

# BEAM HALO MONITORING AT J-PARC 3-50 BEAM TRANSPORT LINE USING LONG AIR IONIZATION CHAMBER

Kenichirou Satou , Takeshi Toyama, Masashi Shirakata, Yoichi Sato

J-PARC/KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki

## Abstract

3 long-type Air Ionization Chambers (AICs) have been installed along 350BT which is the beam transport from the 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) to the Main Ring synchrotron (MR) to monitor beam losses. 3-50BT collimators are used to remove beam halo components outside the emittance larger than  $54[\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}]$  for horizontal and  $60[\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}]$  for vertical plane, at present operations. By measuring the beam loss induced radiations from the 3-50BT collimators, the beam halo components have been monitoring on line. Details of the system, calibration results, and resolution of the system will be described in this paper.

## 空気イオンチャンバーを用いた J-PARC3-50BT におけるビームハロー測定

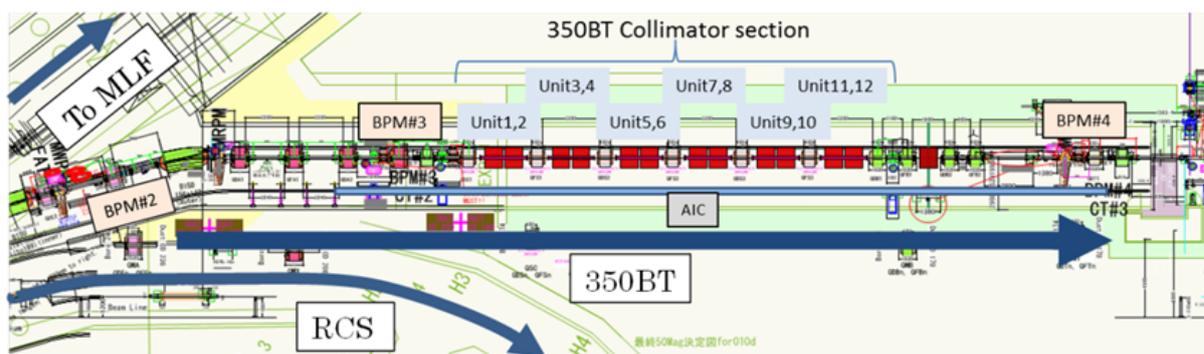


図 1 : 350BT 上流部の機器配置図。各コリメータユニットにはビームを削るための Jaw が 2 台設置され、上流から順に (R, U)、(L, D)、(L, U)、(R, D)、(R, U)、(L, D)、(L, U)、(R, D)、(R, U)、(L, D)、(L, U)、(R, D) である。ここで (L, R, U, D) はビームから見た方向を示している。

### 1. はじめに

J-PARC MR 加速器 (MR) では今年度上半期の運転で速い取り出し (FX) モード 200[kW] の定常運転を達成した。今後はさらに調整を進め、定格出力 750[kW] の安定的な運転を目指している。定格出力時のビーム強度はバンチあたり  $4E13$  にもなる。バンチあたりの強度が増せば増すほど、ビームハローの抑制が重要になってくる。

RCS から MR へのビームトランスポートである 350BT には、RCS から輸送されるビームのハロー成分を除去する目的でビームコリメータが設置されている。このコリメータで精度よくハロー成分を除去することは、MR 入射後のビームロスを低減し、MR 機器の無用な放射化を抑えるために重要である。同時に RCS でのハロー生成メカニズムを詳細に検証し、MR の大強度運転にマッチした運転パターンを探ることは特に重要である。ビーハローを常に監視するハローモニタは、今後の大強度化調整に必要な不可欠なキーコンポーネントになるものと予想される。

RCS から物質・生命科学実験施設 (MLF) へのビームトランスポートである 3NBT にはすでにハローモニタが設置されている。これは板状の 0.1[mm] 厚アルミ製スクレーパーとシンチレータと光電子増倍管を用いたビームロスモニタ (S-BLM) を組み合わせたシステムであり詳細は文献 [1] に詳しい。ただし、このハローモニタは 350BT に設置されていないため測定のためにはビームの行き先を変えなければならず、常時モニタリングは不可能である。

ビームハロー成分の常時モニタリングのため、350BT コリメータから発生する放射線をビームロスモニタで測定し、コリメータで除去されるハロー成分を観測するシステムを構築した。このコリメータで吸収できるビーム強度は 2[kW] 以下である。以降の章ではこのシステムの測定原理、校正結果、測定精度について報告する。

