

新型炉部会 企画セッション 高速炉の国際会議FR26報告

[2K_PL02]

(2) 各国の高速炉に関するシミュレーションと 試験による技術開発状況

※ホームページでの公開に伴い、著作権の都合により図は出典のみ記載しています。

田中 正暁
高速炉研究開発部
日本原子力研究開発機構

本報告は経済産業省からの受託事業である「令和5年度高速炉実証炉開発事業（基盤整備と技術開発）JPMT007143」の一環として実施した成果の一部を含む。



1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

● 「高速炉と関連する燃料サイクルに関する国際会議（FR）」

International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles

- ✓ 高速炉と関連する燃料サイクルに関する情報が集まる最も大きな国際会議の一つ
- ✓ 各国の研究機関、規制当局、電力事業者、メーカー、大学、国際機関が参加
- ✓ 開催履歴（4年間隔で開催）

2009年（FR09）日本・京都

2013年（FR13）フランス・パリ

2017年（FR17）ロシア・エカテリンブルグ

2022年（FR22）オーストリア・ウィーン（Web会議）

2026年（FR26）中国・北京

● FR26：2026年5月18日～21日、中華人民共和国（北京）で開催

✓ 9テーマ（9トラック）

1：革新高速炉設計

2：高速炉の安全性と許認可

3：燃料サイクル技術と持続可能性

4：高速炉燃料と材料

5：試験設備と実験

6：モデリングとシミュレーション

7：経済性、統合システム、非電力用途

8：試運転、運転、廃止措置

9：市民参加、知識管理、教育・研修

本報での対象範囲

- **トラック5および6での技術報告**に加え、**最近の国際会議等での報告**を含めて高速炉開発を進める各国における**試験とシミュレーションに関する技術開発の現状**について概説（高速炉プラント開発に係る報告とし、また、著者による調査範囲に限定）

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

開催国の中国が各トラックで約3割を占め、ロシア、フランス、イタリアが多い。

● トラック5：試験施設および実験

- ✓ 5.1：5(3) ナトリウム関連の試験施設および実験
- ✓ 5.2：6 鉛関連の試験施設および実験
- ✓ 5.3：6(2) 中性子工学試験施設および照射実験
- ✓ 5.4：6(1) 一般的な試験施設および実験

・ () 内の数字は中国の件数
・ 「*」は日本（JAEA）からの発表（各1件）

● トラック6：モデリングおよびシミュレーション計算手法

マルチフィジックス・ツール、検証・妥当性確認（V&V）、AIおよび機械学習の活用

- ✓ 6.01：5(1) プラント設計用統合コードシステム
- ✓ 6.02：4* 事故時熱流動解析
- ✓ 6.03：4(1) 炉心熱流動
- ✓ 6.04：6(2) 定常状態システム・シミュレーションのためのマルチフィジックス
- ✓ 6.05：5* 保護動作を伴わない過渡事象のためのマルチフィジックス
- ✓ 6.06：5(1) 中性子工学における不確かさ解析
- ✓ 6.07：5(1) 核データの開発および解析
- ✓ 6.08：4(1) シビアアクシデントおよびソースターム
- ✓ 6.09&10：8(4) システム熱流動および自然循環
- ✓ 6.11&12&14：11(8) 中性子輸送および遮蔽
- ✓ 6.13：3(2) 熱・構造連成

