



パルスパワーとその応用

Pulse power and it's application

1 まえがき

パルスパワーは、電磁エネルギーを時間的空間的に圧縮した状態を言う。雷では、上昇気流によって雷雲と大地の間の大きな空間に長時間かけて静電エネルギーを蓄積し、そのエネルギーが1瞬のうちに細い雷道に時空的に圧縮された形で放出されるので、雷撃は自然界に存在する典型的なパルスパワーである。そのエネルギーは1回の雷撃当たり $3 \times 10^8 \text{ J}$ 程度で、100kWhに満たないが、1回の雷撃の持続時間は $30 \mu\text{s}$ 程度で、パワー（電力）にすれば 10^7 MW となり、我が国の真夏の全電力の50倍以上に達する。このエネルギーが3 kmの雷道に一樣に分布すると仮定すると、1 m当たりのエネルギーで葉缶一杯の水を温めると温度上昇は30度にも達しないが、立ち木に落ちればそのパワーは幹を引き裂く能力を持っている。

パルスパワー技術の原点は、雷の研究や電力システムの雷防御に関連した人口雷発生技術に求めることが出来る。すなわち、1923年にドイツ・ブランシュバイク大学のMarxは、多数のキャパシターを並列に充電した後にギャップを使って直列に接続して高電圧パルスを発生している（マルクス回路）。その後1975年頃までは、パルスパワーのハイパワーをSDI（Strategic Defence Initiative）¹⁾ に象徴される軍事面に応用する観点から秘密裏に研究され、パルスパワー技術は著しく発展し、1975年の高出力ビーム会議、1976年のIEEEによるパルスパワー国際会議を境にしてパルスパワー技術の民生への応用が促進されるようになった²⁾。

したがって、一般に入手出来るパルスパワー技術情報は、最初は国際会議論文集からが主であったが、1980年代になって著書も見られるようになり、我が国でも1990年代になって「パルスパワー」を中心に取り扱った著書^{3)・5)} が出るとともに、今度の電気工学ハンドブック改訂版でもパルスパワー技術が章として取り上げられることになっている。

本稿では、パルスパワー技術の基礎とその応用分野の概略を紹介することとした。

2 パルスパワーシステム

パルスパワーは、通常マイクロ秒からナノ秒領域の短いパルスの高電圧（kV～MV級）、大電流（kA～MA級）をダイオードや放電回路の負荷に供給することによって作られ、負荷での幾度かのエネルギー変換を通して、最終的に種々の分野で応用される。

大出力電子ビーム発生装置を例にとって、図-1にパルスパワーシステムの構成を示す。エネルギーは左から右に向けて流れ、システムはエネルギー蓄積、パルス成形、パルス伝送・制御、負荷でのエネルギー変換のカテゴリーよりなる。

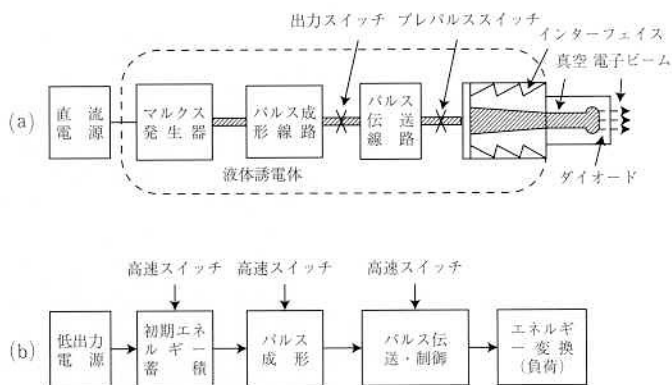


図-1 パルス電子ビーム発生システムの例(a)とパルスパワーシステムの構成(b)

図-1の負荷は、真空中に置かれた正負の電極系（ダイオード）である。電極間に瞬時に高電圧を印加すると、陰極表面の微小な突起から電子が飛び出し、これが引き金となって大量の電子がほぼ同じエネルギーを持って陽極に向かって運動し、所謂電子ビームが得られる。

一般に、パルスパワー発生部と負荷とは周囲媒質が異なるので、それらの領域を分割する高耐電圧のインタフェースが必要である。

パルスパワーシステムでは短時間ではあるが巨大な電力が流れ、各カテゴリー内及びカテゴリー間ではエネルギーの高速転送が行われる。この電力輸送は絶縁媒体中のポインティングベクトル（電界と磁界のベクトル積）でなされ、絶縁媒体は電界に対して著しい非線形性を持つので、電気絶縁技術と高速転送のためのスイッチ技術がパルスパワー発生におけるキーテクノロジーになる。

