

JAERI - M
90-077

超電導ウィグラー・コイル製作

1990年5月

今野 雅行*・吉田 清・磯野 高明
杉本 誠・佐々木茂美・熊谷 健夫**

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

超電導ウィグラー・コイル製作

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

今野 雅行*・吉田 清・磯野 高明

杉本 誠・佐々木茂美⁺・熊谷 健夫**

(1990年4月5日受理)

超電導ウィグラー・コイルは、通常、樹脂含浸したレーストラック型コイルであり、その励磁はトレーニングを重ねることによって定格性能を安定に発生できるようにしていくのが一般的である。そこで、このトレーニング回数を極力少なく済むように製作し、励磁実験を行った。

超電導ウィグラー・コイルの製作にあたり、その製作方法の検討及び樹脂材料の選定を行った。製作方法については、樹脂材料をハケ塗りすること、6個のコイルを一体構造にし、寸法精度を上げること及びレーストラック・コイルの樹脂硬化の際、治具を用いてプレス成形することによりコイルの直線部の膨らみを抑えること、などの方法を採用した。

樹脂材料の選定については、接着強さ、励磁特性、作業性について各種樹脂材料を対象に検討し、最適なものを選び、使用した。

さらに、樹脂含浸について、コイルを4Kまで冷却することによる影響及び電磁力による影響を調べるため、試作コイルによる実験を行った。

これらの結果に基づきウィグラー・コイルを製作した。

励磁実験では、2回目で各コイルの定格電流まで通電可能となり、4回目で導体の臨界電流値まで流すことができた。

当初の目的であるトレーニング回数の少ないウィグラー・コイルの開発に成功した。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ 東海研究所物理部

* 外来研究員，富士電機（株）

** 富士電機（株）

Manufacturing of Superconducting Wiggler Coil

Masayuki KONNO^{*}, Kiyoshi YOSHIDA, Takaaki ISONO, Makoto SUGIMOTO
Sigemi SASAKI⁺ and Tateo KUMAGAI^{**}

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 5, 1990)

The superconducting wiggler coil system was manufactured and charged up successfully. The race track shape coil has training quench to reach rated field at its virgin running. The design and manufacturing of winding method was studied in order to reduce number of training quenches.

The following manufacturing methods were studied before real coil manufacturing.

- (1) the resin material,
- (2) press during curing of winding pack,
- (3) accuracy of coil case.

The various resin materials were evaluated concerning to adhesive strength, training of coils and easiness of winding. A small coil was manufactured and charged up in order to verify the manufacturing technique.

This superconducting wiggler coil system was achieved to rated current at only after one training, and its quench current was reached the critical current of superconducting wire at the fourth charging in this experiment.

Keywords: Superconductivity, High Energy, Wiggler

+ Department of Physics, Tokai Research Establishment

* On leave from Fuji Electric Co., Ltd.

** Fuji Electric Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
1.1 ウィグラー・コイルの使用場所	1
2. 超電導ウィグラー・コイルの設計	2
2.1 基本仕様	2
2.2 超電導線仕様	2
3. 超電導ウィグラー・コイルの製作	6
3.1 コイル製作方法の検討	6
3.2 樹脂材料の選定	6
3.3 試作コイル実験	7
4. 実験結果	12
4.1 磁界測定	12
4.2 励磁実験	13
5. まとめ	19
謝 辞	19
参考文献	19

Contents

1. Introduction	1
1.1 Usage in Wiggler Superconducting Magnet	1
2. Design	2
2.1 Concepts of Design	2
2.2 Superconducting Cable Specification	2
3. Manufacturing	6
3.1 Concepts of Manufacturing	6
3.2 Selection of Resin	6
3.3 Trial Winding	7
4. Experiments	12
4.1 Magnetic Field Measurements	12
4.2 Charging Test	13
5. Conclusion	19
Acknowledgements	19
References	19

1. はじめに

日本原子力研究所は、大型放射光（SR）施設用の各機器の開発を行っている。その計画の一環として、SR用の超電導ウィグラー・コイルの開発研究を行った。

超電導ウィグラー・コイルは、レーストラック型コイルを3対組合わせたものであり、その励磁にはトレーニングによって安定させていくのが一般的である。そこで、このトレーニング回数を極力少なくして済むように製作し、励磁実験を行った。

1.1 ウィグラー・コイルの使用場所

放射光施設などにおいて、シンクロトロン放射のフラックスと輝度を大きくするためには、電子ストレージ・リングで電子を周回させるための偏向磁場を大きくするか、もしくは周回している電子のエネルギーを大きくすれば良い。しかし、偏光磁場を極端に大きくすることは、磁石の設計上困難であり、また周回する電子のエネルギーを大きくするには、技術的にも経済的にも困難さが増す¹⁾。そこで、ストレージ・リング中の電子ビームを強い磁場で曲げて波長の短い放射光を発生させ、それを重ね合わせて短波長放射光の強度を高めるウィグラーを用いることになる。これにより、放射のフラックスや輝度はウィグラーの磁極数に等しい分だけ大きくなる²⁾。このように、ウィグラーは、放射光施設にとってなくてはならないものである。

2. 超電導ウィグラー・コイルの設計

2.1 基本仕様

超電導ウィグラー・コイルは、主コイル1対、補助コイル2対の計3対（6個）のレーストラック型コイルで構成されている。コイルの基本仕様は次の通りである。

- | | |
|-----------------|--------------|
| (1) ビームライン上定格磁界 | 主コイル: 4.0 T |
| | 補助コイル: 2.0 T |
| (2) コイル最大磁界 | 6.0 T |
| (3) コイル間ギャップ | 35 mm |

上記条件に加え、本コイルは、電子ビームの軌道に沿った磁界の積分値を0にする必要がある。

また、このコイルの励磁電源は、Fig. 2.1に示す通り主電源と補助電源から構成されており、補助電源は補助コイルに対し一方方向の電流を供給し、定格電流近傍での調整用に用いる。そのため、補助コイルの定格電流は主コイルに対し数%程度大きな値とする必要がある。

これらの条件を考慮し、定格電流は次の通りとした。

- | | |
|-------|---------|
| 主コイル | 264.6 A |
| 補助コイル | 276.8 A |

Fig. 2.2にコイル外形図、Fig. 2.3に電子ビームライン上の磁界分布図及びFig. 2.4にZ方向（ビームラインと垂直方向）磁界分布図を示す。主コイル中心、補助コイル中心で磁界がそれぞれ4.0 T、2.0 Tにならないのは磁界積分値を0とする条件を優先したためである。

2.2 超電導線仕様

超電導線の仕様を以下に示す。

- | | |
|----------|--------------------|
| (1) 構成 | 超電導導体/安定化材 NbTi/Cu |
| (2) 銅比 | 1.3 |
| (3) 寸法 裸 | 1.00 × 1.00 mm |
| 絶縁込 | 1.05 × 1.05 mm |
| (4) 絶縁材 | ホルマン |
| (5) RRR | 100 以上 |

導体はコイルのR部分の寸法（最小で12.5 R）を考慮し、1 mmとした。また、導体形状は、電流密度を上げることと、コイルの機械的な安定性の向上のための角線とした。

