

# 基幹要素技術として電力流通を支える 真空遮断器の進化

Evolution of Vacuum Circuit Breaker Technologies Supporting Electric Power Distribution

久保田 信孝

■KUBOTA Nobutaka

電力の安定供給及び電力輸送の大容量化には、各種の電力機器の進化と発展が大きく寄与している。電力機器の中でも電力流通の根幹を支えている機器の一つとして、開閉装置（スイッチギヤ）が挙げられる。スイッチギヤは、電力を安全に効率よく輸送、制御する手段として、電気回路の保護、制御、及び監視を行う装置であり、異常な電流、電圧の状態が検出された場合にその回路から機器を即座に切り離したり、電力の使用状況などから回路を切り替えたりするものである。そのようなスイッチギヤの中で、配電系統において数多く使用されてきたメインコンポーネントが、真空遮断器（Vacuum Circuit Breaker：VCB）である。

東芝は、1965年にわが国初の真空スイッチ（7.2 kV - 100 A）の製品化に成功して以来、真空遮断技術の開発を先導してきており、多様化する電力系統の市場ニーズに応じて、全ての配電領域を網羅したVCBの製品化を推進している。

The development and evolution of various types of electric power equipment are contributing to stable supply of electric power and higher capacity of power transmission. Switchgears with the functions of protecting, monitoring, and controlling electric circuits are one of the main types of equipment supporting electric power distribution facilities, ensuring the secure and efficient transmission and control of electricity. In the event of a problem such as the detection of excess voltage or current in a circuit, such a switchgear can immediately disconnect the failed equipment from the circuit. It can also change the circuit according to the power usage conditions. Vacuum circuit breakers (VCBs) are a key component of switchgear used in many different applications.

Toshiba released Japan's first vacuum switch (7.2 kV-100 A) in 1965. Since then, we have been developing leading-edge technologies for various types of VCBs with low- to high-voltage capacities in response to the changing requirements of the market.

## 1 まえがき

電力は、今や人々の生活にはなくてはならない存在であり、現代社会を動かす原動力として欠くことのできないものと言っても過言ではない。2011年に発生した東日本大震災では、電力系統にも大きな被害が発生し、大規模な停電などで日常生活に大きな影響があったことは記憶に新しい。そのような欠くことのできない電力であるがゆえに電力を安全に効率よく輸送、制御する電力流通が重要になる。

電力流通は大きく二つの系統に分けられ、一つは発電所で作られた電力を各地域の変電所まで運ぶ送変電系統と、もう一つは電力を各地域の変電所から各需要家まで運びそれを必要な電気機器まで分配する配電系統である。両系統は基本的に取り扱い電圧が異なり、一般に送変電系統は公称電圧66/77 kV以上の上位系統で、定格電圧72/84 kV以上の開閉装置（スイッチギヤ）が適用され、配電系統はそれ以下の定格電圧のものを扱う。

このような二つの系統に適用されるスイッチギヤは、適用される系統によって求められる仕様は異なる。送変電系統では、高電圧のために高い絶縁性能が、また電力の基幹系統と

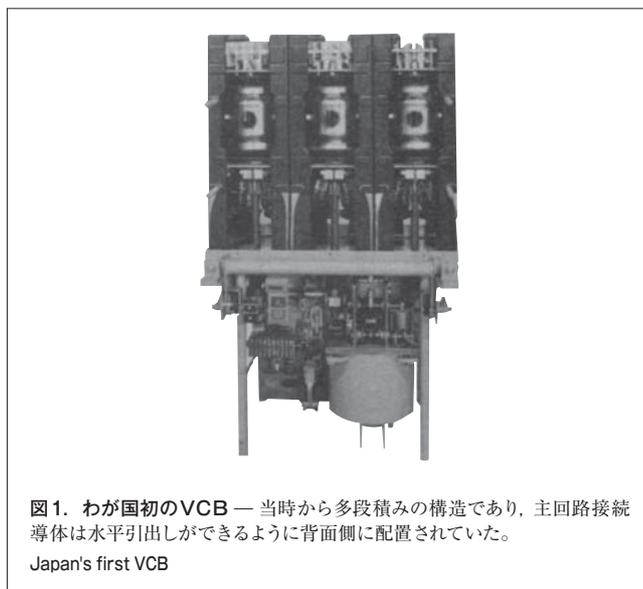


図1. わが国初のVCB — 当時から多段積みの構造であり、主回路接続導体は水平引出しができるように背面側に配置されていた。  
Japan's first VCB

