

陽電子生成に関する開発研究
(共同研究報告書)

1998年3月

高エネルギー加速器研究機構
動力炉・核燃料開発事業団

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, System Engineering Division, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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

陽電子生成に関する開発研究 (共同研究報告書)

中原和夫[†]、榎本收志[†]、池田光男[†]、
大澤哲[†]、紙谷琢哉[†]、細山謙二[†]、
武井早憲*、江本隆*、谷賢*

要 旨

動力炉・核燃料開発事業団では、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高エネルギー加速器研究機構と共同で研究した成果をまとめたものである。

本報告書では、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するため、以下の項目について述べる。

- (1) 超伝導コイルを収納するクライオスタットを設計、製作すること。
- (2) 電磁石ヨークなどの磁性体がある条件で、超伝導コイルを励磁すること。

[†]高エネルギー加速器研究機構
*動力炉・核燃料開発事業団

Study of a positron generation

K.Nakahara[†], A.Enomoto[†], M.Ikeda[†],
S.Ohsawa[†], T.Kamitani[†], K.Hosoyama[†],
H.Takei^{*}, T.Emoto^{*}, S.Tani^{*}

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 presents the study of an intense positron source, which has been developed jointly by High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and PNC.

In this report, we describe following items for an adaptive estimate of a superconducting magnet in order to efficiently converge a positron beam.

- (1) The cryostat which included the superconducting magnet is manufactured.
- (2) An excitement test of the superconducting magnet is carried out with a magnetic substance such as the electromagnet yoke.

[†]High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{*}Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)

目次

要旨	I
英文要旨	II
目次	III
図表リスト	IV
1 序論	1
2 クライオスタットの製作・試験	3
2.1 設計条件	3
2.2 設計結果	4
2.3 製作・気密試験	11
3 クライオスタットを用いた励磁試験	14
3.1 試験体系	14
3.2 小型コイル励磁試験	15
3.3 物性値確認試験	17
3.4 小型コイル歪み試験	17
4 まとめ	20
参考文献	22
図	23

図表リスト

表 2-1	断熱材の効果	5
表 2-2	小型コイルの設計諸元	7
表 2-3	クライオスタットの設計諸元	11
表 3-1	励磁試験に用いた計測機器	15
表 3-2	小型コイル中心軸上の磁場分布 (鉄ブロック無し)	16
表 3-3	鉄ブロックの有無による中心軸上磁場分布の相違	18
図 2-1	クライオスタットのモデル化 (断面図)	23
図 2-2	クエンチ発生時の計算モデル	23
図 2-3	バッファ容積を変化させたときのクライオスタット内の圧力変化	24
図 2-4	バッファ容積を 17 l としたときのクライオスタット内の圧力変化	24
図 2-5	熱伝達カラー	25
図 2-6	側面から見た熱伝達カラー (組立後)	25
図 2-7	液体窒素シールド板及び液体窒素配管	26
図 2-8	液体ヘリウム容器の耐圧検査	26
図 2-9	液体ヘリウム容器への断熱材巻き	27
図 2-10	液体窒素シールド板への取り付け	27
図 2-11	液体窒素シールド板への断熱材巻き	28
図 2-12	完成したクライオスタット	28
図 2-13	クライオスタットの断面図	29
図 3-1	励磁試験体系	30
図 3-2	励磁試験におけるトレーニング状況	31
図 3-3	励磁試験におけるトレーニング結果	31
図 3-4	小型コイルにおけるホール素子設置場所	32
図 3-5	小型コイルのモデル化 (断面図)	32
図 3-6	小型コイル中心軸上の磁場分布 (鉄ブロック無し)	33
図 3-7	鉄ブロックが無い状態での小型コイル励磁データ	34
図 3-8	鉄ブロックが有る状態での小型コイル励磁データ	35

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などである。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各要素は、大電流化技術の開発が必要である[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 γ 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得る技術として、陽電子放出核種の場合と共に期待されている。低速陽電子線の世界最大強度は、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33kWである[2]。また、国内最大強度は日本原子力研究所東海研究所における100MeV(1kW)電子加速器で得られている[2]。

これまで、事業団では高エネルギー加速器研究機構(旧称:高エネルギー物理学研究所)と共同で「電子線形加速器による大強度陽電子線の生成」に関する研究を実施した。この研究において、陽電子標的(タングステン)の発熱を効率よく除去するため、標的周辺部にタング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た[3]。また、陽電子標的出口で広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[4]。その結果、超伝導コイルを用いた場合の陽電子ビームの

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5.6Teslaを達成した。したがって、超伝導コイルを収束系として用いた場合、基本的に収束コイルとして機能することを確認した。

平成9年度は超伝導コイルを用いた収束系についてさらに知見を得るため、事業団と高エネルギー加速器研究機構は共同研究を実施した。この研究において、超伝導コイルを収納するクライオスタットを製作し、電磁石ヨークなどの磁性体がある環境下での超伝導コイルの特性を調査した。

本報告書は、(1)クライオスタットの設計、製作、及び冷却試験結果、(2)小型コイルの励磁試験結果をまとめたものである。

第2章

クライオスタットの製作・試験

小型コイルによる励磁試験を平成8年度に実施した結果、超伝導コイルが陽電子収束系として基本的な性能を有していることがわかった。しかし、この収束系を実用化するためには、超伝導コイルを設置する場所での励磁特性を調べなければならない。特に、超伝導コイルを設置する標的近傍では、荷電粒子を収束させる電磁石用ヨークなどの磁性体があるため、超伝導コイルに作用する電磁力の影響を評価する必要がある。

また、超伝導コイルをビームラインに設置するためには、コイルの取り付け条件を考慮して横型クライオスタットを製作しなければならない。しかし、事業団では横型クライオスタットを設計・製作した実績がないため、今回新しくクライオスタットを設計し、設計手法を取得する必要がある。

これらの条件を考慮して、平成8年度に製作した小型コイルを用いて、磁性体がある環境下での励磁特性を評価できるように、新しくクライオスタットを設計・製作した。本章では、クライオスタットの設計、製作、及び気密試験について述べる。

2.1 設計条件

磁性体がある環境下で超伝導コイルの励磁特性を調べるクライオスタットは、次に示す条件を満足しなければならない。

- (1) クライオスタット外部に鉄ブロックを設置し、小型コイルの励磁試験が実施できる体系とする。
- (2) クライオスタットの形状は製作実績があり、また液体ヘリウム温度下での材料物性値、例えば膨張率などのデータを収集できるように、構造を縦型とする。

- (3) 液体ヘリウムを充填するクライオスタットの内径は、収納性と液体ヘリウム使用量を考慮して $\phi 200$ mm とする。
- (4) 励磁試験を1回実施する時間は平成8年度の実績から約30分である。試験時間の有効性を考え、液体ヘリウムを1回充填した後、8回励磁試験を実施できるように保冷時間を4時間とする。
- (5) 小型コイルでクエンチが発生した場合、気化したヘリウムを安全に放出できる構造とする。このとき、最大圧力は容器の耐圧検査圧力1.5気圧の85%、1.28気圧とする。
- (6) 液体ヘリウムを1回充填した後、4回クエンチが発生しても小型コイルを保冷できるような液体ヘリウムの量をクライオスタット内に確保する。
- (7) 消費した液体ヘリウムを迅速に補充できる構造とする。

2.2 設計結果

2.2.1 断熱材の巻数

一般に、液体ヘリウムなど極低温液体を保冷するためには、容器に巻く断熱材（スーパーインシュレーション）の巻数を多くする必要があるが、クライオスタットの使用目的に応じてその巻数を選択しなければならない。

例えば、液体ヘリウムを数日間程度保冷するクライオスタットでは、運用初期、液体ヘリウムの消費量が多くなる。しかし、次第に消費量が少なくなり、クライオスタットの断熱性能が向上する。この現象は、断熱材の層間にホットスポットが残り、断熱材が逆に熱源となったためである。したがって、液体ヘリウムを長時間保冷するのではなく、数時間保冷し、消費した液体ヘリウムを迅速に補充することが可能な場合、断熱材を巻く必要がない。以上、液体ヘリウム容器に断熱材を巻く効果をまとめると表2-1の通りになる。

次に、表2-1を参考にしながら、約4時間液体ヘリウムを保冷できるように断熱材の巻数を決定する。図2-1にクライオスタットの断面を模式的に示す。クライオスタットは常温に保たれたSUS製真空容器と液体ヘリウムを充填するSUS製円筒容器で構成され、これらの容器間に液体窒素温度に冷却されたシールド板及び断熱材を巻き付け、熱の侵入を

防ぎながら液体ヘリウムを保冷している。このクライオスタットにおいて、真空容器から液体ヘリウム容器に侵入する熱量を断熱材の有無に分けて評価する。

表2-1 断熱材の効果

項目	内容
長所	・容器に侵入する熱量は、断熱材の厚さに比例して減少する。
短所	・ホットスポットの影響で短時間の冷却では十分に保冷されない。 ・相対的に容器や超伝導コイルの支持材等から侵入する熱量が大きくなり、断熱効果が無くなる。 ・材料費や作業工数が増えるため、製作費が多くなる。

(a) 断熱材無しの場合

2面からなる密閉熱放射系において侵入する熱量 Q_R は、断熱材が無い場合、式(2.1)で与えられる [5]。

$$Q_R = \sigma A_L E (T_H^4 - T_L^4) \quad (2.1)$$

ここで、 σ はステファンボルツマン定数 [$5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$] であり、 A_L は受熱面の面積、 T_H 、 T_L は各々放射面及び受熱面の温度である。また、 E は実効放射率で、

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\varepsilon_{L,L}} + \frac{A_L}{A_H} \left(\frac{1}{\varepsilon_{H,H}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

となる。ここで、 $\varepsilon_{L,L}$ は低温面材料の低温受熱面温度での放射率、 $\varepsilon_{H,H}$ は高温面材料の高温受熱面温度での放射率、 A_H は放射面の面積である。但し、平行平板間を仮定すると、 A_L/A_H は1となる。

