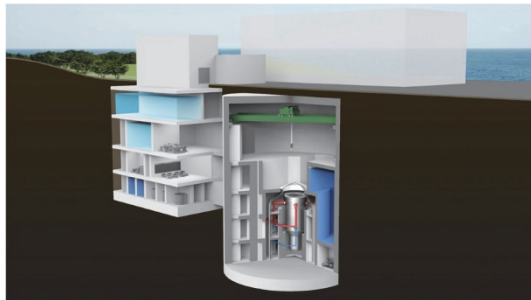


カーボンニュートラル社会に向けた多様なニーズに応える 小型軽水炉開発

Development of MHI Small PWR to Meet Diverse Needs for a Carbon Neutral Society



谷口 洋*¹
Hiroshi Taniguchi

近藤 喜之*²
Yoshiyuki Kondo

蒲原 覚*³
Satoru Kamohara

木谷 朋之*⁴
Tomoyuki Kitani

廣田 直亮*⁴
Naoaki Hirota

柴崎 京介*⁵
Kyosuke Shibasaki

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、熱利用や水素製造等を含め、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を受け、極めて高い安全性が求められる。三菱重工業株式会社では、将来の多様なニーズに応える革新的な軽水炉として、小型軽水炉の開発を進めており、本報では高い安全性を有する発電用小型軽水炉のコンセプトや技術的特徴、更に関連技術について紹介する。

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、安定的にエネルギー供給が可能な原子力発電の利用が望まれている。これまで、我が国では発電単価の観点で有利であり、所謂スケールメリットを活かした大型の発電プラントが志向されてきているが、オフグリッド電源としての利用など社会ニーズの将来的な多様化も予想され、シンプルかつコンパクトな構造を有しプラント短期建設のメリットを持つ小型炉も注目されている。小型炉は、出力規模が小さいことから事故時の影響範囲が小さくなると考えられ、更に小型であることの特徴を活かした革新的なコンセプトの採用が可能なため、従来の原子力発電プラントに比べて更なる安全性の向上を図ることができる。三菱重工業株式会社(以下、当社)では、将来の多様なニーズに応える革新的な軽水炉のひとつとして、小型軽水炉の開発を進めている。

2. 開発の背景

第6次エネルギー基本計画では、原子力発電は将来にわたるベースロード電源として位置付けられており、実用段階にある脱炭素化の選択肢として期待されている。また、原子力は準国産エネルギーとして位置づけられており、国産技術を活用した原子力発電はエネルギーセキュリティの観点からも重要である。このような中、安全性・経済性等の多様な社会的要請に対して応えるプラントとして、小型であることを活かした革新的なコンセプトの採用によって高い安全性を有するプラントを将来の選択肢として持つことが望ましいと考えられる。そこで、当社は長年にわたり培ったPWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)の設計、製作、据付、検査、維持管理技術を活用した、革新的な小型軽水炉の開発を2019年度にスタートさせた。開発においては日本政府の補助の下、研究機関や大学、電力会社と連携し、小型軽水炉の実用化に向けた検討を進めている。

*1 原子力セグメント 原子力技術部 次長

*3 原子力セグメント 原子力技術部 グループ長

*5 MHI原子力研究開発株式会社 第一研究部

*2 総合研究所 原子力研究推進部 主席研究員

*4 原子力セグメント 原子力技術部 主席技師

3. 小型軽水炉のコンセプト

2040年代の小型軽水炉実用化に向け、将来の社会情勢やエネルギー情勢を分析し、電気出力30万kW級のプラントに求められるコンセプトを次のとおり検討した。

(1) 社会的受容性

従来原子力発電には高い安全性が求められてきたが、福島第一原子力発電所事故以降、更に高い安全性及び信頼性が求められる。小型軽水炉では、冷却材喪失等の事故要因を排除する構造(一体型原子炉)を採用することや、原子炉建屋等の重要設備の地下立地による航空機衝突(Airplane Crash, 以下 APC)防護、原子炉建屋の放射性物質閉じ込め機能強化等の対策によって安全性を向上させることにより、社会的受容性の高いプラントを実現する。

(2) 立地自由度

小型の原子炉では出力規模が小さいことから、万が一の事故収束のために動的機器(ポンプ等)を使用せず、重力注入等の自然力を利用したパッシブ安全システムによる対応も可能となる。これにより、最終ヒートシンクを海水ではなく大気とすることにより、安全系の海水システムを不要化できるため、発電所敷地内の高台にも設置可能となるような立地自由度の高いプラントを実現する。

