

学術課題集

# 核融合プラズマのサイエンスとその拡がり

— 52 の研究課題から眺望する学術的ランドスケープ —

2030 年代以降を見据えたプラズマ・核融合科学の学術課題検討会  
(FUSION2030 研究会)

Fusion Plasma Working Group

2021 年 8 月 18 日

## Fusion Plasma Working Group (FPWG) 構成メンバー

仲田資季 (核融合科学研究所) ※取り纏め	田中宏彦 (名古屋大学)
鈿持尚輝 (核融合科学研究所) ※幹事	星野一生 (慶應義塾大学)
横山雅之 (核融合科学研究所)	浅井朋彦 (日本大学) ※幹事
坂本隆一 (核融合科学研究所)	江角直道 (筑波大学)
本島巖 (核融合科学研究所)	高橋俊樹 (群馬大学)
徳沢季彦 (核融合科学研究所)	福本直之 (兵庫県立大学)
藤原大 (核融合科学研究所)	有川安信 (大阪大学) ※幹事
佐藤雅彦 (核融合科学研究所)	長友英夫 (大阪大学)
井通暁 (東京大学)	城崎知至 (広島大学)
辻井直人 (東京大学) ※幹事	菊池崇志 (長岡技術科学大学)
井戸毅 (九州大学)	佐々木徹 (長岡技術科学大学)
藤田隆明 (名古屋大学)	

※敬称略

## 本記事集の作成にあたってご支援頂いた協力著者

藤堂泰 (核融合科学研究所)	前山伸也 (名古屋大学)
佐竹真介 (核融合科学研究所)	岡田信二 (中部大学)
鈴木康浩 (核融合科学研究所)	木野康志 (東北大学)
田村直樹 (核融合科学研究所)	神吉隆司 (海上保安大学校)
松岡清吉 (核融合科学研究所)	藤田慶二 (総合研究大学院大学)
小林真 (核融合科学研究所)	
松山顕之 (量子科学技術研究開発機構)	

※敬称略

## 目次

- はじめに
- 記事の構成と楽しみ方
- 学術課題リスト (52 の学術課題)
- 付録 : Fusion Plasma Working Group 活動履歴

## はじめに

プラズマ・核融合科学分野のコミュニティが一丸となり、これまで蓄積されたプラズマ科学・核融合科学・核融合炉工学の学術知見や 2030 年代以降に取り組むべき学術課題を俯瞰する「プラズマ核融合サイエンスチャート」を作成し、将来展望・ビジョンの構想を活性化する。このような目的の下に「2030 年代以降を見据えたプラズマ・核融合科学の学術課題検討会」(FUSION2030 研究会)が 2020 年 4 月に旗揚げされ、精力的な活動が進められている。

本学術課題集「核融合プラズマのサイエンスとその拡がり」は、上記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たものである。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は容赦頂きたい。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タランスとなる、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。

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 20 年程度で実現されるであろうと楽観的に予想されたが、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”という広大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った学術課題のアピールを試みるものである。

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。僅かながらでも、そのような創造の連鎖の一助となれば幸いである。

最後に、本学術課題集は FPWG メンバーおよび協力著者のひとかたならぬ尽力に加え、多くの研究者との議論から成り立っている。特に、FUSION2030 研究会代表の森芳孝氏(光産業創成大学院大学)および世話人の坂本隆一氏(核融合科学研究所)をはじめとする、研究会幹事の方々、そして研究会へ参加頂いたプラズマ・核融合研究コミュニティの研究者の方々へ、心から感謝の意を表したい。

Fusion Plasma Working Group 取り纏め 仲田資季

## 記事の構成と楽しみ方

下記の図に示すように、それぞれの記事は、

- ・見出し (分野外・分野内他領域向け)
- ・サブタイトル (分野内向け)
- ・カテゴリー (P6 のカテゴリーリストから選択)
- ・目指すもの(output)・波及(outcome)
- ・リード文 (分野外・分野内他領域向け、6行程度)
- ・専門的な内容も含む概略文
- ・参考文献 (関連するオープンアクセスの解説記事を中心に)

から構成される。

課題番号〇〇	著者(所属)
「 <b>学術課題をアピールする見出し(専門外向け)</b> 」	
少し専門的なサブタイトル	研究課題のフレーバーを感じさせる図
カテゴリー: (カテゴリーリスト参照)	
目指すもの(output): - ○○ - □□	
波及(outcome): - △△ - ☆☆	
分野外・分野内他領域向けのリード文(6行程度)	
専門的な内容も含む概略文	
参考文献 (関連するオープンアクセスの解説記事を中心に)	

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うことも出来よう。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。

なお、紙面の制限により、いくつかの専門用語については説明が簡略化されているが、プラズマ・核融合学会がまとめた用語解説 ( <http://www.jspf.or.jp/yogo2008/> )や記事に付記された参考文献などを適宜参照して頂きたい。

本学術課題集は核融合プラズマのサイエンスに主眼を置き、最新の研究課題を列挙している。他方、核融合原型炉に求められる基本概念や技術課題、その解決のための開発研究の進め方、マイルストーンと開発戦略については、

- ・核融合科学技術委員会「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」  
( [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm) )
- ・原型炉開発総合戦略タスクフォース「原型炉開発に向けたアクションプラン」  
( [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1412800.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1412800.htm) )

において展望されている。また、核融合研究における学術研究の重要性や開発研究との相補性などについては、

- ・プラズマ・核融合学会「核融合を発展させる学術研究のあり方(アピール)」  
( <http://www.jspf.or.jp/news/file/appeal07.pdf> )

において提言されている。併せて参照して頂きたい。

## 学術課題リスト

### 躍動する高温プラズマの世界

1. 核燃焼プラズマの自己組織化を予測・活用する
2. 自発形成する断熱層でより熱いプラズマを閉じ込める
3. 微細渦が自発的に励起されるプラズマ乱流のマルチスケール相互作用
4. 非平衡システムに現れる非局所性の起源は？
5. 異なる物質はプラズマ中でどう混ざる？
6. プラズマが不純物を自ら吐き出す条件を探る
7. 高エネルギー粒子の損失を止めろ！
8. 突発的な崩壊現象やその予兆を解き明かせ
9. 巨視的不安定性をいかにして抑えるか
10. 流れを伴う動的な力学平衡状態 —MHD理論を超えて
11. 磁場が描く層・分岐・カオスの起源は？
12. 磁場とプラズマの圧力がつり合う磁場配位とは？
13. 磁化プラズマの巨視的構造形成の謎に迫る
14. プラズマに潜む隠れた対称性をデザインする
15. 乱れと磁場の幾何学で紐解く構造形成と機能創発
16. 波でプラズマを自在に操れるか？
17. 核融合点火を目指した爆縮・加熱高効率化の挑戦
18. 多階層複雑系を要素統合で記述する
19. 統合コードでレーザー核融合の点火・燃焼を予測する
20. 乱流の理解は深化する
21. 高エネルギー粒子を計測する！
22. 先進的中性子計測機で核融合プラズマを診る
23. 核融合研究から芽吹く新たなインフォマティクス

### 相互作用するプラズマと物質

24. 壁と磁場の形状で熱と粒子を制御する
25. 磁場を乱して、壁を守る
26. 気体を使って高温プラズマを手なずけろ！
27. プラズマと物質が触れ合うことにより起こる現象を理解・制御する
28. 核融合プラズマと壁の間で数百MWの熱を散らす

### プラズマを生み出し加熱する

29. 波で核融合炉心プラズマを生成できるか？
30. 負イオンの物理が拓く高効率粒子ビーム技術
31. 繰り返しのできる高エネルギーレーザーの実現
32. 核融合プラズマを荷電粒子で高効率に加熱する
33. 非線形場が結ぶ大強度ビーム物理と非中性プラズマ物理の共通性

## “燃える”プラズマ

34. “燃料”を制すれば、核融合プラズマを制する
35. 核融合プラズマにおける粒子閉じ込めと粒子供給のパラドックス
36. 慣性核融合発電炉で用いられる核融合燃料ペレット
37. エネルギー付与過程に対応した標的構造のバリエーション
38. 磁場閉じ込めプラズマとの相互作用による固体物質の均質化過程
39. 高速飛行の高密度プラズマ塊で粒子やエネルギーを運ぶ

## 核融合炉への道

40. トカマクプラズマの電流分布の最適解は何か？
41. 突発する大熱負荷への備え
42. ヘリウム粒子の一生を追え！
43. 狭い隙間から診てプラズマを制御する
44. 核融合プラズマの自動運転
45. 低アスペクト比化トーラスのpros and cons
46. 非平衡状態を利用してトカマク型炉心プラズマを手軽に生成したい！
47. 開いた磁場による閉じ込め(開放系配位)で核融合炉は可能か？
48. マイルド核融合プラズマコンセプト？
49. 探究！次世代高効率核融合発電方式

## 核融合から新たなテクノロジーへ

50. ミュオン触媒核融合研究の新展開
51. 核融合炉が拓く応用技術
52. 核融合中性子を使った未来の癌治療

---

## 課題の類別 (各記事に関連するカテゴリ記号を記載)

### カテゴリ-A (研究の指向性)

- A1. 大型ミッション研究の加速
- A2. 新概念・新手法・新展開の構築
- A3. 連携研究 (炉工学・プラズマ科学・異分野科学・産業等)

### カテゴリ-B (研究の対象)

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| B1. 磁場構造・平衡         | B9. 原子分子過程・輻射輸送     |
| B2. MHD 現象          | B10. プラズマ計測・診断      |
| B3. 輸送・閉じ込め現象       | B11. プラズマ加熱・アクチュエータ |
| B4. 乱流現象・非線形波動現象    | B12. プラズマ制御         |
| B5. 緩和現象・自己組織化/構造形成 | B13. 数値計算手法・データ解析手法 |
| B6. 核燃焼過程           | B14. 爆縮・高エネルギー密度状態  |
| B7. 周辺プラズマ・ダイバータ    | B15. 核融合プラズマ応用      |
| B8. プラズマ相互作用        |                     |

# 躍動する高温プラズマの世界

1億度を超える高温のプラズマ(原子核と電子が解離したガス)をトーラス状の磁場の中に、あるいは、高強度レーザー照射による圧縮で閉じ込める。このような核融合プラズマでは、太陽を凌ぐほどの強い温度勾配が形成される。極限的な不均一性が駆動する諸現象の中に、強い非線形性と非平衡性が織り成す躍動的な世界を垣間見ることができる。

# 核燃焼プラズマの自己組織化を予測・活用する

## 核燃焼プラズマにおける高エネルギーアルファ粒子の閉じ込めと活用

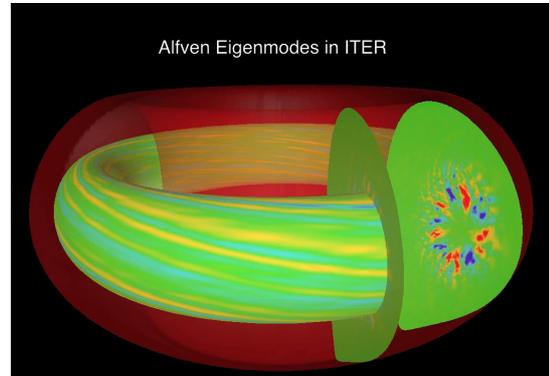
カテゴリー: A1, B2, B4, B5, B6, B13

目指すもの(output) :

- ITER や原型炉での高エネルギー粒子駆動不安定性とアルファ粒子輸送の予測・制御

波及(outcome) :

- 高エネルギー粒子駆動不安定性による帯状流の形成と微視的乱流輸送の制御
- アルファチャネリング
- 運動論的電磁流体力学の確立



ITER プラズマにおけるアルフベン固有モード

国際協力により建設中の ITER において、人類ははじめて核燃焼プラズマの実現に挑戦する。これまでの核融合プラズマ実験では外部からのプラズマ加熱によってエネルギーを入力していたが、核燃焼プラズマでは内部での核融合反応が主要なエネルギー源となる。その性能予測と制御においては、プラズマの自発的な構造形成（自己組織化）を考慮することがますます重要になるであろう。核融合反応から発生し、核融合エネルギーをプラズマに入力する（=加熱する）役割を担うのは高エネルギーアルファ粒子であり、その輸送と閉じ込めは重要な研究課題である。

核燃焼プラズマでは、核融合反応から発生する高エネルギーアルファ粒子が燃料プラズマを加熱することによって、核融合反応に必要な高温状態が自律的に維持される。このため高エネルギーアルファ粒子の良好な閉じ込めが核燃焼プラズマの実現には必須の条件である。しかし、高エネルギーアルファ粒子が不安定化させるアルフベン固有モードなどの電磁流体力学振動との相互作用によって、高エネルギーアルファ粒子の輸送と損失が引き起こされる可能性があるため、その予測と制御は重要な研究課題である[1]。また、高エネルギー粒子駆動不安定性は、非線形効果によって形成される帯状流を媒介として微視的乱流輸送に影響を与え、さらにはランダウ減衰によって燃料イオンを加熱する（=アルファチャネリング）。このような高エネルギーアルファ粒子に起因した自己組織化の性質を理解することで、核燃焼プラズマの性能を向上できると期待される。また、電磁流体力学は無衝突プラズマに対して未完成の学問体系であるが、プラズマ粒子と電磁流体力学振動の運動論的な相互作用の研究は無衝突プラズマを対象とした運動論的電磁流体力学の確立につながるであろう。

[1] 小特集「アルフベン固有モード研究の最新事情」, 藤堂泰 他, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 83, p. 865 (2007)

# 自発形成する断熱層でより熱いプラズマを閉じ込める

輸送障壁を有する  
高性能プラズマの制御

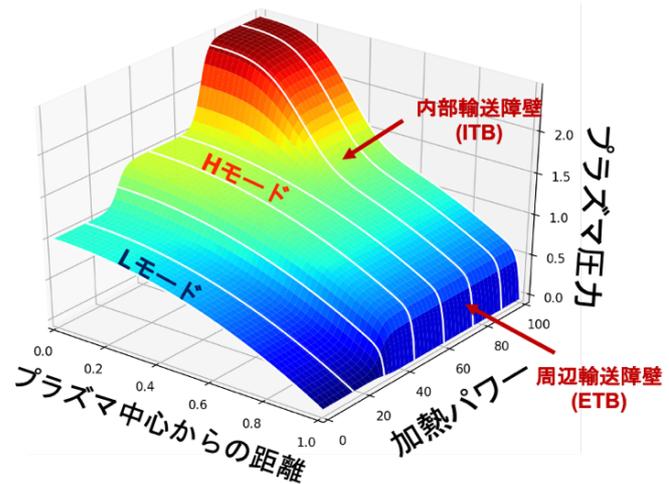
カテゴリー：A1, A2, B3, B5

目指すもの(output)：

- 核融合炉心プラズマの高性能化
- 輸送障壁を有するプラズマの分布制御
- 構造形成の理解
- 制御手法の確立

波及(outcome)：

- 乱流の非線形効果
- マルチスケールの構造形成
- 自己組織化形成の理解の進展



プラズマ内部と境界部に形成される断熱層(輸送障壁)

核融合発電炉では1億度を超える高温プラズマを長時間安定に維持する必要がある。これにはプラズマ内部に温度の高い領域と低い領域を仕切る輸送障壁と呼ばれる断熱層の形成が有効になる。プラズマ中の熱エネルギーは乱流により外に向かって移動するが、速い流れを作ることで乱れていた流れの方向を整えることができる。これにより熱エネルギーが移動しにくくなりプラズマ内部に熱エネルギーを閉じ込めることができる。核融合炉実現には、「輸送障壁はどのように形成されるのか?」という問いを明らかにし、輸送障壁の位置を制御することが重要である。

トラス系プラズマでは輸送障壁の形成により、輸送障壁を伴わない場合(Lモードプラズマ)に比べて、2-4倍の高い閉じ込め性能が得られている。輸送障壁には大きく分けて二種類あり、ひとつはプラズマの外側(表面近く)にできる周辺輸送障壁(Edge Transport Barrier, ETB)、もうひとつはプラズマの内部にできる内部輸送障壁(Internal Transport Barrier, ITB)である。周辺輸送障壁をもつプラズマはHモードプラズマと呼ばれ、核融合炉の運転シナリオに位置づけられる。プラズマ中に内部輸送障壁を形成することで、輸送障壁近傍の圧力勾配により自発電流を流すことができる。これは特に、閉じ込め磁場配位を形成するためにプラズマ電流を流し続ける必要があるトカマクでは重要となる。更に、輸送障壁の形成や制御には、乱流の抑制が重要であるが、乱流を抑制するには大きく分けてExBシアによるものと、ゾーナルフローによる抑制機構が考えられている。このうち、ExBの制御にはNBIを用いた運動量入力が効果的であり、JT-60Uなどにおいてその効果が確認されている。一方で、輸送障壁の形成位置に対する制御ノブとして、有理面・磁気島や磁気シアが考えられる。これには、中性粒子ビームや電子サイクロトロン波を用いた電流駆動による電流分布制御が有効である。これに加えて、プラズマの乱流や圧力など各種物理量のリアルタイムな計測・解析(課題番号44参照)を組み合わせることで、核融合プラズマ制御の実現が期待される。

[1] 森 雅博, 他, “小特集トラスプラズマにおける輸送障壁”, プラズマ核融合誌, **74** (1998) 967.

[2] K. Ida and T. Fujita, “Internal transport barrier in tokamak and helical plasmas”, Plasma Phys. Control. Fusion, **60** (2018) 033001.

# 微細渦が自発的に励起されるプラズマ乱流のマルチスケール相互作用

極微細な電子スケール乱流がプラズマ閉じ込めに与える影響

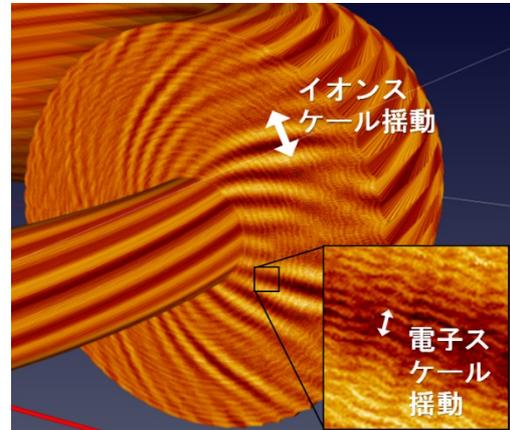
カテゴリー: A1, A2, B3, B4

目指すもの(output) :

- プラズマ乱流のマルチスケール相互作用の解明
- 複スケールの自発的励起過程を持つ乱流理論の構築

波及(outcome) :

- 乱流輸送の核燃焼プラズマに対する外挿性の検証
- 中性乱流におけるマルチスケール乱流現象への波及
- マルチスケールモデリングや簡約シミュレーションのための情報科学との連携



プラズマ中に発達するマルチスケール乱流

磁場閉じ込めプラズマは、大小様々な波・渦が複雑に相互作用する乱流状態にあり、乱流による輸送がプラズマ閉じ込め性能を大きく決定づけることが知られる。加えて、乱流揺らぎを駆動する不安定性にも、大きなスケールで起こる不安定性や小さなスケールで起こる不安定性などのバリエーションが存在する。大きなスケールが大勢を支配するか？小スケールも重要な役割を果たしているか？プラズマ乱流中のマルチスケール相互作用は必ずしも一筋縄ではいかないようだ。従来の単一スケールの駆動による乱流理論を超えた、マルチスケール乱流物理の地平を拓く。

乱流は、駆動源からエネルギーが注入され、非線形混合を経てより細かなスケールの渦へと伝達し、やがて小さなスケールで散逸していく過程として知られる。磁場閉じ込めプラズマでは、密度・温度勾配などに起因する微視的不安定性が揺らぎの駆動源として働く。磁場強度や温度にも依存するが、装置サイズ数  $m$  に対し、イオンスケールの不安定性が数  $cm$ 、さらに微細な電子スケールの不安定性がサブ  $mm$  程度である。これまでは、数十倍以上離れたこれらのスケールは階層分離されると考えられてきたが、近年の数値シミュレーション研究では、互いに作用しあい、プラズマ閉じ込め性能に影響を与えることが指摘されている。核融合炉開発の観点からは、このようなマルチスケール乱流相互作用を実験的にどのように観測するか？核燃焼プラズマの予測に対する妥当性や理論モデルの外挿性は？といった課題があり、プラズマ理論の観点からは、単一のエネルギー注入・伝達・散逸過程で理解される従来の乱流理論を越えて、異なるスケールの駆動源を持つマルチスケール乱流理論をどのように構築するか、計算科学的には、機械学習による相互作用モデリングや簡約シミュレーションの実現といった挑戦的課題が散在する。こうした描像は、イオンスケール不安定性と巨視的 MHD 不安定性や大域的分布形成の相互作用といった現象にも共通する課題であり、また、乱流中のバックスキャッター現象への応用など流体物理学への波及も期待される。

[1] 前山伸也、解説「スーパーコンピュータ「京」で切り拓くプラズマ乱流研究の新展開」、プラズマ・核融合学会誌 91 (2015) 589-596.

[2] 岸本泰明、Li Jiquan、小特集「トーラスプラズマにおけるパリティ-4乱流・MHD系におけるマルチスケール相互作用とパリティ」、プラズマ・核融合学会誌 92 (2016) 552-563.

# 非平衡系に現れる非局所性の起源は？

## 磁場閉じ込めプラズマにおける輸送の非局所性

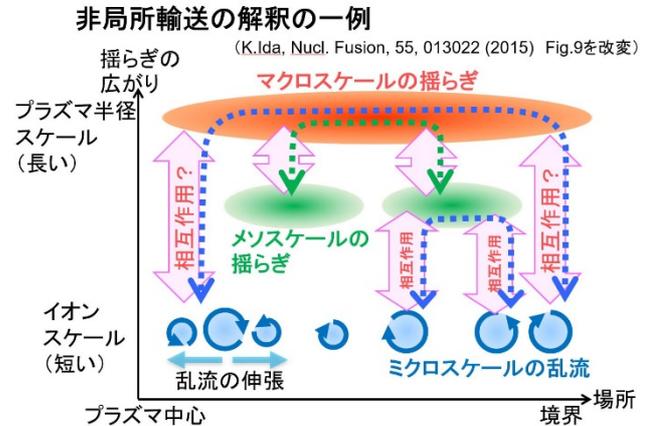
カテゴリー: A1,A2, B2, B3, B4, B5

目指すもの(output) :

- 輸送の非局所性の起源の解明
- 異なる時空間スケールを持つ現象間の相互作用の検証

波及(outcome) :

- 核融合炉心プラズマの性能予測の高精度化
- 非平衡系の物理学の発展



磁場閉じ込めプラズマにおいてはエネルギーの外部からの注入、伝達、外部への排出により構造が維持される非平衡系である。大部分の熱は密度や温度等の物理量の勾配が駆動する揺らぎによって運ばれるので、物理量と勾配が分かれば局所的な揺らぎと熱の伝達は理解できると期待される。しかし、実際には揺らぎの性質や熱伝達は必ずしも局所的な描像では説明できない。この非局所性は、様々な時空間スケールを持つ現象が内在する非平衡系の特徴であり、その理解は非平衡系の輸送過程の理解を促し、また核融合炉の性能予測の高精度化に寄与すると期待される。

古典的な熱及び粒子輸送の描像では、注目する場所における局所的な物理量によって輸送係数が決まるため、輸送を局所量のみで評価できる。輸送を引き起こす素過程の特性長（乱流の相関長や粒子の軌道幅）がプラズマの圧力分布等の勾配長に比べて十分短い場合はその評価は有効であると予想される。しかし、現実には局所量だけで説明できない現象が現れる。例えば、Dimitsシフトと呼ばれる乱流が駆動される温度勾配の閾値のシフトや、変調加熱実験で測定される熱流束と温度勾配の関係に現れるヒステリシスは、局所量に対して輸送が一意に決まらないことを示している。また、磁場閉じ込めプラズマの周辺領域を過渡的に冷却すると、通常の熱の伝達では説明できないほどの短時間でプラズマの中心付近の温度が“上昇”し始めるという不思議な現象が観測されており、プラズマの周辺部と中心部を繋ぐ長距離相関の存在を示唆している。このような“輸送の非局所性”の起源として、帯状流など長距離相関を持つ揺らぎと乱流の相互作用に基づくモデル（上図）、臨界勾配に近づくと雪崩のような大規模な熱伝達が発生するモデル、乱流の空間的広がりに基づくモデルなど様々な考え方が提案されているが、定量的な検証には至っていない。非局所性を含む輸送のメカニズムの理解には、輸送を引き起こすマイクロスケールの乱流と、長距離相関を持ち乱流と相互作用する可能性があるメソスケール、マクロスケールの過程を同時に調べる必要がある。今後、計測器や数値シミュレーション手法の発展により、その理解が大きく進展すると期待される。

[1] 岸本泰明, 他, 小特集「プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成」, プラズマ・核融合学会誌, vol. 78, No. 9, 857-910 (2002)

[2] K.Ida, et al., Nucl. Fusion, 55, 013022 (2015)

