

多数並列 MOSFET を用いた低温用直流電源と超電導コイルの充・放電実験

石郷岡 猛^{*1}, 二ノ宮 晃^{*2}, 近藤 祐一^{*3}, 深野 翔平^{*4}

Cryogenic DC Power Source using Multi-Parallel-Connected MOSFETs and Charge/Discharge Experiment of Superconducting Coil

Takeshi ISHIGOHA^{*1}, Akira NINOMIYA^{*2}, Yuichi KONDO^{*3}, Shohei FUKANO^{*4}

ABSTRACT : The authors have proposed a cryogenic low-voltage/high-current DC power source using multi-parallel-connected MOSFETs as an excitation power source of superconducting coils. It has been confirmed that the power source can operate at 77 K in liquid nitrogen bath. The fundamental idea and experimental results are presented. The experiment using 200 MOSFETs connected in parallel are carried out. The forward-direction voltage drop at 77 K has been measured. The excitation current of the superconducting coil can be increased and decreased arbitrarily. The experimental results show good prospect of this type of DC power source not only for the excitation of superconducting coils but also for the forced discharging of the coils.

Keywords : MOSFET, cryogenic DC power source, superconducting coil, charge and discharge

(Received September 25, 2008)

1. はじめに

コイルの励磁には、低電圧大電流直流電源を必要とする。しかし、低温領域にある超電導コイルに直流電流を供給する際には、極めて太いリード線を要し、室温部から低温部に入るリード線による侵入熱による液体窒素の蒸発が大きく、冷却コストが大きくなるという問題が発生する。この対策として、室温から交流小電流を入力し、低温容器内で変流器により交流大電流に変換し、その後整流装置により直流大電流を得ることが考えられる。このため、本研究では、一次常電導/二次超電導式変流器と、低温でも動作する MOSFET を用い、これを多数個並列接続して順方向電圧降下を低減させた整流装置からなる低温用低電圧大電流直流電源を試作し、これを用いて超電導コイルの充・放電試験を行った。

2. 実験装置

2. 1 超電導変流器

使用した超電導変流器の仕様を表 1 に示す。

表 1 変流器の仕様

一次巻線	材料 巻数	銅線 : 0.56 mm ϕ 500/1000/1500
二次巻線	材料 巻数	Bi2223/Ag HTS tape 3/10
鉄心	材料 断面直径 磁路長	silicon steel 27.5 mm ϕ 320 mm

一次側は直径 0.56[mm] のホルマール銅線を用い、500 および 1000 ターンのコイルを巻いた。これらを直列に接続することにより 1500 ターンとすることもできる。二次側は Bi-2223/Ag HTS テープ線材を用い、3、あるいは 10 ターンの超電導巻線を巻いた。また、変流器の鉄心には断面積 594 [mm²]、磁路長 320 [mm] の珪素鋼製巻鉄心を用

^{*1} : エレクトロメカニクス学科教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

^{*2} : エレクトロメカニクス学科助教

^{*3} : 電気電子工学専攻学生

^{*4} : 電気電子工学専攻学生(現在東京エレクトロン(株)勤務)

いた。超電導変流器の概観を図 1 に示す。

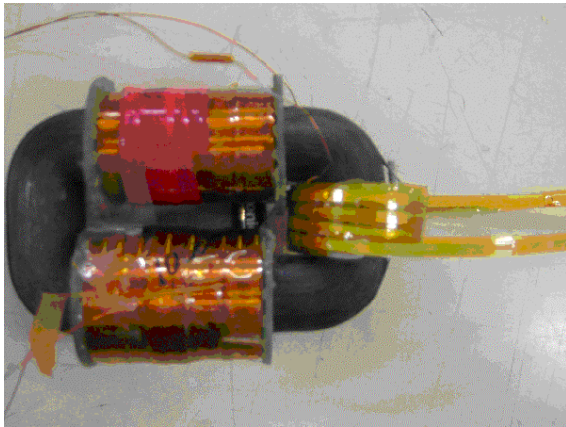


図 1 超電導変流器

2. 2 200 個並列 MOSFET ユニット

図 2 に試作した 200 個並列 MOSFET ユニットの概観を示す。東芝製 2SK2493 MOSFET を 100 個並列に接続したものを 2 組用いて 200 個並列として実験に用いた。また、この素子の D-S 間電圧/G-S 間電圧のそれぞれの定格値は 16/8[V] であり、定格電流は 5[A] である。

