

IFMIF/EVEDA 原型加速器超伝導加速器据付位置でのパーティクル測定 PARTICLE MEASUREMENT IN SRF POSITION ON THE IFMIF PROTOTYPE ACCELERATORS

蛸沢貴^{#, A)}, 柳町太亮^{A)}, 熊谷公紀^{A)}, 近藤恵太郎^{A)}, 春日井敦^{A)}, 長谷川和男^{A)},
阪井寛志^{B)}, 加古永治^{B)}, 梅森健成^{B)},
フランチェスコ スカンタビューロ^{C)}, ガイ フィリップス^{C)}, エルベ ジッコ^{C)}, フィリップ カラ^{D)}
Takashi Ebisawa^{#, A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Koki Kumagai^{A)}, Keitaro Kondo^{A)}, Atsushi Kasugai^{A)},
Kazuo Hasegawa^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Eiji Kako^{B)}, Kensei Umemori^{B)},
Francesco Scantamburlo^{C)}, Guy Phillips^{C)}, Herve Dzitko^{C)}, Philippe Cara^{D)}
^{A)} 量子科学技術研究開発機構(QST), ^{B)} KEK, ^{C)} Fusion for Energy (F4E), ^{D)} IFMIF/EVEDA project team

Abstract

Engineering validation and engineering design activities (EVEDA) of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), an accelerator-based high intensity neutron source, is one of international collaborative projects in the field of nuclear fusion energy development by Japan and Europe, and the installation and the commissioning of the prototype accelerator (LIPAc, Linear IFMIF Prototype Accelerator) is ongoing at the Rokkasho Fusion Institute of QST.

For RFQ (Radio Frequency Quadrupole accelerator) high duty beam operation, new beam transport line which is called MEL (MEBT Extension Line) was installed in SRF (Superconducting Radio Frequency accelerator) position. The FE (field emission) of SRF cavity performance degradation due to particle contamination is a serious problem in SRF society and the same trouble is concerned in LIPAc SRF. To correct relation between the FE and particle contamination in future SRF operation, we performed particle measurement by the gate valve operation with novel vacuum particle monitor in MEL. In this paper, the result of particle measurement is reported.

1. はじめに

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility, 国際核融合材料照射施設) は重陽子-リチウム (d-Li) 核反応を用いた加速器駆動型の強力中性子源であり、20 年以上前から IEA の国際協力の下で検討が進められてきた。現在は、2007 年から開始された、ITER と並行して進めている日欧共同事業である幅広いアプローチ (BA) 活動の枠組みの下で、IFMIF の工学実証・工学設計活動 (Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA) が進められている。IFMIF/EVEDA では、IFMIF の工学設計・主要機器の設計・製作・試験を行い、IFMIF の建設判断に必要な技術実証を行うことがミッションである[1]。このための最も重要な課題の 1 つは大電流の重陽子加速器の原理実証であり、IFMIF 加速器のプロトタイプである原型加速器の開発が日欧協力で行われ、六ヶ所核融合研究所において据付・調整・コミッショニングが実施されている。この IFMIF 原型加速器は、LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) と呼ばれ、Fig. 1 に示すように、重水素イオン源 (入射器) - 高周波四重極加速器 (RFQ) - MEBT - 超伝導加速器 (SRF) - ビーム診断系 (D-Plate) - HEBT - ビームダンプ (BD) から構成された全長約 36 m の大電流重陽子線形加速器である。IFMIF では 2 本のビームラインを用い、各ラインで 4 段の SRF を用いて 40 MeV-合計 250 mA の重陽子ビームを CW 運転する設計であるのに対し、LIPAc は 1 本のビームライン、初段の SRF のみで 9 MeV-125 mA の重陽子ビームの CW 運転を実証する計画となっている。IFMIF 加速器の成否の

鍵を握るのは、空間電荷効果によるビーム発散力が大きい低エネルギー部の大電流加速実証である。

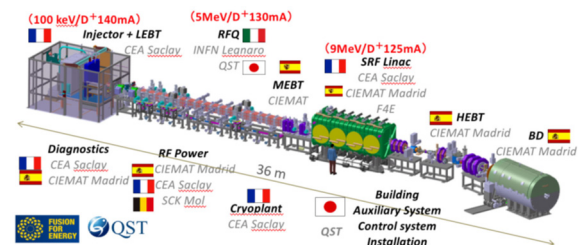


Figure 1: Configuration of the LIPAc.

