ISSN 1884-1600

NIFS NEWS

NIFS

No.230



「Fusion フェスタ in Tokyo」を開催

2016 JUN/JUL

>>> 研究最前線 · · · · 2-5

普段目にする自然現象を利用した レーザー核融合実験用極低温ターゲットの開発

岩本晃史

プラズマの「紐」の振る舞いを粒子シミュレーションで調べる

長谷川裕記

>>> 特 集 • • • 6

Fusion フェスタ in Tokyo

高畑一也·大石鉄太郎

>>> 会議報告・・・・・ 7-8

第22回制御核融合装置における プラズマ・表面相互作用に関する国際会議

本島 厳

第21回高温プラズマ計測に関する国際会議 (HTPD2016)

向井清史

>>> トピックス・・・・・8

第5回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞

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

普段目にする自然現象を利用した レーザー核融合実験用極低温ターゲットの開発

岩本晃史

太陽では、太陽自身の巨大な重力でプラズマを 閉じ込め、核融合反応が起こっています。核融合炉 の実現にむけて、その反応を地上で起こすために 大きく分けて2つの原理の研究が進められていま す。一つは、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) で実験を行っているように強力な磁場でプ ラズマを閉じ込め反応を起こす方法です。もう一つ はレーザーや重イオンなどを用いる慣性核融合と 呼ばれる方法です。国内では大阪大学レーザーエ ネルギー学研究センターにおいてレーザーを用い た高速点火という核融合実験が進められています。 その原理は次の通りです。図1のような直径500 ミクロンの小さな固体燃料ターゲットに超強力な レーザーを照射するとレーザーにより表面のプラ スチック層があぶられ急速にプラズマ化し、大量 のプラズマ化した粒子が外に飛び出そうとします。 その反作用で内向きに燃料が急激に圧縮され(爆 縮といいます)、核融合反応に必要な高温・高圧状 態が実現されます。この状態は、外力が加わらな ければそこに留まろうとする慣性で、非常に短い 時間ですが維持されます。この時、加熱用のレー ザーを打ち込むことで燃料が点火し核融合燃焼を 起こすことができます。図2はその爆縮過程のイ



図1 レーザー核融合実験に使用するターゲット(5円玉との比較)。

メージです。今回は、その小さな固体燃料ターゲットを作る研究について紹介します。なお、この研究は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターとの共同研究により実施しています。

研究に使用する燃料は水素ですので我々が通 常見ることができる状態は気体です。それを約 -259℃まで冷やすと水素の固体を作ることができ ます。ただし、レーザー核融合実験では要求が厳 しく、図2に示すピンポン球のような中空状態(以 後、シェルと呼ぶことにします)で透明な固体水 素を作ることが要求されています。さて、このシェ ルターゲットをどのように実現するか?からこの 研究は始まりました。ここで普段目にする現象とし て、毛細管現象により水を吸い上げ中に溜め込む スポンジに注目しました。この現象を使えば、必 要な形に作ったスポンジ状材料(以後、フォーム 材と呼ぶことにします) に液体状の燃料を染み込 ませ、その後凍らせることでシェル状の固体燃料 層を作ることができると考えました。しかし、こ のフォーム材は燃料に混ざった不純物になります。 そこで、その不純物量と核融合エネルギー取り出 しへの影響についてシミュレーションによる評価 を行いました。その結果、核融合炉用にはフォー ム材の密度を 10 mg/cc 程度まで低くする必要が あることが分かりました。その密度を目標にして 軽量フォーム材の開発を行いました。現在は、そ の開発したフォーム材を使って直径 500 ミクロン の小さなシェルを作ることにほぼ成功しています。 では、次にそのフォーム材中に透明できれいな固体 水素をどのように作るかということが課題になり ます。何も考えずに水を凍らせると中に気泡が入り 白濁した氷ができることが多いですが、これは水の 中の空気などが氷の中に閉じ込められるためです。 水素の場合は固体にすると体積が小さくなるため、

