

レーザー駆動イオン加速の実用化を目指したビーム輸送系の開発

BEAM TRANSPORT SYSTEM FOR LASER-DRIVEN ION ACCELERATION

榊 泰直^{#,A)B)}, 宮武 立彦^{B)}, 小島 完興^{A)}, 竹本 伊吹^{B)}, 錦野 将元^{A)}, 白井 敏之^{C)}, 近藤 公伯^{A)}
 Hironao Sakaki^{#,A)B)}, Tatsuhiko Miyatake^{B)}, Sadaoki Kojima^{A)}, Ibuki Takemoto^{B)},
 Masaharu Nishikino^{B)}, Toshiyuki Shirai^{C)}, Kiminori Kondo^{A)}
^{A)} QST Kansai, ^{B)} Kyusyu-Univ., ^{C)} QST Inage

Abstract

The idea for a compact ion injector becomes attractive in view of recent progress in laser-driven ions acceleration. To achieve this development, the designing methods an injector with the laser-driven ion acceleration is essential, just as present ion sources are designed by using formulas of ion source model. However, there are no design guidelines and model formulas adapted to laser-driven ion acceleration. We are proceeding with the goal of making a design-guideline for developing an injector that makes application of laser-driven ion acceleration.

1. はじめに

レーザー駆動イオン加速手法が発見[1, 2]され、20年以上経過した。この間、手法の基礎物理であるレーザー・プラズマ相互作用の研究が進み、実用化に近いといえる段階まできている。最も実用化に近いものとして、レーザー駆動イオン加速手法を利用した新しい形のビーム入射用加速器(Fig. 1)の実装ということが挙げられるのだが、その実現においては既存のイオン源がイオン源モデル式で装置設計されるのと同じように、物理が考慮されたレーザー駆動イオン加速による入射器設計のモデル式が与えられ、入射器の設計を容易にすること不可欠となるのだが、レーザー駆動イオン加速に適応した設計指針やモデル式は未だ存在していない。

そこで我々は、レーザー駆動イオン加速を現実的に利用した入射器開発を行うための設計指針やモデル式を構築することを目標とした研究を進めている。ここでは、レーザー駆動イオン加速入射器の実証に向けた取り組み(特に、レーザー駆動イオン加速による炭素ビーム加速)について報告する。

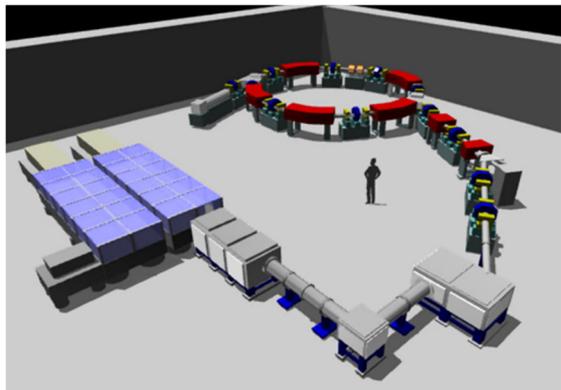


Figure 1: Image of laser-driven ion injector.

2. イオン源の設計に利用されるモデル式[3]

既存加速器施設のイオン源においては、イオン源から電流を引き出すためのプロセス(イオン飽和電流則および式のチャイルド・ラングミュア則等)が理解されて、数式によってモデル化している。また、引き出されたビームを下流にむけてビームロスさせることなく輸送するには、ビームの空間電荷効果が考慮されたパービアンズ K と、ビームの層流性を表す RMS エミッタンスを用いて、ビーム包括線軌道方程式が定式化されている(Fig. 2)。これらのモデル式を利用することにより、イオン源を用いた粒子加速器のビーム輸送系の開発が行われ、さらに、完成したイオン源でモデルの正当性が確認され、設計上の信頼性が確保されている。しかし、このような式はレーザー駆動加速においては未だ構築されていない。

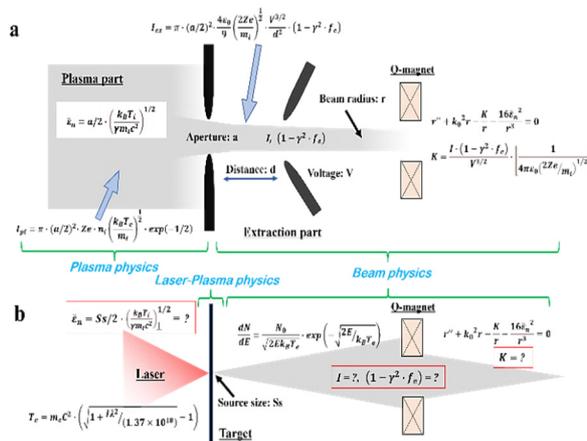


Figure 2: Comparison with Beam Equations for Plasma Ion Source and Laser-Driven Ion Acceleration[3].

