

わたしたちの研究 (3) 光工学研究室



蓮尾昌裕 (S61/1986卒)

1. はじめに

私たちの研究室、機械理工学専攻 物性工学講座 光工学研究室では原理からの抜本的検討をモットーに分光計測手法を開発し、プラズマ等が関わる様々な現象に対して、その理解および利用・制御のための基礎的な研究を行っています。機械工学でなぜ分光手法開発？、なぜプラズマ？と思われる方も多いかと思しますので、研究室の小史から始め、核融合プラズマ計測に関するわたしたちの研究をご紹介します。

昭和40年に工学部機械第二学科に理学部物理学科で光物性研究を行っていた研究室から福田国彌教授が着任し、プラズマの分光研究を行われたのが研究室のスタートとなります。福田教授の定年退官後、昭和63年から藤本孝教授が研究室を主宰され、藤本教授も平成17年に定年退職されました。物理工学科 物性分光光学研究室から、大学院重点化や改組により平成6年に機械物理工学専攻 応用分光光学研究室、平成18年に機械理工学専攻 光工学研究室と名称を変えてきましたが、継続して分



図1 筆者の学部生当時の学生証

光研究を行ってきています。

私は昭和57年に福岡県大牟田市郊外の緑豊かな片田舎から本学工学部機械系学科に入学し(図1)、昭和61年に卒業、昭和63年に大学院修士課程を修了、卒業論文研究、修士論文研究を物性分光光学研究室で指導いただきました。卒業当時はバブル景気が立ち上がりだしたところで、修士課程のころは理工系から金融関係への就職も増え始めた時期だったと思います。技術者は報われないとの風潮も感じられた時代でこの状況は何かおかしいと思って、修士課程修了後に科学技術政策を所掌していた当時の科学技術庁に行政職として入りました。またちょうどその頃は、昭和61年4月のチェルノブイリ原発事故を受けて、原子力の推進派・反対派の喧々諤々の議論が各所でなされていました。原子力安全局原子力安全課に配属されて、十分過ぎる徹夜を経験し、1年弱で退職しました。その後、平成元年4

月に東京大学理学部物理学教室 長澤信方研究室の助手として採用されました。なお、この頃の東京暮らしのこともあって、吉田英生さんから今年京機会関東支部の副支部長を引き継ぐことになりました。助手時代は主にレーザー非線形分光法を計測手段として半導体等の固体光物性を研究し、平成7年に東京大学から博士（理学）をいただきました。平成9年に本学機械物理工学専攻の藤本教授の応用分光学研究室に助教授として着任しました。助教授の頃はレーザーを用いた原子衝突、原子光学、近接場光学、光物性に関わる研究に取り組んできました。平成19年より現職を務めています。

令和3年6月現在のスタッフは私のほか、平成20年に助教に着任して平成29年から現職の四竈泰一准教授、平成30年着任のKuzmin Arseniy講師、平成23年着任の藤井恵介助教の3名（図2）です。後で研究について少し触れますが、それぞれの特徴を生かして活躍しています。所属学生は、博士課程2名、修士課程12名、学部4年生9名です。



図2 四竈泰一准教授



Kuzmin Arseniy講師



藤井恵介助教

2. 核融合研究の現状と私たちのアプローチ

20世紀半ばから始まった制御熱核融合の研究は、当初の核融合発電の早期実現の期待に応えていないのは事実であり、今どうなっているの？と思っておられる方も少なくないと思います。状況としては、フランス カダラッシュに建設中のITER国際核融合エネルギー機構の国際熱核融合実験炉（ITER: イーター）が日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極の協力により2025年の運転開始を目指し、国内では量子科学技術研究開発機構のJT-60SAが日本と欧州の協力により今年から運転開始と、新しい局面に入っています（ITER、JT-60SAともに発電はしません）。

