

## UPGRADE SCHEME OF BLM SYSTEM OF J-PARC MR

Kenichirou Satou<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

New BLM system is now under development to meet severe requirements, the wide band width from DC to 100MHz, and wide dynamic range of  $10^8$ . The system will include 1m long Air Ionization Chambers (AICs), each will be operated together with a proportional chamber (P-BLM) which is mainly used for the present BLM system. Using the merits of P-BLM's high gas gain ability of  $2.0 \times 10^4$ , the AIC's output current linearity response up to 4.8kGy/h, and the new BLM like scintillation counter with fast signal rise time of ns range, the system is likely to meet the requirements. The prototype of the new signal amplifier unit is now being developed. In this paper, the overview of upgrade plan of the new BLM system is presented.

## J-PARC MR 加速器 BLM システムのアップグレード計画

### 1. はじめに

J-PARC MR ではビームコミッショニングの初期段階を終え、定格出力に向けアップグレードを行っている。ビームロスモニタ (BLM) システムでは低出力運転時のビームロスを精度良く測定するため、ガス封入型比例計数管 BLM(P-BLM)が導入されたが、放射線強度が高くなるにつれガス増幅作用による副作用である空間電荷効果によるゲイン低下が顕著になり、運用が難しくなっている。

我々はイオンモードで動作する空気イオンチャンバーAIC と P-BLM の 2 重運用により、ダイナミックレンジ 8 桁、帯域 DC~200kHz を達成する BLM システムを開発中である。開発に先立ち P-BLM および AIC の性能評価を行ってきた。さらに高速動作する BLM も導入し、100MHz まで帯域を延ばす予定である。すでにシンチレータに PMT(Photo Multiplier Tube)を組み合わせた S-BLM をテストし、良好な結果を得ている。本稿では新システムの概要を報告する。

2 章では BLM システムの現状を報告し、3 章では P-BLM と AIC の最大出力電流と放射線に対する感度係数を報告する。4 章では運転時に想定される線量率を報告する。5 章以降では新システムへの要求性能と開発中のアンプユニットについての概要を報告する。

### 2. BLM システムの現状

#### 2.1 モニタヘッドの設置状況

現在の BLM システムは P-BLM を主なモニタヘッドとして使用している。ガスは Ar+1%CO<sub>2</sub>、1.1atm である。MR 加速器の各 QM に一台ずつ 216 台、3-50BT の各 QM に一台ずつ 58 台、さらに入射部や出射部、コリメータ部など、ビームロスポイントになると思われる地点の測定のため予備機を用意しており、それらを含めると合計 316 台になる。P-

BLM の詳細は文献<sup>[1][2]</sup>を参照されたい。使用上の最大ガス増幅度はバイアス電圧 2kV 時  $2.0 \times 10^4$  倍である。

昨夏には約 80m の 20D 同軸ケーブルを用いた AIC を追加し、3-50BT、MR トンネル外周のケーブルラックに設置した。3-50BT は計 3 本、MR は計 19 本設置している。これにより全トンネル領域をくまなくカバーできるようになった。AIC はすでに KEK-PS において 30 年にわたる長期間使用実績があり<sup>[3]</sup>、数十年単位のメンテナンスフリーな安定的運用を見込んでいる。また、AIC は P-BLM の経年変化の監視のため、P-BLM との 2 重運用が望ましく、1m タイプの AIC の導入も計画している。

#### 2.2 空間電荷効果

コミッショニング初期の段階では、微弱なビーム電流による低レベルビームロス信号のため、信号増幅作用のある P-BLM が有効であることが報告されている<sup>[2]</sup>。他方、増幅作用の有用性ととともに、検出器内に蓄積する正電荷電離イオンにより、アノード近傍の電場が弱められ、ガス増幅率が変動する空間電荷効果が深刻な問題になっている<sup>[4]</sup>。空間電荷効果は、正電荷電離イオンのアノード・カソード間のドリフト時間が 2ms 程度であるため、信号の立ち上がり時間が  $0.1 \mu\text{s}$  と高速であるにもかかわらず、そのゲイン変動は出力信号の履歴 (リング 380 ターン分) に依存する。このため、高出力時の信号強度の評価が困難である。さらに現状では波形観測のため高速デジタイザが導入されておらず、波形観測は最速で 10ms 毎である(電荷積分波形観測用)。このためゲイン変動のチェックすら困難である。3-50BT の P-BLM では、実験的に求めた空間電荷効果補正式を用いている<sup>[4]</sup>。

