

## TEST BEAM-LINE FOR LASER-DRIVEN PROTON THERAPY

H.Sakaki <sup>#A)</sup>, M.Nishiuchi <sup>A)</sup>, T. Hori <sup>A)</sup>, P. Bolton <sup>A)</sup>, A. Yogo <sup>A)</sup>, K. Ogura <sup>A)</sup>, A. Sagisaka <sup>A)</sup>, A. S. Pirozhkov <sup>A)</sup>, S. Orimo <sup>A)</sup>, K. Kondo <sup>A)</sup>, H. Kiriyaama <sup>A)</sup>, H. Okada <sup>A)</sup>, S. Kanazawa <sup>A)</sup>, S. Kondo <sup>A)</sup>, T. Shimomura <sup>A)</sup>, M. Tanoue <sup>A)</sup>, Y. Nakai <sup>A)</sup>, H. Sasao <sup>A)</sup>, D. Wakai <sup>A)</sup>, H. Souda <sup>B)</sup>, A. Noda <sup>B)</sup>, Y. Iseki <sup>C)</sup>, T. Yoshiyuki <sup>C)</sup>, T. Nagafuchi <sup>C)</sup>, K. Maeda <sup>C)</sup>, and K. Hanawa <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> JAEA, 8-1-7 Umemi-dai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215, Japan

<sup>B)</sup> Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

<sup>C)</sup> TOSHIBA Corp., 1-1-1, Shibaura, Minatoku, Tokyo, 105-8001, Japan

### Abstract

The beam transport test is carried out through the test beam line of the laser-driven proton accelerator which consists of the phase rotation cavity, PMQ, and bending magnet. The laser system used is J-KAREN at JAEA. The final transmitted bunch duration and transverse profile are well predicted by the PARMILA particle transport code by assuming relatively low initial current of the proton beam. The most probable explanation for this is the space charge neutralization by the laser-plasma-electrons.

## レーザー駆動型粒子線装置のための陽子線プロトタイプ輸送系の開発

### 1. はじめに

原子力機構・関西光科学研究所（関西研）では、文部科学省の『先端融合領域イノベーション創出拠点の形成プロジェクト』に採択され、平成 19 年度より「レーザー駆動型粒子線治療装置」の実用化を目指している。このプロジェクトは、高強度・短パルスのレーザーによる、従来の RF 加速よりも高い 100GeV/m という電界勾配を利用した加速手法<sup>[1-3]</sup>にて、既存のシンクロトロン型粒子線治療装置を小型化するというものである。

これまで、レーザー駆動型粒子線の特徴を計測すると共に、レーザー駆動型粒子線を応用する際に問題となる点の解決のための技術的手法を試してきた。例えば、レーザー駆動粒子線は、エネルギー広がりやブロードで分布する上に、エネルギーの増加とともに指数関数的に粒子数が減少するという特徴があり、このビームに位相回転空洞による RF を印加す

ることで特定のエネルギー領域にピークを形成、利用できる粒子数を増加させることに成功している<sup>[4]</sup>。また、レーザー駆動型粒子線のビーム発散角は、全幅で 10 度を超える様な広がりを有するが、これに対しても 4 極永久磁石(PMQ)を用いてビーム収束をさせることに成功している<sup>[5]</sup>。このようにレーザー駆動型粒子線に対して各要素の単体機能評価は順次成功しているが、医療用装置として実用化するにはこれらの要素を複合的に組み合わせ、医療に最適なビームを提供出来るようにしなければならない。また、それら装置はベンチマーク評価が実施されたコードを用いて標準設計手法が確立され、設計通りのビーム仕様が達成されて医療用として安心・安全なものとなっていなければならない。

そこでレーザー駆動型粒子線に対して、これまで単体性能試験が行われた位相回転空洞、PMQ および偏向電磁石を組み合わせたプロトタイプビーム輸送系を開発し、PARMILA<sup>[6]</sup>を用いて空間電荷効果評価を行い装置の標準設計手法の確立を目指した。

