

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21604013

研究課題名（和文） 加速器用超大電流電源の開発

研究課題名（英文） Development of A Very High Current Power Supply for Accelerators

研究代表者

和気 正芳 (WAKE MASAYOSHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・功労職員

研究者番号：90100916

研究成果の概要（和文）：超伝導磁石の運転には、大きな電流を必要とするが電圧が要らないことに鑑み、今までにない大電流電源を低い電圧で運用することにより低電力で達成することを目指した基礎研究を行った。トランスの二次巻き線を1ターンにすれば原理的には可能だが実際には漏れ磁場が大きな問題となる。三次元形状を考え、漏れ磁場のない巻き線を開発した。コイルの最適化設計には、スクリプト言語によりモデルを作成するプログラムを作り、超伝導磁石のクエンチ問題にも応用した。

研究成果の概要（英文）：Operation of a super-conducting magnet requires a large current. A basic study was performed to produce a very large current ever been achieved with low power based on the fact that it does not require any voltage. This can be achieved if the secondary winding of a transformer consists of single turn, in principle. However, the leakage flux of the transformer becomes a large problem in this case. We have developed a 3-dimensional winding shape that eliminates the leakage flux. Description of the model by the script language made it possible to use ANSYS iteratively. We found this method is very useful for variety of applications and successfully simulated the quench of super-conducting magnets.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：加速器、超伝導磁石、電源、大電流

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導磁石は加速器分野が牽引力となって大型装置の実用化が進められており、高磁界磁石の開発も進んでいる。超伝導磁石による安定な磁場発生のためにはクエンチ対策・絶縁対策・電磁力対策が重要であり、超

伝導磁石技術は加速のかなり大きな部分を占めるに至った。これらの技術はほとんどが従来からの多層巻きコイルによる磁場発生を前提にして研究されている。電源装置を考えれば100kAのような大電流を用いる設計は非合理であり、細い巻き線を多層巻きして、

磁石を作るのが当たり前の考え方であった。多層巻きのコイルには絶縁の問題や、巻き線の固定の問題が起り、クエンチを回避するための様々な工夫が嵩じられなければならない。しかし、電流が100kAでいいなら、そのような工夫は必要なく、超伝導磁石は一本の導体で、1ターンで作れる。構造はしごく簡単になり、当然製作コストも下がり、超伝導磁石の実用化が一層普及するだろう。こういった電源装置の開発は、超伝導磁石の考え方も変える事になる。このような一本の大電流導体で磁場を発生させる低インダクタンス型の超伝導磁石については、国内外でも超伝導磁石の発展として注目され、次世代加速器計画VLHCの中で真剣に検討され、我々も参加して米国フェルミ国立加速器研究所でプロトタイプ製作が行われた。電磁力を打ち消す巧妙なデザインで超伝導磁石の小型化、簡便化を達成したが、世界の加速器計画としてリニアコライダーが採用されることになり実際の建設計画は実現しなかった。

しかし、磁石 R&D としては現在も努力が続けられており、これに見合った超伝導材の開発も進んでいる。こういった新しいタイプの超伝導磁石開発の一環として超低電圧大電流電源装置は位置付けられる。そのため、本研究ではフェルミ国立加速器研究所グループと連携をもった研究の進め方を重視して行くことになった。電源装置については近年、省エネの観点から低電圧型の素子が作られるようになり、内部抵抗の低い FET やパワーショットキーダイオードなどが開発されてきている。こういった素子を使えば従来の固定観念である電源装置の電圧レベルの考え方を変えることが出来るのではないかとということが発想のもとではあったが、実は問題はこのような素子ではなく、むしろトランスに新しい考え方を導入する必要があることがわかった。試行錯誤の結果、新しいトランスの具体的な構造について今では大体の目処が立つようになっている。高エネルギー加速器研究機構ならびにフェルミ国立加速器研究所で基本的な回路の発想はいくつかの試作で試された。中でも我々の所では自動車用バッテリーから3000Aを取り出すデモンストレーションを行い、これに成功した。これはデモンストレーションとしてインパクトがあっただけでなく、この電源を利用して狭い実験室で、新しい型の電磁力打消し磁石の励磁を行うことが出来て、新しい型の磁石の特許を申請することも出来ている。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでの成果を生かして、極端な低電圧高電流の電源装置を設計・製作するための手法の確立を課題とする。本研究の結果を用いればどこでもこういった電源