#### 2.3 P-BLM のガス増幅度 (震災後)

東日本大震災による影響調査の一環として全ての P-BLM のガス増幅度を調査した。震災による影響としては、封入ガスの漏れ、空気の混入、ワイヤー

の破断が想定された。

調査では、信号源として Co60  $\gamma$  線源(0.15GBq)を使用した。負極性バイアス電圧を 1kV から 2kV まで 200V 刻みで計 6 点設定した。電圧は外導体に印加し、アノードからの出力電流をエレクトロメータ (Keithley 社製 HJPM-3R5) で測定した。また、ゲインを求めるため、イオンモード電流( $I_0$ )を求めた。ゲインは各バイアス電圧における出力電流を  $I_0$  で割ることにより求めた。イオンモードでは出力電流が小さく、エレクトロメータの電流測定モードでは正しく測定できないため電荷モードで測定した。エレクトロメータ内のコンデンサに 300s 間電荷をため、測定された積分電荷と測定時間から出力電流を評価した。P-BLM#199 で得られた  $I_0=73\pm 11\text{fA}$ (以降特記しない場合、誤差表示は標準偏差を意味する)を代表値とした。ただしコリメータ部に設置していた P-BLM#6~14 に関しては、モニタ自体の放射化が激しく、Co60 線源による誘起電流と比べ最大 16 倍の出力電流が得られたため、 $I_0$  を個々に測定している。図 1 に P-BLM#199 の測定データを示す。

得られたゲインデータから、Diethorn のガス増幅式<sup>[5]</sup>を用い、最小 2 乗法によりフリーパラメータ  $\Delta V$ 、 $\kappa$ (図 1 内の式を参照)を抜き出した。得られたパラメータは、 $\Delta V=27.1\pm 0.9\text{V}$ 、 $\kappa=3.6\times 10^4\pm 1.4\times 10^3\text{V/cm/atm}$  であった。すべてのデータは、 $\Delta V$  は $\pm 9\%$ の範囲内で、 $\kappa$  は $\pm 12\%$ の範囲内で一致しており、震災による明らかな影響は認められなかった。ゲインはバイアス 1.2kV 時  $30\pm 4$ 、1.6kV 時  $626\pm 93$ 、2.0kV 時  $2.0\times 10^4\pm 4\times 10^3$  であり、おおよそバイアスが 100V 上がる毎に 3 倍のゲインである。

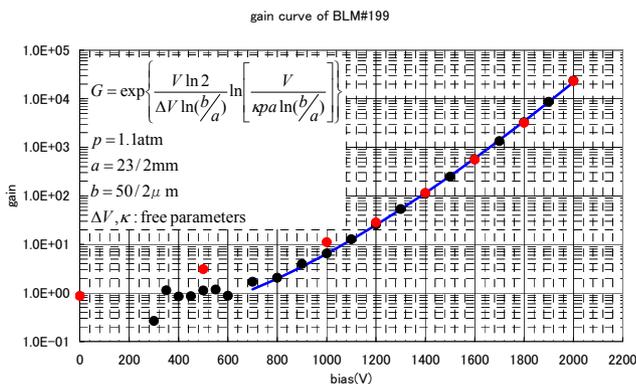


図 1 : P-BLM#199 のゲインカーブ。赤点は電流測定によるもの、黒丸は電荷積分によるもの。青線は電流測定によるバイアス電圧 1kV から 2kV までの 6 点を使用し、Diethorn の評価式 (図中の式) で最適化した計算値。 $p$  はガス圧、 $a$  はアノードの半径、 $b$  は外導体の半径、 $\Delta V$  および  $\kappa$  はフリーパラメータである。

