

# 大立体角スペクトロメータ（第7版）

2012.02.24 加藤静吾

## 1 経過

第6版までは外的条件を考慮せずに、中心運動量  $1.3 \text{ GeV}/c$  の荷電粒子を、 $\pm 7.5\%$ の運動量帯域で、できるだけ大立体角で分析できる常電導磁気分析装置を検討してきた。

その後、実験室で供給される電力に限界があるために消費電力を削減した。またKEK既存の電源に合わせたインピーダンスになるように、入手可能なホローコンダクターに対応させた。KEK既存の電源をまとめると以下のようになる。

電源A	500 kW	2500 A×200 V か 5000 A×100 V の切替
電源B	260 kW	1750 A×150 V, 3500 A×75 V, 875 A×300 V の切替
電源C	500 kW	3000 A×160 V

電源Aと電源Bは複数台あり、タンデム運転が可能である。しかしタンデム運転を避けることが望ましいので、ホローコンダクターを Luvata 社のリストにあるものから選んで、各電磁石に電源1台を対応させて最適化した。電磁石と電源の組合せを次のようにした。

第1四極電磁石	電源A
第2四極電磁石	電源B
双極電磁石	電源A

新規に電源を作ることなく、 $60 \text{ msr}$ の立体角を維持して3つの電磁石で消費電力を  $500 \text{ kW}$ ,  $150 \text{ kW}$ ,  $400 \text{ kW}$  に抑えることができる解を得たが、ターゲットから第1四極電磁石までの距離を  $40 \text{ cm}$  から  $60 \text{ cm}$  まで増やしたことにより立体角は  $55 \text{ msr}$  付近まで低下した。

その後トーキンに見積もりを依頼したところ、大幅な予算超過となった。そのために可能な範囲で電磁石もKEK既存のものを活用し、新規製作部分もできるだけ小型化して経費を節減できるようにしてきた。この報告でその詳細を議論する。

## 利用できる可能性のある既存四極電磁石の仕様

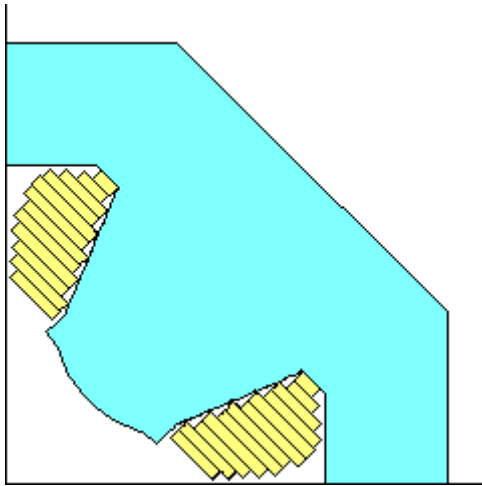


図1 既存第1四極電磁石候補

第1四極電磁石候補となる既存電磁石を第1図に示す。この四極電磁石の口径は30 cm（欲しいのは32 cm）、最大磁場勾配は7.7 T/m（欲しいのは9.0 T/m）、磁場有効幅（高さ）は40 cm（欲しいのは50 cm）、長さが120 cm（欲しいのは90 cm）あり、長すぎる。丁度よい長さの四極電磁石が存在したが限度を超えて放射化していたことが悔やまれる。

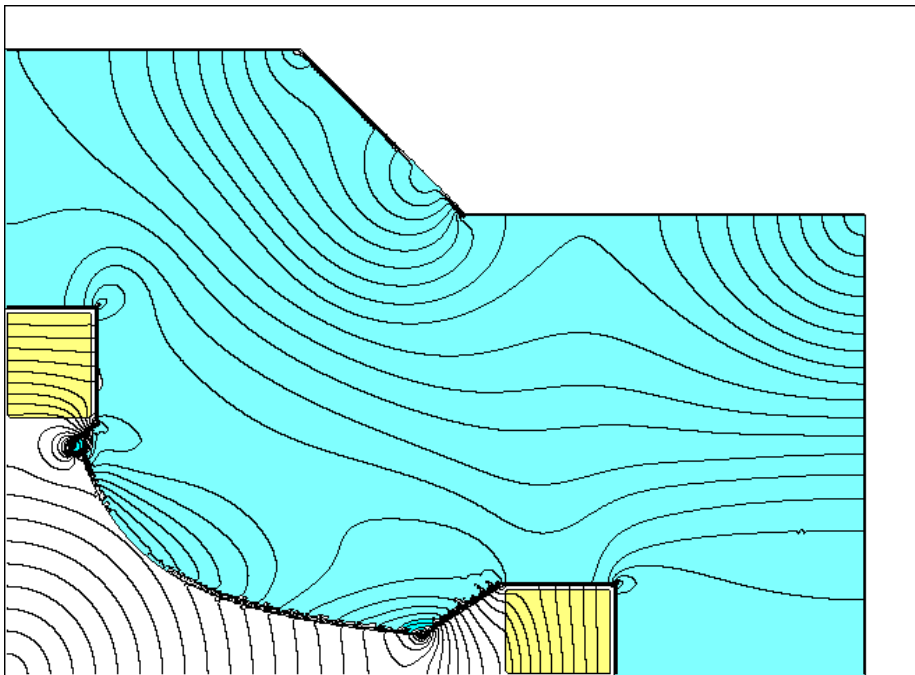


図2 既存の四極電磁石 曲線は3次元で3.08 T/mの磁場勾配を与えるような電流での0.1 Tごとの磁場強度分布を示す。一様な磁場勾配分布では等磁場曲線は等間隔の同心円となる。

