

Ta バリア MgB₂ 超伝導多芯線を用いた小コイルの 熱的安定性の数値シミュレーション

中尾, 彰浩
九州大学大学院電気電子システム工学専攻修士課程

田中, 和英
九州大学大学院電気電子システム工学専攻博士課程

浦竹, 勇希寛
九州大学大学院電気電子工学専攻修士課程

柁川, 一弘
九州大学大学院電気システム工学部門

他

<https://doi.org/10.15017/17894>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 15 (1), pp.47-53, 2010-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン：

権利関係：

Ta バリア MgB₂ 超伝導多芯線を用いた小コイルの 熱的安定性の数値シミュレーション

中尾彰浩*・田中和英**・浦竹勇希寛***・柁川一弘†・船木和夫†・岡田道哉††

Numerical Simulation of Thermal Stability of a Small Coil Using a Ta-Barrier MgB₂ Multifilamentary Superconducting Wire

Akihiro NAKAO, Kazuhide TANAKA, Yukihiro URATAKE, Kazuhiro KAJIKAWA,
Kazuo FUNAKI and Michiya OKADA

(Received December 11, 2009)

Abstract: We have fabricated a small test coil with an AlN former by employing Cu-Ni sheathed Ta barrier MgB₂ multifilamentary superconducting wire. An overcurrent was applied to the coil conduction-cooled in an initial temperature range between 10 K and 30 K to investigate its thermal stability by measuring temperature distribution in the winding and the terminal voltage after the application of overcurrent. We have also developed numerical model and numerically calculated the responses of the test coil to the overcurrent by simulating the electrical and thermal process with a finite element method and $V-I$ characteristics of the coil. The comparisons of the numerical results with the experimental results show that the terminal voltage and the temperature distribution are rather well reproduced by the numerical model. The temperature dependence of thermal runaway current and total heat generation for the thermal runaway are also discussed in relation to the overcurrent by the numerical model.

Keywords: MgB₂ multifilamentary superconducting wire, Critical current density, Conduction cooling, Overcurrent, Thermal stability, Thermal runaway current

1. はじめに

二ホウ化マグネシウム(以下, MgB₂ と略す)は, 自己磁場中で金属系超伝導体としては非常に高い 39 K を超える臨界温度(以下, T_c と略す)を有する¹⁾. このため, NbTi や Nb₃Sn といった従来の金属系超伝導体に比べ, 液体ヘリウムあるいは冷凍機冷却で使用した場合に温度マージン(臨界温度と使用温度の差)を大きくできるので, クエンチ(温度上昇により超伝導状態から常伝導状態へ転移し, 超伝導状態へ復帰できない現象)が生じにくいマグネット用材料として期待されている.

MgB₂ 線材のマグネット応用技術は, まだ開発途上のフェーズであるが, 実用化の指針を得るためには, これまでの金属系や酸化物超伝導線材と同様に, 線材レベルやコイル構造レベルで, 超伝導特性や交流損失特性に加えて, 安定性などの熱的応答特性を定量化する要素的研究が必要である. 具体的には, 線材の特性改善やマグネット技術の観点から, T_c が従来の

金属系と酸化物系の間位置する MgB₂ の線材特性やコイル特性が, 両者のどちらに近い特性を示すのかを明らかにすることが重要な課題のひとつである.

これまで我々の研究グループでは, その熱的特性評価の第一歩として, MgB₂ 超伝導線材の液体ヘリウム浸漬冷却中, 及び伝導冷却を模擬した固体伝熱冷却における常伝導部伝播現象を定量的に評価してきた²⁾. その結果, 常伝導部の伝播は, 酸化物超伝導線材の伝播に比べると比較的高速であるが, 従来の金属系超伝導線材と比べるとかなり遅い結果が得られており, 両者の中間的なレベルになっていることが分かってきた. このような常伝導部の伝播現象についての要素的研究に加えて, 熱的擾乱に対する安定性についての定量的評価を行うことにより, MgB₂ コイルの安定性やクエンチ保護対策の考え方を明確にすることができる.

本研究では, 将来の伝導冷却 MgB₂ コイルへの応用を念頭に置き, 低損失型の Cu-Ni シース Ta バリア多芯線材³⁾を用いて試験用小コイルを製作し, 幅広い温度領域で伝導冷却して過電流通電に対する熱的応答を測定した. また, コイルの熱的応答を数値シミュレーションすることにより, コイルの熱的安定性の評価を行った.

