

2019 年度夏期休暇実習報告 ; HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討

—核設計のための予備検討 (2)—

Report of Summer Holiday Practical Training 2019;
Feasibility Study on Nuclear Battery using HTTR Core
-Feasibility Study for Nuclear Design (2)-

石塚 悦男 中島 弘貴 中川 直樹 Hai Quan HO
石井 俊晃 濱本 真平 高松 邦吉 Inesh Kenzhina
Yevgeni Chikhray 松浦 秀明 藤本 望

Etsuo ISHITSUKA, Koki NAKASHIMA, Naoki NAKAGAWA, Hai Quan HO
Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO, Kuniyoshi TAKAMATSU, Inesh KENZHINA
Yevgeni CHIKHRAY, Hideaki MATSUURA and Nozomu FUJIMOTO

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

August 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

2019 年度夏期休暇実習報告;
HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討
- 核設計のための予備検討 (2) -

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

石塚 悦男、中島 弘貴^{*1}、中川 直樹^{*1}、Hai Quan HO、
石井 俊晃、濱本 真平、高松 邦吉⁺¹、Inesh Kenzhina^{*2}、Yevgeni Chikhray^{*3}、
松浦 秀明^{*1}、藤本 望^{*1}

(2020 年 5 月 29 日 受理)

2019 年度の夏期休暇実習において、HTTR 炉心を原子力電池に見立てた場合の核的な予備検討を実施し、MVP-BURN を用いて熱出力 5 MW で 30 年の連続運転が可能となる燃料の ²³⁵U 濃縮度と可燃性毒物に関して検討した。この結果、²³⁵U 濃縮度が 12 %、可燃性毒物の半径及び天然ホウ素濃度が 1.5 cm 及び 2 wt%の燃料が必要になることが明らかとなった。今後は、炉心の小型化について検討する予定である。

大洗研究所: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+1 水素・熱利用研究開発部

*1 九州大学

*2 ユーラシア国立大学

*3 国立カザフスタン大学

Report of Summer Holiday Practical Training 2019;
Feasibility Study on Nuclear Battery using HTTR Core
– Feasibility Study for Nuclear Design (2) –

Etsuo ISHITSUKA, Koki NAKASHIMA*¹, Naoki NAKAGAWA*¹, Hai Quan HO,
Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO, Kuniyoshi TAKAMATSU⁺¹,
Inesh KENZHINA*², Yevgeni CHIKHRAY*³,
Hideaki MATSUURA*¹ and Nozomu FUJIMOTO*¹

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 May 29, 2020)

As a summer holiday practical training 2019, the feasibility study for nuclear design of a nuclear battery using HTTR core was carried out, and the ²³⁵U enrichment and burnable poison of the fuel, which enables continuous operation for 30 years with thermal power of 5 MW, were studied by the MVP-BURN. As a result, it is clear that a fuel with ²³⁵U enrichment of 12%, radius of burnable poison and natural boron concentration of 1.5 cm and 2 wt% are required. As a next step, the downsizing of core will be studied.

Keywords : Nuclear Battery, HTTR Core, Fuel Design, Burnup Calculation, MVP-BURN, Burnable Poison

+1 Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development

*1 Kyushu University

*2 Gumilyov Eurasian National University

*3 Al-Farabi Kazakh National University

目 次

1. 序 論	1
2. 原子力電池と設計目標	1
3. 燃料濃縮度に関する燃焼計算	2
4. 可燃性毒物に関する燃焼計算	3
5. 結 論	4
謝 辞	4
参考文献	4

Contents

1. Introduction	1
2. Nuclear battery and its design goal	1
3. Burnup calculations for fuel enrichment	2
4. Burnup calculations for burnable poison	3
5. Conclusion	4
Acknowledgements	4
References	4

This is a blank page.

1. 序 論

近年、世界的に小型モジュール炉 (SMR) の開発に向けて様々な取り組みが行われており、米国、英国、カナダ等において積極的に開発支援する動きが活発化している¹⁻³⁾。SMR への期待としては、以下の項目が挙げられる¹⁾。

- ・フルパッシブ等の革新的な安全設計
- ・内蔵放射能が小さいことによる合理的な安全基準の適用、防災計画エリアの縮小
- ・工場生産方式によるコスト削減、品質維持、性能向上
- ・燃料取替不要または交換頻度削減による容易なメンテナンス、核セキュリティ上のメリット
- ・電力需要が小さい地域や電力グリッド未整備地域への導入
- ・熱供給等と併せた活用
- ・初期投資を抑えた電力自由化市場への対応

このような発想のもとに、SMR はこれまでの大電力供給が主要目的であった発電用軽水炉とは異なり、多様な用途が検討されている。最近の報道例としては、フィンランドの国立技術研究センターが熱供給用 SMR の開発を始めようとしており、地域熱供給により CO₂ 排出量の大幅な削減を目指している²⁾。また、米国国防総省では、戦闘地域近傍で軍事展開に必要な電力を賄うための軍事用 SMR として、地球上のいかなる場所でも移動でき、長期にわたって作戦活動を維持・拡大できる様なエネルギー源としての開発を目指している³⁾。このように、これまでも多様な SMR が検討されており、炉型としても高温ガス炉、熔融塩炉、軽水炉、高速炉等と多様であるが、安全性が高く且つ早期実現が期待できる高温ガス炉が有力な候補となっている¹⁾。

このような背景のもと、2018 年度から夏期休暇実習のテーマとして、優れた安全性を有する高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心をベースとした原子力電池に関する予備検討を開始した⁴⁾。2018 年度の夏期休暇実習では、HTTR 炉心を原子力電池に見立て、熱出力を変えた際の連続運転年数について計算した結果、熱出力 2 MW で約 30 年、3 MW で約 25 年、4 MW で約 18 年、5 MW で約 15 年の連続運転が可能となるが、当初の目標であった熱出力 5 MW で 30 年の連続運転は不可能であることが明らかとなった。このため、2019 年度は燃料の ²³⁵U 濃縮度や可燃性毒物を変更して熱出力 5 MW で 30 年の連続運転が可能となるような炉心の概念検討を実施した。

2. 原子力電池と設計目標

一般的に原子力電池⁵⁾とは、RI を熱源として発生した熱エネルギーを熱電変換素子で電力に変換して利用するものであるが、ここでは RI の代わりに HTTR の炉心を熱源とし、開発が進められている新型高温用熱電変換素子等の利用を想定して可動部分を無くし、メンテナンスフリーで長期間運転できるエネルギー源として検討している⁴⁾。本報告で検討している原子力電池のイメージを Fig. 2.1 に示す。また、原子力電池の設計目標は以下のとおりである⁴⁾。

- | | |
|-------------|-----------------------------|
| 1) 基本炉心 | : HTTR 炉心 |
| 2) 熱出力 | : 5 (MW) |
| 3) 運転期間 | : 30 (年) |
| 4) 冷却方式 | : ヘリウム自然循環冷却→自然循環水冷 |
| 5) 冷却水出入口温度 | : 入口 40 (°C)、出口 100 (°C) |
| 6) 熱電変換素子効率 | : 10 (%) |
| 7) 熱電変換素子温度 | : 入熱側 400 (°C)、出熱側 200 (°C) |

今年度は、燃料の ^{235}U 濃縮度や可燃性毒物を変えて熱出力 5 MW で 30 年の連続運転が可能となる条件を求めるために炉心の燃焼計算を実施した。HTTR 炉心部の概略を Fig. 2.2 に示す。

3. 燃料濃縮度に関する燃焼計算

燃料濃縮度に関する燃焼計算では、MVP-BURN(核データライブラリ: JENDL-4.0)を用い、 ^{235}U 濃縮度をパラメータとして熱出力 5 MW で運転する際の実効増倍率(k_{eff})の変化を求めた。

HTTR 炉心配置と燃焼計算モデルを Fig. 3.1 及び Fig. 3.2 に示す。HTTR の炉心は、径方向の 4 つの領域と垂直方向の 5 つの領域に区分して計算している。燃焼計算にあたっては、計算を単純化するため制御棒が抜けた状態とし、装荷する燃料の ^{235}U 濃縮度を一種類とした。また、炉心温度は燃料温度と等しいものと仮定し、以下の条件で燃焼計算を行った。

