

鉛冷却高速炉（LFR）

序文：この年次報告書内のすべてのシステム別レポートを均一にするために、本章は意図的にページ数を減らしてまとめられている。刊行物の完全なリストを含む 2019LFR システムレポートの完全な拡張版は、GIF Web サイトでアップロードできる。

システムの主な特徴

LFR は、核分裂性ウランの効率的な変換のための高速中性子スペクトルと閉じた燃料サイクルを特徴としている。また、これは自己生成されたマイナーアクチニドおよび軽水炉（LWR）の使用済み燃料の再処理からのマイナーアクチニドのバーナーとして、およびトリウムマトリックスを備えたバーナー/ブリーダーとして使用することもできる。LFR の重要な特徴は、比較的不活性な冷却材を選択することで安全性が向上することである。

GIF が確認しているシステムには、3つの基準概念が含まれている。考えられるオプションは、中央ステーションの発電を目的とした定格 600 MWe の大規模システム（ELFR EU）、中規模のシステム（BREST 300 Russia）、および炉心寿命が非常に長いことが特徴の 10-100 MWe 規模の小型の可搬型システム（SSTAR US）である。各 LFR 基準システムの予想される二次サイクル効率は 42%以上である。これらの 3つの GIF LFR 基準概念は、すべての機能をカバーしている。したがって、遠隔地や孤立した場所から、または相互接続された大規模な発電所として機能するなど、幅広い電力ニーズに応えられる可能性がある。異なる LFR システム間には重大な相乗作用があるため、参加国が実施する取り組みの調整が LFR 開発の重要なポイントとなる。GIF LFR システムの一般的な設計パラメータを表 LFR.1 に要約する。

表 LFR.1 GIF LFR 概念の主な設計パラメータ

パラメータ	ELFR	BREST	SSTAR
炉心出力 (MWt)	1,500	700	45
電気出力 (MWe)	600	300	20
一次システムタイプ	プール	プール	プール
炉心入口温度 (°C)	400	420	420
炉心出口温度 (°C)	480	540	564
第 2 サイクル	過熱蒸気	過熱蒸気	超臨界二酸化炭素
正味効率 (%)	42	42	44
タービン入口圧力 (bar)	180	180	200
フィード温度 (°C)	335	340	402
タービン入口温度 (°C)	450	505	550

R&D 目標

LFR のシステム研究計画（System Research Plan : SRP）は、基準冷却剤としての液体鉛の使用、バックアップオプションとしての鉛ビスマスの使用に基づいている。燃料、材料、腐食制御の R&D のニーズを踏まえると、LFR システムには 2 段階の産業展開（2025 年までに比較的低い一次冷却材温度と低出力密度で稼働する実証用原子炉、およびその後、2040 年までに高性能原子炉）が必要になると予想される。2012 年の GIF LFR PSSC の再編成を受けて、SRP は完全に改訂され、新たな最終草案が作成されている。SRP で採用さ

れているアプローチは、各メンバーエンティティの研究の優先順位を考慮し、不必要な労力の重複を避けながら、各メンバーの目的を達成するための調整された研究プログラムを提案することである。

委員会は、これら 3 つのシステム推進には研究と設計に重要な潜在的共通点があることを強調している。この計画では、基準概念の R&D ニーズに対応できる 1 つ（または複数）のパイロット施設につながる並行経路に沿った調整された研究が提案されている。必要な研究活動が特定され、SRP に記載されている。調整された取り組みは、4 つの主要な領域で編成され、プロジェクト（システム統合と評価（SIA）、先端技術と材料、システムとコンポーネントの設計と燃料開発）として形式化される。

システム統合と評価（SIA）プロジェクト：SIA プロジェクトの最終的な目標は、スケジュールとコストを考慮して、GIF の目的を達成するための LFR システムの実現可能性を確保することである。LFR SIA の活動は、R&D プロジェクトで、個別または共同で、安全性、経済性、持続可能性、拡散抵抗性、および物理的防護の GIF 基準に十分に対応することを保証することを目的とした反復プロセスを通じて行われる。

システムおよびコンポーネントの設計プロジェクト：システム設計活動は、中央ステーションと小規模プラントの予備設計、プロトタイプと実証炉の設計、および安全アプローチ、コンポーネント開発、バランスオブプラントを含む分野横断的活動の調整で想定されている。

燃料開発プロジェクト：LFR 燃料開発プロジェクトは、徐々に野心的な要件を満たすように設計されたタスクで構成される継続的な長期プロセスである。これには、炉心材料開発、燃料製造、燃料照射、および燃料認定を目的とした試験の分野での取り組みが含まれる。並行した SFR 燃料開発との相乗効果は非常に高い。

短期的には、1 つの重要な目標は、実証用原子炉システムに適した早期の段階で燃料を供給できるように、少なくともいくつかの技術的解決策を見つけることである。この「実証用燃料」のマイルストーンの達成は、発電のための安全で競争力のある LFR の実現可能性の保証を提供する。

