

NIFS NEWS

No. 260

2021 June / July

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

**OPEN CAMPUS 2021
ONLINE**

**体感！体験！
プラズマエネルギー！**

TVドラマの撮影で使用！
制御室

1億度を超える超高温プラズマを作り出す装置！
**大型ヘリカル装置(LHD)
オンラインツアー**

核融合科学研究所

**参加無料
要申込**
申込はインターネットからのみとなります。

オープンキャンパス・オンライン

一般公開 2021

9/4 10:00 - 16:00

**ヘリカちゃん&マーモ博士と
科学実験!!** 申込不要

**高校生科学研究室
オンライン発表会**
10:00-11:30
高校生たちが学校で研究している内容を
分かりやすくプレゼンテーションします。

公開講座
第1部 13:15-13:35
「サイエンスとしての核融合」
講師 核融合科学研究所 所長 吉田 善章
第2部 14:15-14:55
「プラズマの謎に迫る」
講師 核融合科学研究所 教授 居田 克巳

サイエンストーク
◎高温超伝導って、熱いの？それとも冷たいの？
◎私たちの体の元素はどこから来たの？
◎宇宙と核融合、ステキな関係
以上の3本立てで
当日配信します

核融合研究者への道
他の大学では味わうことのできないユニークな研究教育活動、ビデオ会議 (Zoomミーティング) を使って、こっそり教えちゃいます。

研究動画コンテンツ 申込不要
◎核融合 研究1分紹介！2021
◎核融合研ってどんなところ？
◎プラズマを発生させてみよう！
◎360°VRで楽しむプラズマシミュレーションの世界
...etc

2020年稼働！世界トップレベルの
プラズマ核融合分野専用スパコン
**新プラズマシミュレータ
雷神スペシャルムービー** 申込不要

主催 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
〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL 0572-58-2222
<https://www.nifs.ac.jp/welcome/2021/>

共催 国立大学法人
総合研究大学院大学
物理科学研究科 核融合科学専攻 <https://soken.nifs.ac.jp/>

後援 岐阜県、岐阜県教育委員会、土岐市、多治見市、瑞浪市

詳しい情報はHPで！

核融合科学研究所オープンキャンパス2021のご案内

研究最前線 P2 - P72020 年度成果報告：大型ヘリカル装置計画
プロジェクト 居田克巳2020 年度成果報告：数値実験炉研究プロ
ジェクト 洲鎌英雄2020 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** P8第10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 2021 のご案内

2020年度成果報告:大型ヘリカル装置計画プロジェクト

居田克巳



核融合発電の実現には、高温のプラズマを長時間にわたって安定して維持することが必要であり、これに向けた多くの課題があります。プラズマはイオンと電子の集合体で、各々が異なる温度を持っています。核融合反応を起こす中心部はイオン温度・電子温度共に1億度以上の高温を維持する一方で、周辺部は、プラズマを閉じ込める装置の壁への熱負荷を減らすために、できるだけ低温にすることが求められます。この温度勾配は、約1メートルで1億度という極めて急峻（きゅうしゅん）なものです。温度勾配が急峻になるとプラズマ中に大小様々な渦を伴った乱流が発生し、この乱流がプラズマをかき混ぜて中心温度が低くなってしまいます。また、プラズマの圧力勾配が急峻になるとプラズマが不安定になり、閉じ込めたプラズマの一部が失われることもあります（この現象を不安定性と呼びます）。このため、プラズマの安定維持のためには、乱流と不安定性を理解し、それを制御する方法を確立することが必要です。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）では、軽水素プラズマ実験を経て2017年より重水素ガスを用いてプラズマを生成する「重水素プラズマ実験」を行っています。2020年度の成果としては、1）高温度プラズマ生成法の確立、2）乱流のプラス面の発見、3）プラズマと波の相互作用の観測があげられます。

1) 高温度プラズマ生成法の確立

2020年度のLHD重水素プラズマ実験で、電子温度・イオン温度共に1億度に達するプラズマの生成に成功しました。1億度の電子・イオン温度同時達成は、核融合条件の一つで重要なマイルストーンとなっています。これまで、高いイオン温度のプラズマでは電子温度が低い状態で留まっておりましたが、今回の成功によって、1億度に達するプラズマの生成法を確立することができました（図1）。これにより、LHDの研究は新たな段階に入りました。