平成 21 年 12 月 11 日受付

- * 電気電子システム工学専攻修士課程
- ** 電気電子システム工学専攻博士後期課程
- *** 電気電子工学専攻修士課程
- † 電気システム工学部門
- †† 独立行政法人 産業技術総合研究所

2. 実験

2.1 測定試料

試験用小コイル巻線として、Cu-Ni シース Ta バリア MgB₂ 多芯線を用いた。Table 1 にその諸元を示す。線材は in-situ / Powder-In-Tube 法によって作製した。バリア材である Ta は、線材内で Mg や B との反応による I_c の劣化が少ない材料である。またシース材である Cu-Ni は、抵抗率が銅の 1000 倍程度であるので、交流電流及び磁場を変動させた場合に生じる結合損失の低減が期待される。しかし、多芯線材におけるシース材／母材がすべて Cu-Ni の場合は、その平均抵抗率の大きさから、熱的安定性やクエンチ時の発熱低減に問題が生じる。そのため中央部に Cu を配置し平均抵抗率を低減している。線材の芯数は 6 で超伝導コア比は 9.5%、ツイストピッチは 50mm である。

コイルは伝導冷却を行うという観点から、ボビンの材料として、熱伝導が良好な絶縁材料である窒化アルミ（以下、AlN と略す）を採用した。形状は、巻径 35mm(ボア径 25mm)、外径 98mm、高さ 48mm である。またコイル内部に配置される線材の層間、ターン間、線材とボビン間には、10⁻¹Pa 以下の真空度で、熱伝導性が良好なエポキシ樹脂で含浸を行った。Table 2 にコイルの仕様を示す。

2.2 測定条件

前節で示したコイルに伝導冷却下で臨界電流を超える過剰電流を通電し、これに伴う磁束フロー損失による熱負荷に対してコイルの熱的安定性を観測した。これにより、危険な熱負荷のレベルや冷却条件との関係などに関する大まかなコイルの熱的応答特性についての目安を議論した。

Fig. 1 に本研究で使用した実験装置の概略図と試験用小コイルへの温度センサの取付け位置を示す。MgB₂ コイルは温度調整可能な内挿クライオスタット内の冷却ヘッドに装着した。ボビン中央部、ボビン下部、巻線部下端の温度(それぞれ、T_{ic}、T_{ib}、T_{ob} と記す)をセルノックス温度センサで測定した。冷却ヘッドは温度制御部を経由するヘリウムガスにより冷却される。冷却ヘッドの温度は、温度制御部に設置したヒータによりヘリウムガスを加熱して制御する方式である。コイル上フランジを冷却ヘッドにグリースを介して面接触させることにより、コイル巻線はボビンを介して伝導冷却される。

初期温度は 10~30K の温度範囲で設定した。また通電電流は、1.04 A/s の変化率で掃引して、ある所定値でホールドし、その後急速遮断した。通電電流のホールド値は I_c レベルから始めて、I_c の 10%刻みで増加させていき、熱暴走が観測されるまで電流のホールド値を増加させながら繰り返し通電した。そのような過剰電流を 300 秒間継続して通電させた際の温度センサを取り付けた各部の温度変化及びコイル両端電圧応答を測定した。

Table 1 Specifications of the MgB₂ 6-filament wire.

Sheath	Cu-10%Ni
Barrier	Ta
Wire diameter	0.78 mm
Structure	MgB ₂ / Cu / Ta /Cu-Ni 0.095/0.06/0.10/0.745
Twist pitch	50 mm
Number of filament	6
Filament size	0.10 mm

Table 2 Specifications of the MgB₂ test coil.

Wire	Length	58 m
Coil	Inner dia.	35 mm
	Outer dia.	51 mm
	Height	48 mm
	Turn	40×10
	Inductance	3.66 mH
	Coil const.	0.0082 T/A
Insulator		T-glass
Resin		Epoxy (in vacuum)

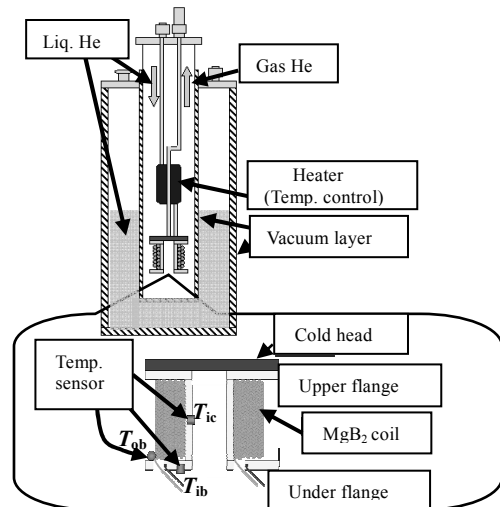


Fig. 1 Cross-section of the experimental setup and the MgB₂ coil.

