

シンクロトロンからのビーム取り出し(QAR法) におけるスピルFB・FF制御の研究

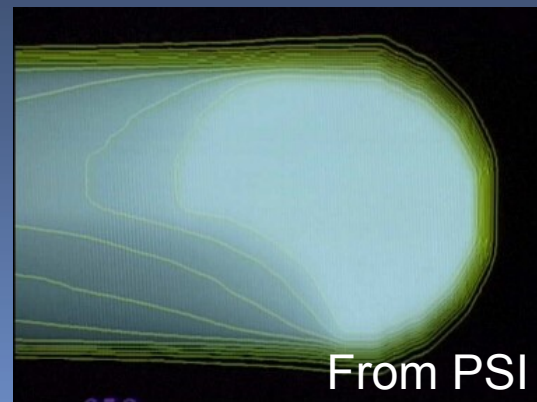
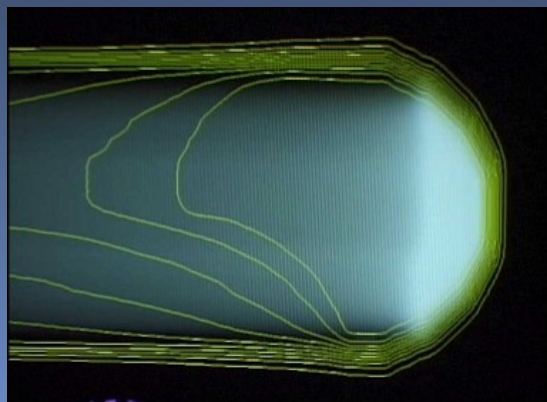
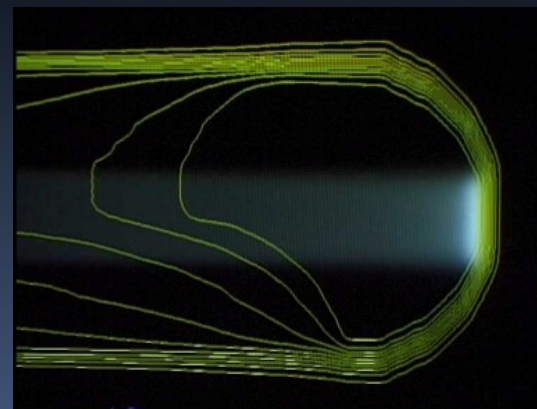
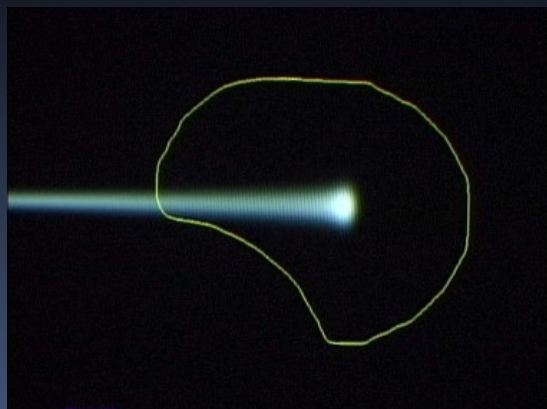
日本大学 生産工学研究科
電気電子工学専攻
村岡 遼#
中西 哲也