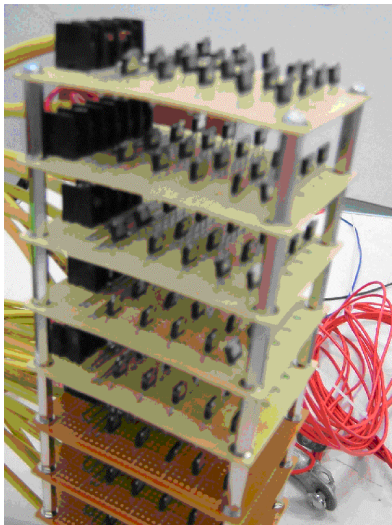


図 2 MOSFET 200 個並列ユニット

2. 3 ツェナーダイオード

本実験では定格 G-S 間電圧 8.1[V], 0.5[W] のツェナーダイオードを用いた。その定格より十分大きい波高値の交流電圧を整形して近似的な矩形波電圧を作り、これを G-S 間に印加することにより確実な動作を実現した。

3. MOSFET の寄生ダイオードの特性

MOSFET の特徴として、D-S 間にある値以上の逆方向電圧が掛かると、ゲート電圧が零でも S→D 方向に電流

が流れてしまう。これは寄生ダイオードによるものである。著者等は、その on 電圧が室温および低温で、それぞれ約 0.5 および 1[V] であることを実験によって確認した。室温、低温(77K)における実験結果を図 3 a), b) に示す。

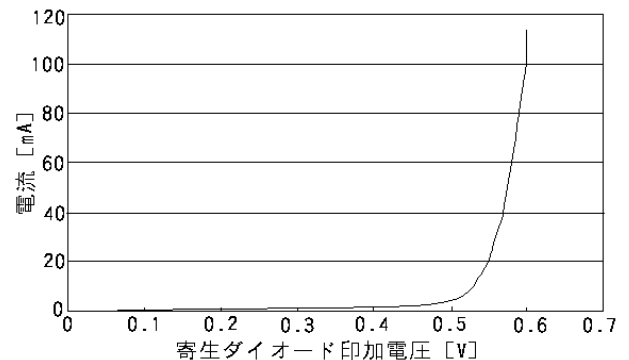


図 3 a) 寄生ダイオード静特性(常温)

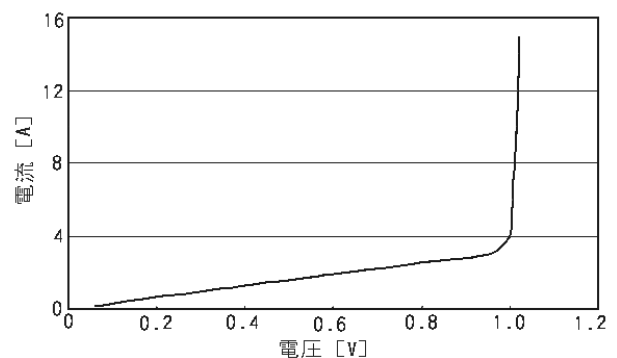


図 3 b) 寄生ダイオード静特性(低温)

4. 充・放電試験

4. 1 充電試験

図 4 に基本励磁試験回路を示す。一次側電圧は 100, 200, 260[V] の三種類で実験した。この回路により、二次側の超電導コイルに直流電流を供給した。

図 5 a), b) は充電時の原理の説明図である。

ソース側がプラスのとき、ゲート信号は入力されず、超電導コイルには一定の直流電圧が印加して励磁電流が上昇する。

ドレイン側がプラスのとき、ゲートには約 8V の電圧がかかり、MOSFET がオン状態となって、二次電圧は短絡され、超電導コイルには電圧が印加されず、待機状態になる。励磁電流上昇、待機を繰り返し徐々に超電導コイルの励磁電流は増加していく。待機状態のとき、励磁電流は時定数に従って減衰するが、上昇時の電流の増加の方が大きいため結果的に充電されていく。

