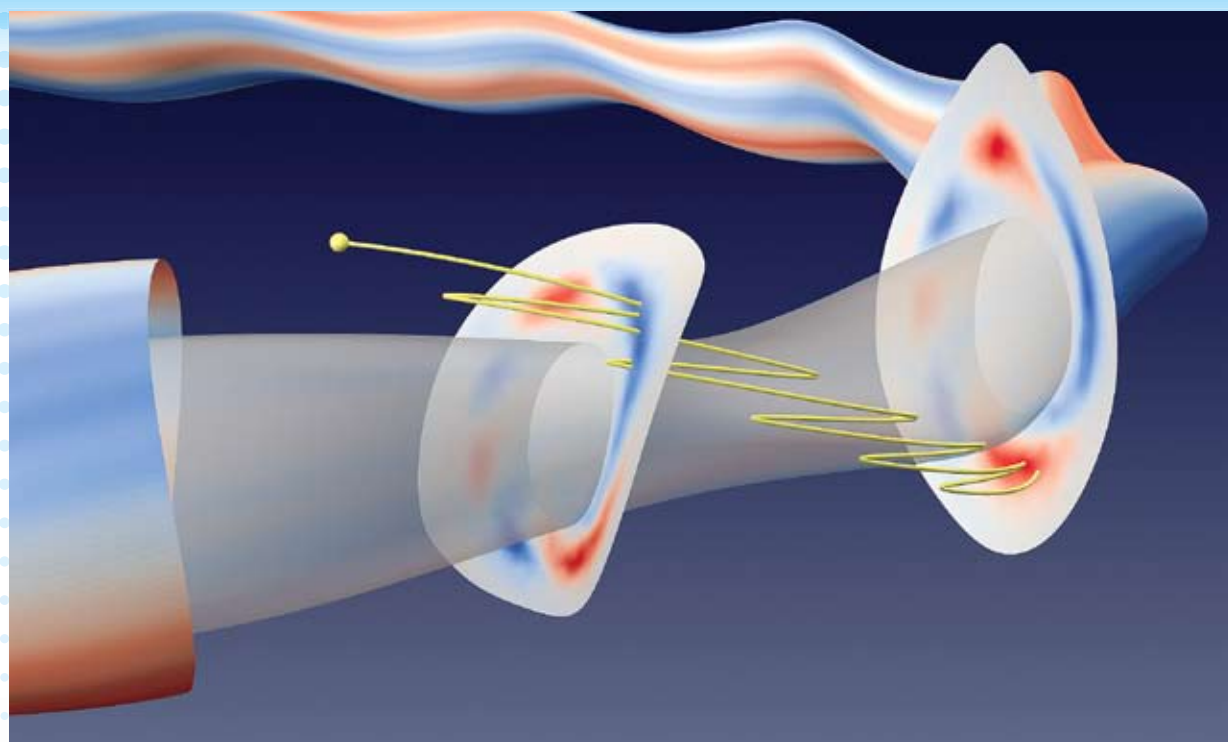


# NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.254



LHDプラズマと捕捉イオンの軌道

2020 JUN/JUL

>>> 研究最前線・・・2-7

2019年度成果報告：大型ヘリカル装置計画プロジェクト  
— 最先端の機器群が支えるLHD実験研究 —

森崎友宏

2019年度成果報告：数値実験炉研究プロジェクト

洲鎌英雄

2019年度成果報告：核融合工学研究プロジェクト

室賀健夫

>>> トピックス・・・8

第9回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞

核融合科学研究所オープンキャンパス2020のご案内

スーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」の愛称決定について

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

## 2019年度成果報告：大型ヘリカル装置計画プロジェクト — 最先端の機器群が支えるLHD実験研究 —

森崎友宏

令和になって初めての「大型ヘリカル装置 (LHD)」実験が2020年2月6日に終了し、実験グループは現在、データ解析とそれに基づく次の実験計画の策定、装置のメンテナンスを進めています。今回も多くの重要な結果が得られ、その成果は、核融合関連で最大の国際会議である「国際原子力機関 (IAEA) 核融合エネルギー会議」で発表されます。2年ごとに開催されるこの会議は、各国から1,000人以上の核融合研究者が一堂に会し、最新の研究成果について熱い議論を交わす“核融合研究のオリンピック”です。今回は、本年の10月にフランス・ニースで開催される予定でしたが、東京オリンピック同様に延期となり、来年5月開催予定となりました。本会議における発表の殆どは、トピックごとに分かれて行われる“ポスターセッション”という形式をとりますが、重要な成果に限っては、“総合セッション”という全参加者の前でプレゼンテーションを行う機会が与えられます。毎回、この少ない発表枠の獲得を目指し、各国がトップクラスの成果をアピールします。今年は事前審査の結果、LHDから4件の論文が選ばれました。2年前 (インド開催) からは1件増です。

今回の「研究最前線」では、上述の総合セッションの発表に選ばれた4件の成果について“速報”します。これらは当然、LHDで生み出された成果で

