



ムーンショット目標 10

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、
地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

実施状況報告書

2025 年度版

超次元状態エンジニアリングによる

未来予測型デジタルシステム

星 健夫

自然科学研究機構 核融合科学研究所

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



【目 次】

超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム	1
PM：星 健夫（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）	
ジェネリックVラボの構築と有用性実証	3
課題推進者：星 健夫（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）	
デジタルプラットフォームの構築と有用性実証	5
課題推進者：川島 直輝（国立大学法人東京大学 教授）	
計測インフォマティクスを中心としたAI/データ駆動科学応用手法の構築と有用性実証	7
課題推進者：青西 亨（国立大学法人東京大学 教授）	
マテリアルインフォマティクスを中心としたAI/データ駆動科学応用手法の構築と有用性実証 ..	9
課題推進者：原嶋 庸介（国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学 准教授）	
数値線形代数の大規模問題を中心とした数理応用手法の構築と有用性実証	11
課題推進者：曾我部 知広（国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 教授）	
革新的偏微分方程式数値解法を中心とした数理応用手法の構築と有用性実証	13
課題推進者：宮武 勇登（国立大学法人大阪大学 准教授）	
Vラボ向け高速計算技術の開発	15
課題推進者：工藤 周平（国立大学法人電気通信大学 准教授）	
プラズマ時空間挙動の予測AI開発	17
課題推進者：上田 修功（理化学研究所革新知能統合研究センター 副センター長）	
先進第一原理シミュレーションによる未来予測型乱流輸送モデルの構築	19
課題推進者：今寺 賢志（国立大学法人京都大学 准教授）	
異種データ統合による未来予測型乱流輸送モデルの構築	21
課題推進者：前山 伸也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 准教授）	
異種データ統合による磁場閉じ込めFES設計と性能予測	23
課題推進者：山口 裕之（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 准教授）	

コア-周辺-壁を結合した統合輸送コードの構築と磁場閉じ込めFES性能予測	25
--	----

課題推進者：糟谷 直宏（国立大学法人九州大学 教授）

コア-周辺-壁の結合に向けた革新的プラズマ-壁相互作用モデルの創出	27
---	----

課題推進者：齋藤 誠紀（国立大学法人山形大学 准教授）

中性子照射下での構造材料劣化予測	29
--	----

課題推進者：森下 和功（国立大学法人京都大学 准教授）

炉工学における異種物性データの統合予測	31
---	----

課題推進者：田中 照也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）

超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

PM：

星 健夫（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本プロジェクトでは、フュージョンエネルギーシステム開発の加速を目的として、多様なバーチャルラボ（仮想実験室、Vラボ）を構築し、次世代システムの性能予測や設計に資する「未来予測」を実現する。研究推進は、フュージョンエネルギー分野とAI分野（データ駆動科学、計算物理学、数理科学、高速計算技術等を含む）との学際的体制で進めている。本年度は主に、下記3項目(I)(II)(III)を実施した。(I) 研究推進体制の構築：本プロジェクトはスモールスタート型として発足し、本年度に課題推進者（PI）の選考・指名を実施した。その結果、2025年12月より15名のPIによる学際的体制を整備し、本格的な研究活動を開始した。(II) ジェネリックVラボおよび要素技術の開発：多様なVラボの共通基盤となる「ジェネリック（共通設計型）Vラボ（G-Vラボ）」の先行開発を進めた。また、インフォマティクス手法をはじめとする要素技術について、一部をモジュール（小型プログラム）とした開発し、今後のVラボ構築に向けた基盤技術の整備を行った。(III) 具体的Vラボ構築に向けた検討：磁場閉じ込め型フュージョンエネルギーシステムや、中性子照射などの関連材料実験を対象として、具体的なVラボ構築に向けた実施計画を詳細化した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

G-Vラボを開発し、下記[1][2]の応用研究を通じて、その有用性を実証した。G-Vラボは、複数モジュールから構成され、モジュールを組み替えることで、多様なVラボを柔軟かつ効率的に構築できる特徴を有する。本成果により、次年度以降に多様なVラボを構築するための基盤を整備することができた。

2) 代表的な論文

[1] K. Sakai, *et al.*, “Conceptual design of Thomson scattering system with high wavelength resolution in magnetically confined plasmas for electron phase-space measurements”, *Plasma Phys. Control. Fusion* 68, 015034 (2026).

概要：G-Vラボを構築・応用したプラズマ研究として、核融合科学研究所の次世代磁場閉じ込め核融合装置 Compact Helical Device (CHD) におけるトムソン散乱計測システムの概念設計を行った。高温プラズマにおけるトムソン散乱計測システムに対して、SN比について定量的評価が実現し、速度分布関数の歪みを検出可能な計測システムの設計が可能になった。この成果は、G-Vラボが新たな実験装置の設計に適用可能であることを実証した。

[2] K. Sakai, *et al.*, “Monte Carlo simulation method for incoherent Thomson scattering spectra from arbitrary electron distribution functions”, *JINST* 21, C01002 (2026).

