

J-PARC RCS リングコリメータ故障によるビーム損失局所化への影響

AN INFLUENCE OF RING-COLLIMATOR MALFUNCTION ON BEAM LOSS LOCALIZATION IN THE J-PARC RCS

吉本政弘、竹田修、原田寛之、山本風海、金正倫計

Yoshimoto Masahiro, Osamu Takeda, Hiroyuki Harada, Kazami Yamamoto, Michikazu Kinsho
Japan Atomic Energy Agency (JAEA) / J-PARC

Abstract

In order to localize the beam loss in the ring, the J-PARC RCS has the ring collimator systems which consist of one primary collimator (scatter) and five secondary collimators (absorbers). However vacuum leaks occurred at the collimator absorber-5 in April, 2016. Therefore the collimator absorber-5 has been removed and the dummy ducts have been replaced. Detailed distributions of the residual radiations on the vacuum chambers along the ring were measured by the Geiger-Müller counter to investigate an influence on the beam loss localization. In addition, the signals obtained by the new beam loss monitors are related with the residual doses.

1. はじめに

J-PARC 3GeV RCS では世界最高レベルの 1MW 大強度ビームを実現するために、ビーム損失を局所化して他機器の放射化を抑制するリングコリメータシステムを設置している^[1]。RCS のリングコリメータシステムは散乱体 1 台と吸収体 5 台で構成されており、これまでのビーム調整の成果と合わせて、コリメータ部以外に大きな放射化を機器に生じさせることなく 500kW ビーム出力までの利用運転の実績を持つことが出来た^[2]。しかし、2016 年 4 月にリングコリメータの吸収体 5 において駆動部破損に伴う真空リークが発生し、取り外した後に代替真空単管ダクト群（代替ダクト）に置き換えての加速器運転を余儀なくされた。これは RCS におけるビーム損失の局所化に大きく影響する。そこでこの状況下での運転再開を判断するために、まず粒子トラッキング計算を実施し、コリメータ下流部で新たなビーム損失が発生しても現在の利用運転時におけるビーム強度では許容可能であることを確認した。次に加速器の立ち上げ調整時において、リング全周にわたるビーム損失モニタ (Beam Loss Monitor: BLM) の測定結果からビーム損失の増加量は許容範囲内であることを確認し、ビーム利用運転を再開した^[3]。今回のコリメータ故障事象を受けて、RCS 全周にわたる残留線量の詳細分布測定を実施することにした。また可能な限り短期メンテナンスに伴うビーム停止毎に継続的に測定することで加速器運転状況に伴う残留線量分布の推移も調査した。この結果から、より詳細なビーム損失の構造を把握することが出来た。

本論文では、リングコリメータ吸収体 5 を取り外したことによるビーム損失局所化への影響を報告する。また詳細な残留線量分布測定の結果からリングコリメータの調整方法に対する課題についても議論する。

2. コリメータ故障の概要と運転再開までの流れ

今回の RCS で発生したコリメータ重故障に関する詳細は別途報告を行っている^[3]。ここでは概要と再開までの流れについて簡単にまとめる。

2016 年 4 月 5 日の J-PARC 加速器における短期メンテナンス・ビーム停止日に合わせて実施したコリメータ制御系の動作試験中に、コリメータ・吸収体 5 から真空リークが発生した。詳細原因については調査中ではあるが、これまでの調査結果からは、制御系不具合によりコリメータ駆動軸系が誤動作をおこし、ベローズもしくはフランジ接合部が破損した可能性を強く示唆している。今回故障した吸収体 5 について予備機が存在しないため、早急な運転再開を実現するためには、吸収体 5 を取り外して代替ダクトでつなぎ合わせることにした。この対策方法にはビームロス局所化への影響が懸念される。そこでリングコリメータの散乱体で散乱された粒子について SAD コードを用いた粒子トラッキング計算で追跡し、吸収体 1～4 からの漏れ出た後に損失する量について評価した。結果をまとめると以下のようになる。

- ① 吸収体 5 を取り除いた場合、散乱粒子の漏れによるロスポイントはアーク部入口付近に 1 か所増える。
- ② 吸収体 4 を微調すると、吸収体 5 からの漏れ分は回収できる。
- ③ ただし、これは吸収体 1～4 の位置調整ができていない場合であり、挿入しすぎると散乱体として働くことになり、散乱粒子が漏れ出ることによってロスポイントは増大する。

