

白金コバルト温度センサによる KEK STF-2 加速器の温度計測

TEMPERATURE MEASUREMENT OF THE KEK STF-2 ACCELERATOR

WITH A PLATINUM COBALT TEMPERATURE SENSOR

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

Takuya Maruyama^{A)}, Koji Yamada^{A)}, Kazuhiro Hara^{A)}, Koji Mitani^{A)}, Hideki Kubota^{A)},
Makoto Higobashi^{A)}, Kazuhiro Kimura^{A)}, Osamu Saito^{A)}, Masaru Yamana^{A)},
Hirotaka Shimizu^{B)}, Hirotaka Nakai^{B)}

^{A)} Okazaki Manufacturing Company

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and Okazaki Manufacturing Co., Ltd. have been developing a temperature sensor for measuring the temperature of superconducting accelerators since 2016. A temperature sensor (Pt-Co RTD) with a platinum-cobalt element, which has excellent temperature-resistance characteristics at cryogenic temperatures, was manufactured, and basic data (precise resistance measurement, reproducibility, self-heating characteristics) was obtained below 4K in a test cryostat, revealing that the sensor has good characteristics even below 4K. As the next step, several Pt-Co RTDs were installed in the cryomodule of the KEK STF-2 accelerator, and the temperature changes of the helium jacket for the superconducting acceleration cavity and the return pipe for evaporated gas were measured. The superconducting acceleration cavity of the STF-2 accelerator is cooled by 2 K superfluid helium, and the installed Pt-Co RTD showed stable resistance in a cryogenic temperature environment even during actual beam acceleration operation, confirming its suitability for the actual device. In this report, we report the temperature measurement results of the STF-2 accelerator.

1. 概要

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)と株式会社 岡崎製作所は、2016 年度より「超伝導加速器の温度計測を目的とした温度センサの開発」を行っている。

現在までに、クライオスタットを使用して、白金コバルト温度センサ(以下、Pt-Co RTD)の 4 K 以下の温度校正(抵抗値測定)及び再現性、自己加熱特性の確認を行い、Pt-Co RTD は 4 K 以下でも温度計測が可能であることが明らかとなった[1,2]。

本報告では、KEK STF-2 (Superconducting RF Test Facility) 超伝導加速器のクライオモジュール内に Pt-Co RTD を取り付けて、超伝導加速空洞用ヘリウムジャケット(以下 Cavity)及び蒸発ガスの戻り配管(以下 GRP 入口)の温度計測を実施した結果について報告する。

2. 白金コバルト温度センサ(Pt-Co RTD)

Pt-Co RTD は極低温での温度抵抗値特性が白金温度センサより優れ、1.4 K~300 K の温度計測が可能である。工業用途では、GM 冷凍機や MRI 等の温度管理用として、300 K から 4 K の計測に多く用いられるが、4 K より低い温度での計測実績に乏しい。

過去の試験では、「1.5 K でも十分な感度($dR/dT=0.2 \Omega/K$)」、「2 K での 2 回測定における変化量(再現性)は 0.006 K 以下」であることが確認できた[1,2]。

Pt-Co RTD は保護管と延長導線からなる外観構造で

あり、保護管内部に白金コバルト素子を挿入し、樹脂にて固定している。代表写真を Fig. 1 に示す。

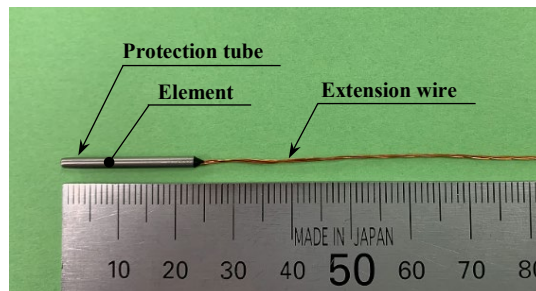


Figure 1: Pt-Co RTD.