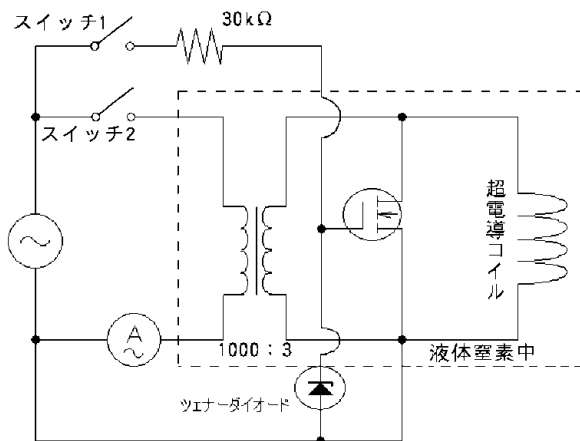


図4 基本励磁試験回路

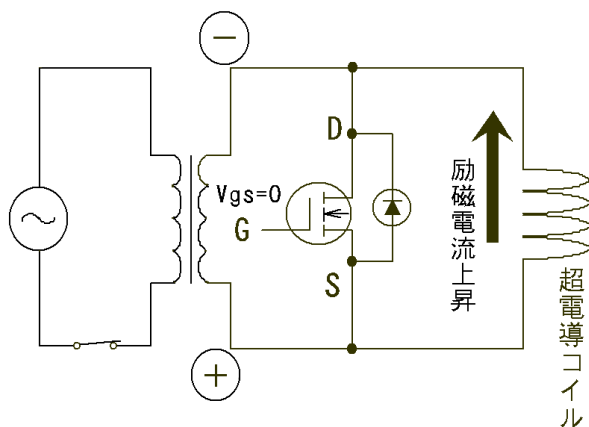


図5 a) 励磁電流上昇

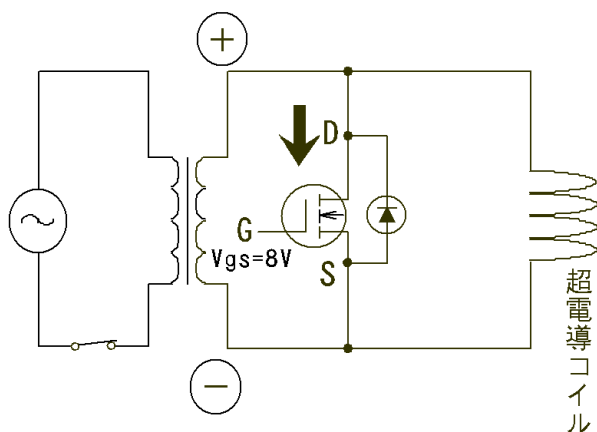


図5 b) 励磁電流待機

図6, 7, 8に一次側電圧 100, 200, 260[V]の場合の観測結果を示す。一次電圧が高い方が励磁電流の飽和値が大きく、充電に要する時間も短いことが明らかである。

