

HTTR 炉心解析における制御棒モデルの検討

Study on Control Rod Model in HTTR Core Analysis

長住 達 松中 一朗 藤本 望 石井 俊晃
石塚 悦男

Satoru NAGASUMI, Kazuaki MATSUNAKA, Nozomu FUJIMOTO, Toshiaki ISHII
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

May 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

HTTR 炉心解析における制御棒モデルの検討

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

長住 達、松中 一朗*¹、藤本 望*¹、石井 俊晃、石塚 悦男

(2020 年 2 月 20 日 受理)

MVP コードを用いて、制御棒の幾何形状を実機の制御棒構造に近づけた詳細モデルを作成し、制御棒モデルの詳細化による HTTR の核特性への影響について検討した。この結果、臨界制御棒位置は、制御棒モデルの詳細化により、従来のモデルと比べて 11 mm 低くなり、実測値である 1775 mm に近づいた。また、制御棒先端のショックアブソーバーにより吸収された反応度は 0.2 % $\Delta k/k$ となり、臨界制御棒位置にして 14 mm の差となることが分かった。さらに、制御棒の形状効果による SRAC コードの解析値に対する補正量は、制御棒モデルの詳細化とショックアブソーバーによる影響を考慮して、低温臨界時において反応度で-0.05 % $\Delta k/k$ 、臨界制御棒位置にして-3 mm となった。

Study on Control Rod Model in HTTR Core Analysis

Satoru NAGASUMI, Kazuaki MATSUNAKA*¹, Nozomu FUJIMOTO*¹,
Toshiaki ISHII 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 February 20, 2020)

The influence of the control rod model on the nuclear characteristics of the HTTR has been evaluated, by creating detailed control rod model, in which geometric shape was close to that of the actual control rod structure, in MVP code. According to refinement of the control rod model, the critical control rod position was 11 mm lower than that of the conventional model, and this was close to the measured value of 1775 mm . The reactivity absorbed by the shock absorber located at the tip of the control rod was 0.2% $\Delta k/k$, and this was 14 mm difference at the critical control rod position. Considering the effect of refinement of the control rod and the effect of the shock absorber, the correction amount for the analysis value in SRAC code due to the shape effect of the control rod, is -0.05% $\Delta k/k$ in reactivity, and -3 mm in the critical control rod position at low temperature criticality.

Keywords : HTTR, Control Rod, MVP, Full Core Calculation, Monte-carlo Calculation

*1 Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

目 次

1. 序論	1
2. 解析方法及びモデル	1
2.1 HTTR 炉心の概要	1
2.2 制御棒の解析モデル	2
2.3 計算条件及び評価方法	2
3. 解析結果	3
4. 結論	4
謝辞	5
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical method and model	1
2.1 Outline of HTTR core	1
2.2 Analytical model of control rod	2
2.3 Calculation condition and evaluation method	2
3. Analytical results	3
4. Conclusion	4
Acknowledgements	5
References	5

This is a blank page.

1. 序論

高温工学試験研究炉 (HTTR)¹⁾は出力 30MW、定格運転及び高温運転時の原子炉出口冷却材温度が 850 及び 950°C の黒鉛減速ヘリウム冷却型高温ガス炉であり、1998 年 11 月に初臨界に達して以来、様々な試験を通して高温ガス炉技術の確証に必要なデータを蓄積してきた。しかし、将来の商業炉の開発に関しては、更なる燃料の高燃焼度化や運転制御の高度化が望まれており、HTTR の運転及び試験を通して得られたデータを基にした設計手法の高度化が不可欠である。特に、臨界制御棒位置等の核的評価は、原子炉の停止余裕に影響するため、高精度の解析が要求される。

HTTR の核的評価としては、拡散及びモンテカルロコードを用いて計算されてきたが、計算で求めた臨界制御棒位置と測定値には差異が見られる。この差異の原因の一つとして、実機の制御棒と解析モデルの形状の違いが考えられる。これまでの解析モデルは、臨界近接の評価を目的として作成され、1) 臨界時は制御棒が炉心から全て引き抜かれた状態になるため制御棒形状の影響が小さいこと、2) 当時の計算機ではメモリーが十分に確保できなかったこと、から簡略化したモデルが採用されていた。しかし、出力上昇試験や燃焼挙動評価では、制御棒が燃料領域に挿入されるために制御棒のショックアブソーバーや制御棒要素のつなぎ目等の形状が影響するものと考えられる。このため、実機に近い制御棒の詳細モデルを作成し、形状の違いによる核的パラメーターへの影響を確認しておく必要がある。

