

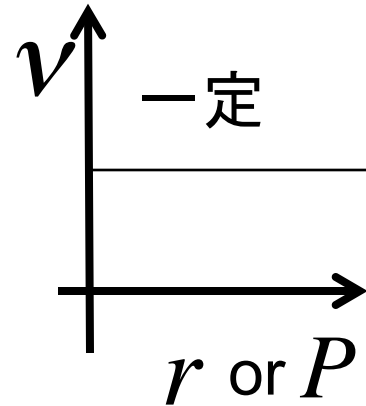
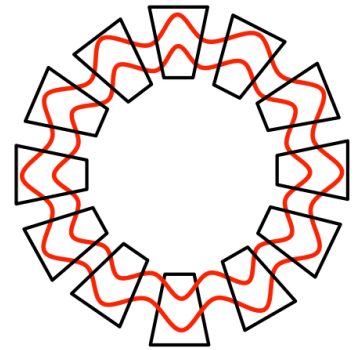
発表内容

- 1.研究背景・目的
- 2.FFAG加速器の原理
- 3.コイルを用いたベータatronチューンの制御手法
- 4.シミュレーションによる評価
- 5.まとめ

FFAG(固定磁場強集束)加速器

特徴

- ① 固定磁場
 - ② 強集束
- ⇒ 早い繰り返し加速、かつ高エネルギーまでの安定した加速が可能
-
- ③ **スケーリング則** ⇒ 全ての運動量に対する閉軌道が相似形
 - ④ **零色収差** ⇒ 全ての運動量に対する集束力が一定
⇔ ベータatronチューンが一定



↓ 実機の場合

電磁石の磁場分布はFFAG加速器の理想的な磁場分布とは異なる場合があります、その結果としてベータatronチューンが一定にならない可能性がある

電磁石の磁場分布を補正し
ベータatronチューンが一定になるように制御する手法
→ 運転・設計の自由度の向上

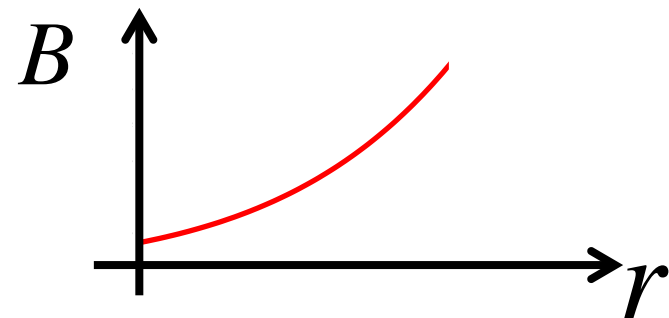
研究目的

FFAG加速器における、ベータatronチューンの
制御手法を考案し、その有用性を評価する

FFAG加速器の原理

ラジアルセクター型

FFAG加速器の磁場分布: $B = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k$
 (k : field index)



磁場の級数展開

$$B = B_0 \cdot \left[1 + \frac{k}{r_0}(r - r_0) + \frac{k(k-1)}{2r_0^2}(r - r_0)^2 + \frac{k(k-1)(k-2)}{6r_0^3}(r - r_0)^3 \dots \right]$$

磁場の線形成分

磁場の非線形成分

⇒ 非線形の磁場成分を用いて零色収差を実現している

ベータatronチューンの制御手法の概要

チューンの近似式*

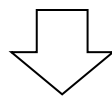
$$v_H \approx \sqrt{1+k}$$

(k : field index)