FR26における「トラック5」と「トラック6」での発表件数

	中国	フランス	イタリア	ドイツ	スイス	チェコ	ロシア	日本	韓国	その他
Track 5: Test Facilities and Experiments Experimental infrastructure and test facilities, including component tests, and integral experiments.										
5.1 Sodium Test Facilities and Experiments	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-
5.2 Lead Test Facilities and Experiments	-	-	4	-	-	-	-	-	-	2
5.3 Neutronics Test Facilities and Irradiation Experiments	2	-	-	-	-	2	2	-	-	-
5.4 General Test Facilities and Experiments	1	1	2	-	-	-	2	-	-	-
Track 6: Modelling and Simulation Computational methods, multi-physics tools, validation and verification, and the use of AI and machine learning.										
6.01 Integrated Code Systems for Plant Design	1	-	1	-	1	-	2	-	-	1
6.02 Accident Thermal Hydraulics Analysis	-	2	-	1	-	-	-	1	-	-
6.03 Core Thermal-hydraulics	1		3	-	-	-	-	-	-	-
6.04 Multiphysics for Steady-State System Simulations	2	1	1	1	-	-	-	-	-	-
6.05 Multiphysics for Unprotected Transients	-	1	-	2	-	1	-	1	-	-
6.06 Neutronics Uncertainties Analysis	1	3	-	-	-	-	1	-	-	-
6.07 Development and Analysis of Nuclear Data	1	-	1	-	-	-	3	-	-	-
6.08 Severe Accident and Source Term	1	-	-	1	-	-	2	-	-	-
6.09 System Thermal Hydraulics and Natural Circulation (1)	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-
6.10 System Thermal Hydraulics and Natural Circulation (2)	3	-	-	-	-	-	1	-	-	1
6.11 Neutronics Transport and Shielding (1)	4	-	-	-	-	-	1	-	-	-
6.12 Neutronics Transport and Shielding (2)	3	-	-	-	-	-	-	-	1	-
6.13 Thermo-Mechanical Coupling	2	-	-	-	-	-	-	-	1	-
6.14 Neutronics Transport and Shielding (3)	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-

【トラック5：試験施設および実験】

- 構成要素試験や統合実験を含む、実験用インフラおよび試験施設の活用（ナトリウム試験施設、中性子照射施設、熱流動試験設備、統合実証試験）
- 主なトピックス：
 - ✓ 燃料・材料の照射試験、熱流動および自然循環試験、ナトリウム機器、システム試験、炉物理実験、先進炉の設計検証に向けた統合試験
 - ✓ 高速炉プラント開発に加え、研究炉や照射施設の整備およびそれらの国際利用
 - ✓ 人材育成や解析コードの検証・妥当性確認（V&V）を支える実験基盤
- 実験データに基づくV&Vや不確かさの定量化を通じて、設計信頼性と許認可基盤の強化

【トラック6：モデリングおよびシミュレーション計算手法】

- マルチフィジックス・ツール、検証・妥当性確認（V&V）、機械学習の活用
- 主なトピックス：
 - ✓ プラント統合解析システム、炉心・システム熱流動解析、自然循環評価、中性子輸送・遮蔽解析、燃料挙動と熱機械連成解析、ソースターム評価、機械学習（挙動予測）を活用した解析高度化
- 高速炉の実用化に向け、連成解析手法整備（マルチフィジックス・ツール）と実験データに基づく技術成熟度の向上

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

● 第4世代原子炉（Generation IV reactors）における高速炉開発

(<https://www.gen-4.org/>)

- ✓ **ナトリウム冷却高速炉（SFR）**：日本、フランス、米国、ロシア、中国、インドで開発プロジェクト
- ✓ **鉛冷却高速炉（LFR）**：ロシアが実機運転開始間近となっており、欧州が開発の中心
- ✓ **ガス冷却高速炉（GFR）**：V4G4コンソーシアムによる実験炉ALLEGRO（75 MWth）計画
- ✓ **溶融塩（高速）炉（MSR）**：中国が実験炉の運転で先行し、複数の開発プロジェクト

（SFR概念図）

<https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/sodium-fast-reactor-sfr>

（LFR概念図）

<https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/lead-fast-reactors-lfr>

（GFR概念図）

<https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/gas-cooled-fast-reactor-gfr>

（MSR概念図）

<https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr>

(<https://www.gen-4.org/>)

次頁以降、液体金属冷却高速炉（SFRおよびLFR）の開発における各種試験とシミュレーションの活用状況について概説

原子力発電開発の様々な段階にある加盟国が効率的に革新炉の開発が行えるように

- 実験施設の情報共有により、各国の**機関間協力（施設利用を含む）の促進**と若手技術者や研究者の**人材育成**を期待
- **SMRや先進炉**に関する実験施設および解析コードの妥当性確認に関わる情報の共有を促進

