電力用遮断器および開閉装置の系統化調査

3

Comprehensive Survey on the History of High Voltage Circuit Breakers and Switchgear

伊藤 弘基 *Hiroki Ito*

■要旨

電力分野においては、これまで発電機（2005 年、2006 年）、変圧器（2004 年）、系統技術（2020 年）などの系統化調査が実施されてきた。今回の調査対象は、発電された電気を工場や家庭に安定的に供給する電力系統において、電力供給の信頼性を支える基盤機器である開閉機器である。

開閉機器の代表である遮断器は、電力系統の回路に接続され、電流を遮断して回路を絶縁状態にする、あるいは通電して導通状態に戻すという、回路状態を導体から絶縁体へ、絶縁体から導体へと切り替えるスイッチ機能を担う。この機能を実現するために、水、油、空気、真空、SF_6（六フッ化硫黄）など、さまざまな媒体が採用され、電力系統の高電圧・大容量化の要求に応えてきた。技術の進歩に伴い、遮断器の外観や構造も大きく変化してきた。

以下に、本報で詳説する遮断技術に関する主な技術進歩をまとめる。

- 1900 年
  英国で水遮断器が開発され、ドイツでは 10～60 kV-1500 MVA 級の製品が製造された。
- 1900～1910 年
  並切型油入遮断器が普及し、交流電力供給網の拡大に大きく寄与。
- 1930～1960 年
  油遮断器の技術は進化を続け、定格 345 kV-63 kA まで高性能化。これらの技術成果は後の空気遮断器やガス遮断器の性能向上にも活かされた。
- 1950～1960 年
  空気遮断器は 36～735 kV の多重切形でシリーズ化され、性能面で油遮断器を凌駕した。
- 1950 年代後半
  米国でガス遮断器が実用化され、二重圧力式から単一圧力式へと進化し、小型化と高信頼性を実現。
- 1960 年以降
  ガス絶縁開閉装置（GIS）が登場し、電力会社とメーカーの協力により、日本が世界の開発をリードする製品となった。GIS は変電所のコンパクト化と信頼性向上に大きく貢献。

ガス遮断器全盛の時代を歩んできた著者にとって、油遮断器や空気遮断器開発史、それらの技術革新の節目を体系的に調査する機会を得られたことは極めて意義深いものであった。油遮断器の高性能化の過程において、消弧室の発明やダブルフロー方式など、現在のガス遮断器にも受け継がれている重要な技術がすでに考案されていた事実に、改めて深い感銘を受けた。先達の功績を学ぶことの重要性を、強く再認識した次第である。

本調査では、遮断器の技術的変遷を概観するとともに、日本が欧米から消弧室構造、ガス吹付方式、多重切構成などの技術を学びつつ、次第に自主技術を確立し、ガス遮断器およびガス絶縁開閉装置（GIS）の開発によって世界をリードする高信頼性を実現してきた過程について報告する。

■ Abstract

The National Museum of Nature and Science has previously conducted comprehensive surveys on power generators (2005, 2006), power transformers (2004), and power system technologies (2020) within the domain of electric power systems. The present study extends this series by focusing on circuit breakers and switching devices, which are indispensable for ensuring the stable transmission and distribution of electricity from generation sources to industrial facilities and households.

Circuit breakers are critical components in power systems, alternating the circuit between conductive and insulating states to interrupt or restore current flow. To fulfil these roles, various interrupting media, including water, oil, air, vacuum, and sulphur hexafluoride (SF_6), have been employed to accommodate the increasing demands for higher operating voltages and greater interrupting capacities. Continuous technological advancements have driven profound transformations in both the external configuration and internal architecture of circuit breakers, reflecting continuous innovation in response to evolving system requirements.

The evolution of circuit breaker technology has been marked by several significant milestones:

- 1900
  Water circuit breakers were first introduced in the United Kingdom, with products rated at 10-60 kV and 1500 MVA subsequently manufactured in Germany.
- 1900-1910
  Oil circuit breakers gained widespread adoption, playing a pivotal role in the expansion of alternating current (AC) power supply networks.
- 1930-1960
  Oil circuit breaker technology advanced considerably, achieving ratings up to 345 kV-63 kA. These advancements also influenced the performance improvements of later air and gas circuit breakers.
- 1950-1960
  Air circuit breakers were standardized in multi-break configurations for voltages ranging from 36 to 735 kV, surpassing oil circuit breakers in both performance and reliability.
- Late 1950s
  Gas circuit breakers were put into practical use in the United States, evolving from the double-pressure type to the single-pressure type, thereby achieving greater compactness and enhanced operational reliability.
- After 1960s
  Gas insulated switchgear (GIS) emerged as a transformative technology. Japan assumed a leading role in global development through close collaboration between utilities and manufacturers, significantly contributing to the compactness and reliability of high-voltage substations.

For the author, who experienced the era dominated by gas circuit breakers, the opportunity to explore the historical development of oil and air circuit breakers and the associated milestones of technological innovation was of great significance. A particularly noteworthy observation was the rediscovery that, during efforts to enhance the performance of classical oil circuit breakers, fundamental concepts such as the arc-extinguishing chamber and the double-flow method had already been conceived. These principles remain integral to the design of modern gas circuit breakers, underscoring the enduring relevance of early innovations and the importance of learning from the achievements of our predecessors.

This survey provides a comprehensive overview of the technological evolution of circuit breakers and examines how Japan, while initially adopting Europe and the United States in areas such as arc-extinguishing chamber design, gas-blast techniques, and multi-break configurations, progressively established its own technological foundations. Through these advancements, Japan ultimately achieved world-leading reliability with the development of gas circuit breakers and gas insulated switchgear.

■ Profile

伊藤 弘基　*Hiroki Ito*

国立科学博物館 産業技術史資料情報センター 主任調査員

1984年３月　東京工業大学理工学研究科修士課程修了
1984年４月　三菱電機株式会社入社、遮断器等の技術開発に従事
1989年９月～1991年２月　米国イリノイ大学総合科学研究所研究員
1995年１月　東京工業大学工学博士
2005年５月～2012年３月　三菱電機株式会社 系統変電システム製作所 技術開発部部長、高電圧・大電力試験所所長
2012年４月　三菱電機株式会社 電力・産業システム事業部 技師長
2018年４月　三菱電機株式会社 技術顧問

2004年８月～2012年８月　CIGRE国際大電力システム会議SCA3送配電機器研究会国内委員長
2012年８月～2018年８月　CIGRE国際大電力システム会議SCA3送配電機器研究会本部委員長
2022年７月～　CIGRE送配電機器に関する第四回信頼性調査 主査
2025年４月　国立科学博物館 産業技術史資料情報センター 主任調査員

■ Contents

1. 電気を送る …… 232
2. 電気を切る …… 242
3. 電気を守る …… 275
4. 直流を切る …… 298
5. おわりに …… 312
6. 謝辞 …… 321

1 電気を送る

1.1 はじめに

電力用機器のうち、電気工学の基礎原理である電磁誘導を利用して機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機や、交流電圧を変換する変圧器は広く知られている。一方、電力供給の開始や停止を担う開閉機器は、専門家以外には馴染みが薄い。かつては、発電機や変圧器が「主器」と呼ばれていたのに対し、遮断器、開閉機器、計器用変成器、避雷器などの装置は「補器」として分類されていた。電力会社の社史[1),2),3),4),5),6)]など古い文献においても、補器に関する記録は主器に比べてかなり少ない傾向がある。

ここで、開閉機器とは、電気回路の開閉（入切）を行う機器の総称であり、遮断器、断路器、負荷開閉器などが含まれる。一方、開閉装置とは、これらの開閉機器に加え、母線、計器、保護装置などを組み合わせたシステム全体を指し、例えばガス絶縁開閉装置が該当する。

今回の調査では、主として、変電所や開閉所に設置される高圧用途の遮断器、並びに断路器、避雷器、変成器などの集合体である高圧用途の開閉装置を対象とする。

開閉機器の一つである遮断器は、電力系統を構成する電気回路に接続されており、導体から絶縁体へ切り替えて電流を遮断する、あるいは絶縁体から導体へ切り替えて電流を通電するスイッチ機能を果たしている。この機能を実現するために、水、油、空気、真空、SF_6（六フッ化硫黄）など、さまざまな媒体が適用され、電力系統の高電圧・大容量化の要求に応えてきた。遮断技術の進歩は極めて速く、これに伴い遮断器の外観や構造も大きく変化してきた。

本系統調査は、各電力会社、関連メーカーなど、多くの専門家の協力を得て実施した。なお、本稿では機器の開発・導入当時の会社名を用いるとともに敬称は省略した。

第1章「電気を送る」では、黎明期における電力系統と遮断器の役割について述べる。

第2章「電気を切る」では、電力系統に導入された各種遮断器の変遷について述べる。

第3章「電気を守る」では、避雷器、計器用変成器を含むガス絶縁開閉装置の発展過程について述べる。

第4章「直流を切る」では、直流系統と直流遮断器の開発状況について述べる。

第5章「おわりに」では、SF_6代替技術の現状と将来技術動向について述べる。

1.2 電力事業の黎明期

電気を供給する電力事業は、19世紀末に各国で始まった。

米国では、発明家トーマス・エジソン（Thomas Alva Edison、ゼネラル・エレクトリック（GE）社創業者）が1882年にニューヨーク・ウォール街で照明を主体とした直流110 Vによる電力供給を開始した。一方、電気技術者ジョージ・ウエスティングハウス（George Westinghouse, Jr、ウエスティングハウス（WH）社創業者）は1886年にマサチューセッツ州グレート・バーリントンで変圧器を利用した交流送電を開始した。

