

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

◆ 記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字		OKUBO HITOSHI					
①研究代表者氏名		大久保 仁		②所属研究機関・部局・職		名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授	
③研究課題名	和文	超伝導限流変圧器の電力システム導入効果に関する実証的研究					
	英文	Feasibility Study on Introduction Effects of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) into Electric Power System					
④研究経費		平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総 合 計
18年度以降は内約額 金額単位：千円		45,700	6,300	19,000	6,300	6,500	83,800
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在							
氏 名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）	
大久保 仁		名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授		電力工学		研究の総括とHTc-SFCLT (Phase-4)の設計	
遠藤 奎将		名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授		電力工学		HTc-SFCLT (Phase-3)の動作検証	
早川 直樹		名古屋大学・大学院工学研究科・助教授		電力工学		HTc-SFCLT (Phase-4)の最適化設計	
加藤 克巳		名古屋大学・大学院工学研究科・助手		電力工学		HTc-SFCLT (Phase-3)の電磁界解析	
小島 寛樹		名古屋大学・エコトピア科学研究所・助手		電力工学		HTc-SFCLT (Phase-4)の動作特性予測	
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
申請者らは、平成12～13年度科学研究費基盤研究(B)「超伝導限流器と超伝導変圧器との複合多機能化に関する研究」、続いて平成14～15年度科学研究費基盤研究(A)「高温超伝導バルク導体を用いた超伝導限流変圧器の開発に関する研究」の補助を受け、限流機能を有する超伝導変圧器として「超伝導限流変圧器（Superconducting Fault Current Limiting Transformer: SFCLT）」という新しい超伝導電力機器の開発プロジェクトを進めてきた。前者のプロジェクトでは、EMTP（汎用電磁過渡解析プログラム）を用いてSFCLTの設計・動作パラメータを最適化するとともに（PHASE-1）、NbTi線を用いた液体ヘリウム冷却のLTc-SFCLT（3相，6.25kVA，275V/105V）を設計・製作し、その基礎的機能を実証した（PHASE-2）。さらに、前者のプロジェクトにおいて提起されたSFCLTの技術開発課題の一つであるクエンチ・限流動作後の超伝導復帰問題に対して、後者のプロジェクトにおいてBi2212/CuNi複合バルク導体を用いた液体窒素冷却のHTc-SFCLT（LTc-SFCLTと同一仕様）を開発することによって克服した（PHASE-3）。 本プロジェクトは、上記2つの科学研究費プロジェクトの研究成果を踏まえて、さらに独創的・先駆的な研究を格段に発展させるものである。すなわち、SFCLT開発のPHASE-4およびPHASE-5として、実器レベルのHTc-SFCLTを開発し、電力システム導入効果に関する実証的研究を行う。そのために解決すべきキーテクノロジーとして、(a)PHASE-3において導入したBi2212/CuNi複合バルク導体の大容量化・低損失化・最適化、(b)極低温環境下におけるHTc-SFCLTの電気絶縁設計、(c)HTc-SFCLTのフィールド試験および電力システムとの構成・運用上の協調（システムコーディネーション）の構築を挙げている。							

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

本プロジェクトにおいては、高温超伝導体を用いた超伝導変圧器と超伝導限流器を複合多機能化した「高温超伝導限流変圧器（HTc-SFCLT）」を提案し、その電力システム導入効果を実証的に検証することを目的としている。初年度（平成 16 年度）においては、Bi2212/CuNi 複合バルクコイルを用いて設計・製作した HTc-SFCLT（PHASE-3：6.25kVA、275/105V）の動作特性として、主としてクエンチ・限流動作後の超伝導状態への自己復帰特性を体系化した。また、平成 17 年度においては、PHASE-3 の限流特性および超伝導復帰特性を数値解析によって検証した。さらに、次世代超伝導テープ導体を用いた HTc-SFCLT（PHASE-4：100kVA、6600/210V）を設計した。主な研究成果は以下の通りである。

