

第4章 システム別レポート

ガス冷却高速炉（GFR）

ガス冷却高速炉（GFR）システムは、閉じた燃料サイクルの一部に組み込める高温ヘリウム冷却高速スペクトル原子炉を特徴としている。ヘリウムで冷却する GFR は、液体金属冷却高速炉の長期的な代替炉として提案されている。この種の革新的な原子力システムには、いくつかの魅力的な特性がある。ヘリウムは、単相で、化学的に不活性であり、透明な冷却剤である。750°C（通常 800-850°C）を超える高い炉心出口温度は、GFR 技術の付加価値である。

GFR の基準概念は、850°Cの炉心出口温度で動作する 2,400 MWth のプラントであり、3つの中間熱交換器を介して間接的な複合ガス-蒸気サイクルを駆動できる。炉心の出口温度が高いと、高速炉の炉心で優れた中性子経済を実現するために必要な高出力密度で継続的に運転する燃料の性能に厄介な負担が課せられる。これは、GFR システムの開発における最大の課題を意味するものである。予想されるすべての運用条件および障害状態で崩壊熱を確実に除去することは、GFR ではそれほど重要な課題ではない。したがって、商用 GFR の開発では、耐火性燃料要素の認定および GFR 固有の安全システムの本格的な実証のための一種の実験的実証炉を設ける必要がある。実際、ALLEGRO プロジェクトの原子炉は、基準 GIF GFR 概念の実証炉として提案されている。

ALLEGRO ガス冷却高速炉の実証プロジェクト

ALLEGRO プロジェクトの目的は、実行可能性を実証し、燃料、燃料要素、ヘリウム関連技術、特定の安全システム（特に崩壊熱除去機能）などの特定の GFR 技術を認定すると共に、これらの機能が代表的なシステムに正常に統合できることを実証することである。GFR 技術の実証では、GFR 商用原子炉の基本機能を 75 MWth ALLEGRO プロジェクトで試験できることを前提としている。

ALLEGRO のオリジナル設計は、2つの He 一次回路、加圧された円筒形保護容器に組み込まれた 3つの崩壊熱除去（Decay heat removal : DHR）ループから成る（図 GFR.1 参照）。2つの二次ガス回路はガス-空気熱交換器に接続されている。ALLEGRO 原子炉は、GFR 技術実験を行う実証炉としてだけでなく、高速中性子スペクトルがあることにより、燃料や材料の開発、およびいくつかの特別な装置や他の研究作業の試験にも魅力的なものとなる研究施設および工業用途のプロセス熱を生成するための熱交換器で原子炉の高温冷却材を使用する試験パッドとしても機能する。

75 MWth の原子炉は、2つの異なる炉心で運転されなければならない（図 GFR.2 参照）。ステンレス製被覆管に UOX または MOX 燃料を使用した開始炉心は、高度な炭化物（セラミック）燃料を含む 6つの実験用燃料集合体の駆動炉心として機能する。2番目の炉心はセラミック燃料のみで構成され、ALLEGRO を高い目標温度で稼働できるようにする。

欧州連合の中央欧州の加盟国、チェコ共和国、ハンガリーおよびスロバキア共和国は、昔から原子力エネルギーを使用してきた代表的な国である。これらの国々は長期的に原子力を利用するつもりであり、原子炉の寿命延長に加えて、今後数年間で新しい原子炉を建設することをそれぞれ決定している。そのため、Visegrad-4 地域の 4つの原子力研究機関と企業（ÚJV Řež, a.s. – チェコ共和国、MTA EK – ハンガリー、NCBJ – ポーランド、VUJE,

a.s.（スロバキア共和国）は、2010年に署名した覚書に基づいて、第4世代ガス冷却高速炉（GFR）の概念のALLEGRO実証炉の建設と運用を目的とした共同準備を開始することを決定した。2000年以降、フランスのCEAはGFR概念の推進者として、共同準備を支援し、実験用原子炉、特に高速炉の建設と運転において、その知識と経験を提供している。安全性と設計の問題、および中長期的なガバナンスと財務の問題を研究するために、前述の4つの組織は、2013年7月に、ALLEGROプロジェクトの立ち上げに必要な準備作業を行う法人組織V4G4 Centre of Excellenceを設立した。V4G4 Centre of Excellenceは、プロジェクトの国際的な代表も担っている。準備作業の結果、初期の作業での特定の安全性と設計の問題が残ったままであり、いくつかの側面で新しいALLEGRO設計を行わなければならないことが判明した。そのため、ALLEGROプロジェクトが開始された2015年に、新たな工程で詳細な技術プログラムが作成された。

図 GFR1. GFR 原子炉システム

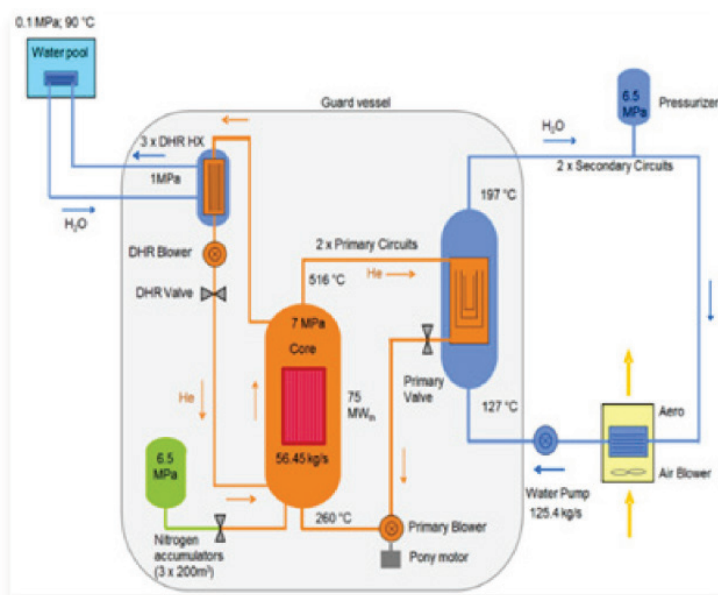
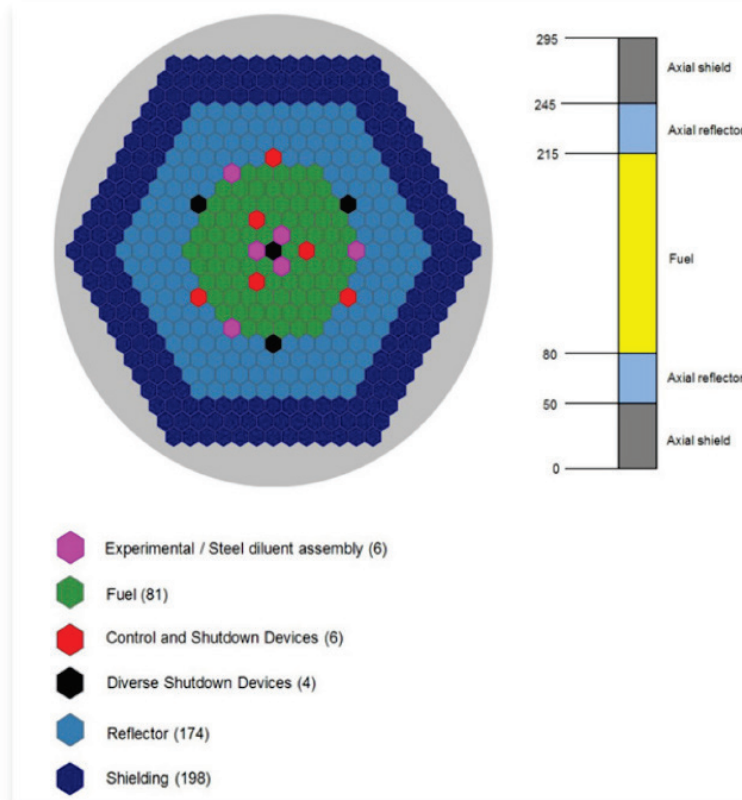


図 GFR 2. GFR 炉心概念



燃料サイクルと燃料

燃料開発の取り組みは、燃料が炉心の設計要件を満たし、炉心が燃料制限内で動作するように、原子炉の設計の取り組みと密接に関連して実施しなければならない。以下のように、革新的な燃料形態を開発するには、技術を進歩させる必要がある。

- 特に事故状況での温度に耐えられるように、熱ガス冷却原子炉の最も望ましい特性を維持する（最高 1,600°C の HTR の場合、ただし GFR の設計と安全性の研究によって確認されている）。
- 高速中性子による損傷に耐え、核分裂生成物の優れた閉じ込めを提供する。
- 増加した重金属含有量に対応する。

燃料と革新的な被覆材の代替形状を調査する必要がある。GFR 燃料の開発までの道のりには、ALLEGRO が複雑に結びついており、反復的なアプローチが必要になる。ALLEGRO の起動炉心は、従来の鋼製被覆管を用いた MOX または UOX 燃料ペレットを考慮するため、独自の設計およびライセンスプログラムが必要になる。ALLEGRO の完全なセラミック検証炉心の反復ステップは、GFR に必要な R&D の欠くことのできない部分である。

すでに特定されている燃料タイプの候補は次のとおりである。

- ALLEGRO 起動炉心の 15-15Ti 鋼製被覆管の UOX および MOX ペレット

- セラミック被覆材の固溶体燃料ペレットを特徴とするピンペレットタイプの燃料。ピンと最終的には集合体が ALLEGRO 開始炉心に導入され、最終的に検証される。

MOX 燃料については重要な情報があり、ALLEGRO スタートアップ炉心を確立するために利用する必要がある。

被覆材になる可能性のあるセラミック（特に SiCf/SiC）および耐熱合金に関するデータは不完全である。これらの材料は、さまざまな負荷（温度勾配、相互作用燃料バリア、動的負荷など）に対処できるように適合させる必要がある。つまり、それらの組成と微細構造には特定の専用の開発が必要である。

高温実験の主な目標は、高温ヘリウム内の 15-15Ti 合金の挙動を調査することである。小型チューブサンプルの試験に加えて、膨張およびバースト実験が高温で実施される。高温処理後の被覆管の耐荷力の変化を調査するために、機械的試験が実施される。SEM と金属組織学を用いて、被覆材の微細構造を調べる。

起動用燃料の認定手順の策定には、高速スペクトルを使用する原子炉での照射および照射済み燃料サンプルの照射後検査を含む、15-15Ti 被覆材を用いた MOX/UOX 燃料の工程が含まれる。

起動炉心の数値モデル開発は、ALLEGRO 起動炉心の燃料挙動をシミュレートするために、高速炉の燃料特性とモデルを用いた「FUROM」コードの拡張に焦点を合わせている。コードの検証は、ナトリウム冷却高速炉の燃料の過去の情報に基づく必要がある。

考えられる変化を追跡するために、高温ヘリウムでの SiC 被覆材の試験が行われる。高温処理後のサンプルを用いて、機械的試験と SEM および金属組織学による微細構造の検査が計画されている。特に、Hi-Nicalon タイプ S ファイバーおよび C ファイバー被覆で観測された有意な体積変化の重要性を評価するために、SiC 複合材料に対するイオン照射の影響が検証される。高線量イオン照射は、SiC 複合材料の GFR 稼働温度を含むさまざまな温度範囲で実施され、SiC 複合材料に対する高線量照射の影響が調査される。

SiC 複合材料の高温酸化挙動の調査は、吸気口を使用した重大事故研究をモデル化するために重要である。さまざまな種類の炭化ケイ素複合材料とモノリシック SiC セラミックが 1,500°C まで酸化される。SiC の表面改質は、酸化挙動の把握に基づいて行われる。

次のトピックが短期的に分析される。

ALLEGRO 原子炉の炉心の設計：

- ERANOS、MCNP、SERPENT 検証済みコードを使用した UOX 炉心の実現可能性調査
- 安全限界と照射能力の両方を満たす原子炉の総出力と出力密度の決定
- 最適な炉心を選択するための選択基準の策定

ALLEGRO 燃料の燃料挙動コードの開発：

- 高速炉材料の材料データの収集
- FUROM コードに必要な原子炉の物理パラメータの導出
- FUROM コードでの高速炉材料データの利用

ALLEGRO 燃料の認定と仕様に関連するタスク：

- ALLEGRO 燃料関連の受け入れ基準
- ALLEGRO の最初の炉心の燃料候補のレビュー
- ALLEGRO に最適なセラミック燃料の成分の選択
- セラミック燃料の認定手順の策定

燃料材料の研究に関連するタスク：

- SiCf/SiC 被覆材料のレビュー
- 高温 He での UOX/MOX 燃料被覆材の試験
- UOX / MOX 燃料被覆材の機械的試験

先進コンポーネントと材料

GFR の炉心内構造材料（被覆材、反射器、制御棒ガイドなど）に関する主な課題は、高温領域とともに高速中性子による損傷に耐えることができる材料を開発することである。したがって、セラミック材料（モノリシック、複合）、またバックアップとして複合サーメット構造、耐熱合金、および金属間化合物が推奨オプションである。さらに、反射器は、中性子漏れを効率的に減らし、周囲の容器を保護するために、特定の中性子特性を備えている必要がある。この段階では、Zr と Si の金属間化合物がこのコンポーネントに適している。

特別な問題と技術

崩壊熱除去機能の向上は、高速または低速の減圧過渡時の補完的なフェイルセーフソリューションの単純でロバストな組み合わせとシーケンスを定義および最適化することを目指すとしている。取り組むべき主なトピックは次のとおりである。

- コアの熱慣性を大きくすること。
- 自然対流を高めるための主要な設計パラメータの最適化。必要なバックアップ圧力の決定。
- DHR システムの最適化
 - 結合された一次-二次ターボ機械
 - 噴射システム、重質ガスアキュムレータ
- 保護容器とシステムの封じ込め



GFR SSC の Branislav Hatala 議長とすべての貢献者