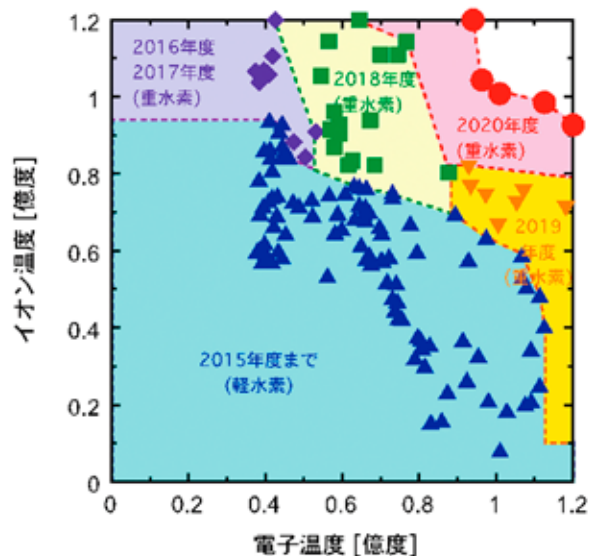


図1 大型ヘリカル装置(LHD)で達成された電子温度とイオン温度

2) 乱流のプラス面の発見

核融合発電では、水素の同位体である重水素と三重水素との混合プラズマが使用されます。LHDでは、その同位体混合プラズマの模擬実験として軽水素と重水素を使用し、混ざり合う水素同位体を世界で初めて観測しました。サイズが大きい乱流は、水素同位体を効率よく均等に混ぜる効果があることが分かりました（図2）。また、乱流は

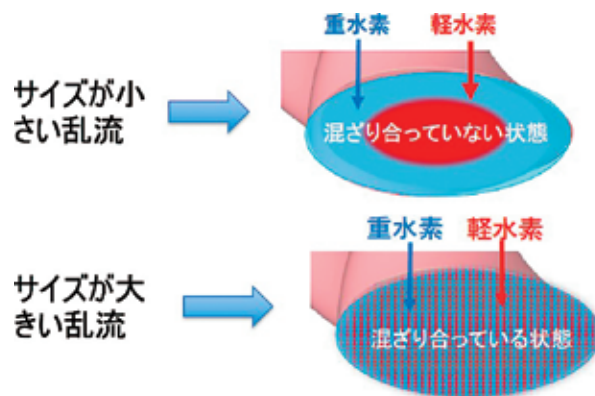


図2 乱流サイズの違いによる同位体混合状態の差異

温度勾配や密度勾配のないところでは発生しませんが、別の場所で発生した乱流が移動してくることがあります。この移動がプラズマ中の非一様な流れでブロックされる現象が発見されました（図3）。さらにプラズマ周辺部では、この乱流ブロックを緩和して乱流の移動を促進させ、装置の壁での熱負荷を減らすことができました。今まで核融合にとってマイナス面が強調されてきた乱流に、プラス面があることを実験で明らかにし、今後の核融合研究の基盤となる成果を上げました。