### 3. 最大出力電流の評価と放射線感度係数

#### 3.1 P-BLM の空間電荷効果と最大出力電流

空間電荷効果によるゲイン変動が P-BLM の出力電流を制限する。ゲイン変動は出力電流の履歴に依

存するため一般的な評価が難しいが、DC 出力に関するものは Hendricks による式<sup>[6]</sup>を基にした評価式<sup>[7]</sup>がある。ゲインを  $G$ 、ゲイン変化を  $\Delta G$  とすると、

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\ln 2}{8\pi^2 \epsilon_0} \frac{b^2 p}{\Delta V \mu L} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{V}{\kappa p a \ln(b/a)} \right] \right\} \frac{I}{V}$$

である。ここで、 $I$  は出力電流、 $L$  は検出器長 0.8m、 $\mu$  は Ar イオンの Ar ガス内移動度である。ここでは  $\text{Ar}^+$  の値  $1.54\text{cm}^2\text{atm/V/s}$ <sup>[8]</sup>を採用する。

図 2 はバイアス電圧毎のゲイン変動を、出力電流の関数で表したものである。出力電流  $1\mu\text{A}$  以下で使用すればゲイン変動は 5%以下に抑えられることがわかる。実際には出力信号の duty は DC 出力のように 100%とはならないため、ゲイン変動は最大 5%であるといえる。

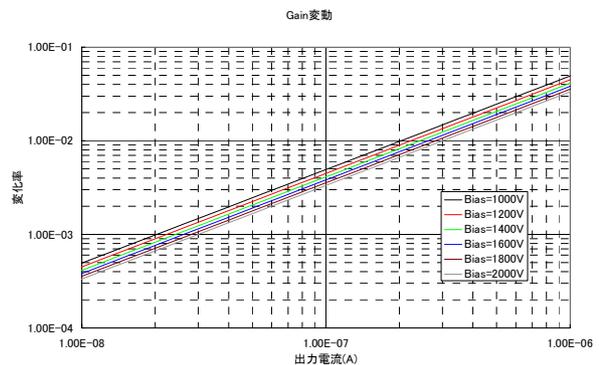


図 2 : 出力電流対ゲイン変動

#### 3.2 P-BLM による残留線量測定と感度係数

P-BLM の高い増幅作用を利用して、残留線量測定が期待されている。ビーム停止直後から放射性原子核の崩壊をトレースする。ビームロスによって電磁石に生成される放射性物質の組成が一定ならば、短寿命核の崩壊をトレースすることにより長寿命核の総量を推測でき、将来の放射化レベルの予測に役立つ。

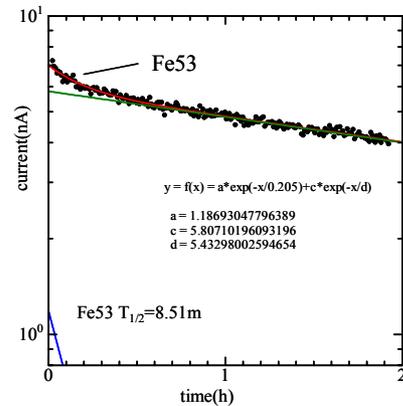


図 3 : 加速器停止後からの残留線量測定。横軸はビーム停止後からの経過時間である。赤と緑のラインとの差分が Fe53 からの寄与と考えられる

図 3 にビーム停止直後から測定した残留線量を示

す。ビームロスにより作られる Fe53 の半減期は 8.51min である。残留線量測定時の P-BLM はバイアス電圧 2kV、ゲイン  $2.0 \times 10^4$  で使用した。線量率 85  $\mu$ Gy/h で出力電流 0.53nA であり、感度は 1.1  $\mu$ C/Gy/gain である。ただし、完全な均一場で測定したわけではないので数倍程度の誤差はあると考えられる。

### 3.3 AIC 出力電流の制限

1m タイプ AIC の導入に先立ち、AIC の最大使用電流を実験で評価した。実験では日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所コバルト 60 照射施設の Co60  $\gamma$  線源を利用した。あらかじめ線源からの距離と照射線量の関係を測定し、校正データとした。照射線量測定には校正済みイオンチャンバーを使用した。試験では AIC と線源からの距離を変えることにより照射線量を調整した。

バイアス電圧は外導体に 0V から 2kV まで徐々に印加し、アノード電流が十分に飽和したのち電流を測定する。電流はシャント抵抗の両端電圧を横河電機社製オシロスコープ DL1640 で測定した。図 4 は測定データである。比較のため、ガス封入型のイオンチャンバーのデータも示している。イオンチャンバーは全長 0.8m、アノード径 8mm、外導体径 23mm で、封入ガスは Ar+1%CO<sub>2</sub> 1.1atm および純 He 1.1atm である。イオンチャンバーも同様に、外導体に対してバイアス電圧を印加する。

AIC では 4.8kGy/h 近傍で飽和が見られ、飽和電流は 14.5  $\mu$ A であった。感度は 11  $\mu$ C/Gy である。白抜きと塗りつぶしのデータポイントはそれぞれプラス極性およびマイナス極性のバイアス電圧を印加したものであり、両データは測定誤差の範囲内で一致した。他方で、イオンチャンバーには出力電流の飽和は見られず、AIC と比較するとより高放射線場での利用に有利であるといえる。ただし、本実験ではイオンチャンバーの飽和電流を測定していないため、定量的な評価は出来ていない。

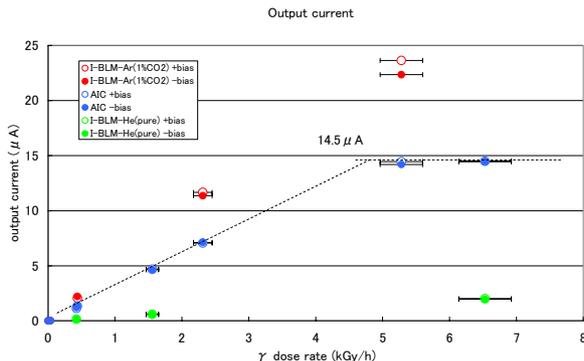


図 4 : イオンチャンバーおよび AIC の照射線量と出力電流の関係

## 4. 加速器運転時の最大線量

P-BLM と AIC は出力電流に制限があるため、加速器運転時の最大線量率を見積もることが本質的に重要である。現在の MR 加速器においてもっとも

ビームロスによる線量強度が強いのは入射部コリメータである。コリメータ部の最大ビームロス容量はコリメータ 1 台当たり 1kW である。したがって瞬間的に 1kW ロスする場合が測定すべき最大線量率である。

最上流のコリメータに設置した 1m タイプ AIC の信号とビームロスパワーの関係を調査した。AIC はコリメータ中心に対して、中心が距離 2.01m、角度 60.2 度の位置にコリメータに対して平行に設置した。RCS からのビーム 1 バッチを入射後直ちにコリメータに衝突させた。1 バッチビームはおよそ 0.5  $\mu$ s 間隔の 2 バンチビームで構成されるが、AIC のレスポンスは 2ms(bias=500V 時、パルスピークの 10%から 90%到達時間)でバンチ間隔に比べて十分遅く、バンチ構造は区別できない。レスポンスはバイアス電圧に比例して短くなる<sup>[3]</sup>。

図 5 に得られた結果を示す。6  $\times 10^{12}$ ppb(particle per batch)、4 バッチ入射時(24  $\times 10^{12}$  粒子ロス)3.6kW ロスに相当するレベルまで良い直線性を示しており、信号の飽和は認められない。このことから、AIC は加速器運転時の最大線量率の測定が可能である。AIC 出力電荷、積算照射線量、ビームロス強度との比例関係は、5.4nC : 0.49mGy : 1  $\times 10^{12}$  であった。

このような高レベル線量率は AIC で測定する。1 バッチで 1kW 相当がロスする場合、積算線量と AIC のレスポンス 2ms を考慮すると、出力信号は 5kGy/h 相当になる。Co60  $\gamma$  線源で測定された最大線量率は 4.8kGy/h であった。1 バッチで 1kW ロスする場合には 4%程度低く見積もる可能性がある。実際には 4 バッチで 1kW のロスであるため、実用上は問題にならない。また、4%程度であるならば AIC の設置位置の最適化で低減できる。

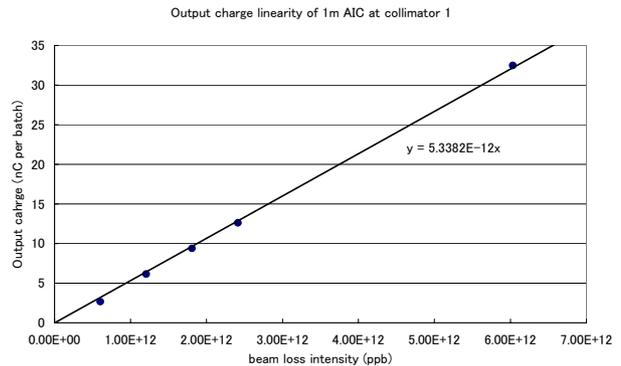


図 5 : コリメータ部に設置の AIC 出力

## 5. 新 BLM システムの必要性能

### 5.1 動作速度

新 BLM システムの動作速度は、観測するビーム挙動と MPS システムからの要請で規定される。要請動作スピードは次の通りである。

- 1)縦方向の運動//シンクロトロン振動 : 360Hz (アップグレードにより 784Hzへ)
- 2)横方向の運動//ターンバイターン測定 : 200kHz

- 3)e-p インスタビリティ//シンクロトロン振動周波数の 100 倍 : 36kHz (将来は 78kHz)
- 4)入射ロス//バッチ入射周期 : 25Hz
- 5)速い取り出しロス//バンチバイバンチ : 2MHz
- 6)遅い取り出しロス//電源リップル周波数(メインは 600Hz) : 1kHz
- 7)キッカー電磁石によるロス//バンチ内振動 : 100MHz
- 8)残留線量測定//短寿命核の崩壊( $T_{1/2}$  数分程度) : DC~1Hz
- 9)MPS(Machine Protection System)//10  $\mu$ s 以内 : 100kHz

モニタ自体の動作スピードは AIC、P-BLM とも印加電圧に依存するが、典型的にはそれぞれ 2kHz、10MHz である。ただし、モニタヘッドからアンプまで数百 m のケーブルで信号伝送するため、アンプを含めた帯域としては高々 200kHz と見積もっている。このことから、1)、4)、6)は AIC と P-BLM で、2)、3)、9)は P-BLM を使用する。また、8)に対しては信号強度が低いいため増幅作用のある P-BLM を使用する。

5)、7)に関しては既存のモニタでは対応できないため、新たに高速動作のモニタを導入する予定である。S-BLM はすでに J-PARC のリニアックおよび RCS で使用実績がある。PIN ダイオードや耐放射線性の高いダイヤモンド検出器もその候補である。

図 6 に入射コリメータ部に試験的に導入した S-BLM による測定結果を示す。横軸は RF に同期した時間(原点は任意)、縦軸は周回数(原点は任意)、垂直軸はビームロス信号強度である。図中の矢印は K4 入射タイミングであり、RCS から 4 番目のバッチが入射される。各バンチ内で複雑な挙動を示しており、入射キッカー波形の不均一性を反映していると考えている。