2019 年に RFQ の 125 mA/5 MeV 短デューティ (~1 ms, 1 Hz) 重陽子ビーム加速試験を行った後、SRF を据え付ける前に RFQ の長パルスビーム加速試験を行うため、SRF より下流側の HEBT、BD 等の機器の据付・コミッショニングをほぼ完了した。また、Fig. 2 に示すように、SRF が据え付けられる位置に、新たに MEBT extension

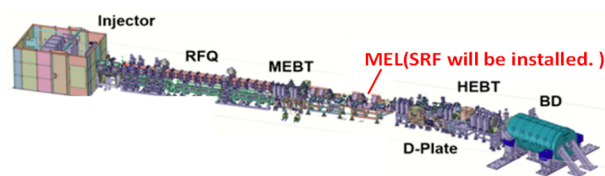


Figure 2: Configuration of long pulse beam commissioning [2].

ebisawa.takashi@qst.go.jp

line (MEL) と呼ばれるビーム輸送系をクリーン環境下で設置し、2021 年 7 月よりビーム試験を開始した。

SRF を使用する施設では、ゲートバルブ (GV) の開閉操作時に発生・混入する微粒子によって生じるフィールドエミッション (FE) による性能劣化が問題視されている[3]。FE が発生すると、局所的に放出される電子が加速電場の増加に伴い増幅し、空洞から加速エネルギーを奪うと同時に放射線が発生させ、加速電場の低下、クエンチを引き起こす。KEK をはじめ世界中の SRF を使用する施設で問題視されており、LIPAc の SRF においても同様の問題が懸念されている[4]。

LIPAc ではクリーン環境下で据え付けた GV の開閉操作で発生する微粒子のサイズ・個数を定量的に評価するため、真空中で微粒子の動きを可視化できる真空用パーティクルモニタを将来 SRF が据え付く位置の MEL に導入し微粒子の測定を行った。本論文では微粒子測定の方法と結果について報告する。

2. MEL の構成・構築

Figure. 3 に示すように、MEL は四極電磁石 (QM)、ステアリング電磁石 (ST)、ビーム位置モニタ (BPM)、ビームロスモニタ (BLoM)、残留ガスパンチ長モニタ (RGBLM)、真空チャンバーとビームダクトで構成される総長約 6 m のビーム輸送系である。左側は上流の MEBT、右側は下流の HEBT に接続される。

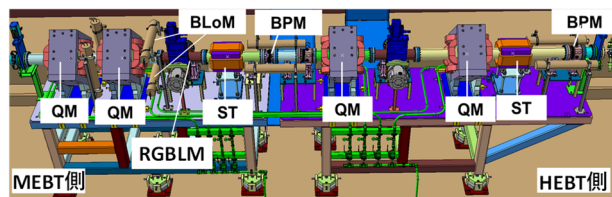


Figure 3: Configuration of MEL.

機器の汚染を防ぐため、Fig. 4 に示すように MEL の真空部品や真空チャンバー等は、SRF の組立てに使用される ISO(14644-1)-class5 相当のクリーンルーム内で超音波洗浄をし、イオンガンでパーティクルカウントが 0 になるまでしっかりブローし洗浄作業した。また、一部の機器はクリーンルーム内で組立てた。



Figure 4: Cleaning components in clean room.

MEL 及び HEBT の最初の三連四極電磁石のビームライン構築作業は、Fig. 5 に示すように、ビームダクト内への埃や微粒子の混入を防ぐため、静電除去シートで周囲を養生し、金属フレームで組立てた土台の天井に取り付けたエアフィルタシステムを起動し整流された気流を

流し、ISO-class5 相当の清浄度を維持した環境下で組立作業を行った。



Figure 5: MEL assembly in clean environment.

