

NIFS NEWS

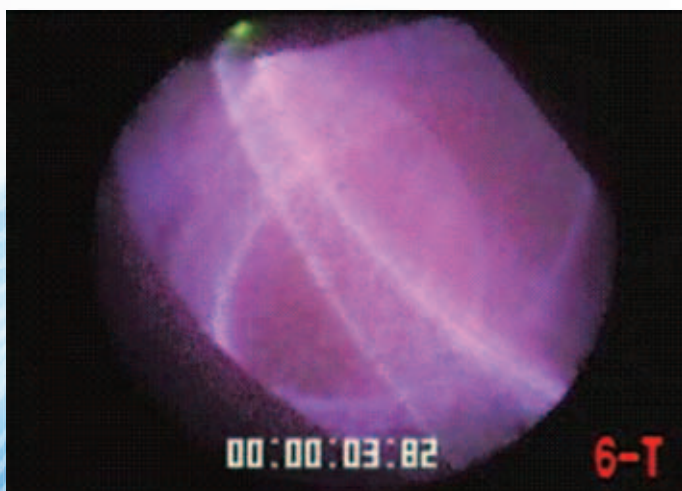
ISSN 1884-1600

NIFS

No.234



重水素ガスを用いたプラズマ実験を開始



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

2017 FEB/MAR

>>> 研究最前線・・・2-3

局所水素負イオン密度計測法の改良と水素負イオンの流れの反転の実測
～水素負イオン源の高性能化に向けて～ 中野治久

>>> 特集・・・4

総研大 アジア冬の学校 大館 暁

>>> 滞在記・・・5

カラム核融合エネルギーセンター (CCFE) 滞在記 後藤拓也

>>> 退職者記事・・・6-11

「問題の発見」と科学研究 伊藤公孝
「工学とは何だろうか」 相良明男
退職を迎えて思うこと 中村幸男
目指せ、核融合発電の早期実用化 長山好夫
シミュレーションは面白い 堀内利得
退職にあたって 広倉 覚

>>> トピックス・・・11-12

職場体験実習を受け入れました
重水素ガスを用いたプラズマ実験を開始しました
Fusion フェスタ in Tokyoのご案内

局所水素負イオン密度計測法の改良と水素負イオンの流れの反転の実測 ～水素負イオン源の高性能化に向けて～

中野 治久

磁場閉じ込め型核融合炉では、1 億度以上のプラズマを生成し、定常的に維持する必要があります。プラズマをこのような高温に加熱・維持する装置の一つに中性粒子ビーム入射装置 (NBI) があります。核融合炉用 NBI では高エネルギーの水素 (または重水素) ビームを生成するために水素負イオン源を用いることが計画されています。水素負イオン源とは水素負イオン (水素原子に電子が一つ余分に付いた電氣的に負に帯電した粒子) のビームを生成する装置です。核融合炉開発のためのプラズマ基礎実験を行っている核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) においても一部の NBI に水素負イオン源を用いています。水素負イオン源を用いた NBI は日本でのみ (当研究所及び量子科学技術研究開発機構那珂核融合研究所) 運用実績があり、日本はこの分野で世界をリードしています。

図 1 に水素負イオン源の断面図を示します。水素負イオン源は、イオン源プラズマ部とビームを生成するビーム加速部に分けることができます。

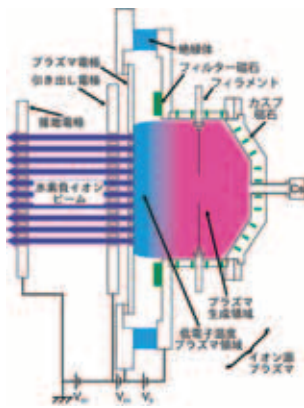


図 1 : NBI用水素負イオン源の断面図。

このうち、イオン源プラズマ部はさらにプラズマ生成領域と低電子温度領域に分けることができます。水素負イオンはプラズマ電極表面で生成され、低電子温度領域に広がってから、ビームとして引き出されます。

NBI用の大型水素負イオン源の開発は、これまで主に装置の大型化や耐電圧の強化など

工学的な側面から進められてきました。さらなる水素負イオン源の高性能化には、イオン源プラズマの粒子の振る舞いや電位構造の変化など、イオン源プラズマの物理の理解を基礎とした水素負イオン源開発が重要であると考えています。そこで我々は、水素負イオンの主な生成領域であり、イオン源プラズマとビームの境界領域であるプラズマ電極表面近傍のプラズマの物理研究を行っています。今回は、この物理研究をする上で必要であった局所水素負イオン密度計測法の改良と、実験的に明らかになった水素負イオン源内の水素負イオ

ンの流れの振る舞いについて紹介します。

局所水素負イオン密度計測法の改良

水素負イオン密度計測法としてキャビティ・リングダウ法 (CRD 法) とラングミュアプローブ支援レーザー光脱離法 (LP-PD 法) が知られています。CRD 法はレーザー吸収分光法の一つです。水素負イオンは 1064 ナノメートル (ナノは 10 億分の 1) の波長のレーザー光を吸収することで電子が一つ剥ぎ取られ、水素原子となります (光脱離反応)。水素負イオンが含まれるイオン源プラズマにこのレーザーを入射すると、イオン源プラズマからの透過レーザー光量より水素負イオンへ吸収されたレーザー光量を見積もることができます。この吸収レーザー光量から、水素負イオン密度が評価できるのです。この計測法は、レーザー光線上の平均密度 (線平均密度) の絶対値を評価できる一方、局所的な密度は分かりません。

