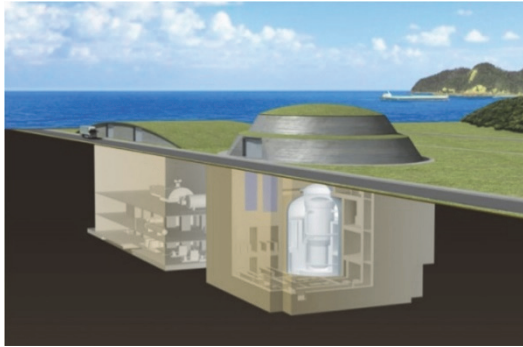


# 将来に向けた革新的な原子炉開発 - 軽水小型炉, 高温ガス炉, マイクロ炉 -

Development of Mitsubishi Innovative Nuclear Reactor toward the future;  
Small-PWR, High Temperature Gas-cooled Reactor and Micro-Reactor



井田 俊一\*<sup>1</sup>  
Toshikazu Ida

谷口 洋\*<sup>2</sup>  
Hiroshi Taniguchi

須山 和昌\*<sup>3</sup>  
Kazumasa Suyama

蒲原 覚\*<sup>4</sup>  
Satoru Kamohara

木村 芳貴\*<sup>5</sup>  
Yoshitaka Kimura

原子力エネルギーは、脱炭素化に向けた有力な選択肢であり、発電用途だけでなく、熱利用等を含め、幅広い分野で活用可能なポテンシャルを有している。一方、原子力エネルギーの利用に関しては、福島第一原子力発電所の事故(以下、福一事故)を受け、極めて高い安全性、また、他のエネルギーと競争できる経済性との両立が求められる。当社では、従来の中大型軽水炉、また国の燃料サイクル政策の下で開発している高速炉に加えて、将来の様々なニーズに対応できるよう、軽水小型炉、高温ガス炉、マイクロ炉を“将来炉”として位置付け、開発に取り組んでいる。本報では、これら3つの将来炉について、特徴とメリット、採用技術等を解説する。

## 1. はじめに

近年の最も大きな社会的ニーズの一つである脱炭素化の実現に向けて、原子力エネルギーの利用は有力な選択肢の一つである。原子力エネルギーは、発電のみならず、熱供給としての利用(水素製造、寒冷地等)、燃料供給が困難な災害地/僻地/離島等へのエネルギー供給等、化石燃料に代えて、多くの場面で活用できるポテンシャルを有している。これまで、一般的には、スケールメリットを活かした大型の発電用プラントが志向されてきているが、最近では、これに加え、将来に向けた分散電源や熱利用等、社会ニーズの多様化に伴い、シンプルかつコンパクトな構造を有する革新的な原子炉が注目されている。これらは、SMR(Small Modular Reactor)とも呼ばれ、いくつかの種類が存在している。当社においては、この革新的な原子炉を将来炉と位置付け、特に、軽水小型炉、高温ガス炉、マイクロ炉について、国の政策に従い開発に取り組んでいる。

## 2. 三菱将来炉の開発について

将来炉に求められる要件は、その社会実装によりもたらされる価値(用途)、それを支える経済性、そして、何よりも、一般に受け入れられるための安心感を与える安全性の確保である。当社の将来炉として位置付ける軽水小型炉、高温ガス炉、マイクロ炉では、これらを常に意識しつつ、他のエネルギー源に対して経済性の面でも競争力を確保できるよう、コンセプト・仕様の検討を進めている。また、特に、日本においては、地震国である上、福一事故も踏まえた世界で最も厳しい耐震性及び安全規制が課せられるため、安全性と経済性の両立は更に重要である。当社は、開発の初期段階から、この課題を認識した上で、社会に受け入れられるコンセプト・仕様を目指して、日々開発に取り組んでいる。

