

J-PARC MR 主電磁石新電源用恒温ユニットの開発

DEVELOPMENT OF THERMOSTATIC UNIT FOR NEW MAGNET POWER SUPPLY AT J-PARC MR

三浦一喜^{#,A)}, 佐川隆^{B)}, 栗本佳典^{A)}, 下川哲司^{A)}, 森田裕一^{A)}

Kazuki Miura^{#,A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Yuichi Morita^{A)}

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

^{B)} Universal Engineering

Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), we plan to shorten the driving cycle from 2.48 sec to about 1 sec for higher beam power. To achieve this, replacement of the power supplies of main magnets is mandatory. The digital control system is adopted to the power supply controller. This is because the digital control system enables us to implement complex algorithm into the controller and reproduce its configuration. In case of the digital control, the stability of the current measurement decides the performance of the controller. To maintain stable operation of our high intensity beam, the stability of the current measurement needs to be at ppm level. This needs the temperature control of the A/D convertor and its surrounding circuit (A/D board). We have developed a thermostatic unit for the A/D board and successfully control the temperature around the A/D board within our requirement level. In this article, we describe the details of the developed thermostatic unit.

1. はじめに

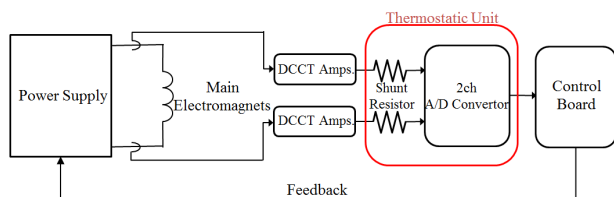


Figure 1: Overview of new power supply feedback loop.

現在、J-PARC MR でビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.5 秒から 1 秒程度へと速めるアップグレードを計画中である。本アップグレード計画最大の目玉の一つが、高繰り返し対応の新主電磁石電源への置き換えである^[1]。

新電源の制御装置では、複雑な制御に耐えうる柔軟性や再現性を満たすことを目的として、A/D 変換を介してのデジタル制御が採用された^[2]。

新電源では電源出力のフィードバック制御に用いるため、電源から負荷(主電磁石)に向けての出力部にとりつけられた DCCT で読み取った出力電流値を 1 Ω シャント抵抗で電圧値に変換、その電圧値を A/D 基板でデジタルデータに変換して、制御基板に送っている(Figure 1)。ビーム大強度化に向けて必須となる電磁石電流の高精度制御のためには、A/D 変換部における電流計測に ppm レベルでの安定度が必要である。この ppm レベルでの測定安定度実現には、A/D 変換部および、シャント抵抗の温度特性を考慮し、それぞれを一定温度に保つためのコントロールが重要である。我々は A/D 変換基板、シャント抵抗のそれぞれにおいて、電磁石電流指令値に対して誤

差 10 ppm 以内での制御を目標と定めて、恒温ユニットの開発を行った。

2. 制御方式

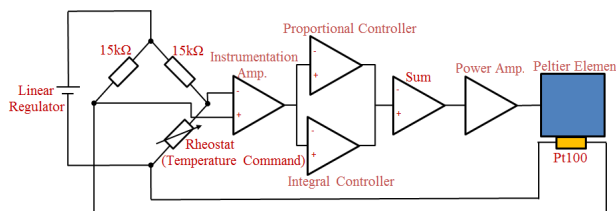


Figure 2: Control method.