なお, HTS コイルの臨界電流値が約 42[A]であるため, 励磁電流の上限値を臨界電流の 70%程度の 30[A]までと

した。

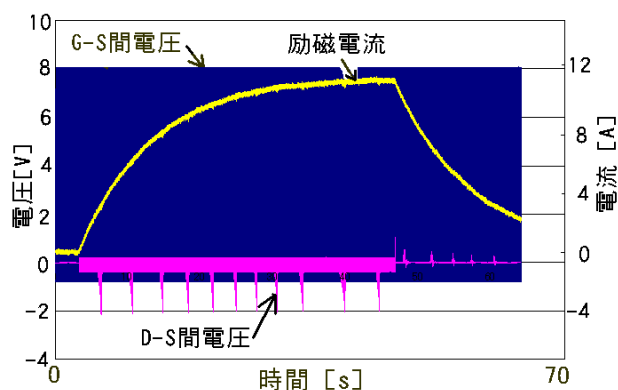


図6 励磁試験 一次電圧100V

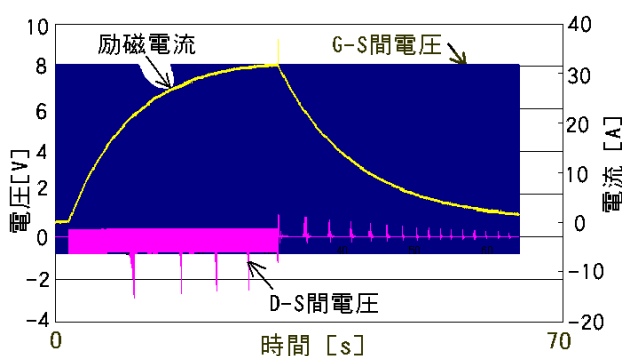


図7 励磁試験 一次電圧200V

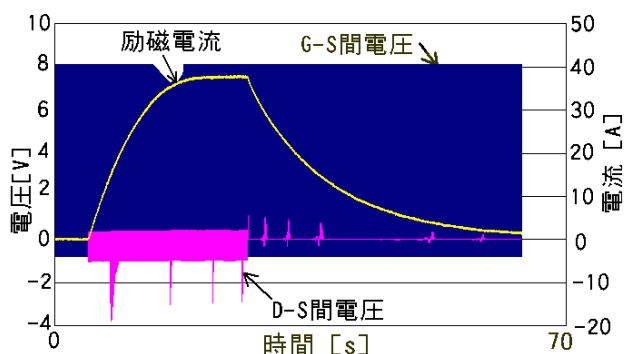


図8 励磁試験 一次電圧260V

4. 2 ゲート開放放電動作

電源電圧は印加したままでも、ゲートを開放すると超電導コイルの励磁電流は減衰する。すなわち、ゲート開放放電試験では、図4の回路で、スイッチ1を開き、ゲート信号は入力されない。ドレイン側がプラスのとき、超電導コイルには逆電圧が印加し、励磁電流を抑制する。また、ソース側がプラスのとき、超電導コイルには順電圧が印加し、励磁電流は増加する。しかし、順・逆正味の平均電圧は零となり、回路の残留抵抗による減衰時定数に従い徐々に放電される。

一次側に 260[V]の交流電圧を印加し、二次側の超電導コイルを所定の電流値まで励磁した後、ゲート開放放電試験を行った。

4. 2 自然放電試験

実験は、まず、変流器の一次側に 260[V]の電圧を印加し、超電導コイルを約 30[A]まで充電する。電流が 30[A]充電された状態で図 4 のスイッチ 1 と 2 を同時に切り、超電導コイルにかかる電圧を零にした状態での電流の変化を記録した。なお、HTS コイルの臨界電流値が約 42[A]であるため、励磁電流値はその 70%程度の 30[A]までとして実験した。

図 9 は超電導コイルを約 30[A]まで充電してからスイッチ 1 および 2 を共に切って放電した場合、すなわち一次電圧とゲート電圧を共に off にし、超電導コイルを完全に無電圧状態にした場合の実験結果である。同図を見ると、共に完全に放電するまで、約 30[s]を要していることが判る。

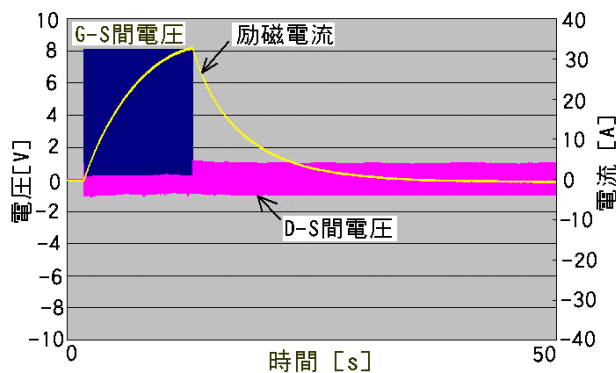


図9 自然放電試験

4. 3 強制放電試験

超電導コイルが何らかの原因により万一のクエンチが発生した場合には、超電導コイルの焼損等の重大事故を防止するため、可及的速やかに励磁電流を強制的に放電させる強制放電動作が必要になる。