$$v_V \approx \sqrt{-k + F^2 (1 + 2 \tan^2 \varepsilon)}$$

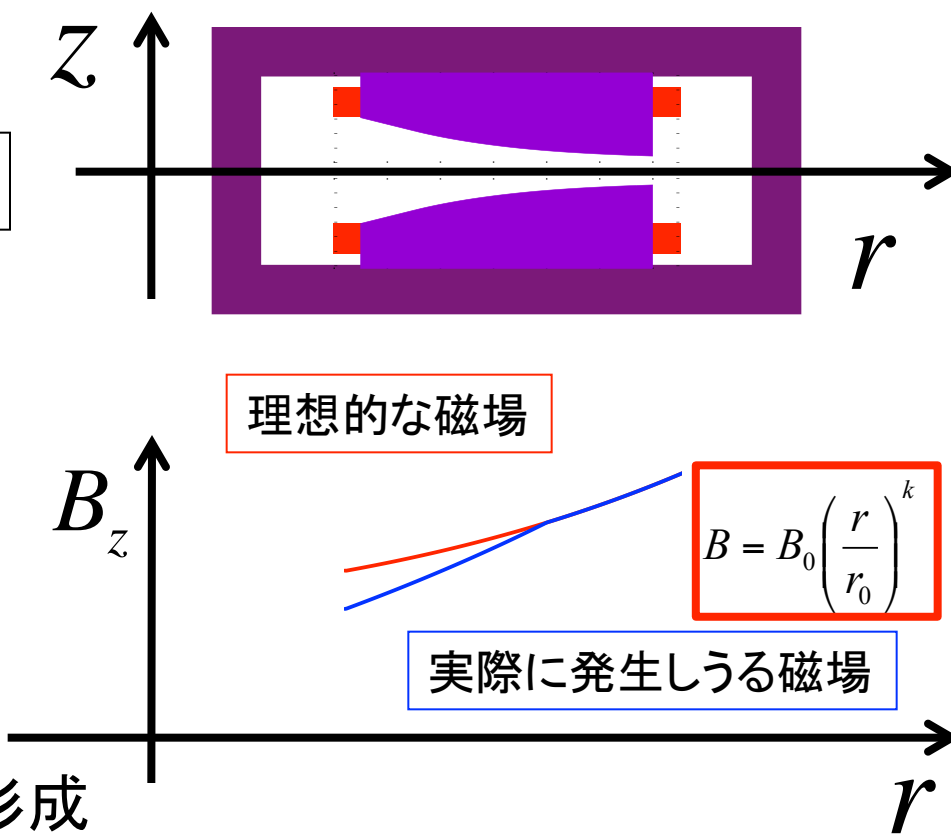
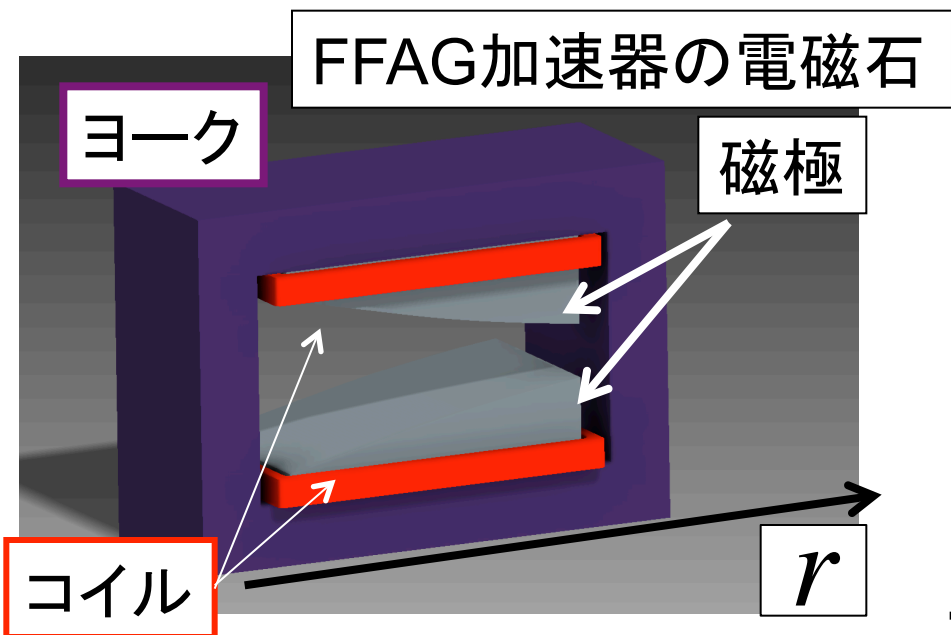
(F : flutter factor, ε : spiral angle)

水平チューン、垂直チューンは
field indexの関数で表すことができる



コイルを用いて磁場勾配を補正することにより
ベータatronチューンを制御することが可能だと考えられる

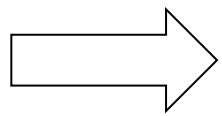
補正手法の概要



・磁極形状で原理を満たす磁場を形成

$$g = g_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-k} \quad (g : \text{磁極間隙})$$

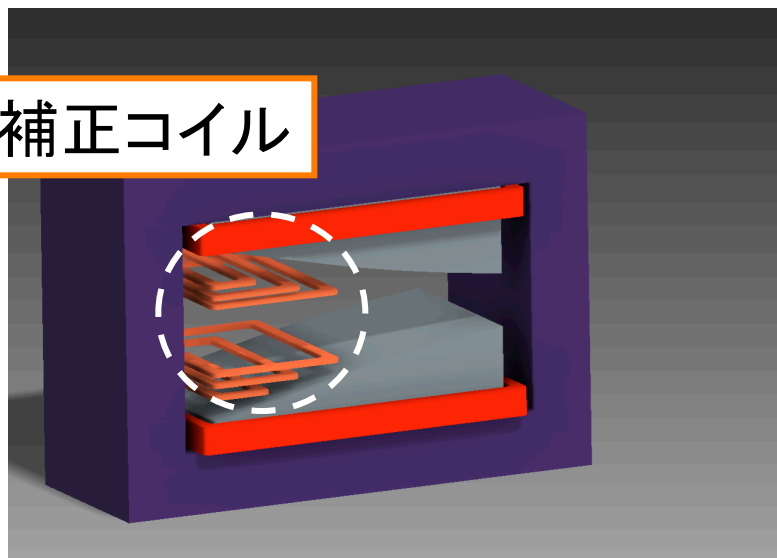
- ・磁気特性 (BHカーブ・磁気飽和)
- ・コイルの実効巻き数
- ・境界条件