また、交流発電機を発明した英国では、1888年に単相交流10 kVによる送電が始まった。

電力を安価に長距離輸送するためには、高電圧に昇圧して送電し、需要地で100 V前後に降圧する必要がある。しかし、当時の直流送電では電圧を変換する技術が未発達であり、低電圧のまま長距離送電を行うと電流が大きくなり、線路損失および電圧降下が増大するため、遠方への送電は困難であった。そのため、都市部などの需要地近傍に発電所を建設する必要があった。

ウエスティングハウスは、ロンドンで開催された発明博覧会において、ゴラールとギブスによる誘導コイル（変圧器の原理）に注目し、1885年に米国での特許権を取得した。翌1886年には、マサチューセッツ州グレート・バーリントンにおいて、変圧器を利用した交流送電を実証した。

また、セルビア系米国人の発明家・電気技術者であるニコラ・テスラ（Nikola Tesla）は、1888年に多相誘導電動機を開発した。ウエスティングハウスは、テスラが開発した三相交流発電機（当時の電動機に適した周波数25 Hzを採用）をナイアガラ滝のエドワード・ディーン・アダムズ発電所に導入し、1895年にはニューヨーク州バッファローへの電力供給を実現した。これにより、交流による長距離送電が可能となり、

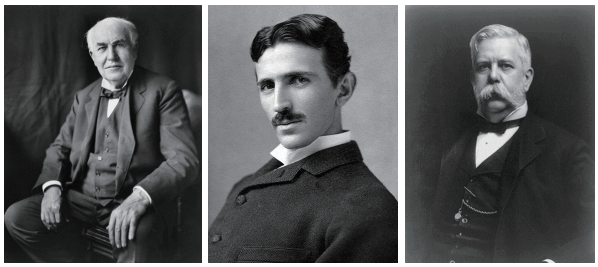


図 1.1　電流の覇権争い、エジソン（左）[7] 対 テスラ（中）[8] とウエスティングハウス（右）[9]

現代の電力供給システムの基礎が築かれた。

当時、直流送電と交流送電のどちらが優れているかをめぐり、「電流戦争」[10] と呼ばれる大きな議論が巻き起こった。エジソンは直流送電を支持し、交流送電に対してネガティブキャンペーンを展開したが、最終的にはその試みは失敗に終わった。図 1.1 に電流戦争の当事者を示す。この結果、変圧器を用いて送電時に電圧を昇圧し、遠距離まで効率的に送電した後、需要地で使用電圧に降圧することで送電損失を低減できる「交流送電」が主流となった。

1.3　国内電力事業の幕開け

日本の電力事業は、エジソンが欧米で電力事業を始めたのとほぼ同時期に開始された。1882 年、東京・銀座で日本初の電灯であるアーク灯が点灯し、街路を照らした。その後、1883 年には東京電燈（現・東京電力）が設立され、1887 年には南茅場町に日本初の火力発電所が建設され、直流 210 V による送電が開始された。以降、1896 年までに全国各地で 33 の電灯会社が設立され、直流 125～210 V による小規模な分散型電源と近距離送電が展開された。しかし、市街地に設置された火力発電所は、運転時に発生する煤煙や騒音が環境問題を引き起こした。

1889 年、大阪電燈（現・関西電力）は西道頓堀に火力発電所を建設し、米国トムソン・ヒューストン・エレクトリック社（後に GE 社に統合）製の 30 kW 交流発電機を導入し、1150 V・60 Hz の交流送電を開始した。これにより、西日本では 60 Hz の周波数が標準となった。

1895 年、東京電燈は浅草集中発電所を運転開始し、出力 200 kW の交流発電機を採用した。導入されたのはドイツ AEG 社製の三相交流発電機で、周波数は 50 Hz である。この周波数が東日本における商用電源の標準となる起源となった。

これ以降、電力事業は、直流による小規模な分散型発電・近距離送電方式から、交流による大規模な集中型発電・遠距離送電方式へと転換していった。明治時代には、多くの電力事業者が乱立し、激しい競争が展開された。しかし、同一地域に複数の電力会社が電線を敷設するなどの弊害が生じたため、大正時代には電力事業者が 5 社に再編された。戦時中には電力事業が国家管理のもとに置かれ、国策会社「日本発送電」が発電と送電を一元的に管理する体制が整えられた [1]。一方、配電については全国を 9 つの地域に分け、それぞれを担当する配電会社が設立された。

戦後 1951 年、GHQ の指令により日本発送電が民営化され、全国を 9 つの地域に分け、それぞれの地域で 1 社が電力供給を担う「地域独占」が認められた。これにより、電力会社は発電所・送配電線・変電所などを一貫して管理する「垂直一貫体制」が確立され、効率的な電力供給が可能となった。一方で、地域独占による弊害を防ぐため、電力料金は公的機関によって規制された。この体制は 40 年以上にわたり維持され、高度経済成長期を通じて国内の電力系統は飛躍的に発展し、世界に類を見ない高い信頼性を確立した。その後、1995 年から電力自由化が段階的に進められ、2016 年には家庭向けの電力小売も完全に自由化された [2),3),4),5),6),11)]。

1.4　交流送電の仕組み

水力・火力・原子力などの発電所でつくられた電気は、送電時の電気抵抗による損失を低減するため、変圧器によって高電圧に昇圧される。具体的には、発電機の端子電圧はおおよそ 17～27 kV であり、これを国内では 275～500 kV といった高電圧に昇圧する。電圧を高くすることで電流を抑え、送電時の発熱によるエネルギー損失を減らすことができる。

このため、各国は基幹電力系統の送電電圧を順次引き上げてきた経緯がある。現在、国内基幹系統の最高電圧は 500 kV であり、変電機器の定格電圧は 550 kV に相当する。

発電所から送られてきた電気は、需要地に設けられた超高圧変電所で 154 kV へ降圧される。さらに配電用変電所で 6.6 kV まで降圧され、一部は大量の電力を使用する鉄道会社や大規模工場に供給される。これらの需要家では敷地内に設置された変電設備によって使用電圧に変換される。残りの電力は、6.6 kV 配電線を経て需要家に供給され、柱上変圧器によって使用電圧（100/200 V）に降圧される。

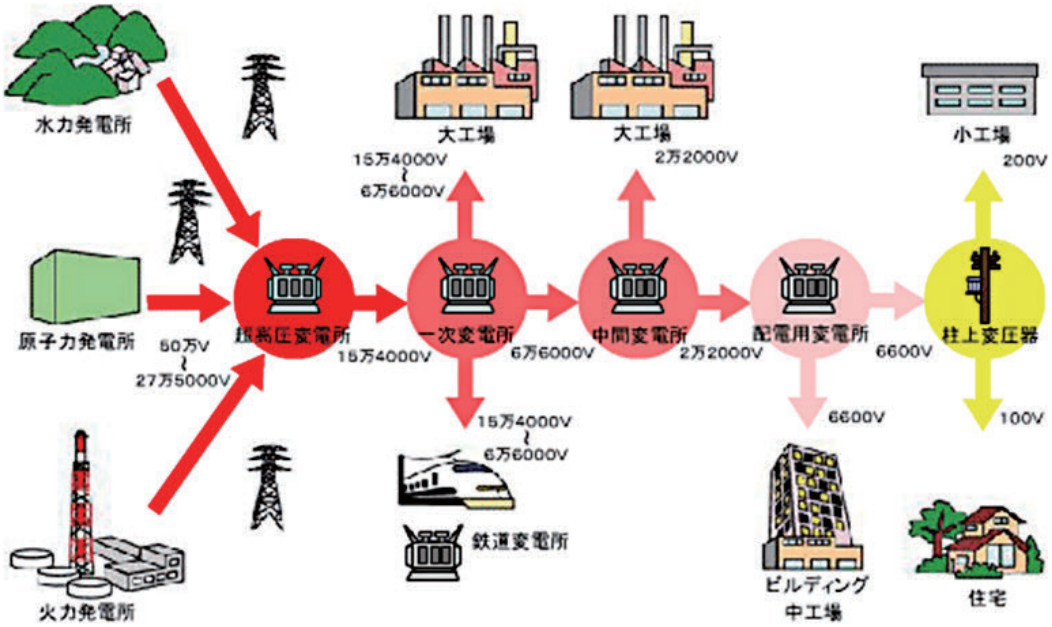


図 1.2　電気の流れ（出典：電気事業連合会 HP）[12)]

図 1.3 は、交流送電における各国の系統最高電圧を示している。電力機器は、系統電圧の昇圧に応じて高電圧化が進められてきた。

電流戦争以降、米国の系統電圧は 22 kV、66 kV、110 kV と段階的に引き上げられ、長距離送電の効率化を目的として、米国やドイツでは 1923 年に 220 kV 系統を開始した。1952 年には米国の American Electric Power（AEP）が 345 kV 送電を開始し、同年スウェーデンも 380 kV 送電線の建設に着手した。さらに、カナダの Hydro-Québec は 1965 年に世界初の 735/765 kV 送電を開始し、1969 年には AEP も 765 kV 送電を開始した。

旧ソ連（現ロシア）では、系統電圧が 1957 年に 420 kV、1959 年に 525 kV、1967 年に 787 kV、1985 年には 1200 kV へと段階的に引き上げられたが、現在の超高圧送電は 525 kV で運用されている。ブラジルでは、345 kV、440 kV、550 kV、800 kV 送電がそれぞれ 1963 年、1971 年、1975 年、1982 年に開始された。これらの高電圧化は、気中絶縁機器の技術進歩によって支えられた。

日本における戦前の系統最高電圧は 154 kV で、「一次変電所電圧」と呼ばれていた。1941～1944 年には朝鮮半島で 220 kV 送電が開始され、機器の高電圧化開発が進められた。戦後復興と高度経済成長に伴い、各電力会社で超高圧送電線の建設が進み、1952 年に関西電力が日本初の 275 kV 送電を開始した。その後、東北・関東・中部・関西・北陸では系統最高電圧として 275 kV、中国・九州では 220 kV、四国・北海道では 187 kV が採用された。

