UDC 537.612: 621.3.013: 621.318.4

論 文

60-A 35

ローズシム法による偏極標的実験用高均一磁界の形成について

正 員 伴 悦 夫 (日本電子)

1. ま え が き

磁界を用いる多くの物理実験においては、磁界の均一度が実験の精度を直接的に規定している。例えば、磁気共鳴などのようなスペクトロスコピーでは、磁界の均一度がその装置の分解能であることが明らかである。従って、時間的な定常化すなわち安定性の確保を前提として、磁界の均一度を高めるための努力がこれらの装置の発展過程の主要な部分をなしている。著者はこのような観点から、均一磁界の発生を目的とする研究用磁石における理論的、実験的研究に関する報告を行ってきたが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、本論文の読者の理解に資するために、最初に二、三の基本的な概念について説明する。磁界の均一度というのは、安定度が時間的な変化の少なさを表わすのに対して、空間的な変化の少なさを、言い換えると一様さを表わすものである。磁界に限らず、いわゆる“場”を用いる実験では、常にこれら二つの一様さに十分な注意が払われている。なお、本論文では一般的あるいは概念的な意味では“磁界”を用い、数値を取扱う所では“磁束密度 $B(T)$ ”という表現を用いているので注意してほしい。

さて、磁界の均一度は対象とする空間内の磁束密度の最大あるいは最小値を基準値 $B_0(T)$ とし、他の点での値を $B(T)$ とし、両者の偏差 $\Delta B = B - B_0$ をとり、比 $\Delta B/B_0$ で表わされている。従って、このように定義された均一度は問題とする空間の位置およびその広がり依存する量（無次元の）であるから、数値を厳密に規定する必要がある場合には、それらの条件が明確にされていなければならないことになる。この間の事情は時間変化における安定度についても同様であって、上記の空間というところを時間に置き換えればそのまま成り立つ。均一度の上記のような定義は、測定器のセンサが物理的に一定の容積を持ってい

るため、“場”の測定を厳密には“各点”ごとに行なうことが不可能であるなどの技術的な事情によって生じたものである。以上のような意味で、本論文においては、例えば 10^{-4} のオーダの均一度というような表現を用いることがあるので注意してほしい。

さて、本論文で対象としているような研究用電磁石における $10^{-3} \sim 10^{-5}$ オーダの磁界の不均一を補正して均一度を向上させる方法として、いわゆるローズシム法が有用である⁽⁴⁾。磁界の不均一補正には、このほかにコイルを使う電流シム法があるが、補正力が弱いので、このオーダに対しては現実的な方法でなく 10^{-6} オーダ以上の微細な補正に使われている⁽⁴⁾。

本論文は、前報において理論的に検討した偏極標的用磁石装置について説明し、2.5 T の磁束密度において達成された高均一磁界の形成の経過を、それに至る間に加えられた考察などを含めて具体的に述べる。

結果的に得られたシムの形状は、磁極内で磁化が一樣であるとする仮定に基づくモデルが妥当であることを示している。

偏極標の実験は、磁界中に置かれて偏極した標的に高エネルギーの粒子を衝突させて行なう素粒子物理の分野の実験であるが、標的の偏極度を高め、同時にそれを測定する手段として磁気共鳴が利用されており、使用される磁界の均一度が実験の精度を決める重要な因子の一つになっている。偏極標の実験の学術的な意義、技術的な内容などの詳細に関しては、文献(5)～(8)などを参照していただきたい。

本論文では、上述のように我々が製作に携わった磁石において達成された高均一度を得る作業が、単純なものだけでなく慎重な計測に基づく判断と考察の下に行なわれる技術、工学的なものであることを説明する。なお本論文で述べるような、いわゆるシミングは古くからいろいろな目的で試みられている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、飽和磁束密度以上の磁束密度において 10^{-5} のオーダの均一度を大容積で実現するために行なわれた結果の報告は今までされていない。研究の性格上、これらの装

