

多数個並列接続 MOSFET を用いた低温用低損失低電圧大電流スイッチ の試作と超電導コイル充電回路への応用

二ノ宮 晃^{*1}, 杉山 歩^{*2}, 倉西 康次^{*2}

Production of the low loss, low voltage and high current switch for 77K with multi parallel connected MOSFETs and the application to the superconducting coil charging circuit

Akira NINOMIYA^{*1}, Ayumu SUGIYAMA^{*2}, Kohji KURANISHI^{*2}

ABSTRACT : To make a quite low-resistance switch operated at 77K in liquid nitrogen bath, we utilize a multi-connected MOSFETs in parallel. The rated current and its resistance of the fabricated switch is 500A/400 $\mu\Omega$ using 100 MOSFETs. And the excitation test of a superconducting coil was carried out using the proposed low-voltage/high current DC power source [1]. Test results show that excitation up to the quench current of 42A of the superconducting coil is made possible by the low-voltage of 0.3Vrms.

Keywords : low-loss switch, MOSFET, cryogenic DC charge circuit, superconducting coil

(Receiver March 3 2015)

1. はじめに

超電導コイルの励磁には、そのコイルの性能を十分に満足させる電圧、電流および容量が必要になる。特に、直流用超電導コイルの場合、大電流への要求は非常に高いが、電圧に関しては必ずしもそうではない。

そこで、直流用超電導コイルの励磁において1V以下の極低電圧を使用し、電流においても電源から直接定格電流を供給するのではなく、徐々に増加させる充電回路を使用することで小容量電源でも超電導コイルの励磁が可能になることを検討している。

利用設備は、1kVA (200V/5A) 級の単巻可変変圧器、巻数比が非常に大きい変圧器 (1000:4)、そしてMOSFETを多数個並列接続して大電流用途での利用を液体窒素温度(77K)環境下で可能にしたスイッチから成る。

これら3設備を用いて超電導コイルを励磁させるには、スイッチ部の抵抗を極力小さくすることが重要になる。

提案する充電回路[1]は、MOSFETと超電導コイルが並列接続されており、商用周波数交流電流の正の半サイク

ル時は、MOSFETを通る回路部分に電流を流し、負の半サイクル時は、超電導コイル部に電流を供給する。そして、つぎのサイクル時、超電導コイル部に電流を供給するときは、以前の電流がゼロにならないよう回路時定数を長くする対策をとる。

本回路を用いて、超電導コイルの励磁実験を実施したところ、実効値電圧0.3V程度の低電圧で超電導コイルをクエンチ電流値(42A)まで励磁させることが可能となった。ここでは、MOSFETの基本特性および充電回路の基本動作特性と損失特性などを実験値に基づき述べていく。

2. 実験設備

本研究に利用する設備は、液体窒素環境下で動作可能なMOSFETスイッチと巻数比の大きい変圧器、そして超電導コイルである。これらの仕様を表1に示す。ここで、MOSFETは、低電流容量の素子を100個並列接続して電流容量を増加させると共にオン抵抗値を小さくしている。変圧器は、珪素鋼板を積層した鉄心を用いて自作したものである。

*1 : システムデザイン学科助教(ninomiya@mug.biglobe.ne.jp)

*2 : エレクトロメカニクス学科 4年

Table.1 Specification of the experimental equipment

MOSFET	2SK2231(N型) V _{DS} :60V, D _{GS} :±20V, I _D :5A
変圧器	1次: 0.6mmφ銅線, 1000 ターン 13.7Ω @R.T. 2次: 4mm幅編組線, 4 ターン 17.3mΩ @R.T. 漏れインダクタンス: 85μH
超電導コイル (住友電工製)	使用線材: Bi超電導線 外径: 170mm,線材部内径: 136mm 高さ: 45mm,巻数: 360 ターン インダクタンス: 25.1mH 臨界電流値(77K): 42.9A

2. 1 MOSFETの静特性

提案回路は、77KでMOSFETを動作させる必要がある。そこで、利用するMOSFETの常温(約300K)と77Kにおける静特性試験を実施した。

Fig. 1 は、これに用いた静特性試験回路図である。ゲート・ソース間の電圧(V_{GS})は20Vに固定し、ドレイン・ソース間の電圧(V_{DS})を変化させてドレイン電流(I_D)を測定した。Fig.2 は、MOSFET単体の静特性結果であり、常温と77Kで測定している。これより、オン抵抗値を求めると、常温では33.5mΩ、77Kでは26.3mΩであった。これより、77K下では、オン抵抗値が常温の約0.8倍になると分った。

