

多様なニーズに応えるマイクロ炉の開発 － 全固体原子炉への挑戦 －

Development of Multi-purpose Microreactor
－ Challenge to All-solid-state Core －



淀 忠勝^{*1}
Tadakatsu Yodo

大槻 昇平^{*2}
Shohei Otsuki

原井 康考^{*2}
Yasutaka Harai

山田 瑞貴^{*2}
Mizuki Yamada

本田 尊士^{*3}
Takashi Honda

小池 武史^{*4}
Takeshi Koike

マイクロ炉は、小型・可搬性・固有の安全性などの特徴を持ち、送電網が充実していない地域での利用が可能である等、既存の陸上発電用原子炉とは異なる新たな価値を創出する革新的な原子炉である。三菱重工業株式会社では、多様なニーズに応える多用途モジュール式マイクロ炉を開発している。本マイクロ炉の特徴である全固体原子炉の炉心・安全概念を検討し、炉心の熱輸送シミュレーションにより、炉心材として高熱伝導体である高配向性グラファイトを採用することで、通常運転時に炉心から発電系まで適切に熱輸送されることを確認した。

1. はじめに

マイクロ炉は、既存の陸上発電用原子炉と比べて極めて小型な原子炉であり、送電網が充実していない地域での電源や熱源の利用を目的に様々な機関で開発が進められている。黎明期の原子力分野では、大学や研究機関向けの研究炉や極地向けの小規模な原子炉が利用されてきた。しかし、その後は他のエネルギー源と競争できる経済性が求められ、民間利用としては大型の発電プラントが志向されている。この流れは当面続くと予想されるが、将来の人口減少や過疎化などのメガトレンドを考慮すると、大規模な電力需要だけでなく、電力利用のニーズも変化すると予想される。この変化に対応するためには、図1に示すように多様な利用条件に適合し、安全で安定した小型電熱供給源に加え、エネルギー備蓄や多目的に使用できる原子力エネルギーの新たな利用法に対応することが求められる。特に、過疎地や離島、山間部、豪雪地帯、災害地などの地域でのニーズに応える必要がある。また、海外では教育・研究目的のためにマイクロ炉を大学研究施設として設置する動きも見られる。そのような新たな時代を見据え、三菱重工業株式会社(以下、当社)は多様なニーズに応える革新的な多用途モジュール式マイクロ炉の開発を進めている⁽¹⁾。

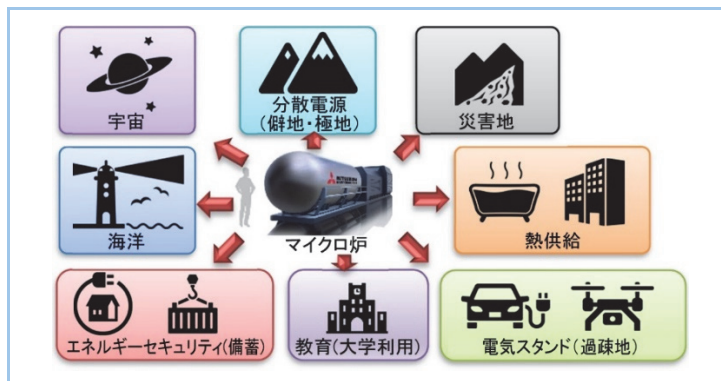


図1 マイクロ炉適用先イメージ

*1 原子力セグメント 炉心・安全技術部 博士(エネルギー科学)

*2 原子力セグメント 炉心・安全技術部

*3 原子力セグメント 機器設計部 博士(工学)/技術士(機械部門)

