

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第3回 プラズマを超高温にする加熱装置

日本原子力研究所 井上多加志, 坂本 慶司



はじめに

これまで本連載講座でみてきたように、トカマク型の磁場閉じ込め核融合炉では、燃料である重水素(D)とトリチウム(T)のプラズマを生成し、温度と密度を高めて核融合反応を起こします。DT核融合反応の結果生じる ${}^4\text{He}$ は核融合に伴うエネルギー(3.5 MeV)をもってプラズマ中に放出され、プラズマ加熱に利用できるものの、そのためにはまず、核融合燃焼条件(たとえば自己点火)を確立することが必要です。すなわち、本連載講座の第1回で紹介したローソン図からわかるように、自己点火条件を確立するイオン温度である数十 keV(数億度)まで、外部からプラズマにエネルギーを投入して加熱することが必要なのです。

本稿では、プラズマを数億度という超高温まで加熱する方法と、加熱を行う装置のしくみを紹介します。またトカマク型核融合炉の定常運転に不可欠なプラズマ電流の駆動という加熱装置が持つもう一つの役割について説明します。さらに加熱装置の開発研究の現状を紹介します。

どうやってプラズマを数億度に加熱するの？

1. ジュール発熱で加熱する方法

トカマク装置の特徴の一つは、プラズマ自身に数メガアンペア以上の大電流を流し、それが作る磁場をも利用してプラズマを閉じ込めるといふ点です。プラズマは、ガスが高温(数 eV: 数万度以上)になっ

てイオンと電子に分かれ、バラバラになったものですから、電流は容易に流れます。電流を流せばプラズマ自身のもつ抵抗によってジュール発熱を起こし、プラズマを加熱することができます。これは電熱器でニクロム線に電流を流して加熱するのと同じ原理です。しかしながら、プラズマの抵抗値は温度の $3/2$ 乗に逆比例して小さくなってしまい、1 keV程度までしかプラズマを加熱することができません。そこで第2段加熱、あるいは追加加熱といわれる更なる加熱方法が求められます。

2. 粒子ビームで加熱する方法

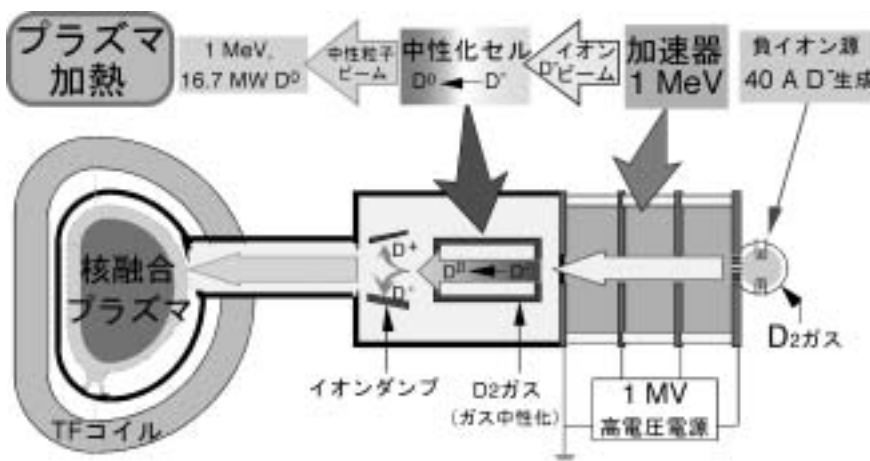
数十 MW もの大パワー粒子ビームをプラズマに入射して加熱する方法を、中性粒子入射(NBI: neutral beam injection)加熱といいます。

NBIのしくみを第1図に示します。NBIでは、まずイオン源でイオンを生成し、これを加速器で加速してイオンビームとします。NBIで用いるイオン源や加速器は、原子核物理実験や産業界で用いられているものと基本的に同様です。しかしその特徴を挙げるなら、桁違いに大電流のイオン源であり、加速器である、ということができるといえるでしょう。例えば、国際熱核融合実験炉ITERのNBIでは、ビームエネルギーは1 MeVと低いのですが、重水素負イオン(D^-)のビーム電流値は40 Aもあり、従来の加速器の100倍以上の大電流イオン源と静電加速器が要求されています。