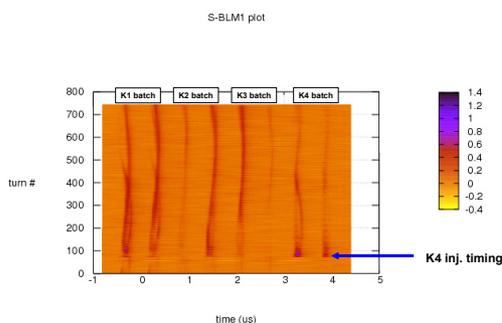


図 6 : S-BLM による入射ロスの観測例

## 5.2 ダイナミックレンジ

新システムのダイナミックレンジは、最大が AIC によるコリメータ部のロスであり、最小が残留線量測定である。BLM からの出力電流は線量率に比例する。

トンネルと外界境界の線量率と機器のメンテナンスを考えると、ビームロスの許容値は 0.5W/m とされている。このとき、一定期間の冷却後、機器の放射化レベルは一步下がった地点で 0.5mGy/h 程度であり、経験則からその 1000 倍 0.5Gy/h が運転時の線量率である。実際にはその 1/10 レベル、0.05Gy/h 以下まで測定できなければならない。測定帯域は 200kHz である。

一方、コリメータ部については 1 箇所あたり 1kW が許容値である。1 バッチで 1kW 相当のビームがコリメータに衝突する場合がもっとも厳しい要請である。このとき、バイアス 500V 時の AIC 出力信号は 5kGy/h 相当となる。測定帯域は 10kHz である。

さらに残留線量測定では、想定される線量率が 0.5mGy/h であるので、測定の下限值は 0.05mGy/h 以下であることが望ましい。測定帯域は 1Hz である。

以上より、必要なダイナミックレンジは  $10^8$  レベルである。我々は AIC と P-BLM(最大増幅度  $2.0 \times 10^4$ )の 2 重運用によりこの要求を達成することを考えている。

## 6. AIC、P-BLM 用アンプの開発

新 BLM システムへの要件を達成するために、AIC および P-BLM 用のアンプを開発している。コモンモードノイズを除去するために絶縁アンプを内蔵する。図 7 にアンプユニットの信号ブロック図を示す。

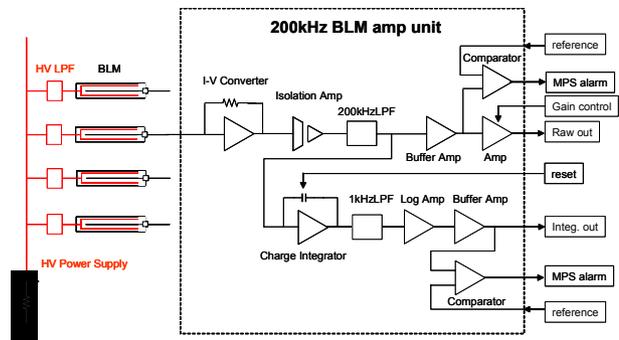


図 7 : P-BLM 用アンプユニットの信号ブロック図。赤のラインは高圧システムを示している。AIC 用のアンプも同様であるが、生信号帯域は 10kHz に制限される。

アンプの設計仕様を以下に挙げる。

- 1)入力容量//20~30nF
- 2)最大入力電流//P-BLA 用 1  $\mu$ A、AIC 用 15  $\mu$ A
- 3)電流・電圧変換係数//P-BLM 用 1  $\mu$ A/10V、AIC 用 15  $\mu$ A/10V(絶縁アンプ出力に対して)
- 4)波形出力//リニア波形 : 両極性 1ch、チャージ積分波形 (Log) : 片極性 1ch
- 5)MPS アラーム出力//リニア波形用 : 1ch、チャージ積分波形用 : 1ch
- 6)アナログ帯域//P-BLM 用 : DC~200kHz、AIC 用 : DC~10kHz
- 7)入力換算ノイズ密度//5  $\mu$ V/Hz<sup>1/2</sup>

- 8) 生信号出力 DC オフセットドリフト//0.1mV 以下 (室温 25°C~30°C)

上記仕様を達成した場合のノイズレベルは 200kHz 帯域で 2.2mVrms、10kHz 帯域で 0.5mVrms、1kHz 帯域で 0.16mVrms となり、ノイズ全幅を rms 値の 3 倍とすると、ダイナミックレンジはそれぞれ 3000、40000、125000 である。チャージ積分信号の出力は、既存の ADC が 11bit であるため、リニア出力のままではダイナミックレンジは ADC で制限され 2000 である。ダイナミックレンジを広げるため Log アンプを使用する。Log アンプ出力は 5 桁のダイナミックレンジを見込んである。測定線量率レベルと帯域の関係を図 8 に示す。

