

J-PARC ハドロン実験施設における 新二次粒子生成標的の温度測定および制御システムの開発

DEVELOPMENT OF TEMPERATURE-MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEM FOR NEW PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

上利恵三[#], 秋山裕信, 森野雄平, 里嘉典, 豊田晃久

Keizo Agari [#], Hironobu Akiyama, Yuhei Morino, Yoshinori Sato, Akihisa Toyoda

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). Temperatures of an old production target in HEF were monitored with 21 thermocouples with 100-millisecond sampling to detect damage to the production target as soon as possible. The old production target was replaced with a new one which was acceptable for 95-kW proton beams. We developed temperature-measurement and control system with a Programmable Logic Controller (PLC) because the new production target was attached about 3 times as many thermocouples as the old one. We also measured the CPU and the memory usage of Linux-CPU modules 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 upgrade of the temperature measurements and control system for the new 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 ラインにある二次粒子生成標的に照射し、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。標的はビームパワーが 50 kW まで受け入れ可能であった(50 kW 標的[2])が、新しい標的の開発が行われ、95 kW まで受け入れ可能となった(95 kW 標的[3], Fig. 2)。

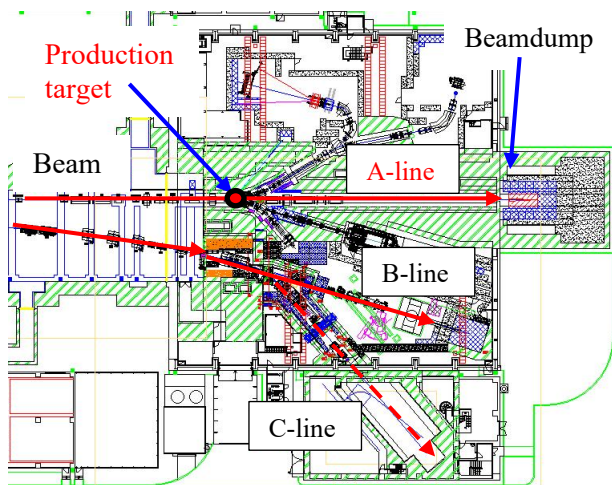


Figure 1: Drawing of J-PARC Hadron experimental facility.

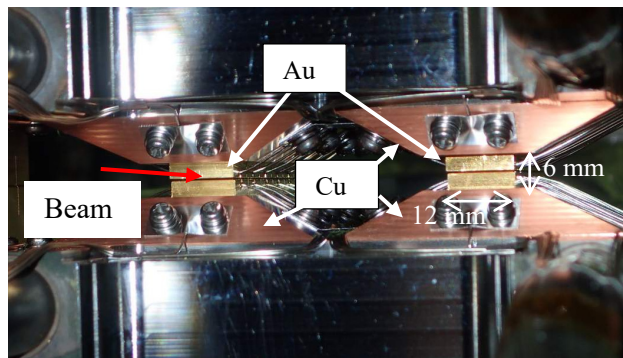


Figure 2: Photograph of 95-kW production target.

2. 二次粒子生成標的

より高いビームパワーでビーム運転を行うため、50 kW 標的を鉛直方向上下対称に 2 個設置した 95 kW 対応可能な標的が開発された。50 kW 標的と同様に、95 kW 標的はビームが照射される部分が金、その土台が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。ビーム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。そこに熱電対が左右に 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 50 または 95 kW 標的の温度測定点数を示す。また標的が何らかの原因で損傷した時のため、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。

[#] agari@post.kek.jp

上述のとおり 95 kW 標的は上下対称構造になり、金、無酸素銅、ステンレス配管、周辺機器などの熱電対が 50kW 標的に比べ約 3 倍に増加したため、測定・制御機器の開発を行った。また下記がその要求事項となる。

- 熱電対の数が約 3 倍に増加するため、安定した測定・制御が可能な機器の査と選択。
- ビームスピルに同期した温度や上下左右温度差波形を表示できる。
- 安全なビーム運転を継続するため、温度がしきい値を超えればインターロック信号の出力し、ビーム運転を瞬時に停止できる。

Table 1: The Number of Temperature Measurements

Target	50kW	95kW
Au	12	48
Cu	2	4
Cooling pipe	2	4
Peripheral	5	9
Total	21	65

3. 温度測定・制御機器

3.1 測定・制御機器

温度測定・制御機器は 50 kW 標的と同様[4]に、横河電機製 PLC、FA-M3V シリーズを選択した。この機器は温度測定が 100 ミリ秒周期で可能で、さらに測定された各温度にしきい値を設定し、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できる。

