

## 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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360128

研究課題名（和文）

高温超伝導ケーブルの合理的絶縁設計・試験技術に関する研究

研究課題名（英文） Rational Electrical Insulation Design and Testing Techniques of High Temperature Superconducting Cables

研究代表者

早川 直樹 (Hayakawa Naoki)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：20228555

研究成果の概要（和文）：

本研究では、次世代電力システムへの導入・実証試験が世界中で進められている高温超伝導ケーブルについて、その技術的障壁の一つである極低温環境下における電気絶縁特性を体系的に調査するとともに、275kV 高温超伝導ケーブルの合理的な絶縁設計指針を提示した。

研究成果の概要（英文）：

As one of the technical obstacles for high temperature superconducting (HTS) cables which have been tested world-wide for the introduction and verification in the next-generation electric power system, this research systematically investigated the electrical insulation characteristics at cryogenic environment and proposed a guideline for the rational electrical insulation design of 275kV HTS cables.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

 キーワード：超伝導ケーブル，液体窒素，ポリプロピレン積層テープ，部分放電，  
部分放電開始電界，サブクール，電気絶縁，絶縁設計

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が世界規模の社会問題となっている現在、エネルギー利用の効率化を可能とする環境調和型エネルギーシステムの構築が必須である。そのためのブレークスルー技術として、世界各国において実用化に向けた研究開発が進められている高温超伝導ケーブルがある。しかし、高温超伝導ケーブルの運転環境である極低温環境下の電気絶縁技術は学術的・工学的に確立されていないのが現状であり、高温超伝導ケーブルの実用化に対する技術的障壁の一つとなっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導ケーブルの運転環境である極低温環境下の電気絶縁特性を調査し、高温超伝導ケーブルの合理的な絶縁設計に資するデータを取得・体系化することにより、次世代の環境調和型エネルギーシステムにおける高温超伝導ケーブルの信頼性を確保することを目的としている。特に、我が国の国家プロジェクトとして実施されたNEDOの「リチウム系超伝導電力機器技術開発」(M-PACC)プロジェクトの一環として開発された275kV高温超伝導ケーブルを対象として、具体的な検討を行った。

### 3. 研究の方法

高温超伝導ケーブルの電気絶縁構造を模擬したサンプル電極（図1）を液体窒素中に浸漬し、交流高電圧を印加した（図2）。液体窒素の圧力・温度をパラメータとして、サンプル電極の部分放電開始特性等の電気絶縁特性を体系的に取得するとともに、放電メカニズムについて考察した。また、従来の絶縁材料の適用限界と新材料の適用可能性についても評価し、高温超伝導ケーブルの合理的な絶縁設計指針を提示した。具体的な研究内容は、以下の通りである。

- (1) 部分放電開始電界の絶縁厚さ依存性
- (2) サブクール液体窒素中の絶縁特性
- (3) 部分放電開始のV-t特性
- (4) 複合段絶縁による誘電損失の低減
- (5) サブクール液体窒素の放電メカニズム
- (6) 高温超伝導ケーブルの絶縁設計指針



