

Final Design of B₀ Magnet for UCN Rebuncher

2010年10月21日 木曜日

Yasushi Arimoto

KEK

Abstract

UCNリバンチャー実証試験用B₀電磁石の3次元設計を行なった。設計された電磁石は最大1Tから25 cmの間で0.2 Tまで減少し、その間の磁場勾配が350 Gauss/cm以下となっていることが3D-TOSCAシミュレーションによって確認された。

1. 電磁石形状

今回設計したリバンチャー実証試験用B₀電磁石の外観図を図1に示す。青色及び緑色の部分が鉄で、緑色は異方性中間磁極を表わしている。異方性中間磁極に対し、磁場勾配を生成しているメインの磁極を主磁極と呼ぶことにする。コイルは赤色で示されており、磁極形状を見易くするためz-x平面で割った片側半分のみを表示している。実験では図中前面が鉛直下向きとなるように設置される。

図2に今回計算した電磁石ヨーク全体の図面を示す。磁極内の磁束密度を下げるためC50の面取りをした(図2-左下図)。また異方性中間磁極の構造図を図3に示す。中間磁極の形状は主磁極のC50の面取り形状に合うように台形にしてある。リターンヨーク、主磁極、中間磁極の材料はSS400とした。この計算における磁性体部(磁極、リターンヨーク、中間磁極)に適用したSS400のBH曲線とそのデータを図3に示す。電磁石の形状は以下の条件を満足するように設計された。

- 磁場分布：10,000 Gaussから2,000 Gaussにビーム軸方向で25 cm以内で減衰し、且つローカルな勾配(dB_y/dz)は350 Gauss/cm以下に抑える。
- 磁極間間隔: 10 cm
- 有効磁場領域: 3 cm x 6 cm ($x \times y$)
- ヨークのx方向の幅 ≤ 90 cm
- 目標磁場からのずれ: $\Delta B_x \leq \sim 10\%$