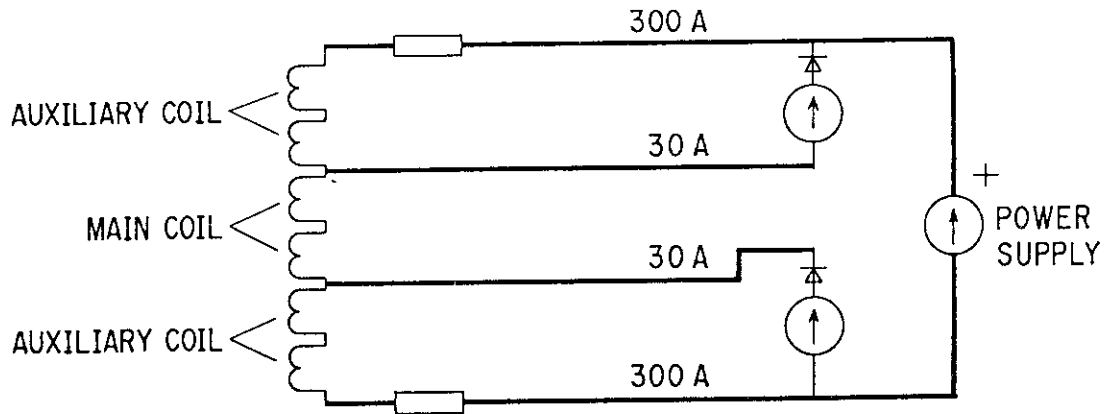
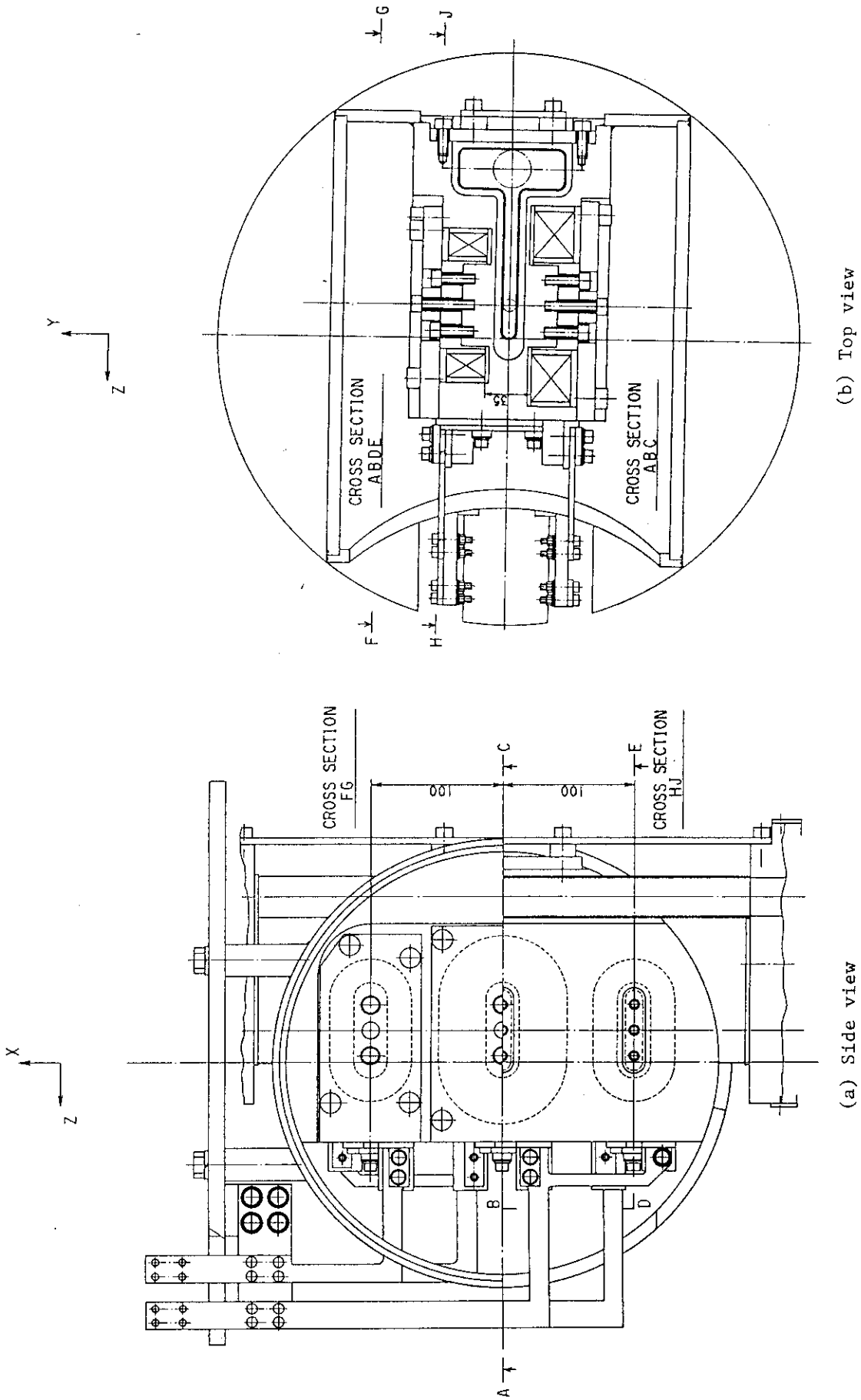


