

Slow beam extraction at the HIMAC synchrotron

K. Noda^{A)}, T. Furukawa^{B)}, S. Shibuya^{C)}, T. Uesugi^{A)}, M. Muramatsu^{A)}

^{A)}National Institute of Radiological Sciences Anagawa, Chiba, 263-8555

^{B)}Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Yayoi-cho, Chiba, 263-8522

^{C)}Accelerator Engineering Cooperation, Anagawa, Chiba, 263-8555

Abstract

The HIMAC synchrotron has employed two slow-extraction schemes: the RF-KO extraction and the ordinary resonant extraction method. The former has been utilized mainly for the cancer therapy, while the later for counter experiments in the physics research. In both extraction schemes, the horizontal RF field with mono frequency, corresponding to the tune around stop-band, can suppress the spill ripple sufficiently. The paper describes the experimental result on this method.

1 はじめに

HIMAC[1]では、1994年6月から重粒子線がん治療の臨床試行研究を開始し、これまで、1600名を超える治療を行ってきた。同時に、重粒子線の医学応用に関連した基礎研究も共同利用研究として進められてきた。これらの研究を支えるために、HIMACでは、その維持管理および性能向上に対する多大な努力が注がれてきた[2]。特にシンクロトロンでは、治療照射の高精度化のために取り出しビームの時間構造の改善が行われてきた。HIMACシンクロトロンの遅いビーム取り出しには、RF-KO法[3,4]と従来型共鳴取り出し法の2種類の遅いビーム取り出し法が採用されている。RF-KO法は、スピルリップルは大きいですが、ビームON/OFFに対する高速応答性から呼吸同期照射法[5]に用いられている。一方、従来型共鳴取り出し法は、デバンチビームに対してもスピルリップルが小さいためにカウンター実験に利用されている。しかしながら、治療照射の精度のさらなる向上を狙ったスポットスキニング法[6]を実現させるために、RF-KO法でのリップルを10%程度に低減させる必要がある。また、従来型取り出し法においても1秒を超える長スピルにした場合には、主電源の1200Hz電流リップルに起因したスピルリップルが非常に大きくなり、改善が要求されていた。この2種類の取り出し法に有効なリップル低減策としてストップバンド近傍のチューンに対応した単一周波数の水平方向RF電場を印加する方法を試みた結果、両者ともに著しいリップルの低減に成功した。

ここでは、リップル低減法を中心としてHIMACでの遅いビーム取り出しについて報告する。

2 RF-KO法でのリップル低減

RF-KO法は、ベータトロン振動との共鳴条件を満たしたRF電場を印加する事により水平方向にビームを加熱しセパトリックスからビームを取り出す方法である。その最大の特徴は、RFをON/OFFする事により容易にビームをON/OFFできることである。一方、最大の欠点はスピ

ル・リップルが非常に大きくなる事で、ほぼ100%のリップルを生じる。そこで、リップルが大きくなる要因を探るための研究を行った結果、以下のような事が判った[7]。

HIMACでのRF-KO法では、3次共鳴でのチューンの振幅依存性に対応するために、水平方向RFに周波数変調(FM)を施している。この取り出し過程は、セパトリックス内部のビームをセパトリックス境界まで拡散する過程と境界から不安定領域に取り出す過程の二つから成り、RF-KO電場の周波数が取り出し領域(Extraction Region;ER)のチューンに対応した時にビームが取り出される。しかしながら、周波数が拡散領域(Diffusion Region;DR)のチューンに対応している時にでも、クロマティシティーとシンクロトロン振動によるチューンの振動によってもビームを取り出すことができる。これは、シンクロトロン振動によって水平方向のチューンが共鳴チューンに近づきセパトリックスが小さくなるためである[8]。図1に示すように、この一連のビーム取り出しがFMの繰り返し周期に同調して起きる事になる。これが、RF-KO法でのスピル・リップルの原因である。