sakaki.hironao@qst.go.jp

3. モデル式構築に向けた実証機開発

3.1 実証機の検討

我々は、レーザー駆動イオン加速入射器の設計指針を構築するためのデータ取得のため、様々な電磁石を流用することでレーザー駆動イオン加速による入射器の実証機を作ること考えている。そこで、設計指針を構築するための評価基準として、実証用ビーム輸送ラインにて、レーザー駆動イオン加速ビームの伝送率をシミュレーションで検討することにした。

Figure 3 に、検討したビームラインの装置配置を示す。レーザー駆動イオン加速手法により発生するイオンは、エミッタンスが良いが発散角が大きい。そのため、レーザー照射ターゲットから 350 mm 離れたところに磁場勾配の大きい Q トリプレット電磁石を設置し、発散角を抑え込む。その後、偏向電磁石と Q 電磁石の組み合わせにて、ディスパージョンが偏向電磁石通過後も変化しないアクロマートな輸送軌道をとるようにする。そして、最下流に設置される Q トリプレットにて x 方向・y 方向とも β が最小になるような磁場勾配を設定する。

3.2 Trace3D による最適化

まず、Fig.3 に示された、レーザー駆動イオン加速実証機を仮定したビームラインにて、炭素 4 価 1 MeV/u ビームを輸送する際の磁場勾配を Trace3D[4] を使って最適化した。その結果、Fig. 4 に示されるように最初の Q トリプレット電磁石の磁場は 12 T/m 程度、偏向磁石間に設置される Q 電磁石は 2.6 T/m、最後の Q トリプレット電磁石は 5 T/m 程度の磁場勾配を設定するとアクロマートでかつ、2 台目の Q トリプレット磁石後に x 方向・y 方向とも β がゼロにできることが計算された。

3.3 PARMILA によるシミュレーション

Trace3D では、レイトレース形状のビーム軌道が把握できるが、空間電荷を考慮したうえで、輸送粒子がビームダクトに衝突しながらどの程度の電流量が最終点で計測されるかのシミュレーションはできない。そこで、レーザー駆動イオン加速ビームの「ブロードのビームスペクトルおよびエミッタンス」を模擬した初期粒子を自作アプリ[5]で発生させ、PARMILA[6]を用いて輸送計算を行った。

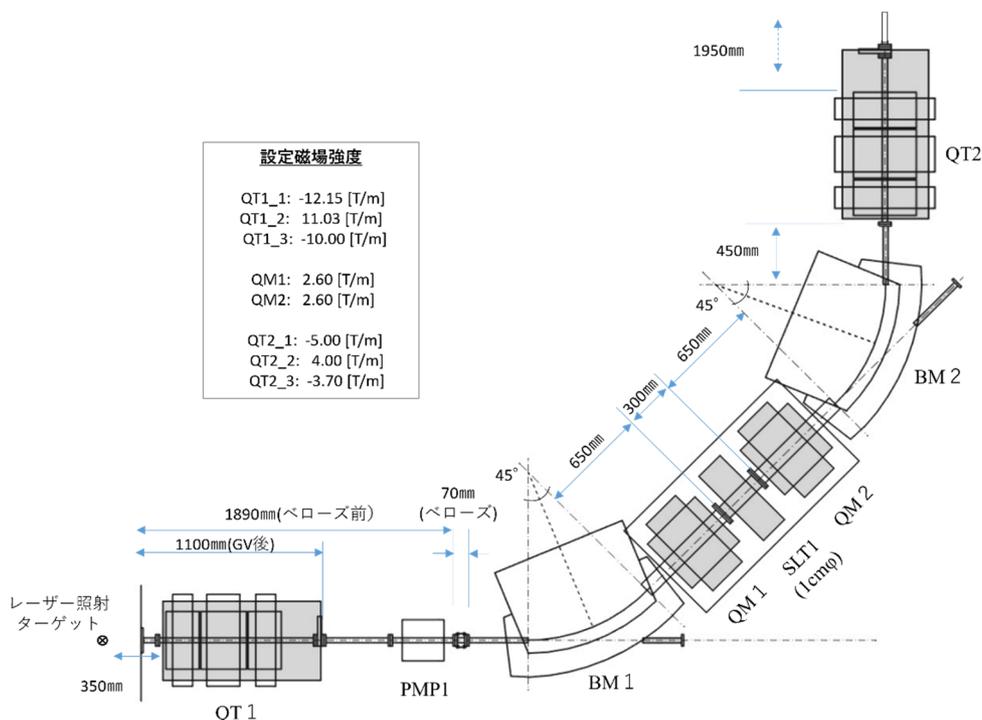


Figure 3: Considered beam Line.