第2四極電磁石として利用できる既存電磁石はボア直径が43.5 cmと欲しい四極電磁石の36 cmより大きい。横方向の有効磁場幅が大きくなるような横長構造なので、ボア直径の2倍程度あることも都合がよい。問題は最大磁場勾配が3.08 T/mしか得られないことであり、欲しい値の4.5 T/mよりもかなり小さい。冷却水路数を増やすようなコイル巻き直しや磁極間隙縮小などの対応が必要である。

## 2 第1段階 双極電磁石の新設

当初検討していた双極電磁石

30 mm×22 mm の長方形断面で直径 13 mm の水路があるホローコンダクター(製品番号 8243, 断面積 526mm<sup>2</sup>, 比質量 4.70 kg/m) を採用する。最小曲げ半径は厚さの 4 倍とし方向によって 8.8 cm と 12.0 cm となる。小さい半径を電磁石中心軸方向へのコイル飛出しを抑えることに利用する。素管の間の絶縁を 0.5 mm、対地絶縁を 2 mm、鉄とコイルの間の空間を 5 mm とした。コンダクターをコイル厚さ方向に 7 層とすると磁極間隙は 34.0 cm で、上流の 2 つの四極電磁石を通過できた粒子は全部双極電磁石を通過できるようにしていた。

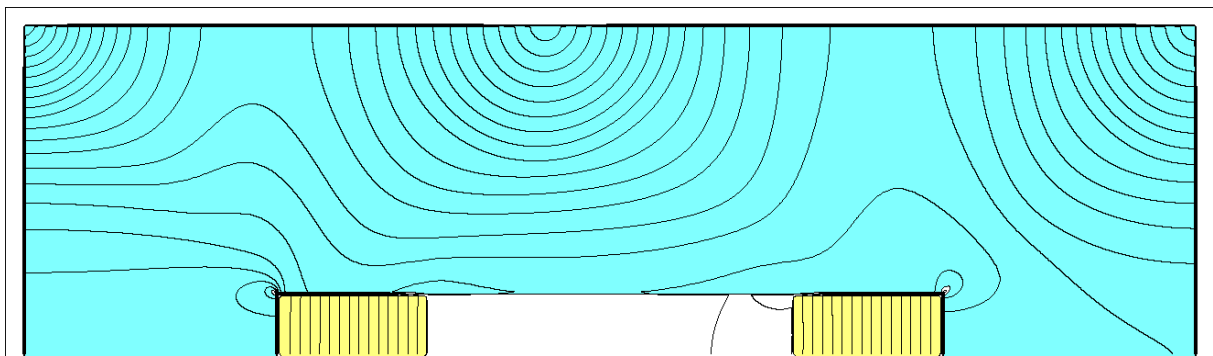


図3 元の双極電磁石案の磁場強度分布 鉄重は過大評価で 169 トンとなる。

経費節減のために縮小した双極電磁石

26.5 mm×23.7 mm の長方形断面で直径 13.5 mm の水路があるホローコンダクター (製品番号 8104、断面積 484mm<sup>2</sup>、比質量 4.34 kg/m) を採用する。最小曲げ半径は方向によって 9.48 cm と 10.60 cm となる。小さい半径を電磁石中心軸方向へのコイル飛出しを抑えることに利用する。コンダクターをコイル厚さ方向に 6 層とすると磁極間隙は 31.44 cm となる。電源 A の最大電流で必要磁場が発生する範囲でヨークの厚さを削減した。図 4 に結果を示す。ヨークで 2 T を超える部分があるが、必要磁場は確保されている。