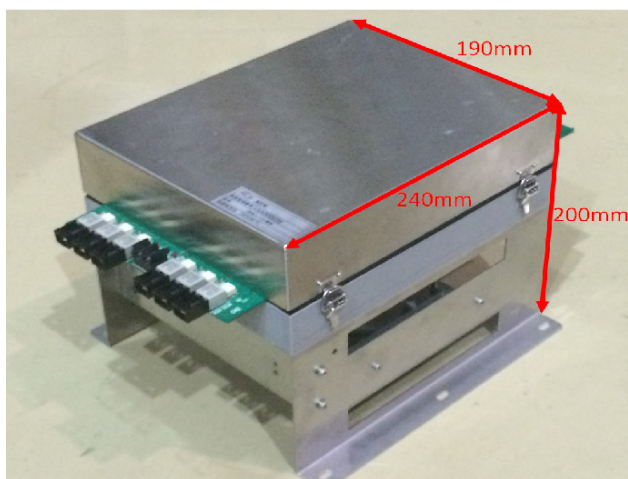
恒温ユニットのコントローラは上記 Figure 2 に示したようにホイットストンブリッジと計装アンプを用いた検出部と、オペアンプを用いた PI 制御による制御部によってフィードバック制御を行うアナログ制御方式を採用した。

制御の流れとしては、コントロール対象の温度測定を恒温槽内に仕掛けた Pt100 により行い、その測定値と可変抵抗による指令値をホイットストンブリッジで比較。PI 制御を介して終段のパワーアンプで電力増幅を実施し、ペルチェ素子に駆動電力を供給するというものである。

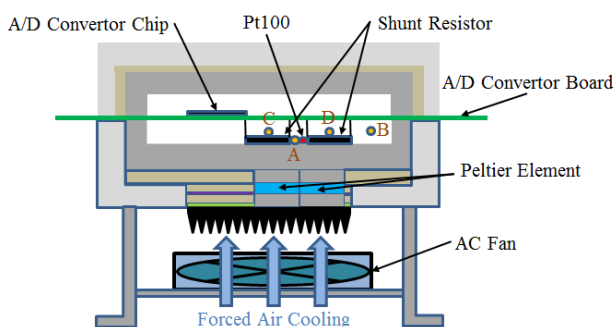
なお、本コントローラにおいてデジタル制御ではなくアナログ制御方式の温度コントローラを選択した理由は、デジタル制御の場合に発生してしまうノイズが、A/D 変換部に対して影響を与える可能性を懸念したためである。同じく温度コントローラ電源もスイッチングノイズを懸念し、スイッチング電源ではなく、リニアレギュレータを採用している。

[#] kazuki.miura@kek.jp

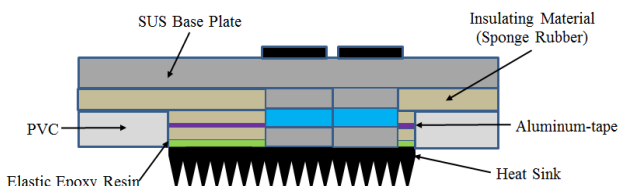
3. 恒温槽筐体製作



(a) Picture



(b) Overview



(c) Enlarged view of the peltier element

Figure 3: Structure of the thermostat.

製作した恒温槽筐体外観写真を Figure 3 (a)に示す。電源制御盤内に格納するため、A/D 基板およびシャント抵抗のみを格納するコンパクトサイズの恒温槽となっている。構造は Figure 3 (b)に示した通りである。A/D 基板は外部入出力の取り回しが容易となるよう、温度コントロール対象である A/D チップ部およびシャント抵抗のみを恒温槽内に収納する形とし、入出力端子のある基板端は恒温槽外に露出させる構造とした。断熱については figure 3 (c)に拡大図を示すペルチェ素子取り付け部を重点的に対応した。ここは温度コントロール対象であるベースプレートと外乱となる外気、ヒートシンクが近接する箇所であるため、断熱構造は断熱材のみでは無く、風防、熱放射軽減のために断熱材間にアルミテープを挟んだ

構造とし、ヒートシンクとの間には筐体との固定も兼ねて、弾性エポキシ接着剤を充填した。

ペルチェ素子については、新電源運転時のシャント抵抗発熱量 1 W に対し、ペルチェ素子放熱側と吸熱側の ΔT が 20 K の条件(放熱側 50 °C、吸熱側 30 °C を想定)において、供給電流 1.7 A で 10 W の吸熱量を有するものを選定した。

