

3D スポットスキヤニングを可能とする速い繰り返し粒子線ドライバー用 誘導加速シンクロトロン

A Compact Hadron Driver for Cancer Therapies using Continuous Energy Sweep Scanning

高山健^{#, A, B, C, D}, 門馬卓海^{A, C}, 安達利一^{A, B}, 川久保忠通^A

Ken Takayama^{#, A, B, C, D}, Takumi Monma^{A, C}, Toshikazu Adachi^{A, B}, and Tadamichi Kawakubo^A

^A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^B) The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^C) Tokyo Institute of Technology

^D) Tokyo City University

Abstract

To realize a slow extraction technique in a fast-cycling synchrotron, which allows energy sweep beam scanning, a zero momentum-dispersion $D(s)$ region and a high flat $D(s)$ region are necessary. The proposed design meets both requirements. The lattice has two-fold symmetry with a circumference of 52.8 m, a 2-m dispersion-free straight section, and a 3-m-long large flat dispersion straight section. Assuming a 1.5-T bending magnet, the ring can deliver heavy ions (200 MeV/au) at 10 Hz. A beam fraction is dropped from the barrier bucket at the desired timing, and the increasing negative momentum deviation of this beam fraction becomes large enough for the fraction to fall in the electrostatic septum extraction gap, which is placed at the large $D(s)$ region. The programmed energy sweep extraction enables scanning beam irradiation on a cancer site in depth without an energy degrader, avoiding the production of secondary particles and the degradation of emittance. Details of the lattice parameters and computer simulations for slow extraction are discussed.

1. はじめに

これまで速い繰り返しシンクロトロンで、エネルギースイープが可能な取り出し手法は実現していない。米国の粒子線セラピーを商売とするベンチャービジネスが口頭発表^[1]にてBNLと共同開発している炭素線加速器で可能だと言及した事はあったが、実態は何も知られていない。

速い繰り返しシンクロトロンで「エネルギースイープ取り出し」が可能であれば、呼吸と同期して動く臓器などへの3Dのスポットスキヤニングが実現できる筈である。10 - 30 Hzで稼働する速い繰り返しシンクロトロンではリング周回時間程度の短時間(数100ナノ秒以下)で加速器リング内に存在するビームを一度に取り出すのが普通である。そのような運転モードで稼働する速いシンクロトロンから望むエネルギー幅に渡って、連続的に、数十ミリ秒の時間範囲内で、取り出しビームのスピル強度が制御された格好で1加速サイクル内に取り出し得る案が最近著者らによって提案された^[2]。

従来の高周波を使った加速手法では簡単ではない。著者等に良い考えはない。ここでは誘導加速シンクロトロン^[3]に採用されている誘導加速電圧パルスによってビームを加速・閉じ込め方式を今回の目的にどう使うかを簡単に紹介する。

使用する加速器は今回の目的に不可欠な理想的な運動量分散関数を持ったラッセを前提とする。そこでは誘導加速装置、入射機器を置く領域は運動量分散関数はゼロ、静電セプタムを使った取り出し域は様で大きな分散関数を持つ。エネルギースイープの原理は比較的簡単である。縦方向ビームハンドリングの大きな自由度を持つ誘導加速シンクロ

トロンでバリアーバケットに捕捉した粒子の一部を意図的に安定領域から零すのは容易である。加速電圧のパルス生成・消滅タイミングはターン毎に制御出来るので、このタイミングを時間の関数としてずらす事によって、粒子の一部に加速電圧不足を引き起こす事ができる。加速電圧不足の粒子は必然的にバリアーバケットから零れ、位相空間内を負の運動量域へドリフトする。この結果、その様な粒子の平衡軌道は取り出し域で最大となる。この平衡軌道がワイヤーセプタム位置を越えると、印加された静電場からの力を受け、偏向を受ける。取り出し後半部に位置する取り出し用電磁石によって、更なる偏向を受け、リング外へ取り出される。

