

大型超電導コイル用超電導導体の電流分布一様化に関する研究

研究代表者 工学部 浜島 高太郎

研究の目的

大都市圏での電力需要は増加と集中の傾向にあり、一方では、景観や環境調和の要求も高くなり、地中電力輸送ケーブルのニーズは今後高まっていくと予想される。しかし、大都市の人口稠密化とともに電力ケーブルの設置確保は一層困難となってきた。そのため、電力ケーブルの送電容量を大きくすることが要請されている。

電力ケーブルの超電導化は通電電流密度の大幅な増加と、損失の低減を同時に実現できるため、従来技術のブレイクスルーになると期待されている。従来の銅ケーブルと比較して超電導電力ケーブルの特長は、低損失であるため、狭いスペースで大電力送電が可能となり、銅ケーブルの容量限界以上の送電が可能であり、低電圧でも大電力輸送可能な点である。実際に多くの試作と設計がなされた結果、寸法で約1/3、送電損失も約1/3になると試算されている。そのため、実用化に向けた開発が世界各国で精力的に行われている。

超電導ケーブルは、多数の高温超電導テープを中心にあるフォーマに巻き付けて構成するものが多く、多層の構成となる。このような多層電力ケーブルでは、各層のピッチ長が等しい場合、多層超電導導体内の各層の電流分布は、通常の素線内のフィラメントに流れる電流分布と同様に、外周の層に集中した不均一な電流分布になることが理論的にも実験的にも確かめられている。したがって、この偏流減少のため、超電導ケーブルの容量が低減し、さらに、大きな交流損失が発生する原因となっている。

多層ケーブルの電流分布を調べる方法の一つに、各層のケーブルを集中定数とした回路計算で電流分布を求める方法がある。しかし、この方法による解析では、一様電流分布を支配する方程式の中において、超電導テープの撚りピッチ、撚り方向、層の半径3つのパラメータで表される導体構成パラメータの関係が陽表示にできないために、複雑な形になっている。撚り方向として、S撚り（左手方向）とZ撚り（右手方向）がある。これらの3つの構成パラメータは導体の製作時に制御可能な量である。

一方、解析的には、各層のケーブルを集中定数とした回路計算で電流分布を求める方法がある。しかし、この方法による表示は、一様電流分布と導体構成パラメータとの関係が陽表示でないために、複雑な形になっている。

本研究では、一様電流分布を得るための基礎方程式を新規に提案し、その実証と、さらに、実用化へ向けた交流損失の測定技術の確立を図ることを目的とした。

まず、同軸多層撚り線の隣り合う層の間で成り立つ磁束保存則を用いることにより、導体内の電流分布を新しく理論的に解析できることを提案する。電流分布と導体構成パラメータの関係を明瞭に示し、2層以上の多層構成導体では、可変撚りピッチ長にすることにより一様電流分布の解があることを示す。

さらに、提案した理論の妥当性を実証するために、約1m長さの3層の同軸高温超電導ケーブルを設計、製作し、そのケーブルの設計・製作の詳細、および100Hzの交流電流をケーブルに供給して各層の電流分布を測定することを目的とした。

また、超電導導体は交流磁界の下で交流損失が発生する。この損失は小さいが、低温での冷凍機的能力を考慮すると、超電導導体の実用化を検討する上で重要な課題である。微小損失測定のために、同軸シャント、ロックインアンプなどの高精度測定装置を用いた測定回路を構成して、超電導導体の主要な交流損失となる自己磁界損失の測定技術を確認することを目的とする。

これにより、偏流現象の発生しない同軸多層導体の実用化のための設計技術を確認することを目的とする。

研究成果

1 高温超電導体内電流分布の基礎方程式

同軸多層撚り線導体の隣り合う層の超電導素線を選び、それらの超電導素線が臨界電流 I_c に達していない場合には、図1に示すように、素線内の飽和していない任意のフィラメントで超電導素線を代表させる。対応する2本の素線内フィラメン

