

## 第1回の内容

- ・ 講義概要, 講義日程, 評価方法, 演習問題
- ・ 第1章:パルスパワー工学の基礎

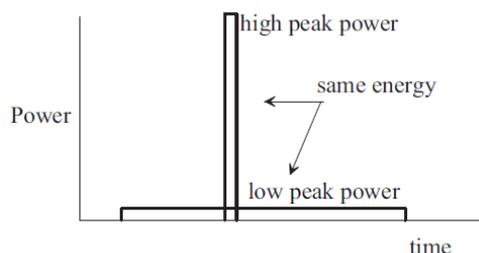
## キーワード

エネルギー, パワー, パルスパワー, 極限状態,  
ナノ秒高電圧パルス, 非線形現象,  
電界集中係数, 表皮効果

## 第1章:パルスパワー工学の基礎

パルスパワーの定義, パルスパワー工学の歴史と分類, 応用分野と応用装置, パルスパワー技術の特長, 装置の基本構成, 電磁気学的基礎知識, 容量性および誘導性エネルギー蓄積回路

## 1.1 パルスパワーとは



パルスパワーの定義:パルス状の電力(パワー)で, 通常時間的空間的に高度に圧縮された状態

- ・ エネルギー  $E$  [J] がパルス幅  $\tau$  [s] に放出されたときのパワー  $P$  [W] は

$$P = \frac{E}{\tau} \quad (1.1)$$

- ・ 小エネルギーでも,  $\tau$  小であれば高パワー
- ・ 全世界の総発電容量:  $10^{12}$  W, パルスパワー:  $10^{14}$  W の例
- ・ パルス幅: nsec , 電圧ピーク 数 10k~MV

## 代表的装置名

Lasers, Precision Thrusters, Simulators (nuclear weapons effects simulators), X ray generators, Precision /Localized Hardening of Metals, Micromachining, Magneforming, Shock forming, Particle accelerators, Fusion research, Detonators, Cigarette lighters, Communications, Radar, Acoustic Ranging, Lidar, Impulse welding, Magnetizing units, Electric guns, Toys, etc.

## 1.2 パルスパワー工学の歴史と分類

## 発展の経緯

- ・ 1925 マルクス回路(Marx generator)
- ・ 1945 コンデンサ放電
- ・ 1965 ハイパワービーム発生
- ・ 1985 磁気パルス圧縮回路付きエキシマレーザ用電源
- ・ 1995 全固体電源
- ・ 2000 マイクロパルスパワー

## 研究分野別の大分類

- ・ 軍事:
- ・ 1960~1970: 核融合・プラズマ分野
- ・ 1980~ : 上記+加工・材料分野
- ・ 1990~ : 生物・環境分野

## 1.3 パルスパワー技術の特徴

1. 極限状態を簡単に実現できる従来の延長線上にはない新しい技術
2. ナノ秒スケールの高電圧, 高速パルス電力を負荷に加える技術, 計測技術
3. 極めて大きな電界強度とエネルギー密度による過渡, 非線形現象が対象

## 1.4 パルスパワー装置の構成

短パルス高電圧発生のため複数の回路要素が必要

- 1) 電源, エネルギー源
- 2) エネルギー蓄積要素
- 3) スイッチ素子
- 4) パルス整形回路
- 5) インピーダンス整合回路
- 6) 負荷



エネルギーの蓄積形態

- 静電エネルギー(Electrostatic Energy)
- 磁気エネルギー(Magnetic Energy)
- 運動エネルギー(Kinetic Energy)
- 化学エネルギー(Cheical Energy)
- 位置エネルギー(Potential Energy)

## 1.5 基本的な電気磁気学的知識

## A) 基礎方程式

- 1) クーロンの法則  $F = qE$
- 2) ビオ・サバールの法則  $F = qv \times B$
- 3) ローレンツ力  $F = q(E + v \times B)$
- 4) マクスウェルの方程式(真空中)

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot}B = \mu_0 j + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\text{div}B = 0$$

- 5)  $D = \epsilon E, B = \mu H, J = \sigma E$

$H$  (A/m),  $D$  (C/m<sup>2</sup>),  $B$  (T),  $H$  (A/m<sup>2</sup>),  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>)

$\epsilon \equiv \epsilon_0 \epsilon_r, \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\mu \equiv \mu_0 \mu_r, \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m

$\sigma$  [S]

## B) 電界・磁界の計算例

- 1) 円柱導体回りの磁界

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- 2) 同軸円筒導体の磁界

$$(1) r > b: B_\phi = \frac{\mu I}{2\pi r} = 0$$

$$(2) a < r < b: B_\phi = \frac{\mu I}{2\pi r} \neq 0$$

- 6) ファラデーの法則  $V = -\frac{d\phi}{dt}$

$$\oint E \cdot dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds$$

- 7) アンペアの法則  $\oint H \cdot dl = NI$

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 NI$$

- 8) ガウスの法則  $\oint E \cdot n ds = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

- 9) ポインティングの定理

$$\text{div}(E \times H) + E \cdot i + \left( E \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0$$

- 1 項: 領域表面から出入りするエネルギー流
- 2 項: 電流に対してなされる仕事
- 3 項: 空間に蓄えられる電界, 磁界のエネルギーの変化分

- 3) 並行平板の磁界

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I}{W} \left( H = \frac{I}{W} \right)$$

- 4) 点電荷による電界

$$E_r = \frac{q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$$

- 5) 線電荷による電界

$$E_r = \frac{\rho_L}{2\pi r \epsilon_0}$$

- 6) 並行平板のキャパシタンス

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 W \ell}{d}$$

- 7) 同軸円筒のキャパシタンス

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \ell}{\ln \frac{b}{a}}$$

- 8) 単位長さあたりの並行平板のインダクタンス

$$L = \frac{\mu_0 d}{W}$$

- 9) 単位長さあたりの同軸円筒のインダクタンス

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

- 10) 並行平板のインピーダンス

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon} \frac{d}{W}}$$

- 11) 同軸円筒のインピーダンス

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon} \ln \frac{b}{a}}$$

- 12) 同軸円筒内部の電界集中

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{b}{a}}, \quad f = \frac{E_{\max}}{E_{\text{average}}} = \frac{\frac{b}{a} - 1}{\ln \frac{b}{a}}$$

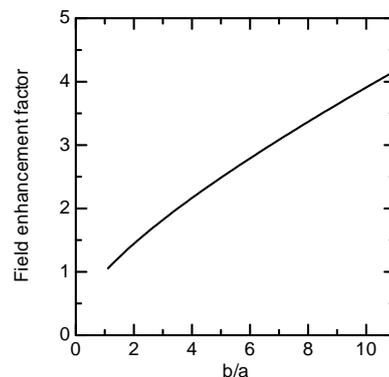
$f$ : 電界集中係数

- 13) 誘電体と気体との電界分担

$$E_1 = \frac{\epsilon_r V_0}{d + x(\epsilon_r - 1)}, \quad E_2 = \frac{V_0}{d + x(\epsilon_r - 1)}$$

$$x \ll d, \quad E_1 = \frac{\epsilon_r}{d} V_0$$

- 14) 表皮効果
- $J_z = J_0 e^{-\frac{r}{\delta}}, \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$



$$\sigma_{\text{Cu}} = 5.8 \times 10^7 \text{ S}, \quad \delta_{\text{Cu}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}}$$

$$f = 100 \text{ MHz}, \quad \delta_{\text{Cu}} = 6.6 \times 10^{-6} \text{ m}$$

### 1.6 容量性エネルギー蓄積方式

電界のエネルギーをコンデンサ(キャパシタ)に蓄積して、高速に放出する方式のこと

#### 1.6.1 電界のエネルギーと容量性蓄積

上下の電極間に電圧  $V (= Q/C)$  まで充電する過程は、上部電極の電位が  $V$  のとき電荷を  $dq$  増加させるのに必要な仕事量は、 $dW_e = V \cdot dq$  だから

$$W_e = \int_0^Q V \cdot dq = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2C} Q^2 = \frac{1}{2} CV^2 \quad [\text{J}]$$

#### 1.6.2 容量性エネルギーの蓄積・放出回路

- ・ 初期状態, スイッチ OFF,  $V_c = 0$
- ・ スイッチ  $S_0$  ON, 充電抵抗  $R_0$  を介して充電
- ・  $V_c = V_0$  の後, スイッチ  $S_0$  OFF, スイッチ  $S$  ON

- ・ 放電電流  $i(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$

- ・ 負荷での消費電力  $P(t) = i^2(t)R = \frac{V_0^2}{R} e^{-\frac{2t}{RC}}$

- ・ 消費エネルギー  $W = \int_0^\infty P(t) dt = \frac{1}{2} CV_0^2$

電圧の外部電源によって充電すると考えると

$$W_e = \int_0^t V \cdot I dt = \int_0^t V \frac{dq}{dt} dt = \int_0^Q V \cdot dq = \frac{1}{2} CV^2$$

$C = \frac{\epsilon W \ell}{d} = \epsilon \frac{S}{d}$  [F]だから、静電エネルギー密度は

$$w_e = \frac{1}{2} CV^2 / (S \cdot d) = \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{d} \frac{1}{Sd} V^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left( \frac{V}{d} \right)^2 = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

10cm × 10cm, 電極間ギャップ長 1mm, 比誘電率

$\epsilon_r = 1$  の空気コンデンサの静電容量は

$$C = 88.5 \times 10^{-12} \text{ pF}$$

