

J-PARC ハドロン実験施設における残留ガスを用いた ビーム強度モニタの信号応答

SIGNAL RESPONSE OF THE RESIDUAL GAS IONIZATION CURRENT MONITOR IN J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

里 嘉典[#], 青木 和也, 上利 恵三, 秋山 裕信, 家入 正治, 加藤 洋二, 倉崎 るり,
澤田 真也, 白壁 義久, 高橋 仁, 田中 万博, 豊田 晃久, 広瀬 恵理奈, 皆川 道文,
武藤 史真, 森野 雄平, 山野井 豊, 渡邊 丈晃

Yoshinori Sato [#], Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh, Ruri Kurasaki,
Shinya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Erina Hirose,
Michifumi Minakawa, Fumimasa Muto, Yuhei Morino, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe
Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

Abstract

A non-destructive beam intensity monitor, called Residual-Gas Ionization Current Monitor (RGICM), has been stably used in Hadron Experimental Facility at J-PARC since 2012. As of June 2021, the highest intensity achieved in Hadron Experimental Facility was 65 kW, that is 7.0×10^{13} protons per shot on 5.2 s accelerator cycle. The accuracy of the proton beam intensity measured by RGICM is relatively about 10 %, compared to beam intensity monitored with the DC-current transformer in J-PARC Main Ring. The present RGICM also has a function to detect a rapid surge of beam intensity during 2 s beam extraction period and generate an interlock signal to the MR machine protection system in order to abort beam extraction. In this report, the current status of the RGICM and future improvements are described in detail.

1. 概要

大強度陽子加速器(J-PARC)[1]ハドロン実験施設では、Main Ring (MR)で加速された最大エネルギー 30 GeV の陽子ビームをハドロン実験施設に輸送し、様々な高エネルギー・原子核物理学の実験研究が行われている[2]。Figure 1 に、ハドロン実験施設のビームライン配置を示す。2020年5月には、スイッチヤードトンネルの途中でビームを分岐し、30 GeV 陽子ビームを直接物理実験に使用するためのBラインの利用運転が開始された[3]。2021年6月末において、一次陽子ビームライン(Aライン)で達成された最大ビーム強度は 65 kW (7.0×10^{13} 個/shot, 5.2 秒周期)であった。また、MR から 8 GeV で取り出されたバンチ化陽子ビームをハドロン南実験棟に輸送し、 μ -e 転換事象を探索する実験(COMET 実験)[4]のための新しいビームライン(Cライン)が現在建設中である。

MR で加速された陽子ビームは、3 次共鳴を用いた遅い取り出し法によって 5.2 秒周期中の約 2 秒間、疑似的な直流ビームとして取り出される[5]。ハドロン実験施設側で取り出された陽子数を計測するビームモニタとして、Fig. 1 に示す位置に設置された残留ガスビーム強度モニタ(Residual Gas Ionization Current Monitor: RGICM)を 2012 年から使用している[6]。

現在使用している RGICM の構造図を Fig. 2 に示す。RGICM は、ビームパイプ内の 0.1 Pa 程度の圧力の残留ガス中を陽子ビームが通過する際に発生する電離電子を電場と平行に印可した磁場によってビームの垂直方向

へドリフトさせ、電荷信号として計測するビームモニタである。収集された電荷は高精度のエレクトロメータを用いてビーム取出し時間中積分を行い、全電荷量を計測する。計測された電荷量は RGICM を通過した陽子ビームの個数と残留ガスの圧力(真空度)に比例することから、陽子ビームの粒子数を計算することができる。得られたビーム粒子数を MR におけるビーム強度モニタである MR-DCCT と比較することにより、ビーム強度の相対的な測定精度及び安定度を評価することができる。MR-DCCT の校正精度は 0.1 %以下と評価されており[7]、リファレンスとして十分な精度がある。

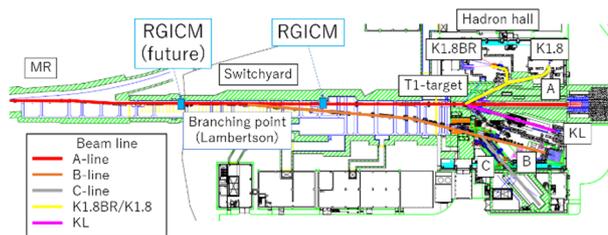


Figure 1: Schematic View of Hadron Experimental Facility.

