

電磁飛翔体加速装置開発の歩み - (I)

矢守 章

(2001年8月1日受理)

Review on the Development of Electromagnetic Launchers - (I)

By

Akira YAMORI

Abstract: It is already more than 20 years since a group of The Australian National University accelerated a macro-particle to 5.9 km/s by electromagnetic means, railgun launcher. Their experimental result encouraged many researchers to develop the electromagnetic launcher (EML) as a hypervelocity accelerator. However, contrary to early expectation only a few groups reported the velocities more than 6 km/s, and the highest velocity obtained by the railgun to date is only about 8 km/s. It has been recognized that the degradation of the railgun performance was caused mainly by the ablation of wall materials which was generated by the intense radiation from the plasma armatures in the railgun bores. However, even today, this problem has not yet been solved. In addition to the objective of achieving hypervelocity, another important objective exists for the development of the electromagnetic launchers, which is to accelerate the projectiles with mass of the order of kg to about 3 km/s repeatedly. In order to achieve this objective, not only the railgun launcher but also the electromagnetic launchers such as an electrothermal-chemical launcher and an induction type launcher have been developed with great efforts. In this paper, the history of the development of the electromagnetic launcher is described by reviewing a variety of the experimental and theoretical results from many works.

概 要

20年以上前に始まった電磁飛翔体加速装置開発のあゆみを現在に至るまで紹介する。電磁飛翔体加速装置関連の論文は殆どIEEE TRANS. ON MAGNETICSに掲載されているので、本雑誌に発表された論文を中心に開発状況を説明していく。

1. はじめに

質量がグラム程度よりキログラム位までの範囲の飛翔体を高速度に加速させる装置で、最も一般的で歴史があるのは火薬銃及び軽ガスの圧縮・膨張を利用したガス銃であろう。しかし、これらの加速装置には飛翔体を推進させるガスの移動速度に物理的な限界があるため、それらによって得られる速度には限界がある。一方、電磁飛翔体加速装置（Electromagnetic Launcher : EML）は速度を原理的に制限するような要素がないため、飛翔体を超高速度にまで加速させられる可能性を持っている。

電磁飛翔体加速装置の本格的な開発がスタートしてより20年以上が経過した。本論文はその開発の歩みを紹介するのを目的としているが、電磁飛翔体加速装置の内でもレールガンと呼ばれる加速装置の開発を重点的に解説する。又、本論文は3部作構成の内の第1部の解説論文で、これに引き続いて第2部、第3部を今後出す予定でいる。

2. 電磁飛翔体加速装置（EML）の説明

2. 1. 加速方式

EML開発の歩みを述べる前に、EML自体の説明をすることが必要であろう。EMLは飛翔体を推進させる力を電気エネルギーより得ている。電気エネルギーを飛翔体加速力に変換させる方式として、

- (1) 電流と磁場との相互作用すなはちローレンツ力によって飛翔体を加速させる方式。これに属するのがレールガンと誘導型加速装置（コイルガン）である。
- (2) 放電によって発生した高密度プラズマの熱によって推進燃料を燃焼させ、その燃焼ガスの圧力で加速させる方式。これに属するのがエレクトロサーマル・ケミカルガン（Electrothermal-Chemical Gun : ETC Gun）。

2. 2. EMLの種類

1) レールガン

レールガンはEML装置開発初期よりEML装置の中で最も高速度達成の可能性を持った装置として多くの研究者に注目され、開発・研究されてきた。その構成を図1に示す。レールガンはこの図より分かるように非常に簡単な構造をしている。レールガン本体は2本（場合によっては2本以上の時もあるが、通常は2本）の金属レール（材質は銅が一般的）とその間に置かれた飛翔体、そして飛翔体後部に位置して飛翔体に加速力を与えるための電流経路（アーマチャと呼ばれる）で構成されている。飛翔体は2本のレールの間を移動出来るようになっていて、アーマチャには電流（アーマチャ電流と呼ばれる）が電源よりレールを通して流れる。レール中を流れる電流の作る磁力線（B）の向きは紙面に垂直方向で、それとほぼ直角方向の向きに流れているアーマチャ電流（ I_a ）と磁力線との間には $I_a \times B$ の力すなはちローレンツ力が発生し、このローレンツ力によって飛翔体は

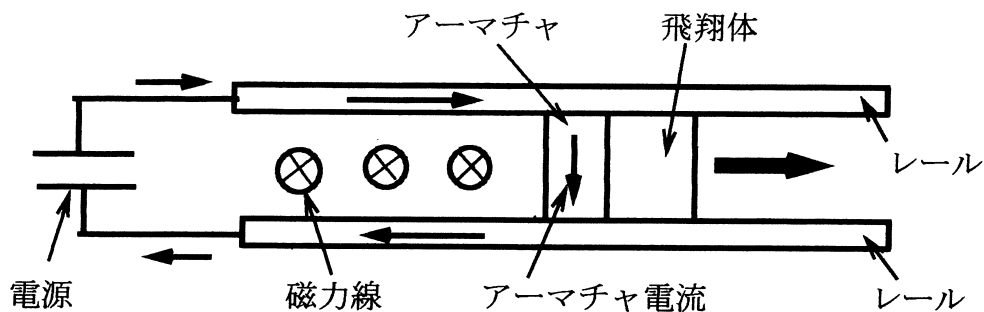


図1. レールガン回路図

図中右方向に加速される。飛翔体を加速させるローレンツ力 F_r は

$$F_r = (1/2) L_o \cdot I_a^2$$

(L_o は1対のレールの1m当たりのインダクタンス、 I_a はアーマチャ電流)で表され、アーマチャ電流の2乗に比例する。この事はアーマチャ電流を補給し続けられれば幾らでも飛翔体速度が増加する事を意味し、レールガンで超高速度が達成させられる事を物語っている。

アーマチャには大きく分けて3種類あり、各々プラズマアーマチャ、ソリッドアーマチャ (又はメタルアーマチャ)、ハイブリッドアーマチャと呼ばれている。

1, プラズマアーマチャ

小さな金属片 (ヒューズ) に大電流を流すと、ヒューズは短時間の内に蒸発して電離した状態のガス (プラズマ) へと変化する。この様な方法で飛翔体のすぐ後ろにプラズマを発生させ、アーマチャとして使用するのがプラズマアーマチャである。プラズマアーマチャは高温のガス状態であるのでアーマチャとレール間の電氣的接触が安定していて、飛翔体加速性能に影響を与える接触不良が発生する事がない。その為、飛翔体が高速度で移動しても安定してレールよりアーマチャへ電流が供給され、飛翔体を高速度にまで加速させられる。欠点としては高温ガスであるプラズマによって銃身内部が損傷を受け、レールガンの再使用を難しくしている事と銃身内壁面より大量のガスをアブレーションによって発生させて、飛翔体を含めた加速質量を大きくする事である。

2, ソリッドアーマチャ

金属固体中にアーマチャ電流を流してローレンツ力で飛翔体を加速するのがソリッドアーマチャである。ソリッドアーマチャの場合、高速度 (大体3km/s位) になるとレールとの接触不良が発生し、それ以上飛翔体を加速する事が不可能となる為、軽い飛翔体を高速度に加速するレールガンのアーマチャには不向きで、重い質量の飛翔体を比較的低速度に加速するレールガンのアーマチャとして適している。一方、高速度用のプラズマアーマチャに較べてアーマチャ部で消費されるジュール損失が小さいので、動作効率がプラズマアーマチャに較べて高く、又高温のガスであるプラズマを使用していないので、銃身材料に与える損傷が小さいと言う利点がある。

3, ハイブリッドアーマチャ

ハイブリッドアーマチャはプラズマアーマチャとソリッドアーマチャの両方の特性を兼ね備えたアーマチャとして開発されたが、その特性が充分活かされたアーマチャまでには至っていない。

2) コイルガン (誘導型EML)

レールガンによる飛翔体加速力は2本のレールの単位長当たりの自己インダクタンスに比例しているが、コイルガンでの飛翔体加速には2つの回路の相互インダクタンス (の勾配) が重要な役目をしている。図2に基本的なコイルガンの構成を示す。ステーターコイルと呼ばれるコイルに時間的に変動する電流を流すと飛翔体の一部であるアーマチャコイルに誘導電流が発生し、この誘導電流と磁場との相互作用すなはちローレンツ力が飛翔体を図中右方向に加速する。この加速力 F_c は

$$F_c = I_s \cdot I_a \cdot \partial M / \partial x$$

(I_s はステーターコイル電流、 I_a はアーマチャコイル電流、 M は両回路の相互インダクタンス、 x はコイル間の距離)

で表される。この式において、

$$I_s \cdot \partial M / \partial x = \partial (M \cdot I_s) / \partial x = \partial \Phi / \partial x$$

(Φ はステーターコイルによる磁束の内アーマチャコイルと鎖交する磁束) はアーマチャコイルが動いた時、アーマチャコイルと鎖交する磁束の変化を表す。アーマチャコイルが微小距離動いた時の Φ の変化量は移動前後のアーマチャコイル面を上下の面とする短い筒の側面より入ってくる (又は出ていく) 磁束に等しい。側面より入

ってくる（又は出ていく）磁束は側面上でのアーマチャコイル径方向の磁束密度を面積で積分した値となるので、上記の F_c はステーターコイルが作る磁束密度の内、アーマチャコイル径方向の磁束密度（ $I_s \cdot \partial M / \partial x$ に比例）とアーマチャ電流（ I_a ）の積（ローレンツ力）をアーマチャコイルに沿って一周積分したものである。又、アーマチャコイル電流はステーターコイル電流の誘導作用によって生じるので、 I_a の値はアーマチャコイル軸方向の磁束密度をアーマチャコイル面上で積分した値に比例する。すなわち、アーマチャコイル面上での径方向、軸方向の2方向の磁束密度がコイルガンでの飛翔体加速にとり重要であると言えるが、この事はステーターコイルに

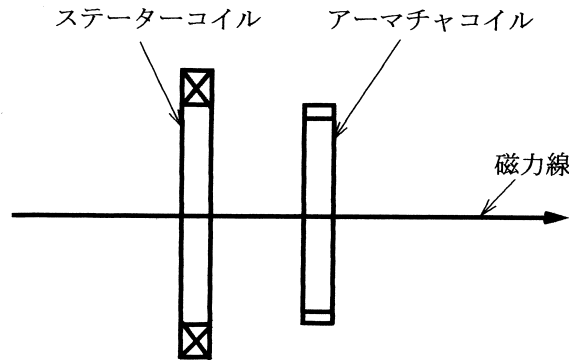


図2. 誘導型 EML (コイルガン)

よる磁力線はある曲率をもって曲がっている事が必要とされる事を意味している。

図2は1台のステーターコイルのみによるコイルガンの構成を示しているが、実際、開発されているコイルガンの構造は多数のステーターコイルを密着させた構造をしていて、飛翔体の移動と同期して各ステーターコイルに順繰りに電流を流し、飛翔体が移動する空間に進行波型の磁場を形成させて、飛翔体加速を行うのが一般的である。

コイルガンの特徴は

- 1, アーマチャとしてレールガンのように高温ガスであるプラズマを使用していないので、飛翔体並びに加速装置がプラズマによって損傷を受ける事がなく、再使用が可能である。
 - 2, 飛翔体系と加速力を与える系が構造的に独立しているため、非接触で加速出来る。この事は飛翔体加速に伴う加速装置への機械的損傷が少ない事を意味し、1の事項と並んで再使用を可能ならしめる。
 - 3, 欠点として、システム特に電源系が複雑で、製作上でも又動作シーケンス上でも問題となる。
- 等である。現在EML装置の中でコイルガン開発は他のEMLに較べて遅れ気味であるが、再使用が可能であるという事から、将来の宇宙での輸送手段としての期待は高い。

3) エレクトロサーマル・ケミカルガン (ETCガン)

ETCガンは前に述べた様に、磁場の力ではなく、基本的にはガス銃と同じ原理で飛翔体を加速する。図3にETCガンの構造を示す。アノードとカソードに接続されたヒューズに電流を流すと、ヒューズはレールガンのプラズマアーマチャの発生と同じく放電室内に高温・高密度のプラズマが発生する。このプラズマの熱輻射によって放電室の壁材料が蒸発・電離して放電が持続される。放電室で生成されたプラズマは放電室より吹き出し、飛翔体の直ぐ後方に設置された推進燃料（固体ないし液体）を燃焼させ、発生した高温ガスで飛翔体を加速する。（放電室内より吹き出したプラズマジェットのみで飛翔体を加速させる場合ETガンと呼ばれる）推進燃料として質量の軽い水素を主成分としている事と、又高温のプラズマが関与した燃焼の為、燃焼ガスの温度が高くなる事が相まって燃焼ガスの移動速度は通常の火薬燃焼ガスに較べて大きく、火薬銃による飛翔体加速より大きな速度

が得られる。ETCガンで軽い質量の飛翔体を高速度にする事も可能であるが、現在の開発目標は比較的重い質量(kg程度)を3km/s程度の速度に加速する点に重きが置かれている。

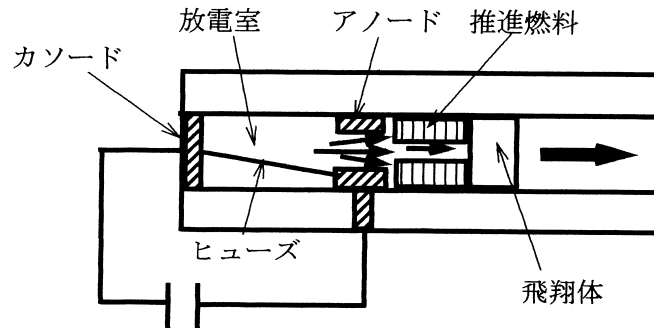


図3. ETCガン

2. 3. 電源

電源として要求される事は

- 1, 数百kA以上の大電流をms台の時間流せる事.
- 2, 数kV以上の電圧を発生させられる事.

であるが、更に一部の加速装置の電源に要求されている事は

- 1, 連続発射のバーストモードが可能な事.
- 2, 移動用電源として小型化, 軽量化されている事.

である.

これらの要求を満たし、使用されている電源として

- 1, コンデンサーバンク
- 2, 単極発電機
- 3, コンパルセータ
- 4, 電池

が挙げられるが、これらについて説明する.