2.3 測定結果

Fig. 2(a), (b)は、それぞれ、初期設定温度 14K のときの熱暴走前（通電電流 $I = 1.4I_c$ ）と熱暴走と判断した際（ $I = 1.5I_c$ ）の測定結果である。各通電において、上から順にコイル両端電圧、T_{ic}、T_{ob}、T_{ib}の時間変化を示す。3箇所（T_{ic}、T_{ob}、T_{ib}）の温度の初期値が若干異なっているのは、直前の測定からの時間経過が短かく、温度の均一化が不十分だったことによる。ここでは初期温度からの温度上昇分 ΔT に着目した。1.4I_c

通電時の場合には、ほぼ ΔT_{ic} (T_{ic} の温度上昇分、以下同様) = ΔT_{ib} となっていることから、ボビン内筒部自体の温度上昇は認められるものの、ボビンを介した冷却はまだ有効に働いているといえる。300 秒間の通電ではクエンチに至らないことから、コイルの熱的な安定性も維持できている。また、 T_{ic} 、 T_{ib} の上昇分と比べて T_{ob} の上昇分が多少大きく、通電電流値を大きくする毎に温度差も大きくなった。これは T_{ob} が冷却ヘッド部から最も離れており、冷却が効きにくくなっていることによるものと考えられる。これに対し、1.5 I_c 通電時には、Fig. 2(b)の電圧の応答に矢印で示す変曲点が観測されたことから、熱暴走と判断できる。しかしながら、コイルの両端電圧や温度変化は比較的緩やかであるため、コイル保護の観点からは十分に対策可能なレベルであると考えられる。

Fig. 3 に熱暴走開始時のコイル両端の開始電圧に対する発熱量の初期温度依存性を黒塗り印で示す。この発熱が熱暴走を抑制できる発熱量の上限に相当するとすると、その限界レベルが 10~20K の範囲で極大を持つことがわかる。この結果は、温度マージンの初期温度依存性だけでなく、ボビンも含めたコイル全体の各種材料の熱伝導率等の熱的特性も熱暴走に関わっていることを示唆している。このことは、熱的に安定な動作特性を持つコイルの冷却構造を設計する際、伝熱材料の熱伝導率等の熱的特性の温度依存性までを考慮した解析が必要になることを意味している。

3. 数値解析

コイル巻線内の熱的擾乱に対する安定性について、実験と数値解析の両面から検討してコイルの熱的特性を評価する。そこで第2節で行った過電流通電試験の結果を近似的に再現できる数値解析コードを作成し、過電流通電時におけるコイルの両端電圧、及び温度分布の時間推移の数値シミュレーションを行った。本研究では、過電流通電試験時に得られたコイルの V - I 特性よりコイルの総発熱パワーを求め、この発熱が巻線部（巻線と含浸材の複合構造）で一様に生じるとする仮定の下で、コイルの熱的応答の数値解析を行った。

3.1 熱伝導方程式

数値解析の基礎方程式として、次に示す熱伝導方程式を用いた。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + G \quad (3.1)$$

ここで、 C 、 T 、 λ 及び G はそれぞれ比熱[J/m³K]、温度[K]、熱伝導率[W/m·K]、発熱[W/m³]を表している。(3.1)式の左辺第1項は、線材の温度上昇に使われる総熱量を表し、右辺の第1項は熱拡散量を、第2項は超伝導線の常伝導転移に伴う発熱を表している。数値解析により得られた解 T' を(3.1)式に代入しても、それが近似解であるため方程式を