On the Formation of the Highly Homogeneous Magnetic Field for Polarized Target Experiment by the Rose's Shim Method.
By *Etsuo Ban*, Member (JEOL Ltd.).
伴 悦夫: 正員, (株)日本電子 新事業開発室

置が量産されることはなく、直接には経済的な意義はないが、基礎研究に現実的な手段を提供するために、工学的な見地より研究することの意義は軽視されるべきではないであろう⁽¹¹⁾。

2. 偏極標的用磁界発生装置のあらまし

本論文では、第1章で述べたように均一度を中心にして報告するので、高エネルギー実験での特殊な条件によって一般物性実験を主な対象とする研究用磁石としては特殊な構造をもつ本体部については、理解を助けるための簡単な紹介にとどめる。

図1に磁石の全景を示す。図示の1が磁極片で、上下に一对が相対向し、中央の空けきに静磁界が発生する。2は磁極で、3のコイルがその周りに巻かれている。4, 5は継鉄で磁束のリターンパスを作っている。磁極片の間の空けきの中心を原点として垂直線をZ軸とする。磁極片、磁極、コイルはそれぞれZ軸を中心軸とする同心軸対称形である。原点を通り継鉄5の中央に向かう水平線をX軸、原点を通りX, Zの両軸のそれぞれに直交する水平線をY軸とする。原点を中心としてX軸の方向に沿って標的となる試料が置かれ、Z軸方向に発生する約2.5Tの磁束密度によって偏極される。継鉄5の中央に見える穴はX軸方向に貫通しており、左方より加速されたビームが導入され標的に衝突する。各種の散乱粒子は、継鉄がなく開いている右側の空間の多くの点で計測される。コイルが円すい形になっていること、継鉄5が斜めに切られていることは、いずれもできるだけ広角度にわたり散乱粒子の計測を可能にしようとするためである。

磁極片1は図2のような形で、空けきに面した先端

X, Y, Z: 空けき中心を原点とする直角座標系

図1 偏極標的用磁石全景

Fig. 1. Whole view of polarised target magnet.

図2 磁極片形状図

Fig. 2. Shape of pole piece: shaded portion is detachable ring which is shown in Fig. 5 to 10.

の周辺に、図示の破線のようにリング状のシムが装着されている。実験結果を見ながら、このシムの形を修正、追加工していく一連の作業をシミングと称している。磁極片およびリングは50%コバルト合金鋼製である。各部材の間はアンブラ鋼製のボルトで堅固に締結されている。

コイル導体は長方形断面の中空銅管で、内部に純水を循環させて冷却される。本体の総重量は約12t、電源はSCRによる三相ブリッジ整流、トランジスタ直列ゲート方式の定電流源で、最大出力は約80kW、電流安定度は $\sim 10^{-5}$ である。なお、文献(8)には本磁界発生装置の使用状況が示されている。

3. シミングの方法と経過

上述のように、磁極片の先端にリング状にして嵌(かん)合されているシムの形状を、磁界均一度を高めるように試行錯誤法によって修正、成形していく作業をシミングと称している。装置の製作上においては、この作業は最終の段階であって、それまでに電源の動作、性能の確認、冷却系の性能の確認、最高磁束密度の確認などの作業のすべてが完了していて、初めて着手できるものである。本論文では、前述のようにこれらの作業についての記述は省略し、以下シミングの経過をその間に加えられた考察を交えて述べる。

図3(a)は、沖電気製WX601D形磁界測定器によって磁束密度分布の測定を行なっている様子である。なお、同図は1号機のものであるが、本機もほぼ同様のものである。使用した磁界測定器は、LC自励発振器のタンク回路のQ値がコイル中に置かれた試料の核磁気共鳴によって変化する現象を、図3(b)のようにブラウン管上に表示するものである。磁束密度 $B_0(\text{T})$ と共鳴周波数 $f_0(\text{Hz})$ は正比例の関係に

(a) 磁束密度分布測定系

(a) System for measurement of flux density distribution.

(b) 2.5 T における重水素の核磁気共鳴信号
(b) NMR signal of deuteron at 2.5 T, observed after improvement of field homogeneity by Shimming ("wiggles" show that good homogeneity has been attained).

