動的安定化による高電流密度大型超伝導導体の可能性に関する研究 III. コイル設計とクエンチ解析

小笠原 武, 野口 照夫*

日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8

* 真空冶金株式会社 千葉県山武郡山武町横田 516

(1987年7月6日受理)

Feasibility Study on a High Current Density, Large-Scale Superconductor by Dynamic Stabilization

III. Coil Design and Quench Analysis

Takeshi OGASAWARA and Teruo NOGUCHI*

College of Science and Technology, Nihon University, 1-8 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101

* Vacuum Metallurgical Co., Ltd., 516 Yokota, Sanbunmachi, Sanbugun, Chiba 289-12

(Received July 6, 1987)

Synopsis :

The dynamic stabilization method was proposed in Part I and Part II of this paper in order to achieve high current density in large scale magnets. To demonstrate the feasibility, a model coil with a stored energy of 25 MJ and a central field of 8 T was designed at an overall current density of 100 A/mm². The conductor was 1 mm×50 mm, Cu-Nb₃Sn-Cu tape and it was needed to grade the thickness of Nb₃Sn to meet the requirement of dynamic stability. These procedures clarified the design criteria of dynamically stabilized magnets. The quench analysis was performed to identify problems peculiar to high current density magnets. The maximum temperature rise was found to be relatively high, 420 K. The protection by external resistor is enough to suppress the temperature rise down to 100 K. These results indicate that the dynamically stabilized tape conductor can attain high overall current density in large scale magnets and that the method is applicable for emerging materials.

1. はじめに

動的安定化法を用いて、超伝導マグネット用大型導体で安定に高い電流密度を実現する可能性について研究を進めてきた。本論文の第一部「磁気安定性」¹⁾において、幅広のテープ型導体 (Fig. 1 参照) を面冷却した状況を想定し、磁気擾乱および熱的擾乱に対する安定性を解析した。その結果、導体が安定性を失うことなく担える安定限界の電流密度 J_s があることがわかった。その値は、導体平均電流密度で 100 A/mm² 以上の値に達する。第二部「安定性マージン」²⁾ では、導体が安定限界電流密度 J_s をもつとき、磁場変動に対する安定性、過渡的擾乱に対する安定性を論じ、この方法で安定化された導体が、大型マグネットがさらされる電磁的・熱的外乱に耐えうることを示した。

本研究第三部の目的は、以上の考察を踏まえて、比較的大型のコイルで捲線部平均電流密度 100 A/mm² をもつものを概念設計し、あわせて、動的安定化基準のつとめて、導体を設計することである。また、コイルの電流密度が大きいため、万一クエンチが生じた場合、局所的な温度上昇、内部高電圧の発生等が問題となる。したがってクエンチの解析を行い、コイルの保護について考察を加えてコイルの安全性を確認しておかなければならない。

2. コイルおよび導体の設計

2.1 高電流密度コイル

捲線部平均電流密度を 100 A/mm² と設定し、直径約 1 m の空間に中心磁界 8 T を発生するという条件で設計したコイルの諸元が Table 1 に示されている。

Fig. 1 Schematic view of Cu-Nb₃Sn-Cu tape conductor. (a) Cu thickness $D/2$, (b) Nb₃Sn thickness d .

導体の最大経験磁界は約 10 T であるので、導体としては Cu-Nb₃Sn-Cu 複合テープ導体の使用を考える。電磁力の支持は、導体と一緒にまきこむ SUS テープで行うものとする。巻線部の電流密度が 100 A/mm² であるから、導体のみの平均電流密度 λJ_c は、200 A/mm² 以上が必要とされる。

Table 1 Specification of a model coil.

Inner diameter (cm)	90
Outer diameter (cm)	114.4
Length	62.4
Overall current density (A/mm ²)	100
Number of pancakes	12
Total number of turns	336
Inductance (H)	0.1
Operation current (kA)	22.6
Stored energy (MJ)	25.5

Fig. 2 Critical current density I_c , stability current density J_s , and operation current density J_{op} plotted against magnetic field. See text for (I), (II) and (III).

2.2 導体の設計

Fig. 2 は Nb₃Sn テープ導体の臨界電流密度 J_c を磁場の関数として示している。コイルの最高経験磁界 10 T における J_c は、 $J_c \geq 2.5 \times 10^9$ A/m² である。一方、上にのべたように、 $\lambda J_c \geq 200$ A/mm² が要請される。したがって、 $\lambda \geq 0.08$ でなければならない。Fig. 1 のようなテープ導体で、 $D = 2$ mm とすると、若干の余裕をみて、 $d = 180$ μ m となる。つぎに、この導体の動的安定性を、第一部の(29)式にもとづいて検討しなければならない。安定限界電流を J_s とかくと、

$$d^2 J_s^2 \leq \frac{96}{\pi^2} \frac{k_s T^*}{\rho} \frac{D}{d} \left/ \left(1 + \frac{3 k_s}{k_c} \cdot \frac{D}{d} + \frac{6 k_s}{h d} \right) \right. \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ρ は Cu 電気伝導度 (Fig. 3), k_s および k_c は超伝導体と Cu の熱伝導度、 h は液体ヘリウムへの熱伝導係数、 T^* は磁場 B 中での臨界温度 $T_c(B)$ とパス温度 $T_0 = 4.2$ K との差 $T^* = T_c(B) - T_0$ である。 J_s を求める際用いたパラメータは次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} D &= 2.0 \text{ mm} \\ d &= 180 \text{ } \mu\text{m} \\ \rho &= 6.5 \times 10^{-10} \Omega\text{m} \\ T^* &= 7.0 \text{ K} \\ k_s &= 0.11 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \text{ (at 10 T)} \\ k_c &= 30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \\ h &= 5 \times 10^4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \text{ (過渡伝熱特性)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Fig. 3 The adopted resistivity of Cu at 4.2 K (full line) compared with those of various coppers; (a) OFHC fully hard, (b) OFHC half-hard, (c) OFHC annealed, (d) 99.999 per cent pure annealed.

これらの値を(1)式へ代入して

$$J_s = 1.82 \times 10^9 \text{ A/m}^2 \quad (3)$$

を得る。この値は $J_c = 2.51 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ より小さいので、この設計では、導体は不安定になってしまう。これを回避して J_s を増加するには、 d を分割して小さくするしかない。そこで、さきの導体を厚さ方向に二分割した形とし

$$D = 1 \text{ mm}, d = 90 \mu\text{m} \quad (4)$$

で、他のパラメータは(2)式と同じにとりて計算すると、

$$J_s = 3.53 \times 10^9 \text{ A/m}^2 \quad (5)$$

となり、この値は $J_c = 2.51 \times 10^9$ より大きく、安定な導体となる。なお(5)式の J_s は、導体幅広面が100%冷媒で冷却された場合である。現実のマグネットでは、冷却周長は、たとえば50%となる。このときの J_s は、(1)式で k_s を $0.5 k_s$ とすることより見積もられ、 J_s (50%冷却) $= 2.6 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ となり、やはり J_c より大きくとれる。導体幅を50mmとすると、2枚のテープの10Tにおける臨界電流 I_c は、 $I_c = 22.6 \text{ kA}$ である。すでに、第二部でもふれたように、このテープ導体は外乱に強く安定なので、 I_c を動作電流 I_{op} ととる (Table 1 参照)。コイルの1ターンの構成は、Fig. 4 に模式的に示したとおり二枚並列の超伝導テープ、電気絶縁および冷却チャネル用のGFRPと電磁力支持のSUSテープからなる。このSUSは薄いカプトンテープで端部も含めて絶縁する。パンケーキ間の間隔は2mmととった。したがって、1ターン当りの断面積は226 mm² である。コイルの動作電流は $I_{op} = 22.6 \text{ kA}$ であるから、巻線部の平均電流密度は 100 A/mm^2 の大きさに達する。

つぎに磁場の変化に伴う安定性電流 J_s 、臨界電流 J_c の変化を考えねばならない。 J_s を決めるパラメータのうち、磁場に依存するのは ρ と T^* である。 ρ は Fig. 3 にあげた値を用いる。また $T^* = T_c(B) - T_0$ をきめるに当たり $T_c(B)$ は10Tで11.2K、 B の低下とともに B に1次で減少して、0Tで $T_c(B) = 18.0 \text{ K}$ となるととった。こうして(1)式から、 J_s が B の関数として得られる。磁場が10Tから7.5Tまでの領域では $J_s > J_c$ で導体は安定であるが、マージンは小さい。これは、臨界電流 J_c が B の低下とともに増加するからである。そこで7.5T以下の領域で導体を変更して、

$$D = 1 \text{ mm}, d = 60 \mu\text{m} \quad (6)$$

ととる。すなわち、Cuは変えず、Nb₃Snの厚みをへ

Fig. 4 Construction of "one" turn of a pancake coil.

らすのである。これによって(1)式からわかるとおり J_s は改善される。Fig. 2 に示したように、磁場が低下して4Tに達すると、再び $J_s \geq J_c$ となる。そこで4T~0Tの領域では、

$$D = 1 \text{ mm}, d = 30 \mu\text{m} \quad (7)$$

とする。

Nb₃Sn の J_c が0磁場から10Tの間で1桁以上変わるので、導体を3種類にgrading する必要がある。なお動作電流密度 J_{op} は、Fig. 2 の破線で示したとおりつねに J_c より小さいことはいうまでもない。このようなgrading は、単に超伝導体の量が低磁場では過剰であるという理由で行う通常のgrading と異なり、動的安定性を確保するために必須の要件であることに注意されたい。Fig. 2 に従って以上のgrading を要約すると、

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad & B = 0 \sim 4 \text{ T}, D = 1 \text{ mm}, d = 30 \mu\text{m} \\ \text{(II)} \quad & B = 4 \sim 7.5 \text{ T}, D = 1 \text{ mm}, d = 60 \mu\text{m} \\ \text{(III)} \quad & B = 7.5 \sim 10 \text{ T}, D = 1 \text{ mm}, d = 90 \mu\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。

導体の製造においては、30 μm 厚のNb₃Snテープを単位とし、1枚を銅板と組み合わせて(I)を得、2枚、3枚とふやして導体(II)、(III)を製作すればCuには継目なしで、導体の製作が行えるであろう。

3. クエンチの解析

3.1 ノーマル伝播速度

導体に沿ったのノーマル領域の伝播速度の断熱条件下での値 v_{ad} は次式で与えられることが示されている³⁾。

$$v_{ad} = \frac{J}{\gamma C} \left(\frac{\rho k_c}{T_s - T_0} \right)^{1/2} \quad (9)$$

ここで J は導体の平均電流密度、 γC は単位体積当り

Fig. 5 Approximation of heat generation curve by an abrupt transition at $T = T_s$.

の比熱である。 T_s は, Fig. 5 に示すように, 熱発生対温度特性を温度 T_s でのステップ状の発熱で近似したときの温度である。 $\gamma C \approx 1 \times 10^3 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $J = 2.07 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, $\rho = 6.5 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ (10 T), $k_c = 30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $T_s \approx 7.5 \text{ K}$ を(9)式に代入して,

$$v_{ad} = 17 \text{ ms}^{-1} \quad (10)$$

を得る。

ノーマル伝播は実際には断熱過程ではなく, 冷媒による冷却で slow down されて,

$$v = v_{ad} \cdot \frac{1-2y}{\sqrt{yz^2 + z + 1 - y}} \quad (11)$$

となる⁴⁾。ここで, y は

$$y = \frac{h_f P (T_s - T_0)}{A J^2 \rho} \quad (12)$$

で定義される量で, h_f は膜沸騰状態での熱伝達係数, P は冷却周長, A は導体の断面積である。 $h_f = 500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $P = 50 \text{ mm}$, $A = 1.09 \times 50 \text{ mm}^2$ を代入して,

$$y \approx 0.048 \quad (13)$$

を得る。また, z は, 次式で与えられる,

$$z = \frac{\eta^2 P^2}{J^2 \rho A^2 \gamma C (T_s - T_0)} \quad (14)$$

ここで η は, ヘリウムの過渡伝熱特性を表す係数⁵⁾で, $\eta \approx 450$ である。(14)式より z を見積もると,

$$z \approx 2.1 \quad (15)$$

となる。式(13), (15)の結果を(11)へ代入して伝播速度 v が得られる,

$$v = 8.5 \text{ ms}^{-1} \quad (16)$$

3.2 クエンチ過程

コイル内の一つのパンケーキでクエンチが始まったとする。ノーマル部は導体に沿って, 速度 v で伝播し, 隣接ターン方向へは αv で伝播するとし, 伝播は, そのパンケーキ内に止まっているものと仮定する。こ

の仮定はクエンチに伴う諸問題をよりきびしく見積もることになる。第2の仮定として, クエンチが始まると時間 t とともに発熱は, 断熱的な導体の温度上昇をもたらすとする, すなわち

$$J^2 \rho(T) dt = \gamma C(T) dT \quad (17)$$

これをかきかえて積分すると,

$$\int J^2 dt = \int_{T_0}^T \frac{\gamma C(T)}{\rho(T)} dT \equiv U(T) \quad (18)$$

左辺は, クエンチ前の電流密度を J_0 とし, クエンチ経過時間を τ とすれば $J_0^2 \tau$ と近似される。また $U(T)$ は, Cu については, $U(T) \approx U(T_0) (T/T_0)^{1/2}$ でよく近似されるので,

$$J_0^2 \tau = U(T) = U(T_0) (T/T_0)^{1/2} \quad (19)$$

となる。

ノーマルゾーンの抵抗 R は, 伝播の様相をさきに仮定したので次式で与えられることがわかる。

$$R = \int_0^{vt} \frac{2\pi\alpha \cdot 2a \cdot \lambda_w \rho(T) dx}{(2A)^2} \quad (20)$$

ここで, $2a$ はテープ導体の幅, λ_w は捲線部における導体の占積率, A は1枚のテープ導体の断面積である。 ρ が T に比例するとし, (19)式を用いて(20)を計算すると,

$$R(t) = \frac{2\pi\lambda_w \cdot \rho_0 \alpha \cdot J_0^4 \cdot 2a \cdot v^2 t^4}{12(2A)^2 U_0^2} \quad (21)$$

が得られる。つぎにクエンチを特徴づける諸量を求める。

(a) 特性時間 t_Q

コイルに蓄えられているエネルギーが抵抗 R で消耗するまでの時間が t_Q で,

$$\int_0^{t_Q} I^2 R dt = \frac{1}{2} L I^2 \quad (22)$$

で与えられる。粗い見積りとして, $I = \text{一定}$ とし, (21)式を代入して,

$$t_Q = \left\{ \frac{30(2A)^2 U_0^2 L}{2\pi J_0^4 \lambda_w \rho_0 \alpha \cdot 2a \cdot v^2} \right\}^{1/5} \quad (23)$$

この式に, 次の諸量を代入する。

$$U_0 = 5 \times 10^{16} \text{ A}^2 \text{ s/m}^4 \text{ (at 50 K)}$$

$$\rho_0 = 10^{-9} \Omega\text{m} \text{ (at 50 K)}$$

$$J_0 = 2.07 \times 10^8 \text{ A/m}^2$$

$$\alpha = 0.01$$

$$L = 0.1 \text{ H}$$

$$v = 8.5 \text{ m/s}$$

他の量 A , λ_w , $2a$ は導体諸元からわかる。こうして, (23)式より

$$t_Q = 3.4 \text{ s} \quad (24)$$

を得る。

(b) 最大温度上昇 T_m

(19)式より次式が得られる。

$$T_m = T_0 \frac{J_0^4 t_Q^2}{U_0^2} \quad (25)$$

これに $T_0 = 50 \text{ K}$, 上記の J_0, t_Q, U_0 を代入して,

$$T_m = 420 \text{ K} \quad (26)$$

を得る。この温度はかなり高く、コイルに保護法を適用しなければならぬことを示している。

(c) 内部電圧

コイル電流の減衰は,

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{1}{L} \int R(t) dt\right) \quad (27)$$

与えられ、これに(21)式を代入し、(23)式を用いると,

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{t^5}{t_Q^5}\right) \quad (28)$$

となる。内部電圧は、 $V = L(dI/dt)$ で与えられる、

$$V = -\frac{5}{2} \cdot \frac{LI_0}{t_Q} \frac{t^4}{t_Q^4} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{t^5}{t_Q^5}\right) \quad (29)$$

この V を時間 t で微分して、最大の電圧 V_m を求めると,

$$V_m = 1.82 \frac{LI_0}{t_Q} \quad (30)$$

となる。この値を評価すると,

$$V_m = 1.2 \text{ kV} \quad (31)$$

となる。

3.2(b)項でみたように、クエンチに伴う温度上昇が大きいので何らかの保護法を施す必要がある。次節で、よく用いられている外部抵抗による保護を考える。

4. 外部抵抗による保護

クエンチ検出を行った後、外部に投入する抵抗の値を R_e とする。電流の減衰の時定数 t_e は,

$$t_e = L/R_e \quad (32)$$

となり、電流は

$$I = I_0 \exp(-t/t_e) \quad (33)$$

に従って減衰する。この電流波形を(18)式に代入し、到達温度を T_m とすれば,

$$\frac{I_0^2}{2(2A)^2} \frac{L}{R_e} = U(T_m) \quad (34)$$

となる。コイルの安全のために、温度 T_m は 100 K に抑える必要があろう。すると、 $U(T_m) \cong 7 \times 10^8 \text{ A}^2 \text{ sm}^{-4}$ となり、(34)式より

$$R_e = 3.1 \times 10^{-2} \Omega \quad (35)$$

が得られる。(32)式の電流減衰時定数は 3.2 s となる。外部抵抗 R_e 両端の電圧は、 700 V 程度である。

内部電圧 $V = IR(t)$ を考えよう。 I は(33)式で与えられ、また $R(t)$ は、ノーマル領域の抵抗で(21)式で表される。この $R(t)$ を(23)式の特性時間を使って表すのが便利である。

$$R = \frac{5}{2} \frac{Lt^4}{t_Q^5} \quad (36)$$

したがって、内部電圧 V は,

$$V = \frac{5}{2} I_0 e^{-t/t_e} \cdot \frac{Lt^4}{t_Q^5} \quad (37)$$

となる。この式から V の最大値をさがすと、 $t = 4t_e$ のときで,

$$V_m = 11.7 \frac{LI_0 t_e^4}{t_Q^5} \quad (38)$$

この式に、 $L = 0.1 \text{ H}$, $I_0 = 22.6 \text{ kA}$, $t_e = 3.2 \text{ s}$, $t_Q = 3.4 \text{ s}$ を代入して,

$$V_m = 6.1 \text{ kV} \quad (39)$$

を得る。内部電圧は比較的大きいので捲線の電気絶縁には、十分の注意をはらった設計が必要である。

5. 結 言

動的安定化法により、高電流密度・大型超伝導コイルを実現する可能性を明確にするために、蓄積エネルギー約 25 MJ , 中心磁場 8 T のコイルを具体例としてとりあげ、概念設計を行った。従来の完全安定化法とことなり、捲線部平均電流密度を 100 A/mm^2 まであげることが示された。また、動的安定性をみtusためには、テープ導体をグレーディングし、各磁場において、安定性電流が臨界電流を上まわるよう配慮しなければならないが、これは、必ずしもグレーディングを要しない通常のコイル設計に比べ不利な点である。

設計したコイルのクエンチの解析を行った結果、最大温度上昇が 420 K と大きいので、これを 100 K に抑えるよう、外部抵抗による保護法を検討した。

総合的にみて、大型テープ導体を用いた動的安定化法は、大型マグネットで高電流密度を達成するのに有用であると考えられる。また現在、開発途上にある高磁場材料のうち、テープ加工が容易な場合が多いと思われる。それらを実用導体に仕上げるためにも本研究が生かされよう。

本研究は、文部省科学研究費核合融特別研究(課題番号 62055028)の援助の下に行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 小笠原武：低温工学 22 (1987) 123
- 2) 小笠原武：低温工学 22 ((1987) 181
- 3) W.H. Cherry and J.I. Gittleman: Solid-State Electronics 1 (1960) 287
- 4) M. N. Wilson: *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, Oxford (1983) 204
- 5) M. N. Wilson: *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, Oxford (1983) 113