

## 技術解説

# 相対論的電子ビーム (REB) と その応用

## —主として慣性核融合へ—

山 中 千代衛\*  
今 崎 一 夫\*\*

### 1. まえがき

相対論的電子ビーム (REB) は、一般に高電圧でかつ大電流値を持った電子ビームに対する総称である。REB に対する研究は、1930 年代 Alfvén に起因している<sup>1)</sup>。彼は、電荷が中和化された光速に近い速度で運動する電子が電流の自己磁場により軌道を曲げられ、電子流の流れの方向には一定値以上進めないことを示した。(Alfvén の電流制限値)

一方大電流電子ビームを得る研究は、活発に進められ、1950年代に入って、Lawson により詳細に調べられた。この結果非中和化ビームにおいて、Alfvén の電流制限値を超える電流値を持つビームの伝播の可能性が示された<sup>2)</sup>。これはビーム電荷の非中和化による斥力により、自己磁場の収束力が打消されることによる。しかし実際このような非中和化のビーム生成は技術的な困難をともない実現しなかった。

1960年代に入り、イギリスの J. C. Martin らによる高電圧短パルス発生技術の確立にともない、大電流発生が可能となり、Alfvén 電流制限値を超えたビームの伝播が実験的に観測された。これは磁場の中和化によることが1970年代前期において理論的に明らかにされた<sup>3)</sup>。これは比較的高密度プラズマにおいて、電子ビームの自己磁場のプラズマ中への拡散特性時間よりも早い立上りを持ったパルスビームがプラズマへ突入するとき、その磁場のエネルギーは、逆行電流が流れることで保存されることによ

る。この逆行電流によりビーム電流は打消され、ちょうど磁場が中和化された状態になる。これにより Alfvén の電流値をうわまわるビーム電流を伝播させ得る。これと対応して高電圧パルス技術も著しい進歩をとげ、その結果 REB は種々の研究分野への応用が有望視され、現在大規模に研究が進められている。

REB の応用分野としては、大線量高エネルギー放射線源、レーザー励起源、イオン加速、核融合等が挙げられる。特に核融合への応用はめざましく、磁場閉じ込め、プラズマ加熱、慣性核融合等の広い領域で活発な研究が行われている。

### 2. REB の発生

#### 2-1 REB 発生装置

REB 発生技術は大強度放射線源、核融合等への応用を目的とすることにより、大出力高速立上りをめざし、装置の開発が活発に行われ、著しい進歩をとげてきた。その結果 REB は ~MA, ~10MV, 10~100 nsec の出力を持つようになった。このような高電圧大電流の短パルス大パワー電子ビームを得ようとする時、負荷が低インピーダンスになると通常のコンデンサー放電ではコンデンサーの内部インダクタンスにより高電圧が効率よく負荷に印加できなくなる。そこでコンデンサーのエネルギーを一時的に分布定数線路の容量に充電しなおし、この線路でパルスを成形する。そしてこのパルスをインピーダンス整合のとれた負荷に印加することによりエネルギーを取り出す。

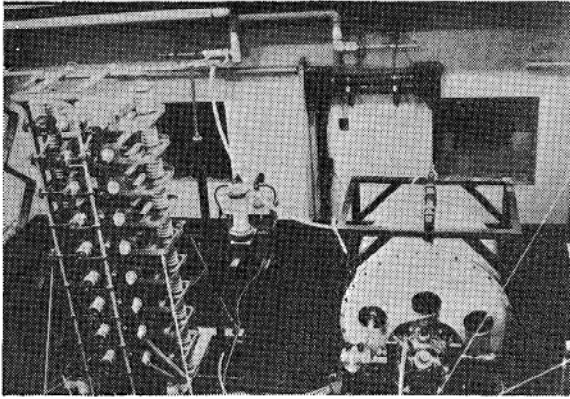
このため、REB 発生装置は主に三つの部分よりなる。第1図に装置の概略図を示す。同時に筆者らの発生装置励電3号の装置写真を示す。

