

核融合炉液体金属ブランケットの電磁ブレーキ効果の抑制へ

－保護性 α - Al_2O_3 膜が異常酸化現象を克服－

【要点】

- FeCrAl 合金のワイヤー放電加工面で生じる異常酸化現象の原因を特定
- 高温の酸化膜形成プロセスにより FeCrAl 合金が異常酸化現象を克服することを実証
- 核融合炉液体ブランケットの電磁ブレーキ効果の抑制に見通し

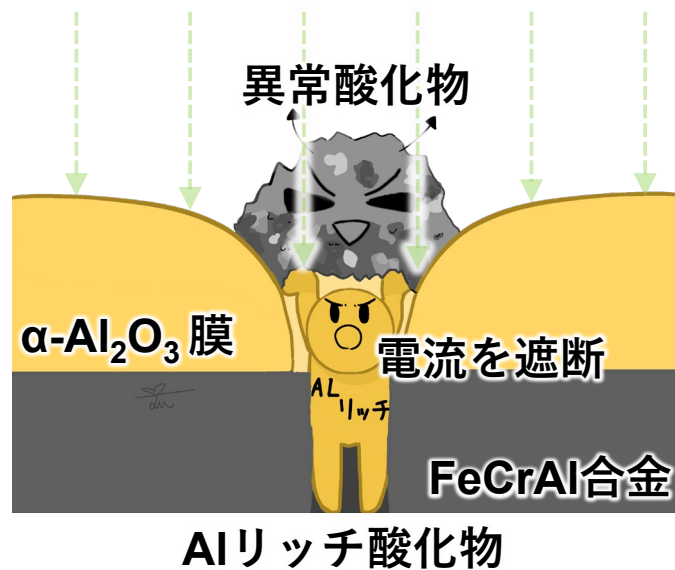
【概要】

東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所の近藤正聡准教授と工学院 機械系の武藤龍平大学院生、北海道大学電子科学研究所／創成研究機構の遠堂敬史特任助教、核融合科学研究所研究部超高流束協奏材料ユニットの田中照也准教授らの研究チームは、FeCrAl 合金（用語 1）が保護性 α - Al_2O_3 膜（用語 2）を形成する際に引き起こす異常酸化現象（用語 3）の原因を特定し、その改善策を見出した。

FeCrAl 合金は、使用前に酸化処理を施して材料表面を緻密で保護性に優れた α - Al_2O_3 膜で覆うことにより、過酷環境下における耐食性を劇的に改善する機能を有する材料である。しかし、特定の条件において、表面に多孔質な酸化物（異常酸化物）が局所的に成長し、均一な膜の形成が阻害されることがあった。そこで近藤准教授らは、この異常酸化物について透過型電子顕微鏡などを駆使して分析した結果、FeCrAl 合金のワイヤー放電加工（用語 4）面に形成されるマイクロクラック内に残存するワイヤー成分が原因であることを突き止めた。さらに、高温で酸化処理を施して異常酸化物の直下に緻密な Al リッチ膜を成長させることにより異常酸化現象を克服可能であることを示した。

また、磁場閉じ込め核融合炉の液体 LiPb ブランケット（用語 5）では、液体金属が高磁場下を横切るように流れる際に誘導電流が発生し、それにより液体金属を流すためのポンプに大きな負荷を与える MHD 圧力損失（電磁ブレーキ効果）（用語 6）を生じてしまう。本研究では、核融合炉液体ブランケット体系を想定した数値シミュレーションを実施した結果、 α - Al_2O_3 膜が部分的に異常酸化物を巻き込んだとしても、液体金属に生じる MHD 圧力損失（電磁ブレーキ）の効果を大きく抑制する性能があることが分かった。

本研究成果は、Elsevier の「*Surface and Coatings Technology*」オンライン版に 8 月 19 日に掲載された。



異常酸化現象を克服した保護性 α - Al_2O_3 膜

●背景

核融合炉の液体ブランケットや集光型太陽熱発電システムの構造材料として、冷媒として使用される高温の液体金属に耐える性能を有することが必要とされる。FeCrAl 合金は、使用前に酸化処理を施すことにより、自ら α - Al_2O_3 膜を形成して表面を保護するという特性を有する。この α - Al_2O_3 膜は化学的に極めて安定で緻密な組織を有するため、液体金属環境下における構造物の耐食性を劇的に向上させるものであり、エネルギープラントのような大型構造物の被覆も可能である。