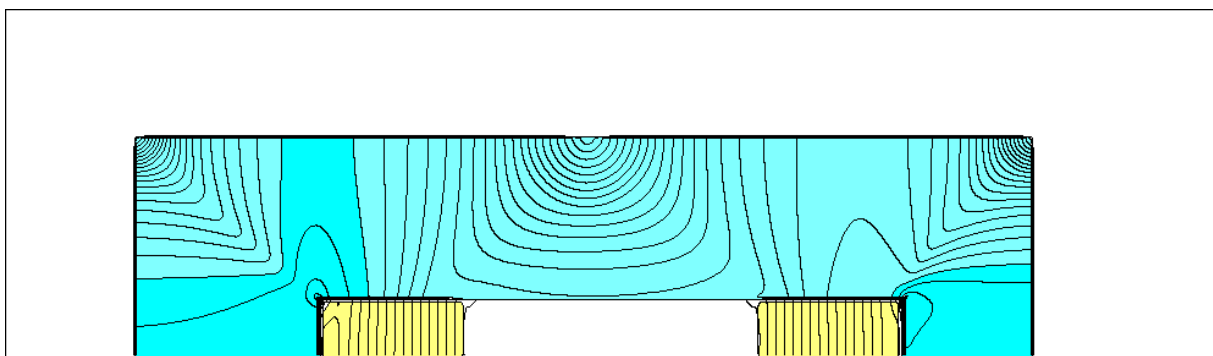


図4 軽量化した四極電磁石 2 T 以上の領域を濃青色で示した。図3と同じ縮尺で表示している。

仕様

幅	245 cm
高さ	120 cm
偏向角	70 度
磁極間隙	31.44 cm
中心軌道半径	300 cm
平均磁極長	$(70/360) \times 2\pi \times (292.5 \text{ cm}) = 357.4 \text{ cm}$ (体積計算用)
鉄重 (過大評価)	84 ton
コイル	
構造	6 層 14 列
巻数	84
対地絶縁を除くコイルサイズ	$(6 \times 2.47 \text{ cm}) \times (14 \times 2.75 \text{ cm})$ $= (14.82 \text{ cm}) \times (38.5 \text{ cm})$
平均周長	11.67 m
曲線(xz 面平行)	$2 \times (70/360) \times 2\pi \times [300 - (8 - 0.7) \div \tan(35 \text{ deg})] \text{ cm}$ $= 708 \text{ cm}$
直線(x 軸平行)	$2 \times (100 - 2 \times 12.0) \text{ cm} = 152 \text{ cm}$
直線(y 軸平行)	$4 \times 5 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$
曲線(xy 面平行)	$2 \times \pi \times 2.65 \times (4 + 14 \div 2) \text{ cm} = 183 \text{ cm}$
曲線(yz 面平行)	$2 \times \pi \times 2.37 \times (4 + 6 \div 2) \text{ cm} = 104 \text{ cm}$
コイル全長	$2 \times 84 \times 1167 \text{ m} = 1961 \text{ m}$
コイル抵抗	$(2 \times 10^{-8} \Omega \text{m}) \times (1961 \text{ m}) \div (4.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 0.0810 \Omega$
軸方向飛出し	$(4 \times 2.37 - 4 + 6 \times 2.47 \div 2) \text{ cm} = 12.89 \text{ cm}$
コイル電流密度	3.63 A/mm <sup>2</sup>
導体電流密度	5.10 A/mm <sup>2</sup>
コイル電流	2469 A
コイル電圧降下	$(2469 \text{ A}) \times (0.0810 \Omega) = 200 \text{ V}$ (「電源 A」の最大値)
消費電力	$(2469 \text{ A})^2 \times (0.0810 \Omega) = 494 \text{ kW}$
磁場	1.51 T (2次元磁場計算)
必要磁場	1.35 T (軌道計算に使う磁場)

## ここまでで出来ること

図1と図2の四極電磁石をそれぞれ第1四極電磁石と第2四極電磁石として図4の双極電磁石と組み合わせてスペクトロメータを構成すると次のようになる。

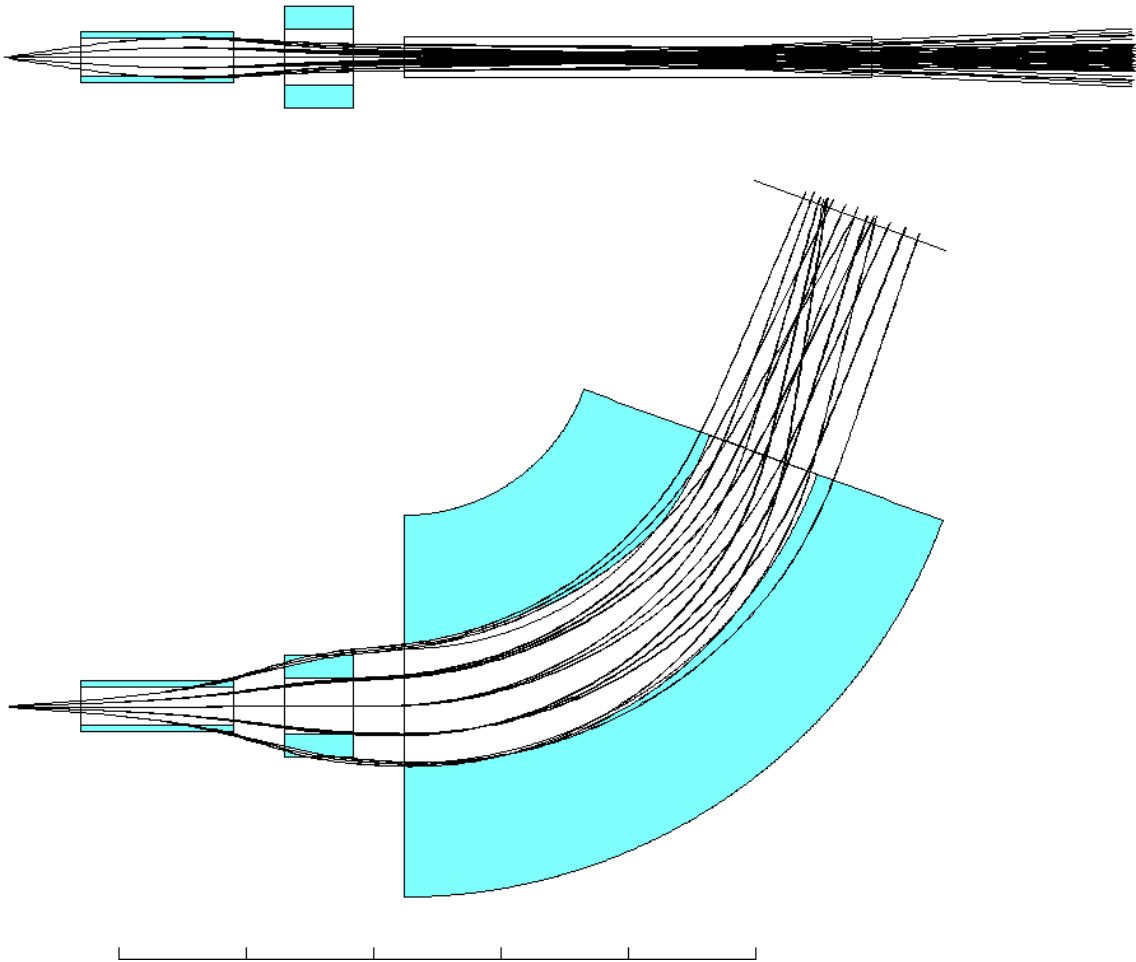


図5 双極電磁石のみを新規製作した場合のスペクトロメータの軌道追跡 青い部分はヨークやコイルを示すものではないことに注意。

この計算では3通りの運動量に対して、横方向 150 mr、縦方向 300 mr の 45 msr の範囲内で軌道追跡している。磁極等にぶつかる粒子もあるが通り抜けるように計算している。同じ運動量と立体角範囲内で乱数的に初期条件を与えて軌道追跡し、全ての間隙を通り抜けた粒子の数を数えて有効立体角を求めた。立体角を大きくするように磁場設定を最適化した。