本報告書では、モンテカルロ計算コード MVP²⁾を用い、制御棒の幾何形状を実機の制御棒構造に近づけた詳細モデルを作成して、制御棒モデルの詳細化による臨界制御棒位置等の核特性への影響について検討した。また、MVP コードを用い、拡散計算コード SRAC³⁾では評価できなかった制御棒の先端部(ショックアブソーバー)により吸収される反応度を評価し、低温臨界時の制御棒位置に対する影響を評価した。

2. 解析方法及びモデル

2.1 HTTR 炉心の概要

HTTR の燃料体⁴⁾を図 2.1 に示す。HTTR の燃料体は、被覆燃料粒子と黒鉛を焼結した円筒状の燃料コンパクトを黒鉛スリーブに挿入して一本の燃料棒とし、六角柱状の黒鉛ブロックに 33 本もしくは 31 本装荷された構造となっている。また、燃料の燃焼による反応度補償のため、2 本の可燃性毒物 (Burnable Poison) 棒が燃料体の外周部に装荷されている。

HTTR 炉心の水平断面図⁴⁾を図 2.2 に示す。炉心は、燃料体、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロックを積み上げたもので構成される。制御棒案内ブロックは、燃料体と同じ対面距離の六角柱状の黒鉛ブロックで 3 個の貫通孔を有し、そのうち 2 つが制御棒挿入孔、残り 1 つが炭化ホウ素ペレットの挿入孔となっている。また、ブロックを積み上げた 1 列をカラムと称し、燃料カラムは上から、2 段の可動反射体ブロック、5 段の燃料体、2 段の可動反射体ブロックの 9 段で構成されている。燃料領域は、30 個の燃料カラム、制御棒及び制御棒案内ブロックから成る 7 つの制御棒案内カラムで構成されている。側部可動反射体領域は、12 の可動反射体カラム、3 つの照射カラム及び 9 つの制御棒案内カラムから構成されている。

制御棒は、図 2.2 に示すように、中心から C が 1 対、R1 が 6 対、R2 が 6 対、R3 が 3 対の総計 16 対からなり、制御棒案内ブロックに設けた制御棒挿入孔内を上下に移動する。

HTTR の MVP コードの入力データは野尻らの報告⁵⁾を基に、各構成要素の組成は沢らの報告⁶⁾に基づき作成した。

2.2 制御棒の解析モデル

(1) 詳細モデル

制御棒の概略図⁴⁾を図 2.3 に示す。制御棒は、軸方向に多分割した二重円筒ベント型であり、10 個の制御棒要素が支持板(support ring)を介して連結して可とう性を有する構造となっており、原子炉圧力容器の上蓋部のスタンドパイプ内に設置された制御棒駆動機構とワイヤーロープ(control rod cable)で連結され、ワイヤーロープの巻取りにより上下に駆動する構造となっている。また、最下部は、万一のワイヤーロープの破断による制御棒の落下に備えてショックアブソーバーが設けられている。

これまで臨界近接試験時に作成された MVP コード用の制御棒モデル(以下、「簡易モデル」という。)は、制御棒の全引抜き状態における炉心に注目していたため、制御棒要素の分割構造や先端のショックアブソーバーの構造も実機と異なり、吸収体及び構造材は軸方向に均一とした簡略化された構造となっていた。そのため簡易モデルは、実機と比べて 9 つの制御棒要素間のギャップの分、中性子吸収材が多くなり、体積及び外表面積にして 6.8%の差となる。このため、制御棒の詳細モデルの作成にあたっては、吸収体の軸方向の要素間のギャップ等を現実ベースで考慮し、実際の制御棒と中性子吸収材の体積及び外表面積を一致させた。また、制御棒の構造材は軸方向の非均一な配列を考慮し、ショックアブソーバーについては詳細な形状を再現した。

制御棒モデルの比較を図 2.4 に示す。制御棒の詳細モデルの作成にあたっては、参考文献⁷⁾の制御棒構造を基に作成し、入力データの検証には MVP コードに搭載されている CGVIEW²⁾を用いて行った。制御棒形状検証の一例として、制御棒位置 1740 mm における断面図を図 2.5 に示す。制御棒の詳細モデルでは、実機と同様な吸収体及び構造材の軸方向の非均一な配列構造等が再現されている。

(2) ショックアブソーバー無モデル

SRAC コードでは、詳細な幾何学形状を再現することが困難なため、制御棒の先端に位置するショックアブソーバーによって中性子が吸収される効果を考慮していない。この効果を評価するため、MVP コード用のショックアブソーバー有り無しとの 2 つのモデルを作成し、両者の反応度差を求めた。ショックアブソーバー有りモデルは前述の詳細モデルを採用し、ショックアブソーバー無しモデルは詳細モデルからショックアブソーバーを取り除いたものとした。CGVIEW による可視化結果を図 2.6 に示す。