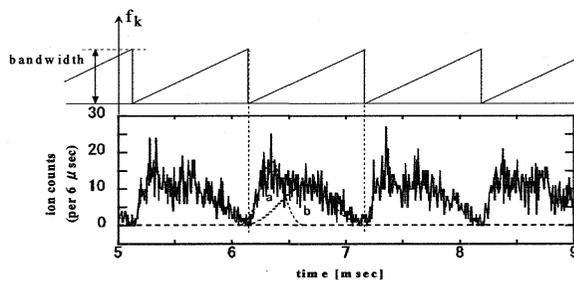


図1. RF-KO法でのスピルリップル。上図はFMによるRF-KO電場の時間変化、下図はビームスピル。下図のピークaは周波数が取り出し領域のチューンに対応した時に取り出されるビーム、ピークbはシンクロトロン振動で取り出されるビーム。

このように、FM一周期でのスピル構造生成のメカニズムがわかると、RF-KO電場の中心周波数、帯域、クロマティシティーを制御する事によりFM一周期のスピルを正弦波的な構造にすることができる。この時、FMの繰り返しの位相を180度ずらしたもう一組のRF-KO信号を導入し、元のRF-KOに加えてやると、原理的には、スピル構造はリップルが無くなり直流ビームになる。我々は、この方法をダブルRF-KO法[9]と呼び、この方法により、リップル強度を σ で70%から25%まで改善する事ができた[10]。この時のリップルの周波数成分は、(1)シンクロトロン周波数、(2)二つのFMを加えたことによるFM繰り返し周波数の2倍成分と(3)それで生じる振幅変調成分の三つである。

さらにリップルを低減するためには、上記リップル要因を取り除く必要がある。特に要因(2)、(3)に関してはERでFMを印加していることが問題となる。言い換えると、周波数帯域に応じたビートによりリップルが生じることを意味している。そこで、ERのチューンに対応した単一周波数のRF-KO電場を印加することでビートを取り除ける可能性がある。これを試した結果を図2に示すように、リップル強度を15%まで低減できた。この時、印加する単一周波数RFの周波数は、ビートを避けるために、拡散領域の周波数と離しておく必要があり、また、振幅に関しても取り出し速度を除去すべきリップル周波数に応じて制御する必要がある。

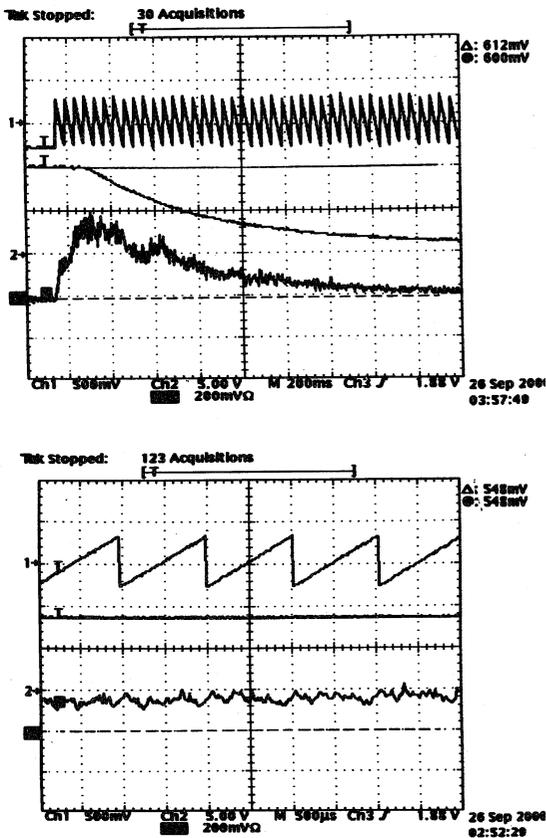


図2. ダブルRF-KO法に単一周波数のRF-KO電場を加えた場合のスピル構造。上：全体構造 (200ms/div)、下：上の拡大 (0.5ms/div)。

3 従来型取り出し法でのリップルの低減

従来型取り出し法とは、チューンを共鳴に近づけることでセパトリックスを縮小させビームを取り出す方法である。HIMACでもRF-KO法が実用化されるまで、この方法を用いて治療照射や基礎実験にビームを供給してきた。そのために、主電磁石電源の電流リップル低減をはじめとする改善が図られ[9,11]、その結果、図3に示すような低リップルのビームが得られた。この場合、コースティング・ビームであり、同時計数カウンタ-実験には非常に適したスピルである。

