空気, N_2 , CO_2 , N_2/O_2 及び SF_6/N_2 混合ガスの絶縁基本特性

正員 六戸 敏昭* 正員 八木橋義豊*
正員 遠藤 奎将* 正員 大森 荘司**

Fundamental Insulation Characteristics of Air, N_2 , CO_2 , N_2/O_2 and SF_6/N_2 Mixed Gases

Toshiaki Rokunohe*, Member, Yoshitaka Yagihashi*, Member, Fumihiro Endo*, Member, Takashi Oomori**, Member

SF_6 gas has excellent dielectric strength and interruption performance. For these reasons, it has been widely used for gas insulated switchgear (GIS). However, use of SF_6 gas has become regulated under agreements set at the 1997 COP3. Presently, development of a gas circuit breaker (GCB) using CO_2 gas and development of a high voltage vacuum circuit breaker (VCB) are being pursued. GIS consists of disconnectors (DS), earthing switches (ES) and buses in addition to GCB. Since the interruption performance is not an important requirement for DS, ES and BUS, use of a gas with high dielectric strength is better than use of a gas with good interruption performance. Air and N_2 are not greenhouse gases, and their dielectric strengths are higher than those of other SF_6 alternative gases, but only about one-third of the dielectric strength of SF_6 gas. This paper deals with a suitable insulation gas which has no greenhouse effect as an SF_6 alternative gas. The N_2/O_2 mixed gas was investigated by changing the ratio of O_2 . Moreover, the effect of an insulation coating was investigated and compared with the dielectric strength of SF_6/N_2 mixed gas. The dielectric strength of air under the coating condition was equal to that of 10% SF_6/N_2 mixed gas.

キーワード： SF_6 代替ガス, ガス絶縁開閉装置, 空気, 絶縁耐力, 絶縁被覆, 異物

Keywords: SF_6 alternative gases, GIS, air, dielectric strength, insulation coating, particle

1. まえがき

SF_6 ガスは絶縁性能及び消弧性能に極めて優れており, ガス絶縁開閉器 (GIS) 用の絶縁ガスとして広く使用されている。しかしながら, SF_6 ガスの地球温暖化係数 (GWP) は 23,900 と非常に高く, 1997 年に京都にて開催された COP3 (気候変動枠組み条約第 3 回締約国会議) において, 規制対象ガスの 1 つに指定された。GIS の SF_6 ガスの漏れは 0.1%/年以下であり⁽¹⁾, 点検・保守時のガス回収及びリサイクルを徹底することで放出量を低く抑えることが可能である。また, 最近では SF_6 ガスの使用量を削減する, あるいは温暖化効果の低減を目指し, SF_6/N_2 混合ガスや SF_6 より GWP が小さい CF_4 や C_3F_8 等の代替フロン系ガスに関する研究が多く行われている^{(2)~(4)}。最近では GIS の母線部分や GIL に SF_6/N_2 混合ガスを適用した例が報告されており, GIL の

場合 SF_6 の割合を 20%程度にすると経済的であると言われている⁽⁵⁾。また, 完全な脱 SF_6 ガス化, 脱フロン系ガス化の動きが出てきており, CO_2 適用ガス遮断器 (GCB) や真空遮断器 (VCB) の高電圧化の研究・開発が盛んに行われており実用化への目処が出てきている^{(6)~(8)}。24 kV クラス以下では乾燥空気や N_2 によるガス絶縁と VCB を組合せた環境負荷の小さい開閉装置が製品化されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。前記開閉器用の絶縁ガスには遮断性能の要求が低いことから, 絶縁性能により重点を置いたガスが適していると考えられる。以上の背景を考慮し, オゾン層破壊効果がなく COP3 で規制対象外となったガスで絞り込むと, 候補となるガスは純 N_2 ガス (N_2) もしくは N_2 と O_2 の混合ガス (乾燥空気を含む) となる。

