

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18019

研究課題名(和文) 直流超電導ケーブルにおける極低温電気絶縁構成の高性能化に関する研究

研究課題名(英文) High Performance of Cryogenic Electrical Insulating System in DC Superconducting Cable

研究代表者

川島 朋裕 (Kawashima, Tomohiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助手

研究者番号：70713824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：

高温超電導ケーブルの研究・開発が各所で進められているが、信頼性・安全性を考慮した場合、電気絶縁が重要な技術課題である。一方で再生可能エネルギーの利用増大、電力融通設備の増大などを背景に直流での絶縁特性の把握が急務となっている。直流超電導ケーブルは超電導の特徴を最大限活用できるが、従来の電力用ケーブル同様に直流電界下においては絶縁体内部の局所電界を変歪させる内部蓄積電荷(空間電荷)が絶縁性能を低下させる恐れがある。本研究では、直流超電導ケーブルの電気絶縁性能に与える空間電荷の影響を明らかにし、電荷注入を抑制した最適な絶縁設計の基本的指針を得ることを目指した。

研究成果の概要(英文)：

The development of high-temperature superconducting (HTS) cables have been tried around the world and the on-site test was done in actual power system. On the other hand, solar and wind power are expected to be used as new renewable energy source as a substitute for petroleum in the future. Usage of such new energies have a good compatibility with DC power transmission based on superconducting technology. However, DC HTS cable may raise the problem that the charge injection can degrade the insulating performance of insulating paper, which is the similar to the problem with the conventional cables such as oil immersion cable for DC. In this research, it was investigated the influence of charge injection on insulating paper at cryogenic environment and aimed to obtain the basic guidelines for optimal DC insulation design with suppressed charge injection.

研究分野：電気絶縁工学

キーワード：極低温電気絶縁 絶縁紙 電荷侵入 直流 絶縁破壊 部分放電

1. 研究開始当初の背景

将来の電力増大に応えるコンパクト大容量ケーブルとして、超電導ケーブルの研究・開発が各所で進められているが、信頼性・安全性を考慮した場合、電気絶縁が重要な技術課題である。一方、再生可能エネルギーの利用増大、電力融通設備の増大などを背景に直流における絶縁特性の把握が急務となっている。直流超電導ケーブルは超電導の特徴を最大限活用できるが、従来の電力用ケーブル同様に直流電界下においては絶縁体内部の局所電界を変歪させる内部蓄積電荷(空間電荷)が絶縁性能を低下させる恐れがある。これまでは交流超電導ケーブルの開発が主であったため、直流超電導ケーブルの絶縁設計に関わる空間電荷の影響について検討した例は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、直流超電導ケーブルの電気絶縁性能に与える空間電荷の影響を明らかにし、電荷注入を抑制した最適な絶縁設計の基本的指針を得ることを目指した。絶縁紙の液体窒素中における直流絶縁特性を総合的・多角的に検討し、空間電荷が直流絶縁特性に与える影響を明らかにした。また、この結果から得られた空間電荷侵入メカニズムを踏まえて、直流超電導ケーブルにおいて最適な絶縁紙の特性を提案した。

3. 研究の方法

超電導ケーブルの絶縁構成は主に絶縁紙-液体窒素複合系であり、絶縁紙としてはPPLP<sup>®</sup>が採用されている。PPLP<sup>®</sup>はポリプロピレン(PP)とクラフト紙(KP)の積層紙である。PPLP<sup>®</sup>の絶縁特性は構成するKPとPPの足し算的な特性とはならず、積層紙特有の特性を示す。そのため、極低温環境下におけるPPLP<sup>®</sup>の絶縁特性を理解するためには、はじめにKPとPPの絶縁特性に与える空間電荷の影響を十分に把握する必要がある。極低温環境下においてはPP内部に空間電荷が侵入し難いことが報告されている<sup>①</sup>。そこで、本研究ではKPを対象とした。超電導ケーブルが部分放電を介して絶縁破壊に至ると考え、球-平板電極系を用いて極低温環境下におけるKPの絶縁破壊特性に与える空間電荷の影響を検討した。検討した主な内容は以下の通りである。