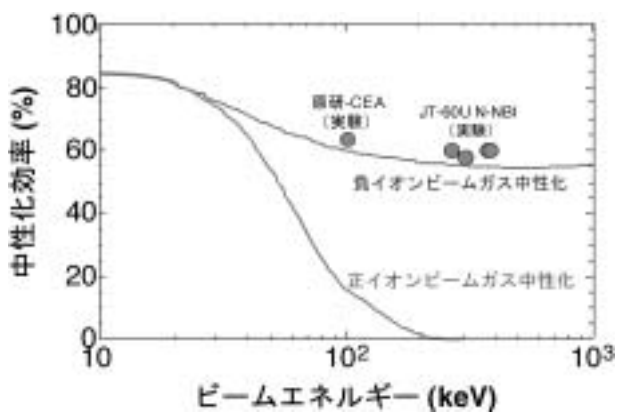
さて、せっかく大電流のイオンビームを発生しても、イオンビームのままではプラズマ閉じ込め用の強力磁場で軌道を曲げられてしまうため、プラズマにイオンビームを直接入射することはできません。そこでNBIでは、「中性化セル」と呼ぶガスセル中にビームを通してイオンビームを中性粒子ビームに変換し、プラズマに入射します。第2図はガスセル

*Intelligible Seminar on Fusion Reactors (3)
Heating Systems to achieve Fusion Reaction in High
Temperature Plasma: Takashi INOUE, Keishi
SAKAMOTO.*

(2005年 2月4日 受理)



第 1 図 中性粒子入射加熱装置(NBI)のしくみ



第 2 図 水素イオンビームの中性化効率

と衝突してそのエネルギーをプラズマ粒子に与え、プラズマを加熱します。これが NBI によるプラズマ加熱の原理で、加熱前の 1 keV 程度のプラズマが「ぬるま湯」とすると、「熱湯」に相当する MeV 級のエネルギーを持つ高出力中性粒子ビームを入射し、プラズマの温度を上げるものです。JT-60を大電流化した JT-60U では、正イオンを用いた従来型 NBK (出力 40 MW) に加えて、400 keV、5 MW の負イオン NBI を用い、イオン温度 5.2 億度のプラズマを生成しています。これは人類が創り出した最高温度として、ギネスブックにも掲載されています。

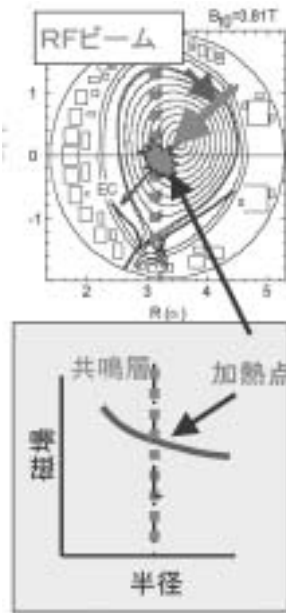
による水素イオンビームから中性粒子ビームへの変換効率をビームエネルギーの関数として計算したものです。従来の NBI では水素または重水素の正イオンを中性化する方式をとっていましたが、正イオンの中性粒子への変換効率はビームエネルギーと共に低下し、例えば、JT-60の正イオン NBK (ビームエネルギー 100 keV) では、中性化効率はわずか 20% 以下です。プラズマが大型化するに従って、ビームを中心まで到達させるためにはより高いビームエネルギーが必要となりますが、MeV 級のエネルギーでは正イオンの中性化効率はゼロとなってしまいます。そこで ITER 以降の核融合炉で用いられる NBI では、1 次ビームとして負イオンを用いることが不可欠となっています。負イオンを用いれば 1 MeV 以上の高エネルギーでも 60% 程度の高い中性化効率を得ることが可能です。

プラズマに入射した中性粒子ビームは電離され、イオンビームとなってプラズマ中の磁場によって閉じ込められます。この間にプラズマの電子やイオン

3. 高周波で加熱する方法

高周波 (RF: Radio Frequency) を使ってプラズマを加熱することもできます。RF のエネルギーを物質に吸収させて温めるという考え方は電子レンジと同じです。ただプラズマを効率よく加熱するためには、最適な周波数や入射方法を選択する必要があります。本節では ITER での使用が期待されているミリ波帯 RF を用いて電子に直接エネルギーを注入する「電子サイクロトロン共鳴 (ECR: Electron Cyclotron Resonance) 加熱、略して ECH」について紹介します。

磁場に閉じ込められたプラズマでは、電子もイオンも磁力線に巻き付いて回転運動をしています。この回転周波数は磁場の強さに比例しますが、一般的な核融合装置での磁場の強さ (数テスラ (T)) の場合、電子の回転数は 1 秒間に約 1,000 億回 (100 ギガヘルツ (GHz)) のオーダーです。この回転周波数に近い周波数を持つ RF を入射すると、電子は共鳴的に加速されます。この高エネルギー電子がプラズマ



