UDC 621.316.933.4 : 546.28.26 : 667.67 : 621.3.015.532
621.3.015.33

論文

55-A37

SiC ペイントのインパルス電圧に対する電界緩和特性

正員 門谷 建蔵 (日立)

正員 佐藤 隆徳 (日立)

正員 加子 泰彦 (日立)

1. ま え が き

核融合装置用磁界発生コイルの口出部や接続部において、短い絶縁距離で、高い沿面フラッシュオーバー電圧をもたすため、沿面電界の緩和を目的とした高抵抗コロナシールドが施される。回転電機の固定子巻線では、定格電圧が6 kV 級以上の機種には一般にコロナシールドが施されている。核融合装置用磁界発生コイルには、核融合実験におけるインパルスないし間欠的な直流電圧と、定期点検時の耐電圧試験における交流電圧とが加えられることになる。コイルに加えられる電圧の波高値が10 kV を超えるようなコイルでは、沿面絶縁距離を短縮し、かつコロナ放電による損傷を抑えるため、コロナシールドを施すのが望ましい。

回転電機の固定子巻線のコロナシールドは、従来はカーボンペイントや含鉄アスベストテープが用いられてきたが、電圧非線形抵抗特性を有する SiC ペイントが開発されてからは⁽¹⁾⁽²⁾、比較的電圧の高い機種では SiC ペイントが用いられるようになった⁽³⁾⁽⁴⁾。

核融合装置用磁界発生コイルのコロナシールドは、50 Hz の交流電圧からインパルス電圧までに有効でなければならない。従来からインパルス電圧に対するコロナシールドは、ストレスコーン方式、比較的低抵抗のカーボンペイントによる方式あるいはコンデンサブッシング方式が考えられている。当然、これらの方式と SiC ペイントによる方式を組合せたオールラウン

ドなコロナシールド方式が考えられる。

しかし我々は、回転電機の固定子巻線に施している SiC ペイントが、50 Hz 交流電圧に対してだけでなくインパルス電圧に対しても十分に有効であることを見いだした⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本論文は SiC ペイントによるコロナシールドがインパルス電圧に対して有効である理由を解明するため、一連の実験と考察を行なったものである。

2. 沿面フラッシュオーバー特性

まずコロナシールドの有効性をみるために、モデルコイルにより沿面フラッシュオーバー特性の測定を実施した。

第1図にフラッシュオーバー電圧の測定方法を示す。供試コイルには、50 mm×10 mm の断面の銅バーの周囲に厚さ4 mm のエポキシ樹脂含浸マイカ絶縁層を施した長さ1 m のモデルコイルを用いた。中央部に幅100 mm の主電極と、これから200 mm 離れた位置に幅20 mm の電極を、シルバーペイントを塗布して設けた。主電極は接地し、中心導体と電極を一括しこれ

第1図 フラッシュオーバー電圧の測定

Fig. 1. Measurement of flashover voltage along the coil surface.

Impulse Stress Grading Properties of SiC Paint. By Kenzo Kadotani, Member, Takanori Sato, Member & Yasuhiko Kako, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.).
門谷建蔵: 正員, (株)日立製作所日立研究所
佐藤隆徳: 正員, (株)日立製作所日立研究所
加子泰彦: 正員, (株)日立製作所日立研究所

に電圧を加え、主電極と電極の間でフラッシュオーバーする電圧を測定した。

ここで、主電極に接続してコロナシールドを長さ l (mm) 施し、この l を変えた。コロナシールドはカーボンペイントまたは SiC ペイントを塗布した。その表面インピーダンス特性については次章で述べる。

印加電圧は、① 50 Hz 交流電圧、② $1\ \mu\text{s} \times 40\ \mu\text{s}$ の標準インパルス電圧および ③ $0.1\ \text{ms} \times 2\ \text{ms}$ の開閉サージ電圧の3とおりで実験した。第2図および第3図にそれぞれカーボンペイントおよび SiC ペイントのコロナシールド長とフラッシュオーバー電圧の関係を示す。電圧は kV_p (添字 p は peak) で波高値を示す。

これよりカーボンペイントではコロナシールドの効果がわずかであるのに、SiC ペイントでは効果が非常

第2図 カーボンペイントによるコロナシールド長とフラッシュオーバー電圧

Fig. 2. Relations between flashover voltage and the corona shielding length of carbon paint.

