

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24年 5月18日現在

機関番号：13101
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22760205
 研究課題名（和文） 超伝導エネルギー貯蔵装置の運転条件に基づいた高温超伝導コイルの設計指針の開発
 研究課題名（英文） Development of SMES design based on electromagnetic conditions

研究代表者
 小川 純（OGAWA JUN）
 新潟大学・自然科学系・准教授
 研究者番号：60377182

研究成果の概要（和文）：
 直流通電電流が変動することによる高温超伝導線材に生じる損失の評価方法と解析方法の開発を行い、これを用い高温超伝導コイルの直流通電電流が変動したときに生じる損失を導出し、コイル形状が損失に及ぼす影響の定量的評価を行った。

研究成果の概要（英文）：
 We developed a loss measurement method from a high temperature conductor(HTS) tape under AC and DC electromagnetic conditions, and used it to study the influence of the HTS coil shape on the loss characteristics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導エネルギー貯蔵装置、損失、運転条件

1. 研究開始当初の背景

SMESは超伝導の電気抵抗がゼロであることを利用し、超伝導コイルに永久電流モードで通電を行い電流の形でエネルギー貯蔵を行う技術である。SMESは定常状態では抵抗がないため消費電力がゼロであるが、エネルギーの入出力時には電流の変動に伴い損失が生じる。このエネルギーの入出力の過程で生じる損失特性の把握はSMESを設計するうえで必須であるため、コイル形状が損失特性に及ぼす影響の調査を行う必要があった。

2. 研究の目的

直流条件に交流が重畳した電磁条件にお

いて超伝導線材に生じる損失特性を定量的に把握し、これを数値解析に反映しコイル形状が変化することによるコイル内の電磁環境が受ける影響について調査を行う。

3. 研究の方法

研究内容及び研究方法は以下に示す内容を行った。

① 直流交流混合電磁条件における超伝導線材の損失評価方法の開発

図1に示すような直流条件に交流条件が重畳している条件において超伝導線材に生じる損失評価手法の開発を行った。この手法として、高精度で簡易に測定が可能ではある

が複雑な電磁環境では測定ができない電氣的測定法と、損失により生じる温度上昇から損失を確実に評価することが可能である熱的測定法がある。この2種類の測定法で同区間、同時に測定することにより実験方法の妥当性を検証を行った。

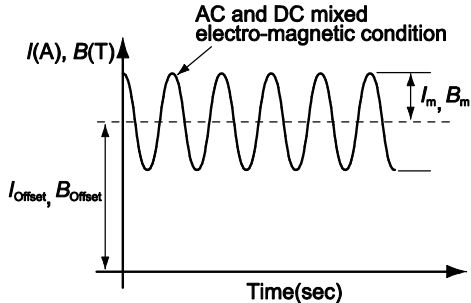


図1 直流・交流混合電磁条件における磁界と通電電流の波形

② 直流交流混合電磁条件における高温超伝導線材の損失を導出するためのプログラムの作成

①の実験結果と同条件において生じる損失を数値実験で導出するためのプログラムを作成し、超伝導コイルを構成する各超伝導線材の電磁条件から、コイル各所における損失の導出を可能とした。

③ 直流通電電流に交流電流が重畳している条件における高温超伝導コイルの損失評価

実験により高温超伝導コイルに直流通電を行った状態で、交流電流が重畳させたときの損失評価を行った。測定方法は①の実験で測定方法の検証を行った電氣的測定を用いて評価を行った。高温超伝導コイルは損失による電圧に対し誘導電圧が非常に大きいため、大型の超伝導コイルではなくダブルパンケーキコイルを用い特性評価を行った。図2に示すようにダブルパンケーキコイルの中心に誘導電圧を打ち消すためのキャンセルコイルを配置し、測定電圧との作動電圧から損失評価を行った。