第2四極電磁石の公称最大磁場勾配が 3.08 T/m しかないために、立体角は 28.1 msr と経費節減前の半分くらいのもとなった。もっと大きな立体角を得るために、第1四極電磁石は長さが短く、磁極間隙が大きく、最大磁場勾配が大きくできることが望ましい。第2四極電磁石の磁極間隙は少し小さくてもよいが、磁場勾配がもっと大きくできることが望ましい。

### 3 第2段階 第1四極電磁石の新設

当初設計の磁極間隙は 32 cm であったがここでは 31 cm に縮小する。既存電源 A (2500 A×200 V) を利用するために電磁石の導体として Luvata の 22 mm×22 mm、水路直径 12 mm、断面積 367 mm<sup>2</sup> のホローコンダクター(製品番号 6095, 比質量 3.28 kg/m)を採用した場合を検討する。コイル抵抗が 0.08Ω に近くなるようにコイルの巻数を調整する。最小曲げ半径を 8.8 cm とする。この導体素管の間には厚さ 0.5 mm、コイル全体には厚さ 2 mm の絶縁を施す。さらに鉄とコイルの間に 5 mm の隙間を取る。

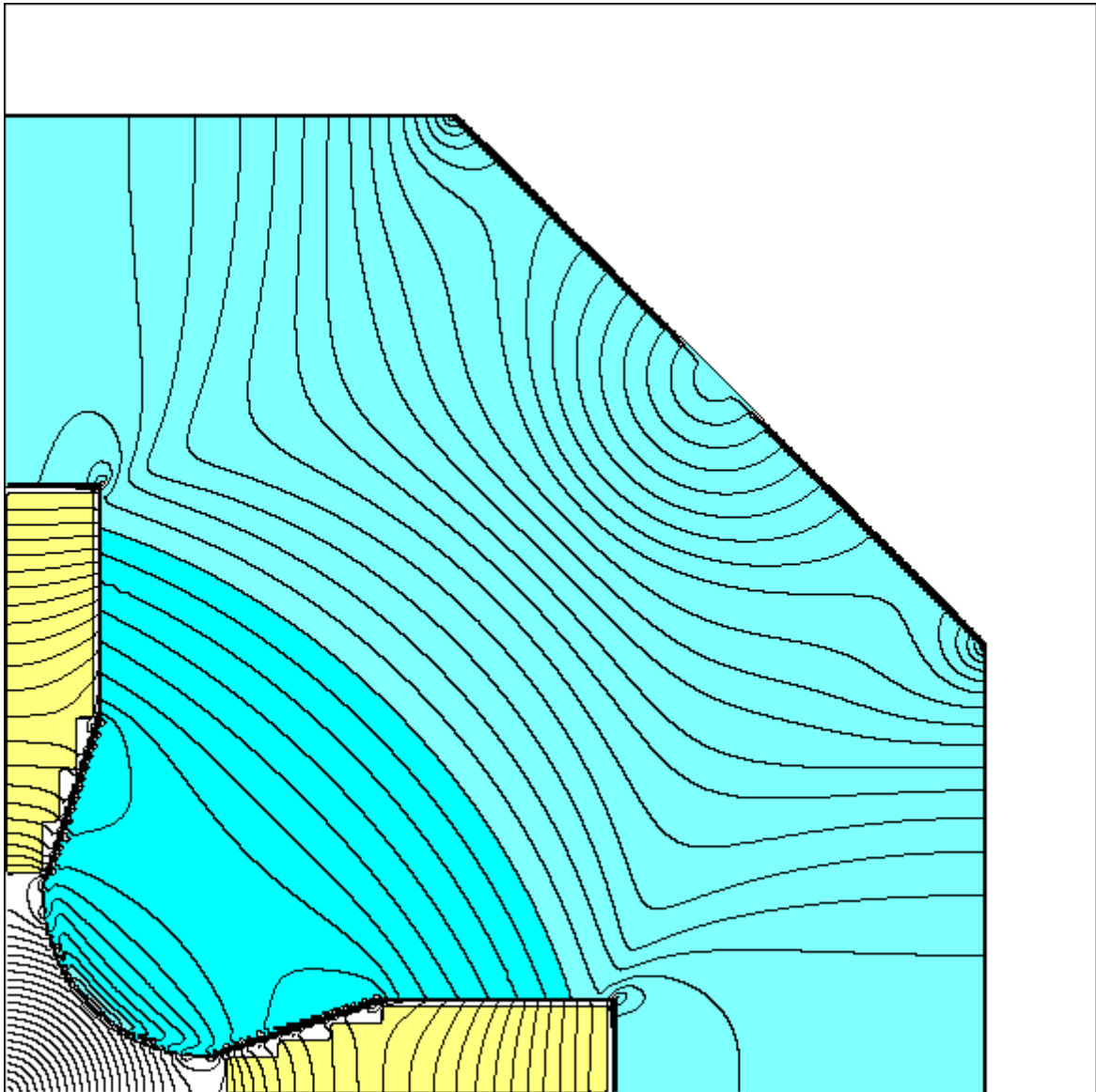


図6 第1四極電磁石の 0.1 T 毎の磁場強度分布 磁場強度が 2 T を超える部分の色を濃く表示した。磁極先端では 2 T より弱くなっている。

コイルを巻く磁極の角を 40 mm と 9 mm に非対称に切り落とし、40 mm の角の所からコイルを曲げ始める。これは隣接電磁石との間へのコイルの飛出しを極力減らすためである。座標原点