目次

- 研究の背景
- 課題と目的
- RFKO信号の発生方法
- ビーム強度の制御
- ビームシミュレーション結果
- まとめ
- 今後の取り組み

粒子線がん治療における ビームの照射方法

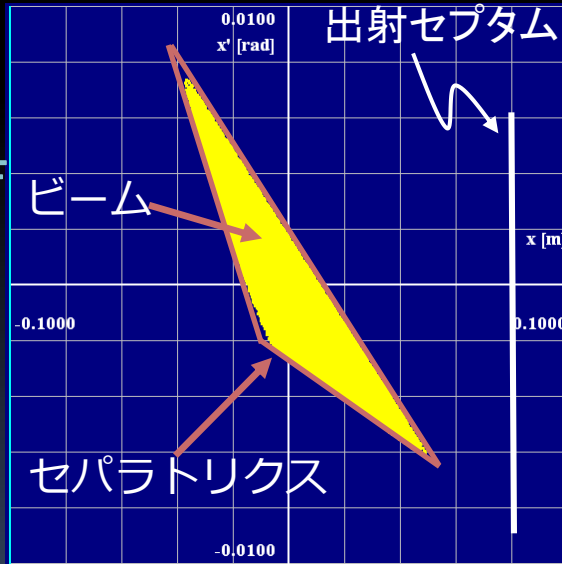
患部以外の部分の線量を低減する
→スポットスキニング照射



QAR法の原理

beam extraction method using a fast Quadrupole magnet Assisted by RFKO

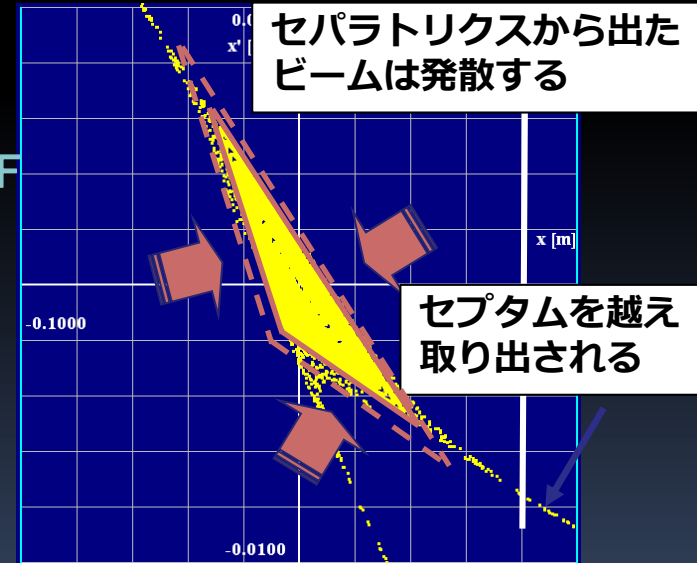