実際の磁場分布が
3次元磁場計算コードにより
計算された磁場分布と
一致しない場合がある

補正コイルの概要

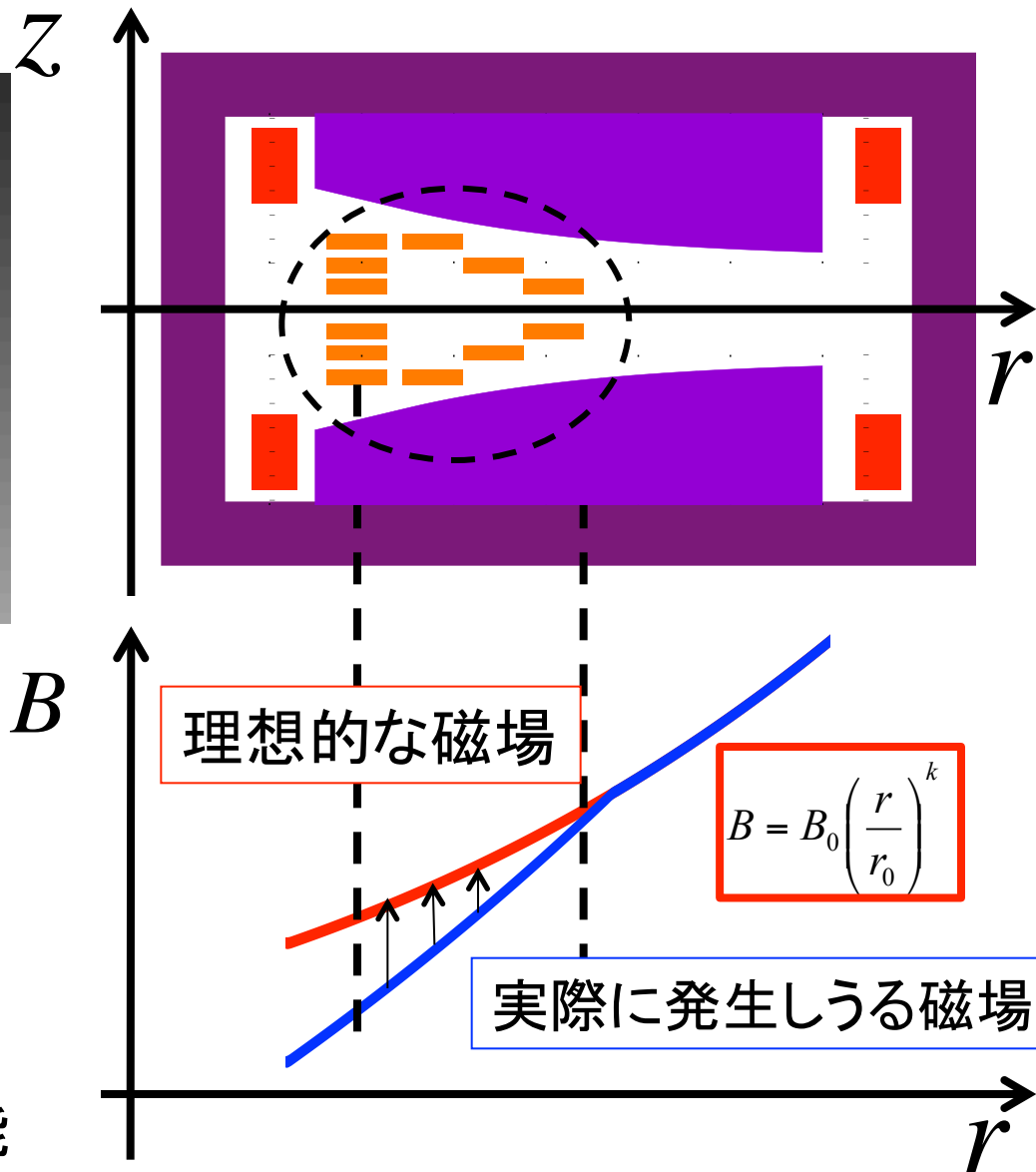
補正コイル



電流値の異なるコイル
を設置することにより
局所的に起磁力を変化

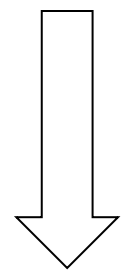
磁場勾配の補正が可能

- ・磁極を再加工することなく
運転しながら調整する事が可能

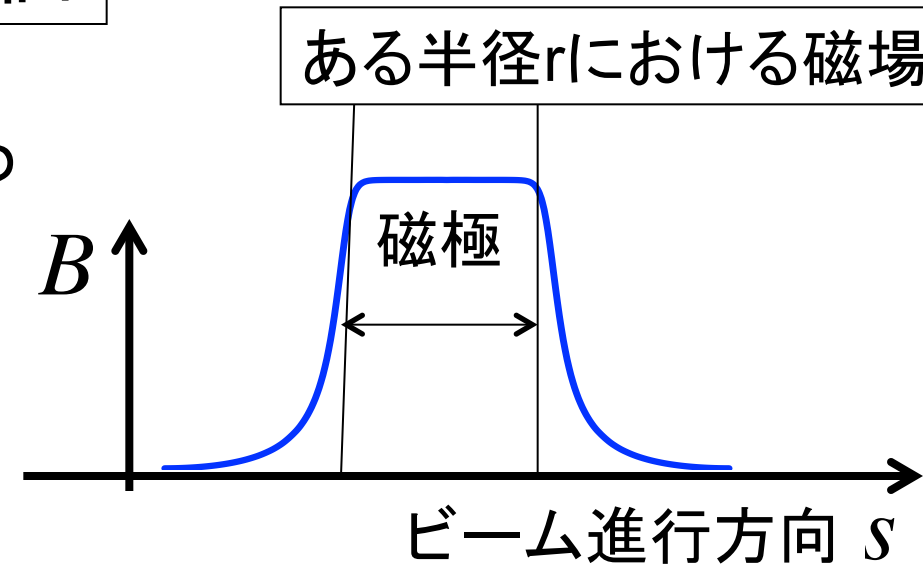


各コイルによる補正量の評価

磁極間隙が広い電磁石
 →ビーム進行方向に磁場分布を持つ



実効的なビームに対する集束力を
 評価する必要がある



・BL積
 (半径方向に磁場を積分した値)

