

若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロンにおける ビーム出射制御系の開発 (2)

DEVELOPMENT OF A BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR THE SYNCHROTRON AT WERC (2)

栗田哲郎

Tetsuro Kurita*

The Wakasa Wan Energy Research Center

Abstract

A beam extraction system of the synchrotron at The Wakasa Wan Energy Research Center has been improved. A reference of spill feedback control automatically adjusts to keep constant spill width according to charge in the ring just before extraction. Using the function to measure charge in the ring, it is added the function to measure charge at the timing of before and after acceleration. Also the power of the RF kicker has increased with optimization of band noise.

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設 (W-MAST) は、タンデム加速器および、それを入射器としたシンクロトロンによって、広範囲のエネルギーのイオンビーム (陽子: 数 MeV-200 MeV; He, C: 数 MeV/u-55 MeV/u) を様々な実験に供給している [1]。シンクロトロンからのビームは、がん治療の基礎研究および材料/生物/細胞への照射実験に利用されている。

W-MAST シンクロトロンでは、帯域ノイズを用いた RF ノックアウト法によって遅い取り出しを行っている。すなわち、加速終了後に六極電磁石を励磁することにより 3 次共鳴のセパトリティクスを形成する。周回する粒子のベータトロン振動するに相当する周波数の高周波を横方向に印加することによって周回粒子を拡散させる。セパトリティクスを超えた粒子は、急激に振幅が増大し出射用静電デフレクタに入るとビームラインに出射される。周回粒子のベータトロン振動数には拡がりがあるため、印加する RF には約 1kHz 間隔の離散スペクトラムの帯域ノイズを重畳させ周波数に広がりを持たせている。

出射されたビームはビームラインのウォブラー電磁石によって照射野を形成して各種ターゲットに照射される。そのため、数百 ms の時間をかけて一定強度でビームを出射する必要がある。出射電流量の時間構造は、出射用高周波の振幅を時間的に変化させて制御している。

2017 年度に、老朽化した出射制御系の更新を行った [2]。継続的な保守性を確保するために、汎用品の組み合わせ PC への依存性が低い出射制御系を開発した。

その際に、出射スピルを一定にするために、出射ビームの電流量をイオンチェンバーで測定し、その信号を出射用高周波振幅にフィードバックするフィードバック制御 (スピルフィードバック) を改良した。

2018 年度にも開発を継続し、フィードバック制御の改良を行った。出射直前のリング内の電荷量をモニタし、それに比例してフィードバック制御の目標値を変化させ、電荷量が変わってもスピルの時間幅が一定なるように制御する機能を開発した。

リング内の電荷量をモニタする機能を利用して、捕獲電荷/加速電荷/出射電荷/漏れ電荷を自動的に測定する機能を付け加えた。

さらに、帯域ノイズの生成について最適化を行うことにより、RF キッカーのパワーを増強させた。

2. スピルフィードバック制御のリファレンス自動調整

2017 年度に出射スピルを一定にするために、出射ビームの電流量をイオンチェンバーで測定し、その信号を出射用高周波振幅にフィードバックするフィードバック制御の開発を行った [2]。フィードバック信号の演算回路の作成には MTT 社の DSP (Digital Signal Processor) 開発キット sBox [3] を用いている。DSP を用いることによりパラメータや動作の変更が容易になる。

出射ビームの電流量をイオンチェンバーで測定し、その信号を Low Pass Filter で高周波成分を除去し、出射ビーム電流量の目標値 (リファレンス) との差分にゲインを乗算して出射用高周波振幅にフィードバックする。定常特性を改善させるために位相遅れ補償器を挿入している。

これによって、RF キッカー法特有のスパイク状の変動は残るが、容易に大域的には一定電流に制御できるようになった。

調整の際には、シンクロトロン内の電荷量に合わせてリファレンスを設定する。リング内の電荷量変動すると出射ビームの時間幅が短くなる。そこで、電荷量が変わっても、自動的に出射ビームの時間幅を一定に制御できるように、シンクロトロン内の蓄積電荷をモニタしてリファレンスを比例させるようにした。この仕組みは先行する事例を参考にした [4]。

