

超純水小ギャップの負極性雷インパルス電圧絶縁破壊特性*

高 村 紀 充**

花 井 正 広**

Breakdown Characteristics of Small Gap in Ultra-Pure Water with Negative Lightning Impulse Voltage

Norimitsu TAKAMURA** and Masahiro HANAI**

Abstract

We investigated the breakdown characteristics of small gap in ultra-pure water with negative lightning impulse voltage using Φ 12.5 mm sphere electrodes. The breakdown voltage of small gap in ultra-pure water increased with increasing the resistivity, and it was 64~83 kV at 2.5 mm gap length, 18.2 M Ω ·cm resistivity. The average breakdown electric field of small gap in ultra-pure water was 30~35 kV/mm..

Key Words : Ultra-pure water, Breakdown, Lightning impulse

1. はじめに

地球環境への配慮と温暖化防止の観点から、近年、電力機器の製造、使用、廃棄の全ての段階において、環境負荷の小さい絶縁材料が求められている。現在、電力用変圧器に用いられている主な液体絶縁材料として、鉱油、シリコン油、植物油（菜種油やパーム油）などがある。これらの液体絶縁材料は全て、高い抵抗率と高い絶縁破壊特性を有しているが、地震、台風、洪水、火災などの災害や事故により、変圧器から液体絶縁材料が漏れた場合には環境に悪影響を与えてしまう危険性がある。このため、変圧器に適用可能かつ環境に影響を与えない液体絶縁材料が必要とされている。この課題の解決策の一つとして、生分解性に優れた植物性油が開発され、使用されている⁽¹⁾が、分解するまでに1か月以上の期間を要するため、その間に発生する環境への影響を避けることができない。

一方、純水や超純水は、優れた冷却性能を有し、漏れても環境に影響を与えることがなく、鉱油の1/3～1/2程度の絶縁耐力を持つ⁽²⁾ことから、液体絶縁材料として適用できる可能性を秘めている。また、比誘電率が81（18℃）⁽³⁾であり、一般的な固体絶縁材料の20倍以

上であることから、複合絶縁構成において固体絶縁材料側にほとんどの電位を分担させることが可能である。しかし、純水や超純水は鉱油に比べ抵抗率が低く、超純水と鉱油では $1:10^7$ 程度の違いがあるため、漏れ電流による損失が大きくなる恐れがある。また、超純水はイオンを溶かしやすく、イオンが溶けることで抵抗率が低くなるため、管理が必要である。このような理由から、純水や超純水を絶縁媒体として使用するための研究があまり行われていないのが現状である。従って、純水や超純水を電力用変圧器などの電力機器に適用するためには、まず、純水、超純水の絶縁耐力を明らかにする必要がある。

本論文では、抵抗率がそれぞれ異なる水道水、純水、超純水に負極性雷インパルス電圧を印加した場合における平均破壊電圧と標準偏差を昇降法（Up-and-down tests）⁽⁴⁾で求め、比較した。その後、直径12.5 mmの球電極と抵抗率18.2 M Ω ·cmの超純水を用いて、負極性雷インパルス電圧を印加した場合における平均絶縁破壊電圧と標準偏差を昇降法で求め、純水（抵抗率2.5 M Ω ·cm）の破壊特性⁽²⁾と比較すると共に、破壊電界の算出と破壊遅れ時間の測定を実施した。また、カメラ付き実体顕微鏡で絶縁破壊した電極の表面を観察した。更に、直径12.7 mmの球電極を用いた昇降法により、直径の違いによる平均絶縁破壊電圧と標準偏差への影響を調査すると共に、上昇法（Progressive stress tests）⁽⁵⁾による絶縁破壊試験も実施し、昇降法と上昇法の結果を比較した。

* 平成28年11月30日受付
** 電気工学科

2. 実験方法

〈2・1〉 水道水, 純水, 超純水の絶縁破壊試験 (昇降法, 直径 12.5 mm の球電極を使用) 図 1 に, 本実験で用いた装置の概略図を示す。水道水, 純水, 超純水の試験では, それぞれ抵抗率が 8.8, 14.7, 18.2 $M\Omega \cdot cm$ の水を, 水温 16 ~ 17°C, 流量 1.0 ~ 5.0 L で, ステンレス製の球電極を取り付けた試験容器内に流した。球電極の直径

