

J-PARC ハドロン実験施設における 二次粒子生成標的の 10 ミリ秒周期温度測定システムの開発

DEVELOPMENT OF TEMPERATURE MEASUREMENT AT 10-MILLISECOND SAMPLING INTERVAL FOR THE PRODUCTION TARGET IN THE J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

上利恵三[#], 里嘉典, 豊田晃久, 森野雄平, 秋山裕信
Keizo Agari[#], Yoshinori Sato, Akihisa Toyoda, Yuhei Morino, Hironobu Akiyama
High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Hadron Experimental Facility (HEF) is designed to handle intense slow-extraction proton beam extracted from 30-GeV Main Ring of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). A production target made of Gold and copper block with water-cooling pipes is acceptable for 95-kW proton beams. To detect damage to the production target as soon as possible, we have developed a temperature-measurement system at 10-millisecond sampling interval with new temperature monitor modules of a Programmable Logic Controller (PLC). Target temperature measurements and frequency spectrum analysis were performed to investigate effect of moving average for noise suppression. In addition, we measured network traffic and CPU and memory usage of a Linux CPU module embedded EPICS IOC on Yokogawa's FA-M3 PLC platform. As a result, this system has operated with stability during beam operation. This manuscript reports the temperature measurements at 10-millisecond sampling interval for the production target at the J-PARC Hadron Experimental Facility.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設[1](Fig. 1)では加速器により 30 GeV に加速され、遅く取り出された陽子ビームを A ラインに設置された二次粒子生成標的(標的)に照射し、発生した二次粒子を物理実験に使用している。また B ライン(高運動量ビームライン)は陽子ビームの一部が B ラインに取り出され、残りの大部分の陽子ビームが A ラインへ導かれ、それぞれの実験エリアで使用される。ビーム運転周期は 4.24 秒、ハドロン実験施設への取り出しは約 2 秒である。

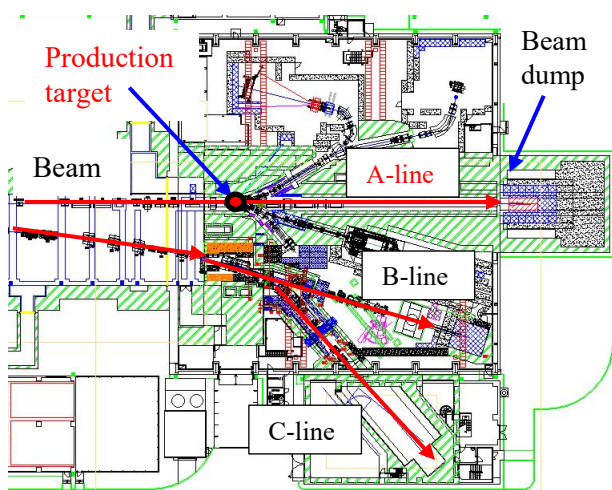


Figure 1: Drawing of J-PARC Hadron Experimental Facility.

2. 二次粒子生成標的

鉛直方向上下対称に 2 個設置したビームパワー 95 kW 対応可能な標的(Fig. 2) [2]が開発された。この標的はビームが照射される部分が金、その土台の無酸素銅や冷却水用ステンレス配管から構成され、He 容器内に設置される。エネルギー寄与による熱応力を減少させるため、金部分はビーム方向に 6 分割している。金部分に熱電対を左右に 2 個、ビーム方向に 6 個設置し、1 山につき 12 個、上下標的合わせて合計 48 個、設置している。Table 1 に標的の温度測定点数を示す。また標的は水平方向に 2 山構造とし、1 山はビームを照射し、他方はビームから退避している。もし標的に損傷が発生した場合、遠隔操作で標的を水平方向に移動し、安全が確認でき次第、他方の山に照射を行うことによりビーム運転を再開できる。

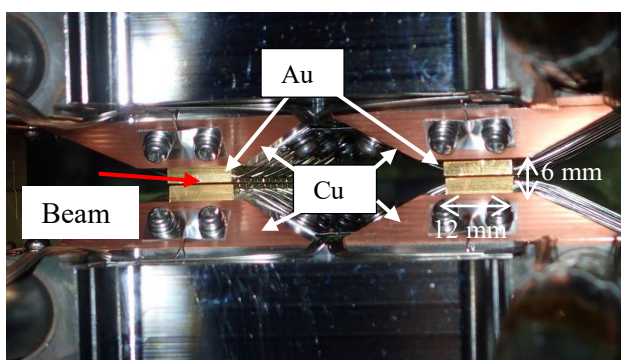


Figure 2: A photograph of 95-kW production target.