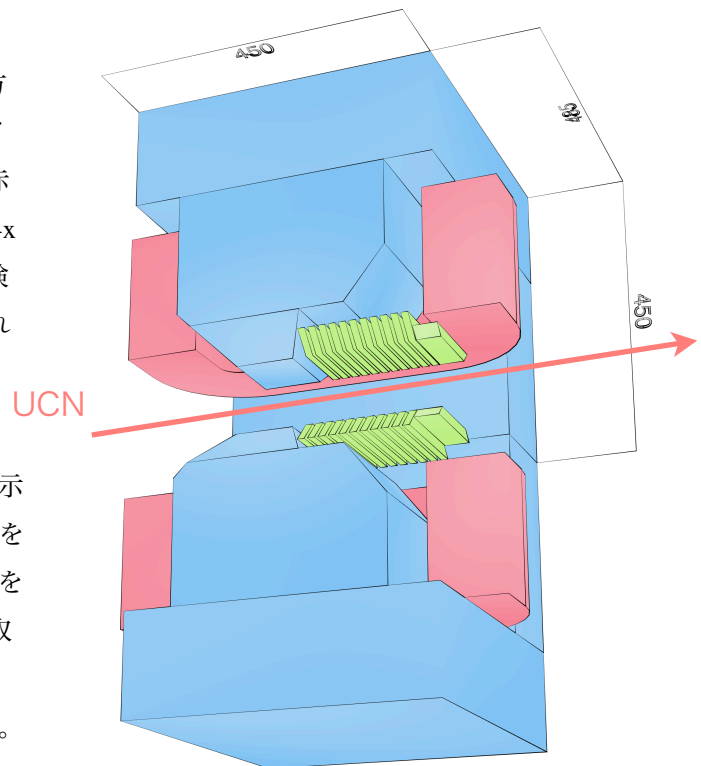


図1:電磁石外観図

Final Design of B₀ Magnet for UCN Rebuncher

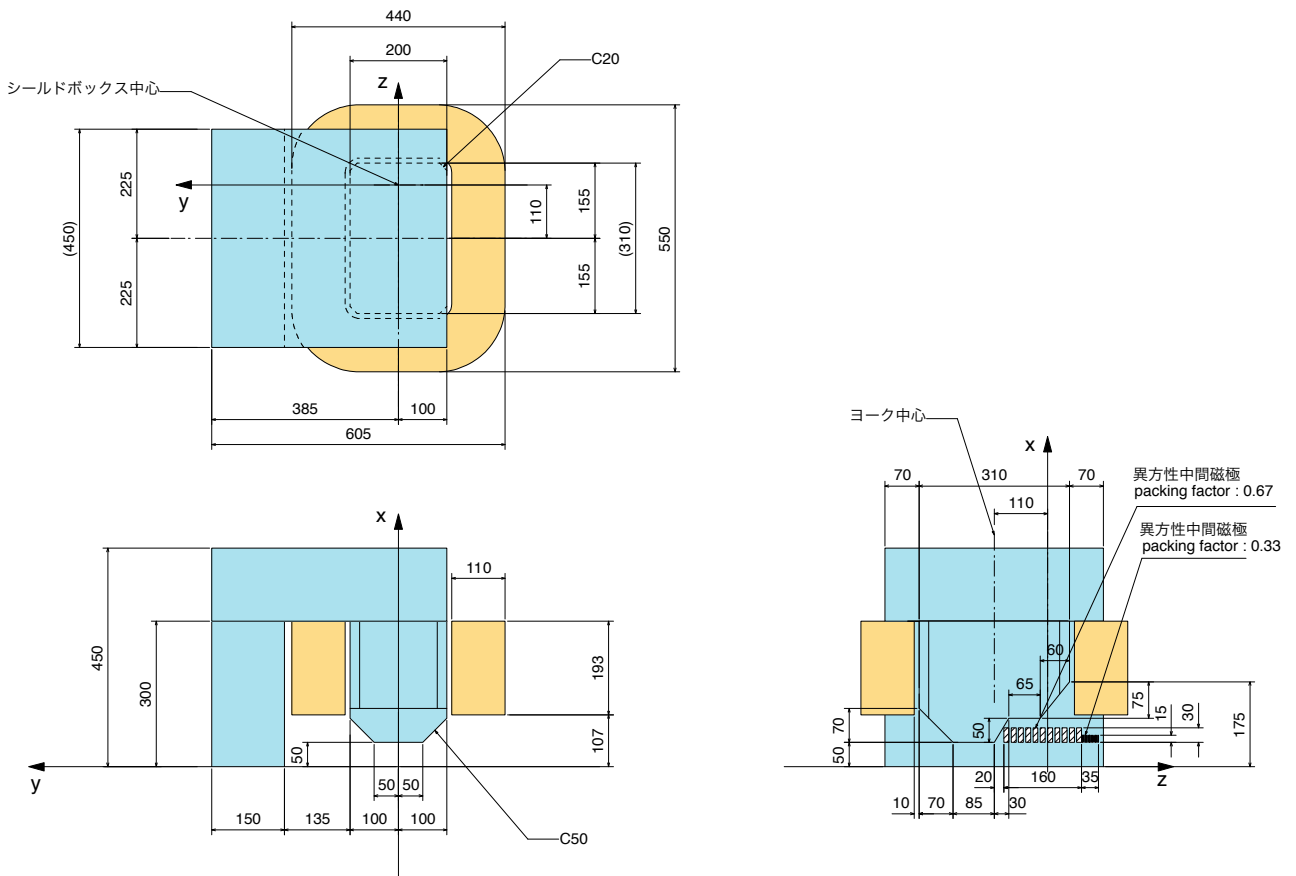
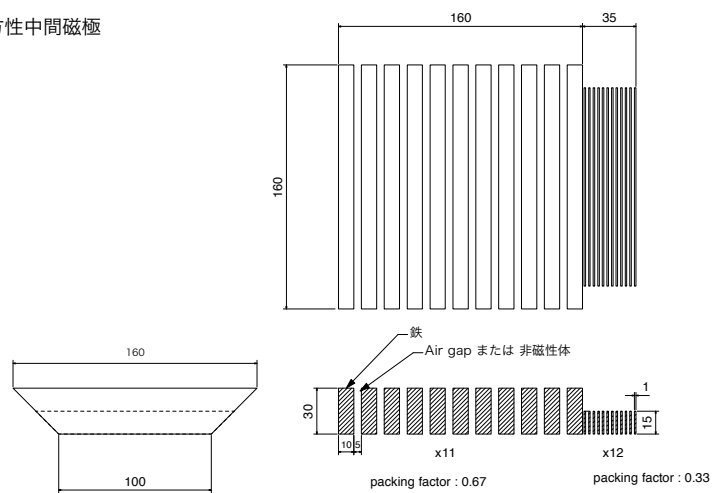