(1) 初期状態
FQ—OFF
RFKO—OFF



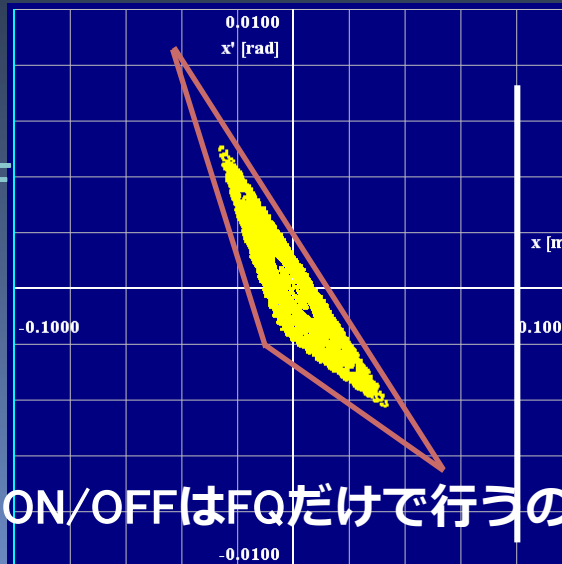
FQ: 高速四極
電磁石

RFKO: 高周波
ロックアウト

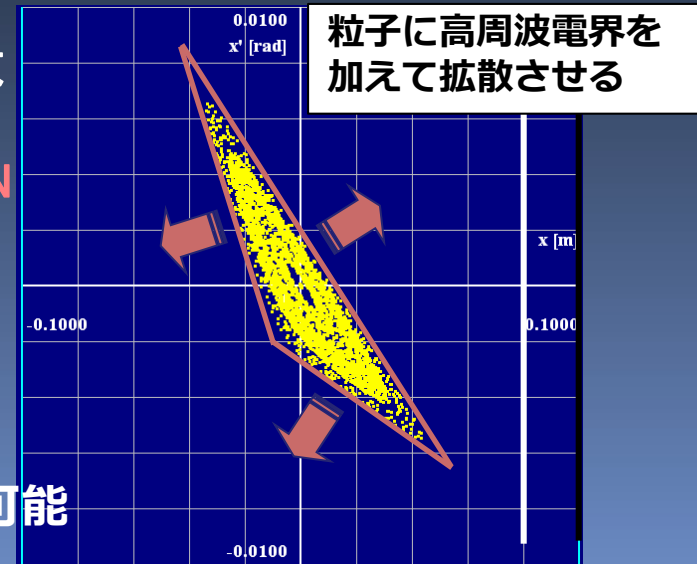
(2) 出射開始
FQ—ON
RFKO—OFF



(3) 出射停止
FQ—OFF
RFKO—OFF

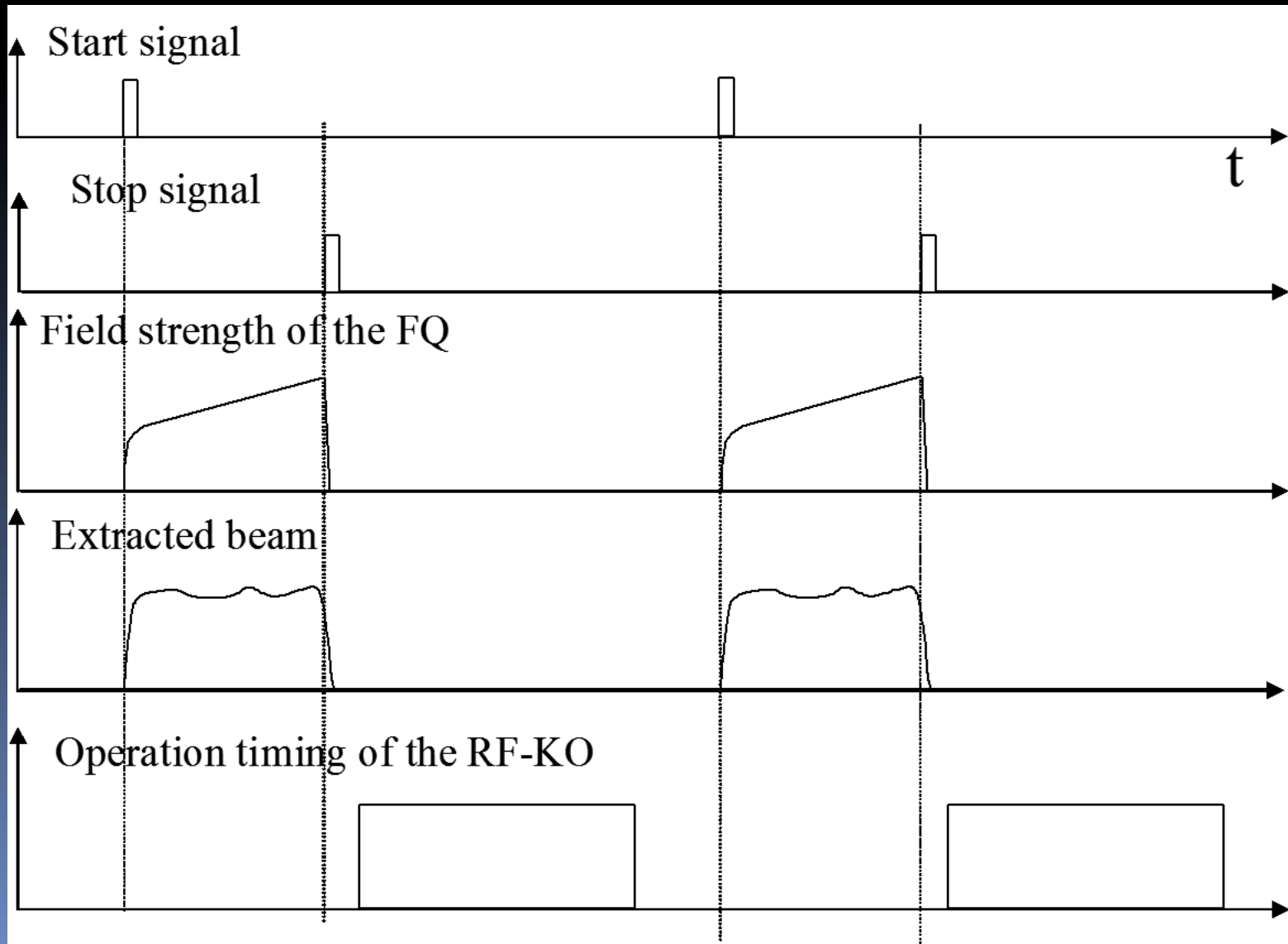


(4) ビーム拡散
FQ—OFF
RFKO—ON