- | | |
|----------------|-------------------|
| ・ヒストリー数 | : 20000 × 100 バッチ |
| ・燃料ブロックあたりの燃料棒 | : 30 本 |
| ・燃焼時間 | : 40 年 |
| ・全制御棒位置 | : 405 cm |
| ・可燃性毒物 | : 未装荷 |

炉心温度を 500、800、1000 及び 1200K とし、燃料濃縮度を 6、8、10、12、14、16、18 及び 20 %とした場合の運転時間と k_{eff} の関係を Fig. 3.3 から Fig. 3.10 に示す。燃料濃縮度を高くすると k_{eff} が大きくなるとともに運転に伴う k_{eff} の減少幅が少なくなることが分かる。なお、炉心温度が高くなると k_{eff} が低下するのは、燃料温度の上昇に伴い ^{238}U の共鳴吸収が増えて ^{235}U の核分裂に寄与する中性子が減少するためである⁴⁾。

炉心温度 1200K において $k_{\text{eff}} = 1$ となる運転時間と燃料濃縮度の関係を Fig. 3.11 に示す。これらの計算結果から、燃料濃縮度を 12 %とした時に、いずれの炉心温度においても k_{eff} が 1 を超え、30 年の連続運転が可能になることが明らかとなった。また、燃料濃縮度 20%では、60 年近くの連続運転が可能になることも明らかとなった。

4. 可燃性毒物に関する燃焼計算

HTTR では、運転初期の過剰反応度を抑えるため Fig. 2.2 に示したように可燃性毒物が各燃料ブロックに 2 箇所装荷されている⁶⁾。可燃性毒物は、直径約 14 mm の炭化ホウ素と黒鉛粉末の混合焼結体 (B_4C-C コンポジット) が採用されており、有効長 200 mm のペレットが燃料ブロック内の上下に配置されている。可燃性毒物の天然ホウ素濃度は、2.22 wt% と 2.74 wt% の 2 種類が採用されており、垂直方向のフラックス分布を平滑化させるため、2 段目と 3 段目の燃料ブロックには 2.74 wt% が、それ以外の燃料ブロックには 2.22 wt% の可燃性毒物が装荷されている。

本章では、 ^{235}U 濃縮度 12 % の燃料ブロックが装荷されているものとし、可燃性毒物の半径と天然ホウ素濃度をパラメータとして燃焼計算を実施した。可燃性毒物の計算モデルを Fig. 4.1 に示す。計算条件は、炉心温度が 800 K、その他は前章と同じ条件とした。炉心温度を 800 K としたのは、熱計算を行っていないため正確な値を得ていないが、熱電変換素子入口温度 400 °C 以上を満足し、かつ効率良く燃料を使用できる可能な限り低い炉心温度にしたいと考えたためである。

可燃性毒物の半径を 0.7、1.0、1.5、2.0 cm とした場合の運転時間と k_{eff} の関係を Fig. 4.2 から Fig. 4.5 に示す。また、比較のために可燃性毒物が装荷されていない場合の計算結果を図中の点線として示す。

可燃性毒物が十分でない場合 (例えば Fig. 4.2 の天然ホウ素濃度 2 wt% 等) は、運転初期の過剰反応度を抑えられないことに加えて、20 年程度で ^{10}B が燃焼してしまい可燃性毒物が装荷されていない状態と同じになってしまう。逆に可燃性毒物の量を確保するため、天然ホウ素濃度を高くしすぎたり、可燃性毒物の半径を大きくしすぎると、運転末期には十分な反応度が得られなくなるために原子炉の運転ができなくなる。このため、天然ホウ素濃度や可燃性毒物の半径の組合せを細かく調整する必要がある。一般に、 k_{eff} は、可燃性毒物の天然ホウ素濃度を高くしたり、半径を大きくすると ^{10}B の自己遮蔽効果により ^{10}B の燃焼速度が遅くなるため k_{eff} の変化を少なくすることができるが⁷⁾、 k_{eff} は ^{235}U と ^{10}B の燃焼や ^{239}Pu の生成によって影響されるため複雑な挙動となる。

可燃性毒物の半径及び天然ホウ素濃度の選定に当っては、30 年間の運転中に k_{eff} が 1.0 から 1.1 の範囲 (図中のハッチング部) に収まり、その間大きく変動しないことを条件とした。これにより、運転初期の過剰反応度を抑えられることに加えて、燃焼に伴う制御棒位置調整の労力を極力少なくすることができる。この観点から、Fig. 4.2 から Fig. 4.5 の計算結果を眺めると、Fig. 4.4 の黒丸 (可燃性毒物の半径: 1.5 cm、天然ホウ素濃度: 2 wt%) が最も適していることが明らかとなった。この際の運転に伴う ^{235}U 、 ^{10}B 及び ^{239}Pu の原子密度変化を Fig. 4.6 に示す。運転開始から 10 年までは ^{235}U 及び ^{10}B の燃焼にともなって k_{eff} が減少傾向となるが、その後 ^{239}Pu の生成に伴って k_{eff} が微増する。運転開始から 25 年後には ^{10}B がほぼ燃焼し、 k_{eff} は ^{235}U の燃焼に伴い再び減少傾向となっている。

5. 結 論

優れた安全性を有する高温ガス炉の炉心をベースとした原子力電池に関する予備検討として、熱出力 5 MW で 30 年の連続運転に必要な燃料の ^{235}U 濃縮度と可燃性毒物に関して検討した結果、以下が明らかとなった。

- ・炉心温度 1200 K 以下において、30 年の連続運転が可能となる燃料濃縮度は 12 % であること、燃料濃縮度を 20 % とすれば 60 年近くの連続運転も可能になることが明らかとなった。
- ・炉心温度 800 K において、30 年間の運転中に k_{eff} が 1.0 から 1.1 の範囲となる条件のもとで可燃性毒物の半径及び天然ホウ素濃度を検討した結果、可燃性毒物の半径が 1.5 cm、天然ホウ素濃度 2 wt% が最適となった。

次年度の夏期休暇実習は、炉心の小型化について検討するとともに、これらの予備検討により実習生のスキルアップに繋げる予定である。

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) 田中隆則, “小型モジュール炉 (SMR) を巡る国際動向とそのインパクト”, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ Vol.60, No.7 (2018), pp.382-386.
- 2) 原子力産業新聞, “フィンランド国立技術研究センターが地域暖房用 SMR の開発を開始”, (2020), <https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/2059.html>, (参照 2020 年 2 月 27 日).
- 3) 原子力産業新聞, “米国防総省、超小型原子炉原型炉の設計契約で WH 社など 3 社を選定”, (2020), <https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/2174.html>, (参照 2020 年 3 月 11 日).
- 4) 石塚悦男, 松中一朗, 石田大樹, Hai Quan Ho, 石井俊晃, 濱本真平, 高松邦吉, I.Kenzhina, Y.Chikhray, 近藤 篤, 高木直行, 藤本 望, “2018 年度夏期休暇実習報告; HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討 -核設計のための予備検討-”, JAEA-Technology 2019-008 (2019), 12p.
- 5) ATOMICA, “原子力電池(アイソトープ電池)”, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-04-02-08.html, (2020), (参照 2019 年 11 月 15 日).
- 6) IAEA, “Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis

Related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10” IAEA-TECDOC-1382, (2003), 352p., <https://www.iaea.org/publications/6821/evaluation-of-high-temperature-gas-cooled-reactor-performance-benchmark-analysis-related-to-initial-testing-of-the-htrr-and-htr-10>, (参照 2019 年 11 月 15 日).

- 7) K.Yamashita, “Optimization Method of Rod-Type Burnable Poisons for Nuclear Designs of HTGRs”, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.31, No.9, pp.979-985 (1994).

