報道資料

報道関係者　各位

令和８年１１月９日

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
国立大学法人東北大学

不安定プラズマの自己加熱を実証
―逆転の発想からの発見―

概要

核融合発電では、核融合反応で生じたエネルギーによってプラズマ※1 を自ら加熱し、高温を保つ「自己加熱」※2が不可欠です。しかし、その過程は複雑で、「不安定になったプラズマが、自ら生み出した波によって自分自身を加熱できるのか？」という疑問がありました。自然科学研究機構核融合科学研究所の居田克巳特任教授、吉沼幹朗准教授、小林達哉准教授、東北大学の加藤雄人教授らの研究グループは、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）※3において、プラズマ中の粒子の速度分布が時間とともに変化する様子（位相空間ダイナミクス）を詳細に計測しました。その結果、プラズマの不安定性によって生じた電磁波が、プラズマ自身を加熱する現象を初めて観測し、「自己加熱」の一つのプロセスを実証しました。本研究成果を基盤として、核融合発電の実現に不可欠なプラズマの自己加熱機構の研究がさらに進展すると期待されます。また、同じようなプラズマ加熱現象が起こる地球磁気圏など、宇宙プラズマの研究への応用も期待されます。

この研究成果をまとめた論文が英国の科学雑誌「コミュニケーションズ・フィジックス」に掲載されました。

研究の背景

核融合発電は、発電時に二酸化炭素を排出しない、持続可能なエネルギー源として期待されています。その実現に向けて、世界中で高温のプラズマを磁場によって閉じ込める研究が進められています。核融合反応を起こすには、外部から高エネルギー粒子や波を入射して、プラズマを超高温に加熱する必要があります。いったん核融合反応が始まると、反応によって生じた高エネルギー粒子がプラズマをさらに加熱する「自己加熱」が起こり、外部からの加熱を減らしても高温状態を維持できるようになります。この自己加熱の過程は複雑で、その全体を実証するにはITERのような大型実験装置が必要となり、自己加熱の実証は2040年頃と見込まれています。一方、自己加熱を支える重要なプロセスの一つである「プラズマの不安定性によって生じた波が、プラズマ自身を加熱する」という現象は、現在の実験装置でも検証することができます。今回、大型ヘリカル装置（LHD）を用いた実験により、「プラズマが自ら生み出した波によって、自分自身を加熱する」プロセスを実証しました。この成果は、核融合発電に必要な自己加熱の仕組みを理解する上で重要な一歩となります。

研究成果

これまでは、プラズマが不安定になって波が発生すると、プラズマのエネルギーが失われ、温度が下がると考えられてきました。そのため、プラズマが不安定になるのをどのように抑えるか、という研究が進められてきました。居田克巳特任教授らの研究グループは、こうした従来の考え方から発想を転換し、「不安定性を抑えるのではなく、不安定になったプラズマを詳しく観測し、その特徴を明らかにすることが重要ではないか」と考えました。そこで、不安定なプラズマをあえて発生させ、その状態を詳しく調べました。その結果、プラズマが自ら生み出した波によって、プラズマ自身が加熱される現象を明らかにしました。波が発生すると、プラズマを構成する粒子の動き方(分布関数)に一時的な「歪み」が生じることはこれまでにも分かっていました※４。しかし、その後、プラズマの温度がどのように変化するのかは明らかになっていませんでした。そこで研究グループは、プラズマ粒子の動き方(分布関数)を詳しく調べました。その結果、波によって生じた粒子の動き方(分布関数)の「歪み」が元に戻った後、粒子の動きの広がりが大きくなっていることを発見しました。これは、プラズマの温度が上昇したことを示しています。つまり今回の研究では、「プラズマが不安定になる → 波が発生する → 分布関数に歪みが生じる → 分布関数の広がりが大きくなる(プラズマが加熱される)」という一連の過程を捉えることに成功しました。今回の研究は、不安定性によって生まれた波が、プラズマのエネルギーを失わせるだけでなく、逆にプラズマを加熱することを示したものです。この発見は、核融合プラズマが高温を保つ仕組みを理解する上で、新たな視点を与えるものです。

