Press Release

2026 年 11 月 20 日
東京科学大学
東北大学

核融合炉の液体ダイバータ環境を模擬し 引張応力が材料の腐食挙動に及ぼす影響を解明

－液体スズの中で鋼材が引っ張られると何が起こるのか－

【ポイント】

○核融合炉の液体スズ冷却ダイバータ模擬環境において、候補構造材料である 316L ステンレス鋼に作用する引張応力が腐食挙動に及ぼす影響を解明

○引張応力によって、液体スズに浸漬した 316L ステンレス鋼材表面に形成される金属間化合物の種類や組織が変化することを、実験的に確認

○核融合炉の過酷な環境下における材料の腐食挙動を理解することで、炉内機器の信頼性向上につながると期待

【概要】

東京科学大学（Science Tokyo）総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所の近藤正聡准教授、東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻の大野直子准教授らの研究グループは、**磁場閉じ込め型核融合炉**（用語 1）の**液体金属スズ（Sn）冷却ダイバータ**（用語 2）の運転環境を念頭に、候補構造材料の 316L ステンレス鋼に作用する**引張応力**（用語 3）が、液体スズによる腐食挙動に及ぼす影響を解明しました。

核融合炉のダイバータは、**プラズマ**（用語 4）の純度を保つための重要な炉内機器ですが、高温のプラズマから大きな熱負荷を受けるため、構造材料の表面を液体スズで覆い、熱を除去する方式が検討されています。この方式では、ポンプで液体スズに圧力を加えて循環させる必要があるため、鋼製の配管には内圧によって引張応力が生じます。しかし、この引張応力が液体スズによる鋼製配管の腐食にどう影響するかは不明でした。

そこで本研究では、高温の液体スズによる鋼製配管の腐食に対して、引張応力がどのような影響を及ぼすのかを明らかにするため、C 字形の C リング試験片を用いた腐食試験を実施しました。この試験では、C リング試験片を変形させ、外側中央部に最大 200 MPa の引張応力を発生させた状態で、300℃と 500℃の液体スズ中に浸漬しました。その結果、300℃では引張応力の影響は認められませんでしたが、500℃では、**金属間化合物**（用語 5）層の初期形成が促進されることが分かりました。また、引張応力による金属間化合物層の緻密化を捉えることにも成功しました。この緻密化により、

その後の層の成長が抑制される可能性が示唆されました。本成果は、Elsevier の学術誌「*Journal of Materials Research and Technology*」オンライン版に、2026 年 10 月 27 日付（現地時間）で掲載されました。

●背景

核融合炉は、二酸化炭素を排出しないゼロカーボン電源として期待されています。フランスでは、核融合エネルギーの実現性を研究するための実験施設である **ITER**（用語 6）の建設が国際協力により進められています。また、国内外の民間企業による核融合炉開発も進められており、2030 年代の発電実現を目指す企業もあります。

磁場閉じ込め型核融合炉のダイバータは、プラズマから不純物や熱を排出し、安定した運転を成立させるために不可欠な炉内機器です。このダイバータの構造材を高温のプラズマによる強い熱から守るために、表面を液体金属で覆った液体ダイバータの概念が検討されています。液体ダイバータでは、食器やはんだに使われる身近な金属で、融点が 232℃と比較的低いスズ（Sn）が、高温でも蒸発しにくく、プラズマへの混入を抑えられることから、冷却材として期待されています。ただし液体スズ冷却ダイバータには、高温のスズが構造材を腐食するという課題があります。鉄鋼製の構造材料の表面では、鉄とスズが反応することにより、脆い金属間化合物が厚く形成されてしまいます［参考文献 1］。

一方で、液体ダイバータでは、液体スズが循環できるように、長い配管をつないだ**循環ループ**（用語 7）を用います。この循環ループを構成する配管には、316L オーステナイト系ステンレス鋼などが候補材料として検討されています。この配管に液体スズを一定の流速で循環させるためには、ポンプによって液体スズに圧力を加える必要があります。このとき、配管は液体スズの圧力により内側から押され、外側に膨らもうとします（図 1（a））。これにより、配管には引張応力が作用するため、構造材料は腐食と引張応力が重畳する過酷な環境に置かれることになります。

