550 kV ガス絶縁開閉装置 (GIS) の開発と製品化

正員 高塚 桂三* 正員 土江 瑛*

Innovation on Energy Power Technology (6)

Development of 550 kV Gas Insulated Switchgear and its Practical Application

Keizo Takatuka*, Member, Ei Tsuchie*, Member

Since the first prototype GIS was constructed in Japan in 1968, rapid progress and wide extension were made during a few years. In 1973, the first 550 kV hybrid GIS was constructed and after three years, in 1976, the world first 550 kV full GIS was completed in Ohi nuclear power plant. During this remarkable short period of GIS development, effort of utilities and Mitsubishi Electric Corporation, as a manufacturer, are mentioned. Especially, some of technical subjects to the large sized equipments were picked up and that solutions were reported to be correct judging from up-to-date knowledges.

キーワード：550 kV 変電所，GIS（ガス絶縁開閉装置），SF₆ ガス，絶縁スペーサ

Keywords: 550 kV-substation, GIS (gas insulated switchgear), SF₆-gas, epoxy spacer

1. まえがき

変電設備の縮小化・高信頼度化・省力化等に多大な威力を発揮している GIS は、今日国内外の各所で広く運転されている。歴史的にみると、我国においては 1968 年の関西電力（株）姫路変電所における 84 kV プロトタイプの実用化試験から始めて、必要な基礎的技術開発の蓄積、より高い電圧階級へのチャレンジ、屋内・屋外の種々な設置環境への適用拡大等をユーザとメーカーが一体となって推し進め、電力の供給安定度向上に努めてきた経緯がある。

ここでは、三菱電機（株）における世界初の 550 kV GIS を実用化した技術的課題を中心に述べ、それらの取組みと克服の結果について現在の視点での評価を試みる。

2. SF₆ ガスの絶縁技術

SF₆ ガスは 1900 年にフランスで発見され、古くから絶縁媒体としての使用は考えられていた。当社においても、ガス絶縁機器への適用を考えた特性の研究は 1960 年頃より開始し、多くの研究成果を発表している。

550 kV GIS の開発に当たり、機器の大型化のためにまず問題となったのは、絶縁特性における面積効果であった。破壊電界強度と電極面積に関する実験の結果を図 1 に示す

が⁽¹⁾、開発当初はまだ長大な電極間の放電特性のデータが少なく、小中電極データから外挿による推定で設計を開始せざるを得なかった。

SF₆ ガス中の絶縁は電界依存性が高いので、ガス中の高電界部に導電性異物が存在すると絶縁性能が低下する。

550 kV 機器のようにタンク内作業もある大型のものでは、特に異物に対する絶縁特性を把握することは重要であった。当時は金属異物の影響を調べるために、針金片や金属粉が存在した時の実験を多数実施して設計基準を作成したり、直線状の金属線の電界による浮上の計算式など発表したが、ガス中に存在が考えられる異物にはいろいろな種類や形状があり、例えば、金属粉が付着した糸くず等、種々の異物に対して図 2 の如く多くのデータを積み重ねて、550 kV GIS

図 1 破壊電界強度と電極面積の関係

Fig. 1. Relation between minimum breakdown electric field and effective electrode area.

* 三菱電機（株）系統変電システム製作所

〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

Transmission & Distribution Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

図2 異物混入による閃絡電圧の低下

Fig. 2. Reduction of flashover voltages due to contaminated metallic particles.

の有害異物の設計・管理基準の設定に役立てた。

ガス絶縁機器中では、電界集中の起こらない準平等電界設計をするため、急峻波領域における絶縁耐力の立ち上がりが少ない。従って、類似の V-t 特性を有する避雷器による保護が望ましいが、初めて 550 kV GIS の納入が予定された関西電力猪名川変電所では気中ギャップによる保護で計画された。1960 年代後半、当時は 550 kV 機器の JEC 試験電圧値は検討中であつたので開発する GIS の試験電圧値は、対地間が商用周波 840 kV、雷インパルス 1800 kV、開閉サージ 1200 kV、遮断器・断路器極間は雷インパルス 1800 kV と $AC550 \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$ kV の重量を考えると、機器内部は最低保証ガス圧でこれらの電圧に耐えることとした。しかし、実系統ではガス漏れはほとんどなく定格ガス圧に通常保たれているので、気中ギャップとの絶縁協調は定格ガス圧で取れるものとした。すなわち気中ギャップ長は、最低保証ガス圧と協調する時よりも長い距離が設定でき、それだけ気中ギャップの動作が避けられることとなったが、40 年経過した現在、協調が取れなくて事故に至ったケースは無く、この考えが正しかったと言える。