Fig.2.1 The diagram of power supply



(b) Top view

(a) Side view

Fig.2.2 Outside and cross-sectional view of wiggler coil

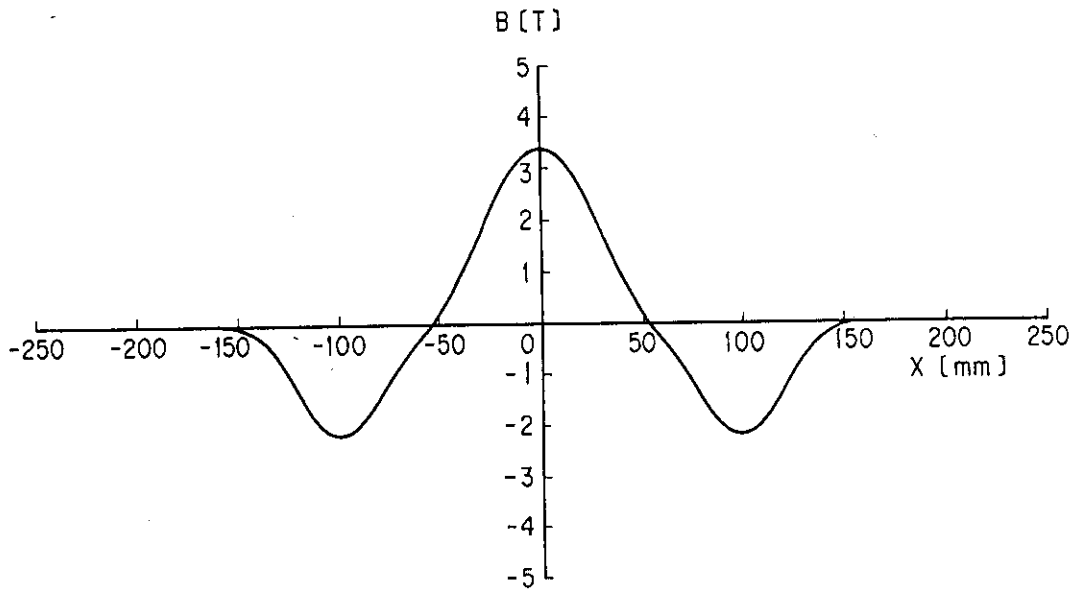


Fig.2.3 Calculated magnetic field distribution on beam axis

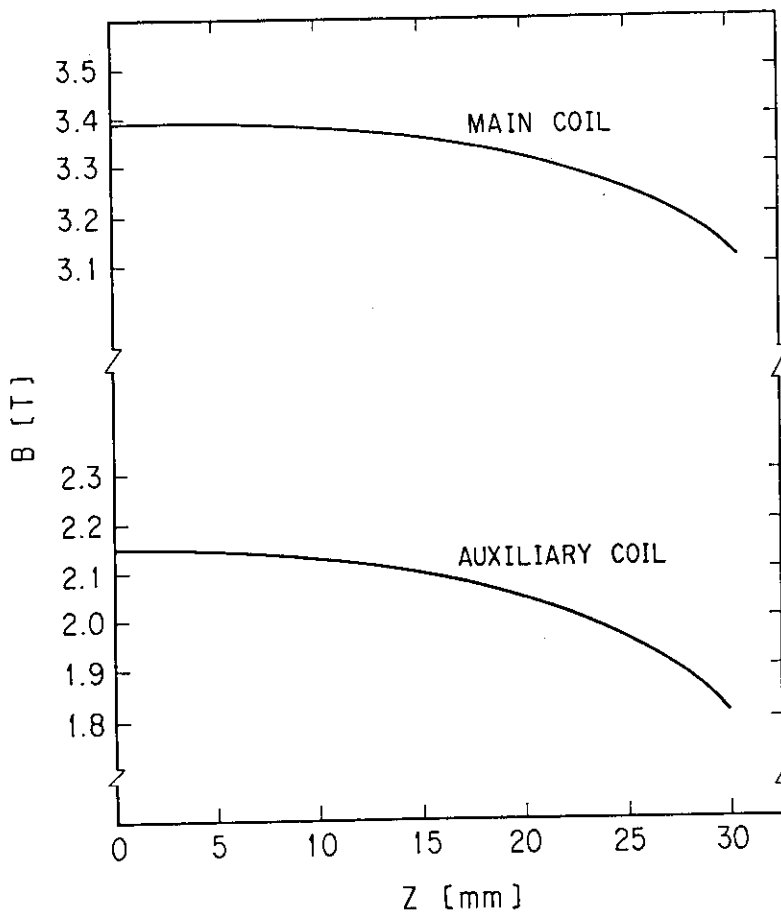


Fig.2.4 Calculated magnetic field distribution on vertical line to beam axis

3. 超電導ウィグラー・コイルの製作

3.1 コイル製作方法の検討

ウィグラー・コイル製作にあたり、その特徴的な方法を以下に示す。

(1) ウィグラー・コイルはレーストラック・コイルであるため、直線部分の線材に加わる電磁力を抑える方法として、一般的には、含浸が用いられる。この含浸の際、気泡がコイルの導体間等に残らないようにするため、真空含浸等様々な方法がある。しかし、本コイルは、最も効果的に気泡を除去できる方法として、巻線時にハケ塗りで樹脂を導体間に付ける方法を採用した。

(2) 各コイル配置の寸法精度を上げるため、一体構造のコイル容器に、6個のコイルを組込むこととした。一体物のコイル容器は、機械加工により、その寸法精度を上げることが可能なため、コイル配置に関する寸法精度も上げることができる。

また、コイルを樹脂含浸する際に使用する巻枠を、そのままコイル容器に取付け可能とした。そのため、コイルは樹脂含浸後、巻枠から外す必要がなく、コイルの変形及び崩れ等を防ぎ、寸法精度を高めることができる。

(3) コイル自身の寸法精度を高めるためには、巻線の際の直線部分の膨らみをいかに抑えるかが重要となった。

直線部分の膨らみが磁界精度に与える影響を Table 3.1 に示す。

また、直線部分の変形は、クエンチの原因にもなりかねない。そこで、コイル形状を保ち、直線性を出すために、樹脂含浸の際、Fig. 3.1 に示す治具を用いて、コイルをプレス成形することとした。また、コイル容器に取付け後は、多数のクサビを用いて、コイルの形状が保たれるようにした。

3.2 樹脂材料の選定

含浸に用いる樹脂材料は、電磁力による導体の動きを止めることを主目的としており、その選定いかんによっては、コイルの励磁特性が左右される。

樹脂材料の選定には、接着強さ、励磁特性、作業性について各種樹脂材料を対象に検討した。

(1) 接着強さ

樹脂材料の接着強さについては、サンプルによる実験を行った。その一例を Table 3.2 に示す。

Table 3.2 は、アルミニウムの板をサンプルの樹脂材料で接着固定し、アルミニウム板を両側から引張り、樹脂材料の引張剪断強度を測定したものである。樹脂材料は、その主剤の中にアルミナ等のフィラーが混入されているものと、入っていないもの（以下ノンフィラーと称す）とがある（スタイクキャスト等はフィラー入り）。一般的に、フィラー入りの樹脂材料

は、ノンフィラーに比較して、その接着強さは強い。但し、フィラー形状はまちまちであり、その寸法は40～80 μm である。コイルの磁界精度を厳しく設計・製作するには、導体間を20 μm 程度に抑える必要があるため、ノンフィラーを採用することが望ましい。そこで、ノンフィラーの樹脂材料を改良し、フィラー入りの樹脂材料と同程度の接着強さを持つものを作ることにした。

(2) 励磁特性

樹脂材料の違いによる励磁特性の違いを調査するため、各種樹脂材料を用いてコイルを製作し、励磁実験を行った。Fig. 3.2に、主なコイルの励磁特性を示す。尚、図中の各コイルは、次に示す仕様で製作されたものである。

通電電流：200 A
 最大磁界：2.55 T
 ターン数：2300
 半径：202.5 mm
 フープ応力：4.16 Kgf/mm²

コイルNo.1はフィラー入り樹脂材料を使用したものであり、コイルNo.2はノンフィラーの樹脂材料を使用したものである。

フィラー入り樹脂材料を使用したコイルは一樣に、電流値に後戻り現象を起こしている。これは、フィラー寸法が不均一であるため、導体間のギャップが不均一になったことが原因していると考えられる。

(3) 作業性

作業性から検討すると、樹脂材料の初期粘度は、ある程度大きな方が扱い易い。また、本ウィグラー・コイルにおいては、樹脂材料を巻線時にハケ塗りするため、その初期粘度は特に重要となる。

以上の3項目の検討結果から、ノンフィラーの樹脂材料で、各項目に適合した改良品を使用することとした。

3.3 試作コイル実験

本コイル製作前に、所定の巻線及び接着を行った試作コイルを製作して、製作方法の確認を行った。

試作コイルは、本コイルの補助コイルと同じ仕様で製作し、導体も、本コイル用の超電導線を使用した。

実験の確認項目としては、4 Kまで冷却することによる影響及びコイルに電磁力が加圧されたことによる影響を、断面を観察することにより調査した。

(1) 試験方法

試験方法としては、試作コイルを励磁することにより、冷却条件及び加圧条件を満足させることとした。

Fig. 3.3に試作コイルのロードライン及び励磁結果を示す。図の通り、試作コイルの励磁

は、2回目で線材の臨界電流値まで流すことができた。

(2) 断面観察

Fig. 3.4 に試作コイルの断面写真を示す。

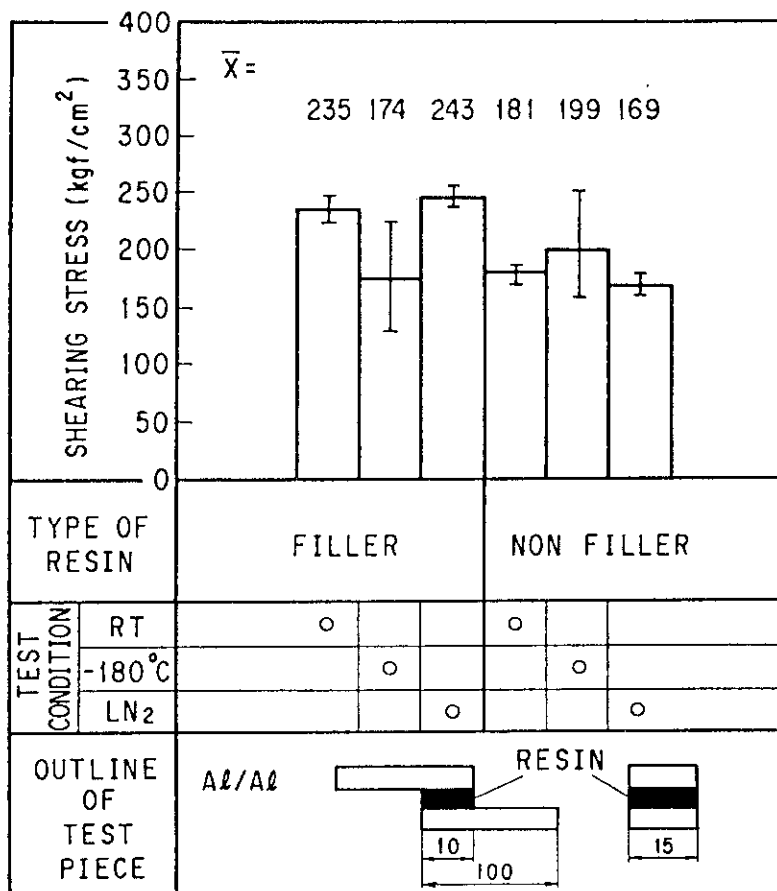
写真観察の結果では、導体に若干の巻き乱れが認められるが、樹脂の破損は認められなかった。幸い、励磁特性も良好な結果を示しているため、本コイルでも同じ樹脂材料を使用することとした

但し、巻線作業時、巻き乱れが起こらぬよう、作業方法を改善した。

Table 3.1 The difference of magnetic field on center of main coil and auxiliary coil in the case straight part of coil bulges.

