レーザー解説 1

相対論的大電流電子ビーム (REB) とその応用

河 島 信 樹*

Relativistic Electron Beam (REB) and its Application

Nobuki KAWASHIMA*

1. 緒 言

相対論的大電流電子ビーム(以下REBと略す: Relativistic Electron Beam)は大きなエネルギーを短い時間の間集中させ得る新しいビーム源として非常に注目を集めている。既に1934年にはBennett (1934) によってビームによる自己収束を中心とした検討が行われ、又宇宙線の伝播との関係でAlfvén (1939) は伝播の限界であるAlfvén電流を導出しており理論的にはかなり古くから研究されてきていた。しかしながら何と云っても実際にその様な電子ビームが1960年代になって実現して以来、この分野は飛躍的な発展を遂げた。はじめてREBの技術開発に成功したのは、英国のAWRE (The Atomic Weapon Research Establishment) に於てでその後米国及びソ連を中心に大規模な開発が行われ、今日では、1パルス当りMJ(メガジュール)のエネルギーをもったビーム生成も夢ではなくなって来ている。

REBがこの様に発展した背景には、軍事的な興味を無視することは出来ないが、平和的な核エネルギーの利用である核融合研究が大きな支えとなり又推進の柱となっている。瞬間的に大きなエネルギーを集中出来る事を利用した慣性核融合や、核融合プラズマの加熱、ビームの

強磁場によるプラズマの閉じ込め等への応用が期待され研究が活潑に行われている。又、最近では電子ビームのかわりにイオンビームを生成する試みが行われ、電子ビームと肩を並べるのもそれ程遠い将来の事ではなかろう。その他レーザーやX-線の強力な発生源にも応用され、その利用は今後更に広い領域にわたっていくであろう。ここでは、REBの発生及び応用についての現状をレビューして将来の展望をしてみよう。

2. 相対論的大電流電子ビーム (REB) の生成

REBの生成はいくつかのタイプがあるが現在最も標準的に用いられるものはFig.1に示したものである。直流高圧電源(～50kV)でマルクス高圧発生器の20～30個のコンデンサーを並列に充電する。これらのコンデンサーはギャップスイッチで直列にうなぎかえられ所要の高圧を発生する。この様にして発生した高圧で、Blumlein又は単純な同軸型の伝送ラインを充電して、負荷の電子銃(Diode)を通して放電する事によって電子ビームがパルスの様に生成される。Blumleinは単純な同軸に比しインピーダンスは高いが、充電電圧と同じ出力電圧が得られるので、電圧が高いパルスを必要とする時

* 東京大学宇宙航空研究所(〒153 東京都目黒区駒場4丁目6-1)

* Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo

Fig. 1 相対論的大電流電子ビーム (REB) 発生概念図

は Blumlein が用いられ、電圧よりも大きな電流の取れるパルスが必要とする時には単純な同軸伝送線が使用される。この様な高圧回路に使用される絶縁物としては、SF₆等の絶縁ガス、油、水やマイラ等の固体絶縁材料が使用される。気体は主としてギャップスイッチの様な絶縁耐力を可変にする必要のある所に良く用いられ圧力を変えて調整する。水や油は一度電気破壊が起っても絶縁復帰するので良く用いられ油は誘電率が2~3であるが絶縁耐力が大きい。又水は誘電率が80と非常に大きいのでパルスの伝播速度が遅いので低インピーダンスの装置の小型化に使用される事が多い。

電子ビームを発生する電子銃は冷陰極電界放出型の単純な二極管である。二極管の特性については、定性的には大体空間電荷制限で決まる Child-Langmuir の式に従う様であるが、ビーム電流が大きい為にそこに生成されるプラズマの影響や、自己磁場によるピンラ現象が絡んできて必ずしも単純ではない。特にカソード表面に出来るプラズマ層の役割は重要で単純な金属からの電界放出と云うよりもプラズマ陰極と云った方が適切であろう。陰極材料としてはステンレス、炭素、ガラス等が用いられ、形状も多様なものが使用されており、現在の所これが最

