

TaバリアMgB₂線材を用いた小コイルの熱的安定性

田中, 和英

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門

中尾, 彰浩

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門

浦竹, 勇希寛

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門

柁川, 一弘

九州大学超伝導システム科学研究センター

他

<https://doi.org/10.15017/17871>

出版情報：九州大学低温センターだより. 4, pp.8-14, 2010-03. 九州大学低温センター
バージョン：
権利関係：

Ta バリア MgB₂ 線材を用いた小コイルの熱的安定性 Thermal stability in of small coil using Ta barrier MgB₂ wire

電気電子システム工学専攻
超伝導システム科学研究センター
産業技術総合研究所

田中和英、中尾彰浩、浦竹勇希寛
柁川一弘、船木和夫
岡田道哉

Department of Electrical and Electronic Systems Engineering

Kazuhide TANAKA, Akihiro NAKAO, Yukihiro URATAKE

Research Institute of Superconductor Science and Systems

Kazuhiro KAJIKAWA, Kazuo FUNAKI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Michiyo OKADA

Abstract—We have fabricated a small test coil with an AlN former by employing Cu-Ni sheathed Ta barrier MgB₂ multifilamentary wire made in a wind-and-react process. An overcurrent was applied to the coil conduction-cooled in an initial temperature range between 10K and 30K to investigate its thermal stability by measuring temperature distribution in the winding and the terminal voltage after the application of overcurrent. The experimental results show that permissive temperature rise without thermal runaway decreases with the initial temperature, while total heat generation for the thermal runaway has a maximum at an initial temperature around 14K. We also 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 with the experimental results show that the electrical and thermal responses are rather well reproduced by the numerical model.

注) 本報告は、低温工学への原著論文 (印刷中) を再編成したものである。

1. はじめに

2001年に発見された二ホウ化マグネシウム (以下, MgB₂ と略す) は, 金属系超伝導材料としては非常に高い 39 K の臨界温度 (以下, T_c と略す) を有する¹⁾. この T_c は, 現在超伝導材料として主に用いられている NbTi ($T_c=9.8$ K) や Nb₃Sn ($T_c=18$ K) と比較して, 20 K 以上も高い. このため, 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を大きくできるので, クエンチ (温度上昇による超伝導から常伝導への転移) が生じにくいマグネット用材料として期待されている. このため, 発見以来, 多くの研究機関で長尺線材化や臨界電流密度 (以下, J_c と略す) の向上を目指した研究が行われてきた²⁻⁴⁾. 現在では, 1 km を超す線材や, MRI マグネットの試作が行われ画像の撮影にも成功している⁵⁻⁶⁾. さらには, 永久電流モードでの長時間運転も可能なレベルになっており⁷⁾, MgB₂ 超伝導体の更なる特性向上により, 産

業用，医療用，運輸用，電力用などの様々な分野での応用の拡大が期待される。

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，液体ヘリウム浸漬冷却中における MgB_2 線材の常伝導部の伝播速度を測定し，印加磁場や通電する電流値に対する最小伝播電流値（常伝導部の伝播が起こらないための通電電流の上限値）や常伝導部の伝播速度などの熱的特性を測定し，これらの特性と冷却条件との関係を定量的に評価してきた⁸⁾。本研究では，伝導冷却 MgB_2 コイルの応用を念頭におき，Cu-Ni シース Ta バリア多芯線材を用いて作製した試験用小コイルを，幅広い温度領域で過電流通電し，コイルの熱的応答の実験結果と数値解析結果から， MgB_2 コイルの熱的安定性に対する基礎的データを得ることを目指した。

2. 実験方法

2.1 試料

本研究では，ex-situ 法に比べて，不純物添加や粉末微細化などの効果により，将来的に超伝導特性の改善が見込める in-situ 法に着目し，5 芯の MgB_2 多芯線材を作製した。Mg 粉末とアモルファス B 粉末を 1:2 の組成比に秤量した後，アルゴン (Ar) 雰囲気中でボールミル混合した。粉末を充填する金属管(バリア材)には，Mg や B との反応による I_c 劣化が小さい純 Ta 管を用いた。また，Ta の外側には Cu-10%Ni 管(以下，Cu-Ni と略す)を被せた。さらに，熱的安定性やクエンチ時の発熱低減のため，中央部に Cu を配置した。Fig. 1(a) に伸線加工後の単芯線材の横断面を示す。その後，得られた単芯線材を 6 等分の長さになるように切断し，これを Cu-Ni 合金管に組み込んだ。ガンドリル方式により作成した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線の横断面を Fig. 1(b)，その仕様を Table 1 に示す。得られた線材の MgB_2 超伝導コア比は 9.5%である。ツイストピッチは 50 mm である。