- (1). 直流プレストレス特性
- (2). 絶縁紙の透気抵抗度と空間電荷侵入の関係
- (3). 直流部分放電特性と絶縁紙-氷複合系による空間電荷侵入抑制効果

4. 研究成果

(1). 直流プレストレス特性

直流プレストレス試験は、直流プレストレス電圧を一定時間印加し積極的に試料内部に電荷を注入した後、急峻な立ち上がりのインパルス電圧を印加し試料内部の電荷挙動を固定した状態で、絶縁破壊させる試験である。

インパルス電界のみを印加した場合の絶縁破壊の強さ(F<sub>b</sub>)と比較することによって絶縁体内部の空間電荷の挙動を推測することができる。表1に用いたKPの諸物性を示す。図1に印加電界パターン、図2にKPの直流プレストレス効果を示す。図2において、直流プレストレス電界0kV/mmはインパルス電界のみを印加した場合のF<sub>b</sub>を示している。

一般に、直流プレストレス電界と逆極性のインパルス電界を印加した場合は、空間電荷によって局所電界が強調される(ヘテロ空間電荷効果)ためF<sub>b</sub>は低下する<sup>②</sup>。一方、同極性のインパルス電界を印加した場合は、空間電荷によって局所電界が緩和される(ホモ空間電荷効果)ためF<sub>b</sub>は上昇する。図2より、密度が疎なKP-Aにおいて正極性直流プレストレス電界を印加後に負極性インパルス電界を印加した場合(F<sub>b(+/-)</sub>)のF<sub>b</sub>はヘテロであるにもかかわらず上昇した。従来研究において、KP-A内部には負電荷が侵入し易い可能性を示唆した<sup>③</sup>。正極性直流プレストレス電界によって対向電極側から侵入した負電荷が高電圧電極側の電界を緩和したためF<sub>b</sub>が上昇したと考えれば、一般的な直流プレストレス効果と異なるF<sub>b(+/-)</sub>の結果も説明可能である。一方、KP-Dは一般的な直流プレストレス効果と同様な傾向を示した。以上より、絶縁紙の密度によって電荷侵入特性が異なり、特に密度が疎な絶縁紙を用いた場合には負電荷が侵入し易くなることを明らかにした。

表1 KPの諸物性

	Paper Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Thickness [mm]	Air Resistance [s/100 ml]
KP-A	0.72	0.125	1580
KP-B	0.85	0.1	10800
KP-C	1.05	0.102	9100
KP-D	1.13	0.074	36800

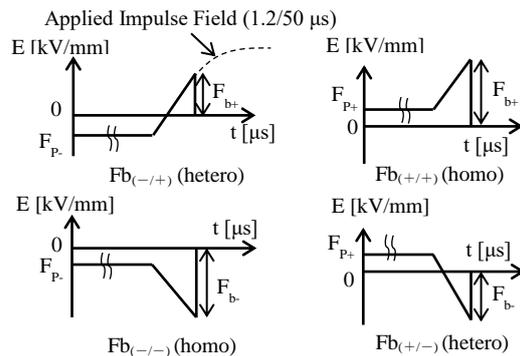


図1 直流プレストレス試験の印加電界パターン

(2). 絶縁紙の透気抵抗度と空間電荷侵入の関係

絶縁紙内部への電荷侵入の要因としては、絶縁紙を構成するセルロース繊維の表面電気伝導と部分放電によるものの2通りが考えられる。極低温環境下において電気伝導は抑制されるため部分放電が電荷侵入の主要因と考