制御熱核融合においては重水素(D)-3重水素(T)混合プラズマの中心イオン温度、中心イオン密度、閉じ込め時間の積、いわゆる3重積がある値を超える必要が

あります。例えば、プラズマ中で核融合反応が持続する自己点火条件では、中心イオン温度1億度、閉じ込め時間1秒とすると中心イオン密度が1立方メートル当たり 10^{21} 個以上となります。磁場閉じ込め核融合では、イオン・電子が磁力線に巻き付くように運動することを利用してプラズマを閉じ込めます。そのために極低温に冷却した超電導コイルで容器を囲み、強い磁場を発生させます。超高温と極低温がメートルオーダーの距離に共存する極限的システムです。

容器内では図3（簡略化のため、右側を壁面、左側をプラズマ中心部のように1次元的に描いています）に例示するように、壁面から中心部へと固体～気体～プラズマと状態変化を伴いながら、無数と言ってよい程のイオン・電子・原子が電場・磁場と相互に現象を織りなします。そのため、いわゆる機械論的要素還元主義では理解しがたい複雑系だとも考えられます。また例えば、プラズマ閉じ込め性能の同位体効果（閉じ込め性能が水素質量数の増加に伴い劣化することが理論的に予想されているものの、実験では逆に向上の傾向がみられること）など、重要であるにも関わらずメカニズムが未解明なものも存在します。

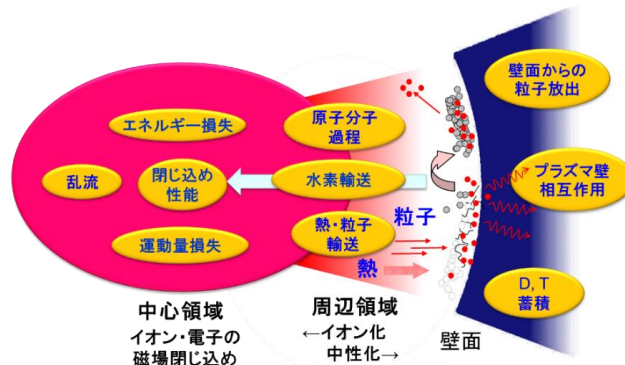


図3 磁場閉じ込め核融合プラズマにおける主な物理過程・現象の模式図

磁場閉じ込めプラズマ研究の主流は閉じ込め性能の向上やプラズマ乱流の理解・制御ですが、プラズマの主体である水素イオンは電子雲を有しないため発光しません。そのため、分光法に興味とノウハウを有する私たちは、光を発する中性水素を主な観測対象としています。いくつかの観測結果を図4、5、6に示します。観測したプラズマ装置は岐阜県土岐市にある核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）です。平成20年には京機会中部支部で訪問された研究所であり、ご覧になった方もおられるかと思えます。LHDは世界最大級のヘリカル型磁場閉じ込め装置であり、観測当時には国内で唯一稼働していた大型装置でした（現在も稼働中）。なお、LHDでは3重水素を使うことが出来ないため、放電ガスは軽水素、重水素やヘリウム（核反応の生成物になる原子）になります。