さらに、 α - Al_2O_3 膜は非常に大きな電気抵抗を示すため、磁場閉じ込め核融合炉において高磁場条件で液体金属が流れる場合に発生する MHD 圧力損失（電磁ブレーキ効果）を抑制する絶縁性被覆としても期待されている。しかし、特定の条件において表面で異常酸化現象が生じることが分かっており、スポット的に多孔質な酸化物（異常酸化物）が形成されることで、均一な膜の形成が阻害されることがあった。こうした場合、被膜本来の保護性や電気絶縁性も損なわれてしまう。

●研究成果

そもそも異常酸化現象の原因は？

ワイヤー放電加工は、導電体であればどんなに硬い材料であっても複雑な形状に精度良く加工することができるという特徴を有し、FeCrAl 合金をはじめとするさまざまな材料の加工に用いられている加工法である。ワイヤー放電加工後に白層を取り除く研磨処理を施した FeCrAl 合金 APMT(Fe-22Cr-6Al-3Mo) に対して、保護性 α - Al_2O_3 膜を形成するための表面酸化処理を施した結果、図 1 に示すような異常酸化物が形成された。透過型電子顕微鏡などを駆使して詳細に分析した結果、異常酸化物の下には幅 1 マイクロメートル（用語 7）以下で深さ 10 マイクロメートル以上の細かいクラックが存在することが分かった。また、そのクラック内部には Cu や Zn などの濃度が高い物質が存在することが

分かった。この Cu や Zn はワイヤー放電加工時に使用したワイヤーの成分であり、加工時に APMT のマイクロクラック内に付着したものである。ワイヤー放電加工面に形成された加工影響層は削ることにより除去することができるが、深く伸びたクラックが残存したものである。マイクロクラック内部に付着したワイヤー成分の酸化反応により、異常酸化物が形成したことが分かった。

