

3.4 電磁石

3.4.1 はじめに

ここでは、ERL周回部（アーク）のラティス設計から得られた主要電磁石パラメータ（表3.11）をもとに電磁石の検討を行う。

表 3.11: アーク部の主要電磁石パラメータ ($E=5$ GeV)

	最大磁場強度 (又は勾配)	磁石長 L [m]	偏向角 θ [deg.]	ギャップ g [mm] ボア半径 r [mm]	NI/pole [A・ターン]	台数
偏向電磁石	$B \sim 1.0$ [T]	1.5	5.0	20	~ 8000	27
偏向電磁石	$B \sim 1.0$ [T]	3.0	10.0	20	~ 8000	18
四極電磁石	$B' \sim 55$ [T/m]	0.5-0.8	-	15	~ 6000	226
六極電磁石	$B'' \sim 2000$ [T/m ²]	0.2	-	20	~ 2200	64

3.4.2 電磁石の検討

表 3.11 の電磁石パラメータより、偏向電磁石に関しては既存の蓄積リングと同程度の磁場（ ~ 1 T）である。しかし、四極電磁石の磁場勾配 55 T/m は第 3 世代放射光源の低エミッタンスリングに比べても 2 ～ 3 倍程度の強度を必要とする。さらに、六極電磁石の 2000 T/m² という強度は、約 4 ～ 5 倍程度に相当する。すなわち、ERL では従来の蓄積リングの数倍強い収束力を持つ電磁石システムが必要である。この強い四極電磁石および六極電磁石を実現するため、簡便な方法としてできるだけボア径を小さくする必要がある。ただし、ギャップやボア径を小さくする場合、真空システムに大きな負担を与える可能性が高いので、その点に十分注意する必要がある。そこで安定軌道の確保の観点および真空システムを考慮し、まず表 3.11 に示したようなギャップおよびボア径を仮定して電磁石の概略設計を行うこととした。すなわち、モデルとなる電磁石（偏向、四極、六極電磁石）を設計し磁場計算を行ない、大まかな評価を試みることにした。計算コードには Poisson を使用し、鉄心は珪素鋼板を使用した。なお、今回の計算では、特に、

- 磁場強度（鉄心の飽和の影響）
- 有効磁場領域 ($\Delta B(x)/B(0) \leq \pm 5 \times 10^{-4}$, $\Delta B'(x)/B'(0) \leq \pm 5 \times 10^{-4}$) の程度、

の 2 点に着目した。

偏向電磁石

図 3.47 にモデル偏向電磁石の断面図を示す。図 3.48 には、磁場計算で得られた励磁曲線を、図 3.49 には、適当な磁場での水平方向の磁場分布をそれぞれ示す。このモデル電磁石の場合、磁場が 1.3 T を超えるあたりからようやく飽和の影響が見られ、8000 A-turns 程度で約 1.0 T の磁場が得られる。また、有効磁場領域は、1.0 T では ± 14 mm、1.4 T でも ± 12 mm 得られる。磁場強度に関しては、十分な余裕がある。しかし、現時点のラティスでは、*Rectangular* 型（長方形型）の偏向電磁石の使用を念頭においているため、*Sagitta*（偏向電磁石出入り口を結ぶ直線に対して、軌道が描く円弧のふくらみの最大値）を考慮する必要がある。磁石長 1.5 m の場合、*Sagitta* は 16.4 mm