フィードバック回路の詳細を Fig. 1 に示す。

リング内の電荷は静電型 BPM の和信号 (バンチ信号) のオフセットのシフトを利用する。バンチ信号の下側のエンベロープを検波し、ビーム出射直前のタイミングで AD 変換して値を読み込み、リファレンス設定に乘算する。

ビーム試験の結果を Fig. 2a, 2b, 2c に示す。シンクロトロンへの入射ビームのパルス幅を変化させることに

* tkurita@werc.or.jp

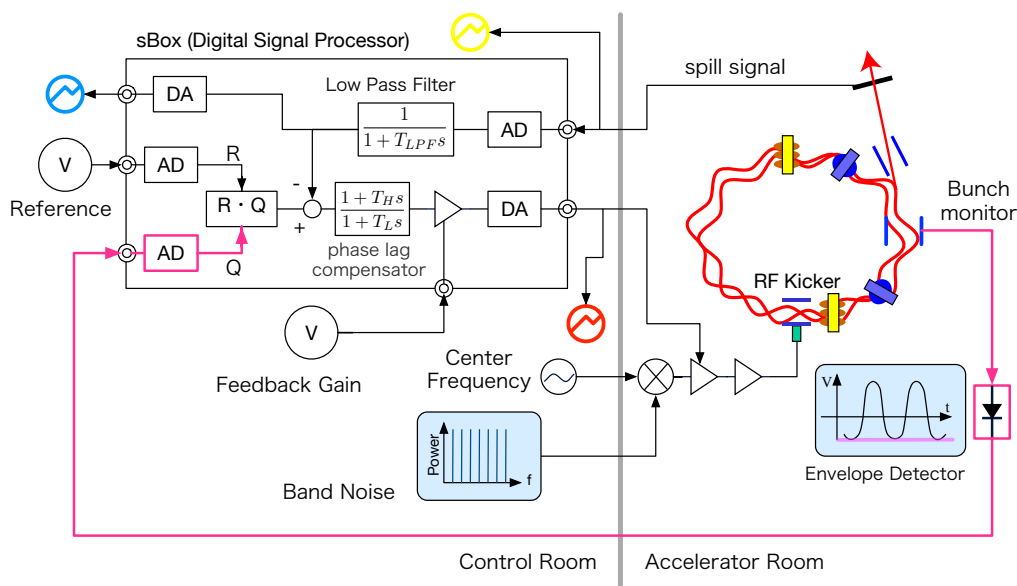
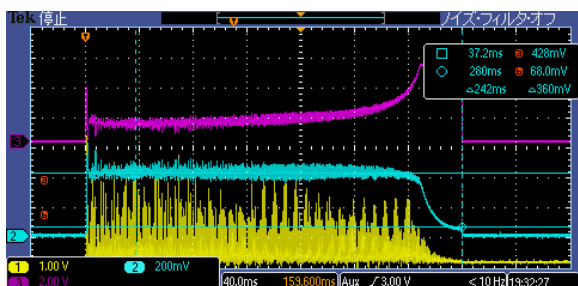
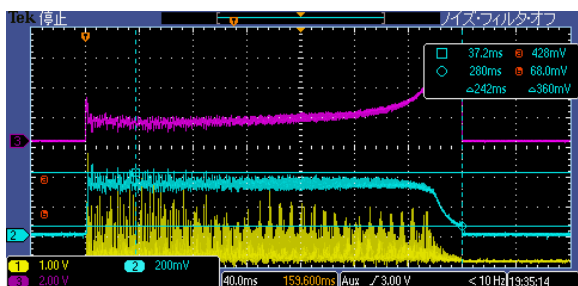


