



## 粒子ビームによる爆縮核融合

中 井 貞 雄\*

新しい技術の開発が、新しい物理の領域を開き、それがさらに新しい生産技術へと展開してゆく。このような過程は、今世紀最大の発明であるといわれるレーザーの工学的応用面において顕著にみられる。高出力レーザーの最近における進歩はめざましく、これを集光することによりこれまで実現しえなかったような高エネルギー密度空間が得られるようになった。数十テラワットの出力パワーを100ミクロン程度の空間に集中し $10^{16}\sim 10^{17}$  (W/cm<sup>2</sup>)というパワー密度が得られている。このような収束レーザービームを球状の核融合燃料に周囲より投射すると、燃料球表面に超高温プラズマが発生する。これが膨張するとき、その反作用により燃料球内部を内向きに圧縮し、中心で核融合反応が点火される。これがレーザーによる爆縮核融合といわれるものであり、核融合によるエネルギー生産の科学的実証を目指し、トカマク方式と並んで各国で大規模に研究が進められている。

### 〔大出力荷電粒子ビームの発生〕

荷電粒子にエネルギーを与え、これを集中投射してレーザーと同様の原理による爆縮核融合を行わせることが可能である。特に、最近の目ざましいビーム発生技術の進歩が、その可能性を大きくした。荷電粒子としては電子およびイオンが利用される。

歴史的にみれば電子ビームは古くから物理的、工学的に利用されてきた粒子ビームではあるが、1960年代初頭までは高々数アンペア程度のビームが発生されるにすぎなかった。これを数百KA、MVの領域まで一気に引き上げたのは英国アルダーマストン、Atomic Weapon Research EstablishmentのJ.C. Martinらの

グループによる先駆的研究によるものである。その後1965年頃より米国海軍研究所、サンディエゴ研究所等で機密研究として始められ、1968年頃よりソ連クルチャトフ研究所でも着手された。その後の装置の大型化、高性能化は目ざましく、数MA、数十MV、数十テラワットの電子ビームの発生が可能となった。

このような電子ビームを用いてレーザーのように燃料球の爆縮を行なわせるためには、ビームを相当距離伝搬させたのち、数mmの燃料球に集中しなければならない。レーザーのような光ビームの場合はレンズあるいはミラーで集光すればすむ話であるが、電子ビームのような電荷をもち、かつそれが高密度に集中したビームを安定に微小ターゲットに投射するのは、かなりむづかしそうにみえる。これに関しては電子ビーム源と球ターゲットとの間をプラズマチャンネルで橋わたしをし、これに沿ってビームを送り込もうとする試みや、磁場によってビームを導こうとする試みがテストされ、条件にもよるが2m程度の距りを70~80%の効率で伝送しうる結果が得られている。伝送した後もビームが充分しぼれているかどうか等については明らかにされていない。このようなビームの伝送、集中が電子ビームを用いる場合の最大のネックになりそうに思われる。

この点に関しては、イオンビームを用いると状況は楽になるようである。他方電子に比べ3桁以上も重いイオンを、電子と同じような大電流で発生するには別のむづかしさがあった。しかしここ数年間の電子ビーム発生技術の進歩につれ、イオンビーム発生技術も急速な進展をみた。装置技術は電子ビーム発生と同じである。極性を反転し正電圧を付加する。このさい電子のようなカソードからの電界放出は期待できない。このためアノード表面にはイオンソー

\*中井貞雄 (Sadao NAKAI), 大阪大学, レーザー核融合研究センター, 教授, 工博, 核融合工学

スとなる充分高密度なプラズマを別に発生する必要がある。アノード表面のプラズマ発生に種々の工夫がなされている。このプラズマから引き出されたイオンが加速されビームとして取り出される。このさいアノード表面を凹球面の一部のようにしておくといオンビームは弾道的に球中心に集中する。このように粒子軌道が電極形状等から求めうる点がイオンビームの電子ビームに比べた場合の大きな利点である。