は絶縁油の絶縁破壊試験の規格である JIS C 2101 と同じ 12.5 mm とした。

図 2 に, 本実験で使用した試験電極の外観を示す。図 2(a) は絶縁破壊が発生していない場合, 図 2 (b) は絶縁破壊が発生した場合の電極の外観である。試験電極は対向させ, マイクロメータを用いてギャップ間隔を 2.50 mm に調整した。この状態で, 負極性の雷インパルス電圧 (1.0/40 μs) を破壊電圧の 50% からステップ幅 1.55 kV で各ステップ 1 回の昇降法で印加し, 絶縁破壊を 15 回発生させた。平均絶縁破壊電圧 (V_{50}) と標準偏差 (σ) は昇降法により算出し, 文献⁽²⁾の純水 (抵抗率 2.5 $M\Omega \cdot cm$) の破壊特性と比較した。

〈2・2〉 超純水の絶縁破壊試験 (昇降法, 直径 12.5 mm の球電極を使用) 図 1(c) に, 本実験で用いた装置の概略図を示す。超純水製造装置 (PURELAB Ultra Analytic, Organo Co. Ltd.) を用いて抵抗率 18.2 $M\Omega \cdot cm$, 水温 21 ~ 23°C の超純水を造り, 0.55 ~ 0.62 L/min の範囲の流量で, ステンレス製の球電極を取り付けた試験容器内に流した。球電極の直径は 2・1 項と同様に 12.5 mm とした。試験電極は対向させ, マイクロメータを用いてギャップ間隔を 1.00, 1.75, 2.50 mm に調整した。この状態で, 2・1 項と同様の方法で, 各ギャップ間隔につき絶縁破壊試験を行った。また, 本実験で得られた V_{50} と σ より, 平均破壊電界 (E_{50}) を算出した。

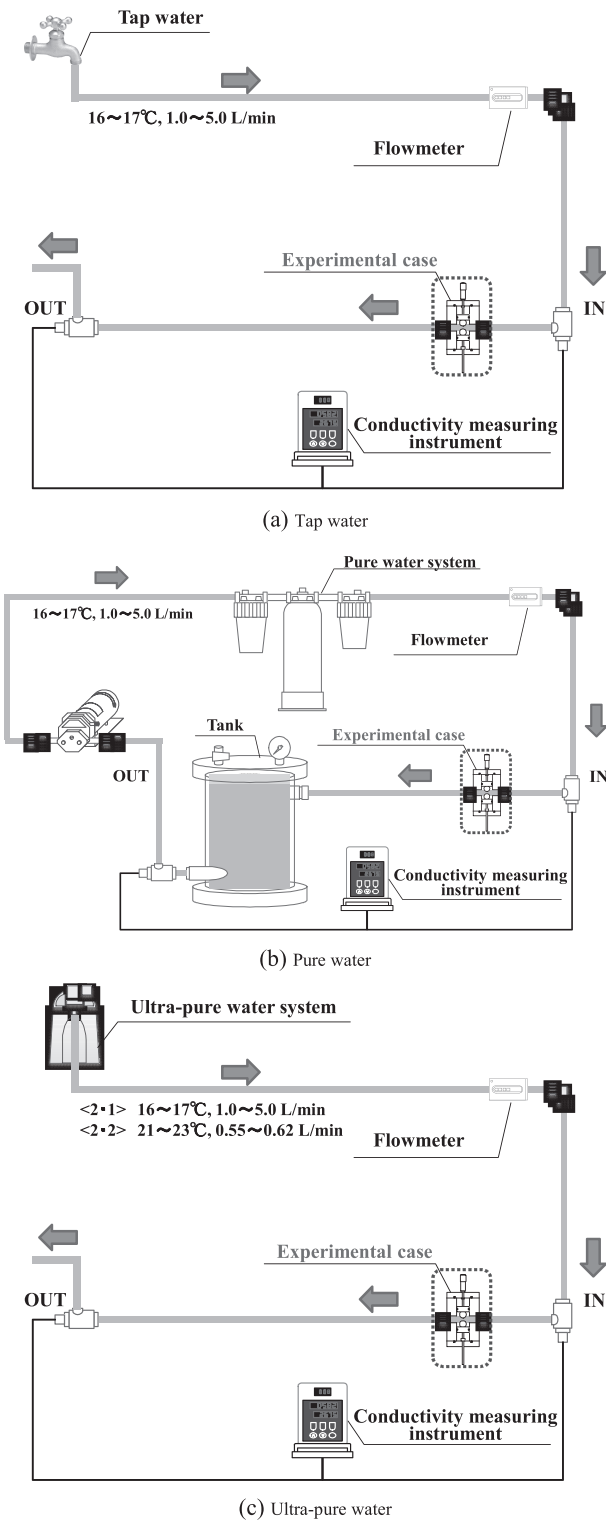


Fig. 1. Schematic of experimental equipment.