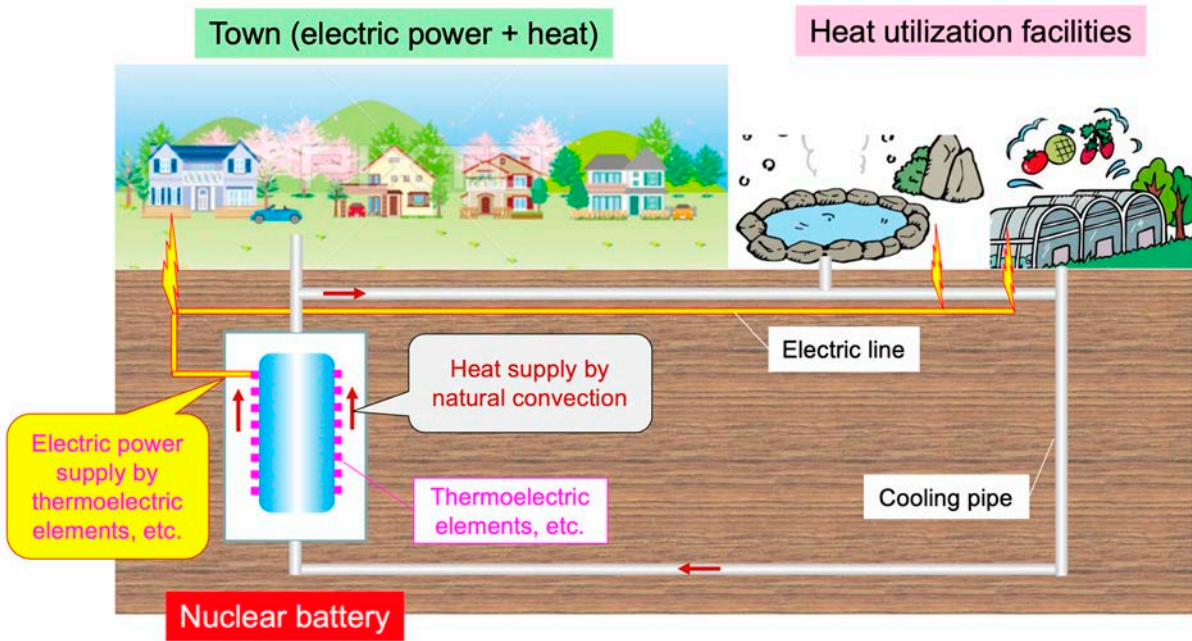


Fig. 2.1 Image of nuclear battery

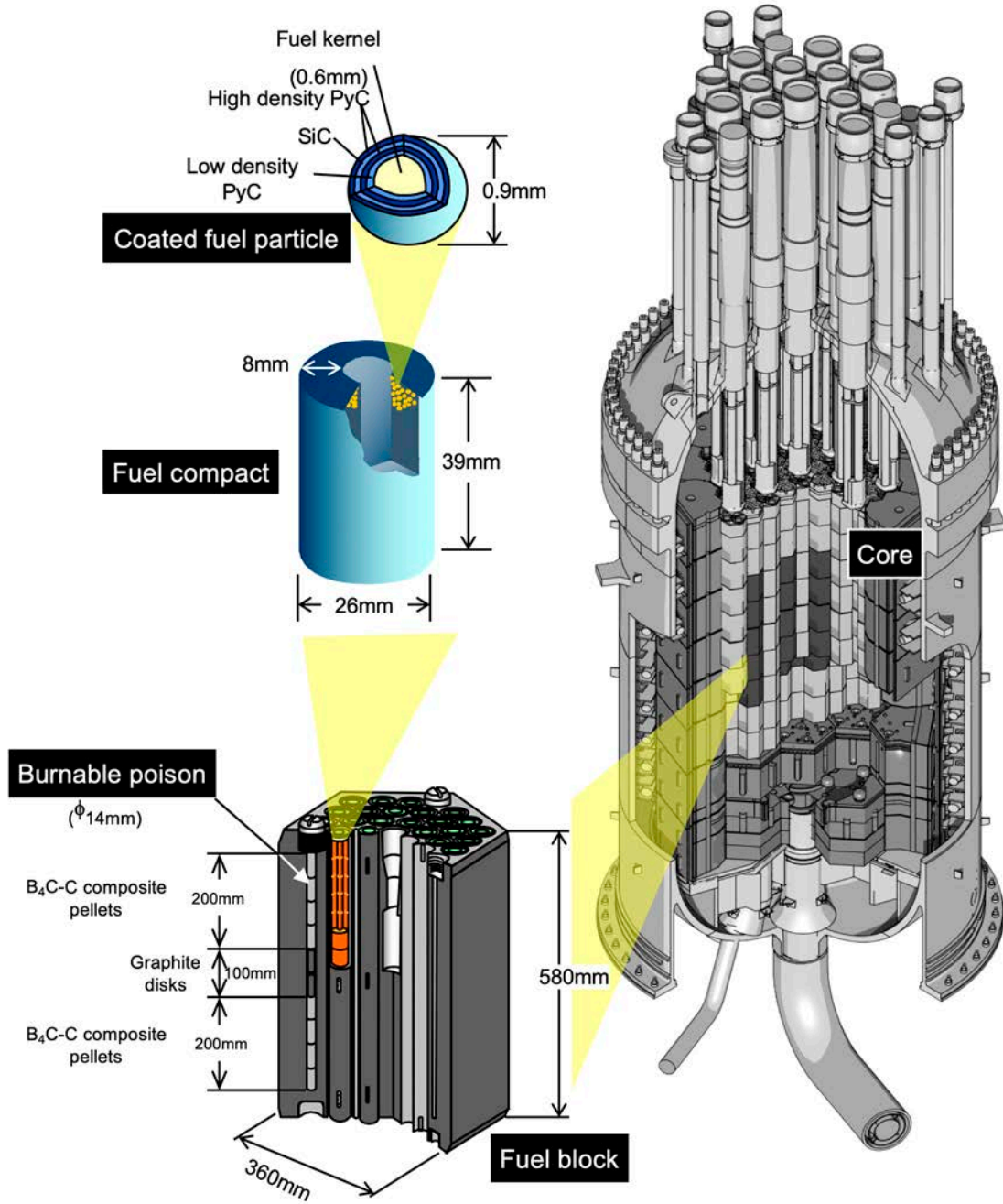


Fig. 2.2 Outline of HTTR core

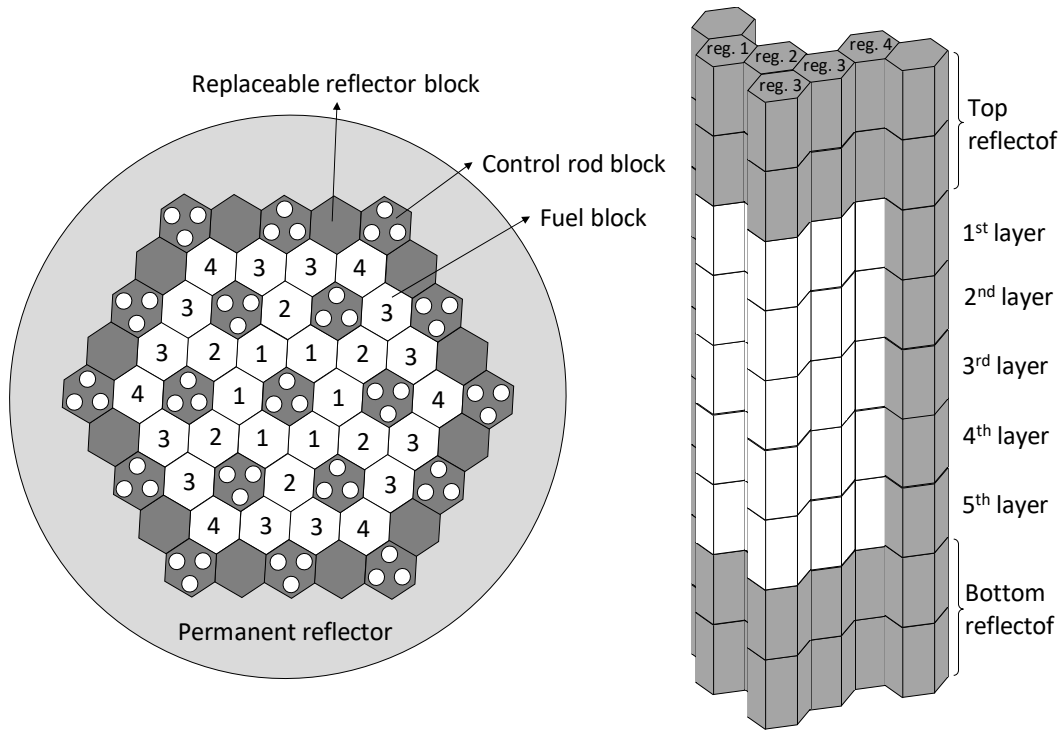


Fig. 3.1 HTTR core layout

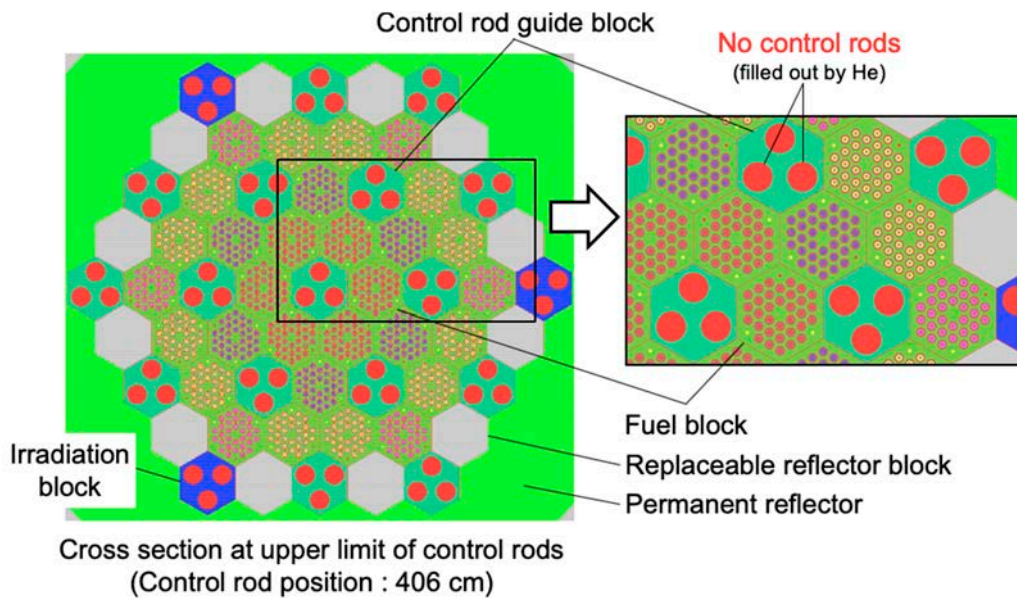


Fig. 3.2 Burnup calculation model of HTTR core