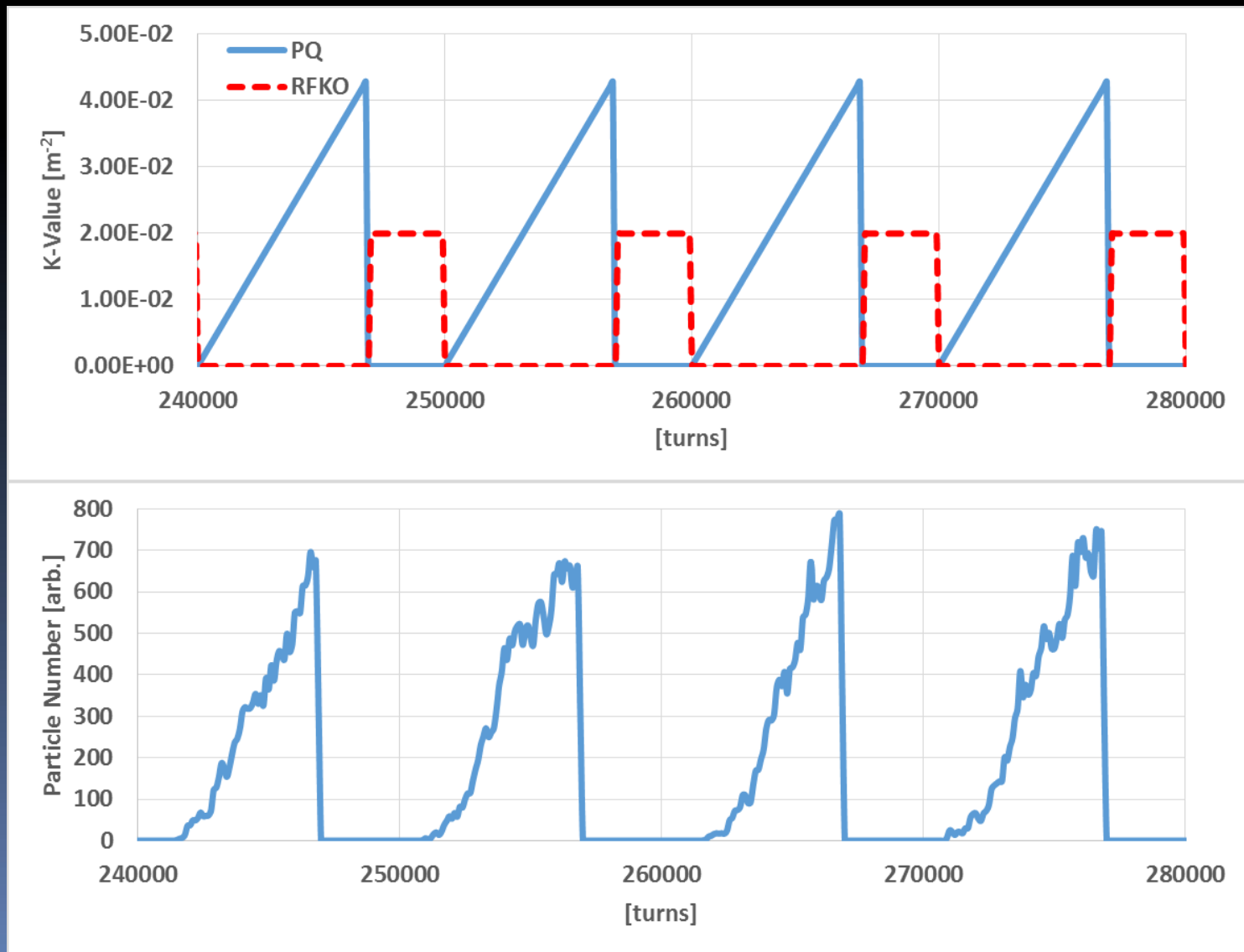


特長：ビームON/OFFはFQだけで行うので高速制御が可能

QAR法のタイミングチャート



ビームシミュレーションの一例



※運動量分散は十分に小さいとして、シミュレーションでは無視

研究の課題と目的

放射線医学総合研究所での原理実証試験
及びビームシミュレーションの結果より

→ 周回ビームの拡散の不均一性

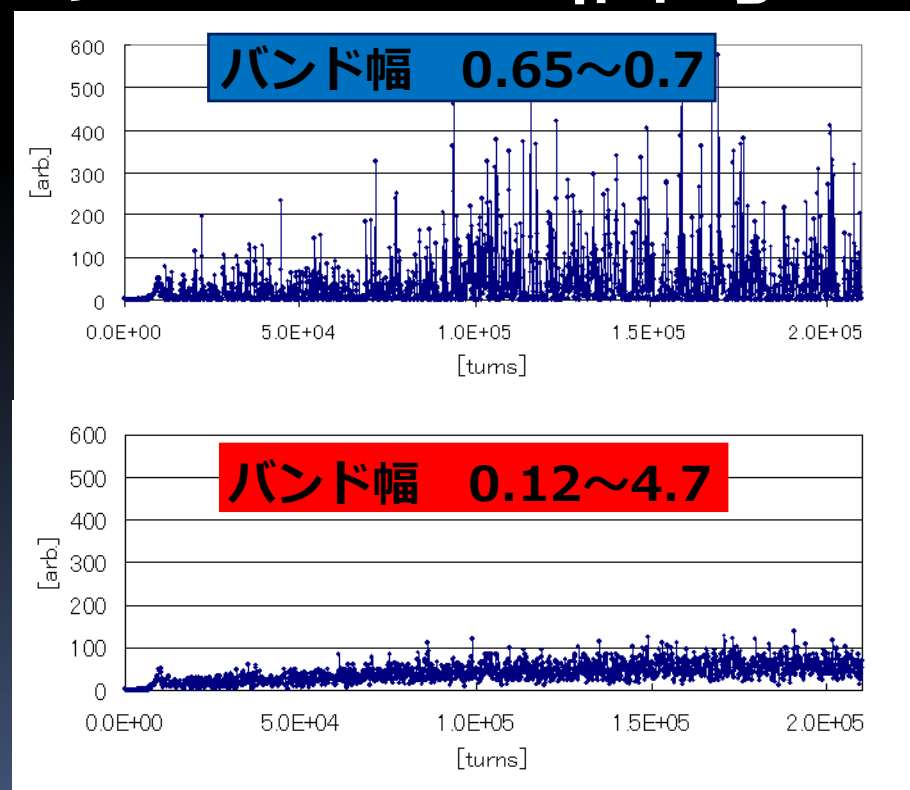
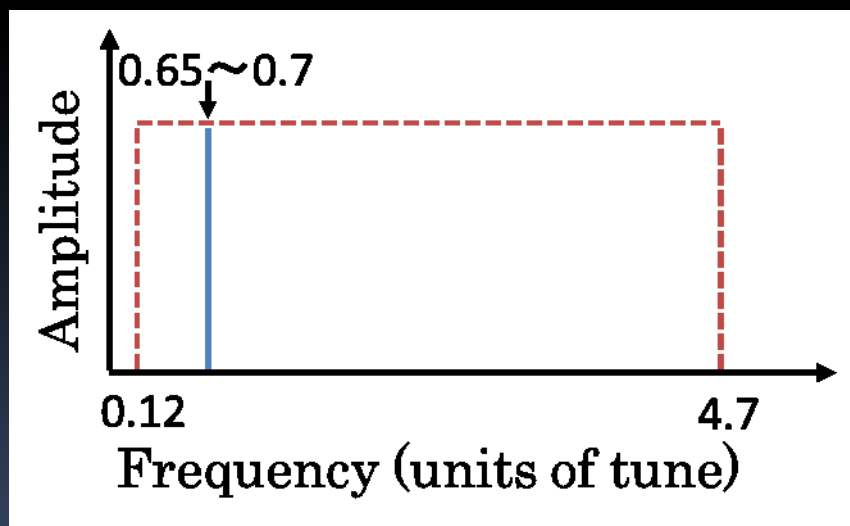
対策