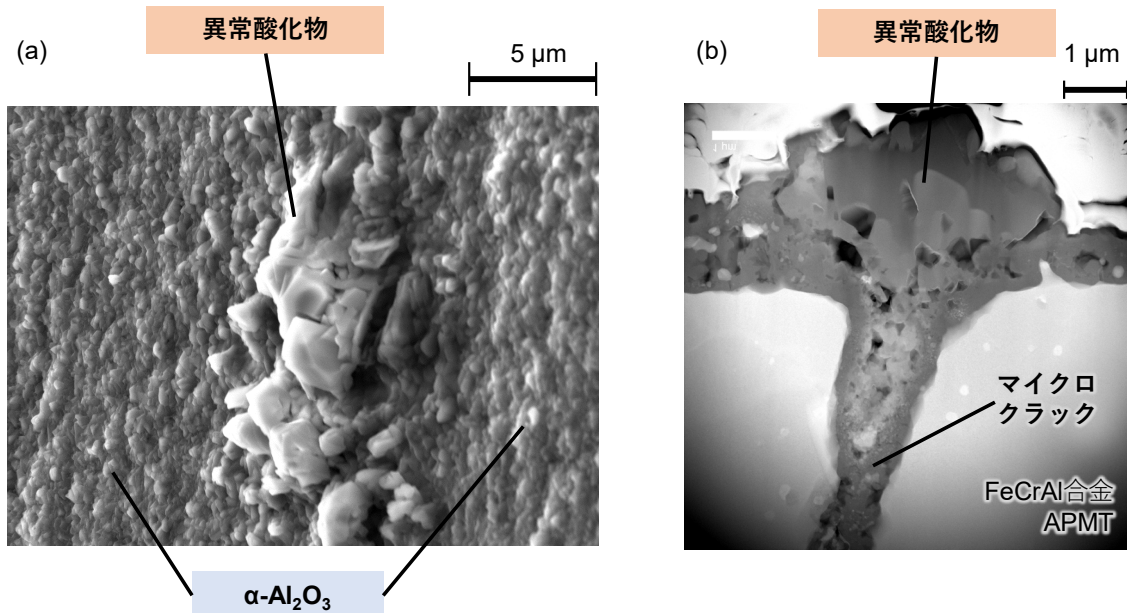


図1 ワイヤー放電加工面に残存したマイクロクラックと酸化処理への影響
(a) 表面像、(b) 断面像

異常酸化現象は克服できるのか？

マイクロクラックや残留したワイヤー成分を完全に除去することは困難である。そこで、Cu や Znなどを主成分とする異常酸化物が、多孔質な組織を有している点に注目した。本研究チームでは、酸化温度を上げることにより、酸素を異常酸化物の中を通過させて FeCrAl 合金の表面へ届けることにより、異常酸化物の下に Al 濃度の高い緻密な酸化被膜が形成できないかと考えた。酸化処理の温度を従来の 1,273 K から 1,373 K に上昇させた結果、図 2 に示すように Al 濃度の高い緻密な酸化被膜を異常酸化物の直下に成長させることに成功した。

Cu や Zn を主成分とする異常酸化物は電気を通しやすい特徴を有していた。そのため、異常酸化物が発生すると被膜の絶縁性は著しく低下してしまう。本研究では、異常酸化物の下に Al 濃度の高い酸化被膜を形成させることにより、電気絶縁性を大きく向上させることができることも分かった。

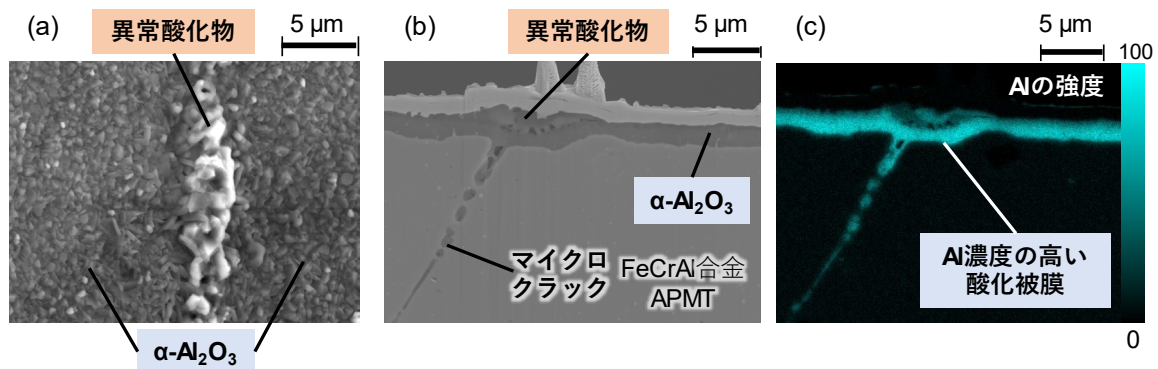


図2 異常酸化物の下に形成された Al 濃度の高い被膜

(a) 表面像、(b) 断面像、(c) Al の強度

核融合炉の MHD 圧力損失（電磁ブレーキ効果）の抑制は？

磁場閉じ込め核融合炉の液体ブランケットでは、液体金属が高磁場下を横切るように流れる際に誘導電流が発生し、MHD 圧力損失（電磁ブレーキ効果）が生じることで、液体金属を流すためのポンプに大きな負荷を与えてしまう。対策として、図 3(a)に示すように、導電率の低い α - Al_2O_3 膜で流路内壁を覆い絶縁する方法が挙げられる。そこで、磁場閉じ込め核融合炉の液体ブランケットの流路を簡易的に模擬した図 3(a)の体系を対象にしてシミュレーション計算を行った。1,373 K で酸化処理を行った場合の APMT 配管では、被膜により配管壁に流れ込む誘導電流が遮断されるため、電磁ブレーキの効果による流れのエネルギーの損失が、本研究で研究した α - Al_2O_3 膜がない時に比べて約 1,000 倍以上小さくなり、つまり 1,000 倍以上流れやすくなることが分かった。