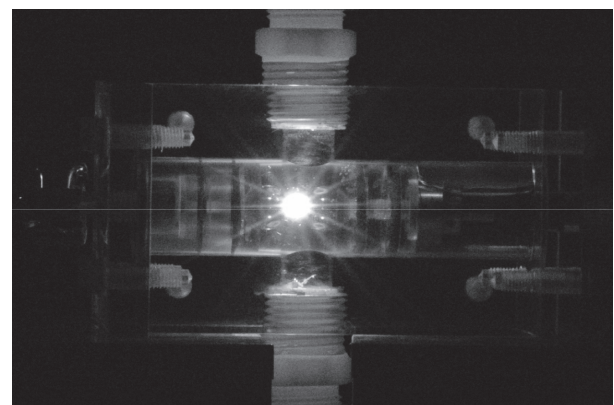
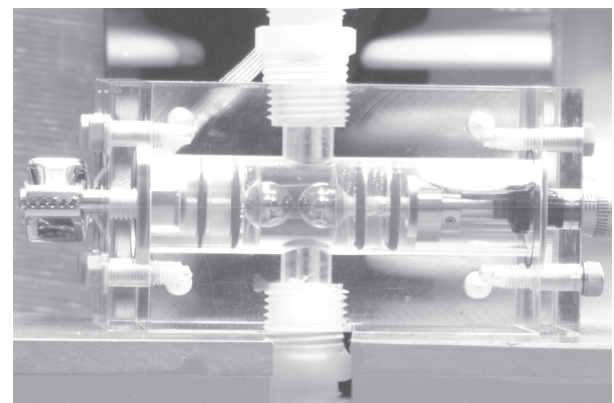


Fig. 2. Experimental electrodes using this study.

〈2・3〉 超純水の絶縁破壊試験 (昇降法, 直径 12.7 mm の球電極を使用) 2・1 項に記した通り, 絶縁油の絶縁破壊試験では, 日本工業規格 (JIS C 2101) に準じて, 直径 12.5 mm の金属球電極が使用されている。しかし, 市販されている金属電極はインチ (inch) を基準として製造されているものが多く, 入手しやすい。そこで, 1/2 inch である直径 12.7 mm のステンレス製の球電極を用いて, 2・2 項と同様の条件で, 絶縁破壊試験を行った。本実験では, 各電極間隔につき 3 サンプルを用いて, 絶縁破壊を 15 回ずつ発生させた。

〈2・4〉 超純水の絶縁破壊試験 (上昇法, 直径 12.7 mm の球電極を使用) 昇降法と上昇法は, とともに機器の雷インパルス電圧絶縁耐力の限度を確かめる意味において重要である⁽⁶⁾とされている。そこで, 2・2 項と同様の条件で, 各ギャップ間隔につき, 負極性の雷インパルス電圧 (1.0/40 μ s) を破壊電圧の 50% からステップ幅 1.55 kV で 1 回ずつ印加し, 破壊が生じるまで上昇させた。破壊が生じたら直径 12.7 mm のステンレス製の球電極を取り換え, 15 サンプルを用いて, 合計 15 回の絶縁破壊を発生させた。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 水道水, 純水, 超純水の絶縁破壊試験 (昇降法, 直径 12.5 mm の球電極を使用) 図 3 に, 抵抗率が異なる純水, 超純水の負極性雷インパルス電圧による絶縁破壊特性を示す。平均絶縁破壊電圧 (V_{50}) は, 抵抗率が高くなるほど高くなることがわかった。また, 図中の 2.5 $M\Omega \cdot cm$ のプロットは文献⁽²⁾により得られたもので, 今回得られた抵抗率と V_{50} の傾向は合っている。抵抗率が 8.8, 14.7 $M\Omega \cdot cm$ では V_{50} の標準偏差 (σ) は小さいが, 18.2 $M\Omega \cdot cm$ では非常に大きな σ を示した。

〈3・2〉 超純水の絶縁破壊試験 (昇降法, 直径 12.5 mm の球電極を使用) 図 4 に, 直径 12.5 mm の球電極を使用した場合における超純水の絶縁破壊試験 (昇降法)

の結果を示す。図中の実線は本実験で得られた超純水 (抵抗率 18.2 $M\Omega \cdot cm$) の V_{50} 特性であり, 破線は文献⁽²⁾により得た純水 (抵抗率 2.5 $M\Omega \cdot cm$) の V_{50} 特性である。同図より, V_{50} はギャップ間隔と正比例して高くなることがわかる。また, 純水に比べ, 超純水ではギャップ間隔が広くなるにつれ, V_{50} が高くなる傾向であることがわかる。更に, 絶縁油の絶縁破壊試験と同じギャップ間隔である 2.5 mm の場合には V_{50} の大きさが 73.5 kV となっており, この値は絶縁油の代表性状絶縁破壊電圧である 60 kV⁽⁷⁾を上回る高い値であることがわかった。このことから, 超純水の絶縁耐力は絶縁油と同等の可能性があると云える。

