

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－

Report of Summer Holiday Practical Training 2018;
Feasibility Study on Nuclear Battery using HTTR Core
-Feasibility Study for Nuclear Design-

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 Inesh Kenzhina
Yevgeni Chikhray 近藤 篤 高木 直行 藤本 望

Etsuo ISHITSUKA, Ichiro MATSUNAKA, Hiroki ISHIDA, Hai Quan HO
Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO, Kuniyoshi TAKAMATSU, Inesh KENZHINA
Yevgeni CHIKHRAY, Atsushi KONDO, Naoyuki TAKAKI 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

July 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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, 2019

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 -

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、松中 一朗^{*1}、石田 大樹^{*2}、Hai Quan HO、
石井 俊晃、濱本 真平、高松 邦吉⁺¹、Inesh Kenzhina^{*3}、Yevgeni Chikhray^{*4}、
近藤 篤^{*5}、高木 直行^{*2}、藤本 望^{*1}

(2019 年 4 月 3 日 受理)

2018 年度の夏期休暇実習として、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た。この結果、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 年の運転が可能であることが明らかとなった。また、熱的な予備検討として、自然循環冷却且つ可動機器のない発電システムを有する原子力電池のイメージを提案した。今後は、次年度の夏期休暇実習として更に検討を進め、原子力電池の成立性について検討する予定である。

大洗研究開発センター: 〒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 東京都市大学、

*3 ユーラシア国立大学、*4 国立カザフスタン大学

*5 新エネルギー・産業技術総合開発機構

Report of Summer Holiday Practical Training 2018;
Feasibility Study on Nuclear Battery using HTTR Core
– Feasibility Study for Nuclear Design –

Etsuo ISHITSUKA, Ichiro MATSUNAKA^{*1}, Hiroki ISHIDA^{*2}, Hai Quan HO,
Toshiaki ISHII, Shimpei HAMAMOTO, Kuniyoshi TAKAMATSU⁺¹,
Inesh KENZHINA^{*3}, Yevgeni CHIKHRAY^{*4},
Atsushi KONDO^{*5}, Naoyuki TAKAKI^{*2} 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 April 3, 2019)

As a summer holiday practical training 2018, the feasibility study for nuclear design of a nuclear battery using HTTR core was carried out. As a result, it's become clear that the continuous operations for about 30 years at 2 MW, about 25 years at 3 MW, about 18 years at 4 MW, about 15 years at 5 MW are possible. As an image of thermal design, the image of the nuclear battery consisting a cooling system with natural convection and a power generation system with no moving equipment is proposed. Further feasibility study to confirm the feasibility of nuclear battery will be carried out in training of next fiscal year.

Keywords : Nuclear Battery, HTTR Core, Natural Convection Cooling, Power Generation System
with No Moving Equipment, Thermoelectric Elements

+1 Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development

*1 Kyushu University, *2 Tokyo City University

*3 Gumilyov Eurasian National University, *4 Al-Farabi Kazakh National University

*5 New Energy and Industrial Technology Development Organization

目 次

1. 序 論	1
2. 原子力電池の想定される利用	1
3. 設計目標	3
4. 核設計のための検討	3
5. 熱設計のための予備検討	4
6. 結 論	4
謝 辞	5
参考文献	5
付 録 鉛テルライド熱電変換素子の開発状況	12

Contents

1. Introduction	1
2. Expected availability of nuclear battery	1
3. Design goal	3
4. Feasibility study for nuclear design	3
5. Preliminary feasibility study for thermal design	4
6. Conclusion	4
Acknowledgements	5
References	5
Appendix Status of development for PbTe thermoelectric elements	12

This is a blank page.

1. 序 論

2018 年度の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実施した。このテーマを選定した理由は、将来的に技術の進展が期待できる熱電変換素子等の機械的な可動構造を有しない発電機構に着目することによって、高温ガス炉の幅広い利用の可能性を示せること、また、原子力の若手研究者が将来に夢を持てるようなテーマになりうると考えたためである。加えて、HTTR 炉心の核計算モデルが既に完成しているため短期間で検討できること、設備が単純であるため原子炉設計に必要な核熱特性を容易に理解できることから夏期休暇実習として適したテーマである。

原子力電池とは、ラジオアイソトープ (RI) の崩壊エネルギーをエネルギー変換器で電気エネルギーに変える一次電池のことであり、一般的には 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¹⁾。RI としては、 ^{144}Ce 、 ^{242}Cm 、 ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 等が使用され、太陽電池が利用できない深宇宙における探査衛星 (カッシーニ、ボイジャー等) のエネルギー供給源等として利用されている。

本検討においては、上記 RI の代わりに HTTR の炉心を使い、開発が進められている新型高温用熱電変換素子²⁻⁵⁾の利用を想定し、メンテナンスフリーで長期間運転できる炉を目指して概念検討を行うことにした。なお、高温用熱電変換素子として期待されている鉛テルライド熱電変換素子の開発状況を付録に示す。