液体ヘリウム容器と液体窒素シールド板間の実効放射率は、 $\varepsilon_{L,L}=0.06$ (低温側材質:ステンレス)、 $\varepsilon_{H,H}=0.015$ (高温側材質:アルミニウム)より $E=0.012$ となる。これより、液体窒素シールド板から液体ヘリウム容器へ流入する単位面積当たりの熱量は、式(2.1)から、

$$\frac{Q_R}{A_L} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

となる。

液体窒素シールド板と真空容器間の実効放射率は、 $\varepsilon_{L,L}=0.021$ (低温側材質:アルミニウム)、 $\varepsilon_{H,H}=0.13$ (高温側材質:ステンレス)より $E=0.018$ となる。これより、真空容器から液体窒素シールド板へ流入する単位面積当たりの熱量は、式(2.1)から、

$$\frac{Q_R}{A_L} = 7.5 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.4)$$

となる。

(b) 断熱材有りの場合

断熱材が有る場合、2面からなる密閉熱放射系における単位面積当たり流入する熱量 Q_T/A_L は、式(2.5)で与えられる[5]。

$$\frac{Q_T}{A_L} = \lambda_s \frac{T_H - T_L}{t_s} \quad (2.5)$$

但し、 λ_s は断熱材の熱伝導率 [$0.41 \times 10^{-4} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]、 t_s は断熱材の積層厚さ [$2.4 \times 10^{-3} \text{ m/10層}$]である[5]。

液体窒素シールド板から液体ヘリウム容器へ流入する単位面積当たりの熱量は、断熱材の厚さを10層として、式(2.5)より、

$$\frac{Q_T}{A_L} = 1.3 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.6)$$

となる。すなわち、断熱材から流入する熱量が式(2.3)で求めた熱量 $2.5 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ と比較して約50倍大きく、断熱材が流入する熱を防いでいない。このため、液体ヘリウム容器と窒素シールド板間には、保冷を目的とした断熱材を巻く必要がない。しかし、運転状況により、液体窒素が完全に蒸発し、窒素シールド板の温度が78 Kより上昇する可能性があるため、保安上断熱材を最小単位である10層巻くこととする。

真空容器から液体窒素シールド板へ流入する単位面積当たりの熱量は、例えば、断熱材の厚さを30層として、式(2.5)より、

$$\frac{Q_T}{A_L} = 1.2 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.7)$$

となる。すなわち、断熱材から流入する熱量が式(2.4)で求めた熱放射量 7.5 W/m^2 より小さいため、断熱材を巻くほど保冷効果がある。

なお、本項の検討では窒素シールド板と真空容器間に巻く断熱材を30層としたが、この厚さは保冷時間から定量的に評価する(第2.2.3項参照)。

2.2.2 クエンチ発生時の圧力上昇

(a) 計算モデル

平成8年度に製作した小型コイルの主要諸元を表2-2にまとめる。

表2-2 小型コイルの設計諸元

項目	仕様
外径	185 mm
内径	139 mm
長さ	100 mm
インダクタンス	3.3 H
最大励磁電流	163 A
貯蔵エネルギー	44 kJ
最大中心磁場	5.6 T

この小型コイルでクエンチが発生した場合、コイル内に蓄積された電気エネルギーが急激に開放され、クライオスタット内の圧力が上昇する。一般に、クライオスタットは大気圧に保たれたヘリウムガス回収ラインに接続され、クエンチ発生後十分時間が経過するとクライオスタット内の圧力は大気圧になる。この熱放出過程では、超伝導コイルの熱容量や液体ヘリウムの膜沸騰による熱伝達率の変化が考えられ、クエンチ発生から終了までの時間を予想することは困難である。例えば、平成8年の励磁試験における液体ヘリウムの液面データに基づくクエンチ発生から終了まで約20秒経過している。しかし、理論的な推測では電気エネルギーは超伝導コイルから約1秒で放出される(式(2.11)参照)。

このため、クエンチ発生時の圧力上昇は、図2-2に示したように、小型コイルに蓄積された電気エネルギーが直接液体ヘリウムに伝達され、ヘリウムガスが発生すると仮定する。このモデルにおいてクライオスタット内の圧力上昇分を計算し、液体ヘリウム容器の容積を求める。

(b) 計算結果

図2-2の計算モデルからクエンチ発生時には次式が成立する。

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R_c + R_p) i(t) = 0 \quad (2.8)$$

ここで、 L は超伝導コイルのインダクタンス [3.3 H]、 $i(t)$ は超伝導コイルに流れる電流、 R_c は液体ヘリウム温度における超伝導コイルの電気抵抗 [1.6 Ω]、 R_p は保護抵抗 [5.1 Ω]を表す。式(2.8)をクエンチ発生時 [$t=0$] 定格電流 [$i_0=163$ A] が流れている条件で解くと、

$$\begin{aligned} i(t) &= i_0 e^{-\frac{R_c+R_p}{L}t} \\ &= 163 e^{-2t} \text{ (W)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

この式より、時刻 t (秒) における超伝導コイルで発生する熱エネルギー $W(t)$ は、

$$\begin{aligned} W(t) &= i(t)^2 R_c \\ &= 42.5 e^{-4t} \\ &= W_0 e^{-4t} \text{ (kW)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

で与えられる。ここで、 $W_0=42.5$ kW とする。

小型コイルでクエンチ発生から時刻 t までに発生する熱エネルギー $Q(t)$ は、

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_0^t W(t) dt \\ &= 10.7 (1 - e^{-4t}) \text{ (kJ)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

で表される。従って、時刻 t までに蒸発するヘリウムの重さ $V_w(t)$ は、式(2.12)で与えられる。

$$\begin{aligned} V_w(t) &= \frac{Q(t)}{l} \\ &= 0.52 (1 - e^{-4t}) \text{ (kg)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

ここで、 l は沸点におけるヘリウムの蒸発潜熱 [20.42 kJ/kg] を表す [5]。

クエンチ発生から十分時間が経過した後、減少する液体ヘリウムの体積は式(2.12)より 4.2 l となり、気体換算で 31 l となる。ただし、ヘリウムの密度として、液体の場合 $\rho_l=124.98$ kg/m³、及び気体の場合 $\rho_v=16.89$ kg/m³ を用いた [5]。従って、クライオスタットの内径を 20 cm と仮定した場合、クエンチで減少する液体ヘリウムは液体ヘリウム容器の長さで 13 cm となる。

次に、クライオスタット内の圧力上昇分 P_r を求める。クライオスタット内の圧力上昇の時間変化 dP_r/dt は、気化するヘリウムによる増分、及び大気圧 P_0 に保たれているガス回収ラインへ回収されるヘリウムによる減分から求められる。

気化するヘリウムによる単位時間当たりの圧力変化は $W(t)P_0/\rho_v l V_0$ で与えられ、また回収されるヘリウムによる単位時間当たりの圧力変化は vsP_0/V_0 で与えられる。ここで、

圧力緩和用に設けるクライオスタット内のバッファ容積を V_0 、回収ライン入口におけるヘリウムガス速度を v 、及び内径 32 mm のガス回収ラインの断面積を s とする。

これより、クライオスタット内の圧力上昇分 P_r の時間変化は、

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{W(t)P_0}{\rho_v \ell V_0} - \frac{vsP_0}{V_0} \quad (2.13)$$

で与えられる。ガス速度 v は、ベルヌーイの定理[6]

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} = \text{一定} \quad (2.14)$$

をクライオスタット内部と回収ライン間に適応することより、式(2.15)で与えられる。

$$v = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2P_r}{\rho}} \quad (2.15)$$

なお、 $\gamma (= c_p/c_v)$ はヘリウムガスの比熱比 1.66[5] を表わす。式(2.13)に式(2.15)を代入し、圧力上昇の時間変化は次式で与えられる。

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{W_0 P_0}{\rho_v \ell V_0} \left(e^{-4t} - \frac{s\ell}{W_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \sqrt{2\rho_v P_r} \right) \quad (2.16)$$

この式(2.16)をクエンチ発生時 ($t=0$) 圧力上昇分 0 ($P_r = 0$) の初期条件で解き、クライオスタット内の圧力 ($P_0 + P_r$) として図 2-3 に示す。なお、図 2-3 では、バッファ容積 V_0 を 10 l、20 l、30 l、及び 40 l の 4 通りとする。

図 2-3 よりバッファ容積を 20 l とすると、クエンチ発生約 0.2 秒後、クライオスタット内の圧力は 1.25 気圧程度となる。バッファ容積が 20 l 前後で最大圧力を液体ヘリウム容器の耐圧検査圧力 1.5 気圧の 85 %、すなわち 1.28 気圧になるように計算すると 17 l となる。図 2-4 にバッファ容積が 17 l における圧力変化を示す。図において、太線は回収ラインが接続されている場合を表わし、細線は回収ラインが接続されていない場合の圧力変化を表す。回収ラインが接続されていない場合の最大圧力は 2.8 気圧と推測され、容器の耐圧検査圧力 1.5 気圧を超える可能性がある。

したがって、液体ヘリウム容器の最大圧力を 1.28 気圧と仮定するとバッファ容積は 17 l となる。この容積は、クライオスタットの内径を 20 cm とした場合、液体ヘリウム容器の長さに換算して 54 cm となる。これより、液体ヘリウム容器の長さは、クエンチが 4 回起こったときに消費する液体ヘリウム分 52 cm (式(2.12) 参照) 及び小型コイルの長さ分 10 cm を加え 116 cm となる。なお、今後の検討では 1.2 m とする。

2.2.3 液体ヘリウム容器の長さ

極低温の液体ヘリウムに侵入する熱の経路は、主に液体ヘリウム容器及び超伝導コイル支持材である。特に、液体ヘリウム容器からの経路は、大別して(1) 常温にある液体ヘリウム容器上部、及び(2) 断熱材に分けられる。

常温である液体ヘリウム容器上部及び超伝導コイル支持材から侵入する熱量は、断面が一樣な固体から侵入する熱量 \dot{Q} として近似され、次式で与えられる [5]。