LP-PD 法は、ラングミュアプローブ (LP) 法と光脱離 (PD) 反応を組み合わせた計測法です。LP は先端に約 1 ミリメートル (mm) の金属電極が付いた探針です。LP 電極に正の電圧を印加することで、イオン源プラズマ中の LP 電極周りの負に帯電した粒子を捕集します。負に帯電した粒子が概ね電子である場合、LP に流れる電流を用いて電極周りの局所的な電子密度を評価できます。この時に LP 電極に直径数ミリメートルのレーザーのパルス (パルス幅: 数ナノ秒) を照射し、LP 電極周りに少量存在する水素負イオンの全てを脱離反応させます。脱離した電子 (脱離電子) が LP に捕集されて LP に流れる電流がパルス的に増加します。この電流の増分 (光脱離信号) が電子密度の増分として評価されます。元の水素負イオンと脱離電子は同数なので、この電子密度の増分から LP 電極周りの局所的な水素負イオン密度が評価できます。一方、上述したようにプラズマ電極近傍では電極表面で水素負イオンが生成されるため、水素負イオン密度が電子密度と同程度以上となっています。この状況では LP に流れる電流に対する水素負イオンの寄与が大きくなって電子密度の正確な評価が難しくなると同時に、この従来の LP-PD 法での水素負イオン密度も評価が困難になってしまいます。

そこで我々は、LP-PD 法を改良し、水素負イオン密度比が高いプラズマにおいても局所的な水素

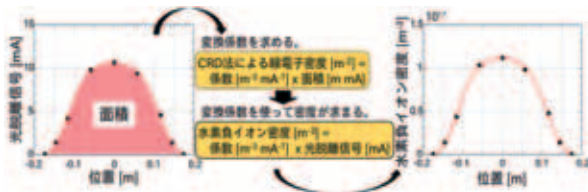


図2 水素負イオンの局所密度計測法の原理。左グラフの縦及び横軸の単位はそれぞれミリアンペア及びメートル。右グラフの縦及び横軸の単位はそれぞれ毎立方メートル及びメートル。

負イオン密度を計測する手法を開発しました(図2)。まず、LP-PD法を用いてレーザー光線の入射軸方向に沿った光脱離信号分布を計測します。この時の光脱離信号はミリアンペア(mA)程度でした。この分布とCRD法で得られた水素負イオンの線密度(毎平方メートル、 m^{-2})から光脱離信号を水素負イオン密度に変換する係数(毎立方メートル毎ミリアンペア、 $m^{-3} mA^{-1}$)を求めます。この係数と光脱離信号から局所的な水素負イオン密度(毎立方メートル、 m^{-3})の絶対値を評価することが可能となりました。これにより、水素負イオン密度分布とプラズマ分布(正イオン密度分布、電子密度分布、電位分布など)及び引き出されるビーム分布との関係性を定量的に評価することが可能になりました。

水素負イオンの流れの反転

LP-PD法を応用することで、水素負イオン源内で水素負イオンがどのように流れているかを調べることができます。図3に水素負イオンの流れの計測法の概念図を示します。LP-PD法でパルスレーザーを入射するとLPに流れる電流がパルス的に増加すると述べました。脱離電子によって増加した電流はある時間で元の電流値に戻ります。これは、レーザー径外にある水素負イオンの運動によって、LP近傍の水素負イオン密度が回復するためです。LPに流れる電流が元に戻る時間(マイクロ秒程度(マイクロは100万分の1))は、レーザーの半径をイオンの運動の平均速度で割った時間に相当します。ここで、水素負イオンに流れがあるとします。障害物(セラミック)をはさんで流れの両側にLP電極を配置してLP-PD法を行います。例えば、図3のLP(A)とLP(B)の対です。

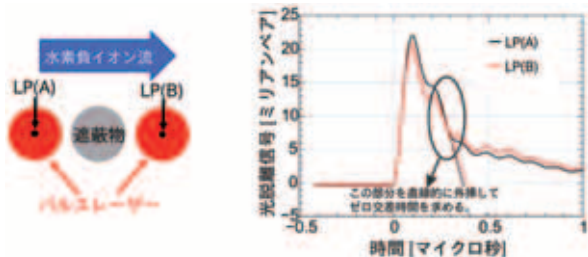


図3 水素負イオンの流れの計測原理。左図の黒点はラングミュアプローブ(LP)電極、赤円はパルスレーザーの断面図。右図はLP(A)と(B)の実際の光脱離信号波形。ゼロ秒でパルスレーザーをLP電極に照射しています。