いずれの場合もビーム損失量として大幅に増加することはないと判断されたため、運転再開に踏み切ることにした。但し、今回のコリメータ重故障のきっかけが制御系の不具合に起因することを考慮し、これ以上のトラブル拡大を引き起こさないために、制

gakkai@kasokuki.com

御系改修を実施するまではコリメータの駆動調整は行わないと決心した。このことは想定以上にコリメータからの漏れ量を増やしロスポイントを拡大させる可能性が否定できない。以上のことから運転中のビームロスモニタによるロス分布の確認だけでなく、短期メンテナンス・ビーム停止日毎にRCSのリング全周にわたる詳細な残留線量の測定を行い、運転継続の判断を適宜行うこととした。

3. 残留線量の詳細測定

3.1 測定条件

表 1 は実施した残留線量測定の条件をまとめたものである。コリメータ・吸収体 5 を取り除いたことによる影響を調べるために、運転再開直前の残留線量分布を測定した。吸収体 5 の撤去作業及び復旧に伴い RCS のビーム運転が 1 週間程度停止していたため、残留線量の絶対値としては大きく減衰していることには注意が必要である。運転再開後の残留線量測定はビーム停止後 4~6 時間後で測定を開始できるように調整した。線量測定はガイガーミュラー比例計数管 (GM 管 : TGS-R74 ALOKA 製) を用いて行った。測定箇所は主要電磁石の真空ダクト表面でかつ上流及び下流フランジの接合部付近とした。真空ダクトの上下平面・内外周平面の放射化の違いを評価するために、GM 管を真空ダクト表面に直接接触させてフランジ毎に上下面と内外周面の 4 点ずつ

測定した。そのため、1 度の測定にかなりの時間が必要となり、それに合わせて作業員の被ばく線量もかなり高いものとなった。表 1 の最下行は測定者及び記録者の被ばく線量結果を示している。作業員の被ばくリスクの低減し且つ残留線量分布を把握することが今後の大きな課題となっている。

Table 1: Operational Conditions of the J-PARC RCS for the Residual Dose Measurements

	2016/4/11	2016/4/14	2016/4/20	2016/4/27
運転期間	再開直前	半日運転	1 週間運転	2 週間運転
運転条件	MLF 利用 (205kW)	MLF 利用 (205kW)	MLF 利用 (205kW)	MLF 利用 (207kW)
		NU 利用 (360kW)	NU 利用 (385kW)	NU 利用 (386kW)
ビーム停止時刻	4/4 7:00	4/14 7:45	4/20 9:00	4/27 9:00
測定時刻	13:15 ~ 20:31	14:18 ~ 17:13	13:38 ~ 16:13	15:35 ~ 18:27
ビーム停止後時間	174.3h ~ 181.5h	6.5h ~ 9.5h	4.5h ~ 8h	6.5h ~ 10h
測定時被ばく量		0.05mSv/h 0.01mSv/h	0.09mSv/h 0.02mSv/h	0.13mSv/h 0.03mSv/h