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (2.17)$$

ここで、 A [m^2] は固体の断面積、 T_1 [K] 及び T_2 [K] は長さ L [m] の両端での温度、及び $\lambda(T)$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] は熱伝導率を表す。式(2.17)における A は、内径 200 mm、厚さ 0.5 mm の円筒容器及び直径 8 mm の支持棒 4 本の断面積の合計から $5.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ となる。同様に、熱が伝導する長さ L は、前項で検討した液体ヘリウム容器の長さ 1.2 m のうち、液体ヘリウム分 62 cm を引いた 58 cm となる。また、 T_1 を液体ヘリウム温度、 T_2 を常温 (300 K)、及び固体の材質を SUS とした場合、熱伝導率の温度積分 $\int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$ の値は $3.06 \times 10^3 \text{ W/m}$ [5] となる。したがって、液体ヘリウム容器上部及び超伝導コイル支持材から侵入する熱量は、

$$\dot{Q} = 2.72 \text{ (W)} \quad (2.18)$$

次に、断熱材から進入する熱量を求める。式(2.3)より、液体窒素シールド板から液体ヘリウム容器へ流入する熱量 Q_{He} は、

$$Q_{\text{He}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ (W)} \quad (2.19)$$

となる。ここで、液体ヘリウム容器の表面積 A_L を側面及び底面の和 0.785 m^2 とし、断熱材から侵入する熱量は無視する。

したがって、液体ヘリウムが蒸発するまでの時間 T は、常に液体ヘリウムの液面が一定であり、液体窒素シールド板からの熱侵入がない場合、式(2.20)で与えられる。

$$\begin{aligned} T &= \frac{V_{\text{He}} \rho_{\text{He}} l}{\dot{Q} + Q_{\text{He}}} \\ &= \frac{\pi 0.1^2 (0.52 + 0.10) \cdot 124.98 \cdot 20.42 \times 10^3}{2.72 + 0.02} \text{ (sec)} \\ &= 5.04 \text{ (hour)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

以上より、液体ヘリウムがすべて蒸発までの時間は 5.0 時間となり、設計条件である 4 時間の保冷時間を満たす。

なお、真空容器から液体窒素シールド板へ流入する熱量 Q_{N_2} は、式 (2.7) より、

$$Q_{N_2} = 1.6 \text{ (W)} \quad (2.21)$$

となる。ここで、液体窒素シールド板と液体ヘリウム容器との間に各々 5 cm の隙間があると仮定し、液体窒素シールド板の表面積 A_L を側面及び底面の和 1.25 m^2 とする。

2.2.4 設計のまとめ

クライオスタットの主要諸元を表 2-3 にまとめる。

表 2-3 クライオスタットの設計諸元

項目	仕様
液体ヘリウム容器の内径	0.2 m
液体ヘリウム容器の長さ	1.2 m
内バッファーとして	0.58 m
液体窒素シールド板の内径	0.3 m
最大圧力	1.28 気圧
保冷時間	4 時間以上
断熱材の巻数	10 層 (液体ヘリウム容器) 30 層 (液体窒素シールド板)

2.3 製作・気密試験

表 2-3 の主要諸元にまとめたクライオスタットを製作する主要工程は、次に示す 13 項目に分けられる。

(1) 部品取りそろえ

(2) 部品洗浄

部品についている油脂分をラッカー、エタノールなどの薬品で洗浄する。

(3) 熱伝達カラー組立

熱伝達カラーを組み立て、液体窒素配管に取り付ける (図 2-5 及び図 2-6 参照)。液体窒素配管及び熱伝達カラーにより液体窒素シールド板は液体窒素温度に冷却される。

(4) 液体窒素配管の溶接及び気密検査

液体窒素配管を組み立て、ヘリウムガスで 2 kg/cm^2 に加圧する。その後 1 時間保持し、圧力の低下がないことを確認する (気密検査)。

(5) 液体窒素シールド板の組立

液体窒素シールド板を組み立て、液体窒素配管を溶接する (図 2-7 参照)。

(6) 断熱真空層上部カバーの組立

断熱真空層 (液体窒素シールド板と真空容器との間隙) の上部にカバーを取り付ける。

(7) 液体ヘリウム容器の組立

(8) 液体ヘリウム容器の耐圧検査

組み立て終わった液体ヘリウム容器をヘリウムガスで $0.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ に加圧する (図 2-8 参照)。その後 1 時間保持し、圧力の低下がないことを確認する。

(9) 液体ヘリウム容器への断熱材巻き

液体ヘリウム容器上部に断熱材を 10 層巻き、さらに下部に 10 層巻く (図 2-9 参照)。液体ヘリウム容器中間部の断熱材は 20 層である。

(10) 液体窒素シールド板への取付

液体窒素シールド板を液体ヘリウム容器に取り付ける (図 2-10 参照)。

(11) 液体窒素シールド板への断熱材巻き

液体窒素シールド板上部に断熱材を 10 層巻き、次に下部に 10 層巻く。断熱材の端部を処理した後、再度上部から下部へ繰り返し 10 層ずつ断熱材を巻く。巻き終わった後、中間部の断熱材は 60 層になる (図 2-11 参照)。

(12) 真空容器への取付及び組立

真空容器胴部に鏡板及び脚部を溶接し、液体ヘリウム容器及び液体窒素シールド板を挿入する (図 2-12)。

(13) 真空容器気密検査

排気口から真空容器内を真空に引き、1 Torr 以下の真空度を1時間以上保持することを確認する。

なお、製作したクライオスタットの断面図を図 2-13 に示す。

第3章

クライオスタットを用いた励磁試験

第2章で設計・製作したクライオスタット内に小型コイルを設置し、磁性体がある環境下での励磁特性を評価する試験は次の3項目である。

(1) 小型コイル励磁試験

平成8年度に定格電流で励磁した小型コイルをクライオスタット内に設置し、再び超伝導状態が再現することを確認する。このとき、必要な磁場分布を測定する。

(2) 物性値確認試験

小型コイル励磁試験と同時にクライオスタットの保冷性能を評価する。この評価から第2.2.1項及び第2.2.3項で検討した物性値の正当性を調べる。

(3) 小型コイル歪み試験

クライオスタット下部に磁性体を設置した場合としない場合について、コイルの励磁特性の相違を確認する。

以下、本章ではクライオスタットを用いた各試験について述べる。

3.1 試験体系

磁性体の有無による小型コイルの励磁特性を評価するため、安全上の観点から小型コイル内部で発生する熱量を抑えなければならない。特に磁性体を用いて励磁する場合、クエンチが発生する電流値を予想できないため、小型コイル以外の保護抵抗でジュール熱を開放する必要がある。このため、以下の点に留意して試験体系を構築した。

(1) 小型コイル内部における発熱を抑えるため、保護抵抗を大きくする。

- (2) クエンチ発生時、蒸発したヘリウムガスにより保護抵抗を冷却するために、クライオスタット内部に保護抵抗を設置する。

従って、平成8年度の試験体系と具体的に異なる点は以下の3点である。

- (1) 保護抵抗を 5.1 Ω から 14.1 Ω に変更した。
 (2) 保護抵抗をクライオスタット内部に設置した。
 (3) 磁場測定用ホール素子を鉛直下側 (鉄ブロック側) に設置した。

これらの点を考慮した試験体系を図3-1に示す。また、励磁試験で用いた計測機器を表3-1にまとめる。

表3-1 励磁試験に用いた計測機器

機器名	仕様
電源装置	Regulated Power Supply 0-200A, 0-40V PAD35-200LT 菊水電子 製
電源コントローラ	7651 Programmable DC Source YOKOGAWA 製
ホール素子用定電流源	7651 Programmable DC Source YOKOGAWA 製
ヘリウム液面計	Liquid Helium Level Sensors 30inch AMERICAN MAGNETICS 製
ヘリウム液面アンブ	Liquid Helium Level Meter Model KE101A AMERICAN MAGNETICS 製
記録装置	縦型6ペン Model 3701-63 YOKOGAWA 製

3.2 小型コイル励磁試験

本試験は、小型コイルをクライオスタット内に設置し、超伝導状態を再現する。このとき、必要な磁場分布を測定する。尚、この試験における励磁電流は、小型コイル歪み試験(第3.4項参照)と同じ値 152 A (定格電流の93%) とする。

3.2.1 試験準備

小型コイルをクライオスタット内に設置し、励磁電流を毎分 15 A ずつ増加させ、152 A になるまでトレーニングを実施した。トレーニングの状況を図 3-2 に示す。また、図 3-3 にトレーニング結果を示す。トレーニング中 20 回のクエンチが発生したが、21 回目の励磁で 152 A まで到達した。なお、トレーニング中のクエンチにより発生した大量のヘリウムガスは、安全に回収ラインに流れることを確認した。

3.2.2 中心軸上の磁場分布

クライオスタットを用いた各試験では図 3-4 に示す位置に磁場測定用ホール素子 (3 個) を設置し、磁場分布を計測する。小型コイル中心軸上の点 P (図 3-5 参照) における磁場の強さ $B_x(x)$ は、式 (3.1) で与えられる [5]。

$$B_x(x) = \frac{\mu_0 NI}{4b(a_2 - a_1)} \left(x \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + x^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + x^2}} + (2b - x) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (2b - x)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (2b - x)^2}} \right) \quad (3.1)$$

ここで、 μ_0 は真空における透磁率 [$4\pi \times 10^{-7}$ H/m]、 N は超伝導コイルの総巻数 [5148 巻き]、及び I は励磁電流 [152 A] を表し、その磁場成分は中心軸方向 (x 方向) のみ存在する。また、 a_1, a_2, b は超伝導コイルの主要寸法を表わす (図 3-5 参照)。この式 (3.1) に $a_1 = 6.95 \times 10^{-2} (m)$, $a_2 = 9.25 \times 10^{-2} (m)$, 及び $b = 5.0 \times 10^{-2} (m)$ を代入し、各ホール素子における磁場分布を求める。その計算結果を図 3-6 及び表 3-2 の設計値の欄に示す。

表 3-2 小型コイル中心軸上の磁場分布 (鉄ブロック無し)

位置 (mm)	ホール素子		磁場強度	
	出力電圧 (mV)	較正值 (mV/kG)	測定値 (T)	設計値 (T)
50	38.4	0.744	5.16	5.18
81	35.9	0.756	4.75	4.61
112	23.9	0.723	3.31	3.26

