

希土類系超伝導コート線材を用いた
縦磁界限流素子のバイパス抵抗の最適化

平成 28 年 2 月 18 日

電子情報工学科

小田部研究室

12232060 永田望

目次

第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 高温超電導体.....	2
1.2.1 銅酸化物超伝導体.....	2
1.2.2 RE系超伝導体.....	2
1.2.3 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超伝導体.....	3
1.3 REBCO 超伝導体の作成手法.....	4
1.3.1 CVD法.....	4
1.3.2 PLD法.....	4
1.3.3 IBAD法.....	4
1.3.4 TFA-MOD法.....	4
1.4 縦磁界効果.....	5
1.5 超伝導ケーブル.....	6
1.5.1 直流超伝導ケーブル.....	6
1.5.2 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブル.....	6
1.6 限流器.....	7
1.6.1 超伝導限流器.....	8
1.6.2 抵抗型超伝導限流器.....	8
1.6.3 限流器付き縦磁界直流電力ケーブル.....	9
1.7 目的.....	10

第2章 実験方法.....	11
2.1 実験に用いた試料の説明.....	11
2.2 実験.....	12
2.2.1 直流四端子法.....	12
2.2.2 測定回路.....	13
2.2.3 電流バイパスを用いた限流器特性の測定回路.....	13
2.2.4 超伝導層のみの特性の評価	14
第3章 実験結果及び考察.....	15
3.1 実験に用いた線材の基礎特性.....	15
3.1.1 線材の $V-I$ 特性.....	15
3.1.2 臨界電流密度の外部磁界依存性.....	16
3.2 実験に用いた線材の超伝導層のみの基礎特性.....	17
3.2.1 保護層の $V-I$ 特性.....	17
3.2.2 超伝導層の $V-I$ 特性.....	18
3.3 試料の超伝導体に電流バイパスを取り付けた時の基礎特性.....	19
3.3.1 電流バイパス付き試料の $V-I$ 特性.....	19
3.4 試料の超伝導体に電流バイパスを2本取り付けた時の基礎特性.....	20
3.4.1 電流バイパス付き試料の $V-I$ 特性.....	20
3.5 バイパスの違いによる電流分流量 ΔI の変化.....	21
第4章 まとめ.....	22
謝辞.....	23
参考文献.....	24

目次

図 1.1 非縦磁界状態と縦磁界状態の図.....	5
図 1.2 縦磁界効果を用いた超伝導電力ケーブル.....	7
図 1.3 平常時 ($I \leq I_c$) のときの動作.....	8
図 1.4 限流時 ($I > I_c$) のときの動作.....	9
図 1.5 限流器付き縦磁界直流超伝導電力ケーブル.....	10
図 2.1 本研究に使用した GdBCO コート線材.....	11
図 2.2 直流四端子法の測定回路.....	12
図 2.3 限流器回路の概念図.....	13
図 3.1 線材の $V-I$ 特性の測定結果.....	15
図 3.2 縦磁界下及び非縦磁界下における $J_c - B$ 特性の測定結果.....	16
図 3.3 保護層の $V-I$ 特性.....	17
図 3.4 超伝導層の $V-I$ 特性.....	18
図 3.5 電流バイパスを取り付けた試料の $V-I$ 特性.....	19
図 3.6 電流バイパスを 2 本取り付けた試料の $V-I$ 特性.....	20
図 3.7 バイパス 1 本と 2 本の $\Delta I - B$ 特性.....	21

表目次

表 2.1: 試料の特性.....	11
-------------------	----

第1章 序論

1.1 はじめに

1908年に Heike Kamerlingh Onnes がヘリウムの液化に成功した。1911年、当時、低温になるにつれて金属の電気抵抗が小さくなることがわかっており、極低温状態では0になるのか、発散するのかが議論されていた。Heike Kamerlingh Onnes は極低温における水銀の電気抵抗を調べる過程で、4.2 K 以下における水銀の電気抵抗が測定不能な程に小さくなることを発見した。これが最初の超伝導体の発見となり、この現象を超伝導現象という。その後、次々と超伝導体が発見される中、なぜ超伝導現象が起こるのかという研究も進められてきたが、長い間原因は不透明なままであった。1957年に Bardeen, Cooper, Schrieffer の BCS 理論により超伝導現象が起こる原因が説明されたが、この理論では超伝導体が発見される超伝導状態から通常の電気抵抗を持つ状態である常伝導状態へと遷移する温度(臨界温度: T_c)が 30 K を超えないと予想されていた。しかしながら、Johannes Georg Bednorz と Karl Alexander Müller により、銅酸化物系物質で T_c が 30 K を超える超伝導体(LaBaCuO)が発見され、その後液体窒素の沸点である 77 K を大きく超えた T_c を持つ YBa₂Cu₃O_x や Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ などの酸化物超伝導体も発見された。これらは銅酸化物超伝導体または高温超伝導体と呼ばれ、その T_c の高さから応用が期待されている。

超伝導体は磁気的な振る舞いの違いから第一種超伝導体と第二種超伝導体に分類される。第一種超伝導体では臨界温度 T_c 以下の温度で超伝導状態となり完全反磁性 (Meissner 効果) を示すが、外部から磁界を加えていくと、ある磁界を超えた所で Meissner 効果および超伝導状態は消失する。この境となる磁界を臨界磁界 B_c という。一方で、第二種超伝導体では T_c 以下の温度で、下部臨界磁界 B_{c1} と呼ばれる磁界までは Meissner 効果を示し、その磁界を超えても、第一種超伝導体とは異なり超伝導体内に一定の磁束の侵入を許すことで超伝導状態を維持する。そしてさらに磁界が増加すると上部臨界磁界 B_{c2} と呼ばれる磁界で超伝導状態が消滅する。第一種超伝導体の B_c と比べると第二種超伝導体の B_{c2} は非常に高いので、工学的利用には第二種超伝導体が多い。第二種超伝導体の B_{c1} から B_{c2} までの磁界領域では、超伝導体は内部に量子化された磁束線が侵入した、混合状態と呼ばれる状態となる。

さらにこの混合状態にある超伝導体に電流を流すと、磁束線は Lorentz 力 \mathbf{F}_L を受ける。この \mathbf{F}_L は、超伝導体内部を流れる電流密度 \mathbf{J} と侵入した磁束線の磁束密度 \mathbf{B} を用いて、 $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ と表せる。したがって、 \mathbf{F}_L の力を受けた磁束線が速度 \mathbf{v} で動くと、電磁誘導により $\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ の電界が発生することになり、電界を生じる。しかしながら、 \mathbf{F}_L を打ち消し、磁束線の運動を止める力が働くことで電界の発生は抑制し、電気抵抗ゼロが実現する。この力をピンニング力といい、単位体積当たりのピンニング力をピン

力密度 F_p という。また、このピンニング力を生み出す常伝導析出物や結晶界面、結晶欠陥等をピンという。 F_L が F_p よりも小さければ、磁束線は駆動せず電界は発生しない。このことから $F_p = J_c B$ と表せ、電気抵抗なしに流せる最大の電流密度を臨界電流密度 J_c という。超伝導体の応用においては、臨界温度 T_c 、臨界磁場 B_{c2} 、臨界電流密度 J_c が重要なパラメータとなる。特に T_c 、 B_{c2} は物質によって決まるが、 J_c は F_p を強化させることにより増大させることができ、電力機器等への応用の際に非常に重要なパラメータである。

現在工学利用されている超伝導体は主に NbTi や Nb₃Sn 等の金属系超伝導体 (T_c が 10~ 20 K 程度) であり、冷媒に液体ヘリウムを使用する必要があるため冷却コストが非常に高い。そのため、臨界温度 T_c が高く、比較的安価な液体窒素での冷却が可能な銅酸化物超伝導体が金属系超伝導体の代替素材として注目されており、送電ケーブルや高磁界発生超伝導マグネットなどへの応用が期待されている。

