	<p>レポート</p> <p>核融合への手引き (8)</p> <p>プラズマ現象の特異性</p> <p>SCE・Net 郷 茂夫</p>	<p>R-92</p> <p>発行日： 2023.年 2月14日</p>
<p>Jupiter</p>	<p>Tokamak Plasma</p>		

(左上枠のイラストは、(左)木星の縞模様の由来の1つで火山から放出された酸素や硫黄を起源とするプラズマです、(右)核融合プラズマのシミュレーションで得られた縞模様です。帯状流とプラズマ乱流が相互作用することで、さらに大きな流れをつくり出します。これらの縞模様は帯ごとに流れる向きが異なります。(右)はプラズマの自己組織化の例です。)

(見出し番号は、前回「核融合への手引き (7) むずかしいプラズマの葉」の続きです。)
(略号、原子核の表示方法は、その(1)の<使用する略号>に定めたとおりでゆきます。)

前回の分割レポート(7)で、プラズマについての基礎的事項を紹介しました。今回のレポート(8)は、レベルを少し上げて、プラズマ現象の特異性についてと核融合につながる超高温プラズマの複雑性と神秘性を覗いてみるものです。

筆者はプラズマの専門家では全くありませんから、感覚的表現が多くなることを予めお断りしておきます。どうぞ皆様の方で、プラズマ物理学や今回後半で紹介する「超高温核融合プラズマの学術的なランドスケープを眺望する学術課題集」¹⁾などを利用して勉強してください。

9. プラズマの現象面の特異性

9-1 プラズマの性質と挙動 (プラズマ中の物理現象)

プラズマの性質や挙動についてはいろいろあり、細かく説明すると相当複雑になりますので、下枠に項目別に要約しました、**太字用語**と**下線部分**が核融合プラズマに関連しますので留意しておいて下さい。

プラズマ／ 1. 基本的物理現象

荷電粒子の一般的な性質、挙動^{2) 3), 4), 5), 7)}

- **デバイ遮蔽**：プラズマが熱運動を無視できるほど冷たい場合は、それぞれの電極に集まったプラズマが二次的な電場を作り、元の電場と相殺してプラズマ中に電場が発生しなくなる。つまり、電極の周りに作られた電磁ポテンシャルを完全に遮蔽してしまうのである。これをデバイ遮蔽と呼ぶ。

太字、下線部分が核融合プラズマに関連が大きい。

- **サイクロトロン運動**：磁化プラズマにおいてプラズマを構成している荷電粒子がローレンツ力を受けて行う**旋回運動**である。要するに、荷電粒子は磁力線に巻き付く性質があること。
(注：磁化プラズマは、手引き(7) 8-4を参照)
- **ドリフト**：磁化プラズマにおいて**プラズマ粒子のサイクロトロン運動の回転中心が電磁場、温度、密度の分布によって磁力線と垂直な方向に移動すること**。外的力(重力、遠心力など)によるドリフトもある。

※上記2つの磁場、電場下での荷電粒子の運動については、その(6)で既に解説している。

8), 9), 10)

2. 全体として、電氣的に中性である。(局部的には非中性もある)
3. **導電性がある**：プラズマは導電性があるので、電場がかかればその方向に荷電粒子は高速移動 (+/- で向きは逆) し、容易に電流が流れる。 また、荷電粒子は電気抵抗を持つので相当する発熱がある。
4. **波動現象, 振動**：電磁場、イオンや電子の運動、圧力などを復元力として生じる。
5. **非平衡状態の自己組織化や集団運動**：ここで言う「非平衡」とは、手引き(7)の 8-4 で述べたプラズマの種類のことではなく、エネルギーや物質の流入流出がある広い意味の非平衡系を指す。(注：プラズマの種類で言う、平衡プラズマとは、電子温度とイオンや原子の温度が熱平衡状態、すなわち同じ温度である状態をいう。非平衡プラズマは、電子温度がイオンと原子の温度よりも高い状態を指す。プラズマ処理で一般的に用いられる弱電離プラズマでは、電子、イオン、中性分子の温度をそれぞれ T_e 、 T_i 、 T_g で表すと、 $T_e \gg T_i \approx T_g$ となっている状態のことをいう)。

エネルギーや物質の流入、流出がある非平衡系の一般的な法則は現状では殆どと言ってよいほど分かっていない。宇宙の構造形成、宇宙プラズマやオーロラの自己組織化、大気や地球内部の流動現象、身近ではコーヒーカップの中の混合現象、粘性流体の中を泳ぐバクテリア、我々の細胞の一つ一つで絶えず進行する化学反応と分子の動き、超流動中の量子渦の作る乱流構造など、マクロからミクロまであらゆる局面で非平衡現象により形成され維持される時空間ダイナミクスが見出される。

流体やプラズマは、そのような自己組織化や集団運動、不安定現象の宝庫である。非平衡系の理解と制御方法を進展させることは、核融合プラズマなどの研究でも避けて通れない課題である。

6. **プラズマの不安定性**：プラズマは、温度、密度が空間的に一様であり、速度分布がマクスウェル分布であるとき安定である。それ以外の場合は、上述の非平衡状態に関係するが、何らかの不安定性が励起されて安定な状態に戻ろうとする。 プラズマの不安定性は巨視的不安定性と微視的不安定性に大別される。

巨視的不安定性として；

- ・フルート (flute；襷ヒダ、溝の意味) 不安定性はプラズマと真空の界面が波打つように成長する不安定性、
- ・キンク (ねじれ) 不安定性は、電流分布の僅かな不均一が、電流と直交する断面のプラズマ形状を波打つように成長させる不安定性、
- ・ソーセージ不安定性、などがある。

微視的不安定性として；プラズマ粒子の速度分布が重要となる不安定性の例がある。また、二流体不安定性 (荷電粒子ビームの粗密を成長させる不安定性)、速度空間不安定性、などいろいろある。

7. 発光現象, 光を放射する。(略)
8. **衝突と拡散**：衝突が起きると、粒子は単一粒子軌道からずれて、拡散を引き起こす。拡散係数とプラズマ閉じ込め時間の関係は密接であり、プラズマ研究課題の1つである。
9. プラズマによる超常現象 (略)

9-2 プラズマの自己組織化，構造化について

前節で，プラズマの特異的な挙動について述べましたが，これらはプラズマ全般にわたって言える現象です．もちろんある一つのタイプのプラズマがすべての現象を同時に表すわけではありませんが，そのいろいろな挙動が要因になって生じてくるプラズマの自己組織化，構造化について少し述べておきます．これらの現象は理解も難しく，詳細は参考文献や自己探索で勉強してください（プラズマ物理学の範囲です）．

<p>プラズマ中の自己組織化・構造化の例 9), 10)</p>	<p>プラズマは開放系であることが多く、自己組織化に伴って散逸構造が生成される．プラズマの自己組織化の例：プラズマがゆらいで発生するフィラメント状の構造；代表例はオーロラ．フィラメントや渦などの構造は、一定の条件ではお互いが生み出した磁場によって、同じ方向に動くほかの渦を引き寄せて自己組織化しながら成長する．</p> <p>乱流が発生しては消えていく、生成と消滅の時間的サイクルを伴った構造なども一つの例である．</p> <p>ピンチ効果：柱状になったプラズマの軸方向に電流を流すと、作り出された磁場と電流自身の相互作用ローレンツ力により、プラズマが急速に締め付けられて、中心部に細い紐状になって集中する現象の例である．</p>
<p>付言；乱流と秩序・構造</p>	<p>伝統的な化学工学とは、一口で言ってしまえば、物質や熱などの「乱流」の学問ではないでしょうか．乱流が前提になって、様々な物質の運動方程式や熱力学方程式があります．「乱流」に対比されるのは「秩序・構造」と思います．化学工学でも、系が自発的に作る「秩序・構造」にかかわる現象を扱うことはあると思いますが、プラズマは裸の原子核と電子という荷電粒子の集団であり、プラズマ内は「乱流」と「秩序・構造」が隣り合わせて縋い交ぜなっているものと考えます．</p>

9-3 プラズマの解析近似手法

プラズマの挙動を解析するのは容易ではありません．プラズマを単に「荷電粒子が高温の空間を自由に動き回っている」というような静的な姿として捉えるだけでは不十分です．

プラズマは錯綜した電場と磁場下，温度勾配，圧力勾配，密度勾配があって高速で運動している荷電粒子群であり，不安定で千変万化するし，特異現象をいろいろな場面で覗かせます．そういう現象の理解と定量化のための解析において近似的方法（モデル化し，特定の方程式を使うことになる）が必要になります．プラズマは粒子群運動の視点以外に「流体」であり，流体モデル，流体力学で扱うことも要求されます．

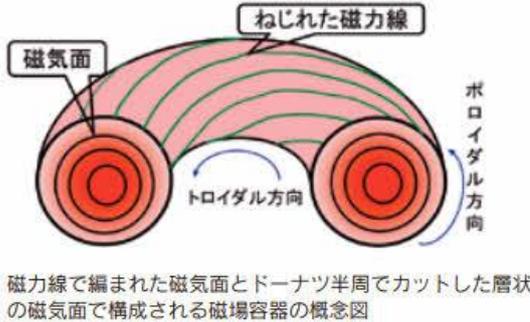
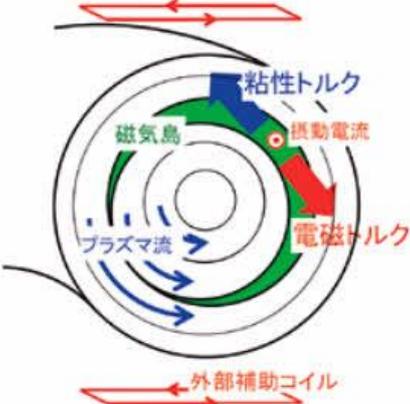
プラズマ流体近似モデルとしては，粒子モデル，運動論的モデル，流体モデル（速度分布関数マクスウェル分布仮定），磁気流体力学（MHD）（Magnetohydrodynamics）モデルなどがあります^{3), 7), 8)}．

<p>粒子モデル</p>	<p>すでに前レポート(6)で，単一粒子運動の解説でやった通り，プラズマを荷電粒子からなる多体系と捉える場合をプラズマの粒子モデルと呼ぶ．プラズマ粒子のクーロン衝突，サイクロトロン運動やドリフト運動が粒子モデルによる記述である．ただし実際は多数次元位相空間での多粒子運動方程式を扱うことになるが，解析は難しくなり，あまり扱われない．</p>
--------------	--

流体モデル 運動論的モデル	プラズマ粒子の速度を分布関数によって近似する場合を運動論的モデルと呼ぶ。代表的には、 Boltzmann 方程式 を解くこと。その中で、プラズマの速度分布関数がマクスウェル分布であると仮定できる場合を 流体モデル と呼ぶ。有用な流体方程式にはいくつかある。
MHD ; 磁気流体力学モデル : よく使われる	流体モデルの1つとして有名なのは、イオン流体と電子流体を結合して一体の流体として扱う場合で、 磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) モデルと呼ばれる。 まず 磁気流体力学 (MHD) の方程式系 を使うことが出来る。特にトーラスによるプラズマの閉じ込めなど、複雑な幾何学的配位の現象についてはまずはMHDによる研究が主体になる。そこで得られるプラズマの圧力、張力、ならびに流体と磁力線との凍り付きなどの概念は極めて有用である。
MHD (補足)	磁気流体力学の基本的アイデアは、電導性流体の中では流体の運動が磁場の変化をもたらして電流を誘起し、その電流と磁場との相互作用から流体への力(ローレンツ力など)を生じ、よって流体の運動自身が変わる、というものである。対象とする物質は主に液体金属(水銀など)とプラズマである。そして基礎方程式として通常の流体力学の基礎方程式(ナビエ-ストークス方程式と連続の式)と電磁場のマクスウェルの方程式とを組み合わせる。

9-4 流体としての扱いに関わるプラズマ圧力と磁気圧

プラズマの (ガス) 圧力	上述したが、トカマクの容器内のプラズマの密度 ($\text{コ}/\text{m}^3$) は非常に小さい(仮に常温で密度を圧力に換算するとまさにほぼ真空である)。しかし、1億倍以上にもなったら膨張して圧力は上がる。化学者なら気体の法則を知っていると思うが、 $pV = nRT$ より、容積が一定ならば、高温になれば圧力は上がる。ここでは計算はしないが、ITER トカマクならば、プラズマ圧力は5--10気圧くらいになる。 <u>ここで重要なことは、このプラズマ圧力は外側に向かって膨張する圧力であることである。この外向き圧力は次項の「磁気圧、磁気張力」とバランスすることが「プラズマの閉じ込め」の基本要諦である。</u>
磁気圧と 磁気張力 (8), (11), (12)	プラズマ中に磁場があることによって生じる圧力のこと。ガスの圧力と同じように圧縮しようとする力に対しての反発力となり、磁場の強さの2乗の勾配に比例した力となる。磁気ローレンツ力の等方的な成分が磁気圧となる。 <u>但し、磁気圧が、動圧やガス圧(上述)と釣り合うことで起こる現象として、磁気圧によるプラズマ排除とか磁気浮力があり、磁気張力と磁気圧勾配とがつりあっている力学平衡状態ができるか否かが重要である。</u> なお、 磁気張力 は、曲がった磁力線をまっすぐにするように作用する力密度の単位を持つ復元力である。
ベータ値 (β value) (16), (17), (18)	プラズマの磁気閉じ込めにおいて、 <u>プラズマの持つ圧力と、これを保持するために用いられる外部磁場の圧力との比をベータ値と呼ぶ。磁場によるプラズマの保持効率を表す基本パラメータのひとつ</u> であり、ベータ値の向上(β 値自体は1より小さいが、0と1の間で大きくすること)を図ることが、将来の核融合炉における効率化の見地から重要である。