すが、プラズマを生成・維持するLHD本体とともに、様々な周辺機器の働きでもたらされました。そこで、実験結果とともに、これらの機器についても紹介します。

第一の成果は、重水素を使用することによるプラズマ性能の向上です。LHDでは、重水素実験第1年次に当たる2017年に、プラズマのイオン温度が核融合発電の実現に必要な1億2,000万度に達しました。ただし、その時の電子温度は4,200万度でした。3年次となる今回の実験では、イオン温度を1億度に近い8,000万度に保ったまま、電子温度を1億5,000万度まで高めることに成功しました。プラズマの温度を上げるためには様々な条件を最適化する必要がありますが、これまでの研究で、真空容器の壁面に付着した水素の量をできる限り少なく抑えることが、高い温度のプラズマ生成につながるということが分かっています。壁面の水素を除去するために、LHDでは薄いプラズマを生成し、それを真空容器表面に僅かに接触させる「放電洗浄」という手法を導入しています。薄いプラズマは、FMラジオに近い周波数を持つ電磁波で生成します。電磁波は「FAITアンテナ」と呼ばれる、研究所で開発されたアンテナから放射されます。図1は、真空容器内に設置されたFAITアンテナで、上下に分かれた構造になっています。

将来の核融合炉では、上述したようにイオン温度1億度以上の高温プラズマを長時間維持する必要があります。但し、プラズマの周辺部は1億度になっている必要は無く、むしろ不純物の除去をしやすくするために、可能な限り低い温度になる



図1 FAITアンテナ。上下二つのアンテナから電磁波を放射する。

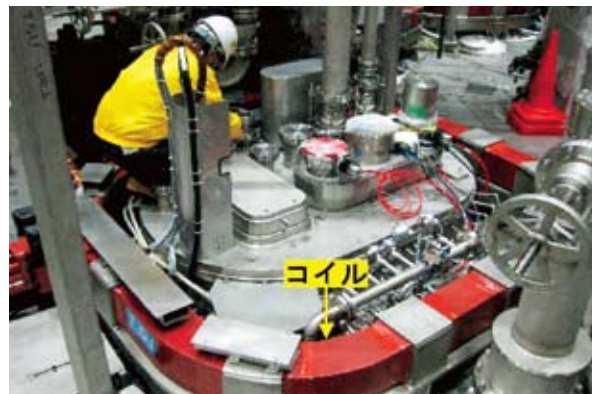


図2 LHDの上部に設置されたコイル (赤い四角)



ことが望ましいとされています。「中心は高温に、しかし周辺は低温に」という困難な要求に応える研究にも大きな進展がありました。LHDでは、プラズマを閉じ込める磁力線の“カゴ”の周辺部を、少しだけ変形することで、この要求に応えることに成功しました。カゴの縁の部分だけを僅かに変形させるために用いるのが図2に示す電磁石（コイル）です。LHD本体の上下に、直径1.5mほどのコイルが10個ずつ設置されています。このコイルが生み出す磁場は、LHDの強力な超伝導コイルが作るカゴ本体の磁場の1,000分の1程度です。磁場の变化は僅かですがプラズマは敏感に反応し、カゴの周辺部で放射冷却が促進され、温度が低下することが分かりました。これは、将来の核融合炉の実現に向けた大きな進展です。

