

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

(3) 炉心溶融のない高温ガス炉コジェネプラント

(3) High-temperature gas reactor co-generation without core melting

*須山 和昌¹, 倉林 薫¹, 中野 敬之¹, 米元 聡志¹¹三菱重工業株式会社

1. はじめに

三菱重工業では、固有の安全性を有し炉心溶融を想定する必要がなく、かつ 900℃以上の高温の熱が取り出せる高温ガス炉を活用し、安全で低炭素な水素製造と発電を両立する「高温ガス炉コジェネプラント」の概念構築を進めている。カーボンニュートラル社会に向けて、高温を利用した水素の安定的かつ大量製造と、ガスタービン発電による高効率発電を両立できる高温ガス炉コジェネプラントを実用化する。これにより、水素を大量にかつ安定供給できることから製鉄業界で目指している水素還元製鉄に提供して産業界の脱炭素化に貢献すると共に、水素製造量と発電量を調整することにより原子炉出力を一定に保ちつつ電力負荷変動に対応することで、原子炉の高稼働率を維持し経済性と脱炭素化の両立を目指す。

2. 高温ガス炉コジェネプラント概念

2-1. 全体計画

高温ガス炉コジェネプラントの原子炉出力は、固有の安全性が維持できると評価されている 600MWt とし、原子炉出口温度は、HTTR の実績から 950℃と設定した。水素製造法は、早期実現が見込めるメタン水蒸気改質法を選定し、発電には高効率が見込めるガスタービンサイクルを採用した。全体系統構成を図 1 に示す。1 次系の主要設備は中間熱交換器(IHX)、He ガスタービン、再生熱交換器から構成され、IHX を介して水素製造設備に高温の熱を供給する。プラントの運転は、水素製造を主体

表 1 高温ガス炉コジェネプラントの主要目

炉型	黒鉛減速ヘリウム冷却炉	
冷却材	ヘリウム	
熱出力	600MWt	
熱利用	水素定格運転	発電定格運転
水素製造	12 万 N m ³ /hr	9 万 N m ³ /hr
発電	160MWe	200 MWe
温度/圧力	原子炉出口 950℃/ 4~6MPa	
燃料	セラミック被覆粒子燃料	