概要：G-Vラボを構築・応用したプラズマ研究として、トムソン散乱計測スペクトルに対する逆問題型データ解析を実施した。本実験では、速度分布が理想的なマクスウェル分布からどの程度ずれているかを高精度に検出することが課題である。模擬実験データを用いた逆問題解析の結果、非Maxwell型の速度分布関数を適切に復元できることを確認した。これにより、G-Vラボが、高い信頼性と精度が求められるプラズマ計測データ解析にも適用可能であることを実証した。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

ジェネリック V ラボの構築と有用性実証

課題推進者：

星 健夫（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム開発に向けバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）の共通基盤ソフトウェアである「ジェネリック（共通設計型）V ラボ（G-V ラボ）」の開発を進めている。本年度は主に下記 2 項目(I)(II)を実施した。(I) G-V ラボの初期バージョン開発：G-V ラボの基本仕様を策定し、各種モジュール（小型プログラム）を柔軟に組み合わせることで、多様な機能を持つ V ラボを構築できる仕組みを整備した。具体的には、自作のデータ解析フレームワーク「ODAT-SE（オーダットエスイー）」の機能拡張により実現させた。さらに、策定した仕様に基づいて G-V ラボを実際に構築し、応用研究へ適用した結果、問題なく運用できることを確認した。これにより、基本仕様の妥当性と有効性を実証した。(II) データスペース構築に向けた準備：V ラボを活用したクラウドサービスの中核機能であるデータスペース（非公開データを含むデータ共有システム）の構築に向けた準備を進めた。具体的には、フュージョンエネルギー分野における網羅的なデータ収集を目指し、要素技術カテゴリの一覧を作成した。その上で、各カテゴリについて特許全文の AI 解析を実施し、主要なデータ所有者やデータ内容のデータベース（データカタログ）を作成した。これにより、次年度以降に進めるデータ収集・整備の方針を明確化することができた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

G-V ラボを開発し、下記 [1] [2] の応用研究を通じて、その有用性を実証した。G-V ラボは、複数モジュールから構成され、モジュールを組み替えることで、多様な V ラボを柔軟かつ効率的に構築できる特徴を有する。本成果により、次年度以降に多様な V ラボを構築するための基盤を整備することができた。

2) 代表的な論文

- [1] K. Sakai, *et al.*, “Conceptual design of Thomson scattering system with high wavelength resolution in magnetically confined plasmas for electron phase-space measurements”, Plasma Phys. Control. Fusion 68, 015034 (2026).

概要：G-V ラボを構築・応用したプラズマ研究として、核融合科学研究所の次世代磁場閉じ込め核融合装置 Compact Helical Device (CHD) におけるトムソン散乱計測システムの概念設計を行った。高温プラズマにおけるトムソン散乱計測システムに対して、SN 比について定量的評価が実現し、速度分布関数の歪みを検出可能な計測システムの設計が可能になった。この成果は、G-V ラボが新たな実験装置の設計に適用可能であることを実証した。

- [2] K. Sakai, *et al.*, “Monte Carlo simulation method for incoherent Thomson scattering spectra from arbitrary electron distribution functions”, JINST 21, C01002 (2026).

概要：G-V ラボを構築・応用したプラズマ研究として、トムソン散乱計測スペクトルに対する逆問題型データ解析を実施した。本実験では、速度分布が理想的なマクスウェル分布からどの程度ずれているかを高精度に検出することが課題である。模擬実験データを用いた逆問題解析の結果、非 Maxwell 型の速度分布関数を適切に復元できることを確認した。これにより、G-V ラボが、高い信頼性と精度が求められるプラズマ計測データ解析にも適用可能であることを実証した。

3) 代表的な特許

該当なし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

デジタルプラットフォームの構築と有用性実証

課題推進者：

川島 直輝（国立大学法人東京大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が構築できるデジタルプラットフォームを開発する。目標は、デジタルプラットフォーム上の各種モジュールやデータを組み合わせることで、多様な V ラボが自在に構築できるようにすることである。本年度は主に、下記 2 項目 (I)(II)を推進した。(I) ビッグデータ生成モジュールの開発・整備： JCAHPC スーパーコンピュータ Miyabi (Miyabi-G) および九州大学スーパーコンピュータ玄界を対象として、ビッグデータ生成にむけた網羅的計算実行ツール（バルクジョブ実行ツール） *moller* の拡張・整備を実施した。各スーパーコンピュータにおいてテストプログラムを用いた動作検証を進めるとともに、システムごとの設定項目や利用方法を整理したマニュアルの整備を行い、利用基盤の充実を図った。これにより、複数の計算機環境において *moller* を安定的に利用するための基盤整備を進展させた。次年度以降 *moller* は、高信頼な V ラボを構築する際に重要となる、シミュレーションによるビッグデータ生成に活用される。(II) ジェネリック V ラボの構築：研究開発課題 1-1 と連携し、自作データ解析フレームワーク「ODAT-SE」とプラズマモジュールの整備・連結を完了し、ジェネリック V ラボの一例とした。コード、マニュアル、チュートリアルを含めた利用環境の整備を進めた。また、研究課題 1-1 との連携にもとづく成果として、東大サーバーmdx 上において、ジェネリック V ラボが正常に稼働することを確認し、異なる分野のモジュールを統合的に利用可能とする仮想研究基盤としての有効性を検証した。(I)(II)のほか、奥野 PJ との PJ 間連携として、加速器物理コード *ImpactX* を物性研究所スーパーコンピュータ (ohtaka、kugui) に導入し、正常動作を確認した。また、*moller* の実用性を実証する応用研究として、研究開発課題 1-1 との連携にもとづき、第一原理材料シミュレーションを用いた REBCO 系材料の酸素欠陥エネルギーの網羅的計算を進め、合金系による欠陥形成傾向の差異を解析し、中性子照射環境下における材料劣化挙動の理解に向けた基礎的知見を蓄積した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

研究開発課題 1-1 と連携のもと、「ODAT-SE」とプラズマモジュールの整備・連結を完了し、mdx 上で両者を組み合わせたジェネリック V ラボが安定して動作することを確認した。完成された V ラボにより応用研究が行われた（研究開発項目 1-1 の報告書）ことにより、デジタルプラットホームの基盤整備が完了し、次年度以降に様々な V ラボを構築していくことが可能となった。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

