

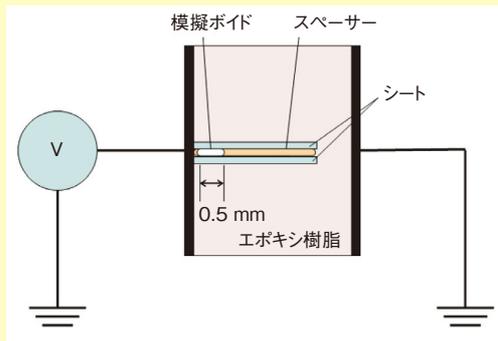
～エポキシモールド機器におけるボイド内の圧力推定～

エポキシモールド機器の高電圧化を目指した取組

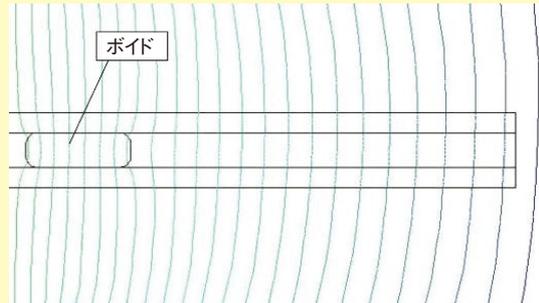
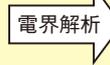
森 佑介
Yusuke Mori

滝澤 明広
Akihiro Takizawa

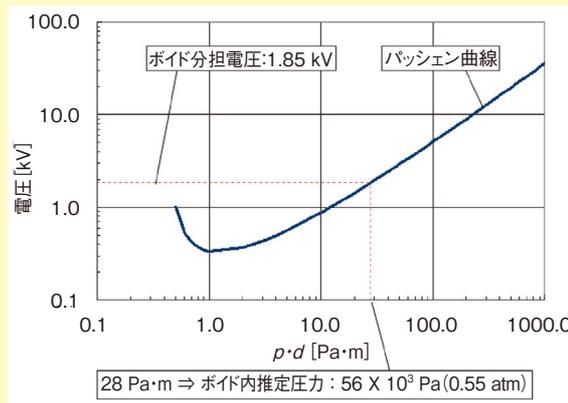
寺田 修
Osamu Terada



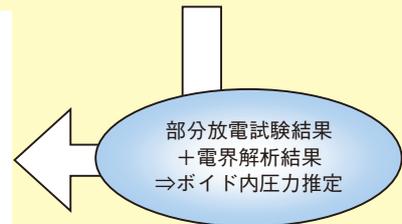
<供試器内の模擬ボイドイメージ>



<ボイド部分の等電位線図>



<ボイド内の圧力推定>



エポキシモールド機器におけるボイド内の圧力推定方法

エポキシモールド機器の部分放電特性を把握する上で重要となるボイド内の圧力推定方法を示す。様々なエポキシモールド機器におけるボイド内の圧力を直接測定するのは容易ではない。そこで本稿では、容易にボイド内の圧力を把握する方法として、部分放電試験結果と電界解析結果からボイド内の分担電圧を算出し、パッシェンの法則と照らし合わせることで圧力を推定した。

エポキシモールド絶縁の適用範囲を拡大することはSF₆ガスの削減などの観点から有用である。より高電圧の機器に適用する場合、機器の信頼性を確実に確保するために、製品設計や製造管理によるボイドレス化と併せて、万一ボイドが存在した場合の部分放電特性を把握しておく必要がある。

これまで筆者らは文献⁽¹⁾にて、部分放電消滅時におけるボイドの分担電圧がパッシェンの法則¹⁾と近い値となる結果を得た。これを利用し、ボイドを想定した電界解析を実施することで、部分放電消滅電圧を事前に予測できる見込みを得た。ただし、これはボイド内の圧力が大気圧と仮定できる場合であり、実際のモールド機器

では硬化プロセスにおいて、複雑に変化していると考えられる。これにより絶縁耐力が変化するため、ボイド内の圧力を把握する必要がある。

本稿では、検証用に模擬ボイドを内在させたモールド機器の部分放電特性を取得し、その結果と電界解析の結果から模擬ボイド内の圧力の推定を試みた。その結果、模擬ボイド内の圧力は大気圧より低い状態になっている可能性を見出した。この圧力推定方法を利用し、樹脂中に発生したボイド内の圧力を把握しておけば、部分放電特性の予測精度向上に繋がると考えている。

1) パッシェンの法則：放電電圧に関する実験則

1. はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械強度が優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられている。東光高岳においても計器用変成器などの電力機器に適用している。エポキシモールド絶縁の適用範囲が拡大されることで温暖化係数の高いSF₆ガスの低減にも繋がると考えられる。しかし、より高電圧機器へ適用する場合、信頼性の観点から、エポキシモールド機器の部分放電特性について十分に検証する必要がある。

一般的にモールド機器における部分放電は、微小な空隙に電界が集中することで発生する。注型時の巻き込みボイドも要因の一つであり、東光高岳においては、ボイドレスとなるよう樹脂の配合や温度、真空度等を管理している。また、規格に基づいた部分放電試験により、ボイド等の電氣的欠陥がないことを確認している。

エポキシモールド絶縁をより高電圧の機器に適用するためには、製品設計や製造管理によるボイドレス化と併せて、万一ボイドが存在した場合を想定し、部分放電特性を把握しておく必要がある。しかし、製品開発の度に多様なボイドを内在させた供試器を製作し、部分放電試験を実施するのは開発コストの増加に繋がる。そこで筆者らは電界解析を活用することで、ボイドが存在した場合の部分放電特性が把握できれば、開発コストの低減、製品の信頼性向上に繋がると考えている。

これまで筆者らは文献⁽¹⁾にて、エポキシモールド内部の放電現象の調査および検討を行い、ボイド部分の電界解析の評価について検証した。その結果、部分放電消滅時におけるボイドの分担電圧がパッシェンの法則と概ね近い値となった。このことより、事前にボイドを想定した電界解析を行うことで、部分放電消滅電圧を予測できる見込みを得た。ただし、これはボイド内の圧力を大気圧と仮定できる場合であり、実際のモールド機器では硬化プロセスにおいてボイド内の圧力が複雑に変化していることが考えられる。これにより、ボイド内の絶縁耐力が変化するため、実際のモールド機器におけるボイド内の圧力を把握する必要がある。これまでボイド内の圧力に関する検討としては、北村らや加子らにより、長期的な部分放電によって減圧されるといった報告がある⁽²⁾⁽³⁾。しかし、硬化終了後におけるボイド内の圧力について検討した例は少ない。本稿では、文献⁽¹⁾で述べた部分放電消滅電圧とパッシェンの電圧が近い値をとることを利用し、ボイド内の圧力の推定を試みたので報告する。

2. ボイド内の圧力推定方法

2.1 圧力推定方法

部分放電消滅電圧とパッシェンの電圧が近い値となることを利用し、以下の手順でボイド内の圧力を推定する。

- (1) 模擬ボイドを内在させた供試器を作成し、部分放電消滅電圧を取得する。
- (2) 模擬ボイドをモデル化して電界解析を実施し、印加電圧に対して模擬ボイドが電圧分担する割合を求める。
- (3) 取得した部分放電消滅電圧と模擬ボイドが電圧分担する割合から、部分放電消滅時の模擬ボイドの分担電圧を算出する。
- (4) パッシェン曲線から、模擬ボイドの分担電圧に対応する pd [Pa·m] を求め、これを模擬ボイドの長さで割ることで圧力を推定する。(p : 圧力, d : 模擬ボイドの長さ)

2.2 供試器

図1に作成した供試器を示す。モールド表面の片側を接地面としており、モールド内で部分放電を発生させるため、図2のように充電部と接地面との間に長さ0.5 mmの模擬ボイドを作成した。模擬ボイドはスペーサーを二枚のシートで挟み込むことで形成した。

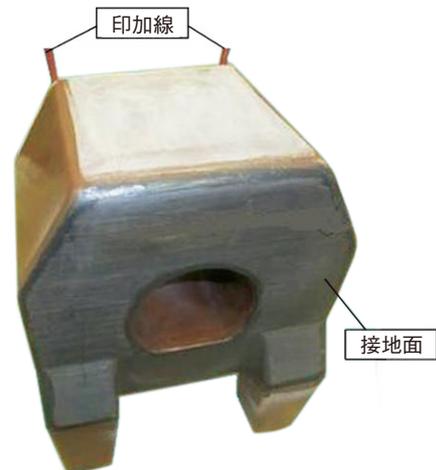


図1 供試器

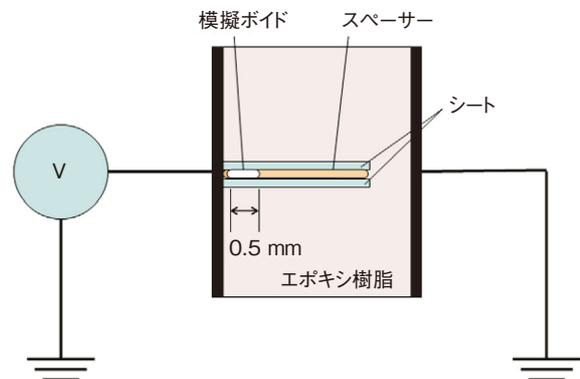


図2 供試器内の模擬ボイドイメージ

3. ボイド内の圧力推定結果および考察

3.1 圧力推定結果

- 2.1 に述べた手順で模擬ボイド内の圧力を推定した。
- (1) 供試器の部分放電消滅電圧を測定した結果、6.9 kVrms であった。
 - (2) 模擬ボイドを考慮した電界解析を実施し、印加電圧に対して模擬ボイドが電圧分担する割合を求めた。図3は模擬ボイド部分の等電位線図であり、模擬ボイドには印加電圧の19%の電位差が発生する。
 - (3) 部分放電測定結果(1)と電界解析結果(2)から、部分放電消滅時における模擬ボイドの分担電圧を算出すると1.85 kV ($6.9 \sqrt{2} \times 0.19$) となる。
 - (4) (3)で得た結果をパッシェン曲線に記入すると図4となる。1.85 kVに対応するpd積は28 Pa・mとなる。模擬ボイドの長さは0.5 mmであるため、模擬ボイド内の圧力は 56×10^3 Pa (0.55 atm) 程度であると推定できる。

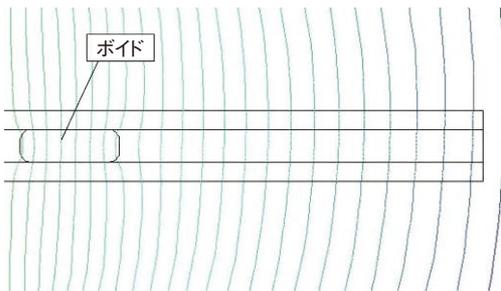


図3 模擬ボイド部分の等電位線図

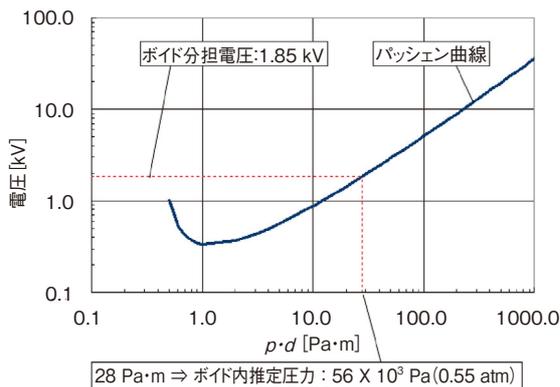


図4 模擬ボイド内の圧力推定

3.2 圧力変化のメカニズムの考察

これまでボイド内の圧力に関しては、文献⁽²⁾⁽³⁾で放電によって圧力は減少することが述べられているが、これらは hour オーダー放電を維持した場合の変化である。本稿の部分放電試験は sec オーダーの課電であり、放電による圧力変化ではなく、硬化終了直後には模擬ボ

イド内が大気圧以下になっていた可能性が高いと考えられる。このメカニズムを解明するためには、硬化プロセスにおけるボイドサイズや温度、ガス分子数の変化について検討する必要がある。図5に硬化プロセスにおける樹脂中のボイドサイズや温度、ガス分子数の変化と、それに伴うボイド内の圧力変化のイメージを示す。同図(1)のように注型時に巻き込み等によるボイドが残存した場合は、その際の真空度に応じた空気と微量に蒸発した硬化剤がボイド内に閉じ込められる。(2)周囲の雰囲気と平衡するようにボイドが収縮し、圧力が上昇する。このときの圧力上昇の程度は、樹脂の粘度等に依存すると考えられる。(3)加熱硬化が開始されると温度上昇により、ボイドが膨張する。(4)硬化反応により樹脂の流動性が失われてボイドサイズが決定する。なお、硬化反応に伴い樹脂は収縮するが、ボイド内の圧力に影響を及ぼすほどの体積変化は生じないと考えられる。(5)硬化後の徐冷により、ボイド内の温度が低下する。また、蒸発していた硬化剤はボイドの表面に堆積する。ボイドサイズが不変の状態でも温度低下やガス分子数が減少するため、ボイド内の圧力が低下する。