2. 原子力電池の想定される利用

概念検討の前に、この様な原子力電池が開発できた場合の位置付けについて、以下に考察する。

これまでの発電炉は、経済性の観点から大型化・高密度エネルギー化に向けて開発が進められてきたが、近年は固有の安全性を有する小型モジュール炉 (SMR) 等、工場生産・単一ライセンス化によって安価で信頼性の高い発電炉開発が注目されている⁶⁾。これらの発電炉は経済性と安全性のバランスを考慮して設計されているが、基本的には経済性の追求と安全性の関係は反比例関係にあると考えられる (Fig. 2.1)。例えば、福島第一原子力発電所において、もし炉心部が崩壊熱を十分冷却できる強固で大きなプールの中にあれば、冷却水が喪失しないため炉心溶融事故は発生しないが、その様なプールは巨大となって経済的に成立しない。また、現状の設備内でどんな事象が発生しても炉心溶融事故を起こさない出力に制限してしまうと、今度は電気等へのエネルギー変換効率が悪くなり経済的に成り立たなくなる。

これに対して、ここで検討する原子力電池は、これまでの発電炉の発想とは全く異なり、エネルギー密度を小さくして安全性を究極まで高めることによってエネルギー消費地に設置するものとし、以下を考慮して経済性を高めるものと定義する。

- 1) 熱エネルギーの直接利用 (エネルギー変換・伝送損失が少ない)
- 2) 相互接続により災害時等に対応できる柔軟なシステム構築 (相互補完)

- 3) 自然循環冷却(冷却用の可動機器不要、高い信頼性と長期運転、設備費削減)
- 4) 可動機器のない発電システム(高い信頼性と長期運転、設備費削減)
- 5) 地下埋込型(核物質防護、高いテロ対策、地震以外の外部事象からの隔離、事故時隔離)
- 6) 水中設置(蒸気発生、事故時冷却、耐震性向上)
- 7) 起動時を除く完全自動運転(設備費・人件費削減)
- 8) 30年間メンテナンスフリー(設備費・人件費削減)

7)及び8)に関しては、技術的・法制度上の課題があるが、将来的に解決できる可能性があるものと考えられる。

上記の想定が成立すると仮定した上で原子力電池をこれまでの発電炉と比較すると、約 7 割のエネルギーを捨てているこれまでの発電炉より原子力電池の経済性が高まる可能性がある。原子力電池の利用イメージを Fig. 2.2 に示す。

次に、HTTR 炉心をベースにした熱出力 5MW の原子力電池を 30 年間使用できるものと想定した場合、どれほどのコストで建設できれば成立するかについて考察する。検討に際しては一般家庭での利用とし、資源エネルギー庁等の家庭消費エネルギー⁷⁾や電気料金⁸⁾を参考にして以下を想定した。なお、熱電変換素子変換効率は、近年開発が進んでいる鉛テルライド熱電変換素子(付録参照)を想定した。

1) 世帯あたりのエネルギー消費	: 1.2×10^3 (W)
2) 世帯あたりのエネルギー電気消費	: 5.3×10^2 (W)
3) 世帯あたりの月間給湯費	: 1 (万円/月)
4) 世帯あたりの電気基本料金	: 800 (円/月)
5) 電気料金	: 20 (円/kWh)
6) 熱電変換素子変換効率	: 10 (%)
7) 運営費(5名分の人件費含む)	: 2 (億円/年)
8) 燃料製作費	: 50 (億円)

上記想定のもとで計算すると、30 年間の総収入は約 290 億円(売電収入:30 億円、給湯収入:260 億円)となることから、建設・設置・廃止・処分が約 180 億円で達成できれば経済的に成立する可能性がある。この金額は、一般的な原子力発電所の 10~20 分の 1 以下である。なお、上記想定では、電気として約 950 世帯、給湯として約 7300 世帯に供給できることから、1世帯あたり 2.2 人と想定すると、1 基で 2 千人から 1 万人分のエネルギーを賄える。一般家庭のエネルギーは、電気と熱エネルギーの割合がほぼ 1:1 程度であるのに対して、想定している原子力電池は 1:9 となるため、電気エネルギーを優先すれば熱エネルギーが余ることになるが、これらの熱エネルギーを温泉や温水プール等の熱エネルギー利用施設、農業、道路融雪等に利用し、100%使い切ることが原子力電池導入の前提になるものと考えられる。

3. 設計目標

前章の想定される利用を参考とし、本報告で検討する原子力電池の設計目標を以下の様に想定した。

- | | |
|-------------|-----------------------------|
| 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) |

4. 核設計のための検討

核的検討は、HTTR 炉心を用いて「熱出力」及び「燃料温度」をパラメータとし、モンテカルロ計算コードで実効増倍率(k_{eff})を計算して運転可能な時間を推定することで行った。HTTR 炉心部の概略を Fig. 4.1 に示す。なお、計算には MVP-BURN を用いた。

熱出力を 2 MW とし、燃料温度を 500、700、1000 及び 1200 K とした場合の運転時間と実効増倍率の関係を Fig. 4.2 に示す。この図から、実効増倍率が 1 以上であれば運転を継続できることから、いずれの燃料温度においても 30 年以上の運転が可能であることが明らかとなった。燃料温度が上昇するにつれて実効増倍率が低下する理由としては、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。同様に、熱出力を 3、4 及び 5 MW とした場合の運転時間と実効増倍率の関係を Fig. 4.3 から Fig. 4.5 に示す。燃料温度で異なるが、熱出力 3 MW で運転できる期間は 25 年程度、4 MW で 18 年程度、5 MW で 15 年程度であることが明らかとなった。この計算結果から、現状の HTTR 炉心では 5 MW、30 年の運転ができないことが明らかとなったが、 ^{235}U の装荷量を増やすことによって対応できるものと考えられる。なお、燃料温度 500 K における ^{235}U の減少割合に関し、熱出力をパラメータとした場合の計算結果を Fig. 4.6 に示す。