1.2 高温超伝導体

1.2.1 銅酸化物超伝導体

超伝導体の結晶内に CuO_2 面を持つものを銅酸化物超伝導体と呼ぶ。銅酸化物超伝導体は臨界温度が高く、液体ヘリウムに比べて安価な液体窒素で超伝導状態にできることから、工学的な応用に期待が寄せられている。現在主に使用されている銅酸化物超伝導体には、Bi 系超伝導体や Y 系超伝導体がある。銅酸化物超伝導体は CuO_2 面と、絶縁面から構成されている。 CuO_2 面は超伝導電流が流れ、絶縁面は CuO_2 面に超伝導電子を供給するという働きをおこなっている。このように銅酸化物超伝導体は結晶構造に異方性があるため、銅酸化物超伝導体で臨界電流密度を向上させるためには、超伝導電流が流れる CuO_2 面を揃えるように結晶を配向させることが必要である。

1.2.2 RE系超伝導体

RE(Rare Earth)系超伝導体とは銅酸化物の一つであり、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (REBCO) の組成式で表される超伝導体である。RE系超伝導体の一つである $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)は T_c が約90 Kであるため、液体窒素を用いて超伝導状態にすることができる。同じ銅酸化物超伝導体であるBi系超伝導体と比べると、高温・高磁界下での臨界電流密度が高いため、高温・高磁界下での応用が期待されている。しかし、Bi系超伝導体のように機械的な加工で結晶配向させることができないため、高い J_c を得るためには Pulsed Laser Deposition (PLD) 法や Chemical Vapor Deposition (CVD) 法などの特殊な製法が必要になる。したがってRE系超伝導体は、Bi系超伝導体よりもコストと時間がかかる等のデメリットがあるが、磁界依存性が優れ、さらに近年の作製技術の向上により、高特性化に加え長尺化・低コスト化が進んでおり、金属系超伝導体やBi系超伝導体に置き換わる次世代超伝導体として期待されている。

このRE系超伝導体は、REの一部、または全てを同じ希土類元素で置き換えたものも同様に超伝導特性を示すことが知られている。RE系超伝導体は、比較的イオン半径の大きなGd、Sm、Dyなどに置換するとより高い T_c が得られることが知られており、特に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO)超伝導体はYBCOと比較すると、高磁界下で J_c が向上することがわかっている。また、RE系超伝導線材の作製の際は、配向基板上に超伝導膜をエピタキシャル成長させる手法が用いられている。一般には、Hastelloyなどの機械的、科学的に強度が高いNi合金の基板上に配向させた中間層を積層し、その上に超伝導層を製膜して保護膜を載せる。このような層状の構造を持つことから、コート線材と呼ばれている。YBCOを用いた超伝導体のコート線材も超伝導層の結晶を ab 面内で揃えなければならず、機械的な手法では難しい。現在では超伝導体の作製方法の研究も進んでおり、より精度の高い(配向が揃っている)コート線材の作製が可能となっている。しかし、作製コストがかかりすぎることや、銅酸化物超伝導体の特徴である大きな異方性を改善することが課題である。

1.2.3 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超伝導体

RE系超伝導体のREを決定する際、REのイオン半径が超伝導体の T_c と焼結温度に大きく影響してくる。イオン半径が大きくなるにつれて高い T_c が得られることが知られている。しかしながら、イオン半径の増加とともに、焼結温度も高くなるため、イオン半径が大きいものは焼結温度も高く、焼結の際に不純物を含んでしまうことがある。ガドリニウムGdは比較的イオン半径が大きく、高い T_c が得られる。焼結温度も比較的が高いが、Gdの焼結温度では不純物は生成されにくい。そのためGdBCOはRE系超伝導体の中でも高い T_c を持ち組成制御が容易であり、Yに比べると資源が豊富であることから、注目されている超伝導体である。

1.3 REBCO 超伝導体の作製手法

1.3.1 CVD 法

CVD 法(Chemical Vapor Deposition)は平衡蒸発物質をガス源に用い、基板上に原料ガスを供給し、基板表面あるいは気相での化学反応により、膜を形成する方法である。原料供給量に制限がないため、高速製膜や量産化が可能である。また、高真空が不要であるため、実験装置が廉価であり、装置の大型化が容易である。[1]

1.3.2 PLD 法

PLD 法(Pulsed Laser Deposition)は、真空チャンバー内に設置した原料ターゲットにレーザー光を照射することで、ターゲットから原子(分子)を引き剥がし、ターゲットに対向する基板に膜を形成する方法である。PLD 法で作製された線材は不純物による汚染が少なく、結晶配向性も高いため、臨界電流が大きくなる。しかし、作製には時間がかかり、大規模な装置が必要となる。

1.3.3 IBAD 法

IBAD 法(Ion Beam Assisted Deposition)は、イオンビームを基材に照射しながら、薄膜を成長させる方法である。イオンビームを特定方位から照射することにより、薄膜を構成する結晶粒の結晶軸が揃った配向中間層を多結晶テープ基材上に成長させることができる。[2]

1.3.4 TFA-MOD 法

トリフルオロ酢酸(TFA)塩を前駆体として、水蒸気雰囲気中で熱処理することにより超伝導層膜を製膜する手法である。高い臨界電流を有する膜を製膜でき、高真空装置が不要であることから、製造装置の低コスト化が可能な製造手法として注目されている。

1.4 縦磁界効果

一般的には超伝導体に電流が流れているとき、磁界の向きは、自己磁界を含め流れる電流に対して垂直である。しかし、外部磁界を印加し、超伝導体に流れる電流に対し、平行に磁界がかかるようにした状態を、縦磁界状態という。それに対して、縦磁界状態ではない状態を非縦磁界状態という。縦磁界状態と非縦磁界状態では、超伝導体に電流を流した際、全く異なる現象が観測されるということが知られている。一つ目は、縦磁界状態と非縦磁界状態では、同じ超伝導体を用いても異なる臨界電流密度が得られるということである。縦磁界状態では、非縦磁界状態に比べて高い臨界電流密度を示し、特に磁界の増加とともに臨界電流密度が増加する特徴もある。[3]

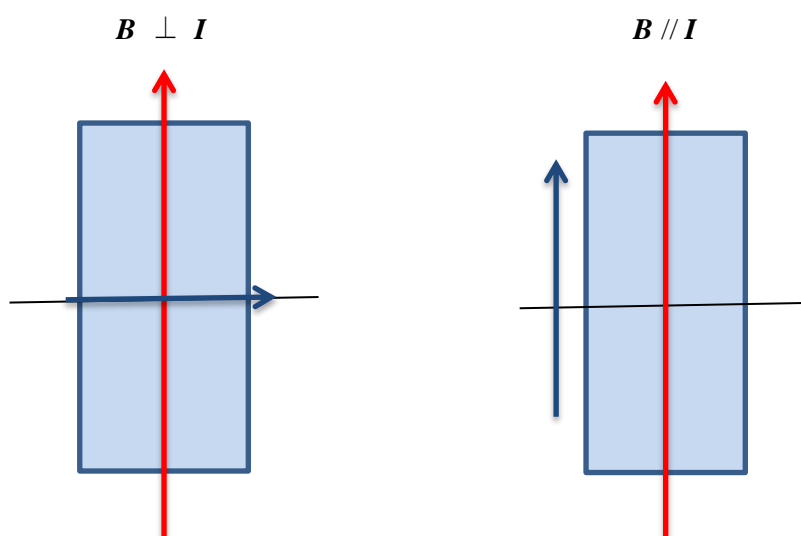


図 1.1 非縦磁界状態と縦磁界状態の図

1.5 超伝導ケーブル

超伝導線材を用いた直流超伝導電力輸送ケーブルが検討されている。この直流超伝導電力ケーブルは、超伝導体の抵抗 0 という性質を利用しているので送電時の損失が少なく、効率よく送電することができる。特に、酸化物超伝導体を用いることで、ケーブル冷媒として、液体窒素を利用できることから、開発が期待されている。

しかしながら、このような大容量のケーブル利用においては、落雷などの事故により故障電流が発生した際、その故障電流によるケーブル焼損や、末端の電力系統の流入を防ぐ必要がある。この保護装置として限流器があり、ケーブル自体に付加する場合と適所に敷設する場合があります。したがって、ケーブル開発においては、この源流器の開発も重要になってくる。

1.6 限流器

限流器 (Fault Current Limiter : FCL) は、電力系統に直列に挿入され、故障が発生したときに流れる故障電流を抑制するための機構である。平常時は低抵抗状態、故障電流の通電時のみ高抵抗状態となる。平常時は低抵抗状態であるため、電力機器に電流が流れるが、故障電流の発生時に高抵抗状態になることにより、電力機器に故障電流が流れないようにすることができる。限流器は、短時間での故障電流の検出・限流動作を行うことが求められる。故障電流の検出・限流動作に時間がかかると、限流する前に、被保護器に故障電流が流れてしまうからである。また、限流動作を開始する際の電流値が正確でなければ、通常の電流を流すだけでも限流動作がおこなわれてしまい、電力機器に電流が流れなくなってしまう。さらには限流動作時の電気抵抗値が正確でなく、低すぎる場合には、故障電流が被保護器に流れてしまうため、限流動作時の抵抗の値も正確なものが要求される。さらには、故障電流に発生後に平常時への復帰時間が短いこと、限流動作時・復帰時に異常電圧を発生させないこと、連続して動作することも要求される。

1.6.1 超伝導限流器

超伝導体を用いて作製された限流器を、超伝導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter) という。超伝導限流器では、平常時の運転電流を電気抵抗 0 (超伝導状態) で流せるため、電力損失が小さい。また、臨界電流を上回る電流により電気抵抗が生じる (常伝導状態) という超伝導体そのものの特性を利用するため、故障を検出するための外部装置が不要である。さらに、故障除去後は自動で平常状態に復帰すること、繰り返し使用することが可能であることも特徴の一つである。

1.6.2 抵抗型超伝導限流器

超伝導体は超伝導状態において、電気抵抗が 0 である。しかし、超伝導状態で臨界電流を超えた電流が流れると、相転移を起こし常伝導状態となる。常伝導状態では大きな電気抵抗を示すことを利用し限流動作を行う限流器を特に、抵抗型超伝導限流器という。

図 1.3 に平常時の限流器の動作について示す。電力系統に流れる電流が臨界電流よりも小さい場合 ($I \leq I_c$) を平常時とする。平常時、超伝導体は超伝導状態であるため電気抵抗が 0 である。なので、図 1.3 に示すように電流は超伝導体を通り、電力機器へと電流を流す。平常時に対し、電力系統に流れる電流が臨界電流よりも大きい場合 ($I > I_c$)、つまり故障電流が流れたときを故障時とする。図 1.4 に示すように、故障時は超伝導体の臨界電流を超えてしまい常伝導状態へと相転移を起こすので、超伝導体の抵抗が大きくなり、バイパスの方を電流が流れる。そのため、電力機器に故障電流が流れることを防ぐことができる。



図 1.3 平常時 ($I \leq I_c$) のときの動作

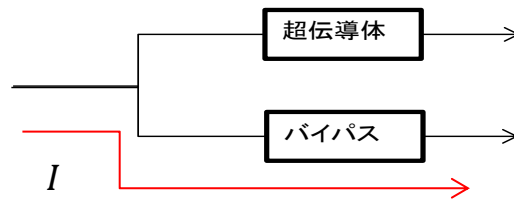


図 1.4 限流時 ($I > I_c$) のときの動作

1.7 源流器付き縦磁界直流超伝導ケーブル

1.7.1 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブル

超伝導電力ケーブルの輸送電流容量は、それを構成する超伝導線材の臨界電流によって決まる。そのため、臨界電流の高い超伝導線材を用いれば、より大きな電流を輸送することができる。また 1.4 より、電流通電方向に平行に磁界を加える縦磁界下では利用環境を変化させるだけで臨界電流が増加する。この縦磁界効果を用いた、直流超伝導電力ケーブルが提案されている[4]。

この縦磁界ケーブルは、巻き方を工夫することにより、線材が作る自己磁界が線材の長手方向に平行に加わるようになっており、縦磁界の高い臨界電流を利用することが出来る。図 1.2 に縦磁界効果を用いた超伝導電力ケーブルの図を示す。外側のシールド層を流れる電流が作り出す自己磁界を内側のインナー層に印加することによって、インナー層の超伝導線材に縦磁界を与えるという構造になっている。インナー層は、シールド層から与えられる縦磁界により、臨界電流が増加するため、通常の直流超伝導ケーブルよりも輸送電流容量が大きくなる。

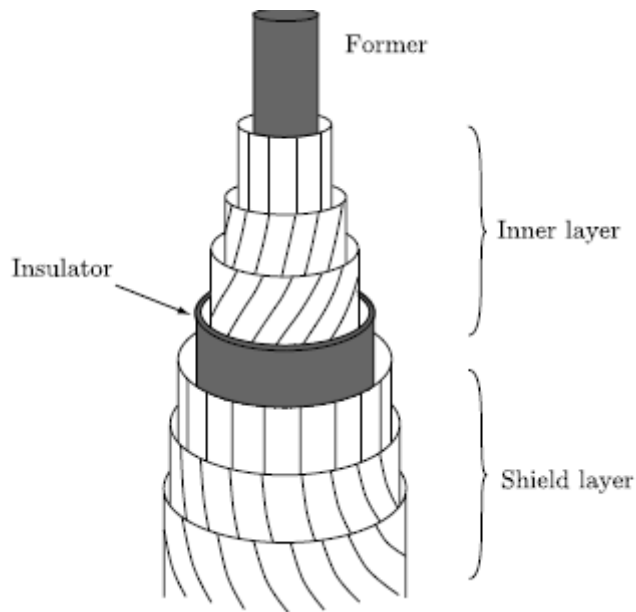


図 1.2 : 縦磁界効果を用いた超伝導電力ケーブル[4]

1.7.2 限流器付き縦磁界直流電力ケーブル

上記では、縦磁界効果を用いた高電力縦磁界直流ケーブルについて述べた。もし、この縦磁界環境下が崩れると、高い臨界電流は減少する。したがって、この臨界電流の減少に注目し、ケーブル付加型の限流器の利用が提案されている[5]。

図 1.5 に限流器を付加した縦磁界ケーブルを示す。縦磁界ケーブルとの違いは、インナー層とシールド層に銅層を付加している点である。ただし、この銅層の巻き方向は超伝導層と反対である。すなわち、臨界電流を超える電流が流れた際に、銅層に分流して作る自己磁界は縦磁界を弱める方向になる。

具体的には、平常時は電流に平行に磁界が加わり、縦磁界下の高い臨界電流で運転する。この状態で故障電流が発生すると、運転電流よりも大きな電流が流れることになるので、その電流が生み出す自己磁界も大きくなる。この自己磁界の増加により、合成磁界の向きに変化が生じ、縦磁界状態から非縦磁界状態へと変化し、臨界電流の値が急に下がることになる。これにより、大きな電界が生じるので、電流は銅層に分流する。この分流した電流は超伝導層と逆向きにまかれているので、縦磁界を弱めるように自己磁

界が発生し、その効果が繰り返し起こることになるので、結果的にケーブルの臨界電流が大きく減少することになり、ケーブル保護となる。このように、ケーブル自体に限流効果を付加できるので、適所に限流器を配置する必要がなく、高効率の電力輸送システムが実現できる。

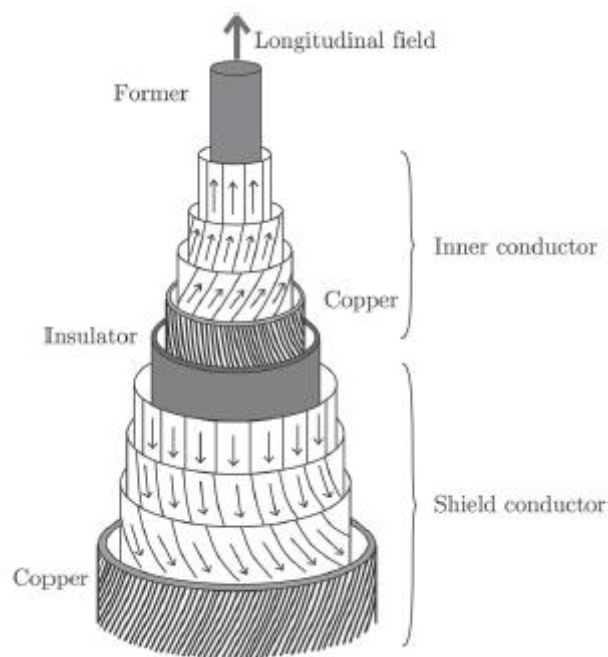


図 1.5 : 限流器付き縦磁界直流超伝導電力ケーブル[5]

1.8 目的

1.7 で述べたように、縦磁界効果を用いた高性能な電力ケーブルで、縦磁界が壊れると、急激に臨界電流が減少し、限流器として利用することが出来る。但し、臨界電流を超える電流を図 1.5 に示す銅層へ効率よく流す必要があり、超伝導線材に生じる抵抗とバイパスの抵抗をうまく設定する必要がある。

したがって、本研究では縦磁界の環境が壊れた場合にバイパスにどのように電流が分流するのかを調べるために、抵抗値の異なるバイパスを設置し、縦磁界状態と、非縦磁界状態でのそれぞれの限流動作を調べた。

第 2 章 実験方法

ここでは、超伝導線材に縦磁界を加え、その縦磁界状態から非縦磁界状態に変化したときの銅バイパスへの分流特性を、直流四端子法を用いて評価した。

2.1 用いた超伝導線材

本研究で用いた試料は、SuperPower 社製の CVD 法 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (GdBCO) コート線材である。試料の特性を表 2.1 に、構造を図 2.1 に示す。

試料は、銅安定化層(20 μm)の上に銀保護層(2.0 μm)を重ね、その上に基盤(50 μm)を置き、5 つの素材(0.2 μm)を中間層として形成し、その上に超伝導層(1.0 μm)を作り、保護膜として銀保護層(2.0 μm)を製膜し、最後に銅安定化層(20 μm)で覆っている。超伝導体は保護層で覆われているため、臨界電流を超える電流が流れた時には、保護層へと分流する。

表 2.1: 試料の特性

T_c [K]	I_c [A]	厚さ[μm]	幅[mm]
89	54	1.0	2.0

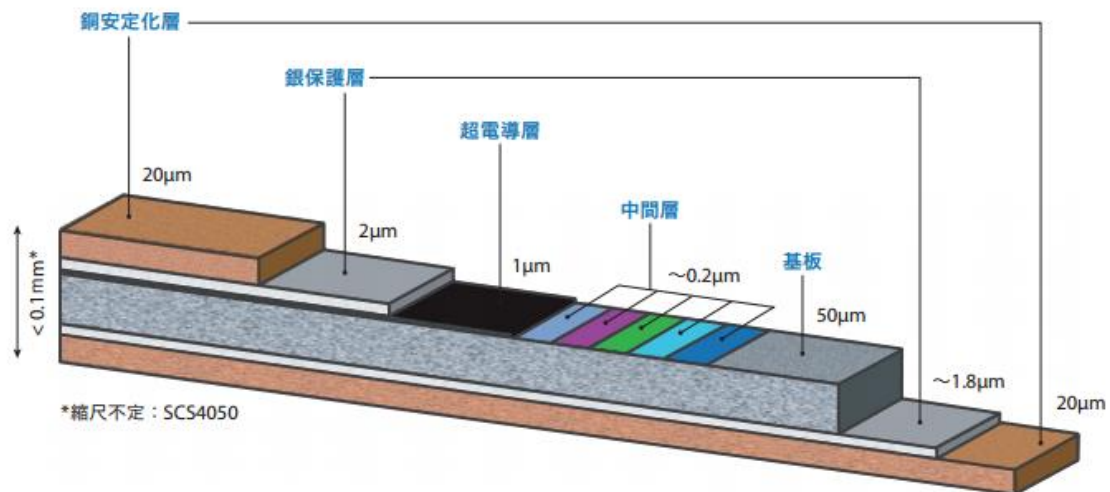


図 2.1 本研究に使用した GdBCO コート線材[6]

2.2 実験

2.2.1 直流四端子法

試料の $V-I$ 特性の評価法の一つに、試料に直接電流を流す通電法がある。この通電法を四端子法という。一般的には抵抗値が非常に小さいときに接触抵抗などの影響が小さい四端子法が用いられる。四端子法の回路を図 2.2 に示す。 R_0 、 R_1 は回路の接触抵抗、 R_m は測定試料の抵抗、 R_v は電圧計の内部抵抗を表す。図 2.2 において R_0 、 R_1 は R_v に比べて十分小さいため無視して考えることができる。このとき全電流は $I = I_1 + I_2$ となり、この回路において $R_m \ll R_0$ のとき $I_2 \cong 0$ と見なすことができるので、 $V \cong R_m I_1$ となり正確に試料抵抗を測定することができる。今回測定した試料の抵抗値は電圧計の内部抵抗に比べ十分小さいと考えられるため、直流四端子法を用いた。

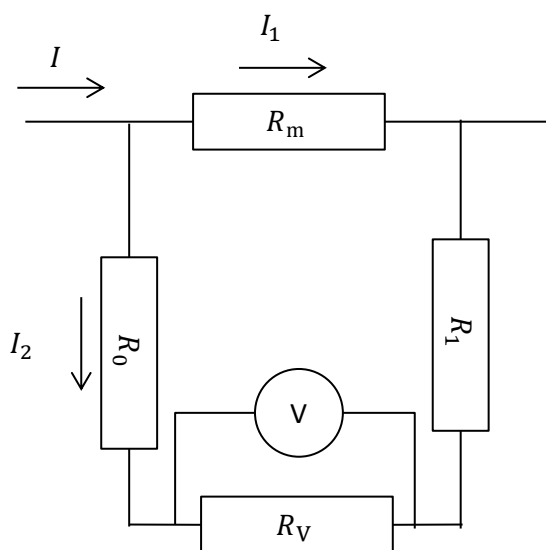


図 2.2 直流四端子法の測定回路

2.2.2 測定回路

本研究では、四端子法を用いて試料に直流電流を通電し、試料の $V-I$ 特性の測定を行った。用いた線材の全長は ?? mm、幅は 2.0 mm で、電流と電圧端子を、はんだを用いて接続した。電圧端子間距離は 9.59 mm である。電流リードと線材間の接触抵抗により発生するジュール熱とノイズの影響を抑えるために、電流はパルス的に通電し、通電中の電圧 V_1 と通電後の電圧 V_2 の差分を測定電圧 V とした。 $V-I$ 特性の測定結果から、電圧端子間距離及び断面積を用いて $E-J$ 特性を導出した。このとき、電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m の時の電流密度 J を臨界電流密度 J_c とした。

また、線材に縦磁界を加えるために、液体窒素で駆動する Bi-2223 超伝導コイルを用いた。磁界の強さを 0 T—0.5 T まで変化させ、それぞれの $E-J$ 特性を求め、その結果から J_c-B 特性を導出した。測定は全て増磁過程により行った。試料空間及びコイル空間の冷却には液体窒素を用いた。

2.2.3 電流バイパスを用いた限流器特性の測定回路

縦磁界限流器の限流動作を調査するために、線材に並列に電流バイパス (Cu) を接続した回路を作製した。測定に用いた回路の概要図を図 2.3 に示す。縦磁界状態から非縦磁界状態へ変化した場合のバイパス抵抗の影響を調べるために、直径 0.8 mm の銅線を電流バイパスとして 2 つ用意し、電流バイパスなし、電流バイパスを 1 つ取り付けた試料、電流バイパスを 2 つ取り付けた試料で $V-I$ 特性を測定し、それぞれの限流動作を調べた。

ここでは、縦磁界状態 ($B \parallel I$) の場合において、試料の両端電圧 V_{super} 、電流バイパスの両端電圧 V_{bypass} を測定し、超伝導体側を流れる電流 I_{super} 、電流バイパスを流れる電流 I_{bypass} を導出することで、故障電流を通電した際の限流動作を観測した。電圧端子間距離は 9.59 mm とした。

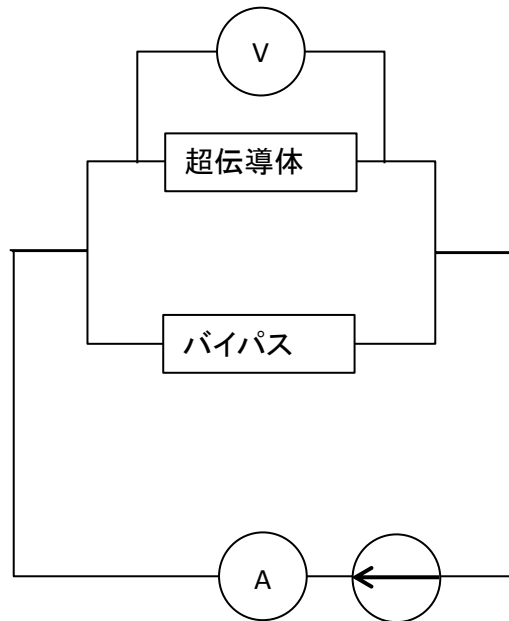


図 2.3 限流器回路の概念図

2.2.4 超伝導線材のみの特性の評価

今回使用したコート線材は、超伝導層の保護層として、銀及び銅層がついている。特に臨界電流を定義する電界領域では、電流は支配的に超伝導層に流れていることが予想できるが、電界の増加とともに徐々に、超伝導から保護層へ分流していくことが予想できる。したがって、広い領域での電流-電圧特性は、超伝導層に流れている電流値と保護層に流れている電流値の和になっていると考えられる。

ここでは、超伝導層みの特性から、バイパスにどのように分流するかを正確に理解するために、解析的に超伝導層のみの電流-電圧特性を評価した。具体的には、超伝導線材の電流-電圧特性をはじめ測定し、線材を折り曲げることによって超伝導層を壊し、保護層のみの $V-I$ 特性を測定した。これらの結果から、解析的に超伝導層のみの $V-I$ 特性を求めた。

3 章 実験結果及び考察

3.1 線材の基礎特性

ここでは、限流器の材料となる GdBCO コート線材を限流器に必要な基礎特性である $V-I$ 特性と J_c-B 特性を、直流四端子法を用いて測定を行い、評価した。

3.1.1 線材の $V-I$ 特性

図 3.1 に縦磁界下において、外部磁界 0—0.5 T まで変化させたときの線材の $V-I$ 特性を示す。

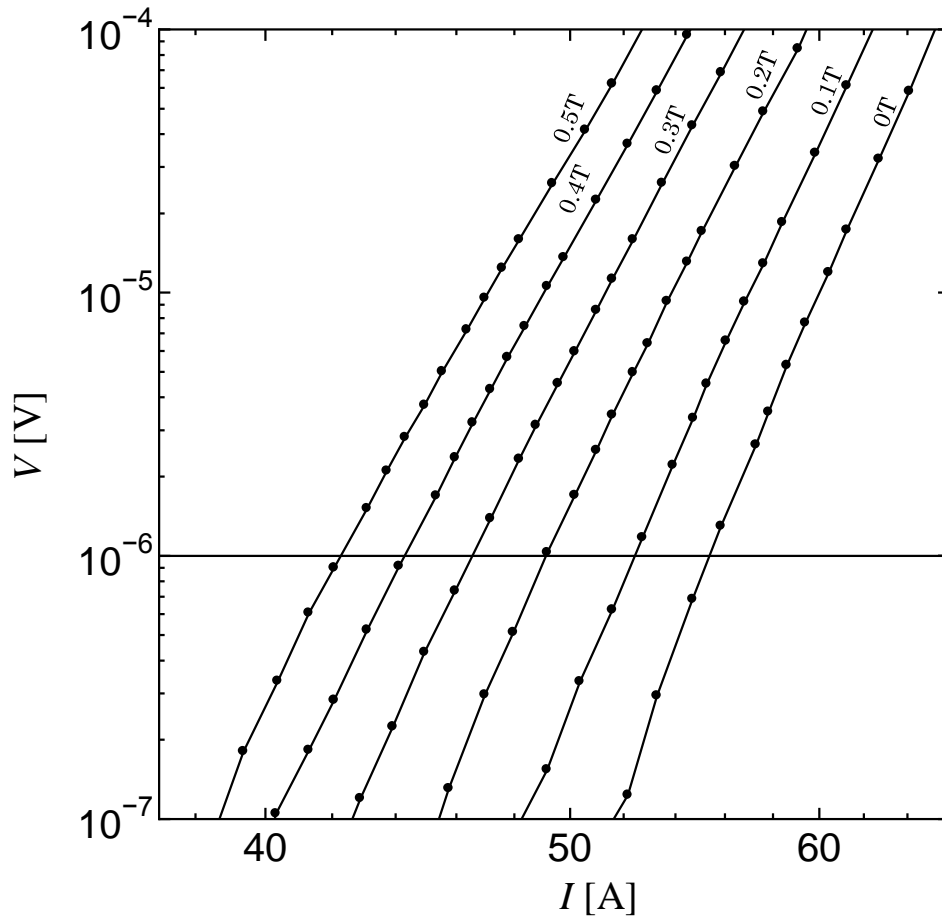


図 3.1 線材の $V-I$ 特性の測定結果

3.2 実験に用いた線材の超伝導層のみの基礎特性

今回使用したコート線材は、超伝導層の保護層として、銀及び銅層がついている。特に臨界電流を定義する電界領域では、電流は支配的に超伝導層に流れていることが予想できるが、電界の増加とともに徐々に、超伝導から保護層へ分流していく。したがって、縦磁界の変化による分流効果を調べるために、超伝導体のみでの $V-I$ 特性を解析的に求めた。

3.2.1 保護層の $V-I$ 特性

図 3.2 に縦磁界下において、外部磁界 0—0.5 T まで変化させたときの保護層のみの $V-I$ 特性を示す。図 3.2 より、保護層のみの $V-I$ 特性は印加する磁界の強さによる変化は見られないということが分かる。

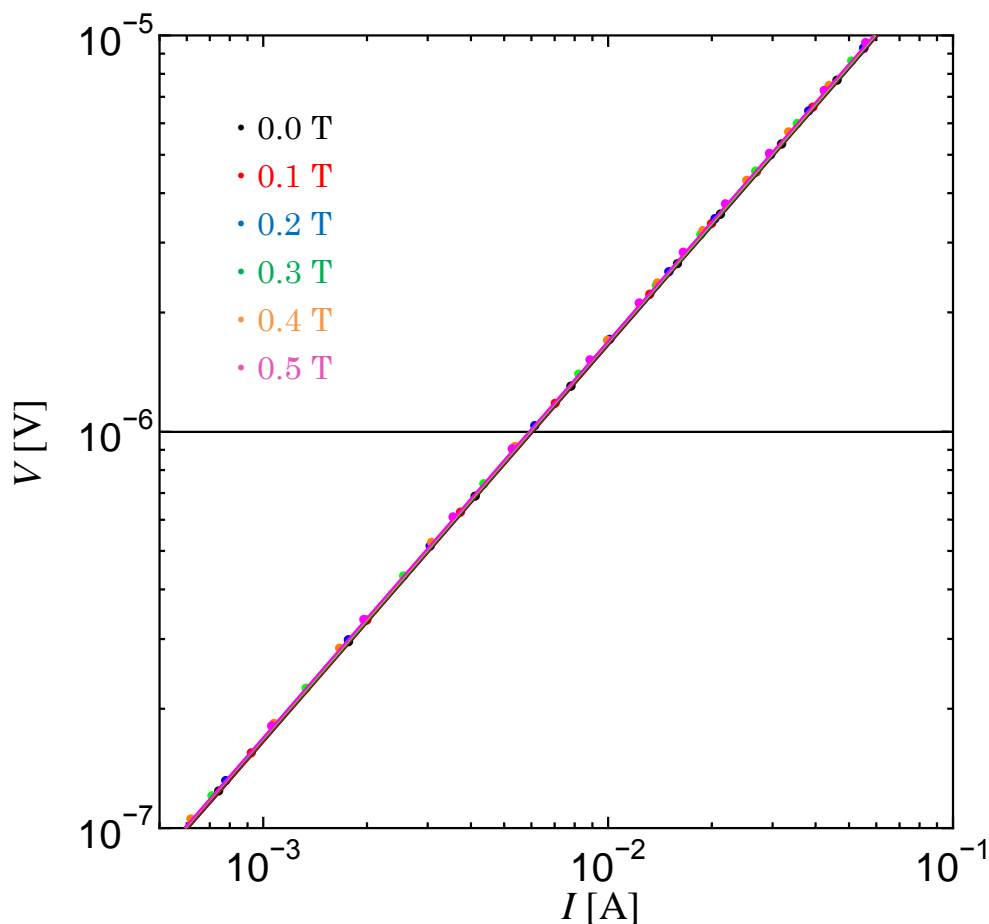


図 3.2 保護層の $V-I$ 特性

3.2.2 超伝導層の $V-I$ 特性

図 3.3 に、3.1.1 及び 3.2.1 より求めた、縦磁界下において、外部磁界 0—0.5 T まで変化させたときの超伝導層のみの $V-I$ 特性を示す。

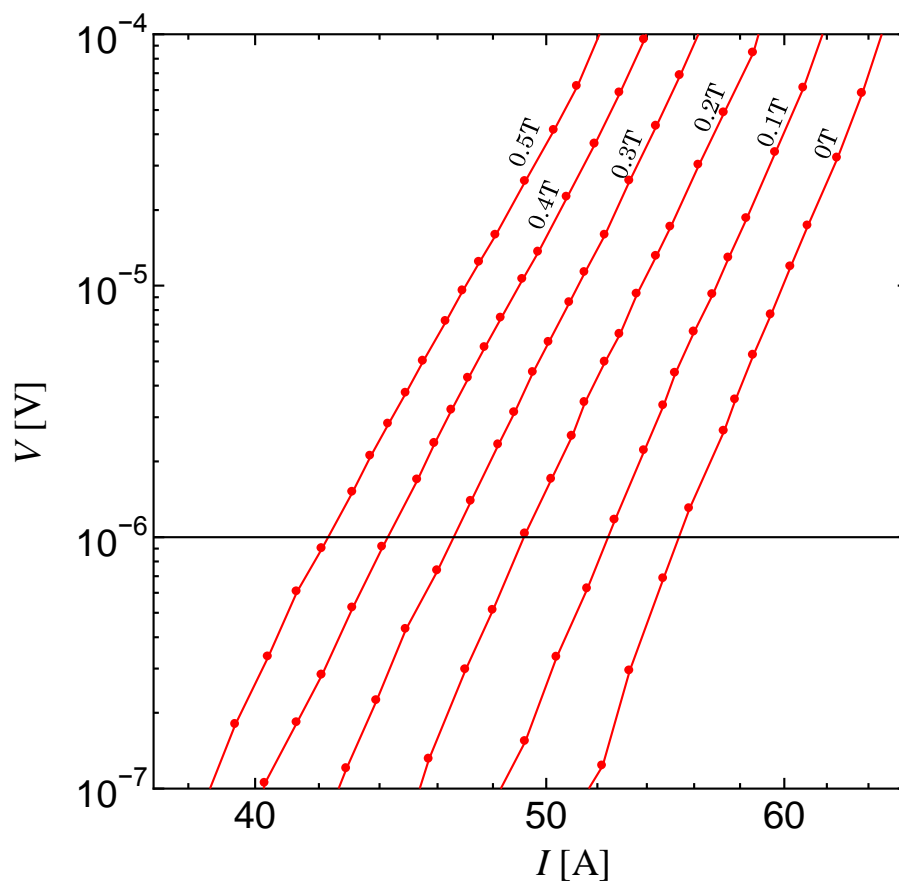


図 3.3 超伝導層の $V-I$ 特性

3.2.3 超伝導層のみと超伝導線材の $V-I$ 特性の比較

図 3.4 に、3.1.1 及び 3.2.2 より求めた、超伝導層と超伝導線材の $V-I$ 特性を示す。図 3.4 より、 $V = 1.0 \times 10^{-5}$ V 付近から、線材と超伝導層のみとで、違いが出てきていることが分かる。これより、超伝導線材に臨界電流を超える電流が流れ、電圧 $V = 1.0 \times 10^{-5}$ V 以上の電圧が発生した際、保護層へと分流し始めると考えられる。また、 $V = 1.0 \times 10^{-5}$ V までは、変化していないことも分かるため、そこまでの電流分流特性に注目する場合には、保護層の存在は無視してよいと考えられる。

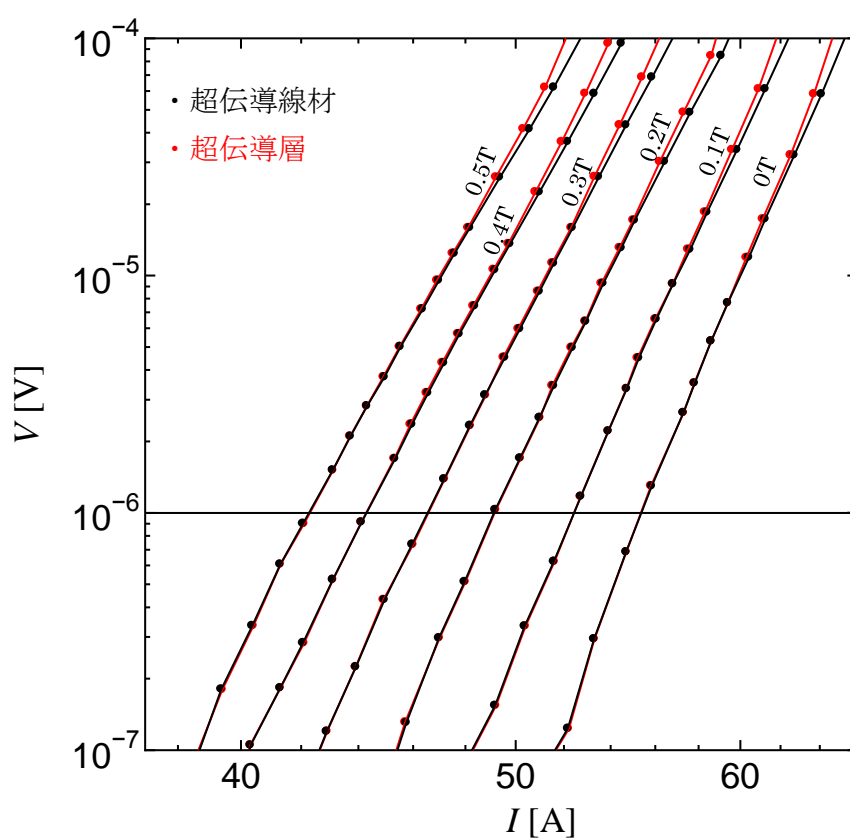


図 3.4 線材と超伝導層の $V-I$ 特性

3.3 臨界電流密度の外部磁界依存性

縦磁界下 ($B // I$) と横磁界下 ($B \perp I$) のそれぞれの場合において、外部磁界を 0—0.5 T まで変化させた際の線材の $J_c - B$ 特性を図 3.5 に示す。解析に求めた $E - J$ 特性において、電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m では、保護層の影響はないことが確認できたので、この基準を用いてこの線材の臨界電流密度 J_c の磁界依存性 ($J_c - B$ 特性) を求めた。

図 3.5 より縦磁界が増加するにつれて、臨界電流密度が減少していることがわかる。縦磁界下と横磁界下での比較を行う。印加する磁界を大きくしていくと、縦磁界下では横磁界下に比べて、臨界電流が高いことが分かる。例えば、0.2 T に注目すると、縦磁界下では $J_c = 3.7 \times 10^{10}$ A/m² であるが、横磁界では $J_c = 2.8 \times 10^{10}$ A/m² であり、この電流減少が得られる。この減少率は線材単体では小さいが、ケーブルの多層化により、縦磁界がさらに強調されるので、その限流効果を大きくなることを期待できる。

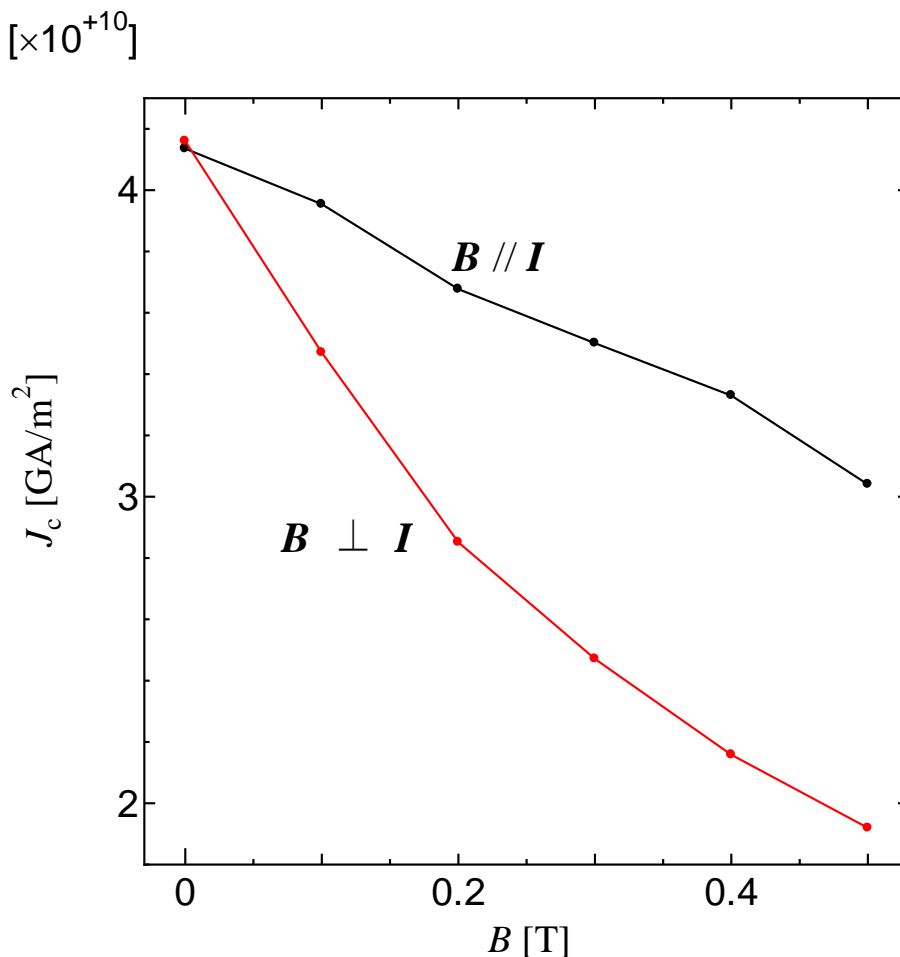


図 3.5 縦磁界下と横磁界下における $J_c - B$ 特性の測定結果

3.4 試料の超伝導体に電流バイパスを取り付けた時の基礎特性

3.4.1 電流バイパス付き試料の $V-I$ 特性

電流バイパスなしと、電流バイパスを1つ取り付けた試料、電流バイパスを2つ取り付けた試料のそれぞれの測定結果の $V-I$ 特性のグラフを図3.6に示す。縦磁界が0.1 Tの時の $V-I$ 特性に注目すると、バイパスがない $V-I$ 特性と比較して、バイパスが1つでは高電界領域で傾きが緩やかで、さらにバイパスを2つ取り付けた場合は、電流量が大きく増加し、さらにその傾きも緩やかになっていることがわかる。したがって、電流の分流は、バイパスの抵抗値のみでなく、縦磁界下での超伝導体の $I-V$ 特性を考慮する必要がある。

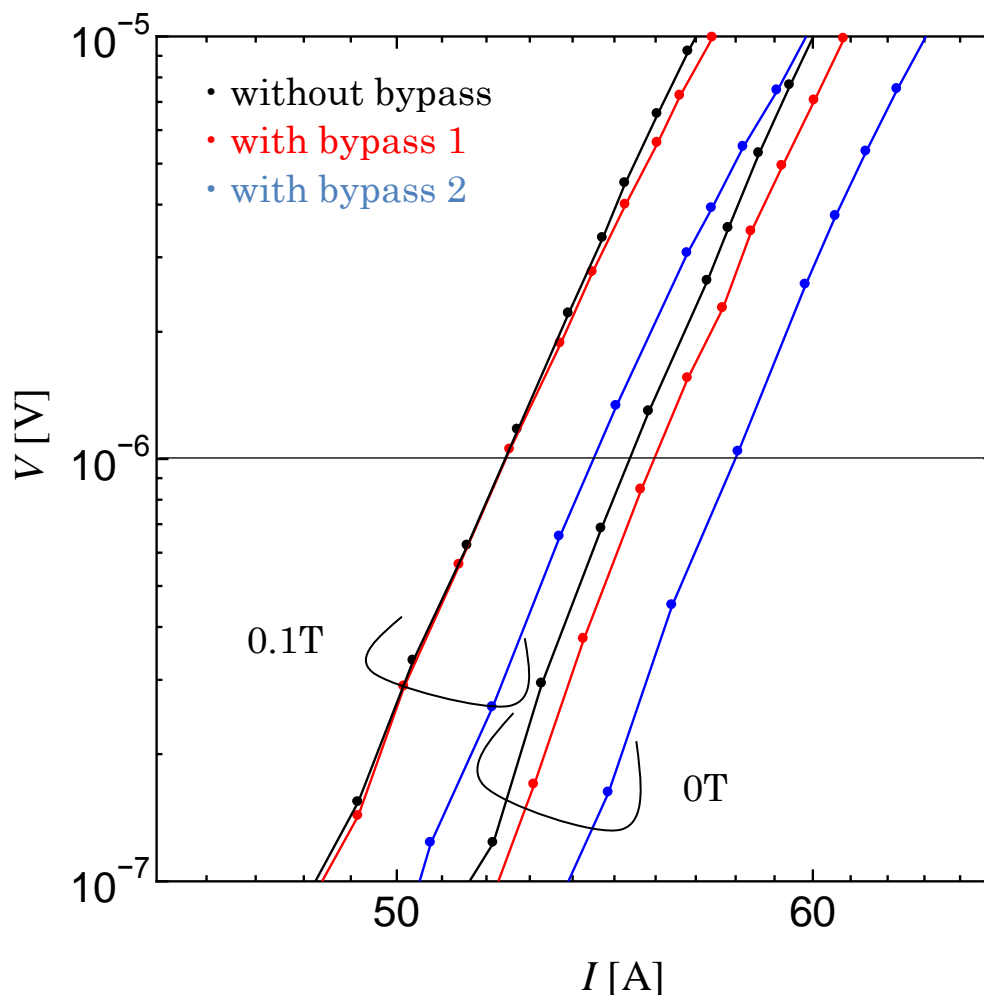


図 3.6 バイパス無し、バイパス1つ、バイパス2つの $V-I$ 特性

さらに、分流電流量が多い2本のバイパスを取り付けた場合に注目する。図3.7にバイパスなしと2本取り付けた場合の $V-I$ 特性を示す。一本銅バイパスを取り付けた場合に比べると、電流分流量が大きくなっているが、磁界増加に伴って、単純な比例関係になっていないことが分かる。そこで、臨界電流密度の電界基準と等価な $V = 1.0 \times 10^{-6}$ Vにおけるバイパスを取り付けた場合の電流分流量の磁界依存性を調べた。図3.8に1本と2本の分流量 ΔI の磁界依存性が示す。この結果から抵抗値が1/2になると電流量が2倍になっているわけではないことがわかる。これは、縦磁界下での電流-電圧特性の非線形によるものと考えられる。したがって、 I_c 近傍で丁度電流が分流するバイパス抵抗値を設定するばかりでなく、この電流-電圧特性も考慮しなければならない。ただし、この特性は銅バイパスと超伝導線材の接続抵抗の影響も受けるために、この点も考慮して、バイパス設計を行う必要がある。

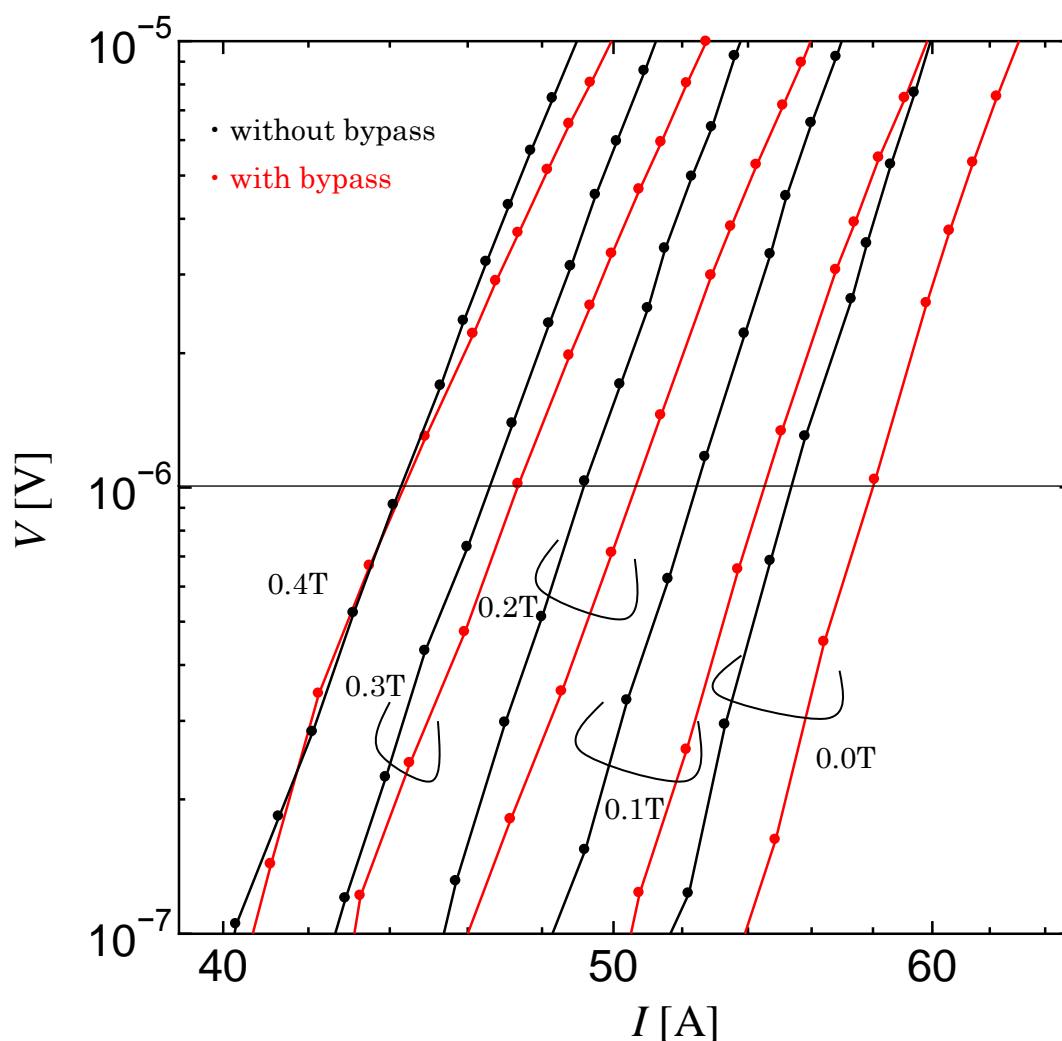


図 3.7: 電流バイパスを取り付けた試料の $V-I$ 特性

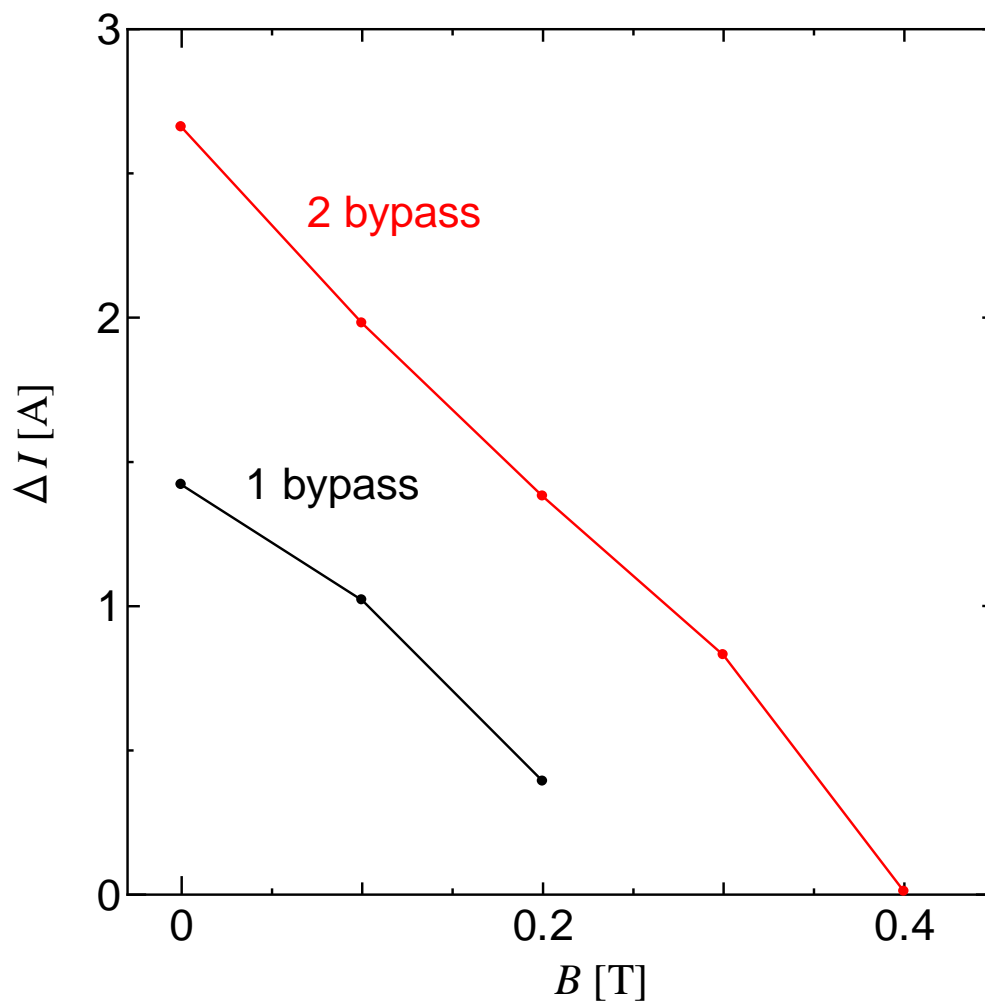


図 3.8: バイパス 1 本と 2 本の $\Delta I - B$ 特性

第4章 まとめ

本研究では、縦磁界の環境が壊れた場合にバイパスにどのように電流が分流するのかを調べるために、電流バイパスなしと、電流バイパスを1つ取り付けた試料、電流バイパスを2つ取り付けた試料を用意した。

本研究の実験結果から、縦磁界下の磁界を変化させることにより、銅バイパスへの電流分量が変化することが確認でき、さらにバイパス抵抗値を変化させても分量が大きく変化することがわかった。ただし、銅層への電流分量はバイパスの抵抗値のみで決定されるのではなく、縦磁界下での非線形性の電流—電圧特性の影響を大きく受けるので、この点を考慮したバイパス設計が必要である。さらに、超伝導線材と銅バイパスの接続抵抗も電流分量に大きく依存するので、この点をきちんと考慮した調査が必要である。

謝辞

最初に、九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系エレクトロニクス分野 木内勝准教授に深く感謝致します。私の研究、学生生活だけでなく、社会に出てからのことなど数多くのことについて、多くの助言やサポートをしていただきました。深く感謝を申し上げます。

また、私の指導教官である九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系エレクトロニクス分野 小田部荘司教授にもお礼を申し上げます。研究についてなど、多くの助言をいただきました。

その他にも、小田部研究室・木内研究室にて九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻の大隈翔悟 氏、増田嘉道 氏、木戸竜馬 氏、平松祐太 氏と九州工業大学電子情報工学科4年の行本孝 氏、伊原大輔 氏、田邊裕也 氏、久野 昌隆 氏、原田蔭敬 氏、上田元揮 氏、高橋 亮太 氏、大瀧敦士 氏に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 青木 伸哉、山口 太一、河野 宰、小特集/酸化物超伝導体薄膜の作製法
42(1991)473
- [2] フジクラ技報 No.107(2004)68-69
- [3] A. Tsuruta et al.: Appl. Phys. **53**, 078003
- [4] T, Matsushita, Superconductor Science and Technology 25 (2012) 125009
- [5] T, Matsushita, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 25 (2015)
5401704
- [6] 古河産業株式会社諸元より