図4は中性水素や中性ヘリウムが周辺領域にどのように輸送されているかを観測した結果です。輝線スペクトルに生じるわずかな磁場効果を用いて発光位置を

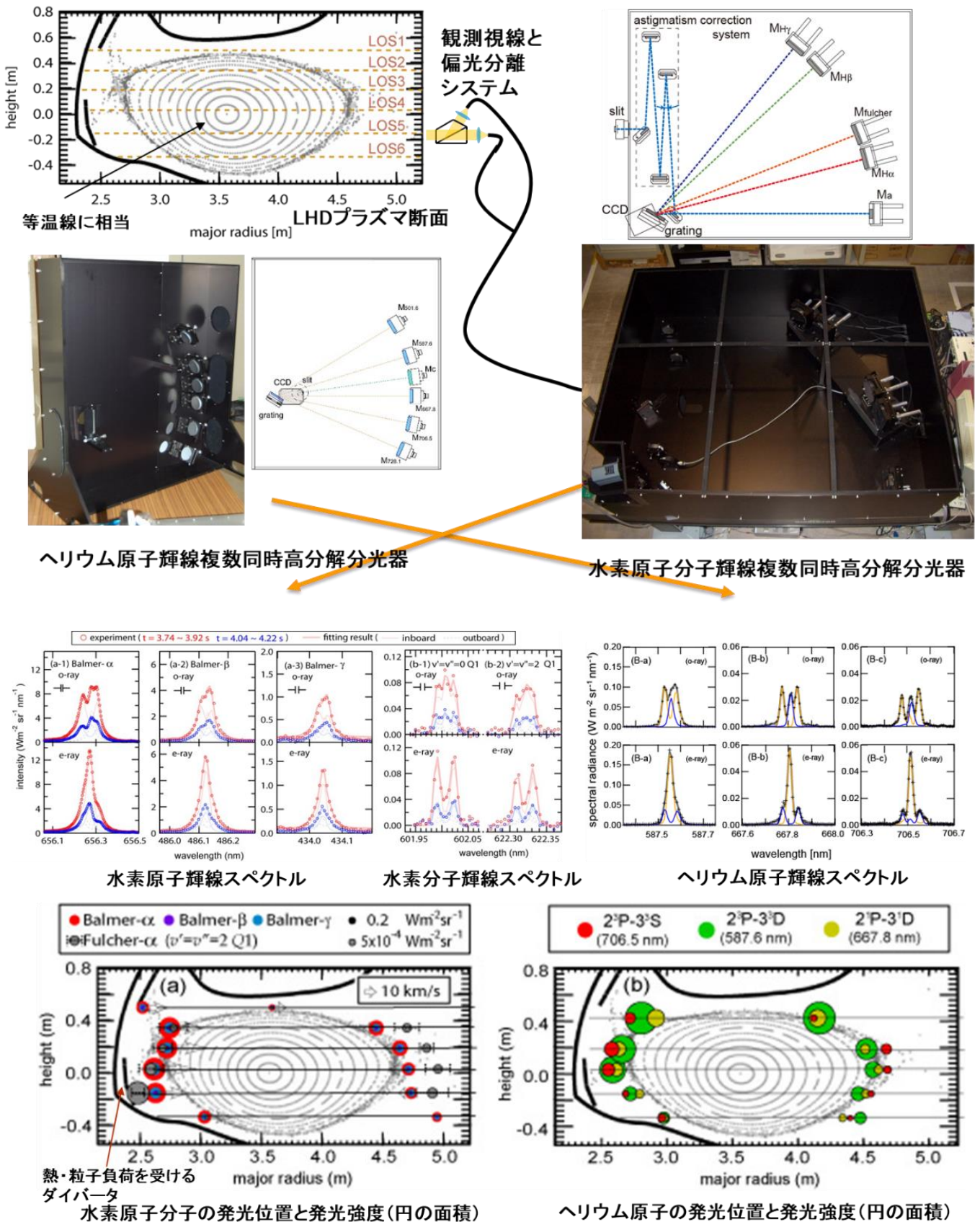


図4 プラズマ周辺領域の中性粒子輸送計測。上から下に、開発した計測器、観測スペクトル、その解析から得られる発光強度の空間分布

推定するため、複数の観測視線で複数輝線を高分解に同時計測する分光器を開発し、計測を行いました[1,2,3]。左下、右下の図がそれぞれ中性水素と中性ヘリウムに対する結果になります[4,5]。円の位置と大きさで発光の位置と強度（その位置での粒子密度に相当します）を表しています。中性粒子のイオン化が進む領域で発光していることやプラズマの熱・粒子負荷を受け止めるダイバータから水素分子が多く出ていることが分かります。

図5は水素原子が中心領域にどのように輸送されているかを観測した結果です。イオン化が進む中で中心領域にわずかに存在する微量の水素原子を検出するため、6桁にも迫る高ダイナミック計測を行う分光システムを開発し、計測を行いました[6]。左下の図が観測されたスペクトルになります。縦軸が対数になっていることに注意ください。スペクトルは温度によるドップラー広がりを表すガウス関数（左下の図では色のついた放物線に対応します）の足し合わせで再現できることが見い出され、プラズマの温度分布を用いた解析から、右下の図のように中心領域に存在する水素原子密度が評価できるようになりました。ところで、約16万度