また, 交流電圧の場合における超純水の破壊原因は, 超純水に電流が流れることによる熱破壊とされている⁽⁸⁾。これと同様に, 雷インパルス電圧印加時にも超純水に電流が流れることで熱が発生し, 気泡が発生することで, 気泡部分に放電が発生し, 破壊に至ると考えられる。

図 5 に, 平均破壊電界 (E_{50}) を算出した結果を示す。本実験で得られた超純水の E_{50} の大きさは 30~35 kV/mm であることがわかった。また, E_{50} はギャップ間隔が広くなるにつれ低くなる傾向が確認でき, この傾向は交流電圧での鉱油の場合⁽⁹⁾と同様であることから, 超純水の雷インパルス電圧破壊確率分布は Weibull 分布に従うことが示唆される。

〈3・3〉 超純水の破壊遅れ時間 (直径 12.5 mm の球電極を使用) 図 6 に, 本実験における典型的な破壊電圧波形を示す。誘電体にインパルス電圧を印加した場合, 破壊遅れ時間 (Breakdown time lag)⁽⁶⁾が発生するが, 超純水の場合にも同様であった。しかし, 図 6(a) のように波高値を過ぎて比較的早い時間に破壊する場合と, 図 6(b) のように波尾後半部分で波高値の半分以下になって破壊する場合が確認された。そこで, 本論文では, 規約原点 (図 7(O₁) 参照) から破壊が発生するまでの時間を破壊遅れ時間 (T_{BD}) と定義し, T_{BD} の平均値と標準偏差

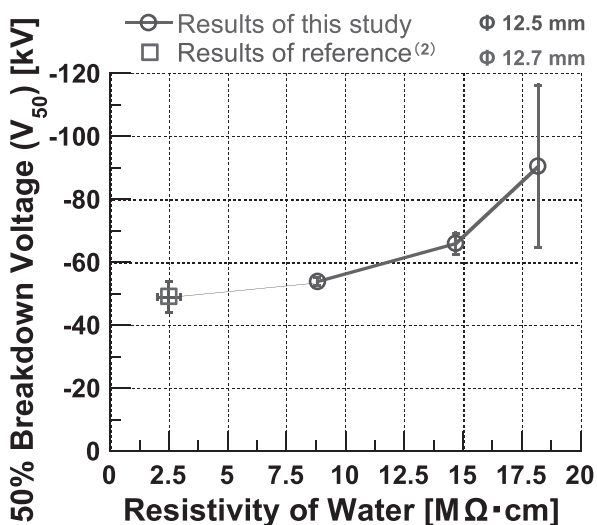


Fig. 3. Breakdown (up-and-down) tests' results of tap, pure, and ultra-pure water.

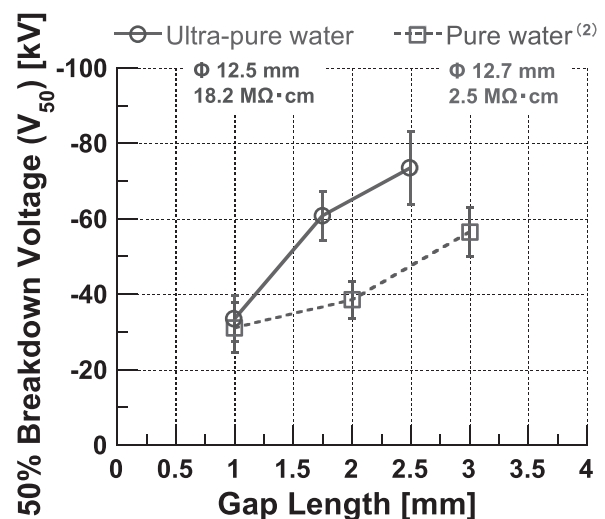


Fig. 4. Breakdown (up-and-down) tests' results of ultra-pure water using Φ 12.5 mm sphere electrodes.