図2: 電磁石全体の形状及び座標系。単位はmm

異方性中間磁極



2010.10.5. KEK Arimoto

図3: 異方性中間磁極の構造

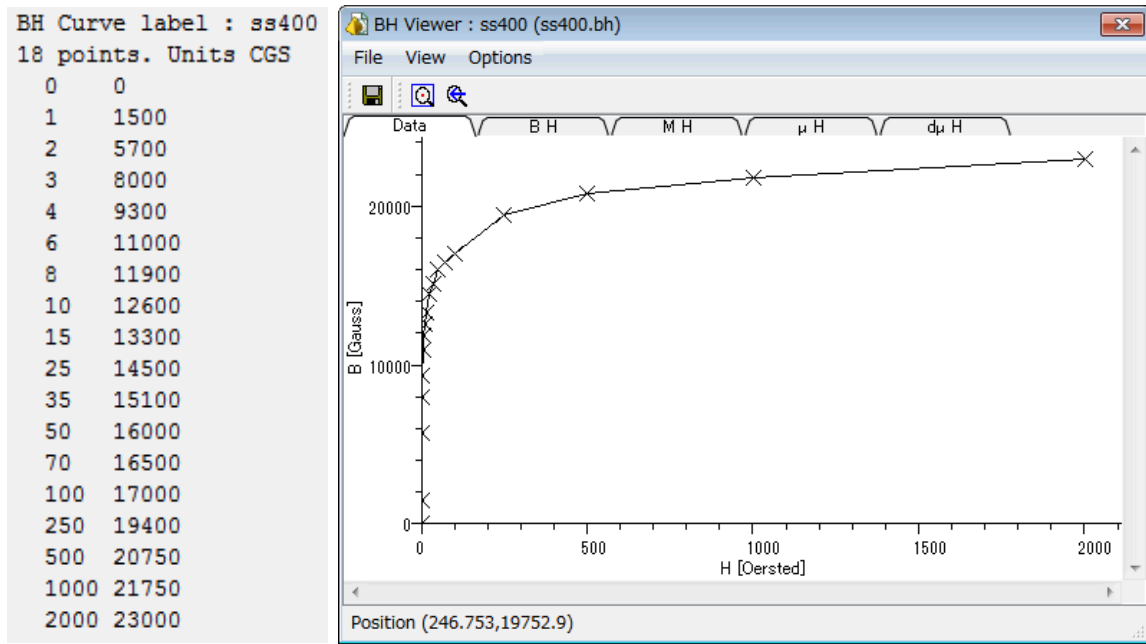


図4: TOSCAモデルに入力したSS400のBH曲線データ

2. 磁場計算結果

2.1. 入力モデル

TOSCA(ver. 13.039)計算に入力したモデルを図5に示す。メッシュのおおまかな大きさがわかるようにコイルは表示せずに磁極部を拡大した。代表的な領域のメッシュサイズを表1に示す。また図6にはヨーク磁束密度のcontour plotを示す。