1973 年に東京電力が日本初の 500 kV 送電を開始、翌 1974 年には関西電力も 500 kV 送電を開始した。以降、九州から東北まで 500 kV 送電系統が整備された。国内の 500 kV 基幹系統の整備は、コンパクトな

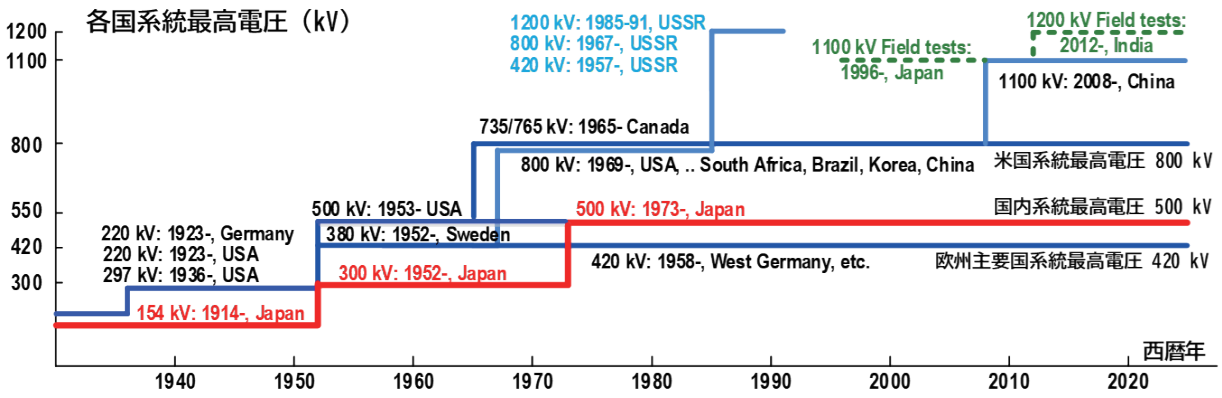


図 1.3　系統最高電圧の変遷

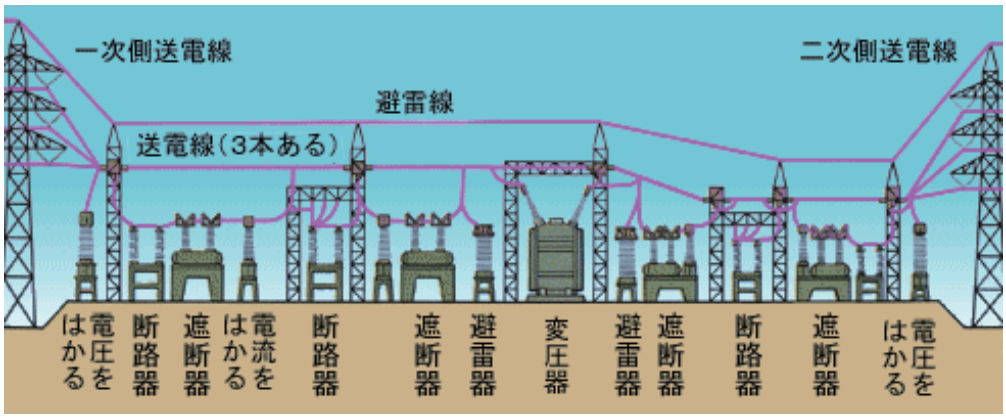


図 1.4　変電所の構成機器（出典：中部電力 HP）[13)]

ガス絶縁開閉装置（GIS）の開発によって推進された。

1970 年代初頭、イタリアの ENEL は試験研究機関 CESI S.p.A と協力して、1000 kV を超える超高圧（UHV）送電の研究を開始した。また、同時期に東京電力も UHV プロジェクトを立ち上げた。

1990 年代には、UHV 変電設備に関するさまざまな実証試験が実施された。東京電力は 1988 年に 1100 kV 二回線送電線の建設を開始、第 1 区間（約 190 km）を 1993 年に、第 2 区間（約 240 km）を 1999 年に完成させた。これらの送電線は現在、500 kV で運用されている。中国では 1981 年に 550 kV 送電を開始し、2005 年に 765 kV 送電を開始、さらに 2008 年には世界初となる 1100 kV 送電の運用を開始した。インドでは 2012 年に 1200 kV 送電の実証試験が開始された。

変電所の主な役割は、変圧器による電圧変換である。変電所に引き込まれる、あるいは変電所から送り出される送電線には、さまざまな機器が接続されている。例えば、故障発生時に電流を遮断する遮断器、電流が遮断された状態で電力系統を開閉・分離する断路器、落雷や遮断器の開閉動作時に発生する過電圧を抑制し、機器を保護する避雷器などが配置される。なお、電圧変換を行わず、系統の構成変更を目的とする開閉所においても、これらの機器を含む開閉装置が配置される。

図 1.4 は、気中絶縁変電所に設置される主要機器を示している。この変電所では、一次電圧を中央に配置された変圧器によって二次電圧へ変換（例えば降圧）している。変圧器の両側には、通常、過電圧を抑制する**避雷器**が配置される。さらに、一次側および二次側には、それぞれの定格電圧に対応した**遮断器**が設置され、その両側には**断路器**や、電流・電圧を計測する**計器用変成器**が配置される。

1.5　電力系統を構成する開閉装置

電力系統を構成する電気回路には、用途に応じて遮断器、負荷開閉器、断路器、接地開閉器などの開閉機器が設置される。これらの機器は、電気を作る発電所や電圧を変換する変電所に配置され、系統の運用性および安全性を確保する役割を担っている。

遮断器（CB：Circuit Breaker）は、電力系統の架空線や絶縁ケーブル（大地から絶縁された電気回路）に接続され、通常時には負荷電流（数千アンペア程度）の開閉を行う機能を有する。さらに、地絡や短絡などの異常時には故障電流（数十キロアンペア程度）を速やかに遮断する能力を備えている。異常な電気回路を電力系統から切り離すことにより、系統全体への事故の影響を最小限に抑制するという重要な役割を果たしている。

断路器（DS：Disconnecting Switch）は、充電された電路を開閉・分離するために用いられる開閉装置であり、負荷電流を遮断する能力は有していない。主として、発電所や変電所内の電気回路において保守作業を行う際、安全を確保するために作業箇所を電圧のある回路から切り離す目的で使用される。

負荷開閉装置（LBS：Load Break Switch）は、遮断器と異なり故障電流の遮断能力を有していないものの、電力系統において負荷電流を安全に開閉する機能を備えている。

接地開閉器（ES：Earthing Switch）は、無電圧状態の線路や母線などの電気回路を保守作業のために接地する目的で使用される。なお、運転中の隣接回線が発生する磁界によって流れる電磁誘導電流や、回線間の浮遊容量を介して流れる静電誘導電流に対しても、開閉能力が求められる場合がある。

避雷器（SA：Surge Arrester、LA：Lightning Arrester）は、発電・変電・送電・配電系統の電力機

器および電力の供給を受ける需要家の機器を、雷や開閉操作によって発生する過渡的な異常電圧（過電圧）から保護する役割を担っている。避雷器は、送電線（主回路）に直列に接続された電力機器と接地（対地電位）の間に挿入され、避雷器の制限電圧を超える場合には素子が導通し、過電圧レベルを抑制する。過電圧が収まった後には、対地絶縁を回復する機能も備えている。

上述した開閉装置は、発電所・変電所・開閉所内において、大地および相間の気中絶縁距離を確保したうえで個別に配置される場合がある。しかし、国土が限られる日本では、各種開閉装置をガスで密閉したコンパクトなタンク内に収めたガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）が広く適用されている。

ガス絶縁開閉装置（GIS）は、変電所や発電所を構成する電気設備（遮断器、断路器、避雷器、母線など）全体を SF_6 ガス（六フッ化硫黄：sulfur hexafluoride）で密閉した複合装置である。1968 年に日本で初めて実系統に適用されて以来、様々な技術進歩を重ね、現在では国内最高定格電圧である 550 kV まで広く適用され、1100 kV も実用化されている。日本は GIS の導入台数が非常に多く、系統における機器の信頼性が極めて高い世界有数の GIS 大国である。

1.6 電力系統における遮断器の役割

発電所から構成される電力系統には、主として図 1.5 に示す 3 種類の系統構成がある。図 1.5 における黒い点（●）は、変圧器や遮断器などが設置されている変電所を示す。また、記号（⊗）は、系統間を連絡または分離するための母線連絡用遮断器を表す[14]。

(a) 放射状系統（Radial System）

すべての変電所および需要家が、ひとつの中央電源に直接接続された複数の線路やケーブルによって給電される構成である。この方式では、遮断器に流れる短絡時の遮断電流は比較的小さいものの、事故が発生するとその回線に接続されるすべての需要家に影響が及ぶ。

(b) ループ系統（Loop System）

各変電所および需要家が、二方向から電源を供給される構成である。電力供給の信頼性が高く、事故時にも迂回ルートによる電力供給が可能となる。一方、遮断器などの構成機器が増加するため、建設コストが高くなる傾向がある。

(c) 複ループ系統（Mesh or Multiple Loop System）

変電所および需要家が、二つ以上の接続経路を通じて電源を供給される構成である。

この方式は、さらに高い信頼性と柔軟性を有し、系統の冗長性が向上するが、設計および運用が複雑となり、設備投資も更に大きくなる。

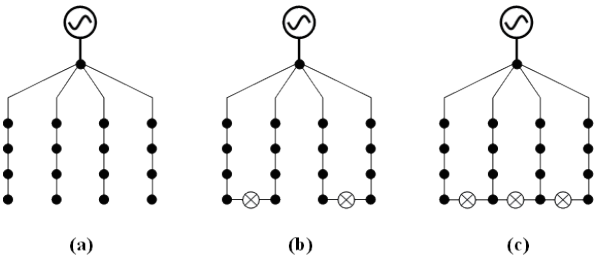


図 1.5　単一電源による系統
(a) 放射状系統　(b) ループ状系統　(c) 複ループ形状

多くの系統はループ構成で設計されており、通常時は放射状系統として運用されている。図 1.6 に示すように、事故が発生した際には、故障区間の両端にある遮断器を開放して故障電路を切り離し、健全な区間については母線連絡・分離用遮断器を閉じることにより、電力供給を継続する。