[3] 岸本泰明, 現代物理のキーワード「非局所性と大域性に支配されるプラズマ乱流」, 日本物理学会誌 Vol. 73, No. 7, 454-455 (2018)

## 異なる物質はプラズマ中でどう混ざる？

### プラズマ閉じ込めの水素同位体質量効果と多種イオン混合

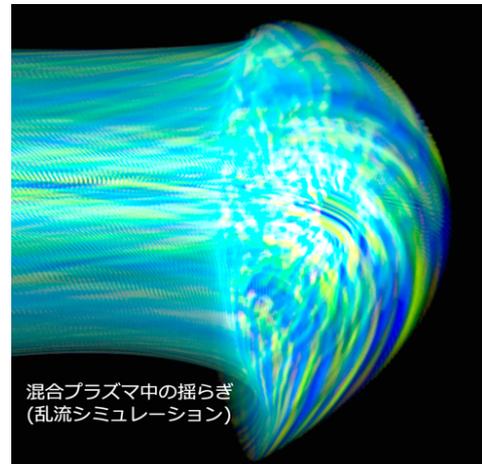
カテゴリー: A1, A2, B3, B4, B6

目指すもの(output) :

- 燃焼プラズマ中の燃料分布や不純物分布の決定メカニズムの解明

波及(outcome) :

- 核融合出力の高精度予測と制御
- 多成分流体・プラズマの混合過程のモデル化



混合プラズマ中の揺らぎ  
(乱流シミュレーション)  
重水素(青)、三重水素(黄)、ヘリウム(赤)の  
温度揺らぎ(各色の発光で表現)

核融合炉における燃焼プラズマは、燃料となる重水素・三重水素や燃焼から生じるヘリウムなどが混在した多種イオン混合プラズマである。プラズマ中の燃料イオンなどの密度比やその分布は燃焼特性を左右するのみならず、質量の違いがもたらす作用を介して、エネルギー・粒子の閉じ込め特性にも強く影響を与える。「同位体効果」と呼ばれる質量差の作用は、際立った単一の現象ではなく、イオン質量に依存する様々な素過程が絡み合う複合現象であることが次第に明らかとなり、多種イオンの混合状態を含む全容解明にはさらなる精密な理論・実験研究が求められる。

核融合燃焼プラズマは、燃料である重水素と三重水素、そして反応生成物である高エネルギーヘリウム(アルファ粒子)や、それが熱化したヘリウム灰などから成り、異なるエネルギーを持つ多種イオンが混合された状態にある。現存の実験装置では純度の高い水素プラズマの閉じ込め特性に加え、不純物イオンの挙動や水素同位体イオンの質量効果(同位体効果)が探究されてきたが、複数イオン種の密度・温度分布や揺らぎの時空間構造を同時的に計測することが重要となる。多くの実験において、イオン質量の大きいプラズマで閉じ込め性能が向上する「同位体効果」が観測された。しかし、なぜイオン質量が閉じ込め特性に影響を与えるのか？その背後にあるメカニズムは何か？といった全容の解明は40年以上にわたる未解決問題であった。閉じ込め方式に依らず、炉心プラズマの輸送特性は乱流輸送現象に大きな影響を受けることが明らかになった今日では、乱流輸送に対するイオン質量差の作用を、電子とイオンを同時に扱う大規模な乱流シミュレーションや軽水素・重水素プラズマ実験によって精力的に研究している。同位体効果は際立った単一の現象に由来するのではなく、プラズマ中の粒子軌道や音波、粒子間衝突といった、イオン質量に依存する様々な素過程が複合的に絡み合って生じていることが次第に明らかとなり、その全容解明には、さらなる精密な理論・実験研究が求められる。計測技術の進展が新たな発見も与えている。最新の荷電交換分光計測では、プラズマ中の水素同位体イオンが、拡散的な時間スケールよりも速く、非一様状態から一様な状態へと混合されることが観測された。そのメカニズムについてはまだ多くの謎を含むが、「燃料イオンは拡散的に一様等分的な混合状態に至る」というこれまで多くの場合で想定されてきた仮定を超えた、核融合燃焼プラズマの新たな姿を捉える研究の進展が期待される。

[1] 田中謙治ほか、“LHDにおける輸送の同位体効果”、プラズマ・核融合学会誌 97, 3(2021)

[2] K. Ida, M. Nakata et al., Phys. Rev. Lett. 124, 025002 (2020)

## プラズマが不純物を自ら吐き出す条件を探る

### 新古典・乱流輸送理論の拡張による不純物ホール現象の解明

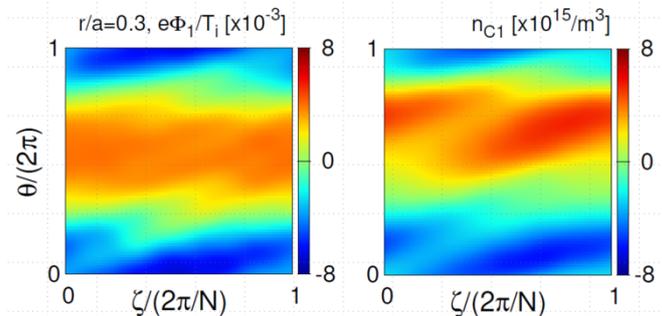
カテゴリー: A1, A2, B3, B4, B5

目指すもの(output):

- 不純物ホール現象のメカニズムの解明
- 新古典・乱流輸送モデルの拡張

波及(outcome):

- 不純物蓄積を抑制する最適化配位の研究
- 計算機科学・数理学との連携



拡張された新古典シミュレーションで得られた、磁気面上のポテンシャル分布 (左) と、炭素不純物の密度分布 (右)。両者の位相のずれが新古典フラックスを生む。

核融合炉のプラズマ中には、重水素・三重水素の他、核融合反応で生じるヘリウムや、炉壁材料のタングステンなど、多くのイオン種を含む。重い不純物イオンほどプラズマ中心に蓄積すると従来の輸送理論では予測されてきたが、それに反する「不純物ホール現象」が実験で見つかった。核融合炉の定常運転実現には不純物の蓄積抑制が必要不可欠である。不純物ホール現象が生じる条件やその背景にある物理機構はどのようなものか？それらの解明を目指して、輸送シミュレーションモデルの拡張が試みられている。

トラスプラズマ中の輸送現象は、荷電粒子のドリフト運動とクーロン散乱による「新古典輸送」と、微視的乱流による「乱流輸送」に大別される。3次元磁場配位では、新古典輸送は電場に対し強く依存し、電子とイオンの粒子フラックスが釣り合うように、径方向電場（径電場）が自発的に形成される。従来の新古典輸送理論では、核融合プラズマの径電場は通常負になると想定され、電荷の大きい重イオン種ほど負電場に引かれてプラズマ中心部に蓄積すると予想される。しかし、LHD 実験では負電場の形成が予想されるプラズマにおいて、不純物イオンが外向きに自発的に吐き出される「不純物ホール現象」が観測された。その解明のために乱流輸送モデルを多イオン種に拡張したが、やはり不純物は内向きに輸送されると分かった。そこで新古典輸送モデルに対しても拡張が行われた。重要なポイントは、3次元磁場中のドリフト運動を正確に解く事と、イオン密度の磁気面上の僅かな非均一性に起因する静電ポテンシャル分布の考慮である。拡張モデルによる大規模シミュレーションの結果、従来の計算と異なり中心から外に向かって負電場→正電場と切り替わり（観測と傾向が一致）、不純物イオンの新古典輸送も外向きになることが予測され、不純物ホール現象の解明に近づいた。

このように、長年「デファクト・スタンダード」となっていた理論モデルでは説明できない現象を、より詳細なモデルに拡張することによって解明することは理論シミュレーション研究の醍醐味と言える。拡張された輸送モデルを用いることで、不純物イオンの蓄積を抑制する核融合炉の磁場配位の設計や運転シナリオの構築の研究につながると期待される。乱流輸送と新古典輸送の相関が不純物輸送に与える影響にも関心が持たれるが、そのためには計算機科学の精髓を尽くした超大規模シミュレーションの開発や、強い非線形性を持つ現象の解析をするための数理学の手法を取り入れた展開が期待される。

# 高エネルギー粒子の損失を止める！

## 高エネルギー粒子起因の不安定性とその制御

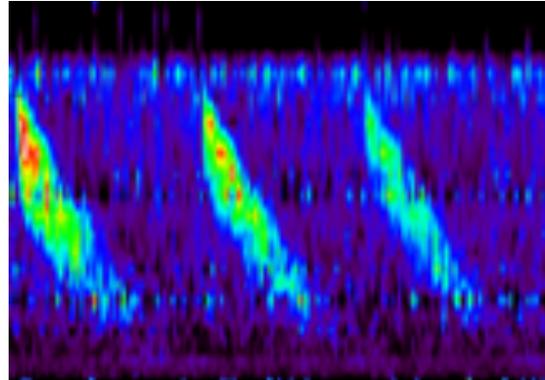
カテゴリー: A1, B2, B3, B4, B6, B11

目指すもの(output) :

- 高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送を予測・制御
- 自己組織化の予測・制御

波及(outcome) :

- 核融合炉の実現と高効率化や炉心プラズマの閉じ込め時間に対する条件の緩和
- 宇宙物理、非線形物理、実空間・速度空間物理、高速制御技術、予測制御技術



アルフベン固有モードによる高エネルギー粒子の吐き出し

磁場閉じ込め型核融合炉において、高温プラズマは核融合反応で生成される高エネルギーアルファ粒子によって加熱され、核融合反応に必要な高温状態が自律的に維持される。このことから、高エネルギー粒子をプラズマ中に良好に閉じ込めることが核燃焼プラズマ生成の必須条件とされている。しかし、高エネルギー粒子がプラズマ中で増大することで不安定性が励起され、高エネルギー粒子が外へ輸送されることが危惧されている。このように、プラズマを加熱する役割を担う高エネルギー粒子の輸送とその制御を明らかにしていくことは重要な研究課題である。

核燃焼プラズマは、核融合反応で生成される高エネルギーアルファ粒子によりプラズマを加熱し、核融合反応に必要な高温状態が自律的に維持される。このため高エネルギー粒子の良好な閉じ込めが核燃焼プラズマの実現には必須の条件である。しかし、高エネルギー粒子がプラズマ中で増大し密度勾配が形成されると、アルフベン固有モードなどの磁気流体力学振動が生じ、波動粒子相互作用により高エネルギー粒子の輸送と損失が引き起こされることが知られている。また、高エネルギー粒子駆動不安定性が、非線形効果によって高エネルギー粒子分布へ影響を与え、自己組織化を誘発していることも知られている。今後は乱流と高エネルギー粒子の相互作用に関する研究も、実験とシミュレーションの両側面からジャイロ運動論を用いた運動論的電磁流体力学の研究が活発化すると考えられる。一方、高エネルギー粒子起因の不安定性を制御する方法が提案されている。まず、高エネルギー粒子の分布を制御する方法が提案されている。イオンサイクロトロン加熱や中性粒子ビーム加熱による直接的分布制御や、電子サイクロトロン加熱により熱プラズマの分布を制御する間接的制御などがある。次に、直接アルフベン波に干渉することで不安定性を制御する方法が提案されている。電子サイクロトロン電流駆動によりアルフベン連続体に干渉する制御法や、三次元の外部共鳴摂動磁場を印加することでアルフベン波を制御する方法である。このように、プラズマを加熱する役割を担う高エネルギー粒子の物理を明らかにし、輸送や閉じ込めを制御する技術を創成することは重要な研究課題である。

[1] 長壁正樹ほか、講座「輸送解析から見た高エネルギー粒子計測手法」、プラズマ・核融合学会誌（2004）

[2] 永岡賢一ほか、小特集「ジオスペースと実験室におけるプラズマの波動粒子相互作用の進展」、プラズマ・核融合学会誌（2021）

## 突発的な崩壊現象やその予兆を解き明かせ

### ディスラプションのダイナミクスの 解明と予知・制御・緩和手法の構築

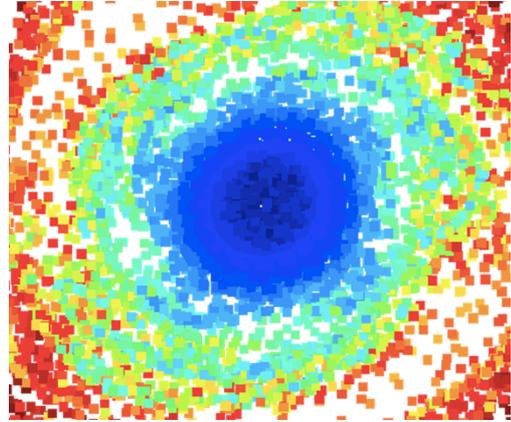
カテゴリー: A1, A3, B2, B5, B12

目指すもの(output):

- 崩壊現象前後を包含するシミュレーション
- 実験検証や予知・制御手法の構築

波及(outcome):

- 原型炉におけるディスラプション回避シナリオ
- 突発現象のモデリング手法や予測手法の構築



ディスラプション発生時にプラズマ内部で  
乱れる磁場構造

炉心プラズマには様々な振幅を伴った突発現象が存在する。なかでも、プラズマ中に蓄積された熱や電流が突発的に消失する崩壊現象はディスラプションと呼ばれ、ITER 級の装置では炉内機器へ大きな熱負荷や電磁力を与えるため、その早期検知や回避・緩和が不可欠となる。ディスラプションは何にトリガーされ、その後どのようなダイナミクスを経て、どの程度炉内機器へ作用するのか？ディスラプションの研究は、連鎖的に絡まり合う一連の非線形現象を解きほぐし、突発現象の予兆をいち早く捉えて制御するための様々なモデルを統合化する研究と言える。

トカマク核融合炉の運転領域に強い制限を与える現象にディスラプションがある。ディスラプションは単一の現象ではなく、トリガーとなる不安定性に加え、蓄積エネルギーの損失、プラズマ電流の損失、そして、対向機器や真空容器壁への熱的・力学的影響といった一連の非線形現象が複雑に連鎖している。蓄積エネルギーを急激に損失させる熱消滅(Thermal Quench)は MHD 不安定性、不純物の蓄積、誤差磁場などに起因する揺動の成長が引き起こすと考えられている。その後、電気抵抗の急激な増大により、閉じ込め磁場を支えるプラズマ電流が損失される電流消失(Current Quench)へと連鎖する。その際、トロイダル電場によって相対論的なエネルギーまで加速された逃走電子が雪崩的に増幅しながら発生する。炉心プラズマはそれを取り囲む導体壁との電磁的相互作用の下で垂直位置移動現象(VDE)と呼ばれる急速移動を生じ、構造物に多大な電磁力負荷を生じる。ディスラプションは機器保全への影響の大きさから ITER では早期検知や回避・緩和が重要となる。現在の実験研究では一連の現象を詳細に計測することが難しく、ディスラプションの予兆現象からトリガー、発生後のダイナミクスを模擬するための直接数値シミュレーション研究の進展も期待される。トカマク核融合炉の研究開発としては、プラズマ物理及びデータ科学的手法を駆使し、ディスラプション発生後の影響を最小化するための機器開発(Massive Material Injection など)や制御手法、早期検知の研究の更なる進展も求められており、その成果は ITER 実験の成功や原型炉設計の進展を支えるものである。特に、トリガー機構の詳細解明とそのモデル化、そして予測・抑制手法との統合化に関して、より一層活発な理論・実験・機器開発に関する研究が動機づけられる。

[1] 河野康則ほか、解説「ディスラプションを制御する～物理現象の理解と制御技術の進展」、プラズマ・核融合学会誌 86 (2010) 3-6

[2] 松山顕之、解説「トカマクディスラプションにおける逃走電子回避に向けた理論モデリングの現状」、プラズマ・核融合学会誌 95 No.12 (2019) 589-595

## 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

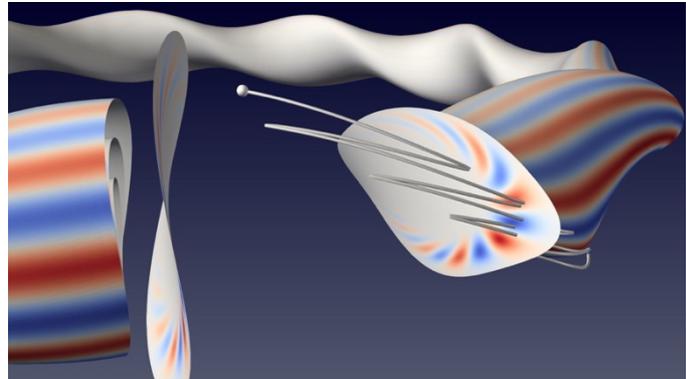
カテゴリー: A1, A2, B1, B2, B5, B13

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



巨視的不安定性の中を駆け巡り、安定化させる粒子運動

核融合炉の実現には、プラズマを大きく変形させうる「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くるであろう。このような粒子的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 の内寄せ配位では、圧力勾配駆動型モードが 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、アルフヴェン固有モード等、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。このような粒子的描像から巨視的不安定性を捉えることは、ITER 等の核燃焼プラズマにおいて、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発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ろう。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] 内藤裕志他, 「磁気流体现象と運動論的效果」, 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

# 流れを伴う動的な力学平衡状態 —MHD 理論を超えて

## 流れのある二流体平衡状態の導出

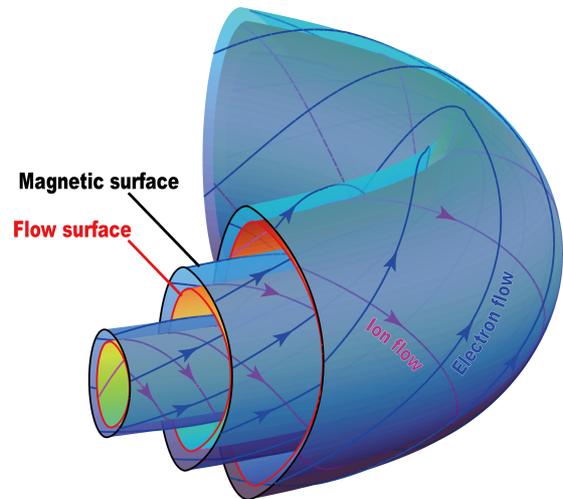
カテゴリー: A1, A2, A3, B1, B2, B5

目指すもの(output) :

- トロイダル回転を有するプラズマや高ベータプラズマの平衡の解明

波及(outcome) :

- 天体・宇宙プラズマの二流体/多流体平衡の解明



イオンと電子の流れが交叉する動的な力学平衡

プラズマを一流体として扱う MHD モデルでは、磁場閉じ込めプラズマの平衡状態はローレンツ力と圧力勾配とが釣り合った静止状態として記述されるが、プラズマ中に音速程度の流れやイオン慣性長スケールの圧力勾配などが存在する核融合炉心を表現するためには、電子/イオンの二流体性・プラズマ中の流れ・圧力の非等方性などを含んだ動的な平衡状態を求める必要がある。電子流体とイオン流体を別々に扱う二流体モデルは、そのような効果を含んだ平衡状態を記述でき、流れを有する核融合プラズマの振る舞いをより正確に表現することができる。

軸対称条件下での MHD 平衡状態は、圧力とポロイダル電流の 2 つの任意面関数を設定した上でポロイダル磁束関数に関する Grad-Shafranov 方程式を解くことによって静止状態として得られる。ところが高性能炉心プラズマにおいては、流れの存在が安定性や輸送特性に大きく寄与しているため、流れのある平衡状態を求める必要がある。そのような平衡は Grad-Shafranov 方程式を修正することによって一流体の範囲内で表現されることもあるが、二流体モデルを用いることによって磁気面を横切るような流れを取り扱うことが可能となり、高速なトロイダル回転を有するトカマク平衡など、MHD で扱うことのできない状態を記述することができる。二流体平衡の方程式では、イオン流体と電子流体のそれぞれのポロイダル流速、エンタルピー、エントロピーに関する計 6 つの任意面関数が現れ、MHD 平衡に比べて自由度が著しく大きくなるため、平衡状態を求めるためには適切な境界条件や関数形の設定が必要となる。二流体平衡において電子慣性を無視すると、電子に関する上記の任意面関数はポロイダル磁束関数（電子面変数）で表される。一方、イオンに関する任意面関数は、ポロイダル磁束関数と、二流体パラメータ（イオン慣性効果） $\varepsilon$  を乗じたイオンのトロイダル流速に関する項の和として定義されるイオン面変数で与えられる。二流体平衡は、単純に  $\varepsilon \rightarrow 0$  の極限を取るだけでは流れのある MHD 平衡に簡約化できない。MHD では電場（静電ポテンシャル）の効果が比較的大きいため、その取り扱いに注意しながら、二流体平衡方程式を直接変形する方法と変分原理に基づく汎関数の極限を取る方法が近年考案されている。さらに、イオン流体を熱平衡成分とビーム成分に分割して高速イオンを含んだ平衡を解析するなど、より一般的な核融合プラズマへの適用が期待される。

[1] 伊藤淳、プラズマ・核融合学会誌、92、pp.832-838 (2016). 【解説】

# 磁場が描く層・分岐・カオスの起源は？

## 閉じ込め磁場構造の大域的幾何学

カテゴリー: A2, A3, B1, B2, B7

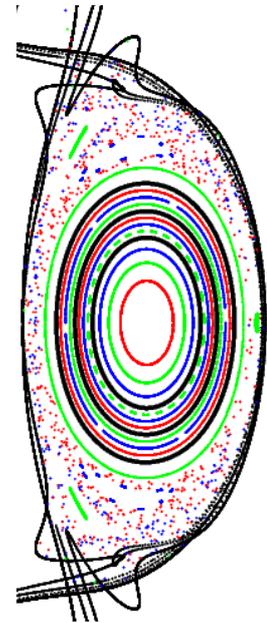
目指すもの(output):

- 磁場閉じ込め概念の基礎となる磁場の大域的幾何構造の記述

波及(outcome):

- 非保存的ハミルトン力学系に対する数理解析的手法の構築

トーラス形状を持つ磁場閉じ込めプラズマでは、トーラスに沿って捻れた磁力線が描く入れ子状の閉曲面(磁気面)でプラズマを閉じ込める。磁場がある方向に幾何学的対称性を持ち2次元的に取り扱える場合、磁気面の存在は数学的に保証されている。しかし、一般の3次元磁場ではそのような保証はなく、むしろ島構造やカオスといった磁気面の破れとも言える複雑かつ多様な構造を作ることが可能になる。目に見えない複雑に捻れた磁場を幾何学として捉え、それが取りうる構造の起源を解き明かすこと、これはトーラス磁場によるプラズマ閉じ込め概念の成立に関わる重要課題である。



多様な構造を描く磁力線のポアンカレ断面図

トーラス形状を持つ磁場閉じ込め核融合の基本的なコンセプトは、入れ子状の構造をもつ磁気面に超高温プラズマを閉じ込めることである。トカマクのように幾何学的対称性を持ち2次元として磁場を定義できる場合、磁場のハミルトニアンに保存量が存在し、磁気面の存在が常に保証される。しかし、ステラレータ等の3次元装置では事情は大きく異なる。まず、幾何学的対称性がないために厳密な磁気面の存在は保証されず、磁力線は磁気面以外にも磁気島やカオスなど多様な軌道を描くことが可能になる。さらに、3次元磁場のハミルトニアンはふつう数値計算によって離散的にしか与えられない。一方で、核融合の観点からは、磁場の大域的幾何構造は中に閉じ込められたプラズマの性質に直結するため、良好な磁気面を持つよう装置設計を考えたい。したがって、3次元磁場のハミルトニアンが良好な磁気面=保存量をもつ、すなわち可積分系であるように構成するための指標を見出すことが必要である。そのためには、非保存的・離散的な磁場のハミルトニアンを力学系の観点から解析し、磁場が取りうる大域的な幾何構造を知る必要がある。与えられた磁場が磁気面を形成するのか、あるいは島構造やカオスを描くのか、さらにはそれらの構造がどのようなパラメータ(磁場コイル形状、電流分布、etc...)依存性をもつのかを明らかにすることは、磁場閉じ込め概念の成立性のみならず、非保存的ハミルトン力学系の数理解析という観点からも興味深い問題といえる。

[1] 鈴木康浩「解説 Wendelstein 7-X の設計思想と磁場配位特性」, J. Plasma Fusion Res. Vol.93, 309 (2017).

[2] 鈴木康浩 「小特集 プラズマが作る磁場トポロジー: 磁気島とプラズモイド 2. 磁気島の発生と消滅」, J. Plasma Fusion Res. Vol.94, 396 (2018).

[3] 古川勝 「解説 流れや磁気島のあるMHD平衡の疑似アニーリング」, J. Plasma Fusion Res. Vol.94, 341 (2018).

