

Energy Selection Magnets for Laser-Driven Proton Irradiation system

Toshihiko Hori^{1 A)}, Hironao Sakaki^{A)}, Akifumi Yogo^{A)} and Kiminori Kondo^{A)}

^{A)} Photo Medical Research Center, Japan Atomic Energy Research Agency (JAEA)
8-1-7, Umemidai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215

Abstract

In order to transport proton beams over 1MeV which are generated for Laser-driven irradiation system, the chicane magnet system which consists of four dipole permanent magnets has been designed and installed the new test beam line at JAEA-KPSI. We report both the design parameters of chicane magnet by using POISSON/SUPERFISH and PHITS code, and the results of a cell irradiation experiment testing the effect of irradiation therapy.

レーザー駆動型粒子線装置のエネルギー選別磁石システム

1. はじめに

文部科学技術振興調整費プロジェクト「光医療産業バレー」拠点を創出する光医療研究連携センターでは、がん治療用のレーザー駆動型粒子線装置の研究開発を行っている⁽¹⁾。レーザー駆動型粒子線は、そのメカニズムから非常に短パルスであるという特徴を持つため、実際の治療に用いる際にはその効果が未知数であり、今からその治療効果を検証する必要がある。そこで、関西研においてレーザー駆動型粒子線を発生させ、細胞照射することによりその効果を検証することになった。本報告は、細胞照射実験に用いたビームラインを構成するエネルギー選別用シケインマグネットの開発と実際のビーム試験について述べる。

2. 要求仕様

$10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ を超える大出力レーザーを固体薄膜ターゲットに集光すると、様々なエネルギーのX線、ガンマ線、電子線および陽子線が発生する⁽²⁾。我々はこの陽子線を用い、レーザー駆動陽子線による細胞照射効果を調べ治療に役立つ知見を得ることを目的にしている。今回の照射実験では、陽子ビームに対し、1)薄膜ターゲットから1mの位置に置かれる細胞に1MeV以上の陽子が伝送されること、2)最大8Gyの線量を数分で照射出来る様、 10^5 個/shot程度になること、3)7.5 μm 厚のカプトン膜上の細胞に均一照射されるように $\phi 10\text{mm}$ で均一に分散されたビームであること、が主に要求された。このビームを生成するため我々はビームライン上にシケイン磁場軌道を作り、要求陽子ビームを切り出すことにした。なお、シケインは偏向永久磁石4台で作りますが、空間的な制限および設置の容易性から200mm(横) \times 400mm(ビーム軸)以内、総重量25kg以下の仕様とした。

3. シケインマグネットの検討

我々はレーザー駆動型陽子線のビーム伝送系を、永久磁石型の4重極磁石 (PMQ) 3台で構築した⁽³⁾実績があり、小型化でき且つPMQ用の3次元可動架台が共有できる利点もあり、今回のシケインは角型永久磁石を対向させたH型偏向磁石構造とした。

3.1 角型永久磁石

市販品、安価で納期も早く要求された表面磁場(約0.5T)をもっている角型永久磁石を調査したところ、全ての仕様を満足した二六製作所製のNK070型ネオジウム磁石(表1)を採用した。

表1. 今回採用したNK070永久磁石の仕様

種類	ネオジウム磁石
形状	角型
磁化方向	厚み方向着磁
表面磁束密度	0.48T(代表値)
吸着力	80kg
幅寸法	50.8mm
長さ寸法	50.8mm
厚み寸法	25.4mm
重量	約 480g

本磁石の寸法精度について、長さ寸法は0.2mm、厚み寸法は0.1mmの実績を有している。一方、表面磁束密度の個々のバラツキについては代表値の+側：10~15%、-側：10%以内となっている。これは着磁する際に生じる不可避のものであり又、製作

¹ E-mail: hori.toshihiko@jaea.go.jp

のロットによってもランダムに生じてしまうとの報告であった⁽⁴⁾。

3.2 磁場計算

次に、POISSON/SUPERFISHを使ってリターンヨークサイズなどを設計するための磁場計算を行った。図1に最終的な磁石寸法と磁力線分布(軸対称1/2サイズ)を示す。磁極中心でのBy成分磁場は0.788T、±1%以下の良磁場領域は10mmとのデータを得た。懸案であった各々の角型磁石のバラツキが中心磁場強度に与える影響については、ギャップ間距離とリターンヨークの機械的寸法を精度よく製作することで無視できることがわかった。

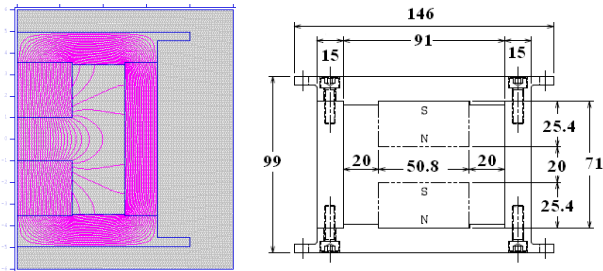


図1. POISSON/SUPERFISHで計算されたH型偏向永久磁石の磁力線分布(左)と各部寸法(右)