以上の計算結果から、効率的に長期運転するには燃料温度を低くした方が有利となるが、熱電変換素子を用いた発電には素子表裏面の温度差を大きくした方が効率的になる²⁾ことを加味し、運転温度を選定する必要があると考えられる。また、現状の HTTR 炉心では炭化ホウ素の可燃性毒物が装荷されているが、原子力電池として最適な可燃性毒物についても検討する余地があると考えられる。

5. 熱設計のための予備検討

上記の考え方と設計目標をもとに発電も考慮した熱設計のための予備検討のイメージを Fig. 5.1 に示す。原子力電池は、地下の水中に設置し、水蒸気を発生させて熱供給を行う。炉心の熱は、黒鉛ブロックによる熱伝達とヘリウムの自然対流により炉容器に伝達され、主に磁性流体の自然対流により水を加熱する。熱電変換素子は、大きな温度差がえられる「炉容器と磁性流体容器の間」と「磁性流体容器と水の間」に設置し、発電を行うものとする。磁性流体容器は、炉容器の表面を放射状に取り囲む構造として表面積を大きくし、炉心から発生した熱を効率的に発散すると同時に MHD (Magneto Hydro Dynamics) 発電⁹⁾により発電を行うものとする。

今後、このイメージの成立性について、熱的な成立性、熱電変換素子や MHD 発電による発電量等について検討したいと考えている。

6. 結 論

2018 年度の夏期休暇実習として、優れた安全性を有する高温ガス炉をベースとした原子力電池に関する予備検討を実施した結果、以下が明らかとなった。

- ・ 熱出力 5MW の原子力電池を想定した場合、1 基で 2 千人から 1 万人分の電気及び熱エネルギーを供給できる。一般家庭のエネルギーは、電気と熱エネルギーの割合がほぼ 1:1 程度であるのに対して、原子力電池は 1:9 となるため、電気エネルギーを優先すれば熱エネルギーが余ることになるが、これらの熱エネルギーを使い切れれば経済的に成立する可能性がある。
- ・ 核設計のための予備検討として、現状の HTTR 炉心を用いて長期運転の可能性について検討した結果、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 年の運転が可能であることを明らかにした。
- ・ 熱的な予備検討として、自然循環冷却且つ可動機器のない発電システムを有する原子力電池のイメージを提案した。

今後は、次年度の夏期休暇実習として、更に原子力電池の成立性を検討するとともに、実習生のスキルアップに繋げる予定である。今後の検討項目を以下に示す。

- ・ 核設計のための予備検討として、現状の HTTR 炉心を用い、燃料濃縮度を変えた場合の 5 MW・30 年連続運転の可能性。
- ・ 熱設計のための予備検討として、原子力電池イメージの熱的な成立性、熱電変換素子による発電量の試算、MHD 発電に使用する磁性流体の選定と発電量の試算、使用できる材料等の検討。

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) 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, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 世界初、中高温域での熱電変換を実現するクラスレート焼結体 U 字素子を開発, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100874.html, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, テルル化鉛熱電変換材料の新形成法を確立、約 2 倍の熱電変換性能を実現, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100953.html, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 4) 産業技術総合研究所, カスケード型熱電変換モジュールで効率 12 %を達成, https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20180522/pr20180522.html, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 5) 村上 拓, “分子動力学法による鉛テルルの熱伝導解析”, 東京大学 2012 卒業論文, 46p.
- 6) 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, Vol.60, No.7 (2018) pp.382-386.
- 7) 経済産業省 資源エネルギー庁, 省エネポータルサイト 省エネって何?, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/actual/, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 8) 東京電力, 電気料金表, http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/151201j0101.pdf, (参照 2019 年 4 月 3 日).
- 9) 齊藤 正樹, “二相流自然循環型液体金属 MHD 発電システムに関する研究 -高速炉条件への適応性評価- (核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)”, JNC-TJ9400 2001-014, (2001), 61p.

