

## 4 K 以下の温度計測を目的とした温度センサの開発

### DEVELOPMENT OF TEMPERATURE SENSOR FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF 4 K OR LESS

丸山 卓也<sup>A)</sup>, 山田 光二<sup>A)</sup>, 原 和宏<sup>A)</sup>, 三谷 晃司<sup>A)</sup>, 久保田 秀樹<sup>A)</sup>,  
肥後橋 誠<sup>A)</sup>, 木村 和弘<sup>A)</sup>, 齊藤 理<sup>A)</sup>, 山名 勝<sup>A)</sup>  
清水 洋孝<sup>B)</sup>, 仲井 浩孝<sup>B)</sup>

Takuya Maruyama<sup>A)</sup>, Kouji Yamada<sup>A)</sup>, Kazuhiro Hara<sup>A)</sup>, Kouji Mitani<sup>A)</sup>, Hideki Kubota<sup>A)</sup>,  
Makoto Higobashi<sup>A)</sup>, Kazuhiro Kimura<sup>A)</sup>, Osamu Saito<sup>A)</sup>, Masaru Yamana<sup>A)</sup>,  
Hirotaka Shimizu<sup>B)</sup>, Hirotaka Nakai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Okazaki Manufacturing Company

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

In recent superconducting accelerators, many superconducting devices are cooled at temperatures below 4 K. Therefore, the High Energy Accelerator Research Organization and Okazaki Manufacturing Company have been developing a temperature sensor with stable quality for the purpose of temperature measurement below 4 K since 2016. It was confirmed that the platinum-cobalt temperature sensor, which was previously thought to be able to measure only up to 4 K, shows good resistance value changes even below 4 K. Furthermore, basic data on temperature calibration (precise resistance value measurement), repeatability and self-heating characteristics below 4 K were acquired, and the temperature characteristics and performance below 4 K were clarified.

#### 1. 目的

超伝導高周波加速空洞の小型化(高周波数化)に伴い、運転温度が 2 K 超流動ヘリウム温度域となった。この温度域での液温、空洞温度を正しく把握することが加速器を安全に制御、運転するために重要な項目である。

既に製品化されている白金コバルト測温抵抗体の温度計測範囲は 4 K 以上であるが、4 K 以下での計測能力も知られている[1]。

本開発では、4 K 以下が測定できる、安価で安定した品質の温度センサの製品化を目的としている。

#### 2. 白金コバルト測温抵抗体

試験サンプルに用いた白金コバルト測温抵抗体は、保護管と延長導線からなる外観構造である。保護管内部には白金コバルト測温抵抗体の素子を挿入し、樹脂で固定している。

白金コバルト測温抵抗体の外観写真を Fig. 1 に示す。

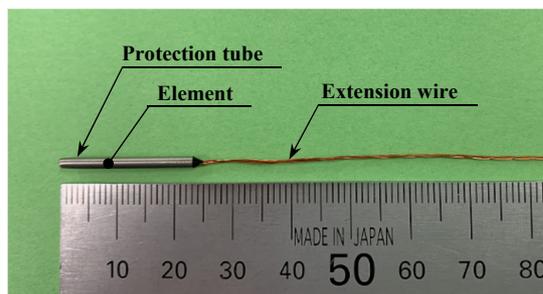


Figure 1: PtCo sensor.

素子の構造は、セラミック製の絶縁碍子の中にコイル状にした白金コバルト抵抗線を挿入し、両端部を封止材で固定した構造である。素子の構造を Fig. 2 に示す。

なお、本素子の構造、材料においては特許を取得している[2]。

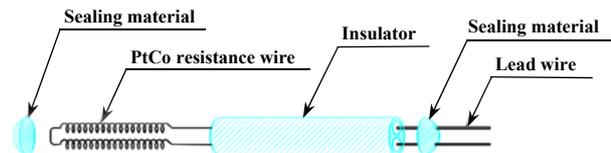


Figure 2: Element structure.

