

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
研究期間：2006～2009
課題番号：18206029
研究課題名 (和文) 次世代パワーエレクトロニクスデバイス・機器のインバータサージ絶縁・評価技術の確立
研究課題名 (英文) Establishment of inverter surge insulation and evaluation technology in next generation power electronic devices and equipment
研究代表者 匹田 政幸 (HIKITA MASAYUKI) 九州工業大学 大学院 工学研究院 教授 研究者番号：40156568

研究成果の概要 (和文)：

ガス絶縁媒体を用いたパワー半導体デバイスの 450℃までの高温・高電圧 (1.2 kV) 環境でのパッケージ手法を提案し、ガスの種類、圧力、それらの放電基礎的特性の実験調査およびパッケージ試作を行った。SiC (シリコンカーバイド) インバータ開発を行いモータ駆動に成功し、600W 級の電気自動車システムに搭載し動作することを示した。光学的検出、電磁波検出を用いたインバータサージにおける部分放電自動計測システムを構築した。本システムを用いて、相対湿度は部分放電開始電圧に影響する最も大きな要因であることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

A package method using gas insulated medium is proposed for power semiconductor devices in the high temperature range to 450 degree C and high voltage (1.2 kV) region. Experiments were performed on discharge inception properties by changing kind and pressure of gas medium, and a prototype package was made. In addition, SiC inverter was developed so as to succeed in driving a motor. The inverter was installed in an electric vehicle system with 600 W class. Furthermore, a partial discharge measuring system for inverter surge was constructed using optical and electromagnetic detection sensors. It was found that relative humidity gives the most significant effect on partial discharge inception voltage.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2007 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
総計	30,300,000	9,090,000	39,390,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気・電力工学・電気機器工学

キーワード：パワーエレクトロニクス・インバータサージ絶縁・繰返しインパルス・部分放電
シリコンカーバイド

1. 研究開始当初の背景

半導体パワーデバイスや制御回路、保護回路などの関連装置はモジュール化されて、小型・軽量化・高性能化ならびに高信頼性化が進んでいる。これに伴い、デバイスや関連機器の高電圧化、大容量化、高周波化に関連した絶縁劣化や、新たな電磁氣的・機械的・熱的な複合現象が認識されてきており、それらの改善を踏まえたパワーモジュールにおける絶縁設計の向上が技術課題となっている。例えば、現在のパワーデバイスのパッケージでは、スイッチング時の降伏電流により 300~350°C 以上に上昇するが、絶縁材料やハンダ・ボンディングなどの周辺部品の耐熱制約により 170°C 以上の高温実装技術はない。さらに、次世代パワーデバイスとして期待され超低損失素子である SiC パワーデバイスの電力システムなどの大容量・高耐圧用途のためには、SiC 半導体そのものの開発と同時に、パッケージ技術や高温動作も重要な検討項目となっている。

これまで国内外で、パワーエレクトロニクスデバイスのモジュール絶縁に関して、シリコンゲルやエポキシ樹脂に対して絶縁破壊電圧と部分放電開始電圧を室温・商用周波数電圧にて測定した結果が報告されている。一方、国内において、基板材料として、窒化アルミ、アルミナ、窒化けい素などの電気絶縁セラミックスの直流、雷インパルス電圧下で 200~600°C までの絶縁破壊特性が報告されているが、実際の IGBT のスイッチング周波数である ~20kHz や次世代 SiC デバイスでは ~200kHz となる繰返し高電圧インパルスによる絶縁特性や長期信頼性評価に関するデータは、国内外とも、これまで報告・公表されていなかった。

一方、インバータは半導体スイッチ動作過程において発生する過電圧（サージ）により、制御装置で駆動されるモータなどの絶縁を悪化させるとともに、EMI などこれらの機器周辺に設置されている各種機器にも悪影響を及ぼす場合がある。電気自動車などのモータ制御では、走行期間中に一度も部分放電が発生してはならないという極めて厳しい要求があり、インバータサージに対するモータ絶縁の部分放電開始電圧は、モータの絶縁設計や長期信頼性にとって極めて重要である。わが国ではサージ電圧での部分放電の計測技術は未確立であり、放電開始条件や機器絶縁劣化現象も十分理解されていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、SiC（シリコンカーバイド）パワー半導体を用いた次世代パワーエレクトロニクスデバイス・機器システムを実用化する際に、必ず解決すべき問題となるスイ