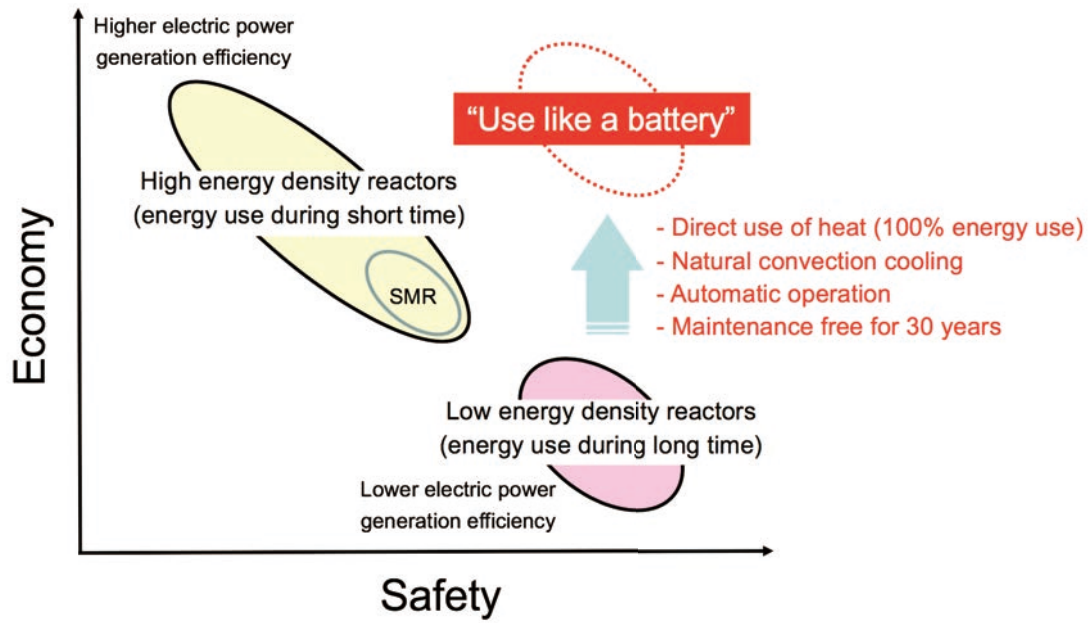


Fig. 2.1 Position of nuclear battery

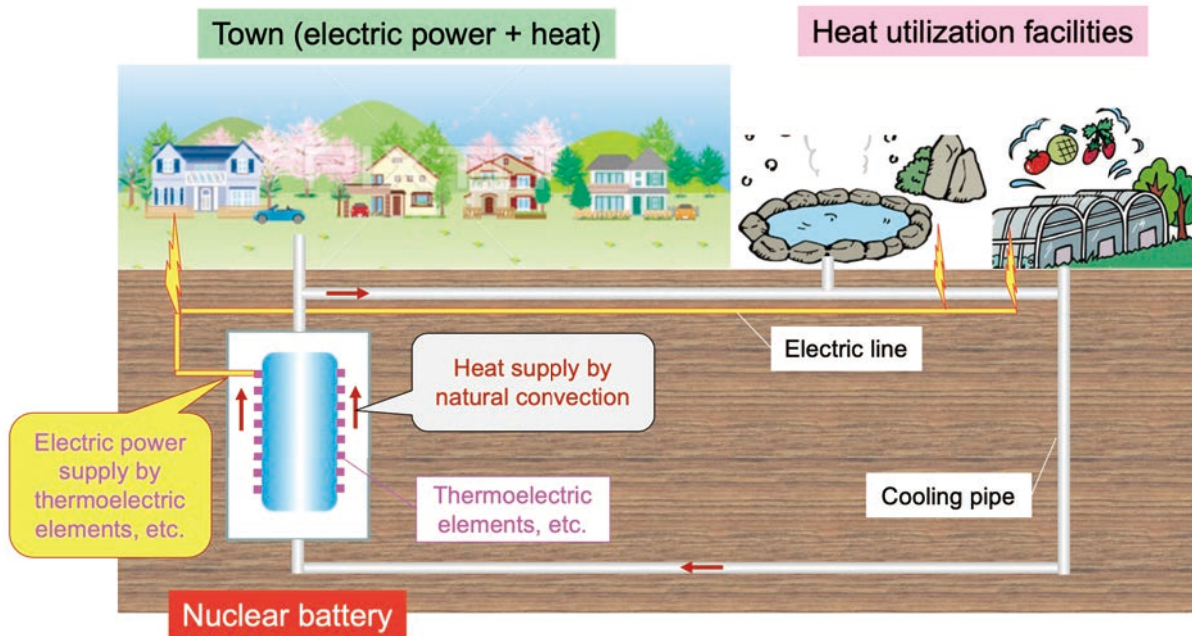


Fig. 2.2 Usage image of nuclear battery

