66/77 kV C-GIS へのガス中複合絶縁の応用

正員 正 木 信 男 (東 芝)

正員 吉 田 哲 雄 (東 芝)

正員 宮 川 勝 (東 芝)

正員 大 島 巖 (東 芝)

正員 松 沢 喜 久 雄 (東 芝)

66/77 kV C-GIS Using Composite Insulation in SF₆ Gas

Nobuo Masaki, Member, Tetsuo Yoshida, Member, Masaru Miyagawa, Member, Iwao Ohshima, Member, Kikuo Matsuzawa, Member (Toshiba)

High-voltage SF₆ gas-insulated switchgear was at first introduced as a power supply facility.

As its reliability and safety come to be recognized in service, the gas-insulated switchgear has evolved into a power receiving facility. This switchgear consists of a cubicle enclosure sealed with a low pressure SF₆ insulating gas and a long-life vacuum circuit breaker installed therein with devices and circuits integrated at higher density, the switchgear has achieved a substantial volume reduction of some 50% from the conventional one.

This paper introduced fundamental technologies such as low-pressure SF₆ gas insulation, gas-solid composite insulation and gas monitoring, and also gas-insulated vacuum switchgear for 66/77 kV power receiving facilities.

1. ま え が き

ガス絶縁スイッチギヤは、電力会社の市街地域の電力供給設備として、1969 年ごろから営業運転されている。当初、2 kg/cm² 以上の高圧力 SF₆ ガスを封入したガス絶縁スイッチギヤ(以下、GIS)は 66 kV クラスに適用された。この間、ガス絶縁による省スペース化、高信頼性が実績を通し認識され、適用電圧は、800 kV クラスにまで拡大発展した。近年、産業構造の変化に相まって、高度情報化が進み大都市のインテリジェントビルが増加している。この受電設備の 66/77 kV スイッチギヤは、数年前から、小形化、信頼性向上と環境調和を求めて、角形容器に機器を収納し、1 kg/cm² 以下の低圧力 SF₆ ガスを封入したキュービクル形ガス絶縁スイッチギヤ(以下、C-GIS)⁽¹⁾が製品化され普及している。

今回、一層の省スペース化を図るため、低圧力 SF₆ ガス中複合絶縁を活用した。第 2 世代の C-GIS を開発し、従来の C-GIS 対比 50% (当社比)の小形化を達

成した。ここでは、この C-GIS に採用したガス中複合絶縁、現地組立をガス処理レスにして、信頼性を確保し、据付工期を短縮した特長ある構造と、小形の真空遮断器を収納した第 2 世代の C-GIS の縮小化技術を紹介する。

2. スイッチギヤの経済性

スイッチギヤの変遷は、不燃化などの安全性向上もあるが、各種絶縁技術開発による小形化の変遷である。この小形化したことの経済性を検討してみる。

受電設備スイッチギヤは、一般に間接設備であり、能率や力率などの効率比較による経済性評価は困難である。このため、受電設備用スイッチギヤを設けた場合の費用の保有費(A)で検討した。保有費(A)は式(1)により表した。

$$\text{保有費}(A) = \text{スイッチギヤ}(B) + \text{スペース費}(C) + \text{保守費}(D) \cdots \cdots (1)$$

更に、ここでは小形化によるスペース費(C)に着目

図1 客層と保有費

Fig.1. Cost distribution according to users.

し、Cを(2)式として表す。

$$\begin{aligned} \text{スペース費}(C) &= \text{旧スイッチギヤスペース費}(C_1) \\ &\times \text{新スイッチギヤスペース費}(C_2) \\ &\dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

すなわち、スイッチギヤの各種技術を駆使し、小形化することは、客先のスペース費(C)の削減になり、(1)式の保有費(A)が軽減でき、客先の経済性として評価できる。ここでいうスペース費とは、客層の利益を保有面積で割った値にC-GISのスペース面積を掛けた値とした。

図1は(B)を100として客層別にグラフ化したもので、大都市のビルにおいては、スイッチギヤ費(B)とスペース費(C)とは同等以上であり、この業種では省スペースのスイッチギヤが望まれることになる。この観点からみたスイッチギヤは、スイッチギヤの小形化もさることながら、客先のスペースを削減し、保有費(A)を軽減させ客先の経済性を向上させることが優先する。従来、66/77 kVクラスのスイッチギヤは、屋内設置の場合、特別に設計した大形電気室に設置されていた。今日では、客先経済性(A)の向上から、ビル受電設備の場合、標準の支柱間隔内にスイッチギヤを設置させることが指標になる。