第3図 SiC ペイントによるコロナシールド長とフラッシュオーバー電圧

Fig. 3. Relations between flashover voltage and the corona shielding length of SiC paint.

に大きく、かついずれの印加電圧波形に対しても共通していることがわかる。次章では SiC ペイントとカーボンペイントを対比させながら、SiC ペイントがインパルス電圧に対しても有効である理由を検討する。

3. SiC ペイントの特性と考察

〈3・1〉 SiC ペイント SiC ペイントは SiC の微粉末をバインダーレジンに分散させた塗料で⁽¹⁾⁽²⁾、一般に溶剤を含む液状バインダーレジンの溶剤が揮発し収縮するに伴い、SiC 粒子が密接し電界非線形抵抗特性を有する塗膜が形成される⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ここで用いた SiC ペイントは、平均粒径 $25 \sim 30\ \mu\text{m}$ の SiC 粒子 (48 重量 %)、アクリルレジン (14 重量 %) および有機溶剤 (38 重量 %) からなる。

SiC 粒子集合体を磁器結合剤で固着させたいわゆる炭化ケイ素バリスタの電圧電流特性は、主として交流電圧で評価されている⁽⁹⁾。また SiC 粒子集合体のインピーダンスは非オーム性 (つまり容量性) であることが知られている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし、コロナシールドに用いられる SiC ペイントの電圧電流特性 (あるいは表面インピーダンスの電界特性) は、公表されたデータがほとんどなく、筆者が調査した範囲では平林氏らによる直流特性のみである⁽³⁾。我々は SiC ペイントの表面インピーダンスを詳細にはあくすることから研究に取り掛かった。

〈3・2〉 表面インピーダンス

(1) 実験方法 第4図に表面インピーダンス測定用試料を示す。直径 30 mm のエポキシ樹脂棒 (誘電率約 3.0、体積抵抗率約 $1 \times 10^{16}\ \Omega \cdot \text{cm}$) の表面に 10 mm の間隔をあけて幅 3 mm の銅はく (厚さ 0.05 mm) を 2 箇所巻付けて電極とし、この電極の間にコロナシールド用ペイントを施した。電極間に電圧を

第4図 表面インピーダンス測定用試料

Fig. 4. Specimen for measuring surface impedance.

第 5 図 表面インピーダンスの電界特性
Fig. 5. Relations between surface impedance and electrical stress.

加え 10 kΩ の検出抵抗から真空管電圧計で電流の実効値を読み、幅 1 cm、長さ 1 cm あたりの表面インピーダンス（表面抵抗率に相当する）を算出した。

(2) 表面インピーダンスの電界特性 第 5 図には、直流および 50 Hz、500 Hz、1.5 kHz の各交流電圧を加えた場合の表面インピーダンスの電界特性を示す。交流電界は実効値で示す。

直流電界での表面インピーダンスは SiC の表面抵抗による表面インピーダンスである。交流電界での表面インピーダンスは容量性インピーダンスと抵抗性インピーダンスとからなる。第 5 図より、SiC ペイントでは容量性インピーダンスが主であることがわかる。また電界により表面インピーダンスが変化する、いわゆる電界非線形性を示している。

(3) 表面インピーダンスの周波数特性 次には低電圧の発振器により高周波低電界 (0.03 kV/cm) を加え、表面インピーダンスの周波数特性を測定した結果を第 6 図に示す。

第 6 図においてコロナシールド用ペイントなしの場合は、電極間の漂遊容量によるインピーダンスがでている。SiC ペイントやカーボンペイントを施した場合の表面インピーダンスにも、この漂遊容量分が入っているが、一けた程度の違いがありその影響は小さいと考えられる。SiC ペイントはカーボンペイントに比

第 6 図 表面インピーダンスの周波数特性
Fig. 6. Surface impedance—frequency characteristics.

第 7 図 電圧電流位相差の周波数特性
Fig. 7. Phase difference of voltage and current-frequency characteristics.

較して、周波数による表面インピーダンスの変化が著しく、容量性に近いことがわかる。一方、カーボンペイントは変化が小さく、抵抗性に近いことがわかる。

第 7 図はコロナシールドを流れる電流と印加電圧の位相差の周波数特性である。これからも SiC ペイントがほとんど容量性であることがわかる。

〈3・3〉 電流波形 次に、50 Hz 交流電界を加えた場合の電流波形をとらえた。

第 8 図はカーボンペイントにおいて高電界 ($E=4$ kV/cm) を加えた場合である。電流と電圧はほとんど同位相であり、カーボンペイントがほとんど抵抗性インピーダンスであることがわかる。

第 8 図 カーボンペイントの電流波形 (50 Hz)

Fig. 8. Current waveform for carbon paint by 50 Hz AC.

(a) $E = 1 \text{ kV/cm}$ (b) $E = 4 \text{ kV/cm}$

第 9 図 SiC ペイントの電流波形 (50 Hz 交流)

Fig. 9. Current waveform for SiC paint by 50 Hz AC.

第 9 図は SiC ペイントの場合である。低電界 ($E = 1 \text{ kV/cm}$) では、電流は電圧よりほぼ 90° 進んでおり、容量性インピーダンスがほとんどであることがわかる。ところが高電界 ($E = 4 \text{ kV/cm}$) では、電流波形は正弦波からずれてくる。

この SiC ペイントの高電界における電流波形を第 10 図によって考察する。SiC ペイントの両端に加わる電圧を $\dot{V}_0$ 、流れる全電流を $\dot{I}_0$ とする。 $\dot{I}_0$ は $\dot{I}_1$ と $\dot{I}_2$ に分離できる。ここで、 $\dot{I}_1$ は $\dot{V}_0$ より θ° だけ進んだ電流成分であり、 $\dot{V}_0$ に比例する正弦波電流である。 $\dot{I}_2$ は $\dot{V}_0$ とほぼ同相であり、 $\dot{V}_0$ の波形において瞬時の電圧値があるレベルを超えると $\dot{I}_2$ が生じる。その大きさは著しい電圧非線形性を示すと考えられる。

第 10 図 SiC ペイントの電流波形の分析

Fig. 10. Analysis of current waveform for SiC paint.

第 11 図 SiC ペイントの等価回路

Fig. 11. Equivalent circuits of SiC paint.

$\dot{I}_2$ は抵抗性であり、 $\dot{I}_1$ はほとんど容量性であるが、幾分抵抗成分が加わっていると言える。

〈3.4〉 SiC ペイントの等価回路 以上のことから、SiC ペイントの表面インピーダンスを、等価回路的に示すと第 11 図のようになる。電圧 $\dot{V}_0$ によって流れる電流 $\dot{I}_0$ は次式で示される。

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_0}{R_1} + j\omega C_1 \dot{V}_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_0}{R_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

R_1 は定数であり、直流電圧による表面インピーダンスの低電界における値に等しく、第 5 図より約 $3 \times 10^{11} \Omega$ のオーダーである。 C_1 も定数であり、第 6 図から計算すると、例えば 100 Hz のときの表面インピーダンス ($1/\omega C$) が $3 \times 10^9 \Omega$ であるから、 $C_1 \approx 1/2\pi f \times 3 \times 10^9 \approx 0.5 \text{ pF}$ となる。第 5 図において $E = 1 \text{ kV/cm}$ の表面インピーダンスから算出した値も、ほぼ同じオーダーになる。漂遊容量 C_0 は第 6 図のペイントな

しの場合について、 10^4 Hz での表面インピーダンス $5 \times 10^8 \Omega$ から算出すると $C_0 \approx 0.003 \text{ pF}$ となり、 C_1 に比べて小さいので無視できる。

R_2 は電圧（電界）によって変化すると考えられる。第 11 図においては、 R_2 と直列に、ある電界以上でオンになるスイッチ g が入っていると仮定した。そのしきい電界 E_0 は、第 9 図 (b) の電圧電流波形より推定すると $E_0 \approx 3 \text{ kV/cm}$ である。これは実効値で示すと約 2 kV/cm であり、第 5 図の 50 Hz 交流の場合に、 E が 2 kV/cm を超えると表面インピーダンスが低下しはじめるのに対応している。

この R_2 は直流の場合と交流の場合とでは非常に異なっており、第 5 図から 1~2 けた違うことがわかる。つまり、 g がオンしても直流ではあまり電流が流れない。それゆえ、第 11 図の等価回路を更に詳細にすると、 R_2 は R と C の直並列回路であり、そのインピーダンスは周波数特性をもつと言える。 50 Hz 以上の高周波電圧に対しては、ほぼ抵抗 R_2 で近似できる。

R_2 は次のオーダである。第 9 図 (b) において電圧がピーク（約 6 kV ）になる位相のところでは、 I_0 が $5 \times 10^{-5} \text{ A}$ となり、 I_1 は約 $1 \times 10^{-5} \text{ A}$ であるから、 I_2 は約 $4 \times 10^{-5} \text{ A}$ である。この場合、表面抵抗率 R_2 は約 $1.4 \times 10^9 \Omega$ と算出される。更に同図で電圧が 5 kV のところでは、 $I_2 \approx 1.2 \times 10^{-5} \text{ A}$ であるから R_2 は約 $4 \times 10^9 \Omega$ 、更に電圧が 4 kV では $I_2 \approx 0.4 \times 10^{-5} \text{ A}$ で R_2 は約 $9 \times 10^9 \Omega$ である。このように R_2 は R_1 よりかなり小さい。

I_1 は正弦波であるが、 I_2 は R_2 の電界非線形性と g のために正弦波からずれ、結局、 I_0 も正弦波ではなくなる。第 5 図の表面インピーダンスは、実際は第 10 図のような波形をしている電流の実効値から算出した、見かけの表面インピーダンスということになる。 50 Hz 交流からインパルス電圧までのコロナシールド効果を考察するには、第 11 図の等価回路で SiC ペイントの表面インピーダンスを近似するのが良い。ここで C_1 、 R_1 および R_2 は、表面インピーダンスと同様に、SiC ペイントの単位幅、単位長さあたりの値である。

〈3.5〉 SiC ペイントの電界緩和効果 コロナシールドの等価回路は一般に第 12 図のように示される⁽¹²⁾。 $\dot{Y}$ はコイル絶縁層の単位幅、単位長さあたりのアドミタンスであり、単位幅、単位長さあたりの静電容量を C とすれば $\dot{Y} \approx j\omega C$ である。 $\dot{Z}$ はコロナシールド用ペイントの単位幅、単位長さあたりの表面インピーダンス（つまり率と称すべき値）である。

沿面電界は一般に主電極端近傍で最大となり、その

第 12 図 コロナシールドの等価回路

Fig. 12. Equivalent circuit of corona shield.