中期的には、長寿命放射性廃棄物の最小化と燃料サイクルの閉鎖を確実にするために、既定の平衡燃料サイクルの代表的なレベルで高度なマイナーアクチニド含有燃料を使用する可能性を確認する必要がある。したがって、現在の液体金属冷却炉で達成するよりも高い燃料燃焼を達成する可能性を確認することが 2 つ目の目標となる。

長期的には、高度な MA 含有燃料の産業展開の可能性、および高温に耐えることができる燃料を使用して鉛（マージンから沸騰）の利点を活用し、発電所の効率を高め、高温の熱を生成できる可能性を確認することが重要である。この「高度な高温燃料」のマイルストーンの達成により、LFR 技術の持続可能な多目的機能を実証する。

先端技術と材料プロジェクト：短期的には、利用可能な材料を最大限に活用し、それによって新しい環境だけに材料認定活動を制限する必要がある。原子炉の実現可能性を確立するには、LFR がかなり腐食性/侵食性の運用条件に耐えることができる技術的に実行可能な構造材料を提供する必要がある。中長期的には、鉛の高い沸点が原子炉の高温運転に有利であり、LFR ミッションをより高い効率のサイクルと水素製造に拡張する。これらのミッションでは、機械部品と燃料被覆の両方で新しい材料を開発するか、既存の材料（コー

ティング)を保護するための工業プロセスを開発する必要がある。これらの材料開発には時間がかかり、投資や技術的成果に応じて柔軟な工程で実施される。LFRに特有の開発は、高中性子線量(燃料燃焼度の増加)および高温(冷却水温度と出力密度の増加)に耐性のある燃料被覆材の開発である。

主な活動と成果

2019年、LFR pSSCは、2020年に発行される予定のいくつかのGIFレポートの草案作成または改訂に強く関与してきた。

- LFR - システム安全性評価 (SSA)。RSWG と協力して、最初の SSA レポート草案が 2018 年 12 月に完成し、2019 年に GIF の専門家に送られた。最終合意を得たレポートは 2020 年初頭に発行される。
- LFR - 安全設計基準 (SDC)。2019 年、LFR pSSC は、RSWG メンバーから受け取ったコメントに基づいて、SDC レポート草案 (LRF の補正) に取り組んできた。同レポートは更新され、完成した。これは 2020 年初頭に RSWG に返送される。
- LFR - PRPP 白書。PRPP の最初の草稿は、PRPPWG と協力して作成された。2019 年 12 月の専門会議の後、LFR pSSC が現在、同文書を完成に向けて作成している。2020 年に発行される予定である。

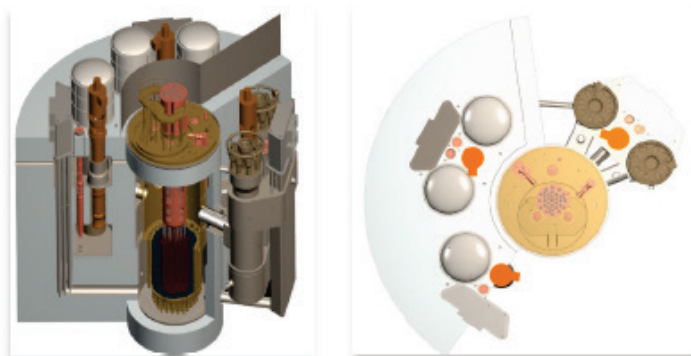
LFR - pSSCは、研究インフラに関するGIFタスクフォースとも積極的に協力しており、先進製造タスクフォース (AMME) に情報を提供している。最後に、LFR - pSSCは、最初に2018年2月にUSDOEのLFR-MoU署名によって拡大され、次に2019年10月に(中国科学院に代わり) INESTの署名によって拡大された。

ロシアでの主な活動

BREST-OD-300 高速中性子鉛冷却原子炉 (図 LFR 2 参照) が、将来の原子力発電用にベースライン商用原子炉施設のパイロットおよび実証プロトタイプとして開発された。BREST-OD-300 原子炉は以下を目的としている。

- 閉じた核燃料サイクルの一部として稼働する鉛冷却原子炉施設で使用される主な設計アプローチおよび固有の安全概念の基本原則の実証的な確認
- 将来の商用鉛冷却原子炉の原子炉部品耐久性の段階的な適正証明
- 発電

図 LFR2. BREST-OD-300 原子炉



LFR 固有の安全性の背後にある基本原理は、組み込まれた燃料、冷却材、構造材料の好ましい固有の中性子および物理化学的特性の優先的な使用、およびそれらの特性で、重大事故クラス（制御できていない出力異常上昇や除熱機能喪失）を完全に防ぐことを可能にする設計ソリューションから成る。BREST-OD-300 原子炉の出力レベルは、関連する設計概念を将来のより大きな出力の原子炉設備の基準として使用する可能性を考慮して選択されている。

炉心の設計では、ウラン-プルトニウム窒化物の混合燃料（燃料被覆材としての低膨潤性フェライト/マルテンサイト鋼および炉心隔壁の無い燃料集合体に含まれる燃料要素）を使用している。選択された高密度窒化物燃料は、鉛冷却材と組み合わせて、一定の低い反応度マージンで炉心内の核分裂性物質の完全な増殖を可能にする。したがって、原子炉稼働中の急速または大きな中性子出力の変動を防げる。

