

加速器医療応用 1・重イオンビーム 2

1. はじめに

先の講義(加速器医療応用 1 重イオン 1)で概説した『普及小型炭素線』加速器システムを構成する炭素シンクロトロンと高エネルギービーム輸送系について、研究用の装置との違いを含めて述べる。

2. 炭素シンクロトロン

2.1. ラティス

電磁石誤差に対する感受性が比較的小さな FODO ラティスとして、出来るだけコンパクトなラティスにするために、放射線医学総合研究所で考案されたラティス[1]を採用した。このような FODO ラティスでは、トランジション $\gamma(\gamma_t)$ と水平方向のチューンは同程度になるため[2], FODO セル数の少ない小型シンクロトロンの γ_t は低くなる。ここで述べるシンクロトロンでは、 $\gamma_t=1.71 \sim 1.76$ で、400 MeV/u 時のローレンツファクターは 1.43 なので、出射エネルギー付近での運転には注意が必要となる。

2.2. 閉軌道補正

閉軌道誤差は、ベストコレクター法[3]を用いて補正する。軌道補正のシミュレーション結果を図 1 に示す。この補正は、実際のビーム調整においても有効に機能している。

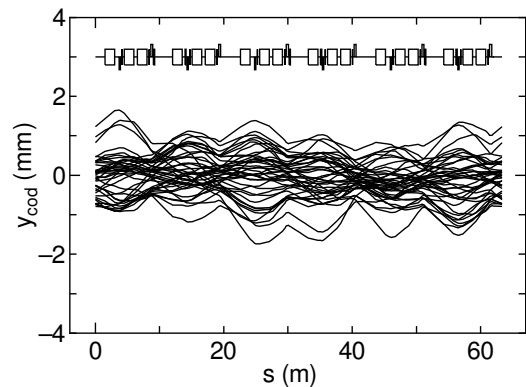
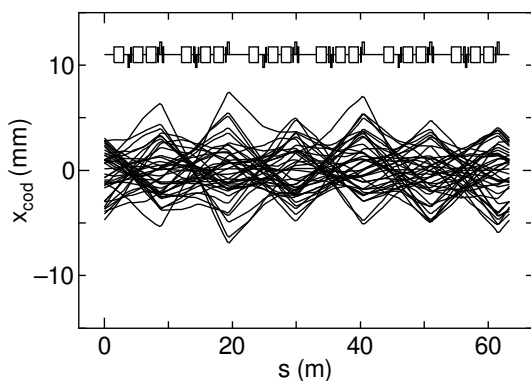


図 1-(a): 補正前の閉軌道誤差。機器誤差の異なる 40 ケースのラティスについて計算。

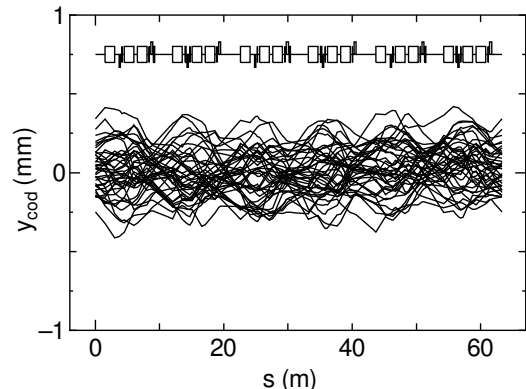
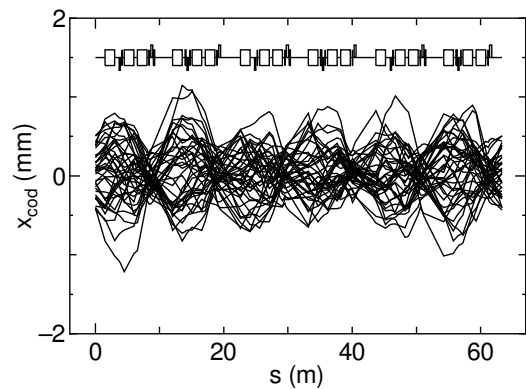


