

博士論文

常電導転移型限流器による故障電流保護に関する研究

Power Fed Protection Using Super-to-Normal Transition Type

Fault Current Limitation

2016 年度

西原太一

明星大学大学院

理工学研究科電気工学専攻

13D4-001

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 論文構成	2
第2章 超電導の理論的背景と応用技術例	3
2.1 酸化物高温超電導体（物質）を理解するための微視理論	3
2.1.1 BCS 理論[5]	3
2.1.2 ギンツブルグ・ランダウ理論[6]	4
2.2 酸化物高温超電導体のための実験的説明	5
2.2.1 高温超電導線材の特徴	5
2.2.2 n 値モデル[11]	5
2.2.3 Bi 系超電導線材[12]	5
2.2.4 Y 系超電導線材[13]	16
2.3 超電導応用システム例	19
2.3.1 超電導ケーブル	19
2.3.2 超電導限流器	21
2.3.3 鉄道系統について	22
第3章 超電導解析モデルの構築と妥当性評価試験	24
3.1 現象論的理論	24
3.1.1 抵抗率の自由エネルギー依存性	24
3.1.2 電流密度依存性による起電力の導出	25
3.1.3 エネルギー最小原理による電流依存性による起電力の導出	25
3.1.4 単純モデルによる電流密度依存性による起電力の導出	26
3.1.5 抵抗率の電流依存性による起電力	28
3.2 超電導層解析モデル	28
3.3 現象論的モデルの妥当性試験	30

3.3.1 Bi 系線材による再現性試験	30
3.3.2 Bi 系線材による温度-電圧同時測定	33
3.3.3 Y 系薄膜による再現性試験	36
3.4 妥当性試験結果まとめ	38
第 4 章 故障電流保護に関する検討	39
4.1 検討対象システムのモデル化	39
4.1.2 グラフ理論を用いた鉄道解析	39
4.1.1 直流系統（回生車両を含む鉄道系統）	39
4.1.4 回生システムを含む回路解析法の提案	40
4.1.3 超電導ケーブルモデル	41
4.2 変電所直接接続による短絡電流増加	42
4.2.1 非定常状態における直流鉄道系統導入時の超電導ケーブルの影響 ..	45
4.2.2 回生システム導入時の検討	48
4.3 限流器検討	64
4.3.1 限流器の導入効果解析	65
第 5 章 結言	67
謝辞	68
参考文献	69

第1章 緒論

1.1 研究背景

限りあるエネルギーを効率よく利用することは、人類共通の課題である。この流れの中で、エネルギーを電気として輸送することは、理に適っており、送電技術の研究は、継続的に行われている。さらに近年では、超電導技術を応用した超電導ケーブルによる、新しい送電技術の研究[1]も盛んに行われている。この超電導ケーブルの適用先として期待されている一つが、直流鉄道系統[2]である。これは、現在世界的に主として研究されている交流電力系統と異なり、交流損失を持たないという特徴がある。

運輸部門においても、鉄道は輸送所要エネルギーが最も低いとされている[3]。輸送密度の高い地域では、電気鉄道が中心となり、取分け直流電化がなされている。さらに鉄道固有の問題である回生失効や、過密なダイヤによる電圧降下の改善が期待されている[4]。そして人口増加に伴うダイヤ改正を行おうとしても、変電所を増設して、送電距離を短くするか、送電容量を郷化させることが困難であることが原因となり、増発することができない事態となっている。こうしたき電区間においても、超電導ケーブルを導入することで、送電距離の問題を解決し、すなわち仮想的な変電所を増設することで、運行編成を増加させ、ダイヤが過密となっても、給電が可能となる。

以上のように、超電導ケーブルは直流鉄道と非常に相性が良いことが明らかにされつつある。直流鉄道系統への超電導ケーブルの導入時におけるデメリットについての研究はあまり進んでいない。単純に変電所間を直流超電導ケーブルで接続すると、短絡電流が増加してしまう。また、超電導ケーブルには、臨界電流という絶対定格電流が存在する。短絡電流が流れる場合にも、ケーブルが損傷せずに、再開路して使用できるように設計製造しなければならない。このことは、電流余裕を大きくとる設計となり、多量の超電導線材を使用することとなり、

初期費用の増大，ケーブルの大型化が避けられなくなる．超電導ケーブルの導入効果が矮小化されることとなる．さらに周辺機器との電力協調のため，保護機器の増設の必要が出てくる．鉄道は重要な社会インフラであるために，超電導ケーブルが原因となり，その運用を停止するわけにはいかない．すなわち，超電導ケーブル導入の長所を生かし，既存の系統と親和性のある導入形態を探る必要が出てくる．そこで超電導ケーブルの非定常時における挙動を明らかにすることで，その設計指針を得るための一提案を行うことを目的とした．

1.2 論文構成

本論文は，第 1 章において研究背景及び論文構成を，第 2 章において理論的な背景と超電導応用技術について，第 3 章に抵抗率依存性を考慮した超電導常電導転移モデルの構築と妥当性評価試験について，第 4 章において直流鉄道系統への超電導ケーブルの導入効果検討を，第 5 章において本研究のまとめをしめし，以上によって構成される．

第 2 章 超電導の理論的背景と応用技術例

2.1 酸化物高温超電導体（物質）を理解するための微視理論

2.1.1 BCS 理論[5]

超電導現象が現れるかは疑問であり，その解明は大きな関心であった．常電導体の抵抗は，結晶格子の格子振動と結晶内の不純物や格子欠陥による．一方，原子量 4 の液化ヘリウムは大気圧下・温度 2.17 K で比熱に 1 次の相転移があり，流動性が変わる現象がある．通常の液体では粘性があるのに対して，これは全く粘性のない液体となる．このことを超流動という．これはヘリウム 4 がフェルミ粒子でなく，ボーズ粒子であることに起因する．

そこで Leon Neil Cooper は，電子がスピンを持たない粒子となること，つまり電子が二個ずつ対を作るとボーズ粒子となれるのではないかと考えた．電子は負電荷を持つため反発力が働き，対状態となることが出来ないと考えられていたが，電子間力が働くことが発見され，これが前述の格子振動に由来するものであることが分かってきていた．

量子化した格子振動をフォノンと言う．このフォノンと電子がエネルギーを授受することで，電子対を形成する．この電子対をクーパー対という．このようなミクロな理論から超電導状態では損失無しで電流が流れることが証明された．この結果，エネルギーバンド構造を持つことが示された．

すなわち，伝導電子はフェルミエネルギー付近まで満たされており，それよりエネルギーが高いところは空席となっている．一方で超電導体ではフェルミエネルギーから Δ だけ小さいところに伝導電子があり，フェルミエネルギー付近にクーパー対がある構造となっている．そしてフェルミエネルギーより， Δ だけ高いところから空席となる．ちょうど半導体のエネルギーバンドが価電子帯と伝導帯の間に禁止帯が存在するような構造と似ている．この Δ をエネルギーギャップという．

2.1.2 ギンツブルグ・ランダウ理論[6]

BCS 理論が世に出るより早く、当時のソ連において原料論からの解析が行われ超電導電子密度などを含む GL 方程式が導かれた。その後の BCS 理論から電子がクーパー対であることがわかり、この方程式は超電導現象を理解する上で重要な式であることがわかった。GL 方程式は下記の 2 式ある。

$$\alpha\Psi + \beta|\Psi|^2\Psi + \frac{1}{2m^*}(-j\hbar\nabla - e^*\mathbf{A})^2\Psi = 0 \quad (1-1)$$

$$\mathbf{J}(r) = -\frac{je^*\hbar}{2m^*}(\Psi^*\nabla\Psi - \Psi\nabla\Psi^*) - \frac{e^{*2}}{m^*}|\Psi|^2\mathbf{A} \quad (1-2)$$

ここで Ψ は秩序パラメータと呼ばれ、量子力学の波動関数のようなものと考えることができる。 m^* 、 e^* は各々超電導電子の質量と電荷である。超電導状態では、電子が対を成しているので、各々、 $m^*=2m$ 、 $e^*=2e$ となる。また、定数 α と β は平衡状態の秩序パラメータを $\Psi_{0-\infty}$ とし、臨界磁界 H_c を用いて、

$$\alpha = -\frac{\mu_0 H_c^2}{|\Psi_{0-\infty}|^2} \quad (1-3)$$

$$\beta = -\frac{\mu_0 H_c^2}{|\Psi_{0-\infty}|^4} \quad (1-4)$$

と与えられることが知られている。さらに秩序パラメータを用いることで式 1-5 に示されるような自由エネルギー密度に関する式を示す。

$$F_s = F_n(T) + \alpha|\Psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\Psi|^4 + \frac{1}{2\mu_0}|\nabla \times \mathbf{A}|^2 + \frac{1}{2m^*}|(-i\hbar\nabla + e^*\mathbf{A})\Psi|^2 \quad (1-5)$$

ここで \hbar はディラック定数を示す。

2.2 酸化物高温超電導体のための実験的説明

2.2.1 高温超電導線材の特徴

超電導体を特徴づける3つの物理量がある。それは、臨界温度 T_c 、臨界磁界 H_c 、臨界電流 (I_c) である。本論で取扱う酸化物高温超電導体はこれらの物理量が金属系低温超電導体よりも高い値を示す。また Bi 系超電導体[7][8]と Y 系超電導体[9][10]では、全般的に Y 系超電導体の方が高性能であるが、Y 系超電導体は配向を揃える困難さから長尺化が難航している。また、高温超電導体は磁界の線材に印加する角度によっても特性が変わってくるという性質を有する。

2.2.2 n 値モデル[11]

臨界状態モデルでは、電界は「臨界電流密度を境に有限の傾きで立ち上がる」と仮定しているが、実際の超電導体はなだらかに立ち上がる。このときに電界の立ち上がりを示した式は、

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1-6)$$

ここで n の値を n 値と呼び、JIS H 7305 により $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ を電界基準として用いるとされている。金属系超電導体であればこの n 値が $40 \sim 60$ と大きな値であるため、臨界状態モデルを用いてもヒステリシス損などの電磁特性を近似可能であった。しかしながら酸化物超電導体の場合 $10 \sim 20$ 程度と非常になだらかな値となり、臨界モデルに適応できない。これは弱結合の磁束フローや、熱冷気による磁束クリープ、結合損といった要因が関係してくるためである。

2.2.3 Bi 系超電導線材[12]

T_c が液体窒素温度を超える高温超電導体が発見されて以来、数多くの研究開発が進められてきた。とりわけ、Bi 系超電導線材と Y 系超電導線材の開発が活発に行われている。それぞれ第一世代 (1G) と第二世代 (2G) とよばれているこ

とから、Bi 系超電導線材は一昔前の材料といった印象が持たれることもある。しかしながら、Bi 系超電導線材は、最近の著しい性能向上によって、最も早くかつ十分な性能を持つ実用超電導線材として注目されてきている。

Bi 系超電導線材は、キロメートル長さの単長を容易に作製でき、比較的高い I_c を持つことが、多くの企業、研究機関によって示されてきた。Bi 系超電導線材の製造は、図 1.1 に示すように、粉末行程、加工工程、焼成工程に分けられる。性能を上げる一つの要因として、超電導フィラメントの高密度化があるが、従来は、超電導フィラメントの密度を向上させるのは圧延工程によってのみ可能であった。

その後、加圧焼成法が開発されたことにより、Bi 系超電導線材は、優れた I_c を有するのみならず、機械強度の面でも従来の超電導線材に比べて優れた特性を有するようになり、従来の第一世代と呼ばれた Bi 系超電導線材とは全く異なる革新的ビスマス系高温超電導線 (DI-BSCCO[®] : Drastically Innovative BSCCO) と呼べる全く新しい工業的な製造が可能な高温超電導線となった。開発された加圧焼成法は、Bi 系超電導線材は酸化物であることから、圧力を上げるだけでなく酸素分圧を精緻に制御する必要があること、最適焼成温度が 800°C 以上の高温で市販の熱電対による測定精度を上回る温度制御を必要とすること、の 2 点から特殊な技術を必要とする。この手法を二次焼成において用いることで、超電導フィラメントの密度を従来の 85 % から 100 % へアップすることが出来、臨界電流や機械強度の向上など大きく性能を上げられた。

市販されている Bi 系超電導線材は、表 1.1 に示す通り高臨界電流仕様と高強度仕様の 2 種類がある。両者の製造プロセスは同じだが、高強度仕様は高臨界電流仕様と比較して、線材断面構成の変化により、機械特性の強化をはかられている。高強度仕様は、引張や曲げなどの機械強度特性が非常に優れ、ステンレスなどの補強を施さない状態でも軟銅線並みの強度を持っていることから、ケー

ブルなどへのシビアな加工，マグネット運転時の大きな電磁力など機械強度が必要な応用には非常に取扱易い線材となっている。

加圧焼成法を用いて製作したビスマス系超電導線の製造実績を図 1.2，臨界電流の特性例を図 1.3 に示した。加圧焼成炉が本格稼働した 2004 年から 2006 年にかけて， I_c は 120 A 程度から 150 A 程度へ，最高で 201 A と大きなアップを示している。これは加圧焼成技術を含めた Bi 系超電導線材の製造工程の最適化が進んできていることを示唆している。また，図 1.2 から高い I_c が長尺に渡って均一に得られていることが分かり，加圧焼成は高 I_c だけでなく， I_c の均一性向上にも寄与していることが分かる。

図 1.4 にビスマス系超電導の組織を示す。大気圧下で焼成した超電導体は多くの空隙が存在し超電導パスを制限している。これに対して，加圧焼成した超電導体は，密度が 100% で空隙が無く，超電導パスを増やすことができ， I_c を大きく向上させたと考えられる。ただし，加圧焼成した超電導体を更に詳細に見ていくと，2223 超電導体の中に未だ 2212 や Pb 系の位相が多く認められる。この異相は，超電導電流パスを制限しており，これを低減することで今後 I_c はさらに大きく改善されることが期待できる。

加圧焼成がもたらすメリットは， I_c 向上だけではなく， n 値向上にも表れている。 n 値が上がることによる利点を図 1.5 に示す。超電導体の電圧と電流の関係は $V \propto (I/I_c)^n$ で示されることから， n 値は図 1.5 に示される曲線の傾きを示す。 n 値が 20 と 12 で比較すると，1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義される I_c が同じ 137 A だとしても，82% の運転率（運転電流/臨界電流）である 113 A で線材を使用した場合，超電導線の発熱はそれぞれ 0.1 mW/m と 1 mW/m となり，一桁の大きさの差が出る。大型マグネットなど大量の線材を使用する応用には， n 値が大きい線材を使用することで，運転率（運転電流）を上げることが出来る大きなメリットを得る。加圧焼成による n 値向上の様子を図 1.6 に示す。大気圧焼成では n 値が 15 から

21 に大きくばらついていたのに対して、加圧焼成では 20 から 21 にコントロールされている。加圧焼成によって、超電導線材の I_c の長手方向におけるばらつきが減少し均質化されていることが要因と考えられる。

ビスマス系超電導線が $I_c=200\text{ A}$ 時、テープ面と平行に外部磁界を印加したときの臨界電流－磁場特性を図 1.7 に、テープ面と垂直に磁場を印加した場合を図 1.8 に示す。広い温度範囲において、高磁場特性に優れていることが分かる。また、図 1.9 には、応用分野として考えられる超電導ケーブル、電動機【モーターとは原動機や自動車を示すこともあるので電動機と表記した方が良い】、トランス、マグネットなど各種分野における要求特性と比較して示す。ビスマス系超電導線は、低磁場領域から高磁場領域にかけて優れた特性を持つ事が分かる。

ビスマス系超電導線材のロードマップを I_c 、長尺化、コスト／性能、AC ロスの観点からまとめた (図 1.10)。超電導線として最も重要な性能である I_c (77 K, 自己磁場下) は、現時点の最高値は短尺で 250 A であり近々に 200 A 級の長尺線材の量産化ができると考えられている。また現状の開発線上には 300 A 以上までが視野に入れられている。線材単長は現在 1500 m までが可能であり、2～3 km 程度への拡張が考えられている。超電導機器が経済的に有用かどうかは超電導線材のコスト／性能値に依存することが多い。例えば、ケーブル導体を作製する場合、導体通電定格値は $I_c \times$ 超電導線材本数に比例し、 I_c が大きいほど超電導線材の使用量が減ることになる。従って線材にかかるコストは、単なる線材長さ当たりのコストだけでなく、その I_c と合わせてコスト／性能値で議論する必要がある。 I_c を上げることでこの値を大きく下げることが可能と考え、 I_c 向上が注力されている。また、量産化が進む事で線材の単価は減少し、コスト／性能値は更に低減が可能である。このことより、他の高温超電導線材や現在主流になっている金属系超電導線材よりも総合的に見て高性能および安価を達成できると考えられている。

超電導線は、直流応用でその特性を最も有効に発揮することが可能な線材であるが、ケーブルなど交流応用にも適用が可能である。この時に必要な性能として交流損失が小さいことが挙げられる。交流損失を低減するには、多芯化、ツイスト化、フィラメントへの電気バリア相の付加が考えられる。これらの技術を適用する事で、3 kA のケーブル導体に換算して、交流損失 1 W/m/phase が現状で得られており、更に交流損失の底辺開発を進める事で 0.3 W/m/phase が達成可能と予測されている。

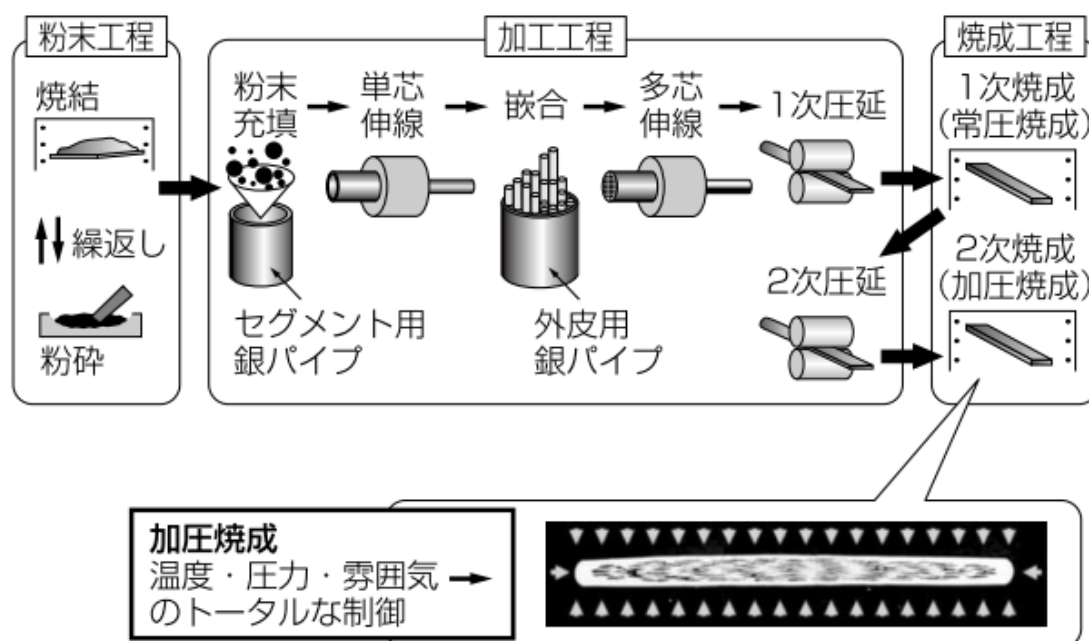


図 1.1 Bi 系超電導線材の製造方法[12]

表 1.1 Bi 系超電導線材の基本仕様，特性例[12]

項 目	高臨界電流仕様	高強度仕様
幅	4.3 ± 0.2mm	
厚 さ	0.22 ± 0.02mm	
長 さ	～ 1500m	
臨界電流 (Ic) at 77K, 自己磁場下	150A	110A
臨界電流 (Je)* at 77K, 自己磁場下	15kA/cm ²	11kA/cm ²
許容引張り強度** (常温)	100MPa	170MPa
許容引張り強度** (77K)	160MPa	230MPa
許容曲げ直径** (RT)	70mm	50mm
シース	高強度銀合金	

* 臨界電流密度 (Je) = 臨界電流 / 線材断面積 (幅×厚)
 ** 臨界電流の 95 % に低下するレベル

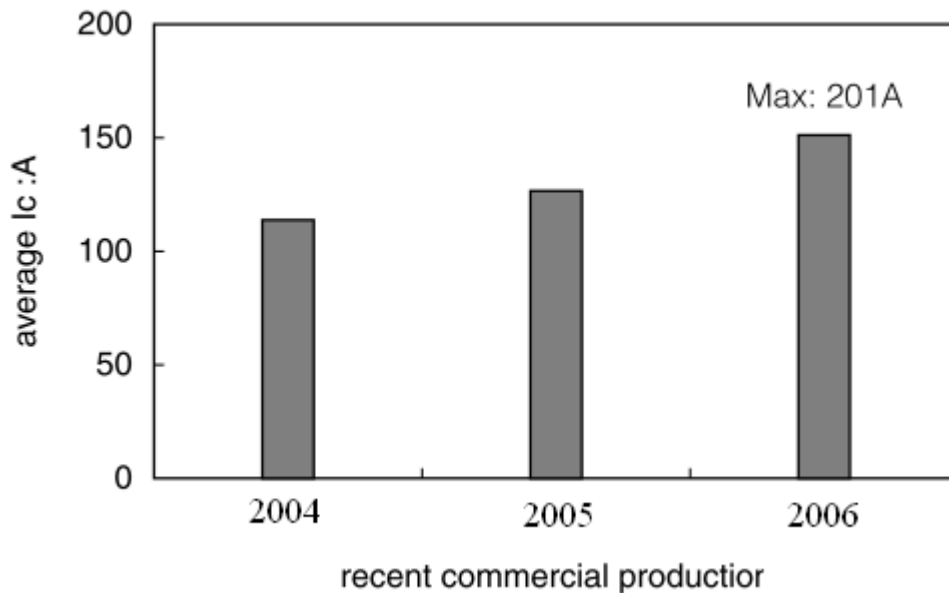


図 1.2 Bi 系超電導線材の製造実績[12]

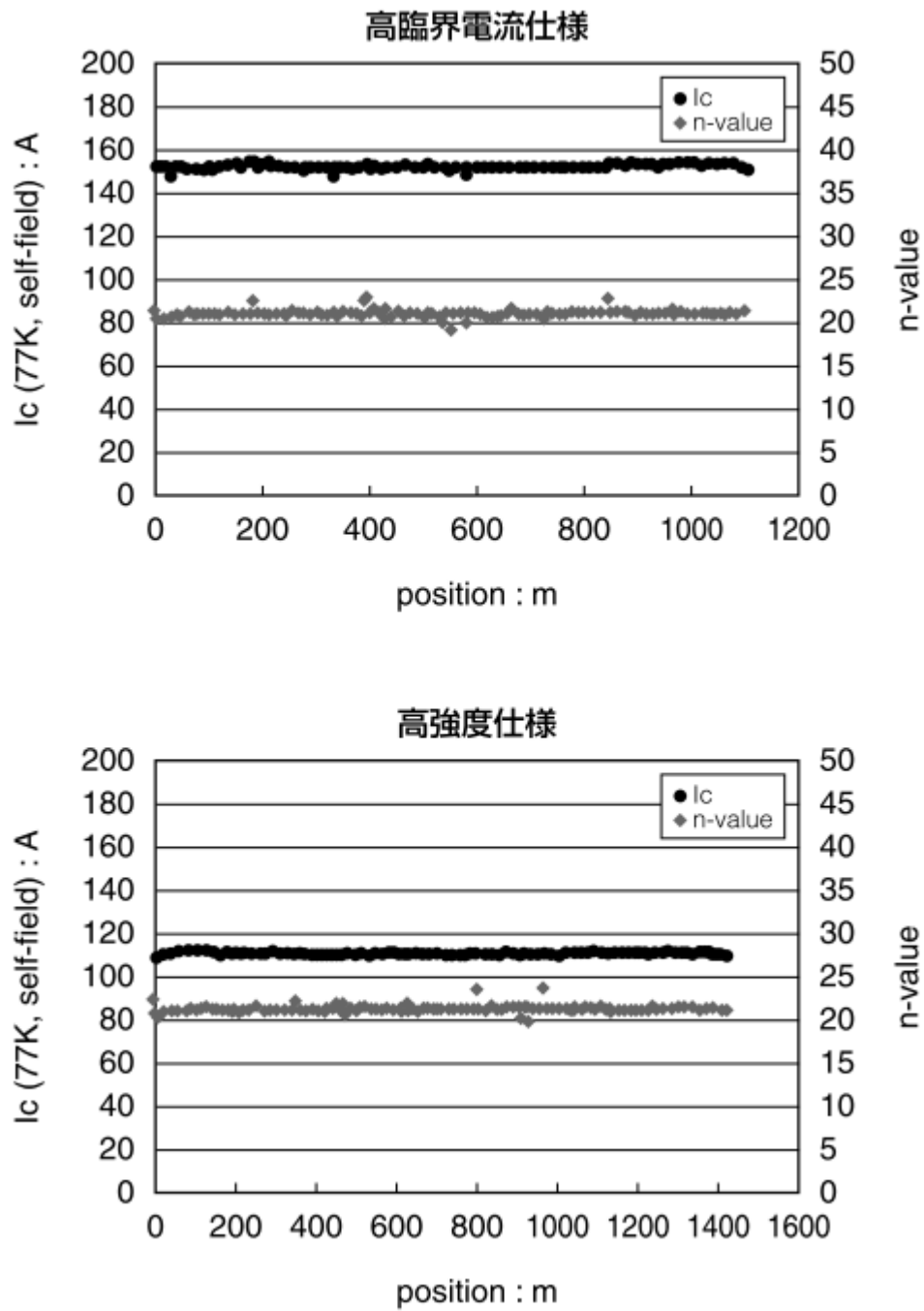


図 1.3 Bi 系超電導線材の長尺線材の I_c , n 値分布[12]

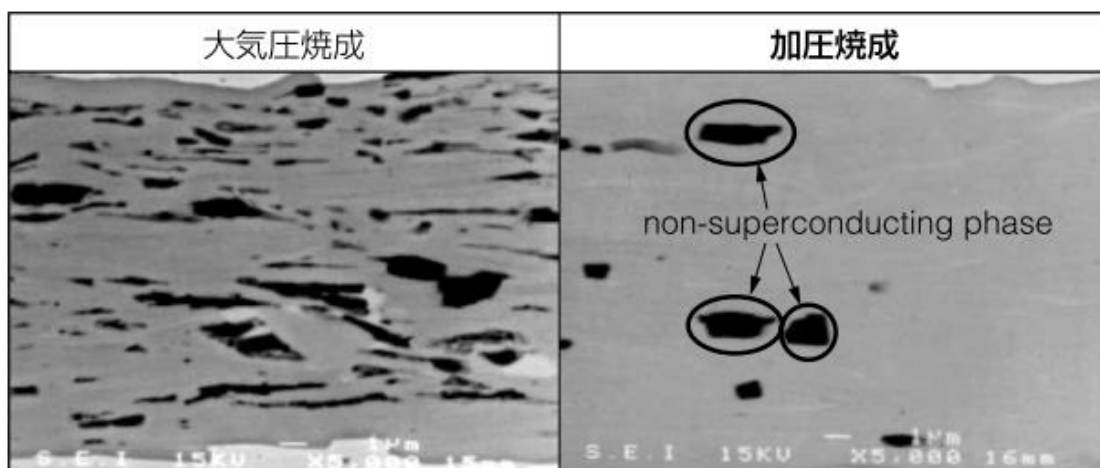


図 1.4 Bi 系超電導体の組織[12]

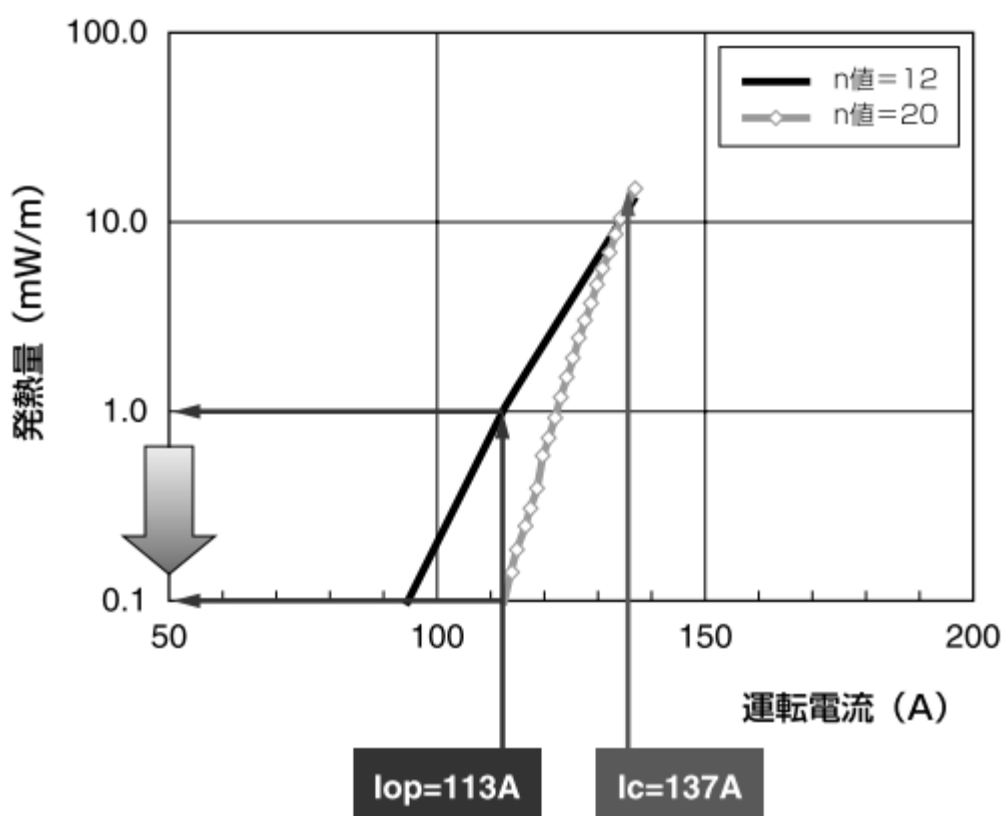


図 1.5 n 値と発熱量[12]

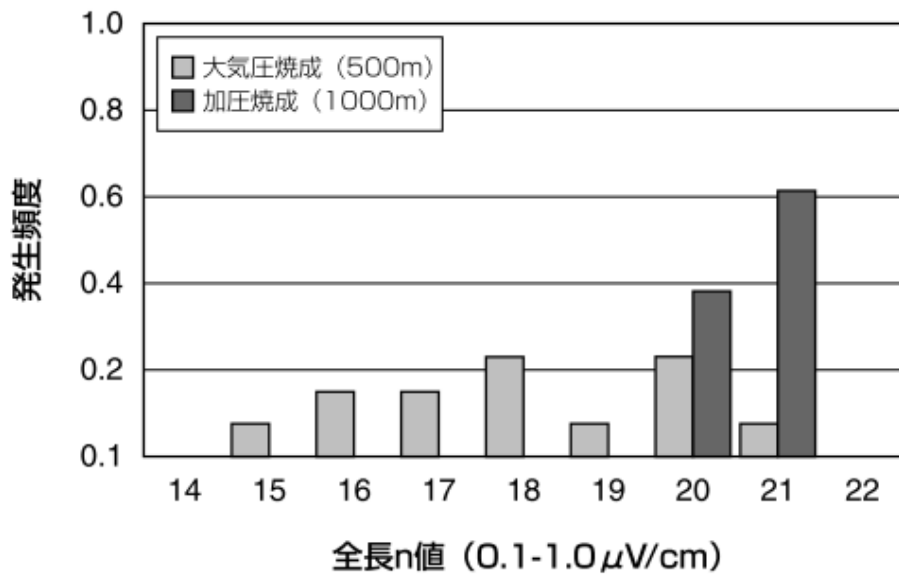


図 1.6 n 値分布の比較[12]

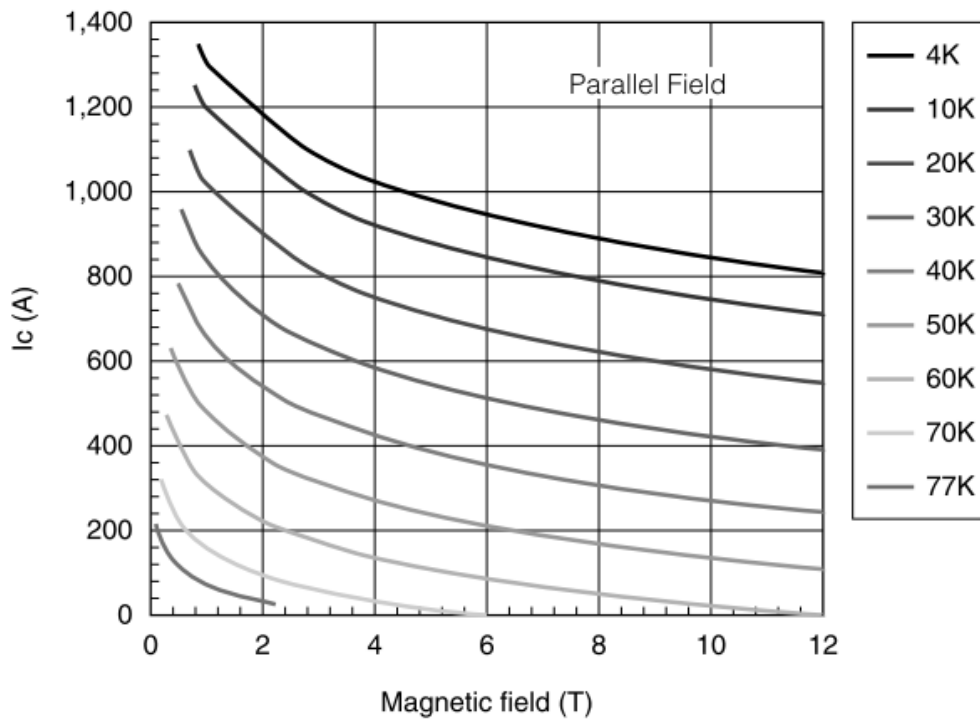


図 1.7 Bi 系超電導線の臨界電流・磁場特性[12]

(テープ面に平行に磁場が印加された場合)

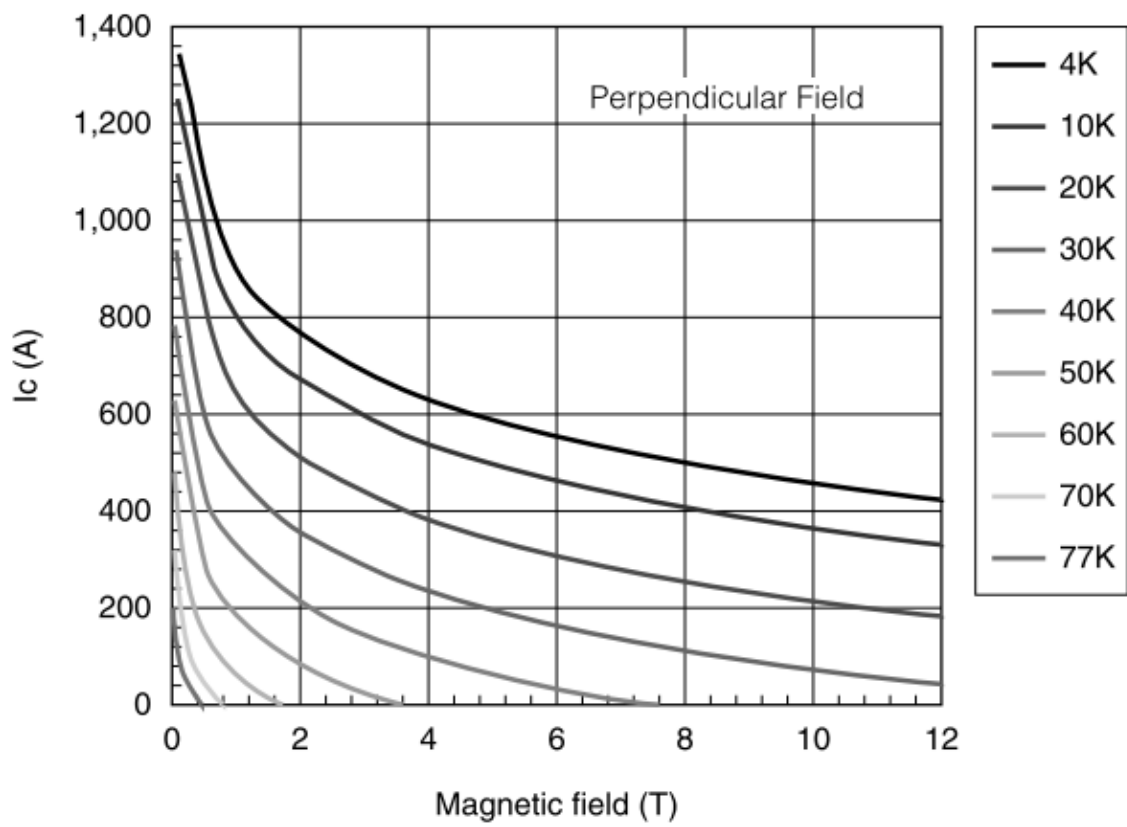


図 1.8 Bi 系超電導線の限界電流・磁場特性[12]
 (テープ面に垂直に磁場が印加された場合)

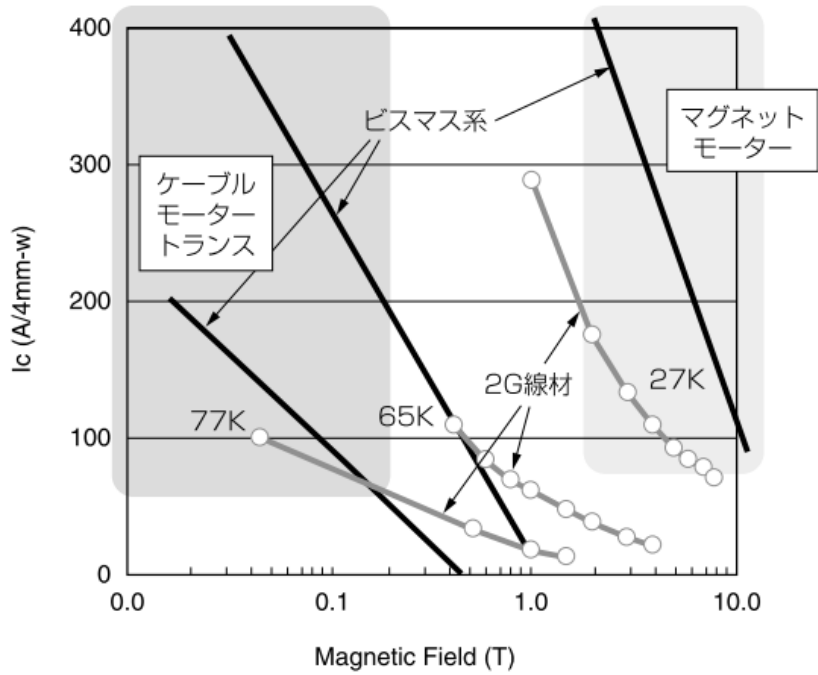


図 1.9 各種応用と臨界電流・磁場特性[12]

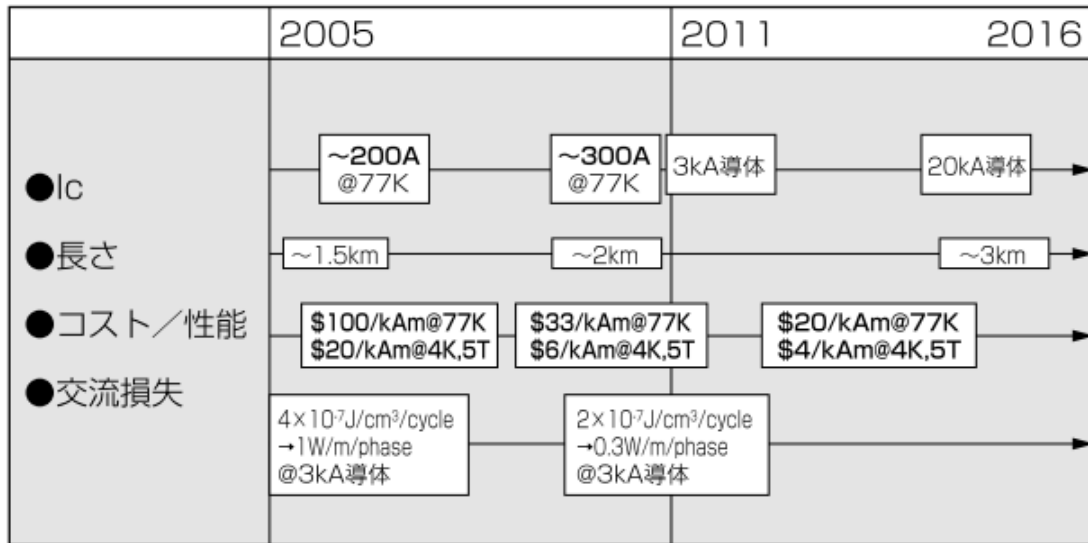


図 1.10 Bi 系超電導線のロードマップ[12]

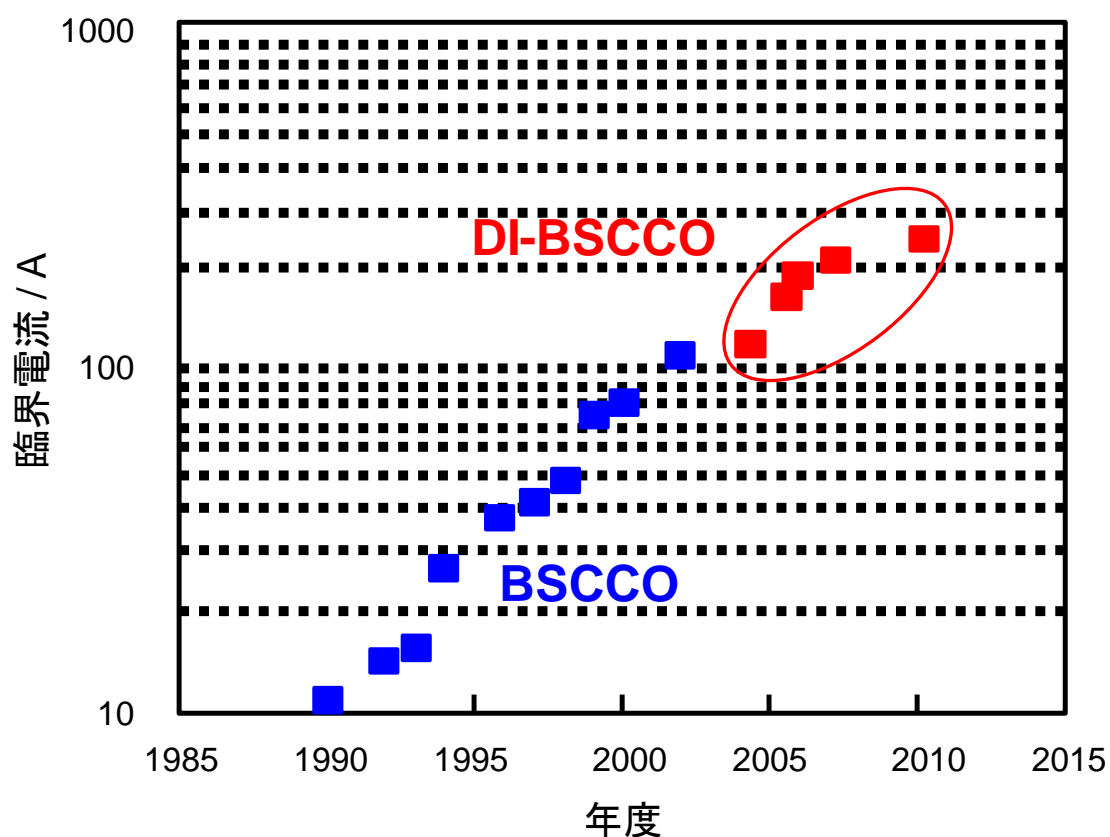


図 1.11 Bi 系超電導線材の推移[12]

2.2.4 Y 系超電導線材[13]

YBa₂Cu₃O₇ (Y123) は T_c が約 93K と Bi 系超電導線材よりも低いが高磁場中での電流密度特性など総じて優れており、またコスト面でもシースに銀を用いる Bi 系超電導線材と比べて限界コストにおいて優れており、Bi 系超電導線材と比べて優位に立つと言われている。しかし、Bi 系がテープに沿ってさえいけば良かったのに対して Y 系超電導線材は c 軸に加え a 軸または b 軸の 2 軸を配向化する必要があり、良好な線材特性を得るには単結晶のような結晶構造が要求される。このため、Bi 系超電導線材を上回る線材として期待されるものの、長尺化しにくく、線材生成速度の高速化が難しいなど課題も多い。

Y 系超電導線材の二軸配向化技術としては IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)

法と RABiTS (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrates)法が開発されている (図 1.13). IBAD 法は無配向金属テープ上に低エネルギーのイオンビームを照射することで YSZ バッファ層などを形成する. 一方, RABiTS 法では二軸配向した Ni や Cu などの fcc (face-centered cubic)金属テープを基板として利用できる. これらによって立方体集合組織を形成するが, この表面が線材用基板として利用できる. これらにさらに 1 ないし複数の中間層を形成して高配向な中間層を作った後で PLD (Pulsed Laser Deposition)法は, 化学量論組成の焼結体ターゲットにパルスレーザを照射して蒸発させ対向させルームとし, 基板上に堆積させる. 他に, 成膜法として熱平衡に近いプロセスでの気相法による超高真空必要としない MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition : 有機金属気相成長法)法や, 酸素雰囲気中で焼成して結晶化させる TFA-MOD (trifluoroacetate-metalorganic deposition-MOD)法等がある.

超電導線材の性能は 77 K 自己磁界下における臨界電流と線材長の積で評価され, 現在の性能は 176000 Am ($=503.5 \text{ m} \times 349.6 \text{ A}$)を上回るものが出来てきている.

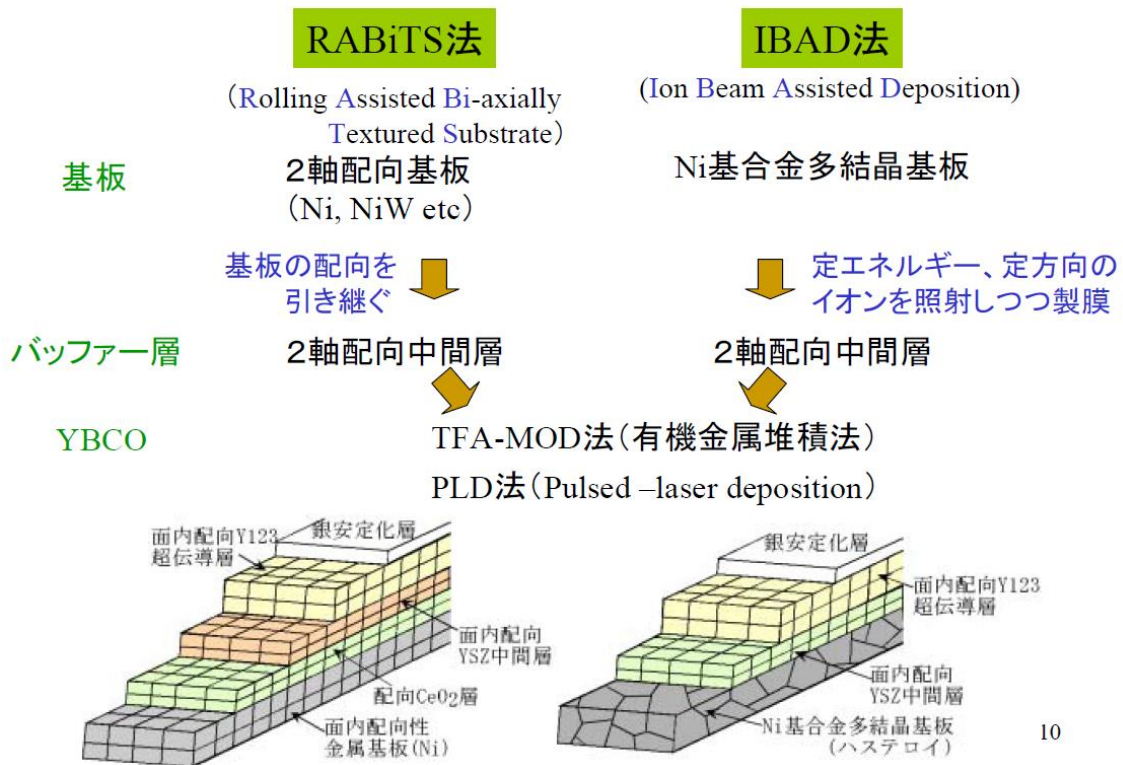


図 1.13 Y系超電導線材の組成[13]

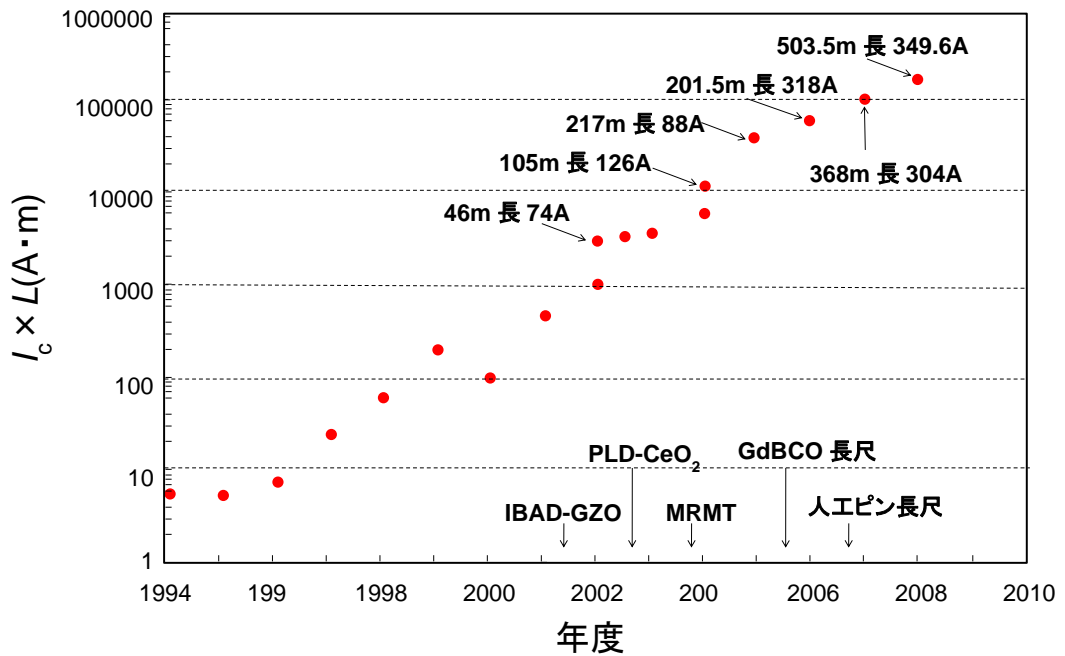


図 1.12 Y系超電導線材の推移[13]

2.3 超電導応用システム例

2.3.1 超電導ケーブル

超電導ケーブルとは、超電導状態におけるゼロ抵抗を利用して、エネルギーを損失することなく送電することを目的に研究開発されている超電導応用機器である。日本だけでなく世界的にも非常に関心の高く、実系統試験も行われている。

図 1.13 に主な世界の超電導ケーブルプロジェクトを示す[1][14][15][16]。

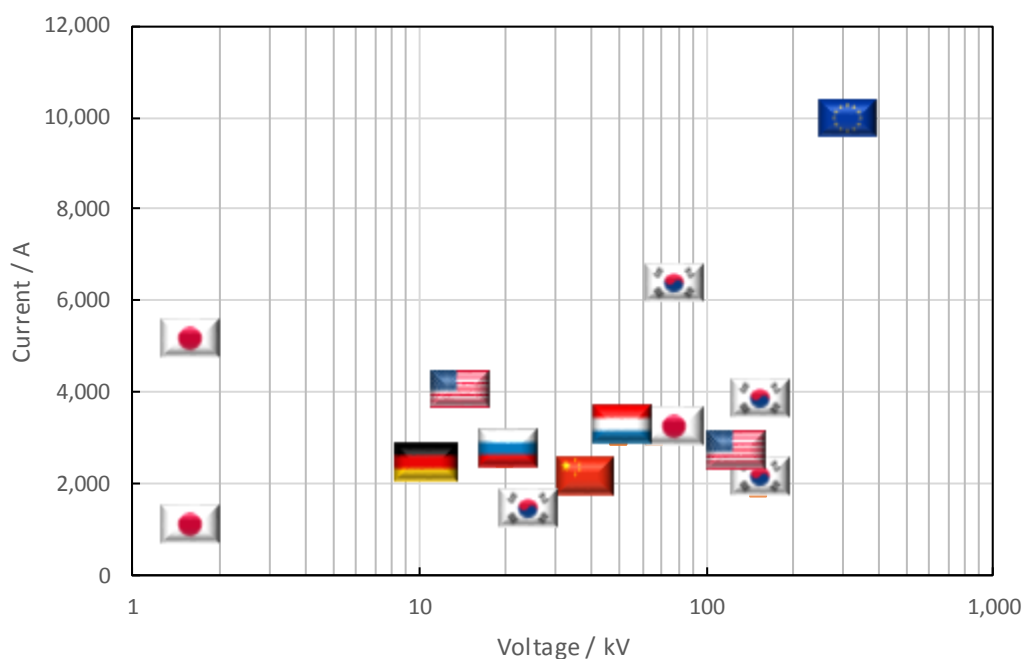


図 1.13 主な世界の超電導ケーブルプロジェクト[1][14][15][16]

日本においては東京電力・旭変電所での交流試験，鉄道総合技術研究所・構内試験線での直流試験などが行われている。海外ではドイツ・アンパシティの交流試験や韓国においても交流・直流試験が行われている。

直流超電導送電システムの研究[17]

平成 17 年度より平成 21 年度まで行われたプロジェクトであり，中部大学を中心に進められた。再生可能エネルギーの利用を前提とした大容量直流送電技

術の開発を目的としたプロジェクトであり，地球上に偏在する砂漠地帯において太陽光パネルによる発電された電力を，直流ケーブルによって都市部へと送電することを見越し，直流超電導ケーブルの基礎研究だけでなくシステム的な検討を行うことを目的とした．プロジェクトの特徴として，電流リード部にペルチェ素子を用いることで熱侵入を抑制するという，革新的なアイデアが盛り込まれていた．なお本プロジェクトは石狩超電導プロジェクトとして，さらなる研究が進められた．

石狩超電導プロジェクト



石狩プロジェクトの 500 m 敷設状況の写真、HP より。筑本中部大学教授提供

平成 25 年から北海道石狩市において，中部大学を中心に石狩超電導プログラ

ムが開始した。当時世界最長となる 1 km の直流超電導ケーブルを開発した。本ケーブルをデータセンタに送電する実証試験を行い、発電送電宮殿をすべて直流で行うことで送電ロスを極限まで減らすことを達成した。

2.3.2 超電導限流器

超電導限流器は、定常時においては低インピーダンスであるため系統に対して影響をほぼ与えない。さらに異常時にはセンサーを必要とせず高インピーダンスとなることで故障電流を抑制し、自己復帰が可能である電力機器である。世界的にも限流器の研究は盛んであり、実用化の期待される超電導応用機器の一つである。

超電導限流器の主なプロジェクト^[1]を図 1.14 に示す。

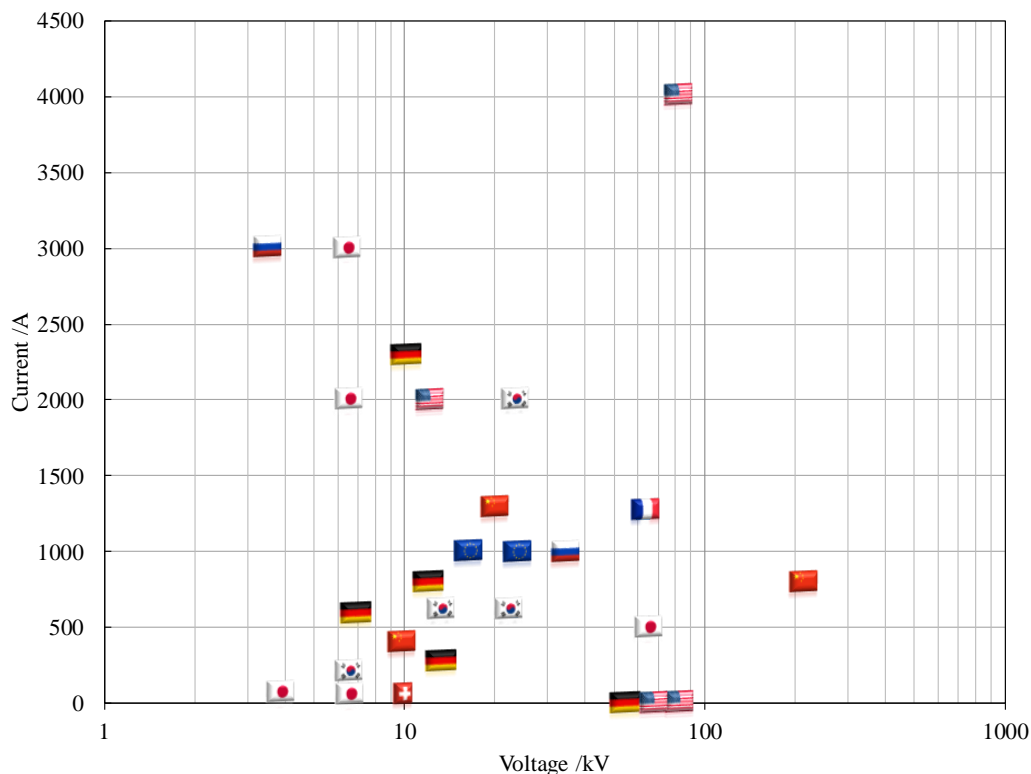


図 1.14 主な世界の超電導限流器プロジェクト[1]

2.3.3 鉄道系統について

鉄道は 18 世紀末、イギリスの炭鉱に設けられた木軌道に由来を持ち、次第に進化を続け今日の鉄道方式となっている。電気鉄道は 1835 年にアメリカにおいてダベンポートによるボルタ電池を用いた電車に始まる。日本においては 1890 年第三回内国勸業博覧会において会場内の軌道に電車を走らせたのが最初である。

1950 年頃からの輸送量増加に伴い、電気車の出力増大とともに、電化区間を増加させ始めた。今日では表 2.1 に示されるように、1800 km を超える非常に長大な輸送距離を占めている。

表 2.1 日本の鉄道の営業キロと電化区間[18]

	営業キロ	直流電化	交流電化	電化キロ計	電化率
JR 在来線	17,565	6,354	3,439	9,794	56%
新幹線	2,598		2,598	2,598	100%
民鉄	7,618	5,542	451	5,993	79%

さらに現在，鉄道総合技術研究所において直流鉄道系統への超電導ケーブルの研究が行われている[19][20][21][22][23][24][25]．さらに直流系統への超電導ケーブルの導入は交流損失がないために非常に親和性が高いことが示されている[27][28]だけではなく，電圧降下や回生利用率が低いことと言った鉄道固有の問題も解決が可能で熱ことを示している．

第3章 超電導解析モデルの構築と妥当性評価試験

超電導が発見されて100年、NMRの超電導の置き換えを始めJR東日本の超電導リニアなど、超電導応用機器の実用化が進んでいる。そしてさらに液体窒素において超電導特性を示す高温超電導体が発見されて30年、高温超電導応用機器の実用化に向けて研究が進められている。その中に、超電導ケーブルがある。

超電導ケーブルは超電導の特徴であるゼロ抵抗を利用して、エネルギーを損失することなく送電することが可能な超電導応用機器である。そして、この超電導ケーブルを直流鉄道系統への導入が鉄道総合技術研究所において研究されている。ここでシステム設計の上で、超電導ケーブルを検討するために定常・非定常・復帰の場合分けを行って考えることとした。

定常時において超電導ケーブルは電気抵抗ゼロとして扱うことで、従来の電気工学における解析に適用することが可能である。さらに復帰時には運転を行うことがないため、熱力学を用いれば検討が可能となる。

しかしながら非定常時の超電導ケーブル、特に高温超電導体を利用した場合、その検討は困難となる。金属系超電導体などであれば、超電導から常電導への転移(S-N転移)は非常にシャープであり、ステップ関数として扱うことが可能である。しかしながら高温超伝導体においては n 値で10~30と非常になだらかな転移を行う。このため非定常時における超電導ケーブルの検討は電気工学・熱力学の両面から検討を行わなければならない。そこで非定常時の超電導体を再現することが可能な超電導モデルを構築する。

3.1 現象論的理論

3.1.1 抵抗率の自由エネルギー依存性

抵抗率 ρ について考える。超電導ケーブルを前提とした超電導モデルにおいて非常に重要な要素である。

常電導領域において考えると、均一な空間内ではオームの法則に示されるよ

うに定数と考えることができる。しかしながら超電導体内において考えた場合、その値は n 値モデルに示されるように電流密度に依存した関数となっている。そこで抵抗率が電流密度に依存するとしてモデルを構築することとした。

3.1.2 電流密度依存性による起電力の導出

抵抗率に電流密度が依存していた場合、電氣的にどのような影響が発生するかを考える。そこでまず、ファラデーの法則により、

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (3-1)$$

ここで電位は、

$$\mathbf{E} = \rho\mathbf{J} \quad (3-2)$$

ここで抵抗率 ρ を、自由エネルギー依存性を考慮すると、ファラデーの法則は、

$$\text{rot}\rho\mathbf{J} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (3-3)$$

と表される。式を整理すると

$$\rho\text{rot}\mathbf{J} + \text{grad}\rho \times \mathbf{J} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (3-4)$$

と拡張される。ここで左辺第二項は抵抗率の空間変異が小さい、つまり常電導状態ではゼロとなり無視できる。つまり抵抗率の電流密度依存性がある場合、起電力を生じさせることを示している。

3.1.3 エネルギー最小原理による電流依存性による起電力の導出

単純モデルを用いてエネルギー最小原理との整合性を確認する。

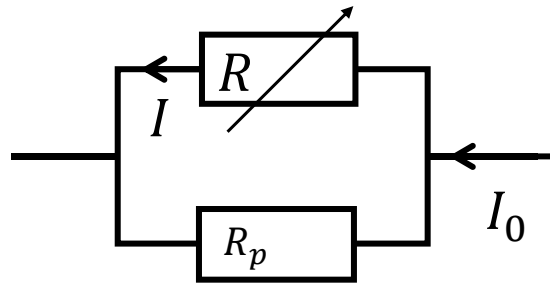


図 3.1 並列回路モデル

図 3.1 のように電流 I_0 を流した場合、電流依存性のある抵抗を用いた場合、エネルギー最小とするには、

$$W = R_p(I_0 - I)^2 + RI^2 \quad (3-5)$$

より両辺を I で微分して

$$0 = -2R_p(I_0 - I) + 2RI + \frac{\partial R}{\partial I} I^2 \quad (3-6)$$

となり、右辺第三項の起電力を得る。電流増加に伴って抵抗が上昇する場合、固定抵抗に向かって電流が流れるように起電力が発生することを示している。

3.1.4 単純モデルによる電流密度依存性による起電力の導出

電流パスを超電導線として模擬することを考える。そのためクーパー対を維持、つまり格子振動によるエネルギー輸送パスを保つ場合 0Ω 、自由電子の移動によるエネルギー輸送の場合は有限抵抗を持つ。そこで超電導線の抵抗は 100 A 以下では 0Ω 、 100 A を超えると 1Ω になるステップ関数と近似する。この十分に離れた(磁気結合のない)超電導線 10 並列に 1000 A の電流を流す。この場合、超電導線材においてエネルギー最小となるのは全ての線材に 100 A 通電させた状態であり、この時のエネルギー損失は 0 W である。

$$\sum_{n=1}^{10} \{R \times (I_c)^2\} = 0 \times (100)^2 \times 10 = 0 \quad (3-7)$$

つぎに 1001 A 通電した場合に電流が均一に流れた場合、全ての線材に 100.1 A 通電されることとなり、

$$\sum_{n=1}^{10} \left\{ R \times \left(I_c + \frac{\Delta i}{10} \right)^2 \right\} = 1 \times \left(100 + \frac{1}{10} \right)^2 \times 10 = 100200 \quad (3-8)$$

エネルギーの消費量は 100200 W となる。

次に 1 本に 101 A 流し、残りの超電導線材は超電導状態を保つとした場合、

$$R \times (I_c + \Delta i)^2 + \sum_{n=2}^{10} \{ 0 \times (I_c)^2 \} = 1 \times (100 + 1)^2 + 0 \times (100)^2 \times 9 = 10201 \quad (3-9)$$

10201 W となる。

同様の計算を、増分電流を変化させながら線材本数の依存性を計算した。電流と損失の関係を図 3.2 に示す。

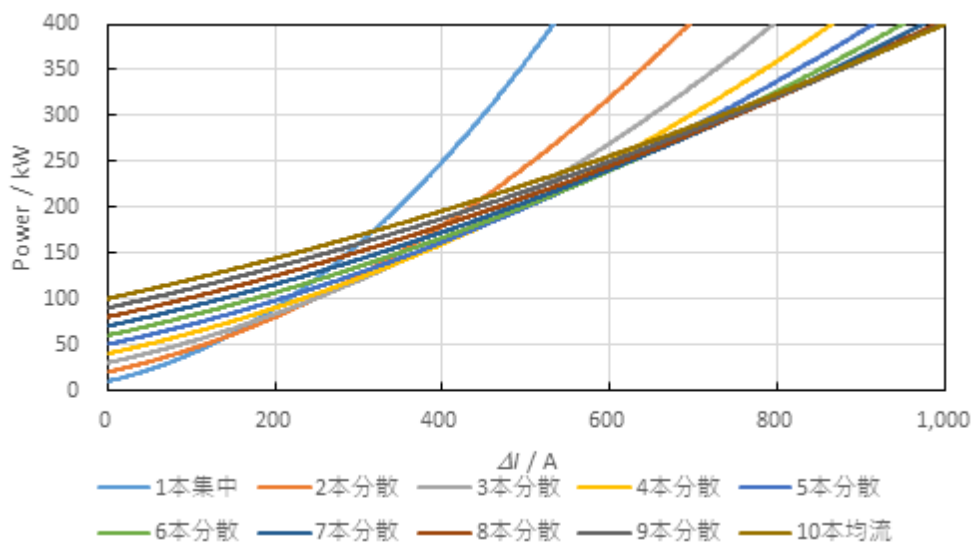


図 3.2. 超電導線材において消費されるエネルギーの比較

臨界電流の総和を超える電流が流れた場合、全体に均一に電流を増加させて、全ての超電導線材が同時に常電導転移を発生させるより、増分電流を一つの線材に増分電流を担当させた場合のほうが総エネルギーは小さくなる可能性がある事を示している。増分電流が小さい場合において 1 本集中において総エ

エネルギー消費量が小さい。しかし増分電流が上昇していくと、2本、3本と電流分担本数が増えた場合にエネルギー消費最小となっていく、最終的には10本全体で分担した場合に最もエネルギー消費が小さくなる。これは臨界状態においてクーパー対が同時に解消されず、エネルギー輸送時において格子振動と自由電子の移動が並列で行われると推測される。

3.1.5 抵抗率の電流依存性による起電力

マクスウェル方程式・エネルギー最小原理・単純モデルはすべて抵抗率に電流依存性がある場合に起電力が生じることを示している。

これは電流と双対関係にある磁束を用いて考えると明らかである。つまり磁束の量子化現象は、超電導現象としては一般的であり、空隙、不純物、弱結合などの部分に磁束を量子化することで、超電導部分と常電導部分を混在させながら全体としてのエネルギーを抑制する。電流においても同様の現象が生じることを示しており、磁束の量子化が発生する領域、つまり本解析対象において適応すべき現象であると考えられる。

3.2 超電導層解析モデル

超電導は電流密度・磁束密度・温度に依存している。このため解析モデルにもこれらの依存性を考慮する必要がある。しかしながら検討対象となる超電導ケーブルはゼロ磁場、または十分に磁場の影響が小さい場所で使用される。そのためモデルの高速化のため磁束密度の影響を考慮しないとし、電気-熱錬成方程式を用いて解析することとした。

解析モデルは差分法を用いる。そこで解析対象の超電導体を図 3.3 のように通電方向と垂直に分割を行う。

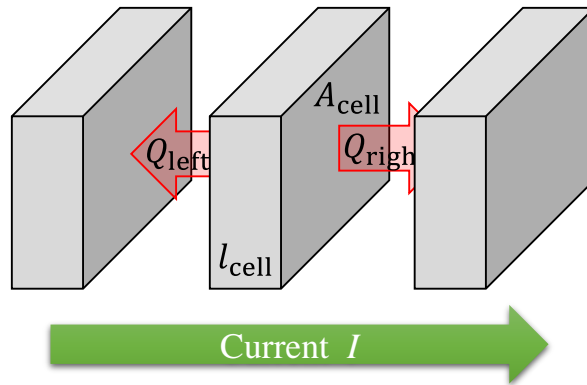


図 3.3 解析モデル

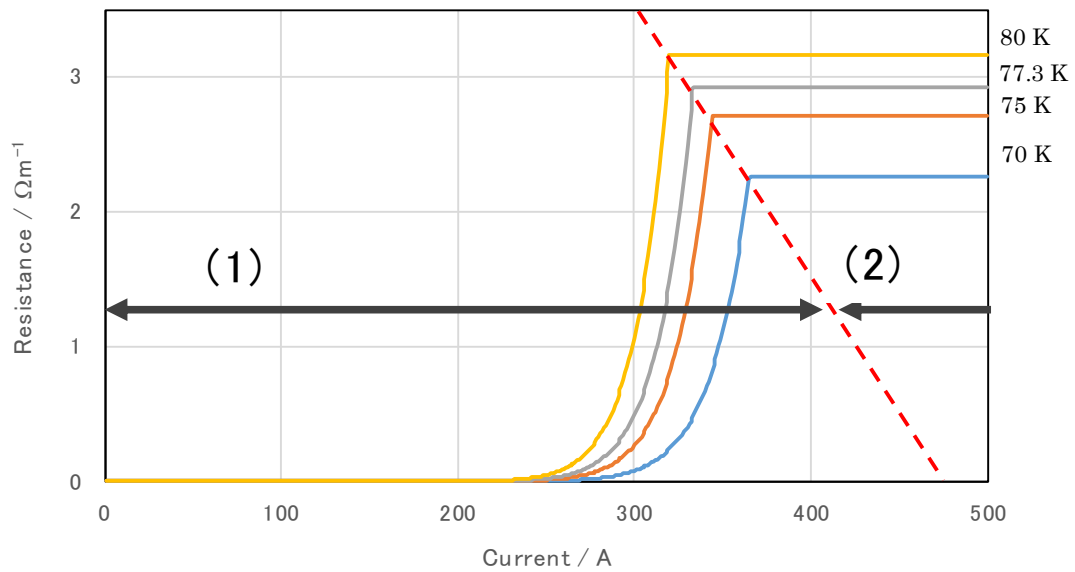
この分割された要素を解析セルとする．このセルによる発熱，隣接セルへの熱伝導，周囲への熱伝達を算出する．そしてそれぞれ得られた値を

$$\Delta T = \frac{W_{cell} + Q_{left}(T) + Q_{right}(T) + Q_{OUT}(T)}{C(T)} \Delta t \quad (3-10)$$

に代入することで微小時間の温度変化を得た．ここで C はセルの熱容量，

$Q_{right} \cdot Q_{left}$ はそれぞれ左右への熱伝導でありフーリエの法則より導出した．さらに外部への熱伝達 Q_{OUT} は構造によって異なる値である．これをすべての要素において計算し，さらに微小時間毎に繰り返した．

電気特性の算出は，図 3-2 のように R_{cell} の場合分けを行うことで再現した．



(1)超電導領域, (2)常電導領域とした. 超電導領域は第二章において示したように, 抵抗値に電流依存性を考慮し n 値モデルを用いた. さらに臨界電流に温度依存性を考慮することで, 温度依存性についても再現した.

3.3 現象論的モデルの妥当性試験

構築したモデルに妥当性があるかを確認するために試験を行った.

3.3.1 Bi 系線材による再現性試験

Bi 系線材(TypeH: 住友電工) 11 cm 線材において, ランプ通電 475 A/s で 1 s を行ったときの抵抗の変化について実測結果とシミュレーション結果を比較した.



図 3.5 測定した Bi 系線材(TypeH : 住友電工)

図 3.6 に実験回路を示す。電流源と直列に超電導素子を接続し、液化窒素にて浸漬冷却を行った。

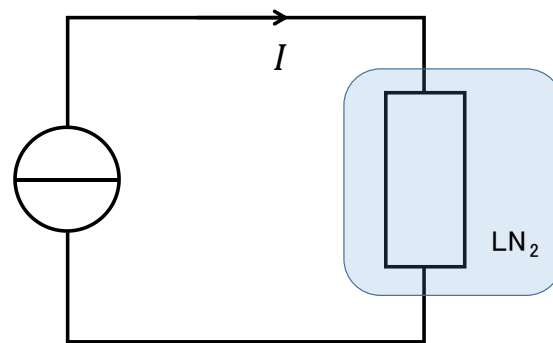


図 3.6 実験回路

図 3.7 に実験結果と解析結果を比較した。

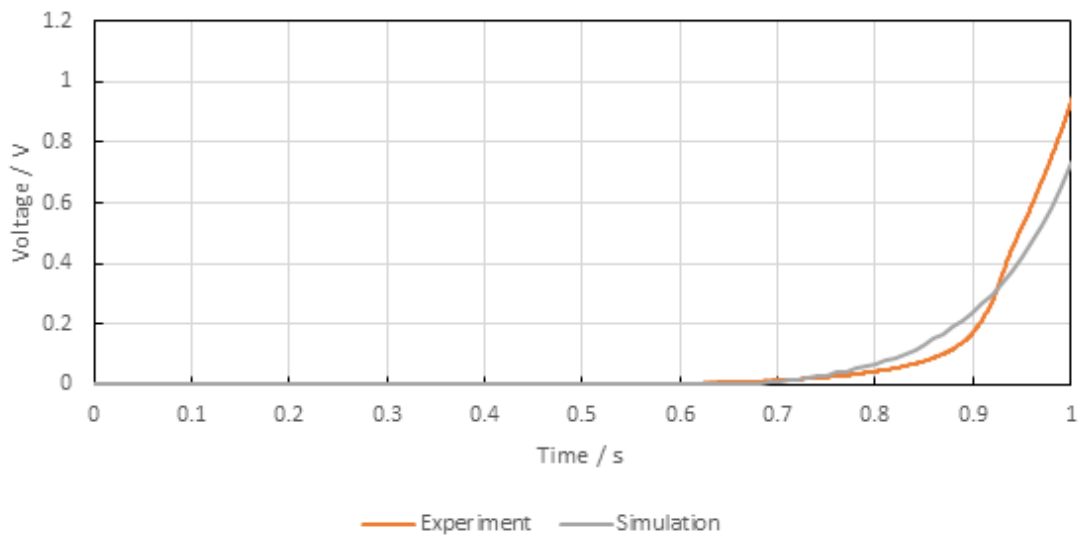


図 3.7 実測結果と解析結果の比較 (475 A/s)

同様にラミネート加工された超電導線材(TypeHT CA50 : 住友電工)についてもランプ通電 630 A/s で 1 s の試験を行った. 図 3.8 に用いた試料を示す.

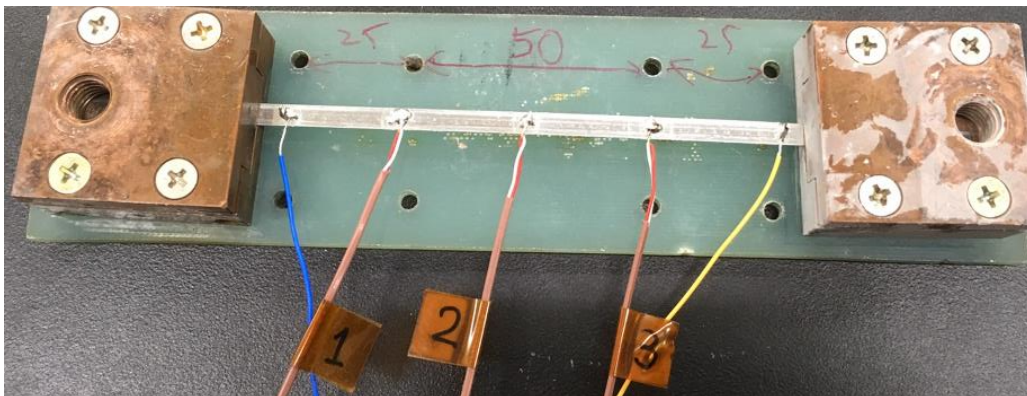


図 3.8 超電導線材(TypeHT CA50 : 住友電工)

図 3.9 に実測結果と解析結果の比較を示す.

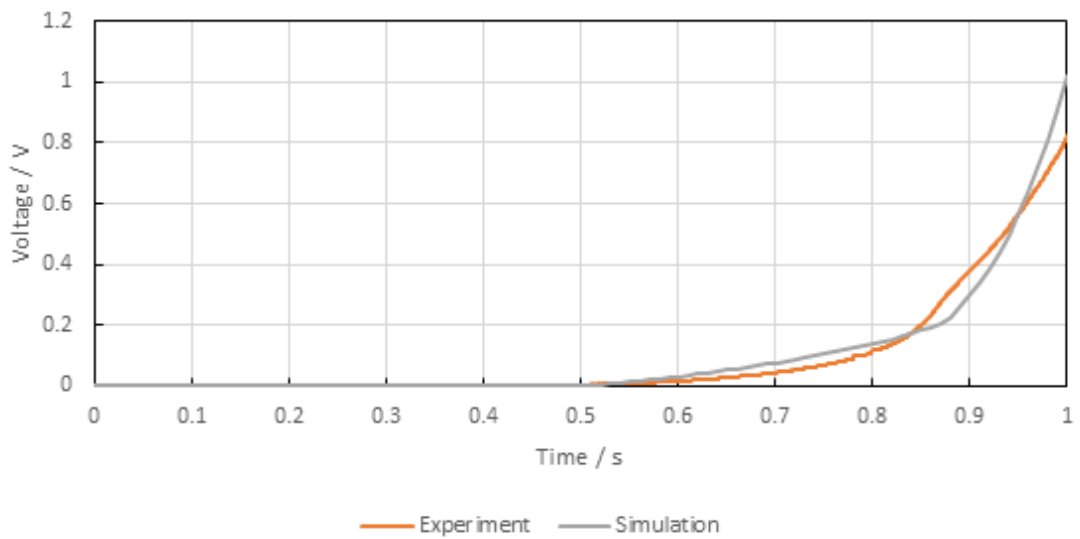


図 3.9 実測結果と解析結果の比較 (630 A/s)

両線材ともに抵抗値の再現に絶対値、傾向ともに妥当な結果を得た。しかしながら焼損寸前という温度上昇が発生したであろうデータを用いても熱電対による温度測定の問題と、液化窒素中での測定のため、温度変化が通電終了後に発生していた。このため次の実測を行い、温度測定の妥当性評価を行った。

3.3.2 Bi 系線材による温度-電圧同時測定

次に温度測定を行うため、電流源と直列に断熱した超電導線材(Type-H：住友電工)を接続し、275 A/min の通電試験を行った。図 3.10 のように、300 mm の超電導線材に 3 cm ごとに T 熱電対を接続した。

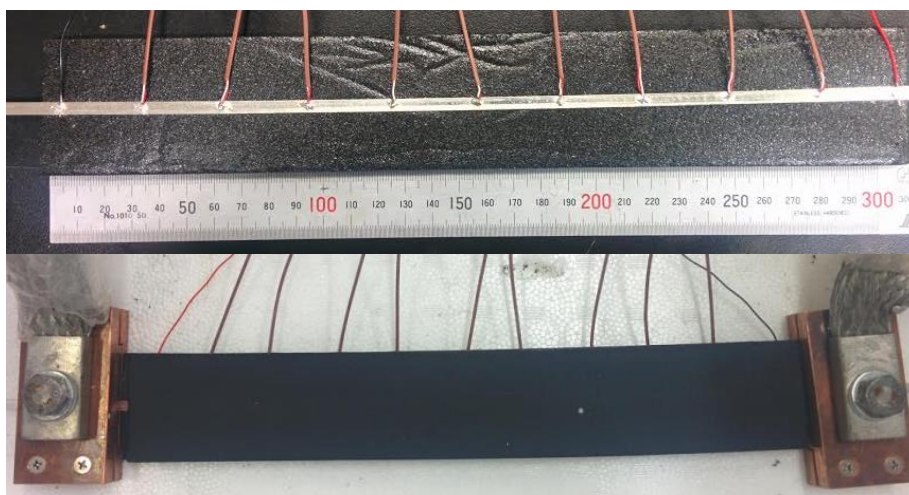


図 3.10 断熱条件での Bi 系線材と熱電対配置

図 3.11 に各熱電対の温度変化と通電電流を示す。

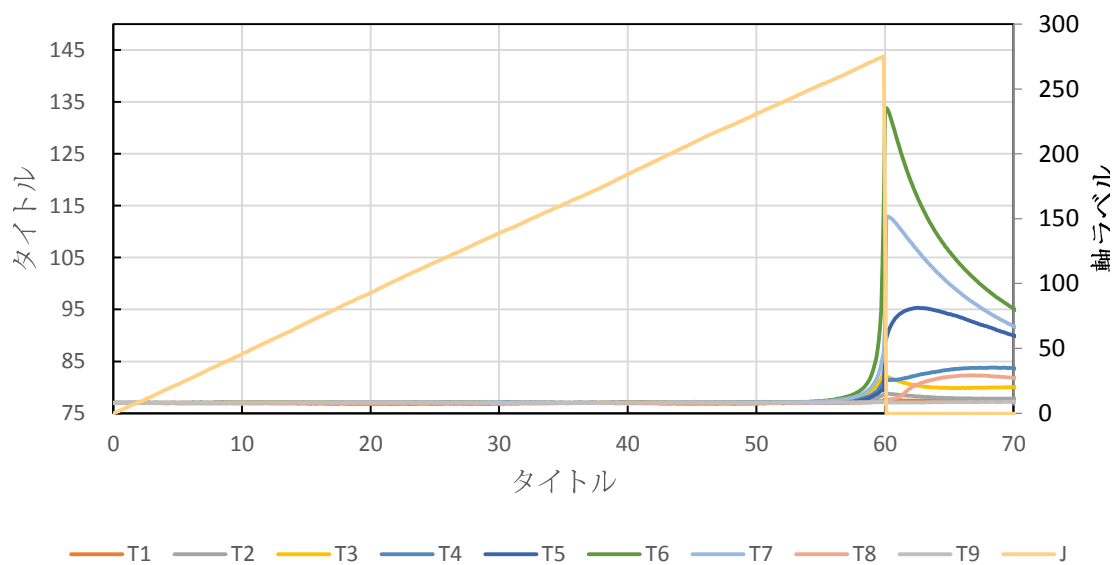


図 3.11 実測結果

長時間試験を行ったため、温度上昇の測定が可能となった。そこで解析結果との比較を行った。図 3.12 に電圧の実測結果と解析結果の比較を示す。

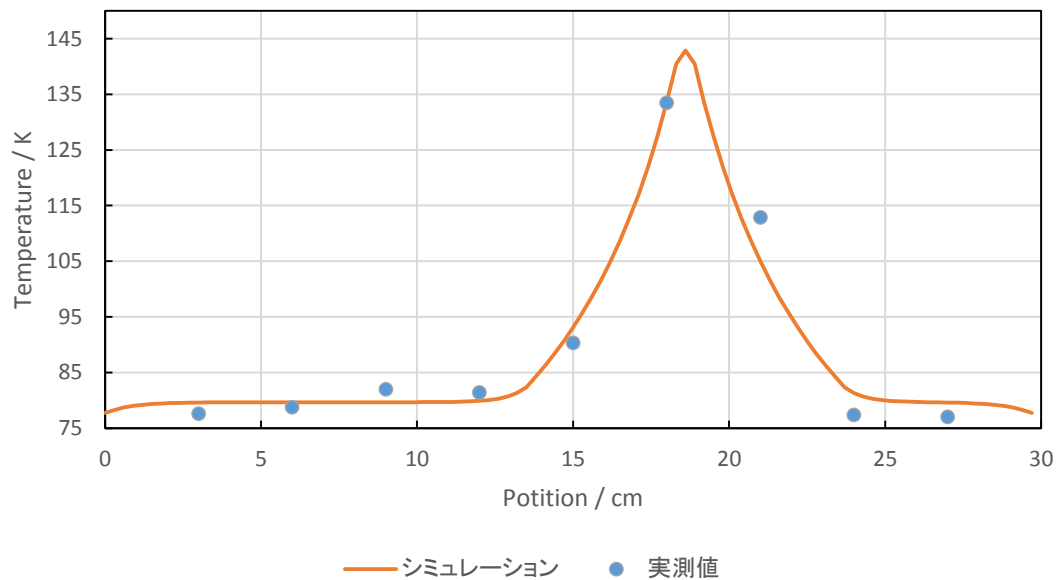
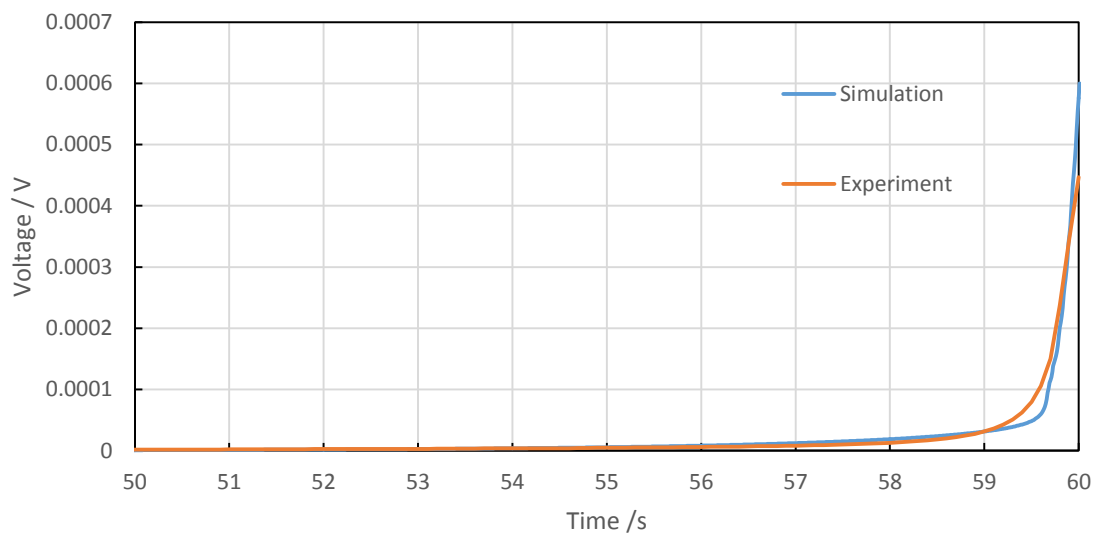


図 3.12 実測結果と解析結果の比較

(a) 電圧比較 (b) 100 ms の温度分布比較

100 ms 時の温度分布の実測結果と解析結果を示す。抵抗変化，温度分布はよく一致したことが明らかになり，熱的にも電気的にも絶対値，傾向ともに妥当性のあるモデルと考えられる。

3.3.3 Y 系薄膜による再現性試験

さらに構造の異なる超電導素子を用いた場合についても検討を行う。図 3.13 に示す YBCO 薄膜を用いて妥当性試験を行った。実測に使用した薄膜は電極部を含み長手方向 210 mm×幅 30 mm である。



図 3.13. 実測に使用した YBCO 薄膜

図 2.14 に YBCO 薄膜の構造を示す。

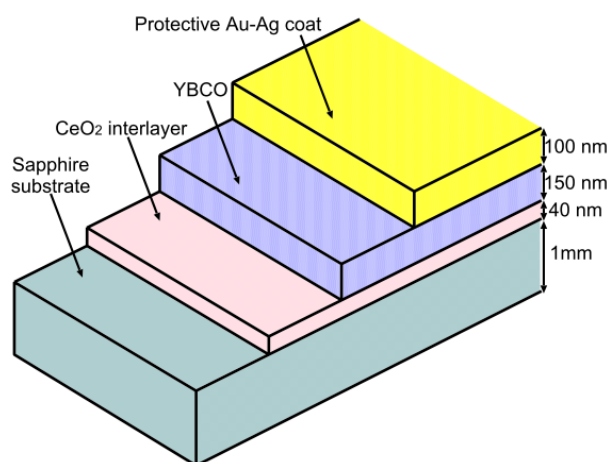


図 3.14 YBCO 薄膜の構造

サファイア基板の上にセリア(CeO_2)をスパッタし MOD 法により YBCO 層を作成し、金銀合金($\text{Au}77\text{wt}\% : \text{Ag}23\text{wt}\%$)によって保護層を形成した多層構造である。ここでセリア層は図 3.15 の断面の観察から YBCO 層と同化しており、3層からなるとして考える。

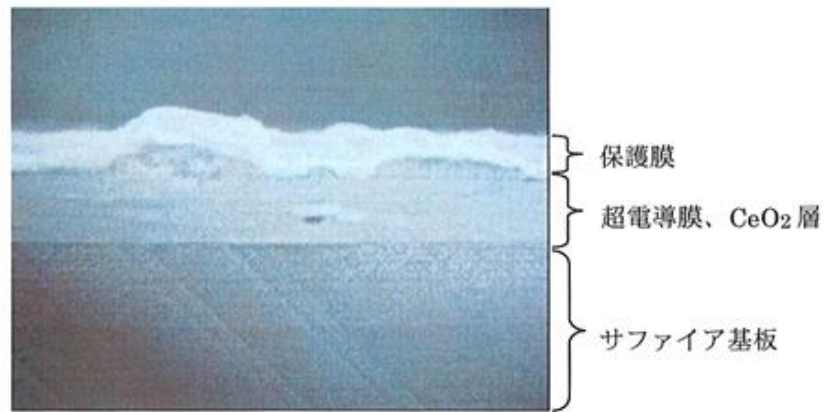


図 3.15 YBCO 薄膜の断面写真

図 3.16 に実測回路を示す。YBCO 薄膜はクライオスタット中に配置し液体窒素による浸漬冷却を行った。

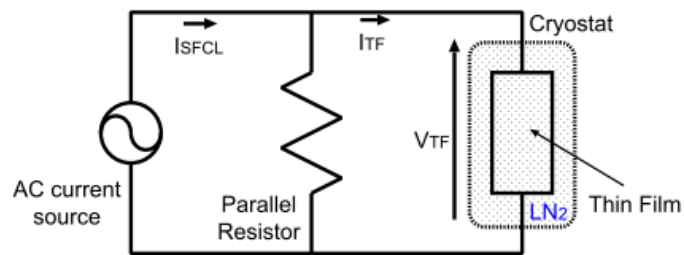


図 3.16 実測回路

図 3.17 に実測結果と解析結果の比較を示す。

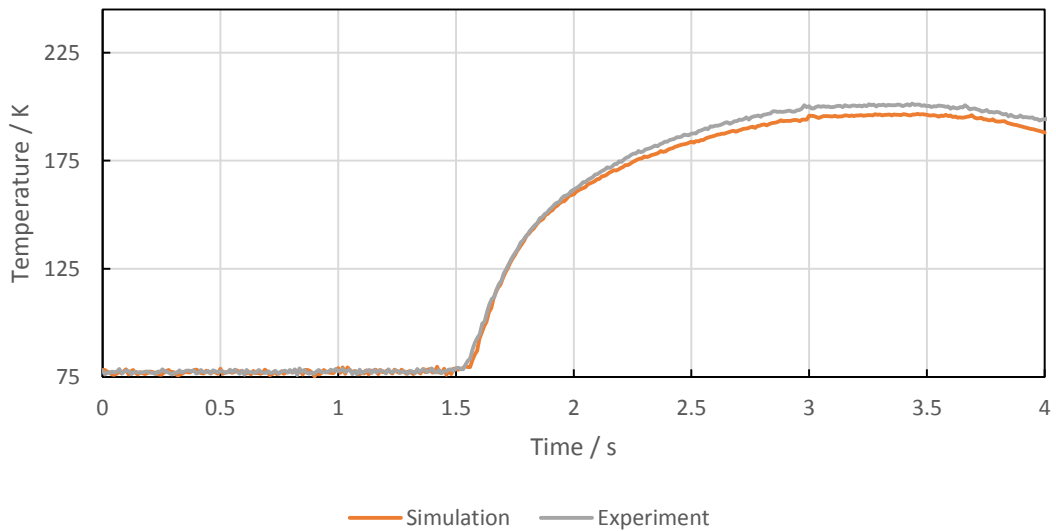
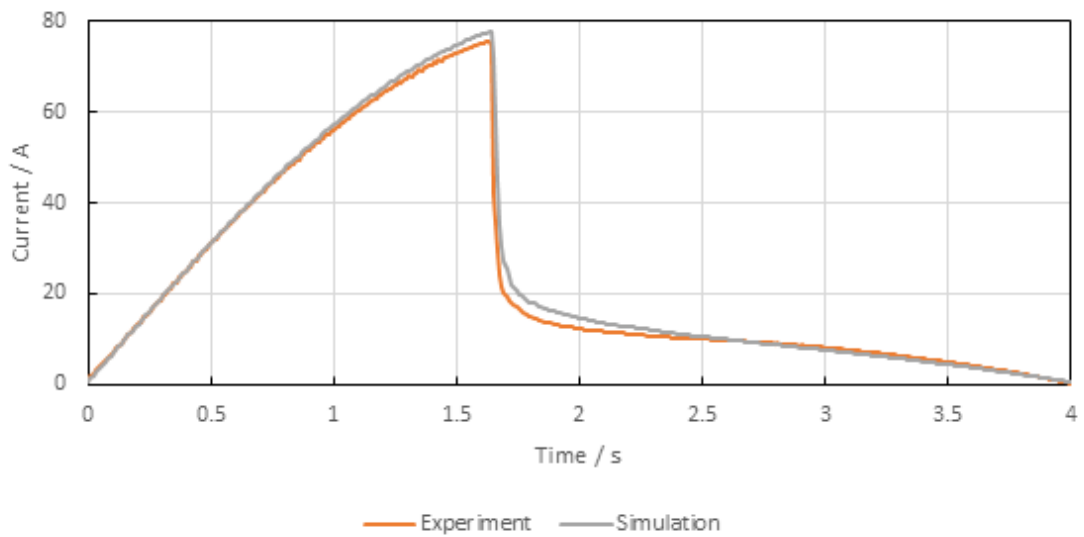


図 3.17 実測結果と解析結果の比較

a) 電流変化 b) 温度変化

電流変化，温度変化共に絶対値および傾向に妥当性のある結果を得た。

3.4 妥当性試験結果まとめ

電圧変化・温度変化ともに妥当性のある結果を得た。さらに材料や構造によらず電氣的・熱的特性再現することが可能であることが示され，用いた仮定の範囲

内において汎用性のあるモデルとなったことが明らかになった。

第4章 故障電流保護に関する検討

4.1 検討対象システムのモデル化

第2章で示したように、超電導ケーブルの導入先は交流直流、さらにはその電圧階級も異なる。このような多様性を求められる場合において、超電導ケーブル導入時の検討を行うためには、構築した超電導転移モデルを導入可能となるシステムモデルの構築も必要となる。そこで検討対象システムの多様性を損なうことが無いように、汎用性を重視したモデルを構築した。ここで検討対象としたシステムは直流鉄道系統とした。

4.1.2 グラフ理論を用いた鉄道解析

汎用性を高めるためにグラフ理論を用いた閉路解析を行った。(4-1)式を使用した。

$$[B][E] = [B] \left([R][I] + \frac{[L][I] - [L][I_{pre}]}{\Delta t} \right) \quad (4-1)$$

ここで[B]はタイセット行列となり各素子の組み合わせを示す。[E]は電源行列となり各素子から発生する起電力を示す。[R]は抵抗行列となり各素子の抵抗値を示す。[L]はインダクタンス行列となり各素子のインダクタンスを示す。[I]は電流行列となり各素子の電流値を示す。[I_{pre}]は微小時間Δt前の各素子の電流値を示す。ここで超電導ケーブルは電流依存性を持つため、増分最小として計算を行うことで再現した。

4.1.1 直流系統（回生車両を含む鉄道系統）

直流鉄道系統は電源である変電所、き電線、レール、車両によって構築される

とした。これらの素子の単純な組み合わせを図 4.1 に示す。

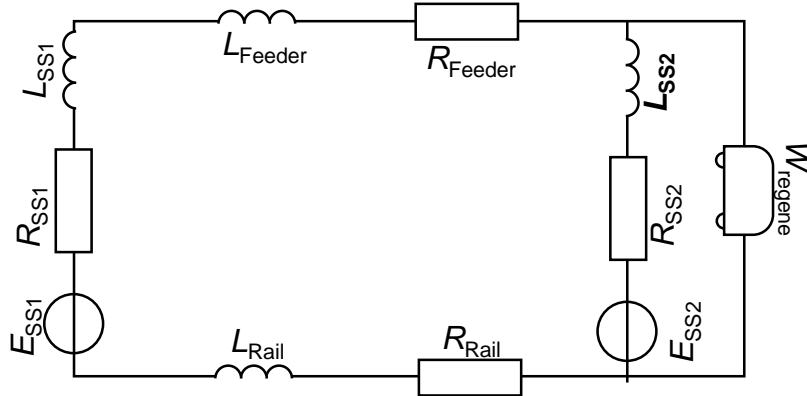


図 4.1 直流鉄道システムモデル

変電所をき電線，レールで接続した回路を車両が移動することで成り立つ。さら
に
変電所左右に同様の回路が広がっていくと更に大型化が可能となる。それぞ
れの値は一般的に鉄道において使用される値を採用した。表 4.1 に使用した値を
示す。

表 4.1 用いたパラメータ

Symbol	value	Symbol	value
E_{SS}	1600 V	$L_{Protective}$	1.2 mH/km
R_{SS}	0.03 Ω	R_{Feeder}	0.01 Ω /km
L_{SS}	0.3 mH	L_{Feeder}	0.8 mH/km
L_{Sc}	1.1 mH/km	R_{Rail}	0.006 Ω /km
$R_{Protective}$	0.025 Ω /km	L_{Rail}	0.7 mH/km

4.1.4 回生システムを含む回路解析法の提案

電源に着目した時，鉄道システムには電圧源である変電所だけではなく，車両の減速による発電を使用した回生システムが存在する。この回生システムはエネルギー最大制御で電流を出力する。つまり定電力源として振る舞う。そこで閉路解析を行うため，この出力電力 W [W] を出力電流 I [A] で割ることによって電圧源

として計算を行った．これをグラフ理論による閉路解析の式に拡張すると以下の式となる．

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{SS} \\ E_{SS} \\ W_{regene}/I_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

ここで定電力源 W_{regene} の出力は，

$$W_{regene} = \{(K - R_r) * k_g * k_{inv}\}dt - W_{hoki} \quad (4-3)$$

より算出される．運動エネルギー K ，転がり摩擦や空気抵抗などのロス R_r ，発電効率を k_g ，インバータの変換効率を k_{inv} ，補機によって使用される電力を W_{hoki} とした．

4.1.3 超電導ケーブルモデル

想定している超電導ケーブルは多層構造の複雑な構造を持つ．そこで熱的，電氣的に分割して考えることで単純化した．まず超電導層，銅保護層，そしてその他の構造物とした．ここでその他の構造物は電氣的には絶縁状態であり，想定している非定常状態が非常に短時間であるため，無視することとした．

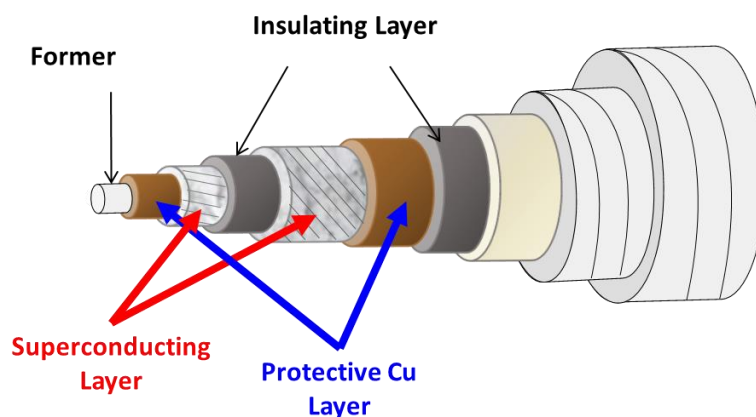


図 4.2 超電導ケーブルの構造

そこで解析モデルでは超電導層と銅保護層のみに着目することとし、簡単化を図った。ここで銅層に関しては熱的に絶縁されているとして、実測値を用いたインダクタンスを使用した。

4.2 変電所直接接続による短絡電流増加

鉄道系統への超電導ケーブル導入はメリットが大きいですが、導入時における短絡電流増加も指摘されている。複数の変電所間をゼロ抵抗で接続するため、その短絡電流も増加するという懸念である。そこで図のように変電所直下でのき電線-レール短絡が発生した場合に、変電所が増加した場合の短絡電流について検討を行う。変電所間隔は大都市圏で一般的な 3 km とした。図 4.3 に複数変電所での短絡事故モデルを示す。

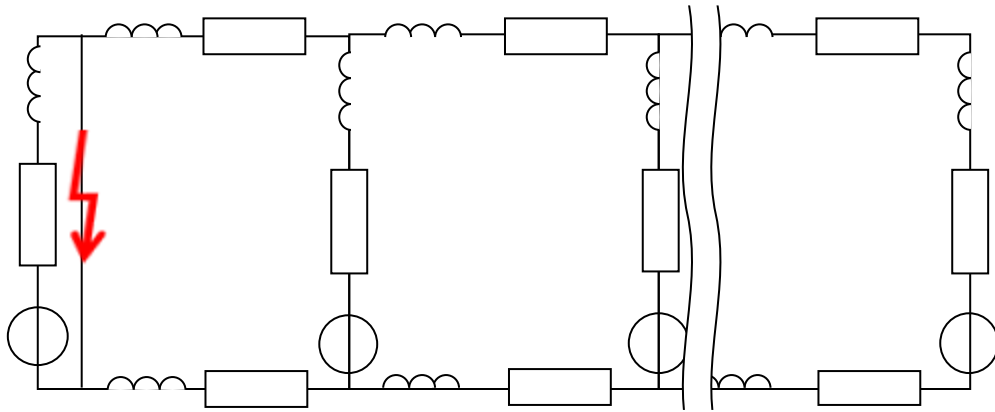


図 4.3 複数変電所接続時の短絡事故モデル

想定した故障は最過酷としてき電線，レールが短絡したとし，短絡抵抗およびアーク電圧は共に 0 とした．この時の短絡電流を図 4.4 に示す．なお遮断までに必要な時間は，通常の鉄道系統であれば 20 ms 以内で遮断可能であるが，鉄道解析においては JIS E 2501 鉄道用地上設備-直流開閉装置及び制御装置-より 100 ms を適用することが多い．よって解析は最過酷を想定して 100 ms とした．

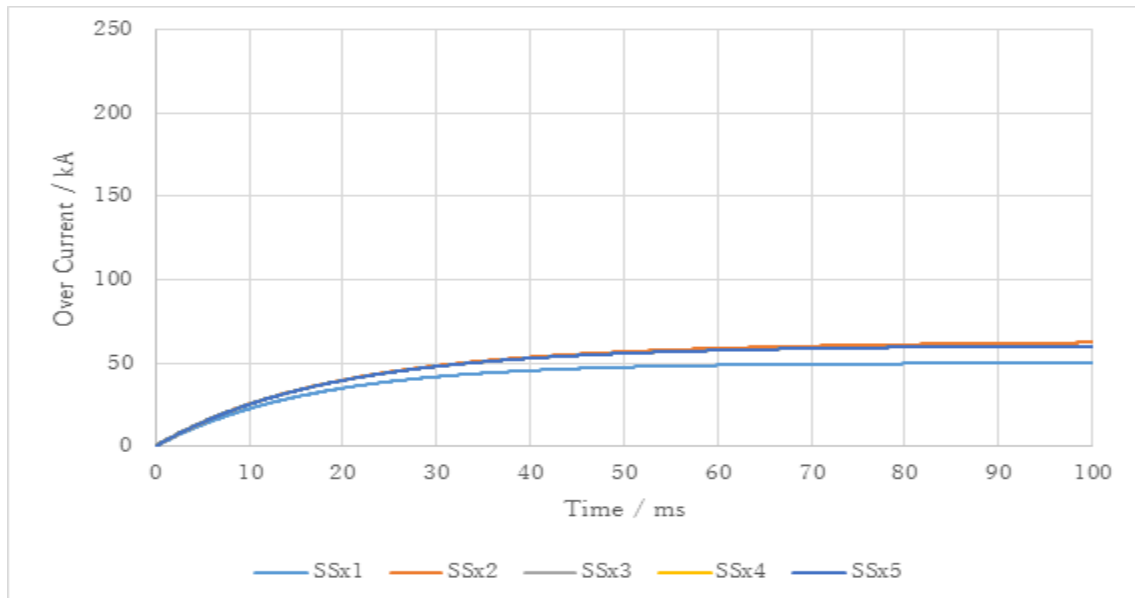


図 4.4 複数変電所における短絡電流の時間依存性

従来の鉄道系統であれば、1変電所ならば約50kA、片側2変電所以上であれば約60kAの短絡電流が予想されることが示された。次にゼロ抵抗ケーブルにおいて複数変電所接続された場合のモデルを図4.5に示す。

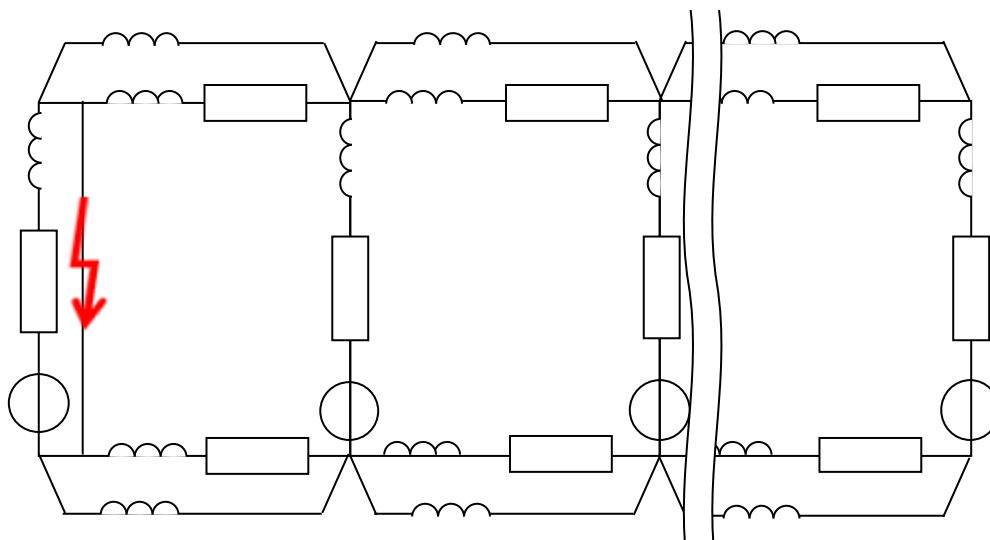


図 4.5 ゼロ抵抗ケーブル接続された複数変電所モデル

このことは、変電所がゼロ抵抗接続されている事を示しており、非常に巨大な故障電流が流れる可能性がある。そこで図4.6に短絡電流の時間依存性を示す。

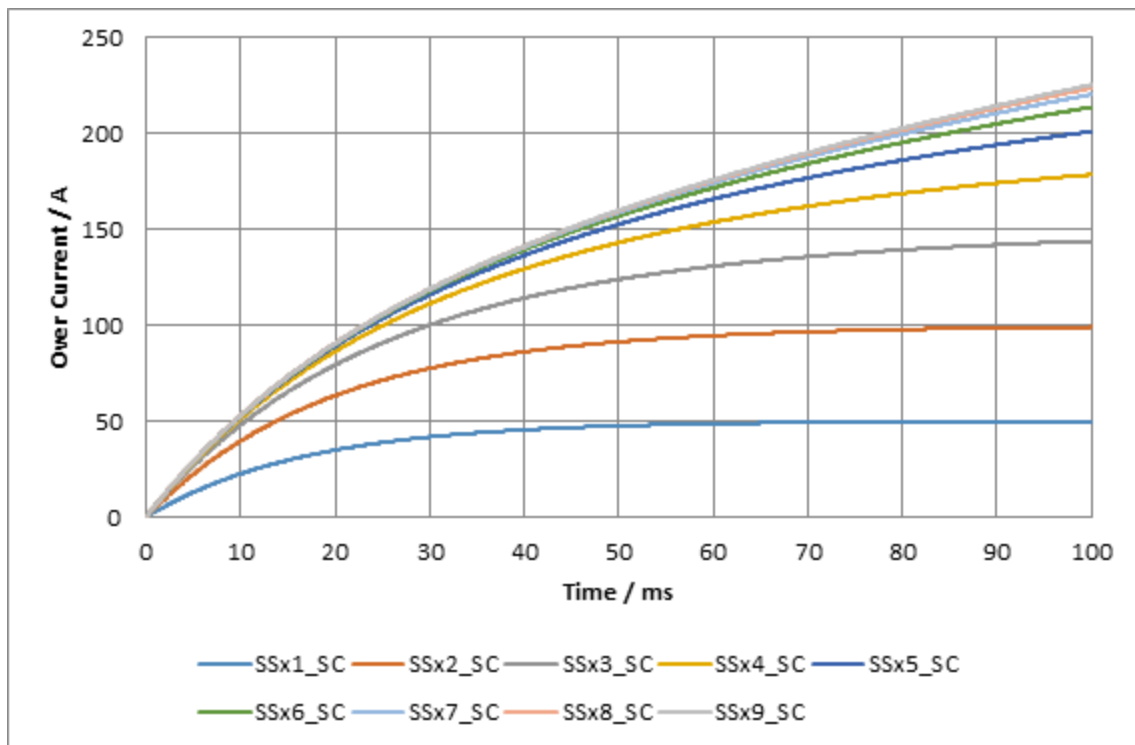


図 4.6 ゼロ抵抗ケーブルにより接続された複数変電所による
短絡電流の時間依存性

変電所数が増加するに従って故障電流が増加している。8 変電所程度においてほぼ収束するが、超電導ケーブルを導入していない場合と比較して、非常に大きいことが示された。

4.2.1 非定常状態における直流鉄道系統導入時の超電導ケーブルの影響

しかしながら、この推測は超電導ケーブルの臨界電流を考慮していない。そこで非定常時における超電導ケーブルが導入された直流鉄道の解析を行った。解析した回路を図 4.7 に示す。

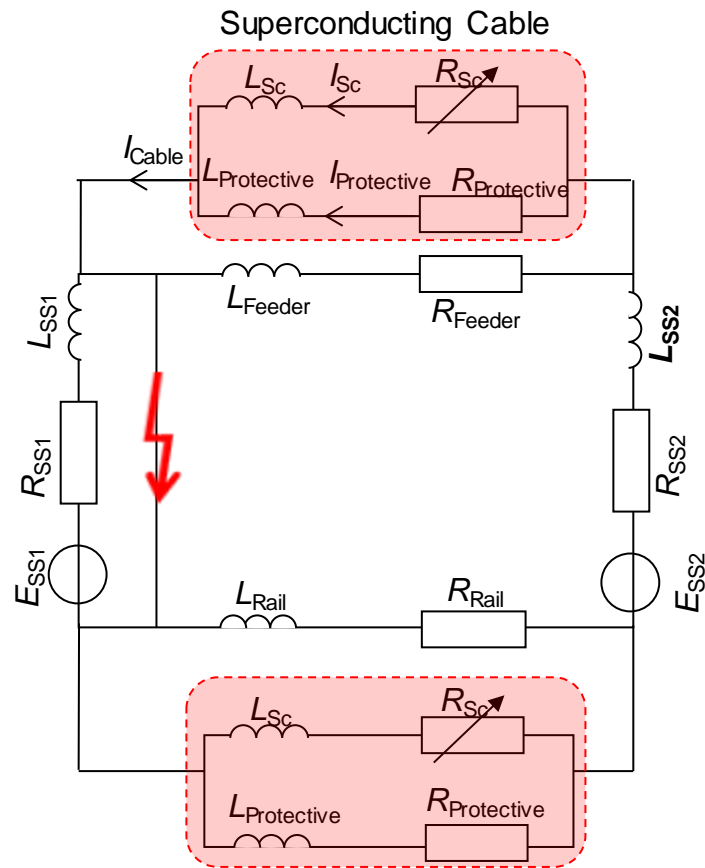


図 4.7 短絡発生時の超電導ケーブル導入直流鉄道系統

なおアーク電圧 0 V ，短絡抵抗 $0\ \Omega$ とする．この時，臨界電流無限大と 10 kA の場合に多いて，どのような挙動の差が生まれるかを比較した．図 4.8 に超電動ケーブル電流，超電導送電流，保護相電流を図に超電導層の抵抗変化を示す．

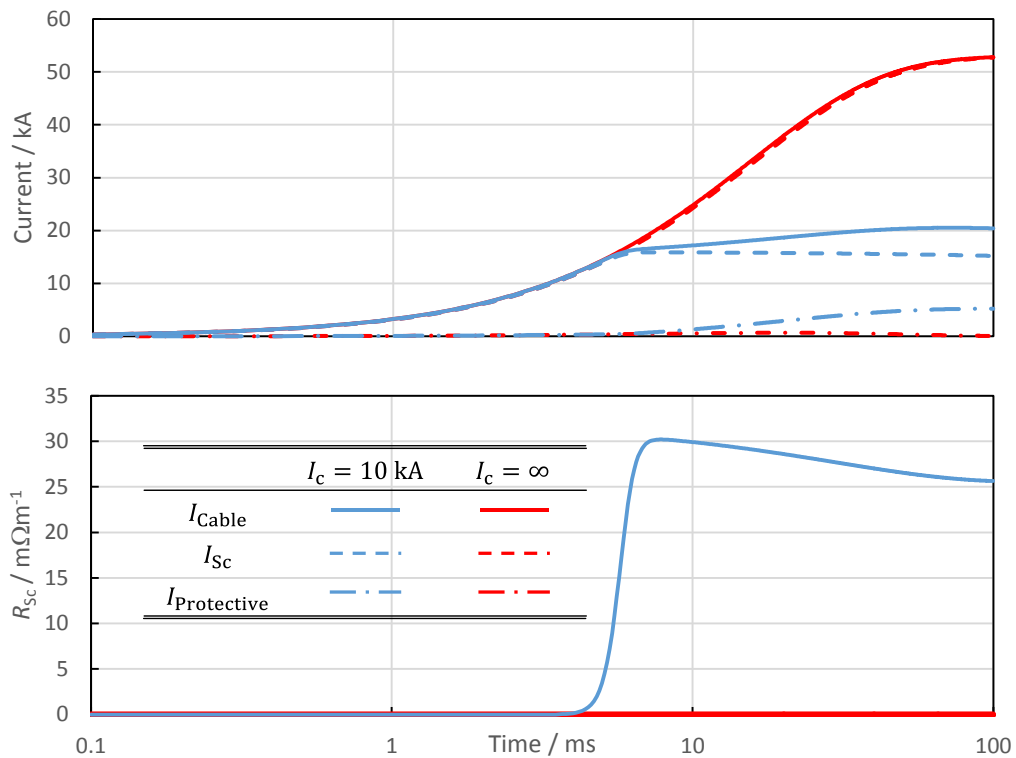


図 4.8 臨界電流無限大と 10kA での比較

超電導ケーブルに過電流が流れた場合、臨界電流無限大の場合、危惧したように過剰な超電導ケーブル電流が流れている。しかしながら、臨界電流 10 kA の場合、臨界電流部分付近において電流が抑制されている。そこで抵抗の時間変化を確認すると、同じタイミングで抵抗が発生し始めていることが明らかになった。つまり、超電導層に過電流が流れることで臨界電流を超え、抵抗が発生し、これが原因となり限流効果が発生した。このことから危惧したような短絡電流増加は発生しないことが明らかになった。このことは超電導ケーブル自体が限流器としての機能を副次的には持っていることを示している。次に図 4.9 に 100 ms 後のケーブル温度分布を示す。

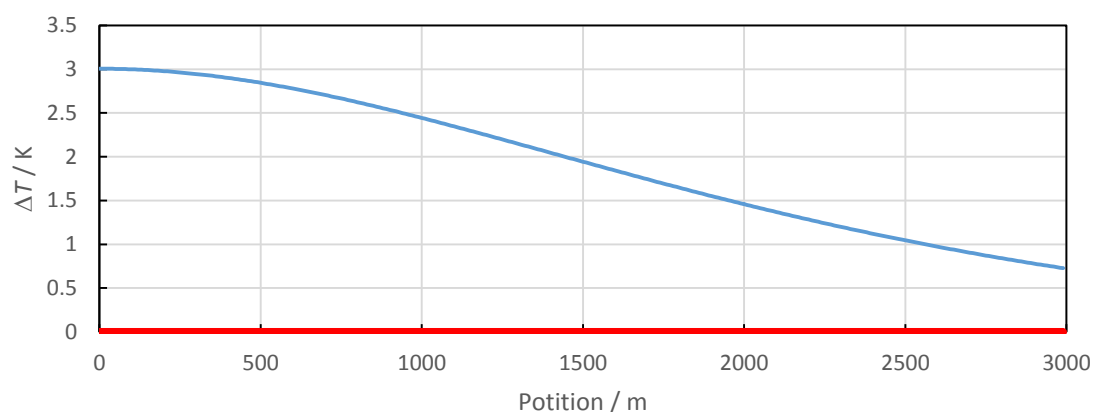


図 4.9 100 ms 後の超電導ケーブルの温度分布

臨界電流無限大の場合，超電導層に温度変化は発生しなかった．これは抵抗変化のグラフからも明らかのように，抵抗が発生しないため，ジュール発熱が起きないためである．しかしながら臨界電流 10 kA の場合においては，常電導転移が原因となりケーブルに抵抗が発生してしまった．これが原因となりケーブルの温度上昇が発生してしまった．さらにその温度上昇に分布が存在する事がわかる．これは初期温度の高温部において臨界電流が低くなっていたために，臨界電流に達するタイミングが最も早かったため，加熱時間が長くなったためであると考えられる．

4.2.2 回生システム導入時の検討

日本の鉄道においては回生システムを導入している．そこで回生車両導入時の超電導ケーブルの挙動についても検討を行う必要がある．

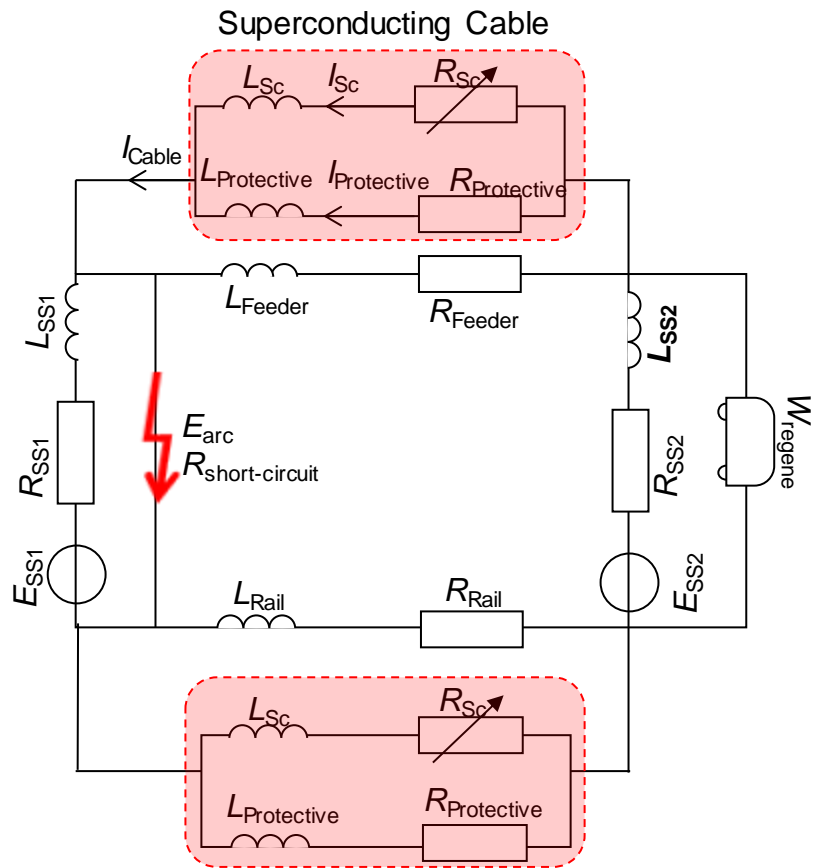


図 4.10 回生システムを考慮した超電導ケーブル導入直流鉄道系統

そこで変電所 2 直下で車両が回生を始めた場合を想定した．限流器の有無が超電導ケーブルに与える影響についての検討を行った．さらに超電導ケーブルの保護手法の検討を行う．

この条件下で超電導ケーブル導入時の影響を解析した結果，故障電流とケーブル温度変化はトレードオフの関係であることが明らかになった．故障電流の増加は変電所間を直接接続していることから，周辺機器の電流容量の増大に課題が発生する．しかしながらケーブル温度が変化した場合，長尺かつ電気絶縁のための絶縁紙が多数巻かれているため，僅かな温度変化であっても復帰に時間を要することになる．超電導ケーブルの温度変化が原因となり鉄道の運行に影響をあたえることは避けねばならない．

回生電力を 0W, 1MW, 2MW, 3MW, 4MW, 5MW と変化させた場合についてのグラフを示す。

電力上昇とともに、電流の突進率が大きくなっている。これはシステムの抵抗減少によって電圧上昇が発生し、その影響が電力に依存するためであると考えられる。その後、一定の値に収束するのは、ケーブルの限流効果によってシステムの抵抗値が高くなったために、電力源が、電圧源電圧に依存した電圧に収束したため、変化がなくなったと考えられる。さらに温度変化のグラフを示す。

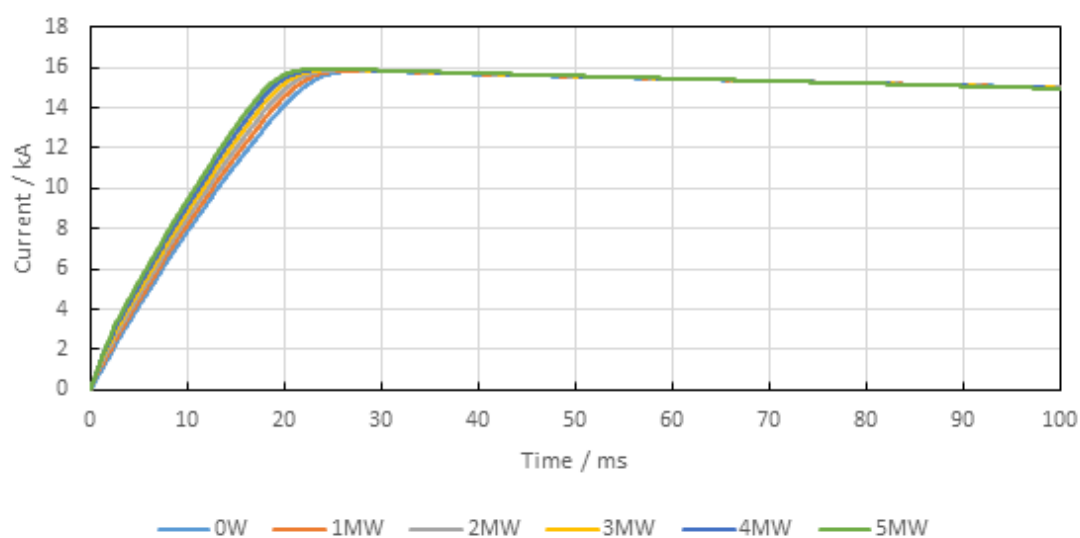


図 4.11 回生電力ごとの超電導送電流の時間依存性

温度変化も電力源電力に依存している。これは電流の突進率が高いため、温度上昇発生するまでの時間が短く、その影響で温度上昇に変化が生じた。

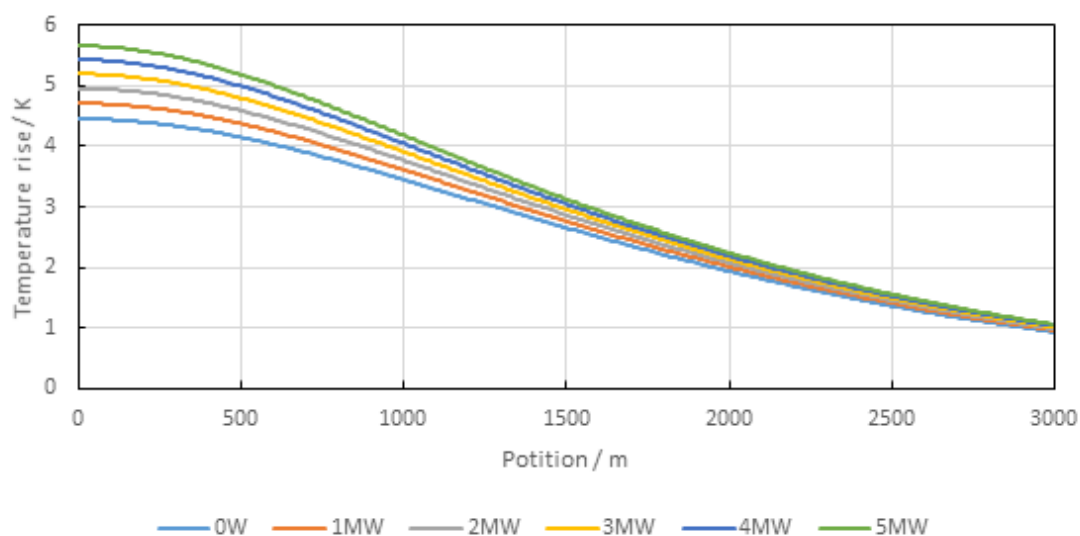


図 4.12 回生電力ごとの温度上昇分布

温度上昇分布も突進率が高くなった 5 MW が最も高い温度変化を示し、電力上昇と最大温度上昇は正の相関性があることが明らかになった。しかしながらその影響はあまり大きくないことも明らかになった。これは回生絞込によって電圧が 1800 V まで上昇した場合、それ以上のエネルギーは機械ブレーキにより消費されることが大きいと考えられる。

4.2.2.1 ケーブル温度依存性

超電導において温度は非常に重要な要素の一つである。超電導ケーブル運用に対して、その検討は活発に行われている。そこでその検討に、一提案として、非定常時における挙動から温度に関する検討を行った。

4.2.2.2 設定温度依存性

非定常時における挙動を超電導ケーブルの設定温度の依存性から検討を行った。そこで温度差一定として、解析を行った。まず、超電導層電流を図に示す。

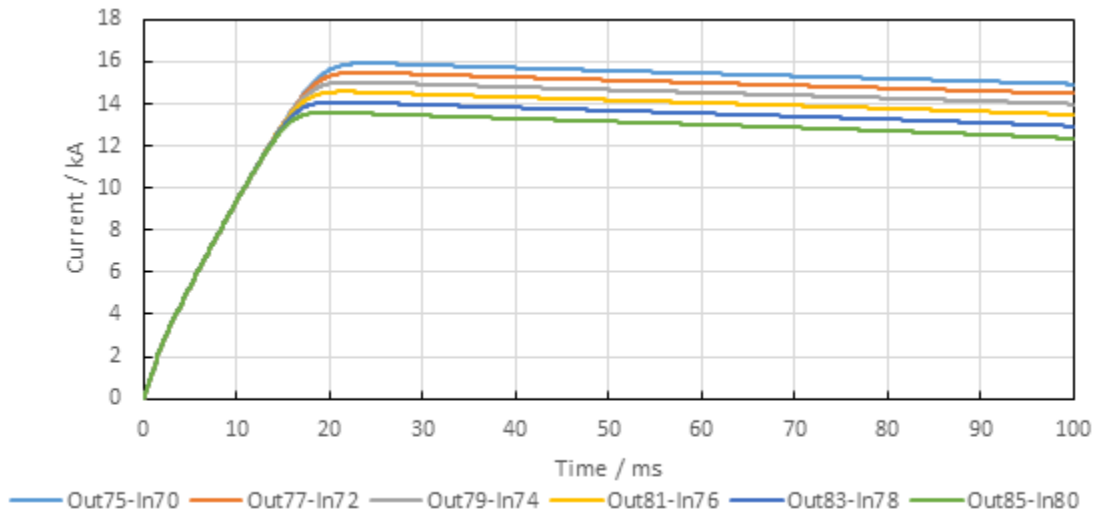


図 4.13 設定温度ごとの超電導層電流依存性

設定温度を高くした場合に超電導層電流が減少することが明らかになった。これは、超電導層の温度が上昇したことで臨界電流が減少したためであると考えられる。つぎに超電導層の温度上昇について比較する。

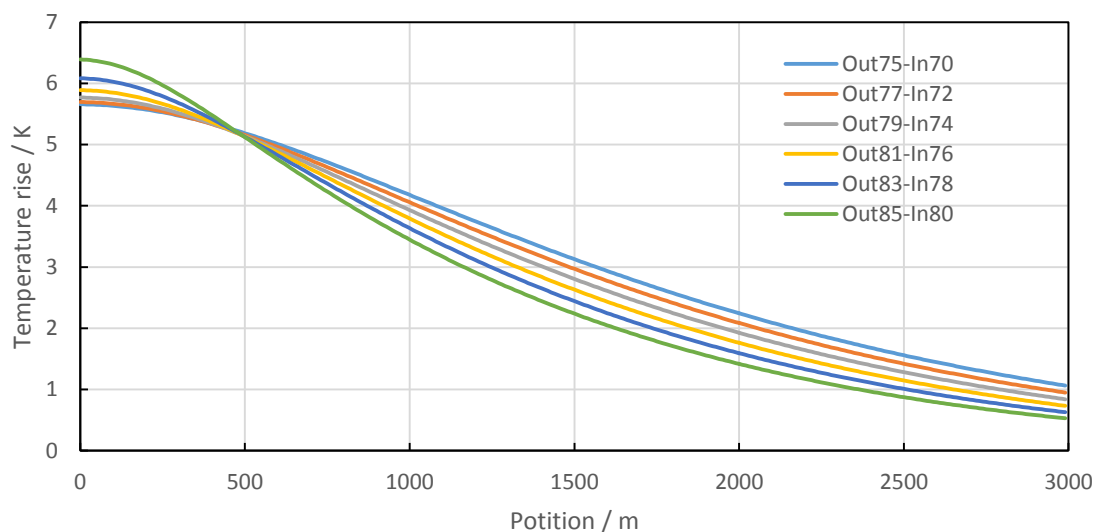


図 4.14 設定温度ごとの温度上昇分布

ここで初期温度が異なるため、初期温度からの温度上昇の比較を行った。その結果、設定温度が高い場合、高温部において温度上昇が大きく、低温部においては設定温度が低い場合に温度が高くなることが明らかになった。これは臨界電流が減少したため、高温部において超電導層電流が臨界電流に達するまでの時間が短く、加熱時間が長くなったためであると考えられる。

設定温度による影響は超電導層電流と超電導層温度の間にはトレードオフの関係があり、導入系統に適した設定温度を採用することがあると考えられる。

4.2.2.3 断熱効果検討 (低温側側温度依存性)

超電導ケーブルは、長尺ゆえに熱侵入による影響を受けやすい。そのため断熱効果の向上の研究は非常に重要となっている。そこで片側の温度を固定し、反対側の温度を変化させることで断熱の影響を表現し、これを検討した。

そこでまず低温側を固定した場合について検討する。図 4.15 に超電導層電流を示す。

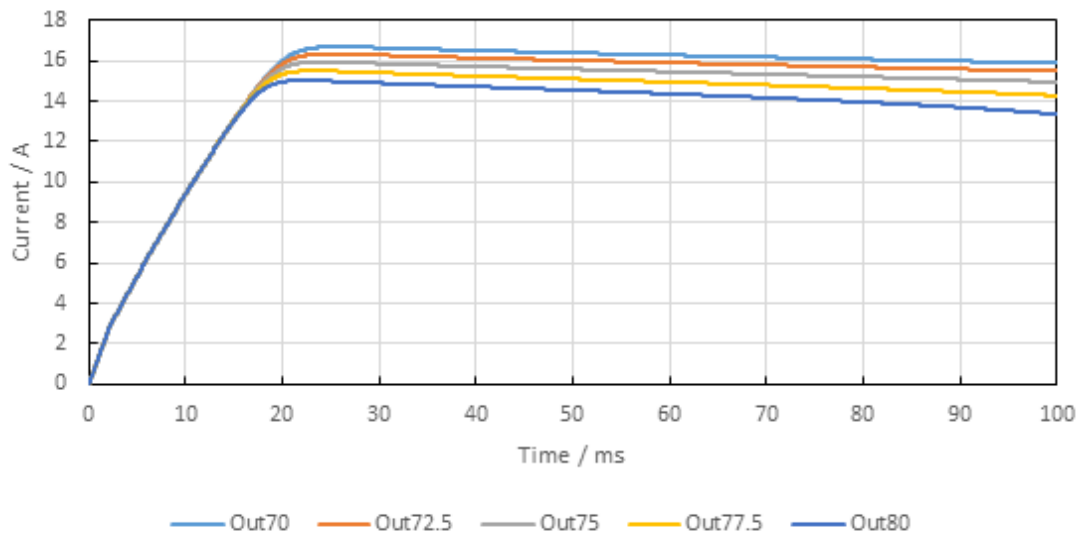


図 4.15 低温側温度固定した場合の超電導層電流の時間依存性

高温側が高い場合、つまり断熱が悪い場合に超電導層電流が低くなることが明らかになった。これは高温部において臨界電流が減少したために発生したと考えられる。次に超電導層温度の分布を図 4.16 に示す

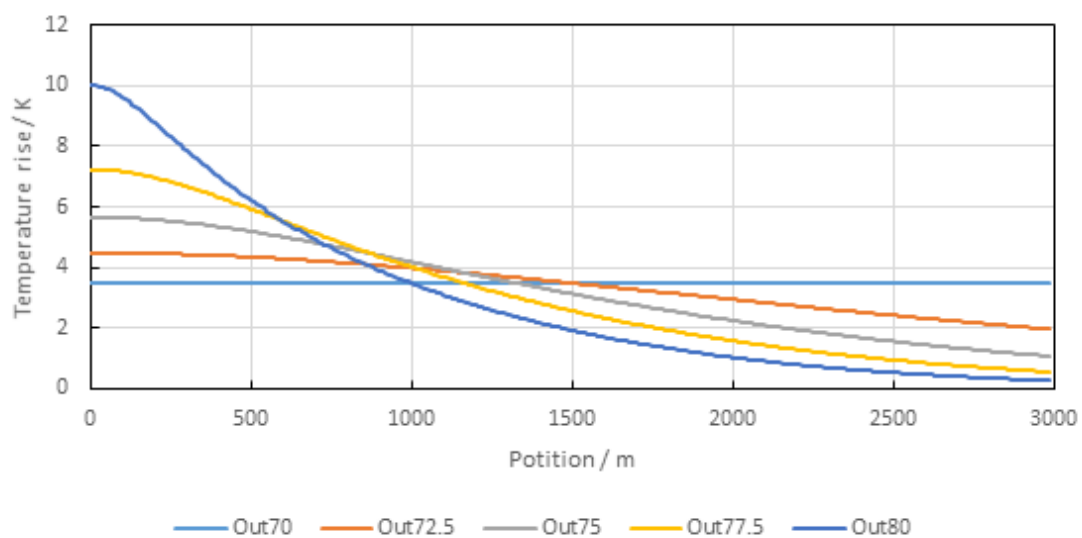


図 4.16 低温側温度固定した場合の温度上昇分布

温度上昇は完全に断熱，つまり高温部と低温部において差が発生しない場合に最も温度上昇が抑制された．これは均一に温度上昇が発生したためであると考えられる．

4.2.2.4 断熱効果検討 (高温側温度依存性)

同様に高温側温度を固定した場合、を検討する。図 4.17 に超電導層電流を示す。

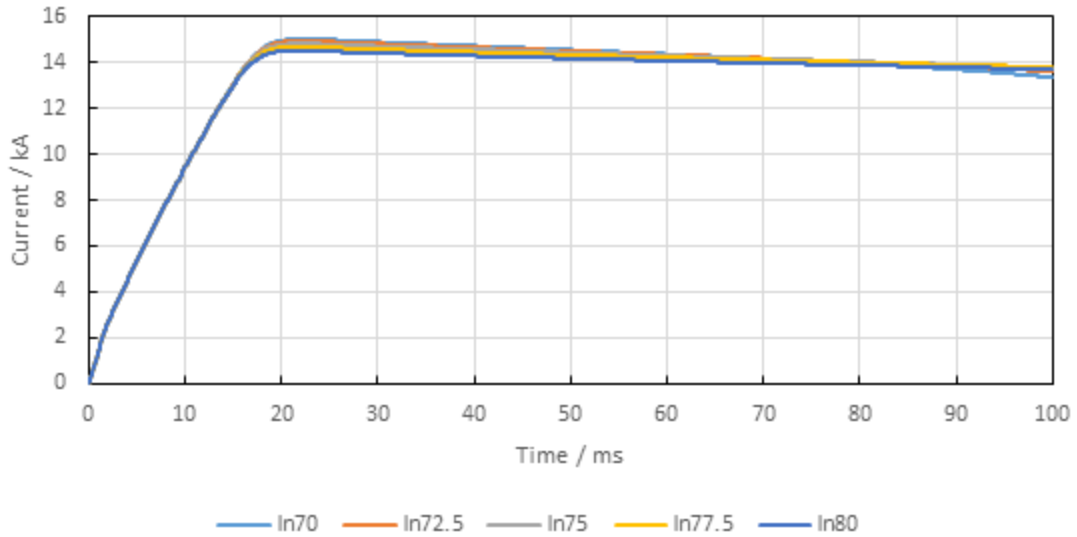


図 4.17 高温側温度固定した場合の超電導層電流の時間依存性

低温側固定と比較すると差が小さい。これはケーブル温度が高いため臨界電流の差が小さくなったためであると考えられる。

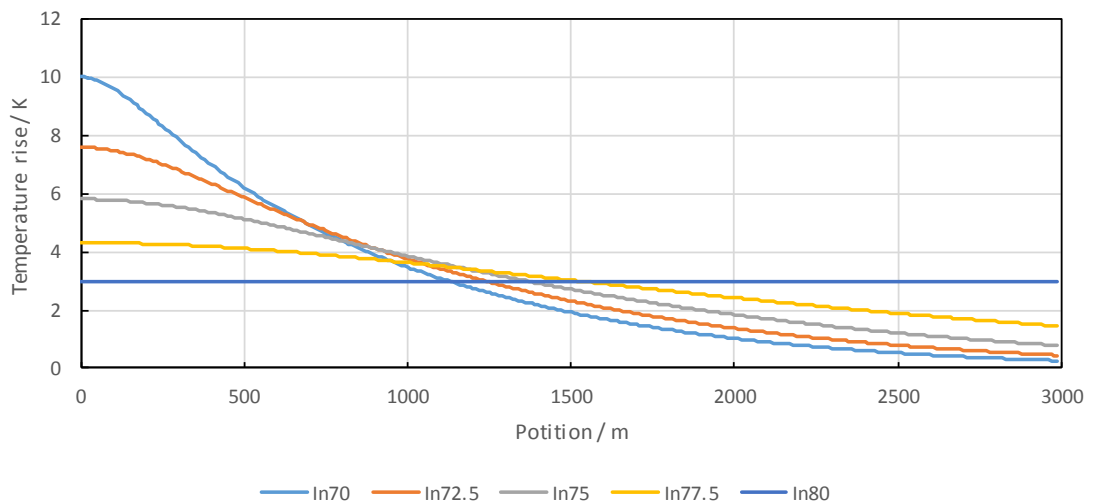


図 4.18 高温側温度固定した場合の超電導層電流の時間依存性

温度上昇分布は均一な場合、つまり完全な断熱状態において最大温度上昇が最も低い。

4.2.2.5 線材本数依存性

超電導線材の本数によって起きうる影響を検討した。図 4.19 に超電導層電流を示す。

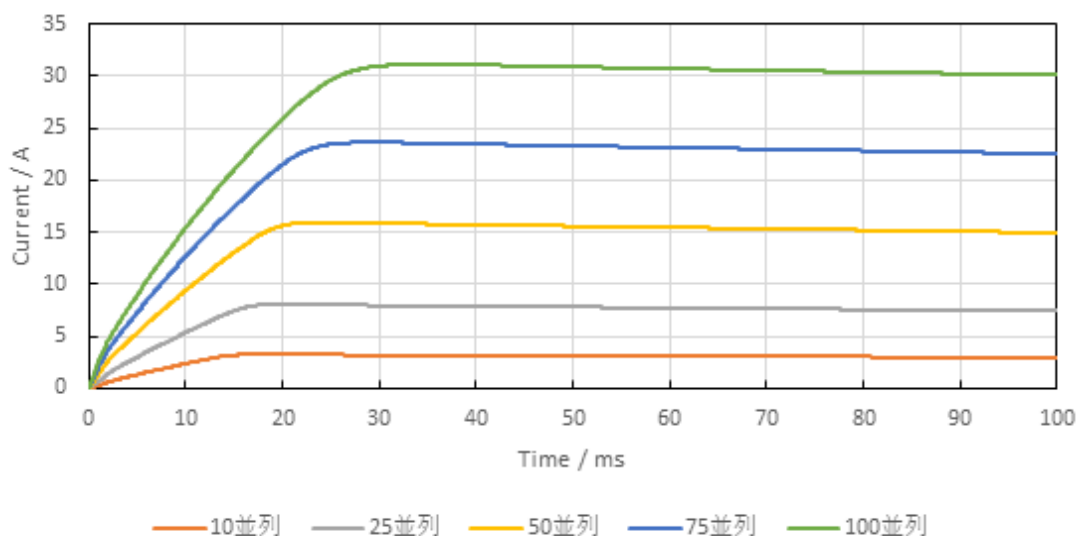


図 4.19 線材本数を変化させた場合の超電導層電流の時間依存性

超電導線の本数を変化させた場合、限流開始電流と飽和後の電流に差が発生している。これは線材本数が変化したため臨界電流も変化したためである。さらに限流後の電流の差は線材本数が減ったため、その抵抗値が上昇したためである。図 4.20 に温度上昇の分布を示す。

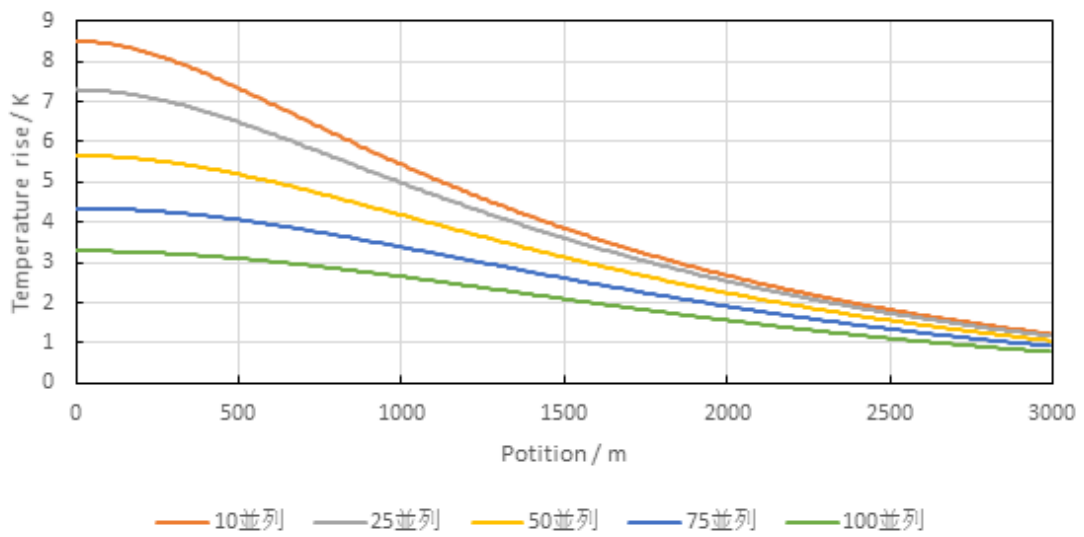


図 4.20 超電導線材本数を変化させた場合についての温度上昇分布

温度上昇と並列数と負の相関性がある。限流開始タイミングがほぼ一致しており、電流が低いにも関わらず本数が少ない場合に温度上昇が大きいことが明らかになった。検討のため図 4.21 に抵抗の時間依存性を示す。

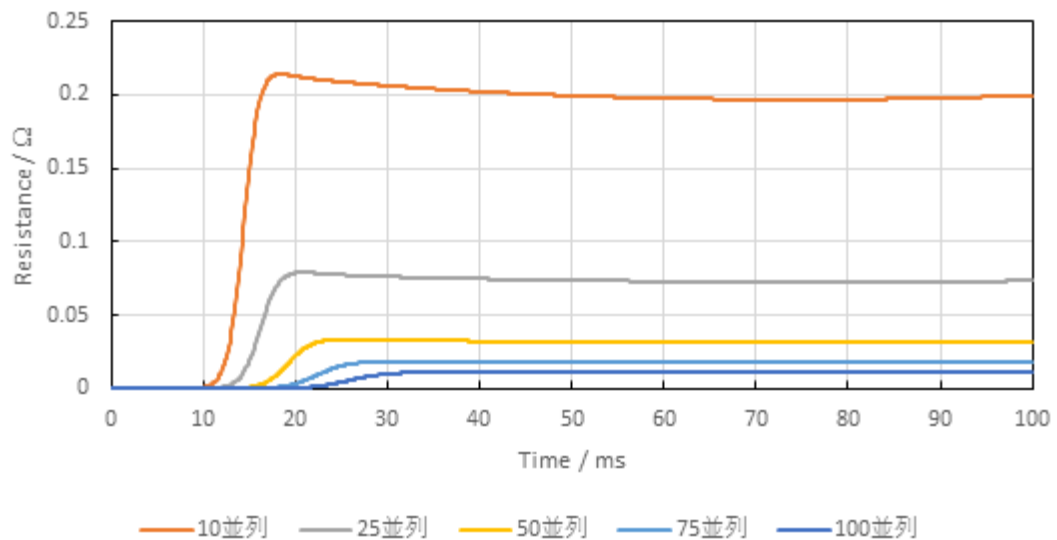


図 4.21 超電導線材本数を変化させた場合についての抵抗変化の時間依存性

抵抗発生タイミングは臨界電流が小さいほうが早いために、加熱時間が長くなっているために、線材本数が少ない場合に温度上昇が大きいと考えられる。図 4.22 に超電導ケーブル電流を示す。

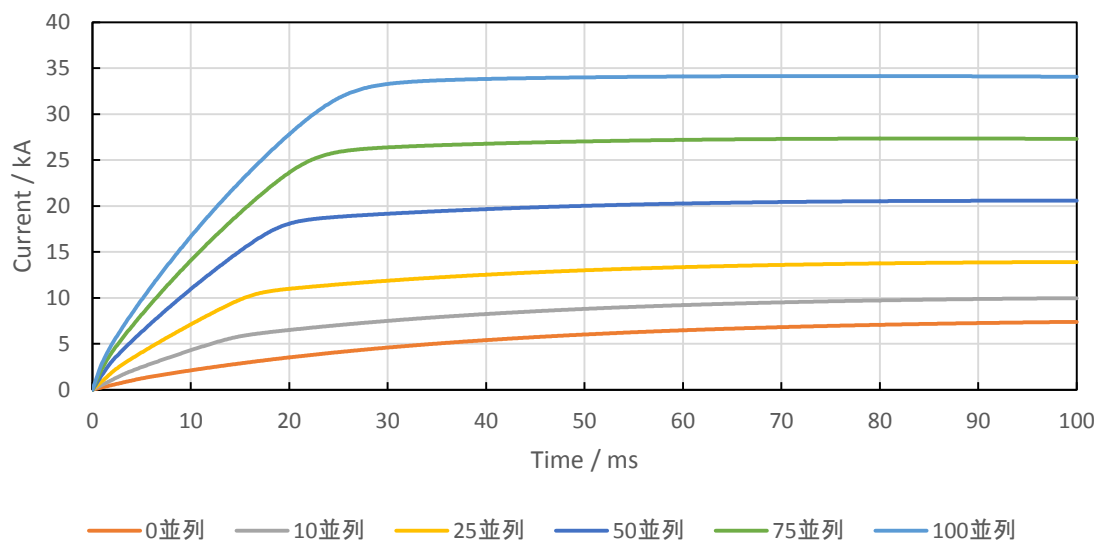


図 4.22 線材本数を変化させた場合の超電導ケーブル電流の時間依存性
温度上昇を抑制したい場合には、超電導線の並列数を増加させることが有効であることが明らかになった。しかしながら図 4.22 のように、超電導ケーブル電流も増加するため、適切な線材数を検討する必要がある。

4.2.2.6 保護層径依存性

超電導ケーブル保護のために、ケーブル保護層の導入が行われている。しかしながら超電導層抵抗が不明であったため、その導入量は超電導層絶縁時を基準に設計されている。このため過剰導入されている可能性がある。そこで超電導層の限流効果を考慮した保護層の導入量の検討を行う。図 4.23 に超電導層電流を示す。

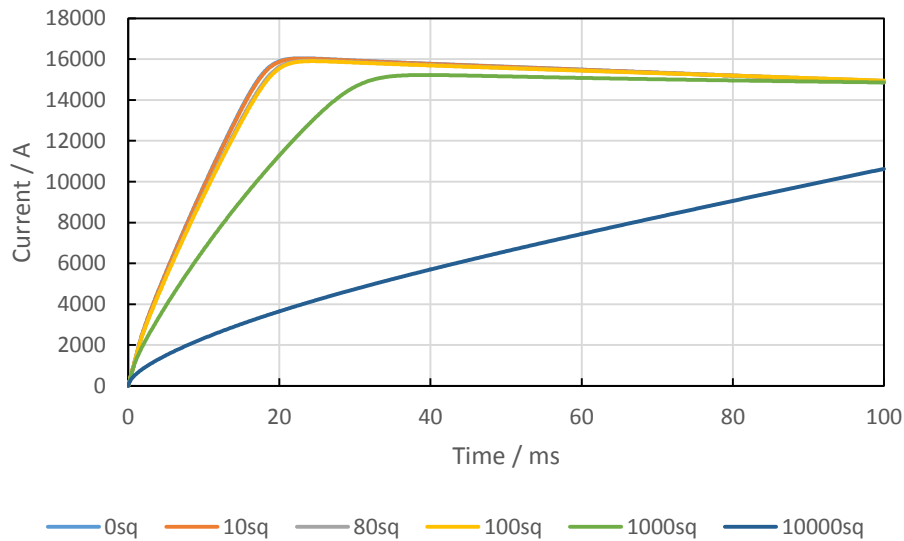


図 4.23 保護層を変化させた場合の超電導層電流の時間依存性

0 sq から 100 sq 程度では超電導層電流に影響を与えないことが示された。1000 sq 導入時に突進率が減少していることが分かる。しかしながら限流後電流については大きく変化していない。10000 sq 導入時には大きく突進率を抑制可能であることが示されている。次に温度上昇分布を図 4.24 に示す。

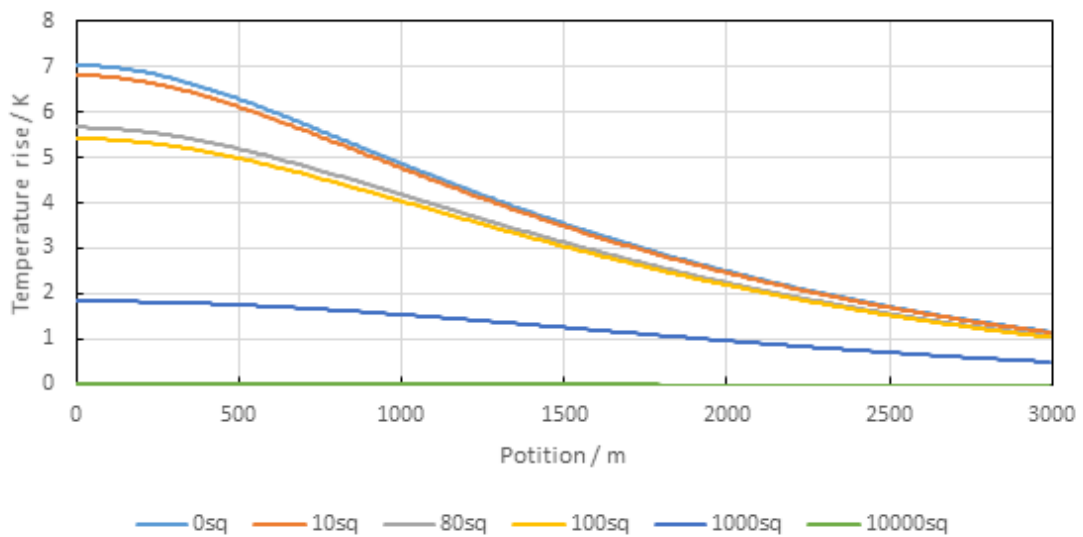


図 4.24 保護層量を変化させた場合の温度上昇分布

保護層導入量に依存して温度上昇が抑制されていることが明らかになった。特に 10000 sq は顕著であり、ほぼ温度上昇が確認できない。次に超電導ケーブル電流を図 4.25 に示す。

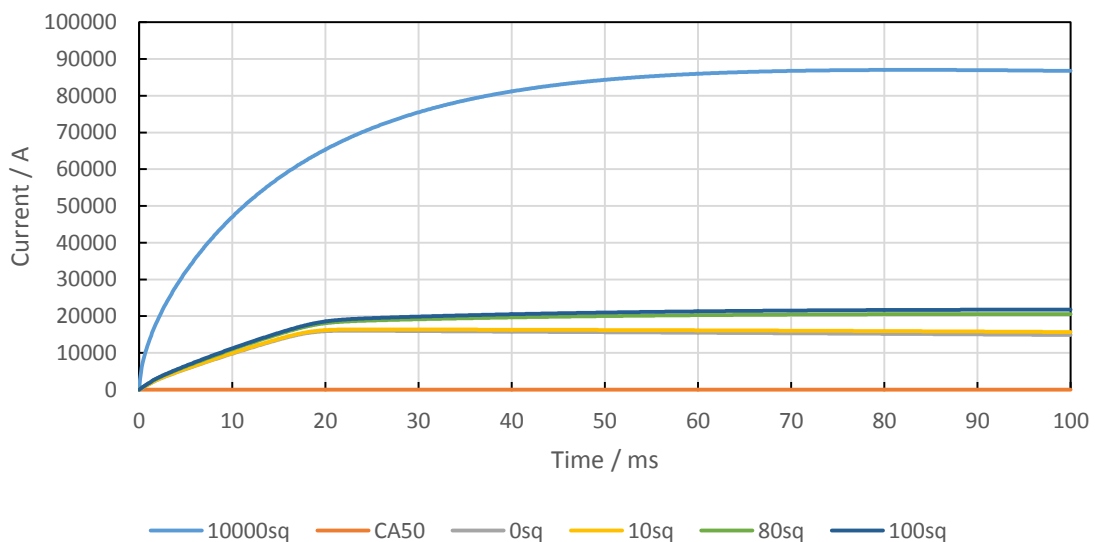


図 4.25 保護層量を変化させた場合の超電導ケーブル電流の時間依存性

保護層導入量に依存して超電導ケーブル電流が増加していることが示されている。これは保護層のインピーダンスが減少し、保護層電流が増加したためである。

る。このことは保護層導入量を増加させた場合、超電導ケーブル電流の抑制と超電導層温度上昇の抑制はトレードオフの関係にあることが明らかになった。

4.2.2.7 ラミネート加工依存性

保護手法として考えられるのは超電導線材へのラミネート加工である。主に機械応力向上のために用いられる。しかしながら過電流通電時においてラミネート加工を行っていないものより、最大通電電流が大きくなることが明らかになっている。そこで保護層、0 sq・80sq・1000 sq とラミネート加工品 CA50 (保護層 0 sq)を比較する。

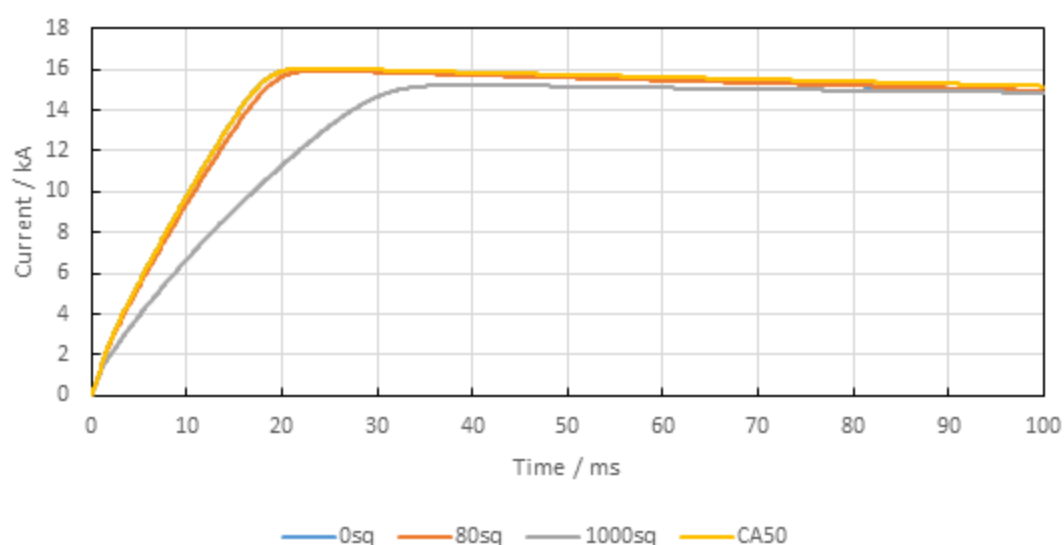


図 4.26 ラミネート加工された超電導線材と保護層導入量を増加させた場合の超電導層電流の時間依存性

超電導層電流にはほとんど影響がないことが明らかになった。これは50 μm と非常に薄いためであると考えられる。次に温度上昇分布について示す。

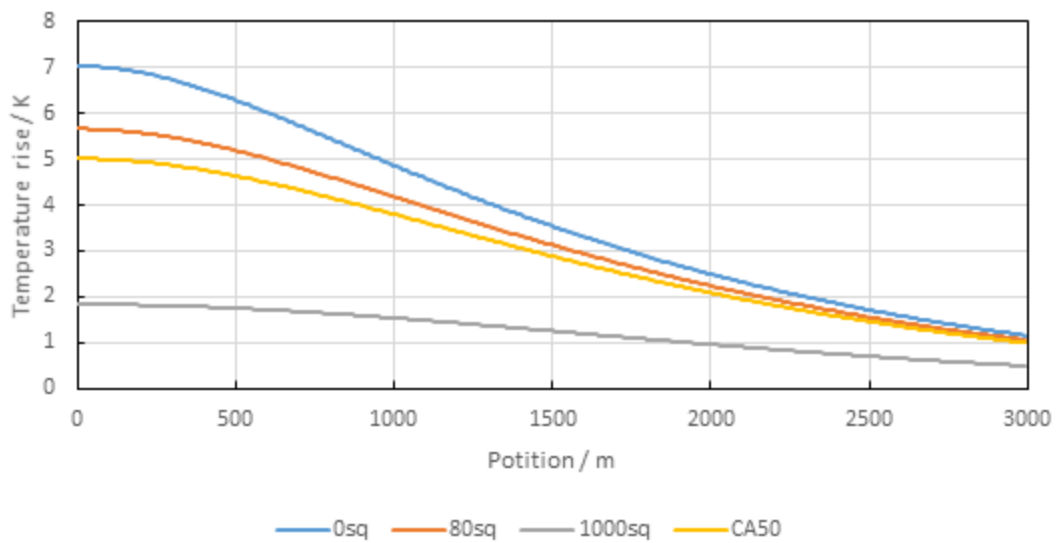


図 4.27 ラミネート加工された超電導線材と保護層導入量を増加させた場合の温度上昇依存性

温度上昇抑制が可能であることが示されている。これは超電導線の抵抗減少とラミネート層分の熱容量が上昇したためであると考えられる。

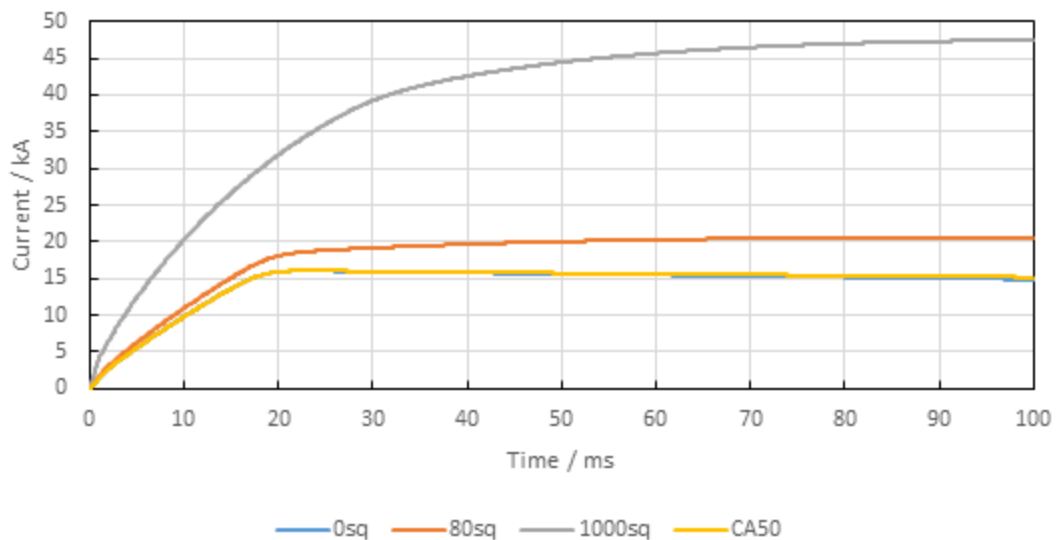


図 4.28 ラミネート加工された超電導線材と保護層導入量を増加させた場合の超電導ケーブル電流依存性

0 sq と同等程度の電流しか流れないことが示されている。つまり銅の利用効率として非常に優れていると考えられる。

4.3 限流器検討

限流器には、稼働時に抵抗を上昇させる常電導転移型と、インダクタンスを増加させるリアクトル型が存在する。それぞれの特徴を図 4.29 に示す。

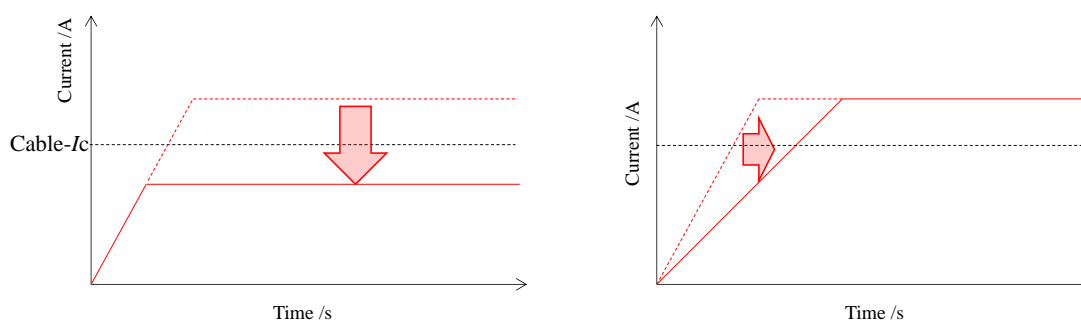


図 4.29 a)転移型限流器と b)リアクトル型限流器の影響

リアクトル型はインダクタンスによって限流を行うため、発熱が生じない。しかしながら、直流においては突進率の抑制のみとなり、遮断遅れなどが発生した場合、超電導ケーブル保護を行うことが出来ない。

常電導転移型限流器は抵抗が発生するために短絡電流の最大値そのものを抑制可能である。そのため遮断遅れなどが発生した場合においても、抑制された電流を通す。しかしながら、発熱を伴う現象であるため、設計は慎重に行う必要がある。

発熱が発生するため、限流器そのものの温度が上がるデメリットが有るが、本研究目的として超電導ケーブル保護に主たる着目点を置くため、常電導転移型を採用するここで限流素子として高い臨界電流が必須となるため、超電導バルクを限流素子とした場合について検討した。

4.3.1 限流器の導入効果解析

限流器の導入により，超電導ケーブルに与える検討と，限流器自体の検討を行う．そこでバルク型限流器を臨界電流 9 kA として導入した．図 4.30 に超電導送電電流を示す．

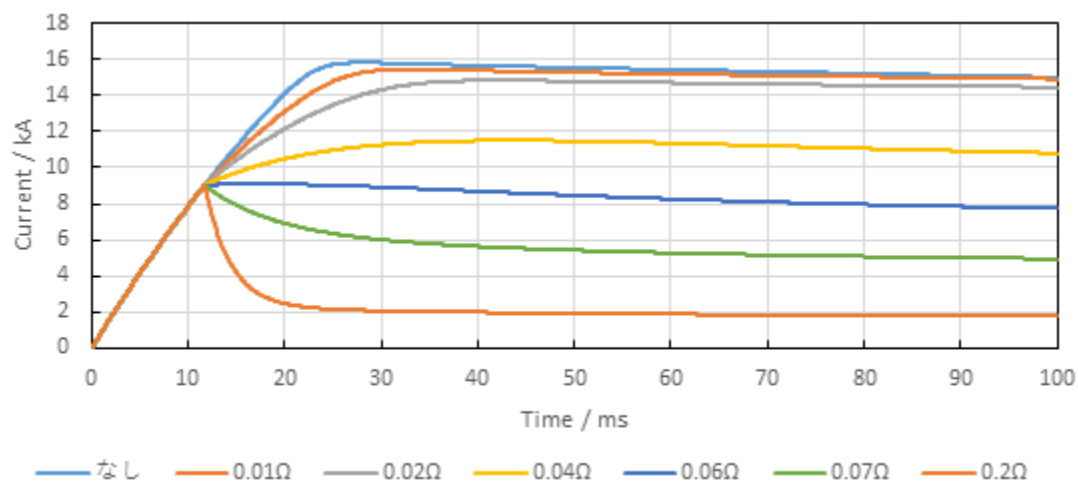


図 4.30 限流器の設定抵抗を変化させた場合についての超電導層電流の時間依存性

限流器による限流効果が確認できた．超電導バルク型限流器は n 値が高いため，常電導抵抗領域に突入するのが早い．図 4.31 にケーブルの温度上昇分布を示す．

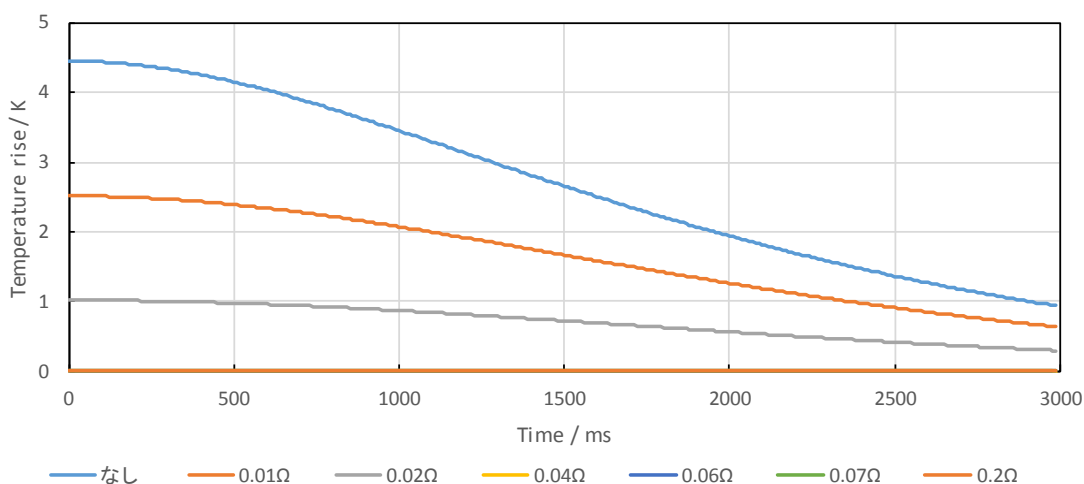


図 4.31 限流器の設定抵抗を変化させた場合についての超電導ケーブルの温度上昇分布

0.04 Ω では温度上昇がほぼ確認できない。これは超電導ケーブルの臨界電流に達していないためである。図 4.32 に導入した限流器の設定抵抗値と 100 ms 遮断時の本体温度を示した。

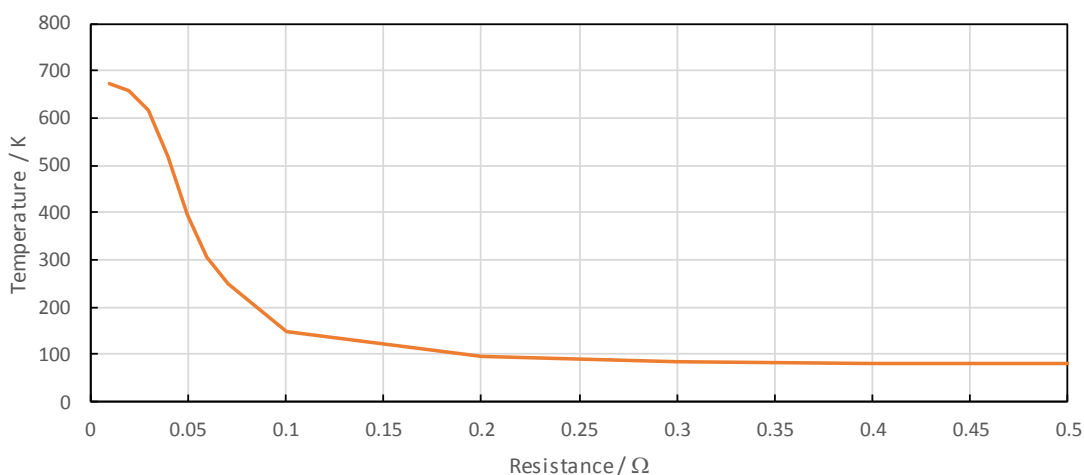


図 4.32 超電導限流器の 100 ms 後の温度の抵抗値依存性

図 4.32 より、0.25 Ω 程度で温度上昇がほぼ起きなくなることが明らかになった。これは遮断が 100 ms と非常に短いことためであると考えられる。

第5章 結言

エネルギーの効率利用を目的に、直流鉄道向け超電導ケーブル導入への一提案を行うことを目的に研究を行った。

超電導体の S/N 転移において、起電力項が存在することを計算的に示した。この項は超電導状態を維持しようとする項であり、磁束の量子化現象と双対関係にあると推測される。この項を考慮した解析モデルを構築した。構築したモデルは超電導状態に影響の大きい、熱・電気・磁気において、ゼロ磁場統制を行うことで電気と熱のみに注目した。これにより電気-熱の連成解析モデルを構築した。妥当性評価を行った結果、傾向、絶対値ともによく一致していた。さらに本モデルにおいて超電導状態の材料や構造に関する統制がないため、材料や構造を変化させた場合においても傾向、絶対値とも一致するモデルであることも示された。

そこで直流鉄道用の超電導ケーブル導入解析を行うことを目的に、鉄道システムモデルの構築を行った。この中で超電導ケーブル運用時を定常・非定常・復帰に分けて考えた。この内、先行研究において定常時における研究は大きな成果を上げているため、非定常モデルに関してモデル構築を行った。この結果、単純にゼロ抵抗ケーブルを接続した場合、非常に大きな短絡電流が通電するおそれがある事を示した。しかしながら構築した超電導ケーブルモデルを導入した解析を行ったところ、超電導ケーブル自身が限流効果を持つことが示された。さらに構造物を変化させた場合の影響を示した。これにより超電導ケーブルの構造検討への一提案が可能であることを示した。

謝辞

星野教授には、論文指導のみならず、学内における事務手続きなど研究面以外でも非常にお世話になりました。伊庭教授には、博士課程において最もつらい時期においてアドバイスを頂いたり、研究活動を継続できるようにしていただいたりと、ここまで来ることが出来たのも伊庭教授のおかげであると考えております。富田室長には、研究の場を与えていただいただけでなく、研究内容においても非常に的確なアドバイスを頂き、今日の研究成果において核心となりました。鈴木研究員には、研究時における活動環境を向上していただくなど、研究を効率よくすすめるためにご尽力いただきました。福本研究員には、解析結果の第三者との比較を行っていただきました。さらに論文指導も行っていただきました。荒井研究員には、解析モデル作成時に鉄道技術者の観点からのアドバイスをいただき、その汎用性の高さ向上の手助けをいただきました。石原研究員には、日常的な研究活動の進展だけでなく、論文作成においても中心的に指導いただきました。赤坂研究員には、従来モデルとの違いについての検討をお手伝いいただき、検討不足であったモデルの向上させていただきました。小林研究員には、思い違いをしていた部分や、自分でも納得の行かない部分などをじっくりと討論していただき、解析モデルの精度向上をお手伝いいただきました。恩地研究員には、日常的な研究生活の上でのお手伝いして頂き、さらに実測に関する知識をご教授頂きました。

最後に、陰ながら学業を支えてくれた家族に感謝を捧げます。

参考論文

- [1] 技術戦略研究レポート TSC Foresight vol.4(2015)
- [2] M. Tomita, “Development of Superconducting cable for Railway System,” J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 48, No. 11, 562-568, (2013)
- [3] 2003 年度輸送関係エネルギー要覧
- [4] H. Ohsaki, Z. Lv, N. Matsushita, M. Sekino, T. Koseki, and M. Tomita, “Superconducting Power Cable Application in DC Electric Railway Systems,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, no. 3, 3600705, (2013)
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 106 (1957)
- [6] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 20, 1044-1062 (1950).
- [7] H. Maeda, Y. Tanaka, N. Fukutomi and T. Asano, J. Appl. Phys. 27 (1988) L209.
- [8] M. Mimura, H. Kumakura, K. Togano, H. Maeda, Improvement of the critical current density in the silver sheathed Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconducting tape Appl. Phys. Lett. 54 1582-1584 (1989).
- [9] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. N. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu, Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 908.
- [10] Leskela, M., Truman, J. K., Mueller, C. H. and Holloway, P.H. : Preparation of superconducting Y-Ba-Cu-O thin films. J. Vac. Sci. Technol. A, 7-6(1989), 3147
- [11] JIS H 7305 超電導-臨界電流の試験方法- 銀シースビスマス 2212 及びビスマス 2223 酸化物 超電導線の直流臨界電流
- [12] SEI テクニカルレビュー・第 168 号
- [13] 長村 光造・松本 要 : 実用高温超電導線材の開發現状と展望 応用物理第 73 巻第 1 号、(2004)
- [14] AmpaCity — Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV cables, Applied Superconductivity and

- Electromagnetic Devices (ASEMD), 2013 IEEE International Conference on,
Stemmler, M. ;Merschel, F. ; Noe, M. ; Hobl, A.
- [15]C. S. Weber et al. Testing and Demonstration Results of the 350 m Long HTS Cable System Installed in Albany, NY. IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, no.2, 2038-2042 (2007).
- [16]Maguire J F, Schmidt F, Hamber F and Welesh T E 2005 IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 1787-1592
- [17]直流超電導送電システムの研究開発 研究成果報告書 (2010)
- [18]電気運転統計, 鉄道と電気技術 vol23 vol6
- [19]“Development of prototype DC superconducting cable for railway system,” M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, M. Miryala, Physica C, vol. 470, S. 1007-1008 (2010).
- [20]“Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system,”M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, M. Miryala,J. Appl. Phys., , vol. 109, no. 6, p. 63909 (2011).
- [21]“Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems,”M. Tomita, M. Miryala, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara,J. Appl. Phys., , vol. 111, no. 6, p. 63910 (2012).
- [22]Characterization of Bi-2223 Tapes for the Development of DC Superconducting Cable for Railways, M. Tomita, , K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, M. Miryala Physics Procedia Volume 36, 1301–1304 (2012)
- [23]Design and construction of a high temperature superconducting power cable cryostat for use in railway system applications,M Tomita, M Miryala, K Suzuki, Y Fukumoto, A Ishihara, T Akasaka and Y Kobayashi,Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 105005

- [24]“Design and Development of Superconducting DC Cable for Railway Applications,”
M. Tomita, M. Miryala, Y. Fukumoto, A. Ishihara, K. Suzuki, Y. Kobayashi, T.
Akasaka, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.23, No.3, pp. 3601504 (2013).
- [25]Critical Current Properties of HTS Twisted Stacked-Tape Cable in Subcooled Liquid
Nitrogen, M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka Y. Kobayashi,
A, Maeda, M. Takayasu, Proceedings of the 2015 Cryogenic Engineering Conference
and International Cryogenic Materials Conference, submitted.
- [26]Characteristic Analysis of DC Electric Railway Systems with Superconducting
Power Cables Connecting Power Substations, H. Ohsaki, N. Matsushita, T. Koseki,
M. Tomita, J. Phys.: Conf. Ser. vol. 507, p. 32035, 2014
- [27]Superconducting Power Cable Application in DC Electric Railway Systems, H.
Ohsaki, Z. Lv, N. Matsushita, M. Sekino, T. Koseki, M. Tomita, IEEE Trans. Appl.
Supercond. vol. 23 no. 3, p. 3600705, 2013
- [28]Application of Superconducting Power Cables to DC Electric Railway Systems, H.
Ohsaki, Z. Lv, M. Sekino, M. Tomita, Physics Procedia vol. 36, p. 908-913, 2012