2組のNbTi機械式PCSから成る並列PCS回路のクエンチ特性

学生員 大塚 信也 (九州大) 学生員 中村 貴史 (九州大)
 学生員 辻 大輔 (九州大) 正員 末廣 純也 (九州大)
 正員 原 雅則 (九州大)

Quench Characteristics in the parallel PCS circuit using two NbTi Mechanical PCS's

Shinya Ohtsuka, Student Member, Takashi Nakamura, Student Member, Daisuke Tsuji, Student Member,
 Junya Suehiro, Member, and Masanori Hara, Member (Kyushu University)

A persistent current switch (PCS) used in the large-scale SMES system needs to have high OFF resistance as well as zero ON resistance for efficient load-leveling operations. So far, the authors have successfully developed NbTi mechanical PCS, which realizes zero contact resistance, infinite OFF resistance, and switch current capacity over 200 A. Considering practical use of the PCS, the switch current capacity has to be further increased to obtain much larger rated current of 100 kA order for the GWh class SMES system. This paper describes the switch current capacity and quench characteristics in the parallel PCS circuit which consists of two NbTi mechanical PCS's. Effects of current distribution and quench property of each single PCS are especially investigated in detail. To clarify the posterior quench mechanism at the time when both PCS's are quenched, quench characteristics on the time are also investigated by applied pulsed current. It was found that each PCS in the parallel circuit has to obtain identical quench current and distribute current uniformly so as to achieve the theoretical maximum switch current capacity. Additionally, existence of quench time lag is definitely confirmed. Quench time lag is the key property to make clear the succeeding quench mechanism.

キーワード：機械式PCS、SMES、並列接続、クエンチ、遅れ時間

1. まえがき

超伝導電力貯蔵装置(SMES)におけるエネルギー貯蔵・転送用スイッチは、無損失でエネルギー貯蔵が行えるようオン抵抗ゼロの永久電流スイッチ(PCS)として機能すると共に、励磁時のジュール損失が小さくなるよう大きなオフ抵抗を有することが必要である。特に負荷平準化を目的とする大規模SMESでは、大きなオフ抵抗が要求されるため、原理的にオフ抵抗を大きくすることが困難な熱式・磁気式超伝導スイッチ(以下、超伝導PCSと呼ぶ)よりも、オフ抵抗を無限大とできる機械式スイッチが適している。ただし、この場合、同スイッチ接点間の接触抵抗は $10^{-4} \Omega$ 以下まで低減されなければならない^(1,2)。

筆者らはこれまで、接触子にNbTiバルクを用いた機械式スイッチにおいて、接点の超伝導化を示す接触部のクエンチ並びに超伝導体の J_c - B 特性に起因するクエンチ電流の磁界依存性を確認しており、機械式のPCSの開発に成功している⁽²⁻⁴⁾。更に、超伝導接点接続の形成機構を接触部の機械的摩擦による融着によるものとして理論的に明らかにし(ブリッジモデル)⁽²⁾、スイッチ開放時のアーク放電が超伝導接点接続に及ぼす影響も明らかにしている^(5,6)。同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⁽²⁾。しかしながら、大規模SMESの貯蔵容量はGWhオーダーにも達し、その定格電流は数百kAオーダーとなるため、実機では更なるPCSの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⁽⁷⁻⁹⁾。特に機械式PCSはオフ抵抗を無限大とできるため、超伝導PCSのように並列化によりオフ抵抗低下の問題がなく、PCS全体としての安定性・信頼性向上⁽⁹⁾の観点からも有利である。これまで、超伝導PCS⁽⁷⁻⁹⁾や金属系超伝導燃線⁽¹⁰⁻¹²⁾、高温超伝導体⁽¹³⁾を対象とした並列接続時の分流特性、クエンチ特性の検討は行われているが、機械式PCSを対象とした検討は行われていない。

本論文では、並列接続されたPCS回路(以下、並列PCS回路と呼ぶ)の最も単純な例として2組の機械式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およびクエンチ特性を実験により調べた^(14,15)。更に、機械式PCS単体にパルス電流を通電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。

2. 並列PCS回路のスイッチ容量

<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 I_T に達すると同時にクエンチすると仮定する。並列PCS回路のスイッチ容量を、「全てのPCSの1つ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

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

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。筆者らのこれまでの研究結果から、接触子接触面を一定の手法で加工することで、同じ I_T を有する機械式PCSが製作可能であることが示されている(標準接触子)⁽²⁾。このように、各PCSの I_{Ti} が等しい値 I_{TE} を持つ場合には、(1)式は次式となる。

$$I_Q \leq N I_{TE} \quad (2)$$

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への均等分流が行われる場合である。

<2.2> 実験回路の電流分布とスイッチ容量 前節で述べたように、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、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。実験は2組の機械式PCSを用いて実施した。図1に実験装置の等価回路を示す。各PCSは接触子の軸方向が大地に対して垂直になるように設置され⁽²⁾、且つ平行に11~16 cm離し

図1 2組の機械式PCSを用いた実験装置の等価回路
Fig.1. Equivalent circuit of experimental setup using two mechanical PCS's.