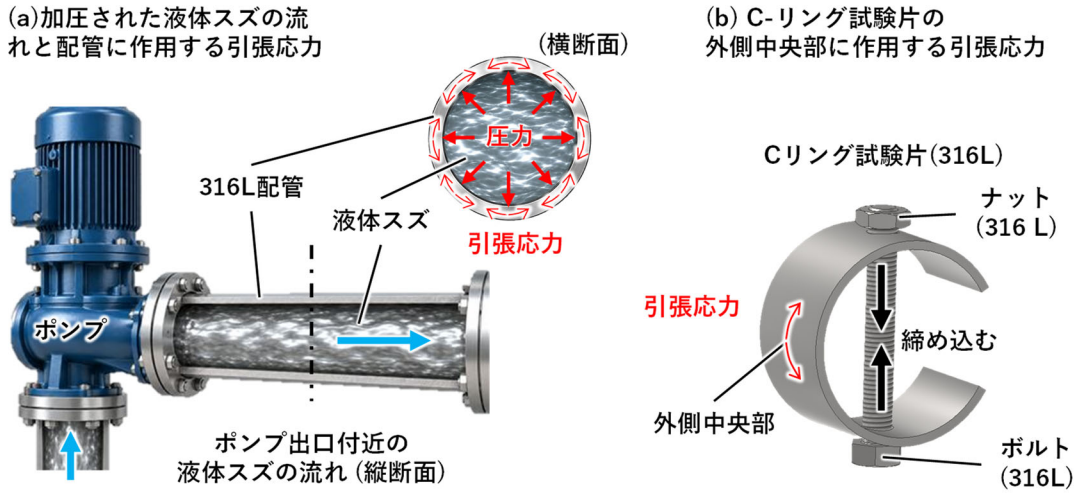


図 1（a）加圧された液体スズの流れと配管に作用する引張応力、（b）C リング試験片をボルトとナットを使って締め込むことにより外側中央部に作用する引張応力

一般的に、鉄鋼材料に引張応力を加えたときの変形には、応力を取り除くと元の寸法に戻る**弾性変形**（用語 8）と、応力を取り除いても変形が残る**塑性変形**（用語 9）があります。スズのような液体重金属の中で、塑性変形を伴うような強い応力が作用すると、材料の割れなどにつながる**液体金属脆化**（用語 10）が生じる場合があることが知られています。一方で、弾性変形の範囲内で作用する引張応力が液体重金属による腐食に及ぼす影響については、これまでほとんど調べられてきませんでした。

●研究成果

今回の研究で研究グループは、通常の腐食試験で用いる短冊状の試験片とは異なり、C 字形をした C リング試験片（図 1（b））を 316L オーステナイト系ステンレス鋼で製作しました。この C リング試験片をボルトとナットで締め込むことで、外側の最も張り出した部分に最大 200 MPa の引張応力を発生させ、液体ダイバータの循環ループの配管に作用する引張応力を模擬しました。この状態で、試験片を 300℃と 500℃の液体スズ中に最長 1,000 時間浸漬し、引張応力が腐食挙動に与える影響を調べました。この腐食試験後、**電界放出型走査電子顕微鏡**（**FE-SEM**、用語 11）などを用いて、引張応力が作用する C リング試験片の外側中央部について、表面近傍の断面組織を分析しました。

500℃の液体スズ中に 250 時間浸漬した後の試験片を分析したところ、引張応力を加えなかった場合（0 MPa）には、鋼材中の鉄とスズが反応し、二スズ化鉄（$FeSn_2$）に相当する金属間化合物の層が形成し、成長しました（図 2（a））。一方、100 MPa の引張応力を加えた場合には、二スズ化鉄の層の空隙が少なくなっていることが確認されました（図 2（b））。さらに、200 MPa の引張応力を加えた場合には、一スズ化鉄（FeSn）に相当する層が形成されることが分かりました（図 2（c））。