(1) HTc-SFCLT の自己復帰特性の体系化

HTc-SFCLT のクエンチ・限流動作後における超伝導状態への自己復帰特性を体系化した。図 1 は HTc-SFCLT の自己復帰閾値であり、故障前の通電電流 I_{L1} と故障除去後の通電電流 I_{L2} との比を用いて $I_{L2}/I_{L1} > 0.99$ と定義した。同図の $I_{L1} = 58\text{A}$ ($\simeq I_c$) の場合、 I_{L1} の 14 倍の固有短絡電流 I_{PRO} に対しても自己復帰できることを示している。

また、HTc-SFCLT のクエンチ時における抵抗発生特性と熱伝導特性を考慮したシミュレーションプログラムにより、PHASE-3 の限流特性を再現するとともに温度上昇過程を評価し、超伝導復帰特性を理論的に検証した。

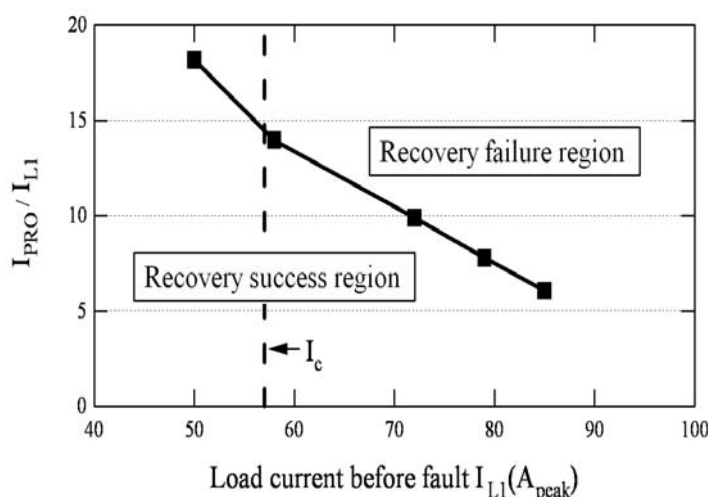


図 1 高温超伝導限流変圧器（HTc-SFCLT, PHASE-3）におけるクエンチ・限流動作後の自己復帰閾値

(2) Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの直並列時における動作特性

HTc-SFCLT の高電圧・大容量化の可能性と技術的課題を検討するため、図 2 に示す Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの直並列時における動作特性を明らかにした。Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの直列接続による高電圧化においては、各コイルの単独通電時の抵抗発生特性によって直列時の特性を推定・評価できることを示した。一方、Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの並列接続による大容量化においては、各コイルの臨界電流および分流の均一化の重要性を指摘した。また、発生抵抗の外部印加磁界依存性を取得した。

(3) 過冷却液体窒素中における Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの動作特性

限流期間中における第 1 半波の電流波高値 $I_{1stpeak}$ を I_{PRO} および I_c で規格化した限流率 ($I_{1stpeak}/I_{PRO}$) および過負荷率 ($I_{1stpeak}/I_c$) を限流特性の評価指標として定義し、 I_{PRO}/I_c に対する関数として、Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの限流特性を評価した。65K の過冷却状態における限流率および過負荷率は 77K の場合よりも小さく、限流機能が向上することを定量的に示した。