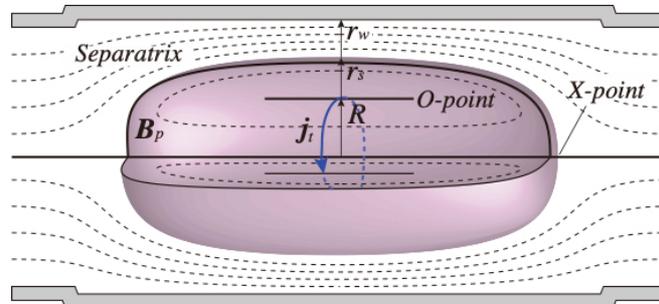
## 磁場とプラズマの圧力がつり合う磁場配位とは？

### 極限的高ベータ磁場閉じ込め方式：FRC

カテゴリー:A2, A3, B1, B2, B3, B5

目指すもの(output)：

- 極限的高ベータ ( $\beta > 1$ )、超高速 (~1000km/s) プラズマ流
- 極限的に高効率な磁場閉じ込めの実現
- 先進燃料による核融合実現の可能性



FRC の概念図

波及(outcome)：

- 天体プラズマ現象の再現

小型で効率が高い核融合炉心や中性子排出のない先進燃料核融合の実現には、高ベータ化が必須である。これを極限まで突き詰めると、プラズマ電流と閉じ込め磁場が完全に直交し、トーラス中心に穴が開いていない磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) となる。FRC の平衡は一流体 MHD 近似において Grad-Shafranov 方程式の解としても得られるが、その特異な磁場配位のため、局所的な $\beta$ 値はその体積の大部分で 1 を超え、したがって粒子は磁化していない。アルヴェン速度に達する平衡フローを持ち、1 桁以上の体積変化を伴う超音速衝突を経ても自己組織的に FRC が再形成されるなど、多くの点で他の磁場配位と異なる性質を示し、同時にその緩和のメカニズムなどには未解明な点も多い。近年、TAE 社の大型 FRC 実験において、高温 (~3keV) FRC の定常運転が実現し、超高ベータ核融合炉心の可能性が見えてきた。

トロイダル電流  $J_t$  とそれがつくるポロイダル磁場  $B_p$  のみで、ポロイダル断面内で磁束が反転し磁場強度がゼロとなる磁気中性点 (O-point) を持つ配位を形成すると、 $J_t \times B_p$  が  $\nabla p$  と完全にバランスし、体積平均ベータ  $\langle \beta \rangle$  が 1 に近く、トカマクなどで閉じ込め効率の指標とされるトロイダルベータ  $\beta_t$  が  $\infty$  となる極限的な配位が形成される。これが、磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) である。FRC 中のイオンはプラズマ表面のみで磁化し、体積の大部分で局所的な $\beta$ 値が 1 を超える。このときイオンの平均ラーモア半径はプラズマの特性長と同程度となり、「純運動論的」とも言える状態となる。閉じ込めについても異常輸送特性が消失するなど、他の閉じ込め方式とは異なる観測結果が多数報告されている。また、プラズマの閉じ込め領域は単連結となり、磁気圧で秒速数百 km に比較的容易に加速できることから、トカマク中心部への粒子供給法としても研究されており、近年では大容積の高ベータ ( $\beta > 1$ ) 中に無衝突衝撃波を形成する実験室天文学的アプローチも行われている。超音速衝突実験では、磁気ヘリシティや一般化ヘリシティの保存という枠組みに収まらない「FRC の自己組織化的生成」を示す結果も報告されており、プラズマ・核融合分野を超えた学術的興味関心を引いている。歴史的にはパルス実験が主流であったが、近年、米 TAE 社で大型装置が建設され、NBI により導入された高エネルギーイオンによる安定化効果により閉じ込め性能を向上した ABD (Advanced Beam-Driven) FRC による高効率核融合炉心開発が進められている。

[1] 浅井朋彦他, 「極限的高ベータ配位:FRC の閉じ込め・安定性をどう理解するか?」プラズマ・核融合学会誌 96, pp.165 (2020).

# 磁化プラズマの巨視的構造形成の謎に迫る

## ヘリシティ保存に基づく緩和過程

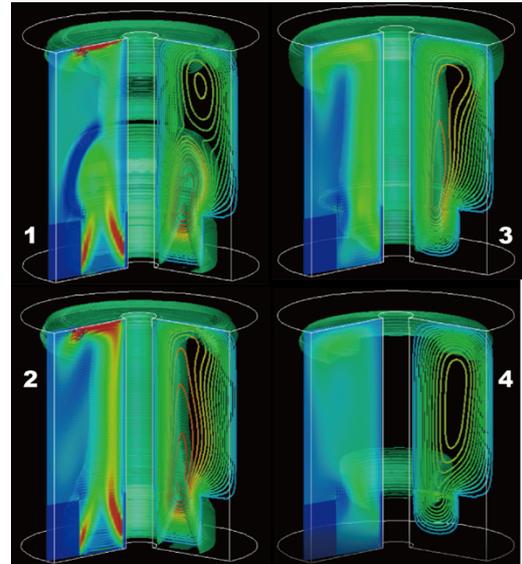
カテゴリー: A2, A3, B1, B2, B5, B12

目指すもの(output):

- 磁場閉じ込め配位の自発的な形成

波及(outcome):

- 天体・大気・海洋などの構造形成・自己組織化



同軸ヘリシティ入射における緩和過程  
(画像提供: 神吉隆司・水口直紀)

非圧縮の完全流体ではヘリシティ（流速と渦度の内積の空間積分）が保存量となり、輸送や大規模構造形成を引き起こしている。同様に理想 MHD プラズマは、磁気ヘリシティ（磁場とベクトルポテンシャルの内積の空間積分）が保存量となり、磁気エネルギー最小の状態へと遷移（緩和）するが、変分問題を解いて得られる最終状態は圧力ゼロの静止平衡に限定されてしまう。高圧力核融合プラズマの緩和状態を再現するために、電子とイオン流体それぞれの一般化ヘリシティ（一般化運動量と一般化渦度の内積の空間積分）が保存される二流体モデルが導入されている。

磁気エネルギーは MHD 不安定性によって散逸するが、磁気ヘリシティは MHD 不安定性の時間スケールで保存されると仮定すると、孤立した MHD プラズマ中の磁場分布は 1 つのラグランジュ未定乗数を用いた変分問題として求めることができる。境界条件に応じてプラズマの巨視的な空間構造が決定され、MHD プラズマは最終的には磁気ヘリシティ保存下での最小磁気エネルギー状態（緩和状態）に到達する。また、プラズマ領域につながる磁力線に沿って外部から電位差を与えることにより、プラズマに磁気ヘリシティを注入し、巨視的構造の維持に利用することができる。ただし、理想 MHD における緩和状態には流れが存在せず、磁場と電流が平行となる force-free 配位に限定されてしまうため、高圧力の核融合炉心プラズマ中に自発的に形成される構造を適切に表現することはできない。そこで、電子とイオンそれぞれの一般化ヘリシティを保存量とするという二流体緩和の考え方を導入することによって、圧力勾配や流れを有する緩和状態を表現することができる。二流体緩和は、MHD や理想流体の緩和を含んだ自由度の大きな過程であり、多様な緩和状態を導くことができるが、有意な巨視的構造へと向かう緩和過程を導出するためには、散逸機構や最小化すべき物理量などをプラズマの性質に基づいて適切に設定する必要がある。

# プラズマに潜む隠れた対称性をデザインする

## プラズマの3次元磁場最適化と 様々な準対称構造

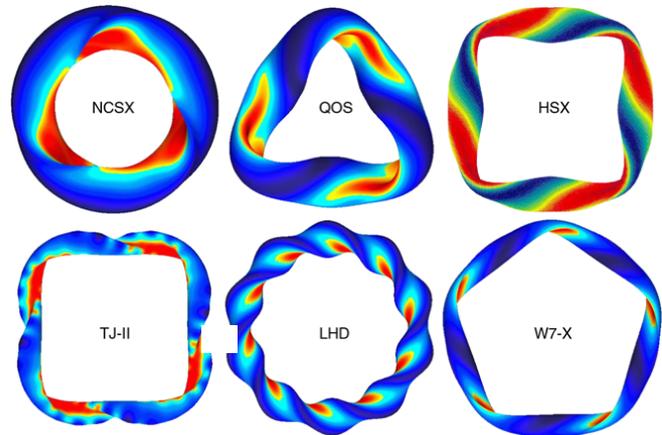
カテゴリー: A1, A2, B1, B3, B4, B5

目指すもの(output) :

- 磁場構造を自在にデザインする方法論の確立
- 高閉じ込めと安定性が両立する磁場構造

波及(outcome) :

- 核融合炉の最適化・高性能化
- 最適化数理で新たな物理特性を探索する方法論の展開



プラズマを閉じ込める非軸対称トーラス  
磁場形状の多様性(中心は装置名を表す)

(Office of Science of the U.S. Department of Energy.

Opportunities in the Fusion Energy Sciences Program より)

トーラス状の磁場で高温プラズマを閉じ込める際、磁場の空間的な対称性はどのような役割を持つだろうか？トカマク系と呼ばれるプラズマは磁場とプラズマ形状の軸対称性が一致し、閉じ込めに有利な保存量が存在する。一方、3次元的に捩れたヘリカル系でも、非軸対称なプラズマ形状の中で、磁場構造には幾つかの対称性を与えることができる。準対称性と呼ばれるこの性質は、プラズマの安定性や輸送現象と密接に関連している。膨大な自由度を持つ磁場構造から隠れた対称性をいかに引き出してプラズマの特質を最大化するか？この問いに迫る研究が展開されている。

トカマクプラズマは、炉心内部に誘導される電流によって磁力線に捩れを与えるため、磁場構造は軸対称性を保持している。近年、Wendelstein 7-X や HSX, Heliotron J などに代表される、3次元磁場配位の多様性に立脚したヘリカルプラズマの磁場配位最適化研究が国内外を問わず加速的に展開されている。ヘリカルプラズマは一般に外部コイルの3次元変形によって、プラズマ電流を外部から誘導することなく磁力線に回転変換を与える。そのため、軸対称系のトカマクプラズマとは異なり、3次元実空間から見たプラズマ形状には幾何学的対称性が失われる場合が多い。しかしながら、近代におけるヘリカルプラズマの考え方の本質は、非対称な幾何形状の中にあってもなお内部の磁場構造あるいは粒子軌道に近似的な対称性(準対称性)を与えることが可能となる点にある。典型的には準軸対称性、準ヘリカル対称性、準等磁場性が知られている。一見、プラズマの中に隠れた対称性とも言える磁場構造の準対称性は、その多様な構造に応じて粒子軌道特性や平衡安定性、輸送特性などに対して様々な影響を与えることから、単なる性能の最適化に留まらず、ある特質が最大化された新たなプラズマの創出も期待される。準対称性の概念や磁場配位最適化はヘリカルプラズマで精力的に培われた研究であるが、それらに付随する方法論はトカマクプラズマにおける電流分布や周辺領域での3次元摂動磁場の制御・最適化にも有効である。多様な3次元磁場やプラズマの内部分布の構造を適当な基底で展開して構成される多次元空間として捉えるとき、多次元極値問題やランドスケープ解析といった閉じ込めプラズマの新たな可能性を開拓する研究展開も期待される。

[1] M. Yokoyama, "Quasi-Symmetry Concepts in Helical Systems", J. Plasma Fusion Res. Vol.78, 205 (2002).

# 乱れと磁場の幾何学で紐解く構造形成と機能創発

## 磁場の幾何構造による 自己組織化の活性化と乱流抑制

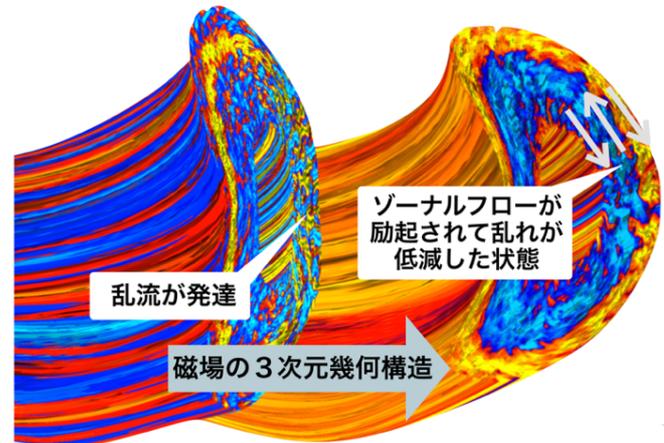
カテゴリー: A2, A3, B1, B3, B4

目指すもの(output):

- 輸送障壁・ゾーナルフロー形成と磁場構造との関連性の解明
- 新たなプラズマ状態や機能の探索手法構築

波及(outcome):

- 数理・情報科学との融合研究による高次元データ解析や素因分析手法の共創
- 幾何構造を持つ場における乱流現象の探究



磁場の幾何構造によるゾーナルフローの活性化

太陽のような恒星、オーロラ、そして核融合炉の炉心など、多彩なプラズマが私達の世界を取り巻くが、その多くは不均一で乱れた状態にある。揺らぎ・乱れに伴う非平衡性や非線形性に由来する構造形成や機能創発メカニズムの理解は、多くの学問に共通する難問である。プラズマ中で生じる自発的な構造転移(輸送障壁や状態遷移)や流れ場形成(ゾーナルフロー)が、乱流場や磁場の幾何構造とどのように関連・結合しているのか? 様々な視点でこの謎を紐解き、乱れから生まれる構造形成を自在に操ることができれば、新たなプラズマの状態や機能の発見に繋がる。

核融合プラズマは熱・物質が激しく流入・流出し、温度・密度について強い不均一性を示す系である。様々な現象において不均一性はしばしば不安定性を引き起こし、波や揺らぎを乱流状態へと発達させる。例えば、磁場閉じ込め炉心プラズマに発達する大小様々な乱流渦はプラズマ中の熱や物質を外へと輸送(乱流輸送)することで閉じ込め性能を阻害してしまう。一方、乱流渦どうしの非線形相互作用により、“ゾーナルフロー”と呼ばれる整然たる「流れ」構造が自発的に形成される現象が知られている。帯状に連なる流れ構造は、それを横切る輸送を抑制する顕著な機能を持つため、炉心プラズマを高い閉じ込め状態へ導く鍵となっている。実験観測や第一原理シミュレーションの進展により、乱流輸送や非線形性に由来した構造形成/自己組織化としてのゾーナルフローや輸送抑制機構の理解が進んでいる。では、乱流の非線形性に由来するそれらの機能を、磁場の幾何構造によって“自在に”引き出すことは可能であろうか? この問いはこれまでの「観測と理解」を追究する研究から自然に導かれるが、これに答える研究は未開拓に近い。非平衡系や非線形乱流現象に潜む構造形成やそれに伴う機能創発を自在に活性化するための方法論を探究することは、プラズマの強い非線形性と巨大自由度に真っ向から挑む研究と言える。そして、それは同時に核融合プラズマの枠組みを超え、物性・天文・生命・生態・社会といった様々な複雑現象の解明にも通ずるものであろう。一見異なる複雑現象に共通する普遍性を系統的に探究するためには、幾何学や数理計画、高次元データ解析といった先端的な数理科学・情報科学との融合的手法が強く動機づけられる。複雑さを定量的に記述するための新たな座標系や定式化など、諸科学と共創的・立体的に拡大する核融合プラズマ研究の新たな展開が始まっている。

[1] 藤澤彰英ほか、“ゾーナルフロー研究の現状と展望”、プラズマ・核融合学会誌第 81 巻第 12 号(2005)

[2] H. Sugama, T. -H. Watanabe et al., “Gyrokinetic Studies of Ion Temperature Gradient Turbulence and Zonal Flows in Helical Systems”, Plasma Fusion Res. 3, 041 (2008)

## 波でプラズマを自在に操れるか？

### 高周波による炉心プラズマ加熱・電流駆動

カテゴリー: A1, B2, B4, B11

目指すもの(output) :

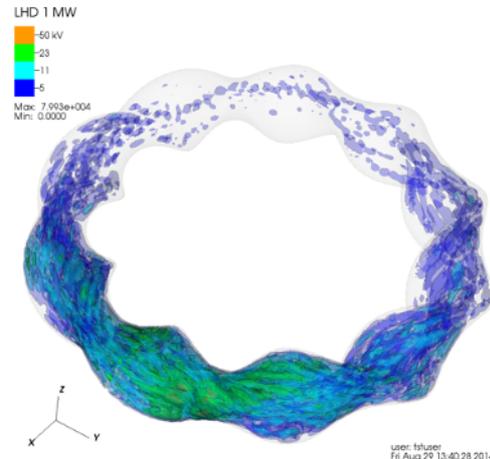
- 高周波による加熱・電流駆動効率の向上
- 核融合炉に適合する高周波システムの開発

波及(outcome) :

- 分布や不安定性の制御による炉心プラズマ性能向上

中心部では1億度に達する核融合プラズマの内部状態は強い乱流により自律的に形成されるが、外部磁場だけで、これを自在に制御することは難しい。高周波による加熱・電流駆動では、入射した波が共鳴条件を満たす荷電粒子のみと選択的に相互作用する。

磁場構造に対して波の周波数や波長、偏光を上手く選ぶことで、電子とイオンの選択的加熱、電流駆動、流れの駆動や高速イオン生成が可能である。実用上の技術的課題はあるものの、磁場閉じ込めプラズマのアクチュエータとして、高周波は多彩な役割を果たしていくことが期待される。



環状プラズマ中の ICRF 波動電場分布

核融合プラズマ中の高周波 (RF) は電子サイクロトロン周波数帯 (ECRF) からイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) までの波に対応している。波・粒子相互作用の計算に必要な理論的定式化は、1990年代頃までにほぼ完了しており、近年の計算技術の急速な進歩によって、現在では環状プラズマのグローバルかつ自己無撞着な波・粒子のシミュレーションが可能となっている。新しく設計する RF システムの性能を定量的に予測することができるという意味で、核融合プラズマにおける波動物理の理解はほぼ完成の域に達していると言えるであろう。応用は、電子及びイオンサイクロトロン共鳴による加熱が基本であるが、ECRF と ICRF の間にある低域混成周波数帯 (LHRF) の波はランダウ共鳴による高い電流駆動効率を持つ。より高度な制御としては、温度分布制御による内部輸送障壁の形成や、局所電流駆動による巨視的不安定性の抑制が実証されている。主な課題は核融合炉に適合する RF システムの開発である。ECRF はプラズマから離れた位置から入射できるため核融合炉のアクチュエータとして最有力であるが、プラズマの性能が上がる高磁場になるほど高電力・定常運転は難しくなる。ICRF を含む LHRF 以下の波は高電力・定常電源の技術が既に確立されており安価であるという利点がある。一方真空中を伝搬しない波をプラズマの近傍で励起する必要があるため、プラズマ・アンテナ相互作用の最小化は解決の難しい大きな課題である。しかし、LHRF は非誘導電流駆動としては最も効率が良く、また、D-T プラズマに少量の不純物を導入すれば ICRF だけで電子とイオンの選択的加熱や高速粒子生成といった多彩な制御が可能である。近年、高温超伝導コイルを用いた LHRF で駆動される強磁場核融合炉コンセプトも提唱されており、RF を主要なアクチュエータとする画期的な核融合炉設計はまだまだ存在するであろう。

[1] 渡利徹夫ほか、小特集「高周波による核融合プラズマ制御の進展」JSPF **81**, 149 (2005)

## 核融合点火を目指した爆縮・加熱高効率化の挑戦

### 慣性核融合における点火燃焼に向けた研究

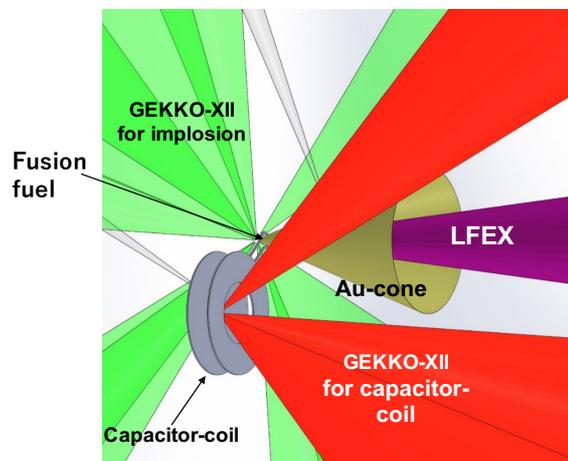
カテゴリー：A1, A2, B6, B10, B14, B15

目指すもの(output)：

- 核融合点火条件の実現
- 建設可能なサイズのレーザー装置による慣性核融合システム的设计と原理実証

波及(outcome)：

- 高効率で点光源極短パルスのX線源・中性子源、EUV光源



高速点火核融合統合実験の燃料とレーザーの配置図。これら複合ターゲットにより高効率に核融合点火が実現できると期待されている。

慣性核融合では、核融合反応によりエネルギー出力ができる状態「点火」に到達するためには、イオン温度を高める（加熱する、1億度が必要）と燃料の密度を高める（圧縮する、固体密度の1000倍の密度が必要）ことである。高速点火と呼ばれる新方式では、圧縮（図の緑のレーザービーム）と加熱（図の紫のレーザービーム）を別々のレーザーで行う。それらの性能を最大限に引き出すために、ターゲット構造変更やレーザー条件の最適化などの多くの研究が進められている。

加熱の効率を高めるために、レーザー装置の開発はもちろん、強力な磁場を加えること、また燃料に新たな構造物を付加するなど多様な新手法が提案されており、研究が進められている。慣性核融合に必要な重イオンやレーザーのパワーをいかに小さくできるか、という課題に向かって挑戦を続けている。核融合発電に必要な重イオンまたはレーザーの特性（エネルギー、ビーム数、エネルギーや波長など）の決定をすること、ならびにできるだけ小さいエネルギーで核融合点火を実現する事が重要である。そのために、現状のキロジュール級の実験装置で、点火に必要なと言われるメガジュール級の実験をスケールダウンした実験を行っている。例えば高速点火レーザー核融合方式では図のように核融合燃料に加熱レーザーガイド用にコーンが取り付けられている。加熱レーザーを効率良く導入する一方で、主燃料の爆縮レーザーによって破壊されない強度を持たせる必要がある。コーンの形状、先端の材質、穴開きコーン、などなど多数の開発課題がある。また加熱レーザー照射時に発生する電子ビームは、角度広がり非常に大きく燃料に届くまでに拡散してしまうという問題があるため、電子ビームを効率良く爆縮燃料まで導くために、非常に強い磁場を用いる手法がある。図に示されるようなキャパシターコイルと呼ばれる小さなデバイスが開発され導入されている。

[1] S. Sakata, et. al., "Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states" nature communications, 9, 3937, (2018)

[2] S. Fujioka, et. al., "Kilotesla Magnetic Field due to a Capacitor-Coil Target Driven by High Power Laser" Scientific Reports, 3, 1170, (2013)

# 多階層複雑系を要素統合で記述する

## 核融合プラズマの統合コード開発

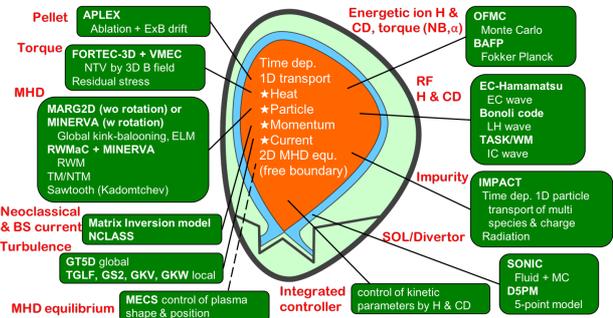
カテゴリー : A1, A2, B3, B4, B5, B13

目指すもの(output) :

- 多階層複雑系の象徴である核融合プラズマの統合記述と、それに基づく予測・制御

波及(outcome) :

- 多階層複雑系の統合記述の観点で諸科学分野との連携・手法循環



核融合プラズマ統合解析コードの一例 : TOPICS (参考文献[2])

地球科学、気象学、経済学など枚挙に暇がない多くの研究分野が『多階層複雑系』の問題に挑戦している。様々な時空間スケールにおける要素過程が非線形結合を通じて階層構造を成し、それら階層がまた非線形的に結合して全体を構成している。個別要素からいかに全体を記述するか、は『多階層複雑系共通の学術的問い』である。多階層複雑系の象徴的媒質である核融合プラズマも、総体として核融合反応を起こすプラズマ状態を生成し、さらに、長時間にわたってその状態を維持・制御することを目指してこの学術的問いに挑戦している。

核融合プラズマは多様な時空間スケールを有する物理過程が複雑に連関する多階層複雑系媒質であり、総体として核融合反応を持続的に起こしうる状態を実現する必要がある。それら個別の物理要素を記述する研究は、この学術課題集にあるように大きく進展している[1,2]。例示すれば、閉じ込め磁場構造の幾何平衡、プラズマの運動論的方程式、電磁・輻射流体方程式、超高強度レーザープラズマ相互作用、高密度爆縮過程、高エネルギー粒子挙動など、PCレベルの汎用計算コードから「富岳」を用いる第一原理シミュレーションコードまでバラエティに富んでいる。それらを連携させて核融合プラズマの全貌を記述する「統合コード」の開発に挑戦している。また、核融合炉では計測器が限定されるため、統合コードを用いた予測に基づく実時間複合制御が必須であり、それら制御手法の開発にも取り組んでいる。その一例である TOPICS (トピックス: 量子科学技術研究開発機構を中心に開発・運用) を上図に示す。多くの要素コード(図の緑枠がそれぞれの要素に対応)が結合して核融合プラズマの全体記述を目指している様子を示している。計算負荷や資源の観点から、個別要素コードを全てそのまま連携させることが現実的でないため、簡約化モデルや大規模データベースの活用を図っている。さらに、多階層複雑系における共通の問いである『個別要素が形作る階層、それら階層間の結合や総体としての全体記述』は単なる要素過程の集合体だけでは不十分なため、全体の予測や制御の観点で意味のある結合・記述方法を模索する必要がある。この過程で、要素過程の物理的追究と相補的なアプローチとして、数理モデリングや機械学習、データ駆動分野との連携研究が進展しつつある。多階層複雑系の統合記述やその検証の観点で多様な学術分野との連携や手法循環の基盤として機能しうる研究課題である。

[1] 三間園興ほか、小特集「高速点火核融合の統合シミュレーション—多階層プラズマシミュレーションシステム“FI3”—」、プラズマ・核融合学会誌 82 (2006) 135-170.

[2] 林伸彦ほか、小特集「統合コードによる磁場閉じ込め核融合プラズマシミュレーションの現状と今後の展望」、プラズマ・核融合学会誌 95 (2019) 423-460.

# 統合コードでレーザー核融合の点火・燃焼を予測する

高速点火方式レーザー核融合の物理素過程の解明と点火・燃焼の炉心設計

カテゴリー : A1, A3, B6, B9, B13, B14

目指すもの(output) :

- 高速点火レーザー核融合の爆縮から核燃焼過程までの物理現象の理解と, 点火実証・高ゲインの核融合燃焼の炉心プラズマ設計

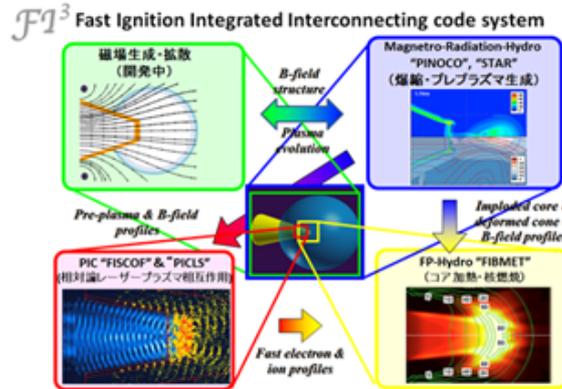
波及(outcome) :

- レーザー生成プラズマの現象の理解とその応用への貢献

高速点火方式レーザー核融合[1]は, ハイパワー・ナノ秒レーザーにより燃料を固体密度の数千倍まで圧縮し, その最大圧縮時に  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 級の高強度レーザーを照射して相対論的高速電子ビームを生成し, この電子ビームにより圧縮燃料の一端を点火温度まで高速に加熱することで核燃焼を点火させる方式である. これらすべての現象を数値計算により予測することが求められるが, 現象の時間・空間スケール・物理階層(運動論的~流体的)が異なるため, これらを全て網羅できる統合コードの開発が期待されている

さまざまな階層の物理現象を内包する高速点火レーザー核融合の爆縮から核燃焼過程までの全過程を対象とした数値シミュレーションの実現を目指し, 輻射流体コード・運動論的相対論電磁粒子コード(PICコード)・流体-粒子ハイブリッドコードからなる統合コード開発を行い, 高速点火レーザー核融合の実験解析並びに将来の点火実証・高ゲイン核融合燃焼が可能な炉心プラズマ設計を行う. 本統合コード開発により, レーザー核融合プラズマを推進材として用いる核融合ロケットの炉心プラズマ設計や, ハイパワーレーザーによる高圧物性, レーザーアブレーションプラズマによる光源開発, 相対論レーザープラズマ相互作用による高エネルギー密度状態の形成ならびにこれを利用した量子ビーム生成源開発等のレーザープラズマ科学・応用に理論・シミュレーションの面から幅広く貢献する.

[1] 三間国興ほか、特集「レーザー核融合とレーザープラズマ応用の発展 1.2.3 高速点火核融合の展開」、プラズマ・核融合学会誌 82 suppl. (2005) 42-47.  
 [2] 三間国興ほか、小特集「高速点火核融合の統合シミュレーション-多階層プラズマシミュレーションシステム“FI<sup>3</sup>”-」、プラズマ・核融合学会誌 82 (2006) 135-170.



階層の異なる輻射流体コード・流体-粒子ハイブリッドコード・相対論電磁粒子コードにより構成される統合コード

## 乱流の理解は深化する

### 実空間、速度空間から位相空間 計測への展開

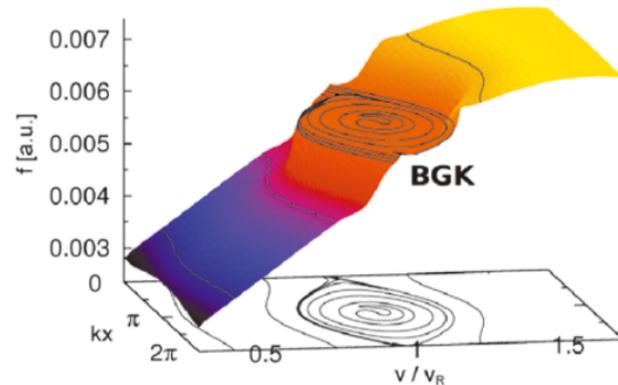
カテゴリー: A1, A2, B10

目指すもの(output) :

- プラズマ乱流輸送現象の解明
- 新たな閉じ込め理論の探索

波及(outcome) :

- 効果的な乱流抑制制御手法の確立
- 多次元かつ大規模データ処理手法



位相空間内で生じた粒子分布関数の歪み  
[参考文献 1]

高い自由度を持つ核融合プラズマを効果的に制御するためには、プラズマの特性を徹底的に知っておくことが望ましい。人体の免疫メカニズムを理解した上で医者が治療を施すことと同様に。なぜプラズマはこのような構造を自発的に形成するのか？なぜ不安定になって粒子やエネルギーを放出するのか？これらの答えを導くため、プラズマ診断手法は発達してきた。そして今、実空間での形状変化だけでなく、粒子の速度空間の変化をプラズマ中の様々な事象が発生している位置において観測すること、すなわち位相空間計測ができるようになってきた。これは中性流体や固体では不可能なプラズマだからこそ知ることのできる新しい物理の地平を切り拓く研究である。

非平衡なプラズマの閉じ込めには各種の不安定性によって生じた乱流が大きな影響を与えている。トーラス型磁場閉じ込めプラズマでは、自律的に形成された構造が、流れを生み出し、この流れにより構造自身が維持あるいは変形することが知られている。また、粒子供給や加熱などの外部入力となされることによりプラズマの形状や閉じ込め特性が変化することが知られており、まさにこれらをアクチュエータとしてプラズマを制御している。自発的にあるいは外部入力により温度や密度の勾配が強くなると、その勾配変化によりプラズマの安定性が変化して乱流が発生し、ある場合にはその非線形性から乱流を抑制するような機構が駆動される。このような物理現象を正確に理解するために、実空間における構造を詳細に観測するための努力が続けられてきた(例えば、イメージング計測器のような2-3次元計測器の開発)が、近年これだけでは十分でなく、速度空間の変化を知る必要があることが指摘されるようになってきた。一般にプラズマ加熱のスキームでは、はじめ各粒子には非等方にエネルギーが与えられ、それが衝突・拡散によって等方化していく。しかし、短い時間スケールで変化するような事象がプラズマの閉じ込めを決定する場合や低衝突度の核燃焼プラズマでは、この速度空間の非一様性やその歪が重要になる。したがって、プラズマのさまざまな領域でこの速度空間の変化を測定すること、すなわち位相空間計測とそれによる粒子・熱輸送の理解の進展が、今、求められている。イオンの速度空間分布の歪を分光学的手法で発光波長スペクトルの非マックスウェル分布形状から推定する手法など新しい計測手法が提案され、初期的な観測が始まった。

[1] 小菅佑輔ほか、解説「乱流プラズマ研究の位相空間への展開」、プラズマ・核融合学会誌 90 (2014) 289-295.

# 高エネルギー粒子を計測する!

## 高エネルギー粒子位相空間分布計測

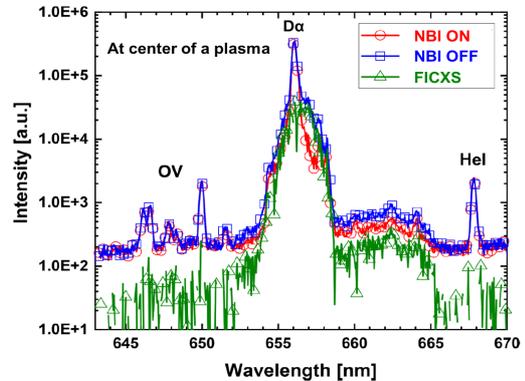
カテゴリー: A1, B2, B4, B5, B6, B13

目指すもの(output):

- 高温プラズマ中の高エネルギー粒子の速度分布・空間分布の取得
- 高エネルギー粒子輸送の予測・制御
- 非線形現象の予測・制御

波及(outcome):

- 核融合炉の実現と高効率化や炉心プラズマの閉じ込め時間に対する条件の緩和
- 宇宙物理、非線形物理、実空間・速度空間物理、高速制御技術、予測制御技術



高速イオン荷電交換分光計測を用いた

高温プラズマ中の高エネルギー粒子計測結果

(Y. Fujiwara et al 2020 Nucl. Fusion 60 112014)

核燃焼プラズマは核融合反応で生成される高エネルギーアルファ粒子がエネルギー源となり高温状態が維持される。プラズマ中の高エネルギー粒子の情報を取得することは、プラズマの加熱物理及び高エネルギー粒子の輸送物理を明らかにし、予測するために必要である。しかし、1億度以上のプラズマ内部の情報を得ることは容易ではない。今後、ITERや原型炉に向けて高時間分解能・高空間分解能で情報量が多い革新的な高エネルギー粒子計測器の研究開発が期待される。

核燃焼プラズマは核融合反応で生成される高エネルギーアルファ粒子がプラズマを加熱することで、核融合反応に必要な高温状態を維持し自律的に燃焼が持続される。このため、高エネルギーアルファ粒子の良好な閉じ込めが核燃焼プラズマの実現には必須の条件である。では、良好な閉じ込めを実現するためには、高温プラズマの中で高エネルギー粒子は“どのような分布”で、“どのような速度”で、“どのような方向”に動いているのか情報を取得する必要がある。また、波動粒子相互作用などによりプラズマが不安定化した場合、閉じ込めの劣化が指摘されていることから、高エネルギー粒子は“どのように輸送され、損失されるのか”という情報を実験的に取得する必要がある。このように、高温プラズマ中の高エネルギー粒子の情報（速度分布、空間分布など）を実験的に取得することは、プラズマの加熱物理を把握することになる。更に、非線形的に発生する異常輸送を予測するための指標となり、その物理メカニズムを明らかにすることで、高エネルギー粒子の閉じ込めを改善する方法の開拓が期待されている。現在用いられている計測装置は、中性子検出器、中性粒子検出器、荷電交換分光計測器が代表的である。また、トムソン散乱法やBe不純物とアルファ粒子の反応で発生するガンマ線により実速度空間分布計測をする方法などが研究開発されている。

[1] 長壁正樹ほか、講座「輸送解析から見た高エネルギー粒子計測手法」、プラズマ・核融合学会誌（2004）

[2] 永岡賢一ほか、小特集「ジオスペースと実験室におけるプラズマの波動粒子相互作用の進展」、プラズマ・核融合学会誌（2021）

# 先進的中性子計測器で核融合プラズマを診る

## レーザー核融合核反応計測

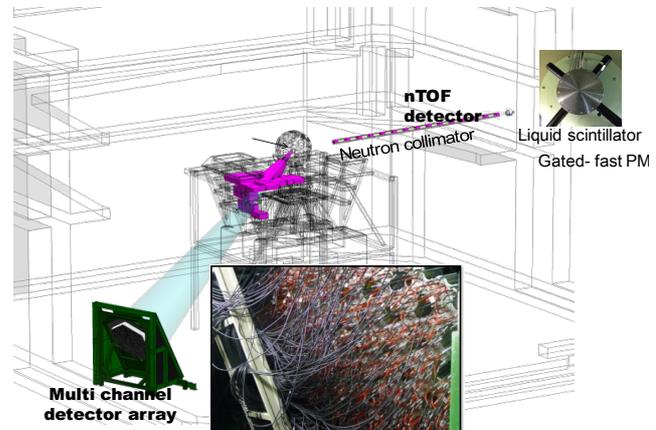
カテゴリー : A1, A3, B6, B10, B14, B15

目指すもの(output) :

- レーザー核融合核反応生成粒子を計測し、イオン温度や密度などのプラズマ状態を診断する

波及(outcome) :

- 中性子源応用、放射線計測機、ホウ素中性子捕獲(BNCT)治療



レーザー核融合核反応計測用中性子計測器

核融合反応で生成する中性子を計測することで、核融合点火条件に必要なイオン温度や密度・半径を知ることができる。中性子計測には複雑な装置開発が求められる。これまでは時間空間平均の中性子計測であったが、これだけでは不十分である。レーザー核融合プラズマを診ることができる、超高速時間分解能、空間分解中性子計測が求められている。

時間・空間平均された核融合プラズマのイオン温度は、中性子の運動エネルギースペクトル広がりから計測することができる。この計測において中性子計測器に求められる時間分解能は1 ナノ秒程度であり、高速応答のシンチレーターおよび高速光検出器で計測が可能であった。さらに、核融合プラズマの時間発展を計測しようとする、1 ピコ秒の時間分解能が必要となり、従来装置とは全く異なる装置開発が必要となる。また核融合反応の空間分布を計測する場合には中性子のイメージング計測器が必要となる。これには高精度な中性子ピンホールと、空間分解型中性子イメージャーが必要となる。

これら高分解能中性子計測器や、レーザー駆動中性子源は核融合研究のみならず多数の応用がある。またレーザー核融合による中性子源は、点光源・短パルス、単色エネルギーで輝度が高いことから、他の手法では得ることができない非常に高品質の中性子源である。この中性子を利用した核物理研究、中性子ラジオグラフ、中性子医療の応用研究も行われている。

[1] J. Frenje, et. al., "Nuclear diagnostics for Inertial Confinement Fusion (ICF) plasmas", Plasma Phys. Control. Fusion 62, 023001, (2020)

[2] Y. Arikawa, et al., "The conceptual design of 1-ps time resolution neutron detector for fusion reaction history measurement at OMEGA and the National Ignition Facility", Review of scientific instruments, Rev. Sci. Instrum. 91, 063304 (2020);

# 核融合研究から芽吹く新たなインフォマティクス

## フュージョン-ドリブン インフォマティクス

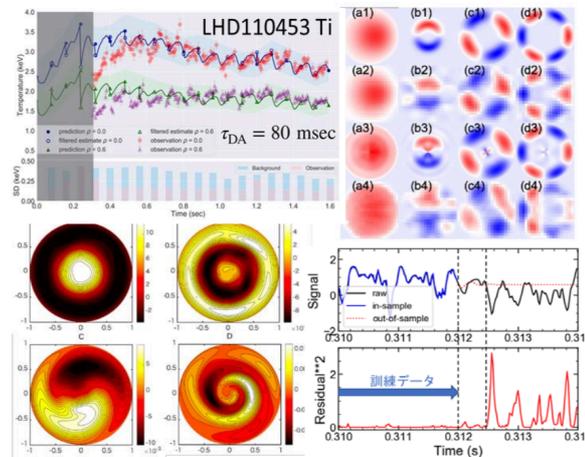
カテゴリー : A1, A2, A3, B13

目指すもの(output) :

- データサイエンスとの協働による核融合研究の加速

波及(outcome) :

- 多階層複雑系研究の新展開
- データサイエンス分野への実データ実践の多様な機会の提供



データサイエンス手法の適用による核融合プラズマ研究の例【図の提供：(各段左から右へ) 森下侑哉 (京大)、大館暁 (核融合研)、佐々木真 (日大)、稲垣滋 (九大)】

核融合プラズマは、多階層複雑系の象徴的な研究対象である。それ故に、「要素還元、演繹」的なアプローチが取られることが多く、それら各要素での理解や知見に基づく統合が行われている。一方、近年、「〇〇インフォマティクス」とも称される「帰納的な推定・記述」のデータ駆動的アプローチが、社会構造変革、さらには研究手法の革新をもたらしている。核融合研究は、世の中に見られる多様なデータが凝縮しており、データサイエンス分野の研究者にとっても「実データ実践の場」として新たなインフォマティクスを芽吹かせる魅力的な舞台である。

核融合プラズマは多様な時空間スケールを有する物理過程が複雑に関連する媒質である。これまで、「階層化された演繹的な」研究が大きく進展し、それらの階層統合へと進展している。一方、社会に目を向ければ、データサイエンスの進展や波及による様々な変革には目をみはるものがある。そのデータサイエンス分野との協働によって、多種・多様・大規模なデータを基盤とした「帰納的」視座を導入することで、核融合プラズマ研究を加速できる可能性がある。例えば、階層化を伴わない全体挙動のモデリング (データ同化)、直接測ることができないプラズマ内部構造の推定 (トモグラフィ)、ディスラプション回避や乱流構造抽出 (高次相関時系列データの変化点検出や予測)、磁場の幾何構造探索 (数理計画や高次元データ可視化など)、衝突輻射モデル構築 (マルコフ連鎖モンテカルロ法の活用) など、様々な取り組みがなされ始めている[1,2]。演繹と帰納の協奏を図ることで、多階層複雑系研究の新展開を学术界に提示できる可能性を秘めている。また、入力と応答の関係の帰納的記述を通じて、物理研究から制御工学研究への展開をもたらさう。

一方、核融合研究は、データサイエンス分野の研究者にとっても、「実データ実践の場」として魅力ある舞台である。例えば、機械学習で得られる知見の解釈可能性研究はプラズマの物理機構解明研究と相補的に取り組む格好の研究題材である。このように、データサイエンス分野との協働は、核融合研究、及び、データサイエンス分野双方の新展開と研究加速をもたらさう。

[1] 浜口智志ほか、小特集「プラズマ・インフォマティクス —データ駆動科学のプラズマへの応用」、プラズマ・核融合学会誌 95 (2019) 535-561.

[2] 今寺賢志ほか、小特集「磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるデータ駆動的アプローチによる物理モデリング」、プラズマ・核融合学会誌 97 (2021) 64-95.

# 相互作用するプラズマと物質

プラズマは第4の物質状態としばしば称される。固体・液体・気体の状態にある様々な物質とプラズマにおける多相間の相互作用の理解は、核融合炉の実現にとって不可欠であるばかりでなく、横断的な理工学課題として根が広がっている。

## 壁と磁場の形状で熱と粒子を制御する

### 幾何・磁場形状による ダイバータ最適化

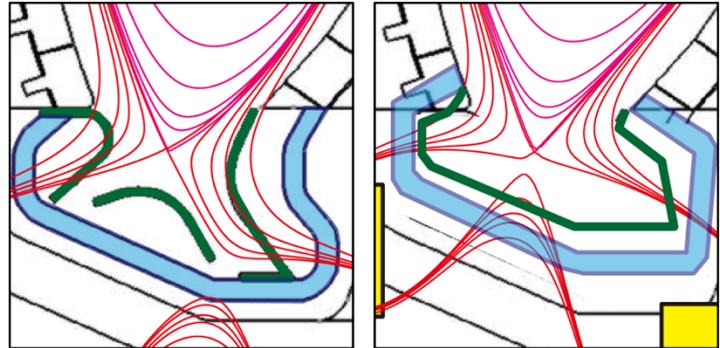
カテゴリー: A1, B1, B7, B8, B9

目指すもの(output) :

- ダイバータの幾何形状・磁場配位による熱・粒子制御の改善

波及(outcome) :

- プラズマ・壁相互作用の理解の深化
- 磁場によるプラズマ・不純物輸送制御



様々なダイバータの幾何形状(磁場とダイバータ構造)  
(赤線は磁気面、緑はダイバータ構造を表す)

炉心から排出されたヘリウム灰やプラズマを受け止め、その排気と除熱、さらに炉内不純物の制御などを実現する機構は「ダイバータ」と呼ばれ、磁場閉じ込め装置において重要な役割を担う。しかし、多くの熱・粒子が限られたダイバータ領域へ集中するため、最終的にそれらを受け止めるダイバータ板の損傷が深刻な課題となる。ダイバータの排気機能、不純物制御機能を向上させると同時に、熱・粒子による損傷を低減させるために、様々なダイバータ幾何形状や磁場配位の提案が行われ、実験や数値シミュレーションによりその有用性の検証が進められている。

炉心から排出されたプラズマや核融合反応で生じるヘリウム灰は、炉心を取り囲む周辺領域の磁場に沿って輸送されダイバータへ到達する。ダイバータでは再結合による中性化や圧縮、除熱が行われ、最終的にはガスとして排気される。また、プラズマと炉壁との接触面を減らすことで、炉心プラズマからの炉壁保護と、炉壁から発生する不純物を制御する役割も担う。しかし、ダイバータはその構造・役割上、高い熱・粒子負荷にさらされ、ダイバータ板の損傷が課題となり、損傷低減のため非接触ダイバータ運転が考えられている。効率的な非接触ダイバータの形成、ダイバータ機能の向上、さらには、それらと高性能な炉心プラズマとの両立を目指し、様々なダイバータ幾何形状や磁場配位が提案されている。ダイバータ幾何形状としては、磁力線とターゲットの角度を浅くしたり、ダイバータ領域を磁力線に沿って長くしたりすることで、受熱面積の増加や非接触ダイバータの効率的な形成・維持を図っている。また、限られた空間で同様な効果をねらった新しい磁場配位も提案されている。例えば、Super-X ダイバータは、ダイバータ領域に2nd X点（ポロイダル磁場の鞍点）を配置し磁力線長を稼ぐとともに、ターゲットを装置外側へ引き出すことで、受熱面積を増大させている。Snow Flake ダイバータは、通常四重極である X点を六重極にすることで、磁力線の延長と受熱面積の増大を図っている。その他にも、X ダイバータ、アイランドダイバータ等、様々な概念のダイバータ配位が提案されている。また、高熱負荷と高損耗を克服するために、固体材料ではなく液体金属を用いた液体ダイバータも提案されている。新しいダイバータ概念はその評価と共に、まだ克服すべき課題（制御性、工学的実現性、等）があるものも多く、研究が進められている。

[1] M. Kotschenreuther, et al. Phys. Plasmas 14, (2007) 072502

[2] D. Ryutov, et al. Phys. Plasmas, 14 (2007) 064502

[3] N. Asakura, et al., Transactions of Fusion Science and Technology 64 (2013) 70

# 磁場を乱して、壁を守る

## 外部摂動磁場による周辺プラズマ制御

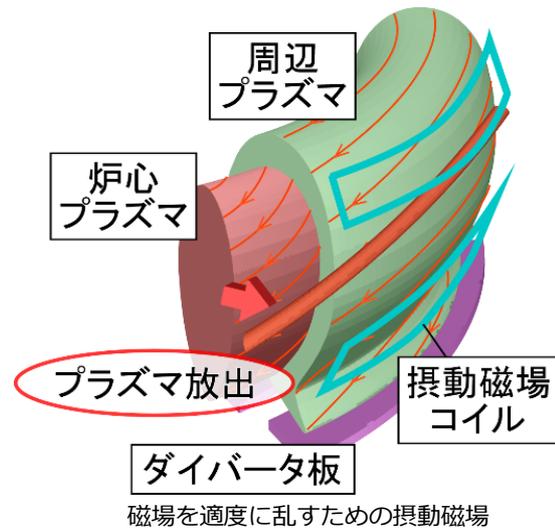
カテゴリー: A1, A2, B1, B3, B7, B13

目指すもの(output):

- ELM 緩和・抑制による過渡熱負荷低減
- 周辺プラズマ変形や放射ダイバータ維持による定常熱負荷低減

波及(outcome):

- 3次元磁場効果・物理の理解



1億度のプラズマを点火する核融合装置の中では、磁場のカゴによりプラズマ周辺部に急勾配をもつ温度・密度分布が形成される。この急勾配は核融合反応を起こす上では好ましいものであるが、同時に、カゴの外側へプラズマを間欠的・周期的に放出する現象を引き起こすことがわかっており、プラズマが運ぶ高熱流束により炉壁の損傷に繋がることが懸念される。そこで、プラズマの外側からあえて磁場を乱すことで、カゴを適度に壊して勾配を緩やかにし、プラズマ放出現象から炉壁を守る研究が進められている。

環状磁場閉じ込め装置では、磁場のカゴを使い高温の炉心プラズマを閉じ込める。特に高性能なプラズマを生成する際、カゴの境界付近には、高いプラズマ圧力勾配に起因する不安定性である『周辺局在化モード (ELM)』が発生し、高熱流のプラズマがカゴの外側へと間欠的・周期的に放出される。放出されたプラズマは、磁力線に沿って耐熱性の材料 (ダイバータ板) まで運ばれるが、このときダイバータ板が損傷することが強く懸念されている。カゴの閉じ込めが良いほど、プラズマの放出間隔は長くなり、これは一度に放出される熱量が膨大となることを意味する。そこで、プラズマ外部に3次元的に設置されたコイルに電流を流し、磁場に摂動を与えてカゴを少しだけ壊すことで、放出間隔を短くする方法が提案・実証されている。さらにこの摂動磁場は、カゴの外側の磁力線構造をも変形させることから、ときにはダイバータ板に触れるプラズマの面積を増やし、あるいは光の形態でプラズマを冷やす領域 (放射領域) を空間中に固定して、定常的なダイバータ熱負荷分布にも影響を及ぼす。ここで重要な点は、磁場の乱し方が適度でないと、炉心プラズマの性能まで劣化してしまうことである。磁場のカゴを適度に壊して炉壁を守れるか、実験ならびに数値シミュレーションを駆使した研究が鋭意進められている。

[1] 武智学、小特集「トカマクにおける三次元 MHD 研究の現状と他の閉じ込め配位からの寄与/4. 巨視的不安定性の制御における外部摂動磁場の効果」、プラズマ・核融合学会誌 **88** (2012) 162-167.