3. 大形注型絶縁物の開発

550 kV GIS 用絶縁スパーサの開発に当っては、当時 300 kV クラスまでの開発・製品化実績を有するエポキシ注型絶縁物の適用を決定したが、84 kV クラスに比して外径比で約 3 倍、質量比で約 30 倍の大型化による質量効果への対応が課題であった。大形絶縁スパーサは、ボイド発生防止のための注型時樹脂注入の仕方、クラック防止と残留応力緩和のための温度分布管理、注型時間とその間の温度管理など研究を重ね、各種電気試験のほか冷熱試験、ヒートサイクル試験、中心導体との接合部の気密試験等に合格するものが多大の努力の結果得られた。

絶縁スパーサには遮断器と他の機器との間でガスの差圧を受けるものがあり、二重圧力式遮断器（高压側：1.5 MPa、低压側：0.3 MPa）の常時差圧の加わる消弧室筒や支持筒と共に、機械強度としては耐圧力特性に併せて高温時のク

図3 550 kV GIS 用スパーサ外観

Fig. 3. Insulating spacer for 550 kV GIS.

図4 部分放電試験状況

Fig. 4. Partial discharge tests for insulators.

リーブ特性の把握が課題である。また、遮断器、断路器の操作棒には繰り返し衝撃荷重に対する疲労強度の検討が重要である。これらは絶縁物の形状、寸法諸元決定に当っては、光弾性法による応力解析や実物による破壊試験を多数実施した。その結果、注型絶縁物中には複雑な埋金や電極を設けることを避け、内部応力の残留や集中を防いだ。

一方で、外部の電界緩和用電極の研究に注力し、後年、絶縁物／金属／ガスで構成されるトリプルジャンクション部の放電特性を明確にし研究成果を発表した⁽²⁾。図3にこのスパーサ外観を示すが、1970 年頃は電気機器へ適用した超大形のエポキシ注型品の実例として海外からも注目された。

なお、当社では製品に使う注型絶縁物は、図4の部分放電試験状況に示すとおり大形の接地タンクを用いた試験装置により、大小絶縁物を問わず全て単品で部分放電試験と耐電圧試験を行った後、組立工程に送ることにしたが現在でもこの方針は貫かれている。

4. 耐震設計技術

550 kV GIS は、大型で質量が大きくて実物大の機器加振による耐震強度の検証が出来ないことに加えてタンク枝管・ボルト締結部の撓性、ばね定数、減衰率等が不詳であったため、モデル実験とモード法による理論解析を実施した。モデル実験は実物と同じ材料で、縮尺 1/5 として、Buckingham の π 定理に基づき評価した。縮尺は加振器の加振力と周波数特性の制約、安定した溶接加工が出来る最小板厚 2 mm、

図 5 550 kV GIS の 1/5 モデルによる加振試験状況
Fig. 5. Seismic tests of 1/5 scale model of 550 kV GIS.

図 6 大形遮断器の輸送形態図

Fig. 6. Transportation method of large-scale circuit breaker.

締結ボルトの縮尺等を勘案して決定した。加振状況を図 5 に示す。検証、解析結果から GIS の耐震強度は十分で、大規模な GIS 構成でも解析により耐震強度の検討が可能であることを確認した。

5. 大形機器の輸送技術

550 kV GIS を構成する各機器はタンク内部に大きな質量を持つ導体やコンタクト、機構類をエポキシ注型絶縁物で支える構造になっている。従ってこれらを据付現場へ輸送する際には道路上の凸凹や輸送車の加速・減速及び不意の衝突事故等による衝撃や振動を伴うため対策が必要である。このため、実機をトレーラやトラックに積んで機器内部で発生する衝撃値を実際の道路を走り実測と解析を実施し積載や運搬時の管理値を決定することにした。一番大形の遮断器は、図 6 に示す如く昔人力で人を運んだ吊り駕籠式にしたガーター式トレーラを使い運搬する方法として、内部に発生する衝撃の出来る限りの緩和と機器高さの制限解消を図った。遮断器以外はトラック輸送が多いが、積載物にかかる衝撃荷重を上下と前後方向で計測し管理基準を 49 m/s^2 (5 G) 以下に設定した。車両にはタコメータを取付け、40 m/h の速度制限も加えたため、運転手にはかなり大きな精神的負担を掛けたようであった。

6. 550 kV GIS プロトタイプの運転試験

関西電力と共同で進めた 550 kV GIS 実用化研究の最後のステップは、全ての構成要素を含んだプロトタイプの信頼性確認のための実運転試験であった。本来、実系統での

図 7 550 kV GIS プロトタイプの運転試験
Fig. 7. Operation test of 550 kV GIS prototype.