Bulge	0.5mm(One Side)	1.0mm(One Side)
Main Coil	1.25%	1.58%
Auxiliary Coil	1.85%	2.50%

Table 3.2 Short lap test for measurement of shear stress



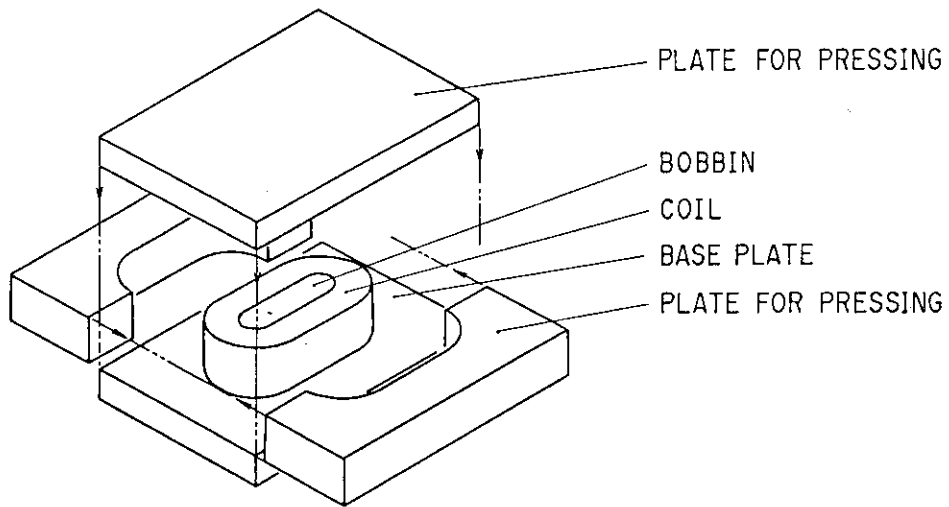


Fig.3.1 The tool for pressing the coil

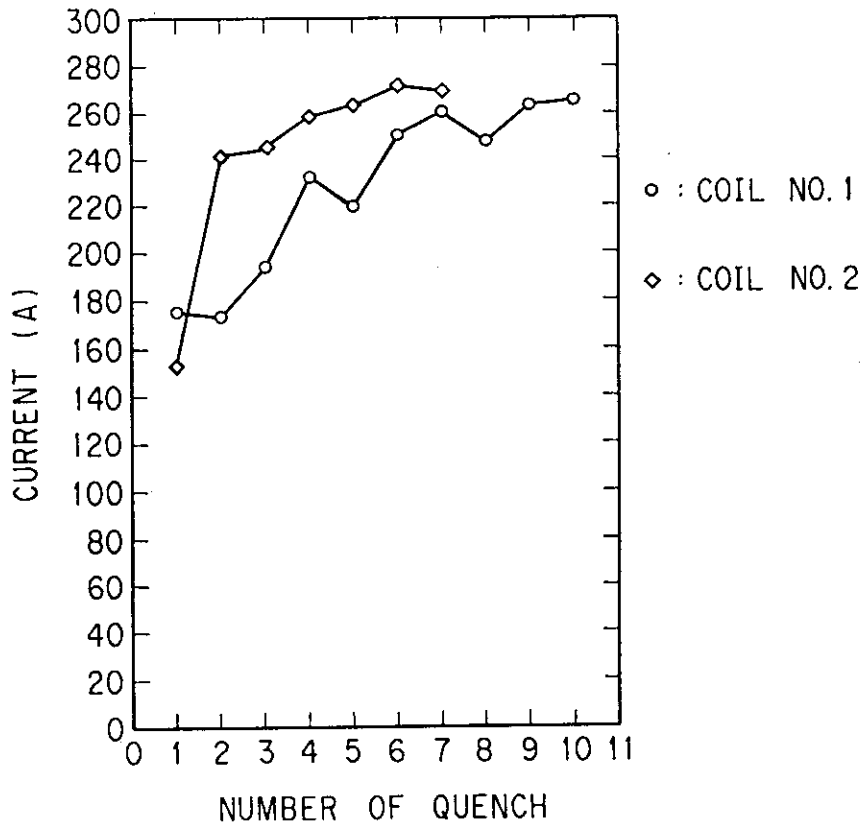


Fig.3.2 Training of the coils

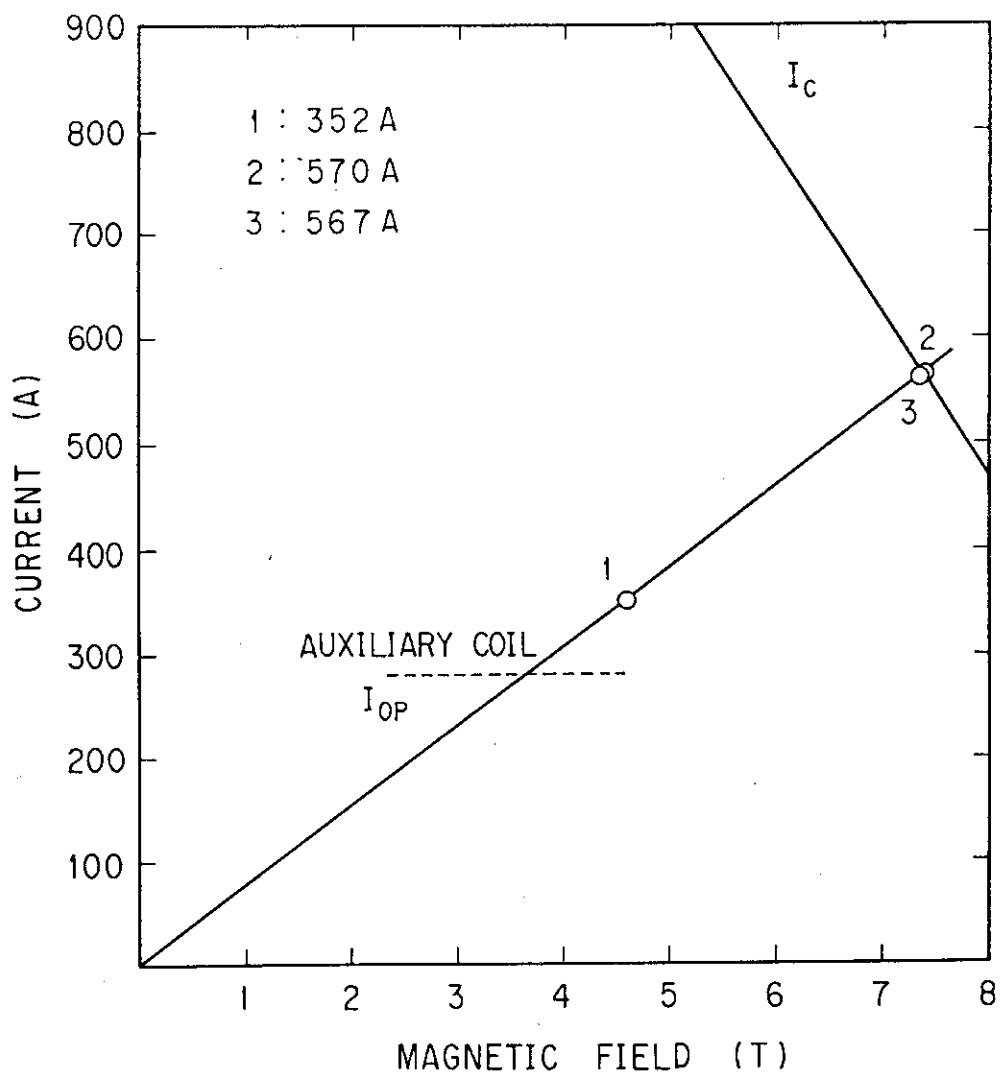


Fig.3.3 Load line of dummy coil

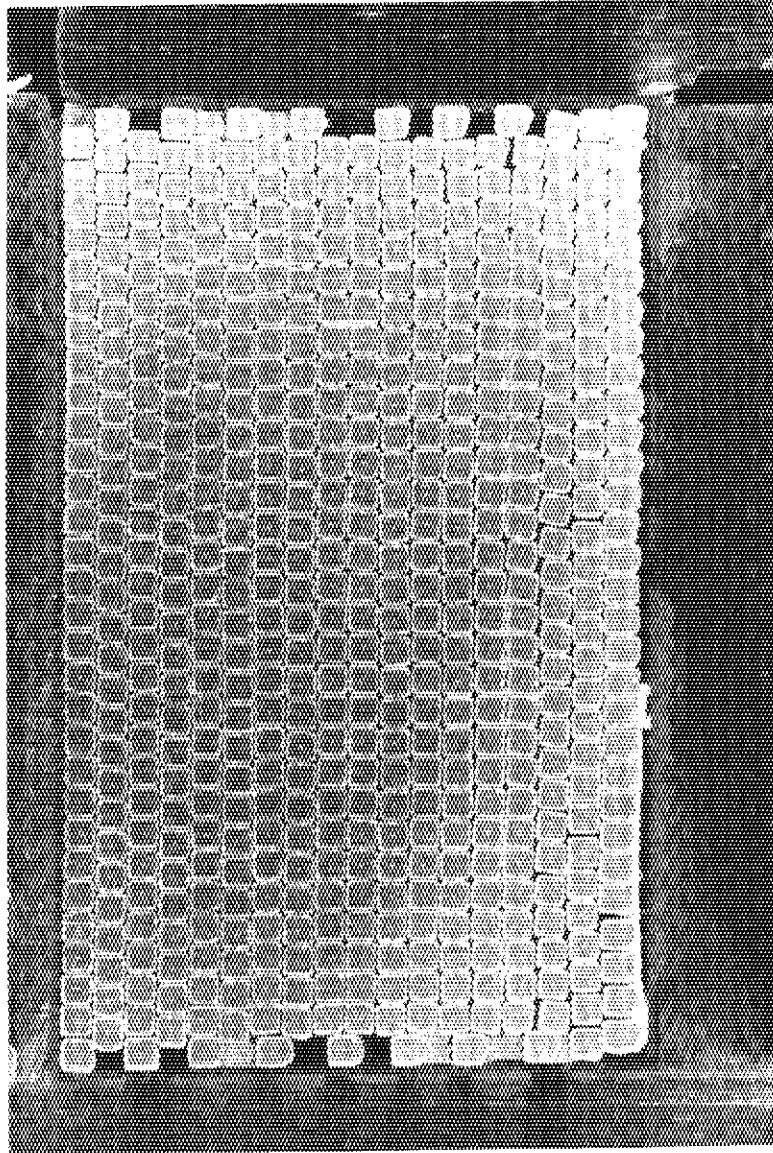


Fig.3.4 Cross-section of dummy coil

4. 実験結果

実験は、常温での磁界測定と励磁実験を行った。

4.1 磁界測定

本ウィグラー・コイルの電子ビームライン上及び電子ビームラインに垂直な方向に関する磁界を測定し、設計通りの性能が得られることの確認を目的として行った。

(1) 測定方法

Fig. 4.1 に試験装置の概略図を示す。試験装置は図に示す通り、ホール素子等の計測装置と、ホール素子を移動させる3軸ステージ及び電源等から構成されている。主な計測装置は、以下の通りである。

- ① ホール素子
- ② ガウスメータ
- ③ デジタルマルチメータ

磁界測定は、3軸ステージでホール素子を電子ビームライン上に沿って、所定のピッチ毎に移動させて行った。尚、測定データは、各移動点での測定値をデジタルマルチメータで16サンプリングして、その平均値を採用している。

測定ピッチは、次の通りである。尚、基準位置は電子ビームライン方向の中心（主コイル間中心）とした。

- ① ビームライン方向（X方向）：5 mm（-490 mm ~ -200 mm）
2 mm（-200 mm ~ 200 mm）
5 mm（200 mm ~ 490 mm）
- ② コイル間ギャップ方向（Y方向）：3 mm（-6 mm ~ 6 mm）
- ③ コイル長軸方向（Z方向）：5 mm（-10 mm ~ 10 mm）

コイルへの通電は、各コイルを直列に接続して行い、補助電源は用いなかった。測定は常温で行うため、コイルの発熱を考慮し、通電電流は1 Aとした。また、コイルはファンを用いて冷却し、熱的に充分安定な状態にさせてから測定した。

(2) 測定結果

電子ビームライン上で、コイルの中心点での磁界測定値と計算値との対比を Table 4.1 に示す。また、Table 4.2 に各コイル間中心において、電子ビームラインからコイル間ギャップ方向（Y方向）及びコイル長軸方向の磁界測定値を示す。

Fig. 4.2 に、電子ビームライン上の磁界測定値と計算値との比較を示す。

また、Fig. 4.3 及び Fig. 4.4 に、Table 4.2 を図示したものを示す。