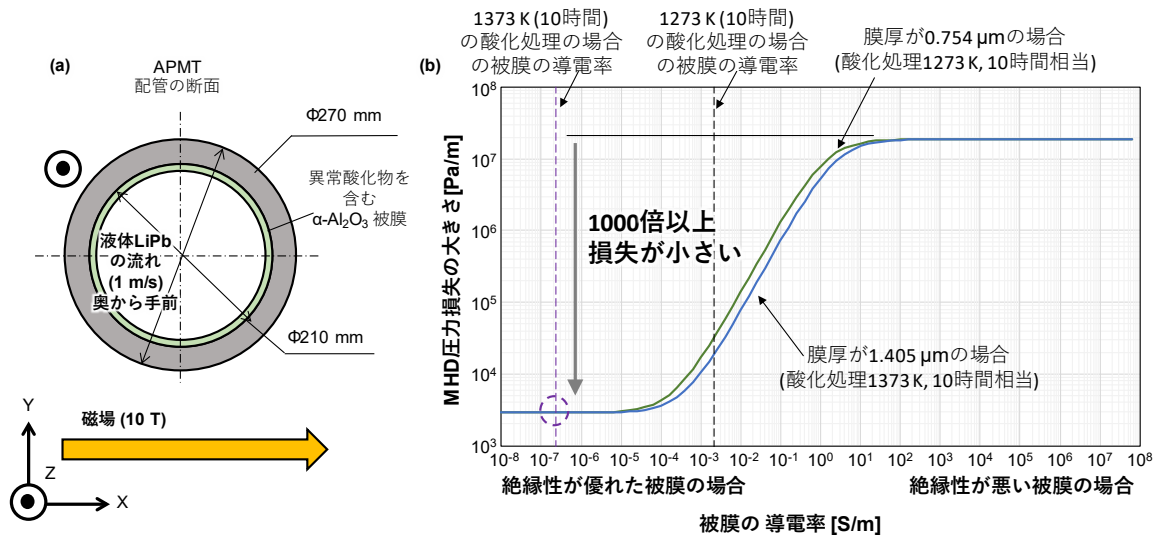


図3 APMT 配管の中を流れる液体リチウム鉛合金による MHD 圧力損失

(a) 計算体系、(b) シミュレーション結果

●社会的インパクトと今後の展開

本研究では、FeCrAl 合金の酸化挙動がワイヤー放電加工による影響を受けることを明らかにした。さらに、局所的な異常酸化という潜在的影響を排除する手法も明らかにした

ことにより、FeCrAl 合金が形成する α - Al_2O_3 膜の信頼性を劇的に向上させることにつながる。結果として、液体 LiPb ブランケット開発における材料共存性と電磁ブレーキ発生
の課題を α - Al_2O_3 膜の活用により解決しうる見通しを得た。核融合炉などの先進エネ
ルギープラントやさまざまな液体金属機器の早期実装を可能とするものであり、カーボ
ンニュートラル社会の実現に拍車がかかると期待される。今後は、核融合炉液体ブラン
ケットなどの苛酷環境下を想定した条件での実証実験へと進めたい。

●付記

本研究は、科学研究費助成事業（基盤研究（B））自己保全機能を有する絶縁性酸化被覆
による MHD 流れの制御技術の構築（21H01060）の支援を受けて行われた。また、本研
究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号
JPMXP1224HK0019、R5 年度学生研修プログラム）、「物質・デバイス領域共同研究拠点：
人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」における次世
代若手研究を通じた技術的支援を受けて実施された。

【用語説明】

- (1) **FeCrAl 合金**：Al を含む鉄系材料である。酸化処理を施すことにより表面に α - Al_2O_3 膜を形成する。
- (2) **保護性 α - Al_2O_3 膜**：酸化アルミニウムの膜のこと。化学的に非常に安定で、核融合炉などで使用される高温の液体金属に対しても優れた耐食性を示す。
- (3) **異常酸化現象**：酸化膜が本来有する保護性が失われるような酸化反応が起きる現象。
- (4) **ワイヤー放電加工**：図 4(a) に示すように、ワイヤーと工作物間にアーク放電を起こしながら工作物を局部的に溶かし、切断する方法である。そのため、図 4(b) に示すように加工面には、マイクロクラックを含む溶融再凝固層が形成される。こうした層は白層と呼ばれ使用する前に研磨などにより可能な限り除去する。

