ISSN 1884-1600

# NIFS NEWS

NIFS

No.246



総研大 アジア冬の学校を開催

#### 2019 FEB/MAR

>>> 研究最前線 · · · · 2-3

核融合プラズマを予測する

─統合輸送シミュレーション研究─

山口裕之

>>> 特 集・・・・4

総研大 アジア冬の学校

鈴木康浩

>>> 退職者記事 ・・・・ 5-7

森田 繁 西村 新 加藤明己

退職に思うこと 定年退職 自由人として生きる 退職にあたって

#### >>> トピックス・・・・ 7-8

労働安全衛生に関する情報交換会(第14回)を開催 第20サイクルのプラズマ実験が終了しました Fusion フェスタ in 東京 2019 のご案内

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

# 核融合プラズマを予測する 一 統合輸送シミュレーション研究 —

## 山口裕之

磁力線のカゴに閉じ込められた核融合プラズマは、その内部でいくつもの物理現象が互いに影響を及ぼし合いながら全体が変化してゆく、典型的な複雑系としてとらえることができます。ここでは、様々なシミュレーションを有機的に組み上げる=統合することで核融合プラズマ全体の振る舞いを予測しようという研究について紹介します。

核融合炉を設計する際には、プラズマの密度・ 温度を核融合反応が起こるレベルにまで高めるこ とができることと、核融合反応のエネルギーによ ってプラズマの温度を維持できることが、保証さ れなければなりません。このため、プラズマの密 度・温度を高い信頼性で予測する手法を開発する ことが、核融合炉を設計する上で欠かせないので す。しかし、核融合プラズマの振る舞いを予測す ることは簡単ではありません。そのことを説明す るために、核融合プラズマの中で起きている現象 とその相互のつながりを整理してみたのが図1で す。外からの粒子供給や加熱を通じてプラズマに 吸収された熱・粒子は、輸送と呼ばれる現象によ ってじわじわと運ばれ、プラズマの中に密度・温 度分布が形成されます。図の中で「密度・温度分布」 から「熱・粒子の吸収」「輸送」「磁場構造の変化」 という3つの現象へ矢印が伸びています。これは、密度・温度分布の変化に応じて、これらの現象の特性が変化するということを表しています。例えば、一般にプラズマの温度が高くなると、それに応じて熱の輸送も大きくなり、温度が上がりにくくなるという性質があります。こういった経路は他にいくつも存在します。また、「輸送」に限ってみても、その中身をいくつかの要素に切り分けて考えてみれば、図のような要素間の相互依存、相互統御の関係が存在しています。

核融合プラズマの密度・温度を高い信頼性で予測する物理モデルは、複雑な相互依存関係を矛盾なく記述するものでなければなりません。そのためにはコンピュータプログラムを使ったシミュレーションが必要不可欠となりますが、一つのプログラムだけでこの複雑な依存関係全体を記述することは、到底できません。そこで、異なる物理現象を記述するプログラム同士が、計算結果を互いに受け渡し合うことで、現象間の依存関係を矛盾なく取り入れるという方法が考えられます。このような方法でプラズマ全体の振る舞いを模擬するシミュレーション方法を「統合シミュレーション」と呼びます。