# 気体を使って高温プラズマを手なずけろ！

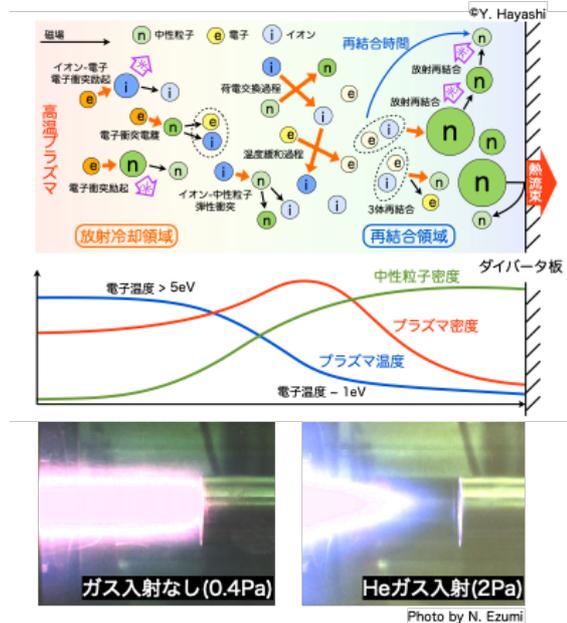
プラズマ-気体相互作用による  
ダイバータプラズマの熱粒子束制御,  
非接触プラズマの生成・制御

カテゴリー: A1, B3, B7, B8, B9, B12

目指すもの(output) :  
高性能炉心プラズマとダイバータ領域の熱粒子  
負荷の低減を両立するプラズマ制御方法の確立  
核融合炉の成立に必須となる非接触プラズマの  
構造形成の制御方法の確立

波及(outcome) :  
プラズマ-気体の相互作用、原子分子過程の理解  
プラズマ気相反応を利用した産業応用

磁場閉じ込め型核融合プラズマ装置において、炉心から流出するプラズマの熱と粒子の制御を行うダイバータ領域への熱粒子負荷を低減するために、プラズマと気体との相互作用によりダイバータ板の手前でプラズマを消滅させて「非接触プラズマ」を形成し、その空間構造や放射領域を適切に制御することが核融合炉成立の重要課題のひとつとなっている。非接触プラズマの安定制御と核融合炉心プラズマとの両立の実現には、プラズマと気体との複雑な相互作用の理解が求められる。



プラズマ中の電子、イオンと気体原子・分子（中性粒子）はさまざまな反応を起こす。電子温度が高い領域では、電子衝突による中性粒子の電離、励起、分子の解離などを引き起こし、それに伴い電子はエネルギーを失い、温度は低下する。イオンと中性粒子の間では、弾性衝突や荷電交換反応によって、粒子の拡散やイオン温度の低下が生じる。プラズマの温度が低くなると、イオンと電子は再結合して中性粒子となり、プラズマは消滅し、その密度は低下する。現在建設が進められている国際熱核融合実験炉（ITER）では、ダイバータ領域への熱粒子負荷を低減するために、プラズマと気体との相互作用によりプラズマ熱流を周囲へ散逸させる部分非接触プラズマを利用したダイバータ運転モードが採用されている。さらに原型炉ではより制御が困難と考えられる、完全非接触プラズマの安定維持が求められている。その実現には、プラズマの挙動とも関連させながら、プラズマと気体との極めて複雑な反応素過程やその空間分布を総合的に理解することが求められる。プラズマと気体の混在する状況は、半導体プロセスや電気推進機などのプラズマ応用の場面とも共通する部分が多く、気相・材料界面における物理化学過程や種々の化合物合成、機能性薄膜生成など、産業応用分野との関わりも深い。

[1] 大野哲靖, 星野一生, 小特集「原型炉に向けてのダイバータの研究開発課題 “3. 非接触プラズマと熱・粒子処理に関するダイバータ実験研究およびモデリングの現状と研究開発課題”, プラズマ・核融合学会誌, vol. 92, No. 12, 877-885 (2016).

# プラズマと物質が触れ合うことにより起こる現象を理解・制御する

## プラズマ－壁相互作用に関する研究

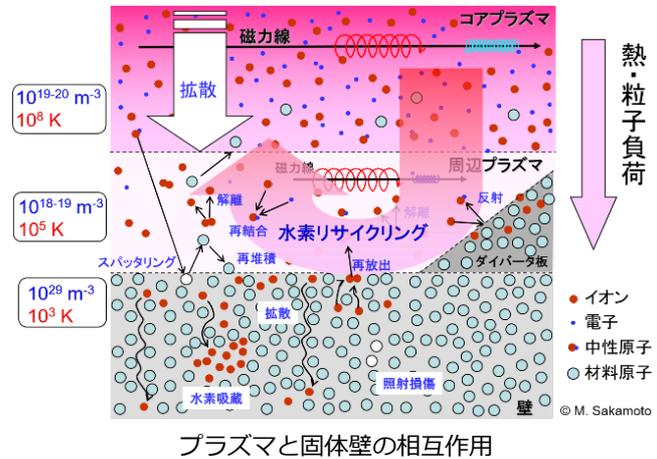
カテゴリー: A1, B7, B8, B9, B13

目指すもの(output) :

- プラズマ－壁相互作用の高精度な理解と制御
- 核融合炉内の壁問題解決

波及(outcome) :

- 新材料の創成と産業応用



核融合装置には必ず壁が存在し、当然ながら、壁が健全な状態を維持できなければ炉は成立しない。1 億度のプラズマは磁場の力で宙に浮いているものの、数万度～数十万度のプラズマは壁と直接接触することで、多種多様なプラズマ－壁相互作用を引き起こす。壁構成粒子のプラズマ中への混入や、燃料ガスの吸蔵・放出現象を介して、壁の存在は炉心プラズマに多大な影響を与える。長期にわたる炉の運用を想定する上で、その実現には、壁に関連する諸現象を正しく理解・予測し、適切に制御することが求められる。

核融合装置には、プラズマを覆う壁が必ず存在し、プラズマと壁の間では多種多様な相互作用 (Plasma-wall interaction (PWI)もしくは Plasma-material interaction (PMI)) が発生する。プラズマや壁材料を構成する粒子種は、水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴン、タングステン、ベリリウム、炭素など多岐にわたり、それぞれが固相・液相・気相・プラズマ相として共存する。多数の素過程の組み合わせが、壁への熱負荷、損傷、ガス吸蔵・放出特性、表面構造、材料物性等を決定し、壁から飛び出す中性ガスや金属粒子が、前面および炉心のプラズマ特性を変化させる。定常核融合発電炉の実現には、到来する膨大な熱・粒子流に対して壁の健全性を保つことは前提条件であり、長い時間スケールでの粒子循環を整えた上で、炉心プラズマ性能を維持しなければならない。信頼性ある炉設計を成立させるためには、プラズマ－壁相互作用を正しく理解し、高精度で予測するのみならず、適切に制御する必要がある。解析解の存在しないマルチスケールの複合現象に対し、小型～大型装置を用いた実験や、各種計算コードを用いた数値シミュレーション研究が精力的に進められている。

[1] 坂本瑞樹 他、小特集「マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解の現状」、プラズマ・核融合学会誌 **84** (2008) 917-947.

## 核融合プラズマと壁の間で数百 MW の熱を散らす

### 核融合炉ダイバータにおける熱・粒子制御

カテゴリー: A1, A3, B7, B8, B9

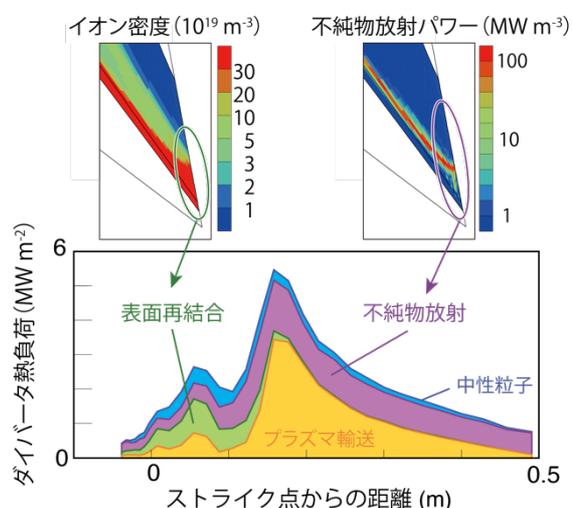
目指すもの(output):

- 核融合プラズマ・炉設計と整合するダイバータにおける熱・粒子制御

波及(outcome):

- 核融合炉設計、プラズマ・中性粒子・不純物間の相互作用の理解

核融合炉では、数億度の炉心プラズマを維持しながら、壁近傍ではプラズマを 1 万度程度まで低温化させ、壁の損傷を防がなければならない。そのため、炉心プラズマから排出される数百 MW ものエネルギーのほとんどを、壁に到達する前に放射や非接触ダイバータによって散逸させる。非常にチャレンジングであると同時に、核融合炉の成立を左右する最重要課題の一つである。そのため、ダイバータプラズマ輸送、非接触ダイバータ、原子分子過程、不純物輸送等に加え、炉心プラズマ設計、工学設計も含め、総合的な検討が必要とされている。



ダイバータ熱負荷と近傍の密度・放射分布

周辺・ダイバータプラズマは、炉心から高エネルギーのプラズマが排出される一方、工学的な境界条件である壁と接する。最終的にプラズマを受け止めるダイバータを工学的に成立させるためには、炉心からプラズマとして排出される数百 MW ものエネルギーの 70~90%を周辺・ダイバータ領域で処理する必要がある。さらに、ダイバータ機器の寿命の観点からは、壁損耗の原因となる粒子負荷も十分に低減させる必要があり、ダイバータ全面を非接触ダイバータ状態にすることが好ましい。このような炉心プラズマとダイバータを両立させる運転は、核融合炉では特に困難でチャレンジングな課題となり、設計にも大きな影響を与える。現在のところ、希ガス不純物の放射による周辺プラズマ冷却と非接触ダイバータを組み合わせた熱制御を基本方針として検討が進められている。ダイバータ熱負荷としては、プラズマのエネルギー輸送の他に、表面再結合による熱負荷（プラズマが壁表面で再結合する際の開放される内部エネルギー）、不純物や中性粒子の放射パワー等による熱負荷を考慮する必要がある。これらの熱負荷を総合的に減少させるためには、非接触ダイバータを空間的に拡大し、安定的に維持する必要がある。プラズマだけでなく、原子分子過程や不純物輸送、及びそれらの相互作用について理解を深め、それらを積極的に利用した運転領域の開発が必要である。さらに、ダイバータ熱負荷低減シナリオは、当然、高性能な炉心プラズマと両立していなければならない。そのため、非接触ダイバータや不純物制御に有利な高密度運転、高不純物放射運転等、運転シナリオの実験的な研究開発も急務となっている。

[1] 上田良夫、他、小特集「原型炉に向けてのダイバータの研究開発課題－現状と展望－」、プラズマ・核融合学会誌、92 (2016) 868

# プラズマを生み出し加熱する

超高温あるいは超高密度のプラズマを創りだすための生成・加熱技術は、核融合炉にとって必須のものであると同時に、極限状態を扱う物理学や、産業・医療にも広く波及する技術でもある。先端的な技術開発に動機づけられたサイエンスも広がっている。

# 波で核融合炉心プラズマを生成できるか？

## 高周波によるトカマクの非誘導立ち上げ

カテゴリー: A2, B5, B11, B12

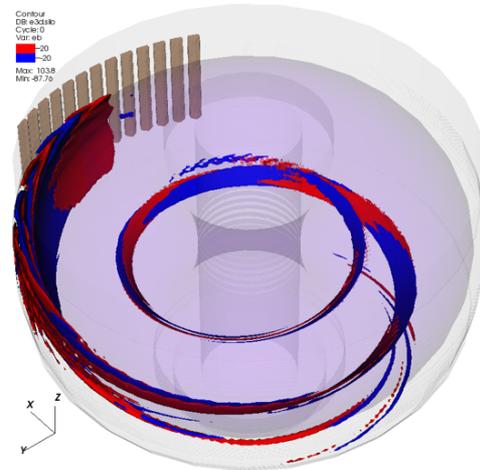
目指すもの(output) :

- 中心ソレノイドの除去によるトカマク性能向上

波及(outcome) :

- 炉心プラズマ制御の効率化
- トカマク定常運転の実現
- 自己組織化する複雑系の制御

トカマク配位は、環状プラズマ中に電流を駆動することで形成される。現在は中心ソレノイド (CS) を用いる方法が主流であるが、これを高周波で置き換え、CS を除去することで、トカマクの性能を大幅に向上できる可能性がある。波の伝搬や、波に加速される電子の輸送は、プラズマの分布に強く依存するため、磁力線のトポロジーが大きく変化するトカマク配位の形成過程を、全て波により制御することは一見困難である。しかし、上手く条件を設定することで、波だけで自律的にトカマク配位が形成されることが分かっている。自己組織化する複雑な系の効果的な制御手法の確立は、RF で駆動される画期的な核融合炉の実現につながるかもしれない。



高周波駆動トカマク型プラズマ中の  
波動電場分布

長時間運転し続けなければならないトカマク型核融合炉には、高周波 (RF) によるプラズマ電流駆動が必要と考えられているが、プラズマ立ち上げには中心ソレノイド (CS) を用いるという考え方が一般的である。しかし、CS の除去により装置中心部の空間を空けることができれば、低アスペクト化 (高ベータ化) やトロイダル磁場の増強によりトカマク型プラズマの性能を飛躍的に改善できる可能性がある。RF によるトカマクの非誘導立ち上げは、CS の除去が必須とされている球状トカマクのコミュニティで、大学等の小型装置を中心に積極的に研究されてきた。現在、電子サイクロトロン波または低域混成波のみによるトカマク配位の形成が可能であることが実証されている。課題は非誘導立ち上げの統一かつ定量的な理解と、それによる電力効率の改善である。RF を用いる電流駆動においては、一般に高エネルギー電子が多く生成される。CS を用いない完全 RF 駆動プラズマにおいては、この非熱的な電子分布が MHD 平衡を支配しているが、生成された平衡磁場配位は逆に波の伝搬・吸収と高エネルギー電子の輸送を決めている。この波・粒子・MHD の相互作用によって自律的にトカマク配位が形成されることが実験的にはわかっているが、このような分布形成を定量的に理解することが必要である。RF による駆動においては、位相空間における波と電子の共鳴的相互作用を上手く利用することで、精密な分布制御ができる可能性がある。トカマク型プラズマの RF 立ち上げの物理を基礎的なレベルで理解することは、RF による高性能な定常炉心プラズマの実現にも役立つはずである。

[1] 前川孝ほか、小特集「球状トカマクの実用炉への展望」第 4 章「CS 無しの立ち上げ、定常維持は可能か？」JSPF **80**, 935 (2004)

## 負イオンの物理が拓く高効率粒子ビーム技術

### 次世代負イオン源・高効率イオン中性化技術の研究開発

カテゴリー: A1, A2, A3, B11, B15

目指すもの(output):

- セシウム添加を必要としない負イオン源や高効率な中性粒子ビーム、高集束ビーム、メンテナンス及び損傷が少ない中性粒子ビームの開発

波及(outcome):

- 核融合炉の実現 - 高エネルギー粒子と電流駆動の関連性を明確化 - 高速制御・予測制御技術 - 加速器・医療・産業分野への負イオンビーム技術の普及、大電流加速器システム



負イオンを用いた大電流・高エネルギー中性粒子ビーム

核融合プラズマでは、核燃焼の維持や電流を流すために大電流・高エネルギー中性粒子ビームをプラズマに入射する必要がある。中性粒子ビームは、正イオンに比べ高エネルギー条件でも中性化効率の高い負イオンをビームとして引き出し、中性化させビームを生成する。しかし、多量の負イオン生成のためにはイオン源内のプラズマ中で電子を原子または分子に付与させる必要性がある。また、ビームの高い中性化効率や集束性を得る必要性がある。このような課題を解決する新しい中性粒子ビームの基礎研究や技術開発が求められている。

トカマク型核融合炉の特徴は、プラズマに数 MA 以上の大電流を流し、プラズマのもつ抵抗によってジュール発熱をさせ、プラズマを加熱することである。しかし、プラズマの抵抗値は温度の $3/2$ 乗に逆比例して小さくなるため、1 keV 程度までしかプラズマを加熱することができない。そこで、外部からプラズマを加熱する1つの方法として、中性粒子ビームがある。ITER ではビームエネルギー 1 MeV、ビーム電流 40 A、パルス幅 3600 秒が求められている。そして、原型炉では 2 MeV、数十 A、定常運転の中性粒子ビームが必要と考えられる。このような、高エネルギー中性粒子ビームを生成するために、正イオンに比べ高エネルギー領域においても中性化効率が高い、負イオンがビーム源として使用されている。現在、負イオンの生成にはイオン源内に仕事関数が低いセシウムを添加する必要性がある。中性化には、イオンビームをガスに通過させることで、荷電交換により 60% 程度のイオンビームの中性化を行っている。しかし、メンテナンス性・経済性の観点から、セシウムを使わない負イオン生成及び、中性化効率の高い中性化方式の研究・開発が求められている。さらに、重要になってくるのが高い集束性を有するビームを作ることである。ビームの集束性はビームラインの損傷やプラズマの加熱・電流効率に大きな影響を与える。イオンを加速する電極やイオン源でのプラズマの状態にも大きく影響されることから、どのように集束性を担保するのも大きな研究課題となっている。これらの研究は他分野（加速器、医療、産業）でも重要な基礎技術となる。また、中性粒子ビームによるプラズマの加熱・電流駆動効率に関する研究も、注目されている。これらの研究が将来の核融合炉設計に重要な指針を示すものとなる。

[1] 竹入康彦ほか、小特集「粒子ビーム応用—その現状と展望—」、プラズマ・核融合学会誌（2002）

# 繰り返しのできる高エネルギーレーザーの実現

## 慣性核融合用高エネルギー繰り返しレーザーの開発

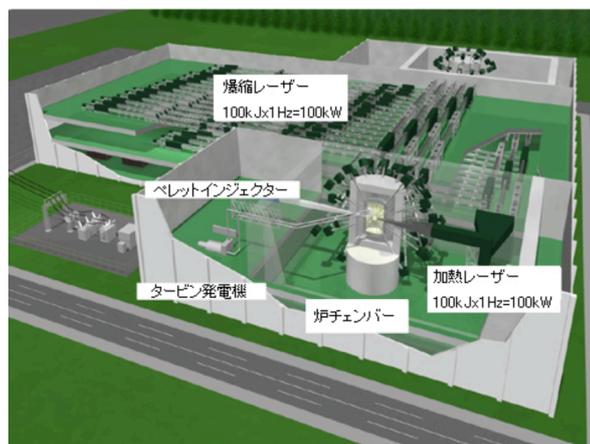
カテゴリー：A1, A3, B11, B14, B15

目指すもの(output)：

- 高エネルギー高繰り返しレーザーの実現

波及(outcome)：

- レーザー核融合発電実証の最も重要なマイルストーン
- レーザー加工などの産業応用利用



レーザー核融合発電用レーザーの構想図

レーザー核融合では大エネルギーレーザーにより核融合燃料を圧縮・加熱して点火・燃焼に至らしめる。これを連続的に繰り返すことで定常発電を行う。従来のレーザー核融合実験に用いられてきたレーザーは、大エネルギーではあるが繰り返し頻度が低い(1 時間に 1 発)という問題があった。レーザー核融合発電のためには 0.1 秒に 1 発を発射する必要がある。現在、大エネルギー高繰り返しの新しいレーザー装置の開発が進められている。レーザーダイオードを励起光発生装置に用い、新しいセラミクス材料をレーザー媒質として用いることでこれが実現する。

これまでの大エネルギーのレーザーは、大エネルギーを作り出すために、大きなレーザーネオジム添加ガラスが使われてきたが、ガラスの熱伝導の特性により放熱効率が低かった。またネオジム添加ガラスの励起に大エネルギーフラッシュランプが用いられてきたが、フラッシュランプの波長スペクトルは白色であるため、レーザーへの光変換率が悪く、無駄な熱を発生させていた。これらの熱の問題により高繰り返しレーザー発射ができなかった。将来のレーザー核融合発電に用いられるレーザーは、フラッシュランプの代わりに単色性の高い半導体レーザーが用いられ、ガラスの代わりにセラミクスが用いられる。この方式により大エネルギーかつ高繰り返しのレーザーが実現できる。国内外で開発が進んでおり、日本においては阪大・浜松ホトニクスならびに国内企業との連携によりすでに 1 モジュールの大エネルギー高繰り返しレーザー装置が完成しつつある。イットリビウム添加セラミクスをレーザー媒質として用い、それを液体窒素で冷却することでレーザー増幅効率を極限まで高めている。またハイパワー半導体レーザーダイオード（細かいレーザーダイオードが多数セグメント化されている）が実用化され、電気からレーザーへのエネルギー変換効率は飛躍的に向上している。セラミクス媒質とダイオード励起を用いたレーザーを用いればレーザー核融合発電が実現できる。

またこのような大エネルギー高繰り返しレーザーは、レーザー加工機、レーザー溶接機など、非常に幅広い産業応用に用いることができる。

[1] 神前康次, 乗松孝好, 疇地宏, 宮永憲明, 苫米地顕, プラズマ核融合学会誌「小特集 高速点火レーザー核融合発電プラント(KOYO-Fast)の概念設計」第二章, J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.12 (2006)817-818

# 核融合プラズマを荷電粒子で高効率に加熱する

高密度プラズマ中の高エネルギー荷電粒子によるエネルギー付与過程

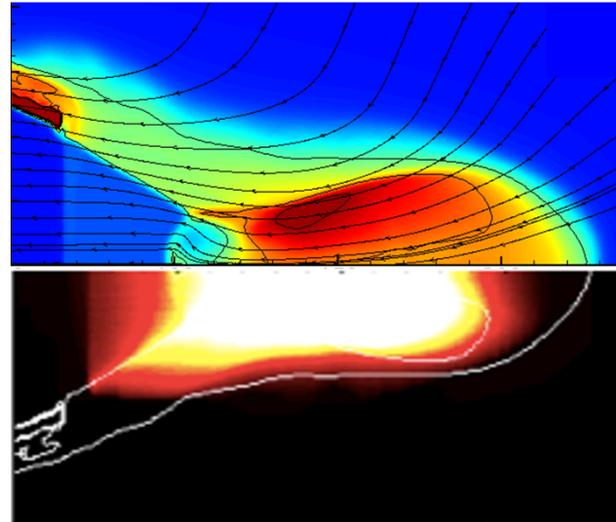
カテゴリー: A2, A3, B11, B14

目指すもの(output) :

- 高エネルギー粒子の高密度プラズマへのエネルギー付与過程の理解
- 縮退・強結合プラズマ中での多体衝突問題・非線形阻止能の理論構築

波及(outcome) :

- 爆縮プラズマ中での $\alpha$ 粒子, 高速電子等による追加加熱効率の改善
- 重イオンビーム・クラスターイオンビーム慣性核融合のターゲット設計
- 重粒子高エネルギー・大電流加速器の開発
- 多体衝突・散乱問題の統一的理解



高速点火型慣性核融合での高速電子による加熱の様子

荷電粒子ビームを物体に入射させると, ある一定の距離で止まり, 標的物質内にエネルギーを付与する. このエネルギー付与過程は, シンプルな電子や陽子が常温固体の標的に入射する場合はよく知られているが, 重粒子ビームが高密度プラズマに入射するなど複雑化した場合には必ずしも明らかになっていない. 特に近年開発が進められている多数の原子が結合したクラスターイオンビームは, 通常の荷電粒子ビームとはまったく異なる特徴的なエネルギー付与プロセスとなる可能性がある. これらの理論的・実験的解析を進めることは, 核融合プラズマや高密度状態の研究だけでなく材料への粒子注入などに対しても非常に重要な研究となっている.

高速電子,  $\alpha$ 粒子, 重イオンビーム, クラスターイオンビームによる燃料標的へのエネルギー付与は, 慣性核融合の加熱過程を理解する上で重要な課題となっている. 特に, 慣性核融合中での $\alpha$ 粒子加熱過程[1]を理解することは, レーザー等のエネルギードライバーに対する要求値を明らかにすることや, 高速点火核融合方式の実現[2]の鍵となる. また, 重イオンビームを用いた慣性核融合では, プラズマ中におけるビーム飛程の制御により燃料の加熱過程を制御しながら爆縮へ導くことが期待できる. さらに近年加速器技術の発達により任意の質量電荷比のクラスター粒子を加速できるようになった[3]. しかし, 爆縮時のプラズマは縮退プラズマのため, 既存の衝突・散乱モデルに従わず, エネルギー付与する過程を直接観測することが難しい. クラスタービームの持つ多粒子性による阻止能は強い非線形性を持つことが予測されている. これらの理論的・実験的解析を進めることは, 爆縮プラズマ中での $\alpha$ 粒子, 高速電子等による追加加熱効率の改善, 重イオンビーム・クラスターイオンビーム慣性核融合のターゲット設計のために必要である. さらに学術的には, 重粒子高エネルギー・大電流加速器の開発や多体衝突・散乱問題の統一的理解を促進させる一助となる.

[1] A. R. Christopherson, et al, Phys. Plasmas, 25, 012703 (2018)

[2] S. Fujioka, et al, Phys. Plasmas, 23, 056308 (2016)

[3] K. Takayama, et al, Phys. Lett. A, 384, 126692 (2020)

# 非線形場が結ぶ大強度ビーム物理と非中性プラズマ物理の共通性

## 重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー開発

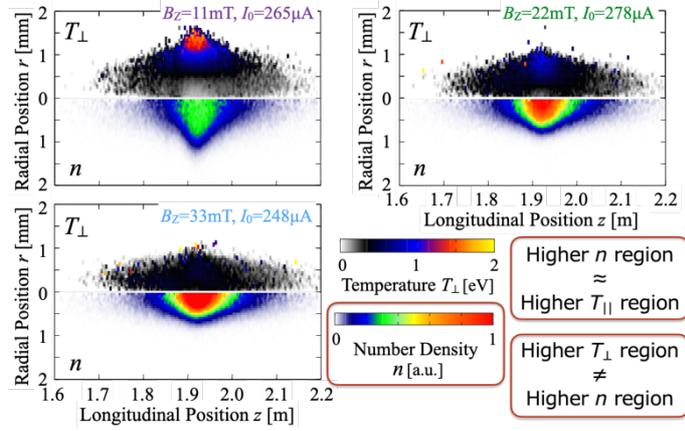
カテゴリー: A1, A2, B5, B11

目指すもの(output):

- 重イオン慣性核融合に固有の技術である大強度重イオンビームの開発

波及(outcome):

- 核融合炉の実現. 大強度荷電粒子ビーム物理と非中性プラズマの関係性の整理



大電流重イオンビームの挙動を模擬した荷電粒子の振る舞いの数値解析結果例

重イオン慣性核融合は、重イオンビームをエネルギードライバーとする慣性閉じ込め方式の核融合システムである[1]。同じ慣性閉じ込め方式であるレーザー核融合と共通する部分が多いため、重イオン慣性核融合の研究分野では重イオンビームの研究開発が占めるウェイトが大きい。扱うビームパラメータとして大電流であることが特徴であり、非線形な場や集団的振る舞いのような非中性プラズマと共通の現象・課題を含んでいる[2]。重イオン慣性核融合の実現のためには、いかにして大電流の重イオンビームを生成し、燃料標的まで制御して導くかが重要課題である。

通常の粒子加速器で生成されるビームとはパルス大電流で空間電荷効果が支配的な挙動を示す点で大きく異なるため、大強度重イオンビームの研究・開発は重イオン慣性核融合に固有の研究課題・技術である。一方で、大強度荷電粒子ビーム物理と非中性プラズマは荷電粒子の集合体として非線形な自己場や空間電荷効果が引き起こす不可逆な挙動など共通の話題が多く、その関係性を整理することで重イオン慣性核融合の実現のみならず、プラズマ物理の理解増進にも貢献することができる。荷電粒子の運動を表す方程式系は適当なスケール変換を行うことで一致することが示され、この等価性を利用して実際に非中性プラズマ物理の実験装置を転用し、重イオン慣性核融合のためのビーム物理模擬実験を実施している[3]。また、実験的観測だけでは不明な点が多いため、理論および数値解析のアプローチも併用して解決に取り組んでおり[3]、図に示すような密度分布と一致しない非一様な温度変化・緩和現象などが示唆されている。

[1] 堀岡 他, J. Plasma Fusion Res. 89 (2013) 87  
 [2] 岡本 他, J. Plasma Fusion Res. 86 (2010) 451  
 [3] 菊池, 曾我, 堀岡, J. Plasma Fusion Res. 93 (2017) 345

# “燃える”プラズマ

核融合反応を伴うプラズマ、すなわち、“燃える”プラズマが核融合炉での本質である。いかにして燃料を循環させ、エネルギーを持続供給し、不純物の排出を制御するか？異なる複数の物質が混じり合い循環するプラズマの学理や技術が広がっている。

# “燃料”を制すれば、核融合プラズマを制する

## 核融合プラズマにおける粒子制御

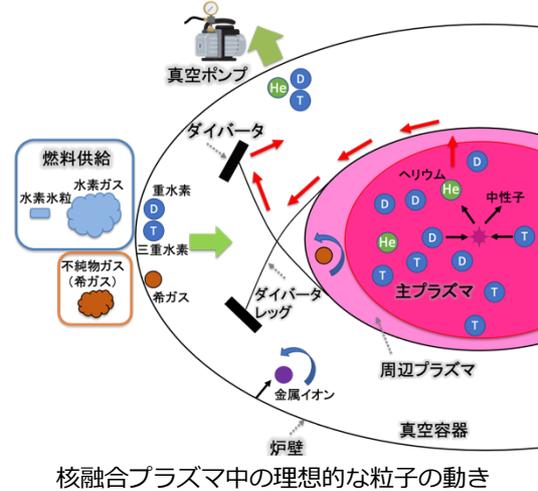
カテゴリー: A1, B7, B8, B11, B12

目指すもの(output):

- 適切な粒子制御のために燃料供給と燃料排出の最適なバランスを見出す

波及(outcome):

- 核融合炉でも適用可能な定常的な粒子制御法の確立
- ヘリウム排気真空ポンプの開発
- 混合プラズマを用いた熱プラズマプロセッシングへの応用



燃料となる水素同位体は、高温のプラズマとなって核融合反応を起こし、ヘリウムと中性子に変換される。プラズマ中にはヘリウム以外にも多くのイオン種が含まれており、核融合反応を長時間維持するためには、プラズマ中の水素イオンの純度を高く保つ必要がある。そのため、水素以外のイオン種は、炉外へ効率よく排気する必要がある。また、核融合反応しなかった水素燃料も、一旦炉外で回収し、再利用する必要がある。このように、水素だけではなく、ヘリウムなどの不純物粒子の挙動を理解し、制御することが、安定な核融合プラズマを維持する重要な鍵となる。

核融合炉において炉心プラズマへ燃料を補給する方法として、燃料である重水素あるいは三重水素を氷粒にしたものや水素ガスを真空容器内に注入する方法がある。プラズマに注入された水素は、高温の水素イオンとなり核融合反応を起こすが、時間の経過とともに必ずプラズマの外に排出される。核融合反応を維持するためには、純度の高い水素プラズマを生成し続けなければならないが、核融合反応で生成されたヘリウムがプラズマ中に蓄積されると、水素燃料が希釈され、核融合反応の低下につながる。また、炉壁の材料である金属が叩き出されるほか、周辺プラズマの制御のために希ガスを入射する必要があり、プラズマ中には、ヘリウム以外にも不純物イオンが含まれている。従って、核融合炉では、水素燃料はプラズマに効率的に供給し、一方でヘリウム等の不純物イオンは効率的に排気するという、ある意味で都合の良い要求を満たす必要がある。例えば、効率的な燃料供給として、自身が作るプラズマ密度勾配によるプラズマの内向き拡散を利用した粒子の輸送研究が行われているが、それでは不純物イオンも同時に蓄積されてしまう可能性があり、その解決のための研究が鋭意進められている。また、選択的に不純物イオンが外向きに吐き出される「不純物ホール」という興味深い現象も観測されており、シミュレーション等を使って理解が進められている。さらに、核融合プラズマは、多種イオンで構成する混合プラズマであり、多種イオン分布の一様性、非一様性について研究が進められている。混合プラズマの性質をうまく利用した、不純物の効率的な排気についての検討も進められている。このように、不純物粒子を含め、水素燃料粒子を制御することは、高性能核融合プラズマを制御することにつながる重要な課題といえよう。

[1] 若谷誠宏ほか、磁場閉じ込め核融合プラズマの燃焼制御、プラズマ・核融合学会誌 **75** (1999) 1346.

[2] 森崎友宏ほか、LHD における重水素実験の初期成果、プラズマ・核融合学会誌 **97** (2021) 177.

# 核融合プラズマにおける粒子閉じ込めと粒子供給のパラドックス

## 磁場閉じ込めプラズマにおける粒子制御

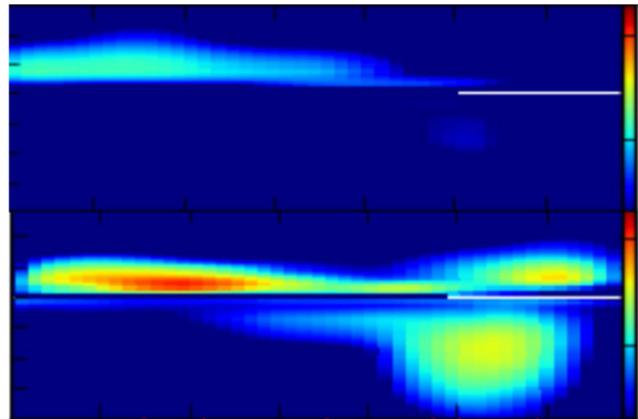
カテゴリー: A1, A2, B6, B11, B12

目指すもの(output):

-磁場閉じ込めプラズマを構成する元素の挙動の理解

波及(outcome):

- 磁場閉じ込め核融合プラズマにおける粒子制御と燃焼制御シナリオの確立



同位体非混合状態(上)と混合状態(下)における径方向-位相速度空間における密度揺動分布. Ida et al[3].

磁場閉じ込め核融合炉では、磁力線に拘束される荷電粒子の性質を使って、高温プラズマ(熱と粒子)を閉じ込めており、「良い閉じ込め特性」は核融合プラズマの必須条件である。一方で、核融合プラズマの中心部では、核融合反応によって水素同位体がヘリウムへ変換され続けるため、水素同位体を供給し、ヘリウムを除去しなければ、燃料希釈によって核融合反応が持続できない。プラズマ閉じ込め磁場は、燃料粒子の供給とヘリウムの除去も妨げてしまうため、核融合炉では「悪い閉じ込め特性」が望ましい?というパラドックスに陥ってしまう。

これまで、そして現在の「燃焼を伴わない」磁場閉じ込め核融合研究では、粒子供給の重要性には触れずに、外部加熱制御によるプラズマの閉じ込め特性向上に主眼がおかれてきた。ところが、将来の燃焼プラズマにおいては、核融合反応によって水素同位体からアルファ粒子(ヘリウム)と中性子への変換と、それに伴うエネルギー生成がプラズマ特性を支配するようになる。そのため、プラズマ中心部への継続的な水素同位体燃料の供給が、燃焼プラズマを維持するための重要な制御手段となる。また、プラズマを加熱し終えたヘリウムがプラズマ中に蓄積すると、燃料希釈によって核融合反応率を低下させるため、速やかなヘリウム除去も重要な課題である。

高温高密度のプラズマ中心部へ水素同位体を供給するためには、磁場を横切って、密度勾配を遡りながら粒子を供給する必要があるが、拡散的描像では粒子供給をすることができない。この粒子供給の二律背反を解決するためには、内向きの対流などによるプラズマ中心部への粒子輸送機構が必要となる。一方で、内向きの対流はヘリウム除去と相反するばかりではなく、プラズマ壁相互作用によってプラズマ周辺部で発生する不純物の蓄積なども引き起こす。

この相反する要求を緩和させるための一つの方法として、固体水素ペレット入射によるプラズマ中心部への直接粒子供給が研究されている。また、乱流によるプラズマ構成イオンの攪拌効果や選択的輸送効果が粒子の供給や排気に及ぼす影響が、最近の研究で明らかになりつつある。

[1] R. Sakamoto and H. Yamada, "Prospects for Self-Burning Operation in Heliotron-Type Fusion Reactor", IEEE Transactions on Plasma Science **44** (2016) 2915.

[2] M. Nakata et al., "Multi-species ITG-TEM driven turbulent transport of D-T ions and He-ash in ITER burning plasmas", IAEA FEC proc. (2016) TH/P2-2.

[3] K. Ida et al., "Transition between isotope-mixing and non-mixing states in hydrogen-deuterium mixture plasmas", Physical Review Letters **124** (2020) 025002.

# 慣性核融合発電炉で 用いられる核融合 燃料ペレット

## 極低温重水素三重水素燃料 ペレットの大量生産と連続射出

カテゴリー：A1, A2, B14, B15

目指すもの(output)：

- 重水素三重水素ペレットの大量生産と連続射出

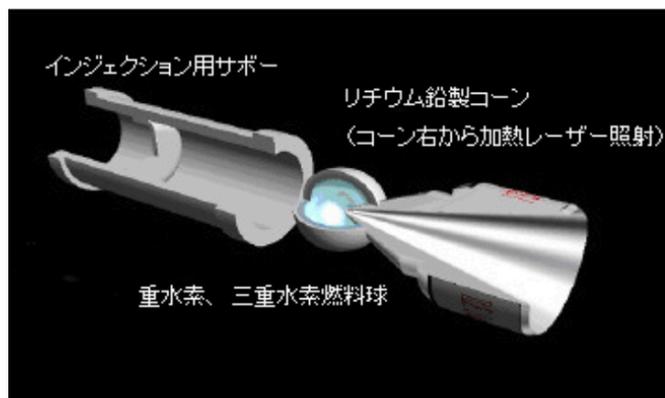
波及(outcome)：

- 水素蓄積技術、極低温工学技術、水素同位体科学

レーザー核融合発電では、重水素三重水素(DT)燃料を固体(氷)にして0.5~2mm直径にしたものが用いられる。さらに高速点火方式の場合は加熱レーザー導入用のコーンが取り付けられている。これを0.1秒に1発、安定かつ高精度に射出し、発射地点からレーザーが集光される場所までマシンガンのように発射する必要がある。カプセルの材料開発、重水素三重水素の氷を作る研究、放射性物質である三重水素の取り扱い技術の研究、大量生産技術、燃料の射出と位置精度確認の研究などが重要課題であり、研究が進められている。

重水素三重水素は、18ケルビン以下に冷却することで固化する。この際に、急激に凍らせるのではなく、緩やかに段階的に固化させることで結晶状態の重水素三重水素を生成することで、均一な燃料カプセルを生成することができる。DT氷はプラスチック製のカプセルに詰まっており、重水素三重水素氷の蒸発を防止する機能を担っている。このために高精度な真球のプラスチックカプセルを作ることも重要課題である。高速点火レーザー核融合用のコーン付きの燃料ペレットの場合、コーンは金属製であるためDTよりも熱伝導が良いため、コーンの周りが冷えすぎてDT氷が不均一になる問題もある。コーン付き燃料ペレットを高速で射出するために、高圧ガスガンが用いられるが、射出時には燃料ペレットを保護して加速したあと、空中で分離するサボーと呼ばれる部品が用いられる(図参照)。またこれを0.1秒に1個連続的に射出するために、DT燃料がペレットに充填され、冷却固化されて、連続的にガスガンに送り込まれて出射できるシステムの構築が必要です。三重水素は放射性物質であるため、安全に貯蔵するために水素吸蔵合金が用いられる。これは車で用いられている水素燃料タンクとしての応用が期待されている。また極低温状態の液化水素の取り扱いに関する知見は産業応用にとって非常に重要である。

[1] 神前康次, 乗松孝好, 疇地宏, 宮永憲明, 苫米地顕, プラズマ核融合学会誌「小特集 高速点火レーザー核融合発電プラント(KOYO-Fast)の概念設計」第4章, J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.12 (2006)817



レーザー核融合発電用燃料ペレット

# エネルギー付与過程に対応した標的構造のバリエーション

## 慣性核融合の燃料標的構造

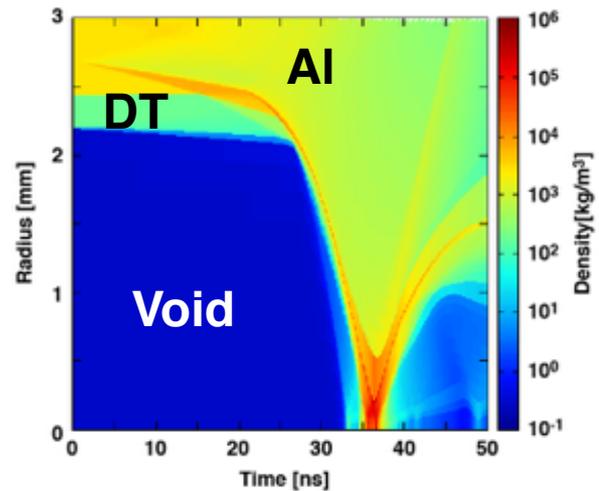
カテゴリー: A1, A2, A3, B14

目指すもの(output) :

- 慣性核融合の炉心に特有な課題である燃料標的構造の理解

波及(outcome) :

- 慣性核融合炉心の実現



重イオン慣性核融合燃料標的の爆縮過程. 数 mm の燃料標的を nsec 程度の時間で急激に圧縮, 固体密度の 1000 倍もの高密度達成を狙う。

慣性閉じ込め方式の核融合システムでは十分な核融合出力を得るために, “何らかの方法”で燃料標的を高密度に圧縮し高温に加熱する必要がある, そのための“ドライバー”と呼ばれる高強度レーザーや大電流イオンビームなどが研究開発されている. 一方で, 燃料標的はドライバーの“特徴”を活かした構造で設計されるため, ドライバーからのエネルギー付与をよく反映した構造とする. ドライバーと標的物質との相互作用は時空間 (照射面 + 侵入深さ + パルス幅) 次元の複雑な物理現象を扱うことになり, 多変量解析を伴う困難な最適化問題である.

慣性核融合炉の開発を進める上で炉心 = 燃料標的はドライバーや炉容器の設計を決める重要な項目であり, その物理現象の理解を中心として研究が進められてきている[1]. レーザーをドライバーとして採用する場合はその集束性の高さや標的表面へ局所的にエネルギーを付与できる特徴を活かした燃料標的設計が行われ, イオンビームをドライバーとして採用する場合はその効率の良さや標的内部へエネルギー付与可能な特徴を活かした設計が行われる[2]. 磁場閉じ込め核融合システムで様々な磁場配位が提案されているように, 慣性核融合でも直接照射型, 間接照射型, 中心点火, 高速点火, 衝撃波点火などの照射方式が考えられるため, ドライバーの照射パターンに適応した標的構造の設計が要求され, 形状も真球, 球 + 円錐 (コーン), 中に燃料球を含んだ円筒, 同心球殻など見た目にも多様な燃料標的が検討されている. 標的内部の構造も, 中心部は空っぽの多層球殻あるいは逆に中身が詰まった中実球, スポット的なドライバーのエネルギー付与分布を緩和するための積極的な輻射の発生や低密度層の導入を図る構造などが様々に考えられている. 米国・国立点火施設 (National Ignition Facility: NIF) では間接照射型の標的構造で, アルファ粒子による自己加熱で燃料ゲインが 1 を超えた実験結果が得られているが[3], 現状の実験結果を元にした商用炉への外挿にはまだ多くの課題が山積みであり, 実験・理論・数値シミュレーションの多面的なアプローチで実現性を明らかにしていく必要がある.

[1] 森 他 : J. Plasma Fusion Res. 97 (2021) 352

[2] 川田 他 : J. Plasma Fusion Res. 89 (2013) 89

[3] O.A. Hurricane, et al., Nature 506 (2014) 344

## 磁場閉じ込めプラズマとの相互作用による固体物質の均質化過程

固体水素ペレット入射による  
磁場閉じ込め炉心プラズマ  
への粒子供給

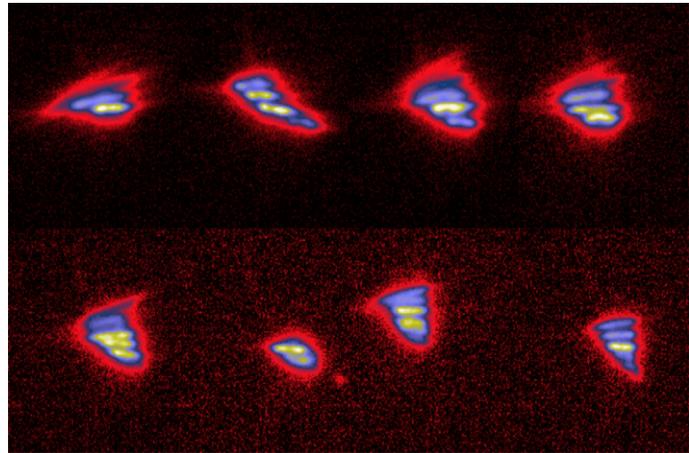
カテゴリー: A1, A2, B8, B11, B12

目指すもの(output):

- 磁場閉じ込めプラズマと物質との相互作用の理解

波及(outcome):

- 磁場閉じ込め核融合プラズマにおける燃料供給シナリオの確立



磁場閉じ込めプラズマ中における固体水素の溶発発光分布

磁場閉じ込め核融合炉では、燃料である水素同位体の供給が重要な燃焼制御アクチュエータとなる。固体水素ペレット入射法は、固体水素を高速でプラズマに入射することによって、固体の水素同位体が溶発、電離して磁場を感じるようになる前に、水素同位体粒子をプラズマ内部へ供給する方法である。固体水素ペレット入射による粒子供給を確立するためには、固体水素がプラズマからの熱流束を受けて溶発する過程と、溶発した粒子によって形成される高密度プラズモイドが磁場との相互作用によって背景プラズマへ均質化していく過程の理解が鍵となる。

磁場閉じ込め核融合炉では、核融合反応によって生成されるエネルギーによって高温のプラズマが維持されるようになるため、燃料である水素同位体の供給が本質的な燃焼制御アクチュエータとなる。一方で、荷電粒子の磁力線を横切る輸送を抑制することによって、プラズマを閉じ込める磁場構造は、燃料粒子の供給も妨げてしまうため、プラズマの閉じ込めと粒子供給の両立が課題となっている。固体水素ペレット入射法は、1000 m/s 程度の速度で固体水素をプラズマに入射する粒子供給方法であり、固体の水素同位体が溶発・電離して磁場を感じるようになる前に、水素同位体粒子をプラズマ内部へ供給することができる。一方で、固体水素の溶発現象は、プラズマの電子温度に強く依存して促進されることから、プラズマが高温かつ大規模になる核融合炉における燃焼プラズマでは、プラズマ中心部へ固体水素を届かせることが難しくなる。

固体水素ペレットによる粒子供給を理解するためには、2つの過程を理解することが重要である。すなわち、1) 溶発過程：固体水素がプラズマからの熱流束を受けて溶発して中性ガスになる過程と、2) 均質化過程：中性ガスがプラズマからの熱流束でさらに加熱されて形成される高密度プラズモイドが、背景プラズマとの相互作用によって均質化する過程である。高密度プラズモイドの均質化過程では、プラズモイドが磁力線に沿って拡がると同時に、閉じ込め磁場の影響を受けて局所的な内部電場を発生することにより、磁場を横切るドリフト輸送を生じさせることから、磁場構造をうまく使って、粒子をプラズマ中心部へ輸送する研究が行われている。

[1] B. Pégourié, "Review: Pellet injection experiments and modelling", Plasma Physics and Controlled Fusion 49 (2007) R87.

[2] 坂本隆一, 『磁場閉じ込め核融合におけるペレットの溶発の物理と応用』, プラズマ・核融合学会誌 89, 544 (2013).

