

1 GeV リニアック検討資料

1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) 大強度陽子リニアック DTL 用四極電磁石の設計

著者(AUTHOR) 吉野 一男

概要(ABSTRACT)

KEK では、1GeV 陽子リニアックワーキンググループにおいて、入射エネルギー 3MeV、加速周波数 432MHz で、収束用に永久四極磁石を使った DTL を開発してきた。今回、その加速周波数を見直した場合に、定電流直流 (DC) 電源で励磁できる収束用四極電磁石の可能性を検討した。本稿では 324MHz-DTL 収束用四極電磁石について、磁場解析コードを利用して検討した結果、磁性体が純鉄で要求仕様の外径内に収めた形状では飽和現象が著しいため、要求磁場強度の達成は難しい事が解った。そこで、磁性体を高飽和値合金(SMEV)に変えて磁場解析を行った結果、飽和現象が最大 2 割近く改善され、磁場強度及び磁場分布とも要求仕様を満たし、実機として使用可能な磁石を得ることができた。この SMEV を使って解析した各モデルの内、外周径・磁場強度の余裕度・磁場分布・温度上昇値・製作のしやすさ等からホロコン 1 層巻きで、巻き数 4.5 ターン/ポールモデルが、最適だと判断した。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

大強度陽子リニアック DTL 用四極電磁石の設計

高エネルギー物理学研究所 吉野一男

1. はじめに

KEK では、1GeV 陽子リニアックワーキンググループにおいて、入射エネルギー 3MeV、加速周波数 432MHz で、収束用に永久四極磁石を使った DTL を開発してきた。

今回、その加速周波数を見直した場合に、定電流直流 (DC) 電源で励磁できる収束用四極電磁石の可能性を以下の設計指針の基で検討する事にした。

設計指針は、

- 1) コストの見地から、DC 電源は市販の既製品から選択する (最大電流は 1000A)。
- 2) DC 励磁に対し、コイルはホロコンを使用して水冷する。
- 3) ホロコンは、4 ポールを直列の 1 系統で冷却し、その入出温度差は 20 ~ 30 °C 前後を目指し (水速 2m/s 前後に押さえる)、最大でも 40 °C を越えない形状を選択する。
- 4) 磁場強度 (磁場勾配のビーム方向積分値 GL) は、要求仕様値の 1.2 倍以上、磁場分布としては、ビーム軸中心の GL_0 に対するドリフトチューブ内径半径の位置での GL の比が 1 % 以内に収まるような形状を目標とする。

以上の条件を考慮し、設計は、DTL 入射部の最も厳しい条件下にある Q_{mag} に対して行い、2 次元及び 3 次元での磁場解析コードを使って形状を最適化していった。

2. 324MHz-DTL 用四極電磁石に関する形状の検討

ビームダイナミクスの見地から提示された加速周波数は 200MHz, 300MHz, 324MHz, 350MHz であり、この内 200MHz-DTL では収束用四極電磁石は現存する。今回は 2 番目に厳しい 324MHz を選択し、設計を進めた。以下に提示された 324MHz-DTL における要求仕様値を示す (表 1)。

1) 磁石内径 (ボア) 半径	9.38 → 8.30 mm
2) 磁石全長	37.2 mm
3) 磁場勾配	112.7T/m
4) ドリフトチューブ外形直径	140 mm
5) ドリフトチューブ内径半径	7.38 mm
6) ドリフトチューブ全長	50.5 mm

表 1 324MHz-DTL 用四極電磁石に対する要求仕様値

表1及び設計指針から、電磁石の形状決定に関して厳しい条件は、

1) ホロコンを巻くためのビーム軸方向のスペースが、 $(50.5-37.2)/2=6.65$ mm程度で有り、更にドリフトチューブの肉厚も考慮すると、片方で6mm弱となる事。

--従ってホロコンに巻く絶縁物の厚みも考慮すると、ホロコンは高さが5mm以下の物に限定され、巻き方も1層しかできない。

--又は、磁石のホロコンを巻く部分だけを削って、2層巻きとする。

2) ドリフトチューブ外形直径が140mmであるため、電磁石の周方向径もできるだけ小さくする必要がある事。

--周方向径を小さくするには、ホロコンを1層で巻く場合、巻き数をできるだけ減らす必要がある。そこで、磁石内径(ボア)半径を9.38mmから8.30mmに変更してもらい、できるだけ少ない起磁力(Ampere-Turn)で要求磁場勾配を達成できるようにした。

