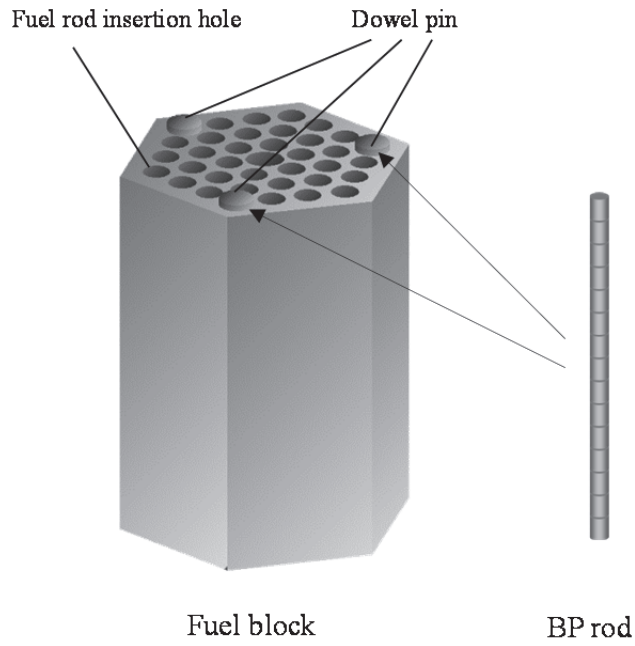


Fig. 4 棒状BPの装荷位置

## 4. 核設計

高温ガス炉の核設計における最も重要な課題は、通常運転時における燃料最高温度を熱的制限値（1495°C）以下に抑えるために、出力分布を最適化し、その形を燃焼期間にわたり維持することである。出力分布の最適化は、複数の燃料濃縮度を用いて行い、最適化した出力分布の維持はBPを用いて行った。核設計の手順をFig. 5に示す。

### 4.1 核計算

核計算の流れをFig. 6に示す。核計算は二段階に分けて行われる。はじめに、セル燃焼計算を行って少数群断面積を作成する。次に作成した少数群断面積を用いて炉心燃焼計算を行い、過剰反応度、出力分布等の核特性値を算出する。

セル燃焼計算は、衝突確率法に基づくSRAC/PIJ<sup>14)</sup>を、被覆燃料粒子に起因する二重非均質性を考慮した燃焼計算ができるように改造したものをを用いて行った。中性子の減速過程をより正確に取り扱うために燃料ブロックを単位セルとした。<sup>12)</sup>セル燃焼計算に用いる多群断面積セットは、JENDL-3.3<sup>13)</sup>に基づくものをを用いた。

炉心燃焼計算は、拡散法に基づくSRAC/COREBN<sup>14)</sup>を用いて行った。炉心の幾何形状モデルは、三次元三角メッシュを用いた全炉心モデルとし、燃料ブロック等の各六角柱ブロックを、径方向については24メッシュに分割（Fig. 7）、軸方向については14メッシュに分割した（Fig. 8）。炉心燃焼計算は、各燃焼ステップで、制御棒を臨界位置に合わせて計算を行った。なお、SRAC/COREBNを用いた高温ガス炉の炉心燃焼計算手法の妥当性は、HTTRの燃焼データを用いて検証されている。<sup>15)</sup>

### 4.2 出力分布の最適化

燃料最高温度を制限値以下に抑えるためには、炉心の出力分布の最適化が必要である。具体的には、炉心の径方向については出力分布を均一にし、軸方向については冷却材入口側（炉心上側）で高くなるようにする。これらの出力分布の最適化は、複数の燃料濃縮度を炉心に適切に配置して行う。

HTTRでは、炉心の出力分布の最適化は、12種類の燃料濃縮度を用いて行われた。しかし、多数の濃縮度の燃料の製造は、燃料コストの上昇につながる。そこで、HTR50Sの設計では、燃料コストを抑制するために、燃料濃縮度数を3種類に大幅に削減して、出力分布の最適化を試みた。なお、燃料の最大濃縮度は、国内での燃料製造を考慮して、HTTRの設計と同じ10 wt%未満とした。

Table 2に燃料濃縮度の配置を示す。燃料領域を軸方向に3分割、径方向に2分割して3種類の燃料濃縮度を配置した。軸方向については、炉心上側に高い燃料濃縮度を配置し、炉心上側で出力密度が高くなるようにした。径方向については、中性子束が低い炉心外側に高い燃料濃縮度を配置し、出力密度が均一になるようにした。Fig. 1に示すレイヤ5および6については、出力密度が低いため径方向の出力分布の最適化の効果は小さいと考え、



炉心内側と外側に同じ燃料濃縮度（最も低い濃縮度）を配置した。

### 4.3 出力分布の維持

炉心に燃料のみを装荷した場合、過剰反応度が大きくなり、それを補償するために制御棒の炉心への挿入量が大きくなる。制御棒の大きな挿入量は、3種類の燃料濃縮度を用いて最適化した出力分布の形を歪め、その結果、燃料最高温度が制限値を超える。そのため、燃焼期間にわたり制御棒の挿入量を小さく保ち、最適化した出力分布の形を維持する必要がある。そこで、棒状のBPを燃料ブロックに装荷して、過剰反応度を燃焼期間にわたり小さく保つ。

棒状BPの毒物特性（毒物効果の大きさと持続時間）は、毒物濃度および直径に依存する。過剰反応度を燃焼期間に渡り小さく保つために、これらのパラメータを最適化して燃料ブロックに装荷した（Table 3）。

燃料最高温度を最も低く抑えることができる理想的な出力分布曲線を Fig. 9 に示す。設計において、出力密度がこの理想曲線に近づくように燃料濃縮度の配置を最適化するが（第4.2章参照）、理想曲線との間にはレイヤ1において大きな差が残る。この差は、主に燃料領域からの中性子の漏れおよび炉心上部に制御棒が設置されていることにより、レイヤ1での中性子束がレイヤ2に比べて小さくなるためである。この出力密度の差を小さくするためには、レイヤ1における中性子束を高くする工夫が必要である。そこで、HTR50Sの設計では、レイヤ1にはBPを装荷しないこととした（HTTRの設計では全レイヤ（全燃料ブロック）にBPを装荷する）。これにより、レイヤ1の出力密度が理想曲線に近づくとともに、炉心全体の出力密度についても理想曲線に近づき（Fig. 9）、その結果、燃料最高温度の低減が期待できる。