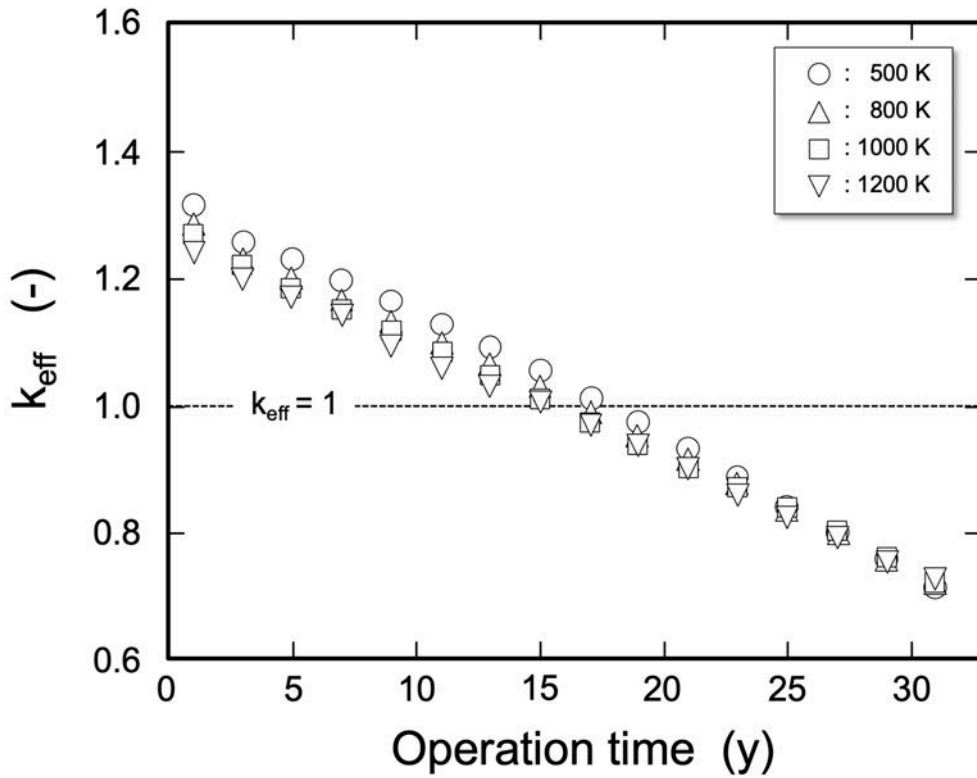


Fig. 3.3 Operation time and k_{eff} for 6% ²³⁵U fuel enrichment

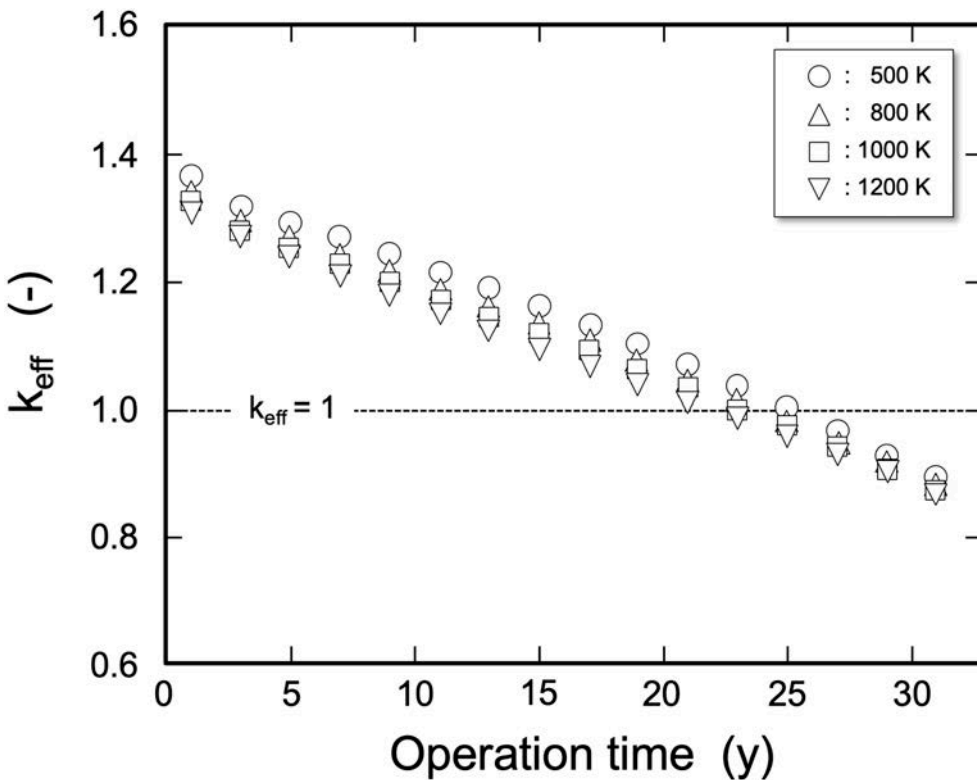


Fig. 3.4 Operation time and k_{eff} for 8% ²³⁵U fuel enrichment

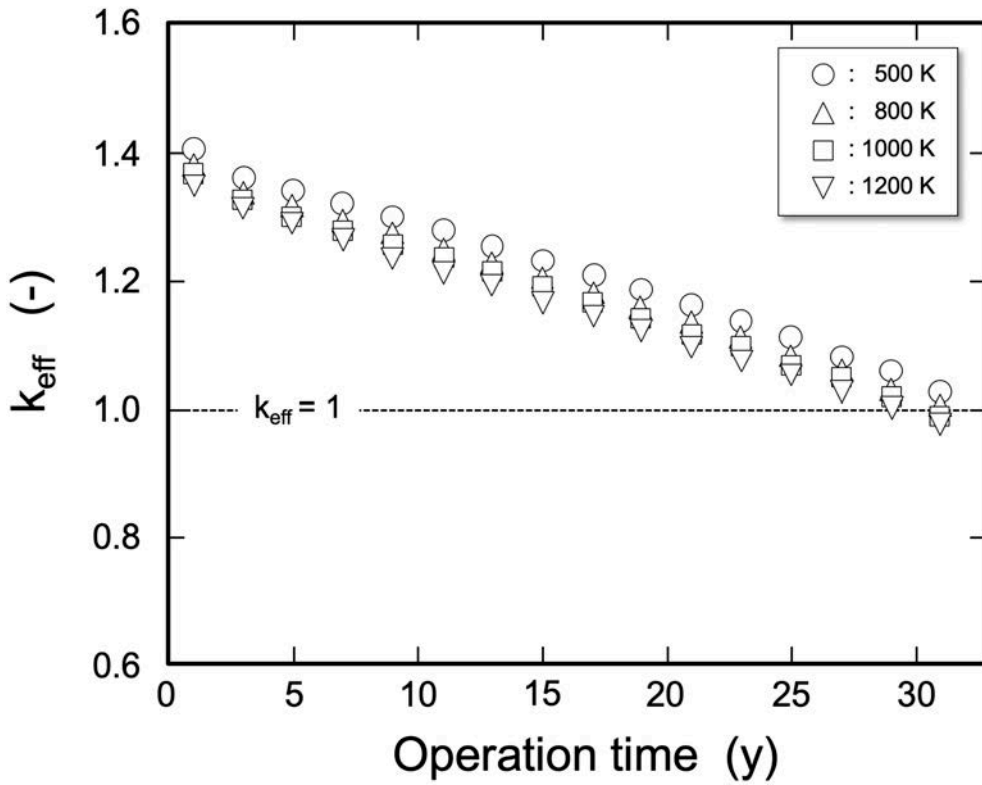


Fig. 3.5 Operation time and k_{eff} for 10% ^{235}U fuel enrichment