て配置してありPCS間の磁氣的結合は無視できる。同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。
クエンチ前はゼロである。

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_{shi} 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

$$R_i = R_{Ji} + R_{Ci} \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

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。

$$I_1 = \frac{L_2 R_1 - L_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} J_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t \right) \right] + \frac{R_2}{R_1 + R_2} J_0 t \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{L_1 R_2 - L_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2} J_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t \right) \right] + \frac{R_1}{R_1 + R_2} J_0 t$$

前節で述べた並列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、(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。

3. 実験の装置構成と方法

<3.1> 実験回路 実験回路は図1に示した通りで、並列回路部は、クライオスタット内で液体ヘリウムにより浸漬冷却される。スイッチ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_i 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、(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_i 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_c の値を示す。各テストは、両PCSの R_i と I_T の関係により4つのグループに分類され(グループA~D)、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

表1 実験に使用した機械式PCSのクエンチ電流と接続抵抗
Table 1. Quench current and junction resistance of tested mechanical PCS's.

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	$I_{T1} = I_{T2}$ $R_{J1} = R_{J2}$

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。電流は0.1 A精度で測定しており、この精度において I_T は一定でばらつきがないことを確認している。機械式PCSの接触子には、従来と同様の鏡面仕上げを施した直径16 mmの円柱状のNbTiバルクを用いた⁽²⁾。なお、各PCSの接触面状態及び電流リードの長さや配置は厳密には同一でないため、各テストにおける R_c 及びインダクタンス L には相違がある。

<3.2> 実験方法 クエンチの検出は、最小電圧感度0.1 μ Vのデジタルボルトメーターを用いて4端子法で接触抵抗を測定することで行った⁽²⁾。スイッチ容量の測定は、両PCSを一定荷重で閉じている状態で、回路電流 I_s をほぼ1 A/s一定で接点のクエンチが発生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、各電流路の電流および接触抵抗の各波形をそれぞれ R_{sh} の電圧降下およびスイッチ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。

4. 実験結果

<4.1> クエンチと電流分布変化 スwitch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⁽⁷⁻⁹⁾。両者の典型的な結果として、図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 、および回路電流 I_s の波形を示す。 R_{c2} が最初に出てきていることから、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。両者の和である 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。

<4.2> スwitch容量 表2には表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

(a) Test3

(b) Test4

図2 クエンチ前後の電流分布と接触抵抗波形
Fig.2. Temporal changes of current distribution and contact resistance before and after quench.

表2 表1に示した各テストのクエンチ特性
Table 2. Quench characteristics of each test listed in Table 1.

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	1.31	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

格化した値 I_Q^* 、および I_Q を I_{T1} と I_{T2} の和で規格化した値 I_{Qsum}^* を併せて示している。表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1.22～1.57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(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(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 と共に分流比にも注意を払う必要があることがわかる。

5. 考察

<5.1> スイッチ容量の理論的検討 今回行った実験の条件下では、(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。

$$\begin{aligned} I_{Qth1} &= \frac{R_{J1} + R_{J2}}{R_{J2}} I_{T1} \\ I_{Qth2} &= \frac{R_{J1} + R_{J2}}{R_{J1}} I_{T2} \end{aligned} \quad (5)$$

実験で測定されるスイッチ容量 I_Q は、<2.1>節の仮定に従えば、(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3(a)～(c)に I_{Qth} と I_Q の関係を示す。(3)式から明らかなように、両電流路の抵抗比 R_2 / R_1 は、第一クエンチ時は 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

図3 抵抗比とスイッチ容量の関係
Fig.3. Relationship between switch current capacity and resistance ratio of the parallel two PCS's circuit.

んだ値となる。図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 の関係から推定し表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)では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回路の抵抗比に従う分流と各PCSの I_T に依存して(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_{co} 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⁽¹⁴⁾。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。

<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(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。クエンチは表1に示した I_T に達した時点で発生するとし、クエンチにより発生する接触抵抗 $R_c(t)$ は、実験結果を考慮して

$$R_c(t) = R_{co} \left[A + B \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_R} \right) \right) \right] \quad (6)$$

(a) Test3

(b) Test4

図4 テスト3、4を模擬したシミュレーション結果
Fig.4. Calculation results of temporal changes of current distribution and contact resistance in Tests 3 and 4.

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3msとした。 R_{co} は各PCSの測定値を用い、クエンチ前はゼロとした。両電流路のインダクタンスは同一とし、各テストの測定値を考慮して、テスト3は0.8 μ H、テスト4は0.7 μ Hとした。インダクタンスが大きいほど、また R_{co} が小さいほどクエンチ後の電流分布の変化は緩やかになる。図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4(a)のテスト3の結果では、図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。シミュレーションにおける I_{T1} を50.9 Aから1.1 A(1.022倍)増加させ52.0 Aにするとクエンチ発生時間は一致することから、この差違は実験中に I_{T1} がわずかに増加したためと考えることもできる。しかし、実際には<3.1>節で述べたように、 I_T は0.1 A精度の範囲内で一定であり、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 本研究では、各PCSの I_T を測定する場合に、スイッチ電流を1 A/sと非常に緩やかに上昇させている。これに対し、図2、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な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、任意の立ち上がり時間を持つ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、2.8 ms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 I_p 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、 $I_{T0} = 7.7$ A

図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)

Fig.5. Quench time lag dependence on peak value of pulsed current ($\tau = 250 \mu\text{s}$).