- 1, コンデンサーバンク

最も多くの電磁加速装置で使用されている電源で、蓄えた静電エネルギーを数十 μ s~数十msの広範囲の放電時間で放出できる。コンデンサーバンクはコンデンサー(大体~kJ/kgのエネルギー密度を持っている)、インダクター(電流波形整形のため使用されるが、必ずしも必要とはしない)、大電流スイッチ、充電用高圧電源で構成されている。コンデンサーバンクの特徴は構成が簡単であり、動作取り扱いも簡単で、又他の機器との連携動作も簡単かつ信頼性高が行えると言う利点を持っている。しかし、コンデンサーの体積当たり及び重量当たりのエネルギー貯蔵率は以前とはかなり改善されたとは言え、未だ可動電源として使用するには大きすぎて、主に実験室内での電源として使用されている。

3. EML開発の始まり

EMLの本格的な開発が始められたきっかけとなった実験は、1978年J. Appl. Phys. に掲載されたオーストラリア国立大学のR. A. Marshall等によって為された実験である [1]。 (R. A. Marshall はその後、アメリカに渡り、Westinghouse Research & Development Center を経て、Institute for Advanced Technology, The University of Texas at Austin に在籍) 彼らは単極発電機 (Homopolar Generator : HPG) 電源によって、300kAの電流をレール長5m、12.7mm×12.7mmの正方形銃口のレールガンに流し、約3gのポリカーボネイト飛翔体を5.9km/sにまで加速するのに成功した。この実験はEMLによって高速度が得られた初めての画期的な実験で、この実験の特徴はそれまでは使用されていなかったプラズマをアーマチャとして使用したことにある。

EML開発が盛んになるのはこのR. A. Marshall等の実験以降であるが、これ以前にもEML研究は行われていて、古くはBirkelandの電気砲の研究がある。(この電気砲は1901年オスロの科学館に展示された。) その後、ドイツ、日本も第二次大戦中にEMLの研究を行い、米国ではWestinghouse社がElectropultを製作し、GE社も研究を行っていた。しかし、これらのEML研究・開発が実用的な装置を作り得なかったのは必要な技術の不足と、続行していくにはその必要性が余り強く無かった事であろう。

しかし、EMLの応用分野の一つである高速度衝突現象研究分野においては、高速度飛翔体加速装置としてEMLの開発がなされ、1963第6回高速度衝突シンポジウムで、Chapman等は磁場圧縮駆動電源とレールガンによって真偽の程は定かではないが10km/sにまで加速したと報告した [2]。又、D. E. Brast とD. R. Sawle はレール型飛翔体高速加速装置でmgの飛翔体を5-6km/sに加速したと報告した [3]。又、オーストラリア国立大学においては、当時大学院生であったJ. P. Barber (現在、アメリカ IAP Research, Inc. に在籍) によってレールガン開発が進められ、HPGを電源として、薄い銅板を重ねた構造の質量3.3gの飛翔体を1.8km/sにまで加速した(1972年) [4]。(このJ. P. Barber 実験の延長がR. A. Marshall等の実験につながったものと思われる) 当時、レールガン開発以外にもマスドライバーと呼ばれる、パルスコイルを使用したEMLも研究されていた。最初のこの型で近代的な装置はMagneplaneと呼ばれる超伝導浮遊電車システムでPowell, Dandy (Brookhaven National Laboratory) によって考えられ、縮小化された装置がMIT National Magnet Laboratory のHenry Kolmとその同僚らによってデモンストレーションされた。そして、同軸型のマスドライバーがスペースコロニー提案者でもあるO'Neill等によってMIT、プリンストン大学の共同研究として開発された [5]。この後、EMLの将来性に着目したアメリカ政府によってEML開発支援が1978年頃より本格化し、EML開発は大きく前進する事となった。

そして、EML研究の熱が高まる中、第一回のEMLシンポジウムが1980年11月アメリカ・サンデエゴ市で開催された。それ以降、2000年5月サンフランシスコでの第10回EMLシンポジウムまで大体2年間隔で開催され、EML関係では最も大きく権威あるシンポジウムとして多くの研究者が参加してきた。このシンポジウムで発表された内容はIEEE TRANSACTION ON MAGNETICS に掲載され、同誌を見ればEML研究・開発の状況が殆ど理解される。よって、本解説はIEEE TRANSACTION ON MAGNETICS に掲載された論文を中心に進められているが、それ以外の雑誌、レポートに発表された内容をも紹介することによって、EML開発の歩みについて説明していく。以下の構成としては、EMLシンポジウムの開催された年代順に項目を設けて進めていく形式をとっている。

4. 第1回EMLシンポジウム

(1980年11月, アメリカ・サンデエゴ市)

(本シンポジウムで発表された内容は, IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL MAG-18, No. 1, 1982に掲載.)

レールガン研究・開発において, ハード部門である機器自体の開発と共に, 発生している現象を理論的に考察するソフト部門の理論計算も必要である. プラズマアーマチャ内部状態の理論的考察に関する論文が1980年McNabによって [6], 続いて1981年John D. PowellとJad H. Battehの連名によってJ. Appl. Phys. に発表されたが [7], J. D. Powell等は本シンポジウムでも同様の報告を行った. PowellとBattehは前述のR. A. Marshallらの実験を受けて, プラズマアーマチャ内部の圧力分布, 磁場分布, 温度分布, 質量分布, 電子密度分布, 電流分布, 平均イオン価分布, 熱流量分布計算を銃身方向のみの変化を考慮した一次元モデルで計算した. 彼らの計算によって, レールガン動作時におけるプラズマアーマチャ内部のマクロ的状態は基本的なところで理解されるところとなった. (本論文ではプラズマアーマチャ内部のプラズマの流れ, 電流の向き等のミクロ的状態は計算されていない) この計算結果をR. A. Marshall等の実験に適応させると, プラズマ圧力は飛翔体後部面が最大となりその値は約220MPaとなり, プラズマアーマチャ後部に行くに従い減少し, 又磁場分布は圧力分布とは逆の分布で, プラズマアーマチャ後端で最大となり, その最大値は約24テスラとなることが推測された. その様子を図4に示す. (J. Appl. Phys. より掲載. プラズマは後ろより押され, 前面を飛翔体で止められているので当然圧力はプラズマ先端で最大になる事は理解される) この後, 1983年J. D. PowellとJ. H. Battehは連名で再びプラズマアーマチャ内部状態の理論的考察に関する論文をJ. Appl. Phys. に発表した [8]. 前回の一元モデルを発展させて二次元モデルでシミュレーション計算を行い, 二次元表示での温度分布, 電子密度分布, 質量分布を新たに付け加えたが, 基本的なところでは前回の発表と大きな差はなかった.

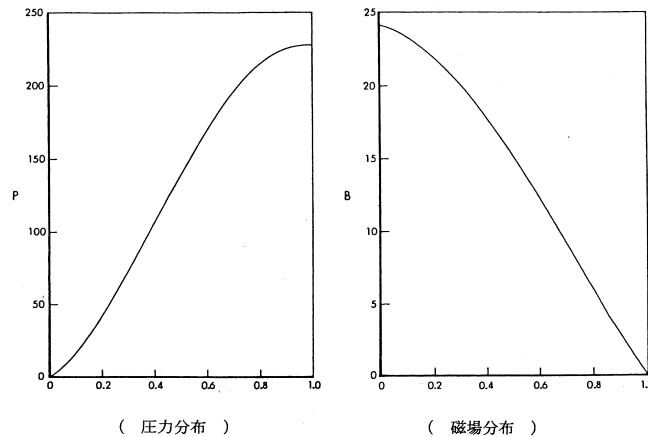


図4. プラズマアーチャ内部の磁場・圧力分布

プラズマアーマチャに関する理論計算に続いて, ソリッドアーマチャ内部の電流分布も計算された. 金属ブロックを使用したソリッドアーマチャにおいては, レール, アーマチャ内部そして両者の接触面での電流分布がレールガン動作に大きな影響を与える. もし, ソリッドアーマチャが静止していて, 且つ電流が時間的に一定であれば電流はレール断面及びレールアーマチャ接触面を一様に流れる. しかし, ソリッドアーマチャが高速で動く場合, 電流の流れる領域も高速で移動するため, レール中では電流の作る磁場が時間的に変化して, 新たな電場を発生させる. この電場によって金属内に新たに発生した電流は本来の電流を打ち消す方向に流れるため, 電

流が金属内部を一様に流れる事が出来なくなり、金属表面に集中して流れるようになる。この現象は表皮効果としてよく知られているが、この現象が高速度で移動するソリッドアーマチャには発生し、ソリッドアーマチャを使用した場合の大きな問題となっている。これに関する計算結果がWestinghouse社R&D CenterのFredric J. Youngらによって報告された [9]。彼らは単一構造ソリッドアーマチャと薄い層状の金属板を張り合わせた多層構造ソリッドアーマチャが3km/sで移動する場合の電流分布を計算した。それによると、両者共レールとソリッドアーマチャ後部との接触面に電流が集中するが、層状型のほうがその集中の度合いが小さかった。また、レール、ソリッドアーマチャ両方とも銅を使用する場合に比べて、ソリッドアーマチャのみを導電率が銅より小さい鉄にした方が電流集中度は小さくなる事が分かった。このソリッドアーマチャ後部面における電流集中は局所的な温度上昇を招き、場合によっては接触面の蒸発による破損をもたらす、接触抵抗の増大を招き、レールガン動作に支障をもたらす事となる。図5にソリッドアーマチャ内部の電流分布に関する彼らの計算結果の一例を示す（同論文より掲載）。

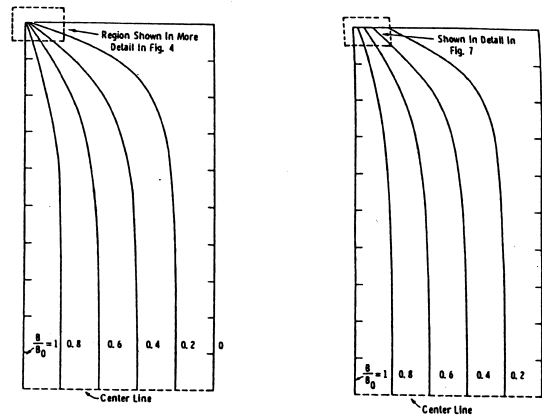


図5. ソリッドアーチャマ電流分布

ハード部門である機器開発においても多くの発表があったが、この内から主な2つのレールガン実験の内容を次に示す。

(1) Westinghouse社R&D CenterのIan R. McNabらによって、300gの飛翔体を3km/sにまで加速させるのを目標としたレールガン開発の報告があった [10]。銃口形状は5×5cmの正方形で、レール長は4mとなっている。電源としては、15MJの単極発電機（HPG）と5MJのトロイダル蓄積コイル及び1.5MA流せるオープニング・スイッチの組み合わせで構成されている。飛翔体は正方形のポリカーボネイトとその後部に接合された6枚の銅板を張り合わせたソリッドアーマチャより構成されている。レールガン全システム的设计は1979年4月にまでに終了したが、会議での発表時点においては製作中で、実験結果報告にまでは至っていなかった。

(2) 1979年よりローレンス・リバモア国立研究所とロス・アラモス国立研究所はR. S. Hawkeらが中心となって共同でレールガン開発・研究を始めた [11], [12]。この共同研究の狙いは

- 1) MAクラスの電流を流した場合のレールガン動作状態確認。
- 2) 飛翔体加速の限界を決めている要因は何か。
- 3) 両研究所で開発しているレールガン動作シミュレーション計算コードと実験結果との比較。

等を明らかにすることであった。これらを調べる為に、R. A. Marshallらが開発したレールガンを参考にして、それと同じ形状の12.7mm正方形銃口で長さが0.9m、1.8mのレールガンと50mm正方形銃口で長さが0.3mのレー

ルガンを製作した。それまで使用されていたレールガン一般的な構造は、前に述べたように銃身部分を重い金属ブロックで上下より挟み、その金属ブロックをボルトで締めるものであった。しかし、R. S. Hawke らが開発した12.7mm正方形銃口レールガンは、銃身を堅固な管の中に隙間が無いように納めた構造で、銃身を締め付けるためのボルト等を必要としないものであった。電源としては、磁場圧縮型発電機（Magnetic Flux Compression Generator : MFCG）を使用した。12.7mm正方形銃口レールガンを使用して一連の実験を実施し、3gの飛翔体を約10km/sにまで加速した実験があった事を報告しているが（ピーク電流約1.2MA）、速度計測に問題があり、この速度達成には疑問がある。この速度が、論文上で報告されたEMLによる速度の最高値とされているが、この事に関しては後述する。この他、新しい方式のレールガン構想についての報告がR. A. Marshallよりなされた [13]。このレールガンについての提案は1980年に開催された第14回パルスパワーシンポジウムでR. A. MarshallとW. F. Weldonによって分散型電源方式（Distributed-Energy-Store : DES）という名前で初めて提案された。それまでのレール電流供給方式はレールガン銃尾部分のみよりなされる方式であったが、DESレールガンでは電源はレールに沿って複数設置され、飛翔体移動と共に各電源が次々にレール途中より電流を供給していく。この方式ではレール電流は各電源より供給される電流の合計となり、飛翔体の移動と共に増加していくが、銃尾一点供給方式に較べてレール途中でのエネルギー損失が小さくなるという利点をもっていた。本シンポジウムでは電源が10個の場合と20個の場合の計算結果を報告した。図6にDES型レールガンの電源構成を示す（同論文より掲載）。

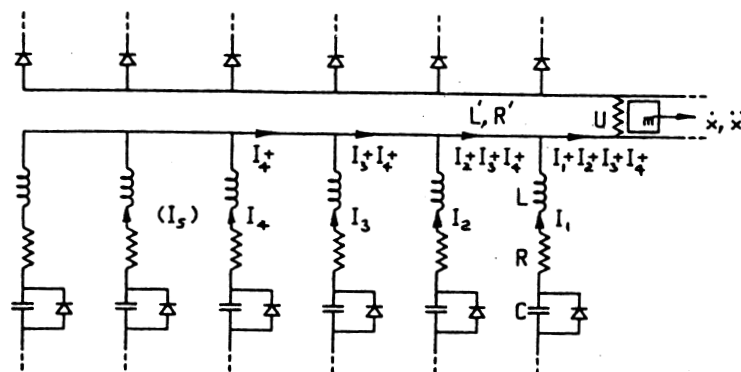


図6. DESレールガン電源構成図

DESレールガンの詳しい回路定数解析結果がJerald V. ParkerによりこのEMLシンポジウムの後、1982年J. Appl. Phys. に発表された [14]。飛翔体を超高速に加速する場合、大きすぎる加速度は飛翔体の破壊を招く恐れがあるので出来るだけ一定の加速度で加速する事が望ましい。J. V. Parkerの計算によるとDESレールガンでは電流値を一定にして加速距離が長くなっても損失が大きくなりならず、一定の加速度でもって2.5gの飛翔体を50km/sにまで加速可能であると述べている。

本シンポジウムではレールガンの発表のみでなく、誘導型EMLの発表も為され、Sandia国立研究所のグループより、彼らが θ ガンと呼んでいる誘導型EMLについての報告がなされた [15]。しかし、この θ ガン開発は初期段階で、直径約50mmアルミニウムリングを80m/sに加速しているにとどまっている。又、他の誘導型EML報告としては、プリンストン大学のK. O'Neilより彼らが開発・研究しているマストライバーの現状報告があった [16]。電源関係ではテキサス大学The Center for Electromechanics (CEM)より50MJ単極発電機 (HPG) 製作計画が報告された。その他、EMLの応用として、宇宙への応用と核融合プラズマへのペレット入射への応用が報告された。

本格的なEML開発研究が始まったばかりの1980年に開催された第1回EMLシンポジウムではあったが、既に比較的大型のレールガン装置及び大容量電源HPGの開発が進んでいる事が報告され、又プラズマアーマチャの基本的特性も理論的に解明されている事が明らかになった。EMLに関する当時の研究・開発状況を述べると、EML開発の努力は殆どレールガンに注がれていたと言えるであろう。又、誘導型EMLもマスドライバー開発等の以前よりの開発の流れが続いていたと言えるが、ETCガンについては未だ殆どその開発がなされていない状況であった。

飛翔体速度に関しては前に述べたようにR. S. Hawkeらによって10km/sという速度達成が報告されたが、その後のレールガン開発状況を考慮すればかなり疑問視される値であろう。この時点においては未だ報告されていないが、高温・高圧のプラズマがもたらす銃身内壁面よりのアブレーションによる二次アークの発生、プラズマアーマチャの質量増加といった現象が、レールガンによる高速度達成の大きな障害となり、現在に至るまでそれ以降誰一人として9km/sという速度でも達成させられなかったと言う事実がそれを物語っているであろう。(1985年AIAA 18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference で発表されたJ. V. Parkerの論文によると、16mm口径レールガンによって11km/sを達成させたとの情報をロス・アラモス国立研究所のC. M. Fowlerより得たとの事であるが、公式に報告された事はなく、その真偽の程は良く分からない)

