

ミュオン加速管の放射線線量推定

ESTIMATION OF RADIATION LEVEL FOR THE MUON LINEAR ACCELERATOR

設楽暁^{#A)} 岩瀬広^{A)} 大谷将士^{A)} 恵郷博文^{A)} 近藤恭弘^{B, C)}

Satoru Shitara^{A)}, Hiroshi Iwase^{A)}, Masashi Otani^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Yasuhiro Kondo^{B, C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} JAEA/J-PARC

^{C)} Ibaraki University

Abstract

The electron loading phenomenon significantly affects the operation of radio-frequency (RF) linear accelerators (linacs), causing issues like multipathing and RF breakdown. Effective protective measures, including radiation shielding, are crucial for sustainable accelerator facilities. This muon linac features advanced RF acceleration cavities, including the disk-loaded structure (DLS) traveling-wave linac, which operates at a high gradient of 20 MV/m, posing challenges related to radiation. Understanding electron generation and dynamics within the cavities is essential for radiation evaluation. This paper assesses radiation estimation from the muon DLS based on electron DLS measurements and dark current electron dynamics simulations with GPT. Detailed descriptions of measurement, simulation with PHITS, and estimation methods are provided in the paper.

1. はじめに

The electron loading phenomenon は高周波線形加速器における重大な課題の一つである。特に、マルチパッキングと RF 絶縁破壊は加速器の安定作動に大きな影響を与える。さらに近年、加速管の放射化の影響についての関心が高まっている。放射線の遮蔽対策は将来的な運用において重要な課題の一つとなっている。

近年、素粒子物理学、材料物理学、イメージングへの応用などでミュオンリニアックへの関心が高まっている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が建設した大強度陽子加速器施設 (J-PARC) では、現在、ミュオンリニアック建設中である。J-PARC のミュオンリニアックは 4 種類の RF 加速空洞で構成されている。その中でもディスクロード進行波型加速管 (DLS) は、20 MV/m という最も高い加速勾配で運転されるため、放射線に関する重要な問題の一つとなっている。特に、ミュオンリニアックは、一般ユーザー施設でもある物質・生命科学実験施設 (MLF) で開発されるため、通常の加速器施設よりも高い安全性が求められる。

放射線の発生の仕組みを理解するには、加速管内での電子の発生とダイナミクスを理解する必要がある。電子の発生に関する研究はいくつかあるが、実測しない限り、その量を正確に推定することは難しい。空洞表面から電界放出により発生した電子は暗電流を形成し、高周波電界によって加速され、空洞表面に衝突して二次放射線を放出する。ミュオン用 DLS (μ DLS) は、加速に伴う速度変化 ($v/c = 0.7\sim 0.9$) があるため、加速電子用 DLS (eDLS) とは構造が異なり、暗電流による電子の加速とそれに伴う二次放射線発生も異なると予想される。

本論文では、eDLS 表面の放射線線量の実測を基に、 μ DLS 内の暗電流電子のダイナミクスシミュレーションに

よる放射線の推定評価を行う。2 節では放射線の実測について、3 節から 5 節では、測定結果とシミュレーションに基づく推定について述べ、6 節で結論をまとめる。

2. 加速管表面の放射線線量計測

初めに、KEK つくばキャンパスにある電子陽電子入射器内のテストスタンドで大電力運転中の eDLS から発生する放射線線量の計測を行い、放射線シミュレーションコードを使用してテストスタンド内放射線分布の再現を試みた。Table 1 に eDLS の RF 特性を示す。放射線測定には InLight® (インライト) を使用した。インライトとは OSL (Optically Stimulated Luminescence: 光刺激ルミネッセンス) を利用した線量計である。インライトを eDLS 表面 30 cm ごとに 6 箇所を設置し、19 時間ほどの大電力高周波運転を行った。Figure 1 にはインライトを設置した様子を示す。Figure 2 には運転時のクライストロン出力・加速管入出力波形を示す。運転時の条件はクライストロン出力が 10 MW、加速管入力 (パルスコンプレッサー出力) がピーク値で 61 MW、パルス運転の繰り返しは 50 Hz で行った。測定結果を Fig. 3 に示す。今回は、このデータをもとに線量再現を行った。



Figure 1: InLight films set on eDLS.