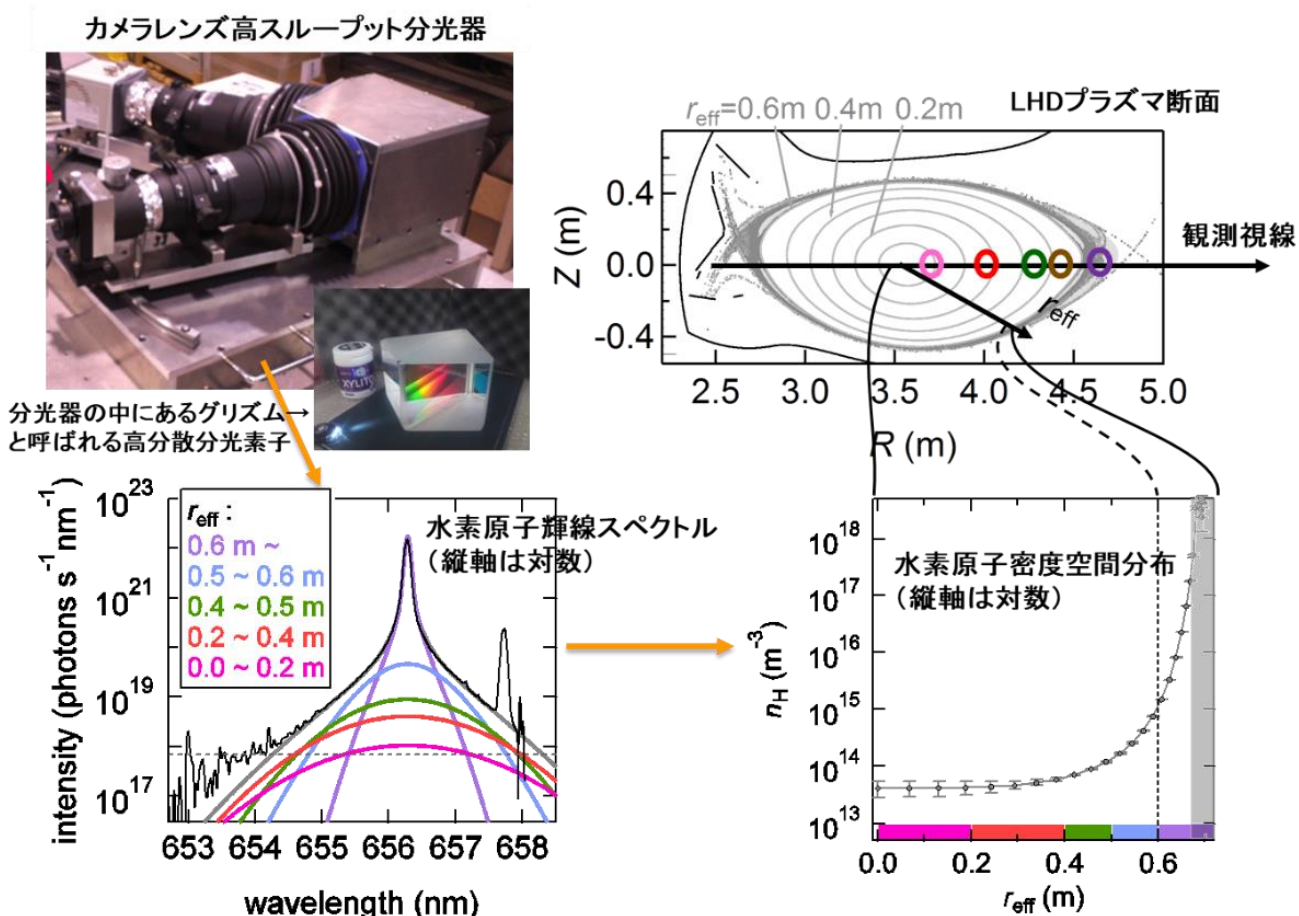


図5 プラズマ中心領域の水素原子輸送計測。左上から左下、右の順に、計測器、観測スペクトル、その解析から得られた水素原子密度空間分布

相当のエネルギーでイオン化する水素原子が中心部おおよそ2000万度（実験時）のプラズマ中に熱平衡状態で存在する割合は、数10桁分の1と天文学的に小さいはずですが。それに比べ数桁分の1の減少に留まっているということは、水素原子と水素イオンの荷電変換衝突による水素原子の中心領域への侵入が非熱的に効率良く起こっていること、またそれに伴う高温水素イオンの運動量・エネルギー損失が少なからず起こっていることを示しています。

図6は周辺領域の壁面をのぞき込む視野で水素分子を観測した結果です。分子発光観測には比較的広い波長範囲で高分解に分光計測する必要があります。一方、私たちは光検出器の感度がある範囲で一斉に高分解分光計測することでプラズマ中の不純物スペクトルまでも同時観測できる分光器を、光学素子の最適化を図って開発してきました[7]。ここではその分光器を用いました。右上の図がそのスペクトル観測例で、オレンジの帯をつけたところに解析に用いた水素分子輝線が