〔ビーム投射によりペレット爆縮は可能か〕

固体ターゲットに電子ビームを投射した場合、ビーム電子は固体中の粒子と弾性及び非弾性衝突を行ないながらエネルギーを失ない、一定の距り進んで停止する。この距りをレンジという。ビームの電流密度があまり高くない場合、ビーム電子はそれぞれ独立に衝突過程によりエネルギーを失い、ターゲットを加熱する。このときのレンジ  $l$  は、固体ターゲットの密度、 $Z$  数、電子ビームエネルギーの関数として実験的に与えられており、モンテカルロ法による計算結果もほぼ一致した値を与えている。集束ビームを投射する微小燃料ペレットの直径がこのレンジよりも小さいと球は一様に加熱され、その結果は加熱された球が膨脹するだけである。前述のように球内部を有効に圧縮するためには、燃料球の表面のみを高温に加熱する必要がある。このためにはビーム電子のレンジが燃料球のサイズより充分小さく、球表面のごく薄い層でビームがそのエネルギーを放出しなければならない。この目的のため表面を、レンジの短かい高  $Z$  物質でコーティングしたような燃料球がデザインされているが余分な層を加熱するため、投入エネルギーより大きな核融合エネルギーを得る（ブレイクイーブン）のための所要ビームエネルギーが大（ $\sim 5$  MJ）となる。

レーザー核融合研究センターにおいて、ここ数年来行ってきた実験結果は、このようなビームとペレットとの古典的相互作用モデルを真向うから否定し、より効率のよい爆縮の可能性を示すものとして注目を集めている。電子ビームを固体ターゲットに照射した場合、表面に発生したプラズマの膨脹により密度の低い  $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$  コロナプラズマ領域を形成する。こ

のようなプラズマ中を伝搬する高密度のビーム ( $10^{14} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) は、プラズマ電子との相互作用の結果 2 流体不安定を引き起す。励起された大振幅なプラズマ波とのカップルにより電子ビームのエネルギーが散逸される。したがって波の衝突減衰の起きにくい、低  $Z$  物質の方が効率よく電子ビームを停止させ得ることを見出した。この機構によれば核融合によるエネルギーゲインを得るための所要ビームエネルギーは大巾に低下するものと期待されている。

イオンビームはこのような不安定性によるエネルギー散逸によらなくても、固体中での衝突によるレンジは充分短かく、効率のよい爆縮が期待されている。

〔世界の研究推進状況〕

上述のように、荷電粒子ビームによる爆縮核融合へ向けての、物理的、技術的な基盤は確立されつつある。このような状況をふまえ諸外国では今後どのように研究を推進しようとしているだろうか。この点に関し、今年7月3日～6日の間ソ連ノボシビルスクで開催された第3回高出力電子及びイオンビーム研究に関する国際会議が最新の動向を示している。米国サンディア研究所の EBFA、ソ連クルチャフ研究所のアンガラ V、我が国の励電Ⅳの諸元と、その完成年度を表1に示す。励電Ⅳは、EBFA、アンガラ V の1モジュールとほぼ同等の大きさであり、この技術の完成は、これを数十台並列運転することによりブレイクイーブンに必要なエネルギーを達成しようとする米ソの計画と充分対応しうるものである。ただ米ソにおいて EBFA、アンガラ計画を進める上で、広いすそ野がそれぞれの国内に展開していることが上記国際会議においても痛感させられた。我が国がよくこれと対応してゆくには、我が国の進んだ産業技術を積極的に応用してゆくのが賢明であろうかと考えられる。

表1	電圧	電流	エネルギー	パルス巾
EBFA 1980	2 MV	15 MA	1 MJ	45 ns
1984	2 MV	60 MA <sup>(36モジュール)</sup>	4 MJ	45 ns
Angara 1979	2 MV	0.8 MA	102 k J	90 ns
1983	2 MV	38 MA <sup>(1モジュール)</sup>	5 MJ	
励電Ⅳ 1979	1.4 MV	1.4 MA <sup>(48モジュール)</sup>	90 k J	50 ns