尚、表 3-2 における位置は、小型コイルの上端を 0 とした鉛直下向きを正方向としている。この場合、鉄ブロックの上端は 266 mm である。

次に、励磁電流が 152 A になるように 2 分間で電流を 30.4 A ずつ増加させ、小型コイルを励磁した (図 3-7 参照)。このとき、測定した磁場を図 3-7 及び表 3-2 の測定値の欄に示す。測定の結果、設計値と測定値は 3.0 % の精度で一致し、超伝導状態を精度良く再現していることがわかる。

3.3 物性値確認試験

本試験において、今回使用した設計値 (物性値) の妥当性を評価する。特に、陽電子標的周辺にクライオスタットを設置する上で重要となる、外部から液体ヘリウム容器に侵入する熱の遮断能力を本試験で評価する。このため、小型コイルの励磁中に液体ヘリウムの液面変化を測定した。液体ヘリウムの液面変化は、小型コイルをクライオスタット内に設置した状態で、毎分 0.2 cm の割合で蒸発すると推測される (式 (2.20) 参照)。この推測は、液体窒素シールド板から熱侵入がなく、液体ヘリウムの液面が 62 cm と一定である条件下で、液体ヘリウムの蒸発時間が 5.0 時間であることから得られた。

外部から侵入する熱による液面の減少を測定するため、クエンチが発生する可能性のあるトレーニング中を除き、図 3-7 の小型コイル励磁試験における液面変化を測定した。その結果、15 分間の励磁中液面減少は認められず、液面減少率の上限として毎分 0.04 cm が得られた。この値は、予想値 0.2 cm/min と比較して 5 分の 1 である。従って、クライオスタットは外部から侵入する熱を遮断する能力を有しており、設計の妥当性は示された。

3.4 小型コイル歪み試験

本試験で、クライオスタット下部に磁性体を設置した場合としない場合について、コイルの励磁特性の相違を確認する。

3.4.1 試験準備

第 3.3 節の試験により、小型コイルが 152 A で安定に励磁することを確認した後、本試験を実施した。試験では、クライオスタット下部に鉄ブロック (直径 230 mm, 厚さ 45 mm, 質量 15.0 kg) を固定し、小型コイルを励磁した。励磁電流の印加は、図 3-7 と同様である。トレーニング結果を図 3-3 の 22 回目以降に示す。図 3-3 によると、小型コイルを

励磁した後、142 A でクエンチが発生した。その後、再励磁したところ、152 A で安定に励磁することを確認した。

3.4.2 中心軸上の磁場分布

第 3.2.2 項と同様な方法で小型コイルを励磁し、中心軸上の磁場分布を測定した。その結果を図 3-8 及び表 3-3 に示す。

表 3-3 鉄ブロックの有無による中心軸上磁場分布の相違

ホール素子の位置 (mm)	磁場強度		
	鉄有り (T)	鉄無し (T)	設計値 (T)
50	5.16	5.16	5.18
81	4.75	4.75	4.61
112	3.32	3.31	3.26

磁場測定の結果、小型コイル中央部では鉄ブロックによる磁場強度変化は認められなかったが、コイル端部では鉄ブロック有の方が 0.3 % だけ強度が増加していた。

3.4.3 考察

磁性体が無い状態で安定に励磁できる小型コイルを用いて、磁性体が有る状態で励磁した結果、次の結果が得られた。

- (1) 励磁電流 142 A でクエンチが発生したが、再励磁したところ 152 A で安定に励磁した。
- (2) 小型コイル中央部では磁場強度変化は認められなかったが、コイル端部では 0.3 % だけ強度が増加していた。

一般に、超伝導コイル内で作用する電磁力は、コイル単体で励磁した場合、互いに打ち消し合い、全体としてゼロとなる。しかし、コイル外部で非対称に強磁性材が配置されていたり、外部から磁場が印加されている場合には、超伝導コイル内に変形させるような電磁力が生じる。今回、小型コイル直下に鉄ブロックを設置したため、磁場分布が上下非対称となり、線材に下向きの電磁力が新しく印加されることになる。このため、線材が移動

し、最も不安定な場所でクエンチが起きたと推測される。しかし、線材が再び固定した後では、鉄ブロックが無い状態と同じ励磁特性が得られた。

以上をまとめると、励磁電流を抑えるように細い線材を使用している小型コイルでは、磁場の非対称などの外部からの影響による磁場変化で線材が動き易い構造である。今後、細い線材を使用した超伝導コイルを陽電子収束系として用いる場合、磁場の非対称性に注意するとともに、線材の固定方法に改良を加える必要がある。例えば、

- (1) 線材の径を大きくする
- (2) 線材の断面を円形から平角にする
- (3) 線材を張る張力を上げる

などが考えられる。

第4章

まとめ

本報告書では、平成8年度に引き続き、超伝導コイルを用いた収束系についてさらに知見を得るため、高エネルギー加速器研究機構(旧称:高エネルギー物理学研究所)と事業団との共同で実施した研究成果についてまとめる。この研究の目的は、(1)超伝導コイルを収納する縦型クライオスタットを製作し、設計手法を明確にすること、(2)電磁石ヨークなどの磁性体がある環境下で、超伝導コイルの励磁特性を把握することである。この結果により、超伝導コイルを用いた収束系を実用化するための知見を得る。

まず、縦型クライオスタットの設計・製作を実施し、外部から侵入する熱を遮断する能力について評価した。評価の結果、クライオスタットは外部から侵入する熱を十分遮断できることが判明した。また、トレーニング中のクエンチにより発生した大量のヘリウムガスは、安全に回収ラインに流れることを確認した。以上のことより、今後必要となる横型クライオスタットを設計・製作する手法を取得した。

さらに、平成8年度に製作した小型コイルを用いて、磁性体がある環境下で超伝導コイルの励磁特性を評価したところ、次のような結果が得られた。

- (1) 磁性体(鉄ブロック)が無い場合 152 A の励磁電流で安定に励磁する小型コイルを用いたところ、磁性体がある場合 142 A でクエンチが発生した。その後、再励磁したところ、152 A で安定に励磁することを確認した。
- (2) 小型コイル中央部では磁性体の有無による磁場強度変化は認められなかった。しかし、磁性体有りの場合、コイル端部で 0.3 % だけ強度が増加していた。

このことから、磁性体との相互作用により小型コイル内の磁場分布が変化し、それにより線材が移動したと考えられる。しかし、線材が再び固定した後では、磁性体が無い場合

と同じ励磁特性が得られた。従って、励磁電流を抑えるように細い線材を使用している小型コイルでは、磁場の非対称などの外部からの影響による磁場変化で線材が動き易くなる。今後、細い線材を使用した超伝導コイルを陽電子収束系として用いる場合、磁場の非対称性に注意するとともに、線材の固定方法に改良を加える必要がある。例えば、

- (1) 線材の径を大きくする
- (2) 線材の断面を円形から平角にする
- (3) 線材を張る張力を上げる

などが考えられる。

参考文献

- [1] S.Toyama, Y.Himeno *et. al.*, “Transmutation of long-lived Fission Products (^{137}Cs , ^{90}Sr) by a Reactor-Accelerator System”, Proc. 2nd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, 1990
- [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 Vol.59, No.7, p917~927 (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 Vol.42, No.10, p53~55 (1996)
- [4] 武井早憲, 江本隆ほか5名, “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-”, PNC TN9410 98-053 (1998)
- [5] “伝熱ハンドブック”, (社) 日本機械学会, 1993年2月
“超伝導・低温工学ハンドブック”, (社) 低温工学協会編, 1993年11月
- [6] “物理学辞典”, 物理学辞典編集委員会編, 1992年5月

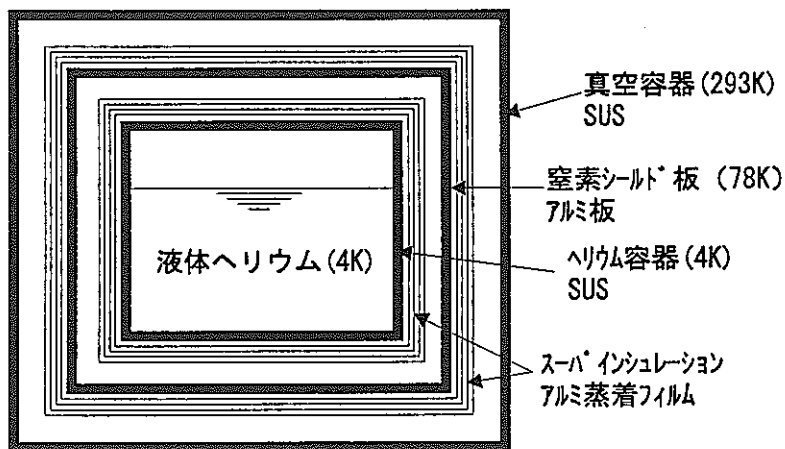


図2-1 クライオスタットのモデル化 (断面図)