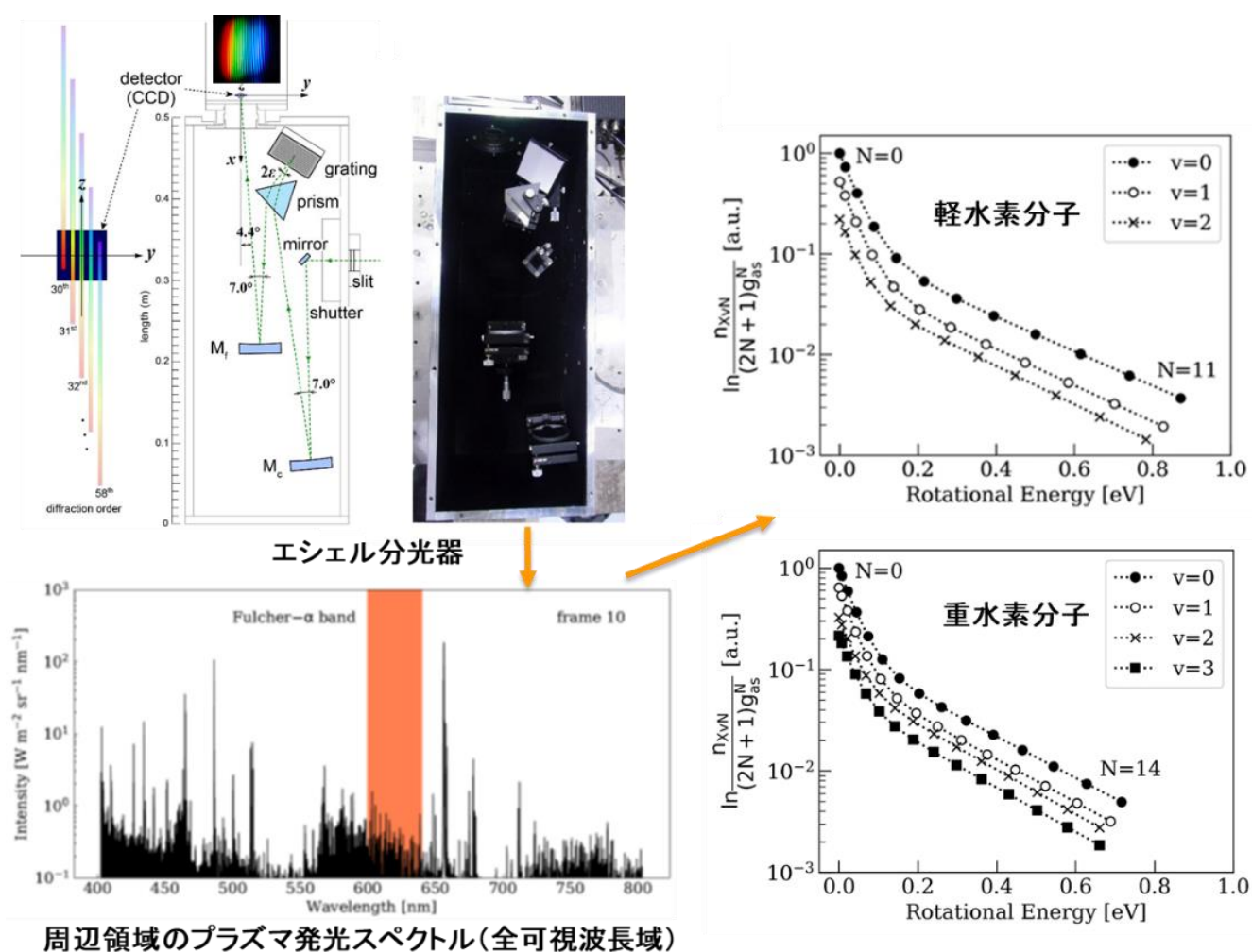


図6 壁面をのぞき込む視野での水素分子計測。左上から左下、右の順に、計測器、観測スペクトル、その解析から得られた（右上）軽水素分子と（右下）重水素分子の回転エネルギー分布のボルツマンプロット

集中しています。解析の結果得られた水素分子の分布数の回転エネルギー依存性は単一温度のボルツマン分布に従わず、軽水素分子、重水素分子ともに2温度のボルツマン分布の和に従うことが見出されました[8]。

これまで紹介しました観測結果と図3に示した素過程を組み入れた統合的シミュレーションとの比較により、壁面から中心までのプラズマと中性水素との相互作用の理解を目指しています。特に、壁面の熱・粒子負荷軽減、中心部への燃料粒子の効率的供給、プラズマ閉じ込め性能の向上における中性水素輸送の影響を明らかにし、さらにそれがプラズマ閉じ込め性能の同位体効果の解明につながることを期待しています。

3. スタッフの研究展開

上に書いた研究は、現在研究室で進めている内容から核融合プラズマ研究の切り口で切り出したものです。研究室のスタッフと学生諸君が熱心に取り組んでくれた成果です。

本稿では他の切り口の研究内容は割愛しますが、スタッフの全員がそれぞれの個性を生かして成果を上げています。簡単に紹介しますと、四竈准教授は可視波長域だけでなく近赤外波長域にも計測範囲を拡大しつつ、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置、九州大学応用力学研究所のQUEST装置、米国プリンストンプラズマ物理研究所のLTX-β装置で共同研究を進行中です。