図 1-(b): 補正後の残留閉軌道誤差。

2.3. 渦電流による 6 極磁場

偏向ダクトに流れる渦電流により発生する 6 極磁場の時間変化(加速時, 計算結果)を図 2 に示す。ビーム調整時には、この時間変化を考慮してクロマティシティ調整用 6 極電磁石 SF/SD を励磁できるようにしている。

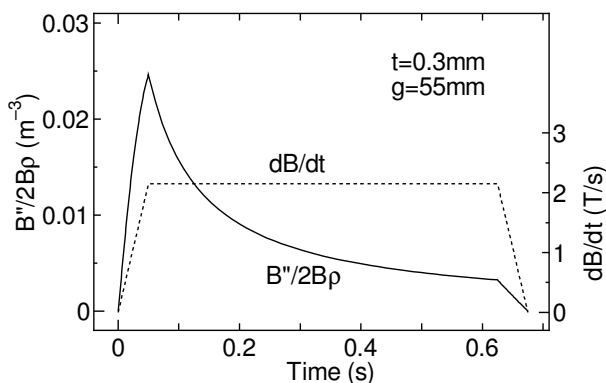


図 2：渦電流による 6 極磁場強度の時間変化。

2.4. 空間電荷によるチューンスプレッド

粒子数が 5×10^9 の場合のチューンスプレッドを、バンチングファクター 0.4 として、WinAgile[4] を用いて計算した結果を図 3 に示す。チューンスプレッドがノーマル 6 極磁場により励起される偶発共鳴 $\nu_x + 2\nu_y = 4$ に達する可能性があるため、この共鳴を 6 極電磁石 SD の補正コイルを用いて補正できるようにしている。

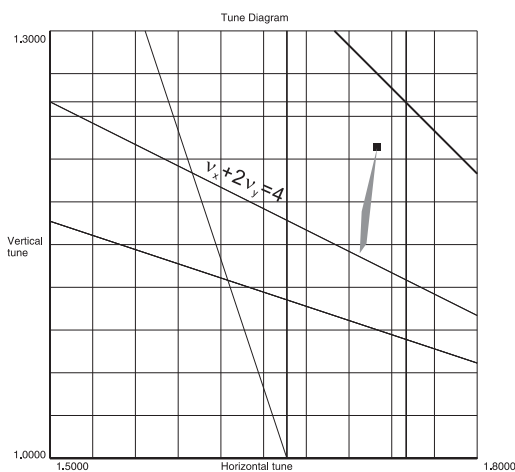


図 3：4MeV/u 時のインコヒーレントチューンスプレッド。

2.5. 4 極電磁石のフリンジ磁場の影響

粒子トラッキングでダイナミックアパチャーを計算した結果を図 4 に示す。フリンジ磁場の影響は、3 次の輸送行列[5]をシンプレクティック化[6]したものを用いて計算した(ハードエッジの寄与のみを含めた)。必要なアパチャーが得られているが、フリンジ磁場の影響が見えている。今後、Lie