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[3]。

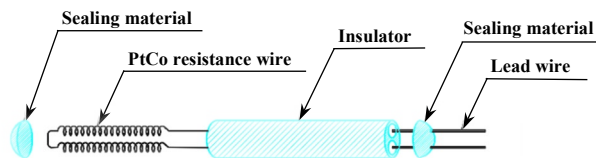


Figure 2: Element structure.

3. クライオスタットによる Pt-Co RTD の温度校正

3.1 冷却原理

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 以下の温度環境を実現することができる。

Pt-Co RTD は、この冷却原理により 4.2 K 以下の温度校正を実施し、温度-抵抗値テーブルを作成した。

冷却原理を Fig. 3 に示す。

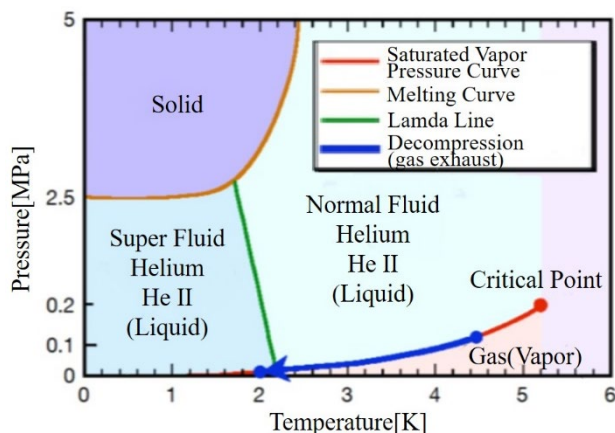


Figure 3: Cooling principle.

3.2 温度校正装置

温度校正装置は、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、供試体となる Pt-Co RTD、基準温度計、絶対圧力計を取り付けてあり、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校正温度を把握することができる。

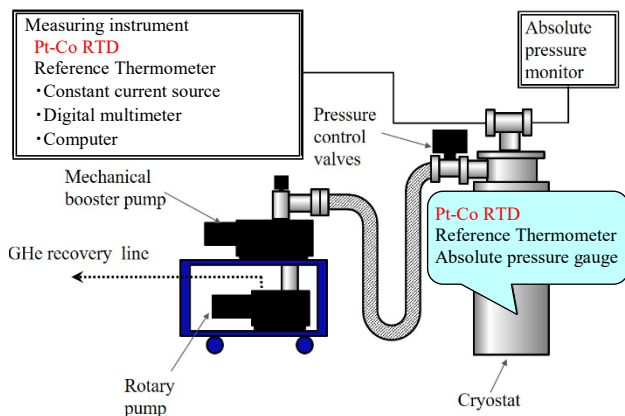


Figure 4: Configuration of test equipment.

4. STF-2 による冷却試験

STF-2 は、8 台の超伝導加速空洞と 1 台の超伝導磁石からなる CM-1 と、4 台の超伝導加速空洞からなる CM-2a が組み込まれている。

CM-2a の超伝導加速空洞の入れ替えに伴い、CM-2a が一度解体され、超伝導加速空洞部がモジュールの外に取り出されたため、Pt-Co RTD を STF-2 内部に取り付けることができ、本計測が実現した[4]。

4.1 計測箇所

計測箇所は Cavity 4 箇所、GRP 入口 2 箇所とし、Cavity 4 箇所のうち 2 箇所には別方式の比較用温度計(以下 Ref)を設置した。計測箇所を Fig. 5 に示す。

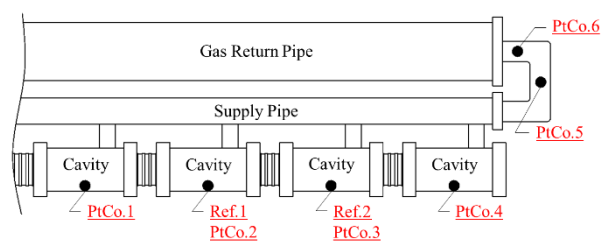


Figure 5: Measurement point.

4.2 Pt-Co RTD 取付

Pt-Co RTD の取り付けでは、延長導線を折り返して計測部の本体に接触させて、サーマルアンカーとした。この取付方法は、入熱による計測誤差を効果的に防止することができ、STF-2 では従来よりモジュール内の温度計の取り付けに採用されている。また、保護管は空気を押し出しながらアルミテープで計測部に密着させることで素子への熱の授受を向上させた。取付状況写真を Fig. 6 に示す。



Figure 6: Installation status on Cavity.

4.3 冷却試験

STF-2 の計測は、Cavity 内部を室温から 1.985 K(通常運転 3 kPa 時の液体ヘリウムの飽和蒸気圧相当)まで冷却して保持した時の温度、および室温までの昇温過程を Pt-Co RTD により行った。

冷却試験は合計 4 回実施し、1.985 K 冷却中の試験環境(加速器のビームパワー)が異なる。

冷却試験環境を Table 1 に示す。

Table 1: Cooling Test Environment

Item	Date	Contents
Pt-Co RTD Installation	2020/3	Cavity: Installed in 4 locations GRP inlet: Installed in 2 locations
Cooling Test ①	2020/8~2020/9	Adjustment operation (Low Power Test)
Cooling Test ②	2021/2~2021/4	Normal operation (Beam Power 0.7 kW)
Cooling Test ③	2021/11~2021/12	Normal operation (Beam Power 0.7 kW)
Cooling Test ④	2022/10~2022/12	High power operation (Beam Power 5.6 kW)

4.4 計測方法

Pt-Co RTD は 4 端子法で接続し、直流電流発生器により 1mA を通電した。このとき、計測系に生じる寄生熱起電力による誤差をキャンセルするため、電流の極性を反転させて両極での電圧を取得、平均した値をその温度での電圧とした。

Pt-Co RTD と Ref の計測回路を Fig. 7 に示す。

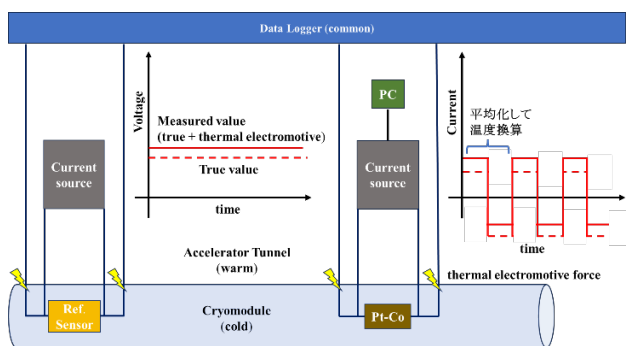


Figure 7: Measurement Circuit.

5. 試験結果

5.1 冷却確認

冷却試験④の「300 K→1.985 K→300 K」のチャートを Fig. 8 に示す。冷却試験での計測は、Pt-Co RTD に断線や出力異常が生じることなく、温度変化の過程を途切れることなく計測できた。最も温度履歴が多い冷却試験④においても同様であった。

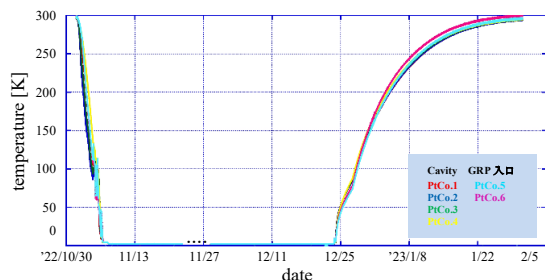


Figure 8: Cooling chart from 300 K to 1.985 K.

5.2 動的変化の確認

冷却試験①の 25 K 付近の計測データを Fig. 9 に示す。GRP 入口に設置した PtCo.5, 6 は、このデータから圧力パルブの開閉に伴う微小な圧力変化(≒温度変化)

を捉えていることが確認できる。また、Cavity に取り付けられた PtCo.1~4 は、徐々に冷却される Cavity 内の温度を安定して計測できた。

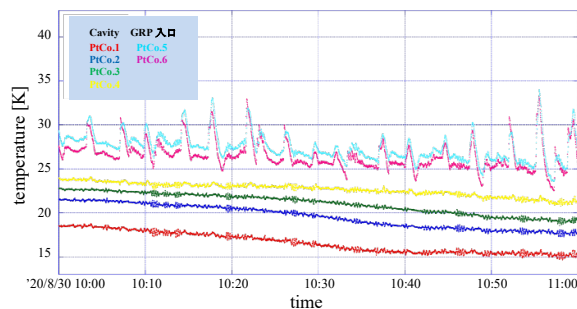


Figure 9: Cooling chart for test ①.