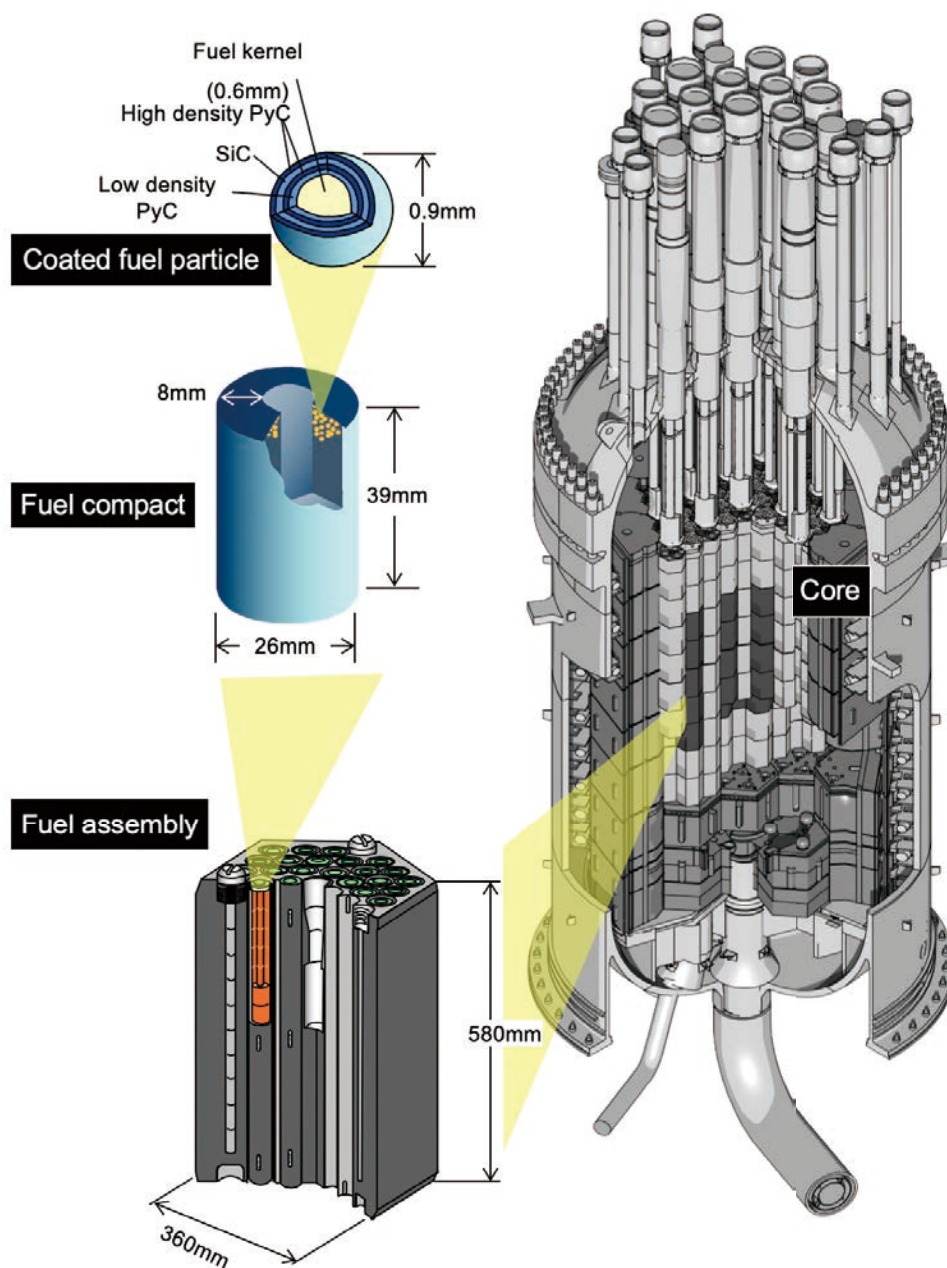


Fig. 4.1 Outline of HTTR core

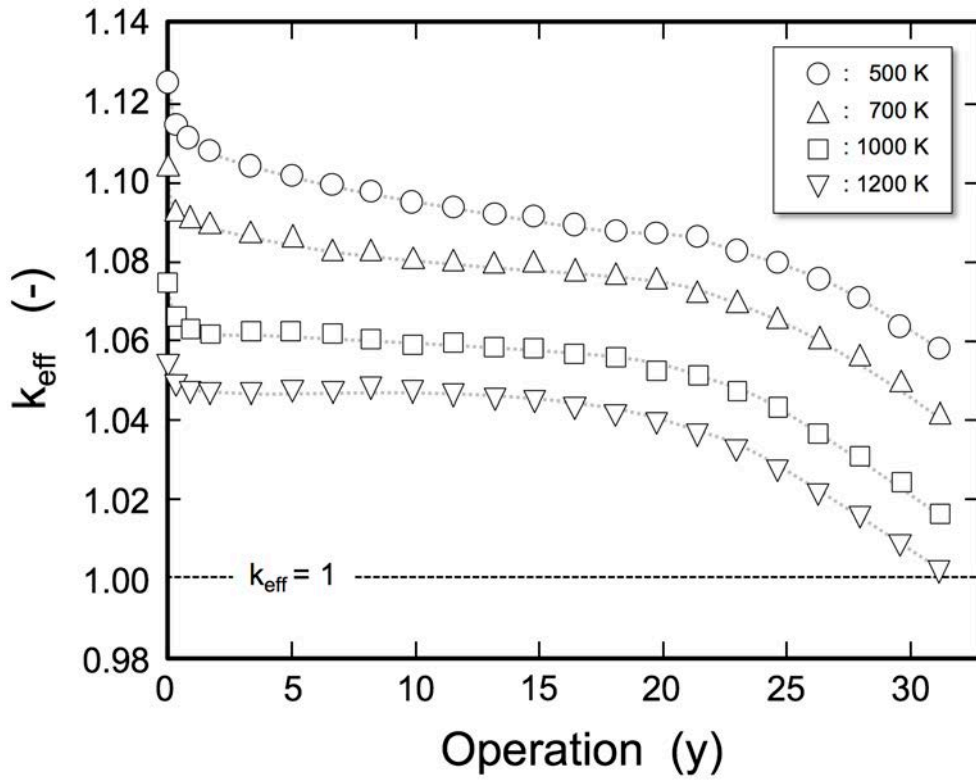