使用するガスを水素から重水素に替えることで、プラズマ性能が向上すること（同位体効果）の理由は未だ明らかになっていません。この原因を追究する実験を進める中で、最近興味深い現象が観測されました。水素と重水素は質量が異なる以外、化学的な性質は全く同じです。両者を混合すると、室温では気体（ガス）として混じり合っていますが、イオン化して水素プラズマ、重水素プラズマになると、イオン化する場所（中心部か周辺部か）によっては混じり合わずに、両者が別々に振る舞うことが明らかになりました。スーパーコンピュータを使用した大規模なシミュレーションを行ったところ、そのような振る舞いの違いは、プラズマ中に発生する“揺らぎ”が大きく関与していることも分かってきました。これらの知見は、同位体効果のメカニズム解明に重要な手掛かりを与えてくれるものと期待されています。今回の発見に大きく貢献したのが、研究所で開発された高性能分光器（図3）です。分光器は、太陽の光を7色に分けることで知られる三角柱のプリズムと同様な働きをする機器ですが、この分光器は光を分解する能力が格段に優れています。水素と重水素は、プラズマ中で赤い光を出しますが、両者の質量が僅かに

違うために光の波長が僅かに異なります。高性能分光器にはこの違いを短時間で見分けるための工夫が凝らされています。五角形の黒い箱の中心部に設置されたひし形の光学素子で光を分解し、手前に見える大口径レンズを装着した高感度検出器でデジタル信号に変換します。この信号の時間変化を詳細に解析することにより、水素と重水素がプラズマ中でどのように振る舞うかが分かります。

重水素実験の最重要課題の一つである、高エネルギー粒子の閉じ込めに関する研究でも大きな進展がありました。プラズマ中を非常に高速で動き回る粒子の振る舞いを調べるため、研究所では、プラズマを垂直方向から観測する高性能中性子分布計測器「垂直中性子カメラ」を開発しました。この計測器を用いることで、プラズマを加熱する高エネルギー粒子が、プラズマ中の“揺らぎ”に乗って外側に運ばれる様子を可視化することに成功しました。図4は、LHD本体の下に当たる、実験室の地階に設置された垂直中性子カメラです。本体下部から延びるガイドチューブ（細いパイプ）が地階天井部に見えます。その下に検出器があります（太いパイプ）。パイプオルガンのパイプのようにも見える、その1本1本がカメラの画素に当たります。スマホのカメラと比べると遥かに少ない画素数ですが、高エネルギー粒子の振る舞いを撮影するには十分です。

このようにLHDの実験では、研究所で開発された加熱機器や計測器等、多くの周辺装置が活躍しています。LHD自身も研究所で開発された装置であることは言うまでもありません。

（大型ヘリカル装置計画プロジェクト 研究総主幹／高密度プラズマ物理研究系 教授）

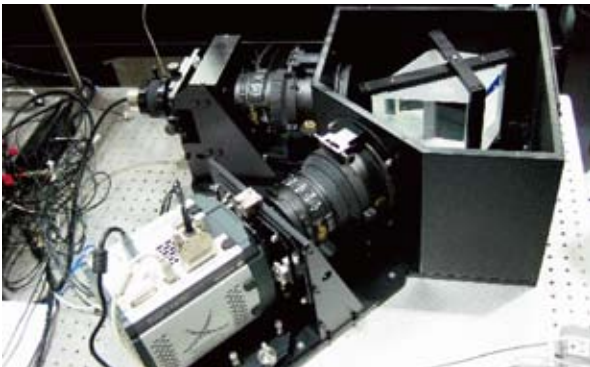


図3 高性能分光器。実験時は五角形の箱の蓋をしめて邪魔な光が入らないようにします。



図4 実験室地階天井部に設置された垂直中性子カメラ

## 2019年度成果報告：数値実験炉研究プロジェクト

洲 鎌 英 雄

数値実験炉研究プロジェクトでは、大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクトや核融合工学研究プロジェクトと連携しながら、超高温プラズマで起こる様々な物理現象の解析と予測を行い、将来の核融合発電炉の設計に役立てるため、先進的な理論モデルとスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」を駆使した大規模なシミュレーション研究を行っています。以下では、最近の研究成果を2件ご紹介しましょう。