第3図 トカマク断面、磁場分布と共鳴層

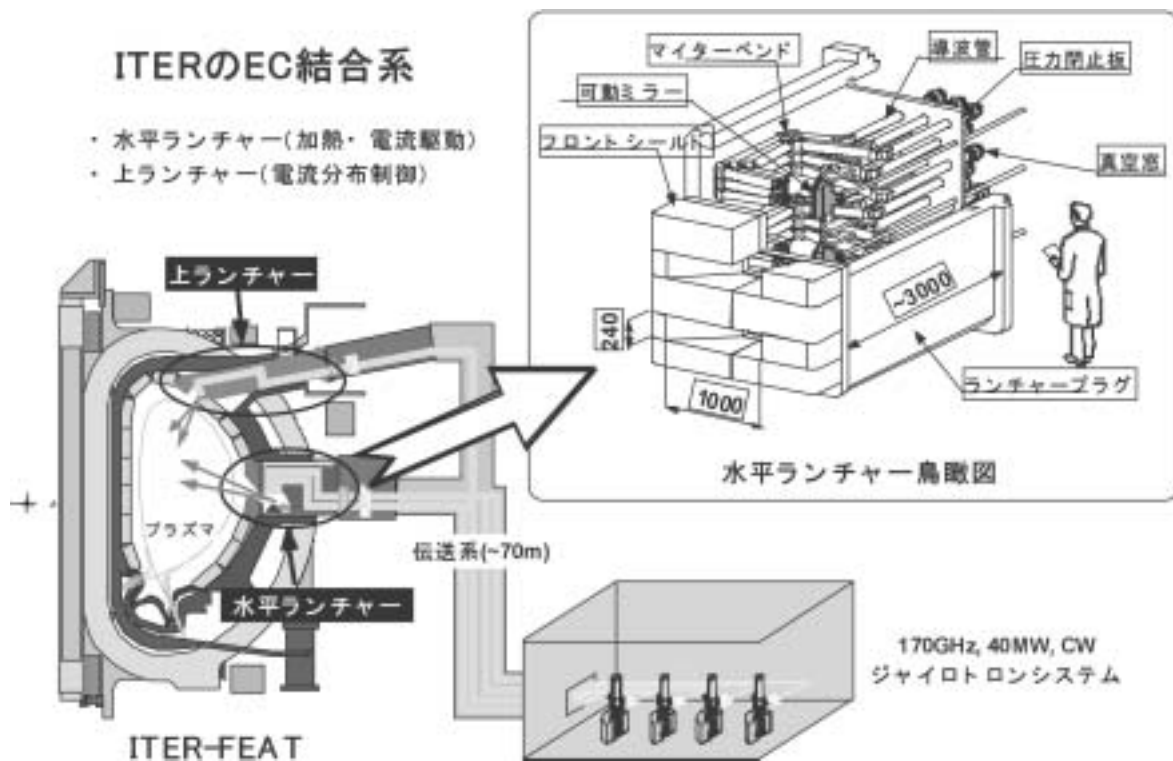
中で他の低速電子にエネルギーを与え、最終的にプラズマ全体が加熱されます。100 GHz 程度と高い周波数の RF は、第3図に示すように、レーザー光線のようにビーム状にプラズマ中を伝播しますが、電子の回転周波数と RF 周波数が共鳴しないところではプラズマ中を素通りするだけで、何も起こりません。共鳴条件を満たす場所でのみ RF エネルギーが

プラズマに吸収されます。トカマク装置では磁場が場所によって変化しており、共鳴条件を満たす場所はプラズマ中の狭い範囲に存在することになります。したがって必要な場所のみを選択して加熱することもできるわけです。JT-60 U ではこの特徴を活かし、RF ビームの入射角度を制御してプラズマ中心を集中的に加熱することで電子温度3億度を達成しました。

ECH 装置は第4図のように、RF を発振する発振源、発生した RF をトカマク真空容器まで伝送する伝送系、RF をプラズマへ入射するアンテナ系(別名ランチャ)で構成されます。

核融合炉の定常運転には加熱装置が必要なのですか？

第 4 章でも説明があったように、従来のトカマク装置はトランスの原理を用いてプラズマ電流を流すため、基本的にパルス運転しかできません。エネルギー源としての核融合炉を考える際には、定常化が不可欠であり、外部からプラズマ中に電流を誘起する必要があります。そこで、NBI や RF を用いて定常的にプラズマ電流を駆動する方法が考えられています。NBI や RF に期待される機能がプラズマ加熱のみであれば、自己点火後には不要となってしまう



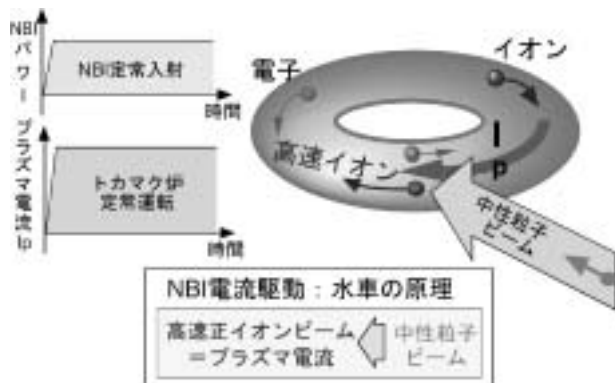
第4図 電子サイクロトロン共鳴加熱装置の概念図

ますが、核融合反応を持続させるためには、NBI や RF の定常入射による電流駆動の機能が期待されます。トカマク炉定常運転の鍵は、NBI や RF の高性能化が握っているといっても過言ではありません。

NBI でプラズマ電流を駆動するためには、第5図のように、環状のプラズマに対してNBIを接線方向から入射します。プラズマに入射された中性粒子ビームはプラズマ表面近傍で主に電子と衝突して高速正イオンとなり、磁場に閉じ込められてトラスプラズマ中をグルグル周回するようになります。これをプラズマ電流として、その作る磁場をプラズマ閉じ込めに利用するものです。たとえていうなら、NBIによる電流駆動とは、水車の上から水を流して水車を回転させる方法にたとえられるでしょうか。

RFを電流駆動に用いる際には、RFビームを磁力線方向に斜めに入射します。するとRFは、まず高速で磁場方向に進行する電子と共鳴を始めます。これをドップラー効果を入れたサイクロトロン共鳴といいます。ドップラー効果により加熱に必要なECR条件よりも少し高い周波数が必要となります。RF電流駆動では、RFと同じ方向に流れている電子だけにエネルギーを与え、これがプラズマ中に駆動される電流となります。ECRを用いた電流駆動では、加熱の時と同様、プラズマ中の狭い範囲のみに電流を選択的に流すことが可能です。自律性の強い核燃焼プラズマ(本連載講座第2回参照)では、局所で発生する乱れがプラズマ全体に波及して性能を低下させる現象が予想されていますが、ECRでこの部分に集中して電流を駆動し安定化する、プラズマ能動制御の研究も行われています。

核融合研究の要求がプラズマ加熱のみであった時



第5図 NBIによるプラズマ電流駆動

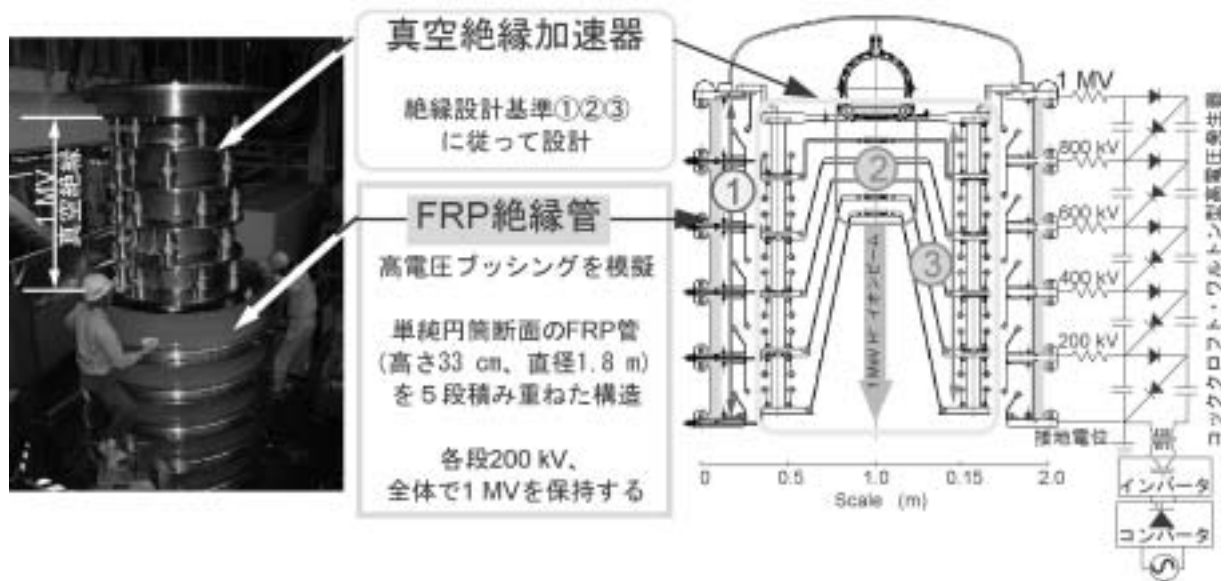
代には、各種加熱法のプラズマとの組合せ試験を行うために、トカマク装置の周囲に多様な加熱装置が設置されましたが、それぞれ一長一短があって優劣をつけがたい状況でした。しかしながら、核融合発電を想定した外部電流駆動による定常化研究が本格化すると、NBI や RF の運転パワーはその核融合炉で発電した電力を使用するわけですから、発電所内の循環電力を低減するために不可欠なシステム効率(加熱パワー/入力電力)や電流駆動効率(駆動できるプラズマ電流/加熱パワー)等が新たな指標として検討されるようになり、現在では、総合性能を勘案してNBIとECHが加熱装置の有力候補として注目されています。

・加熱・電流駆動装置の開発はどうなっていますか？

1. 1 MeV, アンペア級負イオン加速器

ITER NBIのイオン源と加速器に要求される性能は、ビームエネルギー1 MeV、負イオン電流40 Aです。さらにエネルギー生産を行う核融合炉では、高密度・大型プラズマの中心までビームを到達させてより高い電流駆動性能を得るため、1.5~2.0 MeV程度のビームエネルギーが要求されます。原子核物理実験等で用いられている従来の静電加速器に比べると、ビームエネルギーは低いものの、従来の加速器の電流値が高々mAレベルであるのに対して、NBI用加速器ではその数十倍以上となります。しかしながら、1s程度のパルス運転でもアンペア級の電子・イオンビームを1 MeV以上のエネルギーまで加速した例は世界にありません。

さらにITER NBIに向けての開発では、大電流のビーム加速以前に1 MVという高電圧の真空絶縁技術を確立しなければなりません。ITERでは、核融合反応の結果生じる中性子や2次的に発生する γ 線がビーム入射のために開けた開口部を通してNBI内に流入するため、NBI機器はこれらの放射線に曝されます。加速器位置での中性子束は $10^{10} n/cm^2 \cdot s$ 程度と低いので、永久磁石やアルミナ等、イオン源と加速器で用いられる機能性材料の照射損傷は問題となりません。しかしながら、従来用いられているSF₆等の絶縁ガスを加速器の高電圧絶縁に用いると、放射線誘起伝導(RIC: radiation induced conductivity)、すなわち電離箱と同じ原理によってガス中に電流が流れてしまいます。そのため高電



第6図 1 MeV、アンペア級の負イオン加速を目指した MeV 級加速器

圧絶縁は真空を用いざるを得ないのです。

日本原子力研究所(原研)においては、ITER NBIの建設に向けて、1 MeV、アンペア級の負イオン加速を目指した加速器開発を行っています。この「MeV 級加速器」の外観を第6図に示します。加速器外周で真空境界を形成するのは、直径1.8 m、高さ33 cmのFRP(Fiber reinforced plastic: ガラス繊維をエポキシ樹脂で固めたもの)製円管を5段積み重ねたFRP絶縁管(高さ1.9 m)です。MeV 級加速器ではITER NBIの真空絶縁条件を模擬するため、電源部の絶縁に用いるSF₆ガスと加速器の間の真空隔壁としてFRP絶縁管を使用し、その内部に加速電極およびその支持構造物(ここで「加速器本体」と呼ぶ)を挿入して使用する構造となっています。加速器本体は、アルミ製のポスト碍子によって-1 MV電位のフランジから吊り下げられ、構造上切り離されています。FRP絶縁管と加速器本体の間には、幅50 mm、絶縁距離2 m程度の真空ギャップが全周にわたって存在し、-1 MVの高電位にある部分がこのギャップを介して接地電位を直接見込むことを許容した設計となっていることから、この加速器を「真空絶縁型加速器」と呼んでいます。従来の加速器では、高電圧部が接地電位まで見通せるのはビームを加速する加速電極の孔を通してのみであり、貫通放電の可能性を極力小さくする設計となっているのと比較すると、1 MV真空絶縁技術の確立がこの加速器開発のキーポイントとなることは容易にご想像頂けるでしょう。

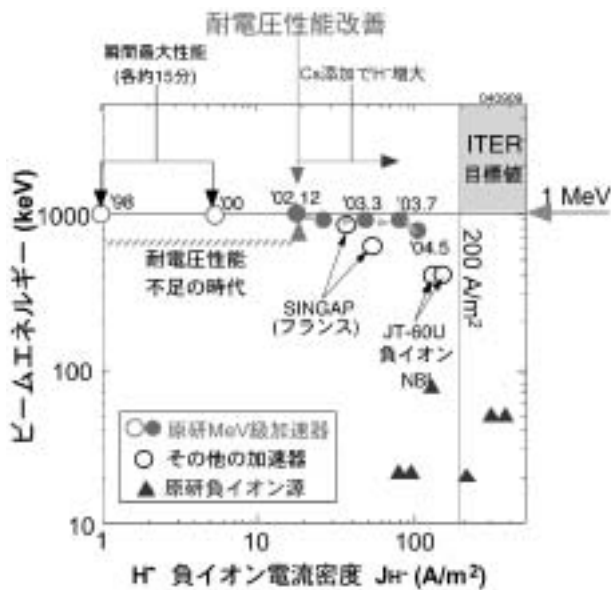
1 MV高電圧を真空絶縁するために行った設計対応は以下のとおりです。

- 従来の加速器の加速電極間の絶縁設計と同様、高真空中の真空アーク放電に対する耐電圧性能が真空絶縁距離の1/2乗に比例するとするClump則を採用。
- 一方、NBIではイオン源が加速器に直結されるため、運転中の加速器内圧力は0.02~0.2 Pa程度まで上昇する。そこでグロー放電に対するパッシェンの法則をも適用。

しかしながら、Clump則では真空絶縁距離が長いほど耐電圧性能は向上するのに対し、グロー放電は絶縁距離が短い方が電子雪崩を起こしにくく、耐電圧性能は向上します。そこでMeV 級加速器では、運転中の圧力が高い加速器電極間では、グロー放電防止を図り(第6図の), 圧力の低い加速器本体周囲では、真空絶縁距離を長くにとってアーク放電を防止する設計()となっています。さらに、

- FRP絶縁管の陰極接合点(フランジ、FRPと真空の三重接点)近傍に大型の「電界緩和リング」を設置し、陰極接合点の電界強度を1.2 kV/mmまで低減した()。

これらの対応によって真空絶縁技術が確立し、今では定格の1 MVを安定に保持することができるようになり、現在、MeV 級加速器の開発は1 MeVレベルで着実に進んでいます。MeV 級加速器におい



第7図 MeV級加速器開発の進展

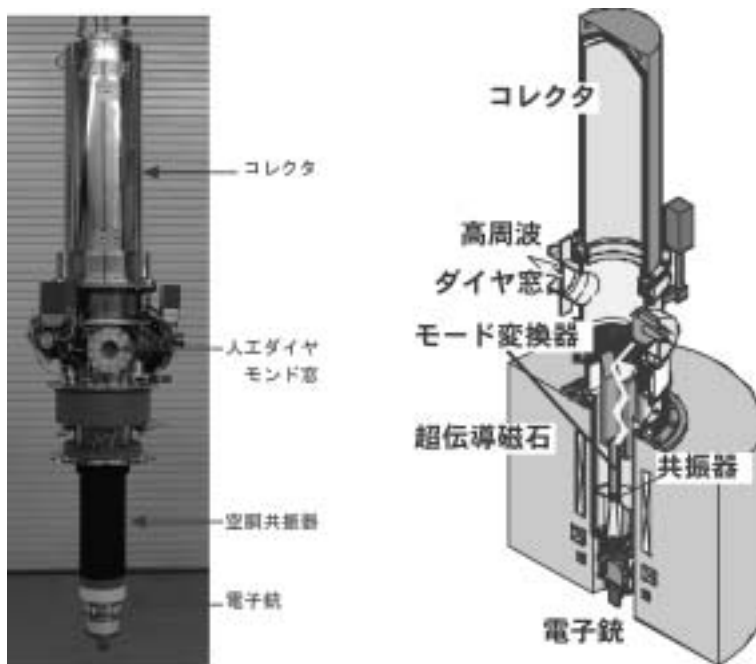
てこれまでに得られた負イオンビームの電流密度をビームエネルギーの関数として第7図に示します。この図には、他の核融合用大電流負イオン源と加速器の達成値もあわせて示しています。これまでに、MeV級負イオンビームの電流密度は実用規模の100 A/m²まで増大し、あと2倍でITER NBI用加速器の要求値を満足するレベルに到達しています。