4. 本番模擬環境下での性能試験

大型恒温槽に本恒温ユニット一式(恒温槽および温度コントローラ)を格納し、温度コントローラの温度指令値を 35 °C に設定。環境温度(T_e)を 40 °C、35 °C、30 °C の 3 パターンに変更、さらに本番環境模擬としてシャント抵抗に 1 V / 1 Hz の正弦波を入力した状態で、いずれの状態からでも指令値に温度を遷移、安定化させることの可否、安定精度を試験した。なお、40 °C は真夏最も過酷な状況下での J-PARC 電源棟温度の模擬でもある。

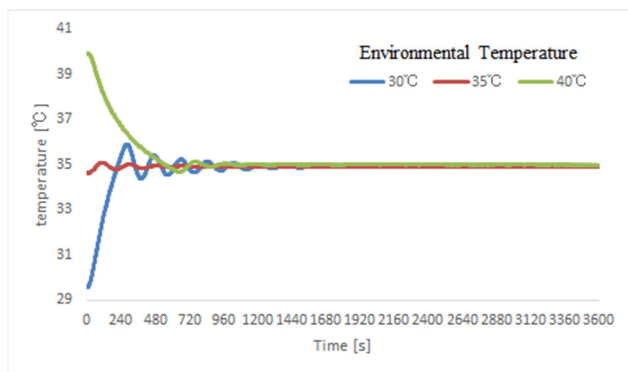
前述した試験結果として、Pt100 取り付け部 (Figure 3 (b) ポイント A)、恒温槽内 (Figure 3 (b) ポイント B)、シャント抵抗#1 (Figure 3 (b) ポイント C) および#2 (Figure 3 (b) ポイント D) の計 4 箇所における 1 時間での温度遷移を下記 Figure 4 に示す。

Table 1 として試験結果要約を示すが、Pt100 取り付け部ではいずれの T_e でも、稼働開始から 1 時間後の安定温度(T_s)は温度指令値 35 °C に対して、誤差 0.1 °C 以内に温度を安定化できており、温度コントローラのフィードバック制御は十分な精度で行えていると言える。

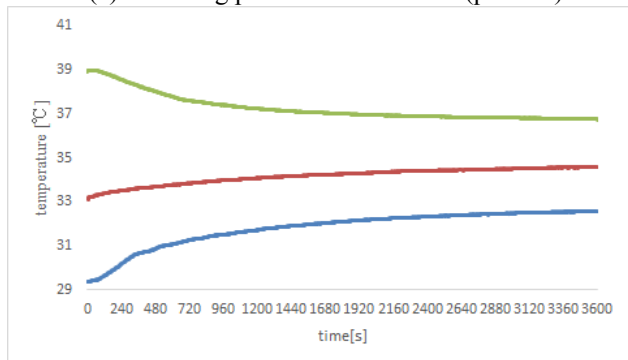
そして、温度コントロール対象である恒温槽内温度は、いずれの T_e でも指令値に対して誤差 2.5 °C 以内に安定している。これは A/D チップの温度特性 2.0 ppm/°C に対して、10 ppm 以内となる目標温度差 (T_t)が ± 2.5 °C 以内という性能目標を満たしている。同じくシャント抵抗#1, #2 も誤差 1.5 °C 以内に安定しており、温度特性 2.5 ppm/°C に対して、 T_t が ± 2.0 °C 以内を満たしており、本恒温ユニットは目標とする性能を満たしている。