3. 基礎技術

C-GISに使用している基礎技術の代表例を図2に示す。このうち、ガス中複合絶縁と、現地ガス処理レスを可能にしたスリップオン接続技術などについて説明する。

〈3・1〉 ガス中複合絶縁 SF₆ガスの破壊電圧は、ガス圧力P(密度)に比例した特性を示すが、スペーサのように絶縁物が介在した場合には、破壊電界強度Eの下限が(3)式⁽²⁾となる。

$$E = 8.9p^{0.85} \text{ (kV/mm)} \dots\dots\dots (3)$$

つまり、破壊電圧はガス圧力にほぼ比例して上昇するので、ガス圧力により絶縁耐力が決定される。

図2 C-GISの基礎技術

Fig.2. Basic technology of C-GIS.

図3 複合絶縁の概念

Fig.3. Applicable range of composite insulation.

図4 複合絶縁の分類

Fig.4. Classification of composite insulation.

一方、エポキシ絶縁物は、インパルス電圧で50 kV/mmの絶縁耐力が期待でき、ガス圧力1 atmにおいては大きな差が出る。

この関係を図3に示す。複合絶縁は、SF₆ガス単独では限界のある破壊電圧を、エポキシ絶縁物を組合せることにより、エポキシ絶縁物の値まで上昇させる絶

縁構造である。つまり、斜線部分が利用範囲である。

複合絶縁の分類を図4に示す⁽³⁾。大別して、電気力線を直交する直列バリアと、平行する沿面バリアがある。バリア絶縁では、SF₆ガス中において破壊電圧を大きく向上させることが困難であるため、これらの中間形、すなわち、電気力線を斜交する被覆絶縁を検討した。

被覆絶縁は、電極 e をエポキシ絶縁物 d で直接覆う構造であり、電極間はSF₆ガスを介した多媒質の絶縁媒体となる。なお、完全に電極間を絶縁物でおおってしまうと固体絶縁となり、絶縁耐力の大きな向上が見られるが、電極間を構成する寸法や形状などの自由度が失われる。

被覆絶縁特性の一例を図5に示す⁽⁴⁾。電極は、 $\phi 38$ mmの半球棒と平板を用い、半球棒の先端に絶縁厚さ t 30 mmのエポキシ樹脂を注形させた。

同図の横軸はギャップの長さ L (電極間距離)であり、縦軸はインパルスフラッシュオーバー電圧 V_{50} である。また、破線で裸電極の特性を併記した。

被覆電極の特性は、裸電極の特性と比べて三つの領域に分けられる。

- (i) X 領域：ギャップの長さの短い領域であり、裸電極の特性より低下する。これは、絶縁物により有効ギャップの長さが短くなり、最大電界強度が上昇したためである。最大電界強度は絶縁物の先端である。
- (ii) Y 領域：被覆により急激に電圧が上昇する

図5 絶縁層付きギャップのインパルス特性
Fig. 5. Impulse characteristic of gap with insulation layer.

領域である。

- (iii) Z 領域：ギャップの長さの長い領域であり、電圧特性が飽和する。しかし、裸電極に比べて電圧上昇の効果はある。これは、ギャップの長さを広げることにより、最大電界強度が絶縁物先端に位置するものの、絶縁物端部の電界強度が上昇し、この部分からフラッシュオーバーが始まるためである。

以上のことから、被覆絶縁は、 Y と Z 領域の境界付近で適用することにより、裸電極に比べて、負極性の場合約1.5倍の電圧向上効果があると言える。このガス中複合絶縁は主回路導体の先端部、または断路器の極間などへの応用が有効である。

このように、被覆絶縁による電圧上昇の要因としては、被覆による電極からの電子放出の抑制や、電界強度抑制による負イオンの電子離脱の抑制など、空間電荷を抑制し、初期電子の形式を遅らせていることが挙げられる。