#### 3. 試験項目

##### 3.1 極低温温度校正

液体ヘリウムを減圧することで 4.2 K 以下の温度をつくり、1.5 K~4.2 K の温度校正を行った。また、4.2 K 以下でのサンプル間のバラツキ(互換性)を確認した。

##### 3.2 再現性

2 K の温度校正(1 回目)→常温→2 K の温度校正(2 回目)を実施し、1 回目と 2 回目の抵抗値の変化量を確認した。

##### 3.3 自己加熱

測定電流を変化させ、発熱による抵抗値への影響を確認した。

## 4. 試験装置

### 4.1 冷却原理

冷却原理を Fig. 3 に示す。大気圧での液体ヘリウムの沸点は 4.2 K であるが、液体ヘリウムを減圧することで、液体ヘリウムの飽和蒸気圧が下がり、4.2 K 以下の温度を実現することができる。試験ではこの冷却原理により、4.2 K~1.5 K の温度を実現した。

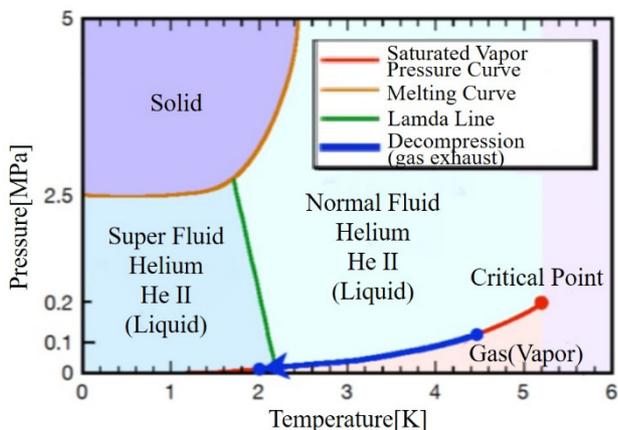


Figure 3: Cooling principle.

### 4.2 装置構成

試験装置は、Fig. 4 に示す、クライオスタット、真空排気系、計測機器系から構成されている。クライオスタットには、サンプルの白金コバルト測温抵抗体 10 本、基準温度計、絶対圧力計を取り付けており、各信号はハーメチック端子を介して計測機器へと接続される。また、真空排気系は、ロータリーポンプ、メカニカルブースターポンプからなり、排出されるヘリウムガスは回収ラインより回収される。

本試験装置は、真空ポンプでの減圧量を圧力制御バルブにより精密に調整することで、一定の圧力(温度)を保持することが可能である。また、絶対圧力計と基準温度計により正確な試験温度を把握することができる。

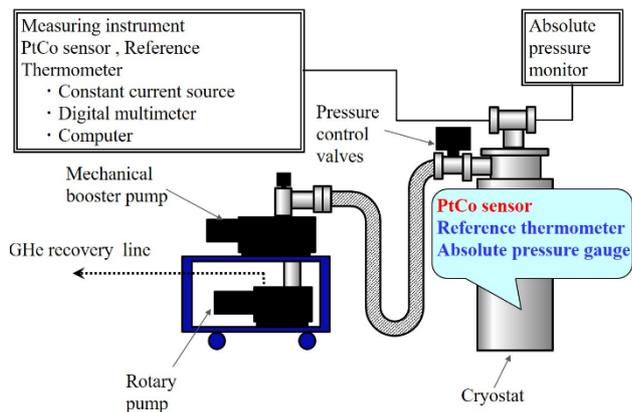


Figure 4: Configuration of test equipment.

## 5. 試験結果

### 5.1 極低温温度校正

極低温温度校正の結果を Fig. 5 に示す。白金コバルト測温抵抗体の 4.2 K 以下の抵抗値を赤いプロットで、また参考として白金測温抵抗体の抵抗値を青いプロットで示す。

白金コバルト測温抵抗体は 1.5 K において約 0.2 Ω の傾き(dR/dT)があり、これは白金測温抵抗体の 100 倍以上である。

本試験では、白金コバルト測温抵抗体は 4.2 K 以下でも測定に十分な抵抗値の傾きを持っていることが確認できた。

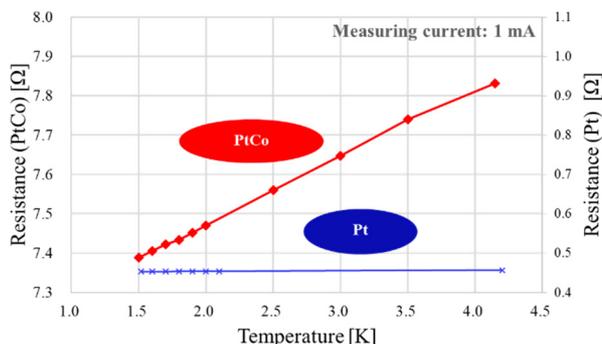


Figure 5: Temperature characteristics of resistance below 4.2 K.

