相対論的電子ビームによる核融合

(名古屋大学プラズマ研究所) 毛利 明 博

相対論的電子ビームによる核融合の研究の発展について概観する。電子ビームリングコイル, 爆縮核融合, 大電流高エネルギー・イオンビーム発生, プラズマ加熱等研究は多岐にわたり, 最近の研究の進展は急速である。

I. はじめに

相対論的電子ビーム(relativistic electron beam, 略して REB)の核融合への応用は, N.C. Christofilos が 1958 年に公表した ASTRON なる プラズマ閉じ込め装置の概念に端を発していると考えられる。この装置は, ミラー磁場中に軸対称な大電流の電子ビームのリングを形成して, リング電流の作る磁場とミラー磁場の複合磁場でプラズマを閉じ込めようとしたものである。当時で, 1 MeV の粒子エネルギーをもつ 100 A の電子ビームを発生することは大変な技術開発を必要とした。 10^8 W 台の線型加速器は, パワーレベルからも空間電荷からも実現が困難なことから, ASTRON の研究者らは電磁誘導場によるパルスの線型加速器を開発した(1964年)。以来15年しか経っていない現在ではあるが, すでに 10^{12} W 台の電子ビームは簡単に発生することができるようになっていた。1980 年までには 10^{13} W 台のものが運転される予定である。このような電子ビーム発生装置の大幅な進展は, 電子ビームの核融合への応用に関連しても質的変革をもたらしてきた。また, 電子ビーム源の高電圧パルス技術は MeV 台の大電流イオンビームの発生にも応用することができるので, 中性子の発生の伴わない核融合の可能性を技術的側面も含めて検討できる時期になってきた。

REB とそれに関連した技術の核融合への応用は多様であるが, 大別すると,

- (1) プラズマと REB との相互作用を利用した磁場に閉じ込められたプラズマの加熱
- (2) REB の固体ベレットへの照射による爆縮核融合
- (3) REB 電流リングの作る磁場によるプラズマ閉じ込め

- (4) 大電流イオンビームの発生とその照射による固体ベレット爆縮核融合
- (5) 高エネルギー・イオンビームによる中性子を発生しない核融合
- (6) 炉材料試験のための中性子源

がある。まず, その基本となる REB 発生装置の簡単な説明をする。

II. REB 発生装置

$10^{10} \sim 10^{13}$ W で全エネルギー $10^5 \sim 10^7$ J の REB のパルスの発生は, まず時間をかけてエネルギーを貯え, 次に短時間にこのエネルギーを電子のエネルギーに変換して行う。したがって, エネルギーの時間的空間的凝縮を有効に図る方法がとられなければならない。現在広く用いられている方式を第 1 図に示す。

第 1 図 REB 発生方法

比較的ゆっくりとマルクス発生機のコンデンサに静電エネルギーを貯える。次に, これを駆動させて発生する高電圧を短時間($\sim 1 \mu \text{sec}$ 以内)に同軸型もしくはブルムライン(Blumlein)型のパルス成形用分布定数回路に充電する。このパルス成形回路の誘電体には

Controlled Nuclear Fusion by Relativistic Electron Beam, Akihiro MOHRI.

(1977年 1月12日 受理)

液体(純水, 油)を用いる。純水はその比誘電率が80あり, 単位体積当りの貯え得る静電エネルギーを大きくすることができる。水の誘電体としての使用については, 英国 Aldermaston の AWRE の J.C. Martin の詳細な検討(1960年代の中頃)に負うところが絶大である。パルスラインに貯えたエネルギーは低インダクタンスの放電型スイッチによってビーム発生のための2極管に伝播される。2極管の陰極の金属の表面部は印加される高電場によって極短時間に金属プラズマとなり, このプラズマの電子は加速されて陽極である箔膜を貫通して出て電子ビームとなる。

