

不純物ホールの観測

吉 沼 幹 朗

みなさんは不純物と聞くと、それを取り除きたいと思うでしょうか、それともそのままでもよいと思うでしょうか。辞書によると、不純物とは「ある物質中に少量混じった余計な別の物質」のことです。余計かどうかは、目的によって変わりますので、必要なもの以外の不必要なものを不純物として広くとらえてみます。そうすると、私たちはしばしば、不純物を取り除く作業をしていることがつくでしょう。収穫した穀物に含まれる不要なもみ殻やごみなどを取り除いたり、ザルを用いて水を切ったり、湿気を取り除くために布団を干したりします。これら

は、力や熱といったエネルギーの受けとり方や、受けとったときの移動のしやすさが物によって異なる性質を利用しているわけです。ところで、不純物は取り除かれるばかりではありません。不純物を適量混ぜることで、純粋な状態より望ましい性質が得られることもあります。電子機器に使われている半導体は不純物が添加されることで性質の異なる半導体となり、様々な機能をもたらします。鉄は不純物を加えることで強度の強い様々な鋼になります。料理でいうと隠し味みたいなものです。このように、不純物というのは取り除くばかりでなく、その量を制御できることが重要であることが理解できると思います。

プラズマ中では、不純物は「取り除くべきもの」でしょうか。ここでの不純物は、水素などの燃料以外のもので、鉄や炭素、酸素、さらにはヘリウムといったものがあります。プラズマ中に不純物が入ってしまうと、プラズマ中のエネルギーが光となって放出され、プラズマの温度を下げてしまいます。また、燃料となる粒子の割合が下がってしまう(燃料が薄まってしまう)ので、プラズマの密度も減ってしまいます。このような理由から核融合においては、不純物は「取り除くべきもの」になります。核融合のために高い温度のプラズマを目指して、プラズマがよく閉じ込められる状態にすると、取り除きたい不純物までが閉じ込められてしまうことがしばしば観測されています。プラズマをよく閉じ込めることのできる状態でありながら、不要な不純物は吐き出されるような理想的な状態はないのでしょうか。

大型ヘリカル装置(LHD)では、そのような状態が観測されています。

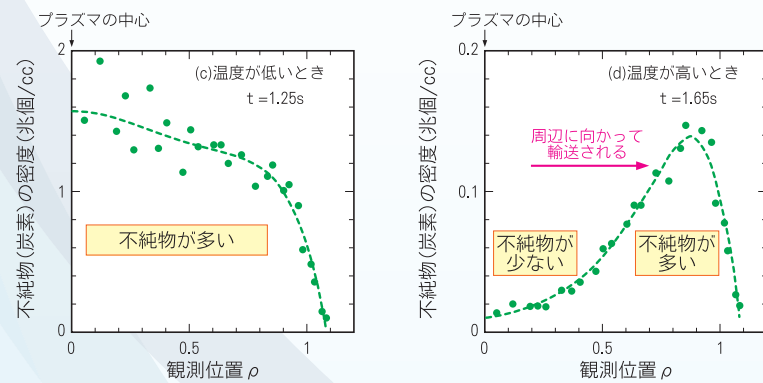
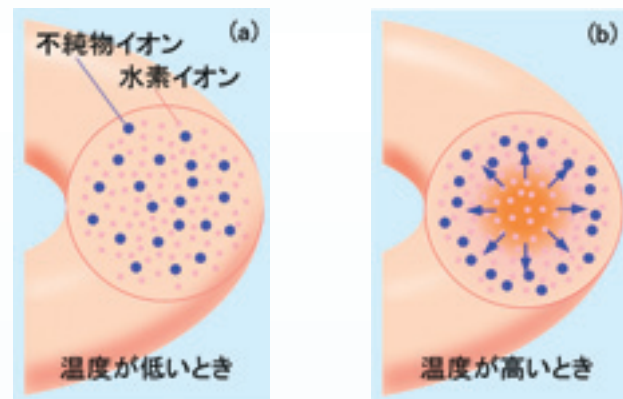


図1 (a)(b)温度の高いプラズマを作ると不純物が外へ吐き出されていきます。中心に穴の開いた分布を「不純物ホール」と呼んでいます。(c)(d)実際に観測された炭素不純物の分布。温度が高いときに、中心部の密度が大きく減少します。

閉じ込めをよくして高いイオン温度のプラズマを作ると、不純物がプラズマの中心部からすばやく吐き出されていきます。図1(a)は、環状であるLHDのプラズマの一部と、その断面に散らばる不純物の様子を簡単に描いたものです。不純物は、温度が低いときは中心部にもたくさん存在していますが、温度が高いときは、図1(b)に描きますように、周辺部に吐き出されてしまい、中心に穴の開いたような分布になります。そのため、このような不純物分布の状態を「不純物ホール」と呼んでいます。図1(c)、(d)は、実際に観測された不純物の密度分布です。観測位置が0の場所がプラズマの中心部で、1の場所がプラズマの周辺部です。温度が高いときには、中心部で、不純物の密度が大きく減少していることが分かります。

