

第27回若手科学者によるプラズマ研究会

開催日時: 令和7年3月5日(水) 13:00 - 3月7日(金) 15:00

開催場所: 量子科学技術研究開発機構 那珂フュージョン科学技術研究所 JT-60制御棟 大会議室 他

最終更新日: 2025/02/10

3月5日(水)【JT-60制御棟 大会議室】								
開始		終了		項目	No.	タイトル	名前(敬称略)	所属
12:20						勝田駅→那珂研 【特急ひたち9号 12:11着/普通 12:08着】 送迎バス発車【勝田駅西口】		
				事務連絡			事務局	QST
13:00	-	13:10	10分			開催の挨拶・会議趣旨説明	鈴木隆博・柳原	QST
13:10	-	13:55	45分	招待講演	01	TBA	寺井隆幸	エネルギー 総合工学研究所
13:55	-	14:10	15分	休憩				
14:10	-	14:55	45分	招待講演	02	核融合炉実現に向けた大規模乱流輸送シミュレーション研究	今寺賢志	京都大学
14:55	-	15:10	15分	休憩				
15:10	-	16:00	50分	一般講演	01	ショートトーク	8名(別紙参照)	別紙参照
16:00	-	17:40	100分			ポスターセッション		
17:40						那珂研→勝田駅 送迎バス発車		

3月6日(木)【JT-60制御棟 大会議室】								
開始		終了		項目	No.	タイトル	名前(敬称略)	所属
8:40						勝田駅→那珂研 送迎バス発車 【勝田駅西口】		
				事務連絡			事務局	QST
9:30	-	10:15	45分	招待講演	03	タングステンプラズマ壁相互作用と燃料蓄積	大宅諒	九州大学
10:15	-	10:30	15分	休憩				
10:30	-	11:00	30分	特別企画	01	JT-60SA セッション	小島信一郎	QST(那珂)
11:00	-	11:50	50分	休憩		昼食		
11:50	-	13:10	80分	特別企画	02	JT-60SA 見学ツアー		
13:10	-	13:25	15分	休憩				
13:25	-	14:15	50分	一般講演	02	ショートトーク	6名(別紙参照)	別紙参照
14:15	-	15:55	100分			ポスターセッション		
15:55	-	16:10	15分	休憩				
16:10	-	16:55	45分	招待講演	03	周辺プラズマ制御温故知新 ～ダイバータ熱負荷と周辺局在化モードを例題に～	鈴木康浩	広島大学
16:55	-	17:10	15分	休憩				
17:10	-	17:40	30分	特別企画	04	JA DEMO セッション	杉山翔太	QST(六ヶ所)
17:40	-					那珂研→勝田駅 送迎バス発車		

3月7日(金)【JT-60制御棟 大会議室】								
開始		終了		項目	No.	タイトル	名前(敬称略)	所属
8:40						勝田駅→那珂研 送迎バス発車 【勝田駅西口】		
				事務連絡			事務局	QST
9:30	-	10:15	45分	招待講演	05	最近の原型炉設計とそれを取り巻く状況	坂本宜照	QST(六ヶ所)
10:15	-	10:30	15分	休憩				
10:30	-	11:15	45分	招待講演	06	トカマク炉とディスラプション対策	松山顕之	京都大学
11:15	-	11:20	5分	事務連絡		JIFSのお誘い		QST
11:20	-	12:05	45分	休憩		昼食		
12:05	-	12:55	50分	一般講演	03	ショートトーク	8名(別紙参照)	別紙参照
12:55	-	14:35	100分			ポスターセッション		
14:35	-	14:45	10分			閉会&写真撮影等	事務局	QST
14:45	-					那珂研→勝田駅 送迎バス発車 【ときわ74号 15:47発 / ひたち20号 16:21発】		

第27回若手科学者によるプラズマ研究会

開催日時: 令和7年3月5日(水) 13:00 - 3月7日(金) 15:00

開催場所: 量子科学技術研究開発機構 那珂フュージョン科学技術研究所 JT-60制御棟 大会議

グループ① 3月5日 (水) 15:10-17:40		
No.	タイトル	名前(敬称略)
01	JT-60SA統合試験運転で観測されたディスラプション	横山達也
02	磁場閉じ込めプラズマ内のマルチスケール乱流間相互作用の実験研究	那須達文
03	輸送障壁中における平行流シヤ駆動モードに対する温度比効果	小山一輝
04	GAMMA10/PDX セントラル部における ICRF 位相制御による差周波波動励起の効率化検討	バッタライ大
05	プラズマダイナミクスのための3次元トモグラフィ再構成手法の開発	武田健太郎
06	トカマク炉におけるシンクロトロン放射を利用したプラズマ電流駆動の解析	高橋夢翔
07	トカマクプラズマにおける捕捉電子モード乱流輸送の磁場形状効果とベータ値依存性	河津智也
08	高ベータ領域における平行方向磁場揺動効果を取り入れたGKVコードの拡張	岡林秀明

グループ② 3月6日 (木) 13:25-15:55		
No.	タイトル	名前(敬称略)
09	ダイバータプラズマにおける大角度散乱効果	梅崎大介
10	低アスペクト比RFPプラズマ装置RELAXでのトカマクプラズマの生成およびその特性	井上孟流
11	最適運転シナリオ構築に向けた技術開発と因果探索の応用	安齋亮慶
12	LHDにおける高速イオンに起因するγ線スペクトル及びその評価法の検討	脇坂真司
13	統合コードTOTALを用いた原型炉プラズマの多変数制御における応答特性に基づく制御ゲイン決定手法	可児和寿
14	大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる微視的テアリングモードの解析	金建希

グループ③ 3月7日 (金) 12:05-14:35		
No.	タイトル	名前(敬称略)
15	非軸対称コイルを用いたプラズマ垂直位置制御に関する研究	高竜太
16	揺動電磁場によるECH高速電子輸送に対する運動論的モデリング	田原康祐
17	水素原子・分子線の絶対測光と衝突・輻射解析を組み合わせた基底状態水素原子・分子密度の評価	吉村溪牙
18	QUESTにおけるプラズマ撮像からのポロイダル断面発光分布の再構成	蒲沢明
19	トカマク放電の熱的安定性モデルによるディスラプションと電流減衰の解析	大城春
20	TST-2球状トカマク装置における線積分トムソン散乱システムの開発研究	武智雄大
21	大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる実配位における微視的不安定性のベータ値依存性解析	竹中健翔
22	重水素パッシェンα線スペクトル視線積分計算によるJT-60SA非接触プラズマ診断の検討	守田常裕

フュージョンエネルギーの社会実装に向けた 各国・各組織の目標設定と取り組み

寺井隆幸¹

(一財) エネルギー総合工学研究所¹

昨今、核融合エネルギーの早期社会実装の気運が高まり、世界中で産学官問わず様々な立場から、色々な国や組織での 2030 年代の発電実証に向けた取り組みが活発化している。

本講演では、核融合反応の話から始め、核融合炉プラントまでの展開について述べ、効率的に核融合反応を発生・維持するための炉心工学の課題、炉心から効率的にエネルギーを取り出し、電力や熱の形で利用できる形にすると同時に、プラズマ排ガスからの燃料回収や D-T 核融合において燃料となるトリチウムの増殖・回収・精製・注入を行う炉工学の課題について触れたのち、核融合実用化（商用化）のためのマイルストーンを整理する。

次に、我が国及び各国の核融合炉開発計画とスタートアップの計画について解説する。その中で、パイロットプラント・実験炉・原型炉などの言葉の意味をあらためて整理するとともに、エネルギー増倍率 Q 、発電実証という言葉の内容（発電という事実、核融合出力、プラントとしての正味の発電出力、定常運転や稼働率も含めた年間発電電力量）、トリチウム増殖率 TBR の意味と、それぞれの計画におけるこれらのパラメータとの関係等についても明らかにしたい。

最後に、カーボンニュートラル時代のエネルギーシステムにおける核融合エネルギーの必要性和時期についてまとめる。

本講演により、核融合エネルギー開発への理解が深まり、その観点から若手プラズマ研究者の方々が、核融合エネルギー開発を志向した時に解決すべき課題や核融合炉実現に向けた道筋を改めて考える一助となれば幸いである。

核融合炉実現に向けた大規模乱流輸送シミュレーション研究

今寺 賢志

京都大学大学院 エネルギー科学研究科

核融合プラズマでは一般に、急峻な温度勾配を自由エネルギー源としてイオン温度勾配 (ITG) モードや捕捉電子モード (TEM) といった微視的不安定性が励起される。それらの不安定性は乱流を形成し、径方向に粒子/熱輸送を駆動することで閉じ込めを悪化させることから、その物理メカニズムの理解と制御方法の開拓は、高性能な核融合炉を実現する上で重要な鍵を握っている。

そのような微視的不安定性や乱流輸送過程を解析する有効な手段の一つが、ジャイロ運動論[1]に準拠した乱流輸送シミュレーション[2]である。ジャイロ運動論は、有限ジャイロ半径による場の平均化効果や波と粒子の共鳴効果といった運動論的現象を適切に考慮していることから、乱流輸送研究に広く用いられている。特に我々のグループでは、背景分布と乱流の時間発展を装置全体で自己無撞着に解くいわゆる大域ジャイロ運動論モデルを用いた理論・シミュレーション研究を行っている(図 1)。このシミュレーションは、計算量が膨大であるものの、局所ジャイロ運動論モデルでは困難な輸送障壁形成の解析[3]や、乱流輸送と新古典輸送の相互作用の解析[4]などを可能としており、実配位での核燃焼プラズマの解析が現在、進められている。

本講演では、ジャイロ運動論シミュレーションがこれまで明らかにしてきた物理を俯瞰することでその有効性を理解するとともに、大域的ジャイロ運動論モデルによって今後解決すべき課題について紹介し、今後取り組むべき研究テーマについて情報共有する。

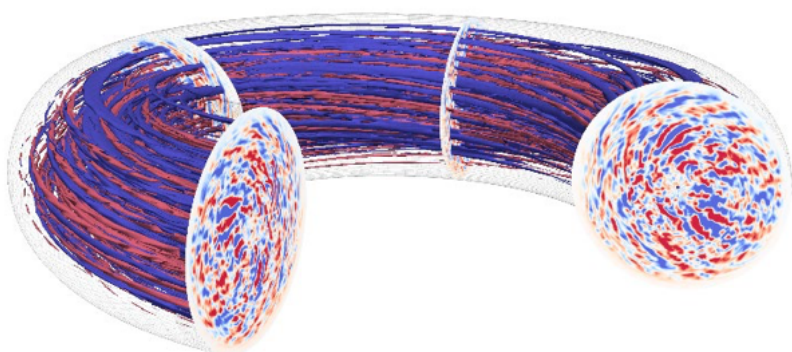


図 1 : 大域的ジャイロ運動論コード GKNET で得られたトラス全体の ITG 乱流構造。軸対称成分は含まない。

参考文献

- [1] A. J. Brizard and T. S. Hahm, Rev. Mod. Phys. **79**, 421 (2007).
- [2] X. Garbet *et al.*, Nucl. Fusion **50**, 043002 (2010).
- [3] K. Imadera and Y. Kishimoto, Plasma Phys. Control. Fusion **65**, 024003 (2023).
- [4] K. Imadera *et al.*, Nucl. Fusion **64**, 086006 (2024).

