

# NIFS NEWS

ISSN 1884-1600

*NIFS*

No.236



Fusion フェスタ in Tokyo を開催

2017 JUN/JUL

## >>> 研究最前線・・・2-5

高性能ダイバークライオポンプの開発

～効率良く粒子を排気する～

本島 厳

液体増殖ブランケット環境を実現する

～熱・物質流動ループOroshhi-2による循環状態での試験～

八木重郎

## >>> 特集・・・6

Fusion フェスタ in Tokyo

高畑一也・吉村信次

## >>> 会議報告・・・7

第27回核融合工学に関する米国電気電子学会シンポジウム (SOFE2017)

磯部光孝

## >>> トピックス・・・8

第6回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞

市民学術講演会を開催しました

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

## 高性能ダイバータクライオポンプの開発 ～効率良く粒子を排気する～

本 島 厳

大型ヘリカル装置 (LHD) では、不純物やプラズマになりそびれた燃料の水素ガスを炉心プラズマから離れたところに効率よく一まとめにするため、真空容器内にダイバータと呼ばれる構造を導入しています。このダイバータは LHD 特有の形をしており、ヘリカルコイルと同様に螺旋状をしています。2010 年より、ダイバータは、より多くの水素ガスを集めるために“閉構造化”と呼ばれる改造を行っており、改造前に比べて 10 倍以上の水素ガスを集めることに成功しています（詳細は、NIFS ニュース 2010/194 号の「研究最前線」をご覧ください）。しかし、一まとめにした水素粒子は、そのままではいずれ周りに散ってしまい、一部はプラズマに戻っていきます（粒子リサイクリングといいます）。粒子リサイクリングが低い状態にすることによりプラズマの性能が向上したり、プラズマの密度が制御しやすくなったりすることが分かっており、低い粒子リサイクリング状態にするためには、ダイバータで一まとめにした水素は真空ポンプで排気する必要があります。落ち葉をほうきでかき集めても、そのままでは風が吹けば飛び散ってしまいます。しっかりちりとりで集めて袋に詰める必要があることと同じです。この袋と同じ役割を担うために、ダイバータ内にガス吸着型のクライオポンプ（以下、クライオポンプと呼びます）を設置することにしました（図 1）。ダイバータクライオポンプは、活性炭が接着された吸着パネルと、吸着パネルを冷却するための冷却装置によって構成され、活性炭がマイナス 253 度以下に冷却されると、水素ガスを吸着ようになる性質を利用した真空ポンプです。活性炭とは、内部に小さな孔（細孔）がたくさんある黒炭で、ご家庭でも脱臭剤としてよく使われています。

核融合科学研究所では、高性能なダイバータク

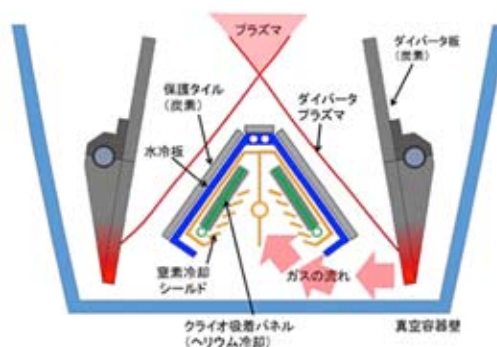


図1 高性能化されたダイバータ。  
ダイバータ内部にクライオポンプが実装されている。

ライオポンプの実現を目指し、2014 年から様々な種類の活性炭の排気特性を調べる開発試験を行い、非常に性能の良い活性炭を発見しました。この試験では、小さな真空容器を用いて、異なる活性炭を何度も冷却して試験をするという地道な作業が必要で、時には朝から晩まで根気よくデータを収集する必要がありました。図 2 に試験をしていた頃の写真を掲載しています。開発試験は、決して派手さ



図2 開発試験時の様子  
（1 番左から、筆者、田中宏彦氏（現 名古屋大学）、村瀬尊則氏）



はないのですが、試験している活性炭が性能の良いものだとなった時には、実験の面白さを改めて教えてくれるものでした。「千里の道も一歩から」という言葉がありますが、地道な開発試験を通して、活性炭の細孔分布（細孔の大きさとその容積の関係）が水素ガスを吸着する性能と強く関係することが分かり、今では、クライオポンプに適した細孔分布に制御された活性炭の開発を企業との共同研究で進めるほどになりました。近い将来、さらに性能の良い活性炭が生み出されるかもしれません。