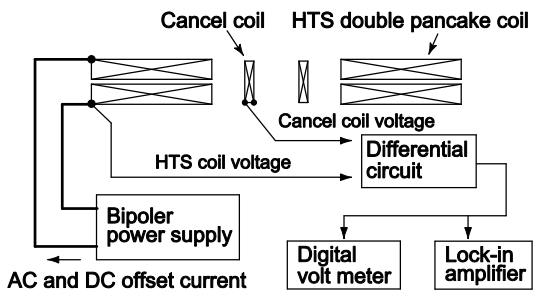


図2 高温超伝導ダブルパンケーキコイル

の測定回路図

④ ダブルパンケーキ積層型超伝導コイルの形状が損失特性に及ぼす影響についての検討

ダブルパンケーキ積層型高温超伝導コイルに直流通電を行いこれに交流電流が重畳した電磁条件における数値実験の解析コードの作成を行った。コイル内の電磁条件は図3に示すように線材面に対し様々な方向から磁界が印加される。コイルを構成する高温超伝導線材の損失特性は、直流・交流磁界の大きさと方向により影響を受けるため、それぞれの電磁条件における損失を数値計算により導出する必要がある。この方法として直流条件における臨界電流値とn値特性を実験で測定し、この測定値をデータベース化し、②で作成した損失導出用プログラムを用いてコイル各所における損失の導出を行った。この手法により形状が損失に及ぼす影響について検討を行った。

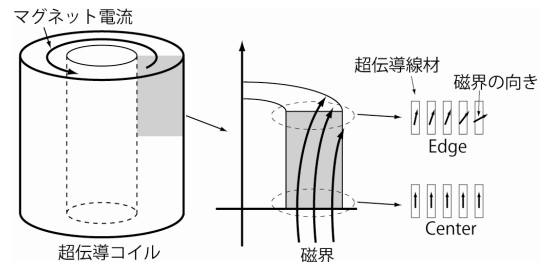


図3 高温超伝導コイル内の磁界分布

4. 研究成果

① 直流交流混合電磁条件における超伝導線材の損失評価方法の開発

図4に臨界電流値が57.6AのBi2223/Ag線材に直流電流10A通電した状態で、交流電流を30A、50A通電しこれに外部磁界を同時掃引した時の損失を示す。破線が四端子法と磁化法を組み合わせた電氣的測定法、プロットが熱電対を用いて測定した熱的測定法の測定結果を示している。この結果より電気手測定法と熱的測定法の測定結果はよく一致しており、電氣的測定法でも簡単に測定することが可能であることが示された。よって、以後の直流交流混合電磁条件における損失評価法は電氣的測定法で評価を行った。

図5に一般的な直流交流混合電磁条件における高温超伝導線材の損失特性を示す。交流磁界を印加している条件で通電電流の波高値20Aと固定し、直流通電電流を変化させた時の損失特性を示す。図より、直流通電電流が20A以下の時には交流・直流通電電流の影響を受けず、ほぼ磁化損失により損失が決

定される。これに対し、20A 以上では損失特性は磁化損失の特性から大きく乖離する。これは、直流・交流通電電流により超伝導内部の電流が飽和している状態で交流磁界を印加したためであると予想される。

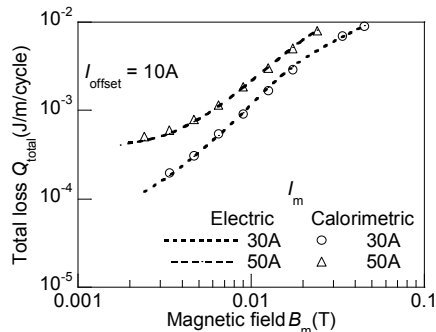


図4 同区間同時に損失を測定した電氣的測定法と熱的測定法の比較

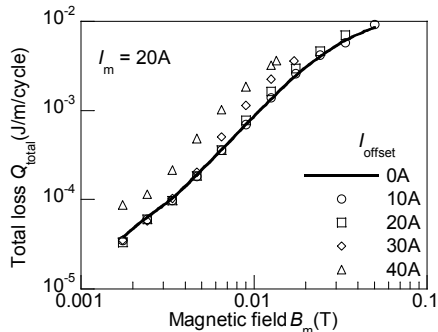
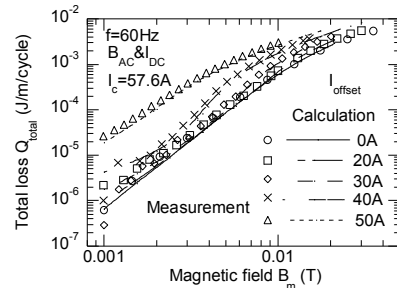