# 高速飛行の高密度プラズマ塊で粒子やエネルギーを運ぶ

## 磁化同軸プラズマガンの開発・応用

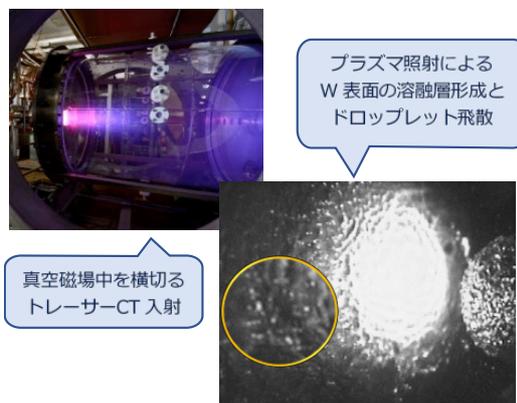
カテゴリー: A1, A2, A3, B7, B8, B11

目指すもの(output):

- 炉心プラズマへの燃料粒子供給・密度分布制御
- 不純物含有プラズマ入射によるディスラプション緩和
- 粒子輸送トレーサー利用,
- プラズマ対向機器材料への短パルス熱負荷模擬

波及(outcome):

- 核融合炉の燃料供給・燃焼制御技術, 粒子輸送研究支援
- 先進的・革新的ダイバータシステム開発支援
- 磁気圏型プラズマ装置でのオーロラ模擬研究支援
- MTF (Magnetized Target Fusion) 利用、成膜や材料表面改質などの産業応用など



磁化同軸プラズマガンを用いた  
CTプラズマ入射・照射

磁化同軸プラズマガン (MCPG) は、自己内部電流により磁場配位が維持されるスフェロマック (Spheromak) 型コンパクト・トーラス (CT) の特徴を活かし、CTプラズマを生成・加速・射出することができる。CTプラズマは、数百 km/s (数百 eV に相当、最速記録は 2,500km/s) に加速されることで、その運動エネルギーにより閉じ込め磁場を横切って炉心プラズマの中心領域まで進入したり、ターゲット材料に衝突することで熱エネルギーに変換され材料表面を急速に加熱したりすることが可能となる。一方で、安定した繰り返し射出などの課題も残されている。

プラズマ生成部から切り離し移送することが可能である CT プラズマの特徴を活かし、MCPG を用いて、(球状) トカマクや FRC の核融合炉心プラズマへ入射する燃料注入法の開発研究が行われている。近年では、核融合炉壁やダイバータ板のプラズマ対向機器の材料であるタングステン等へ CT プラズマを照射することで、短パルス熱・粒子負荷模擬試験の研究が行われている。材料関係では、原型炉開発に向けた先進的な液体金属や革新的なペブルダイバータにおけるプラズマ照射研究も開始されようとしている。プラズマ科学分野への展開として、プラズマ入射による磁気圏プラズマのオーロラ模擬研究も計画されている。また、カナダや米国のベンチャー企業による核融合開発 MTF (Magnetized Target Fusion) では、ターゲットプラズマの生成源としても利用されている。MCPG 装置の研究として、燃料供給や ELM 模擬などでは孤立した短パルス CT プラズマの繰り返し射出が求められており、安定した連続 CT 射出を可能とする電源を含めた MCPG システムの開発や余剰ガスの抑制など動作ガス制御が課題となっている。

- [1] 宇山忠男, 永田正義, プラズマ・核融合学会誌 74, No.3, 200-216(1998). <解説・燃料供給応用>  
 [2] 福本直之, 宮沢順一, プラズマ・核融合学会誌 77, No.3, 246-251(2001). <小特集・燃料供給応用>  
 [3] 菊池祐介, 澤田圭司, 高村秀一, 上田良夫, 永田正義, プラズマ・核融合学会誌 90, No.8, 480-488(2014). <小特集・材料照射応用>  
 [4] 永田正義, 神吉隆司, プラズマ・核融合学会誌 93, No.12, 563-572(2017). <解説・MTF 応用>

# 核融合炉への道

核融合炉は、炉心プラズマの物理的知見と極限環境を支える工学・技術の収斂のもとに実現される。炉環境における様々な制約を打破するための統合的な理工学研究が進むなか、先進的な概念も生み出されており、将来の核融合炉の多様性が広がっている。

# トカマクプラズマの電流分布の最適解は何か？

圧力・電流・回転の制御によって高い核融合出力と高いエネルギー増倍率を目指す

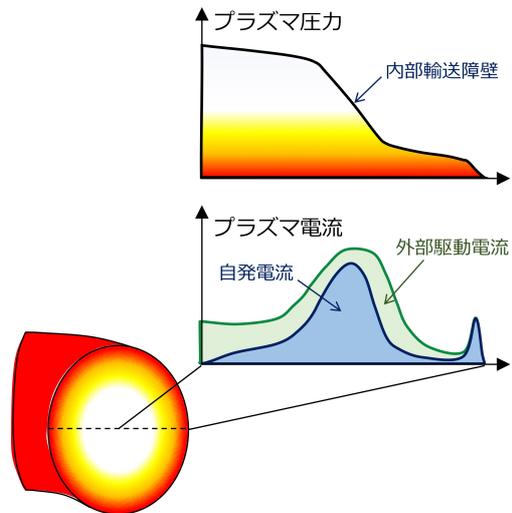
カテゴリー: A1, B1, B2, B3, B11, B12

目指すもの(output) :

- 高いベータ値、高い閉じ込め性能、高い自発電流割合の達成と維持

波及(outcome) :

- 非線形で自律性が強い系の制御技術の開発



プラズマ中に形成される凹状電流分布と断熱層

トカマクプラズマではプラズマ電流が閉じ込め磁場を形成するので、電流の径方向分布がプラズマの特性を大きく左右する。中心にピークした凸状の分布では高いプラズマ圧力（大きな核融合出力）を得やすいが、プラズマを維持するための外部加熱パワーが大きくなる。平坦な分布や凹状の分布（図）とすれば、外部加熱パワーは小さくなるが、高いプラズマ圧力を得るためにプラズマの圧力・電流・回転の分布の適切な制御が必要となる。非線形で自律性が強い系の制御という挑戦的な課題の解決に向けての研究が進められている。

核融合炉の炉心プラズマには、高い核融合出力密度と高いエネルギー増倍率が必要とされる。そのため、プラズマ圧力を高くするとともに、外部加熱パワーを低くする必要がある。トカマクでは、外部加熱パワーはプラズマ圧力を維持するのに必要なパワーとプラズマ電流を維持するのに必要なパワーの大きい方で決まる。外部から中性粒子ビームや高周波を入射する方法のみでは電流駆動のためのパワーが大きくなってしまいうため、プラズマ内に自然に流れる電流、自発電流（ブートストラップ電流）の利用が重要である。自発電流を大きくするためには、凸状の電流分布よりも平坦あるいは凹状の分布が好ましい。さらに、それらの分布では大きな圧力勾配を有する内部輸送障壁（断熱層）が形成されやすく、プラズマ圧力を維持するのに必要なパワーも小さくなる（課題番号 2 参照）。その結果、低電流・小体積のコンパクトな核融合炉を実現できる可能性がある。一方で、電流分布を凹状に近づけるほどプラズマが不安定になりやすい。理論的には、圧力分布と電流分布を適切な形状に保ちつつプラズマを回転させて導体壁の安定化効果を得ることで、この不安定性を抑制し高いプラズマ圧力を維持できると予測されているが、その実現は挑戦的な課題である。熱輸送、自発電流、運動量輸送などを通じて圧力分布と電流分布、回転分布は互いに依存している。核融合炉では、圧力分布の制御ノブである外部加熱は核融合による加熱（アルファ加熱）より小さく、電流分布の制御ノブである外部駆動電流は自発電流より小さい。プラズマの回転も自発的に決まる部分が大きくなると考えられている。電流分布の選択においては、このように非線形で自律性が強い系を制御する技術の開発（課題番号 44 参照）が鍵となる。

[1] 藤田隆明, 解説「JT-60 トカマクプラズマにおける電流分布制御と閉じ込め性能の改善」, 日本物理学会誌 Vol. 5, No. 8, 559-567 (2002)

## 突発する大熱負荷への備え

高プラズマ閉じ込め特性と低ダイバータ熱負荷を両立するカギとなる ELM 制御

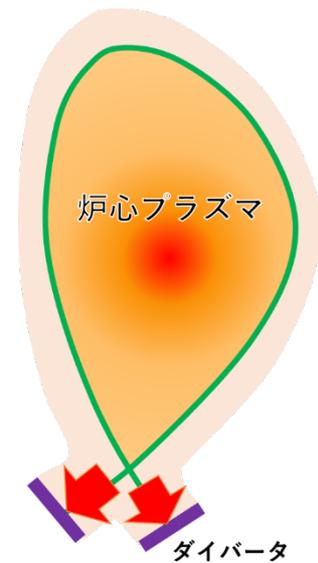
カテゴリー: A1, A2, B2

目指すもの(output):

- 周辺部突発的熱・粒子輸送現象の解明
- 効率的な熱・粒子制御方法の探索

波及(outcome):

- ダイバータ構造の確立
- コアから周辺・ダイバータまでの全領域を包括する輸送物理の理解
- 突発的大熱負荷制御方法の確立
- 一般社会における突発現象、耐熱技術への展開



炉心プラズマから突発的に生じる熱流

1980年代に発見された高閉じ込めプラズマ運転モード(通称 H-mode)は、磁場閉じ込めプラズマ研究における大きなブレークスルーであった。この H-mode プラズマでは、プラズマ周辺部に自発的に輸送障壁が形成されコア部のプラズマ性能が大きく向上する。一方、この輸送障壁形成部の急峻な圧力勾配とその勾配により駆動される周回電流によって、周辺局在化モード(Edge Localized Mode; ELM)と呼ばれる、大きな熱負荷を伴った熱・粒子放出現象が突発的に発生することがある。この ELM を効果的に制御することが核融合炉成立のカギとなっている。

原型炉での定常運転は、H-mode プラズマによる長時間運転となると考えられているため、いわゆる giant ELM(type-I ELM)によるダイバータ損耗への対策が最も重要な課題となっている。そのためダイバータ材として高耐熱性能の材料を開発することやダイバータの構造をより効果的な冷却が可能なデザインにすること、あるいは液体ダイバータを適用することなど様々な対策が検討されている。一方、原因である ELM そのものを制御するという研究も進んでいる。共鳴磁場摂動(RMP)コイルを用いて周辺部にストキャスティックな磁場構造を与え輸送を増大させることで ELM 発生を抑制する手法や高繰返しペレット入射による擾乱によって小振幅の ELM を発生させる方法などが提案され各種装置で実験検討が進んできている。また QH-mode や I-mode などの ELM が発生しない運転モードも発見されており、その運転領域の拡張と、物理機構の理解の進展が期待されている。ペDESTALを含むプラズマ周辺部は外部の真空領域やダイバータ領域との境界であり、同時に輸送障壁を挟みつつプラズマコア部とを接続する領域であることから、プラズマ全体の特性を決定する重要な領域であるので、これら全ての領域を統合する理論シミュレーションコードの開発とそれによる物理理解の深化が期待されている。このような突発現象は、太陽フレア爆発などのプラズマ物理だけでなく、火山噴火・地震発生、あるいは株相場変動など社会一般にも散見される現象であり、その展開が期待される。

[1] 相羽信行、解説「エッジローカライズドモードに関する理論・シミュレーション研究の進展」、プラズマ・核融合学会誌 95 (2019) 99-106.

[2] 鎌田裕 他、小特集「Edge Localized Mode (ELM) 研究の最近の成果」プラズマ・核融合学会誌 82 (2006) 565-598.

## ヘリウム粒子の一生を追え！

### 燃焼プラズマにおけるアルファ粒子 閉じ込め・輸送を制御

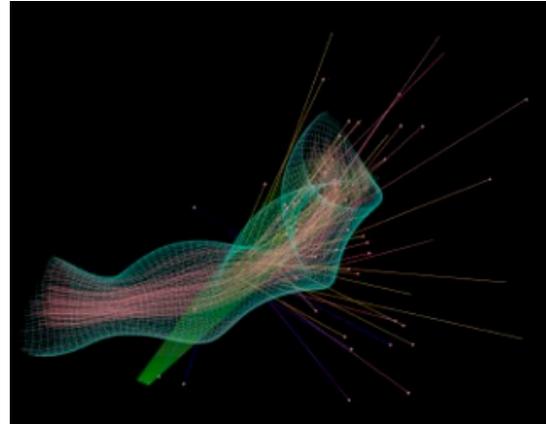
カテゴリー: A1, A2, B2, B3, B6, B12

目指すもの(output) :

- アルファ粒子の閉じ込め・輸送の物理解明
- アルファ粒子の制御

波及(outcome) :

- 核融合炉の実現と高効率化
- 炉心プラズマの閉じ込め時間に対する条件の緩和
- 非線形物理、高速制御技術、予測制御技術



高エネルギー粒子のシミュレーション  
(提供：鈴木航介)

核融合炉では水素同位体イオンの核融合反応によって生成される高エネルギーアルファ粒子（ヘリウム粒子）がプラズマ中のイオンや電子と衝突することでプラズマを加熱し、高温プラズマを維持させる。役割を終えたヘリウム粒子（ヘリウム灰）は核融合炉内に残ることになるが、核融合反応の妨げになるために炉外に排気する必要がある。高エネルギーアルファ粒子の閉じ込めからヘリウム灰排気までの閉じ込め・輸送・排気に関する物理研究が急務の課題である。さらに、核融合の実現には物理解明からヘリウム粒子の一生を制御する技術開発が求められる。

核融合反応によって生成される高エネルギーアルファ粒子（ヘリウム粒子）の研究目的は、①高エネルギーアルファ粒子の閉じ込めは古典的/新古典的か？②高エネルギーアルファ粒子からバルクプラズマへどのようにエネルギーが移行するのか？③プラズマ中の揺動・不安定性によって高エネルギーアルファ粒子は輸送されるのか？④高エネルギーアルファ粒子の増大により不安定性は励起されるのか？⑤プラズマの加熱でエネルギーを失ったヘリウム粒子（ヘリウム灰）はプラズマのコア部から周辺部へ輸送されるのか？を実験的に明らかにすることである。そして既知の理論と比較し、アルファ粒子の閉じ込め・輸送・排気までの一連の物理を理解することが基礎となる。これには、実験とシミュレーションの観点から同時に研究を進めていく必要がある。さらに、アルファ粒子の閉じ込め・エネルギーの移送・輸送を外部から制御することができれば、将来のエネルギーである核融合炉の実現が可能となる。この制御に関しては、アルファ粒子とMHDモード/ITB/ETBなどとの相互作用を考慮した制御手法などが提案され活発に研究がなされている。また、ヘリウムはカーボンやタングステンなどの壁材料やダイバータなどに蓄えられてしまうなどの問題もあり、プラズマと壁の相互作用なども考慮する必要がある。このように、ヘリウムの生成から排気まで多岐にわたる物理を明らかにしていかなければならないため、今後非常に重要な研究分野になっていくと考えられる。

[1] 長壁正樹ほか、講座「輸送解析から見た高エネルギー粒子計測手法」、プラズマ・核融合学会誌（2004）

[2] 永岡賢一ほか、小特集「ジオスペースと実験室におけるプラズマの波動粒子相互作用の進展」、プラズマ・核融合学会誌（2021）

# 狭い隙間から診てプラズマを制御する

## 限られた計装による運転制御

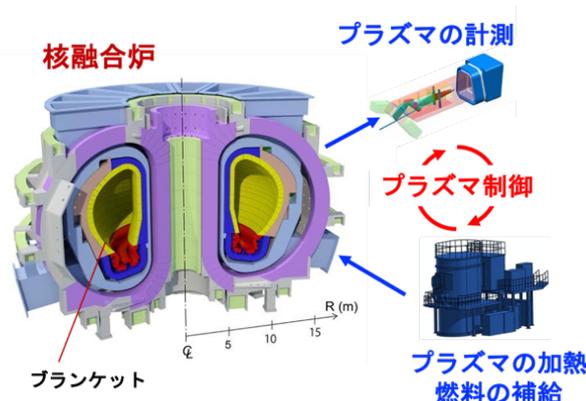
カテゴリー: A1, A2, B3, B6, B10, B12

目指すもの(output):

- プラズマ運転シナリオの確立
- 炉心プラズマ立ち上げ・燃焼、定常維持

波及(outcome):

- 複雑系の制御
- 燃焼プラズマ制御手法の確立



提供: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

核融合発電炉では、中性子と誘導γ線などの高放射線環境が想定されており、またトリチウム燃料を自己生産する機構（ブランケット）の占有面積の確保が必須となるため、計測器に許容される空間も大きな制約を受ける。更に、ブランケット等の複雑な構造物による渦電流が電磁場計測に及ぼす影響も複雑で無視できない。このような条件下では、従来の計測器が使用できなかったり、感度が著しく低下したりするが、核融合発電炉の運転にはこのような環境下でも炉心プラズマ生成や燃焼、定常維持に必要な計測器と計測精度を達成する必要がある。

核融合発電炉では限られた計装により炉心プラズマ立ち上げや燃焼、定常維持を行う必要があり、核融合発電を行うのに有力なトカマク型とヘリカル型の発電炉に関して、それぞれにおいて必須と考えられる計測の整備や、新しい計測概念の考案が重要である[1,2]。

トカマク型の発電炉の制御は大きく分けて平衡制御と燃焼制御に分類することができ、その制御に必要な計測も2つに分類できる。プラズマ電流が磁気面を形成するので、位置・形状計測、平衡の再構成の観点からも磁気計測は必須である。発電炉では、プラズマ電流の大部分をブートストラップ電流（圧力駆動電流）が担うため、圧力分布とその勾配を求めなければならない。核融合出力の直接的な測定、トリチウム増殖率の確保のために、詳細な中性子計測は必須である。ダイバータ板の健全性を確保するために、ダイバータ板表面近傍の温度分布、特にストライクポイントの位置の計測を行う。

自己点火定常運転が可能なヘリカル型の発電炉においては、その運転制御は如何にして自己点火領域に到達し、それを維持するかということに帰着する。また、無電流プラズマであるため、その制御は外部加熱入力によるパワーバランス制御と、燃料供給による粒子バランス制御によって行われる。原理的には線平均電子密度の測定のみで出力の一定制御が可能であることが確認されているが、出力の安定制御のためには、核融合出力（中性子発生数）の評価は必須であり、それに加え周辺電子密度の測定ができることが望ましい。

[1] 「核融合原型炉の計装制御」、原型炉の計装制御に関する研究会 報告書編集委員会、NIFS-MEMO-68、2014

[2] 「核融合原型炉の運転制御」、原型炉の運転制御に関する研究会、NIFS-MEMO-80、2017

# 核融合プラズマの自動運転

## リアルタイムプラズマ制御

カテゴリー: A1, A2, B10, B11, B12, B13

目指すもの(output) :

- 計測結果を基に実時間でのプラズマ制御

波及(outcome) :

- AI による最適化
- プラズマ特性の向上
- 予測性能の向上
- 高速データ解析技術の開発
- エッジ AI



AIによる核融合プラズマ制御のイメージ  
提供: the EUROfusion Consortium

磁場閉じ込め型の核融合発電炉は1年近くプラズマ放電を続けることになる。しかし、プラズマの変化は非常に短時間で起き、さらにわずかな不安定化が全体に影響を与えてしまう可能性があるため、安定なプラズマを自動で制御する必要がある。そのためには「どのようにプラズマの挙動を事前に予測し、どのようにプラズマを安定化させるのか？」が重要な問いとなる。これには応答の速い（応答速度：1ミリ秒以下）計測技術と、プラズマの応答を再現できる精密なシミュレーション、プラズマの挙動を予測するAIの活用が鍵となる。

核融合発電炉の実用化のためには、①装置の健全性を確保しつつ、②定常かつ安定な電力出力が必要である。このためにはディスラプションの回避・緩和及びELMの緩和（①に関連）、ダイバータデタッチメントの制御（①②に関連）や、高ベータ・高密度及び高自発電流割合（②に関連）を自在に制御する必要がある。これら制御対象に対して、高い自律性を有する燃焼プラズマの過渡応答特性と制御応答特性を、実験と理論・シミュレーションの両側面から明らかにし、実時間の予測を含めたシミュレーターの構築が重要となる。この予測に基づき、ガスパフ、中性粒子ビーム(NBI)、電子サイクロトロン(EC)波、及び外部コイルなどを用いてグローバル量（密度、中性子発生率、及び放射損失など）やローカル量（温度、回転速度、及び電流分布など）、プラズマ不安定性、及びプラズマ平衡を制御することで自動運転を行う。一方で、実時間でプラズマを制御するためにはグローバル量だけでなくローカル量や磁場の変化量などを用いた複雑な計測を瞬時に物理量に変換し、得られた物理量を用いて燃焼プラズマの挙動をリアルタイムに予測する必要があるが、近年は複雑な計算の高速化に対して機械学習の導入が成果を上げている。今後の課題としては、高放射線場かつ計測器に制限があり（課題番号43参照）、アクチュエーターが応答速度や制御パラメータにおいて制約される発電炉で、信頼性のある制御手法を構築することが挙げられる。

[1] 浜口智志 他、小特集「プラズマ・インフォマティクス-データ駆動科学のプラズマへの応用」、プラズマ・核融合学会誌、95(2019)535

## 低アスペクト比化トーラスの pros and cons

### 低アスペクト比化による高性能トカマク型発電炉の実現に向けて

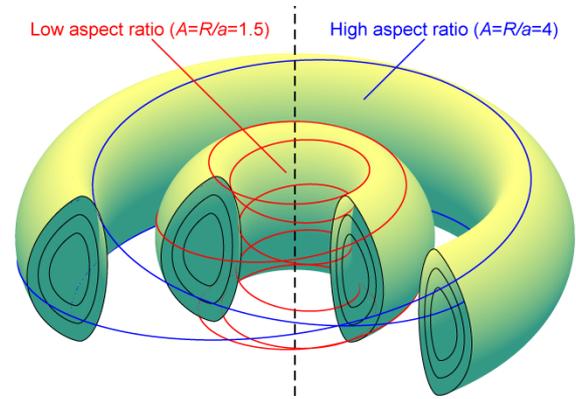
カテゴリー: A1, A2, B1, B2, B3, B12

目指すもの(output):

- トーラスプラズマのベータ限界・安定性・閉じ込め性能の向上

波及(outcome):

- 核融合発電コストの低減
- 小型中性子源の実現



低アスペクト比と高アスペクト比のトーラス

核融合発電の普及のためには発電コストの低減が必須である。そのためには同じ強さの磁場でより高いプラズマ圧力を保持する(=高ベータ)ことが望ましいが、圧力の勾配が大きすぎることに起因する不安定性を回避しないとイケない。プラズマのトーラス形状を低アスペクト比(=主半径/小半径)化すると、より安定性の高い状態が自発的に形成されることから、従来型トカマクに比べて大きいベータ値を達成しつつ優れた閉じ込め性能が得られる。ただし、低アスペクト比化の実現のためには、狭くなった装置中央部の構造や機器を小型化あるいは撤去することが要求されるため、プラズマ性能と工学的課題を両立する解を見出す必要がある。

トカマクプラズマのベータ値は圧力勾配によって駆動されるバルーニング不安定性によって制限されることが Troyon スケーリングとして知られているが、アスペクト比を低くすることによってもたらされる低内部インダクタンスと高楕円度が規格化ベータ値と規格化電流の双方を増加させ、結果的に40%を超えるベータ値が球状トカマク型実験において達成されている。エネルギー閉じ込め時間についても通常のトカマクと同等以上の性能が確認されていることに加えて、特に電子衝突頻度に対して良好な依存性を有していることから、燃焼状態でのさらなる性能向上が期待される。このように低アスペクト比化はプラズマそのものには望ましい性能をもたらす一方で、その実現のためにはいくつかの工学的課題を克服する必要がある。特に、装置中央部に機器や構造物を設置する空間が不足することから、中心ソレノイドコイル、断熱層、ダイバータ、ブランケット、第一壁などに関する制約が厳しくなる。電流駆動手法や壁/ダイバータの熱/中性子負荷低減などに関するブレイクスルーが必要とされるが、これらの課題を克服して低アスペクト比プラズマの持つ性能を引き出すことができれば、炉心プラズマの高性能化を実現でき、核融合発電の経済性向上に寄与することができる。また、発電用以外にも高フラックスの中性子源としての可能性を有していることから、材料照射試験用の小型核融合炉を目指した研究開発も進められている。

[1] 前川孝ほか、プラズマ・核融合学会誌、88、pp.706-759 (2012)。【小特集】

# 非平衡状態を利用してトカマク型炉心プラズマを手軽に生成したい！

## 磁気ヘリシティ入射やプラズマ合体による球状トカマク立ち上げ

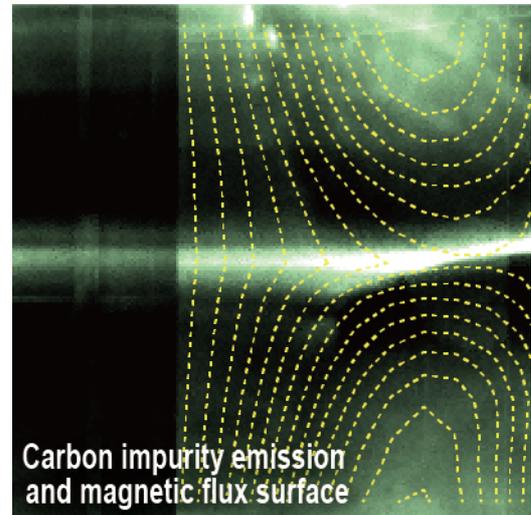
カテゴリー: A2, A3, B1, B2, B5, B12

目指すもの(output) :

- 中心ソレノイドコイル除去によるトカマクの低アスペクト比化

波及(outcome) :