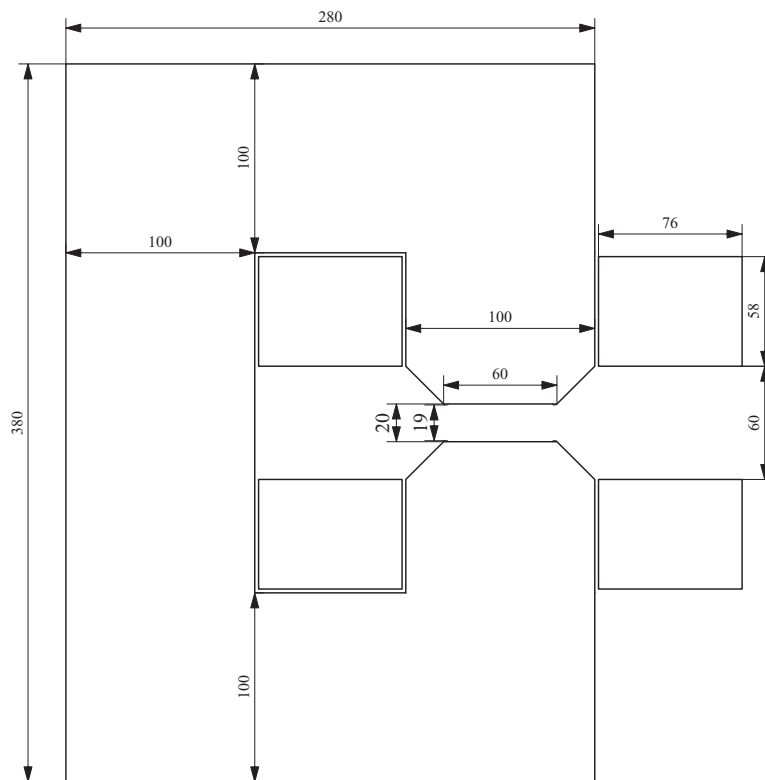


図 3.47: モデル偏向電磁石の断面図 (長さの単位 [mm])。

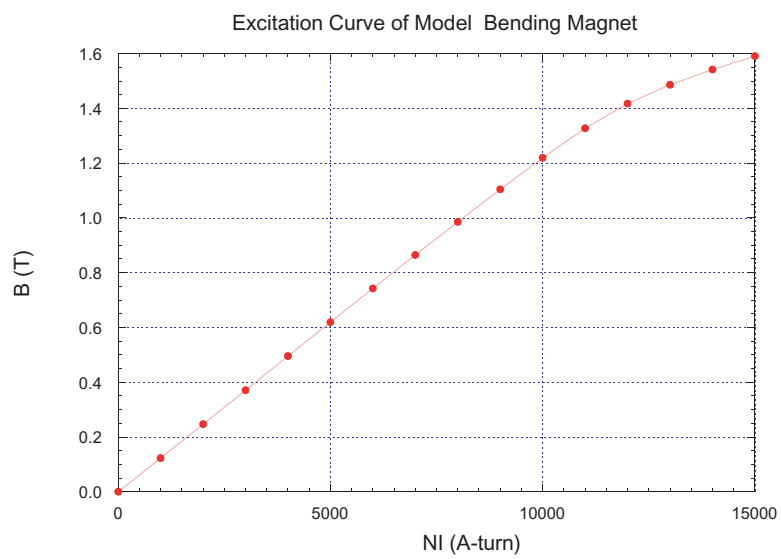


図 3.48: モデル偏向電磁石の励磁曲線。

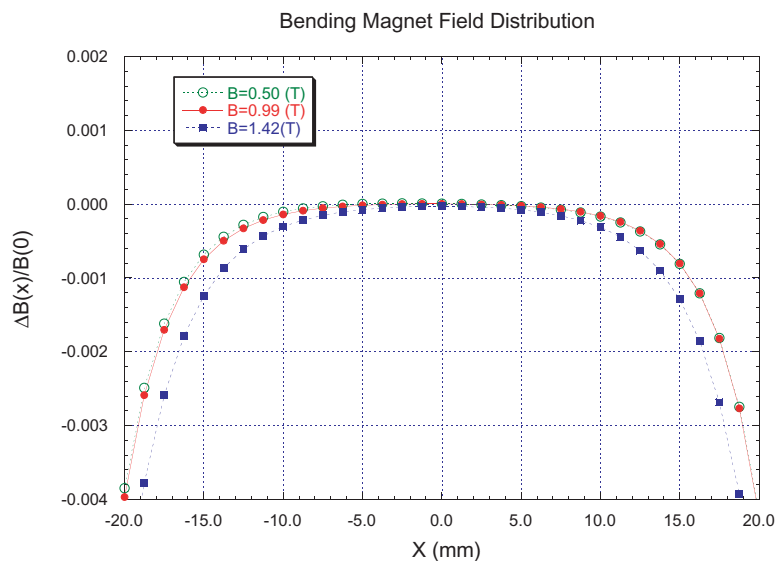


図 3.49: モデル偏向電磁石の磁場分布。

、3.0 m の場合は 65.4 mm になる。したがって、3.0 m の *Rectangular* 型の偏向電磁石では、設計軌道が有効磁場領域から外れてしまうので、再考が必要である。すなわち、*Rectangular* 型ではなく *Sector* 型 (扇型) の偏向電磁石を用いるか、あくまで *Rectangular* 型でいくなら、3 m を 2 分割にするか、もしくは十分な有効磁場領域を確保できる電磁石にするなどの見直しが必要である。

四極電磁石

モデル四極電磁石の断面図を図 3.50 に示し、計算で得られた励磁曲線および磁場勾配分布をそれぞれ図 3.51, 図 3.52 に示す。このモデル電磁石の場合、磁場勾配が 40 T/m を超えるあたりから飽和の影響が見られるが、6000 A-turns 程度で 55 T/m の磁場勾配が得られる。有効磁場領域は、55 T/m でも ± 14 mm 程度確保できそうである。問題となりそうな個所は、磁極間の間隔が最も狭いところで 10 mm になるという点と、ビームラインとの干渉である。今後、真空ダクトとの取り合いおよびビームラインの干渉を考慮して、電磁石の大きさを再考する必要があるかもしれない。