図 10 a)に強制放電の実験回路を示す。この実験では、一次側に 260[V]を印加し HTS コイルを約 30[A]まで充電した後、スイッチングにより G-S 間に充電時とは位相が 180 度ずれた矩形波電圧を印加して放電させた。つまり、ゲート電圧は一次電圧と位相が 180 度ずれている。図 10 b)に G-S 間電圧制御回路を示す。それぞれのスイッチが図 10 b)に示す位置にあるとき、一次側の電圧と G-S 電圧は同位相になり、これらのスイッチを同時に切り換えると位相が 180 度ずれたものが得られる。図 11 a), b)に実験結果を示す。

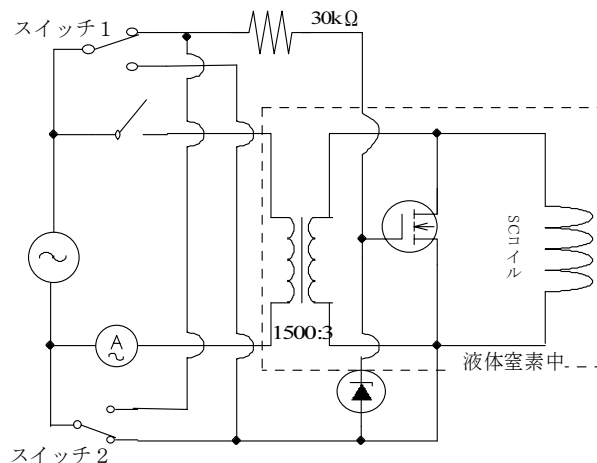


図 10 a) 強制放電試験回路

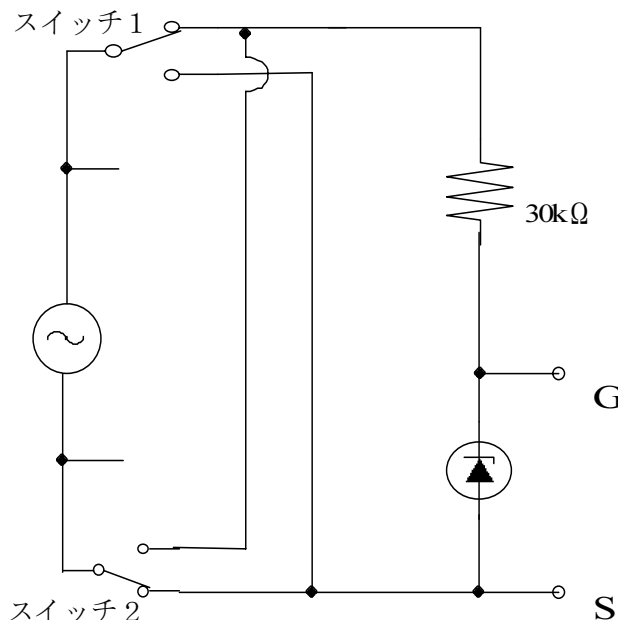


図 10 b) G-S 間電圧制御回路

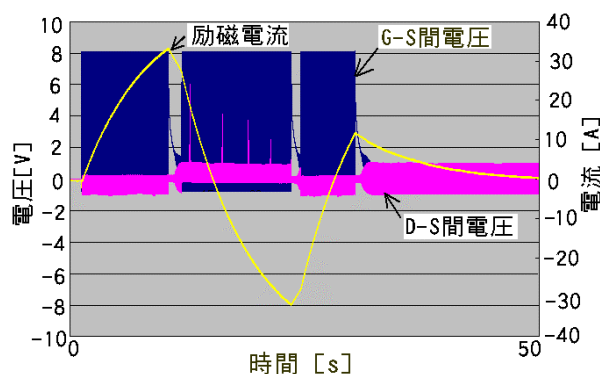


図11 a) 強制放電試験

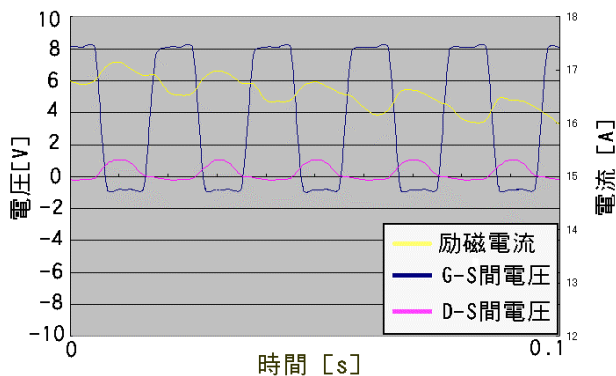


図11 b) 強制放電試験拡大図

図 11 a)において、電流減少時に G-S 間に位相が 180 度ずれた電圧がかかっている。図 11 b)は 図 11 a)のゲート信号位相が切替わっている部分を拡大したもので、G-S 電圧の位相が 180 度ずれていることが確認できる。図 9 の自然放電試験の結果と比較すると、明らかに放電が早められていることが確認できる。

4. 4 急速強制放電試験

放電の際に、MOSFET のゲート信号の位相を 180 度反転させることに加え、変圧器の一次側巻数を 1500 から 1000 あるいは 500 に切り換えることにより二次電圧を高め、更なる放電時間の短縮を実現させる実験を行った。なお、充電時の一次：二次巻数比は 1500 : 3 である。

図 12 a)に急速強制放電の観測結果を示す。この急速強制放電では約 3[s]で完全放電できた。

図 12 b)に、自然放電、強制放電、急速強制放電の 3 パターンの放電試験の状況を比較したものを示す。