大きさは印加電圧と $\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}$ に比例する⁽¹²⁾。そこで $\dot{Z}\dot{Y}$ を小さくすることにより電界緩和ができる。インパルス電圧に対する電界緩和が困難なのは、立上り時間の短い電圧波形に対して、 $\dot{Y}$ が大きくなるのに $\dot{Z}$ がそれほど小さくならないからである。SiC ペイントでは第 11 図の等価回路で示される $\dot{Z}$ を用い、 $\dot{Z}\dot{Y}$ は次式のようなになる。

$$\dot{Z}\dot{Y} = \frac{j\omega C}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + j\omega C_1} \dots\dots\dots (4)$$

比誘電率 4.5、厚さ 4 mm の絶縁層では $C \approx 1.0 \text{ pF}$ である。〈3.3〉節より $R_1 \approx 3 \times 10^{11} \Omega$ で、 R_2 は $10^9 \Omega$ のオーダであるから、 R_1 は無視できる。 $1/R_2$ は 10^{-10} v のオーダである。また $C_1 \approx 0.5 \text{ pF}$ であり、 ωC_1 は $f = 100 \text{ Hz}$ では約 $3 \times 10^{-10} \text{ v}$ のオーダであるが、 f が大きくなると増大し $1/R_2$ に比べてけたが違ってくる。そこで、高周波（あるいはインパルスや開閉サージ）に対しては

$$\dot{Z}\dot{Y} \approx j\omega C / j\omega C_1 \approx 2.0 \dots\dots\dots (5)$$

となる。このように高周波電圧に対しても $\dot{Z}\dot{Y}$ が大きくならず、従って電界緩和効果があるのは C_1 が大きいことによると言える。

50 Hz 交流においては $\omega C_1 \approx 1.5 \times 10^{-10} \text{ v}$ に対して $1/R_1$ は 10^{-12} v のオーダで無視されるが、 $1/R_2$ が 10^{-10} v のオーダで加わるので $|\dot{Z}\dot{Y}|$ は 2.0 よりも更に小さくなり、著しく電界緩和される。これは R_2 が小さいことによると言える。

4. ま と め

SiC ペイントによるコロナシールドは、 50 Hz 交流電圧からインパルス電圧までの広範囲な電圧に対し電界緩和効果があり、沿面フラッシュオーバー電圧が向上する。その電界緩和機構を解明するため、SiC ペイントの表面インピーダンスを詳細に調べたところ次のことがわかった。

(1) SiC ペイントの単位幅、単位長さあたりの表面インピーダンスを等価回路で示すと第 11 図のよう

になる。ここで検討した SiC ペイントでは $R_1 \approx 3 \times 10^{11} \Omega$, $C_1 \approx 0.5 \text{ pF}$ で, R_2 は電界依存性があり約 $10^9 \Omega$ のオーダーである。

(2) インパルス電圧に対する電界緩和効果は C_1 によって生じる。50 Hz 交流電圧においては R_2 によって更に著しい電界緩和がなされる。

終りにのぞみ, 本研究に対し御援助と御指導をいただいた当社日立工場 安芸主任技師ならびに日立研究所 宮下主管研究員に感謝する。

(昭和 54 年 5 月 4 日受付)

文 献

- (1) A. Kelen: 特許公報 昭 37-10971
- (2) A. Kelen: US Patent 3,066,180 (1962)
- (3) 平林・谷・川上: 三菱電機技報, 51, 12, 821 (昭 52)
- (4) 門谷・佐藤・加子: 電学論 A, 100, 229 (昭 55-4)
- (5) 佐藤・永井・門谷・宮下: 昭 54 年電気学会全大, 271
- (6) 門谷・安芸・松延・市野沢: 日立評論, 61, 5, 355 (昭 54)
- (7) A. Kelen, et al.: *Elteknik*, p. 59 (1967-4)
- (8) A. Kelen: *ibid.*, p. 109 (1967-6)
- (9) 増山・松岡: 電学誌, 88, 702 (昭 43-4)
- (10) 中戸川: 工業化学雑誌, 57, 484 (昭 29-7)
- (11) 増山・松岡: *National Technical Report*, 15, 6, 619 (1969)
- (12) 小川: 日立評論, 42, 4, 488 (昭 35)