

社会の課題解決に貢献するマイクロリアクター —未来を切り開く可能性—

(1) まえがき

エネルギー源としての原子力の再評価が進んでいる。やはり再生可能エネルギーでは力不足であるからであろう。再評価されている最近の原子力には2つの方向がある。1つ目は120万キロワット、またはそれ以上の出力の大型炉を建設することである。この方向は伝統的に行われ、日本でも最有力な考え方である。しかし新たに建設する場合、建設費の総額が高騰していることが世界的に大きな課題になっている。2つ目は、米国を中心に開発が進められている、小型化した原子炉、すなわち**SMR**や**マイクロリアクター**を建設し多様な産業に寄与することを目的とする方向である。SMRについては、実用化が近く建設予定地も複数伝えられている。

一方、**マイクロリアクター**には、SMRよりさらに多様な用途に適応でき、設置にあたって建設総額も安く、安全上の懸念も極めて小さい。また、設置可能な地域については大型炉より融通性がある。本報では、その特徴と利用法、開発している企業の現状を整理してみたい。

(2) マイクロリアクターの定義

米国アイダホ国立研究所によると、マイクロリアクターは従来の原子炉の100～1,000分の1の出力で、電気出力は1千kW～2万kWである。小型モジュール炉（SMR）の容量は20～300MWe（2万kW～30万kW）である。[1]ただ、SMRとマイクロ炉の出力分類の境目は論者によって多少異なり厳密なものではない。



図1 原子炉のサイズの定義（SEJ だより第12号から;筆者作成）

マイクロリアクターと

いっても、炉形式、冷却材

は多様であり、それに伴

い様々な用途がある。冷却材としては、水、ナトリウム、溶融塩、ヘリウム、水素が使われ、それぞれ用途と密接な関係がある。マイクロリアクターの特徴を以下に記す。

(3) マイクロリアクターのメリット

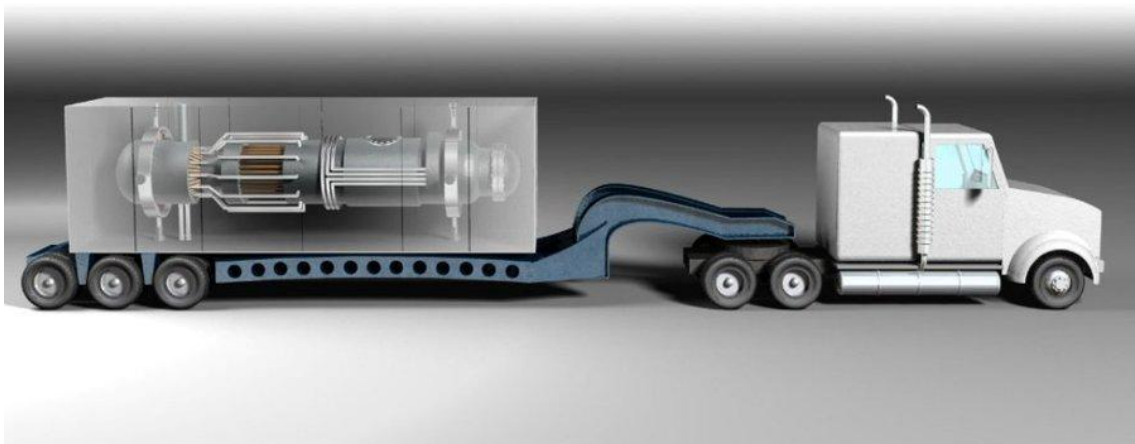


図 2 完成品をトラックで運ぶこともできるサイズ（INEL ホームページから）

1. 高い安全性

- 出力が小さいため基本的に安全性が高い
- 受動的安全機能（Passive Safety）を採用し、電源喪失時でも自己冷却できる設計が多い。
- 固有の安全性（Inherent Safety）を持つ燃料（TRISO 燃料（TRISO-coated fuel particle 被覆燃料粒子）など）を使用することで、過酷事故のリスクがほぼない。