本研究では上記検討を踏まえ, 候補ガスである純 N_2 ガス, 空気, N_2/O_2 混合ガスについて電極表面粗さ, ガス圧及び絶縁物表面異物付着時の絶縁特性を調べ, 各種ガスにおける清浄時及び異物混入時の絶縁特性を明らかにした。また, N_2 と空気については絶縁被覆による絶縁性能向上も検討した。なお, SF_6/N_2 混合ガス及び CO_2 は共に温室効果ガスであるが, 両ガスは SF_6 代替ガスとしての研究が盛んに行われていることから, 参考比較ガスとして取り扱った。

* (株) 日立製作所電力・電機開発研究所
〒319-1221 日立市大みか町七丁目 2 番 1 号
Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd.
7-2-1, Omika-cho, Hitachi 319-1221

** (株) 日本 AE パワーシステムズ
〒316-8501 日立市国分町 1-1-1
Japan AE Power Systems Corporation
1-1-1, Kokubu-cho, Hitachi 316-8501

2. ガス圧設定根拠及び各種ガスの基礎特性

2・1 ガス圧設定根拠 表 1 に各種ガスの基礎物性値の比較を示す⁽²⁾。空気及び N₂ は共に GWP とオゾン破壊係数 (ODP) に該当せず環境負荷が極めて小さいガスである。また、絶縁性能について SF₆ ガスを 100 とした場合、空気は SF₆ ガスの約 1/3 と低くなるが、N₂ 及び CO₂ に比べ約 10% 程度高く代替ガスの中では絶縁性能に優れたガスであると考えることができる。また、空気が N₂ よりも絶縁性能が高い理由として負性ガスである O₂ の影響が考えられ、N₂/O₂ ガスの O₂ の割合を変えることで空気よりも更に絶縁性に優れたガスを作りだせる可能性がある。

GIS への適用を考えた場合、選定した代替ガスの -20℃ 時における液化が始まる圧力は SF₆ ガスよりも高く、機器の定格圧力を高く設定することが可能である。また、ガス圧を高くすることによる絶縁性能向上も期待できるが、実際には高圧ガス保安上の観点から、従来と同等なガス圧力の範囲内で設計される可能性が高い。

以上の理由により、本報で検討するガス圧力を 0.6 MPa

表 1 各種ガスの基本物性比較 (SF₆, Air, N₂, CO₂)⁽²⁾

Table 1. Comparison of fundamental gas properties (SF₆, Air, N₂, CO₂).

Items	SF ₆	Air	N ₂	CO ₂
Molecular mass	146.1	28.8	28.0	44.0
Density (kg/m ³)* ¹	5.9	1.2	1.1	1.8
GWP* ²	23,900	—	—	1
ODP* ³	—	—	—	—
Boiling temperature (°C)* ⁴	-51	-140.7	-196	-78
Liquefaction pressure at -20 °C (MPa)	0.77	Over 4	Over 4	2
Dielectric strength (%) ⁽⁴⁾	100	33	30	30

*1 At 300K, 1 atm

*2 Global Warming Potential, Integrated period: 100years

*3 Ozone Depletion Potential

*4 At 1 atm

表 2 試験にて使用した空気の成分

Table 2. Composition of the air used in the experiments.

Items	Air
N ₂ (%)	78.1
O ₂ (%)	20.9
CO ₂ (ppm)	Under 336
CO (ppm)	Under 0.60
CH (ppm)	Under 1.67
H ₂ (ppm)	Under 0.92
Dew point (°C)	Below -60

までとした。

2・2 選定ガス種類及び空気の定義 試験したガスは、空気、N₂、CO₂、N₂/O₂ (O₂: 20%, 40%, 60%), SF₆/N₂ (SF₆: 5%, 10%) の 5 種類である。また、用いた空気の成分を表 2 に示す。SF₆ と同等な水分管理下における絶縁特性を取得するため封入する空気の露点は -60℃ 以下に管理した。

3. 実験装置及び実験方法

3・1 ガス空間絶縁 図 1 に供試電極の構成を示す。供試電極は同軸円筒電極 (導体直径: 80 mm, シース内径: 250 mm) と平行平板電極 (φ70 mm) を用いた。両電極構造とも接地側の電極の端部には当該部でのフラッシュオーバーを防止するため絶縁被覆を施した。電極表面粗さは算術平均粗さ Ra (平均線からの偏差の絶対値を合計した平均) の値を指標に評価した。試験電極の粗さ Ra は 4 μm, 8 μm, 18 μm の 3 種類とした。表 3 に試験電極表面粗さの特徴を示す。4 μm は試験電極に規則的なエッジを強制的に作ったものである。18 μm は試験電極をアルミ鋳物で製作し、表面は研磨仕上げしない状態である。8 μm はアルミ鋳物で製作した試験電極表面をバレル研磨し、鋭角の突起を無くす

図 1 電極形状

Fig. 1. Experimental electrode configuration.