各国の現在運転中もしくは建設中の代表的 REB 発生装置を第1表に掲げる。表からも, 現在すでに, 全エネルギーにして100 kJ~MJ, 粒子エネルギーにして100 keV~15 MeV の REB がパルス幅10~100 nsec で得られるようになっていことがわかる。これらを1モジュールとして多数台の発生器の併列運転を行えば, 10^7 J の REB の発生は現在の技術の延長線上にあるといえよう。

第1表 各国の REB 発生装置

国名	装置名 (所在地)	出力 (GW)	電圧 (MV)	電流 (kA)	全エネルギー (kJ)	パルス幅 (nsec)
米 国	Aurora(HDL)	10,000	10	1,000	1,200	100
	Hydra (Sandia Lab.)	800	0.75	200	15	100
	PROTO-I (")	2,000	3	670	58	24
	PROTO-II (")	8,000	1.5	6,000	216	24
	Gamble-II(NRL)		1	1,200	60	50
	OWL-II(P.I.)	~1,000	1.4	710	100	100
ソ 連	Angara (Kurchatov)	1,000	2.5	400	>50	60
	Triton(")	100	0.5	200	1.5	30
	(Novosivirsk)	250	1	250	10	50
日 本	Phoebus-II (名大プラ研)	200	0.8	260	8	60
	Pulsrad 445W (")	600	1.8	360	>50	80
	(")	540	0.7	850	36	80
	Reiden-III (阪大レーザー)	40	0.5	80	3	80

核融合を考える際には, 経済的見地より REB への変換効率が問題になる。現在ではマルクス発生機のエネルギーの70%は REB に変換され得るようになってきている。この効率は, 現存のレーザー核融合に適した波長のレーザーの変換効率に対比したとき, 1桁以上高いことに注目すべきである。この高効率であるこ

とが, レーザーによる爆縮核融合と同様な原理で行う REB による爆縮核融合が注目され始めた所以である。REB による爆縮核融合には, 10^{13} W で 10^{17} ~ 10^{18} A の REB が1~10 nsec で必要とされる。この目的に合うための REB 発生装置はなお今後の開発にまたねばならない。

Ⅲ. REB による爆縮核融合

1960年代前期では, 固体の微粒子を 10^8 cm/sec に加速して衝突させて核融合を起すことがまともに考えられた。しかし, 1mmの直径の固体を加速するには, 加速器の長さが100 km 必要となる勘定になる。次に考えたのが, さらに小さい微粒子を加速して標的に衝突させる場合だが, 微粒子を超電導にして進行電磁波で 10^8 cm/sec に加速するにしてもやはり加速器の長さとして10 km が要する勘定になる。1963年には, 固体に巨大パルスレーザーを照射して引き起す小爆発核融合(micro-explosion)が N.G. Basov, J.M. Dawson, A.G. Engelhart らにより提案された。この場合に必要とされるエネルギーは 10^7 J である。レーザーの発生効率が良くなって, しかも巨大なエネルギーを要するので, 直ちに現実に近い話とならないのは当然であった。しかし, 上の共通点つまり固体に微粒子もしくは光子を照射する点に着目して, 電子もしくはイオンのビームの固体照射による核融合を考えたのが F. Winterberg である(1969)。加速効率の良い電子にしても, 10^7 J を発生することは容易でない。このため彼は電子加速用高電圧エネルギーを貯えるために, 超電導リングを真空中に浮遊させ, かつリングに流す大電流によって高電圧の絶縁を保ちながらこれを帯電することまで考えた。電子ビーム発生には電界放出を考えた。

その後, Nuckolls ら(1972)は微小球形固体表面をレーザー照射によって加熱するとき, 外表面が外に放散する反作用として固体が超圧縮される現象を利用すると, 核融合爆発に必要とされるレーザーのエネルギーははるかに少なく済むことを予想した。その後さらに検討が進み, 球殻構造としてその内側に DT ガスを封入することが良いとされている。もし, 電子ビームをこのような小さいベレットに収束することが可能であれば, 発生効率の良い REB の爆縮核融合も同じ原理で考えることができる。