複数の発電所に接続される電力系統は、通常、複ループ系統で構成される。この構成では、一つの電源側に接続された電路で事故が発生しても、別の電源から電力供給を継続できるため、電力供給の信頼性はさらに高くなる（図 1.7 参照）。

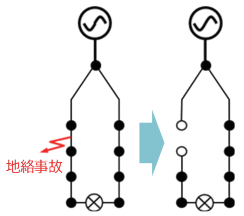
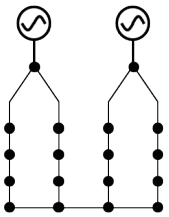


図 1.6　事故発生時、放射状運転システムにおける電力供給の復旧


図 1.7　複数電源にいる複ループ状系統

電力系統は、最高電圧から最低電圧までの段階的な電圧変換を経て構成されており、架空送電線、ケーブル、変圧器などの電路によって接続される。これらの電路は、変電所などに設置された母線（ブスバー）を中心に構成される。母線は、複数の回路を接続・分岐するための共通接続点であり、電力の流れを効率的に制御・分配する役割を担っている。母線には、接続される機器の電圧および電流容量に応じて、さまざまな構成（単母線、二重母線、母線分岐方式など）が採用されている。また、母線には遮断器、断路器、避雷器、計器用変成器などの機器が接続され、電力系統の安全性および信頼性を確保している。

図 1.8 は、変電所における単一母線方式および複母線方式による遮断器の配置例を示す。主要な配置例として、複母線を一台の遮断器で連結した **1 ブスタイ方式**、複母線を二台の遮断器で連結するとともにそれぞれの母線を分割して遮断器で連結した **4 ブスタイ方式**、複母線間に、三台の遮断器とその両端に断路器を配置した構成を複数設けた **1-1/2 遮断器方式**がある。

図 1.8 に示す単一母線方式の変電所は、変圧器を有する受電回線が 2 系列、送電回線も 2 系列あり、これらがひとつの母線に接続されている。この場合、母線で短絡事故が発生すると、すべての回線が停止、全停となる。一方、複母線方式の変電所は、受電側二回線および送電側二回線が断路器を介して、それぞれの母線に接続されている。また、二本の母線は、母線連絡用遮断器で接続されていて、それぞれの母線を分離して運用することも可能である。海外および国内電力系統では、N-1 故障に対して電力供給に支障がないことが要求されることから、変電所は、基本的に複母線方式で構成される。

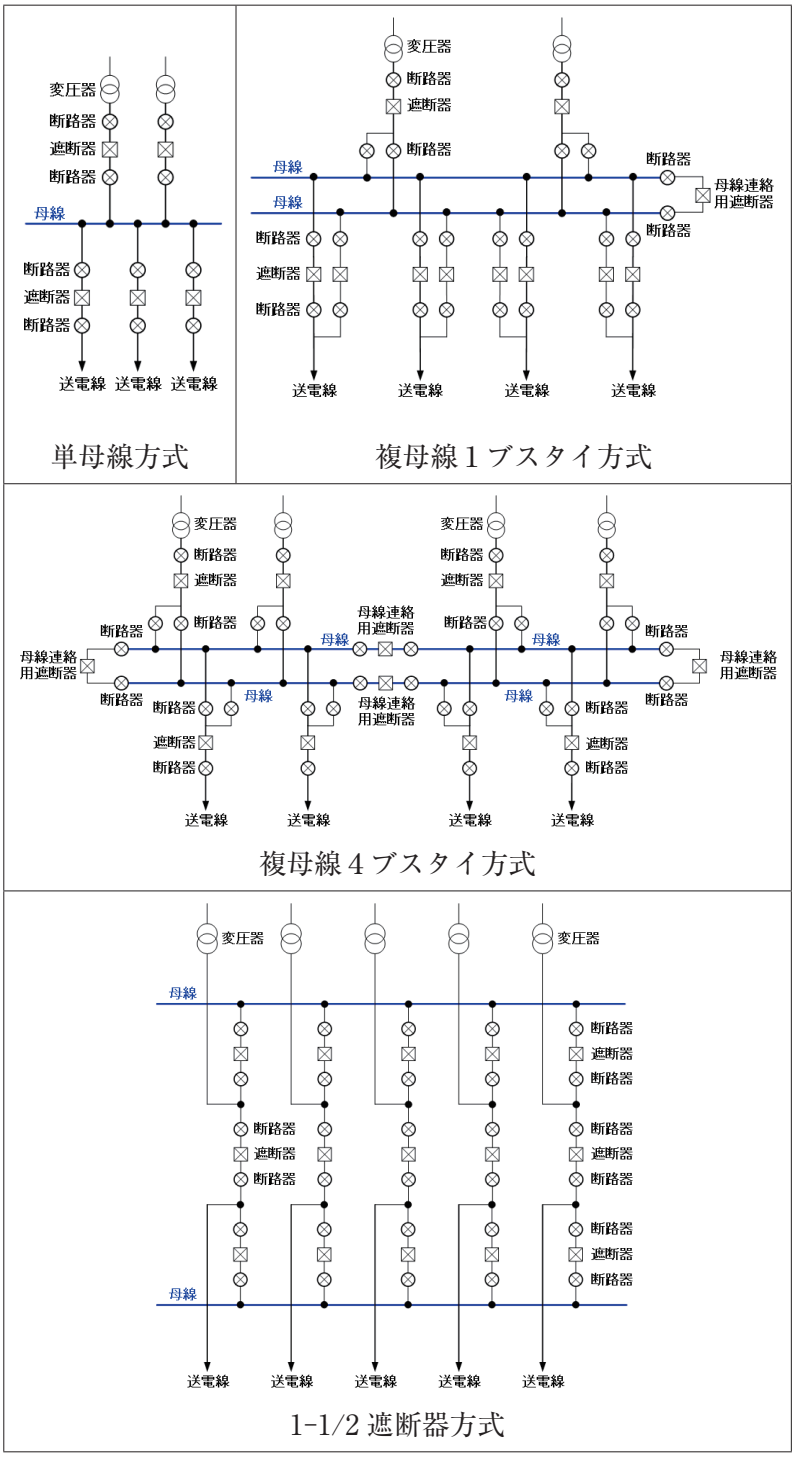


図 1.8　単母線方式および複母線方式の変電所における遮断器・断路器の配置例

表 1.1　各母線方式に対する N-1 故障時の影響

変電所構成	N-1 故障時の影響	系統融通性
単母線方式	全回線 CB 遮断、母線停止、全停	系統融通性無、事故時は全停
二重母線 1 ブスタイ方式	事故回線 CB 遮断、母線連絡用 CB 遮断器開、事故側の母線停止（1/2）	健全側の母線を利用した供給継続
二重母線 4 ブスタイ方式	事故回線 CB 遮断、母線連絡用 CB 遮断器開、事故側の母線停止（1/4）	系統融通性より高い。健全側の母線を利用した供給継続
1-1/2 遮断器方式	事故回線の両端 CB 遮断、事故側の母線停止	系統融通性さらに高い。 点検時回線停止不要

表 1.1 は各母線方式の N-1 故障時の電力系統への影響を纏めたものである。基本的に変電所を構成する遮断器の個数が多いほど、供給障害を回避できる系統融通性が高まる。

遮断器は、電力系統が正常なときには閉極状態で静止しているが、異常時には保護リレーの指令により電気回路を遮断し、事故後には系統復旧のため再接続を行う。このため、遮断器には次のような標準動作責務が規定されている[15]。

一般用遮断器（A 責務）

- 1 回目の遮断後：1 分後に再投入
- 故障が継続している場合：3 分後に再度投入・遮断

高速再閉路用遮断器（R 責務）

- 地絡事故を想定：0.3 秒後に再閉路（再投入）
- 故障が継続している場合：1 分後に再度投入・遮断

これらの動作間隔は、過去の運用経験やアーク消滅時間の実測に基づいて設定されており、電力系統の安全性と信頼性を確保する上で重要な役割を果たしている。

1.7　遮断器の誕生

遮断器は、電力系統の正常時のみならず、短絡・過電流・地絡などの異常時にも電路の開閉が可能な装置である。これらの異常時に発生する過電流に対して、遮断（開極）および投入（閉極）する能力を備えている。

通常の送電時には、遮断器の電極間が極めて低い電気抵抗を有する導体であることが求められるが、電流を遮断する際には、速やかに絶縁体へと切り替わり、電極間に加わる電圧に耐えるスイッチング機能（導体⇔絶縁体の切替）が要求される。

初期の電力系統では、図 1.9 および図 1.10 に示すような、電流が流れると溶断することで回路を保護するヒューズ（金属ワイヤを油中容器に収納したもの）や、銅合金などで作られたナイフ状の電極を刃受け側の電極に差し込み、導通を確保するナイフスイッチ（気中開閉器）が使用されていた。

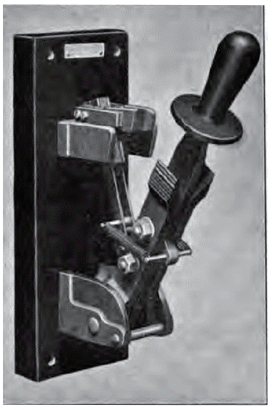


図 1.9　2000 V-10 A ナイフスイッチ（1900 年頃）[16]



図 1.10　30 kV ヒューズ（1900 年頃）[16]