Fig. 4.2 Change of K_{eff} by 2 MW operation

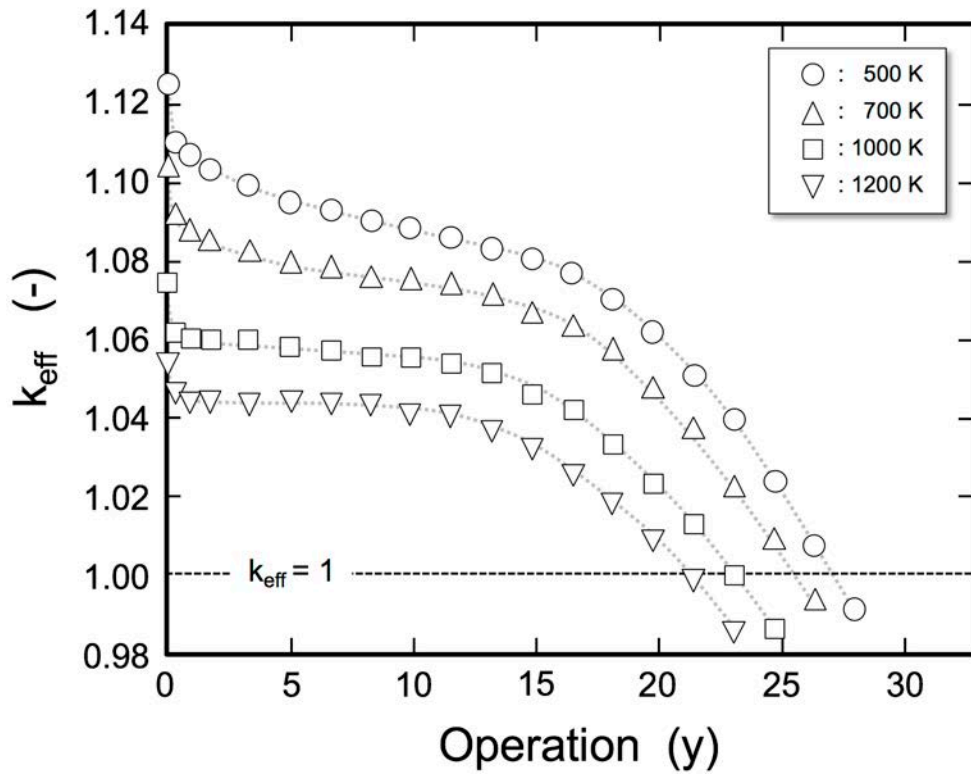


Fig. 4.3 Change of K_{eff} by 3 MW operation

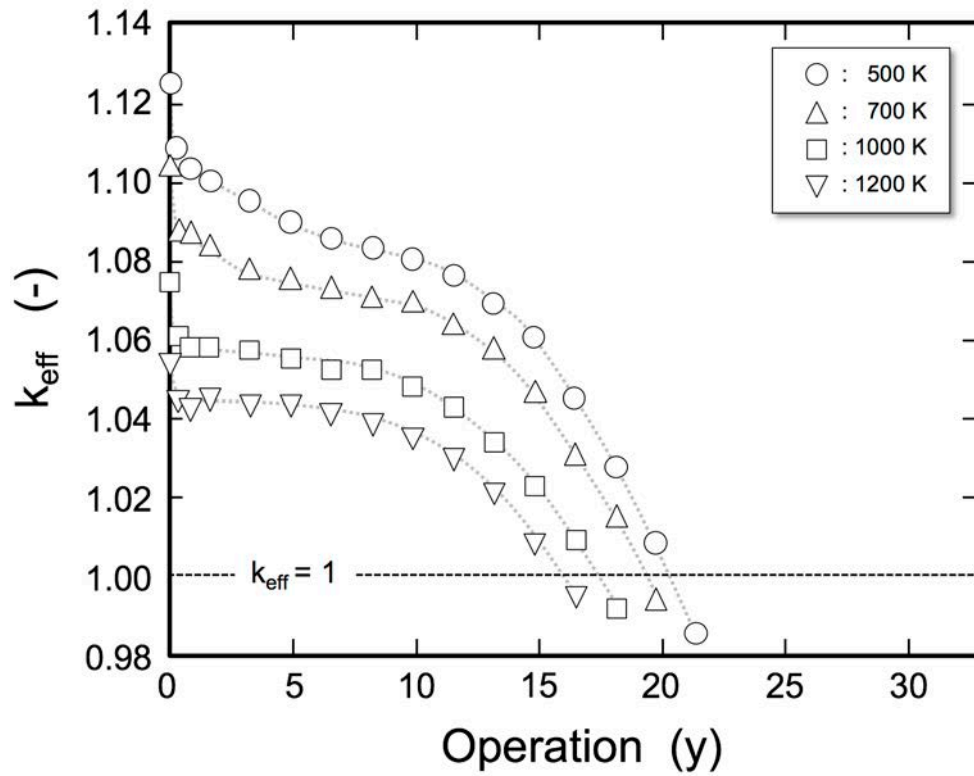


Fig. 4.4 Change of K_{eff} by 4 MW operation

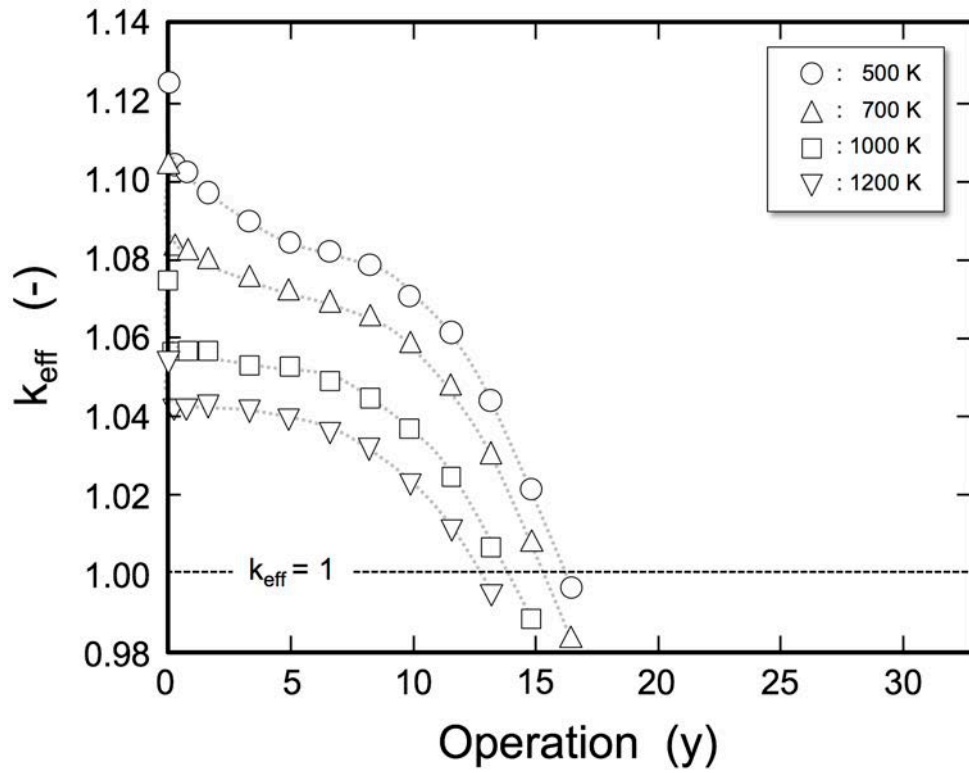
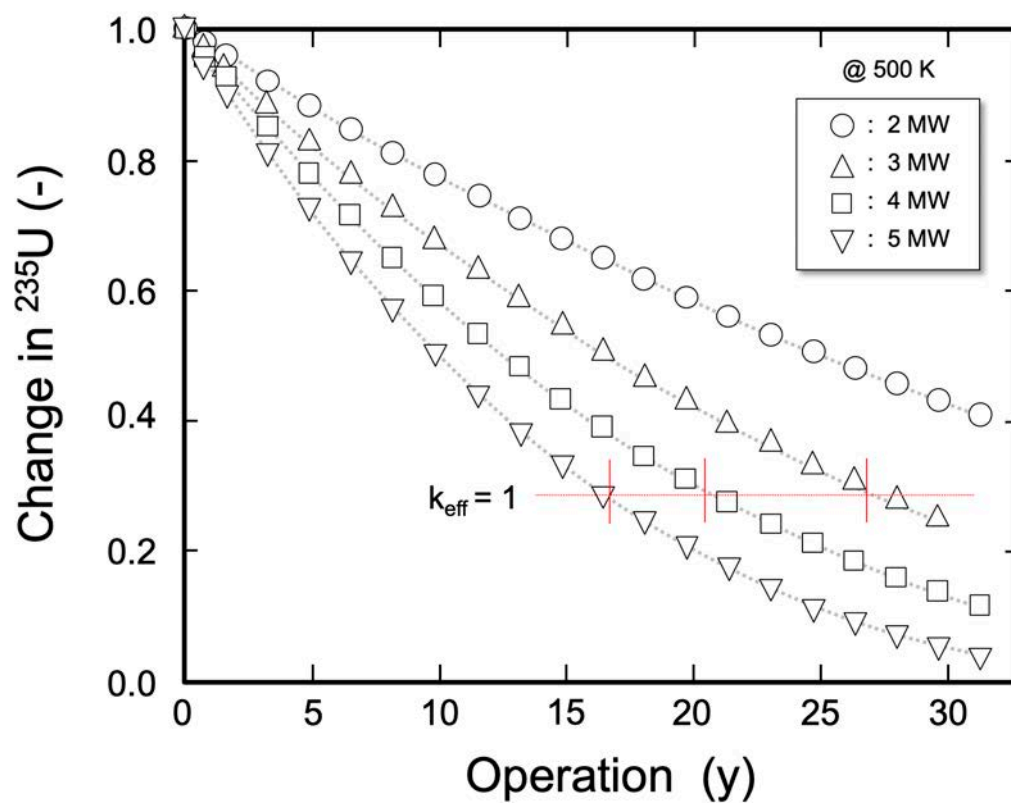