運転試験が望ましかったが、550 kV 系統が未だ運転されていない時代であったため 1 相分のプロトタイプを図 7 の如く当社の工場構内に据付け、電流、電圧ともに実運転で想定される条件よりもはるかに過酷な条件を設定して実施した⁽³⁾。

遮断器は二重圧力式 4 点切り遮断に並列投入抵抗が設置され、操作機構には 300 kV 以下 GCB で実績を積んだ油圧操作機構を 550 kV 用として開発した。断路器は空気操作の一点切りで、接地装置と一体になっている。避雷器は SF₆ ガスギャップと非線形抵抗体が組み込まれた。遮断器のタンク直径は 1750 mm もあり、内部で“相撲が取れる”と言われる程の大きさであった。これはタンク内で消弧室組立を前提にした設計思想によるものであるが、タンクを封じ切る前には設計者もガムテープを持って内部に入り微細な異物除去に努めたものである。こういう作業を通して設計・組立・検査の各関係者との一体感が生まれ、各種の管理改善活動に結びつく貴重なノウハウが蓄積されていった。

1970 年から約 2 年間、130% 過電圧の連続印加の下、変流器の逆励磁による 120% 過電流の通電と遮断の繰返しによる熱ストレスの試験や、その他種々の過酷な電気・機械・実用的試験を実施し、長期試験の後には更に過酷な耐電圧試験、部分放電試験、耐震試験、輸送試験などを実施した。試験途上の点検時に、吸着材の微粉が機器操作時の振動でタンク内に波紋のように散らばっているのが見つかり、急遽ワイシャツの袖を切って袋を作り吸着剤を包んだこともあった。この経験を基に現在でも吸着材は布製袋内に入れて金属ケース内に組込んでいる。いろいろな貴重な経験と満足のいく性能試験の成果をもとに、550 kV 用にも GIS が適用できる確信を得た。

7. 世界初の 550 kV GIS の建設

当社構内での実用化試験の結果、世界初の 550 kV GIS が関西電力猪名川変電所に採用され、1973 年 10 月に運転を開始することになった。この GIS は母線に従来の気中母線を用いたハイブリッド形である。この形態になったのは、

図 8 猪名川変電所納め 550 kV H-GIS

Fig. 8. 550 kV hybrid-type GIS for Inagawa substation.

図 9 大飯原子力発電所納め 550 kV GIS

Fig. 9. 550 kV GIS for Ohi nuclear power station.

当時 GIS の建設コストは尚不確定なことに加えて、多量の長尺 GIS 母線のコストが変電所建設コストに多大な負担になることが想定されたからである。また、変電所の母線構成が 1-1/2CB 方式であったため機器配置をよほど上手にしないと不測のコスト増大を招くことも懸念されたためであった。機器の配置は、遮断器、断路器、接地開閉器、変流器、接続部がガス絶縁されて π 形に配置され、点検や万一の CB 脱着も容易な構成となっており (図 8)、この形態がそれ以降の 1-1/2CB 方式の標準となった。

1974 年 12 月からは、この気中母線もガス絶縁化したフル GIS の建設を目指し、関西電力と「550 kV 長尺母線実系統試験」の共同研究に入った。奥多々良木発電所構内において実系統からの課電と、変流器による通電試験を加えた長期実用化試験が行われた。基礎不等沈下を想定したベローズへの軸直角強制変位試験、真夏に夕立に遭うような急冷試験、積雪相当の荷重試験などを行った⁽⁴⁾。

これらの結果は良好で、1976 年 12 月、関西電力大飯原子力発電所にて母線を含めてガス絶縁化した 550 kV フル GIS が世界で初めて運転を開始した。この GIS は重要な原子力発電所に納入されたものであり、これまでの研究成果が全て反映され、その後の GIS の発展に大きく寄与した黎明期の集大成となった (図 9)⁽⁵⁾。この設備は、1976 年に 1, 2 号機用を設置のあと、1990 年には 3, 4 号機用が増設されて GIS の大開閉所となった。図 9 の右奥に見える半分が第 1 期工事分であるが、二重母線、遮断器 5 ユニットを備

表 1 550 kV GIS へのアプローチ

Table 1. History of GIS development from 84 kV to 550 kV class.