● LMFNSカタログ

<https://nucleus.iaea.org/sites/lmfns/Pages/default.aspx>

- ✓ 「**液体金属冷却高速中性子システム（LMFNS）**」
 - ・ 臨界および未臨界システムを含む革新的なデータベース（合計151施設：SFR関連79施設、LFR関連72施設）
 - ・ IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES: No.NP-T-1.15(2018)
“Experimental Facilities in Support of Liquid Metal Cooled Fast Neutron Systems”

<https://nucleus.iaea.org/sites/lmfns/Pages/default.aspx>

● 技術フォーラム「NEXSHARE」

<https://nucleus.iaea.org/sites/nexshare/SitePages/Home.aspx>

- ✓ 「**ARIS（Advanced Reactor Information System）**」
<https://aris.iaea.org/>
 - ・ 先進炉・革新炉の概念を含む原子炉技術に関するデータベース
 - ・ LMFNSカタログ」とリンクしてデータベース構築
 - ・ 対象：液体金属冷却高速炉、ガス冷却炉、熔融塩炉、軽・重水炉、SMR、超小型炉

<https://nucleus.iaea.org/sites/nexshare/SitePages/Home.aspx>

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

● 協調研究プロジェクト (Coordinated Research Projects : CRP)

<https://www.iaea.org/projects/coordinated-research-projects>

➤ 韓国原子力研究院 (KAERI) : 開始準備中 (JAEA参加予定)

「Numerical Simulation of Transient Experiments at STELLA-2 Integral Effects Test Facility」

- タンク型SFR (PGSFR) の開発支援を目的に原子炉システムの全体的な挙動と安全性を確認
- ナトリウム熱流動試験施設「STELLA-2」(統合効果試験) 試験データ (LOHS/LOF等)
- 高速炉の熱流動分野で使用されている解析コードの検証および妥当性確認

➤ チェコ共和国・Rež研究センター (CVR) : 実施中(Jan. 2025-Jan. 2029)

「Benchmark on Thermal Hydraulics Transient Tests at S-Allegro Helium Facility」

- ALLEGRO (GFR) の縮小モックアップ試験施設S-Allegroから提供される試験データ
- ALLEGROやGFRコンセプトの開発を支援
- 高温ヘリウムシステムの基本機能、システム挙動、受動的崩壊熱除去システムの妥当性確認

➤ 新技術・エネルギー・持続的経済開発機構 (ENEA) : 実施中(May. 2022-Aug. 2026)

「Benchmark of Transition from Forced to Natural Circulation Experiment with Heavy Liquid Metal Loop」

- 強制・自然循環実験 (NACIE) 施設 (鉛ビスマス) 燃料集合体試験データ
- 実験データとの比較により、原子炉システムコード、サブチャンネル解析およびCFD解析の妥当性確認

STELLA-2: Sodium Integral Effect Test Loop for Safety Simulation and Assessment: Phase 2 (*1)

- 模擬原子炉容器 (PGSFR1/5縮尺) : 2.2 m (直径), 4.0 m (高さ)
- 模擬炉心出力 (電気ヒータ) : 約500 kW
19体の37本ピンバンドル模擬燃料集合体

- 実験計画 :

- (1) PHTS (一次熱輸送系) の全流量喪失事故 (LOF)
- (2) 給水喪失事故または蒸気発生器 (SG) の故障 (LOHS)
- (3) PHTSポンプ吐出配管の破断 (配管破断)
- (4) シビアアクシデント (重大事故) の一部

(*1) J. Lee, et al., Nuclear Engineering and Technology, **54** (2022) pp.3551-3566.

(STELLA-2の概念図)

https://nucleus.iaea.org/sites/lmfns/Facility%20Country%20Profiles1/Profile%20SFR-56%20Korea%20-%20STELLA-2_rev2.pdf