も良いと云う標準型はない。陽極はチタン等の金属箔が良く使用されるが、大出力の場合には箔が一度で破壊されるので、磁場を利用した Magnetic Insulated Diode も使用されている (Fig. 2)。

Fig. 2 Magnetic Insulated Diode

3. REBの伝播

電子ビームの研究は古くから行われておりビームの性質については良く知られている様に思われているが、REBの様に大電流で短いパルス状になるとその強い自己磁場や、誘導の為に通常のビームにはない現象が現われて来る。

第一の特徴は、静電的に中和された状態で空間を伝播するビームには自分の作る磁場で曲げられる為に伝播出来る電流の限界値が存在する事である。この電流は、Alfvén電流と呼ばれ次式で与えられる

$$I_A = 17,000 \beta \gamma \quad (\text{A}) \quad (3-1)$$

$$\beta = v/c$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

$$v: \text{ビーム速度}$$

$$c: \text{光速}$$

この電流はビームの半径と自己磁場による電子の Larmor 半径が等しいと云う事から導き出されるもので Alfvén が宇宙線の宇宙空間での伝播との関連で導き出したものである。REB の伝播の基本となるものであるが、実際には、次に述べるプラズマの影響や境界条件の効果が必ず付随するのでこの限界電流は必ずしもすっきりとした型で実験的に検証されたとは云い難い。

第二の特徴は、プラズマ中の伝播する REB における逆電流の存在である。ビームの伝播する領域ではビームによる磁場の時間変化による電場がビームと反対方向にプラズマ中の電子を加速する様にかかり、ビームと反対方向に電流を誘導するがこれが逆電流 (Reverse Current) である。丁度、REB がトランスの一次電流に相当し、プラズマ中に誘起される逆電流が二次電流に相当する。

この逆電流が誘起される為に実際には Alfvén 電流以上の電流の伝播が可能になる。つまり、REB は磁氣的に中和された状態になるのである。(Fig. 3)

以上の議論では REB は電氣的に中和されていると仮定したが、電氣的に完全に中和していないビーム、中空ビーム、Force-free 構造のビームでも Alfvén 電流を越えた伝播が可能である。又、外部磁場をかけたり、金属導体中でも適当な条件を満たすと Alfvén 電流以上のビームが伝播する。

一般にビーム電流は

$$I = Nev = \frac{\nu}{\gamma} I_A$$

N : 単位長さ当りの電子の数

e : 電子の電荷

v : 電子の速度

$$\beta = v/c$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

$$\nu \equiv N r_e$$

$$r_e = \frac{e^2}{mc^2} \quad \text{: 電子の古典半径}$$

で表わされるが、 (ν/γ) という量はビームの持つ磁気エネルギーと運動エネルギーの比に当り、この大きさの 1 より小さいが、ビームが Alfvén

Fig. 3 Alfvén 限界電流とプラズマ中に誘起される逆電流による限界電流の緩和

電流より大小を示すパラメータになりビームの性質を表わすパラメータとして良く用いられる。

4. REBの核融合研究への応用

4-1. REBを利用した慣性核融合

慣性核融合は、磁場でプラズマを閉じ込める核融合と対比して高温、高密度のプラズマを非常に短時間に生成してそれが自然に膨張していく過程で核融合反応を起そうとするもので核融合研究の中で慣性核融合の占める役割は年々大きくなってきている。その中で REB の占める比重は大きく大出力レーザーによる核融合と肩を並べる迄になってきた。将来は、これから研究が開始される重イオン加速器による核融合と

共に、慣性核融合の中の大きな柱となるであろう。

REBを用いた慣性核融合が、Winterberg (米) と Zavoisky (ソ連) によってそれぞれ独立に提案されて以来既に10年近くになるが、その間に急速に装置の大型化が行われて来ている。原理はREBのビームを液体あるいは固体の重水素又は三重水素のターゲットに集中して局所的に短時間に大きなエネルギーを投入して核融合を起させるものである。技術的な問題としては