表 3 電極表面粗さの特徴

Table 3. Feature of surface roughness of electrode.

Surface roughness	Feature
Ra: 4 μm	Regular unevenness
Ra: 8 μm	Barrel polish of an electrode
Ra: 18 μm	No polish surface of an electrode

と共に凹凸の幅を研磨しない時の半分程度にした試験電極である。なお、同軸円筒電極における接地シールドの円筒部分は被覆せず鏡面 ($Ra: 0.03 \mu\text{m}$) 仕上げとした。試験ガス圧は $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ で実施した。

印加電圧は雷インパルス電圧であり、初回フラッシュオーバー電圧はステップアップ法にて、50%フラッシュオーバー電圧は昇降法により求めた。

3・2 異物付着時の絶縁物沿面 絶縁物にはポストスペーサとコーンスペーサの2種類の形状を使用した。ポストスペーサを用いて各種ガスによるフラッシュオーバー電圧を比較し、異物付着時の絶縁物沿面の絶縁耐力が高いガス

図2 ポストスペーサ形状と異物付着位置

Fig. 2. Post spacer shape and particle adhesion positions.

図3 コーンスペーサ形状と異物付着位置

Fig. 3. Cone spacer shape and particle adhesion positions.

の選定を行った。また、コーンスペーサを用いて異物付着時の絶縁が SF_6 ガスと同様に絶縁物沿面方向電界に依存するかどうかを調べた。図2にポストスペーサ形状と異物付着位置を示す。導体及びタンク内径は図1(a)と同サイズとした。異物 ($\phi 0.45 \text{ mm} \times L3 \text{ mm}$, 錫メッキ銅線) はポストスペーサ中央の周方向に4箇所固定した。なお、ガス圧は 0.5 MPa にて実施した。図3にコーンスペーサ形状及び異物付着位置を示す。スペーサ表面の電界値 E_m を沿面方向成分の電界値 E_t と垂直方向成分の電界値 E_p に分けて絶縁を評価した。異物 ($\phi 0.45 \text{ mm} \times L3 \text{ mm}$, 錫メッキ銅線) は④部 (高圧側トリプルジャンクション), ⑤部 (絶縁物表面の電界 (E_m) の最大の位置), ⑥部 (絶縁物表面の沿面方向電界 (E_t) の最大の位置) に周方向に場所をずらしてそれぞれ2本ずつ固定した。

印加電圧は雷インパルス電圧波形で行い、ステップアップ法にて測定し、 15 kV ステップで昇圧した。

4. 実験結果

4・1 ガス圧力に対する基礎特性 図4に空気及び N_2 の50%フラッシュオーバー電圧のガス圧依存性を示す。試験電極は同軸円筒電極である。導体表面粗さ Ra が $4 \mu\text{m}$ 時の結果である。ガス圧及び印加電圧の極性に依らず空気の方が N_2 より50%フラッシュオーバー電圧 (以下50%FOV) は高かった。一方、空気及び N_2 には極性差が見られ、共に負極性雷インパルス電圧印加時の方が50%FOVは低くなった。50%FOVのガス圧依存性は類似であり、両ガス共にガス圧の $0.74 \sim 0.8$ 乗で変化した。次に、各種ガスに対する絶縁耐力の比較を図5に示す。試験電極には同軸円筒電極を使用した。導体表面粗さは $Ra: 4 \mu\text{m}$, ガス圧は 0.5 MPa 時の結果であり、空気の負極性で規格化した。試験したガスは全て負極性雷インパルス電圧印加時の方が正極性時よりも絶縁耐力が低くなった。そこで、以下の試験では負極性雷インパルスについて重点的に実施した。空気の絶縁耐

図4 50%フラッシュオーバー電圧のガス圧依存性

Fig. 4. 50% flashover voltage as a function of gas pressure.