[#] sshitara@post.kek.jp

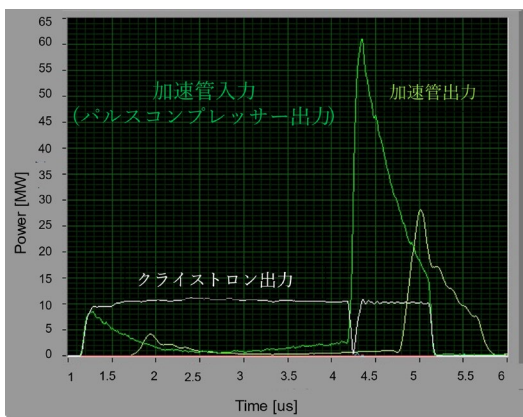


Figure 2: RF power waveform.

Table 1: RF Properties of eDLS

運転周波数 f_a [MHz]	2856
運転モード	TM01- $2\pi/3$
型式	準定加速勾配進行波型
平均シャントインピーダンス[MΩ/m]	61.7
Q	14,000
フィリングタイム [μs]	0.57
加速利得 [MeV/MW ^{1/2}]	7.87
全長 [mm]	2,064

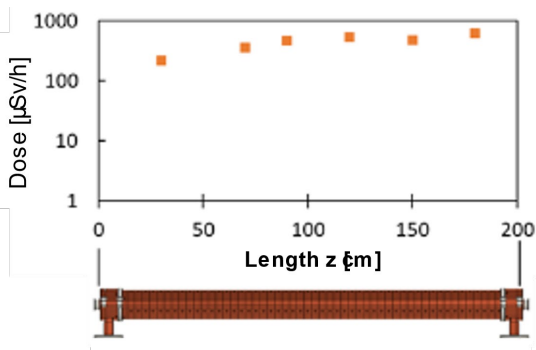


Figure 3: Radiation dose distribution on the surface of eDLS.

3. PHITS による再現

次に、eDLS から発生する放射線線量の計測データをもとに、PHITS にてテストスタンドで測定した放射線分布の再現を試みた。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) [1]は、物質中における粒子の輸送や崩壊を、核反応モデルや核データライブラリを用いて模擬する、3-D モンテカルロ計算コードである。本稿における計算では、PHITS Ver. 3.31 を使用した。

3.1 計算体系

計算体系を Fig. 4 に示す。計算モデルは Generalized

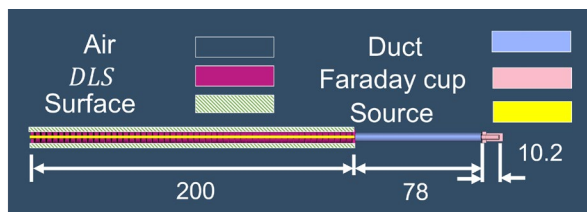


Figure 4: PHITS simulation model of eDLS.

Geometry (GG)を使って記述した。2 m の加速管は中のセルを再現し、ダクト、ファラデーカップを組み合わせた。加速管から全方位に約 200 cm の空間を用意し、その空間を空気として設定した。本来であれば加速管内部表面から、電界放出によって暗電流が発生し、その見積りの放射線線量の計算を行わなければならないが、今回は加速管内部に仮想的な円柱状電子を発生させて、初期エネルギーは 0.04 MeV、加速勾配を図の左から右に 25 MV/m を設定した。この設定は DC 加速であるが、PHITS での評価では加速管クレスト加速をよく再現する [2]。

3.2 計算結果

PHITS で線量を求める際、線量換算係数が必要である。今回、実験結果にフィットするように線量換算係数を求め、放射線線量の値を計算した。PHITS による加速管周りの電子、光子の線量分布の計算結果を Fig. 5 に示す。横軸は加速管に沿った位置を表し、原点は加速管上流端とした。加速管の下流になるほど放射線線量が上がっている様子がわかる。ダクト($z = 200$ cm)とファラデーカップ($z = 280$ cm)の部分で値が大きく跳ねている。これは、加速された電子がダクトやファラデーカップに衝突することで光子が発生しているからである。また、加速管とは違い、材料がステンレスで、厚さも薄いため多くの電子、光子が外に飛び出しているからである。

