

BEAM STABILIZATION OF THE J-PARC ION SOURCE BY ARC CURRENT $\Delta\Sigma$ FEEDBACK CONTROL

Kiyonori Ohkoshi[#], Yuichi Itoh, Akira Ueno, Hidetomo Oguri

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakatasirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki

Abstract

The negative hydrogen ion source driven by an arc discharge with a lanthanum hexaboride (LaB_6) filament is under operation for the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). In order to minimize the beam loss in the J-PARC, especially in the 50GeV-MR (Main Ring), the allowable beam fluctuation of the ion source is very low (± 0.3 mA). On the other hand, the arc impedance is always changing due to the accumulation of boron on the low temperature surface of the filament and the exhaustion of the filament itself. The rather rapid increase of the arc impedance is produced by the former reason for a few days after the start-up of the overhauled ion source operation. Since the arc voltage is set to a constant value, basically the beam current is stabilized by keeping the arc current, that is arc impedance. Therefore, a control program simply negative-feedbacking the difference between the measured arc current and the setting one to the setting of the filament voltage was used at first. However, the beam current fluctuation by the feedback was not negligible to minimize the beam loss at the MR due to the insufficient setting resolution of the filament voltage (0.01V). Therefore, the $\Delta\Sigma$ feedback system was installed into the program, in order to keep the arc current more precisely. The arc current fluctuation was reduced from about $\pm 0.6\%$ to $\pm 0.2\%$ by the improved feedback system. Consequently, the beam current fluctuation was successfully reduced to within about ± 0.1 mA.

アーク電流 $\Delta\Sigma$ フィードバック制御による J-PARC イオン源ビームの安定化

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、リニアック、3GeV シンクロトロン、50GeV シンクロトロンの大強度陽子加速器^[1]による陽子ビームは、物質・生命科学実験、原子核・素粒子実物理及びニュートリノ等の幅広い分野の最先端研究に利用されている。現在、J-PARC で稼働中の負水素イオン源は、六ホウ化ランタン(LaB_6)製フィラメントを使用したアーク駆動型タイプを採用している。フィラメントを使用したイオン源は、フィラメント表面状態の変化がビーム電流の安定性に影響する。最近の J-PARC の運転サイクル (RUN) は、稼働率向上のため約 50 日間(約 1200 時間)連続運転になり、RUN と RUN の間のイオン源メンテナンス時間は、調整運転を含めて 24 時間に短縮されている。調整運転時間が十分ではないため、RUN 開始から数日間はアーク電流の変動が原因でビーム電流が変動するため、50GeV シンクロトロンのビームロスにも影響が出ていた。このため、イオン源にアーク電流フィードバック制御を実装し、さらに安定性向上のためプログラム変更を行ったので、その結果について報告する。

2. J-PARC 負水素イオン源

J-PARC の負水素イオン源はプラズマ生成室内の熱陰極に LaB_6 フィラメント 1 本を設置してソースプラズマを生成する。フィラメントは、内径 23.0mm、外径 29.5 mm、全長 43.6mm の円筒型の形

状をしており、3.3mm 幅の 2 重らせんになっているため隣り合うフィラメントで磁場を打ち消しあい、効率より熱電子を引き出す構造になっている。フィラメントに 150A 程度流し、加熱された LaB_6 フィラメントからの熱電子によりアーク放電させる。プラズマ生成室で生成した負水素イオンは約 50keV でイオン源から引き出され、RFQ 加速器に入射される。J-PARC 負水素イオン源の構造を図 1 に示す。