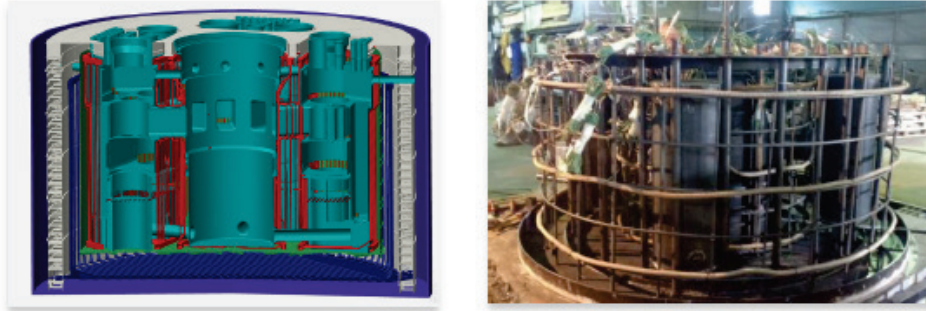
これまで、高密度窒化物燃料技術は、試験プロセスラインに組み込まれてきた。BREST-OD-300（つまり、燃料製造および再製造モジュール）の技術プロセスが改善され、工業生産が行われている。燃料と構造材料の有用性を確認するために、BN-600 原子炉と BOR-60 研究炉で燃料要素が試験されている。BN-600 および BOR-60 での燃料要素への照射の一部が完了し、照射後試験（Post-Irradiation Examination : PIE）が実施されている。これらは原則として燃料の有用性を確認する。これまでに達成された最大燃焼度は-7.4%の重原子（h.a.）である。これらの PIE からは、燃料コードの検証に必要な結果が得られている。照射下での燃料要素の挙動は、原理上、試験前の分析的予測を満たしている。得られたデータは、運転の初期段階のパラメータ（6% h.a.の燃料燃焼）までの BREST 燃料要素の安全な運用の実現可能性を示している。

本格的なモックアップが、あらゆるタイプの燃料集合体、反射器、遮蔽ブロック用に製造されている。水および液体鉛の水圧および振動試験が実施された。新たな炉心計算に必要なデータが得られた。

認定コードを使用して行われた中性子計算から、BREST-OD-300 炉心寿命の反応度マージンが 0.45-0.68 β_{eff} の範囲にあることが示されている。この反応度マージンは、燃料製造の経験（製造精度は 1.2% $\delta K/K$ ）から確保でき、IPPE の BFS ベンチで窒化物燃料を含む中性子特性研究が実施された（推定誤差は 0.7% $\delta K/K$ ）。

BREST-OD-300 原子炉で使用される特定の設計概念には、一体型レイアウト、一次回路に遮断弁がないこと、パッシブおよびアクティブ-パッシブの安全関連デバイスおよびシステムの使用が含まれる。多層金属コンクリート容器と組み合わせた一体型レイアウトは、鉛冷却の喪失による事故を防ぐ。金属コンクリート容器の強度と有用性（図 LFR 3）は、中型の金属コンクリート構造（最大 7 m の一般的な寸法）を試験して得られたデータに基づいてその正当性が実証されている。作業温度および照射下での HT コンクリートグレードの特性を判断するための試験が実施された。コンクリートに対する冷却剤の化学的不活性が示され、計算手順が検証された。

図 LFR3. 原子炉容器計算モデルとモックアップ



BREST-OD-300 は、コイル状の熱交換器を備えた液中型貫流蒸気発生器がある。熱交換管の材料にはシリコン含有オーステナイト鋼が使用されている。1本の管の破裂によって引き起こされる管の従属故障を研究するために実験が行われた。実際の条件（温度、圧力）をシミュレートした鉛冷却材条件下での実験結果は、従属故障を示していなかった。熱交換管を菅板に取り付けるアセンブリの有用性（図 LFR 4 参照）は、モデルに熱を負荷する 1,000 サイクル（540℃まで加熱、220℃まで冷却）に基づいて確認された。溶接および管の金属の研究からは、許容できない欠陥は見つかっていない。

図 LFR4. 菅板に熱交換管を取り付けるアセンブリの試験



主循環ポンプ（Main Circulation Pump : MCP）は、電気駆動の軸形の垂直型である。流路は、水と鉛のテストベンチで最適化されている。必要なヘッド（流量特性）は、30～100%の範囲でポンプの動作を保証するために得られている。実物大の MCP 下部ベアリングは、液体鉛の耐久性について設計および試験が行われている。下部ラジアルベアリングのステーターとローターの 4 回の間停止で、損傷は検出されなかった（設計寿命の 30% が達成された）。有用性はポジティブであると予測されている。

原子炉施設条件の放射線の安全性は、鉛を使用した炉外および炉内実験の結果から得られたデータに基づいている。実験が完了し、さまざまな温度（最大 680℃）での冷却材からの活性化および核分裂生成物の放出と輸送を正当化する依存関係が断定された。放射線安全分析の結果によって、複数の不具合（例えば、原子炉の緊急停止による電力供給の喪失、完全な反応度挿入）を伴う予想される運用上の不具合発生中に、敷地外への人々の避難および再定住の必要性を含む、目標指標の実現を確認した。計算結果は、完全な反応度挿入を伴うシナリオにおける複数の不具合が伴うと予想される運用で、原子炉から初日に放出された FP は $4.3 \cdot 10^8 \text{Bq}$ 以下（つまり、通常運転中の許容される毎日の放出基準レベルを