また、レイヤ1にBPを装荷しないことにより、ここでの局所的な反応度は、BPを装荷した場合に比べて大きくなる。これにより、レイヤ1での制御棒値が大きくなり制御棒の挿入量が抑制され、その結果、燃料最高温度の低減が期待できる。

## 4.4 目標値および制限値

### 4.4.1 核特性

#### (1) 過剰反応度

過剰反応度の目標値は、制御棒位置を指標として定めた。制御棒位置の目標値は、最適化した出力分布の燃焼期間にわたる維持、制御棒値の確保、燃料の有効利用の観点から定めた。

最適化した出力分布の形を燃焼期間にわたり維持するために、BPを用いて過剰反応度を小さくして、制御棒位置を燃焼期間にわたりレイヤ1以上に保つことを目標とした。

燃焼末期に制御棒が全引き抜きに近い状態の場合、制御棒位置と燃料領域の距離が大きいため制御棒値が小さくなる。これにより、制御棒の効きが悪くなり、原子炉の運転に支障を及ぼす可能性が考えられる。HTR50Sでは、運転中の制御棒値を十分に確保するために、制御棒位置は燃焼期間にわたり燃料領域内にあるように設計した。

燃料の有効利用の観点からは、燃焼末期における過剰反応度はできるだけ小さくすることが望ましい。そこで、燃焼末期（730 EFPD）での制御棒位置が燃料領域の上端付近にあるように設計した。

以上より、過剰反応度については、指標とする制御棒位置が燃焼期間にわたりレイヤ 1 にあり、燃焼末期は燃料領域の上端付近にあることを設計目標とした。

## (2) 炉停止余裕

HTR50S の制御棒は、HTTR の設計と同様に、最大反応度価値を持つ 1 対の制御棒が完全に引き抜かれて炉心に挿入できない状態で、室温条件下で炉停止余裕が  $1\% \Delta k/k$  以上となるように設計した。

## (3) 反応度温度係数

反応度温度係数は、温度上昇時に負の反応度フィードバックが炉心に添加されるよう、燃焼期間にわたり負の値でなければならない。

## (4) 残存濃縮度

ウラン資源の有効利用の観点から、燃焼末期（730 EFPD）での残存濃縮度はできるだけ低いことが望ましい。しかし高温ガス炉は、反応度温度欠損が大きいため、残存濃縮度を軽水炉と同等レベル（約 1 wt%）に設計することは困難である。本設計では、残存濃縮度の目標値は、GTHTR-300 の設計目標値と同じ、軽水炉燃料の新燃料濃縮度 4.5 wt%以下とした。

### 4.4.2 燃料温度

核計算で得られる出力分布および中性子フルエンス分布を用いて算出する燃料最高温度は、被覆燃料粒子の健全性を確保するために、HTTR の設計と同様に、燃焼期間にわたり制限値  $1495^{\circ}\text{C}$  以下でなければならない。

Table 2 燃料濃縮度の配置 (wt%)

Layer	Fuel region number			
	1	2	3	4
1st	6.6	6.6	9.4	9.4
2nd	6.6	6.6	9.4	9.4
3rd	4.3	4.3	6.6	6.6
4th	4.3	4.3	6.6	6.6
5th	4.3	4.3	4.3	4.3
6th	4.3	4.3	4.3	4.3

Table 3 BP の配置 (density (%) / diameter (mm))

Layer	Fuel region number			
	1	2	3	4
1st	-	-	-	-
2nd	2.5/18	2.5/18	2.5/18	2.5/18
3rd	2.5/13	2.5/13	2.5/18	2.5/18
4th	2.5/13	2.5/13	2.5/18	2.5/18
5th	2.5/13	2.5/13	2.5/13	2.5/13
6th	2.5/13	2.5/13	2.5/13	2.5/13