\*1 原子力セグメント 原子力技術部 次長

\*2 原子力セグメント 原子力技術部 主席P統括

\*3 原子力セグメント 原子力技術部 首席技師

\*4 原子力セグメント 炉心・安全技術部 主席T統括

\*5 原子力セグメント 原子力技術部

### 3. 軽水小型炉<sup>(1)</sup>

軽水小型炉は、現在の主流である大中型の原子力発電プラントに加え、主に新興国や送電網が整備されていない地域など小規模グリッドでも利用できるカーボンフリー電源としての実用化が期待されている。さらには、離島・島しょ地域や災害地向けのコンパクトなモバイル電源としてのニーズも期待されており、これらの用途に合わせた概ね 30 万 kWe 以下の小出力規模を目指している。特徴としては、①出力規模が小さいことによる固有の安全性と、それを前提とした事故時の原子炉冷却安全システムの簡素化や、②モジュール設計の採用による工場製作、及びそれに伴う現地建設工事の短縮などがあげられる。

当社は、これまで国内 24 基の PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)の建設から保守に携わり、安全性・信頼性向上や長期継続利用に向けた技術開発に取り組むとともに、小型炉を含む多様な革新的原子力技術開発に取り組んできた。このうち、小型炉開発については、軽水炉導入よりも早く、原子力船“むつ”(1967年～1972年;日本原子力船開発事業団)の動力炉開発に始まり、その後、小型一体型モジュラー炉 IMR(Integrated Modular Water Reactor)の開発に取り組む。概念設計のみならず小型一体型炉の特徴的な要素技術の実証試験を実施し、開発知見を蓄積している。これらの開発知見をベースに、実績ある PWR の特性を最大限に活かしつつ、小型炉特有の安全設計やモジュール設計などを用途に応じて採用することにより、小規模グリッド電源としての用途に加え、離島・島しょ地域などの極小グリッド向け電源供給や災害地への一時電源供給、船用動力などのニーズにも対応するため、モバイル型軽水小型炉(船舶搭載炉)としての展開も見据えて開発に取り組んでいる。図1に軽水小型炉開発の展開イメージを示す。

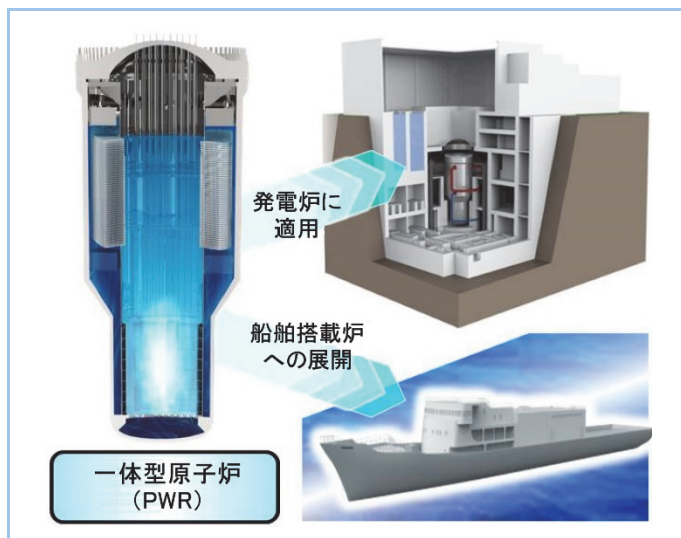


図1 軽水小型炉開発の展開イメージ

発電用軽水小型炉、モバイル型軽水小型炉の共通コンセプトとして、従来 PWR の1次冷却材ループ(大口徑配管)及び1次系の主要な機器(蒸気発生器や1次冷却材ポンプ、加圧器など)を原子炉容器内に統合する一体型原子炉を採用している。これにより、1次冷却材配管が破断することに伴う冷却材の喪失などの事故発生リスクを原理的に排除する。また、出力が小さい小型炉の特性を活かした事故の静定、原子炉の冷却を可能とする安全対策を取り入れることで安全性・信頼性を向上させている。さらに、福一事故の教訓を踏まえて新たに制定された日本の新規制基準への適合性の観点においては、国内既設プラントの再稼働支援での実績も踏まえつつ、厳しい耐震要求や、津波・竜巻等の自然災害(外部ハザード)対策、テロ・航空機衝突への対策などについても設計に反映している。これらの安全性を確保した上で、可能な限りシンプルなシステム構成、設備設計を採用することで格納容器を小型化し、最新技術を適用したモジュール設計、先進的な建設工法の採用等による建設合理化・工期短縮などにより、大幅な建設コスト低減を実現