核融合炉の実現には、磁場の強さが同じであれば、より高い圧力のプラズマを安定的に長時間閉じ込められる装置が、経済的で有望だとされています。LHD実験では高圧力プラズマの保持に成功していますが、これまでの計算機シミュレーションは、この現象を再現できていませんでした。これまでは、プラズマを水や空気と同様に流れる物体(流体)とみなして計算する方法(流体モデル)が用いられてきました。プラズマ中では多数のイオンがそれぞれ異なる速度で異なる動きをしていますが、流体モデルは、これらイオンの平均的な動きを計算します。数値実験炉研究プロジェクトでは、より精密な計算を行うため、流体モデルでは考慮されていない、多数のイオンの動きの違いを

取り入れた「ハイブリッド・シミュレーション」を開発し、これを用いて、将来の核融合炉でプラズマを加熱する役割を担う、高速イオンに関する重要な成果を挙げてきました。例えば、高速イオンがプラズマの振動を引き起こし、その振動がプラズマを加熱することを世界で初めて証明しました。この研究をさらに発展させ、本研究ではハイブリッド・シミュレーションを用いて、LHD実験で成功した高圧力プラズマの保持を再現することに取り組みました。様々な動きをするイオンの中で特に注目したのが、往復運動しながら進んでいく「捕捉イオン」です(表紙図、黄線)。この捕捉イオンの動きはLHD特有のものであるため、その効果を調べる必要があります。そこで、ハイブリッド・シミュレーションで、数百万個の捕捉イオンを含む、数千万個のイオンの運動とプラズマの圧力の変化を計算しました。さらに、高圧力を保持できるかどうかを示すためには、長時間にわたる変化を調べる必要があります。これは膨大な計算量となりますが、プラズマシミュレータを駆使することで、その計算を実現しました。その結果、LHDの高圧力プラズマの保持をシミュレーションで再現することに初めて成功しました(図1)。また、