第1回EMLシンポジウムと第2回EMLシンポジウム(1983年開催)の間の期間に発表された論文並びに報告書を一編ずつ次に紹介する。

前にも述べたが、レールガン動作においてレール中を流れる電流は表皮効果のため、レール中を一様に流れる事が出来ず、高周波領域においては殆どレール表面のみを流れる。この高周波近似における、レール表面電流分布計算がJ. F. Kerriskによって1981年ロス・アラモス研究所レポートとして出された [17]。彼は、レールを囲む金属管(銃身形状保持用)がある時と無い時の2つの条件下における円筒型及び角型レールの表面電流分布、磁場分布、レールインダクタンスを計算した。金属管が無い場合、角型レールのコーナー部の電流密度は平らな部分より大きくなり、特に内側コーナー部において最も大きな電流密度を示した。又、内側の平らな部分の電流密度は外側部分より大きな事も分かった。この計算結果と実験により測定された電流密度分布とが大体一致している事も示された。金属管がある場合、磁場が金属管内に閉じこめられるので(表皮効果によって磁場は金属管外部に浸透出来ない)、金属管に近い外側コーナー部の電流密度が最も大きくなり、レールの平らな部分の電流密度も外側部分の方が内側部より大きくなる事が分かった。レールを取り巻いている金属管には渦電流が流れるが、その電流密度はレールの角に近い部分が最も大きく、その電流の向きはレール電流の作る磁場を打ち消すため、レール電流とは逆方向に流れる事も分かった。

この他、地球より宇宙へ物資等を打ち出す輸送システムとしてのEMLの可能性を、色々な視点より調査・検討したものをまとめたものが提出された。これはNASAルイス・リサーチセンターの支援のもとに、Battelle Columbus LaboratoriesのE. E. Riceが中心になって、「Preliminary Feasibility Assessment for Earth-to-Space Electromagnetic (Railgun) Launchers」の題名で1982年に発表された [18]。著者はE. E. Riceを含めて3人であるが、3人以外にEML研究の先駆者であるRichard Marshall, John Barber, Ron Hawkeも一部執筆に協力している。内容は輸送システムとしての必要条件、システム分析、具体的なミッション検討(核廃棄物放出ミッション、地球周回軌道ミッション)、安全性及び環境アセスメント、経済的見地、EML技術アセスメントの多岐にわたり、EMLの輸送システムとしての可能性を詳しく論じた膨大な報告書である。しかし、この様な詳しく分析されたEMLの輸送システム応用報告が出されたにも拘わらず、その後具体的な且つ真剣なEML輸送システムの計画が進められる事はなかった。

5. 第2回EMLシンポジウム

(1983年10月, アメリカ・ボストン市)

(本シンポジウムで発表された内容は, IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL MAG-20, No. 2, 1984. に掲載)

5. 1. 大型レールガン開発

大型のレールガン開発については第1回EML会議に続き実用化及び高速度達成を目標とした大型レールガン開発の報告が今回のシンポジウムでもなされた。Westinghouse社のEMCKレールガン開発報告はその一つである [18]。有効加速距離4mの銃身を持ち、電源としては17.5M J単極発電機 (HPG) と4.5マイクロヘンリーの磁場エネルギー蓄積コイルより構成されている。レールガン発射実験を5回実施したが、その内プラズマアーマチャ使用の実験を3回、ソリッドアーマチャ使用の実験を2回行った。ソリッドアーマチャを使用した2回の実験の内、1回は電源エネルギー16.3MJ、ピーク電流2.1MAで317gの飛翔体を4.2km/sの速度 (運動エネルギー2.8MJ) にまで加速した。ソリッドアーマチャを使用した実験としては、この4.2km/sの速度は現在に至るまでも最も速い速度である。

もう一つの大型レールガン開発はロス・アラモス国立研究所によるHYVAXレールガン開発である。HYVAXレールガンは、15km/s以上の超高速度達成を目標として設計されたレールガンで、1段当たり1.2mの長さの銃身を9段接続して全銃身を構成し、全長13mにも及んでいる。円形の銃口形状をした銃身はスチールで作られた堅固な円形シェルの中に納められ、レール断面形状は図7に示す様に腎臓に似た形状をしている (同論文より掲載)。レールガン前段には、飛翔体に350m/sの初期速度を与えるためのヘリウムガス入射装置が設置されている。又、分割銃身の特徴を活かし、レールガンへの電流供給方式は銃尾のみより供給する通常の方式に加えて、銃身途中の数カ所より供給する分散供給方式 (DES方式) をも可能となっていた。

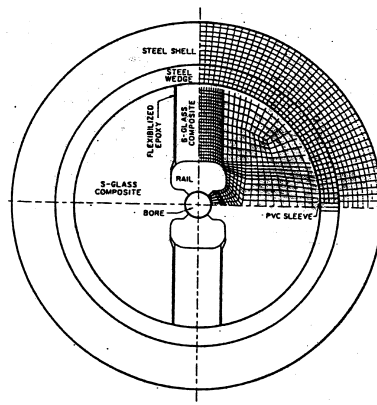


図7. HYVAXレールガン断面図

大型のレールガン開発にはレールガン本体の開発だけではなく、それを駆動する大型の電源開発も必要とされる。テキサス大学CEMより1台で10MJのエネルギーを発生させられる単極発電機 (HPG) 6台の建設計画報告がなされた [20]。テキサス大学では、複数の研究施設で構成されるテキサス大学Balcones研究センターの建設を進めていたが、Center for Electromechanics (CEM) はその研究センターの一研究部門としてEML開発を総合的に進めるために設けられ、設立後現在に至るまで米国のEML開発の中心研究機関として働いてきた。(現在では同じテキサス大学のInstitute for Advanced Technology がCEMに代わって中心研究機関となっている) 本シンポジウム開催時点では建物は未完成で、1984年11月完成予定で、そして電源本体は1985年中に完成予定であると報告している。

5. 2. 新方式レールガン開発 (DESレールガン、Augmented Railgun)

レールガン開発の大きな目的の一つである高速度達成を実現させる為に、上に述べたような電源及びレールガン本体の大型化と言った努力と共に、新しい方式のレールガンを開発する努力も為されてきた。

1, DESレールガン

第1回EMLシンポジウムでも報告された、分散型電源方式 (DES) レールガン開発が今回のシンポジウムにおいてもテキサス大学 CEMによって報告された [21]。CEMではR. A. Marshallの協力で、1980年にDESレールガン開発計画をスタートさせ、基本動作確認のための2段式DESレールガンを製作し、タイムシーケンスに従って電源2台が正しく動作することを確認した。彼らはDESレールガン前段に入射用のガス銃を設置し、ガス銃で700m/s~900m/sに加速された飛翔体がDESレールガンで予定通り加速させられることを確認した。この実験結果をもとにして、1982年に1mの長さのDESレールガンを製作し、更に1983年に4mの長さで、銃口形状が9.5mm×9.5mmの正方形をしている10段式DESレールガンを製作した。このDESレールガン最初の実験は合計電源エネルギー220kJ, 1gの飛翔体質量で行われたが、この実験で得られた飛翔体速度は3km/sであった。DESレールガン開発はこの他、Vought社でも行われ、5段式DESレールガンの前段に、初速度を与える軽ガス銃を設置したシステムの開発を進め、1983年末までには確認試験を終える予定であると報告している。これに関しては後述の(3)の軽ガス銃による初期加速を伴った実験で詳しく述べる。

2, Augmented railgun

もう一つの新しい方式のレールガン開発報告がWestinghouse社よりなされた [22]。このレールガンはaugmented railgunと呼ばれるもので、図8に示されている様に2本のレールの外側にレールを取り囲む配置で新たな電流ループを設置したものである。飛翔体を高速度にする方法として先ず考えられる事は、レール電流を大きくする事であるが、しかしジュール損失によるレールの溶融、レール同士の反発力による銃身への機械的なストレスの限界と言った問題があり、流せるレール電流には限界がある。レール電流を増大させる事なく、大きな飛翔体推進力を発生させる方法として提案されたのがaugmented railgunである。外部電流ループとレールは電氣的に直列に接続され、電流は外部電流ループ、レールそしてアーマチュアから電源へと流れる。外部電流ループを流れる電流の向きとレール電流の向きが同じため、アーマチュア内の磁場はレール電流の作る磁場と外部電流ループの作る磁場との足し算で増大し、同じアーマチュア電流でより大きなローレンツ力が得られる。Westinghouse社では長さが約86cmのaugmented railgunを製作し、電源エネルギー36kJの実験で、6.9gの飛翔体を550m/sに加速した。もし、通常型レールガンを使用して同じ条件で実験すれば、彼らのシミュレーション計算結果によると300m/sにしかならず、augmented railgunで550m/sまで加速出来た事はaugmented railgunの有効性を示すものであると報告している。このWestinghouse社のaugmented railgun実験の規模は小さいものであったが、augmented railgun開発のはしりの実験として、価値ある実験であったと言える。

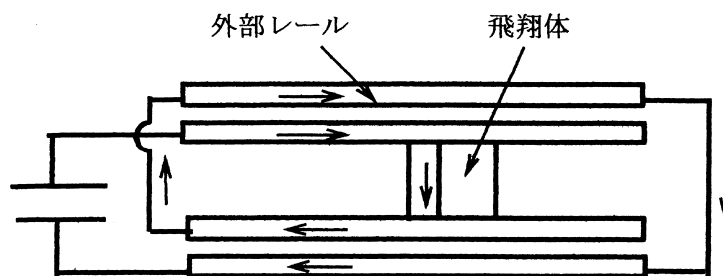


図8. Augmented Railgun

5. 3. 軽ガス銃による初期加速を伴った実験

ルールガン動作において、銃身を形成するルール、スペーサーに対するプラズマによるエロージョン損傷は銃尾付近が著しい事は前に述べた。飛翔体が静止状態より加速させられた場合、低速度状態が永く続く銃尾付近ではプラズマの熱の影響を受ける時間が永くなる。この為、銃尾付近のみが激しくエロージョンによる損傷を受ける事になるが、これは銃身の再使用という観点より見れば、望ましいことではない（このエロージョンは銃身の再使用といった運用上の問題だけではなく、これより更に深刻な問題であるルールガン動作性能の劣化というルールガン開発を妨げてきた重大な問題を引き起こしていたのであるが、未だこの時点ではその事は明確には理解されていなかった）。銃尾付近の著しいエロージョンは、飛翔体が静止状態より加速させられるために発生するという事で、軽ガス銃を使用して飛翔体に初速度を与えて、エロージョンによる損傷を軽減しようとする試みがなされた。それらの実験報告を以下に紹介する。

1) ローレンス・リバモア国立研究所の実験 [23]

同研究所のHawke等は1.5km/sにまで加速可能な1段式ヘリウムガス銃（長さ1m）と1.65m及び5.2mのルールガンとを組み合わせた装置を開発した。実施された実験は電源エネルギーで100kJという小規模な実験ではあったが、ガス銃で1.2km/sにまで加速した飛翔体を3km/sにまで加速した。この場合のルールガン動作のみの効率は6.2（%）であった。

2) GA Technologies 社の実験 [24]

500m/sにまで加速可能なヘリウムガス銃と長さ4m、口径10mmの円形銃口のルールガンとの組み合わせで、5gの飛翔体を約3.2km/sにまで加速した。

3) Vought社の実験 [25]

Vought社とテキサス大学CEMとの共同開発のDESルールガンの前段にはエロージョンの影響を軽減するための予備加速用の軽ガス銃が設置された。この装置の開発に先立ち、Vought社では軽ガス銃と通常型ルールガンとを組み合わせた実験を既に実施し、12.7mm口径、長さ3.65mの通常型ルールガンを使用して、2.5gの飛翔体を8.5km/sにまで加速した実験を行っていた。この時の実験条件は軽ガス銃による入射速度は約1.2km/s、電源エネルギー450kJ、ルール電流500kAであり、ルールガン動作効率は実に20%に達したと述べている。8.5km/sと言う速度は、この後現在に至るまで誰も達成出来ていない値で、かつこの高速度で効率が20%にも達している事は驚異的なことである。彼らは8.5km/s実験でのポリカーボネイト飛翔体の衝突によって出来たスチール板のクレーター写真を掲載しているが、2.5gのポリカーボネイトが8.5km/sで衝突した割にはクレーターの深さが浅い。彼らは速度測定の数値を掲載していないので断定は出来ないが、クレーターの深さ及び20%と言う効率を考慮すると8.5km/sの値には疑問が残る。

4) 東京工業大学の実験 [26]

上記3つの実験において使用されたガス銃は、軽ガスを高圧状態で貯めておくチャンバーと飛翔体との間の隔膜を破る事によって高圧ガスを噴出させ、そのガスの圧力によって飛翔体を加速させる方式を取っていた。この方式で軽ガスの圧力を大きくさせるには技術的問題があって、圧力を大きくする事が難しく、この方式の軽ガス銃で出せる速度は低い値である。軽ガスによって高速度に加速させる方法として開発されたのが2段式軽ガス銃と呼ばれているガス銃である。これは、先ずピストンを加速し、このピストンの運動によって予め詰められていた軽ガスを圧縮して高圧にするものである。この2段式軽ガス銃とルールガンとを組み合わせた初めての実験が東

京工業大学によって行われ、その結果が報告された。電源エネルギー600kJで2段式軽ガス銃より入射された飛翔体の加速実験を何回か行ったが、色々問題が発生し、飛翔体速度計測が出来ずその有効性を検証するに至らなかった。又、彼らは多段式レールガンの有効性を述べ、一例として2段式の場合のシミュレーション計算を行い、その結果をも報告している。レールガンと2段式軽ガス銃の組み合わせによる、彼らの実験は成功には至らなかったが、この実験報告はレールガンと2段式軽ガス銃を組み合わせた実験の先鞭をつけるもので、又EMLシンポジウムにおける日本人で最初のレールガン実験報告としても価値ある報告であった。

5. 4. その他の報告

1) アーマチャ電流分布に関する実験報告

レールガン動作において、プラズマアーマチャ内の電流空間分布は動作性能に大きな影響を与える。銃身に沿って複数配置された磁場プローブによって観測されたアーマチャ電流の空間分布をU. S. Army Ballistic Labo. のK. A. Jamison等が報告した [27]。実験は長さ1m, 12.7mm正方形銃口レールガンを使用し、電源エネルギーは20kJで、2.5gの飛翔体を1.4km/sにまで加速した。プラズマアーマチャ電流密度の空間分布を先端部がカットされたガウス空間分布をしていると仮定し、レールに沿って複数設置された磁場プローブ信号より、アーマチャ電流密度の空間分布のレール位置による変化を求めた。その結果、プラズマアーマチャ電流が小さくなると、プラズマアーマチャ長は長くなる事が分り、この実験においては、プラズマアーマチャ電流が100kAで4.4cmであったものが50kAで9cmに伸びる事が分かった。

2) エロージョンに関する報告

レールガン動作における銃尾付近のエロージョンによる著しいレール損傷は、運用上のみならず動作性能にも深刻な影響を与えると前に述べたが、レール表面の損傷及びレール材質に関する報告がオーストラリアのA. J. Bedfordによってなされた [28], [29]。彼の実験によると、銅にタングステンを染み込ましたレール材質がアークプラズマによる損傷に対して強かった。

3) レール電流密度分布計算

レール断面電流密度分布に関しては、前にJ. F. Kerriskの報告を紹介したが、本シンポジウムにおいて、彼は更に詳しいレール電流密度分布計算結果を報告した [30]。以前、彼が発表したシミュレーション計算は、電流が全てレール表面に集中して流れる場合のレール表面に沿っての電流密度計算であったが、今回、最初レール表面のみを流れていた電流がレール内部へと拡散していく様子をシミュレーション計算で示した。レール表面とレール内部の電流密度には大きな差があり、彼の計算では最大値において50倍レール表面側が大きかった。レール内部に電流が拡散するに従い、電流が流れる面積が大きくなるので、その最大電流密度が下がるのは定性的には理解出来ることであるが、その様子をJ. F. Kerriskは定量的に示した。

6. 第3回EMLシンポジウム

(1986年4月, テキサス州オースチン市)

(本シンポジウムで発表された内容は、IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL MAG-22, No. 6, 1986に掲載)