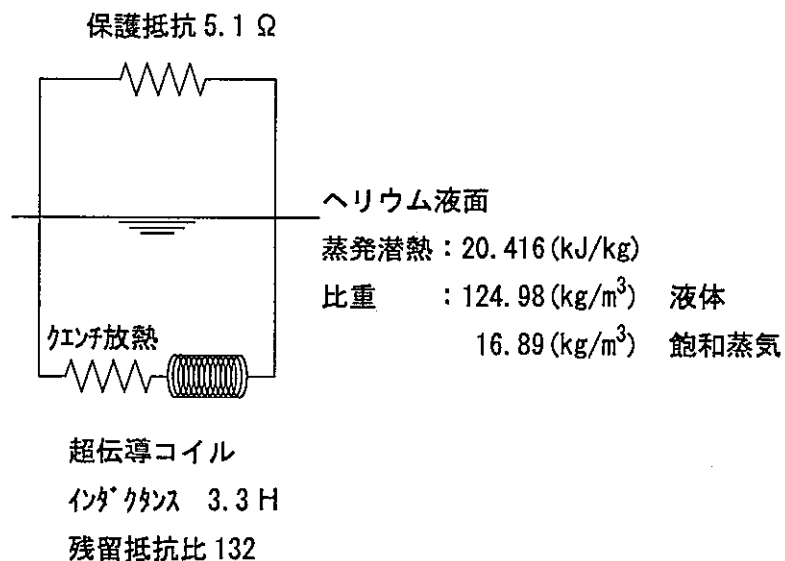


図2-2 クエンチ発生時の計算モデル

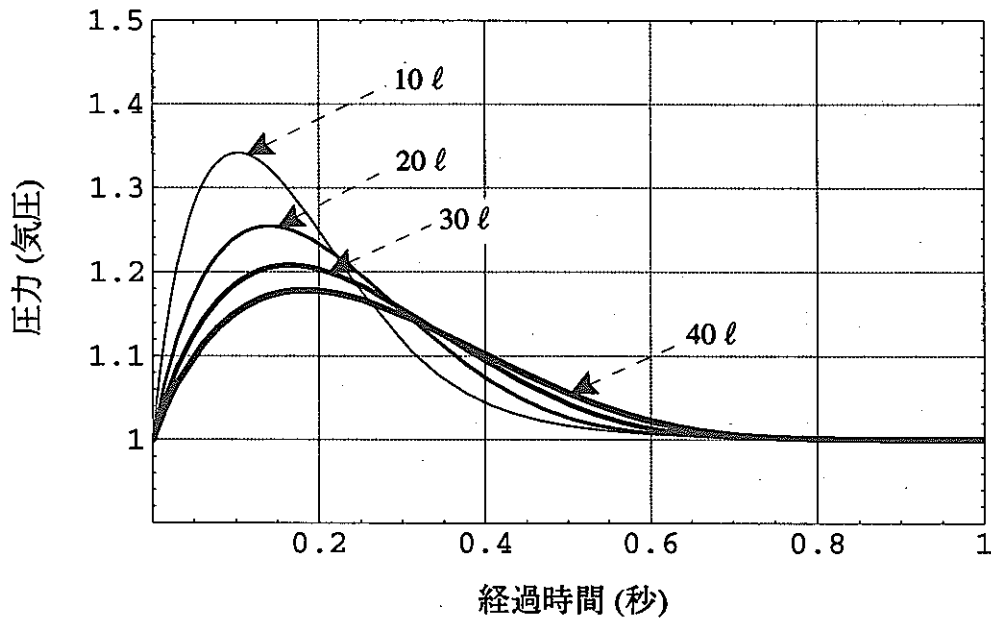


図2-3 バッファ容積を変化させたときのクライオスタット内の圧力変化

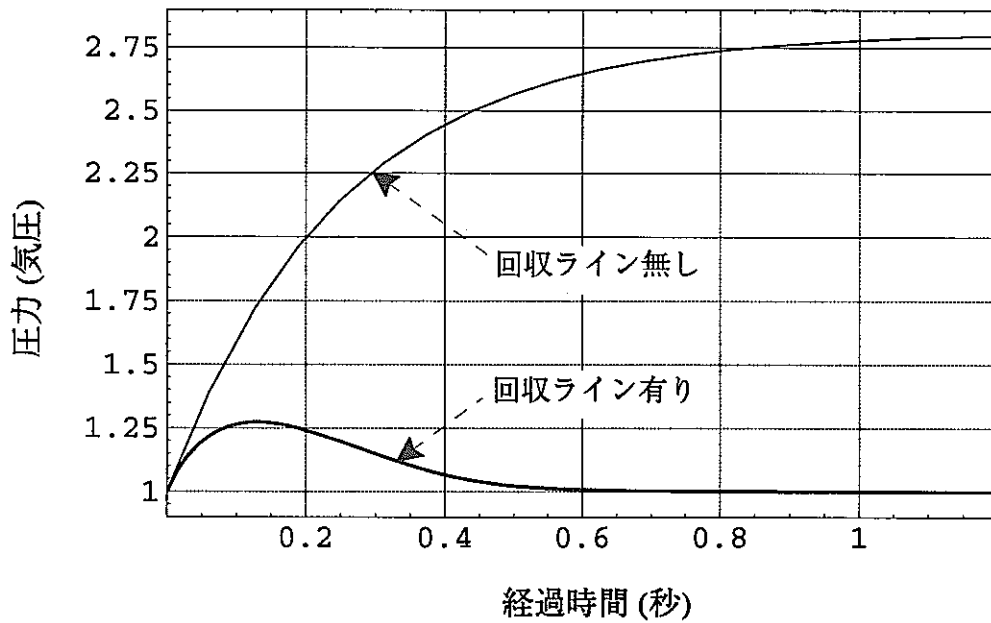


図2-4 バッファ容積を17 lとしたときのクライオスタット内の圧力変化

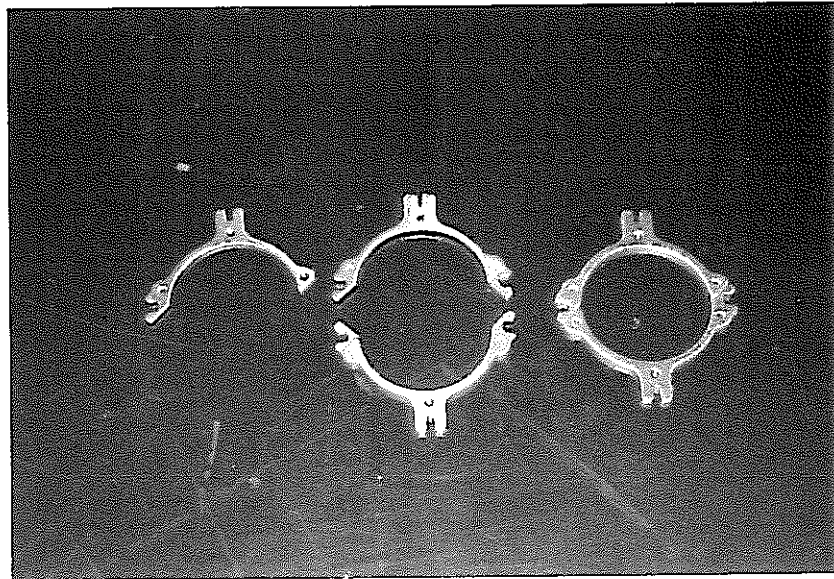


図2-5 熱伝達カラー

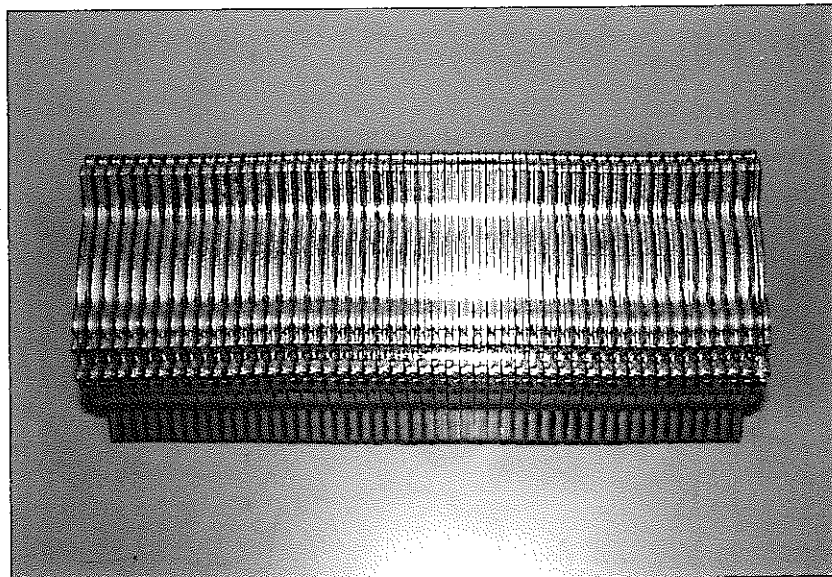


図2-6 側面から見た熱伝達カラー(組立後)