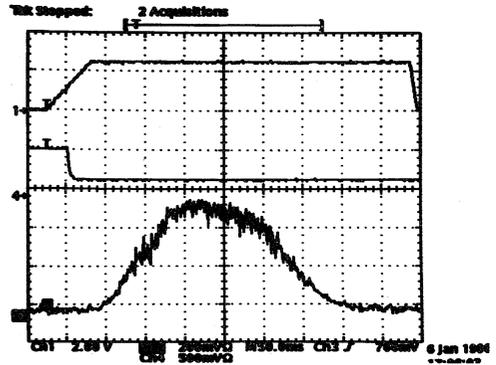


図3. 従来型3次共鳴取り出しでのスピルリップル。スピル長0.3秒、時間スケール：50ms/div。

しかしながら、スピル長を0.3秒から1.5秒程度まで延ばした場合、スピルには1200Hzの巨大なリップルが観測された。これは、取り出し速度が約5倍遅くなった事により、QF電源の1200Hz電流リップルの影響が相対的に大きくなったためである。図4(a)に示すように、特にエネルギーが低い場合には、その影響が顕著に現れる。このようなリップルを低減するためには、取り出し速度を制御する方法が考えられる。その方法の一つとして、単一周波数のRF-KO電場をセパトリックス近傍のチューンに対応させて印加し、エミッタンス増大させる方法を考案した。その結果、図4(b)に示すように、1200Hzのリップルをほぼ取り除く事ができた。

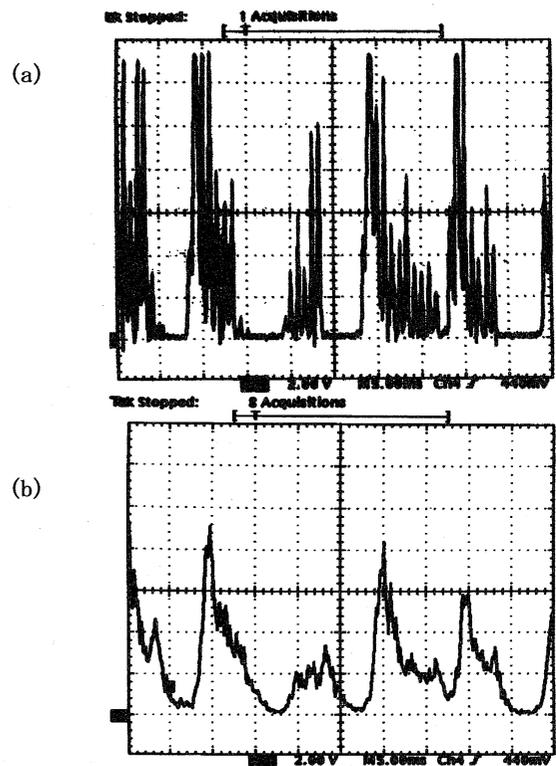


図4. 単一周波数RF-KOによる1200Hzリップルの低減。180MeV/nの場合。(a)RF-KOなし、(b)RF-KO有り。時間スケール：5ms/div。

しかし、図 4(b)から判るように、100Hz 成分は全く取り除けていない。これを調べるために、QF 電源の外部入力から一定周波数のノイズ成分を入れ、その状態で単一周波数 RF-KO を印加した場合のリップルの減衰率を測定した。その結果を図 5 に示す。図から判るように、各ノイズ周波数に対して、ほぼストップバンドのチューンに対応した周波数で RF-KO を印加した場合に、リップルが最小になる事が判る。これはセパトリックス近傍での取り出し速度を速めることがリップル低減に大きく寄与しているためである。さらに、図 6 にノイズ周波数の関数としてリップル減衰率を示す。ノイズ周波数が下がるに従い、リップル減衰率は小さくなっている。これは、RF-KO 電場による最適取り出し速度がリップル周波数に関係するためと考えられる。