図5 各種ガスに対する絶縁耐力の比較

Fig. 5. Comparison of dielectric strength for various gases.

図6 表面の粗さと50%フラッシュオーバー電圧との関係

Fig. 6. Relationship between surface roughness and flashover voltage.

力はN₂よりも7%程度高く、N₂とCO₂は同等であった。N₂/O₂の場合、O₂:20%時の絶縁耐力は空気と同等であり、O₂:40%の場合は空気よりも5%程度高くなったが、O₂:60%ではO₂:20%や空気と同等であった。N₂/O₂では最適O₂の割合が存在し、ガス圧が0.5MPa時では40%前後と考えられる。

4.2 電極表面粗さと絶縁被覆効果 図6に電極表面の粗さと50%FOVとの関係を示す。試験電極には同軸円筒電極を使用した。N₂の場合、ガス圧が0.2MPaでは電極表面粗さの影響は小さく、50%FOVはほぼ一定値であったが、ガス圧が高くなると電極表面粗さの影響が現れRaが4μmから8μmになると50%FOVは大きく低下した。Raを更に8μmから18μmへ変えたが50%FOVの低下は小さかった。一方空気の場合、電極表面の粗さの大きさにほぼ比例して50%FOVが低下する傾向を示した。表面粗さRaが4~18μmの範囲における50%FOVのガス圧依存性を調べた結果、0.5MPa程度の場合、電極表面粗さをRa:8μm以下に管理した場合、空気の方がN₂よりもフラッシュオーバー電圧が安定することが分かった。

次に、絶縁被覆効果について調べた。図7は空気及びN₂

図7 空気及びN₂における電極絶縁被覆時の初回フラッシュオーバー電圧のガス圧依存性

Fig. 7. First flashover voltage with coated conductor as a function of gas pressure in Air and N₂.

における電極表面を絶縁被覆した場合の初回フラッシュオーバー電圧のガス圧依存性である。試験電極は同軸円筒電極であり、電極外径φ80mmに絶縁被覆を施した。絶縁被覆材にはエポキシ系の絶縁被覆(比誘電率:4.7(厚さ1mm以下),3.8(厚さ1~5mm))を使用した。絶縁被覆の厚さが1mm以下の場合、空気及びN₂の初回フラッシュオーバー電圧(First FOV)は電極地肌時の最低フラッシュオーバー電圧(Min FOV)よりも高くなる傾向を示した。N₂(0.5MPa時)におけるFirst FOVの最低値はMin FOVよりも約6%高くなり、空気も同様であった。First FOVがMin FOVよりも高くなった理由として、電極表面を絶縁被覆した場合、電界放出される電子数が抑制されるためであると考えられる。また、絶縁被覆の厚さを3~5mmにするとFirst FOVはより高くなる傾向を示した。そして絶縁被覆の厚さが5mmの場合、First FOVは電極地肌時のMin FOVよりも約16%高くなった。なお、N₂のガス圧0.5MPa時において、絶縁被覆の厚さが100μm程度の場合における標準偏差は電極地肌時よりも1%以上小さく、空気も同様であった。なお、Min FOVは50%FOVに対する最低フラッシュオーバー電圧の割合が最も小さな値を求め、50%FOVに前記値を係数として掛けた値をMin FOVとして図中に示した。

4.3 絶縁物沿面異物付着時のフラッシュオーバー電圧

図8に各種ガス中の異物付着時のフラッシュオーバー電圧の比較を示す。試験は雷インパルス電圧にて実施した。空気の時に対してN₂時及びCO₂時の絶縁耐力は約0.7倍であった。一方、N₂/O₂(O₂:40%)時の絶縁耐力は空気時よりも高く、空気時の約1.05倍であった。また、N₂/O₂(O₂:40%)の絶縁耐力はSF₆/N₂(SF₆:5%)と比較して同等以上であった。従って、異物付着時の沿面絶縁耐力はガス種によって異なり、N₂<CO₂<<空気≒SF₆/N₂(SF₆:5%)≤N₂/O₂(O₂:40%)<SF₆/N₂(SF₆:10%)の順番であった。図9にコーン

図8 各種ガス中のポストスペース異物付着時のフラッシュオーバー電圧比較

Fig. 8. Flashover voltages of the post-spacer with particles in various gases.