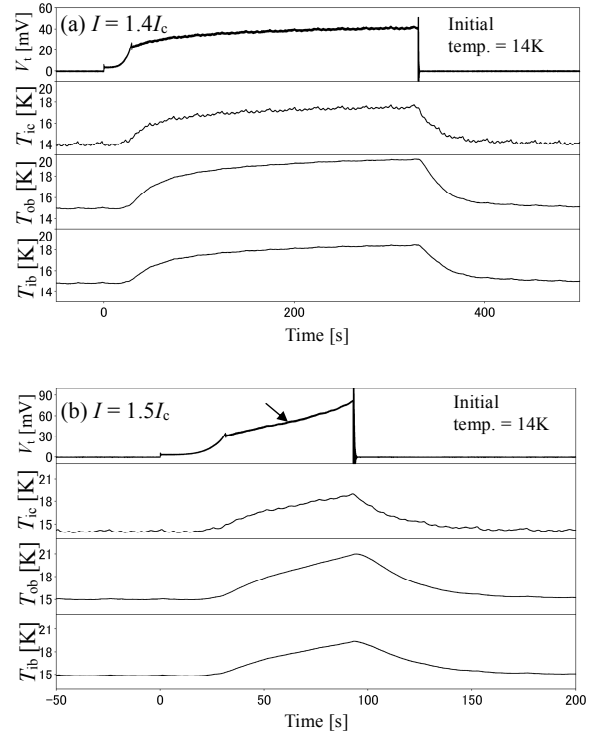


Fig. 2 Responses of terminal voltage and sensor temperature to overcurrent (Initial temp. 14K, (a) $I=1.4I_c$, (b) $I=1.5I_c$).

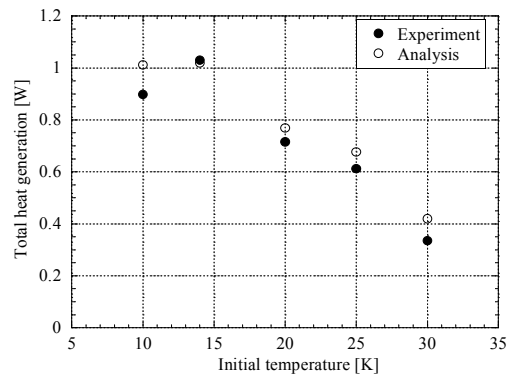


Fig. 3 Initial temperature dependence of total heat generation for thermal runaway (●: Experimental results, ○: Numerical results).

満たさないため、解を(3.1)式に代入して残る残差 R を次のように定義する。

$$R \equiv -\nabla \cdot (\lambda \nabla T') + C \frac{\partial T'}{\partial t} - G \quad (3.2)$$

ここで、重み関数 w を導入し、対象領域全体で残差の重みつき積分を零にする。

$$\int_V w R dV = 0 \quad (3.3)$$

ただし、積分領域 V は対象とする系全体を表す。(3.3)式に(3.2)式を代入して整理すると、次式が得られる。

$$\int (\nabla w) \cdot (\lambda \nabla T') dV + \frac{\partial}{\partial t} \int w C T' dV - \int w G dV = 0 \quad (3.4)$$

(3.4)式が有限要素法において解くべき方程式となる．本研究では重み関数 w を補間関数に等しくする Galerkin 法を適用する．

3.2 解析条件及び解析モデル

本解析において，過電流による発熱は，過電流通電試験時に得られたコイルの $V-I$ 特性を $V = V_0 (I / I_c)^n$ で表す n 値モデル⁴⁾で近似することにより導入した．コイルの I_c の温度依存性及び n 値については，それぞれ Fig. 4, Fig. 5 に破線で示した試行関数を用いた．それぞれの関数形を次に示す．

$$I_c = 27.5 \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right\}^{1.7} \quad (3.5)$$

$$n = 4.37 - 4.23 \times 10^{-2} T \quad (3.6)$$

解析モデルについて，本研究で用いたコイルは軸対称性を持つので計算を簡略化するために2次元軸対称モデルを用いた．Fig. 6 に解析モデルを示す．モデルは，巻棒である AIN 部と巻線部に分かれており，巻線部は MgB_2 線材と含浸材であるエポキシ樹脂が含まれている．要素数は，AIN 部が 396，巻線部が 192 であり，総節点数は 360 である．冷却条件については，コイル上フランジ部と冷却ヘッド部との境界面の温度を一定としている．以下に各部分の解析に使用した物性値を記す．

(1) AIN 部⁵⁻⁶⁾

$$C_{AIN} = 293 + 536T + 0.323T^2 + 0.342T^3 \quad (0 < T < 100) \quad (3.7)$$

$$\lambda_{AIN} = \begin{cases} 2.41 \times 10^{-3} - 2.78 \times 10^{-3} T \\ + 8.39 \times 10^{-4} T^2 + 3.64 \times 10^{-3} T^3 & (0 < T < 20) \\ -19.0 + 2.81T - 166 \times 10^{-2} T^2 \\ + 3.72 \times 10^{-5} T^3 & (20 < T) \end{cases} \quad (3.8)$$