変換を用いた粒子トラッキング[7,8,9]と比較することを予定している。

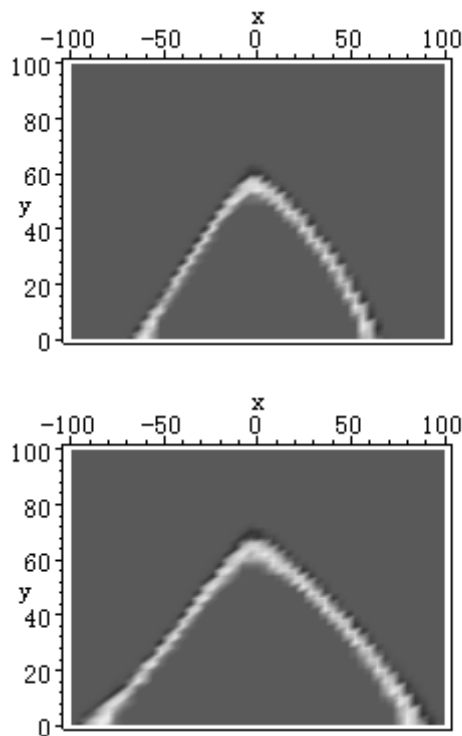


図 4：4 極電磁石のフリンジ磁場の影響。 $\Delta p/p=0$ の場合。上図：フリンジ ON, 下図：フリンジ OFF。

2.6. 入射

2 台のバンプ電磁石を用いてバンプ軌道を形成し、25 ターン入射を行う。入射効率の設計値は 43%程度で、ビーム調整の結果に近い。バンプ軌道を図 5 に示す。

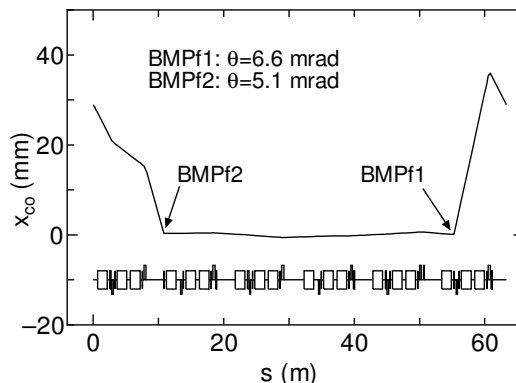


図 5：入射バンプ軌道。

2.7. 高周波加速

高周波加速のシナリオを図 6 に示す。図 7 に示すように、加速空洞に 2 倍の高調波を加えてフラットトップパケットにすると、バンチングファクターを 0.5 程度まで大きくでき、空間電荷によるチューンスプレッドが $v_x+2v_y=4$ に達しないようにできる可能性がある。上述の共鳴補正と共に、高周波捕獲後の低エネルギー領域でのビーム損失低減のために用いる。