2. RGICM 用信号処理回路

Figure 3 に RGICM の信号処理システムを示す。RGICM 本体には真空ゲージとして Teledyne Hastings Instruments 製の熱電対真空ゲージ(DV-5R-KF25)[8]とピラニ真空ゲージ(MKS 275 Convectron Pirani)[9]が取り

[#] yoshinori.sato@kek.jp

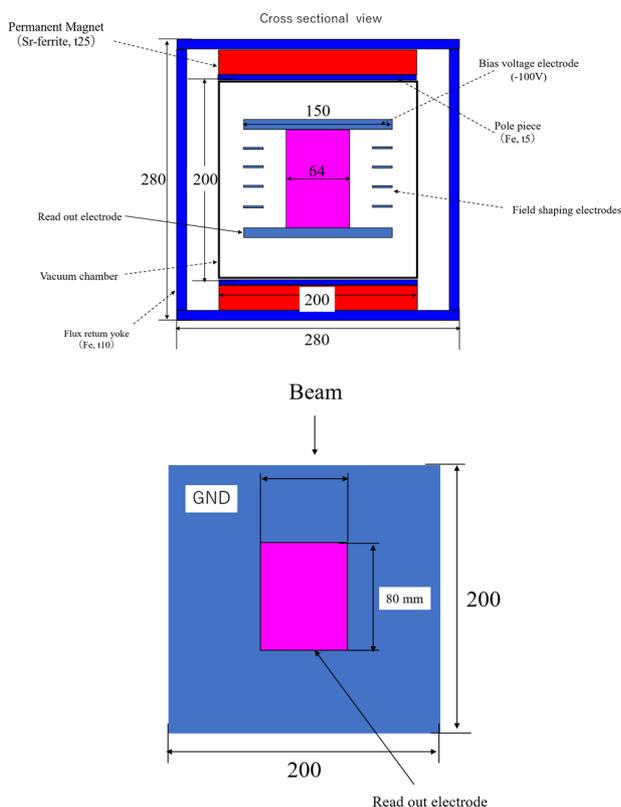


Figure 2: Schematic Drawing of RGICM.

付けられている。熱電対真空ゲージの測定レンジは 0.133 Pa (1 mTorr) から 13.33 Pa (100 mTorr) であり、真空ゲージコントローラ DCV5 からは真空度に対応した 0~10V の電圧信号が出力される。真空ゲージコントローラのリニア出力電圧を PLC の A/D 変換モジュール (F3AD08-1V) で測定し、真空度に変換する。真空ゲージコントローラは、真空ゲージから約 30 m (100 ft) の延長ケーブルを用いてトンネル内の放射線の影響が少ない場所に設置した。

RGICM 本体には電圧印可及及び電荷読出し用の BNC コネクタがあり、それぞれ制御室へ同軸ケーブルで接続されている。RGICM に印可する DC 電圧は通常 -100 V である。電荷読出し用の信号用ケーブルは Keithley 6517B エレクトロメータ [10] に接続される。Keithley 6517B は横河電機製 PLC [11] の GPIB インターフェースモジュール (F3GB01-0N) によって、PLC ラダープログラムで制御される。ビームに同期したビーム取り出し信号ゲートの立ち上がり立ち下りを A/D 変換モジュール (F3AD08-1V) で検知してエレクトロメータの積分時間を制御し、ビーム取り出し終了後に全積分電荷値を取得している。

Keithley 6517B は測定レンジに相当した 0-2V のアナログ信号出力 (電荷測定時は反転出力) を持っており、電荷測定時の信号応答速度は 1 ms 以内と見込まれている [12]。この信号は高速データ収集モジュール (F3HA12-1R) に入力され、ビームに同期した積分信号を波形データとして取得される。F3HA12-1R はサンプリング周期 200 μ s / S、測定点 15,000 ポイントに設定し、ビーム取り出し開始時 (P3) から 3 秒間の波形データを取り込