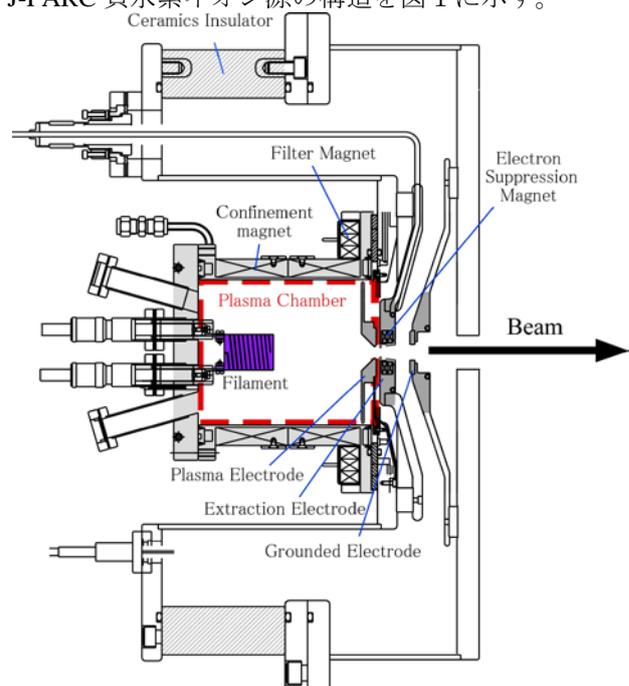


図 1 J-PARC 負水素イオン源の構造

[#] ohkoshi.kiyonori@jaea.go.jp

3. イオン源のビーム電流安定性

イオン源で生成されるビーム電流は、イオン源の各パラメータで変化するが、特にアーク電力に大きく依存している。アーク電圧を 140V 一定にし、アーク電流を変化させた時のビーム電流変化を図 2 に示す。

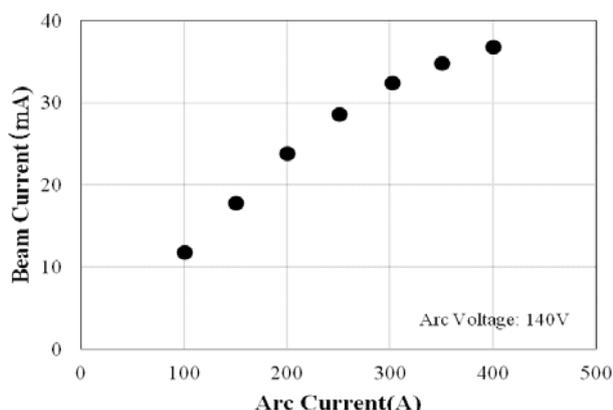


図 2 ビーム電流に対するアーク電流依存性

上のグラフのように、ビーム電流はアーク電流に依存しているため、ビーム電流を一定にするためには、アーク電流を安定させることが重要である。しかしながら実際の運転では、プラズマ中のボロンがフィラメント表面に徐々に付着し^[2]エミッション領域が狭くなっていくため、熱電子量が減少し、アーク電流も徐々に減少し続ける。ビーム電流 17.5mA で 457 時間運転後のフィラメント写真を図 3 に示す。



図 3 運転後のフィラメント

写真の丸で囲んだ部分のみが LaB₆ 本来の紫色を保っており、それ以外の表面はボロンで覆われて黒く変色している。フィラメントは紫色の部分が集中的に消耗し、最終的にはその部分で切断する。アーク電流を一定に維持するには、エミッション領域が狭くなった分、フィラメント電流（定電圧設定）を上げる必要がある。運転開始直後は特に変動が大きいため、1 時間に数回の調整を行うため、オペレータの負担も大きかった。このため、アーク電流を一定に保つためのフィードバックプログラムを作成し、

使用中のイオン源電源に実装した。

4. アーク電流フィードバック制御

アーク電流を一定に保つためにフィードバック制御を行うシステムの構成は図 4 のようになっている。WER(Wave Endless Recorder)波形デジタルライザにより取り込まれたアーク電流波形は EPICS レコードを介して制御端末で動作するフィードバックプログラムに送られる。フィードバックプログラムはアーク電流波形の特定部分（現在はアーク消弧直前の約 60 μ s/60 サンプル）を切り出し、その平均値を計算してアーク電流測定値とする。イオン源は 25Hz で動作しているが、測定系の制限によりアーク電流波形レコードは 1 秒に 1 回更新されている。さらにフィードバックプログラムはこの測定値を蓄積・平均化し、10 秒 (=10 波形分) 毎にフィラメント電圧設定値を計算する。フィラメント電圧設定値の決定方法は単純で、予め与えられているアーク電流の目標値と測定値を比較し、大きければフィラメント電圧設定値を下げ、小さければ上げる動作を繰り返す。設定値を上下させる電圧ステップは設定分解能に等しい 0.01V となっている。

