

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420273

研究課題名(和文) 超臨界流体を利用し大電力・高速スイッチの検討および機能性評価

研究課題名(英文) Research of functional evaluation of high-power, high-speed switch using a supercritical fluid

研究代表者

喜屋武 毅 (KIYAN, Tsuyoshi)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：40381016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超臨界流体を電力システムでの超臨界プラズマスイッチとしての機能性を評価することを目的とした。まず初めに、超臨界流体の高負荷に対して出力波高値が80 kVに達するパルス電源を製作し、超臨界状態を含む加圧窒素の絶縁破壊特性、系の回復特性とアーク放電による衝撃波の進展速度の見積を実施した。実験結果より、衝撃波の進展速度は約400 m/s(実験条件での音速の1.25倍)と推定され、実際に制御可能な超臨界トリガトロンを設計・製作し、流体スイッチの稼働を検証した結果、絶縁回復比はバラつきこそあるものの概ね1.0を示し、超臨界窒素のトリガトロンは約1 kHzまで稼働できる可能性が見いだされた。

研究成果の概要(英文)：In this study, our aim is the evaluation of the functionality of the supercritical switches using nitrogen in pulsed power system. In a series of experiments, we carried out the visualization of a pulsed discharge with shock wave and the estimate of propagation speed, the dielectric breakdown characteristics of pressurization nitrogen, the recovery characteristics of a system, in high pressure nitrogen including the supercritical state. From the experimental results, the propagation speed of the shock wave was estimated to be about 400 m / s (1.25 times the speed of sound in the experimental conditions). In order to verify the operation of the fluid switch, supercritical switch was designed and manufactured that can be controlled by frequency. Dielectric recovery ratio represents roughly 1.0 which responds to the state of a system being recovered. It was found that the possibility to operation of the trigatron of supercritical nitrogen can run up to about 1kHz.

研究分野：放電工学

キーワード：超臨界流体 誘電特性 流体スイッチ パルスパワー

1. 研究開始当初の背景

超臨界流体中における放電プラズマの研究が盛んに行われているが、歴史は古く、1950年代に二酸化炭素の臨界温度以上である 306.15 K、密度 0.1 ~ 700 kg/m³ (圧力範囲: 0.1 ~ 9 MPa) 範囲で直流絶縁破壊電圧と破壊前駆現象が調査されている。その当時は、超臨界流体の存在自体が研究途上にあり、高加圧流体として捉えられていた。また、1969年に窒素の臨界温度以上にある常温および圧力 0.1 ~ 20 MPa の範囲で、平等電極を用いて直流絶縁破壊電圧を測定し、その破壊機構はカソード電極からの電界放出であると述べられている。さらに、超臨界ヘリウム中での放電研究では、擬似臨界点を境にして破壊機構が変わると考えられ、擬似液体と液体中における絶縁破壊電圧がほぼ等しく密度依存性が少ないことから、これらの媒質中では気泡破壊機構でないと推定されている。いずれも、興味深いデータであるが、超臨界流体中での破壊機構に関しては、まだ不明瞭な部分が多く残されている。

一方で、超臨界流体の特異な特性が詳細に調べられ、材料合成、化学反応等の多くの研究がなされている。超臨界流体はマクロ的には、気体並みの高拡散性を有し、液体並みの高溶解性および高密度性を兼ね備え、さらにミクロ的には、各分子による熱運動とその分子間力の拮抗に基づき、ピコ秒のタイムスケールで集合・離散を繰り返す。それに伴う局所的な密度増加 (分子クラスターリング) と密度勾配 (密度揺らぎ) の現象など放電プラズマの雰囲気流体として非常に興味深い。

近年では、2002年に寺島らは、超臨界二酸化炭素中での微小電極長 (1 μ m, 2 μ m) による研究において、絶縁破壊電圧が臨界点近傍においてタウンゼント理論から導かれるパッシェン曲線から大きくはずれ、超臨界近傍で電圧低下が起こるといった報告がされた。その後の動向として、超臨界流体と放電プラズマの融合の応用は、放電化学、材料工学の分野で大きな可能性があるとして期待され、盛んに研究されている。