する。

モバイル型軽水小型炉は、発電用軽水小型炉よりも一回り小さい出力規模としており、原子炉容器の更に小型化により船舶搭載を可能としている。また、海上運用に特有の揺動/傾斜などを想定した環境条件においても、PWR の優位性を活かし、安定して運転可能な設計としている。さらに、モバイル電源としての運用性を最大化すべく、大規模な設備交換や離島・島しょ地域での保守・メンテナンスの最少化、長期間燃料交換不要化などを目指す。

以上のとおり、当社で開発する軽水小型炉は、小規模グリッドや非送電網地域での発電利用のみならず、船舶搭載炉としてモバイル運用が可能な電源、船用動力等としての利用も見据えた展開を目論んでおり、将来の多様なニーズ、用途に対してカーボンフリーな原子力エネルギーの提供を実現していく。

## 4. 高温ガス炉<sup>(2)</sup>

高温ガス炉は、炉心溶融を起こさない固有の安全性と、900℃以上の熱を供給できることを特徴としており、従来の発電用途だけでなく、水素製造などでも利用できる、安定供給可能なカーボンフリー高温熱源としての活用が可能である。

日本では、脱炭素化に向けて、2050年までに80%の温室効果ガス排出削減という長期的目標を掲げており、電力分野だけではなく、産業分野等でのCO<sub>2</sub>削減が求められている。例えば、日本の鉄鋼業界では、2030年代の実用化に向けて進められる“革新的製鉄プロセス技術開発(COURSE50:CO<sub>2</sub>, Ultimate Reduction in Steelmaking Processes by Innovative Technology for Cool Earth 50)”，更にその先の将来、ゼロカーボンを実現するための超革新的技術として、水素還元製鉄への転換を目標として掲げている。将来の水素還元製鉄の実用化に向けては、大量、安価かつ安定的な供給の観点から、原子力による水素供給に対する期待は大きい。

国内の高温ガス炉開発は、日本原子力研究開発機構(JAEA:Japan Atomic Energy Agency)(旧日本原子力研究所)が中心となり、高温ガス炉の調査研究が開始され、1991年に国内初の高温工学試験研究炉(HTTR:High Temperature Engineering Test Reactor)の建設を開始、1998年に初臨界、2004年に原子炉出口ヘリウム温度950℃での全出力運転を達成、更に安全性実証試験を行い、高温ガス炉による高温核熱の供給、固有の安全について実証してきている。

当社は、これまで、このHTTR建設を目的とした研究開発の初期から参画し、HTTRの建設では、幹事会社として、設計4社の取りまとめ、HTTRのプラントエンジニアリング、原子炉格納容器、主要冷却系機器、高温配管等の設計・製作を担当した。その後、高温ガス炉の実用炉に向けた要素技術開発として、超稠密プレートフィン熱交換器開発や高温隔離弁開発、JAEAと高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300:Gas Turbine High Temperature Reactor of 300 MWe)の設計研究に携わってきている。更に水素製造システムについても、JAEAとHTTR接続水素製造システムの設計検討の実績を有している。

当社では、現在、これらの蓄積した技術・経験をもとに、経済性・機動性に優れ、脱炭素化、水素社会といった将来の多様な社会ニーズに応えうる高温ガス炉コジェネプラントの開発を進めている。図2に高温ガス炉コジェネプラントのイメージを示す。

このプラントでは、HTTRで培った技術を用い原子炉出口温度を950℃とし、水素製造と発電のコジェネレーションを行うものである。一般的に、原子力プラントは、燃料コストは低いものの建設に伴う初期コストが高いため、資本費回収のためには設備利用率をあげる必要があり、原子炉は定格出力で運転することが望ましい。このコジェネプラントは、水素需要や給電需要の変動に合わせて、発電量/水素製造量のバランスをとり、原子炉出力を一定に維持することで、再生可能エネルギーとの共存性に対しても配慮しながら、設備利用率を高めることとしている。

また原子炉出口温度を950℃と高く設定することにより、水素製造及び発電の両面において高い効率が期待できる。特に、発電には1次系に直接ヘリウムガスタービンを用いることで、蒸気タ