*4 原子力セグメント 先進炉技術部

2. 全固体原子炉の特徴

2.1 主要仕様

既存発電用原子炉では事故により原子炉冷却材が喪失した場合に放射性物質の外部流出リスクが最も高まる。この事故要因を根本から排除するために、当社の多用途モジュール式マイクロ炉は、原子炉冷却に流体を使用せず、炉心から発電系に高熱伝導体を用いて熱を取り出す全固体原子炉の概念を採用した。従来の原子炉は流体の冷却材を炉心に直接流して冷却するため、原子炉冷却材に起因した事故事象への対応に多くの安全設備が設置されている。一方、本マイクロ炉は全固体原子炉の仕組みにより、炉心に直接冷却材を流さないことから、従来の原子炉と比べて事故に至る想定事象数を削減⁽²⁾することができる。また、仮に炉心の温度が上昇しても核反応が自然に低下して出力が一定に安定する固有の安全特性を持つ設計としている。表 1 に示すように、本マイクロ炉の 1 モジュールの代表的な熱出力は 1MWt で、電気出力に換算すると約 300kWe である。これは、送電網が充実していない地域の小規模コミュニティ向けに電気や熱を供給することを想定した出力である。また、複数のモジュールを接続する機能を持ち、電気出力はニーズに応じて増やすことができる。可搬型のマイクロ炉は、工場生産された後、現地に運送して最小限の施工で運転を開始することができる。この可搬性を実現するために、本マイクロ炉の炉心サイズは非常に小さく、直径 1m 以下、長さ 2m 以下に設計している。また、このサイズを実現するために、ウラン濃縮度 20wt% を上限とした HALEU 燃料 (High-Assy, Low-Enriched Uranium) を採用し、燃料交換なしで 10 年以上の安定した運転を可能としている。運転制御システムとしては、原子炉や発電設備のプラントデータを逐次取得し、シミュレーション技術を用いて原子炉の状況を監視することができるデジタルツインシステムの採用を目指している。この技術により、少人数での運転や遠隔監視が可能である。さらに、仮に原子炉が事故を起こした場合でも、自動的に原子炉は停止し、高い除熱性能を持つ高熱伝導体により、炉心の崩壊熱は自然空冷のみで冷却される。なお、発電設備は、小型かつ高効率な超臨界圧 CO₂ サイクルの採用を検討している。

表1 主要仕様

項目	仕様
原子炉型式	高熱伝導体冷却炉 (全固体原子炉)
熱出力/電気出力	1MWt ~ / 300kWe ~
炉心サイズ	直径 1m 以下、長さ 2m 以下
冷却方式	炉心系: 高熱伝導体による熱伝導 発電系: CO ₂ ガス冷却
燃料	HALEU 燃料
燃料継続利用可能期間	10 年以上 (出力 100% 時)
運転制御	少人数運転・遠隔監視
安全設備	静的炉心停止系・自然冷却系

2.2 炉心概念

炉心は、図 2 に示すように、原子炉容器の中央部に配置しており、その内部には非常用反応度停止機構が備わっている。炉心内には、燃料と高熱伝導体である個々の結晶の配向性を整えた異方性熱伝導の性質をもつ高配向性グラファイトを配置しており、その周囲には通常運転時に使用する制御ドラムと黒鉛製の反射体を配置する。制御ドラムは、周囲の半分に中性子吸収材を設置しており、その制御ドラムの角度調整によって炉心の反応度は制御される。燃料から発生する熱は、高配向性グラファイトを通じて径方向に熱伝導で輸送され、高配向性グラファイトの一部に設置した発電系伝熱管内の CO₂ ガスを加熱する。なお、原子炉に供給される CO₂ ガスはリング状のマニホールドを介して伝熱管に分配され、炉心で加熱された CO₂ ガスはマニホールドで再集約され、発電設備へと供給される。また、原子炉容器と伝熱管、マニホールド間で生じる熱変形を吸収するためベローズ構造を採用する。