申請者はこれまで超臨界領域まで加圧された CO₂ や亜臨界 H₂O 中での放電特性や破壊前駆現象を研究してきた。特に、超臨界 CO₂ 中での針対平板電極による直流電圧の破壊特性や極性効果、シュリーレン可視化法によるパルス放電の破壊前駆現象の観測、球対球電極による破壊電圧特性のワイブル統計評価など、超臨界流体中の放電現象ならびに放電機構が明らかにありつつある。また、シュリーレン法による超臨界 CO₂ 中での非熱平衡プラズマの可視化に成功し、超臨界二酸化炭素中での初期の放電電流の立ち上がり時間が数百ピコオーダーであることも確認された。これまでに得られた知見と実験的検証より、超臨界流体の特異な熱・誘電特性は、大電力システムへの超臨界プラズマスイッチとして可能性を有している。

2. 研究の目的

本研究では申請者らが見出した超臨界流体中での放電プラズマの諸特性から、超臨界流体中での放電プラズマの電気特性を大電力・高速・高繰り返し可能な電源の超臨界プラズマスイッチや超臨界流体コンデンサとして利用することを念頭に、超臨界流体中の放電プラズマの生成・制御と短絡特性評価を行い、特に、流体容器を含めたパルス回路のパラメータを最適化して極短パルス電源システムの超臨界プラズマスイッチング特性や誘電特性を評価し、大電力システムへの超臨界プラズマスイッチや超臨界コンデンサの組込を確立することが目的である。

3. 研究の方法

超臨界 CO₂ 中での直流やパルス放電による研究成果を踏まえて、新たに超臨界 N を加え、極短パルス電源システムの流体スイッチや流体コンデンサとして、スイッチング特性や誘電特性を解明し、新規の大電力・高繰り返しパルス電源システムのスイッチングデバイスとしての機能性の評価を実施する。研究の柱として、以下の三点を検討課題とした。

- パルス放電特性の評価と超臨界プラズマの生成・制御
- 超臨界トリガトロンを備えたパルス電力システムの検討・構築
- 環境負荷の少ない物質変換プロセスの検討 (バックアッププラン)

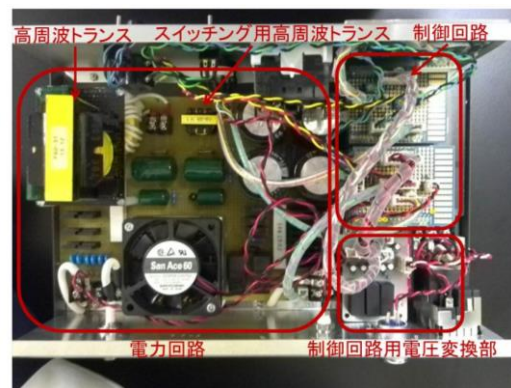


図 1 LLC 共振方式のインバータ回路による高速直流充電器

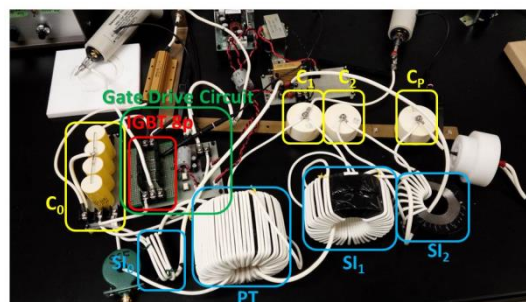


図 2 磁気パルス圧縮(MPC)方式による高繰り返しパルス電源

研究初年度の計画・方法として、超臨界トリガトロンや流体コンデンサを大電力・高繰り返し可能な電源のデバイスとして利用することを念頭に、高耐圧・高圧力を備えた超臨界リアクタの設計・製作と超臨界流体中での放電特性試験の準備を実施した。

これまでに得られた知見をもとに放電容器を含めたパルス電源回路の最適化を行い、観測窓を備えた高圧装置の設計・開発(TOYO KOATSU)と、高速直流充電器(図1)ならびに高電圧パルス電源(図2)の自作を実施した。直流電源として、LLC共振方式のインバータ回路による高速直流充電器、パルス電源として、パルス幅500ns、最大出力電圧80kVを有する磁気パルス圧縮方式による高繰り返しパルス電源の開発を行った。スイッチング特性や流体の回復特性を調査するため、放電プラズマの繰り返し周波数を組込み制御方式(プログラムによる書き替え可能なシステム)の回路構成とした。

