

大強度陽電子源の開発（Ⅱ）

— 収束系への超伝導コイルの適応性評価 —

1998年4月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-1393, Japan

©動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

公 開 資 料

PNC TN9410 98-053

1 9 9 8 年 4 月

大強度陽電子源の開発(Ⅱ) — 収束系への超伝導コイルの適応性評価 —

武井早憲*、江本隆*、谷本育律**、榎本收志**、
大沢哲**、紙谷拓哉**、細山謙二**

要旨

事業団では、大電流電子線形加速器の利用技術の一環として、単色ガンマ線源、自由電子レーザー、大強度陽電子源などを検討している。本報告書は、大強度陽電子線源を開発するために、陽電子ビームを効率良く収束する装置への超伝導コイルの適応性を評価した。

超伝導コイルを用いた場合の陽電子強度を常伝導コイルの場合と比較したところ、強度が2倍以上になることがわかった。さらに、ソレノイドコイルとして超伝導コイルの特性を調べるため、小型コイルを製作し、定格電流まで励磁する試験を実施した。中心軸上の最大磁場強度を測定した結果、設計値である5.6Tを達成した。

従って、陽電子ビームを収束する装置に超伝導コイルを用いた場合、収束コイルとして機能することを確認した。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

** 文部省高エネルギー加速器研究機構

April, 1998

Development of an intense positron source (II)

- An Adaptive Estimate of a Superconducting Magnet for a Positron Focusing Device -

H.Takei*, Y.Tanimoto*, T.Emoto*, A.Enomoto**,
S.Ohsawa**, T.Kamitani** and K.Hosoyama**

Abstract

In the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), the following are examined as part of an application technology using a high power electron linac : monochromatic gamma ray sources, free electron lasers, and intense positron sources.

This report describes an adaptive estimate of a superconducting magnet in order to efficiently converge a positron beam for the development of an intense positron source. By comparing the intensity of a positron beam using a superconducting magnet with a normal conducting magnet, the intensity obtained was more than double. In addition, a small magnet was manufactured in order to examine the characteristics of the superconducting magnet as a solenoid coil. An excitement test was carried out with rated current. As a result of measuring the maximum magnetic field on the central axis, we achieved 5.6 Tesla, which was the designed value.

Therefore, it was confirmed to function as a focusing device, when the superconducting magnet was used to converge the positron beam.

* Frontier Technology Section, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

**High Energy Accelerator Research Organization

目次

| | |
|-------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 第2章 陽電子収束系の役割 | 2 |
| 第3章 超伝導コイルを用いた陽電子収束系の利点 | 5 |
| 第4章 超伝導コイルの設計条件 | 6 |
| 4.1 中心軸上における最大磁場強度の設定 | 6 |
| 4.2 陽電子標的からの熱放射の影響 | 7 |
| 第5章 超伝導コイルの設計結果及び評価 | 8 |
| 5.1 コイル寸法の最適化 | 8 |
| 5.2 陽電子収束効率の比較 | 8 |
| 5.3 超伝導コイルの熱解析 | 9 |
| 第6章 超伝導コイルの試作 | 12 |
| 6.1 コイルの製作 | 12 |
| 6.2 励磁試験結果と考察 | 13 |
| 第7章 まとめ | 15 |
| 7.1 設計について | 15 |
| 7.2 試作について | 15 |
| 付録A Boom-Livingstonの手法 | 17 |
| 参考文献 | 20 |
| 表 | 21 |
| 図・写真 | 23 |

図表リスト

表5-1：超伝導線の仕様

表5-2：超伝導コイルの設計結果

表5-3：KEK 入射器における陽電子輸送系の計算条件

図2-1：陽電子ビーム生成・収束の原理

図2-2：位相空間で表した収束系の役割

図2-3：QWTの磁場分布

図2-4：位相空間で表したQWTの変換

図2-5：ADの磁場分布

図2-6：位相空間で表したADの変換

図4-1：電子ビーム照射時の陽電子標的発熱分布

図5-1：典型的な陽電子ビーム軌道

図5-2：輸送距離による陽電子数の変化

図5-3：超伝導コイル(6T、AD型)で収束された陽電子エネルギー分布

図5-4：常伝導コイル(2.3T、QWT型)で収束された陽電子エネルギー分布

図5-5：コイル位置による陽電子収量の変化

図5-6：計算形状

図5-7：コイル最内層の発熱量

図6-1：試作コイル励磁試験体系概略図

図6-2：No.1コイルトレーニング結果

図6-3：線材間の短絡

図6-4：コイル製作時の注意点

図6-5：No.2コイルトレーニング結果

図6-6：No.2コイル磁場分布

写真6-1：絶縁用ユーピレックスシートを巻いたボビン

写真6-2：超伝導線の巻き付け

写真6-3：端部での処理

写真6-4：試作超伝導コイル

図A-1：ソレノイドコイルの形状

図A-2：(α, β) をパラメーターとした磁場強度比 K の変化

図A-3：温度 4.2 K における線材の I_c - B_c 特性

図A-4：最小体積における (α, β) の組み合わせ

図A-5： $(\alpha, \beta) = (1.38, 0.60)$ でのB0とBM

図A-6：コイルの中心軸上磁場分布

第1章 序論

現在、事業団では、オメガ計画の一環として、高レベル放射性廃棄物の消滅処理に適応できる大電流電子線形加速器開発を目的に、大電流化の要素技術開発を推進している[1]。この要素技術開発用加速器の特徴として、平均ビーム電流が既存の加速器よりも2桁程度高いこと、パルス幅が $100\ \mu\text{s} \sim 4\ \text{ms}$ の範囲で可変であること等である。このためクライストロン、加速管など加速器システムを構成する全ての要素に関して既存の加速器にはない大電流化を特徴としている[1]。

これと平行して、大電流電子線などの特徴を生かした利用技術を開拓するために、単色ガンマ線源・自由電子レーザー(FEL)等の検討を進めている。この利用技術の一環として、電子線形加速器による大強度陽電子線の生成・収束に関する基礎的な研究を平成6年度より原子力基盤クロスオーバー研究として実施してきた。

電子線形加速器による陽電子生成技術[2]は、物性研究等の基礎的な実験において有益な大強度低速陽電子線を生成させうる技術として、陽電子放出核種の場合と共に期待されている。世界最大の低速陽電子線強度は、米国・オークリッジ国立研究所(ORNL)の電子加速器(ORELA)で達成され、その入射電子線の電力は33 kWである[2]。また、国内最大の強度は日本原子力研究所東海研究所の100 MeV(1kW)電子加速器で得られている[2]。

これまで「電子線形加速器による大強度陽電子線の生成」に関する研究では、陽電子標的(タンゲステン)の発熱を効率よく除去するため、標的周辺部にタンゲステンと熱伝導率の高い銅の傾斜機能材料を使用した標的を開発している[3]。この開発により大強度陽電子線を生成する見通しが得られた。

平成8年度は、陽電子標的出口で拡がった陽電子ビームを効率良く収束する収束装置として超伝導コイルの適応性を評価した。この評価のため、超伝導コイルを設計し、さらに、試作コイルの性能試験を実施した。

第2章 陽電子収束系の役割_[4, 5, 6]

陽電子は標的内での電磁カスケードシャワーにより生成されるため、一般に標的出口での陽電子ビームは、入射電子ビームのエネルギーとエミッタンスなどに依存するが、ビーム軸に直角な方向（横方向）では次のような特性がある。

- ① 空間的な拡がりは入射電子ビームの拡がりと同程度である。
- ② 運動量の拡がりはかなり大きい。

従って、陽電子は図2-1に示すように標的出口から拡がるように生成されるため、この陽電子を効率よく収集し、加速するには、光学におけるレンズのように陽電子ビームを平行ビームに変換する必要がある。言い換えると、陽電子収束系の役割として、横方向の空間的な拡がりよりも、横方向運動量の拡がりを小さくすることである。

この様子は、陽電子ビームの横方向の運動を位相空間を用いて表わすことで説明できる（図2-2参照）。この図に示した縦長の楕円は標的出口における陽電子ビームのエミッタンスを表しているが、この楕円を横長の楕円で示したビーム輸送系のアクセプタンスに効率よく変換することである。

現在、ほとんどの陽電子発生装置では、ソレノイドコイルで生成されるビーム軸に平行な磁場で陽電子ビームを収束させている。すなわち、磁場中における横方向の速度成分により、横平面（ビーム軸に対して直角な平面）内で陽電子に回転力（ローレンツ力）を与え、らせん運動によりビームの発散を抑えることである。このようなソレノイドコイルを用いた収束装置は二種類に分けられ、一つは Quarter Wave Transformer (QWT) と呼ばれ、もう一つは Adiabatic Device (AD) である。

図2-3にQWTにおける理想的なビーム軸方向の磁場分布を示す。QWTによる収束作用は、図2-4に示すような位相空間で縦長の楕円を4分の1回転させ、効率良く陽電子ビームを輸送系のアクセプタンスに収めることである。

このQWTに対して、超伝導ソレノイドコイルはAD、すなわち、ビーム軸方向に緩やかに変化する磁場（図2-5）を利用して陽電子ビームを収束させる装置である。

ここで、断熱不变量（adiabatic invariant）と呼ばれる物理量を用いてADの原理を簡単に説明する。先に述べたように、ビーム軸に平行な磁場により陽電子がらせん運動を行い、横方向の運動が周期的になる。

一般に、運動が周期的に変化する力学系において、系の外的要因によるパラメータ（ここでは磁場の強さB）が運動の周期に対して一定とみなせるほど緩やか

に(断熱的に)変化する場合、作用積分

$$J_i = \oint p_i dq_i \quad (2-1)$$

は不变量となる。 p_i と q_i はそれぞれ一般化運動量と一般化座標で、積分は運動の一周期にわたり行う。すなわち、陽電子ビームの運動に対して磁場の変化が一定とみなせるように緩やかに変化する場合、位相空間上の橢円の体積は不变となり(Liouvilleの定理)、効率良くビームが収束される。但し、多くの陽電子がターゲット下流のビームダクトや加速管の壁に衝突し、失われることも考慮しなければならない。

ビーム軸方向に一様な磁場 \bar{B} がある場合、横方向の運動に対する作用積分は

$$J = \oint (\bar{p}_\perp + e\bar{A}) d\bar{l} \quad (2-2)$$

となる。ここで、 \bar{p}_\perp は運動量の横成分、 e は陽電子の電荷、 \bar{A} はベクトルポテンシャル($\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$)、 $d\bar{l}$ は陽電子の円軌道方向の線要素である。円運動の半径を r_0 とすれば

$$J = eB\pi r_0^2 \quad (2-3)$$

が不变量となる。すなわち、 J を一定に保つため、 B の減少とともに r_0 は増加する。したがって、ターゲットに続く加速管の径を大きくするほど r_0 の最大値は大きくなり、陽電子を収束する点で有利となる。

また、横方向運動量に注目すると、 $p_\perp = eBr_0$ より、断熱不变量(2-3)は

$$J = \frac{\pi p_\perp^2}{eB} \quad (2-4)$$

と書き換えるので、 B の減少とともに p_\perp も減少し、横方向の拡散の小さい平行ビームが得られることになる。すなわち、図2-6の位相空間においてADによる収束は、図2-4に示したQWTによる収束と比べて、運動量方向に対するアクセプタンスが大きく、陽電子ビームが効率良く収束できる。当然のことながら、磁場の変化がビーム軸方向の運動に対して緩やかとみなせない高エネルギーの陽電子ビームには当てはまらない。

ADとQWTによる収束を比較した場合では、原理的にQWTの方が収束された陽電子のエネルギーの拡がりが小さくなる。このため、ADを利用する方がビーム輸送系のエネルギーアクセプタンス(ΔE)を大きくしなければならず、このことは同時に、加速された陽電子のエネルギーの拡がり($\Delta E/E$)が大きくなることを意味する。

しかし、シンクロトロン放射光実験や高エネルギー電子・陽電子衝突実験のように陽電子を10億電子ボルト(1GeV)程度の高エネルギーに加速する場合には、このエネルギーの拡がりは比較的問題にならない。また、低速陽電子用にモジュレータを用いて同一のエネルギーに単色化する場合にも、このエネルギーの拡がりは比較的問題にならないため、ADによる収束の方が陽電子収量の点で有利となる。

したがって、本設計ではADによる収束系を選択する方針とした。

第3章 超伝導コイルを用いた陽電子収束系の利点

陽電子収束用ソレノイドコイルを常伝導パルスコイルから超伝導コイルに換えることにより、次のような利点が得られる。

- ① KEK 入射器ではこれまで磁場強度2.3 T の常伝導パルスコイル^[7]を使用してきたが、超伝導化により強磁場を生成できる。その結果、陽電子の収量が常伝導コイルより向上する。尚、収量の計算結果は5.3節に示す。
- ② 超伝導コイルは直流電源による励磁に適している。収束コイルの直流運転は、ビームパルス幅が千分の1秒(1 ms)程度から連続波である電子線形加速器にとって不可欠な条件である。また、時間的に磁場を変化させないため磁場の変化による渦電流(Eddy Current)も発生せず、この電流による磁場の乱れもない^[8]。
- ③ 超伝導コイルの線材として細い線材($\sim 0.1 \text{ mm}^2$)を用いて巻き数を増やす場合、励磁用直流電源として用いてきた10 kA クラスの電源を100 A クラスに小型化でき、運転時の安全性も向上する。また、直流運転の場合は超伝導部における電流損失が全くないので、省電力運転が可能である。
- ④ 線材が細く、巻き数が多いため、磁場計算の精度を向上できる。

超伝導コイルはこのような利点を有するが、今まで陽電子収束系に適応したという報告はない。そこで、陽電子収束用として超伝導コイルの適応性を評価するために、コイルの設計と試作コイルによる性能試験を実施した。

以下、第4章及び第5章では超伝導コイルの設計に関して、また、第6章では超伝導コイルの試作に関してまとめる。

第4章 超伝導コイルの設計条件

加速器運転中も超伝導状態を維持し、充分な陽電子収量が得られる超伝導コイルを設計、製作するために、次のような条件が考えられる。

- ① 超伝導コイルの設置場所として KEK 入射器 陽電子標的近傍を想定する。
- ② 放射線によるコイル部での発熱を超伝導状態の破れ(クエンチ)が起きないレベルに抑え、超伝導コイルを安定状態に保つ。この条件は、電子ビーム照射により陽電子標的から、特に標的の下流側(ビーム進行方向を基準とする)から放射線が大量に発生するためである。
- ③ 超伝導線の絶縁被覆を耐放射線性のある材質を選定する。すなわち、放射線により絶縁被覆が損傷し、超伝導線同士で短絡を起こさないためである。
- ④ 陽電子標的を含む真空容器(外径 160 mm [3, 7])を囲むようにコイルの常温ボア径を選定する。
- ⑤ 陽電子の収量を増やすように中心軸上の最大磁場強度を可能な限り大きくする。特に、設計において、超伝導コイル内壁(中心軸側)での磁場強度が高くなり、クエンチを起こし易くなる点に注意しなければならない。尚、具体的な設計条件は4.1節に示す。
- ⑥ 陽電子標的がビーム照射により約800°Cの熱源[3, 7]となるため、熱放射によるクエンチを起こさないようにする。尚、熱放射の詳細計算は4.2節に示す。

4.1 中心軸上における最大磁場強度の設定

常温ボア径を広くした例として、Xバンドクライストロン用の収束コイルとして開発された伝導冷却方式の超伝導コイル[9]がある。このコイルの形状は、常温ボア径 190 mm、コイル内径 250 mm、外径 400 mm、長さ 280 mmであるから、陽電子標的を設置することができる。従って、本設計において、この開発実績のある収束コイルの形状を参考とする。