ヒューズは溶断すると交換作業が必要となり、ナイフスイッチは手動操作であるため、操作ミスや接触不良が発生する可能性がある。また、高電圧回路を開極する際にはアークが発生するリスクがあり、作業員の安全性に課題があった。電力需要の増加に伴い、電気回路の開閉頻度が高まると、より安全で信頼性の高い保護装置が求められるようになり、様々な媒体中で接点を開閉する遮断器が発明された。

遮断器は、交流の周期的な電流零点において電流を遮断する。交流では、電流が正、零、負、零という周期で変化するため、遮断器は電極間に発生するアークを冷却し、電流が零点に達した瞬間に導電性を失わせてアークを消滅させる。その後、電極間の絶縁が回復電圧に耐えられる状態となることで、遮断が完了する。

一方、直流を遮断するには、強制的に電流の零点を形成する必要があるが、当時の技術ではその実現は困難であった。実用的な交流遮断器の開発は、交流送電が主流となった要因のひとつである。なお、現在では直流送電技術が高圧直流送電（HVDC）として進化しており、効率的な長距離送電が可能となっている。最近の直流送電技術および直流遮断器の開発状況については、第四章で詳述する。

初期の遮断器は、大気中で電極を開閉するという簡易な構造であった。しかし、電力系統の電圧が上昇し、回路電流が増加するにつれて、接点間に発生するアー

クのエネルギーが増大し、電流が零点で遮断できずに流れ続けるという問題が顕在化した。

この課題を解決するため、アークをより効果的に冷却・消弧できる媒体と構造の研究が進められ、初期には水や鉱油を消弧媒体として用いた遮断器が試作・導入された。

水を用いた遮断器は、1900 年に英国で開発された。これは、水を満たした一対のガラス製円筒容器内で接点を開閉する構造を採用した。(図 1.11 参照) その後、1929 年にはドイツの Siemens 社が、蒸留水にエチレングリコールを混合した媒体を用いて、定格電圧 10～60 kV、遮断容量 1500 MVA まで対応可能な水遮断器を製作した。

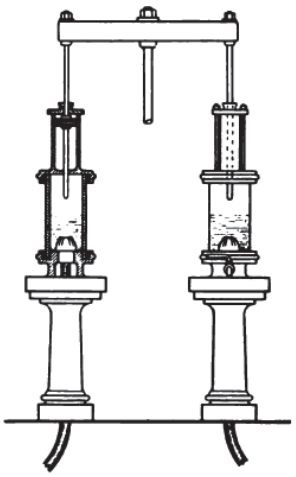


図 1.11　英国で開発された水遮断器 (1900) [16)]

Siemens が製品化した水遮断器は、図 1.12 に示すように、可動電極の周囲に二分割された絞り部を備えた「消弧室」に類似した構造を採用している。まず、下側の消弧室で発生したアークが水を蒸発させ、可動電極が下側の消弧室の小孔を通過する際に、さらに上側の消弧室でも水蒸気が発生し、それを固定電極側に吹き付ける構造である。なお、一相分の接点を二箇所に分割している理由としては、操作側に電気回路を直接接続することを避けて安全性を確保するため、また接触抵抗を低減して通電容量を確保するためと考えられる。この設計思想は、初期の油遮断器にも採用された。

一般的な蒸留水の絶縁強度は 10～30 kV/mm 程度であり、鉱油と同程度の性能を示す。しかし、不純物が混入すると絶縁性能が大幅に低下するため、水遮断器では安定した絶縁性能の確保が困難であったと推定される。このため、高圧電力系統において最初に普及した高圧遮断器は、絶縁油で満たされた密閉容器内で電極接点を開閉する構造を有する並切方式の油遮断器であった。その後、遮断媒体として空気、真空、SF_6 などを用いた遮断器が実用化され、電力系統の高電圧化・大容量化の要求に応える形で技術が進展してきた。

100 年以上にわたる電力供給システムの構築の過程で、電気は世界で最も柔軟かつ信頼性の高いエネルギー供給手段としての地位を確立してきた。現在、世界の電力需要は増加の一途をたどっており、多くの国において電力供給は国内総生産 (GDP) と密接に関連している。安全かつ安定した電力供給を支えるインフラは、極めて高い信頼性を備えた保護装置である遮断器に大きく依存している。

遮断器は、電力系統の正常時および異常時において電流を遮断・通電する重要な装置である。20 世紀初頭に発明された遮断器は、絶縁媒体中で電極を開閉する構造を有している。遮断に用いられる絶縁媒体は、水、油、空気、真空、SF_6 など、時代とともに急速に変遷してきた。それに伴い、遮断器の設計、製造、試験方法、そして現場における適用状況も大きく変化してきた。これらの遮断媒体は、電極が開極する際に発生するアークによって分解され、ガスやその分解生成物を生じる。さらに、高温状態では電離が進行し、イオンや電子などの荷電粒子が生成されて導通状態へ変化する。

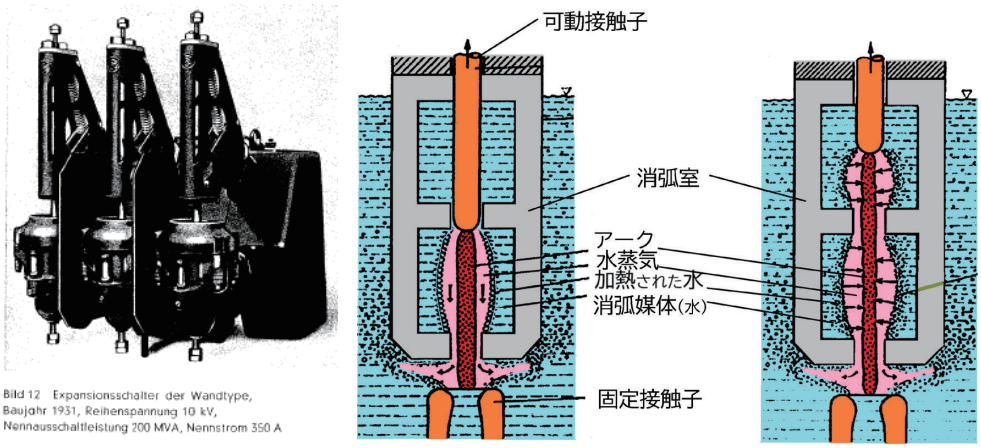


図 1.12　Siemens が開発した 10 kV–200 MVA 水遮断器 (1931) [17)]

以下の表 1.2 は、代表的な遮断媒体について、アークによる分解で生成されるガスや主な分解生成物、そして高温時に発生する荷電粒子の種類を示したものである。

遮断器を開極した際、電極間の回復電圧（地絡時に電流を遮断すると、遮断器端子の地絡側は接地電位、系統側は系統電圧へ回復していく）が電極間に存在する絶縁体（遮断媒体）の絶縁耐力を上回ると、絶縁破壊が発生する。このとき、遮断媒体の分子が電離し、荷電粒子（イオンおよび電子）からなる高温プラズマ中を再び電流が流れる現象を電弧と呼ぶ。すなわち、常温では絶縁体である遮断媒体中をアーク電流が流れる状態となる。遮断器は、発生したアークプラズマを冷却し、アークを消弧して速やかに常温の絶縁体に戻し、電流を完全に遮断（消弧）する役割を担っている。

次章では、油、空気、真空、SF_6 など、各種の遮断・絶縁媒体を用いて開発された電力用遮断器およびガス絶縁開閉装置の技術的変遷について述べる。

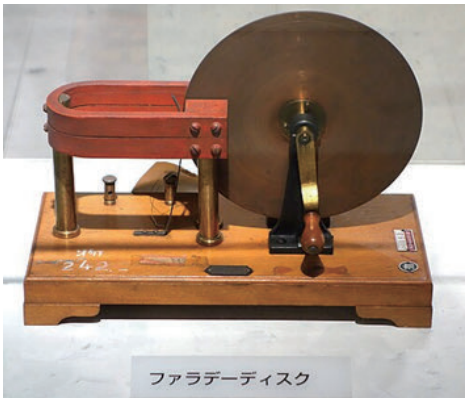
表 1.2　遮断媒体に対する高温状態における主要分解生成物と主要荷電粒子

遮断媒体	アークによる分解反応（絶縁体）	高温プラズマ状態（導体）
油	$C_nH_m \rightarrow H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4$	$\rightleftarrows H, CH_2, H^+, CH_3^+, e^-$
空気	$O_2, N_2 \rightarrow N, O, N_2O, NO_2$	$\rightleftarrows N, O, O^+, N^+, e^-$
SF_6	$SF_6 \rightleftarrows SF_6, SF_5, SF_4, SF_3, SF_2, S_2F_2, F_2S, F_2, S_2, F, S, ...$	$\rightleftarrows S_2, F_2, SF, F, S, SF^+, S^+, F^+, S^{++}, F^{++}, S^{+++}, F^-, S^-, e^- ...$
真空	（CuCr 電極の場合）Cu, Cr	$\rightleftarrows Cu^+, Cu^{2+}, Cu^{3+}, Cr^+, Cr^{2+}, Cr^{3+}, e^-$

コラム 1　電気を作る・変える

電力用機器の中で、発電機と変圧器は電磁誘導の原理を応用した代表例として広く知られている。一方、電力供給の開始や停止を担う開閉機器は、専門家以外には馴染みがない。本調査では「電気を切る」というテーマのもと、開閉機器の役割と技術的発展を調査した。発電機と変圧器の国内発展史は既に整理されているため、ここでは起源を簡単に触れる。