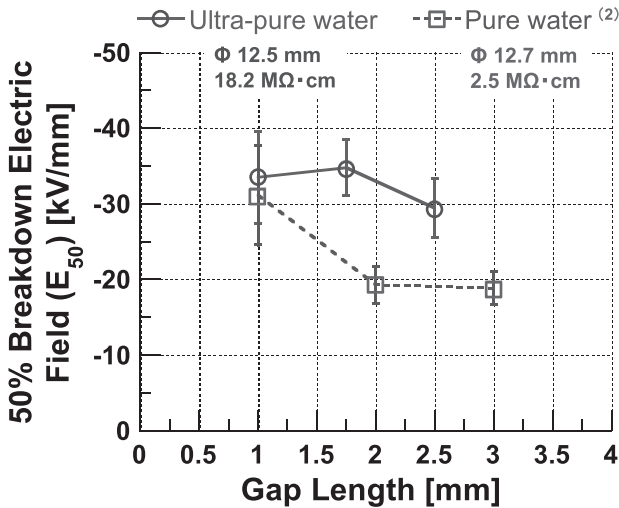
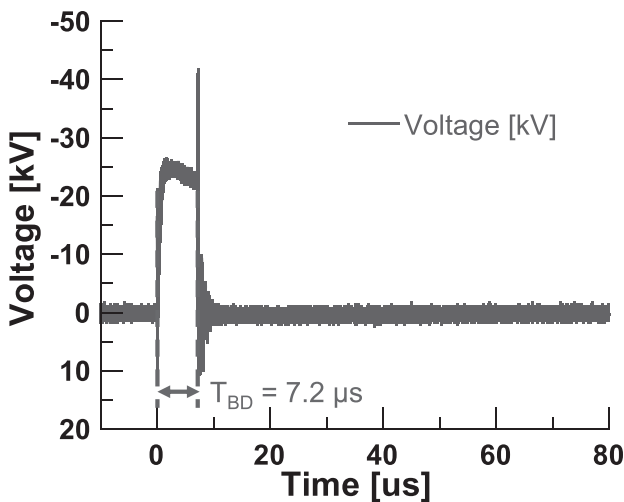
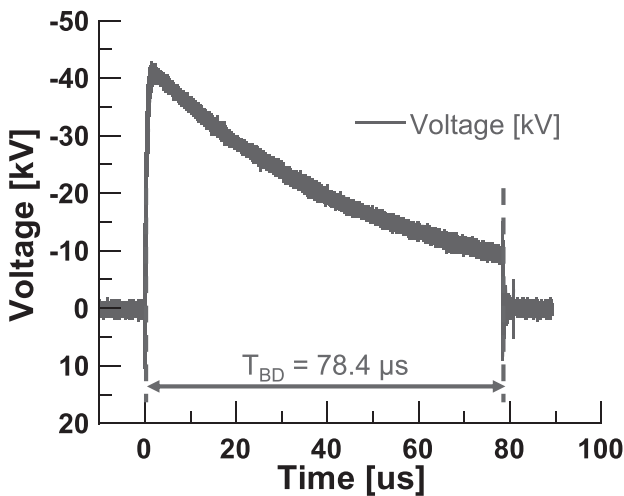


Fig. 5. Average breakdown electric fields of ultra-pure water using Φ 12.5 mm sphere electrodes.



(a) Fast T_{BD} case



(b) Slow T_{BD} case

Fig. 6. Typical breakdown voltage.

を算出し、各ギャップ間隔の結果を比較した。

図8に、各ギャップ間隔における超純水の破壊遅れ時間 (T_{BD}) 特性を示す。図8(a)は絶縁破壊を15回発生させた時の T_{BD} の推移、図8(b)は各ギャップ間隔における T_{BD} の平均値と標準偏差をそれぞれ示している。同図より、ギャップ間隔が1.00 mmのときは T_{BD} のばらつきが大きいことが確認でき、最小で3.0 μ s、最大で78.4 μ sとなった。一方、ギャップ間隔が1.75 mmと2.50 mmのときでは平均値は約5.5 μ sでほぼ同じ値となっており、ばらつきも小さいことがわかる。また、図9に、各ギャップ間隔における超純水の破壊電圧に対する破壊遅れ時間 (T_{BD}) 特性を示す。ばらつきが大きいため、顕著な特性は確認できないが、ギャップ間隔が広くなり、破壊電圧が高くなると T_{BD} が短くなる傾向に見える。

〈3・4〉 破壊した電極表面の観察 (直径12.5 mmの球電極を使用) 昇降法により各実験条件で絶縁破壊を15回発生させた高電圧側と接地側の電極を、カメラ付き実体顕微鏡 (SZ61TR, Orympus Co. Ltd.) を用いて観察し、放電痕の分布と大きさを比較した。

図10に、絶縁破壊試験 (昇降法) 後の電極を示す。図10(a)のギャップ間隔が1.00 mmの場合には、球電極の中心付近に放電痕が集中しているが、図10(b)のギャップ間隔が2.50 mmの場合には、放電痕のばらつきが大きくなっていることがわかる。また、放電痕の直径は高電圧側と接地側で大差が無く、ギャップ間隔が1.00 mmの場合には直径約270 μ m、ギャップ間隔が2.50 mmの場合には直径約600 μ mの放電痕が形成されることがわかった。このように、ギャップ間隔が広くなるにつれ放電痕の直径が大きくなる理由としては、ギャップ間隔が広くなると破壊電圧が高くなり、放電エネルギーが大きくなるためだと考えられる。

〈3・5〉 超純水の絶縁破壊電圧試験 (昇降法、直径12.7 mmの球電極を使用) 図11に、直径12.5 mmと12.7 mmの球電極を使用した場合における超純水の絶縁破壊

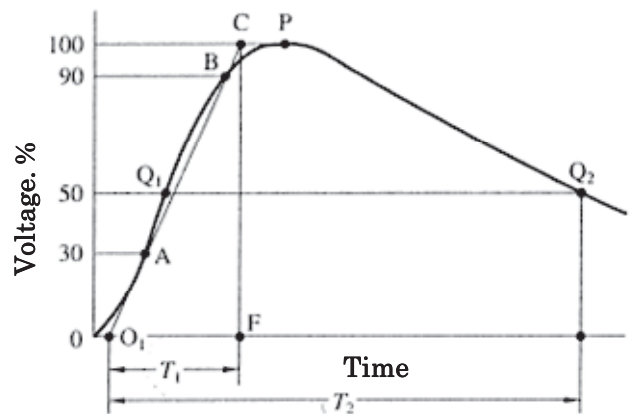
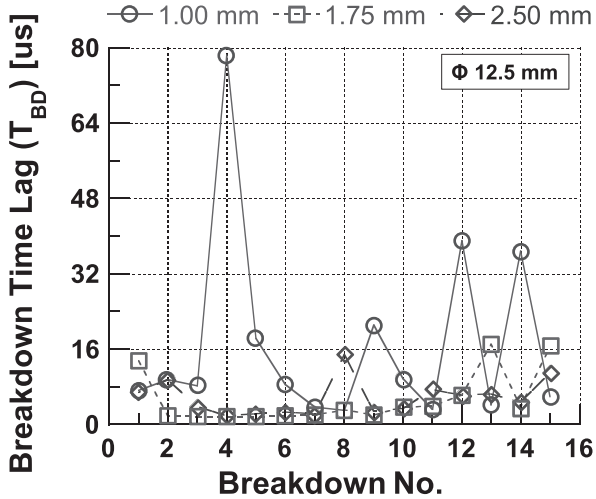
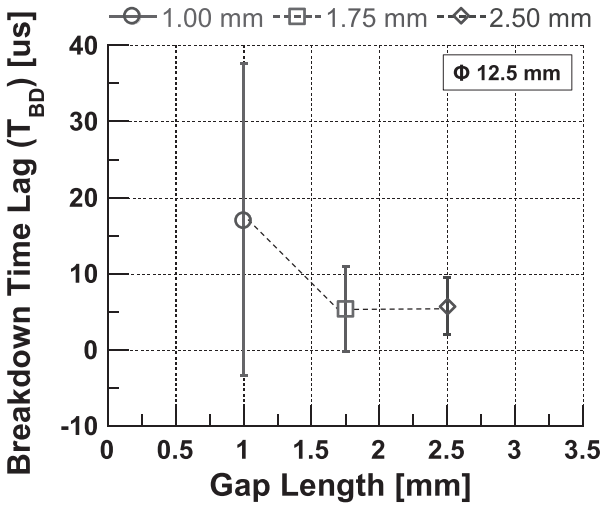


Fig. 7. View of full lightning impulse voltage by convention (T_1 : virtual front time, T_2 : virtual time to half value, O_1 : virtual origin, Q_1, Q_2 : half crest point, P : crest point, $C-F$: crest value).



(a) Transition of T_{BD}



(b) Average of T_{BD} and standard deviation

Fig. 8. Breakdown time lag of ultra-pure water at different gap length.

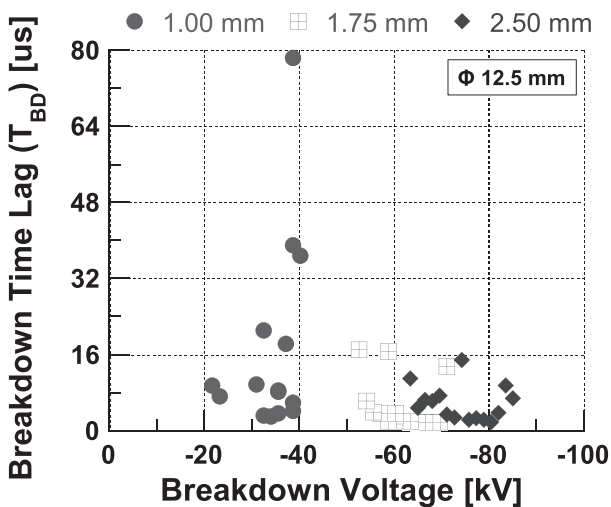


Fig. 9. Breakdown time lag of ultra-pure water at different breakdown voltage.

試験 (昇降法) の結果を示す。電極の直径を 12.7 mm とした場合でも、12.5 mm の場合と同じ傾向であり、ギャップ間隔と正比例して V_{50} が高くなるのがわかる。また、各ギャップ間隔において、破壊電圧が等分散であることを仮定した有意差検定 (t 検定) を行ったところ、ギャップ間隔が 1.75 mm の場合には検定結果が約 0.263 (>0.1) となり、 V_{50} に有意差がないことがわかった。一方、ギャップ間隔が 1.00 mm と 2.50 mm の場合には検定結果がそれぞれ約 0.0000464 と約 0.000001 (<0.01) となり、有意差があることがわかった。この理由として、直径 12.5 mm の球電極の場合には、各ギャップ間隔において 15 回の絶縁破壊を 1 回しか行っていないのに対し、直径 12.7 mm の球電極の場合には 3 回ずつ (計 45 回) 行ったため、有意差が現れたと考えられる。

〈3・6〉 昇降法と上昇法の比較 (直径 12.7 mm の球電極を使用) 図 12 に、直径 12.7 mm の球電極を使用した場合における超純水の絶縁破壊試験 (昇降法と上昇法) の結果を示す。どちらの試験結果とも、ギャップ間隔が広くなるにつれ V_{50} が高くなり、ほぼ直線的に高くなる事が確認できる。また、昇降法に比べ上昇法の方がばらつきが大きいことがわかる。上昇法の試験結果でばらつきが大きい理由としては、電極の取付時の表面状態、超純水の温度や流量の違い (本実験ではそれぞれ $22 \pm 1^\circ\text{C}$, $0.55 \sim 0.62 \text{ L/min}$) などの影響が考えられる。



(a) High voltage electrode of 1.00 mm gap length



(b) High voltage electrode of 2.50 mm gap length

Fig. 10. Electrodes after Breakdown (up-and-down) tests ($\Phi 12.5 \text{ mm}$).

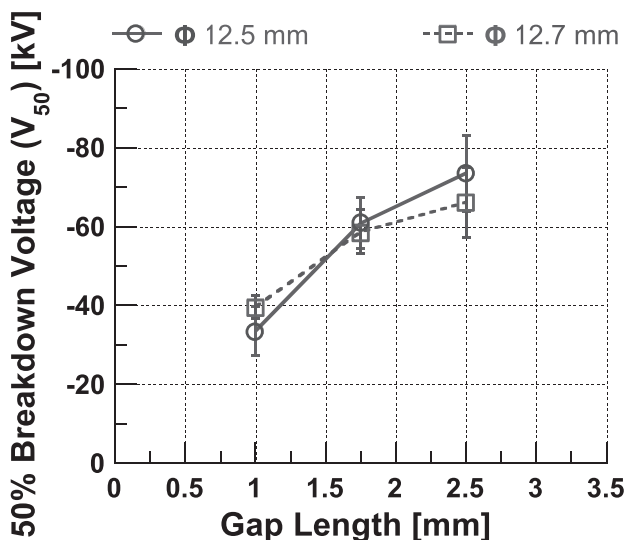


Fig. 11. Breakdown (up-and-down) tests' results of ultra-pure water using Φ 12.5 and Φ 12.7 mm sphere electrodes.

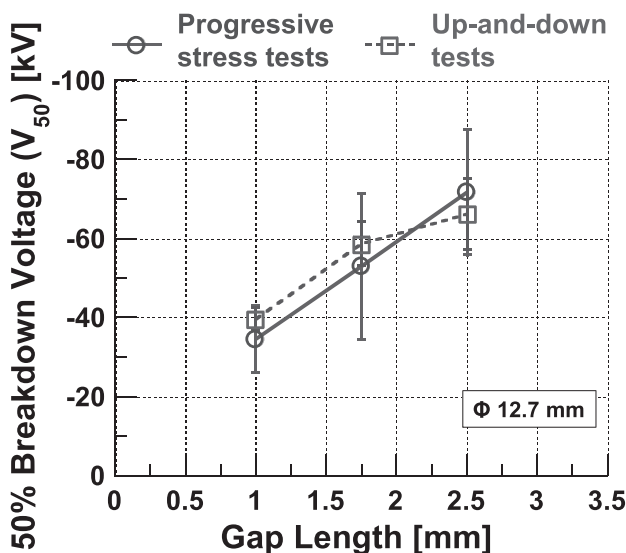


Fig. 12. Breakdown (up-and-down and progressive stress) tests' results of ultra-pure water using Φ 12.7 mm sphere electrodes.