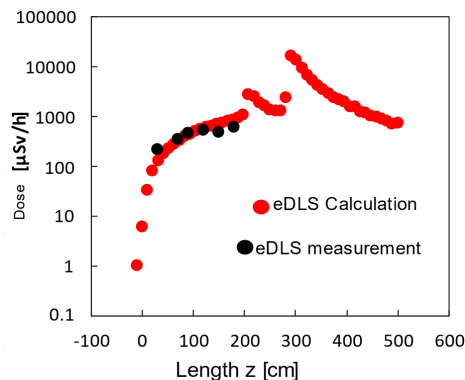


Figure 5: PHITS does simulations and measurements.

また、線量換算係数を用いて加速管の暗電流を評価した。計算は以下の式を使用した。

$$I = a e N \quad (1)$$

I は暗電流、 a は線量換算係数、 N は飛翔している電子数とする。 N はこの時の評価面積 S と電子のフルエンス F の積である。この式を用いて暗電流を計算したところ、暗

電流の値は 0.27 nA となった。実験での暗電流測定は Fig. 4 のファラデーカップを用いて 0.17 nA であった。計算値と比較すると、59%ほど大きくなっている。計算値は加速管下流出口での評価値であり、実際には加速管とファラデーカップの間で暗電流電子が失われることを考慮すると、妥当な結果と言える。

4. GPTにおける μ DLS内部の暗電流電子の加速シミュレーション

μ DLS は、eDLS と異なり、ミューオンの速度変化に応じてディスク間隔が下流に進むにつれて徐々に広がっている。そのため、 μ DLS 内の放出電子はディスク間で異なる移相で加速されるため、eDLS での暗電流電子と異なり、一定電圧での加速モデルが成り立たない。そのため、時間的に変動する電磁場での粒子軌道計算を、これまでも多数の加速器設計で実績のある General Particle Tracer (GPT) [3]で暗電流電子のビームダイナミクスを評価した。本シミュレーションでは、2次元 RF 計算コード SuperFish[4]で計算した μ DLS 電磁界分布を用いて粒子軌道計算を実施した。

本シミュレーションでは、 μ DLS 内部で電子をほぼゼロエネルギーで生成し、加速され、内表面に衝突するまでの軌道や電子の到達エネルギーを計算した。 μ DLS は4段で構成されており、今回は1段目と4段目の計算を行った。電界強度は1段目 20.4 MV/m、4段目は 21.5 MV/m、RF 出力は 40 MW を与えた[5][6]。その粒子の軌跡を Fig. 6 に示す。次節で、この時の粒子位置、速度、エネルギーの値を PHITS での線源データとして用いて、 μ DLS による放射線発生量の推定を行った。

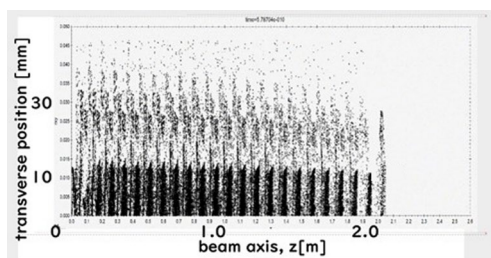


Figure 6: GPT Simulations of electron's orbits in μ DLS.

5. μ DLS 周りの放射線分布の推定

GPT による μ DLS の暗電流のダイナミクスシミュレーションの結果をもとに、PHITS で μ DLS 周りの放射線分布の評価を行った。 μ DLS の放射線遮蔽用建屋案の平面図の一例を Fig. 7 に示す。この図では、 μ DLS は厚さ 100 cm のコンクリート遮蔽壁で囲まれている。また、 μ DLS は4本で使用されるが、今回は計算負荷軽減のため、最上流部と最下流部の2つの μ DLS について評価した。コンクリート遮蔽外壁の線量は、次の2つの方法で計算した。1つ目は、PHITS を使用してコンクリート遮蔽内壁での二次放射線線量のみを計算し、コンクリートの放射線透過率を用いて、遮蔽外壁での線量を手計算した(簡易計算式)。2つ目は、コンクリート遮蔽も PHITS 体系に含めて計算する方法である。計算体系は2節で示した eDLS と同様のモデルであるが、既に暗電流電子の

