

開いた磁場構造中のエネルギー・粒子輸送 Energy and particle transfer phenomena in open field line system

小林政弘

Masahiro Kobayashi

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

SOL の幅

開いた磁場構造中のエネルギー輸送として最も重要な関心事は、閉じ込め領域からSOL中に流れ出たエネルギーがダイバータ板上へどのような分布(チャンネル幅、 λ_q)で到達するかである。これによって、炉設計におけるダイバータ板の熱除去性能の要求が決まる。プラズマの輸送は磁力線に沿って非常に速く、垂直方向のそれに対して少なくとも二桁以上大きい。従って、SOLの幅は極めて薄くなり、外側赤道面付近で数mm程度である。しかし、現状ではその輸送過程の正確な記述は出来ていない。既存の装置の計測データからチャンネル幅のスケーリングを求める研究が進められているが、全体としてデータのばらつきが大きく[1,2]、また各種パラメータへの依存性にも定性的な違いが見られる。例えば、ダイバータに到達する全エネルギー熱負荷(P_{target})への依存性などは、正になったり負になったりするスケーリング則が得られている[2]。また、後述するように、イオンと電子でどのようにエネルギー輸送が違っても重要な研究課題である。この他、ドリフト(ExB , ∇B , curvature drifts)の影響も指摘されている[2,3]。

現在のところ、これらのデータベースに基づいたスケーリングによるITERへの外挿値としては、外側赤道面で $\lambda_q=3.7 \pm 1.1\text{m}$ が得られている。実際のダイバータ板上での熱負荷は、flux expansion(4倍)とダイバータ板と磁力線のなすポロイダル角の影響(2.5倍)があるため、これが10倍ほどになると考えられている。現行のダイバータの設計はこの値に基づいている。

計測器の課題

データのばらつきの原因の1つとしては、ダイバータ板上の熱負荷の計測自体が難しいということが上げられる。計測機器としては、ラングミュアプローブ、赤外線カメラ、熱電対があるが、それぞれにデータの解釈に以下のような課題がある。ラングミュアプローブは、基本的に電子が運ぶエネルギーしか計測できないこと、赤外線カメラは堆積層による赤外線の反射率の変化による影響がある。熱電対はダイバータ板に埋め込

まれているため、また板との接触の度合いによる測定値への影響などのため、ダイバータ表面での温度測定に不確定性がある。また、赤外線カメラと熱電対については、不純物などの放射損失による熱負荷も計測されるため、プラズマの直接の接触によるものとの区別が必要になる。

その他としては、計測の空間分解能の問題がある。上述のように λ_q =数mm~数cmと小さいが、ラングミュアプローブ、熱電対の測定子自体が数mmの大きさを持つ。これについては、放電中にストライク点を移動することで分布データを計測するという工夫がなされている[4]。また、赤外線カメラについては、最近では高空間・時間分解能が進んでおり、データの信頼性が上がってきている。

電子とイオンのエネルギー輸送を知るためには、それぞれの温度分布が必要であるが、イオン温度については、計測データが乏しく今後の課題である。

放電条件の影響

ダイバータ近傍では、密度の上昇とともに燃料粒子の電離やプラズマと中性粒子との運動量交換が起こるため、エネルギーの輸送過程が複雑になる。さらに不純物による放射損失も加わる。これらはいずれも λ_q を大きくする方向に働くと考えられる。また、SOL中の乱流輸送もプラズマパラメータにより変化するため、その影響も受ける。特に高密度領域で、揺動が大きくなる傾向にある[5]。従って、これらの影響をさけるため、 λ_q のスケーリングは比較的低密度の放電におけるデータを用いて解析される場合が多い[4]。一方で、ITERや将来の炉では部分デタッチメント放電が基本の運転シナリオとされるため、上述の原子・分子過程や揺動の影響を含めた λ_q の見積もりも重要であると考えられる。

現象を解釈する上で基本となるモデル

SOLの上流(赤道面付近)で流れ込んだエネルギーがダイバータ板に到達するまでの輸送は、以下の様に考えられる[4]。SOL中での磁力線に沿った方向のエネルギーの輸送時間を $\tau_{\parallel}$ 、磁力線に垂直方向の輸送が便宜的に拡散的であるとしてそ

の輸送係数を $\chi_{\perp}$ とすると、

$$\lambda_q \sim (\chi_{\perp} \tau_{//})^{1/2} \quad (1)$$

と書ける。磁力線に沿った方向の輸送としては、対流(convection)と熱伝導(conduction)によるものがあり、それぞれ $2.5nTV_{//}$ 、 $n\chi_{//}\nabla_{//}T$ と書ける。

ここで、 $n, T, V_{//}, \chi_{//}$ はプラズマの密度、温度、磁力線方向の流速、磁力線方向の熱伝導係数である。従って、 $\tau_{//}$ は輸送過程が対流(convection)か熱伝導(conduction)によるかによって以下のように書ける、

$$\tau_{//v} = L_{//} / V_{//} \quad (\text{対流}) \quad (2a)$$

$$\tau_{//\chi} = L_{//}^2 / \chi_{//} \quad (\text{熱伝導}) \quad (2b)$$

ここで、 $L_{//}$ は赤道面からダイバータ板までの磁力線に沿った長さである。 $\chi_{//}$ については、電子の輸送がイオンよりも圧倒的に大きいため、 $\chi_{//e} / \chi_{//i} > 10$ 、 $\tau_{//\chi} = L_{//}^2 / \chi_{//e}$ となる。また、 $V_{//} \approx 0.5c_s$ とすると(c_s :音速、マッハ数 $M=0.5$)、エネルギーの輸送は小さい方の $\tau_{//}$ が支配的となるため、プラズマパラメータ($\nu_e^* = L_{//} / \lambda_{ee}$: 電子の衝突周波数)により以下のようになる、

$$\lambda_{qv,\alpha} \sim \left(\frac{\chi_{\perp\alpha} L_{//}}{M c_s} \right)^{1/2} \quad (\text{対流的、}\nu_e^* > 50) \quad (3a)$$

$$\lambda_{q\chi,\alpha} \sim L_{//} \left(\frac{\chi_{\perp\alpha}}{\chi_{//}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{\alpha}}{T_e} \right)^{1/2} \quad (\text{熱伝導的、}\nu_e^* < 50) \quad (3b)$$

α は電子またはイオンを表す。このモデルから以下のことが示唆される：

通常、赤道面付近からダイバータまで、 $\nu_e^* \sim 1$ から $\nu_e^* \sim 100$ と大きく変化する。従って、上流では主にエネルギーは熱伝導によって輸送され、ダイバータ板に近づくにつれて対流による輸送に変わっていく。実際、実験においてもX点近傍からダイバータ板にかけて、かなりのエネルギーが対流によって運ばれているという報告がなされている(特に高密度放電において)[6]。

仮に閉じ込め領域からSOLに電子とイオンとで同量のエネルギー流入があるとすると、 $\chi_{//e} / \chi_{//i} > 10$ の関係から、 T_i が T_e よりも高くなる傾向にある。またITERや将来の炉では $\nu_e^* \sim 1$ 程度が予想されるため、イオンと電子間のエネルギー緩和は起こりにくいと予想される。その場合、

上流ではイオンについては新古典的な輸送を考慮する必要がある。また上記の流体モデルには運動論的效果を考慮する必要がある。さらに、ダイバータ近傍でどの程度まで T_i が下がるかは、 λ_q に影響するとともに、物理スパッタリングにも関連して重要な要素である。

(3a), (3b)いずれの場合においても垂直方向の輸送の大きさ $\chi_{\perp\alpha}$ が重要な要素となる。 $\chi_{\perp\alpha}$ はおよそ $0.1 \sim 1 \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲にあると考えられているが、将来の装置に向けて正確な外挿が必要である。**最近の進展**

近年、赤外線カメラ計測の高空間・時間分解能化が進み、これらのデータベースを用いて装置横断的な研究がなされてきた[7]。その結果、 λ_q は主にポロイダル磁場に逆比例して小さくなるという結果が得られている。ITERへの外挿値として、低密度のアタッチ運転において外側赤道面で $\lambda_q \sim 1 \text{ mm}$ という予測が得られている。ほぼ時を同じくして、 ∇B 、curvature ドリフトとPfirsch-Schlueterドリフトに基づいたモデルが提案され、上記の実験結果をよく再現している[3]。この新しい結果は当初の予測より約3分の1の λ_q を与えるが、実際のITERでは高密度で部分デタッチ運転が予定されているため、同様の条件での予測を今後進める必要がある。

3次元的な磁場の効果

SOL中の磁力線構造が、外部摂動磁場などによって軸対称性が破れて3次元的になるときは、上述の効果に加えて、ある特定の磁束線において磁力線に垂直方向の輸送が促進されると考えられる[8]。これについては、ダイバータ板に接続する磁力線の長さやそこに到達するまでの軌道などを考慮した輸送解析が必要となる。また、熱負荷分布計測についても高い空間分解能が必要となる。3次元的な磁場の効果については、不純物放射に与える影響とともに、熱負荷への影響が様々な装置で調べられている[8,9]。

- [1] J.W. Connor et al., Nucl. Fusion **39** (1999) 169.
- [2] A. Loarte et al., Nucl. Fusion **47** (2007) S203.
- [3] R.J. Goldston, Nucl. Fusion **52** (2012) 013009.
- [4] W. Fundamenski et al., Nucl. Fusion **44** (2004) 20.
- [5] B. LaBombard et al., Nucl. Fusion **40** (2000) 2041.
- [6] A.W. Leonard et al., Phys. Plasmas **5** (1998) 1736.
- [7] T. Eich et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 093031.
- [8] M. Kobayashi et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 104021.
- [9] J-W. Ahn et al., Plasma Phys. Control. Fusion **56** (2014) 015005.