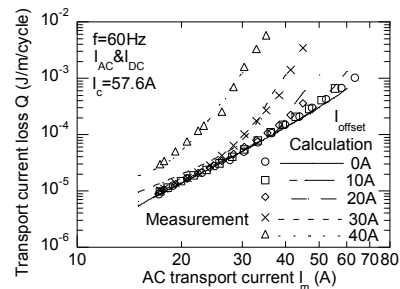
図5 直流交流混合電磁条件における高温超伝導線材の損失特性

② 直流交流混合電磁条件における高温超伝導線材の損失を導出するためのプログラムの作成

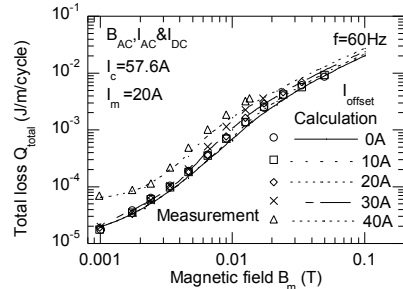
図6に①の実験で得られた実験結果と同条件で数値解析により導出された損失を比較した結果を示す。数値実験方法は超伝導線材内部を模擬的に分割し、各セクションが回路中を作る鎖交磁束から自己・相互インダクタンスを求め、超伝導に生じる抵抗とインダクタンスの関係から超伝導内部の電流分布を求める方法を用いた。図よりどの条件でも実験値と解析値はよく一致しており、解析手法が妥当であることが示されている。よって、数値解析を用いることにより、超伝導コイル内の電磁条件から損失を導出することが可能であることが示された。



(a)交流磁界・直流通電



(b)直流通電・交流通電

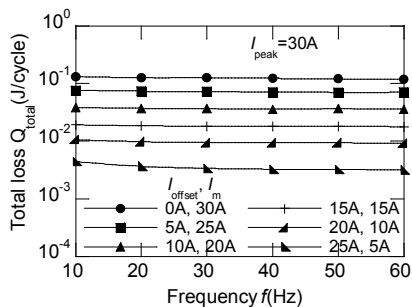


(c)交流磁界・直流通電・交流通電

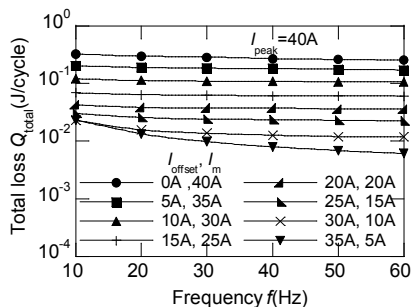
図6 直流交流混合電磁条件における損失の実験値と数値解析値の比較

③ 直流通電電流に交流通電電流が重畳している条件における高温超伝導コイルの損失評価

図7に臨界電流値が37.2Aの高温超伝導ダブルパンケーキコイルに直流通電を行いこれに交流通電が重畳している条件における1サイクルあたりの交流通電損失特性を示す。損失特性は臨界電流値以下では損失はヒステリシスの生じており周波数が増加しても損失は増加しない。しかし、臨界電流値を超えてかつ直流成分が多い場合には抵抗成分が生じるため低周波数においての1サイクルあたりの損失が増加することを確認した。SME Sの運転条件では、臨界電流値以下の運転かつ変動スピードは非常に小さいため、ヒステリシスの損失が生じることが予想されるが、もし運転負荷が大きい場合には抵抗成分の影響も考慮しなければならないことが実験的に示された。



(a)電流の波高値30A



(b)電流の波高値40A

図7 高温超伝導ダブルパンケーキコイルに直流通電電流に交流電流が重畳している通電条件における損失の周波数特性

④ ダブルパンケーキ積層型超伝導コイルの形状が損失特性に及ぼす影響についての検討

図8に実験により得られた液体窒素温度における Bi2223/Ag 線材の直流印加磁界の大きさと印加角度による臨界電流値特性を示す。直流外部磁界が増加するのに伴い臨界電流値は減少し、磁界が線材面に対し平行に印加されている時の方が臨界電流値の影響は少ない。このデータを基にダブルパンケーキ積層型超伝導コイルを構成する超伝導線材の臨界電流値特性を導出した。

図9にダブルパンケーキコイルを8層積層したときのコイル内の臨界電流値を示す。コイルの電磁条件は軸対称、上下対称であるため、1/4部分を図中に示している。図より超伝導コイルの端部面で臨界電流値が低下し、中央部分では臨界電流値が大きいことがわかる。これは、コイル端部では線材面に垂直に磁界が印加されるためであり、線材面に平行に磁界が印加される中央部分では臨界電流値が大きいことがわかる。

図10に直流電流が10A、交流電流が5Aの通電条件における高温超伝導コイル内の損失分布を示す。図より損失が最も大きい個所が上端外側部分であることが示されている。この図は図9の臨界電流値分布とは異なる

っていることがわかる。この理由として臨界電流値が低い場合には、交流磁界による損失が小さいため臨界電流値が比較的高く、垂直磁界が印加される個所の損失が増加する傾向にあることが示されている。ただし、これは直流電流条件により異なるため電磁条件により数値計算する必要がある。

図11に直流通電電流を10A、30Aとしたときのダブルパンケーキコイル間距離の変化による損失への影響を示す。この結果、運転条件が異なる場合には形状による影響が大きく変わることが実験により示された。よって、コイル設計にあたっては直流通電時の変動磁界の数値計算を導入することにより、運転条件における損失を導出することが重要であることを示すものである。

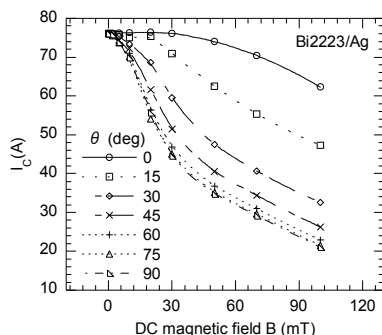


図8 Bi2223/Ag 線材の直流印加磁界の大きさと印加角度による臨界電流値特性

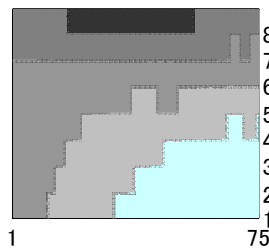


図9 高温超伝導コイル内の臨界電流値分布

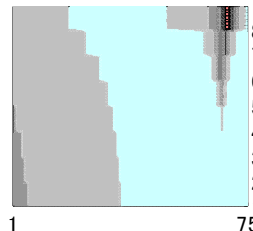
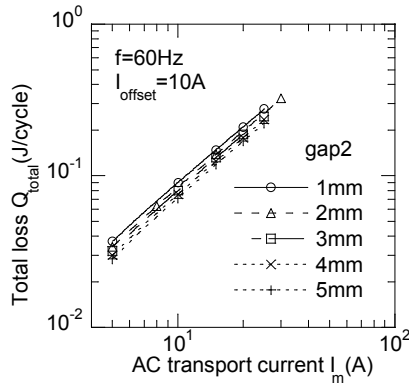
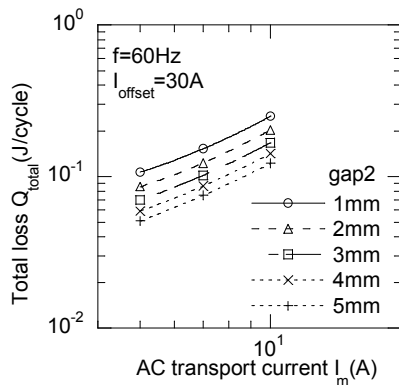


図10 直流電流が10A、交流電流が5Aの通電条件における高温超伝導コイル内の損失分布



(a) 直流電流 10A



(b) 直流電流 30A

図 1 1 ダブルパンケーキコイル間距離の変化による損失への影響

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 1 件)

- ① J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sato, H. Kojima, M. Shibayama, M. Egawa “Influence of DC offset transport current on AC loss characteristic in HTS tapes”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, pp. 3325-3328, 2011

[学会発表] (計 4 件)

- ① J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sato, M. Shibayama, M. Egawa, A. Sato, “Experimental Investigation of Loss Characteristics with AC and DC Offset Transport Current in HTS Double Pancake Coil”, Magnet technology, 2011年9月13日, マルセイユ
- ② 小島 裕史, 柴山 誠, 江川 暢康, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 「交流電流・交流磁界の電磁条件における直流通電バイアスが高温超伝導の損失

特性に及ぼす影響」、秋季低温工学、2010年12月2日、鹿児島

- ③ 佐藤 あゆみ, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 「高温超伝導線材の直流・交流混合電磁条件における数値実験による損失特性評価」、電気学会東京支部新潟支所大会、2010年11月27日、長岡

- ④ J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sato, H. Kojima, M. Shibayama, M. Egawa “Influence of DC offset transport current on AC loss characteristic in HTS tapes”, Applied Superconductivity, 2010年8月5日, ワシントン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 純 (OGAWA JUN)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60377182