

## 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 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656068

研究課題名（和文）

高温超電導ケーブルへの適用を目指した絶縁紙-氷複合絶縁システムの確立

研究課題名（英文）

Establishment of Paper-Ice Composite Insulation System toward to HTS Cable

研究代表者

長尾 雅行 (NAGAO MASAYUKI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30115612

研究成果の概要（和文）：

本研究では、絶縁紙-氷複合絶縁系の電気絶縁特性を解明し、高温超電導ケーブルにおける新しい極低温電気絶縁構成の開発を促進することを目的とした。主な結果は下記の通りである。

- (1) 絶縁紙-氷複合絶縁系の極低温領域における静電容量特性と交流絶縁破壊特性を評価した。KP-氷複合絶縁系は、液体窒素に浸漬した KP 絶縁系よりも、低容量化し、高い絶縁破壊の強さを有することがわかった。このことから、紙-氷複合絶縁系を適用することにより、低容量かつ高耐圧又はコンパクトな超電導ケーブルが実現できる可能性が示された。
- (2) 極低温領域における多層絶縁紙(PPLP)自身の絶縁破壊の強さは、絶縁紙単体より高いことがわかった。さらに、正極性の絶縁破壊の強さは、負極性よりも高いことがわかった。これは、負極性課電時においては、負電荷が絶縁紙内に蓄積する又は PP 内に電荷が侵入しないことより、実効厚さを薄くすることで絶縁破壊の強さが低下したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

We have been suggesting the paper-ice composite system as one of the candidates for the insulating system with LN<sub>2</sub> in high-temperature superconducting cables. The paper-ice composite system is an insulating paper filled with ice and it could inhibit the partial discharge inside the microscopic N<sub>2</sub> gas bubbles remained in the paper. Main results are summarized as below.

- (1) It was confirmed that the KP-Ice composite system could provide lower capacitance and high-voltage endurance to high-temperature superconducting cable.
- (2) It was confirmed that PPLP immersed in LN<sub>2</sub> had higher dielectric strength (Fb) than the KP in LN<sub>2</sub>. It was also confirmed that Positive Fb of PPLP was higher than negative Fb of PPLP. This result could lead the two charge transfer models, the injection model of the negative charge into the KP layer of PPLP and no-injection model of the charge into the PP layer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	0	2,000,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	300,000	3,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：極低温、紙-氷絶縁、PPLP、絶縁破壊

### 1. 研究開始当初の背景

現在開発が進められている高温超電導ケーブルの多くにおいては、絶縁紙-液体窒素複合絶縁系が採用されている。しかし、この絶縁紙-液体窒素複合絶縁系は、高電界になると、液体窒素の気化に伴う部分放電が生じやすく、この部分放電は電気絶縁の性能向上および長期信頼性の確保に対して重大な問題になる。そこで申請者は固体絶縁方式のひとつの変形として、これまでにない発想である絶縁紙-氷複合絶縁系を考案し、これまでの研究の結果、この複合絶縁系が極低温絶縁機構の有力候補の一つとなり得ることを明らかにしてきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、現在開発が進められている絶縁紙-液体窒素複合絶縁系における電氣的弱点である液体窒素を固体である氷に置き換えた絶縁紙-氷複合絶縁系により、全く新しい発想で上記問題の解決を試みる。特にクラフト紙などの多層紙を用いた絶縁系の基礎電気特性、絶縁破壊特性とその発生機構を絶縁紙構造などとの関連において解明し、高温超電導ケーブルの有力な電気絶縁構成の一つとしてその実用化に対する基本的指針を確立する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 紙-氷絶縁系の静電容量特性