んでいる。F3HA12-1R モジュールには MR から提供された DCCT の波形出力信号 (0-5V) も入力しており、ショット毎に同時に波形データを取り込んで比較できるようにした。

エレクトロメータの電荷積分信号は、MR から陽子ビームが正常に取り出されている場合には一定の傾きで増加する。もし何らかの要因で MR からの陽子ビームが短時間に急激に取り出された場合には、電荷積分信号の傾きが変化するため、電荷積分信号を微分した信号を監視することによって、ビームの短時間取り出しを高速かつ確実に検知できる。

陽子ビームの短時間取り出しを監視するための微分モジュールは、エレクトロメータの積分波形信号を逐次比較型 ADC (Analog Devices AD7667AST) によって 1 MS/s でサンプリングし、あらかじめ設定された時間間隔で差分を取り積分波形信号の変化量を計算する。差分変化量が設定されたしきい値を超過した場合には機器保護インターロック信号 (5V-TTL) のレベルを Low として遅い取り出しを中止するためのビームアポート信号を発生させる。差分及び比較演算は微分モジュール内の FPGA 内で処理され、差分を取る時間間隔 (現在の設定は 1 ms) 及びインターロックの閾値は微分モジュールのダイヤルスイッチで設定する。微分された信号は 0-10V のアナログ信号として出力され、F3HA12-1R モジュールに取り込み波形データとして記録される。

PLC はシーケンス CPU (F3SP58-6S) と EPICS-IOC が動作する Linux CPU (F3RP71-2L) を併用し、エレクトロメータ及び真空ゲージの制御をシーケンス CPU で行い、Linux CPU で測定データの EPICS データ化を行っている。

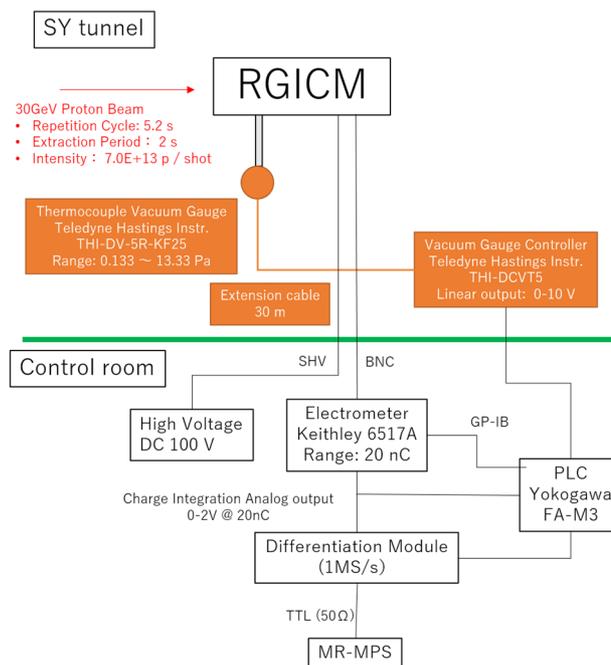


Figure 3: Block diagram of read-out electronics for RGICM.