図9 コーンスペースに異物を付着させた時のフラッシュオーバー電圧のガス圧依存性

Fig. 9. Relationship between gas pressure and flashover voltage of cone spacer with particles.

スペースに異物を付着させた時のフラッシュオーバー電圧のガス圧依存性を示す。50%FOV は空気時 (ガス圧: 0.4 MPa) を基準に規格化している。N₂, CO₂ 時の 50%FOV のガス圧依存性は小さく、且つガス圧が 0.4 MPa 以上でほぼ一定値となる。一方、空気時の 50%FOV はガス圧依存性が高く、ガス圧が高くなるほど N₂ や CO₂ に比べ大幅に 50%FOV が高くなり、ガス圧が 0.6 MPa 時のフラッシュオーバー電圧は SF₆/N₂ (SF₆: 10%) 混合ガスと比較した場合、同等以上となった。また、フラッシュオーバーの起点は全て (B) に取り付けられた異物であり、SF₆ ガスと同様にスペース表面に沿った電界成分で異物付着時の絶縁耐力の評価が可能である。

5. 空気の絶縁耐力の評価

5.1 電極絶縁被覆時 図7を基に、絶縁被覆の厚さとフラッシュオーバー時の絶縁被覆表面電界の関係にしたものを図10に示す。絶縁被覆表面電界及びフラッシュオーバー電圧は共に電極地肌時の空気を基に規格化した。空気及び N₂ は共に絶縁被覆の厚さが厚くなるとフラッシュオーバー電圧は上昇する傾向を示すが、絶縁被覆時の絶縁被覆表面電界は

図10 絶縁被覆の厚さとフラッシュオーバー時の絶縁被覆表面電界の関係 (絶縁被覆: エポキシ系)

Fig. 10. Relationship between coating thickness and breakdown field strength on coating surface (coating: epoxy).

図11 SF₆/N₂ 混合ガスのガス圧依存性

Fig. 11. 50% Breakdown electric field strength as a function of gas pressure (SF₆/N₂ mixed gas).

空気及び N₂ 共にほぼ一定であり、Min E よりも約 6% 高い。従って、絶縁被覆時の絶縁耐力は絶縁被覆表面電界を用いて評価が可能であり、絶縁被覆を厚くした場合のフラッシュオーバー電圧の向上は誘電体による電界緩和効果のためであると考えられる。

5.2 SF₆/N₂ 混合ガスと空気の絶縁耐力比較 図11に SF₆/N₂ (SF₆: 5%) 及び SF₆/N₂ (SF₆: 10%) 混合ガスにおける 50%破壊電界 (50%E_{BD}) のガス圧依存性を示す。試験電極は直径 70 mm の円盤電極であり、電極表面粗さ Ra は 4 μm 時の結果である。縦軸は SF₆/N₂ (SF₆: 10%) の 0.6 MPa を基準に規格化している。空気 (図4を基に図示) と 50%E_{BD} のガス圧依存性は同等であり、ガス圧の 0.76 乗前後であった。次に、空気と SF₆/N₂ 混合ガスを比較するために、電極面積の影響について以下に検討した。破壊電界は電極面積が増えると低下することが知られおり、電極面積や電界集中度が異なる場合であっても SF₆/N₂ 混合ガスにワイブル分布確率を適用すれば絶縁耐力の比較が可能で

ある見通しが得られている⁽⁴⁾。これは特定の面積の電極には弱点がある確率分布をもって存在し、面積の増加とともに弱点の存在する確率が増加すると考えられるためである。特定の面積の電極について、破壊電界の確率分布 $F_1(E_{BD})$ をワイブル確率分布で表すと (1) 式となる。

$$F_1(E_{BD}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E_{BD} - E_0}{E_s - E_0} \right)^m \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 m ：形状パラメータ、 E_s ：尺度パラメータ、 E_0 ：位置パラメータ、 E_{BD} ：特定の面積の電極時の破壊電界である。ところで、電極面積が上記特定の面積の N 倍である場合の破壊確率 $F_N(E_{BDN})$ は、 N 個並列に接続されている特定の面積の電極のうちどれか 1 つが破壊する確率と同じであるから (2) 式が成り立つ。