(3) 経済性

出力規模が小型になるほどスケールメリットが不利になる傾向があるが、小型軽水炉では、動的機器の削減や、小さいフットプリント、先進建設工法の適用等により、競争力のある経済性を目指す。

4. 小型軽水炉の主な技術的特徴

4.1 一体型原子炉

現在のPWRプラントの一般的な1次系機器構成は、原子炉容器(Reactor Vessel, 以下RV)・蒸気発生器(Steam Generator, 以下SG)・1次冷却材ポンプ(Reactor Coolant Pump, 以下RCP)の1次系機器を大口径配管により接続したループ型構成となっている。小型炉では原子炉の出力規模が小さいことから、各機器をコンパクトに設計することができ、更にこれらの機器をRVに内蔵・一体化した一体型原子炉を採用する。この主機一体化によって大口径ループ配管(Main Coolant Pipe, 以下MCP)が不要となり、MCP破断に伴う冷却材喪失事故の発生リスクを本質的に排除することができるため、当該の事故対応設備を考慮することが不要となる。主機一体化の構造コンセプトを図1に示す。

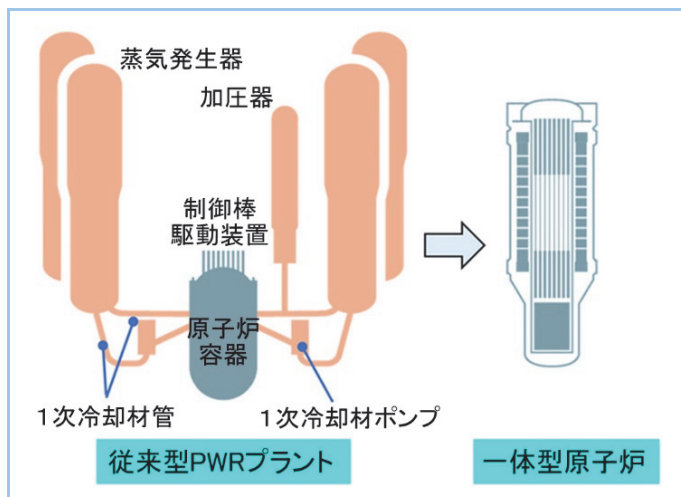


図1 主機一体化の構造コンセプト

一体型原子炉の構造は、**図 2** に示すとおりであり、RV 下部に燃料集合体を収納し、RV 上部に制御棒を駆動する制御棒駆動装置 (Control Rod Driving Mechanism, 以下 CRDM)、2 次側への蒸気を発生する貫流型 SG が設置されている。

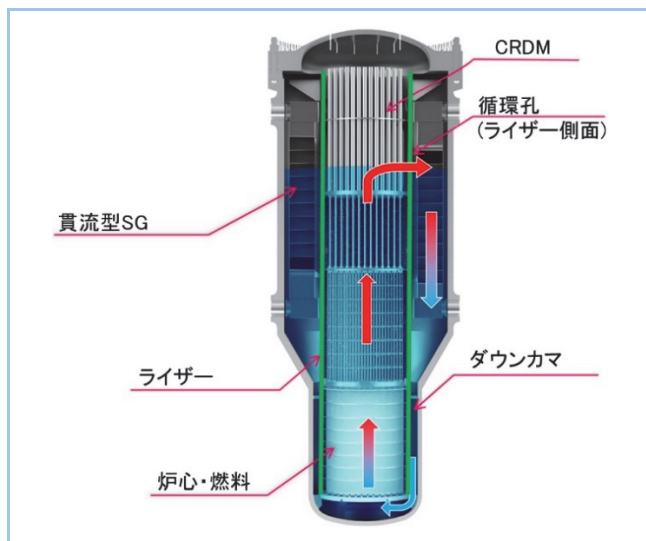


図2 主機一体型原子炉

4.2 二相自然循環冷却

1 次冷却材の流れは、自然循環による駆動力により形成される。1 次冷却材は、RV 下部に装荷された炉心で加熱され、炉心上方の“ライザー”と呼ばれる円筒の内側を上昇し、ライザーの外側にある SG を介して 2 次系冷却材に熱を伝えることによって冷却されながら下降し、RV 下部の“ダウンカマ”と呼ばれる環状のセクションを通ったのち、再び炉心に向かって流れる。1 次系に自然循環の駆動力を利用することで、強制循環に必要な RCP が不要になる。RCP が不要となることで、RCP 軸固着や RCP シールからの 1 次冷却材の漏えいなど、いくつかの事故シナリオが本質的に排除される。