作製した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線を用いてソレノイドコイルを作製した。本研究では，巻線してから熱処理を施す Wind-and-React 法を適用した。熱処理条件は，Ar 気流中で，600°C，1時間とした。巻線した線材の長さは 58m で，コイルのターン数は 400 である。コイル定数は 0.0082 T/A である。なお，線材表面の絶縁は，耐熱性ガラスを編組被覆するものとした。本コイルは伝導冷却を行うことから，ポビンは熱伝導が良好な窒化アルミ製(以下，AlNと略す)とした。形状は，内径 35 mm (ボア径 25 mm)，外径 98 mm，高さ 48 mm である。

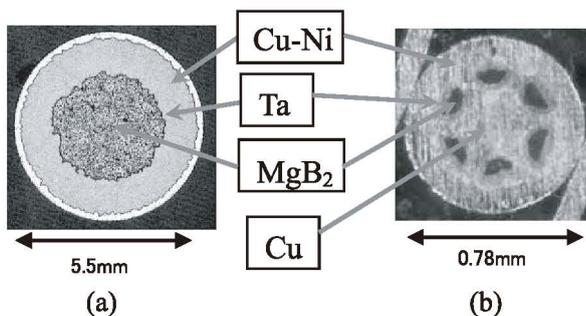


Fig. 1 Cross sectional view of the MgB_2 mono-core wire and 6-filament wire.

Table 1 Specifications of the MgB_2 6-filament wire

	Cu-10%Ni-sheathed wire
Barrier	Ta
Wire dia.	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

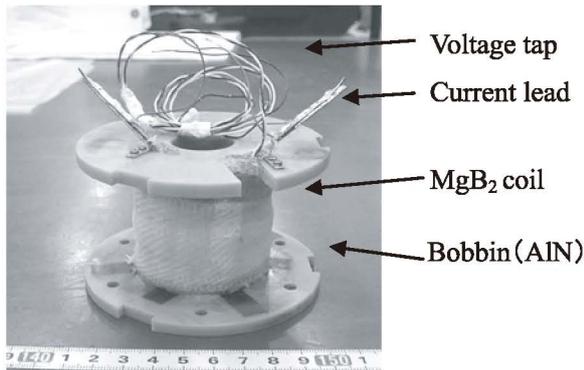


Fig. 2 A photograph of the MgB₂ test coil.

Table 2 Specifications of the MgB₂ test

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)	

コイル最内層部では、最大で 2.2%の曲げ歪が加わっているが、事前確認において本線材は曲げ歪が 3%以内であれば、巻線後に熱処理を行うことで線材性能は低下しないことを明らかにしており、今回の曲げ歪は許容値である。

通電試験を行うにあたり、コイルに温度センサなどの計測線を取り付けるため、ボビンの中央部と下部に貫通孔を設けた。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^{-1} Pa 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。Fig. 2 にエポキシ含浸後のコイルの外観を示す。また、Table 2 にコイルの仕様を示す。

2.2 測定方法

MgB₂ コイルの臨界電流 I_c は、直流四端子法を用いて測定した。その際、温度調整可能な内挿クライオスタット内のコールドヘッドに MgB₂ コイルを装着し、コールドヘッドの温度範囲 5~30 K で特性評価した。冷媒はヘリウムガスである。温度制御は、冷却ガス流量と、試料上部に取り付けたヒータ電流を調整することで行った。

Fig. 3 に使用したクライオスタット概略図とコイルへの温度センサ取付け位置を示す。コイル温度は、ボビン中央部、ボビン下部、巻線部下端（それぞれ、 T_{ic} , T_{ic} , T_{ob} と記す）に設置したセルノックス温度センサで測定した。コイル上フランジとコールドヘッドはグリースを介して面接触させ、ボビンを介した伝導冷却した。

3. 過電流通電実験

作製したコイルについて、5~30 K の温度範囲でコイル I_c を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。ここで、横軸は T_{ic} の実測値である。コイル I_c