ッチングに伴うサージ電圧（インバータサージ電圧）下での次の 2 つの主課題について解決し、次世代パワーエレクトロニクス機器の速やかな実用化・普及に貢献することを目的とする。

① SiC（シリコンカーバイド）パワー半導体デバイスのパッケージの高電界・高温領域における絶縁システムの最適設計手法の確立、信頼性評価法の提言、およびパッケージの試作。

② 次世代パワーデバイスを用いたインバータシステム構築およびインバータ・モータにおける電磁障害（EMC）の評価および抑制手法の提案、インバータサージ下での部分放電（PD）現象解明と計測法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 最適な絶縁ガス媒体の探索

本研究で提案する新しいパッケージの構造は、半導体素子が搭載されたセラミック絶縁基板の周辺をガス絶縁し、密封を行う。使用するモデル試料は図 1 に示す半導体素子の基板として用いられる DBC 試料である。実際に素子を実装するときは、この銅電極上に配置する。DBC 試料の上面の中央部と横部の電極よりアルミ線によるボンディングを行った。この DBC 試料を図 2 に示す高耐圧・高耐熱のブッシングを有する真空用のスチール容器内の平板電極上に配置した。さらに、図 3 に示すように、ガス導入・排気系、高電圧電源、放電測定器、高温槽及びスチール容器(真空用)で構成されている高温電気絶縁特性評価システムを構築した。

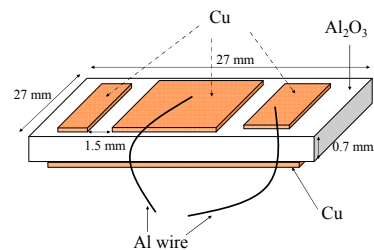


図 1 DBC 基板とアルミ配線

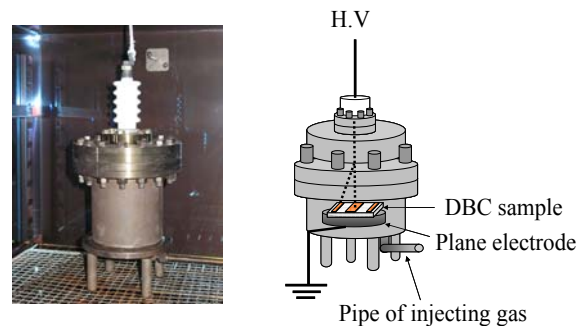


図 2 スチール容器

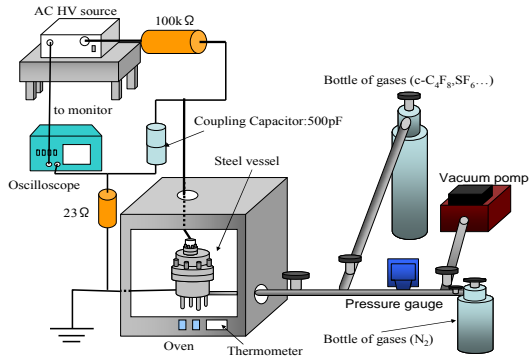


図3 ガス絶縁媒体の高温高電圧環境下での電気絶縁特性評価試験実験回路図

高温（室温～450℃）高電圧（±20 kV）環境下での試験を可能にするように設計・製作されたガス媒体の電気絶縁特性評価装置（図3）を用いて、種々の絶縁ガス媒体の電気絶縁特性、特に部分放電開始電圧（partial discharge inception voltage: PDIV）を測定した。

(2) ガス絶縁パッケージングしたパワーデバイスの試作および特性・信頼性評価

図4に、本研究にて次世代パワー半導体デバイス用として、新たに高温高耐圧ガス絶縁パッケージの試作品として設計・開発した小型スチール容器の外観を示す。また、図4に、SiC Schottky Barrier Diode (SiC SBD 600 V : 1 mm×1 mm, 厚さ 0.3 mm) をはんだにて接着しアルミワイヤボンディングを行った DBC基板を入れた小型スチール内部の様子を示す。