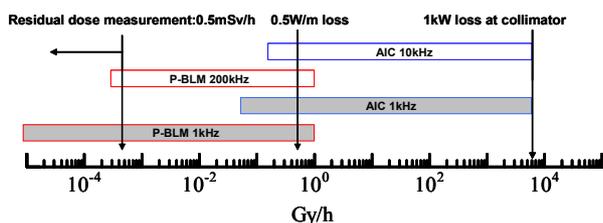


図 8 : P-BLM のバイアス電圧 1.8kV、ゲイン 3000 倍に設定した場合の想定ダイナミックレンジ。1kHz 帯域はチャージ積分信号によるもの。

## 7. ADC

現状では波形信号を観測する ADC が導入されていない。ビームロスの時間構造を詳細に分析することはビームロスのメカニズムの解明、ひいてはビーム強度の増強のために重要である。新システムでは VME ベースのデジタイザ CAEN 社製 VX1740B を導入する。アナログデジタル変換精度が 12bit であるため、波形データのゲインを信号強度に合わせて適時変更しなければならない。

## 8. 整備スケジュール

新システムの整備は今年度と来年度にまたがって行う。今年度はアンプユニットの開発が中心であり、今年度 12 月のビーム再開に合わせて直線部の一部モニタに導入する予定である。絶縁アンプの開発はほぼ完了しており、要求精度を満たしている。新アンプには各対シールドのツイストペアケーブルを使用するため、今夏に敷設する。

デジタイザのインストール、1m タイプ AIC のインストールも直線部を優先的に進め、来年度に完了する予定である。

高速 BLM については S-BLM の性能試験は済んでおり、満足のいく結果が得られた。しかしながら高放射線下の使用では、耐放射線性の評価が必要不可欠である。本年度はモニタヘッドの選定を進め、同時にプリアンプの開発も行う。本格的なインストールは来年度以降である。

## 9. まとめ

現在の P-BLM を中心とした BLM システムでは

空間電荷効果によるゲイン変動問題が深刻である。東日本大震災の影響を調査するため、全 P-BLM のガス増幅度調査を行った。このような大規模な調査は過去行われていない。ガス増幅パラメータを同定し、最大出力電流は  $1\mu\text{A}$  であることがわかった。一方で現在のアンプシステムではこのような低電流を測定する設計にはなっておらず、新たなアンプの開発が必要である。

新システムでは AIC との 2 重運用を行う。2 重運用によりダイナミックレンジの改良と同時に P-BLM の経年変化を監視できるという利点もある。

運転時における線量率の評価を行い、要求精度をまとめた。帯域は最大 100MHz であり、ダイナミックレンジ  $10^8$  レベルである。200kHz 以上では S-BLM などの新たなロスモニタの導入を検討している。P-BLM および AIC 用として、要求精度を達成するためのアンプユニットの開発が進行中であり、今年度 12 月のビーム再開時には一部インストール予定である。

## 謝辞

日本原子力研究開発機構の山本風海氏には高崎量子応用研究所コバルト 60 照射施設の AIC 校正試験で多大なご尽力を頂きました。御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] S. Lee *et al.*, Proc. of EPAC2004 (2004) P. 2667.
- [2] T. Toyama *et al.*, Proc. of HB2008 (2008) P. 450.
- [3] H. Nakagawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. 174 (1980) P. 401.
- [4] K. Satou *et al.*, Proc. of IPAC10 (2010) P. ????
- [5] W. Diethorn, U. S. AEC Rep. NYO-6628 (1956).
- [6] R. W. Hendricks, Rev. Sci. Instrum. 40 (1969) 1216.
- [7] H. Sipila and V. Vanha-Honko, Nucl. Instr. And Meth. 153 (1978) 461.
- [8] J. M. Madson and H. Oskam, Phys. Lett. 25A (1967) 407.