本実験は、絶縁紙-氷複合材料の静電容量特性を評価し、液体窒素のみを含浸した絶縁紙と比較・検討した。

絶縁紙として、多孔構造を持つ密度  $0.72 \text{ g/cm}^3$ 、厚さ  $125 \text{ }\mu\text{m}$  のクラフト紙(KP)を用いた。また、比較試料として、厚さ  $69 \text{ }\mu\text{m}$  のポリプロピレン(PP)フィルムを用いた。図1に試料形状を示す。試料直径は  $90 \text{ mm}$  であり、片面には、主電極として直径  $28 \text{ mm}$ 、ガード電極として内径  $32 \text{ mm}$ 、外径  $40 \text{ mm}$  の金蒸着を施した。また、他面には対向電極として直径  $40 \text{ mm}$  の金蒸着を施した。その後、試料を  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  程度のイオン交換水に浸漬し、常温で  $90 \text{ 分間}$  真空脱気処理を行い、大気圧沸騰中の液体窒素に試料を浸漬させ、絶縁紙-氷複合材料を作製した。これを、平行平板電極系に挟み、液体窒素に浸漬させ、試料の温度が定常状態になったことを確認してから交流電圧 ( $60 \text{ Hz}$ ) を印加した。印加電圧は最大印加電界が  $11 \text{ kV/mm}$  になるまで印加した。このとき、静電容量を電流比較型キャパシタンスブリッジを用いて測定した。また、比較の

ため、室温大気中と LN<sub>2</sub> 中における KP 試料の静電容量特性を取得した。表 1 に 3 種類の試料状態を示す。KP-Air は室温大気中で測定された KP を表し、KP-LN<sub>2</sub> は LN<sub>2</sub> 中で測定された KP、KP-Ice は LN<sub>2</sub> 中で測定された絶縁紙-氷複合材料を表している。

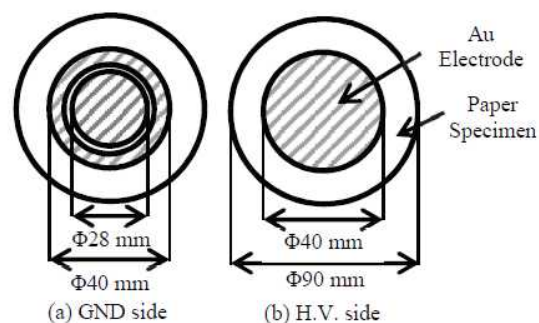


図 1. 金蒸着した絶縁紙試料

表 1. 紙材料と測定温度条件

Specimen	Material	Surrounding Media	Temperature [K]
KP-Air	KP	Air	300
KP-LN <sub>2</sub>		LN <sub>2</sub>	77
KP-Ice	KP and Ice composite	LN <sub>2</sub>	77
PP-Air	PP	Air	300
PP-LN <sub>2</sub>		LN <sub>2</sub>	77
PP-Ice	PP and Ice composite	LN <sub>2</sub>	77

#### (2) 多層絶縁紙の絶縁破壊特性

PPLP、KP、PP film、及び PPLP から片面の KP 部分を剥いだ KP-PP 二層複合試料 (半 PPLP) の極低温環境下におけるインパルス絶縁破壊特性を比較することで、PPLP の持つ積層紙構造特有の絶縁破壊機構を調査した。またこれらを交流及び直流絶縁破壊特性と比較することからも印加する絶縁破壊機構を検討した。

試料にはクラフト紙 (KP)、ポリプロピレンフィルム (PP film)、PPLP 及び PPLP から片面の KP 部分を剥いだ KP-PP 二層複合試料 (半 PPLP) を用いた。表 2 に各試料の厚さ、クラフト紙密度及び PP 比を示す。試料形状は直径が沿面放電が生じない程度の長さを持つ円形とした。

図 2 に絶縁破壊試験に用いた球平板電極系

を示す。電極系（球直径 12 mm、真鍮製、平板直径 30 mm、端部曲率 2 mm、SUS 製）を使用した。同図のように電極間に挟み込み、大気圧沸騰状態の液体窒素に浸漬した。その後、試料の温度が定常状態になったことを確認してから、図 3 の絶縁破壊用試験回路を用いて上昇率 1 kVrms/s の交流電圧（60 Hz）または上昇率 500 V/s の直流ランプ電圧及び立ち上がり 1.2  $\mu$ s のインパルス電圧を課電し、絶縁破壊電圧を測定した。なお、予想される絶縁破壊電圧よりも高いインパルス電圧を印加することにより、インパルス電圧の波頭長内で絶縁破壊を生じさせた。

表 2. 多層絶縁紙の材料特性

Sample	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Thickness [mm]	Ratio of PP
Kraft Paper	0.72	0.125	-
PP film	-	0.069	-
PPLP	0.75	0.125	0.42
KP-PP 2 layers sample	0.75	0.097	0.59