REB を極小領域に収束する手段としては, (1)2極管内の REB のピンチ現象を利用する方法, (2)外部磁場(カスプ磁場)で導く方法, が考えられている。(1)は米国 Sandia 研究所の方法, (2)はソ連 Kurchatov 研

究所の方法である。(1)の方法を説明するために第2図に2極管の内部を示す。陰陽両極間に高電圧が印加されると、陰極に金属プラズマが生成され、その電子は加速されて陽極に当り陽極の金属をプラズマ化する。引き続いて加速される電子は陰陽両極に生成されたプラズマ間の電場と電子の流れによる磁場に影響されて運動する。陽極側プラズマの内部では電場は弱くて磁場の影響が大きいので、プラズマ中に流入した電子は陰極側に逆行して、また電場を感じて陽極側プラズマに入る。これを繰り返して次第に軸に向かって収束していく。軸付近にはあらかじめ高密度プラズマを作っておいて電子の電荷によって収束が妨げられないようにしておけば、加速された電子は軸付近の陽極側に集まる。

第2図 (a)2極管中での電子軌道(100 kA, 200 kV の場合)と(b)軸付近の電子分布(G. Yonas らによる⁽¹⁾)

第2図(b)は、計算機シミュレーションによる電子の集まり具合を示したものである。収束した電子群の速度分布は相当広がっており、ここに置かれた半球状ペレットにはほぼ一様に電子が当たると考えられており、また実験でも確かめられている。陽極に対称に2つの陰極(double-diode)を置き作動させた場合は、中心に置

いた球ペレットをREBで照射できることになる。第3図は、実験中のPROTO-I (Sandia 研究所)の装置概要である。

第3図 2重2極管による爆縮実験装置 PROTO-I(G. Yonas による⁽²⁾)

方向が互いに反対の対向するリング電流の作るカスプ磁場の対称面より中心に向けてREBを入射して、中心までは磁場と封入したガスのREBによるプラズマ生成とを併用して導く方法が(2)の場合である。REB発生装置をモジュール化して多数の並列運転をすることで、REBの全エネルギーを上げることができる。1gの質量のDTペレットに $1\sim 2 \times 10^7$ JのREBを照射した場合には、核融合エネルギーは $10^9\sim 10^{10}$ Jに達する計算になる。1基500 kJのREB発生装置20台程度で 10^7 Jになる。この程度のREB発生は現在の技術水準で可能である。第4図にKurchatovグループのREBによる爆縮核融合炉の概念図を掲げる。 10^{10} Jのエネルギー発生は20~30mの直径の容器中で起させる。5~10mの距離にわたって発生器より中心へREBを伝播させる。爆発時には、カスプ磁場は電気エネルギーへのMHD発電による変換に供することができるとしている。

第4図 REB爆縮核融合炉の概念図 (L.I. Rudakov による⁽³⁾)

小さいエネルギーで超圧縮を起すためには、ペレットの構造に工夫がいる。ペレットの表面部のみ加熱することが超圧縮には必要である。特に電子ビームの場合は、古典的に考えたときの固体中の飛距離は短くはないので、構造が重要になる。しかし、ビームの異常吸収が起ることも期待される。現在、この構造に関しての研究が精力的になされている。L.I. Rudakov ら (Kurchatov 研究所) は円錐形ペレットモデルを用いて爆縮が起ることを実験的に見出している。爆縮によって内部の D_2 ガスは1,000倍に圧縮され、密度は 10^{22} cm^{-3} になり、温度1 keV を得た。このときの核融合生成中性子は $1 \sim 3 \times 10^6$ 個放出された。わが国においても、阪大のレーザー研究施設では (CD_2) 標的に REB を照射して発生する核融合生成中性子は $\sim 10^6$ 個に達している。また標的の厚みに関する知見も得ている。