障害物上流側では、水素負イオンがLP電極上流側からレーザー径内に流れてくる影響を受けるため、電流回復時間は障害物がない場合に比べて早くなります。一方、障害物下流側では、水素負イオンがLP電極下流側からレーザー径外へ流れ去る影響を受けるため、電流回復時間が遅くなります。この電流回復時間の差より負イオンの流れの速さを見積もります。実際には、二次元の流れの方向がLP電極A-B軸の方向に一致するとは限りません。そこでこの計測を90度回転させた方向に対しても行うことで、流れの速度ベクトル(速さと向き)として評価します。さらに、計測位置をプラズマ電極近傍で二次元に動かすことで、水素負イオンの流れの分布(流線分布)を実験的に評価しました。図4はビーム引き出し中の流線分布の一例です。プラズマ電極表面で生成された水素負イオンは、ビームと逆方向の初速度を持ってプラズマ電極から放出されます。図4からビームを引き出すことによって、水素負イオンはプラズマ電極のビーム引き出し孔上部でビームと逆方向からビーム方向に流れが反転する場合があることを初めて実験的に明らかにしました。本研究成果を更に進めることで水素負イオンビームを高効率かつ安定的に大電流化するための設計指針を与えることができます。

本研究成果を含む関連研究は、2016年に英国オックスフォード市で開催された負イオンに関する国際会議(NIBS)においてNIBS award(NIBS賞)として評価を頂きました。水素負イオン源は我々が研究・開発を進めている核融合エネルギー分野の他、素粒子・原子核物理学実験や物質・生命科学実験に用いられる高エネルギー加速器施設、またガン治療法の一つで粒子線治療法のひとつであるホウ素中性子捕捉療法等にも利用されています。本研究は、水素負イオン源の高性能化を通してこれらの分野の発展にも寄与するものと期待されます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

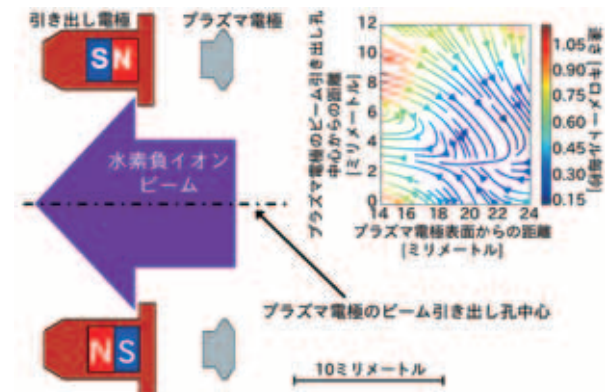


図4 プラズマ電極と引き出し電極間に電圧を印加して水素負イオンビームを引き出した時の水素負イオンの流れ(流線分布)。グラフの位置はプラズマ電極を基準として、実際に計測して流れを評価した領域に対応します。

総研大 アジア冬の学校

大 舘 暁

総合研究大学院大学（総研大）・核融合科学専攻主催のアジア冬の学校が2016年12月12日から14日までタイのチェンマイで開催されました。これまで、アジア冬の学校は核融合科学研究所において、海外の学生を対象に講師による講義のほか、参加者自身によるポスター形式の研究発表会を行ってきましたが、より多くの学生に対して核融合科学専攻の広報を行うために、初めての試みとして、海外での開催に踏み切りました。学生を日本に招聘するより、学生の在籍地に近い場所で講義を行うことで一人あたりの経費を節減し、より多くの学生に参加してもらうことができるわけです。

タイは核融合研究に力を入れつつあり、多くの学生が核融合研究に興味を持っています。2016年度にはタイのチェンマイ大学、タイ国家原子力技術研究所（TINT:Thailand Institute of Nuclear Technology）と核融合科学研究所との間で研究と教育に関する協定を締結し、今回はチェンマイ大学に会場の選定や冬の学校の運営など全面的に協力していただきました。

会場はチェンマイ大学近くの会議場兼宿泊施設である Uniserv CMU でした。昼食も会場内の食堂で全員一緒にとることができ、講義に集中できる素晴らしい施設でした。当研究所からは鈴木康浩准教授、柳長門教授と筆者の3名が講師として参加しました。また、総研大生が2名、管理部より1

名も参加しました。最終的にタイ・ベトナムから36名の学生を受け入れましたが、アジア、ヨーロッパからの100名を超える事前申し込みを受けており、参加者の数をさらに増やすことは今後の課題といえるかもしれません。

今回の冬の学校では、90分の講義を10コマ実施しました。プラズマ・核融合の基礎から、シミュレーションや計測についての実践的な講義、また、核融合工学に関する講義などが日本人・タイ人の講師陣から行われました。参加した学生は大変熱心で、活発な質疑応答が行われたほか、講義時間外にも多くの学生が質問を寄せるなど強い意欲を感じました。総研大への進学についても多数の質問を受けました。今後、多くの学生が核融合科学専攻に志願してくれることを願っています。

タイは常夏の国というイメージがありますが、タイ北部に位置するチェンマイは冬季の気候が穏やかで過ごしやすく、タイを代表する古都の落ち着いた雰囲気もあって、素晴らしい環境での冬の学校となりました。

親身になって協力いただいたチェンマイ大学のスタッフ、中でも Dheerawan Boonyawan、Udomrat Tippawan 両准教授に深く感謝いたします。

（高密度プラズマ物理研究系 准教授）



写真1 冬の学校参加者と講師たちの集合写真



写真2 鈴木准教授に対して熱心に質問をしている学生たち

カラム核融合エネルギーセンター（CCFE）滞在記

後藤 拓也

平成 28 年 11 月 28 日から平成 29 年 2 月 20 日までの 85 日間、英国・カラム核融合エネルギーセンター（Culham Centre for Fusion Energy, CCFE）に滞りましたので、その様子について報告いたします。