2. モジュール設計と迅速な展開

- 工場で事前に製造・組立し、現地で設置するモジュール設計（SMR と同様）が可能。
- 設置期間が短縮でき、大型原子炉に比べて導入が迅速。

3. 独立した電源供給

- 離島、災害地域、軍事基地、宇宙開発など、電力供給が難しい場所でも利用可能。
- 外部電源なしで長期間運転が可能な設計が多い。

4. 燃料交換の頻度が低い

- 一部の設計では数年～数十年燃料交換不要（例：トリウム燃料、TRISO 燃料、HALEU 燃料）。
TRISO 型被覆燃料粒子とは直径数百ミクロンのセラミック燃料核を熱分解炭素で被覆した燃料粒子が用いられる。低密度熱分解炭素及び高密度熱分解炭素（PyC）で被覆した BISO（二重被覆）型被覆燃料粒子に対し、更に炭化ケイ素（SiC）で被覆したものをという。このため運用コストが削減できる。

5. 出力容量が小さいため負荷追従運転の容易性

- 大型炉に比べて負荷追従運転が容易なので用途が広がる。

6. 脱炭素社会への貢献

- CO₂を排出しないクリーンエネルギー。

- 安定した電力供給が可能。

7. 経済性

- 初期投資が小さい（大型原子炉に比べて）。
- モジュール生産、複数生産によりコスト低減が期待される。

（4）マイクロリアクターの主な用途

1. 遠隔地・孤立地域の活性化のための電源供給

- 離島や山岳地帯など、送電網が届かない場所のエネルギー供給。
- 南極基地や北極圏の研究施設など、極限環境での持続的な電力供給。例としてアラスカやカナダ北部のコミュニティ向け電源。

2. 災害時の緊急電源

- 地震・台風・津波などの大規模災害発生時に、迅速に展開できる移動式電源として活用。
- 病院・避難所・通信インフラの電力を安定供給。

3. 産業向け電力・熱供給

- 鉱山・石油採掘施設など、大規模な電力供給が必要なリモート産業への利用。
- 工場・病院・データセンターなどが自家発電システムとして導入できる。
- 高温プロセスを必要とする産業（製鉄・セメント生産・化学プラントなど）。

4. 国の自立に寄与：防衛用途

- 軍事基地の独立電源として利用し、長期間の電力供給を可能に。
- 原子力推進システムの搭載（潜水艦・空母など）。
- 電磁兵器（レールガン、レーザー兵器）の電源供給。例：米国の「Project Pele（プロジェクト・ペレ）」では、移動式マイクロリアクターを軍事基地向けに開発中。

5. 宇宙開発の加速

- 月面・火星基地の電源として、太陽光発電の補完または主電源として利用。
例：NASAの「Kilopower」プロジェクト（宇宙用小型原子炉）。
- 宇宙探査機の推進エンジンや乗組員用電源（深宇宙探査では長期間・一定規模の電力供給が必要）。

6. 産業・医療の革新

- 高温ガス炉型マイクロリアクターを利用し、熱化学法による水素製造が可能。
- 放射性同位体の製造による医療の進歩

7. 小規模エネルギー供給の自立・分散化

- 都市部の分散型電源として利用し、大規模発電所への依存を軽減。
- 送電ロスの低減に貢献し、送電インフラの制約を受けにくい。

(5) マイクロリアクターの研究開発における主要企業の状況

1. 世界の開発状況:

・ **ウェスティングハウス**: 分散型アプリケーション向けの熱パイプ技術を利用した次世代マイクロモジュール炉である eVinci™ マイクロリアクター (0.2~5 MWe) を開発している。主な特徴として、8 年以上の燃料交換サイクルとパッシブ安全システムが挙げられる。eVinci の技術ハブは米国ペンシルベニア州エトナにある。

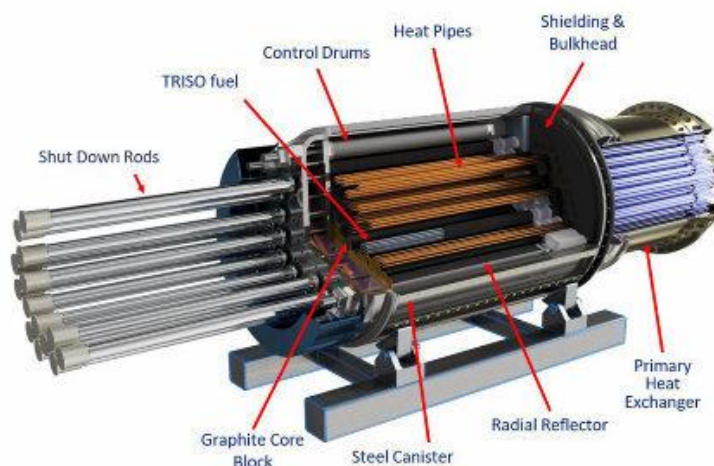


図3 ウェスティングハウス社の eVinci 炉の概念図 (ホームページより)