[#] agari@post.kek.jp

Table 1: The Number of Thermocouples

Au	48
Cu	4
Cooling pipe	4
Peripheral	9
Total	65

標的溫度をできるだけ早く検知できることは、標的の保護インターロックや健全性を確認するために非常に重要である。これまでの温度測定システム[3]の測定間隔は100 ミリ秒であったが、10 ミリ秒で測定できる温度モニターモジュール[4]が発売されたため、それに対応した温度測定システムの開発を行った。ここで、10 ミリ秒間隔で測定によるメリット、デメリットは下記が挙げられる。

メリット

- より速くインターロックをかけることでエネルギー寄与による熱応力から標的を保護できる
- スピル内の温度変動の詳細な測定により、標的の健全性やビーム位置・状態の確認可能になる
- 計測機器の省スペース

デメリット

- 精度は100 ミリ秒測定時(±0.5°C)の2倍
- 50/60 Hz のノイズ除去は無効
- コモンモードノイズを低減する機能も無効

そこで、温度測定の高速度を行うには下記が要求事項となる。これらを克服することにより、ビーム運転時の温度測定が可能になる。

- デメリットに挙げられているノイズ発生有無の確認
- ノイズが発生した場合、原因の特定と対策
- 移動平均を行うことによるノイズ抑制効果と適切な平均数の評価
- ビーム運転時、Linux CPU のネットワークトラフィック、CPU やメモリ容量の確認が必要

3. 温度測定機器

3.1 測定・制御機器

温度測定・制御機器は横河電機製 PLC、FA-M3V シリーズを使用した。今回新たな温度モニターモジュールを採用し、最速で10 ミリ秒周期で測定可能になった。またしきい値を設定し、それを超えればインターロック信号を出力させ、ビーム運転を安全に停止するシステムを構築した。

3.2 PLC モジュール

PLC モジュールのシーケンス CPU モジュールは温度測定、インターロック信号の出力、タイミング信号の入力などすべてを制御している。そして、そこで得られた温度やインターロック信号などのデータは Linux CPU モジュールにより EPICS レコードが作成される。温度測定は温度モニターモジュールで行い、スピル同期した温度を測定するため、トリガ信号を入力モジュールに入力する必要がある。インターロック信号は D/A モジュールにより出力

する。Table 2 に選択した PLC モジュールを示す。

Table 2: PLC Modules

Module	Model number
Sequence CPU	F3SP71-4S
Linux CPU	F3RP71-2L
Temperature monitor	F3CX04-0H
Input	F3XD32-5F
D/A	F3DA04-0N

3.3 ビームスピル同期温度

J-PARC ハドロン実験施設のビーム運転は1 スピル4.24 秒周期で行われ、主リングからハドロン実験施設に約2 秒間ビームが遅く取り出される。1 スピルの温度波形を表示するため、トリガ信号を受信してから温度測定が開始し、温度データを10 ミリ秒毎に1 個ずつ別の PLC 内レジスタに順々に格納し、温度測定完了信号を Linux CPU モジュール内の EPICS シーケンサ[5]が検知し、レジスタの温度データを EPICS の waveform レコードにまとめて格納する。しかしサンプリング周期を100 から10 ミリ秒へ変更したため、温度測定点が増加し、PLC のシーケンサ CPU と Linux CPU 間でデータを通信する共有レジスタの数(最大4096 個)が足りず、2 段階に分けて waveform レコードに変換している。また waveform レコードから最高温度、その5 ショット平均温度、上下左右温度差などを EPICS で計算し、コントロール室でディスプレイに表示し、ビームコミッショニングや標的の健全性確認などに使用する。