NIFS NEWS

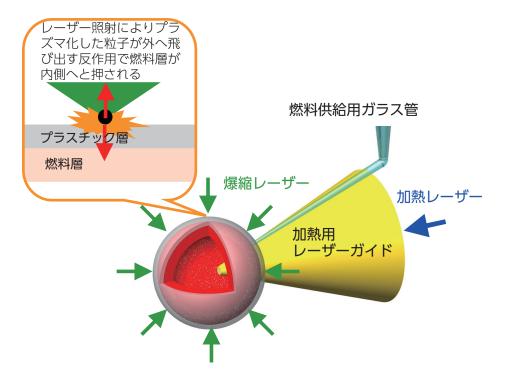


図2 高速点火レーザー核融合の原理とそのターゲット。

氷と同じように気泡が中に閉じ込められてしまい、 約11%が気泡になる計算です。しかしレーザー核 融合実験のためには燃料を均一にすることが要求 され、気泡のない固体水素を作ることが必要です。 氷を作る時にあちらこちらから氷ができ始め急激 に成長すると気泡が閉じ込められますが、気泡を 逃がすように氷の成長を制御すれば気泡が閉じ込 められることなく透明な氷を作ることができます。 我々もこの原理を応用することにしました。液体 は毛細管をゆっくりと移動するということに注意 しながら、透明な固体水素を作る実験をしました。 いきなりシェル状の固体を作るとその固体の質を 評価することが難しくなります。そこで今回は平板 状のフォーム材を作って、我々が考えた透明な固体 を作る原理が正しいかどうかを調べました。まず、 ガラス板の間のフォーム材に液体水素を浸透させ ます。この時、上部は下部より少し高い温度で制御 しています。次に、その温度差を維持しながら下部 を固化温度(-259.2℃)にすると、下部が固化を 始めます。さらに温度制御を行い、その固化温度を ゆつくり上方へ移動させると、それに伴い固化が 上方へと進展することが確認できました(図3の 写真をご参照下さい)。これで、気泡のない透明な

固体水素ができたはずで す。固体の中にどれだけ 気泡が残っているかを調 べる方法には光の屈折を 利用しました。屈折とは、 例えば水を入れたコップ にストローを入れ上から のぞき込むと、水面を境 にストローが折れ曲がつ て見える現象です。固体 に気泡が混ざると光の屈 折量が変わります。この 方法を使って評価すると 約1~2%の気泡が残っ ている可能性がありまし た。しかし何もしない場 合は 11%の気泡が残る 計算でしたので、それと

比較すると気泡の量を大幅に減少させることに成功しました。このように、我々が考えた方法により透明な固体水素の実現に一歩近づきました。現在は気泡を0%にする方法の追求と開発した方法を実際のシェルターゲットに応用する研究を進めています。

(装置工学・応用物理研究系 准教授)

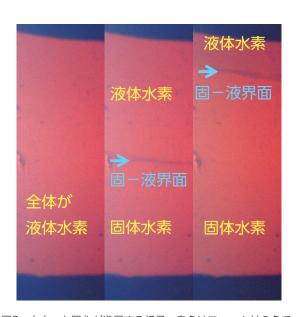


図3 上方へと固化が進展する様子。赤色はフォーム材の色で、水素自体は透明です。

プラズマの「紐」の振る舞いを粒子シミュレーションで調べる 長谷川裕記

磁場閉じ込め核融合の実現のためには、中心部に高温高密度のプラズマを閉じ込める必要がありますが、それと同時に、周辺部のプラズマも制御しなければなりません。この周辺部のプラズマのことを"周辺プラズマ"と呼びますが、周辺プラズマについては、これまでにも NIFS ニュースのなかで取り上げられているように(No.213、No.215、No.219 など)、国内外の数多くの研究者が、その制御を目指した研究を進めています。