3.3 ビーム軌道計算

上記の磁場データ及び磁石寸法からシケイン構造を構築し、PHITS (粒子・重イオン汎用モンテカルロ)コードでターゲットから約0.6m間のビーム軌道計算を行った。図2に出発点のビームエネルギーが0~3MeVまで100%分布、第1磁石の上流にφ5mmのコリメータ、第2、3番目の磁石間に5mm幅のスリット、を挿入した時の代表的な陽子ビームの軌道を示す。スリットはビーム軸から22.6mm離れた位置で、2MeVビームのエネルギー分散の最大を示す。図3に出発点(左)とシケイン通過後(右)のエネルギー分布の相違を示す。図から約1.5MeV以下の低エネルギービームが除外されていること及び、シケイン通過後の2MeVビームの個数は、ターゲット直後と比

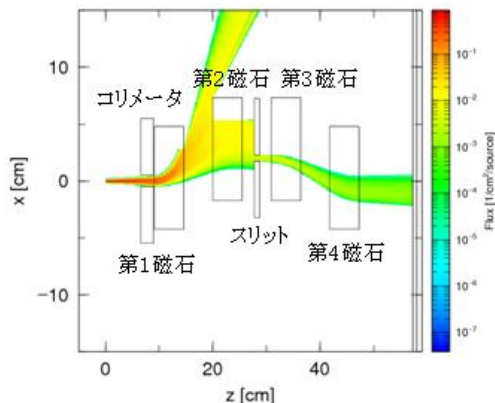


図2. PHITSコードで計算された~3MeVの陽子ビーム軌道。スリット幅は5mm

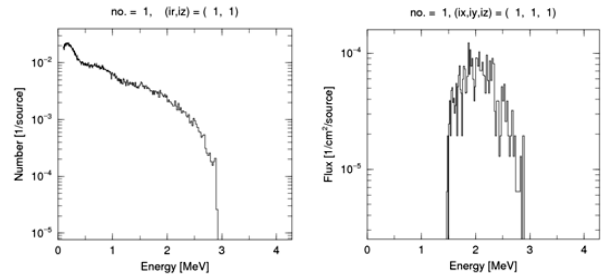


図3. ターゲット直後(左)/シケインマグネット通過後(右)のエネルギー分布の相違

較し 10^2 程度少なくなるが、総数とし 10^5 個以上は確保できるという計算結果を得た。

4. 磁場測定とアライメント

4.1 磁場測定と結果

H型磁石各々の磁場特性を、トランスバース型ホールプローブ(F.W.BELL HTR61-0608-051型)を用いて測定した。測定方法は従来と異なり磁石本体を可動、プローブは固定とし測定精度の向上に努めた。これは磁石が小型(W146-D51-H99mm)軽量である利点を最大限生かしたもので、プローブの傾きなどから生じる測定エラーを改善する一つの方法として有用であった。この測定で得た磁場分布のデータを図4に示すが、(a)はビーム進行軸方向の絶対値、(b)はX軸方向の中心磁場に対する比率、を示す。中心磁場は0.78T、有効磁場長は54.2mm、X軸方向の良磁場領域(±1%以内)は機械中心から±5mmと計測され、POISSONコードを使った計算結果と±1%の誤差の範囲内で合致した。又、4台の磁場のバラツキも誤差の範囲内であった。

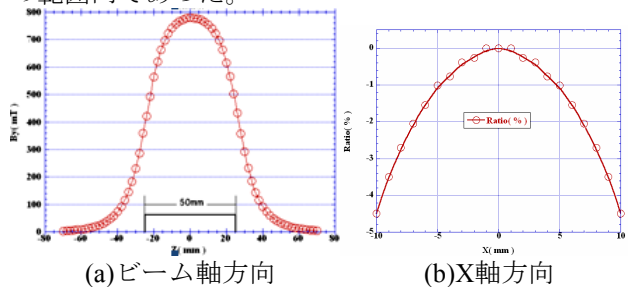


図4. H型偏向永久磁石の磁場分布

4.2 磁石相互間のアライメント

オフラインで4台の磁石相互間をアライメントする準備として1) 仮想上のビームラインを約10m離れて対向するレーザー墨出し器(マツキ社製ML-300XGライン幅1mm)のレーザー光とし、2) 磁石の上・下流側にX、Y軸位置をアライメントするための測量用糸の取り付け、を行い測量用糸とレーザー光が完全に合致するよう慎重に調整した。今回のアライメント精度については±0.2mm以下と見積っている。隣り合う磁石間寸法は有効磁場長の54mmとし、第2,3番目の磁石はビーム軸から19mmシフトさせた位

置に固定したが、これはビームが磁石の良磁場領域を通過するよう工夫したものである。

5. 実ビーム試験

シケインマグネットを実験チェンバー内に設置し(図5)、ターゲットから約2m離れた場所に取り付けたTOF検出器によって陽子ビームの特性を計測した。結果、スリットが15mmの位置で1.5MeV以下の低エネルギービームがカットされ、中心エネルギー2.2MeVの比較的安定した準単色陽子ビームを得ることが出来た。図6にこの時のエネルギー分布とショット毎のバラツキを示すが、中心エネルギーは全てのショットで変化せず、安定度は±20%以内であった。次に、7.5 μm厚のカプトン膜が加工されているビーム取り出し窓をターゲットから0.9m下流側に取り付け、陽子ビームを空気中に取り出した時のビーム形状や位置をモニタした。この時使用した薄膜蛍光板は我々が新たに開発したリアルタイム型ビーム位置・形状モニタで、ZnS(Ag,Al)超微粒子蛍光体を16 μm厚の母材に添付したものである。この時の蛍光板モニタの配置図が図7上図で、ビーム取り出し窓から約5cm離れた場所に設置した。このモニタで得たビーム画像が図7の下図であり、ビーム径はφ10mm、位置はアライメント用のビーム軸と良く合致していたが、ビーム形状の均一性については若干の濃淡が見られた。

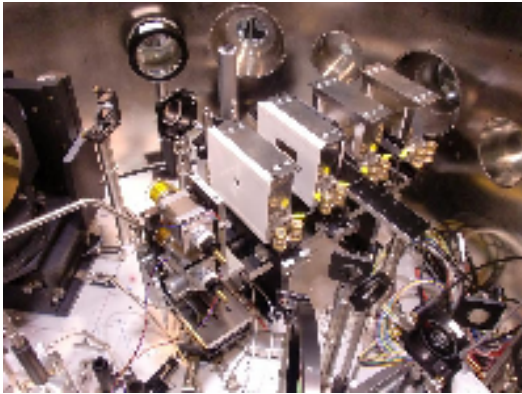


図5. 実験チェンバー内に設置されたシケインマグネット及び周辺機器

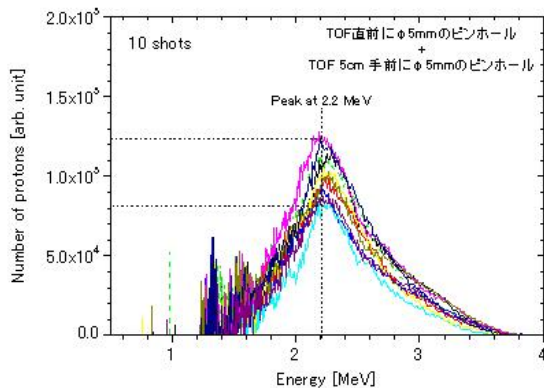


図6. TOFで計測されたビームエネルギー分布と20ショット分の変動測定

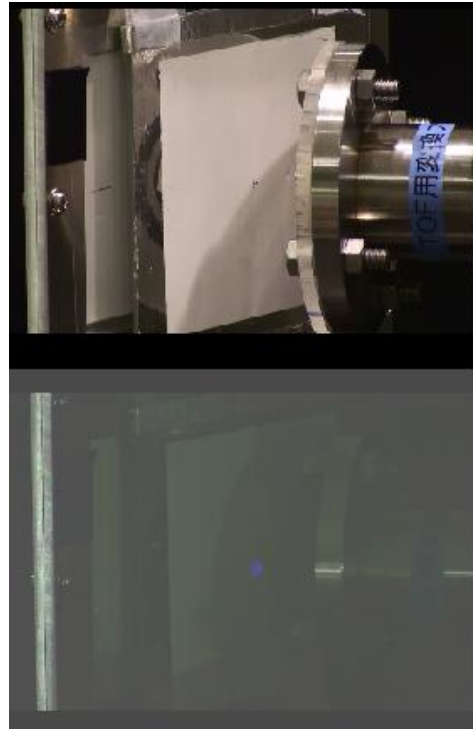


図7. 薄膜蛍光板とビーム窓のレイアウト(上)とモニタされたビーム画像(下)

6. まとめと今後

H型偏向永久磁石4台で構成されたエネルギー選別用シケインマグネットと各々5mmφの穴径をもつコリメータ、スリットで構成されたビーム伝送系を構築し、中心エネルギー：2.2MeV、エネルギー拡がり1MeVのレーザー駆動型陽子ビームを生成した。結果、1ショット当たり：0.12Gy、±20%の安定度をもつビームを細胞照射実験に供給することが出来た。

永久磁石型シケインは省スペースかつ強磁場の利点をもつ一方、電磁石型とは異なり磁場固定のため種々のエラーを補正する機能を有さない。従って、1)4台のH型磁石の磁場特性を合致させるよう製作時の加工精度を上げる、2)3次元可動架台などを用いて4台の磁石相互間のアライメントを正確に行う、3)ターゲットから生成される陽子ビームのビーム軸に対してシケインを理想的な配置にアライメントする、ことが非常に重要と言える。しかし3)のアライメント精度に関しては、陽子ビームのショット毎のビーム軌道の変動を正確に把握できていないため、その評価は今後の課題である。

参考文献

- [1] H Sakaki, et al., “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”, in these Proceedings.
- [2] Stephen P. Hatchett et al., “Electron, photon, and ion beams the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets”, Phys. Plasmas 7, 2076(2000)
- [3] M.Nishiuchi et al., Appl. Phys. Lett. 94, 061107(2009).
- [4] 二六製作所 川瀬雅史氏 Private Communication