・ **ロールス・ロイス**: 高出力密度を持ち、展開可能、安全、信頼性が高く、クリーンなマイクロ原子炉技術を開発している。鉄道、海上、宇宙輸送も可能なスケラブルな設計で、防衛、遠隔地の民生・産業用電力、宇宙探査などの用途を想定している。



図4 ロールス・ロイス社のマイクロ炉 (ホームページより)

・ **NANO Nuclear Energy Inc.**: 米国ナスダック上場企業 (NASDAQ: NNE) であり、特許取得済みの KRONOS MMR™ (イリノイ大学アーバナシャンペーン校と共同で米国原子力規制委員会に事前申請中の定置式高温ガス冷却炉)、ZEUS (固体コア電池炉、固体の熱伝導率で冷却)、ODIN (低圧冷却材炉)、LOKI MMR™ (宇宙用途向けポータブルマイクロ原子炉) など、複数のマイクロ原子炉コンセプトを開発している。NANO Nuclear は、核燃料製造と輸送に特化した子会社も有しており、垂直統合型のアプローチを示している。

・ **X-energy**: 米国国防総省向けに、輸送用コンテナに収まるように設計された高温ガス冷却炉である Xe-Mobile (1~5 MWe) を開発している。より大型の小型モジュール炉である Xe-100 も開発している。

・ **BWXT**: 米国国防総省向けに、TRISO 燃料を使用した輸送可能な高温ガス冷却炉マイクロ原子炉である BANR (50MWt) を開発している。

- ・ **リードコールド**: スウェーデンに拠点を置き、鉛冷却高速炉である SEALER (3~10 MWe) を開発している。実証ユニットの計画がある。
- ・ **オクロ**: アイダホ国立研究所への配備が計画されている高速炉である Aurora (1.5 MWe) を開発している。データセンターへの電力供給用途も検討中。
- ・ **ホロスジェン (HolosGen)**: 輸送用コンテナに収まるように設計されたマイクロモジュール式高温ガス冷却炉である Holos-Quad (3~13 MWe) を開発している。
- ・ **ウルトラ・セーフ・ニュークリア・コーポレーション (USNC)**: 高温ガス冷却炉である MMR-5/-10 (5 または 10 MWe) を開発している。カナダでプロジェクトに関与している。
- ・ **ジェネラル・アトミックス**: 高温ガス冷却炉および高速中性子炉として分類される EM2 (240 MWe) と FMR (50 MWe) を開発している (ただし、EM2 は一般的なマイクロ原子炉の容量を超えている)。

グローバルなマイクロ原子炉開発の状況を見ると、ウェスティングハウスやロールス・ロイスのような既存の原子力産業のプレーヤーが長年の経験を活用している一方で、NANO Nuclear やオクロのような新興企業が革新的な設計とニッチなアプリケーションに焦点を当てていることがわかる。このことから、進化型と革新型の両方のアプローチが追求されるダイナミックな市場であることを示唆される。既存の企業は原子力安全と規制に関する深い知識を持ち込み、一方、新しい参入企業はより柔軟性と新しい技術やビジネスモデルを探求しているといえる。

2. 日本における開発状況:

- ・ **三菱重工業 (MHI)**: 日本の原子力産業における主要企業であり、次世代加圧水型原子炉 (PWR)、電気出力 300 MWe の小型モジュール炉 (SMR)、水素製造用の高温ガス冷却炉、高速炉、そして重要なことに、離島での利用が期待されるポータブルマイクロ原子炉の研究開発に取り組んでいる。また、MHI は、米国のテラパワーとも高速炉技術に関して協力している。
- ・ **東芝**: 次世代沸騰水型原子炉 (BWR)、安全性と経済性を向上させた革新的な BWR (iBR)、電気出力 250 MWe の小型モジュール式高温ガス冷却炉、非常に小型な原子炉である MovelluX™ (約 700℃の熱を水素製造を含む様々な用途に供給可能)、そして長い燃料交換サイクル (最大 30 年) を持つ小型高速炉 4S (Super-Safe, Small & Simple) を開発している。さらに東芝は、CRIEPI (電力中央研究所) と共同で、高速増殖炉の設計である Rapid-L (5MWt、200kWe) と、アラスカでの展開の可能性のある別のバージョンの 4S (10MWe と 50MWe) にも取り組んでいる。
- ・ **日立 GE ニュークリア・エナジー**: パッシブ安全システムを備えた小型軽水炉である BWRX-300 (300 MWe)、小型ナトリウム冷却高速炉 (「PRISM」)、および軽水冷却高速炉 (RBWR) の開発に注力している。ただしこれらは SMR の分類に入れるのが妥当であろう。

- ・ **日本原子力研究開発機構（JAEA）**：原子力イノベーション促進イニシアティブ（NEXIP）を通じて、民間企業による先進的な原子力技術開発を支援する主要な政府機関である。JAEA は、米国との高速炉燃料安全性試験などの国際協力にも関与している。また、MHI などと協力してテラパワーとの高速炉開発に関する覚書（MoU）を締結しており、英国の高温ガス冷却炉実証プログラムにも参加している。
- ・ **電力中央研究所（CRIEPI）**：東芝と共同で高速増殖炉である Rapid-L（超安全月面基地用炉、電気出力 200kW の Li 冷却の高速炉で）と 4S の設計に取り組んでいる。

（6）原子力マイクロ原子炉（エネルギー生産に焦点を当てる）の予測市場規模

参考として、2 社の調査会社の報告を示す。

Credence Research 社によると、マイクロリアクター技術市場は 2024 年に約 1,566 億ドルと評価され、2032 年までに約 6,464 億ドルに達すると予測されており、年平均成長率（CAGR）は 19.38%である。

Fact.MR 市場調査会社の報告では、2024 年の市場規模を約 1,618 億ドルとし、2034 年には約 9,609 億ドルに達すると予測されており、CAGR は 19.5%である。

（7）おわりに

マイクロリアクターの研究開発は、エネルギー・環境・宇宙といった幅広い分野で「未来の夢」を実現する可能性がある。日本の企業は、マイクロ原子炉および関連する小型原子炉技術においても、活発な研究開発能力がある。具体的には MHI や東芝のような主要な産業プレーヤーと、研究機関である JAEA や CRIEPI を通じた支援の研究が活発であることは、マイクロリアクター技術が日本の将来のエネルギーと製造産業において重要な役割を果たすことができると言える。さらに、超小型であるため従来の原子力大企業だけではない意欲のあるベンチャー企業も取り組みやすい。

筆者は原子力推進ロケットに大きな関心を持ってきたが、この方面でも革新的な考え方の採用など進歩がみられる。米国の NASA では、原子力核熱推進と原子力電気推進を組みあわせ、45 日間で火星に行くことも検討している。上記の様に原子力に係りたいと考えている若い人にとってマイクロリアクター開発は夢のある素晴らしい対象となると考える。

最後に本報のデータを得るために、生成 AI（Chat Bot や G E M I N I）を活用したことを付記する。（植田脩三記）

【参照資料】

[1] <https://www.energy.gov/ne/articles/what-nuclear-microreactor>



「赤ペン親父のつぶやき」 第20話

トランプ・ショックを乗り切るには 一稼働できる原発を早急に再稼働させることー

トランプ大統領が公表した相互関税率によると、日本製品には 24%の上乗せ関税を掛けるとのことである。これまで原子力規制委員会がちんたらと審査を行ってきた結果、既に再稼働の準備が整っている原子力発電所でさえ再稼働が遅れるだけ遅れている。その間、電気料金は何%上昇しているのか考えているのだろうか。再稼働を早急に進めれば、電気料金の安定化と引き下げにより、生産コストを下げる事が可能となり、米国から課せられている 24%の関税による日本経済へのダメージの緩和、相殺につながる有力な手段となろう。(E.I. 記)