〈3・2〉 真空遮断器 外部環境から主回路を保護するため、SF₆ガスを封入するC-GISの遮断部は、開閉寿命が長く、分解ガスなどを拡散させない構造である必要がある。また収納機器の集積密度を向上させるため、角形容器を用いるC-GISの絶縁は、SF₆ガス圧力に依存する絶縁設計は困難である。従って、一般にはSF₆ガス圧力は1 kg/cm²以下で、角形の非圧力容器を採用している。この思想で、スイッチギヤ全体を統一できる遮断部としての条件を、表1に示す。これには、遮断原理上から遮断エネルギーが小さく、すなわち寿命が長く低圧力にでき、遮断媒体を介さないクリーンな真空遮断器(以下、VCBと略記)が最適である。この特長あるVCBのシリーズ化を推進するため、縦磁界電極を考案、実用化し、現在では84 kVクラスまで適用されている。

またVCBの一層の小形化を図るには、種々の検討を必要とする。ここでは、バルブの小形化を図った例として、シールドに用いる材料を評価検討した⁽⁵⁾。図6に真空バルブの構造を示すが、固定電極の絶縁破壊電圧は電極の形状、材料により大きく変化することが知られている。これは、電極形状によって電界分布が異

表1 VCBの特長

Table 1. Features of vacuum circuit breaker.

	VCB	その他の遮断器
消 弧	アーク電圧：低	アーク電圧：高
媒 体	無媒体遮断	有媒体遮断

図 6 真空バルブの構造
Fig. 6. Structure of vacuum interrupter.

図 7 破壊電界強度 E_b の面積効果
Fig. 7. Effective surface area S_{eff} vs. breakdown field strength E_b .

なり、その結果絶縁破壊の開始に有効な電極面積も異なるためである。すなわち、電極表面の電界分布から不等係数 $f = E_{max}/E_{av}$ (ここで、 E_{max} は最大電界、 E_{av} は平均電界を示す) を求め、破壊電界強度 $E_b = fV_b/d$ を算出し、整理した。ここで、 V_b は破壊電圧、 d はギャップの長さである。

実験後の電極表面の観察から絶縁破壊箇所は、どの電極形状においても最大電界の 90% 以上の電界が加わる範囲内に集中していた。このことは、電極形状やギャップの長さを変化させることによって絶縁破壊に有効な電極面積も同時に変化していることを示している。このような観点からの破壊の開始に有効な電極面積 S_{eff} を最大電界の 90% 以上の電界を有する面積と定義して、破壊電界強度 E_b と有効面積 S_{eff} の関係を整理した。その結果を図 7 に示す。破壊電界強度 E_b 。

図 8 新形 72/84 kV 真空遮断器
Fig. 8. New 72/84 kV vacuum circuit breaker.

図 9 従来の現地列盤状態
Fig. 9. Conventional installation method.

と有効面積 S_{eff} の関係は、電極形状によらず同一直線上にのり、次式で表すことができる。

$$\text{銅電極 } E_b = 380 S_{eff}^{-0.23} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ステンレス鋼電極 } E_b = 580 S_{eff}^{-0.25} \dots\dots\dots (5)$$

以上のことからステンレス鋼を用いることで約 50% の電界強度を高くとれることになり、これに比例し、ギャップ間を小さくできるようになる。この技術を活用し、遮断器として、CAE などの解析により合理的設計を図った結果、図 8 に示すように遮断部を 30% 小形にできた。この小形化により、遮断器室に変流器を収納でき、機器の集積密度向上を図ることができた。

〈3・3〉スリップオン接続 工場では SF_6 ガスを封入し、封じ切ったままで遮断器を収納した C-GIS を出荷することが、品質維持の観点からも必要なことである。そのために工場組立範囲を拡大し、全装可搬を図る必要がある。

SF_6 ガス絶縁を活用し、小形化した単位盤の現地組立は一般に図 9 に示す方法が用いられている。

(a) 図：単位盤と単位盤との間に、ガスダクトを設け、現地ガス処理し、列盤する。単位盤は、ガス封じ

図 10 新方式現地列盤組立法
Fig. 10. New installation method.

図 11 輸送単位ユニット
Fig. 11. Transport unit.

図 12 盤間連絡母線の接続作業手順
Fig. 12. Procedure for connecting inter-cubicle bus.

切りであるが列盤方向の盤幅が大きくなり、SF₆ガス絶縁の小形の効果が発揮できない。

(b)図：単位盤に空間を設けず列盤し，単位盤を開放させ母線を接続し，その後ガス処理を行う，現地組立てするもので，上記より小形にできるが，ガス封じ切りによる信頼性効果が発揮できない。

そこで単位盤間に空間を設けず，盤幅方向の縮小ができ，ガス封じ切りし，信頼性を維持できる方法として図 10 に示す T 形プッシング(以下，T-Bg)⁽⁶⁾を開発した。この T-Bg は，CV ケーブルの終端処理接続技術を活用したものである。C-GIS の輸送単位ユ

表 2 開発材料と従来材料の特性比較
Table 2. Properties of newly developed material.