に近いところにコンダクターをもう1列追加するともっとよい磁場を発生できるが、8.8 cm の最小曲げ半径では2つのコイルが繋がらなくなる。

コイル断面の幅を増やすと巻き数が増えて全電流が増えるがコイルの長さの増加によって抵抗も消費電力も増える。同じ消費電力になるようにして比較すると幅を増やすことは必ずしも有利ではない。同様に厚さを減らすと巻き数が減って全電流も減るが、磁極の付け根の太さを増すことによる磁場の増大も期待できる。コイル断面の厚さと幅を5～6層、21～22列の間で得られる磁場勾配を求め、同じ消費電力で最大磁場勾配になるものとして5層21列のコイルを選択した。

上記のように最適化してから最大電流を与えた場合の磁場強度分布を図6に示す。

## 仕様

幅	2.6 m
高さ	2.6 m
長さ	0.88 m
直方体体積	5.9 m <sup>3</sup>
鉄重	48 ton
磁極双曲線	$xy = 128 \text{ cm}^2$
磁極間隙	31.0 cm
コイル	
構造	5層22列のうち一部除外（傾き 1/3）
巻数	$22+22+19+16+13 = 92$
対地絶縁を除くコイルサイズ	11.5 cm × 50.6 cm
平均周長	378 cm
直線（z軸に平行）	$2 \times 80 \text{ cm} = 160 \text{ cm}$
曲線（yz面に平行）	$2 \times \pi/2 \times [8.8+2.3 \times (5-92 \div 22 \div 2)] \text{ cm}$ = 49 cm
曲線（xy面に平行）	$2 \times \pi/2 \times [8.8+2.3 \times (22-92 \div 5 \div 2)] \text{ cm}$ = 120 cm
曲線（xz面に平行）	$2 \times \pi/2 \times [8.8+2.3 \times (5-92 \div 22 \div 2)] \text{ cm}$ = 49 cm
コイル全長	$4 \times 92 \times 378 \text{ cm} = 1391 \text{ m}$
コイル抵抗	$(2 \times 10^{-8} \Omega \text{m}) \times (1391 \text{ m}) \div (3.67 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 0.0758 \Omega$
磁極からコイル飛出し	$(8.8 + 12.5 + 0.2 - 4) \text{ cm} = 17.5 \text{ cm}$
電流	2500 A（最大値）
平均電流密度	4.73 A/mm <sup>2</sup>
導体電流密度	6.81 A/mm <sup>2</sup>
電圧降下	$(2500 \text{ A}) \times (0.0758 \Omega) = 190 \text{ V}$
消費電力	$(2500 \text{ A})^2 \times (0.0758 \Omega) = 474 \text{ kW}$
2次元磁場勾配	9.89 T/m
3次元磁場勾配	9.06 T/m
軌道追跡に使う磁場勾配	9.00 T/m

「平均電流密度」は磁場計算に使う。「3次元磁場勾配」は軌道追跡計算に使うもので、これは2次元磁場計算による磁場勾配から次の経験式を使って求めた。

$$\left(\frac{dB}{dr}\right)_3 = \frac{\left(\frac{dB}{dr}\right)_2}{1 + 0.26 \times \frac{G}{L}}$$