イオンビームの固体中の飛距離は電子のそれに比較してはるかに短い。したがって、イオンビーム照射の場合は、エネルギー吸収のためのペレットの外壳を薄くすることができるとともに、効率のよい吸収が期待される。用いるイオンの粒子エネルギーも上げることができるから、必要なビーム電流密度も REB ほどには必要でない。しかし、イオンは質量が大きいことと、イオンビームには必ず電子が静電的に追従するので、REB のように自己ピンチは起らない。イオンビームの収束法としては、イオンビーム発生段階でビーム方向を1点に向ける幾何学的収束法 (Sandia 研究所) とトロイダル磁場レンズによる収束 (名大プラズマ研究所) が提案されているが、両者とも実験には至っていない。

Ⅳ. プラズマ閉じ込め REB リングコイル

大電流 REB の核融合への応用分野として期待されるものに REB の作る磁場によるプラズマの閉じ込めがある。これに関しては、前述の ASTRON に端を発して研究の歴史は長い。この間、トーラス型閉じ込めについては、トカマク (tokamak) 型式の研究に大幅な進展がみられた。また、レヴィトロン (Levitron) やスフェレーター (Spherator) の1個の内部導体系および多極内部導体系 (multipole) においては安定にプラズマが閉じ込められることが示された。この内部導体に流す電流を REB 電流に置き換えること (Astron-Spherator) によって、安定化磁場配位を核融合向きにすることが S. Yoshikawa と Christofilos (1971) により提案された。この場合、必要とされる外部磁場はトカマクと比較してはるかに低い値で済むとされている。心配される REB の電子のシンクロトロン放射による

エネルギー損失もトロイダル磁場の存在により電流がほぼ force-free 状態となることで軽減される。第5図にその概略図を示す。

第5図 Astron-Spherator (S. Yoshikawa, N.C. Christofilos による⁽⁴⁾)

この磁場の配位では、磁力線の振れの勾配が大きい。この磁場はまたトーラスプラズマに誘導電場で大電流を流して得られる、いわゆる安定化ピンチの磁場に酷似している。つまり、安定化ピンチの電流を REB で置き換えたものに相当した磁場配位になっているともいえる。一般に、トーラス磁場に閉じ込められたプラズマの粒子は、磁力線に沿っての磁場の強さの変動によって、トーラスに沿って周回せず行き戻りの軌道をもつものができる (捕捉粒子という)。この粒子は閉じ込め磁場系よりの拡散が早く、特にプラズマが高温になればその粒子損が問題になる。しかし、上記の磁場配位の場合は、特に重要である系の周辺部において、捕捉粒子の存在率が低くなる特長をもっている。

ASTRON の方式では、外部より加えたミラー磁場をその中に作った REB リングの電流が打ち消して、磁力線が閉じた領域を作る。この領域の中にプラズマを閉じ込める。したがって、磁場が軸上で反転しなければならない。この反転の度合を示す反転率をミラー磁場の中心軸上の値に対してのリング電流による打消しの割合と定義する。ASTRON で最終的に使われた入射 REB は 6 MeV, 800 A のものであった。入射して形成した REB リング電流による反転率はわずか 13% 止りで、目指す完全な反転 (反転率 = 100%) には至らなかった。しかし、リング電流は 50 msec 持続した (1972)。この不成功の主な原因は、入射 REB の電流が小さくて REB のミラー磁場中への捕捉効率が上がらなかったことにある。一般に、静磁場に単粒子を入射しても最終的にはまた系より逃げる。粒子を捕捉するには、なんらかの非可逆もしくは非断熱的過程が介在しなければならない。大電流の REB はそれ自身で磁場を作る。入射したとき、REB は自己磁場を作りながら入っていく。この自己磁場は REB の電子のエネ

ルギーより供給されるので、ここに一つの非断熱的な過程が介在して REB は捕捉される。また、安定な平衡軌道に落着く過程においても、自己磁場と周辺との相互作用が利く。