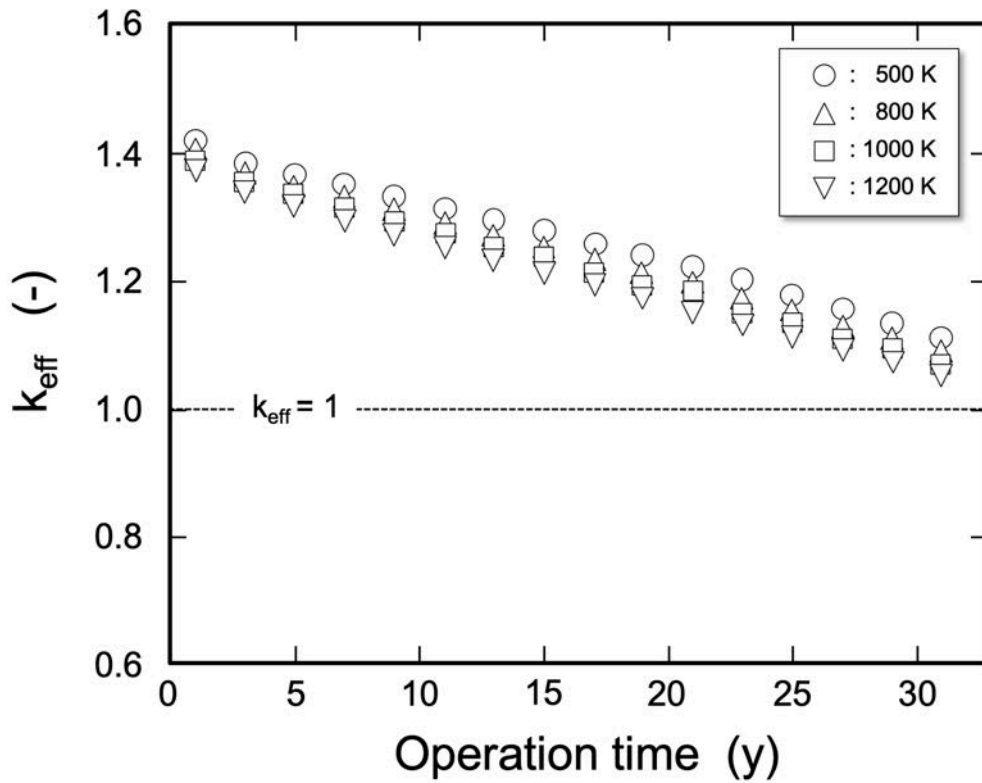


Fig. 3.6 Operation time and k_{eff} for 12% ^{235}U fuel enrichment

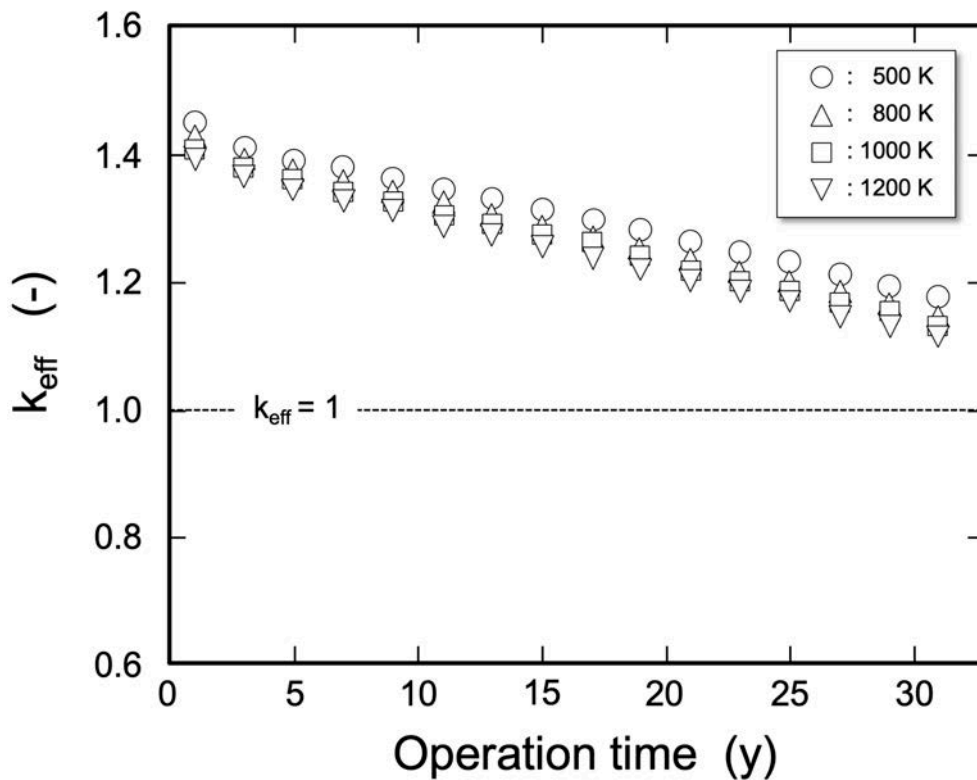


Fig. 3.7 Operation time and k_{eff} for 14% ²³⁵U fuel enrichment

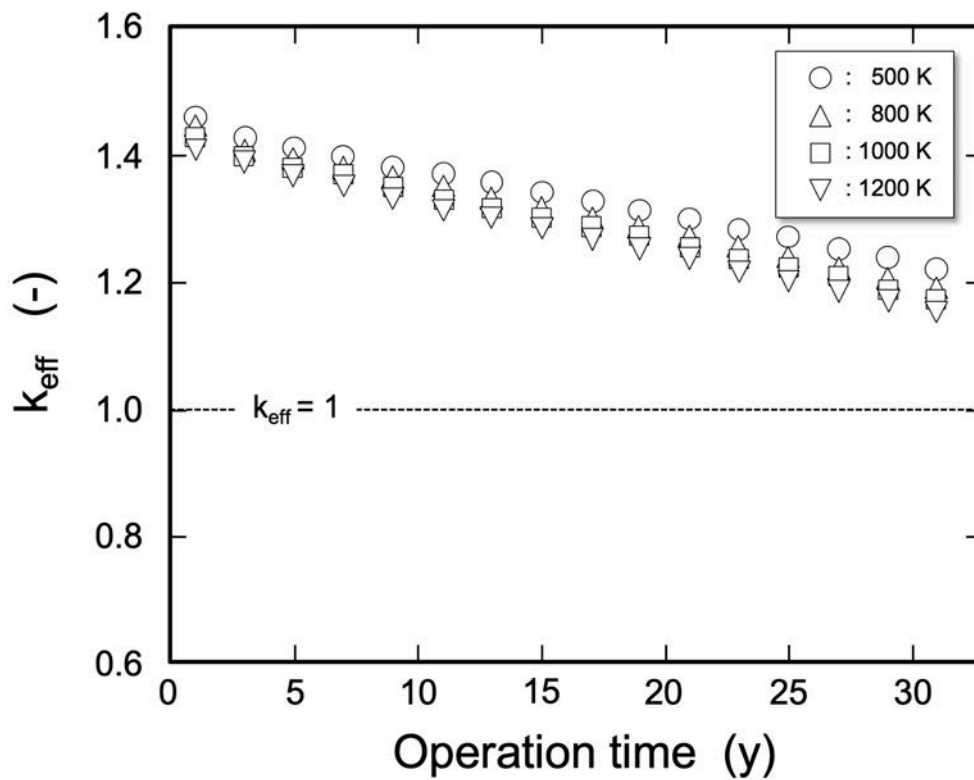


Fig. 3.8 Operation time and k_{eff} for 16% ²³⁵U fuel enrichment