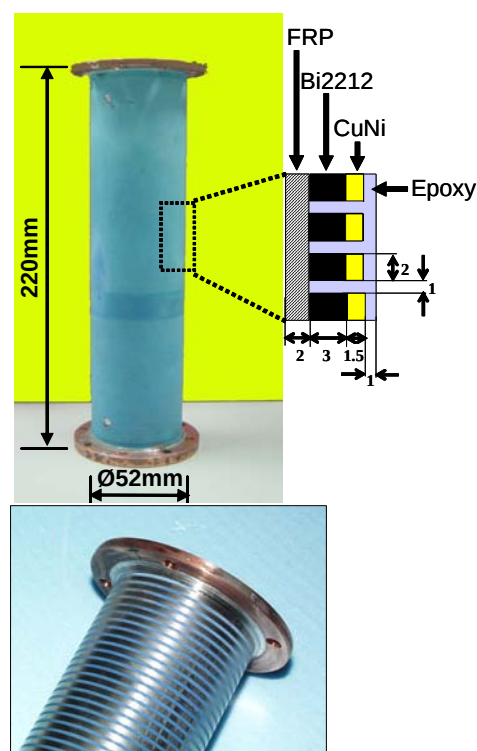


図 2 高温超伝導限流変圧器（HTc-SFCLT, PHASE-3）における Bi2212/CuNi 複合バルクコイル

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

(4) 次世代超伝導テープ導体を用いた

HTc-SFCLT (PHASE-4) の設計

最近の次世代超伝導テープ導体の急速な技術進歩を考慮して、HTc-SFCLT (PHASE-4) への次世代超伝導テープ導体の適用可能性を検討した。図3は2種類の超伝導テープおよびBi2212/CuNi複合バルクコイルのE-I特性を実測・比較したものである、同図より、サンプルAやBi2212/CuNi複合バルクコイルと比較して、サンプルBではより低い I_{1st}/I_c レベルから高い電界が発生しはじめていることがわかる。これらの結果より、PHASE-4の限流器巻線用テープとしてサンプルBを選定した。さらに、シミュレーションプログラムによって動作特性を予測し、最適化設計を行った。

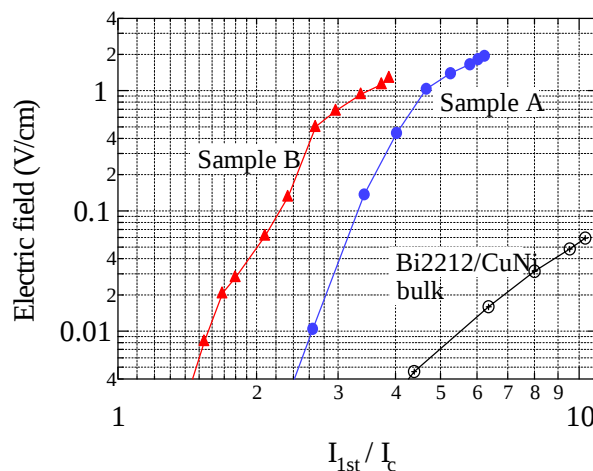


図3 高温超伝導限流変圧器 (HTc-SFCLT, PHASE-4) 用次世代超伝導テープの E-I 特性

(5) 極低温環境下における電気絶縁特性

HTc-SFCLT の高電圧化に対する技術的課題である極低温電気絶縁現象の解明を目的として、液体窒素／固体絶縁物複合絶縁系における沿面放電特性を取得した。電気的信号（放電電流、電磁波）と光学的信号（発光強度、発光像）との高速時間分解・同期観測系を構築することにより、沿面放電の発生・進展過程を可視化し、メカニズムを考察した。

⑧特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

(1) クエンチ・限流動作後における超伝導状態への自己復帰特性および復帰限界の定量的評価

HTc-SFCLT (PHASE-3) のクエンチ・限流動作後における超伝導状態への自己復帰特性は、本プロジェクトの先行プロジェクトである平成 14～15 年度基盤研究(A)において得られた新規な特性である。本プロジェクトでは、この自己復帰特性を実験および数値シミュレーションの両面から体系化するとともに、メカニズム (Bi2212/CuNi 複合バルクコイルのフラックスフロー抵抗と変圧器巻数比による限流機能の増倍作用) を解明した。また、各種の定常運転状態および故障条件を想定し、自己復帰限界を定量的に評価した。さらに、これらの成果は HTc-SFCLT (PHASE-4) の設計に反映され、自己復帰の可能性を考慮に入れた設計となっている。以上の結果は、本研究の新規性を格段に発展させるものとみなすことができる。

(2) PHASE-4 における次世代超伝導テープ導体の適用およびハイブリッド／フレキシブル設計

HTc-SFCLT (PHASE-4) の設計において、低圧側コイルに次世代超伝導テープ導体を適用した。これまでに、超伝導変圧器や超伝導限流器の製作にあたり、次世代超伝導テープ導体を適用した事例は少なく、新規性を有すると言うことができる。また、変圧器巻線の一部を限流器巻線として異なる種類のテープ導体を採用し、その組み合わせおよび比率を可変とするハイブリッド／フレキシブル設計とし、平成 18 年度においてその実験的検証を試みる予定である。このような試みは本プロジェクトの新規性ととも独創性を主張するものであり、これによって HTc-SFCLT の設計の自由度が格段に向上し、高温超伝導電力技術に対してインパクトを与えることが期待される。

(3) 極低温環境下における電気絶縁技術

HTc-SFCLT のみならず、各種の超伝導電力機器に共通の技術開発課題として、極低温環境下における電気絶縁の重要性が指摘・認識されている。しかし、極低温電気絶縁については、現象、特性、メカニズムのいずれにおいても未解明な点が多く、超伝導電力機器における絶縁信頼性の向上・高電圧化を阻む技術的障壁となっている。本プロジェクトでは、研究代表者および研究分担者が極低温電気絶縁についてこれまでに培った豊富な知識・経験（「⑨研究成果の発表状況」欄の「招待講演」項参照）と今後の研究遂行により、放電メカニズムに立脚した極低温電気絶縁技術の確立および絶縁設計指針の提案が期待される。平成 17 年度において得られた液体窒素／固体絶縁物複合絶縁系の沿面放電特性は極低温電気絶縁の基礎となるものであり、その体系化とメカニズム解明を通じて、本プロジェクトの HTc-SFCLT 開発に直接的に貢献するものと考えられる。本プロジェクトにおいて購入した高額物品であるクライオスタットを図 4 に、ストリークカメラを図 5 に示す。



図 4 クライオスタット



図 5 ストリークカメラ

- ⑨研究成果の発表状況（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

●学術誌

- (1) C.Kurupakorn, N.Hayakawa, H.Okubo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, K.-P.Juengst: “Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with Bi2212 Bulk Coil”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2, pp.900-903, 2004
- (2) クルパコン チャチャヴァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の開発」, 電気学会論文誌B, Vol.124, No.10, pp.1193-1199, 2004
- (3) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, M.Goto, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, K.-P.Juengst, H.Okubo: “Recovery Characteristics after Current Limitation of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1859-1862, 2005
- (4) M.Noë, K.-P.Juengst, S.Elschner, J.Bock, F.Breuer, R.Kreutz, M.Kleimaier, K.-H.Weck, N. Hayakawa: “High voltage requirements and test of a 10 MVA superconducting fault current limiter”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.2082-2085, 2005
- (5) H.Okubo, N.Hayakawa: “A Novel Technique for Partial Discharge and Breakdown Investigation Based on Current Pulse Waveform Analysis”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.12, No.4, pp.736-744, 2005
- (6) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, H.Okubo: “Simulation of Electrical and Thermal Behavior of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, Journal of Physics: Conference Series, 2006 (to be published)
- (7) H.Okubo, H.Kojima, F.Endo, K.Sahara, N.Hayakawa: “Impulse and ac Partial Discharge Inception and Breakdown Characteristics of LN₂/Polypropylene Laminated Paper Composite Insulation System”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006 (to be published)

●招待講演

- (1) H.Okubo: “Future Perspectives of Electrical Insulation Techniques for HTS Power Applications”, International Council on Large Electric Systems, CIGRE, SCD1 HTS Workshop, 2004
- (2) H.Okubo: “Future Perspectives of Electric Power Equipment”, Japan-Korea Joint Seminar, 2004
- (3) N.Hayakawa: “Superconducting fault current limiting transformer (SFCLT) project”, International Workshop on HTS Power Applications, 2005
- (4) H.Okubo: “Future Technical Perspectives for Electric Power Equipment in Substations”, CIGRE SC A3 & B3 Joint colloquium, 2005
- (5) N.Hayakawa, H.Okubo: “Partial Discharge Measurement and Characteristics in Cryogenic Electrical Insulation for HTS Power Apparatus”, Workshop on Cryogenic Dielectrics, 2005