### 2. 測定システム

図 1 に 350BT 上流部の機器配置図を示す。350BT にはコリメータ機器が計 12 ユニット設置さ

れており、コリメータ内の Jaw を挿入することによりビームコア外周部を削ることができる。現在定常運転時には水平方向  $54[\pi \text{ mm mrad}]$ 、垂直方向  $60[\pi \text{ mm mrad}]$  に Jaw を設定している。コリメータに関する詳細は文献[2][3][4]に報告がある。

各々のコリメータから発生する放射線強度はビームロスモニタである空気絶縁同軸ケーブルを利用した空気イオンチャンバー (AIC) [5] で測定する。350BT にはコリメータセクションを全てカバーできる全長  $43[\text{m}]$  の AIC がケーブルラック上に設置されている (図 1 参照)。ビームラインと AIC の距離は約  $2.8[\text{m}]$  である。AIC の出力特性は  $1\text{m}$  タイプのものを用いて、あらかじめ日本原子力研究開発機構高崎研の  $\text{Co60}$   $\gamma$  線照射施設で測定した。 $\gamma$  線に対して  $3.0[\mu \text{ A}/(\text{kGy}/\text{h})/\text{m}]$  で最大出力電流は  $10[\mu \text{ A}/\text{m}]$  であった。

AIC からの電流信号を約  $400[\text{m}]$  の同軸ケーブルで地上階の電源棟まで伝送し電流・電圧変換回路 (図 2) で電圧信号に変換し増幅している。入力静電容量は  $42[\text{nF}]$  である。入力信号が微弱であるため、変換抵抗は  $500[\text{k}\Omega]$  である。後段の電圧アンプゲインを考慮すると、電流・電圧変換係数は  $1\text{E}6[\text{V}/\text{A}]$  である。図中 C1、C3 の静電容量を 10 倍ずつ変更することにより高域カットオフ周波数を 10 倍毎下げることができる。本システムではそれぞれ  $5.6$ 、 $56[\text{nF}]$  に設定し、高域カットオフ周波数は  $200[\text{Hz}]$  である。

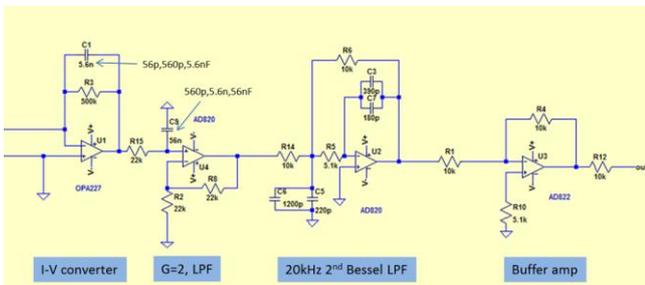


図 2：電流・電圧変換回路

信号処理回路からの信号はオシロスコープで観測し、波形データとして取得する。得られた生信号を図 3 に示す。RCS から計 4 回ビームが入射され、各々のタイミング (K1~K4) にパルス信号が出力されていることがわかる。波形には  $50[\text{Hz}]$  とその高調波成分を含む HAM ノイズと、入射セプタム電磁石電源に由来する長周期ノイズが重畳している。長周期ノイズに関しては常にノイズ波形が安定しているため、オフセットとして差し引くことが可能である。解析では HAM ノイズを除去するために各パルス信号波形を  $40[\text{ms}]$  間積分し、HAM 由来のノイズを除去している。チャージ積分した結果は EPICS レコードに変換され、アーカイブデータ化され、常時モニタリングに利用される。