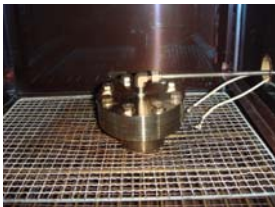


図4 小型スチール容器

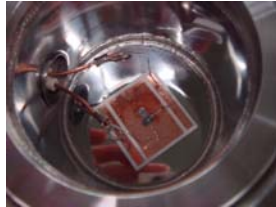


図5 SiC SBDとDBC基板を入れた小型スチール

(3) 次世代パワーデバイスを用いたインバータおよび電気自動車製作と特性評価

次世代パワーデバイスを用いたインバータを製作するため、VJFET および MOSFET SiC デバイスのスイッチング特性の測定を200℃の高温領域まで行い、Si デバイスとの比較を行った。さらに、SiC インバータの設計およびゲート駆動回路や保護回路を製作した。回転速度制御機能を付加してモータ駆動に成功した。また、開発した SiC インバータを 600W 級の電気自動車システムに搭載し、電気自動車の試作を行った。

(4) インバータサージにおけるデバイス・機器の絶縁評価技術確立

インバータサージにおける部分放電 (PD) の自動計測システムを構築した。国際電気標準規格 IEC61934TS で新たに提唱された繰返し PDIV (RPDIV) をエナメルツイストペア試料に対して、発光測定による光学的検出、狭帯域平面アンテナ電磁プローブおよびホーンアンテナによる電磁波検出を用いて測定評価し、比較検討した。

4. 研究成果

(1) 最適な絶縁ガス媒体の探索

本研究では、これらのガスを含み高温高耐圧パッケージ用ガス絶縁媒体の適用を検討した結果、絶縁耐力、無毒性、GWP、沸点（液化温度）、分解温度、操作性などの調査項目から、N₂、SF₆、c-C₄F₈、C₃F₈を対象として選定し、パッケージ用の最適ガス絶縁媒体としての適応性について調査を行った。図6に、ガス単体（N₂、SF₆、c-C₄F₈、C₃F₈）についてPDIVの温度依存性を示す。

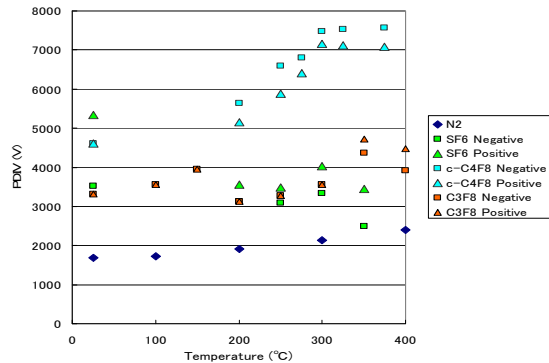


図6 ガス単体（N₂、SF₆、c-C₄F₈、C₃F₈）のPDIVの温度依存性

以上の結果、室温時のPDIV値は全てのガスにおいて、1.5 kV以上を有しており、N₂、SF₆、c-C₄F₈の順に高くなった。高温時ではPDIV値が増加あるいは低下する場面が見られたが、1.2 kV以上の耐圧は有していることが分かった。

(2) ガス絶縁パッケージングしたパワーデバイスの試作および特性・信頼性評価

図7(a)および(b)に、SiC SBD (ショットキーバリアダイオード) の高温時における順方向および逆方向の電流-電圧特性をそれぞれ示す。順方向では温度の上昇に伴って、低い電圧で電流が立ち上がる結果となった。逆方向電圧については、300℃までは逆方向の電流はほぼ0の値を示した。400℃では電圧の増加に伴い、逆方向の電流が増加していることがわかる。図7からわかるように、逆方向においては400℃において、ショットキーバリア高さの減少によると考えられる逆方向電流の増加が見られている。