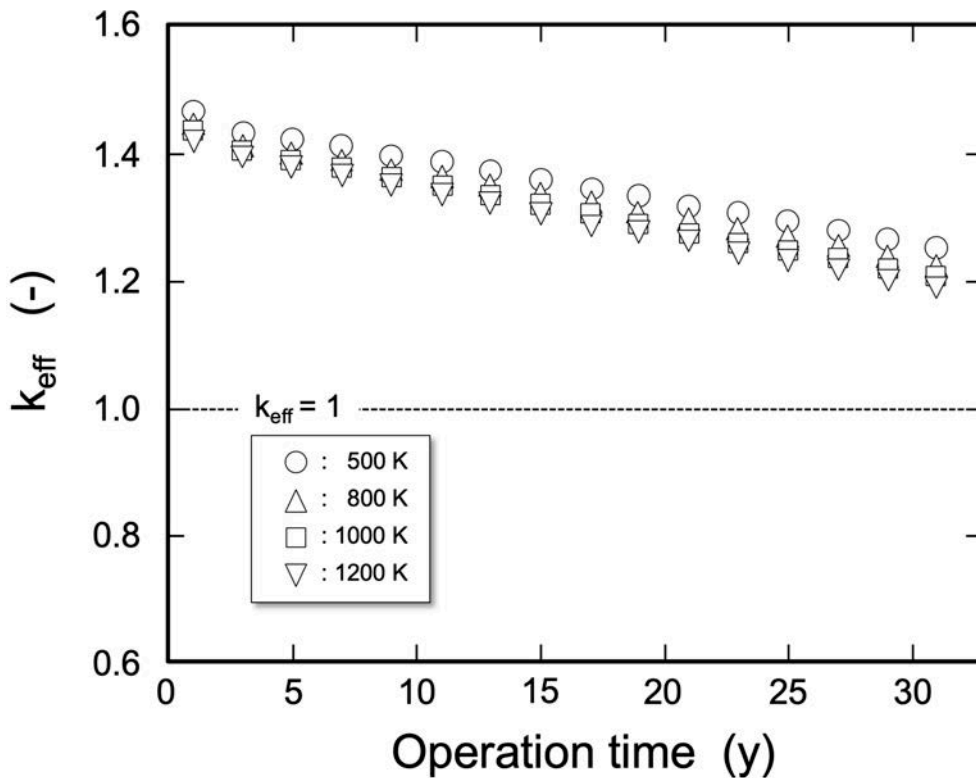


Fig. 3.9 Operation time and k_{eff} for 18% ^{235}U fuel enrichment

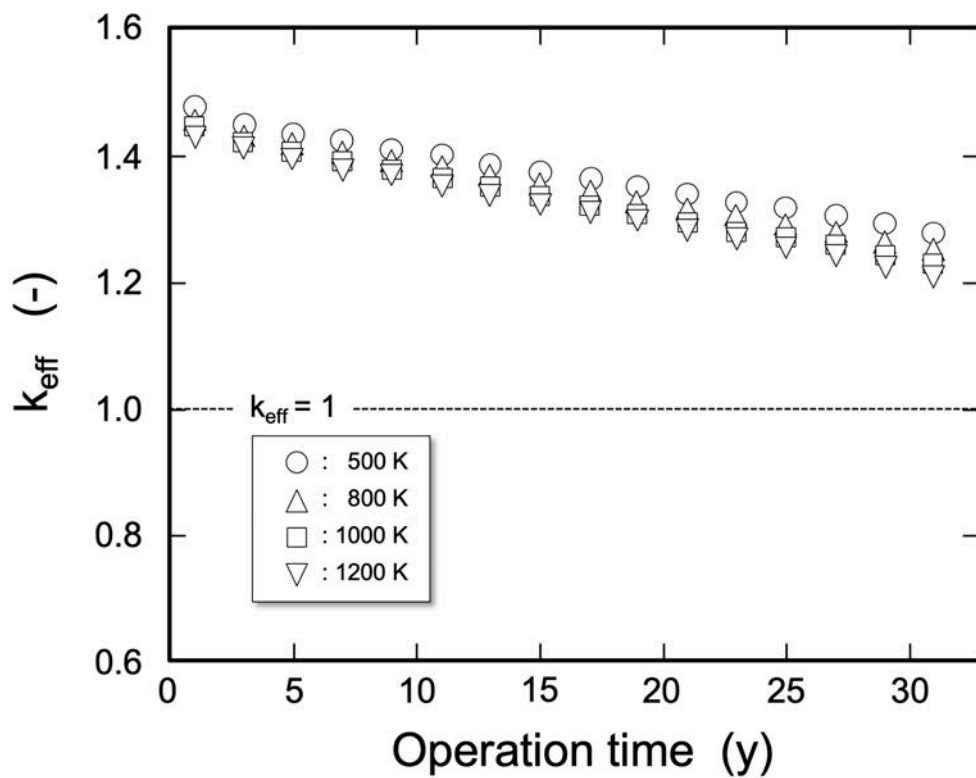


Fig. 3.10 Operation time and k_{eff} for 20% ^{235}U fuel enrichment

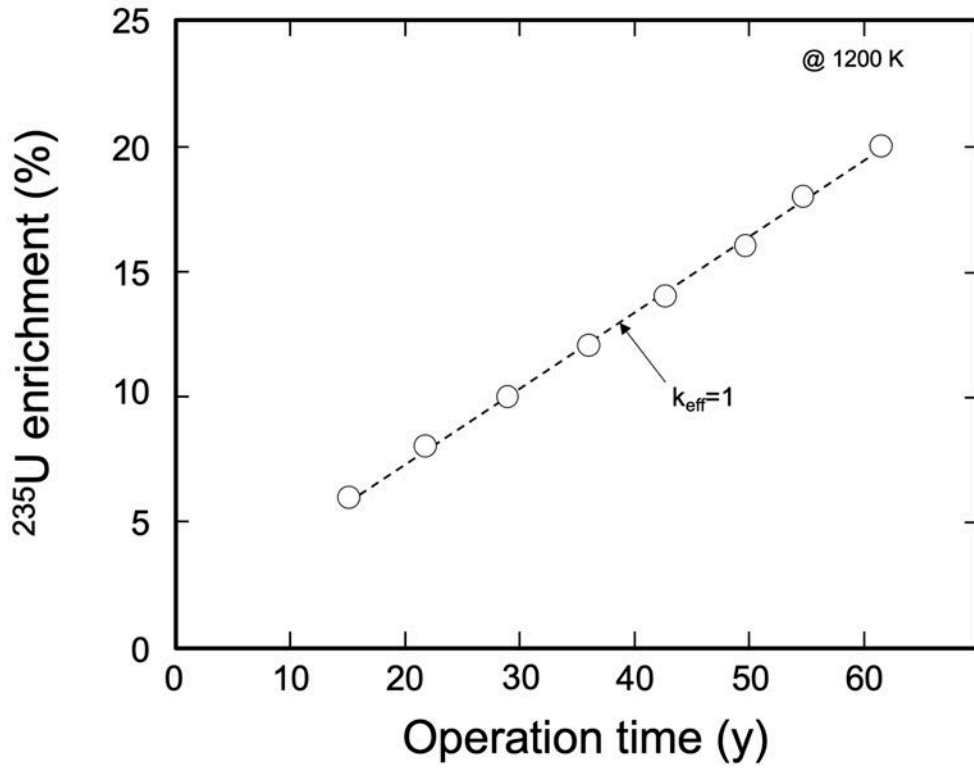


Fig. 3.11 Relation of operation time and ²³⁵U fuel enrichment