CCFE はオックスフォード州のアビンドンという小さな町に位置するカラム科学センターの一部を構成しており、英国原子力機関が運営する核融合研究のための国立研究所です。中型トカマク MAST および、欧州共同実験装置である大型トカマク JET を擁することでも知られています。

私はこれまで将来の核融合発電所の性能を大まかに予測し、その具体的な設計やそのために必要な研究開発計画の策定に役立てることを目的として作成される、システムコードと呼ばれる計算プログラムの開発・改良・運用に従事してきました。CCFE では工学部門・発電炉工学グループに所属する共同研究者の Michael Kovari 氏、James Morris 氏、Christopher Harrington 氏らとともに主に核融合発電所の経済性評価モデル、発電所の所内消費電力の評価モデルについて議論を行い、日欧のこれまでの検討手法・結果を比較しながらモデルの改良作業を進めました。核融合発電所の実現にはまだ数十年の研究開発が必要と考えられており、そういった長期にわたる予測にはどうしても不確実性が伴います。このためモデルはこれで完成ということではなく、今後も継続した見直しが必要ですが、根底となる考え方についてしっかりとした共通認識を持つことができました。これによって今後のさらなる共同作業や、双方の評価

結果の比較が大きく加速すると期待しています。

また敷地内にある遠隔保守に関する研究センター（Remote Applications in Challenging Environments, RACE）の研究グループとも議論する機会をいただきました。RACE では遠隔保守のための機器開発から将来の核融合発電所の遠隔保守施設の概念設計まで幅広く研究が行われており、これらに関する情報提供をいただいたほか、こちらからは核融合科学研究所・核融合工学プロジェクトにおいて概念設計が進められているヘリカル核融合炉の遠隔保守に関するアイデアについて紹介し、有益なアドバイスをいただくことができました。

アビendon は日本よりも緯度ではずっと北に位置しているものの、寒さは土岐市に比べても緩やかで、また中世から残る歴史ある街並みを眺めながら過ごすのは非常に感慨深いものでした。一方日本にいた際にはどこか遠くの話に感じていた移民・難民問題などを強く意識させられる場面も多く、研究にとどまらない貴重な経験を得ることができました。実際、渡航中に本格的な議論が始まった英国の欧州連合離脱については、欧州原子力機関からの離脱も伴うものであることが明らかになり、今後の英国の核融合研究にも少なからず影響を与え得る状況となっております。まさに何が起ころか分からない時代に突入しつつある今、自身の研究にもより力を入れて、核融合エネルギーを少しでも早くエネルギー源の選択肢として提示できるようにせねば、と思いを新たにしています。

（核融合システム研究系 助教）



カラム核融合エネルギーセンターの風景



発電炉工学グループメンバーとの写真。左から M. Kovari 氏、C. Harrington 氏、J. Morris 氏、筆者、R. Kembleton 氏、J. Rivas 氏。

「問題の発見」と科学研究

伊藤 公孝



この道に入った発端は、小学校に入った頃『理科の知識 なぜだろうなぜかしら』（実業之日本社、1955年刊行）を母から与えられ、面白く思った事です。「なぜだろう」と問うこと自体の面白さに取り付かれました。停年を迎えるにあたって自分の仕事を見渡すと、「問題の発見」を自分が大事にし、共同研究者たちとそれを解決する機会を得て来た事をまことに幸運に思います。

研究とはどういうものなのでしょう。学生のときに読んだ鷗外の「妄想」に、『併し帰つて行く故郷には、・・・まだ Forschung という意味の簡短で明確な日本語は無い。研究なんといふほんやりした語は、実際役に立たない。載籍調べも研究ではないか。』という一節がありました。「研ぎすまし究める」ではほんやりして駄目だと鷗外は言うのですが、何が本質でしょうか。それは「発見」だと思います。特に大事なのが「問題の発見」です。

修士課程の学生のときにディスラプティブ不安定性の理論モデルを考えそれが最初の筆頭著者論文になりました。「何故それが突然起きるのか」という問いを抱き、普通の線形安定性では不十分であるとの考えから、「平衡の喪失」という仮説を着想しました。図はそれから引用するものですが、揺動振幅が閾値に達すると平衡解が消滅するというモデルです。この試案は埋れて久しいですが、「何故突然か」という問いは生き続け、様々な物理を生みだしてくれました。極最近、40年の時を経て、非線形励起による崩壊突発の実験的確認がいくつも得られました。H-modeの径電場と言う問題を発見したのは伊藤早苗の創見ですが、そこから発した径電場分岐モデルも、30年を経て、動力学の実験的確認が最近進みました。自分達の見いだした問題が長くかかっても解決されつつある事には感慨があります。