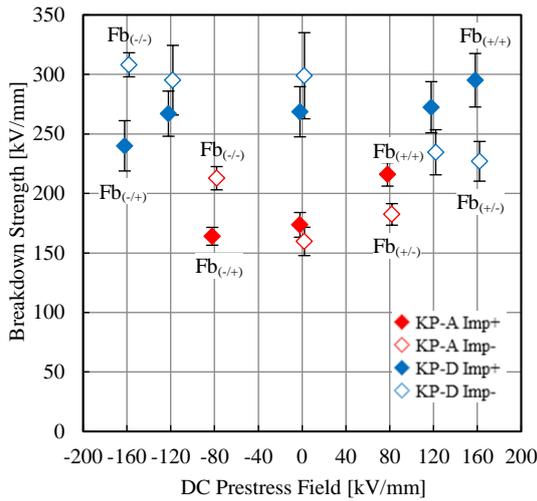


図2 KPの直流プレストレス効果

えられる。図3に絶縁破壊の透気抵抗度依存性を示す。透気抵抗度は100 mlの空気が絶縁紙内部を透過するのに要する時間を表しているため、部分放電がセルロース繊維間を侵入すると考えた場合、透気抵抗度と絶縁紙内部への電荷侵入のし易さの間には相関があると考えられる。図3より、透気抵抗度の増加に伴って絶縁破壊の極性効果が反転した。一般に室温の絶縁油中においては正極性  $F_b$  は負極性  $F_b$  よりも低下することが報告されている<sup>4)</sup>。これは、正極性ストリーマの特性に起因しており、負極性ストリーマに比べて先端電界およびエネルギー密度が高いためである。したがって、透気抵抗度の高い絶縁紙における絶縁破壊の極性効果はストリーマの特性によるものであり、透気抵抗度の高い絶縁紙における結果は一般的な特性と考えられる。一方で透気抵抗度の低い絶縁紙においては負極性  $F_b$  は正極性  $F_b$  よりも低下した。直流プレストレス試験によって密度が疎な絶縁紙は内部に負電荷が侵入し易いことが明らかになった。侵入した負電荷によって絶縁紙の実効的な厚さが減少したため  $F_b$  が低下したと考えれば説明可能である。

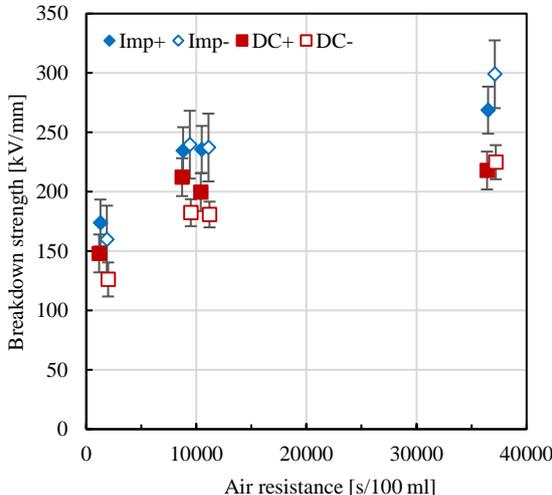


図3 絶縁紙の絶縁破壊の透気抵抗度依存性

以上より、絶縁紙の透気抵抗度を制御することによって電荷侵入を抑制できる可能性が示唆された。

(3). 直流部分放電特性と絶縁紙-氷複合系による空間電荷侵入抑制効果

絶縁紙-氷複合系は、室温では絶縁の天敵である水が低温では絶縁物である氷になることを利用して、電氣的弱点である液体窒素を様々な利点をもつ氷に置き換えた絶縁系である。従来研究において絶縁紙-氷複合系は絶縁紙-液体窒素複合系より絶縁破壊特性が優れていることを報告している<sup>5)</sup>。電荷侵入が絶縁紙のセルロース繊維間を部分放電が侵入するため生じると考えれば、絶縁紙-氷複合系は高い絶縁破壊特性のみならず、セルロース繊維間が氷で満たされているため電荷侵入抑制効果も有している可能性が高い。部分放電による電荷侵入メカニズムの検討と同時に次世代直流超電導ケーブルの電気絶縁構成としての絶縁紙-氷複合系の適応性についても検討した。図4に絶縁破壊特性と図5および図6に絶縁紙-液体窒素複合系および絶縁紙-氷複合系の部分放電特性を示す。部分放電による電荷侵入を極力排除するために球電極をエポキシ樹脂でモールドしたモールド球-平板電極系による試験を行った。

