

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：



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

5.1 まえがき

電流遮断を伴う機械式スイッチ開放時には、接触子間でアーク放電が発生することは避けられない。アーク抑制のために、カウンタパルステクニックを用いて電流零点でスイッチ開放を行うことが検討されているが、数10 kAの直流電流をカウンタパルステクニックを用いて遮断しても、数10 Aの漏れ電流が残ることが報告されている⁽⁸¹⁾。第4章で論じたように、機械式PCSの超伝導接点接続は接触面性状に強く依存するため、このような漏れ電流によりアーク放電が発生すると、クエンチ電流特性に影響を与えることが予想される。また、超伝導コイルと接続された常伝導機械式スイッチでは、アーク消弧時に発生したサージ電圧により、コイル端子間に非常に大きな電圧が誘起されることが知られており⁽⁷⁶⁾⁻⁽⁷⁸⁾、このような観点からも、機械式PCSのアーク放電特性を明らかにしておく必要がある。

本章では、NbTi機械式PCSに超伝導コイルと負荷抵抗を接続した回路で、まずスイッチ開放時の電流遮断に伴い発生するアーク放電特性を、液体ヘリウム中で実験により調べた。その後、アークが超伝導接点接続に及ぼす影響を同様に実験により調べ、第4章で提案したブリッジモデルに基づきその形成機構を理論的に検討した。また、酸化膜が形成された接触子を用いて、アーク放電による酸化膜除去効果を検討した。

5.2 実験装置の構成と実験方法

5.2.1 実験装置

図5-1に実験装置の等価回路を示す。機械式PCSは1 Hの超伝導コイルSCと5 Ω の外部

負荷抵抗 R_L に接続されており⁽⁷⁾、SMESシステムの基本構成を模擬した回路となっている。SCと機械式PCSはクライオスタットA内に設置され、液体ヘリウムで4.2 Kに浸漬冷却されている。機械式PCSの諸元は第3章で説明したとおりで、接触子は標準接触子Aを使用した。上部可動子が陽極、下部固定子が陰極となるよう直流電流源PSに接続されている。スイッチ開放速度及び開放時のギャップ長は、それぞれ標準で60 mm/s及び10 mmとした。以下では、図5-1のSCと R_L が接続されている回路を「回路1」、同回路からSCと R_L を取り外した回路を「回路2」と呼ぶ。

5.2.2 実験方法

(1) アーク放電特性の測定 アーク放電特性の測定は、回路1でSMESシステムのエネルギー転送過程を模擬して行った。実験方法は、著者らの研究グループが過去に実施している接触子にCuを用いて行った場合と同様で⁽⁷⁾、SCとPCSで構成された閉ループに設定した遮断電流値の電流を通電し、PCSを開放したときの端子電圧 V_T とスイッチ電流 I_S をそれぞれデジタルストレージスコープで測定した。遮断電流 I_B は、カウンタパルステクニクを使用した場合の漏れ電流とSCの定格端子電圧(500 V)を考慮して最大50 Aとした。

(2) クエンチ電流の測定 回路1では、機械式PCSと並列にコイルを接続しているため、回路電流 I_0 の一部はコイルにも流れる。そこで、クエンチ電流の測定に際しては、スイッチ電流 I_S をデジタルCTで測定した I_0 とホール素子で測定したコイル電流 I_L の差より求めた。PCS接触子は、図3-7に示されるように、SCの軸方向真上に垂直に設置されているが、スイッチ接点はコイル上端より10 cm以上離されており、しかも、 I_L は数Aと小さなことから、SCが作る縦磁界がクエンチ電流特性に影響を与えないことを確認している。アーク放電がクエンチ電流特性に及ぼす影響は、回路1と回路2のアーク持続時間が異なる両回路で行った。遮断電流等の詳細な実験条件は、実験結果と共に示す。

5.3 実験結果

5.3.1 NbTi機械式PCSのアーク放電特性

回路1において、遮断電流50 Aでスイッチを開放した場合のアーク電圧と電流の波形は、図2-2(a)、(b)に示したとおりである。図5-2に回路1で遮断電流を10 Aから50 Aまで変化させたときの遮断電流 I_B と端子電圧 V_T のピーク値 V_{Tmax} の関係を示す。図中のシンボルは V_{Tmax} の5回の測定における平均値である。図2-2(a)、(b)に示されるように、アーク電圧波

形は、既に解析されている Cu 接触子を用いた場合と同様の形状で⁽⁷⁷⁾、アーク持続時間 τ_A は、遮断電流によらず 25~30 ms であった。一方、アーク維持電圧 V_A は 12 V と Cu 接触子の場合の 15~25 V より低い値を示した。また、NbTi 接触子でもアーク消弧時に振動性のサージ電圧が発生することが確認され、このサージ電圧のピーク値により、図5-2に示されるように V_{Tmax} が「負荷抵抗 $R_L \times$ 遮断電流 I_b 」で予想される理論値 V_{Th} ⁽⁷⁶⁾ より高くなることが明らかにされた。端子電圧の理論値と実測値との差、及び実測値のばらつきは遮断電流が低いほど顕著に現れ、遮断電流 10 A では最大 V_{Th} の 4 倍の電圧が発生する。

以上の結果、NbTi機械式PCSのスイッチ開放時のアーク放電特性は、Cu接触子を使用した場合と基本的に同様であるが、アーク維持電圧はCu接触子を使用した場合よりも低下することが示された。この結果は、Cuを安定化材として使用しているNbTi超伝導体においてNbTiが露出した場合には、安定化材で覆われている場合よりも更に低い電圧までアークが維持されることを示唆している。

図5-3に回路2において遮断電流 50 A でスイッチを開放した場合の典型的なアーク電圧波形を示す。図中、A.I.Point はアーク放電が開始する点 (Arc Ignition Point)、A.E.Point はアークが最終的に消弧する点 (Arc Extinction Point) である。コイルが接続されていないため、アーク持続時間は μs オーダーと回路1の場合より3桁ほど短い。また、回路2で測定されたアーク維持電圧は 6~8 V と回路1で示された値より更に低下した。図5-3に示されたアーク維持電圧は 7 V である。なお、アーク消弧後に観測されている 2 V の電圧は、電源の出力電圧である。

5.3.2 アークがクエンチ電流特性に及ぼす影響

第4章で明らかにしたように、 $I_b = 0$ として一定の F_c と F_p でアーク放電を伴わないスイッチ開閉を繰り返す場合、クエンチ電流は開閉回数 N にほぼ比例して増加し、 F_c 等の操作条件と接触面の仕上げに依存する値に飽和する。図5-4にその一例を改めて示す(テスト1)。同図では、 $F_c = 588$ N 一定で開閉を繰り返すと、50回目以降に、 I_T は 100 A 前後でほぼ飽和していることがわかる(図中ハッチング部)。ところが、 F_c を増加させた91回目以降、飽和していた I_T は再び増加することが確認された。なお、同測定では、測定時間を短縮し液体ヘリウムの蒸発を抑制するために、一部ではスイッチ開閉のみを行い、クエンチ電流の測定を省略している(図中、シンボルがない箇所)。

図5-5 (a) に、回路1においてクエンチ電流が飽和を示した開閉 100 回目以降に、遮断電流 30 A で9回、更に 50 A で7回アーク放電を発生させてクエンチ電流特性を測定した結果

を示す(テスト2)。アーク放電がクエンチ電流特性に及ぼす影響を明瞭にするため、図5-4の結果を考慮して、 I_T が開閉回数に対して飽和を示すようになった後で、アークを伴うスイッチ開放を繰り返した。図5-5(a)から、アーク放電が発生した後もクエンチ現象は観測され($I_T \neq 0$)、超伝導接点接続が維持されることがわかる。最初のアーク放電発生後、 I_T は飽和領域での最小値付近まで一旦低下するが、その後はアークを伴う開閉とともに再び増加し、最終的には直流電源の最大供給電流 200 A に達した。図5-5 (b) に回路2において開閉151回目以降に遮断電流 20、30、40 A でそれぞれ10回ずつ、その後更に 50 A で20回アーク放電を発生させてクエンチ電流特性を測定した結果を示す。同図では、40 A 以下の遮断電流では、クエンチ電流は若干低下しているが、 I_T の飽和領域での最小値付近ではほぼ一定となっている。一方、更に大きい遮断電流 50 A では、図5-5(a)の回路1の結果と同様に、クエンチ電流はアークを伴う開閉とともに増加する傾向を示した。開閉201回目以降、再び $I_B = 0$ でアーク放電を伴わない開閉を繰り返すと、クエンチ電流は増加せずほぼ一定となった。開閉240回目以降、再度遮断電流 50 A で開閉を繰り返すと、クエンチ電流は再び増加する傾向を示した。以上のように、クエンチ電流はアーク放電の影響を受けるが、その特性が著しく低下することではなく、むしろアークを伴うスイッチ開放により増加する傾向を示すことが両回路で確認された。

5.4 考察

5.4.1 アーク放電によるエネルギー損失

スイッチ開放によりアーク放電が発生すると、開放後しばらくの間、接触面表面から液体ヘリウムの蒸発による激しい気泡の発生が観測された⁽¹⁰²⁾。回路1での気泡発生の持続時間は、遮断電流 50 A で12秒、20 A では4秒と遮断電流の大きさにほぼ比例していた。このように、アーク放電のエネルギーの一部は液体ヘリウムの蒸発に消費される。アーク放電によるエネルギー損失 E_{Larc} を、第2章で仮定したように、遮断電流 I_B とアーク維持電圧 V_A 及びアーク持続時間 τ_A の積で近似すると、図2-2の結果を参考に回路1で遮断電流 50 A とした場合の E_{Larc} は15 J となる。一方、回路2で遮断電流 50 A とした場合は、 $V_A = 8$ V、 $\tau_A = 30$ μ s を用いると12 mJ となり、主に τ_A の違いにより回路1の値より3桁ほど小さい。アーク放電により蒸発する液体ヘリウムの最大量を推定するため、 E_{Larc} が全て液体ヘリウムの蒸発に消費されると仮定してその最大値を求めると、15 J のエネルギーによる液体ヘリウムの蒸発量は 5.88 ml となる。ところで、ロードレベリングを目的とするような GWh 級の大

規模SMESシステムでは、第2章で論じたように、励磁時のオフ抵抗による損失が支配的となり、エネルギー転送時のアーク損失 E_{Larc} を考慮しても、超伝導PCSより機械式PCSの方が高効率となることが示されている⁽⁶⁴⁾。しかしながら、 E_{Larc} が増大すると、オン抵抗を零とできた機械式PCSのメリットが低下することや、液体ヘリウムの蒸発量増加とそれに伴うクライオスタット内の圧力が上昇すること、あるいは、図5-2に示されたアーク消弧時に発生するサージ電圧による電気絶縁への影響^{(77),(78)}等を考えると、機械式PCSの実用化に際してはアーク放電の抑制が重要となるであろう。

5.4.2 アーク放電発生後の超伝導接点接続形成機構

(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 図5-6に、回路1、2におけるアーク放電実験後の接触子接触面状態を、粗度計で測定した結果を示す。また、図5-7にその接触面をSEMで観測した結果を示す。アーク放電発生後の接触面は、図5-6に示されるように実験前(図3-4(a)鏡面仕上げ)と著しく異なり、高さ20 μm 以下の凹凸が形成されている。回路2では、このような凹凸は接触面の一部にのみ形成され、陰極と陽極の違いは殆ど見られないのに対し(図5-6(b))、回路1では、回路2より更に広い領域で凹凸が形成されており(図5-6(a))、特に陽極では表面全体に形成されている。ただし、両回路とも直径がmm程度となるような大きなクレーターが形成されることはなかった。

回路1で用いられた陰極表面は、大部分が図5-6(a)に示されるように、実験前の状態と殆ど変化がなく、図5-7(a-1)のような状態であった。しかし、図中の白い点で示されるような微小な粒子の付着が見られた(同図(a-2))。中心部は図5-7(a-3)のような陰極点と思われる放電痕が観測され、図5-6(a)陰極の中心付近に示されている凹凸部は、この放電痕に対応する。また、図5-7(a-4)のように、その放電痕の凸部が潰されて平坦になっている様子が観測された。一方、陽極表面は、全体がほぼ図5-7(a-5)のような状態で、溶融金属が吹き付けられ凝固したような跡(同図(a-6))が観測された。これは、陰極点から溶融・噴出したNbTi蒸気が、対向する陽極表面に広範囲に付着したためであると考えられる(図5-6(a)陽極)。前述した陰極表面上の微粒子は、このNbTi蒸気の一部が、液体ヘリウムの対流あるいは重力により陰極表面上に付着し凝固したものと考えられる。陰極点と対面する陽極中心付近では、図5-7(a-7)のような同図(a-6)と比べて大量のNbTi蒸気が一度に吹き付けられたような跡が見られた。この凸部の一部は、同図(a-8)のように先端が切削され、その表面上に筋状の痕跡と終端部に融着のあとを示すブリッジが形成されていることが確認された。他方、回路2における陰極、陽極両表面での放電痕は、図5-7(b-1、3)に示されるように、殆ど形態

に差がなく、回路1での陰極表面(同図(a-4))と酷似していることがわかる。図5-7(b-2)と図5-6(b)陰極から、回路2で接触面がアーク放電の影響を受ける範囲は、直径1.6 mm程度の円内にあると推定できる。なお、図5-7(b-4)のように、同図(a-4)と同様の凸部が潰されて平坦な面が形成されている様子が、回路2でも観測された。すなわち、アーク放電発生後の接触面は、放電痕による凹凸が形成され接触面性状は変化するが、スイッチ閉時には凸部が接触し、接触した面の一部に融着部(ブリッジ)が形成されている。このことから、アーク放電発生後に形成された超伝導接点接続は、アーク放電の発生がない場合と同様にスイッチ閉時の機械的摩擦による融着部(ブリッジ)の形成によることがわかる。

(2)クエンチ電流の増加 以下では、アーク放電を伴う開閉と共にクエンチ電流が増加する機構を、ブリッジモデルに基づき考察する。図5-8は、図5-4の結果を I_T と G_C の関係でまとめ直したものである。 I_T が飽和を示すまでの結果と、 F_C を増加させた後で I_T が再び増加を示した結果を(4.8)式に基づき近似したところ、飽和前後の実験結果はそれぞれ別の近似曲線 LI 、 LI' に従い増加していることがわかった。特に、飽和を示していた I_T が再び増加する時には、 $I_T - G_C$ 特性は、 LI から LI' のように G_C の大きな領域に遷移している。これらの結果から、飽和を示していた I_T が再び増加を示した理由は、 F_C を増加させたことでスイッチ閉時の可動子が有する運動エネルギーが増加し、それに起因して飽和傾向にあった真実接触面 S_C が再び顕著に増加を始め(図中①)、それと共にブリッジ面積 S_B が増加するようになった(図中②)ためであると考えられる。

(3)アーク放電による真実接触面の変化 (4.3)式に示されるように、真実接触面 S_C と G_C の平方根は比例関係にあり、測定された G_C から S_C の変化が推定できる。一定の F_C と F_p でスイッチ開閉を繰り返す場合、(4.3)式と(4.6)式から、 S_C が飽和を示すまでは、 G_C は開閉回数 N に対して

$$G_C = \frac{2}{\rho\sqrt{\pi}} \sqrt{k_{CN}N + S_{C0}} \quad (5.1)$$

の関係に従い増加することが予想される。

図5-5(a)の結果を開閉回数と G_C の関係でまとめ直すと、図5-9のようになる。図中の4本の曲線 $L_{G0} \sim L_{G3}$ は、それぞれアークを発生させる前の I_T が飽和する前後の結果(L_{G0} 、 L_{G1})、及び、遮断電流30 Aと50 Aでアークを発生させた後の結果(L_{G2} 、 L_{G3})を(5.1)式で近似したものである。図中ハッチング部は、図5-5(a)の I_T が飽和を示した領域に対応するが、この領域で L_{G0} から L_{G1} のように(5.1)式中のパラメータ k_{CN} が減少している。これは、 N に対す