ービンを用いたランキンサイクルに比べ高い効率を目指している。

安全性の面では、HTTRで実証してきた固有の安全性をベースに、原子炉出力をスケールアップした場合でも同等の固有の安全性を維持するべく、当社独自の燃料・炉心設計、構造検討を行い、解析により安全性を検証する。

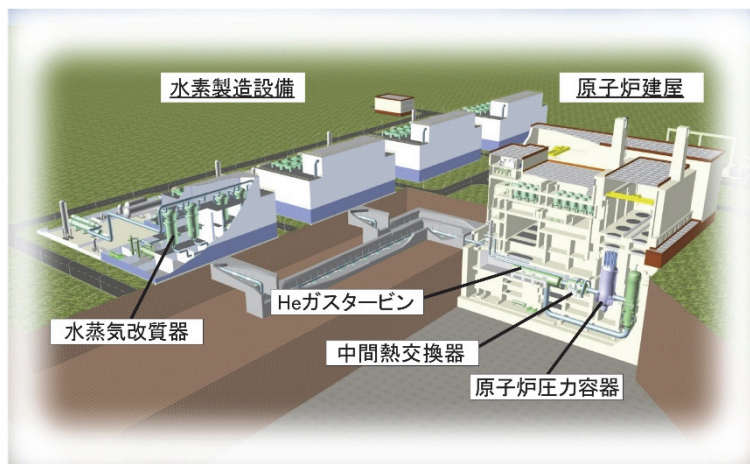


図2 高温ガス炉コジェネプラントのイメージ

水素製造技術には、まずは原子力エネルギーによる水素製造を実証すべく水蒸気改質法を適用し、HTTRによる水素製造の実証を踏まえ、低炭素な水素を大量に安定して製造するプラントを目指す。本プラントでは、約220MWtの熱で時間当たり12万 $\text{N m}^3/\text{hr}$ (年間9億 $\text{N m}^3$ 以上)の水素製造量を目指している。さらに、2050年以降に向けて高温水蒸気電解法やIS法等、カーボンフリー水素製造方法の実用化を想定し、それら水素製造設備を接続した高温ガス炉コジェネプラントによりカーボンフリー水素の大量・安定生産を目指す。

また、経済性の面では、固有の安全性に基づく安全システムの簡素化・最適化、1次系に直接ヘリウムガスタービンを採用するシンプルな系統構成、高温ヘリウムガスによる高効率発電、更に、モジュール化による建設費削減などにより、高い発電効率を確保しながら、核熱利用による安価な水素製造を達成することを目指す。

以上のように、当社では、水素還元製鉄への転換を目指す鉄鋼業界のユーザなどと連携して、国の政策の下で進められる脱炭素化、水素社会の実現に向けたイノベーションといった産業界の取組みと協調を図りつつ、高温ガス炉コジェネプラントの実用化に向けて研究開発を進めていく。

## 5. マイクロ炉<sup>(3)</sup>

マイクロ炉は、一般的な小型炉よりも更に出力レベル・サイズが小さい炉であり、固有の安全性を前提とした可搬性を備えることで、既存の陸上発電型原子炉とは異なる新たな価値を提供可能なオプションの一つである。当社では、図3に示す非送電網地域での電源・熱源利用、エネルギー備蓄等での利用を目的とした、多用途モジュール式マイクロ炉を開発している。

マイクロ炉は、多様な使用目的や設置環境に対応するため、既存の大型原子炉と比較して、一般公衆に近い場所で原子炉が設置される。よって、実用化のためには、利用に伴う放射線影響から一般公衆・環境を防護する観点から、開発の基本理念として、究極まで安全性を追求することを第一としている。既存原子炉では事故により原子炉冷却材が喪失した場合に最も放射性物質の外部流出リスクが高まる。この事故要因を根本から排除するために、本マイクロ炉では原子炉冷却に液体を使用しない“全固体原子炉”の概念を採用した。全固体原子炉は、炉心構造物に黒鉛系の高熱伝導体を採用し、炉心の熱エネルギーを発電系に伝達する。この概念により、液体の冷却材に起因する事故を根本から排除し、原子炉の安全性を大幅に向上させ、一般公衆及

び環境に対する放射線影響を低減させることが可能である。仮に事故が発生した場合でも、もともと出力が小さく、高熱伝導の黒鉛系材料により、空気自然冷却のみで安定的に崩壊熱除去が可能であり、福一事故のような燃料溶融事故には至らない設計としている。