さて、上記の開発試験に基づくダイバータクライオポンプ開発により、2017年にはLHDの真空容器内のダイバータ10セクションのうち5セクションに高性能ダイバータクライオポンプを実装することができました。そのうちの1セクションに導入されたダイバータを図3に示しています。第19サイ

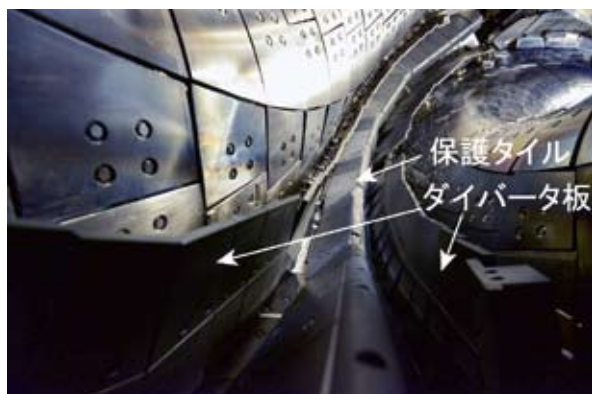


図3 真空容器内に設置されたダイバータの様子

クル実験が始まる前に、試験用の水素ガスをLHDの真空容器に導入してダイバータクライオポンプの排気性能を試験しました。その結果を表1に示しています。表では、第18サイクル実験時の排気性能も示しています。第18サイクル時に比べて、約7倍の排気速度が得られていることが分かりました（図4）。また、排気容量は約15倍向上していることが分かりました。ここで、排気速度（立方メートル/秒）は水素ガスの圧力（パスカル）を掛けることで1秒間あたりの粒子排気量を表し、排気容量（パスカル・立方メートル）は排気可能な全粒子量を表

|         | 排気速度<br>(立方メートル/秒) | 排気容量<br>(パスカル・立方メートル) |
|---------|--------------------|-----------------------|
| 第18サイクル | ~10                | ~3,300                |
| 第19サイクル | ~70                | ~58,000               |

表1 ダイバータクライオポンプの排気性能試験結果

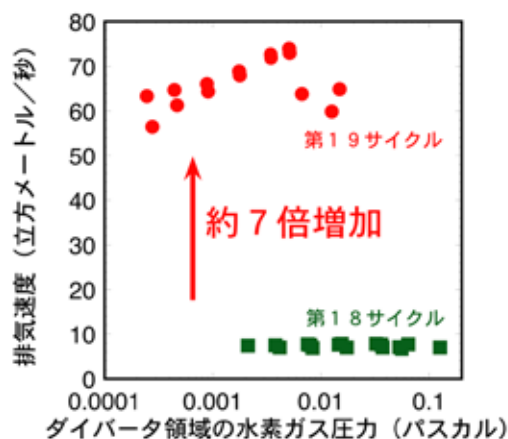


図4 ダイバータクライオポンプの排気速度試験結果

しています。今回得られた排気速度は、LHDの主真空排気装置に迫る値であるほか、ダイバータ部では効率的に水素ガスを集められている分、粒子を排気する量はダイバータクライオポンプの方が多くなります。また、排気容量は燃料供給用の固体水素ペレット20,000発分で、これはLHDの高密度実験1日で使用される水素供給量の約20日分に相当し、排気速度、排気容量ともにプラズマ実験に貢献できる値であることを確認しました。

現在第19サイクル実験中であり、これらの高性能化されたダイバータクライオポンプを用いたプラズマ実験を行い、その効果を確認しています。その初期結果として、ダイバータクライオポンプによりプラズマの密度が低く、また粒子供給停止後の密度の減少速度が速い、いわゆる「粒子リサイクリングの低い状態」が観測されました。これは、ダイバータクライオポンプの排気効果が表れていることを示しています。今後、閉じ込め性能に与える影響のほか、密度制御性について詳細に調べていく予定です。