古代ギリシャの哲学者タレス（BC 624 年頃 ～ 546 年頃）は琥珀を布で擦ると藁や羽毛が引き寄せられる現象を観察した。これは静電気の発見であり、人類が電気を意識した最初の一歩である。「電気」の語源はギリシャ語の ἤlektron（ēlektron）で琥珀を意味する。同時期に磁鉄鉱が鉄を引きつけることも知られていたが、電気と磁気の関係が解明されるのは約 2400 年後である。18 世紀末、ボルタ（ヴォルタ）は銅板と亜鉛板を硫酸に浸したボルタ電池を発明し、人類は初めて持続的な電流を得た。これを契機に電磁気学が確立する。1820 年、エルステッドは電流が磁場を生じることを発見し、アンペールは電流と磁場の関係を定式化した。1831 年、ファラデーは電磁誘導を発見し、発電機の原理を確立した。1864 年、マクスウェルはこれを数学的に体系化し、電気と磁気の統一理論を示した。

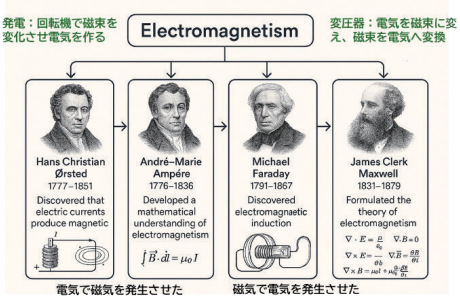


ファラデーの単極発電機（国立科学博物館保有）

発電機は 1832 年、ファラデーが円盤型発電機を試作したことに始まる。U 字型永久磁石の間で導電体円盤を回転させ、中心と周縁部間に誘導起電力を発生させた（写真参照）。1866 年、ジーメンスがダイナモ型直流発電機を開発し、1888 年にはテスラが多相交流発電機を発明。1891 年、ウェスティングハウスがこの発明を採用して交流送電システムを実用化した。

変圧器は 1882 年、ゴラールとギブスが開発したが効率は低かった。1885 年、ハンガリーのガンツ社が閉磁路の鉄心を採用し効率を大幅に改善、外鉄形変圧器を実用化した。1886 年以降、内鉄形変圧器が登場し、1890 年頃よりウェスティングハウスが外鉄形変圧器の大容量化を推進した。

このように、発電機と変圧器が電気を生み変換する役割を担うのに対し、開閉機器は電気を安全に切り、系統を保護・制御することで電力の安定供給を支えている。



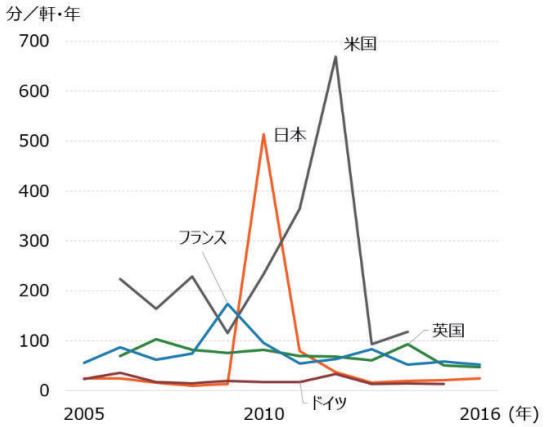
電磁気学の創始者（電気と磁気の関係を発見）

コラム２　年間停電時間の国際比較

図は、資源エネルギー庁が作成した 2005 年から 2016 年にかけての年間停電時間の国際比較を示している。大規模な自然災害などによる一時的な数値の上昇を除けば、日本とドイツの停電時間は最も短く、10～20 分程度である。

一時的な上昇要因として、日本では 2011 年の東北大震災に伴う首都圏での計画停電が挙げられる。米国では、ハリケーン、暴風、大雪などの異常気象による停電事故が 2003 年以降倍増しており、特に 2012 年にはハリケーン・サンディによって地下変電施設の浸水や送電線の倒壊が発生し、東部一帯で約 800 万世帯・事業所が停電した。また、2011 年に送電網のトラブルにより、カリフォルニア州南部とアリゾナ州、メキシコにまたがる広範囲で約 140 万世帯が停電した。

フランスでは 2009 年に暴風雨により南部で 100 万世帯以上が停電したが、2009 年を除く年間停電時間の平均は 67 分であり、日本の約 3 倍である。英国では大規模停電は発生していないものの、年間停電時間の平均は 73 分であり、フランスと同程度となっている。



2005～2016 年における年間停電時間の国際比較

出典：「主要国の年間停電時間の推移」、資源エネルギー庁 HP
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/3es_graph03.html（Browsing : 2025-11/1）

参考文献

1） 日本発送電社史、技術編（1954-1955）
2） 関西電力二十五年史（1978）
3） 東京電力三十年史（1983）
4） 電気学会 100 年史（1988）
5） 東京電力変電技術史（1995）
6） 中部電力七十年史（2021）
7） https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Edison （Browsing : 2025-9/2）
8） https://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla （Browsing : 2025-9/2）
9） https://en.wikipedia.org/wiki/George_Westinghouse （Browsing : 2025-9/2）
10） https://jeea.or.jp/course/contents/02103/ （Browsing : 2025-9/30）
11） https://ja.wikipedia.org/wiki/日本発送電/ （Browsing : 2025-9/30）
12） https://www.fepc.or.jp/supply/network/keiro/ （Browsing : 2025-9/2）
13） https://www.chuden.co.jp/energy/ene_about/electric/kids_denki/（Browsing : 2025-9/2）
14） H. Ito（editor）, “CIGRE Greenbook on Switching equipment”, Springer（2018）
15） 交流遮断器国際規格 IEC standard 62271-100 / 交流遮断器国内規格 JEC-2300（2020）
16） Electricity Control, Leonard Andrews, Charles Griffin & CO., LTD.（1904）
17） Siemens Innenraum Expansionsschalter（1940）

2 電気を切る

本章では、油、空気、真空、SF_6 などの遮断媒体を用いて実用化された各種遮断器の技術的変遷について述べる。

2.1 油遮断器の開発・変遷

2.1.1 油遮断器の誕生

1 kV を超える高電圧の電力系統において、最初に普及した高圧遮断器は、絶縁油で満たされた密閉容器内で接点を開閉する簡易な構造の油遮断器（以下、並切型油入遮断器と記す）であった。油遮断器では、接点を開放すると接点電極間にアーク放電が発生し、そのエネルギーによって周囲の絶縁油が分解され、水素が発生する。水素は熱伝導率が高いため、電極およびアークを効率的に冷却し、電流の遮断を可能としていた。一方で、遮断電流が小さく、水素ガスの発生量が少ない場合、アークの冷却効果が十分に得られず、アークが長時間継続する現象が発生していた。この課題を解決するため、接点周辺を遮へいし、分解生成された水素ガスの圧力を高めることで、接点周辺の油流を促進し、アークの冷却効果を向上させる構造が採用された。この構造が、後に「消弧室」の原型となった。

米国では、1893 年、絶縁油を満たした木製もしくは鉄製のタンクに開閉器を入れた油遮断器の原型が発明された。その後、1895 年、英国の Ferranti、また、1898 年、米国の E. W. Rice が並切型油入遮断器を実用化した。1907 年、米国の J. N. Kelman は、油中で接点を開閉する並切型油入遮断器の特許（US Patent No.938324）を取得した[1]。

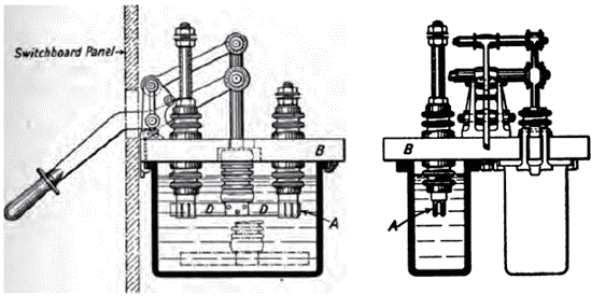


図 2.1　米国で普及した並切型油入遮断器（1900 年頃）[2]

1907 年、米国 GE 社の Hunsiker は、アークや高温ガスの拡散を防ぐ遮蔽構造「explosion pot[3]」（疑似的な消弧室構造）を採用した油遮断器を開発した。1900 年代初頭には、並切型油入遮断器が広く普及し、変圧器とほぼ同時期に実用化されたことが、交流電力供給の普及に大きく寄与した。

油遮断器の消弧原理は、電流遮断時に発生するアークによって鉱油が水素（H_2）、アセチレン（C_2H_2）、メタン（CH_4）などのガスに分解される過程における吸熱反応による冷却作用に基づいている。油中でアークが発生すると、鉱油は分解・気化し、アーク周辺に気泡が形成される。この分解ガスの主成分は水素（H_2）であり、全体の約 70 % を占める。アセチレン（C_2H_2）は 15～25 %、メタン（CH_4）は数 % 程度含まれる（表 2.1 参照）。また、アークの単位エネルギー当たりのガス発生量は 40～60 mL/kWs と報告されており、アークエネルギーの約 10 % が油の蒸発に、約 30 % が油の分解に、約 40 % が生成ガスの温度上昇に使用されるとされる。

さらに、消弧室内のガス圧上昇による効果も加わり、分解生成される水素（H_2）ガスは優れた絶縁特性と高い熱伝導率を有している。発生した高圧ガスは油中の対流を促進し、アークを効率的に冷却してそのエネルギーを奪う効果が高い。

このような遮断原理により、油遮断器は SF_6 ガス遮断器と同様に、気流による冷却作用を利用した遮断器であるといえる。

表 2.1　油中アークによる分解ガスの成分（%）、文献[4]を参照

研究者	Bauer	Wedmore	Magrini	Müller	関根	Bruce
H_2	50.4–65.7	69	70	74	67.8–70	53.1–76.5
CH_4	3.2–5.9	5	5	8	1.0–2.2	0.5–18.6
C_2H_2	23.3	23	25	13	21.8–23.6	17.4–28.5
C_2H_6	34.4	3	—	5	5.9–8.06	0.1–4.8
others	—	—	—	—	—	3.5–11.9