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
84kV 関西電力 と共研	実用化(試験工場) 実系統試験		(姫路 SS)〈国内初〉 ▼1号機運用(泉大津 SS)						
168kV 関西電力 と共研		実系統試験	(新生駒 SS) ▼中広島 SS 110kV ▼新管根 SS						
300kV 中部電力 と共研		(GCB) 設計・製作・試験 (GIS) 設計・製作・試験				(西濃 SS)	▼成出 SS		
550kV 関西電力 と共研		設計・製作・試験 (スパーサ) 設計・製作	長期実用化試験 (工場内)				▼猪名川 SS/ハイブリッド〈世界初〉 (長尺母線) 製作 実系統試験	奥多々良木 SS 大飯 SS(フル GIS) ▼	

える大規模なもので、GIS 化したことにより、従来開閉所に比べ、面積で 1/8、容積で 1/100 に縮小され、耐塩害・高信頼性の画期的な設備が実現されたのである。この工事により、当社においても専用の大形工場の建設をはじめ、製造、品質管理の体制が一新され、整備・強化された。

8. 550 kV GIS 取組みの回想

三菱電機における 550 kV GIS の開発は表 1 に示す如く、下位電圧クラスの実績を徐々に積み上げて短期間に最高電圧クラスを実現したもので、1968 年試験運転用に我が国初の 84 kV を実系統に投入して以来、約 10 年間で 550 kV フル GIS を完成させたことはユーザ殿始め関係者の努力の賜物であろう。前例のない製品を作り上げるために少しでも疑問が発生すれば実証試験を行う方針を貫いた。このため議論や調査に費やした時間は少なくなく、むしろ合理的に問題解決が図れたように思える。ただ、当時は殆ど後戻りが許されない状況でもあったため、現在の設計基準から考えれば裕度の大きいものになっているのは否めない。しかしながら、もし初期の段階で GIS の発展を阻害するような事件が発生していたならば我国においてこれほど適用が拡大したとは思われず、妥当な判断であったと考えている。

これらの GIS は外装品に関わる不具合を除けば、現在まで SF₆ ガス内に組込んだ基本性能に関しては、殆どトラブルも無く運転されており、適正な修理系部位の更新が為されれば今後も長く役目を果たしてくれると期待している。

(平成 20 年 2 月 12 日受付)

文 献

- (1) T. Nitta, N. Yamada, and Y. Fujiwara: "Area effect of electrical breakdown in compressed SF₆", IEEE PES Summer Meeting, Paper T73, 449 (1973)
- (2) H. Hama, H. Yamamoto, S. Sakuma, K. Takatsuka, and T. Yamauchi: Surface Flashover Characteristic of Disc-type Spacer system Initiated by Wedge Shaped Gas Gap and Its Improvement, IEEE Power Delivery, Vol.8 No.3 (1993)
- (3) 森井清二・山下義雄・春本容正・潮 恒郎・森岡昭二・稲村彰一: 「500 kV ガス絶縁開閉装置の開発とその適用」, 三菱電機技報, Vol.47, No.12 (1973)

- (4) 松村 晋・富永正太郎・今滝満政：「550kV ガス絶縁母線の実系統における性能試験」, 三菱電機技報, Vol.51, No.6 (1977)
- (5) 阿澄一興・松田節之・合志宏道：「関西電力(株)大飯原子力発電所納め 550kV ガス絶縁開閉所」, 三菱電機技報, Vol.5, No.6 (1977)

高 塚 桂 三 (正員) 1947 年 8 月 2 日生。1970 年 3 月姫路工業大学電気工学科卒業。同年 4 月三菱電機伊丹製作所に入社。主として、ガス絶縁開閉装置の開発・設計業務に従事。現在、系統変電システム製作所技師長。1989 年 3 月電気学会進歩賞, 1992 年 3 月オーム技術賞受賞。

土 江 瑛 (正員) 1945 年 9 月 28 日生。1964 年 3 月島根県立出雲工業高校機械科卒業。同年 4 月三菱電機伊丹製作所に入社。主として、ガス絶縁開閉装置の開発・設計業務に従事。1996 年 3 月電気学会進歩賞受賞。