自然循環システムでは、水頭差による駆動力と圧力損失による抵抗のバランスによって流量が決定される。水頭差は、炉心側 (1 次系高温側) とダウンカマ側 (1 次系低温側) の 1 次冷却材の密度差によって生じる。さらに、1 次冷却材の循環に二相流を使用すると、密度差が大幅に増加し、単相流に比べて高い流量が実現できるため、所定の熱出力を確保することを可能としている。

4.3 パッシブ安全システム

小型軽水炉では、想定事故事象に対する事故対処設備にパッシブ安全システムを積極的に採用し、安全性を向上している。

(1) パッシブ SG 冷却システム

小型軽水炉では、事故時の崩壊熱除去をパッシブ SG 冷却システムである自立型直接除熱系 (Stand-alone Direct Heat removal System, 以下 SDHS) にて行う。SDHS の基本概念を **図 3** に示す。SDHS は RV に内蔵した SG と大気に直接熱を放出する静的 SG 冷却器を配管で結ぶ閉回路で構成する。静的 SG 冷却器を冷却タンク内に水没させて設置し、通常運転時は運転ラインから切り離して待機状態にあるが、異常時には SG で発生した蒸気を静的 SG 冷却器の伝熱管内に導き、冷却して蒸気を凝縮し、凝縮水は重力で SG に戻る構成としている。つまり、この SDHS の駆動は冷却水自体の密度差に起因する (重力を利用した) 自然循環により達成される作動原理となっている。また、静的 SG 冷却器は崩壊熱レベルの高い事故後初期は冷却タンク水の沸騰蒸発で冷却し、冷却タンク水が蒸散によりなくなると空冷用風路が形成され、自然対流により吸気口から空気が供給され、長期間にわたり空気により冷却することで安全性を高めている。以上の通り、SDHS は外部エネルギーや外部からの物理的支援を必要としない完全自立型の安全系である。

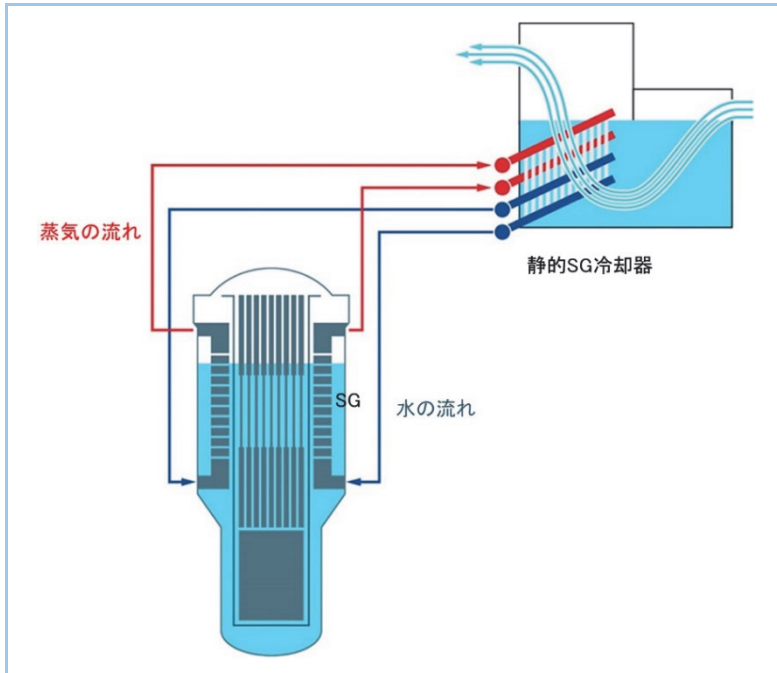


図3 SDHS の基本概念図

(2) パッシブ炉心注水冷却システム

小型軽水炉のパッシブ炉心注水冷却システムの基本概念を図 4 に示す。このシステムは、事故時の多重故障(事故時に更に SG 機能喪失が発生し、パッシブ SG 冷却システムが機能しないような万一の想定)に備えた静的な炉心/格納容器 (Containment Vessel, 以下 CV) 冷却システムであり、冷却水を予めプラント内に蓄えておき、重力や窒素加圧等の動的機器に依存しない駆動力を用いて、人的操作なしに RV および CV 内部を冷却し、炉心損傷や CV 破損を防止するシステムとなっている⁽¹⁾。

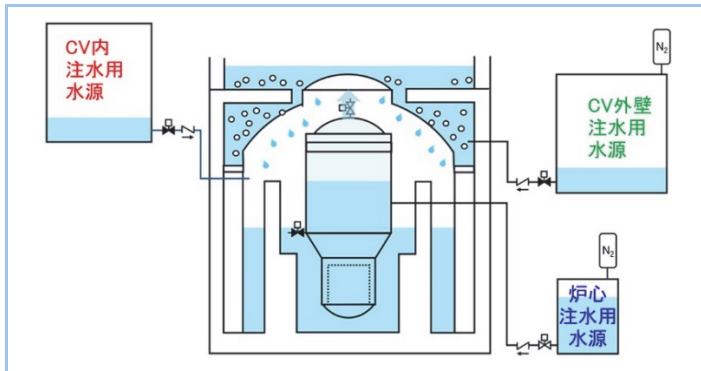


図4 パッシブ炉心注水冷却システムの基本概念

4.4 原子炉建屋の地下立地

小型軽水炉には、RV 及び CV を収納する原子炉建屋と、中央制御室及びその他の安全上重要な設備を配置する原子炉補助建屋がある。

小型軽水炉では主機一体化構造の採用などにより、従来型 PWR の 1 次冷却設備から大幅に簡素化されている。そのため、RV 及び CV を収納する原子炉建屋についても、従来型 PWR に比べて大幅に縮小されている。この特徴を活かして、原子炉建屋全体を地下埋設することが可能となり、建屋周辺地盤を含めて障壁とすることで、大型航空機衝突や竜巻飛来物に代表される外部ハザードに対して、非常に高い耐性を期待することができる。また、原子炉補助建屋に配置される安全上重要な設備は地下階に設置することで、原子炉建屋同様に高い外部ハザード耐性を有する。地下埋設の外壁は、常時及び地震時等の土圧に対しても耐えられるよう頑健にしている。

また、これら原子炉建屋等を地下に埋設することにより、建屋や設備に作用する地震動を低減する効果が期待され、高地震動が見込まれる立地においても耐震性を確保することが可能となる。

津波への対策として、ドライサイト化(基準津波高さよりも高い敷地レベルを設定)、もしくは、堤防、防潮堤、隔壁のような常設の外部障壁などを、適用する敷地条件に応じて選択可能である。

4.5 放射性物質の閉じ込め機能強化

小型軽水炉の主機一体型原子炉はCV内に設置され、想定事故においても放射性物質をCV内に閉じ込める機能を有している。このCVは高強度鋼板を用いたハイブリッド型を採用している。ハイブリッド型CV特徴として、CV円筒部及びドーム部は高強度鋼板で耐圧・耐漏えい機能を担保し、CV底部は基礎版で耐圧機能、底部ライナで耐漏えい機能を担保することで、高い耐圧・耐漏洩性能を持ちながら、CV自体の小型化が可能となっている。

更なる放射性物質の閉じ込め機能強化として、設計基準事象及び過酷事故を超える事象で、万一、安全機能を喪失しCVの限界圧力を超過する場合にも、[図5](#)に示すとおりCV外側に設けた閉じ込め機能を有する区画にCV内雰囲気を放出することとしている。CV外側に設けた区画には雰囲気を冷却する機能を有し、CV内から放出されたガス中の蒸気凝縮及び非凝縮性ガスの収縮による長期的な区画の除熱・減圧を行うことでCVの破損を防ぎ、周辺環境への放射性物質の大量放出を抑制する。

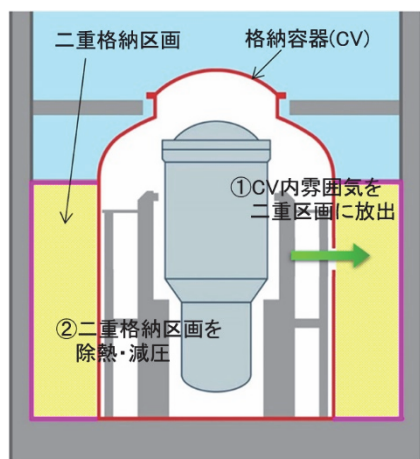


図5 放射性物質の閉じ込め機能

4.6 国内規制基準への適合性

小型軽水炉は、福島第一原子力発電所事故を踏まえて策定された新規規制基準を考慮して開発しており、動的機器に頼らない静的安全システムにより安全性を確保する計画である。また、外部ハザード対策として国内の厳しい耐震条件にも適合する建屋耐震性を確保する。この小型軽水炉の実用化に向けて、特に既設プラントと比べて事故を本質的には排除した小型炉の特徴的な安全性などに関し、小型炉向け規制基準を、学協会を含む関係機関と議論を深めていく。