る S_c の増加割合の低下を意味している。このように、 S_c が飽和する傾向を示したことで、 S_b さらには I_T の飽和が引き起こされたと考えられる。また、シンボル▲、■で示されるように、 G_c は、アークが発生した後もアークを発生させる以前の値より低下することはない、遮断電流を 30 A から 50 A に変化させた時に約 700 S の低下が見られた他は、基本的にアークの発生を伴うスイッチ開放と共に増加していることがわかる。アーク発生後の G_c の増加割合を (5.1) 式の定数 k_{CN} で評価すると、 k_{CN2} と k_{CN3} はそれぞれアークを発生させる前の定数 k_{CN1} より 3.92、5.16 倍大きく、アーク発生後に G_c の N に対する増加割合が大きくなることが定量的に示された。この k_{CN} の増加割合と遮断電流の増加割合がほぼ等しいことから、 k_{CN} の増加はアークのエネルギー E_{arc} に依存するものと考えられる。なお、 I_T が飽和を示す前の定数 k_{CN0} との比較においても、アーク発生後の k_{CN} は 2 倍近く大きくなることが確認された。

一方、図 5-5(b) に示されるような回路 2 における結果でも、アーク放電発生後の k_{CN} は、アークの発生がない場合の 4~10 倍大きくなることが確認された。しかしながら、 E_{arc} が 3 桁以上異なる回路 1 と回路 2 の両回路で、アークによる k_{CN} の増加に顕著な相違が見られなかった。図 5-7 からわかるように、アークによる表面状態の変化は、回路 1 では接触面全体で認められるが、回路 2 では直径 1.6 mm ほどのごく狭い領域に限られている。一方、真実接触面積 S_c を円形状で $\rho = 5.6 \times 10^{-7} \Omega m$ と仮定し、(4.3) 式を用いて $G_c = 2500$ S におけるその直径を求めると 1.4 mm となる。このように、 S_c は回路 2 におけるアーク影響領域とほぼ同じ大きさであり、このため、両回路で S_c が受ける E_{arc} の影響に顕著な差が生じなかったものと考えられる。

(4) クエンチ電流と接触コンダクタンスの関係 図 5-5(a) を (4.8) 式を用いて I_T と G_c の関係でまとめ直した結果を、図 5-10 に示す (テスト 2)。アーク放電の発生がなく I_T が飽和を示す前の結果と、アークを発生させた後の結果を (4.8) 式に基づき近似したものが、曲線 $L2$ 、 $L2'$ である。両 I_T は共に (4.8) 式に従い増加しており、また、 I_T が飽和後に再び増加するときの $I_T - G_c$ 特性は、図 5-8 のテスト 1 で示されたものと同様に、 $L2$ から $L2'$ のように G_c の大きな領域に遷移していることから、アーク放電後の特性もブリッジモデルに基づき理解することができる。すなわち、図 5-5(a)、(b) で示されたアーク放電を伴うスイッチ開閉時のクエンチ電流の増加は、アークにより真実接触面 S_c の顕著な増加が引き起こされたことに起因し (図 5-9)、これと同時に S_b の形成が促進され、 I_T が増加したのと考えられる。アーク放電後の接触面は、図 5-6(a) 陽極に示されるように、微視的にみると多数のテーパ状接触子の集合とみることができ、テーパ形状の接触子は接触面の接線方向にも摩擦力が作用するため効率よくブリッジが形成されることが第 4 章で示されていることから、この

ような形状が S_c 及び S_g の増加をもたらした主因と考えられる。なお、接触子は液体ヘリウム中に浸漬されているため、アーク放電による接触面の酸化は考えられない。しかも、詳細は次節で述べるが、アークの発生により接触面の一部は除去され、露出した清浄な面で接触が行われるようになる。そのため、アーク発生後の G_c 増加の一因として ρ の低下も考えられるが、 G_c だけでなく I_T も G_c の2乗に比例して増加しており、 ρ の低下より I_T の増加は説明できないことから、 G_c の増加は主に接触面形状の変化による S_c の増加によるものと考えるのが妥当であろう。

5.4.3 酸化膜除去効果

第3章で述べた方法で、NbTi 接触子の接触面上に酸化膜を形成させた。室温で100 mΩオーダーの接触抵抗を示した接触子を回路1に用いて、 $F_c = 588$ N一定でアーク放電を伴わない開閉を100回繰り返す、その後に遮断電流30 Aまたは50 Aでアークを伴う開放を繰り返したときのクエンチ電流と接触抵抗特性を、図5-11に示す。なお、図中 $I_T = 0$ は超伝導接点接続が形成されていないことを表す。また、超伝導接点接続が行われた場合、接触抵抗はクエンチ後の値で表した。 $N \leq 100$ のアーク放電を伴わない開閉を繰り返している間は、第4章でも論じたように、超伝導接点接続は形成されず、接触抵抗は100 mΩオーダーの高い値を保持したままである。一方、一度アークを発生させると、接触抵抗はmΩオーダーに低下し、アークを伴う開放2回目でクエンチ現象($I_T = 3.9$ A)が観測されるようになり、超伝導接点接続が形成されるようになった。更にアークを伴う開閉を繰り返すと、初期の数回のみ超伝導接点接続が形成されない場合があったが、それ以外では、 I_T は開閉回数と共に増加し、68 Aに達した。接触抵抗が低下していることから、これはアークにより酸化膜を含む接触面の一部が除去され、露出した清浄な面で接触が行われるようになり、その面上にブリッジが形成されるようになったためであると推定される。このアーク発生後の結果を図5-10に示したものがテスト3である。テスト3の $I_T - G_c$ 特性も(4.8)式の近似曲線L3に従っていることが確認できる。また、 G_c の値は、同様の条件でアーク放電を発生させたテスト2の G_c の値とほぼ一致し、2000 S以上を示していることから、アークによる酸化膜の除去とそれに基づく上述の推定は正しいことがわかる。

次に、室温での接触抵抗が約60 mΩを示した酸化膜ありの接触子を用いて、 $F_c = 588$ N一定でアーク放電を伴わない開閉を繰り返した。この場合、30回程度開閉を行うとクエンチ現象が観測されるようになった。この結果を図5-10に表したものがテスト4であり、この $I_T - G_c$ 特性もテスト3と同様に(4.8)式の近似曲線L4に従っていることがわかる。テス

ト4では、室温での接触抵抗がテスト3よりも小さいことから酸化膜厚がより薄いものと推定され、このためにアークを発生させなくてもスイッチ開閉のみで酸化膜が除去され、超伝導接点接続が形成されたと考えられる。しかしながら、テスト4の G_c は400S以下であり、テスト3に比べると一桁ほど小さい。以上の検討結果より、酸化膜の除去は、アーク放電を伴うスイッチ開閉の方がより広い領域で行われることが明らかとなった。

5.5 むすび

本章では、まず超伝導コイルと接続されたNbTi機械式PCSのスイッチ開放時のアーク放電特性を調べ、アークが超伝導接点接続に及ぼす影響を検討した。更に、酸化膜が形成された接触子を用いて、アーク放電による酸化膜除去効果と超伝導接点接続の形成可能性を調べた。本章で得られた主な結果を要約すると以下のようになる。

- (1) SMESシステムのエネルギー転送過程を模擬して実施したNbTi機械式PCSのスイッチ開放時のアーク放電特性は、基本的には既に明らかにされている接触子にCuを用いた場合と同様であった。しかし、アーク維持電圧は12 VとCuの場合(15~25 V)より低下することがわかった。
- (2) 超伝導接点接続はアーク放電発生後も形成された。最大遮断電流を50 Aとした本実験では、アーク放電によるスイッチ特性の著しい低下は認められず、スイッチ開閉回数に対して飽和を示していたクエンチ電流は、アークを伴う開閉と共にむしろ増加した。
- (3) アーク放電発生後の接触面は、放電痕による20 μm 以下の凹凸が形成されるが、接触抵抗に影響を与える真実接触面はアークを伴う開閉と共に増加することがわかった。(2)のクエンチ電流の増加は、この真実接触面の増加に起因したブリッジの形成によることがブリッジモデルに基づく解析から明らかとなった。
- (4) 機械式PCSのスイッチ開放時に発生したアーク放電は、接触面上に形成された酸化膜などの不純物を除去するコンディショニング効果を有し、この点で超伝導接点形成に有効であることが示された。

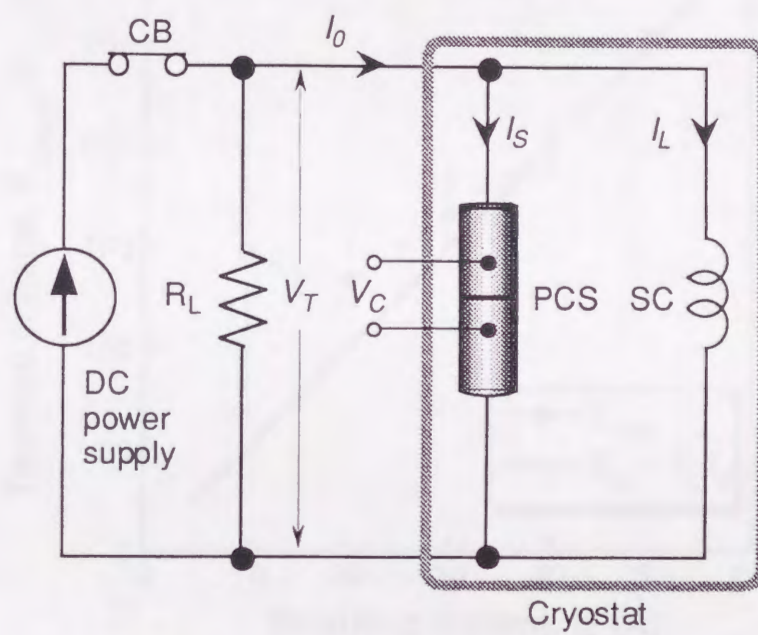


図 5-1 アーク放電特性実験回路（回路 1）
（回路 2 は回路 1 から SC と R_L を取り除く）

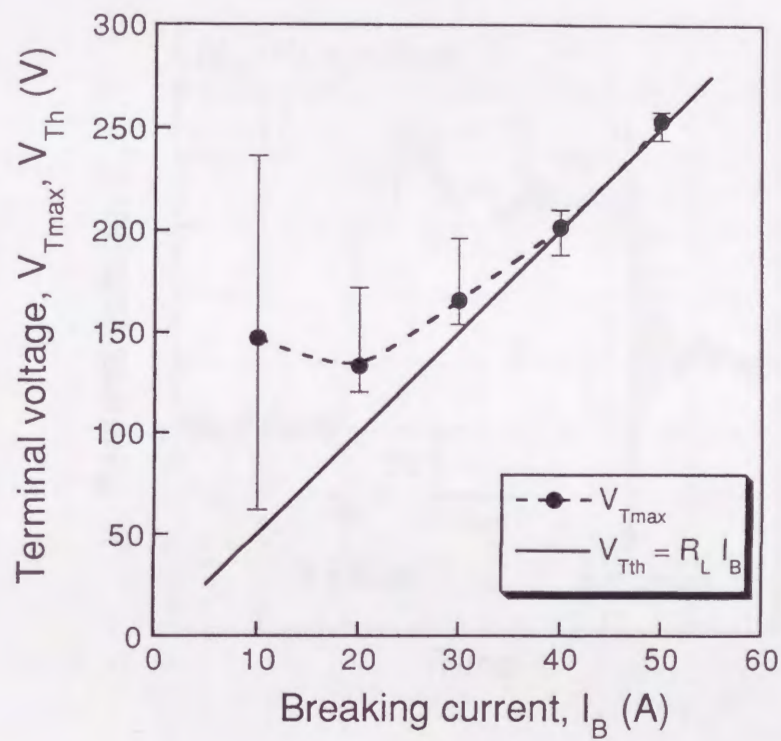


図 5-2 最大端子電圧の遮断電流依存性

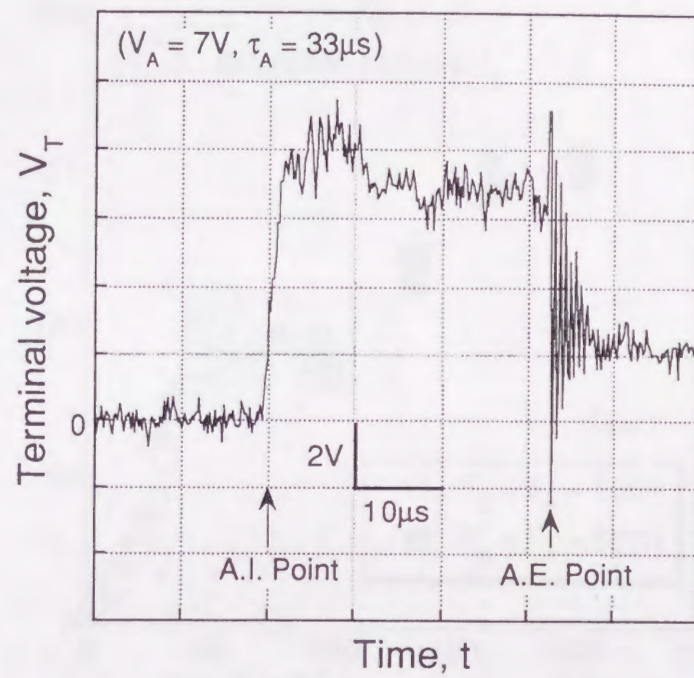


図 5-3 回路 2 での PCS 開放時のアーク電圧波形 ($I_B = 50 \text{ A}$)

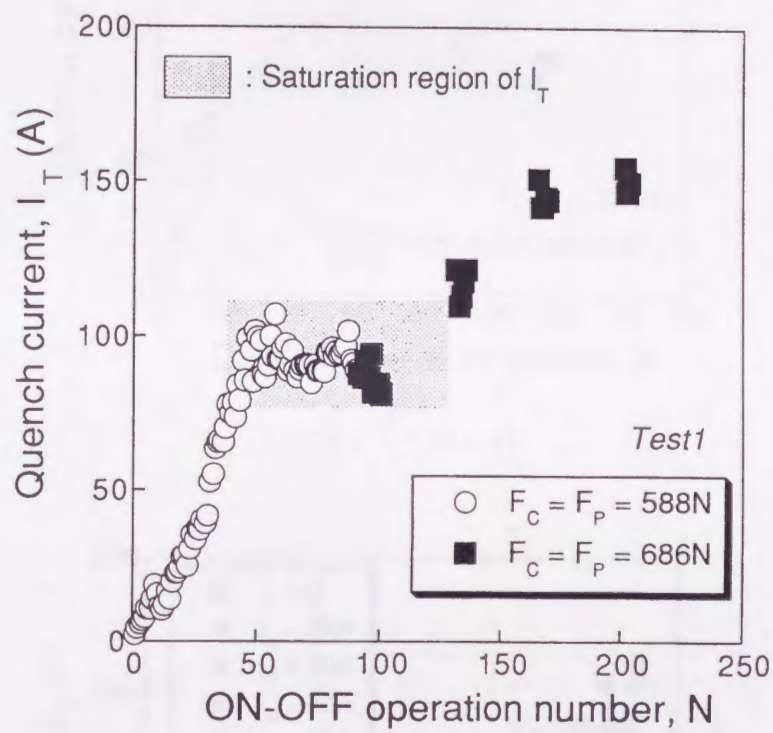
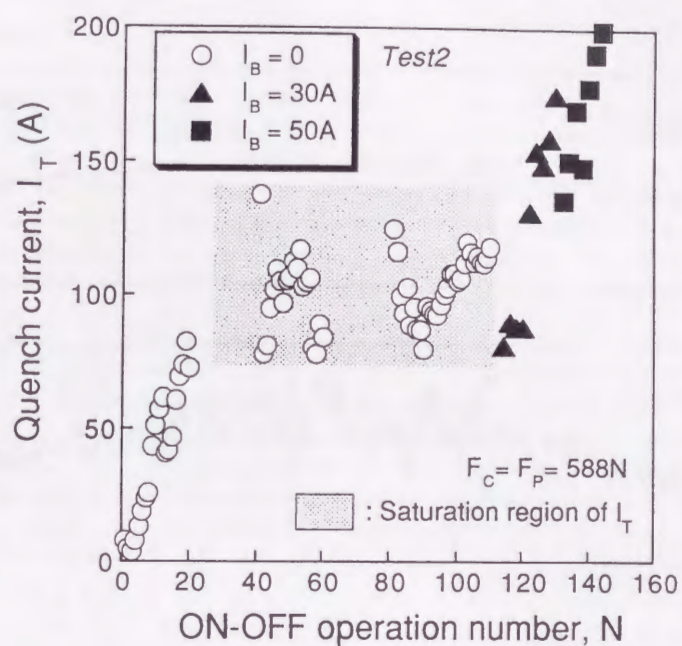
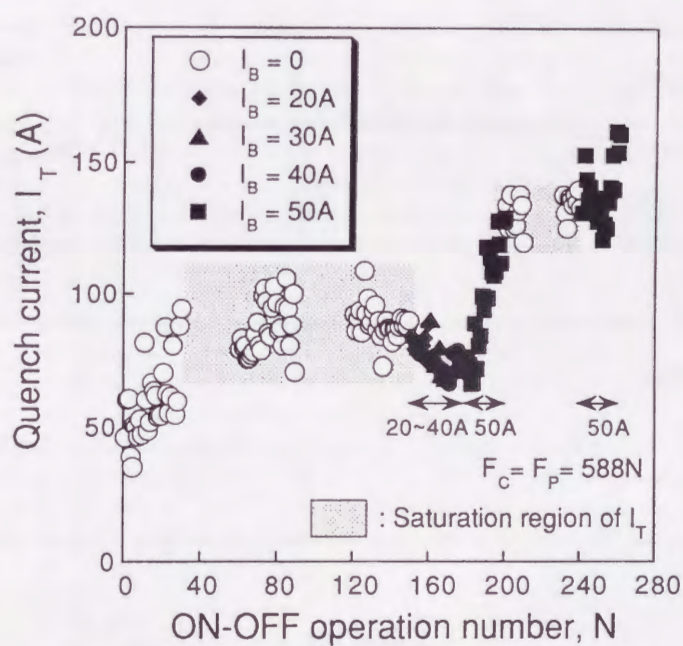


図 5-4 $I_b = 0$ でアーク放電の発生がない場合のクエンチ電流のスイッチ開閉回数依存性 (テスト1)

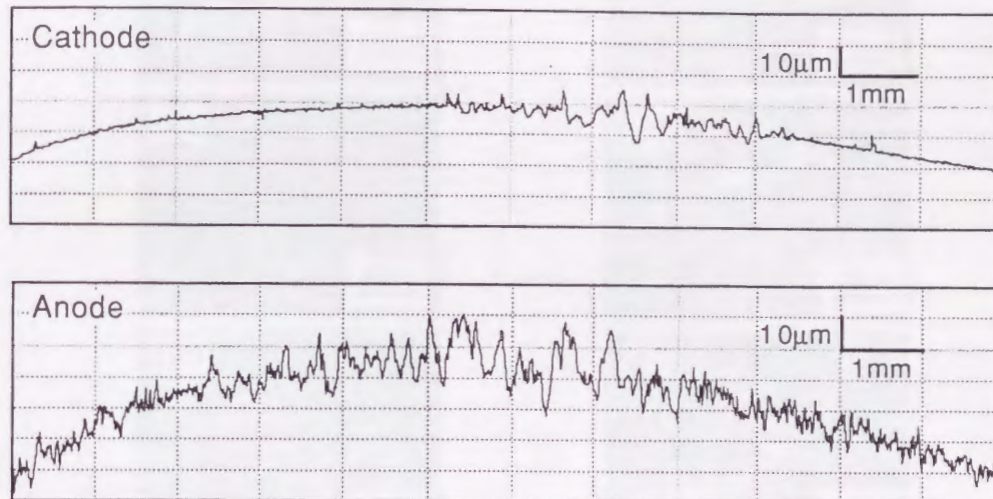


(a) 回路 1 (テスト 2)

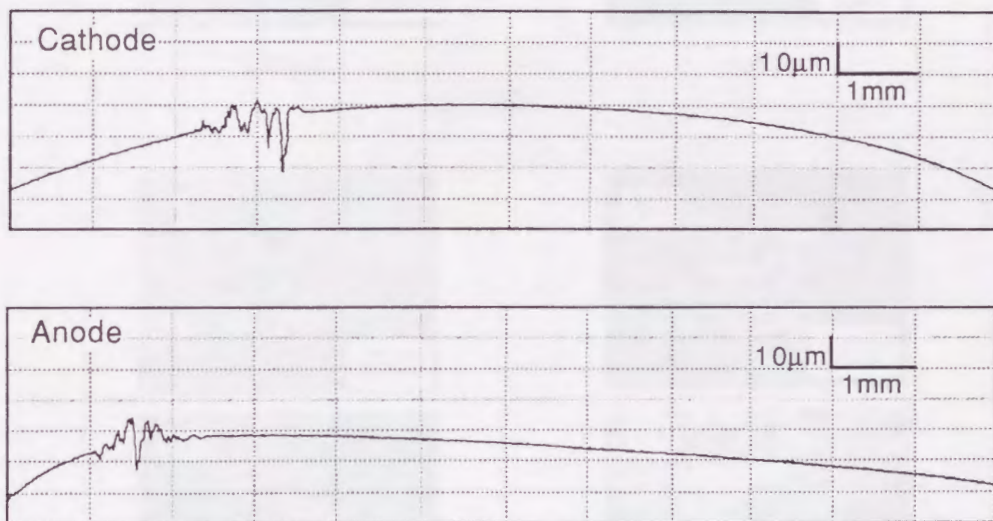


(b) 回路 2

図 5-5 アーク放電がクエンチ電流特性に及ぼす影響



(a) 回路 1



(b) 回路 2

図 5-6 アーク放電実験後の接触面表面プロファイル

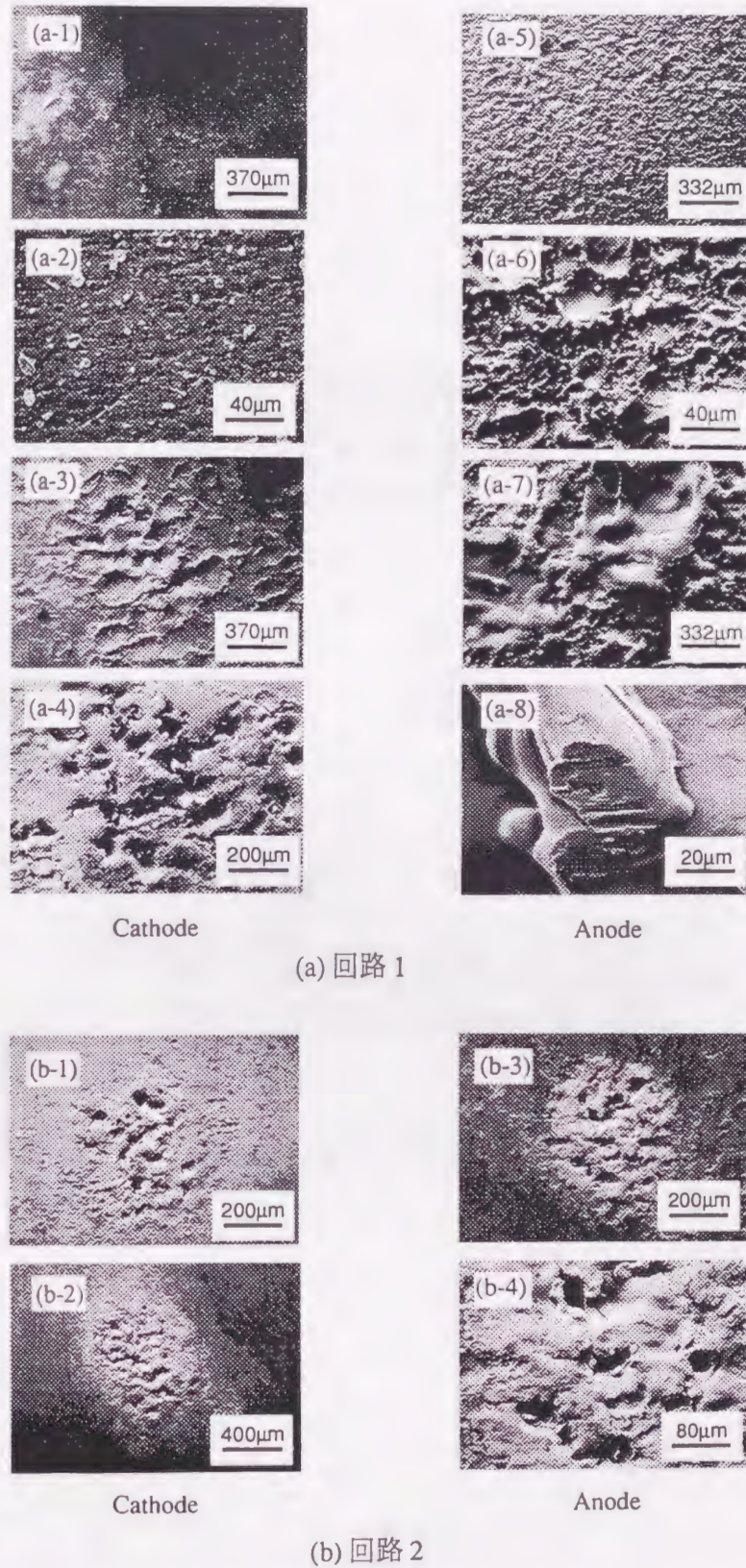


図 5-7 アーク放電実験後の接触面の SEM 観測写真

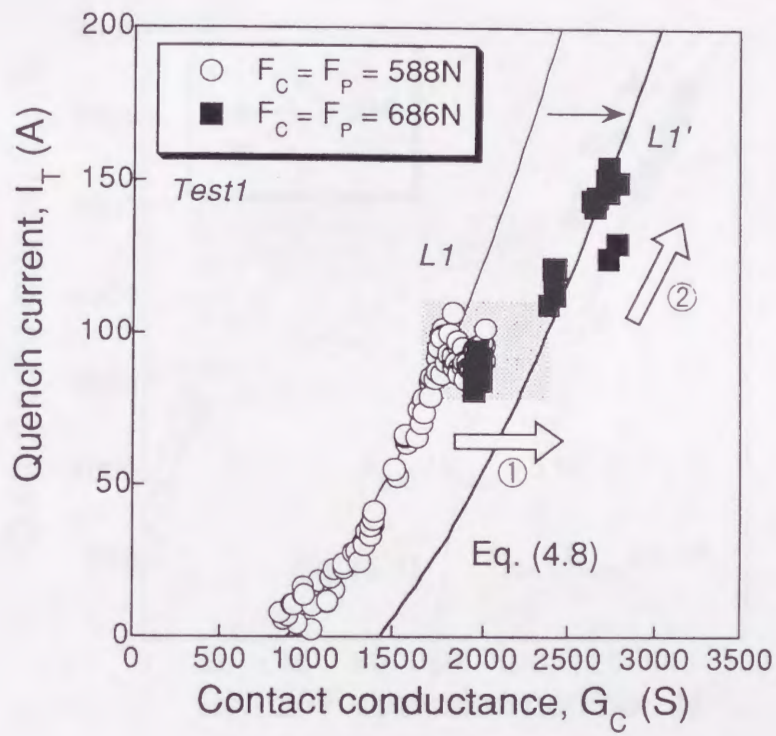


図 5-8 図 5-4 (テスト 1) のアーク放電の発生がない場合の $I_T - G_C$ 特性

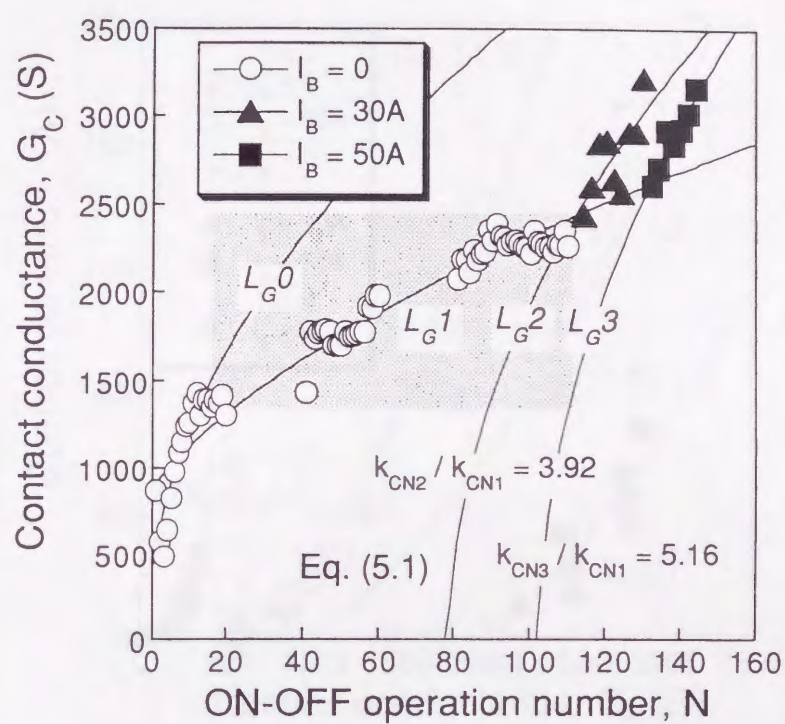


図 5-9 図 5-5(a) におけるアーク放電が接触コンダクタンスに及ぼす影響

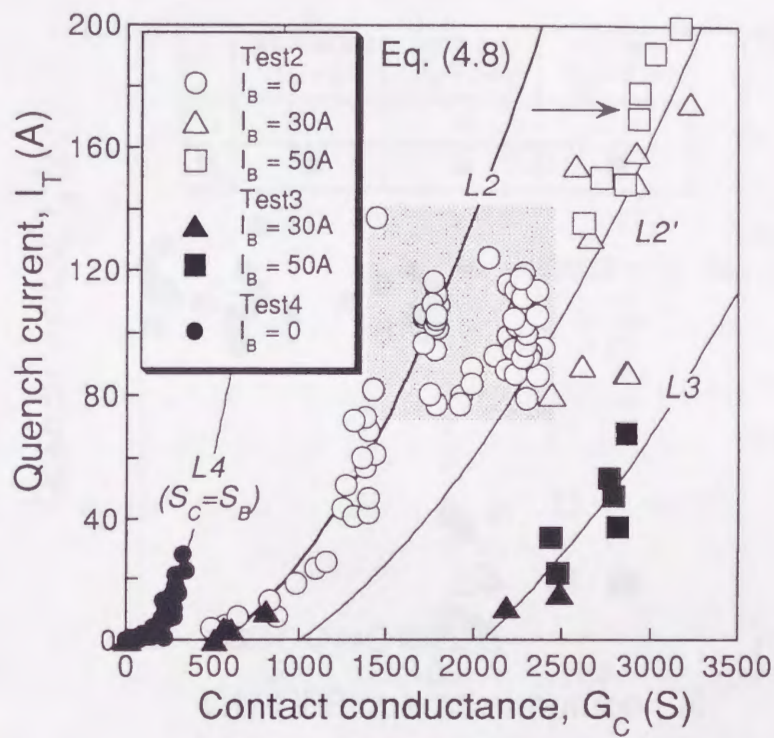


図 5-10 テスト 2~4 のアーク放電が発生した場合の $I_T - G_C$ 特性

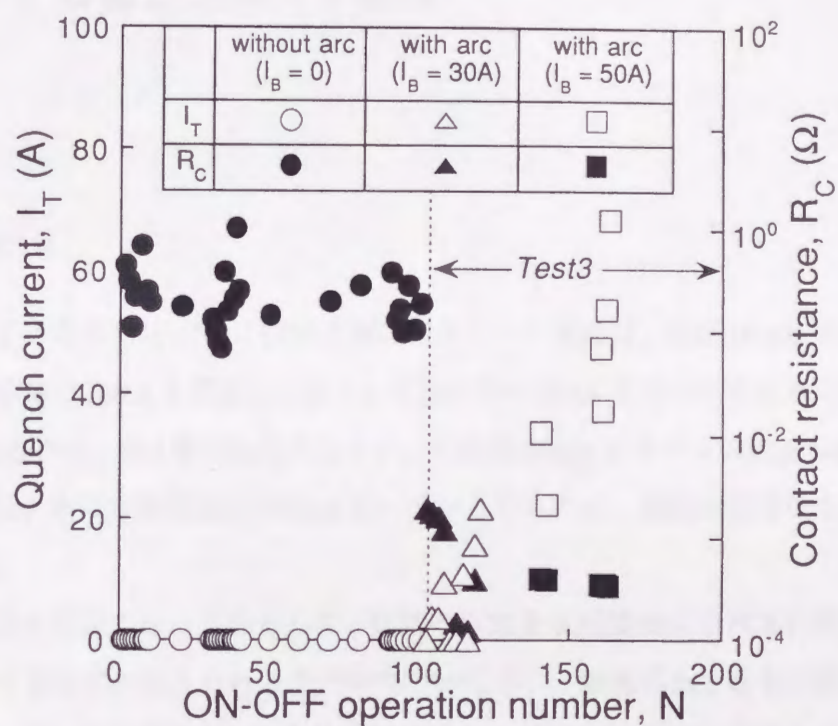


図 5-11 酸化膜が形成された接触子におけるアーク放電がクエンチ電流と接触抵抗に及ぼす影響 (テスト 3)

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

6.1 まえがき

これまで述べてきたように、NbTi機械式PCSのクエンチ電流は、直径16 mmの円柱状接触子を持つPCS単体で200 Aを達成しており、理論的には数kAまで増加できる可能性がある^{(116),(117)}。しかしながら、第2章で論じたように、大規模SMESシステムの貯蔵容量はGWhオーダーにも達し、その定格電流は100 kAオーダーとなるため、実機用には更なる大容量化が必要となる。

PCSの大容量化を実現する一手段として、複数のPCSを並列接続してPCS回路全体の電流容量を増加させる方法が考えられる^{(73),(100),(120),(139),(140)}。特に、機械式PCSはオフ抵抗を無限大とできるため、第4章で指摘したように、超伝導PCSのように並列接続時にオフ抵抗が低下することがなく、PCS全体としての安定性・信頼性向上⁽⁷³⁾の観点からも有利である。

本章では、並列接続されたPCS(以下、並列PCS回路と呼ぶ)の最も単純な例として2組のNbTi機械式PCSを使用し、スイッチの接続抵抗による電流分布が支配的となる条件下で、スイッチ容量とクエンチ特性を実験により調べた。更に、機械式PCS単体にパルス電流を印加して電流が急激に変化した場合のクエンチ特性を詳細に調べ、並列接続された2組の機械式PCSが連続してクエンチする機構を検討した。

6.2 並列PCS回路のスイッチ容量

6.2.1 並列化によるスイッチ容量の増大

並列PCS回路の各PCSは、それぞれのPCSに流れる電流がそのPCSのクエンチ電流値 I_T

に達すると同時にクエンチすると考えることができる。並列PCS回路のスイッチ容量を、「何れのPCSもクエンチすることなしに通電できる最大の回路電流」と定義すると、各々のクエンチ電流が I_{Ti} である N 組のPCSを使用した N 並列PCS回路のスイッチ容量 I_Q は

$$I_Q \leq \sum_{i=1}^N I_{Ti} \quad (6.1)$$

を満たす範囲に制限される。PCSの設計・製作の観点からは、 I_{Ti} は可能な限り大きく、且つ同じ値を有することが望まれる。第4章で示されたように、接触子接触面を一定の手法で加工することで、ほぼ一様な特性を有する機械式PCSは製作可能である(標準接触子)。このように、各PCSの I_{Ti} が等しい値 I_{TE} を持つ場合には、(6.1)式は次式となる。

$$I_Q \leq N I_{TE} \quad (6.2)$$

即ち、 N 並列PCS回路のスイッチ容量の最大値は、PCS単体のクエンチ電流の N 倍であり、この最大値が得られるのは、各PCSに流れる電流が同時に I_{TE} に達し、全PCSが一斉にクエンチする場合、即ち各PCSに均等分流が行われる場合である。

6.2.2 実験回路の電流分布とスイッチ容量

6.2.1項で述べたように、並列PCS回路のスイッチ容量は各々のPCSのクエンチ電流と分流比に依存して決定される。以下、2組のNbTi機械式PCSを用いた実験回路を例に、具体的にスイッチ容量について考察する。図6-1に実験装置の等価回路を示す。図中の記号の意味は、以下に示す通りである(添字 $i=1, 2$ はPCS1、PCS2の値であることを示す)。

R_{Ci} : 機械式PCSのクエンチにより発生する接触抵抗。クエンチ前は零である。

R_{Ji} : R_{Ci} を除く電流路の抵抗。主にPCS接触子と電流リードの接続部の抵抗に依存するが、実験では電流路に挿入した分流用シャント抵抗 R_{sh} を含む。

L_i : 電流路のインダクタンス。接触子は太く短いことから主に電流リードの寸法と配置に依存する。

以下では、 R_{Ji} を接続抵抗と呼び、各PCS電流路の全抵抗を R_i として R_{Ji} と R_{Ci} の和で

$$R_i = R_{Ji} + R_{Ci} \quad (i=1, 2) \quad (6.3)$$

のように定義する。電源電流を増加率 J_0 (A/s)一定で増加させる場合、各電流路に流れる電流 I_1 、 I_2 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{L_2 R_1 - L_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} J_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t \right) \right] + \frac{R_2}{R_1 + R_2} J_0 t \\ I_2 &= \frac{L_1 R_2 - L_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2} J_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t \right) \right] + \frac{R_1}{R_1 + R_2} J_0 t \end{aligned} \quad (6.4)$$

6.2.1項で述べた並列PCS回路のスイッチ容量の定義に従えば、スイッチ容量 I_Q は、 I_1 か I_2 のどちらかがそれぞれのPCSの I_T に最初に達したときの両電流の和として、(6.4)式から推定できる。なお、クエンチ発生後は、接触抵抗 R_c は時間と共に増加するため、時間 t の関数 $R_c(t)$ として取り扱う必要がある。

6.3 実験装置の構成と実験方法

6.3.1 実験回路

実験回路は図6-1に示した通りで、並列回路部はクライオスタットB内で液体ヘリウムにより浸漬冷却される。PCSの接続に用いた電流リードは銅製で、接続抵抗を任意に設定できるように分流用シャント抵抗 R_{sh} を各電流路に挿入してあるため、 R_j は $m\Omega$ オーダーとなる。各電流路のインダクタンス L は $0.2 \sim 0.8 \mu H$ である。実験では、電源電流を $J_0 = 1$ A/sと緩やかに増加させ、(6.4)式で決まる実験回路中の電流分布が L の影響を受けず、 R_j によってのみ決定されるようにした。ただし、クエンチにより R_c が発生して電流分布が急激に変化する際は、 L の影響を考慮する必要がある。表6-1に実験に使用した代表的な7種類(テスト1~7)のPCS組のクエンチ電流 I_T と接続抵抗 R_j の値を示す。各テストは、両PCSの R_j と I_T の関係により4つのグループに分類される(グループA~D)。各テストにおいて、大きな I_T を持つPCSの方をPCS1と呼ぶこととし($I_{T1} > I_{T2}$)、 I_{T1} で規格化したスイッチ容量によって各テストのスイッチ容量の増加割合を比較した。機械式PCSの接触子には、第3章で記述した鏡面仕上げを施した直径16 mmの標準接触子Aを用いた。

6.3.2 実験方法

クエンチの検出方法は、第4章で記述した通りである。スイッチ容量の測定は、両PCSを一定荷重 F_p で閉じている状態で、回路電流 I_s をほぼ1A/s一定でどちらかのPCSがクエンチす

るまで増加させて行った。このときの回路電流 I_s をデジタルCTで、各電流路の電流及び接触抵抗の各波形を、それぞれ R_{sh} の電圧降下及び接触部の電圧降下からデジタルオシロスコープを用いて測定した。

6.4 実験結果

6.4.1 クエンチと電流分布変化

スイッチ容量の測定において、一つのPCSがクエンチした後、もう一方のPCSも連続してクエンチする場合としない場合の2通りの現象が観測された。両者の典型的な結果として、図6-2(a)、(b)にそれぞれテスト3と4におけるクエンチ前後の接触抵抗 R_{C1} 、 R_{C2} 、各電流路の電流 I_1 、 I_2 、及び回路電流 I_s の波形を示す。 R_{C2} が最初に出現していることから、PCS2が最初にクエンチしたことがわかる(第一クエンチ)。この第一クエンチが発生した瞬間の回路電流 I_s がスイッチ容量 I_Q である。第一クエンチによる R_{C2} の発生と共に電流分布は変化しており、 R_{C2} の発生した電流路の電流 I_2 は減少し、クエンチしていない方の I_1 は増加している。両電流の和である I_s はほぼ一定であることから、減少分が他方のPCSに転流していることがわかる。図6-2(a)では、PCS2のクエンチ後約6 msに R_{C1} が発生しており(第二クエンチ)、連続してPCS1がクエンチしたことがわかる。一方、図6-2(b)では R_{C1} の発生はなく、PCS1はクエンチしていない。各テストにおけるクエンチの結果をまとめて表6-2に示す。グループA、B、Cでは連続してクエンチする場合としない場合の両方が観測されたが、グループDでは両PCSともクエンチした。

6.4.2 スイッチ容量

表6-2には、表6-1に示した各テストのスイッチ容量 I_Q の測定結果も示した。また、 I_Q を I_{T1} で規格化した値 I_Q^* と、 I_Q を I_{T1} と I_{T2} の和で規格化した値 I_{Qsum}^* も、併せて示している。表6-2から、両PCSの R_j と I_T がともに異なるグループAでは、 I_Q^* は1.17、1.01であり、並列接続を行っても I_Q は殆ど増加していないことがわかる。他方、グループB、Cのように R_j あるいは I_T のどちらか一方でも等しくできると、 I_Q^* はグループAより増加して1.21~1.57となり、並列接続による I_Q の増加が確認できる。更に、 R_j 、 I_T のいずれもほぼ等しいグループDでは、 I_Q^* は1.99となり、ほぼ(6.2)式で示される理論的な最大値である2倍まで増加できることが示された。一方、 I_{Qsum}^* を用いて(6.1)式で決まるスイッチ容量の最大値に対する達成率を評価すると、テスト1では、 I_Q^* は1.17倍と他のテストと比較して低かったが、 I_{Qsum}^* は0.927であり、ほぼ

個々のPCSの I_T 近くまで通電できていることがわかる。他方、分流比が最も異なるテスト6では、 I_{Qsum}^* は0.633と最も低く、両PCSの I_T を有効に利用できていないことがわかる。以上の結果からも、並列PCS回路のスイッチ容量を有効に増加させるには、 I_T だけでなく電流分布にも注意を払う必要があることがわかる⁽¹⁴¹⁾⁻⁽¹⁴⁴⁾。

6.5 考察

6.5.1 スイッチ容量の理論的検討

本実験条件下では、(6.4)式で表される電流分布に及ぼすインダクタンス L の影響は無視できるので、各PCSに I_T まで通電できたときのスイッチ容量の理論値 I_{Qth1} と I_{Qth2} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_{Qth1} &= \frac{R_{J1} + R_{J2}}{R_{J2}} I_{T1} \\ I_{Qth2} &= \frac{R_{J1} + R_{J2}}{R_{J1}} I_{T2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

実験で測定されるスイッチ容量 I_Q は、6.2.1項の仮定に従えば、(6.5)式の理論値 I_{Qth1} と I_{Qth2} の低い方の値に一致すると考えられる。代表してテスト3、4、6を例に取り、図6-3(a)～(c)に I_{Qth} と I_Q の関係を示す。(6.3)式から明らかなように、両電流路の抵抗比 R_2/R_1 は、第一クエンチが発生するまでは R_J のみによる値で、第一クエンチ後はクエンチしたPCSの R_c を含んだ値に変化する。図6-3から、第一クエンチにおける回路電流、即ちスイッチ容量 I_Q は、予想されたように I_{Qth} の低い方の値と一致していることがわかる。図6-3(a)に示されるように、第一クエンチ後の抵抗比の変化に従い、クエンチしていないもう一方のPCSにその I_T 以上の電流が転流される場合、つまり I_{Qth} に達する場合には、第二クエンチが発生する(シンボル■)。一方、図6-3(b)、(c)のように、もう一方のPCSにその I_T 以上の電流が転流されない場合には、第二クエンチは発生していない(シンボル□)。この第二クエンチの発生がない状態から更に電流を増加すると、図6-3(c)に示されるように、 I_{Qth} でクエンチすることが確認された(シンボル■)。他のテストのスイッチ容量を同様に R_J と I_T の関係から推定して表6-2の実験結果 I_Q と比較すると、両者の差は最大で0.75 A(相対誤差は2%以内)で、ほぼ一致することが確認された。

以上により、本実験条件下では、スイッチ容量は両PCS回路の抵抗比で決まる分流比と各PCSの I_T に依存して、(6.5)式で推定できることが示された。更に、連続するクエンチは、第

一クエンチによりクエンチしたPCSに流れていた電流の一部がクエンチしていないPCSに転流し、そのPCSの I_T 以上の電流が流れた場合に発生することがわかった。

クエンチ後も電流分布が変化しないように、 $R_c \ll R_j$ となるような R_{sh} を接続し、 R_j を約100 m Ω として実験を行ったところ、クエンチした後も電流分布は殆ど変化しないことが確認され、この場合連続するクエンチの発生はなかった⁽¹¹⁹⁾。しかし、実機では $R_c \ll R_j$ とすることは現実的でないため、連続するクエンチを防止するには、クエンチしていない残りのPCSで通電電流を十分分担できるような並列接続数と、安全率を考慮したスイッチ容量を設定することが、必要であろう。

6.5.2 クエンチ機構の検討

(1)連続するクエンチのシミュレーション クエンチ前後の電流分布と第二クエンチ発生の有無を検討するため、図6-2に示したテスト3と4を例に取り、実験条件を考慮して(6.4)式に基づき電流分布の時間変化をシミュレーションする。クエンチにより発生する接触抵抗 $R_c(t)$ は、図4-5(b)に示したと同様の実測結果を考慮して

$$R_c(t) = R_{c0} \left[A + B \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_R} \right) \right) \right] \quad (6.6)$$

のようにステップ関数と指数関数の和で模擬した。測定結果より、定数A、Bはそれぞれ0.8と0.2とし、時定数 τ_R は3 msとした。 R_{c0} は各PCSの測定値を用い、クエンチ前は零とした。両電流路のインダクタンスは同一とし、測定値を考慮して0.2~0.8 μ Hの間で変化させ実験結果とよく合う値を用いた。インダクタンスが大きくなるほどクエンチ後の電流分布の変化は緩やかになる。図6-4(a)、(b)にテスト3と4のシミュレーション結果を実験結果と併せて示す。図6-4(b)のテスト4のシミュレーション結果(太線)は、実験結果(細線)とよく一致しており、クエンチ前後の電流分布とその時間変化をよく模擬できていることがわかる。また、シミュレーションにおいても連続するクエンチは発生しないことが示された。

一方、図6-4(a)のテスト3の結果では、図6-4(b)と同様にクエンチ前後の電流分布とその変化はよく一致しており、連続するクエンチの発生も示されたが、第二クエンチの発生時間に着目すると、シミュレーション結果の方が実験結果より早く発生しており、発生時間に相違がある。シミュレーション結果における I_{T1} を50.9 Aから52.0 Aに増加させるとクエンチ発生時間は一致することから、この差異は実験中に I_{T1} がわずかに増加したためとも考えられる。しかし、その増加量は1.1 A (1.022倍)であり、実験中に1 Aを超える I_T の増減は観測さ

ていないことを考慮すると、この結果は I_T が増加したと考えるよりも I_T に達した瞬間にクエンチが発生しなかったことに起因すると考えるのが妥当であろう。即ち、 I_T に達した後クエンチが発生するまでに時間遅れが存在することを示唆するものである。以下、 I_T に達した後クエンチが発生するまでの時間を「遅れ時間 T_D 」と呼ぶ。図6-4(a)の T_D は5.05 msである。

(2)パルス電流通電時のクエンチ遅れ時間特性 各PCSの I_T を測定する場合、スイッチ電流は1 A/sと非常に緩やかに上昇させた。これに対し、図6-2、図6-4に示したクエンチ時の電流分布変化の時定数は数msオーダーと短い。したがって、クエンチの時間遅れはこのように急激に変化する電流のみに対して発生する現象と考えられる。そこで、このような急激に変化する電流に対するクエンチ特性を詳細に調べるために、矩形パルス電流を一組のPCSに通電したときのクエンチ特性を調べた(パルス電流実験)。

入力する矩形パルス電流の波頭は、時定数 τ で指数関数的に増加する。実験では、時定数 τ として25 μ s、250 μ s、2.8msの異なる3種類を設定し、ピーク値 I_p を0.1 A単位で変化させた。パルス電流実験の結果、クエンチが発生するようになる I_p にはしきい値が存在し、その値はこれまで J_0 を1 A/s程度で増加させて測定したクエンチ電流 I_T と一致することが確認された。以下、この I_p のしきい値を「静的クエンチ電流 I_{T0} 」と呼び、実際にクエンチが発生する電流瞬時値を「動的クエンチ電流 I_{QD} 」として両者を区別する。これにより、遅れ時間 T_D は、電流が I_{T0} に達してから I_{QD} でクエンチが発生するまでの時間と再定義される。

図6-5にパルス電流実験によるクエンチ特性の一例として、 $I_{T0} = 12.7$ AであるPCSに $\tau = 250$ μ sでピーク値 I_p の異なるパルス電流を印加したときの入力パルス電流とクエンチ時の接触抵抗の波形を示す。また、図6-6に、 $I_{T0} = 6.1$ AのPCSに $\tau = 250$ μ sのパルス電流を繰り返し印加したときのクエンチ遅れ時間 T_D の分布を、 I_p をパラメータとして示す。図6-5からも、クエンチは、電流が I_{T0} に達した瞬間に発生するのではなく、遅れ時間を伴うことが確認できる。図6-6より、 I_p の増加とともに遅れ時間 T_D は顕著に低下し、またそのばらつきも小さくなることがわかる。特に、 $I_p = I_{T0}$ では、 T_D は数10~100 ms、長い場合には秒オーダーに達することもあり、広範囲にわたるばらつきが認められた。時定数 τ を25 μ sおよび2.8 msとした場合にも、 I_p に対する T_D 特性は図6-5、図6-6の結果と同様の傾向を示すことが確認された。次に、 I_{T0} に対する I_p の比を過電流率 O_{CR} として、各 τ における O_{CR} と遅れ時間 T_D の関係をまとめた結果を図6-7に示す。 T_D は平均値で表しているが、 $O_{CR} = 1$ 以外では殆どばらつきはない。 T_D は O_{CR} と τ に依存し、 τ が小さいほど、また O_{CR} の増加と共に顕著に低下することがわかる。現時点では、パルス電流によるクエンチ遅れ時間の発生メカニズムは明らかではなく、微小な溶融ブリッジによって橋絡された超伝導接点接続をもつ機械式PCSに固有の現

象なのか、あるいは超伝導体全般に共通した現象なのかも定かではない。一方で、この現象はクエンチを利用した超伝導限流器における限流動作開始電流の安定性の問題とも関連すると考えられ、今後更なる検討が必要である。

以上の結果に基づき、図6-4(a)で示されたテスト3の第二クエンチにおける遅れ時間について考察する。このときのPCS1の電流波形は、ほぼ $\tau = 250 \mu\text{s}$ 、 $O_{CR} = 1.022$ のパルス電流波形と見なすことができる。この条件に対する遅れ時間 T_d を図6-7から求めるとおよそ3 msとなり、 T_d の実測値5 msとほぼ一致する。このことから、図6-4(a)に示された第二クエンチ発生の実験結果とシミュレーション結果の時間差は、パルス電流に対するクエンチの遅れ時間に起因するものと結論づけられるであろう。

以上の結果、遅れ時間を考慮することで連続するクエンチ特性を正確に予測できることがわかった。しかし、遅れ時間を無視してもスイッチ容量を過大評価することはないため、安全サイドの設計を行う観点からは、スイッチ容量の推定に遅れ時間を考慮しなくても問題はないといえる。

6.6 むすび

本章では、NbTi機械式PCS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において、スイッチ容量とクエンチ特性を実験により調べた。得られた結果を各PCSの電流分布とクエンチ特性に基づき理論的に考察し、並列PCS回路のクエンチ機構を検討した。本章で得られた主な結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 並列PCS回路のスイッチ容量は、使用するPCSの容量と分流比に依存して決定され、同一容量を持つPCSを使用した場合、均等分流が行われるときに並列接続数倍の最大容量が得られる。
- (2) 2組のPCSを用いた並列PCS回路において、一つのPCSがクエンチして分流比が変化し、その結果、もう一方のPCSに臨界電流値以上の電流が転流すると、後者も連続してクエンチすることを実験で確認した。
- (3) 電流の時間変化が大きな場合、機械式PCSのクエンチは、静的クエンチ電流に達した瞬間に発生するのではなく、その後ある遅れ時間を経て発生する(クエンチ遅れ時

間)。パルス電流実験により、クエンチ遅れ時間はパルス電流のピーク値と立ち上がり時間に依存することを明らかにした。



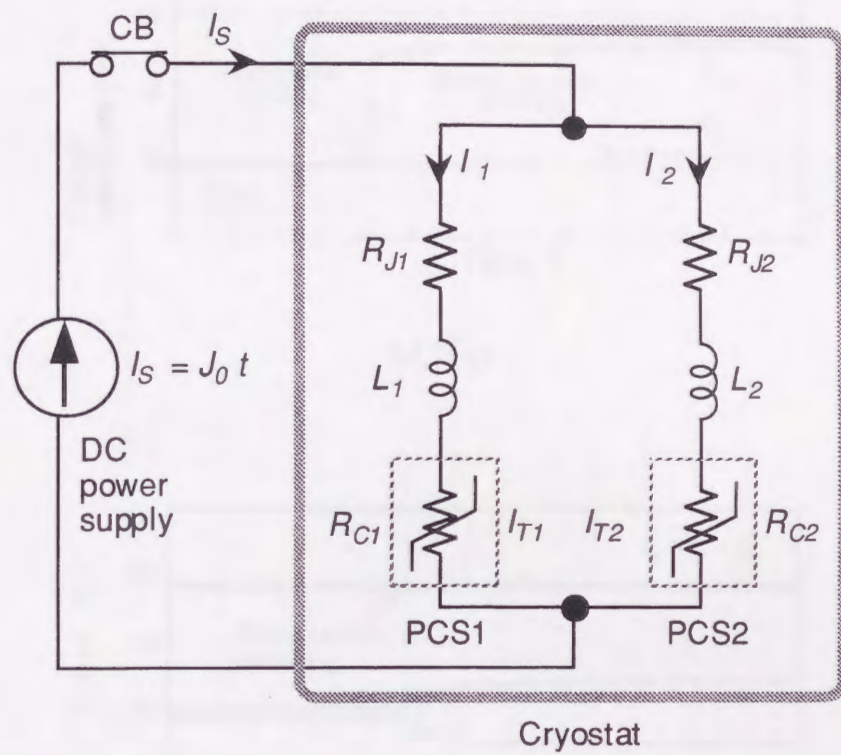
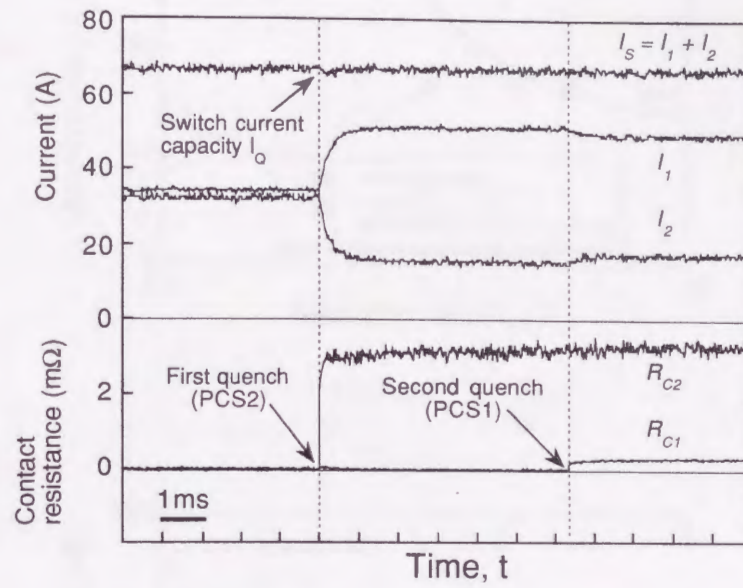
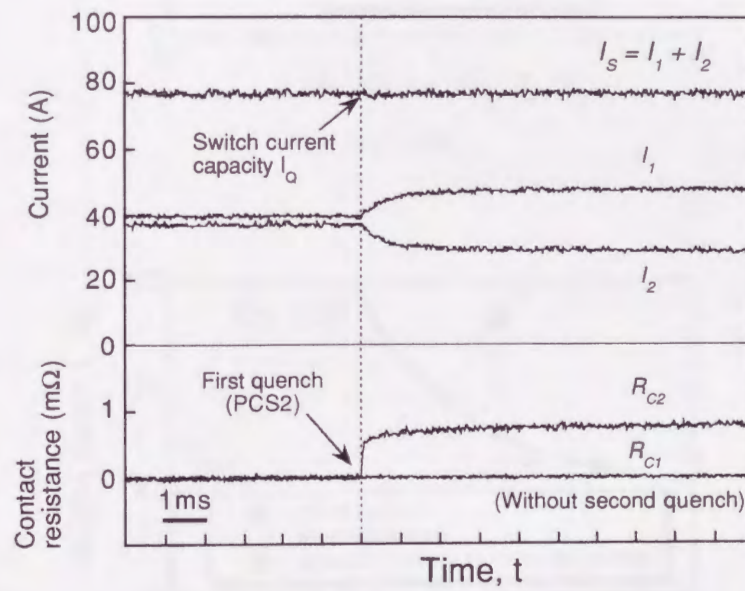


図 6-1 2組の機械式PCSから成る並列接続実験回路

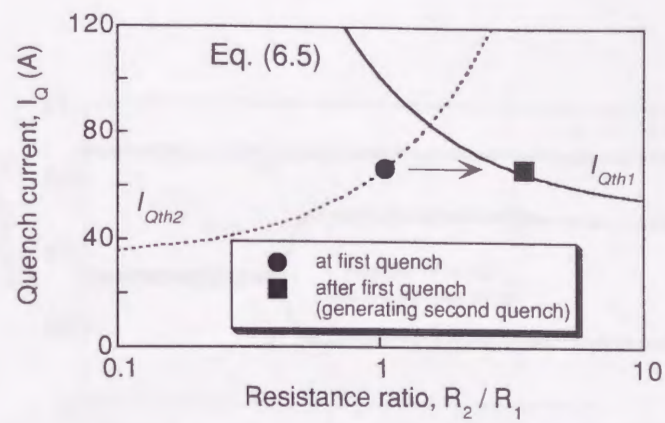


(a) Test3

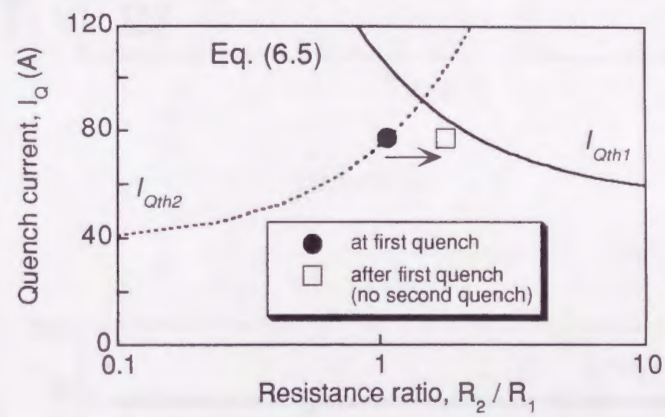


(b) Test4

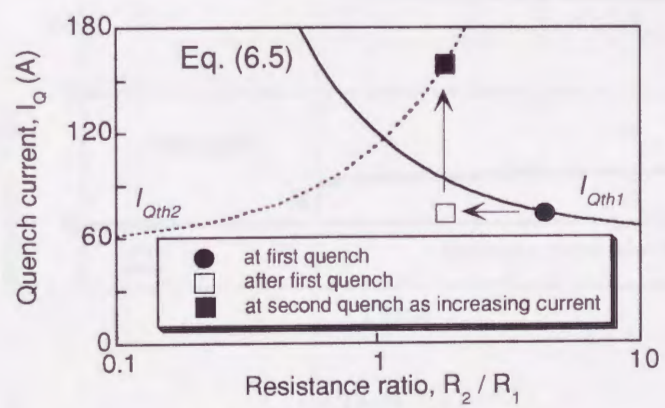
図 6-2 クエンチ前後の電流分布と接触抵抗波形



(a) Test3

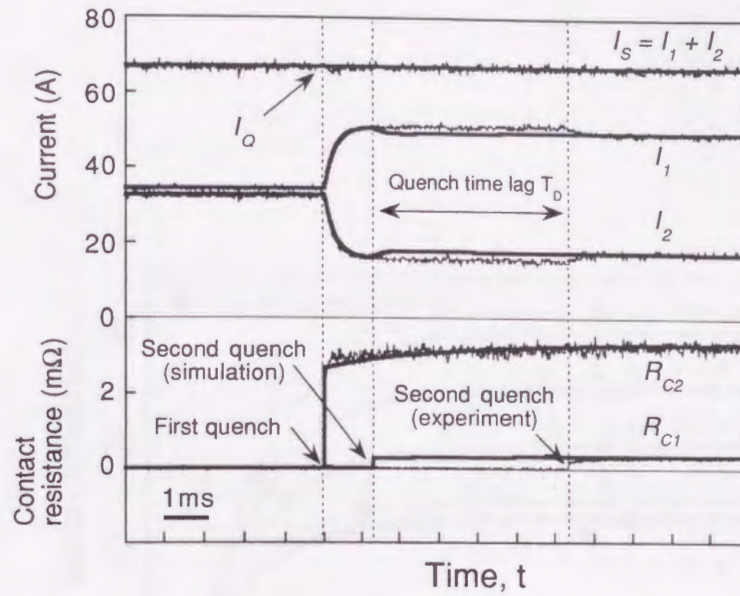


(b) Test4

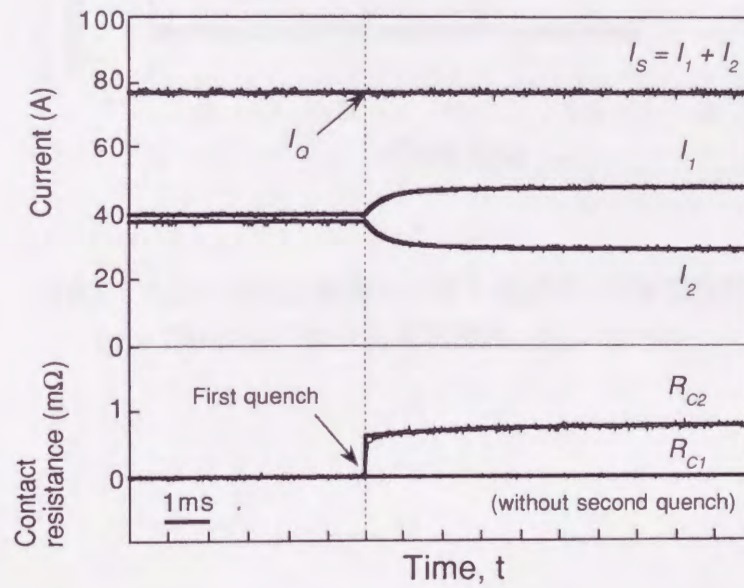


(c) Test6

図 6-3 抵抗比とスイッチ容量の関係



(a) Test3



(b) Test4

図6-4 テスト3、4を模擬したシミュレーション結果
(太線：シミュレーション結果、細線：実験結果(図6-2))