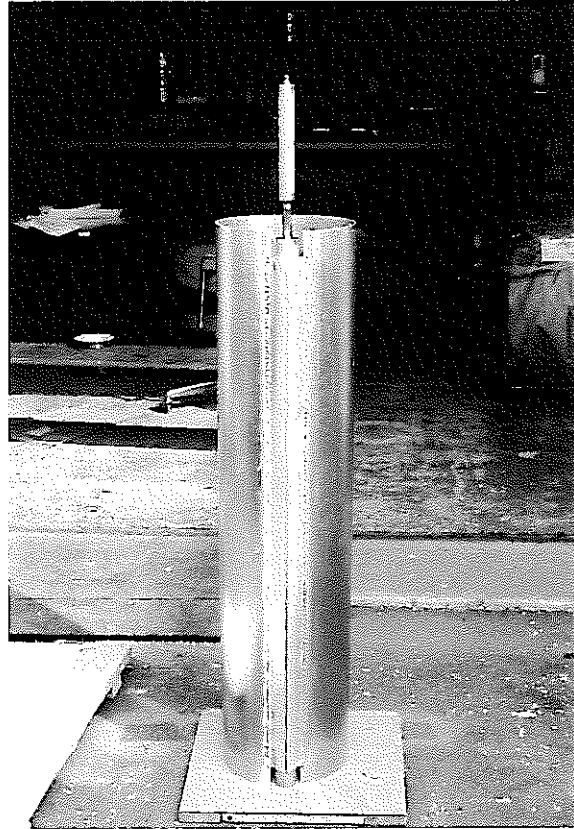


図2-7 液体窒素シールド板及び液体窒素配管

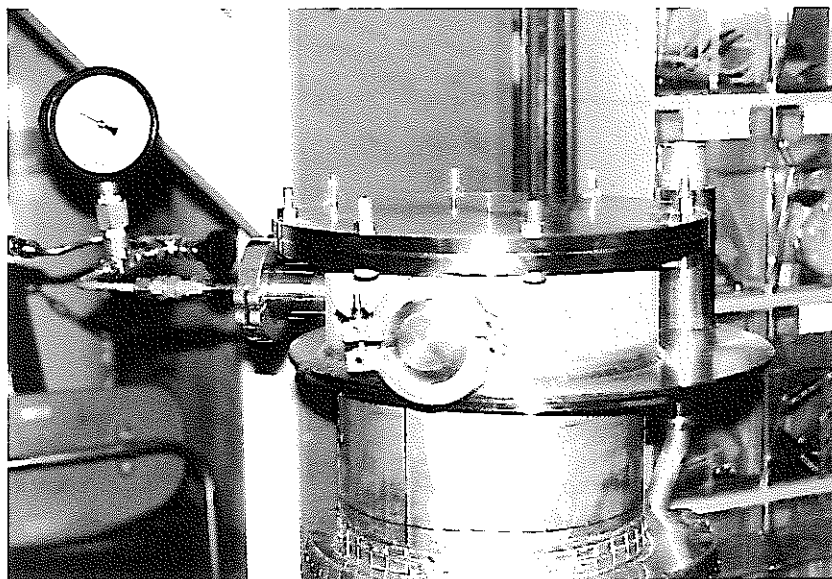


図2-8 液体ヘリウム容器の耐圧検査

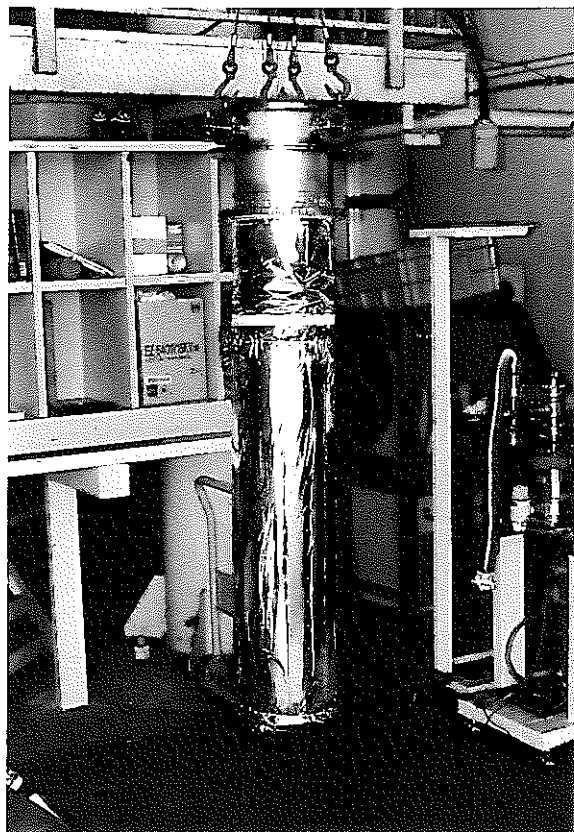


図2-9 液体ヘリウム容器への断熱材巻き



図2-10 液体窒素シールド板への取り付け

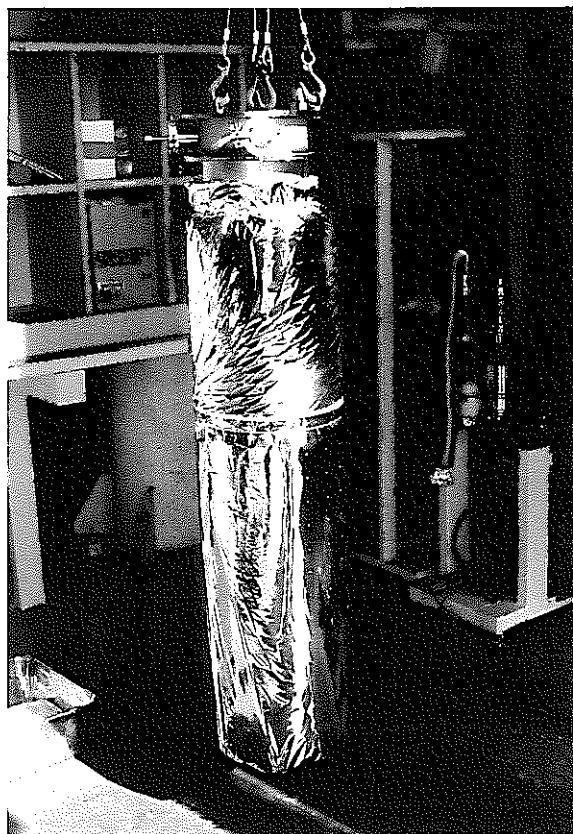


図2-11 液体窒素シールド板への断熱材巻き

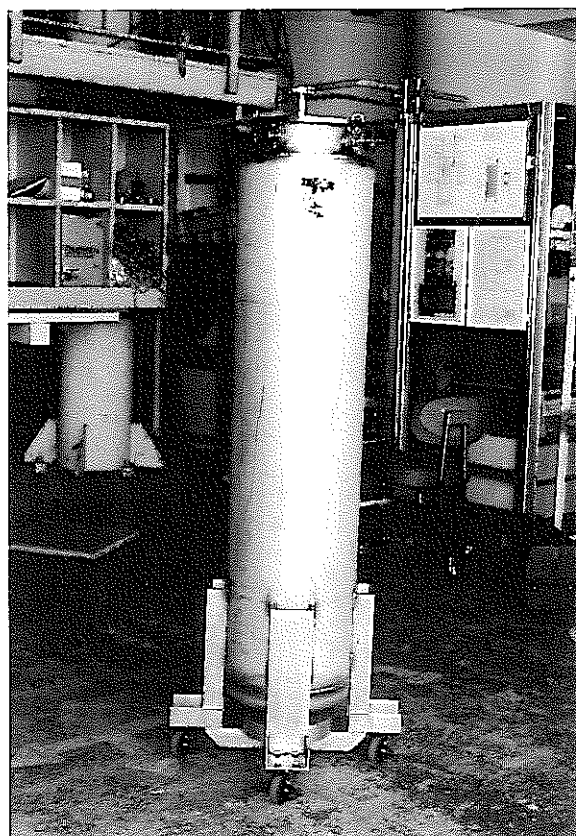


図2-12 完成したクライオスタット

