

学術課題集「核融合プラズマのサイエンスとその拡がり」の紹介 Introduction of academic issues “Scientific landscape in fusion plasmas”

仲田資季
Motoki NAKATA

自然科学研究機構 核融合科学研究所
National Institute for Fusion Science

プラズマ・核融合研究分野全体における研究最前線を見渡し、そして、その先の2030年代を見据えた学術研究の将来展望やそこで重要となり得る研究課題を俯瞰的に整理することを目的としたFUSION2030研究会(略称)が展開されている。その中で「プラズマ科学」「核融合プラズマ」「核融合炉工学」に関する3つのワーキンググループ(WG)が立ち上がり、それぞれの領域の研究課題などを整理する活動が進められた。そのアウトプットは、引き続き「学術研究テーマ」WG活動へと引き継がれ、「プラズマ核融合サイエンスチャート(インフォグラフィックス及びドキュメント)」に集約される。

学術課題集「核融合プラズマのサイエンスとその拡がり」は、FUSION2030研究会の下で展開されている、Fusion Plasma WG(FPWG)の活動成果として取り纏め、web上にて広く公開を行ったものである(図1)：

https://www.nifs.ac.jp/research/Fusion2030/FPWG/fpwg_SciChallenges.html



図1: 学術課題集のwebページ

核融合プラズマの学術(サイエンスと技術)課題の魅力・難しさ・未解明な謎・将来の課題・新展開などに焦点を置き、52の記事として分野内外へ向けて発信される。そのため、「プラズマ核融合サイエンスチャート」の基礎資料としてのみならず、広く公開するものとした。多様な研究トピックを1ページ記事に凝縮する試み故に、関連研究を参考文献として列挙し尽くせなかった点もあるが、その代わりに、専門外・分野外の研究者や初学者にとっての学術的興味のエントランスとなる、関連の深いオープンアクセスの解説記事を挙げることに努めた。作成にあたっては、環状閉じ込め、先進概念、慣性閉じ込めを専門とする23名のWGメンバーに加え、12名の協力著者の支援を得ながら、専門領域の異なる複数のメンバー同士による相互レビューを実施して内容の充実を図った。

核融合炉の研究は、新たなエネルギー源の実現という明確な目的を持って1950年代に創始された研究である。当初はその実現が楽観的に予想されることもあったが、現在もその挑戦は続いている。多くの学術的・技術的課題に取り組んできた結果として、高温プラズマのダイナミクスや物質・光との相互作用などの複雑多彩な振る舞いが紐解かれた。新たな知見と技術を積み重ねることで、目的研究として生まれた研究は“エネルギー源の実現”という幹から様々な方向に枝葉を伸ばし、“プラズマ物理・核融合科学”という物理学・化学・工学を基盤とする複合的な学術領域を形成する形で進化を遂げている。このような進化と発展を強調するため、カテゴリーによる課題の類別に加え、“目指すもの(output)”と“波及(outcome)”も明示した。これらによって、「核融合炉の実現に資する研究」のみならず、「核融合プラズマの難問から諸科

学・社会へ拡大する研究」という様々な色彩を持つ学術課題のアピールを試みるものである。

記事の構成と具体例を図2および図3にそれぞれ示す。専門家が関連研究を概観する場合には「リード文」「概略文」は欠かせないが、「カテゴリー」や「目指すもの(output)・波及(outcome)」で分類・整理し直してみることも有益であろう。他方、専門外の研究者が全体像の概観を楽しむ場合には「見出し」と「リード文」に特化して読み進めることも推奨したい。学生へ向けた参考資料としては、興味に応じて目次の大区分(“躍動する高温プラズマの世界”など)を活用しながら、最新の研究のフレーバーを感じてもらいたい。様々な用途で柔軟に活用されることを期待する。記事の様式については「The Science of EST -Scientific challenges to be addressed by the European Solar Telescope-」や「日本物理学会創立 70 周年記念企画・物理学 70 の不思議」を参考にした。

さて、「52 の研究課題から眺望する学術的ランドスケープ」という副題を掲げた。副題に足るだけの重要課題を十分に取上げたか？未解明の謎や難問をエンタランスとした諸科学への展開を鮮明にアピールできたか？これらの点は改善の余地を残すだろう。しかしながら、本学術課題集を端緒のひとつとして、研究者や次世代を担う学生らが、ここから俯瞰される共通性、あるいは、不足している観点にそれぞれの思いを巡らせ、未来を語り合う議論や対話が巻き起こることを大いに期待している。その中での“気づき”や“視点”から生まれる新たな研究構想や、より豊かな眺望を見晴らすランドスケープを描くアクティビティが活性化するかもしれない。本シンポジウムでの議論を含め、僅かながらでも、そのような創造の連鎖の一助となることを期待している。

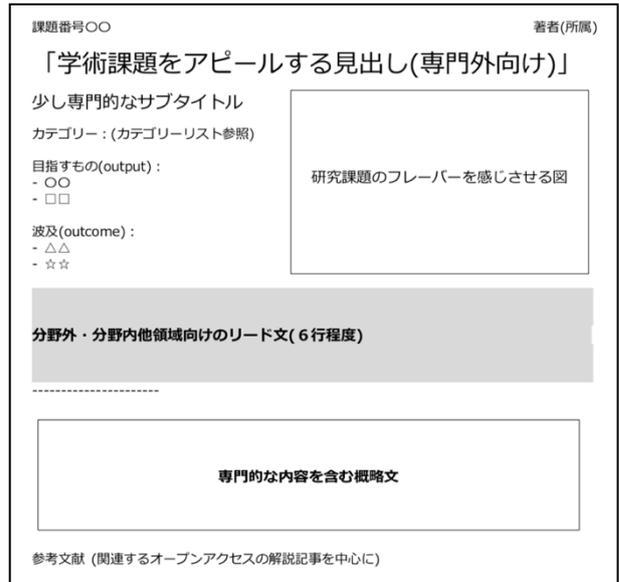


図 2: 記事の構成

課題番号9 佐藤雅彦(核融合科学研究所)

巨視的不安定性をいかにして抑えるか

運動論的效果に着目した巨視的不安定性の抑制方法の探究

カテゴリー: A1, A2, B1, B2, B5, B13

目指すもの(output):

- 巨視的不安定性の抑制
- ベータ限界の向上

波及(outcome):

- 多階層間相互作用の理解

核融合炉の実現には、プラズマを大きく変形させる「巨視的不安定性」の抑制が不可欠である。巨視的不安定性の理解は、プラズマを流体とみなすモデルを用いて大きく進展してきた。さらにその理解を進め、我々が不安定性を自在に制御するためには、流体モデルでは無視された個々の荷電粒子の運動の効果を考えることが重要となってきている。このような粒子の描像から巨視的不安定性を捉えることで、流体モデルでは説明できない新たな抑制メカニズムを発見でき、さらに高い圧力を持つ高性能プラズマの実現が可能になる。

核融合炉では高温高密度のプラズマを安定に維持する必要がある。そのためには、プラズマ中で発生する様々な巨視的不安定性(磁気流体力学(MHD)不安定性)を抑制しなければならない。巨視的不安定性を解析するための代表的な物理モデルは、プラズマを流体とみなすMHDモデルである。しかしながら、MHDモデルでは説明できない現象が数多く存在する。例えば、トカマクプラズマ中の抵抗性壁モードの安定化に必要なプラズマ回転速度は、MHD理論予測値よりも小さい。また、LHDの内部配置では、圧力勾配駆動モードがMHD理論予測よりも穏やかである。このような問題に対し、MHDモデルでは考慮されていない運動論効果、すなわち、プラズマを構成する個々の荷電粒子の運動を考慮する重要性が指摘されている。その他、内部キンクモード、ELM、アルファ固有モード等、トラスプラズマ中の巨視的不安定性だけでなく、宇宙プラズマでの無衝突リコネクションなど、巨視的不安定性に対する運動論効果の研究は幅広く進められている。このような粒子の描像から巨視的不安定性を捉えることは、ITER等の核融合プラズマにおいて、ますます重要になると考えられ、運動論効果を取り入れた巨視的不安定性の解析モデルを進展させていく必要がある。これにより、流体モデルでは説明不可能な、新たな不安定性抑制メカニズムの発見が可能となる。核融合炉は高ベータ(磁気圧に対するプラズマ圧力の比)での運転が求められる。ベータ値は圧力起因の不安定性で制限されるが、運動論効果を考慮することで、流体モデルで予測されるベータ限界以上の高ベータ値が得られる可能性がある。また、核融合プラズマは、MHD特性と輸送特性が共に良好でなければならない。運動論効果を取り入れた解析モデルの進展は、MHDと輸送を矛盾なく結合した解析にも寄与するものと期待される。

[1] 内藤裕也, 「磁気流体現象と運動論効果」, プラズマ・核融合学会誌 77 (2001) 547
[2] 白石淳也, 「プラズマ回転による抵抗性壁モード安定化に関する理論・シミュレーション研究の進展」, プラズマ・核融合学会誌 94 (2018) 183
[3] 佐藤雅彦, 研究最前線「圧力勾配が駆動する不安定性のハイブリッド・シミュレーション研究」, NIFS NEWS No.251 (2019) 6

図 3: 記事のサンプル