●国際会議

- (1) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, M.Goto, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, K.-P.Juengst, H.Okubo: “Recovery Characteristics after Current Limitation of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, Applied Superconductivity Conference (ASC), 3LI07, 2004
- (2) M.Noë, K.-P.Juengst, S.Elschner, J.Bock, F.Breuer, R.Kreutz, M.Kleimaier, K.-H.Weck, N. Hayakawa: “High voltage requirements and test of a 10 MVA superconducting fault current limiter”, Applied Superconductivity Conference (ASC), 4LG18, 2004
- (3) N. Hayakawa, Y.Sugimori, H.Okubo: “Partial Discharge Current Pulse Waveform Analysis (PD-CPWA) Based on PD Mechanisms in Solid and Gas Media”, International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Vol.3, pp.812-815, 2005
- (4) H.Okubo, M.Nagino, H.Kojima, N.Hayakawa, T.Takahashi, K.Yasuda: “Impulse and ac PD Inception Characteristics and Mechanisms of LN₂/Polypropylene Laminated Paper Composite Insulation System”, International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp.429-432, 2005

- ⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

- (5) H.Kojima, C.Kurupakorn, N.Hayakawa, M.Goto, N.Kashima, S.Nagaya, H.Okubo: “Technical Feasibility of Superconducting Fault Current Limiting Transformer in Future Electric Power Network”, International Symposium on EcoTopia Science, 2005
- (6) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, H.Okubo: “Simulation of Electrical and Thermal Behavior of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, 7th European Conference of Applied Superconductivity, TU-P2-67, 2005
- (7) H.Okubo, C.Kurupakorn, S.Ito, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, M.Noë: “High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with 2G Coated Conductors”, Applied Superconductivity Conference, 1LW04, 2006

●解説記事

- (1) 早川直樹：「超電導機器と極低温絶縁」，放電研究, Vol.47, No.4, pp.23-28, 2004
- (2) 早川直樹：「超電導電力機器における電気絶縁技術研究の現状と展望」，電気学会論文誌 B, Vol.126, No.1, pp.1-4, 2006

●学会等

- (1) クルパコン チャチャヴァン，早川直樹，小島寛樹，鹿島直二，長屋重夫，大久保仁：「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) における限流後の復帰特性」，電気学会電力・エネルギー部門大会, No.403, 2004
- (2) クルパコン チャチャヴァン，小島寛樹，早川直樹，後藤益雄，鹿島直二，長屋重夫，大久保仁：「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) 用Bi2212/CuNi複合バルクコイルの直列通電特性」，電気関係学会東海支部連合大会, No.O-143, 2004
- (3) 早川直樹：「超電導機器と極低温絶縁」，放電学会若手セミナー, 2004年11月5日
- (4) クルパコン チャチャヴァン，小島寛樹，早川直樹，後藤益雄，鹿島直二，長屋重夫，大久保仁：「Bi2212/CuNi複合バルクコイルの直並列接続時における抵抗発生特性」，電気学会全国大会, No.5-052, 2005
- (5) クルパコン チャチャヴァン，小島寛樹，早川直樹，遠藤奎将，鹿島直二，長屋重夫，大久保仁：「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) における限流・超電導復帰解析」，電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-05-22, 2005
- (6) クルパコン チャチャヴァン，小島寛樹，早川直樹，遠藤奎将，鹿島直二，長屋重夫，大久保仁：「過冷却液体窒素中におけるBi2212/CuNi複合バルクコイルの限流特性」，電気学会電力・エネルギー部門大会, No.382, 2005
- (7) 早川直樹：「超電導応用電力機器・システムの開発」，弁理士会先端技術研修会, 2005年11月15日
- (8) 早川直樹：「超電導電力機器の電気絶縁技術の将来展望」，電気学会東海支部若手セミナー, 2005年11月17日
- (9) クルパコン チャチャヴァン，伊藤智志，小島寛樹，早川直樹，遠藤奎将，大久保仁：「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) 用DyBCO超電導テープの限流特性」，電気学会全国大会, No.5-012, 2006
- (10) 早川直樹，クルパコン チャチャヴァン，伊藤智志，小島寛樹，遠藤奎将，大久保仁：「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) 用次世代超電導テープの限流特性」，2006年度春季低温工学・超電導学会, 1B-a12, 2006