5.3 1.985 K での特性確認

Pt-Co RTD の通常運転(Cavity 内圧力: 3 kPa、液温: 1.985 K)における任意の 3 日分のデータより、「平均値、標準偏差、液温との差」を算出した。結果を Table 2 に示す。

標準偏差は 0.001 K~0.109 K (Ref: 0.002 K~0.220 K)、Cavity 内液温(理論値)との差は -0.063 K~0.003 K (Ref: 0.037 K~0.582 K) であり高精度な計測結果が得られた。

また、Cavity の計測における再現性は 0.006 K~0.053 K (Ref: 0.170 K~0.391 K) であり、再現性が良いことが確認できた。

Table 2: Characterization at 1.985 K

Temperature Sensor	Ref.1	Ref.2	PtCo.1	PtCo.2	PtCo.3	PtCo.4	PtCo.5	PtCo.6
Installation location	Cavity (Liquid temperature: 1.985 K)						GRP inlet	
Cooling Test ①	Avg. 2.049	2.177	1.922	1.976	1.979	1.974	2.068	2.341
Test ①	SD 0.002	0.002	0.109	0.001	0.001	0.001	0.014	0.013
①	difference 0.064	0.192	-0.063	-0.009	-0.006	-0.011	—	—
Cooling Test ②	Avg. 2.022	2.338	1.975	1.988	1.985	1.980	2.038	2.305
Test ②	SD 0.008	0.011	0.004	0.008	0.012	0.017	0.026	0.035
②	difference 0.037	0.353	-0.010	0.003	0.000	-0.005	—	—
Cooling Test ③	Avg. 2.082	2.380	1.970	1.986	1.984	1.975	2.056	2.318
Test ③	SD 0.005	0.009	0.004	0.010	0.016	0.023	0.034	0.042
③	difference 0.097	0.395	-0.015	0.001	-0.001	-0.010	—	—
Cooling Test ④	Avg. 2.192	2.567	1.970	1.986	1.981	1.977	2.060	2.348
Test ④	SD 0.217	0.220	0.004	0.010	0.016	0.024	0.034	0.044
④	difference 0.207	0.582	-0.015	0.001	-0.004	-0.008	—	—

• difference: Difference from liquid temperature (theoretical value)

• Measurement unit: K

6. まとめ

Pt-Co RTD による KEK STF-2 加速器の温度計測において、以下の結果が得られた。

- 300 K~1.985 K の温度変化を途切れることなく計測できた。
- 「300 K→1.985 K→300 K」の温度下降、上昇を 4 回実施。ビーム運転下においても、断線、出力異常はなく、計測値は正常であった。
- PtCo.5, 6 の GRP 入口の計測では、圧力変動に伴う動的な温度変化を確認できた。
- 標準偏差は 0.001 K~0.109 K であり、散らばりの少ない安定した結果であった。

PASJ2024 WEP024

- Cavity 内液温(理論値)との差は-0.063 K~0.003 K であり高精度に計測できた。
- Cavity での計測の再現性は 0.006 K~0.053 K であり、再現性が良いことが確認できた。

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深く感謝申し上げます。また KEK 素核研の近藤良也様には Pt-Co RTD の最適な取付方法について丁寧にご指導いただきましたこと御礼申し上げます。

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] T. Maruyama *et al.*, “Development of temperature sensor for temperature measurement of 4K or less”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] 特許番号:特許第 5216947 号
- [4] Y. Yamamoto *et al.*, “Cavity exchange work for cryomodules in STF-2 accelerator”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.