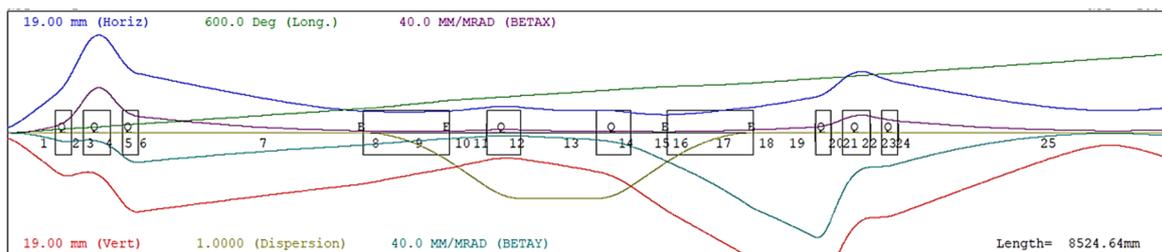


Figure 4: Beam trajectory optimized by Trace3D.

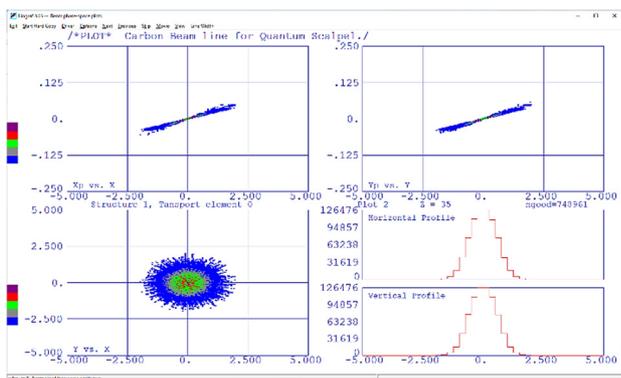


Figure 5: Result of PARMILA (500 mA@QT1 entrance).

計算ビームの初期値は、発生点での初期ビームサイズが 0.03 cm (1σ) で 2 度 (1σ) の発散角を持つエネルギー幅が $0 \text{ MeV/u} \sim 1.7 \text{ MeV/u}$ までのブロード、かつ数ピコ秒幅のビームとした。そして計算粒子数を 75 万粒子として、それらの初期電流量が 0.05 mA 、 50 mA 、 500 mA 、 5 A という条件にて計算した。計算の 1 例として、Fig. 5 に 500 mA で計算された 1 台目の Q トリプレット電磁石直前での計算結果を示しておく。

Table 1: Result of PARMILA Simulation

初期電流量 (全エネルギー幅の粒子数)	最終点到達時 C^{4+} $1.0 \text{ MeV/u} \pm 5\%$ の伝送率(%)	最終点到達時 C^{4+} $1.0 \text{ MeV/u} \pm 5\%$ の電流量(mA)
0.05 mA ($\sim 10^5/\text{mstr}$)	45.7	0.001 mA ($5 \times 10^3/\text{mstr}$)
50 mA ($\sim 10^8/\text{mstr}$)	50.7	1.2 mA ($5 \times 10^6/\text{mstr}$)
500 mA ($\sim 10^9/\text{mstr}$)	56.2	13.6 mA ($5 \times 10^7/\text{mstr}$)
5.0 A ($\sim 10^{10}/\text{mstr}$)	3.3	7.9 mA ($5 \times 10^8/\text{mstr}$)

() は C^{4+} の計算での粒子数 (全エネルギーおよび $1.0 \text{ MeV/u} \pm 5\%$) を mstr 当たりで記載

Table 1 には、初期電流量値を変化させて最終点に到達した $1 \text{ MeV/u} \pm 5\%$ の C^{4+} 粒子の初期値からのロス率、到達電流量が示されている。全粒子の初期電流量が 500 mA までは伝送率が 50% 程度、つまり初期量の 50% の C^{4+} が到達している。 5 A まで電流量を増やすと、イオンの空間電荷効果にてほぼ全ての粒子がロスしてしまう。これは、レーザー加速にて $1 \text{ MeV/u} \pm 5\%$ の幅で C^{4+} が 1 mstr あたり 5×10^8 個発生した場合に相当する。

4. おわりに

今回想定される実証機について PAEMILA でシミュレーションしたところ、トータル電流量がアンペアクラス (全エネルギー幅で粒子数が 10^{10} 個/mstr 程度) になると、空間電荷効果によってほぼ 100% ロスする結果となっ

た。実際には、レーザー駆動イオン加速にて加速されるイオンビームは、その加速メカニズムから電子が帯同することが考えられて空間電荷が大幅に抑えられるはずであるため、実測ではこのシミュレーションと異なる結果となる可能性が高い。早急に実証実験を行って、実際のビームの設計指針をどのように構築すべきかを確かめなければならない。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 の支援を受けて実施されている。

参考文献

- [1] S. P. Hatchett *et al.*, Phys. Plasmas 7 2076 (2000).
- [2] S. C. Wilks *et al.*, Phys. Plasmas 8 542 (2001).
- [3] H. Sakaki *et al.*, J. Plasma Fusion Res. 98 6 267 (2022).
- [4] https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_trace.phtml
- [5] H. Sakaki *et al.*, Proc. of PAC09, TU6PFP009 (2009).
- [6] https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_PMI.phtml