以上の事項より、ホロコンの巻き方から大別して、

[1] 磁石のホロコンを巻く部分だけを削って、2層巻きとし、起磁力を稼ぎつつ周方向径を小さくする。

[2] ホロコンを1層で巻き、巻き数(起磁力)は最小限にして、周方向径をできるだけ小さくする。

[3] ホロコンを1層で巻き、周方向径は多少大きくなるが、起磁力がある程度余裕がでる巻き数にする。

以上の三通りの方針で形状を変えて解析し、最適な磁石モデルを求める事にした。

3. 各方針による電磁石の主要パラメータの計算及びその磁場解析の結果

3-1) 最初にホロコンを2層巻きとして考えた場合、

ボア半径8.3mmで、磁場勾配が112.7 T/m以上となる起磁力(AT)は、手計算(磁場のもれや飽和のない理想的な磁石)では3090.726ATとなる。そこで、磁石外形を最小の寸法になるホロコンの巻数や巻方及び種類を発熱も考慮して算出すると、5[ターン/磁極]-618.1452Aで、112.7 T/mとなり、高さ4.0、幅6.0、肉厚0.8mmの日立製ホロコンを2層で巻くことによって、磁石外形半径を67mmまでに抑えることにした。しかし、2層で巻くためにビーム軸方向の引っ張りがDTLの仕様値(50mm)を超えてしまうので、コイルを巻くビーム軸方向垂直部分を4.6mmづつ削って(カットモデル)、引っ張りを50mm以下に抑えた。以下にそのカットモデルの寸法図と主要パラメータの計算値を示した。

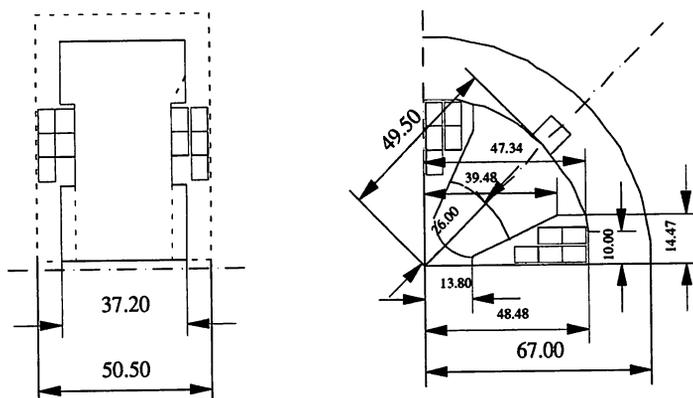


図1 ホロコンを2層巻きにして、ビーム軸方向垂直部分を4.6mmづつ削ったカットモデルの寸法図

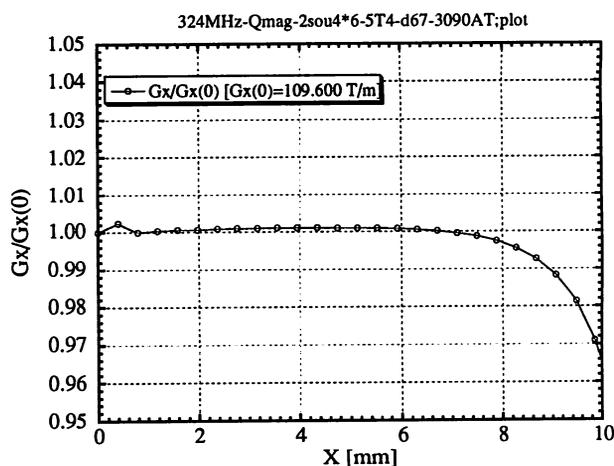
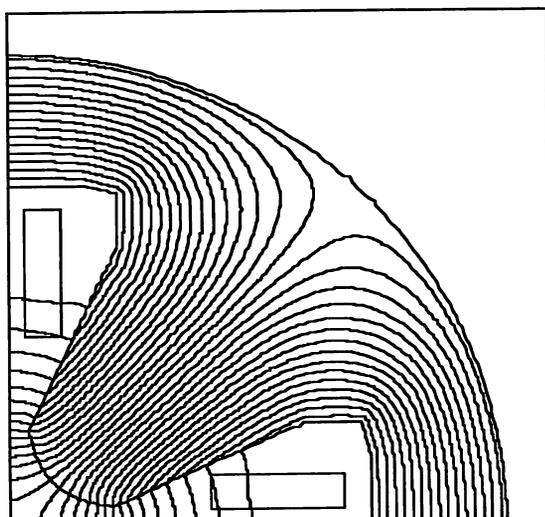
(1pole 当りのコイル長を 1240mm と仮定して算出)
 (平均水温 44℃での温度依存性も計算に含む)