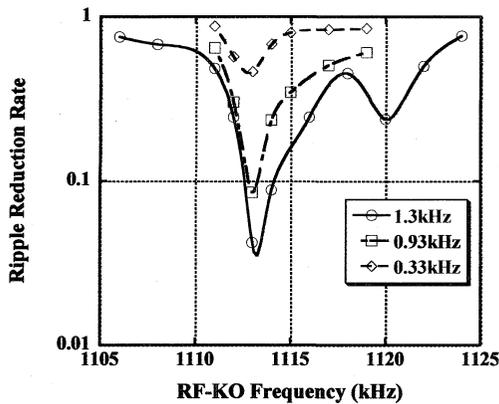


図 5. 各ノイズ周波数に対するリップル減衰率の RF-KO 周波数依存性。

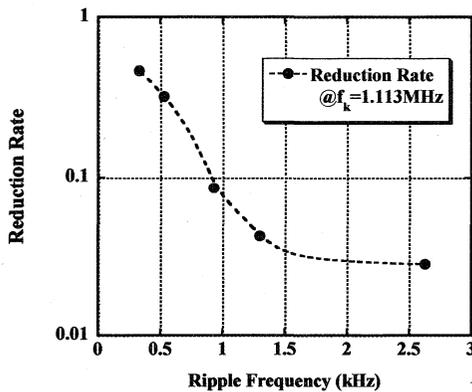


図 6. リップル減衰率のノイズ周波数依存性。

以上のように、単一周波数 RF-KO では低い周波数成分のリップル除去は難しい。そこで、低周波数のリップル除去のためにリップルバッシャ- [12] を用いている。この方法は、リップルの周波数解析を行い、特定の周波数成分をフィードフォワード的に逆位相で QF 電源のアクティブフィルタ-に外部入力することでリップルを低減する方法である。このリップルバッシャ-は、電力一次ラインの周波数変動に対応できるように PLL で作る U 相に同期した基本周波数を基準とし、その整数倍の周波数を最大 5 チャン

ネルまで加算合成する高調波発生器であり、各チャンネル毎に振幅と位相を制御できる。この方法により、50~300Hz のリップル周波数に対して 10~20dB のリップル減衰が可能である。また、リップルバッシャ-法の時間安定性に関しては、夜間のマシンタイムにおける 10 時間程度は無調整で運転できるが、翌日の夜間のマシンタイム開始直前には若干の位相調整を要する。

4 まとめ

RF-KO 法による遅いビーム取り出しは、電源リップルが大きい場合にスピルリップルを低減させる目的で研究開発が始まった [13]。RF-KO 法自体は、既に、粒子線がん治療では不可欠な呼吸同期照射法に実用化されているが、さらに高精度治療照射法であるスポットスキャン法へ向けたリップル低減、スピル全体のフラット化およびビーム遮断時間の高速化 [7,14] が進められている。従来型取り出し法への RF-KO 法の応用は本来の開発目的であったが、当初の予想に反し、50,100Hz といった低周波数リップルの除去に対する効果はあまり大きくなかった。しかしながら、kHz オーダーのリップルには大きな効果がある事が判った。同時に、単一周波数 RF-KO の印加は、従来型 3 次共鳴取り出しにおける取り出し末期でのビームの取り残しを減少させる効果も期待できる。

5 謝辞

本研究にあたり、AEC の皆さんには HIMAC 加速器の運転をはじめ大変お世話になりました。深く感謝します。また、本研究は HIMAC 共同利用研究として行われました。

参考文献

- [1] Y. Hirao, *et al.*, Nucl. Phys. A538 (1992) 541c-550c.
- [2] S. Yamada, Proc. 2nd APAC, Beijing (2001) pp.829-833.
- [3] M. Tomizawa, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A326 (1993) 399-406.
- [4] K. Noda, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A374 (1996) 269-277.
- [5] S. Minohara, *et al.*, Int. J. Rad. Oncology Bio. Phys., 2000;47:1097-1103.
- [6] E. Urakabe, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2540-2548.
- [7] K. Noda, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A492 (2002) 241-252.
- [8] T. Furukawa and K. Noda, Nucl. Instr. Meth. A489 (2002) 59-67.
- [9] K. Noda, *et al.*, Proc. 16th RCNP Int'l. Symp., 1997, Osaka, pp.238-241.
- [10] K. Noda, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A492 (2002) 253-263.
- [11] M. Kumada, Doctor Thesis: The Graduate University for Advanced Studies, 1996.
- [12] M. Kumada, *et al.*, Proc. 4th EPAC, London, 1994, pp.2338-2340.
- [13] A. Noda, INS-T-498 (1990) pp.63-67.
- [14] T. Fukukawa, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A503 (2003) 485-495.