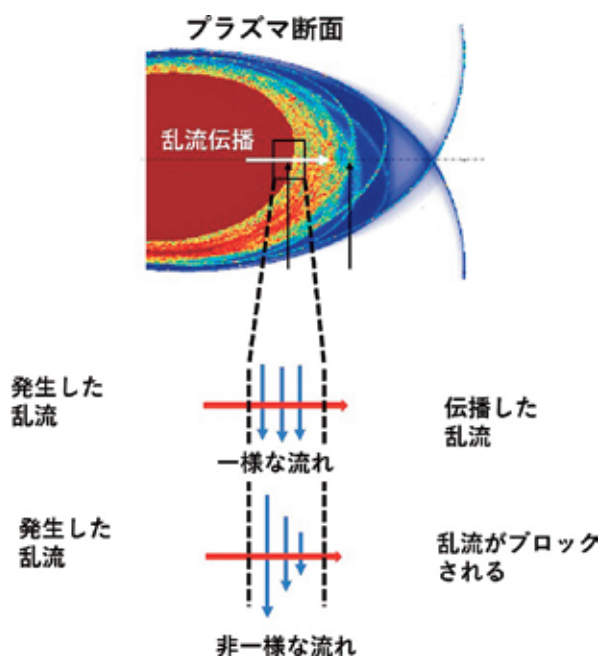


図3 乱流伝播が非一様な流れによりブロックされる様子

3) プラズマと波の相互作用の観測

圧力勾配が急峻になると発生するプラズマの不安定性には、緩やかに現れて持続するものと、突然現れるものがあります。突然現れる不安定性は、地震のように「いつ起こってもおかしくないが、いつ起こるか分からない」という性質を持っています。この突発型不安定性について、「きっかけ」と「プラズマへの影響」の解明に、重要な実験結果が得られました。突発型不安定性は、地震の揺れのような波の発生を伴います。この波を発生させているのはプラズマですが、実はプラズマの中に含まれる不純物がこの波を吸収し、速度分布関数に歪みが生じていることが分かりました（図4）。このプラズマと波の相互作用は、1946年に旧ソ連の物理学者ランダウによって提唱された「ランダウ減衰」という現象です。「ランダウ減衰」

速度分布関数

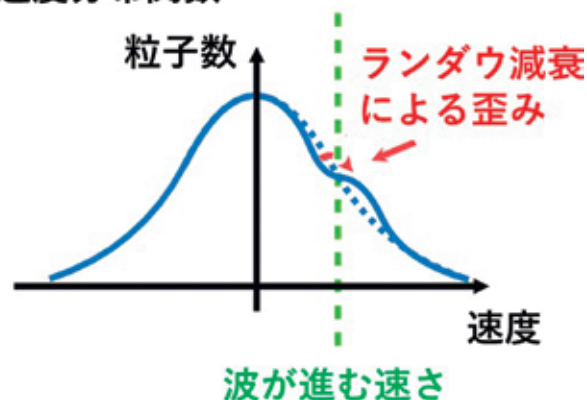


図4 プラズマと波の相互作用(ランダウ減衰)による速度空間分布の歪みのイメージ。青点線はランダウ減衰のない場合。

はプラズマ物理の偉大な発見の一つですが、この現象がLHDプラズマの実験で観測されたことの学術的意義は高いと考えます。

今後の研究

プラズマの乱流と不安定性に関する物理実験により、将来の核融合プラズマの乱流と不安定性の制御法の開発につながる重要な知見を得ることができました。核融合発電では、重水素と三重水素との核融合反応により、プラズマの中心部で高エネルギーのヘリウムが生成されます。この高エネルギーヘリウムは、プラズマを加熱することで減速します。十分に減速したヘリウムは「核燃焼の灰」と呼ばれています。この灰がプラズマに蓄積されると燃焼効率が下がってしまうので、取り除く制御法の開発も重要です。LHDでは今後の展開として、水素同位体混合プラズマにヘリウムビームを入射することで低エネルギーのヘリウムを生成し、そのヘリウムを除去する「ヘリウム灰除去の模擬実験」を行う予定です。また、プラズマ乱流や突発型不安定性のような学際的な広がりが期待できる研究も推進していきます。

(大型ヘリカル装置計画プロジェクト 研究総主幹)

研究成果は

<https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science.html>で公開しています。

2020年度成果報告：数値実験炉研究プロジェクト



洲鎌英雄

はじめに

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、先端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。2020年7月には、10.5ペタフロップス（毎秒1.05京回）の演算性能を持つ新しい「プラズマシミュレータ雷神」が運用を開始し、これまで以上に大規模な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した。以下では、数値実験炉研究プロジェクトの最近の研究成果を2件ご紹介します。

プラズマ輸送の新しい予測手法の開発

将来の核融合炉では、磁場で高温のプラズマを閉じ込めて維持することが必要です。そのようなプラズマ中には、乱流と呼ばれる大小様々な大きさの渦を伴った乱れが発生することがあります（図1）。乱流中の渦はプラズマをかき混ぜて、プラズマの粒子や熱を運びます。これを「乱流輸送」と呼びます。乱流輸送はプラズマの閉じ込めに重要な影響を及ぼすため、核融合炉の設計や開発のためには、乱流によって、どれくらいの量の粒子や熱が輸送されるのかを予測することが必要です。

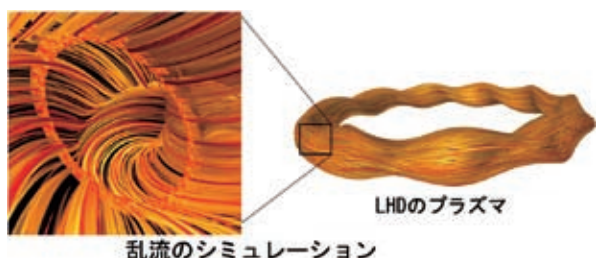


図1 プラズマシミュレータを使って再現した、大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマの乱流。色はプラズマの密度の変化を表しています。乱流によってプラズマの粒子や熱がプラズマの中心から外の方へと運ばれると、プラズマの中心温度や密度が低下してしまいます。なお、プラズマの温度や密度は、中心で高く、外に向かうほど低くなっているため勾配があります。この勾配が乱流に強い影響を及ぼします。

