

NbTi機械式永久電流スイッチのクエンチ特性と超伝導接点接続形成機構に関する基礎研究

大塚, 信也
九州大学システム情報電気電子システム工学

<https://doi.org/10.11501/3147890>

出版情報：九州大学，1998，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：



NbTi 機械式永久電流スイッチのクエンチ特性と
超伝導接点接続形成機構に関する基礎研究

1998

大塚 信也

NbTi 機械式永久電流スイッチのクエンチ特性と
超伝導接点接続形成機構に関する基礎研究

1998

大塚 信也

目次

第1章 序論	1
1.1 電力システムの将来動向と超伝導電力貯蔵技術開発の必要性	1
1.2 SMESの特徴及びシステム開発の現状	3
1.2.1 SMESと競合する電力貯蔵技術	3
(1) 一般性能比較	3
(2) 用途別比較	4
1.2.2 SMESシステムの開発の現状	5
(1) パイロットプラントの仕様	5
(2) 要素機器開発の課題と目標	6
1.3 永久電流スイッチ開発の技術課題及び機械式PCSに関する従来の研究	6
1.3.1 各種スイッチング方式の永久電流スイッチ適用可能性	6
(1) 半導体スイッチング装置	6
(2) 超伝導スイッチ	6
(3) 機械式スイッチ	8
1.3.2 機械式スイッチ開放時のアーク放電抑制技術と検討課題	9
1.3.3 機械式スイッチ接点の超伝導化に関する従来の研究	9
1.4 本論文の構成と内容	11
第2章 SMESシステムの永久電流スイッチに要求されるオン・オフ抵抗特性	20
2.1 まえがき	20
2.2 エネルギー損失のスイッチ抵抗依存性	21
2.2.1 コイル励磁時の損失	21
2.2.2 エネルギー貯蔵時の損失	22
2.2.3 スwitch開放時のアーク放電による損失	22
2.3 ケーススタディによる損失評価	23

2.3.1 検討対象システムのパラメータ設定-----	23
(1) コイルパラメータ-----	23
(2) スイッチパラメータ-----	23
(3) 運転パラメータ-----	24
(4) アーク放電パラメータ-----	24
2.3.2 コイルインダクタンスの影響-----	24
2.3.3 運転時間の影響-----	24
2.3.4 励磁損失低減の必要性と要求される機械式スイッチのオン抵抗特性-----	25
2.4 むすび-----	26
 第3章 機械式PCSの構造と実験装置構成の概要-----	36
3.1 まえがき-----	36
3.2 機械式PCSの構造-----	37
3.2.1 接触子駆動機構-----	37
3.2.2 接触子-----	37
(1) 形状-----	37
(2) 接触面性状-----	37
3.3 実験装置の構成-----	38
3.3.1 クライオスタットA (シングルPCSシステム)-----	38
3.3.2 クライオスタットB (マルチPCSシステム)-----	39
3.4 むすび-----	39
 第4章 機械式スイッチ接点の超伝導化とNbTi機械式PCSの基礎特性-----	50
4.1 まえがき-----	50
4.2 実験装置の構成と実験方法-----	51
4.2.1 クエンチ電流の測定-----	51
4.2.2 磁界依存性の測定-----	51
(1) 縦磁界実験-----	51
(2) 横磁界実験-----	52
4.3 実験結果-----	52
4.3.1 接点の超伝導化を示唆する現象-----	53

(1) 接点のクエンチ	53
(2) クエンチ電流の磁界依存性	53
(a) 縦磁界下の特性	54
(b) 横磁界下の特性	54
4.3.2 クエンチ電流特性	54
(1) 接触面性状の影響	55
(a) 接触面の酸化	55
(b) 粗度	55
(2) 接触子形状の影響	55
(3) 標準接触子のクエンチ電流特性	56
(a) 開閉回数の影響	56
(b) スイッチ駆動力とスイッチ荷重の影響	56
4.4 考察	57
4.4.1 超伝導接点接続の形成機構とブリッジモデル	57
4.4.2 ブリッジ形成機構の定量的検討	58
(1) スイッチ駆動力とスイッチ開放時のギャップ長の影響	58
(2) クエンチ電流とクエンチ後に発生する接触コンダクタンスの関係	59
(a) スイッチ開閉によるブリッジ形成機構	60
(b) スイッチ荷重増加によるブリッジ形成機構	61
4.4.3 ブリッジモデルに基づく磁界依存性の検討	62
(1) クエンチ電流の磁界依存性	62
(2) 横磁界下のピンニング力の影響	64
(3) クエンチ電流とクエンチ後に発生する接触コンダクタンスの关系到及ぼす磁界の影響	64
4.4.4 接合面積と大容量化	65
4.5 むすび	65
 第5章 スイッチ開放時のアーク放電特性とアークが超伝導接点接続に及ぼす影響	 89
5.1 まえがき	89
5.2 実験装置の構成と実験方法	89

5.2.1	実験装置-----	89
5.2.2	実験方法-----	90
(1)	アーク放電特性の測定-----	90
(2)	クエンチ電流の測定-----	90
5.3	実験結果-----	90
5.3.1	NbTi機械式PCSのアーク放電特性-----	90
5.3.2	アークがクエンチ電流特性に及ぼす影響-----	91
5.4	考察-----	92
5.4.1	アーク放電によるエネルギー損失-----	92
5.4.2	アーク放電発生後の超伝導接点接続形成機構-----	93
(1)	アーク放電が接触面性状に及ぼす影響とブリッジの形成-----	93
(2)	クエンチ電流の増加-----	94
(3)	アーク放電による真実接触面の変化-----	94
(4)	クエンチ電流と接触コンダクタンスの関係-----	95
5.4.3	酸化膜除去効果-----	96
5.5	むすび-----	97
第6章 並列接続された機械式PCSのスイッチ容量とクエンチ機構-----		109
6.1	まえがき-----	109
6.2	並列PCS回路のスイッチ容量-----	109
6.2.1	並列化によるスイッチ容量の増大-----	109
6.2.2	実験回路の電流分布とスイッチ容量-----	110
6.3	実験装置の構成と実験方法-----	111
6.3.1	実験回路-----	111
6.3.2	実験方法-----	111
6.4	実験結果-----	112
6.4.1	クエンチと電流分布変化-----	112
6.4.2	スイッチ容量-----	112
6.5	考察-----	113
6.5.1	スイッチ容量の理論的検討-----	113
6.5.2	クエンチ機構の検討-----	114

(1)連続するクエンチのシミュレーション-----	114
(2)パルス電流通電時のクエンチ遅れ時間特性-----	115
6.6 むすび-----	116
第7章 総括-----	127
7.1 本論文のまとめ-----	127
7.2 今後の研究課題-----	129
参考文献-----	132
謝 辞-----	140

第1章

序 論

1.1 電力システムの将来動向と超伝導電力貯蔵技術開発の必要性

世界の人口は毎年顕著に増加しており、国連の統計によると、2050年には世界全体で現在の約2倍の100億人になるものと推定されている。特に開発途上国の人口増加は著しく、現在の約2倍半の86億人に達すると予想される。このような人口増加と経済成長を考慮すると、21世紀中葉には、世界のエネルギー需要は現在の2～3倍に、同様に、日本のエネルギー需要は現在の1.4～2.2倍になるものと見込まれている^{(1),(2)}。その中で、クリーンで利便性の高い電気エネルギーの需要(電力需要)は、経済社会のサービス化・情報化の進展、アメニティ指向の高まりによる空調設備の着実な増加、さらには、産業界におけるオートメーション化や省力化・効率化の進展に伴い、今後とも着実に伸びていくことが予想され、21世紀中葉には、現在の2～3倍(約1.2～1.8兆kWh)となり、全エネルギー消費に占める比率も現在の10%以上増の50～55%に達するものと考えられる⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。

このような電力への依存性が高まる一方で、火力発電所から排出されるCO₂やNO_x、SO_x等による地球温暖化や酸性雨の問題、あるいは、原子力発電所における事故や核燃料の再処理・放射性廃棄物貯蔵といった問題などに対する生活環境の保全や社会安全性の追求がより一層高まると共に、市場のグローバル化によって電力コスト低減への社会的な要請も生じている。すなわち、これからの電力システムには、環境との調和・低廉なコストへの対応を、エネルギーセキュリティの確保と両立させて、安定供給を確保していくことが強く求められる⁽⁷⁾。

一方、近年の電源ベストミックス構築のための新規電源の立地、ならびに電力輸送設備建設のリードタイムはますます長期化する傾向にあり、安定で且つ効率的供給を行うための設備形成を早期に実現することは困難となっている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。他方、経済、医療、流通あるい

は交通システムといった、多岐に亘るコンピュータにより高度に管理・制御されたネットワークシステムの発展に伴い、電力のより一層の高品質化・高信頼性が要求されているが^{(4),(8)}、その反面、都市部への電力需要の集中とそれに伴う短絡電流の増加や、昼夜間・季節間における電力消費の格差拡大に伴う電力設備の稼働率低下と、それによる供給コストの上昇などが問題となっている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

以上のような電力システムに対するニーズと技術的課題に対処するため、将来の電力輸送・供給システムを図1-1に示すように、(1)既存設備を最大限に活用することをはじめ、(2)新素材・新技術導入による設備のコンパクト化・高効率化を実現することで、2030年頃までに電力輸送能力を現在の約2倍とする系統を構築し(図中、(1)現有設備設備強化型電力輸送システムと(2)新鋭設備導入型電力輸送システム)、それと共に、長距離送電線を必要としない需要地に近接して設置した中小の分散電源や各種の電力貯蔵設備を結ぶ新系統(図中、(3)電力貯蔵・分散電源型供給システム)を構築し、両者を融合させる形態とすることで、21世紀中葉までに電力設備容量を現在の2.5倍程度に増強することが考えられている^{(2),(3)}。特に、(3)の電力貯蔵による負荷平準化(ロードレベリング)の実施は、新規の電源設備を形成することなくピーク負荷に対応でき、電力設備の稼働率向上と供給コスト低減に寄与するため、上記問題の根本的な解決策となり得る。そのため、21世紀中葉の電力システムでは、電力貯蔵技術を中心とする電力貯蔵・分散電源型供給システムは重要な役割を担うものと期待されている。現在、(2)、(3)の新システムを構築するためのブレークスルー技術の一つとして、低損失化・コンパクト化・大容量化が可能であり、特に在来技術では不可能であった新機能を有する革新的な電力機器を実現できる超伝導技術の導入が検討されている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。例えば、(2)においては、超伝導ケーブル^{(16),(17)}や超伝導変圧器⁽¹⁸⁾⁻⁽²²⁾、超伝導発電機^{(23),(24)}等の開発が、一方、(3)では、超伝導電力貯蔵(Superconducting Magnetic Energy Storage : SMES)装置⁽²⁵⁾⁻⁽³⁴⁾の開発が鋭意進められている。

SMESは、超伝導技術を利用することで初めて可能となった貯蔵技術で、電力を超伝導コイルが発生する磁界中に電磁エネルギーとして貯蔵するもので、高い貯蔵効率と大容量化によるスケールメリットが期待できると同時に電力システムの安定化に役立つことから、(3)の中核となる貯蔵技術として特に注目されている^{(12),(14),(15),(35)-(40)}。図1-2にSMESシステムの構成図を示す^{(7),(12)}。SMESシステムは、超伝導コイル(SC)とコイル端を短絡・開放しエネルギーの貯蔵・転送を行うスイッチ(短絡時のオン抵抗が零であるスイッチは、超伝導コイルと永久電流モードを構成でき、無損失でエネルギー貯蔵が可能となるため、特に「永久電流スイッチ(Persistent Current Switch : PCS)」と呼ばれる)、及び交流系統と直流SMESシ

システムの間でエネルギーの授受を行う交直変換器やコイル保護装置等から構成される。SMESシステムの実現には、これら個々の要素技術の確立が不可欠であるが^{(7),(10),(12),(14),(39)}、高効率運転の観点からは特に、特性の優れた永久電流スイッチの開発が望まれている。

本研究では、以上のような状況に鑑みて、2つの金属製接触子を機械的に短絡(オン)・開放(オフ)する機械式スイッチ接点の超伝導化を達成できれば、特性の優れた永久電流スイッチと成り得ることに着目し、機械式の永久電流スイッチ開発のための基礎研究として、接点の超伝導化の実現とそのクエンチ特性ならびに超伝導接点接続の形成機構の解明を主たる目的として検討を行った。機械式永久電流スイッチは、SMESシステムの他に、核融合炉やMHD発電装置等の大規模超伝導コイルシステム^{(13),(41),(42)}においても適用を有望視されている方式である^{(43),(44)}。更に、同スイッチは、上述の超伝導技術を主体とした超伝導電力システム⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾を構築する上で必要となる限流器⁽⁴⁵⁾⁻⁽⁴⁹⁾や低温動作超伝導遮断器⁽¹²⁾、あるいは、超伝導機器内でクエンチなどの事故が発生したときに蓄積エネルギーを緊急放出するための緊急放出用超伝導スイッチ⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵³⁾等への応用も可能である。なお、「永久電流スイッチ」の呼称は、本来上述のように、オン抵抗を零とできるスイッチに対して使用されるべきであるが、本章と第2章では、特に断らない限りはSMESシステムのエネルギー貯蔵・転送用スイッチの総称として使用する。

本章では、最初にSMESの特徴を競合する他の電力貯蔵技術と比較した後、SMESシステム開発の現状を紹介する。次に、SMESシステムの永久電流スイッチとして適用が検討されている各種スイッチング方式の特徴をまとめ、機械式永久電流スイッチ開発のための技術課題と共に、本研究の主たる目的である機械式スイッチ接点の超伝導化に関する従来の研究結果を整理し、本研究の必要性和検討課題を明確にする。最後に、本研究の目的と各章ごとの要約を述べる。

1.2 SMESの特徴及びシステム開発の現状

本節では、まずSMESと競合する他の電力貯蔵技術とを比較検討し、SMESシステムの特徴を明らかにする。その後にSMESシステムの開発現状の一例を紹介し、現在の技術開発レベルについて整理する。

1.2.1 SMESと競合する電力貯蔵技術

(1) 一般性能比較 SMESと競合する電力貯蔵技術には、電池電力貯蔵(鉛蓄電池と新

方式電池)^{(8),(54)}、フライホイール^{(55),(56)}、圧縮空気エネルギー貯蔵 (Compressed Air Energy Storage : CAES)^{(9),(57)}、及び現在唯一実用化されている揚水発電^{(58),(59)}等がある。表1-1にこれらの一般性能をまとめて示す^{(7),(9),(10),(57)}。

鉛蓄電池は古くから二次電池として様々な分野で利用されているが、スペースや価格面から電力用には殆ど利用されていなかった。近年になって、電力用として種々の電池方式が検討され、充放電効率やエネルギー密度が高く、自己放電が少なく耐久性に優れたNAS(ナトリウム硫黄)電池等が開発されている。貯蔵効率は揚水発電よりやや高い70~80%である。フライホイールは電気エネルギーを回転体の運動エネルギーとして貯蔵する方法で、貯蔵効率は揚水発電とほぼ同程度であったが、超伝導体を用いた非接触の軸受を真空中で回転させることで、貯蔵効率を80~90%まで増加させる試みも行われている。CAESは空気の圧縮エネルギーとして貯蔵する方法であり、圧縮空気を効果的に使用するため、ガスタービンと組み合わせるシステムが一般的である。貯蔵効率は揚水発電と同程度である。

このような競合技術と比較したSMESシステムの一番の特長は、貯蔵効率が最も高い(~90%)ということである。反面、エネルギー密度が低く、他の貯蔵技術と比較するとより大きな設置スペースが必要となるが、中・小規模ではトロイダル型が可能なため立地環境面での問題は少ない。また、SMESシステムは補機システムが複雑で運用・保守性がやや劣るが、可動部分が少ないため、長期の寿命が期待できるという利点もある。

(2) 用途別比較 表1-2にSMESと競合技術の用途別の優劣比較をまとめる^{(7),(38)}。SMESシステムの主たる用途は、高い貯蔵効率を利用する(1)負荷平準化であるが、有効・無効電力の制御応答性が速く、高頻度の充放電でも性能劣化がないことなどから、(2)負荷変動補償、(3)安定化向上、(4)停電対応、(5)周波数補償、(6)瞬時電圧低下対応など、多岐にわたる利用が可能である^{(7),(12)-(15),(37)}。

(1)、(2) 負荷平準化に関しては、高い貯蔵効率を持つ大・中規模SMESシステムが最も優れている。一方、負荷変動補償に関しては、応答性、有効電力の補償の有無、充放電モードの切替性等が重要となるが、競合技術のうち、応答性の点ではCAESを除くと瞬時の対応が可能で優劣の差は殆どない。

(3) 安定度向上対策には、電力系統安定化装置 (Power System Stabilizer : PSS)、静止型無効電力調整装置 (Static Var Compensator : SVC)、制動抵抗、直列コンデンサの設置など種々の方法が考えられるが⁽⁶⁰⁾、ここでは、PSSやSVCを代表的な競合技術とした。電池電力貯蔵と比較した場合、SMESが応答性では優れているが、待機中の保守管理の手間やエネルギー損失の面でやや劣る。

- (4) 停電対応に関して、応答性では、電圧を内部に確保できる点で電池電力貯蔵が優れており、SMESにはこの点での検討が必要であると考えられる。
- (5) 周波数調整に関しては、常時の負荷周波数制御と瞬動予備力の2面がある。負荷周波数制御の応答面では、SMES、電池電力貯蔵、フライホイールが優れており、瞬動予備力ではより瞬時に大電力の放出が可能なSMESが特に有効と考えらる。但し、その適用は比較的大規模なSMESシステムに限られる。
- (6) 瞬時電圧低下対応に関しては、SMES、電池電力貯蔵、フライホイールが同等に優れているものの、待機中の保守性や補機動力に伴うエネルギーの損失面では、SMESやフライホイールはやや劣ると考えられる。

1.2.2 SMES システムの開発の現状

超伝導現象は、1911年にオランダのOnnesにより発見され、続いて物理現象の究明に関する研究が行われてきたが、その工学的応用は、1965年のSteklyの完全安定化超伝導導体や、1970年のWilsonの極細多芯超伝導導体などの一連の安定化技術の開発により可能となった^{(61),(62)}。実用化を意識したSMESシステムの研究は、このような導体技術の確立と超伝導コイル製作技術の発展に伴い活発となり、これまでの記録すべき発展としては、米国のBoomら⁽³⁰⁾による日負荷平準化用SMESの設計研究とLos Alamos研究所によるBonneville Power Administration (BPA)の系統安定化用SMESの製作⁽³¹⁾が挙げられる^{(13),(38),(40)}。また、その後発足したDOD/DOEのETM 20 MWh計画⁽³³⁾は中断したが、Anchorage電力/Babcock & Wilcox社の500 kWh計画⁽³⁴⁾や我が国の通商産業省資源エネルギー庁予算による国際超伝導産業技術研究センター(ISTEC)の100 kWh計画⁽⁷⁾が現在進行中である^{(38),(40)}。このように、現在製作されているSMESシステムは比較的規模の小さいものが主体となっているが、これは、長期的な信頼性・安定性が要求される電力システムでは、これまでの核融合研究における超伝導技術開発の実績や、周波数変換・直流送電などのパワーエレクトロニクス技術応用の交直変換装置開発の実績から、まずその実現性が非常に高い小規模のものから段階的に開発し、系統併入の影響を検証していくことが望まれるためである。

以下に、我が国における本格的なSMESシステム開発の第一歩として現在進められている、上記ISTECの100 kWh級小規模SMESパイロットプラント建設に必要な要素技術確立のためのプロジェクト「超伝導電力貯蔵システム要素技術開発調査」⁽⁷⁾を例に取り、そのパイロットプラントの仕様と開発目標について記す。

- (1) パイロットプラントの仕様 計画されている100 kWh級パイロットプラントは、常

時は負荷変動補償を行いながら必要な場合には系統安定化・電圧変動補償を行う多用途 SMES システムとして設計されている。負荷変動補償としては、鉄鋼プラントにおける負荷パターンを想定し、ピーク値 20 MW、周期 18 秒の変動負荷を、一方、系統安定化としては、発電機動揺抑制を想定し、ピーク値 20 MW、周期 2 秒の変動負荷を対象に考えている。表 1-3(a) に目標仕様と運転パターンを示す⁷⁾。目標値は、出力 20 MW で、充放電時間は 9 秒間隔、定格電流及び電圧はそれぞれ 20 kA、2 kV である。

(2) 要素機器開発の課題と目標 SMES システムの構成は図 1-2 に示した通りで、表 1-3(b) にその主たる要素機器(超伝導コイル、永久電流スイッチ、クエンチ保護、交直変換装置、直流遮断装置)の技術課題と開発目標をまとめて示す⁷⁾。本研究の検討対象である永久電流スイッチには、オン抵抗 $1 \mu\Omega$ 以下、30 kA 級のスイッチ容量、0.1 秒以下の高速応答、3 万回以上のスイッチング動作が要求されている。

1.3 永久電流スイッチ開発の技術課題及び機械式 PCS に関する 従来の研究

1.3.1 各種スイッチング方式の永久電流スイッチ適用可能性

SMES システムの永久電流スイッチは、エネルギー貯蔵やコイル励磁・エネルギー転送時のスイッチ抵抗による損失を低減するために、「オン抵抗は小さく・オフ抵抗は大きく」することが要求される^{(63),(64)}。永久電流スイッチには、このようなオン・オフ抵抗の要請と共に、表 1-3(b) に示されるようにスイッチング速度や大電流を通電できるスイッチ容量、及び電流遮断能力などが併せて要求される。表 1-4 に、これら要件に対する超伝導式、半導体式、及び機械式という代表的なスイッチング方式⁽⁶⁵⁾の適用可能性をまとめる⁷⁾。

(1) 半導体スイッチング装置 半導体スイッチング装置は、サイリスタ等の半導体素子を用いてスイッチングを行うもので、ns オーダーのスイッチングが可能であり、スイッチング速度に問題はない。その反面、77K でのオン抵抗が $100 \text{ m}\Omega$ オーダーとの報告⁽⁶⁶⁾があるように、低温環境下ではオン抵抗の特性改善が図られるというもののオン抵抗は大きく低抵抗化の見込みが少ないことをはじめ、オフ時にリーク電流が流れること、大電流通電・遮断に関して研究開発が必要であること、素子故障時には短絡状態となり保護動作が難しいこと、などの問題が挙げられるため、永久電流スイッチへの適用は困難と考えられる⁷⁾。

(2) 超伝導スイッチ 超伝導スイッチは超伝導-常伝導間の相転移(クエンチ)を利用してスイッチングを行うもので^{(65),(67)}、超伝導状態の利用によりオン抵抗を零とできる。一

方、オフ抵抗は、クエンチ後の常伝導状態を利用するため無限大とすることはできない。そこで、大きなオフ抵抗を得るために、同スイッチは一般に長尺の超伝導線を用いて巻線構造として製作されるが、高速スイッチング時に自己インダクタンス L により誘起される電圧($L di/dt$)によって絶縁破壊が生じないよう無誘導巻きにされている⁽⁶⁵⁾。超伝導スイッチの開発の歴史は古く、1950年代中頃からデジタルコンピュータあるいは超伝導コイル励磁用整流器のクライオトロン (Cryotoron) に関する研究が行われており⁽⁶⁸⁾、1970年代には、誘導性エネルギー貯蔵システムのオープニングスイッチへ適用した研究が多数行われている⁽⁶⁸⁾⁻⁽⁷¹⁾。例えば、ドイツのKernforschungszentrum Karlsruheでは、220 kJの貯蔵システムで、スイッチング時間 20 μ s、ピーク電圧 47 kV、抵抗の時間変化率 $22 \times 10^6 \Omega/s$ 、スイッチ回復時間 3 min で動作した超伝導スイッチの報告^{(65),(68)}や、旧ソ連のEfremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (ESRIEA) では、50 kJの貯蔵システムから 25 MW (2.5 kA、10 kV) のピーク電力を、最大電流 8 kA/ユニットでオフ抵抗 20~50 Ω の超伝導スイッチを用いて転送したとの報告がある⁽⁶⁵⁾。

ところで、超伝導スイッチは、一般にクエンチをトリガする方式により熱式と磁気式に区別される^{(67),(71)}。熱式は、小容量・高オフ抵抗のものが比較的コンパクトに製作できるが、外部磁界を高速印加することでトリガする磁気式と比較してスイッチング時間が長くなる欠点がある⁽⁷²⁾。一方、磁気式は、高速スイッチングが可能であるが、磁界印加のためのパルスマグネットやパルス電流源を必要とすることから装置全体が大きくなる問題がある。両方式に関する近年の代表的な研究結果を、上述の関係を確認するため電流容量、オフ抵抗、スイッチング時間の観点からまとめ、以下に記す。熱式超伝導スイッチとしては、根本氏⁽⁷³⁾による電流容量 600 A、オフ抵抗 50 Ω 、スイッチング時間 11 s の報告がある。但し、大きな電流容量は、スイッチ素子を 10 並列したことによる。一方、磁気式超伝導スイッチとしては、Noto ら⁽⁷⁴⁾による電流容量 50 A、オフ抵抗 7 Ω 、スイッチング時間 300 ms の報告や、Sadakata ら⁽⁷⁵⁾による電流容量 300 A、オフ抵抗 0.7 Ω 、スイッチング時間 2 ms の報告等がある。また、佐藤ら⁽⁷²⁾のグループにより、高速スイッチング化・大容量化・高抵抗化を目的とした電流トランス型の超伝導スイッチの研究も行われており、電流容量 800 A、オフ抵抗 0.27 Ω 、スイッチング時間 10 ms の報告がある。

以上のように、超伝導スイッチはオン抵抗を零とできるため本来の意味での永久電流スイッチとして機能することができ、ms オーダーのスイッチングが可能で、可動部がないという利点もある。しかしながら、オフ抵抗が 0.1~10 Ω オーダーと十分大きくないことが、損失の点及びスイッチあるいは巻線の並列化による大容量化を行う際の更なるオフ抵抗の

低下をもたらすため問題であり、これも一因となり SMES システムに要求される数10～100 kA オーダーの大電流を通電することが困難であるため⁽⁷⁾、実機化を考えるとこれに変わる永久電流スイッチの開発が必要となる。

(3) 機械式スイッチ 機械式スイッチは、2つの接触子を機械的に短絡・開放することでスイッチングを行うため⁽⁶⁵⁾、常温で使用する場合には接触抵抗の存在によりオン抵抗を零とすることはできず、また、詳しくは1.3.2項で述べるが、電流遮断を伴うスイッチ開放時にはアーク放電の発生が問題となり⁽⁷⁶⁾⁻⁽⁷⁸⁾、その抑制技術を必要とする^{(65),(79)-(82)}。しかしながら、オフ抵抗を無限大とできることや遮断器としての実績があるため、表1-4に示されるように、永久電流スイッチへの適用要件を十分に満足する性能を得ることは可能で、3者の中で最も実用レベルの高い方式であるといえる。特に、オン抵抗特性の改善は、設置スペースの増大を必要とするが⁽⁷⁾、接触子の並列化により可能であり、この方法は同時にスイッチ容量の増加をもたらす。但し、オフ抵抗を無限大とできるため、超伝導スイッチのようなオフ抵抗低下の問題はない。極低温環境下で使用するることによって、さらなるオン抵抗特性の向上は期待でき、詳細は1.3.3項で述べるが、接触子を冷媒中に直接浸漬させる方法^{(43),(44),(83)-(88)}や接触子周辺を真空容器で囲い冷媒中に浸漬する方法⁽⁵¹⁾が検討されている。但し、この場合、極低温環境下におけるスイッチ駆動の信頼性・安定性やスイッチング速度に関する十分な検討を行う必要がある、前者の場合は更に、液体ヘリウムや液体窒素等の冷媒中で電流遮断を行うことになるため、真空遮断と比較して遮断性能の低下を考慮する必要がある⁽⁷⁾。

以上のように、機械式スイッチ接点の超伝導化が可能となり、オン抵抗をゼロとできれば、オフ抵抗を無限大とでき大電流の通電が可能であることから、超伝導スイッチで問題とされた課題を解決し得る理想的な永久電流スイッチとなることが期待される。即ち、SMES システム実現のためには、機械式永久電流スイッチの開発が強く要請される。更に、第2章で論じる SMES 運転中のスイッチ抵抗に基づく損失計算において、負荷平準化を目的とする大規模 SMES システムでは、大きなオフ抵抗を有する永久電流スイッチが必要なことが定量的に示されていることから^{(63),(64)}、機械式永久電流スイッチ開発の必要性が認められる。したがって、以上のことを整理すると、機械式永久電流スイッチ開発のための主たる検討課題は、接点の超伝導化を実現することであり、実機化に際しては更に、そのクエンチ特性の体系的な解明とスイッチ開放時のアーク放電の抑制、及びスイッチの大容量化に関する検討などが必要になると考えられる。

1.3.2 機械式スイッチ開放時のアーク放電抑制技術と検討課題

電流遮断時の機械式スイッチ開放は、短絡してある2つの接触子を引き離すためアーク放電の発生は避けられない⁽⁶⁵⁾。機械式永久電流スイッチの実機化に際しては、遮断特性の向上が検討課題の一つに挙げられ、スイッチ開放時のアーク放電抑制技術の確立が必要とされる。

従来、直流大電流遮断時のアーク放電の発生を抑制する方法として、電流零点で回路を遮断できるカウンタパルステクニック^{(65),(79)-(82)}が検討されている。例えば、日本の原子力研究所が開発中の核融合炉用超伝導コイルでは、コイルクエンチなどの事故時にコイル蓄積エネルギーを外部抵抗に素早く転送するための緊急放出用スイッチとして、カウンタパルステクニックによる機械式接点を持つ遮断器の使用を検討している⁽⁸¹⁾。しかし、15 kAの電流を遮断した場合、完全な零点での開放は行われず、スイッチ部分に10~30 A程度の電流を残したまま遮断され、アーク放電の発生と共に約100 Vのサージ電圧が発生することが確認されている。つまり、カウンタパルステクニックを使用して機械式永久電流スイッチを開放する場合、遮断電流は大幅に低減されるが数10 Aの漏れ電流が生じ、この電流によるアーク放電の発生は避けられないことを示唆している。

したがって、機械式永久電流スイッチの実機化に際しては、カウンタパルステクニックを使用する場合にも、数10 Aの電流遮断によるアーク放電特性と、そのようなアークがクエンチ特性などスイッチ性能に及ぼす影響を十分検討しておく必要がある。

1.3.3 機械式スイッチ接点の超伝導化に関する従来の研究

機械式スイッチのオン抵抗は、接触子のバルク抵抗と接触子同士が接触している部分(以下、「接点」と呼ぶ)の接触抵抗で構成される⁽⁸⁹⁾。バルク抵抗は接触抵抗より小さく、接触子材料に超伝導体を使用することで零まで低減できる。したがって、機械式スイッチを本来の意味での永久電流スイッチとして機能させることができるかどうかは、接触抵抗を零とできるか、即ち超伝導接点接続が可能であるかという問題に帰結する。

これまで、機械式スイッチの接触抵抗に関する研究は、常温では遮断器を中心に行われており、接触面性状、特に接触面粗度と酸化膜の形成に強く影響を受けることが示されている^{(65),(89)-(93)}。他方、機械式スイッチを模擬した実験とはなっていないが、超伝導機器開発の進展に伴い、液体窒素や液体ヘリウム等で冷却された極低温環境下での接触抵抗に関する研究も多数行われている⁽⁹⁴⁾⁻⁽⁹⁶⁾。これらの研究で使用された接触子の材料は、主にCuやAl等の常伝導導体であるため、接点が超伝導化されたとの報告はなされておらず、 10^{-6} ~ 10^{-3}

Ω の接触抵抗が観測されている。また、その接触抵抗は、接触子の材料と接触子同士を押しつける荷重、及び通電電流に依存することが示されている。一方、1960年代の後半から1970年代にかけて、接触子に超伝導体を使用した機械式スイッチの接触抵抗に関する研究が、本来の意味でのオン抵抗を零とする機械式永久電流スイッチの開発を意識して液体ヘリウム中で行われてきた^{(41),(43),(51),(83)-(87)}。その中の代表的な6つの研究の概要をまとめて表1-5に示す。

これらの研究で使用された接触子は、超伝導線を OFHC (Oxygen Free High Conductivity) 銅に埋め込んだもの(表1-5中、研究2⁽⁴³⁾、3⁽⁴⁴⁾)と、バルク状(研究4⁽⁸⁵⁾、6⁽⁵¹⁾)、及びテープ形状(研究4、5⁽⁸⁶⁾)の3種類に大別される(研究1⁽⁸³⁾は記述なし)。この中で注目すべきは、接点の超伝導化が達成されたとの報告がある研究1、4、6である。研究1では、接触子に関する記述はなかったが、「冷間圧接(cold-welding)により強結合(strong coupling)が形成され、接触させている接触子はただ一つの超伝導体のように振る舞う」という記述があることから⁽⁸³⁾、使用した接触子は、テープ形状よりも厚いバルク状のものであることが推測される。したがって、接点の超伝導化を示す結果は、バルク状接触子を使用した研究においてのみ報告されていることになり、機械式永久電流スイッチの開発には、バルク状接触子の使用が有効であると考えられる。

一方、研究6では、接触子を液体ヘリウム中に直接浸漬した場合と、 1×10^{-4} torr 以下に真空排気された容器中に設置して浸漬した場合の特性比較が行われている⁽⁵¹⁾。後者は、接触子を固定するホルダーを介して接触子の冷却を行っている。クエンチ電流は、接触子を真空容器中に設置する方が液体ヘリウムに直接浸漬する場合より高く、10倍以上大きい500 Aを達成している。したがって、真空容器内への接触子の設置は、装置は複雑となるが、遮断特性ならびに臨界電流の向上の点で効果的と考えられる。

ところで、研究1、4、6では、「接触抵抗が消滅した」⁽⁵¹⁾との記述や、「臨界電流」^{(51),(83),(85)}という用語が使用されていることから、接点の超伝導化が達成された結果の例として紹介したが、接点のクエンチにより発生する接触抵抗の変化やクエンチ電流の磁界依存性など、接点の超伝導化を確認するデータの提示はない。また、実際に超伝導化が実現されているとしても、クエンチ電流特性に及ぼす接触子形状や接触面性状の影響、あるいはスイッチ開閉回数やスイッチ荷重などのスイッチ駆動条件に関する影響等の検討は全くなされていない。また、研究6では、4.5 mHの超伝導コイルと7 Ω の外部負荷抵抗を、フューズと遮断器等で構成された転送装置と並列に接続して、コイルの貯蔵エネルギーをスイッチ開放により外部負荷に転送する実験を行っているが、200 Aのコイル電流は20 msで4 Aまで減

少し、そのときに発生するコイル端子電圧の最大値は70 Vであったと報告されているものの⁽⁵⁾、電流遮断によるアーク放電がクエンチ電流などスイッチ特性に及ぼす影響は検討されていない。更に、どの研究においても、超伝導接点接続の形成機構に関する検討は殆ど行われていない。

1.4 本論文の構成と内容

以上の状況に鑑みて、本研究では、機械式永久電流スイッチ開発のための基礎研究として、機械式スイッチ接点の超伝導化の実現とそのクエンチ特性及び超伝導接点接続の形成機構の解明を主たる目的とし、以下の4項目について検討を行った。

1. SMES システムにおける永久電流スイッチの持つべきオン・オフ抵抗特性の定量的評価と、機械式永久電流スイッチ開発の必要性の検証。
2. 接触子に超伝導体NbTiバルクを用いた機械式スイッチの接触抵抗特性測定による接点のクエンチ現象とそのクエンチ特性の磁界依存性の検討。
3. 接触子形状や接触面性状(粗度及び酸化膜)、あるいはスイッチ駆動条件などがクエンチ特性に及ぼす影響の体系的な検討、及び、4.で提案されたモデルに基づくクエンチ特性の定量的な解析。
4. 実験後の接触子接触面のSEM観測と3.の結果に基づく超伝導接点接続形成機構のモデル化、及びモデルの妥当性の検証。

更に、実機化の際には不可欠である、機械式永久電流スイッチ(以下、機械式PCS)開放時のアーク放電特性とその影響の解明、及び機械式PCSの大容量化を目的として、以下の2項目についても検討を行った。

5. 超伝導コイルと負荷抵抗に接続したNbTi 機械式PCS 開放時のアーク放電特性とアークがクエンチ特性に及ぼす影響の検討。
6. 2組の機械式PCSを並列接続し、そのスイッチ容量とクエンチ特性の検討とクエンチ機構の解明。

このように、本研究は、機械式永久電流スイッチ開発のために必要とされる検討課題をほぼ網羅して総括的に検討しており、将来の実機化に向けての設計指針の確立に貢献するものと期待される。本論文は、これらの研究の成果をまとめたものであり、以下に述べる7つの章より構成されている。

第2章では、SMESシステムにおける永久電流スイッチの持つべきオン・オフ抵抗特性を明らかにするため、永久電流スイッチとして適用が検討されている機械式スイッチと超伝導スイッチのオン・オフ抵抗特性を考慮し、励磁と貯蔵中の各損失をSMESシステムの規模別のケーススタディを通して定量的に比較検討する。更に、機械式スイッチの損失に、第5章で論じる接点の超伝導化が達成されたNbTi機械式PCSのアーク放電特性を考慮して評価したアーク損失を含め、両スイッチの損失を検討することで、SMESシステムにおける機械式PCSの必要性を検証する。

第3章では、本研究で開発した接触子にNbTiバルクを用いたNbTi機械式PCSの構造を、接触子駆動機構と接触子の形状及び接触面性状等の仕様を中心に概説する。更に、機械式PCSを液体ヘリウム中に浸漬し、外部磁界やアーク放電特性の影響を検討することができるように開発した2種類のクライオスタット装置の仕様と特徴について説明する。

第4章では、第3章で説明した実験装置で、まず機械式スイッチ接点の超伝導化の実現可能性を接触抵抗特性の測定による接点のクエンチ現象とそのクエンチ特性の磁界依存性に注目して調べる。次に、接触子形状や粗度、酸化膜等の接触面性状、あるいはスイッチ開閉回数やスイッチ荷重等のスイッチ駆動条件がクエンチ特性に及ぼす影響を体系的に検討し、定量的に考察することで、機械式スイッチ接点の超伝導化(超伝導接点接続)に必要な条件とその形成機構の解明を行う。

第5章では、第4章で論じた機械式PCSを超伝導コイルと負荷抵抗に接続し、SMESシステムの基本構成を模擬した回路として機械式PCS開放時に発生するアーク放電特性を液体ヘリウム中で調べ、電気絶縁の観点から超伝導コイルに及ぼす影響を検討する。更に、アーク放電が超伝導接点接続及びクエンチ電流特性に及ぼす影響を検討すると共に、アーク放電による接触面上の不純物除去効果に着目し、酸化膜を形成した接触子のアーク放電による超伝導接点接続の形成可能性を調査した。

第6章では、スイッチの大容量化を目的として、2組のNbTi機械式PCSを並列接続した回路でスイッチ容量とクエンチ特性を調べ、そのクエンチ機構を各PCSの電流分布とクエンチ特性に基づき定量的に考察する。更に、一方のPCSのクエンチにより電流変化が大きく変化する場合を模擬し、パルス電流通電によるクエンチ特性を詳細に検討し、並列PCS回路の連続するクエンチ機構の解明を行う。

最後に第7章では、本研究で得られた成果を要約し、本論文を総括すると共に、今後の課題について述べる。

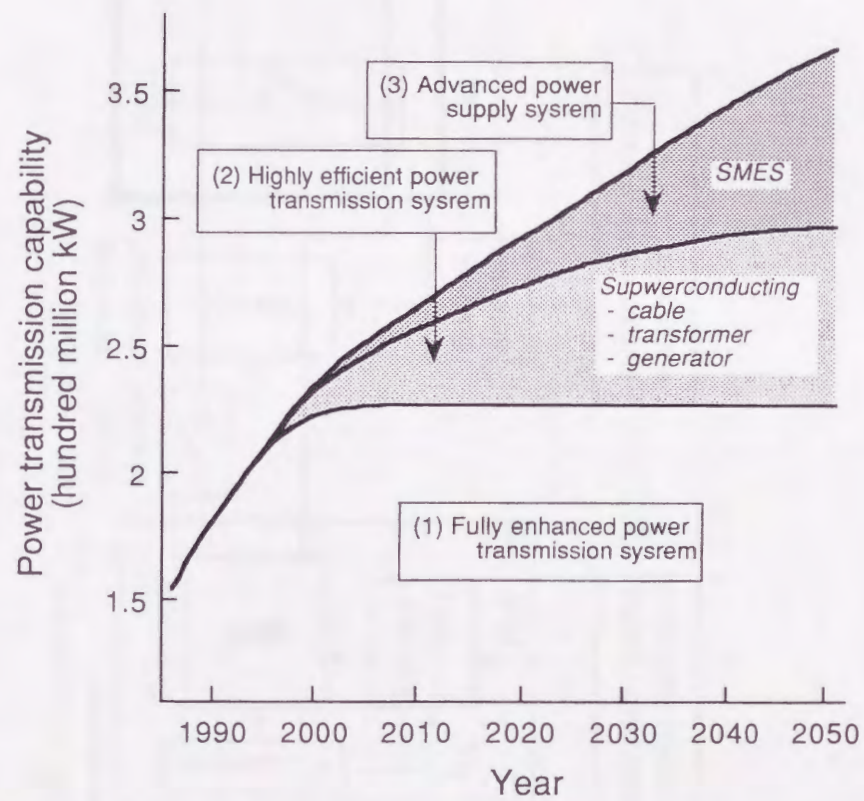


図 1-1 超伝導技術導入による 21 世紀中葉の電力輸送・供給システムの構成 ^{(2),(3)}

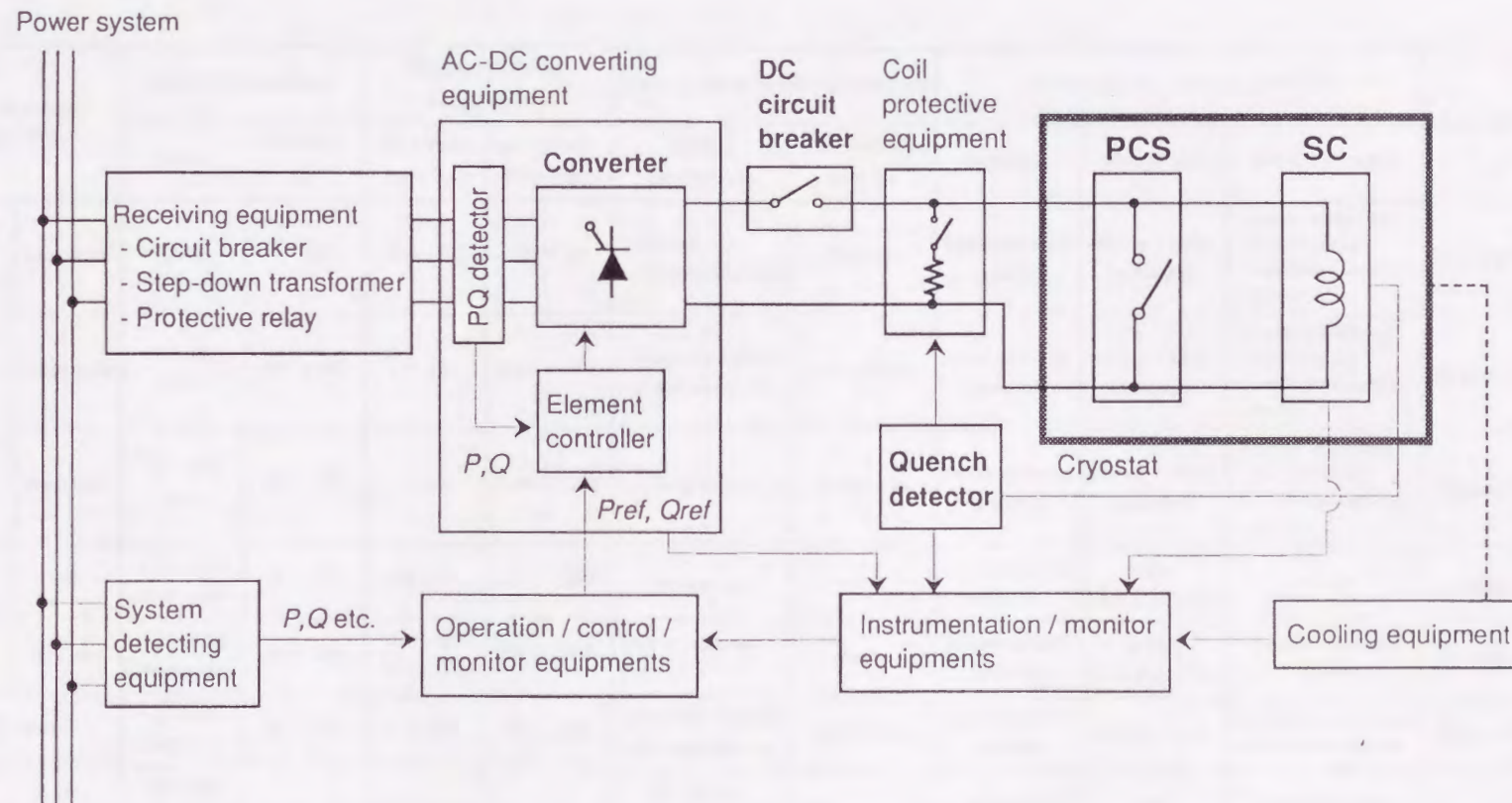


図 1-2 SMES システムの構成図 (7),(12)

表 1-1 各種貯蔵技術の一般性能比較 (7),(9),(10),(57)

Energy storage method		Storage characteristics		Theoretical storage energy density		Location and environment properties		Operation and maintenance properties			Life time
		Scale	Efficiency (%)	per weight (Wh / kg)	per volume (kWh / m ³)	Safety / environment	Construction location	Response	Storage time	System operation	
SMES	Large-scale	GWh	~ 90	50 ~ 100	10 ~ 25	Quench Magnetic leakage	Restrictive	Instantaneously possible	minute ~ week, as required	Slightly complicated input-output unit Complicated auxiliary system	30 years**
	Middle-scale	10~100 MWh	85 ~ 90	~ 12	0.44 ~ 2.8	Magnetic leakage (if solenoid coil)	Less restriction	Instantaneously possible	minute ~ week, as required	Slightly complicated input-output unit Complicated auxiliary system	30 years**
	Small-scale	1~100 kWh	80 ~ 85	~ 12	0.44 ~ 2.8	No problem	Less restriction	Instantaneously possible	minute ~ week, as required	Slightly complicated input-output unit Complicated auxiliary system	30 years**
Battery	Lead	~10 MWh (Small-scale)	65 ~ 75	180 (35*)	100 ~ 200*	No problem	Freely	Instantaneously possible	a day, weekly possible	Simple	5 years
	New type	~10 MWh (Small-scale)	70 ~ 80	500 ~ 800 (30 ~ 60*)	100 ~ 200*	Active material leak	Freely	Instantaneously possible	a day, weekly possible	Need of a auxiliary system	10 years**
Fly wheel		~10 MWh (Small-scale)	60 ~ 70	5 ~ 100	30 ~ 150	Noise and vibration Abnormal rotation	Less restriction	Instantaneously possible	minute ~ hour	Complicated input-output unit & auxiliary system	30 years**
CAES		10~100 MWh (Middle-scale)	60 ~ 75	0.5 ~ 1500	~ 5	Subsidence Ground water variation	Restrictive	10 minutes order	a day, weekly possible	Need of operation in a power plant	20 years**
Hydropower		~GWh (Middle- / Large-scale)	65 ~ 70	1.36	1.36	Environmental compatibility	Restrictive	minute order	minute ~ week	Simple	30 years

*current state, ** target year

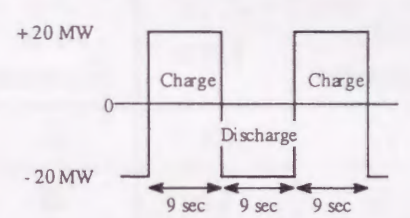
表 1-2 各種貯蔵技術の用途別比較 (7)(38)

Application	Item	SMES			Battery		CAES	Fly wheel	Hydropower		SVC	PSS	SDR
		Middle/ Large-scale	Small-scale	Middle-scale	Small-scale	Middle-scale			Small/ Middle-scale	Large-scale			
Load-leveling	Storage efficiency	⊕	-	○	-	△	△	-	-	△	-	-	-
	Facility cost	△	-	△	-	△	△	-	-	○	-	-	-
	Response	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	△	⊕	⊕	-	⊕	-	-
Compensation of load fluctuation	Effective power compensation	○	○	○	○	○	○	○	○	-	×	-	-
	Changing-over of charge & discharge mode	○	○	○	○	○	×	○	○	-	-	-	-
	Facility cost	△	△	△	△	△	○	○	○	-	⊕	-	-
Improvement of stability	Transient stability	-	⊕	-	△	△	-	-	-	-	○	⊕	⊕
	Static stability	-	⊕	-	△	△	-	-	-	-	⊕	⊕	△
	Voltage stability	-	⊕	-	○	○	-	-	-	-	⊕	○	△
	Response	-	⊕	-	△	△	-	-	-	-	⊕	⊕	○
	Changing-over of charge & discharge mode	-	⊕	-	△	△	-	-	-	-	-	-	○
	Effective/Reactive power compensation	-	○	-	○	○	-	-	-	-	×	○	×
Power outage	Maintenance	-	△	-	○~△	-	-	-	-	-	○	○	○
	Auxiliary drive power	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Facility cost	-	△	-	△	△	-	-	-	-	○	○	○
	Response	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	△	⊕	⊕	○	-	-	-
Frequency adjustment	Service time	○	△	○	△	△	△	△	△	○	-	-	-
	Maintenance	△	△	○~△	○~△	○~△	○	△	△	○	-	-	-
	Load frequency control	⊕	-	⊕	-	⊕	○	⊕	⊕	○	-	-	-
Momentary voltage dip	Instantaneous driving reserve power	⊕	-	○	-	○	△	○	○	○	-	-	-
	Response	-	⊕	-	⊕	-	-	⊕	⊕	-	-	-	-
	Maintenance	-	△	-	○	-	-	△	△	-	-	-	-
	Facility cost	-	△	-	○	○	-	△	△	-	-	-	-

⊕ Very superior, ○ Superior, △ Superior, × Inferior (or no function), - No competitive technology

表 1-3 100 kWh 級 SMES パイロットプランの仕様 (ISTEC) ⁽⁷⁾

(a) 目標仕様と運転パターン

Item	Specification	Operation pattern (Compensating load fluctuation)
Stored energy	100 kWh (360 MJ)	 The diagram illustrates the power output over time. It shows three rectangular pulses. The first and third pulses are positive, labeled 'Charge', and reach a level of +20 MW. The middle pulse is negative, labeled 'Discharge', and reaches a level of -20 MW. Each pulse has a duration of 9 seconds, as indicated by the '9 sec' labels below the x-axis. The y-axis is labeled with +20 MW, 0, and -20 MW.
Output power	20 MW	
Maximum stored energy	133 kWh (480 MJ)	
Rated current	20 kA	
Rated voltage	2 kV	
Coil type	Toroid	

(b) 要素技術の課題と開発目標

Item	Subject of developing technology	Developing target
Superconducting coil (SC)	Reduction in AC loss High stability Reduction in junction resistance High dielectric strength	< 0.05% Thermal stability margin to quench > 300 mJ/cc $\sim 1 \times 10^{-9} \Omega$ Withstand voltage > 3 kV
Persistent current switch (PCS)	High current capacity Quick response Long life time & high reliability Reduction in ON resistance	30 kA class < 0.1 sec $\sim 30,000$ times < $1 \mu \Omega$
Quench protection	Improvement of detecting sensitivity Protective system	Sensitivity 10mV Operation time 10 ms
AC - DC converter	Improvement of conversion efficiency	> 95%
DC circuit breaker	Large breaking current High withstand voltage Quick interruption	20 kA class 3 kV class < 0.1 sec

表 1-4 各種スイッチング方式の永久電流スイッチへの適用可能性^{(7),(65),(72)}

Type Item	Superconducting type (S-N transition)	Semi-conductor type		Mechanical type	
		at R.T.	at low temperature	at R.T.	at low temperature
R_{ON}	◎	×	△	△	○
R_{OFF}	×	△	△	◎	◎
Sustaining large current	×	×	×	○	△
Current interruption	×	△	△	△	△
Switching speed	○	○	○	○	△

○ : At this stage, it can be utilized in the SMES system. (◎ : ideal)

△ : It is difficult to utilize it in the SMES system at this stage, but it has the possibility in the future.

× : It could be difficult to utilize it in the SMES system even in the future.

表 1-5 機械式の永久電流スイッチに関する従来の主要な研究結果

Study		1	2	3	4	5	6
Authors		G.K. Gaulé, et al. (1968) ⁽⁸³⁾	J.L.Zar (1968) ⁽⁴³⁾	Y.Kawasaki, et al. (1970) ⁽⁴⁴⁾	J.J. Winter, et al. (1972) ⁽⁸⁵⁾	P.Krueger (1972) ⁽⁸⁶⁾	K.Kuwabara, et al. (1974) ⁽⁵¹⁾
Contact pieces	Material	No description	Nb-Zr wire mounted in OFHC copper strip	(1)Nb-Zr wire mounted in OFHC block (2)Copper block	(1)Scraped Pb (2)Nb-plated Pb (3)Nb ₃ Sn tape	(1)Nb ₃ Sn tape (2)Nb ₃ Sn tape with indium layer	(1)Oxygen-free copper (2)Nb-Ti-Zr alloy
	Shape	-	Plane to Plane	Plane to Plane	Hemisphere to Plane	Plane to Plane	Hemisphere to Hemisphere
		-	OFHC strip; 1.27cm wide x 1mm thick Nb-Zr alloy; φ 0.25mm x 9 wires	OFHC block; 12.5mm wide x 1mm thick Nb-Zr alloy; φ 0.25mm x 9 wires Copper block; 2.5cm wide x 1.4cm thick	(1)-(3); Hemispherical boss of φ 0.3cm Block; 0.4cm x 0.4cm x 0.3cm thick	Nb ₃ Sn tape; 5mm wide x 0.2mm thick Indium layer; 0.1 ~ 0.2mm thick	Undescribed clearly
	Condition	-	In liquid He	In liquid He	In liquid He	In liquid He	In Liquid He or vacuum
Contact force		10 kg	2270kg	~ 560 kg	~ 51 kg	~ 12 kg	30 kg
Drive mechanism		Undescribed	Two cams operated by torque tube	Spring operated by handling rod	Spring operated by electromagnetic force	Spring operated by electromagnetic force	Undescribed
Achievement of zero contact resistance		Reported as "strong coupling"	No	No	Reported as "superconductive pressure contacts"	No	Reported as "the disappearance of the contact resistance"
Critical current		240A	-	-	280A	-	500A

第2章

SMES システムの永久電流スイッチに 要求されるオン・オフ抵抗特性

2.1 まえがき

SMES システムのエネルギー貯蔵・転送を行うためのスイッチは、第1章で述べたように、一般に永久電流スイッチ(PCS)と呼ばれ、無損失でエネルギー貯蔵が行えるようオン抵抗が零であることが要求される。同スイッチはまた、励磁時の損失を低減するために、大きなオフ抵抗を有することも必要とされる。

現在、SMES システムのエネルギー貯蔵・転送用スイッチとしては、第1章の1.3節で記述したように、オン抵抗をゼロとできPCSとして機能する熱式・磁気式の超伝導スイッチと、オフ抵抗を無限大とできる機械式スイッチの2つが主に検討されている。機械式スイッチは、接触子間の接触抵抗が存在する場合、貯蔵時にジュール損失が発生してPCSとして機能しないが、励磁時のジュール損失の発生はない。ロードレベリングを目的とする大規模SMES システムでは、特にコイルインダクタンスが大きくなることから、オン抵抗による貯蔵時の損失よりも、むしろオフ抵抗によるコイル励磁時の損失が問題になる^{(12),(43),(44)}。そのため、励磁・転送という一連のSMES 運転におけるエネルギー損失を考える場合、オフ抵抗を無限大とできない超伝導スイッチよりも機械式スイッチの方がむしろ低損失となることも考えられる。一方で、機械式スイッチは電流遮断を伴うスイッチ開放時にアーク放電が発生する問題があるため、機械式スイッチのエネルギー損失を評価する際には、アーク放電による損失も考慮する必要がある。

本章では、SMES システムの永久電流スイッチの持つべきオン・オフ抵抗特性を明らかにするため、まず機械式スイッチと超伝導スイッチのオフ・オフ抵抗特性によるコイル励磁及びエネルギー貯蔵時のエネルギー損失を評価する理論式を、機械式スイッチ開放時に発

生するアーク放電による損失評価式と併せて、それぞれ導出した。その後で、貯蔵エネルギーの規模により、大規模 (GWh 級)、中規模 (MWh 級)、小規模 (kWh 級) の3種類に分類した各 SMES システムにおいて、両スイッチのエネルギー損失比に関するケーススタディを行った。更に、NbTi 機械式 PCS のアーク放電特性を考慮して、機械式スイッチの損失にアーク損失も含めたエネルギー損失比の検討を行った。

2.2 エネルギー損失のスイッチ抵抗依存性

図2-1 (a) - (c) に示す超伝導コイル SC、エネルギー貯蔵・転送用のスイッチ PCS、及び保護抵抗 R_L から構成される基本的な SMES システムの等価回路を用いて、超伝導スイッチのオフ抵抗 R_{OFF} による励磁損失と、機械式スイッチのオン抵抗 R_{ON} による貯蔵損失、及び機械式スイッチ開放時に発生するアーク放電による損失をそれぞれ求め、比較検討する。

2.2.1 コイル励磁時の損失

コイル励磁は、PCS をオフ状態として励磁電流が PCS に分流しないようにして行われる (図2-1(a))。機械式スイッチはオフ抵抗を無限大とできるため、励磁電流が PCS へ分流することはない。一方、超伝導スイッチのオフ抵抗 R_{OFF} は約 $1 \sim 10^2 \Omega$ のオーダーであるため^{(65),(72)-(75),(97)-(101)}、PCS に電流が分流しオフ抵抗によるジュール損失が発生する。

励磁電流 I_{ex} の単位時間当たりの電流増加率を J_0 (A/s)、コイル電流が定格電流 I_0 に到達するまでの時間を T_{ex} とすれば、オフ抵抗による励磁中のエネルギー損失 E_{Lex} は (2.1) 式で与えられる。但し、 L は超伝導コイルのインダクタンスである。

$$E_{Lex} = \frac{(L J_0)^2}{R_{OFF}} \left[T_{ex} - \frac{L}{R_{OFF}} \left\{ \frac{1}{2} \exp \left(-2 \frac{R_{OFF}}{L} T_{ex} \right) - 2 \exp \left(-\frac{R_{OFF}}{L} T_{ex} \right) + \frac{3}{2} \right\} \right] \quad (2.1)$$

一方、励磁時間 T_{ex} と励磁電流増加率 J_0 の関係は次式となる。

$$J_0 = \frac{I_0}{T_{ex} + \frac{L}{R_{OFF}} \left[\exp \left(-\frac{R_{OFF}}{L} T_{ex} \right) - 1 \right]} \quad (2.2)$$

2.2.2 エネルギー貯蔵時の損失

エネルギー貯蔵は、PCSをオン状態としてSCを短絡し、永久電流ループを構成することで行われる(図2-1(b))。超伝導スイッチのオン抵抗はゼロであるため、貯蔵時にジュール損失は発生しない。一方、一般に機械式スイッチは接触抵抗によるオン抵抗が存在するため、貯蔵中にオン抵抗 R_{ON} によるジュール損失が発生する。

貯蔵時間を T_{st} とすると、オン抵抗による貯蔵中のエネルギー損失 E_{Lst} は次式となる。

$$E_{Lst} = \frac{1}{2} L I_0^2 \left[1 - \exp \left(-2 \frac{R_{ON}}{L} T_{st} \right) \right] \quad (2.3)$$

2.2.3 スイッチ開放時のアーク放電による損失

NbTi機械式PCSのアーク放電特性の詳細は第5章で論じるが、ここでは液体ヘリウム中で測定された同PCSのアーク維持電圧 V_A とアーク持続時間 τ_A を考慮して^{(102),(103)}、アーク放電によるエネルギー損失を評価する。図2-1(c)に示される回路($L = 1\text{H}$ 、 $R_L = 5\Omega$)で、カウンタパルステクニックを用いてスイッチ開放を行ったときの漏れ電流(leak current)を考慮し、遮断電流 $I_B = 50\text{A}$ でNbTi機械式PCSを液体ヘリウム中で開放した時のコイル端子電圧 V_T とスイッチ電流 I_S の測定波形、及び両者の積を計算したアーク電力損 P_{Larc} を図2-2に示す。同図から、アーク点弧直後は、 V_T と I_S は共にほぼ一定であるためアーク電力損失 P_{Larc} もほぼ一定であることがわかる。しかし、 I_S が低下するとともに V_T と P_{Larc} は徐々に増加を始め、アーク消弧寸前には、 V_T は急激に増加し P_{Larc} もそれに伴い急激に増加することがわかる。このようなアーク放電によるエネルギー損失は、 P_{Larc} を時間積分することで評価でき、この図2-2(c)の P_{Larc} の波形を数値積分して概算すると、ほぼ $2V_A I_B \tau_A$ と一致した。そこで、エネルギー損失を過小評価することなく簡便に評価することを考え、 I_B は定格電流 I_0 に等しく、 τ_A はSMESシステムの規模及び I_B によらず一定であると仮定し、アーク放電によるエネルギー損失 E_{Larc} を

$$E_{Larc} = 2V_A I_0 \tau_A \quad (2.4)$$

として評価する⁽⁶⁴⁾。第1章で述べたように、通常、機械式スイッチの開放は定格電流のような大電流通電下では行われず、カウンタパルステクニック等を用いて遮断電流を殆ど零

まで低減して行われるため、実機におけるアーク放電のエネルギー損失は、 $I_B = I_0$ とした (2.4) 式から評価される E_{Larc} よりも小さいと考えられる。

2.3 ケーススタディによる損失評価

2.3.1 検討対象システムのパラメータ設定

(2.1)、(2.3)、(2.4) 式に示されるように、各エネルギー損失 E_{Lex} 、 E_{Lst} 、 E_{Larc} は、コイル仕様 (コイルインダクタンス L 、定格電流 I_0)、運転方法 (励磁時間 T_{ex} 、貯蔵時間 T_{st})、スイッチ抵抗特性 (オン抵抗 R_{ON} 、オフ抵抗 R_{OFF})、及びアーク放電特性 (アーク維持電圧 V_A 、アーク持続時間 τ_A) に基づき評価できる。各パラメータは以下のように決定した。なお、パラメータ J_0 は、これらの決定されたパラメータから (2.2) 式の関係で定まる。

(1) コイルパラメータ 大規模 (GWh 級)・中規模 (MWh 級) SMES システムは、現在の揚水発電所に匹敵する規模であり、超伝導コイルの規模も大型となる。大規模 SMES システムには、我が国の新エネルギー総合開発機構 (NEDO) や米国の Wisconsin 大学で行われた概念設計の設計値^{(37),(38),(40)}を、中規模 SMES システムには、米国の DOD/DOE の ETM 20 MWh 計画の設計値^{(38),(40)}を用いる。これに対し、小規模 (kWh 級) SMES システムは、第1章で述べたように、これまでに米国の BPA の Tacoma 変電所で約 8 kWh の SMES システムが実際に作製されていることや、Anchorage 電力の 500 kWh SMES システムの建設計画など参考となる設計諸元が提示されている。ここでは、米国の Anchorage 電力と我が国の ISTEK の設計諸元^{(7),(12),(38),(40)}を用いる。表 2-1 にこれら SMES システムのインダクタンス L と定格電流 I_0 をまとめ、図 2-3 にその I_0 と L の関係を示す。図 2-3 中の直線は、貯蔵エネルギー $E_0 = (L I_0^2) / 2$ をそれぞれ 10 GWh、20 MWh、500 kWh 一定としたときの L と I_0 の関係を表している。同図からも明らかなように、SMES システムの大規模化は、 I_0 よりも L を増大させることで達成される傾向にある。以下の検討では、同一規模の SMES システムを L の大きさにより High- L type と Low- L type の2種類に分類した (表 2-1 の奇数番号 SMES が High- L type)。High- L type は、Low- L type と比べてコイルインダクタンスが大きく I_0 を小さくできるが、大規模 SMES システムでは、 I_0 は High- L type でも 100 kA に達する。

(2) スイッチパラメータ 機械式スイッチ本体のオン抵抗は、主に接触抵抗に依存するが、接触抵抗が殆どゼロまで低減された場合には、接触子と電流リードとの接続部の接続抵抗がオン抵抗を決定する要因となる。これらを考慮して、オン抵抗 R_{ON} は、これまでに低温環境下で測定された常伝導体及び超伝導体接触子の接触抵抗⁽⁹⁴⁾⁽⁹⁶⁾、及び超伝導接続の接

続抵抗⁽¹⁰⁴⁾⁻⁽¹¹⁴⁾の研究結果を参考に $10^{-12} \sim 10^{-3} \Omega$ とした。一方、超伝導スイッチのオフ抵抗 R_{OFF} は、磁気式・熱式の超伝導スイッチの研究結果^{(65),(72)-(75),(97)-(101)} から $1 \sim 1 \text{ k}\Omega$ とした。但し、 $1 \text{ k}\Omega$ のオフ抵抗は、通常の超伝導スイッチでは実現が困難な値である。

(3) 運転パラメータ 1日単位のロードレベリングを目的とする大規模 SMES システムでは、GW クラスの電力を 8~10 時間出力できるように設計されている⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁰⁾。そのため、残りの時間内で励磁を行うと考えると、励磁と貯蔵時間の合計は 14~16 時間になる。一方、系統安定化などを目的とした中・小規模 SMES システムでは速応性が要求され、出力時間は数秒~数分単位の短い時間である⁽¹²⁾。そのため、励磁と貯蔵時間の合計は、大規模 SMES システムよりも長くなると考えられる。しかしここでは、SMES システムの規模によらず励磁時間 T_{ex} と貯蔵時間 T_{st} の和は 16 時間一定とし、この条件下で T_{ex} と T_{st} を変化させた。

(4) アーク放電パラメータ アーク維持電圧 V_A 及びアーク持続時間 τ_A は、カウンタパルステクニックの使用を仮定し、且つ第 5 章で論じる NbTi 機械式 PCS のアーク放電特性に関する実験結果を考慮して、それぞれ 12 V、100 ms 一定とした。

2.3.2 コイルインダクタンスの影響

図 2-4 に貯蔵エネルギー E_0 で規格化した励磁及び貯蔵時のエネルギー損失 E_{Lex}/E_0 と E_{Lst}/E_0 のインダクタンス依存性を、 R_{ON} と R_{OFF} をパラメータとして (2.1)、(2.3) 式からそれぞれ計算した結果を示す。励磁時間 T_{ex} と貯蔵時間 T_{st} は共に 8 時間一定とした。インダクタンス L が大きくなるほど、 E_{Lex} は増加し、反対に E_{Lst} は減少していることから、 E_0 が大きくなるほど、あるいは、同一規模の SMES システムでは High- L type ほど、励磁損失よりも貯蔵損失が大きくなる傾向にあることがわかる。これは、 L が大きくなるほどコイルに誘起される逆起電力が大きくなるため、PCS のオフ抵抗に分流する電流が大きくなり、 E_{Lex} は増加することになる。また、 L が大きくなるほど貯蔵中の電流減衰の時定数 L/R_{ON} は増加するため、 E_{Lst} は減少することになる。

2.3.3 運転時間の影響

図 2-5 に、(2.1) 式と (2.3) 式より計算した各 SMES システムの貯蔵と励磁時のエネルギー損失比 $E_r = E_{Lex}/E_{Lst}$ を、励磁時間 T_{ex} の関数として示す。この結果は、 $R_{ON} = 10^{-9} \Omega$ 、 $R_{OFF} = 100 \Omega$ で、励磁時間 T_{ex} と貯蔵時間 T_{st} の和は 16 時間一定としたときのものである。損失比 E_r の励磁時間特性は、SMES システムの規模によらず、励磁時間あるいは貯蔵時間が 1、2 時間と極端に短い場合に急激に低下しているが、全体的にはほぼ一定で、 $T_{ex} = 8 \text{ H}$ 付近で

僅かなピーク値をもつことがわかる。一方、損失比 E_r は、SMES の規模 E_0 と特に L の増加とともに低下する傾向を示し、大規模 SMES システムや中・小規模 SMES システムの High- L type では 1 以下まで低下している。 $E_r < 1$ は、励磁時の損失が貯蔵時の損失より大きく、励磁損失が支配的となることを意味することから、図 2-5 の結果は、SMES システムの規模が大型化するほど励磁損失の抑制が重要となることを示唆している。

2.3.4 励磁損失低減の必要性と要求される機械式スイッチのオン抵抗特性

以上の結果、SMES システムの規模が増大するほど、あるいは、同一規模であればインダクタンス L が大きくなるほど、機械式スイッチの方が超伝導スイッチより有利となること示された。機械式スイッチでは、電流遮断を伴うスイッチ開放時にアーク放電による損失が発生することを考慮して、本節では更にアーク損失を考慮してスイッチ損失を検討する。なお、検討は機械式スイッチが不利となる Low- L type の SMES システムで行う。

図 2-6 (a)、(b) に Low- L type の大規模及び小規模 SMES システム (SMES2 と SMES6) のアーク損失 E_{Larc} を考慮したエネルギー損失比 $E_r^* = (E_{Larc} + E_{Lst}) / E_{Lex}$ の R_{ON} 依存性を、 R_{OFF} をパラメータとして (2.1)、(2.3)、(2.4) 式に基づき計算した結果を示す。両図での励磁時間と貯蔵時間はともに 8 時間一定とした。図中、損失比 E_r^* は、オン抵抗依存性により 3 つの領域に分類できる。領域 A と C では、 E_r^* はオン抵抗に無関係で一定である。これは、領域 A は、アークによる損失 E_{Larc} がオン抵抗による損失 E_{Lst} と比べて支配的となっているためであり、領域 C は、 E_{Lst} が E_0 と一致しており、貯蔵ができなくなるまで損失が増加したこと起因する。一方、領域 B では、 E_r^* がオン抵抗と共に増加するオン抵抗依存性を示す。

図 2-6(a) から、大規模 SMES システムでは、Low- L type であってもオフ抵抗によらず、 R_{ON} が $10^{-8} \Omega$ 以下であればアーク損失を考慮した損失比 E_r^* が 1 以下となることがわかる。この結果は、SMES2 に機械式スイッチを採用する場合、オン抵抗を $10^{-8} \Omega$ 以下に低減できれば、SMES 運転中の損失を超伝導スイッチを採用した場合より小さくできることを表している。これに対し、図 2-6(b) の小規模 SMES システムでは、オフ抵抗が 10Ω 以上の場合にはオン抵抗に関わらず E_r^* が 1 以下となることはなく、 10Ω 以下の場合に R_{ON} が $10^{-8} \Omega$ 以下であれば $E_r^* < 1$ となることがわかる。これは、領域 A における E_r^* が 1 を越えており、 R_{ON} の低減効果が損失低減に寄与しないことに起因する。このように、アーク放電による損失が大きいと、 R_{ON} を低減させても機械式スイッチを超伝導スイッチよりも優位にすることは困難となる。

この点を更に検討するため、SMES2 と SMES6 の損失比 E_r^* の遮断電流依存性を計算した。

その結果を図2-7に示す。同図から、損失比 E_r^* は、 I_B の低下、即ち E_{Larc} の低下と共に減少することが確認できる。このように、 E_{Larc} を十分抑制することができれば、 R_{ON} の低減と共に損失比 E_r^* を低下させることができ、kWh級の小規模SMESシステムにおいても、場合によっては E_r^* を1以下とできる可能性がある。

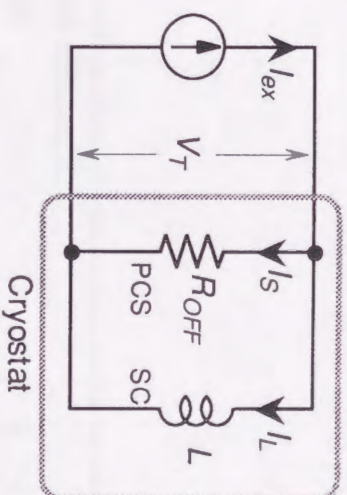
以上の結果、大規模SMESシステムでは、アーク損失を考慮しても R_{ON} を $10^{-8} \Omega$ 以下とできれば損失比は1以下となることが示された。したがって、将来SMESシステムの規模が大型化し、ロードレベリングへの応用が可能になった際には、貯蔵時の損失よりも励磁時の損失が支配的になり、 R_{ON} を $10^{-8} \Omega$ 以下とできれば機械式スイッチの方が超伝導スイッチよりも有利となる。また、この結果から、本研究で着目した機械式の永久電流スイッチ開発の必要性が認められる。

2.4 むすび

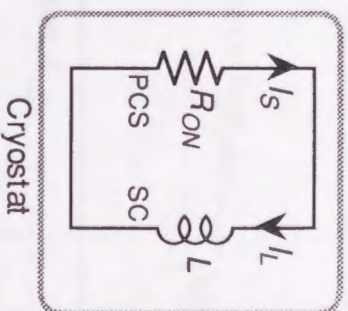
本章では、SMESシステムにおける永久電流スイッチの持つべきオン・オフ抵抗特性を明らかにするために、機械式スイッチと超伝導スイッチのオン・オフ抵抗特性に基づきコイル励磁時とエネルギー貯蔵時の損失を、SMESシステムの規模別のケーススタディを通じて定量的に比較検討した。更に、機械式スイッチ開放時に発生するアーク放電による損失を考慮して、機械式スイッチと超伝導スイッチの損失比を考察し、特に大規模SMESシステムでは機械式の永久電流スイッチが優位となることを明らかにした。本章の主な結果を以下に記す。

- (1) 超伝導スイッチを用いたSMESシステムでは、励磁時のエネルギー損失は、オフ抵抗が低下するほど、またコイルインダクタンスが大きいほど増加する。一方、機械式スイッチを用いたSMESシステムでは、貯蔵時のエネルギー損失は、オン抵抗の低下及びコイルインダクタンスの増加と共に低下する。
- (2) 貯蔵規模別の励磁損失に対する貯蔵損失のエネルギー損失比を考察した結果、(1)の結果から示唆されるように、規模及びインダクタンスの増加と共に損失比は低下した。特に、大規模SMESシステムでは、Low-L typeにおいてもその比は1以下となり、励磁損失が支配的となる結果が示された。

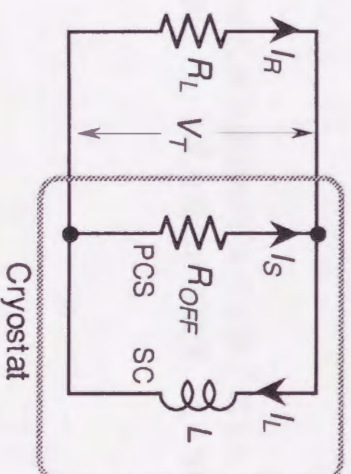
- (3) アーク損失を考慮しても、オン抵抗を $10^{-8} \Omega$ 以下にできれば(2)の結果が成立することがわかった。この結果は、将来 SMES システムの規模が大型化し、ロードレベリングへの応用が可能になった際には、オン抵抗による貯蔵時の損失よりもオフ抵抗による励磁時の損失が支配的になり、エネルギー効率の点では、機械式スイッチの方が超伝導スイッチよりも有利となることが明らかとなった。
- (4) 機械式スイッチでは、アーク損失が過大となると、オン抵抗を小さくして貯蔵効率を低下させても超伝導スイッチよりも全損失が大きくなる場合があり、アーク損失の抑制を図ることも重要である。



(a) コイル励磁 (PCS:OFF)



(b) エネルギー貯蔵 (PCS:ON)



(c) エネルギー転送 (PCS:OFF)

図 2-1 損失計算に用いた SMES システムの等価回路

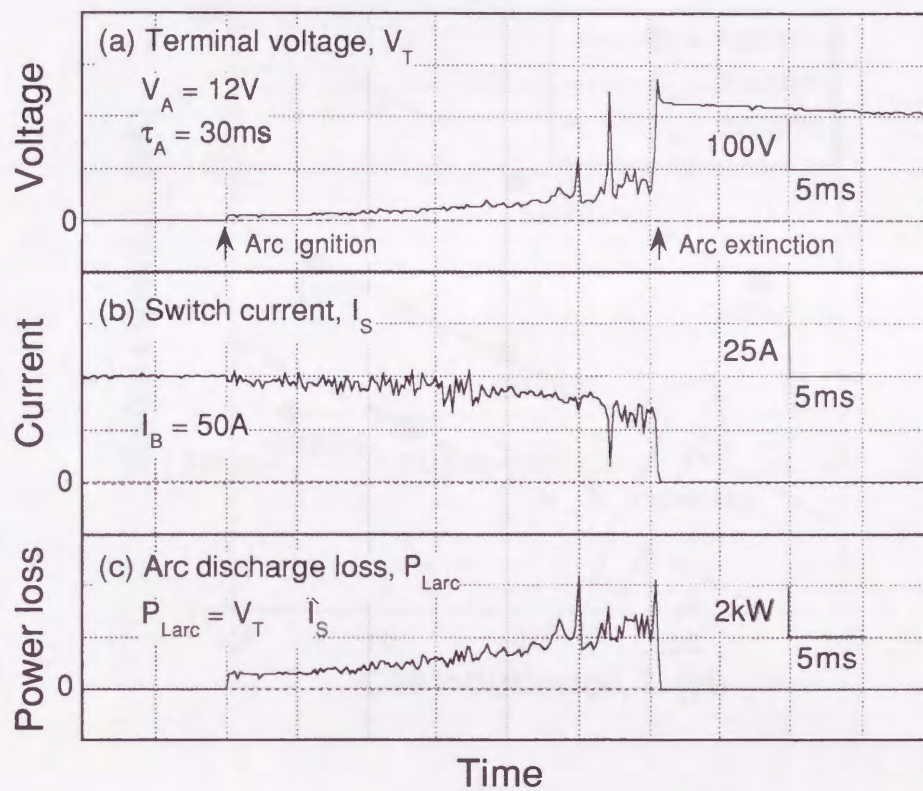


図 2-2 NbTi 機械式 PCS 開放時のコイル端子電圧とスイッチ電流の測定波形とアーク電力損の計算結果 ($I_B = 50 A$)

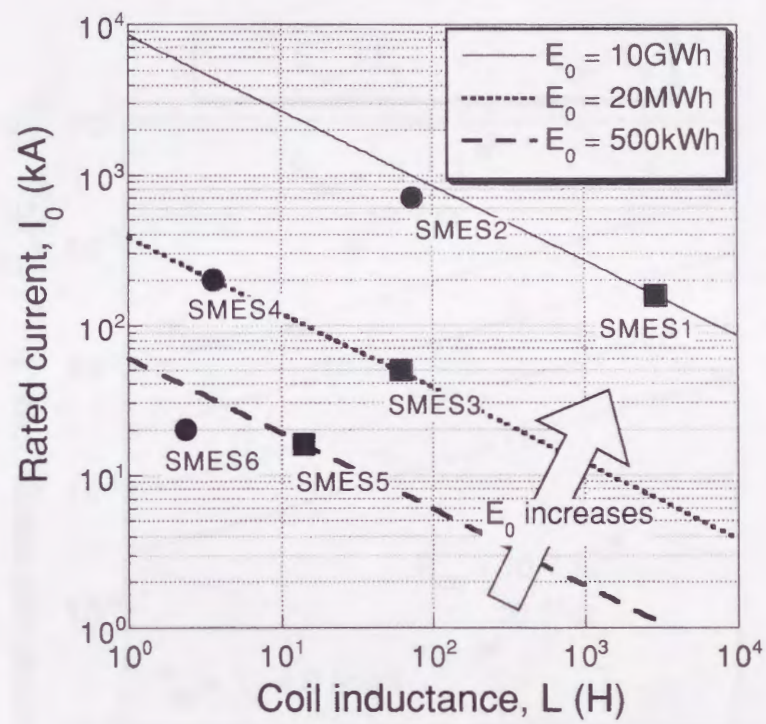


図 2-3 表 2-1 中の各 SMES システムのコイルインダクタンスと定格電流の関係

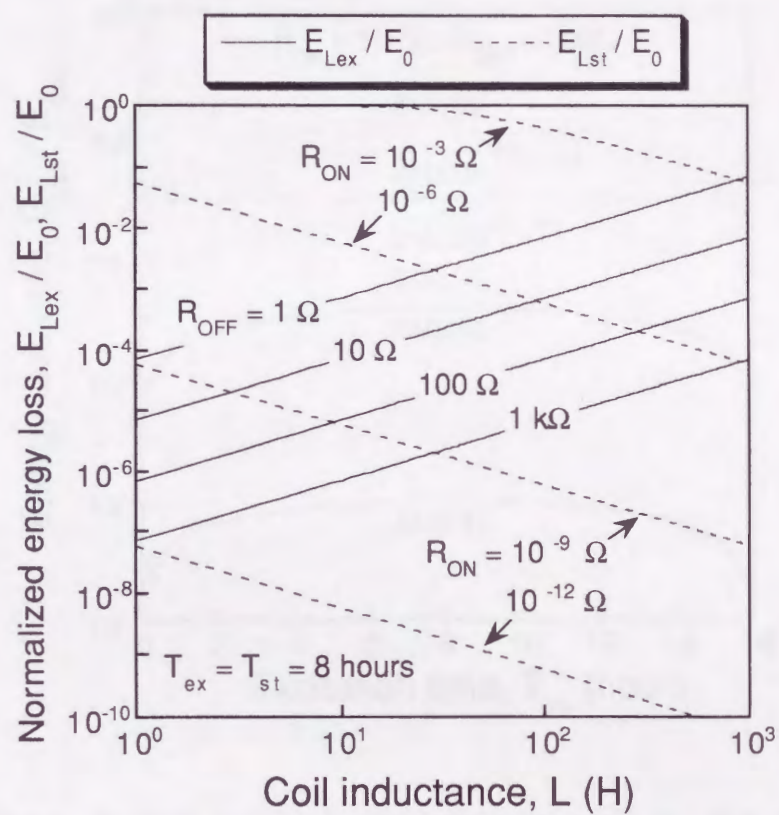


図 2-4 R_{ON} と R_{OFF} をパラメータとした励磁及び貯蔵時のエネルギー損失のインダクタンス依存性

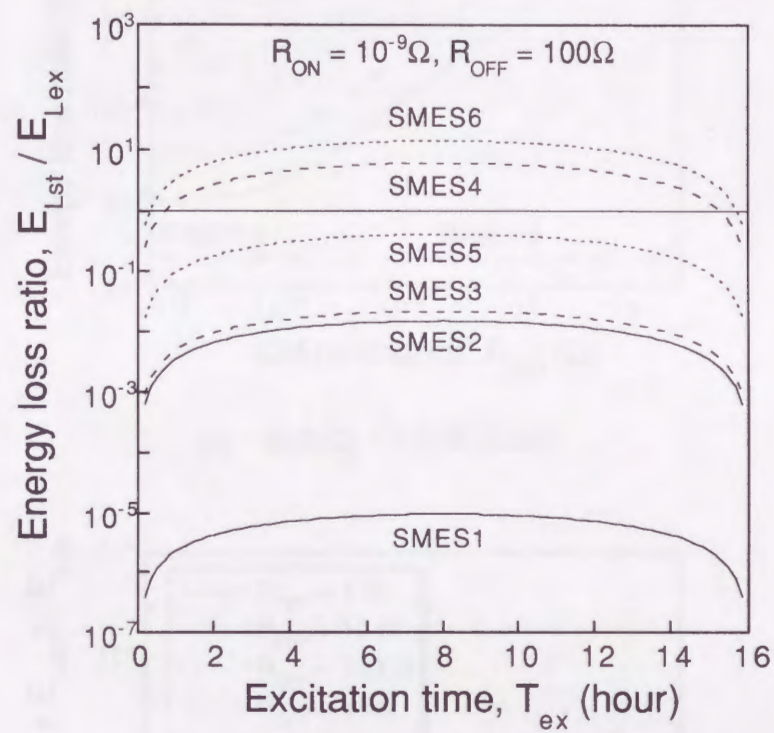
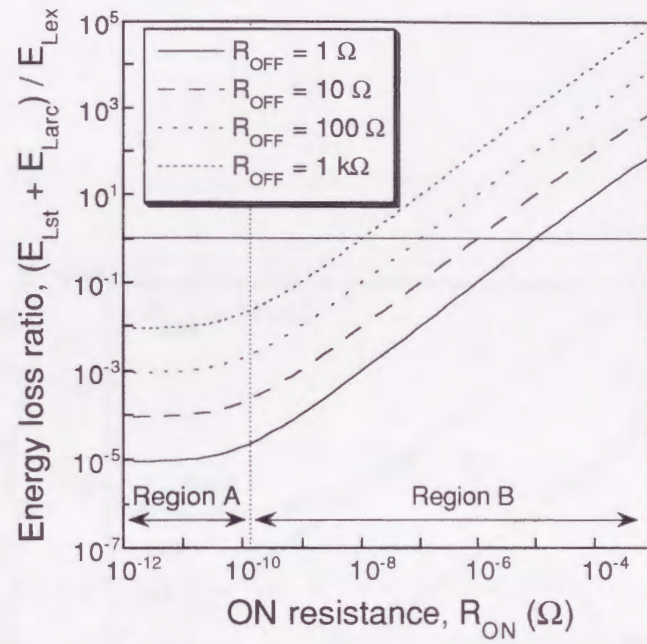
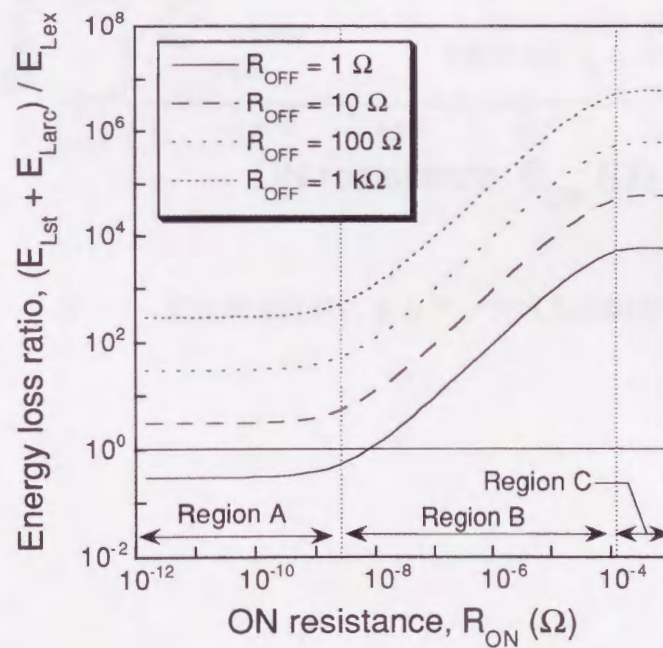


図 2-5 各 SMES システムの貯蔵と励磁時のエネルギー損失比



(a) SMES2 (大規模 SMES)



(b) SMES6 (小規模 SMES)

図 2-6 アーク損失を考慮したエネルギー損失比

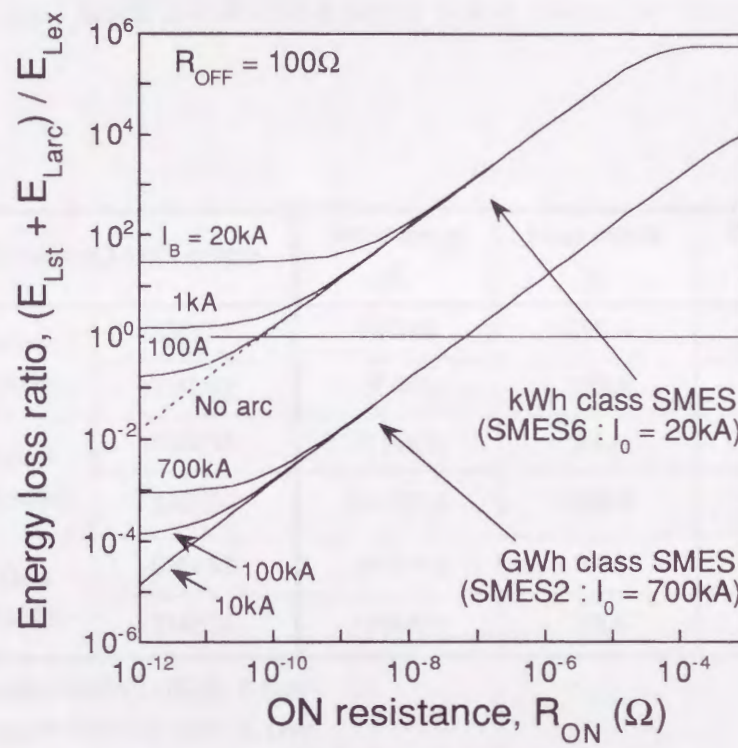


図 2-7 遮断電流低減によるアーク損失抑制効果

表 2-1 損失計算に用いた各 SMES システムのコイルパラメータ

Classification of SMES system		Stored energy E_0	Rated current I_0	Coil inductance L
GWh class (Large-scale)	SMES1	10GWh	157kA	2921H
	SMES2	5GWh	700kA	73.5H
MWh class (Middle-scale)	SMES3	21MWh	50kA	61.2H
	SMES4	20.4MWh	200kA	3.67H
kWh class (Small-scale)	SMES5	500kWh	16kA	14.1H
	SMES6	133kWh	20kA	2.4H

Odd number SMES's : High - L type

Even number SMES's : Low - L type

第3章

機械式PCSの構造と 実験装置構成の概要

3.1 まえがき

第1章で述べたように、SMESシステムの実現には、永久電流スイッチ(PCS)の開発をはじめ、要素技術の確立が必要とされる。PCSの開発課題としては、コイル定格電流をクエンチなしに通電できるスイッチ容量や第2章で検討したSMES運転時に要求されるオン・オフ抵抗特性を実現すること、ならびに極低温環境下で安定に且つ高い信頼性を維持して機能する動作保証などが挙げられる。

本論文で検討する接触子にNbTiバルクを使用したNbTi機械式PCS実験装置は、これらの点を考慮し、主として以下に記す4要件を満足するように設計・製作した。

1. 液体ヘリウム環境下で確実に動作すること。
2. クエンチ電流特性に及ぼす外部磁界やアーク放電の影響、あるいはPCS並列接続時のクエンチ特性等を検討するための実験機器の設置ができること。
3. 大電流(クエンチ特性)・高電圧(アーク放電特性)の測定、及び接触部周辺の様子が観測できること。
4. 3.と共に熱侵入の低減を図り、液体ヘリウム蒸発量を抑制すること。

特に、アーク放電実験では、アーク放電による液体ヘリウムの蒸発とそれに起因してクライオスタット内の圧力上昇が考えられるため、クライオスタット容器、特に観測窓が破損しないように注意を払った。

本章では、まず本研究で製作した機械式PCSの構造と動作機構を説明し、次に同PCSの主要な構成要素である接触子について述べる。更に、実験装置全体の構成を簡単に述べる。

3.2 機械式 PCS の構造

本章以降で使用する「機械式 PCS」は、接触抵抗をゼロまで低減でき永久電流スイッチとして機能する機械式スイッチを指す。なお、接点の超伝導化達成に関する議論は、第4章で行う。

3.2.1 接触子駆動機構

図3-1に本実験に使用した機械式 PCS の駆動機構の概略図を示す。また、図3-2に接触子付近の写真を示す。機械式 PCS は、大地に対して垂直に配置された上下2つの接触子から成り、両接触子はクライオスタット内に設置され、大気圧沸騰状態の液体ヘリウムで4.2 K に浸漬冷却される。上部接触子は可動子であり、下部接触子は固定子である。可動子は、クライオスタット外部のガスシリンダーとステンレス製のプッシュ・プルロッドを介して接続されており、スイッチの開閉は、可動子をガスシリンダーで上下に駆動することで行われる。ガスシリンダーとプッシュ・プルロッドの接続部には荷重測定用のロードセル(NTS Co. Ltd, LCL-M-200K)が取り付けられており、スイッチ開閉のためのスイッチ駆動力 F_c 、及びスイッチを閉じた後に接触子同士を押しつけるスイッチ荷重 F_p を測定できる。 F_c と F_p はそれぞれ、シリンダー内のガス圧を調整することで最大1960 Nまで変化できる。スイッチ開放時のギャップ長は標準で16 mmとした。

3.2.2 接触子

(1) 形状 実験には形状の異なる3種類の接触子(A、B、C)を使用した⁽¹¹⁵⁾。図3-3に各接触子の外観と仕様をまとめて示す。各接触子は、直径16 mmの円柱状バルクNbTiを長さ約3~5 cmのロッドに切り分け、旋盤でそれぞれの形状に整えたあと接触面を後述(2)に示す方法で仕上げて作成した。以下、接触部をマクロに見た場合の接触子形状によるみ決定される見かけの接触面積を「マクロ接触面積 S_{max} 」と呼ぶ。標準接触子として用いた接触子A(長さ31 mm、直径16 mm)は、平面对平面の面接触($S_{max} = 201 \text{ mm}^2$)である。一方、接触子B(長さ50 mm、直径9 mm)は、平面对半球(曲率半径4.5 mm)の点接触であり、 S_{max} は理論的には零である。接触子Cは、接触子Aと同一のバルク寸法であるが、水平面に対して約60度のテーパを付けた先端が円錐状の可動子が、同じテーパのすり鉢状の凹部を持つ固定子に組み合わされた面接触で、接触子Aの約2倍の S_{max} ($= 418 \text{ mm}^2$)を有する。

(2) 接触面性状 接触面の粗度及び酸化膜の影響を検討するため、以下の方法で接触子

を準備した。

接触面の粗度は接触面の仕上げ方法に影響を受ける。接触面は、# 2000番の耐水ペーパーで回転研磨機により研磨したあと、更に金属研磨剤(ピカール)で研磨して仕上げた。回転研磨機を使用することで、手研磨で仕上げた場合と比べて接触面上のうねりが低減され、スイッチ個体差による特性のばらつきが抑制された^{(116),(117)}。以下では、以上の方法で最大粗さ1 μm 以下に仕上げられた接触子を「鏡面仕上げ」、同接触子を# 320番の耐水ペーパーで再研磨したものを「粗面仕上げ」と呼ぶ。図3-4と図3-5にそれぞれ鏡面及び粗面仕上げを行った接触子Aの実験前の接触面状態を、表面粗さ測定器(KOSAKA Laboratory Ltd., SE1700)及びScanning electron microscope (SEM)で観測した結果を示す。両図に示されるように、粗面と鏡面仕上げでは接触面の状態が明らかに異なるが、粗面仕上げの場合でも最大粗さは10 μm 以下である。また、セミマクロに接触面表面を見ると、中央部が約30 μm 程度凸状に盛り上がっていることがわかる。この盛り上がりは、手研磨の場合、200 μm 程度と更になくなることを確認されており、スイッチ個体差のばらつきは、このようなセミマクロな形状にも依存していると思われる^{(116),(117)}。

接触面上の酸化膜は、接触子を室温大気中300度のホットプレート上で10分間以上加熱して形成させた。酸化膜厚の測定は行っていないが、(1)接触面が変色したこと、(2)室温における接触抵抗が10~100 $\text{m}\Omega$ オーダーと処理前より1~3桁上昇し、通電電流に対してオーミックな特性を示さなかったこと、の2点から酸化膜の形成を確認した^{(116),(117)}。なお、通常は接触子に以上の加熱処理を施すことはなく、接触面仕上げを終えた接触子は、エタノールで脱脂した後直ちにガス窒素あるいは液体窒素で充填したクライオスタット内に設置し、大気中での酸化を最小限に抑えるように注意した。

3.3 実験装置の構成

実験には、目的に応じて2種類のクライオスタットA、Bを使用した。何れのクライオスタットでも、機械式PCSのクエンチ電流等に関する基礎特性は同様に測定できるが、駆動できるPCSの数や設置できる実験機器に相違があり、実施できる実験内容が異なる。表3-1に両装置の仕様と特徴をまとめ、以下にその概要を述べる。なお、両装置を用いた実験回路の詳細は、該当するそれぞれの章で説明する。

3.3.1 クライオスタットA (シングルPCSシステム)

図3-6にクライオスタットAの内・外部を撮影した写真を示し、図3-7にその構造図を示す。本装置で駆動できるPCSは1組であるが、クライオスタット下部には1Hの超伝導コイル⁽⁷²⁾が設置されている。そのため、接触子をコイルボア内に設置することで機械式PCSのクエンチ電流の縦磁界特性を測定できる(第4章)⁽¹¹⁸⁾。一方、図3-7に示すように、接触子をコイルが発生する磁界の影響が無視できる位置に配置して、接触子を超伝導コイルと外部の負荷抵抗に並列に接続することで、NbTi機械式PCSのアーク放電特性とアークがクエンチ電流特性に及ぼす影響を調べることもできる(第5章)^{(102),(103)}。クライオスタット側面には観察窓が取り付けられており、機械式PCSのクエンチ後、あるいはスイッチ開放によるアーク放電発生前後の液体ヘリウム中の接点周囲の様子を直接観測することができる⁽¹⁰²⁾。

3.3.2 クライオスタットB (マルチPCSシステム)

図3-8にクライオスタットBの外観と内部を撮影した写真を示し、図3-9にその構造図を示す。基本的な構造はクライオスタットAと同様であるが、本装置は最大4組のPCSを駆動することができる。そのため、本装置では、4組までのPCSを並列接続して並列PCS回路のクエンチ特性を検討することができ(第6章)^{(119),(120)}、一つのロッド先端に接触子の代わりに永久磁石を装着することで、他のロッドで駆動されるPCSのクエンチ電流の横磁界特性を測定することもできる(第4章)⁽¹²¹⁾。なお、液体ヘリウム蒸発量の抑制とそれによる実験時間の延長を計るため、本装置には観測窓は設けられていない。

3.4 むすび

本章では、本研究で製作した機械式PCSの構造とそのスイッチング機構を記述すると共に、実験に使用する3種類の接触子形状とその接触面粗度について説明した。更に、実験の用途により使い分けられた機械式PCSを設置する2種類のクライオスタット装置の概要を述べた。

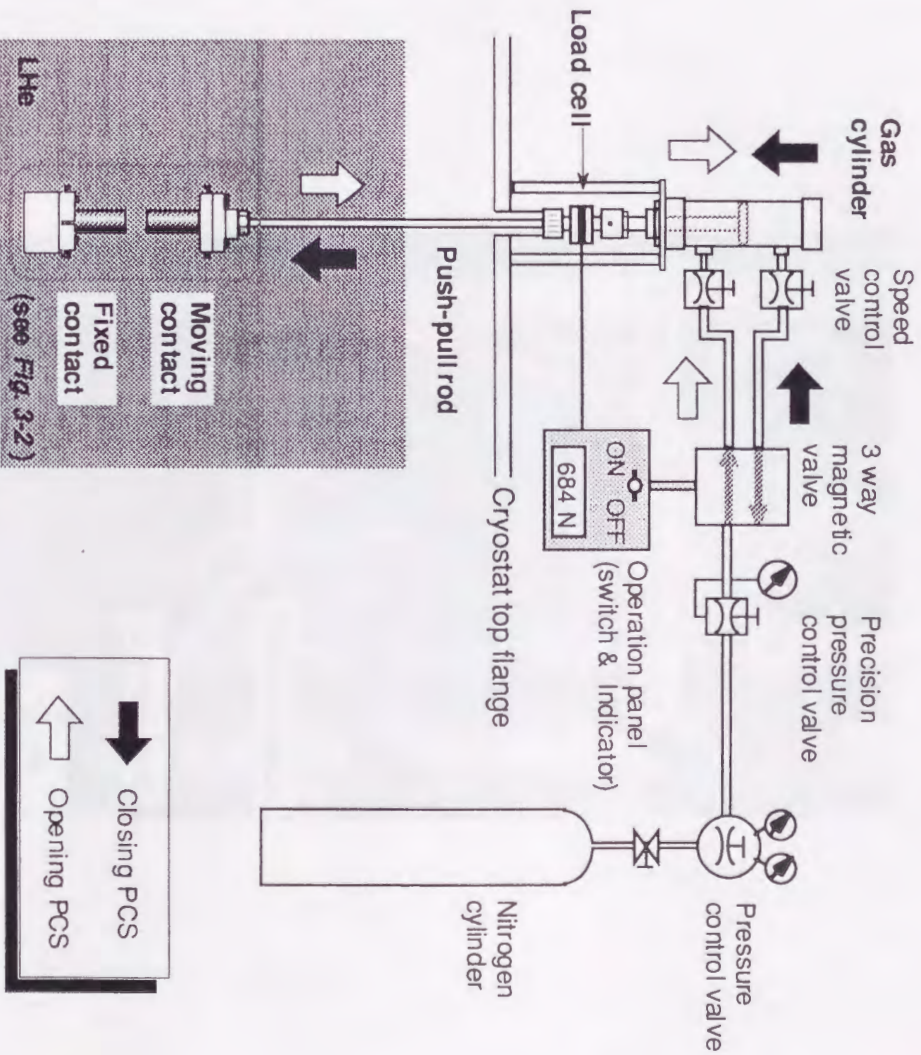


図 3-1 機械式 PCS の駆動機構

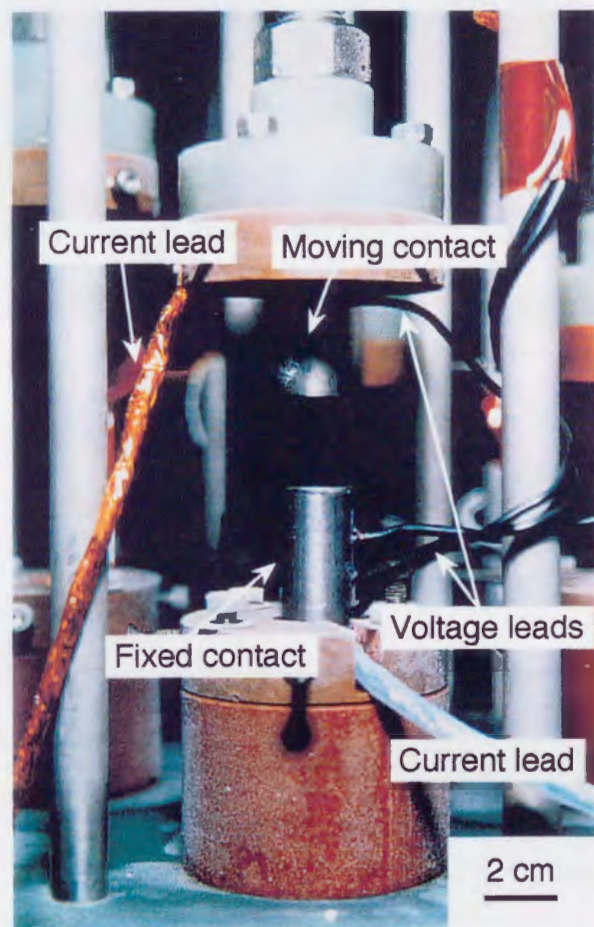
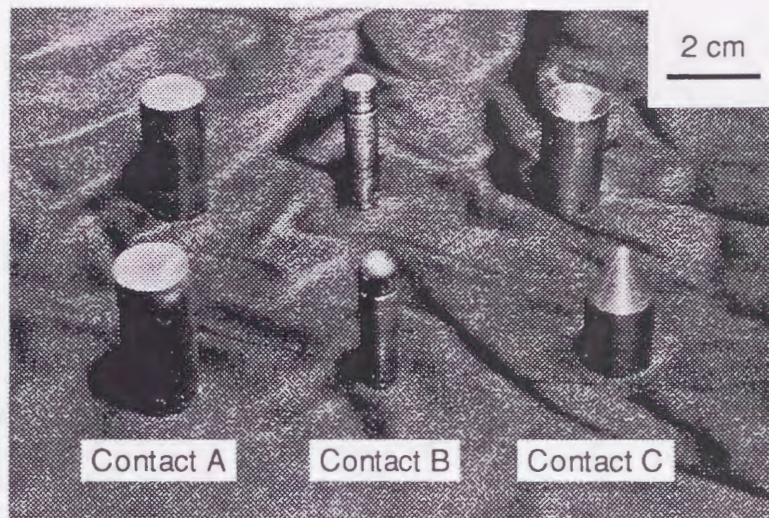


図 3-2 機械式 PCS の接触子構造（開放状態）

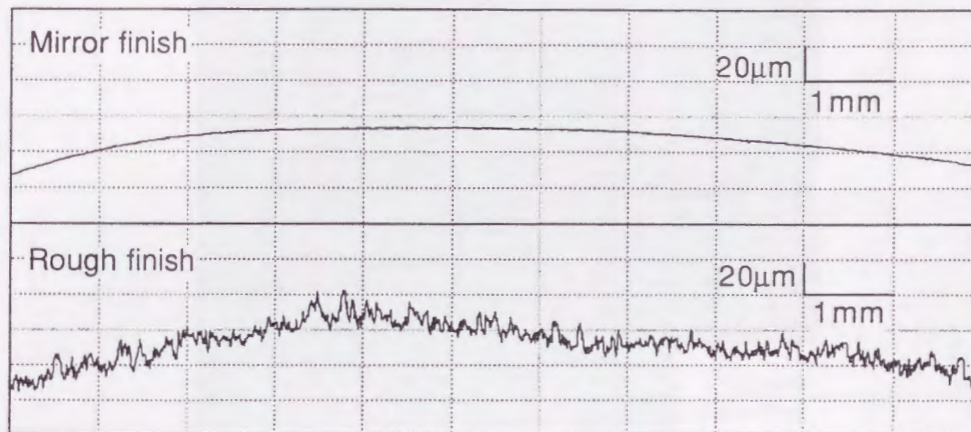


(a) 外観

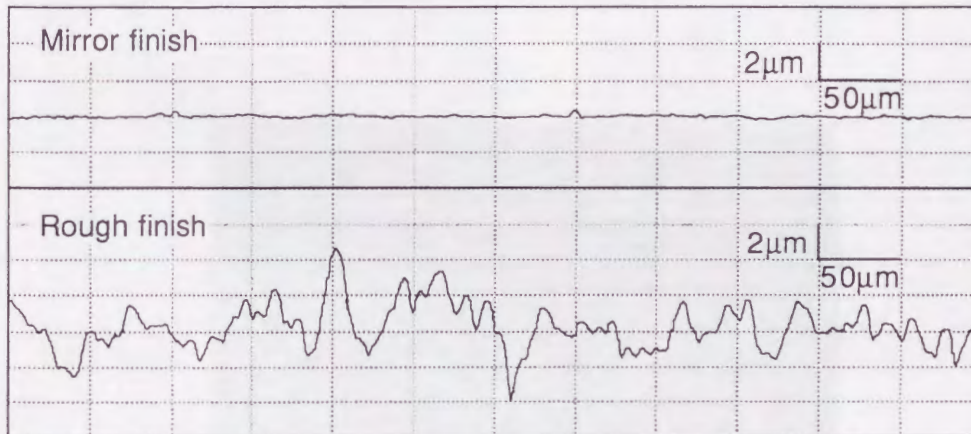
(b) 仕様

Type	A (standard contact)	B	C
Material	NbTi bulk	NbTi bulk	NbTi bulk
Contact shape	Plane	Hemisphere & Plane	Tapered plane
Size	$\phi = 16 \text{ mm}$ Height = 31 mm	$\phi = 9 \text{ mm}$ Height = 35 mm Curvature rad. = 9 mm	$\phi = 16 \text{ mm}$ Height = 31 mm
S_{max}	201 mm ²	-	418 mm ²
Surface treatment	Rough finish Mirror finish	Mirror finish	Mirror finish

図 3-3 実験に使用した各種接触子の形状と仕様



(a) 全体図

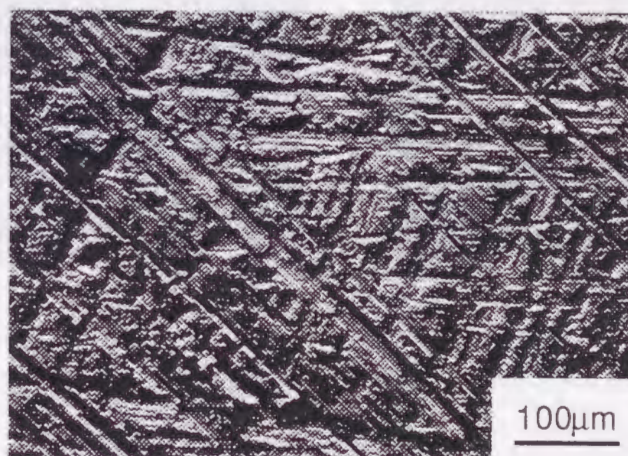


(b) 一部拡大図

図3-4 鏡面及び粗面仕上げを施した接触面の表面プロファイル



(a) 鏡面仕上げ

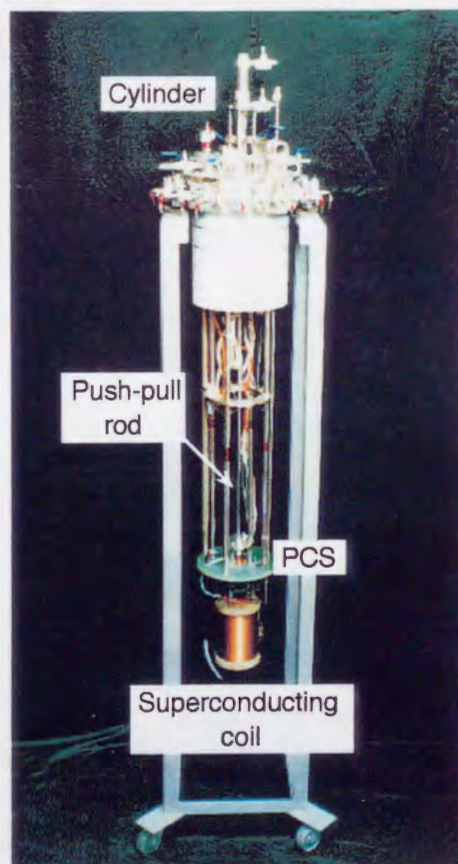


(b) 粗面仕上げ

図 3-5 鏡面及び粗面仕上げを施した接触面表面の SEM 観測写真



(a) 外観



(b) 内部インサート

図 3-6 クライオスタット A の内・外部

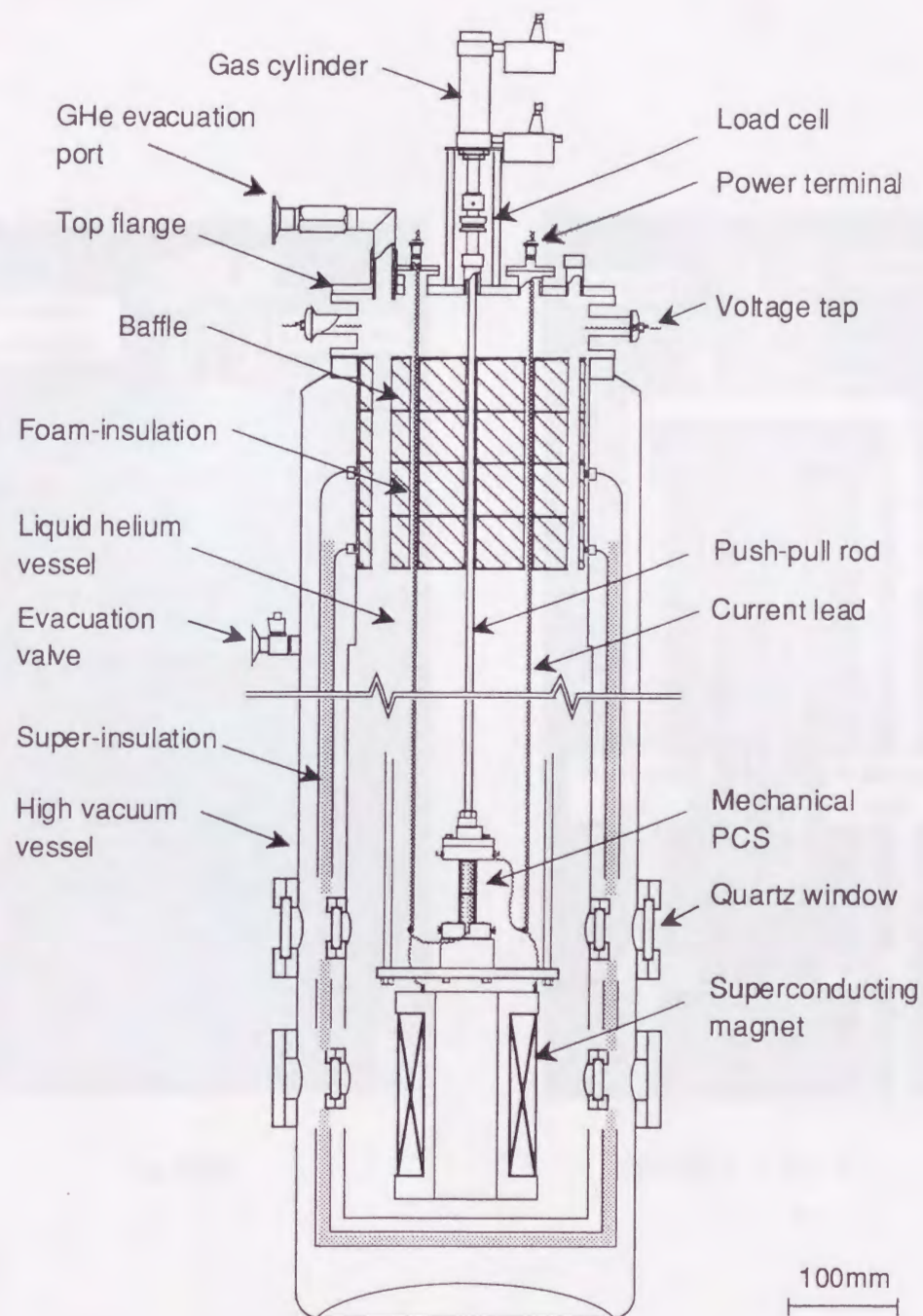
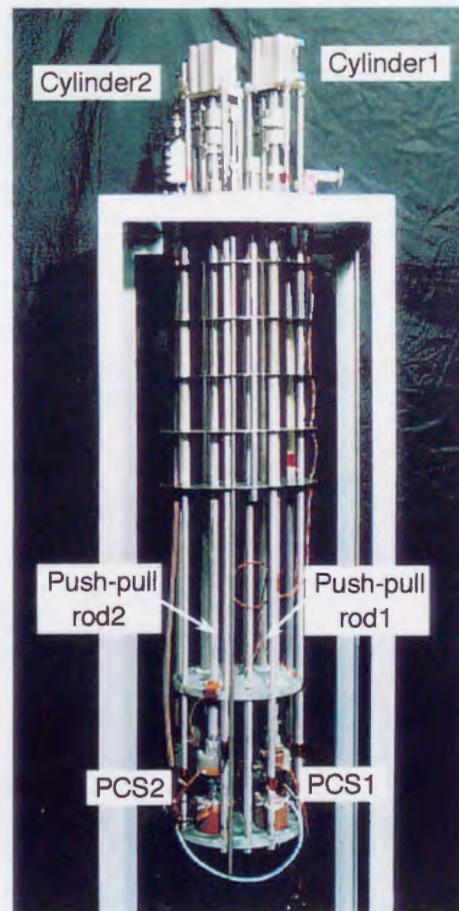


図 3-7 クライオスタット A の内部構造



(a) 外観



(b) 内部インサート

図 3-8 クライオスタット B の内・外部

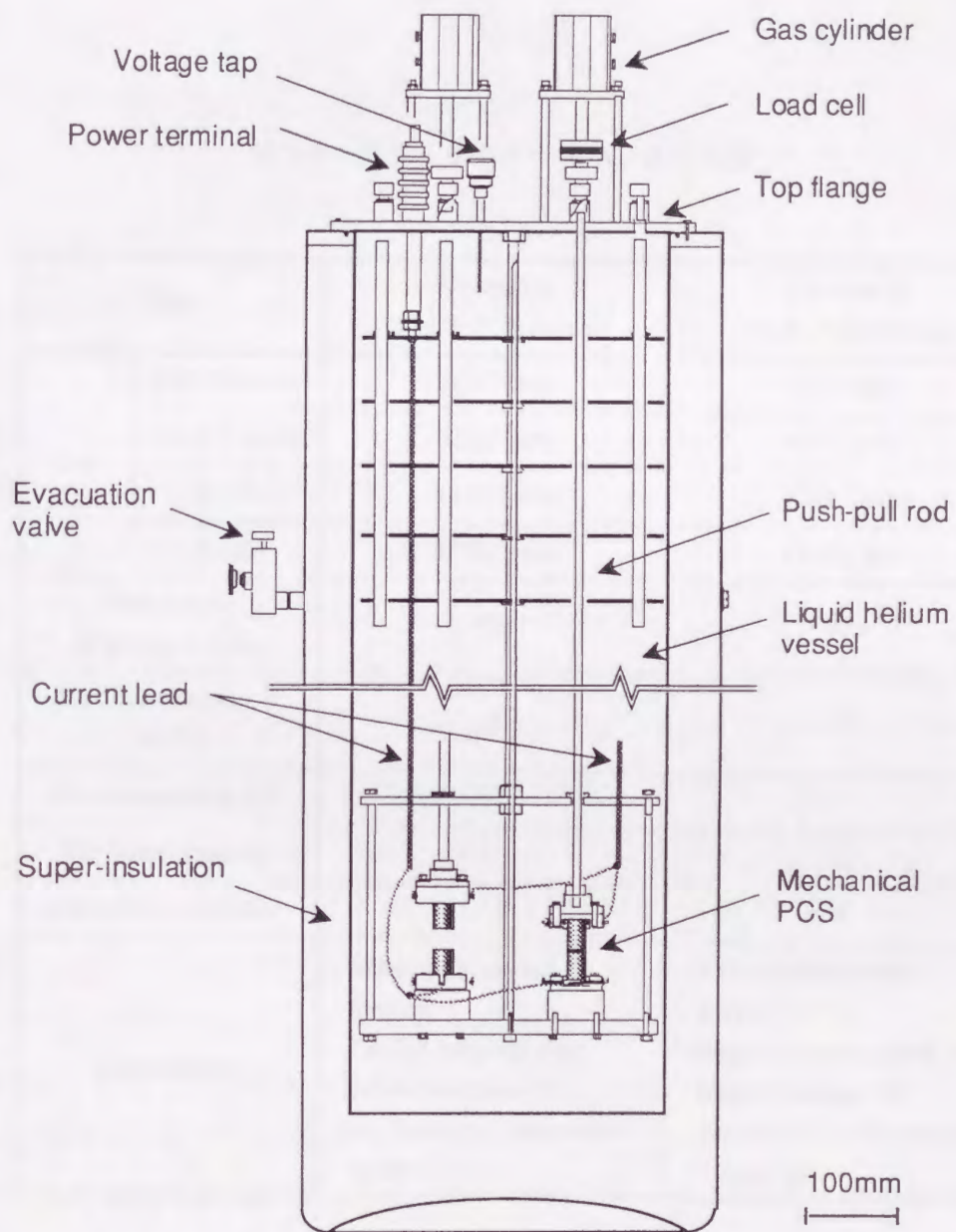


図 3-9 クライオスタット B の内部構造

表 3-1 クライオスタット A、B の仕様

Type		Cryostat A (Single PCS system)	Cryostat B (Multi PCS system)
Size	Inner diameter	266.7 mm	301.5 mm
	Outer diameter	381.0 mm	457.2 mm
	Depth	1371.6 mm	1219.2 mm
	Height	1750.0 mm	1515.7 mm
Inner volume (Capacity of LHe)		50 l	80 l
Maximum number of PCS's		1	4
Superconducting coil		○	×
Permanent magnets		×	○
Observation windows		○	×
Experiments		- Basic characteristics (chapter 4) - Parallel magnetic field property (chapter 6) - Arc discharge characteristics (chapter 5)	- Basic characteristics (chapter 4) - Perpendicular magnetic field property (chapter 4) - Parallel PCS's characteristics (chapter 6)

第4章

機械式スイッチ接点の超伝導化と NbTi 機械式 PCS の基礎特性

4.1 まえがき

機械式スイッチのオン抵抗は、主に接触子のバルク抵抗とその接触部の接触抵抗で構成される。接触子に超伝導体を使用することでバルク抵抗はゼロまで低減できるため、機械式の PCS を達成できるかどうかは、接触抵抗をゼロにできるかという問題に帰結する。第1章で述べたように、1960年代の後半から1970年代の中頃にかけて、機械式スイッチの接触抵抗の低減を目的とした研究が実施されており^{(43),(44),(51),(83)-(87)}、接触抵抗が消滅したとの報告や200Aを越える臨界電流が達成された等の興味深い報告が行われている^{(43),(44),(51)}。しかしながら、接点の超伝導化を示す詳細なデータの提示はなく、特にその形成機構に関する検討は殆ど行われていないため、接点を超伝導化するための条件が明らかとなっていない。また、接触子の形状や性状、あるいはスイッチを繰り返し開閉した場合などに関する検討も行われておらず、機械式 PCS の設計指針を確立するためには、これらの特性を検討して明らかにする必要がある。

本章では、接触子に超伝導体 NbTi バルクを用いた機械式スイッチの接触抵抗特性を液体ヘリウム中で実験により調べた。その結果、接点のクエンチによるものと思われる接触抵抗の超伝導から常伝導への「転移現象」^{(115),(116),(117),(122),(123)}が観測されたので、転移現象の基礎的な特性と転移が発生する臨界電流の磁界依存性を実験により詳細に調べ、接点の超伝導化達成を検討した。次に、接点の超伝導化が達成された NbTi 機械式 PCS のクエンチ電流特性を、接触子形状及び接触面性状の影響、およびスイッチ開閉回数やスイッチ駆動力に着目して調べた。最後に、これらの結果に基づいて超伝導接点接続形成機構をモデル化し、その理論的解析を行うと共に、一般的な NbTi の臨界電流密度の磁界依存性 ($J_c - B$ 特性) と

比較検討することで接点の超伝導化の妥当性を定量的に検証した。

4.2 実験装置の構成と実験方法

4.2.1 クエンチ電流の測定

機械式 PCS のクエンチ電流は、接点のクエンチにより接触抵抗が発生したときのスイッチ電流と定義される^{(116),(117)}。一般に接触抵抗の測定には、通電電流と電圧降下より求める4端子法^{(89),(114)}や超伝導コイルと閉回路を構成し電流減衰の時定数から求める減衰率法^{(105),(106)}などが用いられる。本研究では、クエンチ電流の確定を目的として接触抵抗を測定するため、4端子法を採用した。4端子法は、繰り返しスイッチ開閉を行う場合にも短時間で容易に測定が行える利点がある。

図4-1にクエンチ電流測定の回路構成を示す。直流電流電源から供給されるスイッチ電流を約 1 A/s で緩やかに増加させ、電圧を次の方法で測定しクエンチ電流を決定した。各接触子側面には 3 本の電圧測定用リードが軸方向一列に等間隔にセラソルザ (ASAHI GRASS Company, #297) で取り付けられており、接触面を挟む互いの電圧リードで接触抵抗を、各接触子の残りの 2 本の電圧リードでそれぞれのバルク抵抗を測定できる。各電圧は最小電圧感度 0.1 μV のデジタルボルトメータ (IWATSU, VOAC751) 及びデジタルストレージスコープ (Tektronix, TD540A) を使用して測定した。接触抵抗を測定するための電圧リードは接触面から約 1 cm 離して取り付けであり、本実験におけるクエンチ電流決定の電界基準値はほぼ 0.05 $\mu\text{V}/\text{cm}$ となる。なお、スイッチ電流はクライオスタット外部の電流リードに取り付けられたデジタルクランプテスター (HIOKI, 3265) で測定した。

電流リードは接触子底面に直接接続してあるが、接続が不十分であるとリード線接続部の接触抵抗によるジュール発熱によってバルクが熱的にクエンチすることがあったので^{(116),(117)}、電流リードの取り付けには注意を払った。

4.2.2 磁界依存性の測定

スイッチ電流が流れる方向、即ち接触子の軸方向に対して垂直に印加される磁界を「横磁界」、並行に印加される磁界を「縦磁界」とする。縦磁界の印加には、インダクタンス 1 H の超伝導ソレノイドコイル⁽⁷⁾を用いた。一方、横磁界は、ヨークに取り付けたサマリウム-コバルト系焼結磁石 (TDK Corporation, REC-32A) を用いて印加した⁽¹²¹⁾。

(1) 縦磁界実験 図4-2にクライオスタット A 内に設置された縦磁界実験の装置構成を

示す。接触子は超伝導コイル内部の中心軸上に配置され、スイッチ電流はコイルが発生する外部磁界と平行に流れる。接触子位置の磁界強度(磁束密度 B)を液体ヘリウム中でGaAs系ホールプローブ(TOSHIBA, THS102A)を用いて測定した結果と数値解析の結果から、接触面上の磁界強度は殆ど一定であることを確認した。印加磁界強度はコイル通電電流により調整される。コイル電流を通電しないときを「ゼロ磁界」と呼び、このときのクエンチ電流を I_{TB0} とする。

縦磁界実験は、設定した磁界強度を印加した後にスイッチ電流を通電してクエンチ電流を測定するクエンチ電流特性と、一定のスイッチ電流通電下で印加磁界をクエンチが発生するまで増加させて測定する臨界磁界 B_c 特性の2つを、 I_{TB0} を変化させて調べた。なお、各 I_{TB0} に対する測定中は、スイッチは一定の荷重 F_p で閉じたままで開放はしない。表4-1(a)に実験に使用した接触子の各テストの I_{TB0} をまとめる。

(2) 横磁界実験 クライオスタットB内に設置された横磁界実験の装置構成を図4-3(a)、(b)に示す。同図(b)は正面から、同図(b)は上面から見た配置である。接触子と磁石は、スイッチ電流が磁石によって発生する外部磁界に対して垂直になるように配置してある。同図(b)に示されるように、下部固定子の接触面中心を原点($x=y=z=0$)として、磁石はまずこの原点にギャップ中心が一致するように設置される(以下、この位置を磁石の初期位置と呼ぶ)。図4-4に、初期位置にある磁石ギャップ間の $y=0$ における x 及び z 軸方向の磁界分布を、接触子を取り外した状態で、液体ヘリウム中でホールプローブを用いて測定した結果を示す。図4-4から明らかなように、磁石を x 軸方向に移動させることで、固定された接触子に印加する磁界強度 B を変化できる。一方、移動距離 x による B の変化は縦磁界実験の場合とは異なり、接触面上の位置により磁界強度は異なることを意味する。磁石を接触子から最も遠ざけた場合にも、接触子位置の磁界強度は完全にゼロにはならないため、横磁界では縦磁界で定義した I_{TB0} の代わりに、実験中の最低の印加磁界強度における I_T を I_{TB0}^* として用いる。

横磁界実験では、クエンチ電流の磁界依存性のみを I_{TB0}^* を変化させながら調べた。表4-1(b)に実験に使用した接触子の各テストの I_{TB0}^* をまとめる。なお、 I_{TB0} と I_{TB0}^* の最大値は、それぞれ10 Aと200 Aとした。これらは、各実験に使用した直流電流電源の最大供給電流値によって制限される値である。

4.3 実験結果

4.3.1 接点の超伝導化を示唆する現象

(1) 接点のクエンチ 図4-5 (a) に液体ヘリウム (4.2 K) 及び液体窒素 (77 K) 中で測定した接触抵抗とバルク抵抗の通電電流依存性の典型的な例を示す。77 K では、バルク抵抗と接触抵抗は共に通電開始とともに観測されているが、4.2 K では、通電開始後の低電流領域では、両抵抗とも測定限界以下である。4.2 K において、スイッチ電流を更に増加すると、ある臨界電流値 (同図では 20 数 A) に達すると $10^{-3} \Omega$ オーダーの接触抵抗が突然発生する現象が観測された^{(115),(116),(117),(122),(123)}。本論文では、同現象を「転移現象」と呼び、その臨界電流値を I_T 、発生した接触抵抗を R_C とする。図4-5 (b) に転移の瞬間の接触抵抗とバルク抵抗の時間変化を示す。同図からわかるように、接触抵抗は数 10 μs の非常に速い立ち上がりを示している。一方、バルク抵抗は接触抵抗の発生と同時に一旦出現しているが、数 μs 以内に再びほぼゼロに低下している。この状態から更に電流を増加すると、バルク部でも接触部と同様の転移現象が発生しバルク抵抗が観測されるようになった(図4-5(a))。発生したバルク抵抗は R_C より 2 桁程度小さく、接触子の形状と NbTi の臨界温度における抵抗率 $5.6 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ^{(46),(62)} を用いて計算した理論値とほぼ一致した。転移後の接触抵抗特性は、図4-6 (a) に示されるように、通電電流に対してヒステリシスを示し、通電電流を I_T 以下としても直ちには測定限界以下まで低下しない。転移現象は確率的に発生する現象ではなく、開閉を繰り返した場合でも測定の度に観測された。特に、スイッチを閉じたままの状態を測定を繰り返す場合、転移後に更に大きな電流を通電しない限りは、 I_T と R_C は共に一定値を示した。また、図4-6 (b) に示すように、接触子が液体ヘリウム液面から露出すると、その他の条件は同一であるにも関わらず、 I_T ならびにバルク抵抗が発生する電流値は、どちらも低下することが確認された。

以上の結果と、接触子材料 NbTi は、4.2 K では超伝導状態であるが、77 K では超伝導状態にはならないこと、ならびに転移後にはスイッチ接触部からジュール発熱によるものと思われる気泡の発生が認められたこと等を考慮すると、転移現象はスイッチ接点の超伝導-常伝導間の相転移(クエンチ)に起因する現象であると考えられる。以下では、先に「臨界電流」と定義した I_T を「クエンチ電流」と再定義する。

(2) クエンチ電流の磁界依存性 超伝導体に磁界が印加されると、クエンチ電流はその材料固有の臨界電流密度の磁界依存性 ($J_c - B$ 特性) に従い低下することが知られている^{(35),(46),(124)-(128)}。転移現象が接点のクエンチ現象であるならば、臨界電流 I_T は磁界依存性を示し、その特性は接触子材料 NbTi の $J_c - B$ 特性と一致することが予想されるので、次にその磁界依存性を検討した。

(a) 縦磁界下の特性 図4-7 (a) に I_T の縦磁界依存性を示す。同図は、同一の接触子 Aa を用いて測定しており、各 I_{TBO} は一定のスイッチ駆動力とスイッチ荷重で開閉を行うことで増加させている(表4-1(a))。どの I_{TBO} においても、 I_T は印加磁界強度の増加とともに徐々に低下しており、磁界依存性を示すことが確認された。次に、図4-7(a) で使用した接触子 Aa を用いて測定した臨界磁界 B_C のスイッチ電流依存性を図4-7 (b) に示す。同図から、通電しているスイッチ電流が I_{TBO} に近づくほど、 B_C は顕著に低下することがわかる。

(b) 横磁界下の特性 横磁界下でも I_T の磁界依存性が確認されたが、磁石の移動距離に対する I_T の依存性は2種類存在することがわかった。その典型的な両者の特性を図4-8 (a)、(b) に示す。両図は異なる接触子 Ab と Ac を用いて測定したものであり、 I_{TBO}^* は縦磁界の場合と同様に、一定のスイッチ駆動力とスイッチ荷重で開閉を繰り返すことで増加させた(表4-1(b))。図4-8(a) では、 I_T は $x < 5 \text{ mm}$ において x と伴に低下しているが、 $x > 5 \text{ mm}$ では x と伴に増加しており、 x に対して極小値を示す。一方、図4-8(b) では、 I_T は常に x と伴に増加している。図4-4 に示されるように、 x と伴に磁界強度 B は低下することから、 I_T は基本的には印加磁界強度の増加に伴い低下する傾向にあることがわかる。なお、この磁石の移動距離 x に対する2種類の I_T 特性は、接触面上に形成される超伝導接点接続の位置によりクエンチ電流に影響を与える実効的な磁界強度が変化することに起因しているが⁽¹²¹⁾、その詳細は4.4節で述べる。

以上のように、 I_T の磁界依存性が認められたことから、(1)で論じた転移現象はスイッチ接点のクエンチに起因する現象であり、機械式スイッチ接点の超伝導化が達成されたといえるであろう。したがって、クエンチ電流 I_T は超伝導状態で通電できる最大スイッチ電流を表すことになる。以下、本スイッチを接点の超伝導化が達成された機械式の永久電流スイッチとして「機械式 PCS」と呼び、そのクエンチ特性を論じる。なお、図4-6(b)の接触子が液体ヘリウムの液面から露出した場合にクエンチ電流が低下した理由は、接点の温度上昇に起因するものと考えられ、この点においても、本スイッチでは接点の超伝導化が達成されていることが支持される。本研究で確認されたクエンチ電流の最大値は、直流電源の最大供給電流の 200 A に達し、これに対応する最小抵抗値の測定限界は $10^{-10} \Omega$ オーダーである^{(116),(117)}。

4.3.2 クエンチ電流特性

4.3.1 項で述べたように、クエンチ電流は外部磁界や冷却条件の影響を受ける。以下の測

定は、外部磁界がない状態で、且つ接触子が液体ヘリウム中に完全に浸漬された状態で実施した。また、スイッチの開閉は電流ゼロで行い、開閉時にアーク放電が発生しないように注意した。

(1) 接触面性状の影響 3.2 節に記述した方法で接触面を仕上げた接触子 A を用いて、酸化及び接触面粗度がクエンチ電流特性に及ぼす影響を検討した。

(a) 接触面の酸化 酸化膜を形成させた場合には、粗度によらず転移現象は観測されず、数 A 通電時の接触抵抗は数 100 mΩ と非常に高い値を示した。100 A 程度通電すると接触抵抗は 10 mΩ まで低下したが、その後の測定においても、また開閉を 100 回程度繰り返しても転移現象は観測されず、接点の超伝導化が達成されることはなかった。

(b) 粗度 鏡面仕上げと粗面仕上げを行った接触子に対にした鏡面对粗面接触子組や粗面对粗面の粗面接触子組においても、鏡面对鏡面の鏡面接触子組と同様に接触面粗度によらず転移現象は観測された。しかしながら、同一条件におけるクエンチ電流特性は鏡面接触子組が明らかに優れていた。例えば、 $F_c = F_p = 588 \text{ N}$ 一定で 30 回開閉を行った場合、クエンチ電流は鏡面接触子組では約 50 A に達したが、鏡面对粗面接触子組では数 A で、粗面接触子組では 10 A 程度であった。この後更に開閉を繰り返すと、鏡面接触子組では回数に依存してクエンチ電流は更に増加を示したが、粗面接触子組では 30 A 程度で飽和を示し、鏡面对粗面接触子組では 40 A 程度で飽和を示すことが確認された。他方、各接触子組の R_c を比較すると、粗面接触子組は 2 mΩ 以上であるのに対し鏡面接触子組は 1 mΩ 以下で、鏡面对粗面接触子組では両者の中間の値を示した。この結果からも、鏡面接触子組で最も良好な接触が得られることがわかる。

(2) 接触子形状の影響 上述 (b) の結果を考慮して、接触子 A、B、C の接触面を全て鏡面仕上げとした。転移現象は、接触子形状によらず何れの接触子においても観測されたが、クエンチ電流は形状依存性を示した。 $F_c = F_p = 588 \text{ N}$ 一定で開閉を行った場合、接触子 B のクエンチ電流特性は点接触にも関わらず接触子 A とほぼ同一で、極端に低い値とはならなかった。一方、接触子 C は開閉 1 回目から 100 A を越えるクエンチ電流 (102 A) が観測され、2 回目以降は 200 A でもクエンチしなかった。接触子 A と B の結果を考慮すると、接触子 C の良好なクエンチ電流特性は S_{max} によるものではなく、接触子形状によるものと考えられる。以上の結果、クエンチ電流を上昇させるという観点からは、接触子 C を標準接触子としクエンチ電流特性を検討することが望ましいが、接触子 C はクエンチ電流が電源容量 (200 A) を容易に上回ることで、さらには形状が特殊であるため仕上げによるスイッチ個体差の管理が困難であることから、以下では接触子 A を標準接触子として実験を行った。

(3) 標準接触子のクエンチ電流特性

(a) 開閉回数の影響 図4-9に接触面性状が同一となるように仕上げた4つの標準接触子(A1~A4)を用い、開閉を繰り返した行った場合の典型的なクエンチ電流特性を示す。接触子A1は $F_c = F_p = 686\text{ N}$ 一定で、残りの接触子A2~A4は全て $F_c = F_p = 588\text{ N}$ 一定で開閉を行っている。図4-9から、クエンチ電流は開閉回数 N とともに増加し、その開閉回数に対する増加割合は、 F_c 、 F_p が大きな接触子A1が最も大きいことがわかる。接触子A1のクエンチ電流は、 $N=30$ 回で 200 A に達したが、更に1000回程度 $F_c = F_p = 686\text{ N}$ 一定で開閉しても、 200 A 以上のクエンチ電流が保持されることを確認した。また、同図より、クエンチ電流は最終的にはある一定値で飽和する傾向にあることがわかる(接触子A4)。接触子A2~A4は30回までは全く同じ条件で使用されており、その I_T 特性もほぼ一致している。このように、標準接触子では、回転研磨機を使用し接触面性状を一定に管理することで再現性のある I_T 特性が得られ、 $F_c = F_p = 588\text{ N}$ 一定で30回開閉すると、クエンチ電流は数Aから約 50 A まで上昇することがわかった。一方、手研磨で同一仕上げを行った場合、接触子ごとのクエンチ電流特性のばらつきが大きく、大部分が 30 A 以下で飽和する傾向を示した。

(b) スイッチ駆動力とスイッチ荷重の影響 F_c と F_p がそれぞれクエンチ電流特性に与える影響を検討するため、まず開閉を行っていないバージンな標準接触子を用いて、 F_c を変化させてスイッチを閉じ、 $F_p = 588\text{ N}$ 一定のもとでクエンチ電流特性の F_c 依存性を測定した。その結果を図4-10に示す。図中シンボル○で示されるように、クエンチ電流は F_c を増大させる度に上昇しており、その増加割合は F_c のほぼ2乗に比例している。また、 $F_p = 588\text{ N}$ で測定しているため、 $F_c = 0$ でスイッチを閉じた場合にも転移現象が観測されることがあり($I_T > 0$)、開閉17回目以降では常に観測されるようになっているが、この $F_c = 0$ でのクエンチ電流値は、直前の $F_c > 0$ でスイッチを閉じた際に得られた I_T より大きくなることはなかった。次に、クエンチ電流特性の F_p 依存性を検討するため、図4-9に示された開閉動作後の接触子A2とA3を用いて、各 F_c でスイッチを閉じた後、 F_p を0から 1500 N 程度まで増加させてクエンチ電流特性を測定した結果を図4-11(b)に示す。両接触子のクエンチ電流は、図4-9で示された開閉の繰り返しにより得られた最大値までの範囲内では、 F_p とともに増加する傾向を示した。また、接触子A2では、 F_c に対する依存性は殆ど認められず、 F_p に対する I_T の変化は接触子A3より大きい。これに対し、接触子A3では、 F_c の増加に伴い $F_p = 0$ での I_T が増加する F_c 依存性が見られた。一方、開閉を行っていないバージンな接触子では、小さな F_c でスイッチを閉じた後に F_p を増加させても、常に接触抵抗が観測され接点が超伝導状態を示すことはなかったが($I_T = 0$)、更に大きな F_c でスイッチを閉じ

て F_p を増加することで、転移現象が観測されるようになった。例えば、図 4-11(a) に示すように、バージンな状態の接触子 A2 では、 $F_c = 294 \text{ N}$ でスイッチを閉じて F_p を増加させていくと、 $F_p = 784 \text{ N}$ で初めて転移現象 ($I_T = 1.7 \text{ A}$) が観測された。また、同図からも、 F_c の増加に伴い $F_p = 0$ での I_T の増加が認められ、先述の接触子 A3 の開閉回数は接触子 A2 の半分以下であることから、この F_c 依存性は開閉初期の接触面状態に起因して生じる現象であるとも考えられる。

以上の結果から、クエンチ電流は F_c ならびに F_p に、特に F_c に強く依存し、開閉を繰り返すことで増加することがわかった。

4.4 考察

4.4.1 超伝導接点接続の形成機構とブリッジモデル

図 4-12 に実験後の接触子接触面の SEM 像を示す。同図から、接触面には多数の筋状の痕跡とその終端部には溶融後に凝固したような盛り上がりが存在していることがわかる。このような痕跡と凝固したような盛り上がりは、一般に金属同士が接触するときの機械的摩擦による融着の痕であることが知られており^{(129),(130)}、接触面の一部は、このような融着した部分で接合されているものと考えられる。このことから、本研究で確認された超伝導接点接続の形成機構は以下のように推察される。

接触面は、ミクロに見ると図 3-4 に示されるように完全に平坦ではないため、実際に接触している真実接触面積 S_c は、平坦度などに依存して決まるマクロ接触面積 S_{max} よりも小さな値となる^{(90)-(93),(131),(132)}。このような真実接触面上の一部に、スイッチを閉じることによる接触子接触（衝突）時の機械的摩擦、あるいはスイッチ荷重 F_p 増加時の弾性変形とそれに伴う剪断運動による機械的摩擦^{(85),(129)} などにより融着部（ブリッジ、面積 S_b ）が形成され、接点が接合されることで超伝導接点接続が形成されることが考えられる（ブリッジモデル、図 4-13）。但し、4.3.2 項の結果が示すように、 F_p によるブリッジ形成は、これまでに一度形成されたブリッジの跡が再び融着することで行われるためブリッジの増加はなく、新たなブリッジの形成は、スイッチ開閉を繰り返すことで行われると考えられる。つまり、ブリッジが一度も形成されていないバージンな接触子では、 F_p を増加させても融着部は形成されず、転移現象は観測されない（図 4-11(a)）。多数回開閉を行った後の接触子では、 F_p を増加させてもそれまでに形成されたブリッジ以上の融着部は形成されず、クエンチ電流は開閉の繰り返しにより得られた最大値以上に増加しない（図 4-11(b)）。一方、開閉を繰り返すと、

新たなブリッジが形成されクエンチ電流は顕著に増大することになる(図4-9)。

ブリッジモデルによれば、図4-8(a)、(b)で示された横磁界下の異なる2種類の I_T 特性は、接触面上のブリッジ形成位置の相違に起因すると考えられる。図4-14に図4-8(a)、(b)の結果をそれぞれのブリッジ形成位置における磁界強度に対する依存性として再整理した結果を示す。但し、図4-12に示されるように、ブリッジは多数形成されているものと考えられるが、個々のブリッジは非常に小さく、しかも接触面上の一部に密集して形成されており、その部位を1つの接触跡として目視で観測することができるため、ここでは、ブリッジ形成位置をその接触跡の中心と仮定した。クエンチ電流は、接触面上のブリッジ位置を考慮した実効的な磁界に対してほぼ同様の依存性を示し、印加磁界強度の増加と伴に低下することが示された。この結果からも、超伝導接点接続はブリッジにより形成されることが支持される。

以上の結果、超伝導接点接続は接点を接合するブリッジによって形成されているものと考えられ、クエンチ電流特性の変化は種々の要因によってブリッジの形成が影響を受けた結果であると解釈できる。

4.4.2 ブリッジ形成機構の定量的検討

(1)スイッチ駆動力とスイッチ開放時のギャップ長の影響 スイッチを閉じることによるブリッジ形成に必要とされるエネルギーは、主に接触子同士の接触(衝突)時に可動子が有している運動エネルギーによって供給されと考えられる。以下では、接触時の運動エネルギー E_v を、スイッチ駆動力 F_c とスイッチ開放時のギャップ長 d に基づき定量的に評価し、 E_v とクエンチ電流特性の関係を検討する。

本研究で用いたガスシリンダーのスイッチ駆動力は、時定数 τ で指数関数的に設定値 F_c まで増加することが確認されている。また、可動子が運動を始め固定子と接触するまでに要するクロー징時間の実測値は、可動子の自重 mg (g は重力加速度)と加速力 F_c から求められる理論値より大きなことから、可動子は抗力を受けて動作していると考えられる。そこで、可動子の運動を速度 v に比例した抗力 kv を受けると仮定して解析すると、時間 t における可動子の速度 v は下記の式で表される⁽¹³³⁾。

$$v = \frac{mg + F_c}{k} \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{m}t\right) \right] - \frac{F_c \tau}{m - k\tau} \left[\exp\left(-\frac{k}{m}t\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (4.1)$$

(4.1)式より求められるクロー징時間の理論値は、実測値と良い一致を示すことが確認

された。図4-15に(4.1)式を用いて F_c 及び d と運動エネルギー E_v との関係を計算した結果を示す。同図から、運動エネルギー E_v は、 F_c と d と共に増加し、特に F_c のほぼ2乗に比例して増加することがわかる。図4-10において、クエンチ電流が F_c の2乗にほぼ比例したことを考慮すると、この結果は、 I_T が E_v にほぼ比例して増大することを示している。なお、 I_T と E_v の比例関係は、可動子の加速距離に相当する d によって E_v を変化させた場合においても成立することが確認された^{(133),(134)}。

以上の結果から、機械的摩擦に基づくブリッジ形成機構の考え方は基本的に正しいことがわかる。また、接触子Cにおける良好なクエンチ電流特性は、テーパ形状により荷重が接触面に対して接線方向にも作用するため、接触時の機械的摩擦力が接触子A、Bと比べて大きく、ブリッジが形成されやすくなるためであると考えられる⁽⁸⁵⁾。

(2)クエンチ電流とクエンチ後に発生する接触コンダクタンスの関係 ブリッジモデルを考慮すると、クエンチ電流 I_T とクエンチ後に発生する接触コンダクタンス $G_c = 1/R_c$ の関係について、次のような二つの仮定が導かれる。

【仮定I】 超伝導電流は融着した接合部(ブリッジ)を通してのみ流れ、その電流密度は各ブリッジで等しい。つまり、クエンチ電流 I_T は、図4-13に示したブリッジの総断面積 S_B とその臨界電流密度 J_c の積で定義され、実験で確認されたクエンチ電流の磁界依存性 $I_T(B)$ は、 J_c の磁界依存性 $J_c(B)$ に起因すると考えられる。したがって、クエンチ電流 $I_T(B)$ は以下の式で評価される^{(116),(117)}。

$$I_T(B) = J_c(B) S_B \quad (4.2)$$

【仮定II】 室温で測定した接触抵抗と液体ヘリウム温度で測定した R_c がほぼ等しいことから、クエンチ後の常伝導電流は、図4-13に示される真実接触面 S_c 全体を流れる。つまり、接触コンダクタンス G_c は、 S_B ではなく S_c に依存する。したがって、 G_c は接触抵抗を取り扱う場合に一般に用いられるHolmの理論^{(89)-(91),(131)}から、接触子材料の抵抗率 ρ と S_c から下記の式で評価される^{(116),(117)}。

$$G_c = \frac{2}{\rho} \sqrt{\frac{S_c}{\pi}} \quad (4.3)$$

なお、ブリッジは S_c 上に形成されることから、 S_B と S_c の間には

$$S_B \leq S_C \quad (4.4)$$

の関係が成り立つ。

4.4.1 項で論じたブリッジモデルでは、ブリッジ形成の機構は、スイッチ開閉を繰り返す場合とスイッチ荷重 F_p を増加させる場合で異なると考えた。以下に、両者のブリッジ形成機構の違いを S_B と S_C の関係の相違に基づくものとして定量的に検討する。

(a) スイッチ開閉によるブリッジ形成機構 図4-9の結果からわかるように、 F_C と F_p を一定として開閉を繰り返す場合、 I_T は開閉回数 N にほぼ比例して増加し、ある回数以降では飽和することもある。一方、結果は示さなかったが、 G_C は初期値 G_{C0} から N の平方根に比例して増加することが確認されており、 I_T が飽和を示した後も更に増加を続けることがわかっている。以上の結果と (4.2)～(4.4) 式の関係を検討すると、 S_B が飽和するまでは、 S_B と S_C は共に開閉回数 N に比例して増加することが推測される。但し、スイッチ開閉によるブリッジ形成が行われない場合でも、 S_C は接触面仕上げ状態と F_p に依存する初期値 S_{C0} を持つことを考えると、 N に対する S_B と S_C の関係はそれぞれ以下の式で表される。ただし、 k_{BN} と k_{CN} は定数である。

$$S_B = k_{BN} N \quad (4.5)$$

$$S_C = k_{CN} N + S_{C0} \quad (4.6)$$

両式から、開閉を繰り返す場合、 S_B と S_C は以下の関係を満たしながら増加すると考えられる。

$$S_B = K_N (S_C - S_{C0}) \quad (4.7)$$

ここで、 $K_N = k_{BN} / k_{CN}$ は接合状態を示す定数である。以上の結果から、(4.2)、(4.3)、(4.7) 式を I_T と G_C の関係で整理すると以下の式が導出される^{(116),(117)}。

$$I_T(B) = \frac{1}{4} J_C(B) \rho^2 \pi K_N (G_C^2 - G_{C0}^2) \quad (4.8)$$

ここで、 G_{c0} は S_{c0} に依存して (4.3) 式の関係で決まる定数である。(4.8) 式から、開閉を繰り返す場合、 S_B が飽和を示すまでは I_T は G_C の 2 乗に比例し増加することが予想される。以上の解析結果をもとに、図 4-9 の結果を I_T と G_C の関係で整理し直すと図 4-16 を得る。同図に示されるように、クエンチ電流 I_T は (4.8) 式の理論式に従い、 G_C の 2 乗に比例して増加することが確認された。また、図 4-9 で I_T の飽和が認められた接触子 A4 は、 I_T が飽和した後も G_C は増加しており、 I_T の飽和は S_B の飽和によることがわかる。一方、図 4-9 でほぼ同一特性を示した接触子 A2～A4 のクエンチ電流特性は、図 4-16 のように G_C の関係で整理すると異なる曲線で近似された。これは、(4.8) 式のパラメータ (特に G_{c0}) が各接触子で異なるため、個々の接触子の接触面仕上げ及び接触状態に起因する S_{c0} が完全に一致していないことが原因である。以上より、一定の F_C と F_p でスイッチ開閉を繰り返す場合、ブリッジは (4.7) 式の関係に従って S_C と共に増加し、そのときの I_T と G_C の関係は (4.8) 式で表されることが明らかとなった。

(b) スイッチ荷重増加によるブリッジ形成機構 図 4-11 に示されるように、 $F_C > 0$ でスイッチを閉じて F_p を増加させる場合、 I_T は F_C に依存する初期値 I_{T0} から飽和を示すまでは、 F_p のほぼ 4 乗根に比例して増加する。一方、 G_C も I_T と同様に初期値 G_{c0} から F_p のほぼ 4 乗根に比例して増加することが確認されている。これらの結果と (4.2)～(4.4) 式の関係から、 S_B は初期値 S_{B0} から F_p の 4 乗根に、 S_C は初期値 S_{c0} から F_p の平方根に比例して増加することが予想され、 F_p に対する S_B と S_C の関係は、それぞれ次式で表される。ただし、 k_{BF} と k_{CF} は定数である。

$$S_B = k_{BF} \sqrt[4]{F_p} + S_{B0} \quad (4.9)$$

$$S_C = k_{CF} \sqrt{F_p} + S_{c0} \quad (4.10)$$

両式から、スイッチ荷重を増加する場合、 S_B と S_C は下記の関係式を満たしながら増大するものと考えられる。

$$S_B = K_F \sqrt{S_C - S_{c0}} + S_{B0} \quad (4.11)$$

ここで、 $K_F = k_{BF} / \sqrt{k_{CF}}$ は (4.7) 式の K_N と同様に接合状態を示す定数である。以上の結

果、(4.2)、(4.3)、(4.11)式から I_T と G_C の関係を求めると以下の式が導出される^{(116),(117)}。

$$I_T(B) = \frac{1}{2} J_C(B) \rho \sqrt{\pi} K_F \sqrt{G_C^2 - G_{C0}^2} + I_{T0} \quad (4.12)$$

(4.12)式から、スイッチ荷重を増加させる場合、 I_T と G_C の関係は開閉を繰り返す場合の(4.8)式とは異なり、 S_B が飽和を示すまでは、 I_T は初期値 I_{T0} から G_C にほぼ比例し増加することが予想される。以上の解析結果をもとに、図4-11の結果を I_T と G_C の関係として整理し直すと図4-17を得る。同図から、接触子A2では、 G_C が2000 S以上では I_T は飽和のためほぼ一定値となっているが、それ以下では、他の接触子A3の結果と同様に、 I_T はそれぞれの I_{T0} から G_C に比例して増加していることがわかる。特に、 $F_C = 0$ でスイッチを閉じた場合、 $F_p = 0$ では $S_{B0} = S_{C0} = 0$ と考えられるので、(4.12)式の I_T' と G_{C0} は零となり、 I_T は G_C に比例することになる。 $F_C = 0$ での接触子A3、及び図4-17には示さなかったが $F_C = 0$ での接触子A2の結果は、原点を通る直線で近似できた。このように、上述の結果も(4.12)式で予想された理論特性とよく一致していることから、仮定I、IIならびに上述の検討は妥当であることがわかる。また、 I_T と G_C の関係は、(4.7)、(4.11)式に示されるようなブリッジ形成時の S_B と S_C の関係に依存して定まることがわかる。

4.4.3 ブリッジモデルに基づく磁界依存性の検討

以下では、4.4.2項で妥当性が示されたブリッジモデルに基づいて磁界依存性に関するこれまでの結果を検討し、超伝導接点接続の達成を更に検証する。

(1) クエンチ電流の磁界依存性 クエンチ電流 $I_T(B)$ をゼロ磁場のクエンチ電流 I_{TB0} で規格化すると、(4.2)式より以下の式が得られる。

$$I_{TN} = \frac{I_T(B)}{I_{TB0}} = \frac{J_C(B)}{J_C(0)} = J_{CN} \quad (4.13)$$

即ち、 I_{TB0} で規格化されたクエンチ電流特性 I_{TN} は、規格化されたブリッジの臨界電流密度の磁界依存性 J_{CN} と一致する。つまり、同一材料から製作された接触子の I_{TN} 特性は接触子によらず全て一致することを示唆している。

図4-18に縦磁界下で測定された図4-7(a)、(b)の両特性を各 I_{TB0} で規格化した結果をまとめる。(4.13)式から予測されるように、規格化された全ての結果はほぼ同一曲線に従っていることがわかる。更に、その特性は図中実線や波線で示される縦磁界下で測定された

NbTi 多芯線^{(124),(125)}や NbTi 薄膜⁽¹²⁶⁾の規格化された臨界電流密度と良い一致を示した。

ところで、縦磁界実験では、 I_{TB0} は 10 A 以下となるように制限され、最大の印加磁界は 2.8 T であった。一方、横磁界実験では、 I_{TB0}^* は表 4-1 に示されるように 10 A より大きく、外部磁界は最大で 0.51 T であることから、横磁界実験における I_T 特性を検討する際には、ブリッジに流れる電流による自己磁界の影響を考慮する必要があると思われる。また、超伝導体の反磁性のため、その周囲で磁界強度が変化する横磁界実験においては、更に、ブリッジの形状に依存する減磁率 (Demagnetizing factor) を考慮する必要がある⁽⁶²⁾。クエンチは磁界強度が最も強い部分で生じると考えられるので、自己磁界 B_s と減磁率 n の影響を考慮した J_c に影響を与える実効的な横磁界強度 B_E は、次式で与えられることになる。但し、 k は $k = 1 / (1 - n)$ で与えられる定数である。

$$B_E = k B + B_s \quad (4.14)$$

(4.14) 式の B_s 及び k 、即ち n は、ブリッジの形状とその分布に依存して定まるため、 B_E を評価するにはこれらを知る必要がある。以下では、図 4-14 でのブリッジ形成位置の仮定を考慮し、ブリッジは単一で断面積 S_B の円柱形状であると単純化して考える。

スイッチ電流 I_s は S_B を均一に流れていると仮定すると、 I_s によってブリッジ円柱側面に発生する自己磁界 B_s は以下の式で表される。

$$B_s = \mu \frac{I_T}{2 \pi r_B} = \mu \frac{I_T}{2 \pi \sqrt{S_B / \pi}} = \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{J_c I_T}{\pi}} \quad (4.15)$$

ここで、 r_B は円柱ブリッジの半径、 μ は液体ヘリウムの透磁率である。ブリッジの臨界電流密度を NbTi バルクと同じ $J_c = 10^9 \text{ A/m}^2$ ^{(35),(46),(62)} として (4.15) 式から B_s を評価すると、 $I_T = 100 \text{ A}$ ではほぼ 0.1 T となり、磁石によって印加される外部磁界とほぼ同程度であることから、 B_s の影響は無視できないことがわかる。他方、円柱形状の単一ブリッジでは、減磁率 n は 0.5 ⁽¹³⁵⁾ より $k = 2$ となり、反磁性によるブリッジ表面の磁界は最大で外部磁界 B の 2 倍となる。

このように円柱形状の単一ブリッジを仮定し、図 4-8(a)、(b) で示された横磁界下の I_T 特性を B の代わりに B_E を用いて規格化すると図 4-19 を得る。同図に示されるように、規格化された I_T 特性は、図 4-18 の縦磁界の結果と同様に全てほぼ一致することが確認され、その特性はまた、波線で示される横磁界下で測定された NbTi 薄膜の規格化された臨界電流密度

(126)とよく一致した。なお、図4-18の縦磁界下の結果と比較すると多少ばらつきが大きいのは、仮定したように自己磁界と減磁率に影響を与えるブリッジは、実際には単一円柱形状ではなく、また各テストごとの相違が影響しているものと考えられる。

以上の結果、縦と横の両磁界下でクエンチ電流の磁界依存性が確認され、その依存性はブリッジ、即ち接触子材料NbTiの臨界電流密度の磁界依存性と一致することが定量的に確認された。したがって、この結果からも、ブリッジモデルの妥当性を認めることができる。

(2)横磁界下のピンニング力の影響 超伝導体に電流が流れているとき、横磁界が印加されるとローレンツ力によって磁束フラックスの移動が発生する^{(35),(62)}。横磁界下にある機械式PCSがクエンチ電流 I_T でクエンチした場合、磁束フラックスに作用するローレンツ力がピンニング力を超えたものと考えられる。ピンニング力は磁界に依存し、NbTi導体の場合は5 T程度でピーク値を持つ特性となる結果が示されている^{(128),(136)-(138)}。上述の仮定に従えば、単位体積あたりのピンニング力 $F_{pin}(B_E)$ は次式で与えられる。

$$F_{pin}(B_E) = J_C \times B_E = \frac{(I_T \times B_E)}{S_B} \quad (4.16)$$

(4.16)式から、規格化された $(I_T \times B_E)$ 特性は B_E の関数として表されることが予想される。この関係は、図4-19の結果を(4.16)式を使って整理した図4-20において確認できる。規格化された $(I_T \times B_E)$ は全て F_{pin} を表すと考えられる一つの曲線上に分布し、 B_E は5 Tより小さいため B_E と共に増加している。但し、0.8 T以上で見られる差違は、図4-19でも見られた B_E の不確定さに起因するものと思われる。この結果、図4-20からも超伝導接点接続がNbTi機械式PCSの2つの接触子間で形成されていることが示された。

(3)クエンチ電流とクエンチ後に発生する接触コンダクタンスの係に及ぼす磁界の影響

NbTiは磁気抵抗効果(Magneto-resistance effect)を殆ど示さないため、 ρ の磁界依存性は無視できる⁽⁶²⁾。したがって、磁場環境下で一定の F_C と F_p でスイッチ開閉を繰り返すときの $I_T - G_C$ 特性は、磁界強度が大きくなるときほど、その傾きが図4-18、図4-19で確認された $J_C(B)$ の減少に従い低下することが、(4.8)式から予想される。図4-21は、図4-18の結果を $I_T - G_C$ 特性としてまとめ直したものである。図中のシンボル▼と▲は、各テストの I_{TBO} 及び2.1 Tのときの I_T を表す。シンボル▼から▲に向かって、各テストの I_T は磁界強度と共に連続して低下しているが、 G_C はほぼ一定値を保っている。これは、(4.8)式の導出過程で仮定されたように、 $J_C(B)$ は磁界依存性を示すが、 G_C と ρ は磁界依存性を示さないことを示している。図4-21において、両シンボルはそれぞれ(4.8)式に従って変化しており、その両者の

傾きの比から 2.1 T の縦磁界における $J_c(B)$ の低下は 40% と推定され、図 4-18 に示された I_{TN} の低下割合と一致する。更に結果は示さなかったが、図 4-8(a)、(b) に示された横磁界下の結果においても、 $I_T - G_c$ 特性は (4.8) 式で近似でき、磁界強度の増加による傾きの低下は、図 4-19 に示された I_{TN} の低下割合と定量的に一致することが確認された。

4.4.4 接合面積と大容量化

ブリッジの臨界電流密度を、再び NbTi バルクと同じ 10^9 A/m^2 と仮定して、 $S_{max} = S_B$ の場合の標準接触子 A の臨界電流を求めると 200 kA となる。したがって、同接触子においてクエンチ電流が 200 A に達した場合、 S_{max} に対する接合面積 S_B の割合 (接合率) は 0.1% 程度と推定される。点接触である接触子 B と面接触である接触子 A の転移電流特性に余り変化がないのは、このように接合面積 S_B が S_{max} に比べて非常に小さなことに関係していると考えられる。一方、真実接触面積 S_c に対する S_B の割合 (真実接合率) を (4.2)、(4.3) 式より I_T と G_c の関係から計算すると、図 4-15 に示された接触子 A1、A3 の転移電流の最大値に対してはそれぞれ 20%、41% となる。他方、真実接合率はその定義より同一の I_T では G_c が大きなほど低下することになり、 $I_T = 100 \text{ A}$ における接触子 A2、A1 及び接触子 C の真実接合率を同様に求めるとそれぞれ 14%、7%、4% となる。真実接合率は接合率より 1桁以上大きなことから、クエンチ電流を増大するには S_c を S_{max} に近づけ S_{max} を有効に使用できるよう接触面状態を管理する必要がある。また、以上の議論から、接触子 C の真実接合率を接触子 A と同程度の 40% まで向上させると kA オーダーの転移電流が得られることが予想される。したがって、本スイッチ方式でも接合部を有効に形成できるよう接触子形状を選定し接触面状態を管理することで kA オーダーの超伝導電流を通電することも可能と考えられる。しかしながら、クエンチ電流の増加は一方で接合面積の増大を意味するので、スイッチ開放が困難になることが予想される。大規模 SMES に用いられる PCS の電流容量は、第 2 章で述べたように 100 kA 以上となることから、PCS 個体の電流容量の更なる増加が必要であるが、上述の問題から将来は PCS の並列接続による容量増加も併せて検討する必要があるであろう。特に機械式スイッチは超伝導スイッチで問題となる並列化によるオフ抵抗の低下がないことから、PCS 並列接続は大容量化に対して有効な手段になるものと期待される。以上の観点から、第 6 章では並列接続された機械式 PCS のクエンチ特性を検討する。

4.5 むすび

本章では、まず接触子に NbTi バルクを用いた機械式スイッチの接触抵抗特性を液体ヘリウム中で測定し、接点の超伝導化を示すクエンチ現象を観測した。次に、この機械式 PCS のクエンチ特性に接触子の形状や接触面性状、あるいはスイッチ開閉回数等のスイッチ駆動条件が及ぼす影響を、クエンチ電流の磁界依存性と共に実験により調べた。その後、得られた結果に基づき超伝導接点接続の形成機構を定量的に検討した(ブリッジモデル)。本章で得られた主な結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 機械式スイッチ接点の超伝導化が達成され、クエンチなしに 200 A 以上の電流を通電することができた。1000 回程度開閉を繰り返しても、200 A 以上のクエンチ電流が維持されることを確認した。
- (2) 機械式 PCS における超伝導接点接続は、主にスイッチを閉じる時の接触子接触時の機械的摩擦により、真実接触面上に融着による接合部(ブリッジ)が形成されたことによる。ブリッジの形成は、この他にスイッチを閉じた後にスイッチ荷重を増加することにより作用する剪断力に基づく機械的摩擦力によっても形成されるが、この場合は、開閉により形成されたブリッジの跡を再融着するだけである。ブリッジ形成の観点からは、テーパを付けた接触子形状が最も有効である。
- (3) (2)で解明したように、接点の超伝導化はブリッジの形成で達成されるため、ブリッジ形成を妨げる要因があると接点の超伝導化は実現されない。接触面上に形成された酸化膜がこの最大の要因となることを実験により確認した。
- (4) クエンチ電流はブリッジ形成の促進と伴に増加する。また、クエンチ電流は外部磁界により低下するが、その特性はブリッジ、即ち接触子材料の NbTi の臨界電流密度の磁界依存性に起因する。
- (5) 超伝導接点接続の形成機構をモデル化し(ブリッジモデル)、スイッチ開閉を繰り返す場合とスイッチ荷重を増加させる場合でブリッジの形成過程が異なることを定量的に解析した。また、同モデルに基づきクエンチ電流の磁界依存性も定量的に説明できることを示し、ブリッジモデルの妥当性を確認した。

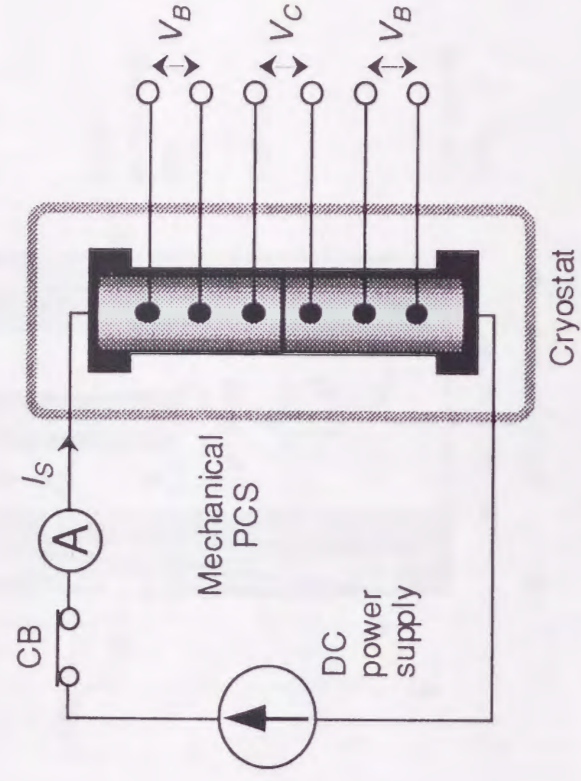


図4-1 機械式PCSのクエンチ電流特性測定回路

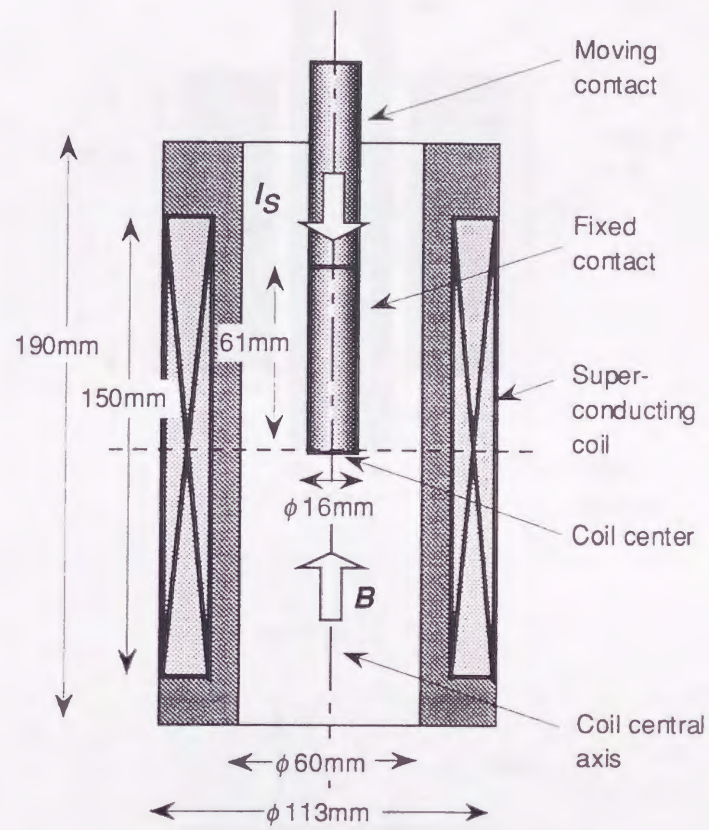
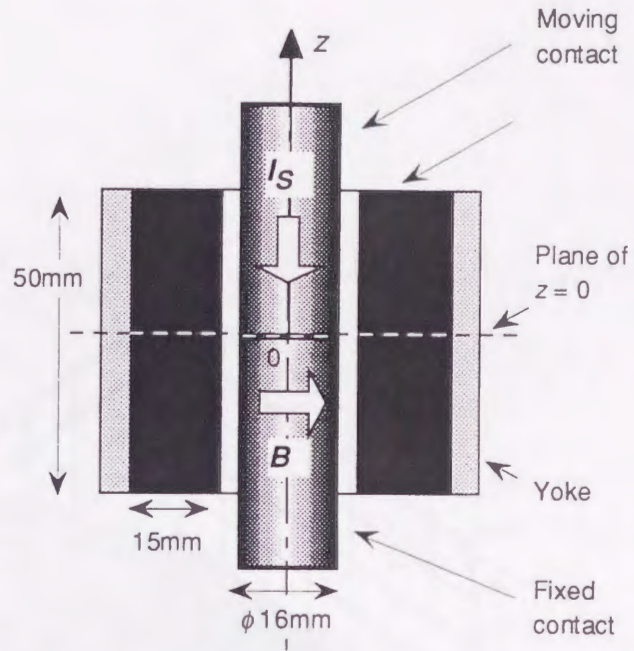
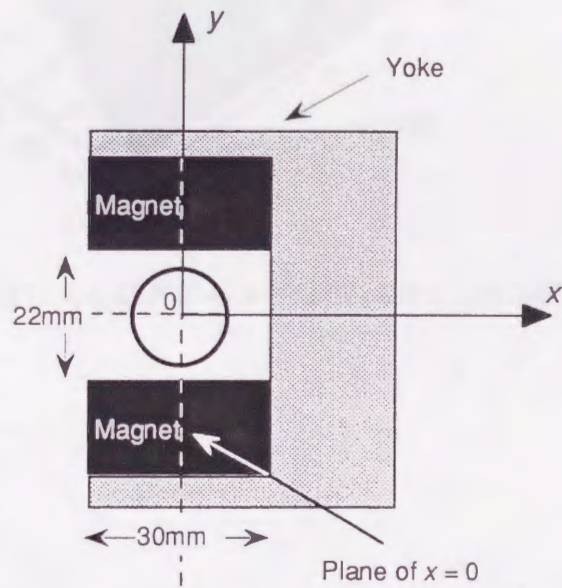


図 4-2 縦磁界特性実験の PCS 配置



(a) 正面図



(b) 上面図 (初期位置)

図 4-3 横磁界特性実験の PCS 配置
(磁石は x 軸方向のみ移動)

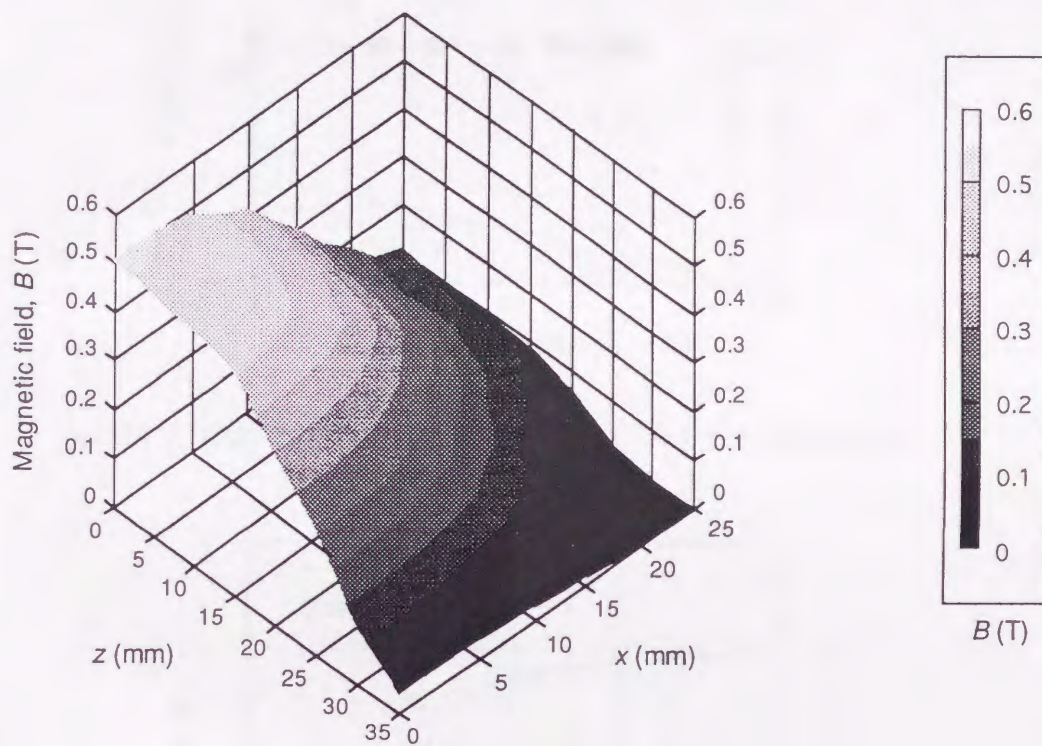
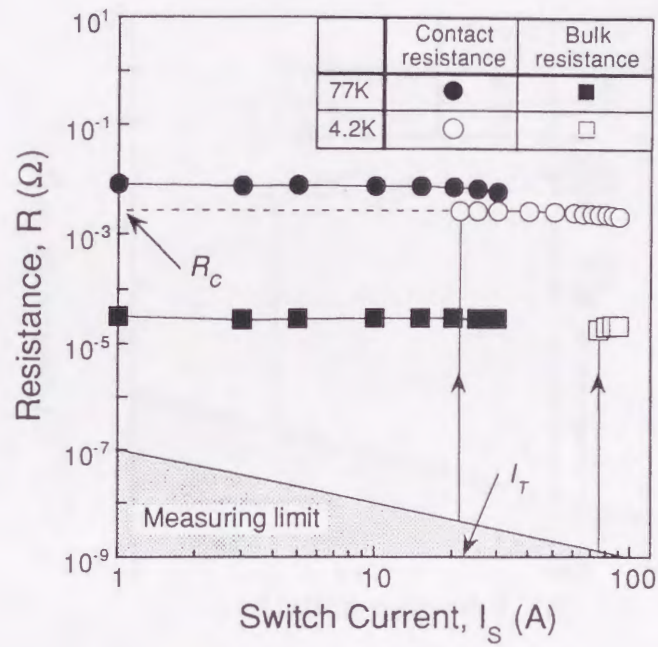
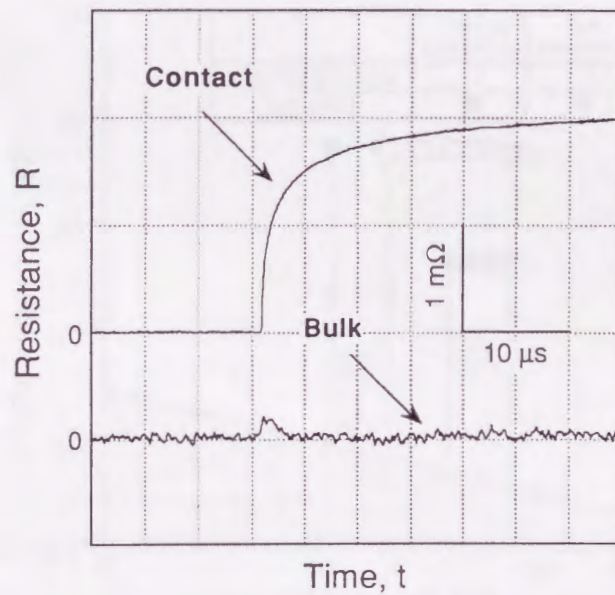


図4-4 初期位置にある磁石ギャップ間の $y=0$ における磁界分布

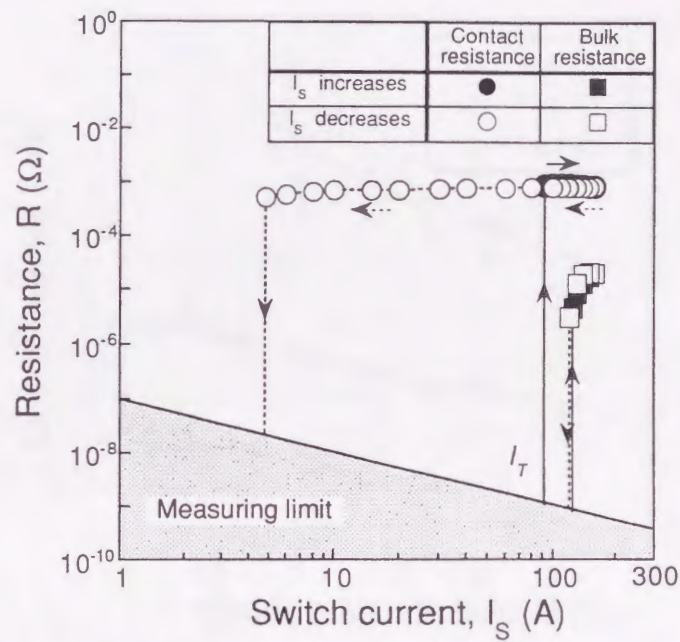


(a) 77K と 4.2K での接触抵抗とバルク抵抗のスイッチ電流依存性

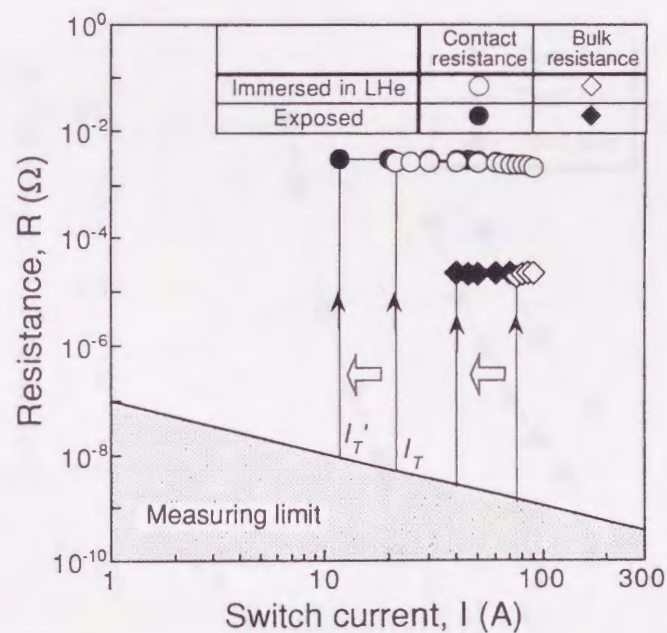


(b) I_T での接触抵抗とバルク抵抗の時間変化

図 4-5 NbTi 機械式 PCS のクエンチ（転移現象）

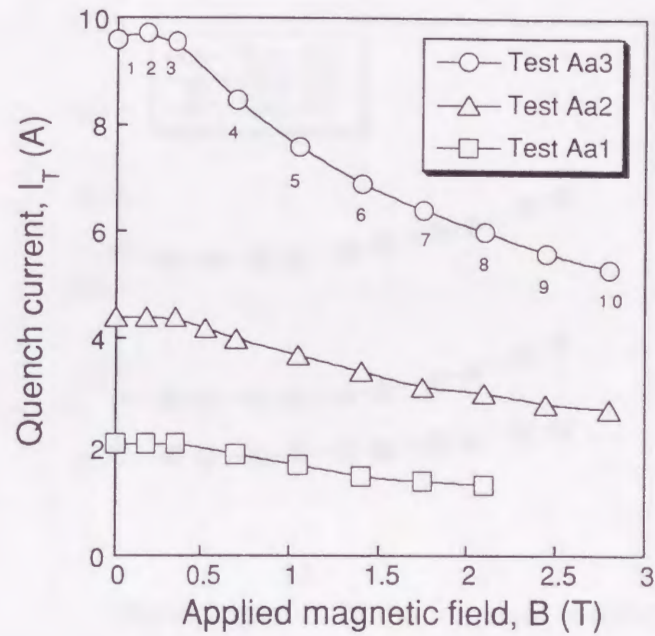


(a) クエンチ後の接触抵抗とバルク抵抗のヒステリシス特性

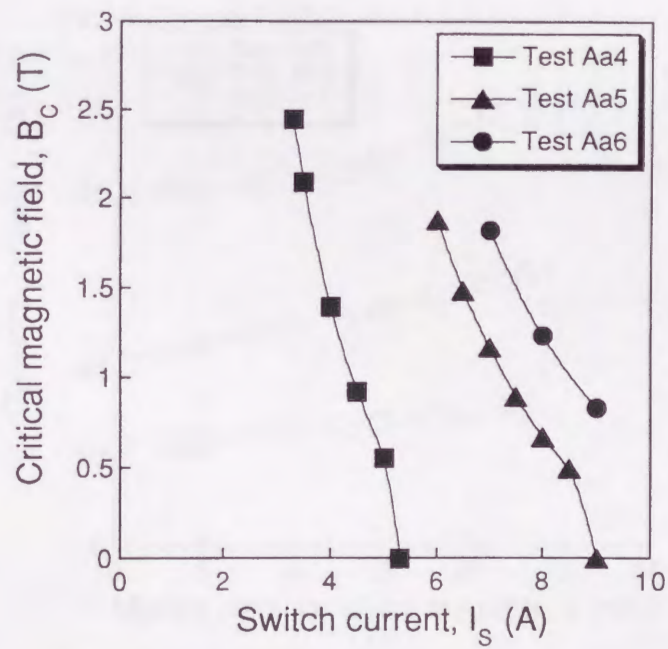


(b) 液体ヘリウムから露出した接触子のクエンチ電流特性

図 4-6 クエンチに関する諸特性

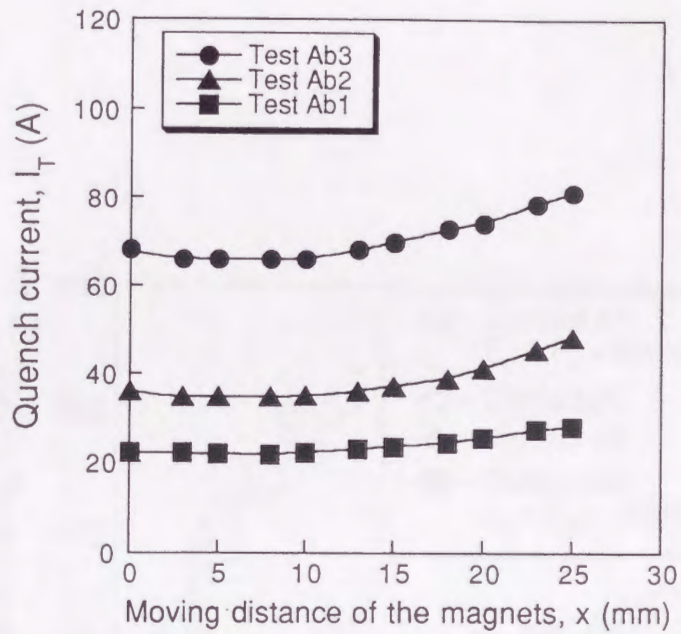


(a) クエンチ電流の磁界依存性 ($I_T - B$ 特性)

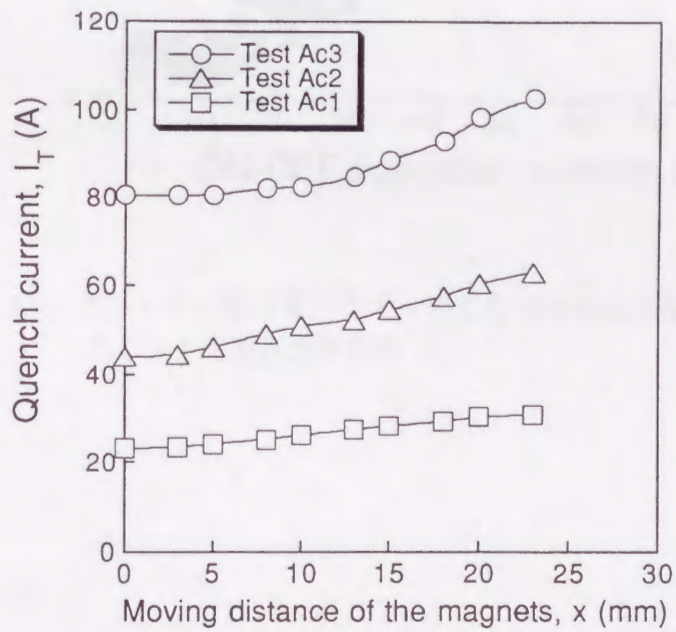


(b) 臨界磁界のスイッチ電流依存性 ($B_C - I_S$ 特性)

図4-7 縦磁界下のクエンチ特性



(a) 極小値あり



(b) 極小値なし

図4-8 横磁界下のクエンチ電流特性
(磁石移動距離とクエンチ電流の関係)

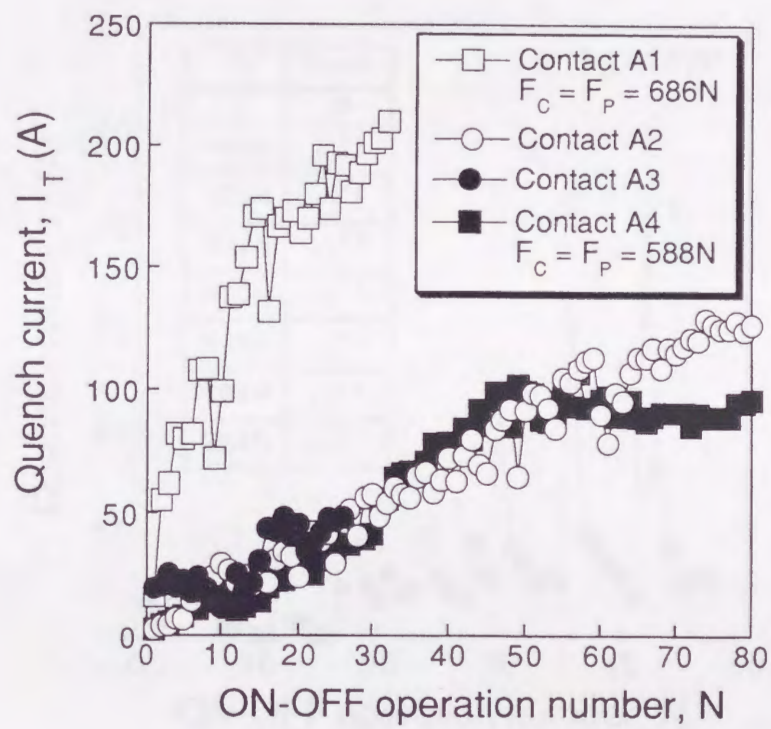


図 4-9 スイッチ駆動力をパラメータとしたクエンチ電流のスイッチ開閉回数依存性

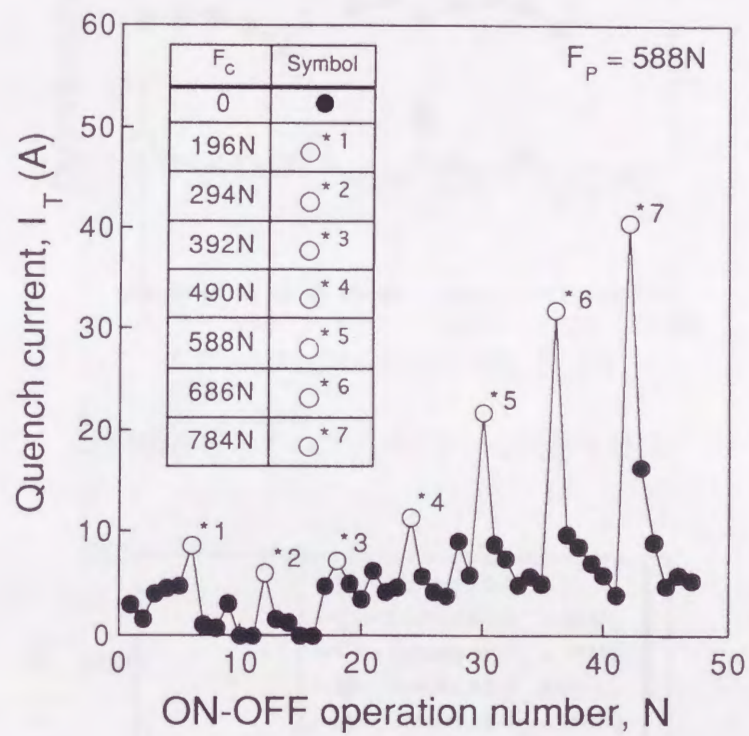
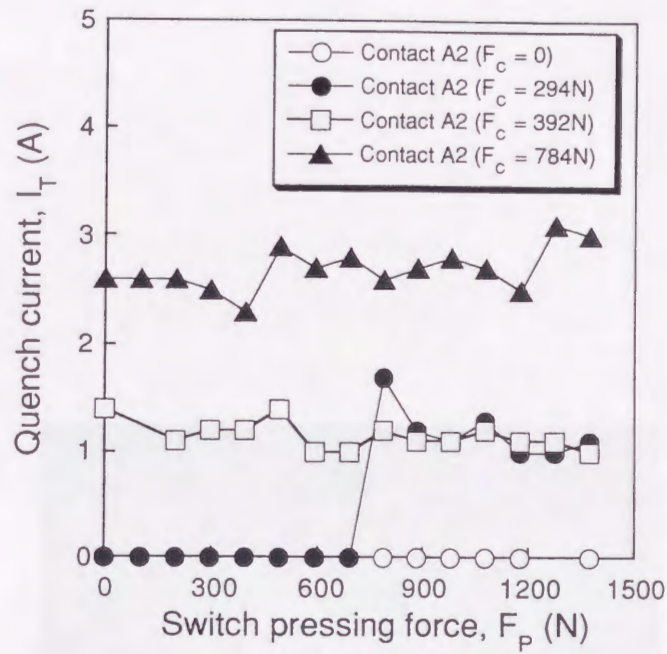
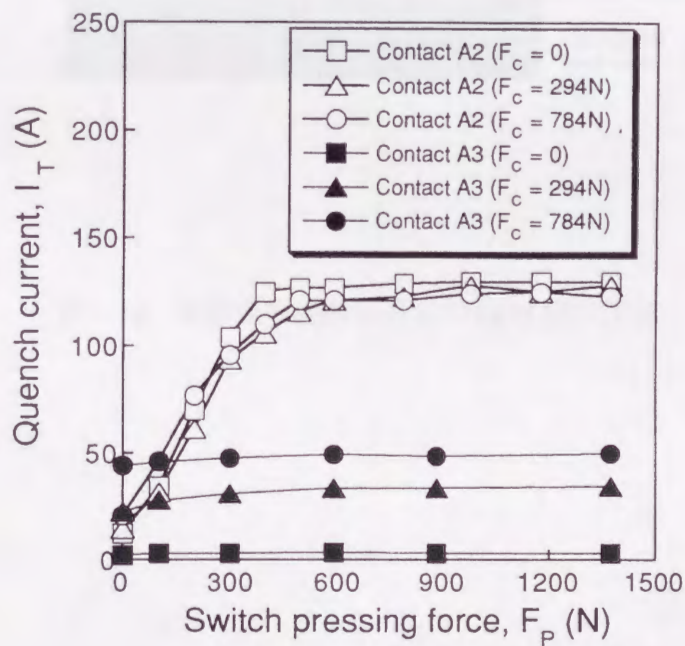


図 4-10 スイッチ駆動力とクエンチ電流の関係



(a) 開閉を行っていないバージンな接触子使用



(b) 図 4-9 実験後の接触子使用

図 4-11 スイッチ荷重とクエンチ電流の関係

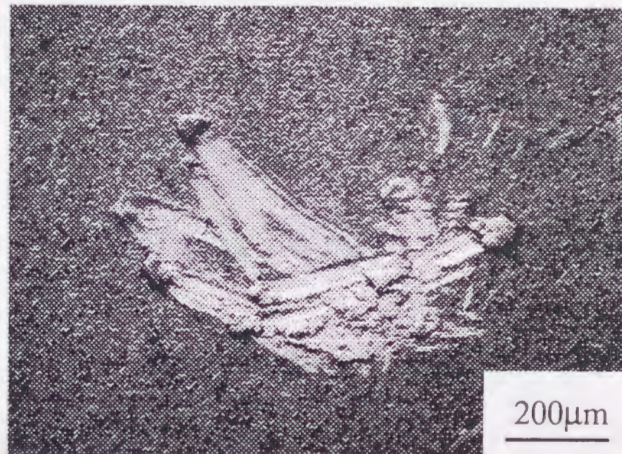


図 4-12 実験後の接触面表面の SEM 観測写真

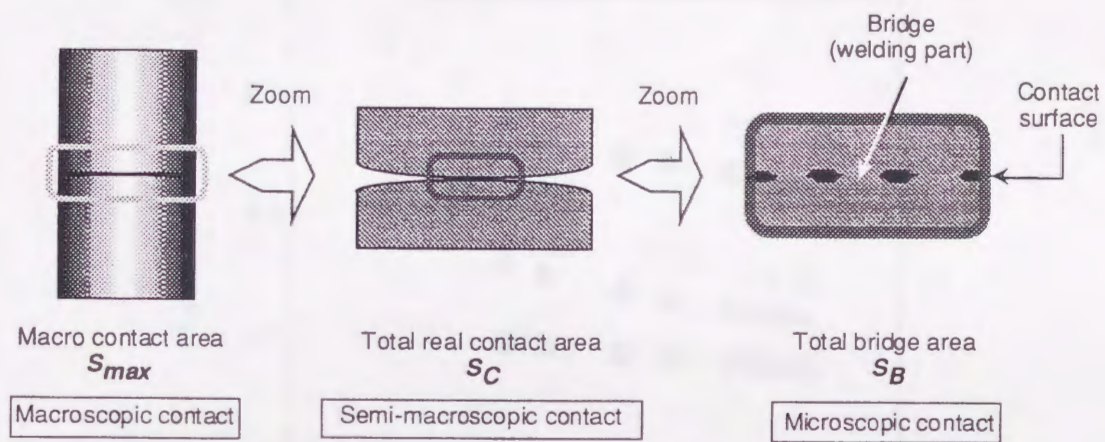


図 4-13 ブリッジモデル

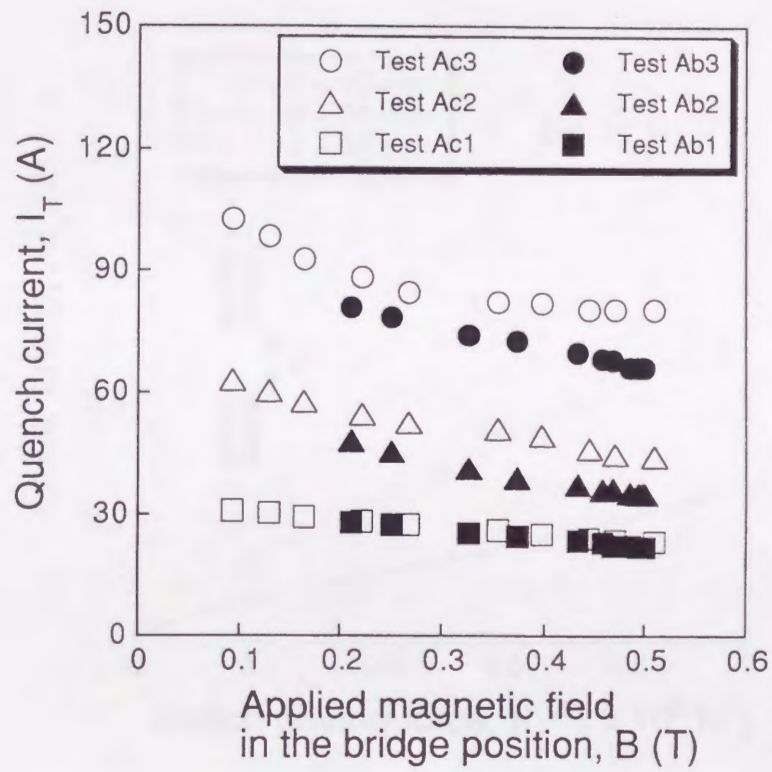


図 4-14 図 4-8 をブリッジ位置の磁界強度で整理した
横磁界下のクエンチ電流特性

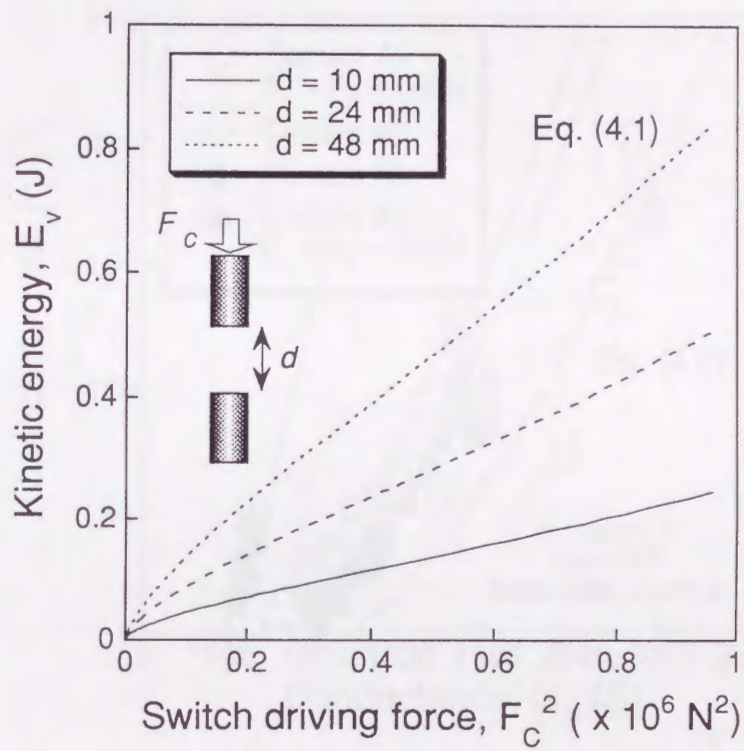


図 4-15 接触子間ギャップ長をパラメータとしたスイッチ駆動力と可動子が有する運動エネルギーの関係

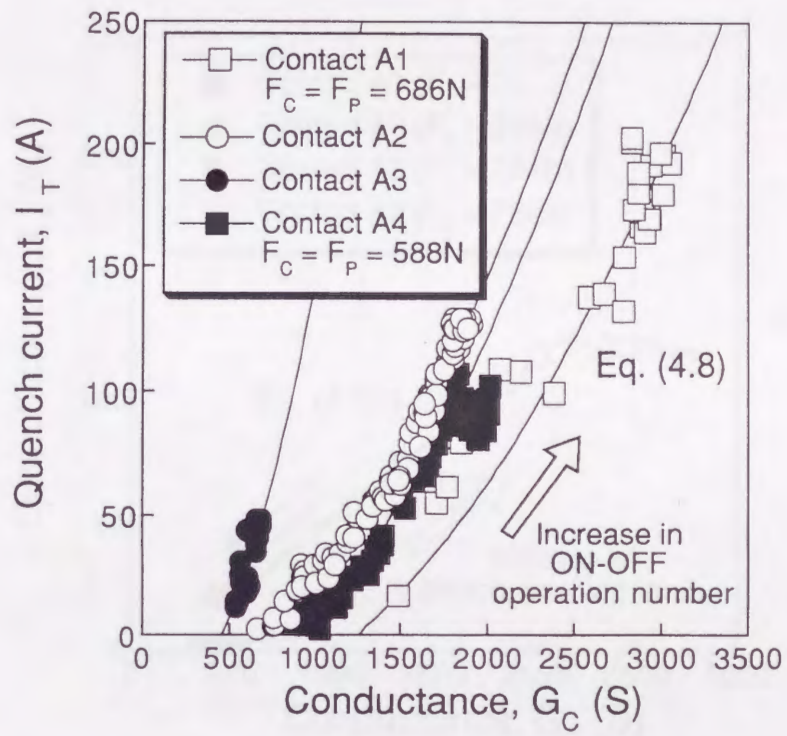


図 4-16 図 4-9 に示したスイッチ開閉による I_T 増加時の $I_T - G_C$ 特性

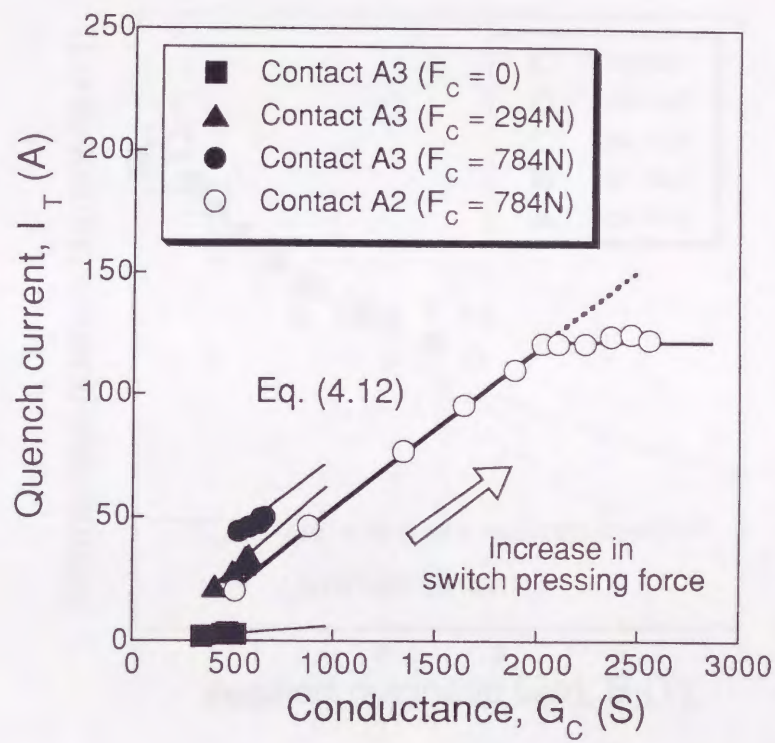


図 4-17 図 4-11(b) のスイッチ荷重印加による I_T 増加時の $I_T - G_C$ 特性

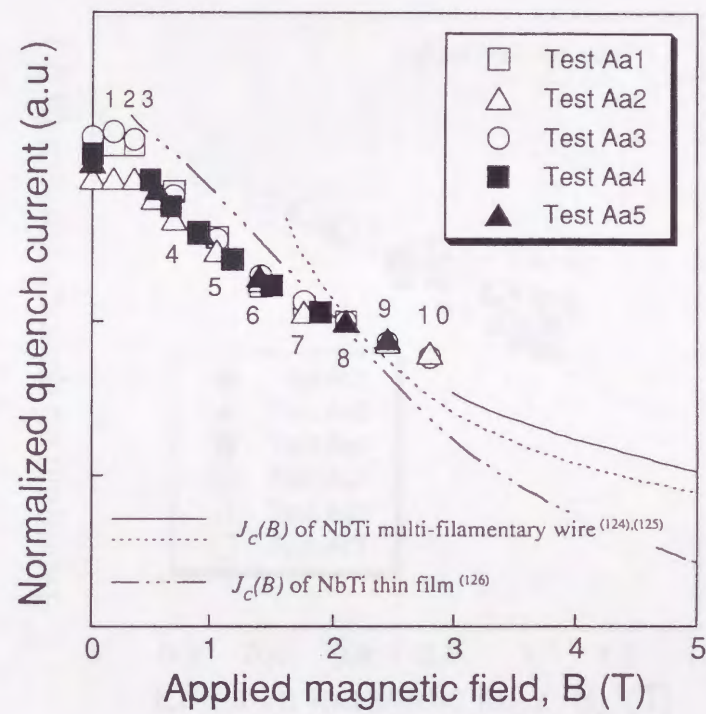


図 4-18 図 4-7 の結果を I_{T80} で規格化した縦磁界下のクエンチ電流特性 ($J_c - B$ 特性)

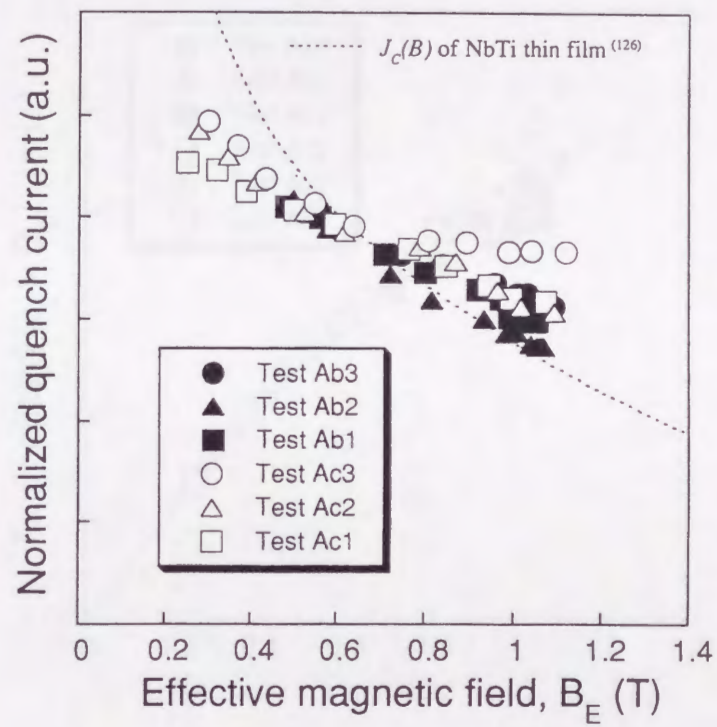


図4-19 自己磁界と減磁率を考慮して図4-8を規格化した横磁界下のクエンチ電流特性 ($J_c - B$ 特性)

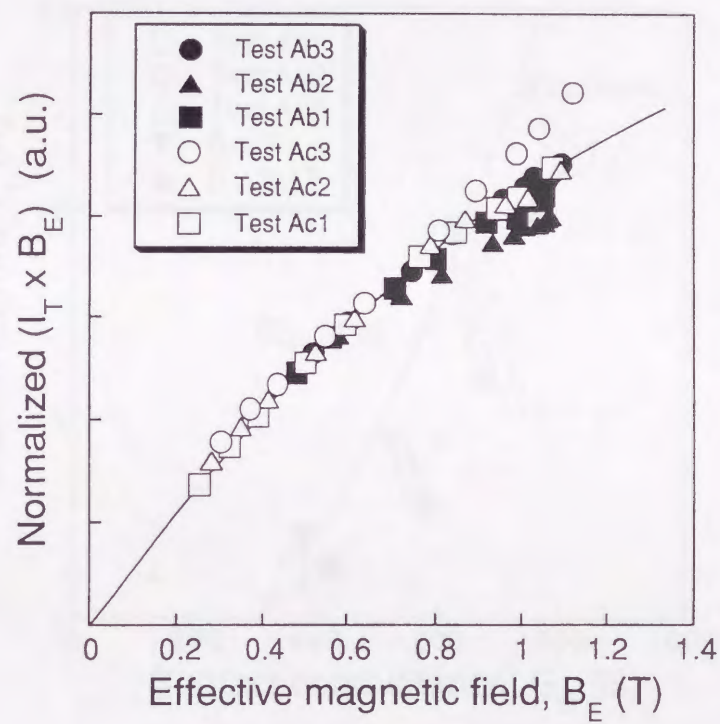


図 4-20 図 4-19 の結果を規格化して得られる $(I_T \times B)$ 特性の磁界依存性

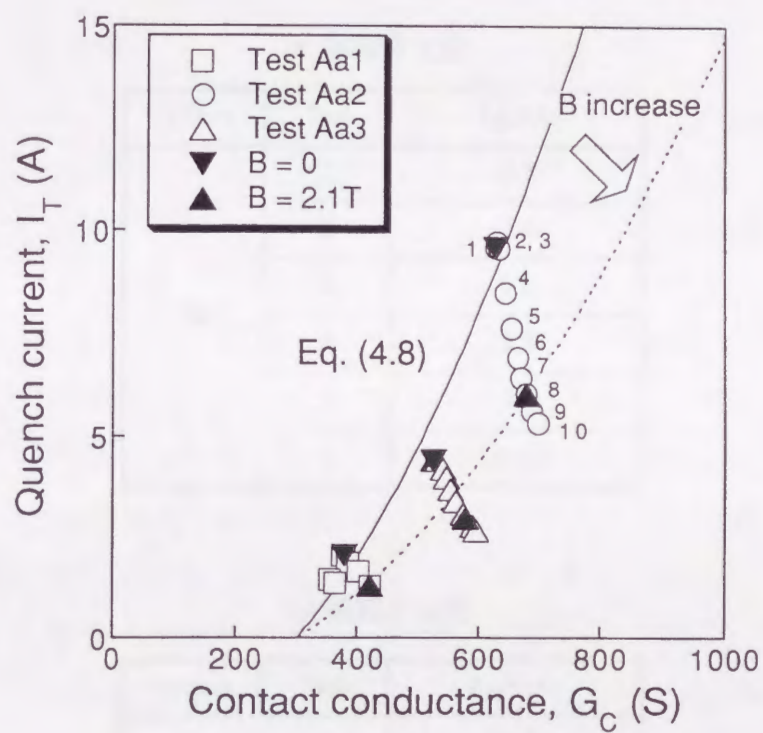


図 4-21 図 4-7 の結果から得られる縦磁界印加時の $I_T - G_C$ 特性

表 4-1 縦及び横磁界実験に使用した接触子の各テストにおける I_{TB0} と I_{TB0}^*

(a) 縦磁界実験

Contact	Test	I_{TB0} (A)
Aa	1	2.1
	2	4.4
	3	9.6
	4	5.3
	5	9.0
	6	> 10

(b) 横磁界実験

Contact	Test	I_{TB0}^* (A)
Ab	1	28.1
	2	48.2
	3	81.2
Ac	1	30.9
	2	63.3
	3	102.7