ここで， C_{AIN} ， λ_{AIN} はそれぞれ AIN の比熱及び熱伝導率である．

(2) 巻線部⁷⁻¹⁰⁾

(2.1) 比熱

$$C_{Cu} = 1.32 \times 10^5 - 2.09 \times 10^4 T + 969T^2 - 5.00T^3 \quad (10 < T \leq 70) \quad (3.9)$$

$$C_{MgB_2} = 1.88 \times 10^4 - 1.83 \times 10^3 T + 77.7T^2 \quad (10 \leq T < 45)$$

$$C_{epoxy} = \begin{cases} 237 - 152T + 24T^2 & (7 < T < 30) \\ 2.09 \times 10^4 + 6.69 \times 10^3 T - 5.31T^2 & (30 < T) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$C_{wind} = 0.5(0.9C_{Cu} + 0.1C_{MgB_2}) + 0.5C_{epoxy} \\ = 6.89 \times 10^4 - 1.19 \times 10^4 T + 725T^2 - 6.02T^3 \quad (10 \leq T \leq 45) \quad (3.12)$$

$$C'_{wind} = k C_{wind} \quad (3.13)$$

ここで， C_{Cu} ， C_{MgB_2} ， C_{epoxy} はそれぞれ銅， MgB_2 ，エポキシの比熱であり， C_{wind} は各要素の体積率を考慮した平均比熱

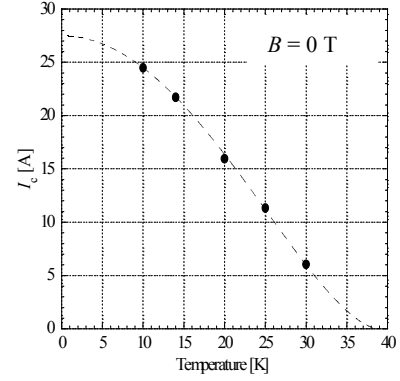


Fig. 4 Temperature dependence of I_c evaluated from the coil $V-I$ characteristics.

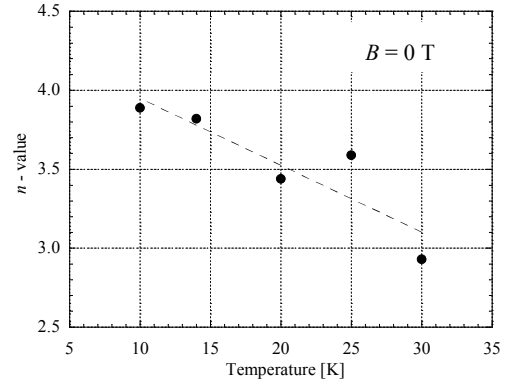


Fig. 5 Temperature dependence of n -value evaluated from the coil $V-I$ characteristics.

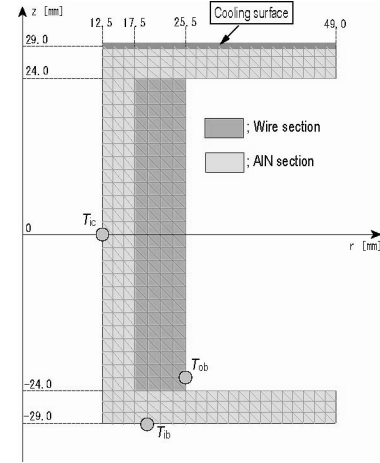


Fig. 6 Analytic model.

である．また C'_{wind} は解析に用いる平均比熱であり， k は次項の k' と共に調整パラメータである．

(2.2) 熱伝導率

$$\lambda_{Cu} = -5.7 \times 10^2 + 1.9 \times 10^2 T - 5.4T^2 + 4.3 \times 10^{-2} T^3 \quad (10 < T < 50) \quad (3.14)$$

$$\lambda_{MgB_2} = -1.1 + 0.32T - 3.3 \times 10^{-4} T^2 - 2.7 \times 10^{-5} T^3 \quad (6 < T < 45) \quad (3.15)$$

$$\lambda_{\text{epoxy}} = \begin{cases} 8.94 \times 10^{-2} + 9.93 \times 10^{-4} T \\ -2.07 \times 10^{-5} T^2 \\ 5.38 \times 10^{-2} + 2.90 \times 10^{-4} T \\ -1.64 \times 10^{-5} T^2 \end{cases} \quad \begin{matrix} (7 < T \leq 17) \\ (17 < T < 50) \end{matrix} \quad (3.16)$$