図3、図4にそれぞれ、実験装置の構成概念図と実際の実験装置のセッティングの様子を示す。実験環境は、高圧容器(TOYO KOATSU), 高速直流充電器, MPC方式パルス電源, Nd:YAG レーザ (Continuum Minilite II : 532 nm), ディレイジェネレータ (Quantum Composers: Sapphire 9200), CCDカメラ (APS-C CCD sensor, 総画素数1490万画素), オシロスコープ (Tektronix : DPO 3034), 電圧計測プローブ (NISSIN PULSE : EP-50K), 電流計測プローブ (Peason Electronics. : CT 5046) で構成されている。

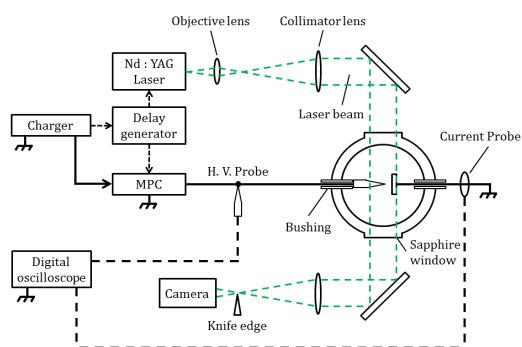


図3 実験装置の概略図

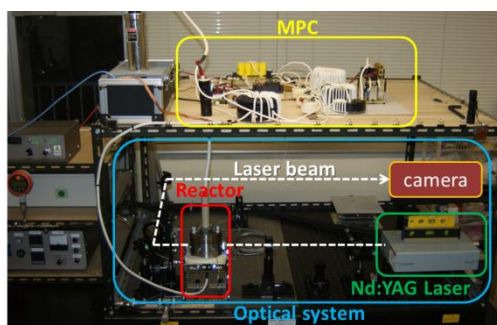


図4 実験装置のセッティングの様子

4. 研究成果

超臨界状態を含む高加圧窒素の絶縁破壊特性を調査するため、高圧容器内に配置した針対平板電極($d : 800 \mu\text{m}$, $r : 130 \mu\text{m}$)における圧力条件 $P=12.69 \text{ MPa} \sim 0.4 \text{ MPa}$ の絶縁破壊電圧, 電流と, 平板対平板電極 ($d : 430 \mu\text{m}$)における圧力条件 $P=4.15 \text{ MPa} \sim 2.5 \text{ MPa}$ での絶縁破壊電圧, 電流の測定を実施した。図5は、加圧窒素中における各圧力の絶縁破壊電圧 V_b と電流 I の平均値を示している。臨界圧力 P_c 付近は気相と超臨界相に変化する領域のため、圧力を細かく刻んで、データを測定した。図5より全体的に破壊電圧データのばらつきが存在するが、臨界圧力近傍(気体～超臨界状態)では、ばらつきが小さく、高加圧時(超臨界状態)にはばらつきが大きくなる超臨界特有の特徴が見られた。図6に針対平板電極にパルス電圧を印加したときの衝撃波進展の様子を示す。放電前の電極の様子はリファレンスである。観測時の条件は、針電極と平板電極の間隔は $800 \mu\text{m}$, 針電極の先端曲率半径は約 $130 \mu\text{m}$, 圧力は 4.0 MPa である。パルス電源にトリガ信号入力したときを $t = 0 \text{ s}$ とし、約 $2 \mu\text{s}$ 毎にシュリーレン画像を記録した。 $t = 160 \text{ ns}$ 時にアーク放電とその周りの黒い部分に低密度領域

