

## 多数個並列 MOSFET を用いた低温用低電圧/大電流直流電源の試作

二ノ宮 晃<sup>\*1</sup>, 花島 雄<sup>\*2</sup>, 鈴木 孝彦<sup>\*2</sup>

### Cryogenic Low Voltage/ High Current DC Power Source using Low Loss Switching Device with Multi-Parallel Connected MOSFETs

Akira NINOMIYA<sup>\*1</sup>, You HANASHIMA<sup>\*2</sup>, Takahiko SUZUKI<sup>\*2</sup>

**ABSTRACT** : In order to carry out direct-current (DC) magnetic excitation of the superconducting coil, it is possible to make it reach to a rated value only on the voltage corresponding to the inductance value and current increasing rate of a primarily coil. However, DC power sources are usually under an ordinary-temperature, in order to wire the load under low-temperature circumstances, the loss by heat penetrate occurs, and a voltage is needed for a power supply. Moreover, since the output parts of the power supply consist of semiconductor devices and circuit elements, it cannot disregard the voltage drop from here, either. By these contributing factors, a certain amount of voltage value is needed for the DC power source for superconducting coils.

Then, we make the heat reduction by setting up under a low-temperature circumstances for a power source, and are examining the DC power source for superconducting coils considered only as the semi-conductor switch with which the component part also made the on-resistance value small as much as possible. A goal is making it increase to the current capacity made to carry out the quench of the superconducting coil by a undervoltage of 1 voltage or less. Until now, we were not able to attain the performance of the infancy under the impact of a loss of a switch part and a periphery circuitry part. This time, it became a possible to be able to improve that performance sharply and to attain the aim of an infancy by improving this point completely.

**Keywords** : low voltage and high current DC power supply, MOSFET, high turn ratio power transformer

(Received September 22, 2010)

#### 1. はじめに

超伝導コイルを直流励磁するには、本来コイルのインダクタンス値と電流上昇率に見合う電圧のみで定格値まで到達させることが可能である。しかし、直流電源は通常常温に置かれ、そこから低温負荷に導線で電力を供給している。そのため、導体を介した熱侵入が発生する。電流容量が大きくなるとこの損失は無視できなくなる。また、電源の出力部分は、半導体素子と回路部品で構成されているために、ここからも電圧降下が発生する。これらが要因となって、超伝導コイル用直流電源といえども、ある程度の電圧値が必要になっている。

<sup>1</sup>そこで、我々は、電源部分を低温環境下において、常

温からの侵入熱を低減させ、その構成部分となる半導体部からの損失も極力低減させた超伝導コイル用直流電源を検討している[1]。目標は、1 V以下の低電圧で超伝導コイルをクエンチさせられる電流容量まで増加させることである。これまでは、スイッチ部分と周辺回路部分からの損失が大きく影響していて目標とした性能を達成することができなかった。今回、本提案電源について全面的に見直し、大幅にその性能を改善することができた。

#### 2. 電源回路

本提案電源は、巻数比の大きく異なる変圧器 (200 : 1) と多数の MOSFET を並列接続したスイッチ回路部分から成る。変圧器の1次側は導線を用いて1000回巻き、2次側はBi系超伝導テープ線を5回巻いてある。これにより、常温から低温に引き込む部分の電流は200分の1に

\*<sup>1</sup>:エレクトロメカニクス学科助教

\*<sup>2</sup>:エレクトロメカニクス学科学生

低減できる。また、この変圧器部分には3次コイルもある。この部分は、パルス信号を生成して MOSFET を制御する部分である。図1が作成した変圧器であり、表1がその諸言である。