ここで、 λ_{Cu} 、 λ_{MgB_2} 、 λ_{epoxy} はそれぞれ、銅、MgB₂、エポキシの熱伝導率である。また、線材は密巻されており、軸方向及び径方向の合成熱伝導率 λ_{wind} は共に次式のように近似した。

$$\lambda_{\text{wind}} = \frac{1}{0.5 \left(\frac{0.9}{\lambda_{\text{Cu}}} + \frac{0.1}{\lambda_{\text{MgB}_2}} \right) + \frac{0.5}{\lambda_{\text{epoxy}}}} = \begin{cases} 0.1682 + 2.999 \times 10^{-3} T \\ -7.100 \times 10^{-5} T^2 \\ 0.1055 + 5.853 \times 10^{-3} T \\ -3.374 \times 10^{-5} T^2 \end{cases} \quad \begin{matrix} (10 < T < 17) \\ (17 < T < 50) \end{matrix} \quad (3.17)$$

また、比熱の場合と同様に、解析に用いる熱伝導率 λ'_{wind} は次式で表されるものを用いる。

$$\lambda'_{\text{wind}} = k' \lambda_{\text{wind}} \quad (3.18)$$

3.3 解析結果

過電流通電試験時と同様に、初期設定温度を 10K から 30K まで約 5K 刻みに設定し、数値解析を行った。Fig. 7(a), (b)に、初期設定温度 14K で、それぞれ $I = 1.4I_c$ 、 $1.5I_c$ のときのコイル両端電圧の実験結果と解析結果との比較を示し、Fig. 8(a), (b)に $I = 1.5I_c$ の際の各温度センサの温度推移の実験結果と解析結果を示す。また初期設定温度 20K における熱暴走前後のコイル両端電圧の実験結果と解析結果との比較を Fig. 9(a), (b)に示す。

Fig. 7(a), (b)より、初期設定温度 14K においては、実験時における熱暴走前と熱暴走時のいずれの場合においても、電流掃引時における誘導電圧分を差し引くと、電流掃引時、一定電流通電時共に実験結果と解析結果がよく一致した。ここには示していないが、 $I = 1.0I_c$ から $1.3I_c$ においても同様の結果が得られている。また、センサ各部の温度についても温度の上昇度や上昇率共に、Fig. 8(a), (b)より実験値と解析結果が概ね一致するという結果が得られている。一方、初期設定温度 20K においては Fig. 9(a), (b)より、実験値に比べ解析結果の方が両端電圧の増加が抑えられており、両者の間にずれが生じていることがわかる。また同様に各部の温度推移についても、実験値に比べ解析結果の温度上昇が抑えられている結果も得られている。これらのことを考慮すると、初期設定温度 20K においては、実験時に比べ数値解析における冷却が相対的に優勢で、発熱が抑えられていると考えられる。

次に、数値解析から得られた熱暴走電流 I_{tr} について、実験結果との比較を Fig. 10 に示す。ここで I_{tr} は試験時と同様に、過電流通電後 300 秒以内に両端電圧の経時変化曲線

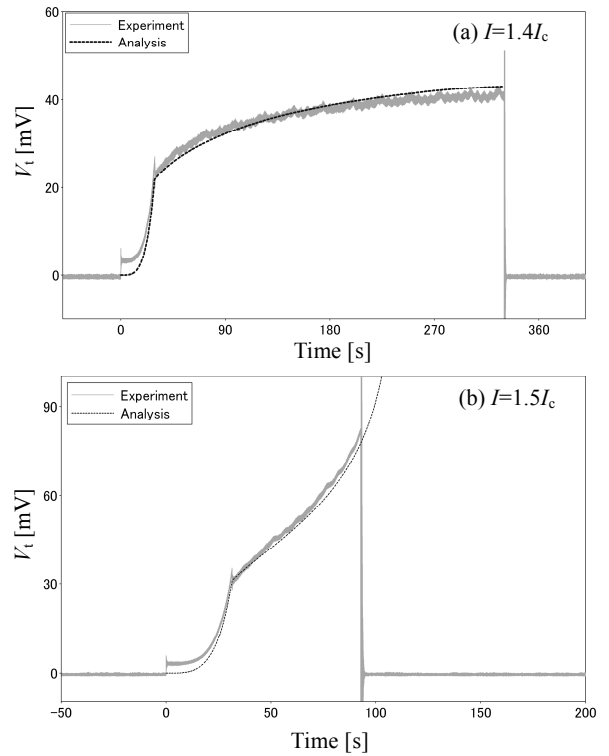


Fig. 7 Numerical result of terminal voltage compared with experimental result (Initial temperature 14K, (a) $I=1.4I_c$, (b) $I=1.5I_c$).