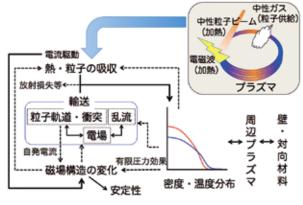


図1. 核融合プラズマの構成要素やその中で起こる現象間の関係性。矢印は、ある要素や現象から別の要素や現象への影響を表す。

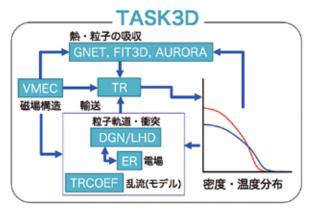


図2. 統合輸送コードTASK3Dの概念図。矢印は計算結果(数値 データ)の流れを表す。

# NIFS NEWS

核融合科学研究所では、京都大学との共同研究を通じて、密度や温度の変化を支配する方程式(輸送方程式といいます)を解くプログラムを中核とした統合輸送シミュレーションコード、TASK3Dの研究を進めています。TASK3Dというのはプログラム全体の名前であり、その中には、図2のように、いくつものプログラムが含まれています。アルファベットで書かれているのが各プログラムの名前で、TRというのがプラズマの輸送方程式を解くメインのプログラムです。その他に熱・粒子の吸収、磁場構造、輸送現象の一部などを記述するプログラムが含まれています。このTASK3Dを使って、我々は、まずは大型へリカル装置(LHD)の実験結果を再現できるよう、それぞれのプログラムやモデルの改良を進めています。

一方、核融合プラズマ中の輸送現象には未解明 の部分もあり、あらゆる実験結果をうまく説明で きる理論というものは、世界的にも見つかってい ません。特に、プラズマ中の揺らぎが引き起こす、 乱流による輸送は大きな謎の一つです。近年のコ ンピュータ性能の発達に伴って、乱流シミュレー ションの技術は、LHDのように複雑な形状のプラ ズマにおける乱流を模擬できるレベルにまで発展 しています。その成果を統合シミュレーションに 取り入れない手はありません。しかし、乱流シミ ュレーションは、一般的に膨大な時間を要します。 そこで、いくつもの密度・温度、磁場構造のパタ ーンに対してあらかじめ乱流シミュレーションを 行っておき、その結果をよく再現する数式モデル (簡約化モデルと呼ばれます)を作ることで、乱 流による熱や粒子の流れを瞬時に評価する手法が 核融合科学研究所において開発されてきています。

また、輸送方程式の「答え」であるところの密度・ 温度分布にLHDの実験結果を当てはめることで、 熱の輸送を逆算するシステムも整備されてきてい ます。この実験解析システムTASK3D-a(aは analysis=解析という意味)は、実験結果の体系的 な理解やデータベース化に貢献するだけでなく、 理論研究者と実験研究者の橋渡し役としても大き な役割を果たしてきています。さらに、膨大な実 験データベースを基にLHDプラズマの輸送を予測 するという、データ駆動型科学へ踏み込む新たな 試み(実験データベースモデル)も可能となりま した。

我々はこういった最新の成果をTASK3Dに取り 入れて、シミュレーションによる予測結果と実験 結果との比較を進めています。図3は、TASK3D によって予測されたLHDのイオン温度の分布と実 験結果との比較の例です。この実験結果に対して は、実験データベースモデルを用いて、実験で観 測されたイオン温度分布をよく再現できているこ とが分かります。残念ながら現段階では、あらゆ る実験結果を再現することのできるレベルには至 っていません。今後、モデルの拡張や改良を図っ ていく必要があります。図2に戻ると、今は図1に 示した矢印のうち、特に重要なものや優先度の高 いものを取り入れたという段階で、一方通行や未 開通となっている経路もあります。今後、矢印に 対応したシミュレーションを増やしていくことで、 より矛盾のない、あるいはこれまでよりも幅広い 実験条件に対応したシミュレーションを可能とし ていきます。

統合シミュレーション研究は、単なるプログラムの統合ではなく、多くの研究者たちの研究活動そのものの統合という側面があります。このような「知の統合」により、LHDにおける輸送現象の全容を明らかにするとともに、核融合プラズマの振る舞いに対する信頼性の高い予測手法を確立していきたいと考えています。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)

