

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13743

研究課題名（和文）次世代超電導ケーブルの実現に向けたスラッシュ窒素の電気絶縁特性の解明

研究課題名（英文）Investigation of electrical insulating property of slush nitrogen for next generation 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）・助教

研究者番号：70713824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：浸漬冷却の超電導機器においては、冷媒が冷却と電気絶縁の役割を担うが、冷媒への電界集中が部分放電(PD)を招くため、絶縁上の弱点にもなり得る。液体窒素と固体窒素粒子の混合冷媒であるスラッシュ窒素は高い冷媒性能を有するが、固体窒素の導入が絶縁性能に与える影響が不明な点が多い。PD波形の特徴量解析より、固体窒素は放電に対して一定のバリア効果を有するが、基本的には絶縁上の弱点として作用し、短時間の絶縁性能は液体窒素よりも低下することを明らかにした。一方で、固相率の高いスラッシュ窒素の絶縁破壊電圧は、液体窒素単体の約80%であり、絶縁設計次第で高い冷却性能と十分な絶縁性能が両立できる可能性も示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スラッシュ窒素の冷却・運搬特性は、液体窒素よりも優れることが多数報告される中で、電気絶縁性能は、液体窒素との優劣の観点においても知見が少なく、固体窒素の導入による絶縁性能の変化がメカニズムに則って議論された報告はなかった。本研究によって、PD波形の特徴量解析より、固体窒素は放電に対して一定のバリア効果を有するが、基本的には絶縁上の弱点として作用し、液体窒素に比べて短時間の絶縁破壊特性は低下することを明らかにした。一方で、固相率の選択によっては、絶縁破壊電圧の低下を抑制できることも示した。これらは、超電導機器の絶縁設計をスラッシュ窒素の放電メカニズムに則って行う上で、重要な知見になるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In immersion cooling superconducting equipment, the refrigerant plays the double role of cooling and electrical insulation, but electric field concentration on the refrigerant causes partial discharge (PD), which can be a weak point in electrical insulation. Although slush nitrogen, which is a mixed refrigerant of liquid nitrogen and solid nitrogen particles, has high cooling performance; however, the effects of the introduction of solid nitrogen particles on the insulation performance has not been clarified. From the analysis of PD waveform characteristics, it was shown that the solid nitrogen particles have a certain barrier effect against discharge, but basically act as a weak point in electrical insulation. On the other hand, the breakdown voltage of slush nitrogen with high solid phase ratio is about 80% of that of liquid nitrogen. It was suggesting that the high cooling performance and sufficient insulation performance may be compatible depending on the insulation design.

研究分野：電気絶縁工学

キーワード：極低温電気絶縁 スラッシュ窒素 液体窒素 部分放電 放電波形 特徴量

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超電導技術は、電気抵抗がほぼゼロになる特徴を利用して損失を圧倒的に低減できるため、エネルギー輸送・利用の高効率化による省エネルギー・省資源化と共に、CO<sub>2</sub>削減・低環境負荷に貢献する技術として期待されている。国内外を問わず、超電導機器の研究・開発は、実証試験も含めて盛んに進められている。超電導機器の冷却方式は、冷凍機による伝導冷却方式と、臨界温度以下の冷媒に超電導体を直接浸す、浸漬冷却方式の2つに大別される。中でも浸漬冷却は、その簡便さから、多くの機器で採用されており、冷媒が冷却のみならず電気絶縁の役割も担っている。超電導状態の安定維持のためには、冷媒は高い冷却性能に加えて、機器の長期信頼性を保証する電気絶縁性能が要求される。核融合などの特別な応用を除けば、高温超電導を利用できる液体窒素冷却の機器は多数の利点がある。しかしながら、液体窒素の顕熱のみで冷却可能な範囲は限られており、熱容量も小さいために、大量の液体窒素が必要である。また、浸漬冷却方式においては、冷媒に電界集中が生じるため部分放電(PD)を生じ易く、そのエネルギーは冷媒に局所的に注入されるため、冷媒の気化を招く。気泡は、更にPDの発生を助長するため、最終的には絶縁破壊を引き起こす恐れがある。特に電力用途の超電導機器においては、高電圧レベルへの展開が想定されるため、PDに関する問題解決は必至である。

### 2. 研究の目的

スラッシュ窒素は、液体窒素と固体窒素粒子の混合冷媒であり、液体窒素の顕熱だけでなく、固体窒素が有する高い融解潜熱も利用できるため、液体窒素単体に比べて優れた冷却特性を有する。スラッシュ窒素の冷却特性および運搬特性に関する報告は多い。