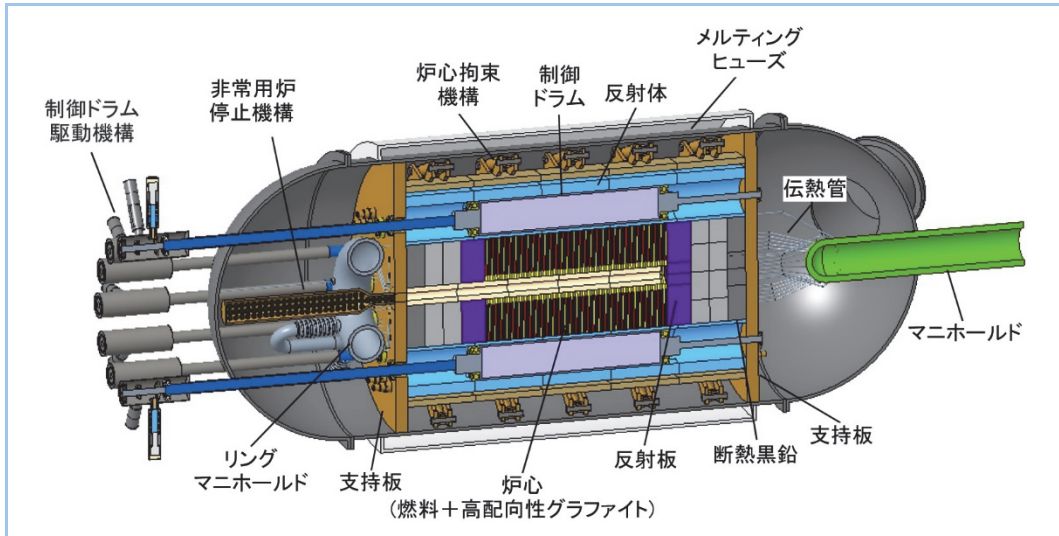


図2 原子炉構成案

2.3 安全概念

一般的に、原子炉の設計では“止める”“冷やす”“閉じ込める”の安全要素が考慮され、本マイクロ炉もこれらの要素が十分に機能するように設計される。まず、制御ドラムの回転による緊急停止によって原子炉を停止する“止める”機能がある。仮に制御ドラムが機能しない場合でも、非常用炉停止機構により受動的に中性子吸収材が炉内に挿入されることで自動的に原子炉は停止する設計である。次に、“冷やす”機能については、発電系による除熱を基本的な冷却機能としているが、仮に発電系の除熱が機能しない場合でも、炉心の崩壊熱は空気其自然対流及びふく射による冷却（自然冷却モード）で除去される設計である。図3に示すように、原子炉容器の側面部分は真空層を持つ断熱構造になっており、炉心温度上昇時は、メルティングヒューズが熔融して開放孔が開放し、真空層に空気が流入することで自然冷却モードに移行する。シミュレーション解析により、炉心中心温度は有意に上昇することなく、自然冷却のみで崩壊熱が除去されることを確認している⁽³⁾。また、“閉じ込める”機能については、燃料部や原子炉容器などで放射性物質を閉じ込める設計である。小型かつ可搬性機能を持つマイクロ炉に対しては、核テロ対策を含む核セキュリティについて十分に考慮して設計する必要性が提唱されている⁽⁴⁾。そのため、本マイクロ炉では、核セキュリティの深層防護の考えを導入し、簡単に破壊できない原子炉構造などの安全設計を目指している⁽⁵⁾。