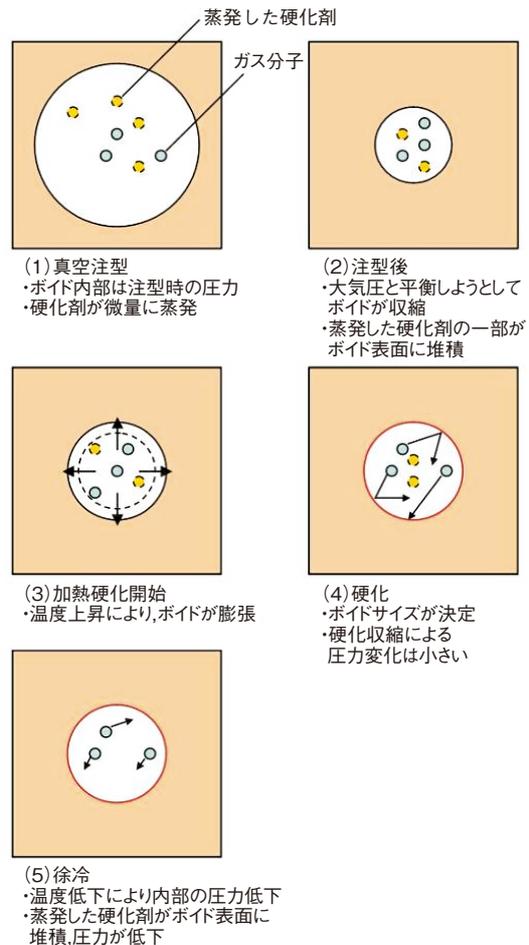


図5 硬化プロセスにおけるボイド内の圧力変化イメージ

硬化剤の蒸発の影響が極めて小さいと仮定すると、徐冷後のボイド内の圧力 P_5 は次式のように硬化温度と徐冷後の温度との比となる。

$$P_5 = P_4 \frac{T_5}{T_4} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P はボイド内の圧力、 T は温度、下添え字は図 5 に示した硬化プロセスを表す。樹脂の硬化温度によって異なるが、電力用エポキシモールドの場合、硬化直後の圧力 P_4 から、徐冷により 0.7 ～ 0.8 倍程度になると推定できる。ボイド内の圧力が瞬時に周囲の圧力と平衡し、硬化剤の蒸発などの影響が極めて少ないとするならば、 P_5 は 0.7 ～ 0.8 atm 程度になるはずである。しかし、3.1 節で解析と実験の結果から推定した圧力は 0.55 atm であったことから、注型後のボイド内の圧力が大気圧と完全に平衡せずに硬化したことが考えられる。樹脂中のボイドにおいては、さらに硬化剤の蒸発分の影響などにより減圧することが考えられる。それ以外にも、半硬化～完全硬化の間にボイド内のガスが樹脂に吸収されることなども考えられる。

以上のように、ボイド内の圧力を硬化プロセスから定量的に検討するのは極めて難しい。2.1 節で述べた方法であれば、容易にボイド内の圧力を推定できる。これを利用して、樹脂や硬化条件によるボイド内の圧力変化を把握しておけば、エポキシモールド機器の部分放電特性の予測に有用であると考えている。

4. まとめ

エポキシモールド機器におけるボイド内の圧力を把握することは、機器の部分放電特性を予測する上で重要である。しかし、これについて検討した例は少なく、なおかつ、硬化プロセスから定量的に計算することは困難である。そこで本稿では、模擬ボイドを内在させた供試器の部分放電消滅電圧と電界解析の結果から、模擬ボイド内の圧力推定を試みた。その結果、模擬ボイド内の圧力は 0.55 atm 程度と推定でき、大気圧より低い状態である可能性を見出した。

5. おわりに

電力の安定的な供給を維持するには、電力機器の長期的な信頼性が求められる。そのためには、機器の部分放電特性の把握が必要である。しかし、エポキシモールド機器における部分放電現象については、未だに不明瞭な点もある。今後もエポキシモールド機器における部分放電について検証し、信頼性の向上に役立てる所存である。

参考文献

- (1) 森, 滝澤:「エポキシモールド機器の高電圧化を目指した取り組み～エポキシモールド内部の空隙における部分放電現象と電界解析の活用～」, 東光電気技報, No.17 pp.17-20 (2012)
- (2) 北村, 平林:「エポキシ樹脂中の密閉ボイドにおける部分放電特性と圧力変化」, 電気学会論文誌 A, 105 巻 7 号 pp.365-372 (1985)
- (3) 加子, 東村:「エポキシ樹脂の内部部分放電によるボイド内ガス圧およびボイド内表面抵抗の変化」, 電気学会論文誌 A, 105 巻 10 号 pp.555-561 (1985)



森 佑介
技術開発本部
技術研究所
解析・試験技術グループ 所属
解析技術の研究に従事



滝澤 明広
技術開発本部
技術研究所
解析・試験技術グループ 所属
電力機器の開発・設計および解析技術の研究に従事



寺田 修
電力機器事業本部
モールド変成器製造部
設計グループ 所属
電力機器の開発・設計に従事