液体絶縁体中の不純物粒子は、絶縁破壊電圧を低下することが古くから知られている。不純物粒子の誘電率が液体絶縁体に比べて高い場合には、不純物粒子が高電界部に移動し、最終的には電極間にブリッジを形成するため、絶縁破壊電圧を低下する。つまり、固体窒素が単純に不純物として作用する場合には、絶縁上の弱点になることが予想される。したがって、スラッシュ窒素の絶縁破壊電圧は液体窒素単体に比べて低下すると考えられる。一方で、申請者は過去に絶縁紙内部を氷で満たした絶縁紙-氷複合系を提案し、PDのエネルギーを氷の融解に消費できるため絶縁紙-液体窒素複合系よりも優れた長期絶縁性能を有することを報告した。スラッシュ窒素中の固体窒素も、氷と同様に放電に対するブロック効果を有する可能性は高い。本研究では、PD特性を含めたスラッシュ窒素の基礎的な電気絶縁特性を明らかにした。

### 3. 研究の方法

Freeze-Thaw 法は、他の手法に比べて比較的簡便にスラッシュ窒素を生成できる。デュワー内を減圧し、液体窒素の蒸発潜熱を利用して液温を低下させ、液面に層状に発生した固体窒素を攪拌することにより、スラッシュ窒素を生成した。攪拌を停止したときの固相と液相の割合を、スラッシュ窒素の固相率と定義した。例えば、図1は固相率80%の状態である。高速度カメラを用いたスラッシュ窒素の観察から、電極周辺を流動する固体窒素のサイズは、最大で約1mmであり、それ以下の固体窒素も多数観察された。スラッシュ窒素中に球-球電極系(φ12mm, 真鍮)を浸漬し、絶縁破壊特性を取得した。

従来のPD計測手法は、積分型や共振型といった検出回路を主に採用していた。オシロスコープなどの計測装置のデジタル信号処理が未熟であったために、検出回路を通して計測装置の周波数特性に合わせて波形に加工する必要があった。得られるPD波形は、本来のPD波形(いわゆる生波形)と検出回路を含めた計測システムの伝達関数の畳込みになっている。つまり、検出回路の周波数特性によって波形の特徴量(立上り/立下り時間など)は、凡そ決定される。PD生波形の立上り/立下り時間や周波数スペクトルは、放電空間における電子とイオンの挙動を反映している。したがって、従来のPD計測手法は放電空間の状態を反映した、これらの重要な情報を見落としていることになる。図2のPD計測システムを用いて、PD生波形を時系列に沿って全て記録し、PD波形が有する特徴量を用いて、スラッシュ窒素の絶縁性能に与える固体窒素の影響を考察した。

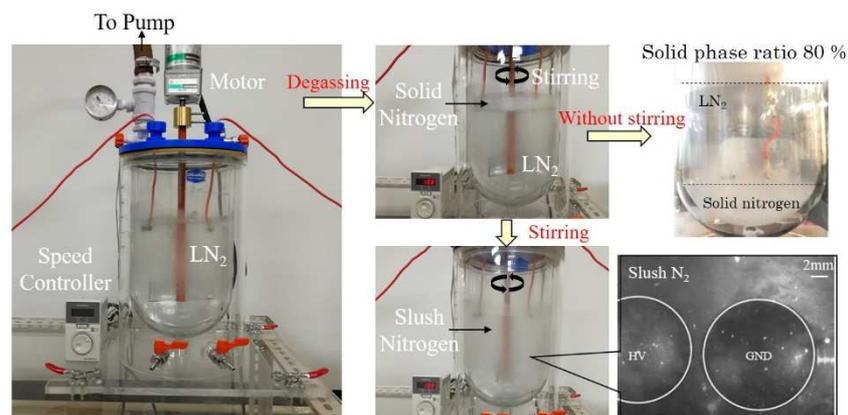


図1 装置の外観とスラッシュ窒素の様子

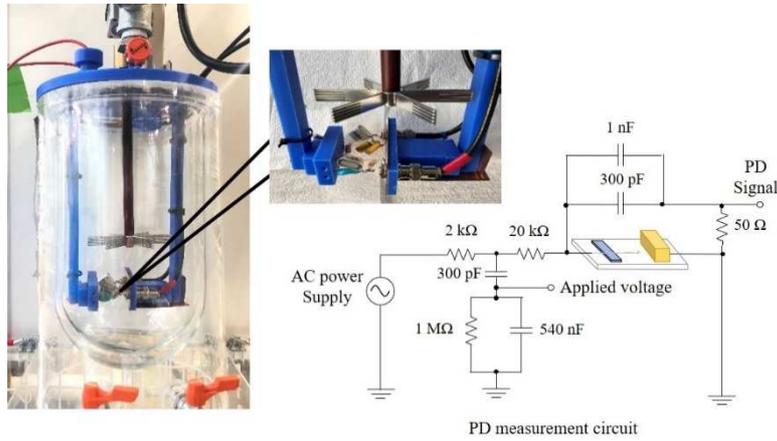


図2 PD計測システム

#### 4. 研究成果

##### (1). 絶縁破壊特性

図3に絶縁破壊電圧のギャップ距離依存性を示す。プロットおよびエラーバーは、10回の測定値の平均値および標準偏差である。ギャップ距離が0.75 mm以下においては、スラッシュ窒素の絶縁破壊電圧は液体窒素とほぼ同等となった。1 mm以上の領域においては、固相率が80%においては、スラッシュ窒素の絶縁破壊電圧は液体窒素の約80%であるが、固相率が20%まで低下すると、更に絶縁破壊電圧は低下し、液体窒素の約40%となった。Clausius Mossottiの式より算出した固体窒素の誘電率は、液体窒素の1.5程度であり、絶縁破壊電圧が半分以下まで低下するほどの電界強調が、固体窒素の導入のみによって起こるとは考え難い。PDによって帯電した固体窒素が電界変歪を引き起こし、更なるPDを助長したため、絶縁破壊電圧を低下したと考えた。

一方で、固相率80%のスラッシュ窒素の絶縁破壊電圧が、固相率20%に比べて高いことから、固体窒素が純粋な絶縁上の弱点のみとして作用したとも考え難い。固相率の増加に伴って、熱容量は増加するため、固体窒素の導入によってPDの発生を助長したとしても、そのエネルギーを固体窒素の融解に消費できる。固相率の高いスラッシュ窒素は、絶縁破壊電圧の大幅な低下を抑制できることが示唆された。

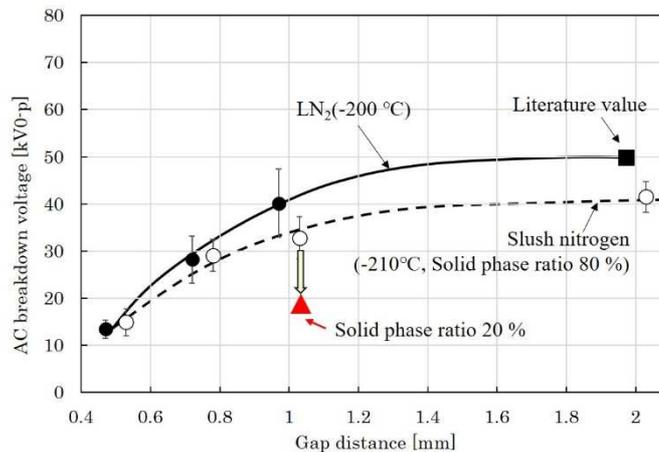


図3 スラッシュ窒素の絶縁破壊特性のギャップ距離依存性

##### (2). PD特性

図4に液体窒素、スラッシュ窒素の典型的なPD波形を示す。液体窒素のPD波形は、数10 ns程度のパルス幅を有しており、先行研究で報告されている結果と類似している。一方で、スラッシュ窒素のPD波形は、液体窒素と同様の単一ピークを有するPD波形と合わせて、多数ピークを有する波形が観測され、全体の約50%を占めていた。同様の計測システムを用いたガス窒素中のPD波形の中には、多数ピークを有する波形は観測されなかった。

また、液体窒素に比べてPD発生数の増加と発生間隔の低下もみられた。PD波形の経時変化に着目すれば、液体窒素では数10 nsのパルス幅を有するPD波形が比較的安定して観測されるのに対して、スラッシュ窒素は多数ピークを有する波形が混ざるだけでなく、パルス幅もその時々で異なっていた。

PD波形は放電空間における電子なだれ過程を反映している。つまり、PD波形が有する2つのピークは、2回の電子なだれ過程を反映していると考えられる。したがって、固体窒素の導入によって、最初の電子なだれが固体窒素との衝突により停止し、帯電した固体窒素による電界変歪

が、次の電子なだれを発生したと予想される。攪拌によって固体窒素が電極間へ偶発的に侵入すると、このような現象が生じるが、それ以外の場合は液体窒素と同様の PD 波形が観測されるはずである。1000 発の PD 波形から無作為に 100 発を選び、図 5 に示す PD 波形の特徴量分布を用いて固体窒素の導入による PD 波形の変化を考察した。立上り時間および立下り時間は、PD 波形の最大振幅の 10% から 90% までの時間差と定義した。また、電荷量は電流波形を積分して算出した。スラッシュ窒素の PD 波形の特徴量分布は、凡そ液体窒素と重なるが、立上りと立下り時間が長く、電荷量の大きい波形が観測されていることがわかった。このような波形は、2 ピークを有する PD 波形であり、固体窒素の導入により、PD 波形の立上り/立下り時間が長くなることを示している。前述の通り、最初の電子なだれが固体窒素に衝突し、帯電した固体窒素による電界変歪が更なる電子なだれの発生を助長したとすれば、電子なだれはより長い距離を進展したことになる。PD 波形の立上りは電子の挙動、立下りはイオンの挙動を反映しているため、より長い距離を進展したのであれば、立上り/立下り時間が長くなることは説明できる。