（高密度プラズマ物理研究系 准教授）

# 液体増殖ブランケット環境を実現する

## ～熱・物質流動ループOroshhi-2による循環状態での試験～

八木重郎

核融合炉を実現するためには、燃料となる三重水素（トリチウム）が必要です。しかし三重水素は地球上に資源としては存在しないものなので、核融合プラズマを包むように設置されるブランケットと呼ばれる設備において、プラズマから放出される中性子と、リチウムを反応させてその都度生産（増殖）し、取り出す必要があります。また、発電するためにはブランケットで発生した熱を核融合炉の外に運び出し、タービンに運ぶ必要があります。この時リチウムを含んだ高温で利用できる液体（液体増殖材）を使って、熱も三重水素もまとめて取り出してしまふことがより効率的ではないかと考えられており、これを液体増殖ブランケットと呼びます。液体増殖材としては、金属リチウム・鉛リチウム共晶合金<sup>\*1</sup>（以降 PbLi）・フッ化物溶融塩、の3種類が有力視されています。これらの液体増殖材を用いた実験は国内外でいろいろと行われてきたのですが、多くは実験室規模の小型で単純な装置を利用したものでした。しかし核融合炉のブランケットを含むループでは、場所によって配管の形や温度、磁場の強さなどの条件が大きく異なります。液体増殖材は配管などの材料を腐食する可能性があり、このメカニズムや条件をきちんと調べる必要がありますが、腐食は液体の流れの強弱だけでなく、ループ内の温度差でもその挙動が大きく変わってきます。また流れ方そのものも磁場のあるなしで大きく変わってきます。こういった背景から、大規模なループで複合的な環境を実現することが必要となってきました。そこで熱と水素の輸送を中心に据えた、液体増殖材研究のテストスタンドとして、熱・物質流動ループ Oroshhi-2<sup>\*2</sup> が核融合科学研究所・総合工学実験棟 1 階の大実験室に整備されました。

装置の概略を図1に示します。この装置内には、

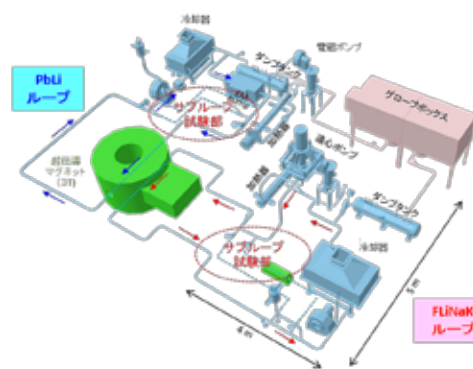


図1 Oroshhi-2の全景（上）と概略（下）。上の写真は下図の左上方向から撮影したものです。

先に挙げた液体増殖材のうちの PbLi とフッ化物溶融塩の FLiNaK<sup>\*3</sup> の2つのループが備えられ、これらの一部が超伝導磁石の中を通る構造になっています。

### 1. マグネットを使って実験できること

磁場を利用する核融合炉では、ブランケットの部分にも強い磁場がかかるのですが、強い磁場の中では液体の流れ方が大きく変わります。まず PbLi の場合は電磁誘導により発生する大電流と磁場の相互作用により非常に大きなブレーキ効果が発生してしまいます。Oroshhi-2 では PbLi を用いて流路に直交する方向に 3 テスラ（世界最強）という、核融合炉の想定に近い磁場の強さでの世界初の実

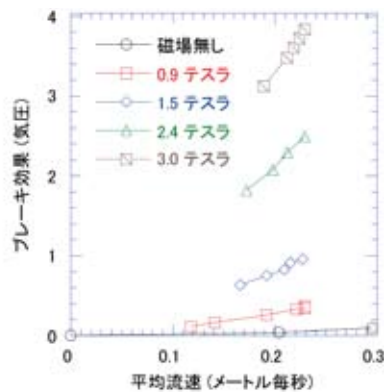


図2 強磁場中でのPbLiの流れに対するブレーキ効果。ブレーキ効果は流路の長さにも比例して大きくなります。

験に成功し（図2）、ブレーキ効果は平均流速と磁場強度の二乗に比例するという理論的な予想にはほぼ一致する結果を得ました。さらに、複雑な形状（曲がり、分岐、径の変化など）でどうなるかについては未解明な点が多いのですが、Oroshhi-2は電磁石の中心にドラム缶が入るほどの大きな空間があり、ここを利用して実際に測定ができます。すでに京都大学との共同研究によって、世界初となるクランク状の配管での圧力損失の測定が行われました。このブレーキ効果の軽減には、配管の内側での電気的な絶縁処理が必要であり、それらの試験についても実施の準備が進んでいます。