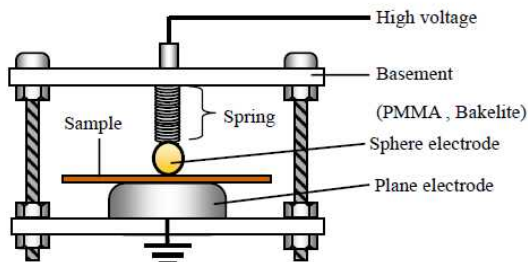


図 2. 絶縁破壊試験用の球平板電極系  
(球： $\phi$  12mm、真鍮製 / 平板： $\phi$  30mm、SUS 製)

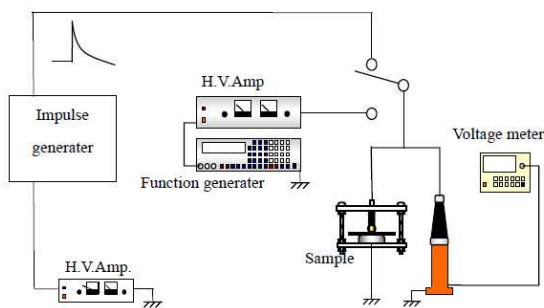


図 3. 絶縁破壊試験回路

#### 4. 研究成果

##### (1) 紙-氷絶縁系の静電容量特性

図 4 に KP における静電容量の電界依存性を示す。また図 5 に、印加電界 4kV/mm における静電容量の温度依存性を示す。

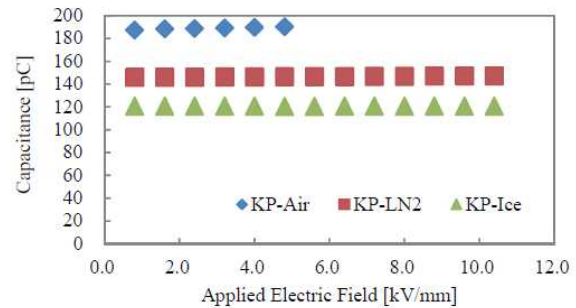


図 4. 様々な材料条件におけるクラフト紙(KP)の静電容量の電界依存性

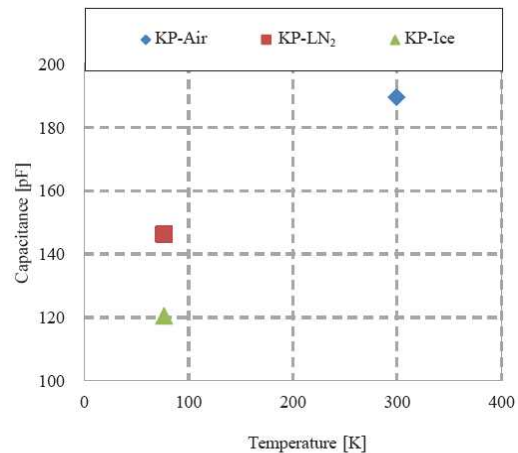


図 5. 様々な材料条件におけるクラフト紙(KP)の静電容量の温度依存性(印加電界：4kV/mm)

周囲媒質の温度の違いに着目すると、300 K で測定された KP-Air の静電容量は 77 K で測定された KP-LN<sub>2</sub> と KP-Ice よりも小さくなった。KP を構成するセルロース繊維の双極子運動は極低温下で凍結され、その比誘電率が大幅に低下していると考えられる。このことが、KP-Air の静電容量よりも KP-LN<sub>2</sub>、KP-Ice の静電容量が低くなった原因と考えられる。また、同じ 77 K で測定された KP-LN<sub>2</sub> の静電容量よりも KP-Ice の静電容量の方が小さくなった。これは KP 内部を占有する物質の比誘電率の違いが原因と考えられる。一般的に、77 K における液体窒素と氷の比誘電率は 1.4 と 3 であるため、KP 内部に液体窒素と氷が同体積充填された場合、KP-Ice