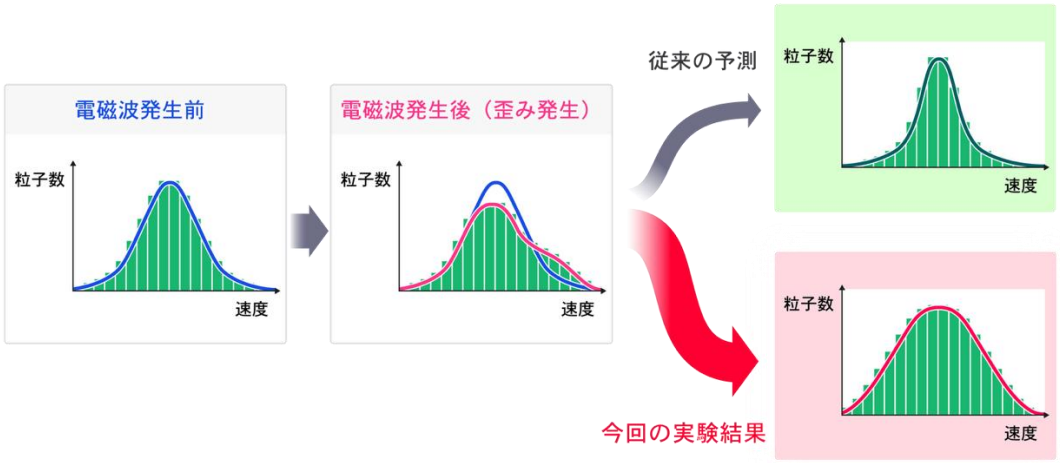


図　不安定なプラズマが電磁波を発生させて速度分布の歪みを引き起こし、その歪みが取れた時に粒子の動きの広がりが大きくなっている様子

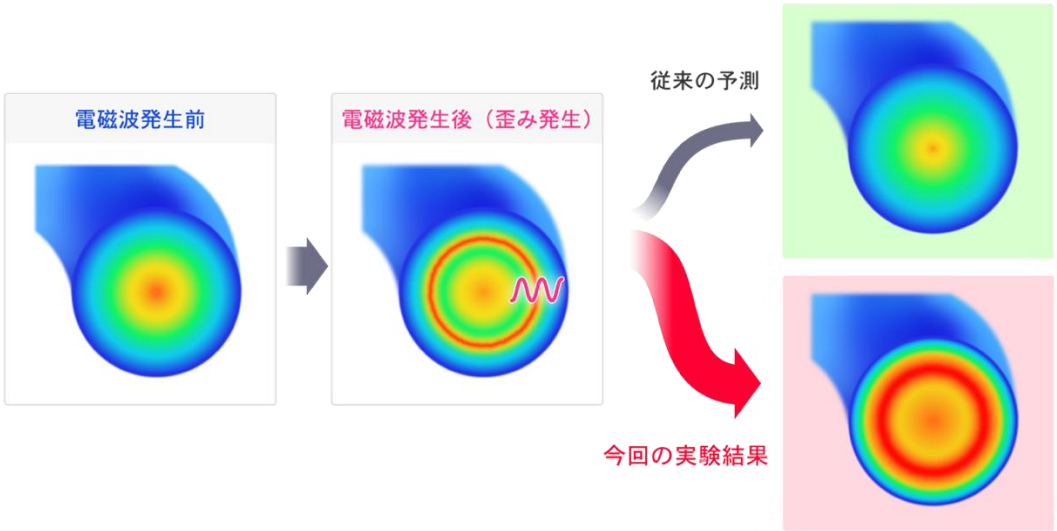


図　速度分布の歪みが取れた後に予測に反してプラズマが加熱されて温度が上昇している様子

成果の意義と今後の展開

現在、核融合の「自己加熱」のプロセス全体を実証できる装置は存在しません。「自己加熱」は核融合発電の実現に不可欠な要素であり、その一部のプロセスであっても実証することには大きな意義があります。今回、実験によって捉えた「プラズマの不安定性によって生じた波が、プラズマ自身を加熱する」という現象は、自己加熱を支える重要なプロセスの一つです。この現象を実験的に捉えたことは、核融合プラズマにおける自己加熱の仕組みの理解を進める重要な成果です。さらに、この「波によってプラズマが自らを加熱する」という現象は、核融合プラズマに限らず、地球磁気圏のプラズマでも起こる普遍的な物理過程です。本研究の成果は、核融合と宇宙プラズマという異なる研究分野をつなぐものであり、今後の学際的な研究の発展にもつながることが期待されます。

【研究サポート】

科学研究費特別推進研究「核融合プラズマの位相空間揺らぎがもたらす新しい輸送パラダイムの探求」（課題番号21H04973）と「核融合・地球磁気圏プラズマの位相空間歪みの観測と突発的現象の理解」（課題番号26H02030）のサポートで研究が行われました。（ホームページ：https://tokusui.nifs.ac.jp）

【用語解説】

※１　プラズマ

固体、液体、気体に次ぐ物質の第 4 の状態。高温のため原子が電子とイオンに分離し、電子とイオンが自由に運動できるようになった状態。

※２　自己加熱

自己加熱とは、物質の内部で生じたエネルギーや反応によって、その物質自身の温度が上昇する現象。核融合炉では、核融合反応によって生じたエネルギーがプラズマを加熱し、高温の状態を保つ現象を「自己加熱」と呼ぶ。

※３　大型ヘリカル装置（LHD）

核融合科学研究所の主実験装置で、我が国独自のアイデアに基づくヘリオトロン磁場を用いた世界最大の超伝導ヘリカル型のプラズマ生成装置。LHD とは Large Helical Device の略。1998 年 3 月から実験が開始された。トカマク型のプラズマ生成装置と磁場構造が異なっており、特徴を生かしたユニークな研究を行うことができる。