図1 超伝導ケーブルの電気絶縁構造を模擬したサンプル電極

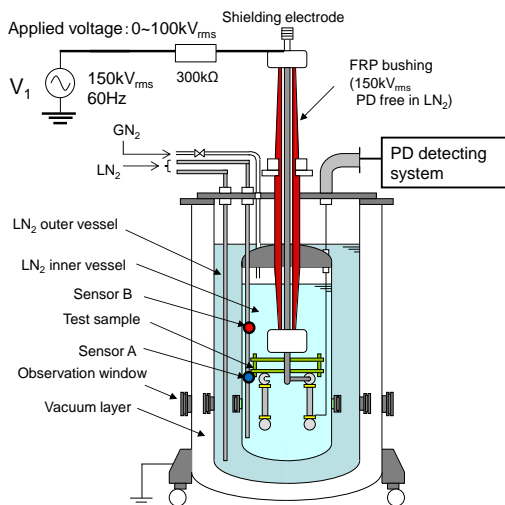


図2 高電圧試験回路

### 4. 研究成果

本研究は、当初の研究目的に基づいて遂行され、以下のような知見・成果を得た。

- (1) 部分放電開始電界の絶縁厚さ依存性  
高温超伝導ケーブルの絶縁環境を模擬した液体窒素（ $P=0.1\text{MPa}$ ,  $T=77\text{K}$ ）／ポリプロピレン積層テープ（PPLP, A-Type / C-Type）複合絶縁系において、種々の絶縁厚さについて部分放電開始電界（PDIE）を測定・比較した（図3）。その結果、PDIEは統計的電界体積SSLV（絶縁上の弱点の総量と等価）の増加とともに低下すること、C-TypeのPDIE下限値（ $21.6\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ ）はA-Typeよりも40%高いことを明らかにした。

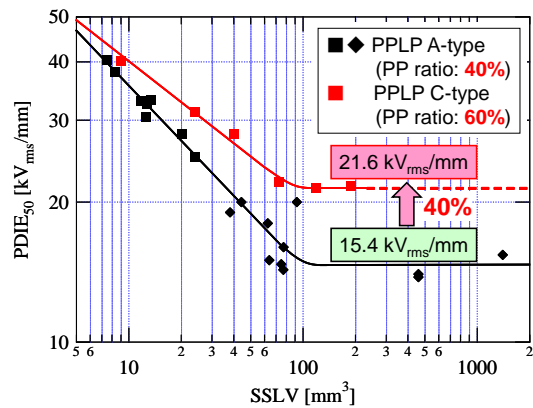
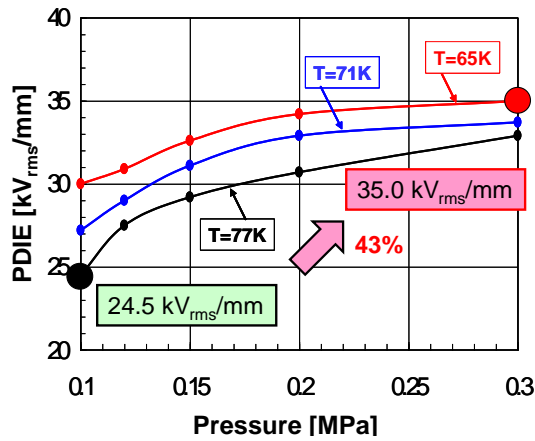
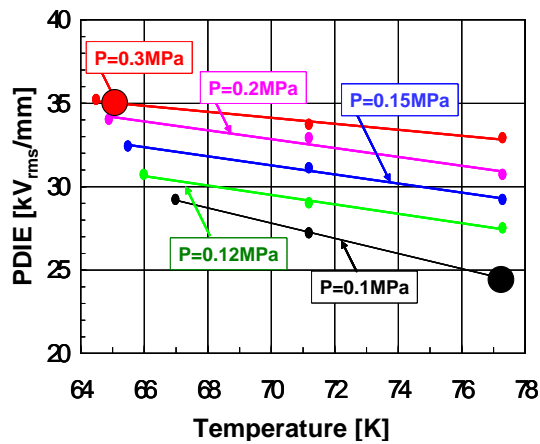


図3 部分放電開始電界の絶縁材料依存性

- (2) サブクール液体窒素中の絶縁特性  
高温超伝導ケーブルの実用的な冷却・運転環境を模擬したサブクール液体窒素（ $\text{SLN}_2$ ）／PPLP（C-Type）複合絶縁系において、圧力（ $P=0.1\sim 0.3\text{MPa}$ ：絶対圧）と温度（ $T=65\sim 77\text{K}$ ）をパラメータとしてPDIEを測定・体系化した（図4）。その結果、PDIEは圧力上昇とともに増大・飽和し、温度低下とともに直線的に増大する傾向にあること、 $P=0.3\text{MPa}$ ,  $T=65\text{K}$ のPDIE（ $35.0\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ ）は、大気圧沸騰状態（ $P=0.1\text{MPa}$ ,  $T=77\text{K}$ ）のPDIEよりも43%高いことを見出した。
- (3) 部分放電開始のV-t特性  
超伝導ケーブルの試験電圧を決める上で重要な寿命特性（V-t特性）について、部分放電開始のV-t特性における寿命指数（n値）を調査した結果、サブクール液体窒素（ $0.3\text{MPa}$ ,  $77\text{K}$ ）中において  $n=80$  が得られた。この値は大気圧液体窒素（ $0.1\text{MPa}$ ,  $77\text{K}$ ）中の値と同等であり、部分放電開始のV-t特性における圧力依存性が小さいことがわかった。



(a) 圧力依存性



(b) 温度依存性

図4 サブクール液体窒素中の部分放電開始電界

(4) 複合段絶縁による誘電損失の低減

M-PACC プロジェクトで開発された 275kV 高温超伝導ケーブルの絶縁設計においては、誘電損失が交流損失の 3 倍に達しており、次世代の高電圧/低損失高温超伝導ケーブルの開発に向けてコンパクト化（絶縁厚さ）と低損失化（誘電損失）を両立することが必要である。そこで、高絶縁性能を有する PPLP (C-type) と低誘電損失特性を有する Tyvek（高密度ポリエチレン (PE) 不織布）との複合段絶縁による誘電損失の低減効果について検討した（図5）。その結果、PPLP-C 層と Tyvek 層の絶縁厚さの割合を 22% : 78% とすることにより、275kV 高温超伝導ケーブルの誘電損失を PPLP-C のみを用いた従来設計の 33% に大幅に低減できることを明らかにした。また、複合段絶縁において、各絶縁材料の界面の影響はなく、その PDIE は各絶縁材料の特性（PDIE, 比誘電率）によって予測できることを示唆した。

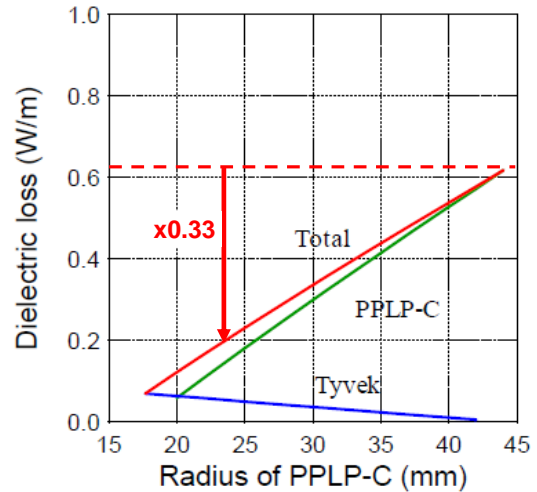


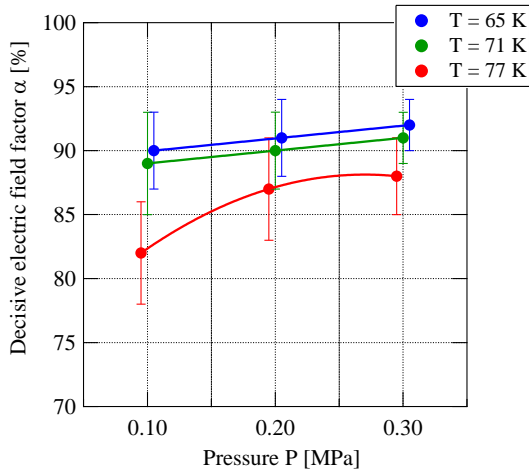
図5 PPLP-C/Tyvek 複合段絶縁による誘電損失の低減

(5) サブクール液体窒素の放電メカニズム  
 高温超伝導ケーブルの冷却・絶縁媒体であるサブクール液体窒素(SLN<sub>2</sub>)の圧力および温度を制御し、準平等電界下におけるSLN<sub>2</sub>の絶縁破壊特性に関する体系的データを取得した。その結果、加圧・冷却によりLN<sub>2</sub>をSLN<sub>2</sub>の状態にすることで気泡の体積が縮小し、さらに気泡の発生が抑制されることを明らかにした。特に、LN<sub>2</sub> (P=0.1MPa, T=77K)の絶縁破壊に寄与する電界レベルの最大電界に対する割合(α[%])は82~83%であり、加圧・冷却によってSLN<sub>2</sub>のαが87~93%に上昇した（図6）。すなわち、SLN<sub>2</sub>中における気泡の大きさおよび数の減少に伴い、絶縁破壊に寄与する電界レベル(α)が上昇し、高電界体積の減少とともに絶縁破壊電界が上昇したと考えられる。

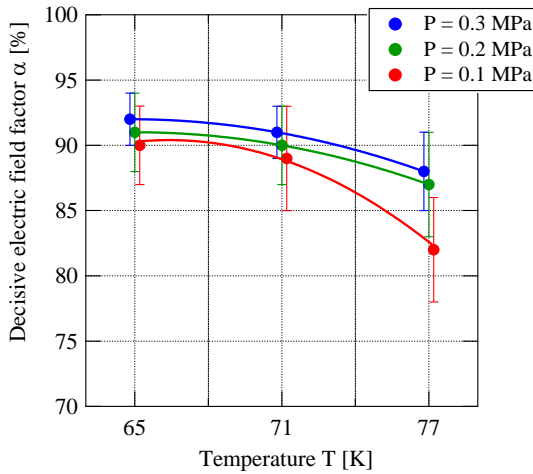
(6) 高温超伝導ケーブルの絶縁設計指針

275kV 高電圧超伝導ケーブルの高絶縁性能と低誘電損失の両立・最適化に向けた新しい絶縁材料として、Tyvek/PE合成紙の適用可能性を調査した（図7）。その結果、Tyvek/PE合成紙の部分放電開始電界は、PPLP-Cと同等であることを明らかにした。また、Tyvek/PE合成紙を275kV超伝導ケーブルに適用した場合の誘電損失は、PPLP-Cを用いた従来の275kV超伝導ケーブルの21%に低減することを示した。これは、交流損失を含めた全損失が41%に低減することを意味する。