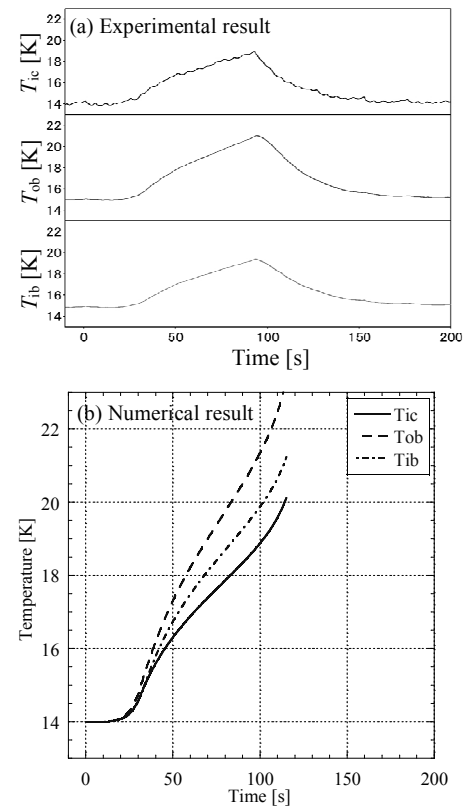


Fig. 8 Numerical result of sensor temperature compared with experimental result (Initial temperature 14K, $I=1.5I_c$.(a)Experimental result ,(b)Numerical result).

に変曲点が生じた通電電流値とした。実測結果と比較すると、初期設定温度が 10K 及び 14K においては多少低めに出ているが、20K 以上の初期設定温度の場合には、実験時に熱暴走前と熱暴走と判断した電流値 (○, ×) の範囲内で熱暴走となるような解析結果が得られた。また、温度が上昇しコイル I_c が低下する傾向に沿って、 I_H も低下していることがよく再現されている。

また、数値解析により得られた許容発熱の初期温度依存性を Fig. 3 に白抜き印で示す。ここで許容発熱は、熱暴走時におけるコイル両端の開始電圧に対する発熱量とする。

Fig. 3 の実験結果と比較すると、極大の存在も含めて全体的な傾向を再現することができることが確かめられた。

最後に、初期設定温度 14K, $I = 1.5I_c$ において通電開始 117 秒後の巻線部の温度分布の数値解析結果を Fig. 11 に示す。解析より、ボビンを介した冷却は有効ではあるものの、冷却面から遠く、またボビンとの接触面から離れた部分において局所的に急激な温度上昇をしていることがわかった。ゆえに今後のコイル作製においては、このような局所的発熱を分散させる対策が必要である。具体的には、熱伝導が良好な金属シートや絶縁物などのヒートドレインを巻線部の内層、外層、フランジ面の各部に接するように配置することが考えられる。

以上のことから、今回作成した数値解析コードは概ね妥当であり、実験結果を近似的に再現できていると言える。しかし、初期設定温度によっては一部で定量的にはうまく実験結果を再現できないものもあった。今後、数値解析結果の信頼性を向上させるため、冷却ヘッドによる冷却条件をより厳密に考慮することに加え、コイル巻線と同等の線材の短尺試料の E - J 特性を測定してこれに基づいたコイル内のより具体的な発熱分布を考慮した解析を行っていく必要がある。

4. ま と め

Cu-Ni シース Ta バリア多芯線材を用いて作成した試験用小コイルの過電流通電試験を行い、 MgB_2 コイルの熱的安定性を検討した。また、過電流通電に対するコイルの熱的応答を評価するために有限要素法による解析コードを作成し、実験時に得られたコイルの V - I 特性を用いて、巻線部で一様に発熱する条件下でのコイルの熱的応答について解析を行った。

その結果、コイル両端電圧、3か所のセンサ部温度に関して、解析値は概ね実験値と一致し、また熱暴走電流や許容発熱量の温度依存性についても数値解析により大まかに再現することができた。しかし、初期設定温度によっては、一部で定量的にはうまく実験結果を再現できないものもあった。今後、数値解析結果の信頼性を向上させるため、より厳密に冷却条件を考慮することに加え、コイル内部の発熱分布までを取り込んだ解析を行っていく必要がある。