この予測を目指した活発なシミュレーション研究が推進されてきましたが、新しい「プラズマシミュレータ雷神」によって、これまでにない高い精度のシミュレーション研究ができるようになりました。一方、高精度化に伴って必要となる計算量も膨大なものになります。さらに、プラズマの温度や密度が変わると乱流輸送も変わるため、その予測には温度や密度等が異なる様々な場合について、何度も大規模シミュレーションを行わなければなりません。そのため、高い精度を保ったまま計算時間を大幅に減らすことのできる、高効率な予測方法の開発が強く望まれていました。数値実験炉研究プロジェクトでは、「プラズマシミュレータ雷神」による高精度大規模シミュレーションと、これまで蓄積してきたデータの分析結果から得られたプラズマ温度・密度・乱流輸送量の関係式、さらに最新のデータサイエンスの手法を組み合わせることで、高効率な予測方法の開発に成功しました。この新たな方法では、様々な場合の中から選ばれた特定の場合にのみ高精度大規模シミュレーションを実行し、その結果を最も良く反映するように修正した関係式を使って予測を行います。この新たな方法による予測値と、様々な場合について何度も高精度大規模シミュレーションを行った結果を比較したところ、非常に良く一致することが確認されました（図2）。つまり、新たな方法は、高精度大規模シミュレーションを行うのはある特定の場合のみにもかかわらず、様々な場合について何度もそれを行うのとはほぼ同等の予測が可能なのです。この方法により、より高精度でのシミュレーションを用いた輸送予測を効率的に実行することが可能になり、様々な場合を想定した予測が必要となる核融合炉の設計研究が大きく前進することが期待されます。

球状トカマクプラズマの合体過程における磁気再結合シミュレーション

次にご紹介するのは、球状トカマクプラズマの合体過程におけるプラズマ加熱現象に関する東京大学との共同研究による成果です。これまで数値実験炉研究プロジェクトでは、東京大学の球状

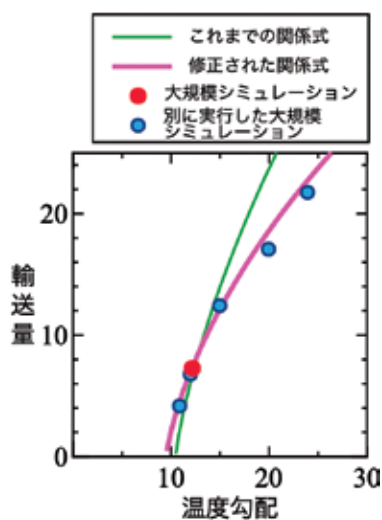


図2 乱流によるプラズマ輸送量の予測結果。修正された関係式を用いた予測は、別に実行した大規模シミュレーションの結果と良く一致しています。今回開発した方法は、5回の大規模シミュレーションと同等であるため、予測効率はほぼ5倍向上しました。ここでは輸送量と温度勾配の関係を予測しましたが、これに加えて密度勾配との関係も予測する場合は、効率は5×5の25倍になると予想されます。さらに、イオン温度と電子温度の違い等を考慮に入れると、その予測効率はさらに高くなると期待されています。

トーラス装置TS-6の球状トカマクプラズマ合体実験で観測される加熱現象の物理機構を解明するため、粒子シミュレーションによる解析を行ってきました。核融合エネルギーの実現にとってプラズマの加熱は重要課題です。また、プラズマ合体過程では、磁力線が切れてつながかわる「磁気再結合」と呼ばれる現象が生じますが、この現象は、プラズマ加熱や、太陽フレア、オーロラなど様々なプラズマ現象に深く関わる普遍的な物理現象として重要な研究対象ともなっています。球状トカマクプラズマの合体実験においては、二つのプラズマが合体し始める点で磁気再結合が起こります。これまでは、磁気再結合が起こっている近くの局所的な領域における加熱が注目されていましたが、最近の測定装置の進展から、加熱は実験装置内全域にわたる大域的な現象であることが分かってきました。この現象を再現するため、装置内の空間領域を模擬してプラズマを扱うモデル(図3)を用いた粒子シミュレーションを実行しました。その結果、実験装置内のプラズマ加熱現象、特にイオン温度の上昇の様子や、大域的なプラズマの流れを見ることができました(図4)。プラズマ合体中には、磁気再結合の下流において圧縮によるイオン加熱がまず起こります。この加熱されたプラズマは輸送・拡散によって広い範囲へ広がっていきます。また、プラズマ合体後には、合体点付近で圧縮だけでなく粘性による加熱が起こって