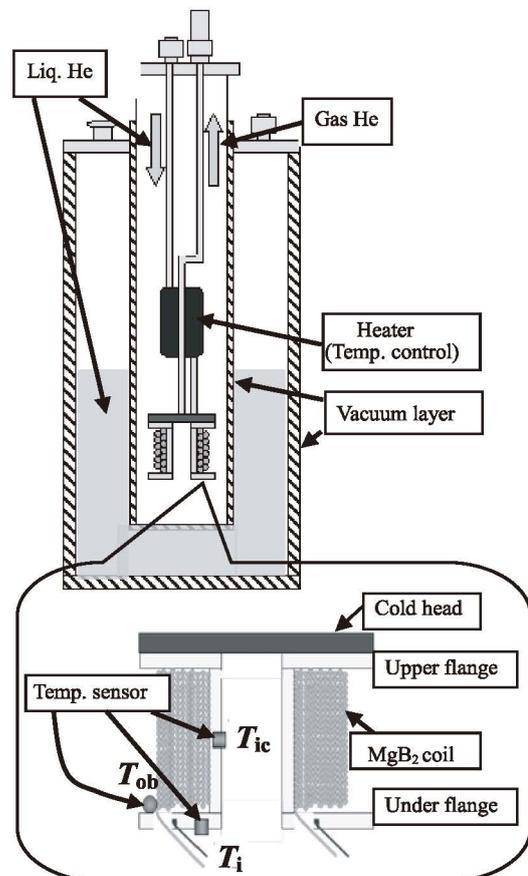


Fig. 3 Cross-section of present cryostat and the MgB₂ coil.

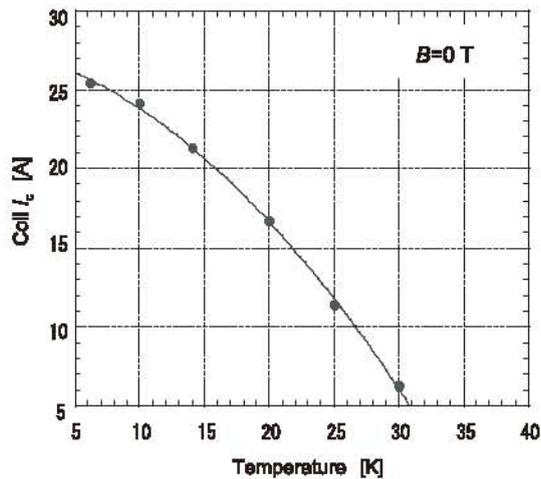


Fig. 4 Temperature dependence of I_c evaluated from the coil V - I characteristics.

は、巻線全長 58 m に対して、端子間電圧が 5.8 mV に達した時の通電電流値とした。

コイルの通電電流は、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。コイル I_c の温度依存性で得られた結果をもとに、通電電流のホールド値を I_c レベルから始めて、 I_c の 10% 刻みで増加させた。以上のような通電パターンを、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。Fig. 5(a)~(c)に初期設定温度 14 K のときの測定結果を示す。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。電流掃引時には、両端電圧に誘導電圧

が重畳されている。3 箇所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十分ではなく、温度の均一化が不十分なためである。ここでは、初期温度からの温度上昇分に着目した。 I_c を通電した場合 ($I = 1.0I_c$) には、若干の温度上昇分がほぼ均一であることから、AIN 製ボビンによる冷却が有効であるといえる。このときのコイル巻線部全体の発熱は、コイル端子電圧と通電電流の積として求めると 0.15 W である。一方、 $I = 1.4I_c$ 通電時の場合には、ほぼ $\Delta T_{ic} = \Delta T_{ib}$ 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は至らないことから、熱的な安定性も維持できていると判断した。ボビンの上フランジに熱接触させている冷却ヘッド部の温度は通電前の温度レベルを維持する制御を行っているため、この温度上昇分は主に冷却ヘッド部とボビンとの温度差になっているものと推

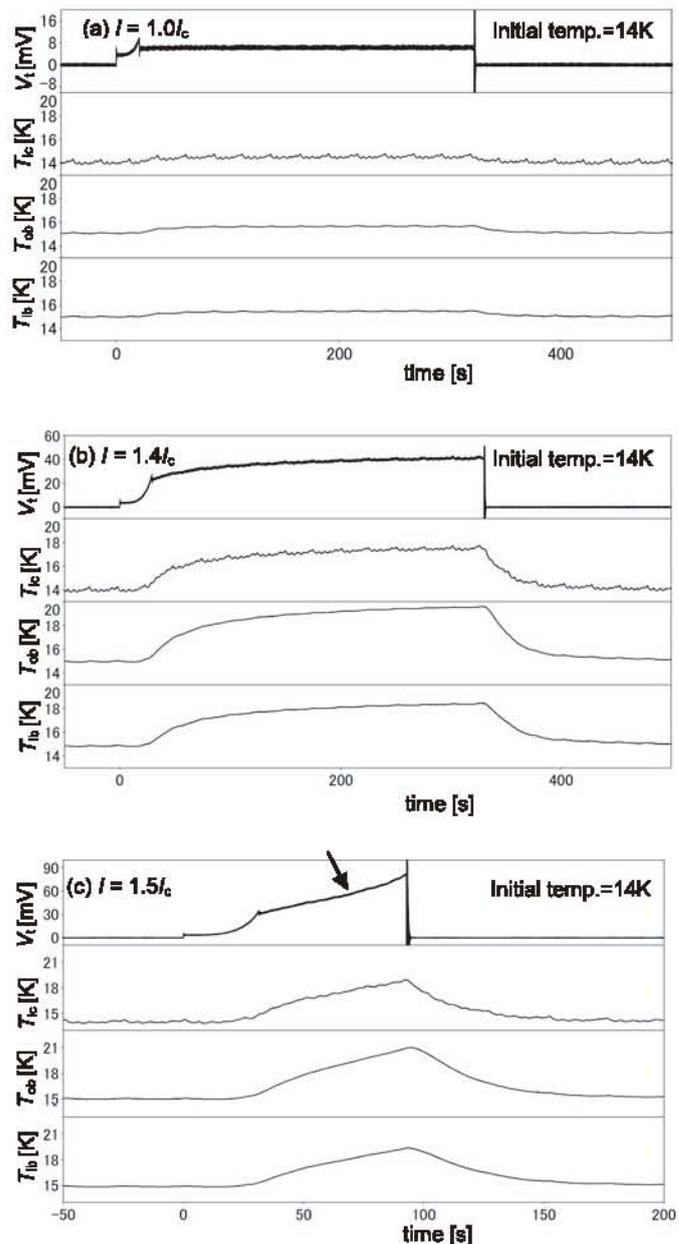


Fig. 5 Responses of terminal voltage and sensor temperatures to overcurrent. (a) $1.0I_c$, (b) $1.4I_c$, (c) $1.5I_c$.

察される。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、 $1.5I_c$ 通電時には、Fig. 5(c) の電圧の応答に矢印で示す変曲点が観察されたことから、熱暴走と判断できる。このときのコイル全体での発熱は 1.95 W に達した。しかしながら、コイル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。

次に、過電流通電において、温度上昇が顕著であった T_{ob} の上昇分の漸近値について、その過電流設定値への依存性を全ての初期設定温度についてまとめたものを Fig. 6 に示す。測定は初期設定温度 10~30 K の範囲で実施した。図中の縦線は、各初期設定温度において、熱暴走を観測した過電流レベルを表している。初期設定温度が低いほど、熱暴走に至るまでの温度上昇に余裕があることがわかる。これは初期設定温度が低いほど、 T_c に至るまでの余裕度(温度マージン)が大きいことによるものであろう。

Fig. 7 に熱暴走開始時のコイル発熱の初期温度依存性を示す。この発熱が熱暴走を抑制できる発熱量の上限とすると、その限界レベルが 12~14 K の範囲内で極大値を持つことがわかる。この要因として、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における伝熱効率の影響も考えられる。その場合には、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に当り、伝熱材料の熱伝導率の温度依存性までを考慮した解析が必要になる。今後は、これらのことにも着目し、コイル化における熱設計データベースを蓄積することが課題である。

4. 考察

コイル全体に分布する熱的擾乱について実験と数値解析の両面から評価し、コイルの熱特性をモデル化することを試みた。ここでは、過電流通電試験時に得られたコイルの平均的な V - I 特性からコイル巻線部の全発熱を求め、これがコイル巻線部で一様に分布するとする第1ステップの近似により、発熱に対するコイルの熱的応答について解析を行った。

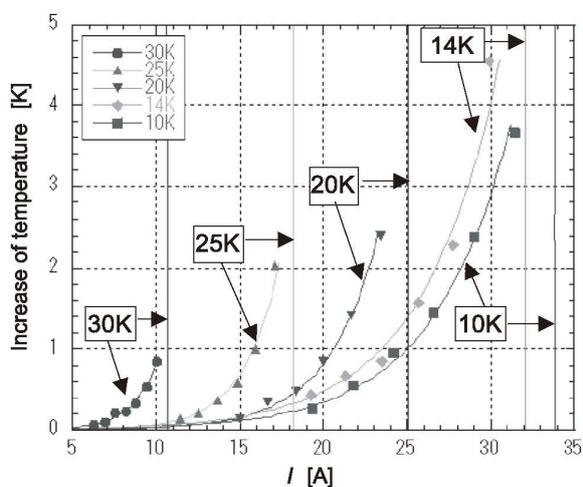


Fig. 6 Temperature rise in T_{ob} after 300s application of overcurrent.

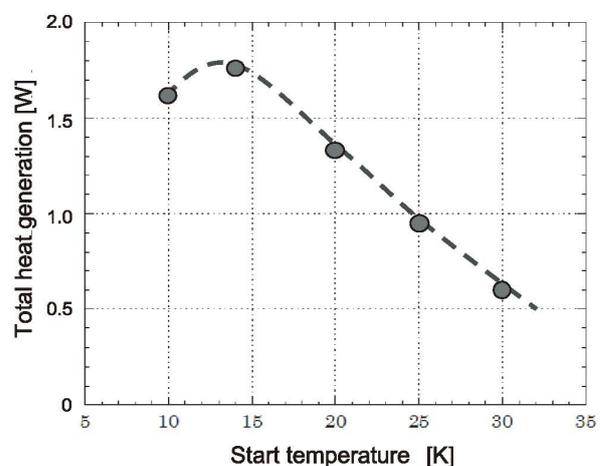


Fig. 7 Start temperature dependence of total heat generation for thermal runaway.

数値解析は、熱伝導方程式に重みつき残差法、特に Galerkin 法を適用し、導かれた方程式を有限要素法により解いて実施した。解析モデルについて、今回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。モデルは巻棒である AIN 部と巻線部とに分かれており、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。冷却条件として、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（初期設定温度）としている。また、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 n 値モデルで近似することにより評価した。このうち、コイルの I_c については Fig. 4 に示した測定結果の近似曲線を、得られた n 値については Fig. 8 に破線で示した試行関数を用いた⁹⁾。

過電流通電試験時と同様に、初期設定温度を 10 K から 30 K まで 5 K 刻みに設定し、数値解析を行った。Fig. 9 及び Fig. 10 に初期設定温度を 14 K、 $I=1.5I_c$ とした際のコイル両端電圧、及び各温度センサ部の温度推移の数値解析の結果を示す。解析の際に採用した各部の熱特性値等は文献 9 を参照願いたい。Fig. 9 と実験結果(Fig. 5(d))を比較すると、電流掃引時($0 \leq \text{time} \leq 33$)には多少ずれが生じているが、一定電流通電時は実験結果と概ね一致した。また、同様に、Fig.10 と実験結果とを比較すると、各温度センサ部ともに多少の温度差や温度上昇の速さに違いはあるものの、実験結果と概ね一致している。

次に、数値解析から得られた熱暴走電流 I_{tr} と実験結果との比較を Fig. 11 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に変曲点が生じた通電電流値とした。初期設定温度が 10 K 及び 14 K においては多少外れてはいるが、実験時に熱暴走前と熱暴走と判断した電流値と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 が低下するのにはほぼ比例して、 I_{tr} も低下していることがわかる。

以上のことから、今回作成した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。今後、数値解析結果の信頼性を向上させるため、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、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。

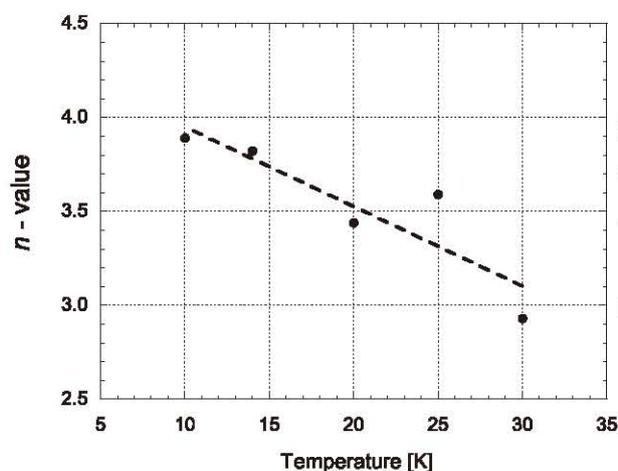


Fig. 8 Temperature dependence of n -value evaluated from the coil $V-I$ characteristics

