超伝導ソレノイド設計ソフト
－低温技術講習夏合宿の成果の公開－

Superconducting Solenoid Magnet Design Software Program

冷凍部会夏合宿実行 WG：産総研[A], 高エネ研[B], 物材機構[C], クラオウェア[D], 大陽東洋酸素[E]
我妻　洸[A], 細山 謙二[B], 佐藤 明男[C], 藤岡耕治[D], 上岡泰晴[E]
Koh Agatsuma[A], Kenji Hosoyama[B], Akio Sato[C], Koji Fujioka[D] and Yasiharu Kamioka[E]
AIST[A], KEK[B], NIMS[C], Cryoware[D], Taiyo Toyo Sanso Co. Ltd.[E]
E-mail: koh.agatsuma@aist.go.jp

1. はじめに

冷凍部会では、昨年に続いて本年も１週間の低温技術夏季合宿を開催した。7 T 超伝導マグネットを自作してみようという企画である。「顧客から内直径 5 cm, 中心磁場 7 T の超伝導マグネットの引き合いがきた」という想定の下に、マグネットの寸法を割り出し、使用線材の長さ、および見積もり価格を提案する。さらに、これを製作し、性能を試験で確認し、出荷するというシナリオである。いままでは, 図表を使ってマグネットを設計させていたが、読み取り誤差の問題がある。そこで今回は計算機による設計ソフトを作成し，これを教育にも取り入れた。

2. 超伝導ソレノイドの設計

一般に、ソレノイド型マグネットの設計には F-factor（またはG-factor）のグラフが用いられる。今回想定した有効内直径約 50 mmϕ、中心磁場 7 T、磁場の均一度を有効内直径の1/2 で 5% 以内としてマグネットを設計すると、F_0= 0.82、α = 1.9、β = 1.35となる。巻線量最小で設計すると、α = 2.05、β = 1.20と見積もれる。この結果を用いると巻線量最小設計の方が線材が多いという妙なことになる。このような結果が得られてしまった原因は、教科書やハンドブックに記載されている F-factor のグラフが、αが極端に小さいという超伝導マグネットの特質を考慮していない点にある。正確な値を求めるには計算機を用いる必要がある。

コイルの中心磁場 B_0は F-factor を用いて次式で表される。

$$B_0 = a_1\, j\, \lambda\, F_0(\alpha,\beta)\times 10^{-6}\ \text{(T)} \qquad (1)$$

ただし、α = a$_2$/a$_1$, β = b/a$_1$　(Fig. 1　参照)。

$$F_0(\alpha,\beta) = \frac{4\pi}{10}\beta \log_e \frac{\alpha+\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}{1+\sqrt{1+\beta^2}} \qquad (2)$$

また、半径 ζ = z/a$_1$ の球内の磁場均一度 Δ_ζは磁場の減衰率が大きい軸方向での B_ζを指標として次式で定義される。

$$\Delta_\zeta = (B_0 - B_\zeta)/B_0$$

(1) 式より、

$$\Delta_\zeta = (F_0 - F_\zeta)/F_0 = (1 - F_\zeta/F_0) \qquad (3)$$

ここで、F_ζは次式で与えられる。

$$F_\zeta = \frac{2\pi}{10}\left[(\beta-\zeta)\log_e\frac{\alpha+\sqrt{\alpha^2+(\beta-\zeta)^2}}{1+\sqrt{1+(\beta-\zeta)^2}} + (\beta+\zeta)\log_e\frac{\alpha+\sqrt{\alpha^2+(\beta+\zeta)^2}}{1+\sqrt{1+(\beta+\zeta)^2}}\right]$$

F_0 は、(1) 式より $F_0(\alpha,\beta) = 10^6 B_0/a_1 j\lambda$ として既知である。したがって、磁場の均一度が与えられれば、(2), (3)式を連立させ、α, βを求めることができる。まず(2) 式を αについて解くと,

$$\alpha = \frac{\left\{\left(1+\sqrt{1+\beta^2}\right)e^{\frac{5F_0}{2\pi\beta}}\right\}^2 - \beta^2}{2\left(1+\sqrt{1+\beta^2}\right)e^{\frac{5F_0}{2\pi\beta}}} \qquad (4)$$

これを F_ζ に代入して(3) 式に適用すると β に関する方程式が得られる[1]。得られる方程式は超越関数で、微分が困難であるが、逐次近似法を用いて解くことができる。

また、使用線材を最小にするには、次式の巻線体積 Vを最小にすればよい。

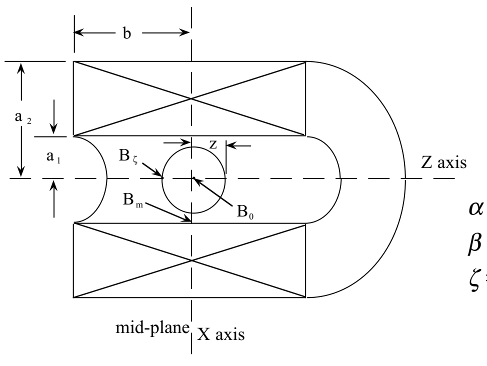
$$V = 2b\,\pi(a_2{}^2 - a_1{}^2) = 2\pi\beta(\alpha^2-1)a_1{}^3$$

すなわち定数を省いた以下の νを最小にする条件を求める。

$$\nu = \beta\,(\alpha^2 - 1) \qquad (5)$$

(5)式に、(4)式を代入して βで微分し、dν/dβ = 0 となる βを ニュートン法で求める。この値を(4)に代入してα を求め,諸元を決定することができる。

これらを計算するために Fortranで記述したソフトを作成した。このソフトは冷凍部会の HP で公開している[2]。ご利用下さい。



α = a$_2$/a$_1$
β = b/a$_1$
ζ = z/a$_1$

Fig.1 Cross section of air-core solenoid superconducting magnet. Magnetic field homogeneity in a sphere of radius ζ : $\Delta_\zeta = (B_0 - B_\zeta)/B_0$

参考文献

1) 我妻 洸 他：昭和 50 年電気学会全国大会　634
2) http://akahoshi.nims.go.jp/reitob/summer/