次節から、これらの簡単な説明を行う。

2. エネルギースイープと深さ方向のスキヤニング

進行軸に垂直面内でのビームスポットスキヤニングはこれまでも多くの提案と実績があるので、ここでは取り上げない。遅い繰り返しシンクロトロンではフラットトップに達した磁場強度を階段状に下げながらビームを取り出す手法が実証されている^[4]。これは主電磁石のパターン電源のデリケートな制御と高周波減速との組み合わせで実行される。不連続ながら「エネルギースイープ取り出し」に他ならない。スイープの要する時間は秒程度であり、速い繰り返しシンクロトロンと2桁程度のスイープ時間幅の差がある。

ここで述べる「エネルギースイープ取り出し手法」は図1に見られる様に、ガン部位の最深部から最浅部までを1加速サイクル内にブラッグピーク位

[#] takayama@post.kek.jp

置のスイープでカバーするものである。

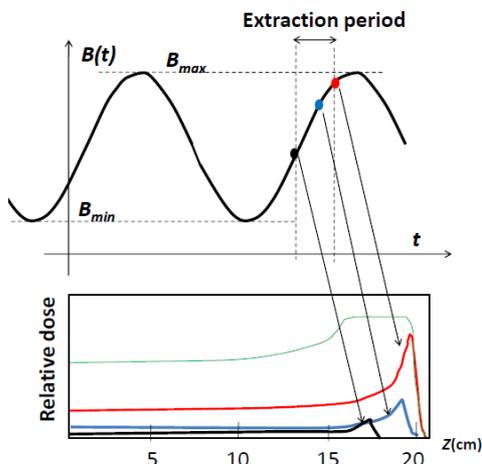


Figure 1: Extraction in a single acceleration cycle and Change of Bragg peak positions.

3. 理想的な加速器リングラティス

加速器自身は誘導加速シンクロトロンを前提にしているの、大型の入射器はない。ECR イオン源とレーザーアブレーションイオン源が 200 kV の高圧プラットホームに収まっているだけである。取り出された完全電離炭素イオンは静電入射キッカーによって 1 ターン入射が行われる。リングは周長 52.8 m、2 種類の FODOF セルからなる 2 階対称ラティスで構成される。2 m 長の完全な運動量分散ゼロ域と 3 m 長の一様平坦な運動量分散関数 (6 m) 域をそれぞれ 2 か所持ち、入射部・加速部とエネルギースイープ用の取り出し部として用いられる。又、速い取り出しを可能にする $\pi/2$ のベータトロニック位相進みを持つ直線部を有する。図 2 は加速器全体構成である。表は加速器仕様とビームパラメーターを表す。

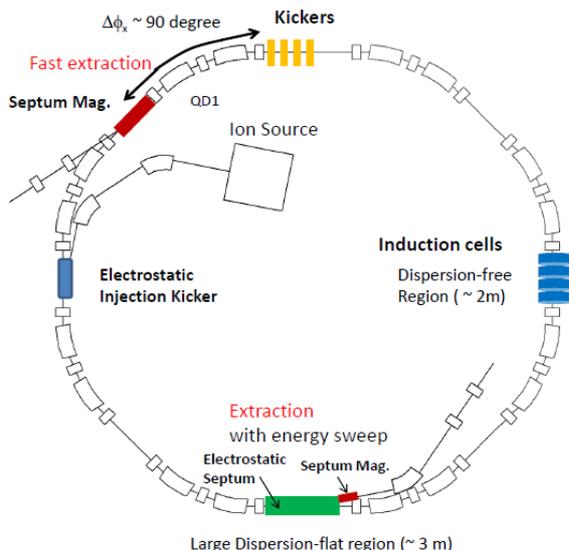


Figure 2: Compact Hadron Driver for Cancer Therapies based on Induction Synchrotron.

