

J-PARC リニアック MEBT1 部垂直コリメーターの開発

DEVELOPMENT OF A VERTICAL COLLIMATOR AT THE MEBT1 OF J-PARC LINAC

杉村高志^{#, A)}, 丸田朋史^{A)}, 平野耕一郎^{B)}

Takashi Sugimura^{#, A)}, Tomofumi Maruta^{A)}, Koichiro Hirano^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

There is an upgrade plan of J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Linac from currently operated beam parameters such as, beam current of 40 mA, beam pulse width of 500 μ sec and repetition of 25 Hz, to 50 mA, 500 μ sec and 50 Hz, respectively. To reduce beam loss during a beam acceleration is a must task to accelerate a high power beam. At J-PARC Linac, a beam from an ion source followed by RFQ (Radio Frequency Quadrupole) injected into a series of DTLs (Drift Tube Linac) through a MEBT1 (Medium Energy Beam Transport 1), where a beam matching and a beam pulse forming are carried out at the beam energy of 3 MeV. There are some locally activated spots in DTL area at the current beam power level so that some kind of mitigation measure is required. Beam simulation results show that the beam loss at the DTL area can be reduced if there is a pair of vertical beam collimators. This paper reports a design and fabrication status of new vertical collimators.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、ビーム強度の増強が計画されており、現在運転しているパラメーター40 mA、25 Hz、500 μ s を50 mA、50 Hz、500 μ s に変更することを目指している。加速器で大強度ビームを得るためには、ビームロスを出来得る限り軽減しておくことが必須である。

J-PARC リニアックでは、イオン源、RFQ(高周波四重極型リニアック)で加速されたビームを MEBT1 (Medium Energy Beam Transport 1)でマッチング及びパルス成形を行い DTL(ドリフトチューブ型リニアック)に入射している。現在の運転において、DTL における局所的放射化が観測されたため、増強においては更なる対策が必須である。

ビームシミュレーションの結果から、DTL におけるビームロスは、MEBT1 に新たに垂直方向のコリメーターを設置することで、軽減できることが分かった。

本発表では、上記目的のため、MEBT1 に設置する垂直方向コリメーターの製作設計の状況について報告する。

2. ビーム光学からの要請

MEBT1 では、8 台の四重極電磁石(Q-Mag)を用いて DTL へのマッチングを行うとともに、横方向への電場を発生する 2 連の高周波空洞を用いてビームのチョッピングを行い、Linac 後段に置かれたリングへの入射に最適な時間構造を持ったビームを作り出している。これらのチョッパー空洞の共振周波数は 324 MHz であり、これは DTL 空洞の共振周波数と同一である。チョッパー空洞により正規のビーム軌道より蹴りだされたビームは 4 番目の Q-Mag の後ろに設置されたビームスクレーパーで負荷される。ビームスクレーパーは、対向した位置に 2 台設置されており、直線導入機によりビームとの水平方向

距離を可変することができ、この機能により、チョッピングされたビームと同時に正規ビームの横方向のハローも負荷させることができる。

MEBT1 で時間的、空間的に整形されたビームは DTL に入射され、さらに加速を続けるが、27 m ある DTL 区間のうち先頭から 5 m 付近において局所的に放射線量の高いところが存在するなど、DTL 区間でのビームロスが無視できない状況が確認されている。

これらの DTL 区間でのビームロスの低減を含め、リニアックでのビーム性能の向上を目指してビーム調整やビームシミュレーションを随時行っている。Figure 1 にシミュレーションで得られた MEBT1 でのビームエンベロープを示す。このエンベロープは、MEBT1 に複数設置された WSM(Wire Scanner Monitor)で測定されたビームサイズと Q-Mag の設定を再現するようにビームの Twiss パラメーターを決定し、それらの値から求められたものである。ビームスクレーパーは MEBT1 の先頭から約 1.8 m の位置にあり、この付近で、Y 方向(鉛直方向)のビーム

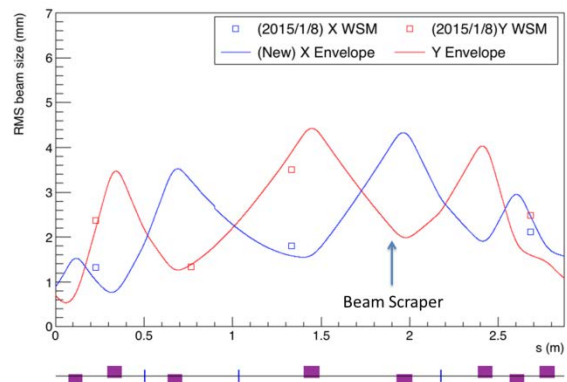


Figure 1 Simulated Beam Envelope at MEBT1 based on the measured data from WSM.