トの電気的中性線で囲まれたループ (a-b-c-d-a) に鎖交する磁束は、次の関係式を満足する。

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

左辺の積分はループ内のフィラメントの電気的中性線上でゼロとなるため、右辺のループ内の磁束は保存されることになる。図1には隣り合う層の撚りピッチ長が同じ場合を示してあるが、ピッチ長が異なる場合には式 (1) の左辺を満足するように、各層の撚りピッチ長の最小公倍数の長さを考えることにする。

まず、外部磁界を考慮しない自己磁界のみの場合を次式に示す。

$$\frac{(r_{k+1} - r_k)}{\pi(r_{k+1} - r_k)} \sum_{i=1}^k I_i + \left(\frac{\epsilon_k}{L_k} - \frac{\epsilon_{k+1}}{L_{k+1}} \right) \sum_{i=1}^k \pi r_i^2 \left(\frac{\epsilon_i I_i}{L_i} \right) + \left(\frac{\epsilon_k}{L_k} \pi r_k^2 - \frac{\epsilon_{k+1}}{L_{k+1}} \pi r_{k+1}^2 \right) \sum_{j=k+1}^n \left(\frac{\epsilon_j I_j}{L_j} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、i、kは内側から数えた層数で、 L_i は第i層のツイストピッチ長、 r_i はケーブルの中心から第i層の銀シース線の中心までの半径、nは全層数を、 I_i は第i層を流れる電流、 ϵ_i は第i層の撚り方向を示す係数でS撚りの場合は+1、Z撚りの場合は-1である。この特性式(2)は超電導ケーブルの電流分布解析に適用でき、各層の撚りピッチ長、撚り方向、半径とからなる3つの導体構成パラメータと各層の電流分布との関係が陽に表れており、それらの間の関係を見通すのに都合が良い形となっている。

また、ケーブルの全輸送電流 I_t は次式で与えられる。

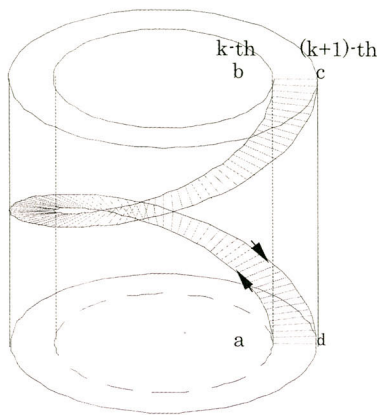


図1 k-(k+1)層の電気中性線によって囲まれた領域

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3)$$

各層のピッチ長は、各層の電流が一樣であるとし、数値解析により求める。第1層目、2層目、3層目の半径が11.21 mm、16.21 mm、21.21 mmである同軸3層撚り導体（同方向撚り）における一樣な電流分布を実現する各層のピッチの関係を図2に示す。これより、一樣電流分布を得るには、外層ほどピッチを短くする必要がある。1層目のピッチ長の変化に対して2層目、3層目のピッチ長は、最大値185 mm、114 mmで飽和する傾向があることが分かる。

ここで得られたピッチが高温超電導線で超電導ケーブルを実現できるかどうかは、曲げ歪みを考慮する必要がある。Bi2223の銀シースを用いた製作可能範囲は、臨界曲げ歪が0.2%以下であるから、この値より十分に小さくなる各層のピッチの組合せを選択する。すなわち、第3層目が曲げ歪に対して最も厳しく、臨界曲げ歪に対応するピッチは約80 mmである。また、製作時のピッチの誤差を考慮して、比較的誤差に対して敏感でないピッチを選んだ。

長さ1mのケーブルを製作するにあたり、1層目、2層目、3層目のピッチ長を333.3mm、166.7mm、111.1mmとした。これは、ケーブル全長が各層の撚りピッチの最小公倍数となるよう考慮して選んだ。このときの各層の曲げ歪みはそれぞれ、0.06%、0.11%、0.12%であり、十分に臨界曲げ歪以下である。また、各層における電流分布は式(1)、(2)の計算結果から32.92%、33.84%、33.24%となる。