$$BL(r) = \int B_z(r) r d\theta$$

指標

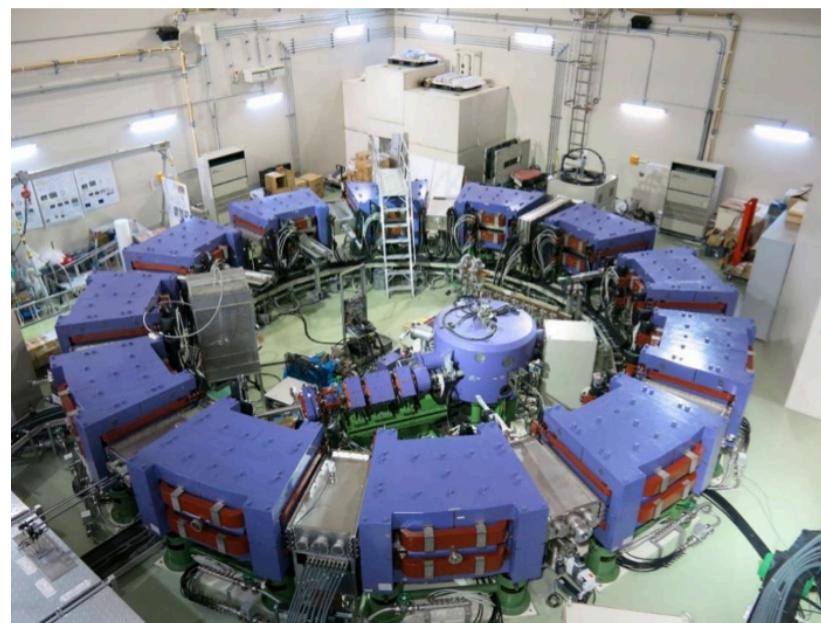
・BL積から計算した
 実効的な磁場勾配
 → local $k + 1$

$$local\ k + 1 = \frac{\partial BL(r)}{\partial r} \frac{r}{BL(r)}$$

補正手法の評価のためのシミュレーション

⇒ 150 MeV FFAG加速器
(九州大学加速器・ビーム応用科学センター)

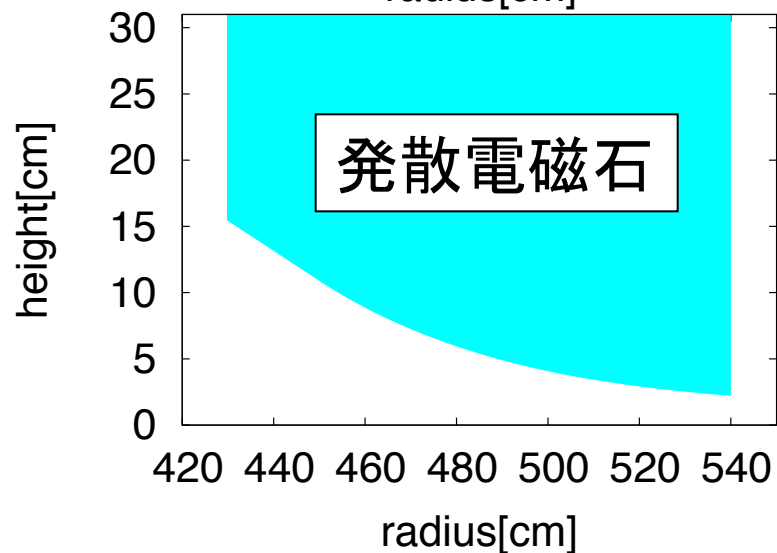
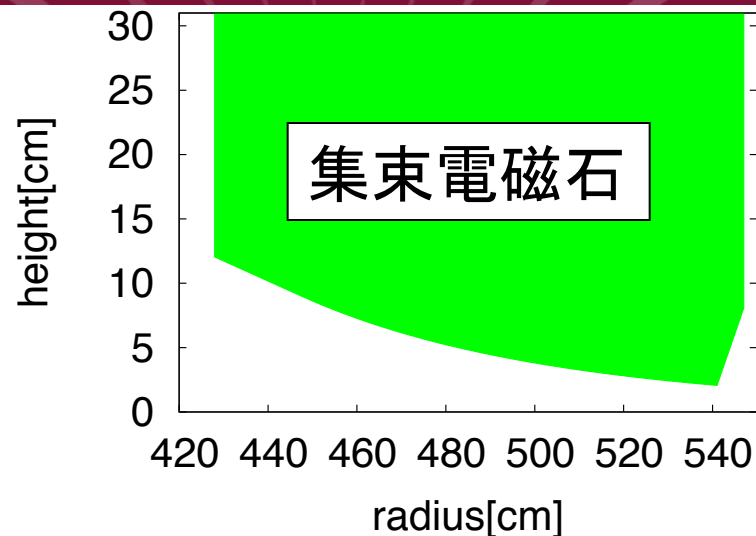
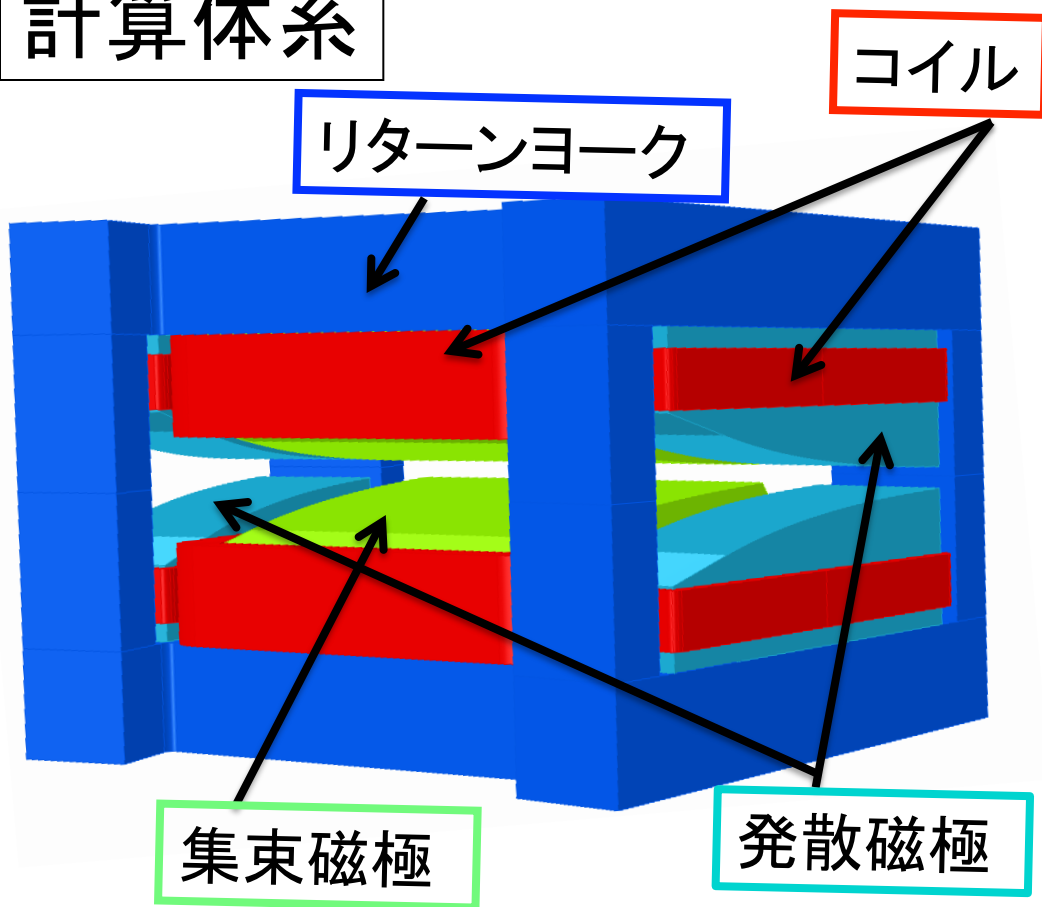
- ・ KEKで開発された、陽子FFAG加速器の実用実証プロトタイプ機
陽子:12 MeV → 150 MeV
(10 MeV → 100 MeV)