また、光工学研究の幅を広げるべく、単一光ファイバを用いた内視鏡や点欠陥含有ダイヤモンド微粒子の発光スペクトルを用いた温度計測にも取り組んでいます。Kuzmin講師は発光スペクトル計測と自ら開発している金属薄膜水素透過プローブを組み合わせて、プラズマ中の水素流束の計測に取り組んでいます。また、LHD装置やQUEST装置で共同研究を展開しています。藤井助教は持ち前の器用さから、上に書いた分光装置に加え、新たな装置を開発し、様々な現象を見出しています。また、大量の核融合プラズマデータの機械学習や原子・原子核・プラズマにおける数理統計モデルなどに研究の場を広げています。各スタッフの活躍については、研究室ホームページ（<http://oel.me.kyoto-u.ac.jp/index.html>）の研究内容や研究成果をご覧ください。

4. おわりに

本稿では皆様への制御熱核融合の研究開発の啓発およびそれらへの応援の期待も願って、それに関わる研究を紹介させていただきました。ところで、先にも書きましたが、核融合プラズマは複雑系であり、要素還元的アプローチでは限界に行き当たるかもしれません。ただ、私自身は若いときの文系転向しかかって挫折した経験もあり、学生時代にご指導いただいた藤本教授の教えもあって、モノとコトを分別し、自分の主観を極力排して分析と総合を行うデカルト的アプローチでの研究に心の安らぎを感じています。