超えない) である。BREST-OD-300 を使用した NPP での炉心損傷の確率は、 $8.6 \cdot 10^{-9}$ /年を超えないため、このようなタイプの原子力ベースの原子炉の許容レベルの安全性を確保できる。

原子炉施設は、ロシアの核規制文書に規定されている基本要件に従って詳細な設計が行われた。鉛冷却原子炉の特性を考慮に入れた一連の基準と規制文書は、詳細な設計と R&D のパフォーマンスと並行して策定されている。現時点では、受領したコメントに基づいて連邦基準と規則が更新され、Rostekhnadzor に送られている。研究からは、BREST-OD-300 の概念は、その競争力を確保しながら、大規模な商用原子炉施設で使用できることが示されている。BREST-OD-300 原子炉の設計は、Glargosexpertiza の肯定的な結論を受け、現在 Rostekhnadzor とのライセンス供与の過程にある。

日本での主な活動

LFR の基本的な実験的および理論的研究は、東京工業大学が実施している。液体重金属冷却材 (heavy liquid metal coolant : HLCM) の化学的制御と材料適合性に関する実験的研究が行われている。構造用コンクリート材料と HLCM の化学的適合性は、LFR の開発にとって、特に冷却剤の漏れ事故の場合に重要なトピックである。さまざまなセメント材料と液体 Pb および Pb-Bi との化学的適合性が、773 K での腐食試験で調査された。さまざまな水/セメント比のポルトランドセメントで作られたクーボン試験体を準備し、Pb および Pb-Bi に 250 時間の静的状態に入れ、試験後、セメント試験体と液体金属との化学的相互作用を分析した。その結果は、HLCM とセメントとの化学的相互作用が限定的であることを示した(わずかな化学的相互作用と物質移動のみ)。これらの化学的挙動は妥当であり(セメント材料はこの温度で HLCM 内で熱力学的に安定している)、これらの結果は、冷却剤限度としての構造用コンクリートの可能性を示している。

理論的研究で、革新的な LFR の概念が研究されている。鉛合金の使用は、高速炉で優れた中性子経済を提供することができる。鉛合金の魅力的な特徴を生かして、ブリードバーン原子炉の新しい概念の研究が開始されている。この原子炉の新しい概念は、従来の原子炉の設計に基づいている。原子炉は、平衡状態になったら、燃料として天然ウランまたは劣化ウランのみを必要とする。平衡状態で炉心の燃焼領域を動かすことなく、燃料の高い燃焼を達成することが可能である。

Euratom での主な活動

2019 年 6 月、欧州委員会 (EC) は、ルーマニアの研究革新省および原子力研究所 (Ministry of Research and Innovation of Romania and the Institute for Nuclear Research : RATEN-ICN) と共同で、Pitesti (ルーマニア) で FISA 2019 および EURADWASTE '19 会議を開催した。会議には約 500 人の利害関係者が集まり、第 7 回会議および Horizon 2020 Euratom Research and Training フレームワークプログラム (Framework Program : FP) の一環として実施された、約 90 のプロジェクトの進捗状況と主要な成果が発表された。その骨組みでは、ALFRED インフラに関する FALCON コンソーシアムが主催するサイドワークショップが多数の参加者を魅了し、液体重金属技術の R&D の状況と欧州の LFR 検証路のロードマップについての議論を刺激した。

Euratom R&D プロジェクトに関しては、すでに実施されている LFR 技術と第 4 世代燃料に関連した主なプロジェクトは、GEMMA、M4F、INSPIRE、および LFR SMR INERI プロジェクト (JRC と US DOE が関与) である。LFR では、受動的な安全凍結防止に関連

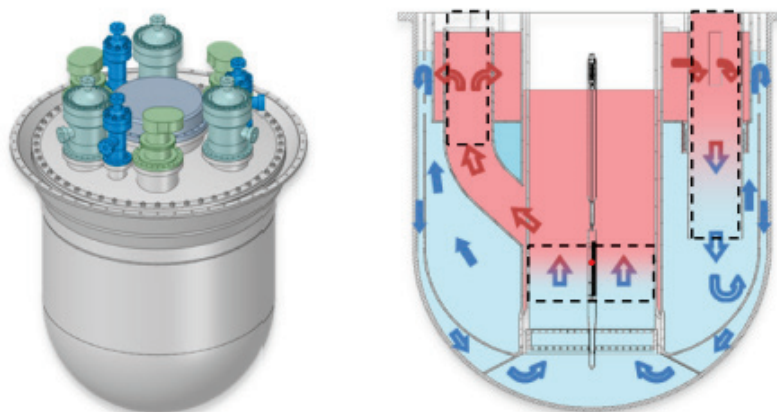
する PIACE という名の新しいプロジェクトが開始された。このプロジェクトは、Brasimone の ENEA 研究所で発足ミーティングが行われ、現在実行中であり、2020 年以内いくつかの実験結果が提供される予定である。