図 3

Fig. 3.

あるので、 f_0 を測定することによって B_0 を知ることができる。ただし、比例定数と共鳴時の Q 値の変化は試料の核種によって異なる。もし静磁界が不均一であれば、信号はそれぞれ共鳴周波数の異なる素容積からの寄与を積算した形になり、いわゆるブロードニングが起きる。また、試料にはそれぞれ固有の緩和時間があり、磁束密度(あるいは周波数)の掃引時間との関係でウィグルと称されているビート現象が観察されることがあるが⁽¹²⁾、これは磁界均一度が高いことを示す目安になっている。図 3 (b) は静磁界に商用周波の正弦波を重ね合わせて、ブラウン管の横軸と同期させることによって信号を静止観測するようにしているものであるが、上述のようなウィグルが見られる例である。詳細は文献(13)などを参照していただきたい。

さて本題に戻るが、シミングはまず正確な励磁特性の測定から始まる。上記の磁界測定器によって、最初に 42.58 MHz/T の定数をもつプロトン核 ^1H で約 0.8 T まで測定する。このとき X, Y, Z の三軸ステ-

ジによりプローブ位置を動かし、均一度の最も良い点を確認しながら行なう。この作業の過程において、装置全体の性能および磁石本体の製作の精度が、以後の作業に対して十分なものであるかがチェックされる。

これらは開発段階にある装置における一般的な手順であるが、本機の場合においては 10^{-5} のオーダの精度を対象にしていることを念頭においた注意深さが要求される。例えば、励磁電流が 10^{-5} のオーダ以上でドリフトしていれば正確な磁束密度分布、均一度の測定を行なうことはできない。また、相対向している磁極片の先端面の間の平行度(平行さの度合い)、偏心度(対称軸の一致の度合い)などの機械的精度が十分でなければ、シミング作業を適確に進めることは不可能である⁽²⁾。次に、16.55 MHz/T の定数をもつリチウム核 ^7Li に代えて約 1.8 T までの測定を行なう。一定磁束密度において、核を ^1H から ^7Li に代えると信号強度が約 1/3 に低下するので、改めて均一度の最も良い所を注意して探さねばならない。これは ^1H によって磁束密度を上昇させながら測定している間に、磁極の機械的な変形、磁極片の磁化の非線形的な変化などの理由によって、均一度の最も良い位置が最初の位置からずれてきているためである。同様にして、リチウム核の測定限界になったら、6.54 MHz/T の定数をもつ重水素核 ^2D に代えて測定を続ける。

このようにして、励磁曲線上にできるだけ多数の測定点をプロットしておく。これは一般に磁束密度が高くなるにつれて磁界の均一度が悪くなり、NMR の信号を検出するのが困難になってくるという技術的な理由によるものであるが、以後の作業をスムーズに進めるうえで必要な手順である。實際上、シミングが行なわれていないこの段階においては、2~3 mm 程度のわずかなプローブ位置の移動で、信号の検出が不可能になることがしばしば生ずる。

図 3 (b) は 2.5 T の磁束密度における約 16.5 MHz の重水素核 ^2D の信号であるが、後述するようなシミングが完了し均一度が良好になってからのもので、前記のようなウィグルが観測されるようになっている。シミングの前には確認するのが困難なほどの S/N 比である。図 4 は以上のようにして測定が完了した励磁曲線である。

以上によってシミング作業に入る準備が整ったことになる。予備実験の結果に基づいて、図 5 のような形状のシムリング SR 1-1 を図 2 に破線で示すように、磁極片の先端に取付けたものから始める。中心磁束密度約 2.53 T (以下、 B_0 として図中に示す) のときの X および Z 方向の分布を図の下側に示す。ここで、

●, △, ○印はそれぞれ ^1H , ^7Li , ^{13}D の核磁気共鳴による測定点を示す。

図 4 励磁特性

Fig. 4. Exciting characteristics.

図 5 SR 1-1 に対する磁束密度分布

Fig. 5. Flux density distribution for SR 1-1.