次に、この素子を後述する充電回路に利用するとき、ドレイン・ソース間に挿入されている寄生ダイオードの特性について検討した。試験方法は、Fig.1の試験回路の電源の極性を逆にして実施した。これを行う目的は、充電回路において、負の半サイクル時に寄生ダイオードが動作すると超電導コイル部とこのダイオード部が同時に動作することになり、充電動作ができなくなるからである。すなわち、提案回路の動作範囲は、寄生ダイオードの動作しない電圧範囲に制限される。Fig.3 は、このときの特性であり、常温時はオン電圧が0.6V、77K時は1Vに上昇することが分った。

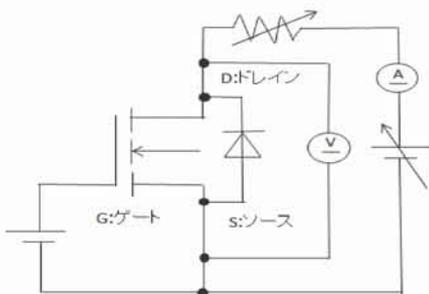


Fig.1 Measurement circuit

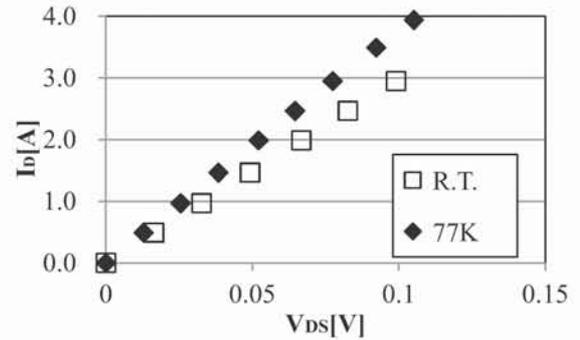


Fig.2 Static characteristics of MOSFET

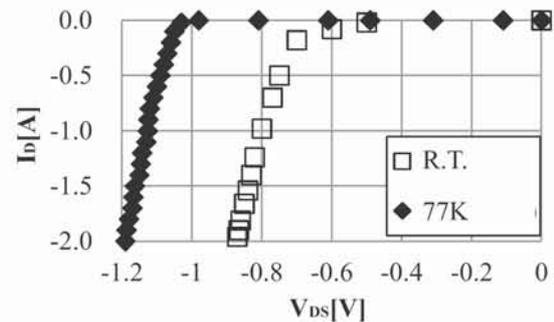
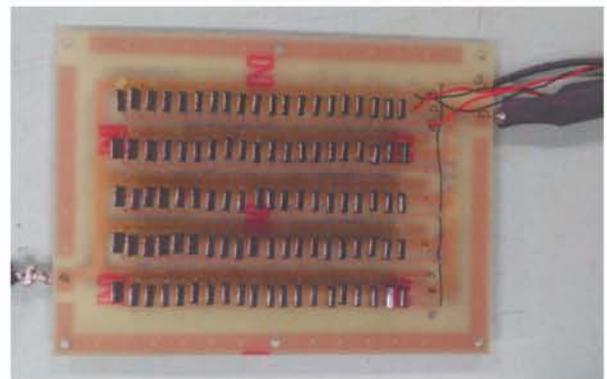


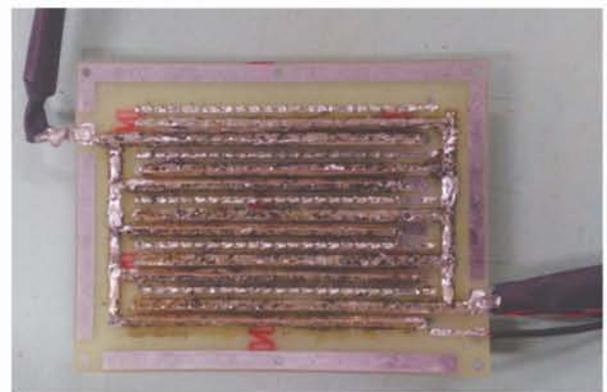
Fig.3 Reverse direction characteristics of MOSFET