1. 如何にして大出力電子ビームを生成するか。
2. 如何にして電子ビームのエネルギーを一ヶ所に集中するか。
3. どのようなターゲット (Pellet) を作るかに集約出来よう。

第一の大出力電子ビームは、各国できそって大型化が行われており、最初理論的に必要と予想された10~100kJのビームは既に実現されている。現在代表的な大型装置としては次の二つである。

1. Sandia Lab. (米国)

Proto II. 1.5MeV. 6MA 24ns
(216kJ, 9×10^{12} W)

これは、二年後に完成する核融合炉の原型をめざしたEBFAのプロトモデルである。

2. Knvchatov Institute (ソ連)

Angora 5

1 Module 50kJ 60nsec

全体が48Modulesで構成され、最終的には2.4MJ. 50MAのビームになる。

我国でも大阪大学及び名大プラズマ研究所でこれらEBFAやAngora 5の1モジュールに相当する100kJクラスの装置が稼動しはじめている。

第二のビームの集束の問題は技術的には、装置の大型化とターゲットの一樣照射の必要性からビーム源を分割するがビーム源とターゲットの間の距離が増加する為、第一にはビームを如何にしてターゲット迄有効に導くかと云う事と

分割されたビームを如何にして一点に集中させるかと云う事であり、この点がレーザーに比して格段に難しくなっており、磁場の配位としてカスプ磁場を用いたりいくつかの試みが行われているが、未だ確立されたものとは云えない。

第三のターゲットの生成の問題は大出力レーザーによる核融合と共通の問題でREBの場合はその技術がそのまま活用出来ると考えられるが、現在は未だそれ程切実な問題とはなっていない。

現在は固体ターゲット或いはFig.4に示した様な平面にD-Tガス (重水素及び三重水素)

Fig. 4 REBによる慣性核融合のターゲットの一例

1: Au又はPt coating (5 μ m)
2: (CH₂)_n coating (10 μ m)
3: 鉄 4: 鉛

の埋め込まれたターゲットを用いての実験が各所で行われ1 shot当り $10^7 \sim 10^9$ 個の核融合反応による中性子の検出が行われている。これはいずれも10kJoule以上のエネルギー入力に対して核融合の出力は $10^{-5} \sim 10^{-3}$ Jouleであるので現在は未だはるかに及ばないが、将来大型化した時のスケールリング則が重要である。Fig. 5に大阪大学のグループの結果であるが、今後このスケールリング則の確立が重要な課題である。

4-2. REBによるプラズマ加熱

REBにおいてはビームへのエネルギー変換効率が良いのでこれを用いて磁場で閉じ込められたプラズマの加熱を行おうとする試みは古く

Fig. 5 慣性核融合における中性子の発生とレーザー出力との関係 (阪大グループ)

から行われてきた。実際にREBをプラズマと相互作用させてみるとエネルギーが高いので単一粒子としての平均自由行程ははるかに長いから殆んど素通りしてしまうと云う予想に反して、非常に強く相互作用を起してREBのもつエネルギーが、プラズマのエネルギーに変換される。これはビームの電流が大きい為に集団の効果が強く現われる為である。

REBとプラズマの相互作用は物理的にも興味ある問題であり、分類してみると代表的なメカニズムとしては次の三つが考えられている。

i) ビームとプラズマ中の電子が直接に集団的に強く相互作用して二流体不安定性を起しビームのエネルギーがプラズマのエネルギーに変換される。

ii) REBによって誘起される逆電流(Reverse Current)がプラズマと相互作用する。

ii-1 イオン音波不安定性

逆電流を作る電子のドリフト速度 v が、プラズマのイオンの音波の速度 c_s ($c_s = \sqrt{\frac{RT_e}{m_i}}$) を越えるとプラズマ中に強いイオン音波が励起されこれを通