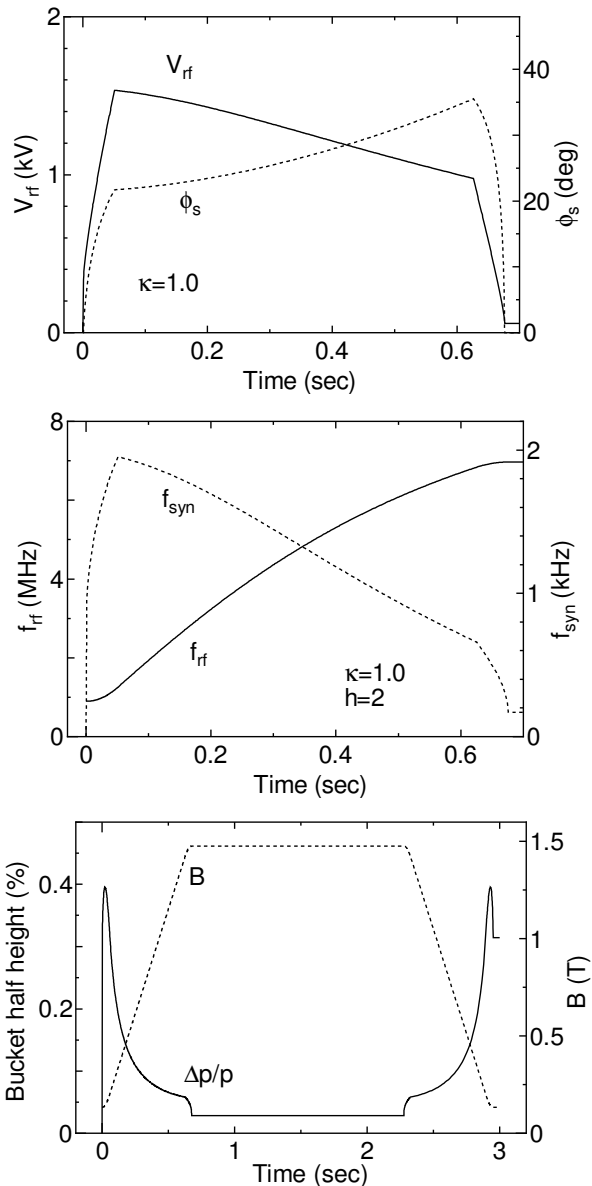


図 6：高周波加速のシナリオ。断熱捕獲を行い、加速中の RF バケットの面積を縦方向のビームエミッタンスに等しくしている。

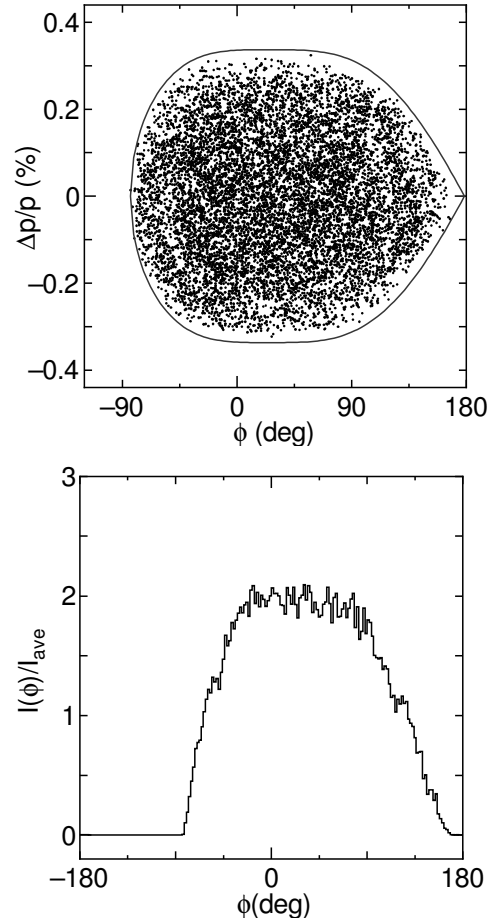


図 7：2 倍の高調波を加えた場合の縦方向の粒子分布。上段図の曲線は RF バケット。

2.8. 出射

1/3 整数共鳴を用いた遅い出射を行う。セパトリクスを図 8 に示す。3 台のバンプ電磁石を用いて、出射点近傍にバンプ軌道を形成する。バンプ軌道を図 9 に示す。

呼吸同期照射時に一旦呼吸ゲートが閉じた後に再度ゲートが開く場合や、照射領域を変更する際に、ビーム利用効率を上げるために、同一フラットトップ内で出射を中断・再開する複数回出射が可能になっている。出射の中断・再開のビームシミュレーション結果を図 10 に示す。ビーム試験の結果、出射の中断・再開をシミュレーションと同様に行うことが可能なが分かっている。

