

CONSTRUCTION OF HIGH GRADIENT PERMANENT QUADRUPOLE
MAGNETS FOR 400 MHz LINAC

M. Kumada, H. Baba, S. Inagaki, N. Kaneko and H. Sasaki

National Laboratory for High Energy Physics

Abstract

Very high gradient SmCo_5 permanent magnets were constructed and tested for the possible candidates for the quadrupole magnets of 400 MHz, 100 MeV proton linac, which is the injector for GEMINI synchrotron. The attained maximum field gradient was 16 KG/cm and the pole tip field strength was 12 KG, which is the world record in the published data. We have also demonstrated that the field strength was able to be adjusted mechanically by the rotation of the outer quadrupole ring.

1. なぜ High gradient 永久磁石か？

高エネルギー-研の将来計画のひとつのGEMINI¹⁾の synchrotron の INJECTOR として 400 MHz, 100 MeV の proton linac が考えられているが この収束四極磁石としては 233 台の 永久四極磁石を使う予定である。この種の永久磁石を使、凡例は米国の NEN (New England Nuclear Cooperation) の linac があり ここで永久四極磁石収束系は linac が retire する迄 うまく働き²⁾ 又、これからは Super Hilac にも永久磁石を使う予定であるとの事である。

Linac の収束四極磁石に永久磁石を用いる理由は 電源がいらない事によるその維持の簡便さの他に Drift tube の限られた空間内に出来る限り強い磁場も発生させたい為である、強磁場、すなわち 強磁場勾配 (high gradient) が要求される理由は 実用的な設計範囲内では磁場勾配が強ければ強い程、Linac のアクセプタンスが大きくなるからである。これは言い方を変えると、与えられたアクセプタンスに対して、磁場勾配が強ければ強い程、四極磁石の Alignment の要求に対する許容度は楽になるという利点を持つ。毎々の 400 MHz linac の入射エネルギーは 1 MeV であるが この時の最大のアクセプタンスを与える磁場勾配は $g_0 = 24.6 \text{ KG/cm}$ である。(この値は linac の入口での四極磁石の値で、ここから下流に向かってセル当りの phase advance が一定となる様減少していく。) 最初のセルの磁場勾配が 24.6 KG/cm という値は毎々の linac では phase advance μ が $\mu \approx 96^\circ$ に相当するが、現在の磁石のテクノ

ロジの state of art を考えても無理と思われるので 現実的を目標値として $g = 15 \text{ kG/cm}$ を設定した。ちなみにこの時, alignment error と dipole error 等の error が無い時のアクセロゲイション A は $A = 1.5 \pi \text{ mm.mrad}$, また linac の前段加速器である RFQ よりの エミッタンス ϵ は $\epsilon \leq 1.4 \pi \text{ mm.mrad}$ である。

2. SmCo_5 モデル四極磁石

High gradient 四極永久磁石の field gradient $g = 15 \text{ kG/cm}$ を実現するべく サマリウムコバルト (SmCo_5) を用いて 3種類の四極磁石を制作した。これらの磁石の断面図を Fig.1 に示す。上から順に Mark I, Mark II, Mark III と呼ぶ事にする。Mark III は 電磁石のコイル部に相当する部分を SmCo_5 でおきかえたと考えてよく, また外側の4極の磁石のついたリングは磁場勾配を調整する為のものである。³⁾ Mark I では鉄の磁極の3方が SmCo_5 で囲まれている。Mark II には磁極はなく, 容易軸の方向が45度ずつ変化していくような 16 個のセグメントから構成されている。⁴⁾ この磁石の特徴は磁極上の磁場 B_{pole} (Mark II の場合は磁極はないが SmCo_5 セグメントの内半径の場所での磁場の強さを磁極上の磁場と呼ぶ事にする。) が 16 セグメントの場合には

$$B_{\text{pole}} \lesssim 1.87 B_r \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)$$

と SmCo_5 の残留磁場 B_r よりも大きくなっていく点である。ここで r_1, r_2 は SmCo_5 セグメントの内半径及び外半径である。磁場測定の詳細については別の機会に述べる⁵⁾ ことにして ここでは磁場勾配の強さと有効長だけを示す。

表 1

	g_0	l_G	$\int g(s) ds$	材質	l_{G0}	B_{pole}
Mark I	12.8 kG/cm	26.26 mm	33.72 kG	H-22A	20 mm	9.7 kG
II	16.1	22.38	34.95 ~ 36.0	H-30	20	12.1
III	7.6	24.71	16.91 ~ 18.13	H-30	18	4.55