いうことで大電流の通電容量が求められるため、装置全体の容積は非常に大きなものとなっている。一方配電系統では、送変電系統と比べて電圧が低いことから装置は全体の容積が比較的小さくコンパクトな構造になっている。また各需要家の

負荷の種類が多く、そこに使用されている配電用機器やシステム構成も多岐にわたるため、スイッチギヤも多種多様な構成となっている。更にシステムの構成上、地絡故障などによる電位上昇が高く、それに見合った絶縁回復性能が求められる。

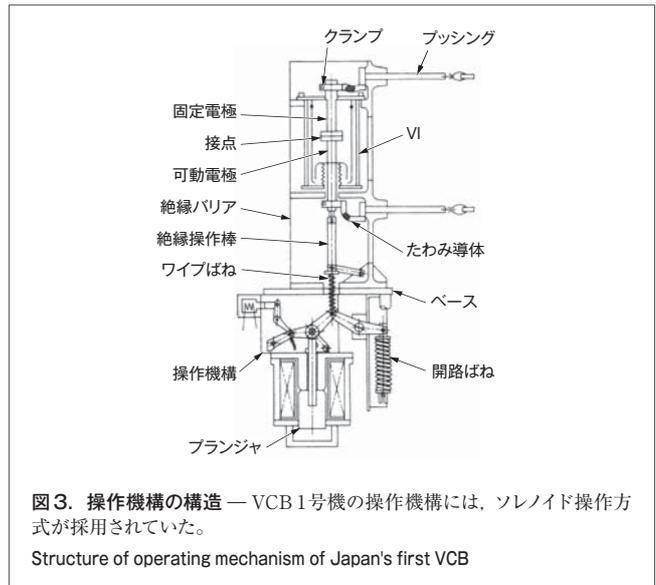
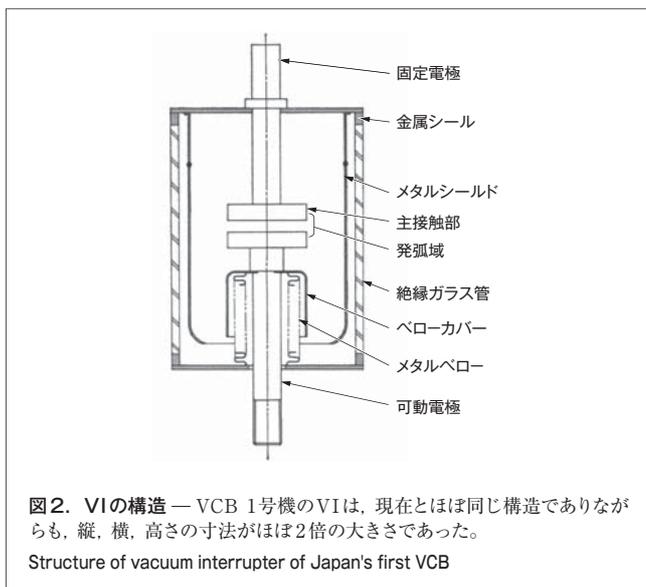
スイッチギヤのメインコンポーネントである遮断器にも、前述のような理由から、適用されるシステムの電圧、電流の条件や、目的などにより、様々な種類のもが存在している。現在、配電システムに適用されている遮断器には、真空遮断器 (Vacuum Circuit Breaker : VCB) が主に適用されている (図1)。VCBの特長は、一般に小型、軽量、及び長寿命であると言われる。

ここでは、現在の配電システムで主流となっているVCBについて、その草分け的な役割を担ってきた東芝が行ってきた真空遮断技術の開発と、それらの成果を基にした製品化の変遷を述べるとともに、最近の市場動向から今後の展望を述べる。

