

パルス電磁エネルギーの発生・応用の最新技術動向

パルス電磁エネルギーの発生と制御調査専門委員会編

目次	
1. はじめに	3
2. パルス電磁エネルギーの発生	3
2.1 電磁エネルギーの蓄積	3
2.2 スイッチング技術	6
2.3 高繰り返し技術	10
3. パルス電磁エネルギーの計測	19
3.1 高電圧計測	19
3.2 大電流計測	21
3.3 光学計測	25
4. パルス電磁エネルギーの変換	29
4.1 パルス電子ビームの発生	29
4.2 パルス光源	30
4.3 パルスマイクロ波	34
4.4 パルスX線	38
4.5 高速飛翔体	42
5. パルス電磁エネルギーの応用	45
5.1 材料・加工	45
5.2 環境	54
5.3 生物・医療	56
5.4 工業	61
6. 理論とシミュレーション	62
6.1 数値シミュレーション	62
7. おわりに	64

パルス電磁エネルギーの発生と制御調査専門委員会委員

委員長 江 偉 華(長岡技術科学大学)
顧問 八 井 淨(長岡技術科学大学)
幹事 勝 木 淳(熊本大学)
幹事補佐 土 田 秀 一(電力中央研究所)
委員 青 木 尊 之(東京工業大学)
足 立 成 人(神戸製鋼所)
市 川 幸 美(富士電機)
植 竹 直 人(日立製作所)
岡 村 勝 也(東 芝)
佐久川 貴志(明 電 舎)
河 野 康 則(日本原子力研究所)
後 藤 達 美(日本高周波)
清 水 尚 博(日本ガイシ)

委員 千 林 曉(日 新 電 機)
徳 地 明(ニ チ コ ン)
藤 井 貞 夫(川 崎 重 工 業)
堀 田 和 明(ウ シ オ 電 機)
堀 岡 一 彦(東京工業大学)
松 沢 秀 典(山 梨 大 学)
山 本 昌 志(石川島播磨重工業)
行 村 建(同 志 社 大 学)
小 椋 一 夫(新 潟 大 学)
高 木 浩 一(岩 手 大 学)
河 村 讓 一(住友重機械工業)
協力者 原 田 信 弘(長岡技術科学大学)
石 田 大 典(石川島播磨重工業)

1. はじめに

パルスパワー技術は、20 世紀後半の数十年の間に、核融合研究による推進力を受けて飛躍的な進展を遂げた。エネルギー蓄積、スイッチング、パルス整形、高電圧絶縁など、様々な面において技術と経験が蓄積され、パルスパワーシステムの制御性と信頼性が著しく高まった。その結果、応用分野は核融合、加速器などの研究領域から、材料、環境、医療など一般産業応用まで広がってきている。一方、新しい応用はパルスパワー装置に対して新たな性能を求めている。特に繰り返し率、寿命、コストなどの要素について、従来のパルスパワー技術だけでは対応できない点が多く、新しい技術的対応策が求められた。

このような背景のもとに、近年パルスパワーの発生と応用に関する研究開発において、新しい技術的展開が注目されている。パワー半導体素子の性能向上により、これを用いたパルスパワー電源の応用範囲が広がり、産業用パルスパワー装置の主役になりつつある。また磁気パルス圧縮は、磁性体の性能アップとコストダウンによりさらに普及を伸びている。応用面では、排ガス処理、極端紫外光源、生物制御などは脚光を浴び、早くも話題となっている。

これらの研究動向を把握し、今後の新展開に対応するために、電気学会「パルス電磁エネルギーの発生と制御調査専門委員会」は平成 13 年 7 月に設置された。三年間の活動期間中、委員たちは上述関連事項を中心調査研究し、さらに 8 回委員会を通じて情報交換を行った。本報告書は、これらの委員会活動の結果をもとに、委員会メンバーが分担して執筆したものである。

2. パルス電磁エネルギーの発生

2.1 電磁エネルギーの蓄積

2.1.1 容量性エネルギー蓄積

コンデンサ（キャパシタ）で電荷として静電エネルギーを蓄積してパルスパワーを発生させる方式は最も一般的なエネルギー蓄積方式であり、多くの装置に用いられている。代表的な機器としてマルクスバンクや磁気パルス圧縮回路、パルスフォーミングライン(PFL)等がある。

コンデンサによるエネルギー貯蔵は誘電体媒質中に電界のエネルギー形態となり、コンデンサの蓄積エネルギー密度 U_c は次式で表せる^{(1), (2)}。

$$U_c = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 [J/m^3] \quad (2.1)$$

ここで、 D :電束密度、 E :電界強度、 ε_0 : 真空の誘電率、 ε_r :媒質の比誘電率である。高エネルギー密度を得ることの他にパルスパワー発生装置に用いられるコンデンサに対する要求としては

- ① 高速に充放電ができること。
- ② 高電圧で使用できること。
- ③ 高ピーク電流に耐えること。

等があげられる。表 2.1 は代表的な物質の比誘電率と絶縁耐力を示す^{(3)~(6)}。

またコンデンサに蓄えられるエネルギーは

$$W_c = \frac{1}{2} CV^2 [J] \quad (2.2)$$

と表される。 C :コンデンサの静電容量、 V :充電電圧である。よって、高耐圧で静電容量の大きなコンデンサはエネルギー蓄積に好適である。

表 2.1 物質の比誘電率と絶縁耐力

誘電体となる物質	比誘電率	絶縁耐力 [kV/mm]
チタン酸バリウム	~5000	—
チタン酸ストロンチウム	~2000	—
ポリエチレン	2.3	150
ポリプロピレン	2.1	300
油浸紙	~5.9	200
絶縁油	2.2	27
水（数 μ 秒の脉冲充電時）	80	20
SF ₆ ガス（1 気圧）	1	8
空気	1	3

コンデンサは電力用として発達してきた歴史があり誘電体材料としては油浸紙、ポリプロピレンフィルムと油浸紙の複合誘電体、ポリプロピレン等のプラスチックフィルムのみのものである。これら誘電体材料とアルミ箔を使用した電極箔を合わせて巻かれたコンデンサ素体を直列・並列に接続して絶縁油を真空含浸し金属ケース等に納めている。他に上記フィルム状誘電体の表面に薄い電極を金属蒸着した構造で、絶縁破壊した場合でも破壊点の一部蒸着電極が消失し、絶縁機能を自己回復(Self Healing)する SH 型と呼ばれるコンデンサもある⁽⁷⁾。近年、パルスパワー向けに高繰り返し高速充放電に耐える低インダクタンスのコンデンサが多く市販されるようになってきている^{(8), (9)}。

水は短時間領域（ μ s オーダ以下）においては比較的高い絶縁耐力を持ち、常温で 80 の大きな比誘電率を有する。そのため従来からパルス伝送回路で水パルスフォーミングライン等に用いられる。体積抵抗率は水中のイオン分により変化するのでイオン交換樹脂などを用いて常時特性を維持する必要がある。通常は大型の装置に利用される。

近年、開発が盛んになっている高繰り返し磁気パルス圧縮電源の回路概略を図 2.1 に示す。エキシマレーザに適用