磁場閉じ込め装置の周辺部では、中心部とは異 なり、磁力線が端を持っており、その終端となっ ている場所には「ダイバータ板」と呼ばれる受熱 板が置かれています。周辺プラズマは主に磁力線 に沿ってこのダイバータ板へ向かう運動をしてい ますが、わずかながら、磁力線を横切る方向にも 動いています。そして、磁力線を横切る運動につ いては、これまで、粒子同士の衝突やプラズマの 不安定性にともなう「拡散」という過程だけで説明 が試みられてきました。しかし、最近の実験による と、この拡散過程から予測される密度よりも高い 密度のプラズマが壁の近くまで存在していること がわかってきました。拡散過程だけでは説明でき ないこの密度の拡がりの原因として考えられてい るのが、間欠的に中心部から周辺部に飛んでくる、 磁力線に沿った紐状のプラズマの塊("プラズマブ ロッブ"と呼ばれています)です。ある密度のもの (塊) がある速度で運動する(飛んでくる)ことを、 拡散に対して「対流」と呼びますが、この紐状の 塊による対流過程によって、より多くのプラズマ が壁の方向へ運ばれ、一部のプラズマが壁に当たっ てしまうことも考えられます。そのため、世界中で、 このプラズマの「紐」に関する研究が進められて います。

このプラズマの「紐」は、中心部のプラズマと 周辺プラズマの境目あたりで、なんらかの不安定 性によって作り出されると考えられています。で は、なぜ、このような「紐」が作り出されると「紐」 は外側に飛んでいくのでしょうか。磁場閉じ込め 装置の内部では、磁力線は真っ直ぐではなく曲がっ ていて、また、磁場の強さも変わります。図1のよ うに磁力線が曲がっていて、真空容器の壁に近づく ほど磁場の強さが弱くなっているとすると、磁力線 に垂直な方向の運動がイオンと電子で逆向きにな るため、プラズマの「紐」のなかでプラスとマイ

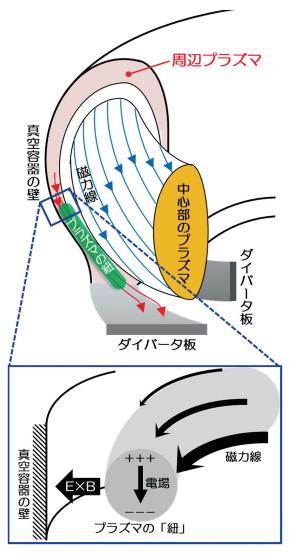


図1 プラズマの「紐」の模式図。プラズマ中に「紐」構造ができると、磁場の形状によって、電気の偏りが生じます。この偏りで生まれた電場と磁場の効果で、「紐」は外側へ動きます。

ナスの電気の偏りが生じます。このような偏りが生じると「紐」のなかに電場が生まれます。すると、この電場と磁場の効果 (E × B ドリフト) によって、「紐」は、磁力線を横切って、秒速数キロメートルにもなるスピードで真空容器の壁に向かって動いていくのです。

このようなプラズマの「紐」の振る舞いを制御するためには、まずはその性質を理解することが必要ですが、プラズマの運動は複雑なため、その理解のためには、計算機シミュレーションが欠かせません。しかし、これまでの「紐」についてのシミュレーションでは、流体手法というプラズマの紐状の塊

NIFS NEWS

全体の動きに注目したものが主流で、塊を構成しているプラズマ粒子ひとつひとつの運動は計算していない、すなわち、個々の粒子が引き起こすミクロな効果は取り入れることができませんでした。そのため、例えば、プラズマ粒子がダイバータ板にぶつかる際にできるシースと呼ばれるミクロな電場が計算できないため、プラズマの「紐」の内部の電流構造が、正しく再現されているのか分からないという問題がありました。その他にも、個々の粒子の運動が「紐」の振る舞いにおよぼす影響などについては、ほとんど解明されてきませんでした。