3. MEL の微粒子測定

MEL ビームライン構築後、真空用パーティクルモニタを使用し、MEL の両端の GV の開閉操作時に発生する微粒子の測定を行った。Fig. 6 に示すように、MEL には上流、下流に 2 つの真空チャンバーがあり、一方に真空用パーティクルモニタを設置し、もう一方から真空排気を行った。

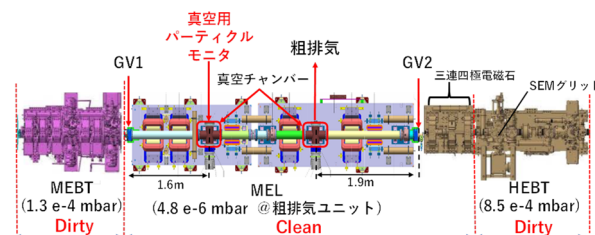


Figure 6: Setup of particle measurement.

最初に MEBT 側の真空チャンバーに真空用パーティクルモニタを設置し、HEBT 側の真空チャンバーから真空排気しながら MEBT 側の GV1 を開閉操作し、微粒子測定を行った。Fig. 7 は、真空用パーティクルモニタを真空チャンバーに挿入した写真である。MEBT 側の GV1 は 10 回開閉し、測定した。MEL の真空度は排気ユニットの真空計で 4.8×10^{-6} mbar、MEBT と HEBT はプライマリポンプのみ動作させポンプ直上の真空計で見て $\sim 10^{-4}$ mbar の真空度を維持した。

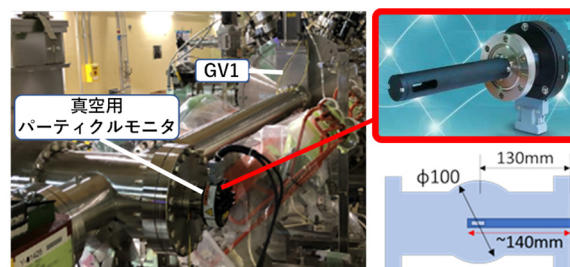


Figure 7: Vacuum particle monitor in vacuum chamber.

今回使用した真空用パーティクルモニタは、開口部 (面積: 1.25 cm^2) を通過した微粒子のサイズ (識別能力: $0.3 \sim 3.6 \text{ }\mu\text{m}$) と個数を、レーザー散乱を利用して同定することができる[5]。パーティクルモニタの開口部を、ビームダクトのほぼ中心に位置するよう真空チャンバーに配置した。

最初の測定の終了後、HEBT 側の真空チャンバーにパーティクルモニタを移設し MEBT 側のチャンバーから排気しながら同様の測定を行った。ただし、HEBT 側の GV2 は HEBT に設置されている SEM グリッドワイヤ計測器への急激な圧力変動による損傷を最小限にするため、開閉操作を 3 回までとした。今回の測定では、一回の GV 開閉で発生する微粒子の計測に 20 秒程かけた。

今回の測定では、クリーン環境下で組立作業を行った HEBT 側の方では微粒子の検出は検出限界以下もしくは数個程度で、クリーン環境下で組立てられていない MEBT 側では大量の微粒子が検出されると予想した。

4. 微粒子測定の結果

はじめに、MEBT 側の真空チャンバーにパーティクルモニタを設置し、GV1 を開閉操作した際の 0.3-0.5 μm 、0.5-1.0 μm の微粒子の測定結果を Fig. 8 に示す。その他のサイズの微粒子は検出限界以下であった。1 回目の GV1 の OPEN 時に 0.3-0.5 μm の微粒子が 300 個程度、CLOSE したときに 250 個程度検出された。2 回目以降も数十～数百個検出され、検出数が減少する傾向は見られなかった。また、開閉操作を続けていると CLOSE 時に 0.5-1.0 μm の大きいサイズの微粒子も数個検出された。