ここで  $G$  と  $L$  は磁極間隙と磁極長を表す。

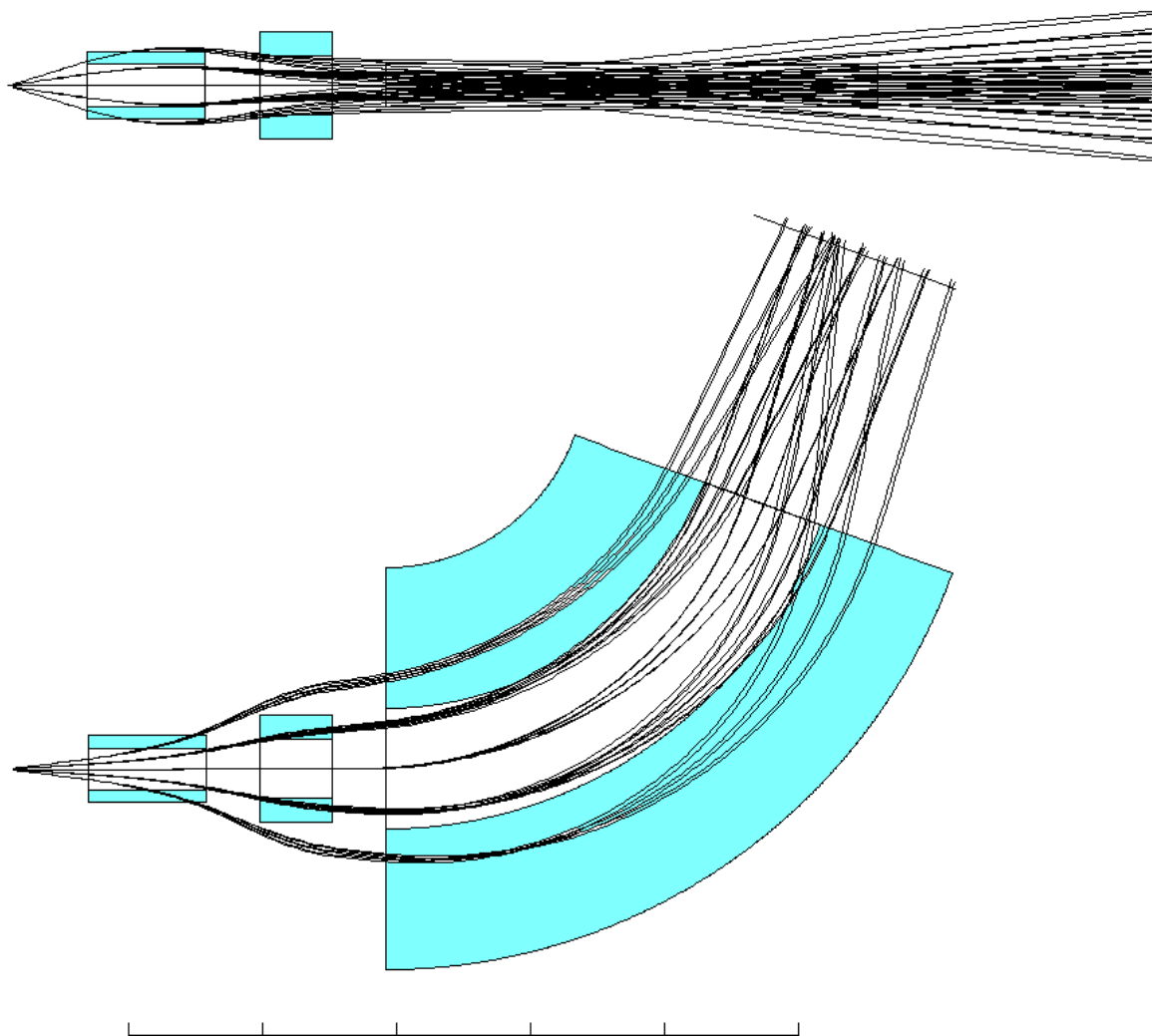


図7 第1四極電磁石と双極電磁石を新設した場合のスペクトロメータ軌道追跡

この計算では第1四極電磁石の長さを88 cm、磁場勾配を8.30 T/mとしているが、第2四極電磁石の磁場勾配は3.08 T/mに制限されている。横方向250 mr、縦方向600 mrの立体角150 msrに対して粒子を追跡している。得られた立体角は47.6 msrとなった。検出器位置で横方向に収束不足であることが読み取れる。



#### 4 第3段階 第2四極電磁石の改造

第2四極電磁石の磁場勾配を増大させることを考慮してスペクトロメータの立体角が最大になるように条件を探すと第2四極電磁石の磁場勾配として4.54 T付近に増やす必要がある。

既存の第2四極電磁石の磁場勾配を増大する方法として、コイルを巻きなおすことと、磁極間隙を縮小することが考えられる。

##### コイルを巻き直して磁場勾配を増やす場合

与えられえているコイルポケットにコイルを効率的に収納するのでホローコンダクターの選択が不自由になる。Luvataの23.7 mm×16 mm、水路直径9 mm、断面積307 mm<sup>2</sup>のホローコンダクター（製品番号6803, 比質量2.73 kg/m）を採用した場合を検討する。コイルポケットの隙間が上下方向と左右方向で4 mmの差が発生している。