※４　参考情報

プレスリリース：波がプラズマの熱を運ぶプロセスを世界で初めて観測
https://www.nifs.ac.jp/news/researches/220929.html

【論文情報】

雑誌名：Communications Physics
コミュニケーションズ・フィジックス

題名：Direct observation of phase-space dynamics during energetic-particle-driven MHD bursts
（高エネルギー粒子によるMHDバースト発生時の位相空間ダイナミクスの直接観測）

著者名：K. Ida1, M. Yoshinuma1,2, T. Kobayashi1,2, K. Nagaoka1,3, K. Ogawa1,2, T. Tokuzawa1,2, H. Nuga1,2, Y. Katoh4

居田克巳[1]、吉沼幹朗[1,2]、小林達哉[1,2]、永岡賢一[1,3]、小川国大[1,2]、徳沢季彦[1,2]、奴賀秀男[1,2]、加藤雄人[4]

1 自然科学研究機構　核融合科学研究所
2 総合研究大学院大学
3 名古屋大学　大学院理学研究科
4 東北大学　大学院理学研究科

DOI： 10.1038/S42005-026-02939-3

【本件のお問い合わせ先】

● 研究内容について
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
研究部　位相空間乱流ユニット
特任教授　居田　克巳（いだ　かつみ）
電話: 0572-58-2182　E-mail: ida.katsumi@nifs.ac.jp

● 本件の広報及び取材の申込について
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
管理部 総務企画課 対外協力係
電話: 0572-58-2016　E-mail: taigai-kakari@nifs.ac.jp

東北大学大学院理学研究科・理学部
広報・アウトリーチ支援室
電話: 022-795-6708　E-mail: sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

● 核融合研究の紹介ページ
文部科学省「核融合のＨＰ」https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/
核融合科学研究所「核融合へのとびら」http://www.nifs.ac.jp/ene/index.html