

新型炉部会セッション

原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況

Latest trends of advanced reactor development supporting nuclear innovation

(4) 安全性・信頼性を高めた小型ナトリウム冷却高速炉

(4) Compact SFR with improved safety and reliability

*坂場 弘¹¹三菱重工株式会社

1. 開発の目標とコンセプト

21世紀中の軽水炉／高速炉共存から、将来の実用炉への発展・実証を見据え、多様な高速炉ニーズに対応できるナトリウム冷却高速炉プラント概念構築を目指している。

高速炉技術として最も成熟したナトリウム冷却炉（SFR）をベースに、国産技術に立脚した高い安全性・信頼性を実現するとともに、競争力のある経済性、資源の有効利用（柔軟な燃料増殖比の確保）や放射性廃棄物低減（マイナーアクチニド：MAの核変換）が可能で、さらに、再生可能エネルギーと共存できる機動性を有する小型ナトリウム冷却高速炉（MCR：Mitsubishi Compact Reactor）概念を構築する。

具体的には、以下を採用することによる従来小型炉より高い受動的な安全特性及びナトリウム安全特性を有するとともに、将来の社会ニーズに合わせ大型化への展開（出力変更）も容易なプラントとしている。

- ・粒子型金属燃料炉心の採用により異常時炉停止失敗事象（ATWS）時にも固有の反応度フィードバック特性による受動的炉停止を達成
- ・ナノ流体の採用によりナトリウムの化学的活性度を抑制
- ・実証性の高いナトリウム冷却高速炉技術を採用（小型から大型の出力増大へ対応可能な崩壊熱除去系型式を採用）
- ・将来の社会ニーズに応じて柔軟に出力アップが可能なプラント概念

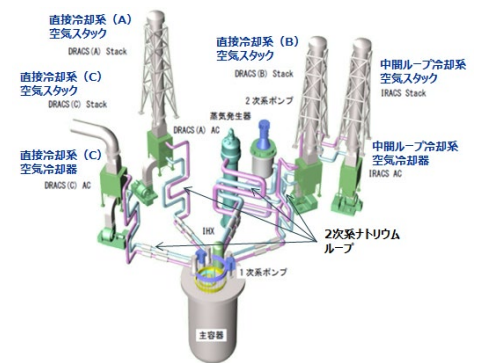


図1. MCR200の系統概念

2. 安全性・信頼性を高めた小型ナトリウム冷却高速炉の概要

2-1. プラントの概要

a. 系統概念と出力増加の考え方

金属燃料炉心を搭載した出力200MWe級の小型ナトリウム冷却高速炉の系統概念を構築した。崩壊熱除去系や炉停止系は実績あるSFR技術を採用。主冷却系は1系統とし、同一系統を増やすことにより出力増加が容易なプラントを構築する。

この大型化によりスケール効果及び習熟効果により実用レベル出力での経済性を追求する。図1に系統概念図を示す。

b. 採用する主な革新技術

革新的なHeボンドを使用した粒子型金属燃料炉心を採用すること等により受動的炉停止機能を強化する。図2に従来型金属燃料との比較を示す（燃料ピン内の充填材をNaからHeガスに変更することでガスペナムを燃料ピン下部に設置）。また、2次系Naにナノ流体（冷却材Na中に金属ナノ粒子を分散）を採用し、Naの化学的活性を抑制することでNa水反応等の影響緩和を行い小型ナトリウム冷却高速炉の信頼性向上を図る。

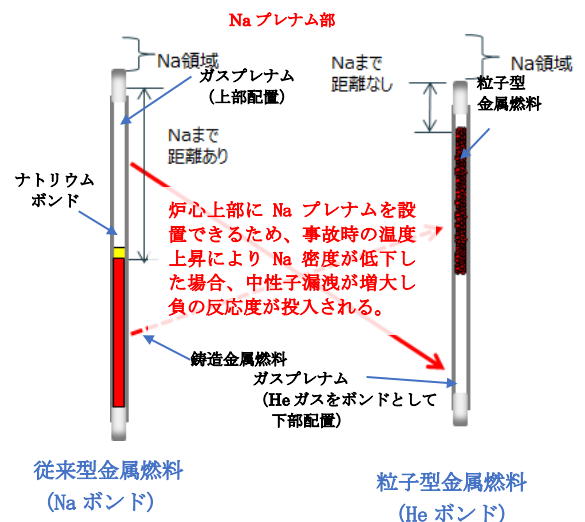


図2. 従来型金属燃料と粒子型金属燃料

2-2 高い受動的安全特性を有する金属燃料炉心概念の構築

高い炉心性能及び低ナトリウムボイド反応度を達成できる革新的な上部ナトリウムプレナム付き粒子型金属燃料炉心を構築した。ナトリウムボイド反応度低減には、上部ナトリウムプレナムの設置に加え、炉心を扁平化し、中性子漏えいを増大させ、更に内側炉心と外側炉心の高さに差をつけることにより、炉心径増大、炉心性能低下を回避しつつ、線出力増加を抑制した（図3）。

また、炉心大型化（電気出力 200MWe の MCR200 から 1000MWe の MCR1000 への出力増大を想定）に際しては、燃料ピン細径化と多数ピンバンドル化により、線出力を維持しつつ出力密度を増加させることにより、径方向サイズの増大を抑制することを可能とした。（図4）。

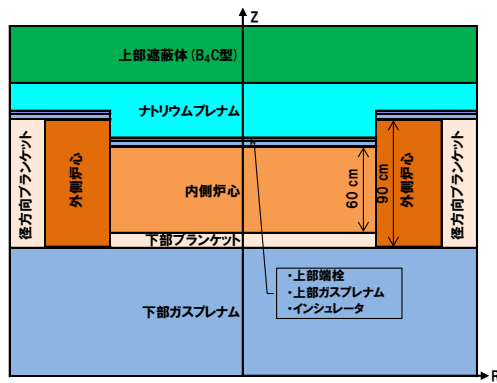


図3 MCR200の炉心断面図

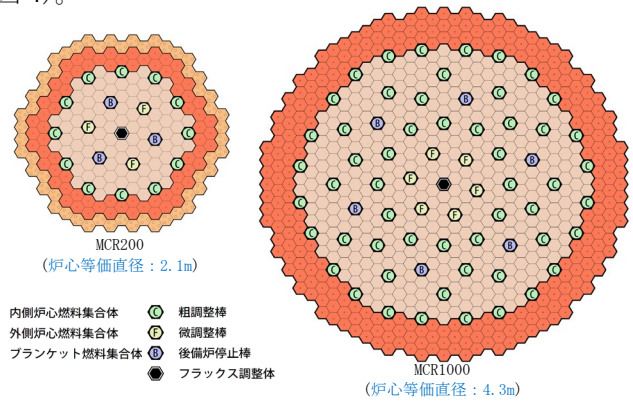


図4 MCRの炉心配置

2-3 受動的安全特性の概略評価

MCR200 及び MCR1000 を対象に、動特性解析コードを用いて ATWS 時の過渡解析を実施し、受動的炉停止特性の成立性を評価した。

その結果、MCR200 については、集合体（ラップ管）の熱変形によりもたらされる炉心湾曲による負の反応度フィードバックを考慮することで、受動的炉停止を達成できる見通しを得るとともに、設計対応を要する点（ロッドストップ機構や1次系ポンプのポニーモータ運転など）を明らかにした。また、MCR1000 についても炉心湾曲による反応度を考慮することによって受動的炉停止を達成できる見通しを得た。

2-4 プラント概念の構築

a. ヒートマスバランス

小型炉の系統構成として IHX（中間熱交換器）1基、1次系ポンプ2基とし、各系統の温度をパラメータにケーススタディを行い、主容器径への寄与が大きい IHX の径を小さくするヒートマスバランスを見出した。

b. 原子炉構造

将来の社会ニーズに応じて柔軟に出力アップが可能なプラント概念として、大型化に際した開発要素を低減するために、出発点の小型炉の冷却系機器の数を極力少なくし、同一構成の冷却系統ループ数を増加することで出力をアップするシナリオを策定した。このシナリオに基づき MCR200 の原子炉構造概念（図6）を構築した。この概念では、小型炉として主容器径を可能な限り削減するために、主容器に設置する機器の配置スペース合理化の観点から炉心を大きく偏心させた上で機器を反対側に寄せて配置する、更に熱交換器の2次系冷却材の放射化抑制に寄与しない遮蔽体を削除する等の対策を施した。また、主容器の炉壁熱保護方策の検討を踏まえ、冷却系機器含め日負荷追従運転をした場合での機器の健全性を評価・確認し再生可能エネルギーとの共生できる概念であることを併せて確認した。

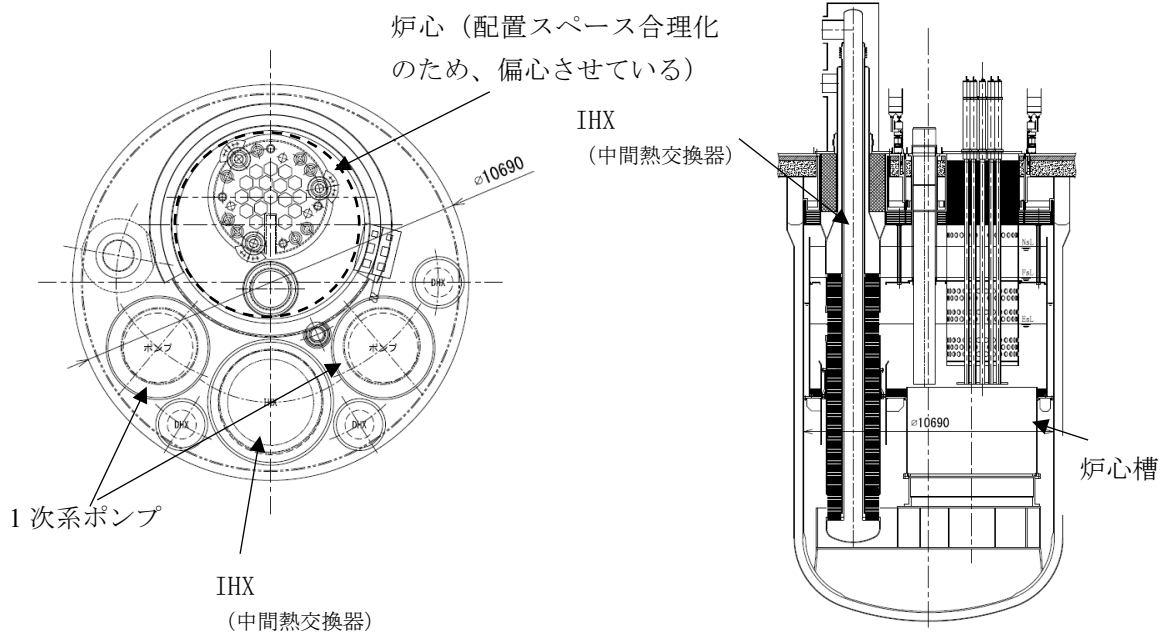


図 6 原子炉構造概念

c. 1次冷却系/2次冷却系

先に述べたように採用したヒートマスバランスは、主容器径の削減を狙い、搭載機器である IHX の伝熱面積を小さくできる条件のもと、2次系の主要機器である SG の伝熱面積を小さくできるケースを選定し、MCR200 の IHX 及び 1次系ポンプについて必要仕様を設定し、基本構造を構築した (図 7)。

なお、IHX に関しては、熱過渡事象における構造健全性の確認として、上部・下部管板周りを対象に、上部管板については手動トリップ、下部管板については外部電源喪失を想定した熱応力評価を行い、構造健全性の成立見通しを得た。同様に 2次系主要機器であるポンプについては、必要仕様を設定し、基本構造を構築した。

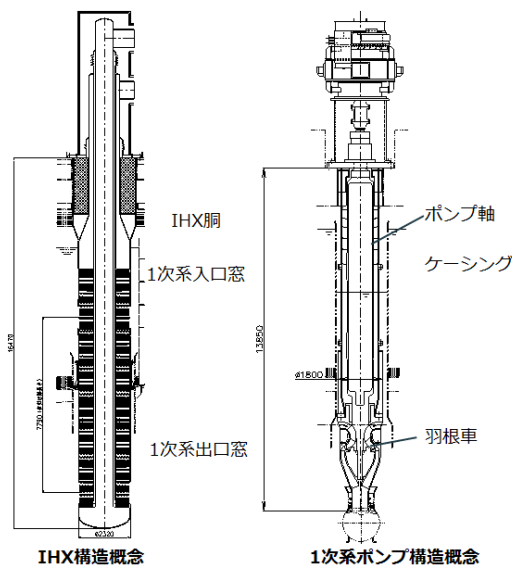


図 7 IHX(中間熱交換器)及び 1次系ポンプの構造概念

d. 建屋配置

構築した主要機器の基本構造を格納できるコンパクトな建屋を実現するため、以下の配置設計とした。2次主冷却系及び崩壊熱除去系（DRACS）の2次系配管が極力短くなるように接続先の各機器を近傍に設置し、もう一つの崩壊熱除去系（IRACS）は、2次系配管の引き回しを考慮して2次主冷却系室の近傍に配置する。SGは建屋南側の設置となるためタービン建屋は原子炉施設建屋の南側に配置する。これらの検討により最適な建屋配置概念を構築した。

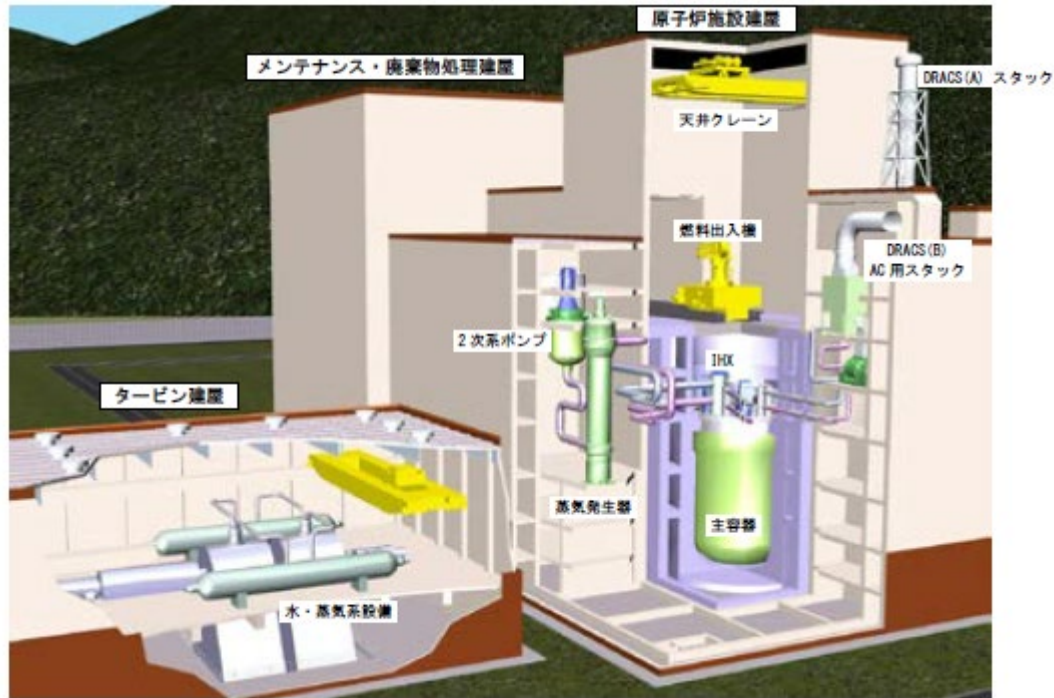


図8 建屋配置概念図

3. まとめ

高い安全性、信頼性を確保しつつ、社会的要請に応じて柔軟に出力アップが可能なプラントを市場に提供するため、冷却系統ループ数の増加により出力アップするシナリオを策定し、出力200MWe級のプラントの基本構造概念を構築した。今後、同一構成の冷却系統を増設することにより出力アップすることを想定した基本構造概念を構築していく予定である。なお、本報告は、経済産業省からの補助事業である「令和2年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含む。

*Hiroshi Sakaba¹

¹Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.