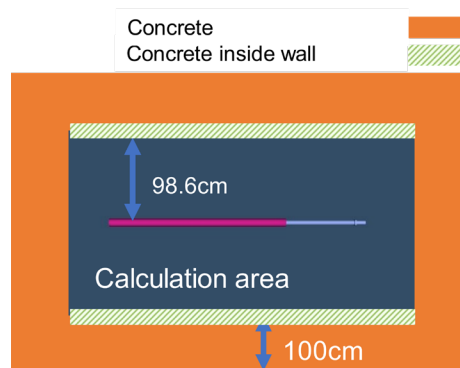


Figure 7: Design plans for the μ DLS building.

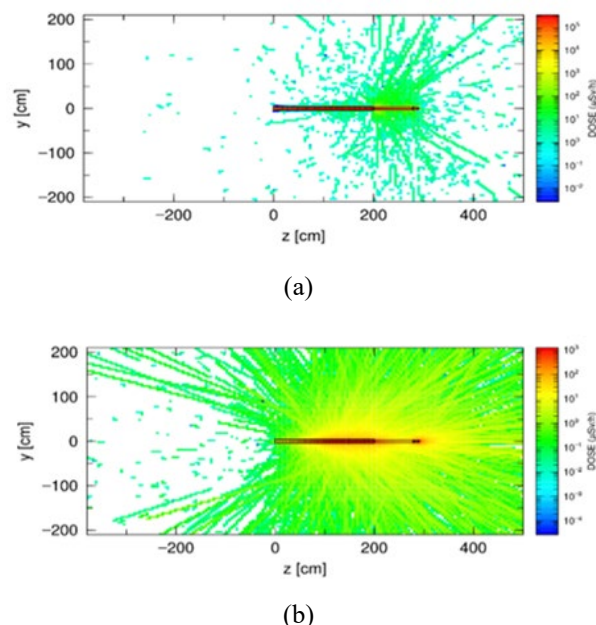


Figure 8: Radiation distribution around the μ DLS. (a: electron, b: photon)

加速は GPT で行っているため、PHITS 内での加速勾配を 0 として計算した。

PHITS で線量を求める際、線量換算係数が必要である。eDLS では、実験結果にフィットするように線量換算係数を求めた。eDLS と μ DLS の内部に存在する粒子数の比を eDLS の線量換算係数に掛けることで μ DLS の線量換算係数とした。両加速管の構造はディスク間隔以外に差がなく、また、本体の材質も同じ無酸素銅であることから、この係数仮定を採用した。上記の線量換算係数を用いて、 μ DLS 周りの放射線線量分布を求め、 μ DLS 表面から 98.6 cm 離れた μ DLS 用建屋の内壁までの距離での放射線線量を求めた。放射線分布を Fig. 8 に示す。

5.1 簡易式

コンクリート内壁あたりになる場所 ($r = 98.6$ cm) の放射線線量の値を Fig. 9 に示す。図内の Upstream は最上流部の μ DLS を指し、Downstream は最下流 4 番目の μ DLS を指す。この結果より、線量最大値は $10 \mu\text{Sv/h}$ 程度になった。この結果をもとに、幅 100 cm のコンクリート

の透過する放射線線量を以下の式を用いて計算した。

$$D_2 = D_1 \frac{r_1^2}{r_2^2} e^{-\Sigma t} \quad (1)$$

D_2 は遮蔽後の放射線線量、 D_1 は遮蔽前の放射線線量、 r_1 は線源から内壁までの距離、 r_2 は線源から外壁までの距離、 $e^{-\Sigma t}$ は透過率である。今回の計算のエネルギー分布を求め、その分布に対して各エネルギーの透過率をPHITSで求めた。エネルギー分布の結果をFig. 10に、透過率をFig. 11に示す。各エネルギーの透過率を使って式(1)にあてはめ、計算を行った。Figure 11の透過率の結果を用いて計算を行うと、もし10 $\mu\text{Sv/h}$ がすべて10 MeVの高エネルギー放射線であると仮定しても、コンクリート透過率が0.01であるため、コンクリートを透過する放射線線量は0.068 $\mu\text{Sv/h}$ 以下になる。