2.1 初期エネルギー蓄積

パルスパワー発生に用いられる代表的エネルギー蓄積法は、キャパシターを用いる静電エネルギー蓄積法、インダクターを用いる誘導エネルギー蓄積法、回転体の慣性を利用する運動エネルギー蓄積法、高性能火薬による化学エネルギー蓄積法に分けられ、表-1のようにそれぞれには得失があり、目的によって使い分けられる。

表-1 初期エネルギー蓄積法の主な特性値

項目	蓄積法	誘導エネルギー $(\frac{1}{2}Li^2)$		運動エネルギー $(\frac{1}{2}I\omega^2)$	化学エネルギー (火薬)
		静電エネルギー $(\frac{1}{2}CV^2)$	常温コイル		
最大蓄積エネルギー密度 (J/m ³)		~ 10 ⁵	~ 10 ⁷	~ 10 ⁷	~ 10 ¹⁰
蓄積時間 (オーダ)		min. ~ hour	sec.	min. ~ hour	min.
放出時間		0.1 ~ 10 μ s	0.1 ~ 10ms	sec. ~ hour	ms ~ min
蓄積エネルギー		< 60MJ	< 100MJ	< 1GJ	< 100MJ

静電エネルギー蓄積法は、高電圧大電流電源用として広く使用されており、蓄積エネルギーの転送に短絡スイッチを必要とする。

誘導エネルギー蓄積法は、蓄積エネルギー密度をキャパシターの場合より2桁程度大きくできるが、蓄積時間が短い。パルスパワー発生は、図-2のスイッチS₁（開放スイッチ）を開放して $v = Ldi/dt$ を発生させると同時にスイッチS₂を閉じて負荷に電流を転送することによって行う。低電圧大電流源によって長時間かけてエネルギー蓄積する超伝導パルスパワーシステムの開発も検討されている。

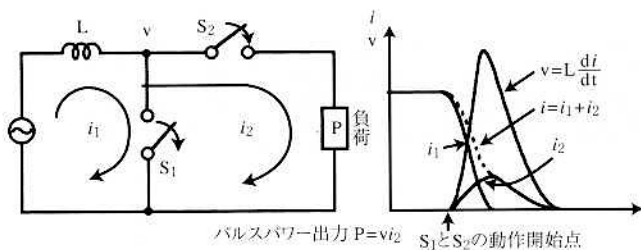


図-2 誘導エネルギーの放出回路

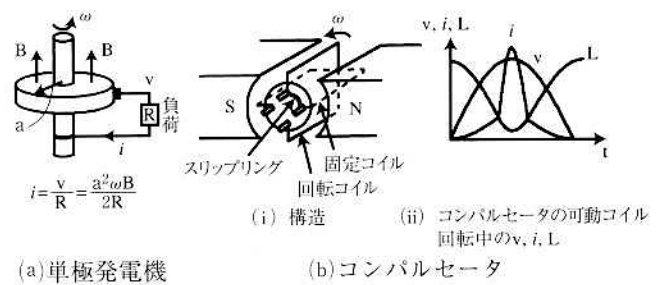


図-3 単極発電機とコンパルセータの原理

運動エネルギー蓄積法は、図-3のように発電機の内部インダクタンスを小さくする工夫をした単極発電機とコンパルセータがあり、エネルギーは回転子自体または直結のフライホイールに蓄積される。コンパルセータは、同図(b)のように回転コイルと固定コイルを直列につなぎ、(c)に示すように最大電圧発生時にインダクタンスが最小になるようにしてパルス電流を発生する。大容量発電機は、各種の核融合実験装置及びフラッシュランプ用に開発されている。

化学エネルギー蓄積法では、火薬類を爆発させて得られる運動エネルギーを電磁エネルギーに変換してパルスパワー発生に応用する。これには、励磁された閉ループの面積を爆発力で減少させることにより高磁界大電流を発生させる方法と爆発による導電性の高速ガス流を磁界中で運動させてEHD作用で大電流を発生させる方法があり、図-4は前者の例である。図で、爆発前後の閉回路電流とインダクタンスをそれぞれL₀、L、I₀、Iとすると、I = I₀ L₀ / Lであり、火薬の爆発によって閉回路の断面積が縮小されるのでL₀ > Lになり、電流が増幅される。火薬の単位重量当たりのエネルギーは、他のエネルギー蓄積法に比べて桁違いに大きく、パルスパワーシステムを小形に出来るが、単発動作である。

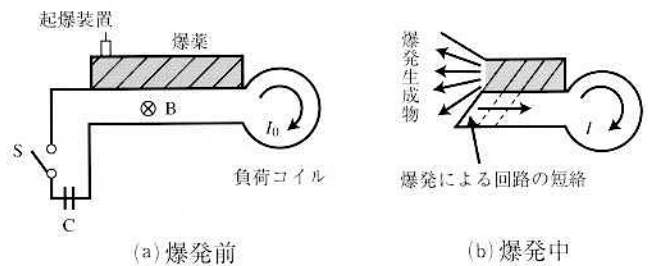


図-4 爆薬発電機の原理図

2.2 パルス成形

負荷が要求するパルスパワーは、高電圧・大電流の矩形波である場合が多い。このために、初期蓄積エネルギーを高速転送することによって得られるパルスパワーを必要な

振幅と幅の矩形波に近づけるために、パルス成形、圧縮、昇圧を行う。

パルス成形

パルス成形は、スイッチを使って負荷に適した立ち上がり時間、パルス幅、波高値等を形成することで、矩形波成形にはパルスフォーミング線路（PFL）としての単一線路（シングルライン、図-5(a))とブルームライン線路（図-5(b))、並びにパルスフォーミング回路（PFN）が、三角波の発生にはスパイラル線路が使用される。一般に、PFLはパルス幅がnsから μ s領域の成形に、PFNはより長いパルス幅の成形に使用される。図-5(a)、(b)で $Z_0 = Z$ と整合を取った場合、出力電圧波の振幅と幅はそれぞれ $V_0/2$ 、 V_0 及び $2l/v$ 、 $2l/v$ となる。ただし、 v は線路内におけるサージの伝播速度である。電源は直流又は $2l/v$ より十分に長いパルス幅のパルス電源であればよく、高い矩形波電圧を得たい場合にはマルクス回路が使用される。

キャパシタに蓄えたエネルギーを誘導性負荷に転送する場合、電流は減衰性振動になるが、極性変化のない長いパルス幅の電流を負荷に流すためにはクローバ回路が使用される。

エネルギー圧縮とパルス圧縮

パルスパワー圧縮には、エネルギーの時間的圧縮と空間的圧縮があり、空間的圧縮はテーパ線路のようにエネル

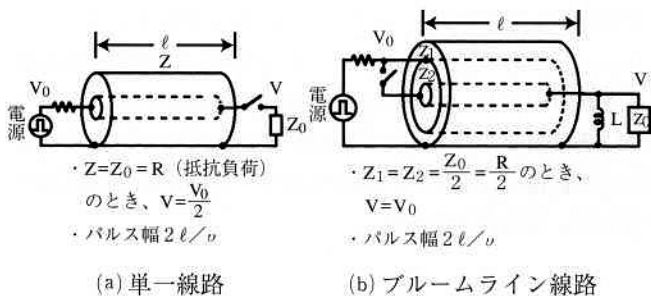


図-5 矩形波発生用パルス形成線路 (v :サージ伝播速度)

ギー伝送過程で行う場合とレンズによる集光やプラズマの自己ピンチ等のように負荷領域で行う場合がある。図-6は、真空中にアルゴンガスを円柱状に噴出させ、そこにパルス電圧を印加して円筒状プラズマを作り、放電電流とその自己磁界によるローレンツ力でプラズマをピンチさせたときにX線が発生する過程で、空間的圧縮過程を示す例である。

時間的圧縮は、基本的には図-7のC-L共振回路で行う。(a)図はパルス圧縮の原理図で、最初にCの蓄積エネルギーをSを閉じてLを経由してC₁に転送し、つぎにSを開くと同時にS₁を閉じてC₁のエネルギーをC₂に転送する。このとき、C_{i+1}-L_{i+1}-C_{i+2}よりなる閉路の共振周波数がC_i-L_i-C_{i+1}の回路より高い場合パルスは圧縮される。上記のプロセスを繰り返してエネルギーをC₃、C₄に転送すると次第にパルス幅が短くなる。図(b)では、C_iのエネルギーがC_{i+1}に転送される段階でインダクタL_iを未飽和から飽和に変化するように設計しておく、インダクタが(a)図のインダクタンス及びS_iを開放してS_{i+1}を閉じる動作の機能を持ち、パルス圧縮が行われる。このような可飽和リアクトルを磁気スイッチとよぶ。