図4より、モールド電極系を用いることによって負極性  $F_b$  の低下は抑制されている。特に絶縁紙-氷複合系は顕著にその効果が表れており、先に述べた一般的に絶縁破壊の極性効果と同様な傾向を示した。図5より、絶縁紙-氷複合系においては絶縁破壊まで部分放電が観測されない場合もあり、特に負極性においてその傾向は顕著である。これらは直流プレストレス試験および透気抵抗度依存性の結果から推測した部分放電による電荷侵入メカニズムを支持する結果である。また、将来の直流超電導ケーブルの電気絶縁構成として絶縁紙-氷複合系は電荷侵入の観点においても優れた絶縁性能を有していることを明らかにした。

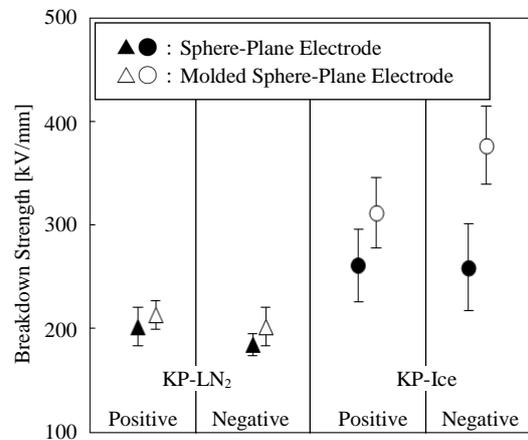
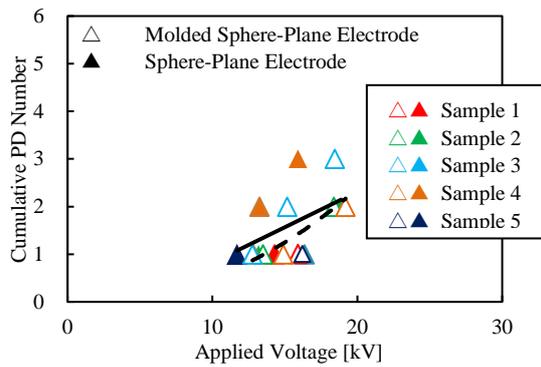
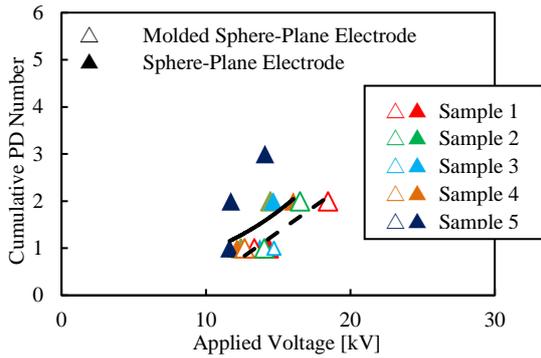