2.3 計算条件及び評価方法

今回の評価にあたり、核計算コードとしてモンテカルロ計算コード MVP、核データライブラリは JENDL-4.0⁸⁾を用いた。計算条件を表 2.1 に示す。

計算に際しては、初臨界時の制御棒位置の実測データと比較を行うことを想定して、低温臨界時の未燃焼炉心を想定し、制御棒の引抜きは R3 制御棒を上限位置まで全数引き抜き、C、R1 及び R2 制

御棒位置の差を±2 mm 以内でそろえた状態(Fs パターン)とした。また、バッチ及びヒストリは、臨界制御棒位置の統計誤差が±1 mm 以下となるよう、以下に設定した。

有効バッチ数	:1200
スキップバッチ数	:50
バッチ当たりヒストリ数	:120000

上記の設定により、実効増倍率の標準偏差は、 $6.5 \times 10^{-5} \sim 7.2 \times 10^{-5}$ %となった。この値は、反応度に換算すると $6.3 \times 10^{-3} \sim 7.3 \times 10^{-3}$ % $\Delta k/k$ となる。以降に示す結果は、標準偏差の 2 倍を統計誤差として評価した。

3. 解析結果

(1) 各モデルにおける臨界制御棒位置の比較

各モデルの臨界制御棒位置近傍における実効増倍率と反応度及び内挿法により求めた臨界制御棒位置の計算結果を表 3.1 及び表 3.2 に示す。臨界制御棒位置は、モデルの詳細化により 11 mm 低くなり、HTTR の実測値⁹⁾である 1775 mm に近づく結果となった。

(2) 各モデルにおける制御棒位置毎の反応度値の比較

制御棒位置毎の制御棒モデル間の反応度差を図 3.1 に示す。両モデルの反応度差は制御棒の挿入に従って増加する傾向になり、炉心深くまで制御棒が挿入される程、制御棒の形状の違いによる反応度への影響が顕著に現れることが分かった。また、制御棒モデルの詳細化による HTTR 炉心特性への影響は、反応度差にして全挿入時で約 0.5 % $\Delta k/k$ 、臨界制御棒位置付近で約 0.2 % $\Delta k/k$ となった。

(3) ショックアブソーバーによる中性子吸収効果

各モデルの臨界制御棒位置近傍における実効増倍率と反応度及び内挿法により求めた臨界制御棒位置の計算結果を表 3.3 及び表 3.4 に示す。ショックアブソーバーにより吸収された反応度は 0.20 % $\Delta k/k$ となり、ショックアブソーバー無しモデルの臨界制御棒位置は、有りモデルに比べて 14 mm 高くなった。

SRAC コードではショックアブソーバーの形状の再現に加え、制御棒本体の詳細な形状の再現も困難であるため、本検討における簡易モデルからショックアブソーバー部を取り除いた形状で制御棒をモデル化している。このため、SRAC コードの解析結果の補正のためには、制御棒の形状効果とショックアブソーバーの効果を合わせて考慮する必要がある。このことから、低温臨界時における解析結果の補正量は、制御棒形状の詳細化とショックアブソーバーの考慮による効果が相互に打ち消し合い、反応度で-0.05 % $\Delta k/k$ 、制御棒位置で-3 mm となり、小さいことが分かった。

4. 結論

MVP コードを用いて、制御棒の幾何形状を実機の制御棒構造に近づけた詳細モデルを作成し、制御棒モデルの詳細化による HTTR の核特性への影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 臨界制御棒位置は、制御棒モデルを詳細化することにより簡易モデルと比べて 11 mm 低くなり、実測値である 1775 mm に近づいた。
- (2) 簡易モデルと詳細モデルの反応度差は制御棒の挿入に従って増加する傾向となり、全挿入時で約 0.5 % $\Delta k/k$ 、臨界制御棒位置付近で約 0.2 % $\Delta k/k$ になることが明らかになった。
- (3) ショックアブソーバーにより吸収された反応度は 0.2 % $\Delta k/k$ となり、臨界制御棒位置として 14 mm の差となることが分かった。また、制御棒の形状効果による SRAC コードの解析値に対する補正量は、制御棒モデルの詳細化とショックアブソーバーによる影響を考慮して、低温臨界時において反応度で -0.05 % $\Delta k/k$ 、臨界制御棒位置にして -3 mm となった。

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) Y. Nagaya, et al., “MVP/GMVP 2: General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multi group methods”, JAERI 1348 (2005), 388p.
- 3) K. Okumura, et al., “SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System”, JAEA-Data/Code 2007-004 (2007), 313p.
- 4) 藤本望, “高温工学試験研究炉 (HTTR) の核特性評価手法の改良に関する研究”, JAEA-Review 2006-038 (2007), 160p.
- 5) 野尻直喜 他, “高温工学試験研究炉 (HTTR) 臨界試験の予備解析結果ーモンテカルロコード MVP に基づく解析ー”, JAERI-Tech 98-032 (1998), 59p.
- 6) K. Sawa, et al., “Fabrication of the First-Loading Fuel of the High Temperature Engineering Test Reactor”, J. Nucl. Sci. Tech. Vol.36, No.8 (1999), pp.683-690.
- 7) (編)高温工学試験研究炉部, “HTTR(高温工学試験研究炉)の試験・運転と技術開発(2007 年度)”, JAEA-Review 2008-049, (2008), p.48.
- 8) K. Shibata, et al, “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Technol. Vol.48, No.1, (2011), pp.1-30.
- 9) International Atomic Energy Agency, “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.