また、文献[9]によると、このコイルの最大磁場強度はヘリウム温度 4.2 Kにおいて約 6 T であるから、この磁場強度を目標値として設定する。

4.2 陽電子標的からの熱放射の影響

陽電子標的からの熱放射を評価するために、次に示す温度分布及び配置で評価した。

① 陽電子標的の温度分布（図4-1[3, 7]参照）

- ・ 標的表面（直径 20 mm の円）からの熱放射を考える。
- ・ 温度分布は、中心温度（1076 K）が中心からの距離に比例して低くなり、円周部で 576 K とする。

$$T(r) = 1076 - 50000r$$

② 配置

- ・ 標的はSUS304（比熱 500 J/(kg · K) @300K [10]）の容器（外径 160 mm、内径 150mm）内の真空中に置かれ、超伝導コイルはその外側にあると仮定する。

黒体とみなされる標的表面 S からの単位時間あたりの熱放射エネルギーは、シュテファン-ボルツマンの法則より

$$\int_S I dS = \int_0^{0.01} \sigma T(r)^4 2\pi r dr \\ = 6.2 [W]$$

となる。

これがSUS容器の長さ 15 cm の部分（約 3 kg）にすべて吸収されたと仮定した場合、SUS容器の単位時間あたりの温度上昇は、

$$\frac{6.2[W]}{500[J/kg K] \times 3[kg]} = 4.1 \times 10^{-3}[K/s]$$

となる。

従って、SUSの熱伝導や空気の流れ等による冷却により、超伝導コイルに問題となる温度上昇はない。

第5章 超伝導コイルの設計結果及び評価

5.1 コイル寸法の最適化

超伝導コイルを設計する場合、常伝導コイルの設計と異なり、線材に流れる臨界電流密度 (I_c) が冷却温度と線材が置かれた場所の磁場強度 (B_c) により制限される。

さらに、陽電子標的から発生する放射線の影響も考慮するため、中心磁場強度を損なわない範囲でコイル体積を最小にしなければならない。

これらの点を考慮して超伝導コイルの寸法を最適化するBoom-Livingstonの手法^[11]を用いる。このとき、線材として高エネルギー素粒子実験用超伝導加速器のために開発されたものを用いる。線材の詳細仕様を表5-1に示す。

このBoom-Livingstonの手法を用いた超伝導コイルの設計を付録Aに示す。

付録Aにおける基本条件は以下の通りである。

- | | |
|----------------|-----------------------------|
| ① 中心軸上での最大磁場強度 | 6 T |
| ② コイル内径 | 250 mm |
| ③ 超伝導線材 | NbTi/Cu (銅比1.8) ホルマル絶縁被覆 |

この条件で最適化した結果を表5-2「KEK入射器」の欄に示す。

5.2 陽電子収束効率の比較

陽電子収束コイルを超伝導化する利点を明確にするため、超伝導コイルと常伝導コイルを用いた場合の陽電子ビームの軌道を計算し、収束効率を比較した。

まず、陽電子標的における陽電子の生成を電子・光子輸送コードEGS4^[12]を用いて計算した。計算の結果、得られた標的出口における陽電子の位置及び運動量を用いて、PF入射器における陽電子輸送系（ソレノイドコイル・60 MeV程度の加速管・四極電磁石）を模擬した陽電子ビームの運動方程式を4次のRunge-Kutta法で数値積分し、陽電子ビームの軌道を決定した。ここで、中心軸上の最大磁場強度を超伝導コイルで6.0 T、常伝導コイルで2.3 Tとし、詳しい計算条件を表5-3に示す。

図5-1に数値積分によって得られた典型的な陽電子ビームの軌道を示す。

図5-2にエネルギー4 GeV の電子が1000個標的に入射した条件で、輸送距離(標的出口からの距離)と陽電子数の関係を表す。この結果、標的から13 m 輸送した後でも常伝導コイルの2倍以上の収量が得られることが分かった。

この理由は、超伝導コイルの強い磁場がビーム軸方向に緩やかに減少するAD収束系であるため、幅広いエネルギー分布の陽電子まで収束できるからである。これを確かめるために、AD型超伝導コイルとQWT型常伝導コイルで収束された陽電子のエネルギー分布を各々計算し、図5-3と図5-4に示す。これらの図より、AD型超伝導コイルの方がエネルギーアクセプタンスが大きくなることが分かる。

また、陽電子の収量が2倍になることは標的に入射する電子のエネルギーが約半分で済み、電子線形加速器の長さも半分で済むことに相当する。その結果、加速器にかかるコストや空間的な制限が大幅に改善されることになる。さらに、陽電子ビームを用いた諸実験に必要な時間も半分で済むことになる。

さらに、放射線によるコイル部の発熱を避けるため、コイルを標的の上流側に移動させる場合を想定して、設置場所による収束効率の変化を計算した。計算条件は表5-3と同じである。その結果を図5-5に示す。図において標的出口がコイルの上流端となる位置を基準位置とし、その位置における陽電子収量を100として相対的に表している。図より基準位置から 50 mm 上流側にコイルを移動させた場合でも 85 の収量が得られ、逆に基準位置から 50 mm 下流側に移動させられれば 108 の収量が得られることがわかった。このため、放射線の影響を少なくし、超伝導コイルのクエンチを克服することが重要である。

5.3 超伝導コイルの熱解析

陽電子の収量を増やすには、超伝導コイルへの熱的影響を考慮し、コイルの位置及び遮蔽体の厚さなどを最適化しなければならない。そこで、陽電子標的から発生する放射線による熱的影響を調べるために、超伝導コイルにおけるエネルギー吸収量をEGS4により評価した。

(1) 計算条件(図5-6参照)

① 入射電子ビーム

| | |
|-------|------------------------------------|
| エネルギー | : 4 GeV (KEK 入射器仕様) |
| 電流 | : 1 μ A (電力 4 kW) |
| ビーム直径 | : 1 mm (ガウス分布; $3\sigma = 0.5$ mm) |

入射電子数 : 10^4 個

② 対象とする放射線

電子線・陽電子線・ γ 線

③ 陽電子標的の形状

$\phi 4\text{mm} \times 14\text{mm}$ の円柱形(4放射長)

④ 陽電子標的の材質

タンゲステン

⑤ 超伝導コイルのモデル化

5.1節で決定したコイル寸法、外径330 mm、内径250 mmとし、長さ300 mmの仮想的な円筒形とする。ビーム軸方向の位置を超伝導コイルの中心と標的出口を一致させる。尚、5.1節で決定したコイルの長さは150 mmであるが、コイルを上流側に150 mm移動した場合にも対応するため、長さ300 mmのコイルとした。

放射線のエネルギーを吸収する材質として、超伝導状態となるニオブ・チタン(NbTi)でなく、線材の主成分である銅とする。これは、銅により線材の超伝導状態が安定に維持するためである。

クエンチは超伝導線の局所的な部分における発熱が原因で起こるため、銅を1 mmの厚さで20層に分割し、長さを10 mmずつに区切った部分でのエネルギー吸収量を計算する。

⑥ 鉛遮蔽体

鉛遮蔽体と超伝導コイルとの間に設置する断熱材の形状[9]を考慮し、鉛遮蔽体の外径を190 mmと固定する。この鉛の形状において、内径を140 mm(厚さ25 mm)と90 mm(厚さ50 mm)の二種類とする。この場合、真空容器の径を小さくする必要がある。

尚、長さは超伝導コイルと同じ300 mmの円筒形とする。

⑦ カットオフエネルギーの設定

EGS4におけるカットオフエネルギーの設定は、計算体系に応じて決めなければならない。このため、電子(陽電子)・光子に対するカットオフエネルギーを20 keV、50 keV、100 keV、500 keV、1 MeV、10 MeVの六種類に分け、タンゲステンなどにおける内部発熱量を比較した。その結果、カットオフエネルギーが増加するごとに計算時間は短くなり、計算精度が悪くなった。このため計算時間を考え、カットオフエネルギーの最小値である20 keVの場合と比べて10%の精度で一致する1 MeVを今回のカットオフエネルギーとした。但し、厚さ50 mm

のカットオフエネルギーは鉛におけるエネルギー損失を精度良く計算するため 100 keVとした。

(2) 計算結果と考察

計算結果の一例として、放射線の影響が最も大きい第 1 層目（最も陽電子標的に近い内側）の銅について長さ 10 mm 当りのエネルギー吸収量を図5-7に示す。

図より厚さ 50 mm の鉛遮蔽体を設置した場合、標的の下流側に位置する部分の発熱量が 10 mW 程度であることがわかる。すなわち、陽電子標的出口から下流に長さ 150 mm のコイルを設置した場合でもエネルギー吸収量は合計 3 W 以下となる。従って、実験室レベルにおいて液体ヘリウムの冷凍能力が 3 W 程度^[13]であることから、コイル全体の平均的な発熱を抑えることができる。

しかしながら、超伝導コイルのクエンチは、放射線の偶然的な集中による局所発熱が周囲に波及することと考えられるので、以上の計算ではクエンチの発生はないと断定できない。これを確かめるために、超伝導コイルをビーム軸方向に移動させ、クエンチの発生回数を調べる試験も有効である。

第6章 超伝導コイルの試作

超伝導コイルが陽電子収束用ソレノイドコイルとして十分な機能を有することを評価するため、試作コイルによる性能試験を実施した。そこで、高エネルギー粒子実験用超伝導加速器のために開発された超伝導線材とコイル製作技術を用いて、試作コイルを製作し、評価した。

6.1 コイルの製作

表5-2「試作コイル」の欄に示す仕様で試作コイルを製作した。このコイルの形状は、5.1節での検討結果や電力貯蔵装置用ソレノイドコイルとして実績のある形状(内径162 mm、外径190 mm、最大中心磁場6.3 T)を参考とした。このコイルは第5章で設計したコイルより小型であるが、最大中心磁場強度がほぼ等しいため、超伝導コイルに反映できると判断した。

一般に、製作直後に実施するコイルの励磁では、超伝導線の定格電流値に到達する前にクエンチを起こすことが多い。この主な原因是、コイル内に線材が動ける隙間があり、特に巻き方が変わるコイル端部には隙間が多くなり、励磁電流によるローレンツ力が静止摩擦力を上回り、スリップによる摩擦熱が発生するためである。このようなクエンチを重ねることによりスリップを起こさず、定格電流を流すことが可能になる。(これをトレーニングという。)

従って、超伝導コイルの製作において、線材の移動しやすいコイル端部の処理に細心の注意を払って一定の張力(4 kgf)で巻き付けることが重要である。今回、端部における線材の移動を抑えるため、耐低温性のG10材と呼ばれる繊維状の板(エンドスペーサー)を加工して隙間に挿入した(写真6-3参照)。さらにエンドスペーサーと線材の隙間は、エポキシ樹脂系のグリーンパテを詰めて線材を固定した。

試作コイルの製作過程および完成時の外観を写真6-1～6-4に示す。

6.2 励磁試験結果と考察

試作コイルの励磁試験体系を図6-1に示す。内径 200 mm のクライオスタッフ内に試作コイルを設置し、液体窒素と液体ヘリウムを用いて約 4 Kまで冷却した。この超伝導状態において 200 A・40 V まで供給できる直流電源によりコイルを励磁し、コイル中心軸上の磁場強度をホール素子を用いて測定した。尚、クエンチの際、超伝導状態のコイルに蓄えられているエネルギーを吸収するため、コイルに 5 Ω の保護抵抗を接続した。

(1) No. 1 コイルの励磁試験

No. 1 コイルのトレーニング結果を図6-2に示す。

トレーニングを重ねる毎に最大励磁電流が減少する傾向が見られた。励磁速度を小さくしてもあまり改善されなかったので、以下の考察を行った。

① 原因について

- ・通常、超伝導コイルのトレーニングではクエンチを重ねる度に最大励磁電流は下がらない。このため、クエンチの度に超伝導線材表面のホルマル絶縁材が少しづつ剥れ、隣り合った超伝導線材同士が短絡し、その面積が広がったと考えられる。
- ・隣り合った超伝導線材間の電圧は同じ層内よりも異なる層間の方が大きいので、異なる層間の方が短絡を起こしやすくジュール熱も大きい。また、コイルの励磁電圧 (V) は励磁速度 (dI/dt) に比例するため ($V = L dI/dt$, L:コイルのインダクタンス)、同じ層間の短絡の場合、励磁速度を小さくすることによりクエンチを免れられる。

ところが、この試験結果から励磁速度を小さくしてもあまり改善されなかったので、異なる層間で短絡していると考えられる(図6-3 参照)。

- ・巻付け時、端部の処理においてホルマル絶縁材を傷つけていた可能性がある。また、ボビンのフランジ平行度が悪く、端部の処理をより困難にしていたことも原因の一つである。

② その後の方針について

- ・励磁速度を非常に小さくしなければならないコイルは実用的でない。従って、このコイルで定格の性能を得ることは困難であり、同一の仕様で試作コイル (No. 2) をボビンから製作することとした。
- ・No. 2 コイル製作時の注意事項
 - a. ホルマル絶縁材を傷つけない。

b. フランジの平行度の精度を向上させる(図6-4参照)。

(2) No. 2 コイルの励磁試験

No. 2 コイルのトレーニング結果を図6-5に示す。トレーニング時の励磁速度は160A／10分であった。

29回のクエンチを重ねることにより、ヘリウム温度4.2Kにおける励磁電流は、最大値である163Aであった。このとき、中心軸上の最大磁場強度は5.6T、励磁電圧は約10Vであった。

また、コイル中心軸上の磁場強度分布を測定し、ほぼ予想通りの磁場強度が得られた(図6-6参照)。ホール素子による測定精度は±1%であるから、測定値と理論値の差はホール素子の据付精度によるものと考える。

さらに、クエンチを起こさず、励磁電流を160Aまで上昇する時間を1分まで短縮できた。

尚、図6-5に示した44回のトレーニングにおいて使用した液体ヘリウム量は、約1500ℓ(500ℓデュワー瓶3本分)である。

(3) 今後の改良点について

さらに太い、あるいは断面が平角形状の超伝導線材を使用する方が、コイルの製作が容易になり、トレーニングの簡略化や線材の安定化という利点が得られる。しかし、NbTiの臨界電流密度は同じであるから、直流電源の容量が大きくなり、第3章で述べた利点と矛盾する。従って、運転時の安全性まで加味し、改良点を決めなければならない。

第7章 まとめ

平成 8 年度は、陽電子標的出口で拡がった陽電子ビームを効率良く収束する収束装置として、超伝導コイルの適応性を評価した。その結果を以下にまとめる。

7.1 設計について

① コイル寸法の最適化

KEK 入射器を想定して、中心軸上の磁場強度が 6 T である超伝導コイルを設計するために、Boom-Livingston の手法を用いてコイル寸法を最適化した。

② 陽電子収束効率の比較

陽電子ビーム収束用コイルを超伝導化することにより陽電子の収量が常伝導コイルと比較して 2 倍となる。これにより電子線形加速器の長さを約半分にするなどの利点が得られる。

③ 热解析

EGS4 を用いて陽電子標的から超伝導コイルに入射する放射線による発熱量を計算した。その結果、入射電子ビームが 4 GeV-4 kW の場合、超伝導コイル要素(厚さ 1 mm・長さ 10 mm の中空状円筒形)における発熱量は、最大 10 mW 程度であった。従って、コイル全体の平均的な発熱を抑えられるが、さらに、放射線が短時間に局所的に集中する場合のクエンチも評価しなければならない。

7.2 試作について

① 製作手法の習得

超伝導コイルの性能は製作における諸条件に大きく影響される。特に、コイル端部に丁寧な処理を施すことが重要である。

② 励磁試験の実施

No. 2 コイルでは、29 回のクエンチを経て、中心軸上の磁場強度として設計値の 5.6 T を達成した。また、中心軸上の磁場分布が予想通りであつ

た。

また、クエンチを起こさず、励磁電流を160Aまで上昇する時間を1分まで短縮した。

以上の結果から、陽電子収束系として、従来用いられてきた常伝導パルスコイルを超伝導コイルに適応しても十分な機能を有することが分かった。

付録A Boom-Livingstonの手法

(1) はじめに

常伝導コイルと異なり、超伝導コイルの場合、線材に流れる臨界電流密度(I_c)が線材の温度と線材が置かれた場所の磁場強度(B_c)により制限される。

さらに、陽電子標的から発生する放射線の影響もあるため、中心磁場強度を損なわない範囲でコイル体積を最小にしなければならない。

これらの点を考慮して、本付録では超伝導コイルの寸法をBoom-Livingstonの手法[11]により最適化する。

(2) 設計条件

最適化において必要な設計条件を以下に示す。

- ① 中心軸上での最大磁場 --- 6 T
- ② コイル内径 ----- 250 mm
- ③ 超伝導線材 ----- NbTi/Cu (銅比1.8) ホルマル絶縁被覆
線径 ϕ 0.65 mm (ホルマル付 ϕ 0.7 mm)
- ④ コイルの成分 ----- NbTi 26.8% ($1.18 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{ターン}$)
Cu 48.2% ($2.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{ターン}$)
ホルマル 12.5% ($5.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{ターン}$)
すきま 12.5% ($5.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{ターン}$)

$$1 \text{ ターンあたりの断面積 } S = 4.39 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

また、クエンチを克服する観点から以下の項目を考慮する。

- (a) コイル長が長くなると、放射線による入熱が増え、クエンチを起こしやすくなる。
- (b) コイル厚が厚くなると、線材が動きやすいコイル端部の層数が増え、摩擦によるクエンチを起こしやすくなる。また、製作も困難になる。

今回の最適化において、(b)は製作方法の改善等により回避できるので、(a)の方を優先し5番目の条件を付加する。

- ⑤ コイル長 ----- 150 mm ($\beta = 0.60$)

この条件は陽電子標的と加速管との距離が 20 cm であることから得られた。

(3) 最適化手順

- ① コイル寸法と発生磁場との関係

図A-1に示すような形状のソレノイドにおいて、 $(r, z) = (0, 0)$ での磁

束密度 B_0 は

$$B_0 = \mu_0 J_{ave} \beta \ln \left\{ \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)}{1 + (1 + \beta^2)} \right\} \quad (\text{T}) \quad (\text{A-1})$$

で表される。

ここで、 J_{ave} は運転電流 I (A) をすきまを含む 1 ターンあたりの断面積 S (m^2) で割った平均電流密度

$$J_{ave} = \frac{I}{S} \quad (\text{A}/\text{m}^2) \quad (\text{A-2})$$

であるが、総ターン数 N を用いて

$$J_{ave} = \frac{NI}{2a^2(\alpha - 1)\beta} \quad (\text{A}/\text{m}^2) \quad (\text{A-2}')$$

と表せる。

② Boom-Livingston の手法

まず、線材における最大磁場強度 B_M (コイル内壁部 (r, z) = ($a, 0$) での値) を $\alpha = b/a$ 、 $\beta = l/a$ の関数として図 A-2[11]に示す。図において磁場強度 B_M は磁場強度比 $K = B_M/B_0$ として表わされる。尚、この B_M 値が超伝導線材の I_c - B_c 特性により線材に流れる電流を制限する。

図 A-2より、 $\beta = 0.6$ のとき、 B_M/B_0 の比 K は $1.0 \leq \alpha \leq 2.0$ の範囲で $K = 1.4$ 程度である。すなわち、 B_0 を 6 T とした時、 B_M は約 8.4 T となる。

そして、温度 4.2 K における超伝導線材の I_c - B_c 特性 (図 A-3) より、最大磁場強度 8.4 T での臨界電流は約 100 A である。

次に、コイルの体積を最小にする、すなわち、線材長を最短にする α を決定する。そこで、Fabry の G -function

$$G = \frac{\sqrt{2\pi}}{5} \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \left\{ \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)}{1 + (1 + \beta^2)} \right\} \quad (\text{A-3})$$

と volume factor

$$\nu = 2\pi(\alpha^2 - 1)\beta \quad (\text{A-4})$$

を用いて (B-1) 式を書き換える。

$$B_0 = J_{ave} \alpha G \sqrt{\nu} \times 10^{-6} \quad (\text{T}) \quad (\text{A-5})$$

また、コイルの体積 V は

$$V = a^3 \nu \quad (\text{m}^3) \quad (\text{A-6})$$

線材長 L は

$$L = \frac{a^3 v}{S} \quad (\text{m}) \quad (\text{A-7})$$

と表せる。

$B_0=6\text{T}$ としたとき、最大励磁電流は線材の特性により 100 A に制限されることから、(A-5)式は

$$6 = \frac{100}{4.39 \times 10^{-7}} \times 0.125 \times G\sqrt{v} \times 10^{-6} \quad (\text{A-8})$$

となり、 $G\sqrt{v} = 0.21$ である。

そして、コイルが最小体積となる $G\sqrt{v}$ および (α, β) の組み合わせを示した図 A-4[11]より、 $G\sqrt{v} = 0.21$ で v が最小になるときの α と β の組を

$$(\alpha, \beta) = (1.38, 0.60) \quad (\text{A-9})$$

と求められる。

以上の議論を超伝導線材の $I_c - B_c$ 特性上に示す[14]（図 A-5）。

また、中心軸上の磁場強度分布を図 A-6に示す。また、結果を表5-2「KEK入射器」の欄に示す。

参考文献

- [1] 遠山伸一, 谷賢, "大電流電子加速器の開発", 動燃技報 88, 1993年
- [2] 岡田漱平, 金沢育三, "高強度低速ポジトロンビーム発生・利用技術", 応用物理 第59巻 第7号 (1990)
- [3] 武井早憲, 江本隆, "電子線形加速器による陽電子生成", 原子力工業 第42巻 第10号 (1996)
武井早憲, "大強度陽電子源の開発-陽電子生成効率の解析(I)-", PNC TN9410
96-028, 1996 年 1 月
- [4] 竹内康紀, "陽電子発生", OHO'90 高エネルギー加速器セミナー
- [5] R.Chehab, "Positron Sources", LAL/RT 92-17, December 1992
- [6] H.Brechta, K.E.Breymayer, K.G.Carney, H.DeStaeler, R.H.Helm, and C.T.Hoard,
"The Positron Source", The Stanford Two Mile Accelerator, R.Neal Editor,
W.A.Benjamin Inc. (1968)
- [7] 佐藤勇, 穴見昌三, 榎本收志, 福田茂樹, 小林仁, 中原和夫, "放射光入射器増強計
画 - KEKB に向けて-", KEK Report 95-18 March 1996
- [8] 大内徳人, "超伝導電磁石", OHO'92 高エネルギー加速器セミナー
- [9] S.Yokoyama et. al., "Cryogen Free Conduction Cooled NbTi Superconducting Magnet for
a X-band Klystron", IEEE Transactions on Magnetics, vol.32, no.4, July 1996
- [10] "伝熱工学資料(改訂第4版)", 日本機械学会編
- [11] R.W.Boom and R.S.Livingston, "Superconducting Solenoids", Proc. of the IRE,
March 1962
- [12] W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O.Rogers, "The EGS4 Code System", SLAC-265,
December 1985
- [13] 李瑞, "ギフォード・マクマホン型小型冷凍機", 応用物理 第67巻 第4号 (1998)
- [14] M.N.Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford (1983) chapter 3

表5-1 超伝導線の仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------------------------|----------------------------------|
| 線材の構成 | NbTi/Cu |
| 線材の銅比 | 1.8 |
| 線材の絶縁被覆材 | ホルマル |
| NbTiフィラメント径 | 直徑 $6 \mu\text{m}$ |
| 線材の構造 | 複合多芯ツイスト線 |
| ツイストピッチ | 13 mm |
| 線径 [被覆材込みの場合] | 直徑 0.65 mm [直徑 0.7 mm] |
| 臨界温度 | 9.5 K |
| 臨界電流密度 [温度4.2K, 磁場8T] | $1.1 \times 10^3 \text{ A/mm}^2$ |
| 残留抵抗比 (RRR) | 132 |
| 引張破断応力 | 74.5 kgf/mm ² |

表5-2 超伝導コイルの設計結果

| 項目 | 設計結果 | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | KEK 入射器 | 試作コイル |
| 内径 | 25.0 cm | 13.9 cm |
| 外径 | 34.5 cm | 18.5 cm |
| 長さ | 15.0 cm | 10.0 cm |
| 体積 (cm ³) | 6.46×10^3 | 1.17×10^3 |
| 線材長 | 14.7 km | 2.67 km |
| ターン数 | 16,050 | 5,148 |
| インダクタンス | 78.4 H | 3.9 H |
| 蓄積エネルギー | 392 J | 52 J |
| 最大励磁電流 | 100 A | 163 A |
| 最大中心磁場 | 6.1 T | 5.6 T |

表5-3 KEK 入射器における陽電子輸送系の計算条件

| 項目 | 条件 |
|-----------|-----------------------|
| DCソレノイド磁場 | 0.5 T |
| 加速電界 | 10.0 MV/m |
| 加速位相 | 20 deg. |
| ステップサイズ | 1.0 mm |
| 入射電子エネルギー | 4.0 GeV |
| ビーム径 | 0.5 mm (1σ) |
| パンチ長 | 15 psec (正規分布FWHM) |

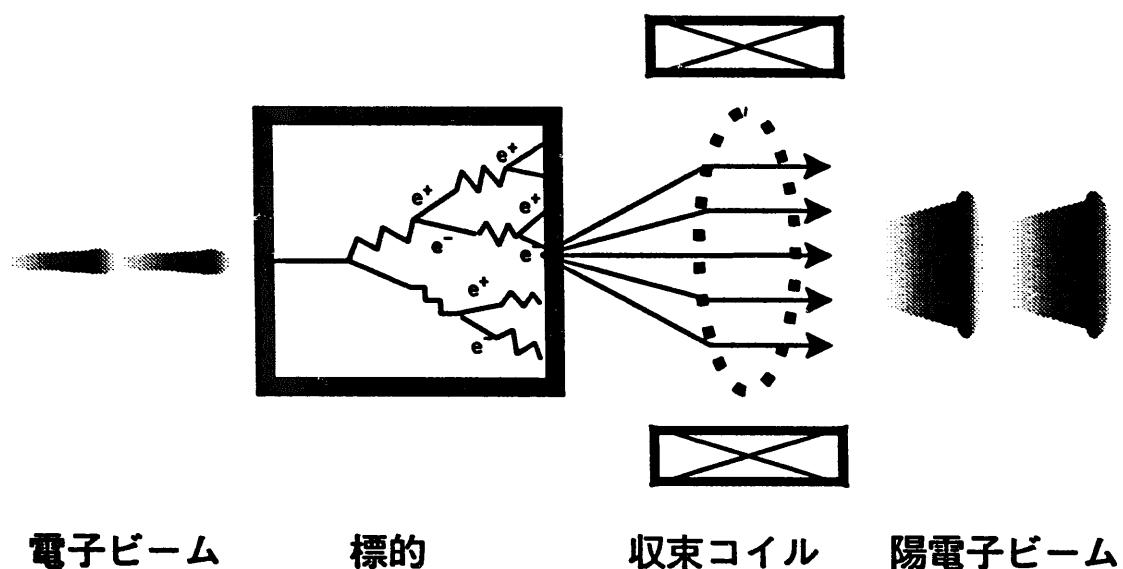


図2-1 陽電子ビーム生成・収束の原理

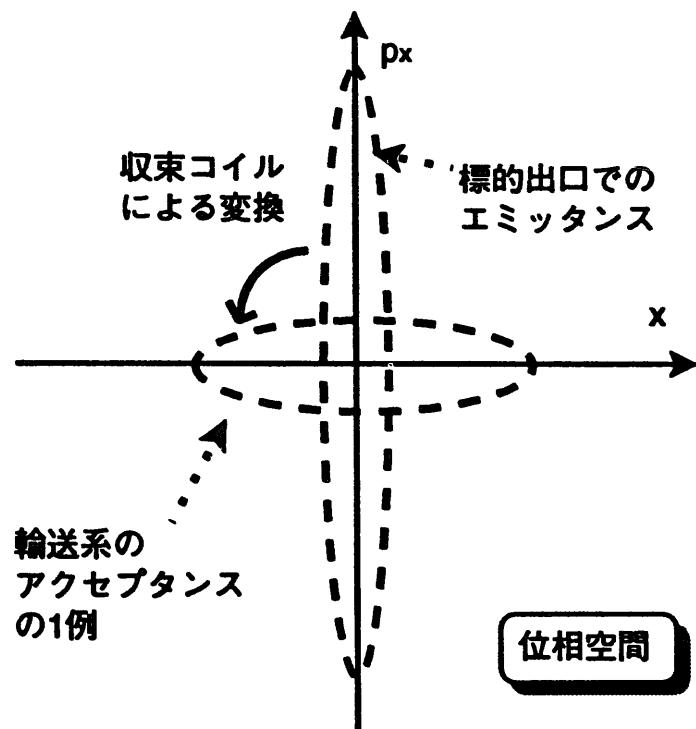


図2-2 位相空間で表した収束系の役割

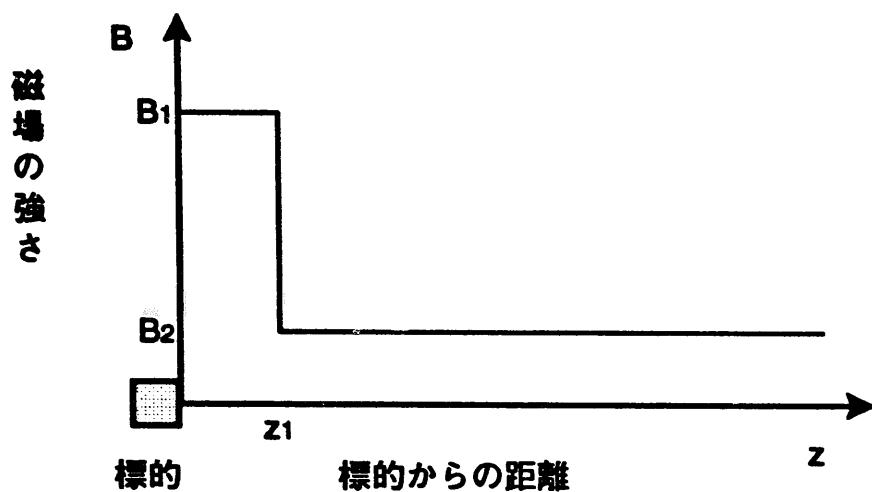


図2-3 QWTの磁場分布

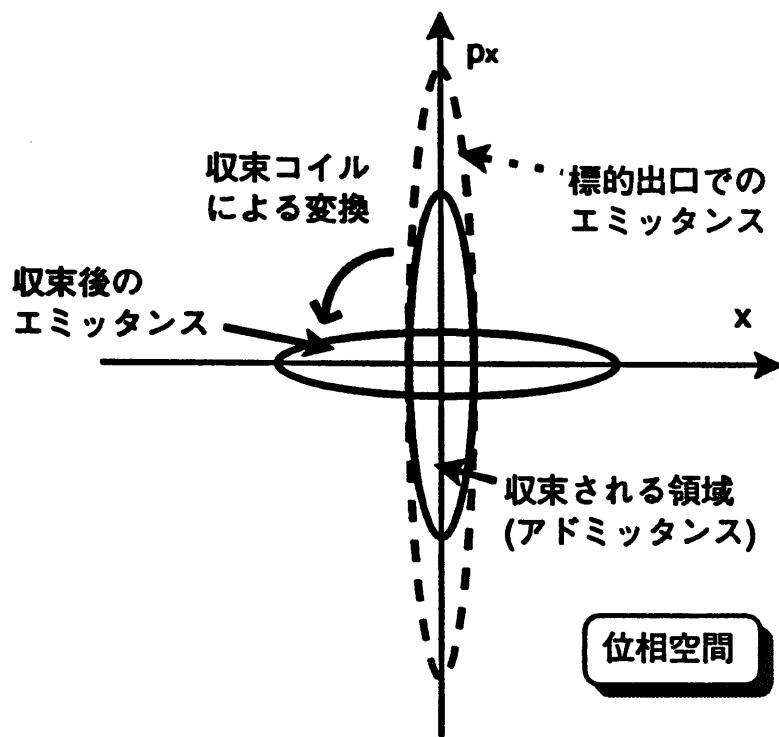


図2-4 位相空間で表したQWTの変換

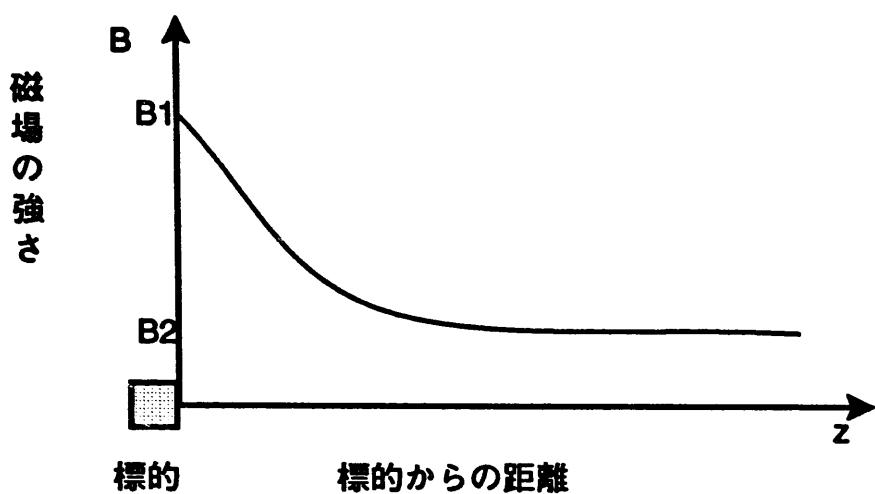


図2-5 ADの磁場分布

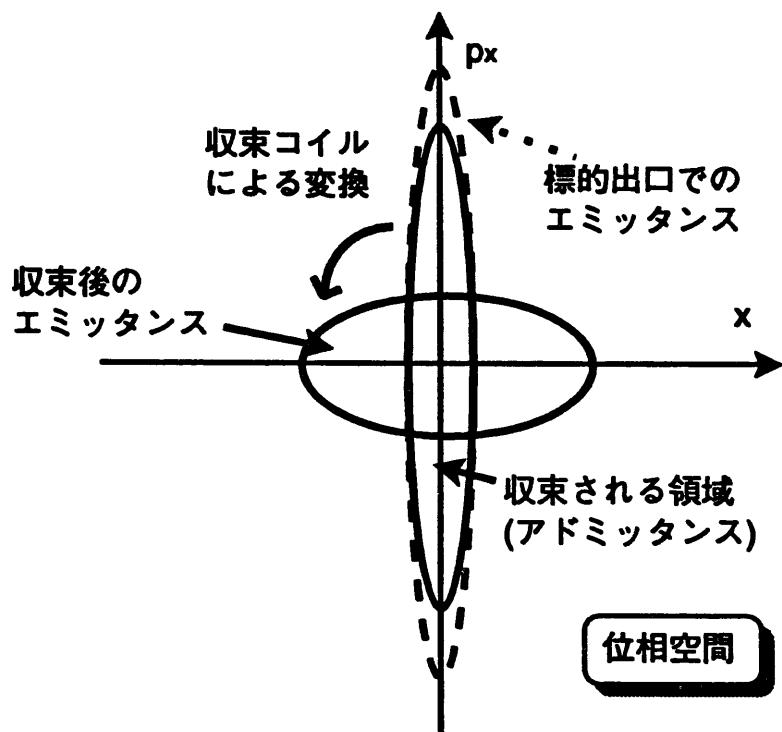


図2-6 位相空間で表したADの変換

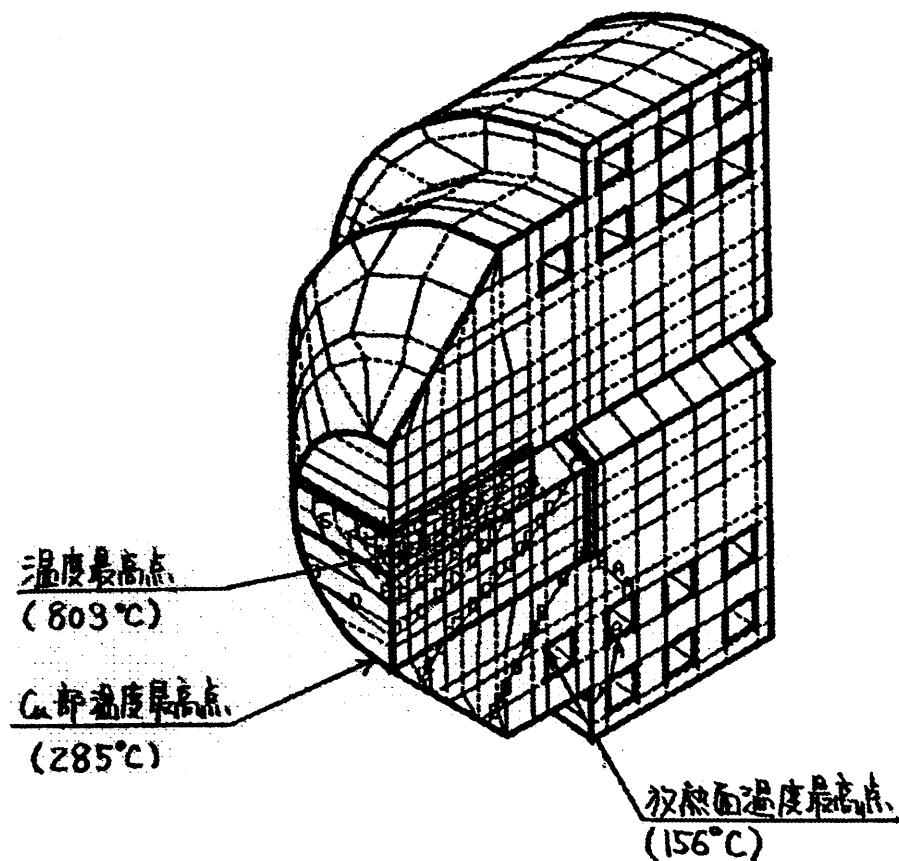
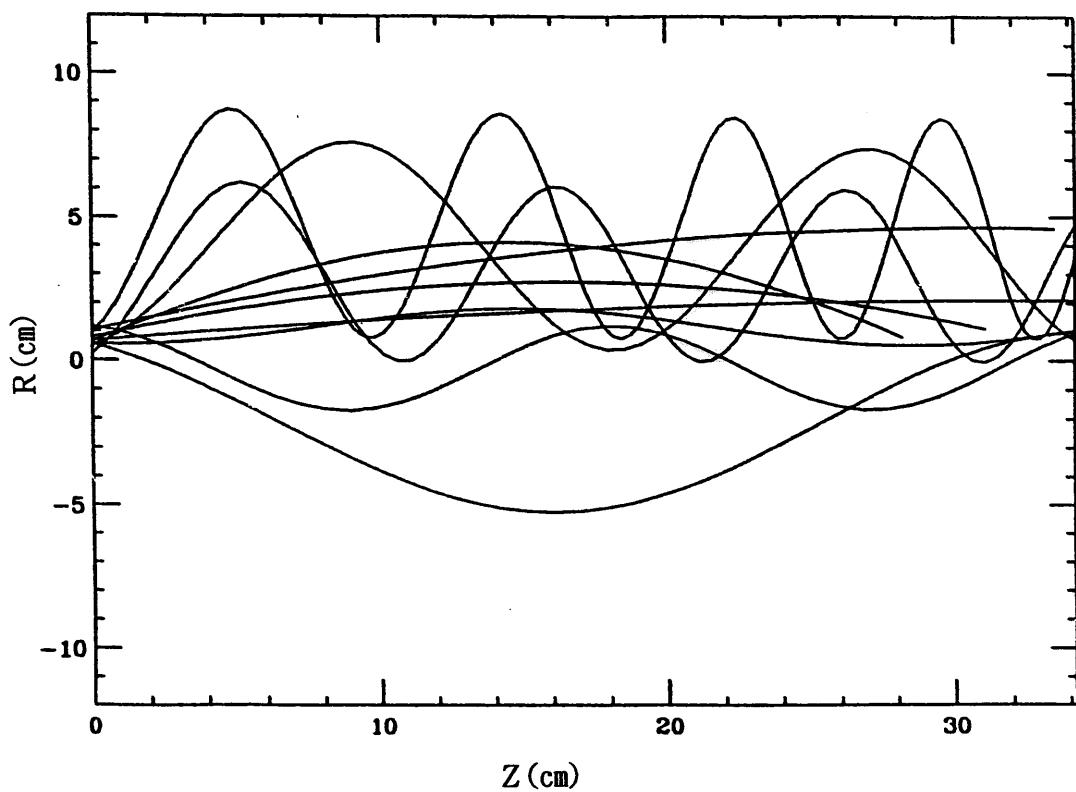


図4-1 電子ビーム 照射時の陽電子標的
発熱分布 [3, 7]

(a) 超伝導コイル



(b) 常伝導コイル

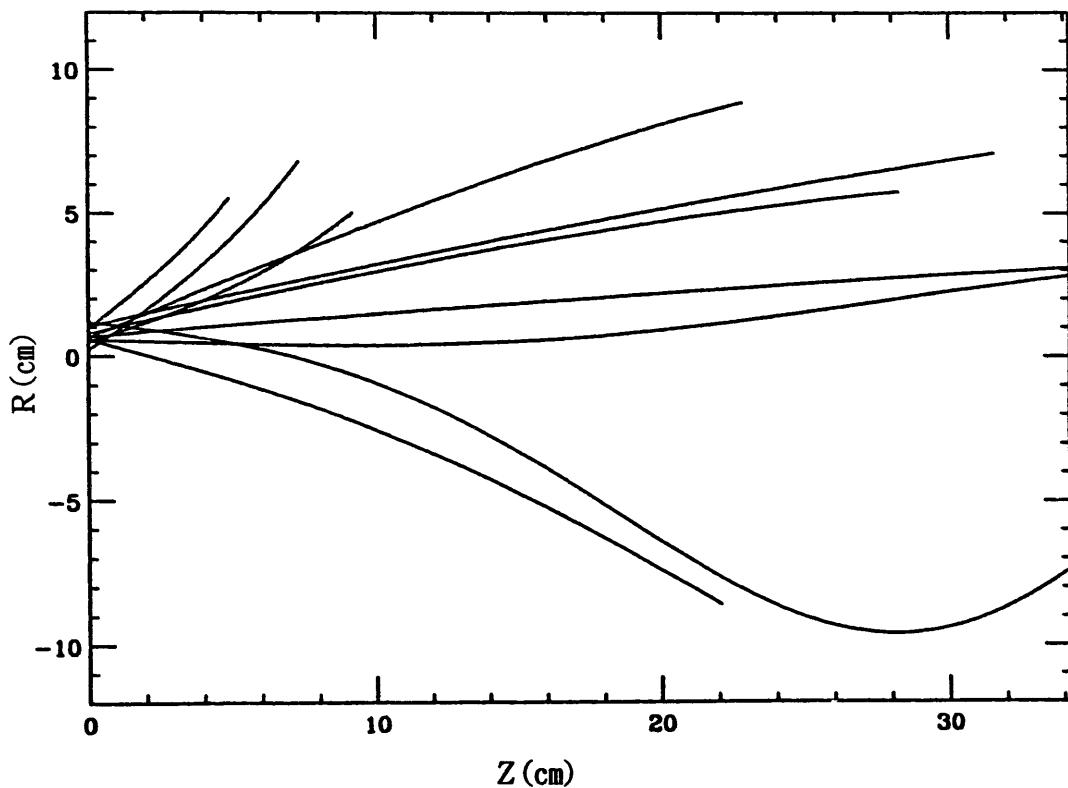


図5-1 典型的な陽電子ビーム軌道。(a)は超伝導コイル、
(b)は常伝導コイルによるビーム軌道である。

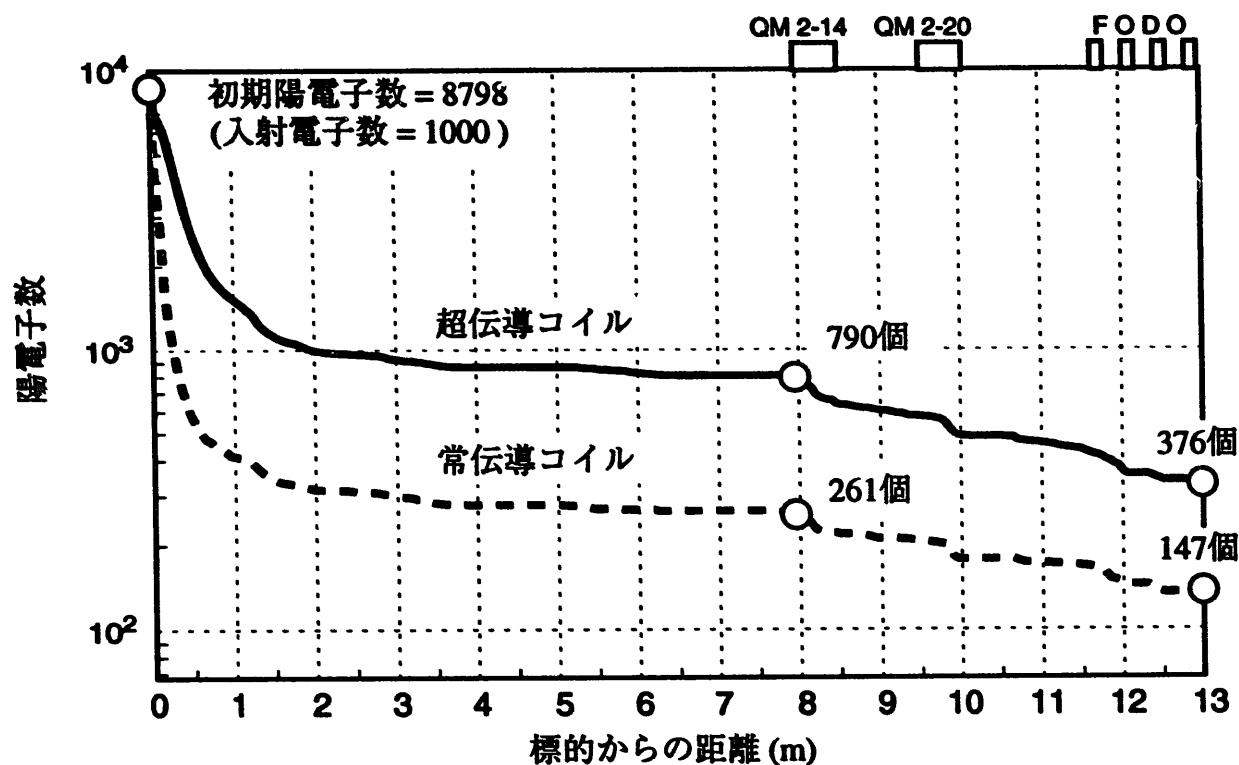


図5-2 輸送距離による陽電子数の変化

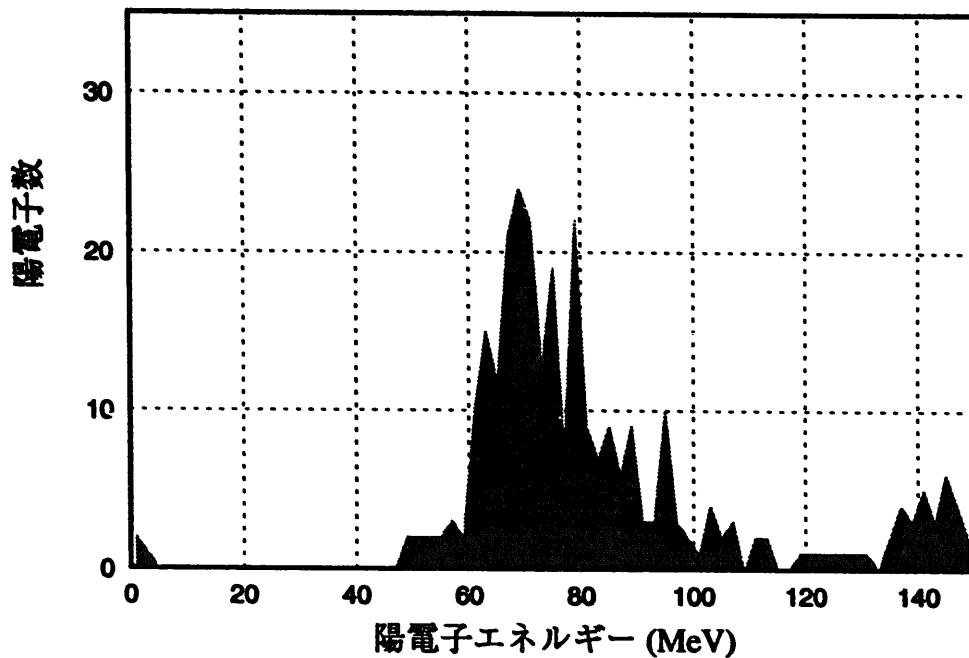


図5-3 超伝導コイル(6T、AD型)で収束された
陽電子エネルギー分布
(加速管~60MeV通過後)

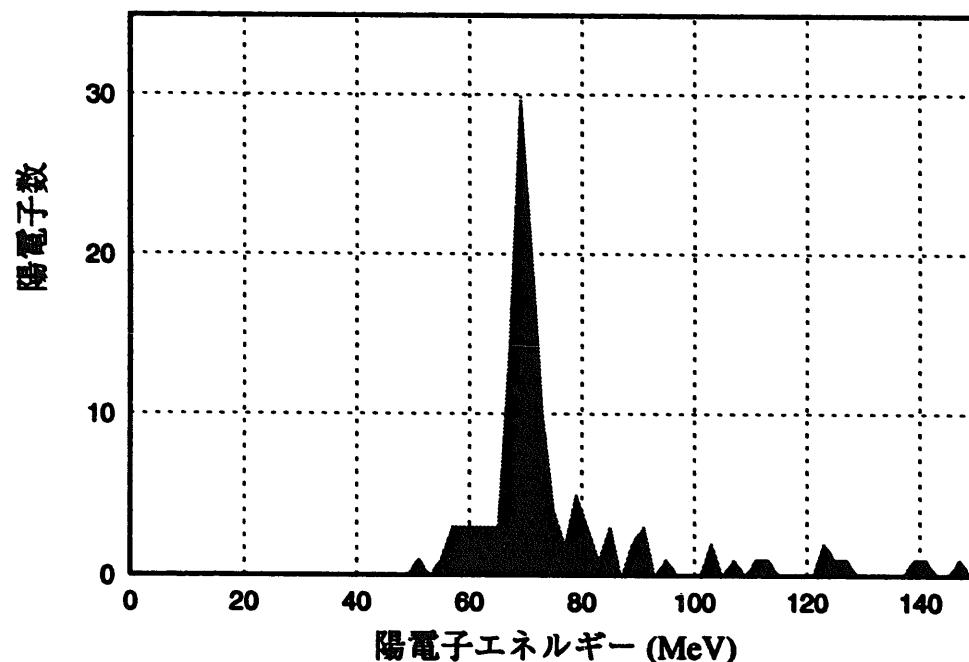


図5-4 常伝導コイル(2.3T、QWT型)で収束された
陽電子エネルギー分布
(加速管~60MeV通過後)

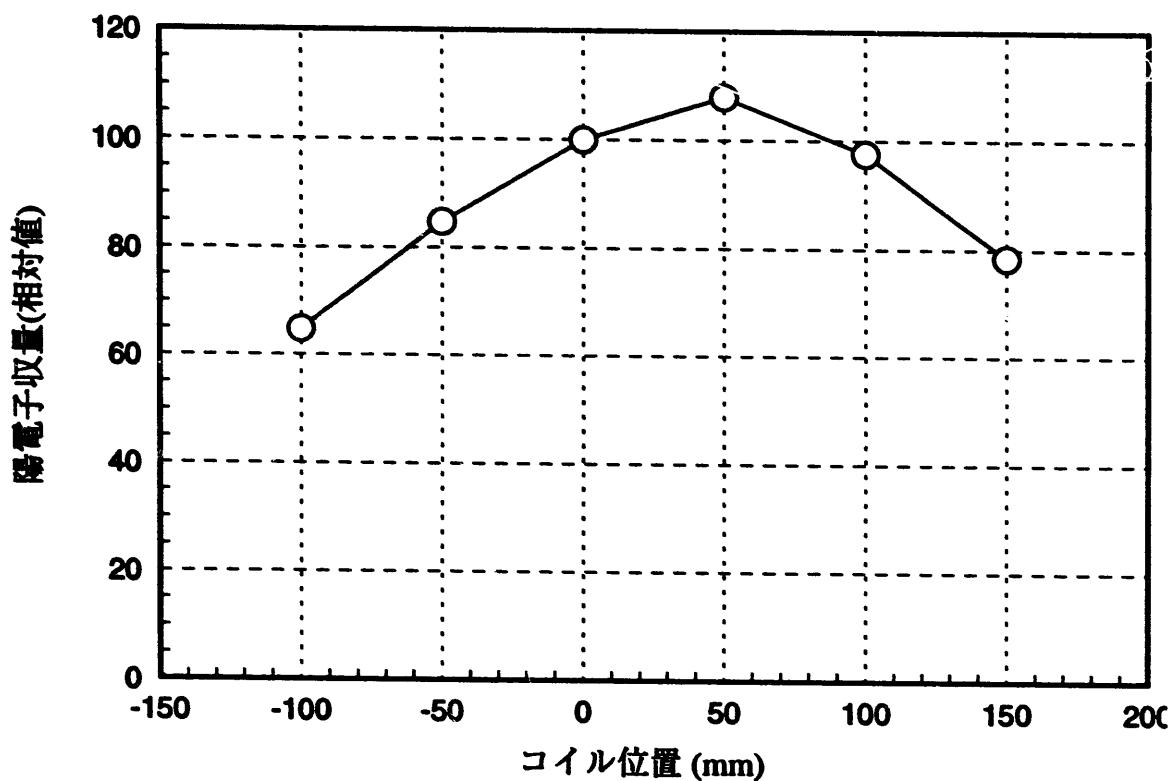


図5-5 コイル位置による陽電子収量の変化
(基準位置にコイルを設置した場合の
収量を100とする)

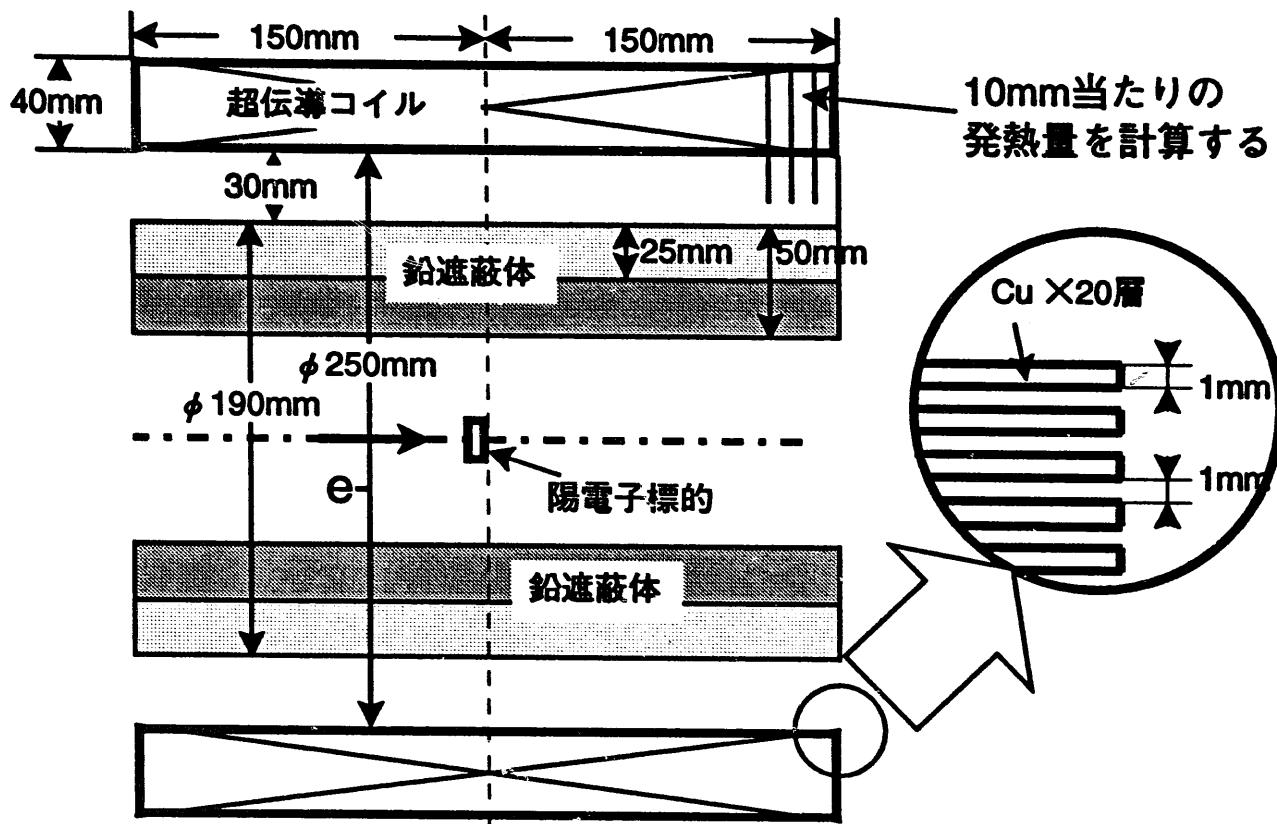
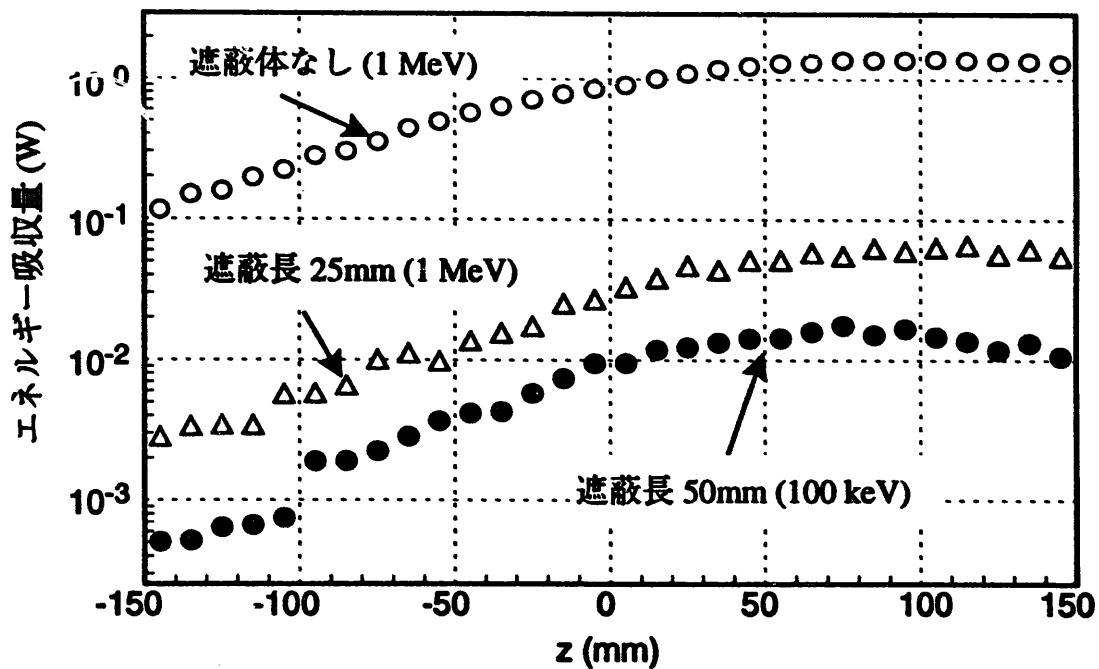


図5-6 計算形状

図5-7 コイル最内層の発熱量
(括弧内の数字はカットオффエネルギーを表す)

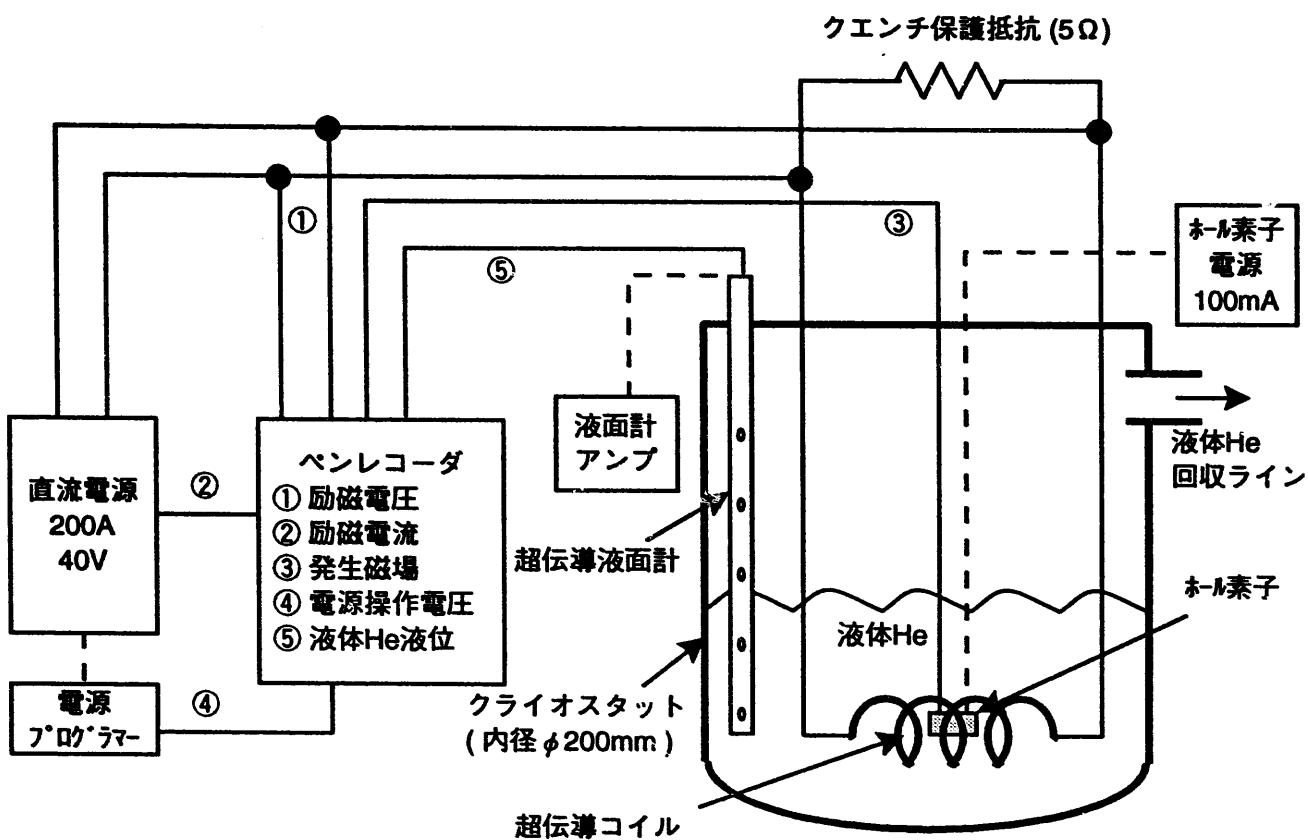


図6-1 試作コイル励磁試験体系概略図

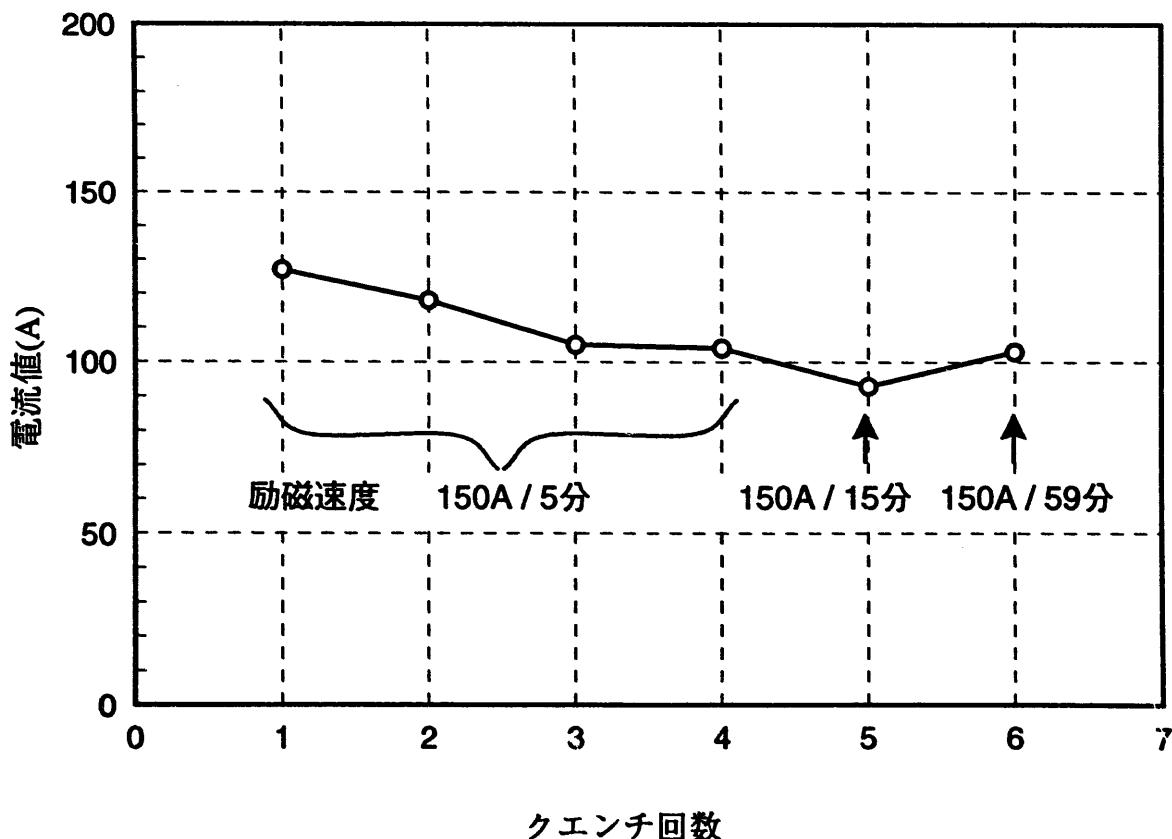


図6-2 No.1コイルトレーニング結果

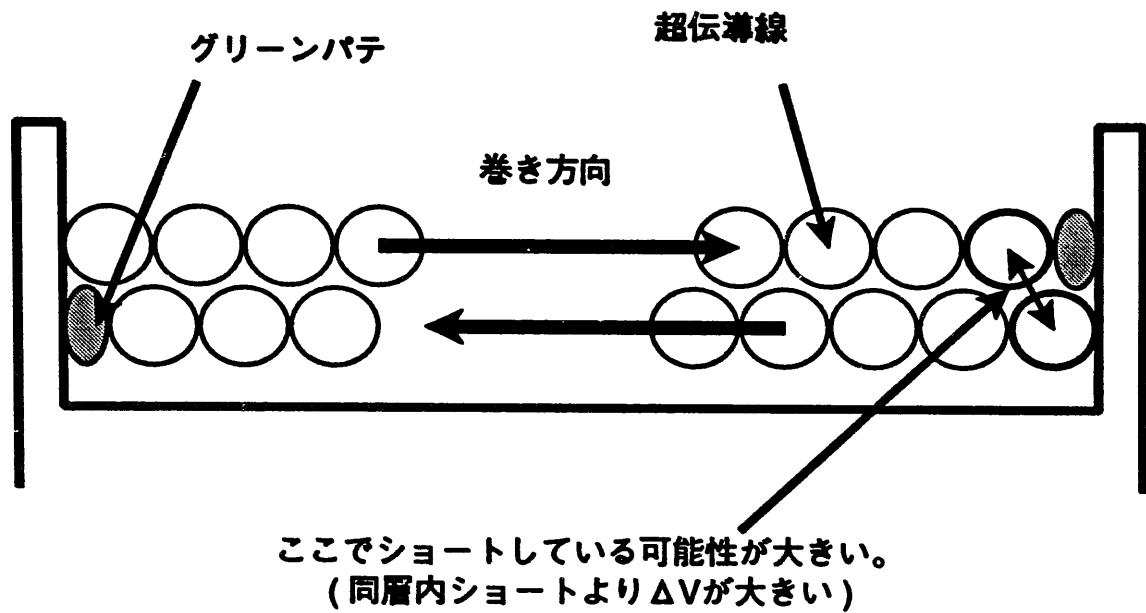


図6-3 線材間の短絡

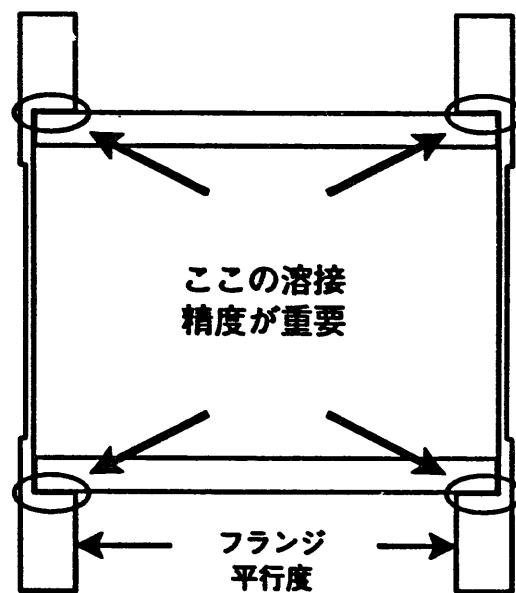


図6-4 コイル製作時の注意点

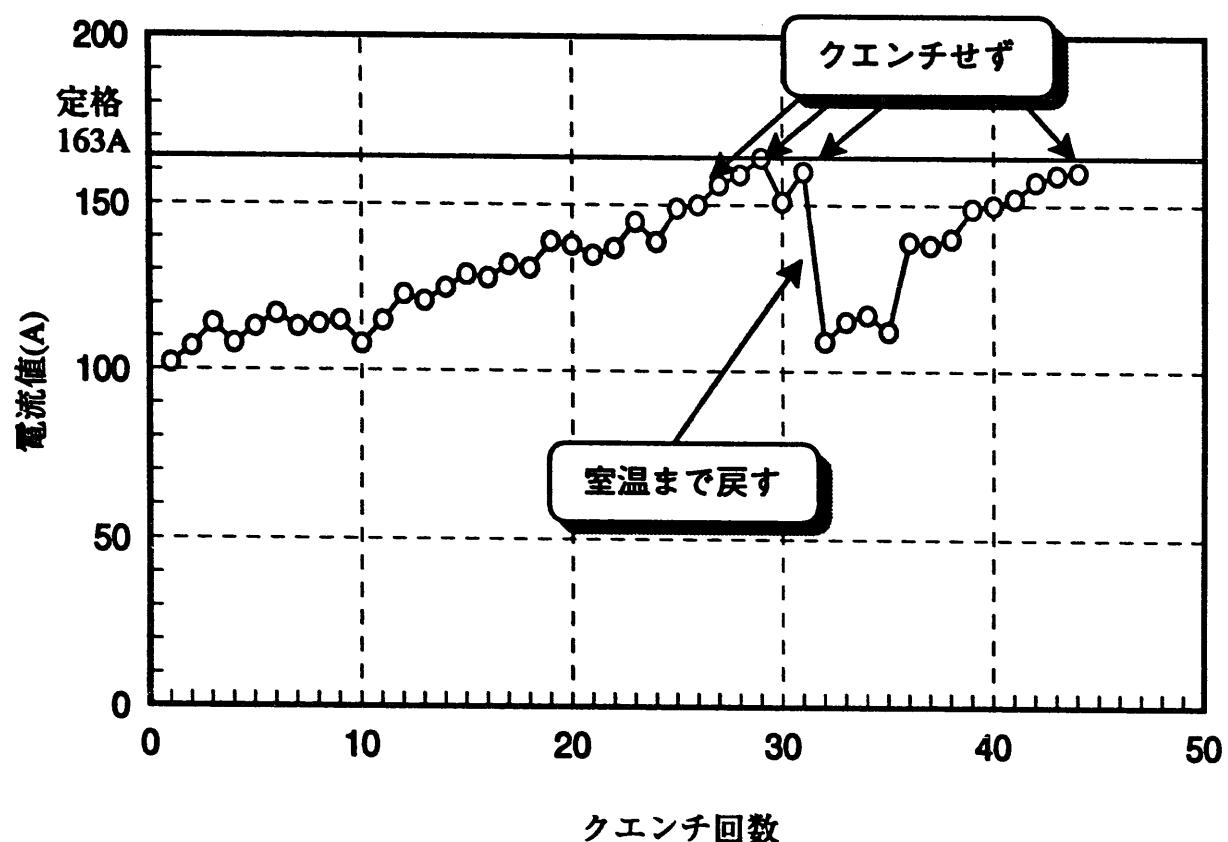


図6-5 No.2コイルトレーニング結果

| 位置 | 中心 (z=0) | 中間 (z=25) | 端部 (z=50) |
|---------|----------|-----------|-----------|
| 測定値 (T) | 5.47 | 5.00 | 3.51 |
| 理論値 (T) | 5.45 | 4.85 | 3.43 |

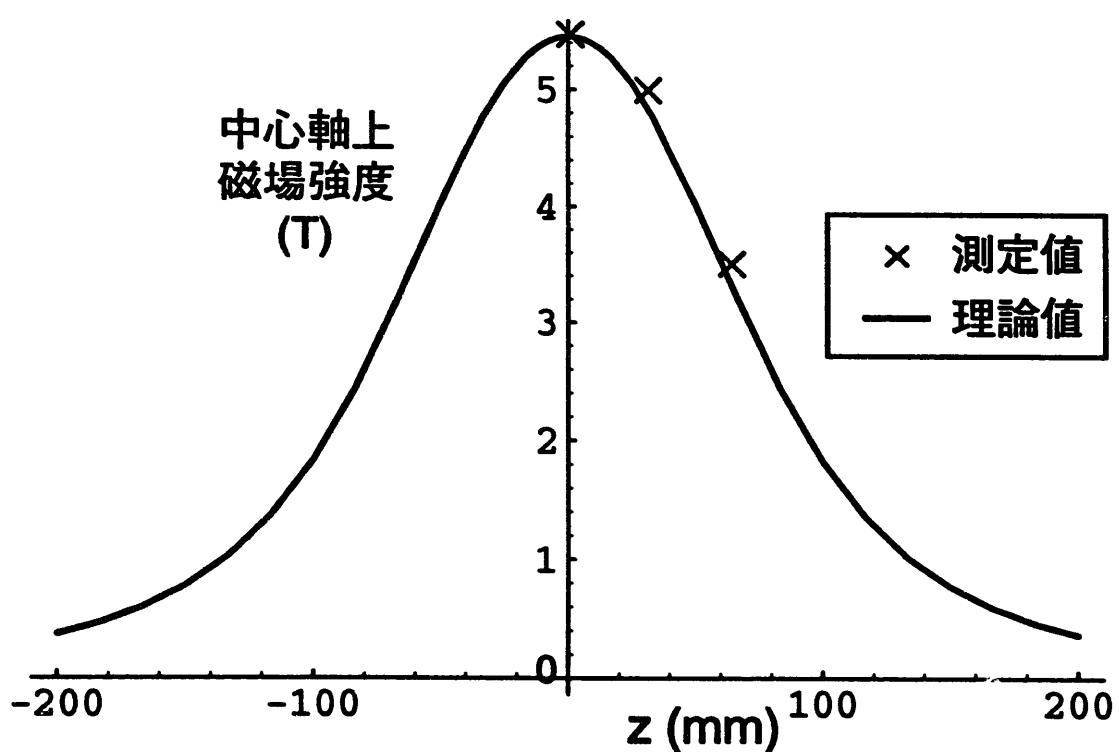
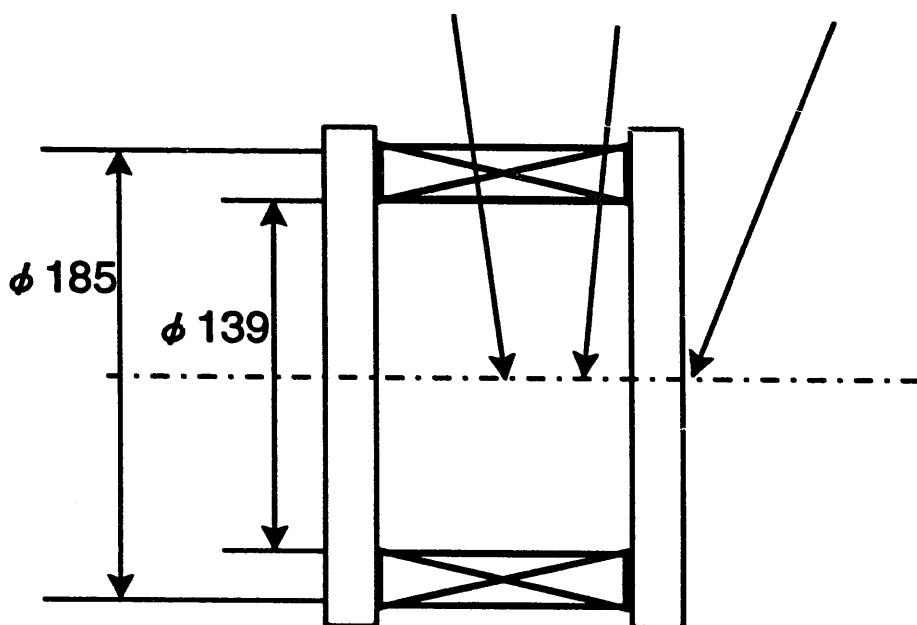


図6-6 No.2コイル磁場分布

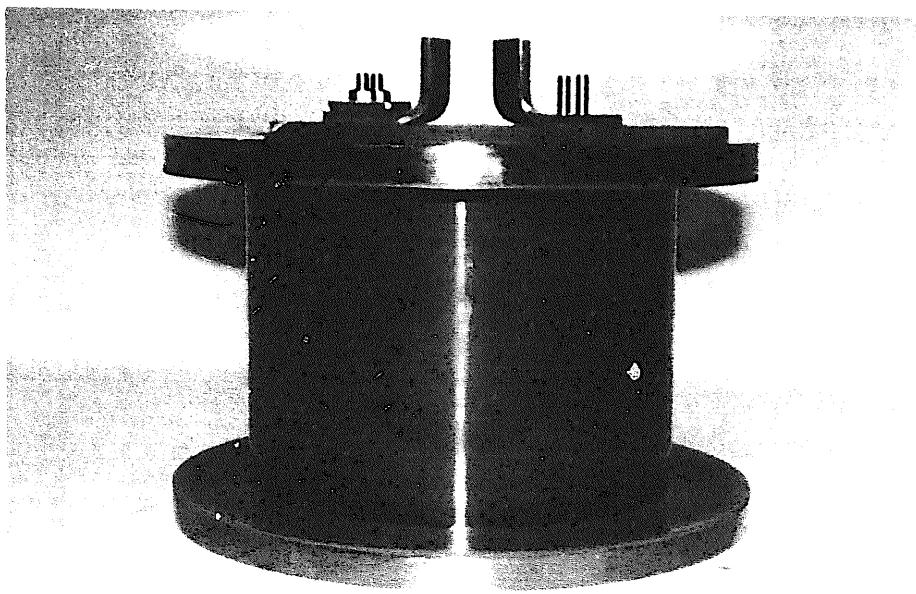


写真6-1 絶縁用ユーピレックスシートを巻いたボビン。
ボビンの形状は、高さ 124 mm、外径 189 mm、
シートの厚さは 75 μ m である。

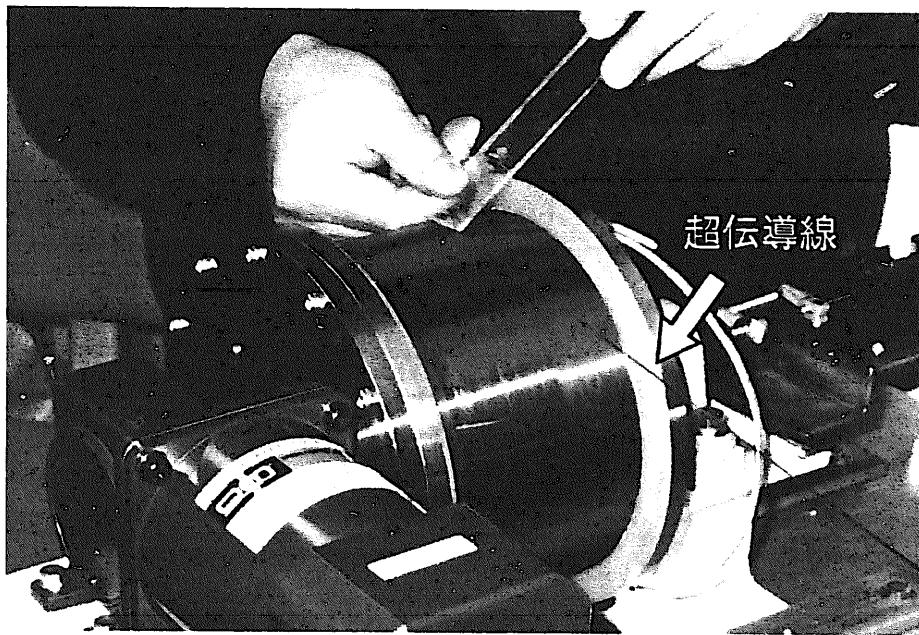


写真6-2 超伝導線の巻き付け。プラスチック等の柔らかい物で押さえ、線材を傷付けないように一定の張力で巻き付ける。

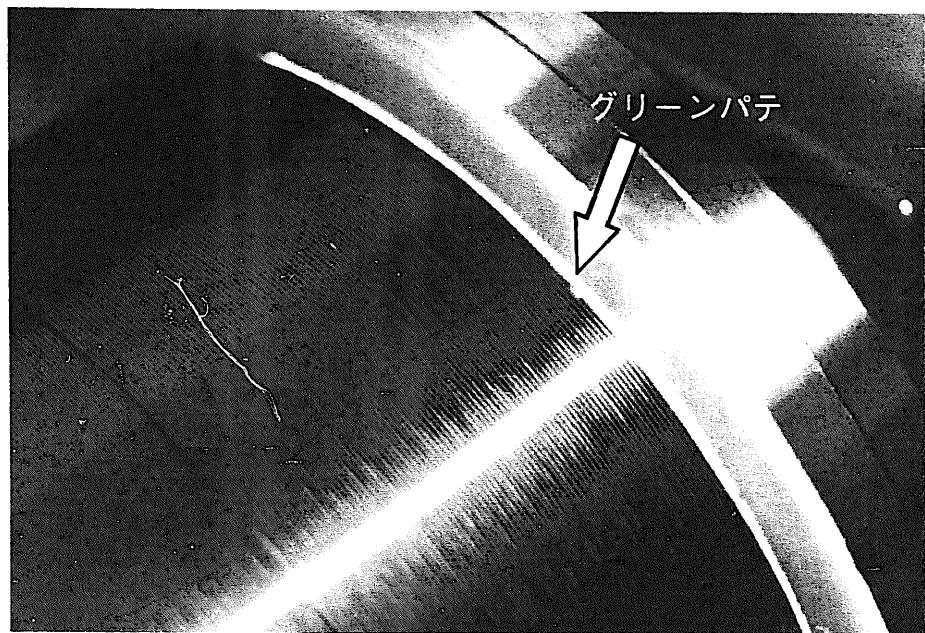


写真6-3 端部での処理。エンドスペーサーと線材の隙間にグリーンパテを詰める。

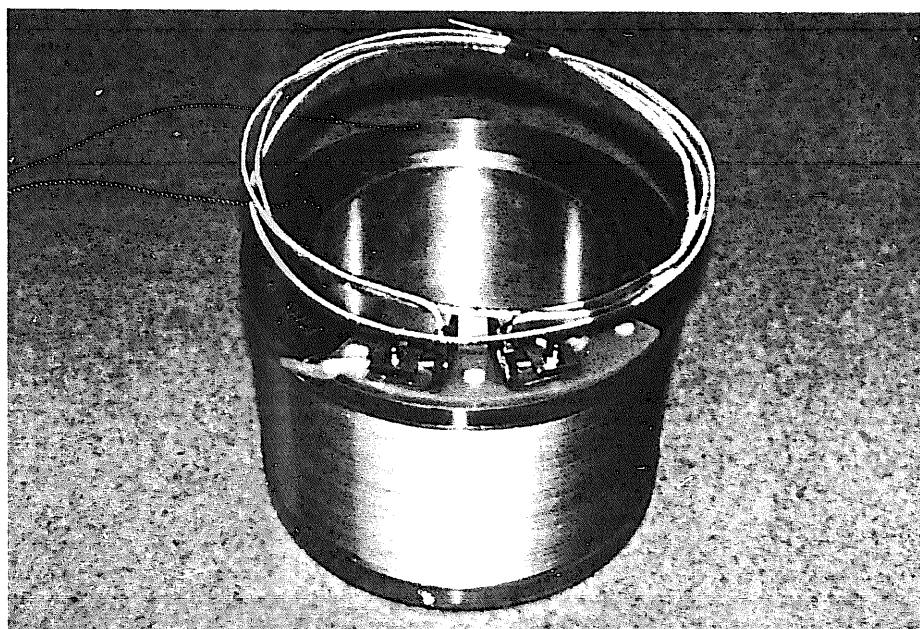
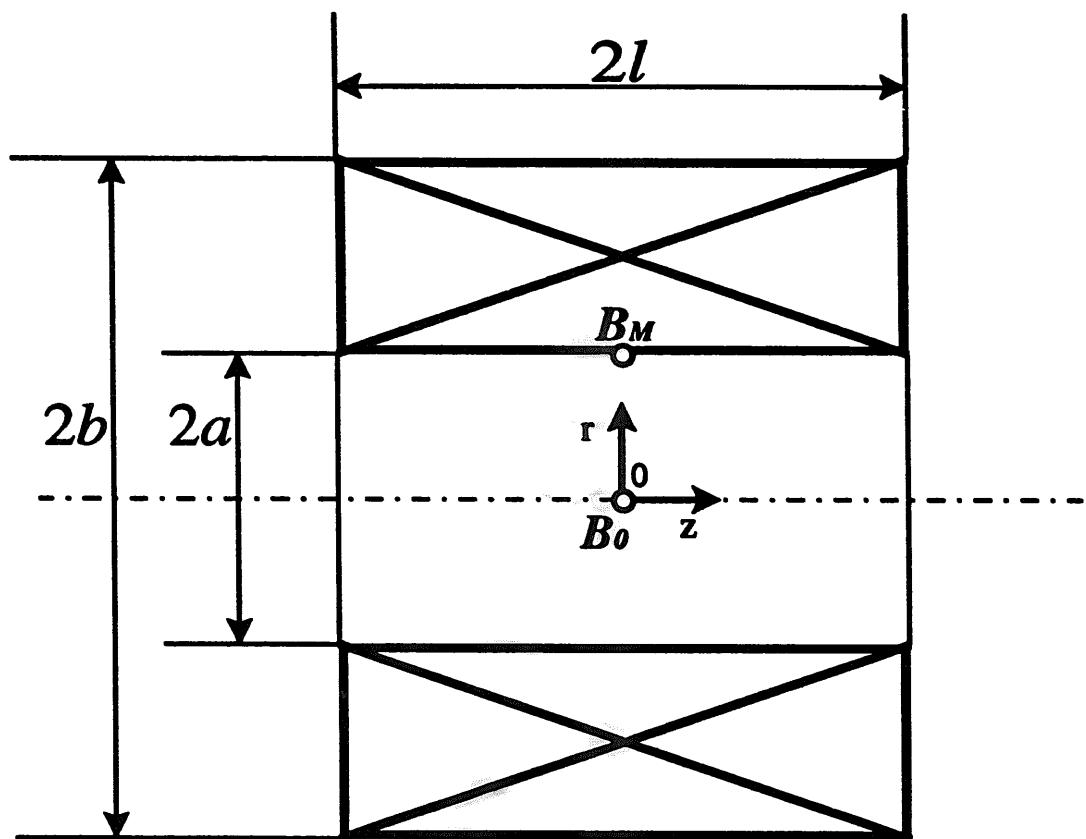
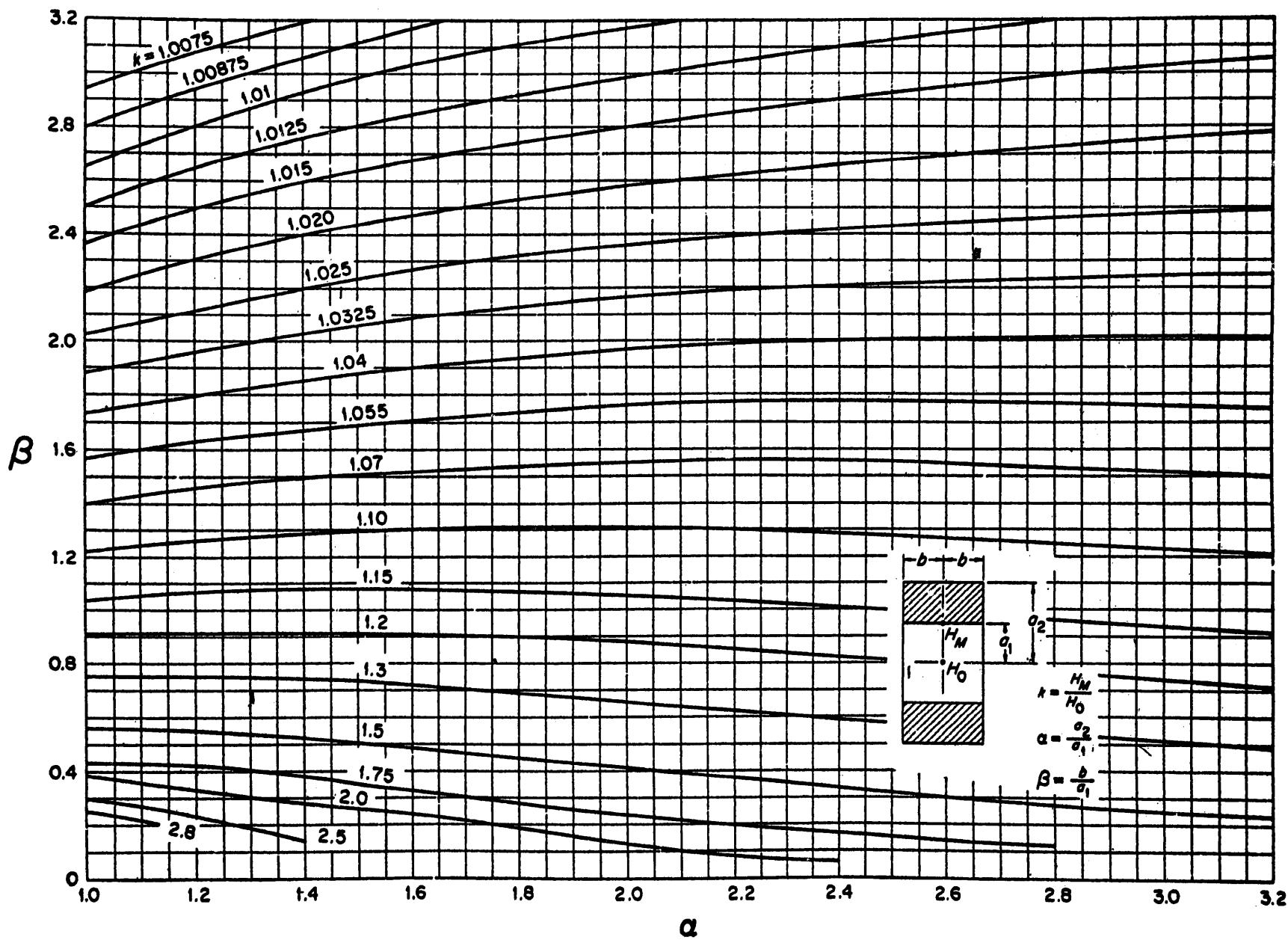


写真6-4 試作超伝導コイル

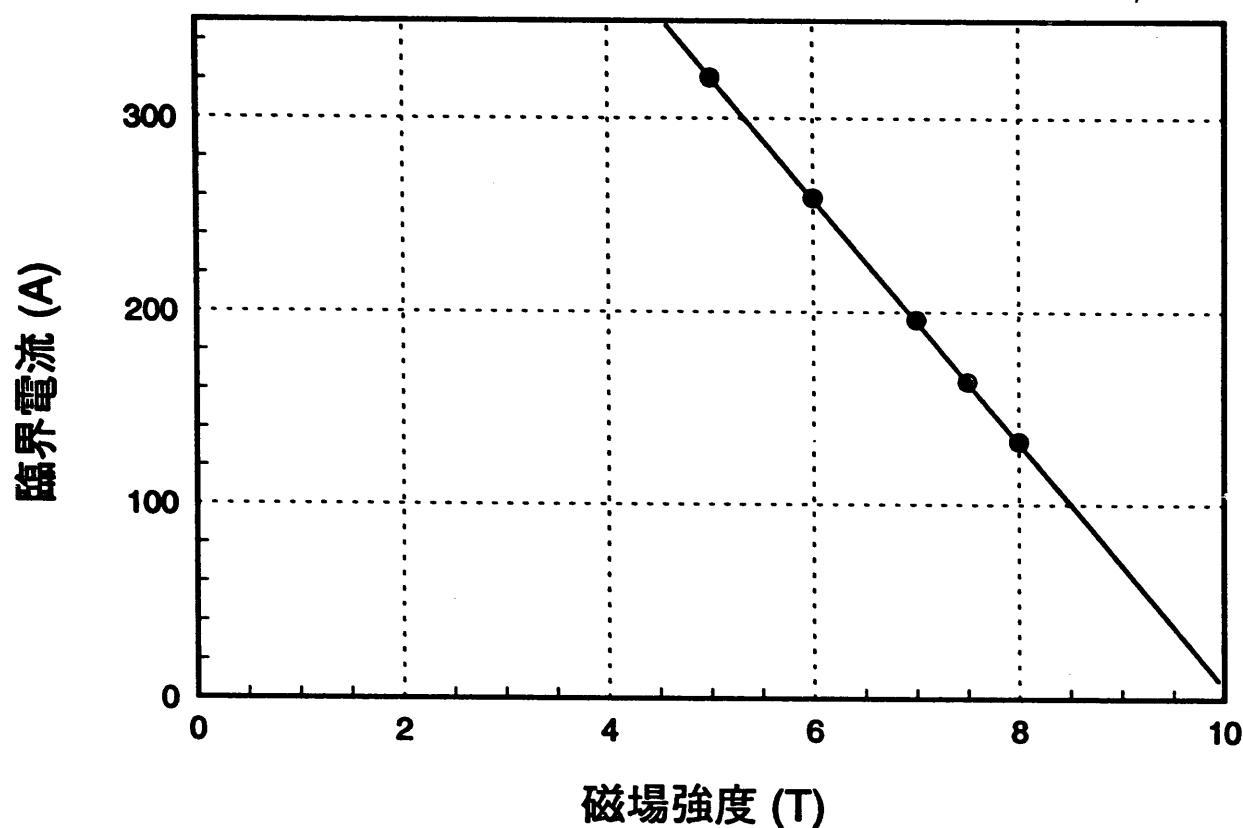


$$\alpha = \frac{b}{a} \quad \beta = \frac{l}{a}$$

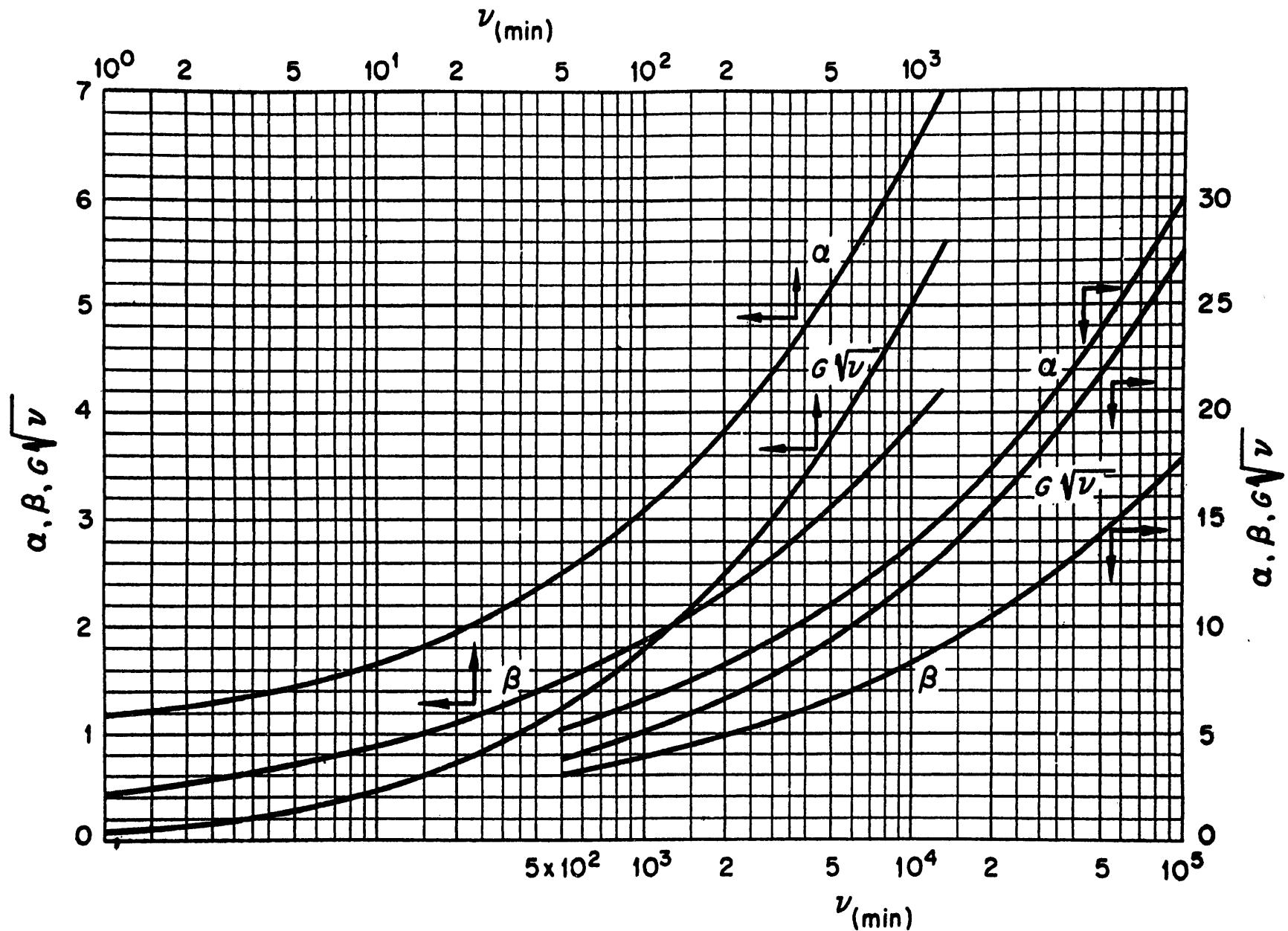
図A-1 ソレノイドコイルの形状



図A-2 (α, β)をパラメータとした磁場強度比 $K=B_m/B_0$ の変化。
 $\beta=0.6$ のとき $1.0 \leq \alpha \leq 2.0$ の範囲で $K=1.4$ 程度である。
(文献[11]より転載)

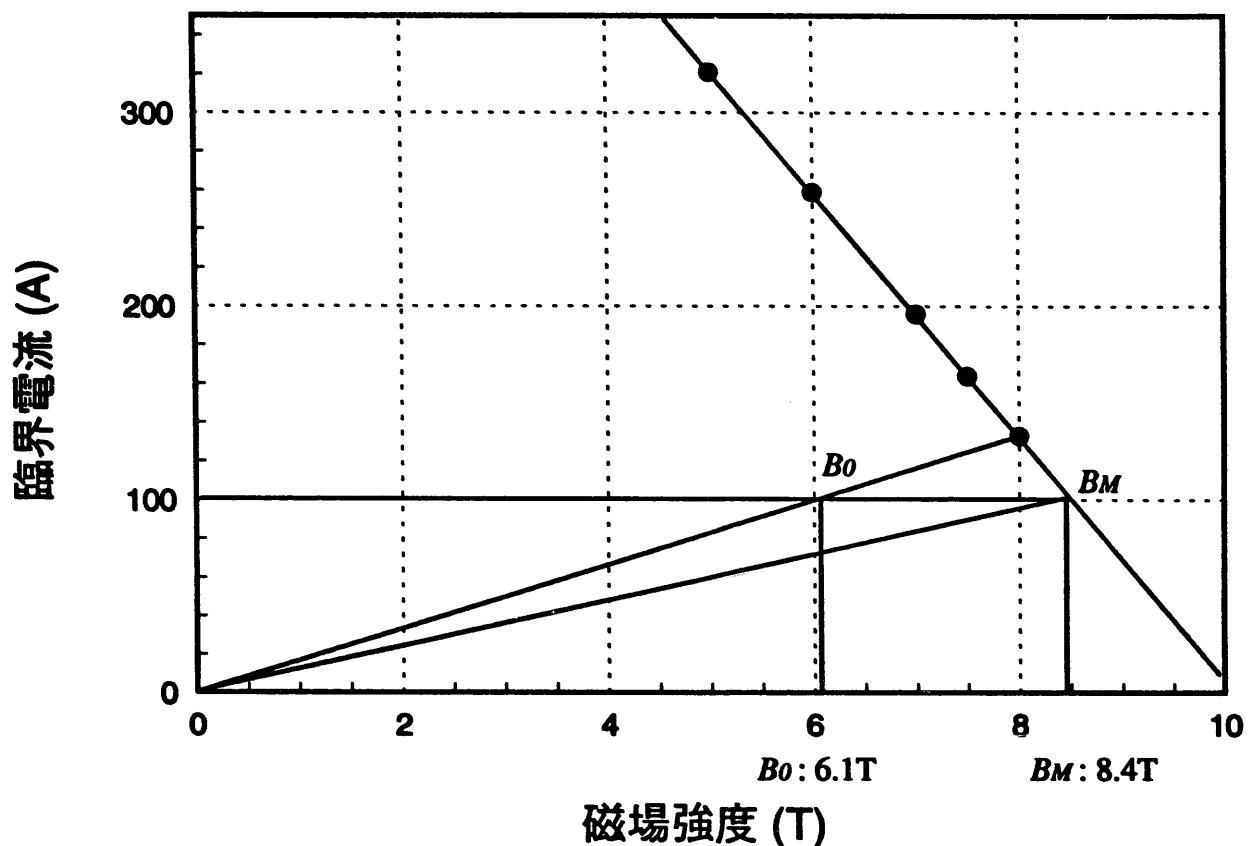


図A-3 温度 4.2 K における線材の I_c - B_c 特性
(日立電線(株)の試験データより転載)

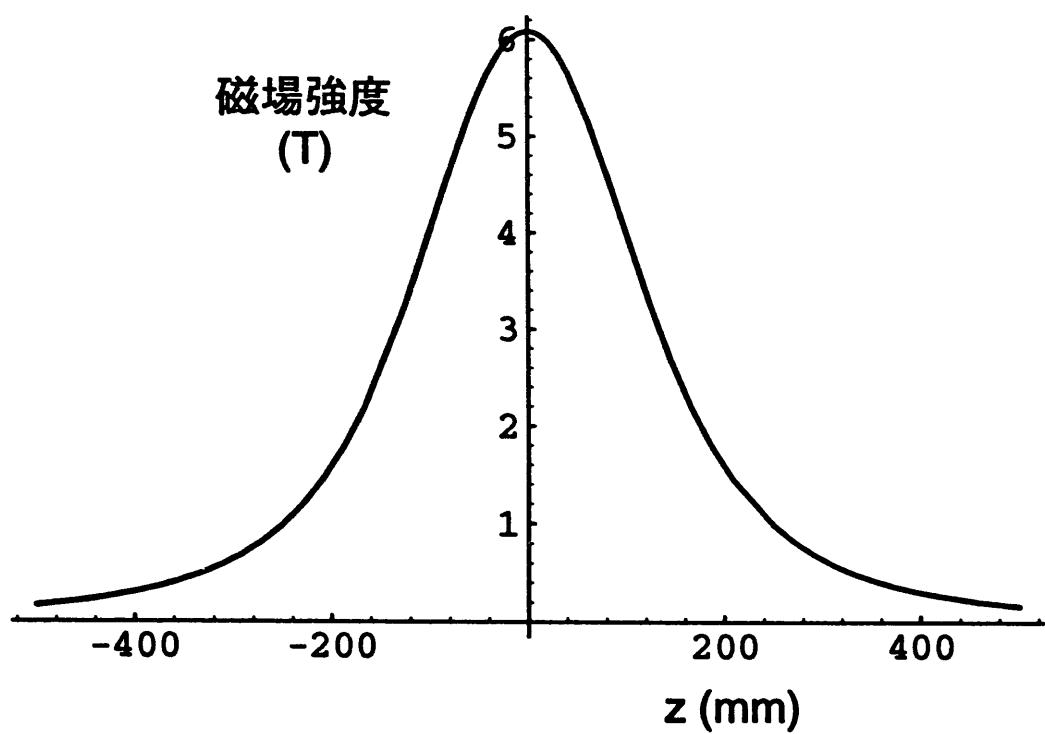
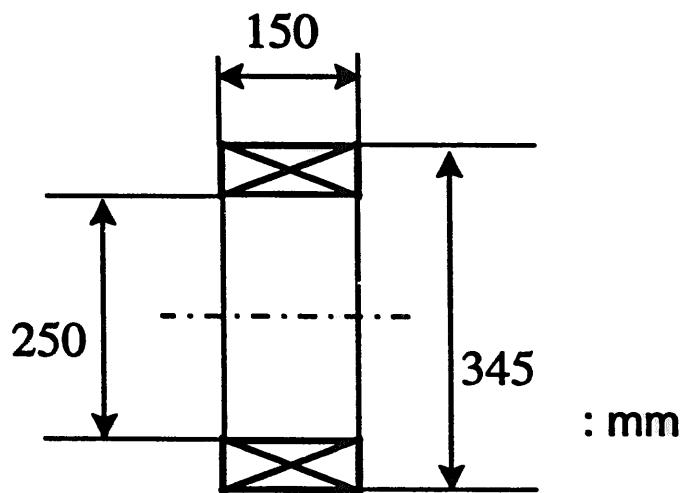


図A-4 最小体積における(α, β)の組み合わせ。

$G\sqrt{v} = 0.21$ のとき (α, β) = (1.38, 0.60) となる。
(文献[11]より転載)



図A-5 (α, β)=(1.38, 0.60)での B_0 と B_M



図A-6 コイルの中心軸上磁場分布
(励磁電流100A)