5.2 詳細計算

μDLS の建屋内放射線分布を詳しく求めるためにFig. 12のように加速管の周りにコンクリートを設置し、PHITSで計算を行った。評価した箇所はコンクリートの内側(Inside)と外側(Outside)である。計算した結果がFig. 13、Fig. 14である。この図からわかるように、Downstreamがより高い放射線線量を放出していることがわかる。放射線線量の最大値は0.05 $\mu\text{Sv/h}$ で、簡易式で計算したときとほぼ同じような値になった。

次に暗電流について評価を行う。今回、放射線線量

を求める際に使用した線量換算係数と式(1)を用いて μDLS の放射線線量を推定した。今回製作する μDLS はeDLSと構造は違うものの、同じ材料、同じ精度で製作しているため、電界放出される電子の量も同じだと考えられる。そのため、暗電流を推定する方法も同じ方法で行うとする。また、eDLSが50 Hz運転であったが、 μDLS は25 Hz運転のため、暗電流の量は半分相当になる。その結果、上流部の加速管では0.073 nA、下流部では0.9 nAとなった

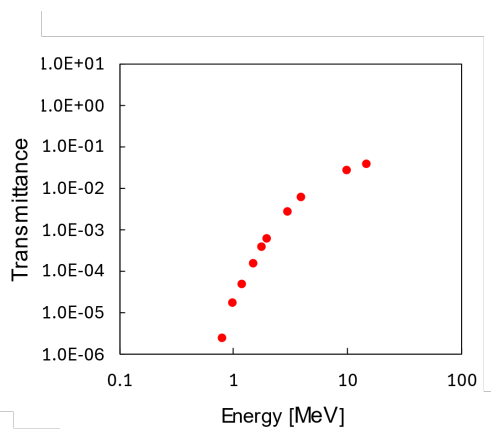


Figure 11: Radiation dose at each energy.

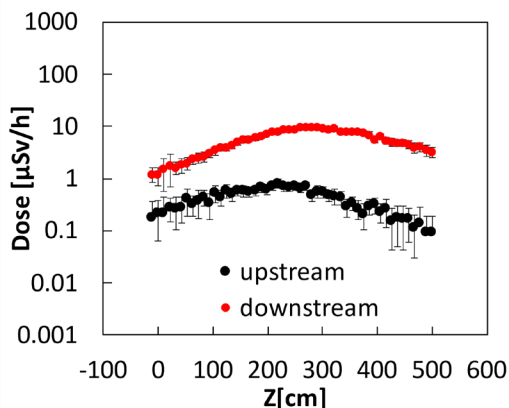


Figure 9: Dose simulations around the two μDLS s.

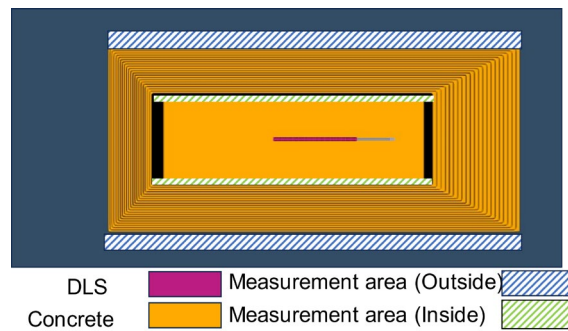


Figure 12: PHITS simulation model of μDLS with the building.

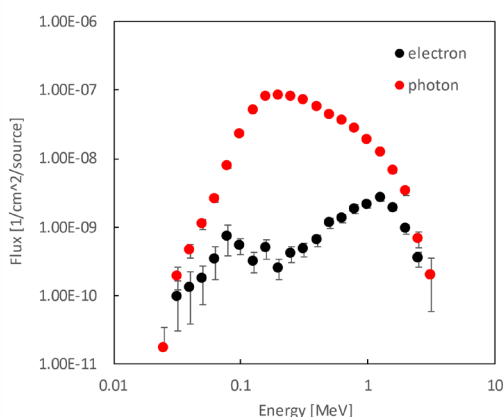


Figure 10: Energy distribution near concretes inner wall.

