

熱流動部会セッション[計算科学技術部会共催]

熱流動 CFD 技術の進展

Progress of CFD in Nuclear Thermal Hydraulics

(4) ナトリウム冷却高速炉開発における熱流動 CFD 技術の展開

(4) Deployment of Thermal Hydraulics CFD Technologies for Sodium-cooled Fast Reactor Development

* 田中 正暁¹¹ 原子力機構

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）におけるナトリウム（Na）冷却高速炉（SFR）の開発では、「常陽」、「もんじゅ」、JSFR を含む実証炉及び実用炉に対し、機構外で開発された解析コードの導入と併せて、数々の熱流動解析コード（熱流動 CFD 技術）の開発整備が行われてきた。例えば（以下、派生、関連コード含めた代表名称）、プラント動特性解析コードに関し、「常陽」の開発では「MIMIR」⁽¹⁾、「もんじゅ」の開発では「COPD」⁽²⁾ 及び「HARHO-IN」⁽³⁾ が整備され、これらを統合して「Super-COPD」に発展した⁽²⁾。また、汎用熱流動解析コード「AQUA」⁽⁴⁾、燃料集合体熱流動解析では、サブチャンネル解析コード「ASFRE（単相流）」⁽⁵⁾ 及び「SABENA（沸騰 2 相流）」⁽⁶⁾、更に有限要素法を用いた詳細熱流動解析コード「SPIRAL」⁽⁷⁾ が開発された。安全分野では、高速炉安全解析コード「SIMMER」⁽⁸⁾、蒸気発生器での Na-水反応現象に対応する「SWACS」⁽⁹⁾ や「SERAPHIM」⁽¹⁰⁾、Na 燃焼解析コード「SPHINCS」⁽¹¹⁾、格納容器安全解析コード「CONTAIN-LMR」⁽¹²⁾、等々の開発整備が進められた。また、「常陽」新規規制基準対応では、Super-COPD を主軸として、局所閉塞事象に ASFRE、BDDBA 評価に SAS、SIMMER、Super-COPD（デブリモジュール）、並びに商用 CFD コード「FLUENT」等が使用された⁽¹³⁾。現在、原子力機構では、民間で実施する SFR を含む革新炉システムの開発を支援するため、前述の解析コード群や解析経験を含む既往知見を技術基盤として整備し、これを最大限活用した設計検討や安全評価を実現する統合評価手法「AI（Artificial Intelligence）支援型革新炉ライフサイクル最適化手法（ARKADIA）」の開発を進めている⁽¹⁴⁾。

本報では、今後の SFR 開発における熱流動 CFD 技術の展開として、「戦略ロードマップ」（2022 年 12 月 23 日改訂）に基づいて 2024 年度から 5 年間で進められる実証炉の概念設計への ARKADIA で整備する熱流動 CFD 技術含む解析評価技術基盤の適用⁽¹⁵⁾ について概説する（ただし、本報では安全分野を除く）。

2. 実証炉開発への熱流動 CFD 技術の適用

2-1. 統合評価手法「ARKADIA」の開発

図 1 に ARKADIA のシステム構成の概念図を示す。ARKADIA は、3 つのサブシステム（最適化を含む設計検討を支援する「評価支援・応用システム（EAS）」、プラント挙動を解析する「仮想プラントライフシステム（VLS）」、SFR をはじめとする原子炉開発の知見を集約した「ナレッジマネジメントシステム（KMS）」）で構成され、「AI 支援プラットフォーム（ARKADIA-Platform）」にて統合及び制御される⁽¹⁴⁾。また、AI 技術（関連技術含む）の導入による機能高度化や知識ベースの拡充を行うとともに、安全性、経済性等に関する様々な開発目標に対して、プラント概念創出や炉システムの設計支援を行い、設計及び開発プロセスの変革を目指している。様々な機能を有する ARKADIA 開発については、2023 年度までは、設計検討に軸足を置いた「ARKADIA-Design」⁽¹⁶⁾、安全性評価に軸足を置いた「ARKADIA-Safety」⁽¹⁷⁾、知識ベースの構築に軸足を置いた「ARKADIA-KMS」⁽¹⁸⁾ を個別に整備し、2024 年度以降、ARKADIA-Platform の下にこれらを統合し、個別機能の強化及び拡充と併せて、一つの ARKADIA を整備していく計画である。