$$F_N(E_{BDN}) = 1 - [1 - F(E_{BD})]^N \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 E_{BDN} ：電極面積が N 倍時の破壊電界である。(2) 式に (1) 式を代入すると (3) 式となり、特に、 $E_0 = 0$ の場合には $N = 1$ の時の最頻値を E_{BD1} とすると (4) 式が得られる。

$$F_N(E_{BDN}) = 1 - \exp \left[-N \cdot \left(\frac{E_{BD} - E_0}{E_s - E_0} \right)^m \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$E_{BDN} = \left[\left(\frac{m-1}{m} \right) / N \right]^{\frac{1}{m}} \cdot E_{BD1} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 E_{BD1} ： $E_0 = 0$ 及び $N = 1$ 時の破壊電界である。従って、破壊電界は電極面積の $-1/m$ 乗に比例すると考えられる。 SF_6/N_2 混合ガスの形状パラメータ m は 22 程度⁽¹¹⁾ であるから、(4) 式を用いて SF_6/N_2 混合ガスと空気の絶縁耐力の比較が可能である。

図 7、図 10 を基に 0.6 MPa 時の空気と SF_6/N_2 混合ガスの絶縁耐力の比較を図 12 に示す。絶縁耐力はフラッシュオーバー電圧の -3σ 値で比較した。また、電界集中度が大きな部分に絶縁被覆を施すと誘電体による電界緩和が大きくなる

ため、誘電体による電界緩和を 10% と見込んだ場合である。絶縁被覆した空気の絶縁耐力は被覆なしの SF_6/N_2 (SF_6 ：5%) 混合ガスよりも約 6% 高くなり、 SF_6/N_2 (SF_6 ：10%) 混合ガスの約 95% となる。なお、電極表面粗さ Ra は $4\mu m$ である。

6. ま と め

SF_6 代替ガス候補である空気、 N_2 、 N_2/O_2 について CO_2 及び SF_6/N_2 混合ガスと比較検討し、以下の事項が明らかになった。

(1) 同軸円筒電極のガス空間における 0.5 MPa 時の絶縁耐力は $N_2 \approx CO_2 < \text{空気} \leq N_2/O_2$ (O_2 ：20～60%) の順番であり、 O_2 が 40% 前後で最大となる。

(2) 異物付着時のスペーサ沿面における絶縁耐力はガス圧が 0.5 MPa 時に $N_2 < CO_2 < \text{空気} \approx SF_6/N_2$ (SF_6 ：5%) の順番であり、空気は N_2 よりも 30% 程度高い。また、ガス圧を 0.6 MPa に上げると空気の絶縁耐力は SF_6/N_2 (SF_6 ：10%) 混合ガスと同等以上となる。

(3) 電極を絶縁被覆すると初回フラッシュオーバー電圧は被覆なし時の最低フラッシュオーバー電圧よりも約 6% 高くなる。また、電極被覆時の絶縁耐力は絶縁被覆表面電界で評価が可能である。

(4) SF_6 代替ガスを絶縁耐力の面から評価すると空気もしくは N_2/O_2 (O_2 ：20～60%) が適している。

(5) 空気のガス圧を 0.6 MPa とし、電極に絶縁被覆(部分的に厚さ：5 mm 以上)した条件では電極を被覆しない SF_6/N_2 (SF_6 ：10%) 適用時に近い寸法で設計が可能である。(平成 16 年 8 月 5 日受付，平成 17 年 1 月 14 日再受付)