## 2 VCBの概要

1966年に、わが国で初めて製品化されたVCB<sup>(1)</sup>を図1に示す。VCBの特長は、小型、軽量、及び長寿命であり、電流開閉性能においても接点の消耗量が少なく、多数回の電流開閉に対応できることが挙げられる。これらの特長は、真空中の放電現象などの電気的特性によるところが大きく、その優れた絶縁性能や放電時のアーク電圧が低く安定していることに起因している。これはVCBのキーパーツである真空バルブ (Vacuum Interrupter : VI) の特長そのものである。

VCBは、電流を開閉するVI (図2)、電路となる導体が電気的に絶縁、支持された主回路部、及びVIの主接点部の可動電極を動作させる操作機構 (図3) から構成される。VIの一般的な構造は、電流の開閉や通電を行う電極部分と、容器全体の構造を支え良好な真空状態を保持するための真空容器



部分から成る。製品化当初の真空容器には、図2に示したようにガラス管が用いられたが、現在ではほとんどセラミックス製に替わっているものの、この基本構造はVIの開発及び製品化されたころからほとんど変わっていない<sup>(1), (2)</sup>。

電極部分は、真空容器内を移動可能な可動電極とVCB本体との固定の役割も担う固定電極の二つに分けられる。両電極とも、一部の形状が若干異なるだけでほぼ同一である。これら電極部分は、主に通電を行う導体と電流開閉時にアークの制御を行う主接触子から構成される。この主接触子の構成や形状により遮断性能が大きく左右される。電極部分のアーク制御の方式としては、世界の3大電極と呼ばれるスパイラル電極、コントレート電極、及び縦磁界電極があり、縦磁界電極は1976年に当社が開発した方式である。

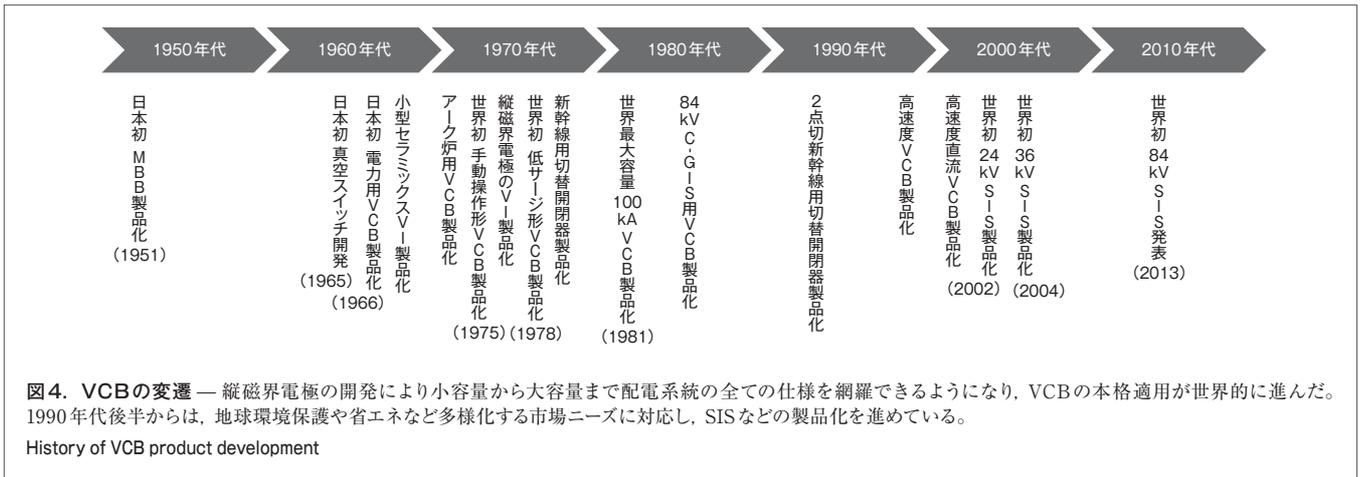
## 3 真空遮断技術の変遷

ここでは、当社の真空遮断技術の開発と製品化の歴史 (図4) を振り返るとともに、近年の市場ニーズに対応した最新の技術開発について述べる。

### 3.1 アーク制御技術の発展

VCBの登場は、1960年代にさかのぼる。それ以前は、油遮断器 (OCB) や磁気遮断器 (MBB) と呼ばれるものが主流であった。MBBは、1950年代に登場し、それまで使われていたOCBのように絶縁油を使用しないため火災のリスクを低減できる特長から次第に需要が拡大し、ビル施設や火力発電所の補機用など比較的大きな電源設備として使用されるようになった。

