

LHDにおける不純物粒子ドロップー実験

芦川直子

核融合発電炉で定常的にプラズマを維持するためには、プラズマ真空容器内での燃料粒子バランスを考慮する必要があります。燃料粒子はガスパフ、固体燃料ペレット、超音速分子ビーム入射等の手法で供給され、真空容器内からの排出は真空排気装置によって行われます。しかし、実際の粒子の挙動は、より複雑で、プラズマ対向壁材料へ燃料ガスの一部が蓄積し、再放出するという現象（壁リサイクリング）も起こるため、これらの影響を考慮した粒子バランスの制御は一つの課題として挙げられています。また、プラズマを維持するためにはエネルギーバランスの観点から放射損失を低く抑えることも求められています。酸素がプラズマ真空容器に残留すると放射損失源となるため、残留酸素の軽減が求められています。軽減させる手法として、真空排気装置による排出以外に、プラズマ対向壁表面に酸素を化学結合により捕捉させ被覆層として保持させることで、プラズマへの混入を防ぐという手法もあります。世界的には、壁リサイクリングの実時間制御としてリチウムやホウ素が使用されており、また酸素軽減を目的とした実時間制御ではホウ素が使用されています。リチウムやホウ素などをプラズマ中へ入れる手法の一つとして、これら元素を粒子形状でプラズマ中へ落下させる手法があります。落下量及びタイミングに関する高い制御性を持つ粒子落下装置として、不純物粒子ドロップー（IPD）装置が米国・プリンストンプラズマ物理研究所（PPPL）で開発されました。装置名に「不純物」とありますが、様々な研究用途に応じて任意の粒子材質の選択、利用が可能です。IPD装置の利点は、粒子の落下タイミング及びその量を任意で設定できる点にあります。さらにレーザー散乱を用いたフローメータによって、実際にIPD装置から落下した粒子量の計測もできます。このような高い制御性を伴う装置であることが、世界中の多くの核融合実験装置でIPD装置が運用されている理由の一つです。現在までに、DIII-D（米国）、EAST（中国）、ASDEX-U（ドイツ）、KSTAR（韓国）、W-7X（ドイツ）での運用が行われ、これらに加えて、核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）へのIPD装置の取り付け、及びプラズマ実験中の

運用が2019年度に実施されました。

PPPLによるLHDへのIPD装置計画は、2018年にDavid Gates氏（先進プロジェクト部長、PPPL）から提案され、2019年初旬には森崎友宏大型ヘリカル装置計画研究総主幹とD. Gates氏との間で書面が交わされ、共同研究がスタートしました。今回の共同研究では、IPD装置自体はPPPLでの作成、組み立て、事前動作確認の後NIFSへ輸送することで合意し、互いの研究所で必要となる物品の確認作業から開始しました。運用開始は2019年10月から開始されたLHD第21サイクル実験を目標としました。これに併せて2019年1月にPPPL研究者来所による事前打ち合わせ、2019年7月にNIFSへのIPD装置到着及びPPPL研究者と共同での事前動作確認を行った上で、2019年9月にはPPPL研究者と共同でのLHDへの搬入、取り付け作業を行いました。

LHDはヘリカル型装置であるため、プラズマの断面形状がトラス（周回）方向へ連続的に変わります。いくつかあるポートのうち、どれが好ましいかをあらかじめEMC3-EIRENEコードとDUSTTコードを連携させた数値シミュレーションを用いて、ホウ素、炭素、鉄で異なる径の粒子を落下した際の到達位置に関する計算を行いました。粒子がプラズマに接触する場所のパラメータが異なると、プラズマフローの向きの影響により、プラズマ内



図1 LHD上部ポートへのIPD装置取り付け後のグループ写真。水色ヘルメットを着用しているのがPPPLからの研究者。左からF. Nespoli氏、IPD装置（白枠）、D. Gates氏、R. Lansford氏およびE. Gilson氏。

部へ粒子が到達しづらい条件があるためです。粒子がプラズマの最も内側に到達する条件を持つポートが設置場所として選ばれました。図1はLHDへのIPD装置取り付け作業後に撮影された、LHD上部ポートでのグループ写真です。取り付けに当たり、事前に機器の真空漏れがないか確認作業を行い、その後LHD本体室へ持ち込みました。総重量が100kgを超えるため、床から上部ポートへの移動はクレーンにて行いましたが、作業に立ち合ったPPPL研究者は、写真や動画を撮影して作業の様子を詳細に記録していました。

最初に述べたように、IPD装置の設置は既に複数の装置において行われていましたが、LHDは装置半径が大きく高さも高いため、本体室内でのケーブル長が長くなること、また本体室への立ち入りができる時間帯に制限があるため、重要な機器は極力本体室外に置くこと等、他の装置と比べて異なる点が複数ありました。例えば、フローメータに使用する光ファイバーは新たに長距離用が必要となりましたが、LHDで信号伝送用として標準仕様とされている光ファイバーに比べて大きなコア径(600ミクロン)が必要となりました。国内メーカーでは約3か月程度の長い製作日数が必要との回答で困っていたのですが、同型の光ファイバーを使用していた韓国KSTAR(トカマク装置)のIPD装置担当者(Hyungho Lee博士)に問い合わせたところ、親切にも韓国語ができない筆者と韓国メーカーとの間で通訳をしてくれ、結果的に半分程度の納期で同ファイバーを入手することができました。おりしも日韓の間ではホワイト国除外がニュースをにぎわしていた時期であったため、国際共同研究におけるパイプの重要性を再認識した出来事でした。現在のLHDではプラズマ実験期間中は週に1回のメンテナンス日が設けられており、この日を利用して遠隔操作や安全性に関する試験などを実施しました。IPD装置は、予定されている実験以外で粒子がプラズマ中へ落下しないようにする構造や、LHD本体とIPD装置をつなぐゲートバルブ内部に粒子が入り込まないように保護する駆動機構を備えています。また、このゲートバルブのインターロック機能と、IPD装置側のインターロック機能がリンクするような仕組みを組んでいます。これらはLHDに関わる技術部職員により作成されました。また、落下させる粒子(粒径数十ミクロン)をあらかじめIPD機器内に設置した後、真空ポンプによる排気を行うので、内部の粒子が舞い散らないように他の機器にくらべてゆっくりと真空排気が開始できる

ような排気ラインを組みました。これも技術部職員が色々と検討・組み立てを行いました。



図2 (a) 制御室での実験中の様子(左からF. Nespoli氏、E. Gislou氏、R. Lansford氏)。

(b) IPD装置が設置されているポート(LHDに取り付けられた窓)に設置された可視カメラによる画像。円形の視野の中にプラズマに起因する青白い発光と、ホウ素粒子による白い無数の輝線と点が見えます。

IPD装置を用いた最初の実験日は12月上旬に設定され、同週はPPPL研究者も実験に参加し、無事にIPD装置による粒子落下が成功しました。図2は、PPPL研究者が制御室で実験に参加している様子、及びIPD装置が設置されているポートに隣接する可視カメラによる画像です。背景となるプラズマは青白く見えており、その中で白く無数の輝線と点となっているのがホウ素粒子による発光です。LHDでは他の装置(例えばEASTでは約10秒間、KSTARでは約20秒間)に比べて長時間のプラズマ放電が可能ですが、2020年2月にはその利点を生かした600秒放電へのホウ素粒子落下実験を実施しました。現在は、事前に条件を設定しプラズマ放電への粒子落下実験を行っていますが、将来構想としては、密度や温度へのフィードバック制御の一環としてIPD装置による粒子落下を伴うプラズマ実験も期待されています。

今年の実験では、ホウ素と窒化ホウ素の粒子が使用されました。特にホウ素はプラズマ中の酸素を軽減する効果が期待されていますが、これまでの実験で期待どおりの効果が確認され、F. Nespoli氏が2021年に開催される「制御核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用国際会議」で発表予定です。さらに水素リサイクリングやプラズマ温度分布に対する効果についてデータ解析が継続されるとともに、次年度LHD実験における新たな実験提案も期待されています。

(核融合システム研究系 助教)