次に HEBT 側の真空チャンバーにパーティクルモニタ

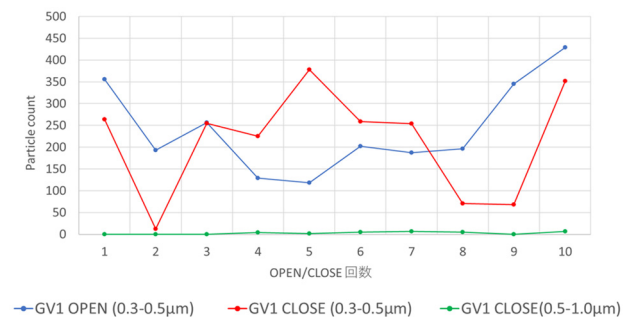


Figure 8: Result of particle measurement in MEBT side vacuum chamber.

を移設し測定した結果を Fig. 9 に示す。1 回目に GV2 を OPEN した時に 80 個程度、CLOSE した時に 40 個程度検出した。2 回目、3 回目ともパーティクル検出数は数十個程度であり変わらなかった。

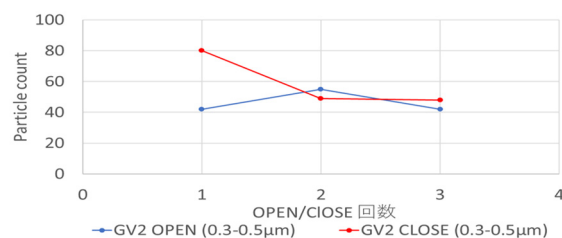


Figure 9: Result of particle measurement in HEBT side vacuum chamber.

予想通り、MEBT 側の方が数百個と HEBT 側より微粒子の検出数が多かったが、HEBT 側での検出数が予想より非常に多い結果となった。

5. 考察

MEBT 側はクリーン環境下で組立てられなかったため、MEBT の内部に残留する微粒子が排気の際に拡散され GV1 に付着し、GV1 を開閉した時に MEL 側に混入したものと考えている。一方、HEBT 側ではクリーン環境下での据付作業を行ったにもかかわらず数十個もの微粒子の検出が確認されたことから、クリーン作業を十分に行っても GV の開閉操作による微粒子の混入・汚染はある程度は避けられないことがわかった。また、GV の開閉操作を続けることで GV に付着した微粒子が揺さぶられ落ち検出数が減少するものと予想していたが、そのような傾向は見られず、開閉操作を繰り返すことで 0.5-1.0 μm の大きいサイズの微粒子を発生させる結果となった。これは GV の開閉操作を繰り返す過程で GV 表面の材料が削れて混入したためではないかと考えている。さらに開閉操作を続ければ、微粒子の検出数はさらに増加していくと推測される。

6. まとめと SRF 性能劣化低減策の検討

真空中パーティクルモニタを使用して、GV 開閉操作で発生する微粒子の測定を行い、MEL への微粒子の混入量を定量化することができた。

今回の MEL の微粒子測定の結果から、GV 開閉操作後の微粒子汚染による SRF の性能劣化は、下流側より上流側の空洞の方が顕著になると推測されるのでどの程度の劣化の違いが生じるか、数十個程度の汚染ならば問題ないのかを SRF のコミッショニング時に確認する。また、空洞の性能劣化状況を見て、SRF 近辺のクリーン作業の方法・手順を見直す。これらの知見を基に、微粒子汚染も考慮した核融合中性子源用クライオモジュールの設計を検討する。

参考文献

- [1] J. KNASTER *et al.*, Overview of the IFMIF/EVEDA project, Nucl. Fusion 57, 102016, (2017).
- [2] K. Kondo *et al.*, "Validation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho", Fusion Eng. Des 153, 11503 (2020).
- [3] H. Sakai *et al.*, "Field emission studies in vertical test and during cryomodule operation using precise x-ray mapping system", Phys. Rev. Accel. Beams 22, 022002 (2019).
- [4] Private communications with N. Bazin *et al.*
- [5] http://www.wexx.jp/product_detail/id=163(参照: 2021-08-03)