3.2 PLC モジュール

PLC のモジュール構成はシーケンス CPU モジュールが温度測定、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、そこで得られた温度データやインターロック信号などは Linux-CPU モジュールにより EPICS レコード化される。温度測定は温度モニタモジュールで行い、スピル同期した温度を測定するため、タイミング信号を A/D 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 50 および 95 kW 標的で選択した PLC モジュールを示す。

Table 2: PLC Modules

Module	Model number
Sequence CPU	F3SP71-4S
Linux CPU	F3RP61-2L (50 kW) F3RP71-2L (95 kW)
Temperature monitor	F3CX04-0N
A/D	F3AD04-0R
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 5.2 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。

5.2 秒周期の温度波形を表示するため、温度測定は A/D モジュールでタイミング信号を受信してから開始し、温度データを 100 ミリ秒毎に 1 個ずつ別の PLC 内レジスタに格納し、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。その 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、ビームコミッションや標的の健全性確認などに使用する。

3.4 インターロック

インターロックは下記のとおり 2 段階のしきい値を設定する。

- 1 段階目はアラームハンドラ[6]により警告音を鳴動する。
- 2 段階目はインターロック信号により自動的に加速器を停止させる。

2 段階目のインターロック用温度はビームと非同期で 100 ミリ秒毎に測定する。しきい値は EPICS レコードで設定し、設定された値を PLC 内のレジスタに格納し、シーケンス CPU モジュールで標的溫度と比較し、もししきい値を超えればインターロック信号を出力する。

4. 測定機器の安定性

4.1 Linux-CPU モジュール

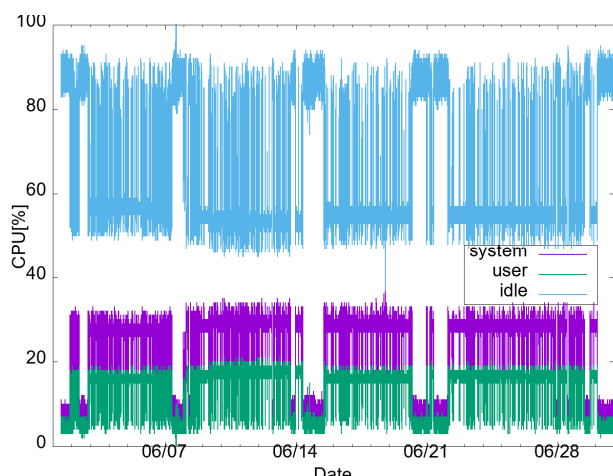
シーケンス CPU および Linux-CPU モジュールにより、温度測定、制御システムを構築するが、ビーム運転中測定機器に過度な負荷が発生していないか確認するため、Linux-CPU モジュールの CPU とメモリの使用状況を測定した。まず 50 kW 標的で F3RP61、次に 95 kW 標的で F3RP71 での結果を評価した。それぞれの Linux-CPU モジュールの仕様と測定条件を Table 3 に示す。

Table 3: Specification of Linux-CPU Modules

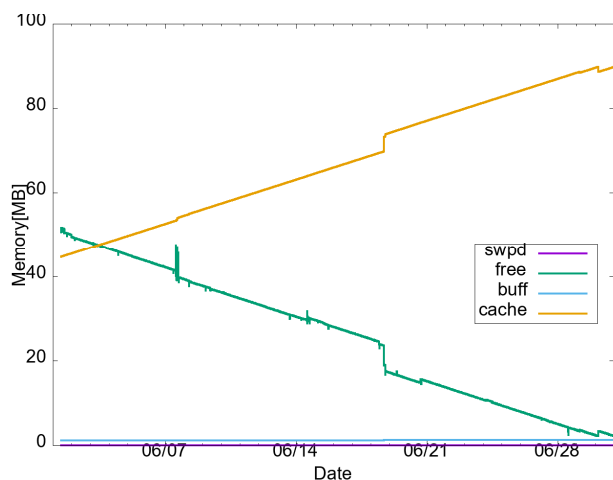
Target	50 kW	95 kW
Linux CPU	F3RP61-2L	F3RP71-2L
CPU	MPC8347E 533 MHz	Cortex-A9 MPCore Dual 866 MHz
SDRAM	DDR2 128 MB	DDR3 1 GB
Period	6/2/18 – 7/1/18	2/9/21 – 2/28/21
Sampling [s]	10	5