ることが分かりました。さらに、この圧縮加熱、粘性加熱の詳しいメカニズムも解明されつつあります。このシミュレーションによって得られた温度分布や、プラズマ加熱エネルギーの磁場依存性は、TS-6での実験結果とよく一致することが確かめられ、今後さらにプラズマ加熱現象の理解が進むことが期待されます。

ここで紹介した2件を含む数値実験炉研究プロジェクトの多数の研究成果は、今年5月にオンライン形式で開催された、核融合研究分野のオリンピックと例えられる「国際原子力機関 (IAEA) 核融合エネルギー会議」においても発表され、高い評価を得ています。

(数値実験炉研究プロジェクト 研究総主幹)

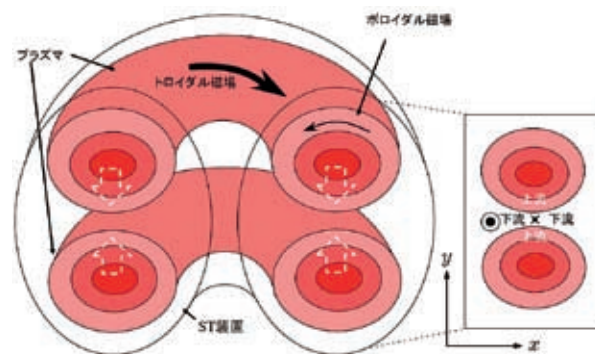


図3 左：球状トカマク(ST)合体の模式図、右：粒子モデルで解く領域。モデルの領域は装置内のあるポロイダル面全体を模擬しており、×点によって、磁気再結合が起こり始める場所を表しています。

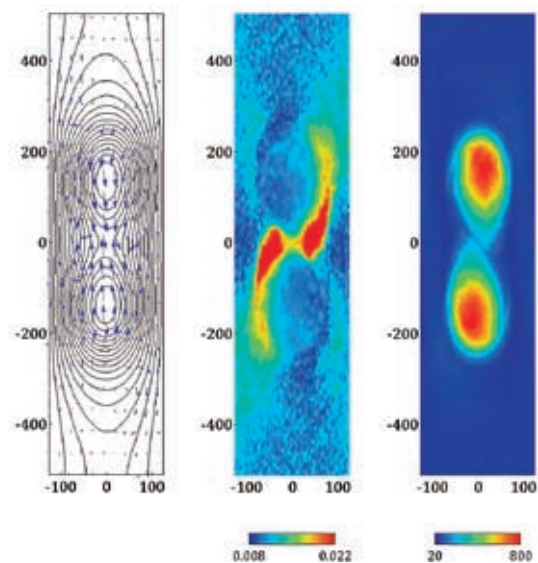


図4 シミュレーション結果。二つのプラズマが合体している最中の、磁力線(左図の曲線)、イオンの流れ(左図の矢印)、イオン温度(中央図)、イオン密度(右図)、を表します。磁気再結合によって、下流部分に高温のプラズマが生成されていること、そのプラズマが広がっていく様子が示されています。

2020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、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2020年度の主な成果を紹介します。

ヘリカル型核融合炉の概念設計

ヘリカル型核融合炉の概念設計では、ヘリカルコイル巻線形状の最適化によるプラズマ閉じ込め性能の改善や、コンパクトで高効率な先進工学機器の開発など、物理・工学研究の進展を受け、現在の大型ヘリカル装置（LHD）の2倍のサイズで正味電気出力10万キロワットの発電運転を可能とする新たな設計を提案しました。これにより、早期に定常核融合発電を実証し、商用発電に至る新しい開発戦略を提案しています（図1）。