タングステンのプラズマ-壁相互作用と燃料蓄積

大宅 諒¹
九州大学¹

ダイバータやブランケットには、核融合炉の長期的・安定的な運転を可能にするための機能が期待される。プラズマに対向する壁面（プラズマ対向壁）は、プラズマから高い熱・粒子負荷に曝される。そのため、壁材料には、高融点・高熱伝導率・低損耗といった特長を持つ、タングステンの使用が検討されている。

プラズマ対向壁では、プラズマと壁材料の間に様々な相互作用が生起する（プラズマ-壁相互作用）。燃料である水素同位体が、壁に蓄積（壁排気）され、再放出（リサイクリング）される。また、壁が損耗されて、損耗粒子がプラズマに不純物として混入するなど、プラズマと壁の双方向に影響を持つ。さらに、原型炉においては、核融合反応で生成するヘリウムと中性子による、壁への照射効果が重要である。ヘリウム照射による壁表面の形態変化やナノスケールのバブル形成、中性子照射によるナノスケールの損傷形成は、燃料粒子の蓄積と再放出を大きく変化させる。これらは、核融合炉の工学的な健全性だけでなく、プラズマの定常放電にも密接に関係し、長期的・安定的な運転に強い影響を与える。

本発表では、原型炉 JA-DEMO のプラズマ対向壁について、燃料である水素同位体の蓄積量の評価を中心に紹介する。周辺プラズマ統合コード（SONIC）と、材料中の水素拡散コードによる連携計算を実施した。これにより、対向壁全体の蓄積量の時間発展の評価が可能となる。また、原型炉条件として肝要なヘリウムと中性子の照射効果をモデル化し（図 1）、コードに導入した。その結果、ヘリウムの照射効果により、蓄積量は減少することが示された。また、蓄積量はおおよそ時間の平方根に比例して増加したが、これは中性子の照射効果として特徴的な傾向である。本研究は、損耗により壁表面に形成される再堆積層について、その影響の評価も進めており、本発表で紹介する。

（謝辞）本発表で紹介する研究は、量子科学技術研究開発機構の原型炉開発共同研究（令和 2-4 年度、5-7 年度）で行われました。関係する皆様の日頃のご指導に心より感謝申し上げます。

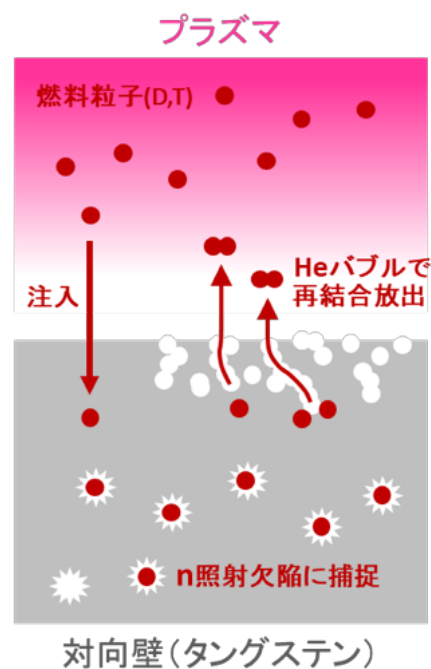


図 1 タングステン中の水素同位体挙動とヘリウム・中性子照射効果

周辺プラズマ制御温故知新

～ダイバータ熱負荷と周辺局在化モード制御を例題に～

鈴木康浩¹

広島大学大学院先進理工系科学研究科¹

近年、核融合エネルギー研究開発を取り巻く状況は大きく変わり、国の基本政策として位置づけられると同時に、スタートアップ企業をはじめとする民間セクターの参入が相次いでいる。民間セクター参入が意味することは、これまで公的セクターの研究所や大学が目指してきた核融合炉方式に疑問点が投げかけられ、異なる方式がより優れた核融合炉として提案されることである。これが意味するところは、「核融合炉とは何か？」という原点に立ち返って、今後進めるべき研究開発の方向を今一度議論する必要がある、ということである。

では、その原点とは何であろうかという、私は「定常核融合炉の実現」と言い切ることができる。核燃焼プラズマによる長パルス運転が、結局、高い工学エネルギー利得を得ることにつながるからである。しかし、長パルス運転は炉内機器にかかる熱負荷が増大すると共に、閉じ込め改善モードでは周辺局在化モードのようなパルスの熱負荷も同時に現れる。この問題をどう解決するか、近年の研究開発リソースが多く割かれてきた。

これらを考えるとき、特にプラズマ「物理」研究者は、Type-I ELM をどう制御するか？ detachment をどう実現するか？という狭い文脈で理解しがちである。しかし、あるべき核融合炉の姿、燃料希釈のない炉心プラズマを炉壁から分離して長時間閉じ込める、を思い出せば、古くから考えられてきた問題の一側面に過ぎないことが解る。本講演では、これまで行われてきたダイバータ熱負荷研究を概観する（故きを温ね）と共に、近年の ELM 制御実験で用いられる能動的プラズマ制御を議論する（新しきを知る）。そして、これらの「物理研究」を、どのように核融合炉の制御ロジック（つまり工学）まで落とし込むかを問題提起したい。

最近の原型炉設計とそれを取り巻く状況

坂本宜照
量研 六ヶ所研

原型炉の概念設計は、2015 年 6 月に QST 六ヶ所研に設置された産学官が連携したオールジャパン体制で設計活動を推進する原型炉設計合同特別チーム（現在、総勢 211 名の専門家）を中心に進めている。特別チームでは ITER 技術基盤に基づいた原型炉基本概念を構築し、MEXT 核融合科学技術委員会が 2022 年 1 月に纏めた第 1 回中間チェック・アンド・レビュー(CR1)報告書において、原型炉概念設計の基本設計を含めた CR1 までの達成目標は達成されているとの判断が示された。

このころから、核融合研究開発を取り巻く状況が大きく変化している。ITER 建設の進展やパリ協定に代表される地球温暖化問題を背景に、エネルギー安全保障への懸念から核融合エネルギーへの期待が高まり、核融合スタートアップへの民間投資が急激に増大した。特に、米国、英国、中国は 2020 年ごろから研究開発を加速しており、核融合研究開発は ITER に代表される国際協力から、産業化を見据えた国際競争の時代に突入している。

我が国においても諸外国の動向を踏まえフュージョンエネルギーの産業化に向けて大きく動き出している。2023 年 4 月に我が国初の核融合国家戦略である「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が策定された。本戦略には、フュージョンエネルギーを新たな産業として捉え、世界のサプライチェーン競争に時機を逸せずに参加することが謳われており、具体的にはフュージョンインダストリーの育成戦略、フュージョンテクノロジーの開発戦略、推進体制等が盛り込まれている。さらに、翌年 6 月に策定された統合イノベーション戦略 2024 において、「世界に先駆けた 2030 年代の発電実証の達成に向けて、必要な国の取組を含めた工程表を作成するなど、フュージョンエネルギーの早期実現を目指す」ことが閣議決定された。それを受けて、核融合科学技術委員会では、社会実装に繋がる科学的・技術的に意義のある発電実証を可能な限り早期に実現するために、原型炉目標や原型炉段階への移行判断の見直しに着手している。

QST では、原型炉の第 1 期目標を「2030 年代発電実証」として、のちに多段階で改造しながら原型炉の目標を達成する考え方（プラン D）を整理した。講演では、上記の背景に加えてプラン D の概要と今後の見通しについて紹介する。

トカマク炉とディスラプション対策

松山 顕之¹

京大エネ科¹

本講演の前半では ITER 運転におけるディスラプションの位置づけと対策について述べ、後半では研究会のテーマである核融合炉実現を志向した際の課題について議論する。

ディスラプション対策[1]は ITER 計画の最重要課題の一つとされており、ディスラプション緩和システム(図 1)の最終設計レビューは昨年の 3 月に行われた。対策を複雑にする原因は MeV 逃走電子の発生にある。14 MeV 中性子に由来して生じるガンマ線が引き起こす雪崩的増幅過程が ITER で発現すると 1990 年代後半に Rosenbluth らが予測し[2]、その後、20 年以上にわたる精力的な研究[3]はその予測の確度を高める一方で、成功の確信を持てる解決策はいまだ構築されていない。但し、ITER の設計では実装できない解決策は検討から排除されている点も注意が必要で、ITER の次の炉がトカマク方式に基づくとすればディスラプションと逃走電子への対策は設計初期から十分に精査されるべき、というのがディスラプションに関わる研究者の統一見解ではないだろうか。また、機械学習や強化学習の高度化はディスラプション回避の信頼性を高めるプラズマ制御の研究に異分野からの参入を含め、多くの研究者・技術者を導いており、今後の発展が期待される。

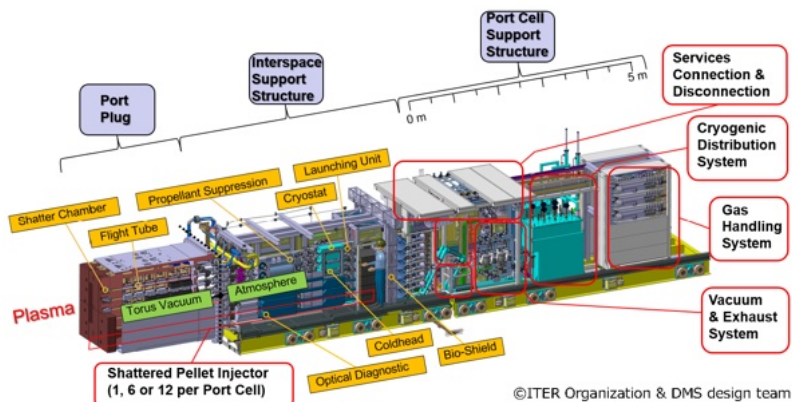


図.1 ディスラプション緩和システム

参考文献

- [1] 芳野隆治、プラズマ・核融合学会誌 **75**, 1360 (1999).
- [2] M. N. Rosenbluth et al., in *Proceedings of the 16th International Conference on Fusion Energy, Montreal*, 1996 (IAEA, Vienna, 1997), Vol. 2, p. 979.
- [3] M. Lehnen, et al., “R&D for Reliable Disruption Mitigation in ITER” in *Proceeding of 27th IAEA Fusion Energy Conference (Gandhinagar, 22-27 October 2018)* p. EX/7-12.

JT-60SA 統合試験運転で観測されたディスラプション

○横山達也¹, 井上静雄¹, 小島信一郎¹, 若月琢馬¹, 浦野創¹, 佐野竜一¹,
大谷芳明¹, 隅田脩平¹, 仲野友英¹, 武智学¹, Tamás Szepes², 吉田麻衣子¹
量研¹, HUN-REN²

ディスラプションとはトカマクプラズマの閉じ込めに必要なプラズマ電流が瞬間的に失われる崩壊現象であり、定常運転を妨げるだけでなく装置の損傷の原因となる。特に大型装置の運転開始直後はディスラプションが多く発生することが知られており、2023 年に行われた超伝導トカマク装置 JT-60SA の統合試験運転でも、多くのディスラプションが観測された[1,2]。これらのディスラプションの調査は、ITER や原型炉といった将来のトカマク装置で発生しやすいディスラプションを事前に把握し、それらを回避するために重要である。

本研究では JT-60SA の統合試験運転で観測されたディスラプションをその特徴から(a)垂直位置不安定性による崩壊、(b)非軸対称な MHD 不安定性による制御不能状態、(c)放射損失の増大による崩壊の 3 種類に分類し、それぞれの特徴や、崩壊の生じやすい条件について議論した。

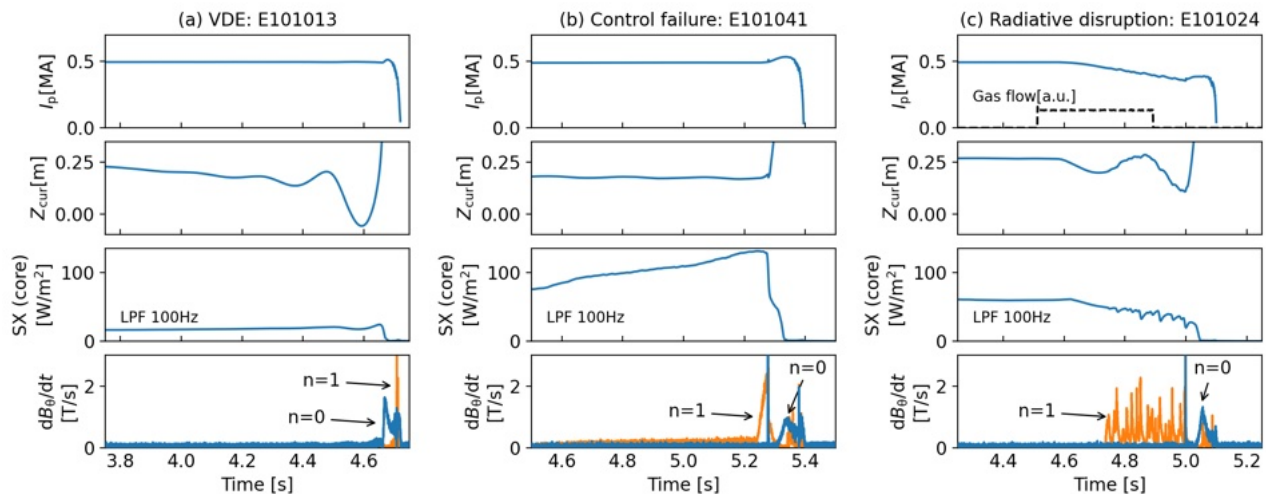


図 1. JT-60SA 統合試験運転で観測された(a)垂直位置不安定性による崩壊、(b)非軸対称な MHD 不安定性による制御不能状態、(c)放射損失の増大による崩壊の 3 種類ディスラプションの代表的な波形。

参考文献

- [1] P. C. de Vries et al. Nuclear Fusion, 49(5):055011 (2009).
- [2] T. Yokoyama et al. Nuclear Fusion, 64(12):126031 (2024).