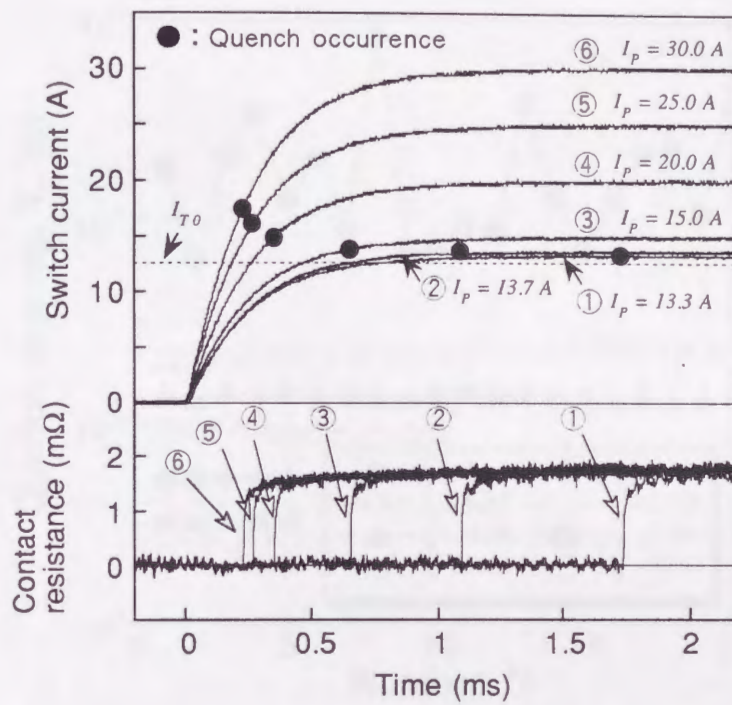


図 6-5 クエンチ遅れ時間のパルス電流ピーク値依存性
($\tau = 250 \mu\text{s}$ のパルス電流印加時、 $I_{T0} = 12.7 \text{ A}$)

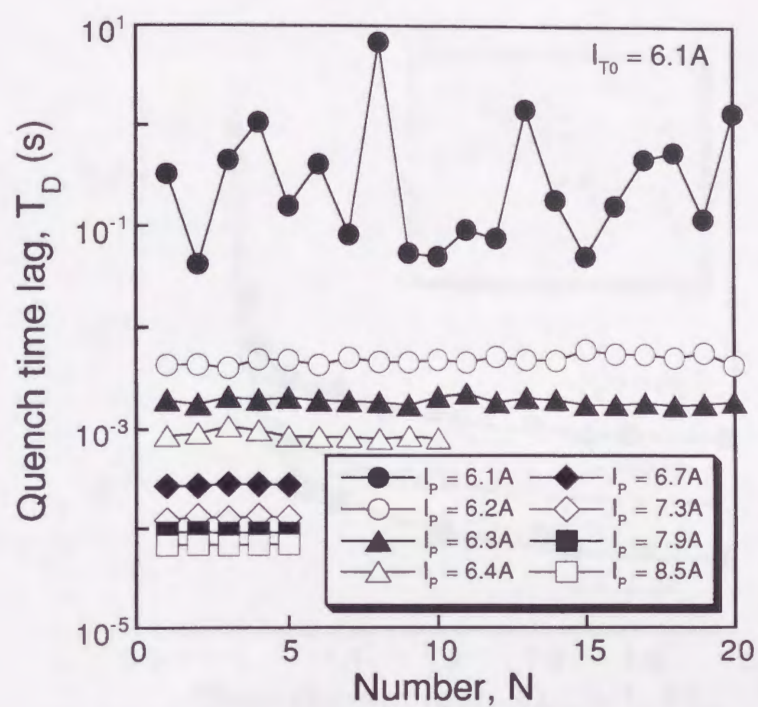


図 6-6 クエンチ遅れ時間のばらつき
($\tau = 250 \mu s$ のパルス電流印加時)

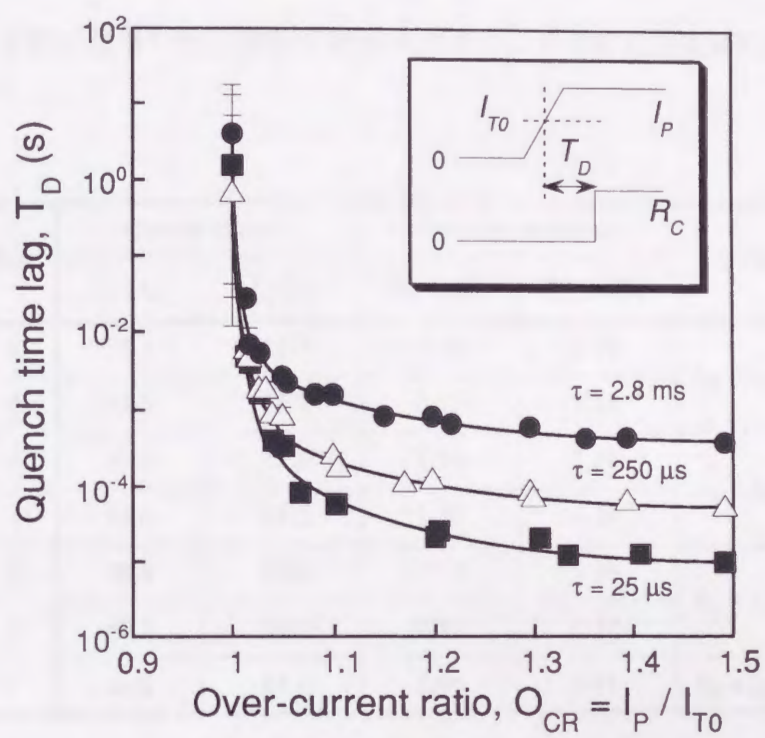


図 6-7 クエンチ遅れ時間特性

表 6-1 実験に使用した各機械式PCS組のクエンチ電流と接続抵抗の関係

Group	Test	Quench current		Junction resistance		Features
		I_{T1} (A)	I_{T2} (A)	R_{J1} (m Ω)	R_{J2} (m Ω)	
A	1	55.5	14.3	0.78	2.79	$I_{T1} \neq I_{T2}, R_{J1} \neq R_{J2}$
	2	42.3	16.1	0.77	1.25	
B	3	50.9	32.6	1.34	1.41	$I_{T1} \neq I_{T2}, R_{J1} = R_{J2}$
	4	54.0	37.2	1.30	1.38	
C	5	58.9	53.6	0.79	1.39	$I_{T1} = I_{T2}, R_{J1} \neq R_{J2}$
	6	60.2	56.2	0.81	3.52	
D	7	44.6	44.6	3.96	3.91	$I_{T1} = I_{T2}, R_{J1} = R_{J2}$

表6-2 表6-1に示した各テストのクエンチ特性

Test	Switch current capacity I_Q (A)	Quenched PCS	Normalized I_Q	
			$I_Q^* = I_Q / I_{T1}$	$I_{Qsum}^* = I_Q / (I_{T1} + I_{T2})$
1	64.7	Both PCS's	1.17	0.927
2	42.8	PCS2	1.01	0.733
3	66.9	Both PCS's	1.21	0.801
4	77.1	PCS2	1.43	0.845
5	92.4	Both PCS's	1.57	0.821
6	73.7	PCS1	1.22	0.633
7	88.5	Both PCS's	1.99	0.992

第7章

総括

7.1 本論文のまとめ

21世紀中葉の電力システムにおいて重要な役割を担うと考えられる電力貯蔵・分散電源型供給システムで、中核をなす電力貯蔵技術となることが期待される SMES システムの実用化には、特性の優れた永久電流スイッチ (PCS) の開発は不可欠である。本研究では、機械式の永久電流スイッチが開発できれば、オフ抵抗を無限大とでき、大電流通電が可能となることから、大規模 SMES システムの永久電流スイッチとして最適であることに着目して、機械式永久電流スイッチ開発のための基礎研究として、接触子に超伝導体 NbTi バルクを用いた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て検討を行った。具体的には、永久電流スイッチのオン・オフ抵抗特性に基づく損失計算を機械式永久電流スイッチ開放時のアーク損失を考慮して行うことによる機械式永久電流スイッチ開発の必要性の検証 (第2章)、接点の超伝導化達成による機械式永久電流スイッチの実現とそのクエンチ特性の体系的な検討、及び超伝導接点接続形成機構の解明 (第4章)、スイッチ開放時のアーク放電特性の解明とアークがクエンチ特性に及ぼす影響の検討 (第5章)、大容量化を目的として並列接続された機械式永久電流スイッチのスイッチ容量とクエンチ特性の検討、及びクエンチ遅れ時間の解明 (第6章) を行った。

本研究で得られた主な成果の要約を以下に記す。

- (1) SMES システムの貯蔵規模はコイルインダクタンスにより特徴づけられ、一般に規模の増大とともにコイルインダクタンスは大きくなる。コイル励磁時の永久電流スイッチのオフ抵抗によるエネルギー損失は、オフ抵抗の低下とコイルインダクタン

スの増加とともに増大する。一方、貯蔵時の永久電流スイッチのオン抵抗によるエネルギー損失は、オン抵抗の低下とコイルインダクタンスの増加とともに低下する。したがって、励磁損失に対する貯蔵損失の比は、SMESシステムの規模及びインダクタンスの増加に伴い低下する。特に、ロードレベリングを目的とする大規模SMESシステムでは、その損失比は1以下、すなわち貯蔵損失より励磁損失が支配的となり、アーク損失を考慮した場合でも、機械式スイッチのオン抵抗を $10^{-8} \Omega$ 以下にできれば上述の関係が成立する。この結果、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適用が可能になった際には、機械式スイッチのオン抵抗による貯蔵時の損失よりも超伝導スイッチのオフ抵抗による励磁時の損失が支配的となり、こ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り、機械式永久電流スイッチ開発が必要であることが指摘された。(第2章)

- (2) 接触子にNbTiバルクを用いた機械式スイッチ接点の超伝導化を達成し(NbTi機械式PCSの実現)、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。接点の超伝導化をもたらした超伝導接点接続は、主にスイッチクロージングによる接触子接触時の機械的摩擦により、真実接触面の一部が融着されたことで、即ち接合部(ブリッジ)が形成されたことで達成される(ブリッジモデル)。ブリッジの形成が促進されることによりクエンチ電流は増加するため、ブリッジ形成を促進するスイッチ開閉動作はクエンチ電流増加をもたらす。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り、接触面の性状に関しては粗面よりも鏡面がよいが、セミマクロに見たうねりのない平坦な面が特に効果的である。一方、酸化膜が形成された接触子ではブリッジの形成は行われず、超伝導接点接続を得るにはこの点に注意が必要である。機械式PCSの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NbTiの臨界電流密度の磁界特性に依存することを指摘した。本研究で提案したブリッジモデルにより、以上のクエンチ特性を定量的に解析できた。(第4章)

- (3) 電流遮断を伴うNbTi機械式PCS開放時のアーク放電特性は、基本的には接触子にCuを用いた場合と同様であるが、アーク維持電圧は12 VとCuの場合(15~25 V)より低下する。この結果、Cuを安定化材として使用しているNbTi超伝導体においてCuが除去されNbTiが露出した場合には、安定化材で覆われている場合よりも

更に低い値までアークが維持されることを指摘した。一方、アーク放電発生後も超伝導接点接続は形成され、遮断電流 50 A 以内では、アーク放電によるクエンチ電流の著しい低下は認められず、むしろスイッチ開閉回数に対して飽和を示していたクエンチ電流はアークを伴う開閉と共に増加することを明らかにした。アーク放電発生後の接触面は、放電痕による 20 μm 以下の凹凸が形成されるが、接触抵抗に影響を与える真実接触面はアークを伴う開閉と共に増加する。スイッチ開放時に発生したアーク放電は、接触面上に形成された酸化膜などの不純物を除去するコンディショニング効果を有し、この点でも超伝導接点形成に有利であることを指摘した。

(第5章)

- (4) 大容量化を目的として並列接続された機械式PCSのスイッチ容量は、使用するPCS個々の容量と分流比に依存して決定される。同一容量を持つPCSを使用した場合、均等分流が行われるときに並列接続数倍の最大容量が得られることを確認した。2組のPCSを用いた並列PCS回路において、一つのPCSがクエンチして分流比が変化し、その結果もう一方のPCSに臨界電流値以上の電流が転流すると、後者も連続してクエンチする。電流の時間変化が大きな場合、機械式PCSのクエンチは静的クエンチ電流に達した瞬間に発生するのではなく、その後ある時間経過して発生することを見いだした(クエンチ遅れ時間)。パルス電流実験より、クエンチ遅れ時間はパルス電流のピーク値と立ち上がり時間に依存し、立ち上がり時間が速くなるほど、またピーク値が増大するほど顕著に低下することを明らかにした。静的クエンチ電流をピーク値とするパルス電流を通電した場合、クエンチ遅れ時間は数10~100 ms、長い場合には秒オーダーに達することもあり、広範囲に渡るばらつきが認められたが、ピーク値を0.1 Aでも増加させるとオーダーが変化するようばらつきはなくなることを指摘した。

(第6章)

7.2 今後の研究課題

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を実現すると共に、その超伝導接点を有するNbTi機械式PCSのクエンチ特性を体系的に解明した。第4章で述べたように、直径 16 mm のNbTiバルクを使用した機械式PCS単体では、200 A 以上のクエンチ電流を達成しており、理論的には数 kA まで増加させることが可能である。したがって、使用する接触子の直径や形状及び接触面性状を最適化

し、接合率を更に増大することで、まず機械式PCS単体としてのクエンチ電流を十分上昇させ、これらPCSを第6章で論じたように複数個均等分流が行われるように並列接続することによって、実用に供するスイッチ容量(10 kA級~100 kA級)は十分達成できるものと考えられる。しかし、実機化に際しては、実規模レベルでの特性試験を安定性・信頼性の実証を踏まえながら実施することが必要であり、これについては今後の検討課題である。実規模レベルの機械式PCSを製作する場合、高安定化・高信頼化、高耐クエンチ化を考慮した設計・製作が必要であり、以下に示す検討が今後必要であると考えられる。

- (a) 安定化材を有する接触子を用いた機械式PCSの製作とその効果の評価
- (b) 接触子と電流リード接続部の超伝導接続の達成
- (c) kA級の大電流通電試験の実施
- (d) 真空容器内設置による機械式PCSの遮断特性改善

本研究で使用した接触子は、第3章で記述したように、NbTiバルクを加工したもので、安定化材は付加されていない。本実験での最大通電電流は200Aであったが、PCSを一定条件で閉じている間のクエンチ電流は一定であり、クエンチ電流が実験毎に著しく低下するなどの不安定性は見られず、安定化材がないことに起因する悪影響は観測されていない。しかしながら、(c)の実規模レベルに対する大電流通電試験の実施を考えると、安定性の高いPCSを製作することは必務であり、この観点からは、第一に(a)の安定化材の付加を検討すべきであろう。但し、超伝導接点接続は超伝導体が融着した部位で形成されるため、安定化材を付加した効果が得られるかどうかは疑問であり、この点を考慮した接触子構造を考える必要がある。

また、(c)の大電流通電試験において、第4章で述べられたように、接触子と電流リードとの接続に不具合があるとそこで発生するジュール発熱により接触子バルクが接点より先にクエンチすることがあったので、試験回路における接続部位の低抵抗化、もしくは超伝導化は必須である。特に、超伝導コイルと永久電流ループを構成し安定性・信頼性を検証する場合には、接触子と電流リードとの接続部の超伝導化(超伝導接続)の実現が必要となるであろう。

(d)に関しては、第1章で述べたように、真空容器内でのクエンチ電流に関する検討はKuwabaraら⁽⁵¹⁾により既に行われているが、詳細な遮断特性や遮断時に発生するアーク放電がクエンチ電流特性に及ぼす影響等に関する検討はなされておらず、これらの特性解明が

望まれる。他方、第5章で明らかにしたように、アーク放電発生後も超伝導接点接続は形成されるが、接触子を直接冷媒中に浸漬した場合には、アーク放電により溶融・蒸発した接触子材料の一部は冷媒中で急冷・固化して金属微小粒子としてなる。このような金属微小粒子が他のシステム構成要素、特に超伝導コイルに混入する場合は絶縁破壊をトリガする原因になるとも考えられ⁽⁷⁸⁾、SMESシステム全体の信頼性・安全性を維持する上でも、機械式PCSの真空容器内への設置は必要となるであろう。

なお、第6章でも述べたが、本研究で指摘したクエンチ遅れ時間は、クエンチを利用した超伝導限流器における限流動作開始電流の安定性の問題とも関連すると考えられ、そのメカニズムを解明することも今後の重要な検討課題である。

参考文献

- (1) 沼田 郁夫：「21世紀中葉のエネルギー・電力について -地球環境と調和したエネルギーを考える-」、財団法人電力中央研究所、(1990)
- (2) 電中研ニュース No.213「電力輸送技術の長期研究ビジョンを策定」(1992)
- (3) T.Suzuki：“Future Power System and Challenges in Electric Power Engineering”, *Proc. 8th ISH*, Yokohama, Japan, Paper No. S.D1 (1993)
- (4) 土森 紀之、長澤 隆士：「21世紀の電力エネルギーと輸送技術 III. 系統構成・運用の高速化」、電学誌、**112**、pp.592-596 (1992)
- (5) 関根 泰次、林 敏之：「広域・大電力送電のための“連係強化技術開発” - プロジェクトの概要とこれまでの成果 -」、電学論 B、**114**、pp.955-959 (1994)
- (6) 栗原 郁夫、田中 祀捷：「将来の需給要因を考慮した我が国における電力貯蔵設備の導入量の評価」、電学論 B、**116**、pp.563-570 (1996)
- (7) 「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」研究成果発表会予行集、財団法人国際超電導産業技術研究センター (1997)
- (8) 渡辺 隆夫、加茂 友一：「負荷平準化から見た最近の電池技術の動向」、電学論 B、**118**、pp.493-496 (1998)
- (9) 山本 隆彦：「負荷平準化の切り札ー電力貯蔵」、電学誌、**115**、pp.639-640 (1995)
- (10) 森本 祥一：「負荷平準化に欠かせない電力貯蔵」、電学誌、**116**、pp.666-668 (1996)
- (11) 廬 大錫、北 裕幸、西谷 健一、長谷川 淳：「分散型電力貯蔵システムの導入評価に関する一考察 - 二次電池を中心として -」、電学論 B、**116**、pp.187-196 (1996)
- (12) 上山 仁夫：「超電導電力貯蔵装置 (SMES) の研究開発動向」、電学論 B、**113**、pp.1319-1322 (1993)
- (13) 佐藤 隆：「超伝導の大型機器への応用 - 4. 電力応用超伝導マグネット -」、プラズマ・核融合会誌、**69**、pp.620-626 (1993)
- (14) 原 築志：「超電導技術の電力システムへの適用について」、電学論 B、**112**、pp.963-968 (1992)
- (15) 仁田 旦三：「超電導を応用した高密度電力輸送・貯蔵」、電学誌、**112**、pp.601-605 (1992)
- (16) E.B.Forsyth：“The Brookhaven Superconducting Underground Power-Transmission System” *Electronics and Power*, pp.383 - 389 (1984)
- (17) E.B.Forsyth：“Superconducting Power Transmission Systems - the Past and Possibly the Future”, *Supercond. Sci. & Tech.*, **6**, pp.699-714 (1993)
- (18) M.Yamamoto, N.Mizukami, T.Ishigohka and K.Ohshima：“A Feasibility Study on a Superconducting Power Transformer”, *IEEE Trans. Magn.*, **22**, pp.418-420 (1986)
- (19) H.Riemersma, M.L.Barton, D.C.Litz, P.W.Eckels, J.H.Murphy and J.F.Roach：“Application of Superconducting Technology to Power Transformer”, *IEEE Trans. Power Appara. Sys.*, **PAS-100**, pp.3398-3407 (1981)

-
- (20) T.Isono, Y.Takahashi, H.Yoshida, K.Okuno, N.Koizumi, M.Sugimoto, et al. : "Critical Current Measurements Using 13-T Split Coils and 100-KA Superconducting Transformer", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.1839-1842 (1991)
- (21) M.Yamamoto, N.Okada, T.Ishigohka and I.Ishii : "A Study on a Coreless Superconducting Transformer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**, pp.889-892 (1993)
- (22) 船木 和夫、岩熊 成卓、柁川 一弘、竹尾 正勝、末廣 純也、原 雅則、他 : 「液体窒素冷却 500 kVA 級酸化物超電導変圧器の開発」、低温工学、**33**、pp.371-381 (1998)
- (23) H.Matsumoto and T.Kitajima : "Development of Major Technologies for Superconducting Generator with Quick Response Excitation", *IEEE Trans. Magn.*, **30**, pp.1805-1808 (1994)
- (24) K.Arai, M.Kazumori, T.Ichikawa, Y.Nakabayashi, S.Ohshima, Y.Matsunobu, et al. : "Development of 70 MW Class Superconducting Generators", *IEEE Trans. Magn.*, **30**, pp.1875-1878 (1994)
- (25) W.Hassenzahl : "Superconducting Magnetic Energy Storage", *IEEE Trans. Magn.*, **25**, pp.750-758 (1989)
- (26) V.V.Andrianov, V.M.Batenin, A.S.Veselovsky, I.A.Kiryenin and S.I.Kopylov : "Conceptual Design of a 100 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.2329-2332 (1991)
- (27) C.Marinucci and G.Vésey : "Discharge Performance Analysis of the Swiss Superconducting Magnetic Energy Storage Model", *IEEE Trans. Magn.*, **28**, pp.402-405 (1992)
- (28) P.J.Birkner : "On the Design of Superconducting Magnetic Energy Storage System", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**, pp.246-249 (1993)
- (29) T.Moore : "Storing Megawatthours with SMES", *EPRI Journal*, pp.24-33 (1994)
- (30) R.W.Boom and H.A.Peterson : "Superconductive Energy Storage for Power Systems", *IEEE Trans. Magn.*, pp.701-704 (1972)
- (31) H.J.Boenig and J.F.Hauer : "Commissioning Tests of the Bonneville Power Administration 30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage Unit", *IEEE Trans. Power Appara. Sys.*, **PAS-104**, pp.302-312 (1985)
- (32) I.D.Hassan, R.M.Bucci and K.T.Swe : "400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation", *IEEE Trans. Power Electro.*, **8**, pp.237-249 (1993)
- (33) C.A.Luongo and the Bechtel SMES Team : "Review of the Bechtel Team's SMES Design and Future Plans for a Technology Demonstration Unit", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.422-427 (1995)
- (34) X.Huang, S.F.Kral, G.A.Lehmann, Y.M.Lvovsky and M.Xu : "30 MW Babcock and Wilcox SMES Program for Utility Applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.428-432 (1995)
- (35) S.Foner and B.B.Schwartz : "Superconducting Machines and Devices - Large System Applications -", Plenum Press, New York and London (1974)
- (36) R.J.Loyd, C.A.Luongo and J.P.Blanchard : "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for Electric Utility Load Leveling and SDI Applications", *Superconductivity and Its Application*, Elsevier, pp.432-438 (1988)
- (37) 村上 吉繁 : 「超電導エネルギー貯蔵技術とその研究開発の現状」、低温工学、**27**、pp.453-462 (1992)
-

- (38) 入江 富士男：「超伝導磁気エネルギー貯蔵の開発状況と問題点」、低温工学、**30**、pp.259-269 (1995)
- (39) 入江 富士男：「超電導エネルギー貯蔵 (SMES) の開発現状と課題」、電学論 B、**115**、pp.447-450 (1995)
- (40) J.Schwartz and E.E.Burkhardt : "An Investigation of Superconducting Magnets for a 10 MWh SMES", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **2**, pp.195-204 (1992)
- (41) J.F.Parmer, H.Gurol, E.M.Leung, S.D.Peck and R.Sutton : "A Superconducting Magnet for Space-Based MHD Power", *Superconductivity and Its Application*, Elsevier, pp.274-279 (1988)
- (42) L.Z.Lin, L.G.Yan, Z.Y.Gao, Z.K.Wang, B.H.Jing, J.B.Zenkevitch, et al. : "The Test of a Superconducting Saddle Magnet for MHD Facility", *Cryogenics*, **34**, pp.709-712 (1994)
- (43) J.L.Zar : "Electrical Switch Contact Resistance at 4.2K", *Adv. Cryo. Eng.*, **13**, Plenum Press, New York, pp.95-101 (1968)
- (44) 川崎 義治、小山 健一、等々力 達：「超電導磁石永久電流スイッチに関する実験」、低温工学、**5**、pp.249-260 (1970)
- (45) K.E.Gray and D.E.Fowler : "Superconducting Fault-current Limiter", *J. Appl. Phys.*, **49**, pp.2546-2550 (1978)
- (46) K.E.Gray and R.T.Kampwirth : "Design for a Repetitive Superconducting Operating Switch", *Cryogenics*, **24**, pp.21-26 (1984)
- (47) 原 築 志：「超伝導限流器の開発の現象」、低温工学、**26**、pp.236-246 (1991)
- (48) T.Ishigohka and M.Sasaki : "Fundamental Test of New DC Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.2341-2344 (1991)
- (49) D.Ito, K.Tsurunaga, E.Yoneda and Y.Sugiyama : "Superconducting Fault Current Limiter Development", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.2345-2348 (1991)
- (50) D.L.Atherton : "Theoretical Treatment of Internal Shunt Protection for Superconducting Magnet", *J.Phys. E Sci. Inst.*, **4**, pp.653-659 (1971)
- (51) K.Kuwabara and H.Sugawara : "Developing of Vacuum-type Persistent Current Switches", *Proc. 5th Int. Cryo. Eng. Conf.*, pp.409-412 (1974)
- (52) M.K.Abdelsalam and Y.M.Eyssa : "Quench Protection for the 21 MWh ETM coil", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.2316-2319 (1991)
- (53) H.H.J. ten Kate, S.L.Wipf, B. ten Haken and L.J.M. van de Klundert : "Development of a Superconducting Protection Switch for the HERA P-ring Design Study and Demonstration Models", *IEEE Trans. Magn.*, **24**, pp.1178-1181 (1988)
- (54) 岡村 勉夫：「電力用蓄電装置の基礎的研究」、電学論 B、**115**、pp.504-510 (1995)
- (55) 樋笠 博正、石川 文彦、芝山 宗昭、小野 健、横山 彰一、中村 史利、他：「8 MWh 級高温超伝導浮上式フライホイール電力貯蔵システムの概念設計および適用性の検討」、電学論 B、**113**、pp.768-775 (1993)
- (56) 村上 雅人、長尾 英二：「特集：新しい超伝導応用をめざして - II. 超伝導浮上型フライホイール -」、電学誌、**114**、pp.218-221 (1994)

- (57) 鳥塚 達夫：「分散電源および電気エネルギー貯蔵」、電学誌、**117**、pp.353-356 (1997)
- (58) 高橋 智義：「可変速揚水発電システムの原理と効果」、電学論 B、**115**、pp.447-450 (1995)
- (59) 和田 文雄：「水力資源の活用」、電学誌、**116**、pp.590-592 (1996)
- (60) 関根 泰次、林 宗明、芹澤 康夫、豊田 淳一、長谷川 淳 共著：「電力系統工学」、コロナ社、pp.149-162 (1979)
- (61) 山本 純也：「超伝導の大型機器への応用」、プラズマ・核融合学会誌、**69**、pp.601-602 (1993)
- (62) 社団法人低温工学協会：「超伝導・低温工学ハンドブック」、オーム社 (1993)
- (63) 大塚 信也、大坪 秀一、崔 炳柱、末廣 純也、原 雅則：「超伝導体を用いた機械式オープニングスイッチのオン抵抗特性」電気学会放電誘電・絶縁材料合同研究会資料、ED-96-30, DEI-96-24 (1996)
- (64) S.Ohtsuka, H.Ohtsubo, T.Nakamura, J.Suehiro and M.Hara : "Feasibility Study on a Mechanical Persistent Current Switch in SMES", *Proc. ICEE*, Matsue, Japan, pp.102-105 (1997)
- (65) K.H.Schoenbach, M.Kristiansen and G.Schaefer : "A Review of Opening Switch Technology for Inductive Energy Storage", *Proc. the IEEE*, **8**, pp.1019-1040 (1984)
- (66) O.Mueller : "Switching Losses of the Cryogenic MOSFET and SIT", *Cryogenics*, **30**, pp.1094-1100 (1990)
- (67) R.V.Harrowell : "A New Superconducting Switch", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **7**, pp.491-499 (1974)
- (68) A.Ulbricht : "A Resistive Superconducting Power Switch with a Switching Power of 40 MW at 47 kV", *Cryogenics*, **19**, pp.591-602 (1979)
- (69) J.D.G.Lindsay, D.J.Blevins, H.L.Laquer, G.A.Miranda, J.D.Rogers, C.E.Swannack, et al. : "Development of a Superconducting Switch for Magnetic Energy Storage System", *IEEE Trans. Magn.*, **11**, pp.594-597 (1975)
- (70) K.Grawatsch, H.Köfler, P.Komarek, H.Kornmann and A.Ulbricht : "Investigations for the Superconducting Power Switches", *IEEE Trans. Magn.*, **11**, pp.586-589 (1975)
- (71) K.E.Gray, W.Y.K.Chen and R.P.Huebener : "Evaluation of Superconductors for Large Scale Switching of Electrical Power", *IEEE Trans. Magn.*, **13**, pp.784-787 (1977)
- (72) 佐藤 誠樹、松尾 政晃、黒田 邦茂、竹尾 正勝、三好 一徳、式町 浩二：「電流型超伝導永久電流スイッチの開発」、九州大学工学集報、**69**、pp.319-315 (1996)
- (73) 根本 薫：「永久電流スイッチの通電安定性」、電学論 D、**114**、pp.969-977 (1994)
- (74) K.Noto, Y.Kono, M.Matsukawa, T.Itagaki, T.Ishida, K.Chiba, et al. : "Development of a 50A-Fast Response, Magnetically Controlled Persistent Current Switch", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.258-261 (1995)
- (75) N.Sadakata, K.Uchiyama, K.Goto, T.Saito, O.Kohno, Y.Kouno, et al. : "Fast Switching Characteristics of Magnetic Persistent Current Switch for SMES", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.282-285 (1995)
- (76) J.Gerhold : "High Voltage Problems at Low Temperatures", *Proc. 6th Int. Conf. Magn. Tech.*, pp.982-985 (1977)
- (77) 崔 炳柱、井上 順介、末廣 純也、原 雅則：「エネルギー転送過程における超伝導マグネットの内部誘導電圧特性」、電学論 A、**114**、pp.451-458 (1994)

- (78) B.J.Choi, S.Ohtsuka, J.Suehiro and M.Hara : "Simulation Test and Theoretical Analysis of Surge Propagation in a Superconducting Magnet", *Cryogenics*, **35**, pp.505-513 (1995)
- (79) E.M.Honig, C.E.Swannack, R.W.Warren and D.H.Whitaker : "Progress in Switching Technology for METS System", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-5**, pp.61-65 (1977)
- (80) 嶋田 隆一、谷 啓二、岸本 浩、田村 早苗、柳父 悟、玉川 徹、他 : 「核融合実験装置用直流遮断器の解析と実証試験 [(JT-60) への適用] 」、電学論 B、**99**、pp.773-780 (1979)
- (81) S.Yamaguchi, H.Sasao, Y.Matsumura and T.Tsukamoto : "A Mechanical Arcless DC Circuit Breaker for a Superconducting Magnet System", *Fusion Eng. Design*, **20**, pp.415-419 (1993)
- (82) E.V.Diji : "A Resonant Series Counterpulse Technique for High Current Opening Switches", *IEEE Trans. Magn.*, **31**, pp.84-89 (1995)
- (83) G.K.Gaulé, J.T.Breslin and J.J.Winter : "Superconductive Pressure Contacts", *J. Appl. Phys.*, **39**, 2686 (1968)
- (84) D.Atherton : "Mechanical Semi-persistent Switches for Superconducting Solenoids", *Cryogenics*, **8**, pp.248-249 (1968)
- (85) J.J.Winter, J.T.Breslin and G.K.Gaulé : "High-Current Superconductive Pressure Contact Studies", *J. Appl. Phys.*, **43**, pp.1226-1230 (1972)
- (86) P.Krueger : "A Remotely Operated Electromechanical Cryogenics Switch, 100A, $\mu\Omega$ to Infinite Resistance", *Proc. 4th Int. Cryo. Eng. Conf.*, pp.354-357 (1972)
- (87) C.K.So and D.Blair : "An Electromechanical Mechanism for Adjusting Superconducting Point Contact Characteristics", *Cryogenics*, **16**, pp.618-619 (1976)
- (88) S.Nozaki, M.Aida, M.Masuda and M.Hamada : "New Type Mechanical PCS for SMES", *Adv. Supercond. VIII Proc. 8th ISS*, Hamamatsu, Japan, **2**, pp.1283-1285 (1995)
- (89) J.J.Shea and J.A.Bindas : "Measuring Molded Case Circuit Breaker Resistance", *IEEE Trans. Comp. Hyb. Manu. Tech.*, **CHMT-16**, pp.196-202 (1993)
- (90) P.Barkan and E.J.Tuohy : "A Contact Resistance Theory for Rough Hemispherical Silver Contacts in Air and in Vacuum", *IEEE Trans. Power Appara. Sys.*, **PAS-84**, pp.1132-1143 (1965)
- (91) T.Hisakado : "Effects of Surface Roughness and Surface Films on Contact Resistance", *Wear*, **44**, pp.345-359 (1977)
- (92) A.H.Uppal and S.D.Probert : "Mean Separation and Real Contact area between Surfaces Pressed Together under High Static Loads", *Wear*, **23**, pp.39-53 (1973)
- (93) A.H.Uppal and S.D.Probert : "Deformation of Single and Multiple Asperities on Metal Surfaces", *Wear*, **20**, pp.381-400 (1972)
- (94) A.Kawashima and S.Hoh : "Contact Resistance in Liquid Nitrogen", *Cryogenics*, **14**, pp.381-383 (1974)
- (95) T.Tamai and K.Tsuchiya : "Contact Resistance Characteristics at Low Temperature", *IEEE Trans. Comp. Hyb. Manu. Tech.*, **CHMT-1**, pp.54-58 (1978)
- (96) T.Tamai : "Singularity of Contact Resistance at Very Low Temperature", *IEEE Trans. Comp. Hyb. Manu. Tech.*, **CHMT-9**, pp.40-45 (1986)

- (97) T.Nitta, M.Nakata and T.Okada : "Switching Behavior of a Magnetically Controlled Superconducting Switch", *IEEE Trans. Magn.*, **28**, pp.418-421 (1992)
- (98) P.McIntyre, Y.Wu, G.Liang and C.R.Meitzler : "Study of Nb₃Sn Superconducting Joints for Very High Magnetic Field NMR Spectrometers", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.238-241 (1995)
- (99) M.Urata, H.Maeda, S.Nakayama, E.Yoneda, Y.Oda, T.Kumano, et al. : "Stabilization of a of Nb₃Sn Persistent Current Switch", *Fusion Eng. Design*, **20**, pp.409-414 (1993)
- (100) M.Urata, T.Yazawa, H.Maeda, T.Tomisaki, S.Kabashima, K.Sasaki, et al. : "Stabilization of Cu-Ni Based Persistent Current Switch" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**, pp.586-589 (1993)
- (101) H.Maeda, M.Urata, Y.Oda, M.Kageyama and S.Kabashima : "Instability of Persistent Current Switch", *IEEE Trans. Magn.*, **27**, pp.2124-2127 (1991)
- (102) 大塚 信也、大坪 秀一、中村 貴史、末廣 純也、原 雅則 : 「NbTi 機械式 PCS の超伝導接続にアーク放電が及ぼす影響」、超伝導マグネット研究センター報告、**4**、pp.176-184 (1997)
- (103) S.Ohtsuka, T.Nakamura, D.Tsuji, J.Suehiro and M.Hara : "Arc Discharge Characteristics Generated by Opening a Mechanical PCS", *Proc. Japan-Korea Joint Symp. ED & HVE*, Fukuoka, Japan, pp.141-144 (1997)
- (104) G.Luderer, P.Dullenkopf and G.Laukien : "Superconducting Joint between Multifilamentary Wires", *Cryogenics*, **14**, pp.518-519 (1974)
- (105) M.J.Leupold and Y.Iwasa : "Superconducting Joint between Multifilamentary Wires 1. Joint-making and Joint Results", *Cryogenics*, **16**, pp.215-216 (1976)
- (106) Y.Iwasa : "Superconducting Joint between Multifilamentary Wires 2. Joint Evaluation Technique", *Cryogenics*, **16**, pp.217-219 (1976)
- (107) J.W.Hafstrom, D.H.Killpatrick, R.C.Niemann, J.R.Purcell and H.R.Thresh : "Joining NbTi Superconductors by Ultrasonic Welding", *IEEE Trans. Magn.*, **13**, pp.94-96 (1977)
- (108) L.F.Goodrich and J.W.Ekin : "Lap Joint Resistance and Intrinsic Critical Current Measurements on a NbTi Superconducting Wire", *IEEE Trans. Magn.*, **17**, pp.69-72 (1981)
- (109) T.Horiuchi, K.Matsumoto, M.Hamada, K.Uo, O.Motojima and M.Nakasuga : "Superconducting Joint of the Demountable Helical Coil", *Fusion Tech.*, **8**, pp.1654-1658 (1985)
- (110) D.W.Scherbarth, O.R.Christianson, E.F.Daly, T.Kupiszewski, D.Marschik, J.M.Pfotenhauer, et al. : "Conductor Joint Performance During the Ebasco Team SMES POPE (Proof of Principle Experiment)", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.274-277 (1995)
- (111) T.A.Painter, J.R.Miller, J.Bascunan, P.Riley and A.L.Devernoe : "Manufacture and Verification Testing of Low-resistance Nb₃Sn Joints for Cable-in-conduit Conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.753-756 (1995)
- (112) R.L.Myatt and R.D.Pillsbury, Jr. : "DC Resistance and Eddy Current Losses in the ITER Conductor Joint", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, pp.996-999 (1995)
- (113) 下畑 賢司、山本 俊二、中村 史朗、川口 武男 : 「NbTi 超電導線の超電導接続」、低温工学、**30**、pp.70-75 (1995)
- (114) 佐藤 知絵、鴨志田 陸男、後藤 純考、高橋 龍吉、和田山 芳英、高力 勝男、他 : 「(Nb,Ti)₃Sn

- 超電導線突き合わせ接続部の抵抗特性」、低温工学、**30**、pp.377-386 (1995)
- (115) 大塚 信也、大坪 秀一、中村 貴史、末廣 純也、原 雅則：「NbTiを用いた機械式スイッチの接触抵抗特性」、平成8年度電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(論文II)、pp.927-928 (1996)
- (116) 大塚 信也、大坪 秀一、中村 貴史、末廣 純也、原 雅則：「NbTiを用いた機械式スイッチ接点の超伝導化と超伝導接点接続形成機構の検討」、低温工学、**32**、pp.473-484 (1997)
- (117) S.Ohtsuka, H.Ohtsubo, T.Nakamura, J.Suehiro and M.Hara : "Characteristics of NbTi Mechanical Persistent Current Switch and Mechanism of Superconducting Connection at Contact", *Cryogenics* (in press)
- (118) 辻 大輔、大塚 信也、中村 貴史、末廣 純也、原 雅則：「機械式PCSにおける転移電流の縦磁界依存性」、平成9年度電気関係学会九州支部記念連合大会講演論文集、No.1424 (1997)
- (119) 大塚 信也、中村 貴史、辻 大輔、末廣 純也、原 雅則：「並列接続された機械式PCSの電流分布とクエンチ現象」、第56回1997年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、E2-33 (1997)
- (120) S.Ohtsuka, : "Quench Current Characteristics of Parallel Mechanical PCS's", *Proc. 15th Int. Conf. Magn. Tech.*, Beijing, China (in press)
- (121) 大塚 信也、中村 貴史、辻 大輔、末廣 純也、原 雅則：「NbTi機械式PCSのクエンチ電流の横磁界依存性」、平成10年電気学会全国大会講演論文集、No.1435 (1998)
- (122) S.Ohtsuka, H.Ohtsubo, T.Nakamura, J.Suehiro and M.Hara : "Characteristics of Contact Resistance between NbTi Electrodes", *Adv. Supercond. IX Proc. 9th ISS*, Sapporo, Japan, **2**, pp.1441-1444 (1996)
- (123) S.Ohtsuka, : "Contact Resistance Characteristics of Mechanical Switch Made of NbTi", *Proc. 8th ACED*, Bangkok, Thailand, Paper No.711 (1996)
- (124) W.A.Fietz : "Nb₃Sn in 1978 : State of the Art", *IEEE Trans. Magn.*, **15**, pp.67-75 (1979)
- (125) H.R.Segal, K.Hemachalam, T.A. de Winter and Z.J.J.Stekly : "Development of NbTi Conductor for High Field Application", *IEEE Trans. Magn.*, **15**, pp.807-809 (1979)
- (126) 武田 実、西垣 和：「NbTi薄膜の J_c に対する磁場方向依存性」、第55回1996年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集、E1-31 (1996)
- (127) A.D.McInturff and G.G.Chase : "Effect of Metallurgical History on Critical Current Density in NbTi Alloys", *J. Appl. Phys.*, **44**, pp.2378-2384 (1973)
- (128) K.F.Hwang and D.C.Larbalestier : "Generalized Critical Current Density of Commercial Nb46.5, Nb50 and Nb53 w/o Ti Multifilamentary Superconductors", *IEEE Trans. Magn.*, **15**, pp.400-403 (1979)
- (129) T.N.Ying and S.M.Hsu : "Asperity-asperity Contact Mechanism Simulated by a Two-ball Collision Apparatus", *Wear*, **169**, pp.33-41 (1993)
- (130) H.Bresgen : "Contact Resistance, Adhesion and Wear of Tarnished and Untarnished Silver Subjected to an Oscillating Friction Load", *Wear*, **69**, pp.157-165 (1981)
- (131) R.Holm : "Electrical Contacts (Fourth Edition)", Springer-Verlag, Berlin (1967)
- (132) 新田 勇、岩渕 明、南 正晴、高尾 智明：「真実接触点を考慮した摩擦発熱による温度上昇の解析」、低温工学、**30**、pp.457-467 (1995)
- (133) 中村 貴史、大塚 信也、大坪 秀一、末廣 純也、原 雅則：「NbTi機械式スイッチのクロージ

- ング速度とスイッチ駆動力が転移電流に及ぼす影響」、平成8年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集、No.424 (1997)
- (134) 中村 貴史、大塚 信也、大坪 秀一、辻 大輔、末廣 純也、原 雅則：「NbTi 機械式 PCS の電極衝突時の運動エネルギーと転移電流特性の関係」、平成9年電気学会全国大会講演論文集、No.1297 (1998)
- (135) J.A.Osborn : "Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid", *Phys. Rev.*, **67**, pp.351-357 (1945)
- (136) D.C.Larbalestier : "The Metallurgical Design of Nb-Ti and Nb₃Sn Multifilament Superconductors", *IEEE Trans. Magn.*, **15**, pp.209-212 (1979)
- (137) B. ten Haken, L.J.M. van de Klundert, V.S.Vysotsky and V.R.Karasik : "The Critical Current in a NbTi Tape Measured in Different Directions of Magnetic Field and the Current Reduction Due to the Self Field", *IEEE Trans. Magn.*, **28**, pp.755-758 (1992)
- (138) 三浦 大介、井上 至、松本 要、田中 靖三：「人工ピン型 NbTi 交流用超電導線材の開発とその応用」、電学論 A、**115**、pp.185-193 (1995)
- (139) K.Mori, Y.Suzuki, N.Hara, M.Kitamura and T.Tominaka : "Current Distribution Characteristics of Superconducting Parallel Circuits", *IEEE Trans. Magn.*, **30**, pp.1919-1921 (1994)
- (140) 横水 康伸、伊藤 浩二、松村 年郎、大久保 仁、鬼頭 幸生：「臨界電流の異なる高温超電導素子の並列接続時における電流分布状況」、電学論 B、**113**、pp.1149-1154 (1993)
- (141) N.A.Buznikov, A.A.Pukhov, A.L.Rakhmanov and V.S.Vysotsky : "Current Redistribution between Strands and Quench Process in a Superconducting Cable", *Cryogenics*, **36**, pp.275-281 (1996)
- (142) N.Koizumi, K.Okuno, Y.Takahashi, H.Tsuji and S.Shimamoto : "Current Imbalance due to Induced Circulation Currents in a Large Cable-in-conduit Superconductor", *Cryogenics*, **36**, pp.409-418 (1996)
- (143) 平野 直樹、三戸 利行、高畑 一也、岩本 晃史、前川 龍司、佐藤 定男：「NbTi/Cu 3 本撚線の安定性に与える電流分布の影響」、低温工学、**33**、pp.82-89 (1998)
- (144) N.Koizumi, K.Okuno, Y.Takahashi, H.Tsuji, M.Nishi, K.Yoshida, et al. : "Experimental Results on Instability Caused by Non-uniform Current Distribution in the 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U) Conductor", *Cryogenics*, **34**, pp.155-162 (1994)

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始熱心な御指導と御鞭撻を賜りました九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 原 雅則 教授に謹んで感謝の意を表します。また、本論文の作成にあたり、有益な御助言と御教示を賜りました電気電子システム工学専攻 竹尾 正勝 教授、船木 和夫 教授に深く感謝の意を表します。

本研究の遂行に際しては、九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 末廣 純也 助教授より多大なる御指導を賜り、心より感謝いたします。また、修士課程在学中に共同研究者として本研究の実施に御尽力いただいた、大坪 秀一 氏（現 九州旅客鉄道（株））、中村 貴史 氏（現 九州電力（株））、辻 大輔 氏、堤 浩一 氏に感謝いたします。更に、本研究を遂行する上で不可欠であった極低温実験設備及び方法に関する基礎を築かれ、また学部、修士課程時代の筆者を御指導下さいました崔 炳柱 氏（現 韓国ソラボル大学）、井上 順介 氏（現 中国電力（株））に心より感謝いたします。

実験装置の製作においては、同専攻 堺 厳裕 技官、電気系工作工場の和泉 実 技官、松崎 秀文 技官より御協力いただきました。また、ヘリウムの供給と回収ならびに試料の分析に関しては、理学部極低温実験室、工学部超伝導科学研究センター及び中央分析センター工学分室の方々に御協力いただきました。

平素の研究室生活においては、九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 今坂 公宣 助手、同専攻博士課程 高野 浩二 氏、鶴 信一郎 氏、石 福烈 氏を始めとする原研究室の皆様方、ならびに九州電力（株）より博士課程に国内留学されていた久 富木 護 氏、見山 雅英 氏に公私共々御世話になりました。皆様方のお陰で、密度の濃い非常に充実した時間を過ごすことができました。

本研究は以上の皆様方の御協力の下で成し得たもので、ここに記して心より感謝の意を表します。

最後に、これまでなにかと気苦労をかけ続けましたが、本論文の完遂まで暖かく見守り時には激励してくれた両親、ならびに現在の主発点を築く御指導を賜りました久留米工業高等専門学校 藤井 邦夫 教授（現 九州共立大学 教授）に深く感謝いたします。

1998年8月28日

著 者

東洋文庫 日本書紀 卷之四 孝武天皇 孝武天皇 孝武天皇