項目[単位]	開発材料	従来材料	測定法
エポキシ樹脂	液状エビス形	固形エビス形	—
充てん剤	ガラス短繊維 シリカ	— シリカ	—
性状	液 状	固 形	—
ゲル化時間 (150°C・min)	5	70	試験管法
熱変形温度 (°C)	150	107	JIS K 6911
耐クラック性	11	3.8	Oliphant washer
熱膨張係数 (10 ⁻⁵ /°C)	2.1	3.6	TMA 法
成形収縮率 (%)	0.11	0.59	自社法
引張り強度 (kgf/mm ²)	10.2	10.6	JIS K 6911
引張り弾性率(kgf/mm ²)	1,640	1,360	JIS K 6911
曲げ強度 (kgf/mm ²)	17.7	16.7	JIS K 6911
曲げ弾性率 (kgf/mm ²)	1,380	1,190	JIS K 6911
絶縁破壊 (kV/mm ²)	15.5	15.1	JIS K 6911

図 13 熱膨張率比較
Fig. 13. Comparison of thermal expansion coefficients.

ニットを図 11 に示す。この状態で全装可搬した単位盤は図 12 の手順で連結でき，当初の目的を達成でき，ガス処理時間の除去による据付工期の短縮効果もある。この方法により C-GIS と変圧器を接続することもでき，受電設備全体の配置の自由度を向上できた。

この特長ある T-Bg の場合，導体が T 形になっており，エポキシなどで注形すると，硬化時の収縮により組合される材料との熱膨張係数の差によって複雑に内部応力が発生する。この応力による注形品の亀裂(クラック)を防止する必要があるので，高耐熱，高耐

クラックの樹脂、および発生応力の抑制が不可欠となる。このため、表 2 に示すエポキシ樹脂を開発した。開発したエポキシ樹脂の熱膨張係数を従来の樹脂および金属と比較して図 13 に示す。図示したように開発した樹脂は熱膨張係数を低減したことで、アルミまたは銅の熱膨張係数に近似し、かつ導体接続の最高許容温度まで変化なく、注形時の発生応力を抑制できた。

なお、今回開発したエポキシ樹脂は、ガラス短繊維とシリカ粒子を多量に充てんした独自の複合材料⁷⁾である。

〈3・4〉 監視技術 電力供給基幹回路に位置付けられるスイッチギヤは、瞬断することなく電力を供給し続ける必要がある。C-GIS は密閉容器内に SF₆ ガスを封じ切りで使用していることから、いかに常時状態監視をするかが重要なテーマとなる。この「予知保全」策とし自己診断機能付き C-GIS モニタを製品化している。このモニタは、マイクロコンピュータとオプトエレクトロニクス技術を組合せることにより、ガス圧力監視機能と VCB 操作機構部の異常監視を行うようにしたもので、その外観を図 14 に示す。

この C-GIS 用モニタ装置は、次の監視機能と表示機能を備えている。C-GIS 内部のガス監視として、圧力低下、圧力上昇、負圧、温度上昇の 4 点について異常が発生したときに、表示パネルの赤い LED が点灯し、かつリレー接点により外部に信号を出すようにしている。また、操作機構部の監視としては、遮断器の機構部の動作異常やトリップコイルの断線の監視を行っている。なお、モニタ監視装置は CPU 異常監視、CPU 電源監視、センサ電源監視などの自己診断機能を備えている。

4. 新形 66/77 kV C-GIS

受電設備スイッチギヤの場合、電力量計測のため、

図 14 モニタ外観
Fig. 14. External view of monitor.