4.2 50 kW 標的の試験結果

まず 50 kW 標的、Linux-CPU モジュールが F3RP61、2018 年 6 月 2 日から 7 月 1 日までのビーム運転時の CPU とメモリの使用状況の結果を Fig. 3 に示す。CPU はシステム・ユーザ・アイドル時間の割合[%]を、メモリはスワップ・フリー・バッファ・キャッシュの量[MB]を示している。CPU 使用率はアイドル時間の割合は 50~60%、メモリ容量は空きメモリが徐々に減少し、数 MB までになった。結果より、測定する温度点数が約 3 倍になる 95 kW 標的でのこのシステムで F3RP61 を使用することは過負荷になることが推定される。また CPU のアイドル時間の割合が約 1 日間、約 90%に増加しているのは、加速器のメンテナンス日でビーム運転が行われていないからである。



(a) CPU usage rate



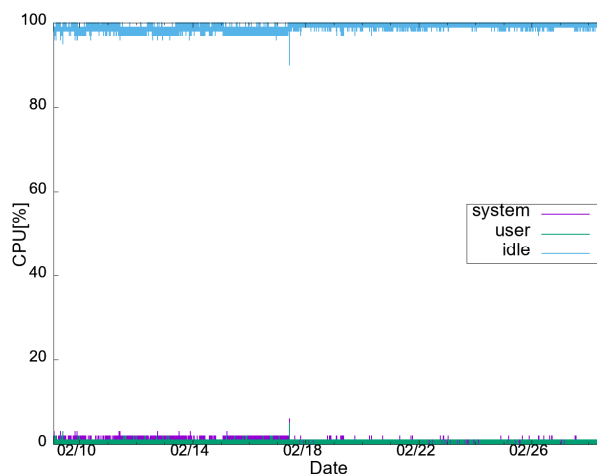
(b) Memory usage

Figure 3: Trend graphs of CPU and memory usage with F3RP61 for 50-kW production target during beam operation.

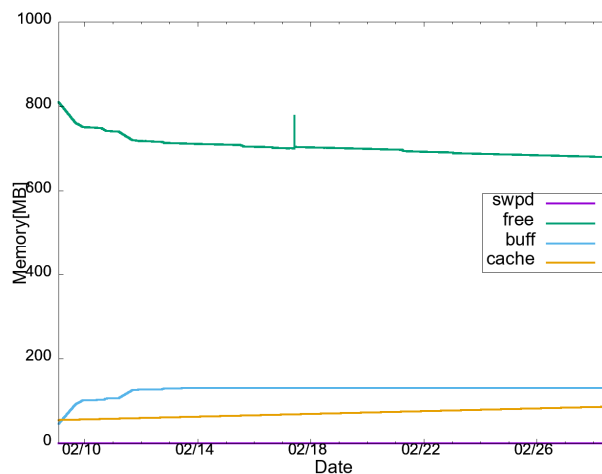
4.3 95 kW 標的の試験結果

4.2 の結果やメモリ容量 (RP61:128MB、RP71:1GB)、通信速度 (RP61:100Mbps、RP71:1Gbps) により、95 kW 標的は Linux-CPU モジュールを F3RP61 から F3RP71 に変更した。また 95 kW 標的が上下構造からなるので、測定機器の PLC も 2 系統用意し、標的上・下部に分け、温度測定および制御を 2 つに独立することにより、CPU やメモリの負荷を分散した。

95 kW 標的で、Linux-CPU モジュールが F3RP71 の 2021 年 2 月 9 日から 2 月 28 日のビーム運転時の結果を Fig. 4 に示す。この測定では標的上部のみ結果を示している。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使用上問題は無いことがわかる。結果より、負荷が分散でき、安定した動作ができたことを確認した。



(a) CPU usage rate



(b) Memory usage

Figure 4: Trend graphs of CPU and memory usage with F3RP71 for the upper side of 95-kW production target during beam operation.

5. ビーム同期温度用ソフトウェア

Linux-CPU モジュールによって EPICS レコード化された温度データはビーム制御室のディスプレイに表示される。現在値を並べたステータス画面、スパイル同期温度波形やそこから EPICS レコード内で計算される最高温度・その 5 ショット平均温度・上下左右温度差、トレンドグラフなどがある。

ここでは代表的なスパイル同期温度波形を表示する画面を Fig. 5 に示す。この画面は Python の GUI ツールキットである wxPython [7]で作成され、ビーム周期である 5.2 秒毎に表示される。グラフの上部にある4つのグラフは上流から見た温度測定位置と同じ(例えば、左上のグラフは上流から見た標的左上の温度)で、下枠は左上グラフが(左上 - 左下)、右上が(右上 - 右下)、左下が(左上 - 右上)、右下が(左下 - 右下)の温度差を表示している。またグラフ毎にある 6 個のプロットはビーム方向にある 6 つの測定点で、上流から下流に行くにつれ TC1, 2, ..., 6 と名付けている。

グラフは主リングから取り出されたビーム強度が 6.4×10^{13} [ppp], スパイル長が 2.07 [sec]の時である。タイミング信号を入力してから 0.6~0.7 秒でビーム寄与による発熱が開始し、温度は徐々に上昇するが、2.6~2.7 秒で温度が減少を始める。スパイル同期温度や上下左右温度の差分を表示することにより、温度勾配がわかり、ビームの状態や標的の健全性などを確認している。

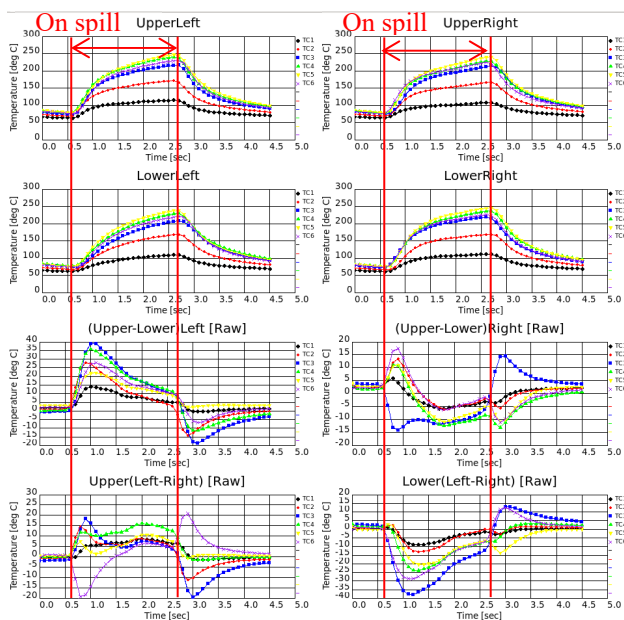


Figure 5: Typical plots of Au temperatures synchronized with beam extraction.

6. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設の新しい 95 kW 二次粒子生成標的の温度測定および制御システムの設計・開発を行ったことにより、下記の事がわかった。

- 測定・制御機器は横河電機 PLC、FA-M3V シリーズを選択した。
- ビーム運転時、Linux-CPU モジュール F3RP61-2L の CPU とメモリ使用状況を調査した結果、50 kW 標的では CPU のアイドル時間の割合が約 50% で、メモリが不足していることがわかった。
- 95 kW 標的に PLC を 2 系統、上記より性能が高い Linux-CPU モジュール F3RP71-2L を使用することにより、CPU とメモリの負荷が分散でき、安定した動作が確認できた。
- インターロックは 2 段階に設定し、1 段階目は警告音、2 段階目はインターロック信号を出力することによりビーム運転を安全に停止する。
- ビームスパイルに同期した温度を表示し、ビームコミッションングでの使用やビームの状態や標的の健全性を確認している。

参考文献

- [1] 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).
- [2] H. Takahashi *et al.*, "Indirectly water-cooled production target at J-PARC hadron facility", J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Sept. 2015, vol. 305, no. 3, pp. 803-809.
- [3] 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.
- [4] K. Agari *et al.*, "Upgrades of Temperature Measurements and Interlock System for the Production Target at J-PARC Hadron Experimental Facility", Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems (ICALEPCS), Melbourne, Australia, Oct. 17-23, 2015, pp. 371-373.
- [5] EPICS Sequencer website;
<https://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/>
- [6] EPICS Alarm Handler website;
<http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/alh/>
- [7] wxPython.org website;
<http://www.wxpython.org/>