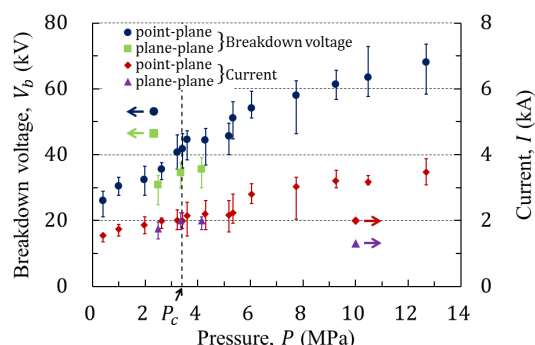


図5 超臨界状態を含む加圧窒素の絶縁破壊電圧, 電流特性

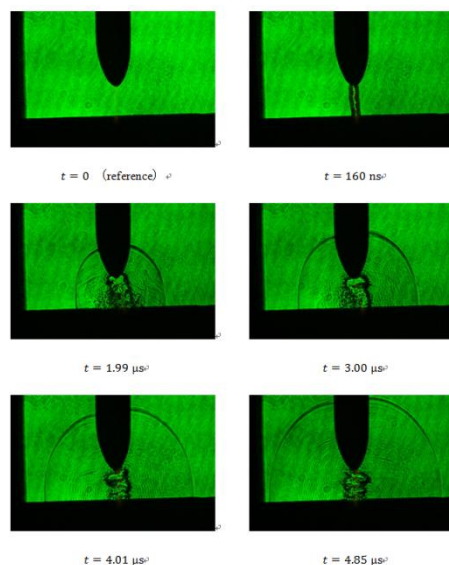


図6 針対平板電極にパルス電圧を印加した時の衝撃波進展の様子(シュリーレン)

域が観測された。低密度領域の幅は約 280 μm で、 $t = 1.99 \mu\text{s}$ 時に、低密度領域の周辺に放射状に衝撃波が発生していることがわかる。衝撃波のエッジの進展から、衝撃波の進展速度は約 400 m/s で、実験条件における音速の 1.25 倍と推定された。

超臨界窒素の流体スイッチとしての機能性を評価するために、絶縁破壊後の系の状態回復をはかる指標として、媒質の雰囲気流体に対する絶縁破壊電圧の相対比 R_p を以下のように定義した。

$$R_p = V_{b2}/V_{b1}$$

ここで、 V_{b1} 、 V_{b2} はそれぞれ、連続した印加電圧に対する 1 回目の破壊電圧値と 2 回目の破壊電圧値を表す。図 7 に印加電圧に対する絶縁破壊時の連続する破壊電圧の概念図を示す。 V_{b1} が V_{b2} と等しい場合、 R_p は 1 近