次に、サンプル 10 本(材料ロット及び製造日が同じ)のバラツキを Fig. 6 に示す。4.2 K 以下のバラツキの確認では最大で 0.2 K であった。

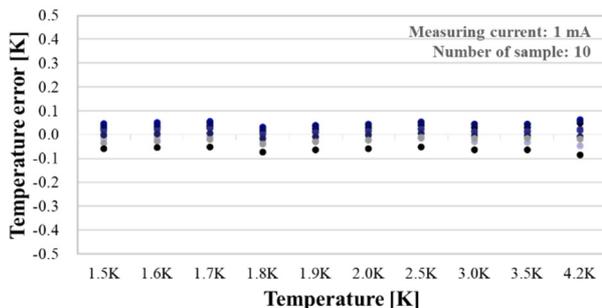


Figure 6: Dispersion of temperature error between samples below 4.2 K.

## 5.2 再現性

再現性試験結果を Fig. 7 に示す。2 K での 2 回測定における変化量は 0.006 K 以下であった。

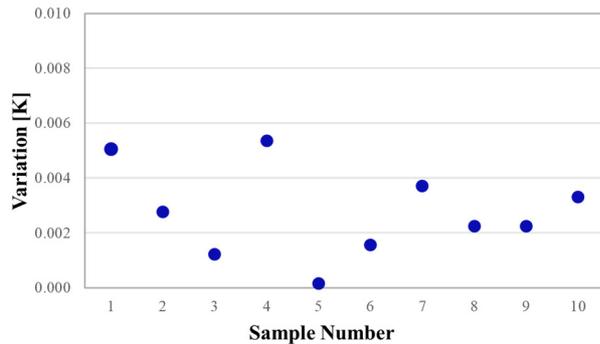


Figure 7: Repeatability of temperature measurement at 2 K.

## 5.3 自己加熱

自己加熱試験結果を Fig. 8 に示す。測定電流が 0.1 mA と 1.0 mA では自己加熱の影響により約 0.034 Ω (約 0.18 K) の差が生じた。

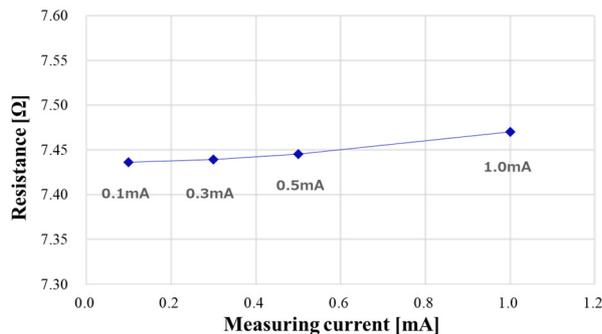


Figure 8: Effect of self-heating at 2 K.

## 6. まとめ

- 1.5 K においても測定に十分な感度があった。  
( $dR/dT = \text{約 } 0.2 \text{ } \Omega/\text{K}$ )
- 2 K での 2 回測定における変化量は 0.006 K 以下であった。
- 4 K 以下のサンプルのバラツキは最大で 0.2 K であり、工業用途では許容範囲と考えるが、高精度を必要とする場合は一品毎に固有テーブルを作成する等、検討が必要である。
- 自己加熱は、0.1 mA と 1.0 mA の差が約 0.18 K であったが、測定電流に対応する温度抵抗値テーブルを使用することで解決可能である。

## 7. 今後の課題

- 実機設備での長期運用における問題点をフィードバックし、性能向上につなげる。
- 製造段階での安定性(材料ロット及び製造日による製造バラツキ)を検証し、品質、コストの両立をめざす。

## 8. 実機設備での検証状況

現在、高エネルギー加速器研究機構にある、KEK STF-2 クライオモジュールに白金コバルトセンサを取り付け、加速器運転中の温度計測を実施、検証中。

## 謝辞

本開発において、学術的なアドバイスならびに円滑な試験進行にご尽力いただきました高エネルギー加速器研究機構 加速器冷凍機グループの皆様にご深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] N. Kimura *et al.*, “Characteristics and Sensitivity of Industrial Pt-Co Resistance Thermometers below 4.2 K”, KEK Internal 91-5, October 1991, p.13, 15, 17.
- [2] 特許番号:特許第 5216947 号.