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

- EBR-I/EBR-II、Fermi-1、FFTFの建設・運転の経験の他、関連する試験および解析研究についても高速炉開発を主導するトップランナー
- **NEAMSプロジェクト** (<https://neams.inl.gov/>)
物理法則に基づく高忠実度 (high-fidelity) を期待できるシミュレーション技術を活用し、各機関で個別に開発が進められてきた解析コード群を連成 (連携) することで、原子炉システム全体を取り扱うためのマルチスケール/マルチフィジックス解析の実行を可能
- **エネルギー省原子力局 (DOE/NE) が主導 :**
アイダホ国立研究所 (INL) 「**MOOSE**」+ アルゴンヌ国立研究所 (ANL) 「**SHARP**」
- **INL : MOOSEフレームワーク** (<https://mooseframework.inl.gov/>)
 - ・ 有限要素法 (FEM) によるオープンソースのマルチフィジックス解析プラットフォーム
 - ・ 燃料性能解析コードBISON、炉心・中性子輸送解析コードGRIFFIN等が多数整備
 - ・ 連成可能な各分野の解析コード群を提供
- **ANL : SHARPフレームワーク** (<https://www.anl.gov/nse/proteus>)
 - ・ CFDコード「Nek5000 (高度版「NekRS」)」、構造解析コード「Diablo」、中性子解析モジュール「PROTEUS」などで構成されるシミュレーション・ツールキット
 - ・ 各物理モジュールの統合による「仮想原子炉」の実現を目指し、実験だけでは評価が困難な現象の予測精度向上や設計余裕の合理化が期待
 - ・ 最新のスーパーコンピュータ環境で動作するよう設計

(SHARP概略図 : ANL/NE-16/6 : Figure 1.1.)
<https://publications.anl.gov/anlpubs/2016/05/127401.pdf>

□ 米国原子力規制委員会 (US-NRC) は、原子力推進部門から独立した原子力安全規制機関であり、その審査・規制基準は国際的な動向に影響を与える規制基準をリード

● **安全性評価用解析コード群 (BlueCRAB) の整備**

<https://www.nrc.gov/docs/ML2407/ML24079A243.html>

- 非軽水炉の許認可申請書に記載された関連現象をモデル化するにあたり、NEAMSコードと、NRCが開発中のコード群 (BlueCRAB) を使用する計画
- 近い将来に許認可申請の対象となる可能性が高い炉型について妥当性確認を実施済み

➤ BlueCRAB解析コードの検証および妥当性確認 (**技術レポート : ML24079A245**)

- NRC Non-Light Water Reactor (Non-LWR) Vision and Strategy Verification and Validation (V&V) of the Comprehensive Reactor Analysis Bundle (BlueCRAB)

※ドラフトとの扱い。V&Vの進捗に従い順次改訂 (追記) されていくとのこと

(BlueCRAB構成図 : Figure 1)

<https://www.nrc.gov/docs/ML2407/ML24079A245.pdf>

- コンソーシアム (Ansaldo/Nucleare、ENEA、RATEN、SCK・CEN) によるLFR開発は欧州における中心的な役割
- LFR開発 : MYRRHA (ADS研究炉) – LEANDREA (LFR技術実証) – ALFRED (LFR実証炉) – EU-SMR-LFR (EAGLES-300 : 商用SMR) – ELFR (European LFR)

● ベルギー (SCK CEN)

- MYRRHABELLE : MYRRHA – 1/5スケール・モデル (水)
- **E-SCAPE : MYRRHA – 1/6スケール・モデル (鉛ビスマス)**
- 技術実証施設「LEANDREA」計画 (ALFRED、SMR-LFRを対象)

(E-SCAPE概略図)

<https://nucleus.iaea.org/sites/Imfns/Facility%20Country%20Profiles1/Profile%20LFR-03%20Belgium%20-%20E-SCAPE.pdf>

LMFNS: Profile LFR-03
Belgium - E-SCAPE

● イタリア (ENEA、Ansaldo/Nucleare)

- LFR用の機器、燃料、材料、熱流動関連の試験の実施
 - ・ CIRCE (LBE) : 加速器駆動未臨界システム (XADS) の動作原理の確認
 - ・ **NACHI-UP (鉛) : ワイヤスペーサー型19ピンバンドル燃料集合体試験**
 - ・ HELENA (鉛) : 建設中の多目的ループ試験施設
- 欧州でのLFR開発における設計・安全解析・炉心開発の技術基盤
 - ・ **MEDUSA: 炉心マルチフィジックス解析 (解析コード連成) 時のプラットフォーム整備**

(NACHIE概略図)

<https://nucleus.iaea.org/sites/Imfns/Facility%20Country%20Profiles1/Profile%20LFR-46%20Italy%20-%20NACIE.pdf>