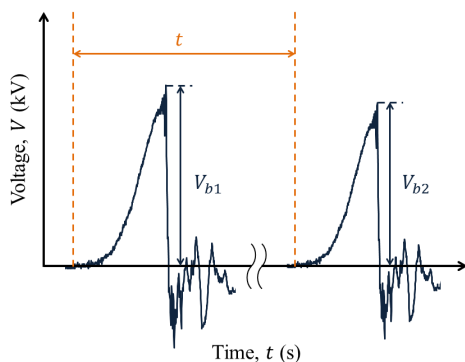


図 7 連続する印加電圧に対する絶縁破壊の概念図

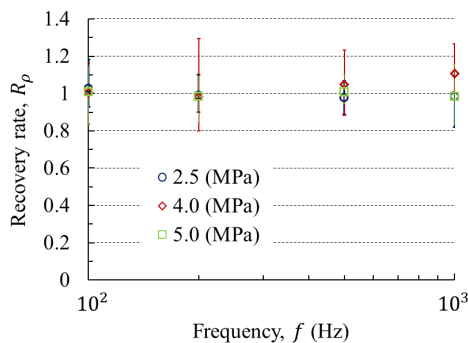


図 8 周波数に対する系の誘電回復特性

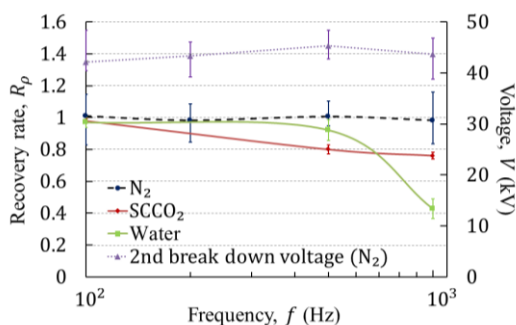


図 9 各メディアと窒素のデータ比較

傍になり、1 回目の絶縁破壊後から 2 回目の絶縁破壊が起こるまでに、雰囲気流体として用いている系の状態が回復しており、 V_{b1} より V_{b2} が低い場合、 R_p は 1 未満となる。つまり、 R_p が 1 に近いほど、流体スイッチの再現性が良好であることを示す指標となる。系の誘電回復特性に対する印加電圧の周波数依存性を検討するために、直流充電器と MPC 方式パルス電源をディレイジェネレータ、外部トリガを使って同期させ、パルス電源のトリガ信号のタイミングを制御することで、印加電圧の時間間隔を可変とした。一連の実験では、周波数 100, 200, 500, 1000 Hz におけるデータ測定を媒質温度 $T = 298 \text{ K}$ 一定のもと、圧力条件は臨界圧力近傍の 2.5, 4.0, 5.0 MPa で実験を実施した。図 8 は周波数に対する系の誘電回復特性として、縦軸は回復比 R_p 、横軸は放電間隔の時間幅から算出した繰り返し周波数 f をそれぞれ示している。各圧力条件 2.5, 4.0, 5.0 MPa のもとで実験を行った結果、二次絶縁破壊電圧 V_{b2} は殆ど低下せず、加圧窒素の超臨界状態は 1 kHz でも絶縁回復比 R_p が 1 より減少しないことが確認された。図 9 は、5.0 MPa 加圧時における超臨界窒素の二次絶縁破壊電圧及び、大気圧水や超臨界二酸化炭素の回復特性と本研究の加圧窒素の誘電回復特性の実験データを比較した結果である。放電間隔から見積もられた周波数 f が 1 kHz のとき、水の回復比が約 0.4、超臨界 CO_2 は約 0.8 となっている。しかし、加圧窒素の絶縁回復比はバラつきこそあるものの概ね 1.0 を達成し、さらに、超臨界窒素の 2 回目の絶縁破壊電圧も低下しないことが示された。この結果より加圧窒素が他の媒質と比較して絶縁回復特性が優れていることが伺える。

実際の電力システムに流体スイッチを用いる場合、安定的なスイッチング制御が要求される。自爆型のクロージングスイッチでは、制御パラメータの流体圧力やの電極間隔を変更することで受動的な制御は可能である。しかしながら、精度の高い周波数制御を要求する場合、スイッチング制御を簡単に行えるトリガトロン型ギャップスイッチが有効である。

これまでの実験の結果から、超臨界窒素は優れた誘電回復特性を持っている可能性が示された。そこで、流体スイッチの媒質として超臨界窒素を用いた高繰り返し制御可能な超臨界トリガトロンの設計・製作を行い、流体スイッチとしての機能性を検証した。

超臨界トリガトロンを有した電力システムを評価するため、高圧容器の電極治具をトリガトロン型電極治具として製作した。図 10 に超臨界トリガトロンの電極構成と実際のトリガトロンの電極治具を示す。PEEK 樹脂製で製作された電極治具中に平板対平板の電極を取り付け、電極間隔は主電極上部の回転ネジで制御可能である。主電極の材質はステンレス、タングステン製のトリガ電極に

PEEK 樹脂の絶縁スリーブを装着することで主電極との絶縁構造とした。評価実験にあたり、主電極間の電極間隔は $250\ \mu\text{m}$ 、トリガ電極と主電極の間隔は $100\ \mu\text{m}$ に設定した。図 11 に超臨界トリガトロンを配備したパルス電力システムの構成図を示す。本回路の構成は、B-PFL を実際に使用されるパルスパワーシステムと想定し、超臨界トリガトロンを B-PFL のクロー징スイッチとして用いたものであり、B-PFL の基本回路における電源部分に高速充電が可能な MPC 方式パルス電源を用いてパルス充電し、データを取得した。媒質温度 T : $298\ \text{K}$ 、圧力 P : $4.05\ \text{MPa}$ 、電極間隔 d : $250\ \mu\text{m}$ の条件でスイッチング

