



修士論文

YBCO薄膜を用いた  
超電導限流器の基本特性と設計  
に関する基礎的考察

平成19年2月2日提出

指導教員 仁田 旦三 教授

東京大学大学院 工学系研究科  
電気工学専攻

学生番号 56411

氏名 守末 奨

# 内容梗概

## 研究の目的

電力需要の増加に応えるため、さらには、電力自由化による新規発電事業者の参入などにより、電力系統は今後ますます大規模・複雑化すると考えられ、短絡故障、地絡故障による事故電流が増大する傾向にある。電力系統の短絡電流は、遮断器の遮断容量以下である必要がある。これまでも、遮断器の遮断容量の向上や電流耐量の大きい機器へのリプレース、あるいは変電所での母線分離などの系統構成の工夫によって事故電流が既設遮断器の定格遮断容量を越えないように対処を行っているが、これらは設備コストの増大を招き、また、電力系統の設計と運用に大きな制約を強いている。こうした中で、故障時の電流を速やかに抑制する機器である限流器が注目されている。限流器は、故障電流などの大電流が流れた時のみ動作し、インピーダンスを発生する機器であるため、短絡電流の抑制と系統安定度の向上という電力系統からの相反する要求を満たすことができる。

限流器の系統への導入は強く望まれており、様々な方式の限流器が開発されてきているが、未だに実用化には至っていない。限流器を系統へ導入する際には様々な要求仕様がある。これら全てを満たす限流器を実現するためには限流素子の詳細な検討が必要である。

本研究では高温超電導体である YBCO 薄膜を用いた抵抗型限流器を考える。動作電流値、復帰時間、インピーダンスについて実験により明らかにし、それらを元に設計方針、設計時に必要とされる基礎特性を考察する。また、金属保護膜の特性への影響についても考察する。

## 本研究の成果

抵抗型限流器の設計上問題となる、復帰時間、動作電流値の精度、インピーダンスに関する考察を行った。

- 復帰時間は動作時に発生する熱量によって決まってくる。
- 同一素子では実験条件による動作電流値の誤差は数%と小さく、大きな影響を受けず素子の特性で決まる。このため並列抵抗を自由に変えることが可能となる。
- 発生するインピーダンスは事故電流によって変化する。

という知見が得られた。

また、表面全体に金属保護膜のある薄膜と部分的に金属保護膜のある薄膜について、その特性の比較を行った。部分的に金属保護膜のある発生するインピーダンスが大きく、インピーダンスの発生速度も大きい、動作時に発生する熱量が抑えられることで復帰時間が短いことから限流素子として優れているということが示された。金属保護膜の影響の大きい要素としてはインピーダンス、復帰時間であり、動作電流値については大きな差は出ないと考えられる。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	高温超電導体を用いた超電導限流器	3
2.1	限流器	3
2.2	超電導と超電導材料	5
2.2.1	超電導	5
2.2.2	第一種超電導体と第二種超電導体	5
2.2.3	超電導材料	6
2.3	超電導限流器	7
2.3.1	S/N 転移型	7
2.3.2	変圧器型	8
2.3.3	整流器型	9
2.4	超電導限流器実現に向けた問題点	9
2.5	インパルス電流に動作しない限流器の実現の可能性	11
2.6	理論的考察	12
2.7	まとめ	14
第3章	YBCO 薄膜の基礎特性	15
3.1	実験に使用した YBCO 薄膜	15
3.2	実験装置	16
3.2.1	冷却方法	16
3.2.2	測定装置	17
3.3	実験項目とその目的	18
3.4	実験方法	19
3.4.1	抵抗測定	19
3.4.2	動作電流値の周波数特性	19
3.4.3	限流動作後の復帰時間	20
3.5	動作電流値の定義	23
3.6	通常電流の選定	23
3.7	実験結果	25
3.7.1	薄膜 A(保護膜なし)	25
3.7.2	薄膜 B(全体に保護膜)	31
3.7.3	抵抗測定	31

3.7.4	薄膜 C(部分的に保護膜)	34
3.8	保護膜の違いによる比較	37
3.8.1	動作電流値	37
3.8.2	復帰時間	37
3.8.3	インピーダンス	38
3.9	まとめ	40
<b>第 4 章</b>	<b>YBCO 薄膜の諸特性および抵抗型限流器設計に関する考察</b>	<b>41</b>
4.1	復帰時間と熱の関係	41
4.2	限流インピーダンスについて	43
4.3	限流動作に関する考察	45
4.3.1	動作電流値	45
4.4	抵抗型超電導限流器設計に関する考察	47
4.4.1	YBCO 薄膜の諸特性	47
4.4.2	6kV 配電系統	47
4.4.3	抵抗型電導限流器の設計に関する考察	48
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>52</b>
5.1	本論文の成果	52
5.2	今後の課題	53
付 録 A	超電導体の n 値	57
付 録 B	電磁スイッチ制御装置	58

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

我が国の電力需要の伸びは鈍化傾向が見られるものの、最大電力・発電電力量ともに増加の傾向を示している [1]。今後は電力化の進展とともに首都圏を中心に着実に増加し続けるものと予想される<sup>1</sup>。また、電力に対する信頼度の向上など高品質化への要求が高まっており、電力会社では電力を安定的かつ効率的に送電するために、発電設備の新設や系統の連系などによって電力系統の増強、拡大を行なってきた。電力需要の増加に応えるため、さらには、電力自由化による新規発電事業者の参入などにより、電力系統は今後ますます大規模・複雑化すると考えられ、短絡故障、地絡故障による事故電流が増大する傾向にある [2]。

電力系統の短絡電流は、遮断器の遮断容量以下である必要がある。これまでにも、遮断器の遮断容量の向上や電流耐量の大きい機器へのリプレース、あるいは変電所での母線分離などの系統構成の工夫によって事故電流が既設遮断器の定格遮断容量を越えないように対処を行っているが、これらは設備コストの増大を招き、また、電力系統の設計と運用に大きな制約を強いている。

また、短絡電流を抑制する方策として系統インピーダンスを高くすることも考えられるが、一方で電力系統は系統安定度を考慮した設計でなければならない。送電可能電力  $P_{max}$  は、送電端電圧を  $E_1$ 、受電端電圧を  $E_2$ 、送受電端間のリアクタンスを  $X$  とすると

$$P_{max} = \frac{E_1 E_2}{X} \quad (1.1)$$

と表される。すなわち、 $X$  が小さいほど  $P_{max}$  は大きくなり、安定度が向上する [3]。通常時には系統安定度向上のために低インピーダンスであることが、故障時には故障電流抑制のために高インピーダンスであることが望ましい。

こうした中で、故障時の電流を速やかに抑制する機器である限流器が注目されている。限流器は、故障電流などの大電流が流れた時のみ動作し、インピーダンスを発生する機器であるため、短絡電流の抑制と系統安定度の向上という電力系統からの相反する要求を満たすことができる。

このため、電力系統に限流器が導入されれば、遮断器の負担は低減し、事故の規模が変わらなければ遮断器の格下げが、事故の規模が増大しても遮断器の容量の格上げを避けることができる<sup>2</sup>。さらに、系統設計時の短絡電流による制約が大幅に緩和されるため、より自由な系統設計が可能になり、これまでより経済性や安定度の向上を主眼とした系統設計が行なえる。すなわち、電力系統に限流器を導入することにより、経済的で信頼性の高い電力系統を

<sup>1</sup>ライフスタイルの変化や情報機器の普及などにより一人あたりの使用エネルギー量が増す。今後約 25 年間で年平均 1%の伸びを示し、2030 年頃に飽和すると考えられる。

<sup>2</sup>現在、高電圧電力系統の遮断器には、SF<sub>6</sub> ガスによるガス遮断器が用いられているが、SF<sub>6</sub> は温暖化係数が非常に大きく、今後は使用量を削減される可能性がある。このため、絶縁性能が劣る代替ガスの利用や真空遮断器への移行が必要となる可能性がある。

実現することが可能となる。この他にも、電力設備の過電流に対する保護が軽減されることが可能となり、電力機器のコスト削減という観点からも有効である。

## 1.2 本論文の目的

以上のように限流器の系統への導入は強く望まれており、様々な方式の限流器が開発されてきている。試作限流器によりフィールド試験が行われた例はあるものの、未だに実用化には至っていない。後述するように限流器を系統へ導入するには様々な要求仕様がある。これら全てを満たす限流器を実現するためには限流素子の詳細な検討が必要である。

本研究では高温超電導体である YBCO 薄膜を用いた限流器を考える。安定性、取り扱いのし易さ、経年劣化が少ない、限流動作時のホットスポット現象<sup>3</sup>の発生を抑えることができる等の理由から YBCO 薄膜に対して金属の保護膜を施すのが一般的である。しかしながら、保護膜を施す事は素子の抵抗を減少させる事となり限流器として使用する場合には望ましくない。また、問題となる部分のみに保護膜を施すことで問題が解決されれば素子の製造の段階での幅が広がり、限流器の仕様を自由に決めて設計する事が可能となる。そこで保護膜の形状による特性の違いについて明らかにし、限流素子に最適な保護膜について考察する。

また、抵抗型超電導限流器で特に問題となる、動作電流値、復帰時間、インピーダンスについて実験により明らかにし、それらを元に設計方針、設計時に必要とされる基礎特性を考察する。

## 1.3 本論文の構成

第 1 章では、序論として本研究の背景、目的について述べた。

第 2 章で限流器の概要とその中で特に有望とされている超電導限流器について紹介し、現在の課題について述べる。また、低温超電導体を用いた超電導限流器の先行研究において問題であったインパルス電流に対する誤動作が、高温超電導体を用いることで改善できることを示し、理論的な考察を行う。

第 3 章では金属保護膜の異なる 3 種類の YBCO 薄膜について諸特性の測定実験の諸特性の測定実験について実験方法、実験結果を述べる。それを元に動作電流値、復帰時間、インピーダンスについて YBCO 薄膜の金属保護膜の違いによる特性の変化について考察する。

第 4 章では部分的に保護膜を施された薄膜について系統導入の際に問題となる動作電流値、復帰時間、インピーダンスを実験結果からより詳細に考察する。それらを踏まえて限流器導入の実現に最も近い配電系統での抵抗型超電導限流器の設計方針、必要となる特性試験について述べる。

最後に第 5 章で本研究の成果をまとめ、結論を述べるとともに、今後の課題を示す。

---

<sup>3</sup>短絡事故直後において、最初に常電導転移した部分で局所的に温度が急上昇して薄膜が焼損する現象

## 第2章 高温超電導体を用いた超電導限流器

### 2.1 限流器

限流器は、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装置である。常時は低インピーダンスで、故障電流が流れたときのみ高インピーダンスを発生する。限流動作時の典型的な電流波形を図 2.1 に示す。点線で示されている部分が限流器がない場合の電流波形であり、実線で示されている部分が限流器が導入された場合の電流波形である。事故の発生とともに限流動作が開始され、事故電流が抑制されていることがわかる。

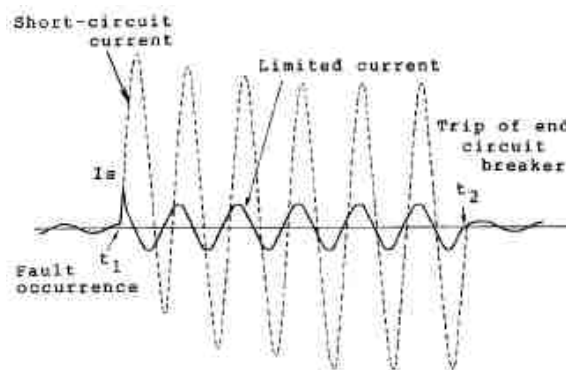


図 2.1: 限流器の動作例

電力系統から限流器に要求される仕様としては

1. 1 サイクル以下の出来るだけ短い時間で故障を検出し、限流動作に入る
2. 電力系統の通常の運用を妨げないために、動作開始電流値・動作時に発生する限流インピーダンスが正確である
3. 電流経路に直列に挿入される機器であるため、通常運転時のインピーダンスが小さい。抵抗分が大きいと損失が増加し、リアクタンス分が大きいと系統安定度に悪影響がある。
4. 送電線の事故除去に伴って、通常 1 秒以内で再閉路が行われるため、事故除去後は急速に限流状態から通常状態に復帰する
5. 限流動作時や通常状態への復帰時に、系統に異常な電圧を発生させない
6. 連続して起こる故障に対して対応できる

などが挙げられる。

また、限流器の導入により次のような効果が期待できると言われている。

#### 電流抑制効果

事故時に高インピーダンスを発生するので、過大電流を抑制することが可能となる。過大な電流を抑制する理由として遮断器の遮断容量や短時間耐電流性能を越えることが予想されることが挙げられる。

系統の大容量、複雑化が進む中、短絡事故電流が増大し遮断器の定格遮断容量を越える状況が考えられる。現在のところ発・変電所の母線分離などの系統上の工夫で対応しているが、この場合電力の安定供給のために制約が多く、この方策では限界がある。一方、遮断器の定格遮断容量や送・変電施設の短時間耐電流性能を向上することで短絡電流の格上げを行うことも考えられるが、全系統での大幅な交換、改修等に多くの時間と費用が必要となるため現実的でない。

限流器により過大電流の抑制を行うことができれば系統の分離の必要が無くなり系統構成上の制約は減少する。また、短時間耐電流性能を軽減できコストの削減につながる。

#### 電圧維持効果

容量の大きな負荷の投入による電圧低下を抑制する手段として系統の連系があるが、前述のように短絡電流の増加が問題となる。しかし、限流器の適用により短絡電流を抑制できれば、系統連系がスムーズに行うことができ、系統に悪影響を及ぼすことなく電圧低下を防ぐことが可能となる。

また、三線地絡、及び一線地絡事故においては、限流器端子間の電圧が高いため、限流器を境にして系統電圧の低下を防止できるとされている。

#### 系統安定度向上

系統に事故が生じた際、事故の前後で発電機の電気出力に差が生じ、この差が発電機の加速エネルギーとなる。限流器が系統に導入されることで故障時のインピーダンスが大きくなり、故障前後の発電機出力の差を小さくすることが可能となるため発電機の加速が抑えられ、安定度が向上すると考えられる。

以上のように本来の目的である事故電流の抑制だけでなく、より安定な電力供給、電力系統設計上の制約条件の減少による系統構成の簡易化に寄与すると考えられる。事故電流を許容する設計が緩和されることでコストの削減にもつながる。

これらの特性を満たすような限流器を実現する方式として、アーク利用方式・半導体利用方式・超電導体利用方式など数多くの限流器が考案、試作されている。中でも、超電導体を利用する方式は、故障を検知する外部回路の必要が無く動作が迅速であること・繰り返し動作が可能であること・定常時のインピーダンスが低いことなど優れた特徴を持っており、その他の方式に比べて優位に立つと期待されることから、現在活発に研究開発が行なわれている [5]。



## 2.2 超電導と超電導材料

### 2.2.1 超電導

超電導の歴史は、1911年にオンネス (H.Kamerlingh-Onnes) が水銀の超電導現象を発見したことから始まる。オンネスは、極低温での金属の電気抵抗を測定した際、水銀の電気抵抗が 4.2K 以下で消失することを見出し、この現象を超電導 (superconductivity) と呼んだ。

超電導は、完全導電性と完全反磁性の二つの現象を伴っている。完全導電性とは、電気抵抗が零になる現象であり、電流が流れても電圧降下は生じないし、ジュール熱も発生しない。また、完全反磁性とは、内部への磁束侵入を許さない現象であり、マイスナー効果と呼ばれる。超電導体が超電導の性質を示すのは、臨界温度  $T_c$ 、臨界磁界  $H_c$ 、臨界電流密度  $J_c$  により決定される臨界面の範囲内のみである。この様子を図 2.2 に示す。 $T_c, H_c$  は超電導物質によって、 $J_c$  は製造方法、製造過程で決まる。

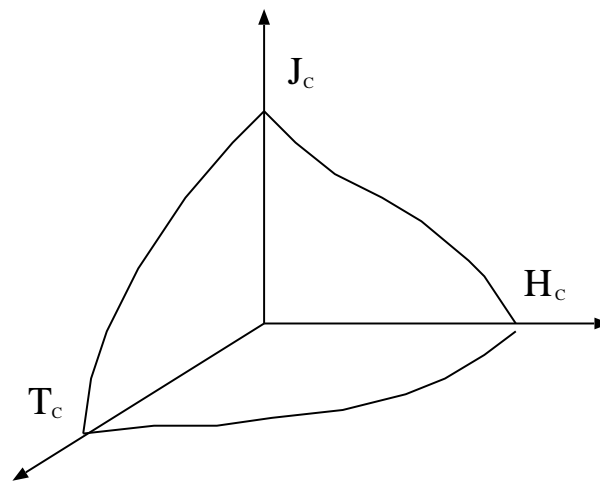


図 2.2: 超電導体の臨界面

### 2.2.2 第一種超電導体と第二種超電導体

超電導体は、磁氣的性質により第一種超電導体と第二種超電導体に分類される。前者は比較的小さい臨界磁界を持ち、後者は比較的大きい臨界磁界を持つ。

図 2.3 に、第一種および第二種超電導体に外部磁界を印加した場合の外部磁界と内部磁束密度の関係を示す。第一種超電導体では、外部磁界が臨界磁界  $H_c$  に達するまで内部に常電導部分が生じることはなく、完全なマイスナー効果を示す。これに対して、第二種超電導体では、外部磁界が下部臨界磁界  $H_{c1}$  より大きく上部臨界磁界  $H_{c2}$  より小さい場合、内部に超電導と常電導共存し、外部磁界の増加とともに常電導部分が増加する。そして、外部磁界が  $H_{c2}$  を越えると超電導体内部はすべて常電導状態となる。

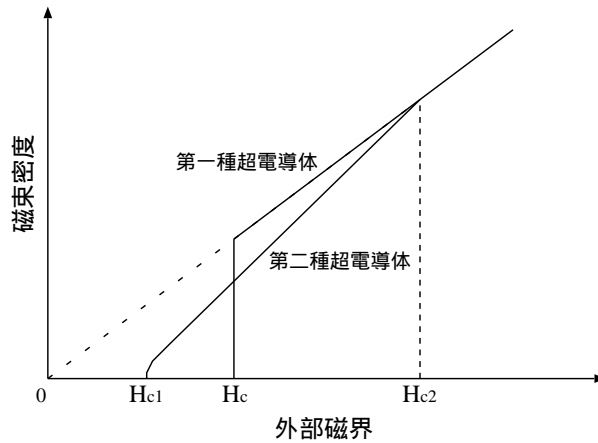


図 2.3: 第一種超電導体と第二種超電導体の外部磁界と磁束密度の関係

### 2.2.3 超電導材料

オンネスによる超電導の発見以来、多くの超電導材料が発見されてきた。しかしながら、初期に発見された超電導材料である水銀、すず、鉛などの金属は、いずれも第一種超電導体であり、臨界磁界が低く、実用になるほどのものではなかった。

#### 低温超電導体

1950年代後半から60年代前半にジョセフソンによるジョセフソン効果の発見と $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 化合物、 $\text{NbTi}$ 合金など多くの金属系第二種超電導体の発見があった。金属系超電導体は、その超電導状態が液体ヘリウム温度(4.2K)付近において成り立つため、低温超電導体(Low-Temperature Superconductor)と呼ばれる。

これらの超電導材料を実用化するには、線材として利用できることが重要である。このためには、超電導材料に高い臨界磁界や臨界電流密度が要求され、また、長尺にしたときに安定した特性が得られることなどが要求される。このため、現在実用化されている超電導線材は、合金材料である $\text{NbTi}$ が主として用いられ、その他金属間化合物である $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 、 $\text{Nb}_3\text{Al}$ も用いられる場合もある。

#### 高温超電導体

1986年に、ベドノルツ(J.G.Bednorz)とミュラー(K.A.Müller)は $T_c$ の極めて高い酸化物超電導材料を発見した。これ以後、Y系、Bi系など多くの酸化物超電導材料が発見され、これらの多くは従来の超電導材料よりも高い臨界温度を示した。このため、酸化物超電導体は、高温超電導体(High-Temperature Superconductor)と呼ばれている。

技術開発の点ではBi系材料が先行している。Bi系材料では、住友電気工業や古河電気工業が $I_c$ が100~150A、長さが数百m~1km級のBi系線材を開発し、すでに超電導送電ケーブルなど向けに実証実験を開始している。一方、Y系線材は、強い磁界中で臨界電流が急激に減少するBi系に比べて大きい電流を流せることや材料費が安いことなどから、Bi系に代

わる可能性があるとして注目されて線材化の研究が進められており、200m 程度の線材が得られている。また、2001 年には金属系として高い臨界温度を持つ  $\text{MgB}_2$  が発見され、線材化の研究が行なわれている。

## まとめ

低温超電導体と高温超電導体について説明した。まとめとして、代表的な超電導材料についてその特性と発見年を表 2.1 に示す [6]。

表 2.1: 代表的な超電導材料の特性

超電導材料	臨界温度	臨界磁界 (4.2 K)	発見年
NbTi	9.8 K	11.5 T	1961
Nb <sub>3</sub> Sn	18.0 K	22 T	1954
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	92 K	80.5 T	1987
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	107 K	24 T	1988

## 2.3 超電導限流器

超電導体を利用する方式の限流器は、特に超電導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter) と呼ばれ、現在活発に研究が行なわれている。超電導限流器の特長としては、平常時の損失が小さいこと、事故を検出し動作するための外部装置が不要であること、短絡電流に対する応答速度が早いこと、繰り返し使用が可能であることなどが挙げられる。

超電導体は、超電導状態では抵抗が零であるが、臨界電流よりも大きい電流を流すと超電導/常電導相転移 (S/N 転移) を起こして常電導状態となり、抵抗が発生する。超電導方式にはこの S/N 転移を利用するものと、超電導体の低損失を利用するものと大きく分けられる。S/N 転移を用いる方法には、相転移する超電導体に系統電流が直接流れる方式である S/N 転移型と、変圧器の二次回路で相転移を行なうため超電導体には直接系統電流が流れない方式である変圧器型がある。また、S/N 転移を用いない方法には、整流器型がある。

- S/N 転移を用いる方法
  - S/N 転移型
  - 変圧器型
- S/N 転移を用いない方法
  - 整流器型

### 2.3.1 S/N 転移型

超電導体は、超電導状態では抵抗が零であるが、臨界電流よりも大きい電流を流すと S/N 転移を起こし、電気抵抗が発生する。この性質を利用し、常電導抵抗そのものを限流のための抵抗として利用するのが S/N 転移直接利用方式である。

S/N 転移型超電導限流器の構成は、大きく二つに分けられる。一つは超電導体自身の電気抵抗によって限流する方式であり、もう一つは超電導体に並列に接続した限流素子によって限流する方式である。これらの概念図を図 2.4 に示す。

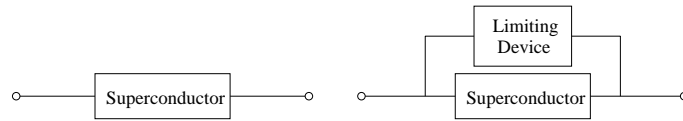


図 2.4: S/N 転移型超電導限流器

最新の事例としては、ドイツの CURL10 計画において、2004 年から高温超電導線材を用いた抵抗型超電導限流器の試作品が開発・試験されている [7]。限流器の定格は 10kV, 10MVA, 3 相で、超電導コイルには Nexans 社製の MCP-BSCCO2212 コイルを用いている。

### 2.3.2 変圧器型

一次側に常電導、または超電導コイル、二次側に短絡した超電導コイルを用いて、両者を変圧器結合し、二次側超電導体の S/N 転移を利用するのが変圧器結合 S/N 転移方式である。巻数比を変えることによって、同じ超電導素子を用いても任意のインピーダンスを持つ限流器が構成できる。

変圧器方式の超電導限流器には鉄心を含むものと鉄心を含まないもの(空心構造)がある。一般には、主回路と二次回路の磁気結合を高めるために鉄心が用いられ、磁気遮蔽型超電導限流器とも呼ばれる。円筒の超電導バルクを用いた変圧器型限流器の構成を図 2.5 に示す。

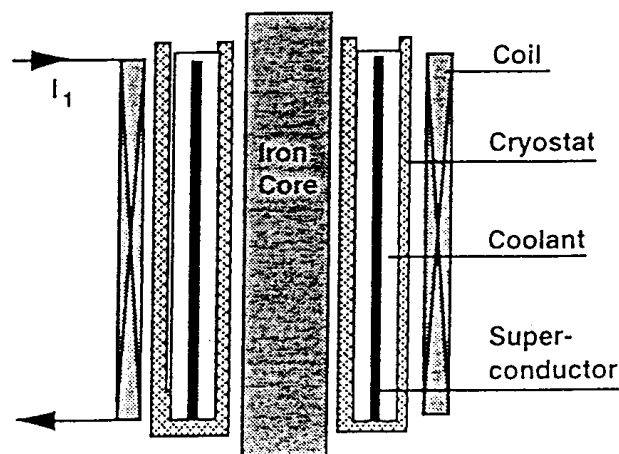


図 2.5: 磁気遮蔽型超電導限流器

スイスの ABB 社では、100kW 級 (電圧 480V) の変圧器結合 S/N 転移方式のうち、磁気遮蔽型超電導限流器を試作して、試験を実施している [8][9]。

鉄心を含まないもの(空心構造)の限流器としては、動作開始電流値調整可能な超電導限流器が提案され、試作限流器による実験的考察も行なわれている。この方式については後で詳

しく述べる。

### 2.3.3 整流器型

整流器を用いた限流器は、整流回路部と超電導リアクトルからなる。図 2.6 に整流型超電導限流器の回路図を示す。

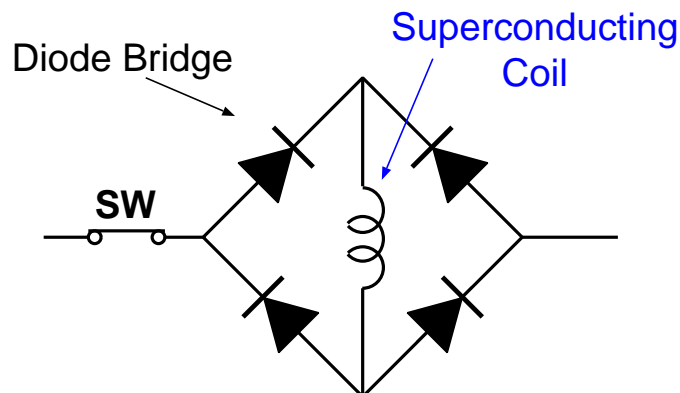


図 2.6: 整流型超電導限流器

定常時は整流器回路部の直流リアクトルに直流電流が流れ、系統電流はリアクトルを通らずに流れる。そのため、系統側からみた限流器のインピーダンスは等価的にゼロに見える。よって、整流器回路部の定常インピーダンスはほぼゼロである。

限流動作時には限流器の通過電流が急増するが、系統電流値が回路に流れる直流電流値を越えると、系統電流は直流リアクトルを通して流れる。過渡的な電流増大に対して、直流リアクトルのインダクタンスによる電流変化抑制効果が働き、自律的に限流される。このとき、系統からみた限流器のインピーダンスは高くなったように見える。

これまでの事例としては、米国エネルギー省のSPI(Superconductive Partnership Initiative)計画により、GA社で15kV,20kAの級高温超電導限流器が開発された[5]。超電導線材はBi-2223テープ線材である。

## 2.4 超電導限流器実現に向けた問題点

超電導限流器を電力系統に導入しようとする場合、電力系統からの要求を考慮する必要がある。電力系統から要求される仕様としては、定常時のインピーダンス、限流インピーダンス、定常時・動作時の損失、動作開始電流値、限流器端子電圧、復帰時間が考えられる。これらの、電力系統から要求される仕様を考慮すると、これまでに提案されている超電導限流器の多くの方式には、それぞれ問題点があることが分かる。これらを表 2.2 にまとめる。

このうち整流器型はバイアス用の大容量の直流電源を必要とし、実現が難しいとされている。バルク超電導体を用いる変圧器型の限流器は限流インピーダンスの設定・復帰時間については電力系統からの要求を満たすものの、動作開始電流値についてはS/N転移を利用する

表 2.2: 超電導限流器各方式の問題点

方式	問題点
整流器型	直流電源
変圧器型 (超電導バルクを用いる方式)	動作開始電流値
S/N 転移抵抗利用型	動作開始電流値、復帰時間、インピーダンス

ため、設定が困難であった。そこで、変圧器型の超電導限流器で、製造後に動作開始電流値を調整可能な方式の超電導限流器が提案された [11]。

低温超電導体である NbTi を用いた動作開始電流値が調整可能な限流器が試作されている [12]。この限流器は電力系統からの要求をほぼ満たすものである。しかし、インパルス電流に対しても同じ電流値で動作してしまうという問題がある。NbTi 線材を用いた変圧器型限流器に対するインパルス電流に対する動作を図 2.7 に示す。この場合 50Hz 交流電流で 85A 程度で動作するようにしていたにもかかわらず、同じ電流値で開閉サージに対して動作している。インパルス電流に対して交流電流と同じ動作をしてしまうため系統に導入した際には誤動作してしまう可能性が高い。限流器を系統に導入するためには誤動作を防止する必要があり、NbTi を用いた限流器ではインパルス電流に対してまだ十分な特性が得られていない。

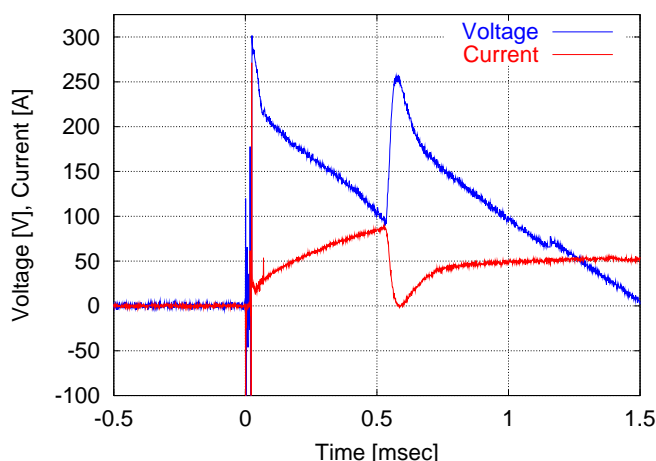


図 2.7: NbTi を用いた場合のインパルス応答

これは熱容量と熱伝導の大きさが関係していると思われる。NbTi が熱伝導率が大きいいため電圧発生により生じた熱が全体に波及する。熱容量が小さく、液体ヘリウム温度での運転のため熱容量は更に低下し急激な温度上昇を引き起こす。また  $n$  値<sup>1</sup>が大きいために熱の発生量が大きいことも原因と考えられる。冷却の面においても液体ヘリウムの熱容量は小さいため発生した熱の冷却はほとんど期待できない。以上から液体ヘリウム温度での運転、金属系超電導体での限流器の実現は困難であると言える。

抵抗型の問題点は超電導体の S/N 転移により動作することであり、超電導体の S/N 転移電流は製造過程に強く依存し、その精度は 10%程度である [10] ため、抵抗型限流器では系統が

<sup>1</sup>電流と電圧の関係を近似的に  $V = (\frac{I}{I_c})^n$  で表した時の  $n$  の値 ( $I_c$ : 臨界電流値) 付録 A を参照

ら要求される動作開始電流値の精度(数%)を実現することが難しいとされる。また、限流インピーダンスの設定が難しい、復帰時間が遅いなどの問題がある。しかしながら、これらの問題は超電導体への並列抵抗の接続、超電導体の直列接続、並列接続等の設計上の工夫により改善することができる可能性がある。

## 2.5 インパルス電流に動作しない限流器の実現の可能性

金属系の低温超電導体である NbTi を用いた限流器では小さな熱容量、大きな熱伝導率、高い  $n$  値、液体ヘリウム温度での動作が主な要因となってインパルス電流に対して誤動作が引き起こされたと考えられる。そこで、金属系の超電導体と比較して熱容量、熱伝導率、運転温度が良い条件である酸化物系超電導体を用いる事が考えられた。その中で均一で  $J_c$  の高い超電導膜が得られる Y 系の酸化物超電導体の薄膜に注目した。

インパルス電流に対する動作の改善の検討のため、様々な周波数の交流電流と異なる波頭長のインパルス電流に対する YBCO 薄膜の動作電流値を測定する実験が行われた。実験に使用された YBCO 薄膜の仕様を表 2.3 に示す。基板には 1mm のサファイア基板が使用され、YBCO 表面を 150nm の金の保護膜で覆われている。

表 2.3: YBCO 薄膜の仕様

長さ [mm]	10
幅 [mm]	100
厚さ [ $\mu\text{m}$ ]	0.30
臨界電流値 [A]	60

動作電流値の周波数特性を図に 2.8、インパルス電流通電時の動作電流値と通電開始から電流がピークに達するまでの時間の関係を半サイクルの交流電流を通電した時の動作電流値と共に図 2.9 に示す。

電流がピークに達するまでの時間が短くなれば通電時間が短くなりその分動作電流値が大きくなるのがわかる。これから動作電流値を適切に選択すれば、事故電流のみに動作し、開閉サージ等動作することを意図しないサージ電流に対しては動作しない限流器を実現可能であると言える。また、測定値が同一の曲線にのることから共通の理論があると考えられる。

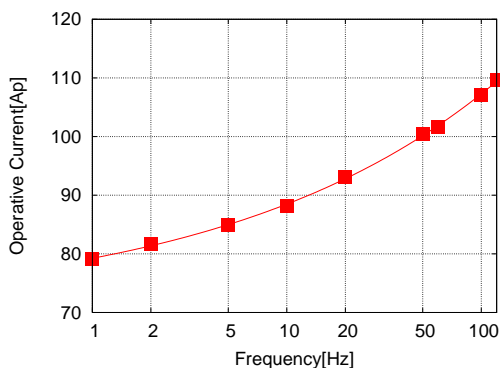


図 2.8: 動作電流の周波数依存性

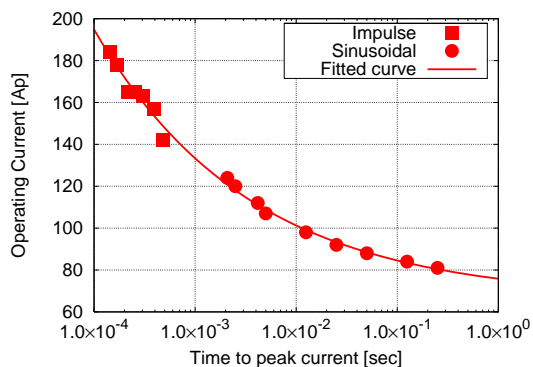


図 2.9: 通電開始から電流ピークまでの時間と動作電流値の関係

## 2.6 理論的考察

超電導体は図 2.2 に示すような臨界温度  $T_c$ 、臨界磁界  $H_c$ 、臨界電流密度  $J_c$  で囲まれる領域内で超電導状態を保つことが可能である。発生する磁界については無視して考える。

様々な周波数の正弦波電流を通電した時に YBCO 薄膜が限流動作した電流波形を図 2.10 に示す。これを見ると限流動作は電流のピークを過ぎてから起こっており、温度の上昇が限流動作した大きな要因であると考えられる。

そこで、発生する熱量と液体窒素によって冷却される熱量から薄膜へ蓄積していく熱量を考え、温度が臨界温度に達した時に常電導転移を起こし、限流動作が開始するとする。

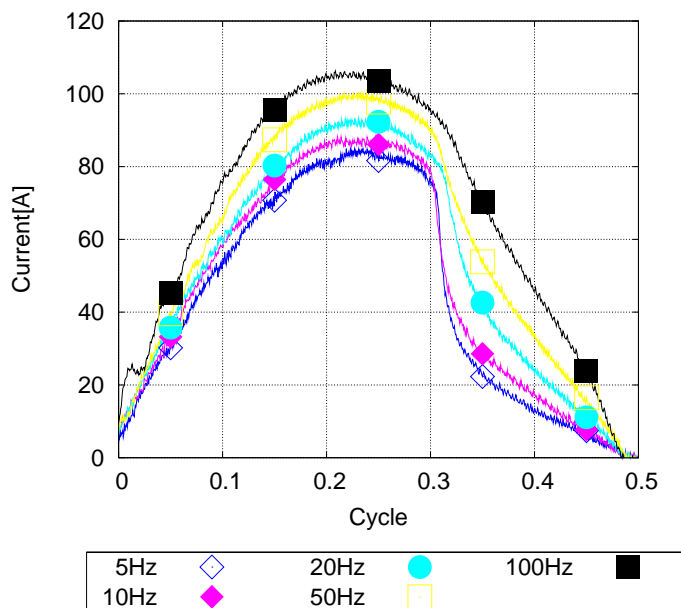


図 2.10: 動作する時間



通電開始から常電導転移が起きるまでに薄膜に蓄積される熱は次の等式で表される。

$$Q_{operation} = \int_0^{\tau} (Q_g - Q_c) dt \quad (2.1)$$

- $Q_{operation}$  : 動作時に薄膜素子に蓄積されている熱量
- $\tau$  : 限流動作する時間
- $Q_g$  : 電力消費による熱の発生量
- $Q_c$  : 液体窒素による冷却熱量

周波数に関わらずほぼ 0.3 サイクルの時点で動作が起こっていたため  $\tau = \frac{0.3}{f}$  とした。f は通電電流の周波数である。 $Q_g$  は VI の積で求める。

今回の考察では薄膜の横方向の熱伝導は考慮していない。 $Q_c$  は液体窒素との温度差に比例し、 $Q_c = AST$  で表される。A は比例定数、S は薄膜の面積、 $1 \times 10^{-3} [m^2]$ 、T については蓄積した熱量と薄膜の熱容量から計算される。 $Q_{operation}$  については  $0.18 [J]$  とした。この計算により周波数と動作電流値との関係が求められる。

計算結果と実測値との比較を図 2.11 に示す。横軸に通電開始から電流ピークに達するまでの時間を、縦軸に動作電流値をとった。周波数の低い部分では概ね一致していると言える。しかし、周波数の高い部分では計算値と実測値で大きな開きがある。サファイアへの熱の伝導も考慮されてしまっている為であると考えられる。サファイアへの熱の伝導を考えず、YBCO と金だけの熱容量を考えて計算した結果を ( $Q_{operation} = 3.78 \times 10^{-3}$ ) 図 2.12 に示す。インパルス電流に対する動作電流に対しては値は近づいたが、50Hz の交流電流に対しては小さく出てしまった。インパルス電流は通電時間が非常に短時間であるために熱の伝導は考慮しなくて良いが、50Hz についてはサファイアへの熱の伝導を考慮にいれなければならないことがわかった。

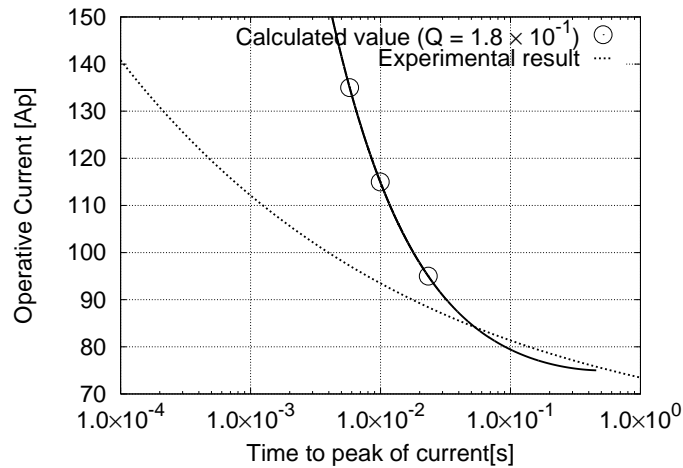


図 2.11: 計算値と実測値の比較 (サファイア基板への熱の伝導を考慮した場合)

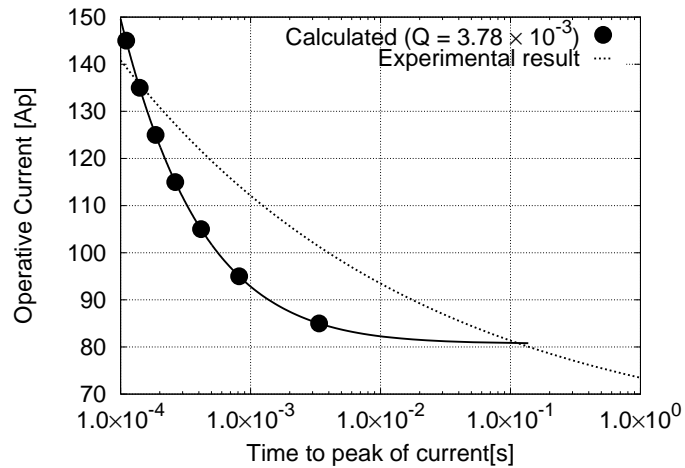


図 2.12: 計算値と実測値の比較 (サファイア基板への熱の伝導を無視した場合)

## 2.7 まとめ

限流器、超電導体の概要を述べ、現状の超電導限流器の問題点を挙げた。系統からの要求をほぼ満たす低温超電導体を用いた変圧器型限流器が試作されたが、液体ヘリウム温度での運転であること、金属系の超電導体であることが原因となり、インパルス電流に対して誤動作することを述べた。

液体窒素温度で利用可能な超電導体の中から均一で  $J_c$  の高い超電導膜が得られる Y 系の酸化物超電導体の薄膜に注目し、高温超電導体を用いることで低温超電導体を用いた限流器での問題点であるインパルス電流に対する誤動作を改善可能であるということを示した。また、その結果に対して磁束流状態での熱の発生による温度上昇で常電導転移が起こって動作するという観点から考察を行なった。

インパルス電流に対する動作については YBCO 薄膜を用いることで改善することが示されたが、抵抗型限流器は動作電流値、復帰時間、限流インピーダンスが問題とされており、これらが系統からの要求を満たす限流器を実現するため YBCO 薄膜の基本的な特性を把握する必要がある。

## 第3章 YBCO 薄膜の基礎特性

安定性、取り扱いのし易さ、経年劣化が少ない、限流動作時のホットスポット現象の発生を抑えることができる等の理由から YBCO 薄膜に対して金属の保護膜を施すのが一般的である。しかしながら、保護膜を施す事は素子の抵抗を減少させる事となり限流器として使用する場合には望ましくない。また、問題となる部分のみに保護膜を施すことで問題が解決されれば素子の製造の段階での幅が広がり、限流器の仕様を自由に決めて設計する事が可能となる。

そこで保護膜の有無、部分的に保護膜が施された場合での特性の違いについて明らかにし、限流素子に最適な保護膜について考察する。

### 3.1 実験に使用した YBCO 薄膜

実験に使用した試料は 3.1 に示すように全て YBCO 薄膜がサファイア基板上に中間層を介して形成されており、YBCO 薄膜表面の金と銀の合金による保護膜の施し方によって薄膜 A、薄膜 B、薄膜 C に区別される。薄膜 A は保護膜が施されていない (図 3.2)。薄膜 B は薄膜全体を金と銀の合金による保護膜で覆われている ((図 3.3)。薄膜 C は薄膜の両縁 3mm が金と銀の合金による保護膜で覆われている (図 3.4)。試料のサイズは長さ 10cm、幅 1cm であり、厚さはサファイア基板の厚さが 1mm、YBCO が  $0.3\mu\text{m}$ 、保護膜が 50nm となっている。図 3.5 が薄膜の外観で、黒い部分が YBCO である。

直径 1mm のインジウム線を密着させることにより実験装置との接続を行なった。

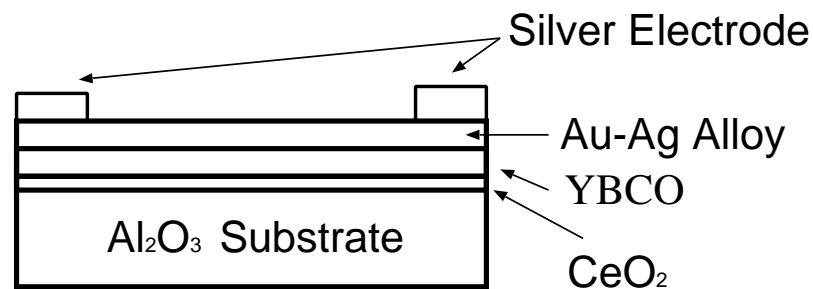


図 3.1: 実験に使用した YBCO 薄膜の模式図

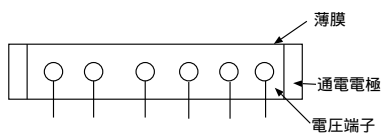


図 3.2: 薄膜 A

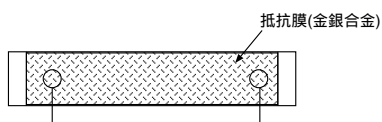


図 3.3: 薄膜 B

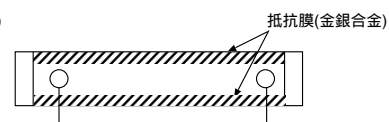


図 3.4: 薄膜 C

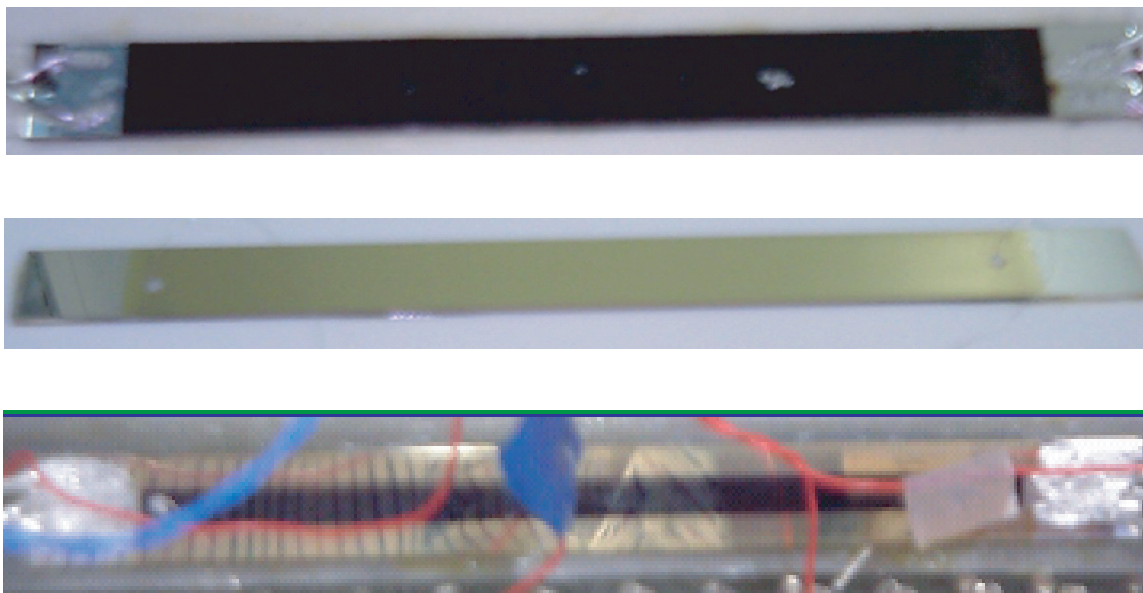


図 3.5: 薄膜の外観 (上から薄膜 A、薄膜 B、薄膜 C)

## 3.2 実験装置

実験装置は、超電導限流器を冷却するための冷却系と超電導限流器を含めた電気系から構成される。ここでは冷却方法と、測定方法について説明する。

### 3.2.1 冷却方法

冷却系に関する実験装置は、液体窒素コンテナ、アメゴム、クライオスタットから成る。寒剤には液体窒素を用いる。クライオスタットは、ガラス製低温容器であり、内槽、外槽から成る。

超電導限流器は、クライオスタットの内槽に設置する。

クライオスタット内への液体窒素の供給は、液体窒素コンテナからアメゴムを經由して行なう。このような冷却系の構成を図 3.6 に示す。

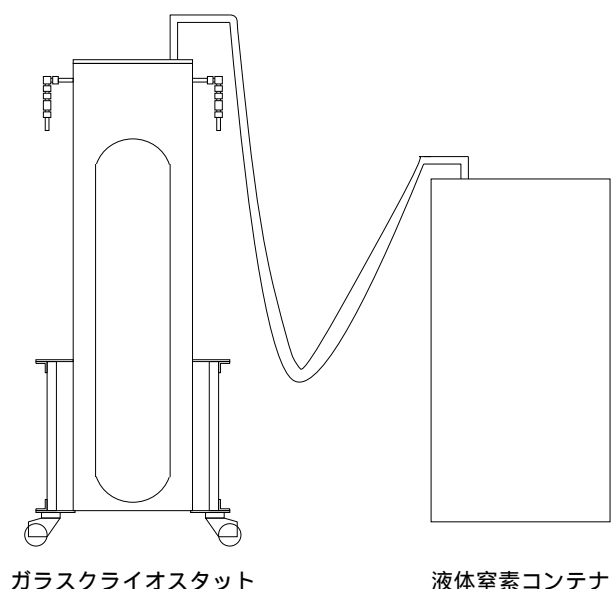


図 3.6: 冷却系の構成

### 3.2.2 測定装置

測定装置には、計測ステーション WE7000(横河電機)、絶縁アンプ (横河電機)、電流計測プローブ (横河電機) を用いた。図 3.7 に測定装置の構成を示す。

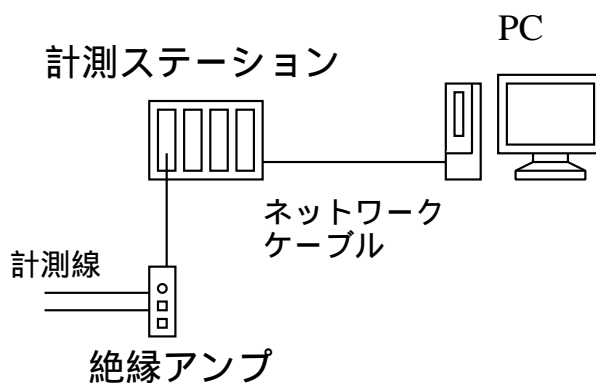


図 3.7: 測定装置の構成

WE7000 は、パーソナルコンピュータ (PC) からコントロール可能な計測ステーションであり、ネットワークケーブルにより PC と相互に通信可能である。このため、測定データはネットワークケーブルにより PC に取り込むことができる。測定レンジが最大で  $\pm 35\text{V}$ 、最小で  $\pm 1\text{V}$  であるため、絶縁アンプを通して測定を行なった。絶縁アンプの仕様を表 3.1 に示す。絶縁アンプは、高耐圧型の入出力絶縁型アンプであり、絶縁アンプのゲインは、測定データに応じてそれぞれ設定した。電流計測プローブはクランプ式でプローブ先端のクランプで測定電線を挟むことで電流測定が可能となる。電流計測プローブの仕様を表 3.2 に示す。

表 3.1: 絶縁アンプの仕様

形名	直流増幅器 Type3132
入力チャンネル数	1
電圧ゲイン	0.1 ~ 100
周波数特性	DC ~ 5kHz
最大入力電圧	250V DC または 250 V AC(正弦波)

表 3.2: 電流プローブの仕様

型名	電流プローブ 701930
立上り時間	35ns
周波数帯域	DC ~ 10MHz
最大ピーク電流値	150rms
振幅確度	±1.0%

### 3.3 実験項目とその目的

#### 1. 抵抗測定

YBCO 薄膜を用いた超電導限流器では並列に抵抗を接続することが考えられている。限流インピーダンスや動作開始電流、復帰時間など系統の要求に見合った最適な抵抗を選ぶためには、動作時に YBCO 薄膜に発生するインピーダンスを把握しておく必要がある。また、動作時の過大な熱の発生による薄膜の焼損を防ぐためにも必要とされる。そのため、全ての実験に先立ち常温状態から徐々に温度を下げていき、常電導状態から超電導状態へと転移する境界の抵抗を測定した。

#### 2. 動作電流値の周波数特性

先述のとおり、周波数特性を測定する事でインパルス電流に対する動作も推定可能であると考えられる。様々な周波数の交流電流を半周期通電した際の動作開始電流値を測定し、限流動作開始電流の周波数特性を明らかにした。

#### 3. 動作後の超電導状態への復帰時間測定

他方式の超電導限流器と比較すると、抵抗型の超電導限流器では限流動作中に発生する熱によって限流動作後の超電導状態への復帰により長い時間が必要とされ、そのことが系統導入に際して大きな問題となっている。様々な条件における復帰時間を把握する事は薄膜素子の形状を決めるためにも、並列抵抗の大きさを決めるためにも重要であると考えられる。今回は次の2つの場合の復帰時間を計測した。

- 事故電流のみ流れた場合の復帰時間  
次の定常状態から事故が起こる実験に向けた予備的な実験である。通電電流、通電時間、並列抵抗の抵抗値をパラメータとして復帰時間を計測した。
- 定常状態から動作した際の復帰時間  
限流器の動作条件をより実事故に近付けるため定常状態から事故が生じ、限流器

が動作した場合の復帰時間を測定した。事故電流のみ流れた場合で通電時間に対しては完全に比例する事がわかり、実際の系統においては約 80ms で遮断器が動作可能であるということを踏まえ、通電時間を 5 サイクルとし、通電電柱、並列抵抗の抵抗値をパラメータとして復帰時間を計測した。

#### 4. 通電中の超電導状態への復帰試験

通電中での超電導状態への復帰が可能な電流値を把握できれば、それ以下の電流を通常電流として選定することで、超電導状態への復帰を待つ必要がなくなり限流器設計上考慮する項目が少なくなりより自由な設計をすることができる。動作後、非常に短い時間の通電休止時間をおいた後に動作電流値よりも小さな電流を長時間通電することで通電中に超電導状態へ復帰可能な電流値を測定する。

### 3.4 実験方法

#### 3.4.1 抵抗測定

常電導状態から超電導状態の境界となる抵抗値を測定した。3.8 に抵抗測定のための回路を示す。一分間で約 10K 下がる程度の速度で液体窒素を徐々に入れながら 10mA の直流電流を流した。50Ω の抵抗を電流測定用として使用し、薄膜両端にかかる電圧は銅電極に設置した計測線より計測した。得られた電流、電圧から薄膜の抵抗値を算出する。

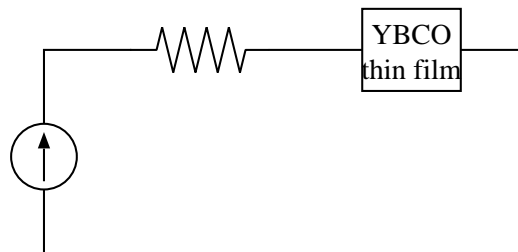


図 3.8: 抵抗測定用回路

#### 3.4.2 動作電流値の周波数特性

交流電流通電試験の回路を図 3.9 に示す。電流値を細かく操作することが出来るように電源として電流源を用いた。電流源を用いることで常電導転移後も続けて大きな電流が流れ続け、薄膜が焼損する事態が予想された。焼損を防ぐため保護抵抗を YBCO 薄膜に並列に接続した。保護抵抗を接続することにより、薄膜にとって電圧源と等価と考えられる。電流源は PC による制御で回路全体への通電電流値を容易に変化させることができ、所定の時間がたつと自動的に電流が流れなくなるようになっている。異なる周波数の交流電流を半周期通電した時の動作電流値の周波数特性を調べた。回路全体の電流、薄膜へ通電する電流、薄膜両端の電圧を測定した。

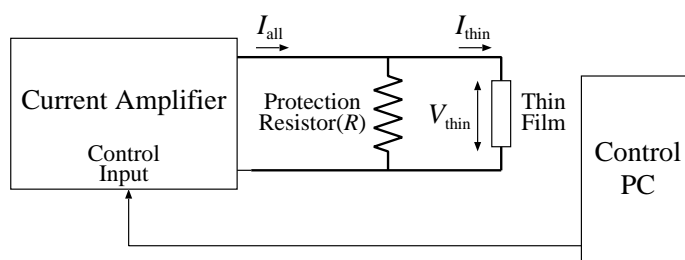


図 3.9: 周波数測定回路

### 3.4.3 限流動作後の復帰時間

事故電流のみを通電した際の復帰時間

図 3.10 に示す電流指令を与えて動作後の薄膜の超電導への復帰時間を測定した。

- $I_1$ : 動作電流値以上の電流値
- $I_2$ : 長時間通電しても超電導状態を保つ電流値
- $T_1$ : 動作電流を通電する時間
- $T_2$ : 通電休止時間
- $T_3$ : 超電導状態への復帰を確認するための電流を通電する時間

YBCO 薄膜が S/N 転移して動作する電流  $I_1$  を時間  $T_1$  通電する。この間に YBCO 薄膜では熱の発生による温度上昇が起きる。その後、時間  $T_2$  の通電休止時間を経て、超電導状態を保つ電流値  $I_2$  を時間  $T_3$  通電する。超電導状態を保つ常状態での薄膜の V-I 曲線との比較により、超電導状態へ復帰しているかどうかを判断する。超電導状態に復帰できる最小の通電休止時間  $T_2$  を復帰時間と定義した。周波数は 50Hz とした。回路全体の電流、薄膜へ通電する電流、薄膜両端の電圧を測定した。

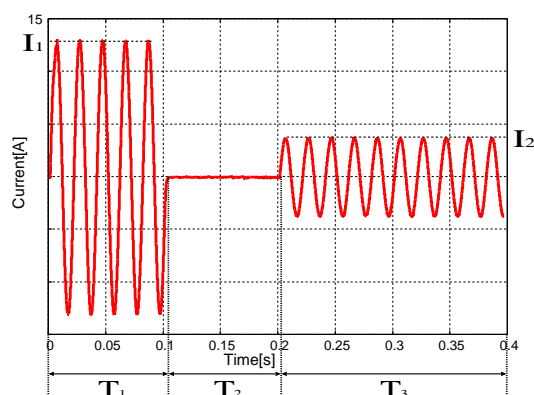


図 3.10: 電流指令



### 定常状態から動作した場合の復帰時間

図 3.11 に測定回路を示す。実験回路には二つの抵抗が接続されている。その大きさは  $R_a = 0.5 [\Omega]$ 、 $R_b = 1 [\Omega]$  である。(通電電流を大きくする実験では通常電流が薄膜の動作電流値を超えてしまうため  $R_b = 2 [\Omega]$  とした。)

実験回路には、二つの電磁スイッチ SW1、SW2 が接続されており、SW1 は遮断器動作を、SW2 は短絡事故を模擬するためのスイッチである。スイッチの動作は電磁スイッチ制御装置により制御した。スイッチの動作を図 3.12 に示す。 $T_0$  が定常状態になるまでの時間、 $T_1$  が事故電流が発生する時間、 $T_2$  が回路を開放する時間である。 $T_0$  を約 1 秒、 $T_1$  を 5 サイクルとして  $T_2$  を変化させて超電導状態に復帰しているかを確認した。

交流電源には、210 V、50 Hz の商用電源を用い、電源電圧をスライダック<sup>1</sup>により調整した。スライダック電圧と事故電流との対応を図 3.13 に示す。回路全体の電流、薄膜へ通電する電流、薄膜両端の電圧、スライダック電圧を測定した。

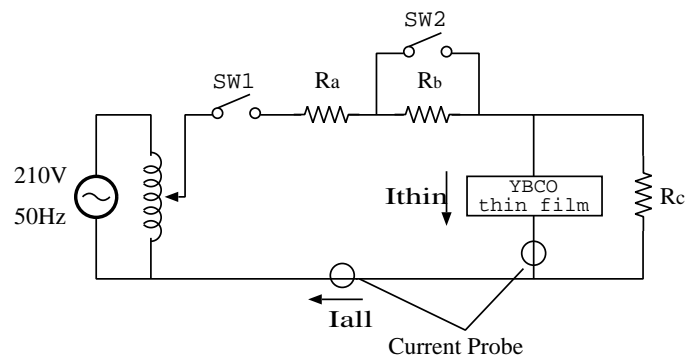


図 3.11: 復帰時間測定実験回路

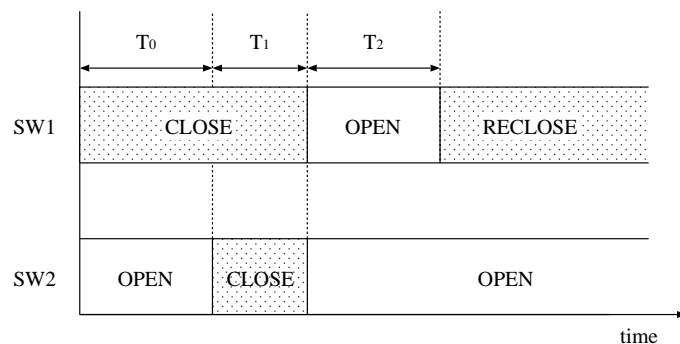


図 3.12: スイッチの動作

<sup>1</sup>ハンドルにより電圧を調整可能な変圧器

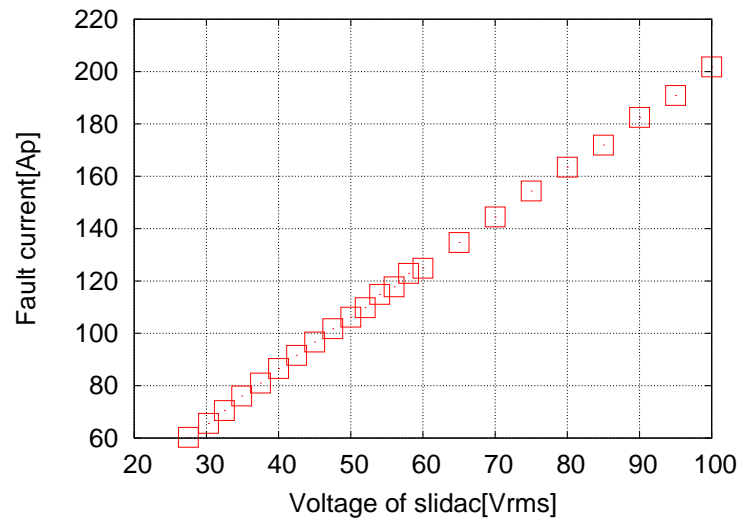


図 3.13: スライダック電圧と事故電流の関係

### 3.5 動作電流値の定義

動作電流値の定義について述べる。図 3.14 に動作時と非動作時の V-I 曲線を示す。非動作時には電流が大きくなるにつれて電圧が発生するが電流の減少とともに電圧も生じなくなる。一方、動作時では大きな電圧が発生し、原点付近では直線に近いのが分かる。これは、YBCO 薄膜が常電導転移を起こし抵抗が発生し続けていることを示す。このように常電導転移による抵抗が発生している時を動作状態とし、回路全体に流れる電流値を動作電流値と定義する。

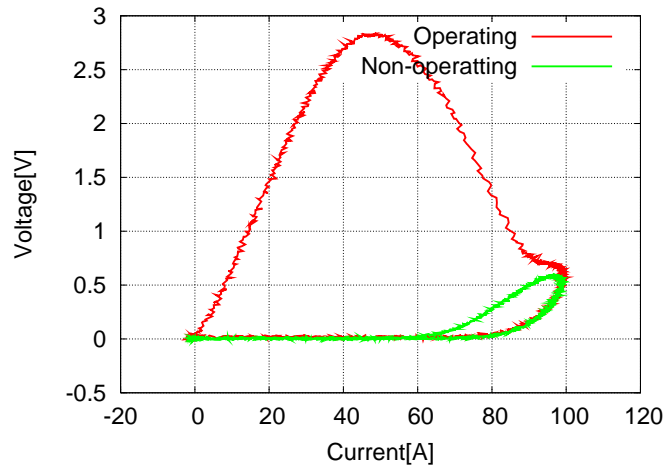


図 3.14: 動作時と非動作時の V-I 曲線

### 3.6 通常電流の選定

超電導状態を保つ電流値の測定を行った。図 3.15、3.16 に電流を 1 秒間通電した時の薄膜に流れる電流波形を示す。これは薄膜 A について測定した例である。30A では超電導状態を保っているのに対し、それ以上の電流を通電した時には約 30 サイクルで常電導転移が起きていることが分かる。この場合長時間の通電に対して超電導状態を保つ事が可能な電流値を 30A とし、その値から 5A 小さな電流を通常電流として通電した。同様に薄膜 B、薄膜 C についても長時間の通電に対して超電導状態を保つ事が可能な電流値を計測し、その値はそれぞれ 50A、45A であった。実際に系統へ導入される際にはより大きなマージンをとって運転されるため復帰時間測定では厳しい条件といえる。

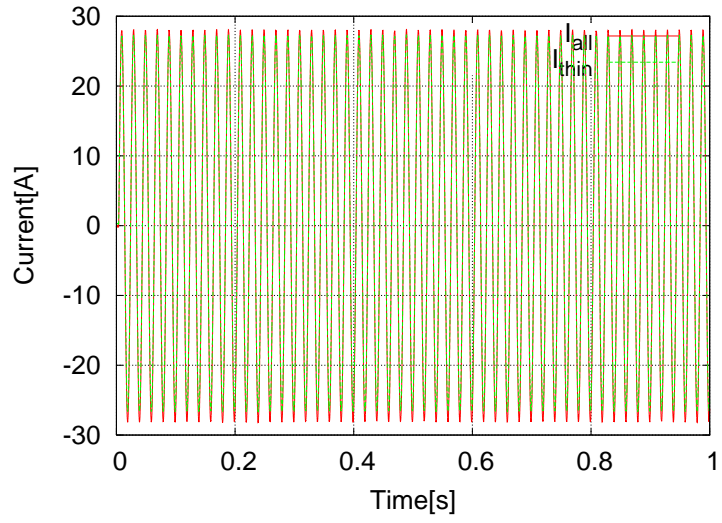


図 3.15: 超電導状態を保つ場合

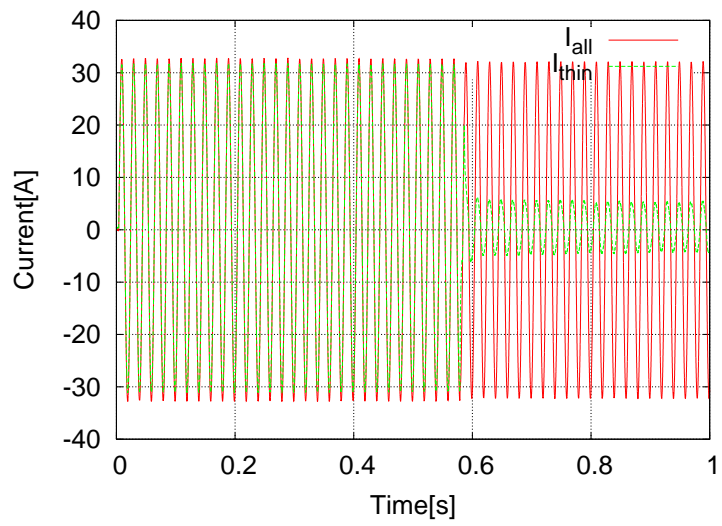


図 3.16: 常電導状態へ転移する場合

## 3.7 実験結果

### 3.7.1 薄膜 A(保護膜なし)



#### 抵抗測定

時間の経過と抵抗値の変化の関係を図 3.17 に示す。室内温度での抵抗値が  $62\Omega$ 、液体窒素の注入により温度がさがるにつれて抵抗値が徐々に小さくなり、 $45\Omega$  程度で常電導から超電導への転移が起こった。

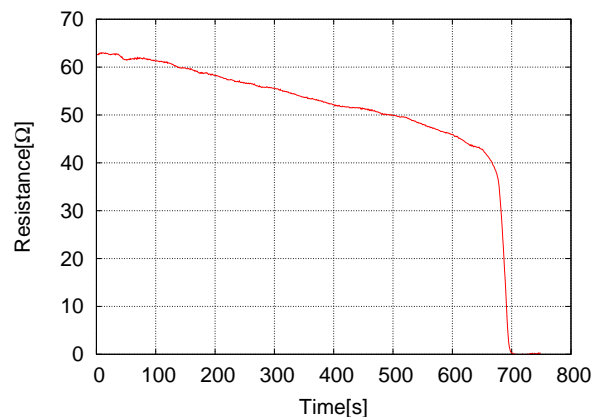


図 3.17: 薄膜の抵抗値の変化

#### 動作電流値の周波数特性

$0.3\Omega$  の抵抗を並列に接続して実験を行った。抵抗測定の結果では  $45\Omega$  であったが、流れる電流が小さい準定常状態での抵抗値であり、大きな電流に対しては全体が常電導転移せずに抵抗の発生が小さくなるということが考えられる。また、保護膜のない YBCO 薄膜では常電導転移時に発生する熱による熱が局所的に発生し焼損しやすいという理由から、抵抗測定で得られた抵抗に対して非常に小さい並列抵抗を選択した。

測定した動作電流値の周波数特性を図 3.18 に示す。周波数が大きくなるにつれて動作電流値は大きくなっているが、図 2.8 と比較すると大きな差は出なかった。金属保護膜のある薄膜に比べ熱の伝導が少ないためにごく局所的な常電導転移が起こることで動作してしまったのではないかとと思われる。

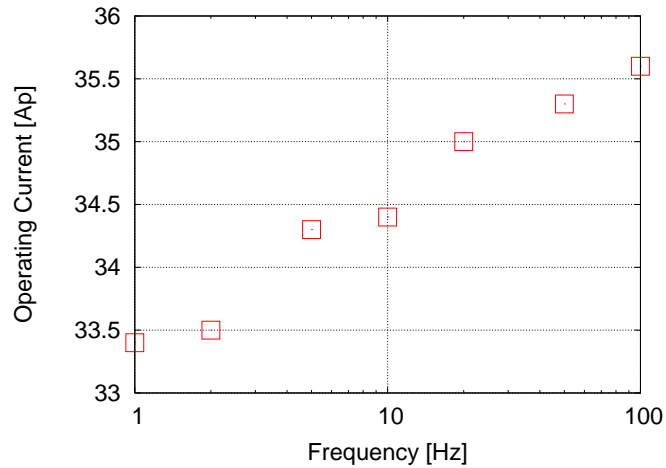


図 3.18: 動作電流値の周波数特性

#### 復帰時間測定

復帰時間について次のように  $I_1$ 、 $T_1$ 、並列抵抗  $R$  を変えてそれぞれ測定した。

$I_1$ [Ap]	40、50、60、65、70、75、80、85
$T_1$ [cycle]	0.5、1、3、5
$R$ [ $\Omega$ ]	0.5、1、1.5

図 3.19 に  $I_1$  を変化させた時の復帰特性を示す。並列に接続した抵抗は  $1.5\Omega$  である。通電時間半サイクルでは通電電流値の影響が小さい。熱の発生する時間が  $\frac{1}{4}$  周期と短いことにより温度の上昇の差があまり出なかったためと考えられる。3 サイクル、5 サイクルでは通電電流値に比例している。

図 3.20 に並列抵抗  $R$  を変化させた時の復帰特性を示す。通電電流は  $60A$  である。通電電流を変化させたときの同様に短いサイクルの通電では差が小さいが 3 サイクル、5 サイクルについては抵抗の大きさにほぼ比例している。

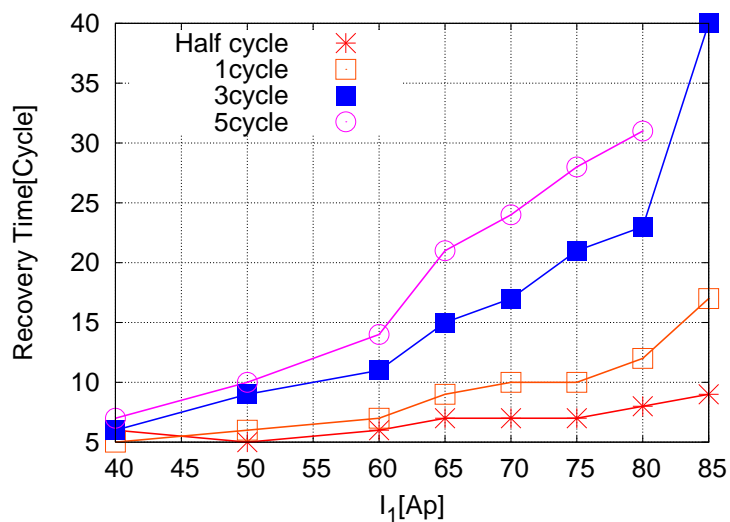


図 3.19: 薄膜の復帰時間

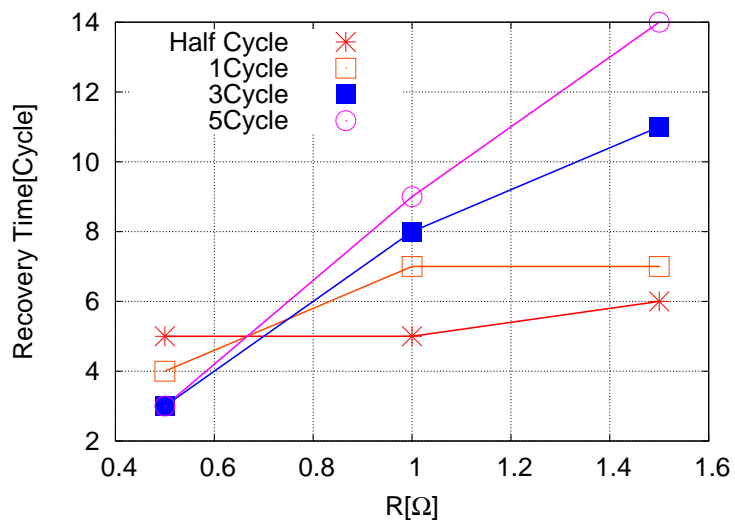


図 3.20: 薄膜の復帰特性

### 通電中の超電導状態への復帰の可能性

限流動作後 1 サイクルの休止時間の後、通常電流を通電することで通電休止時間が短く超電導状態へ復帰できない場合でも  $T_3$  を長くすることで通常電流通電中に復帰が可能かどうかを確認した。

電流を 1 サイクル停止して電流を再び通電した時の全体への通電電流と薄膜への通電電流の電流を図 3.21 に示す。左の図が通電中に超電導状態へ復帰した例で、電流を  $I_1$  を 70A として 3 サイクル、 $I_2$  を 10A として 20 サイクル通電したところ、20 サイクル目に超電導状態

へ復帰した。一方、右の図が復帰できなかった例であり、電流は  $I_1$  は同条件で、 $I_2$  を 15A として 40 サイクル通電している。10A 程度以下の小さな電流でなければ通電中の超電導への復帰は不可能であると言える。

電力の発生の様子を図 3.22 に示す。復帰する場合も復帰しない場合も再通電開始から徐々に発生する電力が大きくなる。これに関しては次のように説明できる。図 3.23 が動作時に発生する電力の変化である。動作時半サイクルで最大の電力を発生した後、時間と共に徐々に小さくなっていく。発生する熱により常電導部分が広がるため抵抗が増し、薄膜に流れる電流が小さくなるためである。ここではその逆の現象が起きている。

復帰する場合では徐々に超電導状態の部分が広がり、最終的に完全に超電導状態へ戻る。一方、復帰できない場合では徐々に超電導状態の部分が広がるものの、ある程度広がるとそれ以上には広がらない。発生する電力がある時間後にほぼ一定となっいることから、それが見てとれる。発熱量と冷却量が均衡する状態になったためであり、これよりも発生する熱が小さくなければ超電導状態へ復帰できないということになる。発生電力で考えると 15W よりも小さな電力しか発生しない場合でなければならない。

15W の境界となるのが 10A という非常に小さな電流であり、いったん動作してしまうと通電中に超電導状態へ復帰することはできない。超電導状態へ完全に復帰した後に再閉路しなければならず、復帰時間の把握が重要であると言える。

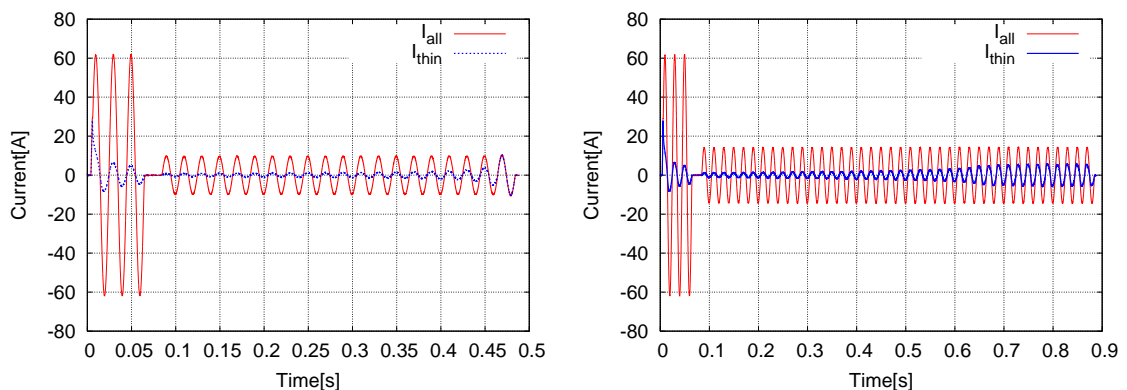


図 3.21: 通電電流の電流波形 (左:復帰する場合、右: 復帰しない場合)

### 薄膜の焼損

復帰特性測定中に薄膜が焼損した。通電電流は指令値で 85A、3 サイクル通電するはずであったが 1 サイクル目に焼損した。

図 3.24 に 85A の電流を通電時間半サイクル、1 サイクル、3 サイクル通電した時の薄膜に流れる電流波形を示す。通電時間半サイクル、1 サイクルと比較すると 3 サイクル通電の時には小さな電流で推移していることがわかる。超電導体の臨界電流値には温度依存性があり、温度が低いほど高い臨界電流を得られる。焼損した試験では通電前に温度が上昇していたと考えられる。また、図 3.25 に示すように発生する電圧についてはあまり差が見られないので焼損したケースと焼損しなかったケースでは熱の発生の際には焼損してしまった時の方が小さいと言える。より小さな熱で焼損してしまったことから通電前から温度が上昇していた



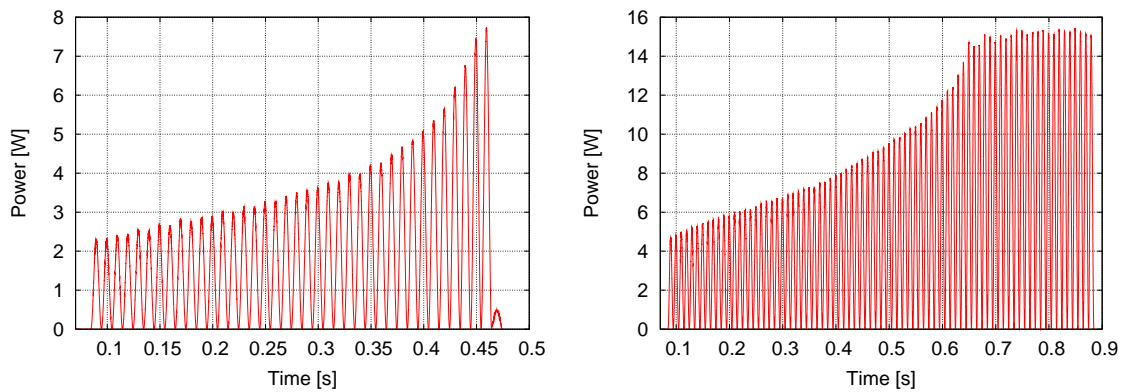


図 3.22: 発生する電力 (左:復帰する場合、右:復帰しない場合)

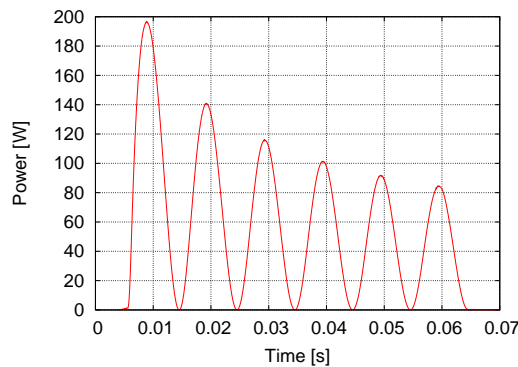


図 3.23: 動作時に発生する電力

と言える。実際、焼損が起きる直前の計測で3サイクル通電後、36サイクルの休止時間をおいても復帰しなかった。その後十分時間をおいて計測を行わなかったために薄膜の焼損が引き起こされてしまった。

YBCO 薄膜の最大温度は350Kとされている。350Kにおける薄膜の抵抗値は室温状態での抵抗値と臨界温度での直上抵抗により温度依存性が一定であるとの仮定すると $96\Omega$ となる。今回焼損した例では $8.5\Omega$ であり直上抵抗の値よりも小さい値である。図 3.26 に示すように焼損した部分は接続部分に近いごく一部分のみであり、局所的な熱上昇による焼損であると言える。熱の分散を図るために抵抗膜の存在が不可欠である。

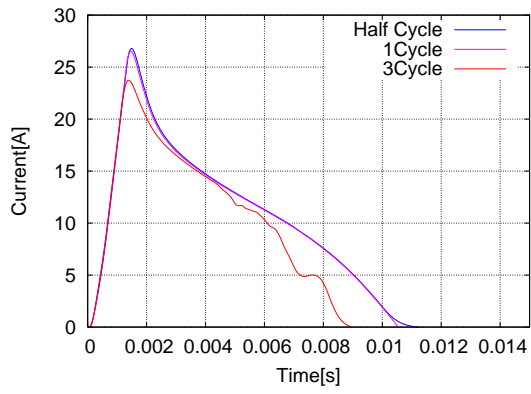


図 3.24: 薄膜に流れる電流

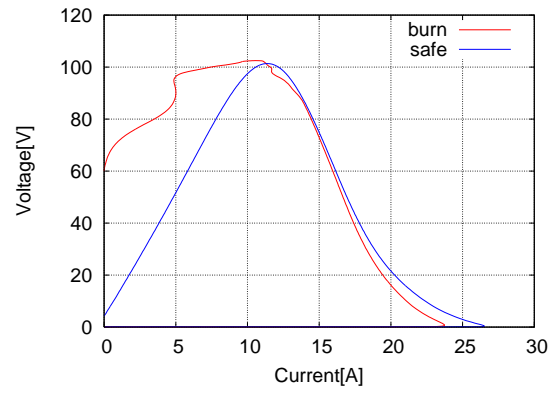


図 3.25: 薄膜の電圧 - 電流特性



図 3.26: 焼損した薄膜

### 3.7.2 薄膜 B(全体に保護膜)



### 3.7.3 抵抗測定

時間の経過と抵抗値の変化の関係を図 3.27 に示す。室内温度での抵抗値が  $18\Omega$ 、液体窒素の注入により温度がさがるにつれて抵抗値が徐々に小さくなり、約  $13\Omega$  で常電導から超電導への転移が起こった。

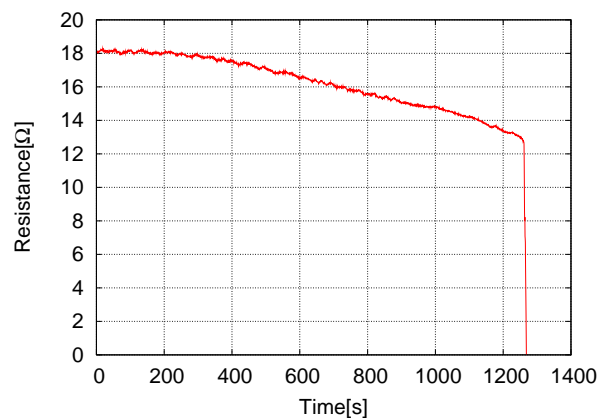


図 3.27: 薄膜の抵抗値の変化

### 周波数特性

抵抗値は  $0.3\Omega$  とした。測定した周波数特性を図 3.28 に示す。周波数が高くなるにつれて動作電流値はある程度大きくなっている。

### 復帰時間の測定

#### 事故電流のみが通電した時の復帰時間

$I_2$  は  $45\text{A}$  とした。復帰特性について  $I_1$ 、 $T_1$  を変えてそれぞれ測定した結果を図 3.29 に示す。復帰時間は通電電流に比例して増加していることがわかる。

#### 定常状態から事故が生じた際の復帰時間

##### 1. 事故電流を変化させた場合

スライダック電圧を  $30\sim 60\text{V}$  で変化させ、事故電流値を変化させたときの復帰時間の測定を行なった。並列抵抗の抵抗値は  $1\Omega$  とした。結果を図 3.30 に示す。グラフの横軸が通電された事故電流、縦軸が回路開放時間  $T_2$  で、ある回路開放時間  $T_2$  に対して薄膜

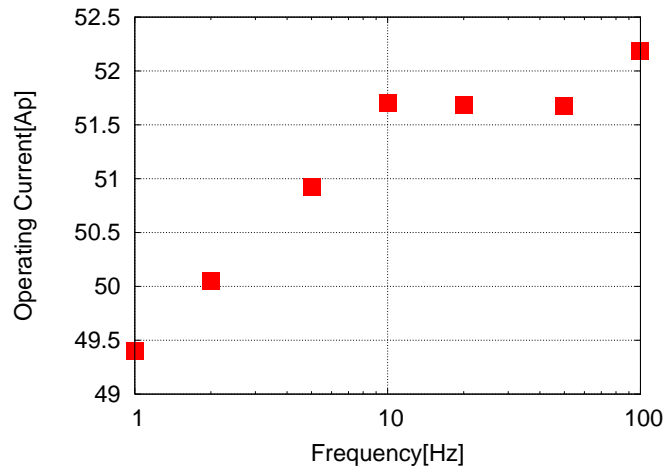


図 3.28: 動作電流値の周波数特性

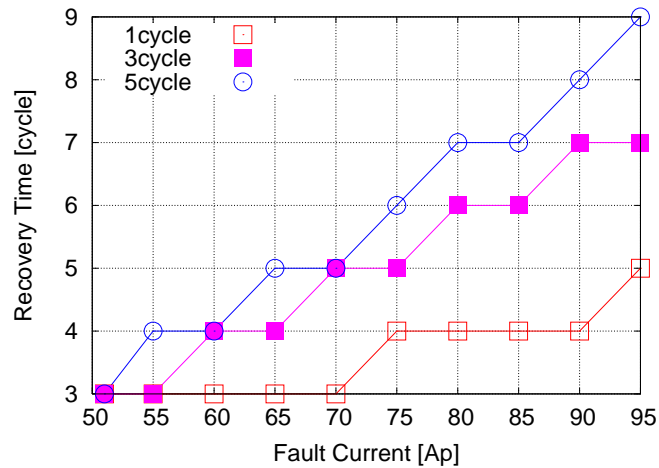


図 3.29: 薄膜の復帰特性

が超電導状態に復帰しているか否かを示している。○が復帰したことを、×が復帰できなかったことを表す。事故電流に対する復帰時間は図 3.30 中の直線で表される。

## 2. 並列抵抗を変化させた場合

並列抵抗の抵抗値は 1、1.5、2、3、4、5、6、8[Ω] の 8 通りで変化させ、復帰時間の測定を行なった。スライダック電圧は 35Vrms(事故電流 76.1Ap) とした。結果を図 3.31 に示す。グラフの横軸が並列抵抗値、縦軸が回路開放時間  $T_2$  で、ある回路開放時間  $T_2$  に対して薄膜が超電導状態に復帰しているか否かを示している。○が復帰したことを、×が復帰できなかったことを表す。抵抗を大きくすると復帰時間は大きくなるが、ある程度の大きさになると復帰時間の増加の割合は小さくなる。

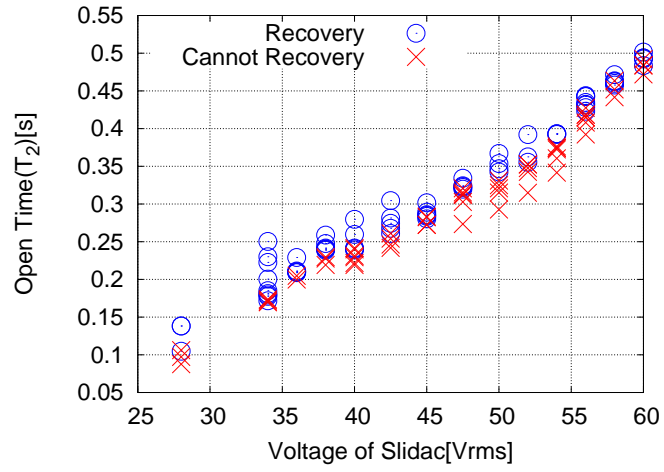


図 3.30: 通電電流を変化させたときの復帰時間

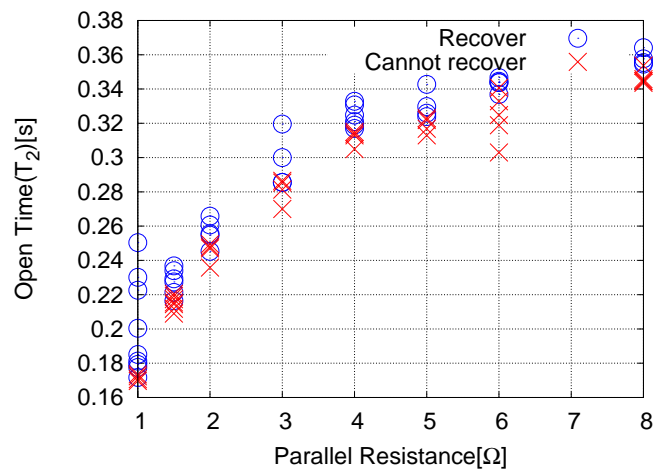
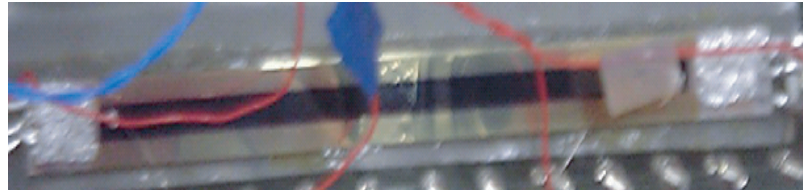


図 3.31: 並列抵抗を変化させたときの復帰時間

### 3.7.4 薄膜 C(部分的に保護膜)



#### 抵抗測定

時間の経過と抵抗値の変化の関係を図 3.32 に示す。室内温度での抵抗値が約  $27\Omega$  と予想される。液体窒素の注入により温度がさがるとして抵抗値が徐々に小さくなり、約  $23\Omega$  で常電導から超電導への転移が起こった。

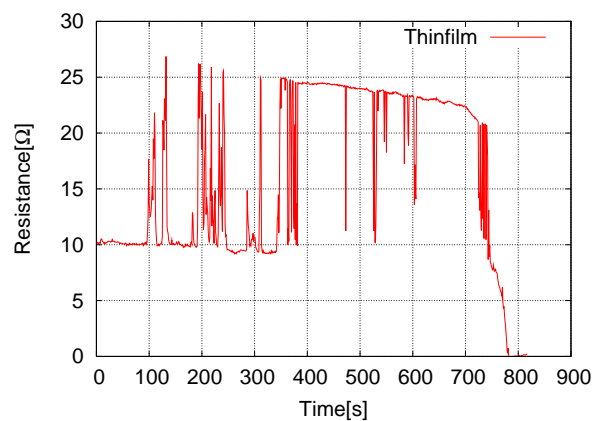


図 3.32: 抵抗値の変化

#### 動作電流値の周波数特性

測定した周波数特性を図 3.33 に示す。周波数が高くなるにつれて動作電流値はある程度大きくなっている。

#### 復帰時間の測定

##### 事故電流のみを通電した時の復帰時間

薄膜 A、薄膜 B 同様に電流に対して比例して復帰時間は長くなっている。

##### 定常状態から事故が発生した時の復帰時間の関係

##### 1. 通電電流と復帰時間の関係

スライダック電圧を  $30 \sim 90V_{rms}$  で変化させ、事故電流値を変化させたときの復帰時間の測定を行なった。並列抵抗の抵抗値は  $1\Omega$  とした。結果を図 3.35 に示す。グラフの

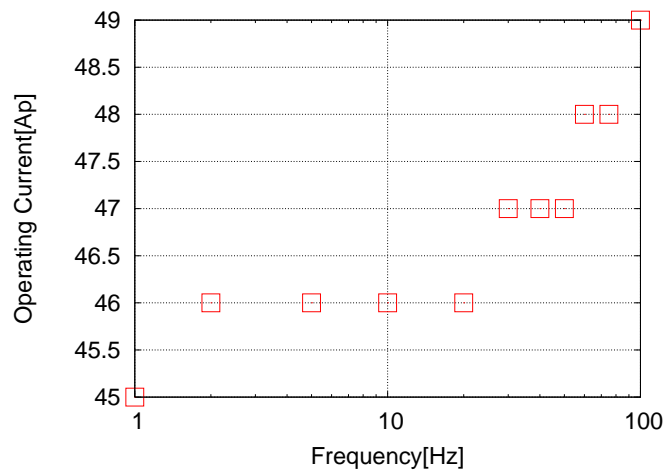


図 3.33: 動作電流値の周波数特性

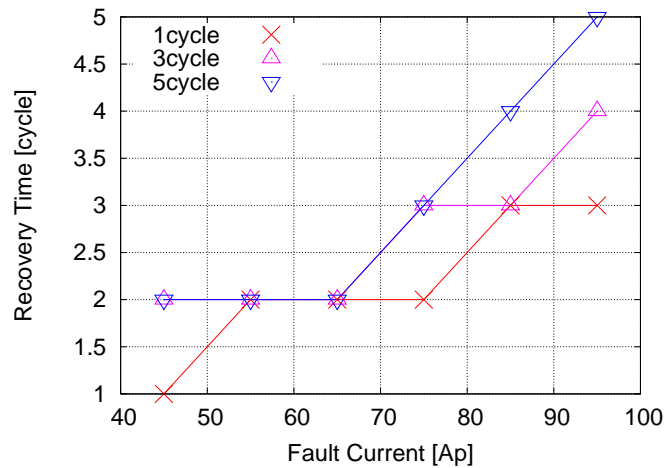


図 3.34: 復帰時間

横軸が通電された事故電流、縦軸が回路開放時間  $T_2$  で、ある回路開放時間  $T_2$  に対して薄膜が超電導状態に復帰しているか否かを示している。○が復帰したことを、×が復帰できなかったことを表す。通電電流に対して復帰時間は比例することがわかる。

## 2. 並列抵抗と復帰時間の関係

並列抵抗の抵抗値は 1、2、3、4、5、6、8[Ω] の 7 通りで変化させ、復帰時間の測定を行なった。スライダック電圧は 35Vrms(事故電流 76.1Ap) と 45Vrms(事故電流 96.7Ap) の 2 通りで行なった。結果を図 3.36、図 3.37 に示す。グラフの横軸が並列抵抗値、縦軸が回路開放時間  $T_2$  で、ある回路開放時間  $T_2$  に対して薄膜が超電導状態に復帰しているか否かを示している。○が復帰したことを、×が復帰できなかったことを表す。抵抗を大きくすると復帰時間は大きくなるが、ある程度の大きさになると復帰時間の増加の割合は小さくなる。

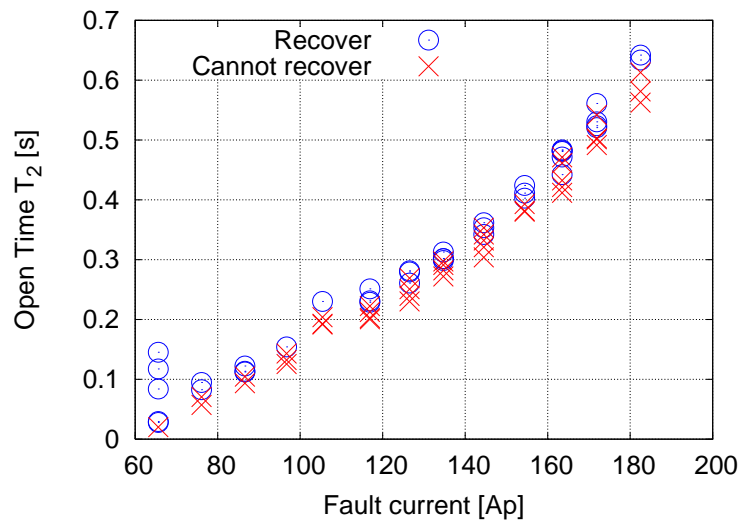


図 3.35: 通電電流を変化させたときの復帰時間

スライダック電圧を変えても、復帰時間の抵抗に対する増加率がほぼ同じ程度になるということがわかった。

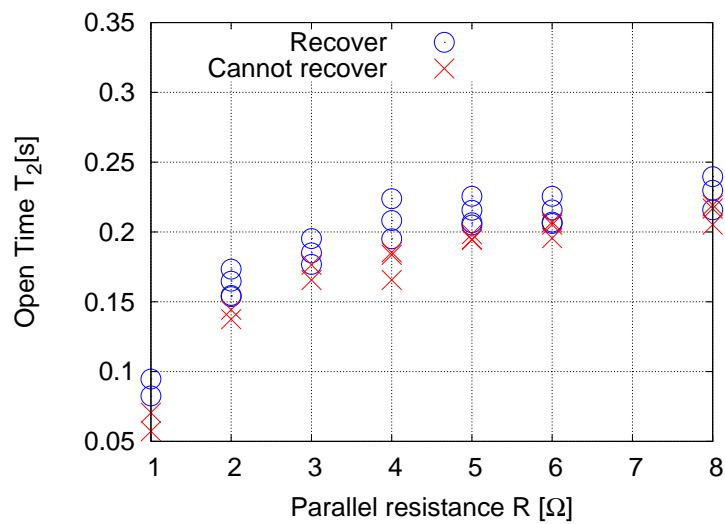


図 3.36: 並列抵抗を変化させたときの復帰時間 (35Vrms)



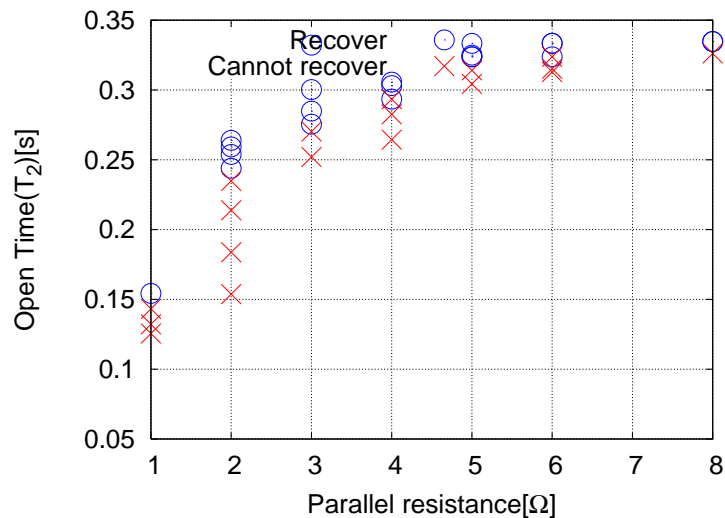


図 3.37: 並列抵抗を変化させたときの復帰時間 (45Vrms)

### 3.8 保護膜の違いによる比較

安定性、取り扱いのし易さ、経年劣化が少ない、限流動作時のホットスポット現象の発生を抑えることができる等の理由から YBCO 薄膜に対して金属の保護膜を施すのが一般的である。今回の実験でも保護膜のない薄膜においては焼損が起きた。焼損部分のごく狭い範囲に限られており局所的に大きな熱を発生してしまったことが予想される。このことから熱を分散させる金属膜の必要性が確認された。

本節では金属の保護膜の施された薄膜 B、薄膜 C について動作電流値、復帰時間、インピーダンスを比較し、保護膜の違いによる性質の検討を行う。

#### 3.8.1 動作電流値

通電電流を 60A 半サイクル、並列抵抗を  $0.3\Omega$  とした時の、薄膜 B、薄膜 C の動作の様子を図 3.38 に示す。横軸が薄膜に流れる電流、縦軸が薄膜両端に発生する電圧を示している。薄膜 B の方が動作電流は大きくなるが、素子の製造段階での  $I_c$  の違いによるものとも考えることもできる。動作電流が並列抵抗に影響を受けないことから類推すると、保護膜の影響は少ないことが考えられる。

#### 3.8.2 復帰時間

並列抵抗を  $1\Omega$  とした場合の復帰時間の変化を図 3.39 に示す。薄膜 C の方が条件が同一の場合短い復帰時間が得られる。これについては薄膜 B と比較して動作電流値が小さい、発生インピーダンスが大きいくことで発生熱量が抑えられたことが一因として考えられる。そこで動作中に発生する熱と復帰時間との関係に着目する。その結果を図 3.40 に示す。ここでは同じ

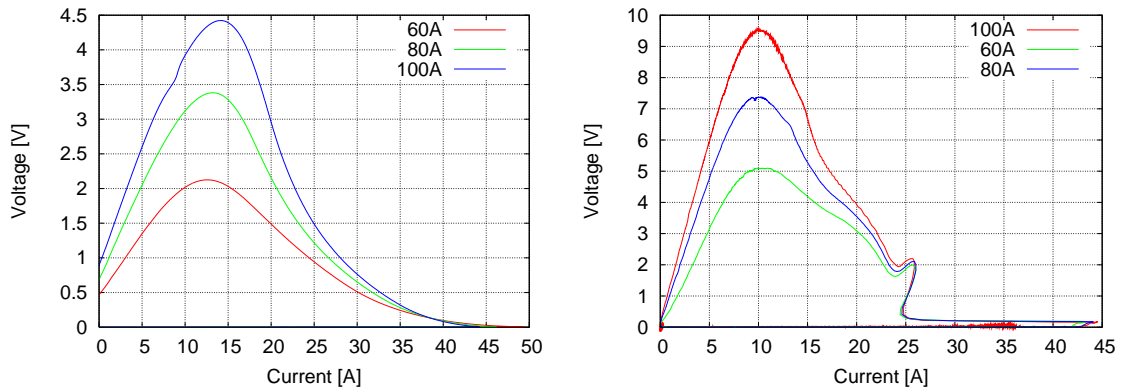


図 3.38: 動作の様子 (左:薄膜 B、右:薄膜 C)

発生熱量に対してほぼ同じ復帰時間となっており、冷却の面では大きな差はないということが言える。薄膜 C の方が発生するインピーダンスが大きいため薄膜への通電電流が小さくなり、発熱量が少なかったために復帰時間が短くなったと思われる。

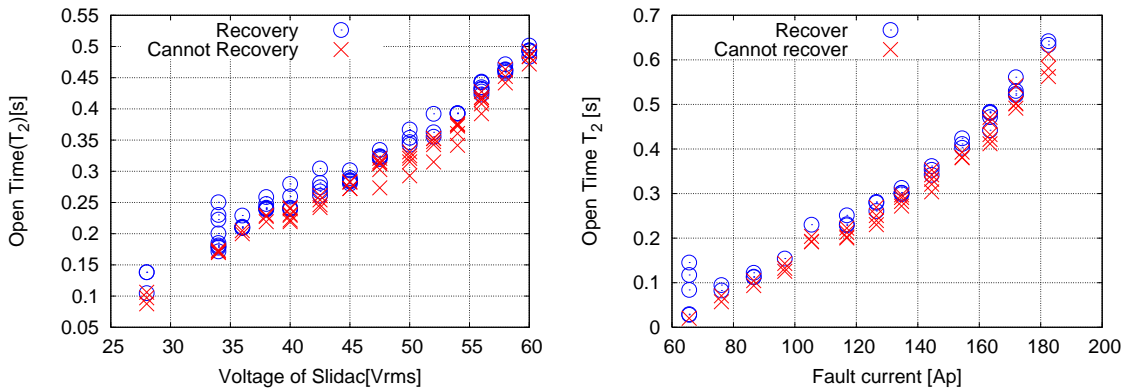


図 3.39: 復帰時間 (左:薄膜 B、右:薄膜 C)

### 3.8.3 インピーダンス

並列抵抗を  $1\Omega$ 、スライダック電圧を  $30\sim 60V$  で変化させた時に薄膜に発生する抵抗を図 3.41 に示す。横軸が限流器が接続されていない場合に発生する事故電流、縦軸が限流動作後、4 サイクル経過した時に薄膜に発生している抵抗値である。両者ともに事故電流に対して線形に増加する傾向については共通するものがある。発生するインピーダンスは薄膜 C の方が大きくなっているがこれは常電導状態での抵抗の大きさによるものである。(薄膜 B :  $13\Omega$ 、薄膜 C :  $23\Omega$ ) 両者を比較するため、薄膜全体に対する常電導部分の割合について考えていく。その図を図 3.42 に示す。全体を保護膜によって覆われた薄膜 B の方が同じ電流に対する常電導部分の割合は小さいという結果が得られた。

この傾向から動作直後からインピーダンスが上昇する過程でも薄膜 B の方が小さくなるこ

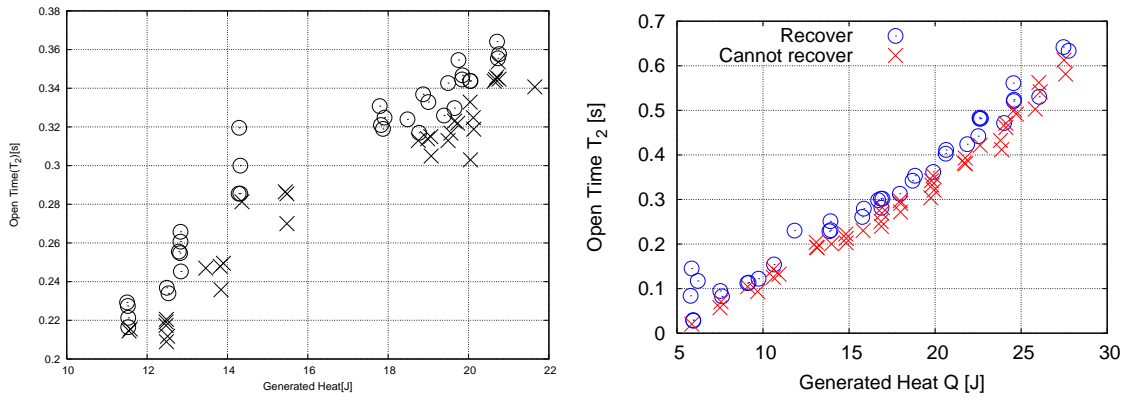


図 3.40: 発生熱量と復帰時間の関係 (左:薄膜 B、右:薄膜 C)

とが推測される。限流器としては動作インピーダンスが高いことともに、動作後により早くインピーダンスを発生するのが望まれるため、インピーダンスが高いことだけでなく、インピーダンスの発生が早い点でも一部を保護膜で覆わない薄膜の方が優れていると言える。

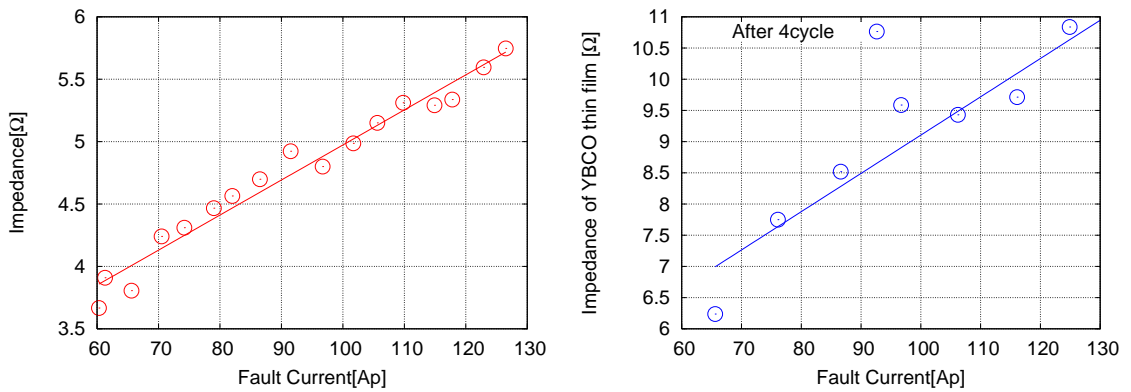


図 3.41: 動作後 4 サイクル経過時の薄膜の抵抗 (左:薄膜 B、右:薄膜 C)

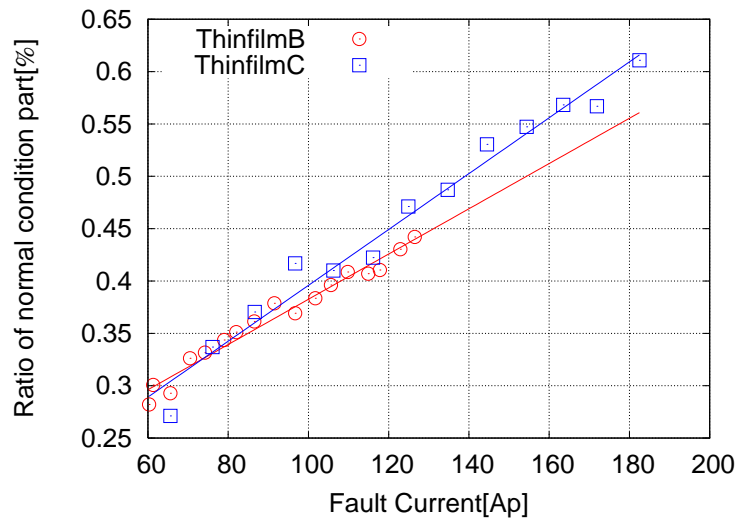


図 3.42: 薄膜全体に対する常電導部分の割合

### 3.9 まとめ

本章では YBCO 薄膜を用いた実験について、その実験方法、実験結果を述べた。実験から次のことが明らかになった。

- 動作電流値には周波数依存性がある。しかし、差が小さいためインパルス電流に対してもほぼ変わらないことが考えられる。  
インジウムによる接続に問題があった可能性が考えられ、接続の仕方を変えて再実験する必要があると思われる。
- 復帰時間は
  - － 事故電流に比例する。
  - － 通電時間に比例する。
  - － 小さい並列抵抗に対してはほぼ比例し、大きくなると一定の時間に近付いていく。
- 通電中の超電導状態への復帰が起きるためには 10A 以下の小さな電流でなければならない
- 発生するインピーダンス、インピーダンスの発生速度の点で部分的な保護膜の薄膜が優れている。
- 発生するインピーダンスが大きいほど動作時に発生する熱量が抑えられる
- 冷却の面では大きな差は見られなかった。

## 第4章 YBCO 薄膜の諸特性および抵抗型限流器設計に関する考察

前章では保護膜の違いによる基本特性の比較を行い、部分的に保護膜のある薄膜

本章では部分的に保護膜の施された薄膜について抵抗型限流器の設計上問題となる復帰時間、インピーダンス、動作電流の考察を行い、これらを元に配電系統における限流器の設計について考察する。

### 4.1 復帰時間と熱の関係

復帰時間を決定する最も大きな要因は薄膜に発生する熱であると思われる。そこで事故電流を変化させた場合と並列抵抗を変化させた場合のそれぞれについてに限流動作後に発生した熱と復帰時間の関係について考える。事故電流を変化させた場合を図 4.1 に、並列抵抗を変化させた場合を図 4.2 に示す。横軸が動作時に発生する熱量、縦軸が動作後の回路開放時間を示しており、○が復帰したことを、×が復帰できなかったことを表す。発生する熱の算出は薄膜に流れる電流と薄膜両端の電圧の積を動作時間で積分することで行なった。

事故電流を変化させた場合、並列抵抗を変化させた場合ともに復帰時間は発生した熱量に対して比例していることが見て取れる。図 4.1、4.2 を比較するとほぼ同じ様な値の復帰時間になっている。

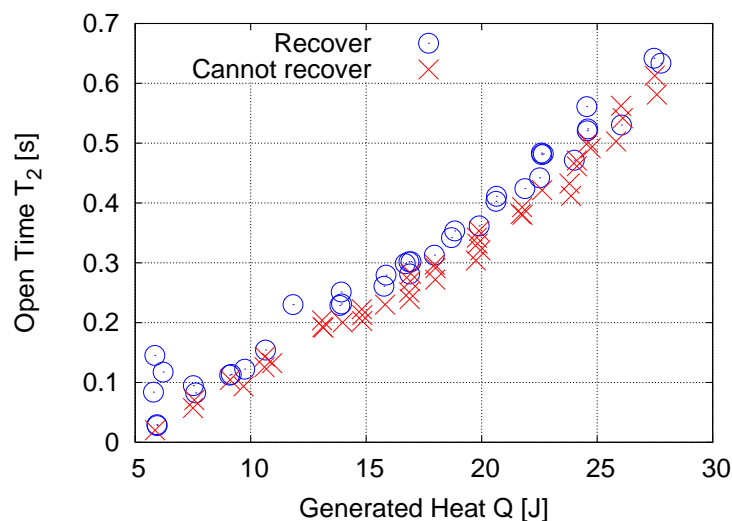


図 4.1: 発生する熱量と復帰時間の関係 (通電電流を変化させた時)

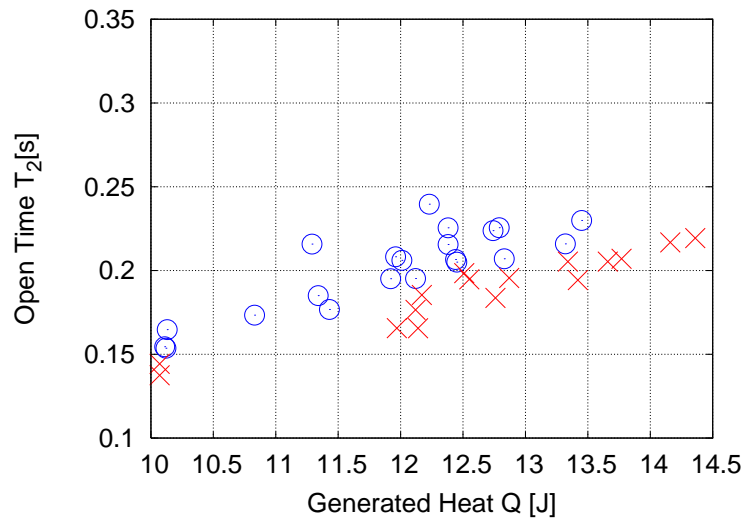


図 4.2: 発生する熱量と復帰時間の関係 (並列抵抗を変化させた時)

1つの図に合わせて表示すると図 4.3 の示す通りになる。図中の直線は復帰可能か否かを分ける境界であり最小の復帰時間と考えられる。直線の式は

$$T_2 = 0.025 \times Q - 0.1 \quad (4.1)$$

で表される。発生熱量が 4J で復帰時間 0s となるが、これは動作時間中においても発生する熱の冷却は進んでいるためである。発生する熱が小さい場合には動作時間中での冷却で完全に熱が取り除かれるために復帰時間は 0s となる。一方、熱の発生が大きく完全に冷却ができない場合において回路を開放し、冷却する時間を設けなければならない。

事故電流を変化させる場合、並列抵抗を変化させる場合と実験条件は異なるにも関わらず、発生する熱量と復帰時間の関係を考えればほぼ同じ条件で復帰時間が決定されるということが言える。

このように通電時間、通電素子、冷却条件が同じであれば、通電電流や並列抵抗が変化する場合でも発生する熱量を考えることで復帰時間を推測することが可能であると考えられる。

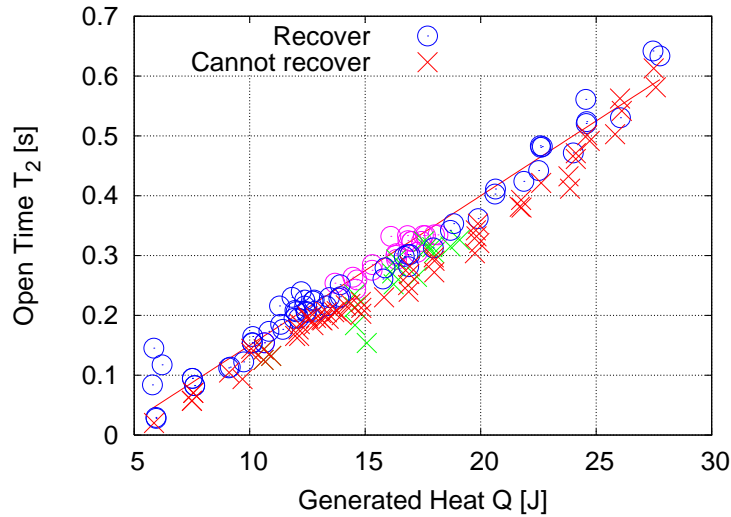


図 4.3: 発生する熱量と復帰時間の関係 (両方の場合を併記)

## 4.2 限流インピーダンスについて

YBCO 薄膜が常電導転移し、限流動作した際に薄膜に発生するインピーダンスを様々な実験条件において考える。今回はほぼ定常状態となる動作から 4 サイクル後と動作直後に最大の電力消費が起こる時点での発生するインピーダンスを算出する。定常状態となる時点でのインピーダンスは限流電流を決定するため把握しておく必要がある。また、動作直後のインピーダンスについては薄膜の焼損が動作直後に多いことから必要と思われる。インピーダンスは薄膜と並列抵抗へ通電する電流の比から算出した。

図 4.4 に電圧を大きくして事故電流を大きくした際のインピーダンスの変化を示す。並列抵抗の値は  $1\Omega$  である。図 4.5 に並列抵抗の大きさを変えていった際のインピーダンスの変化を示す。スライダック電圧は  $35V_{rms}$ (事故電流  $76.1A_p$ ) である。 $\Delta$  が限流動作直後、 $\circ$  が 4 サイクル後のインピーダンスを表している。

まず、事故電流を変化させた場合について考える。動作直後、4 サイクル後ともに通電電流に対しては比例関係がある。流れる電流に対して超電導状態の部分が伸縮するような性質があるのではないかと考えられる。図 3.32 に示すように超電導状態と常電導状態の境界となる抵抗が  $23\Omega$  なので半分以上の部分が超電導状態を保っている。同じ割合で常電導部分が広がって行くと考えると薄膜の全ての部分が常電導転移するには事故電流が  $300A_p$  以上の電流が流れる状態でなければならない。

並列抵抗に対しては並列抵抗が小さい場合には並列抵抗の値に比例して増加し、大きくなるにつれてその増加率が小さくなり、およそ  $11\Omega$  程度で飽和することがわかる。並列抵抗に対して薄膜のインピーダンスは飽和するので想定される事故電流に対して薄膜に発生するインピーダンス程度の並列抵抗を接続することが限流インピーダンスの点からは適していると言える。しかし、図 3.36、図 3.37 からわかるように並列抵抗を大きくすることは復帰時間の増加につながるため復帰時間についても考慮する必要があり、限流インピーダンス、復帰時

間双方に適した並列抵抗の選定法について考えなければならない。

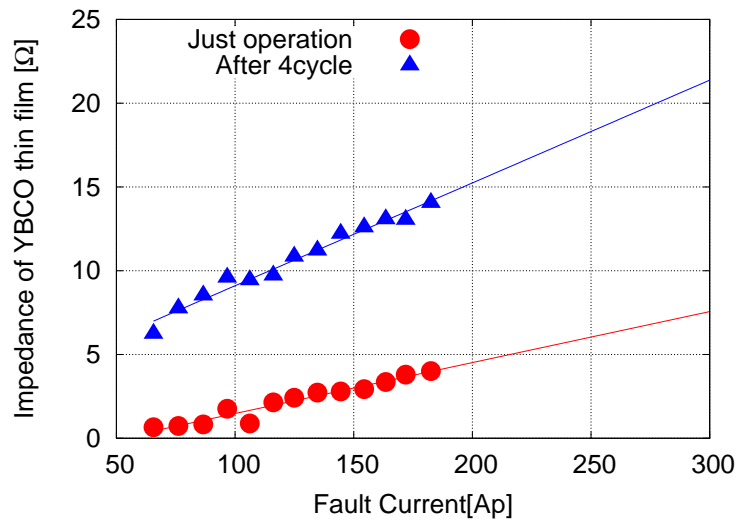


図 4.4: 発生するインピーダンス (通電電流を変化)



図 4.5: 発生するインピーダンス (並列抵抗を変化)



### 4.3 限流動作に関する考察

限流器に事故後即座に動作する高速性と、所定の動作電流値で確実に動作する高い動作精度が要求される。実験条件によって動作時間や動作電流値が大きく変化してしまうことはこれらの要求を満たすことが困難となる。そこで動作時間と動作電流値について同一条件で比較と事故電流や並列抵抗値を変化させた時の異なる実験条件での比較を行う。

#### 4.3.1 動作電流値

事故電流、並列抵抗を変化させて実験を行った。動作が開始した瞬間の電流値の分布を図4.6、図4.7に示す。横軸が動作した瞬間の電流値であり5Vの範囲で区切られており、縦軸がその範囲で動作が起こった回数を示している。

まず、全体に流れる電流について見ていくと47.5~48.75Aの範囲に集まっている。一方、薄膜に流れる電流で見た場合には平均でA誤差はとなっている。全体に流れる電流の誤差と比べるとその誤差は小さくなっている。薄膜に流れる電流で見ると誤差が小さく、全体に流れる電流で見ると誤差が大きくなることから動作の瞬間にYBCO薄膜に発生する抵抗には動作ごとにバラツキがあることがわかる。これはYBCO薄膜が完全に均一とは言えないために起こることであるが、この程度の誤差は許容されると思われる。

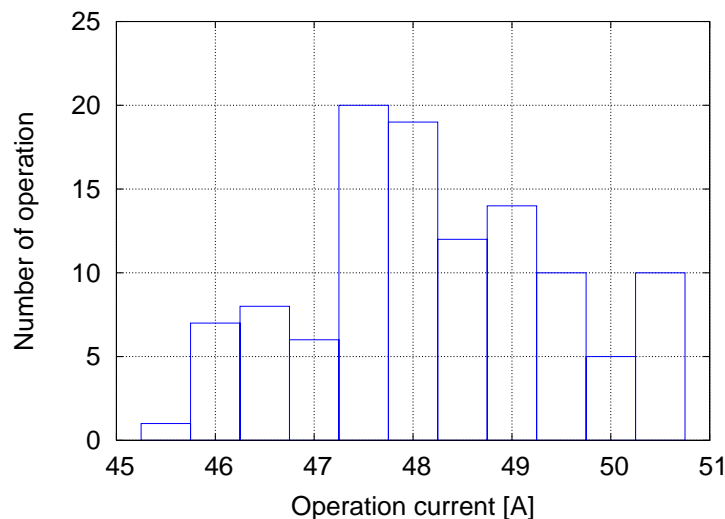


図 4.6: 動作電流値の分布 (全体に流れる電流)

図4.8、図4.9に条件を変えた場合に動作電流がどのように変化するかを示した。同一条件で複数回実験を行い、その動作電流値の平均を各実験条件での動作電流値としてまとめた。図4.8が事故電流を変化させた結果、図4.9が並列抵抗を変化させた結果である。並列抵抗の大きさが大きくなるにつれて全体に流れる電流でみた動作電流値は小さくなる傾向が見られる。しかし、他の3つの結果については、薄膜の不均一性による誤差の程度であると考えられ、事故電流、並列抵抗に対しては影響を受けないということが言える。

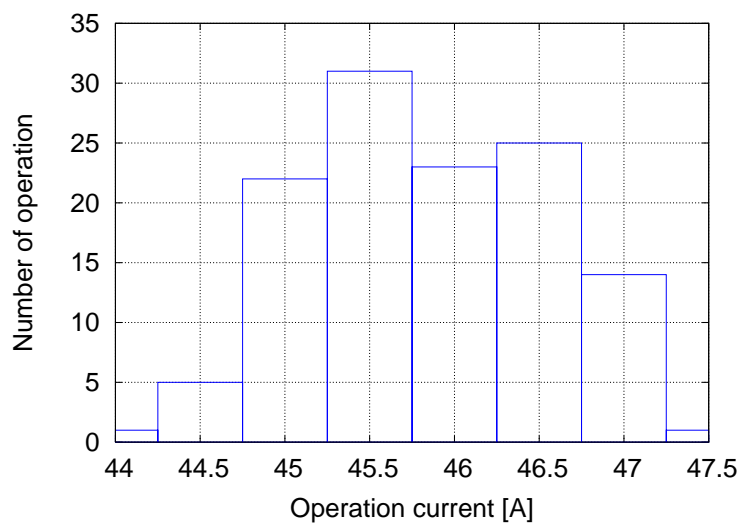


図 4.7: 動作電流値の分布 (薄膜に流れる電流)

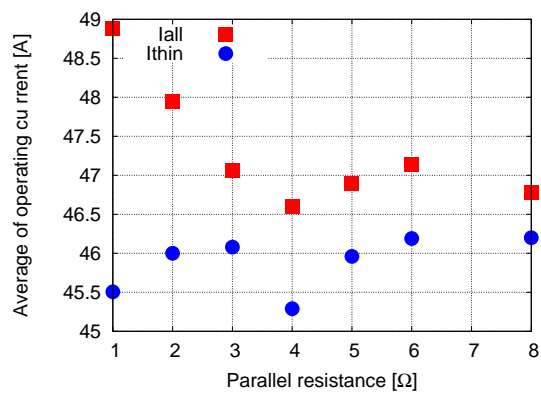
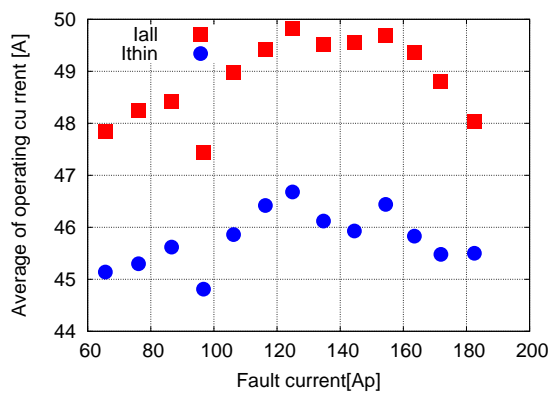


図 4.8: 事故電流を変化させた時の動作電流の変化

図 4.9: 並列抵抗を変化させた時の動作電流の変化

## 4.4 抵抗型超電導限流器設計に関する考察

これまでの考察により、YBCO 薄膜に関するいくつかの特性を明らかにした。これらを踏まえて、電力系統への導入を考えて、要求される特性を満たすための抵抗型超電導限流器の設計について考察を行う。

まず、要求される特性を改めてまとめる。YBCO 薄膜についてこれまでにわかっている特性についてまとめる。これらを踏まえて、YBCO 薄膜を用いた抵抗型超電導限流器を設計することを考えた場合にどのような設計が可能となるかについて、現状で系統への導入の実現の可能性の最も高い 6.6kV 配電系統を例にとって考察する。

### 4.4.1 YBCO 薄膜の諸特性

- 事故発生後、即座に限流動作を行なう。
- 同一素子の動作電流値の誤差は小さく、事故電流や並列抵抗によっては大きな影響を受けない。つまり任意の事故電流に対して素子によって決まる動作電流値で動作し、並列抵抗を自由に設定することができる。
- 限流動作時に薄膜に発生するインピーダンスは次のような特性がある。
  - － 事故電流に対しては比例して増加する。
  - － 並列抵抗に対しては小さい場合にはほぼ比例し、大きくなるにつれて増加率が小さくなりほぼ一定の値に近付いていく。
- 復帰時間は動作時に発生する熱を考えることで見当をつけることができる。

### 4.4.2 6kV 配電系統

まず、6kV 配電系統の特徴をまとめる。

- 短絡電流は遮断器の遮断容量から 12.5kA 以下に制限されている。
- 配電用変電所の変圧器のインピーダンス  $X_t$  は 7.5%(10MVA 基準)において標準化されている。
- 配電系統では短絡リレーの動作が 0.2 秒程度である。
- 1 分間の無電圧時間経過後に再開路再開路する低速再開路方式が適用されている。

近年、分散電源の設置が増加しており、電力系統と分離して運転しているものもあるが、配電系統と連系して運転されているものも多く見られる。今後電気事業自由化の進展に伴い系統連系される分散電源はさらに増加することが予想される。ここで配電系統に連系可能な発電容量について考える。最も過酷な状況を想定して、発電機、故障点とも変圧器二次母線の直近にあるものとする。短絡電流が 12.5kA で制限されるので定格電圧 6.6kV で計算すると短絡容量は 143MVA に相当する。一方配電用変電所の変圧器のインピーダンス  $X_t$  は 7.5%(10MVA 基準)で標準化されており、上位系統の短絡インピーダンスとして  $X_t$  だけを考慮すると、上

位系統から故障点に流入する短絡容量は 133MVA である。したがって、この系統で分散電源連系に伴い許容できる短絡容量の増分は 10MVA だけであり、連系発電機のインピーダンス  $X_g$  を自己容量で 20% とするとこの増分に対応する発電機容量は 2MVA となる。以上のように 6kV 配電系統では短絡容量に多くの余裕がないことから発電装置を連系する場合には限流器による対策が必要となる。

#### 4.4.3 抵抗型電導限流器の設計に関する考察

例として図 4.10 に示す配電系統モデルにおける限流器の設計について考える。導入する発電機の容量を 10MVA、上位系統の背後インピーダンスを 0.9% とする。故障点は変圧器二次側母線、三相短絡故障とする。

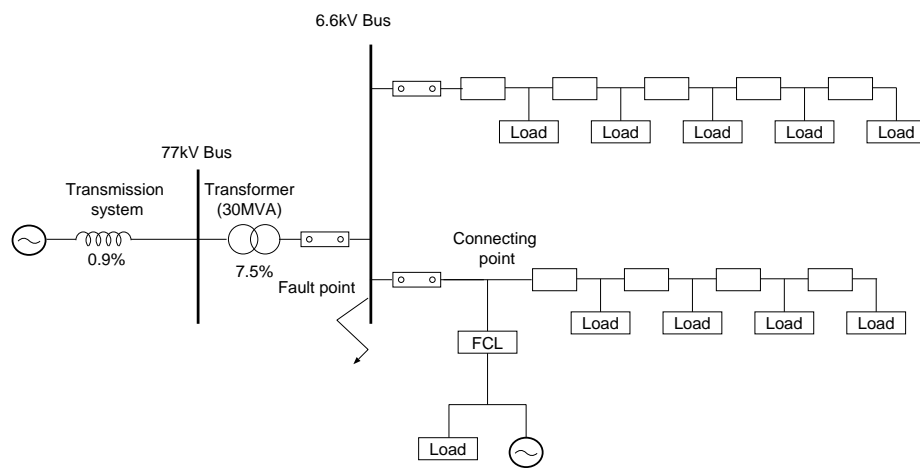


図 4.10: 想定する配電系統

#### 薄膜の並列数

限流器の限流動作開始電流を  $I_{FCLop}$ 、薄膜単体の動作開始電流を  $I_{YBCOop}$ 、薄膜の並列数を  $N_{parallel}$ 、想定する事故電流を  $I_{fault}$  とすると

$$I_{FCLop} = I_{YBCOop} \times N_{parallel} < I_{fault}$$

となる必要がある。

また、長時間通電可能電流値を  $I_{keep}$ 、定格電流を  $I_n$  とすると

$$\sqrt{2}I_n < I_{keep} \times N_{parallel}$$

の条件も満たす必要がある。

以上より薄膜の並列数  $N_{parallel}$  の条件は

$$\frac{\sqrt{2}I_n}{I_{keep}} < N_{parallel} < \frac{I_{fault}}{I_{YBCOop}} \quad (4.2)$$

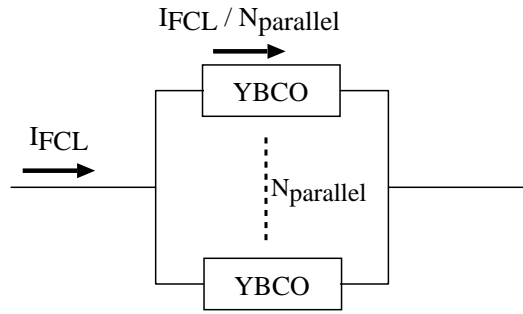


図 4.11: 並列数の決定

### 必要な限流インピーダンス

故障時の等価回路を図 4.12 に示す。このとき故障点から見た短絡インピーダンス $\%Z$  は式 (4.3) で表される。 $|\%Z|$  が故障点電流を許容値以下に抑制できる条件から限流インピーダンス  $R_{FCL}$  を式 (4.4) で求めた。

今回の条件では 10MVA 基準で 22.85%となる。 $X_g$  は自己容量で 20%とした。

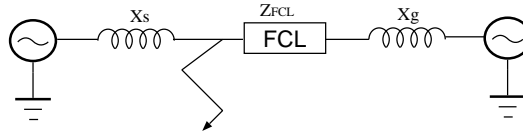


図 4.12: 故障時等価回路

$$\%Z = \frac{-X_g \cdot X_s + jR_{FCL} \cdot X_s}{R_{FCL} + j(X_g + X_s)} \quad (4.3)$$

$$R_{FCL} = \sqrt{\frac{(X_g \cdot X_s)^2 - |\%Z|^2(X_g + X_s)^2}{|\%Z|^2 - X_s^2}} \quad (4.4)$$

### 薄膜の直列数の決定

限流インピーダンス、復帰時間、最大温度、これらの条件を満たすように薄膜の直列数を決定する。ここでは薄膜に並列抵抗が接続されたものを 1つのユニットとして考え、このユニットを必要直列数接続されたものを直列ユニットとする。

復帰時間については動作状態で発生する熱量に依存しており、許容される熱量は式 (4.1) から求めることができる。低速度再閉路では事故除去後 1分後に再閉路されるため、復帰時間がこの条件を満たすことができる熱の許容量はそれぞれ 2.4kJ である。また、YBCO 薄膜の最高利用温度は 350 であり、許容熱量は 4.5kJ となる。

限流動作時に限流器に流れる事故電流を  $I_{FCL}$  とする。並列数  $N_{parallel}$  のとき一つの直列ユニットに流れる電流  $I_{unit} = \frac{I_{FCL}}{N_{parallel}}$  である。

発生する熱量は次の式で表される。

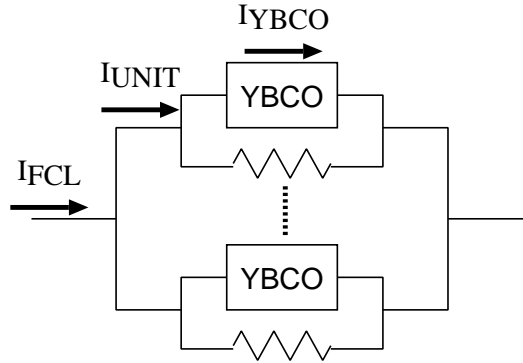


図 4.13: 並列抵抗値の決定

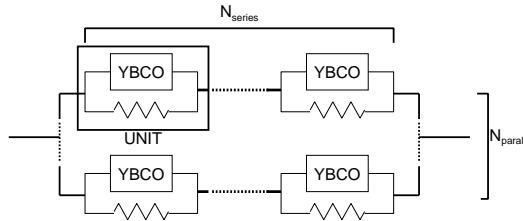


図 4.14: 直列数の決定

$$Q = I_{YBCO}^2 \times R_{YBCO}$$

$$I_{YBCO} = I_{FCL} \times \frac{R}{Z_{YBCO} + R}$$

この熱の条件から並列抵抗の抵抗値  $R$  が決定される。

限流器に必要とされるインピーダンスが式 (4.4) より求められた。並列数  $N_{parallel}$  のとき、このインピーダンス条件を満たすためには直列ユニットそれぞれに  $\frac{R_{FCL}}{N_{parallel}}$  のインピーダンスが必要になる。

一つのユニットのインピーダンスは

$$Z_{unit} = \frac{R_{YBCO} R}{R_{YBCO} + R}$$

であるので必要直列数  $N_{series}$  は次の式で求められる。

$$N_{series} = \frac{N_{parallel}}{Z_{unit}}$$

## まとめ

超電導限流器の設計を次のような手順で考えた。

1. 定格電流、動作開始電流から超電導薄膜の並列数  $N_{\text{parallel}}$  を決定
2. 事故時の系統電流から限流インピーダンス  $Z_{\text{FCL}}$  決定
3. 最大温度、復帰時間から発生する許容熱条件の決定
4. 熱条件を満たすよう並列抵抗の抵抗値  $R$  を決定
5. インピーダンス条件を満たすよう直列数  $N_{\text{series}}$  を決定

実際の限流器を試作する場合には並列抵抗は薄膜と分け 1 つの等価的な抵抗を接続することになる。つまり、並列数  $N_{\text{parallel}}$  直列数  $N_{\text{series}}$  の薄膜のモジュールを作成し、それに並列に  $\frac{R \times N_{\text{series}}}{N_{\text{parallel}}}$  の抵抗を接続する。

以上の考え方では薄膜の特性評価の必要な項目は次の 4 項目であった。

- 動作開始電流
- 長時間通電可能電流
- 復帰時間測定 (発生する熱量との関係)
- 動作状態での薄膜のインピーダンス

また、定格投入電流が投入時第一波の最大値が定格遮断電流の 2.5 倍と規定されている [15]。定格投入電流は遮断器を投入する際に投入電流の電磁力により遮断器動作に支障を及ぼさない限度を示しており、定格遮断電流 12.5kA の場合定格投入電流は 31.5kA である。FCL の仕様の評価を行う際には遮断時の故障電流実効値とともに故障電流第一波波高値の評価を行う必要がある。このような理由から動作直後のインピーダンスの測定も必要であると思われる。

## 第5章 結論

本論文では、高温超電導体である YBCO 薄膜の諸特性を実験により明らかにし、抵抗型超電導限流器の設計指針について考察を行った。本章では、まず本論文の成果をまとめる。それを踏まえて、本研究で用いた試作限流器の現状で考えられる問題点を述べる。さらに今後行なうべき研究課題について述べ、本論文のむすびとする。

### 5.1 本論文の成果

第1章では、電力系統の現状について述べ、本研究の目的を述べた。

第2章では電力系統へ導入する際の限流器に対する要求仕様について述べ、超電導限流器の各方式とその問題点について示した。また、高温超電導体を用いることで低温超電導体を用いた先行研究で問題となっていたインパルス電流に対する動作が改善されることを明らかにした。限流動作が磁束流状態での熱の発生による開始されるという観点から理論的な考察を行い、通電時間が非常に短いインパルス電流に対しては商用周波数での動作よりも大きな電流で動作することを示し、高温超電導体を用いることの有効性を述べた。

第3章では金属保護膜に違いのある3種類の YBCO 薄膜について基本特性として抵抗値、動作電流値、復帰時間の測定を行った。金属保護膜のない薄膜の焼損から保護膜の必要性が改めて確認された。金属保護膜がある場合では抵抗値が小さくなるため限流素子としては望ましくない。また、部分的な保護膜で十分ということになれば素子の製造段階での幅が広がり、限流器の要求仕様に対する設計の自由度が増す。これらの理由から表面全体に金属保護膜のある薄膜と部分的に金属保護膜のある薄膜について、その特性の比較を行った。部分的に金属保護膜のある発生するインピーダンスが大きく、インピーダンスの発生速度も大きい、動作時に発生する熱量が抑えられることで復帰時間が短いことから限流素子として優れているということが示された。金属保護膜の影響の大きい要素としてはインピーダンス、復帰時間であり、動作電流値については大きな差は出ないと考えられる。

第4章では部分的に保護膜が施された YBCO 薄膜について抵抗型限流器の設計上問題となる、復帰時間、動作電流値の精度、インピーダンスに関する考察を行った。

- 復帰時間は動作時に発生する熱量によって決まってくる。
- 同一素子では実験条件による動作電流値の誤差は数%と小さく、大きな影響を受けず素子の特性で決まる。このため並列抵抗を自由に変えることが可能となる。
- 発生するインピーダンスは事故電流によって変化する。

という知見が得られた。これらを踏まえて 6kV 配電系統を対象とした抵抗型超電導限流器の設計方針を考察し、設計段階で必要とされる薄膜の基本特性試験について言及した。



## 5.2 今後の課題

- 薄膜の焼損現象の解明

インピーダンスの大きさ、発生速度の点では部分的に金属保護膜を施した薄膜が限流素子として優れていることがわかったが、焼損に対して、保護膜のない薄膜からどれだけ向上したか、全体に保護膜のある薄膜と比較してどの程度か、詳細な焼損条件がどのように表されるか、等を明らかにするため、それぞれの薄膜で焼損が起きるまで電流、電圧を大きくした実験を行う必要がある。

- 薄膜の直、並列による実験

全ての薄膜が同一の特性をもつという仮定の元に設計に関する考察を行った。実際にはYBCO薄膜には動作電流値に最大で $\pm 20\%$ の誤差が出てしまう。また、抵抗の発生の仕方も異なる可能性がある。このような基本特性の違いが薄膜を直列、または並列に接続した時に限流器全体の特性としてどのような影響を与えるか把握しなければならない。

- 直列、並列の方法に関する考察

実際に薄膜を直並列に接続して限流器を製作する場合、直列のユニットを必要並列接続する方法と並列ユニットを直列に接続する方法、それぞれに別々で接続する方法が考えられる。接続の方法によって性質が異なる可能性があり、直列数、並列数によっても接続の方法を変える必要があることも考えられる。接続部分も考慮した設計をする必要がある。

## 謝辞

本研究を行なうにあたり、仁田旦三教授には、直接の御指導と多くの貴重な御助言を頂きました。ここに謹んで感謝申し上げます。

馬場旬平助教授には実験の計画や考察などあらゆる相談にのっていただき深く感謝致しております。

本研究を行うにあたり実験遂行をはじめ絶えず御協力頂いた、技術職員の高田康宏氏、博士課程2年の米津武則氏、修士2年の西川勝也氏、修士課程1年の鈴木公三氏、高木隆志氏、マークエインズリー氏学部4年の菊池卓郎氏、に感謝致します。

日頃の研究生活を送るにあたりお世話になりました仁田・馬場研究室秘書兼近直美氏、玉岡徳子氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 電力統計情報, 電気事業連合会, <http://www.fepc.or.jp/>
- [2] 小林 広武「新しい配電ネットワーク技術の開発動向と課題」, 電学論 B124 巻 4 号 (2004)
- [3] 関根泰次, 林宗明, 芹澤康夫, 豊田淳一, 長谷川淳: 「電力系統工学」, コロナ社, 1979
- [4] 関根聖治, 仁田旦三: 「超電導限流器の電力系統安定度向上効果に関する考察」, 電気学会論文誌 B, vol.114, No.6, 1994
- [5] 「故障電流抑制用限流装置の適用技術と解析評価」, 電気学会技術報告第 850 号, 2001
- [6] 「超伝導・低温工学ハンドブック」, 低温工学協会, 1993
- [7] Mathias Noe et al., High Voltage Design, Requirements and Test of a 10 MVA Superconducting Fault Current Limiter, ASC2004, 4LG18
- [8] E.M.Leung, Superconducting Fault Current Limiters, IEEE Power Engineering Review, August, 2000
- [9] W.Paul et al., Tests of 100kW High-Tc Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.5, 1995
- [10] 藤川一洋, 白井康之, 仁田旦三, 福西雅幸: 「電力系統から要求される限流器の仕様に関する一考察」, 平成 9 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-97-158, PSE-97-158, 1997
- [11] K.Fujikawa, Y.Shirai, T.Nitta, K.Hagiwara and T.Shibata, “Experimental study on adjustability of superconducting fault current limiter with adjustable trigger current level”, IEEE Trans. vol.ASC-9, No.2, pp.1351-1354, June 1999.
- [12] 八太啓行, 仁田旦三, 千葉政邦, 白井康之, 田口真海, 持田晃弘: 「動作開始電流調整可能な超電導限流器の過渡的動作時の動作開始電流値に関する実験的考察」, 平成 15 年電気学会全国大会, 5-151, 2003
- [13] 干瀧太郎, 馬場旬平, 千葉政邦, 仁田旦三: 「YBCO 高温超電導薄膜のパルス電流に対する応答」, 平成 16 年電気学会全国大会, 5-009, 2004
- [14] J.Baba, T.Higata, M.Chiba and T.Nitta, “Fundamental characteristics on Y123 thin film for switching surge current to design SCFCL”, IEEE Trans. on ASC, pp.1970-1973, 2005
- [15] 「交流遮断器」, JEC-2300

## 発表文献

1. Jumpei Baba, Susumu Morisue, Masakuni Chiba and Tanzo Nitta : “Measurement of relation between current applying time and trigger current level of Y123 thin film for sinusoidal current”, Journal of Physics: Conference Serises 43 7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS'05) 921-924, 2006
2. Susumu Morisue, Jumpei Baba, Masakuni Chiba , Tanzo Nitta, Masatoyo Shibuya, and Toshiya Kumagai : ”Recovery characteristics of SFCL by use of Y123 thin film”, Applied Superconductivity Conference(ASC2006), 3LE12 , 2006.8
3. 守末奨、Mark Ainslie、馬場旬平、熊谷俊哉、仁田旦三 : 「YBCO 薄膜を用いた超電導限流器の復帰時間測定」, 平成 19 年電気学会全国大会, E201-C1, 2007.3(発表予定)
4. Susumu Morisue, Mark Ainslie, Jumpei Baba, Masakuni Chiba , Tanzo Nitta, Masatoyo Shibuya, and Toshiya Kumagai ”Measurement on recovery time of SFCL by use of YBCO thin film”, The International Conference on Electrical Engineering 2007(ICEE2007), 2007.7(発表予定)
5. Susumu Morisue, Jumpei Baba, Masakuni Chiba , Tanzo Nitta, Masatoyo Shibuya, and Toshiya Kumagai : ”Recovery characteristics of SFCL by use of Y123 thin film”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2007 (To be published)

## 付録 A 超電導体の n 値

超電導体において発生する電圧  $V$  は電流  $I$  の関数として、

$$V \propto I^n \quad (\text{A.1})$$

のように表されることが経験的に分かっている。この時の指数が  $n$  値と呼ばれる量である。

さらに超電導線材に  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  の電圧が発生する電流値と定義される臨界電流値  $I_c$  を用いると、

$$V = 10^{-4} \times \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (\text{A.2})$$

のように表されることも分かっている。

現在のところ、低温超電導体ではこの  $n$  値が大きく、高温超電導体では小さい。図 A.1 に高温超電導体である BSCCO と低温超電導体である NbTi の発生電圧 - 通電電流の関係について示す。ここで YBCO の  $n$  値は 20、NbTi の  $n$  値は 45 とした。  $n$  値が大きいと、電圧が発生し始めた部分の曲線の傾きが大きくなることが分かる。

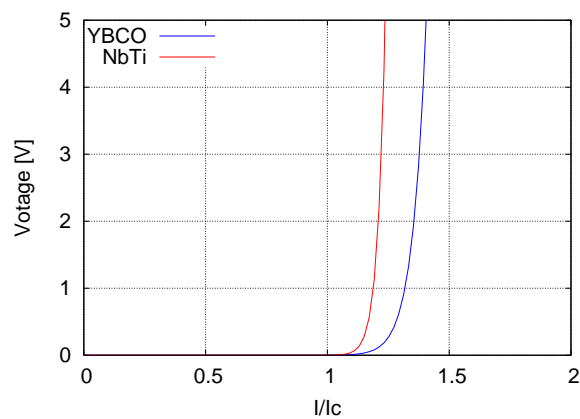


図 A.1: 電流電圧特性と  $n$  値の関係

## 付 録 B 電磁スイッチ制御装置

電磁スイッチ制御装置は、電磁スイッチに流す電流のオン・オフを制御し、電磁スイッチのオン・オフを制御するためのものである。このとき、位相調整を行ない、開閉のタイミングを微調整できる。

電磁スイッチ制御装置は、コントロールボックスと制御用 PC から成る。図 B.1 に、電磁スイッチ制御装置の構成を示す。

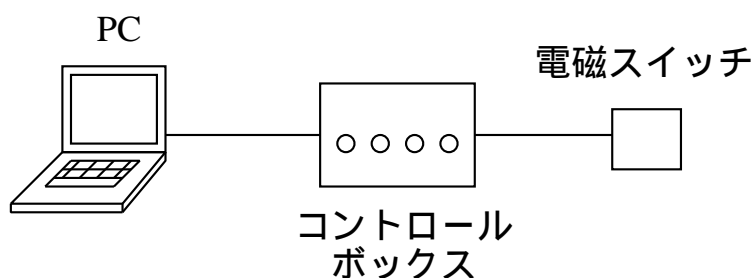


図 B.1: 電磁スイッチ制御装置の構成

### 制御用 PC

制御用 PC では、スイッチ制御プログラムを実行し、あらかじめ与えたスイッチ動作シーケンスに基づく制御信号をプリンタポートから出力する。制御用 PC とコントロールボックスはプリンタケーブルにより接続されており、制御用 PC から出力された制御信号は、コントロールボックスに入力される。

### コントロールボックス

コントロールボックスには、プリンタ入力ポート、位相調整つまみ、電磁スイッチおよび制御電源用の端子がついている。また、コンセントによって 100 V の商用電源と接続しており、これを後で述べる位相調整の際に参照電圧として用いる。コントロールボックス内には半導体スイッチが収められており、プリンタポートより入力された制御信号は、半導体スイッチのトリガとなる。

図 B.2 に、電磁スイッチおよび制御電源をコントロールボックスの端子に接続する方法を示す。電磁スイッチ制御電源と電磁スイッチは、コントロールボックスを介して接続するため、コントロールボックスに収められている半導体スイッチがオンの時、電磁スイッチに制御電流が流れ、半導体スイッチがオフの時電磁スイッチには制御電流が流れない。このため、コントロールボックスにより、電磁スイッチのオン・オフを制御できる。

### 位相調整

図 B.3 に示すように、コントロールボックスに入力された制御信号は位相調整した後に半導体スイッチに入力される。

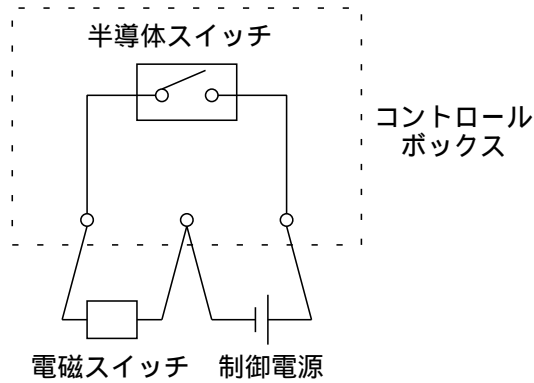


図 B.2: 電磁スイッチおよび制御電源の出力端子への接続法



図 B.3: 位相調整

位相調整は、コントロールボックスの参照電圧を基準として行なう。コントロールボックスに入力された制御信号は、オン・オフそれぞれについて時間遅れを持たせて半導体スイッチに入力する。このとき、時間遅れは参照電圧の零点を基準とし、オンの場合は  $t_1$ 、オフの場合は  $t_2$  とする。制御信号に対する半導体スイッチのオン時間を図 B.4 に示す。

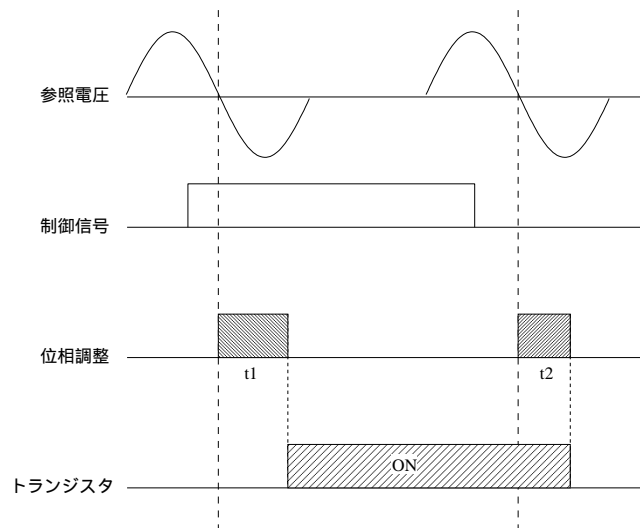


図 B.4: 制御信号に対する半導体スイッチのオン時間

時間遅れ  $t_1$  および  $t_2$  は、コントロールボックスの位相調整つまみを用いて調整可能とした。このようにして、半導体スイッチのオン・オフ時の位相調整を可能とした。

#### 半導体スイッチ

半導体スイッチには、当初トライアック<sup>1</sup>を用いたが、オン制御に加え、オフ制御を可能と

<sup>1</sup>二方向性三端子サイリスタ

するため、トランジスタを用いる方式に変更した。

半導体スイッチの構成を図 B.5 に示す。半導体スイッチは、二つのトランジスタとそれぞれに並列に接続されたダイオードから成る。また、半導体スイッチに入力される制御信号は、位相調整後の制御信号である。

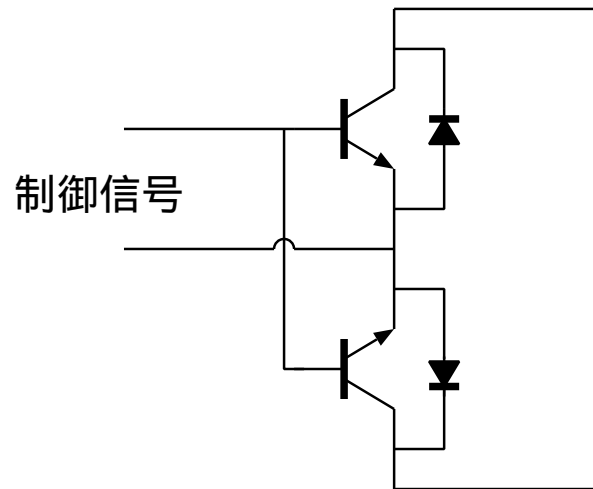


図 B.5: 半導体スイッチの構成

#### 制御電源

電磁スイッチは、制御電流として、直流・交流のいずれも使用可能であるが、事故位相の微調整を可能とするため、制御電源には直流の配電盤 (100 V) を用いた。