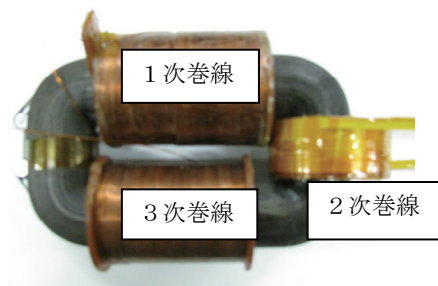
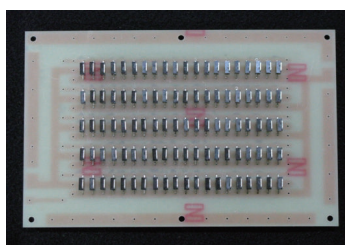


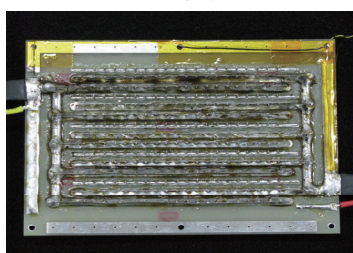
図1. 低熱侵入型変圧器

表1. 変圧器諸言

| 鉄心     |            |
|--------|------------|
| 素材     | シリコン鋼      |
| 直径     | 2.75mmφ    |
| 磁路長    | 265mm      |
| 1次側コイル |            |
| 素材     | 銅(0.56mmφ) |
| 巻数     | 1000       |
| 2次側コイル |            |
| 素材     | Bi系 HTS 線  |
| 巻数     | 5          |
| 3次側コイル |            |
| 素材     | 銅(0.56mmφ) |
| 巻数     | 300        |



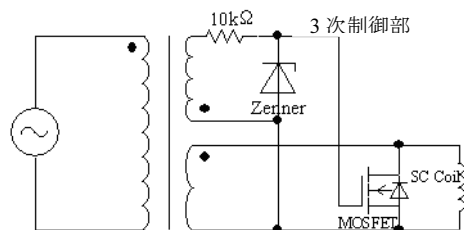
(a). 表側



(b). 裏側

図2. MOSFET スイッチ回路部分 (MOSFET100 個使用)  
MOSFET: 東芝製 2SK2493 (ドレイン電流 ( $I_d$ ) 5A, ゲート電圧 ( $V_{GS}$ ) 8V、ドレインソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) 16V、基板上には Bi 系酸化物超電導テープ線 (臨界電流 150A) を最大2本並列接続.

図2は、スイッチ部分である。これは常温時の定格電流が 5A のパワーMOSFET (東芝製 2SK2493) を 100 個並列接続して製作したものである。注意した点は、100 個すべてに同一電流値が流れるように均流化対策を施した点である。これは、基板上の回路部分の幅を均一にし、全ての素子が同一回路長になるようにして行った。



1 次常温部

2 次低温部 (77K)

図3. 超伝導コイル励磁回路. ここで、1次巻線は常温、2次巻線は77K、3次巻線はMOSFET 制御部で100個のMOSFETにパルス信号を供給.

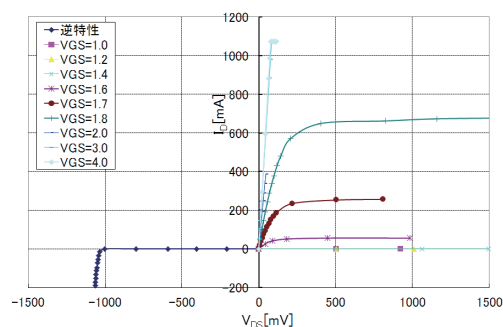


図4. MOSFET 単体静特性 (77K)

しかし、このままでは回路部分に使用している銅製の基板長に相当する抵抗成分が存在してしまう。そこで、この配線部分に Bi 系の酸化物超伝導テープ線 ( $I_c$ :150A @住友電工製) を並列接続して、線路長の抵抗成分もゼロにするように改良した。今回は、200A までを考慮したため最大2本並列接続してある。