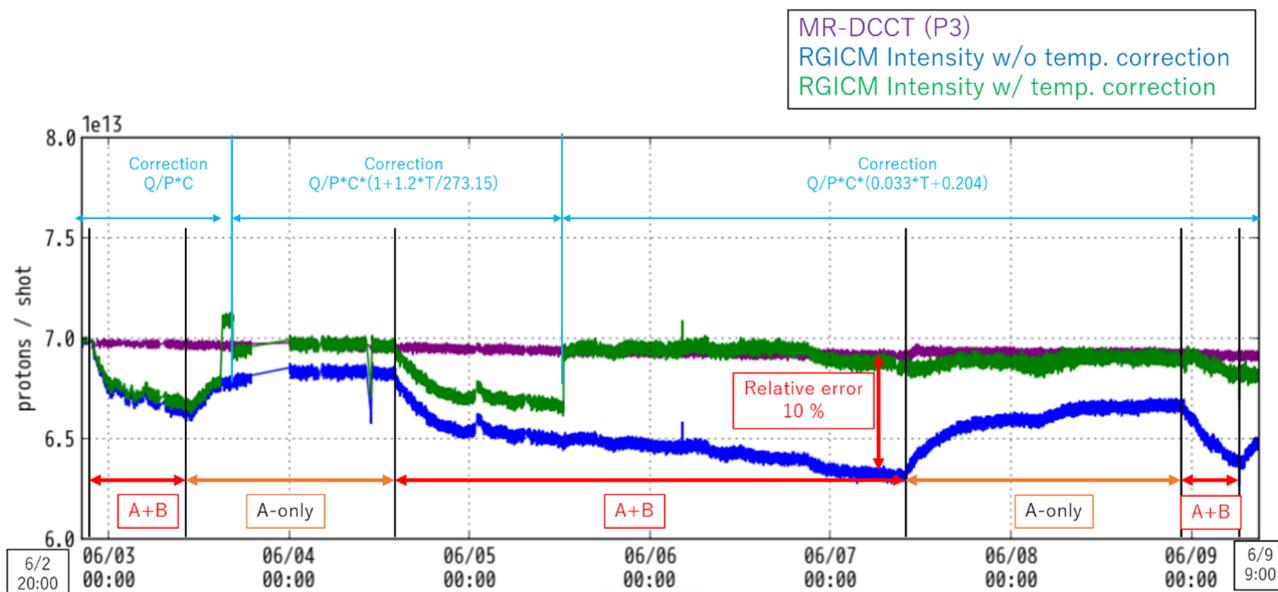


Figure 4: Trend of beam intensity measured with MR-DCCT and RGICM from 2021/6/2 20:00 to 2021/6/9 9:00.

3. RGICM で測定された陽子ビーム強度の変動

Figure 4 に 2021 年 6 月 2 日のメンテナンス停止後から 6 月 9 日のメンテナンス停止前までのビーム運転期間中に RGICM 及び MR-DCCT で計測された陽子ビーム強度のトレンドグラフを示す。

6 月 2 日の時点で RGICM のビーム強度が MR-DCCT のビーム強度に一致するように校正係数を調整した。RGICM で計測されたビーム強度は、MR-DCCT のビーム強度と概ね 10%以下で一致している。しかし RGICM のビーム強度トレンドには系統的なドリフトが見られることがわかる。この原因を調査すると、Fig. 5 に示す通り真空ゲージの読みとスイッチャードトンネル空調の還気温度に相関があることが判明した。RGICM で測定された電荷量をビーム強度に換算する際には、電荷量を残留ガスの圧力で割り算している。このため、Fig. 4 における RGICM 信号量(温度補正なし)は、残留ガスの圧力が上昇すると減少する方向にドリフトする。

Figure 1 に示す通り、スイッチャードトンネルにはハドロン実験ホールの二次粒子生成標的に陽子ビームを照射する A ラインと、スイッチャードの途中で陽子ビームを分岐してハドロン実験ホール南側へ輸送する B ラインの 2つのビームラインがあり、B ラインは実験スケジュール等の要請によって運転と停止を行う。このため、A ラインの電磁石のみが通電される場合(A-only)と、A ラインと B ラインの両方の電磁石が通電される場合(A+B)の 2種類の運転形態がある。B ラインの電磁石が通電されるとケーブルやコイルでの電力損失に伴う発熱量が増加し、結果的にスイッチャードトンネル内の空気温度が上昇する。Figure 4 の RGICM 信号量及び Fig. 5 の真空ゲージとトンネル還気温度のトレンドの変化は A ライン単独運転と AB ライン同時運転の時期に一致しており、これによって RGICM で測定されたビーム強度が変動することがわ

かった。

Figure 4 から読み取れるように、A ライン単独運転の場合は半日程度でドリフトが安定するが、AB ライン同時運転の場合には 3 日以上経過してもドリフトが安定しない。このような長期ドリフトがあることは、AB ライン同時運転が行われるようになった 2020 年 5 月以降から顕著になってきた。同時に、周囲温度起因の長期ドリフトを補正すれば RGICM と MR-DCCT の一致はより改善されることがわかる。MR-DCCT および真空度から計算した RGICM の校正係数とスイッチャードトンネル内温度の直線相関から計算した補正を適用すると、Fig. 4 の後半のトレンド