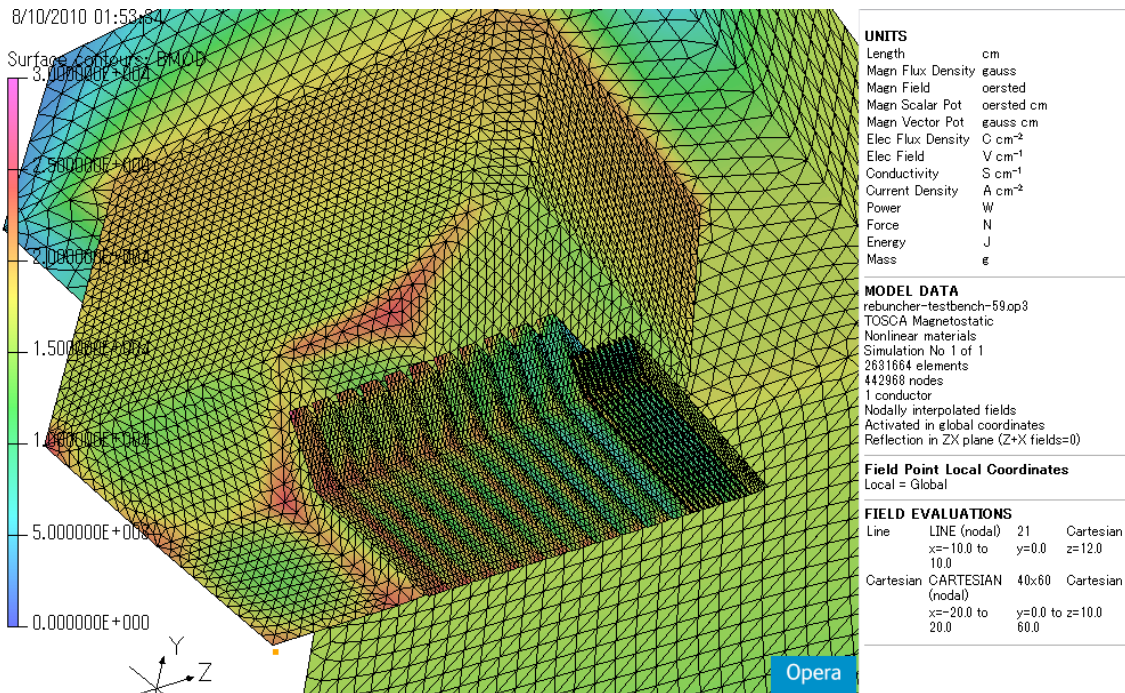


図5: TOSCA入力メッシュ

領域	最大メッシュサイズ [cm]
主磁極	1
中間磁極 1 (Packing factor 0.6)	z方向: 0.25 その他: 1
中間磁極 2 (Packing factor 0.3)	z方向: 0.025 その他: 1
リターンヨーク	2.5
ギャップ (中間磁極真下)	z方向: 0.25 その他: 0.5
ギャップ (上記以外)	0.5

表1: 代表的な領域のメッシュサイズ

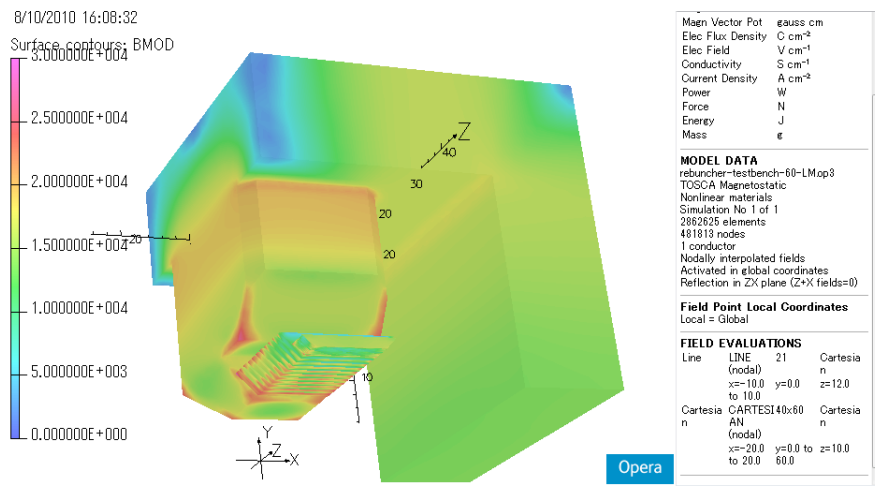


図6: ヨーク磁束密度Contour Plot.

コイル断面積は11.0 cm x 19.3 cm、電流密度は225 A/cm²とした。この時の総電流は47767.5 A・Tとなる。

2.2. 計算時間

- コンピュータ
 - モデル: Dell Vostro 430
 - CPU: Intel(R) Core(TM)i3 CPU 540 @3.07GHz/
 - メモリ: 4.00 GB
 - OS: Windows7 Professional 32ビット
- Element 数: 3228073
 - Linear tetrahedra : 2438832
 - Quadratic tetrahedra : 789241
- Node数 : 1495979
- 計算時間 : 1時間18分

2.3. Median plane 上の磁場分布

メディアンプレーン上(x=0 cm)での磁場分布を図7に示す。左図はB_y成分をz軸に沿ってプロットしたもので、-12.5 cm < z < 12.5 cmが rf 磁場(リバンチング)領域となっている。右図はzでB_x成分を微分したものであ