RFKO信号としてのカラーノイズの周波数バンドの拡大

改善されたが効果が十分ではない

任意のスパイル構造の実現のためにFF,FB制御

一様な拡散のためのRFKO信号

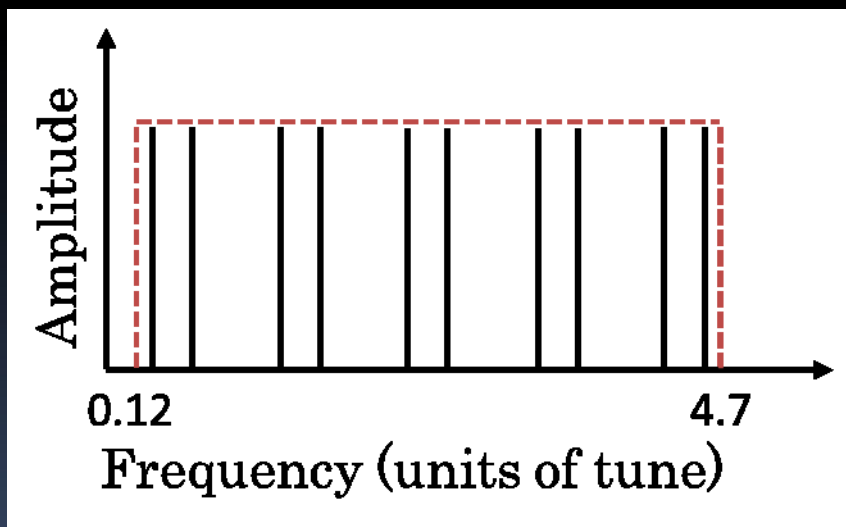


RFKO信号の周波数帯を広くすると拡散が一様になる



高周波アンプへの負担が増えてしまう

マルチバンドスペクトルについて



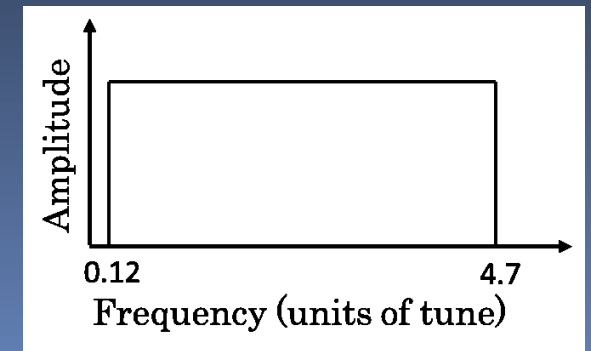
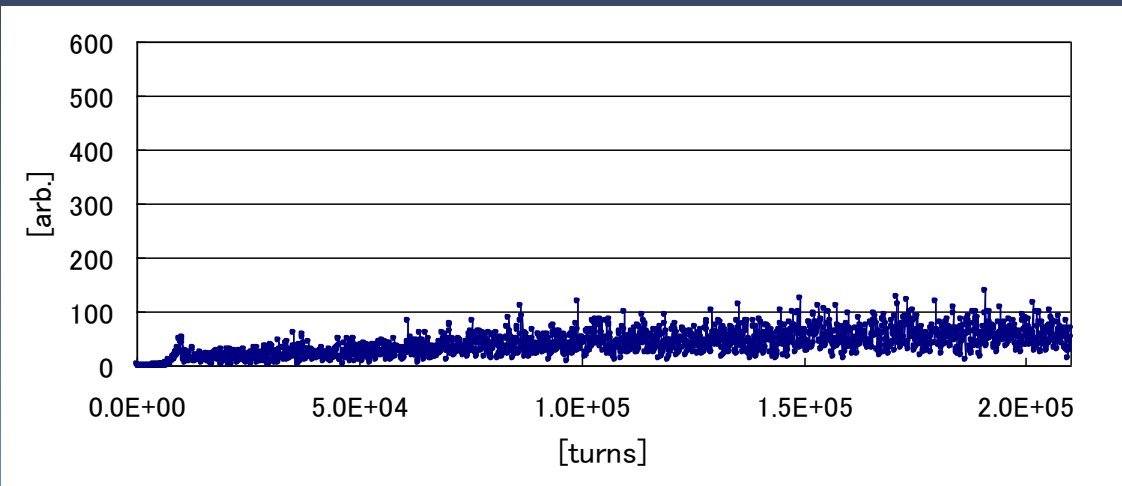
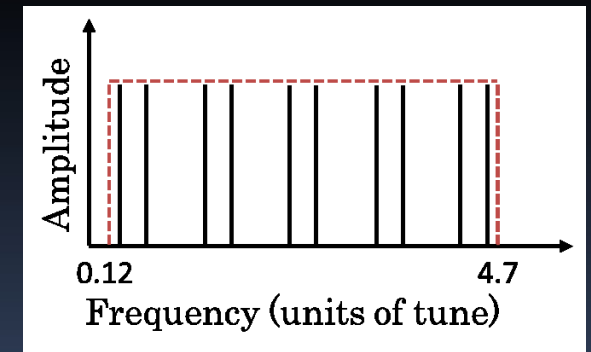
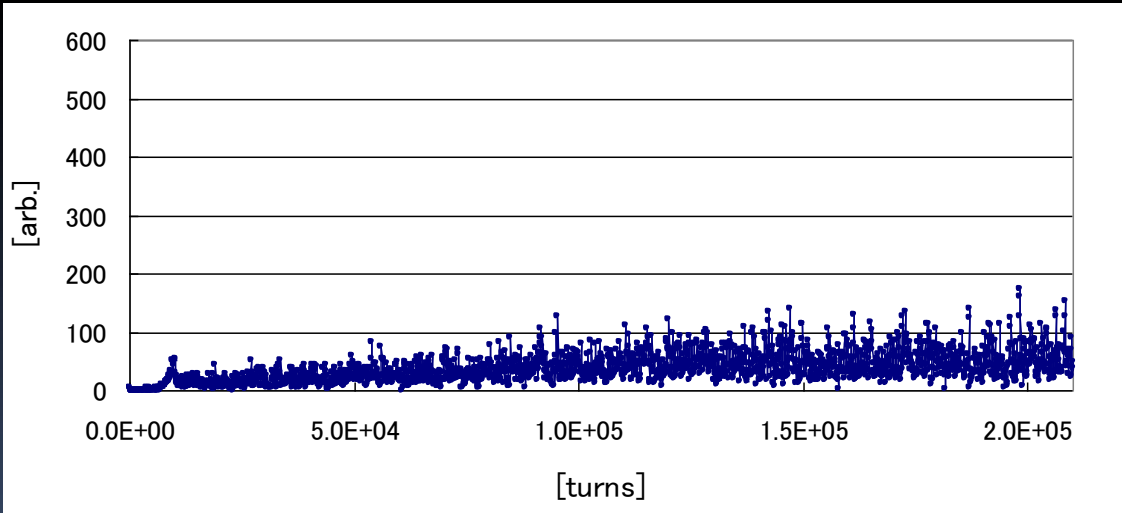
RFKO信号として

共鳴周波数帯 $(n + \frac{1}{3}, n + \frac{2}{3})$ を
有するMBスペクトルを提案

$(n = 0, 1, 2, 3, 4)$ の場合

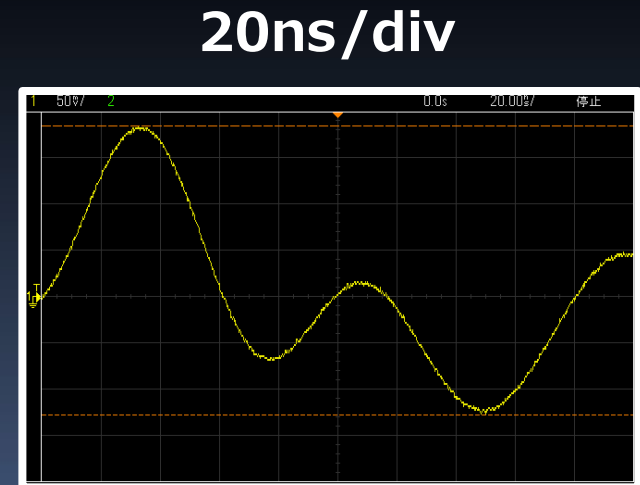
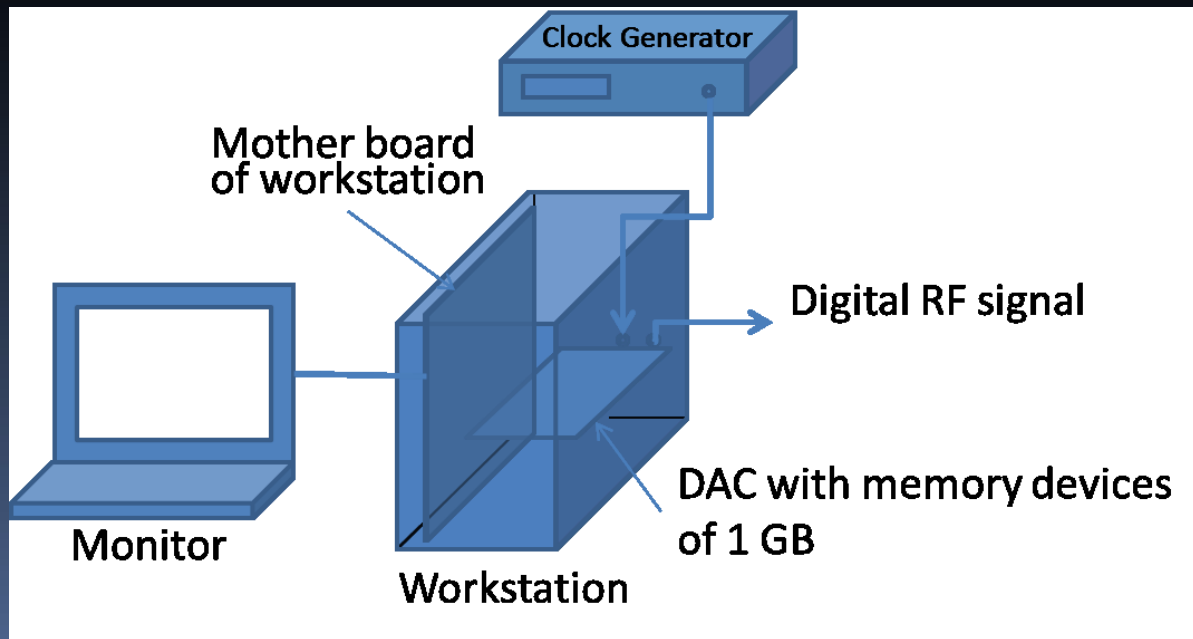
- 実質的な周波数幅 $\rightarrow \frac{1}{10}$
- 各バンドの周波数帯域を任意に変更可能
- ➡ 一回のスピル量を増やせる