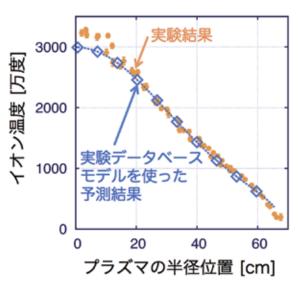


図3. TASK3Dによって予測されたLHDにおけるイオン温度と実験結果との比較の例。このケースでは、実験データベースモデルにより実験結果がよく再現されている。

# 総研大 アジア冬の学校

総合研究大学院大学(総研大)・核融合科学専攻 は、総研大アジア冬の学校を2019年1月21日か ら25日までタイのバンコク近郊で開催しました。 総研大アジア冬の学校は、近年、経済発展が目覚 ましい東南アジアの優秀な学生を多数招へいする ことを目的として、東南アジアの国々で開催する こととしています。これまでに2回、タイにて開催 しており、昨年度からはタイ国家原子力技術研究所 (TINT:Thailand Institute of Nuclear Technology) が主催しているASEAN School on Plasma and Nuclear Fusion (ASPNF) と共催の形で開催し ています。このことにより、核融合エネルギーに 興味を持つ優秀な学生を多数招待することが可能 となりました。これは、2016年度に、タイ・チ エンマイ大学、TINTと核融合科学研究所との間で 締結した、研究と教育に関する学術協定を活用す ることにより可能となったものです。

本年度の冬の学校は、タイ・バンコク郊外のマヒドン大学サラヤキャンパス内を会場として開催されました。理学部材料工学科の講義室を会場として使用し、機材等も最新のものが整備された素晴らしい施設でした。昼食も会場内で全員一緒に取ることができ、まさに1週間寝食を共にし、核融合を学ぶことができる機会となりました。今回は、タイ、ベトナム、インドネシア、ネパール、インド、パキスタン、フィリピン、日本の計8か国から合計62名の参加がありました。

当研究所からは山田弘司教授、磯部光孝教授、 大舘暁教授、後藤拓也助教と筆者の5名が講師と して参加しました。また、総研大生が2名参加し



図1. 核融合科学研究所山田教授による基調講演

## 鈴木康浩

ました。今回の冬の学校では、総研大・核融合科学専攻として、60分の基調講演、90分の講義を2コマ、60分の講義を1コマ実施しました。60分の基調講演においては、山田教授から日本の核融合研究開発に関する現状報告がなされました。総研大の講師陣からは、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行われました。ASPNF側が企画した講義としては、タイ、フランスなどの核融合研究開発の現状、更にフランス・WEST実験装置からの実況中継、チェコ・プラハ工科大学に設置されているGOLEMトカマク装置実験を活用した遠隔実験演習などが行われました。

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。マヒドン大学がありますバンコク郊外・サラヤは都市部であるにもかかわらず多くの自然が残る地域です。素晴らしい環境の下で冬の学校を開催するにあたり、TINTとマヒドン大学のスタッフ及びサポート学生の皆様には親身にご協力いただきました。中でもTINTのThawatchai Onjun常務副理事、Roppon Picha研究員、マヒドン大学のSomsak Dangtip准教授に深く感謝いたします。

(核融合理論シミュレーション研究系 准教授)



図2. 演習における学生同士の議論。様々な国々からの参加学生 が、英語で議論を戦わせます。

# 退職に思うこと

「パイロット」か「船乗り」になり、社会のしがらみに煩わされることなく悠々自適?の人生を送るのが中学・高校生頃からの私の望みだったのですが、偶然や必然による紆余曲折を経て、40年間も大学院生・研究者として核融合研究に携わることになりました。結果として本来の希望に似た環境で人生を送ることができ、非常に不思議な気持ちと良き協同研究者に恵まれた充実感を感じて定年退職を迎えようとしています。

陽陰極間の単純な放電を利用した「真空スパーク」装置と「X線分光器」を組み合わせた研究で、名古屋大学プラズマ研究所(当時)の学生として博士学位を取得しました。2500万度の電子温度と固体密度の1/10程度の電子密度(10<sup>21</sup>cm<sup>-3</sup>)を持つ高温高密度プラズマが生成でき、またそれを正確に計測できたこと、更にヘリウム様遷移元素イオン励起準位のQED効果や水素様鉄イオンスペクトルが観測できたこと等、印象深く記憶しています。

1984年に名古屋大学プラズマ研究所で職を得てからは、岡崎・分子科学研究所・UVSORでのプラズマ計測機器較正システムの建設、JIPPT-IIU及びCHS装置での可視・VUV・X線結晶分光、固体水素・不純物ペレット入射、京大・Heliotron-Eや日本原子力研究所(当時)・JT-60装置での共同研究、LHDの計測設計等を同時進行的に行いました。結果として、予算執行や装置建設に忙殺されることになり、多くの貴重な実験データがありながら、最低限の論文発表に終始したことが悔やまれます。