Final Design of B₀ Magnet for UCN Rebuncher

る。グラフ中心上部に描かれている図形はz軸のスケールを合わせて描いた磁極形状である。リバンチング領域では勾配がほぼフラットになっていることがわかる。

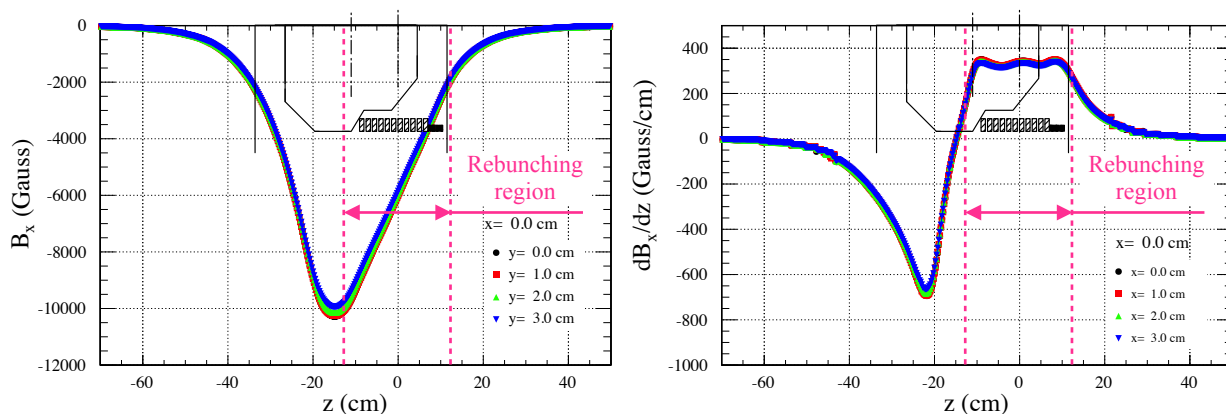


図7: 左図: z vs B_x 分布. 右図: z vs dB_x/dz

2.4. z vs B_x

次にリバンチング領域を拡大したものをプロットする。図8は B_x 成分を z の関数としてプロットしたものである。4つのプロットはそれぞれmedian planeからの距離(x)の位置が異なり、左上, 右上, 左下, 右下の図がそれぞれ $x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5$ cmの時のものである。また各グラフ中の●、■、▲、▼で示された曲線はそれぞれ $y=0, 1, 2, 3$ cmの場合のものである。 -12.5 cm $<z<12.5$ cmの領域で $B_x=-10000$ Gaussから -2000 Gaussまで減衰していることが分る。

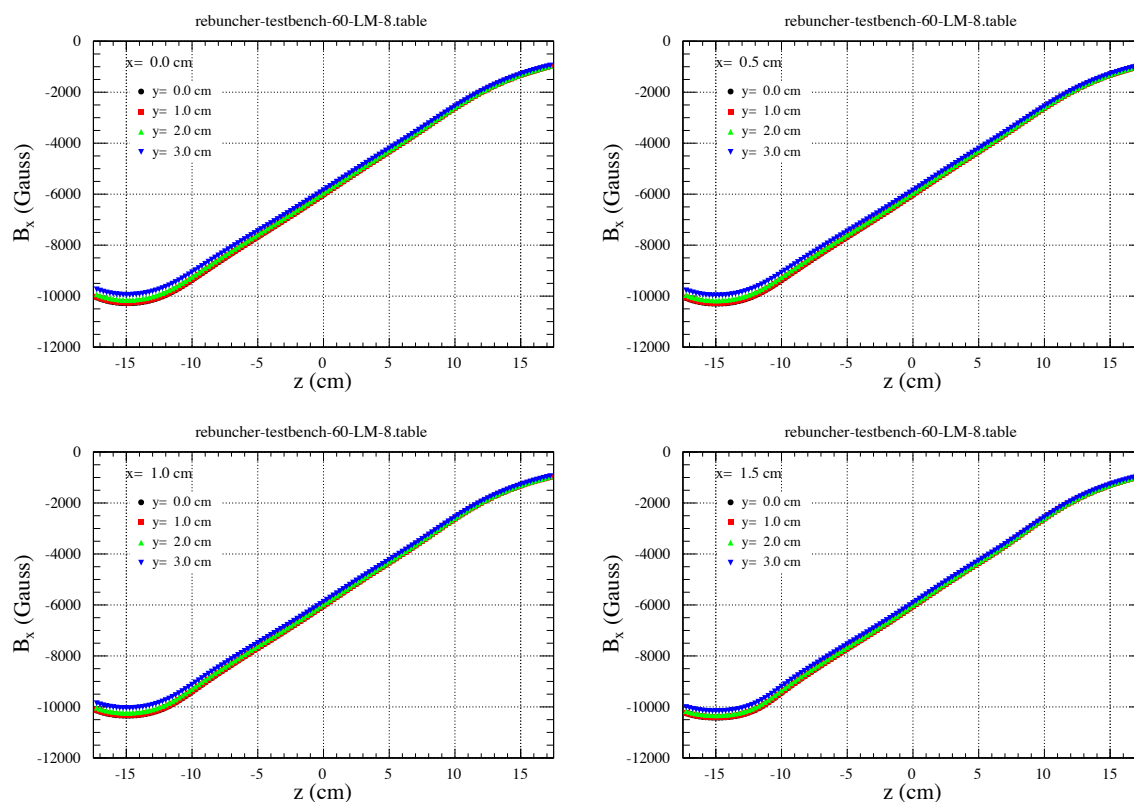


図8: z vs B_x 分布. 上左図: $x=0$ cm, 上右図: $x=0.5$ cm, 下左図: $x=1.0$ cm, 下右図: $x=1.5$ cm.