セプタム電極 ESD で切り取られたビームは、セプタム電磁石 SM1,2 により高エネルギー輸送

系に誘導される。ESD~SM2 の出射ビーム軌道を図 11 に示す。

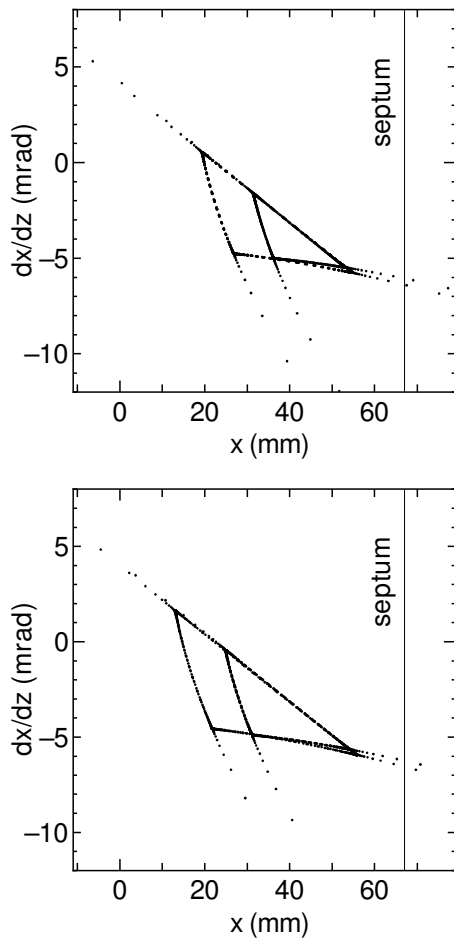


図 8：出射点におけるセパトリクス。上段：140 MeV/u 出射時，下段：400 MeV/u 出射時。出射エネルギーに依存した出射角の変化は小さい。

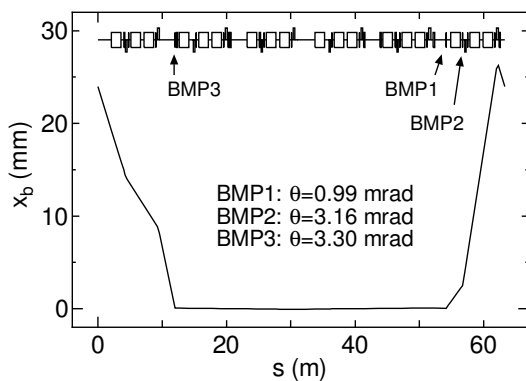


図 9：出射バンプ軌道。

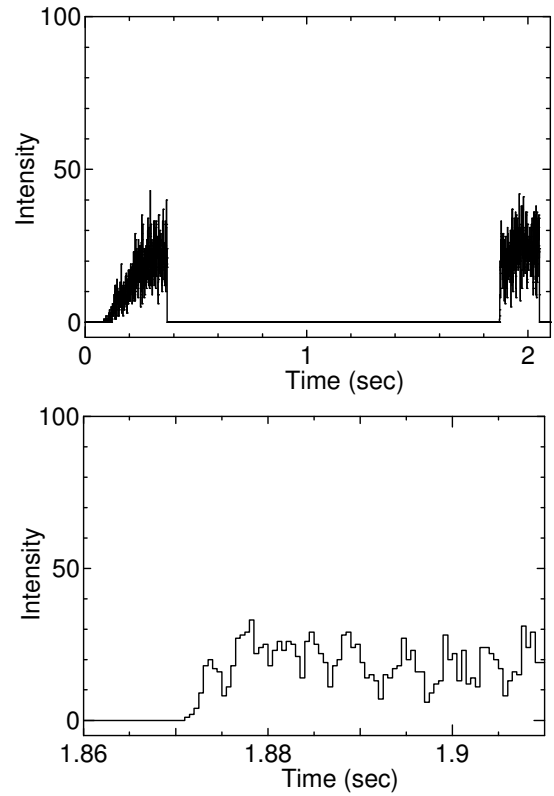


図 10：出射中断・再開のシミュレーション結果。下段は出射再開時付近の拡大図。

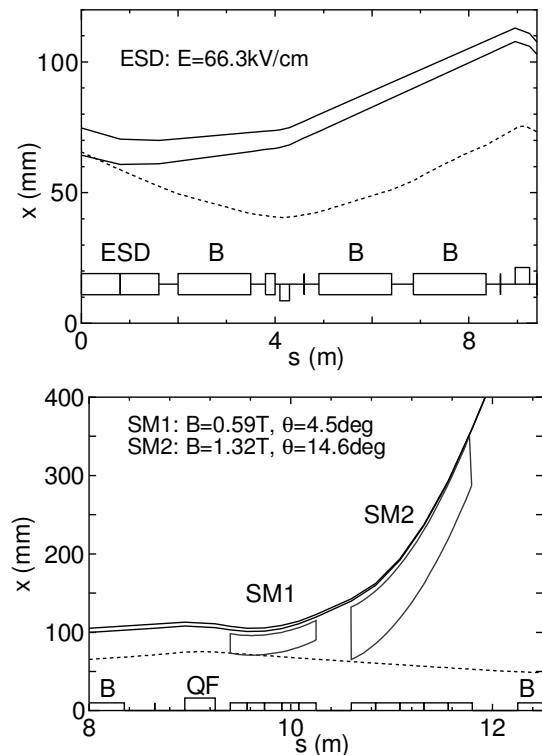