4. おわりに

純水や超純水は、優れた冷却性能を有し、漏れても環境に影響を与えることがなく、鉱油の1/3～1/2程度の絶縁耐力を持つことから、液体絶縁材料として適用できる可能性を秘めている。このため著者らは、超純水の絶縁耐力を明らかにすることを目的とした実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 超純水(抵抗率 18.2 M Ω ·cm)の平均絶縁破壊電圧 (V_{50}) はギャップ間隔と正比例して高くなることがわかった。また、純水に比べ、超純水ではギャップ間隔が広くなるにつれ、 V_{50} が高くなることがわかった。更

に、ギャップ間隔が 2.5 mm の場合には、 V_{50} の大きさが 73.5 kV となり、絶縁油の代表性状絶縁破壊電圧である 60 kV と同等の可能性であることがわかった。

(2) 雷インパルス電圧印加時にも交流電圧印加時と同様に、超純水に電流が流れることで熱が発生し、気泡が発生することで、気泡部分に放電が発生し、破壊(熱破壊)に至ると考えられる。

(3) 超純水の平均破壊電界 (E_{50}) の大きさは 30~35 kV/mm であることがわかった。

(4) 超純水の破壊遅れ時間 (T_{BD}) について、ギャップ間隔が 1.00 mm のときは T_{BD} のばらつきが大きいことがわかった。一方、ギャップ間隔が 1.75 mm と 2.50 mm のときでは平均値はほぼ同じ値となっており、ばらつきも小さいことがわかった。

(5) 絶縁破壊試験(昇降法)後の電極は、ギャップ間隔が 1.00 mm の場合には、電極の中心付近に放電痕が集中するが、ギャップ間隔が 2.50 mm の場合には、放電痕のばらつきが大きいことがわかった。また、放電痕の直径は高電圧側と接地側で差が無く、ギャップ間隔が 1.00 mm の場合には直径約 270 μ m、ギャップ間隔が 2.50 mm の場合には直径約 600 μ m の放電痕が形成されることがわかった。

(6) 超純水の平均絶縁破壊電圧 (V_{50}) は、電極の直径を 12.7 mm とした場合でも、12.5 mm の場合と同じ傾向で、ギャップ間隔と正比例して V_{50} が高くなることがわかった。また、ギャップ間隔が 1.75 mm の場合には有意差検定 (t 検定) の結果、 V_{50} に有意差がないことがわかった。一方、ギャップ間隔が 1.00 mm と 2.50 mm の場合には有意差があることがわかった。

(7) 超純水の絶縁破壊試験である昇降法と上昇法の結果を比較したところ、昇降法に比べ上昇法の方が、ばらつきが大きくなることがわかった。

文 献

- (1) 株式会社東芝コミュニティ・ソリューション社：「菜種油絶縁変圧器」, 特別高圧用変圧器カタログ, KSP-5033 pp.24-25 (2016)
- (2) 助原正己, 吉田哲雄, 池亀博夫, 高木邦彦, 西川尚男：「純水中の破壊電圧」, 昭和 56 年電気学会東京支部大会, No.17 p.20 (1981)
- (3) 玉虫文一, 富山小太郎, 小谷正雄, 安藤鋭郎, 高橋秀俊, 久保亮五, 長倉三郎, 井上敏：「岩波理化学辞典第 3 版増補版」, 岩波書店 p.1317 (1981)
- (4) 電気学会絶縁試験法ハンドブック改訂委員会編：「高電圧試験ハンドブック」, 電気学会 pp.312-313 (1983)
- (5) 広瀬英雄：「上昇法によるインパルス絶縁破壊電圧の推定」, 電気学会論文誌 A, Vol.104, No.8 pp.464-470 (1984)
- (6) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック下巻」, 電気学会 p.63 (1998)
- (7) JX 日鉱日石エネルギー株式会社：「高圧絶縁油 A 変圧器、しゃ断器用油」, 製品紹介カタログ, INS-0003-0508
- (8) 佐藤広治, 小島寛樹, 花井正広, 加藤克巳, 早川直樹：「超純水の短ギャップ交流絶縁破壊特性」, 平成 26 年電気学会全国大会論文集, 2-043 p.52 (2014)
- (9) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック下巻」, 電気学会 p.89 (1998)
- (10) 電気学会電気規格調査会編：「インパルス電圧・電流試験一般 JEC-0202 (1994)」, 電気書院 p.11 (1994)