		324MHz Q-mag
ボア径	[mm]	16.6
四極磁場の強さ G	[T/m]	112.7
起磁力 NI	[AT]	3090.726 (Max 5000)
鉄芯長	[mm]	37.2
コイル巻数	[ターン/磁極]	5
使用電流	[A]	618.1452 (Max 1000)
電流密度	[A/mm ²]	45.86
導体寸法	[mm]	h4.0,w6.0,t0.8
導体断面積	[mm ²]	13.48
抵抗	[m Ω/磁石]	6.62
電圧	[V/磁石]	4.09
損失	[kW/磁石]	2.53
冷却水量 (V=2m/s)	[liter/min]	0.98
水温上昇 (直列)	[℃/磁石]	37.39
圧力損失 (直列)	[Kg/cm ²]	1.21

表2 ホロコン (高さ 4.0, 幅 6.0, 肉厚 0.8mm) を 2 層巻 (5 [ターン/磁極]-618.1452A) にした場合の 324MHz-DTL 用四極電磁石の主要パラメーター

表2の計算結果から、4ポール直列でのホロコンの水温上昇が37度まで上がってしまい、使用電流の増加を考えると厳しい値であるが、使用可能な範囲であり、起磁力はかなりの余裕がある。

次に、この形状による2次元磁場解析 (ポアソン) の結果を示す (材質は純鉄)。



ORP = .RIGAMQ TD(0003) 3146000402 5-62/3 TCYC = R 7761

図2 励磁電流618.726A(3090.726AT)での磁場分布及びその磁場勾配Gの周方向(X)分布

解析結果から磁場勾配Gは、中心で109.6 T/m(97.2%)となり、磁場分布も周方向(X) 7.3 mm (ドリフトチューブ内径半径)の位置で、中心に比べ、約0.2%以内に収まっているので、ポアソンではこの形状に問題がないことが確認できた。

次に、この形状による3次元磁場解析(マフィア)の結果を示す。マフィアでは、コイルを巻くビーム軸方向部分をカットしているモデル(カットモデル)とノンカットモデルについて解析し、励磁電流3090.726AT(618.726A)における磁場勾配ビーム方向積分値GLの周方向依存性をそれぞれのモデルで示し、次に励磁電流に対する磁場強度(磁場勾配G及び積分値GL)の依存性を比較した。