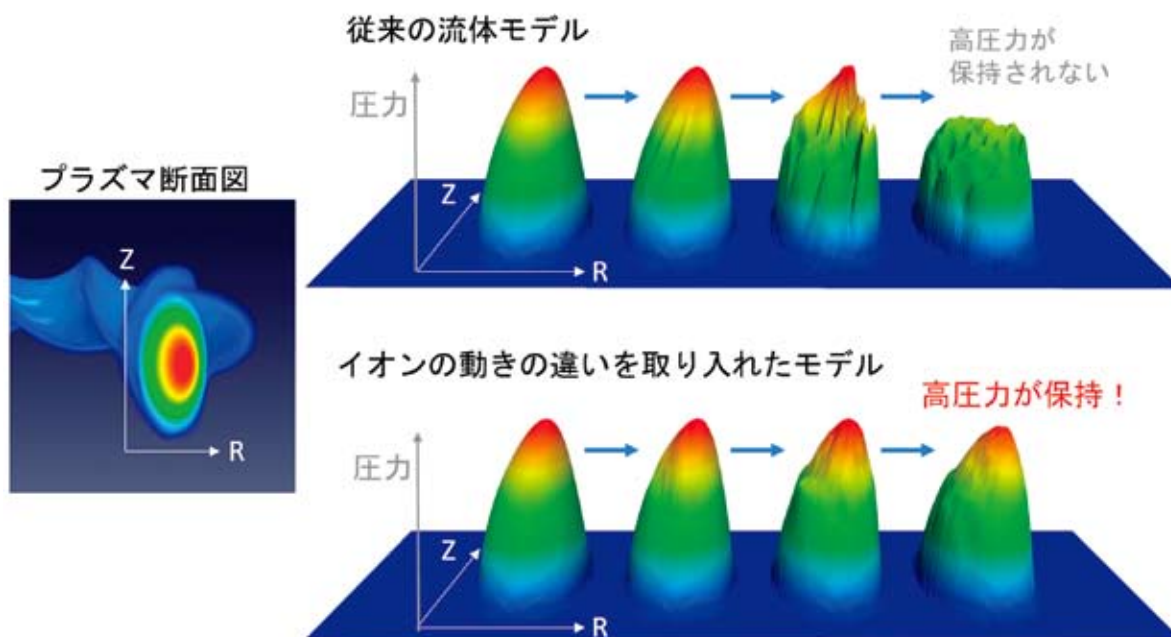


図1 LHDの高圧力プラズマのシミュレーション結果。プラズマ断面の圧力分布を示します。左図は、色が圧力を表していて、プラズマの中心部で圧力が高く、外に向かうほど低いことを示しています。右図はその圧力分布の時間変化を示します。



捕捉イオンの運動とプラズマの圧力変化との関係を詳しく解析しました。これにより、捕捉イオンがプラズマ中に発生する揺らぎが大きくなるのを抑えることによって、高圧力プラズマの保持に大きく貢献していることが明らかになりました。本研究によって、将来のヘリカル型核融合炉におけるプラズマの予測精度を大幅に向上させることができました。今後、本研究成果が基盤となって、将来のヘリカル型核融合炉の経済性向上を目指す設計研究が大きく前進することが期待されます。

核融合炉の内部のプラズマ側に面する壁にはプラズマから出てくる熱や粒子が照射されるため、壁からは不純物や中性の粒子がプラズマ中へ放出され、炉心プラズマの温度、密度やその閉じ込め性能に大きな影響を及ぼします。このような現象は、プラズマ・壁相互作用と呼ばれ、高性能核融合プラズマの実現のために極めて重要な研究課題です。プラズマ・壁相互作用は、様々な物理過程や化学反応過程が関与する非常に複雑な現象であり、その研究には幾つもの理論モデルや計算手法を組み合わせたシミュレーションが必要となります。プラズマ・壁相互作用の一例として、壁近くにある水素分子の輸送や反応があります。水素分子は、プラズマ中心部への燃料補給やプラズマ全体の閉じ込めに大きな影響を与えるとともに壁への熱負荷を軽減する役割を担うことが期待されています。このような水素分子の影響を調べるためには、壁近くのプラズマ（周辺プラズマ）中の水素分子の運動量・運動エネルギー、振動・回転などの状態を知ることが必要です。ところが、これらの情報を実験観測のみから得るのは容易ではありません。そこで、LHDにおける水素分子に関するこれらの情報を求めるための計算手法を、信州大学・山形大学・京都大学との共同研究により開発しました。この計算手法は、三つのシミュレーションを組み合わせます。まず、分子動力学とよばれる方法を用いたシミュレーションにより、炭素の壁で反射・放出される水素分子の状態を計算します。放出された水素分子はプラズマの中で電子やイオンと衝突しながら移動していくとともに、その状態が変化します。このような水素分子の振る舞いを、中性粒子の輸送シミュレーションを用いて計算します。ここで、LHDの複雑な形状を持つプラズマの密度や温度などの情報が必要ですが、これにはプラズマ輸送シミュレーションによる計算結果を用います。このように、三つのシミュレーションを組み合わせることで、周辺プラズマ中の水素分子の状態を予測することができるようになりました。図2は、三つのシミュレーションの結果を示しています。本研究で開発されたシミュ

レーション手法は、今後、LHDやその他のプラズマ実験装置において観測される水素の発光スペクトルの解析や水素分子の挙動の理解に大いに役立つことでしょう。

数値実験炉研究プロジェクトを推進するために活用されているプラズマシミュレータは、2020年度に新機種に移行しました。新機種の理論演算性能は、10.5ペタフロップス（毎秒1.05京回の演算能力で2020年2月末まで運用していた旧プラズマシミュレータの4倍）、主記憶容量と外部記憶装置はそれぞれ202テラバイトと32.1ペタバイトとなり、これまで以上にプラズマの大規模シミュレーションを実行することができるようになります。親しみをもつていただくため、この新しいプラズマシミュレータの愛称を一般公募した結果、「雷神」と決められました。「プラズマシミュレータ雷神」により、プラズマの理論シミュレーション研究全体がますます発展することが期待されます。次号のNIFSニュースにおいて、「プラズマシミュレータ雷神」のより詳しい情報を掲載する予定です。

(数値実験炉研究プロジェクト 研究総主幹／核融合理論シミュレーション研究系 教授)

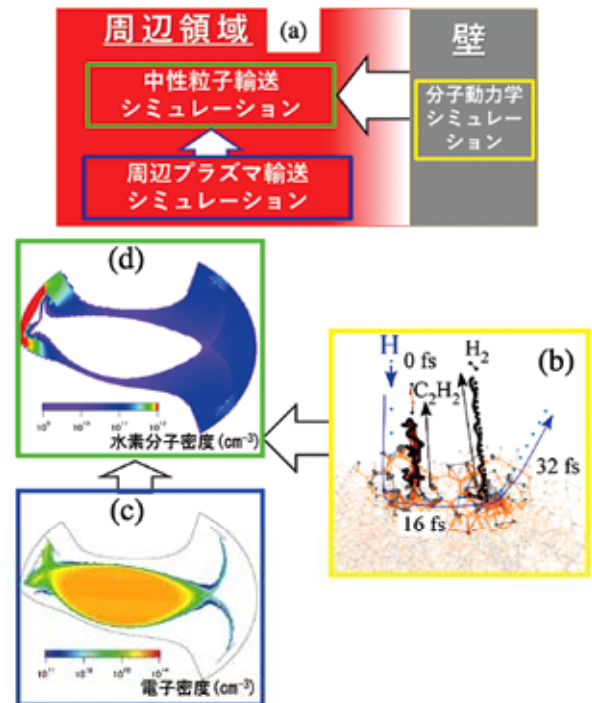


図2 三つのシミュレーションの関係 (a) と計算結果。分子動力学シミュレーションを用いて、炭素の壁から放出される水素分子の状態を計算し(b)、プラズマ輸送シミュレーションによりLHDのプラズマの状態を求めます(c)。これらの計算結果を使って、中性粒子輸送シミュレーションにより、周辺プラズマ中で水素分子の振る舞いを計算します(d)。

## 2019年度成果報告：核融合工学研究プロジェクト

室賀 健夫

核融合工学研究プロジェクトでは、将来のヘリカル型核融合炉を想定した概念設計と各機器の開発に必要な要素研究を国内外の共同研究・連携研究と併せて進めています。以下に2019年度の主な研究成果を紹介します。

ヘリカル型核融合炉の概念設計では、ヘリカル型核融合炉の実現性をより高めるため、複数の装置を建設することで核融合出力と装置サイズを徐々に増大させ、開発リスクを低減しつつ重要設計課題の解決を図る段階的開発戦略の検討をさらに進めました。また、磁場配位の最適化についてさらに検討を進め、これまで大型ヘリカル装置(LHD)と同じねじれ具合を想定していたヘリカルコイルの巻線形状を僅かに変化させる(図1)ことでより高温・高密度での運転ができ、経済的な炉にできる可能性が明確になりました。



図1 ヘリカル核融合炉のヘリカルコイル巻線形状の比較。青色点線がLHDと同じねじり方に基づく形状、橙色で描かれたものが変更後の形状。

核融合炉の超伝導マグネットには1メートル当たり1万トン以上に相当する強大な電磁力が発生します。そのため、マグネットは十分な強度を持った構造物で囲まなければなりません。これまでの設計では、マグネットとそれを支える構造物を合わせた総重量は1万トンを超えていました。今回、構造の強さに影響がない部分に新たな穴を空けるなど「トポロジー」を変化させて最適な形状を探るという手法をヘリカル型核融合炉に適用したところ(図2)、構造物の総重量を約2千トン以

上減少できることが分かりました。最適化されたモデルの強度解析も行い、問題なく電磁力を支えられることが確認されました。

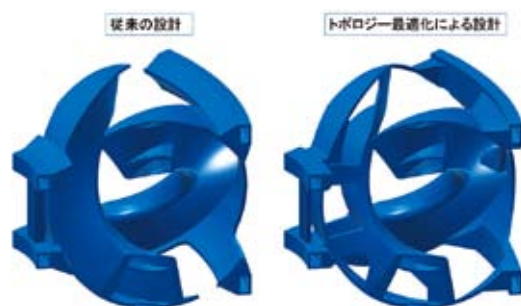


図2 コイル支持構造物の形状の従来設計(左)とトポロジー最適化を適用した設計(右)。

また、ヘリカル型核融合炉設計を進めるうえで明確になった22の重要課題と核融合工学研究プロジェクトで進められている各研究テーマの関係性を可視化する作業も実施しました。これにより研究分野の広がりや機器整備の状況も含めた研究の進展状況も明確となり、今後共同研究等を通じた研究開発の進展や、新しい研究分野の創成につながることを期待されます。

ブランケットの低放射化構造材料として核融合科学研究所が世界をリードしているバナジウム合金では、ブランケットと炉外機器との接続に必要な異材接合技術の開発を進めています。低放射化バナジウム合金NIFS-HEAT-2とニッケル合金ハステロイXの直接溶接はこれまで不可能とされてきましたが、熊本大学、齊魯工業大学(中国)等との共同研究により、「爆発圧接」を用いることで金属間化合物の析出と割れを無くすことに成功しました。材料の混合領域では高強度で耐放射線照射特性にも優れると最近注目されている高エントロピー固溶体が生成していると考えられ、今後は高温で長時間使用してもその固溶状態を維持できるのかどうかを調査する予定です。

長寿命液体ブランケットの開発研究を熱・物質流動ループ試験装置Oroshhi-2を用いて進めています。同装置では3テスラの磁場を利用して、強磁場下における熔融塩の除熱特性の評価を行う世界初の試験を東北大学との共同研究で進めていま



す。また、液体金属から水素燃料を連続回収する試験装置の設置を京都大学との共同研究で進めており（図3）、世界初の高効率・連続回収技術の実証を目指しています。



図3 液体金属（リチウム鉛）からの高効率・水素燃料連続回収装置（京都大学との共同研究）。

プラズマ対向材料として有望なタングステン材料について、酸化物分散強化法を用いて高性能化する研究を行っています。これまで、機械的合金化法と熱間等方加圧法を組み合わせる方法を用いて、金属組織内部に微細で熱的に安定な化合物を分散させて、材料の機械的特性を飛躍的に向上させてきました。2019年度は、この方法を発展させ、ナノチタン酸化物を分散させることで、材料の硬さの低下が抑制されることを確認しました。

酸化物分散強化銅とタングステンとの接合法と

して開発した「先進的ろう付接合法」を、酸化物分散強化銅とステンレス鋼、あるいは、酸化物分散強化銅同士を接合するために高度化し、流体漏れの無い完全リークタイトな接合接手の生成を可能とする技術開発に成功しました。この技術を用いて、矩形の冷却流路と冷却流路壁面に熱伝達率を促進させるV型スタッガードリブ構造と呼ばれる突起構造を有する世界最高性能のダイバータ受熱機器試験体の開発に成功しました（図4）。今後、この試験体をLHDに実際に取り付けた試験を進める計画です。



図4 タングステン、酸化物分散強化銅、ステンレス鋼を先進的ろう付接合法で接合したダイバータ受熱機器試験体。

超伝導マグネットの研究では、次世代のヘリカル型装置への適用を目指して、高温超伝導体の開発研究を進めています。希土類系高温超伝導線材（REBCO）を組み合わせ、STARS、FAIR、WISEと名付けた3種類の導体を設計し、それぞれにサンプル試作と評価試験を進めています（図5）。液体窒素で冷却して通電することによって超伝導として流すことのできる最大電流（臨界電流）を測定し、予測された値との比較を行うことで、劣化が認められた場合には製作法の改善を図っています。

（核融合工学研究プロジェクト 研究総主幹／核融合システム研究系 教授）



図5 次世代ヘリカル装置への適用を目指して開発されている3種類の高温超伝導体サンプル。左上：STARS導体（端部断面とサンプル全体）、左下：FAIR導体（端部断面とサンプル全体）、右：WISE導体（小型コイル巻線の様子と直線形状短尺導体端部）。

## 第9回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞

本研究所ヘリカル研究部高密度プラズマ物理研究系の本島 厳准教授が、「核融合定常プラズマ維持を目指した粒子バランスとその制御に関する研究」にて、第9回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞しました。

この賞は、新しい自然科学分野の創成に熱心に取り組み、成果をあげた優秀な若手研究者を対象として、自然科学研究機構が授与しているものです。

安定した核融合プラズマを実現するためには、燃料である水素の制御が重要となります。本島准教授らの研究グループは、強力な極低温真空ポンプを使い、プラズマに戻る水素を減らすことでプラズマの密度をうまくコントロールすることに成功しました。これにより、水素燃料の制御を容易に、かつ安定的に行うための方法が確立されたことが高く評価され、今回の受賞となりました。今後、核融合プラズマ定常維持に向けた研究がさらに進展すると期待されます。

なお、この賞については、6月14日に受賞式と記念講演会が執り行われる予定でしたが、新型コロナウイルス感染症の拡大防止の観点から、中止となりました。

そこで自然科学研究機構ホームページ上にて受賞者の講演動画の特別公開を行いました。講演動画では、本島准教授自ら大型ヘリカル装置（LHD）の真空容器の中に入って研究を紹介しています。現在は、[こちら](#)からご覧になれます。



竹入所長と本島准教授



[こちらのQRコード](#)

## 核融合科学研究所オープンキャンパス2020のご案内

核融合科学研究所は、9月5日(土)にオープンキャンパス2020を開催します。テーマである「体感！体験！プラズマエネルギー」のとおり、プラズマを中心とした研究の最前線を、施設公開、講演会、科学実験等で分かりやすくご紹介します。本年は、新型コロナウイルス感染症対策のため『オンライン』による新しい形のオープンキャンパスを開催します。(現地での開催はありません。)

イベントの詳細については、随時ホームページ (<https://www.nifs.ac.jp/welcome/2020/>) でご確認ください。

## スーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」の愛称決定について

新しいスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」の愛称公募を2020年1月23日から3月10日の間で実施し、【雷神】(読み方：らいじん)と決定しました。

「プラズマシミュレータ」は世界トップレベルのプラズマ核融合分野専用スーパーコンピュータです。愛称となった【雷神】は日本の民間信仰において雷を司る神を意味しています。雷はプラズマの一形態であり、雷を操る雷神のごとく高温プラズマを自在に制御するための研究を行っている当研究所の、雷光のごとく一瞬の間に膨大な計算を行うことができる同機にふさわしい愛称です。また、【雷神】は俵屋宗達筆の「風神雷神図屏風」などの国宝にも表現されてきた古くからの東洋美術のモチーフであることから、海外の方々からの知名度も高く、日本のスーパーコンピュータの愛称に適しているという理由で、全国からのたくさんの応募(約200件)の中から選考しました。



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 発行

NIFS NEWS

No.254

2020年6,7月号

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6

TEL : 0572-58-2222(代) FAX : 0572-58-2601

URL : <https://www.nifs.ac.jp/>

E-mail : [nifs-news@nifs.ac.jp](mailto:nifs-news@nifs.ac.jp)

※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。

複写される  
方へ

本紙に掲載された著作物を複写したい方は(社)日本複写権センターと包括複写特許契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F

TEL:03-3475-5618 FAX:03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp 著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究所へご連絡ください。