1989年には、米国・テキサス大学・TEXT装置で1か月間不純物ペレット入射に、オークリッジ国立研究所・ATF装置で3か月ブートストラップ電流解析のためのZeff計測に従事し、1993年には独・マックスプランク研究所・W7-AS装置で10か月間Hモード等の研究に従事しました。TEXTでの真夜中の不純物ペレット実験やW7-ASでのECH加熱高密度放電には大変感心しました。また、ドイツ人の論理的な一般概念や思考にも感銘し、その後の自分自身の考えにも影響を与えたような気がします。

ドイツから帰国後すぐに岐阜県に転居し、LHD の計測機器開発に休みなしで取り組み(写真)、無

## 森 田 繁

事1998年3月31日のファーストプラズマに不純物計測を間に合わせることができました。その後20年間、性能向上を図



りながら、不純物モニターシステムは全てのLHD 放電で休みなく稼働しました。これは私の密かな 喜びになっています。不純物ペレットによるイオ ン温度上昇、アルゴン放電における2億度近いイ オン温度の達成、1/1有理面を統計的磁場領域に 配置したHモード様放電の生成、密度勾配・磁気島・ 統計的磁場による不純物遮蔽の観測と解析、1次 元・2次元EUV分光法開発、タングステン分光等 も忘れ難い思い出として残っています。多くの大 学院生と上記の研究を協同でき、成果を分かち合 えたことも大きな喜びになりました。

九州大学・CPD及びQUEST装置、大阪大学・レーザー研、名古屋大学・X線天文グループ等との国内共同研究に加え、日中及び日中韓(A3)共同研究も印象深く記憶に残っています。特に、中国・合肥・等離子体物理研究所・EAST装置、中国・成都・西南物理研究所・HL-2A装置では、10年ほど前からVUV・EUV分光器を導入し共同研究者と分光計測をゼロから立ち上げてきましたが、今日のグループの充実ぶりを見ると感慨深いものがあります。

健全な研究意欲と健康な心身は表裏一体、退職後にはより積極的に体力の維持・向上に努めるつもりです。最後になりましたが、過去40年にわたる私の実験研究や共同研究を支えていただいた全ての方に深く感謝申し上げます。

(高密度プラズマ物理研究系 教授)



LHD光ファイバー敷設準備(後藤・稲垣・森崎) 1997年12月25日 (カメラ:森田)

# 定年退職 自由人として生きる 西村 新

今春、定年退職することになりました。これまで数々の先生方の最終講義をお聞きし、ある先生には「老いを楽しむ」、ある先生には「第二の人生」などと声をお掛けしたものでしたが、いよいよ自分の番となりました。昭和57年3月、大阪大学で工学博士号を取得し、4月から研究者生活をはじめました。平成3年1月に核融合科学研究所に赴任し、今春3月まで、都合37年間、文部省、文部科学省の下で人生を過ごさせていただきました。この間、平成24年12月から平成27年3月まで、国際熱核融合実験炉(ITER)計画の超伝導マグネット部門の副部門長を務めました。その間はITER国際機構から給与をいただきました。

大阪大学では溶接工学を学びました。向井喜彦 教授の研究室で研究させていただいたので、応力 腐食割れ、疲労、クリープといった「時間」が重 要な因子となる破壊現象を学びました。これらの 破壊を「時間依存性の破壊」と呼び、引張、曲げ、 座屈、脆性破壊といった静的な破壊と区別してい ます。部品や機器を製造すると、必ず、当初の機能 を発揮できなくなる力学的な限界があります。通常 は静的な破壊を設計の基準として製品は製造され ます。無限の荷重に耐えるとか、無限に使用できる 部品や機器は存在しません。時間依存性の破壊は、 静的破壊に比べてかなり低い荷重や応力で発生し ます。時間をかけて、少しずつ材料の性質が変化し、 破壊が進行します。溶接部は、形状が不連続になっ ていたり、金属組織が母材と大きく違っていたり、 内部に応力が残っていたりします。このような溶接 継手特有の問題と溶接継手が使用される環境との 組み合わせで、重大な問題が引き起こされることが あります。このような理解から、疲労を中心とした 研究をしていました。また、大阪大学では、液化天 然ガスや液体水素、液体ヘリウムなどの極めて低い 温度の液体を取り扱うための特殊な接続継手の開 発なども行いました。

核融合科学研究所は、ちょうど30年前、平成元年5月に創設されました。「プラズマの学理とその応用」という高邁な研究目標、研究指針が掲げられていました。平成2年度に助教授のポストが新設され、大型ヘリカル装置(LHD)の装置設計・製作(特に溶接継手設計)や大型超伝導コイルの設計・

研究開発を行うために赴任してきました。大型ヘリカル実験棟の設計、機械冷却水設備の設計・製作にも参加しました。日米



間の核融合協力事業やJIS規格の制定なども行いました。平成10年3月に初めてLHDのプラズマを点火しました。当時の飯吉厚夫所長の素晴らしい指導力によって、多くの研究者、技術者が「成功体験」を経験しました。LHD完成後は、ヘリカル型原型炉設計や、原型炉設計に必要な中性子照射効果に関する研究、高強度極低温構造材料の開発研究などを行ってきました。ITER計画は多くの困難に直面していますが、人類の夢とされる核融合発電が実現することを期待しています。

皆様方のおかげで、研究、教育生活をかなり自由に送らせていただきました。国際的な活動も含め、多くの企画、計画、評価などに参加させていただきました。多少独善的な提案や評価を受け入れていただいたこともありました。国際的な人間関係も作らせていただきました。

国際的な活動の中でご縁があり、中国科学院の招へいで、4月からは国際訪問教授として北京で生活を始めることになりました。ITER国際機構に勤務時の2年4か月間のフランス生活、フランスから帰国後の3年間の青森での生活に続き、3度目の自宅以外での生活になります。若い研究者、学生達の教育、研究指導にあたり、新しい材料開発や核融合発電の実現に向けて次の時代を担う人材を育てたいと思っています。同時に、自分自身の知識、経験を一層広げ、「自由人」として「生涯研究者」を全うしたいと思っています。

これまでの37年間の研究者人生の中で、たくさんの方々から教えをいただき、また、励ましをいただきました。本当にお世話になりました。心からお礼申し上げます。核融合研究の一層の発展を願っております。

(核融合システム研究系 教授)

# 退職にあたって

創立30周年を迎える当所にほぼ29年間お世話になりました。名古屋大学農学部の個人事業主のような講座から異動によって、大型ヘリカル装置(LHD)という全所を挙げてのプロジェクト研究を推進していく社会的意義の高い事業に参加させていただきました。本当に微力ではありましたが、建設当初の頃から加わらせていただいたことを感謝しています。

業務遂行に当たって、必要な資格も色々取得させていただきました。あまり活用できなかった資格もありましたが、『人生死ぬまで勉強だよ』と言ってくださった採用当時の先生の言葉どおり勉強しる機会を多くいただけました。また、研修として、放送大学数単位取得、英会話、ハングルも職務の意義務免除という形で、勤務時間中に勉強としていただきました。『勉強は仕事じゃないよ』とと忠してくださった先輩の言葉は今でも心に残っています。ただ、勉強したことを仕事にもっと生かし、継続し、実績を積み重ねていれば、真に実力のある技術者になれただろうと今更ながらに後悔しきりです。

写真は、計測実験棟大実験室で平成8年頃写し

## 加藤明己

ていただいたもので、 トムソン散乱計測用の 作成途中のミラーに反 射した20数年前の私で す。ほぼ800平方メー トルの広い空間で、 置の開発を行ってはX 線パルス波高分析器