表 2.1 計算条件

出力	0 MW
炉心燃焼度	0 EFPD*
燃料温度	300 K
冷却材/減速材/構造材温度	300 K
Xe,Sm 濃度	0 ppm

*EFPD: 全出力換算日(Effective Full Power Day)

表 3.1 各モデルの臨界制御棒位置近傍における実効増倍率と反応度

CR 位置		簡易モデル	詳細モデル
1740 [mm]	k_{eff}	$0.9918 \pm 1.37 \times 10^{-4}$	$0.9933 \pm 1.43 \times 10^{-4}$
	$\% \Delta k/k$	-0.83 ± 0.014	-0.68 ± 0.014
2030 [mm]	k_{eff}	$1.0305 \pm 1.38 \times 10^{-4}$	$1.0317 \pm 1.34 \times 10^{-4}$
	$\% \Delta k/k$	2.96 ± 0.013	3.07 ± 0.013

表 3.2 簡易モデルと詳細モデルの臨界制御棒位置

	臨界制御棒位置
簡易モデル	1801 ± 0.84 [mm]
詳細モデル	1790 ± 0.91 [mm]

表 3.3 ショックアブソーバー有りモデルと無しモデルの実効増倍率と反応度

CR 位置		ショックアブソーバー 有りモデル	ショックアブソーバー 無しモデル
1740 [mm]	k_{eff}	$0.9933 \pm 1.43 \times 10^{-4}$	$0.9952 \pm 1.43 \times 10^{-4}$
	$\% \Delta k/k$	-0.68 ± 0.014	-0.48 ± 0.014
2030 [mm]	k_{eff}	$1.0317 \pm 1.34 \times 10^{-4}$	$1.0336 \pm 1.38 \times 10^{-4}$
	$\% \Delta k/k$	3.07 ± 0.013	3.25 ± 0.129

表 3.4 ショックアブソーバー有りモデルとショックアブソーバー無しモデルの臨界制御棒位置

	臨界制御棒位置
ショックアブソーバー 有モデル	1790 ± 0.91 [mm]
ショックアブソーバー 無モデル	1776 ± 0.96 [mm]