Table 1: Summary of Test Results

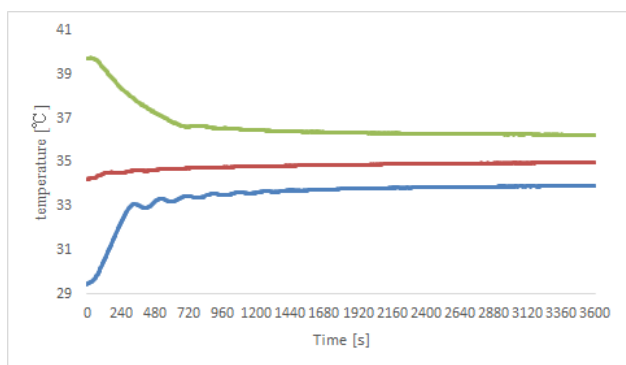
	Environmental temperature [T_e] [°C]	Stability Temperature [T_s] [°C]	ΔT [°C] ($T_s - 35$)	Target value of the temperature difference [°C] (T_t)
Mounting portion of the Pt100	30	34.93	-0.07	/
	35	34.91	-0.09	
	40	34.96	-0.04	
Internal of the thermostat	30	32.58	-2.42	± 2.5
	35	34.58	-0.42	
	40	36.75	1.75	
Shunt Resistor #1	30	33.94	-1.06	± 2.0
	35	34.98	-0.02	
	40	36.23	1.23	
Shunt Resistor #2	30	34.10	-0.90	± 2.0
	35	34.96	-0.04	
	40	35.98	0.98	



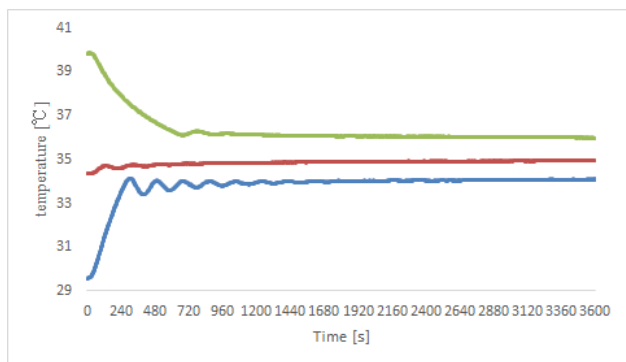
(a) Mouting position of the Pt100 (point A)



(b) Inside of the thermostat (point B)



(c) Shunt resistor #1 (point C)



(d) Shunt resistor #2 (point D)

Figure 4: Temperature transition.

5. まとめと今後

我々J-PARC MR 主電磁石グループでは、将来計画であるニュートリノビームラインのビーム大強度化に向けて、主リング運転周期を2.5秒から1秒へと、高繰り返し化を実現可能な電磁石用新電源の開発を進めている。新電源の制御装置では、複雑な制御に耐えうる柔軟性や再現性を満たすことを目的として、A/D 変換を介してのデジタル制御が採用されており、出力電流読み出し用の $1\ \Omega$ シャント抵抗および、A/D 基板の温度コントロールが、電磁石電流の高精度制御のために必要となった。

そこで我々は、ppm レベルでの温度制御が可能な性能を有し、制御盤内に格納可能なコンパクトサイズの恒温槽を開発。3 パターンの環境温度を設定したうえで、本番運転環境を模擬した性能評価試験を実施し、要求性能を満たしていることを確認した。

今後の検討事項としては、現状スイッチングノイズによる影響を懸念して温度コントローラの電源にはリニアレギュレータを使用しているが、その分、電源の電流上限による出力パワー制限が厳しいため、ペルチェ素子 2 つを直列接続して冷却能力を高めている状態である。しかし、コントローラ電源をスイッチング電源に変更できれば、小型でより大きなパワーをペルチェ素子に供給可能となるため、ペルチェ素子 1 つで十分な冷却能力を得られると考えている。そのため、実際にスイッチング電源を使用した場合のノイズ影響を測定、検討し、スイッチング電源の実用可否について、今後試験をしていく予定である。

参考文献

- [1] Y.Morita, et al., "Power Supply System of J-PARC Main Ring Main Magnets for High Repetition Rate Operation", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [2] Y.Kurimoto, et al., "Precise Current Control in Accelerator Magnets with a Digital Feedback System", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, p.546-552, February, 2014.