図3は本提案回路の基本回路である。これを用いて基本動作を説明する。入力常温部であり、巻き数比 200 対 1 の変圧器を介して 77K 環境となる。この低温環境部には負荷の超伝導コイルと MOSFET が100個並列接続されている。MOSFET を制御するための部分は変圧器3次巻線であり、ここにあるツェナーダイオード (RD8A) で電源に同期した方形波 (8V) を生成している。これを MOSFET のゲートに供給することでオンオフ制御を行って超伝導コイルに一方方向の電流を供給している。ここで注意したいことは、MOSFET に取り付けられているダイオードである。このダイオードの静特性を図4に示す。これより逆方向は77Kでは1Vで導通状態になることである (常温時は、0.6V 程度)。

本回路はこの点を考慮しており、超伝導コイルを直流励磁する際、この MOSFET に並列接続されているダイオードが動作しない電圧範囲でのみ整流回路が実現でき、同時に充電が可能となる。すなわち、ここに 1 V 以上の電圧が加わると、ダイオードを介して MOSFET が逆方向にも導通することになり、2 次回路部分が MOSFET のみの短絡した回路となり超伝導コイルは励磁できなくなる。

またこの図 4 の順方向特性を見ると、ゲート・ソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) が高くなるとオン抵抗値を低くすることがわかる。我々は、この値を 8 V として実施している。

### 3. 試験結果

図5は、液体窒素環境下で実施した HTS 線材有無によるスイッチ回路部分のオン時の電圧電流特性である。このとき、MOSFET 単体のオン抵抗値の一例 (77K) を図 6 に示す。これより、その値は  $43\text{m}\Omega$  である。任意に選択した 10 個のサンプルの結果、オン抵抗値は  $32\sim 43\text{m}\Omega$  の範囲に分布した。従って、100 個並列接続したときの予想オン抵抗値は、この点を考慮した範囲内になると考えられる。結果は  $0.4\text{m}\Omega$  であった。これより、HTS 線材を並列接続させることで予想通りの低抵抗スイッチが実現できることが判明した。なお、作成したスイッチ回路の交流特性は 1 kHz、60A まで実施し問題の無い事を確認している。

次に、このスイッチ回路を図 7 に示す充電回路に組み

込み、超伝導コイルの励磁実験を実施した。なお、この回路には、新たにスイッチ 1 と 2 が追加されている。これは、クエンチ時、電源の 1 次側を切り離すと同時に、スイッチ回路部分にもパルス信号を与えない状態をつくり、負荷のみの電流減衰回路を構成するためである。これにより、回路内に発生した抵抗成分を抽出することが可能となる。使用超伝導コイルは、内径 118mm、外径 190mm、巻数 360 ターン、インダクタンス  $24.9\text{mH}$ 、クエンチ電流 32A の住友電工製のビスマス系超伝導コイルである。これを図 8 に示す。

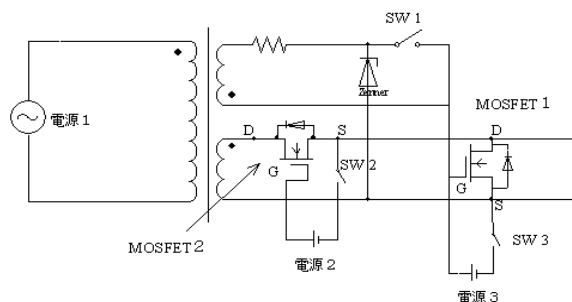


図 7. 充電実験回路



図 8. 酸化物超伝導コイル (臨界電流 32A: 住友電工製)

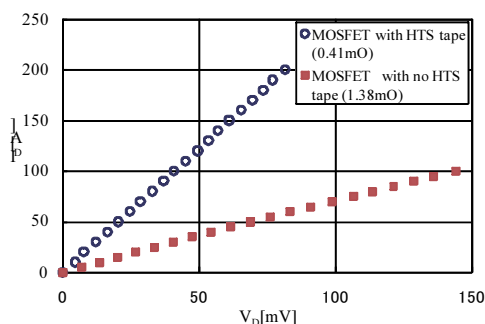


図 5. 100 個並列接続 MOSFET の静特性 ( $V_{GS}=8\text{V}$ )