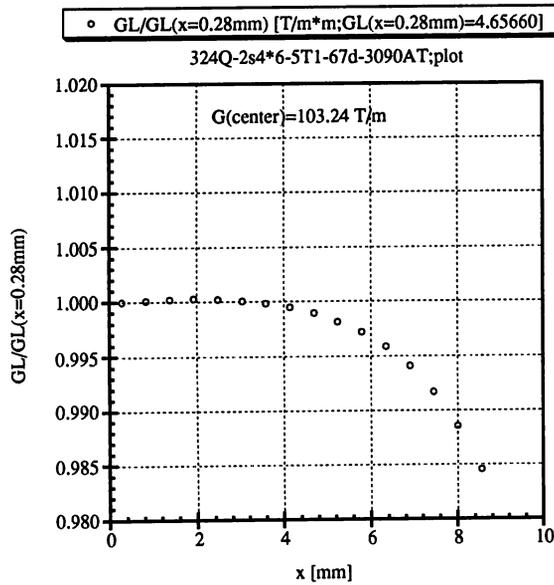


図3 ノンカットモデル-3090ATでのビーム軸方向積分値GLの周方向分布

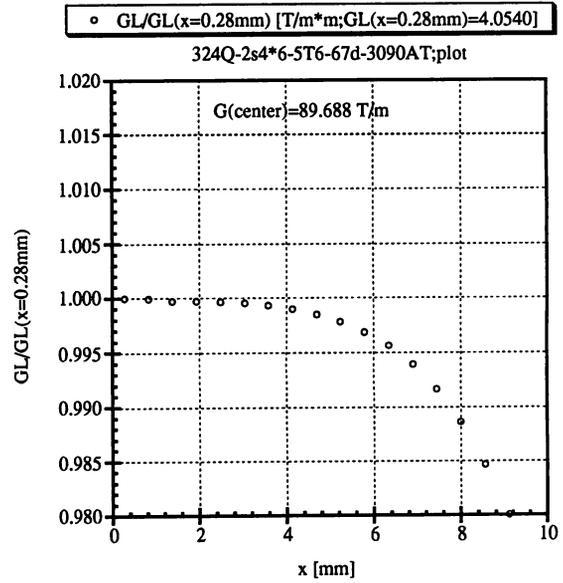


図4 カットモデル-3090ATでのビーム軸方向積分値GLの周方向分布

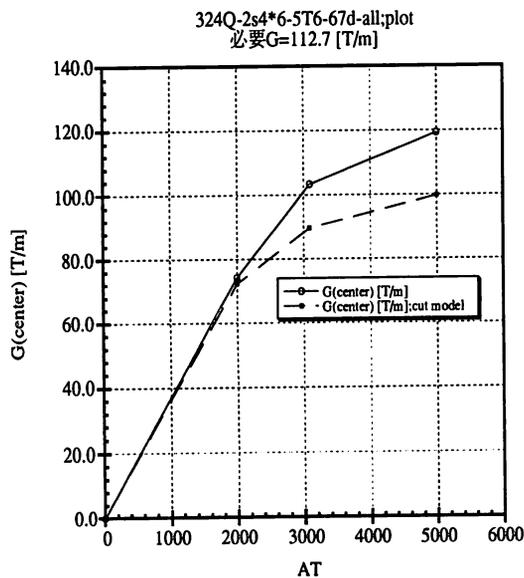


図5 ノンカットモデルとカットモデルについての励磁電流に対する磁場勾配Gの依存性

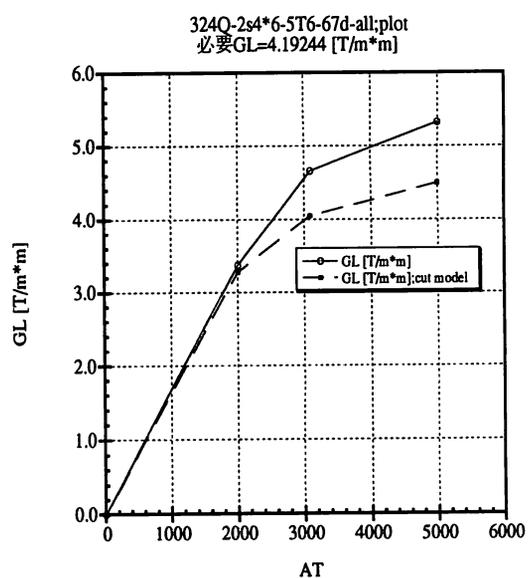


図6 ノンカットモデルとカットモデルについての励磁電流に対する磁場勾配ビーム軸方向積分値GLの依存性

解析結果から、磁場(GL)分布は、両モデルとも同じ傾向で、周方向(X) 7.3 mmの位置で、中心に比べ約 0.7 %以内で許容範囲である。磁場強度(GL)は、ノンカットモデルでは4.6566 T/m*m (3090AT)となり、要求値(4.19244)の11%増が得られるので問題ないが、カットモデルについては、磁場勾配Gが5000ATでも99.83 T/m(88.6%)程度しか上がらず、かなり飽和していることがわかる。GLでも3090ATで4.054T/m*m(96.7%)と足りず、5000ATでは4.4936T/m*m(107.2%)となり、かろうじて必要磁場を7.2%超える程度で、仕様値はクリアできるが、実用的な余裕はほとんどないと思われる。

今までの解析結果から、ホロコンを2層にして、その巻く部分をカットしたモデルでは、飽和現象が著しくなり、必要な磁場強度が得られないことが解った。そこで、材質を換えて(FeCo合金)、同じモデルについての解析を試みた。この合金は高飽和値合金(別名パーメンジュール又はセメンジュール;SMEV)といい、大きな導磁率を示す(図7)。

図8、9はカットモデルにおける純鉄とSMEVの磁場強度(G, GL)の比較を示した。

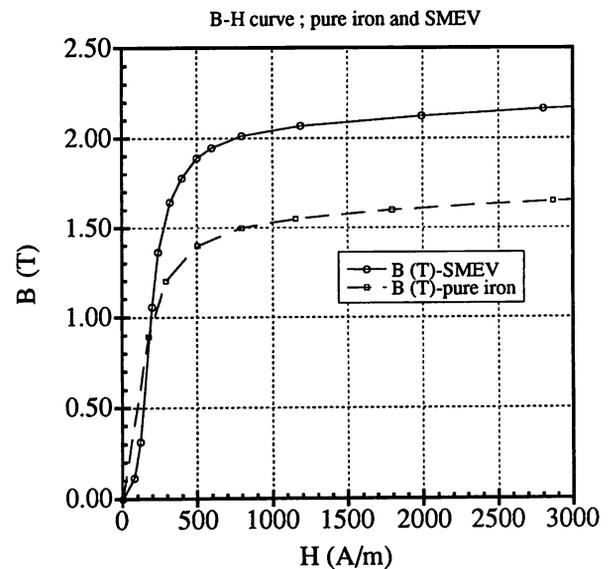


図7 純鉄及び高飽和値合金(SMEV)のB-H曲線

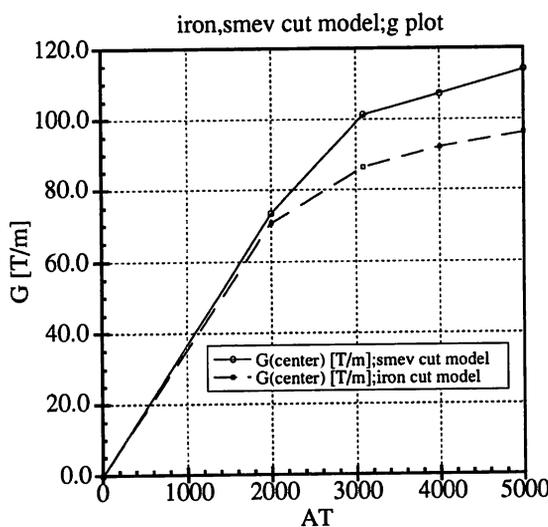


図8 カットモデルにおける純鉄とSMEVの磁場勾配Gの比較

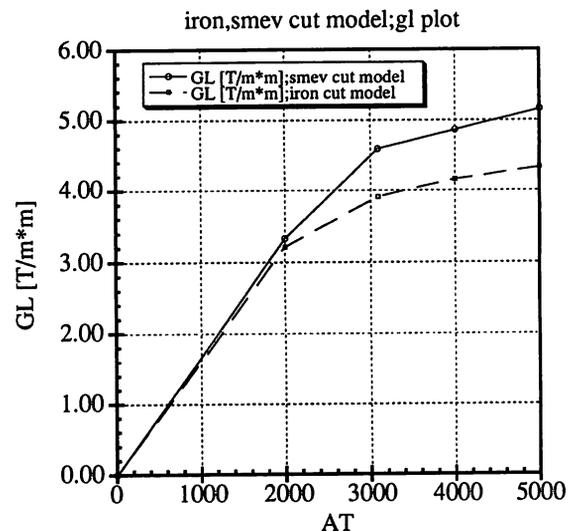


図9 カットモデルにおける純鉄とSMEVの磁場勾配ビーム軸方向積分値GLの比較

図8、9から、SMEVは純鉄に比べG及びGLとも、同程度の増加傾向を示し、5000ATでは、18~19%も増えている。これらは要求仕様値に比べても、GLが3090ATで9.6%増し、5000ATでは23%増となり、十分実用的な値となっている。従って、カットモデルでも、材質をSMEVにすると使用できることが確認できた。

3 - 2) 次に、ホロコンを1層で巻き、巻き数（起磁力）は最小限にして、周方向径をできるだけ小さくした場合。

ボア半径8.3 mm、磁場勾配112.7 T/mに必要な起磁力(AT)は、3090.726ATとなる。そこで、ホロコンを1層で巻いた場合、磁石外形を最小の寸法になるホロコンの巻数や巻方及び種類を発熱も考慮して算出すると、3.5[ターン/磁極]-883.0645Aで、112.7 T/mとなり、高さ5.0, 幅6.0, 肉厚0.8 mmのホロコンを使うことにした。以下にそのモデルの寸法図と主要パラメータの計算値を示した。

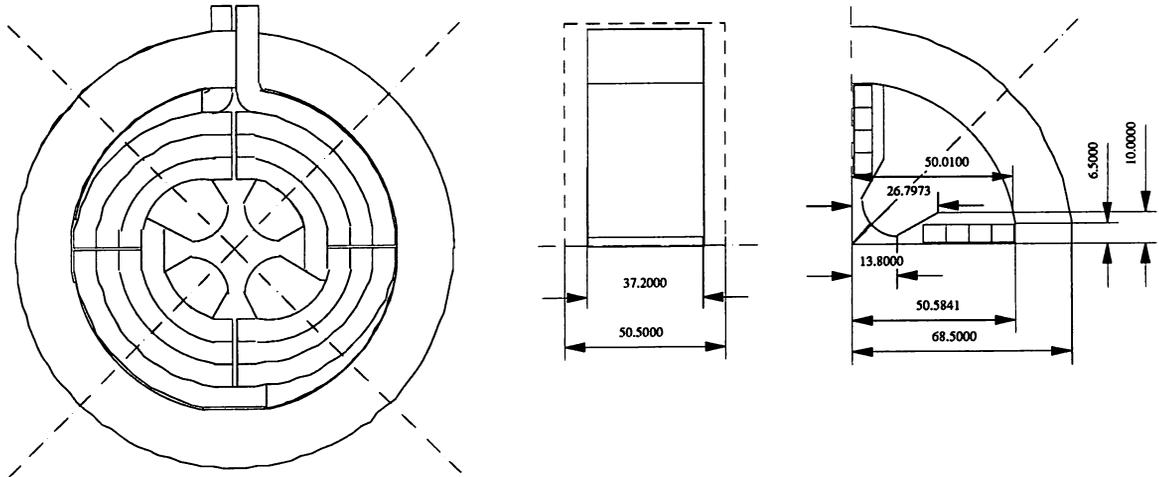


図10 ホロコンを1層巻きにして、巻き数を最小限(3.5T)にしたモデルの寸法図

(1pole 当りのコイル長を 868mm, 平均水温 41℃ と仮定して算出)		
324MHz Q-mag		
ボア半径	[mm]	16.6
四極磁場の強さ G	[T/m]	112.7
起磁力 NI	[AT]	3090.726 (Max3500)
鉄芯長	[mm]	37.2
コイル巻数	[ターン/磁極]	3.5
使用電流	[A]	883.0645 (Max 1000)
電流密度	[A/mm ²]	60.44
導体寸法	[mm]	h5.0, w6.0, t0.8
導体断面積	[mm ²]	14.61
抵抗	[m Ω/磁石]	4.25
電圧	[V/磁石]	3.75
損失	[kW/磁石]	3.31
冷却水量 (V=2m/s)	[liter/min]	1.49
水温上昇 (直列)	[℃/磁石]	32.3
圧力損失 (直列)	[Kg/cm ²]	0.84

表3 ホロコン（高さ 5.0, 幅 6.0, 肉厚 0.8mm）を1層巻（3.5[ターン/磁極]-883.0645A）にした場合の 324MHz-DTL 用四極電磁石の主要パラメータ

表3の計算結果から、4ポール直列でのホロコンの水温上昇が3.2度に収まり、多少楽になっているが、起磁力の余裕が少なくなっている。

次に、このポールの形状は同一で、周方向径のみ変えていって、どの程度の径まで実用可能かどうかを磁場解析で求めた。解析はマフィアで行い、3-1)の経験から、材質を、純鉄とSMEVの二通りで進めた(図11、12)。