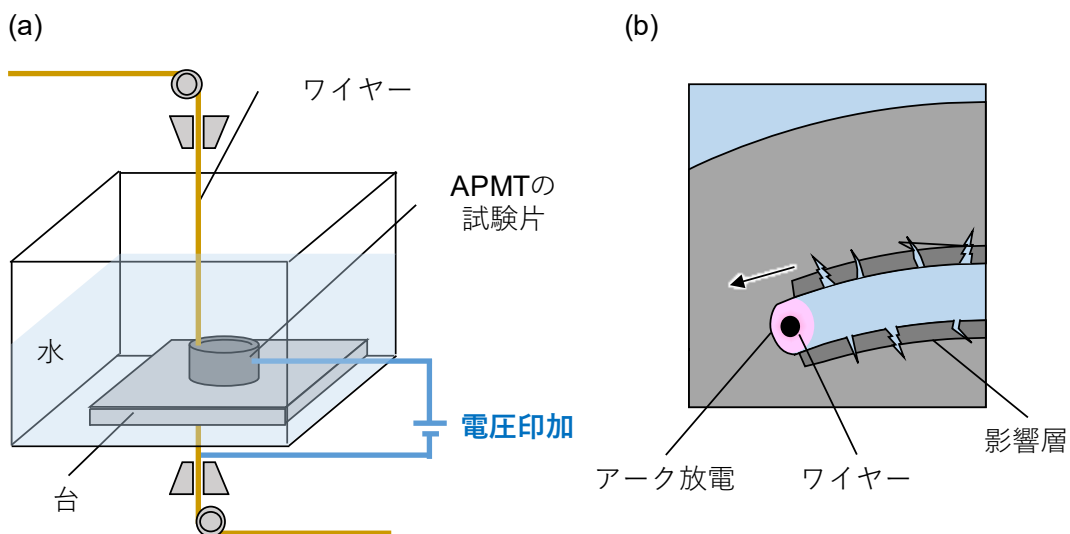


図 4 ワイヤー放電加工の仕組み

(a) 装置の図、(b) ワイヤー放電加工の様子

- (5) **核融合炉の液体 LiPb ブランケット**：ブランケットは一般的には「毛布」の意だが、核融合炉では、プラズマを毛布のように液体金属で覆うエネルギー変換システムを指す。核融合反応で発生する中性子を取り込みながら、熱エネルギーと新たな燃料を生産する役割を持つ。液体金属は液体状の金属。液体としての流動性を持ちつつ、金属として熱や電気を伝える能力に優れており、冷却材をはじめ、さまざまな用途に使用される。広義では液体となった金属すべてを指す。核融合炉の燃料増殖材兼冷媒として、中性子を増倍する機能を有する鉛 (Pb)と燃料であるトリチウム (T)を生産する機能を有するリチウム(Li)の合金であるリチウム鉛合金が期待されている。(【2022年2月24日 東京工業大学プレスリリース】高性能核融合炉ブランケットの新概念に見通し <https://www.titech.ac.jp/news/2022/062923>)