図 2.2 は、1901 年に米国の発電所に設置された初期の並切型油入遮断器の写真である。この単相遮断器は、二槽構造の鉄製タンクを採用し、下部に水を、上部に絶縁体である油を満たし、油層中で電極を開閉する並切型油入遮断器であった。使用電圧は 40 kV で、最大 400 A の電流を遮断する能力を有していた。火災により焼失するまでの 11 か月間、良好な開閉動作が維持されたと報告されている[5]。

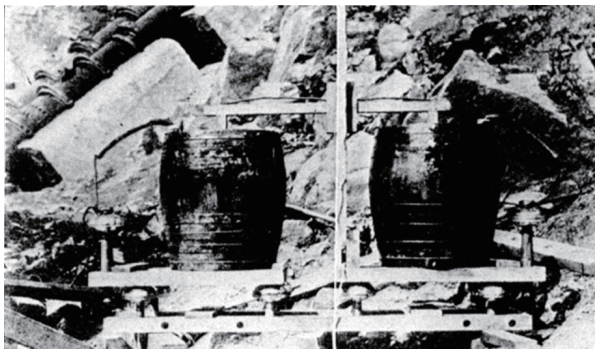


図 2.2　米国発電所に適用された 40 kV 並切型油入遮断器 (1901) [5),6)]

図 2.3 は、並切型油入遮断器の断面構造例を示す。中央には絶縁された操作部があり、その下部に 2 本の棒状電極が固定されている。両側には電気回路に接続される電極が配置されている。上側電極に設けられた空間は、後年、消弧室へと発展する技術的基盤となったと考えられている。

電気回路に直列接続された油遮断器が電極接点を開極すると、電極間にアーク放電が発生する。このアークのエネルギーにより、周囲の絶縁油が分解され、水素やアセチレンなど、比較的熱伝導率の高いガスが生成される。これらのガスは空間を通って下側電極へと流れを形成し、電極およびアークを冷却することで、電流の遮断が達成される。

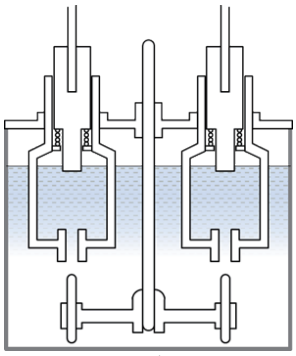


図 2.3　初期の並切型油入遮断器 [5)]

アークのエネルギーを利用して消弧を行う並切型油入遮断器には、いくつかの課題が存在した。特に小電流を遮断する際には、アークに吹き付ける油流が弱くなり、遮断に失敗したり、遮断アーク時間が長くなったりする問題が生じた。また、アークの不規則な動きによって生成された分解ガスがタンクの壁面に接触すると、閃絡が発生し、遮断器が爆発する事故も頻発した。

2.1.2　消弧室の発明

各社による研究開発の成果として、1916 年にドイツ AEG (Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft) 社が、そして、1922 年に米国 GE (General Electric) 社がそれぞれ、遮断器の電極周囲を絶縁物で囲み、電流遮断時に発生するアークをその内部で制御する構造「消弧室」を考案した[6)]。この技術により、遮断性能は飛躍的に向上した。この「消弧室」は、現在主流となっているガス遮断器にも採用されており、現代の遮断技術の基盤となっている。

米国 GE 社が開発した「Self-expulsion chamber (自己排出空間)」と呼ばれる消弧室 (図 2.4 参照) は、固定接触子を壺形の絶縁筒で包み、その内部でアークを発生させる構造を有していた。この空間は、当初、アークによって発生する金属粒子や気泡の周囲への拡散を防ぎ、絶縁性能を維持することを目的として設けられたものであった。しかし、電極間に発生したアークが油を分解することでガス圧が上昇し、可動接触子がノズル形状の絶縁物を通過する際に強力なガス流が生じることが判明した。このガス流によってアークが効果的に冷却されることが確認され、結果として遮断性能の向上につながった。

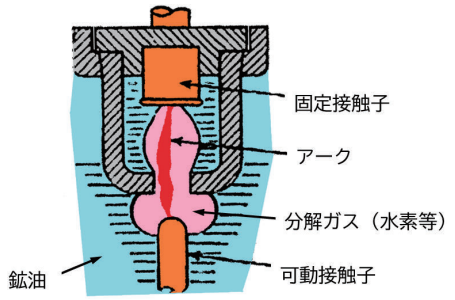


図 2.4　米国 GE 社が実用化した自己排出型消弧室 (Self-expulsion chamber) 構造、文献 [3),7)] を参照して作成

消弧室は、アークによって生成された分解ガスの拡散を抑制し、タンク壁面への接触による閃絡事故を防止する役割を果たすとともに、この空間内のガス圧を十数気圧から数十気圧にまで高めることで、鉱油を上回る絶縁耐力を実現した。さらに、加圧されたガスが電極間に勢いよく噴出することで、アークを効率よく冷却でき、遮断性能が飛躍的に向上した。

このように、偶然の発見から誕生した消弧室は、遮断器技術における大きな革新をもたらした。消弧室内のガス圧を高め、流出するガス流によって不規則なアークの挙動を制御するという設計思想は、遮断性能を大幅に向上させた。この革新的なアイデアは、後に油遮断器のみならず、空気遮断器やガス遮断器の開発にも応用され、現代の遮断技術の基盤となっている。

2.1.3　油遮断器の高性能化

初期の油遮断器では、消弧室内の電極間に発生するアークのエネルギーを利用して油を気化させ、消弧室

内のガス圧を上昇させることで、ガスを消弧室外部へ噴出し、油流を発生させてアークの冷却を促進する「自力消弧方式」が採用されていた。しかし、遮断電流が小さく、アークのエネルギーが十分でない場合には、油の対流が弱くなり、速やかな遮断が困難になるという課題があった。一方、「他力消弧方式」では、機械式ピストンを動作させるための連結機構や、大出力のばねを蓄勢・開放する高価な操作装置が必要となるが、当時はそのような大出力操作装置の入手が困難であった。

このような背景から、ばねなどの機械的な操作力を併用して油流を発生させる「他力併用自力消弧方式」が考案された[3),5)]。

図 2.5 は、外部操作装置を利用した「他力併用自力消弧方式」の消弧室を備えた油遮断器の構造例を示している。この方式では、開極時に電極間に発生するアークのエネルギーによって油が分解され、消弧室内のガス圧が上昇する。これにより、ガスが消弧室出口のノズルから噴出し、油流を形成してアークを冷却する「自力消弧」が行われる。さらに、開極動作に連動して、ばねなどの外部操作力によって押し出された油が、電極の半径方向から電極間へと流れを形成し、アークの冷却と遮断性能を補助する構造となっている。

スウェーデン ASEA（Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget）社の Contraction 消弧室、米国 WH 社の Multiflow 消弧室など、各社が自力消弧と他力による油流制御を組み合わせた「他力併用自力消弧方式」の油消弧室の開発に注力していった[8),9)]。

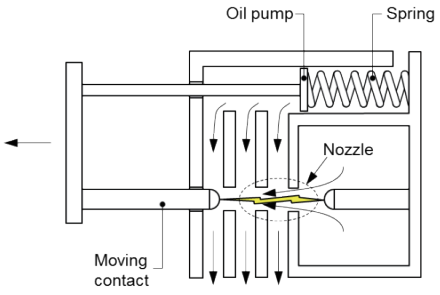


図 2.5　他力併用自力方式の油遮断器の構造例[5)]

図 2.6 に示す ASEA 社が開発した Contraction 消弧室では、接触子が乖離すると、電極間にアークが発生し、そのエネルギーによって油が分解され、水素などのガスが生成される。このガスの発生により消弧室内の圧力が上昇し、形成された油流がアークを効果的に冷却する。ガス圧力の上昇に伴い、消弧室自体が押し下げられて容積が増加し、過度な圧力上昇を防止する構造となっている。また、バネによって支えられた周囲の空間が圧縮されることで、常温の油が可動接触子の先端へと流入し、アークの冷却を促進する。

このガス流が下部電極内部を通過して外部へ排出される構造は、現在のガス遮断器にも採用されている「ダブルフロー方式」と共通する設計思想であり、当時としては画期的な技術革新であったと考えられる。さらに、接触子が下部へ移動すると、油が極間に流入して絶縁を確保し、同時に、消弧室周囲に設けられた開口部を通じてガスが排気され、内部圧力の過剰な上昇を抑制する構造となっている。

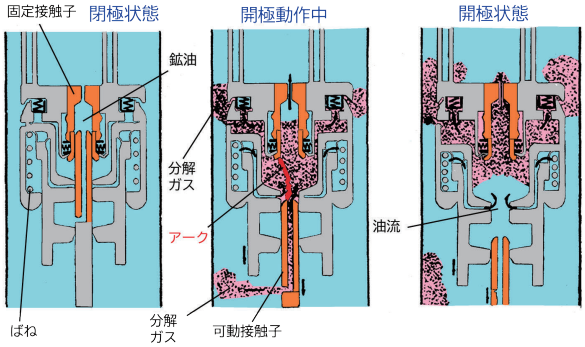


図 2.6　ASEA 製 Contraction 消弧室の動作原理、文献[7)]を参照して作成。

なお、消弧室からのガス吹付方式は、当初、可動接触子の頂部に向かってアークの軸方向へガスを吹き付ける垂直軸方向吹付方式（axial-blast）が採用されていた。しかし、この方式では、電界強度が高く、周囲の冷却油に比べて温度が高く絶縁性能が低下している可動接触子頂部にガスを直接吹き付けるため、遮断後に絶縁破壊（再点弧）が発生するという問題があった。

この課題を解決するため、消弧室の側面に開口部を設け、可動接触子の移動方向に対して横方向からガスを吹き付ける構造である横方向吹付方式（radial-blast）が開発され、油遮断器では横方向吹付方式が主流となった（図 2.7 参照）。