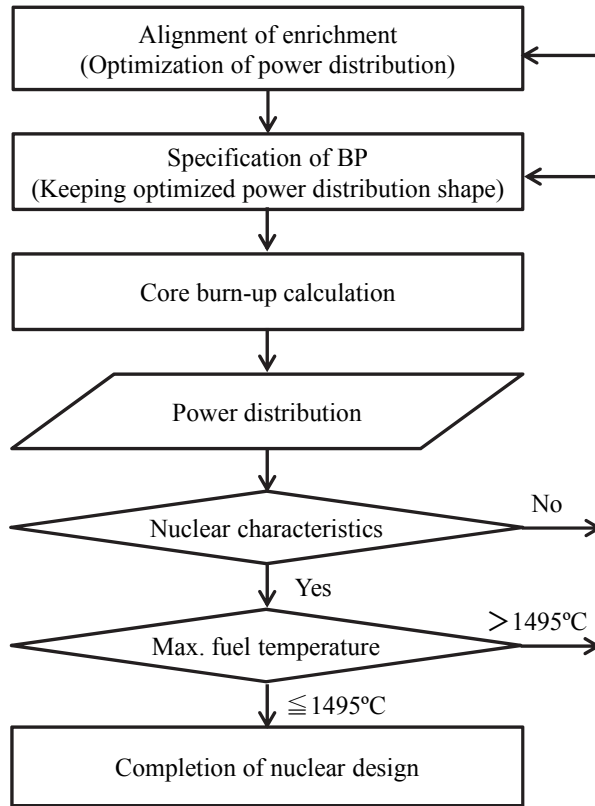


Fig. 5 核設計の手順

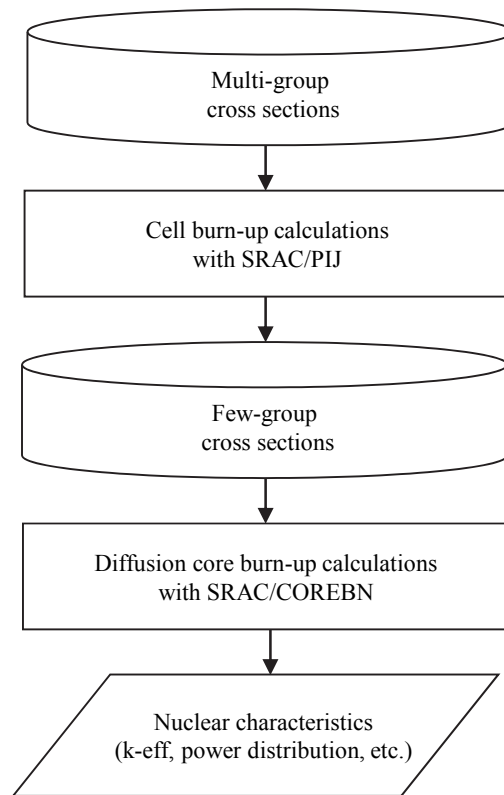


Fig. 6 核計算の流れ

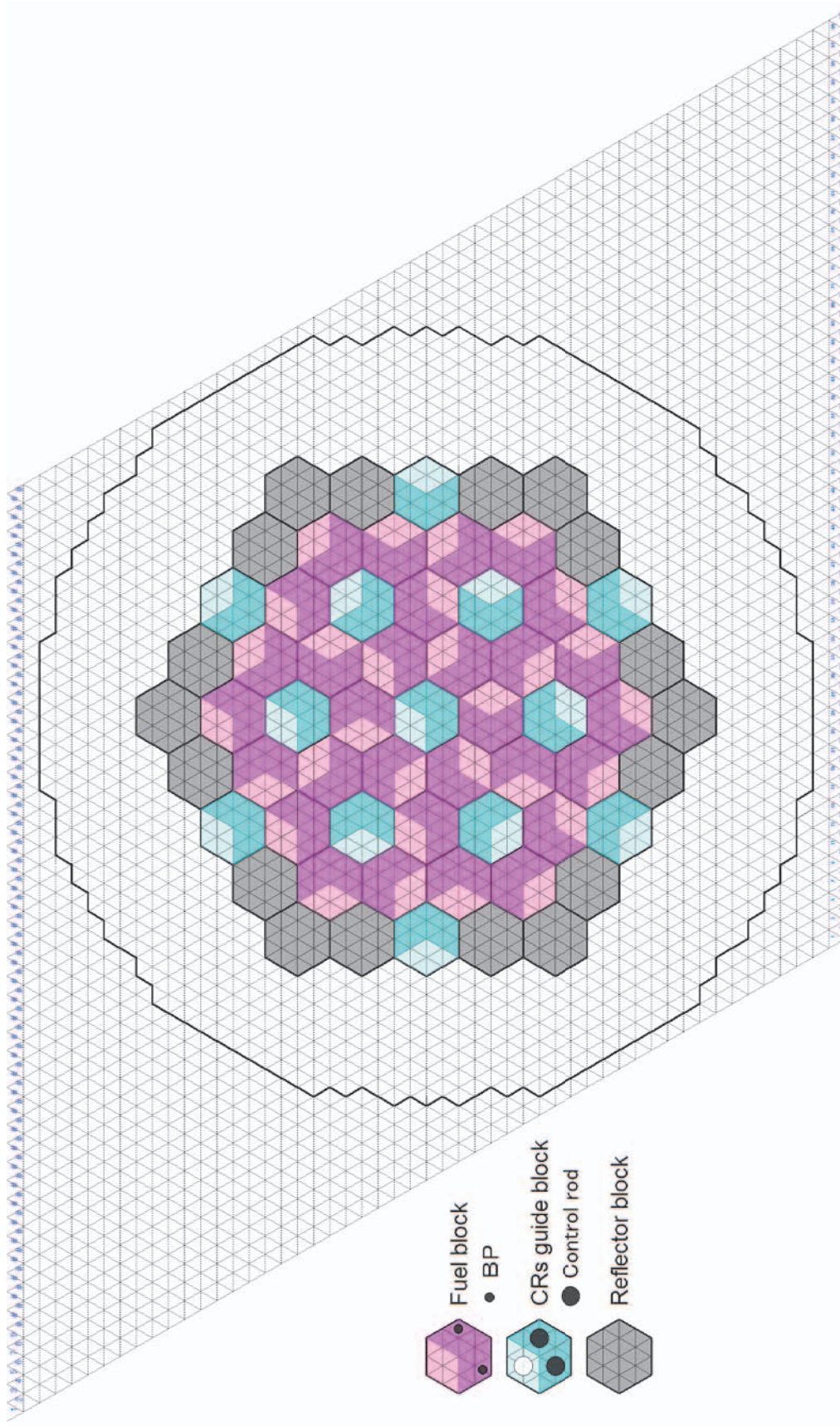


Fig. 7 炉心計算モデルの径方向メッシュ分割

Mesh 分割数	Region幅 (cm)	軸方向メッシュ								制御棒案内カラム		可動反射 体カラム	固定 反射体
		column1		column2		column3		column4		CR out	CR in		
		BP有り	BP無し	BP有り	BP無し	BP有り	BP無し	BP有り	BP無し				
1	14.5												
4	58.0	RB11		RB11		RB21		RB21		CB11	CR12	RB81	PB11
2	14.5	RB31		RB31		RB41		RB41		CB11	CR12		
8	43.5	RB31		RB31		RB41		RB41		CB11	CR12	RB81	PB11
1	2.0	C331	C331	C331	C331	C331	C331	C331	C331				
1	1.3	A198	B198	A198	B198	A198	B198	A198	B198				
1	5.0	A198	B198	A198	B198	A198	B198	A198	B198				
1	5.0	A198	B198	A198	B198	A198	B198	A198	B198				
1	5.0	A198	B198	A198	B198	A198	B198	A198	B198				
1	5.0	A198	B198	A198	B198	A198	B198	A198	B198	CB17	CR17	RB81	PB11
1	1.3	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298	CB18	CR17	RB82	PB12
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	5.0	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	2.8	A298	B298	A298	B298	A298	B298	A298	B298				
1	1.4	C332	C332	C332	C332	C332	C332	C332	C332				
1	2.0	C333	C333	C333	C333	C333	C333	C333	C333				
1	1.3	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398	CB19	CR17	RB82	PB12
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	5.0	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	2.8	A398	B398	A398	B398	A398	B398	A398	B398				
1	1.4	C333	C333	C333	C333	C333	C333	C333	C333				
1	2.0	C334	C334	C334	C334	C334	C334	C334	C334				
1	1.3	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498	CB20	CR17	RB82	PB12
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	5.0	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	2.8	A498	B498	A498	B498	A498	B498	A498	B498				