- 自己組織化現象・磁気リコネクション現象の活用
- 天体プラズマ現象の解明



球状トカマク合体生成時に発生する磁気リコネクション

トカマク型核融合炉を低アスペクト比化する際に生じる装置中央部の構造的制約を回避するために克服すべき工学的課題の一つが、トカマク型プラズマの生成に使用されるソレノイドコイルを取り除くことである。代替手段として、高周波電流駆動を用いる手法と、電極や外側コイルを利用した電流駆動を用いる手法が研究・開発されている。特に後者では最終的なトカマク平衡とは異なった電流分布をプラズマ中に形成し、そのプラズマが自然にトカマク平衡に遷移していくという性質を利用しており、安価な機器によってソレノイドコイルを代替できる可能性がある。

トカマク型装置では、(1) プラズマの生成、(2) プラズマ電流の立ち上げ、(3) 初期電子加熱、という3つの重要な役割を、装置中央部のソレノイド (Center Solenoid : CS) コイルが果たしている。ところが、球状トカマク型装置では中央部に設置できる機器に制約が生じることから、CS コイルを用いることなく定常加熱/電流駆動のターゲットとなりうるトカマクプラズマを形成する必要がある。トカマク型プラズマで研究の進んでいる高周波電流駆動以外の代替手段として、電極を用いた同軸ヘリシティ入射/局所ヘリシティ入射、外側コイルの誘導を利用したプラズマ合体などを用いた手法が開発されている。同軸ヘリシティ入射では、真空容器内に同軸状に設置された電極間に電圧を印加することによって磁力線に沿った電流を流し、その電流自身が作り出すローレンツ力によって電流経路が真空容器内に広がった後に、磁気リコネクションによって閉じた磁気面を形成し、球状トカマク平衡へと緩和する。局所ヘリシティ入射では真空磁場に沿って流すらせん状の電流が、磁気リコネクションを介して軸対称電流に変化し、トカマク型配位へと緩和する。プラズマ合体法では、軸方向に離れた場所に球状トカマクプラズマを2つ生成し、それらが磁気リコネクションを介して単一の球状トカマクを形成する (図を参照)。それぞれに装置構成やプラズマの振る舞いは異なっているが、いずれも非平衡・不安定な状態から、「磁気ヘリシティ保存に基づく緩和」や「磁気リコネクション」といった素過程を通して球状トカマク配位が自発的に形成されることを利用しており、高プラズマ電流、高密度、高温のプラズマを生成し、追加熱によって定常維持された状態へ接続することが期待される。

[1] 前川孝ほか、プラズマ・核融合学会誌、88、pp.706-759 (2012). 【小特集】

# 開いた磁場による閉じ込め(開放系配位)で核融合炉は可能か？

## 直線開放系配位における端損失改善の取り組み

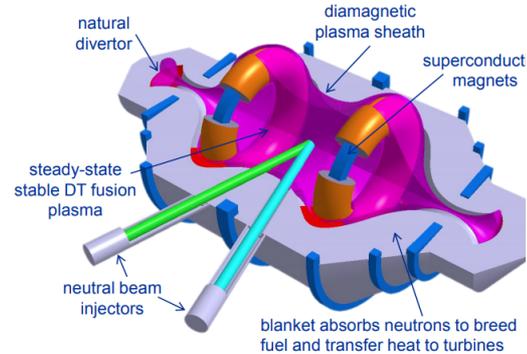
カテゴリー: B1, B3, B5, B15

目指すもの(output) :

- シンプル形状を活かした核融合発電システムの高効率化

波及(outcome) :

- 境界プラズマ研究への応用
- 先進燃料核融合炉への応用
- 高効率直接エネルギー変換



Lockheed Martin の Compact Fusion Reactor の装置概念図

直線開放系の特長を活かした境界プラズマ研究（特に輸送物理研究）は進捗し、ダイバータ(課題番号 24 など)シミュレータや新たな燃料供給法など、核融合分野への技術応用研究も進行中である。一方で、端損失は開放系固有の課題であり、特に電子閉じ込め改善は必須となるため、炉心プラズマとして開放系配位が成立するには乗り越えるべき障壁がある。それでもシンプルな構造で発電コストを削減できる魅力は大きく、海外では磁場反転配位 (FRC)、シアフローで乱流を抑制する遠心カミラー、ミラーとカスプを組み合わせた配位、などが研究されている。

直線開放系は、単純ミラーや非軸対称系のミラーなどに加えて、衝突合体と NBI 及び端部バイアス制御で配位維持時間を伸ばしてきた FRC、ARPA-E の BETHE プログラムでファンドを獲得している遠心カミラー、ロッキードマーティン社のミラーとカスプを組み合わせた配位 (CFR)、また CFR と類似の概念ではあるが内部ヘルムホルツコイルにより装置中央でソレノイド磁場を完全キャンセルする非断熱トラップなど、複数の方式で炉心プラズマとしての研究が進められている。磁場コイルと閉じ込め容器が鎖交する環状閉じ込めと異なり、直線開放系は閉じ込め容器の保守交換が容易で、また開いた磁力線に沿って高エネルギー荷電粒子を直接エネルギー変換器へ導入できる。これにより維持コスト削減と発電効率向上が期待できるため、発電システムとしてのプラント効率向上を見込める。しかし、現在開発中のいずれの方式においても、磁力線方向の輸送特性改善（特に磁場に凍結しやすい電子の閉じ込め改善）は重要な課題として残されている。高ベータプラズマでは放射損失が低減されるので、高温が要求される先進燃料（例えば  $D-^3He$  や  $p-^{11}B$ ）を利用でき、よって高エネルギー荷電粒子を生成する先進燃料炉の開発においては、直接エネルギー変換器と親和性の高い直線開放系プラズマへの期待が大きい。

[1] 北條仁士ほか、講座「開放端磁場プラズマの物理」、プラズマ・核融合学会誌 **75**、693 (1999)。

# マイルド核融合プラズマコンセプト？

## 磁化標的核融合 (magnetized target fusion : MTF)

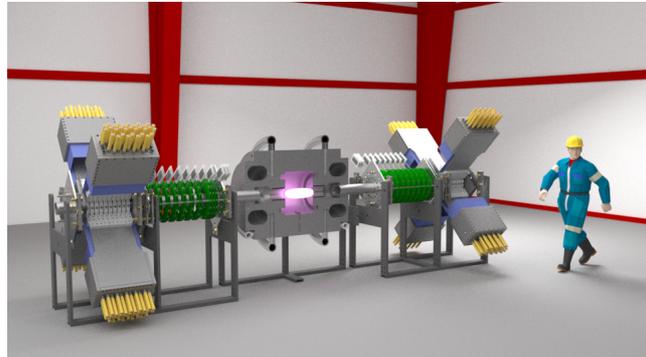
カテゴリー: A2, A3, B1, B2, B3, B14

目指すもの(output) :

- 磁場閉じ込め型のパルス炉

波及(outcome) :

- 核融合炉へのファストパス
- 液体ダイバータの開発
- パルスパワー研究やその応用



Compact Fusion System 社による MTF コンセプト

磁化標的核融合 (Magnetized Target

Fusion: MTF) では、単連結構造であるコンパクトトロイド (CT) プラズマによる「標的」を、液体金属や金属フォイルなどの導体でできた円筒状領域に打ち込み、プラズマを導体ごと核融合条件まで圧縮・加熱する。MTF は、この過程を繰り返すことで、慣性核融合より低い  $10^{26}/\text{m}^3$  程度の密度と、磁場閉じ込め核融合より短い 100 マイクロ秒程度の閉じ込め時間による「マイルド」な核融合条件によるエネルギー生産を目指す炉方式の総称である。MTF が目指す閉じ込め時間は、標的となる CT 中の不安定性の成長時間よりも短く、また核融合炉に必要なとされる多くの要素について「中間」となるパラメータ領域を目指すことから、他の方式で開発された既存の技術が流用できるとされている。

1972 年に米国・Naval Research Laboratory の LINUS 計画から研究・開発がスタートし、現在はカナダ・General Fusion 社をはじめ、ARPA-E が重点的に支援していることから、Helion Energy 社、Compact Fusion Systems 社など米国の民間企業でも精力的に研究が進められている。MTF では、FRC (磁場反転配位) やスフェロマックなど、単連結構造であるコンパクトトロイド (CT) プラズマを液体金属中に生じた「渦」や「ライナー」と呼ばれる円筒状の金属フォイル中に高速に打ち込み、これらの導体ごとプラズマを圧縮・加熱することで核融合条件の達成を目指す。圧縮方法については、ピンチによる金属円筒の圧縮や液体金属中を伝播する音響衝撃波による爆縮などさまざまな方法が提案されている。現在主流であるのは、高速で回転させた液体金属に生じる「渦」によって中心に形成された空洞に CT を入射し圧縮する、「液体金属ライナー」方式である。この液体金属ライナーは、再生可能な第一壁であると同時に、ブランケットとしても機能し、また、発生した熱を外部に取り出す役割も果たすとされている。さまざまな手法が提案され、各方式においてライナーの換装やエネルギー変換など解決すべき課題も異なるが、代替方式として研究開発が活発化している。

[1] M. LABERGE, 「ジェネラルフュージョン社における衝撃波磁化標的核融合開発」プラズマ・核融合学会誌 93, pp.32 (2007).

## 探究！ 次世代高効率核融合発電方式

### 先進燃料による核融合発電 システムの概念設計

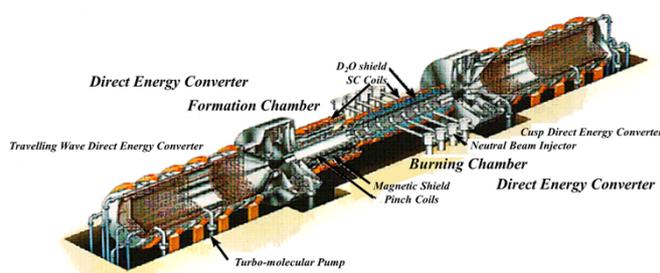
カテゴリー: A2, B3, B6, B7, B11, B15

目指すもの(output) :

- 次世代核融合方式の実現可能性検証

波及(outcome) :

- 直接エネルギー変換器の開発と実証
- コア燃料供給法の創成
- プラズマ中の核物理現象の実験検証
- ヘリウム排気技術の新提案



日本発 1GWe D-<sup>3</sup>He燃料FRC核融合概念設計炉“ARTEMIS”

先進燃料の定義として明確なものはないが、広義には D-T 燃料以外である。例えば、D-D、D-<sup>3</sup>He、<sup>3</sup>He-<sup>3</sup>He、p-<sup>6</sup>Li、p-<sup>11</sup>B などが挙げられる。ただし、「先進」であるためには、点火条件を満足できる閉じ込めの実現が見込める上で、トリチウムと 14MeV 中性子に由来する諸問題を根本的に解決する必要がある。この観点で比較的多く検討されているのが、D-<sup>3</sup>He と p-<sup>11</sup>B である。構造材の脆化・放射化を軽減し維持コストを削減でき、生成した高エネルギー荷電粒子を直接電気エネルギーに変換できれば、より経済性の高い核融合発電方式を実現できるのではないかと

先進燃料核融合は、トリチウム増殖を必要とせず、14MeV 中性子に由来する構造材の脆化・放射化を抑制し、荷電粒子のエネルギーを直接電気エネルギーに変換できるメリットがある。この反面、イオン温度や密度閉じ込め時間積に要請される条件は、D-T 反応の数倍から 10 倍程度まで高くなる。高温下でのシンクロトロン放射損失は、強磁場閉じ込めプラズマで大きくなるため、良好な閉じ込め特性を有する高ベータプラズマが求められる。近年の研究で、クーロン衝突を介さない核弾性散乱によって、生成粒子から燃料イオンへのエネルギー付与率が従来の評価よりも格段に向上することが示されており、それに伴って要請条件は緩和されている。また、核融合出力に対する荷電粒子出力が大きく、線形加速器の逆過程を利用した進行波型直接エネルギー変換器 (TWDEC) の導入で、荷電粒子の運動エネルギーを電気エネルギーへ高効率に変換できることで発電プラント効率の向上が期待される。このため、TWDEC の実験検証は重要課題である。また、高エネルギー荷電粒子の閉じ込めや高エネルギー荷電粒子によって駆動される不安定性など、今後の検討が必要とされる。

- [1] 浅井朋彦ほか、小特集「企業による核融合研究の最近の動向」、プラズマ・核融合学会誌 **93**、18-46 (2017)。
- [2] 松浦秀明ほか、小特集「核燃焼プラズマにおける核弾性散乱とその炉心特性への影響」、プラズマ・核融合学会誌 **91**、449-478 (2015)。
- [3] 神前康次ほか、小特集「D-<sup>3</sup>He 核融合とその開発課題」、プラズマ・核融合学会誌 **71**、469-531 (1995)。

# 核融合から新たなテクノロジーへ

核融合プラズマの研究は次世代のエネルギー開発という意義だけに留まらない。そのなかで培われてきた物理的な理解・概念・方法論や工学技術は、宇宙機開発や環境技術、先端医療などへの水平展開力を持っている。“エネルギー”を超えた波及が拡がりつつある。

# ミュオン触媒核融合研究の新展開

## 負ミュオンを用いた持続的エネルギー生成技術

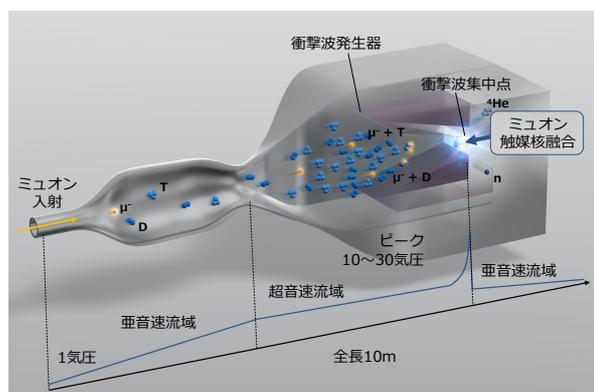
カテゴリー: A2, A3, B9, B15

目指すもの(output) :

- 飛行中ミュオン触媒核融合の実証
- 高効率なエネルギー回収を可能とするガス循環型ミュオン触媒核融合炉の実現

波及(outcome) :

- クリーンで持続可能エネルギーの生成
- 長寿命核分裂生成物(LLFP)低減・資源化



ミュオン触媒核融合の概念図

負ミュオンとは、電子の 200 倍の質量をもつ負電荷の素粒子で、水素原子に静止させると電子と置き換わり 1/200 の半径を持つコンパクトな中性原子を形成する。このため容易に別の水素原子核に近づき、ミュオン分子状態を形成後、核融合反応を起こす。反応後、放出されたミュオンは再びミュオン分子をつくり次々と核融合反応を繰り返すため「ミュオン触媒核融合」と呼ばれている。脱炭素社会に向けた持続可能エネルギー生成技術としての可能性だけでなく、核融合中性子を用いた長寿命核分裂生成物(LLFP)の低減・資源化への応用技術としても注目されている。

ミュオン触媒核融合( $\mu$ CF)は、負ミュオンがトリチウムと「ミュオン原子： $t\mu$ 」を生成後、 $D_2$ 分子中の重陽子と「ミュオン分子： $dt\mu$ 」を形成し、分子内にて  $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu + 17.6 \text{ MeV}$  を起こすことで実現する(Vesman 機構)。ミュオンの寿命は $\sim 10^{-6}$ 秒と短いため、1ミュオン当たり可能な核融合サイクル数が重要であるが、これを律速するのが分子形成に要する反応速度( $\sim 10^{-8}$ 秒)であり、核融合で得られるエネルギーはミュオン生成の実効的エネルギーの半分程度であった。最近、少数多体系の理論的研究の進展により、速いパス( $\sim 10^{-11}$ 秒)でミュオン分子共鳴状態  $dt\mu^*$  ( $d\mu + t$  閾値より 2 keV 上の準安定状態)が形成され、その解離過程から 1 keV 程度の運動エネルギーをもつ  $t\mu$  または  $d\mu$  原子を生成できることが分かってきた。これらのミュオン原子を利用すると、従来の  $\mu$ CF 過程に加え、これとは全く異なった機構による(律速過程の分子形成を経由しない)「飛行中ミュオン触媒核融合(In Flight  $\mu$ CF; IF $\mu$ CF)」も可能になる。上図は、 $D_2/T_2$  混合気体中に IF $\mu$ CF 反応場としてのマッハ衝撃波干渉領域を生成するガス循環型のミュオン標的のデザインで、高効率なエネルギー回収を可能とする。現在、この新たな $\mu$ CF過程の実証実験や、 $\mu$ CF より得られるエネルギーや中性子利用に関する工学的見地からの検討が精力的に進められており、 $\mu$ CF 研究は今、新たな局面を迎えている。

[1] N. Nagamine and M. Kamimura, Muon Catalyzed Fusion: Interplay Between Nuclear and Atomic Physics, Adv. Nucl. Phys. 24 (1998) 151. (doi : 10.1007/0-306-47073-X\_3)

[2] KEK HP (ミュオン触媒核融合): <https://www2.kek.jp/imss/msl/muon-tour/fusion.html>

[3] A. Iiyoshi et al., Muon catalyzed fusion, present and future, AIP Conference Proceedings 2179 (2019) 020010. (doi : 10.1063/1.5135483)

# 核融合炉が拓く応用技術

## 核融合炉の宇宙・中性子源応用

カテゴリー：A2, A3, B15

目指すもの(output)：

- 核融合エネルギーによる宇宙開発・先進医療等への貢献

波及(outcome)：

- 核融合炉を基盤とした社会システムの構築



核融合エネルギーによる宇宙推進

核融合エネルギーは大出力のベースロード電源となるだけでなく、その膨大なエネルギーをロケットや衛星の推進力に変換することで宇宙開発に利用することが検討されている。また、核融合炉で大量に発生する高いエネルギーを有した中性子を活用し、先進放射線治療、放射性医薬品製造、原子炉で問題となる長半減期核廃棄物の減容化など、豊かな社会発展に大きく貢献することが可能である。核融合炉の小型化・効率化によりさらに広く積極的な利用が可能となるため、核融合反応の維持と両立できる炉設計研究が急がれる。

核融合エネルギーは化学反応や原子核反応などと比べて単位質量当たりの発生エネルギー量が非常に大きい。このエネルギーにより低燃費で大推進力を得て、宇宙開発へ貢献することが期待される。核融合エネルギーを使用することで、例えば、既存技術では数年を要する地球から火星への飛行時間を数カ月に短縮でき、宇宙線による被ばくの低減が可能であることから、有人宇宙探査においては核融合エネルギーの利用は必須と考えられている[1]。

核融合炉では核融合プラズマ内で高速中性子が発生し、この中性子を炉壁で受け止め、その運動エネルギーを利用して発電を行う。そのため、核融合炉では外部からアクセスのし易い炉壁付近において、原子炉や加速器中性子源と比べて圧倒的に高い中性子束が得られるため、中性子を積極的に利用した応用が展開できると考えられる。例えばホウ素中性子捕捉療法では高い中性子束により短期間でのがん治療が可能となる。また、中性子の医療分野への有効利用には、核変換による放射性医薬品の原材料製造が考えられる。放射性医薬品は特定の臓器に集まる化合物に放射性同位元素を結合させ、放射性同位元素から放出される放射線の分布を画像化することで病気の診断に用いるものである。医療の充実により日本でも多くの放射性医薬品が利用されているが、例えば  $^{99}\text{Mo}$  のような放射性同位元素は海外から輸入しており、その安定調達には大変な努力が注がれている。核融合炉で発生する高エネルギー高中性子束場により放射性同位元素を効率的に製造することが検討されている[2]。核融合炉を核変換に積極利用する応用として、原子力発電所で生成した長半減期の放射性同位元素の短寿命化が挙げられる。上で説明したとおり、核融合反応で発生する中性子はそのエネルギーを保ったまま炉壁に到達するため、この高エネルギー中性子により長半減期の放射性同位元素を核変換し、短寿命核種に変換することができる。これにより長期間に渡って管理しなければならない放射性廃棄物の大幅な減容化が可能と期待される[3]。

そのほかに、核融合炉の生成物であるヘリウムやトリチウムは超低温冷媒や原子力電池などに利用できる。いずれの応用においても、核融合反応の維持と両立できる炉設計研究が急がれる。

[1] 中島秀紀ほか、「新たな宇宙開発を拓く核融合技術 核融合ロケットの開発へ向けて」、プラズマ・核融合学会誌 83 (2007) 264-294.

[2] 太田雅之ほか、A-FNS 計画における  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造の概念検討, 日本原子力学会論文誌 (2018)

[3] Y. Furudate et al., Construction of minor actinides reduction scenario in Japan utilizing fusion reactors, Prog. Nucl. Energy, 103 (2018) 28-32.

# 核融合中性子を使った未来の癌治療

## 革新的静電型プラズマ閉じ込め方式による小型中性子源開発

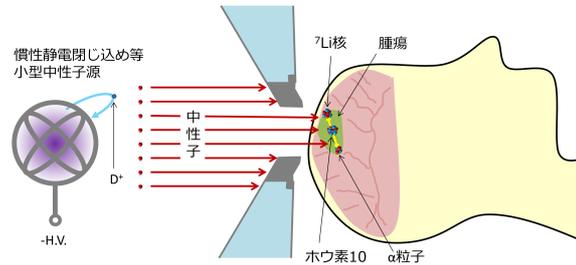
カテゴリー: A2, A3, B15

目指すもの(output):

- 中性子源の小型化・高強度化

波及(outcome):

- ホウ素中性子捕捉療法への応用



小型中性子源を用いた BNCT の概念図

(参考文献[2]の図を一部変更して作成)

中性子は物性の基礎研究から材料内部構造イメージングなどの産業利用などに幅広く利用されている。中性子源としては原子炉や  $^{252}\text{Cf}$  等の放射性物質が従来使用されてきたが、近年は小型加速器をベースとした中性子源開発が進捗している。ここでは、数 MeV のオーダーまで加速した陽子や重陽子を Li や Be ターゲットへ照射し中性子を発生する。これに比べて D-D 等の核融合反応はより低い入力エネルギーで中性子を発生するので、中性子源の小型化に活用できる。小型化・高強度化の実現で、先進ガン治療であるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) を地域医療に展開できる。

中性子は物性研究や産業応用など幅広い領域に利用されているが、近年、先進ガン治療のホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) の応用にも期待されている。BNCT は、ホウ素を含む薬剤を腫瘍細胞にのみ選択的に取り込ませ、熱または熱外中性子を照射、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  の高エネルギー荷電粒子で腫瘍細胞を破壊するガン治療法である。BNCT に利用する中性子源として従来は原子炉が利用されてきたが、現在では加速器を用いた中性子源の研究が進捗している。ここでは、陽子や重陽子を数 MeV のオーダーまで加速し、Li や Be ターゲットへ照射することで中性子を発生しているが、D-D や D-T 等の核融合反応を利用することで更なる小型化を見込める。また、閉じ込めプラズマ中の核融合による中性子源は、体積効果に伴う発生数の増大を期待できる。地雷探査への応用も期待されている慣性静電閉じ込め (IEC) はその一つである。IEC や同軸円筒電極を用いた中性子源は、企業でも開発され製品化されている。これらに加えて、直線磁場で安定化した静電閉じ込め重水素ビームプラズマによる BNCT 中性子源の提案もある。治療には  $10^9/(\text{cm}^2 \text{秒})$  の中性子束が必要とされているため、目標の中性子発生数への到達を目指して開発が進められている。

[1] 吉川潔ほか、解説「慣性静電閉じ込め核融合研究の現状」、プラズマ・核融合学会誌 **83**、795-811 (2007)。

[2] 櫻井良憲ほか、解説「中性子を用いた次世代型がん放射線治療：ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 原子炉から小型加速器へ」、日本原子力学会誌 **61**、469-473 (2019)。

## 付録 : Fusion Plasma Working Group 活動履歴

FPWGの活動履歴を以下に示す。なお、会合資料や録画データは  
<https://www-col.nifs.ac.jp/info/Fusion2030/fpwg.html>  
において公開している。

2020年10月7日	第1回FPWG会合 16:30 - 18:00
2020年10月14日	第2回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年10月21日	第3回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年10月28日	第4回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年11月5日	第5回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年11月11日	第6回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年11月18日	第7回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年11月25日	第8回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年12月2日	プラズマ・核融合学会 第37回年会 シンポジウム
2020年12月10日	第9回FPWG会合 9:15 - 10:30
2020年12月23日	第10回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年1月13日	第11回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年1月27日	第12回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年2月17日	第13回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年3月3日	第14回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年3月10日	第15回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年3月17日	第1回レビューア-会合 13:30 - 15:00
2021年3月24日	第16回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年4月14日	第17回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年4月22日	「核融合プラズマのサイエンスとその拡がり」を プラズマ・核融合コミュニティへ公開・意見照会
2021年4月28日	第18回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年5月13日	第19回FPWG会合 9:15 - 10:30
2021年8月18日	「核融合プラズマのサイエンスとその拡がり」を公開
	FPWG 活動終了・解散