老子は次のように言っています（老子七十一）。

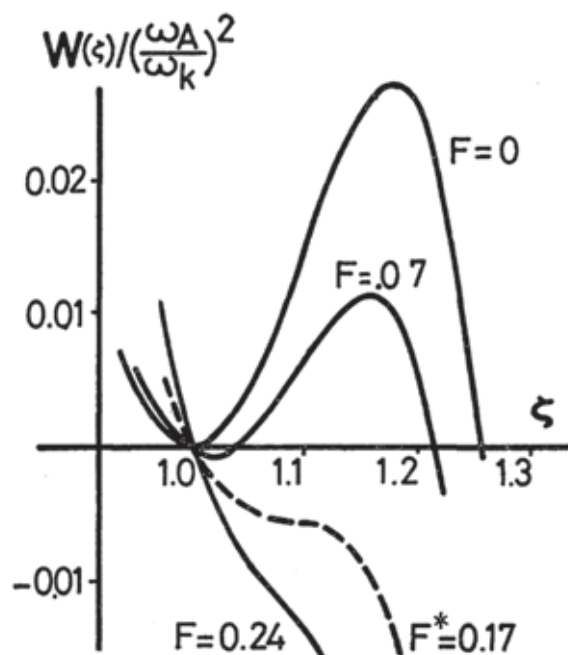
知不知上 不知知病

私には、語学的な正しさはとにかく、「知らざ

るを知るは上なり 知るを知らざるは病なり」と読みたいところです。問題を問うているなら、何らかの答えはその中にあります。答えを知っている事に気付かない事が自分たちの限界なのだ、老子はそう言っていると思いたいのです。

科学が相手にする自然は、問うた事にのみ答えてくれます。まことに、「問題の発見」こそ科学の発見へ私たちを導くものです。

（核融合科学研究所 フェロー/核融合理論シミュレーション研究系 教授）



軸対称変形に関連する変数 ξ とそのポテンシャル W 。F はプリカーサーの磁場変動を反映するパラメタ。(J.Phys. Soc. Jpn. 40 (1976) 1757 より再録)

「工学とは何だろうか」

相良 明 男



青畳 大の字に寝て 夏終わる (文明)

父の句ですが、今の小生の心境です。多くの方々に出会い、支えて頂いて、やっとここまで来ました。感謝申し上げます。

18の春にギターを抱えて上田を発ちました。長野乗り換えのディーゼルは嫉捨でスイッチバック。そして木曾路はまだ青白い雪の中。多治見からトンネルを抜けるとそこは魅惑の都会でした。それでも目指すはただ一つ、名大プラズマ研。と、こんな具合に小生の青春の門は意気揚々と始まりました。

核融合のためにロシア語を選択し、原子核工学科ではブランケットを選択。研究室ではひたすら数式と大型計算機の毎日。原研の炉設計室にも居候しました。中性子工学で卒論と修論を書いた人は、核融合研では小生しかいないのではなかろうか。博士課程進学試験の抱負プレゼンでは、分裂と融合のハイブリッド炉をやりたい、と青くぶち上げました。

ついに博士課程でプラズマ研に籍を置くことになりました。最初に頂いた課題は、壊れた真空ポンプを直して、無人運転用のインタロック回路を作れ、でした。次は、低速イオン衝撃散乱で金属最表面の不純物原子の脱離断面積を測れ、そのために10の-12乗トールの極高真空を作れ、でした。もちろん、脱離断面積はプラズマへの不純物混入評価に必要です。測定値は理論モデルで良く説明できたので、これで工学博士号を頂きました。「教科書に一点でも自分のデータが載れば立派なものだ」と言われますが、「TOKAMAKS by Wesson」の図9.5.1の(c)のデータは小生のです。

ポスドクの間は、名大バンテグラフ加速器と寝食を共にするが如き生活でした。数ミリ角の試料表面を、針のようなヘリウムビームで水切りの様に分析する芸当は小生の十八番です。コッククロフトからの水素照射と同時分析で、金属中のバブル内圧を見積もったら金属水素でした。北大の電子顕微鏡で測るために、当時出たばかりの金属魔法瓶に液体窒素で封入して空輸しました。

助手採用の少し前に、Hモード旋風が来て、トカマク型JIPP TII-Uにヒーター付き炭素リミターを提案し、試作を経て本体を造ったところで中止、

リミターHモードは幻に終わりました。次はヘリオトロン型CHSに寄生して、ダイバータ模擬の材料照射を画策。損耗の数ミリ横に再付着ピークが現れることを自作の解析のモデルで予測し、実際に加速器分析したら正にピンゴ！翌日の飛行機でモントレーの国際会議に間に合ったのです。予測が無かったら数ミリ横は測り飛ばしていたでしょう。

大型ヘリカル装置(LHD)建設初期は何度も土岐へ往復しました。プレハブでのダイバータ設計会議、自作の有限要素コードで熱工学設計、CAD室の移転、低温実験棟でのPWI実験、等々で、マイカーはいつも泥んこ。LHD実験が始まるまではモデル予測の論文を沢山書きました。LHDファーストプラズマのための壁洗浄チームを任せられ、しかも世界最大級装置の一回きりのデータを後世に残す作業は、正に胃に穴があくような重圧でした。いただいた2日間で、ECR放電洗浄と排気操作で暴れ牛をなだめつつ、ようよう安定放電が見えた時の感動は複雑でした。

ヘリカル炉設計を任せられ、液体ブランケット採用では、原研に仁義を切りに参じました。さらに炉工センター、次に核融合工学研究プロジェクト研究総主幹を任されてからは、これまでのハードとソフトの経験が一気に炉設計統合に役立ちました。中性子工学、真空工学、イオンビーム工学、材料工学、放射線工学、伝熱流動工学、高周波加熱工学、等々。