図4 絶縁紙-氷複合系の絶縁破壊に及ぼす部分放電の影響

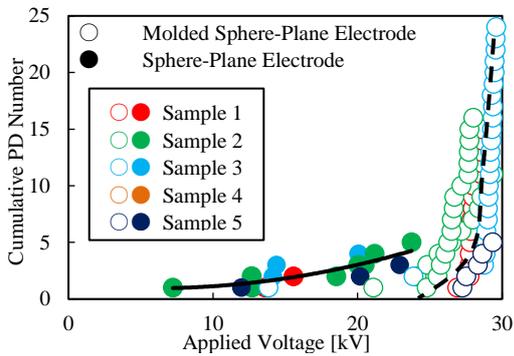


(a) 正極性

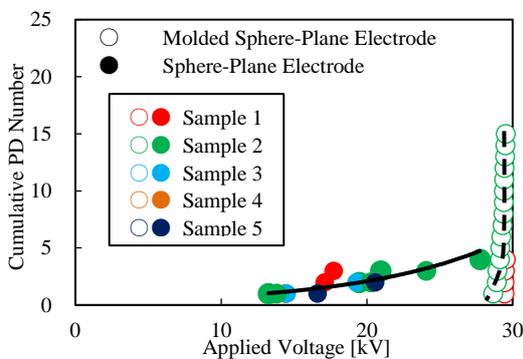


(b) 負極性

図5 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電特性



(a) 正極性



(b) 負極性

図6 絶縁紙-氷複合系の部分放電特性

<引用文献>

① 長尾雅行, 「極低温絶縁技術とそのおもしろさ」, 電気学会論文誌 A, 124 巻 9 号, pp.759-762 (2004)

② A. Bradwell, R. Cooper and B. Varlow, “Conduction in Polyethylene with Strong Electric Field and the Effect of Prestressing on the Electric Strength”, Proceedings of IEE, Vol.118, No.1, pp. 247-254, 1971

③ M. Nagao, M. Kurimoto, R. Takahashi, T. Kawashima, Y. Murakami, T. Nishimura, Y. Ashibe, T. Masuda, “Dielectric breakdown mechanism of polypropylene laminated paper in liquid nitrogen”, CEIDP, Vol.2, pp.419-422, 2011

④ 村田正男, 畑良輔, 広瀬正幸, 斎藤和夫, 川上陽二, 「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」, 電気学会論文誌 A, Vol.114, No.2, 1994

⑤ 長尾雅行, 樋上武, 柳瀬純一, 小崎正光, 柴田俊和, 「液体窒素中における絶縁紙 - 氷複合絶縁系の絶縁破壊特性」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, p.259-263, 1995

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 9 件)

① T. Kawashima, Y. Kitagawa, Y. Murakami, N. Hozumi, M. Nagao, “Influence of Charge Behavior on Breakdown Strength of Kraft Paper in Liquid Nitrogen”, International Electronics Symposium, Bali, Indonesia, pp. 234-237, 2016

② T. Kawashima, Yup Pui San, Y. Murakami, M. Nagao, “Effects of partial discharge on DC breakdown characteristics of paper-ice composite insulation system in liquid nitrogen”, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Toronto, Canada, pp. 235-238, 2016

③ T. Kawashima, Y. Yamashita, Y. Murakami, M. Nagao, K. Tohyama, “Nonlinear distortion of AC dissipation current waveform and space charge in EVA film”, 1st International Conference on Dielectrics, Montpellier, France, pp.147-150, 2016

④ Yup Pui San, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した直流絶縁破壊特性」, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 第 46 回電気電子絶縁材料シンポジウム, MVP-20, p.253-254, 2015

⑤ 北川雄太, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「絶縁紙-液体窒素複合系のインパルス絶縁破壊に与える交流プレストレスの影響」, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 12-5, 2015

⑥ Yui Pui San, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「絶縁紙-氷複合系の部分放電を介した直流絶縁破壊特性」, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, I2-3, 2015

⑦ 北川雄太, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「絶縁紙-液体窒素複合系の絶縁破壊に及ぼす絶縁紙の透気度の影響」, 電気学会全国大会, 2-039, p.45, 2015

⑧ Yui Pui San, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「液体窒素中における絶縁紙-氷複合系の直流絶縁破壊特性」, 電気学会全国大会, 2-040, p.46, 2015

⑨ Yui Pui San, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, 「絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した直流絶縁破壊特性」, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 第46回電気電子絶縁材料シンポジウム, MVP-20, p.253-254, 2015

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川島 朋裕(KAWASHIMA, Tomohiro)  
豊橋技術科学大学・工学研究科・助手  
研究者番号：70713824