図 2 に、本報で対象とする ARKADIA-Design の構成イメージを示す。ARKADIA-Design では、「統合インターフェース（PSSP）」⁽¹⁹⁾ で EAS、VLS、KMS を結合（連成、連携）する。PSSP は、汎用性の高い Python 言語で作成されたスクリプトで、複数の解析コード等を結合することが可能であり、上位の ARKADIA-Platform に接続する。



図1 ARKADIAの構成イメージ

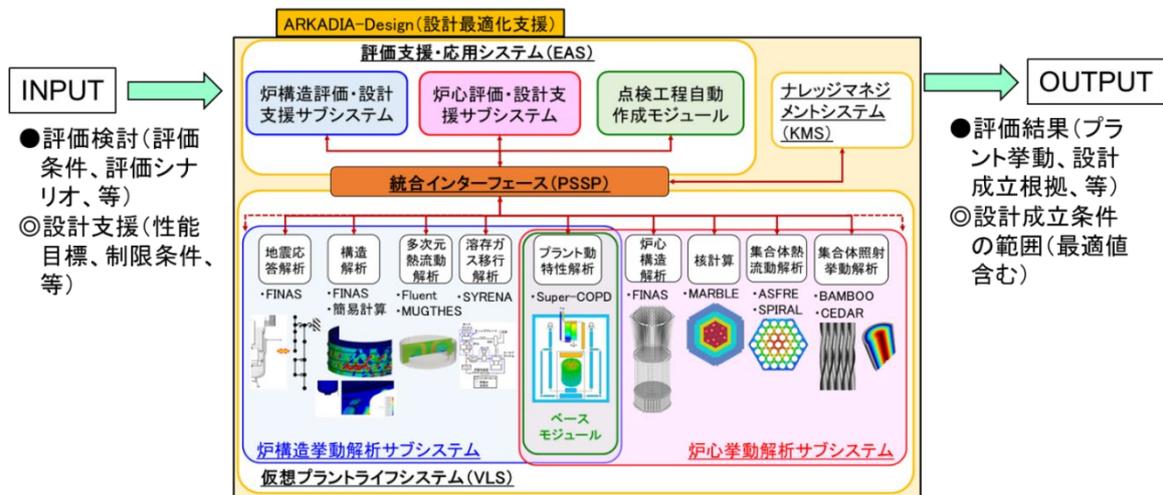


図2 ARKADIA-Designの構成イメージ

2-2. マルチレベルシミュレーション技術

ARKADIA-DesignのVLSでは、ユーザの目的に応じて詳細度の異なる解析モデルを組み合わせるマルチレベル(ML)シミュレーション技術⁽¹⁹⁾を基本とする。MLシミュレーションは、図2の下層にあるVLSに格納する解析コード群の中から、特定の解析コードを単独で、あるいは複数分野(マルチフィジクス)や複数スケール(マルチスケール)の解析コードをPSSPで結合及び制御して解析することになる。MLシミュレーションでは、連成解析であっても使用する個々の解析コードは独立しており、それ単独で、解析モデルの改良やメンテナンス、バージョン管理を行えばよく、解析コードの管理が比較的容易となる。複数の解析コードを連成する場合、物理現象の再現性、収束性及び保存性の観点で、個々の解析コードに対する検証と妥当性確認(V&V: Verification and Validation)の実施はもちろんのこと、連成解析時の物理現象等の受け渡しに問題がないこと(連携機能のVerification)、連成解析結果の妥当性(Validation)について確認しておく必要がある。現在、このV&V実施手順の具体化とマニュアル化を検討している。