以上より、PD 波形の特徴量解析より、固体窒素は放電に対して一定のバリア効果を有することが期待されるが、基本的には固体窒素は絶縁上の弱点として作用し、液体窒素に比べて短時間の絶縁破壊特性は低下することが明らかとなった。一方で、固相率の高いスラッシュ窒素の絶縁破壊電圧は液体窒素単体の 80% 程度であることから、絶縁設計次第で高い冷却性能と十分な絶縁性能が両立できる可能性も示唆された。

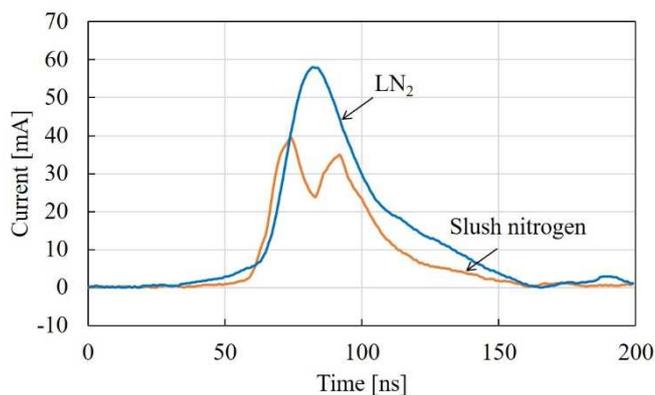
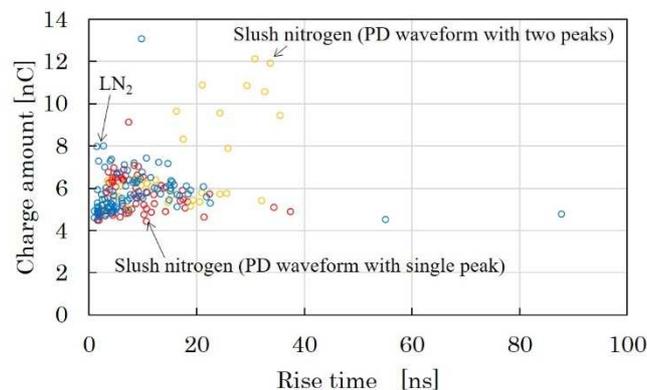
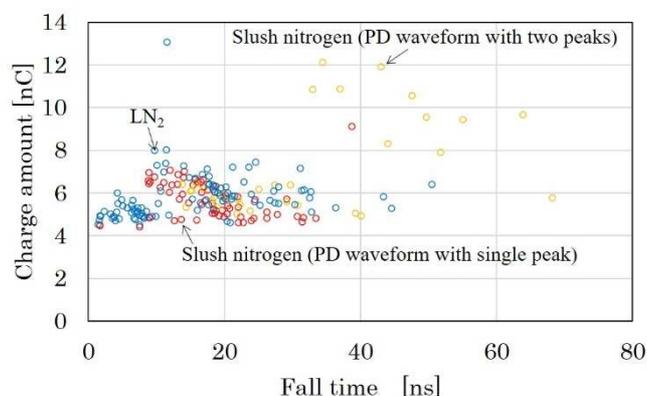


図 4 典型的な PD 波形



(a) 立上り時間—電荷量分布



(b) 立下り時間—電荷量分布

図 5 立上り時間/立下り時間—電荷量分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YAMADA Kazuki, KAWASHIMA Tomohiro, OBANA Tetsuhiro, MURAKAMI Yoshinobu, NAGAO Masayuki, HOZUMI Naohiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Discrimination of Partial Discharges in Gaseous and Liquid Nitrogen by Using Waveform Characteristics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401025 ~ 2401025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1585/pfr.15.2401025">https://doi.org/10.1585/pfr.15.2401025</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Yamada, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi
2. 発表標題 Fundamental study for breakdown characteristic of slush nitrogen as a coolant in superconducting coil
3. 学会等名 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamada, T. Kawashima, T. Obana, Y. Murakami, M. Nagao, N. Hozumi
2. 発表標題 Assessment of electrical insulation performance of cryogenic fluids using partial discharge waveform
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kawashima, K. Yamada, Y. Murakami, M. Nagao, N. Hozumi
2. 発表標題 AC dissipation current of dielectric material at high electric field in cryogenic
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田和輝, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 スラッシュ窒素の交流絶縁破壊に及ぼす固相率の影響
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山田 和輝  (Yamada Kazuki)		
研究協力者	村上 義信  (Murakami Yoshinobu)		
研究協力者	穂積 直裕  (Hozumi Naohiro)		
研究協力者	長尾 雅行  (Nagao Masayuki)		