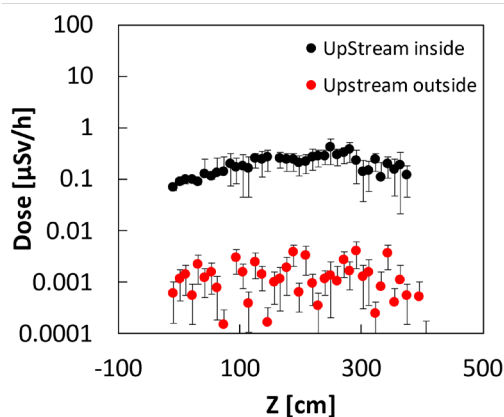


Figure 13: Radiation dose around concretes in upstream.

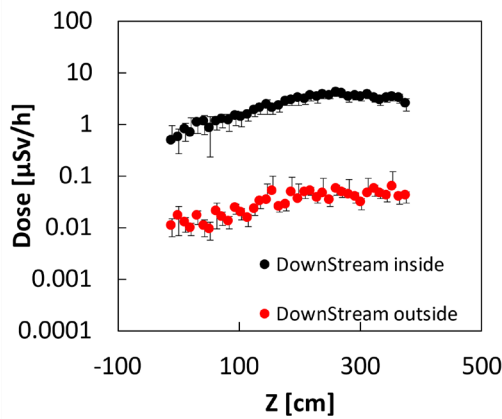


Figure14: Radiation dose around concretes in downstream.

6. まとめ

eDLSの放射線分布をシミュレーションコードPHITSで再現し、実験結果と比較した。 μ DLSについては、GPTで暗電流電子のダイナミクスシミュレーションを行い、その結果を基にPHITSで放射線分布を計算した。建屋の遮蔽壁の設計と線量換算係数を用いて μ DLS周りの放射線線量分布を求めた。計算結果から、コンクリート遮蔽壁を通過する放射線線量が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。このことにより、厚さ 100 cm のコンクリートで放射線遮蔽を行うと基準値である $20 \mu\text{Sv/h}$ 以下に減衰すると推定することを確認した。今後は実際に計測を行ってみて、シミュレーションとどのくらい乖離しているかを確認していきたい。

謝辞

今回の実験には多くの方々に関与されて実現できま

した。特に三菱電機システムサービスの牛本信二氏に実験のセットアップ、加速管運転やデータ集取でお世話になりました。加速器六系の塩澤真未氏には実験の解析のやり方を教えて頂きました。心より感謝いたします。また、解析結果の評価などの議論に参加いただいた加速器五系スタッフに対して、この場を借りて感謝を表明致します。

参考文献

- [1] Y. Iwamoto *et al.*, “Benchmark study of particle and heavy-ion transport code system using shielding integral benchmark archive and database for accelerator-shielding experiments “Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135, 2024.
- [2] H. Iwase *et al.*, “Dark current and radiation of KEK-Linac accelerating structure protons”, Proc. 14th Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-14), Gyeongju, Korea, Oct. 2018, pp. 21.
- [3] K. Sumi *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 2420 (2023) 012038.
- [4] J. H. Billen and L. M. Young, “POISSON SUPERFISH”, LA-UR-96-1834, 1996.
- [5] K. Sumi, “ミュオン $g-2$ /EDM 精密測定実験に向けた高勾配加速を実現する加速管の開発とビーム測定系の改良” 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 Master’s thesis, 2022.
- [6] K. Sumi *et al.*, “Design and beam dynamics study of disk-loaded structure for muon LINAC”, 13th International Particle Accelerator Conference (IPAC’22), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 14-16.
- [7] Kazumichi Sumi *et al.*, “Basic design of l-band disk-loaded structure for muon linac”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), QST Takasaki (online), Japan, Aug. 2021, pp. 133-1