計測インフォマティクスを中心とした AI/データ駆動科学応用手法の構築と有用性実証

課題推進者：

青西 亨（国立大学法人東京大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課では、フュージョンエネルギーシステム研究開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が高い信頼性をもつために、計測インフォマティクス手法（先端的な計測データ解析手法）のモジュールを開発する。本年度は、下記2項目(I)(II)を推進した。(I) 超次元データ空間計測における分解能最適化モジュールの開発：プラズマ計測を対象として、異種座標軸からなる高次元データにおける分解能と信号対雑音比 (S/N 比) のトレードオフを解消する手法を開発した。一般に、分解能を高めるとデータ点数が減少し S/N 比が低下するため、両者を両立する手法が求められる。多重解像度データ統合手法を開発し、安定動作を確認するとともに、デジタルプラットフォームへの実装を完了した。研究開発項目 1-1, 2-2 と連携し、プラズマ位相空間乱流計測で、開発した手法の有用性を実証した[1, 2]。(II) 炉材料インテリジェント計測モジュールによるヘリウムバブル解析：研究開発項目 4-1 のテーマである「中性子照射下における炉材料劣化予測」に対応するため、炉材料中のヘリウムバブルのインテリジェント計測モジュールの開発に取り組んだ。ヘリウムバブルは中性子照射脆化およびヘリウム脆化の主要因であり、その定量評価は材料寿命予測に不可欠であるが、従来は人手解析に依存していた。本課題では時谷政行 (NIFS) 提供の透過電子顕微鏡 (TEM) データを用い、基盤 AI である Cellpose を改良して自動検出を試み、一定の検出性能を確認した。一方で、学習データ数不足、解像度制約、アノテーション困難性が主要課題であることを明確化した[3]。これを踏まえ、次年度の AI 学習用データセット整備に向けた計測条件を整理した。

- [1] 青西亨、小林達哉、星健夫、Improving resolution of plasma velocity-distribution-function measurements using multi-resolution data integration、Sixth IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis (<https://conferences.iaea.org/event/393/overview>)、2025/9/9.
- [2] 青西亨、大西颯真、小林達哉、星健夫、多重解像度データ統合によるプラズマ速度分布関数測定の分解能向上、第 42 回 プラズマ・核融合学会年会 オーガナイズドセッション 「プラズマ共創データサイエンス — インフォマティクスで予測を高度化する」、2025/12/1
- [3] 俣田直也、時谷政行、星健夫、青西亨、機械学習を用いた金属材料中のヘリウムバブルの検出、【学際的先端計測未来創成研究会 — 先端計測と情報科学分野の横断】【学際的インフォマティクス：プラズマ核融合、材料、脳・バイオへの応用】、2026/2/27

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本研究開発プロジェクトの主な対象である、磁場閉じ込め型フュージョンエネルギーシステムむけ[1, 2]、フュージョンエネルギーシステム材料むけ[3]、の計測インフォマティクス手法がそれぞれ独立に開発された。次年度以降にこれら手法を活用することで、各種 V ラボに実験の知見を統合することができる。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

マテリアルインフォマティクスを中心とした AI/データ駆動科学応用手法の構築と有用性実証

課題推進者：

原嶋 庸介（国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム研究開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が高い信頼性をもつために、マテリアルインフォマティクス手法（材料科学などで用いられるパラメータ探索手法）のモジュールを開発する。本年度は主に、下記 2 項目(I)(II)を実施した。(I)異種データ統合モジュール開発：実験データ（時系列を含む）とシミュレーションデータなどを統合して分析・活用する異種データ統合モジュールを開発し、予期せぬエラーなく動作することを検証した上で、デジタルプラットフォームに提供した。具体的には、モデル問題を設定したうえで、プロセスインフォマティクス（時系列プロセスを対象としたインフォマティクス）むけモジュールをデータ解析フレームワーク ODAT-SE に組み込み、実験データとシミュレーションデータを統合する異種データ統合モジュールを開発し、エラーなく動作することを検証した[1]。(II) 次年度に向けた準備研究：上記モジュールを用いて、フュージョンエネルギー分野の材料特性予測として中性子照射下での構造材料劣化予測（研究開発課題 4-1）および異種物性データ統合予測（研究開発課題 4-2）の実施、モジュールの有用性の実証に向けた作業を進めている。具体的には、研究開発課題 4-1 と関連した部分については、研究開発課題 4-1 で開発しているマルチスケールシミュレーションコードと本研究開発課題が開発しているプロセスインフォマティクスコードを統合し、中性子照射下での構造材料劣化予測モデルのモジュールのプロトタイプを開発中である。現在、マルチスケールシミュレーションコードをプロセスインフォマティクスコードに組み込むためのインターフェイスを調整中である。研究開発項目 4-2 と関連した部分については、電気伝導度の高温挙動と低温挙動の間のデータを用いて、本研究開発課題が開発しているデータ統合コード(CLAUDE)を拡張した転移学習手法を検証する。現在、拡張機能としてモデルエビデンスを用いた基底選択の導入のための技術的要素を調査中で、研究開発課題 1-2 と詳細について議論している。研究開発項目 4-2 に含まれる他テーマについても、情報交換を行なっている。

[1] 岡田拓巳他、中性子照射下での構造材料劣化予測に向けたプロセスインフォマティクスに基づくプラットフォーム構築、第 42 回 プラズマ・核融合学会年会、2025 年 12 月 1 日。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

モデル問題を設定したうえで、プロセスインフォマティクスコードを ODAT-SE に組み込み、実験データとシミュレーションデータを統合する異種データ統合モジュールの開発と動作検証を行った。これにより次年度以降に、中性子照射下での構造材料劣化プロセスなど、時系列プロセスを対象とした V ラボの構築が可能となった。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