表 1 からわかるように 磁場勾配の強さは Mark III, Mark I, Mark II の順に強くなっていく。これらの磁場勾配を B_{pole} に換算して現在迄に公開されている他の High gradient SmCo_5 四極磁石と比較する為のプロットしたものが Fig. 2 である。今迄の世界記録である NEN (LBL) は $B_{\text{pole}} = 9.7 \text{ kG}$, 一方 Mark II は $B_{\text{pole}} = 12.1 \text{ kG}$,

と大きく記録を更新している事がわかる。但し、注意すべきは Mark II の有効長が 22.38 mm と Mark I の 26.26 mm に較べて 4 mm 強 短い事である。磁場勾配の軸方向の積分値では Mark II は Mark I の 4% 増 程度である事に注意しておこう。

次に強調すべき事は Mark III において 磁場勾配の強さが永久磁石において調整可能である事を初めて実験的に示した事である。Fig. 3 にこれを示す。外側リングの内側の磁石に対する角度を横軸に $0 \sim 90^\circ$ 查える事によって 磁場勾配 g_0 が $\pm 10\%$ 調整可能である事を示している。この方法は Mark II のようなセグメント型には適用できないが $g_0 < 12.8 \text{ kG/cm}$ 以下の Mark I のタイプには応用する事ができる。

3. 結論

Mark II のセグメント型で磁場勾配 $g_0 = 16 \text{ kG/cm}$, $B_{\text{pole}} = 12 \text{ kG}$ との強さの新記録を達成し、また鉄芯型の磁石で強さの調整を行う事ができる事を証明した。Mark II については、しかしながら、予想していた $B_{\text{pole}} = 15 \text{ kG}$ より 3 kG 低かった。これは SmCo_5 材 H-30 の B-H 特性が非線形であった事による影響と考えられる。また Mark II の内半径 r_1 は 2.5 mm を 6 mm 迄小さくする事が可能である。最近では SmCo_5 よりさらに高い B_r , H_c を持つ NdFe 系の材料も入手可能になった。これらを総合すると $g_0 = 26.8 \text{ kG/cm}$, $B_{\text{pole}} = 16 \text{ kG}$ も不可能ではないと思えるので現在、その製作を検討している。

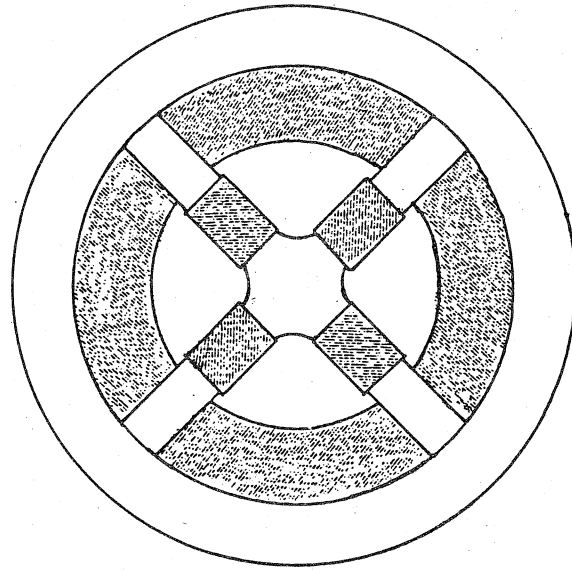
4. 謝辞

永久磁石の製作には 日立金属の柿沼信男氏、磁場測定には Linac グループの高崎栄一氏、竹中たてる氏の協力をいただいた事に感謝します。

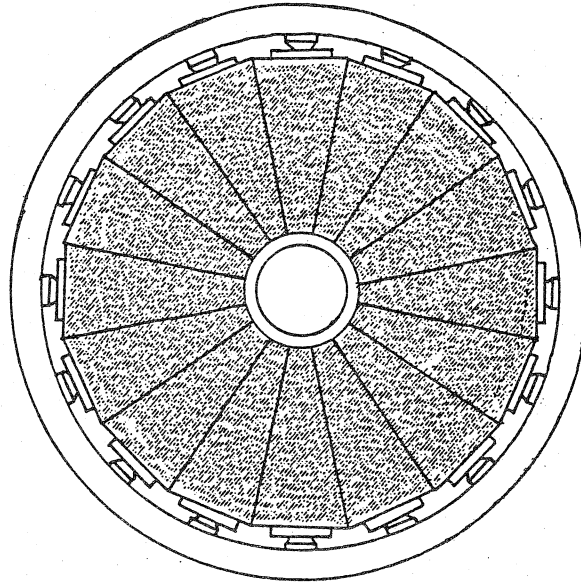
5. 参考文献

- 1) Proceedings of the meeting on BSF future prospects -II KEK Internal 83-7
- 2) A.M. Sessler, private communication
- 3) K. Halbach, Nuclear Instruments and methods 206 (1983) 353-354
- 4) K. Halbach, Nuclear Instruments and methods 169 (1980) 1-10
- 5) M. Kumada et. al. 第5回加速器科学研究発表会 & NIM 投稿予定