核融合プラズマ内の電子・イオンスケール乱流間相互作用の研究

那須達文¹, 徳沢季彦^{1,2,3}, 前山伸也², 永島芳彦³, 居田克巳², 稲垣滋⁴, 西浦正樹⁵, 吉村泰夫⁶, 矢内亮馬², 佐竹真介², 吉沼幹朗², 田中謙治^{2,3}, 小林達哉^{1,2,3}, 江尻晶⁶, 渡邊清政^{2,7}, 山田一博², 西村大輝², LHD 実験グループ
総研大¹, 核融合研², 九大³, 京大⁴, 東大⁵, 量研⁶, 名大⁷

核融合エネルギーの実現には、現在多くの大型装置で輸送に支配的とされる、乱流を理解し制御することが必要である。特にイオンラーマ半径程度のイオンスケールの乱流が乱流輸送に支配的であるとされてきたが、近年のシミュレーション研究の進展により、電子ラーマ半径程度のスケールの電子スケール乱流が相互作用し、イオンスケール乱流輸送に寄与する可能性があることが分かってきた^[1]。将来的な核燃焼プラズマでは α 粒子による電子加熱によって電子温度が卓越することで電子スケール乱流が強く励起されると予想されており、電子・イオンスケール乱流間相互作用の実験的検証が待たれている。

そこで、LHD においてミリ波後方散乱による電子スケール ($k_{\perp} \rho_i \sim 5$) の乱流計測とドップラー反射計によるイオンスケール ($k_{\perp} \rho_i \sim 0.5$) の乱流計測を組み合わせた同時計測を行った。そのときの乱流強度の変化を図 1 に示す。ECH パワー変化に電子スケール乱流が応答する様子や、4.7-5.0s で電子スケール乱流強度とイオンスケール乱流強度が相反して変動する様子などが見られる。これらを整理した結果を当日発表する。

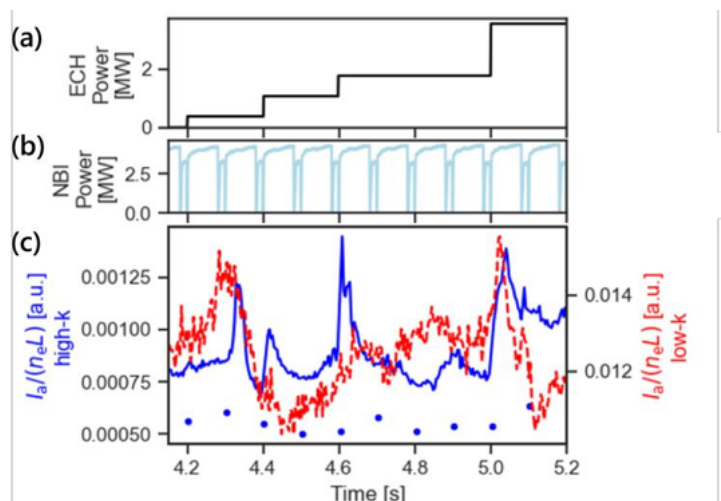


図.1 放電時の (a) ECH ・ (b) NBI の加熱パターンと (c) 電子 (青) ・イオン (赤) スケール乱流強度の時間変化

参考文献

[1] S. Maeyama et al, Nature Communications **13**, 3166 (2022).

輸送障壁中における

平行流シア駆動モードに対する温度比効果

小山一輝¹, 小菅佑輔²

九大 総理工¹, 九大 応力研²

輸送障壁が形成されている領域を念頭に、イオン温度勾配駆動 (ITG) モードおよび平行流シア駆動 (PVG) モードに対する線形解析の結果を報告する. というのも先行研究において, ITG 乱流が駆動する自発回転による平行流の径方向勾配が発達することで, 運動量輸送が発生しうることが報告されており, この運動量輸送が圧力の漏出, つまり閉じ込め悪化をもたらし得ることが指摘されているためである[1]. こうした運動量輸送の担い手として, PVG モードが考えられる. そこで本発表では PVG モードと ITG モードが共存する系に注目し, 特に PVG モードのパラメータ依存性を報告する.

イオン圧力の輸送チャンネルに輸送障壁が形成されるとき, イオンの熱輸送が改善される. そのため, 温度比 ($\tau \equiv T_{i0}/T_{e0}$) が有限になることが予想される. この温度比 τ は, ITG および捕捉電子駆動モードのモード間の閾値を変化させることが報告されている[2]. そこで本研究においても, 温度比効果について着目した.

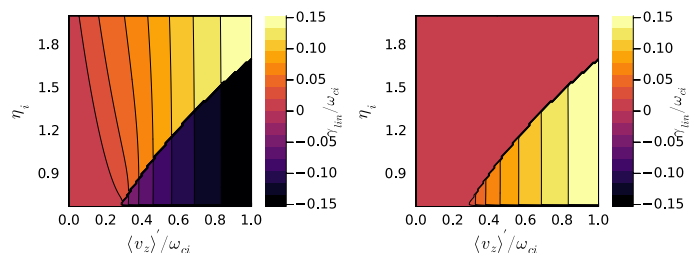


図 1: 各モードの排他性 ($k_y \rho_s = 0.8, k_z \rho_s = 0.1, \tau = 1$)

本研究ではまず, ITG モードと PVG モードが排他的に不安定化することを明らかにした (図 1). 加えて, 温度比 τ が ITG および PVG モード間の閾値を, 変化させることを確認した. $\tau < 1$ のとき, PVG モードが不安定化するパラメータ領域が広がり, $\tau > 1$ のとき ITG モードが不安定化するパラメータ領域が広がることを確認した.

また, PVG モードが不安定化する領域での波数依存性における温度比効果についても明らかにした. 温度比 τ が有限であるとき, PVG モードの成長率 γ_{lin} のピークが高波数側にシフトしていくことを確認した. このことから, 輸送障壁のようなシア流においても高波数側にシフトした PVG モードが運動量輸送を駆動していることが示唆される.

参考文献

[1] S.S. Kim *et al* 2011 *Nucl. Fusion* **51** 073021

[2] A. Casati *et al Phys. Plasmas* **15**, 042310 (2008)

GAMMA 10/PDX セントラル部における ICRF 位相制御による 差周波波動励起の効率化検討

バッタライ大¹, 平田真史¹, 市村真¹, 木梨裕太¹, 瀬戸拓海¹, 宮内礼那¹,
小野みずき¹, 堀尾大輔¹, 江角直道¹, 東郷訓¹, 坂本瑞樹¹, 福山淳², 池添竜也³
筑波大¹, 京都大², 九大³

GAMMA 10/PDX では ICRF 遅波を用いたイオン加熱を行っているが、冷たいプラズマ近似の範囲では、密度が 10^{19} cm^{-3} 以上になると遅波をコア領域に励起することが困難となることが予想される[1]。現在、原型炉ダイバータ模擬実験に向けた Pilot GAMMA PDX-SC では 10^{19} cm^{-3} 以上の密度を目指しており、高密度時のイオン加熱方法の確立が重要な課題である。

新しいイオン加熱方法として、高密度でもコア領域に励起可能な二つの異なる周波数の速波を用い、その差周波数をもつ遅波(差周波波動(DF))をプラズマ内部で励起する実験を行っている。これまでに反磁性量の増大や荷電交換中性粒子計測から実際にイオン加熱を確認した[2][3]。

本研究では、二つの速波を定在波として励起し、定在波の腹の位置を制御することで DF を強く励起することを検討している。実験ではセントラル部東西両端に設置された二つの Type-III アンテナに 9.9 MHz を印加し、その位相を変化させた(Fig. 1)。東側に設置された E-DHT アンテナを用いて励起された 16.26 MHz の速波は、セントラル部両端の強磁場部でカットオフとなりセントラル部に定在波として励起される。励起された波動は反射計及び磁気プローブにより計測され 高密度時($\sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)に 6.36 MHz の DF を確認することができた。本公演では DF が効率よく励起する条件を調べる為に TASK-3D 計算コードを用いて 9.9 MHz の波動構造を検討し、DF へ与える位相依存性について考察を行った。

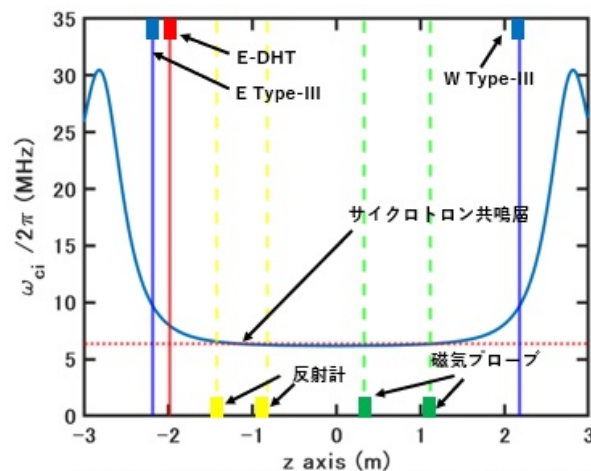


Fig. 1 GAMMA 10/PDX セントラル部磁場、アンテナ及び計測器位置

参考文献

- [1] R. Ikezoe, *et al.*, Plasma Fusion Res. **14** (2019) 2402003.
- [2] H. Kayano, *et al.*, Plasma Fusion Res. **16** (2021) 2402045.
- [3] Y. Sugimoto, *et al.*, Plasma Fusion Res. **18** (2023) 2402084.

本研究は NIFS 双方向型共同研究(NIFS23KUGM174, NIFS23KUGM182)のもと実施されている。

ラプラシアン固有関数と L_1 正則化を利用したスパースモデリングを用

いたトモグラフィ法の開発

武田健太郎¹, 鈴木康浩¹

広島大学大学院先進理工系科学研究科¹

乱流による異常輸送[1]は、熱・粒子輸送を増大させるため、その理解と制御は重要な課題の一つである。そのため、本研究はトモグラフィ法を用いて乱流の構造を再構築し、画像解析手法を用いてプラズマ乱流のダイナミクスを考察する。プラズマ乱流の再構成は、乱流の非局所性、非定常性という特性から MLEM 法[2]のような逐次計算法が広く利用されるが、MLEM 法は観測領域の欠損時に精度が低下し、高解像度再構成には、計算負荷が大きい。

そこで、本研究では基底に斎藤のラプラシアン固有関数[3]を採用し、 L_1 正則化を用いたスパースモデリングによって基底係数を決定する級数展開法、「LEF 法」を開発した。LEF 法は観測欠損に強く、必要最小限の基底を取捨選択して、任意の観測領域で再構成することができるため、計測器配置の自由度が低い核融合炉に適している。本発表では直線プラズマを模した Phantom データを作成し、2D 及び 3D の再構成結果を MSSIM で評価する。2D での数値実験再構成結果を図 1に、3D での数値実験再構成結果を図 2に示す。数値実験からガウシアンのような構造などは、Phantom と相違なく再構成できることがわかった。

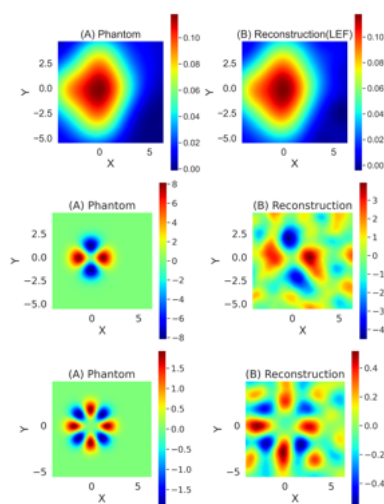


図 1 2D 数値実験再構成結果

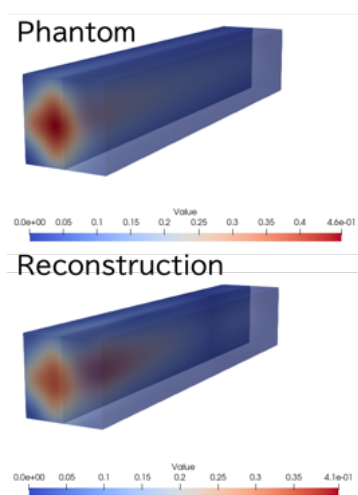


図 2 3D 数値実験再構成結果

参考文献

- [1] Garbet, X., F. Mourgues, and A. Samain. "Magnetic turbulence and anomalous transport.," Plasma Physics and Controlled Fusion 32.11, (1990): 917.
- [2] Shepp, Lawrence A., and Yehuda Vardi. "Maximum likelihood reconstruction for emission tomography.," IEEE transactions on medical imaging 1.2, (2007): 113-122.
- [3] N. Saito, "Data analysis and representation on a general domain using eigenfunctions of Laplacian.," Applied and Computational Harmonic Analysis 25.1, (2008): 68-97.