図 11：出射チャンネルにおける出射ビーム軌道。

3. 高エネルギービーム輸送系

軌道補正は、ステアリング電磁石とその下流のスクリーンモニターを用いた1対1補正とzeroing法[10]を用いる。軌道補正のシミュレーション結果を図12に示す。この補正は、実際のビーム調整においても有効に機能している。

ビーム調整時には、偏向電磁石と4極電磁石の励磁設定はほぼ無修正で輸送系終端までビームを輸送できている。

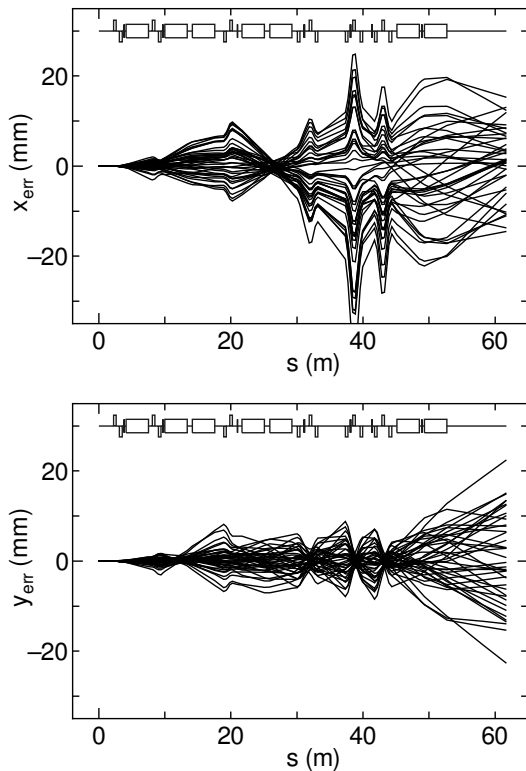


図12-(a)：補正前の閉軌道誤差。機器誤差の異なる40ケースのラティスについて計算。

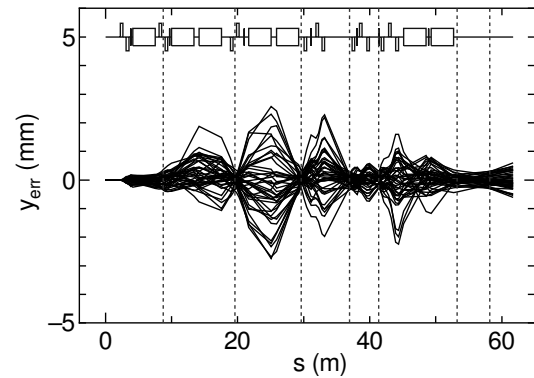
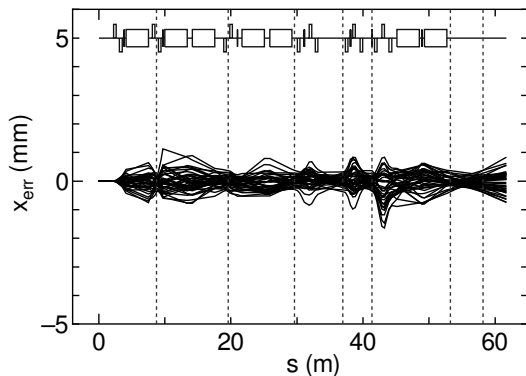