「工学とは何だろうか」はもちろん朝永振一郎博士の「物理学とは何だろうか」のパクリです。朝永先生は、玉ねぎの芯が見たくて一枚一枚剥いていくようなもの、と仰っています。ならば工学はその逆で、集めて最適に組み上げる学問。では何のために？が重要。**世のため人のため**、核融合エネルギー実現に向けて、待ったなしの工学の時代です。小生の土岐での夏は終わりますが、特に若手の皆さんの熱い夏はこれからが本番です。

(核融合工学研究研究総主幹/核融合システム研究系 教授)

退職を迎えて思うこと

中村 幸男



2011年の東日本大震災以降いつも考えさせられたことがあります。これまでの自分の人生回顧とこれからの人類社会の行く末についてです。私の科学との出会いは、小学生6年の時に北海道で見られた「皆既日食」でした。煌々と輝く太陽が消えて闇の世界が広がった瞬間を今でも鮮明に覚えています。中学校の担任の理科の先生に後押しされて、科学者を目指しました。核融合研究との出会いは、大学4年生の時の第一次オイルショックで社会問題となったエネルギー危機がきっかけであったように記憶しています。最先端の科学研究（核融合研究）ができることと社会貢献にも繋がるという点が自分の方向性を決定づけたように思います。大学院での修行を終え、トカマク装置での研究をしたくて、九州大学の応用力学研究所に就職し、それから定常核融合炉開発と向き合うことになりました。日本で初めての強磁場超伝導装置（TRIAM-1M）の設計・製作から長時間放電の実現まで、大学の研究室規模の人員で世界のフロントランナーとしての定常研究ができたことは非常に感慨深いものがあります。核融合科学研究所に移ってからは、世界最大の超伝導ヘリカル装置（LHD）での定常プラズマ研究に取組み、定常プラズマ維持に関する世界記録の達成や不純物輸送に関する研究で貢献できたことは大きな喜びです。このように磁場核融合装置での定常運転に関する研究開発に携わってきて、10kWからMW級のパワーハンドリングを経験してきましたが、GW級の核融合炉はさらに困難を極めるものと思われまます。定常研究もまだ道半ばですが、後は若い研究者に委ねたいと思います。

最初に述べたように、核融合炉開発を進めるもう一方で、東日本大震災での原発事故問題を契機として、「科学技術とは何か」、「人間とは何か」を考えることが多くなりました。我々の研究を推

進するためには、一般市民の理解が不可欠であり、私も若者への啓発活動ということでスーパー・サイエンス・ハイスクール（SSH: 文科省認可高校）との教育連携活動を進めて参りました。人類は直立二足歩行から始まり、定住を求めて農業を行ない、都市文明を作り、産業革命によって科学文明を発達させ、現在に至っています。我々の生きた20世紀の時代は「科学革命」の真つ只中にあり、人類の生活パターン（文明）を大きく変化させました。今の時代、簡単に引き返すことができないほどに、人間社会は科学技術に依存しています。この先、人類（人間）は何を望むのでしょうか。これまでの人類の歩みは、人間（一人ではなく多くの人間集団＝社会）が脳の中で考えた幻想を実現する方向に進められたと言われていています。未来は人類の共同幻想が何であるかによって決まります。未来社会を創る上で、自然を理解すること（科学）も重要ですが、これからは人間の本質を理解する方がもっと重要になるかもしれません。地球文明が減びずに、持続可能な人類社会を人間自身が見出せることを願って止みません。退職を迎えましたが、科学技術の将来の役割も含めた人類社会の在り方を、周りや社会に流されずに自分自身で考えること、そして、共感できることを見出すことの大切さを、これからも若者に伝えていきたいと思っています。

（プラズマ加熱物理研究系 教授）

目指せ、核融合発電の早期実用化

長山好夫



定年退職に当たって、これまで支えてくださった多くの方々にお礼を申し上げます。

東日本大震災で原子力災害が起きた時、本研究所元顧問の伊藤智之・九大名誉教授は電気学会の会合で、「核融合発電を早く実用化しないからだ」と叱られたそうです。もともと原子力発電は早々に安全な核融合発電に引き継ぐはずだったので、「約束が違う」というわけです。

私は38年前に大学院を修了し、JT-60 建設チームに参加しました。JT-60 の目的は科学的ブレークイーブン（加熱入力と核融合出力が同じ閉じ込め条件の達成）でしたが、当時は1億度すら夢物語でした。しかし、イオン温度5億度や科学的ブレークイーブンが達成され、連続運転も実証されました。核融合炉はもはや夢ではなく着々と現実近づいていますが、課題も次々と現れています。

1960年に米国のケネディ大統領は「十年以内に人類を月に送る！」と演説し、NASAが作られ、1969年にはアポロ11号が月面着陸しました。熱意を持って研究開発すれば核融合炉も実現するはずです。現在、世界各国の協力でフランスに国際熱核融合実験炉（ITER）を建設中です。そして、ITERの次の原型炉で発電実証し、さらに次がようやく商用核融合発電所です。

実用化までの長期間、核融合研究開発を続けるには国民の熱い支援が必要です。それには、第一にどんな課題にも解を求め、立ち向かうこと、第二にNASAのようにスピンオフ技術で社会貢献することです。

課題に対しては、日本の研究者有志が電気学会「核融合炉の経済性向上」調査専門委員会に結集し、「今の技術で設計できる核融合炉」を目指し、「学問のための学問ではなく、炉設計に役立つ研究を」と活動しました。そして、当時の有名な最難問に対して解を提案し、設計に必要な原理実証

実験を行いました。報告書は電気学会で販売中です。

スピンオフとしては、私達も長崎大や関西大との共同研究で「痛くない、被曝しない」マイクロ波乳がん検査装置の研究を始めました。2005年の自然科学研究機構発足でイメージングサイエンス事業が始まり、当時の本島修所長から大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマ用にマイクロ波イメージング計測開発を命ぜられました。間瀬淳・九大教授のご指導のもと、山口聡一郎君（現関西大）と一号機を作り、平野洋一室長のご厚意で産総研のTPE-RX装置に取り付けて実験しました。この成功体験が力となって、LHDが要求する高度な技術開発に桑原大介君（現農工大）や吉永智一君（現防衛大）、技術職員の杉戸正治さん達と立ち向かえたのです。実は、LHDのマイクロ波イメージング反射計に人体計測用のアンテナを付けたのがマイクロ波乳がん検査装置です。市販を目指して定年後も研究を続けようと思っています。

核融合実用化までのさらなる課題に立ち向かうには、ITERだけでなく、LHDどころか大学の多様な基礎研究（ミラー、ST、CT、RFP、FRC、…）から、研究の遺伝子を求めなくてはなりません。本研究所は世界随一の核融合技術の集積地であり、日本中の大学の核融合基礎研究の支援センターです。本研究所の今後の活動に大いに期待するところです。

（高密度プラズマ物理研究系 教授）

シミュレーションは面白い

堀内 利得



今から43年前、広島大学の大学院生として、広島県竹原市にあった理論物理学研究所に机を頂いたときから私の研究生活が始まりました。そこで、宇宙論の若手研究者として活躍中の着任間もない富松彰先生と巡り会い、彼の指導の下、当時としては珍しいブラックホール等の“コンパクト星”と呼ばれる天体の周りに形成される降着円盤に、磁場を取り入れた場合の力学構造を理論解析と簡単な数値計算を用いて解析し、その結果を博士論文としてまとめました。

その後、昭和59年に日本学術振興会特定領域奨励研究員に採用され、西川恭治先生がセンター長を務めていた広島大学核融合理論研究センターに着任したことが、私の研究生活に大きな転機をもたらしました。当時、同センターの教授であり、シミュレーショングループのリーダーであった佐藤哲也先生の下、核融合プラズマの研究を通じて新しい科学の領域としての「シミュレーション科学」の確立を目指す研究活動が胎動し始めたところでした。さらに、この研究グループの中心メンバーとして、私とほぼ同年配の、林隆也先生、田中基彦先生、渡邊國彦先生が活躍しており、自由な研究環境で活発な議論が行われていたことが、私がシミュレーション研究者として成長する上で大きな糧となりました。

同センターで私に与えられた最初の研究課題は、磁化プラズマの自己組織化に関するシミュレーション研究でした。当時、J. B. Taylor博士の有名な逆磁場ピンチ装置で観測された自己組織化現象の理論提唱とこれを一般化したA. Hasegawa博士の論文が出ており、私の課題はこれらの理論を3次元シミュレーションの立場から検証することでした。幸いにして、誕生して間もない世界最先端のベクトル型スーパーコンピュータが名古屋大学プラズマ研究所に導入され、リモートでプラズマ核融合研究に利用できる環境が整っていました。シミュレーションでは、上記の理論の検証にとどまらず、階段状緩和過程の存在と磁気リコネクションの役割、ヘリカル状態への緩和やヘリシティスペクトルの逆カスケード現象等の自己組織化を支配する一連の物理機構を明らかにすることができました。

核融合科学研究所に助教授として採用された平

成2年の少し前から、研究対象を磁場逆転配位やスフェロマックと呼ばれるコンパクトな磁場閉じ込め装置で発生するエネルギー緩和や自己組織化等のシミュレーション研究、さらには、これらの現象を支配する重要な物理過程である磁気リコネクションとそのミクロな原因である電気抵抗の発生機構の解明を目指した研究へと広がっていきました。特に、後者の研究では、プラズマ流入と流出が可能となるミクロ開放系における粒子シミュレーションモデルを開発し、それにより無衝突磁気リコネクションを支配する様々な物理機構の解明を行うことができました。これらの研究成果は、現在進めている階層連結モデルの開発へと発展してきています。

これら一連の研究の中で私が得た最も印象的なこととしては、“一見不規則で複雑に見えるプラズマ現象の中に、非常に整然とした構造へ自発的に遷移する潜在能力（自己組織化）が存在している”ということです。この美しい物理過程の存在を私に教えてくれたのがスーパーコンピュータを用いたシミュレーション研究でした。

また、私の研究生活は、中国からの留学生や総研大生、名大シグマ研や東大の小野研究室の大学院生の研究指導をする機会に恵まれたこと、および、プラズマ数値シミュレーション国際会議（奈良市）や「シミュレーションサイエンス」に関する総研大国際シンポジウム（葉山市）等の国際会議を主催する機会を得たことにより、より視野を広げ変化に富んだ充実したものとなりました。多くの人に助けられるとともに、多くの友人・知人を得ることができた有意義な研究生活であったと思っています。ここに、あらためて感謝申し上げます。（数値実験炉研究研究総主幹 / 基礎物理シミュレーション研究系 教授）

退職にあたって

広 倉 覚



退職にあたって、みなさま方に深くお礼を申し上げます。今までどうもありがとうございました。

さて私は1979年（昭和54年）3月17日に名古屋大学プラズマ研究所に文部技官として入所しました。それから、38年が過ぎました。

記しておきたいことが二つあります。まずは、研究・技術的なことがいろいろ学べたということです。これは属した組織を含め人間関係に恵まれたということでもありました。また男の厄年の頃にたいへんなこともありましたが、周りの皆様のおかげで乗り越えられました。この頃、私の専門は「真空」ということで、「真空」の仕事に専門性をもってすることができました。「真空」について就職後初期に学んだこと、そのことがわが身を助けてくれました。

次はハングルについてです。私は1984年頃に文字のおもしろいことからハングルを勉強し始めました。もちろん趣味として勉強していたわけです。現在NIFSには日韓核融合交流事業があります。そしてハングルの学んでいたことがきっかけで私は韓国の大田市にある国家核融合研究所（NFRI）のKSTAR実験装置に2泊3日のとても貴重な出張ができました。良い経験をさせていただきました。

た。NIFSでは韓国語講座が開かれています。たえず数名の方が参加していますが、日韓交流の基礎としてできるだけたくさんの方がハングルに接していただけたらいいなあと私は考えています。趙先生、生徒のみなさんいろいろお世話になりました。カムサハムニダ。

ふりかえって、仕事とはいったいなんなんだろう？はじめ私は仕事はただお金を稼ぐために時間を費やすものだと思っていました。しかし私は仕事を通して、「自分の頭で考えて自分で判断し、そして実行する。」というとても大切なものを得たように思っています。

退職後はどうするかですが、まだ決めておりません。思い出のある韓国へは行きたいとは思っていますが・・・

（技術部計測技術課放射線計測機器制御技術係）

TOPICS

トピックス

職場体験実習を受け入れました

研究所では、近隣の中学校・高校が行う職場体験学習に協力しています。2月1日から3日に土岐商業高校から8名の生徒が来所し、技術部と管理部に分かれて様々な職場体験実習を実施しました。

技術部では、実験装置を遠隔で操作する機器の管理等を体験しました。また管理部では、旅費などの計算や伝票の確認作業、来所者の受付業務等を体験しました。

こうした職場体験を通じて、研究所には研究以外にもいろいろな仕事があり、それらに多くの人に関わっていることを実感してもらうことができました。



重水素ガスを用いたプラズマ実験を開始しました

核融合科学研究所は、第19サイクルの大型ヘリカル装置（LHD）によるプラズマ実験において、3月7日から、重水素ガスを用いたプラズマ実験（以下「重水素実験」）を開始しました。これまでの実験では、通常の水素（軽水素）ガスを用いてきましたが、今サイクルでは7月7日までの間、重水素実験を行い、その物理的な性質を詳細に調べ上げるとともに、プラズマ性能の向上を図っていきます。

重水素実験を開始する3月7日には、「大型ヘリカル装置による重水素ファーストプラズマ点火式」を開催し、文部科学省、岐阜県、土岐市、



多治見市、瑞浪市の関係者並びに共同研究者等から、146名の方にご出席いただきました。

点火式では、竹入康彦所長の式辞に続き、小森彰夫自然科学研究機構長から挨拶があり、式辞等の中で、将来の核融合発電に向けた成果を上げられるよう、実験を安全に実施していくことが改めて確認されました。その後、竹入所長により実験シーケンスを開始するスイッチが押され、重水素ファーストプラズマが約1秒間生成されました。ファーストプラズマを記念して、関係者らによってくす玉開封が行われ、会場からは盛大な拍手が起こりました。引き続き、ご出席の来賓の方々から、重水素実験によるさらなる研究成果に期待する旨のお言葉を多数頂戴いたしました。



Fusion フェスタ in Tokyoのご案内

未来エネルギーとして期待されている核融合の研究を紹介する『Fusion フェスタ in Tokyo』が、日本科学未来館において平成29年5月3日（水）に開催されます。講演のほか、ご家族で楽しめる科学工作体験、科学教室もあります。皆様のお越しをお待ちしております。

開催日時：平成29年5月3日（水・祝）10:00～17:00（最終入場16:30）

会場：日本科学未来館（東京都江東区青海2-3-6） 入場無料
特別講演：『重力波で観る天体観測の夜明け』

東京大学先端科学技術センター
量子情報物理工学分野 特任准教授
鹿野 豊先生（予定）

【お問い合わせ先】

自然科学研究機構 核融合科学研究所
管理部研究支援課
〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL：0572-58-2040
URL：<http://www.nifs.ac.jp/welcome/tokyo2017/>



平成 28 年度 Fusion フェスタ in Tokyo の様子



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.234

2017年2,3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。

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、直接本研究へご連絡ください。