<p>トカマクプラズマにおける高ベータ化¹⁷⁾</p>	<p>トカマク装置などでプラズマを閉じこめて核融合反応を起こさせるためには、強い磁場が必要である。β値が1よりも小さいとプラズマは磁場によって閉じこめられる可能性があり、1に等しいか1よりも大きいとプラズマ閉じこめの可能性はない。10⁻³ < β < 10⁻¹の時を中間プラズマという。トカマクによる制御核融合反応の実現はβ値が10⁻¹位の時と予想されている。</p>
<p>磁気面と磁気島¹²⁾</p>	<p>ここは言葉で説明してもわからないと思うので、図9-1に磁気面、図9-2に磁気島を図示している。解説は参考文献12)を参照願う。</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図9-1. 磁気面, 引用：図9-1, 図9-2 ともに文献12) より引用している.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図9-2. 磁気島</p> </div> </div>	

10. 超高温プラズマの特異性

核融合の反応器は「1億度以上の超高温プラズマ」であり、その超高温プラズマは常識的
化学工学では想定できない特異性や異常性を持っています。そこには未解決の課題も多くあ
ると言われます。反応器内の超高温プラズマの安定性が保証されなければ、核融合反応、ひ
いてはそれによる発電など期待するべくもないでしょう。

磁場、電場などが交錯している領域で、温度、密度などの勾配があり、非平衡、非定常な状
態が多く、工学的常識では考えられないような異常性の領域を持っていると言われます。特
に核融合トカマクやヘリカル¹⁵⁾で扱う「超高温プラズマ」はプラズマの中でもまた例外的に
扱われ、その挙動は未だ十分には解明されていない課題が多いと専門家¹³⁾でさえ言います。

10-1 核融合プラズマのサイエンスとその拡がり

—超高温プラズマの科学全般に関わる文献紹介

「核融合プラズマの魅力・難しさ・未解明な謎・将来の課題・新展開に注目し、52のトピック
スからその学術的なランドスケープを眺望する学術課題集」が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；数十名のプラズマ物理、核融合の専門
家や研究者から構成されている）から、活動成果のかたちで取り纏めたものが2021年8月に以
下のサイト（文献1）に公表されています。

[核融合プラズマのサイエンスとその拡がり \(nifs.ac.jp\)](http://nifs.ac.jp)

この学術課題集は、**52 テーマの記事**として本分野内外へ向けて発信されています。各テーマ別に A4 1 頁にまとめられており、あまり時間をかけずに読むことはできますが、専門用語が多く内容も高度で、入門者には難しいでしょうが、**核融合プラズマにおいてこんなにも沢山の未解決課題や要研究テーマが存在している**ことがあるのかと驚くほどです。この文献から筆者の関心で面白そうなものを抜き取った課題項目を 表 10-1 に挙げています。

せっかくですから、2つの研究番号(1と27)をそのまま図示します。図 10-1 は今回 9-2 項で触れた自己組織化の問題です。図 10-2 は、前回レポートで触れたプラズマ消失の問題です。

表 10-1 上記文献から抜き取った課題項目

研究番号	課題名
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
4	非平衡系に現れる非局所性の起源は？
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る！
8	突発的な崩壊現象やその予兆を解き明かせ（ディスラプション問題）
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釣り合う磁場配位とは？
21	高エネルギー粒子を計測する！
25	磁場を乱して、壁を守る
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
34	“燃料”を制すれば、核融合プラズマを制する

10-2 BA (JT-60SA, 那珂, 六ヶ所研) で多くの研究が必要な理由について

2019年11月に、筆者が世話役となり、量子科学技術研究開発機構(量研/QST)那珂研究所のJT-60SAという核融合の研究開発目的の大型試験装置(本体の径12m×高さ15mという大型装置、当時は完工の直前であった)の見学会をSCE・Net主催で実施しました(参加数12名)。その見学記は、窓レポートR-64とR-66で報告しています。

このように大きな試験装置なら、D-T核融合反応を短時間でもテストすることは当然できるだろうし(それだけの装置を備えているように見えた)、発電に繋げることはまだ無理でも、外部にちょっとした冷却設備を設ければ、短時間なら核融合反応熱を外部に取り出すことくらいはできるのではないかと感じたものです。しかし、当時の研究所長から、それはもともと計画されていないことが明言されました。そのことが最初はしっくりきませんでした。

筆者が思うに理由は2つあって、1つはトリチウム問題です。これだけの装置でD-T反応をやるためにはキログラムオーダーのかなり大量のトリチウムが必要です。トリチウムの扱いは今の福島原発のトリチウム汚染廃水問題（わずか数グラムのトリチウムが100万トンの水に薄まっている状態）からは認可は不可能でしょう。

もう1つの原因が本節で解説したものです。D-T核融合反応をやる前にやらねばならない超高温プラズマに関わる課題が山ほどあることがわかりました。那珂研のJT-60SAはそれら多くの課題の実証的検証と解決策のデータを採取することが最大の目的です。そういうデータ無くして、ITERで安定したプラズマでD-T核反応を実現することは困難ということを最近になって強く認識しました。

文献, 参考書

<プラズマ・核融合科学の学術課題>

1) [核融合プラズマのサイエンスとその拡がり \(nifs.ac.jp\)](http://nifs.ac.jp)

；プラズマ・核融合科学分野のコミュニティ, 「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) 編

<プラズマ物理学；プラズマモデル近似流体の解析, 非平衡減少などを含む>

2) [デバイ遮蔽 \(physics.thick.jp\)](http://physics.thick.jp)

3) [Plasma Physics \(u-tokyo.ac.jp\)](http://u-tokyo.ac.jp) , プラズマ物理学の基礎

4) [pdf \(jst.go.jp\)](http://jst.go.jp) , プロセスプラズマの基礎, ・. 荷電粒子の消滅 (損失) 過程

5) [プラズマ物理学 \(physics.thick.jp\)](http://physics.thick.jp) , プラズマ物理学, プラズマであるための条件

6) <https://ja.wikipedia.org/wiki/プラズマ物理>, Wikipedia プラズマ物理

7) [psec-all.pdf \(u-tokyo.ac.jp\)](http://u-tokyo.ac.jp) , プラズマ物理学講義レジュメ

8) [PlasmaPhysics_Memo06.pdf \(nagoya-u.ac.jp\)](http://nagoya-u.ac.jp)

9) [プラズマ核融合学会誌8月号【82-08】/小特集3 \(jspf.or.jp\)](http://jspf.or.jp)

10) [非平衡・プラズマ - 東京大学理学部物理学科・大学院理学系研究科物理学専攻 \(u-tokyo.ac.jp\)](http://u-tokyo.ac.jp)

<自己組織化；プラズマ圧力, 磁気圧, 磁気島>

11) [磁気圧 | 天文学辞典 \(astro-dic.jp\)](http://astro-dic.jp) , 磁気圧

12) [250-2.pdf \(nifs.ac.jp\)](http://nifs.ac.jp) 磁気島「どんな時に磁気島はできるのか？」

<専門家の意見;QST 那珂研の所長談>

13) [r-66_rev.pdf \(sce-net.jp\)](http://sce-net.jp) 窓レポート, R-66, 第2部 1. プラズマの挙動について (研究所長: 栗原氏より),

<プラズマ処理の基礎知識>

14) [プラズマの種類と特徴: プラズマ処理の基礎知識1 - ものづくり&まちづくり BtoB 情報サイト「Tech Note」 \(ipros.jp\)](http://ipros.jp)

<ヘリカル型核融合炉>

15) [大型ヘリカル装置計画 / 核融合科学研究所 \(nifs.ac.jp\)](http://nifs.ac.jp)

< β 値>

16) [用語解説 - 量子科学技術研究開発機構 \(qst.go.jp\)](http://qst.go.jp) QST 用語解説

17) [ベータ値 - ATOMICA - \(jaea.go.jp\)](http://jaea.go.jp)

18) [プラズマ核融合学会誌2月【79-2】/小特集2 \(jspf.or.jp\)](http://jspf.or.jp)

課題番号1

藤堂泰(核融合科学研究所)

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

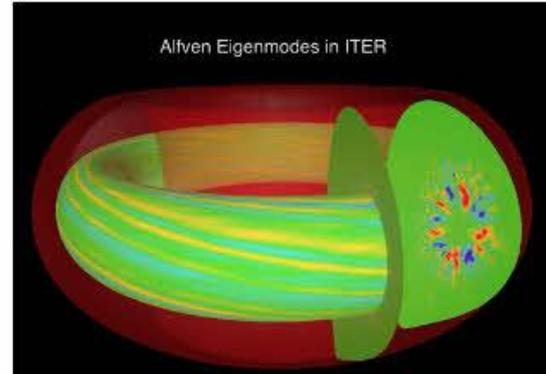
カテゴリー: A1, B2, B4, B5, B6, B13

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)