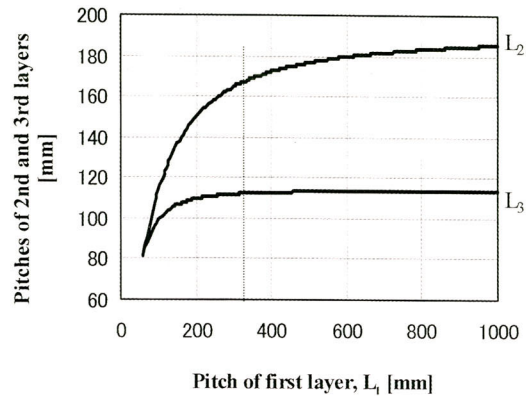


図2 一樣電流分布を達成する第1層の撚りピッチに対する第2、3層の撚りピッチの関係

表1 高温超電導ケーブルの主要諸元

| Ag-sheathed Bi-2223 tape | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Width | 3.20mm | | |
| Thickness | 0.21mm | | |
| Critical current | 15A | | |
| Multilayer Conductor | | | |
| | Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 |
| Total length [mm] | 956.0 | 978.0 | 1000.0 |
| Radius [mm] | 11.21 | 16.21 | 21.21 |
| (including Kapton sheet and adhesive tape) | | | |
| Twist pitch [mm] | 333.33 | 166.67 | 111.11 |
| Number of tapes | 20 | 26 | 25 |
| Bending strain [%] | 0.06 | 0.11 | 0.12 |

層間のギャップ長は約4mmで、各層の電流を測定するために、ログスキーコイルなどの計測器を適切に設置した。本研究で製作した導体の設計値を表1に示す。

2 超電導ケーブルの製作

超電導テープをFRP (Fibler Reinforced Plastic、厚さ1mm) の巻き枠に螺旋状に巻き付けて多層ケーブルを構成した。1層目は巻き枠にそのまま巻き付けたが、製作しやすいように2層目、3層目については、FRPを縦に切断し2つに分け、内側の層を取り囲む様に再び元の形状に固定し、巻き付けた。この工程において、巻き枠の半径の変化を防ぐために、小型の固定材を巻き枠の中に挿入し、作業を行い、3層ともピッチの撚り方向は同じ方向とした。これを各層ごとに端部の銅ブロックに半田で固定した。

また、実際の長い電力ケーブルではインダクタンスが大きくなるため、端部の接触抵抗は問題とならないが、短い長さの実験装置では、インダクタンスが小さいため、重要な課題となる。端部接触抵抗が非常に小さな値となる階層状の銅ブロックを使用して、各層のリアクタンス成分に比べ、十分に無視できる値まで減らした。

また、各層に電流測定のために、良い線形性を示すログスキーコイルを設置した。そして、完成した同軸3層撚りケーブルの写真を図3に示す。

3 測定及び測定結果

交流電流を通電したときの測定回路の概略図を

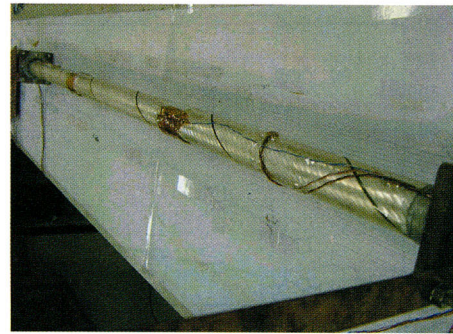


図3 完成した3層同軸超電導導体

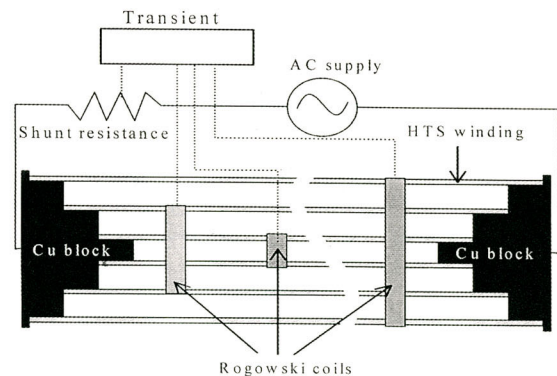


図4 試験回路の概念図

図4に示す。測定は、液体窒素で導体を冷却して行った。通電電流は、シャント抵抗を用いて測定した。超電導体とリターン電流のリード線は磁氣的干渉を防ぐ為、十分距離をとった。0A~100A (周波数100Hz) の交流電流 I_t を通電し、シャント抵抗とログスキーコイルの出力をデジタルスコープにより測定した。