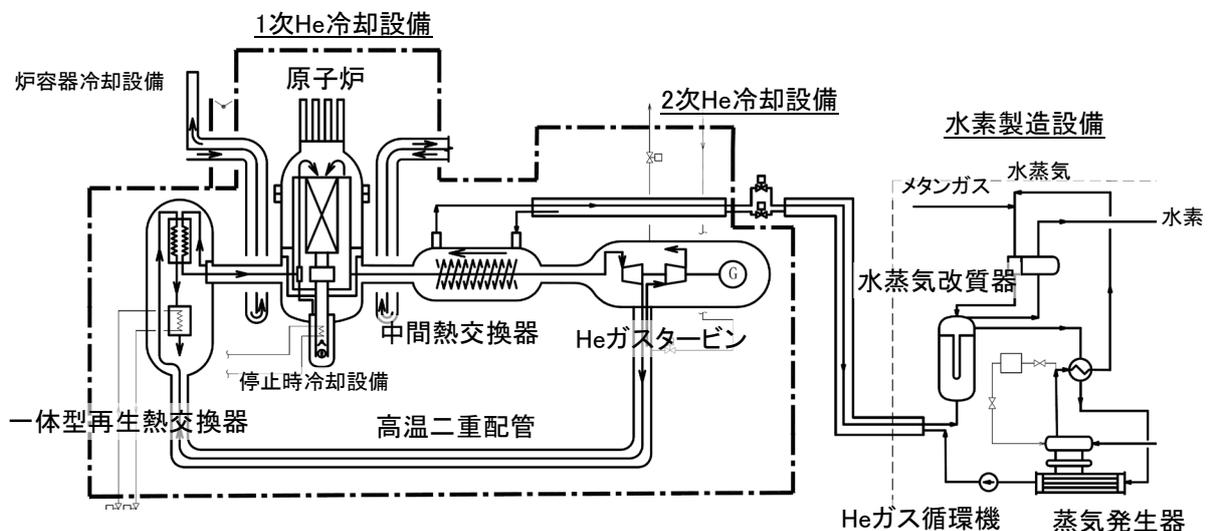


図 1 高温ガス炉コジェネプラントの全体系統構成図

とする水素定格運転と発電を主体とする発電定格運転を設定し、水素製造と発電を調整運転することで負荷変動に追従する。水素定格運転時の水素製造量は、2050年頃に製鉄業界が目指す直接還元製鉄を対象として製鉄に必要となる水素量（400万トンの製鋼に必要となる水素量）を目標とした。発電定格運転では無冷却翼を採用できる温度としてタービン入口温度 850℃を条件とした。2つの定格運転についてヒートマスバランスと炉心や高温機器の特性を検討した。1基当たりの水素定格運転及び、発電定格運転における水素製造量、発電量の評価結果を表1に示す。プラントのイメージ鳥観図を図2に示す。図2では、目標の水素製造量を達成する為に600MWtの原子炉4基、水素製造設備4ユニットの構成とした。

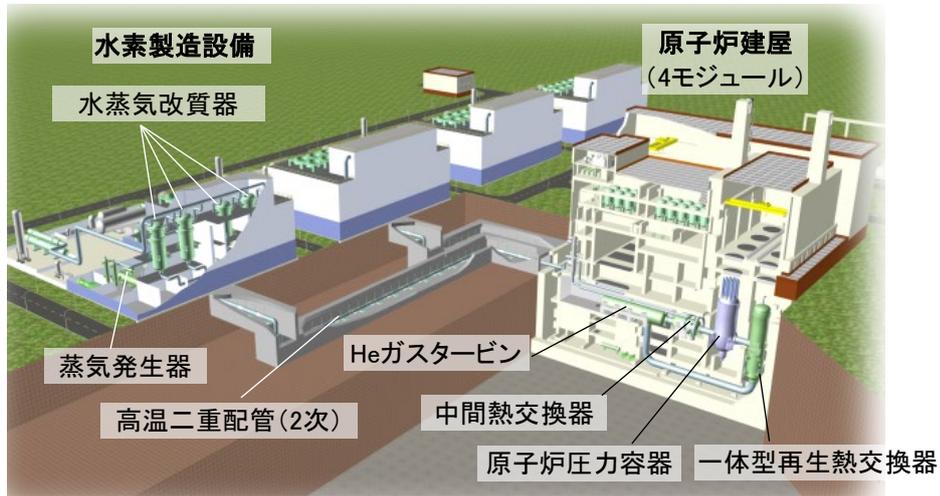


図2 高温ガス炉コジェネプラントの鳥観図

2-2. プラント制御概念

高温ガス炉コジェネプラントでは、プラントの運転計画として原子炉熱出力一定で水素製造と発電量の負荷分担を変更可能な制御概念を目指している。原子炉、ガスタービン、水素製造設備と応答性の異なる3つの設備を考慮しながら運転を行う必要があり、プラント運転制御は複雑となる。図3に電力側負荷変動の一例を示す。日負荷追従運転は、日周期負荷変動に対する計画的な発電機出力の制御方法、AFC運転は、中周期負荷変動に対する中央給電指令所指令に応じた発電機出力の制御方法、GF運転は、小周期負荷変動に対する系統周波数変動に応じた発電機出力の制御方法である。これら周期の異なる負荷変動に応じた、制御概念の構築を進めており、三菱重工では、PWRでプラントの熱流動解析に実績のあるM-RELAP5を用いて、1次ヘリウム系、2次ヘリウム系をモデル化、水素製造設備については2次ヘリウム系の境界条件として図4に示す解析モデルを構築し、制御方法、運転方法の成立性、実用性の検証を進めている。