2-3. 実証炉開発へのMLシミュレーション技術の適用

安全性強化、開発コスト低減、運用時の経済性向上等を考慮した実証炉を実現するためには、開発プロセスの合理化を含めた変革が必要である。従来のような、個別現象(課題)に対応した解析コードを用い、機器間あるいは現象間の相互作用の不確かさを包絡する保守的な境界条件を設定した解析評価ではなく、MLシミュレーション技術を駆使してプラントの全体挙動を予測し、プラント設計に反映することができれば、機器毎のモックアップ試験や、システム特性を把握する大規模な総合試験等をシミュレーションで代替することにより、開発コストを大幅に低減し、開発過程の合理化を実現できる。例えば、タンク型炉である実証炉では、従来のループ型炉(JSFR等)に比べて、原子炉容器(RV)の直径が大きく、炉容器内部では熱流動現象の多次元性が強くなる。プラント全体挙動の把握を対象にプラント動特性解析コード単独で解析評価を行

う場合、プレナム内の多次元熱流動現象を1次元モデルに縮約した解析モデル（例えば、多領域モデル等）の利用が考えられる。また、RV内の炉心部及び上/下プレナム部（ホット/コールドプレナム（H/CP）部）を多次元解析モデルとし、RV内の1次熱輸送系に含まれるポンプ、中間熱交換器（IHX）、崩壊熱除去系等の機器及び2次熱輸送系以降の機器等をプラント動特性解析モデルとして連成させることにより、RV内の局所的な熱流動現象と併せ、プラント全体の熱流動挙動を同時に把握することが可能となる。このとき、RVの多次元解析、あるいはプラント動特性解析との連携解析により、プラント過渡時も含めたRV内の詳細な熱流動挙動等の情報を取得し、物理現象に関する根拠を得て、縮約モデルを構築することができる。

共通基盤技術として、図2の下層のVLSの中央に配置するように、SFRプラントの設計検討及び安全評価（主にDBAまで）で用いるプラント全体挙動を評価するための解析コード（ベースコード）として、Super-COPDの整備を進めている。

炉心分野では、燃料集合体の健全性評価及び事故時を含めた炉心冷却性評価の他、2026年頃の燃料仕様の選定根拠の提示に資することも含め、炉心挙動解析技術の整備を実施している。燃料集合体サブチャンネル解析コードASFREは、FAIDUS集合体（切り欠き位置：コーナー、中央）の熱流動解析及び局所閉塞事象の評価に適用可能となるよう整備を進めている。固有安全による自己制御性評価を含む炉心冷却性評価を実施するために炉心変形とそれに伴う反応度変化を考慮可能な「炉心変形反応度解析評価手法」（核計算（MARBLE）/炉心熱流動解析（ASFRE、Super-COPD、CFD）/炉心変形解析（FINAS）の連成解析）⁽²⁰⁾と、燃料ピン変形と健全性評価を行う「燃料集合体挙動評価手法」（燃料集合体内熱流動解析（ASFRE）/燃料ピン変形解析（BAMBOO）/燃料挙動解析（CEDAR）の連成解析）⁽²¹⁾を整備している。また、最適化を含む炉心設計支援として、炉心仕様を検討する「炉心設計解析手法」（核計算（MARBLE）/燃料集合体熱流動解析（ASFRE）/燃料健全性評価（EZLIFE）の連携）、炉心設計解析で暫定される炉心仕様条件の下、プラントの安全評価を実施するSuper-COPDとの連携解析手法を整備している⁽²²⁾。