(3) 誤差評価

Table 4.1 に示す誤差について、評価する。

測定装置の誤差としては、3軸ステージの位置精度によるものと、ホール素子等の計測機器の測定精度によるものとに分けられる。

3軸ステージの位置精度は、次の通りである。

- X方向：初期位置 0.5 mm 以内
自動送りによる再現性 0.1 mm 以内
- Y方向：0.5 mm 以内
- Z方向：0.5 mm 以内

測定位置が上記値ずれたことによる磁界の測定誤差は、それぞれ次の通りとなる。

- X方向：±0.03 %
- Y方向：±0.01 %
- Z方向：±0.07 %

測定誤差の各方向性を考慮してトータルすると、±0.08 %となる。

次に、計測機器の測定誤差は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{〔総合誤差〕} &= \text{〔ガウスメータ誤差〕} + \text{〔校正器誤差〕} + \text{〔ホール素子直線性〕} \\ &= \pm 1.55 \% \end{aligned}$$

従って、発生しうる最大誤差は±1.63 %となる。

ここで、Table 4.1 に示す値を見ると、主コイルの誤差は1.4 %であり、上記の最大誤差内に入っている。従って、この値が測定誤差と考えられる。また、補助コイルについては測定誤差の1.4 %を差し引いた4.4 %、4.7 %が測定値と計算値との本質的な差異と考えられる。

補助コイルの測定値が計算値より小さいことについては、コイルの抵抗値から考えて、渡り部の減ターンによるものと考えられる。しかし、磁界積分値を0にする点では、主電源264.6 A、補助電源14.7 Aとすると可能となる。

4.2 励磁実験

本ウィグラー・コイルを液体ヘリウムで冷却して超電導状態にし、定格電流を流すことが可能であること及び、設計通りの磁界が発生していることを確認するために、励磁実験を行った。

(1) 実験方法

Fig. 4.5 に、励磁実験時のウィグラー・コイルを示す。図の通り、ウィグラー・コイル本体のフランジを実験用クライオスタットのフランジに吊下げて行った。

各コイルは直列に接続し、補助電源は用いなかった。

測定は、ウィグラー・コイル本体の両端電圧及び、電子ビームライン上での主コイルと各補助コイルの中心磁界を行った。尚、中心磁界の測定については、ホール素子の設置位置に関する精度を、さほど厳しくは設定しなかったため、その測定値は参考値として評価する。

(2) 実験結果

Fig. 4.6 に、ウィグラー・コイルのロードラインを示す。このロードラインは主コイル及び、補助コイルの最大経験磁界を示している。

Fig. 4.6 の条件における励磁特性を Fig. 4.7 に示す。図の通り、各コイルの定格電流は2

回目で通電可能となり、4回目で導体の臨界電流値まで流すことができた。

Table 4.3 に、定格電流における各コイルの磁界測定結果を示す。

Table 4.1 Magnetic field on center of coils

[Unit:Gauss]