LMFNS : Profile LFR-46
Italy - NACIE

● ルーマニア (RATEN)

- **ATHENA : ALFREDの主要機器の構成および熱水力性能の実現可能性を確認する鉛冷却プール型多目的実験装置 (建設中)**
 - ・ 主容器直径3.2m(1/2.6)、高さ10mの大型容器 (880トンの液体鉛を保持)
 - ・ 模擬炉心 (電気出力2.21MW)、主ポンプ、および熱交換器を設置
 - ・ LFRの通常運転時および事故時を模擬した試験の実施

❑ Rapsodie、Phénix、Super-Phénixの建設・運転経験を有し、米国と並んで、高速炉プラントの開発に加え、関連する各種試験および解析研究のトップランナー

● PAPIRUSプラットフォーム (CADARACHE研) :

FR26 (Track-1) : L. GICQUEL, et al., "PAPIRUS, a sodium and advanced coolants platform containing technological loops and facilities dedicated to the nuclear reactors of the future".

➤ 25を超える大小様々な試験施設で構成

- DIADEMO: ナトリウム／ガス熱交換器のプロトタイプ設計および性能確認、熱応力サイクル耐性試験
- PEMDYN : 電磁ポンプの動的特性試験
- MECANA、VAIANA : グローブボックス中でのナトリウム試験
- DOLMEN、IRINA : 計測機器、小型部品等のナトリウム中での試験、他

● Start-upsによる革新炉開発 (France2030) (*)

Start-ups	Type	Output power	Objectives	Others
CALOGENA	PWR	30 MW	District heating	Step-2
THORIZON	MSR	250 MWt/100 MWe	Industrial heat/Electricity	
Blue CAPSULE	HTR	150 MWt	Industrial heat/Electricity	
STELLARIA	MSR	250 MWt/110 MWe	Industrial heat/Electricity	
Jimmy	HTR	15 MWt	Industrial heat	Step-2
HEXANA	SFR	400 MWt/150 MWe	Industrial heat/Electricity	
Otrera	SFR	110 MWe	Industrial heat/Electricity	
newcleo	LFR	30 or 200 MWe	Electricity/Heat/Radio-isotope	
Renaissance fusion	Fusion	1 GWe	Electricity	
Taranis-GenF	Fusion	1 GWt	Electricity	

(*)FR26プレゼンテーション資料 ("Nuclear French Strategy" by S. Sarrade) による

© 2026 JAEA

- **HEXANA (2023年にCEAから独立したスタートアップ : <https://www.hexana.com/>)**
FR26 : N. ZWEIBAUM, et al., "DEVELOPMENT AND QUALIFICATION ROADMAP FOR HEXANA'S SODIUM-COOLED FAST MODULAR REACTOR"
- プール型ナトリウム冷却高速炉 (SFR) 2基 (合計800MW (熱出力) / 335MW (電気出力))、熱貯蔵システム、蒸気タービンによる発電システムで構成し、エネルギー需要に柔軟に対応 (2035までに初号機 (FOAK) の導入目標)
- PHENIX、SuperPHENIX、ASTRIDでの技術開発の延長線上で開発 (実証炉は不要)
- CEAが有する既存ナトリウム試験施設群「PAPIRUS」のほか、ASTRIDのホットプールを縮尺模擬した水流動試験装置「MICAS」の利用を予定
 - ・ **機器取扱プラットフォーム** : 大型コンポーネントおよび小規模機器に関連する作業の検証
 - ・ **熱流動縮尺試験施設 (水およびナトリウム試験施設)** : 強制・自然対流条件下における1次冷却系の流動・伝熱特性の把握、主要機器 (1次系ポンプ、中間熱交換器、炉心上部プラグ、容器スラブ (断熱材を含む)) の性能把握等
 - ・ **原子炉キャビティ試験 (窒素充填)** : 崩壊熱除去特性の把握、検査・補修に関する試験
 - ・ **ナトリウム-溶融塩試験ループ** : 2次および3次系の構成機器 (熱交換器、配管、ポンプ、計装機器) の統合的実証試験
 - ・ **溶融塩-蒸気試験ループ** : エネルギー貯蔵・変換系に使用される機器 (タンク、蒸気発生器) の統合的な適格性評価