原子炉構造分野（熱流動、構造）では、RV内の熱流動解析と構造解析を組み合わせた、機器・構造設計の支援を可能とする解析機能の整備を行っている。実証炉においては、崩壊熱除去系として、AOO及びDBA対策にホットプレナム（HP）内に冷却器を浸漬させたDRACS（D-DRACS）と2次熱輸送系を共有するIRACS、DEC対応にHPとCPを接続する貫通型DRACS（P-DRACS）の採用が検討されている⁽²³⁾。崩壊熱除去時には、D-DRACSからの低温Naと高温の炉心部との相互作用に加え、IHXからCPに供給される低温Naによる炉心熱流動挙動を把握する必要がある。このため、詳細なRV内の熱流動解析のため、「原子炉容器内多次元熱流動解析手法（RV-CFD）」⁽²⁴⁾を整備している他、機器間の相互作用を考慮するため、Super-COPDによるプラント全体挙動とRV-CFDによる局所的な熱流動挙動を一度に解析できる連成解析手法を整備している。商用CFDコードでは、流体計算だけでなく、体系内の構造部を含めた解析モデル（メッシュ）を設定することができ、共役熱伝達を考慮した流体-構造熱連成解析が可能である。構造表面近傍や構造内部の温度分布の情報を抽出して、構造解析コード（FINAS）と連携することで、流体と構造との間に保守的な境界条件を設定することなく、直接的に熱応力評価を実施する機能整備を進めている。

RV内における流動適正化評価技術として、炉心での気泡通過による出力変動やIHXでの伝熱劣化を防止するため、HP内の自由液面からのカバーガス巻き込み評価が必要となる。本課題に対し、HP内の流動場の情報（流速分布）を得るためのCFD解析手法と、流速分布から、ガス巻き込みの有無及びガス巻き込み量を評価するツール（StreamViewer）⁽²⁵⁾の整備を実施している。

2-4. 安全審査への適用

現在、実証炉の安全審査対応について、先行例となる「常陽」新規規制基準対応の経験を踏まえ、高速炉メーカーと協働で、評価シナリオとその解析に必要な解析コード等の具体化を検討しているところである。なお、解析コード等の適用性の確認では、「常陽」新規規制基準対応での実績、原子力学会の標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」⁽²⁶⁾及び「統計的安全評価の実施基準：2021」⁽²⁷⁾に整合するEMDAP⁽²⁸⁾の実施手順を基本とし、PIRTによる評価シナリオにおける重要現象及び解析モデルの特定とV&Vを実施する。「常陽」新規規制基準対応では、事故事象（ULOF、LORL、PLOHS）の評価に商用CFDコード（FLUENT）を適用した。このとき、FLUENTの適用にあたっては、内作コードと同様に、PIRTの実施と、

重要現象と必要な解析モデルの特定を行い、Verification として、CFD コードのベンダーが整理している検証事例⁽²⁹⁾にて解析モデル（使用モデル）の検証の有無の確認と、一部については内作による検証を実施した。また、Validation として、評価シナリオに含まれる重要現象に適用する解析モデル（乱流モデル等）を含む解析実績等を調査し、妥当性（個別効果）を確認するとともに、原子力機構で実施したナトリウム試験（PLANDTL）を対象とした試験解析により妥当性（総合効果）を確認した。今後の実証炉の安全審査に向けて、評価シナリオとの特定と関連する妥当性確認問題の設定、使用する解析コードのバージョンと解析モデル等の固定を前提として、解析結果（妥当性確認としての実績）を第3者の審査を経た成果物として蓄積することも妥当性及び適用性を説明する重要な根拠になると考える。また、一連の解析は、品質保証ガイドライン⁽³⁰⁾等に従って実行され、解析品質を十分に確保する必要がある。

3. ナレッジ連携解析（熱流動 CFD 技術の資産化）

今後、高速炉開発経験者の減少や、解析経験者（IT 技術者）の減少に伴う、人材教育、知識継承への対応が重要となるであろうことが容易に予想される。そこで、解析経験の属人化を防ぎ、多数の解析経験を積極的に高速炉開発関係者間で共有できる仕組み作り（解析経験の資産化）を進める必要がある。