MBスペクトルを使用した際の シミュレーション結果



マルチバンドスペクトルの発生方法

■ 高速DACを使った方法

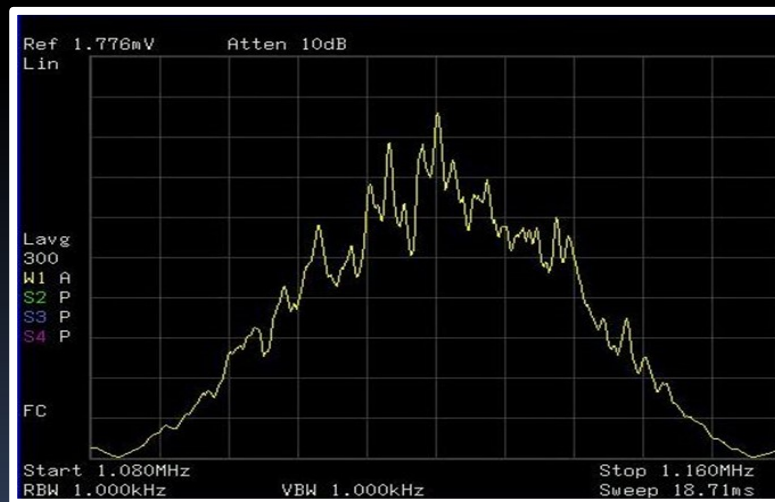
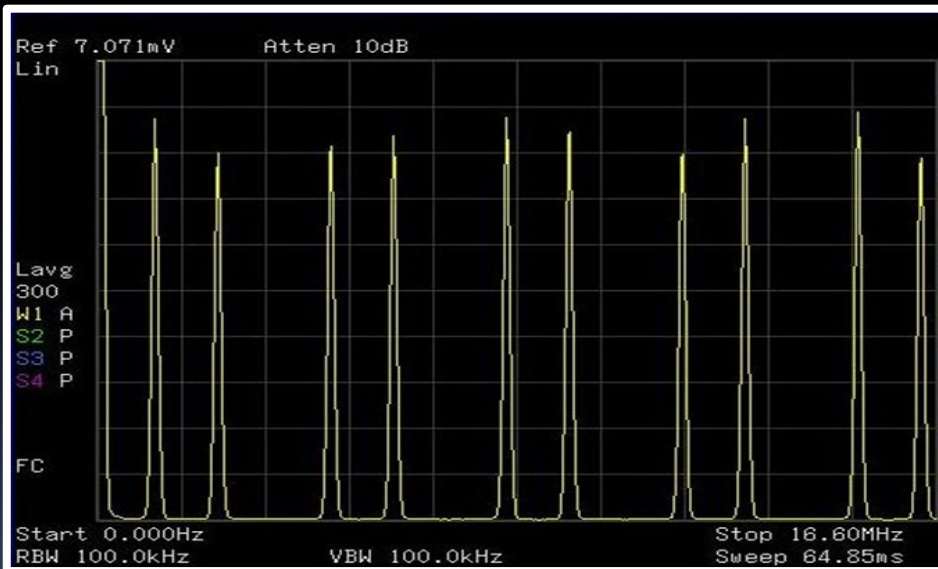