そこで、私たちは、粒子法という手法を用いた 3次元シミュレーションで、「紐」の振る舞いを調 べています。粒子法を用いると、ミクロな電場であ るシースも矛盾なく計算できるため、「紐」の内部 の電流やプラズマ粒子の動きを正しく再現できる からです。ただ、粒子法を用いた計算では、流体手 法とは異なり、多数のプラズマ粒子(イオンと電子) ひとつひとつの運動と、これらの粒子が作る電場 の時間変化を解く必要があるため、流体手法に比 べてその計算量は桁違いに大きくなります。さら に、3次元のシミュレーションであるため、その計

電位分布 eф/Tc 1.5 電流密度 o j/enocs 1 400 20 40 20 40 20 60

図2 3次元粒子シミュレーションで得られた「紐」の内部の電流構造(渦状のカラーの太い線)。灰色の透けた曲面は電子の密度の値が等しい面を示しています(すなわち、このあたりに「紐」があることを表しています)。また、奥側のカラーマップは、電位の分布を示しています。各方向の軸の値は、その長さを、イオン音速と呼ばれる速度でのイオン旋回半径で割ったものとなっています。

算はとても大規模なものとなりますが、核融合科 学研究所のスーパーコンピュータ「プラズマシミュ レータ」を用いることによって、その実行が可能 となりました。そして、この大規模シミュレーショ ンによって、プラズマの「紐」の内部をらせん状 に流れる電流系の存在を確認しました(図2)。また、 「紐」の内部の電位構造などを詳しく調べることも 可能となりました。「紐」の内部には、その断面で 見ると、図3に示したように、電位が高い部分と低 い部分があるのですが(「紐」のなかに電場が生じ るのはそのためです)、その電位の高低に合わせて、 プラズマの温度も高低の分布を持つことが明らか になりました (図4)。このような温度分布 (粒子 速度分布の場所による差異)があると、「紐」の振 る舞いに対して様々な影響を与える可能性がある ため、その点について、さらに調べていく予定です。

プラズマシミュレータは昨年6月に更新され、計算性能が従来に比べて約8倍に向上しました。今後は、この新プラズマシミュレータを用いて、更に大規模なシミュレーションを行い、プラズマの「紐」の振る舞いを、より詳しく検証していきます。また、周辺プラズマの分野で重要な研究対象となっている非接触プラズマや不純物輸送と、「紐」の振る舞

いの関係なども今後の重要なテーマです。これらの研究を通して、「紐」を含めた周辺プラズマの挙動の予測、そして、核融合発電の実現に貢献することを目指します。

(基礎物理シミュレーション研究系 助教)

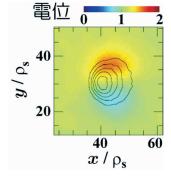


図3 磁力線に垂直な断面における電位(静電ポテンシャルエネルギー)の分布(カラーマップ)。カラーバーの値は、1が初期の電子熱エネルギーに相当するようにとっています。各方向の軸は、図2と同様にとっています。

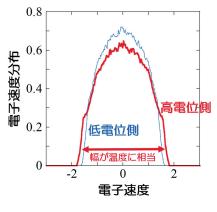


図4 「紐」の内部の電位が高い部分(高電位側)における電子速度分布(赤い太線)と電位が低い部分(低電位側)における電子速度分布(青い細線)。プラズマの粒子は、それぞれ異なる速度で動いていて、このように粒子の速度が分布を持っています。この分布の幅が温度を意味しています。高電位側の速度分布の方が、分布の幅が広いことから、高電位側の電子温度が高いことがわかります。なお、横軸は、1が初期の電子熱速度に対応しています。また、縦軸については、速度分布を積分して1となったときが、背景のプラズマ密度と同じ値に相当するようにとっています。

Fusion フェスタ in Tokyo

高畑一也・大石鉄太郎

研究所の研究活動、そして近年大きく進展している核融合研究について、広く一般の方々に知っていただくために、ゴールデンウィーク中の4月30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 2016 - 核融合!未来を創るエネルギーー」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7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1,800名にご参加いただきました。