2. 2 多数個並列接続MOSFETの静特性

MOSFETを多数個並列接続するための回路基板(サイズ100×150mm)を作製した。この基板の特徴は、各素



(a) Surface substrate (MOSFET 100 Pieces)



(b) Solder side surface

Fig.4 Large number wiring MOSFET board

子に同一強度の電流が流れるようにするために、全素子の回路長を同一にしてある。Fig.4 は、基板上に 100 個素子を取り付けた状態である。また、基板内の銅回路部分には、抵抗成分を低減させるためにBi系超電導テープ線材 (Ic : 150A, 住友電工製) を並列接続してある。

Fig.5 は、完成基板を用いて 100 個並列接続時の静特性試験結果である。試験温度は 77K、Vgsは 20Vであり、オン抵抗は 0.393mΩであった。MOSFET単体の低温下でのオン抵抗値は 26.3mΩであったことから、この 1/100 の値である 0.263mΩを期待したが、やや大きい値であった。これは、回路基板上的超電導線未配線部分や接続部等の影響と思われる。

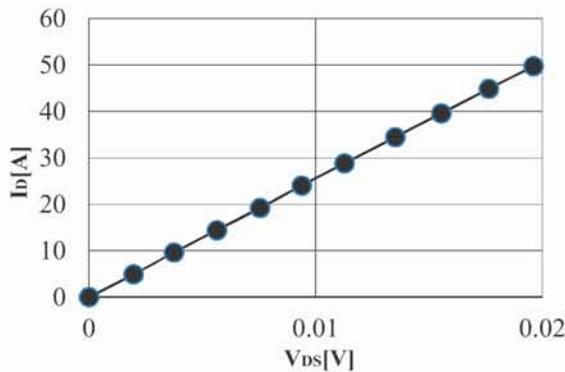


Fig.5 Static characteristics of the 100 parallel connected MOSFET

2. 3 充電回路実験

Fig.6 は、充電実験に用いた試験回路図である。使用している変圧器は自作したものであり、巻数比が 1000 : 4 と非常に大きいのが特徴である。この変圧器の無負荷試験特性をFig.7に示す。また、Fig.6内破線部分は、液体窒素素子に入れる部分であり、コイル両端電圧以外の計測は実施していない。これは、電流などの計測による抵抗成分の増加を極力失くすことを意図したためである。しかしながら、超電導コイルに充電されていく電流は測定したい。そこで、ホール素子を超電導コイル中心軸上 50mmの高さに配置し、そこでの磁場値から電流値を求めたこととした。Fig.8 は、ホール素子の起電力と通電電流の関係である。なお、ホール素子の制御電流は 1mAである。

Fig.9 は、充電回路の動作特性を説明する図である。これとFig.10に示す電源電圧 80V (実効値) で実施した超電導コイル充電特性を用いて、回路動作について説明する。

Fig.9 内①の破線で示した正の半サイクル時は、MOSFET 部分に電流が流れるときであり、これは Fig.10(a)に示すゲート・ソース間電圧 (Vgs) が正の電圧