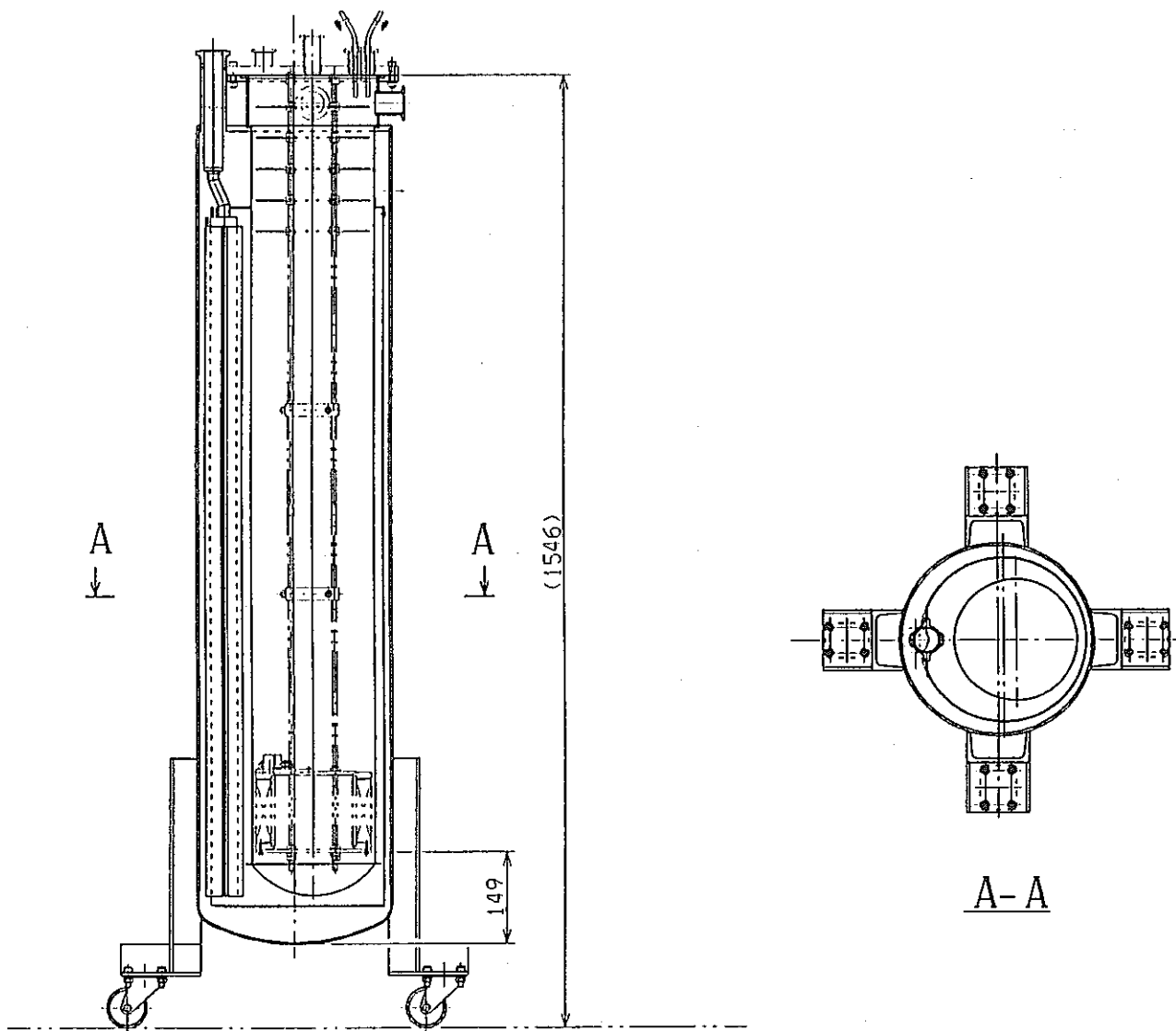


図2-13 クライオスタットの断面図

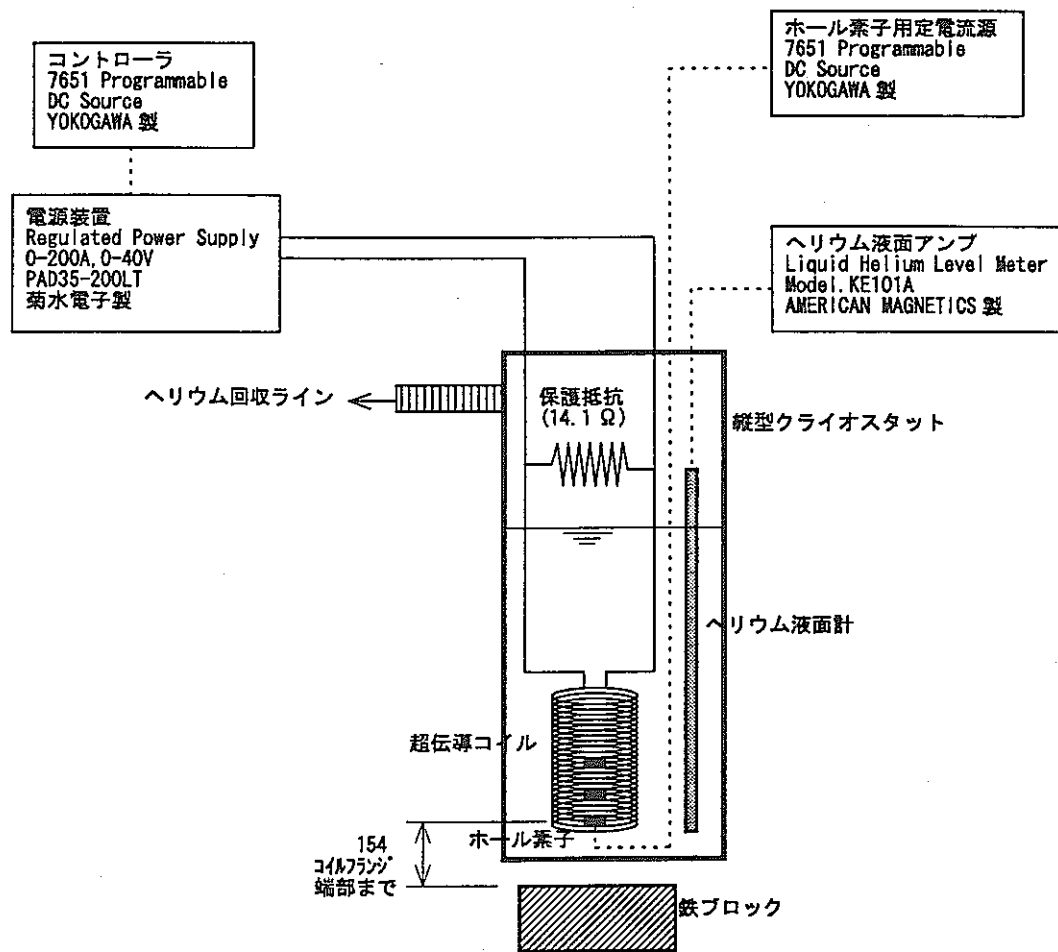


図3-1 励磁試験体系

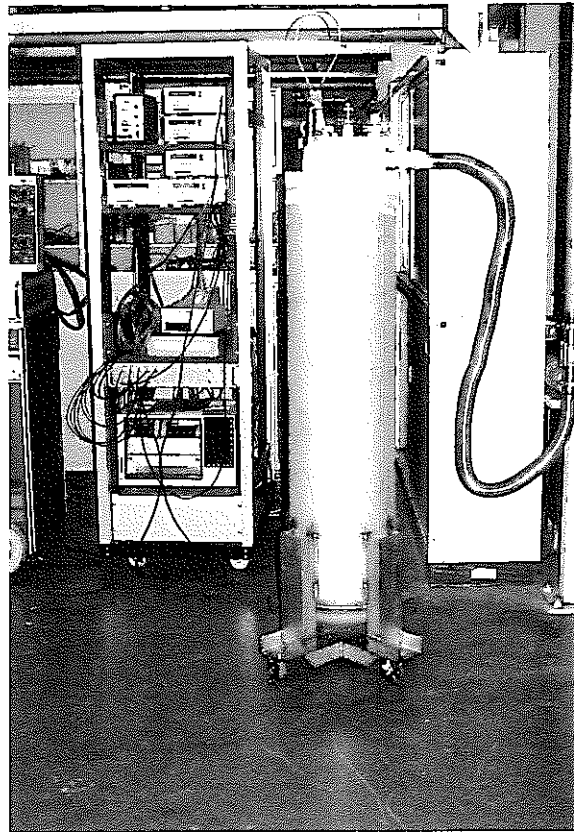


図3-2 励磁試験におけるトレーニング状況

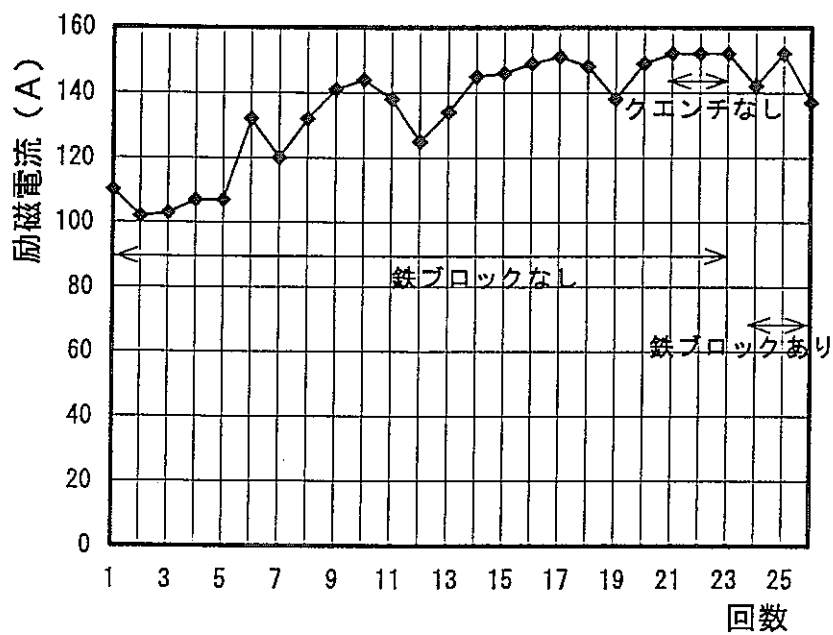


図3-3 励磁試験におけるトレーニング結果

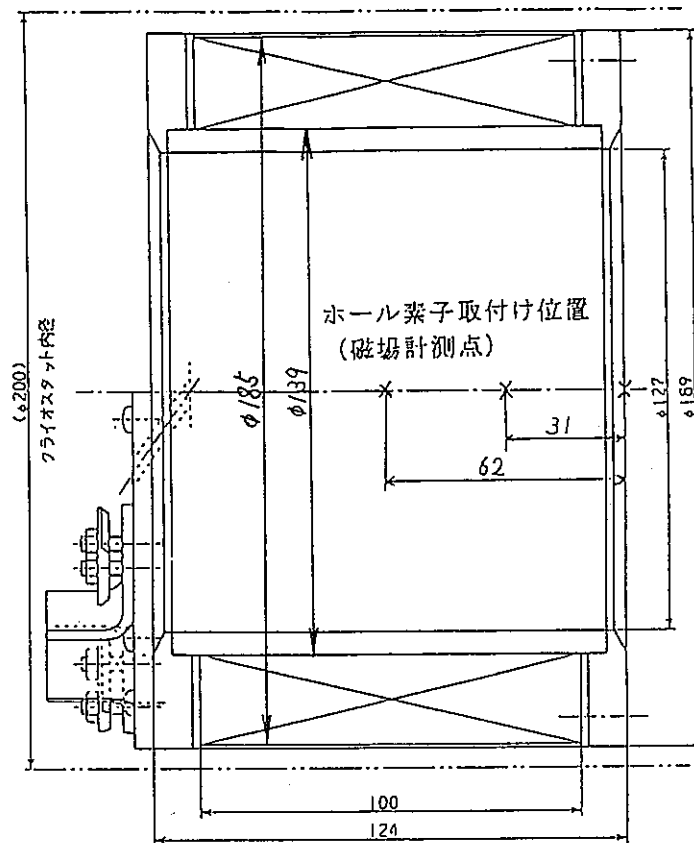


図3-4 小型コイルにおけるホール素子設置場所

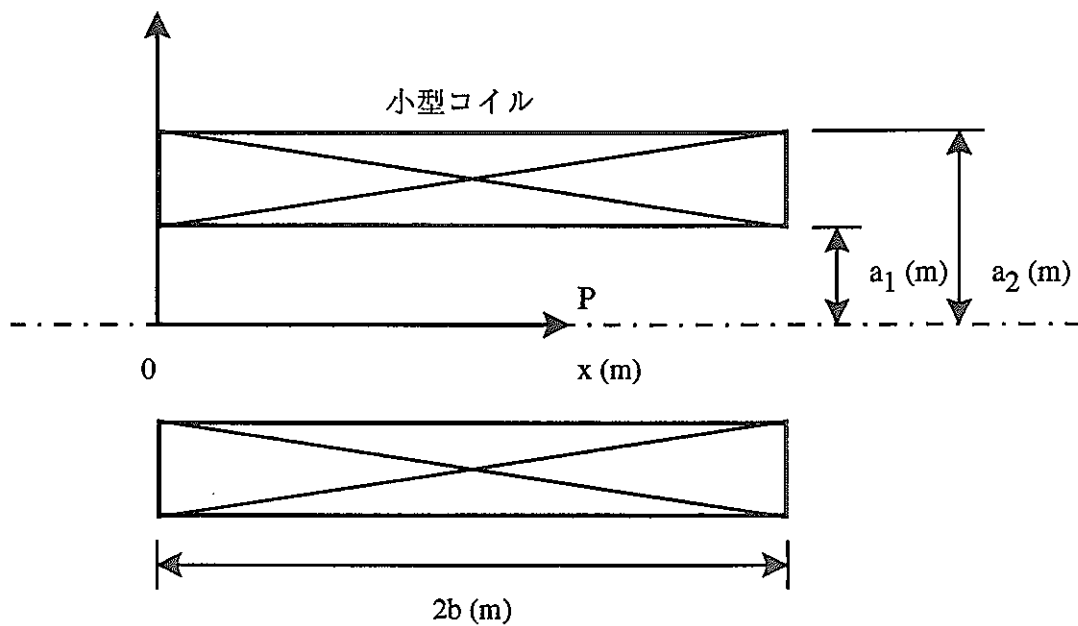


図3-5 小型コイルのモデル (断面図)