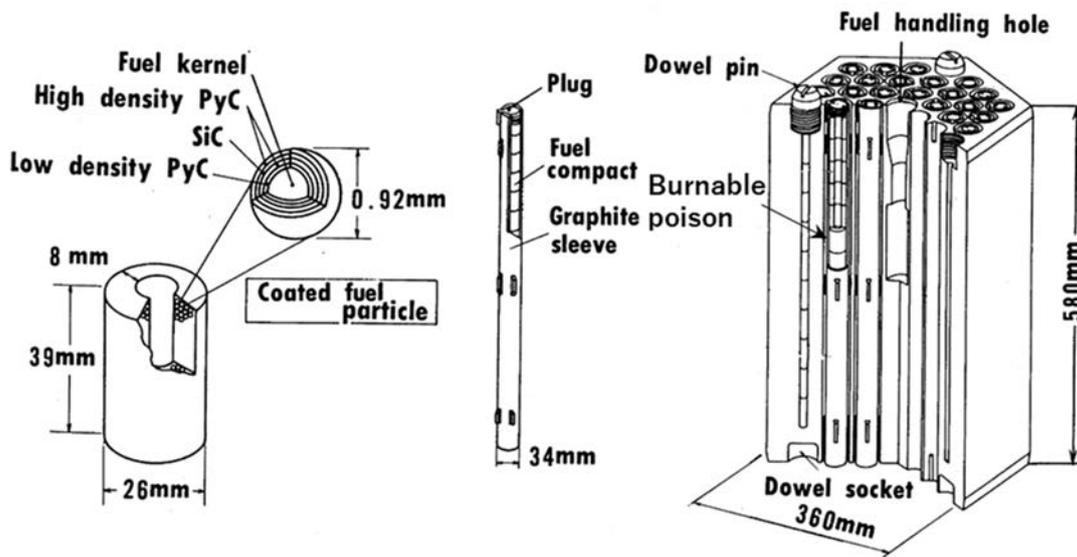


図 2.1 HTTR の燃料体

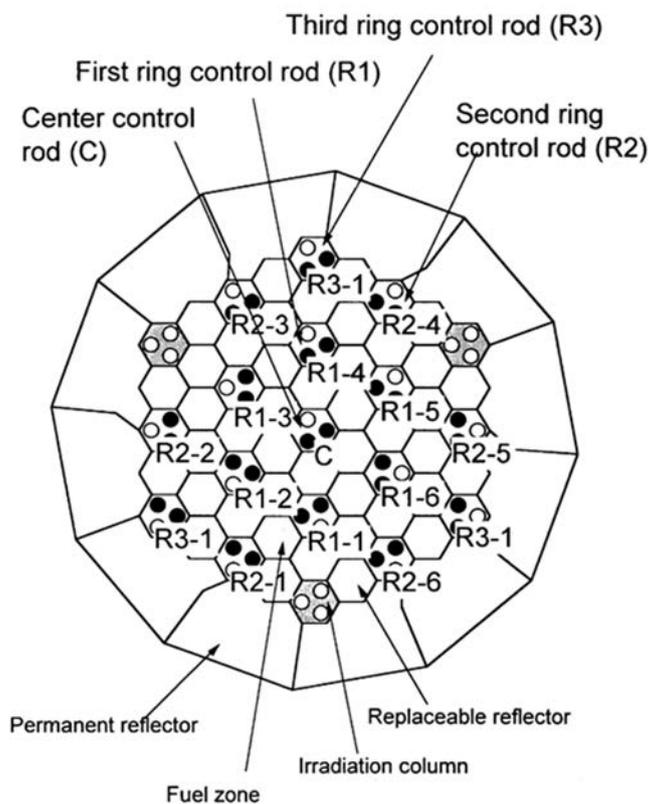


図 2.2 HTTR 炉心の水平断面図

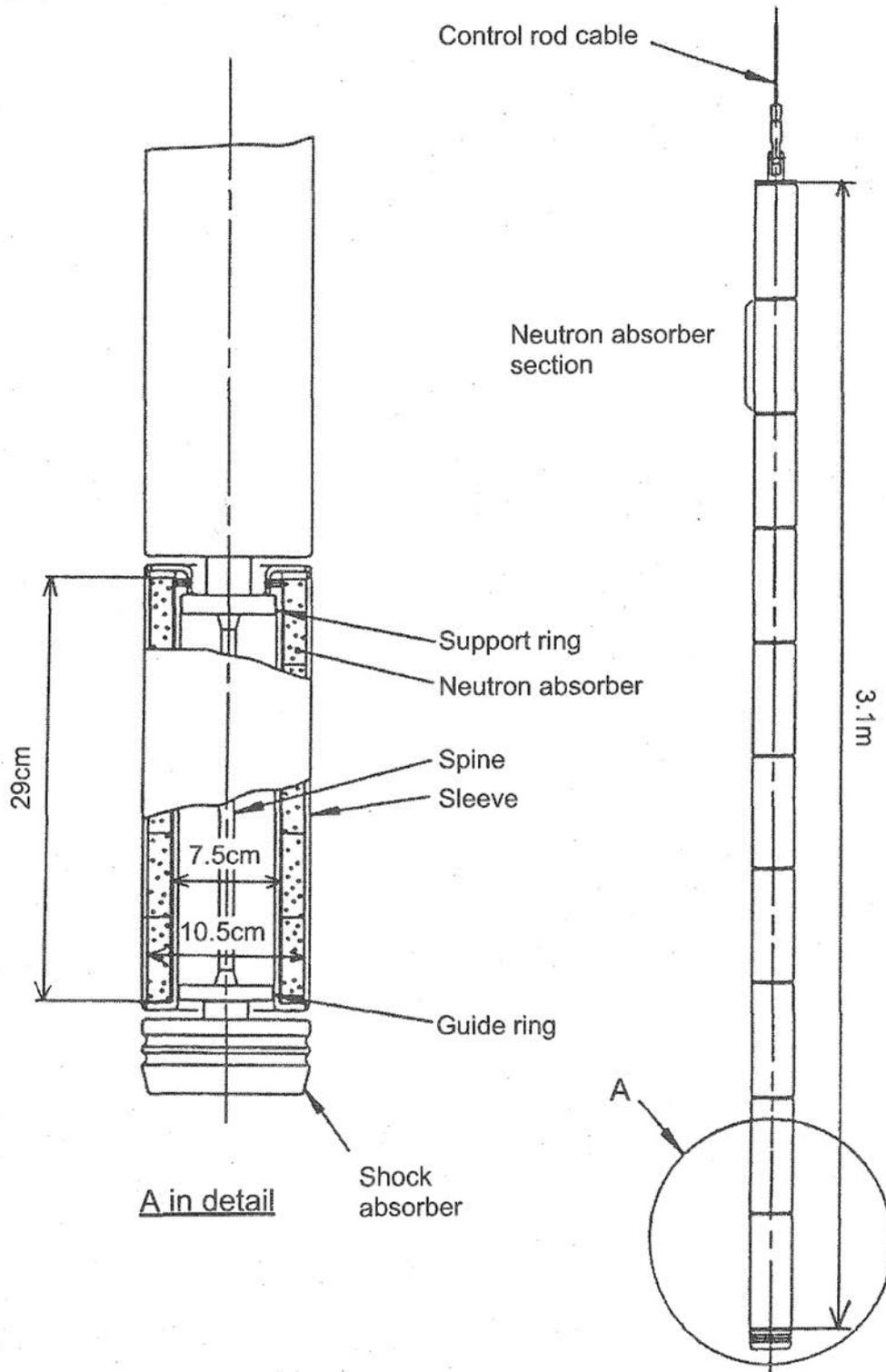


図 2.3 制御棒の概略図

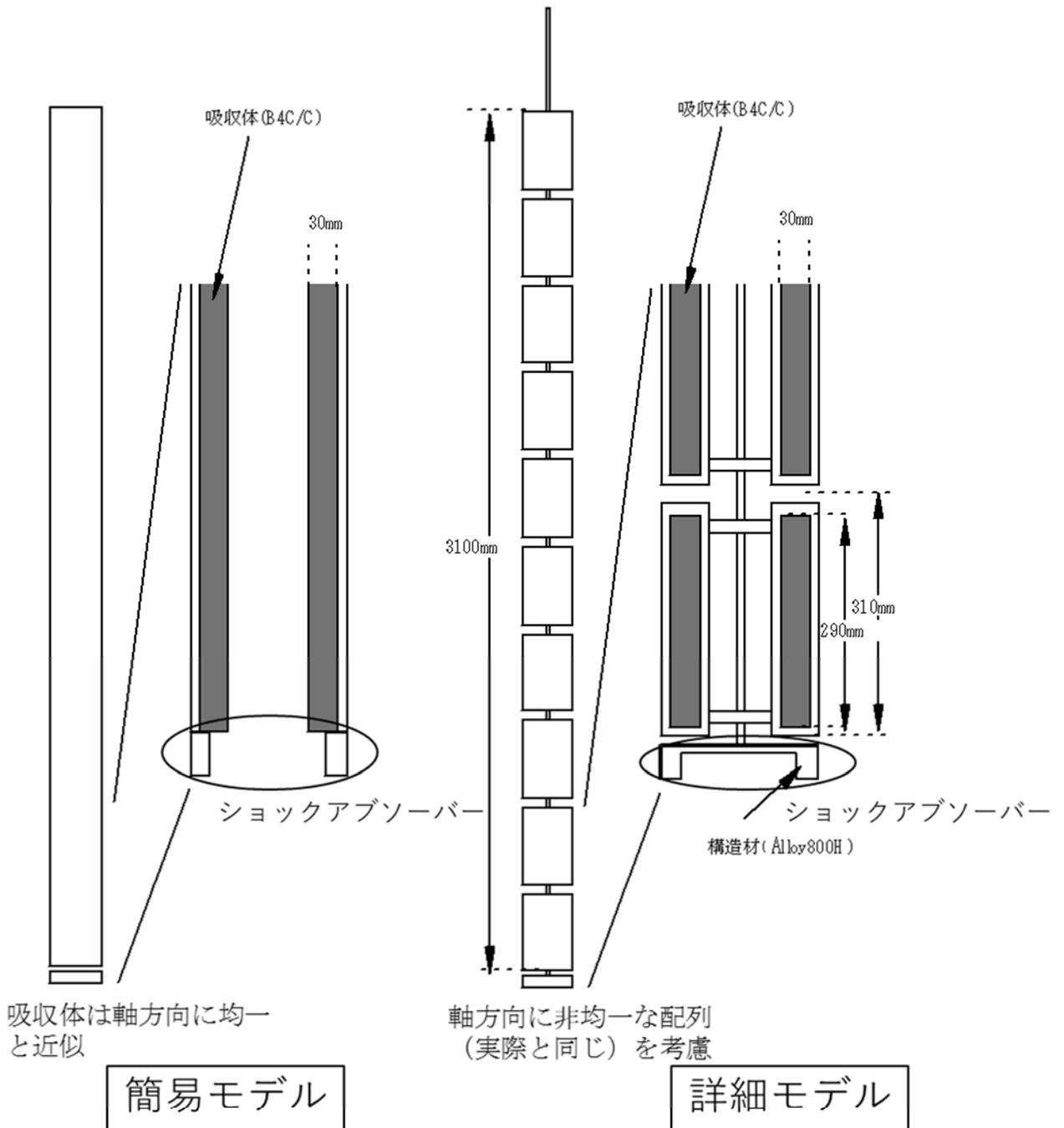