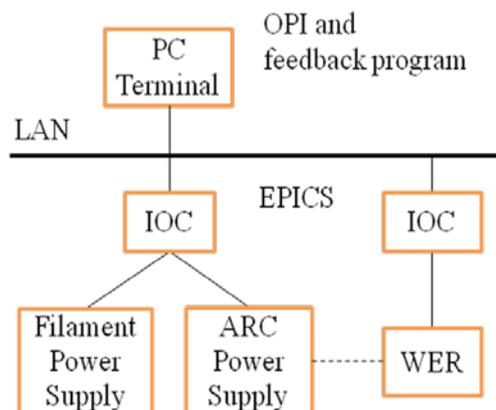


図 4 システムの構成

このように基本的な動作は単純であるが、設定値が予め与えた可動範囲を超えないようにする機能、MPS(Machine Protection System)の動作によりアークタイミングがずらされた場合などを想定してサンプルから異常値を除去する機能、またサンプル数・波形数が十分でない場合や目標値と現在の測定値の差が一定範囲内なら設定値を更新しない機能など、安全面も考慮した工夫がなされている。

この方式によるアーク電流フィードバックシステムを運用することにより、ビーム電流の長期的な安定度を確保することができた。

5. $\Delta\Sigma$ 変調方式

しかしながら、この方式の問題はイオン源フィラメント電源の電圧設定分解能が 0.01V しかないことである。これは 0.05%FS(11bit)の分解能に相当し、

低電圧大電流直流電源としては一般的といえる。しかしながら、J-PARC 負水素イオン源においては、他のパラメータにもよるがフィラメント電圧での 0.01V の変化はアーク電流において 1~2A 程度の変動をもたらす。時間とともに徐々にアーク電流が下がっていき、フィードバックプログラムがこれに対抗してフィラメント電圧設定値を 1LSB 上げると、その時点でアーク電流は跳ね上がる (図 5。更新周期 60 秒、不感帯幅 0.8%とした)。

この階段状の変化を嫌ってやや過剰なフィードバック (更新周期 10 秒、不感帯幅 0.1%) とすると、熱容量による遅れ要素の影響もあり設定値は ±1LSB の範囲で振動し、それがビーム電流で見ても変動となって観測されてしまう (図 6)。ただし、この場合でも長期的な変動に関してはほぼ完全に抑制することができる。

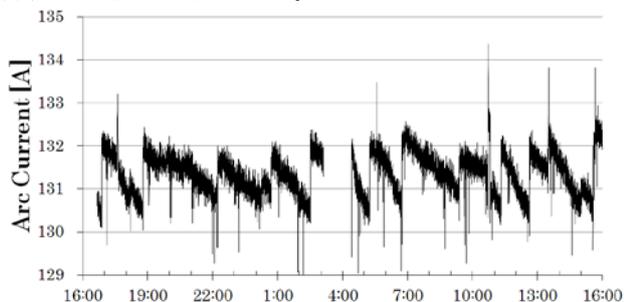


図 5 階段状になる場合

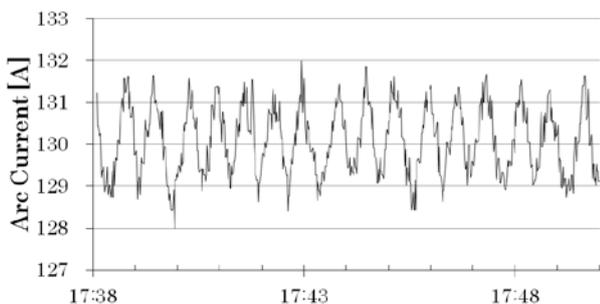


図 6 振動する場合 (時間軸拡大)

今回、このような振動または階段状の変動を軽減するため、フィードバックプログラムの改良を行った。主たる変更点はフィラメント電圧を設定する部分において ΔΣ 変調を用いて等价的に電圧設定値の分解能を向上させたことである。