第3回EMLシンポジウムが開催される約1年前の1985年7月にAIAA 18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conferenceが米国オハイオで開催された。この会議において、高速度達成を妨げ、現在でも大きな障害となっているレールガン銃身内部での現象についての発表がなされた。それはロス・アラモス国立研究所から

の2つの研究報告であった。ひとつはJ. V. Parker, W. M. Parsons, C. E. CummingsとW. E. Foxによるもので [31], もうひとつはN. M. SchnurrとJ. F. Kerriskによる研究報告であった [32]。ふたつともレールガン銃身内壁からの壁材料の蒸発がもたらす影響を扱った論文でアブレーション・モデルと呼ばれた。若干長くはなるが、重要な報告であったのでアブレーション・モデルについて説明する。

6. 1. アブレーション・モデル

ロス・アラモス国立研究所では当時既にレールガン動作をシミュレーション化したLARGEと呼ばれる計算コードを開発していた。このLARGEにはレールガン動作を妨げる要素として飛翔体と壁との摩擦による抗力が含まれていた。確かに摩擦抗力はレールガン動作を妨げるひとつの要素ではあるが、これよりもっと深刻な阻害要素がある事をParkerが提案したとSchnurrは論文に述べている。それがアブレーション・モデルであったが、このアブレーション・モデルが生まれるきっかけはParkerの論文によると次の通りである。プラズマアーマチャへの入力パワーがほぼ一定でかつ一定な圧力状態にあるにも拘わらず、プラズマアーマチャの長さが長くなるという事は既に観測されていたが、それを説明するために持ち出されたのが銃身内部でのアブレーション現象であった。もし入力パワー及び圧力状態が一定であればプラズマアーマチャ長は大体一定であると考えの方が普通である。しかし、観測結果はプラズマアーマチャ長が時間と共に長くなる事を示していて、この矛盾を説明するにはプラズマアーマチャに連続的に物質が補給されている必要がある。この考えがアブレーション・モデルへと発展していったが、Schnurrの論文は主に銃身内壁材料が蒸発に至る過程の熱的解析を扱い、Parkerの論文は実験データとアブレーション・モデルで得られたデータとの比較結果を報告している。プラズマをアーマチャとして使用しているレールガンにおいては高温（1万度以上）のプラズマアーマチャから銃身内壁面に大量の熱が放射される。この熱輻射によって銃身内壁材料は瞬時に蒸発し、放出されたガスの一部は電離してプラズマ状態となってプラズマアーマチャに混入し、プラズマアーマチャ質量を増加させる。この結果、入力パワー及び圧力一定であってもプラズマアーマチャの全質量が時間と共に増加してその長さが長くなるというのがアブレーション・モデルによる説明である。レールガン内部でのアブレーションの存在は1982年に開催されたIEEE International Conference on Plasma Science でJ. L. Wuらによって報告されていたが、彼らはアブレーションで発生したガスが電離して、プラズマアーマチャに混入するとは考えていなかった。しかし、J. V. Parkerらの試算では、代表的なレールガン実験においてはプラズマアーマチャより放射される熱は大体1MW/cm²位になり、その為殆どの材質は数マイクロ秒の内にこの熱輻射で蒸発し、大量のガスを銃身中に発生させる。放出されたガスの内、一部のガスの温度は12000~20000度Kにまで達し、これらのガスは電離してプラズマ状態となり、プラズマアーマチャに混入する。アブレーションにより発生するガス量はプラズマアーマチャからの熱輻射に比例すると考えられるから、プラズマアーマチャに注入されるエネルギーが大きく、プラズマ温度が高い場合、プラズマアーマチャの質量増加は大きくなる（熱輻射は温度の4乗に比例する）。プラズマアーマチャの質量増加を定式化するのに、アブレーション定数 α （単位はg/MJ）なるパラメーターを導入して次の様な式を求めた。

$$dm_a/dt = \alpha \cdot I \cdot V_a$$

(Iは電流, V_a はアーク電圧 m_a はアーマチャ質量)

彼らの計算では、 α の値はレールガンに使用される材質に対して、大体数g/MJ~数十g/MJになるとしている。この質量増加を考慮した場合の飛翔体の運動方程式は次のようになる。

$$F = m \cdot dv/dt + v \cdot dm/dt$$

(m はアーマチャ質量を含めた飛翔体全質量, F は飛翔体加速力, v は速度)

右辺第2項は v という速度で動いている系の質量増加による減速を表す項で（加速力 F が零であれば速度は下がる）、速度が速くなればなる程、質量増加による加速力の損失項 $v \cdot dm/dt$ は大きくなり、速度上昇を大きく妨げることとなる。

以上がアブレーション・モデルの説明である。J. V. Parkerはアブレーションによる質量増加による損失項に加えて、M. Schnurrによって提案されたプラズマアーマチャと壁との摩擦抵抗による損失をも考慮した飛翔体運動方程式を示した。銃身中のプラズマアーマチャは流体の流れの状態を判定するレイノズル数が大きく乱流状態にあり、その為プラズマアーマチャに働く摩擦抵抗の大きさは速度の2乗に比例する。この摩擦抵抗の大きさを試算する場合、プラズマアーマチャと壁との正確な摩擦抵抗係数が重要となるが、高速飛翔体のリエントリ理論及びその実験データを参考にして、J. V. Parkerらはこの値を0.0015として、一例を挙げて計算している。その計算によると、摩擦による抵抗力は飛翔体を推進させる力の20%以上になるとの結果を出している。

AIAA会議の翌年に開催された第3回EMLシンポジウムにおいて、J. V. Parkerらは前年のアブレーション・モデルの発表に引き続いてアブレーションのレールガン動作に対する影響の実験報告を行った [33]。実験は飛翔体を使用しての実験と、飛翔体を使用せずプラズマのみが銃身中を移動するフリーアーク実験と呼ばれる2つの実験モードで実施された。飛翔体を使用しての実験はHYVAXレールガンで行われ、1.3gの飛翔体が3.08km/sにまで加速された。フリーアーク構造を調べる為に設置された磁場プローブ観測によって、フリーアークは大部分の電流が流れているアーク本体部分と、その後続く電気伝導度の低いテール部分のアークとで構成されている事が分かった。(アークと磁場プローブに関しては後で説明する)そして、テール部分のアークはアブレーションで発生したガスとの衝突でその速度が遅くなり、次第にフリーアーク本体より離れていく(アブレーションで発生したガスを銃身中より排気すると、アーク速度が速くなる事からも、速度の低下はガスとの衝突によるものであると報告している)。この2つのアークの速度差は、2つのアークとレールで囲まれた回路と鎖交している磁束の時間変化を発生させ、この回路に誘導電圧を誘起せしめる。この誘導電圧はテール部分より切り離されたフリーアーク本体後方のアーク両端の電圧を上昇させ、低い電気伝導度であったアークを再放電させる結果、プラズマアーマチャ電流を減衰させる事となる。AIAA会議(1985年)でのParker等の発表ではアブレーションで発生したガス中での再放電については言及されていなかったが、再放電で発生したこのアークはリストライク・アークと呼ばれ、プラズマアーマチャの質量増加以上にレールガン動作を阻害するものであった。(リストライク・アークは分離したアークの再放電によるものだけではなく、アブレーションで発生した高温の中性ガスの絶縁破壊で新たに生じたモードのリストライク・アークもある。)この一連のリストライク・アーク発生に至る様子を図9に示す。

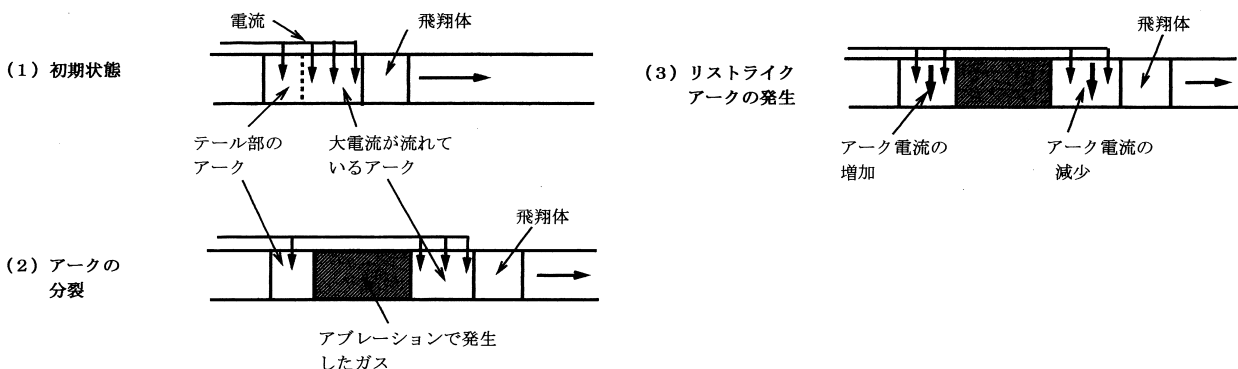


図9. リストライク・アークの発生過程

* アークと磁場プローブの説明

[アーク]

ガスの放電には3つの放電状態すなわちタウンゼント放電、グロー放電それにアーク放電がある。3つの放電状態の中でアーク放電は最終階段の放電状態を表し、電流密度が最も大きな放電である。

[磁場プローブ]

電流測定には抵抗両端の電圧を測って求める接触型測定と電流の作る磁場を測定して電流値を求める非接触型測定がある。非接触型測定に使用されるのが磁場プローブである。磁場測定用の小さなコイルを電流が流れている回路の近くに設置し、磁場の時間変化によってコイルに発生した電圧を測る事によって電流値を求める。

ルールガン実験で得られる飛翔体速度の詳しいシミュレーション計算をニューメキシコ大学のM. Shahinpoorとローレンス・リバモア国立研究所のR. S. Hawkeがアブレーション・モデルを使って行い、その計算結果をSANDIA REPORTに発表した [33]。彼らは 1) アブレーションがない場合、 2) 常にアブレーションがある場合、 3) 動作中一部の間アブレーションがある場合、これら3つのケースに分けて飛翔体速度計算を行い、その比較を行った。彼らの計算結果によると、得られる最大飛翔体速度はアブレーションが無い場合には30km/sであった速度がアブレーションを考慮すると6.6km/sにしかならなかったと報告している。

ローレンス・リバモア国立研究所では1982年超高圧下における物質状態を研究するため1gの飛翔体を12km/sに加速するルールガン装置の開発を始めた。そのために長さ1.65mと5.2mのルールガンを製作し、実験を行ってきたが、その実験結果の要約を報告した [35]。ルールガン前段には1.5km/sの速度を出せるガス銃が設置され、ルールガンとガス銃の接続後、リーマー装置によって両方の銃口内部表面を切削して、表面を仕上げると共に両装置の正確な位置合わせを行った。これらの装置による実験で得られた飛翔体速度と損失を無視して算出された予測速度（飛翔体を推進させる力を $1/2 \cdot L_0 \cdot I_a^2$ として計算し、アブレーションの影響は考慮しない）との差は4.5km/sの実験値を境にして大きく変わることが分かった。4.5km/sまでの実験においては、飛翔体速度は予測速度と一致していたが、それ以上の速度では予測速度が大きくなればなる程実際得られた速度は予測速度より大きく下回る結果となった。これらの速度減少はリストライク・アークの発生、プラズマアーマチャの伸張及び分裂、プラズマアーマチャと壁との摩擦抵抗等によってもたらされたものと報告している。

アブレーション・モデルはこれ以降多くの実験結果を説明するために適応され、それが正しいモデルであると広く認められるようになった。しかし、アブレーション・モデルが突きつけたものはルールガンで超高速度を得ることに対する大きな障害の存在で、その障害は現在に至っても残っていて、ルールガンによる超高速度達成は大きな暗礁に乗り上げてしまったままである。

6. 2. 大型ルールガンの開発

大型で信頼性の高いルールガン・システムの構築を目指したルールガン実験報告がMaxwell社とロス・アラモス国立研究所よりなされた。

1, Maxwell社のCHECKMATEルールガン [36]

Maxwell社はコンデンサーバンクのメーカーとして名高い会社であるが、ルールガン開発にも参入しCHECKMATEシステムと呼ばれるルールガン・システムの開発を進め、1985年8月より実験を行ってきた。CHECKMATEの電源系は1台当たり1MJの充電エネルギーを持つコンデンサーバンク6台で構成され、ルールガン本体の長さは5mで、5.1cm×5.1cm正方形の銃口形状をしていた。ルールガンの前段には銃身内部のエロージョンを軽減させるための、500～700m/sの速度を出せる予備加速用のガス銃が設置された。

Maxwell社ではCHECMATEレールガン・システムを使用して、1985年に20回以上の発射実験を行い、電源エネルギー4MJで106gの飛翔体を3.1km/sにまで加速したと報告している。

2. ロス・アロモス国立研究所のHIMASSレールガン [37]

CHECMATEレールガンより更に大口径の10cmφ口径のHIMASSレールガンについての報告がロス・アラモス国立研究所よりなされた。図10にHIMASSレールガンを示すが、銃身一番外側部分は厚さ約5cmのケブラー繊維で被われ、その内側に銅レールとG-10と呼ばれるFRPがレール間のスペーサーとして配置されている。電源は600kJコンデンサーバンク、爆縮型発電機、インダクターで構成され、3~4MAの電流を流せる能力を持っていて、ピーク電流2.6MAで600gの飛翔体を約1km/sにまで加速した。

爆縮発電機はコンデンサーバンクとレールガンの中に設置されているインダクターを火薬の力でコンデンサーバンク側よりレールガン側へと順次圧縮していく事によって大電流パルスが発生させる装置である。

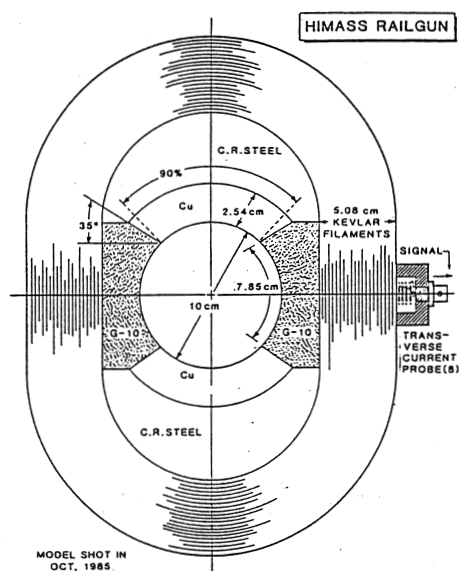


図10. HIMASSレールガン断面図

6. 3. 銃身材料実験

R. A. Marshallによって提案されたDESレールガンの開発についての報告がLTV Aerospace and Defense Companyよりなされたが、現在の開発状況を述べただけで、実際の発射実験報告はなかった [38]。

DESレールガン構想が発表された1980年より本EML会議時点の1986年までの間、DESレールガン開発が続けられていたにも拘わらず8km/s以上の速度達成が達成された事はなく、理想的な動作達成のための技術的問題が克服がされていなかったものと思われる。

6. 4. 銃身材料実験

レールガン実用化で問題となるレール表面のエロージョンは銃身の寿命に大いに関係しているが、レール材質に関しての実験報告がテキサス工科大学 [39] とUltramet社 [40] よりなされた。

テキサス工科大学ではスパーク・ギャップを用いて電極のエロージョン試験を行った。ギャップ電極のエロージョンに関してはjet plasma erosion (JPE) が大きく関与していると言われていたが、それを裏付ける結果が得られ、電極材質に関しては銅タングステンが総合的にみて最も優れていた。

Ultramet社の実験でも銅レール表面にタングステン、タングステン-レニウムをコーティングしたものが銅単独

の場合に較べてアークによる損傷がはるかに小さかったと報告している。

銅レールと共に銃身の構成部品で銅レールに挟まれているスペーサーの材質に関してはSPARTA社よりの報告があった [41]。SPARTA社ではポリカーボネイト、FRP、マコール、通常のセラミックス、最先端セラミックス等の材料に対するアークによる損傷具合を調べたが、最先端セラミックスがアークによるアブレーション、熔融に最も強いという結果が得られた。