4.7 建設工法の高度化

小型軽水炉の建設においては、建設工期の短縮のため、プレファブ又はプレキャスト工法といった原子力発電プラントの建設以外の他分野で実績ある建設工法も活用し、現地工事費用を低減する。また、外部ハザード対策として重要設備の地下設置による建設コスト増加を抑制するため、地中連続壁工法⁽²⁾といった高度化された建設工法を活用する。

また、小型軽水炉では主機一体型構造のため、工場での1次系機器のユニット製造が可能となる。一体型原子炉のユニット化により、現地工事範囲の縮小、建設工期の短縮を図っていく。

5. 関連技術の紹介

5.1 モバイル型小型軽水炉

モバイル型小型軽水炉は、前章までに説明した発電プラントの知見を活用し、将来の多目的

利用のニーズのひとつとして船舶搭載を想定した、電気出力3万kW級の一体型原子炉である。船舶搭載型のコンセプトは、図6に示すような原子力発電船として、離島・遠隔地といったオフグリッド地域への給電や、災害地の非常用電源供給・海水淡水化・熱源利用など、多目的な活用を想定している。

モバイル型小型軽水炉では、海上運用による船体の揺動や傾斜を想定した環境条件においても安定して運転可能となるよう配慮している。また、モバイル電源としての運用性を最大化すべく、保守・メンテナンスの最小化のほか、窒化ウラン燃料等の長寿命燃料による燃料交換不要化を志向している。

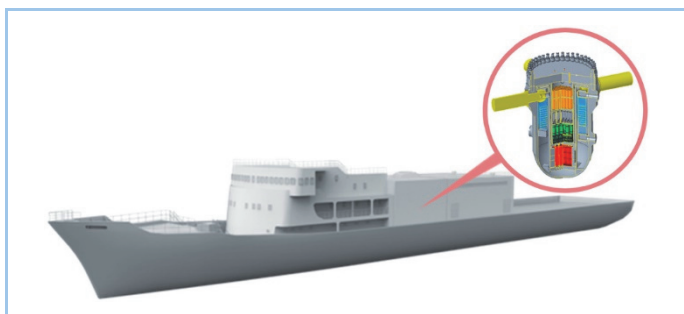


図6 モバイル型小型軽水炉(船舶搭載)

5.2 窒化ウラン燃料

窒化ウラン燃料は、二酸化ウラン燃料と比較してウラン充填密度が高いため長寿命燃料に適しており、更に、熱伝導率が高いため特に事故時の燃料温度を抑制可能であるという安全上の利得も有している。一方で、窒化ウラン燃料は高温で水分との反応性が高く、酸化・細粒化が進むことが知られ、軽水炉への適用を見据えた知見は乏しい。

当社では、核燃料として優れた特長を有する窒化ウラン燃料をモバイル型小型軽水炉への将来的な適用を視野に、課題である水との高い反応性の抑制方法の検討を進めており、その一つとして添加物入り窒化ウラン燃料の研究に取り組んでいる。同取組みでは、種々の窒化ウラン試料を水蒸気と反応させ、その反応度合から添加物の与える水反応抑制効果について評価しており、炭素添加により窒化ウランの水反応性が抑制される可能性が示唆された⁽³⁾。

今後も引き続き、窒化ウラン燃料に添加物を加えることで水反応性を抑制する方策を念頭に、窒化ウラン燃料への炭素添加による水反応抑制効果に関するさらに詳細な機構検討や燃料仕様検討を進めるべく、水蒸気反応試験及び試験後分析、さらには計算科学的検討を含めた研究開発を計画している。

6. まとめ

将来の多様なニーズに応える革新的な軽水炉のひとつとして、優れた安全性と競争力のある経済性を有する小型軽水炉の開発を進めている。2040年代の実用化を目標として、現在はプラント仕様の具体化を図っており、今後の要素技術試験に向けた計画も策定中である。実用化に向けては、電力会社をはじめ研究機関やサプライヤと連携し、革新技術の開発・実証試験には国の支援を頂きながら開発を進めていく。

参考文献

- (1) 廣田直亮ほか、多目的利用を実現する軽水小型PWRの開発ーパッシブ炉心冷却システムの開発ー、日本原子力学会 2021年秋の大会、2E15
- (2) 地中連続壁協会、地中連続壁の概要、<https://www.jadw.jp/tech/>
- (3) 柴崎京介ほか、炭素添加窒化ウラン燃料の水蒸気反応試験、日本原子力学会 2024年秋の大会、2N20