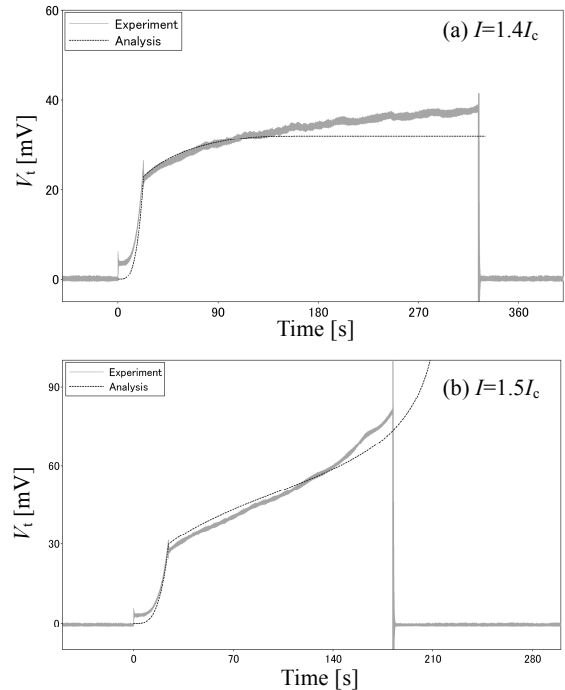


Fig. 9 Numerical result of terminal voltage compared with experimental result (Initial temperature 20K, (a) $I=1.4I_c$, (b) $I=1.5I_c$).

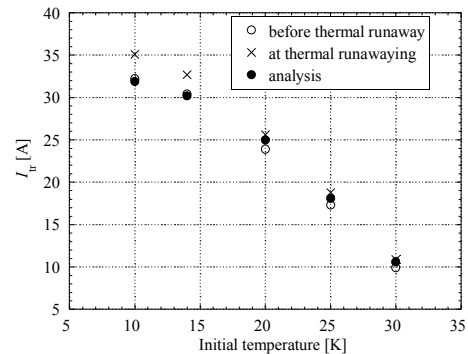


Fig. 10 The comparisons of the numerical results with the experimental results of thermal runaway current.

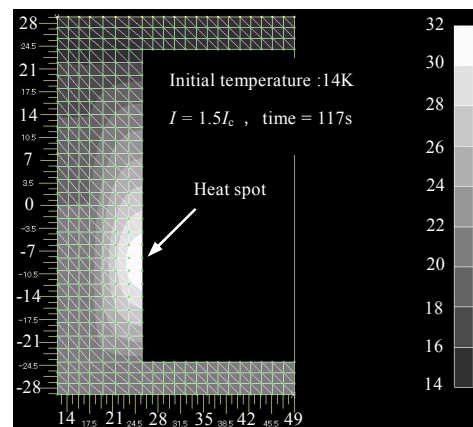


Fig. 11 Temperature distribution of MgB_2 coil when overcurrent applied (Initial temperature 14K, $I = 1.5I_c$, time = 117s).

参 考 文 献

- 1) J. Nagamatsu, et al.: “Superconductivity at 39K in magnesium diboride,” *Nature* **410** (2001) 63-64.
- 2) K. Funaki, et al.: “Quantitative Analysis of Normal Zone Propagation in MgB₂ Superconducting Wires,” : TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn) **43** (2008) 423-429.
- 3) K. Tanaka, et al.: “AC loss properties of MgB₂ multifilament wires” *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 095007 (5pp).
- 4) T. Nitta, et al.: “Superconductivity and energy engineering” (Ohmsha. Ltd., 2006) 46-47.
- 5) K. Watari, et al.: “Thermal conductivity of AlN ceramic with a very low amount of grain boundary phase at 4 to 1000 K” *J. Mater. Res.*, Vol. 17, No. 11, Nov 2002 2940-2944.
- 6) J. C. Nipko, et al.: “Phonon excitations and related thermal properties of aluminum nitride” *Phys. Rev. B* **57**, 10550 – 10554.
- 7) M. Schneider, et al.: “Heat and charge transport properties of MgB₂” *Physica* **C363** (2001) 6 – 12.
- 8) A. Rao, et al.: “Low temperature specific heat (zero field and with field) of Fe and Mn-doped MgB₂” *Physica* **C469** (2009) 64 – 69.
- 9) L. E. Evseeva, et al.: “Influence of anthraquinone inclusions on the thermal properties of epoxy resins at low temperatures” *Cryogenics* **38** (1998) 253 – 255.
- 10) Cryogenic Association of Japan, “Handbook of applied superconductivity and cryogenic engineering,” (Ohmsha, Ltd., 1993) 581, 1091, 1096.