数値線形代数の大規模問題を中心とした数理応用手法の構築と有用性実証

課題推進者：

曾我部 知広（国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム研究開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が高速性と高信頼性を併せ持つために、数値線形代数分野の先端的アルゴリズムに基づくモジュールを V ラボに導入する。本年度は、大規模行列に対する線形方程式問題（大規模問題）向けに、最適解法を自動設定するモジュールを試験的に開発し、フュージョンエネルギー分野のシミュレーションで現れる複数の線形方程式問題に適用して、最適な解法が見出されるかどうかを検証した。最適解法を自動設定するモジュールは、具体的にはフュージョンエネルギー分野で使用されている対称行列用の線形方程式の解法であるクリロフ部分空間法の代表的な解法である共役勾配法（Conjugate Gradient method、略して CG 法）の実装、そして非対称行列用の線形方程式の代表的な解法である BiCGSTAB 法の実装を行い、クリロフ部分空間法の収束性を高める前処理技術として不完全 LU 分解 (ILU(0)) の実装を行なった。また、疎行列用の直接解法（疎行列用の LU 分解法）の有力なソフトウェアライブラリである MUMPS と連携させる基礎的なモジュールを開発した。クリロフ部分空間法は、独自に実装したものであるため、フュージョンエネルギー分野で使用されているライブラリ（PETSc: 米国アルゴンヌ国立研究所、2025 年 12 月時点で最新安定版 PETSc Release Version 3.24.2）と比較した。さらに、PETSc には実装されていない D-ILU 型前処理の実装も行なった。上記モジュールを用いた計算速度や信頼性の調査により、次年度に向けた最新の解法の実装を行う意義を確認できた。本成果は、独自の実装によりライブラリをブラックボックス的に使うのではなく詳細にコードを改良できるため、フュージョンエネルギー分野に特化した前処理技法の開発や解法のチューニングを自由に行うことが可能となることを意味する。

福山淳（京大/PM アドバイザー）と連携し、本モジュールをトカマク型フュージョンエネルギーシステム向けコードである TASK の中にある線形方程式の問題（TASK/wf2d 波動光学的伝播解析）に適用したところ、この問題に関しては疎行列用直接解法を選択するのが適切であるとの判定であった。疎行列の構造がバンド構造であったことや条件数の大きさに起因していると考えられる。それ以外の問題にも適用しており、全体としては、疎行列用直接法と反復法（クリロフ部分空間法）のどちらも重要であり、PETSc に実装されていない前処理技術の実装や開発も重要であることがわかった。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

最適解法を自動設定するモジュールの開発・利用により、フュージョンエネルギー分野のシミュレーションにおける線形方程式では、問題により最適解法が異なることが分かった。次年度以降、上記モジュールを活用することで、高速性と高信頼性を併せ持つ V ラボを構築していくことができることが分かった。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

革新的偏微分方程式数値解法を中心とした数理応用手法の構築と有用性実証

課題推進者：

宮武 勇登（国立大学法人大阪大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム研究開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が高速性と高信頼性を併せ持つために、偏微分方程式向け数値解析学分野の先進アルゴリズムに基づくモジュールを V ラボに導入する。本年度は、次年度以降の本格的な不確かさ定量化評価手法および数値解法開発に向けた基盤整備として、下記 2 項目 (I) (II)を実施した。(I) プラズマ系向けモデル方程式の策定：偏微分方程式の数値計算の不確かさ定量化評価手法の対象となる簡略化モデル方程式の策定を行った。背景として、フュージョンエネルギー分野におけるプラズマ系の方程式に対して数値解法が開発されているが、計算精度を定量的に評価した研究は少なく、多くの場合、研究者の経験に基づく主観的な判断に依存していることが挙げられる。当該年度は、次年度以降に不確かさ定量化評価手法と数値解法の開発の両面の研究を推進する計画であることを踏まえ、研究開発課題 2-2 と議論し、簡約化モデルとして位相空間 2 次元 Vlasov-Poisson 方程式系を扱うことが適切であると判断した。比較的低次元であることから、様々な解法との比較を行うことができるため、将来的に高次元モデルを対象とする研究に進むための基礎となることが期待される。(II) 数値計算の不確かさ定量化手法に関する基礎検討：次年度以降の研究も見据え、数値計算の不確かさ定量化手法に関する基礎検討も行った。基本となる考え方は、数値計算の誤差を確率変数としてモデル化し、その特徴量を推定することにある。しかし、既存の多くの手法は、変数の少ない常微分方程式を対象とする研究にとどまっているものがほとんどで、空間高次元の偏微分方程式へ適用するには大きなギャップがあった。そのギャップを埋めるべく、中規模程度の常微分方程式に対しても適用が可能な不確かさ定量化手法を開発した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

次年度以降に実施予定である不確かさ定量化評価手法および数値解法開発に向けた基盤整備として、対象モデル方程式の策定および関連する数理的検討を中心に研究を実施した。これらは、フュージョンエネルギー分野におけるプラズマ系に対して、高速性と高信頼性を併せ持つ V ラボを実現するための数理的基盤を与えることが分かった。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

V ラボ向け高速計算技術の開発

課題推進者：

工藤 周平（国立大学法人電気通信大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム研究開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）が高速性と高信頼性を併せ持つために、現世代・次世代計算機（ハードウェア）向けの高速計算技術を取り入れたモジュールをV ラボに導入する。本年度は、下記2項目(I)(II)を実施した。(I) プラズマシミュレーションコード TASK に対する高速化可能性検討：フュージョンエネルギーシステム分野のコードを高速計算技術の観点から調査し、計算の高速化を阻害する主要な要因（性能ボトルネック）を特定することで、計算の高速化の可能性を検討した。具体的には、福山淳（京大/PM アドバイザー）と連携し、V ラボでの活用が想定されるトカマク型フュージョンエネルギーむけシミュレーションコード TASK の2つのモジュール（wf2d および wf3d）のコード調査を行った。wf2d においては、共有変数の除去による主要なループ処理のスレッド並列化や、行列要素生成における演算量削減などを行い、テスト問題において約4.6倍の高速化を達成した。また wf3d については、同様にループ処理のスレッド並列化や頂点探索処理へのデータ構造の適用により、テスト問題において約31倍の高速化を達成した。これらの結果は、TASK のレガシーフォートランに由来する構造的な問題（非明示的なグローバル変数の共有、基本的なデータ構造の未適用）の修正による効果を示しており、今後のV ラボ構築において性能問題解決に役立つものと考えられる。(II) 第一原理プラズマシミュレーションコード GKNET に対する高速化可能性検討：研究開発課題2-1と連携し、V ラボでの活用が想定されるトカマク型フュージョンエネルギーむけ第一原理プラズマシミュレーションコード GKNET の高速化可能性を検討した。GKNET コードのうち準中性条件ソルバー部分のコードを提供され、数値的性質およびアルゴリズムの解析を行った。従来、本ソルバーにおいては行列の性質の悪さから直接法のみが適用できると認識されていたが、適切な前処理を用いることで反復法を用いてもわずか100反復程度で収束が得られることが判明した。またCPU 向けの初期段階の実装においては既に反復法を用いることで従来の直接法を上回る速度が得られており、次年度以降のさらなる実装高速化や次世代ハードウェア利用としてGPU 向け実装の開発への方針を得た。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

磁場閉じ込めフュージョンエネルギーシステムむけV ラボでの活用が想定される2種プラズマシミュレーションコード（TASK、GKNET）に対して高速計算技術の観点から調査を行った。得られた知見により、次年度以降、現世代・次世代計算機（ハードウェア）上で高速性と高信頼性を併せ持つV ラボが構築できるための方針を得た。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

プラズマ時空間挙動の予測 AI 開発

課題推進者：

上田 修功（理化学研究所革新知能統合研究センター 副センター長）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム開発を加速する各種バーチャルラボラトリ（仮想実験室）で求められる、高速かつ高信頼にプラズマ挙動を予測する AI 技術を開発する。本年度(2025 年 12 月～2026 年 3 月末)は、磁気流体力学(MHD)方程式を対象とした Physics-Informed Neural Networks (PINN) の基盤構築と評価環境の整備を中心に研究を推進した。MHD 方程式の数学的構造を整理し、密度・圧力・流速・磁場を出力とするニューラルネットワークに対し、方程式残差を損失関数として組み込むことで、物理法則と整合した学習フレームワークを構築した。また、有限体積法に基づく OpenMHD コードにより Orszag-Tang 渦の高精度数値解を生成し、PINN との比較評価基盤を整備した。これにより、L2 誤差や収束挙動などに基づく定量評価が可能となった。さらに、計算領域を複数のサブドメインに分割し各領域で局所的に学習を行う FBPINNs (Finite Basis PINNs) について追試を行い、通常の PINN との比較を通じて、局所適応により高精度化が期待できる一方で、計算コストが増大する特性を明らかにした。加えて、Kolmogorov-Arnold Network (KAN) の理論構造に関する調査を行い、PINN との統合に向けた基礎的知見を整理した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

PINN による MHD 方程式解の再現と、その妥当性を検証する評価基盤を確立した点である。特に、OpenMHD による高精度数値解を基準として、PINN の予測結果を L2 誤差や収束特性に基づき比較可能としたことで、物理学習モデルの性能を客観的に評価する枠組みを構築した。この枠組みにより、従来の数値解法と比較した際の PINN の有効性と限界を明確に把握できるようになり、今後の KAN 統合や高次元問題への展開に向けた基盤が整備された。また、モデル高度化に向け、FBPINNs との比較検証により、局所適応型アプローチの有効性と課題を定量的に整理した。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

先進第一原理シミュレーションによる未来予測型乱流輸送モデルの構築

課題推進者：

今寺 賢志（国立大学法人京都大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステムむけ V ラボの基盤を担う第一原理プラズマシミュレーションコード GKNET を発展させ、コアプラズマを包括的に取り扱うことが可能なグローバル電磁乱流コードを開発する。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、下記 3 項目(I)(II)(III)を実施した。(I)物理・数理間連携計画の策定：次年度以降に高速かつ高信頼な第一原理プラズマシミュレーションを実現するために、物理系研究者（研究開発課題 2-1、2-2）と数理系研究者（研究開発課題 1-5、1-6、1-7）で集中的に議論し、分野間連携の計画を策定した。結果として、(A)第一原理コード GKNET の数値計算手法の改良および高速化、(B)線形ジャイロ運動論方程式を高速に解くための大規模線形行列ソルバーの開発、(C)動的低ランク近似などの先進的数値解法を適用した Vlasov コードの開発、を、次年度以降に進める計画を策定した。(II) Field solver への反復法の導入：研究開発課題 1-7 と連携し、GKNET の中核的計算である Field solver（場の方程式を解く計算ソルバー）に反復法を導入した。具体的には、ADI 前処理と BiCGSTAB 法を併用することで、平均相対誤差を 10^{-10} オーダーに維持しつつ、約 2.8 倍の高速化を実現した。(III) Collision solver への Fourier Neural Operator の導入：GKNET の中核的計算である Collision solver に Fourier Neural Operator (FNO)を用いた速度空間 2 次元衝突拡散シミュレーションを導入した。その結果、従来法（4 次精度陽的 Runge-Kutta 法）と比較して、平均相対誤差を 10^{-3} のオーダーに維持しつつ、約 21 倍の高速化を実現した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

フュージョンエネルギーシステムむけ V ラボに重要な電磁グローバルジャイロ運動論コードの高速化を目的として、反復行列ソルバーおよび FNO ソルバーを開発し、今後の大規模第一原理シミュレーションに向けたモジュール整備を進めた。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