	Auxiliary Coil(1)	Main Coil	Auxiliary Coil(2)
Measured Value	-73.1	125.4	-72.8
Calculated Value	-77.5	127.1	-77.5
Difference	4.4(5.8%)	1.7(1.4%)	4.7(6.1%)

Table 4.2 Measured magnetic field on following points

[Unit:Gauss]

		Auxiliary Coil(1)	Main Coil	Auxiliary Coil(2)
Center of Coils on Beam Axis		-73.1	125.4	-72.8
Z Axis	-10mm	-73.0	125.2	-72.7
	- 5mm	-73.2	125.3	-73.1
	5mm	-72.8	125.0	-72.6
	10mm	-71.8	124.3	-71.6
Y Axis	- 6mm	-74.6	127.4	-76.0
	- 3mm	-73.4	125.9	-73.9
	3mm	-74.2	125.9	-73.5
	6mm	-76.8	128.2	-75.2

Table 4.3 Measured magnetic field on center of coils

[Unit:Tesla]

Current	Auxiliary Coil(1)	Main Coil	Auxiliary Coil(2)
264.6A	-	3.36	-
276.8A	-2.13	-	-2.17

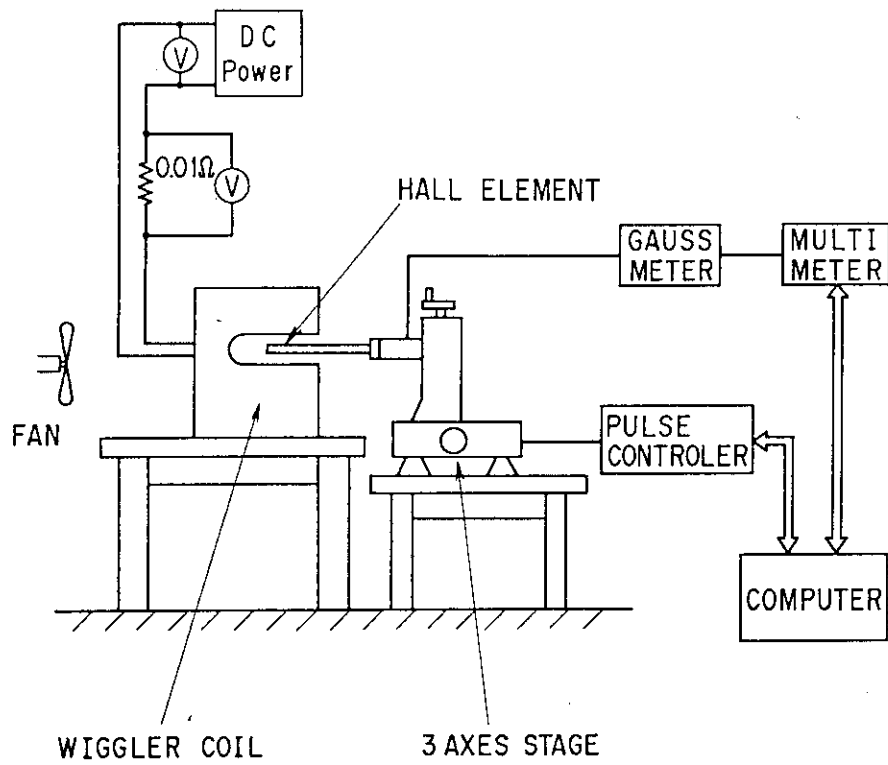


Fig.4.1 Test assembly

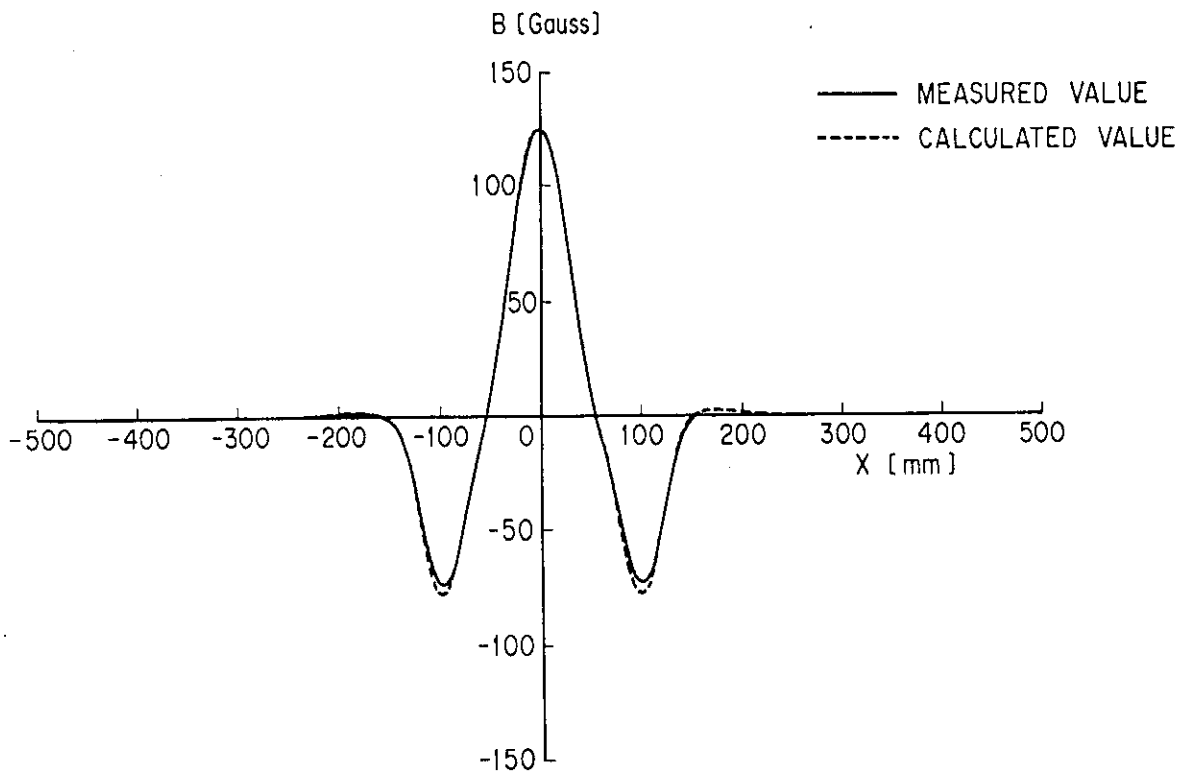


Fig.4.2 Magnetic field distribution on beam axis

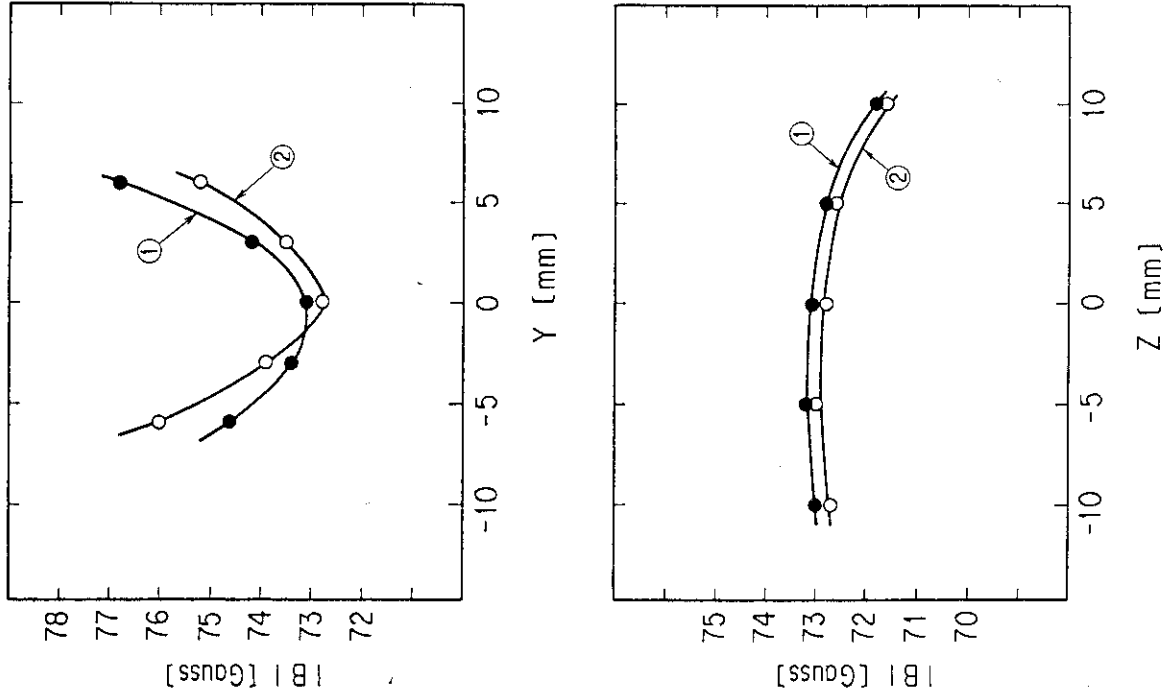


Fig.4.4 Measured magnetic field of auxiliary coils