(HEXANAプラント構成概略図 : FIG. 1.)
FR26 : N. ZWEIBAUM, et al., "DEVELOPMENT AND QUALIFICATION ROADMAP FOR HEXANA'S SODIUM-COOLED FAST MODULAR REACTOR"

● OTRERA (2023年にCEAから独立したスタートアップ : <https://otrera.fr/>)

ICAPP2025 : F. Varaine, et al., "192 - OTRERA Reactor: Innovative Design and Techno-economic Performance of a Modular Sodium-cooled Fast Neutron Reactor"

- ループ型ナトリウム冷却高速炉 (SFR) 2基 (合計600 MW (熱出力) / 220 MW (電気出力))、ラッパー管を用いない燃料集合体の採用 (VVER型炉)
- CEA (PEMDYN試験施設) にて試作済みの電磁式ナトリウムポンプ (全長約2.5 m) および50 MWthのナトリウム-ガス熱交換器 (DIADEMOループで縮小モデル試験を実施) それぞれ6基 (6ループ) で構成し、工場での製造と陸上輸送が可能
- PWR群を基盤としたクローズド燃料サイクル (PWR用再処理施設) と適合し、HALEUやMOX燃料に対応

(Otreraプラント概略図)
<https://otrera.fr/>

<https://otrera.fr/>

- シミュレーション技術では、炉物理計算コード (ERANOS)、熱流動解析コード (CATHARE、TrioCFD)、炉心損傷解析コード (SAS-SFR、SIMMER (国際協力)) など高速炉開発に係る解析手法が数多く整備され、連成解析を含むマルチフィジックス・マルチスケール解析を牽引
- **MATHYS (Multiscale Advanced Thermal-Hydraulics Simulation)** (CEA)
[C.Geffray, NURETH-18, Portland, OR, August 18-22, 2019, 4864-4875]
マルチフィジックス解析の実現を目的として、熱流動、炉物理、燃料挙動、構造力学など複数の物理現象を連成させて統合的に評価する、連成解析ツール
 - 時間発展計算における各コード間のデータ交換、計算順序の制御、収束判定
 - 適用事例：
 - ・ プラント動特性解析コード「CATHARE」と、炉物理解析コード「APOLLO3」やCFDコード「TrioMC/TrioCFD」を連携させ、反応度フィードバック解析に適用
 - ・ MATHYSの発展として、コード結合の標準インターフェース**ICoCo**(*1)と、Pythonベースの連成プラットフォーム**C3PO**(*2)の整備

(ICoCo連成手法の概略図 : Fig.2)

(*1)R. Bavière, et al., NED, **277** (2014), pp.124-137.

(*1)R. Bavière, et al., NED, **277** (2014), pp.124-137.

(*2) G. Billo, et al., ANE, **202** (2024) 110469.

□ myMUSCLE：マルチフィジックス・マルチスケール解析のためのプラットフォーム

- 近年の原子炉設計では、中性子輸送、熱流動、構造力学、燃料挙動など複数の物理現象を統合的に評価する必要がある
- 既存コードを連携させ、高忠実度な連成解析を実現することを目的
 - EUのHorizon 2020プロジェクトSESAMEにおいて、システム熱流動コードSPECTRAとCFDコードCFXを連成した経験を基盤として発展
 - 鉛冷却高速炉（LFR）を対象に、1次元のシステム熱流動コードSPECTRAと、CFX、Fluent、STAR-CCM+、OpenFOAMなどの3次元CFDコードを結合し、自然循環やプール内の熱流動現象に適用して1次系全体と局所流動現象を同時に解析するマルチスケール解析が行われている

(myMUSCLE概略図：Fig. 1 & Fig. 2)

H. J. Uitslag-Doolaard, et al., Nuclear Science and Engineering, **197** (2023), 2543-2560. DOI:10.1080/00295639.2022.2148809

H. J. Uitslag-Doolaard, et al., Nuclear Science and Engineering, **197** (2023), 2543-2560. DOI:10.1080/00295639.2022.2148809

- 基礎基盤に係る試験施設多数保有し、シミュレーションとモデリングおよび材料開発をGIF、IAEA、OECD、EURATOMのプロジェクトとして実施

□ FAST Code Systemの開発

FR26 : D. Petrović, et al., "FAST Code System: Review of Recent Developments, Present Capabilities, and Validation Efforts"

- 中性子物理、熱流体、機械的挙動を対象とした高精度なマルチフィジックス連成解析による定常解析および過渡現象および事故時のシミュレーションを実施するための高速炉向けの汎用計算ツールを開発
- 支援対象：原子炉設計、安全解析、技術検討

(FASTコードシステム概略図：FIG. 1.)