4. 温度測定試験

4.1 電磁石通電

まずビーム運転を行っていないメンテナンス時に温度測定を行い、10 ミリ秒で測定できることがわかったため、よりビーム運転を模擬した電磁石通電時(ビーム運転・同期なし)に温度測定を行った。測定した温度はビームが照射される山の右上の金部分のみの温度を示している。

測定結果を Fig. 3 に示す。結果より、電磁石を通電することにより、温度変動が発生し、約5 °Cの波高で約1.5 秒の長周期変動が観測された。ビームライン上で標的に近い K1.8D1 電磁石のみを通電することにより温度変動が発生することがわかった。電磁石電力や温度測定配線を確認すると、それらが近傍に配線されることによるものだと推測された。よって両配線を離し、温度測定配線に市販のシールドチューブを設置した。

温度変動対策後の測定結果を Fig. 4 に示す。Figure 3 に観測されていた温度変動の波高は0.1°Cになり、安定して温度測定できることがわかった。

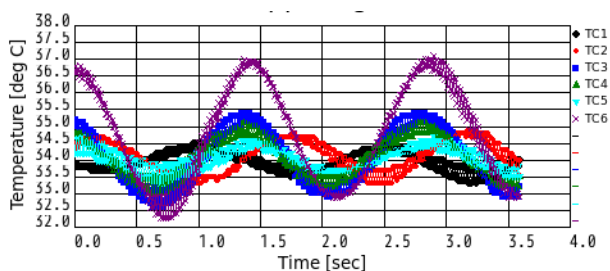


Figure 3: A typical plot of target temperature fluctuations at the upper right corner.

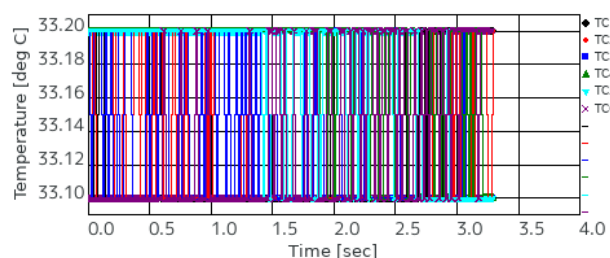


Figure 4: A typical plot of target temperature at the upper right corner after coping with temperature fluctuations.

4.2 ビーム運転

電磁石通電試験時に安定して温度測定できたことを確認できたため、標的にビームを照射時に温度測定し、最適な移動平均数を調査した。ビームを 100 ショット照射した時のビーム強度、スパイル長、鉛直方向ビーム位置の平均、標準偏差を Table 3 に示す。ビーム位置は標的より上流側 1 m に設置された残留ガス型ビームプロファイルモニタ(RGIPM)によって計測された。また経験上、標的の温度はこれらのパラメータに依存することがわかっている。

Table 3: Statistical Means and Standard Deviations of Beam Intensity, Spill Length and Beam Position during Beam Study

	Mean	Standard deviation
Intensity [ppp]	1.759×10^{13}	2.532×10^{10}
Spill length [second]	1.820	0.010
Vertical position [mm]	-0.534	0.007

上流から 5 個目の金部分標的の温度で移動平均なしの平均温度と標準偏差を Fig. 5、移動平均数 2 の結果を Fig. 6 に示す。これらの標的の温度はビーム照射直後飽和していないため、ビーム照射開始から 12 ショットを除き 88 ショットを平均した温度である。平均温度はトリガ信号が入力されてから経った同時刻での 88 ショット分温度を平均したものである。結果より、平均温度が移動平均数によらずほぼ同じであるのは、平均温度に比べ温度変動が小さいためである。次に標準偏差は移動平均数が 2 以上になると、変動が減少することがわかった。