しかしながら、現有試験設備の容量は1 MeV, 1 Aであり、ITER NBIの要求値40 Aまで大きな乖離があることは誰の目にも明らかです。そこで、10

年といわれるITER建設期間中に実規模負イオン源と加速器の統合性能試験を行う計画です。ITER建設決定後、速やかに実規模試験に移行できるよう、ITER参加極間で協議が進められています。

2. 170 GHz, 1 MWジャイロトロンの開発

ITERの電子サイクロトロン共鳴加熱装置として、周波数170 GHz, 1本あたりの出力1 MW級のRF源が求められています。この周波数帯で効率の良い発振が可能なRF源はジャイロトロンと呼ばれる電子管です。第8図は原研で開発したITER用ジャイロトロンの写真で、高さは約3 m、重さは約800 kgあります。ジャイロトロンによるRF発振の原理は、いわゆるサイクロトロン共鳴メーザーで、以下のように、プラズマ中のECRによる電子の加速とは逆のプロセスでRFを発生するものです。すなわち、まず約80 keVの電子ビームを電子銃で発生させ、磁場に巻きついた回転電子ビームを作ります。この回転電子ビームを、7 Tの磁場が印加された空洞共振器に打ち込みます。その結果、電子ビームの回転運動エネルギーが誘導放射によってRFのエネルギーに変換されます。空洞共振器内の特定の場所にエネルギーの揃った良質の電子ビームを打ち込むことにより特定の発振モードを励起し、ある周波数のRFを選択的に発振させることができます。



第8図 大電力ジャイロトロンの外観と構成

ジャイロトロンの名前は、この電子の回転運動、つまりジャイロ運動に由来しています。RF 電力は、空胴共振器の下流側に置かれたモード変換器で長距離伝送に適したガウス型の RF ビームに変換されて、出力窓を通して外部に出力されます。

さて、発振に寄与し空胴共振器を出る電子ビームは、30 keV を最低エネルギーとして広い連続スペクトルを持ちます。そこで原研のジャイロトロンでは、RF 発振後の電子ビームの最低エネルギーに対応する電圧を電子ビーム処理部(コレクタ)に印加することにより、電子ビームの残存運動エネルギーを静電エネルギーとして回収し、再度電子ビーム発生用のパワーに回生しています。通常のジャイロトロンは RF 発振効率は30%程度ですが、このエネルギー回収を利用することにより、効率50%での高出力運転が可能になっています。エネルギー回収型ジャイロトロンは効率の大幅な向上に加えて、必要な電源、冷却系などの容量がほぼ半減し、大幅なシステムの簡素化、コストダウンが可能になるため、核融合炉の加熱電流駆動装置としての ECH 装置には不可欠の技術となっています。

もう一つの重要な開発要素は、ジャイロトロン内を超高真空に保ちつつ RF を外部に取り出すための真空窓の開発でした。従来真空窓にはサファイア、窒化ケイ素等を用いていましたが、誘電損失による発熱のため0.5 MW で1s以下の出力が限界でした。ところが、プラズマプロセッシング技術の進展により、1996年頃からプラズマ化学気相蒸着法(CVD)により質の良い大口径の人工ダイヤモンドの製造が可能となりました。ダイヤモンドは常温での熱伝導率が現在知られている物質中でもっとも高く(銅の約5倍)、100 GHz 帯の RF による発熱が従来のセラミックの1/10以下とミリ波帯の窓材料として極めて優れた性能をもつことから、この特性を生かして水冷ダイヤモンド窓を開発しました。これをジャイロトロンに組み込む技術を開発し、原研において世界で初めて人工ダイヤモンド窓搭載ジャイロトロンを開発に成功して、これまでに0.9 MW でパルス幅9.2sの高出力発振に成功しています。今後さらにモード変換器の高効率化、実験用テストスタンドの改良を行い、1 MW で連続出力の達成を目指しています。