の静電容量は KP-LN<sub>2</sub> よりも大きくなるはずである。しかし、今回の実験では絶縁紙-氷複合材料を作製する過程で液体窒素を用いて急冷却を行っているため、KP 内部の氷にはクラックが含まれている可能性がある。そのため、KP 内部の氷の比誘電率が液体窒素の比誘電率 1.4 以下となり、KP-LN<sub>2</sub> の静電容量よりも KP-Ice の静電容量の方が小さくなったと考えられる。また、図 6 に示すように同様の方法で作製した KP-Ice の交流破壊電圧は KP-LN<sub>2</sub> よりも高い実験結果を再現しているため、氷内部のクラックは絶縁破壊特性に顕著な影響を与えないほど微細なものであると考えられる。

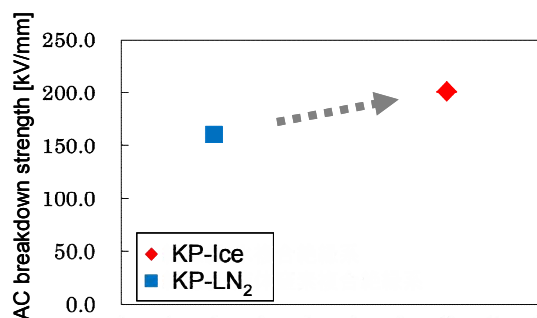


図 6. 紙-氷絶縁系 (KP-Ice) と紙液体窒素複合絶縁系 (KP-LN<sub>2</sub>) の交流絶縁破壊強度

図 7 に PP における静電容量の電界依存性を示す。PP-Ice、PP-LN<sub>2</sub>、PP-Air はいずれも同等の静電容量であることがわかった。これは PP は KP と異なり、無極性高分子であることと、緻密な材料構造であることが関係している。すなわち、PP の誘電率は温度によらず一定であることから静電容量に温度依存性が見られないことに加え、PP 内部には空孔が存在しないため、LN<sub>2</sub> の侵入や氷の生成が起こらなかったと考えられる。

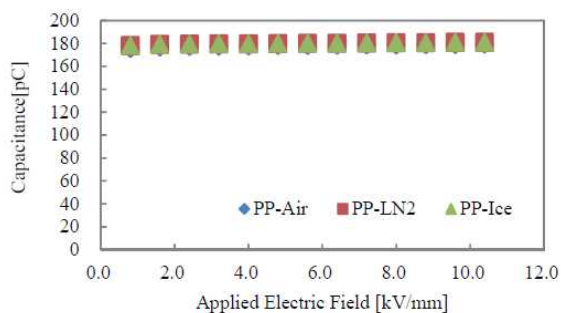


図 7. 様々な材料条件におけるポリプロピレン (PP) フィルムの静電容量の電界依存性

## (2) 多層絶縁紙の絶縁破壊特性

図 8 に液体窒素中における KP、PP film 及び PPLP の交流絶縁破壊の強さ (AC-Fb)、直流絶縁破壊の強さ (DC-Fb) 及びインパルス絶縁破壊の強さ (Imp-Fb) を示す。同図の縦軸は絶縁破壊の強さ (Fb) を表しており、本報告では各 Fb は絶縁破壊電圧を試料厚さで除した値と定義している。同図中のプロットおよびエラーバーは、平均値および標準偏差をそれぞれ示している。同図より、以下の特徴が確認できる。

- ① KP と PP film の各 Fb を比較すると、どれも PP film の方が KP よりも高い
- ② KP と PPLP の各 Fb を比較すると、どれも PPLP の方が KP より高い
- ③ AC-Fb における PPLP と PP film の Fb を比較すると、PPLP の方が PP film より低い。
- ④ Imp-Fb における PPLP と PP film の Fb を比較すると、PPLP の方が PP film より高い傾向にある。
- ⑤ DC-Fb における PPLP と PP film の Fb を比較すると、PPLP の方が PP film より高い (Imp-Fb より極性差大)。

上記について考察すると、①については、絶縁油中において PP film は KP より耐ストリーマ性がはるかに優れているため(1)、液体窒素中においても同様に、PP film は KP より高い Fb となったと考えられる。②については、PPLP は KP 層に挟まれた PP の高分子層の優れた絶縁性が寄与しているため、PPLP の Fb が KP より上昇したものと考えられる。③については、PPLP 中の KP はセルロース繊維の集合体であり、不純物の混入や繊維の微視的な希薄部などによる耐電圧弱点部を持つため、部分放電による劣化が起こり、AC-Fb が低下したものと考えられる。④については、PPLP は高分子層である PP 層に加えて、電気的な弱点部を持つ KP 層を含んでいるにも関わらず、PP film より Imp-Fb が高い傾向にある結果であり、複合絶縁紙特有の現象が起きていると考えられる。PPLP を構成する KP はセルロース繊維の集合体であり、PP film は高分子材料である。インパルス課電において PPLP は、KP 層でのストリーマの分散効果による先端電界の緩和と PP 層での優れた絶縁特性により、絶縁性能を向上させていると考えられる。⑤については、直流課電ではインパルス課電以上に PPLP と PP film において Fb の差が確認できた。これは、直流はインパルスより課電時間が長くなるため、KP 層でのストリーマの分散効果による先端電界の緩和がインパルス以上に影響したためであると考えられる。

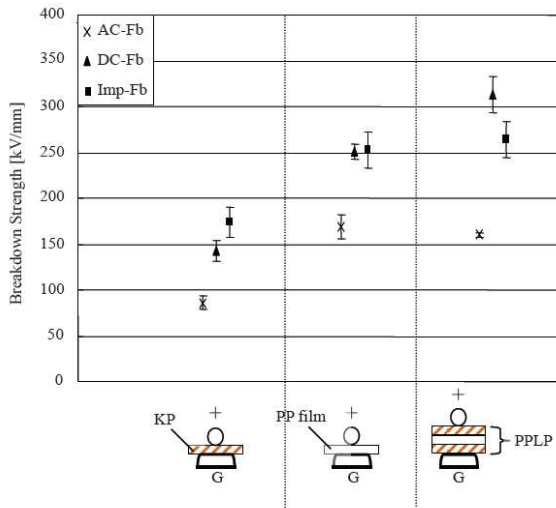


図 8. 各絶縁紙試料における正極性絶縁破壊特性

図 9 に液体窒素中における KP、PP film、PPLP の DC-Fb 及び Imp-Fb の極性における影響を示す。同図より、以下の特徴が確認できる。⑥ どの試料においても正極性課電時より負極性課電時の Fb が低い傾向にある。特に PPLP の DC-Fb においては極性による差が大きい。絶縁油中においては正ストリーマの方が負ストリーマより先端電界が高いため正極性課電時の方が負極性課電時より Fb が低くなると考えられるが、⑥はこれとは異なった結果である。液体窒素中では負極性課電時において、KP と PP film それぞれに何らかの Fb を低下させる要因があり、これが負極性直流課電時の PPLP においても影響していると考えられる。この結果については、次に示す実験結果と合わせてさらに考察する。