1	1.4	C334	C334	C334	C334	C334	C334	C334	C334				
1	2.0	C335	C335	C335	C335	C335	C335	C335	C335				
1	1.3	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598	CB26	CR17	RB82	PB12
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	5.0	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	2.8	A598	B598	A598	B598	A598	B598	A598	B598				
1	1.4	C335	C335	C335	C335	C335	C335	C335	C335				
1	2.0	C336	C336	C336	C336	C336	C336	C336	C336				
1	1.3	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698	CB36	CR17	RB82	PB12
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	5.0	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	2.8	A698	B698	A698	B698	A698	B698	A698	B698				
1	1.4	C336	C336	C336	C336	C336	C336	C336	C336				
8	58.0	RB51		RB51		RB61		RB61		CB46	CB46	RB82	PB12
4	58.0	RB71		RB71		RB71		RB71		CB56	CB56	RB A1	PB12
1	14.5												

Fig. 8 炉心計算モデルの軸方向メッシュ分割



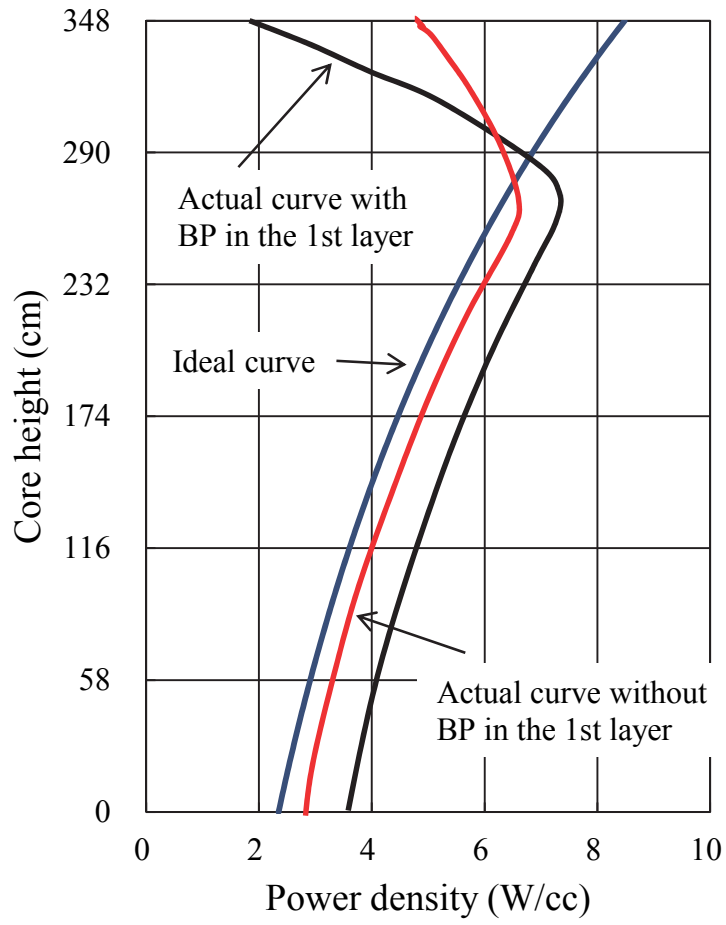


Fig. 9 出力密度の理想曲線



## 5. 解析

### 5.1 核特性

#### 5.1.1 過剰反応度

制御棒位置の燃焼変化を Fig. 10 に示す。縦軸は制御棒位置を表し、目盛り間隔 58 cm は燃料ブロックの高さと同じである。制御棒が燃料領域下端まで挿入された場合、制御棒位置は 0 cm で、燃料領域上端まで引き抜かれた場合、制御棒位置は 348 cm である。制御棒位置は、燃焼期間にわたり 290 cm 以上であることからレイヤ 1 以上に保持され、過剰反応度が小さく抑えられている。また、730 EFPD における制御棒位置は 342 cm で、燃料領域上端 (348 cm) 付近にあることから、過剰反応度を燃焼期間にわたり目標通りに制御することができた。

#### 5.1.2 炉停止余裕

ワンロッドスタック時の炉停止余裕を算出するにあたっては、最大反応度値を持つ制御棒を特定する必要がある。炉心温度 300 K、全制御棒が全挿入の状態の過剰反応度と、その状態から調べる対象の制御棒 1 対を全引き抜きした過剰反応度の差を算出し、C 制御棒、R1 制御棒、R2 制御棒の反応度値を調べた。その結果、反応度値が最も大きい制御棒は、R1 制御棒であることが分かった。

ワンロッドスタック時の炉停止余裕の計算条件を以下に示す。計算の結果、ワンロッドスタック時の炉停止余裕は 20.0 % $\Delta k/k$  であり、1 % $\Delta k/k$  以上を確保することができた。

- R1 制御棒 1 対を全引き抜き
- その他制御棒 (C 制御棒 1 対、R1 制御棒 5 対、R2 制御棒 6 対) 全挿入
- 炉心温度 300 K 均一