してREBが誘起した逆電流のエネルギーがプラズマのエネルギーに変換される。

ii-2 Buneman不安定性

逆電流の作る電子のドリフト速度 v が更に大きくなってプラズマの電子の熱速度 v_{th} ($v_{th} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}$) を越えると激しいBuneman不安定性が起り、REBのエネルギーはプラズマへ急速に変換される。

実験的には必ずしも上記物理的メカニズムが検証された訳ではないが、かなりの効率で比較的容易にプラズマが加熱される事は事実である。唯これが核融合炉心プラズマ加熱に何処迄応用出来るか、例えば現在Tokamakで有効に動作している高エネルギー中性粒子ビーム入射によるプラズマ加熱に優る加熱方法として有効であるかは必ずしも見通しは明るくない。しかし例えば電子のみを加熱する必要がある場合等においては有用な手段となり得よう。

4-3. REBによるプラズマ閉じ込め

エネルギーの高い電子ビームを環状 (又は円筒状) にしてビームの作る磁場を利用して高温プラズマを閉じ込め、又その電子ビームのエネルギーを利用してプラズマを加熱する試みは、核融合研究の初期からAstronと云う大型装置で行われて来た。Astron計画自身は発案者のChristofilosの死去と共に中止されたが、この考え方は、Astronが使った電子ビーム源としての加速器がREBに変わってうけつがれている。

二つの方向が試みられており一つはAstronの様にミラー型磁場の中央で磁場を横切る方向に環状のREB ringを作りビームの磁場が元の磁場を打消して磁力線が閉じた配位を作ってプラズマを閉じ込めると共に加熱するものである。米国Cornell大学で意欲的に行われており現在、ビームの磁場 B_b が元の磁場 B_m を打ち消して $B_b/B_m = 120\%$ 迄得られている。唯この種の実験では、ビームはかなり高い密度のガス中

(~ 0.1 Torr) に打ち込まれており、又ビームのLife timeも、最近かなり長くはなっているが $\sim 400 \mu\text{sec}$ と未だ短い点が今後改良すべき大きな課題である。

もう一つの磁場配位はトラス型のものでTokamakにおける中心の電流をREBでおきかえようとするものである。既にいくつかの装置で行われてきたが今迄あまりうまくいってなかった。最近、名大プラズマ研究所ではビームのInjectorの改良で、かなり効率の良いビーム生成に成功しており今後の成果が期待される。

4-4. 強力イオンビームの生成

電子ビームを加速するかわりにイオンビームを加速する実験は最近非常に活潑に行われている。核融合の場合にイオンへ直接エネルギーが行く事が魅力的である。

イオンの加速の方法は次の三つの方法が試みられている。

i) Reflex triode

Fig. 6 に示した配位で、Anodeにナイロン・メッシュ等を用いて電子ビームのBombardによって生成されたAnode周辺のプラズマからイオンを外に引き出すものである。この際AnodeのCathodeと反対側にはVirtual cathodeが生成されてイオンを引き出す事になる。このタイプは大出力のイオンビームがとれる事が特徴であるが、大出力の場合は、ナイロンメッシュ等は一回のビーム放出で、飛散するので毎回清掃して取りかえる必要がある。現在、各所で大型化が進められているが、既に全電流で 400 kA 電流密度で $1 \sim 10 \text{ kA/cm}^2$ のものが得られている。

ii) Magnetically Insulated Diode

Cathode-Anodeが磁場に垂直に配位されたイオン源で、Cathodeを出た電子ビームが磁場を横切って電子ビームがAnode-Cathode間を比較的長い時間滞在する間にプラズマを形成してここから磁力線を横切ってイオンを引き出すものである。この方法はReflex