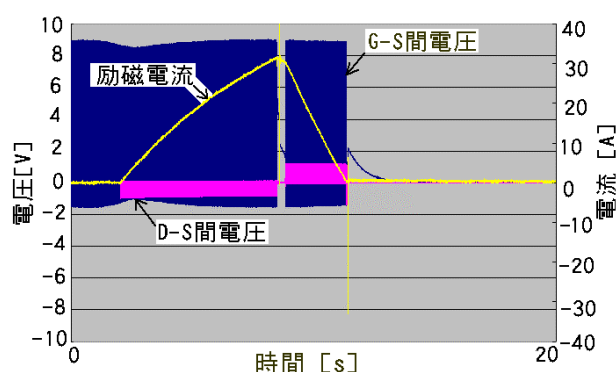


図12 a) 急速放電時の電流変化

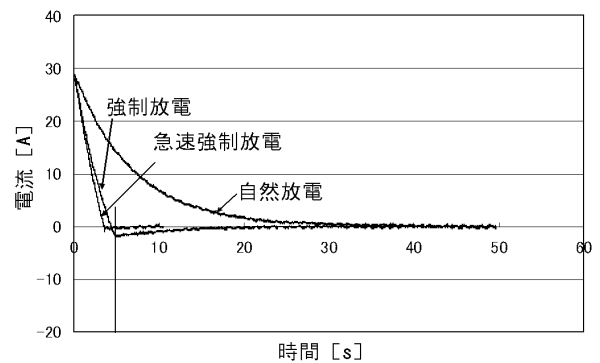


図 12 b) 各種放電時の電流変化の比較

5. 結 論

以上の実験において、本研究の目的である、室温部では高電圧小電流入力、低温部では低電圧大電流出力の低温用直流大電流電源の動作が確認できた。実験に使用した多数並列接続 MOSFET アレーは、低温で使用可能で、十分順方向抵抗が小さいことが判った。

また、電源電圧と変流比を変化させることで充電速度のパターンを任意に変えることができること、また、放電時にゲート信号の位相を反転させることにより、より高速に放電できることが確認できた。これにより、超電導コイルが万一のクエンチに至った場合でも安全にその蓄積エネルギーを放出することができる。

なお、今後、効率の測定や実際のクエンチ時の緊急放電試験などを行うことが必要と思われる。

参考文献

- (1) Ryo Kawanami and Takeshi Ishigohka, "Low Temperature Characteristics of MOSFET Targeting Low-Voltage High-Current Power Source for Superconducting Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2, pp.1630-1633, June 2006.
- (2) S. Fukano, T. Ishigohka, Y. Kondo, A. Ninomiya, R. Kawanami, "Cryogenic Low-Voltage/ High-Current DC Power Source using Multi-Parallel-Connected MOSFETs", Presented at 20th International Conference on Magnet Technology, Philadelphia., Aug. 27-31, 2007.