MBBの消弧原理は、遮断電流で作られる磁束と、そのとき発生するアークの相互作用により、アークを引き伸ばして冷却し遮断するというものであった。そのため、遮断電流が小さ



くなるとアーク時間が非常に長くなる欠点があり、それを防止するのに開路動作時のエネルギーを利用して空気を吹き付け、アークをアークシュート内に引き伸ばすという方法を同時に用いて遮断を行っていた。

一方、真空遮断の考え方は19世紀末に提唱されていたが、第二次世界大戦後まで実用化されることはなかった。当社は、真空遮断技術に関する多くの課題を研究開発によって一つひとつ解決していき、1965年に既に保有していた水銀整流器の真空技術と送信管技術を融合したVIを使用したわが国初の真空スイッチ (7.2 kV-100 A) の製品化に成功し、業界に先駆けて本格的な電力用 VCB の量産化を実現した。その後、研究開発を進めるものの、遮断容量の向上には限界があり、大容量化は難しいとされていた。

しかし当社は、1972年に、プラズマの磁気制御の研究成果として、平板電極間にアークと平行に強力な磁界を加えるとアークを形成する荷電粒子がその磁界内に閉じ込められ、更にその磁界を一様に分布させることでアークを拡散し遮断性能を飛躍的に向上させる技術を開発した。こうして電極自体に磁界を発生させるコイル部分を持たせ、電極間に一様な磁界を発生させて電流を遮断する縦磁界電極が誕生した。

### 3.2 VCBの開発と進化

縦磁界電極は、スパイラル電極及びコントレート電極と並ぶ3大電極として現在でも使用されている。また、大電流遮断性能の向上はもとより、VIの小型化へも応用され、低コスト化にも貢献する技術革新となった。これにより、VCBが小容量から大容量まで適用できるめどが立ち、配電システムの全ての仕様を網羅できるようになった。その結果、1981年には当時世界最大容量の遮断電流 100 kA の VCB を製品化した (図5)。これを受けて、それまで大容量の真空遮断技術に対して懐疑的だった欧州も VCB の開発に注力するようになり、VCBの本格適用が世界的に進むこととなった。

1980年代には、大容量化 (大電流遮断と高電圧化) が進み、遮断電流 100 kA の VCB 製品化に続き、定格電圧 84 kV

対応として絶縁性能の高い六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) ガスを使用したキュービクル形ガス絶縁スイッチギヤ (Cubicle Type Gas Insulated Switchgear : C-GIS) に搭載される VCB を製品化した。また、操作機構は、図3に示した製品化当初のソレノイド操作機構から、省電力のモータによるばね蓄勢機構型の電動ばね操作機構へ進化していった。そして1990年代前半まで、VCBの特長を生かした適用拡大と経済の高度成長に支えられて需要が増大していった。

### 3.3 多様化する市場ニーズへの対応

1990年代後半に入り VCB の開発は、それまでの大容量化だけでなく、多様化する市場のニーズを捉え、新しい適用分野や新方式の機器開発にも対応していくことになる。

この時期の動向として、1997年に採択された京都議定書 (地球温暖化防止京都会議 : COP3) など、地球環境の保護や省エネが注目を集めるとともに、コージェネレーションシステムの普及などにより家用発電設備の需要が高まっていた。そのため、系統事故時の瞬時電圧低下を抑制し重要負荷設備へ



の影響を低減するニーズが高まり、系統異常（電圧、電流、及び電力）を高速に検出し1サイクル以内の高速動作で遮断可能な高速度真空遮断装置を開発した。この装置は、高速検出デジタルリレーと高速動作のVCBが組み合わせられ、その操作機構には電磁反発作用を利用したコイルと永久磁石を搭載したアクチュエータを組み合わせた操作方式を採用している。

また前述の操作方式を採用したものに、それまで気中遮断器の独壇場であった直流遮断の分野へ適用された、直流高速度真空遮断装置（HSVCB）がある。通常、真空中での直流遮断は不可能であるため、VIに並列にコンデンサとリアクトルを設けることでVIに逆電流を通電し強制的に電流ゼロ点を作り出し、更に並列に消弧装置を設けることで回路インダクタンスに蓄えられたエネルギーを吸収して遮断を行う。VI中で電流を遮断するため、遮断時のアークが外部に放出されることがなく安全であり、気中遮断器で必要であった接触子のメンテナンスが不要になり、遮断音も低減できるといった特長を持っている。

2002年には、地球温暖化ガスの指定を受けたSF<sub>6</sub>ガスを全く使用せず、主回路をエポキシ樹脂でモールドした環境配慮型の24 kV固体絶縁スイッチギヤ（Solid Insulated Switchgear: SIS）を製品化した（図6）。その後、2004年には定格電圧36 kVまでの製品化を実現した。SISの特長は、主回路全体をエポキシ樹脂でモールドし、その外層には接地層を設けて電氣的に相分離しているため、相間短絡事故へ至らない構造になっていることである。またエポキシ樹脂の高い絶縁性能により、SF<sub>6</sub>ガスを用いた同容量のC-GISに比べ容積が約1/2（当社製品比）と非常にコンパクトになっている。更に操作機構には、永久磁石とソレノイドコイルを使用した永久磁



図6. 24 kV SIS — それまでC-GISが主流であった特別高圧の定格電圧で製品化した。その高い製造技術が認められ、第51回 大河内記念生産賞を受賞した。

24 kV solid-insulated switchgear (SIS)

石保持式電磁操作方式を採用し、電動ばね操作方式と比べ約1/2に部品点数を削減し、メンテナンスの省力化を図っている。2013年には、世界初となる84 kV SISを開発し発表した。

## 4 今後の展望

今後、VCBの更なる高電圧化の動きが進むものと予測される。わが国では既に145 kVクラスのVCBの製品化に向けた開発が行われ、また東アジア諸国でも高電圧VCBの研究開発が盛んに行われている。現在、国際的に送変電系統へのVCB適用の影響について調査が進んでおり、VCBの高電圧化で世界をリードしているわが国の適用状況が調査、報告されている。これには、SF<sub>6</sub>ガスの使用量削減の世界的な動きがあり、VCBは高電圧分野でのガスレス化を実現する技術として期待されている背景がある。

また、電力系統の市場動向を見ると、再生可能エネルギーを利用した分散電源化の流れがある。太陽光発電に代表される再生可能エネルギー発電では、中小規模の電源が増加するためシステム構成が変化し、小規模電源設備に対応したスイッチギヤのニーズが高まると考えられる。これに関連して直流送電の関心も高まり、世界各地で高電圧直流送電が計画されている。分散電源化に伴って直流送電が見直されており、低圧から高圧まで直流遮断のニーズが高まっている状況がある。ここにも真空遮断技術の適用が検討されていくと考えられる。

## 5 あとがき

1965年にわが国初の真空スイッチを製品化して以来、当社は真空遮断技術のノウハウを蓄積し発展させることで、電力流通分野のリーディングカンパニーとしての役割を担ってきた。

今後も多様化する市場ニーズに応じて、更なる技術開発を推進し、高信頼性かつ低環境負荷のVCB製品化に取り組んでいく。

## 文 献

- (1) 沢 守男 他. 真空しゃ断器. 東芝レビュー. 21, 6, 1966, p.574 - 580.
- (2) 難波江章 他. 真空しゃ断器. 東芝レビュー. 23, 12, 1968, p.1508 - 1511.



久保田 信孝 KUBOTA Nobutaka

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 スイッチギヤ部主査。真空遮断器の設計・開発に従事。電気学会、CIGRE（国際大電力システム会議）会員。  
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems