高温超伝導層流ガス冷却電流リードの設計図表

西岡 務, 前畑 京介, 石橋 健二, 竹尾 正勝
三戸 利行*, 山本 純也*

九州大学工学部 福岡市東区箱崎 6-10-1
* 核融合科学研究所 名古屋市千種区不老町

(1995年9月7日受理)

Design Chart of High-Temperature Superconducting Current
Leads Cooled with Laminar Flow Gas

Tsutomu NISHIOKA, Keisuke MAEHATA, Kenji ISHIBASHI, Masakatsu TAKEO,
Toshiyuki MITO* and Junya YAMAMOTO*

Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812
* National Institute for Fusion Science, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

(Received September 7, 1995)

Synopsis:

General design equations are derived from one-dimensional energy balance equations for gas-cooled current leads of high temperature superconducting (HTSC) material. The equations are solved to evaluate general characteristics for cooling with a laminar flow gas. General characteristics arranged in the design chart are applicable to the design of current leads with a wide variety of geometrical dimensions. Thermal runaway in the case of accidental stoppage of the cooling gas and the transition to the normal state of part of the current leads is analyzed. The current leads optimized under the condition of self-sustained cooling are usable in a refrigerator cooling system, almost minimizing the total refrigerator load.

Keywords: gas-cooled current lead, high temperature superconductor, laminar flow, design chart, refrigerator cooling

1. 序 論

超伝導磁石の励磁には従来、ガス冷却方式の銅材を電流導体とする電流リードが用いられてきた。このような電流リードはジュール発熱や熱伝導によりクライオスタット内に熱を伝えるが、低温ガスで電流リード導体を冷却することにより、クライオスタット内への熱侵入を低減できる。通常、電流リードはできるだけ少ない冷却ガス流量でクライオスタット内への熱侵入が小さくなるよう最適化される。電流リードからの熱侵入によって蒸発するヘリウムガスを冷却ガスとして用いる自己維持冷却条件下で最適化された銅材電流リードでは、通電電流で規格化した熱侵入量は約 1 mW/

A が下限となっている¹⁾。そのため、通電電流が数 kA 以上の超伝導磁石の冷却システムでは、電流リードからの熱侵入は大きな熱負荷となる。

一方、近年発見され、工学的応用が期待される高温超伝導体 (HTSC) は、液体窒素温度以下 (77 K) の温度領域では、通電時のジュール発熱がなく、熱伝導率は銅材と比較して 2 桁程度小さい。そこで、電流リードの電流導体として高温超伝導体を用いた場合、電流リードからの熱侵入量の低減が期待できるので、最近では HTSC 電流リードの開発研究が行われるようになってきた^{2~4)}。これら HTSC 電流リードは主に伝導冷却で設計されているが、一般的な最適設計計算はなされていないのが現状である。さらに通電電流が数

Fig. 1 Schematic diagram of the gas-cooled HTSC current lead connected with the gas-cooled copper lead.

kA 以上の場合、導体に熱暴走が生じた場合の安全性を考慮した電流リードの最適設計を行う必要がある。

本研究では銅材電流リードに関して既に確立された設計手法⁵⁾を HTSC 電流リードに適応できるように拡張し、導体に熱暴走が生じた場合の安全性を考慮してガス冷却と伝導冷却の場合の通電特性を一般的に評価し、様々な設計条件に有用な設計手法を確立する。

2. 一般化した設計計算

Fig. 1 にガス冷却 HTSC 電流リードの特性を評価するための概略図を示す。HTSC 電流リードは 4.2 K から 77 K の温度領域で用いられ、77 K で銅材電流リードに接続される。各接続部での接触抵抗は無視できるほど小さく、電流リードの冷却としては自己維持冷却条件を仮定する。このとき、電流リード導体と冷却ガスとの間の 1 次元エネルギーバランス方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda s \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho I^2}{s} - fh(T-\theta) = 0 \quad (1)$$

$$fh(T-\theta) = mC_g \frac{d\theta}{dx} \quad (2)$$

式中で用いられている記号については Nomenclature を参照されたい。ここで導体断面積 s は導体の位置によらず一定とする。この方程式は通電電流 I 、導体断面積 s 、冷却周長 f 、熱伝達係数 h 、導体長さ l の 5 個のパラメーターを含む。従って、(1)、(2) 式を基本式として設計計算を行う場合には、5 個の独立したパラメーターを逐次変化させ最適なパラメーターの組合せを求める必要がある。このような複雑な設計計算を避けるため、通電電流で規格化した熱流束 Q を $Q = \lambda s / I (dT/dx)$ 、電流リードの冷却に関するパラメータ

γ を $\gamma = hFS$ と定義する。これらを用いると(1)、(2)式は次のように整理できる。

$$\frac{dT}{du} = \frac{DQ}{\lambda} \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{du} = \gamma D(T-\theta) - \rho D \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{du} = \frac{\gamma D(T-\theta)}{MC_g} \quad (5)$$

ここで D は電流リードの通電電流と導体の幾何学的形状の関係を示し $D = Il/s$ で定義される。文献 5) では、(1)、(2) 式を一般的に解くため x の関数から温度の関数に変換しているが、(3)~(5) 式のように変換するとその変換は必ずしも必要ではないことが分かる。上式を解くためには、パラメーター γ 中に含まれる冷却ガスの熱伝達係数 h が必要である。HTSC 電流リードでは冷却チャンネル当りの冷却ガスの質量流量が少ないため、冷却ガスのレイノルズ数の値は乱流の基準となる 2,300 以下になると予想される。したがって、本研究では冷却ガスの流れを層流とした。この場合、熱伝達係数 h はヌセルト数 Nu を用いて $h = Nu\lambda_g/d$ で示される。また層流ではヌセルト数の表式は、

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668[RePr(d/l)]}{1 + 0.04[RePr(d/l)]^{2/3}} \quad (6)$$

であり、レイノルズ数及びプラントル数はそれぞれ $Re = Gd/\mu$ 、 $Pr = \mu C_g/\lambda_g$ で定義される。ここで層流における冷却特性パラメーター γ_{lam} を、

$$\gamma_{lam} = SS_g/d^2 \quad (7)$$

と定義すると、(6) 式中の項 $RePr(d/l)$ は γ_{lam} を用いて $MC_g/(\lambda_g D \gamma_{lam})$ に書き換えられる。したがって、パラメーター γ は、

$$\gamma = 4\lambda_g \gamma_{lam} \left\{ 3.66 + \frac{0.0668[MC_g/(\lambda_g D \gamma_{lam})]}{1 + 0.04[MC_g/(\lambda_g D \gamma_{lam})]^{2/3}} \right\} \quad (8)$$

に整理できる。

電流リード流路に冷却ガスを流すためには、冷却ガス流路の流入口と放出口の間に圧力差が必要である。一方、超伝導磁石の安定した励磁運転のためにはクライオスタットの内圧は低いことが望ましい。そのため、できるだけ小さい圧力損失で十分な冷却ガス流量を得ることが要求される。冷却ガスの流路 $dx_g = r dx$ での圧力損失 dP は $dP = \lambda_p G^2 / (2d\nu_g)$ で与えられる。管摩擦係数 $\lambda_p = 64/Re$ を用いると、HTSC 電流リードの圧力損失は次のように一般化できる。

$$\Delta P / Cf = 32D \int_0^1 \frac{\mu}{\nu_g} du \quad (9)$$

Fig. 2 An example of the growth of the temperature profile of HTSC leads in the case of thermal runaway. Values of γ_{lam} and D are taken to be $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$ and $1.1 \times 10^5 \text{ A/m}$, respectively.

ここで C_f は冷却ガス流路の形状を表わすパラメーターであり、 $C_f = rSG/d^2$ で与えられる。このように、冷却特性パラメーター γ_{lam} 及び幾何学的パラメーター D を一般化した方程式である(3)~(5)式に与えることで、HTSC 電流リードからの熱侵入量 Q_c 及び一般化された圧力損失 $\Delta P/C_f$ が得られる。

HTSC 電流リードからの熱侵入量 Q_c は導体はジュール発熱しないため、幾何学的パラメーター D の増加とともに減少する。しかしながら、幾何学的パラメーター D の値を大きくすると、導体長 l に比べて導体断面積 s を小さくすることになり、なんらかの原因で HTSC 電流リードに熱暴走が発生した場合に導体温度の上昇を助長する。そこで本研究では、冷却ガス停止事故を想定した場合の HTSC 電流リードの導体温度上昇特性を解析した。用いた式は次の非定常熱伝導方程式である。

$$sC_v \frac{\partial T}{\partial t_s} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho I^2}{s} \quad (10)$$

ここで $\tau = t_s/l^2$ と変数を変換し、さらに幾何学的パラメーター D を用いると(10)式は一般化され、

$$\frac{d}{du} \left[\lambda \left(\frac{dT}{du} \right) \right] + \rho D^2 = \nu C \left(\frac{dT}{d\tau} \right) \quad (11)$$

Fig. 3 Design chart of HTSC current lead cooled with laminar flow gas. Generalized characteristics of gas-cooled HTSC leads are arranged by means of the generalized temperature rise time τ . Symbols show generalized characteristics of conduction-cooled HTSC leads.

となる。しかしながら、導体全てが超伝導状態である限り発熱項はゼロであるので、熱的擾乱を模擬するために、温端部において規格化した長さにして $0.2(1.0 \leq u \leq 1.2)$ の領域で常伝導に遷移したと仮定した。さらに高温超伝導体の臨界温度を 77 K とし、HTSC 電流リードが通電可能な導体の最高温度 T_{max} を $T_{\text{max}} = 300 \text{ K}$ とする。一方、超伝導磁石に通電される電流は超伝導磁石に影響を及ぼさない程度で一定速度で減少しなければならない。本研究では、通電電流を安全に減少掃引するために必要な時間を 10 分と仮定する。

(11) 式に初期条件として定常状態の温度分布、熱的擾乱及び幾何学的パラメーター D を与えると、導体最高温度 T_{max} が 300 K に達するまでの導体温度上昇時間 τ が得られ、通電電流掃引時間である 10 分と数値解析結果を比較することで電流リードの安全性を評価できる。

3. HTSC ガス冷却電流リードの設計図表

前章で述べた計算法には、温度の関数である導体の電気抵抗率 ρ 、熱伝導率 λ 、比熱 C 、導体の発熱に関する実効熱容量 ν 、ヘリウムガスの物性値⁶⁾ が必要

である。本研究では、導体に用いる高温超伝導体を YBCO⁷⁾ とした。

このようにして求めた熱侵入量 Q_e 、幾何学的パラメーター D 、圧力損失 $\Delta P/C_f$ の一般的通電特性を冷却ガス停止事故の導体温度上昇時間 τ で整理した。Fig. 2 には一例として $\gamma_{lam}=1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$ 、 $D=1.1 \times 10^5 \text{ A/m}$ のときの導体温度上昇特性を示す。Fig. 3 に導体温度上昇時間がそれぞれ $\tau=5.0 \times 10^3 \text{ s/m}^2$ 、 $1.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ 、 $2.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ 、 $4.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ となる幾何学的パラメーター D の通電特性を示す。横軸は冷却特性パラメーター γ_{lam} で、 $\gamma_{lam} < 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{A}^2$ の領域では、ガスによる冷却の効果はほとんどなくなり、伝導冷却リードの通電特性に漸近する。また $\gamma_{lam} > 1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{A}^2$ の領域では、ガスによる冷却の効果が支配的になり、理想的ガス冷却リードの通電特性に漸近する。また同図の左には伝導冷却 HTSC 電流リードについて、導体温度上昇時間がそれぞれ $\tau=1.0 \times 10^2 \text{ s/m}^2$ 、 $4.0 \times 10^2 \text{ s/m}^2$ 、 $2.0 \times 10^3 \text{ s/m}^2$ 、 $5.0 \times 10^3 \text{ s/m}^2$ となる幾何学的パラメーター D の熱侵入量 Q_e を示す。ガス冷却の有用性を示すため、 $\gamma_{lam}=1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$ 、 $\tau=2.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ となるガス冷却 HTSC 電流リードと同程度の熱侵入量となる ● で示される $\tau=4.0 \times 10^2 \text{ s/m}^2$ の伝導冷却 HTSC 電流リードを比較する。電流リードの導体長を $l=0.20 \text{ m}$ と仮定すると、300 K に達する時間 t_s はガス冷却 HTSC 電流リードの $8.0 \times 10^2 \text{ s}$ に対し、伝導冷却 HTSC 電流リードでは $1.6 \times 10 \text{ s}$ となり、導体に常伝導転移が生じたときの安全性に50倍の大きな差があることがわかる。熱侵入量については銅材電流リードの下限値である 1.0 mW/A と比較すると 1/5 に低減できる。

次に設計図表の使用法を示すため、例として 5.0 kA 級電流リードの設計を行う。電流リードは電極当たり外径 150 mm の円筒に挿入された直径 50 mm HTSC 円柱 7 本から構成されるバンドル型とする。このとき、 $S=2.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{A}$ 、 $S_g=7.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{A}$ 、 $d=1.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ が得られるので、冷却特性パラメーター γ_{lam} の定義により $\gamma_{lam}=1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$ となる。導体温度上昇時間として Fig. 3 に示される $\tau=1.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ を選択すると、 $\gamma_{lam}=1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$ での熱侵入量 Q_e 、幾何学的パラメーター D 及び圧力損失 $\Delta P/C_f$ としてそれぞれ $Q_e=1.3 \times 10^{-4} \text{ W/A}$ 、 $D=1.5 \times 10^5 \text{ A/m}$ 、 $\Delta P/C_f=1.6 \times 10^1 \text{ PaAsm}^2/\text{kg}$ が得られる。従って、この電流リード冷端からの熱侵入量 q_e 、

Fig. 4 The total heat load of HTSC leads in the case of (a) $6.6 \times 10^4 M$ and (b) $3.4 \times 10^4 M$

導体長 l はそれぞれ $q_e=Q_e \times I=0.65 \text{ W}$ 、 $l=D \times S=0.41 \text{ m}$ となる。導体長 l から導体温度上昇時間は $t_s=1.7 \times 10^3 \text{ s}$ と十分に冷却系事故に対処できる時間であることが分かる。さらに電流リードの冷却条件は自己維持冷却であるので、 q_e から冷却ガス流量 m を計算すると $m=q_e/l_h=3.1 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ が得られ、 $G=m/s_g=7.9 \times 10^{-3} \text{ kg/sm}^2$ となる。従って、 C_f の定義より $C_f=1.1 \times 10^{-4} \text{ kg/Asm}^2$ が得られ、圧力損失は $\Delta P=1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ となる。このように設計図表を用いることで容易に電流リードの通電特性を知ることができる。

4. 冷凍機冷却を考慮した HTSC 電流リード

HTSC 電流リードを用いたときは冷凍機にかかる負荷は様々な冷却方式で研究されている⁸⁾。冷凍機冷却を考慮した場合に HTSC 電流リードを最適化し、超伝導磁石の冷却を経済的に行うためには、電流リードからの熱侵入量 Q_e を最小にするのではなく、熱侵入量 Q_e と冷却ガス消費に伴う冷媒損失による冷凍負荷 Q_r を加えた実効的熱負荷 Q_t を最小にする必要がある。本研究ではヘリウムガスを電流リード温端 (77 K) で回収し、ヘリウムガスのエンタルピーを冷凍機の冷凍サイクルに利用することを考えた。冷凍機を理想的なカルノーサイクルとし、冷凍機に戻す温度を 77 K とする。4.2 K, 77 K でのヘリウムガスのエンタルピーはそれぞれ $8.5 \times 10^3 \text{ J/kgK}$ 、 $2.4 \times 10^4 \text{ J/kgK}$ なので、冷凍負荷 Q_r は通電電流で規格化した

冷却ガスの質量流量 M の関数として, (a) $Q_r = 4.2 \times (2.4 \times 10^4 - 8.5 \times 10^3) \times M = 6.6 \times 10^4 M$ で与えられる。また一例として, 超伝導大型加速器 HERA に用いられている冷凍機の場合では冷凍負荷は (b) $Q_r = 3.4 \times 10^4 M$ である⁹⁾。Fig. 4 に $\gamma_{lam} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}^2$, $\tau = 2.0 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ の通電特性の HTSC 電流リードに関して, 質量流量 M をパラメーターとした場合の熱侵入量 Q_c , 冷凍負荷 Q_r , 実効的熱負荷 Q_t の関係を示す。実線で示される熱侵入量 Q_c は冷却ガスの流量の増加とともに低減できる。一方, 冷凍負荷 Q_r は冷却ガスの流量と比例関係にある。したがって, 熱侵入量 Q_c と冷凍負荷 Q_r の和で表わせる実効的熱負荷 Q_t は最小値を持つ。自己維持冷却での質量流量は $M = 9.8 \times 10^{-9} \text{ kg/sA}$ であり, (a), (b) いずれの場合も実効的熱負荷 Q_t をほぼ最小にする。

5. 結 論

銅材電流リードに関して確立された設計手法を HTSC 電流リードに応用した。冷却ガスの流れを層流と仮定した HTSC 電流リードの通電特性を冷却特性パラメーター γ_{lam} を導入し, 冷却ガス停止事故時の導体温度上昇特性を考慮した上で設計図表に整理した。さらに自己維持冷却条件下で用いられる HTSC 電流リードは冷凍機冷却を考慮するとほぼ最適な性能を示した。

Nomenclature

C : Specific heat of conductor [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 C_g : Specific heat of helium gas [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 d : Hydraulic diameter i. e. $d = 4s_g/f$ [m]
 f : Cooling perimeter [m]
 F : f normalized by current [mA^{-1}]
 G : m per unit area in cooling channel [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
 I : Current [A]
 l : Conductor length [m]
 m : Mass flow rate of cooling gas [kg s^{-1}]
 M : m normalized by current [$\text{kg s}^{-1}\text{A}^{-1}$]
 P : Pressure of cooling gas [Pa]
 ΔP : Pressure drop of cooling gas [Pa]
 q : Heat leak along conductor [W]
 q_c : Heat leak at cold-end of conductor [W]
 q_r : Reduction of refrigerator power [W]
 q_t : Total refrigerator load i. e. $q_t = q_c + q_r$
 Q : q normalized by current [WA^{-1}]
 Q_c : q_c normalized by current [WA^{-1}]
 Q_r : q_r normalized by current [WA^{-1}]

Q_t : q_t normalized by current [WA^{-1}]
 s : Cross-sectional area of conductor [m^2]
 S : s normalized by current [m^2A^{-1}]
 s_g : Cross-sectional area of cooling channel [m^2]
 S_g : s_g normalized by current [m^2A^{-1}]
 T : Temperature of conductor [K]
 T_c : T at cold-end [K]
 T_w : T at warm-end [K]
 t_g : Temperature rise time [s]
 u : Normalized length of conductor
 x : Length along conductor [m]
 x_g : Length along cooling channel [m]
 θ : Temperature of cooling gas [K]
 λ : Thermal conductivity of conductor [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 λ_g : Thermal conductivity of cooling gas [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 λ_p : Friction coefficient
 ν : Density of current leads effective for thermal runaway [kgm^{-3}]
 ν_g : Density of cooling gas [kgm^{-3}]
 μ : Viscosity of helium gas [sPa]
 ρ : Electric resistivity of conductor [Ωm]

参 考 文 献

- 1) Yu. L. Buyanov, A. B. Fradkov and I. Yu. Sheballin: *Cryogenics* **15** (1975) 193
- 2) K. Ueda, T. Bohno, K. Takita, K. Mukae, T. Ueda, I. Itoh, M. Miura, N. Uno and T. Tanaka: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1993) 400
- 3) Y. Yamada, T. Yanagiya, T. Hasebe, K. Jikihara, M. Ishizuka, S. Yasuhara and M. Ishihara: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1993) 923
- 4) P. F. Herrman, E. Beghin, G. Bottini, C. Cottevielle, A. Leriche, T. Verhaege and J. Bock: *Cryogenics* **34** (1994) 543
- 5) T. Nishioka, K. Maehata, K. Ishibashi, M. Takeo, T. Mito and J. Yamamoto: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo (1994) 1231
- 6) K. Maehata, T. Nishioka, K. Ishibashi and M. Takeo: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1994) 765
- 7) S. Y. Seol and J. R. Hull: *Cryogenics* **33** (1993) 966
- 8) R. Wesche and A. M. Fuchs: *Cryogenics* **34** (1994) 145
- 9) I. Ben-Zxi, B. V. Elkonin, J. S. Sokolowski and D. Sellmann: *Nucl. Instr. and Meth.* **A276** (1989) 53