Fig. 4.5 Change of K_{eff} by 5 MW operation

Fig. 4.6 Change in ^{235}U at 500 K

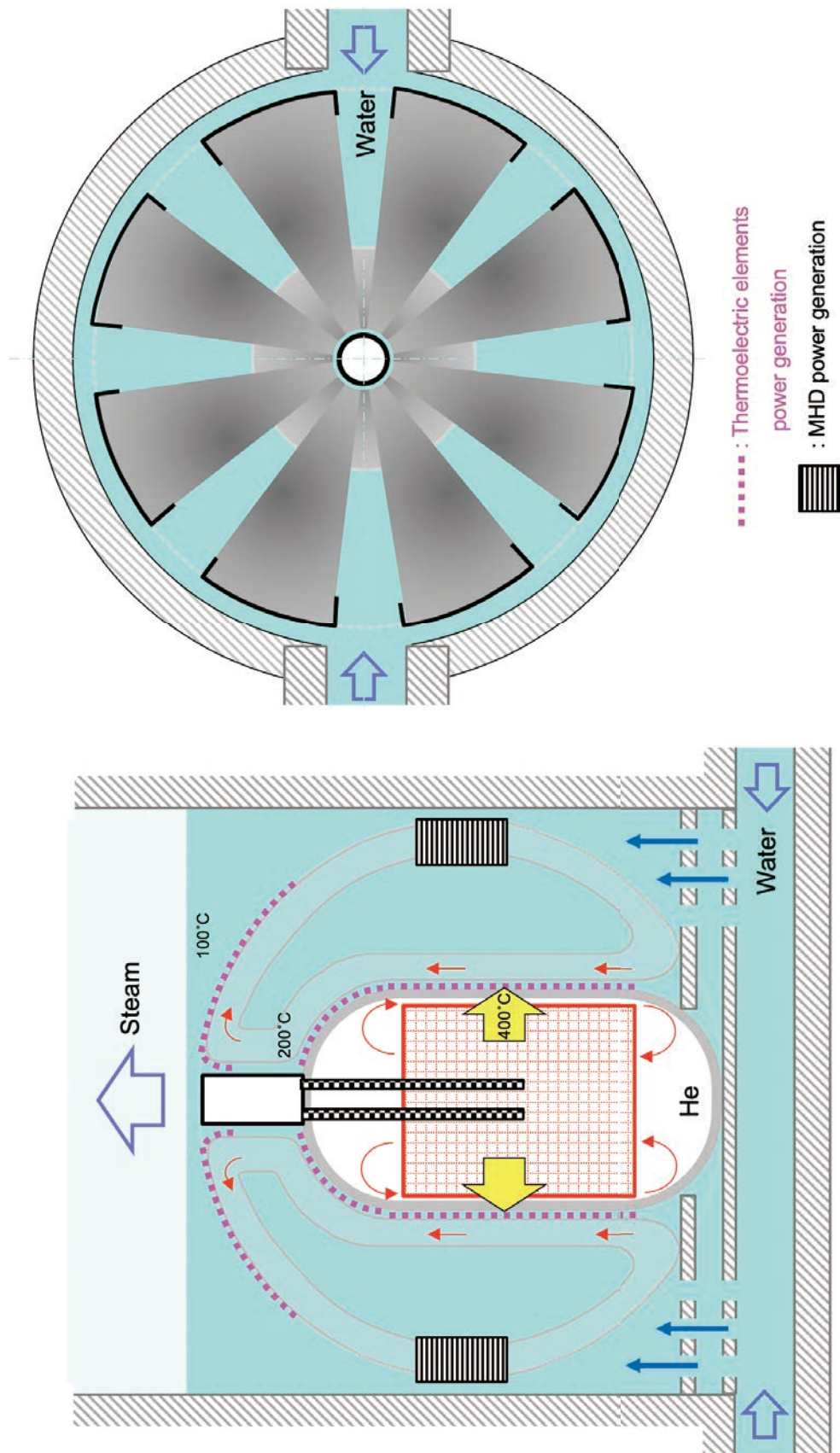


Fig. 5.1 Image of heat transfer and electricity generation

付 録

鉛テルライド熱電変換素子の開発状況²⁻⁵⁾

熱電変換材料の性能向上には、ゼーベック係数や電気伝導率を増大させること、格子熱伝導率を低減させることが必要となるが、材料においてはゼーベック係数、電気伝導率、電子熱伝導率が密接に関係しているため、これらの特性のうち1つだけを選択的に制御することは困難である。このため、制御性の良い格子熱伝導率を低減する研究が進んでいる。

格子熱伝導率を低減させるには、合金化によって原子配列を乱す方法とナノスケール構造制御によって結晶界面を増やし結晶粒間の熱伝導を低減させる方法がある。この様な状況において、鉛テルライド(PbTe)は、規則的な結晶性構造を有しているにも関わらず、他の物質と比較して低い格子熱伝導率を有しているため、高温用の熱電変換材料として期待され、幅広く研究されている。

こうしたなか、2015 年 11 月 26 日に国立研究開発法人産業技術総合研究所、独立行政法人日本学術振興会から、PbTe 熱電変換材料の焼結体にマグネシウム・テルライド(MgTe)のナノ構造を形成することで、変換効率 11 %(高温側 600 ℃、低温側 10 ℃)の熱電変換モジュールの開発に成功したとの発表があった。この後、2017 年 11 月 17 日には、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合、古河電気工業株式会社から、世界ではじめて中高温域での熱電変換を実現するクラスレート焼結体 U 字素子を開発したとの発表があり、工場排熱や自動車エンジンなど、中高温域といわれる 200～800℃の未利用熱を有効利用するための高出力熱電発電モジュールの実現に見通しが得られた。U 字素子は、従来のモジュールにある高温側の金属電極と絶縁性基板を無くすことにより高密度に実装でき、高温耐性を得るのに適した構造となっている。更に、2018 年 5 月 22 日には、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合から、PbTe 熱電変換材料にゲルマニウム(Ge)を添加した新しいナノ構造形成法により、従来材料と比べて約 2 倍の熱電変換性能を有し、カスケード型熱電変換モジュールで変換効率 12 %を達成したとの発表があり、PbTe 熱電変換素子の性能は年々向上している。

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	1
比透磁率 ^(b)	(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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	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	ジーメンズ	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
粘着力のモーメント	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
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, 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 ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² 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	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
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 ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	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
酵素活性濃度	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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm 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=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) 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「 Δ 」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=1 cGy=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=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