また、この固有の安全性と簡素化した制御系により無人自動運転が可能な設計としている。さらに、燃料取換え作業不要な長寿命炉心を実現するため、ウラン濃縮度 20%を上限とした HALEU 燃料 (High-Assy, Low-Enriched Uranium) を採用する。

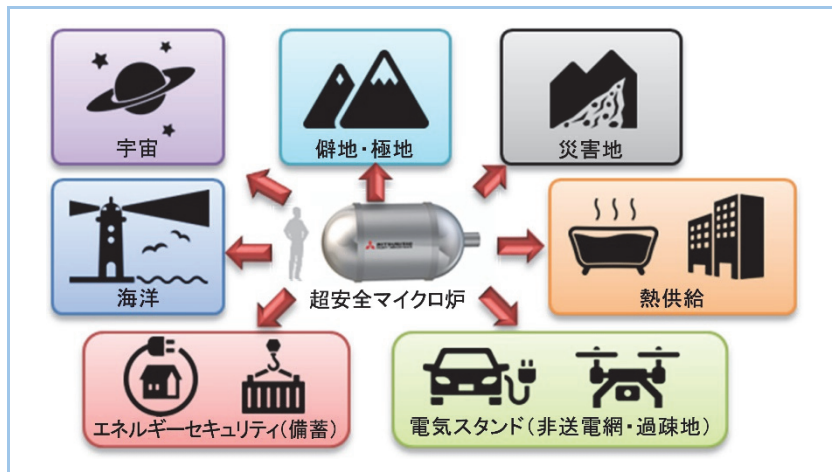


図3 マイクロ炉適用先イメージ

本マイクロ炉は、1モジュール当たり最大 1MWt の出力を想定しており、需要規模に応じて複数のユニット構成により対応する。製造は、工場でのライン製造を計画しており、大量生産によるコスト低減を実現可能である。また、トラックで輸送可能な重量にすべく、金属系材料と比べて重量を 70%削減可能な黒鉛系材料を最大限活用し原子炉の軽量化を図っている。サイズについては、HALEU 燃料採用により炉心を最大限小型化し、40ft の国際海上貨物用コンテナ内に原子炉系・発電系をすべて収める計画である。マイクロ炉の開発計画仕様を表1に示す。

表1 マイクロ炉の主要仕様(計画案)

項目	仕様
原子炉形式	高熱伝導体冷却炉 (全固体原子炉)
炉心構造物	黒鉛系材料
熱出力	~1MWt
電気出力	~0.5MWe
運転制御	無人自動運転
安全性/最終ヒートシンク	静的崩壊熱除去系 (空気自然冷却)
可搬性/サイズ	国際海上貨物用コンテナ

以上のように、多用途ニーズに向けて、新たな原子炉の価値を創造すべく、当社は、引き続き、可搬型モジュール式マイクロ炉の実現に向けて取り組んでいく予定である

## 6. 今後の展開

当社の将来炉開発については、引き続き、国や様々な事業者の方々と対話しながら、求められる(選ばれる)プラントとなるよう、設計検討を進めていく。

## 7. まとめ

社会の求める脱炭素化に資する原子力技術として、当社が推進する軽水小型炉、高温ガス炉、マイクロ炉の開発は、将来の社会ニーズに備えるための重要な取組みと考えている。いずれも、従来の発電用途のみならず、それぞれの特徴を活かした社会実装の可能性を有しており、今

後も、サービスを提供する事業者の方々と議論しながら、開発を進めていくこととしたい。また、それぞれの革新技術について実証していく必要がある上、安全・安心の確保と、競争力のある経済性の実現については、引続き、追及していく必要があると考えている。さらに、安全規制に関し、従来の大中型炉とは異なり、出力が小さく革新的な安全コンセプトに適した規制基準について、早期に議論が開始されることも期待したい。

## 参考文献

- (1) 杉浦寛和ほか, 多目的利用を実現する軽水小型 PWR の開発, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, 1I05.
- (2) 須山和昌ほか, 炉心溶融のない高温ガス炉コジェネプラント(水素製造・発電)の開発, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, 1K08.
- (3) 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, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, 2I07.