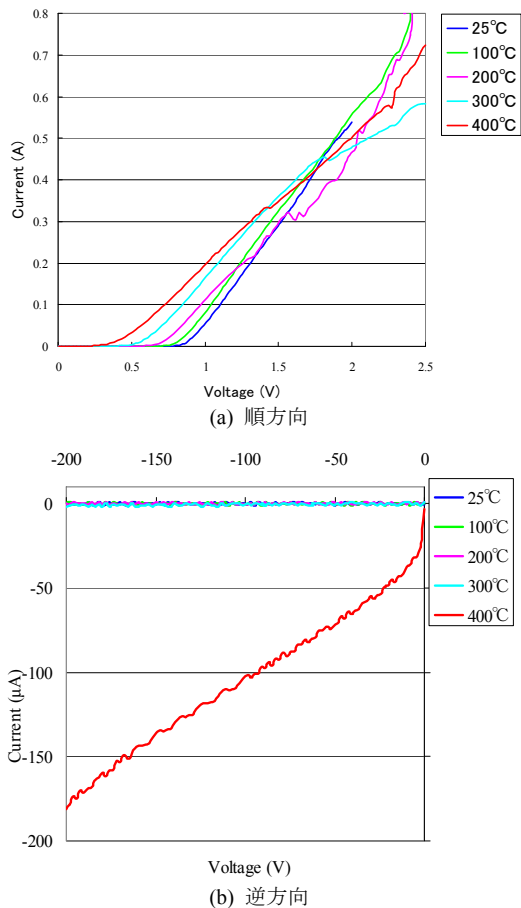


図7 SiC SBDの高温時における順方向の電流-電圧特性

さらに、ガス絶縁パッケージのプロトタイプとして、図4および図5のような、高温高圧用半導体パワーデバイス用の高電圧端子を付けたステンレス製のガス絶縁パッケージのプロトタイプを設計・製作した。実際のガス絶縁パッケージでは、蓋フランジの部分は使用せず、パッケージ封じ切りの部分より下部の構造となる。

(3) 次世代パワーデバイスを用いたインバータおよび電気自動車製作と特性評価

次世代パワーデバイスとして注目されているSiCデバイスを用いたインバータシステムにおける電磁障害 EMI・EMC を評価するためSiCインバータを開発した。本研究では、VJFETおよびMOSFET SiCデバイスのスイッチング特性の測定を200°Cの高温領域まで行い、Siデバイスとの比較を行った。図8に、SiC-MOSFETのスイッチング波形の一例を示す。

その結果、Si IGBTデバイスと比べて高速かつ低損失な特性が明らかとなった。これらのSiCデバイスの特性の測定を活用して、SiCインバータの設計およびゲート駆動回路や保護回路を付加してSiCインバータ開発を行い、回転速度制御機能を付加してモータ駆動

に成功した。また、開発したSiC-VJFETインバータを600W級の電気自動車システムに搭載し、SiCインバータ駆動による電気自動車の試作を行った。図9に電気自動車の主回路システムブロック図を示す。また、図10に製作したSiCインバータ駆動の電気自動車を示す。スイッチングデバイスとしてSiCE社のSiC-Cascode素子(SiC-VJFET, 耐圧1500V, 5A)をインバータ回路製作に用いた。ゲート駆動回路はブートストラップ方式の駆動回路を採用し、International Rectifier社のHVIC (IR2106PbF)を用いて駆動回路を作製した。バッテリーは24V (12V×2)の鉛蓄電池、モータは600WのACサーボモータを使用している。

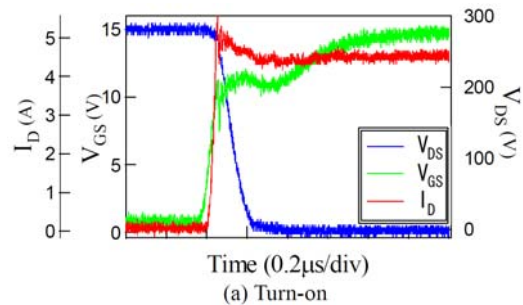


図8 SiC-MOSFETのスイッチング波形

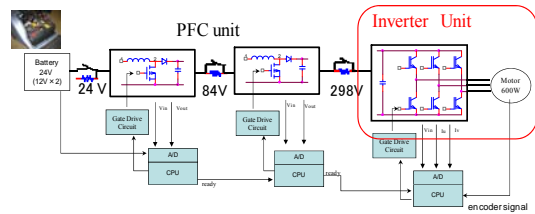


図9 電気自動車の主回路システムブロック図



図10 SiCインバータ駆動の電気自動車 (24Vバッテリー駆動)

さらに、SiC-MOSFET (耐圧600V, 10A)のスイッチング特性を測定し、SiC-MOSFETを搭載したインバータを作製しSiC-MOSFETインバータの動作を確認できた。インバータの入力電圧を96Vとして高圧化させモータ駆動時の特性を評価し、SiC-MOSFETインバータを電気自動車へ搭載し、動作することを確認した。

(4) インバータサージにおけるデバイス・機器の絶縁評価技術確立

モータ巻線絶縁を模擬したエナメルツイ

ストベア試料を対象として、インバータサージによる部分放電 (PD) 計測システムを製作した (図 11)。当初は、PD 検出センサとして、放電の発光を観測する光電子増倍管 (PMT) を用いる光学的手法の他に、電気的手法では、試料と直列に接続されたコンデンサ (直列コンデンサ検出法) を用いた。

