# 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<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>, Koji Yamada<sup>A)</sup>, Kazuhiro Hara<sup>A)</sup>, Koji 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

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4K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4K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、超伝導加速空洞用へリウムジャケット (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、1.4K~300K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、300Kから4Kの計測に多く用いられるが、4K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 Ω/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リン グ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.

# 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 ける機会ができ、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Table1に示す。

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

#### Table 1: Cooling Test Environment

#### 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 圧力バ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

 re Sensor
 Ref.1
 RtCo.1
 PtCo.2
 PtCo.3
 PtCo.4
 PtCo.4

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
	SD	0.002	0.002	0.109	0.001	0.001	0.001	0.014	0.013
	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
	SD	0.008	0.011	0.004	0.008	0.012	0.017	0.026	0.035
	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
	SD	0.005	0.009	0.004	0.010	0.016	0.023	0.034	0.042
	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
	SD	0.217	0.220	0.004	0.010	0.016	0.024	0.034	0.044
	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-CoRTDによるKEKSTF-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。

- 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

- 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.