RFKO信号の時間波形

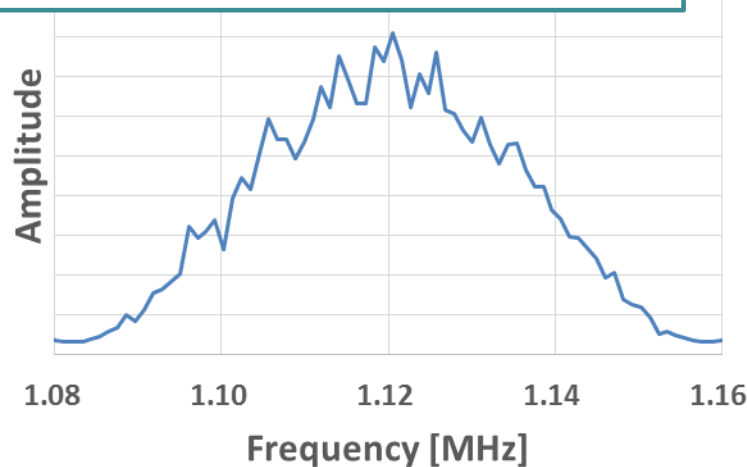
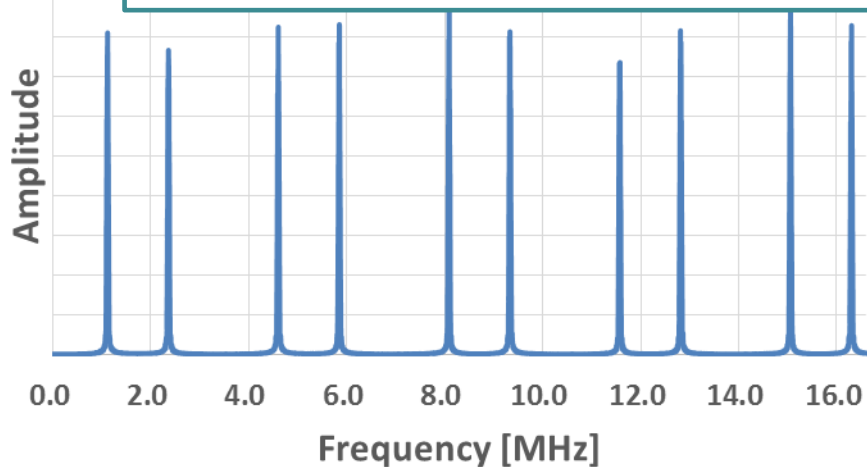
PC上で予めMBスペクトルの時間波形のデジタルデータを計算
そのデータをPCのマザーボードに組み込まれたDACのメモリに書き込み
それらを外部クロックにより出力

発生させたMBスペクトルの確認

スペクトラムアナライザを使った周波数分析の結果



シミュレーションに用いるRFKO蹴り角のフーリエ解析の結果



任意のスピル構造の実現に向けて

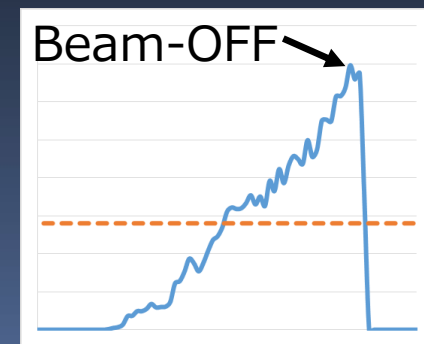
■ RFKOの高周波信号の周波数帯域を広げる
ことで拡散は一様に近づいた

➡ FQを直線的に立ち上げた場合、
ビームオフ時のスピル強度が最大になる

➡ スキャンニング照射には不適

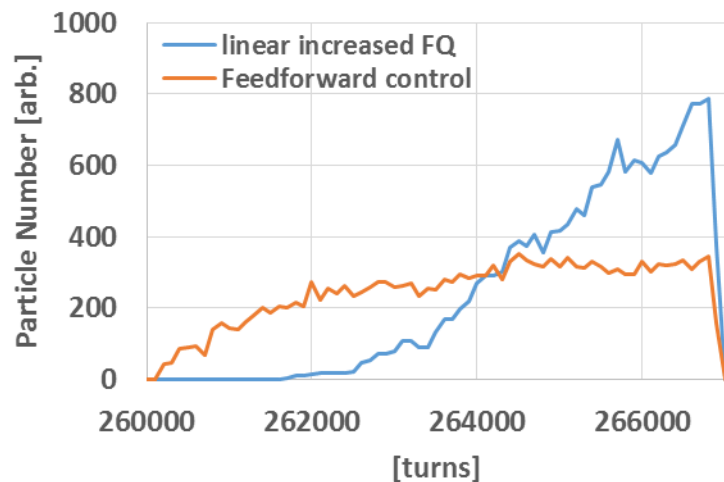
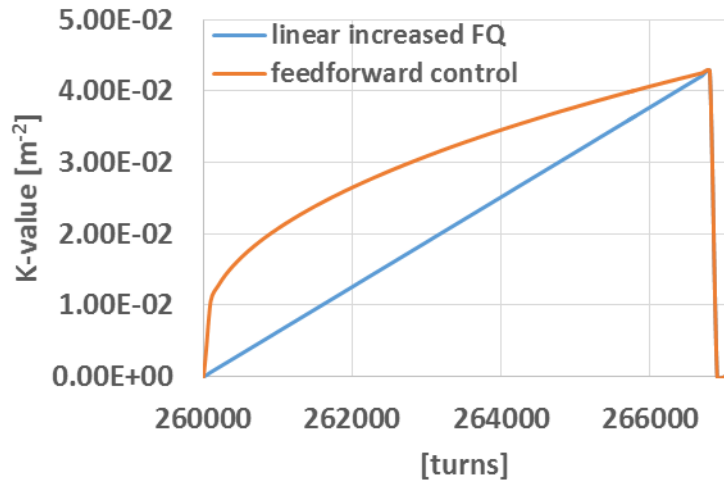
■ 今回はスピル構造の平坦化が目標

➡ FQ波形の最適化 (FF制御+FB制御)