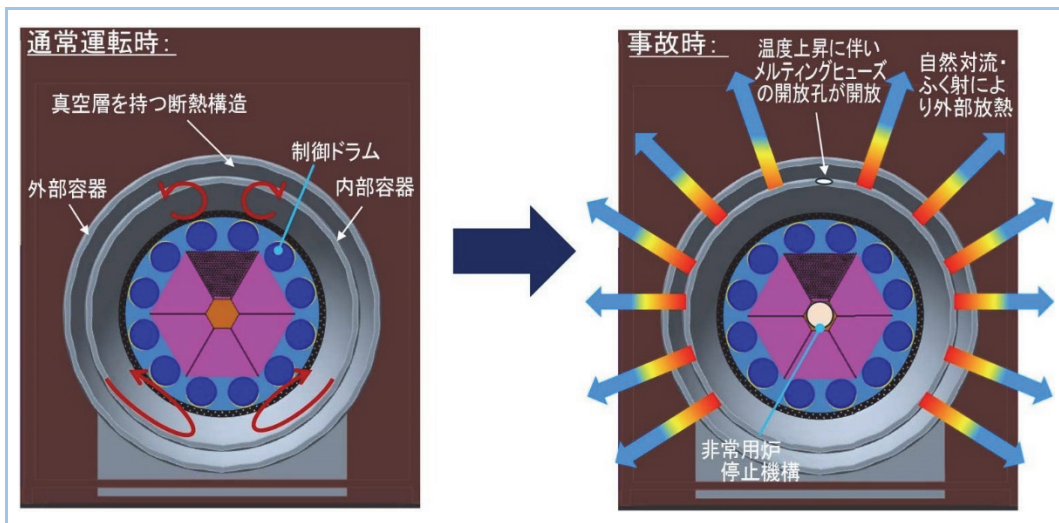


図3 自然冷却モードの概念

3. 全固体原子炉コンセプトの成立性

3.1 炉心材料の伝熱性能

全固体原子炉の実現には、炉心構成材に高い熱伝導性が求められる。そのため、可搬性のため軽量化と高熱伝導の特性を兼ね備えた黒鉛系の材料を炉心材料として採用することを検討している。具体的には、図4に示す高配向性グラファイトを炉心材料に採用する予定である。これまでの研究で、高配向性グラファイトの熱伝導、強度、加工性などの工学的性質を評価し、全固体原子炉の実現性について検討した。図5に示すように、高配向性グラファイトの熱伝導率の計測結果は、従来の原子力分野で利用されている黒鉛材料と比べて約6倍の熱伝導性能を持つことを確認した。また、強度計測や加工試験により、炉心材料としての基礎的なデータを取得し、高配向性グラファイトの材料特性を把握した。



図4 高配向性グラファイトのサンプル

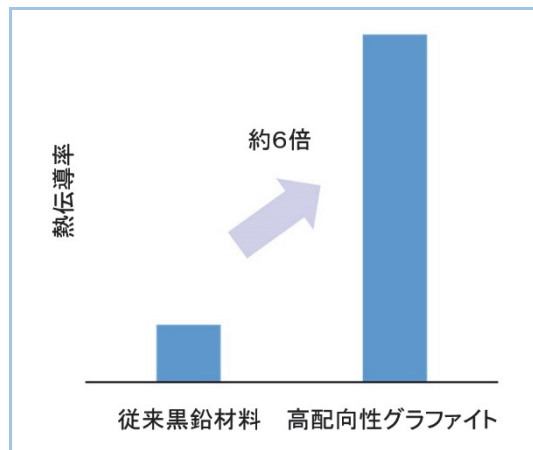


図5 高配向性グラファイトの熱伝導性能

3.2 全固体原子炉の熱輸送評価

炉心の熱輸送性を評価するために、3.1 節で得られた熱伝導率の測定結果を基に、照射環境を考慮して炉心内の温度分布のシミュレーション解析を実施した。この評価には、マルチフィジックスの原子炉シミュレーション環境である MOOSE⁽⁶⁾を基に当社で開発した異方性熱伝導の評価が可能な3次元熱伝導解析コードを使用した。図6は通常運転時の炉心内部の温度分布を評価した結果である。炉心内部の燃料から発生した熱は、高配向性グラファイトを通じて発電系伝熱管まで適切に熱伝導で輸送されている。また、炉心内部の最高温度は黒鉛の破損温度基準の目安である1600℃以下であり、通常運転時に炉心が健全で、適切に高配向性グラファイトで除熱されることを確認した⁽⁷⁾。さらに、この炉心部の核特性や強度をシミュレーション解析により評価し、炉心が燃料供給なしで10年以上の出力稼働が可能であることを、制御ドラムもしくは非常用炉停止機構により炉心を十分に余裕を持って停止状態にできることを確認⁽⁸⁾し、本マイクロ炉の臨界性能や炉停止性能、燃料の使用期間、応力などの技術的な成立性の目途を得た。これらの結果より、全固体原子炉の基本的な概念の成立性を確認した。今後、本マイクロ炉の概念設計を進めながら、安全性の実証に必要な要素試験を実施する計画である。