2.5. 磁場勾配分布

図9にzの関数としてB_xの磁場勾配をプロットする。磁場勾配は以下の式を使って導出した。

$$\frac{dB_x}{dz} = \frac{B_{x,i} - B_{x,i-1}}{z_i - z_{i-1}}$$

ここでB_{x, i}はi番目のB_x成分を表わしている。

4つのグラフはそれぞれmedian plane からの距離(x)が異なる。また各グラフ中の●、■、▲、▼で示された曲線はそれぞれy=0, 1, 2, 3 cmの場合の磁場勾配である。Median plane では磁場勾配は目標の350 Gauss/cm以下に抑えられている。またその他の位置でも400 Gauss/cm以下に抑えられていることがわかる。平坦部 (-10 cm < z < 10 cm)の3つ山のうねりは主磁極の勾配が不連続になっていることによる。また y方向の位置による勾配の差は6%程度である。

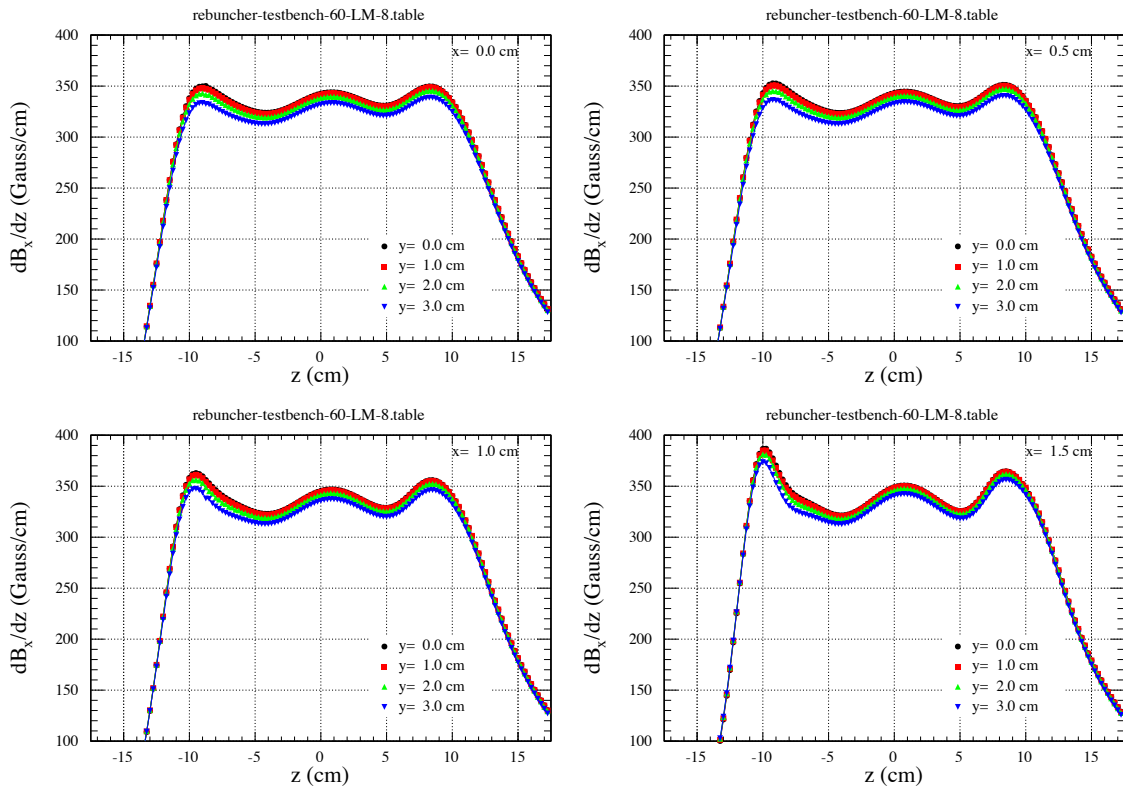


図9: z方向の磁場勾配。上左図: x=0 cm, 上右図: x=0.5 cm, 下左図: x=1.0 cm, 下右図: x=1.5 cm.

