



研究・技術ノート

核融合炉実現のために，粒子輸送研究からわかる重要課題

A Critical Issue Toward Realization of DEMO Fusion Reactor from the Particle Transport Study

松田 慎三郎, 飯尾 俊二, 柏木 美恵子¹⁾, 坂本 隆一²⁾, 染谷 洋二¹⁾, 林 巧¹⁾
 MATSUDA Shinzaburo, TSUJI-IIO Shunji, KASHIWAGI Mieko¹⁾, SAKAMOYO Ryuichi²⁾,
 SOMEYA Youji¹⁾ and HAYASHI Takumi¹⁾

東京工業大学, ¹⁾量子科学技術研究開発機構, ²⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2020年1月29日 / 原稿受理: 2020年3月11日)

研究の背景

核融合原型炉に向う研究開発シナリオの検討が国の委員会を中心に多くの研究者が参加してオールジャパン的に進められており、昨年にはそのロードマップが纏められた。しかし、多くの研究者による報告書は包括的で、予算的制約などもあり、研究機関や大学が組織的に目指すべき具体的な研究計画は今後の検討に委ねられている。

これら国の検討に先立つ2012年より、核融合科学研究所(NIFS)の共同研究として、定常運転原型炉に必須の計測・制御、運転制御に関わる重要課題、および将来の炉型選択に関わる技術課題について広範な分野の研究者の参加によりシンポジウムを開催し検討してきた。これらの成果はNIFS-MEMOとして既に出版されている[1, 2]。ここではこれらの共同研究によって明らかとなった諸課題のうち特に核融合出力を決める要因である粒子輸送について、その基本的描像を説明するとともに、その後の検討により得られたシステム簡素化の方向性と今後の検討課題について紹介する。

定常核融合炉プラントにおける粒子循環の描像

原型炉以降の核融合炉の設計データベースは定常状態に等価なプラズマから得なければならない。また、核燃焼コア領域で生まれるHe灰濃度の対燃料比が大略5%を超えないこと、さらにHeがコア部に蓄積しないための条件として、He粒子閉じ込め時間とDTプラズマのエネルギー閉じ込め時間の比が7~15以下となることが求められている[3]。これに関して逆井らのJT-60Uを利用した先行実験[4, 5]では中性粒子ビーム入射(NBI)加熱したDプラズマに核燃焼で発生するHeをHe中性ビーム入射によってプラズマコア部で発生させることによって模擬し、他方、ダイバータ部からはD₂とHe粒子を大容量クライオポンプを用いて同時に真空排気するなど、reactor relevantな粒子フローの実験として、数少ない重要なデータを提供した。

一方、国際熱核融合実験炉ITER以上に大きなプラズマ

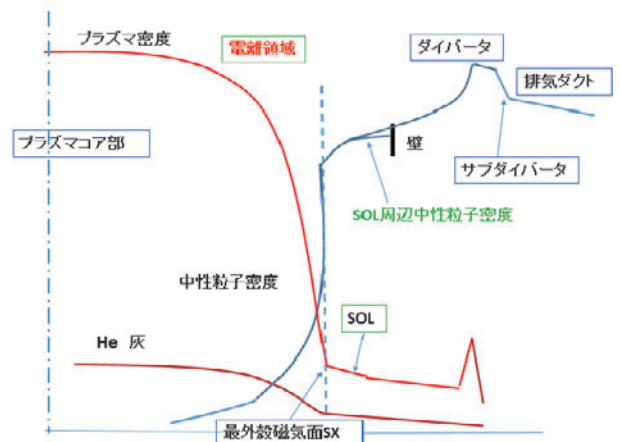
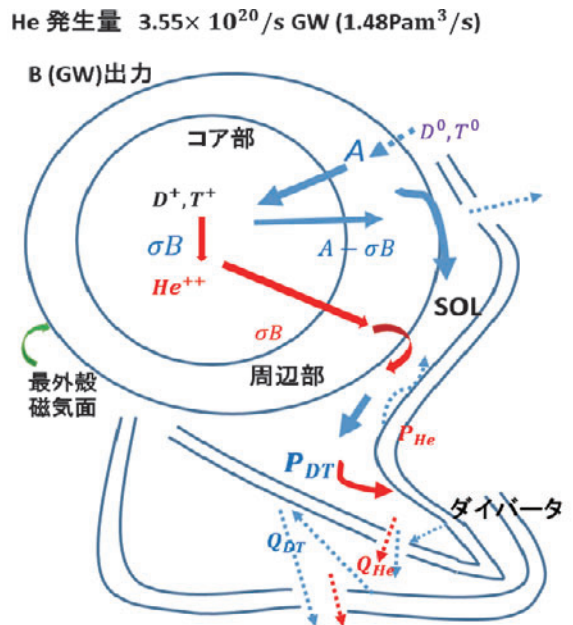


図1 定常トカマク炉における粒子フロー(上)と密度分布(下)の概念図。Aは電離率(ion/s)、 σ は核反応He発生率への変換係数(ions/GW)、Pはダイバータ室での中性粒子のガス圧(Pa)、Qは真空排気するときの流量(Pa·m³/s)。

断面の核融合炉では核燃焼領域への粒子供給は容易ではなく、高密度プラズモイドのドリフト輸送による粒子供給特性の改善が期待できる高磁場側からのペレット入射でも粒子供給深さはおよそ小半径0.8付近までであり、コア部へ中性のままの粒子供給はできないことがわかっている[6]。また、高エネルギーNB入射によってもコア部に達する粒子束は核燃焼分に程遠く、結局のところ、核燃焼に寄与する粒子供給は周辺領域で電離して生まれるプラズマの内向き輸送に依存することになる。この描象を理解する人は未だ少なく、乱流輸送による内向き粒子束の定量的予測が出るまでは核融合炉の出力を決められない状況となっている。

また、放射冷却ダイバータ実現のためにもDT燃料と灰として生まれるHeの定常フローを理解することが先ず必要であり、それにはプラズマ領域、SOL領域およびダイバータ領域までの粒子フローと分布を供給から排気に至るまで通して検討する必要がある。検討の結果、ダイバータ部でのDTガス圧範囲が鍵であり、それはデタッチが成立し、かつ主プラズマの閉じ込め性能劣化が起きないこと、He排気が可能なことを満たす範囲であり、これは真空排気速度に上限を設け、DT燃料循環量を最小限に抑える条件であることも示した。

さらに、炉で想定されるガス圧力範囲では真空排気ポンプとして分子流ポンプを省略していきなり粘性流ポンプを使う簡易システムが可能であることを示した[2]。

一方、炉本体の外側では排ガス処理から燃料供給システムまでプラントとして捉え、如何にしてシンプルで定常運転可能な循環系を構成できるかを検討した。まず、排ガスを処理するに当たり不純物だけを取り除き、DT同位体分離をせずに混合ガスとしてペレットやNBIに使う系が考えられた[7,8]。その後、耐放射線保守性向上を目的にNBIの加速器部分を炉心プラズマの直視から外す検討において、粒子束を定量的に検討した結果、NBIによる粒子供給率は核燃焼によるD消費率より小さいため、NBIは負イオンDビームのみで循環システムの構成ができることがわかった。このようにNBIシステムの合理化の見通しはできたが、粒子の循環についてプラント全体の中での組み込みが今後の検討課題である。

また、デタッチ・ダイバータでは、ダイバータ受熱領域の裾野でプラズマ温度の十分な低下を得ることが困難であるため受熱面の損耗が課題として指摘されている[9]。この対策として受熱ブロックの裏側から隙間を通してのガス注入による解決の可能性を検討すべきである。

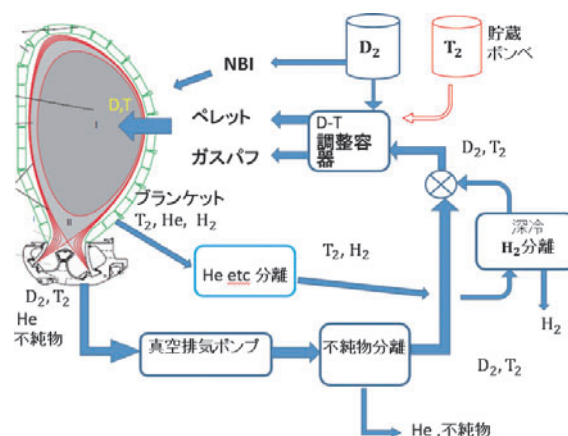


図2 プラント全体の粒子循環ループ。

むすびと謝辞

核融合の世界ではエネルギー閉じ込めの研究は炉の経済性を決める要因であるため優先度の高い研究として進められてきた。他方、粒子輸送は炉の定常運転に不可欠であるにも拘らず、精力的に取り組まれてきたとは思えない。実験規模による制約や計測の難しさが根本にあるため、研究者の個人的関心だけでは容易にreactor relevantな実験は遂行が困難であろう。このため、研究機関を挙げて組織的な取り組みが必要と考えられ、今後の具体的な研究計画の検討に期待する。

このノートは過去8年間に亘る共同研究で議論されたものであり、議論に参加された研究者の皆様に感謝する。

参考文献

- [1] 核融合原型炉の計装制御研究会報告書, 2014年5月 NIFS-MEMO-68.
- [2] 核融合原型炉の運転制御研究会報告書, 2017年11月 NIFS-MEMO-80.
- [3] D. Reiter *et al.*, Nucl. Fusion **30**, 2141 (1990).
- [4] A. Sakasai *et al.*, J. Nucl. Mater. **266-269**, 312 (1999).
- [5] A. Sakasai *et al.*, J. Nucl. Mater. **290-293**, 957 (2001).
- [6] B. Pegourie *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **51**, 124023 (2009).
- [7] R. Sakamoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 812 (2014).
- [8] Y. Kojima *et al.*, Fusion Eng. Des. **121**, 145 (2017).
- [9] 朝倉伸幸:「日本の原型炉でのダイバータの放射冷却検討の進展」, 2019年2月シンポジウム《核融合原型炉の重要課題》での講演。