

## ■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(67)

分野：「高エネルギー粒子物理」<sup>1</sup>，  
「輸送と閉じ込め物理」<sup>2</sup>

開催日：2018年9月3日－9月5日<sup>1</sup>，  
2018年9月17日－9月20日<sup>2</sup>

場所：リスボン（ポルトガル）<sup>1</sup>，  
サン・ポール・レ・デュランス（フランス）<sup>2</sup>

担当委員：

藤堂泰(核融合研)<sup>1</sup>，長壁正樹(核融合研)<sup>1</sup>，永岡賢一(核融合研)<sup>1</sup>，篠原孝司(量研)<sup>1</sup>，Andreas Bierwage(量研)<sup>1</sup>，村上定義(京大)<sup>1</sup>，山本聡(京大)<sup>1</sup>，井戸毅(核融合研)<sup>2</sup>，田中謙治(核融合研)<sup>2</sup>，田村直樹(核融合研)<sup>2</sup>，本多充(量研)<sup>2</sup>，宮戸直亮(量研)<sup>2</sup>，吉田麻衣子(量研)<sup>2</sup>，今寺賢志(京大)<sup>2</sup>

(下線は当該グループの会合への出席者を示す)

次回会合の予定（開催日程，開催場所）を以下に示す。

会合名	開催日程	開催場所
高エネルギー粒子物理	2019年 3月下旬から4月上旬	ロヴァニエミ (フィンランド)
輸送と閉じ込め物理	2019年3月25－27日	オースチン (米国)

### 1. 「高エネルギー粒子物理」

第21回となる本会合は，リスボン（ポルトガル）のリスボン高等工科大学(Instituto Superior Técnico de Lisboa)にて開催された。参加者はリモート参加も含め約30名，26件の発表があった。

はじめに，ITERの進捗状況がITER機構のPinches氏から報告された。今回特に中性粒子ビーム(NB)の開発がイタリアのパドバで着実に進んでいる様子が報告された。また，高エネルギー粒子物理に関わる課題の確認が行なわれた。

共同実験の報告は次のとおりである。ELM(周辺部に局在した不安定性)と共鳴磁場摂動(RMP)などの周辺磁場摂動に起因する高速イオン損失を扱う共同実験EP6においては，ASDEX Upgrade(AUG)のRMPの影響に関する研究にMEGAコードを使用する準備が進んでおり，MEGAのMHDソルバーMIPSでプラズマ応答を評価した結果が紹介された。KSTARの実験の報告ではRMPコイル電流を増やしていくと損失高速イオンプローブ(FILD)の信号は最初は少しずつ増えていくが，ある閾以上では急激に増え，やがて飽和することが観測された。閾についてはIPECとfull orbitの計算で再現され，小ピッチ角の粒子の寄与が示唆されたが，飽和は数値計算では再現できなかった。不安定性を考慮したNB電流駆動の検証を扱うEP8では，DIII-Dでの解析の報告があり，アルヴェン固有モード(AE)と新古典テアリングモード(NTM)については背景の平衡と分布を与えるとkickモデルがAEやNTMそれぞれによる高速イオンの閉じ込めをよく再現できていた。精度をあげるため，微視的揺動の影響も考慮する必要がありそうである旨報告された。

一方NTMの扱いについては現在のモデルに考慮されていない電場の効果を見逃すことがないかという指摘があった。イオンサイクロトロン放射(ICE)の損失高速イオン診断への利用を評価するEP9については，LHD及びKSATRのデータに対するEPOCHコードによる解析報告とDIII-DのNB打ち分けによるICE信号の変化に関する実験の解析が進んだ旨の報告があった。計測による高速イオンの速度空間分布再構築を議論するEP11では，DIII-Dの高速イオンD alpha計測(FIDA)への適用が報告された。AEによる高速イオンの輸送を従来より明瞭に示すことができていた。また，AUGではFIELDのシンチレーション画像の“ぼやけ”を解消できたことによりRMP印加時の高速イオン損失の微細構造が観測された。AE制御のアクチュエータ検討に関する共同実験EP12については，TCVにおいてoff-axis NB入射かつ電子サイクロトロン加熱(ECH)有りでは，高速イオン駆動測地線音波振動モード(EGAM)が観測され，on-axis NB入射やECH無しでは観測されなかった。観測されたケースでは高速イオン分布のエネルギー方向にbump-on tailが観測された。プラズマ中心部で中性粒子密度が高いことによる高速イオン損失がbump-on tailを生んでいるという解釈であった。KSATRでは，NBのスキャンを実施した。ECHによるAEの抑制はほぼ確実に観測されるが，他の不安定性を励起する場合があります。プラズマの総合性能という観点では最適化が必要であるという報告であった。TJ-IIではSTELLGAPコードの解析によると電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)による僅かな電流がAEギャップを大きく変えてAEを起こしやすくしており，実験と矛盾しないと報告された。

数値計算のベンチマーク活動については，前回から始まったベータ誘起AE(BAE)とベータ誘起アルヴェン音響波固有モード(BAAE)を対象としたベンチマーク活動について報告があった。DIII-Dの実験結果を対象としたベンチマークケースについて，LIGKA，ORB5，XHMGC，FAR3Dコードを用いた報告があった。LIGKAの解析では，想定されるn=6のBAAEについてバルクプラズマの反磁性の効果，不純物の効果などの影響などベンチマーク対象項目の多くを実施していた。ORB5ではBAAEと思われるものの周波数が実験よりずっと低く観測されていた。XHMGCは今回最も不安定であったn=3の報告であった。FAR3DはBAEやBAAEを取り扱えるようにするコードの改良に関する報告であった。関連してBAAEの周波数のchirpingは微視的乱流が小さいことで説明できるという報告もあった。ITERの標準運転シナリオに基づくベンチマークケースでは，鋸歯状振動が不安定で本ベンチマークには不適切なため，ベンチマーク活動用には安全係数分布の若干の修正が必要である旨提案された。

計測装置に関しては，ITERにおいて高速イオンを生み出すNB及びイオンサイクロトロン周波数加熱装置が稼働を始める2032年の運転キャンペーンPre-Fusion Power Operation(PFPO)-2に高速中性粒子計測(NPA)とγ線計測しかないことが問題視され，PFPO-2の後に設置予定の計測器を前倒して設置できるように調査し，働きか

けることとした。

加えて、ITER Physics Basis (Nuclear Fusion 誌) の改訂の編集委員の選定について説明があった。

## 2. 「輸送と閉じ込め物理」

第 21 回となる本会合は第 18 回以来の単独開催であり、28 名 (日本 1 名, 欧州 16 名, 米国 7 名, ITER 機構 4 名) が現地参加した。リモートでの発表は 13 件だった。前週にセビアで開催された EU-US Transport Task Force (TTF) 会合に引き続いての会合であったため、日本からの 1 名を除いて全て欧州と米国からの参加者であった。前回会合はモデリング・シミュレーションのセッションが多かったため、本会合では継続的に行われてきた共同実験・共同活動に関するセッションが主体であった。臨界勾配と分布の硬直性、3次元磁場による輸送・閉じ込めへの影響、運動量と粒子ピンチの衝突率依存性、LH 遷移の 4 セッションからは多数の報告があり、他 5 セッションからは短くまとめた報告があった。今回は 2 つの新規トピックの提案があり、1 つは最外殻磁気面近傍の乱流と輸送、もう一つは周辺ペダスタル物理トピカルグループとの協同によるコアと周辺の同位体スケールリングである。会合 2 日目の午前には ITER サイトの見学ツアーが設けられ、ポロイダル磁場コイルとクライオスタットの製作建屋の内部を見学した。