これらの測定時のプローブの位置について説明する。図 4 の励磁特性の測定は単に磁束密度の絶対値を知るだけで良いから、前述のようにプローブ位置は信号の大きさが最大になるように適宜に動かしている。これに対して、図 5 以後においては磁界の均一度、あるいは分布を問題にしているので、各軸方向に沿ってのプローブの移動距離に対し磁束密度の偏差の値がプロットされている。なお、この段階においては、前述のように通常、磁極間げきの中心を原点とする絶対座標値にはこだわらず、信号が最も大きくなる高均一度点を見いだしてから、その点の前後あるいは左右にプローブを移動して分布測定を行なっている。従って、これら

の図における横軸 (X' , Y' あるいは Z') の値は (mm) を単位とするステージの目盛りの読みである。実際的な理由によってステージは空間的に固定されていないので、これらの図では同一の目盛値でも必ずしも同一の点になっていないことがあるので注意を要する。

また、第 1 章で説明したように NMR プローブの試料管は $4\phi \times 10\text{ mm}^2 \times \text{mm}$ 程度の容積を持っているから、測定値はこの容積内での加重平均値となり、真の意味での磁束密度分布とは一致していない。なお、図 15 はシミング完了後の結果で、空げき中心を原点とする座標系を用いている。両者を区別するため、前者 (ステージの読み) を X' , Y' , Z' , 後者 (中心を原点とする) を X , Y , Z で表わしている。また、SR 1-1 などの記号は Shim Ring の略記号として用いており一般的なものではない。

さて、図 5 によれば X 方向については最小値をもついわゆるディッシュ形の、 Z 方向については最大値をもついわゆるトップ形の分布をしている。シムがないときの X 方向の分布は、トップ形であることがわかっているから、このことはシムによって逆方向に強く補正されている状態、すなわち過補正 (Over compensation) の状態になっていることを示している。次に、SR 1-1 のシムリングの内周側を直径 2 mm、深さ 0.5 mm だけ削ったリング SR 1-2 による分布を図 6 に示す。この図では、ディッシュ形の分布の両側のピークが現われるまで測定範囲を広げているが、中心付近の様子は図 5 の場合と大きな違いはない。通常、この例のように効果の度合いを見るために、まず小さな追加工をする。

次に、SR 1-1 に対して内径を 6 mm、突起面に設けた溝の内、外径を、それぞれ 4 mm 大きくしたリング SR 2 による分布を図 7 に示す。この分布は図 5 の場合と異なり、 X 方向にトップ形、 Z 方向にディッシュ形である。すなわち、このシムでは不足補正 (Under compensation), 補正が弱すぎる状態である。

これらの結果によって、リング SR 1-1 を取付けたシムと SR 2 を取付けたシムの形状の間に、補正が適当になる形状が存在していることがわかる。

また、これまでの測定により発生する最大磁束密度に若干の余裕があることがわかったので、有効空げき長を 1 mm だけ大きくすることにした。これは偏極標の実験における特殊な事情によるもので、空げきに挿入される標的、冷却系、カウンタなどの設計を少しでも楽にしようとするためである⁽⁶⁾。このために、まず磁極片の先端面を 0.5 mm ずつ削る。次いで、リング SR 1-2 の前面を同じく 0.5 mm ずつ削る。この

図 6 SR 1-2 に対する磁束密度分布
Fig. 6. Flux density distribution for SR 1-2 (Shim ring dimensions not shown in figure are same as those of SR 1-1).

図 7 SR 2 に対する磁束密度分布
Fig. 7. flux density distribution for SR 2.

図 8 SR 3-1 に対する磁束密度分布
Fig. 8. Flux density distribution for SR 3-1.

上側 2.55 T, 下側 2.53 T における X 方向の分布
図 9 SR 3-2 に対する磁束密度分布
Fig. 9. Flux density distribution for SR 3-2.

図 10 SR 3-3 に対する磁束密度分布
Fig. 10. Flux density distribution for SR 3-3 (Shim ring dimensions not shown in figures are same as those of SR 3-2).

