

真空開閉器用真空バルブと 新工場の生産革新

Vacuum Switch Tubes for Vacuum Switches

越智 聡*

Satoshi Ochi

保井徹也*

Tetsuya Yasui

道念大樹†

Taiki Donen

要 旨

三菱電機では1965年に6.6kVコンタクタ用真空バルブを製品化して以来、半世紀以上にわたり、接点材料や電極構造の開発、真空バルブ構造の最適化及び製造工程の確立等を進めてきており、様々な進歩を遂げた結果、今日では非常にコンパクトで高性能かつ長寿命を実現している。

真空バルブは環境負荷の大きいガスや油を使用しないことや欧州RoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electronic equipment)等で規制される有害物質を使用していないことなど他の絶縁媒体と比較して環境適合性が高い機器として近年大きく注目されている。用途は多岐にわたり、生産本数は累計450万本を突破している。

当社の真空バルブの製造は1965年に伊丹地区の通信機製作所で開始し、1990年から丸亀地区の受配電システム製作所で生産しているが、従来同敷地内の別々の建屋にあった遮断器工場と真空バルブ工場を統合した一貫生産工場を新設し、2018年から稼働させている。

新工場では約15%の生産能力向上を図るとともに、四つのコンセプト(一貫生産・自動化・IT活用・環境改善)に取り組んでいる。特に、IT活用については当社のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を導入し、工場全体のIoT(Internet of Things)化を推進し、生産革新の実現を追求している。



当社真空バルブの特長

- ・高性能でコンパクト
- ・高信頼性
- ・高環境適合性
- ・幅広いラインアップ



受配電システム製作所の新工場

真空開閉器用真空バルブと受配電システム製作所の新工場

真空バルブのラインアップとしては、定格電圧1.5~84kV、定格電流最大4,000A、定格遮断電流最大63kAの幅広い定格の製品群をそろえている。自社の真空遮断器や真空コンタクタ向けのほかにも国内や欧米などの真空開閉器メーカーへの真空バルブ単品での販売も実施している。右の図は、当社受配電システム製作所に新設した遮断器と真空バルブの一貫生産工場である。

1. ま え が き

真空バルブは真空遮断器などの開閉機器に主接点として組み込まれ、電力系統に幅広く使用されている。当社では、1962年に基礎研究を開始し、1965年に6.6kVコンタクト用真空バルブを製品化して以来、半世紀以上にわたり、電極構造と接点材料の開発及び製造技術の確立等を進めて、様々な進歩を遂げてきており、今日では非常にコンパクトで高性能、長寿命な設計を達成している。また、真空バルブは他の絶縁媒体と比較して環境適合性が高いことから、用途が拡大して需要が増加しているため、当社では2018年に工場を新設し、生産能力の約15%向上を図っている。新工場では自動化による生産性向上、当社独自のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を利用したIT活用、環境改善等を図っている。

本稿では、この真空バルブについての最近の技術、適用分野及び新工場での生産革新について述べる。

2. 真空バルブの技術

2.1 真空バルブの特長

真空の絶縁耐力は、空気、SF₆(六フッ化硫黄)ガス、絶縁油などの絶縁媒体よりも優れており、この真空が持つ高い絶縁耐力によって真空バルブはコンパクトな設計が可能になっており、次の特長を持っている。

- (1) 短い空間距離で高電圧化が可能
- (2) 電流遮断時のアーク電圧が低いため接点消耗量が少ない
- (3) 長寿命・メンテナンスフリー
- (4) 電流開閉時のアークの外部噴出がない
- (5) 環境負荷の大きいガスや油を使用しない
- (6) 欧州RoHS等で規制される有害物質を使用しない

また、SF₆ガスについては温暖化係数が高いことから近年は欧米を中心に中電圧及び高電圧の開閉機器で規制の動きが活発になっている。真空バルブではこのような温暖化ガスを使用せず、またRoHSで規制される有害6物質を使用しないこと等によって環境適合性が高いため、ますます注目されている。

2.2 真空バルブの電極構造

真空バルブは図1のように、セラミックスの絶縁容器中に固定接点及び可動接点が設置されており、可動接点は可動電極棒及びベローズを介してフランジと接合されているため、絶縁容器内を真空中に保ったまま外部操作機構による接点の開閉が可能な構造になっている。アークシールドは

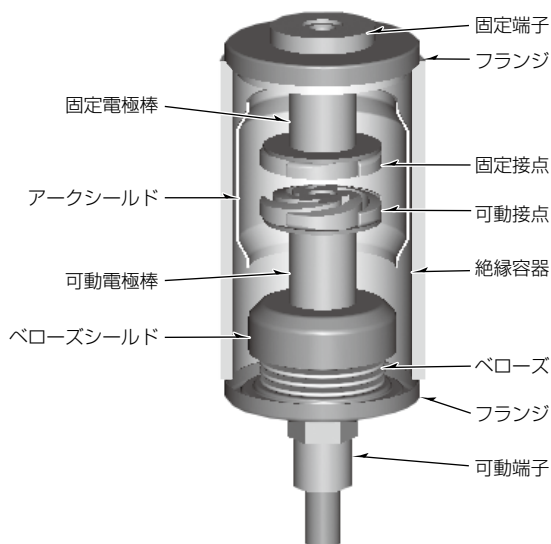


図1. 真空バルブの構造

大電流遮断時に接点間から発生する金属蒸気が絶縁容器の内面に付着し、耐電圧性能が低下するのを防いでいる。

当社では、表1に示すように主に3種類の電極構造を採用しており、用途に応じて使い分けている。遮断電流が小さい場合は真空中のアークは拡散モードになるため平板電極構造で遮断可能であるが、遮断電流が大きくなるとアークが集中して1点にとどまり、接点の局所部が過熱されることによって接点間に金属蒸気が蔓延(まんえん)し、遮断性能が低下する。スパイラル電極ではスパイラルの羽に沿って流れる電流によって電磁力を発生させ、集中アークが接点外周に沿って回転することによって接点の局所部の過熱を防ぎ、遮断性能を向上させている。当社では独自のスパイラル電極構造を開発し、従来の電極構造より約25%の接点径の縮小化を達成している⁽¹⁾。一方、縦磁界電極では、接点の裏側に配置されたコイルに沿って流れる電流によって接点間に軸方向の磁界を発生させ、この磁界によって集中アークを接点表面全体に瞬時に拡散させることで接点の局所部の過熱を防ぎ、遮断性能を向上させている。

これらの電極構造については磁界解析で大電流遮断時に発生する磁界を計算することによって構造を最適化している。また、電極を真空チャンパ内に配置し、実際に電流遮

表1. 真空バルブの電極構造

電極構造	平板電極構造	スパイラル電極構造	縦磁界電極構造
形状			
適用例	・遮断電流12.5kA以下の遮断器及び負荷開閉器用 ・コンタクト用	・遮断電流16kA以上の遮断器及び負荷開閉器用	・低サージ遮断器用 ・大容量多数回遮断器用 ・高電圧遮断器用

断中のアーク挙動を高速度カメラ測定することや電流遮断直後の接点表面の温度測定を赤外線カメラで行うこと等によって、更なる解析精度の向上を図っている⁽²⁾(図2、図3)。

2.3 接点材料技術

接点材料は真空バルブの性能を左右する非常に重要な要素であり、当社は真空バルブの製品化以来、それぞれの用途に合致した独自の接点材料を開発している。大電流の遮断性能が要求される用途には遮断性能に優れた銅クロム接点を使用されているが、この銅クロム接点については独自の不純物レベルの管理等によって性能の向上及び安定化を実現している。遮断器の操作力が限られる用途については銅クロム接点に添加元素を追加して、接点溶着力を低減させた接点材料を開発しており、高電圧用真空バルブについては耐電圧性能に優れたクロムの割合を高めた銅クロム接点を開発している。また、真空バルブでは、真空の高い絶縁耐力による遮断現象によって負荷側に過電圧が発生することがあるが、低サージ接点材料を使用することで遮断電流を低減し、過電圧を抑制することが可能になっている。当社では銀系の接点材料に添加物を加えることで遮断性能を向上させ、低サージとしては世界最大の定格遮断電流(7.2kV、40kA)の真空バルブを1997年に開発し、更なる

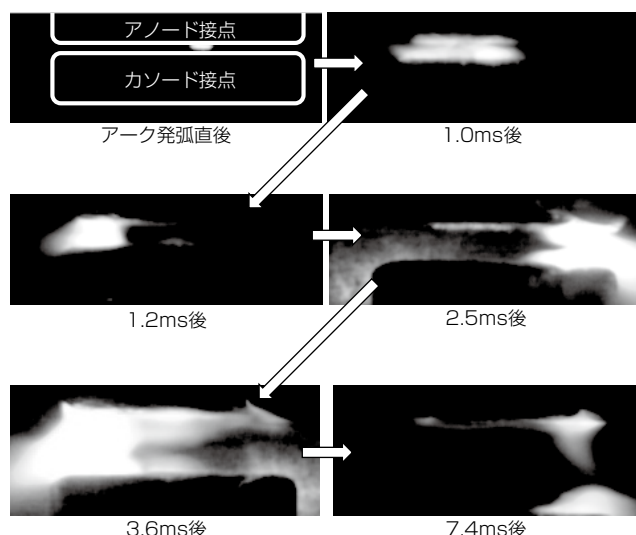


図2. 真空チャンバでのスパイラル電極のアーク観測

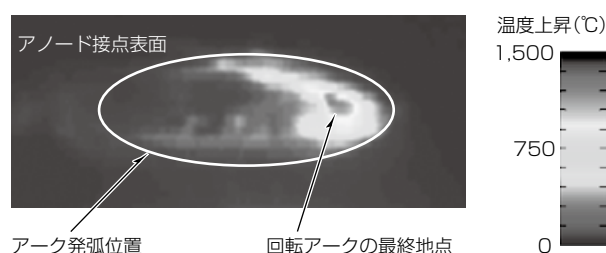


図3. 電流遮断直後の接点温度測定

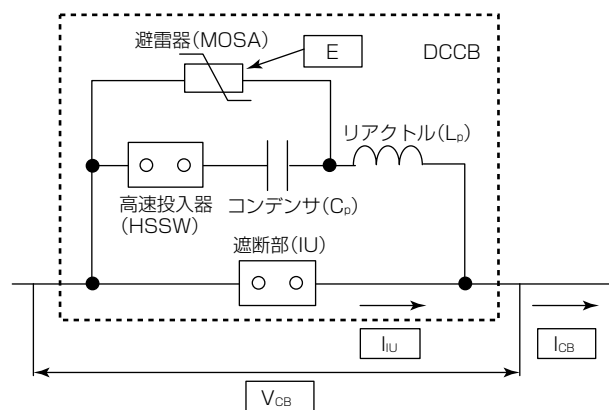


図4. 他励発振方式DCCBの回路図

縦磁界電極構造の最適化によって、2009年に同定格で容積を約20%低減させた真空バルブの開発にも成功している。

2.4 最近の真空バルブ適用分野

真空バルブはその優れた絶縁特性とコンパクトな設計や信頼性によって真空遮断器(VCB)、真空コンタクト(VMC)、キュービクル型ガス絶縁開閉装置(C-GIS)等にとどまらず、負荷時タップ切替器やオートリクローザー、キャパシタースイッチ、リングメインユニットにも使用されており、大容量化や高電圧化が進んでいる。近年では長距離送電で普及してきている高電圧直流送電(HVDC)のシステム内のAC/DC変換器で、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のバイパススイッチに接点開極距離を短く設定できる真空バルブが採用されており、IGBTの故障時に高速で保護回路を形成することを可能にしている。また、分散電源を統合する多端子HVDC送電では、健全回線への事故の波及を防ぐために、直流遮断器(DCCB)を設置して、10ms以内に10kA以上の事故電流を除去する必要がある、当社では図4のような回路によるコンデンサ(Cp)とリアクトル(Lp)による共振回路での高周波電流の重畳で強制的に電流零点を形成する方式によって、真空バルブの高い絶縁回復特性を利用して、第1遮断零点での80kV、16kAの遮断に成功している⁽³⁾。

3. 新工場の生産革新

3.1 新工場のコセプト

当社受配電システム製作所では、2018年8月、四つのコンセプト(一貫生産・自動化・IT活用・環境改善)を導入した真空バルブと遮断器の一貫生産工場を本格稼働させた。特にIT活用は、当社のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を導入し、社内のe-F@ctoryモデル工場として、九つの領域に対して工場全体のIoT化を推進し、

生産革新の実現を追求している(図5)。

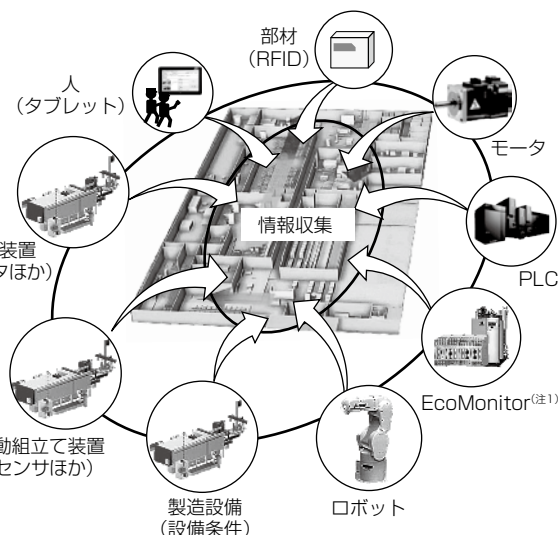
3.2 自動化による生産革新

真空バルブの製造工程は、主に部品表面処理、ろう付け組立て、試験、仕上げに分けられる。新工場では、量産機種を対象にろう付け組立て、試験、仕上げ工程に自動化設備を導入し、生産能力を約15%向上させた。試験工程に導入した設備(図6)は、機械開閉試験、耐電圧試験、真空度試験の各装置を当社製ロボットによって工程連結し、約15~20%のリードタイム短縮を実現している。試験データは、各製品の個体番号を読み取り、紐(ひも)付け処理した後、上位のビッグデータ基盤で生産情報を一元管理しており、トレーサビリティ管理の強化を図っている。

3.3 e-F@ctory導入による取組み

3.3.1 データ収集と見える化

新工場のe-F@ctory導入に当たり、対象設備の選定、収集データの抽出を行い、各種設備、人、部材、製造条件などから、約4,000点のデータを収集し、生産現場の可視化を実現している(図7)。設備データは、各種センサなどアナログ入力信号のデジタル値への変換、温度調節器や計測器などからMODBUS(注2)通信(注3)やCC-Link通信(注4)を用いて、PLC(Programmable Logic Controller)へデータ伝送を行い、リアルタイムでデータ収集を行っている。



RFID: Radio Frequency Identifier
(注1) 当社のエネルギー計測ユニット

図7. 新工場のデータ収集イメージ

収集したデータは、BI(Business Intelligence)ツールで、生産現場のリアルタイムな状況把握、生産情報管理、設備予防保全、品質未然防止、環境改善に活用している(図8)。

- (注2) MODBUSは、Schneider Electric USA, Inc.の登録商標である。
(注3) Modicon社がPLC向けに定めた通信プロトコルである。
(注4) 産業用オープンネットワークである。

3.3.2 改善サイクルの高速化による生産革新

(1) ラインモニタ

ラインモニタは4画面で構成しており、“生産進捗”“工程間仕掛数”“設備稼働”“工程内品質状況”を30秒~1分周期でデータ更新し、生産現場のリアルタイムな状況把握が可

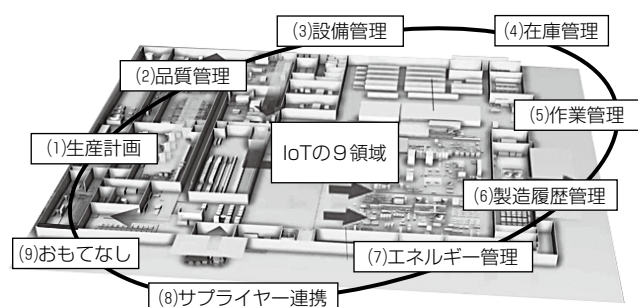


図5. 新工場のIoT化領域



図6. 自動試験ライン



図8. BIツールで作成した画面(抜粋)

能になった。各画面は、計画／実績数に加えて、直感的に正常／異常を把握する手段として、信号機で状態を示している。新工場2階に位置する管理・設計事務所では、ラインモニタで生産現場を常時監視しており、異常時の迅速な対応が可能である(図9)。

(2) 生産情報管理

生産スケジューリングシステムの導入によって、作業進捗確認や設備投入計画などの作業計画を自動化し(図10)、間接業務の効率化を実現した。生産スケジューリングシステムの運用定着には、計画精度の向上が必須であった。そこで、納期情報、製品ごとの経路、作業条件、制約条件、所要時間、使用設備、使用治工具、作業人数など、工程ごとの詳細情報を計画ロジックに組み込み、計画精度の向上を図っている。詳細なマスタ情報の管理が重要であり、システム部門と使用部門が連携し、マスタの細分化、最新化を継続して実施している。作業支援ナビゲーションを開発し、生産スケジューリングシステムから出力された生産メニューの表示、及び作業着完、製造履歴などの作業実績を生産現場に設置されたタブレット端末で入力できるようにした。従来、紙で管理していた製造履歴を電子化することによって、製造条件の分析、品質管理の強化、作業時間分析(個人ごとの能率管理が可能など)が効率的に行えるようになり、改善サイクルの高速化と深化を実現している。

(3) 設備予防保全

設備日常点検、定期点検結果をタブレット端末で入力で



図9. ラインモニタの設置(管理・設計事務所)

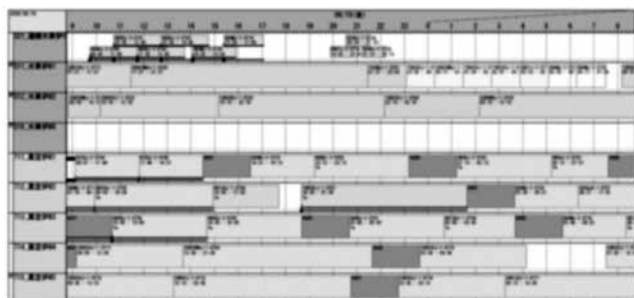


図10. 生産スケジューリングシステムの画面

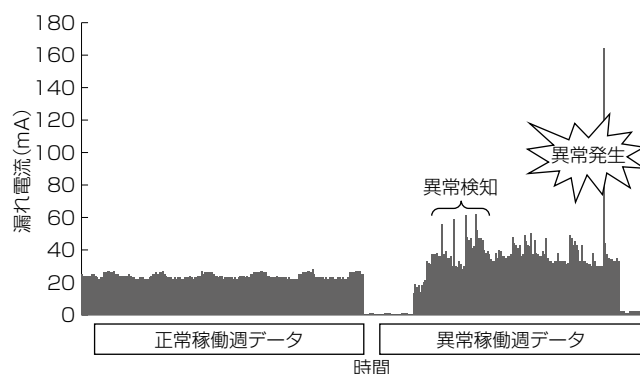


図11. 設備漏れ電流測定による予防保全

きるオペレータ支援システムを開発している。点検結果のデータを時系列グラフで監視し、数値変化の把握によって、劣化具合や異常の早期発見が容易になって設備の安定稼働が期待できる。また、設備稼働データを短周期で自動収集しており、管理データが設定値を超えると通知メールが届くシステムを構築している。漏れ電流を測定している設備については、正常稼働週に対して、異常が発生した週のデータは漏れ電流の増加を確認できる(図11)。このシステムによって、故障発生前にメンテナンス計画や生産負荷調整など、生産ロスを最小限にした設備保全が可能になり、突発故障の削減につながっている。

(4) 環境改善

ろう付け組立てを実施しているクリーンルームは、従来、ダスト量の変化に関係なく室内循環機器をフル稼働していた。新工場では、ダスト量を自動計測し、データをPLCで自動演算処理する。その結果を循環ファンの周波数調整にフィードバックし、風量を自動調整することで過剰な運転の抑制と省エネルギーを図っている。この制御によって、年間約25tのCO₂削減が見込まれる。

4. む す び

当社の真空バルブに関して、電極構造、接点材料及び新工場での生産革新について述べた。今後も環境適合性の高い製品が求められることから、真空バルブの需要は拡大することが期待されるが、更なる技術開発によって顧客のニーズに対応した製品をそろえて、電力の安定供給に貢献していく。

参考文献

- (1) 古賀博美：真空開閉器用真空バルブ，三菱電機技報，88，No.11，701～704（2014）
- (2) Donen, T., et al.: Temperature Measurement and Arc Rotation Observation of Spiral-type Contact, XXVIIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 255～258（2016）
- (3) 常世田 翔，ほか：高電圧直流送電向け直流遮断器，三菱電機技報，92，No.11，616～620（2018）