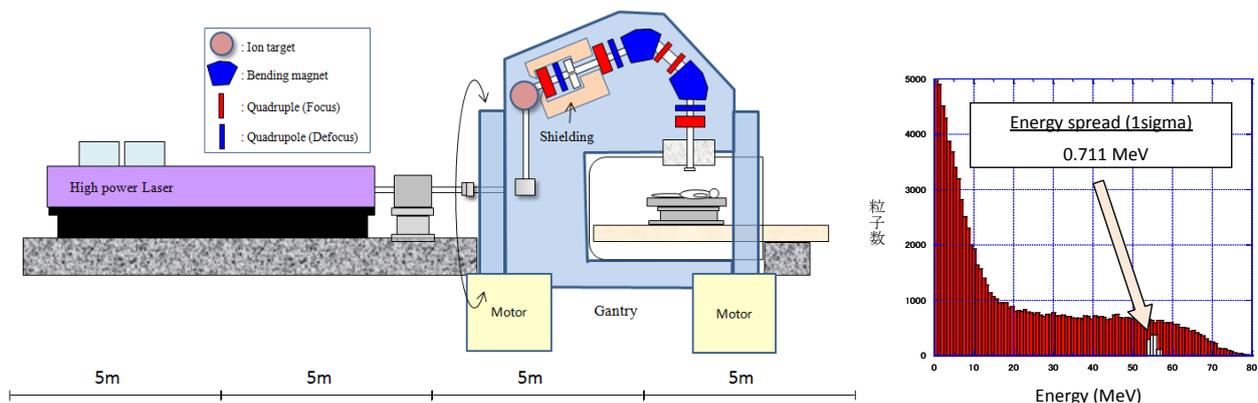


図 1：レーザー駆動型粒子線治療装置の概念図および、PARMILA で求められた患部でのビーム仕様。

<sup>#</sup> sakaki.hironao@jaea.go.jp

## 2. レーザー駆動型治療装置の概念設計

装置を小型化するには、生成されたレーザー駆動粒子線が発生した直後から、治療に最適なビームとなり、つまり磁石などの複数のコンポーネントを介すことなく患者にそのまま照射できるのが理想である。しかし、現状観測されている高強度レーザーを用いた加速イオンビームの特徴は<sup>[7]</sup>、ブロードエネルギーで、エミッタンスは小さいが非常に大きな発散角を持つため、レーザー駆動型粒子線をビーム加工せずして治療に用いるということは出来ない。

そのため、治療装置概念設計を行うに当たってはレーザー駆動型粒子線を治療に最適な形になるように磁場を用いて整形することを考えた。この概念設計計算は、PARMILA にインプットとして、将来的に達成されるレーザー駆動型粒子線のビーム特徴を模擬した粒子(80MeV ピークでブロードエネルギー、発散角±5 度、エミッタンス~0.01π mm-mrad、粒子数 10<sup>9</sup> 個)を自作ソフトウェアで発生させて用いた。

図 1 に概念設計で考えられたレーザー駆動型治療器と、ビーム輸送系で治療用に切り出されたビームを示す<sup>[8]</sup>。治療装置は、レーザー本体と治療用ガントリを含めて約 20m 程度のサイズとなっている。このビーム輸送系で治療エネルギー55MeV、ビームサイズ 0.114mm φ が切り出され、目のメラノーマ治療を模擬したビーム条件を満足出来ることが得られた。

## 3. プロトタイプ輸送系の構築

前章で行われた概念設計は、あくまで現状得られているビーム仕様ではなく、将来的にビームが高エネルギーになったと仮定して PARMILA で計算されたものである。よって、実際のビームを用いてま

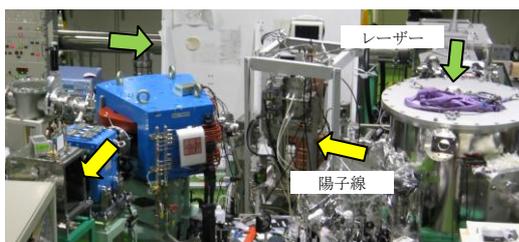
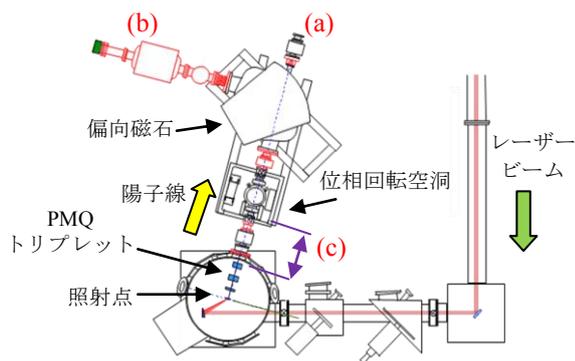
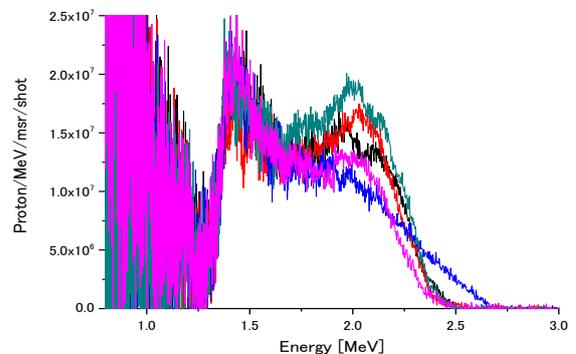