トカマク炉におけるシンクロトロン放射を利用した プラズマ電流駆動の解析

高橋夢翔, 飛田健次, 大石鉄太郎, 高橋宏幸
東北大学

1. 背景と目的

トカマク型核融合炉では、閉じ込めのためにプラズマ電流を流す必要がある。JA DEMO^[1]では電流駆動のため、核融合出力の数割程度にも及ぶ 100 MW 程度のパワーを要する設計となっている。このパワーを低減するため、シンクロトロン放射 (SR: Synchrotron Radiation) の利用を考える。SR は磁力線に巻き付く電子から放射される電磁波であり、数千 GHz 程度の高次高調波成分を含む。電子温度の高い原型炉では、第一壁に到達する SR は数十 MW 程度と計算され、これを利用することで、電流駆動に要するパワーの低減を試みる。

SR による電流駆動では、第一壁を反射面とし、その面に傾斜角をつけることで方向を制御した SR をプラズマに入射させる^[2]。入射した SR は電子と共鳴してエネルギーを受け渡し、ECCD と同様の原理に基づき電流が駆動されると考えられる。ただ、SR の含む高次高調波について、そのプラズマへの吸収や電流駆動の評価は限定的である。そこで本研究は、SR による電流駆動の有効性を示すため、JA DEMO プラズマを対象とし、高次高調波の吸収・電流駆動を数値解析により明らかにすることを目的とする。

2. シンクロトロン放射スペクトルの計算

本計算では、放射輸送コード CYTRAN^[3]を用いる。CYTRAN では磁気面平均値を用いてプラズマの空間分布を考慮できるため、JA DEMO の平衡データに基づく値を設定し、計算を行った。

右図にスペクトルの計算結果を示す。SR は 1000 - 1500 GHz 程度の周波数成分が強く放射され、合計の放射パワーは 72 MW となった。このスペクトルを用いて電流駆動等の評価する。

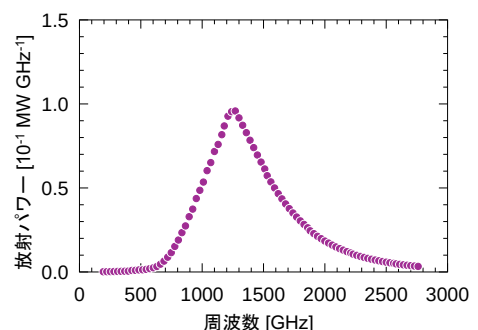


図 1 SR のスペクトル

3. シンクロトロン放射を利用したプラズマ電流駆動の計算

本計算では、プラズマの形状や空間分布を考慮できる電流駆動解析コード TRAVIS^[4]を用いる。網羅的な解析には時間を要するため、今回は、SR が弱磁場側赤道面上の領域(右図)で反射する場合のみ考慮する。プラズマに入射した SR によって駆動される電流を、入射角を変えながら解析する。

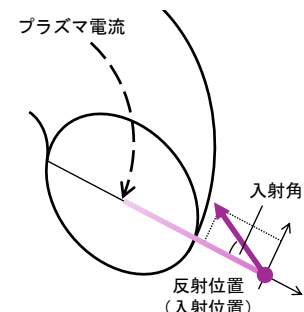


図 2 SR の入射条件

4. 参考文献

- [1] K. Tobita *et al.*, Fusion Science and Technology 75 (2019) 372.
- [2] Dawson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1730. [3] S. Tamor, SAIC Report SAI-023-81-189LJ/LAPS-72 (1981).
- [4] N. B. Marushchenko *et al.*, Computer Physics Communications **185** (2014) 165.

トカマクプラズマにおける捕捉電子モード乱流輸送の

磁場形状効果とベータ値依存性

河津智也¹, 今寺賢志¹, 稲垣滋², 門信一郎², 金史良², 石澤明宏¹

京都大学大学院エネルギー科学研究科¹,

京都大学エネルギー理工学研究所²

僕は核融合炉実現とは「商用利用可能な核融合炉、すなわち Q 値が 40 以上になる核融合炉の実現」と定義する。理由は僕が「核融合炉発電所」を実現することを夢見てこの業界に入ったためである。核融合炉発電所実現のためには、高ベータプラズマの達成が必要である。しかし、ベータ値の上昇は磁場構造の変化 (Shafranov-shift など) や MHD・微視的不安定性の成長を招き、乱流輸送を増大させる。この問題を克服するための物理的ダイナミクスの理解が、高ベータ領域で安定かつ高性能な核融合炉を設計するうえで不可欠となる。

本研究ではトカマクプラズマ、特に JT-60U のトカマク実験装置パラメータに対して局所的ジャイロ運動論シミュレーションコード GKV を用いて、微視的不安定性の一つである捕捉電子モード (TEM) 乱流輸送のベータ値依存性を調査する。燃焼プラズマでは α 粒子が電子を加熱するため、電子温度勾配駆動の不安定性を理解する必要がある、その中でも TEM はイオンラーマー半径スケールの揺動を生じ、イオン温度勾配不安定性 (ITG) と並んで乱流輸送の特性に大きく影響する。

本発表では JT-60U の L-mode プラズマ (#E45072) のややエッジよりの小半径 ($\rho=0.7$) における乱流輸送を Shafranov-shift の効果に着目して議論する。計算の結果 $\rho=0.7$ では TEM が不安定であることが明らかになった。そして、Shafranov-shift なしの β スキャンでは低波数領域の線形成長率が磁場揺動の影響をほとんど受けず、さらにベータ値を上げていくと KBM に遷移することが分かった。これは CBC パラメータが調査された先行研究[1]と同様の結果である。講演ではさらに TEM の非線形計算による乱流輸送と Shafranov-shift ありでのベータ値依存性の結果について報告する。

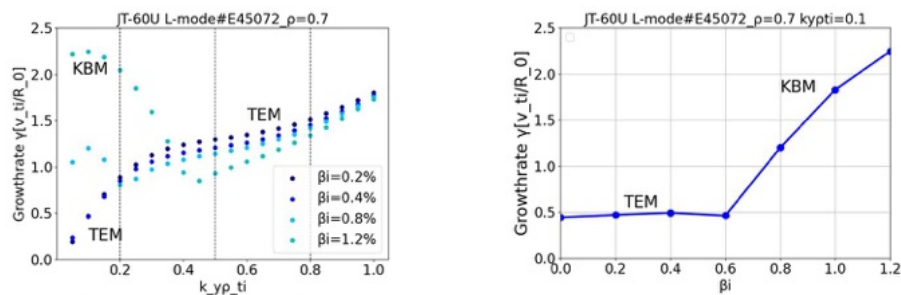


図: Shafranov-shift なしでの線形成長率 γ_{v_{ti}/R_0} の各ベータ値における波数スペクトル (左図) と $k_y \rho_{ti} = 0.1$ におけるベータ値依存性 (右図)

低波数領域では TEM が磁場揺動の影響を受けず、ベータ値を上げていくと KBM に遷移する。

参考文献

[1] A. Ishizawa *et al.*, *J. Plasma Phys.* **81**, 435810203 (2015)

高ベータ領域における平行方向磁場揺動効果を取り入れた

GKV コードの拡張

岡林秀明¹, 今寺賢志¹, 石澤明宏¹
京都大学¹

近年、核融合炉実現に向けて様々な研究が理論・実験共に進められている。核融合反応を持続させる指標としてローソン条件がある。これは、プラズマの温度、密度、閉じ込め時間の関係を示したものである。近年では閉じ込め時間の増加に向けて不安定性や輸送の研究はもとより、TCV による制御などが注目を集めている一方で、球状トカマクなどの高いベータ値(圧力)を持つ高アスペクト比装置への期待が高まっている。

微視的不安定性解析はジャイロ運動論方程式に基づいたシミュレーションによって行われる。ジャイロ運動論方程式は Vlasov 方程式、Maxwell 方程式で構成されるが、Ampere 則により決定される磁場揺動はベータに比例することから、低ベータ領域では無視(静電近似)あるいは、垂直方向のみの磁場揺動が取り扱われることが多かった。しかし近年、平行磁場揺動が不安定性を成長させることが報告されている。今回の発表では、GKV コードにおいて $A_{\parallel}$ を計算し、平行方向の磁場揺動効果を取り入れた際にどのような不安定性が生じるかを議論し、MTM との関係について考察する。

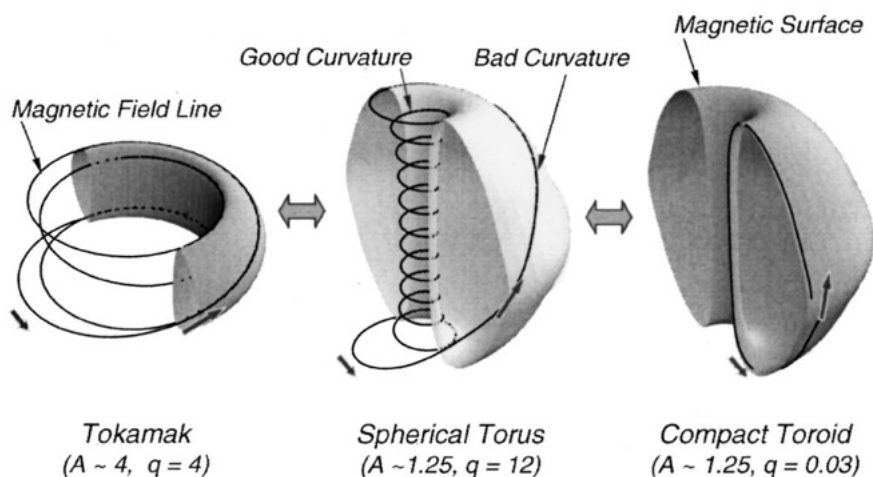


図.1 大半径トーラスと球状トカマク

参考文献

- [1] D. Kennedy and C.M. Roach, *On the importance of parallel magnetic-field fluctuations for electromagnetic instabilities in STEP*, Nucl. Fusion **64**, 086049 (2024).

ダイバータプラズマにおける大角度散乱効果

梅崎大介¹
量研¹

【緒言】

核融合炉の実現のため、ダイバータ板にかかる熱負荷の低減は喫緊の課題である。イオン—原子間の弾性衝突では大角度散乱 (Large-angle Elastic scattering: LES) も生じ、小角度散乱が支配的なクーロン散乱に比べて、一度の散乱で大きなエネルギーが輸送され、粒子の運動方向も大幅に変化する。我々の以前の研究で、LES により、磁場に垂直な方向の粒子輸送 (大角度散乱輸送) が生じ、密度分布が変化することを指摘している[1]。ダイバータ板に到達したイオンは、壁面で中性化・反射されプラズマへ再突入する。原子は密度が高い方から低い方へ向かう流速 $\vec{V}_n$ を有する。このとき、原子の流速 $\vec{V}_n$ と磁場 $\vec{B}$ の外積方向 $\vec{V}_n \times \vec{B}$ に、イオンの大角度散乱流速 $\vec{V}_{LES}$ が生じる。

本研究では統合コード SONIC[2]に、LES を導入し、重陽子—重水素原子間の LES が、プラズマの輸送過程及び密度分布に及ぼす影響を評価した。

【解析方法と結果】

代表的なトカマク装置として JT-60SA のシナリオ #2 を対象に SONIC シミュレーションを行った。燃料ガスパフレートは $5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 、ラジエーションパワーは 12 MW である。

図 1 に、外側ダイバータ板におけるイオン密度分布を示す。黒線は LES を無視、赤線は LES を考慮、青線は LES 考慮の上でトロイダル磁場の向きを反転している。破線は LES を無視した場合からの密度の変化率を示している。LES により、通常の磁場配位で 5%、反転磁場配位で 20%程度減少した。大角度散乱流速により、イオンがダイバータ板へと早く到達することで、ダイバータ板上の密度が減少した。トロイダル磁場の向きを反転すると、大角度散乱流速の向きも 180 度反転して更に密度が減少した。

中性粒子の振る舞いは、ダイバータ板形状やプラズマの状態にも左右される。今後の展望として、大角度散乱を積極的に活用し、熱負荷の低減が可能なダイバータ形状や、運転条件の探査を目指す。

[1] D. Umezaki, et al., Contrib. Plasma Phys. e202300064 (2023)

[2] H. Kawashima et al., Plasma Fusion Res. 1, 31 (2006)

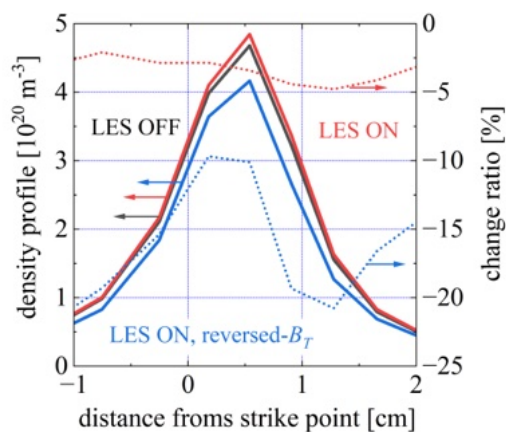


図 1 外側ダイバータ板における密度分布の比較

低アスペクト比 RFP プラズマ装置 RELAX での トカマクプラズマの生成およびその特性

井上孟流¹, 比村治彦¹, 三瓶明希夫¹, 政宗貞男¹
京都工芸繊維大学¹

磁場閉じ込めプラズマでは、安全係数 q や磁気シアで特徴づけられる磁場構造がプラズマの安定性に重要な役割を果たす。これらは理論やシミュレーション研究において精力的に研究されているが[1]、系統的な実験的検証は十分に進んでいない。そこで、 q それらがプラズマ閉じ込めに及ぼす影響を探求するために、 q 分布や磁気シア分布を系統的に変化させられる実験装置を構築する。本研究では、RFP 配位とトカマク配位のトロイダルプラズマを対象とする。これらはトポロジーが類似している一方で、トロイダル磁場とプラズマ電流の大小関係が互いに反対となる。そのため、磁気シアの強度、極性、空間分布に違いがある。この相違を活用し、系統的な実験を行うことで、トロイダルプラズマにおける磁気シアの影響を探求できる。

本研究では、低アスペクト比 RFP 装置 RELAX のトロイダル磁場系を増強し[2,3]、RFP 配位からトカマク配位までの広範な磁場配位を持つトロイダルプラズマの形成[4]およびその特性を評価する。図 1 は RELAX 装置で形成されるトロイダルプラズマのパラメータ領域を示している。左側には RFP 領域($-0.25 < q_a < 0.6$)、右側には本研究で実現したトカマク領域($0.8 < q_a < 12$)が示されている。このことから、RELAX 装置において、RFP プラズマに加え、トカマクプラズマ、およびそれらの中間領域に位置する *ultralow- q* プラズマや *low- q* トカマクプラズマ、さらには *high- q* トカマクプラズマといった多様なトロイダルプラズマの形成が可能となった。また、これらの様々な磁場配位のプラズマにおける磁場揺動と q_a の関係を実験的に調査している。

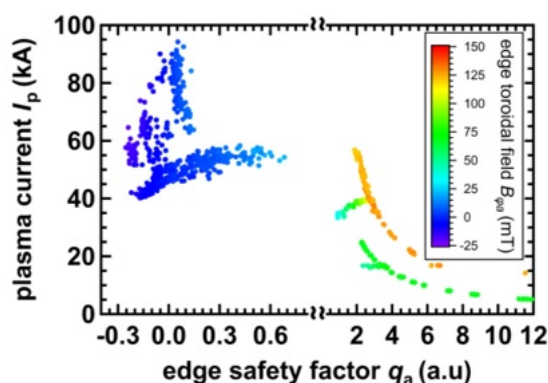


図 1. RELAX で形成されるプラズマのパラメータ領域。

参考文献

- [1] Y. Idomura *et al.*, Nucl. Fusion **45** (2005) 1571. [2] T. Inoue *et al.*, Fusion Eng. Des., **184**, (2022) 113285.
[3] T. Inoue *et al.*, Plasma Fusion Res. **19** (2024) 1205030. [4] T. Inoue *et al.*, Plasma Fusion Res. **19** (2024) 1202025.

最適運転シナリオ構築に向けた技術開発と因果探索の応用

安齋亮慶¹, 成田絵美¹, 本多充², 森下侑哉¹, 村上定義¹

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻¹, 京都大学大学院工学研究科工学基盤教育センター²

核融合発電の実現には、核融合炉プラズマの立ち上げからその維持に至るまで、安定した制御のシナリオ構築を行う必要がある。現在では統合コードを用いた最適なシナリオ探索が行われている。しかし現状の経験をもとにしたシミュレーションを繰り返すシナリオ探索方法では、制御すべきパラメータの組みあわせ爆発があり、また人の手で入力を切り替えて探索するため手間が大きく、最適なシナリオを探索することが困難である。より良いシナリオ構築のためにはパラメータの組み合わせ最適化問題を解決し、経験によらない自動化された探索手法が必要である。本講演では組み合わせ最適化を解決する自動化シナリオ構築の手法として、ベイジアンネットワークを用いたバックキャストシナリオ構築を提案し、ベイジアンネットワークの作成に利用する変数間の依存・因果関係を表すネットワークモデルを構築するための因果探索手法を用いたモデリング(図1)を行なっている現状について報告する。

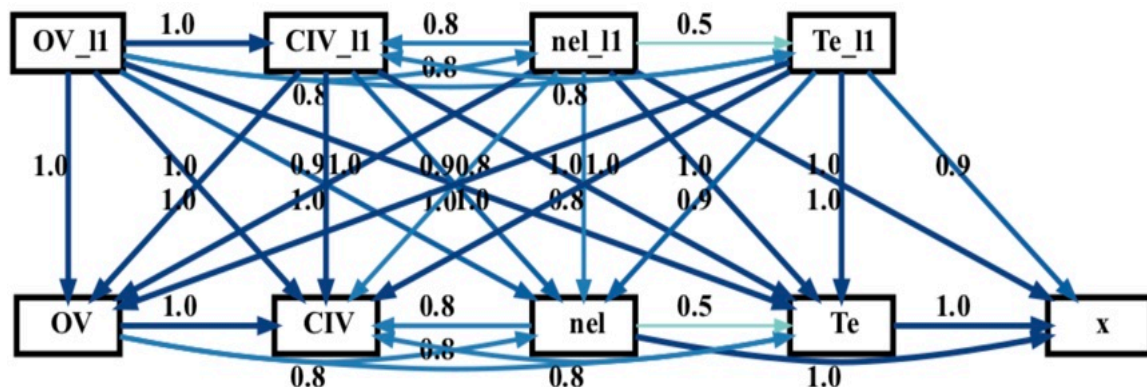


図.1 磁場 2.75T 時の LHD 放電データの因果探索によるモデリング結果. プラズマの物理量間の因果関係と依存関係を示す. OV は酸素不純物発光強度, CIV は炭素不純物発光強度, nel は線平均電子密度, Te は電子温度, x はプラズマの不安定性の指標である Density Exponent である. また 11 とついている変数は 1 時刻前の変数である. 枝の重みは変数間の結びつきの強さを示す.

参考文献

- [1] K. Uemura et al., *A Multivariate Causal Discovery based on Post-Nonlinear Model*, PMLR **177**, 826-839 (2022)
- [2] J. Peters, D. Janzing and B. Schölkopf, *Causal inference on time series using restricted structural equation models*, Adv. Neural Inf. Process (2013)

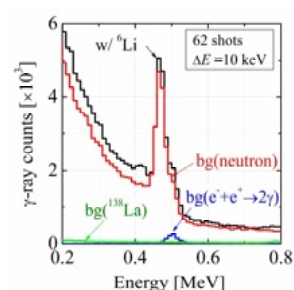
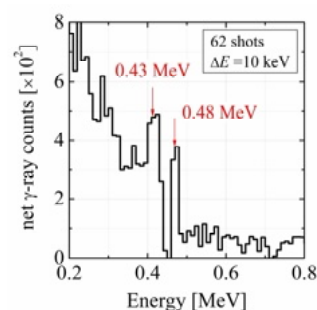
LHD における高速イオンに起因する γ 線スペクトル及びその評価法の検討脇坂真司¹, 松浦秀明¹, 小川国大^{2,3}, 川本靖子², 磯部光孝^{2,3}¹ 九大院工, ² 核融合研, ³ 総研大

イオン間のエネルギーが高まると、散乱過程に核力の影響が現れる(核弾性散乱[1])。核融合プラズマにおいて核弾性散乱が連続的に生じることで、イオン速度分布関数の高エネルギー領域に非 Maxwell 成分(ノックオンテイル)が形成される。ノックオンテイル形成について多くの数値解析がなされてきたが[2]、その実験的検証は十分とはいえない。我々は 2017 年度から、LHD 重水素プラズマにおいてノックオンテイルの観測実験に取り組んでおり、ノックオンテイルに起因する DD 反応率の上昇を観測した[3]。これは DD 反応を利用した観測であるが、断面積のエネルギー依存性がより急峻である ${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応(次式)のノックオンテイル観測への利用も検討されている[4]。



${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応は DD 反応と異なりバルク重陽子が反応にほとんど関与しないため、バルク密度・温度の揺動が計測に与える影響を排除できる。そのため、DD 反応を用いた観測と比較して、より正確にノックオンテイルを評価できる可能性がある。我々は、上述の DD 反応を用いた観測と並行して、 ${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応で生じる γ 線を用いたノックオンテイルの観測実験に取り組んできたが、0.43 MeV のピークが明確に観えないことが問題点であった。今回は、LHD 軽水素プラズマにおいて軽水素ビーム(重水素割合: 0.015%)を用いた実験を実施し、 ${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応由来の γ 線(0.43 MeV 及び 0.48 MeV)の評価法に対する知見を得ることを目的とした。

LHD 軽水素プラズマに 170 keV 軽水素ビーム(重水素混入割合: 0.015%)を入射した。このプラズマに、直径 1.3 mm、高さ 0.5 mm 程の円柱状 ${}^6\text{LiF}$ 焼結ペレット(${}^6\text{Li}$:95%濃縮)を入射した。荷電交換分光計測を用いて ${}^6\text{Li}$ 空間分布の時間発展を計測し、Li 発光強度がペレット入射前の 3 倍以上に高まった時間に対して、 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 検出器[5](結晶サイズ 3 インチ)で γ 線を計測した。図 1 に、 ${}^6\text{Li}$ 入射が確認された 62 ショット分の γ 線データを積算した結果を示す(黒)。0.48 MeV 付近に大きなピークが観測された。本実験におけるバックグラウンド γ 線について調べると、①シンチレータに含まれる ${}^{138}\text{La}$ の放射性崩壊による γ 線(図 1 緑)、②ビーム-バルク間の DD 反応で生じた中性子に由来する γ 線(検出器の中性子遮蔽材に含まれる ${}^{10}\text{B}$ との反応(${}^{10}\text{B}(\text{n},\alpha\gamma){}^7\text{Li}$)による 0.48 MeV- γ 線等、図 1 赤)、③不純物(Li 及び F)がプラズマに混入したことで誘起された電子対生成及び電子対消滅に由来する 0.51 MeV- γ 線(図 1 青)の 3 つが存在することが分かった。図 1 中の黒から緑、赤及び青を差し引いた、 ${}^6\text{Li}$ 反応由来の正味の γ 線スペクトルを図 2 に示す。ビーム重陽子に起因する ${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応由来と思われるピーク(0.43 MeV 及び 0.48 MeV)及び、ビーム陽子に起因する ${}^6\text{Li}+\text{p}$ 反応由来と思われるピーク(0.43 MeV)が観測された。発表では、検出される ${}^6\text{Li}+\text{p}$ 及び ${}^6\text{Li}+\text{d}$ 反応由来の γ 線カウント数を数値解析により推定し、議論を行う。

図 1 γ 線スペクトル(Li 滞在時及びバックグラウンド)図 2 ${}^6\text{Li}$ 反応由来の正味の γ 線スペクトル

参考文献

- [1] J. J. Devaney, M. L. Stein, Nucl. Sci. Eng., 46 (1971) 323. [2] 松浦, 他, プラズマ・核融合学会誌, 91 (7) (2015) 449.
 [3] H. Matsuura, et al., Nucl. Fusion, 61 (2021) 094001. [4] H. Matsuura, et al., Plasma Fusion Res., 2 (2007) S1078.
 [5] K. Ogawa, et al., JINST, 18 (2023) P09024.

統合コード TOTAL を用いた原型炉プラズマの多変数制御における 応答特性に基づく制御ゲイン決定手法

可児和寿, 藤田隆明, 岡本敦, 河内裕一
名大院工

核融合原型炉プラズマの制御においては、1 つの操作量が多数の制御量に影響を与えるだけでなく、さまざまな時間スケールを持つ現象が混在する。したがって、このような複雑な系に対しての制御ロジックの構築が必要とされている[1]。炉心プラズマを模擬する統合プラズマ輸送コード TOTAL では、多変数帰還制御の機能が付加された。本研究では、TOTAL の多変数帰還制御機能を用いて原型炉プラズマを対象とした適切な制御ロジックの構築に向けて PID 制御ゲインの決定手法について議論を行うことを目的とする。

多変数 PID 制御において、 j 番目の操作量 X_j は式(1)によって決定される。 $X^{\text{pre}}, X^{\text{base}}$ はそれぞれプレプロ値、ベース値であり、 C_j^k は k 番目の制御量での偏差 e_k によって式(2)のような PID 制御式によって求められる。

$$(1): X_j(t) = X_j^{\text{pre}}(t) + X_j^{\text{base}} + \sum_k C_j^k(t), \quad (2): C_j^k(t) = G_{p,j}^k \left(e_k(t) + \frac{1}{\tau_{i,j}^k} \int e_k(t) dt + \tau_{d,j}^k \frac{de_k(t)}{dt} \right)$$

多変数 PID 制御ゲインの値はプラズマの応答特性を基に導出した。例えば、比例制御ゲイン G_p は操作量ベクトルと制御量ベクトルの間に線形関係を仮定しその応答行列を計算し、それに基づいて決定した。応答行列は定常状態からの操作量のステップ変化による制御量の変化率から導出し、制御ゲインはその逆行列から計算した。算出された制御ゲインの値を用いて制御試験を行い、ゲインの非対角項(副次的な制御)の効果について調査することでその値の評価を行った。核融合出力と電子密度を NB 入射パワーとペレット入射率によって制御した場合の結果(Fig.1)より、電子密度変化によって NB 入射パワーに修正を与える非対角項は核融合出力制御において影響が大きいということが分かった。

本研究は量研原型炉研究開発共同研究の支援を受けた。

参考文献

[1] Working group report on Diagnostics & Control for fusion DEMO, Joint Special Design Team for Fusion DEMO, September 2023.

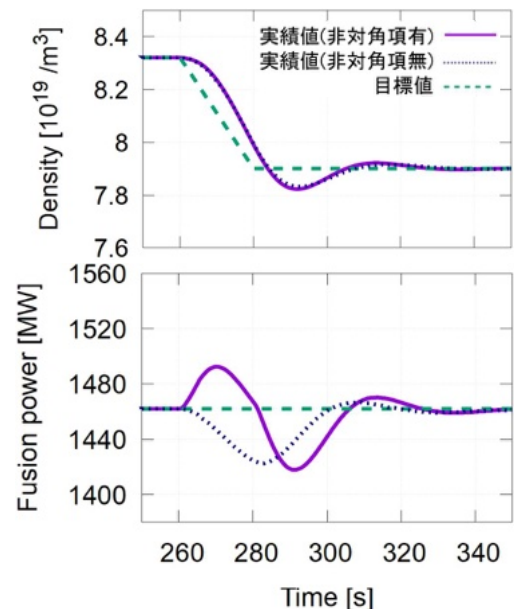


Fig.1. 核融合出力と電子密度を NB 入射パワーとペレット入射率で制御を行い、非対角項の影響を評価した結果。

大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる

微視的テアリングモードの解析

金建希, 今寺賢志, 石澤明宏

京大エネ科

トカマク型磁場核融合発電実現のためには、高ベータ化と H モードでの運転は必須である。その際、高ベータ領域やエッジ領域においては、電磁揺動によって微視的テアリングモード (MTM) や運動論的バルーニングモード (KBM) が不安定化し、熱輸送や乱流輸送を引き起こすと考えられているが、大域的シミュレーションによる解析はまだ十分に行われていない。

そこで本研究会では、トカマク装置 ASDEX Upgrade で観測された MTM を想定して、文献[1]の初期パラメタを参考に大域的ジャイロ運動論シミュレーションコード GKNET を用いて解析を行った。図 1 は無衝突かつ同心円トーラス磁場配位でのシミュレーション結果で静電ポテンシャル揺動 ϕ とベクトルポテンシャル揺動 $A_{\parallel}$ のコンター図を示している。図 2 は ϕ と $A_{\parallel}$ のパリティを示しており、テアリングパリティ^[2]を持っていることから MTM が励起されていることがわかる。

他のトカマク装置でのシミュレーション^[3]では、ベータ値がある閾値を超えると MTM から KBM に遷移することが報告されているため、今後はベータ値依存性を調べる。さらに、衝突や実磁場平衡による shafranov-shift を考慮し、実現象に近づけたシミュレーションを行うと共に、線形及び非線形シミュレーション結果を詳細に解析し、MTM の飽和機構、磁場構造のストカスティック化における大域効果の役割を示す予定である。

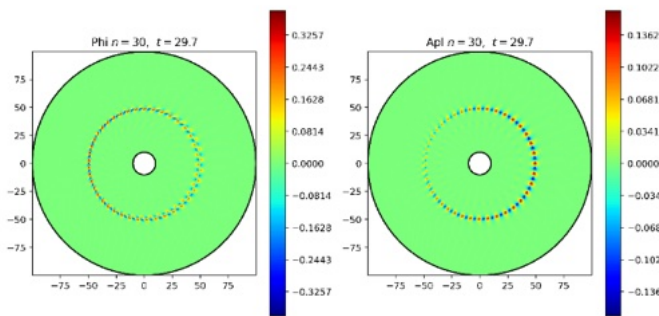


図 1. MTM の ϕ と、 $A_{\parallel}$ のコンター図。

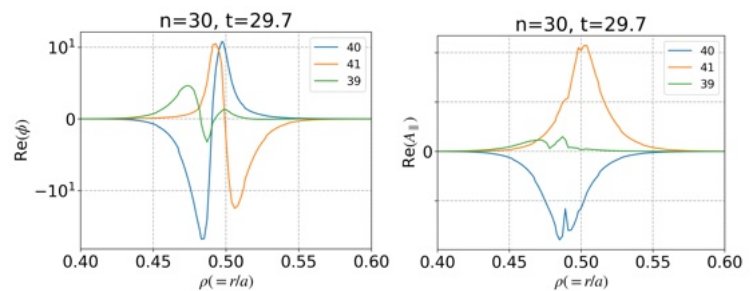


図 2. MTM の ϕ と、 $A_{\parallel}$ のパリティ。

参考文献

- [1] S. Maeyama and T.-H. Watanabe, A. Ishizawa *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 195002 (2017).
- [2] A. Ishizawa, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, H. Sugama and N. Nakajima, *J. Plasma Phys.*, **81**, 435810203 (2015).
- [3] J. Dominski *et al.*, *Phys. Plasmas*, **31**, 044501 (2024).

非軸対称コイルを用いたプラズマ垂直位置制御に関する研究

高竜太, 井上静雄, 小島信一郎, 浦野創, 鈴木隆博, 相羽信行
量研

トカマクプラズマの高橢円度化に伴い出現する垂直位置移動現象(VDE)はプラズマの崩壊を誘発し真空容器やプラズマ対向機器に大きな損傷を及ぼすため, その抑制は解決すべき課題である. VDE 制御には真空容器内側の軸対称コイルを用いるのが主流であるが, 原型炉においては工学的な制約条件から垂直不安定性を制御するための容器内軸対称コイルを導入は困難であり, 容器外コイルでは厚い導電壁の影響で制御性が悪化する. 日本の原型炉では ELM 制御のためにブランケットモジュールとともにプラズマに近い位置に非軸対称コイルを設置する概念設計が検討されている. この非軸対称コイルを活用した高橢円度プラズマの制御及び VDE 抑制の検証を試みた例はなく, その際に発生する誤差磁場の影響は未知である.

本研究では JT-60SA に導入される非軸対称コイルである誤差磁場補正コイル(EFCC)を用いて, MHD 平衡制御シミュレータ (MECS)と 3 次元真空磁場解析を用いてプラズマの垂直位置の制御性と非軸対称磁場の影響を調査した. 初めに垂直位置制御に必要な軸対称成分 ($n=0$)を生成するための EFCC への最適な電流比は, 上側コイル:中間コイル:下側コイル=1:4.14:1であることを明らかにした. 次に JT-60SA における 4.6 MA のプラズマ電流立ち上げ放電(0.3 MA/s)を対象に, EFCC による垂直位置の制御性能及び最大到達橢円度を MECS を用いて検証した. 外乱としてプラズマ電流崩壊を模擬して制御の堅牢性を評価した. 図 1 にプラズマ電流崩壊の割合に対する到達橢円度を示す. 超伝導コイルのみの制御ではコイル電圧が飽和し橢円度 1.7 まで運転可能であるのに対し, EFCC を適用することで, 橢円度 1.95 まで運転領域が拡張することがわかった. 図 1 のカラーバーは EFCC が $q=2$ 面に生成する誤差磁場を示しており, 0.2 mT 以上ではプラズマ崩壊を誘発するロックモードが発現する. 誤差磁場を考慮した場合の運転領域の減少はわずか(赤点線)であることを明らかにした.

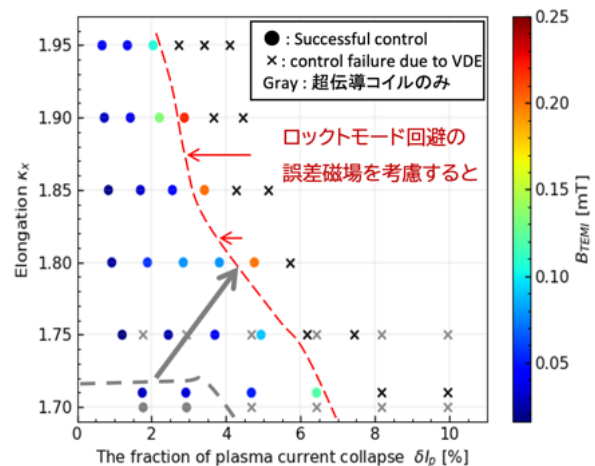


図 1 プラズマ電流立ち上げ時(0.3 MA/s)におけるプラズマ電流崩壊の割合と到達橢円度の相図. カラーバーは EFCC 電流による誤差磁場を示す.

揺動電磁場による ECH 高速電子輸送に対する運動論的モデリング

田原康祐, 飯尾太那, 山本泰弘, 村上定義

京都大学工学研究科原子核工学専攻

磁場閉じ込め方式の核融合プラズマにおいて、プラズマ中のポロイダル・トロイダル方向へのシア流によって乱流輸送が低減することが知られており [1], 乱流輸送低減を目的とした効率的なシア流の駆動手法が求められている。

JT-60U や LHD をはじめとする多くの装置において電子サイクロトロン加熱 (ECH) 時の自発的なトロイダル流が実験的に観測されている [2,3]. ECH によるトロイダル流駆動機構の解明を目的として ECH 高速電子の運動に注目したシミュレーションを行った結果、閉じ込め磁場の非軸対称性により高速電子の径方向輸送が促進され、トロイダル方向への回転駆動力を生じる要因となることが明らかになった [3]. また、完全軸対称なトカマク配位においても、非ゼロのトロイダルモード数を持つ揺動電磁場の存在下で同様の回転駆動力が生じる可能性が指摘されている [4].

本研究ではトカマクプラズマを対象に、微視的スケールの揺動電磁場による ECH 高速電子の径方向輸送およびトロイダル回転駆動力への影響を検証するため、5 次元ドリフト運動論方程式ソルバー GNET [5]を用いて揺動存在下での ECH 高速電子の軌道追跡シミュレーションを行った。図 1 は静電ポテンシャル揺動 ($\langle e|\phi|/T_e \rangle = 0.01$) を印加した場合における、高速電子の径方向粒子フラックス分布である。ここで Γ^+ および Γ^- はそれぞれ、 δf シミュレーションである GNET における、Maxwell 分布からの正 ($\delta f > 0$) および負の変化分 ($\delta f < 0$) に対応する電子群による寄与を表す。静電ポテンシャル揺動の存在下では無摂動の場合 (黄, 緑線) と比較して有意に径方向輸送が増大していることがわかる。また、体積積分した径方向フラックスのパラメータ依存性を図 2 に示す。図 2-(a)より ECH 電子の径方向輸送は振幅パラメータ ($\varepsilon_\phi = \langle e|\phi|/T_e \rangle$) の 2 乗に比例する一方、エネルギー依存性 (図 2-(b)) は単純な拡散モデルによるべき乗則には従わない結果が示された。講演ではより詳細な結果に加え、ドリフト運動論に基づいてこれらの結果を説明づける輸送モデルについて議論する予定である。

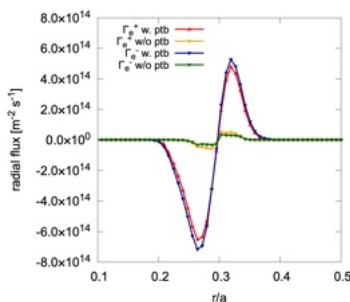


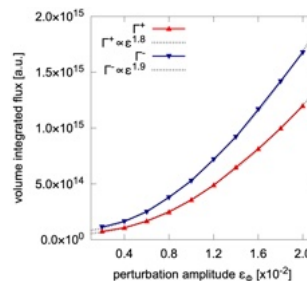
図.1: 径方向フラックス分布.

参考文献

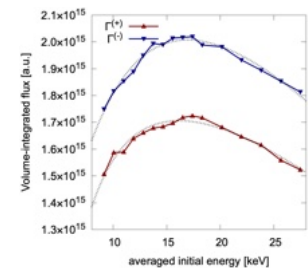
[1] Z. Lin, *et al.*, Science **281**, 1835 (1998)

[2] M. Yoshida, *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 115028 (2009)

[3] Y. Yamamoto, *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 102501 (2021)



(a): 揺動振幅



(b): 初期エネルギー

図.2: 径方向輸送のパラメータ依存性

[4] S. Murakami, *et al.*, IAEA-FEC (2023)

[5] S. Murakami *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 693 (2000)

水素原子・分子線の絶対測光と衝突・輻射解析を組み合わせた

基底状態水素原子・分子密度の評価

吉村 溪冴
東北大院工

核融合炉のダイバータ領域には、中性の水素原子・分子がガスパフやリサイクリングなどにより多量に存在する。この中性粒子はダイバータに流入するプラズマのエネルギーを低減する役割を担うため、ダイバータの熱負荷を制御するには水素原子・分子のパラメータを診断することが重要である。水素原子・分子のパラメータは中性粒子輸送コードによって評価されるが、計測は難しくシミュレーションで得た結果と比較可能なデータが限定的である。そこで、本研究では水素原子・分子線の絶対測光と衝突・輻射 (CR) 解析^[1]を組み合わせることで、標準計測の範囲内で基底状態水素原子密度 (n_H) および放電中の分子密度 (n_{H_2}) を評価可能にした。

実験では、水素分子線の Fulcher- α 帯の輝線と水素原子線の Balmer 系列線の絶対測光を行った。また CR 解析では、入力パラメータである n_{H_2} と n_H を変化させ、実験で得た Fulcher- α 帯の輝線および Balmer 系列線の発光強度を再現する値から n_{H_2} と n_H を決定した。図 1 (a) (b) に n_{H_2} および n_H の評価結果を示している。それぞれの評価結果は $n_{H_2} = 8.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $n_H = 9.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ となった。放電前の圧力から算出した水素分子密度は $1.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ であったため、分子密度は 1/10 以下に低下したことがわかる。この結果から、プラズマ中に水素分子が入り込むことができていない可能性が考えられた^[2]。また、 n_H は n_{H_2} の 11 % 程度であることがわかった。講演では、本手法の詳細と得られた結果について報告する。

参考文献

- [1] K. Sawada and M. Goto, Atoms 4 (2016) 29.
- [2] 篠原俊二郎：プラズマ・核融合学会誌 99 (2023) 444-448

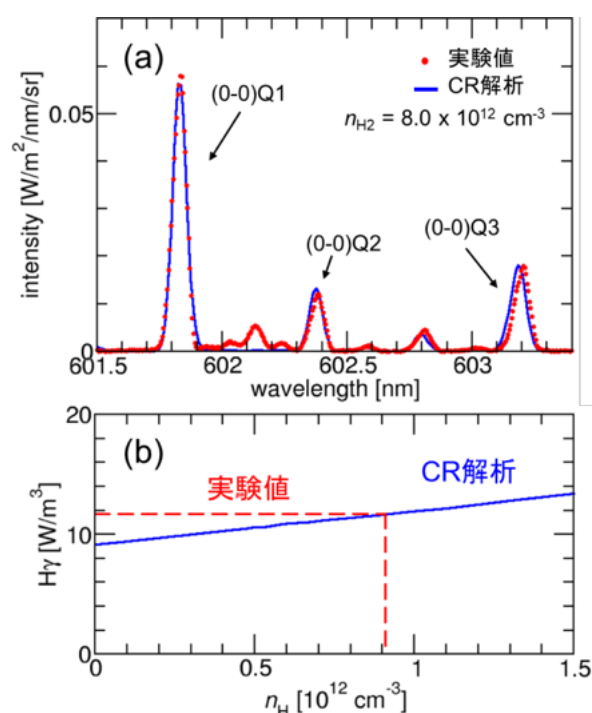


図 1 (a) n_{H_2} の評価結果、(b) n_H の評価結果

QUEST におけるプラズマ撮像からのポロイダル断面発光分布の再構成

蒲沢明¹, 筒井広明¹, 長谷川真², 恩地拓己², 大塚裕也³, 元木巧将³
東京科学大学¹, 九州大学応用力学研究所², 九州大学大学院 総合理工学府³

九州大学の球状トカマク装置 QUEST で生成されたプラズマが発する可視光は高速カメラによって観測・録画されている。図 1 は QUEST におけるプラズマ録画の 1 フレームで、トーラス形状の発光を捉えている。トーラス形状の発光の表面には光の筋が多数見られ、縞状になっている。録画時刻の経過と共に、その光の縞模様はポロイダル方向へと回転しているように見て取れる。これはトカマクプラズマのポロイダル方向への回転を反映していると考えられる。トカマクプラズマのポロイダル回転はプラズマ輸送と閉じ込めに影響を与える重要な要因である[1]。その様子を調べる 1 つの方法は、観測される発光がトロイダル軸対称であると仮定した上で、ポロイダル断面における発光の縞を捉えてその時間経過を追うことである。QUEST においてポロイダル断面の発光強度分布を推定する先行研究はあるが、真空容器内部の反射光をプラズマが発する光と正確に区別できていないという問題がある[2]。そこで本研究では真空容器内部の反射光を考慮した上で、プラズマ撮像からポロイダル断面発光分布を推定することを目的とした。

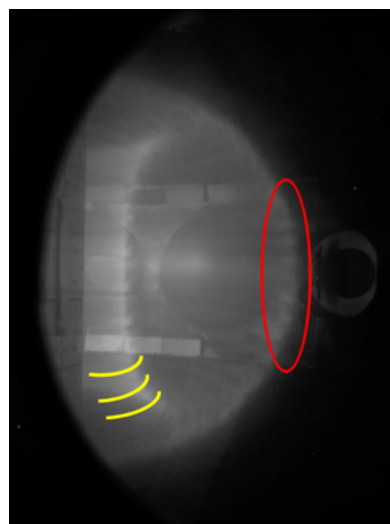


図 1. QUEST におけるプラズマ録画の 1 フレーム（黄色線が光の筋の一部を表し、赤枠で囲まれた部分が縞模様の一部を示す）

撮像からポロイダル断面における発光分布を推定するために、撮像という画素値の行列 Φ を、トロイダル軸対称の発光分布を空間的に離散化して得られる列ベクトル $\mathbf{j}$ と、発光分布を画素値へと変換する行列 $\mathbf{R}$ (幾何行列という) の積で表す。このときに $\Phi = \mathbf{R}\mathbf{j}$ という線型方程式を $\mathbf{j}$ について解けばよい。幾何行列 $\mathbf{R}$ は撮像素子までの、真空容器内部空間における光の伝搬を表し、幾何光学に基づいて算出される。 $\mathbf{j}$ を無限個の基底関数で表し、 Φ と基底関数の入力 (ポロイダル断面上の位置) がガウス過程に従うとすることで尤もらしい $\mathbf{j}$ を確率的に求める。

既知の発光分布 $\mathbf{j}_{\text{known}}$ に $\mathbf{R}$ をかけて得られた Φ_{syn} から $\mathbf{j}_{\text{known}}$ が正しく得られるかを検証し、次に撮像 Φ_{img} からの再構成を行った。その結果と考察、今後の課題について発表する。

参考文献

- [1] Dreval, M., et al. "Simultaneous evolution of plasma rotation, radial electric field, MHD activity and plasma confinement in the STOR-M tokamak." *Plasma Physics and Controlled Fusion* **50.9** (2008): 095014.
- [2] Suzuki, Kosuke, et al. "MHD equilibrium reconstruction using the visible light tomographic method with Laplacian eigenfunction." *Plasma and Fusion Research* **16** (2021): 2402090-2402090.

トカマク放電の熱的安定性モデルによるディスラプションと電流減衰の解析

大城春, 松山顕之, 中村祐司

京大エネ科

現在、国際協力のもと建設が進んでいる実験核融合炉 ITER でも採用されているトカマク方式の核融合発電の実現には、運転を妨げるディスラプション現象の理解が重要である。ディスラプションの要因は様々であるが、2023 年ファーストプラズマを達成した JT-60SA ではおよそ 20% 程度のディスラプションはプラズマ周辺領域の不純物による放射崩壊で説明できると報告されている[1]。周辺領域から不純物が混入した場合、放射により温度分布が収縮することで、電流分布への擾乱と MHD 不安定性が起きると考えられるが、放射による温度分布収縮の詳細な機構には解明の余地がある。そこで本研究は、不純物の放射による温度分布収縮の過程を解明する事を目的とした。

本研究では、従来反応拡散方程式の解析手法を用いて加熱と不純物による放射のバランスを議論してきた熱的安定性モデル[2]を基に解析を行い、ディスラプションを模擬する統合コード INDEX[3]による数値計算と熱的安定性モデルの比較を行った。

解析の結果、温度分布の収縮では、温度に対する反応項の傾き $\partial (nn_z L-H)/\partial T$ と熱伝導率 κ が重要な事を明らかにした。図 1(a)は、INDEX で計算した電子温度分布である。1.0 ms から 1.2 ms にかけて、1.0 ms における $(\rho, T_e) = (0.5, 150 \text{ eV})$ を境に温度が低下していることがわかる。図 1(b) はオーミック加熱とネオンによる放射を差し引いた正味の損失パワーに対する電子温度の関係を示したグラフである。図 1(b)より、30 eV から 150 eV の温度領域において、温度低下に伴い損失パワーが上昇するため温度勾配は大きくなると考えられ、対応して(a)の温度分布では $T_e = 150 \text{ eV}$ を境に温度分布は収縮している。温度勾配が大きくなるにつれ熱流束も大きくなるため、シミュレーションでは磁気面の崩壊によりプラズマの熱拡散率が大きくなる熱クエンチ中では温度分布は収縮しにくい事が観測された。また一旦温度分布が収縮すると、図 1(c)に示すように温度分布はプラズマ中心に向かって一定速度で収縮を続ける事が観測された。これは反応拡散方程式が記述する進行波として理解でき、反応項である放射項により駆動される事をシミュレーションにより確認した。

本研究より、ITER で想定されているペレット入射のようなコアの不純物量が多い場合では熱クエンチ後の温度と放射パワーの関係によって温度分布の収縮が決まり、MGI のような周辺領域の不純物量が多い場合では不純物の拡散により温度分布が収縮し続ける事が明らかとなった。

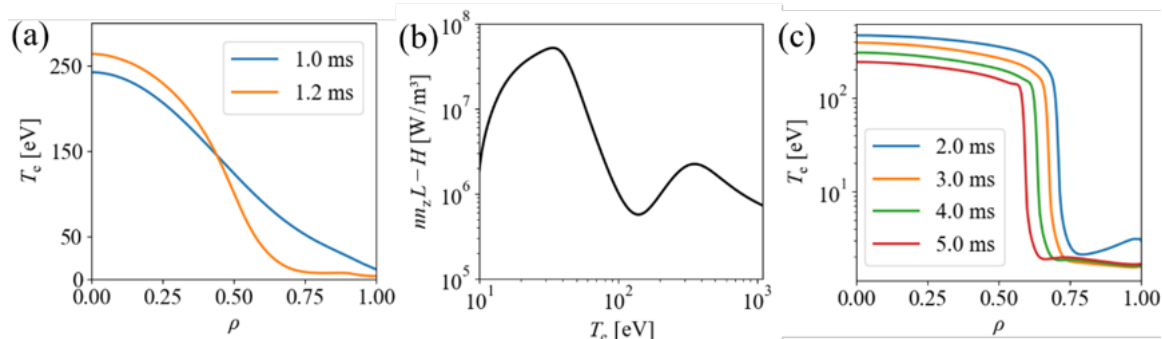


図 1 (a) INDEX で計算した電子温度分布、(b) 電子温度とオーミック加熱からネオンによる放射を差し引いた正味の損失パワーの関係、(c) INDEX で観測された電子温度分布上の進行波

[1] T. Yokoyama et al., *Nucl. Fusion*, **64**, 126031 (2024).

[2] W. M. STACEY, *Physics Plasmas*, **4**, 1069 (1997).

[3] A. Matsuyama, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, **64**, 105018 (2022).

TST-2 球状トカマク装置における 線積分トムソン散乱システムの開発研究

武智雄大¹, 江尻 晶¹, 篠原孝司¹, 辻井直人¹, 彭 翊¹, 林 彧廷¹,
蔣 正男¹, 田 一鳴¹, 安立史弥¹, 熊 一錦¹, 江 陽光¹,
王 圣予¹, 吉田 勝¹, 井戸 毅², 河野 香², 永島芳彦²
東京大学¹, 九州大学²

トムソン散乱計測は、これまで電子密度・温度の測定方法として確立された手法である。核融合炉においては、計測のための光学部品は中性粒子流や不純物堆積による損傷を避けるために、プラズマから離れた位置に置かれる必要がある。しかし、このような構成では散乱光の立体角が非常に小さく、従来のトムソン散乱計測システムでは性能が悪いことが示されている。この小さな立体角を補うために、より長い散乱長を持つ後方散乱光を用いた線積分トムソン散乱計測法が開発されている。本研究では、TST-2 球状トカマク装置における YAG レーザー (1064 nm) を用いた線積分トムソン散乱計測法の開発を行っている。以下に TST-2 における線積分トムソン散乱計測システムの構成を示す (図 1)。

これまでの研究では、大気中での集光系の組立と立体角の測定、入射窓の損傷対策計算、迷光抑制のためのフィルター試験、レーザー入射系の設計組立試験、TST-2 装置への取り付けと真空中での立体角測定を行った。加えて、線積分トムソン散乱計測システムを用いたラマン散乱測定、プラズマ計測を行うことが予定されている。立体角分布は、理論計算と計測結果の間に良い一致を示した。入射窓の損傷対策では、凹レンズと凸レンズを用いてレーザー光の断面を拡大・縮小することで、レーザーフルエンスが窓の損傷閾値を下回ることが理論計算から示された。迷光抑制のためのフィルター試験では、トムソン散乱測定に必要な波長領域での信号が確保できているという点で、ショートパスフィルター (1065 nm, 1075 nm) とバンドパスフィルター (1064 nm) が迷光抑制のためのフィルターの候補となった。迷光となりうる 1064 nm の信号の遮断性能という点ではさらなる測定が必要である。

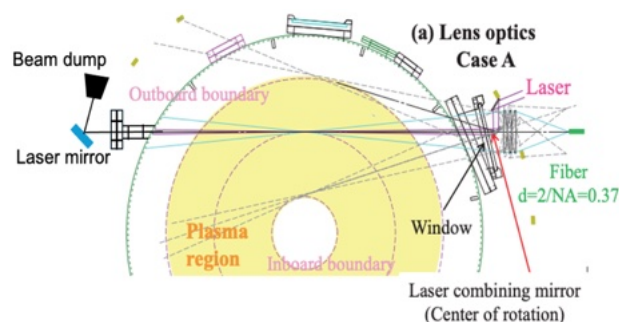


図 1: 装置上から見た TST-2 における線積分
トムソン散乱計測システムの構成

参考文献

- [1] Y. Lin *et al.*, Plasma and Fusion Research **17**, 1405098 (2022).
- [2] A. Ejiri *et al.*, Plasma and Fusion Research **18**, 2402025 (2023).

大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる実配位における 微視的不安定性のベータ値依存性解析

竹中健翔¹, 今寺賢志¹, 奥田修平¹, 石澤明宏¹
京大¹

高効率な核融合炉の実現のために、規格化圧力であるベータ値の大きい条件における微視的不安定性の理解が求められている。こうした有限のベータ値においては、生じた電磁揺動が乱流輸送に影響を及ぼし、イオン温度勾配(ITG)不安定性が抑制されることが知られている。加えて、有限のベータ値はシャフラノフシフトによる平衡磁場の变化を介して電磁的乱流に影響を及ぼす。局所的ジャイロ運動論シミュレーションを用いた研究では、シャフラノフシフトの影響でベータ値による ITG モードの電磁的な安定化効果が相殺される、すなわち ITG モードが不安定化することが報告されている^[1]。ただし、これらの効果について大域的なシミュレーションによる検証は行われていない。

そこで本研究では、MHD 平衡計算コード MEUDAS を用いて各ベータ値に対応するトカマクの平衡磁場配位を計算し、大域的ジャイロ運動論シミュレーションコード GKNET を用いることで、ITG モードに対し平衡磁場变化を考慮に入れたベータ値依存性解析を行った。結果、大域的シミュレーションにおいてもベータ値による電磁的安定化効果が平衡磁場变化により抑制されることが確認された。本研究会では、より詳細な結果および密度分布などのパラメータ依存性について発表する。

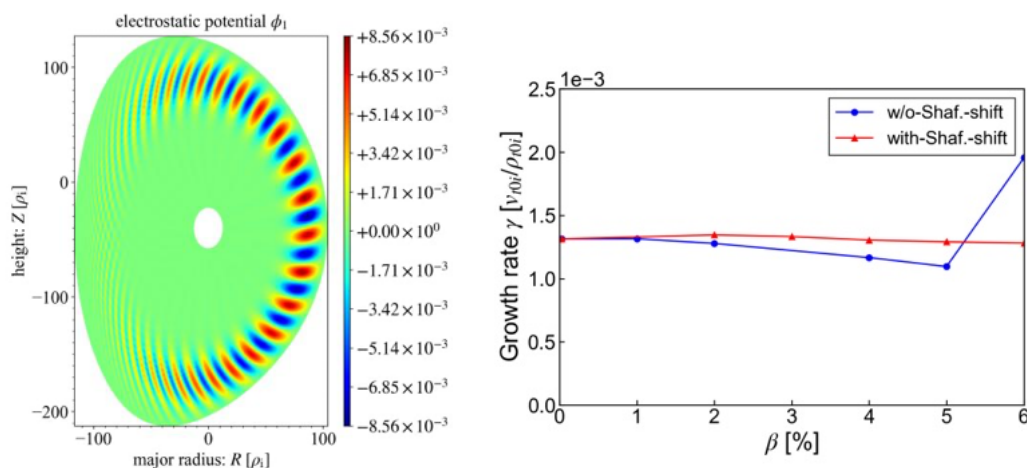


図.1 有限ベータにおける実配位での静電ポテンシャルの計算結果例(左)
平衡磁場変化なし(w/o-Shaf.-shift)とあり(with-Shaf.-shift)における ITG 成長率(右)

参考文献

- [1] A. Ishizawa, *et al.*, Nucl. Fusion **64**, 066008 (2024).

重水素パッシェン α 線スペクトル視線積分計算による JT-60SA 非接触プラズマ診断の検討

守田常裕¹, 四竈泰一¹, 仲野友英², 佐野竜一², 川手朋子³,

Xu Mengnan¹, 蓮尾昌裕¹

京大院工¹, 量研², 核融合研³

核融合ダイバータの非接触プラズマ運転では、不純物ガスをダイバータから入射し、プラズマをターゲット板から離して維持する。この制御のために水素再結合フロント位置のモニタが必要だが、計測ポートが制限されるため少数視線で適用可能な手法開発が望まれる[1]。本研究では、重水素パッシェン α 線発光のピーク位置が再結合フロント位置と近くなる性質を利用し、その視線積分スペクトルのゼーマン効果から求まる磁場と位置の対応から視線上の発光ピーク位置を求め、再結合フロント位置を推定できるか検討した。

検討には、JT-60SA の統合ダイバータコード SONIC[2]で計算したアルゴン・ネオン入射量が異なる 3 つの非接触プラズマと 1 つの接触プラズマの数値データを用いた。衝突ふく射モデル[3]により重水素の電離・再結合束と励起原子密度を計算した結果、非接触時のパッシェン α 線発光ピークは再結合フロントから 1.5 mm の距離に生じることが分かった。

水平ポートの上端・下端を始点として、非接触プラズマの再結合フロント周辺を通る視線を複数設定した。図 1 には例として、上端を始点としてセパトリクスに沿って進みストライク点付近に終着する視線（黄線）と、下端を始点として再結合フロント付近を通りストライク点から離れた位置に終着する視線（赤線）を示す。設定した視線ごとにパッシェン α 線発光の視線積分スペクトルを計算した。スペクトル形状はゼーマン効果、シュタルク・ドップラー広がり、分光器装置関数を考慮した。また、計測のバックグラウンドとなる黒体ふく射、制動放射も考慮した。計算したスペクトルに対し視線上の 1 点発光を仮定してパッシェン α 線発光強度、バックグラウンド、磁場強度、電子密度をパラメータとするフィッティングを行った。例示した視線上で求めた輝線発光位置を視線の色と同配色のマーカーで図 1 に示す。上記の解析結果をもとに、視線の選択と再結合フロントの位置の計測精度について調べた。

[1] W. Biel, *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **146**, 465 (2019).

[2] K. Shimizu, *et al.*, *Nucl. Fusion* **49**, 065028 (2009).

[3] T. Fujimoto, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **66**, 2315 (1989).

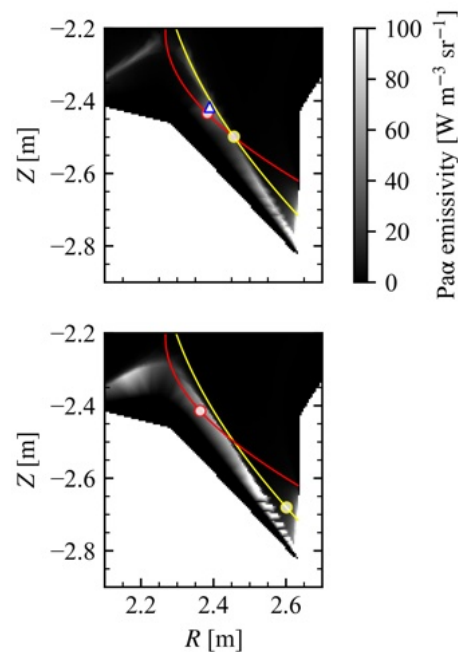


図 1 重水素パッシェン α 線の発光分布を背景に、再結合フロント(青マーカー)と水平ポート上端・下端からの視線(黄・赤線)で求めた輝線発光位置(黄・赤マーカー)。((上)非接触プラズマ、(下)接触プラズマ)