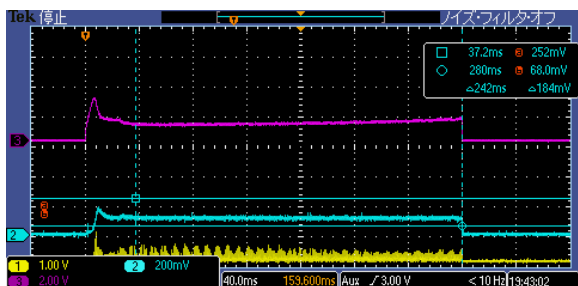
Figure 1: A diagram of the spill feedback circuit with auto reference adjustment.



(a) pulse width of injection beam $25\mu\text{s}$, charge $\sim 8\text{nC}$



(b) pulse width of injection beam $15\mu\text{s}$, charge $\sim 6.5\text{nC}$



(c) pulse width of injection beam $10\mu\text{s}$, charge $\sim 2.8\text{nC}$

Figure 2: Spill signals under the feedback control with auto reference adjustment. yellow: extracted beam, blue: output of LPF, red: feedback signal.

よってリング内の電荷量を変化させ出射スピルの変化を測定した。電荷量の減らしたときに、スピルの時間幅は短くならず、波高が変化している。すなわち、リファレンスの自動調整機能が期待通り動作していることが確認できる。

しかし電荷量を減らすと、リング内に射出残しが発生する。これは、リング内の電荷量によって射出効率が変化していることが原因である。電荷量に対する射出効率の変化を Fig. 3 に示す。

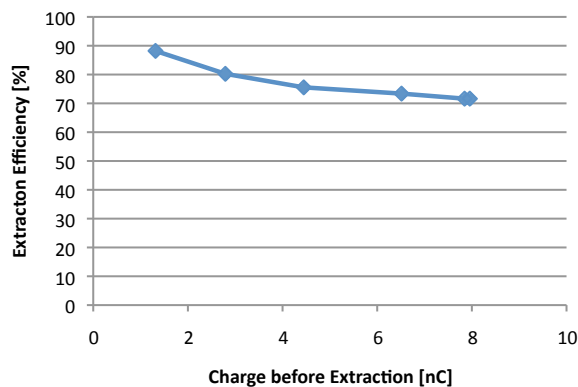


Figure 3: Extraction efficiency depending on charge in the ring before extraction.

3. 出射ビーム電流量と蓄積電荷の自動測定

リファレンス自動調整機能の開発に伴い、リング内の電荷をモニターする機能が射出制御系に備わったので、これを利用してリング内の捕獲電荷/加速電荷および射出電流量/漏れ電流量 (RF キッカーを OFF したときに射出される電流量) の自動測定機能を追加した。

これまで、これらの測定には二人がかりでオシロス

コープでバンチ信号の下側と出射電流量の同時測定を行い、10周期分の平均を記録していた。オシロスコブのトリガーを加速開始タイミングもしくは加速終了タイミングに切り替えて測定し、さらにRFキッカーをOFFにして漏れ電流を測定していた。

これらを制御ソフトウェアのボタン一つを押すだけで自動的に行えるようにした。これにより、運転業務の大きな効率化を図ることができた。

以上の仕組みを Fig. 4 に示す。バンチ信号の下側エンベロープ信号を加速開始/加速終了タイミングで sBox [3] で記録する。sBox は PC と通信が行えないので、記録した値を一度 AD 出力し、PC で読み込むために CONTEC AIO-120802LN-USB [5] に入力する。同時に、出射電流量を IF Converter でカウント数に変更して、CONTEC-AIO モジュールに付属の Counter で計測する。