4 一様電流分布測定結果及び検討

2層導体における全通電電流に対する各層の電流分布測定結果を図5(a)に示す。理論上、2層の場合の各層の電流分布は3:7となり、測定結果は理論通りの電流比となることが実証された。

図5(b)には3層導体における全通電電流に対する各層の電流分布測定結果を示す。測定結果より、各層の電流分布の割合は30.25%、36.82%、32.94%となり、理論値と測定値を同図に示す。2層構成導体の場合と同様に、ほぼ理論値通りの結果が得られた。したがって、パラメータを制御することにより、測定結果がほぼ理論値通りの電流分布となることが分かった。

しかし、詳細を見ると、各層の電流の理論値と測定値の間には $\pm 3\%$ 程度の僅差があった。この原因としていくつかのことが考えられる。まず、

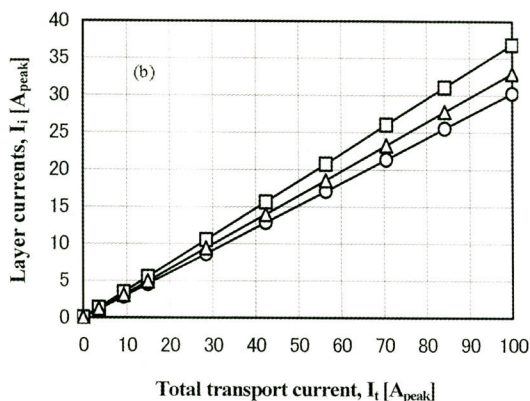
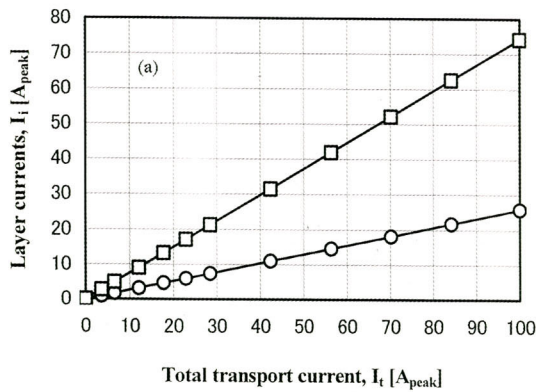


図5 電流分布の測定結果
(a) は2層、(b) は3層

完成後の寸法測定結果では、導体のピッチ長と半径が、それぞれ、計算に用いた値より長さが±1.0 mm、半径が±0.1mm程度の誤差を含んでいるためと考えられる。また、端部構成の段差のため、各層の長さに違いが生じ、理論計算に影響を及ぼしたものと考えられる。一方、電流分布と各パラメータに関する理論計算の結果から、層の半径の変化がピッチ長の変化や層の長さの変化と比べて、電流分布に対して最も大きな影響を与える。したがって、半円筒状の2層目と3層目の巻き枠の半径が変化し、測定結果と理論値との間に、ある程度の僅差が生じたと考えられる。

5 交流損失の測定

超電導線は本来抵抗が無いが、交流電流を通電すると交流損失が発生し、熱負荷の原因となる。交流損失は超電導電力ケーブルだけでなく、超電導コイルや超電導トランスなどの電力用機器に対しても課題である。したがって、超電導応用に使われている高温酸化超電導線材に生じる交流

損失を正確に評価することが重要である。超電導ケーブルには多数の超電導線を使うので、他の超電導線が出す外部磁場が交流損失に影響を及ぼしていることが考えられるため、ここでは、その基礎的な測定方法を確立することを目指して、高温超電導テープ線材1本の交流損失を求めた。