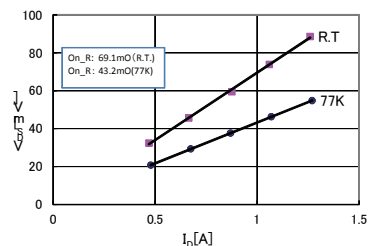


図 6. MOSFET 単体の常温と 77K の特性比較 ( $V_{GS}=8\text{V}$ )

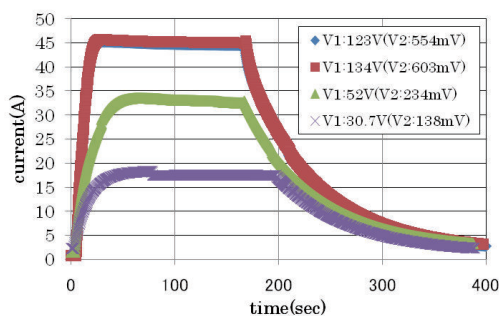


図 9. 超伝導コイル励磁特性

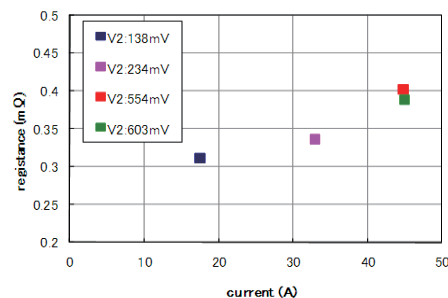


図 10. 励磁時の回路内抵抗値特性

図 9 は、変圧器 2 次電圧が 140mV～600mV（1 次電圧は 30V～130V 相当）の範囲で行ったときの充電特性である。ここで、2 次電圧 234mV（1 次電圧 50V）のときが、ほぼ使用超伝導コイルのクエンチ電流値に相当する。そして、2 次電圧が 550mV と 600mV の特性は、一つの特性のように見えている。これは両特性が一致していることを示している。これより両特性は、コイル内で発生した抵抗値がほぼ同一であることが推定できる。すなわち、超伝導が破れて常伝導がコイル内で発生したとき、電圧が平衡状態になることで供給電力が低下していると予想できる。これは電源が弱いということであるが、別な見方をすると負荷急変に対して、事故の抑制する機能（フェイルセーフ機能）を有する電源とみることも可能である。これは、クエンチが拡大して超伝導コイルに致命的なダメージを与えることを抑制する機能と考えられる。

図 10 は、このときの回路内で発生した抵抗値である。これより 2 次電圧が 550mV, 600mV の超伝導コイルがクエンチしている状態においても、コイル内で発生した抵抗値は上昇せずにいる一定値を保っていることがわかる。

## 4. 結 論

酸化物超伝導コイル電源を低損失で実現するために交直変換部分を 77K の温度環境下で動作させる定電圧/大電流型の充電回路について検討した。本提案電源は、巻き数の大きく異なる変圧器と MOEFET を多数個並列接続したスイッチ回路部分から構成される。

これらを用いて得られた特性をまとめると以下となる。

- ・スイッチ回路部分のオン抵抗値は、期待した値である。並列個数分の 1 に低減させることが可能となった。今回は 100 個使用したが、この個数をさらに増やすと、電流容量の増大とオン抵抗値のさらなる低減化が可能である。
- ・本提案電源には、超伝導コイルが過励磁時状態になりクエンチしたとしても、常伝導状態が拡大することのないフェイルセーフ機能付きであることが判明した。

## 参考文献

1. Yuichi Kondo, et al., IEEE Trans. Appl. Super., Vol.19, no.2, pp2337-2340, JUNE. 2009.