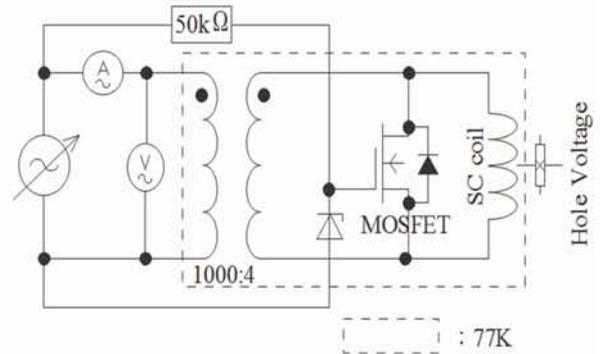


Fig.6 Experimental circuit

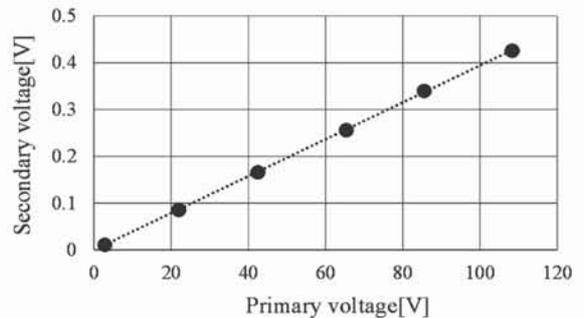


Fig.7 Transformer no-load test

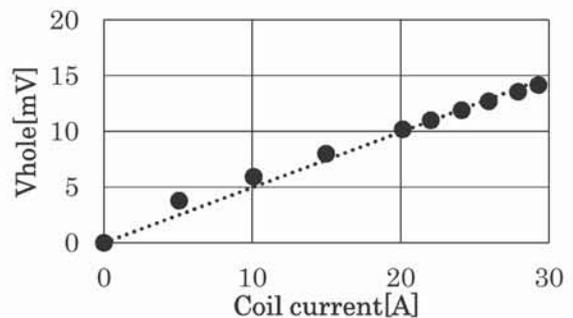


Fig.8 Relationship between superconducting coil current and Hall voltage

を発生しているところから判断できる。ここでの電流ピーク値は、同図(b)より 0.46Aである。これを 2 次側の MOSFET部分に流れる実際の電流に換算すると、その値は 115Aに相当する。尚、MOSFETは 100 個並列接続してあるので、その許容電流値は 500Aである。そして、各素子には均等に電流が流れるよう設計してあり、大きな事故には至っていない。また、Vgs電圧には 20V用ツェナーダイオードを用いたが、やや電圧が低下していた。

次に、Fig.9内の②の点線で示した負の半サイクル時は、超電導コイルに電流が流れるときであり、超電導コイルのインダクタンス値が 25mH であるため、第1サイクル時の流れ始めの電流値は、Fig.10(b)の1次電流波形から推測できるように非常に小さい値 (最大値-0.03A)

である。これを2次側に換算すると、その値は7.5Aに相当する。

第2サイクル目の負の半サイクル時における超電導コイル部分の電流は、前の半サイクル時の電流に新たに供給された電流が加え合わされて上昇することになる。これを示しているのが、Fig 9の②と③であり、実際の特性がFig10(b)の2サイクル目の負の部分である。これより、第1サイクル時よりも第2サイクル時のほうが、そして、サイクル回数が増えると電流がさらに負に増加していることが分かる。この状態をより長く計測した特性がFig10(c)である。

Fig11は、この一連の特性をコイル中心軸上50mmの高さに設置したホール素子で測定した特性である。これより、約20秒(1000サイクル)で超電導コイルのクエンチ電流値(42.9A)まで達していることが判断できる。また、ここには実験時に消費された電力も同時に示してある。これより、超電導コイル電流の増加時においても電力は16.2Wでほぼ一定である。これは、電源からの供給電力がコイル電流の増加時においても変化の無いことを示す充電動作に特有の性質と考えられる。

Fig.12は、1次電圧を変化させて超電導コイルの充電特性について検討したものであり、同図(a)には、このときのコイル両端電圧を示している。この特性における電圧値の負の最大値は、どの特性においてもMOSFET内の寄生ダイオードの77Kにおけるオン電圧値である-1V以下である。これより、負の半サイクル時、超電導コイルには電流が確実に供給され、サイクル回数の増加と共に電流が増加する充電動作が行われていることが分かる。

Fig.13は、Fig.12で検討した3種類の1次電圧値における本装置内で発生した損失について検討したものである。ここで、全損失は、1次側の電圧、電流より算出している。また、銅損は主に2次側のMOSFET部分を通る電流により発生したものが主である。これより、充電電流が小さいときは、損失の大部分が銅損であることが分かり、充電電流が30Aを超えると損失も増加し、臨界電流値付近では、さらに損失が増加することが分かる。

これらの損失は、銅損と超電導コイルからの損失だけでは考えにくく、変圧器の無負荷損も考慮する必要があると思われる。その理由は、MOSFET部分を通る電流と超電導コイル部分に流れる電流の大きさが極端に異なることから判断できる。すなわち、変圧器鉄心が一方に磁化されたような振る舞いが想定できる。そこで、直流バイアスの有無による使用変圧器の無負荷試験を常温下で実施した。なお、直流バイアスの方法は、2次側に10Aの直流電流を流して実施した。Fig.14は、このとき

