

シミュレーションで探る周辺プラズマ輸送

河村 学 思

“周辺”という言葉から何を思い浮かべるでしょうか？「〇〇駅周辺」のように名の通った場所の周りという使い方が多いかもしれませんが、あまり重要そうに聞こえないかもしれませんが、離れたところにも情緒のある通りや地元の人々の集うお店など、主役の魅力を引き立てる脇役があることも多いのではないのでしょうか。核融合プラズマの実験装置にも“中心”と“周辺”があります。実現を目指している核融合炉の目的は発電ですから、熱を作り出す場所が“中心”で、「炉心プラズマ」と呼ばれています。炉心から外側に行くにつれて温度が低くなり、部分的に装置の壁に触れる場所もでてきます。それらを「周辺プラズマ」と呼びます。

NIFSニュースNo.213(2013年8/9月号)では、周辺プラズマが装置壁に触れていることや、壁を保護するための方法について詳しく解説されています。今回は、別の視点から“周辺”を眺めます。核融合炉も熱で発電する点は火力発電と同じですが、核融合炉の燃料である重水素と三重水素のプラズマは、消費するよりも多くの量が補給され、常に装置内を循環しています。(図1参照)。熱の補給もあるのですが、炉心に近い話題ですので割愛させていただきます。燃料の補給で“周辺”と関わりが深いのは、気体の重水素と三重水素が電離してプラズマとなる場合で、人が気体を供給(ガスパフ)するものと、自然に生まれる循環(リサイクリング)があります。後者はプラズマが壁に触れて気体に戻った(表面再結合)後、再びプラズマに入るために起きる(図2参照)のですが、周辺プラズマがこの循環の舞台になっています。

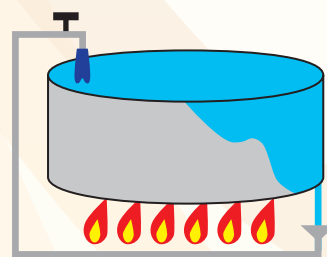


図1：五右衛門風呂に例えた核融合実験装置内の熱と燃料の循環。プラズマは水と違い、溜めておく(閉じ込める)ことが難しい。

熱の供給と燃料の供給のバランスでプラズマの密度や温度が決まるので、装置内の燃料の移動(輸送と言います)を把握することは重要です。しかし、輸送を全ての場所で測ることはできないので、コンピュータを使ったシミュレーションと実験が互いに補い合っています。LHDの周辺プラズマや燃料気体の分布を求めるにはEMC3-EIRENEコード(研究者が開発している計算ソフト)が使われています。当研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の場合、形が他の装置(トカマク方式)と比べて複雑な分、難しいのですが、実際の形を使った計算が最近可能になりました。

水素を使ったシミュレーションを行って、LHDの周辺プラズマの密度分布(1ccあたりの電子の個数)を色で示したものが図3です。取り囲

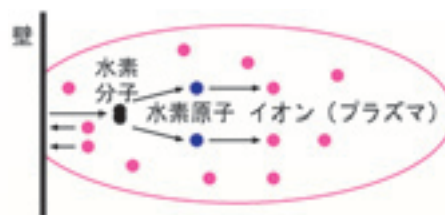


図2：プラズマ中の水素イオンのリサイクリング。イオン(●)が分子(○)となり、原子(●)に解離して、またイオンに戻る。

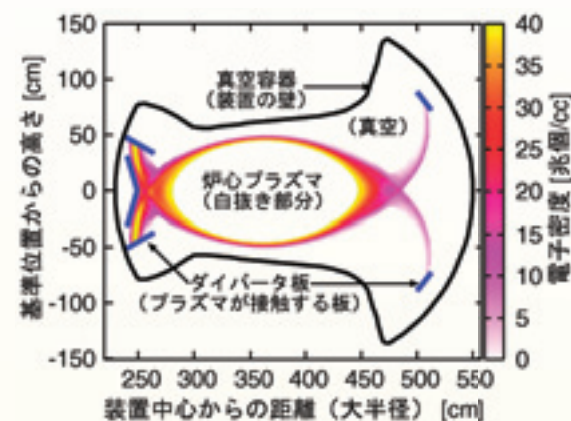


図3：シミュレーションで計算された電子密度の分布。色の付いた部分が周辺プラズマ。このシミュレーションでは炉心プラズマは計算されていません。

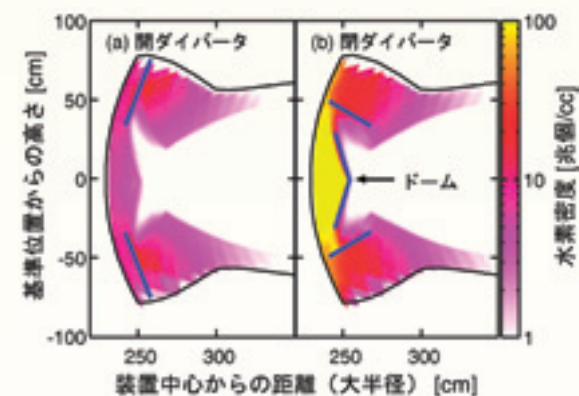


図4：水素(分子と原子)の密度分布。右中央の白い部分は高温高密度のプラズマがあるために水素が電離して、あまり入り込まない。

んでいる黒線は装置本体を、内部の青線はダイバータ板(プラズマが触れている板)を表しています。このシミュレーションでは、ダイバータ板に触れたプラズマが全て気体の水素になって板表面から吹き出していて、図2のように分子や原子を経てイオン、つまりプラズマに戻ると仮定しています。このような反応を原子過程と呼び、実際にはこの例以外にもたくさんの過程があります。図4に示しているのは、プラズマとともに計算された水素の密度(分子と原子の合計)です。左の(a)が開ダイバータで、右の(b)が閉ダイバータのシミュレーション結果です。(b)左端の黄色の場所では、図中矢印で示したドームで水素気体が閉じ込められて密度が高くなっています。この密度上昇は、閉ダイバータの特徴で、以前の開ダイバータでは見られません。水素を装置から取り除く目的で、このドームの下に真空ポンプの設置が進められています。

シミュレーションは形状だけを切替えて同じ条件で行える上、計算を行った全ての場所で密度や温度を知ることができるので、開/閉タイプの違いを容易に比べることができます。例えば、閉ダイバータでは水素密度以外にもプラズマ密度が増加することがわかりました。ダイバータ板の向きが変わったことで水素がよりプラズマに入り込みやすくなり、板のすぐ近くでプラズマが多く生まれます。その結果、板に触れて水素に戻るプラズマも増え、というようにお互いが影響を与え合い、水素もプラズマも密度が部分的に増加します。また、それに伴ってプラズマ温度の低下も見られます。こういった違いは周辺で大きく、炉心に近づくにつれて小さくなります。

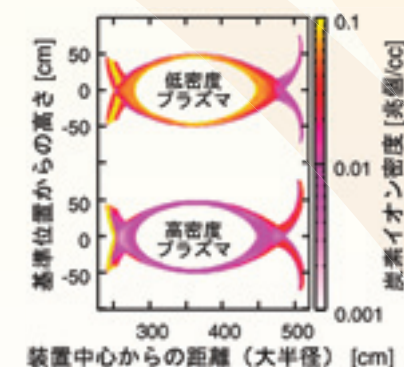


図5：不純物(炭素イオン)の密度分布。高密度プラズマは低密度プラズマの2倍の電子密度。加熱の強さは両方向じ。

周辺プラズマを考える上でもう一つ欠かせないのが不純物です。LHDの場合、主な不純物は炭素で、炭素製のダイバータ板がプラズマに削られて発生します。これも水素のように、分子や原子としてプラズマに入って電離してイオンとなり、プラズマの一部となって輸送されます。不純物は炉心プラズマに入り込むと熱を奪ってしまうので、できるだけ避けるべき物です。不純物はプラズマから力を受けて移動します。代表的な力は炉心側の高温の方へ吸い上げる「熱力」と、流れで外側へ押し流す「摩擦力」の2種類で、その釣り合いが不純物の輸送を大きく左右します。図5に二つの異なる条件でシミュレーションを行った結果を並べて示します。装置内の燃料量を変えて低密度と高密度のプラズマを再現して、不純物の分布を計算したものです。高密度の方が流れが強いためダイバータ板側へ不純物が押しやられ、炉心側の不純物が減っています。

LHDの周辺プラズマについて、輸送シミュレーションの現状をご紹介しました。真空ポンプの影響であったり、炉心と周辺が互いに及ぼす影響であったり、調べる必要のあるテーマはまだあります。実験の観測と比べることでより正確なシミュレーションを実現させる必要があります。周辺は炉心の研究に比べて後回しになりがちなのですが、国際協力でフランスに建設が進められている核融合実験炉(ITER)のような大型装置では今以上に重要になります。“周辺”という研究分野が、多くの研究者の集う魅力ある分野となることを願います。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)