2018 年の終わりに、MYRRHA は、ADS システムに LBE 技術を取り入れるロードマップを策定した。ベルギーは、2019-2038 年の期間において次のように 5 億 5,800 万ユーロを割り当てた。

- フェーズ 1 に 2 億 8,700 万ユーロ : 2019-2026 年の MINERVA (最大 100 MeV の線形加速器、4 mA +陽子ターゲット施設/ PTF I) の建設
- フェーズ 2 および 3 に 1 億 1,500 万ユーロ : フェーズ 2 は最大 600 MeV の加速器の第 2 セクションの設計および R&D、フェーズ 3 は LBE 冷却未臨界炉に関連するさらなる設計およびライセンス供与活動に充てられる (2019-2026 年に実施)。
- 2027-2038 年の MINERVA の運用と実験に 1 億 5,600 万ユーロ

ALFRED プロジェクト (LFR European demonstrator) に関しては、FALCON コンソーシアムは 2018-2019 年に重要な一歩を踏み出した。最初に、設計レビューの主要段階が完了し、一重壁の差込み管を使用する 3 つの蒸気発生器 (steam generator : SG)、2 番目の崩壊熱除去 (DHR) システム用の 3 つの専用ディップクーラー、および 3 つのプライマリポンプ (primary pump : PP) から成る新たなシステム構成が定義された。ホットプールとコールドプールを定義し、容器の温度成層を完全に排除するための一次流路を特別に配置することで、一次システム構成にさらに変更が加えられた (強制および自然循環条件の場合)。新しい構成とその主な特性を次の図 LFR.5 に示す。DHR-1 は、蒸気発生器 (3 機) に接続され、PIACE プロジェクトで研究されている凍結防止システムを備えた非常用復水器で構成されている。同様のシステムが、二重壁の差込み管を使用してディップクーラーに接続された DHR-2 システムにも使用される。

図 LFR5. ALFRED 一次システムの流路構成と外観図



FALCON コンソーシアムは、ALFRED 開発に関連する現物支給での技術活動の支援をいとわないいくつかのパートナーとの覚書に署名し、コミュニティおよび ALFRED プロジェクトを拡大した。FALCON コンソーシアムは、ALFRED の運用とライセンス供与に関しても重大な決定を下した。代表的な環境での材料に関する既知の限度に適切に対応するために、段階的な方法を使用して運用とライセンス供与の両方にアプローチすることが決定された。このアイデアは、一定の一次質流量と増加する電力レベルを特徴とする段階的アプローチに従い、最大リード温度の増加をもたらすものである。

- 第1段階（低温）：実証済みの技術、実証済みの材料、酸素制御、低 T°、および高温燃料集合体（Fuel Assembly：FA）を使用して、専用の被覆材の炉心内の判定を行う。
- 第2段階（中温）：FAの交換が必要であるが、高温での炉心内の判定に、同じ SG と PP、および Hot FA を使用する。
- 第3段階（高温）：性能を向上させるための主要コンポーネントの交換。これは、LFR の初号機（First-Of-A-Kind：FOAK）の条件を表している。

各段階は、以下の段階で実行される運転を条件づけるために使用される。運転の各段階は個別にライセンスを取得する必要があるが、前段階で得られた信頼を生かすと、ライセンスプロセスを続行できることが期待される。次の表に、想定される段階的アプローチの主なパラメータを示す。

表 LFR2. ALFRED の段階的アプローチの主なパラメータ

通常運転（全出力）	単位	段階 1	段階 2	段階 3
熱出力	MW	100	200	300
炉心入口温度	°C	390	400	400
炉心出口温度	°C	430	480	520
揚程	MPa	0.15	0.15	0.15

2019年、ルーマニア政府は、「ルーマニアのALFREDインフラ開発の準備活動」に特化したプロジェクトの枠内で、250万ユーロをRATEN-ICN（ルーマニア研究所）に資金提供した。このプロジェクトは2019年9月から2020年11月までの15ヵ月間続く予定である。RATEN-ICNはまた、プロジェクト「ALFRED - ステップ 1、実験的研究支援インフラ：ATHENA（鉛プール型施設）およびChemLab（鉛化学実験室）」でルーマニア政府からの提案の要請に応えた。

2019-2020年のEuratom Fission Call for H2020プロジェクト案では、1億3,390万ユーロの予算が割り当てられた。LFRに関連する分野でいくつかのプロジェクト案が提出された。選択されたプロジェクトは2020年半ばまでに開始される予定である。最後に、SESAME Euratomの共同プロジェクトは、ワークショップと液体金属の熱水力学的側面に特化した書籍の発行し、2019年に終了した。