臨界勾配と分布の硬直性セッションでは、JET の軽水素と重水素のそれぞれの放電において加熱パワーを変化させた場合の分布の硬直性に関する報告があった。いずれの同位体でも低パワー時に高硬直性、高パワー時に低硬直性が見られ、重水素放電でより高い温度勾配が維持できた。この傾向は GENE の非線形シミュレーションで概ね再現できた一方、TGLF は低い硬直性を示すことが知られていたため、とりわけ低パワー時において実験結果と乖離することが判明した。JET のイオン温度分布硬直性を調べた L モード放電を対象に、ASTRA/JETTO/TRANSP の 3 統合コード間で TGLF を用いた分布の再現性ベンチマークが行われ、概ねコード間の良好な一致を得ている。一方、準線形モデルの更なる改善のための、低硬直性の克服や、高速イオン圧力と関連するイオン温度勾配駆動乱流の非線形電磁安定化 (nonlinear electromagnetic stabilization) 効果の取り込みなどの課題も明らかとなった。

3次元磁場による輸送・閉じ込めへの影響セッションでは、冒頭でまずセッション議長からトカマクだけでなく、LHD を含む各実験装置の最新の成果が紹介された。DIII-D では共鳴磁場摂動 (RMP) を印加すると周辺領域で乱流の顕著な増大が見られ、さらに ELM 抑制直後に “bursty wiggles” と呼ばれる数十マイクロ秒の寿命を持つ間欠的な現象が生じ、輸送を増大させているとの報告があった。ジャイロ運動論コードによる検証も進展しており、RMP 印加時に GENE と XGC では輸送の増大が見られた一方、GTC では変化がなかった。同じく DIII-D からは、LH 遷移のパワー閾値の衝突率依存性が、RMP を印加しない場合は  $-0.1$  乗であったのに対し、RMP 印

加時には  $-0.3$  乗であるとの報告があった。また、 $n=3$  の非共鳴磁場摂動を印加した場合には、 $E \times B$  速度シアや密度揺動に顕著な変化は見られなかった。

運動量と粒子ピンチの衝突率依存性セッションでは、セッション議長から JET において密度ピーキングの 6 割程度が中性粒子ビーム供給の寄与であることなどが紹介された後、同一規格化衝突率にもかかわらず密度ピーキングが異なる JT-60 放電においてその原因を調べた発表が行われた。実験の解析に留まらず、ニューラルネットワークモデルを開発し、その適用による再現性検証もなされ、良好な一致を得ている。本セッションでは ITER を見据えた軽水素、重水素、三重水素、ヘリウムなどが混在する状況下での密度分布やピーキングを予測するためのモデリングが複数発表されており、とりわけ JET 実験との対比による妥当性検証を踏まえた活発なモデル開発が進めている様が見受けられた。また、同位体効果に関しては新たなセッションが設けられた。これまでは単純なジャイロボーム則から閉じ込め時間が質量の平方根の逆数に比例するという仮定が用いられてきたが、実験で得られたスケールリングはそのようになっておらず、近年の理論の進展もまたこのような単純な依存性を否定している。本セッションでは今後、同位体効果に関する知見を広く集約していくものと思われる。

LH 遷移のセッションは ITER における LH 遷移閾パワーの予測能力向上を目的としている。Alcator C-Mod と ASDEX Upgrade のデータから、LH 遷移を起こす周辺イオン熱流束の閾値は密度のみならず磁場と共に増加することが分かった。JET からは、ダイバータ配位を変化させることで、閾パワーが 2-3 倍程度変化することが分かり、その原因として  $E \times B$  速度シアが示唆されるとの報告がなされた。

最後に新規提案の最外殻磁気面近傍の乱流と輸送セッションについて触れておく。これまで周辺領域については同様のセッションがあったが、GYSELA が周辺に SOL プラズマやリミタを模した境界を置いた場合とそうでない場合でコアにおける密度揺動レベルすらも変化してしまうという結果を動機の一つとして、本セッションではより最外殻磁気面近傍を対象としている。当該領域での計測データなどを用いながら、ジャイロ運動論コードや簡約化 MHD コードなどの理論モデルの適用可能性や再現性などを検証しつつ、物理描像の理解を深めていくことを目的としている。

(原稿受付日：2018 年 10 月 4 日)