6. 5. 単極発電機開発

レールガン連続発射に関する電源の開発報告がGE社 [42] とIAP Research社 [43] よりなされた。レールガン連続発射を行うにはそれを可能とする電源の開発が必要である。

一般的にはレールガンの電源としてコンデンサーバンクが多く使用されるが、コンデンサーバンクの急速充電には無理があり、連続発射動作の電源としては適していない。連続動作の電源としてはコンパルセーターが最も適しているが、単極発電機 (HPG) も条件によっては連続動作が可能である。しかし、これらの電源の発生電圧は低く、電圧増幅用のオープニング・スイッチが必要とされるが連続発射用電源として使用するには連続動作可能なオープニング・スイッチ (下記に説明) の開発が必要とされる。

GE社は12MJ/HPGと4Hz動作で最大500kA流せる回転式オープニング・スイッチの組み合わせの電源を開発し、250kAでの単発テストを実施した。IAP Research社でも連続動作可能なオープニング・スイッチの開発に取り組み、やはり回転方式で500kA通電が可能なオープニング・スイッチの設計を行い、500kA近い電流値での実験を行った。

HPGは小型で且つ大容量の電源として大型レールガン装置には無くてはならない装置であるが、テキサス大学CEMよりParker Kinetic Design社に電源容量60MJという世界最大のHPGを発注したとの報告があった [44]。このHPGは1台当たり10MJ容量のHPG6台より構成され、完成後テキサス大学Balcones Research Centerに設置される予定であると述べている。

又、同研究所よりこの60MJHPGを使用して、1gの飛翔体を50km/sという超高速度にまで加速させるGEDI (Guided Electromagnetic Defensive Interceptor) 実験計画についての報告があった [45]。GEDI計画は計画全体を6つの段階に分け、最初1mのレールガンでの実験で始まり、最終の6段階時点においては25mの長さのレールガンで50km/sを目指すという壮大な計画であった。しかし、8km/sという速度すら安定して得られていない当時、50km/sという目標速度は余りにも現実離れした値で、この計画の資金がStrategic Defense Initiative Office (SDIO) より出ている事を考慮すると、超高速度を目指した計画ではあるが50km/sという目標速度は政治的配慮で掲げられた値であろうと思われる。

* オープニング・スイッチの説明

インダクター (コイル) に流れている電流を急激に遮断しようとする時、インダクター両端に電流の時間変化に対応した電圧が発生する。この現象を利用して電圧の増幅を図るには電流を遮断するためのスイッチが必要であるが、このスイッチをオープニング・スイッチと呼んでいる。電流を遮断する際、オープニング・スイッチ両端にインダクターで発生した電圧が印加されるので、遮断する電流が大きい場合その電圧も大きくなり電流の遮断部が再放電し、電流遮断が非常に難しい。オープニング・スイッチとして最も使用されているのがヒューズタイプのものであるが、これは一回使用すると消滅するので、レールガン連続動作の為に連続使用可能なオープニング・スイッチの開発が必要とされる。

6. 6. シミュレーション計算

レール電流密度、磁場分布に関してはJ. F. Kerriskの計算結果を前に紹介したが、GA Technologies社のJ. A.

Leuerがレールが4本のaugemnted railgunの場合についての磁場分布計算結果を報告した [46].

又、シミュレーション計算結果としてはこの他、GT Devices社のD. A. Tidmanらよりの報告があった [47]. 彼らはアブレーションはないものとして、プラズマアーマチャ及びガン内壁の熱的状态についての計算を行った。銃身内部のプラズマアーマチャはレイノズル数が大きく、壁との摩擦で乱流状態になっていて、その熱エネルギーは抵抗加熱及びガン内壁面との摩擦で供給され、一方熱損失は対流と熱輻射とによるものとして計算した。

6. 7. 誘導型加速装置

誘導型加速装置開発については [3] EML開発の始まり の章でO'Neillらのマス・ドライバー等の開発を述べたが、その開発状況は低調で第1回、第2回EMLシンポジウムとも誘導型加速装置に関してはその宇宙輸送への応用としての報告があっただけであった。今回の第3回EMLシンポジウムではより具体的な誘導加速装置の報告がテキサス大学CEMのM. D. Driga等によってなされた。彼らは誘導型加速装置の基本的設計について述べ、更に具体的な例として2種類の誘導型加速装置を紹介した [48]。一つは1kgの飛翔体を10km/sに加速する事を目的とした装置で、全長が18mで加速時間は3.6msであった。もう一つの装置は電磁力によって航空機を打ち上げるカタパルトとしての誘導型加速装置であった。しかし、彼らの発表は以前の発表よりはより具体的ではあったが、その発表内容は基本的設計、構想を述べたのみで誘導型加速装置の具体的な製作についての記述はなかった。

7. 第3回EMLシンポジウム

(1988年4月、テキサス州オースチン市)

(本シンポジウムで発表された内容は、IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL 25, No. 1, 1989に掲載)

7. 1. J. V. Parkerの論文

1985年に発表されたアブレーション・モデルは飛翔体速度上昇を妨げている要因を指摘する事によってレールガン開発の問題点を浮き彫りにした。1978年に発表された RashleighとMarshallの論文より丁度10年が経過したこの第4回EMLシンポジウムで、このアブレーション・モデルを基としてプラズマアーマチャ・レールガンの問題点を論評した有名な論文が発表された [48]。この論文は「Why plasma armature railgun don't work (and what can be done about it)」と題されたアブレーション・モデル提唱者のJ. V. Parkerによる論文で、レールガン研究に関わる論文の中でMarshall等の論文と並んで最も多く引用された論文で、レールガン研究にとって貴重な論文である。その内容はプラズマアーマチャ・レールガンが当初の大きな期待に反して、Marshall等の実験で得られた5.9km/sの速度を大幅に更新出来ずにいる原因等を説明したものである。アブレーションで発生した高温中性ガス中での再放電(リストライク・アーク)発生機構及びその防止方法、再放電発生時におけるプラズマアーマチャ電流の減衰を表す式、アブレーションの減少をもたらす方法等について論じている。

7. 2. 各国よりのEML開発報告

前回までのEMLシンポジウムまでは殆どが米国のEML研究者からの報告で、米国以外の国からの発表は非常に少なかった。しかし、今回のEMLシンポジウムには米国以外の英国、日本、オランダ、ドイツ、フランス、イスラエルからも多くの研究成果報告があり、EML研究が益々国際的になって来た事を示していた。下記に本シンポジウムで発表された各国よりのEML開発報告を紹介する。

1) 英国

英国よりはRoyal Armament Rsearch and Development Establishment が前回の第3回EMLシンポジウムに続いて、1981年より彼らが続けてきたレールガンと誘導型加速装置の開発報告を行っていた [49]。彼らはレールガン電源として750kA通電可能な6.7MJのHPGの開発並びに1MA流せるオープニング・スイッチの開発にも着手し

ていると述べている。(このHPGについては前回の会議においてその内容を詳しく報告している。)ランチャーとしては多目的使用の25mm角形銃口のランチャー, それに初速用の火薬銃を備えた25mm円形銃口のランチャーを開発し, これらの装置で主にソリッドアーマチャ, ハイブリッドアーマチャの実験を行っていた。誘導型加速装置としては3相励磁方式と進行波励磁方式の装置を開発していると報告している。しかし, 彼らの報告内容はオープニング・スイッチ等EML装置の個々の部品開発に関するものが殆どで, 未だ部品開発の段階である事が伺える。

この他, 英国からはCulham Laboratoryよりexplosive foil使用の入射装置を備えたレールガン装置の報告があった [51]。explosive foil加速は金属箔に大電流を流して瞬時に金属箔をガス化させ, ガスの膨張する力によって飛翔体を加速するもので, レールガンへの入射装置としての使用は非常に珍しく, この入射装置によって電源エネルギー2.7kJで飛翔体を300m/sにまで加速した。又, レールガン本体の電源としては8kV, 1.1MJのコンデンサーバンクを備え, 本会議発表時点までに電源エネルギー325kJで飛翔体を約2km/sに加速したと報告している。

英国からは更に, 単極発電機の開発報告, コンパルセーターを電源としたレールガン・システムの報告があった。

2) ドイツ

ドイツからはミュンヘン工科大よりアブレーション効果とプラズマアーマチャ及び飛翔体と壁との摩擦を考慮した飛翔体加速シミュレーション計算とレールガン実験の結果を比較・検討した報告と磁場圧縮コイルを備えた同軸型プラズマ加速装置の開発報告があった [52] [53]。

ドイツからのもう一つ報告はETCガンに関するものであったが, これに関しては後述のETCガン開発のところで紹介する。

3) イスラエル

イスラエルからは3つの報告があったが, その内2つはETCガンに関する報告で, これらも後述のETCガンのところで紹介する。

4) 日本

日本からは3つの報告があり, 1つは名古屋大学核融合研究所よりの研究報告で [54], あとの2つは宇宙科学研究所よりの報告であった。 [55], [56]

5) フランス

フランスのSaint Lois市にあるFrench-German Research Institute (ISL) よりレールガン開発報告がなされた [57]。ISLは本来弾道学に関する研究所でこのシンポジウム発表時点において既に40年以上の歴史があり, 新しい分野のEMLに関する研究を1987年にスタートさせていた。ISLが有していた装置は500kJのコンデンサーバンクとヘリウムガス銃入射装置付きの長さ1.5m, 口径15mmレールガンで, この他ETCガンの開発・研究も行っていた。彼らのETCガン研究に関しても後に紹介する。

6) オランダ

オランダからは電池を使用した電源システムの開発報告がなされた [58]。

7. 3. 新方式レールガンの開発

1) SRS (Segmented Rail Surface)レールガン [59]

新しい方式のレールガン構想がJ. V. Parkerから報告された。リストライク・アークの発生はレールガン動作に大きな影響を与える事は述べたが、SRSレールガンはこのリストライク・アークを消滅させる事を目的としたレールガンである。図11にSRSレールガンの構成を示す(同論文より掲載)。この図より分かるように、2本のレールの内1本のレールは分割され、各段のレールはオープニング・スイッチ(S1-S4)を通して電流供給用のレールに接続されている。飛翔体通過と共に前段のレールのオープニング・スイッチが動作して、その段のレールを電源系より切り離す事によってリストライク・アークの電流経路を遮断し、これによってリストライク・アークを消滅させようとするものである。SRSレールガンの有効性を調べるために16分割SRSレールガン(1segmentレール長は10cm)と通常のレールガンを使用して、レール電流100kA、フリーアーク状態での比較実験を行った。銃身後方部を流れる電流はSRSレールガンの方が通常型レールガンより少なく、逆に飛翔体加速に有効となるアークの先頭付近の電流の全電流値に対する割合はSRSレールガンの方が通常型レールガンより増加し、その値は約60%より70%に増加した。この結果、アークに働く加速力が増加しアークの移動速度は約32%速くなった。しかし、彼らが行った実験での電流値は小さく高速度達成のためにはこのフリーアーク実験より遙かに大きな電流で動作するSRSレールガンを製作する必要がある。そのためには、大きな電流値で確実に動作するオープニング・スイッチが必要不可欠で、その開発こそがSRSレールガンの将来性を決めるものであった。彼らは本論文でSRSレールガンこそが8km/s突破を可能ならしめるレールガンと述べているが、大電流用のオープニング・スイッチ開発等の技術的問題を克服出来なかったせいか、この発表の後SRSレールガンがEMLシンポジウムで再び報告される事はなかった。

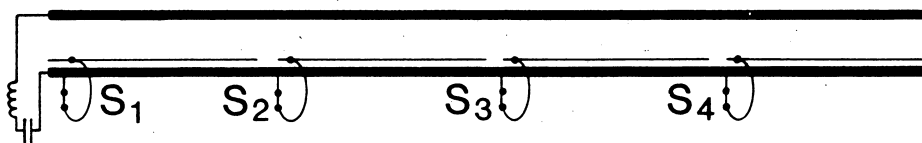


図11. SRSレールガン構成図

2) 電池を電源としたレールガン開発 [60]

レールガン電源としては殆どの場合、コンデンサーバンク、HPGが使用されてきたが、電池を電源として開発する研究もなされ、これに関しては前に述べたようにオランダよりの報告があったが、米国Eglin空軍基地においても1987年にメガワット級の電力を出せる電池システムの開発を始め、その内容を本シンポジウムで発表した。電池をEML電源として使用する利点は、比較的製造費用が安くそして電池自身が大きなエネルギー貯蔵率を持っていることである。Eglin空軍基地ではフルサイズの電池システム開発に先立ち、プロトタイプ of 電池システムを作り、それによって80kAまでの放電電流テストを行い、その範囲での動作確認を行った。このプロトタイプでの実験結果を踏まえて2MA流せるフルサイズの電池システムの製作を計画していると述べている。

7. 4. 大型レールガン並びに超高速レールガンの開発報告

1) Westinghouse社のEMACKレールガン [61]

発表当時のWestinghouse社では30MJ-1.3MAの単極発電機を有し、EMACKと呼ばれるランチャーで400gの飛翔体を1.5km/s以上の速度にまで加速した実績を持っていた。同社が開発していたEMACKレールガン・システムの構成を図12に示しているが(論文より掲載)、電源は単極発電機(HPG)とインダクター、オープニング・スイッチとで構成されている。Westinghouse社ではEMACKシステムを3段階の開発ステップを経て、最終段階で32MJ-2.2MAのHPGで繰り返し周波数が1Hz近くで連続動作可能な発射装置にするのが目標であると報告している。

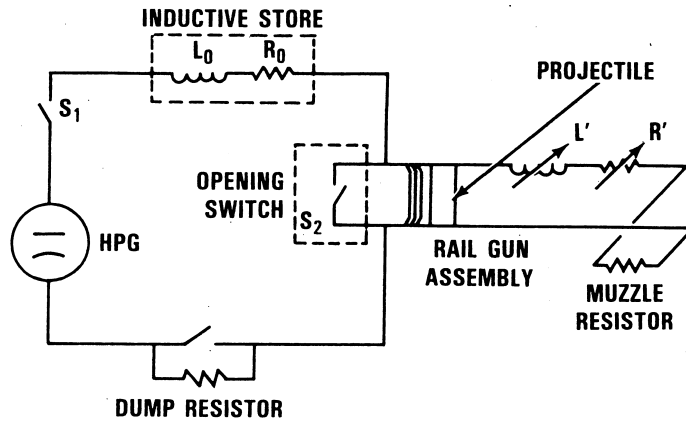


図12. EMACKレールガン構成図

2) テキサス大学CEMよりの開発報告

CEMからの報告の中で4つの論文を下記に紹介する.

1, CEMでは図13に示す様なレールガン設備一式を備えた直径5m, 深さ45mにも及ぶ縦坑型レールガン・レンジを建造し(論文より掲載), 本シンポジウム時点で既に動作可能な状態となっていると報告している. このレールガン・レンジ上部には60MJ単極発電機システム, レールガン銃身内部を切削するホーニングマシンが納められ, そのすぐ下層部にはレールガンが配置されて, レンジ最下部に設置されたターゲットに向かって飛翔体を発射する仕組みとなっていた. レールガンとしては口径45mm, 長さ3mのレールガンが標準装備となっているが, これより大型の口径90mm, 長さ10mのレールガンも製作中であると報告している [62].