表 加速器・ビーム仕様

Energy	656 MeV for proton 200 MeV/nucleon for $A/Q = 2$ ion
C_0	52.8 m
Ion species	Gaseous/metal ions
Ion source	Laser ablation IS ECRIS
Injector	200 kV (electrostatic)
Ring	Fast cycling (10 Hz) $B_{max} = 1.5$ T $\rho = 2.8662$ m FODOF cell with edge focus of B Mirror symmetry $v_x/v_y = 1.3143/1.4635$ 2m long dispersion-free region 3m long flat large dispersion region $a_p = 0.273088$ $\gamma_T = 1.92$, $E_T = 864.7$ MeV
Acceleration	Induction cells driven by SPS employing SiC-MOSFET $V_{acc} = \rho C_0 dB/dt$ (max 7 kV)
Vacuum	10^{-8} Pa

図 3 にラティス関数を示す。

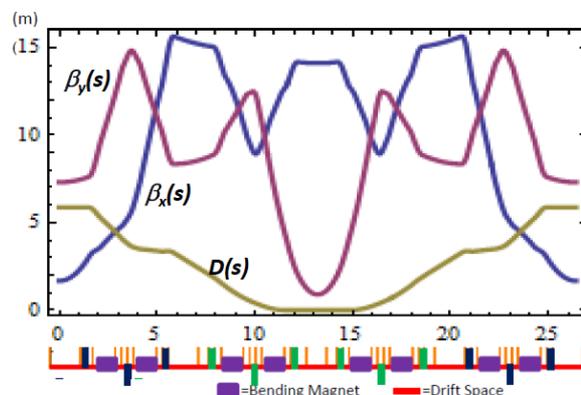


Figure 3: Lattice Functions for 1 Super-periodicity.

4. 加速と取り出し

緒言に述べた様に、加速、閉じ込めは誘導パルス電圧で行う。バリアー電圧で閉じ込めたイオンパルスの取り出し開始時までは、粒子バンチの全域を覆う様なタイミングで加速電圧を発生しておくが、取り出し時間帯になったら 1 ターンで、加速電圧パルスの生成タイミングを変化させてやる。具体的には加速電圧パルスの立下りのタイミングと図 4 の右側のバリアー電圧パルスの立ち上がり時間タイミング近傍に移す。こうすると閉じ込められた粒子集団のテール域に存在する粒子の加速電圧が不足する。図 4 に示す様に、何れ、バリアーバケットから脱落す

し始める。この操作はバリアーの高さを意図的に下げた事と等価である。シンクロトロン運動により、負の運動量ズレを持つ粒子は時間と共にバンチテール側に継続的にドリフト移動して来るので、一部はやはりバリアーバケットから脱落する。

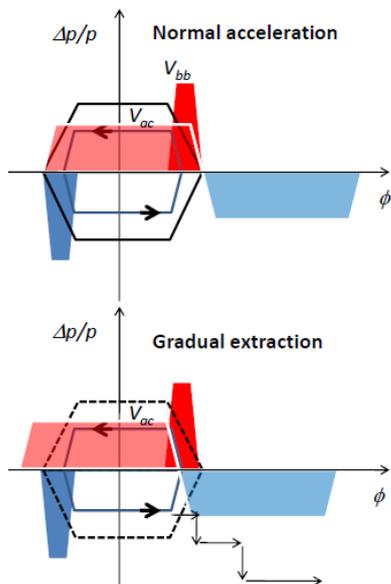


Figure 4: Barrier bucket and acceleration voltage pulse with its reset voltage pulse (upper). Tracks of particles that have left the trapping region encircled by a broken line (lower).