取引用計器用変圧変流器(以下、PCT)を接続する。電力量計測の器材として個々の計器用変圧器(PT)と変流器(CT)とを組合せる場合と、各要素を一体化したものとがある。一般に PCT は独特の形状をしており、電力会社が手配し需要家に支給される。この PCT をいかに合理的に接続するかが、受電設備用 C-GIS の技術である。

新形 66/77 kV C-GIS の定格を表 3 に示す。代表的受電設備用のスケルトンと、盤構成を図 15 に示す。PCT を中心に左右対称の回路構成を可能にしたのは、前述した。外部母線の採用によるもので、列盤方向の寸法を最小にした。また受電遮断器の一次、二次側に断路器があり、この断路器をコンパクトにすることが、盤奥行き方向の縮小になる。このため、前述したガス中複合絶縁を活用して、図 16 に示す小形の断路器を開発した。その他遮断器の小形化などにより収納機器の集積密度を向上させ、従来 C-GIS 対比 50% (当社比)の小形を達成した。また代表的受電盤の側面図を図 17 に、外観を図 18 に示すが、ビル支柱間隔 6 m 内に C-GIS を設置でき、設置スペースの大幅な削減

表 3 66/77 kV C-GIS 定格
Table 3. Ratings of 66/77 kV C-GIS.

公称電圧 (kV)	定格電圧 (kV)	定格電流 (A)	絶縁階級 (号)	耐電圧(kV)	
				商用周波	雷インパルス
66	72	800	20, 25	60	140
77	84	1200		70	160
					350
					400

図 15 66/77 kV 受電設備用 C-GIS 面積比較
Fig. 15. Size comparison between old and new 66/77 kV C-GIS.

図 16 新形 72/84 kV 断路器
Fig. 16. New 72/84 kV isolator.

図 17 66/77 kV 受電盤側面図
Fig. 17. Side view of new type 66/77 kV incoming panel.

図 18 新形 66/77 kV C-GIS 外観
Fig. 18. External view of 66/77kV C-GIS.

ができた。

5. あとがき

66/77 kV クラス C-GIS の縮小化技術と製品を説明した。C-GIS の省スペース化と高信頼性が認識され、22/33 kV クラス、またはそれ以下のクラスにも C-GIS が採用されてきており、ますます低圧力 SF₆ ガス絶縁を活用したスイッチギヤが増加すると考えている。

(平成元年 12 月 15 日受付, 同 2 年 7 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 正木・吉田: 「キュービクル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)の動向」, 電学誌, 107, 121 (昭 62-2)
- (2) 藤波・宅間・八島・河本: 「ガス絶縁スぺーサの帯電機構と絶縁特性」, 電学論 B, 108, 297 (昭 63-7)
- (3) 「放電バリア効果」, 電気学会技報 (II 部), No. 270 (昭 63-5)
- (4) 吉田・大島・宮川・正木: 「SF₆ ガス中の複合絶縁特性」, 平元電気学会会大, 138
- (5) 塩入・上川路: 「C-GIS用真空バルブの絶縁技術」, 電気計算,

3, 31 (平元-3)

- (6) 正木・吉田・佐藤(隆)・佐藤(勲)・吉川: 「66/77 kV C-GIS 用スリッポン式ケーブル接続部の開発」, 昭和電線電覧レビュー, 37, 176 (昭 62-2)
- (7) カオミンタイ・小山: 「高速成形ができる耐クラック性注型材料」, 東芝レビュー, 44, 353 (平元)

正 木 信 男 (正員)

昭和 23 年 5 月 9 日生。46 年 3 月 神奈川大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。主として, 中圧スイッチギヤの開発設計に従事。

吉 田 哲 雄 (正員)

昭和 24 年 9 月 4 日生。43 年 3 月 広島県立尾道工業高校電気科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。重電技術研究所に勤務。主として, スイッチギヤの気中絶縁, 複合絶縁, 固体絶縁および低圧力 SF₆ ガス絶縁に関する研究に従事。

宮 川 勝 (正員)

昭和 35 年 12 月 16 日生。58 年 3 月 明治大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社, 現在, 重電技術研究所に勤務。主として, 中圧スイッチギヤの研究開発に従事。

大 島 巖 (正員)

昭和 21 年 4 月 28 日生。44 年 3 月 九州工業大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社, 重電技術研究所に配属され現在に至る。工学博士。この間, 変圧器・開閉装置・変換装置・避雷器などの高電圧技術開発に従事。最近では真空遮断器, 中圧スイッチギヤ, 電力変圧装置の開閉技術・高電圧技術およびパルスパワーの研究に従事。IEEE 会員。

松 沢 喜 久 雄 (正員)

昭和 9 年 8 月 7 日生。33 年 3 月 東北大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。主として, 中圧スイッチギヤの開発設計に従事。