パルス昇圧

パルス成形や圧縮は電圧が低いほど容易なので、比較的低い電圧でこれらを行った後に昇圧を行うのが得策である。パルス昇圧には、1) パルストランス法、2) 線路積み重ね（ラインスタック）法、3) LC反転回路法、4) 誘導電圧重畳法、5) インピーダンス変換線路法、6) 開放スイッチ

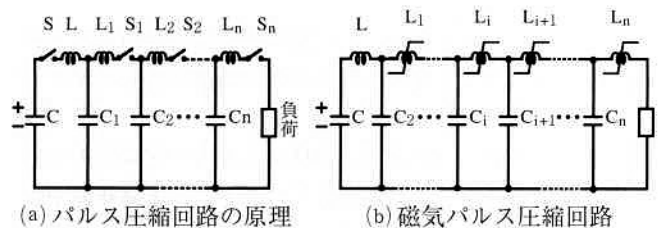


図-7 磁気パルス圧縮回路

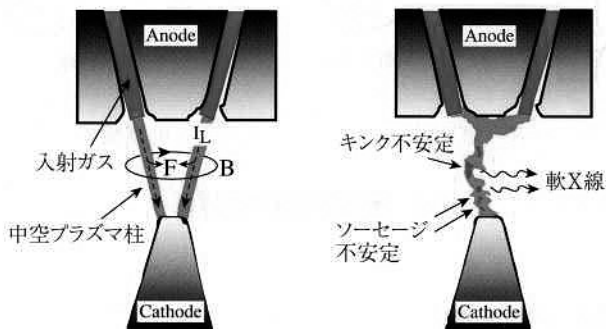


図-6 ガスパフZピンチの原理とピンチプラズマ形成過程

法等がある。誘導電圧重畳法は、変圧器作用による電界を空間で重畳する方法で、線形誘導加速器（インダクションライナック）に使用される。開放スイッチ法は、負荷を含む誘導性回路を後述のプラズマエロージョンスイッチで高速開放する方法で、パルス圧縮法の一つでもある。

2.3 パルスパワー伝送・制御

線路とインタフェイス

巨大なパルスパワーを負荷に伝送する線路は、機能から見るとパルスパワーの波形を変えずに伝送する線路、電圧・電流を増幅する変換機能を持つ線路（インピーダンス変換線路；テーパ線路）、極性を反転する線路があり、絶縁媒質から見るとガス絶縁線路、液体（含む水）絶縁線路、真空絶縁線路がある。負荷がダイオードの場合は、真空へのパルスパワー伝送になるので、パルス発生部と負荷部との間には図-1のように真空インタフェイスを設ける。負荷へのパルスパワー伝送の限界は、線路並びに真空インタフェイスの絶縁耐力によって左右されることが多い。真空絶縁線路では、パルスパワー進行に伴って線路導体表面の微小突起がプラズマ化してもパルスによる自己磁界でプラズマ中の電子を元の導体に引き戻すことにより高い絶縁耐力を保持する方法が取られる。これを磁気絶縁線路（図-8）という。また真空インタフェイスでは、導体表面や絶縁物表面で発生した電子が絶縁物表面に衝突しないように電子の軌道を磁界又は適切なインタフェイス表面形状にすることにより制御して、耐電圧を高くする。

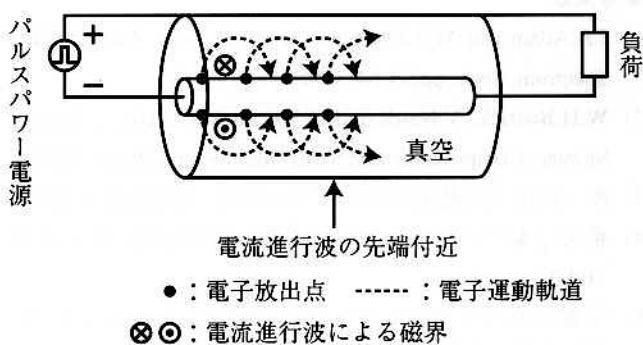


図-8 磁気絶縁線路

スイッチ

パルスパワーシステムでは、エネルギーの高速転送制御のためのスイッチが不可欠で、これには開放スイッチと短絡スイッチがある。スイッチの電流容量はMAにも及び、具備すべき特性も厳しいので、目的によって種々のスイッチが使用されている。

開放スイッチには、真空遮断器、プラズマエロージョンスイッチ、プラズマフォーカス、拡散放電制御形スイッチ、金属拡散プラズマアークスイッチ、クロスフィールドチュー

ブ、ヒューズ、爆薬スイッチがある。

また、短絡スイッチには、スパークギャップスイッチ（媒質により真空、気中、液体、固体、沿面放電の各スイッチがあり、気中には自爆形、トリガトロン形、電界歪み形、レーザトリガ形等がある）、サイラトロン/イグナイトロン、半導体スイッチ、磁気スイッチなどがある。

スイッチ技術の詳細は、専門書があるので参考にするが良い。^{6) 7)}

3 パルスパワー計測

パルスパワー技術で使用される電圧・電流のパルス波形は、大きな振幅Aで狭い幅Tの矩形波が好ましい場合が多いが、この矩形波をフーリエ変換すると図-9のようになる。図から明らかなように、Tが極めて小さいので、パルス電圧・電流には高い周波数成分を持つ連続スペクトルが含まれており、その測定には極めて高い周波数応答の測定器を必要とする。また、パルスパワー分野では電圧・電流の他に、負荷側においては荷電粒子ビーム、X線、プラズマ、レーザ等の計測が必要になる。さらに、高速高電圧・大電流を取り扱うために誘導ノイズ対策が不可欠である。

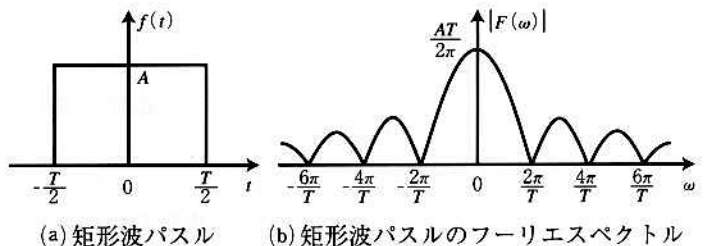


図-9 矩形波パルス中の振幅密度スペクトル

4 パルスパワー応用

電磁エネルギーは絶縁体内に存在するときエクセルギーとして利用できるが、その絶縁体は先にも述べたように電界に対して著しい非線形性を示す。ハイパワーの輸送と利用には高電界を伴うので、それが長い時間続く場合は絶縁体が完全破壊する。パルスパワーは継続時間が極めて短いので、過渡的ではあるが絶縁空間を完全破壊させることなく高電界場を作ることが出来、これによって比較的容易に高エネルギー粒子ビーム、高密度励起粒子、高密度高温プラズマ、超高密度磁気エネルギーを空間に創出できる。したがって、パルスパワー応用では、先ずパルスパワーを高エネルギー高密度プラズマ、荷電粒子ビーム、電磁化速度、放電（励起粒子）、超高磁界等に一次変換され、更に必要があればそれらを二次、三次変換してレーザー、マイクロ波、X線、高エネルギー荷電粒子の発生、核融合、物体加速、新物質の創成、物質加工等に応用される。物質加

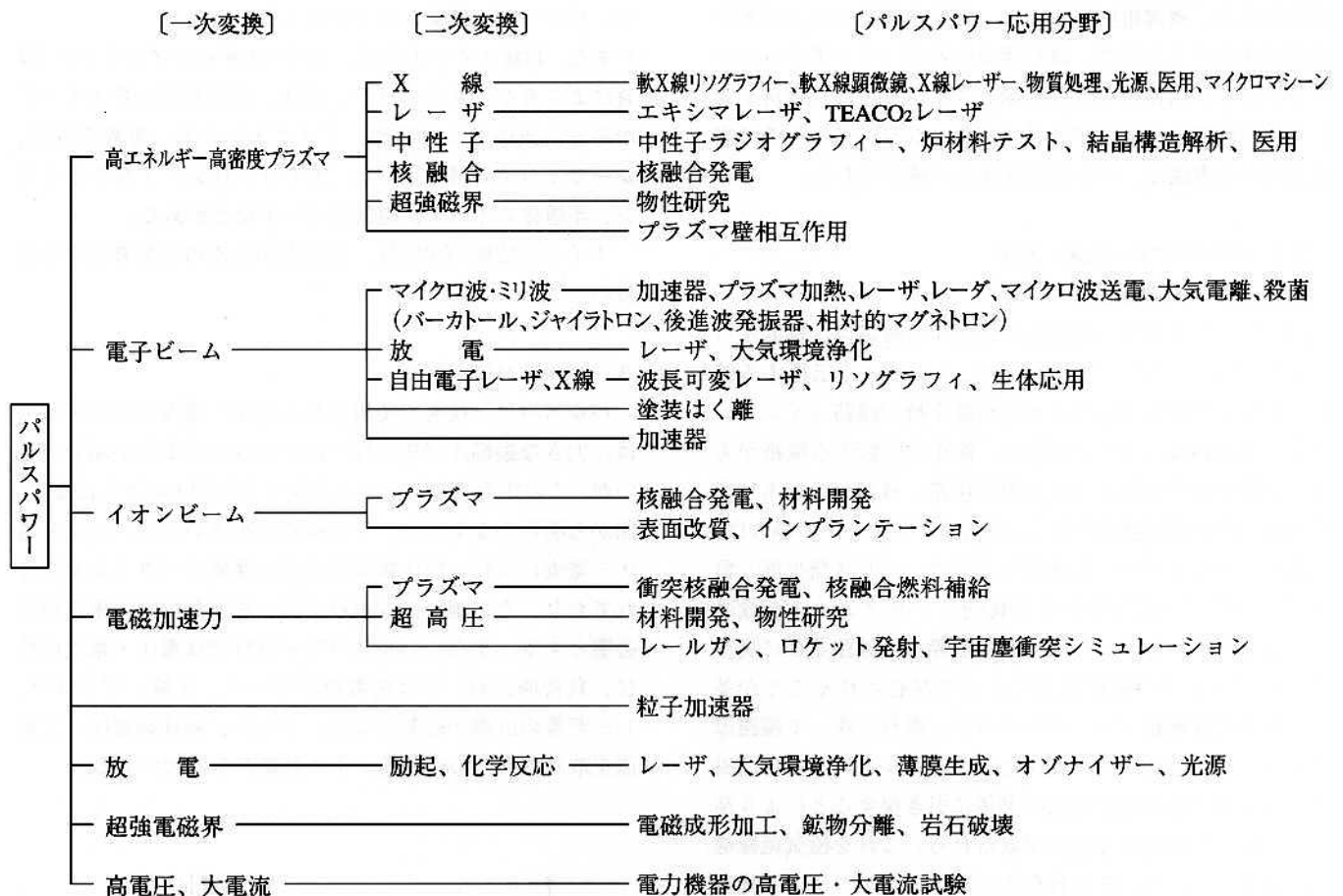


図-10 パルスパワー応用分野

工の一例を挙げると、パルスパワーでレーザーやイオンビームを発生させ、これであブレーションしたりスパッタリングすることにより、熱融解過程を経ずに高品質の機能性薄膜の作製、石英などの誘電体の微細加工、高硬度薄膜生成、超微粒子作製などが可能である。

パルスパワー応用分野をまとめると図-10になる。パルスパワー技術は、先にも述べたように古くは電力機器開発において利用されてきたが、最近ではレーザー、粒子ビーム、粒子加速、X線の分野で応用され、さらに物質処理、食品加工殺菌、バイオ、環境保全などに関連する分野への応用も模索されている。

5 むすび

パルスパワー分野の基礎は、電気工学、レーザー工学、プラズマ理工学、材料工学などに関係する学際領域にあり、その応用はたとえば上記のあブレーションやスパッタリング技術に見られるように物質の熱溶解過程なしに物質加工、機能膜生成が出来る、従来技術では不可能であったことを可能にしつつある。

参考文献

- 1) J.A.Adam and M.A.Fischetti (ed.) : "Star Wars" ,IEEE Spectrum, Sept., pp.34-64 (1985)
- 2) W.H.Bostick, V.Nardi and O.S.F.Zucker (ed.) : Energy Storage, Compression, and Switching, Plenum Press (1976)
- 3) 原・秋山 : 高電圧パルスパワー工学、森北出版 (1991)
- 4) 柳父 (編) : パルスパワー技術とその応用、オーム社 (1992)
- 5) 京都ハイパワーテクノロジー (編) : パルスパワー工学の基礎と応用、近代科学社 (1992)
- 6) A.Guenther, M.Kristiansen and T.Martin (ed.) , Opning Switches, Plenum Press (1987)
- 7) I.M.Vitkovitsky, High Power Switching, Van Nostrand Reinhold Co., (1987)