150 MeV FFAG加速器

- ・DFD-triplet型電磁石を
周期的単位セルとした12セル
- ・現在、ビーム利用に向けた
取り出しビームラインの整備を
進めている

計算体系



- ・3次元磁場計算コードOpera-3dを用いて、磁場分布を計算
- ・軌道計算によりベータatronチューンを計算

補正コイルの設計の流れ

補正コイルの設置位置・個数の決定



補正コイルの電流値の最適化

・3次元磁場計算コードにより計算した
磁場分布を用いてlocal $k+1$ を計算

・半径ごとの補正量の見積り

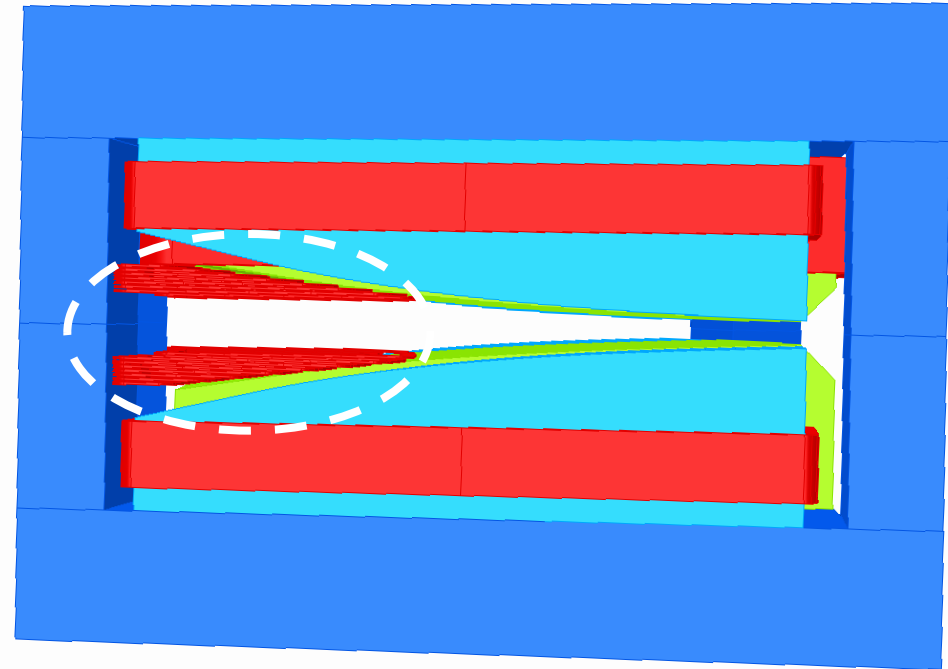
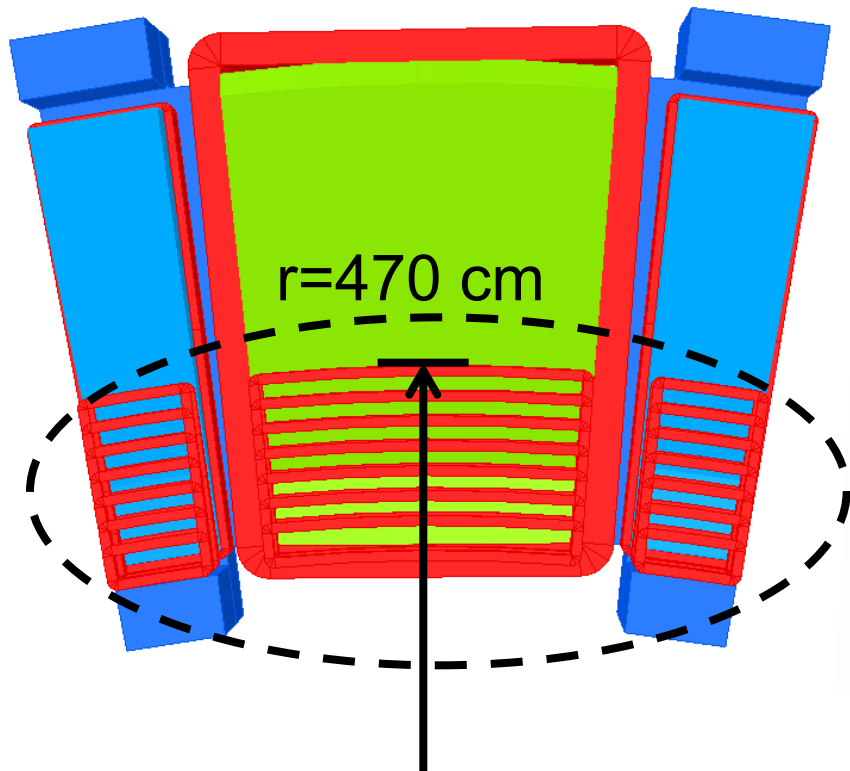
・補正量に相当する磁場が発生するように
各コイルの電流値の決定