図12-(b)：補正後の残留閉軌道誤差。縦点線はスクリーンモニターの位置。

4. ビーム調整支援プログラム

ビームコミッショニングでは、上述の設計に用いたビーム解析・シミュレーションコードに、調整対象固有の加速器モデルをサブルーチンとして加えたビーム調整支援プログラムを用いている。加速器モデルには、機器の単体試験の結果が反映されている。偏向電磁石の割合が大きく曲率半径が小さな小型シンクロトロンでは、偏向電磁石の影響が大きいため、偏向電磁石の詳細な磁場マッピングのデータを用いた3次元磁場中のシムプレクティックトラッキング[11]により、偏向電磁石のモデル化、共鳴によるビーム損失の評価および出射条件の決定等を行っている。

調整支援プログラムを用いることにより、炭素シンクロトロンの調整開始から初出射までに6日、高エネルギービーム輸送系終端までの輸送を短期間で行うことができています。

調整支援プログラムの使用は、ビームコミッショニングのごく初期を除くビーム調整のシステムティックな実施に有効であるだけでなく、コミッショニング終了後においても、各地にある装置の状態の連絡・把握に役立っている。

5. おわりに

企業が粒子線治療装置を製造する場合、装置の信頼性や保守性を確保しつつサイズやコストの低減を考えなければならないが、その際に、公的研究機関等による加速器の研究成果やOHOをはじめとする加速器スクールの教科書が非常に役に立っています。加速器研究者の方々に感謝しま

す。本稿に記載した炭素加速器の設計・製造や調整には社内・社外の多くの方々から寄与しています。特に、ラティス設計やビーム調整の折々に、放射線医学総合研究所の研究者の方々から有益なコメントや励ましを頂きました。

参考文献

- [1] T. Furukawa et al., “Design of Synchrotron and Transport Line for Carbon Therapy Facility and Related Machine Study at HIMAC”, Nucl. Instr. and Meth. **562** (2), p.1050 (2006).
- [2] E.D. Courant, H.S. Snyder, “Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron”, Ann. Phys. **3**, p.1 (1958).
- [3] 福間均, “閉軌道の補正”, OHO’88, III (1988)..
- [4] P.J. Bryant, “AGILE, A Tool for Interactive Lattice Design”, EPAC’00, p.1357 (2000).
- [5] H. Matsuda, H. Wollnik, “Third Order Transfer Matrices for the Fringe Field of Magnetic and Electric Quadrupole Lenses”, Nucl. Instr. and Meth. **103**, p.117 (1972).
- [6] D. Douglas, E. Forest, R.V. Servranckx, “A Method to Render Second Order Beam Optics Programs Symplectic”, IEEE Trans. Nucl. Sci. **32**, p.2279 (1985).
- [7] E. Forest, J. Milutinovic, “Leading Order Hard Edge Fringe Fields Effects Exact in $(1+\delta)$ and Consistent with Maxwell’s Equations for Rectilinear Magnets”, Nucl. Instr. and Meth. **A269**, p.474 (1988).
- [8] J. Irwin, C.X. Wang, “Explicit Soft Fringe Maps of a Quadrupole”, PAC’95, p.2376 (1995).
- [9] D. Zhou et al., “Explicit Maps for the Fringe Field of a Quadrupole”, IPAC’10, p.4500 (2010).
- [10] T. D’Ottavio et al., “User Control of the Proton Beam Injection Trajectories into the AGS Booster”, PAC’91, p.896 (1991).
- [11] Y.K. Wu et al., “Explicit Symplectic Integrator for s-dependent Static Magnetic Field”, Phys. Rev. E **68**, 046502 (2003).