図 10 に液体窒素中における半 PPLP (KP-PP 二層試料) の DC-Fb 及び Imp-Fb を示す。同図より、以下の特徴が確認できる。

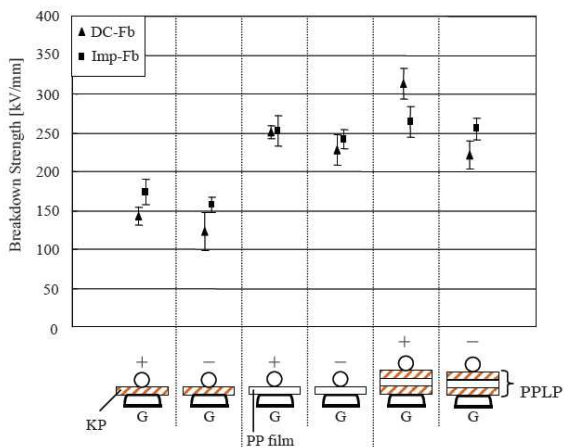


図 9. 各絶縁紙試料における絶縁破壊特性の極性差

⑦ 高圧電極側に KP がある構成(構成 I、II)ではインパルスと直流どちらも負極性課電時の方が正極性課電時より Fb が低下している。

⑧ 高圧電極側に PP がある構成(構成 III、IV)ではインパルスと直流どちらも正極性課電時の方が極性課電時より Fb が低下している。

⑨ 全ての構成で  $\text{Imp-Fb} > \text{DC-Fb}$  となっている。

⑦、⑧について、これらの結果を統一的に考えると、高圧側の極性に関らず KP が陰極側にある時の構成 II、IIIは、KP が陽極側である時の構成 I、IVに比べて、低い Fb を有していると考えられる。この結果を検討するために、液体窒素中において PP film は空間電荷の注入が起こりにくい試料であるとの考えに加え、KP は負電荷が侵入しやすい試料であるという考えを導入する。これによると、陰極側に KP がある構成 II、IIIは KP に負電荷が侵入し、試料全体の実効厚さが薄くなったため、Fb が低下していると説明できる。

さらに、液体窒素中において KP に負電荷が侵入するという考えの導入により、図 9 に

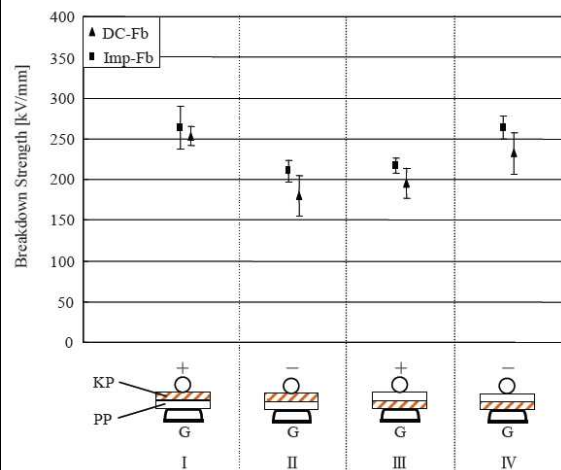


図 10. 半 PPLP 試料における絶縁破壊特性

において KP の Fb が負極性課電時の方が正極性課電時より低下した結果も説明できる。しかし、この考えについては、結果から推定したメカニズムであり、さらなる検討が必要である。⑨については、インパルスより課電時間の長い直流の方が KP への負電荷侵入が多いという点と PP film への電荷堆積が多いため、面積効果が影響していると考えられる。

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 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 ", 2011 Annual Report. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, pp.419-422 (2011)

[学会発表] (計5件)

- ① 川島朋裕、栗本宗明、村上義信、長尾雅行、稲垣 宏、芦辺祐一、広田博史:「絶縁紙-液体窒素複合系のインパルス絶縁破壊に及ぼす直流プレストレス効果」、平成24年電気学会全国大会 講演論文集 [2]、No. 2-13、 pp.15 (2012. 3. 23 at 広島大学(広島))
- ② 川島朋裕、栗本宗明、村上義信、長尾雅行:「液体窒素中における絶縁紙-氷複合材料の誘電特性」、平成23年度 電気関係学会 東海支部連合大会、 pp.M2-1 (2011. 9. 26 at 三重大学(三重))
- ③ T. Kawashima, M. Kurimoto, Y. Murakami, M. Nagao: " Dielectric Characteristics of Insulating Paper-Ice Composite Material in Liquid Nitrogen ", 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp. 433-436 (2011. 9. 9 at 同志社大学(京都))
- ④ 高橋良輔、栗本宗明、村上義信、長尾雅行、西村崇、芦辺祐一、増田孝人:「絶縁油及び液体窒素中における絶縁紙のインパルス絶縁破壊機構の検討」、平成23年電気学会 全国大会講演論文集(DVD-ROM)、No. 2-011、 pp.13 (2011. 3. 16 at 大阪大学(大阪)\*震災により中止し、論文公開のみ)
- ⑤ 高橋良輔、村上義信、長尾雅行、西村崇、芦辺祐一、増田孝人:「PPLP-液体窒素複合絶縁系のインパルス絶縁破壊機構の検討」、No. XIII-8、 pp. 320-325 (2010. 9. 13 at 琉球大学(沖縄))

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

[www.dei.ee.tut.ac.jp](http://www.dei.ee.tut.ac.jp)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長尾 雅行 (Nagao Masayuki)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科  
・教授  
研究者番号：30115612

(2) 連携研究者

村上 義信 (Murakami Yoshinobu)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科  
・准教授  
研究者番号：10342495