文 献

- (1) 「電力用 SF_6 ガス取扱基準」，電気協同研究，Vol.54，No.3 (1998)
- (2) 「 SF_6 の地球環境負荷と SF_6 混合・代替ガス絶縁」，電気学会技術報告，No.841 (2001)
- (3) L. Niemeyer: "A Systematic Search for Insulation Gases and Their Environmental Evaluation", Gaseous Dielectrics VIII, pp.459-464 (1998)
- (4) F. Endo, T. Utsumi, and Y. Yagihashi: "Influence of Field Nonuniformity on Insulation Characteristics of SF_6/N_2 Gas Mixtures", Proc. of the Tenth Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.B, No.415, pp.294-295 (1999-8) (in Japanese)
遠藤 幸将・内海 知明・八木 橋義豊: 「 SF_6/N_2 混合ガス絶縁特性に及ぼす電界集中度の影響」，平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.415，pp.294-295 (1999-8)
- (5) A. Chakir and H. Koch: "Seismic calculations of directly buried gas-insulated transmission lines (GIL)", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol.2, pp.1026-1029 (2002)
- (6) H. Saitoh, H. Ichikawa, A. Nishijima, Y. Matsui, M. Sakaki, M. Honma, and H. Okubo: "Research and Development on 145 kV/40 kA One Break Vacuum Circuit Breaker", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol.1, pp.1465-1468 (2002)
- (7) K. Nagatake, S. Akiyama, H. Ichikawa, M. Sakaki, T. Fukai, and M. Honma: "Development of Environmentally Benign Type 72/84 kV Vacuum Circuit-Breaker", Proc. of the Fourteenth Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.B, No.237 pp.143-144 (2003-8) (in Japanese)
長竹和浩・秋山俊介・市川裕己・榑 正幸・深井利真・本間 信:

図 12 空気と SF_6/N_2 混合ガスの絶縁耐力の比較
Fig.12. Comparison of dielectric strength (Air and SF_6/N_2 mixed gas).

「環境低負荷 72/84 kV タンク形真空遮断器の開発」, 平成 15 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.237, pp.145-144 (2003-8)

- (8) T. Uchii, H. Kawano, T. Nakamoto, and H. Mizoguchi: "Considerations on Arc Quenching Properties of a Puffer-type CO₂ Gas Circuit Breaker", Proc. of the Fourteenth Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.B, No.226 pp.121-122 (2003) (in Japanese)
内井敏之・河野広道・中本哲哉・溝口 均:「パッファ型 CO₂ ガス遮断器における消弧性能の検討」, 平成 15 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.226, pp.121-122 (2003-8)
- (9) T. Rokunohe, T. Utsumi, Y. Yagihashi, F. Endou, T. Oomori, S. Itou, and E.Daibou: "Development of 24 kV C-GIS Insulated with High Pressure N₂ Gas", 2003 National Convention Record IEE Japan, No.207, pp.353-354 (2003-3) (in Japanese)
六戸敏昭・内海知明・八木橋義豊・遠藤奎将・大森荘司・伊藤俊二・大坊誠悦:「高気圧 N₂ ガス絶縁による 24 kV C-GIS の開発」, 平成 15 年電気学会全国大会, No.6-207, pp.353-354 (2003-3)
- (10) 「受変電設備の最新機器」, 富士時報, Vol.75, No.11 (2002)
- (11) L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, and D.S. Green: "Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆", NIST Tech.Note, No.1425 (1997-11)

六 戸 敏 昭 (正員) 1992 年 3 月茨城大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同 4 月, (株) 日立製作所日立研究所に入社。1998 年 2 月から 2000 年 2 月まで, 同社国分工場にて GIS 設計業務に従事。現在, 電力・電機開発研究所に所属し, ガス絶縁開閉装置に関する研究・開発に従事。博士(工学)。

八木橋 義 豊 (正員) 1992 年 3 月青森県立弘前工業高等学校電気科卒業。同年 4 月, (株) 日立製作所日立研究所に入社。現在, 電力・電機開発研究所に所属し, ガス絶縁機器に関する研究・開発に従事。

遠 藤 奎 将 (正員) 1968 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所に入社。以来, 日立研究所にてガス絶縁機器の高電圧技術開発に従事。現在, 電力・電機開発研究所主管研究員。工学博士。IEEE, 放電学会会員。

大 森 荘 司 (正員) 1965 年 3 月 13 日生。1989 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科生産システム工学専攻修士課程修了。同年 4 月日立製作所国分工場に入社。以来, ガス絶縁開閉装置設計に従事。現在, 2001 年 10 月日本 AE パワーステムズに所属し, 国内電機グループマネージャ。