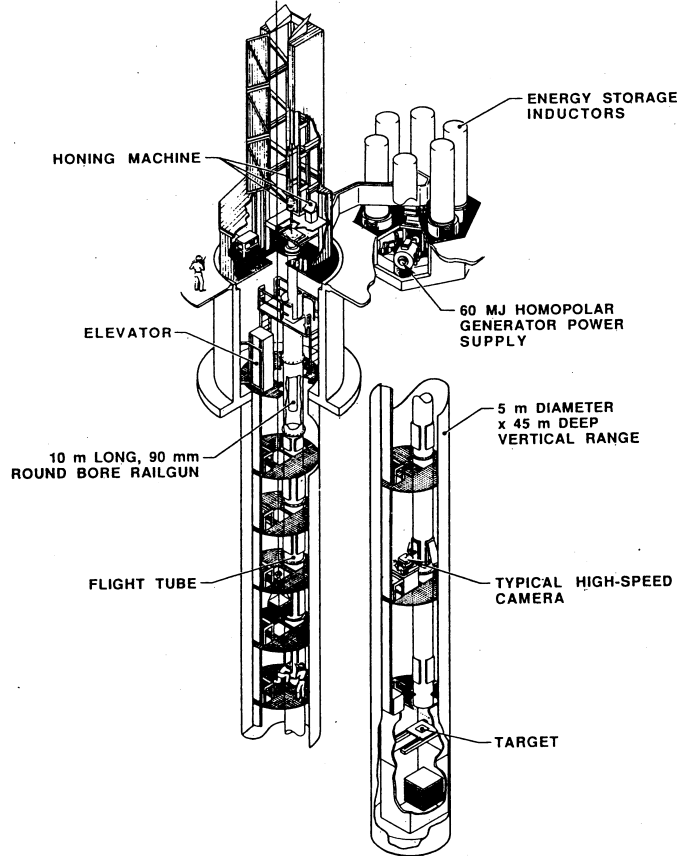


図13. CEM縦穴型レールガン・レンジ

2, 飛翔体速度で2.5~4km/s, 飛翔体運動エネルギーで9MJを目標としたレールガンの開発をCEMでは進めていたが, 本論文ではそのレールガンの構造を主に説明している. 一般的にレールガン開発には大きく分けて2つの大きな目標があり, その一つが10km/s以上の高速度を出せるレールガンの開発であり, もう一つがkg程度の質量を持つ飛翔体を3km/s位に連続発射させられるランチャーの開発である. 本研究の狙いは後者の目標を達成させる事であるが, 飛翔体運動エネルギーが9MJというのはEMLでは過去に例がなく, そのため基本的な構造設計は火薬使用の普通の砲身を参考にして決め, 口径は90mmに, 銃身長は10mにしたと述べている. 本レールガンを設計する上で考慮された事柄としては堅固である事, 口径の寸法が正確である事そしてメンテナンスに多大なる労力を伴わない事等であった. 銃身構造としては幾つかの型が提案されたが, 図14に示す様に液体の圧力で銃身の変形を抑制する型が採用された. 銃身は銅製のレールとファイバークラス・エポキシ複合材料のスペーサで構成され, その直ぐ外側をセラミックス円板が取り囲み更にその外側を2重の強力スチール管が配置されていた. 銃身の変形を抑制する液体(グリセリン)は2重の強力スチール管の間に充填されていたが, この型が採用されたのは銃身の堅固さを先ず第一に考慮した結果であった. 銃身の堅固さとは, 電磁力等の負荷がもたらす銃身の変形に対する強さを意味し, もし堅固さが不足していると銃身の大きな変形が飛翔体に蛇行運動を発生させると共にソリッドアーマチャの接触不良等をも招き, 飛翔体速度のみならず銃身の寿命にも大きな影響を与える. 銃身の堅固さを実現するには銃身材料, 銃身内部締め付け方法そして銃身全体の幾何学的構造配置が重要なポイントとなる. 銃身内部を外側より締め付ける事は動作時の銃身の変形を抑えるために重要な事であるが, 本レールガンでは多くのレールガンで使用されてきたボルトで締める方式に代わって上に述べたような241MPaの圧力の液体で締めるという方式を採用した. 液体を使用する事は銃身内部で発生した熱を循環する液体が奪い取っていく利点もあり, 連続動作においてはよりその特性が活かされる事になると述べている. フルサイズの口径90mmレールガン作製に先立ち, 1/2サイズの口径45mmレールガンを作製し, 11回の実験で1.3MAの電流を流す事に成功して, その結果2km/sの速度が得られた [63].

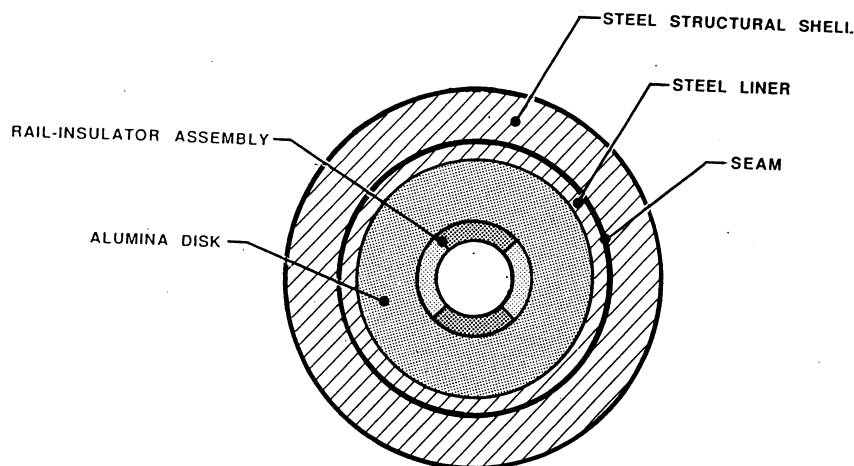
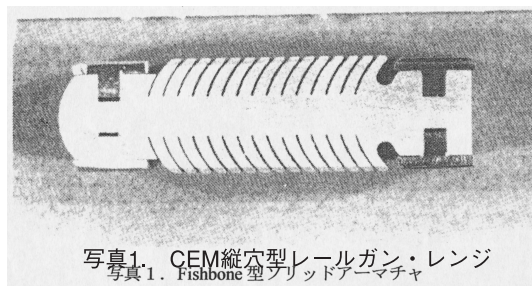


図14. CEM液体圧締め付け方式レールガン断面

3, 上記2, では9MJの運動エネルギーを持つ飛翔体を目標としたレールガン開発について述べたが, 同じ開発計画に参加しているグループより電源設置, 発射レンジの設計建設, 1/2サイズ及びフルサイズのレールガン設計・作成等を目標としたフェーズI段階についての報告がなされた. レールガン銃形状は飛翔体とサボット(飛翔体形状が銃身中を飛翔体がスムーズに移動していくには適していない場合, 飛翔体をサボットと呼ばれる物で包み込み, 銃身より発射された後サボットは飛翔体より分離され飛翔体のみが飛んでいく)の一体構造に適した円形銃口とし, アーマチャはソリッドアーマチャを採用した. 魚の背骨構造をしたソリッドアーマチャの7

回の発射実験の結果を報告しているが、重さ253gの飛翔体を1660m/sにまで加速している。(ルールガンは1/2サイズのルールガンを使用)ソリッドアーマチャ使用のルールガンにおいてはアーマチャ及び飛翔体と銃身との相互作用が重要であるが、本開発計画においてもこれを重要視し、実験だけでは無くシミュレーション計算にも重きを置き、高速度でも安定して銃身中を移動するソリッドアーマチャの開発を続けていると報告している [64].

4, CEMでは上で述べたようにFishboneと呼ばれる魚の背骨構造をしているソリッドアーマチャ(写真1)の開発を進めてきたが、本論文で3種類のルールガン(13mm角形銃口ルールガン, 32mm円形銃口ルールガン, 45mm円形銃口ルールガン)を使用してのFishboneソリッドアーマチャ実験結果を報告している。Fishboneソリッドアーマチャの前後にはチタン製のボアライダーと呼ばれるガイドが取り付けられ、中央部にはルールと接触してルール電流をアーマチャ部に導通させる複数の魚の背骨構造をした金属の導通片が付けられている。13mm口径ルールガンを使用しての実験で背骨構造の導通片全てに電流が流れる訳ではなく、アーマチャ電流を導通させるのはアーマチャ後部の導通片のみで、導通片の数を必ずしも多くする必要のない事が分かった [65].



3) G.T-Device社のEMETランチャー (GEDI計画) [66]

超高速度を目指すGEDI計画については第3回EMLシンポジウムでのテキサス大学CEMよりの報告を紹介したが、GEDI計画の一環としてG.T-Device社によって実施されたEMET方式のルールガン実験結果が同社より報告された。G.T-Device社ではEMET方式と呼ばれるルールガンの開発を以前より行っていたが、このEMETルールガンはプラズマアーマチャの発生方法として、最も多く使用されているヒューズ方式に代わってルールガン銃尾より比較的低温の高圧プラズマを注入する方式を採用した。この様子を図15に示す。ヒューズ方式は金属片の蒸発・電離過程を経てプラズマを発生させるので、飛翔体初期位置付近の銃身内部損傷及びアブレーション・ドラッグが大きくなる。この飛翔体初期位置付近の損傷を軽減させるため銃尾より外部で生成されたプラズマをルールガン内部へ注入し、その圧力で飛翔体に1~1.5km/sの初速度を与える事によって低速度で顕著となるアブレーションの影響を軽減させるのを目的としていた。G.T-Device社ではGEDI計画の一環として銃身スペーサの材料選択をも研究テーマとして選び、EMETルールガンを使用してアブレーションに大きな影響を与える銃身スペーサの材料比較試験を行った。試験したスペーサ材料はセラミックスと通常使用されているポリカーボネイトの2種類であった。セラミックスは高い熔融温度を持っている事でルールガン銃身のスペーサとして注目されていたが、割れ易いという欠点がある為大きな衝撃力が働くルールガン銃身材質としては問題があった。しかし、彼らの実験ではセラミックスのスペーサは大きな損傷もなくルールガン動作に耐える事が分かった。又、彼らの報告で興味深いのはプラズマアーマチャ長に関する事であった。スペーサとしてポリカーボネイトを使用した時、プラズマアーマチャ長は大体7cmという一定の長さで銃身中を移動したが、セラミックスの場合はルールガン中をプラズマアーマチャが90cm移動する間にその長さは6cmより大体14cmにまで長くなった。又、アークプラズマによって出来た傷跡より電流はプラズマアーマチャ中を一様に流れるのではなく電流経路の局所化すなわちフィラメンテーション現象が起きていると推測している。そして、この電流のフィラメンテーション化(電流

の不均一分布化)はプラズマアーマチャ内部のプラズマ電流に働く推進力(ローレンツ力)の空間的不均一さを発生させる事となり、この結果生じたプラズマの移動速度の違いが後方に流出していくプラズマを発生させると述べている。そして、ファイメンテーション化が著しいセラミックスの場合プラズマアーマチャより流出していくプラズマを原子質量が大きな金属レールよりの蒸発によって発生したプラズマによって補償される結果プラズマアーマチャ長が増大したのではないかと推測している。

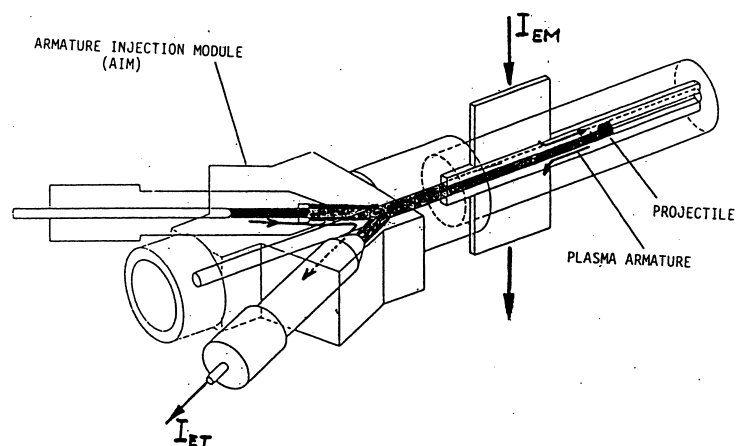


図15. EMETレールガン・プラズマ射出部

4) 初期加速用軽ガス銃を用いた高速レールガンの開発

銃身内部のアブレーションの影響を少なくするために軽ガス銃で初期加速を行った後、レールガンによって追加速する実験は1985年の第2回EMLシンポジウムで報告されたが、今回の会議でも引き続いて報告された。その内よりNew Mexico大学とLawrence Livermore国立研究所よりの報告を紹介する。

1, New Mexico大学グループよりの報告 [67]

New Mexico 大学とSandia国立研究所は共同で高圧状態方程式研究のための高速レールガン (HELEOS) 開発を行っていた。3g飛翔体を最大8km/sにまで加速可能な2段式軽ガス銃の開発を行っている事を報告し、2段式軽ガス銃とレールガン接続部のslip-joint部の構造等の説明及び1.3gの飛翔体を2段式軽ガス銃のみで約7km/sにまで加速した事を報告した。

2, Lawrence Livermore国立研究所よりの報告 [68]

Lawrence Livermore 国立研究所とSandia国立研究所は共同でStarfireと呼ばれる高速度レールガン開発計画を進めていた。このStarfire計画は前述のHELEOSレールガンを使用して3gの飛翔体を15km/sにまで加速させようとするものであった。本シンポジウムでの報告は主に構造上の問題点等に関するもので、レールガンを締め付けているVブロックの直線性検査結果、2段式軽ガス銃とレールガンとの接続部等について報告している。軽ガス銃とレールガンとの2段加速では軽ガス銃より発射された飛翔体をレールガンにスムーズに入射する事が重要であるが、彼らはレールガン銃尾にテーパを付ける事により6.3km/sでの入射速度テストに成功したと報告している。

7. 5. ソリッドアーマチャ研究報告

比較的重い飛翔体の加速にはプラズマによるアブレーションを発生させる事もなく、そして動作効率もプラズマアーマチャに較べて高い値を示すソリッドアーマチャが有利である。しかし、ソリッドアーマチャには固体同士の接触不良がソリッドアーマチャとレールとの間にアークを発生させ、ソリッドアーマチャとしての機能を消滅させると言った大きな問題がある。これに関しては色々研究されてきたが、それに関しての2つの研究報告とソリッドアーマチャを含めた4種類のアーマチャの比較報告を紹介する。

1) IAP Research社よりの報告 [69]

ソリッドアーマチャにおいてはレールとの安定した接触が最も重要な事は前に述べたが、接触面をミクロ的に見ればその接触はAスポットと呼ばれる点を通して2つの固体が接触している事が分かる。電流はこのAスポットを通して流れるのであるが、ある一定以上の電流が流れるとジュール損失でこのAスポットが蒸発し、その結果接触不良を引き起こしてアークを発生させる事となる。このアークが発生する臨界電流とソリッドアーマチャーレール間の接触圧力の関係をIAP Reseach社では銅とアルミニウムの場合の実験で調べ、接触圧力が大きい程臨界電流が大きくなる事を求めた。この事はソリッドアーマチャにおいては大きな圧力でレールとの接触をさせる必要があり、これに関する研究・開発が行われていた。そのひとつで古典的なソリッドアーマチャとしてオーストラリア国立大学で使用された山形構造のソリッドアーマチャを図16に示す。以後、色々考案されたが、図17に示すU字型はJ×Bの力がアーマチャのアーム部をレールに押しつけるためアーマチャ・アーム部分の機械的な力と電磁力とが合わさって良好な接触を示した。IAP社で重さ15gで15mmのラウンチ・パッケージを持つU字型ソリッド・アーマチャを作製し、飛翔体速度400m/sの実験で良好な結果を得た。