Cornell 大学の Fleischmann らは大電流 REB (400~600 keV, 10~30 kA) の入射によって、ミラー磁場の完全反転(反転率~120%)をなしとげた。しかし、形成された REB リングは、ミラー磁場とリング電流の作る磁場の方向が逆である理由で起る歳差運動不安定性を引き起した。この不安定性は ASTRON においても観測されていたものである。しかし、トロイダル磁場もしくは多極磁場で、この不安定性は安定化される。その後、2.5 MeV にエネルギーを高めて完全反転状態が 200 μ sec まで持続することができた(1976)。この最終的に出来た磁場は、初期の ASTRON 型ではなくて、むしろ Astron-Spherator 型になっていることに注目すべきである。一方、安定化ピンチ状態を REB で作る実験を進めてきたプラズマ研究所では、17 kA, 380 keV の REB 入射によって、20 kA の REB リングを形成した(1976)。この磁場配位は安定化ピンチもしくは Astron-Spherator 型で、相当磁場反転率は 500% に達している。持続時間は 60 μ sec である。また、プラズマを含むこの系の安定化には外部トロイダル磁場の時間的制御が必要であることもわかってきている。

これらの実験によって、REB 入射により目指す Astron-Spherator 型の磁場が得られることが示された。しかし、核融合炉に必要とされるリング電流 10 MA に到達するためには、電流値を現在の 2 桁高めなければならない。さらに、リング電流と閉じ込めているプラズマの諸要素の最適組合せを見出すこと、この系でのプラズマ閉じ込め効果(輸送状態)を調べることなどは今後の重要な課題である。閉じ込められたプラズマの加熱については REB とプラズマとの相互作用に期待することができる。加熱のもう一つの方法に REB リングを外部磁場により圧縮して行う 3 次元的な断熱圧縮による加熱がある。このとき、プラズマの温度は飛躍的に上がるとともに、REB の粒子エネルギー自身も上げることができる。現在、当プラズマ研究所では数 100 kA の REB リングを断熱圧縮する装置を建設中である。

電子のビームリングの代わりに、イオンビームのリングを作りシンクロトン放射損失を軽減する案は Christofilos により以前に提案されていた(1967)。そこで考えられた陽子のエネルギーは GeV と大きく、

しかも大電流が要求される。しかし、どうして発生するかは考えられていなかった。最近、H.H. Fleischmann と T. Kammash は、まず 30 MeV 程度の陽子のリングを形成し、次にこれを圧縮して 300 MeV 程度に上げるとともに、プラズマも断熱圧縮加熱する案を提案した(1974)。この目的のため、大電流高エネルギーのパルスビームの開発が実際に進められている。後述のように、MeV の陽子を 10^9 A 程度発生することは現在では困難なことではない。

V. 大電流パルスイオンビームの発生

現存の REB 発生に用いる高電圧パルス技術を応用して、0.2~1.7 MeV のエネルギー範囲で 100 kA 台の陽子ビームは発生することができるようになった。この発生方法には次の 3 通りがある。

- (1) 反射型 3 極管(reflex triode)方式
- (2) ピンチ電子ビーム 2 極管方式
- (3) 磁気絶縁 2 極管方式

反射 3 極管方式の原理を第 6 図に示す。陽極の材料としては電子ビームの照射貫通によって陽子プラズマが出来やすいものを選ぶ。電子ビームのピンチを防止するため、磁場を軸方向にかけておく。高電圧パルスは陰極に対して正になるように陽極にかける。陰極を出て加速され陽極の材料をプラズマ化した REB は真空中を進む。しかし、電子自身の空間電荷によって陽極の外側の逆向き電場は助長されるので、電子は陽極に向けて戻る。ここで、さらに陽極材料をプラズマ化して陰極へ向う。次に、両極間の電場で陽極へと反転する。この運動が繰り返されて、陽極付近には高密度の陽子を含むプラズマが生成される。このプラズマのイオンは形成した陽極外側の電場で加速されて大電流イオンビームになる。Naval Research 研究所では、この方式を用いて、0.6~1.2 MeV のエネルギーの陽子ビームを 120 nsec のパルス幅で 200 kA 取り出した(1976)。