一方、熔融塩の場合は、ブレーキ効果は発生しないかわりに流れの乱れが抑えられ、熱が運ばれにくくなってしまいます。熔融塩はそもそも熱を伝えるにくい材料、これは大きな問題であり、配管内に突起などを入れて流れを積極的に乱れさせる、といった対応が必要になります。こちらも効果の実証を目指し、共同研究により試験部の製作が進んでいます。

## 2. サブループ試験部を使って実験できること

また、両ループともにサブループ試験部と呼ばれるエリアがあります。ここでは水素を用いた試験や、腐食に関連した試験などが実施できるようになっています。PbLiループでは超音波を利用した流速計の実証研究が行われた（大阪大学との共同研究）ほか、熱交換器を備えた水素の取り出し・腐食試

験のための試験ラインが昨年度末に完成しました。FLiNaKループでは、永久磁石による1テスラの磁場の中で、高温で材料腐食を実験するライン（図3）が稼働中です。材料の腐食において重要なループ内部の温度差については、流量に制約はあるものの両ループともに200℃程度までの温度差をつけながら流すことができます。

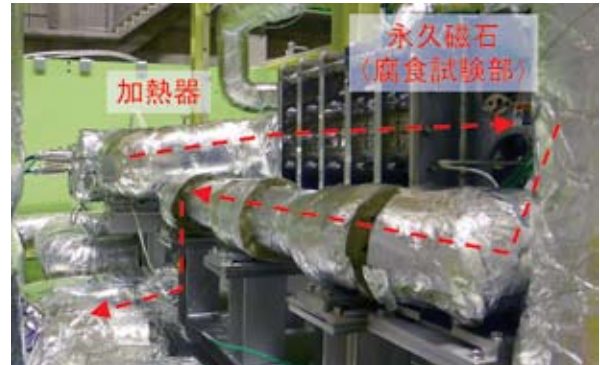


図3 高温磁場腐食試験部。1テスラの磁場中で、矢印のように高温の熔融塩が流れます。試験部は腐食試験用の金属片を出し入れできる構造となっています。

なお、腐食などの化学的な実験をする上では、流体中の不純物が大きな影響を持ちます。Oroshhi-2はグローブボックスという空気や水蒸気を非常に低い濃度に維持できる装置も備え、これを用いて高純度のFLiNaKやPbLiを製造して利用しています。グローブボックスの内部スペースは現在も、小規模な実験や液体増殖材の製作に有効利用されています。

このようにOroshhi-2は様々な新しい設備を増強しつつ、世界に類を見ない試験設備として新しい研究データをどんどん出し始めています。今後の発展にご期待ください！

（核融合システム研究系・助教）

- \*1 原子数でリチウムが約16%、鉛が約84%の割合で混ざったもの
- \*2 OroshhiとはOperational Recovery Of Separated Hydrogen and Heat Inquiryの略を研究所の住所にかけたもので「オロシ」と読みます。この装置では三重水素（トリチウム）は使用しません。
- \*3 リチウム・ナトリウム・カリウムそれぞれのフッ素との化合物を混合したもの



## Fusion フェスタ in Tokyo

高 畑 一 也 ・ 吉 村 信 次

将来の核融合発電の必要性、核融合研究における学術研究の重要性、研究所および総合研究大学院大学（総研大）の研究・教育活動を、広く社会・国民に知っていただくために、ゴールデンウィーク中の5月3日に、日本科学未来館（東京都江東区青海）において「Fusion フェスタ in Tokyo 2017 -核融合!未来を創るエネルギー-」を開催しました。平成22年度より毎年、東京で開催している本イベントも今回で8回目となりましたが、当日は晴天に恵まれて、家族連れを中心に約2,150名の参加をいただきました。