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

Fig.6. Fluctuation of quench time lag ($\tau = 250 \mu\text{s}$).

であるPCSに $\tau = 250 \mu\text{s}$ 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に $I_p = 6.1 \text{ A}$ のPCSに $\tau = 250 \mu\text{s}$ 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 ms～数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 μs 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5、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い

図7 クエンチ遅れ時間特性

Fig.7. Quench time lag dependence on over-current ratio and rise time of pulsed current.

く、微小な熔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. まとめ

本研究では、2組のNbTi機械式PCSを並列接続した回路のスイッチ容量とクエンチ特性を実験により調べ、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た。本研究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) 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ことを実験により確認した。

(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。

(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わけではなく、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。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)および特別研究員奨励費)によった。記して感謝する。

(平成10年6月18日受付、同10年10月26日再受付)

文 献

- (1) S.Ohtsuka, et al.: "Feasibility Study on a Mechanical Persistent Current Switch in SMES", *Proc. the Int. Conf. on Electrical Engineering*, Matsue, Japan, p.102 (1997)
- (2) S.Ohtsuka, et al.: "Characteristics of NbTi Mechanical Persistent Current Switch and Mechanism of Superconducting Connection at Contact", *Cryogenics*, Vol.38, No.9, p.893 (1998)
- (3) 辻、他: 「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連合大会論文集, No.1424 (1997)
- (4) S.Ohtsuka, et al.: "Magnetic Field Dependence of Transition Current of NbTi Mechanical PCS", *Cryogenics* (in press)
- (5) S.Ohtsuka, et al.: "Arc Discharge Characteristics Generated by Opening a Mechanical PCS", *Proc. Japan-Korea Joint Symposium on ED and HVE*, Fukuoka, Japan, p.141 (1997)
- (6) 大塚、他: 「NbTi機械式PCS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」電気学会論文誌B, Vol.118-B, No.12, p.1398 (1998)
- (7) M.Urata, et al.: "Stabilization of Cu-Ni Based Persistent Current Switch", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol.3, No.1, p.586 (1993)
- (8) K.Mori, et al.: "Current Distribution Characteristics of Superconducting Parallel Circuits", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.30, No.4, p.1919 (1994)
- (9) 根本、他: 「永久電流スイッチの通電性能安定化」電気学会論文誌D, Vol.114-D, No.10, p.969 (1994)
- (10) M.Iwakuma, et al.: "Abnormal Quench Process with Very Fast Elongation of Normal Zone in Multi-strand Superconducting Cables", *Cryogenics*, Vol.30, p.686 (1990)
- (11) V.S.Vysotsky, et al.: "Quench Development in Superconducting Cable Having Insulated Strands with High Resistive Matrix (Part1, Experiment)", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.28, No.1, p.735 (1992)
- (12) M.Tsuda, et al.: "Instability of NbTi/CuNi Superconducting Wires", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol.3, No.1, p.503 (1993)
- (13) 横水、他: 「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」電気学会論文誌B, Vol.113-B, No.10, p.1149 (1993)
- (14) 大塚、他: 「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年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, E2-33, p.182 (1997)

- (15) S.Ohtsuka, et al.: "Quench Current Characteristics of Parallel Mechanical PCS's", *Proc. the 15th Int. Conf. on Magnet Technology*, Beijing, China, p.551 (1997)

大塚 信也

(学生員) 1971年1月16日生。94年3月九州大学工学部電気工学科卒業。96年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月同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博士課程進学、日本学術振興会特別研究員。主に、超伝導電力システムにおける高電圧現象、及び超伝導オープニングスイッチに関する研究に従事。低温工学協会、放電研究グループ会員。

中村 貴史

(学生員) 1973年11月9日生。96年3月九州大学工学部電気工学科卒業。98年3月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修士課程修了。同年4月九州電力(株)入社。

辻 大輔

(学生員) 1973年9月17日生。97年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年4月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修士課程入学。

末廣 純也

(正員) 1961年3月9日生。83年3月九州大学工学部電気工学科卒業。85年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月新日本製鐵入社、88年4月九州大学工学部助手、92年4月同助教授、現在に至る。主として、極低温放電現象、および静電細胞操作に関する研究に従事。博士(工学)。95年電気学会論文賞受賞。静電気学会、低温工学協会、日本生物物理学会員。

原 雅則

(正員) 1942年4月13日生。72年3月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。九州工業大学講師、助教授、九州大学助教授を経て同教授。現在、九州大学大学院システム情報科学研究科(<http://www.isee.kyushu-u.ac.jp>)所属。電力工学、高電圧パルスパワー工学、超電導工学、バイオ工学に関する研究に従事。工学博士。IEEE Senior、低温工学協会、静電気学会、放電研究グループ会員。