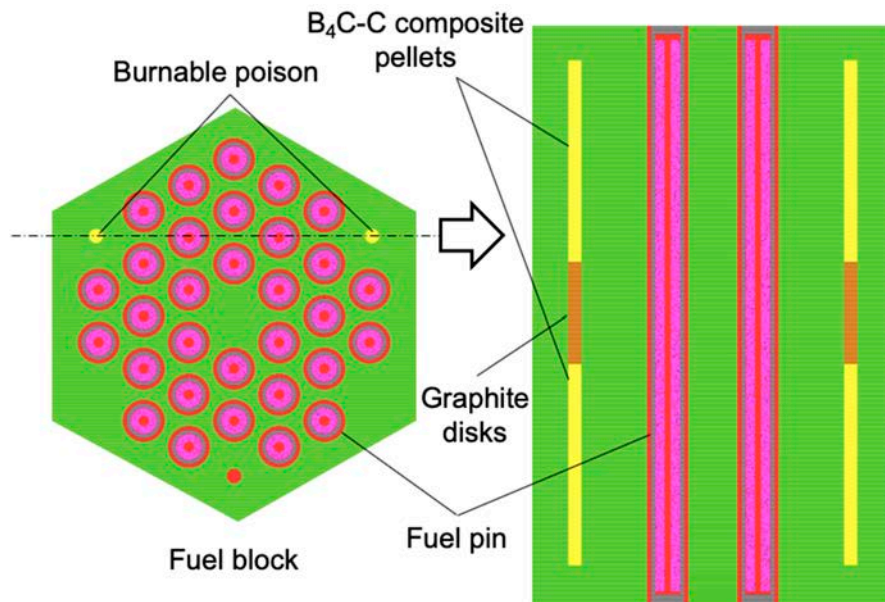


Fig. 4.1 Calculation model of burnable poison

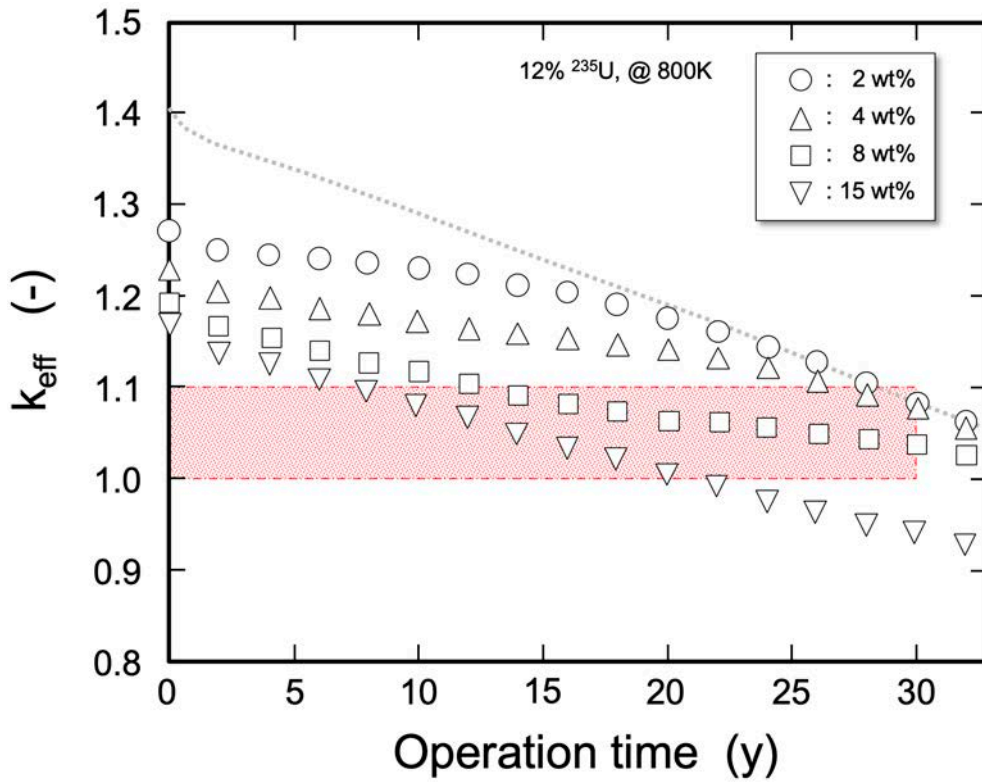


Fig. 4.2 Operation time and k_{eff} for burnable poison size ($r=0.7\text{cm}$)

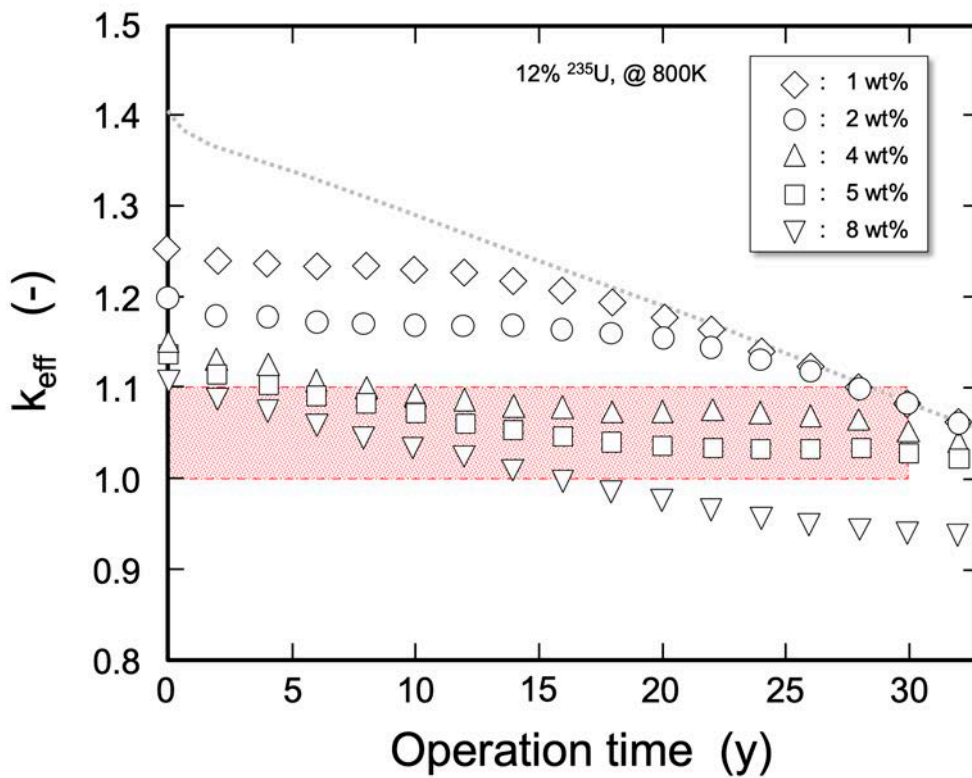


Fig. 4.3 Operation time and k_{eff} for burnable poison size ($r=1.0\text{cm}$)