プラズマ中には種々の不純物が存在しますが、その種類によってもプラズマ中心部での密度の減少の割合が異なることが分かってきました。図2は、高いイオン温度のプラズマ中で、中心部での不純物の密度が減少したときのヘリウム、炭素、ネオンの密度分布を観測したものです。ヘリウムより炭素、炭素よりネオンのほうがより中心の密度が減少し、周辺部と中心部における差が顕著になっています。これは力の受け方や移動のしやすさが、不純物の種類によって異なることを示しています。たとえば、ネオン、炭素、ヘリウムは、それぞれ電気を帯びている量が異なり、より大きな電気をもっているネオンには、より大きな電気的な力が働きます。そのため、この電気的な力がどのように作用して、不純物の輸送に影響を与えるのかをこれからの研究で

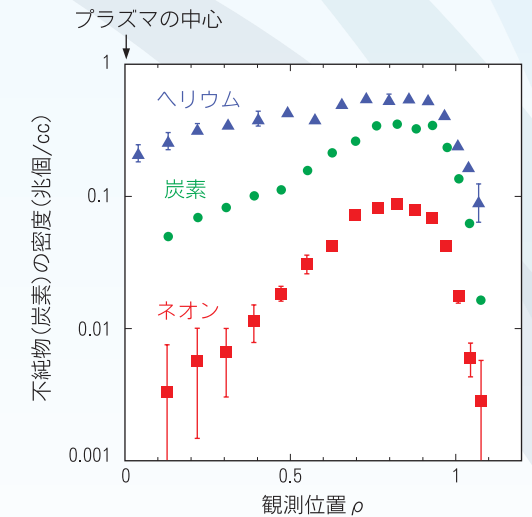


図2 ヘリウム、炭素、ネオンの密度分布です。種類によって密度の減少の様子が異なります。電気を帯びている量の大きなネオンが、中心部での密度の減少が顕著に現れています。

明らかにすることが必要になります。

ここで輸送という言葉がでてきましたが、これはある場所からある場所へ物質が運び送られていくことを表す言葉です。図3を見て想像してみてください。プラズマ中のそれぞれの位置で不純物の輸送を担当する人がいます。どんどん運ぶ人の場所は、輸送が大きい場所、ひと休みしている人の場所は輸送が小さい場所になります。輸送が大きい場所では、荷物はたまりません。輸送の小さいところに荷物がたまりやすくなります。その輸送が滞ると、そこに物がたまり山となります。受け渡せなくなると、その手前にどんどん物がたまっていくこととなりますので、反対側に受け渡す人もいるでしょう。このようにして、プラズマ中には不純物の分布ができあがります。不純物の輸送を担う人たちが、どのようなときに

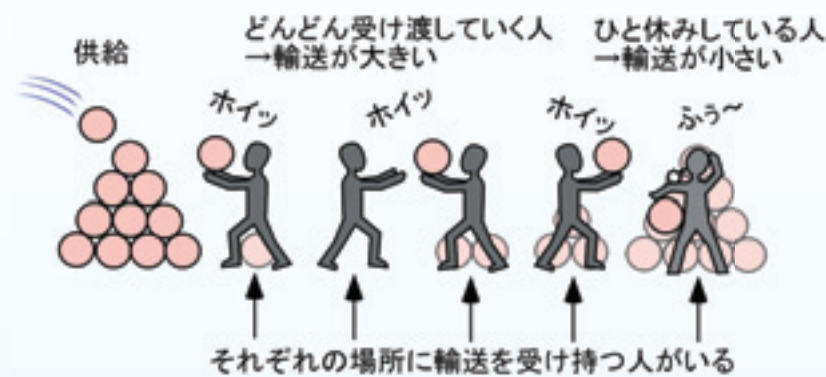


図3 輸送とは、ある場所からある場所へ物質が運ばれていくことを表します。それを担う人が、それぞれの場所に居て、その人たちの働き方によってさまざまな密度分布が形成されます。

にがんばって、どのようなときにひと休みしたくなるのか、また、どちらに向かって運ぼうとするのかを理解することが、この不純物ホールの仕組みを明らかにすることにつながります。

不純物ホールは、まだまだ分からないことの多い現象ですが、プラズマ中の不純物を上手に操るためにも、その仕組みを解明していこうと思います。(高温プラズマ物理研究系 助教)