\* 山中千代衛 (Chiyo YAMANAKA). 大阪大学, レーザ核融合研究センター, 教授, 工学博士, 電気工学

\*\* 今崎一夫 (Kazuo IMASAKI), 大阪大学, レーザ核融合研究センター, 助手, 電気工学

Marx 発生器

ブルムラインパルス成形部



ダイオード部

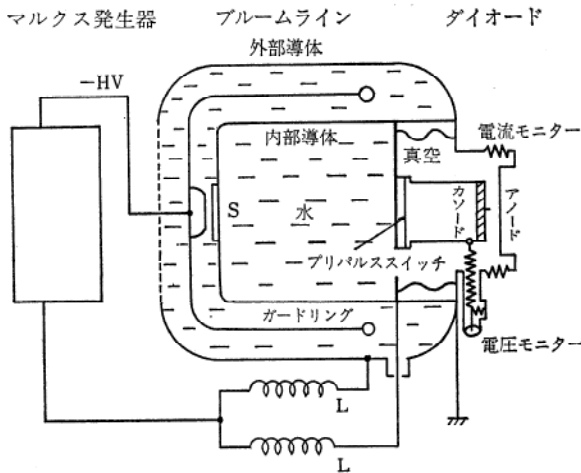


図1 相対論的電子ビーム発生装置概略図  
および励電3号装置写真

まずはじめにエネルギーを蓄積する部分には一般にマルクス発生器を用いる。これによりマイクロ秒程度の立上り時間を持った衝撃電圧パルスが発生させる。これを用いて分布定数容量に充電する。電圧印加時間が $1 \sim 10 \mu\text{sec}$ 程度であるので高電圧にもかかわらず装置の絶縁強度は比較的強くとり、装置の小型化が計れる。

パルス成形部は、同軸型や平板型の低インダクタンス化された電極を用いて分布定数線路を作る。電極の一端にスイッチを設け、これによりパルス成形を行う。パルス幅は充電電極の長さで電極間の誘電体により定まる。またブルムラインやスタックライン方式を用いて電圧を重ね、パルス成形部で昇圧を行うこともできる。

誘電体としては、絶縁油、水、マイラー等がよく用いられる。油は高電圧に対し大きな絶縁耐力を持っているため、高電圧 REB 発生装置

( $\sim$ 数MV) に用いられる。一方水は比誘電率が非常に大きく ( $\epsilon_r \approx 80$ )、またパルス高電圧に対して油に近い絶縁耐力を持っているため、大電流 REB 発生装置に用いられる。マイラーは固体であるため、保守に難点があるが、低電圧では信頼性があり、平板型パルス成形ラインに用いられる。このとき導体末端の電界集中を防ぐために導電性の中に装置する。

高速立上りパルスを得るために、パルス成形スイッチの低インダクタンス化が計られてきた。このため水中、油中、固体等の誘電体ギャップを用い、ギャップ間隙を狭げると共に、マルチアークギャップの開発が行なわれている。その結果耐圧が数MVで数十 nH のギャップの開発が完成している<sup>4)</sup>。

このようにしてパルス成形部で高電圧高速立上りのパルスを成形し、電子ビーム発生部(ダイオード)へこれを印加する。ダイオードは電界放出型のカソードおよびアノードから成り、大電流を得るために広面積カソードを用いる。パルス初期においてはダイオードのインピーダンスは、時間的に減少する。この典型的な実験結果を第2図に示す<sup>5)6)</sup>。これは大電流の発生によりカソード表面が加熱されプラズマ化し、このプラズマが膨張することにより、実効的な