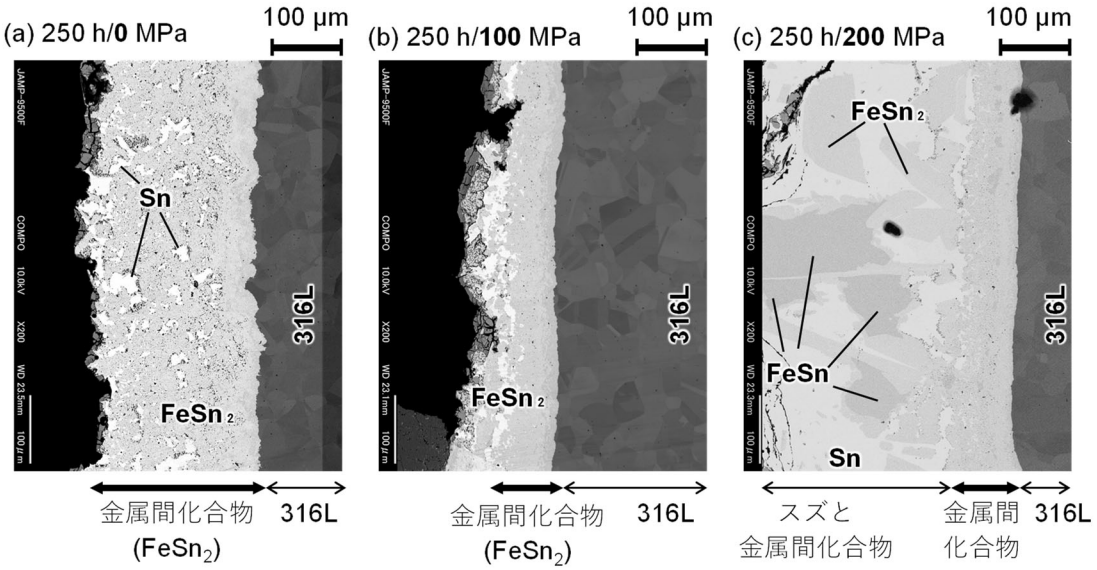


図 2　500°Cの液体スズに 250 時間浸漬した後の C リング試験片の外側中央部の表層断面写真、（a）引張応力なし（0MPa)、（b）引張応力: 100 MPa、（c）引張応力：200 MPa

このような金属間化合物層の形成は、引張応力によって液体スズと接する 316L ステンレス鋼表面の鉄の化学ポテンシャルが上昇し、スズとの反応に利用される鉄の供給が促進されたためと考えられます。一方で、形成された緻密な金属間化合物層が鉄やスズの移動経路を減少させ、その後の層の成長を抑えた可能性があります。このように、引張応力は金属間化合物層の初期形成を促進する一方で、層の緻密化を通じて、その後の成長を抑制する可能性が示唆されました。

●社会的インパクト

各国の政府や民間企業による核融合エネルギーの開発競争が激しくなるなかで、液体ダイバータをはじめとする革新的な炉内機器の開発と信頼性の確保が重要な課題となっています。核融合炉の構造材料は、核融合反応で発生する高エネルギー中性子や、プラズマからの高熱負荷による温度上昇、冷媒の流動による影響など、さまざまな因子が複雑に作用する過酷な環境にさらされます。そのため、これらの因子が材料の腐食に及ぼす影響を明らかにすることが重要です。

研究グループはこれまでに、米国のオークリッジ国立研究所との共同研究により、中性子照射が腐食挙動に及ぼす影響を明らかにしてきました [参考文献 2]。また、液体重金属の流れによって、腐食した材料の表面が削られるエロージョン現象についても研究を進めてきました。今回の研究では引張応力が腐食に及ぼす影響を新たに明らかにしました。こうした研究を通じて、これまで十分に解明されていなかった核融合炉の過酷な環境における材料の腐食挙動への理解が深まり、炉内機器の信頼性向上につながることが期待されます。

●今後の展開

今後は、本研究で得られた引張応力が腐食挙動に及ぼす影響に関する知見を活用して、液体金属環境に適した高耐食性材料の開発や腐食抑制技術の高度化を進めます。また、温度、流動、応力などの複数の因子が材料の腐食に及ぼす影響を体系的に解明し、実際の運転環境における材料の健全性を予測する技術の確立を目指します。さらに、こうした成果を、統合試験装置やプロトタイプ炉などでの機能実証へと発展させ、核融合炉の安全性と信頼性の向上に貢献していきます。

●付記

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）の支援を受けました。また、本研究の一部は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業の基盤研究（B）（課題番号：23H01895）および挑戦的研究（萌芽）（課題番号：23K17676）の助成を受けて実施されました。