Fig. 6 Reflex triode型イオン源

triodeに比して毎回Anode取りかえの手間は少いが得られる電流密度は低い。

iii) REBによる集団加速を利用したもの

大出力のREBを作るとそれに附随してイオンが加速される事が比較的初期から知られている。この種のイオン加速は、二つに分類する事が出来る。

一つは、REB加速のCathodeとAnodeの間の領域で大出力REBがpinchする時に加速されて出て来るものである。通常の二極管配位或はその中でAnodeをアースから浮かした状態で作動させると、Anode-Cathode間に高密度プラズマが生成されてイオンが飛び出して来る。もう一つは加速されたREBが、中性ガス中を伝播する時にそれに伴ってイオンが加速されるものである。いずれもi), ii)にあげた方式と異なり、加速されるイオンはREBの加速電圧をはるかに越えたものである点の特徴である。例えば、 1 MeV 程度のREBに対して少く共数MeV、高い場合には $10 \sim 20 \text{ MeV}$ のエネルギーのイオンが生成されている。又、後者の場合のガス圧は、 $50 \sim 500 \text{ mTorr}$ がよく用いられている。この加速のメカニズムについては、未だあまり良く分っていないが、REBが作るプラズマのイオンがREBの静電的なポテンシャルにトラップ

されて引き出されるものであろう。今後、更にイオン源として形状、外部パラメータによる制御等が確立され、イオンへの変換効率が上げれば、有用なものとなろう。

このようにして生成されたイオンビームは電子ビームの場合と同じ様に今後核融合の各分野に応用されるであろう。特に、生成されたイオンビームによるプラズマ加熱、重イオン加速による慣性核融合への応用等が注目される。又、電子ビームの場合と同様に、イオン・リングによるプラズマ閉じ込めも試みられており、開放型のミラー磁場の中でのReverse Field Mirror生成にも応用が考えられている。唯、イオンビームの場合、電子が一緒にまわると生成する磁場が打ち消されてしまう所が、イオン・リングによる閉じ込めの問題点である。

イオン加速に関連して言及しておくべき実験は、当初イオン加速は、REBを用いたElectron Ring Accelerator (ERA) として、加速器の分野で注目されたと云う事である。これはREBのRingを作り、これを磁場の勾配等で、リングの軸方向に加速するもので、この時この電子ビームのリングに適量のイオンをトラップさせておくとイオンがリングと一緒に加速される。電子とイオンの質量の相違から、同じ速度で動くイオンが非常に大きなエネルギー迄加速されるものである。この方式は新しい加速器、特に重イオン加速に適したものとして大いに注目され、かなり大規模な実験が行われているが、最初のもくろみ程の成果は今の所上っていない。

5. REBのレーザー、マイクロ波及びX線生成への応用

REBによる電磁波励起への応用はREB研究の初期から活発に行われている分野である。エネルギー変換率も高く、短時間に大出力を出す事の出来るREBは、大出力パルスレーザーやマイクロ波パルス出力のエネルギー源として大きな可能性を占めていると云える。

5-1. REBによるレーザー生成

レーザーにおけるREBの利用の一つは、レ

ーザーのポンピングを直接行うものであり又、もう一つの例は、高気圧での様なグロー放電を得る得の初期励起としての役割である。

レーザー励起にREBが用いられ実用に供されているものの代表的なものはCO₂レーザーである。CO₂レーザーは現在では広く多くの分野に利用されており、核融合の分野では、特にガラスレーザーと対比して一つの重要な大出力源としての重要性が認識されている。

ガラスレーザーやCO₂レーザーの他の波長での大出力レーザー開発の必要性はいろいろな分野で指摘されておりREBはその為の重要な手段と云えよう。HFレーザー、DFレーザー等はこれであり又、紫外線レーザー、真空紫外レーザーの開発にも活発に利用されている。Xeガス中での1,700Å前後のレーザー発振や水素ガス中での1,161Åレーザー等もREBを用いて得られている。

一時、慣性核融合では従来のガラスやCO₂レーザーの赤外線領域よりは、可視の5,000Å附近のレーザー光が有効であると考えられて特にREBのパルス中の短いものを利用した例えば、O₂のオーロラ線(5577Å)レーザー発生やXeO、KrO等からの5550Åレーザー発生の試みが行われている。現在では未だ慣性核融合で最適の波長については必ずしも定説がある訳ではないが、可視光での大出力レーザーは確立されれば多いに役立つものである。

Table 1にはREBを用いたレーザーの最近のいくつかを示してある。

次表に見られる様に新しいレーザーの開発は日進月歩でわずかの間に急速に進展しているが現在の所未だガラス(ルビーを含む)、CO₂レーザーと肩を並べる新しいレーザーは生れていない。これをめざしてREBの短いパルス中で大出力を生かした高効率の新しいレーザー生成の研究は今後も活発に行われる。

5-2. 大出力マイクロ波生成

REBによって強力なマイクロ波が生成される事はかなり初期の段階から活発に行われてき

Table 1.

ガ ス 名	波 長	REB	Laser 出力	効率	論文名 / 研究場所
KrF (1400 Torr F ₁ 4 Torr Kr > 100 Torr)	2.484 Å	2 MeV 6 kJ 55 kA	108 J 2 GW 92 J 92 J	3 %	J. M. Hoffman et al Appl. Phys. Letter 28, 538 (1976)
ArF (100 Torr)	1.933 Å	55 nsec	2 GW	3 %	(Sandia Lab.)
XeCl	3.080 Å	430 keV			J. J. Ewing et al Appl. Phys. Letters 27, 350 (1975) (AVCO)
XeBr	2.818 Å	430 keV 50 ns 36 J	200 W		S. K. Searles et al Appl. Phys. Letters 27, 244 (1976) (NRL)
HgCl	5.576 Å	300 keV 100 A/cm ²	138 KW		J. H. Parks, Appl. Phys. Letters, 31, 192 (1977)
HgBr	5.018 Å	150 ns	50 KW		31, 297 (1977)
Br ₂ ⁺ (Ar 2 atm Br ₂ 3 Torr)	2,920 Å	235 keV 5 A/cm ² 1.1 μs	100 KW/cm ²		J. M. Murray et al Appl. Phys. Letters, 28, 530 (1976) (UC/LLL)
I ₂ (10 atm. CF ₃ I)	3,420 Å	1 MeV 20 kA 20 ns	3.6 MW 10 ns		R. S. Boadford et al Appl. Phys. Letters 27, 546 (1975) (Northrop Res. and Tech. Center)
Hg ₂ (3.75 atm.)	3,350 Å	1.5 MeV 600 J 20 ns	Positive gain confirmed		L. A. Schlie et al Appl. Phys. Letters 28, 393 (1976)

た。大きく分けると次の三つに整理される。

- i) 中性ガス中への REB 入射によるマイクロ波の発生
- ii) 遅波回路を形成する容器中を伝播する REB によるマイクロ波発生
- iii) 空間的にリップルをもつ磁場の中を伝播する REB によるマイクロ波の発生

この様な実験では、約100MWのパルスマイクロ波の生成が観測されている。唯、初期に期待された程最近はこの方面の発展はみられず、実用化迄には未だ程遠い段階であり今後、今迄のものに何かがかかわらなければ一段の飛躍の見通しは必ずしも明るくはない。

5-3. X線源他

X線としてはレントゲン装置の大型のものであり“オーロラ”と呼ばれる大型装置は強力なX線源としてこの間迄世界最大のREB源の地位を保ってきた。これらのX線源は、物性物理

学の研究や、宇宙における放射線損傷の試験等にかなり使用されており今後も用途はひろがるであろう。

6. 結 言

以上REBの特徴とその応用について述べてきたが、REBの特徴は何と云ってもパルス巾の短い大出力が得られる事であり、又エネルギー変換効率も非常に良い。ここから、慣性核融合、プラズマ加熱、レーザー生成等の応用が生れてきている。

今後更に大出力化やビームパルス巾等の改良が行われる事によりREBは上記の応用実用の面のみならず、物理的に新しい領域を開く可能性のあるエネルギー源として、又宇宙空間でのエネルギー伝送、等への応用等広い分野で活用されていくであろう。

参 考 文 献

—Production of REB—

Blumlein, A. D., U. S. Patent No. 2, March 29, 465; 840 (1949).

Boers, J. E. and Kelleher, D., J. Appl. Phys., **40**, 2409 (1969).

"Exact solution of poisson's equation for space-charge—limited flow in a relativistic planar diode".

Graybill, S. E. and Nablo, S. V., IEEE Trans., **NS-14**, 3, 782 (1967).

"The generation and diagnosis of pulsed relativistic electron beams above 10^9 watts".

Lovelace, R. V. and Ott, E., Phys. Fluids, **17**, 1263 (1974).

"Theory of magnetic insulation".

—Propagation of REB—

Alfven, H., Phys. Rev., **55**, 425 (1939).

"On the motion of cosmic rays in interstellar space".

Bennett, W. H., Phys. Rev., **45**, 890 (1934), **98**, 1584 (1955).

"Magnetically self-focusing streams".

"Self-focusing streams".

Graybill, S. E., IEEE Trans., **NS-18**, 3, 438 (1971).

"Dynamics of pulsed high current relativistic electron beams".

Hammer, D. A. and Rostoker, N., Phys. Fluids, **13**, 1831 (1970).

"Propagation of high current relativistic electron beams".

Lawson, J. D., Phys. Fluids, **16**, 1298 (1973).

"Simple models of solid and hollow relativistic electron beams with arbitrarily high current".

Lee, R. and Sudan, R. N., Phys. Fluids, **14**, 1213 (1971).

"Return current induced by a relativistic beam propagating in a magnetized plasma".

McArthur, K. D. and Poukey, J. W., Phys. Rev. Lett., **27**, 1765 (1971).

"Return current induced by a relativistic electron beam propagating into neutral gas".

Stallings, C., Benford, J., and Childers, K., Plasma Phys., **18**, 317 (1976).

"Magnetic focusing of intense relativistic electron beams".

Yonas, G. and Spence, P., Record of 10th Symp. Electron, Ion, and Laser Beam Technology, San Francisco Press, 143 (1969).

"Experimental investigations of high ν/γ beam transport".

Wallis, G., Sauer, K., Sunder, D., Rosinskii, S. E., Rukhadze, A. A., and Rukhlin, V. G., Sov. Phys. -Usp., **17**, 492 (1975).

"Injection of high-current relativistic electron beams into plasma and gas".

—Nuclear Fusion by REB—

Babykin, M. V., Zaviosky, Ye. K., et al., Nucl. Fusion Suppl., 75 (1972).

Bogolyubskij, S. L., Linksonov, V. I., Rudakov, L. I., Smirnov, V. P., Gerasimov, B. P., Mikhajlov, A. P., Popov, Yu. P., and Samarskij, A. A., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna, 1977) p. 177.

"Demonstration of the possibility of using electron beams for heating thermonuclear targets".

Clauser, M. J., Phys. Rev. Lett., **34**, 570 (1975).

"Targets for electron-beam fusion".

Nakai, S., Imasaki, K., and Yamanaka, C., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna, 1977) p. 207.

"Relativistic-electron-beam-induced fusion".

Winterberg, F., Nucl. Fusion, **12**, 353 (1972).

"Initiation of thermonuclear reactions by high-current electron beams".

Yonas, G., Poukey, J. W., Prestwich, K. R., Freeman, J. R., Toepfer, A. J., and Clauser, M. J., Nuclear Fusion, **14**, 731 (1974).

"Electron beam focusing and application to pulsed fusion".

—Plasma Heating—

Chu, K. R. and Rostoker, N., Phys. Fluids, **17**, 813 (1974).

"Interaction of a rotational relativistic electron beam with a magnetized plasma".

Ekdahl, C., Greenspan, M., Krivel, R. E., Sethian, J., and Wharton, C. B., Phys. Rev. Lett., **33**, 346 (1974).

"Heating of a fully ionized plasma column by a relativistic electron beam".

Kapetanacos, C. A. and Black, W. M., Phys. Lett. **34**, 1156 (1975).

"Plasma heating by a rotating relativistic electron beam"

Lovelace, R. V. and Sudan, R. N., Phys. Rev. Lett., **27**, 1256 (1971).

"Plasma heating by high-current relativistic electron beams".

Miller, P. A., Appl. Phys. Lett., **27**, 107 (1975).

"Interaction of a 15-KJ relativistic electron beam with a mirror-confined plasma"

Prono, D., Ecker, B., Bergstrom, N., and Benford, J., Phys. Rev. Lett., **35**, 438 (1975).

"Plasma-return-current heating by relativistic electron beams with $\nu/\gamma \sim 10$ "

Thode, L. E. and Sudan, R. N., Phys. Fluids, **18**, 1552 (1975), 1564 (1975).

"Plasma heating by relativistic electron beams. I. Two-stream instability"

"Plasma heating by relativistic electron beams. II. Return current interaction"

—Plasma Confinement by REB—

Bzura, J. J., Fessenden, T. J., Fleischmann, H. H., Phelps, D. A., Smith, A. C., and Woodall, D. M., Phys. Rev. Lett., **29**, 256 (1972).

"Trapping of high-current relativistic electron beams in a magnetic mirror trap"

Christofilos, N. C., Condit, Jr. W. C., Fessenden, T. J., Hester, R. E., Humphries, S., Porter, G. D., Stallard, B. W., Weiss, P. B., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna, 1971) I, p. 119. "Trapping experiments in the astron".

Mohri, A., Masuzaki, M., Tsuzuki, T., and Ikuta, K., Phys. Rev. Lett., **34**, 574 (1975).

"Formation of a non-neutral relativistic-electron-beam ring in a toroidal magnetic field".

—Ion Acceleration by REB—

Graybill, S. E., IEEE Trans., **NS-19**, 292 (1972).

"Production and acceleration of ions by intense relativistic electron beams".

Greenspan, M., Humphries, S., Maenchen, Jr. J., and Sudan, R. N., Phys. Rev. Lett., **39**, 24 (1977).

"Geometric focusing of 20-GW proton beams with use of a magnetically insulated diode".

Golden, J., Kapetanakis, C. A., Marsh, S. J., and Stephanakis, S. J., Phys. Rev. Lett., **38**, 130 (1977).

"Generation of 0.2-TW proton pulses".

Luce, J. S., Sahlin, H. L., and Crites, T. R., IEEE Trans., **NS-20**, 3, 336 (1973).

"Collective acceleration of intense ion beams in vacuum".

Miller, R. B. and Straw, D. C., J. Appl. Phys., **47**, 1897 (1976).

"Observations of collective ion acceleration with drifting intense relativistic electron beams".

—Microwave Generation by REB—

Friedman, M. and Herndon, M., Phys. Fluids, **16**, 1982 (1973).

"Emission of coherent microwave radiation from a relativistic electron beam propagating in a spatially modulated field".

Granatstein, V. L., Sprangle, P., Parker, R. K., and Herndon, M., J. Appl. Phys., **46**, 2021 (1975a).

"An electron synchrotron maser based on an intense relativistic electron beam".

Manheimer, W. M. and Ott, E., Phys. Fluids, **17**, 463 (1974).

"Theory of microwave generation by an intense relativistic electron beam in a rippled magnetic field".

—Laser Pumping by REB—

Fenstermacher, C. A., Nutter, M. J., Leland, W. T., and Boyer, K., Appl. Phys. Lett., **20**, 56 (1972).

"Electron-beam-controlled electrical discharge as a method of pumping large volumes of CO₂ laser media at high pressure".

Bradford, R. S., Ault, Jr., E. R., and Bhaumik, M. L., Appl. Phys. Lett., **27**, 546 (1975).

"High-power I₂ laser in the 342-nm band system".

Hoffman, J. M., Hays, A. K., and Tisone, G. C., Appl. Phys. Lett., **28**, 538 (1976).

"High-power uv noble-gas-halide lasers".

Powell, H. T., Murray, J. R., and Rhodes, C. K., Appl. Phys. Lett., **25**, 730 (1974).

"Laser oscillation on the green bands of XeO and KrO".