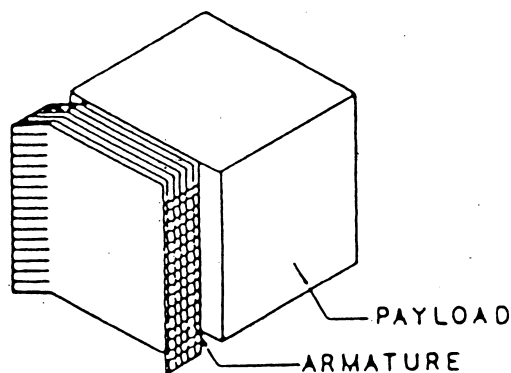


図16. 山型ソリッドアーマチャ

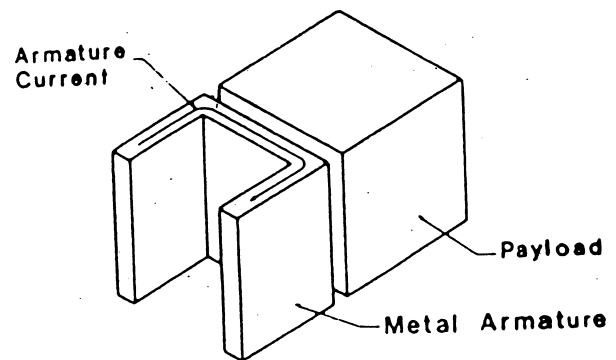


図17. U字型ソリッドアーマチャ

2) 接触抵抗の測定結果 [70]

動作中のソリッドアーマチャとレール間の接触抵抗測定をIAP社のJ. P. Barber らが行った。彼らはレールガン銃口より2本の0.17mmの細い金属ワイヤーを銃身内部へ導き、その先端をソリッドアーマチャ前部より中を通してソリッドアーマチャ側面に取り付けた。この細い金属ワイヤーとレールを一組の電圧測定回路として使用し、ソリッドアーマチャ側面とレール間の電圧を測定する事によってソリッドアーマチャとレール間の接触抵抗を求めた。この接触電圧測定よりその接触抵抗は大体 $10\mu\Omega$ である事が分かった。

3) 3種類のアーマチャの比較 [71]

プラズマアーマチャとソリッドアーマチャがアーマチャとして最も多く使用されていたが、アーマチャとしてはこの他にもハイブリッドアーマチャ、トランジションアーマチャがあり、本論文ではこれらの中でプラズマアーマチャ、ハイブリッドアーマチャ、トランジションアーマチャの3つを効率の観点より比較・検討している。この3つのアーマチャに共通する事は高速度レールガンのアーマチャとして開発されてきた事であるが、プラズマアーマチャを除いた2つのアーマチャについては実績らしい実績は殆どなかった。しかし、この2つのアーマチャはプラズマアーマチャの欠点を克服出来る可能性を持ったアーマチャとしてその将来性が期待されていた。図18にハイブリッドアーマチャを示すが(本論文より掲載)、ソリッドアーマチャとプラズマアーマチャを合わせた構造をしていて、ソリッドアーマチャの小さなジュール損失とプラズマアーマチャの高速度における安定したアーマチャ電流供給が出来る事の特徴としていた。

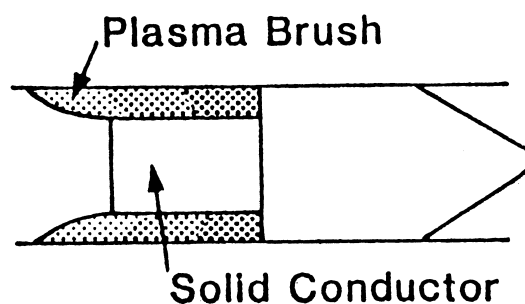


図18. ハイブリッドアーマチャ

7. 6. プラズマアーマチャの観測結果報告

プラズマアーマチャに関する実験結果報告の内より放電圧の経験則に関する報告、大口径レールガンのプラズマアーマチャ長等の観測結果それにプラズマアーマチャの光学観測結果の報告をそれぞれ紹介する。

1) プラズマアーマチャ電圧の経験則 [72]

プラズマアーマチャ両端のレール電圧はプラズマ抵抗による電圧降下、2本のレール表面における接触電圧それにプラズマ電流の時間変化による誘導電圧を合計した値である。陰極側レールでの接触電圧は銅プラズマの場合で大体15V、アルミニウム・プラズマで大体18Vの値となり、陽極側レールではプラズマアーマチャを構成している原子の電離電圧とほぼ同じ値となり銅、アルミニウムでそれぞれ大体6V、8Vとなる。接触電圧はレール材質によっても変わるが両方併せて一般的に大体20~30Vで、プラズマアーマチャ電圧全体の大体10%程度でプラズマアーマチャ電圧に占める割合は小さい。アーマチャ電流の時間変化による誘導電圧は時間変化が激しい放電初期においては大きな電圧値となるが、放電初期を過ぎて一定電流値になった後はその影響は小さくなり、レールガン動作の大部分の時間が一定電流状態である事を考慮すると誘導電圧のプラズマアーマチャ電圧に対する影響は小さいと言える。これらを考慮するとプラズマアーマチャ電圧を決めるのはプラズマ抵抗と言える。LTV Missiles and Electronics GroupのG. L. Jacksonらは彼らが所有する口径20mmDESレールガンと他のレールガンによって行われた実験データよりマズル電圧に関する多くのデータを集め、プラズマアーマチャ内部の電界(E)、レール間隔(d)そして圧力(p)に関して図19に示す様なグラフを求め、(本論文より掲載)次の様な経験式を得た。

$$E/p=9.12(pd)^{-0.77}$$

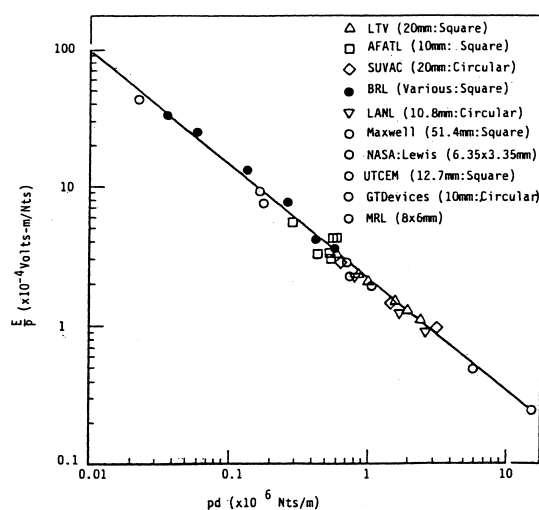


図19. 電界—レール間隔関係グラフ

2) 大口径レールガンでのプラズマアーマチャの観測結果 [73]

大口径の大型レールガンであるCHECMATEレールガン（口径寸法5cm×5cm，長さ5m）を使用してK. A. Jamisonらはプラズマアーマチャの基本特性を調べる実験を4回実施したが，これらの実験は大口径のプラズマアーマチャ・レールガンを使用したプラズマアーマチャの特性を調べる始めての実験であった．4回の実験は飛翔体質量が120gと233gで最大電流が約1.2MAと1.4MAで実施され，得られた速度は大体2km/sであった．アーマチャ長に関しては5cm正方形銃身中をメガアンペア台の電流を流した場合大体30cmになる事が分かった．又，銃身内部より放射される光の観測用のポートを側面のスペーサ部に設け磁場プローブ観測と同時に光学観測を行い，図20に見られる様な波形を得た．（論文より掲載）これらは4カ所での同時観測によって得られた信号で実線がアーマチャ電流信号を示しているが，この図より加速後半においては放射光の信号幅がアーマチャ電流分布より広がっている事が読みとれる．この放射光の幅の広がりはプラズマアーマチャの移動から遅れてプラズマアーマチャ後方に取り残されていく物質の存在を示していた．

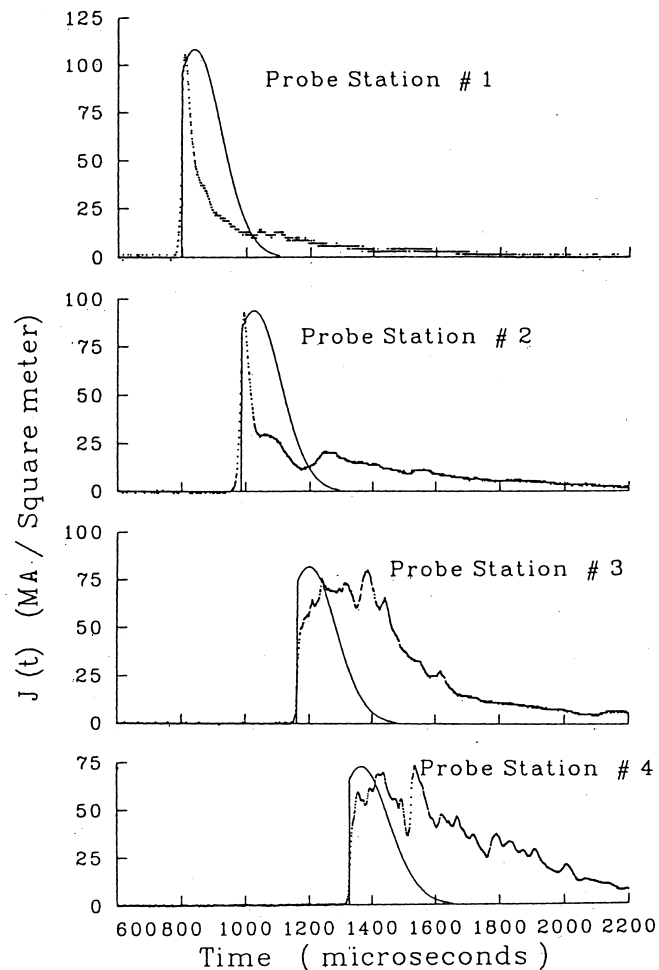


図20. 放射光と磁場の同時観測による波形

3) プラズマアーマチャの光学観測結果 [74]

University of Tennessee Space Inst. ではプラズマアーマチャを光学的見地より調べる為に銃身内部にレーザ光を伝搬させ，伝搬したレーザ信号のレベルを測定すると共にプラズマよりの放射光スペクトル観測を行った．実験は75～190kAの比較的小さな電流値で行われたが，レーザ光の伝搬信号も又プラズマよりの放射光もプラズマア

ーマチャ電流が最大になる時刻でそのレベルが非常に小さくなり、最大電流値が観測ポートを過ぎると又その信号レベルが上昇する事を観測した。これはJ. Gilligan等によって以前報告されたプラズマの輻射熱によって発生したガスが銃身のスペーサ表面を被う事によってプラズマよりの輻射熱をシールドすると言う事を証明をしたデータと言えるであろう。プラズマよりの放射光のスペクトル観測では銃身材料であるアルミニウムと銅のラインに吸収がある事が観測され、それらがプラズマに占める割合はそれぞれ大体10%であった。又このスペクトル観測でプラズマ温度は17000度より20000度の範囲にある事も分かった。

7. 7. プラズマーマチャ内部現象のシミュレーション計算 [75]

プラズマーマチャ内部の物理現象については1980年Powellらのシミュレーション計算の報告があった。しかし、前に述べたように彼らの計算は圧力分布、磁場分布等のマクロ的状態を計算したものであったが、マイマミ大学のM. A. Huertaらは2次元のMHD方程式によってプラズマーマチャ内部の電流の流れの時間変化を計算した。彼らはこの発表以降も次々とプラズマーマチャ内部のシミュレーション計算結果を発表し、この分野においてはKeefer等と並んで多くの成果を残してきた。

7. 8. ETCガンの研究報告

前回のEMLシンポジウムまでにおいては殆どその研究報告が無かったETCガンの研究報告が今回のシンポジウムではいくつか報告された。この事はEML開発に新たな開発対象が加わったと言うだけでなく、その後のEML開発の流れに大きな影響を与えるものであった。ETCガンは、前にも述べたように磁場の力で飛翔体を加速させるのではなく、放電管で発生したプラズマの圧力とプラズマの熱で発生した推進燃料よりの軽ガス（水素ガスが主成分）とで飛翔体を加速させる。飛翔体移動に伴う体積増加がプラズマ及び軽ガスの圧力を低下させるので飛翔体を長い距離加速させるのが難しく、その為目標とする飛翔体速度は大体3km/s位の低速度となっている。しかし、連続発射可能なランチャー開発の可能性がルールガンより大きいという事で注目され始め、このシンポジウム以降ルールガンと並んで電磁飛翔体開発の大きな開発対象となっていった。ここではCEM、フランス、ドイツそしてイスラエルよりの研究報告を紹介するが、この時点でのETCガン研究は放電管内部での放電状態のみに関するもので、推進燃料との相互作用は考慮されるに至ってなく、ETCガンと言うよりETガンの段階であった。

1) CEMよりのETガン開発報告 [76]

M. D. Driga等がETガンに適した電源についての報告を行った。飛翔体加速に関しては一定加速度で飛翔体を加速する事が望ましいとされているが、その為には一定圧力のガスを発生させる事が必要とされる。それを実現させるには適切な放電々流波形が要求されるが、本報告ではそれに適した電流波形を発生させるコンパルセータ電源についての報告を行っている。一定圧力で飛翔体を押していくに必要なエネルギーは体積が時間と共に増大するので時間と共に増大する。この時間と共に増大するエネルギーを供給するには放電々流波形を時間の1/2乗に比例して増大させれば良い。しかし、実際は色々な損失を考慮しなければならないので1/2乗より早い立ち上がりの電流波形が必要とされるが、それに適したコンパルセータ電源システムについて報告している。

2) フランスよりのETガン実験報告 [77]

M. Guillemot等による報告であるが、他のETガンとは違い金属抵抗又は炭素抵抗を熱して、その熱でCH²等を高圧ガス化する方式を採用している。ETCガンの放電周期は一般的には大きな値をとるが、彼らのETガンは約5マイクロ秒と短い値であるのが特徴で、数グラムの飛翔体を効率35%で2km/sにまで加速した。

3) ドイツよりのETガン実験報告 [78]

Braunschweig工科大学のJurgen G. H. SalgeらはETCガン研究の為に高圧ガス放電管を製作して実験を行った。

放電エネルギー消費率とガス圧力は放電領域の形状に大きく依存するが、電源エネルギー60kJでの彼らの実験では放電管内径10mmで最高圧力125MPaであったものが、内径を5mmにしたら400MPaにもなった。最も良い加速性能を示したのは内径5mm、放電管内部にポリエチレン粉末を入れて行った実験であった。この時の実験で3.4グラムの飛翔体を2.84km/sにまで加速したが、電源エネルギーから飛翔体運動エネルギーへの変換効率は8.7%であった。

4) イスラエルよりのETガン実験報告

Sorq Nuclear Research Centerからの2つの実験結果を紹介する。

1, A. Loeb等はETガン内部の放電領域における温度分布、圧力、プラズマ導電率等の計算を行ったが、放電管内の径方向のプラズマ温度分布は壁の周辺のみで大きく変化している事が分かった [79]。

2, N. Spector等は放電管で発生するプラズマのパラメータを測るのを目的とした実験を行った。放電管は黒いポリエチレン製で長さ5.5cm、内径4.2mmの大きさで、電流持続時間80マイクロ秒、最大電流3-24kAの放電電流で実験を行った。実験内容は放電管より打ち出されたプラズマジェットを光学観測する事によってプラズマジェットの飛翔速度、温度、密度測定を行う事であったが、プラズマジェット飛翔速度は6-20km/s、温度は1eVより低めで密度は $2.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ が得られた [80]。

7. 9. EMLの応用の報告

EMLの応用として将来の宇宙への輸送システムについてと高速度飛翔体衝突による核融合を紹介する。

1) 宇宙への輸送システム [81]

EMLシンポジウムのチュアーマンであるHarry D. FairがEMLの宇宙輸送システムとして使用する事に関する過去の報告を紹介した。本シンポジウム時点で宇宙へロケットで飛翔体を送るのに掛かる費用は重量1ポンド当たり1000ドルから40000ドルであったが、これに関してJ. S. Lewis等は米国の発射システムを考慮すると本シンポジウム時点より30年前のサターンI型ロケット以来のコストより大きな進歩はないと述べている。この事は化学ロケットを使用している限りいつまでも付いてまわる問題であった。将来の宇宙輸送システムとしてのEMLに関して1977年NASA Ames Labo.の後援により開催された夏季学校で電磁力によるマストライバーで月表面の物質を月周回軌道に乗せる事が論じられた。1980年にはJohn BarberによってEMLの宇宙輸送システムとしての応用に関する発表が、1982年には前にも紹介したがNASA/Lewis Labo.の報告集が出版された。その後、月面物資輸送に関する計画はM. D. Driga等によって更に検討され彼らのレポートが1986年、1988年に発表された。そして時の大統領が月面基地計画と太陽系有人ミッションを含んだ新しい宇宙政策方針にサインした事はNASAの方針を本来の科学技術探査へと変化させ、月面よりの月周回軌道計画の興味を増大させた。1988年にはRoss M. Jonesによって小型飛翔体を地球周回の低軌道よりEMLによって打ち上げるミッションについての検討報告があった。これらの報告を要約すると、EMLによって地球より打ち上げるメリットは

- 1, 純粋なペイロードのみを打ち上げられる
- 2, 安全性、速度制御が化学ロケットより簡単に得られる
- 3, 打ち上げシステムが地上に残る事により諸々のメリットが発生する。

であるとHarry D. Fairは述べている。

2) 衝突核融合構想 [82]

核融合の主流はプラズマ核融合であるが、EMLを使用した高速度飛翔体の衝突によって核融合を実現させようとする試みの論評をWashington大学のF. L. Ribe等が本論文で述べている。

参考文献

- [1] S. C. Rashleigh and R. A. Marshall : “ Electromagnetic Acceleration of Macroparticles to High Velocities, ” J. Appl. Phys. 49(49), pp. 2540-2542, April,1978.
- [2] Chapman, R. L, Harms, D. E. and Sorenson, G. P. : “ The Magneto-hydrodynamic Hypervelocity gun, ” 6th Symposium on Hypervelocity Impact, “ Vol. 1, pp. 319-330, 1963.
- [3] Brast, D. E. and Sawle, D. R. : “ Feasibility Study for Development of a Hypervelocity Gun, ” NASA-CR-60119, 1964.
- [4] J. P. Barber : “ The Acceleration of Macroparticles and a Hypervelocity Electromagnetic Accelerator, ” Doctor's Thesis, The Australian National University, 1972.
- [5] W. R. Snow and G. K. O'Neil : “ Construction and Testing of the 2.5 m Mass Driver, ” Princeton/AIAA DGLR 14th International Electric Propulsion Conference, AIAA Paper No. 79-2095, AIAA, New York, 1979.
- [6] I. R. McNab : “ Electromagnetic Macroparticle Acceleration by a High Pressure Plasma, ” J. Appl. Phys. 51(5), pp. 2549-2551, 1980.
- [7] John D. Powell and Jad H. Batteh : “ Plasma Dynamics of an Arc-Driven, Electromagnetic, Projectile Accelerator, ” J. Appl. Phys. 52(4), pp. 2717-2730, 1981.
- [8] John D. Powell and Jad H. Batteh : “ Two-Dimensional Plasma Model for the Arc-Driven Rail Gun, ” J. Appl. Phys. 54(5), pp. 2242-2254, 1983.
- [9] Fedric J. Young and William F. Hughes : “ Rail and Armature Current Distributions in Electromagnetic Launchers, ” IEEE Trans. on Magnetics : Vol. MAG-18, pp. 33-41, 1982.
- [10] Daniel W. Deis and Ian McNab : “ A Laboratory Demonstration Electromagnetic Launcher, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 16-22, 1982.
- [11] A. L. Brooks, R. S. Hawke, J. K. Scudder and C. D. Wozynski : “ Design and Fabrication of Large and Small-Bore Railguns, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 68-81, 1982.
- [12] R. S. Hawke, A. L. Brooks, F. J. Deadrick and J. K. Scudder : “ Results of Railgun Experiments Powered by Magnetic Flux Compression Generators, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 82-93, 1982.
- [13] Richard A. Marshall : “ The TAERF Scientific Railgun Theoretical Performance, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 11-15, 1982.
- [14] Jerald V. Parker : “ Electromagnetic Projectile Acceleration Utilizing Distributed Energy Sources, ” J. Appl. Phys. 53(10), pp. 6710-6723, 1982.
- [15] T. J. Burgess, E. C. Cnare, W. L. Oberkampf, S. C. Beard and M. Cowan : “ The Electromagnetic θ Gun and Tubular Projectiles, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 46-59, 1982.
- [16] William R. Snow, R. Scott Dunbar, Joel A. Kubby and Gerard K. O'Neil : “ Mass Driver Two: A Status Report, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, pp. 127-134, 1982.
- [17] J. F. Kerrisk : “ Current Distribution and Inductance Calculations for Rail-Gun Conductors, ” LA-9092-MS, UC-34, Los Alamos National Laboratory, 1981.
- [18] Eric E. Rice, Lisa. A. Miller and Richard W. Earhart : “ Final Technical Report on Preliminary Assessment for Earth-to-Space Electromagnetic (Railgun) Launchers, ” NASA-CR-167886, 1982.

- [19] D. W. Deis and D. W. Scherbarth : “EMACK Electromagnetic Launcher Commissioning, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 245-248, 1984.
- [20] J. E. Floyd and T. A. Aanstoos : “A New High Current Laboratory and Pulsed Homopolar Generator Power Supply at the University of Texas,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 377-380, 1984.
- [21] L. D. Holland, : “The DES Railgun Facility at CEM-UT,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 256-259, 1984.
- [22] D. A. Fiske, J. L. Wu and Y. C. Thio : “The ELF-1 Augmented Electromagnetic Launcher, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 287-290, 1984.
- [23] R. S. Hawke, W. J. Nellis, J. Rego, A. R. Susoeff and G. H. Newman : “Rail Accelerator Development for Ultra-High Pressure Research,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 291-293, 1984.
- [24] J. D’ Aoust, K. Cobb, R. Creedon, L. Franklin, B. Lucas, P. Miller and A. Peuron : “Development of a Modular EML System for the Air Force Arament Laboratory, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 294-297, 1984.
- [25] Michael M. Tower and Charles H. Haight : “Development of a High-Energy Distributed Energy Source EM Railgun with Improved Energy Conversion,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 298-301, 1984.
- [26] Shu USUBA, Ken-ichi KONDO and Akira SAWAOKA : “Development of Railgun Accelerator Combined with Two-Stage Light Gas Gun,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 260-263, 1984.
- [27] K. A. Jamison, M. Marqez-Reines and Henry S. Burden : “Measurement of the Spatial Distribution of Current in a Rail Gun Arc Armature,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 403-406, 1984.
- [28] A. J. Bedford : “Rail Damage in a Small Caliber Rail-Gun, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 348-351, 1984.
- [29] A. J. Bedford : “Rail Damage and Armature Parameters for Different Railgun Rail Materials, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 352-355, 1984.
- [30] J. F. Kerrisk : “Electrical and Thermal Modeling of Railguns, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, pp. 399-402, 1984.
- [31] J. V. Parker, W. M. Parsons, C. E. Cummings, and W. E. Fox : “Performance Loss due to Wall Ablation in Plasma Armature Railguns,” AIAA 18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA-85-1575, 1985.
- [32] N. M. Schnurr and J. F. Kerrisk : “Numerical Studies of Ablation and Ionization of Railgun Materials, ” AIAA 18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference,” AIAA-85-1576, 1985.
- [33] Jerald V. Parker and W. Mark Parsons : “Experimental Measurement of Ablation Effects in Plasma Armature Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1633-1640, 1986.
- [34] M. Shahinpoor and R. S. Hawke : “Exact Solution to the Governing Dynamic Equations of Plasma Armature Electromagnetic Railguns,” Sandia Report, SAND87-0473 · UC-38, 1987.
- [35] R. S. Hawke, W. J. Nellis, G. H. Newman, J. Rego and A. R. Susoeff : “Summary of EM Launcher Experiments Performed at LLNL,” IEEE Trans. on Magnetic s, Vol. MAG-22 , pp. 1510-1515, 1986.
- [36] Michael M. Holland, G. Mark Wilkinson, A. Peter Krickuhn and Rolf Dethlefsen : “Six Megajoule Rail Gun Test Facility,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1521-1526, 1986.

- [37] E. L. Zimmerman, C. M. Fowler, E. Foley and J. V. Parker : “HIMASS Electromagnetic Launcher at Los Alomas,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1823-1825, 1986.
- [38] Charles H. Haight and Michael M. Tower : “Distributed Energy Store (DES) Railgun Development, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1499-1505, 1986.
- [39] A. L. Donaldson, M. Kristiansen, A. Watson, K. Zinsmeyer and E. Kristiansen : “Electrode Erosion in High Current, High Energy Transient Arcs,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1441-1447, 1986.
- [40] J. T. Harding, R. B. Kaplan, H. O. Pierson, R. H. Tuffias and J. L. Upshaw : “Chemically Vapor Deposited Materials for Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1506-1509, 1986.
- [41] Stuart N. Rosenwasser and R. Daniel Stevenson : “Selection and Evaluation of Insulator Materials for High Performance Railguns Bore,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1722-1729, 1986.
- [42] R. Berg, A. Breitenstein, S. Carr, L. Coffman, H. Cook, J. Kolawole and R. Quay : “Preliminary Results from the Multishot Opening Switch and Barrel Testing at ARDC, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1399-1403, 1986.
- [43] Tim McCormick and John Barber : “A 500 kA Repetitive Opening Switch, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1613-1618, 1986.
- [44] W. L. Noble, J. M. Weldon and J. H. Gully : “Final Manufacture and Assembly of a Modular 60 MJ Pulsed Homopolar Power Supply,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1623-1627, 1987.
- [45] R. L. Laughlin, J. H. Gully, K. E. Nalty, and R. C. Zowarka : “System Design of the Ultra High Velocity GEDI Experiment,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1578-1583, 1987.
- [46] J. A. Leuer : “Electromagnetic Modeling of Complex Railgun Geometries, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1584-1590, 1986.
- [47] D. A. Tidman, S. A. Goldstein and N. K. Winsor : “A Rail Gun Plasma Model,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1763-1771, 1986.
- [48] M. D. Driga, W. F. Weldon and H. H. Woodson : “Electromagnetic Induction Launcher, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, pp. 1453-1458, 1986.
- [49] Jerald V. Parker : “Why Plasma Armature Railgun don ’t Work (and What can be done about It), ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 418-424, 1989.
- [50] S. A. Atkinson : “United Kingdom EM Gun Programme,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 57-62, 1989.
- [51] R. A. Burden, J. W. Gray and C. M. Oxley : “Explosive Foil Injection (EFI) Pre-Accelerator for Electromagnetic Launchers,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 107-110, 1989.
- [52] S. Ainger and E. Igenbergs : “Friction and Ablation Measurements in a Round Bore Railgun, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 33-39, 1989.
- [53] A. Hudepohl, M. Rott and E. Igenbergs : “Coaxial Plasma Accelerator with Compression Coil and Radial Gas Injection,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 232-237, 1989.
- [54] K. Ikuta : “A Study of Ablation Effects for an Axisymmetric Electromagnetic Accelerator, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 249-251, 1989.
- [55] K. Sato, M. Yanagisawa, A. Yamori and N. Kawashima : “Experimental Measurement of Railgun Performance,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 500-503, 1989.

- [56] M. Yangisawa, K. Sato, A. Yamori and N. Kawashima : “Development of Railgun Accelerator at ISAS, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 616-620, 1989.
- [57] V. Wegner and F. Jamet : “Electromagnetic Acceleration Activities at the French-German Research Institute Saint-Louis (ISL),” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 587-590, 1989.
- [58] W. Karthaus, W. J. Kolkert and J. Nowee : “Preliminary Results of a Battery-Based, Multi Megawatt 200 kA Pulsed Power Supply,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 284-289, 1989.
- [59] Jerald V. Parker : “The SRS Railgun: A New Approach to Restrike Control,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 412-417, 1989.
- [60] James B. Cornette and Leo E. Thurmond : “Prototype Development of a Battery Power Supply at the Electromagnetic Launcher Research Facility,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 121-126, 1989.
- [61] H. A. Calvin, W. Craddock, B. D. McKee and C. Dunham : “EMACK Improvements, Present and Future,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 111-115, 1989.
- [62] D. R. Peterson, J. H. Price, W. F. Weldon, R. C. Zowarka, C. W. G. Fulcher and J. H. Hahne : “Design and Operation of a High-Energy Railgun Facility,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 438-442, 1989.
- [63] J. H. Price, E. P. Fahrenthold, C. W. G. Fulcher, D. R. Peterson, W.F. Weldon and R. C. Zowarka : “Design and Testing of Large-Bore, Ultra-Stiff Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 460-466, 1989.
- [64] R. C. Zowarka, Jr., D. R. Peterson, J. H. Price and W. F. Weldon : “9 MJ Laboratory Gun and Range at The University of Texas at Ausrin,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 653-661, 1989.
- [65] J. H. Price, C. W. G. Fulcher, M. W. Ingram, D. E. Perkins, D. R. Peterson and R. C. Zowarka : “Design and Testing of Solid Armatures for Large-Bore Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 467-473, 1989.
- [66] F. D. Witherspoon, R. L. Burton and S. A. Goldstein : “Physics Experiments on the GEDI EMET Facility, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 605-609, 1989.
- [67] M. Shahinpoor, J. R. Asay, C. H. Konrad and C. A. Hall : “Use of a Two-Stage Light Gas Gun as an Injector for Electromagnetic Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 514-518, 1989.
- [68] A. R. Susoeff, R. S. Hawke, J. K. Balk, C. A. Hall and M. J. McDonald : “Fabrication Issues and Technology Development for HELEOS,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 541-545, 1989.
- [69] John P. Barber and Charles L. McDnald : “The Mechanical Design of Armatures,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 79-82, 1989.
- [70] Brian L. Mass, John P. Baber and David P. Bauer : “In-Bore Armature Contact Voltage Measurement, ” IEEE Trans. on Magnetics, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 353-356, 1989.
- [71] Lindsey D. Thornhill and Jad H. Batteh : “Armature Options for Hypervelocity Railguns, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 552-557, 1989.
- [72] G. L. Jackson, N. M. Tower and C. H. Haight : “Scaling Relationships for Plasma Driven Railguns,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 252-255, 1989.
- [73] K. A. Jamison and Henry S. Burden : “Measurements of Plasma Properties from a Large Bore, Plasma Aramature Railgun,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 256-261, 1989.
- [74] Dennis Keefer and Roger Crawford : “Optical Diagnostics of Railgun Plasma Armatures, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 295-299, 1989.

- [75] M. A. Huerta and G. C. Boyton : “Two Dimensional Time Dependent MHD Simulation of Plasma Armatures, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 238-242, 1989.
- [76] M. D. Driga, M. D. Ingram and W. F. Weldon : “Electrothermal Accelerators: The Power Conditioning Point of View,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 147-152, 1989.
- [77] M. Guillemot, A. Nicolas and M. Roche : “Projectile Launching by an Electrothermal Gun, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 207-209, 1989.
- [78] Jurgen G. H. Salge, Thomas H. G. C. Weise, Ulrich E. Braunsberger, Harald Fien, Markus J. Loffler, Wolfram Witt, Dieter Zwingel and Klaus Zocha : “Mass Acceleration by Plasma Pulse, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 495-499, 1989.
- [79] A. Loeb and Z. Kaplan : “A Theoretical Model for the Physical Process in the Confined High Pressure Discharges of Electrothermal Launchers,” IEEE Trnas. on Magnetocs, Vol. 25, pp. 342-346, 1989.
- [80] N. Spector, Z. Kaplan, A. Loeb, B. Brill and J. Levinson : “Confined High Pressure Discharge Experiments, ” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 538-540, 1989.
- [81] Harry D. Fair, Phil Cosse, Carolyn P. Meinel and Derek A. Tidman : “Electromagnetic Earth-to Space Launch,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 9-16, 1989.
- [82] F. L. Ribe and D. C. Barnes : “Review of Impact Fusion Concept,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, pp. 20-26, 1989.