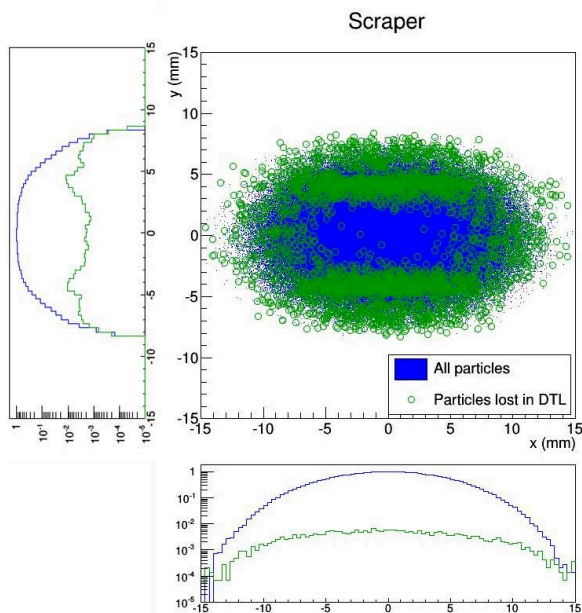


Figure 2: Particle lost in DTL.

サイズが局所的に最小になっているのが分かる。

Figure 2 にシミュレーションで得られたビームスクレーパー位置での横方向のビームの広がりを示す。青は全加速粒子の位置を示しており、緑はその後の加速中にDTL 内で失われる粒子の位置を示している。緑で示した粒子が上下に分かれて分布していることから、この位置に上下方向のコリメーターを設置することで、DTL 内で失われるはずの粒子を事前に取り除くことができる。以上のことから、現在あるビームスクレーパーの直後に垂直方向のビームコリメーターを設置することとした。

3. 熱負荷のシミュレーション

3.1 シミュレーション条件の設定

DTL 空洞内でのビームロスを軽減するため、Figure 2 に示す緑の分布の Y 方向の中心から±3mm より外側の領域について、ビームを削ることを検討する。

ビームの Y 方向大きさの 1σ は 2 mm である。3 mm は 1.5σ であり、87%に相当するので、上下に 2 分したコリメーターでビームを負荷したとすると、コリメーター1個での負荷は、6.5%である。ビーム電流、パルス幅、繰り返し、エネルギーの条件から負荷の大きさは、 $50 \text{ mA} \times 500 \mu\text{s} \times 50 \text{ Hz} \times 3.0 \text{ MeV} \times 0.065 = 244 \text{ W}$ となる。よって、シミュレーションでの負荷も、244 W で行うこととした。ビームを負荷させる物質については、スクレーパーにおいて使用実績のある炭素複合材 (Carbone Composite material, C/C 材 CX-2002、東洋炭素製[1])を想定した。コリメーターの構造としては、25 mm x 20 mm x 10 mm のサイズの C/C 材の直方体と、25 mm x 20 mm x 5 mm の C/C 材の背面に排熱路として高熱伝導度 ($1700 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)を持つ 5 mm 厚のグラフェン(Pyroid® [2])を張り付けたものの 2 種類を考えた。排熱路としてはコリメーターの最小面の片方に銅製の水路を接合したものと考え、水路の大きさは 3mm x 3mm の正方形断面を持つものを往復の 2 本持つものと、4 mm x 3 mm の長

方形断面を持つものを往復の 2 本持つものの 2 種類を考えた。Figure 3 にシミュレーションに用いたモデルを示す。入熱は半径 3 mm の半円に 244 W が均一に入熱されるものとした。負荷は上下とも同じであるので、下部のものについてのみシミュレーションを行った。シミュレーションには ANSYS R15.0 [3]を用いた。ビームは幅 500 μs 、繰り返し 25 Hz のパルス列であるので、まずこれらの平均ビームパワーによる定常状態を計算し、その温度を初期条件として 1 パルス分の時間変化をシミュレーションで求めた。Table 1 にシミュレーションパラメータをまとめた。

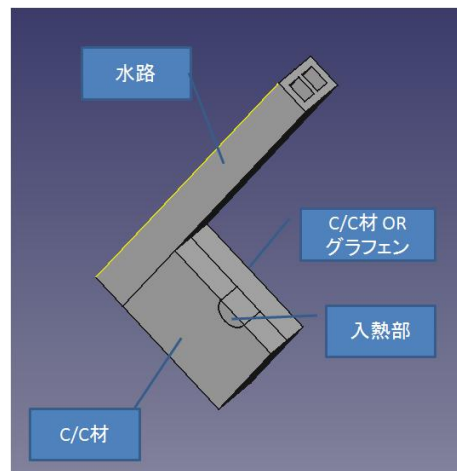


Figure 3: 3D model for the simulations.

