パルスステアリングの検討

M. Kikuchi

May 10, 2007

1　基本パラメータ

ビームエネルギー $E = ecB\rho$、必要な曲げ角を Θ とする。また、電磁石の長さを ℓ とすると、磁場は

$$B = \Theta B\rho/\ell \tag{1}$$

で与えられる。必要なアンペアターン数は次式で与えられる：

$$NI = \frac{Bd}{\mu_0} \tag{2}$$

一方インダクタンス L は、

$$\int B^2/2\mu\, d^3x = LI^2/2 \tag{3}$$

より、w を磁石のポール幅として

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\ell w}{d} \tag{4}$$

で与えられる。電流の立ち上がり時間を τ とすると、電源電圧 V は

$$\begin{aligned} V &= Ldi/dt = LI/\tau = \mu_0 N^2 \frac{\ell w}{d} \frac{I}{\tau} \\ &= \mu_0 N \frac{\ell w}{d} \frac{Bd}{\mu_0 \tau} = NwB\ell/\tau \\ &= Nw\Theta B\rho/\tau \end{aligned} \tag{5}$$

となる。上の式の変形で、(2)(1) 式を使った。(5) 式よりエネルギーと蹴り角が与えられているとすると、電源電圧はターン数とポール幅の積及び立ち上がり時間だけで決まることがわかる。表 1 に電磁石

電源パラメータの例を示す。

Table 1: 電磁石・電源パラメータ

$\Theta = 1$ mrad; $\ell = .15$ m、$w = .06$ m、$d = .04$ m

E (GeV)	B (T)	NI (AT)	I (A)	N	τ (msec)	V (V)	L (mH)
3	0.0667	2122	10	212	5	25.4	12.7
3	0.0667	2122	15	142	5	17.0	5.70
4	0.0889	2829	10	283	5	60.4	40.1
4	0.0889	2829	20	142	5	22.7	5.70
8	0.1778	5659	20	283	5	90.6	22.6

2　電磁石

例 1 $E = 4$ GeV 用空冷 H 型磁石を考える。電流は 20 A とする。

- コイル: 電流密度 1 A/mm^2 とするとコイル断面積は $NI = 2830/2$ AT より 1415 mm^2、絶縁材厚さを 10%みると例えば 40×45 mm^2 となる。素線は例えば 7×2.8 mm^2 の平角線。絶縁はエポキシ真空含侵処理とする。
- 図 1 に steering 断面概形を示す。
- コイルに働く力：磁場計算で求めるしかないが、例えばギャップ磁場の 10 %がコイルに存在したとすると、
$F = NI/2 \times B = 2830/2 \times .0889 = 126$ N $= 12.9$ kgf となる。
方向はポールから押し出される方向である。
- skin depth $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\tau}{\mu\sigma}} = 12.6$ mm
- 抵抗値 $R = \rho_0 2(\ell + w + 2w_c)N/(NI/j_0/N) =$

$\rho_0 2(\ell + w + 2wc)Nj_0/I = 0.083\ \Omega$、但し $w_c = .04$ はコイルの幅、$j_0 = 1 \times 10^6\ \mathrm{A/m^2}$ は電流密度。

- 消費電力：$P = RI^2 = 33\ \mathrm{W}$

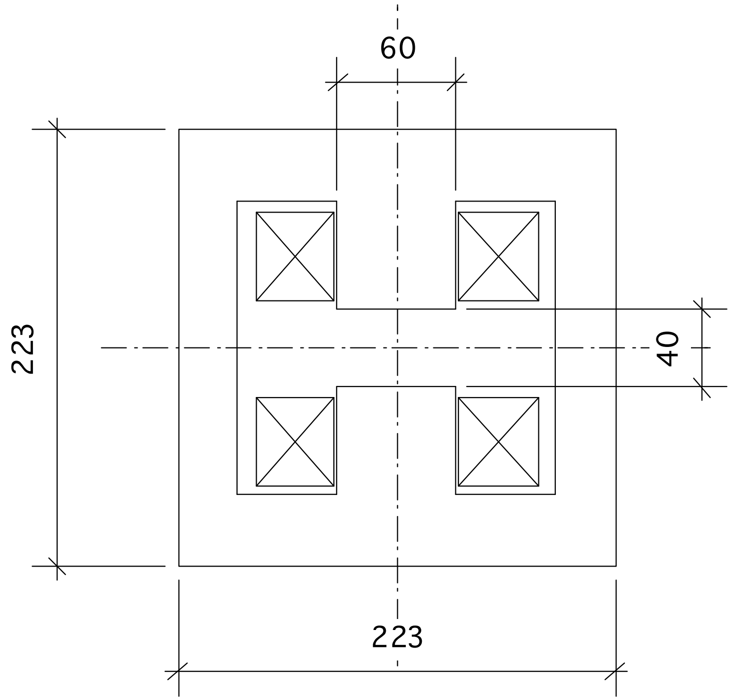

Figure 1: steering 断面概形

例 2 $E = 4$ GeV 用空冷 H 型磁石を考える。電流は 10 A とする。

- コイル: 電流密度 1 A/mm^2 とすると NI が例 1 と同じなのでコイル断面積は同じになる。ターン数が 2 倍になるので絶縁材の厚さは多少厚くなる。
- 電磁石コアは例 1 と同じ。
- コイルに働く力：NI が 20 A の場合と同じなので例 1 と同じになる。
- 抵抗値 $R = \rho_0 2(\ell + w + 2w_c)N/(NI/j_0/N) = \rho_0 2(\ell + w + 2wc)Nj_0/I = 0.332\ \Omega$、但し $w_c = .04$ はコイルの幅、$j_0 = 1 \times 10^6$ A/m^2 は電流密度。
- 消費電力：$P = RI^2 = 33$ W

3　チェンバー

内半径 a のセラミックチェンバーを考える。内面コーティングによる Power は表面抵抗率を ρ_s とすると、

$$P = \int_0^1 dt \int_S VJds \tag{6}$$

で与えられる。ただし、$V(s)$、$J(s)$ はそれぞれ表面における誘起電圧、電流密度である。表面抵抗率を用いると、V と J の間には

$$V = \rho_s J \tag{7}$$

の関係が成立する。表面の指定に極座標を用いると、
$V(\theta) = \dot{B}a\cos\theta$ より、式 (6) は

$$P \quad = \quad \int_0^1 dt \int_0^{2\pi} \dot{B}^2 a^2 \cos\theta^2/\rho_s \cdot ad\theta$$

$$= \quad \frac{a^3}{\rho_s}\int_0^1 \dot{B}^2 dt \int_0^{2\pi} \cos\theta^2 = \frac{a^3\pi}{\rho_s}\int_0^1 \dot{B}^2 dt \ . \tag{8}$$

ここで $\dot{B}$ は外部磁場の変化率である。いま磁場の立ち上がり、立ち下がり時間を τ とすると、

$$P = f\frac{2a^3\pi}{\rho_s}\frac{B^2}{\tau} \tag{9}$$

となる。

- $a = 0.01$ m、$B = 0.1778$ T、$\tau = 5$ ms、$\rho_s = 0.05\ \Omega$、$f = 50$ Hz とすると、式 (9) より、$P = 39.7$ mW となる。(ちなみに $\rho_s = 0.05\ \Omega$ は TiMo 10μm に相当する）また、
$V_{\mathrm{max}} = aB/\tau = 0.356$ V、$\bar{J} = 1.26$ A.
- ビームの基本周波数を 100 GHz とすると、Mo($\rho = 5\times 10^{-8}$ Ωm) に対する skin depth は $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 0.36\ \mu$m