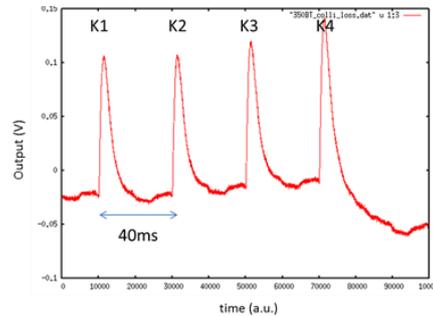


図 3：I-V 変換回路の出力波形。変換係数は  $\text{V}/\text{I}=1\text{E}6[\text{V}/\text{A}]$

### 3. システム校正

システムを校正するため、コリメータセクション上流に設置している軌道補正用ステアリング電磁石 2 台を用いてコリメータにビームを当て、AIC の出力を調べた。

コリメータは計 12 ユニットあるため、AIC 出力の場所依存性を調査した。調べたコリメータはユニット 1、6、9 である。調査するコリメータに対して Jaw を最小アパーチャ (公称値  $54[\pi \text{ mm mrad}]$ ) まで挿入し、それ以外のコリメータでは Jaw を全て引き抜いた状態で試験を行なった。ビームが目的のコリメータに当たったことは各 4 重極電磁石に設置したビームロスモニタの信号分布と、MR に設置されたダイレクトカレント・カレントトランスフォーマ (DCCT) で確認した。ビーム強度は RCS の DCCT 測定値を参照した。試験では 10 回測定を繰り返し、ショット毎のばらつきを抑えた測定を行った。測定の結果を表 1 に示す。各測定結果のばらつきは標準偏差で 6% 程度である。場所による出力の違いは  $\pm 4\%$  程度である。

表 1：AIC 出力のビームロス位置依存性

Unit#	loss [E11]	Q[nC]	error SD[%]	Q/Loss [nC/E11]
1	1.48	3.396	5.9	2.29
6	1.48	3.279	5.9	2.20
9	1.48	3.106	5.9	2.10

粒子数依存性はユニット 6 を使用した。図 4 に測定結果を示す。RCS からは一度に 2 バンチ毎入射されるが、信号処置回路の周波数特性のために区別して測定できない。よって横軸は 2 バンチを組にしたバッチ当たりの粒子数で表している。測定では 10 回測定の上、平均値をプロットした。誤差は測定値の標準誤差を示している。測定のばらつきは 6% 程度であった。

図からわかるように 1 バッチあたり  $8.4\text{E}11$  個のビームロスまで比例して増加している。この強度は 1 バッチあたりの定格強度  $8\text{E}13$  のおよそ 1% つまり  $720[\text{W}]$  ロスに相当する。コリメータ容量が  $2[\text{kW}]$  であることを考えるとこの 3 倍程度まで調査が必要であるが、信号処理回路出力の定格値  $10[\text{V}]$  を超えるため調査を行えていない。今後の課題で

ある。

コリメータセクションにおけるロス粒子数と AIC 出力電荷の変換係数は 2.18 [nC/E11]であった。上記のビームロス位置による変動とショット毎のふらつきを考慮すると、測定精度は±7%程度である。

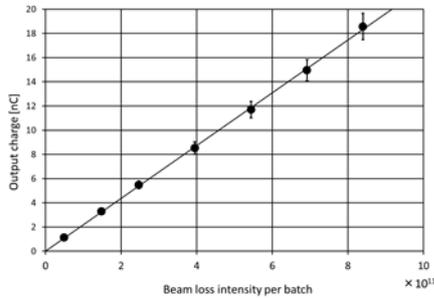


図 4：AIC 出力のロス粒子数依存性

#### 4. システムの測定精度

図 5 にオフセット測定結果を示す。HAM ノイズを除去するために各バッチの入射時+40[ms]間を積分し、積分電荷をプロットしている。各入射タイミングのデータに加えて、信号処理回路が設置されている部屋の温度変化も示している。データは 4 日間の連続データである。長周期の変動が確認できるが、温度データとの明らかな相関は確認できないため、温度ドリフトではなく 1/f ノイズ由来であろう。各オフセットは K1~K4 それぞれ、 $-1.045 \pm 0.008$ [nC]、 $-1.008 \pm 0.006$ [nC]、 $-0.969 \pm 0.006$ [nC]、 $-0.938 \pm 0.007$ [nC]である。誤差は標準偏差を採用している。得られた誤差から、測定限界は 3 章で報告した校正係数を使用しバッチあたり  $0.008$ [nC]/ $2.18$ [nC/E11]= $3.7E8$  であり、これは定格ビーム強度  $8E13$ [ppb]の約 0.0005%に相当する。システムのダイナミックレンジは  $8.4E11/3.7E8=2.3E3$  である。

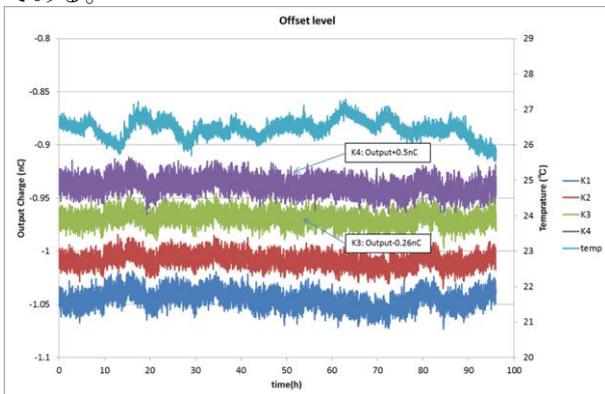


図 5：オフセットレベルの長期変動（4日間）

電荷測定精度に加えて、コリメータアパーチャーの設定精度も重要である。ビーム軌道が変動すると見た目のコリメータアパーチャーが変化したように見える。定常運転時におけるビーム軌道のズレは BPM3、および BPM4 で測定された値から、高々0.5[mm]程度であり、現在のコリメータ

設定（水辺方向： $54 \pi$  [mm・mrad]、垂直方向： $60 \pi$  [mm・mrad]）を考慮すると、コリメータアパーチャーのショット毎のふらつきは高々3%程度である。ただし、この誤差についてはショット毎のばらつきとして現れるため、2 章で算出した変換誤差±7%に含まれるものである。

東日本大震災の影響でコリメータの位置が数 mm 変動したことが報告されている[4]。この影響で本来  $54 \pi$  [mm・mrad]までアパーチャーを小さくできるはずが、全 24 箇所の Jaw (L、R、U、D) の内 3 箇所が  $54 \pi$  [mm・mrad]まで閉めることができないままである。この 3 箇所の Jaw が完全に働かないとして、測定結果は最大 13%程度過小評価になる可能性がある。ただしこの誤差については、今夏にコリメータを再アライメントするため、今年度下半期の運転からは解消される。

#### 5. ハロー測定結果

図 6 に FX 運転時のビームハローの測定結果を示す。コリメータアパーチャーは水辺方向： $54 \pi$  mm mrad]、垂直方向： $60 \pi$  mm mrad]に設定されていた。測定時点で定常的に 162[kW]運転を行っていたが、途中で 199[kW]、202[kW]運転を試みている。162[kW]運転時にはバッチあたり  $0.58E11$  個程度のハロー成分が観測されているが、199[kW]運転でその 1.4 倍へ、202[kW]運転で 1.6 倍へと急激に増加している。またショット毎の変動も激しいことがわかる。

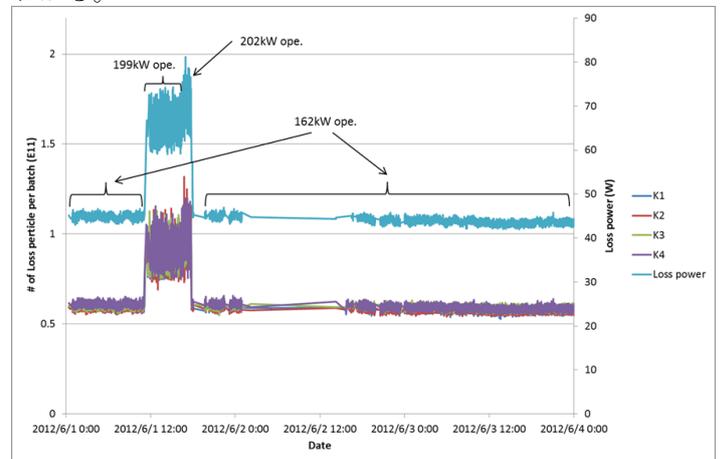


図 6：FX モード連続運転時のビームハロー測定例。入射バッチ毎のロス粒子数およびビームロス電力。図中の表示は MR 出力時 (30[GeV]) のもので、Loss power は入射ビーム (3[GeV]) 換算。

#### 6. まとめ

350BT コリメータシステムと AIC を用いてビームハロー成分を高精度に常時モニタするシステムを構築した。ハロー成分の測定範囲は 1 バッチあたり  $3.7E8$  個から  $8.4E11$  個であり、測定誤差は 7%程度である。現在は震災によりコリメータ設置位置にズレが発生し、最大 13%程度過小評価になっている。しかしこの誤差は今夏のメンテナンスで

解消される見通しである。現在本システムを用いて RCS の詳細なチューニングが行われている。

## 参考文献

- [1] M. Yoshimoto, et al., WAOAA03, Proceedings of the IPAC'12, New Orleans, USA, May 20-25, 2012.
- [2] M. J. Shirakata, et al., Proceedings of EPAC2006, Edinburgh, Scotland, Jun. 26-30, 2006 (1148-1150).
- [3] M. J. Shirakata, et al., Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011 (1662-1664).
- [4] M. J. H. Shirakata, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 9-11, 2012.
- [5] H. Nakagawa, et al., Nuc. Instr. and Meth. 174 (1980) 401.