以上のように、高温超伝導ケーブルの絶縁設計においては、高絶縁性能と低誘電損失との協調が重要であり、放電メカニズムに立脚した絶縁設計指針を提示した。



(a) 圧力依存性



(b) 温度依存性

図 6 サブクール液体窒素中の絶縁破壊に寄与する電界レベル

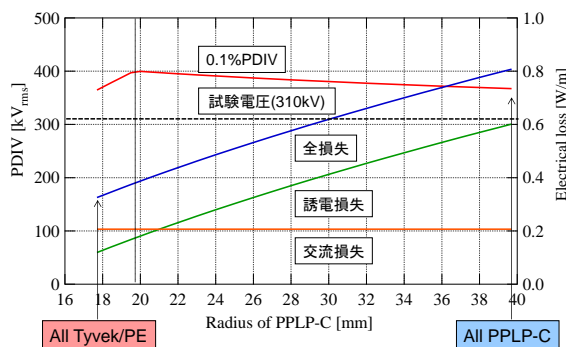


図 7 Tyvek/PE 合成紙を適用した 275kV 高温超伝導ケーブルの部分放電開始電界と誘電損失

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) N.Hayakawa, H.Kojima, M.Hanai, H.Okubo: “Recent Progress in Electrical Insulation Techniques for HTS Power Apparatus”, Physics Procedia, Vol.36, pp.1305-1308 (2012), 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- (1) N.Hayakawa, S.Nishimachi, O.Maruyama, T.Ohkuma, J.Liu, M.Yagi: “A Novel Electrical Insulating Material for 275 kV High-Voltage HTS Cable with Low Dielectric Loss”, European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS), Genova, Italy, September 15-19 (2013, to be presented)
- (2) 西町誠一郎, 早川直樹, 丸山修, 大熊武, 劉勁, 八木正史: 「275 kV 高電圧超電導ケーブルにおける電気絶縁/損失特性の協調」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟コンベンションセンター, 8月27~29日(2013, 発表確定)
- (3) 西町誠一郎, 早川直樹, 丸山修, 大熊武, 劉勁, 八木正史: 「275 kV 高電圧超電導ケーブルの誘電損失低減に向けた新絶縁紙の適用可能性」, 電気学会全国大会, No.5-148, 名古屋大学, 3月20~22日(2013)
- (4) 早川直樹, 西町誠一郎, 小島寛樹, 花井正広, 大久保仁: 「275 kV 高電圧超電導ケーブルの誘電損失低減に向けた新絶縁紙の適用可能性」, 電気学会誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会, DEI-12-088/EWC-12-021, 愛知県産業労働センター, 12月14日(2012)
- (5) S.Nishimachi, N.Hayakawa, H.Kojima, M.Hanai, H.Okubo: “Pressure and Temperature Dependence of Breakdown Characteristics of Sub-Cooled Liquid Nitrogen”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp.440-443, Montreal, Canada, October 14-17 (2012)
- (6) 西町誠一郎, 小島寛樹, 早川直樹, 花井正広, 大久保仁: 「サブクール液体窒素の交流絶縁破壊メカニズム」, 電気関係学会東海支部連合大会, No.F1-1, 豊橋技術科学大学, 9月24~25日(2012)
- (7) 西町誠一郎, 小島寛樹, 早川直樹, 花井正広, 大久保仁: 「超電導電力機器におけるサブクール液体窒素の電気絶縁性能」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.414, 北海道大学, 9月12~14日(2012)
- (8) 井上真彰, 西町誠一郎, 小島寛樹, 早川直樹, 花井正広, 丸山修, 大熊武, 八木正史, 大久保仁: 「275kV 高温超電導ケーブルにおける複合段絶縁による高電圧化と誘電損失低減の両立」, 電気学会全

- 国大会, No.5-100, 広島工業大学, 3月21～23日(2012)
- (9) 井上真彰, 早川直樹, 小島寛樹, 花井正広, 大久保仁: 「275kV 高温超電導ケーブルにおける誘電損失低減に関する検討」, 電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, 9月26～27日(2011)
- (10) N.Hayakawa, H.Kojima, M.Hanai, H.Okubo: “Recent Progress in Electrical Insulation Techniques for HTS Power Apparatus”, European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS), No.4-LB-P36, The Hague, The Netherlands, September 18-23 (2011)
- (11) 早川直樹, 鶴飼泰之, 小島寛樹, 花井正広, 大久保仁, 丸山修, 大熊武, 八木正史: 「過冷却液体窒素中における超電導ケーブル絶縁モデルの部分放電開始特性」, 電気学会全国大会, No.5-095, 大阪大学, 3月16～18日(2011)
- (12) 鶴飼泰之, 小島寛樹, 遠藤奎将, 早川直樹, 市川裕士, 藤原昇, 八木正史: 「高温超電導ケーブルにおける部分放電開始電界の絶縁材料依存性」, 電気学会全国大会, No.5-075, 明治大学, 3月17～19日(2010)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 直樹 (HAYAKAWA NAOKI)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号: 20228555

### (2) 研究分担者

大久保 仁 (OKUBO HITOSHI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90213660

遠藤 奎将 (ENDO FUMIHIRO) (H21年度)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号: 90402396

花井 正広 (HANAI MASAHIRO) (H22～24年度)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号: 00587446

小島 寛樹 (KOJIMA HIROKI)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・  
助教 (H21年度), 准教授 (H22～24年度)  
研究者番号: 003777772