装置の設計が行え、超伝導磁石の考え方に革新をもたらすことになることを目標とする。その成果確認のために実際に1V10000Aの電源装置を製作する。製作だけが目的ではないので、データの積み上げに時間をかけ研究期間を3年に設定する。特に一番問題となる漏れ磁場に関してはコア材料、形状の選択が重要であるし、又、有限要素の三次元計算を用いた厳密な検討も必要であると考えている。計算方法の確立はこの研究の大きな部分を占めることになる。電流導入部の構造からいえば大型の装置が先行するフェルミ国立加速器研究所での磁石 R&D との連携も重視して、国際的に認知される研究成果となるよう配慮し、実用性に問題がないことも明らかにする。将来は1MA級の実証試験を準備して行く。これまで考えられて来なかった超低電圧大電流で超伝導磁石の考え方を考えるものであり、加速器応用から出発するが適応範囲は広く、画期的な省エネルギー装置の普及で社会に貢献する可能性がある。

## 3. 研究の方法

低電圧高電流を作り出す回路は原理的にはチョッパーでパルスを作り、N対1のトランスで減圧増流すれば良いことになる。トランスで電流はN分の1になり、電流はN倍になる。しかしながら、現実にはこのような回路はうまく動作しない。二次側巻き線が1ターンでは通常漏れ磁場ばかりとなり、出力が出ない。二次側を2ターン以上とした場合、二次側のインピーダンスが高くなり、低電圧ではそもそも電流が流れなくなる。これが、従来極端な低電圧電源が考えられて来なかった理由である。半導体の電圧降下の寄与もこれに重なる。しかし、1ターンの2次コイルと言うのは絶対的に不可能なのではなく、立体的に幾何学形状を工夫することで低いインピーダンスと磁束の漏れなしを実現できることがわかった。導体そのものをコイルの一部とし、またコイルを導体に貫通させて漏れ磁場なしで囲う構造とするのである。コイルの隙間は極力狭くしなければならないので、工作上曲げ加工をするわけには行かない。我々はコイルは”巻くもの”であると言う概念を捨て、銅ブロックから放電加工で四角いコイルを切り出すという方法を編み出した。さらに最適化するためには有限要素法を用いた解析が有効と考えられる。トランスコア材料としては、ファインメットなどの高周波加速、誘導加速で用いられて来た材質を用いる工夫を試みる。素子的にはパワーショットキーダイオードを用いた整流回路から、発展させてパワーFETの同期整流により、さらに電圧降下を小さくすることができる。

## 4. 研究成果

(1) 計算手法の確立

一般に磁性体が関与する三次元磁場計算はなかなか実用的な意味での有限要素計算が難しく、電流変化があるトランスの場合は特に解析が面倒である。巻き線の電流も含めての電磁場エネルギーを最小にする手法で2次電流を計算することが出来た。

(2) 超伝導磁石クエンチ問題への応用

計算手法として、FEM をスクリプトで自動的に繰り返して使うことが確立され、電磁場と熱が複雑にからみあった超伝導磁石のクエンチ問題を解析することができるようになった。

(3) 立体コイルの切り出し

コイルは巻くことが基本となっており、四角いコイルは角の曲がりて大きな空間損失が起こるものとされてきた。この研究の放電加工による試作で、四角いコイルを切り出すことが自由にできるようになった。コイルは巻くものであると言う既成概念を払拭することができた。

(4) 低電圧大電流の実証

試作電源で4000Aまでの発生を1V以下の低電圧で行い、新しいタイプの電源装置の原理は実証された。しかし、試作に用いたトランスでは、コイルの製作を優先したため、磁性体間に隙が生じ、これが磁気抵抗を増大させる結果となり、目標とした10kAには届かなかった。磁性体間隙の影響は有限要素計算でも確認されたので、新たな試作で解決されると思われる。研究期間終了後も研究継続が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① M. Wake, R. Yamada, M. Lamm, R. Ostojic, R. H. Wands, T. M. Page, “Complete Quench Simulation of Large Solenoid Magnet”, IEEE Trans. Appl. Sup. Cond. Vol. 22, 4704504, (2012) (査読あり)
- ② M. J. Lamm, N. Andreev, G. Ambrosio, J. Brandt, R. Coleman, D. Evbota, V. V. Kashikhin, M. Lopes, J. Miller, T. Nicol, T. Page, T. Peterson, J. Popp, V. Pronskikh, Z. Tang., M. Tartaglia, M. Wake, R. Wands, R. Yamada, R. Wands, R. Yamada, “Solenoid Magnet System for the Fermilab Mu2e Experiment”, IEEE Trans. Appl. Sup. Cond. 22 4100304, (2012) (査読あり)