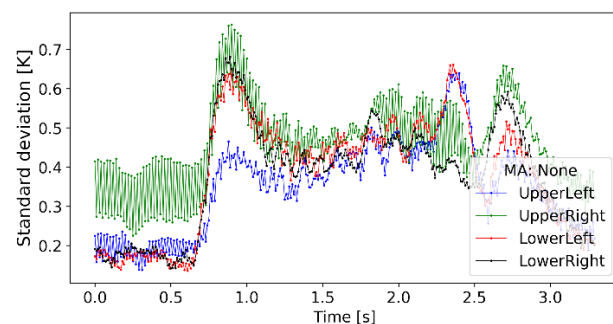
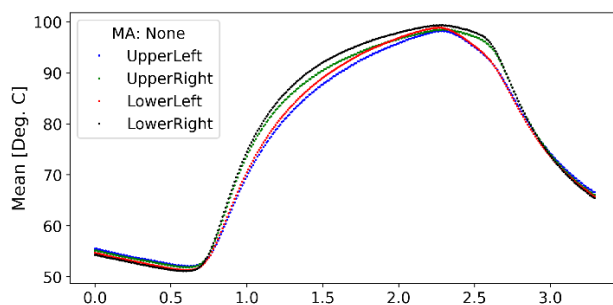


Figure 5: Plots of means and standard deviations of raw target temperatures during 88-shot beam study.

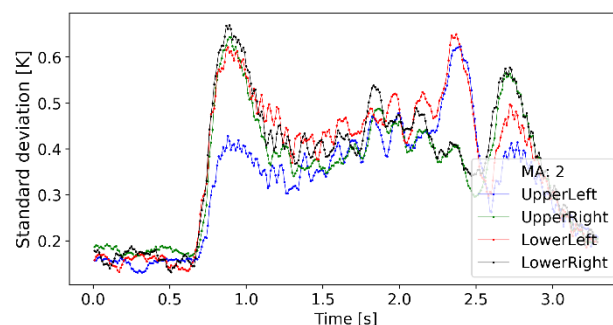
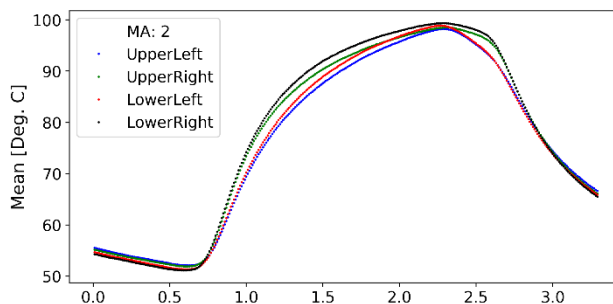


Figure 6: Plots of statistical means and standard deviations of 2 data-points moving average temperatures calculated from raw data in Fig. 5.

また標的にビーム照射なしで、その他の加速器機器が動作している(ダミーショット)時の標的右上の温度波形をスペクトル解析した結果を Fig. 7 に示す。Figure 7 は移動平均なし、2、4 の 3 つの結果を示している。移動平均数を 2 以上にするとデメリットで挙げられていた 50 Hz 付近の変動が抑制されていることがわかった。

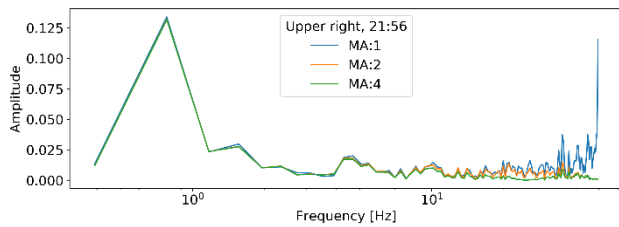


Figure 7: A plot of frequency spectrum of target temperatures during dummy shot.

5. 温度測定環境

5.1 概要

PLC での測定・制御はシーケンス CPU モジュールで行われており、そこで得られたデータを Linux CPU モジュールに共有し、EPICS レコードを作成している。温度測定の高速度化後の Linux CPU モジュールのネットワークトラフィック、CPU 稼働率やメモリ容量も調査した。