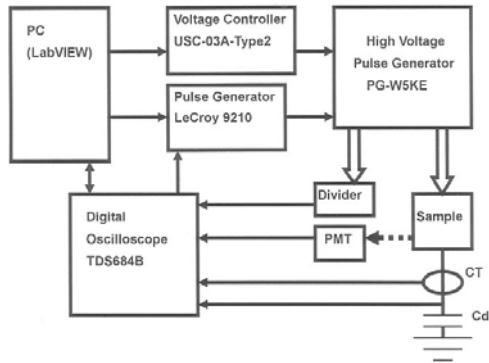


図 11 インバータサージによる部分放電計測システム

この PD 計測システムを用いたインバータサージ下での PD 測定に関しては、インバータサージを模擬した繰返し両極性インパルス電圧下での部分放電開始電圧 (Partial discharge inception voltage : PDIV) において、実験初期では PDIV がばらつく過渡状態から、PDIV が一定値に収束する安定状態へ変化する PDIV 特性変化を実験的に見出し (図 12)、その要因を検討した。特に、PDIV がインバータサージ電圧印加初期より安定して測定すべきプリストレス電圧値・時間について実験により詳細に検討を行った。

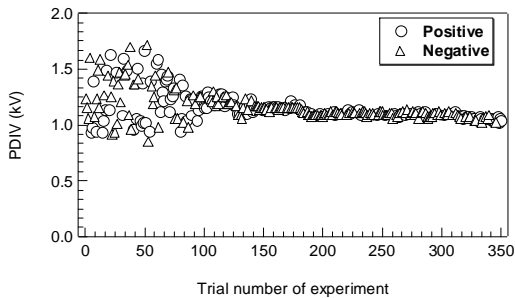


図 12 インバータサージ電圧下での部分放電開始電圧 (PDIV) の実験回数依存性

一方、PD 検出として用いた発光測定による光学的検出、中心周波数 1.8GHz の狭帯域平面アンテナ電磁プローブおよびホーンアンテナによる電磁波検出上記の 3 つの検出法はいずれも ns 領域で十分な応答速度があることがわかった。さらに繰返しインパルス電圧印加時の部分放電開始電圧 (Repetitive partial discharge inception voltage: RPDIV) がほぼ等しいことがわかり、RPDIV の標準的な測定法の提案に至った。

また、RPDIV の温度・湿度効果の詳細デー

タが取得された。特に相対湿度は RPDIV 測定値に影響する最も大きな要因である。このメカニズムとして絶縁皮膜の水分吸収による誘電率増加や表面抵抗の低下として解釈した。

また実用上的には簡便で可搬型の計測器が好ましい。そのため電池駆動の小形パッチアンテナ、信号モジュールと小形データロガーを組み合わせた放電モニタを試作した。図 13 に外観を示す。



図 13 試作部分放電モニタの外観図

測定感度を検討した結果、数 m 先のモータ内部分放電を検出できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

① K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Hikita, “PDIV Characteristics of Twisted-Pair of Magnet Wires with Repetitive Impulse Voltage”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, vol.14, No.3, pp.744-750 (2007.3)

〔学会発表〕 (計 38 件)

① 匹田政幸 「インバータサージ電圧における部分放電計測の現状と動向」平成22年電気学会全国大会シンポジウム, 東京 (2010.3.17)

② 木村健 「IEC規格化の現状」平成22年電気学会全国大会シンポジウム, 東京 (2010.3.17)

③ 中西啓太, 木村健 「繰返しインパルスパターンのRPDIVへの影響」平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010.3.17-19)

④ 河野大樹, 陳玉, 小迫雅裕, 大塚信也, 大村一郎, 匹田政幸, Thierry Lebey 「高電圧高温半導体用ガス絶縁パッケージングの開発に向けた予備的検討」平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010.3.17-19)

⑤ M. Hikita, K. Yamaguchi, M. Fujimoto, M. Kozako, S. Ohtsuka, M. Ohya, K. Tomizawa, “Partial Discharge Endurance Test on Several Kinds of Nano-Filled Enamelled Wires Under High-Frequency AC Voltage Simulating Inverter Surge Voltage”, CEIDP2009, Virginia Beach, USA (2009.10.18-21)

⑥ 前田貴久, 神谷隆志, 木村健 「繰返しインパルスの波尾領域での部分放電現象」平成

21年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 浜松 (2009.9.10-11)