図3にKMSとVLSとの連携（KMS-VLS連携）⁽³¹⁾の全体構成の概要を示す。KMS-VLS連携では、解析条件の設定から、EASにてKMSから必要な情報及び知識（ナレッジ群）を収集して解析コードの入力データを作成してVLSで解析を実行し、VLSでの解析結果はEASでの妥当性判断を含めて新たな経験知としてKMSの「解析データベース（解析DB）」に格納されることになる。このように、解析毎に経験を蓄積し、KMSは自己発展する。ARKADIAのKMSに格納される解析経験について、産業界で導入が進められているSPDM（Simulation Process and Data Management）を参考に、解析経験のナレッジ化（資産化）を目指し、共通資産として活用することで、AI技術等を活用しながら、膨大な既往知見からの効率的なデータマイニングや、ARKADIAによる解析モデルの自動提案など、解析作業の効率化を図る予定である。具体的に、A) からE)までのDB及び機能を整備する。すなわち、A) KMS-VLS連携機能：VLSとの連携及びKMS内のナレッジ群を扱うインターフェース、B) 施設・試験DB：解析対象となる施設等の仕様や妥当性確認試験データ等を含むDB、C) 解析モデルDB：各種相関式及び各種物性値を格納したDB、D) 解析DB：既往の解析結果（解析条件を含む）を経験知として格納するDB、E) 「入力データトレイン」：解析条件に合致する入力データの生成に必要なナレッジ群が配置されたデータファイルを整備する。

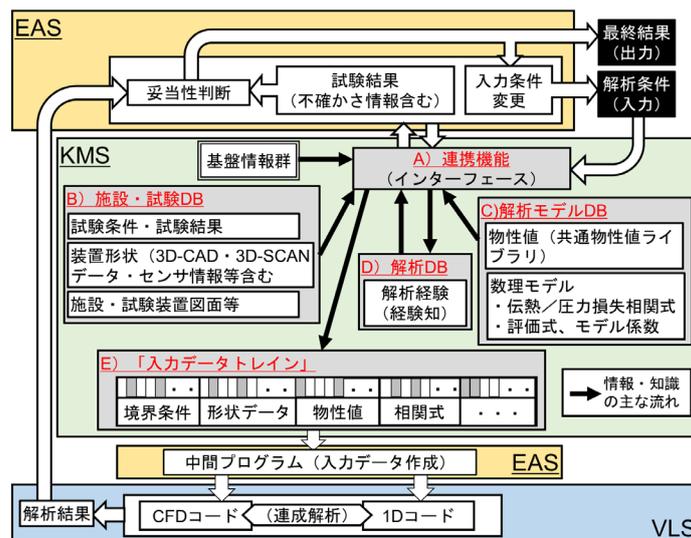


図3 KMS-VLS連携の全体構成イメージ

4. おわりに

今後のSFR開発における熱流動CFD技術の展開として、ARKADIAにおける熱流動CFD技術を含む解析評価基盤技術の開発整備を進め、各熱流動解析コードの活用と必要な機能高度化や妥当性確認はもとより、

ML シミュレーション技術を積極的に活用し、ユーザの目的に沿って、複数の解析コードとの結合によるマルチフィジックス・マルチスケールを含めた連成解析手法の実証炉開発への適用を進めていく。ML シミュレーション技術を進化させ、ユーザの目的に応じた必要な詳細度にて、計算機内に SFR プラント全体をモデル化する「プラント全系連携解析手法」⁽³²⁾ の構築を進める。将来的に、これをデジタルツイン技術⁽³³⁾ に拡張し、資産化した解析経験と合わせて、設計検討段階でのエンジニアリングツインとしてシミュレーションによる設計成立性検討の効率化や、実証炉建設段階や稼働後のデジタルツインとしてそれぞれ性能試験成立性確認やプラント挙動管理などに適用し、SFR プラント開発の革新を目指した開発を進めていく。