図 2 : 関西研に設置された 2.0MeV 級陽子ビームライン。

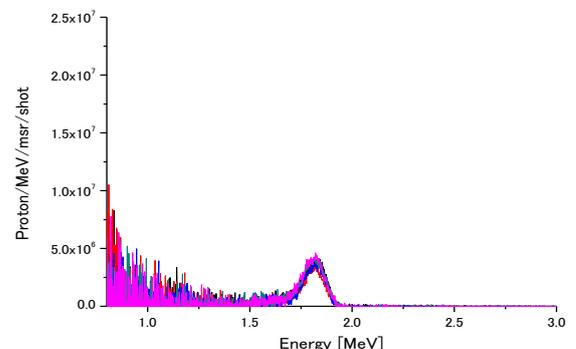
たく評価が行われておらず、本手法が将来の標準的な設計手法として位置づけられるものではない。そこで、我々は関西研 J-KAREN レーザー (630mJ、波長 800nm、45 フェムト秒) を 12.5 μm 厚さのポリイミドターゲットに照射することで、最大エネルギー約 2.5MeV の陽子線を発生させて、これまでに特性計測が行われた位相回転空洞、PMQ を組み合わせることで PARMILA コードのベンチマーク評価を行うことにした<sup>[9]</sup>。

### 3.1 プロトタイプ輸送系の構成

図 2 に PARMILA を評価するために構築されプロトタイプ輸送系を示す。レーザーは、照射部に置かれたポリイミド薄膜に対して、45 度入射で照射される。そして、照射点から下流に向かって 55T/m(50mm 長)・40T/m(50mm 長)・60T/m(20mm 長)の PMQ トリプレットを配置し発散角を抑えられる。その下流に 80MHz で 115kV の位相回転空洞を置いて、ビーム数増加のためのバンチングを行う。最後に、偏向電磁石とその直後に 2cm 幅の x 方向スリットを置き 1.9MeV 陽子を準単色化してビームを弁別する。ビームは、図 2 の上図の(a)(b)(c)点で、シンチレータを用いた TOF スペクトロメータ固体飛跡検出器(CR39)にて、エネルギーとビーム形状が診断されるという構成になっている。



i) 図 2 (a)点での準単色化前スペクトル(5 ショット)



ii) 図 2 (b)点での準単色化後スペクトル(5 ショット)

図 3 : TOF 計測されたプロトタイプ輸送系を通過後の陽子ビームエネルギースペクトルの安定度。

### 3.2 ビームの安定度

図 3 に、図 2 の(a)(b)で TOF 計測されたエネルギースペクトルを示す。i)は、PMQ トリプレットを入れ位相回転空洞と偏向磁石を OFF した状態で直線的にビームを(a)まで輸送したスペクトル、ii)は PMQ トリプレットを入れ位相回転空洞、偏向磁石ともに ON にした状態のスペクトルである。レーザー駆動型は、レーザーの安定度がそのままビーム安定度になっている。しかし、位相回転空洞や偏向磁石を用いると、安定化されたビームだけが効率的に切り出され見かけ上の安定度が確保されている。

### 3.3 横方向ビーム形状

PMQ トリプレットを通過させた後、アルミ厚さでコントロールするエネルギーフィルターを付けた CR39 で横方向ビーム収束状況を計測し、PARMILA の計算結果と比較した。

図 4 に、レーザー照射点から 650mm、750mm、850mm、950mm と距離を変えた地点にて CR39 で計測されたビーム形状結果(写真)と、PARMILA の計算結果(グラフィカル)を示す。レーザー駆動型粒子線は 100%といえるエネルギー幅を持つために、今回はエネルギーフィルターを使って、0.9MeV と 1.9MeV のエネルギーのビーム形状を観測している。

0.9MeV では縦長形状、1.9MeV では横長形状であることわかる。エミッタンスが小さいために、観測された収束ビーム幅は極めて狭いことが見てとれる。

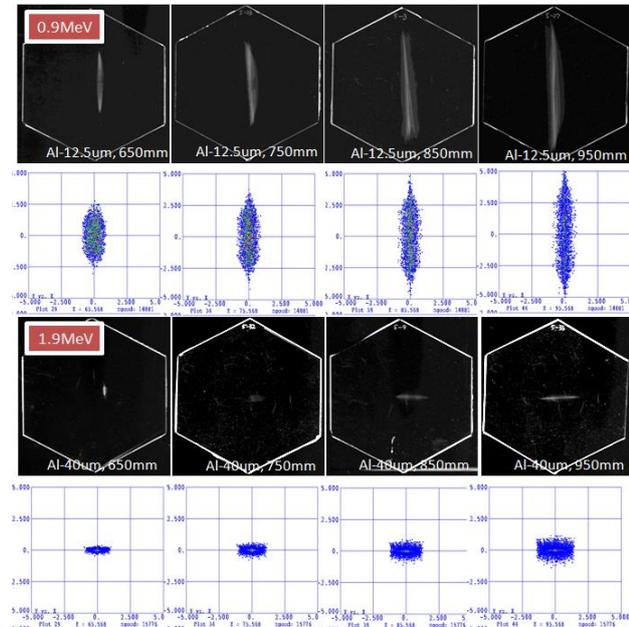


図 4：図 2(c)点(照射点から 650mm-950mm)でアルミ製エネルギーフィルター付 CR39 にて計測された、ビーム収束形状と、PARMILA によるビーム形状比較。

次に、図 2(b)点における横方向ビーム形状を図 5 に示す。図中の(a)、(b)は PMQ トリプレット、位相

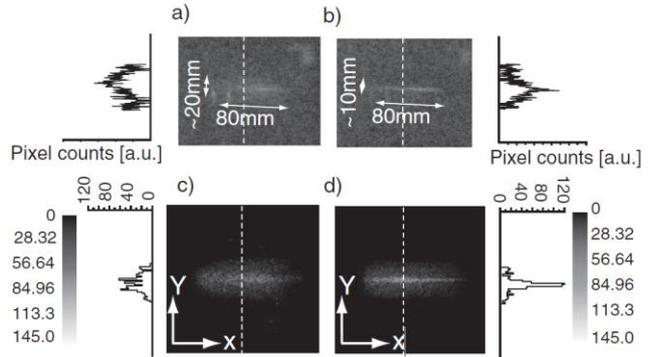


図 5：図 2 の(b)において蛍光膜モニタによって観測された横方向形状。

回転空洞、偏向電磁石を通過させて蛍光膜モニタで観測した結果である。(a)は位相回転空洞に RF を入れ、(b)は RF を OFF している。また、図中(c)(d)は、蛍光膜モニタ観測地点と同じところでの PARMILA での計算結果である。(a)(b)に対応させ、(c)が RF ON で、(d)が RF OFF である。位相回転空洞のギャップ間電場の動径方向成分による発散効果の影響<sup>[10]</sup>により、RF ON の場合の方がビームの輪郭が不明瞭となっている。よって、RF 効果について、PARMILA モデル(SUPERFISH のデータを利用)は適切なモデルであると考えられる。

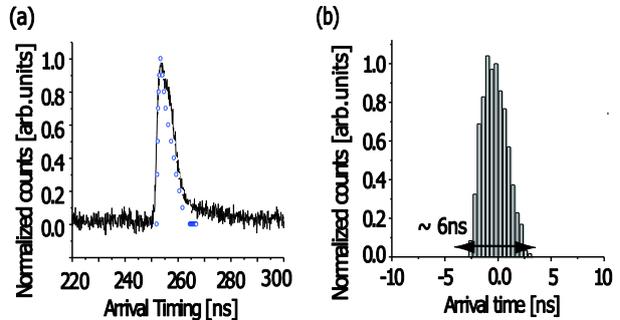


図 6：図 2 の(b)において TOF 計測された陽子ビームエネルギースペクトル(左)と、PARMILA から求められたビーム時間幅(右)。

### 3.4 縦方向ビーム形状

図 6 には、PMQ トリプレットを通過させ位相回転空洞 ON、偏向電磁石 ON とした場合の図 2 の(b)点で計測された TOF のデータと PARMILA の計算結果を示す。図 5(a)は、PARMILA の計算結果に TOF 計測で用いているシンチレータと光電子増倍管の回路定数を考慮した値 (○) とオシロスコープで計測された TOF の生データを表示している。また図 5(b)は、(a)で考慮された TOF の回路定数を考慮せず PARMILA の計算結果を横軸時間にして表示したものである。

#### 4. 空間電荷についての議論

イオンビームは電子ビームと比較して空間電荷効果の影響を受け易いために、空間電荷によるビーム形状の変化の評価が必要となる。今回のビームラインでは PMQ トリプレットの入り口部分で 1.9MeV のビームピーク電流は、計測されたビーム時間とビーム個数から求めれば約 52mA となる。この値を PARMILA の初期データとして計算すると、全く計測結果とビーム形状が一致せず、PRMILA シミュレーションの結果は、空間電荷の影響で発散方向に大きくずれる。

実測のビーム形状と、PRMILA シミュレーションの形状を一致させるには、PARMILA の入力電流値を 1/10 の『~5.0mA』にしなければ形状および透過率が一致してこない。なお、0.0mA (零) のビーム形状は、5.0mA と変わらない程度の差であった<sup>[9]</sup>。このことから、レーザー駆動型粒子線においては、発生点からビーム輸送中において空間電荷効果の影響がほとんど見られないという特徴があると考えられる。

この原因は、レーザーショット時に起こる、プラズマ状態という電荷中性化状態、つまり「ショット時に生成される大量の電子」により、空間電荷中性化がビーム加速後にも何らかのメカニズムで維持され、エミッタンスが良いままビームが輸送されていくという状況を生み出しているように推測される。なお、発散角はレーザーショット直後に電子によって作られる加速電場の電場形状によって発生していることが、ターゲットの物理的構造を変えることで発散角が抑制されるということから確かめられている<sup>[11]</sup>。つまり、レーザー駆動型粒子線は、「空間電荷中性化により空間電荷の影響を受けず、初期エミッタンスは極めて良い(発散角は悪い)ビームが発生している」といえる。

#### 5. まとめ

レーザー駆動型粒子線に対して、これまで単体性能試験が行われた位相回転空洞、PMQ トリプレットおよび偏向電磁石を組み合わせたプロトタイプビーム輸送系を組み上げて、標準設計手法の確立を目指し、ビーム横方向形状および縦方向形状を計測し空間電荷効果を PARMILA に評価した。

その結果、初期電流量を 5mA という実際の陽子個数から考えると 1/10 の電流量でシミュレーションしなければビーム形状の一致が難しいということが判った。これはレーザー照射で陽子と同時発生する電子群の影響で、空間電荷中性化が長時間維持されビーム形状が悪化しないためと推測する。

今後は、空間電荷中性化のメカニズムと、その効果を定量的に表現し、レーザー駆動型粒子線のビーム輸送系の設計方法を明確にしていきたいと考えている。

#### 6. 謝辞

ビーム計測に用いた、蛍光膜モニタは原子力機構 J-PARC センターの片桐政樹氏が快く提供して下さった中性子計測用高機能蛍光物質を用いて開発された。また、予備実験の際にビーム位置を計測する際に用いた多芯比例係数型位置モニタは、原子力機構先端基礎研究センターの西尾勝久氏、J-PARC センターの石山達也氏の協力にて開発した。それらの計測装置が無ければ本実験の成功は無かった。また、原子力機構 J-PARC センターの池上雅紀氏、長谷川和男氏には、PARMILA の計算に関してご相談させていただいた。ここに敬意を表す。

本研究は、文部科学省の科学技術振興調整費『先端融合領域イノベーション創出拠点の形成プロジェクト』に平成 19 年度採択された「光医療産業バレー」の研究開発の一環として行われた。

#### 参考文献

- [1] A. P. Fews et al., Phys. Rev. Lett. 73, 1801 (1994)
- [2] F. N. Beg et al., Phys. Plasmas 4, 447 (1997).
- [3] R. A. Snavely et al., Phys. Rev. Lett. 85, 2945, (2000).
- [4] S. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46 L717 (2006).
- [5] M. Nishiuchi et al., Appl. Phys. Lett., 94, 061107 (2009).
- [6] H. Takeda, 2005, Parmila LANL (LA-UR-98-4478).
- [7] M. Nishiuchi et al., Phys. Plasmas 15, 053104 (2008).
- [8] H. Sakaki, et al., PAC09, TU6PFP009, (2009).
- [9] M. Nishiuchi, et al., Phys. Rev. ST-AB., 13, 071304 (2010).
- [10] M. Ikegami et al., Phys. Rev. ST-AB., 12, 063501 (2009).
- [11] P. K. Patel et al., Phys. Rev. Lett. 91, 125004 (2003).