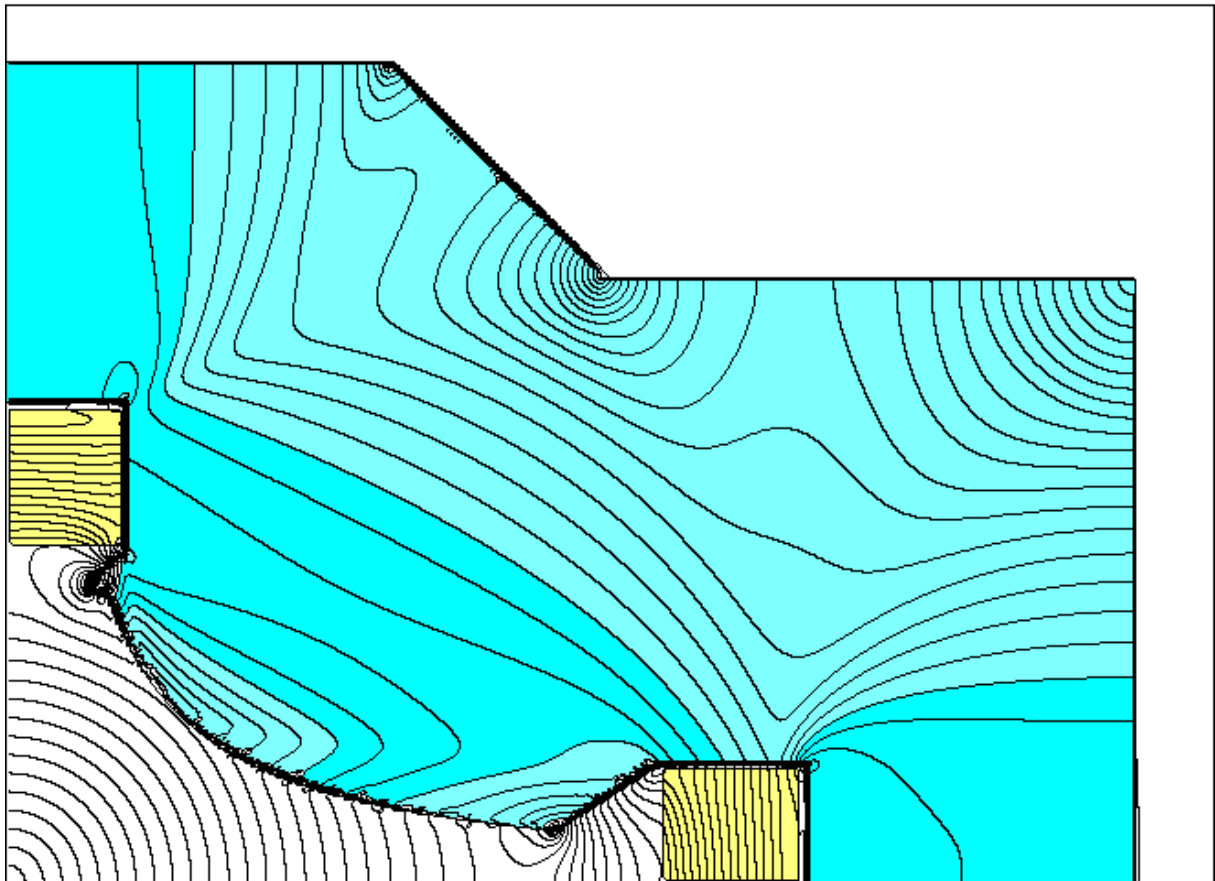


図8 コイルを巻きなおした場合の第2四極電磁石 濃い青色の部分は2 T/mを超える。

## 仕様

幅	2.06 m
高さ	2.14 m
長さ	0.54 m
鉄重	19.0 ton (直方体として)
磁極双曲線	$xy = 239 \text{ cm}^2$
磁極間隙	43.72 cm
コイル	
構造	6層5列
巻数	30
対地絶縁を除くコイルサイズ	10.2 cm × 12.25 cm
平均周長	284 cm
直線 (z 軸に平行)	$2 \times 46 \text{ cm} = 92 \text{ cm}$
曲線 (yz 面に平行)	$2 \times \pi/2 \times [6.8 + 1.7 \times (6 \div 2)] \text{ cm}$ $= 37 \text{ cm}$
曲線 (xy 面に平行)	$2 \times \pi/2 \times [9.8 + 2.45 \times (5 \div 2)] \text{ cm}$ $= 50 \text{ cm}$
曲線 (xz 面に平行)	$2 \times \pi/2 \times [6.8 + 1.7 \times (6 \div 2)] \text{ cm}$ $= 37 \text{ cm}$
直線 (x 軸に平行)	$2 \times 29.8 \text{ cm} = 60 \text{ cm}$
直線 (y 軸に平行)	$2 \times 3.8 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$
コイル全長	$4 \times 30 \times 284 \text{ cm} = 341 \text{ m}$
コイル抵抗	$(2 \times 10^{-8} \Omega \text{m}) \times (341 \text{ m}) \div (3.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 0.0222 \Omega$
磁極からコイル飛出し	$(6.8 + 10.2 + 0.2 - 4) \text{ cm} = 13.2 \text{ cm}$
電流	4505 A
平均電流密度	10.80 A/mm <sup>2</sup> (9.20 A/mm <sup>2</sup> 必要)
導体電流密度	14.66 A/mm <sup>2</sup>
電圧降下	$(4505 \text{ A}) \times (0.0222 \Omega) = 100 \text{ V}$ (「電源A」最大値)
消費電力	$(5000 \text{ A})^2 \times (0.00975 \Omega) = 244 \text{ kW}$
2次元磁場勾配	5.94 T/m
3次元磁場勾配	4.91 T/m
軌道追跡に使う磁場勾配	4.54 T/m

電流密度が超伝導電磁石並に大きいことが気になる。冷却水路の分岐数を増やすことで解決できると思われる。既に第1四極電磁石と双極電磁石とで「電源A」を2台使っているので、これで3台目が必要になる。もう少し細いコンダクターにして「電源C」も使えるようにする必要がある。