異種データ統合による未来予測型乱流輸送モデルの構築

課題推進者：

前山 伸也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、磁場閉じ込め型フュージョンエネルギーシステム向けバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）における乱流輸送およびプラズマ分布の高精度予測を実現するため、理論・シミュレーション・実験の異種データを統合するマルチフィデリティ輸送モデルを構築する。マルチフィデリティ（Multi-fidelity）とは、信頼性（fidelity）が異なる異種データ・モデルを統合する手法をさし、V ラボ構築むけデータ駆動科学の中核的アイディアである。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、下記 2 項目(I)(II)を実施した[1, 2]。(I) 物理・数理間連携計画の策定：次年度以降に高速かつ高信頼な第一原理プラズマシミュレーションを実現するために、物理系研究者（研究開発課題 2-1、2-2）と数理系研究者（研究開発課題 1-5、1-6、1-7）で集中的に議論し、分野間連携の計画を策定した。第一に、第一原理プラズマシミュレーションコードの数値計算手法の改良・高速化として、動的低ランク近似などの先進的数値解法を適用した運動論的プラズマシミュレーションコードの開発を行う。第二に、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける大規模線形行列ソルバーの開発として、線形ジャイロ運動論方程式を高速に解く大規模線形行列ソルバーの手法検討・開発を行う。(II)マルチフィデリティ輸送モデル開発にむけた検討：次年度以降のマルチフィデリティ輸送モデル組込みを見据え、本年度は、輸送コード GOTRESS を例として構成・入出力に関する初期検討を開始し、輸送コードにマルチフィデリティ法を導入するための仕様を策定した。GOTRESS による輸送計算を実施するとともに、CDBM モデルや TGLF モデルなどの既存の輸送モデルのデータ書き出しおよびそのデータに基づくガウス過程回帰モデルの生成を行った。出力データに基づき、マルチフィデリティ手法の適用を検討した。異なる輸送モデルでは平衡量から換算した個別の入力パラメータが用いられるが、マルチフィデリティ回帰では異なるフィデリティモデルの入力パラメータが同一（あるいは包含）である必要がある。そのため、(a)上記既存輸送モデルを共通の平衡量を入力とするように変更してデータを生成、(b)データに基づきマルチフィデリティ回帰モデルを作成、(c)さらに、マルチフィデリティ回帰モデルを模擬する単一ガウス過程回帰モデルを代理モデルとして生成、(d)ガウス過程回帰代理モデルを統合コードに適用という手順で、マルチフィデリティ回帰を統合輸送コード GOTRESS に適用するための仕様を策定した。

[1] 前山伸也、“磁化プラズマ乱流のマルチスケール・マルチフィデリティモデリング”、STE シミュレーション研究会：プラズマ科学とデータ駆動科学の協調、2026 年 3 月 10 日。（招待講演）

[2] 前山伸也、“マルチフィデリティデータ統合による乱流輸送モデリング”、第 28 回若手科学者によるプラズマ研究会、2026 年 3 月 12 日。（招待講演）

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

第一原理プラズマシミュレーションコードの高速化可能性検討、および、マルチフィデリティ法導入のための初期検討により、次年度以降にマルチフィデリティ法に基づく高信頼 V ラボを構築するための知見をえた。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

異種データ統合による磁場閉じ込め FES 設計と性能予測

課題推進者：

山口 裕之（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、多様な磁場閉じ込めフュージョンエネルギーシステムのバーチャルラボラトリ（仮想実験室、Vラボ）を開発するため、多様な磁場閉じ込め装置で蓄積された観測データを含む異種データを統合した輸送モデルを構築し、顕著な非線形性を特徴とするプラズマ輸送を高速かつ高精度に予測する技術の開発を目指す。本年度（2025年12月～2026年3月）は4ヶ月間のみの研究期間であり、下記3項目(I)(II)(III)を実施した。(I) 異種データ統合手法の基盤構築：信頼性の高いプラズマ輸送モデル開発を実現する異種データ統合手法の基盤構築が進展した。研究開発課題1-1、2-2と連携し、多様な磁場閉じ込め実験装置への展開を想定した実験・シミュレーションデータベースの仕様策定を行った。本仕様に基づき、大型ヘリカル装置（LHD）で取得された実験解析データ1800点以上を格納したデータベースのプロトタイプを作成した。さらに、Pythonによるユーザーインターフェースを試作し、データ検索およびデータ登録が正常に動作することを確認した。(II) 磁場配位汎用型の統合コードの初期的開発：磁場閉じ込め向けバーチャルラボラトリの基盤モジュールの一つとして、磁場配位汎用型の統合コードを新規に開発し、プラズマの1次元輸送シミュレーションを対象とした動作検証および性能実証を完了した。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）を対象に開発されてきた既存の統合輸送コードTASK3Dとのコード間ベンチマークにより、LHD磁場配位におけるプラズマ温度・密度・径電場の径方向分布を正常に計算できることを確認した。また、シングルコアでの計算速度においても既存コードより優れていることを確認した。さらに、新規コードの並列計算機能を用いた場合、4コア並列で約4.5倍、8コア並列で約7倍（それぞれ、既存コードのシングルコア実行に対する比）高速に計算可能であるという結果を得た。(III) 閉じ込め配位最適化設計コードの機能拡張：高性能な将来装置をデジタル空間上で設計する手法の高度化へ向けて、核融合科学研究所で開発中の閉じ込め配位最適化設計コードの機能を拡張した。具体的には、装置建設コストの見積もりにおいて有効な指標となる蓄積磁気エネルギーおよび電磁力を、任意形状コイルに対して簡易的に評価する機能を実装した。これにより、コスト評価モデルへの迅速なデータ提供が可能となった。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

新規に開発した統合コードにより、プラズマの1次元輸送を高精度に、かつ、LHDを対象に開発されてきた既存の統合輸送コードよりも高速に計算することが可能となった。本コードは多様なヘリカルおよびトカマク型を含む環状磁場閉じ込め装置を対象として開発を進めているものであり、今後設計される将来装置の性能予測に必要な不可欠な技術基盤である。本成果は、その基幹モジュール群が正しく動作し、適切に結合されていることを実証するものである。これは、本コードの信頼性と新規開発の意義を裏付けるとともに、磁場閉じ込めフュージョンエネルギーシステム向けバーチャルラボラトリの適用範囲拡大に寄与する、重要な成果である。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