六極電磁石

六極電磁石の断面図を図 3.53 に示し、計算で得られた励磁曲線を図 3.54 に示す。このモデル電磁石の場合、磁場勾配が 3500 T/m² を超えるあたりから飽和の影響が見られるが、2000 A-turns 程度で 2000 T/m² の磁場勾配が得られる。よってかなりの余裕の設計となっている。ただし、六極電磁石についても、やはり四極電磁石と同様な点が問題となる可能性が高いので、真空システムとの取り合い等、今後さらに検討する必要がある。

3.4.3 電磁石電源の検討

電源の検討はほとんど行っていないが、すべての電磁石は個別励磁で行うことを想定しており、ERL の建家の検討において、東西 6 箇所電源棟から各電磁石に配線する予定である。上述したモデル電磁石ならば、偏向、四極、六極電磁石のコイルの巻き数を 20、40、40 ターン / ポールと仮定した場合、電源の最大電流値はそれぞれ 400 A、200 A、55 A となる。電源容量は、コイルの抵抗値 (断面寸法および長さで決まる) が決まらなると正確な数値は出せないが、最大でも 10 kW

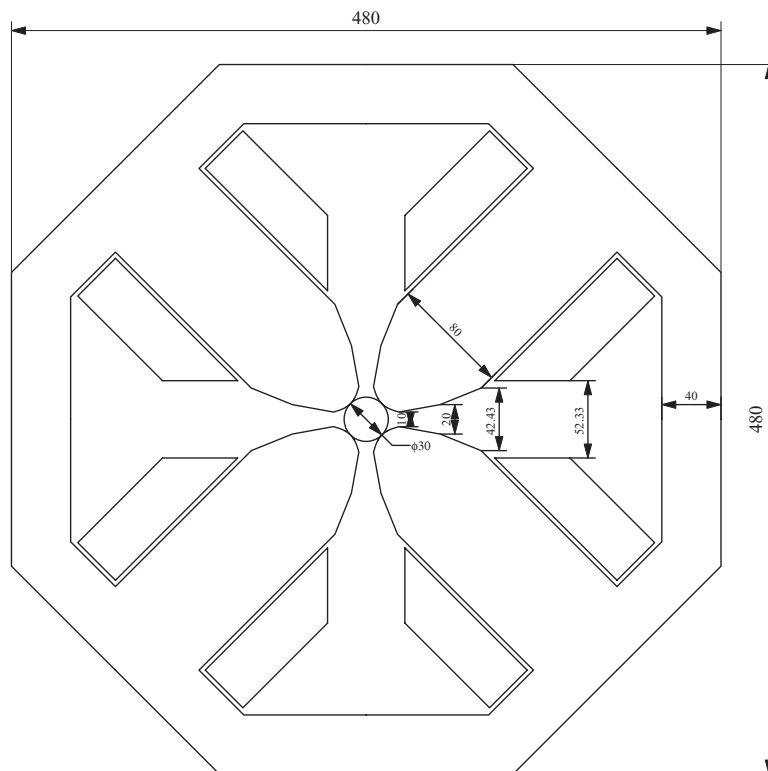


図 3.50: モデル四極電磁石の断面図 (長さの単位 [mm])。)