本イベントは、核融合発電の意義とその実現へ 向けた研究を紹介するとともに、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、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、竹入康彦所長が「未来を創る エネルギーーここまで来た核融合研究ー」と題し、 核融合の原理から大型へリカル装置(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 るようわかりやすく工夫された講演を行いました。 これらの講演の中では LHD の真空容器の中から本 島厳准教授が実況ライブ中継を行い、LHDの様子 を臨場感高く紹介することができました。さらに インターネットによるライブ配信も行い、来場で きなかった方々にも講演会や科学教室を視聴して いただきました。研究者を志す小学生の参加者が 熱心に講師と対話したり、インターネットから寄 せられた質問に講師が答えたりと、双方向的なや り取りを通してより核融合研究に親しんでいただ ける機会となりました。また特別講演として、佐 藤勝彦博士(日本学術振興会学術システム研究セン ター所長・前自然科学研究機構長・自然科学研究機 構名誉教授・東京大学名誉教授)をお招きして、「ア インシュタインの一般相対性理論と宇宙の誕生」と 題する講演をしていただきました。講演では、一 般相対性理論に基づいて宇宙の誕生についての研 究が開始された経緯、佐藤博士が提唱された宇宙 の加速度的な膨張を予言する「インフレーション 理論」の基礎、相対性理論が予測した時空の揺ら ぎである重力波が昨年初めて観測されたという最 先端の研究の進展、そして今後の重力波観測によっ

てインフレーション理論の実証に至る展望まで含めて、スケールが大きく科学の面白さに満ち溢れたお話をしていただきました。

科学体験・工作教室では、核融合研究に関連した技術を身近に知ってもらうため、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型分光器を作る工作教室では、自分で作った分光器で様型を作る工作教室では、自分で作った分光器では、その場で分光スペクトルを観測しました。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、ミニ講演、核融合研究紹介、総研大核融合科学専攻紹介、研究所紹介ビデオの上映を行いました。来場者から核融合発電の早期実現を期待する声を多くいただき、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29年の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 助教)



佐藤勝彦先生による講演会の様子



科学体験教室の様子 (プラズマボール)

第22回制御核融合装置における プラズマ・表面相互作用に関する国際会議

本島厳

2016年5月30日から6月3日の5日間、第 22 回制御核融合装置におけるプラズマ・表面相 互作用に関する国際会議 (PSI2016) がイタリ ア・ローマで行われました。この会議は、核融合 炉におけるプラズマ表面相互作用を周辺プラズマ と壁材料の両方の視点から取り扱う会議として2 年に一度開催されています。会場となった教皇庁 立ウルバノ大学は、バチカン市国 サン・ピエト 口広場の近くに立地し、その起源は 1627 年ま で遡り、大変歴史ある場所でした。開会式では、 G. Maddaluno 現地実行委員長(イタリア、新技 術・エネルギー・持続的経済開発機構)および E. Tsitrone 国際実行委員長(フランス、原子力・代 替エネルギー庁)から開会の挨拶があり、開催地 のローマに因んで、「ローマは一日にして成らず、 国際熱核融合実験炉(ITER)も然り」と現在建設 中の ITER への激励から本会議は始まりました。 ITER の真空容器内機器の仕様策定が進みつつあ り、また核融合原型炉における工学的課題を議論 する中で、本会議の重要性は高まっており、発表 件数は過去最多となる 432 件でした。総合研究 大学院大学からの学生1名を含め、核融合科学研 究所からは17名が参加しました。

本会議では、本研究所の中村幸男教授が大型へ リカル装置 (LHD) における長時間放電時の不純 物の振る舞いに関する招待講演を行ったほか、田 中宏彦助教が LHD における窒素、ネオン不純物 ガスがダイバータ粒子、熱流束に及ぼす影響につ いて口頭発表を行いました。中村教授の発表では、



会議の集合写真

LHD プラズマの大きな特長である長時間放電を使って不純物の振る舞いを周辺プラズマのパラメータや放電条件によって系統的に場合分けし、その結果は今後のプラズマ定常維持に向けた重要な指針を与えるものであることが報告され、聴衆から大きな関心が寄せられていました。

この会議では、会議中のエクスカーションの時間を使って、有志によるサッカー大会が恒例となっています。毎回、開催地選抜チームと PSI 国際チームに分かれて試合を行います。筆者もPSI 国際チームの一員として参加し、見事4対1でPSI 国際チームが勝利しました。講演中は海外の研究者と活発な議論をすることでコミュニケーションを図りますが、こうして海外の研究者と一緒に汗を流してコミュニケーションをとることも大変有意義なものです。

次回の第23回 PSI 国際会議は、2018年6月 18日から米国 プリンストン大学で開催される予 定です。

(高密度プラズマ物理研究系 准教授)



中村教授による招待講演の様子



恒例となっているサッカー大会の参加者

第21回高温プラズマ計測に関する国際会議 (HTPD2016)

向井清史

2016年6月5日から9日にかけて米国・ウィスコンシン州マディソンにおいて、標記会議が開催されました。隔年開催の本会議では、①先進的解析手法、プローブ、②X線分光較正、宇宙プラズマ物理及び慣性核融合における計測、③核融合生成物計測、④マイクロ波イメージング、干渉・偏光計、⑤X線イメージング、分光、⑥能動分光、トムソン散乱、⑦反射計、散乱計測、粒子及びガンマ線計測の7つのセッションが設けられ、高温プラズマを対象とする計測器の開発や実験技術に関する課題が議論されました。発表件数は約390件で、うち口頭発表(すべて招待講演)は28件行われました。主な参加国は発表件数順に、米国(227件)、欧州(64件)、中国(53件)、日本(28件)であり、うち核融合科学研究所から14件の発表がありました。

会議冒頭のプリンストンプラズマ物理研究所の Lei Shi 博士による招待講演では、実験データとシミュレーションデータとを定量的に比較する統合診断が紹介され、大きな注目を集めていました。筆者は、輻射分布

計測器のイメージングボロメータ(IRVB)に関して、LHD 重水素実験に向けた検出器開発として、真空蒸着法を用いた炭素コート手法の改良について発表しました。IRVB は輻射分布の統合診断を行う上で重要な計測器であり、新しい検出器は各国の核融合プラズマ実験装置に適用できるのかといった質問を受けました。次回は General Atomics 社がホストとなり、2018 年に米国・カリフォルニア州サンディエゴにて開催される予定です。

(高温プラズマ物理研究系 助教)



会議オープニングの様子

TOPICS

トピックス

第5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永岡賢一准教授が、「高エネルギー粒子ビームを用いた高温プラズマ物性の研究」によって、第5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。

本研究所の大型へリカル装置では1時間近くの定常放電が実証されていますが、プラズマ温度は比較的低温で、核融合発電のために必要となる、1億度以上の高温プラズマの高密度での維持の



受賞者の集合写真(永岡准教授は前列左から2人目)

実現に向けて課題が残されています。本研究では、イオン加熱に最適なビーム加熱を検討し、世界最大級となる75アンペア出力のイオン源4台を搭載した大電流粒子ビーム入射装置の設計・整備を行いました。このビーム入射装置を用いた実験により、イオンの閉じ込め改善を実現し、9,400万度のプラズマ(イオン)温度を達成することに成功しました。他にも、プラズマが時間変化することを考慮した定量的な輸送解析研究の進展、不純物イオンの吐き出し効果の発見、プラズマの自発回転の駆動と乱流粘性の減少の観測、イオンの閉じ込め改善と電子の閉じ込め改善の同時実現など、幅広い研究成果が挙がっており、これらの成果が評価されて受賞に至ったものです。

なお、授賞式と受賞記念講演が、平成28年6月5日(日)に、日本科学未来館・未来館ホール(東京)にて行われ、永岡准教授は「地上に太陽をつくる — ヘリカルプラズマの1億度への挑戦 —」と題した記念講演を行いました。記念講演には、一般の方々からも多数の参加がありました。



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 発行

NIFS NEWS

2016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

※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。