リング SR 3-1 による分布を図 8 に示す。有効空げき長すなわちシム先端面間隔は 72 mm から 73 mm に増加したが、この分布は SR 1-2 によるもの、図 6 とだいたい同じである。

次に、SR 3-1 のリングの内周の切り欠き部分の径を 2 mm だけ大きくしたときのリング SR 3-2 による分布を図 9 に示す。いずれも X 方向の分布であるが、上のほうが $B_0 = 2.53$ T, 下のほうが 2.55 T のとき

である。このように 0.02 T の磁束密度の増加によって 2.53 T のときにあったピークがなくなり、分布は大きく変化する。

実際に使用される磁束密度はほぼ 2.5 T であるので、この形のシムでもまだやや過補正であることがわかる。そこで、リング SR 3-2 の突起部にある溝の内径を 2 mm 小さくし、深さを 1 mm にしたリング SR 3-3 の分布を図 10 に示す。これにより直線のこう配は残

図 11 スペーサによって直線こう配を与えたときの磁束密度分布の変化

Fig. 11. Variations of flux density distribution with spacers.

図 12 スペーサによりシムリング面に付加したこう配による磁束密度の直線こう配の変化

Fig. 12. Variation of linear Flux density gradient by the added taper of Shim ring plane with spacers.

っているが、2.5 T において補正がほぼ適当な状態、すなわち、最適補正 (Just compensation) の状態になった。この直線 (一次) のこう配は、両磁極間に作用する磁気力 (引力) によって磁極片先端面が平行でなくなっていることによる。

図 11 は、磁極片とシムリングの間にまくら状にスペーサを挿入することによって、先端面の傾斜を変えたときの磁束密度分布を示す。図中の i はまくらによって付け加えられたテーパの角度 (rad) である。これにより、シムリング面での傾きのみによって X 方向の一次のこう配の制御ができることがわかる。

図 12 は i (rad) と X 方向について、20 mm の間の一次の磁束密度こう配の関係を示すものである。両者の間には直線関係があり、 $i \approx -5.5 \times 10^{-4}$ rad にすれば一次の磁束密度こう配は除去されることがわかる。

ここで、磁気力によるたわみについて若干の考察を行なう。第 2 章で説明したように、本磁石の継鉄は片

FC 33 プローブの 2.4 T 付近の測定点

図 13 ホール素子の校正曲線

Fig. 13. Calibration curve of Hall probe FC 33 near 2.4 T.

側が開いた、いわゆる C 形構造をしており、磁極間に作用する電磁力に対して、片持ちはりの構造であるので、通常の研究用電磁石の場合の継鉄の、いわゆる H 形構造 (ダブルヨーク)⁽³⁾ と比べて著しくたわみやすい。

上述のようにして、一次のこう配の補正をした後で無励磁状態にし、マイクロメータで実測した傾きは、 6×10^{-4} rad であった。一方、励磁したときの残留一次磁束密度こう配の測定値より換算した傾きは -1×10^{-4} rad であった。すなわち、電磁力によって $\Delta i \approx 7 \times 10^{-4}$ rad、シムの先端点の間の変位に換算すると、約 0.1 mm のたわみに相当するだけ変化している。通常の H 形の継鉄構造は極めて強固なもので、このような問題を生ずることはないが、本機のような C 形の構造では上記の程度のたわみは避け難い。しかし、設計段階においてその量を正確に予測することは困難であるから、本例のように実測結果に基づいて補正するほかはない。なお、このたわみは傾きの変化からわかるように、主に継鉄間の締結ボルトの伸びによるもので、その内部応力は繰返し荷重に対して十分許容範囲に入っていないなければならない。

以上によって、ほぼ所定の均一度の磁界を実現することができたので、最終的に磁束密度の空間分布をホール素子磁界センサを用いて測定した結果について以下に述べる。これはホール素子の空間分解能が高く、NMR によるよりも広範囲の測定ができることによる。使用した素子はジューメンス社製 FC 33 形である。入力に定電流源を用い、ホール起電力をデジタル電圧計で測定する。

NMR 磁界測定器との同時測定を行なって検定した結果を図 13 に示す。この素子の受感面積は $3 \times 6 \text{ mm}^2$ 程度、厚さ (磁束密度方向) は 1 mm 以下であるから、NMR の場合の容積 $\phi 4 \times 10 \text{ mm}^2 \times \text{mm}$ に対し 1/10 以下の空間分解能がある。

時間的な変動については、NMR 発振器の周波数お

FC 33 プローブによって測定された中心面内の X, Y 方向の分布
 図 14 中心面での磁束密度分布
 Fig. 14. Flux density distribution in median plane measured by Hall probe FC 33.