コアー周辺一壁を結合した統合輸送コードの構築と磁場閉じ込め FES 性能予測

課題推進者：

糟谷 直宏（国立大学法人九州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステムのバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）の中核となる、コア（炉心）領域・周辺領域・壁（炉壁）領域を連成したプログラムコードを開発する。トカマク型フュージョンエネルギーシステムを対象としたプログラムコードを、主に開発する。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、以下 2 項目(I)(II)を実施した。(I) トカマク向け V ラボ最初期バージョン（V ラボ ver. 0、ミニマルモデル）の仕様策定と次年度開発計画：プラズマ性能予測に必要な機能を選定し、トカマク向け V ラボの最初期モデル(V ラボ ver. 0、ミニマルモデル) について、コア領域・周辺領域・壁領域の仕様および研究開発計画を策定した。一般的に、信頼性と計算速度は相反する要求であり、シンプルで高速なモデルと信頼性は高いが低速なモデルは双方が重要である。コア領域・周辺領域・壁領域のモデルは、初期には、それぞれシンプルなモデルをモジュールとして実装し、以後はより高信頼なモデルのモジュールも選択できるようすることとなった。コア領域については TASK コードを最初期モデルに策定し、研究開発課題 1-1・1-2、および、福山淳（京大/PM アドバイザー）と連携しながら、V ラボむけにコード整備を行なっていくこととなった。また、周辺領域は簡易モデルを最初期モデルに実装し、壁領域まで考えたコア-周辺-壁モデルの開発については研究開発課題 2-5 と連携することとなった。そして本研究課題で開発されるプラズマ性能評価シミュレーションコードとジェネリック V ラボの機能を組み合わせることで、将来装置の性能予測が行える V ラボとなる。(II) コアプラズマ輸送解析：トカマク向け V ラボを構成するコア輸送モジュールにおいて、次世代トカマクパラメータを用いたコアプラズマ輸送解析を行った。核燃焼、外部プラズマ加熱、不純物の影響を考慮した自己無撞着に決まるプラズマ分布形成機構を評価した。ITER トカマク装置 L モードおよび H モードプラズマについて、先行研究と同様、不純物中心蓄積のない結果を得た。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

トカマク型フュージョンエネルギーシステムむけ V ラボ最初期バージョンに対して、構成要素であるコア領域・周辺領域・壁領域のそれぞれにおけるモデルを策定し、次年度以降の V ラボ最初期バージョンの開発方針が決定された。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

コア-周辺-壁の結合に向けた革新的プラズマ-壁相互作用モデルの創出

課題推進者：

齋藤 誠紀（国立大学法人山形大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、フュージョンエネルギーシステム向けバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）に必須となるプラズマ-壁相互作用のモジュールを開発する。V ラボは、コア（炉心）領域・周辺領域・壁（炉壁）領域の連成により実現される。具体的には、プラズマ-壁相互作用のモデルに基づき、3 種壁モデル（壁モデル A/B/C）を開発する。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、下記 2 項目(I)(II)を実施した。

(I) フュージョンエネルギーシステム向け V ラボ開発への連携体制の確立：プロジェクト内連携体制を確立し、次年度以降のフュージョンエネルギーシステム向け V ラボ開発の計画を具体化した。特に壁モデル A（放出分布モデル）を優先的にモジュール化し、V ラボ最初期バージョン（V ラボ ver.0）に実装する方針となった。(II)3 種壁モデルのプロトタイプの開発着手：炉心プラズマと壁面の複雑な相互作用を正確に評価するため、3 種壁モデル（壁モデル A/B/C）の開発に着手した。

壁モデル A（放出分布モデル）：プラズマからの入射粒子に対する壁材表面での反射やスパッタリングなどの放出挙動を記述するモデルである。具体的には、分子動力学法を用いて放出粒子のエネルギーや振動・回転準位分布を計算し、学習データを生成する。このデータを活用し、シース端におけるプラズマパラメータから壁面からの放出分布を予測するモデルを、全結合ネットワークの学習により構築する。本年度は、本モデルの学習パイプラインの構築と概念実証を完了した。

壁モデル B（壁内原子密度予測モデル）：プラズマ照射に伴う壁材内部への水素同位体の侵入・滞留や、それに伴う密度分布の変化を評価するモデルである。照射に伴い動的に変化する材料構造をシミュレーションに反映させるため、深層学習を用いた Dynamic kMC を実現する。さらに、開発した Dynamic kMC と MD 法を連携させ、長時間のプラズマ照射において壁内に水素同位体やヘリウムが蓄積する動的過程を評価する。そして、その結果を学習データとして活用し、シース端におけるプラズマパラメータから壁内粒子密度の深さ分布を予測する機械学習モデルを構築する。本年度は、Dynamic kMC を実現するための第一歩として、深層学習によるエネルギー分布予測モデルの実装を終えた。

壁モデル C（壁温・熱伝導モデル）：プラズマからの熱負荷を受けた際の壁材の温度上昇や熱伝導を解析するモデルである。具体的には、周辺プラズマコードから得られるシース端における粒子入射および輻射による熱流速分布を入力として、炉壁表面の温度を解析する。さらに、その解析結果を学習データとして活用し、熱流速分布から壁表面の温度を予測する深層学習モデルを構築する。本年度は、原型炉ダイバータの CAD データに基づく熱伝導解析に着手した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

フュージョンエネルギーシステム向け V ラボに実装する 3 種の壁モデル（壁モデル A/B/C）が策定され、特にモデル A（放出分布モデル）が V ラボ最初期バージョン（V ラボ ver.0）に次年度実装されることとなった。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