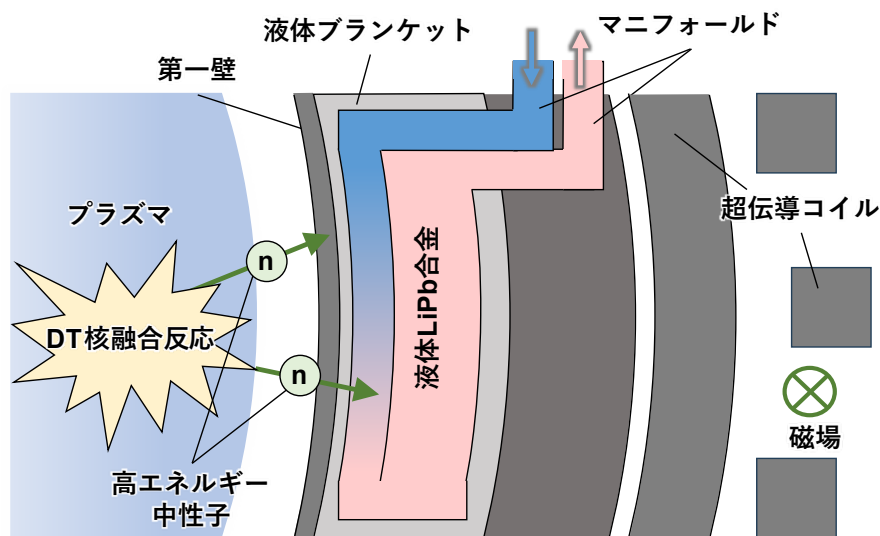


図5 液体金属ブランケットの構造模式図

- (6) **MHD 圧力損失 (電磁ブレーキ効果)**：図 6(a)のフレミングの右手の法則に従って、高磁場下を液体金属が横切って流れる際に、誘導電流が発生する。その誘導電流と液体金属の流れにより、図 6(b) のフレミングの左手の法則に従って、流れと逆向きにローレンツ力が生じる。この際に失われる流体の圧力の損失は電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) 圧力損失と呼ばれる。配管壁に流れ込む誘導電流を導電率の低い膜で遮断することにより、流れと逆向きに生じるローレンツ力を大きく低減することができる。

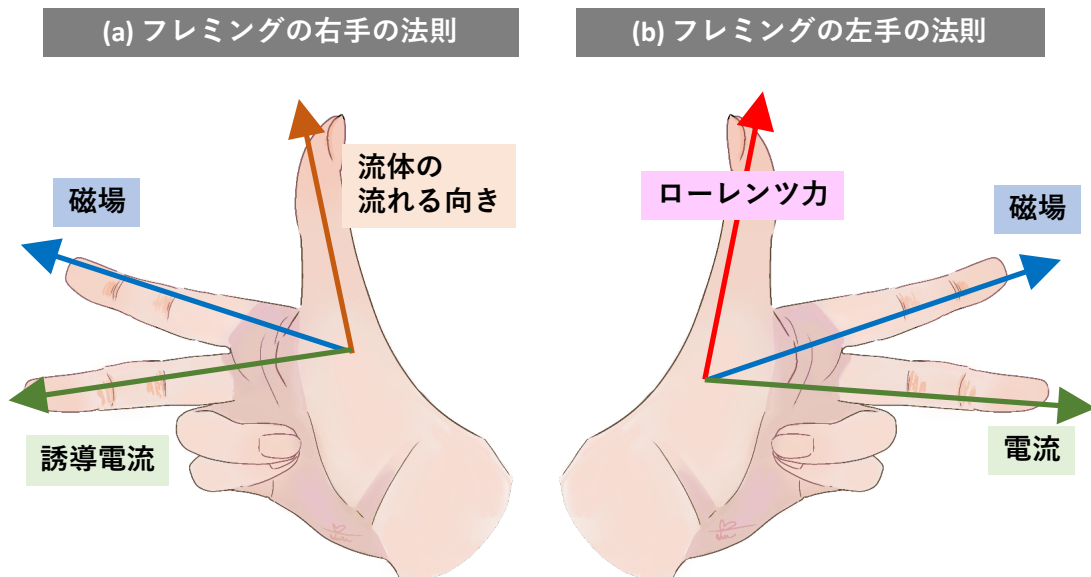


図6 誘導電流の発生とそれによるローレンツ力の発生
(a) フレミングの右手の法則、(b) フレミングの左手の法則

- (7) マイクロメートル：1メートルの100万分の1。髪の毛の太さは約100マイクロメートル。

【論文情報】

掲載誌：*Surface & Coatings Technology*, Volume 493, Part 2, 15 October 2024, 131250

論文タイトル：Growth of α - Al_2O_3 layer involving abnormal oxides in FeCrAl alloy tube fabricated by WEDM process and electrical insulating performance in fusion reactor blanket

著者：Ryuhei Muto, Masatoshi Kondo*, Takashi Endo, Ryunosuke Nishio, Teruya Tanaka *Corresponding author

DOI：10.1016/j.surfcoat.2024.131250

【問い合わせ先】

東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 准教授

近藤正聡

Email: kondo.m.ai@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-3065

北海道大学 電子科学研究所/創成研究機構

ナノテク DX センター/ナノテク連携研究推進室 特任助教

遠堂敬史

Email: t-endo@cris.hokudai.ac.jp

TEL: 011-706-9333

核融合科学研究所 研究部 超高流束協奏材料ユニット 准教授
田中照也

Email: tanaka.teruya@nifs.ac.jp

TEL: 0572-58-2319

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661

北海道大学社会共創部広報課

Email: jp-press@general.hokudai.ac.jp

TEL: 011-706-2610 FAX: 011-706-2092

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

Email: taigai-kakari@nifs.ac.jp

TEL: 0572-58-2019 FAX: 0572-58-2601