

人工ダイヤモンドを用いた高エネルギーイオン閉じ込め研究

神尾 修治

将来の核融合炉では、核融合反応により生成された高エネルギー粒子がプラズマを加熱する役割を担うため、高エネルギー粒子を良好に閉じ込めることが必要不可欠です。核融合炉における高エネルギー粒子閉じ込めの理解・予測のため、世界の様々な磁場閉じ込めプラズマ実験装置において、高エネルギーのビームを打ち込む方法、あるいは電磁波を入射してイオンを加速する方法を用いて高エネルギー粒子を生成し、その閉じ込め特性理解のための研究が行われています。この研究を実施するために、大型ヘリカル装置(LHD)では、世界最大級の高エネルギー粒子の計測システム群が設置されていますが、ここでは、新たに導入した人工ダイヤモンドを用いた計測システムによる高エネルギーイオン閉じ込め研究について、最新の実験結果をまじえて紹介します。

真空容器の中で磁場によって閉じ込められたプラズマの粒子（イオンや電子）は磁場に巻き付いて運動しているので直接計測することは簡単ではありません。特に1億度を超えるような高温のプラズマの場合、中に計測装置を入れることはできません。ところが、プラズマ中の高エネルギーイオンはある低い確率で、以下の理由により外に飛び出してくるので、これを測ることによってその情報を得ることができます。プラズマ中にはわずかな量ですが、電気的に中性な粒子も存在します。高エネルギーイオンはこの中性粒子と衝突して荷電交換することによって、高エネルギーの中性粒子となります。すると、この粒子はもはや磁場に捕らわれなくなり、プラズマの外へと飛び出してくるという仕組みです。この飛び出してきた高エネルギーの中性粒子を中性粒子分析器（NPA）によって計測します。NPAにはいくつかの種類がありますが、今回紹介するのは人工ダイヤモンドを検出器として使ったタイプです。

ダイヤモンドやシリコンを用いた半導体検出器では、外からエネルギーが与えられると、与えられ

たエネルギーに応じた数の電子がバンドギャップと呼ばれる壁を越えます。この壁を越えた電子の数を数えることで外から与えられたエネルギーの大きさが分かります。従来用いられてきたシリコン検出器においては、このバンドギャップが狭く、室温レベルのエネルギーでも電子がバンドギャップを超えてしまうため、液体窒素温度（約マイナス200度）まで冷却する装置が必要で、大型化するという弱点がありました。その一方、バンドギャップが広いダイヤモンド検出器は冷却の必要がなく、非常にコンパクトにできます。この特徴は、検出器を複数個設置して多チャンネル化する際に非常に有利となります。ただ、ご存じのように天然ダイヤモンドは高価ですし、人工ダイヤモンドにおいては、ダイヤモンド内にある不純物に電子が捕獲されてしまい、電子の数が正確に数えられないという問題がありました。近年、化学気相成長法を用いた人工ダイヤモンドの精製技術・加工技術の向上によって、不純物の非常に少ないダイヤモンドが安定して生成されるようになり、性能の良いダイヤモンド検出器を容易かつ安価に入手できるようになりました。LHDでは、世界で初めて人工ダイヤモンド検出器をNPAとしてプラズマ計測に導入し、高性能な計測システムを開発することに成功しました。

図1は、LHDに設置した人工ダイヤモンド中性粒子計測システムです。LHD真空容器と約4mのステンレス管でつながっており、このステンレス管を通り抜けてきた高エネルギーの中性粒子を測定します。現在、検出器は、それぞれプラズマの内側（Ch1）、中心（Ch4）、外側（Ch7）を見るように3台設置されています。将来は、人工ダイヤモンド検出器がコンパクトであるという利点を活かし、最大9台まで増設する予定です。内側と外側のCh1とCh7の視線は、青色で示した磁場の弱い領域を見込みます。この領域は、ヘリカルリップルと呼ばれ、ヘリカル型装置特有のものです。磁場に垂直方向の速度が大きいイオンは、このヘリカルリップルに捕捉

されやすいという性質があります。この磁場に垂直方向に大きな速度を持つ高エネルギー粒子を計測するため、磁場に垂直方向（磁場の向きは紙面垂直方向）の位置にダイヤモンド検出器を設置しました。