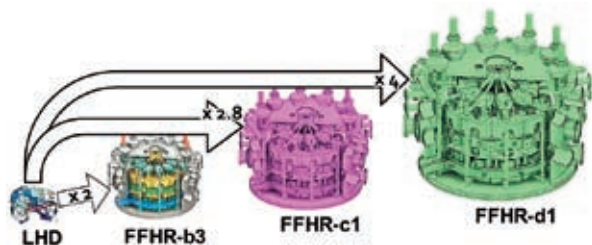


図1 ヘリカル型核融合炉の大きさ比較。最新設計であるFFHR-b3は、LHDの2倍の大きさで10万キロワットの発電を狙う。

ペブルダイバータの提案

ヘリカル型核融合炉の設計では様々な新しい発想を取り入れた検討を進めています。その一つがペブルダイバータです。プラズマ中の不純物を排気するためにプラズマを直接受け止めるダイバータでは、強烈な熱をいかに除去するかが課題です。その方法としてセラミック材料で作ったペブルと呼ばれる小さな球をプラズマの境界付近に向けて落とす方法を検討しています（図2）。落下点の衝撃を吸収するため、発電を担うブランケットを冷却する液体金属を真空容器の底に一度溜め、これにペブルを落とす方策を新たに提案しました。

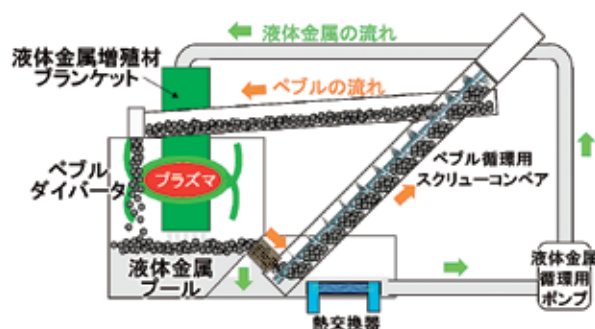


図2 ペブルダイバータの循環構造

ブランケット材料の腐食研究

ブランケットでは、溶融塩と呼ばれる高温液体が冷却材・増殖材の候補の一つで、炉内外を循環させて用います。この中に発生するフッ化水素によって構造材料で腐食が生じる懸念があります。その進行度合いに関する研究を進め、溶融塩の一種であるFLiNaK（フリナック）におけるフッ化水素濃度と構造材料である低放射化フェライト鋼の腐食速度との関係について世界で初めて定量化することができました。図3の装置を用いた試験によると、腐食を1年あたり0.1ミリメートル（mm）以下に抑えるために要求される濃度は0.03 ppm（ppmは百万分の1）以下です。核融合炉に

において生成される水素同位体の濃度は1 ppmを想定していますので、腐食速度として1/30の低減が必要です。そこで、溶融塩中にチタンの微粒子を添加したり、構造材料の表面を薄いタングステンで被覆したりすることが有効と分かりました。



図3 フッ化水素を入れた溶融塩による低放射化フェライト鋼の腐食試験を行う装置

先進多段階ろう付接合法の開発

ダイバータには上述のペブルの他、高い温度まで耐えるタングステン（白熱電球のフィラメントに使われる金属）と銅合金を組み合わせた構造を従来より開発しています。これらの材料同士の接合が大きな課題ですが、「酸化物分散強化」という手法を使って高強度化された銅合金とタングステンとを強靱に接合する「先進的ろう付接合法」という技術を開発してきました。昨年度はこの技術を高度化した「先進多段階ろう付接合法」を開発し、この方法で作ったダイバータ試験体をLHDに実際に取り付けて試験を行い、優れた除熱性能を確認することができました。また、この方法を用いてシート状のタングステンと鉄鋼材の接合試験を行い、40 mm×40 mmという面積において高い接合率を得ることに成功しました（図4）。今後、この技術はいろいろな耐熱機器への応用が期待できます。

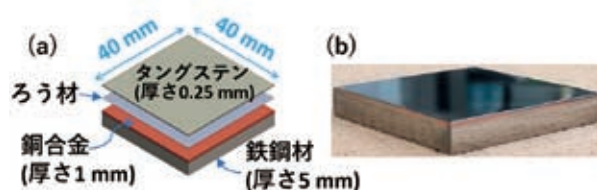


図4 先進多段階ろう付接合法を用いて製作したタングステンシート材と鉄鋼材の接合試験体。(a)接合構造模式図と(b)接合後実物写真。

分散強化タングステンの開発

一方、タングステン材料についても独自の酸化物分散強化法を用いて高性能化する研究を進めています。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、材料の機械的特性を飛躍的に向上させる技術を発展させてきました。特に、チタン酸化物を分散させることで高温焼鈍後における機械的特性の劣化を抑制できることを確認しました。タングステンの場合、もしも超高温になって一度溶けた後に再結晶化すると機械的にもろくなることが問題とされています。そこで、その温度までの利用を想定した酸化物分散強化タングステンの開発とその評価を行い、内部に熱的に安定な酸化チタン粒子を分散させること（図5）により、結晶粒の粗大化を抑制でき、再結晶状態での強度低下を抑制できることが分かりました。