中性子照射下での構造材料劣化予測

課題推進者：

森下 和功（国立大学法人京都大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、核融合炉における中性子照射環境下での構造材料の劣化挙動を予測するバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）を開発する。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、下記 3 項目(I)(II)を実施した。(I) 材料実験向け V ラボ開発への連携体制の確立：プロジェクト内連携体制を確立し、次年度以降の材料実験向け V ラボ開発の計画を具体化した。特に、マテリアルインフォマティクスを担当する研究開発課題 1-4 と連携計画について密に議論を行い、データベース構築ならびにシミュレーション・機械学習モデルの構築・検証に関する基本方針を策定した。具体的には、本研究開発項目において次年度より開発予定の核融合炉材料劣化のマルチスケールシミュレーションコードと、研究開発課題 1-4 で開発中のプロセスインフォマティクスコードを統合し、中性子照射下における構造材料の劣化予測モデルに関するモジュールのプロトタイプ開発方針を定めた。(II)「密なデータベース」の構築：公開論文等に掲載された中性子照射およびイオン照射に関する実測データを対象として、核融合炉用構造材料（主に低放射化フェライト・マルテンサイト鋼）の破壊靱性および寸法安定性に関するデータの収集・整理を開始した。マルチスケールモデリングおよび機械学習モデルの検証に活用可能なデータベース構築を目的として、データ項目および構造の仕様を策定した。具体的には、以下のようなパラメータを体系的に整理する設計とした。

- ・ 論文メタ情報：著者、発行年、掲載誌、DOI、PDF ファイル名
- ・ 照射条件：照射種（中性子／イオン）、照射施設、照射孔、照射温度、照射量（dpa）、損傷速度（dpa rate）、中性子フラックス、照射時間／フルエンス、イオン種、イオンエネルギー、有効な損傷が存在する深さ範囲、dpa 深さ分布、He の有無、He 導入方法、He 濃度、He/dpa 比
- ・ 材料パラメータ：材料名（F82H、JLF-1、EUROFER、T91、モデル合金、純鉄等）、材料分類、化学組成（Cr、W、Ni 等）、熱処理条件、ヒート番号、平均粒径、照射後焼鈍の有無・条件
- ・ 照射後特性：評価手法（TEM、APT、引張試験、シャルピー試験等）、降伏応力、推定破壊応力、引張強度、全伸び、ひずみ速度、硬さ、DBTT 変化、破壊靱性値、スウェリング、微細組織（転位ループ、ボイド、He バブル等の数密度および直径）
- ・ その他：数値データの有無、図からの抽出の有無、定性的記述の有無等

これにより、異なる材料・照射条件間の比較や、シミュレーション・機械学習モデルへの入力データとして活用可能な基盤の整備に関する方針を策定した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

公開論文等に掲載された核融合炉用構造材料の破壊靱性および寸法安定性に関する照射データを収集・統合し、マルチスケールモデリングシミュレーションおよび機械学習モデル構築の前提となる高品質データ基盤の仕様を策定した。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現）・超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

炉工学における異種物性データの統合予測

課題推進者：

田中 照也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題はサブ課題（ α ）（ β ）からなり、2 種の材料実験向けバーチャルラボラトリ（仮想実験室、V ラボ）を開発する。サブ課題（ α ）では高性能電気絶縁・トリチウム透過低減・耐腐食を満たすセラミック材料予測むけ V ラボを開発し、サブ課題（ β ）では 高温・中性子環境下におけるタングステン材料中のトリチウム捕獲・輸送・放出挙動の予測むけ V ラボを開発する。本年度（2025 年 12 月～2026 年 3 月）は 4 ヶ月間のみの研究期間であり、サブ課題ごとにプロジェクト内連携体制を確立し、次年度以降の材料実験向け V ラボ開発の計画を具体化した。サブ課題（ α ）：「密なデータ（既存のデータ数が多い）」として文献から各種セラミック材料の「電気絶縁性能」データを収集するとともに性能予測モデルを構築し、異種データ統合により、「疎なデータ（少数のデータ）」しか存在しない核融合炉用セラミック材料の「水素同位体透過低減性能」の予測に、最初に取り組むこととした。研究開発課題 1-4 で開発されたデータ同化プログラム CLAUDE を使用することにより、予測モデル構築及び異種物性データの統合までが可能であること電気絶縁性能データの特徴等を確認した。また、電気絶縁性能と水素同位体透過性能を支配する共通の物理メカニズムの有無を議論し、相関関係を有する可能性がある共通要素を見出した。この共通要素が性能を支配する温度領域のデータを重点的に収集し、異種データ統合のための解析を進めることとした。サブ課題（ β ）：「密なデータ」である、イオン照射して損傷を与えたタングステン材料中の水素同位体蓄積量や脱離挙動の文献値を収集すると共に、データ同化に用いる水素同位体移動現象予測統合コードの開発を進めた。コード内で取り扱う現象の拡充と、各階層間の入出力データの整理などを進め、統合コードのスムーズな運用が可能となった。このコードを用いて、イオン照射して損傷を与えたタングステン材料中の水素同位体蓄積量や脱離挙動に関する予測精度の評価を実施した。次年度以降、研究開発課題 1-4 で開発されたデータ同化プログラムデータ同化プログラムとの連携により、予測性能を向上させると共に、「疎なデータ」である中性子照射実験に関する文献データを収集し、統合コードの適用性について評価を行う。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

サブ課題（ α ）（ β ）ともに、研究開発課題 1-4 と連携した研究活動を開始し、V ラボ開発にむけて、次年度からの連携研究の推進方策を議論と決定を行った。さらにサブ課題（ β ）では、鉄イオン照射を実施し損傷を与えた後に重水素ガス曝露により損傷中に重水素が蓄積したタングステン材料内部の重水素密度分布や昇温脱離スペクトルに関する文献データと統合コードの比較を行い、限られた実験条件範囲ではあるが、統合コードにより文献データを再現することが可能であることを示した。この再現性は、次年度以降の V ラボ開発に対する萌芽的成果である。

2) 代表的な論文

特になし。

3) 代表的な特許

特になし。