最新のLHD実験において得られた、ダイヤモンド検出器による計測結果について紹介します。この実験は、重水素に少しだけ軽水素を混ぜたプラズマに、イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）の電磁波を入射して高エネルギーイオンを生成しました。図1の緑の線で示した場所の周辺の軽水素イオンが電磁波と共鳴し、磁場に垂直方向に加速されます。図2 (a) に、ICRF加熱の入射パワー、プラズマの密度、及びダイヤモンド検出器で測定した高エネルギーイオンのカウントを示します（35keV以上の高エネルギーイオンをカウントしていますが、これは秒速約2,500km以上の速さのイオンに相当します）。ICRF加熱を実施することで、ヘリカルリップルを見込むダイヤモンド検出器のCh1とCh7のカウントが著しく上昇する一方、ヘリカルリップルを見込んでいないCh4のカウントは余

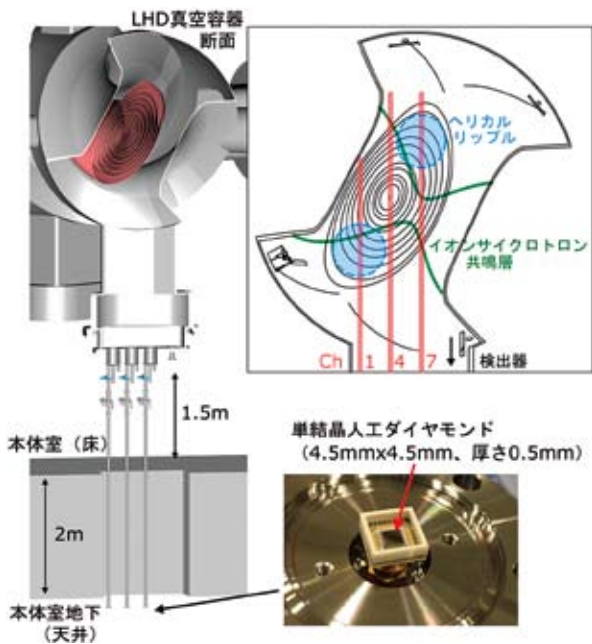


図1 LHDに設置した人工ダイヤモンド中性粒子計測システム。検出器はドーナツ状のヘリカルプラズマ中心から7.7m下に位置し、プラズマを真下から観測しています。

り変わらないことが分かりました。図2(b)の高エネルギーイオンのエネルギー分布を見ると、Ch1とCh7は高いエネルギーまで観測されました。また、10秒あたりでICRF加熱をOFFにしたところ、高エネルギーイオンのカウントが著しく低下し、再びONにしたところ有意なカウントが得られることが分かりました。これらの結果は、ICRF加熱によって高エネルギーイオンが生成され、ヘリカルリップルに捕捉されていることを示しています。

このように人工ダイヤモンド検出器を用いることで、高エネルギー粒子閉じ込め物理に関する大きなヒントが得られるようになりました。今後は、今回得られた結果について詳細な解析を行い、ヘリカルリップルに捕捉されている高エネルギーイオンについて理解を深めます。また、検出器を増やして高エネルギーイオンの空間分布を更に詳しく計測し、高エネルギーイオンの閉じ込めについての詳細に迫りたいと考えています。LHDにおける高エネルギーイオン閉じ込め研究を推進することで、引き続き核融合炉の早期実現に貢献していきます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

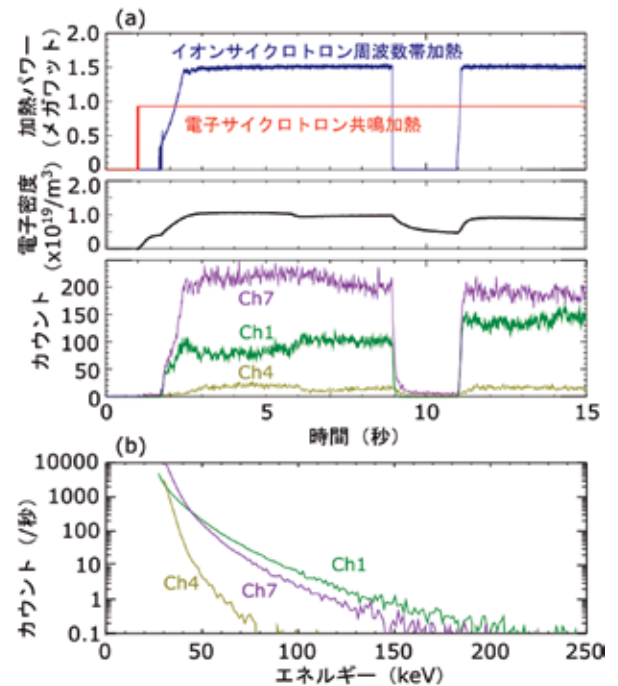


図2 ダイヤモンド検出器による計測結果。(a) 加熱パワー、プラズマの密度、ダイヤモンド検出器の高エネルギー粒子カウントの時間変化。(b) 高エネルギー粒子のエネルギー分布。