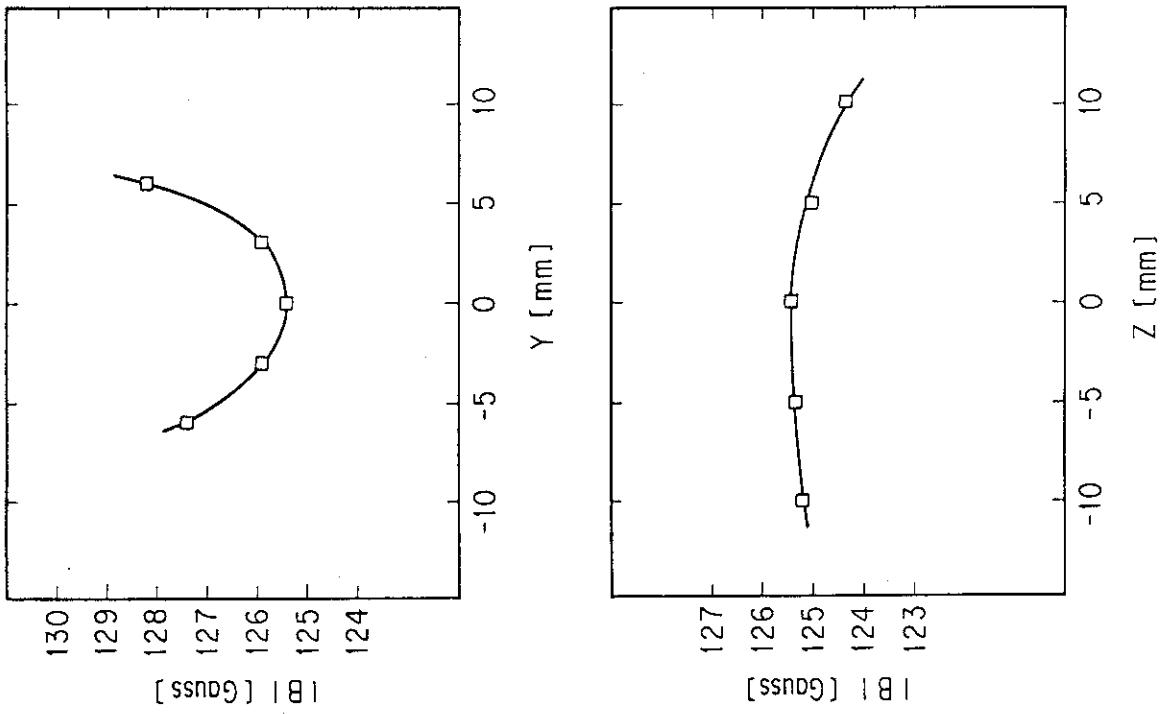


Fig.4.3 Measured magnetic field of main coil

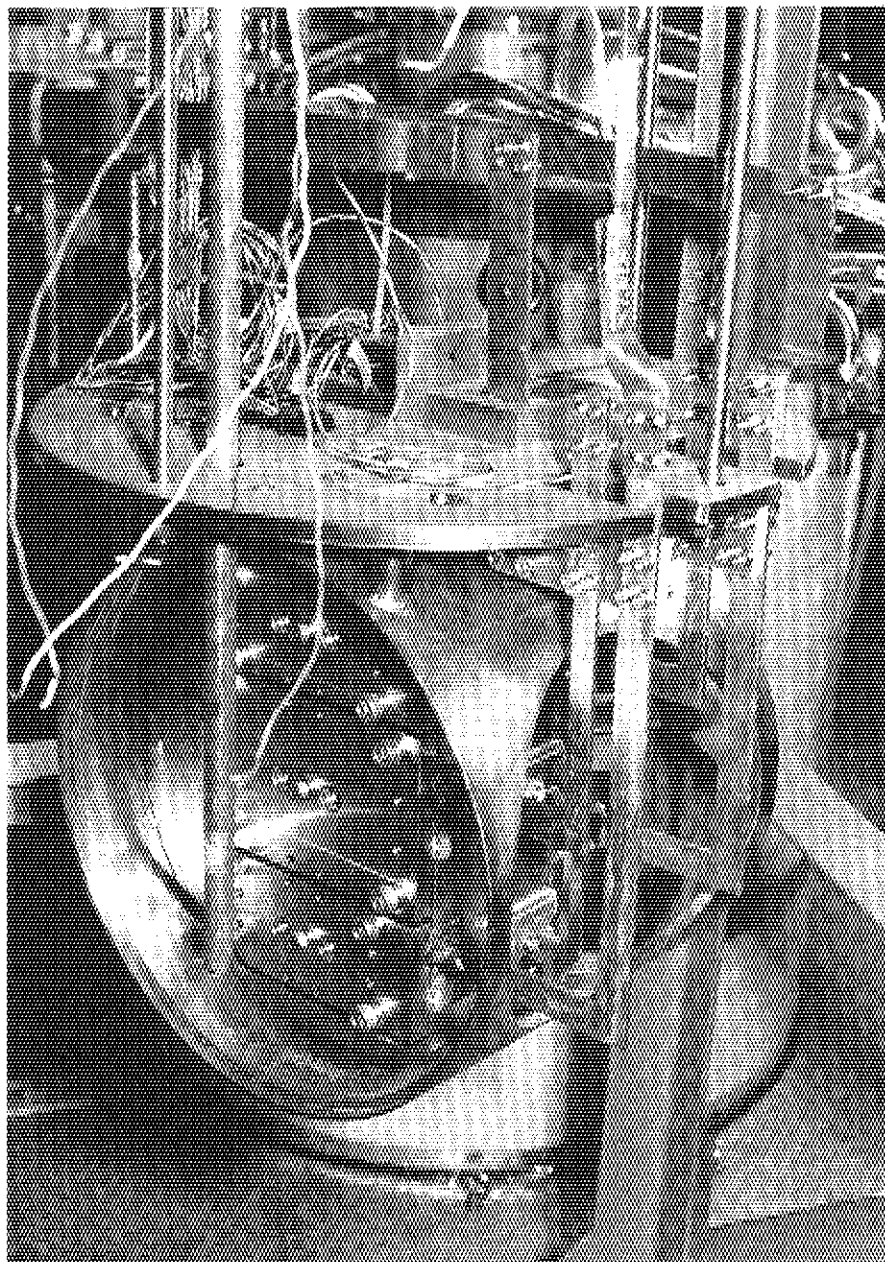


Fig.4.5 Wiggler coil

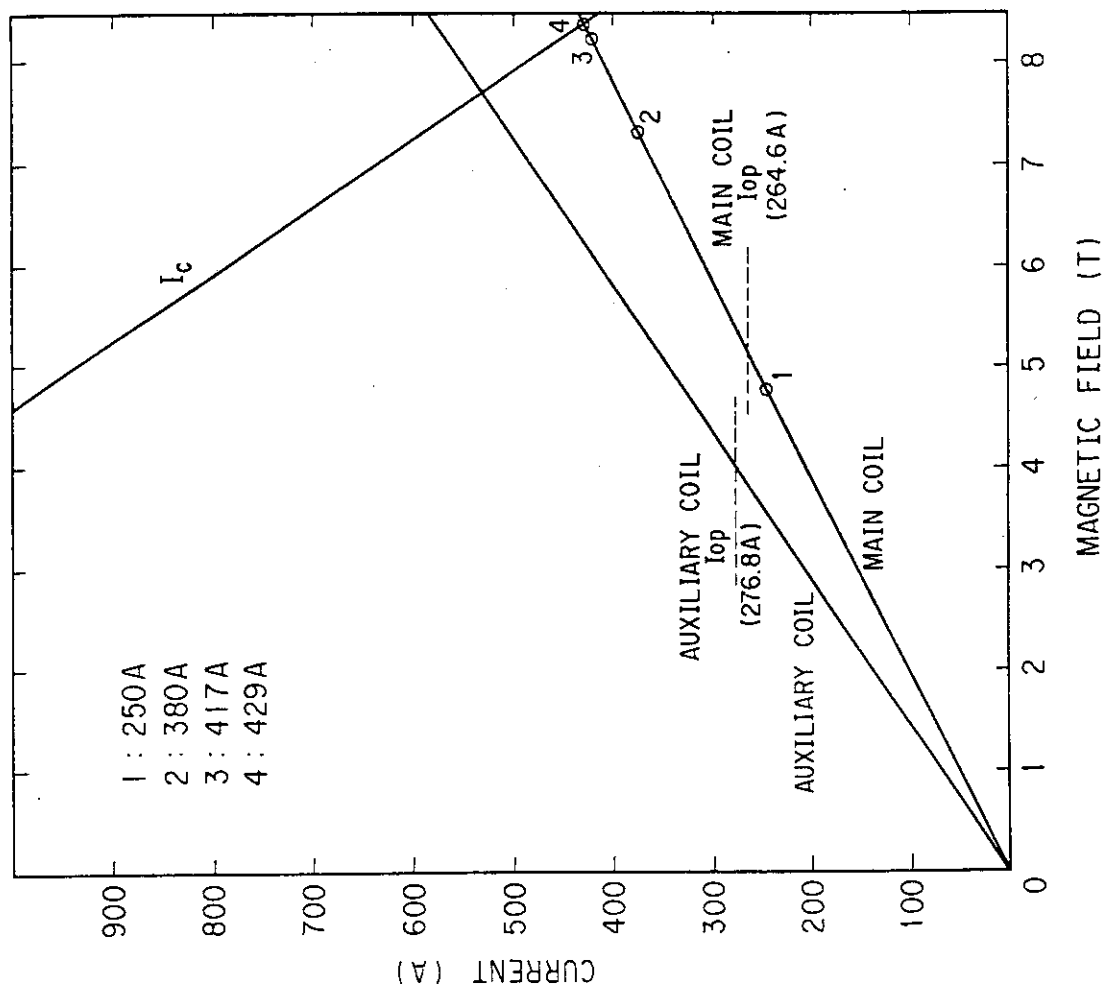


Fig.4.6 Load line of wiggler coil

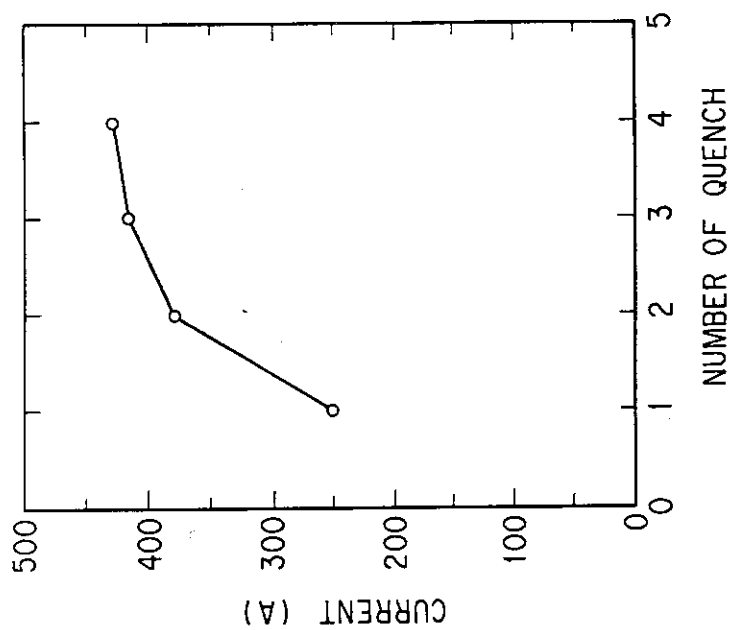


Fig.4.7 Training of wiggler coil

5. ま と め

当初の目的であるトレーニング回数の少ない超電導ウィグラー・コイルの開発に成功した。レーストラック型コイル6個の直列励磁において、2回目で定格電流まで通電可能となり、4回目で導体の臨界電流値まで通電可能であったことは、画期的なことである。

導体の臨界電流値まで通電することが可能であったことは、今回のコイル設計により巻線、含浸等のコイル製作段階において、導体の臨界電流に関する特性に影響を与えずに済んだこととなる。これは、コイル製作において検討した接着方法、コイル容器製造、コイル成形方法、樹脂材料の選定などの結果が、それぞれ効果的に作用したこととなる。

本研究開発により、小型レーストラック形超電導コイルに関する製作技術は十分に理解された。

謝 辞

本研究にあたり、御指導頂きました日本原子力研究所核融合研究部 島本次長及び、同超電導磁石研究室の室員の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 近藤 淳：“ウィグラー及び自由電子レーザー”，電子技術総合研究所調査報告 第200号（1979）
- 2) H. ビニック（菅滋 正 訳）：サイエンス1月号（1988）

5. ま と め

当初の目的であるトレーニング回数の少ない超電導ウィグラー・コイルの開発に成功した。レーストラック型コイル6個の直列励磁において、2回目で定格電流まで通電可能となり、4回目で導体の臨界電流値まで通電可能であったことは、画期的なことである。