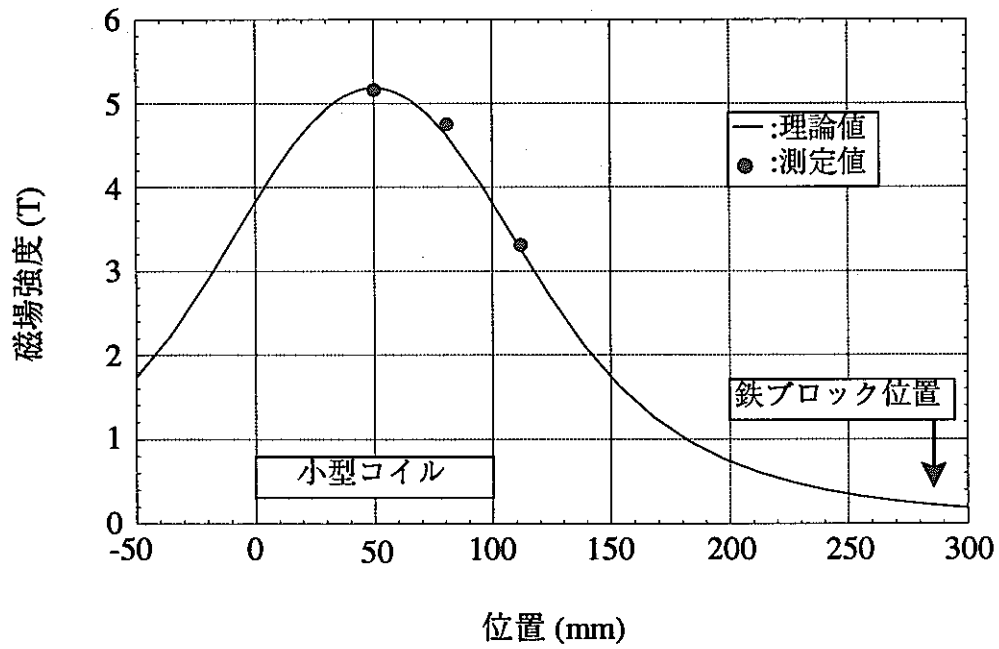


図3-6 小型コイル中心軸上の磁場分布
(鉄ブロック無し)

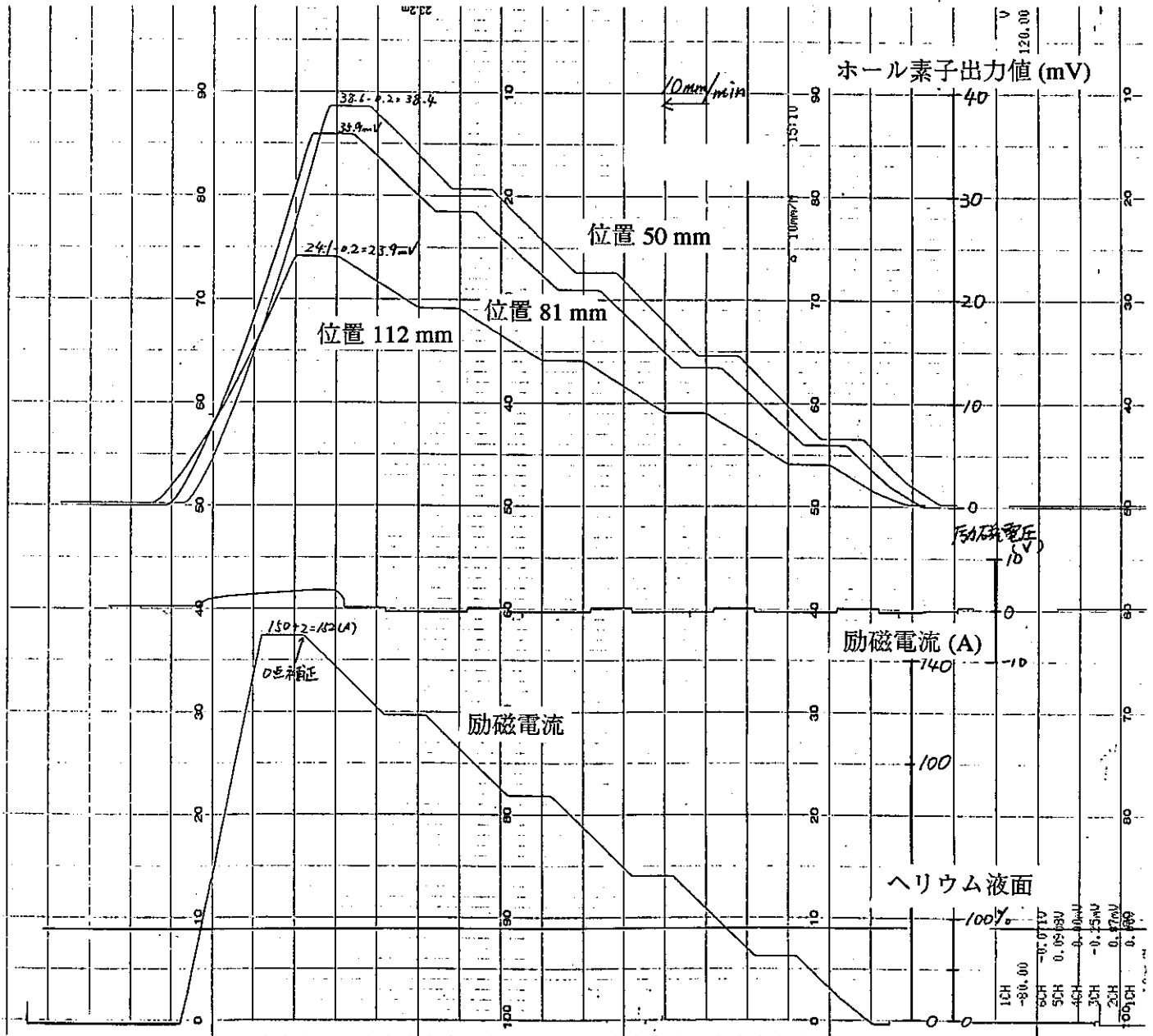


図3-7 鉄ブロックが無い状態での小型コイル励磁データ

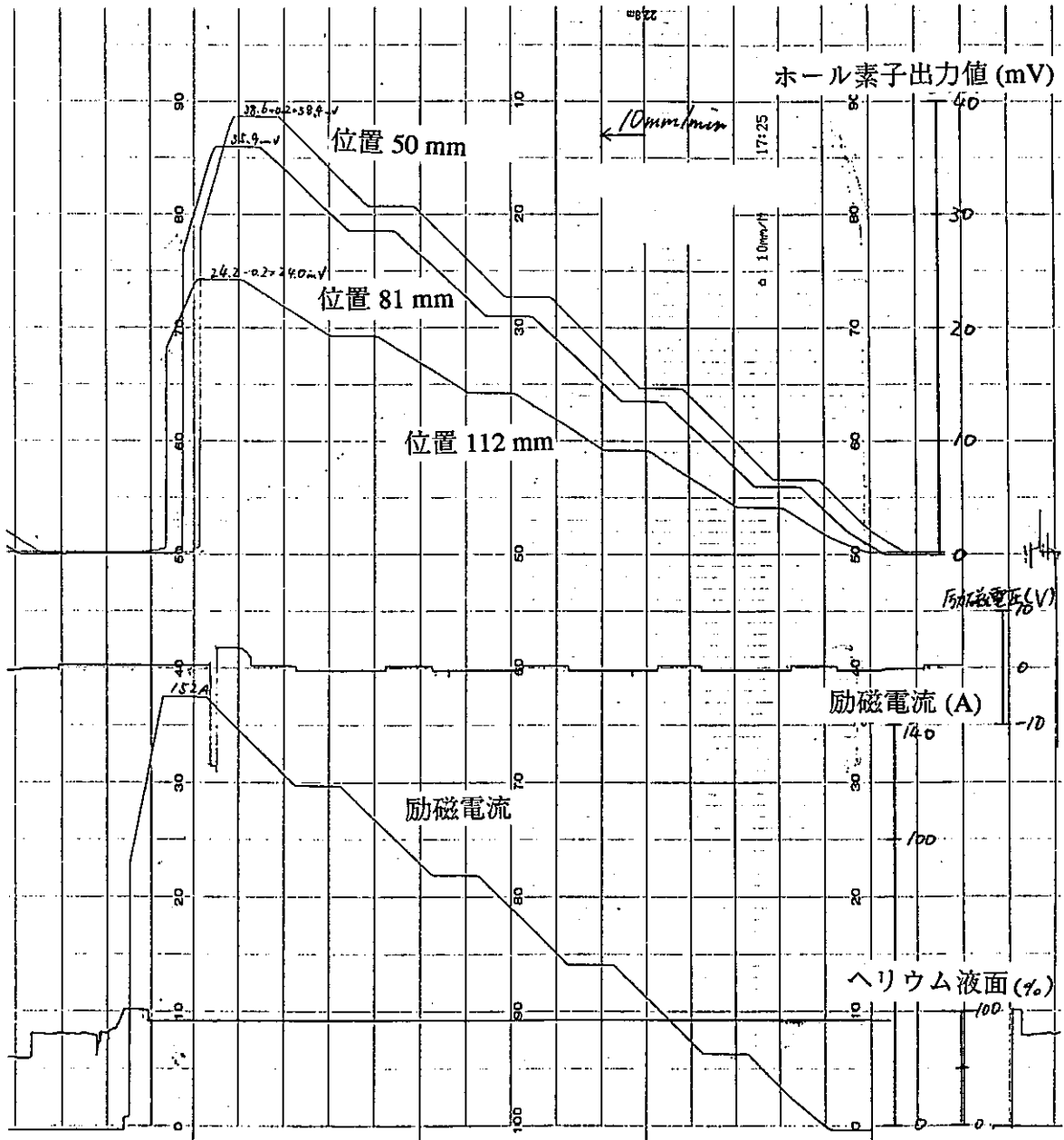


図3-8 鉄ブロックが有る状態での小型コイル励磁データ