⑦ 木村健, 匹田政幸, 早川直樹, 永田正義, 門脇一則, 村上義信「繰返しインパルスに対する部分放電開始電圧(RPDIV)測定の第1次共同実験(RRT)」第40回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 松江 (2009.8.26-28)

⑧ 中西啓太, 戸田有紀, 宮田慎哉, 木村健「繰返し部分放電開始電圧(RPDIV)の自動計測システムと湿度・気圧の影響」第40回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 松江 (2009.8.26-28)

⑨ 山口浩平, 工藤祐紀, 藤本真人, 小迫雅裕, 大塚信也, 匹田政幸, 大矢真, 富澤恵一, 伏見典善「インバータサージ電圧を模擬した高周波交流高電圧下のナノコンポジットエナメル線の部分放電特性の予備的検討」第40回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 松江 (2009.8.26-28)

⑩ 岡田真一, 山口浩平, 藤本真人, 小迫雅裕, 大塚信也, 木村健, 匹田政幸「インバータサージ模擬電圧印加がエナメル線クロス試料のPDIVに及ぼす影響」平成21年電気学会全国大会, 北海道 (2009.3.17-19)

⑪ S.Okada, K.Fukunaga, K.Yamaguchi, S.Ohtsuka, K.Kimura, M.Hikita, “Comparison of Electromagnetic Wave, Light Intensity and Electric Charge of PD on Crossed Magnet Wires under Repetitive Impulses”, CEIDP2008, Quebec City, Canada (2008.10.26-29)

⑫ 吉永啓祐, プーンヤケットソムパッタナー, 牧健太郎, 原田克彦, 大塚信也, 匹田政幸「SiC-VJFETのスイッチング特性およびインバータの製作」平成20年電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, 北九州 (2008.10.23-24)

⑬ K.Kimura, S.Okada, M.Hikita, “Electromagnetic Wave in GHz Region of PD Pulses under Short Rise Time Repetitive Voltage Impulses”, GA-2, p196, ISEIM2008, Mie (2008.9)

⑭ プーンヤケットソムパッタナー, 吉永啓祐, 牧健太郎, 原田克彦, 大塚信也, 匹田政幸「SiC-VJFETを用いたインバータシステムの構築と電気自動車の駆動」平成20年電気学会産業応用部門大会, 高知 (2008.8.27-29)

⑮ A.Kikuchi, K.Yoshinaga, K.Harada, S.Ohtsuka, M.Hikita, “Switching Characteristics of SiC-VJFET for Inductive Load”, International Seminar of Doctoral Students on Clean, Kitakyusyu, Japan (2008.2.1)

⑯ K.Fukunaga, S.Okada, S.Ohtsuka, M.Hikita, K.Kimura, “RPDIV/RPDEV Characteristics of Twisted-pair under Repetitive Bipolar Impulse Condition”, CEIDP2007, Vancouver, Canada (2007.10.14-17)

a (2007.10.14-17)

⑰ 菊池章文, 吉永啓祐, 原田克彦, 大塚信也, 匹田政幸, 「インダクタンス負荷におけるSiC-VJFETのスイッチング特性」平成19年電気学会産業応用部門大会, 大阪 (2007.8.20-22)

⑱ 岡田真一, 福永顕一, 山口浩平, 大塚信也, 木村健, 匹田政幸「繰返しインパルス電圧下のエナメル線クロス試料におけるPD電磁波・発光強度・電荷量の相互比較」第38回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 東京 (2007.11.22)

⑲ 福永顕一, 大塚信也, 木村健, 匹田政幸「インバータサージ下での部分放電消滅電圧測定装置の構築」平成18年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 熊本 (2006.8.21-22)

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

名称: 電子部品パッケージ

発明者: 匹田政幸, 大村一郎, Thierry Lebey

権利者: 匹田政幸, 大村一郎, Thierry Lebey

種類: 特願

番号: 特願 2009-169960

出願年月日: 2009.07.21

国内外の別: 国内

名称: エッチング試験方法

発明者: 匹田政幸, 大村一郎, Thierry Lebey

権利者: 匹田政幸, 大村一郎, Thierry Lebey

種類: 特願

番号: 特願 2010-13961

出願年月日: 2010.01.26

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

匹田 政幸 (HIKITA MASAYUKI)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40156568

(2) 研究分担者

木村 健 (KIMURA KEN)

奈良工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号: 10363409