導体の臨界電流値まで通電することが可能であったことは、今回のコイル設計により巻線、含浸等のコイル製作段階において、導体の臨界電流に関する特性に影響を与えずに済んだこととなる。これは、コイル製作において検討した接着方法、コイル容器製造、コイル成形方法、樹脂材料の選定などの結果が、それぞれ効果的に作用したこととなる。

本研究開発により、小型レーストラック形超電導コイルに関する製作技術は十分に理解された。

謝 辞

本研究にあたり、御指導頂きました日本原子力研究所核融合研究部 島本次長及び、同超電導磁石研究室の室員の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 近藤 淳：“ウィグラー及び自由電子レーザー”，電子技術総合研究所調査報告 第200号（1979）
- 2) H. ビニック（菅滋 正 訳）：サイエンス1月号（1988）

5. ま と め

当初の目的であるトレーニング回数の少ない超電導ウィグラー・コイルの開発に成功した。レーストラック型コイル6個の直列励磁において、2回目で定格電流まで通電可能となり、4回目で導体の臨界電流値まで通電可能であったことは、画期的なことである。

導体の臨界電流値まで通電することが可能であったことは、今回のコイル設計により巻線、含浸等のコイル製作段階において、導体の臨界電流に関する特性に影響を与えずに済んだこととなる。これは、コイル製作において検討した接着方法、コイル容器製造、コイル成形方法、樹脂材料の選定などの結果が、それぞれ効果的に作用したこととなる。

本研究開発により、小型レーストラック形超電導コイルに関する製作技術は十分に理解された。

謝 辞

本研究にあたり、御指導頂きました日本原子力研究所核融合研究部 島本次長及び、同超電導磁石研究室の室員の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 近藤 淳：“ウィグラー及び自由電子レーザー”，電子技術総合研究所調査報告 第200号（1979）
- 2) H. ビニック（菅滋 正 訳）：サイエンス1月号（1988）