以上の運動の様子をシミュレーションで追うのは比較的簡単である。25 msec から取り出しを開始し、約 4 msec 後の位相空間上の粒子分布を示している。予想通りの振る舞いである。

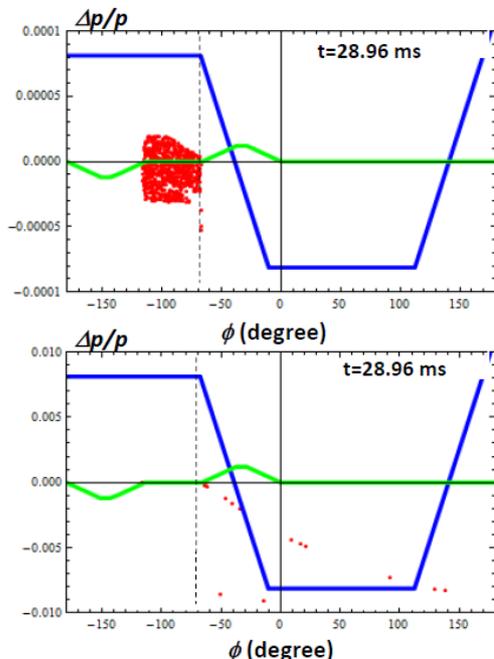


Figure 5: Phase plot of macro particles with V_{bb} and V_{ac} (note the vertical scale).

バリアーバケットから脱落した粒子の運動量ズレが -1%になると、静電セクタムを置いた場所での変位は -6 cm となり、100 kV 以上の高圧を印加したセクタムワイヤーと電極の間に入る。その後は図 6 示す様な軌道を描き加速器リング外に出て行く。

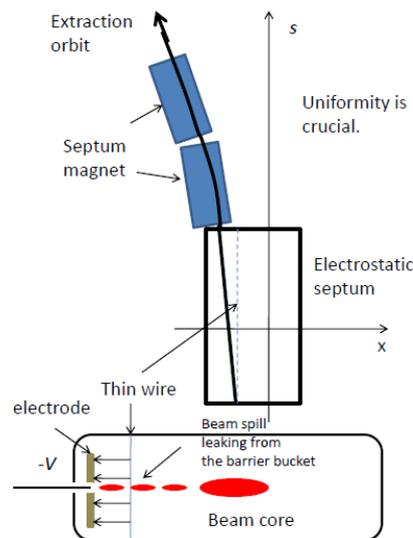


Figure 6: Schematic view of extraction.

以上のプロセスによりビームは連続的にエネルギーを変えて、取り出される。ビームスプillage強度制御は単純に V_{ac} パルスの移動速度を制御だけで行う。論文 2 に詳述している。エネルギーの異なるスプillageを同じ軌道を維持して標的まで伝送させるには静電セクタムを含め、取り出しラインの電磁石も、加速器リングの主電磁石で同じ励磁パターンが要求される。以上についても論文 2 の参照を期待する。

結論

エネルギースイープ取り出しが可能な速い繰り返し粒子線ドライバーが提示された。加速器として成立する上での鍵となる技術に関して議論された。

参考文献

- [1] J. P. Lidestri, S.G. Peggs, D. Trbojevic, and D.J. Brenner,, "RCMS Status and Future Plans", presented at *Asian Forum for Accelerators and Detectors*, in Melbourne, Jan. 15-16, 2014.
- [2] Leo Kwee Wah, T. Adachi, T. Kawakubo, T. Monma, D. Tanuja, and K.Takayama, "A Compact Hadron Driver for Cancer Therapies using Continuous Energy Sweep Scanning", submitted to *Phys. Rev. ST-AB* (2015).
- [3] K. Takayama T. Yoshimoto, M. Barata, Leo Kwee Wah, Liu Xingguang, T. Iwashita, S. Harada, T. Adachi, T. Arai, D. Arakawa, H. Asao, E. Kadokura, T. Kawakubo, H. Nakanishi, Y. Okada, K. Okamura, K. Okazaki, A. Takagi, S. Takano, and M. Wake, *Phys. Rev. ST-AB* **17**, 010101 1-6 (2014), K.Takayama and R.J.Briggs, *Induction Accelerators* (Springer, Heidelberg, 2011) Chapter 11 and 12.
- [4] K.Hiramato, talk at *Workshop on Hadron Beam Therapy of Cancer*, 27th April, 2009, Erice, Italy.