前述のフィードバック動作により定周期でフィラメント電圧設定値が算出されているが、フィードバックのパラメータを変えて設定値を増減する電圧ステップ幅を電源の分解能より小さく取れば設定値をより細かく求めることはできる。しかし、このままでは電源の分解能による量子化誤差によりその精度を活かすことができない。そこで、算出した設定値 V を分解能で切り上げた値 V_A と切り捨てた値 V_B を求め、それらを時分割で交互に設定を繰り返すことを考える。 V_A が設定されている時間 T_A と V_B が設

定されている時間 T_B の比を調整すれば、平均値として設定値 V を表現することができる。イオン源においてはフィラメントの熱容量がローパスフィルタとして働くため、交番周期 T_A+T_B にはさほどの高速性は要求されない。

$$V = V_A \frac{T_A}{T_A + T_B} + V_B \frac{T_B}{T_A + T_B} \quad (1)$$

上式を単純に実装すれば PWM であり、乱数またはノイズを利用して確率的に表せば Dither 法となるが、ここでは ΔΣ 変調方式を採用した。ΔΣ 変調は量子化誤差を積分して次回の設定値から差し引く局所フィードバックにより行われる (図 7)。これは量子化誤差の累積値を 0 に近づけるように動作し、その過程で自動的に上述の V_A/V_B の切り替えが行われることとなる。言い替えれば、ΔΣ 変調により量子化誤差は時間軸方向へと分散され、熱容量のフィルタとしての働きにより低減されることとなる。

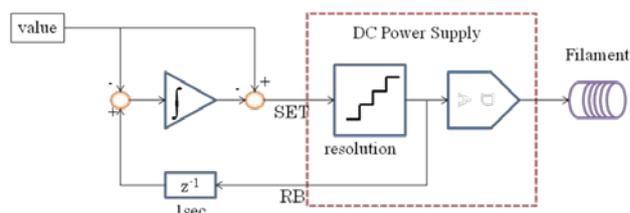


図 7 ΔΣ 方式の構成

今回は ΔΣ 変調の周期を電源の応答時間も考慮し、ソフトウェアで扱いやすい 1 秒周期とした。設定値を算出する周期は変わらないが、最小 1 秒間隔で変調後の設定値を送出している。設定値を算出するフィードバックのパラメータについては、設定値を増減する電圧ステップ幅を 0.001V とした。設定値更新周期は変更ないので、電圧ステップ幅のみ 1/10 とした場合は追従性が悪化することが予想されるため、測定値が目標値から 1% 以上離れていた場合には電圧ステップ幅を 0.005V に一時的に増強するように工夫した。

ΔΣ 変調を用いた方式の動作結果を図 8 に示す。階段状の変動も振動も観測されていない。

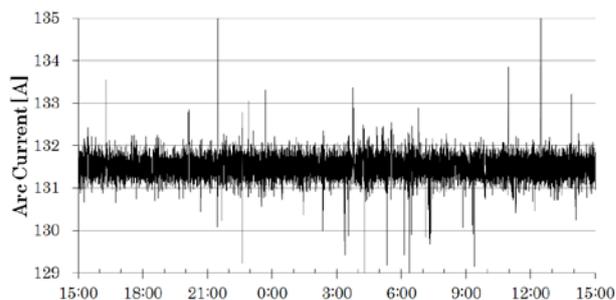


図 8 ΔΣ 方式による動作結果

それぞれの場合のアーク電流の変動を標準偏差 σ で表すと、階段状の場合 $\sigma=0.414\text{A}(0.315\%)$ 、振動する場合 $0.801\text{A}(0.616\%)$ 、 $\Delta\Sigma$ 方式では $0.239\text{A}(0.182\%)$ であった。

6. まとめ

イオン源に $\Delta\Sigma$ 方式アーク電流フィードバックプログラムを実装したことで、アーク電流の変動率を $\pm 0.2\%$ 以内にすることに成功し、オペレータの負担を大幅に軽減することができた。

Reference

- [1] Hasegawa, in Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, 2007 (IEEE, Albuquerque, New Mexico, 2007), p. 2619.
- [2] H. Oguri, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 02A715 (2010)