図 16 中心面内 Y 方向広域磁束密度分布
 Fig. 16. Wide range flux density distribution along Y axis in median plane.

よびホール起電力の安定度はいずれも 10^{-6} のオーダーに入っており、このホール素子によって mm オーダで磁束密度分布を測定することができる。

図 14 は、 $Z=0$ すなわち空けきの中心面内での X および Y 方向の磁束密度分布を上記のホール素子を用いて測定した結果である。中心付近の測定間隔は 2 mm であり、磁束密度は 10^{-5} のオーダーの精度で測定されていることがわかる。

また、図 15 は、 $Z=0, \pm 5, \pm 10$ mm としたときの X-Y 面内の等磁束密度線図、いわゆるマップを示すもので、 $|Z| \leq 5$ mm の範囲で X 軸上にシムによる二つのピークができています。ただし、この場合は測定点が少なく、自測によって補間しているのでマップは正確なものではない。

図 16 は、Y 方向について、磁束密度がほぼ零になる ± 800 mm の範囲にわたる磁束密度分布を示す。

図 15 XY 面内の磁束密度分布
 Fig. 15. Flux density map in X-Y plane.

図 17 一様磁化仮定による計算磁束密度分布
 Fig. 17. Calculated flux density distribution based on the uniform magnetization.

4. 考 察

前章のような方法と経過によって得られたシムの形に対する理論解析は、前述のように高磁界用円すい筒磁極へのローズシム法の適用として一般化して前報において行なった。ここでは、シミング中のデータに即して、より実際の考察を加える。最初に、前報では内容の複雑化を避けるため、検討を省略したシム突起面にある溝の効果について考える。

図 9 のように 2.53 T においてディッシュ形であった分布が、図 10 に示したように溝の内径を 1 mm、深さを 0.5 mm だけ深くしたとき、2.5 T においてほぼ平坦な分布になった。一方、図 9 においては 2.55 T ではほぼ平坦な分布に変化している。これらの結果が

ら、上記のような溝の変化の効果は 2.5 T から 2.55 T への磁界の変化の効果と同程度であるように見える。しかし、実際にはこれらの効果は独立でなく、相互に複雑に作用し合っている。

いま、前報の理論すなわち磁極の表面に磁荷が一樣に分布しているとのモデルに基づいて、溝の効果を実算した結果を図 17 に示す。最初に溝がないとして、図 14 に示したような実際に補正されて得られた 10^{-5} のオーダの分布に近い曲線 1 を与えるようにしたときのシムの深さは 2.51 mm であった。なお、シムの内周にある小さな切り欠きは、実際にも、また計算上でも効果が小さいので、この計算では無視してある。次に、図示のように幅 4 mm、深さ 0.5 mm の溝を付けると、計算分布は曲線 1 から曲線 2 に変化する。この変化は、実測されている溝の変化の効果をおおむね説明しているものと言える。前報のようにシミングによって得られたシムの形を全体的に見れば、一樣磁化の仮定は妥当なものである。しかし、ここで考察したような磁束密度変化の効果は、補正項として考慮する必要がある。例えば、実際のシムの深さは 2 mm であり、また幅 4 mm、深さ 1 mm の溝が付いている。これらは、いずれも形状的には補正効果を弱める方向のものである。すなわち 2.5 T の磁束密度においても、磁束が縁端に集中する効果（縁端効果）が補正を強める効果として作用していることがわかる。

以上のように、実際のシミングの過程は前章に詳述したように、注意深い測定、考察に基づく追加工の繰返しによる試行錯誤の過程である。計算による形状はシミングにおけるスタート点に対する参考形状とみなすべきであるという前報での指適は、このような現実的な事情を意味する。

本例は、予備実験および類似の先行機の結果を参考にできたので、比較的スムーズにシミングが終了しているが、いずれにしろ、この作業は細心の注意を払って行なわなければ所要の結果を得ることは不可能である。

次に、空間分布（図 15）が X, Y 方向について対称でないのは（実験的には確認されていないが）、継鉄構造の非対称性によると思われる。ただし、偏極標的は X 方向（ビーム入射方向）に長細いので、このような分布は好都合である。また分布の細部はかなりひずんでいるが、これは既報⁽²⁾のようにシミング相互の非平行性、偏心あるいは異形（形状が異なっていること）などの機械的な不整の効果が重なり合って現われているためである。これらは、いずれも本磁石の使用条件

によって、やむを得ずとられている継鉄の構造上の弱点に基づく結果である。

5. あとがき

偏極標的実験用の磁石において実施されたシミング作業の経過について具体的に述べた。磁束密度 2.5 T、有効磁極間隔 73 mm、先端径 146 mm、先端径比約 2 の円すい筒磁極である。中心付近の $20 \times 20 \times 50 \text{ mm}^3$ 程度の容積内に 10^{-4} オーダの均一磁界を発生させるために、ローズシムによる補正を試みた結果、ほぼ所要の性能を得ることができた。不均一の補正は、縁端の磁束集中効果とシムの突起面の小さな溝の効果が微妙にバランスして行なわれており、作業には細心の注意が要求される。

最終的に得られたシムの形状は、一樣磁化仮定による計算結果とおおむね一致している。

終りに、本機の 1 号機の製作にあたり御指導と激励をいただいた名古屋大学理学部物理 N 研 福井教授、梶川助教授、堀川助教授、ほか関係者の皆様、本機の製作にあたり御指導いただいた当時高エネルギー物理学研究所カウンター部 政池教授、御助言、御協力をいただいた同部 森本、練川、石本の各氏に感謝します。また、鋼材を供給していただいた大同製鋼（株）、東北金属（株）、コイルを製作していただいた古河電気工業（株）の関係者の皆様に感謝します。

（昭和 59 年 2 月 17 日受付、同 59 年 10 月 25 日再受付）

文 献

- (1) 伴：「磁界均一度向上のための Rose シム法の解析」, 電学論 A, 101, 327 (昭 56-6)
- (2) 伴：「非対称長方形磁極による 磁界の解析」, 同上 A, 101, 507 (昭 56-10)
- (3) 伴：「高磁界用円すい筒磁極に対する 磁界均一度向上のための Rose シム法の解析」, 同上 A, 103, 525 (昭 58-10)
- (4) W. A. Anderson: *Rev. Sci. Instrum.*, 24, 856 (1953)
- (5) 政池：「偏極水素ターゲット」, 日本物理学会誌, 25, 419 (昭 45-5)
- (6) 梶川：「偏極ターゲット」, 同上, 30, 284 (昭 50-4)
- (7) 平松：「偏極ターゲットにおける NMR 測定」, 同上, 31, 552 (昭 51-7)
- (8) 政池：「高エネルギー実験の新しい技術」, フィジクス号外, 1, 1, 238 (昭 55) 海洋出版
- (9) L. M. Langer & C. S. Cook: "A High Resolution Nuclear Spectrometer", *Rev. Sci. Instrum.*, 19, 257 (1948)
- (10) 松田：「サイクロトロン用電磁石について」, 日本物理学会誌, 14, 168 (昭 34-4)
- (11) D. J. Kroon: *Laboratory Magnets* (1968) Philips Publ.
- (12) A. A. Melissinos: "Magnetic Resonance Experiments", *Experiments in Modern Physics*, p. 368 (1966) Academic Press
- (13) 飯田：「磁場の測定方法」, 物理測定技術, 4 版 3, p. 62 (昭 42)