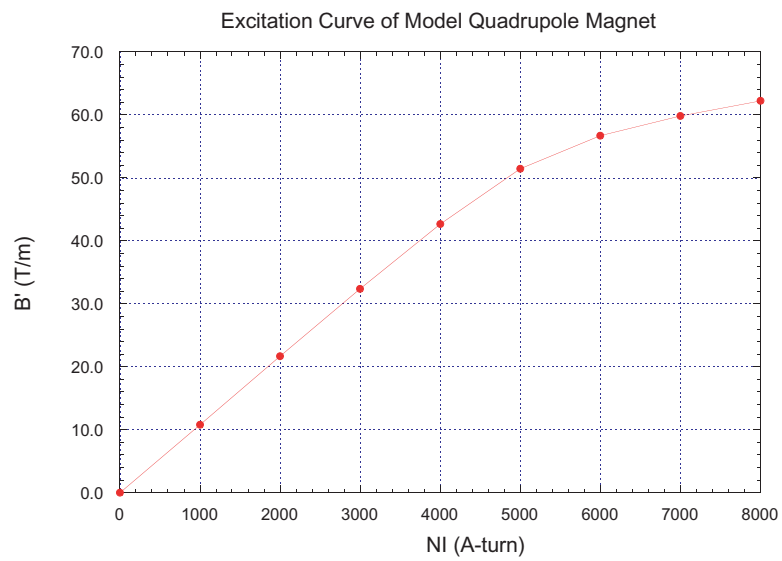


図 3.51: モデル四極電磁石の励磁曲線。

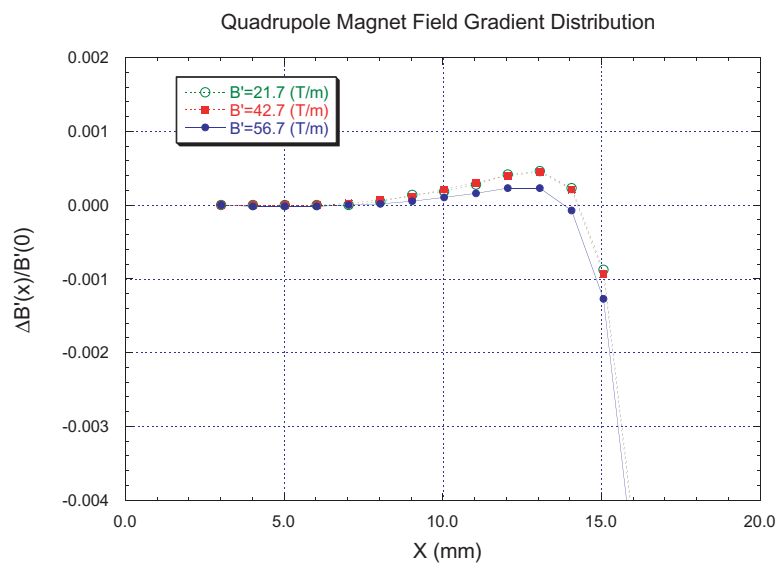


図 3.52: モデル四極電磁石の磁場勾配分布。

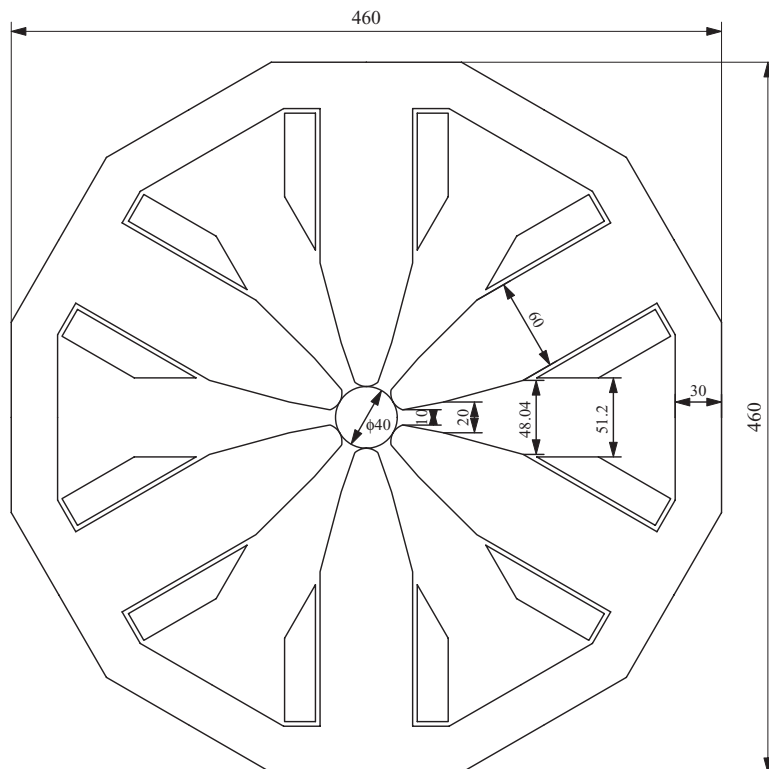


図 3.53: モデル六極電磁石の断面図 (長さの単位 [mm])。

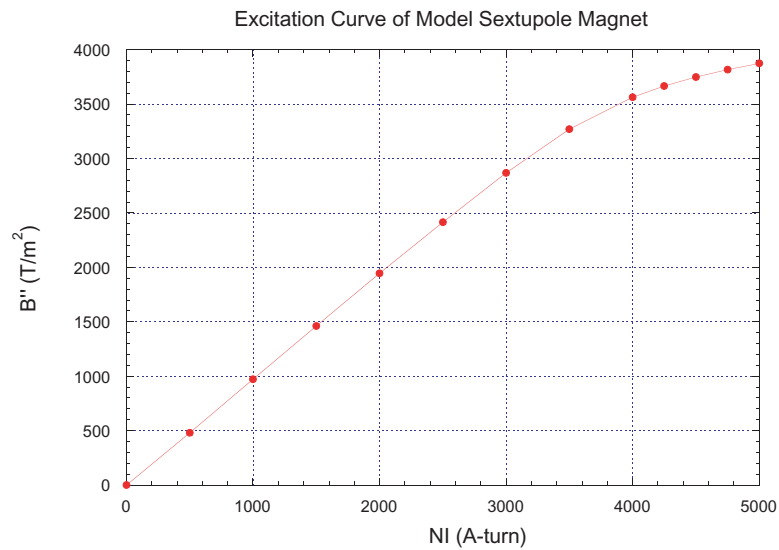


図 3.54: モデル六極電磁石の励磁曲線。

程度と思われる。この程度の電源であれば、長時間安定度およびリップルともに 10^{-5} 台の精度もものが、既設蓄積リングですでに使用されている。しかし、ERL のビーム力学の観点から、どの程度の精度が電源に要求されるかによって、電磁石電源の技術的な検討を行っていく必要がある。

3.4.4 測量・アライメントおよび軌道変動など

測量およびアライメントの方法に関しても、まだ検討は行われていない。ただし、電磁石設置におけるアライメント誤差は、従来の蓄積リングと同程度 ($0.1\sim 0.2$ mm) と予想している。しかしながら、ERL のビームサイズは、水平・垂直方向ともに数ミクロン程度になるので、架台や建物等の振動による軌道変動の抑制レベルは、サブミクロンになる。SPring8 などの第3世代放射光源では、垂直方向がそのレベルに達しており、サブミクロンの軌道安定化が重要なテーマとなっている。今後、ERL でも軌道安定化に関して、モニターおよびフィードバックシステム等、重要課題の一つとして検討を行う必要がある。

小林幸則 (KEK・PF)
菅原龍平 (KEK・加速器)