本イベントは、楽しみながら科学や核融合を身近に感じていただけるよう、小中学生から高校生までの若い世代にも分かりやすい講演会と科学体験・工作教室・展示から構成されています。講演会では、特別講演として、鹿野豊先生（東京大学先端科学技術研究センター特任准教授・チャップマン大学量子科学研究所客員助教授兼任）をお招きして、「重力波で観る天体観測の夜明け」と題する講演をしていただきました。重力波とは時空の歪みの時間変動が光速で伝搬する波動現象で、1916年にアインシュタインによって予言されたものです。講演では、一般相対性理論に基づいた重力波の基礎、アメリカのレーザー干渉計重力波観測所LIGOによる世界初の重力波検出、その重力波源が二つのブラックホールの合体であることを示すシミュレーション結果、そして今後の重力波観測への貢献が期待される日本の大型低温重力波望遠鏡KAGRAの建設状況について、スケールが大きく科学の面白さに満ち溢れたお話をいただきました。次に、竹入康彦所長が「未来を創るエネルギー-ここまで来た核融合研究-」と題して、核融合の原理から大型ヘリカル装置（LHD）をはじめとした核融合研究の進展、そして今後の実現へ向けた見通しについての講演を行いました。また、伊藤篤史准教授が「はじめての核融合」と題し、初めて核融合についての話を聞く方でも理解できるよう分かりやすく工夫された講演を行いました。これらの講演中に、核融合科学研究所からのライブ中継も実施しました。LHD本体室からの中継では、LHDの通路から長壁正樹教授が手を振ってその大きさをアピールしました。LHDの制御室からの中継では、小林達哉助教がLHDの紹介や実際のプラズマ動画を用いたクイズを行いました。会場からの質問に答えるなど、双方向のやり取りを通してより核融合研究に親しんでいただける機会となったと思います。さらに、来場できなかった方々にも講演会を視聴していただけるよう、全ての講演に対してインターネットによるライブ配信を行いました。今回は、ニコニコ動画とYouTube Liveを合わせて延

べ1000人を超える方々が視聴されました。

科学体験・工作教室では、核融合研究に関連した技術を実感・体験していただくために、大気圧プラズマ、真空実験、高速カメラ、磁気浮上列車、音声の可視化、形状記憶合金、三次元映像、プラズマボール、分光などの実演を行いました。LHD型分光器（写真）を作る工作教室では、参加者の方々がご自分で作られた分光器で様々な光源を見て、その場で分光スペクトルを観測する体験をされました。また、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）指定校である東海大学付属高輪台高校と東京都立科学技術高校の生徒による工作教室を交えた研究発表も大変好評でした。展示では、核融合研究紹介、総研大核融合科学専攻紹介、研究所紹介ビデオ上映を行いました。来場者からは、「科学を身近に感じられた」、「子供も楽しめた」、「早く核融合発電を実現してほしい」などの感想をいただき、多くの皆様に理解を深めていただけたと思います。

核融合研究の意義と科学の楽しさをより広く知っていただくため、今後も東京でのイベントを開催していきます。次回は、平成30年5月3日の開催を予定しています。

（装置工学・応用物理研究系 教授／Fusion フェスタ in Tokyo 実行委員長）

（高密度プラズマ物理研究系 准教授）



鹿野豊先生による講演会の様子



科学工作教室の様子（LHD型分光器）

## 第27回核融合工学に関する米国電気電子学会シンポジウム (SOFE2017)

磯 部 光 孝

6月4日から6月9日にかけて、中華人民共和国上海市にて第27回核融合工学に関する米国電気電子学会（IEEE）シンポジウムが開催されました。通称 SOFE と呼ばれる本会議は歴史が古く、1965年から隔年で開催され、今回で27回目を迎えました。IEEEの会議であることから、これまで米国内で行われてきましたが、近年の中国における核融合研究の急速な成長、及びそれに伴う同国からの出席者数の増加を踏まえ、今回初めて米国を飛び出し、中国での開催となりました。今回の会議には400名を超える研究者や大学院生等が出席しました。核融合科学研究所からは、竹入康彦所長、長壁正樹大型ヘリカル装置計画実験統括主幹、廣岡慶彦核融合システム研究系教授、及び筆者の4名に加え、総合研究大学院大学の大学院生3名、計7名が出席しました。