交流損失の測定回路を図6に示した。FRP製板上の両端に銅板を取り付け、超電導テープ線材の端部をはんだで銅板に接続した。また、超電導テープ線材の両端に電圧タップを矩形ループで構成した。なお、超電導テープの冷却には液体窒素を用いた。

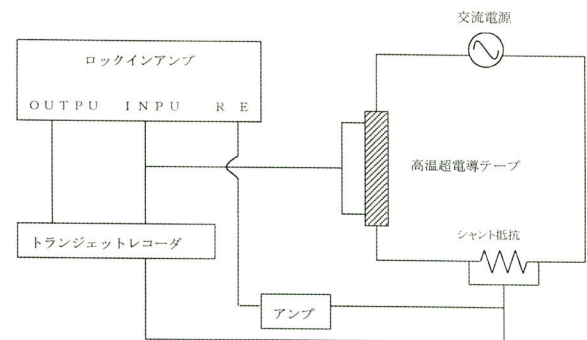


図6 自己磁界交流損失の測定回路

電源より交流電流を流して超電導線の両端に加えて、交流損失をロックインアンプで測定した。交流電流は電源設備の許す範囲で行い、周波数は10、60、100Hz、電流値は0~100Aで試験した。

図7(a)には、臨界電流56AのBi-2223銀シース超電導線の交流損失測定結果を示す。図より、各周波数において約30Aから臨界電流の間の交流損失は理論値と一致し、この間の交流損失は測定可能であることが分かった。しかし、低電流域では理論値と多少のずれを観測した。これは、測定の値が極めて低いため、信号と雑音の比が小さくなったことによると思われる、今後、雑音の減少を検討する必要がある。

また、Bi-2223銀シース線は機械的に弱いので、ステンステープを貼り付けて機械的強度を高め、取り扱いの際の劣化を少なくする線材が開発された。その臨界電流は66Aで機械的にも強い超電導テープである。もう一つの臨界電流の異なるテープ線の交流損失を測定した結果を図7(b)に示す。理論値と比較的良好一致が得られ、交流損失の基礎的な測定方法は確立できた。

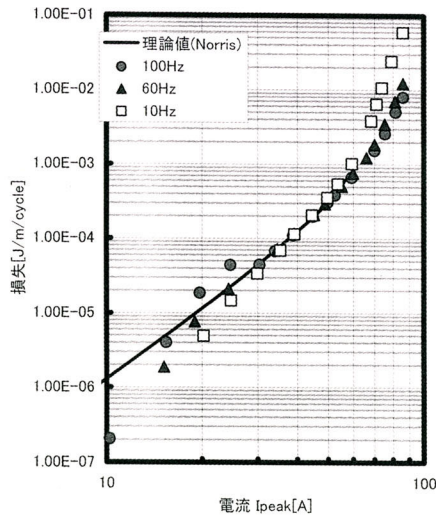


図 7 (a) Bi-2223銀シース超電導線の交流損失結果

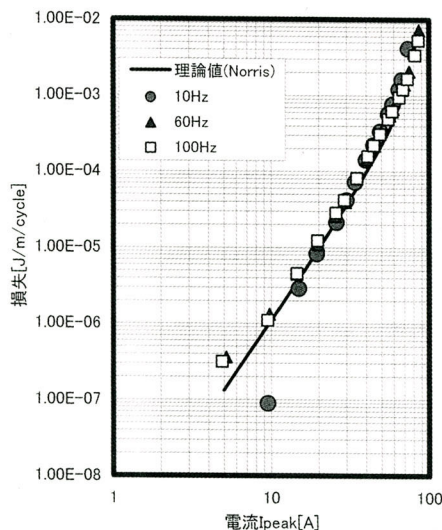


図 7 (b) ステンレス補強付きBi-2223銀シース超電導線の交流損失結果

6 まとめ

以上に述べたことをまとめると、以下のようになる。

まず、多層超電導導体の電流分布を支配する基礎方程式を3つの導体構成パラメータの陽関数で表示し、電流制御が可能であることを示した。次に、この基礎特性式を用いて、一様電流分布を実現するための各層の撚りピッチ長を解析した。その結果、2層以上の多層構成導体では可変撚りピッチ長にすると解がある。また、撚りピッチ長を可変にした場合、同方向撚りが交互撚りよりも比較的適切な撚りピッチ長が得られ、導体構成が容易である。