フィードフォワード制御の計算方法

■ 平坦なスパイル構造が得られるようにFQの関数を検討



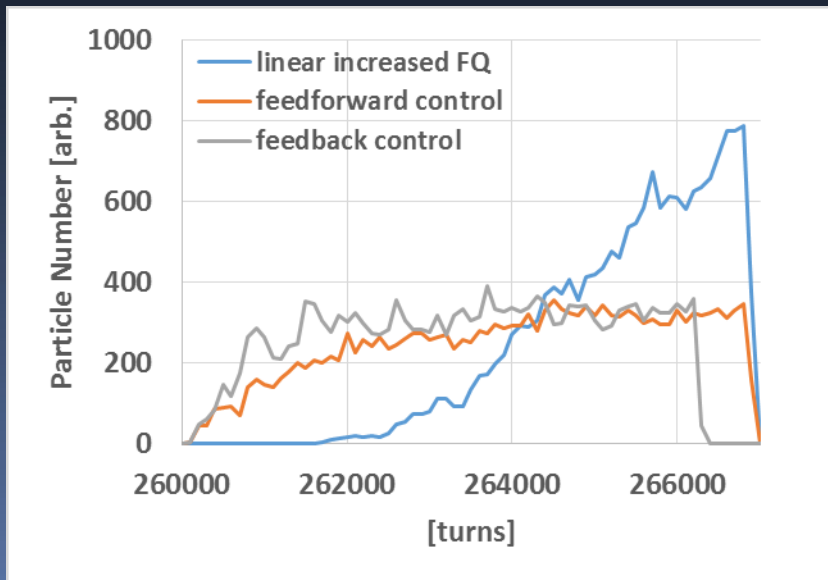
$$K_{ff}(n) = \frac{K_{max}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\left(\frac{\log(n)}{\log(N_{FQ})}\right)^{10} + \sqrt{\frac{n}{N_{FQ}}}}$$

$K_{ff}(n)$: 回転数に対するFQの値
 K_{max} : FQの最大値,
 N_{FQ} : FQの1運転区間の回転数
 n : 回転数(変数)

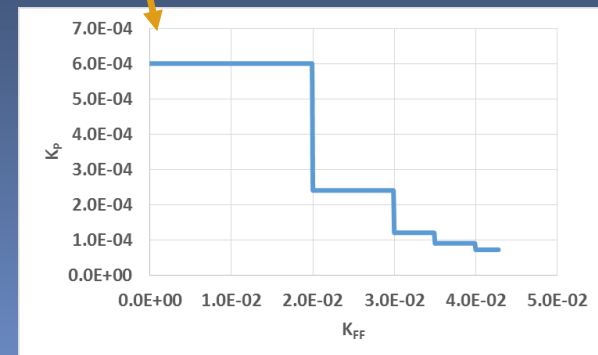
フィードバック制御の計算方法

FB制御により取り出される粒子数を目標値に近づける

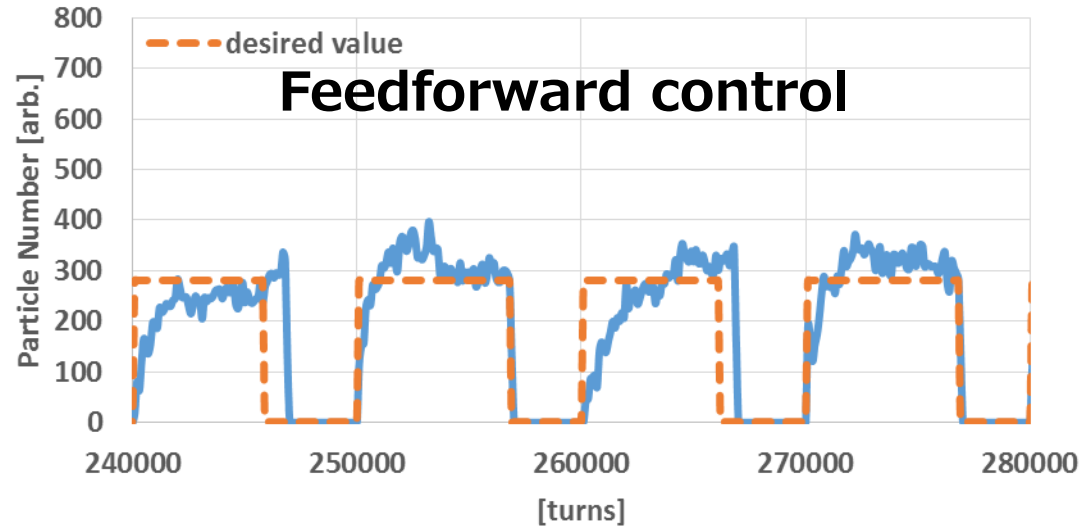
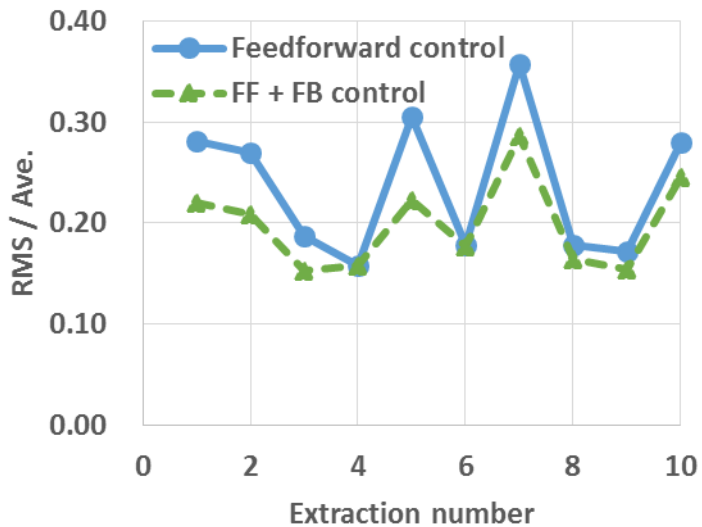
$$K_{quad} = K_{FF} + K_P \times e_i + \sum_{i=1}^n K_P \times e_i$$



K_{quad} : 最終的なFQのK値
 K_{FF} : FF制御部分
 K_P : 比例係数
 e_i : 偏差



RMSを用いたスピル構造の評価



$$RMS[e] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2}$$

まとめ

- マルチバンドスペクトルの発生方法について述べ、そのときのスピル構造への影響を確認した。
- QAR法において、一回の取り出しビーム強度を平坦にするために、FQのコイル電流波形の検討を行った。FF, FB制御を併用することで平坦なビーム強度が得られた。

今後の取り組み

- スピルモニタの応答速度を考慮したFBシミュレーションを行う
- 取り出し前半でのビーム強度を強くして、後半のビーム強度を弱くしたスピル構造の実現