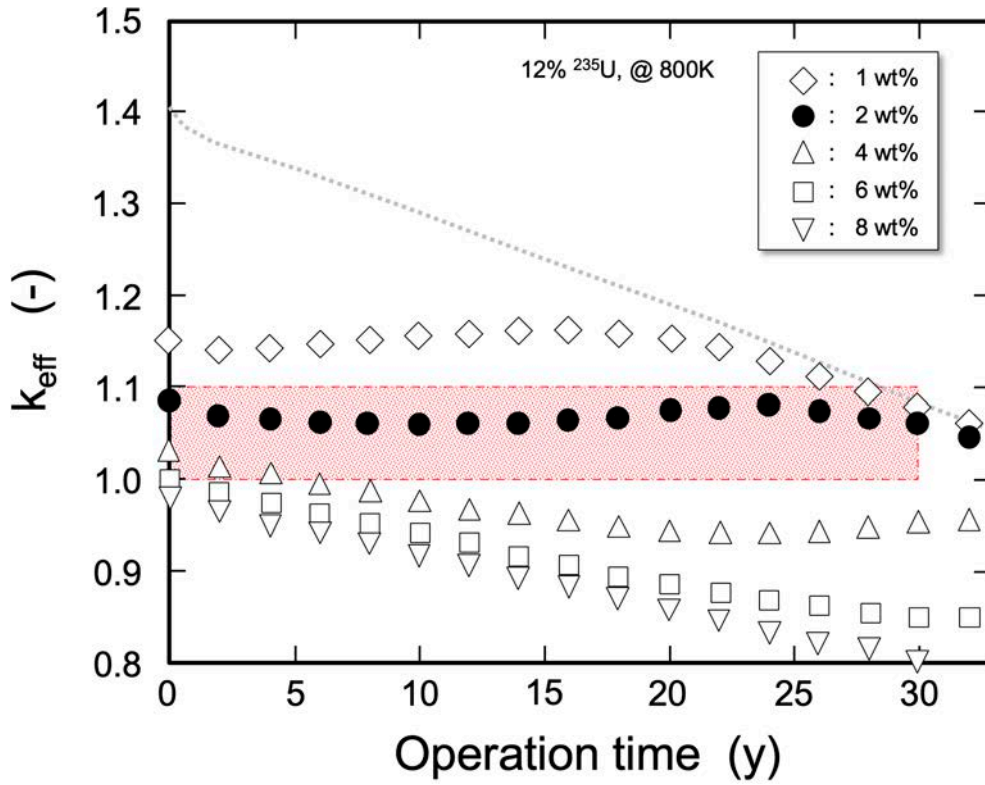


Fig. 4.4 Operation time and k_{eff} for burnable poison size ($r=1.5\text{cm}$)

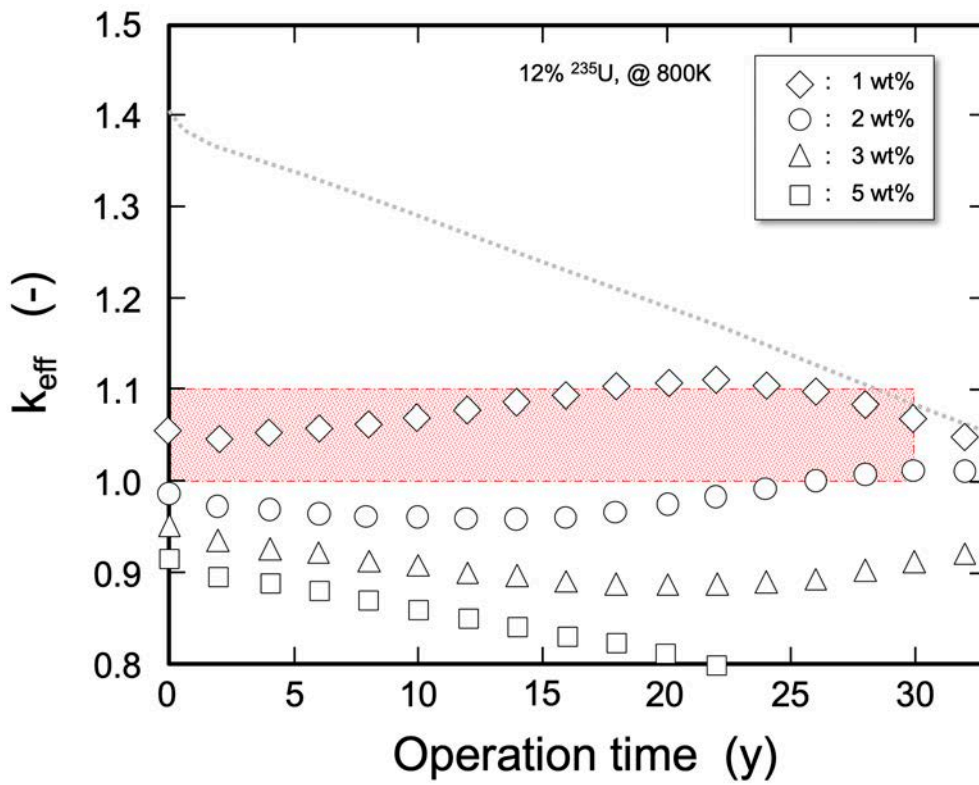


Fig. 4.5 Operation time and k_{eff} for burnable poison size ($r=2.0\text{cm}$)

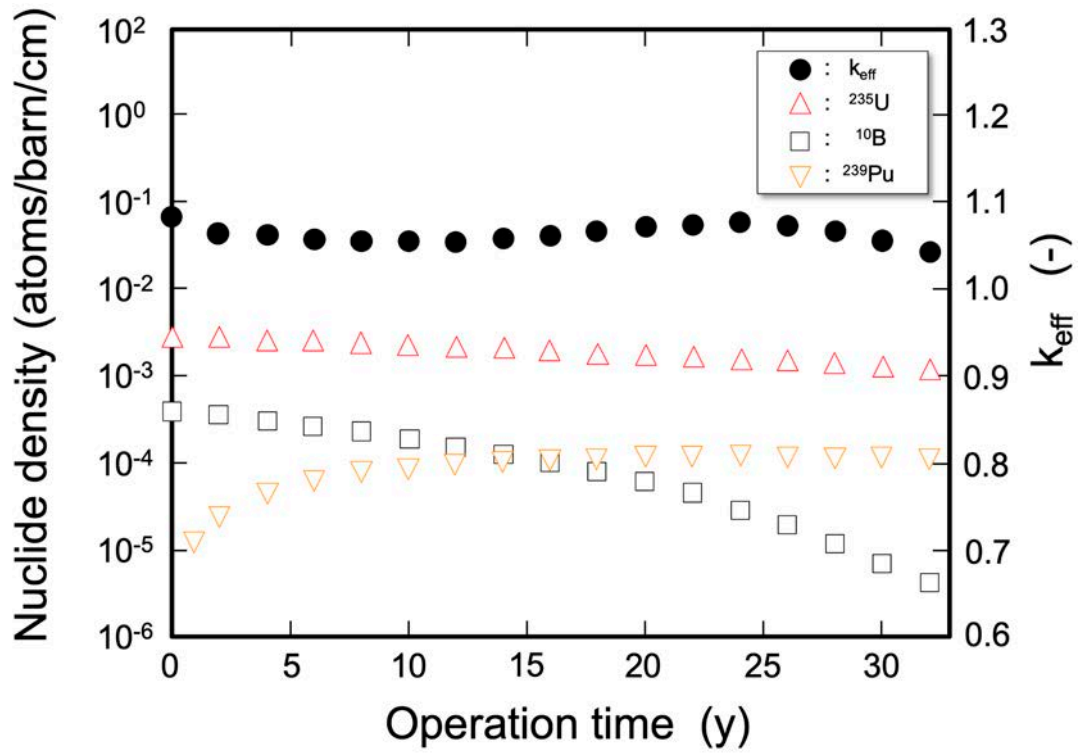


Fig. 4.6 k_{eff} and nuclide densities of ^{235}U , ^{10}B , ^{239}Pu for Fig.4.4 (2wt%)

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량	モル	mol
光度	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組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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 (CI-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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ 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	1 cal=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 ⁻⁶ m