指標 (local $k + 1$) の変化量が一定値以下

ベータatronチューンの計算

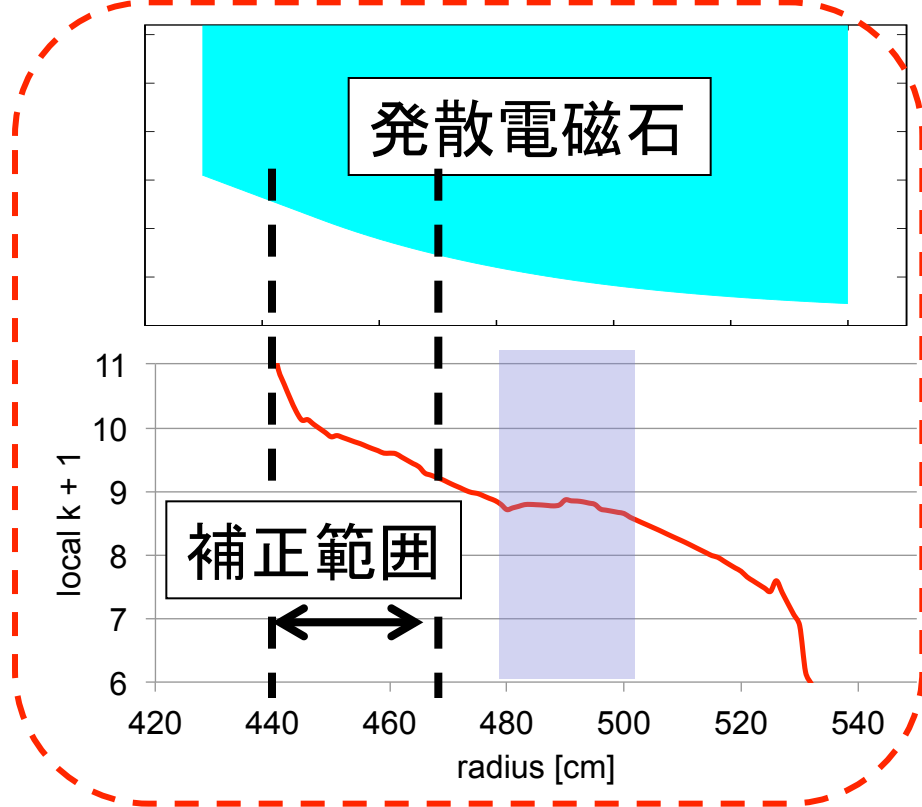
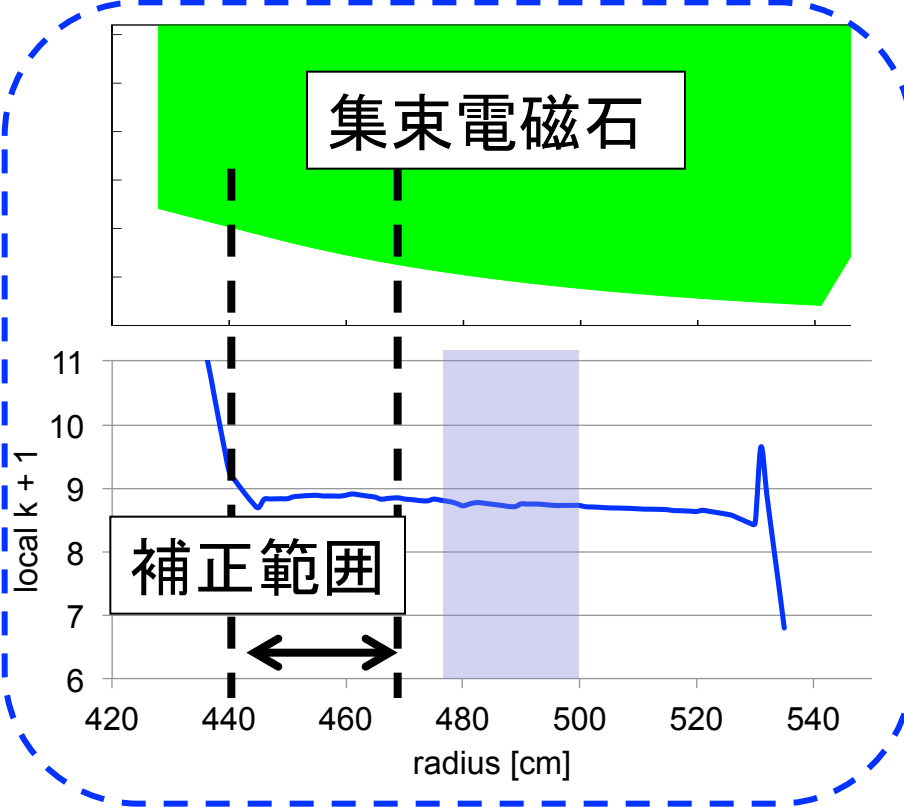
補正コイルを制作し実機でのビーム実験による評価

