

高速四極電磁石とRFKOを用いたシンクロトロンからのビーム取り出しに関する研究

- グローバルspill構造に関する研究 -

日大生産工 (学部) ○ 増淵 聖

日大生産工 中西哲也

1.はじめに

重粒子がん治療では、X線など従来の放射線治療に比べて、がん患部に線量を集中することができる。そのため、がん患部の周りの正常な細胞への影響が少なく、人体への負担が少なくて済む。[1] その照射法としてスポットスキニング照射法があり、それに適したシンクロトロンからのビーム取り出し法としてQAR法が提案されている。[2]これは、RFKOによりビームを拡散し、高速四極電磁石で取り出す方法である。初期座標の粒子分布はガウス分布なので取り出しビーム強度が徐々に減っていく波形を考えていた。しかし、高速四極電磁石の値によってそのグローバルspill構造が変わってしまうことがあった。その原因について検討する。

2.QAR法について

セパトリクスと呼ばれる粒子が安定してシンクロトロン内を周回できる領域の大きさを高速で変化させることによりビームを取り出す方法である。図1にQAR法の原理を示す。パルス四極電磁石(PQ)をONにすることでチューンが共鳴値に近づき、セパトリクスが収縮する。それによって、セパトリクス外にはみだした粒子が取り出される。四極電磁石をOFFにすることでセパトリクスがもとにもどる。そして、粒子が取り出されることによってできた隙間を、RFKO装置をONにすることで元の粒子で満たす。これを繰り返し粒子を取り出していく。

3.粒子の初期分布

粒子は、次式で示される楕円内に分布させ、ガウス分布で与える。

$$x^2/\beta + (\alpha x + \beta x')^2 = \varepsilon$$

六極電磁石を用いて六極磁界を発生させることで粒子の分布は図3に示すようなセパ

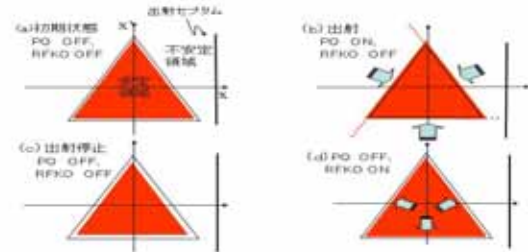


図1 QAR法の原理

リクスと呼ばれる安定領域を形作る。このためセパトリクスの内部がガウス分布するとは限らない。この安定領域からはみ出した粒子は共鳴状態となり、振幅が増大し取り出される。

取り出しで出来た隙間をRFKOを拡散させることで埋め、再度取り出しが行われる。その時、RFKOによって内側から外側へ平均して拡散していく。そこで、 ε を40分割させてそれぞれの区間の粒子数をプロットした図が図4である。

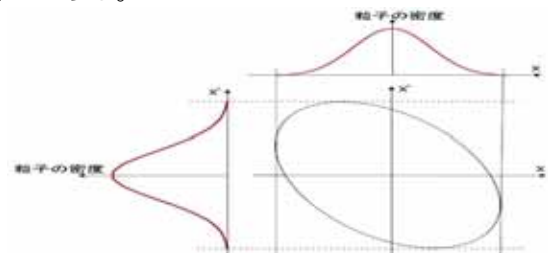


図2 粒子の初期座標の概念図

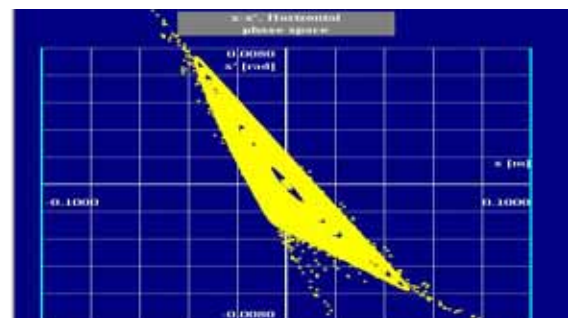


図3 セパトリクス図

A study of the extracted beam from a synchrotron using a fast Q-magnet assisted by

RF-knockout

-about the global spill structure-

Satoshi MASUBUCHI and Tetsuya NAKANISHI

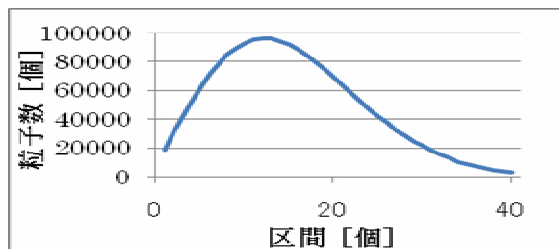


図 4 初期座標の粒子数

4. 収縮率とビーム強度の関係

PQのK値を変えた場合の収縮率を計算して、取り出し粒子数がどのように変化するか（グローバルスピル構造）シミュレーションを行った。収縮率を20、40、60%と変化させてシミュレーションを行った結果が図5、図6、図7、図8である。

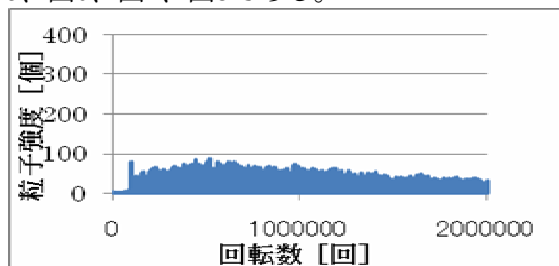


図 5 取り出し粒子数（収縮率20%）

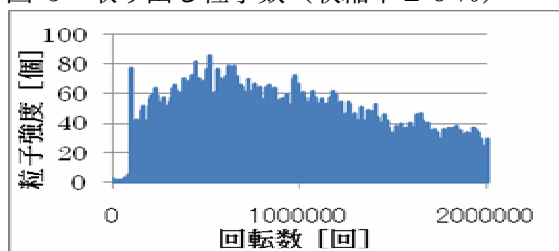


図 6 図5の拡大図

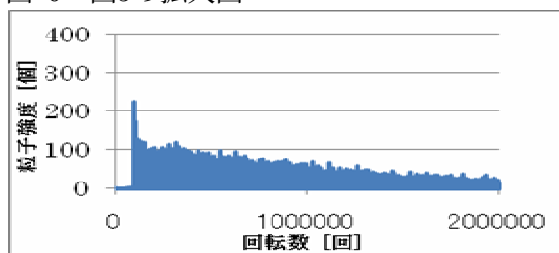


図 7 取り出し粒子数（収縮率40%）

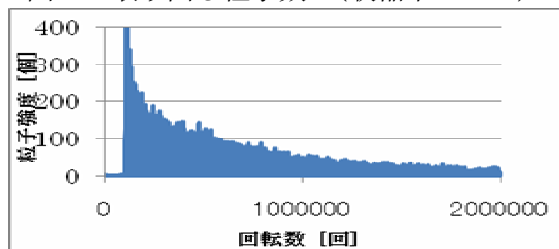


図 8 取り出し粒子数（収縮率60%）

図から分かるように、収縮率の変化に伴いグローバルスピル構造も変化しているのが分かる。収縮率が小さい時には二回目の取り出し以降のスピル構造は徐々に増えていき、その後減少していく。収縮率が増えるに連れ、グローバルスピル構造のピークが出射開始に近づく。

このグローバルスピル構造は初期座標の粒子分布がガウス分布なので取り出しビーム強度が徐々に減っていく波形を考えていたが図5ではこれを示さなかった。そこで、図4で示した分布で考える。グローバルスピル構造は右の方にずれていくので取り出し粒子数が徐々に増えていくことが予測される。この場合、収縮率が90%まではこのような分布になることが考えられた。しかしシミュレーション結果では、60%で増加することがなくなった。

一回目の取り出しビーム強度は収縮率の大きさに関係しているが、RFKOには関係していない。そこで、二回目の取り出しビーム強度に着目した。収縮率を Δs とした時に $\sqrt{1-\Delta s}$ とし、横軸を $\sqrt{1-\Delta s}$ としたものが図9である。

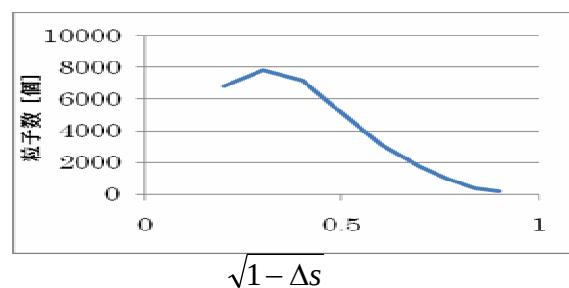


図 9 $\sqrt{1-\Delta s}$ とビーム強度の関係

図から分かるように図4と相対的には同じような波形となった。

一方、収縮率60%の時にスピル強度が減少していく現象は図4から説明できない。そこで、RFKOによる拡散はチューンが共鳴値に近づくほど大きいと考える。その場合、計算結果は次のように説明できる。境界付近ではRFKOな拡散が大きく、取り出されてもすぐに補給される。収縮率が大きい場合、チューンの変化が急になるためRFKOによって補給される粒子数が出射される粒子数よりも小さくなっていると考えられる。

5. まとめ

収縮率を変えるとグローバルスピル構造が変化していくことが分かった。二回目の取り出しビーム強度に着目すると、初期分布の楕円の周上の粒子数の分布に一致することが分かった。収縮率60%以上の時にスピル強度が減少していく現象は更に検討を要する。

「参考文献」

- [1] 辻井博彦、遠藤真広、「切らずに治すがん 重粒子線治療がよくわかる本」コモンズ
- [2] 中西哲也、他 粒子線がん治療用シンクロトロンからの新ビーム取り出し法の研究 日本大学生産工学部第39回学術講演会