実験では、この基礎方程式を用いて導体構成パラメータを設計した。Bi-2223の銀シース線を同じ方向に撚り、撚りピッチを可変とすることにより、最大曲げ歪み率 (0.2%) 以下で一様電流分布を実現できることが分かった。すなわち、電流分布の制御が実現可能であることが分かった。そして、理論を実証するために、同軸3層撚り導体を製作しE、測定を行った。

実際の長い電力ケーブルではインダクタンスが大きくなるため、端部の接触抵抗は問題とならないが、短い長さの実験装置では、インダクタンスが小さいため、端部接触抵抗が非常に小さな値となる階層状の銅ブロックを使用して、各層のリアクタンス成分に比べ、十分に無視できる値まで減らすことができ、理論どおりの実験ができた。これにより、2層導体では、理論計算通りの不均一な電流分布測定結果が得られた。電流分布は不均一となるが、3層目を製作し、3層導体として測定を行うと、1層目、2層目、3層目における電流分布の割合はそれぞれ30.25%、36.82%、32.94%となった。これは、理論値と非常に近い結果であり、同軸多層撚り導体において、各層のピッチ長を調節する事により、各層の電流分布を均一化できる事を示唆している。

これらのことから、同軸多層撚り導体の電流分布解析の妥当性は実験で検証できた。すなわち、導体構成パラメータ (ピッチ、半径、巻き方向) を制御することにより、導体内の電流分布を制御できることを実証した。

さらに、超電導ケーブル交流損失の測定技術を確立するために、1本のBi-2223銀シーステープについて測定した結果、理論値と良く一致し、微小な交流損失の測定に関する基礎的な技術の確立ができた。

今後は、多数本の超電導テープ線の交流損失を正確に測定するための技術の確立を図る予定である。

産業技術への貢献

超電導ケーブルの一様電流分布を得るための理論を新しく提案し、その実証試験を実施して、理論の妥当性を確立した。これにより、超電導ケーブルの基本設計が可能となった。したがって、磁界を導体に印加したときの特性を調べることにより、超電導ケーブルに関する基本的な特性を得ることができるようになる。さらに、交流損失の基

礎的な測定技術を確立できた。実導体の測定技術
を確立して、冷却システム技術と組み合わせた実
用化ケーブルの設計を可能にする予定である。

事業化に関しては、本年度の成果をもとに、更
なる応用を検討し、電線、電機メーカ、電力会社、
国立研究所などへの働きかけを行い、共同研究、
あるいは委託研究をしつつ、技術移管をする。ま
た、本開発研究成果の電流偏流のない超電導導体
を実際の超電導マグネット装置の導体候補とし
て、あるいは、装置も含めた提案を国家プロジェ
クトなどへの提案が期待できる。