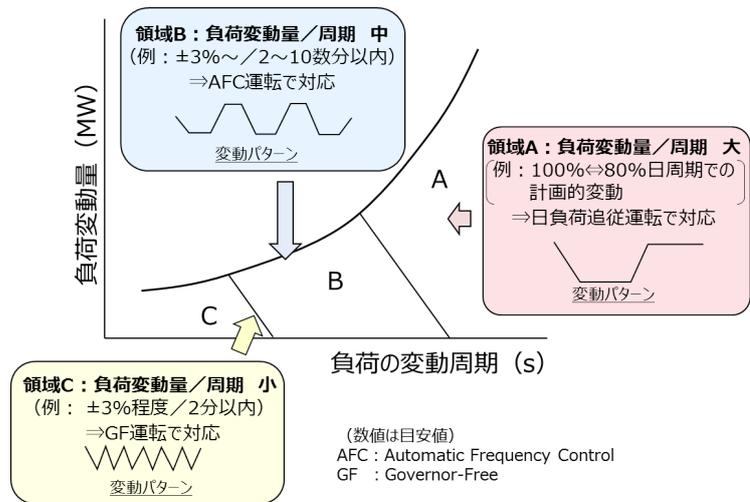


図3 電力負荷変動と対応する負荷運転方法との関係

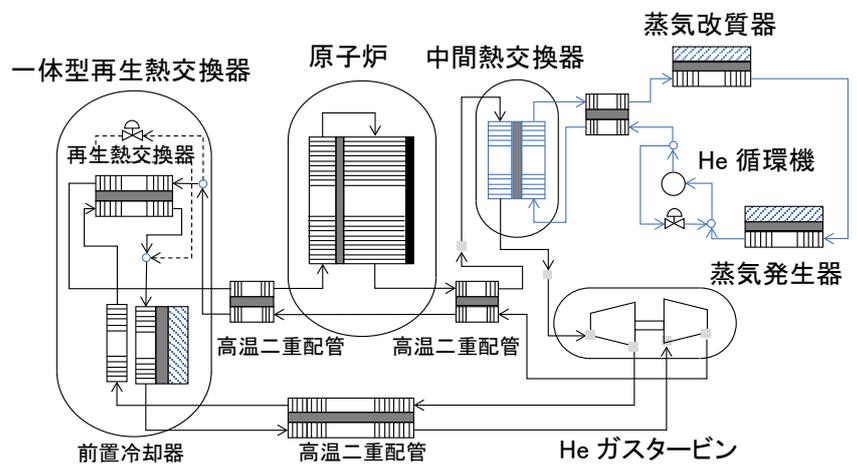


図4 高温ガス炉コジェネプラント解析モデル

2-3. 主要機器概念

高温ガス炉コージェネプラントの1次系の主要機器として、原子炉から水素製造施設へ熱を供給するためのIHX、プラント発電効率に寄与する再生熱交換器が挙げられる。IHXは原子炉出口の超高温に晒されるとともに水素製造と発電のバランスにより運転条件が異なりそれぞれの条件で成立することが求められる。また、ガス/ガスの熱交換器であり伝熱性能が低いため大型化が懸念される。高温のガス/ガス熱交換器としてはHTTRにおいてヘリカルコイル型伝熱管を採用した熱交換器が実証されている。そこで、コージェネプラントにおいてもヘリカルコイル型の熱交換器を基にして、大型化と複数の運転条件で成立する中間熱交換器の検討を進めている。中間熱交換器の概念図を図5に示す。交換熱量約220MWtに対し概略寸法は直径約6.0m、全長約12.2mとなった。再生熱交換器については、交換熱量がさらに大きくなることからこれまで三菱重工業で開発を進めている熱交換密度が大きい細密プレートフィン型熱交換器を採用して検討を進めている。一体型再生熱交換器の概念図を図6に示す。前置冷却器を含めた一体型熱交換器として交換熱量約760MWtに対し、直径約6.7m、高さ約30.5mの外形となった。