会議は、Bernard Bigot ITER機構長によるITERプロジェクトの最近の状況に係る基調講演から始まり、次いで、Yuanxi Wan 中国科学院プラズマ物理研究所元所長から中国核融合工学試験炉CFETRの設計等に係る基調講演がなされました。竹入所長は、「Prospect towards Steady-State

Helical Fusion Reactor based on Progress of LHD Project Entering the Deuterium Experiment Phase」と題して基調講演を行い、重水素実験開始に伴うイオン温度の最高記録値の更新、ヘリカル型核融合炉の実現に向けた核融合工学研究の進捗など、数多くの最新研究成果に係る報告を行い、聴衆の関心を集めました。今回の会議は、大型ヘリカル装置（LHD）における重水素実験開始後の初めての大規模国際会議ということで、長壁実験統括主幹は、「Preparation and Commissioning for the LHD Deuterium Experiment」と題して招待講演を行い、LHD重水素実験実施に向けた準備とコミッショニングを中心に報告を行いました。筆者は、重水素実験に伴い発生する中性子の発生量管理において必要不可欠な中性子計測器の概要、及び同計測器を使った高エネルギー粒子閉じ込め研究の初期結果等について「Neutron Diagnostics in the Large Helical Device」と題して口頭発表を行いました。次回の本会議は、米国へと戻り2019年6月にフロリダ州ジャクソンビルにおいて開催される予定です。

（高温プラズマ物理研究系・教授）



竹入所長による基調講演の様子



SOFEが行われた会議場

## 第6回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞

本研究所プラズマ加熱物理研究系の伊神弘恵准教授が、「静電波を用いた高密度プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱の研究」によって、第6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、自然科学研究機構が、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授与しているものです。

伊神准教授は、大型ヘリカル装置（LHD）において、プラズマ外部から電磁波を入射して加熱する電子サイクロトロン共鳴加熱の研究に積極的に取り組んでおり、通常の電磁波が遮断される高密度プラズマにおいても加熱を可能とする手法を実証するなどの研究成果が評価されて、今回の受賞に至ったものです。

なお、授賞式と受賞記念講演が、6月11日（日）に、日本科学未来館・未来館ホール（東京）にて行われ、伊神准教授は「波動モード変換を利用した超高密度プラズマ加熱への挑戦」と題した記念講演を行いました。また、講演終了後には、研究に関係した品を用意したブースを設け、受賞者と来場者とが直接語り合う「ミート・ザ・レクチャラーズ」が開催され、伊神准教授も講演に招待された多くの高校生らの質問に答え交流を深めました。これら一連のイベントには、一般の方々からも多数の参加がありました。



受賞者らの記念写真（伊神准教授は前列左から2人目）

## 市民学術講演会を開催しました

核融合科学研究所は、7月8日（土）にセラミックパークMINO 国際会議場（岐阜県多治見市）において、「チンパンジーの心 人間の心」をテーマに、市民学術講演会を開催し、多治見市、土岐市、瑞浪市を中心に約230名の方にご参加いただきました。

前半は、松沢哲郎京都大学高等研究院特別教授が、「互いを思いやる心の進化」と題して、講演されました。主な研究対象となったチンパンジーにちなんで「アイ・プロジェクト」と呼ばれる実験研究と、西アフリカの野生チンパンジー群を対象とした野外研究の双方を通じて、人間の心の進化的起源を実証的に探究する「比較認知科学」という学問分野を創出したことについて紹介されました。

後半は、竹入康彦所長が、「世界における核融合プラズマ研究の進展」と題して講演を行いました。講演では、核融合発電の原理や、1億度を超えるイオン温度を達成した大型ヘリカル装置（LHD）の最新の成果等、世界中で進む核融合プラズマ研究の現状について紹介しました。



松沢哲郎 京都大学高等研究院特別教授の講演



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.236

2017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 : <http://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。

一般社団法人学術著作権協会 〒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。