エンベロープ検波器の出力の電荷量に対する校正は、負性抵抗回路を用いた Slow CT [6] を用いて行った。

出射制御系には、RF スイッチによって中心周波数を遮断する機能もあるので、漏れ電流の測定も含めてすべて自動的に行える。

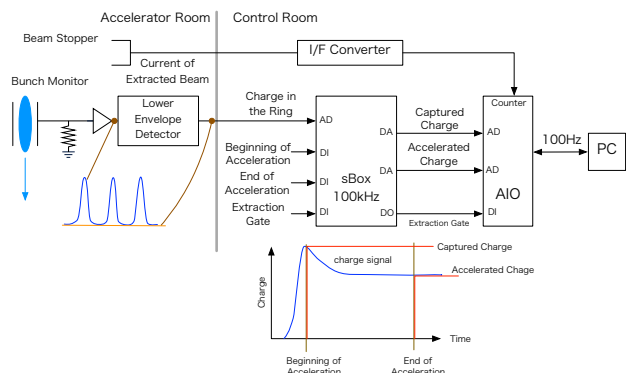


Figure 4: The mechanism of auto measurements of charge in the ring and extracted beam current.

操作画面を Fig. 5 に示す。過去の測定履歴たどれるように工夫してある。

4. 帯域ノイズの最適化

RF キッカーに印加する高周波は、周回粒子のベータatron 振動数の拡がりに対応するため、周波数に拡がりを持たせる必要がある。そのような高周波を生成するため、おおよそベータatron 振動数に対応した中心周波数 f_0 を 1kHz 間隔、帯域 $\Delta f = 25\text{kHz}$ の離散スペクトラムで AM 変調することによって、 $f_0 \pm \Delta f$ の拡がりを持った高周波を発生させている。

離散スペクトラムの帯域ノイズを生成する際に、各周波数成分の位相は乱数で決定していた。そして最大振幅が $\pm 1V$ に収まるように規格化する。

位相の選択によって、帯域ノイズのうねりぐあいが変わるので、規格化の過程で平均振幅すなわち RF キッカーのパワーが変化すると考えられる。

そこで平均振幅が最大になる位相を最小化アルゴリズムの一つである Nelder-Mead 法によって探索した。Figure 6 に位相を乱数で決定した帯域ノイズと平均振幅



Figure 5: The operation window for auto measurements of charge in the ring and extracted beam current.

を最大化した帯域ノイズの比較を示す。有意に平均振幅を大きくなり、RF キッカーのパワーの増大が期待できる。

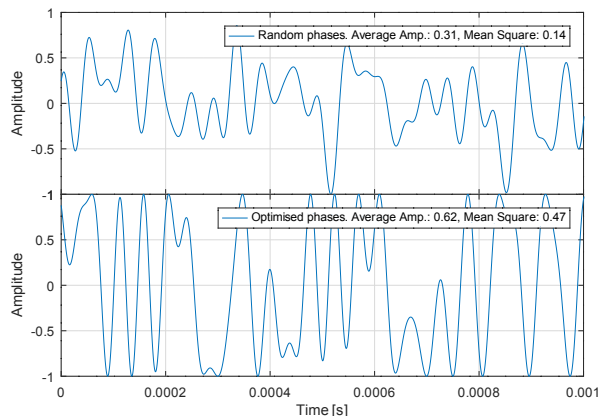


Figure 6: Comparison of band noises of which frequency interval is 1kHz and band width is 25kHz. Upper: random phases. Lower: optimized phase for maximizing average amplitude.

平均振幅の効果を確認するために、ゲインパターン一定、中心周波数を減衰させ出射しきれない状況で、様々な帯域ノイズに対する出射効率の変化の測定を Fig. 7 に示す。RF キッカーが通過する荷電粒子に対して行う仕事は、電圧の 2 乗に比例するので横軸は二乗平均振幅とした。さらに、周波数間隔を変化させた場合の比較も行った。

離散スペクトラムだけでなく、連続スペクトラムの帯域ノイズ (colored noise) による測定も行った。colored

noise はデジタルフィルタ法 [7] によって生成した。二乗平均振幅を増加させる調整は、振幅のピーク部分を減衰させることによって行った。

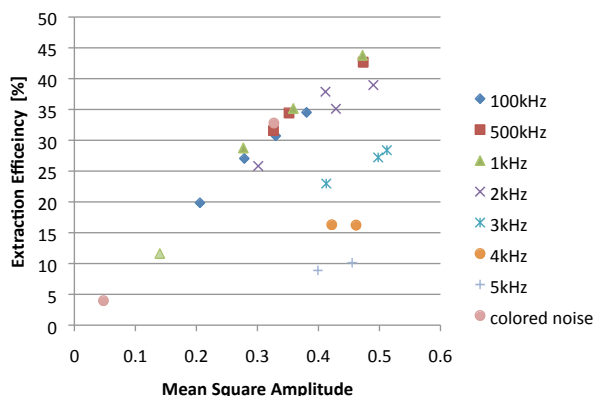


Figure 7: Extraction efficiency of proton 200 MeV depending of mean square amplitude and frequency interval.

Figure 7 を見ると、周波数間隔が 1kHz 以下の場合、二乗平均振幅に対して出射効率が比例している。周波数間隔が、2kHz 以上になると出射効率が落ち始める。周波数間隔が広すぎると、ベータトロン振動数が一致しない粒子が増えるためと考えられる。

Figure 8 に周波数間隔を変更したときの出射スピルの比較を示す。周波数間隔を広げるにつれ、スパイク状の細かい変動がなくなる傾向にある。

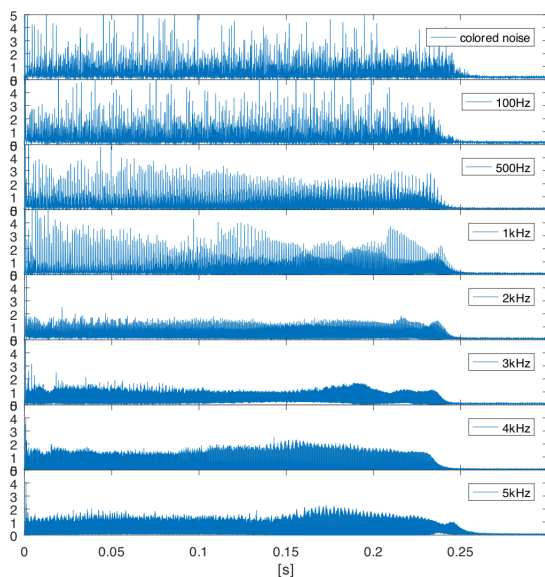


Figure 8: Comparison of spill structures (proton 200 MeV) of various frequency intervals.

5. まとめ

W-MAST シンクロトロンの出射制御系にスピルフィードバックの自動リファレンス調整機能、蓄積電荷と出射電流自動測定機能を追加した。

帯域ノイズの各成分の位相を調整することにより、二乗平均振幅を大幅に向上させることができた。これにより RF キッカーの出力が向上し、出射調整の自由度が上がる。また、スピルのスパイク状の細かい変動を抑制するには、ある程度、周波数間隔を広げた方が良いことが分かった。

参考文献

- [1] S. Hatori *et al.*, “Developments and applications of accelerator system at The Wakasa Wan Energy Research Center”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B241, (2005), 862.
- [2] T. Kurita, “DEVELOPMENT OF A BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR THE SYNCHROTRON AT THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 590-592;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP094.pdf
- [3] http://www.mtt.co.jp/dsp/sbox_index.html
- [4] H. Nishiuchi *et al.*, “DEVELOPMENT OF BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR MEDICAL SYNCHROTRON”, Proceedings of 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Japan, Aug. 2009, pp. 287-291;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/wpapa05.pdf
- [5] <https://www.contec.com/jp/products-services/daq-control/pc-helper/usb-module/aio-1208021n-usb/feature/>
- [6] T. Kurita, “Development of a current monitor using a negative impedance circuit”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A763, (2014), 7.
- [7] T. Nakanishi, K. Tsuruha, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A608, (2009), 37.