【参考文献】

[1] Masatoshi Kondo, Miyakawa Yukihiro, Yoshiki Kitamura, Minho O, Teruya Tanaka, Corrosion Science, Corrosion mechanism of reduced activation ferritic martensitic steel JLF-1 in liquid metal Sn, 209 (2022) 110748, DOI：10.1016/j.corsci.2022.110748
（東京工業大学プレスリリース「液体金属スズで構造を保護する核融合炉機器の開発に見通し」https://www.titech.ac.jp/news/2022/065437）

[2] N. G. Russell, M. Romedenne, J. Jun, B. A. Pint, M. Kondo, C. On, Y. Katoh, A methodology for corrosion testing ODS steels in liquid tin under reactor conditions in HFIR, Fusion Engineering and Design, 222 (2026) 115504, DOI：10.1016/j.fusengdes.2025.115504

【用語説明】

（1） **磁場閉じ込め型核融合炉**：超高温のプラズマを強力な磁場によって閉じ込め、重水素や三重水素の原子核融合反応を持続させる核融合炉。代表的な方式としてトカマク型やヘリカル型がある。

（2） **液体金属スズ（Sn）冷却ダイバータ**：プラズマ中の不純物やヘリウムなどを排出する役割を担うダイバータのうち、構造材の表面に液体スズを流すことで、プラズマによる高い熱負荷を効率的に除去するものをいう。

（3） **引張応力**：材料を引っ張る方向に作用する単位断面積当たりの力。引張応力の値は、その物体に作用する力をその力が作用する断面積で割ることで求め、単

位には Pa（パスカル）を用いる。

（4） **プラズマ**：物質が高温に加熱されるなどして、原子が電子と正の電荷を持つイオンに分かれた状態。固体、液体、気体に続く、物質の第 4 の状態とも呼ばれる。

（5） **金属間化合物**：異なる種類の金属元素が特定の組成比で結びついて形成される化合物。鉄とスズの場合には、$FeSn_2$や FeSn などが形成されるが、これらの化合物は脆く、構造材料の健全性に影響を及ぼす可能性がある。

（6） **ITER**：日本、欧州連合、米国、中国、韓国、ロシア、インドの 7 極が共同でフランスに建設を進める世界最大級のトカマク方式の核融合実験炉。

（7） **循環ループ**：複数の配管をつないで一つの閉じた流路を形成し、液体金属などの流体を繰り返し循環させる装置。配管、ポンプ、加熱装置、冷却装置などで構成される。

（8） **弾性変形**：材料に力を加えると形状や寸法が変化するが、その力を取り除くと元の形状や寸法に戻る変形。316L オーステナイト系ステンレス鋼も一定の応力範囲内では弾性変形を示し、この範囲を弾性領域と呼ぶ。

（9） **塑性変形**：材料に強い力を加えた場合に、力を取り除いても元の形状や寸法に戻らずに残る変形。

（10） **液体金属脆化**：固体の金属材料が液体金属と接触することで、延性や破壊に対する抵抗力が低下し、亀裂や破断が生じやすくなる現象。

（11） **電界放出型走査電子顕微鏡（FE-SEM）**：強い電界によって放出された電子を試料表面に照射し、発生する電子を検出することで、試料表面の微細な構造を高倍率・高分解能で観察する装置。

【論文情報】

掲載誌：*Journal of Materials Research and Technology*
論文タイトル：Effect of applied tensile stress on Fe–Sn intermetallic layer growth and degradation of 316L austenitic stainless steel in liquid Sn
著者：Masatoshi Kondo, Yujin Nishiya, Kenshi Ohno, Naoko Oono-Hori, Gen Omori, Sota Nakagawa
DOI：10.1016/j.jmrt.2026.10.228

【研究者プロフィール】



近藤 正聡（コンドウ マサトシ）Masatoshi Kondo
東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所
准教授
研究分野：液体金属などの高温流体を用いた核融合炉のエネルギー変換や海水淡水化技術の開発

【お問い合わせ先】

（研究に関すること）
東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所　准教授
近藤 正聡
Email：kondou.m.fdb5@m.isct.ac.jp

（報道取材申し込み先）
東京科学大学 総務企画部 広報課
取材申し込みページ：https://www.isct.ac.jp/ja/001/media
Email：media@adm.isct.ac.jp
TEL：03-5734-2975　FAX：03-5734-3661

東北大学 大学院工学研究科 情報広報室
Email：eng-pr@grp.tohoku.ac.jp
TEL：022-795-5898