(PHA)の開発研究の手伝いをしていました。検出器への信号強度を調節するためのフィルター交換機器の制御や、PHA用真空装置の制御を遠隔で行うため、GPIBやRS-232Cを用いた通信プログラムの開発、動作試験をしていました。まだ研究所の本拠地は名古屋でしたので、この広い空間に片手に満たない人間が動いていた頃でした。その後、加熱技術課、製作技術課と異動し、電動発電機の運転・保守、放射線測定と仕事を移し定年を迎えました。色々ご迷惑をおかけした皆様にこの場をお借りして謝罪させていただくとともに、御礼申し上げます。今までありがとうございました。

(技術部製作技術課 課長代理)

### TOPICS

トピックス

#### 労働安全衛生に関する情報交換会(第14回)を開催

核融合科学研究所では、労働安全衛生法に基づく各機関の取り組み、活動状況及び課題等の情報交換を目的とする「労働安全衛生(安全衛生法対応等)に関する情報交換会」を、1月31日と2月1日の両日で開催しました。これは、法人化後の平成16年度からほぼ年1回の頻度で企画開催しているもので、今回は14回目となります。大学・大学共同利用機関・高等専門学校等19機関から、安全衛生に関わる技術職員を中心に、事務職員、研究者、大学等環境安全協議会評議員、労働衛生コンサルタントらを交えた約60名が参加しました。

情報交換会の様子

- 開会にあたり、竹入所長から「本会がより良い安全衛生管理の実践 につながることを期待する」と挨拶がありました。その後、7機関から

につながることを期待する」と挨拶がありました。その後、7機関からの参加者から、防火・防災及び安全・衛生教育への取り組み、放射線管理並びにPCB・アスベスト廃棄物への対応等に関する12件の報告がありました。特に、PCB廃棄物や水質汚濁防止に関する話題では、各機関共通の懸案事項であることから盛んに質疑

19機関の参加者らによる記念撮影

応答が交わされ、その中から具体的で示唆に富んだ取り組み事例が数 多く紹介されるなど、有意義な情報交換会となりました。

また、研究所の大型へリカル装置(LHD)の見学会も併せて開催され、プラズマ実験中の制御室や稼働中の実験設備などを見学しました。参加者からは「生の実験現場を見ながら、安全・衛生管理に関する機関間の相違を互いに評し合う良い機会」などの声があり、大変好評でした。

閉会にあたり、西村安全衛生推進部長から、「真摯な語り合いの中から得た貴重な情報は、各機関での労働安全衛生の向上と労働者の安全 確保に必ず役立つ」と挨拶がありました。 TOPICS トピックス

#### 第20サイクルのプラズマ実験が終了しました

大型ヘリカル装置(LHD)の第20サイクルのプラズマ実験 が、2月21日に終了しました。「サイクル」とは、数か月間連 続してプラズマ実験を行う期間のことです。平成10年の実験 開始以来、今回で20回目の実験期間となる第20サイクルの プラズマ実験は、昨年10月23日に始まり、延べ63日間にわ たって9,200回を超えるプラズマの生成を行いました。この 間、国内外の大学・研究機関からの多くの共同研究者ととも に様々な研究を進め、新たな知見が次々と得られています。 詳しくは今後の研究成果発表などをお待ち下さい。



プラズマ実験15万回記念写真

また、実験期間中の1月11日には、プラズマの通算生成回数が、平成10年の実験開始から数えて15万回に達しました。

#### Fusion フェスタ in 東京 2019 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 東京 2019』が、日本科学未来館において 2019年5月3日(金・祝)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:2019年5月3日(金・祝)

10:00~17:00 (最終入場16:30)

場:日本科学未来館(東京都江東区青海2-3-6) 会

入場無料

特別講演:核融合科学研究所長 竹入 康彦

「新発見続々!! 研究最前線」-世界が注目するヘリカル型核融合研究-

#### [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: 0572-58-2076 FAX: 0572-58-2608

URL: http://www.nifs.ac.jp/welcome/fusionfesta/









2018 (平成 30) 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

## 融合科学研究所 発行

NIFS NEWS No.246

2019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

<u>※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。</u>