- ③ K. Ise, H. Tanaka, K. Takaki, M. Wake, K. Okamura, K. Takayama, and W. Jiang, “Development of a Megahertz High-Voltage Switching Pulse Modulator Using SiC-JFET for an Induction Synchrotron”, IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 39, 730-736, (2011) (査読あり)

- ④ E. Kadokura, T. Kawakubo, H. Nakanishi, M. Wake, T. Adachi, T. Arai, Y. Arakida, M. Hasimoto, T. Iwashita, T. Kubo et. Al., “A Compact Switching Power Supply utilizing SiC-JFET for the Digital Accelerator”, Conf. Proc. C1205201 3677-3679, (2011) (査読あり)

- ⑤ M. Wake, T. Iwashita, K. Okamura, K. Takayama (KEK, Tsukuba), K. Takaki (Iwate U.), Y. Osawa, K. Ise, “Novel Switching Power Supply utilizing SiC-JFET and its Potential for the Digital Accelerator”, Conf. Proc. C110904, 3402-3404, (2011) (査読あり)

- ⑥ T. Iwashita, M. Wake, K. Okamura, K. Takayama, K. Takaki, M. Toshiya, “A Compact Switching Power Supply utilizing SiC-JFET for the Digital Accelerator”, Conf. Proc. C110904 1920-1922, (2011) (査読あり)

- ⑦ T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama, K. W. Leo, T. Arai, Y. Arakida, M. Hashimoto, E. Kadokura, M. Kawai, T. Kawakubo, Tomio Kubo, K. Koyama, H. Nakanishi, K. Okazaki, K. Okamura, H. Someya, A. Takagi, A. Tokuchi, and M. Wake, KEK digital accelerator, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 071301, (2011) (査読あり)

- ⑧ K. Ise, H. Tanaka, K. Takaki, M. Wake, K. Okamura, K. Takayama, and W. Jiang, “Development of a Megahertz High-Voltage Switching Pulse Modulator Using SiC-JFET for an Induction Synchrotron”, IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 39, 730-736 (2011) (査読あり)

- ⑨ R. Yamada, A. Kikuchi, E. Barzi, G. Chlachidze, A. Rusy, T. Takeuchi, M. Tartaglia, D. Turrioni, V. Velev, M. Wake, A. V. Zlobin, “Comparison Between Nb3Al and Nb3Sn Strands and

Cables for High Field Accelerator Magnets” IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 20, 1399-1403 (2010) (査読あり)

- ⑩ K. Ise, H. Tanaka, K. Takaki, M. Wake, K. Okamura, K. Takayama, and W. Jiang, ” Development of a Megahertz High-Voltage Switching Pulse Modulator Using SiC-JFET for an Induction Synchrotron” , IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 39, 730-736 (2010) (査読あり)
- ⑪ E. Kadokura, T. Kawakubo, H. Nakanishi, M. Wake, T. Adachi, T. Arai, Y. Arakida, M. Hasimoto, T. Iwashita, T. Kubo et. Al. A Compact Switching Power Supply utilizing SiC-JFET for the Digital Accelerator” , Conf.Proc. C1205201 3677-3679(2010) (査読あり)
- ⑫ R. Yamada, A. Kikuchi, E. Barzi, G. Chlachidze, A. Rusy, T. Takeuchi, M. Tartaglia, D. Turrioni, V. Velev, M. Wake, A. V. Zlobin, “Comparison Between Nb3Al and Nb3Sn Strands and Cables for High Field Accelerator Magnets” , IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 20, 1399-1403, (2010) (査読あり)

[学会発表] (計2件)

- ① 和気正芳、山田隆治  
鉄を使わない大型検出器磁石  
超伝導低温工学会、岡山大学、2009年9月18日
- ② 和気正芳、山田隆治  
EXCELによるフラックスジャンプモデル  
超伝導低温工学会、岡山大学、2009年9月19日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和気 正芳 (WAKE MASAYOSHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・功  
労職員  
研究者番号：90100916