その一方、近年の最適化手法や人工知能等の発展は目覚ましいものがあり、ここで改めて書くまでもなく、それらの技術は今後の社会や学術を内部から変革していくものと思います。人工知能が人間を超えるシンギュラリティ後の未来についても様々なことが予想されているようですが、研究教育の現場においては、そのずっと以前に、ブラックボックス化した人工知能的シミュレーションの結果を無意識のうちに受け入れ、思考停止に陥ってしまうことを危惧しています。そうならないためにも、分析・総合アプローチをその限界を含め、今後も研究室内で喧々諤々議論していこうと思います。もちろん、人間の興味や好奇心はそのアプローチの枠外に存在する研究の原動力ですので、研究室のスタッフ・学生がそれぞれ興味あることに没頭し、その総合体として新しい光工学を発展させたいと思っています。最後になりますが、このような機会をいただき、有難うございました。

参考文献

1. Development of multiwavelength-range fine-resolution spectrometer for hydrogen emissions and its application to large helical device periphery plasmas, K.Fujii, K.Mizushiri, T.Nishioka, T.Shikama, A.Iwamae, M.Goto, S.Morita, S.Kado, K.Sawada, and M.Hasuo, Review of Scientific Instruments, 81, 033106 (2010), <https://doi.org/10.1063/1.3356730>
2. Development of Multi-wavelength-range High-resolution Spectrometer for Hydrogen Atomic and Molecular Emission Lines, K.Fujii, T.Shikama, A.Iwamae, M.Goto, S.Morita and M.Hasuo, Plasma and Fusion Research, 5, S2079 (2010), <https://doi.org/10.1585/pfr.5.S2079>
3. Hydrogen transport diagnostics by atomic and molecular emission line profiles

- simultaneously measured for large helical device, K.Fujii, T.Shikama, M.Goto, S.Morita and M.Hasuo, Physics of Plasmas, 20, 012514 (2013), <https://doi.org/10.1063/1.4789454>
4. Hydrogen Atomic and Molecular Emission Locations and Intensities in the LHD Edge Plasma Determined from Simultaneously Observed Polarization Spectra, K.Fujii, K.Sawada, M.Goto, S.Morita and M.Hasuo, Plasma and Fusion Research, 10, 3402041 (2015), <https://doi.org/10.1585/pfr.10.3402041>
 5. A Simultaneous Measurement of Polarization-resolved Spectra of Neutral Helium 2^3P-3^3D , 2^1P-3^1D and 2^3P-3^3S Emissions from the Periphery of an LHD Plasma, K.Mizushiri, K.Fujii, T.Shikama, A.Iwamae, M.Goto, S.Morita and M.Hasuo, Plasma Physics and Controlled Fusion, 53, 105012 (2011), <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/10/105012>
 6. Development of a High Dynamic Range Spectroscopic System for Observation of Neutral Hydrogen Atom Density Distribution in LHD Core Plasma, K.Fujii, S.Atsumi, S.Watanabe, T.Shikama, M.Goto, S.Morita and M.Hasuo, Review of Scientific Instruments, 85, 023502 (2014), <https://doi.org/10.1063/1.4863650>
 7. Plasma Spectroscopy on an Aluminum-Pellet Ablation Cloud in an LHD Plasma with an Echelle Spectrometer, H.Tanaka, K.Fujii, T.Shikama, S.Morita, M.Goto and M.Hasuo, Atoms, 8, 81 (2020), <https://doi.org/10.3390/atoms8040081>
 8. Ro-vibrational population distribution in the ground state of hydrogen isotopologues in LHD peripheral plasmas deduced from emission spectroscopy, H.Ishihara, A.Kuzmin, M.Kobayashi, T.Shikama, K.Sawada, S.Saito, H.Nakamura, K.Fujii, M.Hasuo, the LHD Experiment Group, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 267, 107592 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107592>