2.6. y方向のフリッジ磁場

図10にB_x成分をピーク値が1となるように規格化したものをyの関数としてプロットしたものを示す。4つのグラフはそれぞれx方向の位置が異なっている。また各グラフ中の●、■、▲、▼、○、□で示された曲線はそれぞれz方向の位置が-12.5, -7.5, -2.5, 2.5, 7.5, 12.5 cmの場合の磁場分布である。ビーム領域は-3 cm < x < 3 cmであり、この範囲では磁場の変化量は3%程度である。またC型にしたことによる非対称性はほとんど見られない。

Final Design of B₀ Magnet for UCN Rebuncher

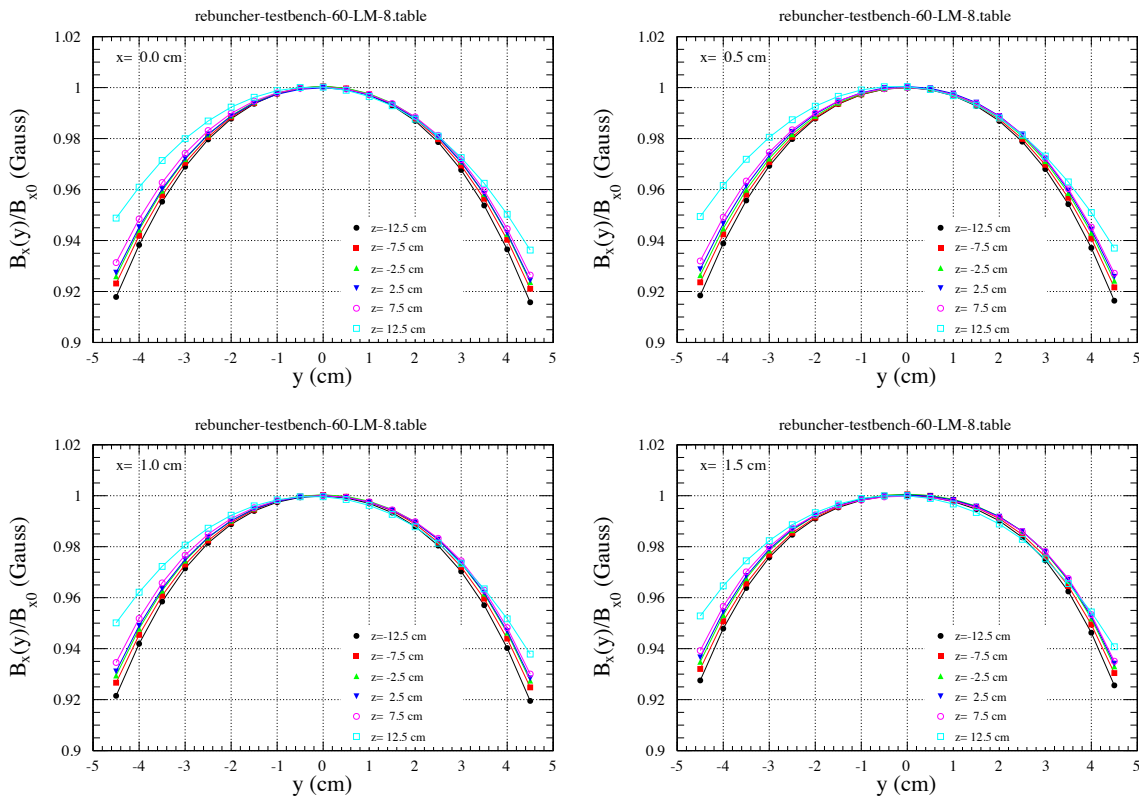


図10: y vs B_x . 上左図: $x=0$ cm, 上右図: $x=0.5$ cm, 下左図: $x=1.0$ cm, 下右図: $x=1.5$ cm

またこの図から B_x 成分の y 方向分布は z 方向の位置によらずほぼ一定(相似形)であることがわかる。磁場勾配を生成するため主磁極間隔は z を関数として変化しているため、このことは主磁極間隔によらず y 方向のフリッジ磁場の形状が相似であることを示している。これは異方性中間磁極を挿入した効果である。

2.7. 異方性中間磁極による磁場の変動

中間磁極付近での磁場分布を図11に示す。左図は z を関数とした B_x 成分の磁場分布、右図は z 軸方向の磁場勾配である。図上段から下段に下がるにつれて中間磁極からの距離は離れていくように図を配置した。最上段のプロット($x=4.5$ cm: 中間磁極表面からの距離=0.5 cmに相当)を見ると $-10\text{cm} < z < 7\text{cm}$ 付近で (packing factor 0.67の中間磁極の積層周期と同じ) 1.5 cm周期で磁場が変動していることがわかる。中間磁極から離れると変動は小さくなり、 $x=3.5$ cm (中間磁極表面からの距離=1.5 cm)以下ではこの変動はほとんど見られなくなっている。中間磁極の積層鋼板との間隔は0.5 cmであるので、ビーム領域を磁場変動の小さい領域にしたい場合は、積層鋼板同士の間隔を中間磁極-ビーム領域間距離の約1/3以下にすれば良いと考えられる。尚、packing factor 0.33の中間磁極による磁場変動は鋼板間の距離が0.2 cm, 周期が0.3 cmと小さいので $x=4.5$ cmの位置でも見えていない。