図 2.4 制御棒モデルの比較

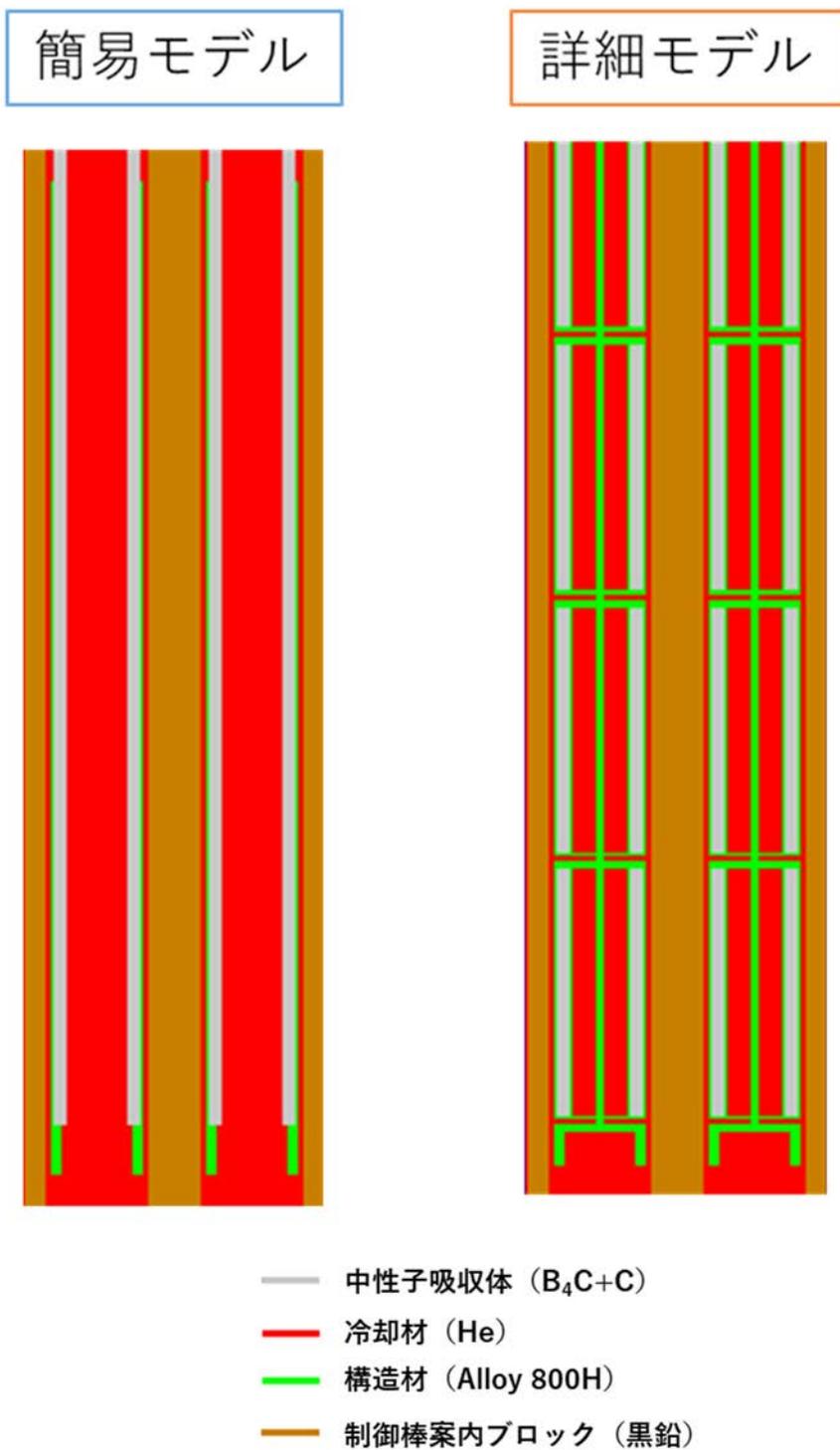


図 2.5 簡易モデルと詳細モデルの CGVIEW による可視化結果

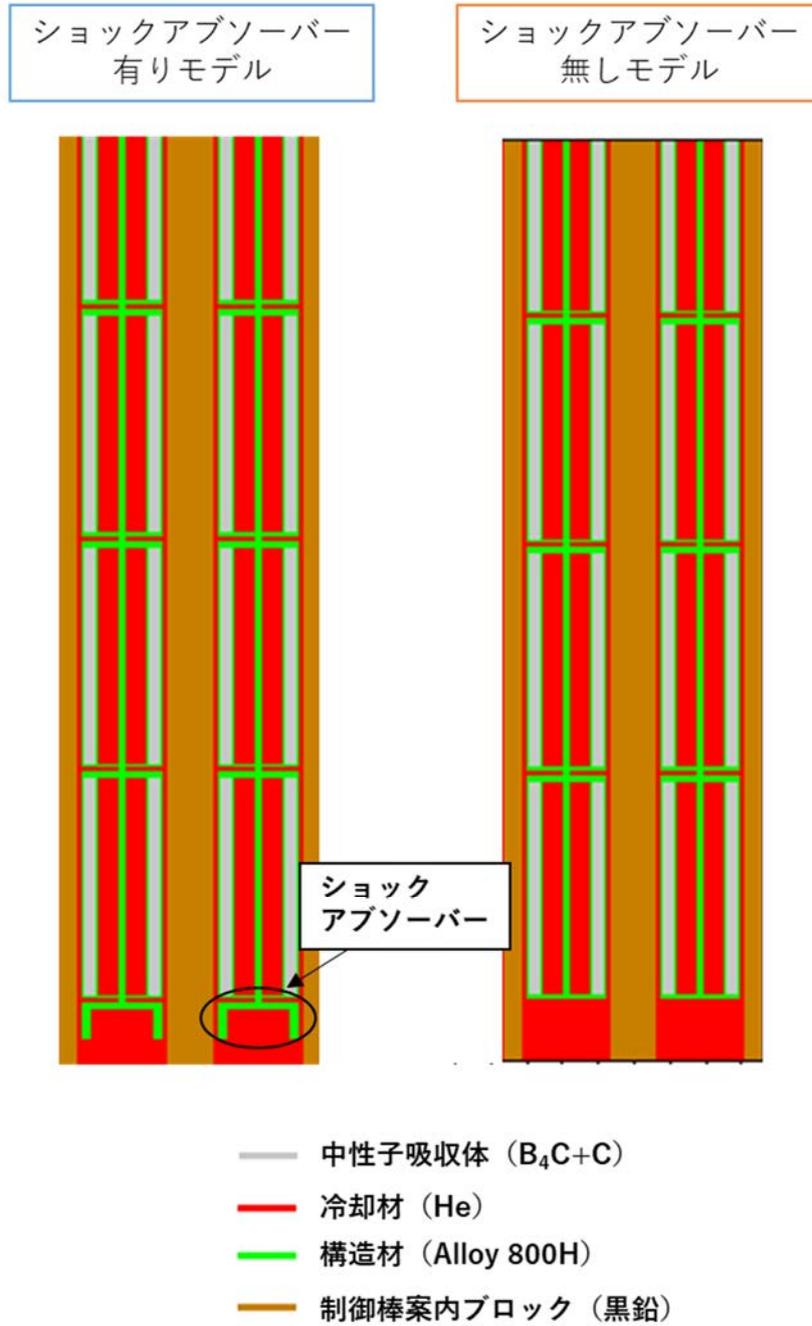


図 2.6 ショックアブソーバー有りモデルと無しモデルの CGVIEW による可視化結果