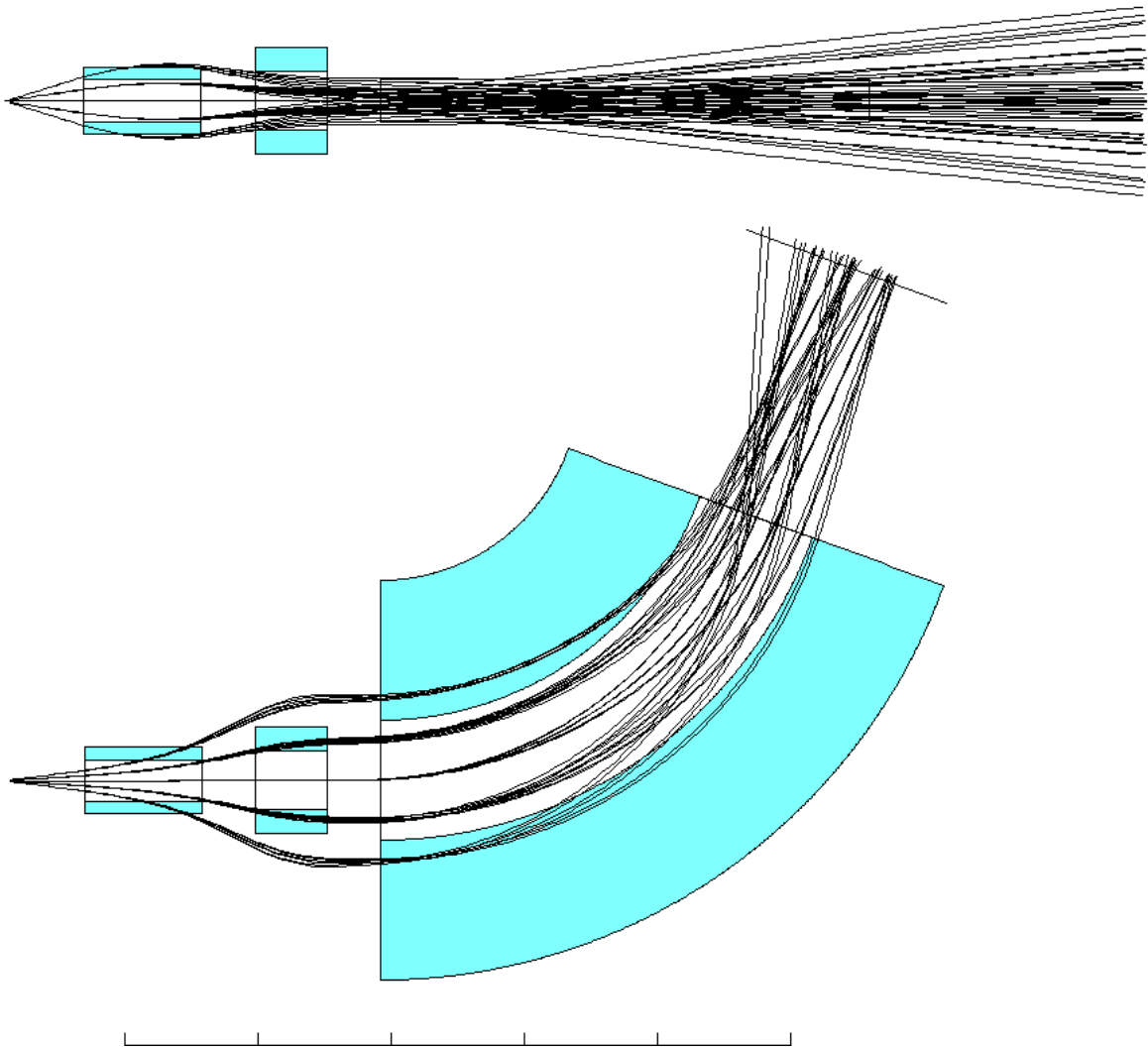


図9 第2四極電磁石の磁場勾配を最適値にした場合の軌道追跡

この場合には  $53.5 \text{ msr}$  の立体角が得られる。横方向が収束している。

## 磁極間隙を縮小する場合

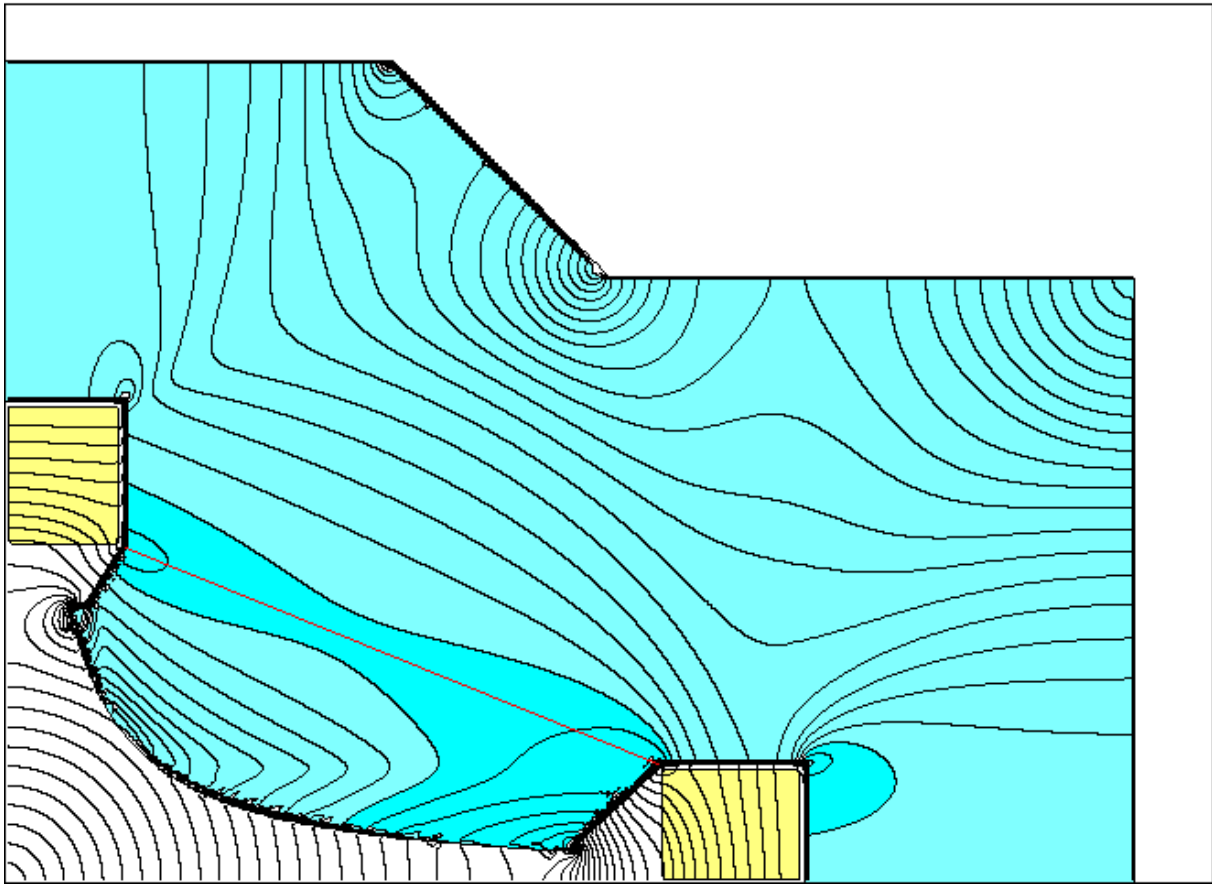


図9 磁極間隙を 34 cm まで縮めた第2四極電磁石の磁場強度分布。磁極の所の赤い線より先端の磁極部分を作り直す。図2の計算と同じ電流を与えた。磁極の角にある強磁場を起こしているシムの形状は今後調整する。

### 仕様

幅	206 cm
高さ	214 cm
長さ	54 cm
鉄重	19.0 ton (直方体として)
磁極双曲線	$xy = 239 \text{ cm}^2 \rightarrow 144.5 \text{ cm}^2$
磁極間隙	43.72 cm $\rightarrow$ 34.0 cm
電流	加工前の公称最大値
最大磁場勾配	3.08 T/m $\rightarrow$ 4.68 T/m
必要磁場勾配	4.54 T/m (軌道計算)

既存の四極電磁石がどの電源を占有していたか不明であるが、「電源A」でないことを期待する。このような第2四極電磁石を使ったスペクトロメータでは 52.6 msr の立体角となる。小さいながら磁極間隙の影響がある。