補正コイルの設置位置・個数の決定



- ・設置位置: 真空槽と電磁石に物理的に干渉しない領域
(428 cm ~ 470 cm)
- ・設置個数: 集束電磁石、発散電磁石にそれぞれ7個

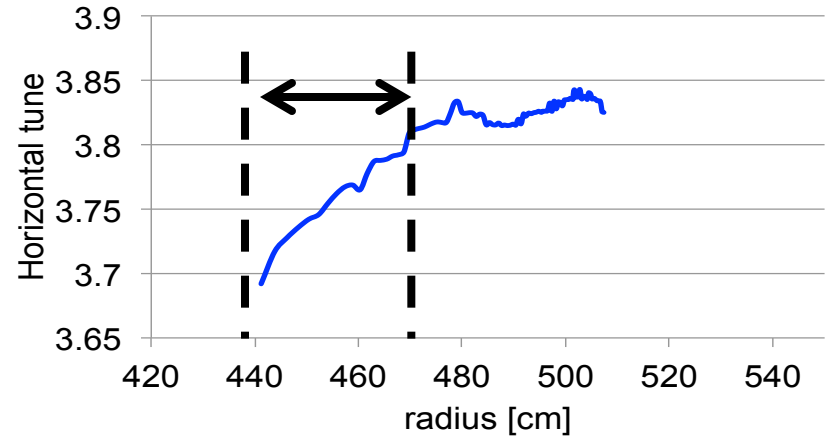
補正コイルの電流値の最適化



目標値 集束電磁石成分: 0.20以内
 発散電磁石成分: 0.44以内

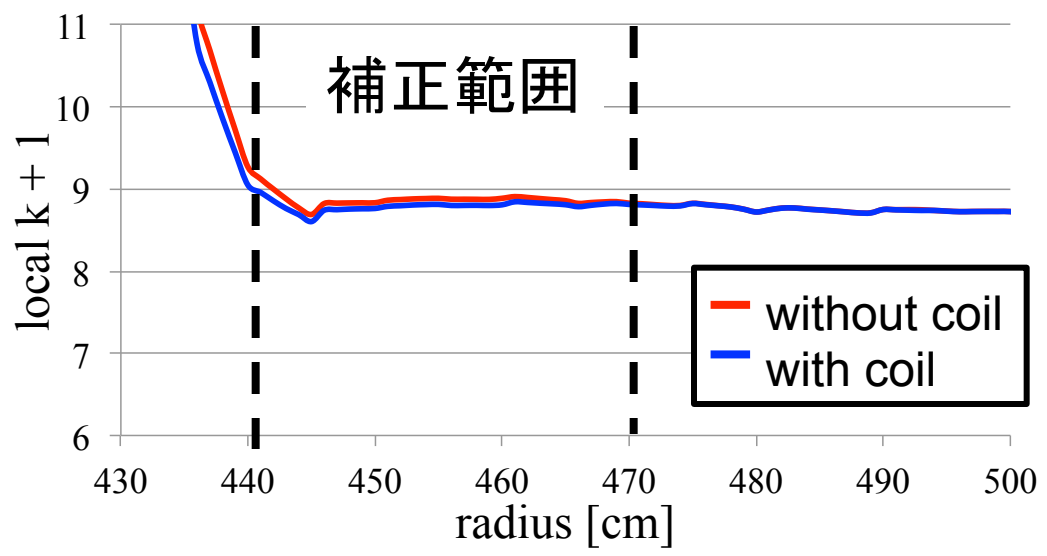
発散電磁石成分の
 local k + 1 の変化量大

→ 水平チューンの変化



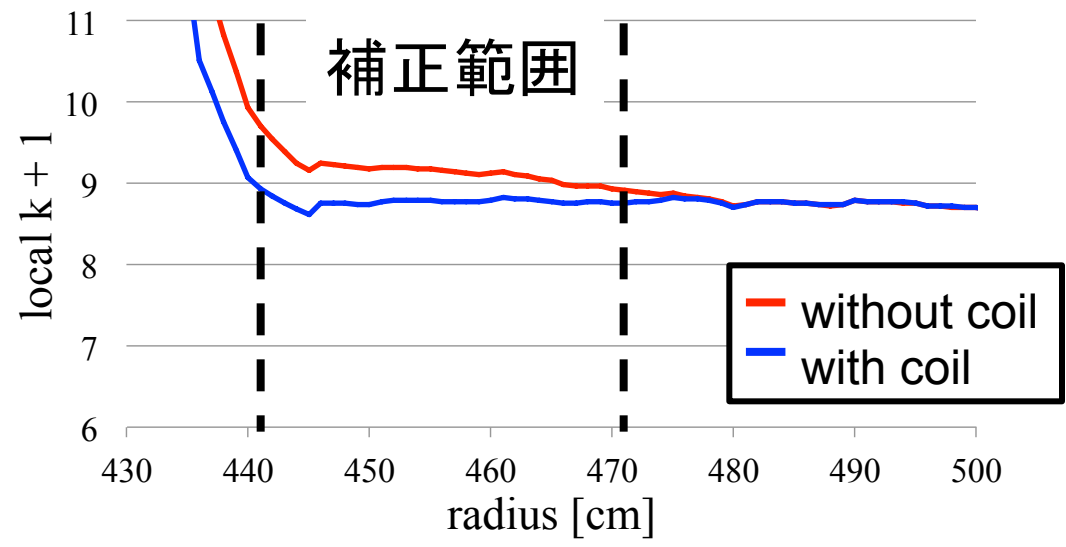
補正結果

集束電磁石



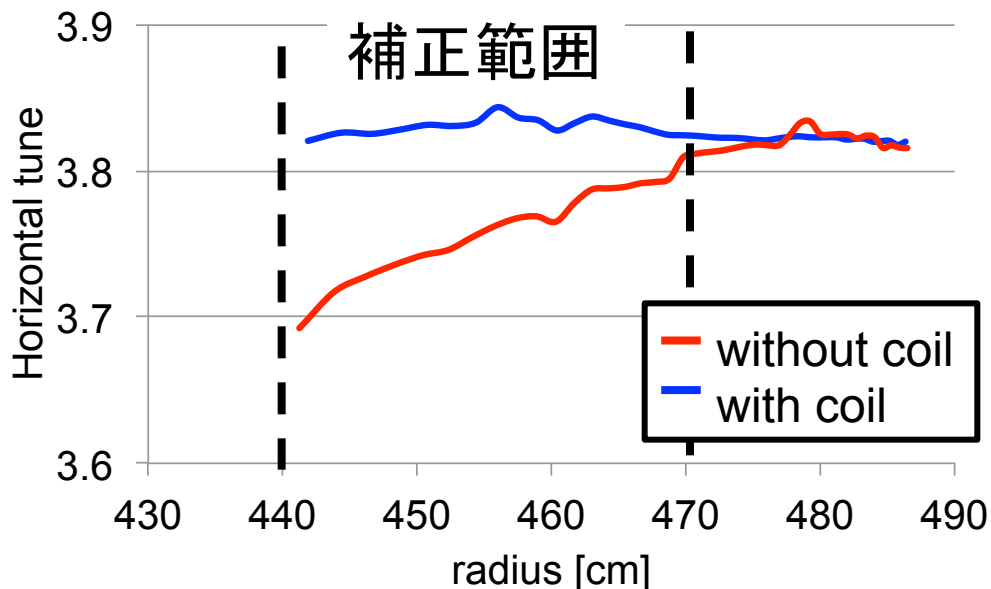
8.72 ± 0.17