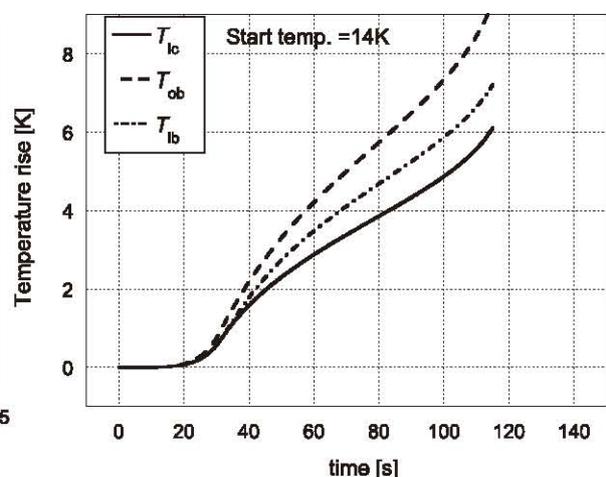


Fig. 9 Numerical results of sensor temperature. ($T=14K$, $I=1.5I_c$)

最後に、本研究を進めるにあたり、実験結果に関しご討論いただいた物質・材料研究機構の熊倉浩明博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J. Nagamatsu, et al.: "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," *Nature* **410** (2001) 63-64
- 2) K. Tanaka, et al.: "Fabrication and transport properties of MgB₂ wire and coil," *Physica C* **382** (2002) 203-206
- 3) H. Yamada, et al.: "Effect of aromatic hydrocarbon addition on in situ powder-in-tube processed MgB₂ tapes," *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 175-177
- 4) S. X. Dou, et al.: "Transport critical current density in Fe-sheathed nano-SiC doped MgB₂ wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 3199-3202
- 5) M. Tomsic, et al.: "Development of magnesium diboride (MgB₂) wires and magnets using in situ strand fabrication method," *Physica C* **456** (2007) 203-208.
- 6) V. Braccini, et al.: "Development of ex situ processed MgB₂ wires and their applications to magnets," *Physica C* **456** (2007) 209-213.
- 7) M. Takahashi, et al.: "Relaxation of trapped magnetic field in a 100m long class MgB₂ solenoid coil in persistent current mode operation," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 373-375
- 8) K. Funaki, et al.: "Quantitative Analysis of Normal Zone Propagation in MgB₂ Superconducting Wires," *TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn)* **43** (2008) 423-429.
- 9) A. Nakao, et al.: *Research Reports on Information Science and Electrical Engineering of Kyushu University*, to be submitted.

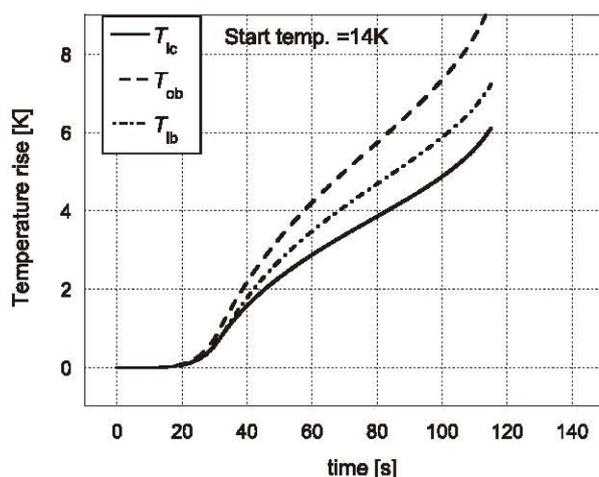


Fig. 10 Numerical results of sensor temperature.
($T=14\text{K}$, $I=1.5I_c$)

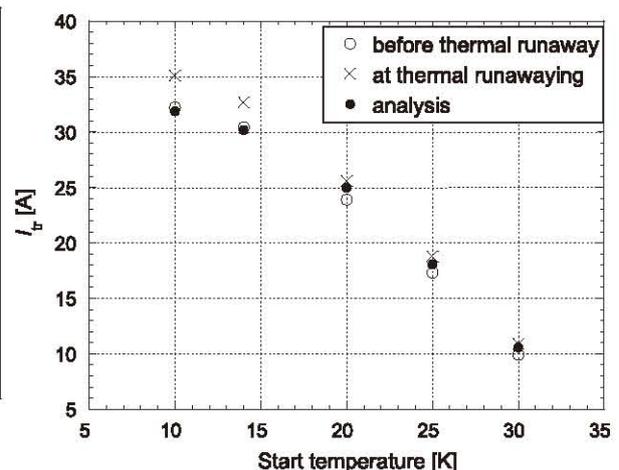


Fig. 11 Comparing between experimental and analytic result of thermal runaway current.