研究発表

- 1) 浜島高太郎, A. K. M. Alamgir, 原田直幸, 津田理, 小野通隆, 高野
広久: 超電導体内の電流分布解析; 低温工学会誌, Vol.35,
No.4, pp.176-183 (2000).
- 2) 浜島高太郎, A.K.M. Alamgir, 原田直幸, 津田理, 小野通隆, 高野広
久: 同軸撚り線型超電導導体の電流分布解析, 平成12年電気学会
全国大会, 5-185, p2185 (2000).
- 3) AK,M. Alamgir, Y. Itoh, N. Harada, T. Hamajima, Analysis of
current distributions in a coaxial superconductor with return path,
平成12年電気学会全国大会, 5-186, p2186 (2000).
- 4) A. K. M. Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 津田理, 浜島高太郎, 小野通
隆, 高野広久: 同軸多層撚り超電導導体の均一電流分布に関する
実験; 低温工学会誌, Vol.36, No.1, pp.10-15 (2001).
- 5) 津田理, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 浜島高太郎, 高野広久,
小野通隆: 撚り乱れを考慮した同軸多層撚り導体の均流化に関す
る考察; 電気学会研究会資料, ASC-00-47, RM-00-43, pp.49-54
(2000.6)
- 6) 伊藤康隆, A.K.M.Alamgir, 津田理, 原田直幸, 浜島高太郎: 同軸多
層撚り導体における電流一様化実験; p521, 平成12年度電気・
情報関連学会中国支部連合大会 (平成12年10月21日, 岡山大学).
- 7) 浜島高太郎, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 津田理, 原田直幸, 小野通隆,
高野広久: 高温超電導ケーブルの電流一様化解析; 第63回秋季低
温工学・超電導学会講演概要集, p247 (2000).
- 8) 津田理, A.K.M.Alamgir, 伊藤康隆, 原田直幸, 浜島高太郎, 小野通隆,
高野広久: 高温超電導ケーブルの電流一様化実験; 第63回秋季低
温工学・超電導学会講演概要集, p248 (2000).
- 9) A.K.M.Alamgir, Y.Itoh, M.Tsuda, N.Harada, T.Hamajima, M.Ono
and H.Takano: Homogeneous current distribution experiment of a
multilayer coaxial Superconductor; The international Workshop on
Critical Currents and Applications of HTS, pp.56-57, Oct. 17-19, 2000
(Fukuoka, Japan).
- 10) M. Tsuda, A.K.M. Alamgir, Y. Ito, N. Harada, T. Hamajima, M.
Ono, H. Takano, "Homogeneous current distribution in a coaxial super
conductor with and without return current path," IEEE Transactions on
Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, 2481-2484 (2001).
- 11) AK.M. Alamgir, Y. Itoh, H. Harano, S. Kajita, M. Tsuda, N. Harada,
T. Hamajima, H. Takano, M. Ono, "Homogeneous current distribution
in a HTS cable,"平成13年電気学会全国大会, 5-203, p2025 (2001).
- 12) AK.M. Alamgir, Y. Itoh, T. Harano, M. Tsuda, N. Harada, T.
Hamajima, H. Takano, M. Ono, "Study on homogeneous current distri
bution in HTS coaxial cable," 第64回春季低温工学・超電導学会講演
概要集, p161 (2001).
- 13) 原野稔也, 伊藤康隆, A.K.M.Alamgir, 津田理, 原田直幸, 浜島高太
郎: 高温超電導ケーブルの電流分布に関するパラメータサ
ーベイ, 平成13年度電気・情報関連学会中国支部52回連合大会講
演論文集, 140806, p353
- 14) 伊藤康隆, 原野稔也, A.K.M. Alamgir, 原田直幸, 津田理, 浜島高太
郎: 高温超電導ケーブルにおける非線形性を考慮した電流分布
の検討, 第65回春季低温工学・超電導学会講演概要集, p256 (2001).

- 15) 藤本二郎, 川上宏司, 原野稔也, 伊藤康隆, 津田理, A.K.M.Alamgir,
原田直幸, 浜島高太郎: 超伝導ケーブルの電流分布一様化に関す
る研究, 第3回IEEE広島支部学生シンポジウム論文集, pp.12-13
(2001年12月14-15日).

グループメンバー

| 氏名 | 所属 | 職 (学年) |
|----------------|--------|--------|
| 浜島 高太郎 | 工・電気電子 | 教授 |
| 原田 直幸 | 〃 | 講師 |
| 津田 理 | 〃 | 助手 |
| アラムギル | 〃 | D3 |
| 伊藤 康隆 | 〃 | M2 |
| 原野 稔也 | 〃 | M1 |
| 藤本 二郎 | 〃 | B4 |
| Kim Young Seok | 〃 | 外国人研究者 |

連絡先

電話 0836-85-9475 (ダイヤルイン)
FAX 0836-85-9401 (学科事務室)
E-mail: hamajima@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp