

当社は、ガス遮断器において 1993 年世界で初めて 550kV 1 点切りガス遮断器の製品化に成功した。この遮断器の適用により 550kV ガス絶縁開閉装置 (GIS) は大幅な縮小化が可能となった。今後の課題として、新材料コンポジットブッシングの開発および近年の電力系統の変化による特殊な遮断性能への対応が必要となってきている。

GIS の技術変遷として近年の絶縁および温度仕様の合理化に至るまでの縮小化技術を紹介する。避雷器の技術革新により製品の雷インパルス試験電圧を低減する絶縁仕様の合理化 (以下、LIWV 低減と略記) が可能となり最新の絶縁技術は 1,000kV 母線に集約されている。また、GIS の品質を支える生産技術のトピックスとして注型品の解析技術、アルミニウムタンク製造の合理化、当社福島工場の組立試験ラインを紹介する。

The world's first 550kV gas circuit breaker (GCB) with one break was successfully developed by Toshiba in 1993, enabling a dramatic reduction in the size of gas-insulated switchgear (GIS). In the next stage of research in the field of GCBs, composite bushings and new GCBs with special interrupting performance corresponding to the recent changes in the network will be developed.

As examples of GIS evolution, a description is given here of minimizing technology which allows optimum specification of the insulation level and temperature rise characteristics. The development of a high-performance surge arrester has made it possible to reduce the lightning impulse withstand voltage (LIWV), and this technology has been applied to a 1,000kV bus. As examples of basic production technologies to ensure the quality of GIS, a casting analysis of insulators, an automated manufacturing system for aluminum tanks, and assembly and testing lines at the Fukushima Works are also described.

ガス遮断器の技術開発

Recent Developments in Gas Circuit Breakers

土屋 宗彦
M. Tsuchiya

山崎 利春
T. Yamazaki

1 まえがき

高電圧電力用ガス遮断器は、技術の移り変わりがもっとも激しい電気機器の一つである。また、ガス遮断器に対するニーズも下記のように多岐にわたり、おのおのに対応した技術開発を実施してきた。

- (1) 縮小化、総合経済性の追求
- (2) 電力設備増強のための高電圧化、大容量化
- (3) 電力系統構成の変化に伴うガス遮断器責務の多様化

ここでは、これらのニーズに適応したガス遮断器の最近の技術開発状況と適用技術、および今後の技術開発内容について紹介する。

2 最近のガス遮断器の技術開発状況と適用技術

2.1 ガス遮断器の縮小化技術

縮小化に対応した開発の一例として、550kV 1 点切りガス遮断器の開発について紹介する。

図 1 は世界で初めて完成し、1993 年に実系統での運転を開始した単体用 550kV 1 点切りガス遮断器の外観である。

この遮断器は、小型で低駆動力操作を可能にしたハイブリッドパッファ消弧室の採用、また接触子を同時に両方向に動作させることにより速度を抑え、摺動部、シール部の信頼性維持を可能にしたデュアルモーション機構を採用した。これにより、従来型 2 点切りガス遮断器と比較し質量で約 85%に、部品点数で約 70%に軽量、縮小化することができた。この遮断器の構造、開発思想については、本誌 47 巻 6 号⁽¹⁾に詳細に述べたので、ここでは省略する。

図 2 は、この技術を基に開発した GIS 用縦型 1 点切りガス遮断器について、従来の 2 点切りガス遮断器を縦構造にした場合との比較を示した。2 点切りで構成すると、全高約 7.5 m となり非常に大きく耐震性能上にも問題があるが、1 点切りで構成することにより、全高 5.4 m となり、GIS 全体を縮小化することができる。図 3 は、定格電流 8kA の GIS 1 回線にお

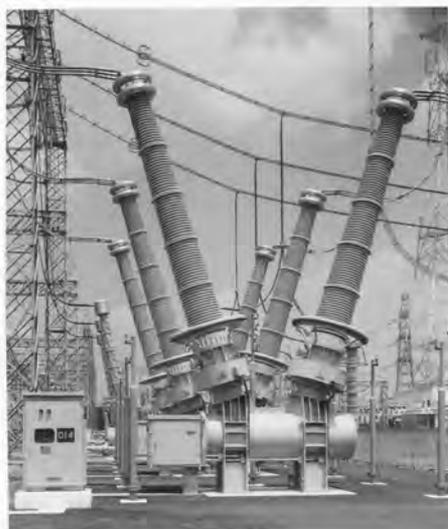


図1. 550kV 1 遮断点型単体用ガス遮断器 世界で初めて完成した 550 kV 1 点切りガス遮断器は、従来型と比較して大幅な縮小化を達成した。

550kV one-break gas circuit breaker

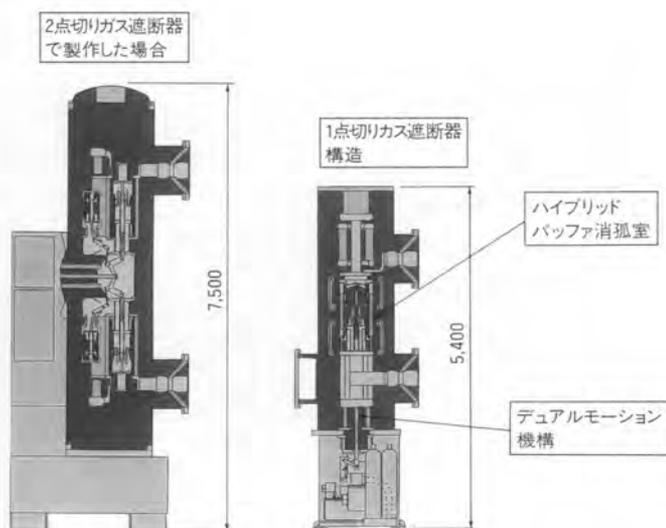


図2. 1 点切りと 2 点切り GIS 用縦型ガス遮断器の比較 遮断点数を 2 点切り→1 点切りにするだけで、550kV ガス遮断器の縦型配置が可能となった。

550kV gas circuit breaker for GIS

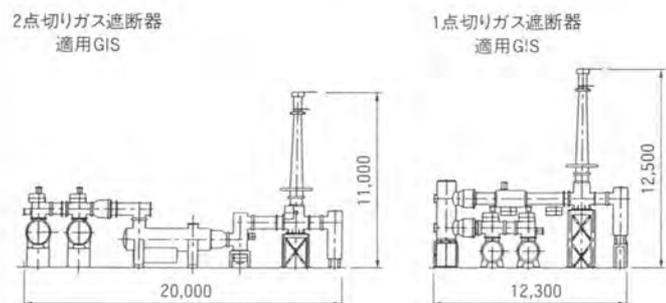


図3. 従来型と新型(1点切り縦型)ガス遮断器採用のGIS比較 1点切り縦型ガス遮断器の適用によりGIS面積・容積・質量の大幅な軽減を達成した。

Comparison of new and conventional 550 kV GIS

いて従来型 2 点切り横型ガス遮断器を使用した場合と、1 点切り縦型ガス遮断器を適用した場合の比較である。従来型と比較し、面積、容積、質量とも約 60 % に軽減でき、変電所内設置面積を大幅に軽減することができる。

2.2 ガス遮断器大容量化技術

国内電力消費量の急速な伸びに対応した大容量化ガス遮断器の開発としては、300kV 遮断電流 63kA ガス遮断器の開発を紹介する。

図4はこのガス遮断器の構造である。

このガス遮断器は、ハイブリッドバフファ消弧室を採用することにより、小型消弧室で遮断電流 63kA を達成することができた。さらに、従来の 300kV 遮断電流 50kA のガス遮断器と、この消弧室が異なるだけで、ガスタンク、油圧操作機構はすべて同一部品を使用して構成した。したがって、実系統で運用中の 50kA ガス遮断器についても、消弧室を交換するだけで 63kA 器に現地改造することができる。

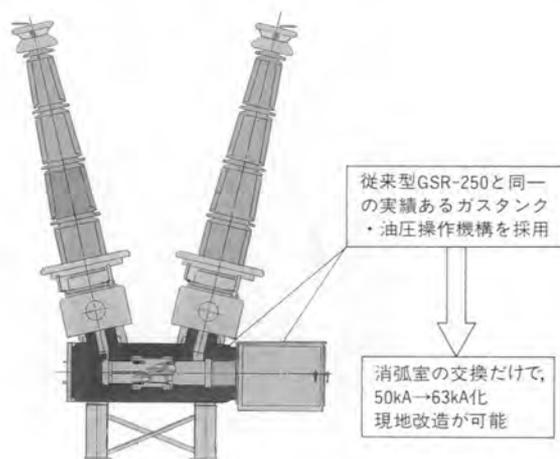


図4. 新型 300kV 63kA ガス遮断器構造 小型消弧室で遮断電流 63 kA 性能を達成した。

Structure of 300kV-63kA gas circuit breaker

3 今後のガス遮断器の技術開発

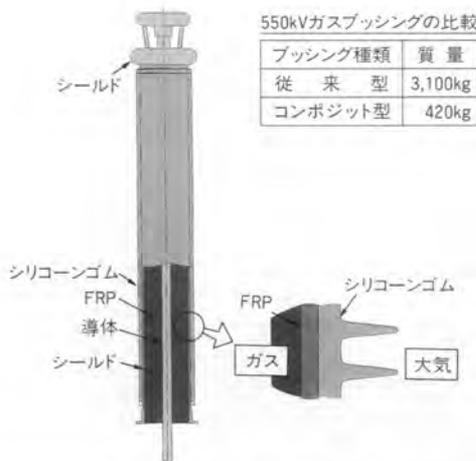
3.1 ガス遮断器の縮小化技術

ガス遮断器をさらに縮小化していくためには、新材料の適用が不可欠である。その一例としてガスブッシングの新しいコンセプトとしての軽量なコンポジット型ガスブッシングを紹介する。図5はガス遮断器の開発試験に、このガスブッシングを使用した実施例である。また、図6にコンポジット型ガスブッシングの構造を示す。コンポジット型ガスブッシングは磁器碍(かい)管を使用せず、繊維強化プラスチック (FRP) 筒の外周にシリコンゴムを接着して碍管を形成した構造である。FRP、シリコンゴムの複合材料という意味でコンポジット型ガスブッシングと呼ばれている。従来の磁器碍管使用ガスブッシングと比較して大幅な軽量化が可能となり、ブ



図5. コンポジット型ガスブッシングを使用したガス遮断器の遮断試験実施例 コンポジット型ガスブッシングは軽量で取扱いが容易なため、開発試験の効率がアップしている。

Current interrupting test of gas circuit breaker using composite gas bushing



550kVガスブッシングの比較

ブッシング種類	質量
従来型	3,100kg
コンポジット型	420kg

図6. コンポジット型ガスブッシングの構造 従来の磁器碍管を使用したガスブッシングと比較して、大幅な質量の軽減が達成できる。

Structure of composite gas bushing

ブッシングを搭載するガス遮断器についても、耐震性能上大幅な簡素化が可能となる。

今後、FRP、ゴムの劣化特性など、長期信頼性を確認することにより、製品への適用拡大が可能となる。

3.2 電力系統構成の変化に対応した遮断性能の検討

近年の電力系統構成の変化は、規格で定められたガス遮断器の遮断責務を上回る条件を発生する可能性があり⁽²⁾、適用されるガス遮断器の選定において十分な検討が必要になる。

3.2.1 短絡容量の増大化傾向への対応

短絡容量の増大の一例としては、図7に示す電力系統の環状系統から放射状系統への移行における TRV (過渡回復電圧) 上昇率の増加を挙げることができる。従来の環状系統では並列回路により、サージインピーダンスが小さいため短絡電流が大きくなる。この短絡電流を抑制するため最近では放射状系統とする系統構成が出てきている。放射状系統では短絡電流は低下するが、並列回路の減少によるサージインピーダンスの増加割合が大

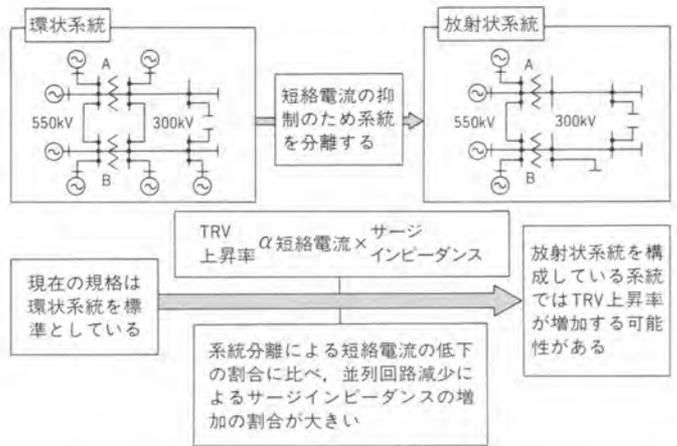


図7. 放射状系統における TRV 上昇率の増加 電力系統の環状系統から放射状系統への移行により、TRV 上昇率が増加する可能性がある。

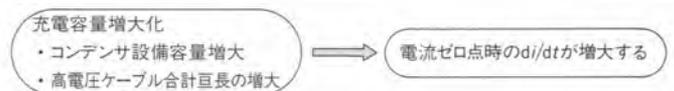
Increase of transient recovery voltage (TRV) in radial networks

きくなり、結果として遮断時の TRV 上昇率が増加する。現在の規格は環状系統を標準としているため、規格値を上回る TRV 上昇率が発生する可能性がある。

3.2.2 系統の充電容量増大傾向への対応

次に、系統の充電容量増大化傾向における遮断責務の変化としては、図8に示す系統の充電容量の増加に伴う電流ゼロ点時の di/dt (電流変化率) の増大があげられる。

近年のコンデンサ設備容量の増大、高電圧ケーブル巨(こう)長の増大で系統の充電容量が大きくなると、事故電流による高周波電流の減衰が遅くなるため、遮断時の電流ゼロ点で高周波による di/dt が増大する。遮断電流 50kA の遮断器に対して、80kA 相当の di/dt の遮断性能が必要となる例もある。



- 事故電流への高周波含有分が変化する
- ガス遮断器の適用機種について十分な検討が必要である

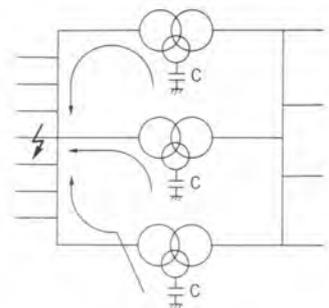


図8. 系統の充電容量増大化傾向への対応 電力系統の充電容量の増大により、ガス遮断器の事故電流遮断時の di/dt が増大する。

Increasing tendency of capacitance in electric power network

4 あとがき

ここでは、高電圧遮断器の最近の技術開発状況と適用技術、

および今後の技術開発内容について紹介した。今後ともユーザーのニーズに対応するとともに、電力系統の構成の変化にも対応し、いっそうの縮小化、大容量化を達成し、信頼性の高いガス遮断器の技術開発を進めていく所存である。

ガス絶縁開閉装置の技術開発

Recent Developments in Gas-Insulated Switchgear

大山 敏 青柳 浩邦
S. Ohyama H. Aoyagi

1 まえがき

SF₆ガスを絶縁媒体としたGISは海外では1966年に245kVの変電所が実用化され、国内では1969年に72kVの製品が実用化された。その後、国内で要求される縮小化、耐震性能、対汚損性能などに対してGISがきわめて優れた特長を持っていることから急速に普及し、現在では開閉装置の主流を占めている。当社でもすでに4,300回線を超えるGISが製作出荷され良好に運転されている。この間にGISの技術変遷は著しいものがあり、高信頼度化、高電圧・大容量化、縮小化などで急速に製品開発が進んだ。ここでは、GISの技術革新の概要と製品づくりを支える生産技術について紹介する。

2 ガス絶縁開閉装置の技術革新

2.1 当社GISの変遷

GISは電流遮断性能の向上、絶縁技術の高度化、材料技術の進歩、解析技術の高度化などの技術革新に支えられて、この約20年間に画期的に縮小化、高信頼度化を達成してきた。機種変貌(ほう)の著しい300kV GISを例にして製品の変遷を図9に示す。1970~80年代では、ガス遮断器の単圧化と1点切り化が達成され、絶縁現象の解明や注型絶縁物の技術進歩により機器の縮小化が進展した。また、避雷器の素子が炭化ケイ素から高性能酸化亜鉛へと変化するなどの材料技術面での大きな進歩があった。1980年代の後半からは機器の全三相化と複合化、および避雷器の高性能化によりLIWV低減や温度仕様の合理化が導入されいっそうの縮小化が進んだ。この約20年間に据え付け面積で37%、部品点数で20%に減少している。

2.2 避雷器の技術革新とLIWV低減

避雷器の技術革新によりLIWV低減が可能になったことは、

GISにいっそうの縮小化の可能性を与えている。

図10に、LIWV低減にいたる技術革新のフローを示す。高性能酸化亜鉛素子の開発および解析技術の高度化の両面からLIWV低減が可能となった。素子開発では、組成改良によりV-I特性平坦化、長寿命化、高課電率化を達成し、また製造プロセスの改良により均一性を確保し高耐量化を達成した。さらに解析技術の高度化により系統交流過電圧仕様の見直しと合理的な絶縁協調手法が導入されLIWV低減が可能となった。

図11に500kV高性能避雷器の仕様と構造を示す。JEC(日本電気学会・電気規格調査会規格)217に対してLIWVと制限電圧がおのおの1,425kVと870kVに低減され、構造的には金属シールドによる素子の電位分担制御方式を採用し、簡素化による信頼性向上を図っている。

2.3 LIWV低減におけるGISの絶縁設計

GISの場合、SF₆の絶縁特性から、試験電圧の中では雷インパルス試験電圧に対する絶縁がもっとも厳しくなり諸元決定の支配要因となっている。したがってLIWVが低減されると

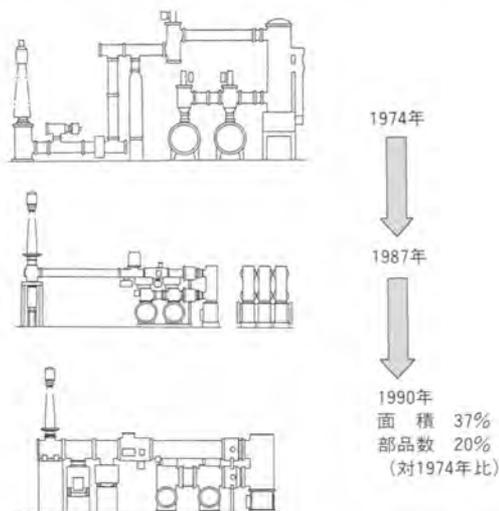


図9. 300kV-8kA GISの変貌 機器技術の革新により、大幅な縮小化と部品数の削減を達成している。

Evolution of 300kV-8kA GIS

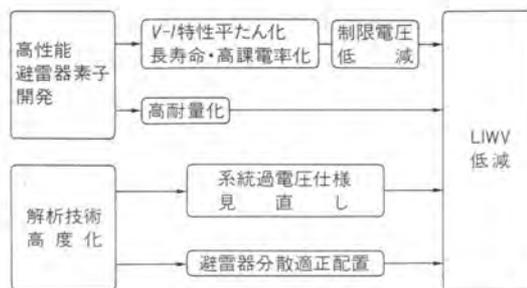


図10. LIWV低減にいたる技術革新 避雷器素子と解析技術の両面の発展がLIWV低減を可能にした。

Technical innovations for LIWV reduction

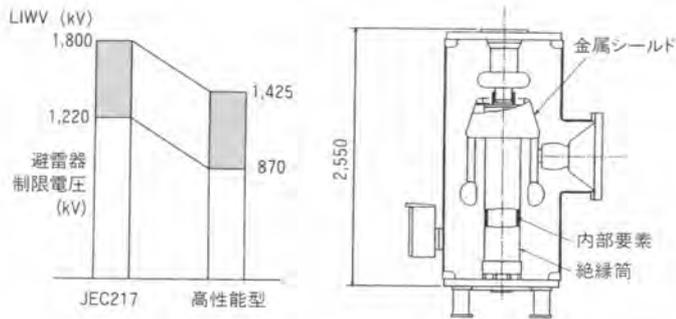


図 11. 500kV 高性能避雷器 避雷器の制限電圧の低減により信頼性を損わずに LIWV 低減が可能となっている。

500kV high-performance surge arrester

縮小化が可能となる。縮小化した場合、AC 運転電圧や開閉サージに対するストレスが上昇してくるため、これらに対する対策と評価が必要になってくる。

縮小化により交流運転レベルのストレスが 20~30% 高くなっても図 12 に示すガス空間および固体絶縁物の長時間 $V-t$ 絶縁特性や⁽³⁾、固体絶縁物の開閉サージ $V-N$ 特性はまだかなりの裕度がある。GIS で製造上存在しうる数 mm の金属異物に対する対策が縮小化には重要となる。金属異物は交流電界下で運動し、タンクの内部電界が高くなるとタンクと高压電極間で往復運動を行う。この現象で金属異物が高压電極近傍に到達したとき、断路器サージに代表される急峻(しゅん)波サージが印加されると金属異物により乱された不平等電界下で著しい絶縁低下現象が生ずる。したがって、タンクの内部電界の選択および金属異物の挙動抑制と無害化が重要である。1,000kV では 500kV に比較し大幅な絶縁合理化仕様・LIWV 低減が適用されている。1,000kV 母線では常時 AC 運転電圧が 500kV の 2 倍であるにもかかわらず口径が 500kV 母線の 1.27 倍に縮小化されている。

図 13 に 1,000kV 母線への適用技術を示す。きめ細かな異物発生抑止対策、異物が動き回らないように無力化するタンク

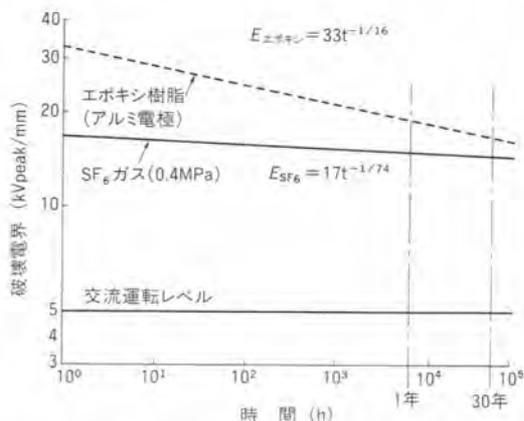


図 12. 長時間 $V-t$ 特性 縮小化により交流運転レベルの電界が高くなっても、約 3 倍の裕度がある。

Long-term $V-t$ characteristics

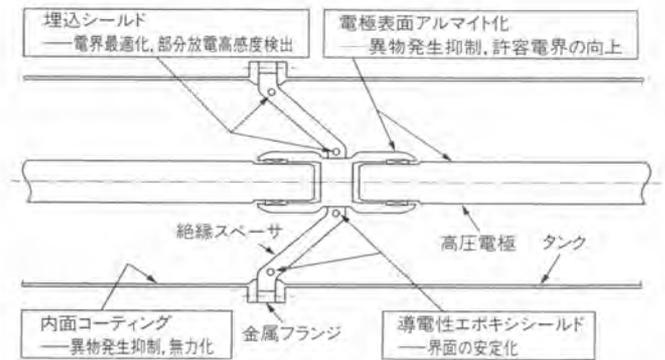


図 13. 1,000kV 母線の絶縁技術 きめ細かい金属異物発生抑止と無力化対策が縮小化を可能にしている。

Insulating technology for 1,000kV busbar

内面コーティングおよび導電性エポキシシールドによる電極界面の安定化技術などの、新しい技術と蓄積した技術の協調が縮小化を可能にしている。

2.4 168/204kV 新型 GIS

この章の最後に新製品である 168/204kV GIS の適用技術を紹介する。図 14 に外観を示す。GIS のハードウェア面における指向技術である縮小化、大容量化、操作器の簡素化などを実現化している。ガス遮断器は従来の空気または油圧操作に代えてバネ操作方式を採用し簡素化を図った。また、縮小化により従来困難であった 1 回線全体の一体輸送が可能となり、据え付け工期の短縮と工場品質の直送化の拡大を実現できた。定格は遮断容量 40kA・電流定格 4,000A と大容量化を達成している。

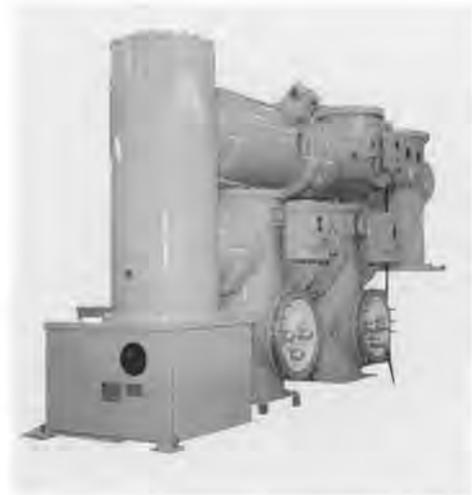


図 14. 168/204kV 新型 GIS 縮小化により 1 回線全体の輸送が可能である。

New 168/204kV GIS

3 最近の GIS の生産技術

GIS の生産には、注型絶縁物、製缶溶接タンク、切削加工

部品、鍛造部品などの部品製作とそれらの工場組立・試験と現地据え付け・試験の幅広い生産技術が必要である。長年培ってきたこれらの生産技術により GIS の高い製造品質と品質の安定化を達成しユーザーニーズにこたえてきた。一方、より効率の良い生産システムの実現も必要であり、種々の分野で生産技術開発と新しい製造システムへの転換を進めてきた。以下に、幅広い GIS 生産技術の分野から最近のトピックスを 3 例紹介する。

3.1 注型品の硬化プロセス解析技術

注型絶縁スペーサは GIS の信頼性を左右するもっとも重要な部品の一つである。注型品の製造フローでは、エポキシ樹脂が型の内部で加熱されながら“液状→ゴム状→固体”へと変化する反応行程や、その後の離型作業や圧力強度試験などによる行程でさまざまな内部応力や外力が発生する。注型品にはこれらの行程でクラックやボイドの欠陥が生じないようにきめ細かい技術が必要となっている。エポキシ樹脂は充填(てん)材が樹脂マトリックスに分散された複合材料であり、1980 年代以降の研究によりクラック欠陥の発生条件を特定する技術を確立した。図 15 は破面解析例を示している。

一方、樹脂の液体から固体への反応では、体積収縮と自己発熱が生ずるため、硬化の順序が適正にコントロールできなくなると欠陥が生じやすくなる。1987 年以降一次硬化における反応状態を解析的に求める手法を開発してきた。

図 16 に三相絶縁スペーサの硬化プロセス解析結果例⁽⁴⁾を示す。反応の各時間で固体化するときの樹脂温度が水平な等温度線となるように温度制御を最適化することが可能となっている。以上の材料強度評価技術と硬化プロセス解析技術は 1,000kV GIS の注型品や 200kg~500kg の大型注型品の開発製品化に適用され、品質の安定化に大きく寄与している。

3.2 アルミニウムタンク製造の合理化

GIS の主要部品であるアルミニウムタンクは、製缶溶接後機械加工を行い圧力試験を実施し圧力容器として完成する。

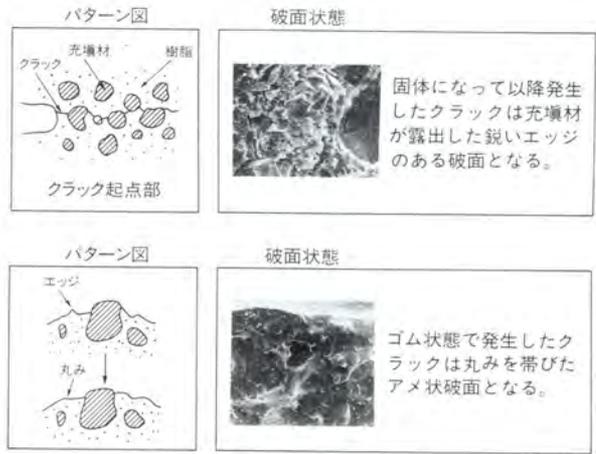


図 15. エポキシ樹脂のクラック破面解析 樹脂組成、温度やひずみ速度が強度と破面形態に与える影響を把握した。
Fractography of epoxy resin cracking edge

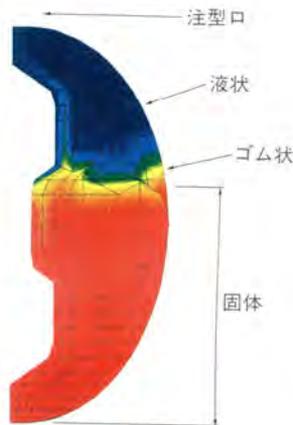


図 16. 硬化時の注型品内部の粘度分布 固体化する時の等温度線を水平に制御することにより、収縮量に相当する樹脂を液状部より容易に供給できる。
Viscosity distribution of casting resin in curing process

従来までタンク製造にはバーリング分岐加工の開発や自動溶接器の導入と溶接行程のライン化などを推進してきたが手作業主体の工法であった。今回、製缶溶接・機械加工の一貫ライン化を完成した。図 17 に新しい製缶溶接システムを示した。

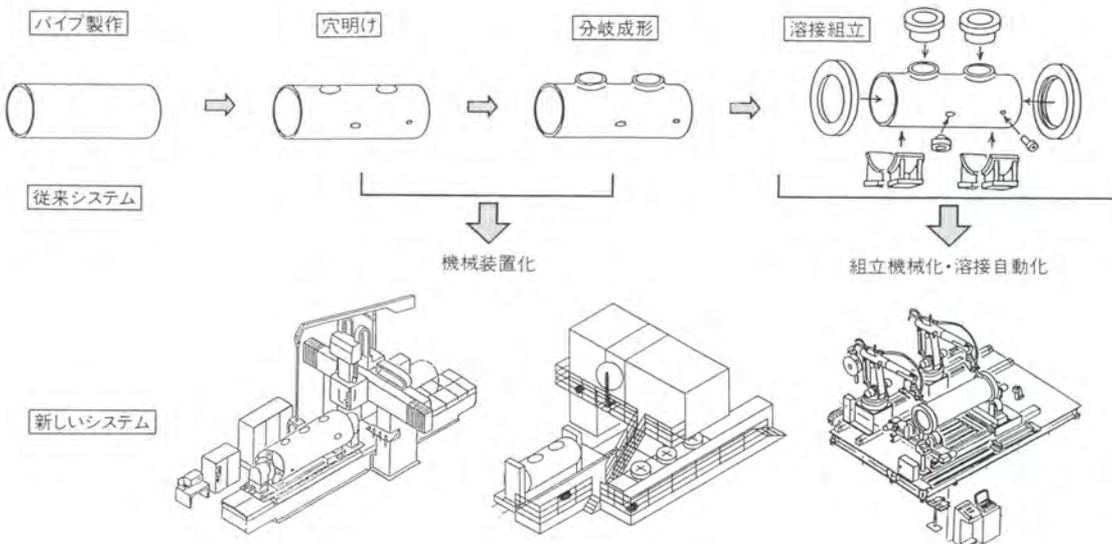


図 17. 新しいアルミニウムタンク製造システム 従来の手作業主体のシステムから新しい加工装置を導入し、溶接組立では技能者の熟練技能を機械化した。
Renewal of aluminum tank manufacturing system

この新しい製造システムの考えかたを以下に示す。

- (1) 従来の技能中心の製法から“熟練者の技能を機械化する”コンセプトに基づいた製法にした。
- (2) 部品行程では部品加工精度を高める機械装置を導入し、後行程の組立機械化を可能にした。特に分岐成形では工具を回転させて成形する回転加工により加工精度の確保を容易にした。
- (3) 溶接組立行程では組立の機械化を実現するとともに、確立したアルミ溶接技術のもとに、ロボットによる自動溶接を図った。
- (4) タンク機械加工では大型 NC 加工機を導入し、短段取り化と加工精度の均質化を図った。

これらの製造合理化により製缶溶接職場をより快適な職場に転換し、また安定した品質と高い生産性を達成した。

3.3 新しい組立試験ラインの合理化

GIS/ガス遮断器の組立は今日まで組立作業管理と異物管理を重点に品質の作込みを行い、防塵(じん)室と組立ラインの整備および要素作業の機械化を推進してきた。一方、製品試験では製品ユニット試験の高度化と自動試験装置の導入によるデータ処理の高度化を進めてきた。今回、245kV 以下の製品の組立試験を行う福島工場を新設した。福島工場では、部品の投入から組立試験、製品発送まで一貫ラインを構築した。この新しいラインの考えかたは次のとおりである。

- (1) “高い品質、高い生産性、人にやさしい設備”を基本コンセプトとしてその実現を図った。
- (2) 部品は組立着工の3日前に搬入され、マーシャリング・水洗乾燥後ジャストインタイムで組立に投入される。また、組立順序と一致した専用の部品マーシャリング台車の活用により組立作業管理を容易にした。
- (3) ガス中部品の内装組立は防塵室で行い、昇降りフタや



図 18. 電動台車による製品の搬送 製品は組立ステーションおよび試験工程へ電動台車で無人搬送される。

GIS transporter

高所作業車を活用して作業性の向上を図った。外装組立および製品試験は広域防塵エリアで行い異物管理の高度化を図った。

- (4) 従来人手に頼っていた製品の搬送を、組立から試験まで電動台車による無人搬送とした。
- (5) 試験行程は移動式耐電圧試験装置を使用し製品の定位での耐電圧試験を可能にした。

図 18 に製品の搬送状況を示す。以上により、この新しい組立試験ラインは品質作込みと高い生産性を同時に達成することが可能となった。

4 あとがき

絶縁技術において、ガス空間や固体絶縁物の実力から考えると、新しい技術開発によりまだまだ縮小の可能性は残っている。今後、絶縁および温度仕様の合理化や材料の高耐熱化の技術開発により、GISの縮小化はよりいっそう進展していくものと思われる。また生産技術では、培ってきた基礎技術に加えて新しい技術開発を進め製品の信頼性と経済性の向上を図り、ユーザーニーズにこたえていく。

文 献

- (1) 小林昭夫, 他: 550 kV 1点切りガス遮断器, 東芝レビュー, 47, 6, pp. 443-448 (1992)
- (2) 森森英一: 超高压放射状系統の故障遮断条件, 電気学会論文誌, 113-B, 4, pp.420-428 (1993)
- (3) 小林伸光, 他: ガス絶縁開閉装置の動向と将来展望, 東芝レビュー, 47, 6, pp.449-453 (1992)
- (4) 青木幸典, 他: エポキシ樹脂注形部品の硬化プロセス解析技術, 東芝レビュー, 49, 2, pp.123-126 (1994)



土屋 宗彦 Munehiko Tsuchiya

1978年入社。電力用ガス遮断器の開発に従事。現在、浜川崎工場開閉装置部課長。
Hamakawasaki Works



山崎 利春 Toshiharu Yamazaki, D.Eng.

1976年入社。開閉装置の機械技術開発に従事。現在、重電技術研究所機械・機器技術開発部課長, 工博。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



大山 敏 Satoshi Ohyama

1971年入社。ガス絶縁開閉装置の開発に従事。現在、浜川崎工場開閉装置部主幹。
Hamakawasaki Works



青柳 浩邦 Hirokuni Aoyagi

1960年入社。開閉装置の絶縁技術開発に従事。現在、重電技術研究所電力技術開発部主査。
Heavy Apparatus Engineering Lab.