#### 5.1.3 反応度温度係数

以下の式を用い、基準状態から  $\Delta T$  を +60 K および -60 K とした場合の平均値を反応度温度係数とした。燃料温度係数は、50 MWt 出力の温度条件から燃料コンパクトの温度を  $\Delta T$  変化させて算出した。減速材温度係数の算出は、黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロック等、固定反射体を除く黒鉛の温度を  $\Delta T$  変化させて算出した。

$$TC = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\Delta T}$$

TC : 反応度温度係数

$\rho_0$  : 温度を変化させる前の過剰反応度

$\rho_1$  : 温度を  $\Delta T$  変化させた後の過剰反応度

反応度温度係数の計算結果を Fig. 11 に示す。燃料温度係数は、燃焼期間にわたりほぼ一定で負に保たれる。減速材温度係数は、燃焼初期から中期にかけて、燃焼とともに負の絶対値が小さくなるが、燃焼中期以降はほぼ一定で燃焼期間にわたり負に保たれる。この結果、全温度係数は燃焼期間にわたり負の値に保たれる。

減速材温度係数の負の絶対値が燃焼初期から中期にかけて減少するのは、燃焼に伴うプルトニウムの蓄積に起因するものである。<sup>15)</sup> 核分裂性核種である  $^{239}\text{Pu}$  と  $^{241}\text{Pu}$  の核分裂断面積の共鳴が低エネルギー領域に存在するため、減速材温度の上昇により核分裂反応率が増加し、温度係数の負の絶対値が減少する。

#### 5.1.4 残存濃縮度

燃焼末期(730 EFPD)での残存濃縮度を Table 4 に示す。残存濃縮度の炉心平均値は 3.4 wt% で目標値の 4.5 wt% より低いことから目標を達成した。

Table 4 に示すように、残存濃縮度の最大値は 6.4 wt% であり比較的高い。ウラン資源の有効利用の観点からは、より一層の残存濃縮度の低減が望ましい。これを可能とする方法として、高燃焼度燃料の利用と軸方向の燃料シャッフリングによる燃料の高燃焼度化が挙げられ、今後検討を進める予定である。

## 5.2 燃料温度

出力分布の計算結果を Fig. 12 に示す。これらの出力分布と中性子フルエンスの計算結果を用いて、HTTR 建設時に開発された FLOWNET<sup>16)</sup> と TEMDIM<sup>17)</sup> による熱流動計算を行い、工学的安全係数を考慮した燃料温度を算出した。その結果、燃料温度は燃焼 30 EFPD で最大となり、その値は 1464°C であることから、燃焼期間にわたり制限値 1495°C 以下にすることができた。<sup>18)</sup>

以上より、適切な燃料濃縮度の配置と BP の設計により、燃焼期間にわたり核的な目標値および制限値を満たすとともに、燃料温度についても制限値 1495°C 以下に抑えることができた。HTR50S の核設計を、HTTR の 12 種類の濃縮度から大幅に削減して、僅か 3 種類で行うことに成功した。

Table 4 残存濃縮度 (wt%)

Layer	Fuel region number			
	1	2	3	4
1st	4.0	4.1	6.4	6.3
2nd	2.9	3.2	5.2	5.2
3rd	1.5	1.7	3.2	3.3
4th	1.8	1.9	3.6	3.6
5th	2.2	2.3	2.5	2.5
6th	2.7	2.8	3.0	3.0

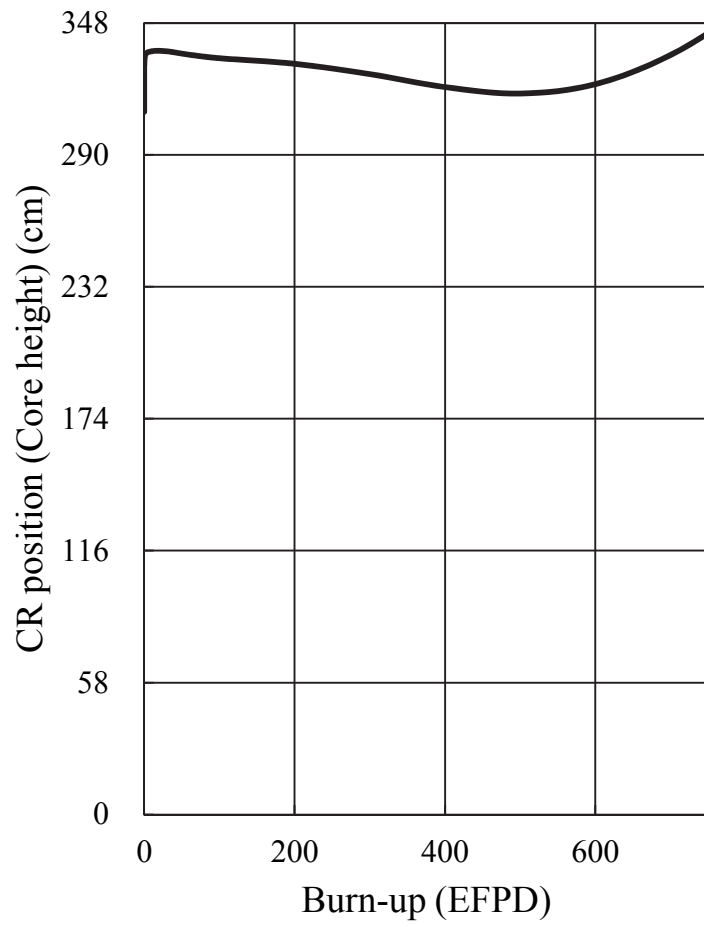


Fig. 10 制御棒位置の燃焼変化

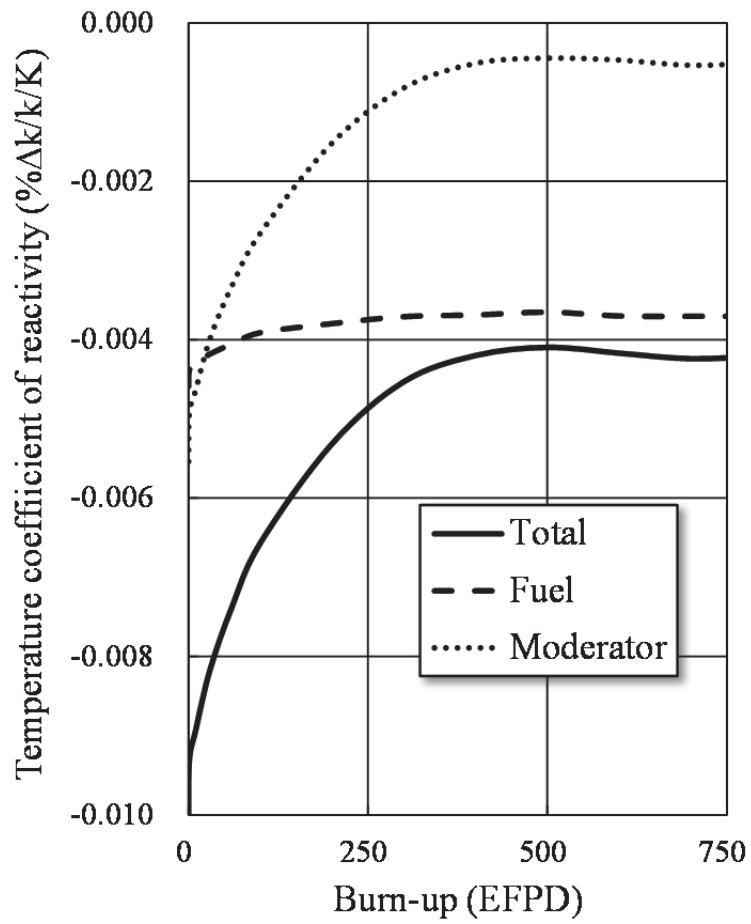


Fig. 11 反応度温度係数の燃焼変化

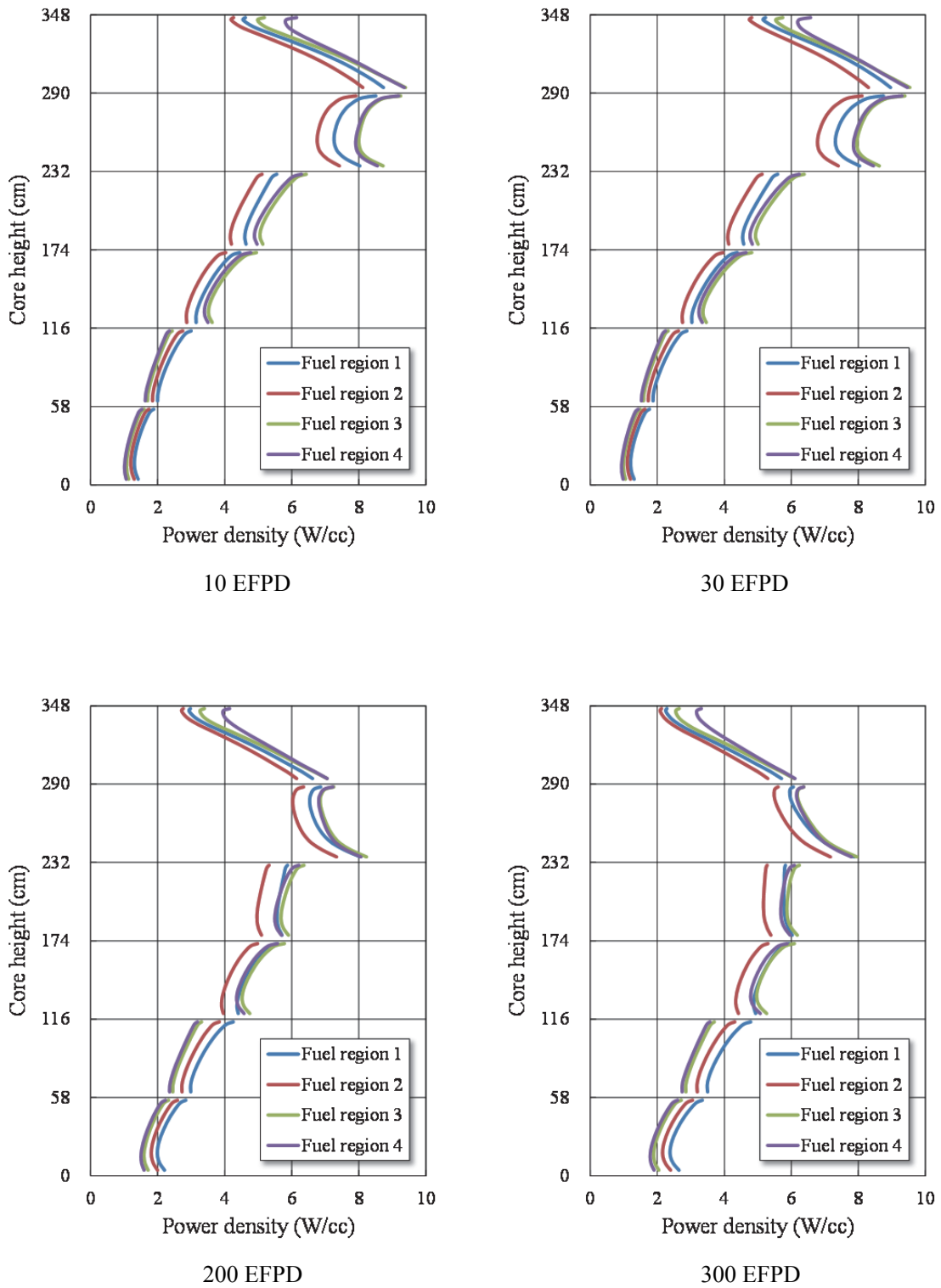


Fig. 12 出力分布(1/2)

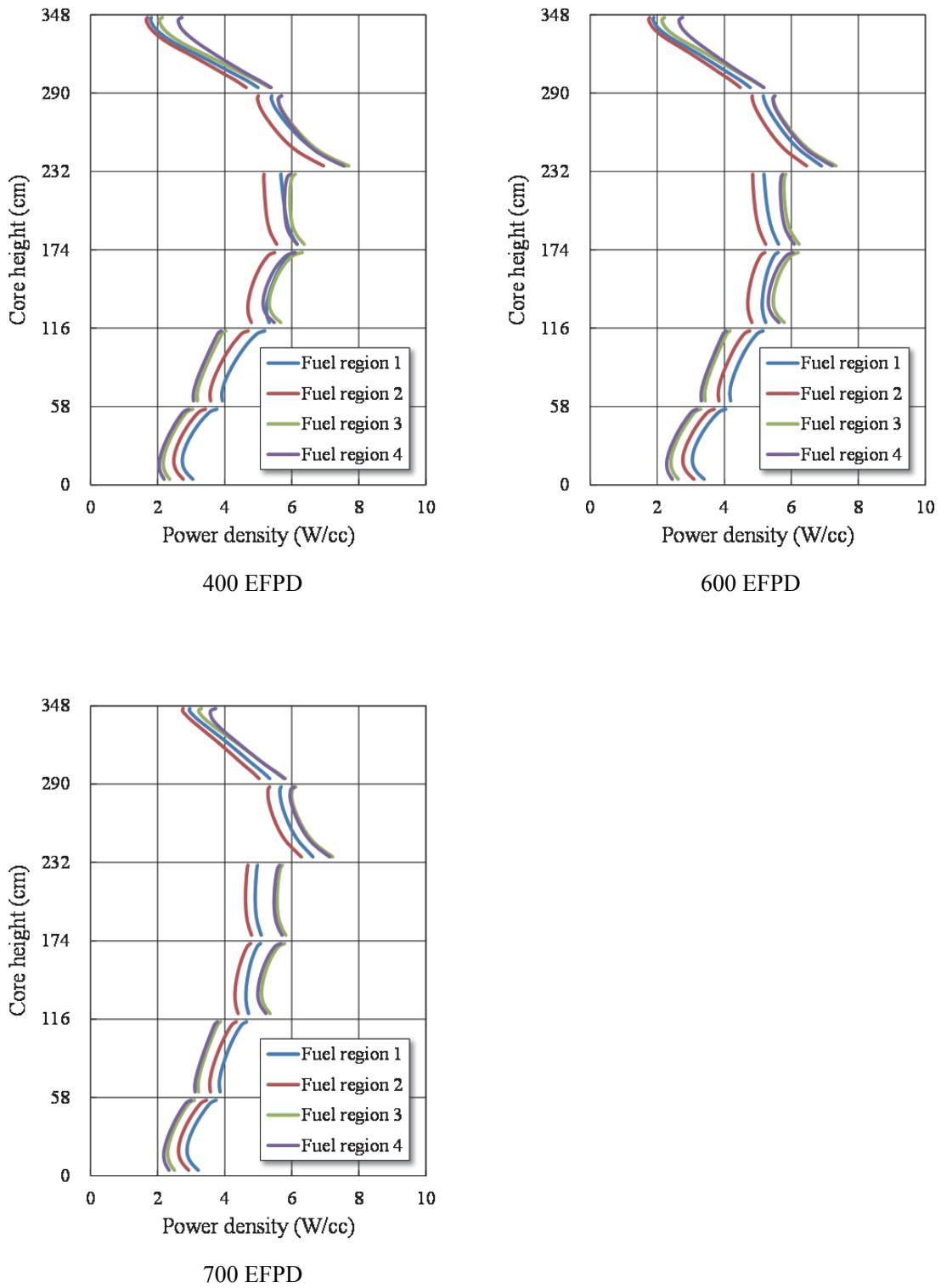


Fig. 12 出力分布(2/2)

## 6. まとめ

熱出力 50MWt、原子炉出口温度 750°C、運転期間 2 年の小型高温ガス炉システム HTR50S の核設計を、HTTR の設計技術を改良して行った。

核設計の最大の課題である出力分布の最適化とその維持を 3 種類の燃料濃縮度と 2 種類の BP を用いて行うことができた。核的な目標値および制限値を満たすと同時に、燃料温度も燃焼期間にわたり熱的制限値 (1495°C) 以下に抑えることができた。これにより、HTTR に比べて出力が約 1.7 倍 (50 MWt)、出力密度が 1.4 倍 (3.5 MW/m<sup>3</sup>) の HTR50S の核設計を、僅か 3 種類の濃縮度で行うことに成功し、HTTR の 12 種類の濃縮度を用いた設計に比べて大幅に濃縮度数を削減することができた。

平均残存濃縮度は 3.4 wt% であり目標値 4.5 wt% を大幅に下回ることができた。しかし、最大値は 6.4 wt% と比較的高く、ウラン資源の有効利用の観点からは更なる残存濃縮度の低減が望まれる。今後、ウラン資源の有効利用を目的として、高燃焼度燃料の利用と軸方向の燃料シャッフリングによる燃料の高燃焼度化を検討する。



## 参考資料

- 1) A. Terada et al., "Development of Hydrogen Production Technology by Thermochemical Water splitting IS Process," J. Nucl. Sci. Technol., 44[3], 477-482 (2007).
- 2) Idaho National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Argonne national Laboratory, Next Generation Nuclear Plant Research and Development Program Plan, INEEL/EXT-05-02581, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) (2005).
- 3) S. Ehster, et al., "Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactor in Europe," Proc. of ICENES'2005, Brussels, Belgium, Aug. 21-26, 2005 (2005).
- 4) K. Kunitomi et al., "JAEA's VHTR for Hydrogen and Electricity Cogeneration : GTHTR300C," Nuclear Engineering and Technology, 39[1], 9-20 (2007).
- 5) 大橋弘史 他、“小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅰ）－基本仕様及び系統概念設計－、JAEA-Technology 2011-013 (2011).
- 6) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所設置変更許可申請書（完本）〔別冊 3 HTTR〕”、(2001)
- 7) S. Saito et al., “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, JAERI-1332 (1994).
- 8) 藤川正剛 他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”、日本原子力学会和文論文誌、1[4]、p.361 (2002).
- 9) 中川繁昭 他、“高温工学試験研究炉の出力上昇試験－試験経過及び結果の概要－”、JAERI-Tech 2002-069 (2002).
- 10) Y. Tachibana et al., “Plan for first phase of safety demonstration tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, Nucl. Eng. Des., p.224, 179 (2003).
- 11) N. Sakaba et al. : “Safety Demonstration Test Plan of HTTR - Overall Program and Result of Coolant Flow Reduction Test “, Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, Nov. 16-20, 2003, p.293 (2003).
- 12) 後藤実 他、“拡散計算コードによる HTTR の炉心温度係数算出手法の改良”、JAEA-Research 2007-046 (2007).
- 13) K. Shibata et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," J. Nucl. Sci. Technol. 39, 1125 (2002).
- 14) K. Okumura, T. Kugo, K Kaneko, K. Dobashi, "SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
- 15) M. Goto et al., "Long-term high-temperature operation in the HTTR (2) Core physics," Proceedings of HTR 2010, Prague, Oct. 18-20, 2010
- 16) 丸山創 他、“炉内流動解析コード FLOWNET の検証”、JAERI-M-88-138 (1988).
- 17) 丸山創 他、“燃料温度解析コード TEMDIM の検証”、JAERI-M-88-170 (1988).
- 18) 稲葉良知 他、“小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅲ）－炉心熱流動設計－”、JAEA-Technology 2012-019 (2012).

## 付 録

### A.1 炉心重金属収支

730 EFPD での炉心重金属収支を Table A1 に示す。炉内プルトニウム量は 11.60 kg で、そのうちの 75 %が核分裂性プルトニウムである。

Table A1 炉心重金属収支

Loaded uranium (t)	1.12
Enrichment at BOL (wt%)	6.1
Enrichment at EOL (wt%)	3.4
Averaged burn-up (GWD/t)	33
Local maximum burn-up (GWD/t)	49
Plutonium at EOL (kg)	11.60
<sup>238</sup> Pu	0.05
<sup>239</sup> Pu	6.98
<sup>240</sup> Pu	2.46
<sup>241</sup> Pu	1.68
<sup>242</sup> Pu	0.42
Fissile plutonium at EOL (wt%)	75

### A.2 燃焼度分布

各燃料ブロックの燃焼度を Table A2 に示す。HTR50S の炉心平均燃焼度は 33 GWD/t、最大燃焼度は 49 GWD/t（燃料領域 3 のレイヤ 2）である。

Table A2 各燃料ブロックの燃焼度 (GWD/t)

Layer	Fuel region number			
	1	2	3	4
1st	30	28	32	34
2nd	47	43	49	49
3rd	40	36	42	41
4th	36	32	37	36
5th	28	25	23	22
6th	19	18	16	15

### A.3 燃料最高温度

工学的安全係数を考慮した燃料温度の解析を行った。<sup>18)</sup> 工学的安全係数を考慮した燃料最高温度は燃焼時点 30 日のカラム 9 において生じる (Fig. A3)。工学的安全係数を考慮した燃料最高温度は 1464°C であり、通常時の燃料温度制限値 (1495°C) を満足している。

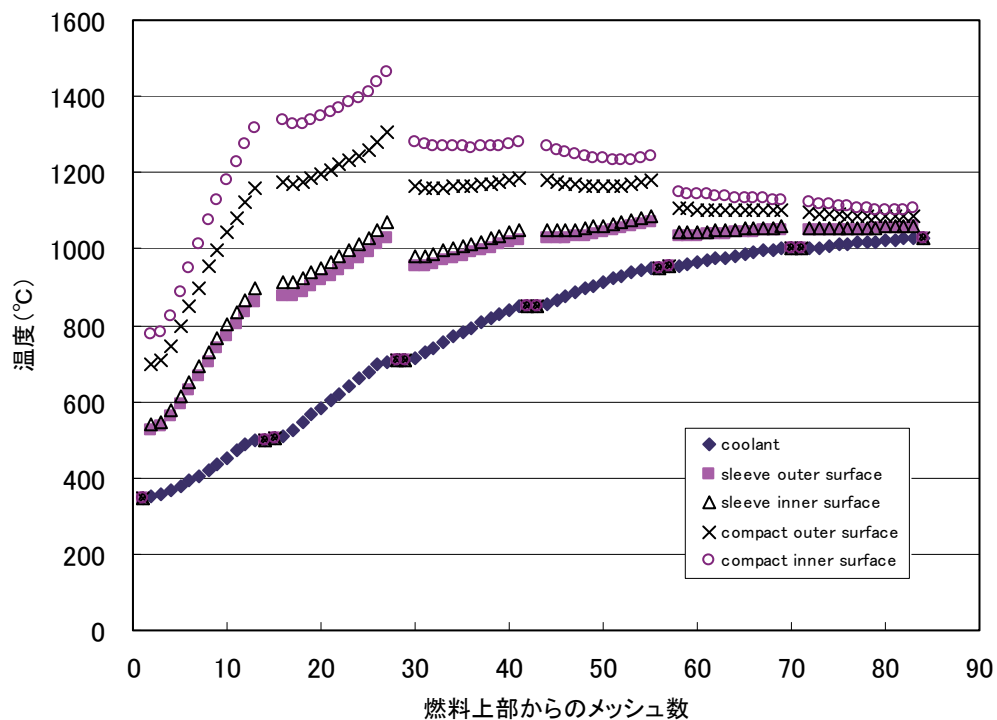


Fig. A3 軸方向温度分布 (燃焼 30 日、工学的安全係数を考慮、最高温度のカラム)  
(メッシュ番号 0 は燃料領域最上部、メッシュ番号 83 は燃料領域最下部に相当する。)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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	モル	mol
光	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	数メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm		cd sr <sup>(c)</sup>
放射線核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性炭	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘着力	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性化濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
ストルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≡ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