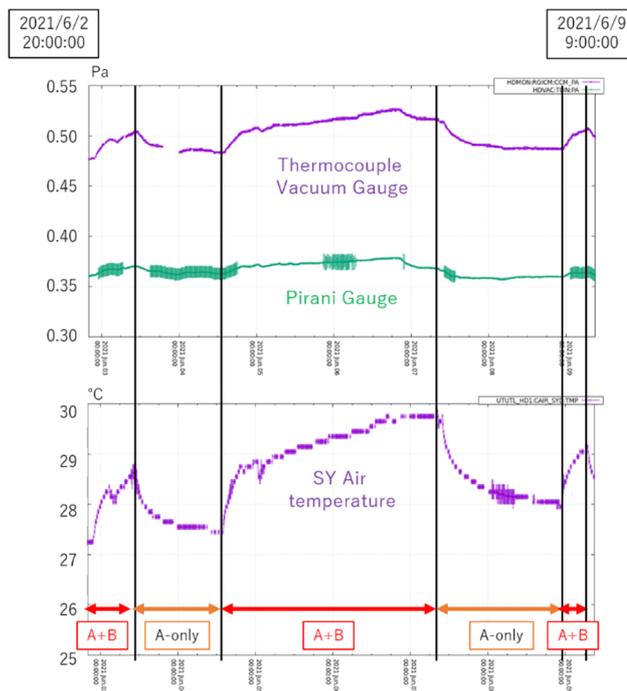


Figure 5: Trend of vacuum pressure and temperature in the switching yard tunnel.

に示す通り、MR-DCCT との一致度を 5 %以下に改善できる可能性がある。

4. 遅い取り出しビームの短時間取出し検出

ハドロン実験施設では、通常時には約 2 秒間にわたって一定の強度で MR からビームが取り出される。しかしながら、様々な要因で遅い取り出しビームが短時間で大量に取り出される可能性があり、これを検知して MR のビー

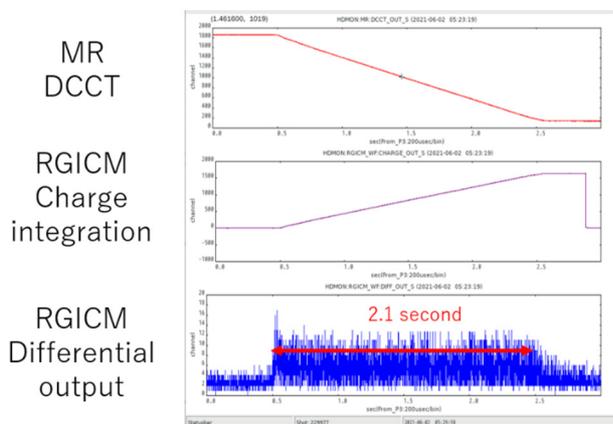
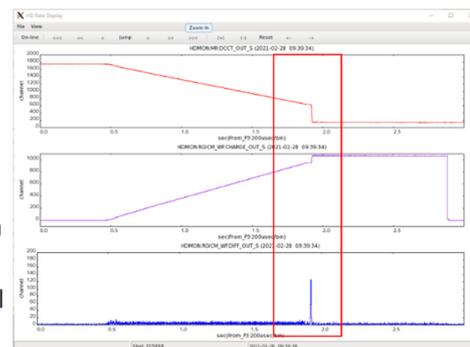


Figure 6: Typical waveform data of MR-DCCT and RGICM in 66 kW beam operation.

取り出しを中断し、ビームをアボートすることは二次粒子生成標的の防護のために重要である。ハドロン実験施設では、二次粒子生成標的で発生した二次ビーム量をシンチレーション検出器 3 台の同時計数によって監視するシステムが運用されている。このシステムは安定的に動作するが、シンチレーション検出器は短時間に高レートの入力信号があると飽和する可能性があるため、一次ビームの強度の急速な変動を直接監視できるモニタシステムがより望ましい。RGICM を用いる方式では、エレクトロメータで計測された電荷積分波形を微分した信号を監視しているため、仮に短時間で大量の陽子ビームが取り出された場合でも MR から取り出される最大粒子数はエレクトロメータの測定レンジを超えないため、原理的に信号が飽和せず短時間のビーム取り出しを検知することができる。Figure 6 に、66 kW での定常ビーム運転中の MR-DCCT 及び RGICM の典型的な波形信号を示す。