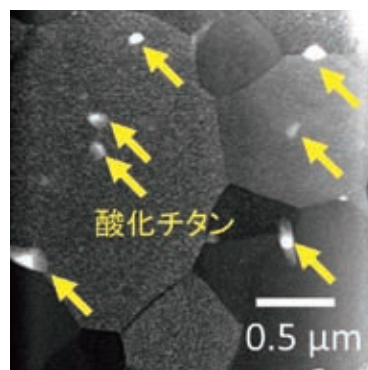


図5 1800℃焼鈍後の分散強化タングステンの電子顕微鏡写真。酸化チタン（黄色矢印の先）が分散している。なお、マイクロメートル（μm）は100万分の1メートルである。

高温超伝導導体の開発

超伝導マグネットの研究では、将来の核融合炉及びその前に位置する次世代の核融合実験装置への適用を目指して、大電流を流すことのできる大型・高温超伝導導体の開発研究を進めています。希土類系高温超伝導（REBCO）材料で作られたテープ形状の線材を組み合わせ、STARS、FAIR、WISEと名付けた3種類の導体を設計し、それぞれについてサンプル試作と評価試験を進めています。3導体とも液体窒素（マイナス196度）で冷却して通電を行い基本特性を調べ、性能に問題がないことを確認しました。これを受け、大型超伝導導体試験装置に装着し、ヘリウムガスを用いてマイナス253度の極低温に冷やすとともに、最大8.5テスラの磁場をかけて強い電磁力が発生する中での特性試験を行っています（図6）。

（核融合工学研究プロジェクト 研究総主幹）



図6 大電流大型高温超伝導導体（STARS）で構成した試験用サンプル。大型超伝導導体試験装置に組み込む前に実験スタッフと一緒に集合写真。

第10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核融合理論シミュレーション研究系の河村学思助教が、「核融合装置における周辺プラズマの3次元輸送モデル研究」の成果に対して、第10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。

核融合装置を様々な要素からなる複合的なシステムとして考える際、非常に高温高密度の炉心プラズマと装置の壁との間で、両者の関係を調節する周辺プラズマが重要となります。河村助教らの研究グループは、軸対称を仮定しない3次元の数値計算コード(EMC3-EIRENE)を導入・開発し、大型ヘリカル装置(LHD)の周辺プラズマ全体の分布や流れを数値的に求めることに成功しました。また、プラズマの温度・密度の計測やプラズマの発光分布の計測と数値計算結果の直接的な比較手法を開発し、その計算結果の妥当性を検証しました。実際の放電に合致する計算を行うことで、水素プラズマ中の不純物(炭素やネオンなど)の分布を推定し、分布に見られる元素ごとの特徴を物理的に説明することに成功しました。これらのことが高く評価され、今回の受賞となりました。今後、核融合装置壁への熱負荷の軽減手法や、装置設計に関する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、7月20日にオンライン形式で「枯渇しないエネルギー源「核融合」の実現にコンピュータで挑む」というタイトルで受賞記念講演が行われました。

記念講演は、QRコードからご覧になれます。



吉田所長と河村助教



核融合科学研究所オープンキャンパス2021のご案内

核融合科学研究所は、9月4日(土)にオープンキャンパス2021をオンラインで開催します。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・エネルギー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。昨年同様、全ての企画を完全オンラインで配信しますが、画面越しにリアルな最先端の科学をお届けできるよう準備を進めています。施設公開では、主力装置である大型ヘリカル装置(LHD)の実験室内と制御室の見学ツアーをライブ配信で行います。通常の見学コースにはない施設からの映像もお届けします。皆さまからチャットで質問も受け付けます。講演会では、吉田善章 核融合科学研究所長の講演を予定しています。科学実験や工作教室を交えた動画を数多く作成し、オンデマンドで配信します。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/2021/>)でご確認ください。