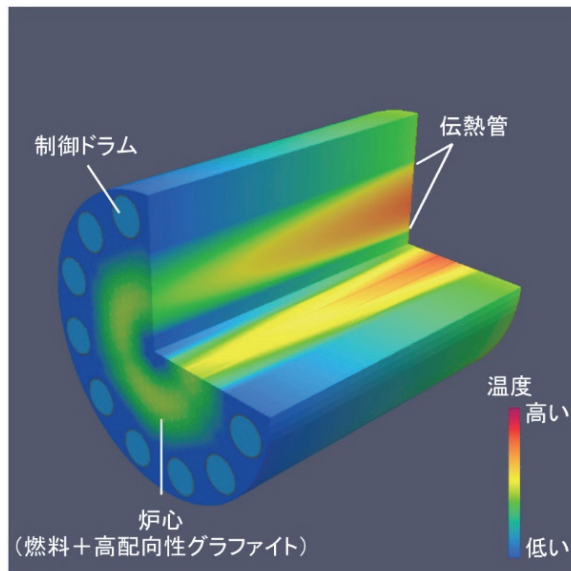


図6 炉心内温度分布のシミュレーション結果

4. まとめ

当社で開発中の多用途モジュール式マイクロ炉では、安全性を追求するために全固体原子炉コンセプトを採用する。その原子炉概念の成立性を検討するために、炉心や安全の概念を策定した。また、高配向性グラファイトなどの炉心材料に関する基礎データを取得するとともに、様々なシミュレーション評価により、全固体原子炉コンセプトのキー技術である高熱伝導体を用いた除熱性能の成立性について目途が得られた。

当社は、本マイクロ炉の利用を検討しているお客様と協力し、その実現に向けて今後も着実に開発を進める予定である。

謝辞

本報の執筆にあたり、令和元年度～令和5年度の経済産業省補助事業“社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業”の成果の一部を利用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 淀忠勝ほか、三菱多用途モジュール式超安全マイクロ炉の開発(1)原子炉概念、日本原子力学会 2020 年秋の大会, 2I07.
- (2) 淀忠勝ほか、三菱多用途モジュール式超安全マイクロ炉の開発(4)事故シーケンスの選定、日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1H15.
- (3) 小林翔太ほか、三菱多用途モジュール式超安全マイクロ炉の開発(2)予備的な事故時伝熱解析、日本原子力学会 2021 年春の年会, 1C09.
- (4) Shin-etsu Sugawara, Towards “extended” safety goals (Conceptual exploration of safety goals for microreactors), Mechanical Engineering Journal, Vol11, No.2, (2024).
- (5) Satoru Kamohara, IAEA technical meeting MHI’s R&D project on Microreactor Technology and Development Plan, Technical Meeting on the Status, Design Features, Technology Challenges and Deployment Models of Microreactors, (2021-4).
- (6) G. Giudicelli, et al, 3.0 – MOOSE: Enabling massively parallel Multiphysics simulations, SoftwareX, Vol.26, 101690, 2024.
- (7) 淀忠勝ほか、三菱多用途モジュール式超安全マイクロ炉の開発(5)MOOSE フレームワークに基づく予備的な炉心熱解析、日本原子力学会 2024 年秋の大会, 1G08.
- (8) Takeshi Koike, et al., Preliminary Core Design Analysis of Core Criticality and Heat Transfer of the All-Solid-state Micro-Reactor, 31st International Conference on Nuclear Engineering, (2024-8), ICONE31-135017.