5.2 ネットワークトラフィック

Figure 8 は上部温度を測定している PLC の Linux CPU モジュールのネットワークトラフィックを示す。2023 年 6 月はサンプリング時間が 100 ミリ秒、2024 年 4 月から 5 月までは 10 ミリ秒で温度測定していた。この図は Multi Router Traffic Grapher (MRTG) で作成され、SNMP マネージャとして動作し、ネットワークトラフィック情報を取得、グラフ上にプロットしている。結果より、INPUT はほぼ同じ、OUTPUT のみ 3~5 倍の通信量が増加している。これはサンプリング時間を 100 から 10 ミリ秒へ変更したこと、またビーム運転周期も 5.2 から 4.24 秒に短縮したためであると考えられるが、数 Mbps 程度なので問題ないことがわかった。

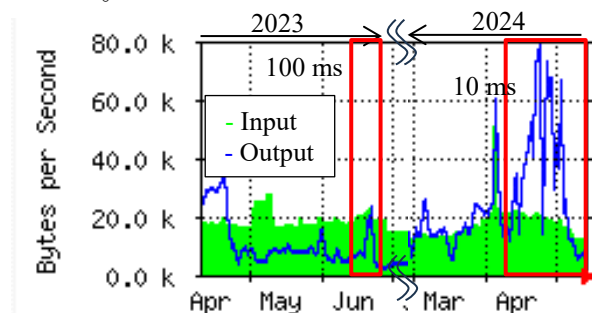


Figure 8: A trend graph of network traffic on Linux CPU module of PLC.

5.3 CPU・メモリ

標的 上部温度の Linux CPU モジュールで 2024 年 4 月から 6 月までのビーム運転時の CPU 稼働率とメモリ容量を Fig. 9 に示す。結果より、CPU のアイドル時間の割合は 90 % 以上になった。メモリ容量も未使用のメモリが少し漸減しているが、ビーム運転の終了時でも 600 MB 以上あるので使用上問題は無いことがわかる。結果より、ネットワークトラフィック、CPU 稼働率、メモリ容量はすべて安定し、動作に問題がないことを確認した。

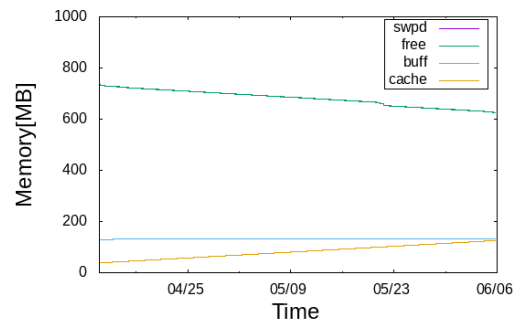
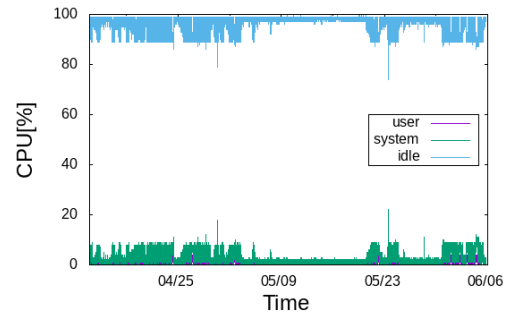


Figure 9: Trend graphs of CPU and memory usage on Linux CPU module of PLC.

6. まとめ

- サンプリング時間を 10 ミリ秒に設定するとノイズ除去が無効になるため、電磁石通電により標的の温度変動が発生した。相互の配線を離し、温度計測配線にシールドチューブを設置することにより、温度変動を抑制できた。
- ビームスタディを行うことにより、移動平均なしでは標的の温度変動が発生することを確認した。移動平均数を 2 以上に設定することにより、50 Hz あたりの温度変動を抑制できた。
- PLC の Linux CPU モジュールのネットワークトラフィック、CPU 稼働率、メモリ使用率を調査し、安定して温度測定できていることを確認した。

参考文献

- K. Agari *et al.*, “Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP)*, Volume 2012, Issue 1, 1 January 2012, 02B009 (16 pages).
- M. Saito *et al.*, “Indirectly cooled secondary-particle production target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 25, 063001 – Published 3 June 2022.
- K. Agari *et al.*, “Development of temperature-measurement and control system for new production target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, *Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022)*, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 309-312.
- YOKOGAWA PLC website.
<https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/control/control-devices/programmable-logic-controllers-plc-pac/>
- EPICS Sequencer website.
<https://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/>