韓国での主な活動

韓国では、LFRの優れた安全性、非常に長い燃料交換間隔、およびLFRの経済的可能性の利点を生かし、LFR R&Dが船舶推進と宇宙電力開発に向けられている。1996年にソウル大学（Seoul National University：SNU）で最初の研究が開始されてから、科学情報技術省（Ministry of Science, Information and Technology：MSIT）の支援を受けて、LBEによって冷却された燃料無交換船舶推進原子炉の4年間の概念設計開発を実施するために、マイクロ原子力エネルギー研究検証アリーナ（Micro Nuclear Energy Research and Verification Arena：MINERVA）という名前の新しい大学コンソーシアムが結成された。蔚山科学技術大学（Ulsan National Institute of Science and Technology：UNIST）は、SNU、韓国科学技術院（Korea Advanced Institute of Science and Technology：KAIST）、慶熙大学、蔚山大学、KEPCO国際原子力大学院（KEPCO International Nuclear Graduate School：KINGS）、およびMoojin-Keeyeon Companyの参加するMINERVAコンソーシアムを主導している。韓国のLFRプログラムには、現在以下の2つの主要目的がある。

- 欧州と北東アジア諸国（韓国を含む）間の民間船の CO2 排出量を最大 40%削減することにつながる北極海航路（Northern Sea Route : NSR）の航行を可能にする砕氷船を含む、船舶推進用のマイクロモジュール炉。気候変動を改善するための国際海事機関（International Maritime Organization : IMO）の決議を支持して、これをコンテナ船とばら積み貨物船に拡大させることが想定されている。
- 核廃棄物変換中に生成されたエネルギーを使用した持続可能な発電に関する技術開発要件は、安全性の向上に向けて改変されている。

最初の目標を達成するために、MicroUranus と呼ばれる燃料無交換マイクロモジュール炉が、URANUS を基準として MINERVA コンソーシアムによって設計された。MicroUranus は、ポニーポンプの助けを借りたコンパクトな炉心や特有の自然循環などの革新的な機能を備えており、その炉心寿命は、燃料を交換せずに砕氷船やコンテナ船のライフサイクル全体をカバーできる最大 40 年である。MicroUranus の電力定格は、15MWe から 30MWe の範囲で最適化されている。腐食を含む老朽化現象に耐えられる反応器システムの信頼性を保証するために、傾斜機能複合材料 (Functionally Graded Composite : FGC) の使用が想定されている。この材料開発の一環として、研究者グループが 3 次元有限要素解析 (Finite Element Analysis : FEA) を使用して FGC 管のピルガー圧延プロセスを設計した。

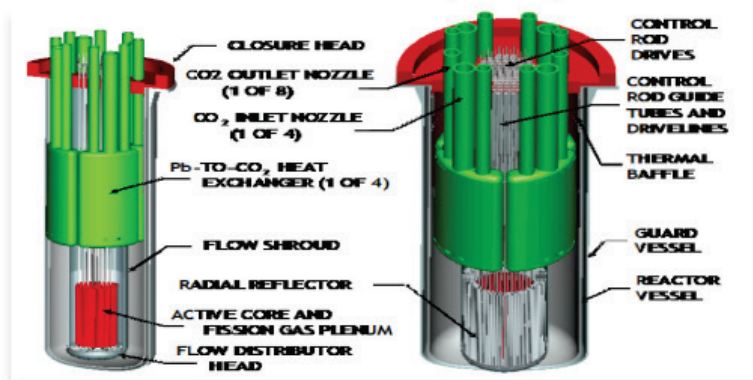
2 番目の目標を達成するために、韓国で初めて、長寿命の廃棄物を短寿命の低中レベルの廃棄物に変換する LFR ベースのバーナー PEACER (Proliferation-resistant Environment-friendly Accident-tolerant Continual energy Economical Reactor : 核不拡散、環境型、事故耐性、持続的及び経済的原子炉) が開発された。2008 年、韓国の科学技術省 (Ministry of Science and Technology : MOST) は、長寿命の廃棄物変換の技術として SFR を選択した。最近、韓国の核変換に関する LFR R&D は、ソウル大学校と UNIST が参加する成均館大学校が主導のコンソーシアムによって TORIA (Thorium-Optimized Radioisotope Incineration Arena : トリウム最適化放射性同位体焼却アリーナ) として指定された ADS 駆動の Th ベースの核変換システムに向けられた。どちらの目的でも、大規模な試験ループが材料と熱水力試験およびモデルの基準評価に採用されている。韓国初の大規模 LFR 試験施設である HELIOS は、SNU から MINERVA が主導する UNIST に移転した。SNU では、2018 年から PILLAR (Pool-type Integral Leading test facility for lead-alloy-cooled small modular Reactor : 鉛合金冷却小型モジュール炉用のプール型統合リーディング試験施設) と呼ばれる URANUS モックアップが設計、製造、運用されている。

米国での主な活動

米国では 1997 年から LFR の概念と技術に関する研究が行われている。これまでの活動には、原子炉の概念設計に加えて、鉛の腐食と熱水力試験、鉛での使用又は LBE 環境に適した先進材料の開発と試験が含まれていた。米国での現在の LFR 活動は限定的であるが、国立研究所、大学、および産業部門での過去および現在の取り組みは、LFR 技術への継続的な関心を示している。原子炉の設計概念に関して、特に重要なのは、長期にわたりアルゴンヌ国立研究所 (ANL)、ローレンス・リバモア国立研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory : LLNL) などの組織が実施した、図 LFR 6 に示す小型の安全に運搬可能な自律型原子炉 (Small, Secure Transportable Autonomous Reactor : SSTAR) の過去の開発である。SSTAR は小型モジュール炉 (SMR) であり、運搬可能で密閉された原子炉システムで、20 MWe/45MWt を供給することができる。いくつかの注目すべき特徴には、