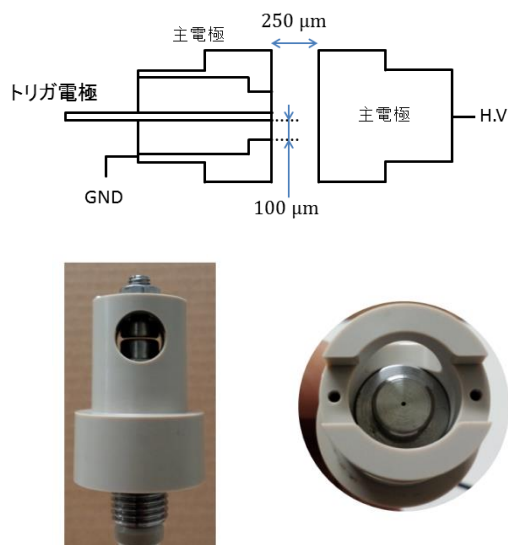


図 10 トリガトロン電極の構成とトリガトロン電極治具及び主電極

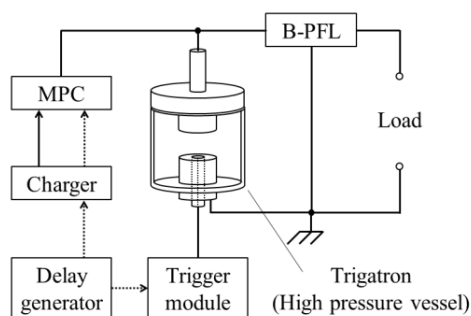


図 11 超臨界トリガトロン評価回路

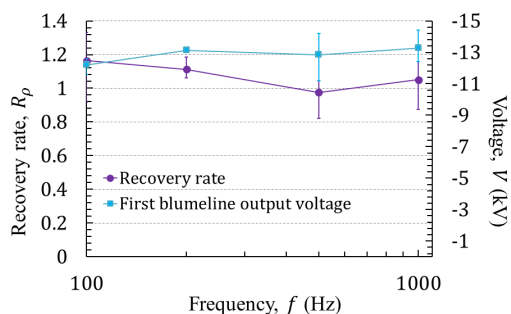


図 12 周波数による B-PFL の出力電圧と回復比

周波数を 100, 200, 500, 1000Hz としたときのデータを測定した。超臨界流体スイッチとしての評価を行うために、超臨界トリガトロン絶縁破壊電圧の相対比 R_ρ を算定した。

図 12 に周波数による B-PFL の出力電圧 V と回復比 R_ρ を示す。各周波数において R_ρ はおよそ 1 となり、B-PFL の出力電圧も安定した。このことから超臨界窒素を用いた流体スイッチは、高繰り返し動作が確認され、稼働要件の制限は想定されるが、超臨界窒素のトリガトロンは約 1 kHz まで稼働できる可能性が示唆された。

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 Z.B. Yang, S.H.R. Hosseini, Tsuyoshi Kiyari, S. Gnapowski, H. Akiyama, Post-breakdown dielectric recovery characteristics of high-pressure liquid CO₂ including supercritical phase, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, 21(3) 1089-1094 June 2014, DOI: 10.1109/TDEI.2014.6832252

[学会発表] (計 4 件)

- ① 岩崎優太, 石川貴士, 森友宏, 喜屋武毅, 超臨界状態を含む高加圧窒素を用いた流体スイッチの検討, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 福岡市, (2015 年 9 月)
- ② 岩崎優太, 石川貴士, 森友宏, 喜屋武毅, 高加圧窒素の絶縁破壊後における誘電特性の調査, 高加圧流体中におけるパルス放電プラズマ, 平成 27 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 金沢市, (2015 年 9 月)
- ③ 岩崎優太, 石川貴士, 森友宏, 喜屋武毅, 高繰り返しパルス発生装置の製作と超臨界流体スイッチへの応用, 近畿大学第 5 回院生サミット, 紀の川市, (2015 年 7 月)
- ④ Y. Iwasaki, T. Ishikawa, T. Mori, and T. Kiyari, Study on pulsed breakdown characteristics in high pressurized

nitrogen gas including supercritical
state, 2015 Pulsed Power Conference,
May 31-June 4, 2015, Austin, TX, USA,

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

- ① 岩崎優太, 石川貴士, 森友宏, 喜屋武毅,
高加圧窒素の絶縁破壊後における誘電
特性の調査, 平成 27 年電気学会基礎・
材料・共通部門大会講演論文集（優秀論
文発表賞）, pp. 302-307

6. 研究組織

(1) 研究代表者

喜屋武 毅 (KIYAN, Tsuyoshi)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：40381016