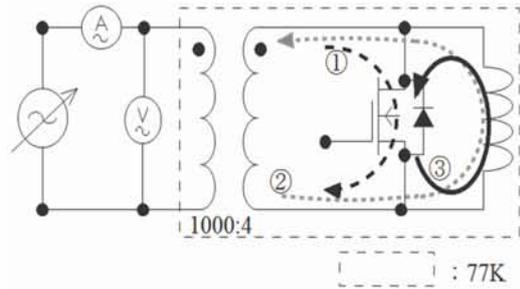
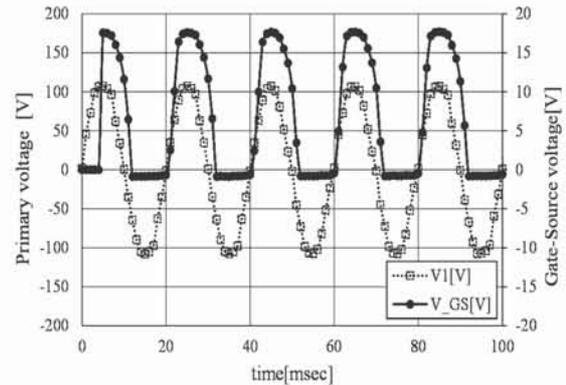
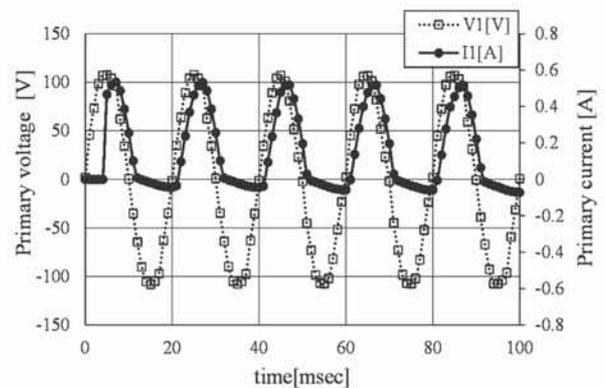


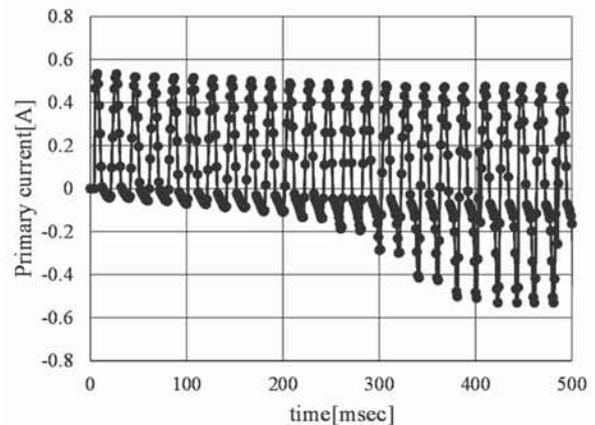
Fig.9 Illustration of a charging circuit operation



(a) Primary voltage and gate-source voltage(V_{GS})



(b) Primary voltage and primary current



(c) Primary current

Fig.10 Superconducting coil charging characteristics at 80V

の特性である。これより、通常の無負荷試験においては、その損失は極めて小さいが、バイアスされた特性においては、その損失が倍増することが判明した。

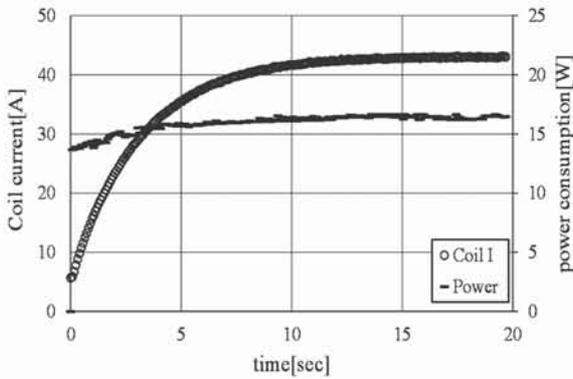
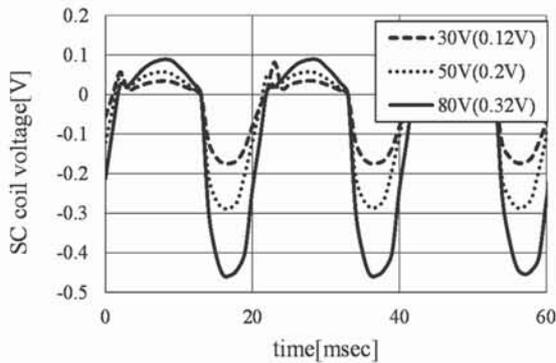
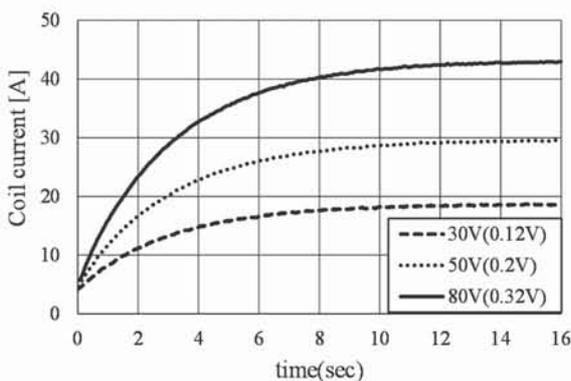