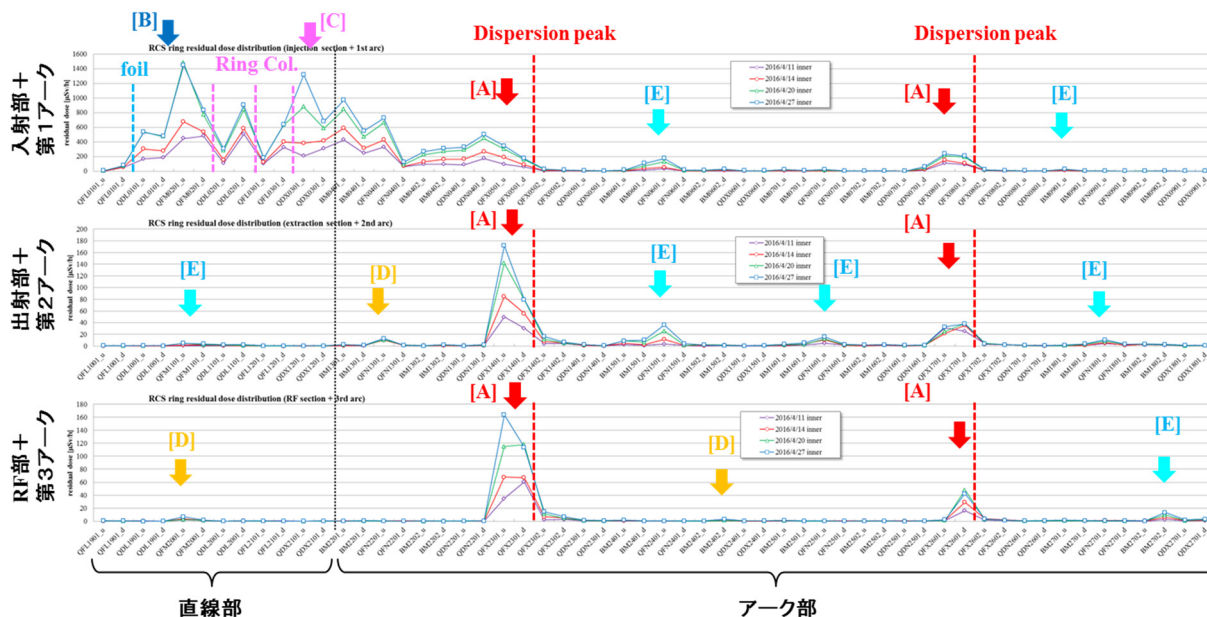


Figure 1: Residual dose distribution along the ring in the J-PARC 3GeV RCS.

3.2 リング全周の残留線量

Figure 1 は表 1 に沿って測定した残留線量分布とその推移をまとめたもので、RCS の三回対称性に合わせて 3 段に分けてプロットした。縦軸は測定した真空ダクト表面の内、より特徴的な結果を示した内周

側の残留線量をプロットしている。また横軸はビーム進行方向の距離 $s[m]$ ではなく、マグネット名称としており、注意が必要である。残留線量の詳細分布から特徴的なロスポイントには次の 5 種類に区分することが出来る。

[A] ディスパーションピーク位置付近でのロスポイント:

このポイントでのビームロス、これまでの加速器運転でも観測・注視している箇所である。外周側に比べて内周側に大きく出ているのが特徴で、主にコリメータ・散乱体で散乱されエネルギーロスした粒子が、吸収体からは漏れ出たが運動量の違いからディスパーションピークに到達する直前でダクトアパーチャによって削られたために生じたものである。特に第1アーク部は吸収体5を取り外したことによる影響が強く出ており、アーク部に入った直後から継続的にビームロスが発生しており、ディスパーションピーク直前では大凡0.5[mSv/h]まで増加している。

[B] 荷電変換フォイル周辺及び下流でのロスポイント:

荷電変換フォイル周辺にはこれまで高い残留線量があり、詳細測定はコリメータ重故障前から継続して測定している。この残留線量の原因は、荷電変換フォイルにエネルギー400MeVの負水素イオンビーム及び陽子ビームを照射する際に核反応で生じる二次粒子によるものである^[4]。そのため、この残留線量については吸収体5の取り外し前後で大きな違いが生じていないことは確認できた。

荷電変換フォイルの下流部には、荷電変換フォイルによる大角度散乱粒子がリングコリメータに到達する前にビームロスすることで高い残留線量が発生している。この課題に対してリングコリメータ手前にH0コリメータを設置し、大角度散乱粒子によるビームロスを局所化させるようにしている^[5]。しかし、今回リングコリメータ直前の四極電磁石QFM0201の入口で1.4[mSv/h]もの高い残留線量が観測された。H0コリメータも故障したリングコリメータと同じ制御システムを使用しているため、ビーム運転再開後は制御系の改修が完了するまでは駆動・調整はさせないこととした。そのために調整不十分で大きな残留線量が残ったと考えられる。

[C] リングコリメータ下流部でのロスポイント:

吸収体5を取り除いたことによりリングコリメータから下流部に大きな残留分布が見られる。特に直後の四極電磁石入口(QDX0301上流フランジ部)の残留線量は1.3[mSv/h]まで上昇し残留分布の形状が変化している。これは吸収体5を遮蔽体ともに取り外したために、漏れ出た散乱粒子に加えてリングコリメータ内部で発生した2次粒子(陽子及び中性子)による影響が大きいと考えられる。その後、アーク部に入ると2次粒子の影響は徐々に減少し、四極電磁石QFN0401で一旦ビームロスはほとんどなくなるが、その後ディスパーションピークに向けてまた残留線量が徐々に増加する。この原因は[A]と同様のエネルギーロスをした散乱粒子によるビームロスによるものである。なお、吸収体5を取り外した後の代替真空単管ダ

クトに関する放射化と残留線量については別途次節で議論する。

[D] わずかに放射化しているが、運転再開後は増加していないポイント:

このポイントでは現在のビーム運転において有意なビームロスは発生していない。以前に発生したビームロスによる放射化の名残で、残留している長寿命核種の影響を見ているものと考えられる。

[E] わずかに放射化しており、運転再開後に増加しているポイント:

このポイントは元々残留線量が無かったもしくは非常に小さかったところに、今回の吸収体5を取り外してビーム運転を再開したことで残留線量が増加した箇所である。つまりコリメータからの漏れ出た粒子によるビーム損失点を示唆している。コリメータ制御系改修後にコリメータ吸収体の位置微調整を行うことで、この点でのビーム損失は抑制できると考えている。

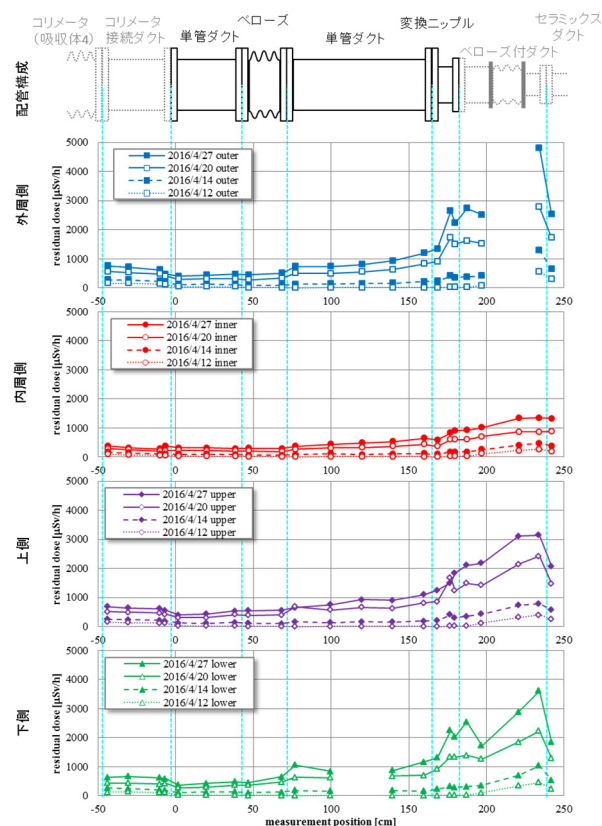


Figure 2: Schematic view of the dummy ducts for the Ring collimator absorber-5, and residual dose distributions along the dummy ducts.

3.3 代替ダクトの残留線量

取り除いた吸収体5の跡にぴったり当てはまる代替ダクトは用意していないため、手持ちの形状の異なる真空ダクト群を組み合わせで代替ダクトとして

真空接続を行った。Figure 2 に組み合わせた真空ダクト群の模式図を示す。またこの代替ダクトの上下面及び内外周面に沿って測定した残留線量分布も併せてプロットしている。途中変換ニップル及びベローズ付ダクトの 2 か所で、真空パイプ径が小さくなっている。測定した 4 つの残留線量分布すべてに対してアパーチャの小さくなる 2 地点で残留線量のピークが見られる。また測定結果は残留線量分布に偏りがあることが分かる。特に外周側の線量は内周側に比べておよそ 3 倍程度大きい。この線量分布の偏りはこれまであまり認識しておらず、今回から実施した残留線量の詳細分布測定によって明らかとなった。

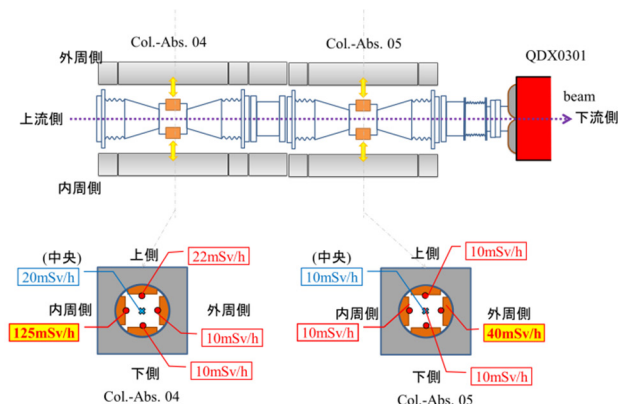


Figure 3: Schematic view of the Ring collimator absorber-4&5, and measurement residual dose on the absorber blocks.

4. コリメータ調整方法に対する課題

4.1 コリメータ本体の残留線量

今回の吸収体 5 を取り除いたことにより、ビーム運転後のコリメータ内部の放射化の状況を初めて確認することが出来た。フランジ開放部から吸収体 4 及び 5 のコリメータブロックの表面線量について遠隔での測定が可能なテレテクタを用いて測定した結果をまとめたものが Fig. 3 である。測定はビーム停止後 4.5 日後に実施しており、吸収体 4 では内周側に 125mSv/h と最も高く、吸収体 5 では外周側に 40mSv/h と最も高い残留線量が計測された。このような偏りの原因はコリメータ調整手法によるものと考えられる。コリメータの調整は、各吸収体の遮蔽体外に設置している BLM を見ながら散乱粒子の吸収量を、RCS 全周にわたる BLM を見ながら散乱粒子の漏れ量を評価して、最適位置を探索している。しかし、RCS 全周の BLM は主にステアリングマグネットの架台の下に設置してあり^[4]、各吸収体の BLM は全て通路側に支持治具に取り付けて設置している^[5]。つまり BLM は各エリアに 1 台しかないので、上下側や内外周側のビーム損失の差異を正確に知ることが出来ない。結果として、水平方向及び垂直方向の位相空間上でのビームのコリメーションがアン

バランスになり、残留線量の偏りとなって現れる。このことは Fig. 2 で見られる残留線量分布の偏りの原因にもなっている。

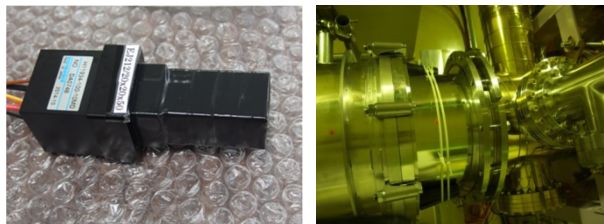


Figure 4: Excitation curve of the integrated magnetic field as a function of the coil current.

Table 2: Specifications of the Plastic Scintillator

タイプ	プラスチックシンチレータ
材質	EJ212
サイズ	20×20×50
仕様	反射材・遮光処理

Table 3: Specifications of the PMT

メーカー	浜松ホトニクス
型式	H11934-100-10MD
内臓 PMT	R11265U-100
光電面種類	スーパーバイアルカリ
窓材質	硼硅酸ガラス
ダイノード	メタルチャンネル 12 段
上昇時間(Tr)	1.3ns
走行時間(T.T.)	5.8ns

4.2 ビーム損失の偏りを計測するための BLM 開発

一般に BLM 単体ではビームの損失点を特定することは困難である。大強度加速器における重要な課題の一つがビーム損失の低減であり、RCS においてもこれまではどこでビームを損失してももれなく検出することを優先していた。しかし、1MW の大強度運転を控えより精密なビーム調整が必要となり、そのためにもビームの損失点を特定しその損失量を評価する必要性が高まっている。今回から実施した GM 管を用いた残留線量の詳細分布測定によりビーム損失点は明らかになった。そこで既に明らかになったビーム損失点に追加し局所的なビーム損失を検出する BLM を開発すれば、より精密なビーム調整が実現できると期待できる。

Figure 4 の写真右は試作した局所ビーム損失を検

出するための新型 BLM である。この BLM はシンチレーション光検出タイプのため、局所ビーム損失のみを検出することは難しい。しかしシンチレータ部の容量を小さくし損失点に直接取り付けすることで、局所ビーム損失に大きな感度を持たせることが可能となり、GM 管測定と同等なビーム損失の偏りを検出することが出来る。表 2 及び 3 に新型 BLM のシンチレータ及び光電子増倍管 (PHOTOMULTIPLIER TUBE: PMT) の主な仕様をまとめる。PMT は小型で感度が高くかつ時間応答の早いものを選定した。この新型 BLM を 2 台準備し、代替ダクトに設置した。取り合いの関係上、設置場所は残留線量の 2 番目に高いピーク点である変換ニップルとし、内周側及び外周側に直接取り付けした。Figure 5 はビーム運転時の典型的な BLM 出力波形を示したものである。PMT への印加電圧は 400V で、途中プリアンプ等を通さずに終端抵抗 50Ω で直接オシロスコープに接続した。(この信号収集モードをビーム損失信号の波形収集モードと定義する。) RCS に 0.5msec かけて多重入射されたビームのエミッタンスは空間電荷効果により広がるが、その後加速とともに縮小する。そのためコリメータ部のビーム損失は入射後 8msec 程度までで減衰する。Figure 5 の赤色プロットが内周側 BLM 信号で青色プロットが外周側 BLM 信号である。外周側に大きく偏っており、積分すると 2.48 倍となっており残留線量の比率 2.44 とほぼ一致していることが分かった。これはビーム損失と残留線量との相関を示している。

またビーム運転停止後に放射化した代替ダクト表面からのγ線について新型 BLM を用いて検出することを試みた。PMT への印加電圧を最大定格の 900V まで上げて、終端抵抗を 1MΩ に切り替えて 2 秒間のデータを平均処理して長時間データ収集を行った。(この信号収集モードを残留核種からのガンマ線検出モードと定義する。) Figure 6 が測定結果を示したもので、緑色ドットが内周側、オレンジ色ドットが外周側を示している。途中データ収集に失敗している期間もあるが、放射化した代替ダクトの減衰曲線を得ることが出来た。また定期的に GM 管を用いて残留線量を測定した結果も併せてプロットして比較した。これを見ると残留線量と減衰曲線とはよく一致していることが分かる。この結果から新型 BLM を用いたγ線計測の校正データを作ることが出来、トンネル内での GM 管を用いた線量測定を行わなくても残留分布とその時間変化を測定することが分かった。この方法をリング全周にわたって展開することで、作業者の被ばくリスクの低減し且つ残留線量分布を把握するという課題に対する解答を得ることが出来る。

4.3 コリメータの微細調整

新型 BLM を真空ダクトの上下側、内外周側の表面に設置することで、残留線量の偏りの原因となるビーム損失のアンバランスを測定できることが分かった。この結果から、新型 BLM をコリメータ本体の内部やコリメータからの漏れ粒子によるビーム損失点に設置することで、コリメータの微細調整が

可能となると期待できる。2016 年夏期メンテナンス時に駆動軸制御系の改修を行うので、秋からのビーム調整時に新型 BLM を用いたコリメータ位置の微細調整を試みる。

5. まとめ

RCS におけるコリメータ重故障の発生に伴い、リング全周にわたる残留線量分布の詳細測定を継続して実施している。これによりビーム損失の詳細について把握することができ、またコリメータから漏れ出た散乱粒子によるビーム損失点を特定することが出来た。新型 BLM をビーム損失点のダクト表面の内外周側 2 か所に取り付けた。波形収集モードに設定することで、残留線量分布の偏りをビーム損失量と関連付けて計測することが出来た。γ線検出モードに設定し、GM 管測定によるデータ校正を行うことで、残留線量とその減衰曲線を得ることが出来た。また、この新型 BLM を用いることで、コリメータの微細調整が可能となることを期待しており、秋以降のビーム調整時に試みる。

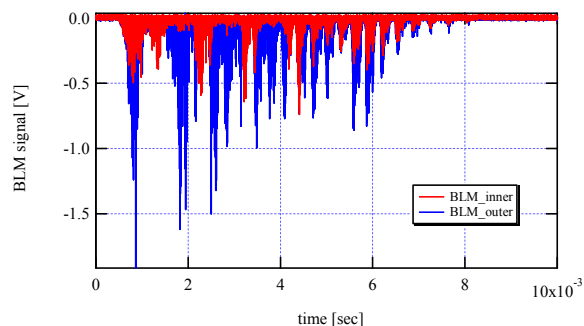


Figure 5: Typical measurement signals of the new BLMs on the dummy ducts.

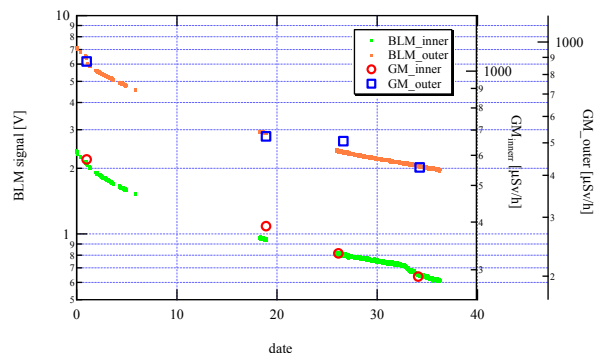


Figure 6: Relation between decay curves measured by the new BLMs and measurement residual radiations on the same places obtained by the GM counter.

参考文献

- [1] K. Yamamoto, PRST-AB 11, 123501 (2008).
- [2] H. Hotchi *et al.*, in Proc. of PASJ2015, p.103.
- [3] K. Yamamoto *et al.*, In these proceedings: MOP007.
- [4] K. Yamamoto *et al.*, in Proc. of PASJ2013, p.1060.
- [5] K. Yamamoto, in Proc. of HB2008, USA p.304.