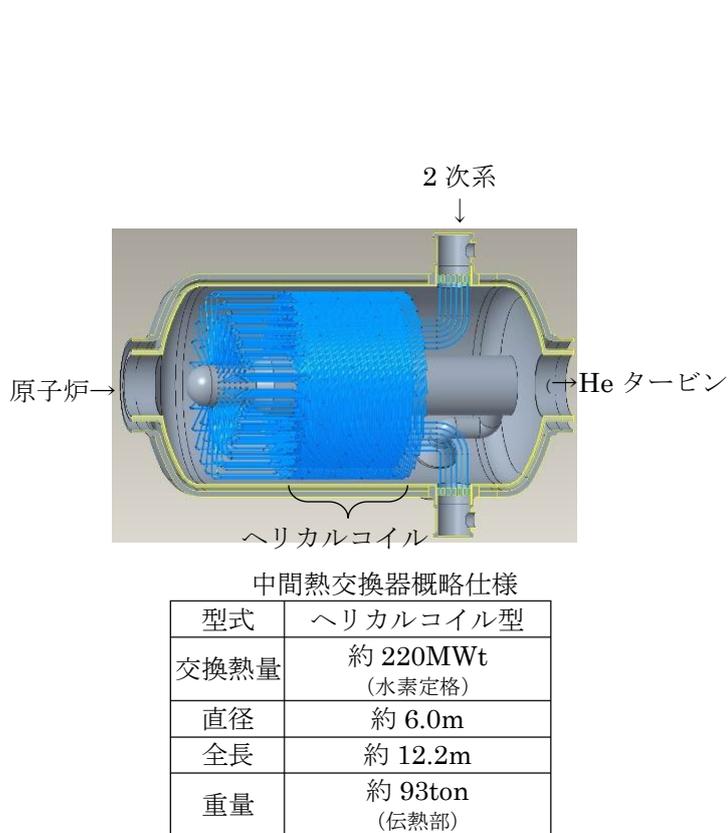


図5 中間熱交換器概念図

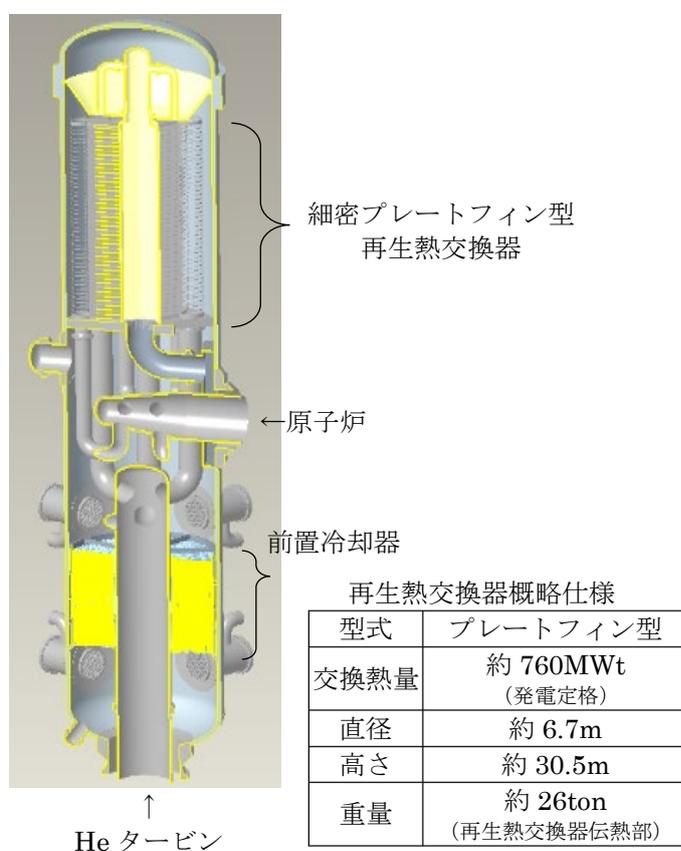


図6 一体型再生熱交換器概念図

3. まとめ

三菱重工業では、炉心溶融のない高温ガス炉コージェネプラントの概念を構築し、水素製造量及び発電量のバランス、水素定格運転と発電定格運転による負荷追従を想定したプラント制御概念、主要機器であるIHX、再生熱交換器の概念構造を得た。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。

*Kazumasa Suyama¹, Kaoru Kurahayashi¹, Takayuki Nakano¹ and Satoshi Yonemoto¹

¹Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.