第 6 図 反射型 3 極管

ピンチ電子ビーム 2 極管方式は、前述の爆縮核融合研究に用いた 2 極管(第 2 図)内の陽極側のプラズマのイオンの挙動を利用するものである。陽極側の表面にやはり $(\text{CH}_2)_n$ の高分子材料の膜をつけて、陽極側プラズマの中の陽子の量を多くする。陽極プラズマのイオンは加速されて陰極に向う。陰極をイオンが貫通しやすい構造にすると、大電流イオンビームが取り出せる。現在、この方式で 0.5~0.8 MeV でパルス幅 30~50nsec にわたり 150~200 kA の陽子ビームを取り出せている。

磁気絶縁 2 極管方式は陰極より陽極へ加速される電子を磁場により防ぎ、イオンのみを引き出す方法である。現在までのところ、同軸になっている 2 極管を使って 300~400 keV のエネルギーで約 100 kA のビームは取り出せている(Cornell 大学)。

これらの実験をみると、ごく近い将来、数 MeV で数 MA のイオンビームは簡単に生成できることになるだろう。このビームの応用面は非常に広い。

Ⅶ. 中性子を発生しない核融合

D-T および D-D 核融合は中性子の発生を伴う。核融合炉として考える際、高密度高速中性子束は炉材料の面で技術的な困難を引き起す。また、3 重水素の取扱いにも難しい問題点がある。次の核融合

は中性子の発生を伴わない。反応断面積は $p\text{-}{}^6\text{Li}$ の場合、 p が 2 MeV で 200 mb 程度で、D-T に比較すると小さい。しかし、上記の難点は自動的に解消する。いままでの最大の問題点は高エネルギー陽子ビームの大量発生にあったけれども、少なくともパルスの際にはこの程度のエネルギーのビームは簡単に発生できるようになった。この技術的進展をみれば、中性子を発生しない核融合に関しても積極的に取り組むべき時期にきている。反応を十分に起させるには、イオンビームリングの方式も利用できるであろう。また、異なった方式が創案されることを期待する。

Ⅶ. む す び

大電流相対論的電子ビームに関する研究は、技術面においても核融合への応用面においても、急速な発展を遂げてきている。将来にわたっても、さらに格段の進展をみるであろう。わが国においても、この方面における一層の研究強化が望まれる。

— 参 考 文 献 —

- (1) YONAS, G., *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **30**, 164 (1973).
- (2) YONAS, G.: Rep. of Sandia Lab., SAND-74-5367, (1974).
- (3) RUDAKOV, L.I.: Exp. aspect of laser and electron-beam produced thermonuclear plasma, IAEA-182, p. 37 (1976), IAEA.
- (4) YOSHIKAWA, S., CHRISTOFILOS, N.C.: *Proc. 4th Conf. on Plasma Phys. Controlled Fusion Res.*, Vol. II, p. 357 (1971), IAEA.

核融合研究の進歩と 動力炉開発への展望

(「核融合炉調査」研究専門委編)
好評発売中!!

B 5 判, タイポオフセット印刷, 575p.(1976.8.)
定価 8,000円(会員特価 6,000円), 〒300円
内容詳細は本誌Vol.18, No.7 (p.469) 参照。

ホットラボの設計と管理

(「ホットラボ」研究専門委編)
好評発売中!!

B 5 判, タイポオフセット印刷, 122p.(1976.9.)
定価 2,500円(会員特価 1,500円) 〒210円
内容詳細は本誌Vol.18, No.7 (p.470) 参照。