Figure 7 に、2020 年 2 月 28 日に発生した短時間ビーム取り出し時に計測された MR-DCCT と RGICM の信号波形を示す。この事象では、ビーム取り出し中に MR 電磁石電源の電力系統中の真空遮断機(VCB)が意図せず開放され、遅い取り出し部に設置された電磁石が複数台同時にダウンした。この時に MR 内で加速された陽子数は 7×10^{13} 個であり、取り出し終了前に 5.5×10^{12} 個の陽子ビームが 11 ms の間に取り出された。RGICM はこの時の信号波形を検知し、取り出しを中止するアボート信号が正常に発出された。このショットにおいて、二次粒子生成標的等、ハドロン実験施設側の機器に異常は見られなかった。MR-DCCT と RGICM の波形データから、短時間取り出し事象の時間幅やビーム強度等、事象の詳細分析に必要なデータが取得できている。

MR
DCCT
RGICM
Charge
integration
RGICM
Differential
output



MR
DCCT
RGICM
Charge
integration
RGICM
Differential
output

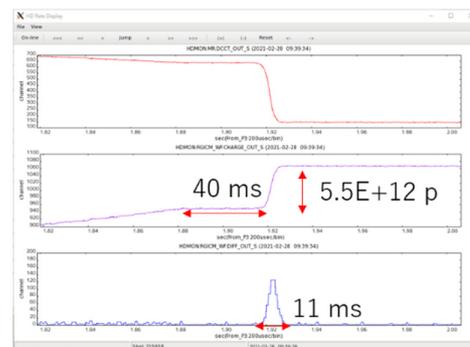


Figure 7: Rapid increase of beam intensity on shutdown of MR magnets due to electric power cutoff during beam extraction. The upper figure shows the waveforms measured during extraction period. The lower one shows expanded area on rapid increase of beam intensity.

5. まとめと今後

ハドロン実験施設でビーム強度測定に利用されている RGICM は 2012 年以來安定に動作しており、取り出されたビーム強度の測定と、予期しない短時間ビーム取り出しの検出に役立ってきた。2020 年 5 月から B ラインの運転が開始され、スイッチャードトンネル内空気の温度変化に追従したビーム強度測定値の変動が顕著に観測されるようになってきた。今後は RGICM の本体付近に測温抵抗体を設置してトンネル内温度との相関を長期的に測定することにより、ビーム強度測定の精度向上を試みる。また、Fig. 1 に示すように RGICM の設置場所を B ラインの分岐部より上流側に変更することで、8 GeV でのビーム輸送を行う C ライン運転時においても、ビーム強度測定と短時間のビーム取り出し検出が A ラインと同じビームモニタで運用できるようになる。

参考文献

- [1] J-PARC Website; <http://j-parc.jp/>
- [2] K. Agari *et al.*, “Primary proton beam line at the J-PARC hadron experimental facility”, Prog. Theo. Exp. Phys. 2012, 02B008.
- [3] Y. Komatsu *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における新設一次ビームラインのビームコミッショニング”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 485-489.

- [4] The COMET experiment Website; <http://comet.kek.jp/>
- [5] M. Tomizawa *et al.*, “J-PARC 遅い取り出し運転の現状と今後の計画”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 70-74.
- [6] Y. Sato *et al.*, “残留ガスを用いた非接触ビーム強度モニタの開発”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 612-615.
- [7] T. Toyama *et al.*, “BEAM-BASED CORRECTION OF ADCCT RESPONSE”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 451-455.
- [8] <https://www.teledyne-hi.com/products/Vacuum/Pages/DV5-Series.aspx>
- [9] <https://www.mks.com/f/275-convectron-pirani-vacuum-gauges>
- [10] <https://www.tek.com/ja/products/keithley/low-level-sensitive-and-specialty-instruments/electrometers>
- [11] <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-platforms/control-system/programmable-logic-controller/>
- [12] Tektronix-Keithley, private communications.