Table 1: Beam Condition for the Simulations

Current	50 mA
Pulse Width	500 μsec
Repetition	25 Hz
Thinning ratio	6.5%
Beam Distribution	Semicircle / Uniform
Beam Diameter	3 mm
Energy	3 MeV

3.2 シミュレーション結果

シミュレーションでは水路内の雰囲気温度を 30 °C に固定して、銅との境界面に $5800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の熱伝達係数を設定した。シミュレーションの出力例を Figure 4 に示した。上部には熱分布が示されており、下部には最高温度を示した点での温度の経時変化がプロットされている。条件の組み合わせにより 4 通りのシミュレーションの結果を Table 2 にまとめる。ここで、非定常解最高温度とはパルス内での最高温度を示している。

3.3 結果考察

結果が示す最高温度はいずれも C/C 材の使用可能温度 (2000 °C 以上)を十分に下回るものであり、どれを選択しても、コリメーターとして使用できるものと判断でき

る。

水路の違いにおいては、いずれの素材の場合においても最高温度の差は 10 °C 程度であり、大きな違いは見られない。

バックプレートの違いにおいては、Pyroid®を用いたものは C/C 材を用いたものよりも低い最高温度を示しており、素材の持つ熱伝導率の違いを反映しているものであるといえるが、その差はいずれの水路の場合でも 50 °C 程度である。これらの最高温度域での 50 °C の差は C/C 材の使用可能温度 2000 °C に比較すれば十分許容できるものである。

Table 2: Summary of Simulations

No.	1	2	3	4
バックプレート	Pyroid	C/C	Pyroid	C/C
水路(mm)	4 x 3	4 x 3	3 x 3	3 x 3
定常最高温度(°C)	297	355	306	366
非定常解最高温度(°C)	628	676	635	684

4. 実機製作に向けて

本コリメーターは J-PARC の入射リニアックで用いられるものであり、信頼性の高いものとするは必須である。C/C 材と Pyroid®を接合させたものは最高温度に関しては高い性能を発揮できることをシミュレーションは予測しているが、接合プロセスが必須である。他方 C/C 材のみで、構成したものは素材を切り出すだけでできるものであり、接合プロセスを経たものより信頼性が高いといえる。また最高温度の点では、前述のとおり十分許容できる範囲であることが、シミュレーションにより分かったことから、

コリメーターの構造としては、C/C 材のみ構成されたものを使用することとした。

本コリメーターはスクレーパーの直後に置くことになっているが、スクレーパーには駆動部や、表面温度観測装置が設置されており[4]、本コリメーターおよびその駆動系を設置することができる空間は非常に限られている。しかし、スクレーパー部の自重が 10 g 以下となることから、水路自身にコリメーターの支持機能を持たせ小型化を図ることで、現状の MEBT1 のビーム光学的配置を変更することなく設置することが可能となるように、設計を進め、本年度内の完成を目指しているところである。コリメーターは 2017 年夏季にビームラインへ設置することを計画している。

5. まとめ

J-PARC リニアックではビームの大強度化を進めているところであるが、その過程でビームロス対策が必要となっている。DTL 部でのビームロスの低減策として、MEBT1 部にコリメーターを設置することとし、その実現に向けて、コリメーターの熱負荷をシミュレーションにより評価した。その結果を用いて、実機的设计に入っており、本年度内に完成させ、来年度に MEBT1 に設置する予定である。

参考文献

- [1] <http://www.toyotanso.co.jp/Products/Pdf/CCcomposite.pdf>
- [2] http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/MINTEQ/Pyroid_HT_Pyrolitic_Graphite_Heat_Spreaders/95268/0
- [3] <http://www.ansys.com/ja-JP/Products/Multiphysics>
- [4] K. Hirano *et al.*, "DEVELOPMENT OF BEAM SCRAPER USING A 3-MEV LINAC AT J-PARC", MOP005, in these proceedings.

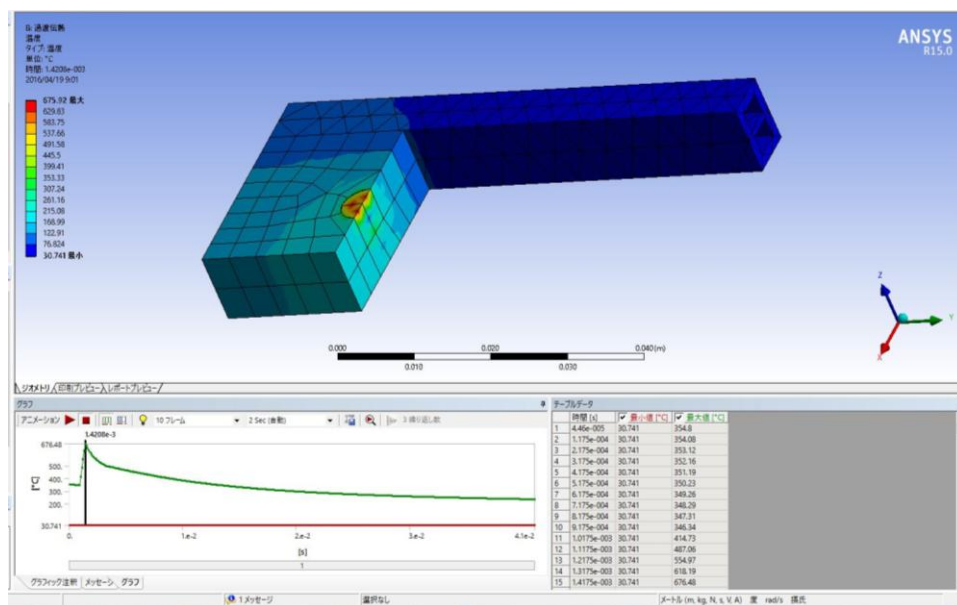


Figure 4: Graphical output of ANSYS.