FR26 : D. Petrović, et al., "FAST Code System: Review of Recent Developments, Present Capabilities, and Validation Efforts"

- モジュール型マルチフィジックス・フレームワーク
 - 中性子物理 (PARCS)
 - 熱流動 (TRACE)
 - 燃料挙動 (FRED)
 - 核物理 (Srpent2)
- 対象：SFR、LFR、MSR

(iii) 中国 (SFR : 8施設、LFR : 7施設)

□ **中国原子能科学研究所 (CIAE)** が主体となって一連のSFR開発 (CEFR、CFR600、CFR1000、CiFR1000) を推進

- CFR-600の技術基盤を支える試験研究 (高温ナトリウム中材料試験、熱流動・安全性に関する試験) およびオープンソースコード (米国、フランス等) を用いた解析研究を実施

(vi) インド (SFR : 14施設)

□ **インディラ・ガンディー原子力研究センター (IGCAR)** が主体となって、実験炉FBTR (運転中)、原型炉PFBR (初臨界) をはじめとするSFR開発を推進

- PFBR関連施設として、500kW Sodium Loop、BIM、INSOT Creep Loopなど多数のナトリウム試験施設が整備

(vii) 韓国 (SFR : 4施設、LFR : 1施設)

□ **韓国原子力研究院 (KAERI)** では、原型炉PGSFRの開発支援を目的にナトリウム熱流動試験施設STELLA-1およびSTELLA-2[10]を建設

- **STELLA-2での試験データを用いてIAEA/CRPを実施 (JAEAも参加予定)**

(viii) ロシア (SFR : 11施設、LFR : 10施設)

□ BOR-60、BN-600、BN-800のほか、多くの試験施設を有してSFR開発を積極的に推進し、BREST-OD-300を始めとするLFR開発を推進

1. はじめに（高速炉の国際会議：FR）

2. 各国における高速炉開発の状況

2-1. FR26での報告実績

2-2. 高速炉開発に係る試験とシミュレーションの活用（直近の情報を含めて）

（1）IAEAでの試験および原子炉施設のデータベース

（2）国際ベンチマークプロジェクト（IAEA/CRP）

（3）各国の試験とシミュレーションの開発状況（液体金属高速炉）

（i）米国

（ii）ベルギー・イタリア・ルーマニア

（iii）中国

（iv）フランス

（v）オランダ

（vi）インド

（vii）韓国

（viii）ロシア

（ix）スイス

3. おわりに

- IAEA主催の国際会議「FR26」での報告と、最近の国際会議等での報告等をまとめ、各国の高速炉（SFR、LFR等）開発を支える試験施設とシミュレーション技術の現状
- IAEAでは、機関間協力（施設利用を含む）の促進と若手技術者や研究者の人材育成に加え、原子力発電開発の様々な段階にある加盟国が効率的に革新炉の開発が行えることを目的として、高速炉プラントおよび試験施設等に関するデータベースの整備やベンチマークを実施
- 各国動向
 - ・ 米国、仏では、高速炉開発の推進、マルチフィジックス解析の推進
 - ・ 欧州は鉛冷却高速炉（ALFRED等）を中心とする実証設備の整備
 - ・ 大型試験施設や複数の解析コードによる連成解析手法の整備
 - ・ 実験とシミュレーションの統合による設計信頼性の強化に係る試みと認識
- ◆ 開発の方向性：
 - ・ モデリング&シミュレーションのV&Vに必要な実施手法整備、実験データの取得
 - ・ マルチフィジックス・マルチスケールを可能とする連成解析手法の整備（プラント全体挙動の把握）

※本報の内容は、著者による調査範囲に限定されるものであるが、高速炉開発に携わる関係各位の一助となれば幸いである。