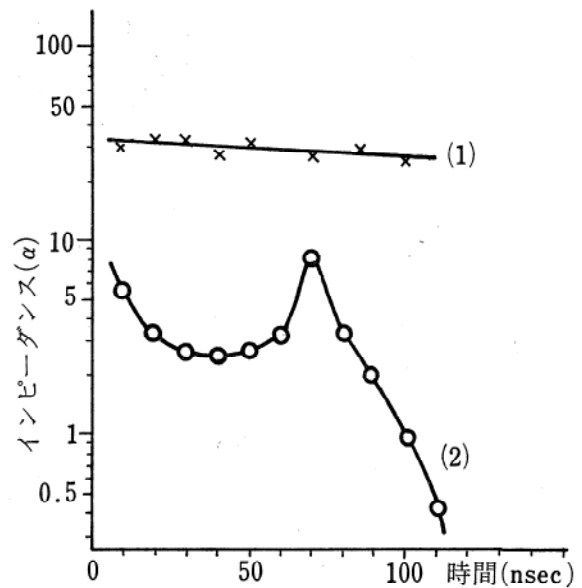


図2 ダイオードインピーダンスの時間変化を示す。(1)は電流量が少なく、カソード表面プラズマの生成が少ない時である。(2)はプラズマが十分生成された場合である。

表1 各国の REB 発生装置

研究所	装置名	仕様	完成年度
USA			
Sandia	Hydra	2ビーム, 100ns 10kJ	1972
	Proto-I	2ビーム, 25ns 50kJ	1976
	Proto-II	2ビーム, 100kJ	1977
	EBFA-I	500kJ	1979
	EBFA-II	> 1 MJ	1982
NRL	Gamble I	1ビーム, 70ns 20kJ	1972
	Gamble II	1ビーム, 100ns	1974
Harry Diamond	Aurora	4ビーム, 100ns 2.5MJ	1973
USSR			
Kurchatov	Ural	5 kJ	1972
	Triton	5 kJ	1972
	Kalmar-I	30kJ	1976
	Angara-I	10kJ	1975
	Angara-V	48ビーム, 5 MJ (2 MV 1 MA 120kJ ×48)	1980
日本			
大阪大学	励電1号	1 kJ, 60ns 300kV, 40kA	1972
	2号	1 kJ, 100ns 300kV, 20kA	1973
	3号	10kJ, 80ns 500kV, 80kA	1974
	4号	90kJ, 80ns 1.7MV, 1.7MA	1978
名古屋大学	Phoebus I	0.5kJ, 50ns	1973

ダイオード間隙が狭ばめられたためである。発生 REB の電流量が増加するにつれ、自己磁場の影響で電子は複雑な振舞をする。すなわち自己磁場により電子の軌道が曲げられる。カソードの最外縁部より放出された電子のラーマ半径とダイオード間隙とが等しい電流をダイオードの臨界電流とよび、それ以上の電流が流れると、自己磁場の効果が電界での加速効果にまさり、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトで電子はダイオード中心に収束してくる。このため、パルス中期においてはダイオードインピーダンスはこの効果により増加する。これら電子の振舞はまだ十分解明されておらず、今後の発展に期待したい。

以上 REB 発生装置の概略をのべた。表1に各国装置の一覧を示す。

## 2-2 REB の収束

慣性核融合においては広面積カソードより放出される大電流 REB を収束させ燃料ペレットに照射することが必要である。もしダイオード中心部で電荷の中和化が保持できれば自己磁場により収束をひきおこす。この性質を利用してこれまで種々の方法が試みられた。図3にその実験例を示す。これらの収束実験では等ポテンシャル面をアノード中心を先端にした円錐形にし、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトでアノード中心へと電子を

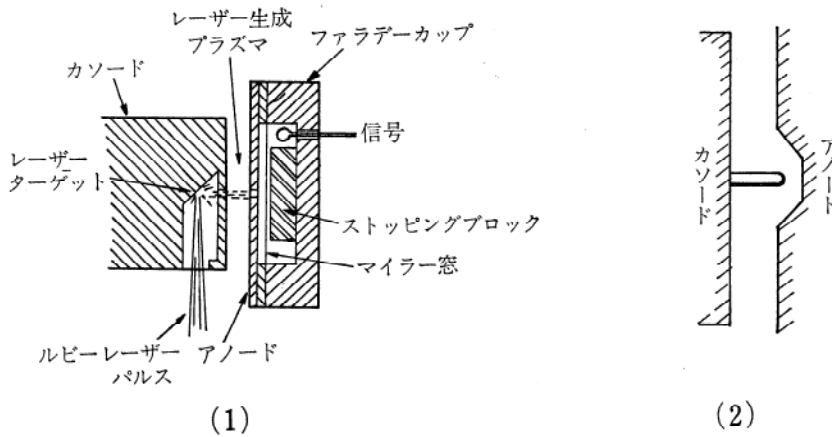


図3 1) レーザー生成プラズマを利用した収束用ダイオード  
2) ガイドロッドを利用した収束用ダイオード

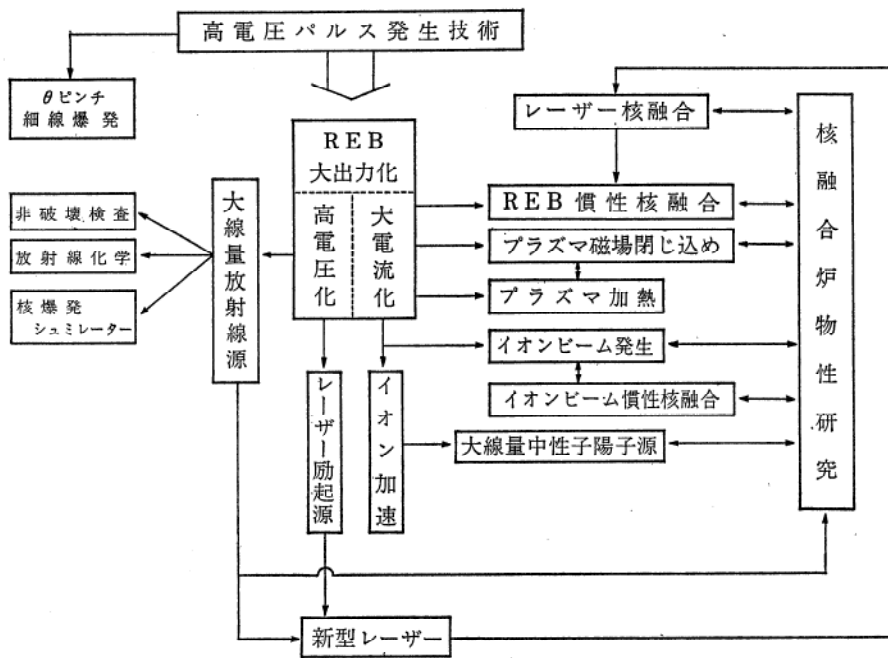


図4 REBの応用

ドリフトさせる。これで中心部に高密度プラズマを作りこれにより爆縮を行わせるのが慣性核融合の原理である。図3-1)は、カソード内部に設置したターゲットにレーザーを照射し、ダイオード中心部に電荷保持に必要なプラズマを作っている。またプラズマの存在により等ポテンシャル面はゆがめられ円錐に近い形状になっていると考えられる<sup>9)</sup>。また同じ目的に細線爆発を利用した例もある<sup>9)</sup>。図3-2)は、ガイドロッドを付設することにより円錐形ポテンシャルを作るとともにガイドロッドよりプラズマを発生している<sup>9)</sup>。

以上のような実験により安定な強い REB の収束が観測されている。この収束径は 1 ~ 3 mm 前後で、その結果ビーム電流密度は  $10^{6\sim7}$  A/cm<sup>2</sup> に達している。今後装置の大出力化にともない、収束機構のより詳細な解明が必要となると思われる。

### 3. REB の応用

大出力 REB 発生技術の開発により、種々の分野での応用が活発に行われている。図4にその関係を示す。

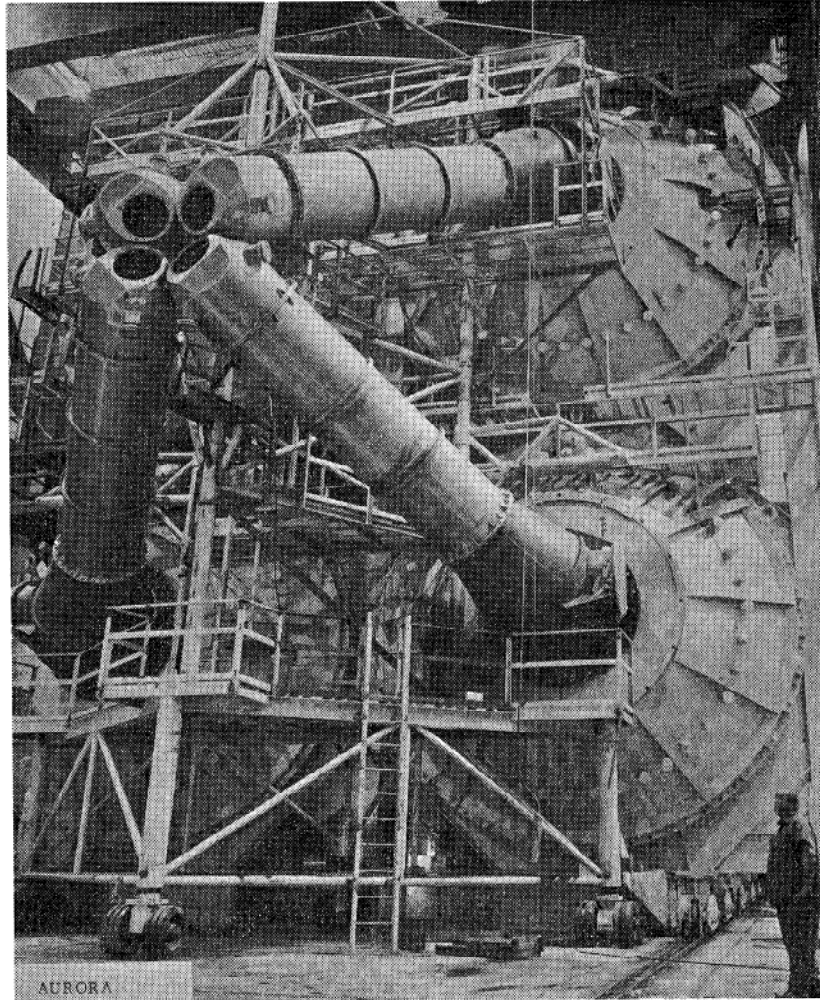


図5 Aurora ダイオード部

### 3-1 放射線源

$\gamma$ 線源 $\beta$ 線源として REB を用いる最も代表的な装置は Aurora である。これは15MV, 1.6 MA, パルス幅100 nsec, 3 MJ の出力を持っている。装置の総重量は7,500 T<sub>ON</sub> にも達する。図5に Aurora のダイオード部の写真を示す。中心部に4本のビームをパイプでガイドして集中させ高密度コンバーターに照射することにより、50,000レントゲンの $\gamma$ 線を放出する。この $\gamma$ 線の利用目的は、核爆発のシュミレーションにあると言われているが、この種の装置は軍事機密扱いとなっているので詳細は不明な点が多い。

従来のX線源に比べて大強度、小型の装置が多く商品化されており非破壊検査器、架橋放射線高分子改質、放射線重合、殺菌等の放射線化学への応用、また大線量であるため、このよう

な効果による物性研究の可能性も挙げられており、今後より広い応用研究が行われるものと考えられる。

### 3-2 レーザー励起源

電子ビームによるレーザー励起は、かなり以前より行われていたが<sup>10)</sup>、REB によれば従来の電子ビーム発生装置では困難な高気圧短波長レーザーに対しても有効な励起ができる。すなわち高電圧であるため高気圧ガスに対しても同様照射ができ、かつパルス立上りがナノ秒と高速のため緩和時間の極めて短い真空紫外領域付近までの励起が可能となった。図6にこの実験例を示す。

1.5MV 3 KA 50 nsec の REB を用いて Xe 1,730Å の誘導放出光の観測を行っている<sup>11)</sup>。この種の研究は REB 発生装置の商品化とともに

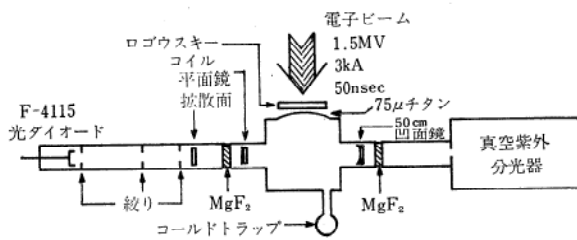


図6 REB 励起レーザー

に急速に盛んになっている。レーザー核融合のためのニューレーザー開発の一つの分野として、今後も発展していくものと考えられる。

### 3-3 イオン加速

電子ビームによりイオンが加速される現象は1950年代 Velsler らにより観測された。REB を用いた実験は1960年代後半より始まり、種々のイオン加速現象が見出された。その加速機構は、ビーム電荷によるもの、プラズマ波を励起しそのイオン補捉によるもの、衝突等があることがわかった。ERA は電荷による加速を利用して、大量高エネルギーのイオン加速を目指している。また直接イオン加速効果を利用して、大強度中性子源、陽子源として用いる可能性もある。現在 2.5 MeV のダイオード印加電圧で 5~15 MeV,  $10^{14}$  個の陽子加速が観測され、同時に中性子を  $10^{10}$  個/shot 得た例も報告されている<sup>12)</sup>。また Reflex triode 等、の応用により REB による大強度イオンビームの発生も

行われている。従来の加速器では達成できない核融合炉材料の物性研究への応用に有力であり、大線量中性子源、イオン源として発展していくと考えられる。

### 3-4 REB 核融合への応用

REB のプラズマ核融合への応用は、プラズマ閉じ込め、プラズマ加熱、ペレット爆縮と核融合の全域にわたって応用が考えられている。

プラズマ閉じ込めへの応用としては主に二通りが考えられている。まずトカマクに打込み REB 電子がトロイダルプラズマ電流となり、Kurskal Shafranov 不安定性の安定化を計るとともに付加的な加熱を行う。もう一つは、Spherator や Levitron に応用して、REB により円環電流を作り最小 B を作ることにある。またアストロン型の閉じ込めへの応用も試みられている。これらの研究はまだ基礎段階であり、トーラスへの REB の打込み実験等が行われている。

直線的に閉じ込めたプラズマへの加熱は、方法の簡便さもあって、実験的にも理論的にもよく研究がなされている。ミラー装置、カスプ磁場への打込みによるプラズマの予備加熱、 $\theta$  ピンチ、Z ピンチへの打込み実験が行われ、二流体不安定性、逆行電流によるイオン音波不安定性による加熱が観測されている。図7にその実験例を示す。ここではミラーで閉じ込められた

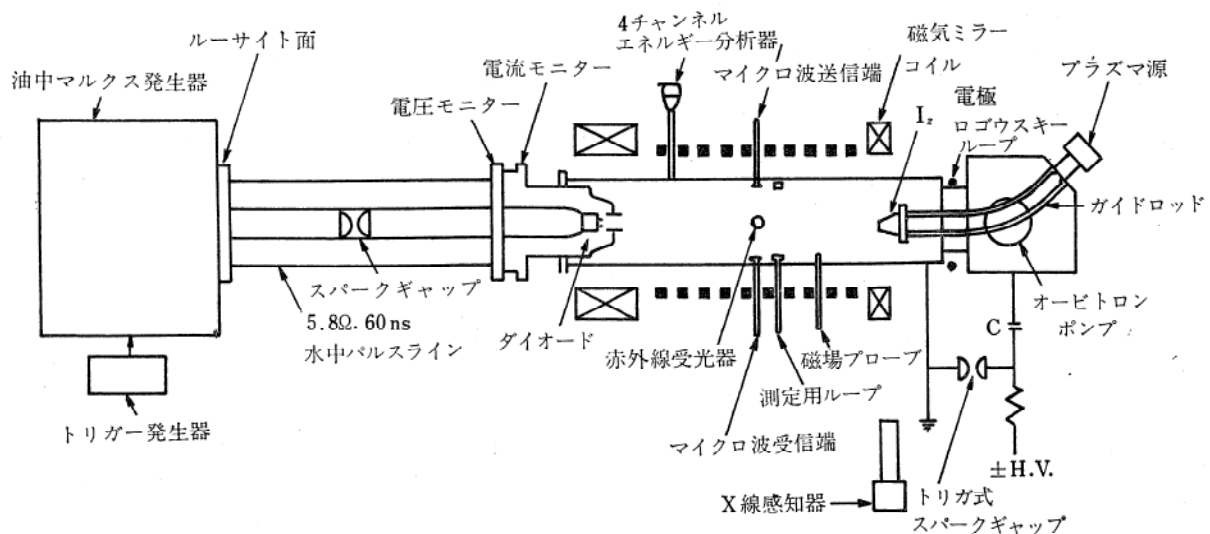


図7 REB によるミラー磁場中のプラズマ加熱実験

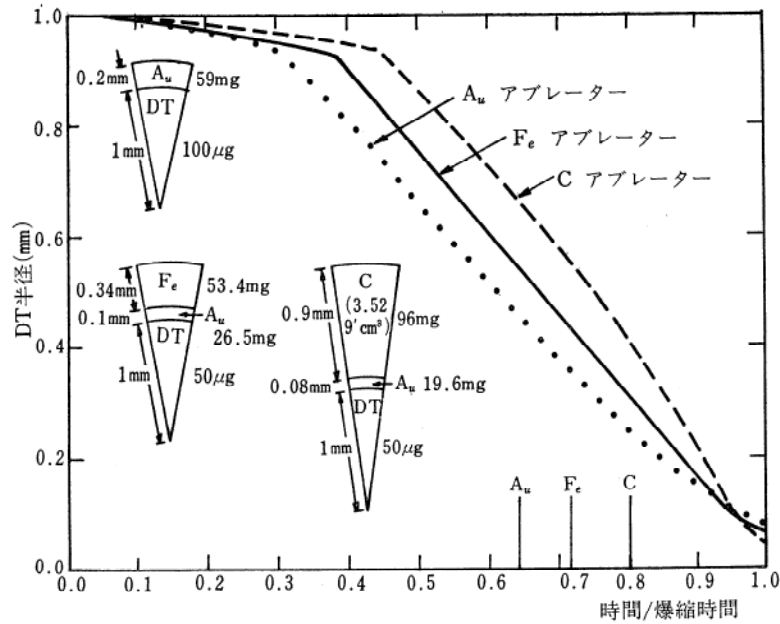


図8 REBによるプラズマ圧縮(シュミレーション)

プラズマへ打込んでいる。プラズマの密度は  $(5 \sim 8) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  で 500 K V, 80 K A の REB を用いて加熱が起っていることを確かめている<sup>13)</sup>。

REBによる慣性核融合はレーザーのそれと比べて方法はよく類似している。REBの場合の特徴としては、パルス幅が長く( $\sim 10 \text{ nsec}$ )収束径が大きい(1 mm), 反面総ビームエネルギーが大きい( $\sim \text{MJ}$ )という点があげられる。REBのこのような性質より、ペレットの径は1 mm前後の大きさの物が適している。

またREBのすぐれている点として、発生効率がよく( $\sim 50\%$ )、レーザーのようなコヒーレンスがないため照射ビーム数が少なくすみ、装置自体が簡素となることがあげられる。

レーザーと比較してREBの固体中(表面)での停止機構の解明は従来十分なされておらず、そのため核融合ペレットの設計等も十分なされていなかった。二体衝突によるエネルギー吸収を仮定するとブレークイーブンに必要なREBは $\sim \text{MJ}$ ,  $10^{14} \text{ watt}$ ,  $\sim 10 \text{ nsec}$ となる。図8に、そのときのペレット構造および圧縮過程を示す<sup>14)</sup>。しかしより効率のよいエネルギー吸収機構が筆者らにより発見され、この値は大巾に低減させることができるものと期待されている。

すなわち衝突によるエネルギー吸収に比べてはるかに効率のよい吸収が実験的に観測されている。阪大による結果では<sup>15)</sup>薄膜重水素ポリエチレンターゲットをREBで照射し熱中性子  $10^9/\text{shot}$  の発生が観測された。これは膜厚を  $40 \mu\text{m}$  から  $500 \mu\text{m}$  に変化させても発生量の変化がない。この結果は、REBのエネルギー放出長がきわめて短いことを示しており、噴出プラズマ中での運動論的な二流体不安定性によるエネルギー吸収を考えると理論的によく説明できる。

REBのペレット照射において実験による圧縮はまだ直接観測にかかっていないが、ソ連クルチャトフ研究所において、円錐形ターゲットを用いて、シュミレーションで予測した圧縮時刻とよく一致した時刻に放出される中性子の観測が報告されている。

REBによる慣性核融合はREBの応用分野の中でも最も大規模で興味深い分野である。そのためアメリカ、ソ連の他わが国でも大型装置の開発に大きな努力を払っている。図9にアメリカ、サンディア研究所での年次計画とレーザーのそれとの比較を示す。目下1980年代前期でのブレークイーブンを目指しProto II, EBFA I, 励電4号の建設が進行中である。ソ連でもほぼ同程度の規模での装置開発が進んでいる。

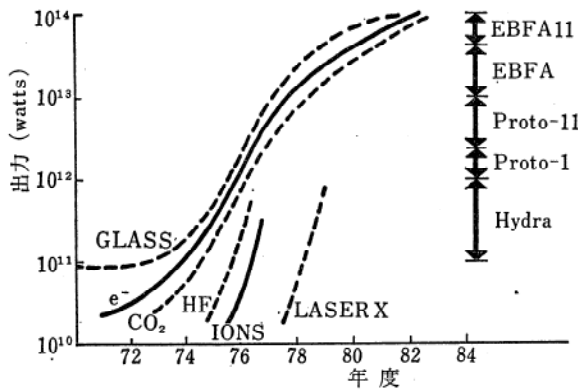


図9 サンディア研究所(米)年次計画とレーザーとの比較

#### 4. おわりに

REB 発生技術の進歩にともない種々の分野での応用が活発に行われている。数年前までは主に高電圧化がすすみ、その応用目的も放射線源が主であった。一方核融合への応用はめざましいものがある。慣性核融合においては装置の発生効率が高いことにより、実用核融合発電に対しては非常に有利であると考えられている。このため従来の技術と異った極低インダクタンス、極低インピーダンス装置の開発に大きな努力が払われている。今後より総合的かつ大規模な REB 研究がこの分野を中心に起こるものと

考えられる。

#### 参考文献

1. H. Alfvén Phys. Rev. 55 P.425 (1939)
2. J. D. Lawson J. Electron Control. 3 P. 587 (1957)
3. D. A. Hammer et al. Phys. Fluid. 13 P. 7 (1970)
4. SANDIA Lab. Electron-Beam-Fusion Progress Report 1975 SAND 76-0148 P. 22
5. G. Yonas et al. Nucl. Fusion. 14 P. 731 (1974)
6. K. Imasaki et al. Tech. Rep. Osaka Univ 27 P. 165 (1973)
7. P. A. Miller et al. Appl. Phys. Lett. 23 P. 423 (1973)
8. G. Yonas. et al. Phys. Rev. Lett, 30 P. 164 (1973)
9. K. Imasaki et al. Tech. Rep. Osaka Univ.
10. N. G. Basov. et al. Soviet. Phys. Solid. State 8 P. 15 (1966)
11. J. B. Gerado et al. IEEE QE-9 P. 748 (1973)
12. J. Luce et al. IEEE NS-20 P.336 (1973)
13. P. Korn et al. Phys. Rev. Lett. 27 P. 579 (1973)
14. 文献 4) P.41
15. S. Nakai. et al. "Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research" 1976 Vol. 1, P.207, IAEA (1977)