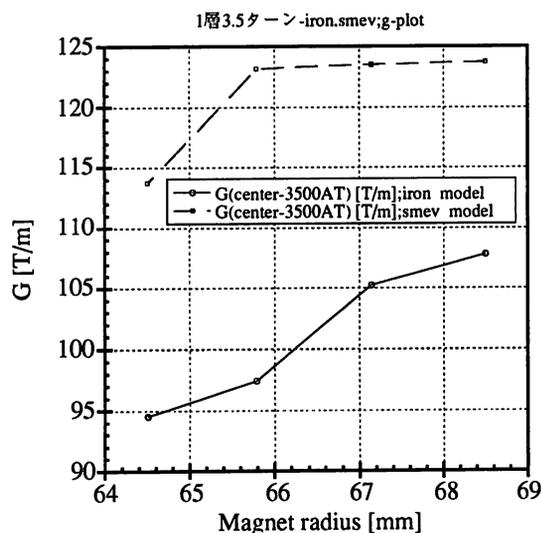


図11 ホロコン巻き数を最小限(3.5T-3500AT)にしたモデルの外周径に対する磁場勾配Gの関係

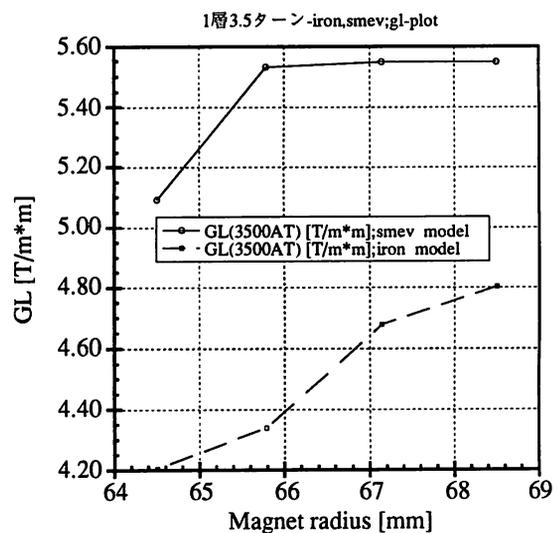


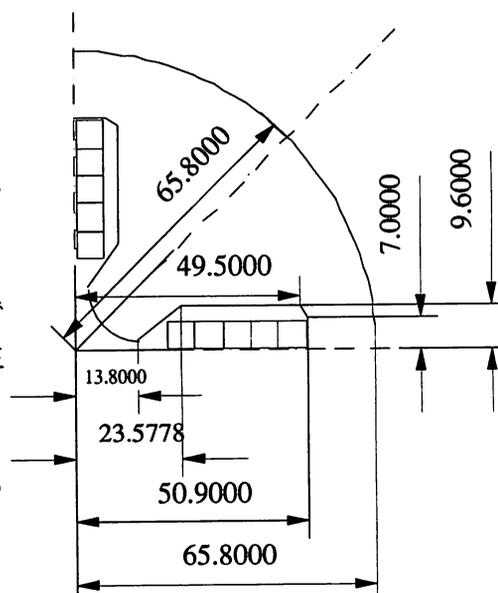
図12 ホロコン巻き数を最小限(3.5T-3500AT)にしたモデルの外周径に対する磁場勾配ビーム軸方向積分値GLの関係

解析結果より、材質が純鉄のモデルでは、径を68.5mmにしても、GLで4.805 T/m*m程度で、3-1)でのカットモデルよりは向上しているが、要求仕様値の約1.15倍しか得られていない。一方、SMEVの場合では、径が65.8mmまで、ほとんど飽和傾向はみられず、64.5mmで飽和し始めているが、それでもGで要求仕様値をクリアし、GLでは1.2倍以上となっているので、十分実用可能な値となっている。

3-3)最後に、ホロコンを1層巻きのまま、周方向径は多少大きくなるが、起磁力がある程度余裕がでる巻き数にした場合。

材質はSMEVを使用し、起磁力に余裕を持たせるため、3-2)の外周半径64.5mmのモデルを基に、1ターン増やして4.5ターンにして考えた。この際、外周径の増加をできる限り押さえるため、ホロコンは高さ5.0、幅5.0、肉厚1.0mmを使用し、ポール先端の幅を狭めて、ホロコンがより中心側で巻けるようにした。以下にそのモデルの寸法図と主要パラメータの計算値を示した。

図13 ホロコンを1層で巻きで、起磁力がある程度余裕がでる巻き数(4.5T)にしたモデル



(1pole 当りのコイル長を 1116mm と仮定して算出)
 (平均水温 44℃での温度依存性も計算に含む)

324MHz Q-mag

ボア径	[mm]	16.6
四極磁場の強さ G	[T/m]	112.7
起磁力 NI	[AT]	3090.726 (Max4500)
鉄芯長	[mm]	37.2
コイル巻数	[ターン/磁極]	4.5
使用電流	[A]	686.828 (Max 1000)
電流密度	[A/mm ²]	44.45
導体寸法	[mm]	h5.0,w5.0,t1.0
導体断面積	[mm ²]	15.45
抵抗	[mΩ/磁石]	5.20
電圧	[V/磁石]	3.57
損失	[kW/磁石]	2.45
冷却水量 (V=2m/s)	[liter/min]	0.93
水温上昇 (直列)	[℃/磁石]	38.48
圧力損失 (直列)	[Kg/cm ²]	1.29

表 4 ホロコン (高さ 5.0, 幅 5.0, 肉厚 1.0mm) を 1 層巻 (4.5 [ターン/磁極]-686.828A) にした場合の 324MHz-DTL 用四極電磁石の主要パラメーター

表 4 の計算結果から、4 ポール直列でのホロコンの水温上昇が 38 度まで上がってしまい、使用電流の増加を考えると厳しい値であるが、使用可能な範囲であり、起磁力はかなりの余裕がある。