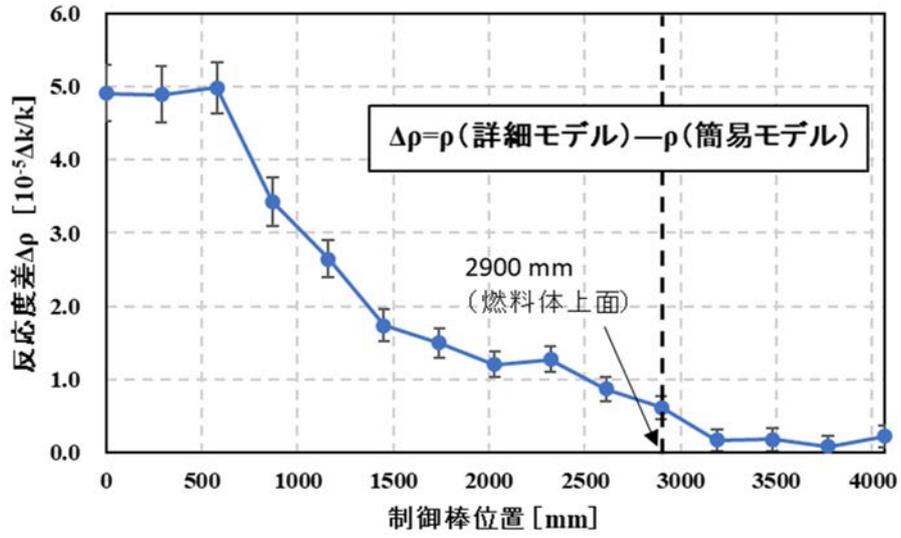


図 3.1 制御棒位置毎の制御棒モデル間の反応度差

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
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ^(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
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	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	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	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