参考文献

- (1) 吉田、黒羽、サイクル機構技報、No.15 (2002)、pp.17-26.
- (2) 中井他、JAEA 研究開発報告書、PNC TN241 85-12 (1985).
- (3) 仲井他、JAEA 研究開発報告書、PNC TN9520 88-019 (1988).
- (4) 村松、動燃技法、No.76 (1990)、pp.16-26.
- (5) 成田、大島、JAEA 研究開発報告書、TN9410 97-104 (1997).
- (6) 大洗工学センター安全工学部、(本社) 動力炉技術開発部、動燃技報、No.73 (1990)、pp.103-111.
- (7) H. Ohshima, Y. Imai, Proc. of FR17, June 26-29, Yekaterinburg, Russian Federation (2017), IAEA-CN245-453.
- (8) 山野他、JAEA 研究開発報告書、JNC TN9400 2003-070 (2003).
- (9) 浜田、田辺、動燃技報、No.82 (1992) p.85-88.
- (10) 高田、山口、サイクル機構技報、No.17 (2002) , pp.63-74.
- (11) A. Yamaguchi, Y. Tajima, Nuclear Engineering and Design, Vol.219 (2003), pp.19-34.
- (12) K. K. Murata, et al., SAND91-1490 UC-610 (1993).
- (13) (国研) 日本原子力研究開発機構 大洗研究所高速実験炉部、別紙 5 (2023)、
<https://www2.nra.go.jp/data/000442209.pdf>
- (14) H. Ohshima, et al., Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol. 9 (2023), pp.025001-1-025001-10.
- (15) 田中他、日本原学会 2024 秋の大会、9/11-13、東北大学、(2024)、2G14.
- (16) M. Tanaka, et al., Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.11, No.2 (2024), Paper No.23-00424.
- (17) A. Uchibori, et al., Nuclear Engineering and Design, Vol.413 (2023), 112492.
- (18) A. Seki, et al., Procs. of ICONE31, August 4-8, 2024, Prague, Czech Republic, (2024), ICONE31-131784.
- (19) 堂田他、第 24 回計算工学講演会、計算工学講演会論文集、Vol. 27 (2022).
- (20) N. Doda, et al., Procs. of NURETH-19, March 6 - 11, 2022, Brussels, Belgium, (2022), Log nr.: 35413.
- (21) T. Uwaba, et al., Nuclear Technology, Vol.207, No.8 (2021), pp.1280-1289.
- (22) E. Hamase, et al., Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.11, No.2 (2024), Paper No.23-00440.
- (23) S. Kubo, et al., Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.3 (2020), Paper No.19-00489.
- (24) E. Hamase, et al., Bulletin of the JSNE Mechanical Engineering Journal, Vol.9, No.4 (2022), Paper No.21-00438.
- (25) 松下他、日本機械学会第 27 回動力・エネルギー技術シンポジウム、9/20-21、東京 (2023)、A123.
- (26) AESJ, AESJ-SC-A008:2015 (2015).
- (27) AESJ, AESJ-SC-S001:2021 (2021).
- (28) U.S. NRC, REGULATORY GUIDE 1.203 (2005).
- (29) ANSYS, Inc., ANSYS Fluid Dynamics Verification Manual, Release 15.0, (2013).
- (30) (一社) 日本電気協会、JEAC4111-2021 (2021).
- (31) 田中他、日本原学会 2023 春の年会、3/13-15、東京大学、(2023)、1L09.
- (32) 吉村他、日本機械学会第 27 回動力・エネルギー技術シンポジウム、9/20-21、東京 (2023)、A134.
- (33) 松尾、浅田、シミュレーション、第 40 巻、第 2 号 (2021)、pp.59-63.

*Masaaki Tanaka¹

¹Japan Atomic Energy Agency