次に、この形状にて、励磁電流 (起磁力) を変えていった場合の、磁場勾配 G 及び磁場勾配ビーム軸方向積分値 GL の変化を磁場解析 (マフィア) にて求めた (図 1 4)。解析結果から、設計起磁力 3090AT においてすでに、GL は要求仕様値の約 20% 増し、G でも 99% を達成しているの、起磁力の余裕度を考えると、磁場強度については安心して使える事が確認できた。又、実際の使用では必要な GL (4.19244 T/m*m) を達成できる起磁力で運転するので、その時の励磁電流 (起磁力) は約 570A (2564.82AT) 程度となり、飽和傾向を示す領域のだいぶ手前の

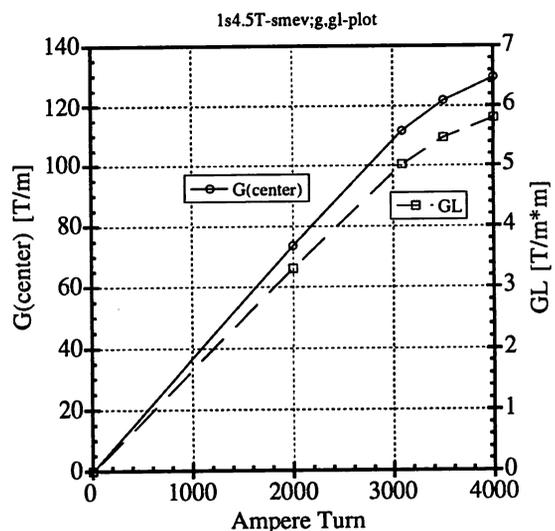


図 1 4 巻き数を 4.5 ターンにしたモデルの励磁電流 (起磁力) に対する磁場勾配 G 及び磁場勾配ビーム軸方向積分値 GL の関係

直線領域で運転でき、水温上昇も約32℃に収まるので、懸念事項はほとんどない事が解った。

次に、起磁力 3090AT における磁場分布を図 15 に示した。図から周方向(X) 7.3 mmの位置で、中心に比べ約 0.5%以内となっており、許容範囲にあることが確認できた。

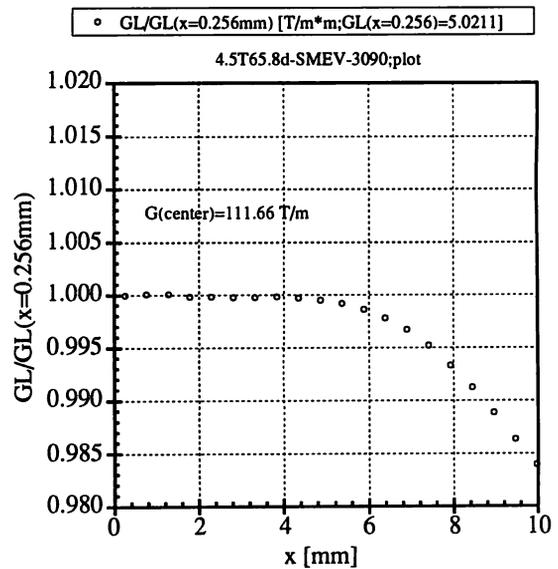


図 15 巻き数を4.5ターンにしたモデルの起磁力 3090AT における磁場勾配ビーム軸方向積分値GLの周方向分布

4. まとめ

324MHz-DTL 収束用四極電磁石について、DC 励磁をホロコンで冷却して、要求仕様を満たせるような電磁石が可能かどうかを、磁場解析コードを利用して検討した。その結果、磁性体が純鉄で要求仕様の外径内に収めた形状では飽和現象が著しいため、要求磁場勾配Gの達成は難しく、磁場勾配ビーム軸方向積分値GLに換算した値が僅かにクリアする程度で、実用的な余裕がほとんどない電磁石しかできないことが解った。そこで、磁性体を高飽和値合金(SMEV)に変えて磁場解析を行った結果、飽和現象が2割近く改善され、磁場強度及び磁場分布とも要求仕様を満たし、実用的な余裕度のある磁石の製作が可能である事が解った。

従って、324MHz-DTL 収束用四極電磁石は、磁性体を高飽和値合金(SMEV)を使い、ホロコン1層巻き、巻き数4.5ターン/ポールのモデルが、外周径・磁場強度の余裕度・磁場分布・温度上昇値・製作のしやすさ等から、最適だと判断した。今後は、実際に、このモデルを試作・測定して、実機として使用可能かどうかを検討していくつもりである。