MARK I



MARK II



MARK III

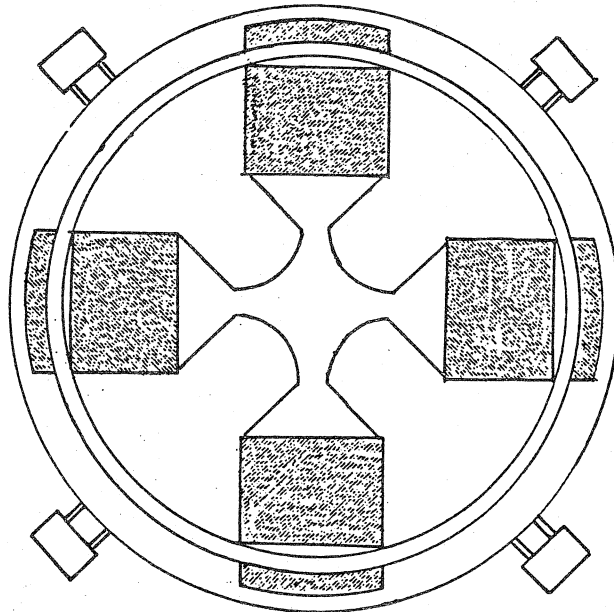


Fig. 1 各種永久四極磁石の断面図 図でハッチング部 (▨)は サマリウムコバルト

Fig. 2 各種ポールチップ磁場強度換算 B_{pole} (KG)

- NEN 1
- NEN 2-a
- KEK - linac group
- NEN 2-b
- KEK MARK III (H-30)
- USSR (ITEP)
- KEK MMK I (H-22A)
- NEN 2-C (LBL)
- KEK MARK II (H-30)

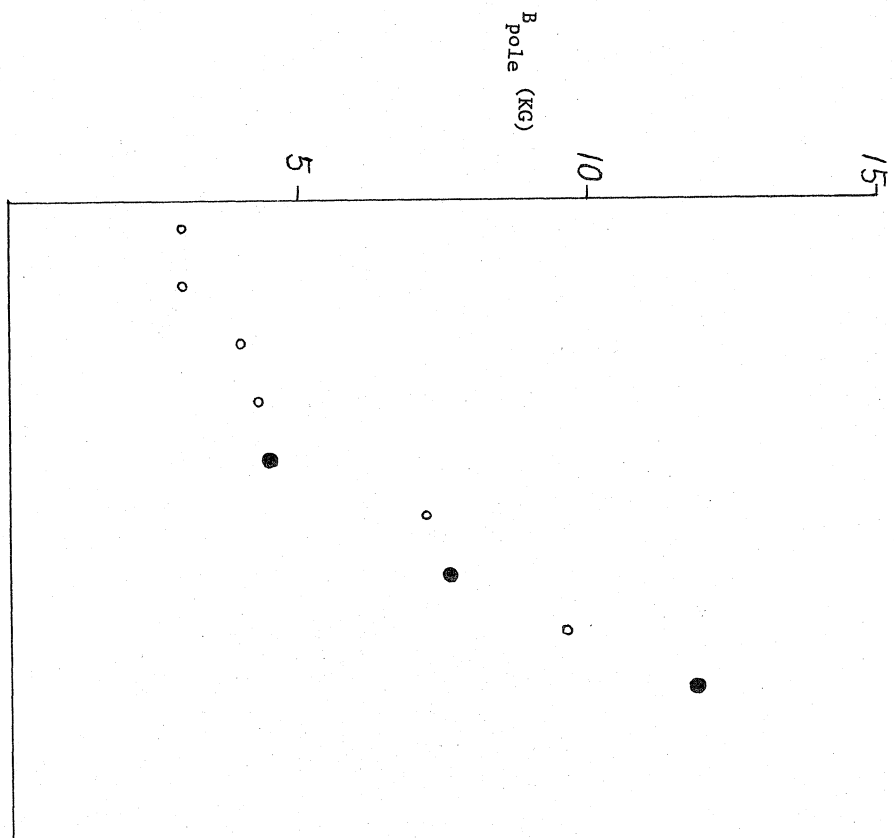


Fig. 3 外挿レンズの角度調節による磁場勾配の変化