稼働および停止の両方の熱除去を自然循環に頼ること、原子炉全体またはカセットの燃料交換による非常に長い炉心寿命（15～30年）、革新的な超臨界 CO₂ ブレイトンサイクル電力変換システムなどがある。この概念は、GIF LFR pSSC の 3 つの基準設計の 1 つを表している。この概念は現在開発中ではないが、LFR の小型/超小型サイズのカテゴリを表すために、pSSC が基準システムとして維持している。

図 LFR 6. ALFRED 小型の安全に運搬可能な自律型原子炉 (SSTAR) のイラスト



SSTAR 原子炉設計の取り組みに加えて、LFR に関連する過去の国立研究所の取り組みには、Delta Loop を備えたロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory : LANL) での鉛および鉛合金の性能と材料適合性の研究活動がある。この施設はその後閉鎖された。

現在の国立研究所の活動には、概念設計、先進材料開発と性能研究、および蒸気発生器の状態を監視するための機器が含まれ、産業界から Westinghouse、Hydromine および Columbia Basin Consulting Group (CBCG) が参加し、主にオークリッジ国立研究所 (Oak Ridge National Laboratory : ORNL) およびパシフィックノースウェスト国立研究所 (Pacific Northwest national Laboratory : PNNL) の USDOE GAIN (原子力技術革新加速ゲートウェイ) プログラムで産業と政府のパートナーシップとして実施されている。米国の産業部門では、現在の LFR 原子炉イニシアチブに、上記の 3 社が含まれている。Westinghouse Corporation は、新しい先進 LFR システムを設計および商品化するための継続的なイニシアチブを維持している。Hydromine, Inc. は、200 MWe サイズ範囲の LFRAS-200 (アンフォラ型) に識別される新しい LFR 原子炉の概念と、より小型 (マイクロ原子炉) のシステム群を開発しており、CBCG は LBE 原子炉概念の新しい概念設計を開発している。

Westinghouse LFR は、設計の初期段階から設計に組み込まれたシンプルでロバストな設計、パンプセーフティ、ライフサイクル要件を通じて、最も困難なグローバル市場でも経済競争力を高めることを目指している。これは 950MWt (~450 MWe) の原子炉であり、技術実証用の低電力プロトタイプユニットから開発されている。同原子炉は、ハイブリッドのマイクロチャネルタイプの熱交換器を使用して容器のサイズ/重量を削減し、熱エネルギー貯蔵システムを利用して、炉心の熱出力の変動を最小限に抑えて負荷追従性を提供する。さらに、これは究極のヒートシンクとして空気を使用する超臨界 CO₂ 電力変換システムを備えている。プロトタイプユニットは、550℃未満の温度に維持された純鉛冷却材と酸化燃料を使用する。プロトタイプの実証段階の後、先進燃料と高温が実行される。

Hydromine の LFR-AS-200 コンセプトは、コンパクトな 200 MWe LFR であり、純鉛の

有利な特性を冷却材として利用して、コンポーネントの排除やその他の設計の最適化により、高度なコンパクト化 (<1m³プライマリシステムボリューム/MWe 出力) が実現されている。このコンパクトさの測定基準は、以前に設計された、または現在設計段階にある他の金属冷却高速炉よりも 2~5 倍低いと推定されている。この 200MWe の概念に加えて、Hydromine は、同様のコンパクトさを備え、設計が簡素化された LFR-TR-X 系として知られる非常に小さな (マイクロ) 原子炉 (5~20 MWe) 系の開発も想定している。これらの設計では、制御棒と停止棒が炉心の外側に配置されており、原子炉は燃料交換することなく 15 年間継続して運転することができる。LFR-5 は、稼働温度が低く、適格な材料を使用しているため、短期的に展開される可能性がある。

CBCG は、統合グリッドスケールバッテリー概念として負荷追従機能を備えた原子力発電所の設計を開発することにより、クリーンエネルギー生産への統合アプローチを採用している。この原子力発電所とグリッドバッテリーはどちらも CBCG による新しい設計である。これは、統合された施設として組み合わせると、原子力発電所がベースロード運転を続けている間、需要負荷の変動はバッテリーによって調整されるものである。この原子力発電所は、高速炉スペクトルで運転する LBE 冷却材を使用している。最初の取り組みは、ライセンス供与と規制の要件に焦点を合わせている。進行中の研究の一環として、CBCG は、この技術に関連する主要な放射線放出の危険性を排除することにより、格納容器の建設要件と敷地外への放出の可能性を低減するポロニウム低減システムを開発している。

中国での主な活動

2019 年 2 月、中国科学院 (Chinese Academy of Sciences : CAS) の INEST が、中国科学技術部による第 4 世代国際フォーラムの鉛冷却高速炉 (LFR) プログラムの中国代表に任命された。この役割において、INEST は中国の国内組織の GIF LFR 活動フレームワークを調整する。2019 年 10 月 18 日、INEST は、中国に代わって LFR 覚書 (MoU) に署名した。

中国政府は、1986 年以降、CAS、科学技術大臣、NSF によって、鉛冷却炉技術を開発するための継続的な国家支援を提供してきた。鉛冷却炉に関する過去 30 年間の研究に続いて、中国鉛冷却炉 (China Lead-based Reactor : CLEAR) が ADS と高速炉システムの両方の基準原子炉として選択され、プログラムは CAS の INEST/FDS チームによって実施されている。CLEAR の活動は、原子炉の設計、原子炉の安全性評価、設計と分析のソフトウェア開発、鉛ビスマス実験ループ、主要な技術とコンポーネントの R&D 活動である。

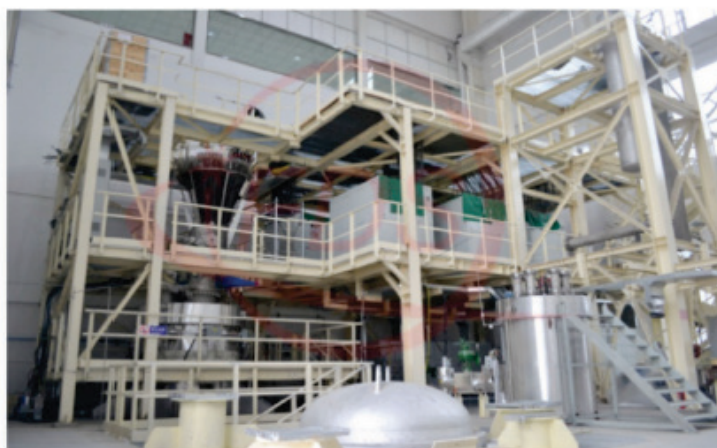
鉛冷却炉に関連する政府によるいくつかの「第 13 次 5 カ年」計画が発表されている。小型のモジュール式エネルギー供給システムの構築を目的とした CLEAR-M プロジェクトが開始された。出力が 10MWth の最初のプロトタイプミニ原子炉 CLEAR-M10a の工学的設計が実施された。CLEAR-M の工学的および商業的応用を促進するために、鉛冷却炉産業革新聯盟 (China Industry Innovation Alliance of Lead-based Reactor : CIALER) と小型鉛冷却炉国際協同組合同盟 (Co-operative Alliance for Small Lead-based Fast Reactor : CASLER) が設立され、INEST が両者を主導し、100 社以上の企業から支援を受けている。また、関連する工業団地の建設が開始された。

ADS システムについては、いくつかの概念と関連技術が評価中である。たとえば、未臨界・臨界デュアルモード稼働の稼働能力を備えた MA 核変換を最終目標とする CLEAR-I の詳細な概念設計が完了した。エネルギー生産のために、高度な外部中性子源駆動の進行波炉としての革新的な ADS 概念システムである CLEAR-A が提案された。加速器と組み合わせた 10MWth の未臨界実験用 LBE 冷却炉の建設を目的とした CiADS プロジェクトが承

認められ、予備的な工学設計が進行中である。このプロジェクトは、CAS と他の産業組織の協力によって実施された。

中国の鉛冷却炉プロジェクトをサポートし、鉛冷却炉の主要コンポーネントと統合された運転技術を検証および試験するために、鉛冷却の工学検証原子炉 CLEAR-S (図 12 LFR.7 参照)、原子炉核設計検証用の HINEG 中性子発生器と組み合わせた鉛冷却のゼロ電力臨界/未臨界原子炉 CLEAR-0、および鉛冷却の仮想原子炉 CLEAR-V を含む 3 つの統合試験施設が 2017 年から建設され、試運転されている。2019 年には、プール型 CLEAR-S 施設をベースとした流量損失ベンチマーク試験が準備され、2020 年に実施される予定である。

図 LFR 7. 鉛冷却の工学検証原子炉 CLEAR-S



近年、他のいくつかの組織が LFR 開発に対する注目を高め始めている。中国広核集団 (China General Nuclear Power Group : CGN) は、CLFR 原子炉の概念設計と関連する研究を行っている。中国核工業集団 (China National Nuclear Corporation : CNNC) は、コアニュートロニクス特性試験などの LFR 技術を開発しています。国家電力投資集団 (State Power Investment Corporation : SPIC) は、100 MWe BLESS 原子炉の概念設計に焦点を当てている。西安交通大学 (Xi'an Jiaotong University : XJUT)、中国科学技術大学 (University of Sciences and Technology of China : USTC) などのいくつかの大学は、中国の LFR 開発を支援するために、材料試験、熱水力分析、安全性分析などを含む基本的な LFR 技術の R&D を行っている。

2019 年 12 月、GIF LFR の国内調整会議が INEST で開催された。LFR R&D に携わった 10 を超える中国の組織の代表者がこの会議に出席した。国内の LFR 共同ワーキンググループが提案され、INEST が中国の関連組織および活動の参加と協力を調整するワーキンググループのリーダーの候補となった。



LFR SSC の Alessandro Alemberti 議長とすべての貢献者