発散電磁石

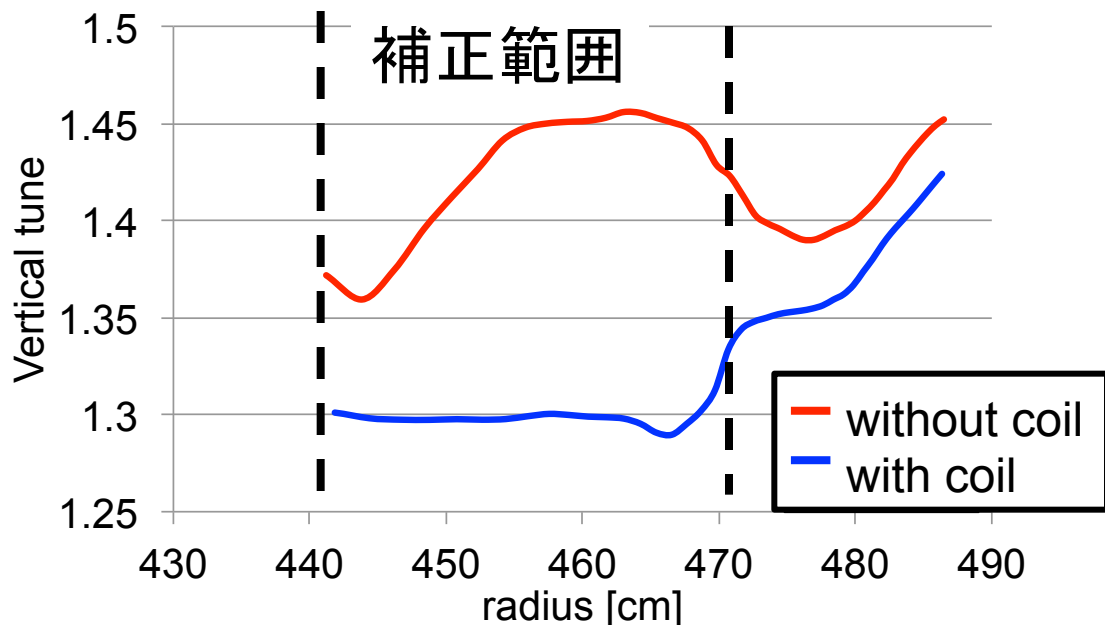


8.71 ± 0.31

ベータatronチューンの計算結果



水平チューンの変化量
0.12 → 0.02



垂直チューンの変化量
0.1 → 0.03

結論

本研究では磁極間隙に設置したコイルを用いてチューンを制御する手法を考案し、その有用性を評価した。

- ・シミュレーションにより、補正コイルを用いて任意の場所における水平チューンを制御できた
 - ・集束力を評価する指標として実効的な磁場勾配 (local $k+1$) を用いることは妥当であった
-

今後の展望

- ・今後、テストコイルを作成し磁場測定を行う
- ・150 MeV FFAG加速器でビーム実験を行い、本研究で提案したベータatronチューンの制御手法の実証を行う