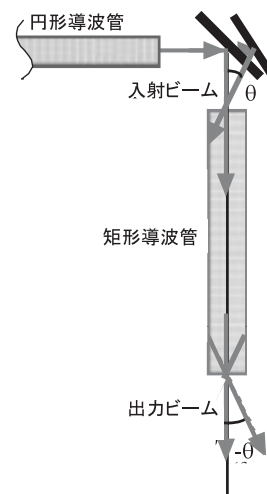
3. 電子サイクロトロン加熱用結合系の開発

ITER では合計24本の170 GHz の1 MW ジャイロトロンから、それぞれ導波管により RF が伝送され、結合系(アンテナ系)に導入されます。ITER で用いられる ECR 加熱は周波数が170 GHz と高いため、光のようにビームとして扱うことが可能で、ミラーで反射させることが可能です。そこで ITER では、第4図で示すように、先端部に可動ミラーを置き、RF ビームの入射方向を制御して、プラズマ中への入射位置を選択する設計としています。プラズマからの中性子を遮蔽するため、導波管はポートプラグ内でクランク状に曲げられています。

一方、遠隔制御型アンテナと呼ばれる新方式の結合系も提案されています。これは第9図のように、ある特定の長さの矩形の導波管の入り口に RF ビームを入射すると、この入射角度と同じ角度で導波管先端部から RF ビームが放射されるものです。この方式にすればミラーをプラズマ近傍に設置する必要がなく、信頼性の向上が期待できます。この方式は、中性子環境が厳しくなる発電実証プラントでは必須のアンテナと考えられ、原研ではモックアップを製作して計算通りの制御性能を確認しています。

まとめ

以上、簡単に核融合炉の加熱装置について説明してきました。加熱装置の第1の役割は、十分な核融合反応が起こりうる温度までプラズマの加熱を行うことです。いわば加熱装置が核融合反応の最初の着火源の役割を果たすこととなります。加熱装置のもう一つの機能は、電流駆動を行ってトカマク型核融



第9図 遠隔制御型アンテナの概念図

合炉の定常運転を実現することです。さらに加熱装置によってプラズマ電流，あるいは電流分布を調節して高性能プラズマを生成し，核燃焼制御の機能をも担うことができます。

このように，加熱装置は核燃焼を始動し，炉心の高性能化・定常運転を実現し，さらには核燃焼を制御する機能を有する装置であり，核融合炉のなかで重要な役割を担うものといえます。その一つである NBI は従来の加速器物理・工学を基本として桁外れの大電流イオンビームを加速する加速器です。また ECR は，大型の電子管をパワー源としてプラズマ中の電子を共鳴的に加速するものです。加熱装置には従来の加速器工学や電子工学分野の技術が多数

応用され，核融合炉用に高出力・高効率のイオン源，加速器，ジャイロトロンといった機器が開発されており，今後，他分野への応用も期待されています。

著者紹介

坂本慶司(さかもと・けいし)



1981年九州大学大学院工学系修士課程修了。理学博士。日本原子力研究所核融合工学部加熱工学研究室室長。日本原子力研究所に入所以来、プラズマの高周波による加熱電流駆動技術、特にジャイロトロンを中心とする大電力ミリ波工学の開発研究に従事。

井上多加志(いのうえ・たかし) 本誌，46(12)，p.852参照

☆日本原子力学会 標準委員会発行☆

『使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2004』

(AESJ-SC-F002:2004, 2004年1月21日制定)

2005年1月31日発行 会員価格8,400円(定価:10,500円) [税込/送料別]

原子力発電所の使用済燃料に対する我が国の基本方針は，リサイクルによるプルトニウム及び回収ウランの再利用にあります。燃料サイクルにおける中間貯蔵は，再処理施設の操業に柔軟に対応するための手段と考えられています。このような状況を踏まえて日本原子力学会では，中間貯蔵用金属キャスクに関する標準を制定しました。

この標準の対象とする金属キャスクは，使用済燃料の中間貯蔵施設での静置・保管だけでなく，原子力発電所からの輸送，及び中間貯蔵施設からの輸送に一貫して使用するものです。

したがって，保管及び輸送上の基本的安全機能及び構造上の設計要求，並びに各過程での検査項目及び検査方法を規定し，さらに事業者の責任，発電所内における先行貯蔵，部材の長期健全性の確認についても規定しています。

ご購入ご希望の方は，標準委員会ホームページ<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/sc/>

または FAX 03-3581-6128 にてお申込下さい。(標準委員会ホームページから申込書を印刷することができます。)

お問合せ先 (社)日本原子力学会事務局標準委員会担当 TEL 03-3508-1263