3. まとめ

TOSCA3Dを使用して3次元計算を行ない、仕様を満足する電磁石が設計された。この磁石では異方性中間磁極を使っている。鋼板を積層をした異方性中間磁極の不連続性による磁場のバツキはビーム領域ではほとんど見られなかった。今後は B_0 磁石の3次元磁場とrfコイルの3次元磁場と合わせてAdiabatic parameterを計算する。

Final Design of B_0 Magnet for UCN Rebuncher

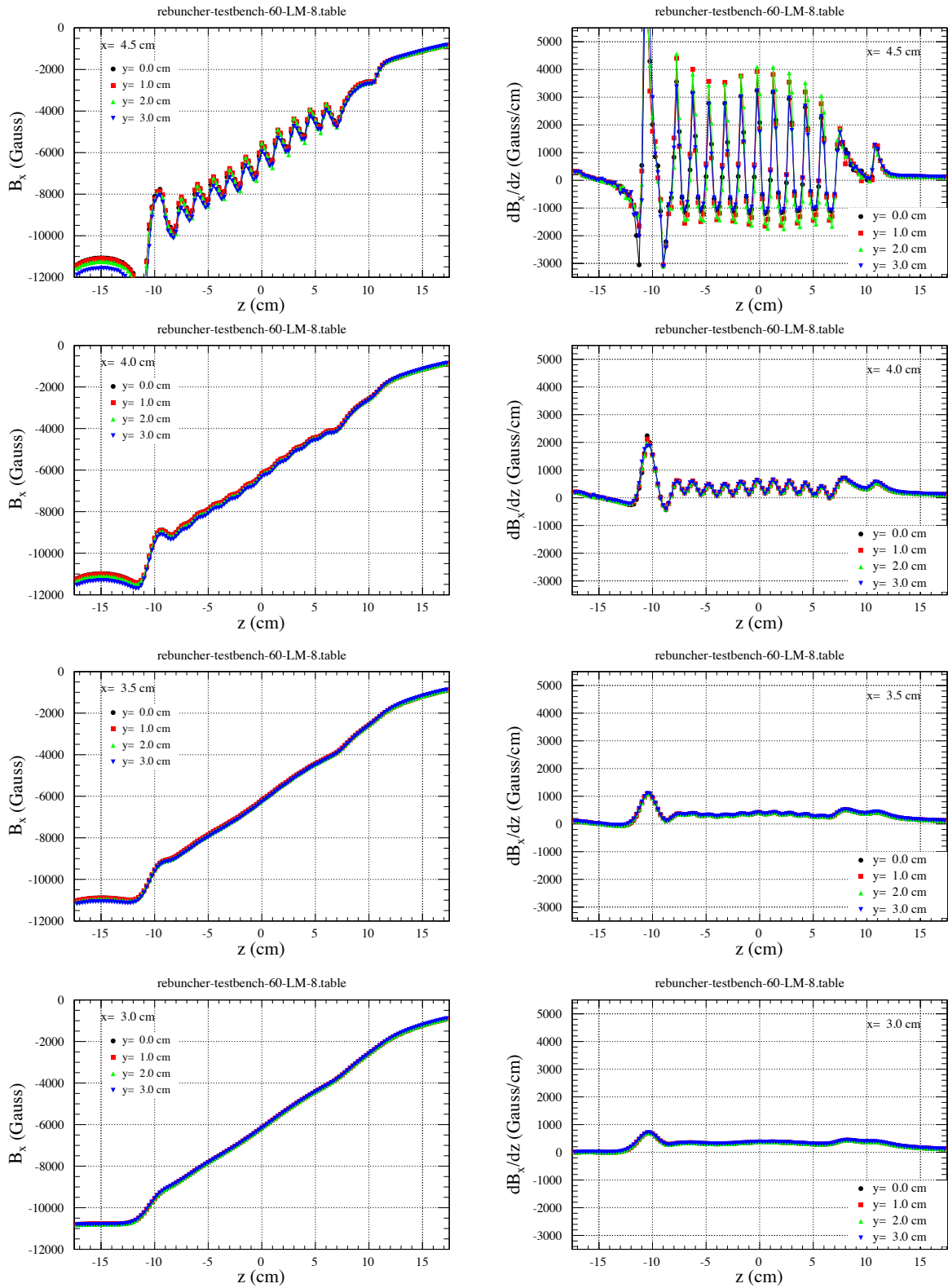


図11: 左図: z vs B_x . 右図: z vs dB_x/dz . 上から $x=4.5, 4.0, 3.5, 3.0$ cm.