Fig.11 Charging current characteristics due to the Hall element and power consumption at the time of the charging current



(a). Superconducting coil voltage



(b) Superconducting coil charging current

Fig.12 Charging current characteristics due to the primary voltage change

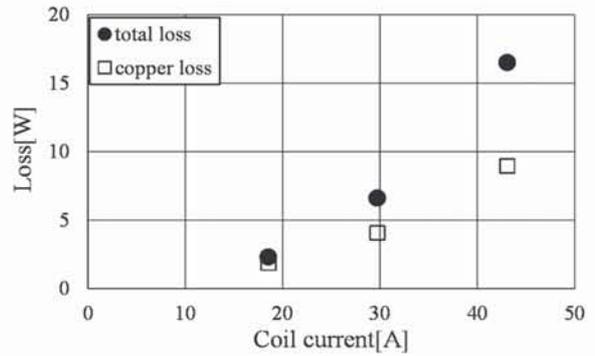


Fig.13. Power consumption properties

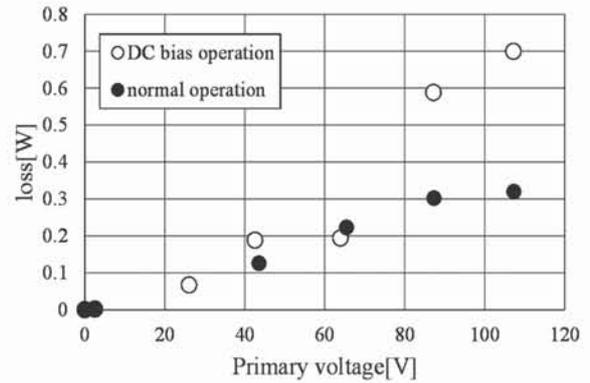


Fig.14 No-load loss characteristics at the time of the normal and the DC bias (10A DC) operations

まとめ

MOSFETを多数個並列接続して液体窒素環境下で動作するオン抵抗値が極めて小さいスイッチを製作し、これを用いて超電導コイルの充電特性について検討した結果、1V以下の低電圧で超電導コイルをクエンチさせる電流値まで励磁させることが可能であることを実証した。得られ結果を以下に示す。

- MOSFETを100個並列接続して77Kで動作するMOSFETスイッチを製作した。本スイッチのオン抵抗値は、約400 $\mu\Omega$ 、定格電流は500Aである。このオン抵抗値をMOSFET単体のそれと比較すると、本スイッチのオン抵抗値は、単体の特性の約70分の1である。
- 製作したMOSFETスイッチを利用して、コイルの充電実験を実施したところ、臨界電流42AのBi系超電導コイルを0.3V程度の交流電圧で充電できることが分かった。
- 42A充電時の全損失は16.2Wであり、このときの変圧器1次側の電圧および電流は、80V、0.46Aである。また、損失の内訳は銅損が半分以上であった。

- MOSFET部分の電流値と超電導コイル部分の電流値が極端に異なることによる鉄心の偏磁作用が疑われる。この点を解決すると電力の低減化がさらにはかれることが考えられる。これについては、今後の検討を要する。

参考文献

- [1] Youichi Kondo, Shohei Fukano, Akira Ninomiya and Takeshi Ishigohka “Cryogenic Low-Voltage/High-Current DC Power Source Using Multi-Parallel-Connected MOSFET’s”,
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, ol.19,
No.3, pp2337-2340, JUNE 2009.