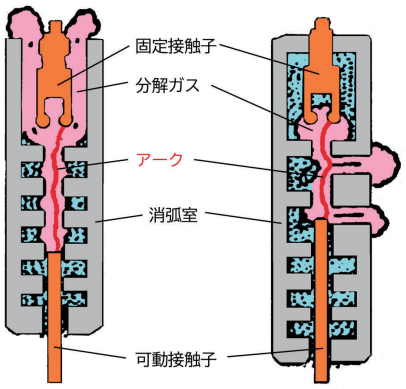


図 2.7　垂直方向吹付方式（axial-blast）、横方向吹付方式（radial-blast）の消弧室、文献[7),10)]を参照して作成

一方、油遮断器に代わって電力系統に導入された空気遮断器およびガス遮断器では、軸方向吹付方式（axial-blast）が主流となった。消弧室内の気体を高圧に保持することで、接触子表面の絶縁強度を高め、絶縁破壊を抑制するとともに、消弧室内の電極間に発生するアークの全長に軸方向の強い気流を吹き付けることでアークの冷却効果を高め、遮断性能を向上させる構造である。特にガス遮断器では、外部の空気圧縮機や操作装置に連動する機械式ピストンによって、可動接触子の先端に吹き付ける気体を高圧に加圧し、絶縁強度を高めるとともに、他力消弧方式を用いて加圧した低温ガスをアーク全長にわたって吹き付けることで、効率的にアークを冷却し、より大きな電流を遮断する方式が定着する。

油遮断器における油流の横方向吹付方式は、操作装置の操作力が現在と比べて小さく、アークの熱エネルギーを利用した油の蒸発による自力消弧方式に依存していた油消弧室の高性能化開発の過程で、その有効性が見出された結果と考えられる。当時、開発を支援する有効な解析ツールもなく、試験と改良を繰り返す試行錯誤によって、消弧室の高性能化が進められた。

以下に示す技術的成果は、現在のガス遮断器にも継承されている重要な要素である。

- 密閉空間でのガス圧向上による絶縁強度の強化
- 強力なガス吹付けによるアーク冷却技術（消弧室の発明）
- 他力併用による小電流遮断性能の向上
- ガス吹付方向の工夫による大電流遮断性能の向上
- ダブルフロー方式による効率的なガス排出とアークの冷却

これらの設計概念は空気遮断器およびガス遮断器の性能向上に広く適用されているが、その多くが油遮断器の高性能化開発の過程で考案された点は、遮断技術の発展史を考察する上で極めて重要である。

2.1.4　アーク消弧理論の研究

1920 年代初頭から、遮断器の性能向上（高遮断能力・短遮断時間）を目指し、世界各国で消弧室の最適化を目的とした研究が始まった。1921 年に発足した国際大電力システム会議（CIGRE：International Council on Large Electric Systems）において、遮断器に関する研究会が設置され、アーク消弧理論の調査が開始された。CIGRE の遮断器研究会において、最初に発足した調査作業会（WG 13.01）のテーマは、遮断器のアーク消弧理論およびモデルに関する研究であった[11),12),13)]。

主なアーク消弧理論とその提唱者を纏める。

(a) 拡散消弧理論（J. Slepian, 1928）[14)]
- 電流が零点を通過する瞬間にアークへのエネルギー供給が途絶
- 分解ガスの乱流による冷却と電荷消去で絶縁回復
- 遮断の成否は、絶縁回復速度と過渡電圧波形の上昇速度の競合によって決定

(b) 膨張消弧理論（Kesselring, 1929）[15)]
- アークによるガスの断熱膨張で冷却
- 荷電粒子の凝結による消イオン作用で絶縁回復

(c) 置換消弧理論（Price & Mayer, 1936）[16)]
- 油流がアーク空間に入り込み、絶縁層として機能

(d) 壁面消弧理論／伝熱消弧理論
- アークが壁面に接触することでイオンを中和
- 油流による冷却効果で絶縁回復

これらの理論に基づき、各社は、それぞれのアーク冷却効果を強調した消弧室を開発した（表 2.2 参照）。

表 2.2　油中アークに関する消弧理論

製造者	理論	消弧室の特徴
WH 社（米）	拡散消弧	デイオン・グリッドで壁面接触による中和
Siemens（独）	膨張消弧	油分解ガスの断熱膨張を利用
GE 社（米）	油衝消弧	油流による置換・混合冷却
日立（日本）	油流冷却	ピストン駆動による油流で冷却

ただし、提唱された各種消弧理論のうち、単一の作用のみでアークが冷却されるわけではなく、いずれの消弧室においても複数の冷却機構が複合的に作用することで消弧が達成されていたと考えるのが妥当である。

2.1.5　鉄瓶（タンク形）対土瓶（碍子形）戦争

日本では現存する図面から推定すると、最初の並切型油入遮断器が試作されたのは 1897 年とされている。1904 年には、定格 6–15 kV, 200–250 A の並切型油入遮断器が製造されており、欧米とほぼ同時期に、国内でも早い段階から遮断器の製造が始まった[17)]。

油入遮断器は、1930 年頃から使用する油量を削減した碍子形（小油量形）が開発され、消弧室の発明によって遮断能力が向上した。これに対抗して、タンク形も鉱油の使用量を減らした節油形が登場した。タンク形（通称「鉄瓶」）と碍子形（通称「土瓶」）にはそれぞれ長所と短所があり、電力会社やメーカー間で激しい議論が交わされた。米国・英国ではタンク形が主流となり、欧州では碍子形が好まれた。日本では電力会社ごとに選択が分かれた。

碍子形（土瓶型）は電気的絶縁性に優れ、少量の油で必要な性能を確保できたが、機械的耐久性に課題が

あった。一方、タンク形（鉄瓶型）は構造的に頑丈であったが、消弧室が鉄製タンク内にあるため、大地との絶縁距離を確保する必要があり、比較的多量の油を要した。終戦までの日本では主に碍子形が採用されていたが、戦後になるとその構造的な利点と欠点が再評価され、「土瓶 対 鉄瓶戦争」と呼ばれる技術・商業競争が勃発し、各メーカーが自社製品の優位性を主張し合う状況となった[19]。

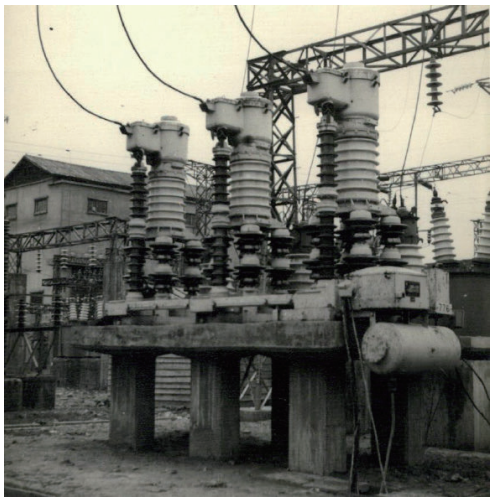


図 2.8　日本発送電新居浜変電所納 60 kV 碍子形油遮断器（掲載許諾）[18]

タンク形油遮断器は主に米国で普及した。この方式では、対地間絶縁を容器内の絶縁油で確保するため、大量の油を必要とした。油量削減のため、タンク形状にはさまざまな工夫が施された。米国での普及背景には、安価な石油が国内で豊富に入手できたことも影響した。一方、碍子形油遮断器（小油量形）は欧州を中心に主流となった。接点とアーク放電室が磁器絶縁体の内部に配置されており、必要な油量が少ないのが特徴である。ただし、遮断に失敗してアークが継続すると、分解ガスによって内圧が上昇し、爆発のリスクがある。また、タンク形に比べて耐震性や機械的耐久性に劣るという課題もあった。それでも、油量が少ないことで絶縁油の交換が容易であり、消弧室や動作機構の点検・保守がしやすいという利点がある[6]。

米国では、現在、ガス遮断器においてもタンク形が好まれる傾向がある。その理由の一つは、電力会社が長年にわたり蓄積してきた保守・点検のノウハウを継承できる点である。また、米国の電力系統は網目状に連系されており、事故時の遮断電流が大きくなる傾向があるため、多量の消弧媒体を封入できるタンク形が有利とされている。

2.1.6　碍子形油遮断器の開発・変遷

タンク形油遮断器の油量削減を目的として、碍子形油遮断器が開発された。消弧室を碍子筒に収納し、対地絶縁も碍子筒や支持碍子で確保することで、必要な油量を消弧室周辺に限定し、大幅な油量削減を可能にした。

碍子形は油量が少ないため、油の交換や消弧室・機構部の点検が容易という利点がある。一方で、大電流遮断時には鉱油の黒化が顕著であり、磁器製の筒は鉄製タンクに比べて機械的に脆弱である。また、鉄製タンク形では上部フランジにブッシング形変流器を多数かつ安価に取り付け可能であったが、碍子形では変流器を独立製作する必要があり、コストや設置数に制約が生じた。欧州では 6 kV クラスまで碍子形が主流となり、日本でも戦時中・戦後の絶縁油不足を背景に小油量形遮断器の需要が高まり、国内メーカーもこれに応じて開発を進めた。

1930 年代後半、欧州では 220 kV クラスの碍子形油遮断器が開発された。日本では、富士電機がドイツ Siemens Schuckert Gesellschaft 社と技術提携し、1930 年頃から 60 kV 以上の鉄タンク形遮断器が碍子形へと更新された。この流れの中で、高岳製作所の極小油量形遮断器（SCB）、日立製作所の制弧遮断器（CCB）、富士電機の膨張遮断器（ECB）などが登場した。1950 年には、欧州で 380 kV-12000 MVA（遮断電流 18 kA）、日本でも 287.5 kV-5000 MVA（10 kA）の碍子形（小油量形）遮断器が開発された[1),3),7)]。

米・英では依然としてタンク形遮断器が主流であったが、米国 GE 社は 1934 年に「インパルス型」と呼ばれる 287.5 kV-2500 MVA の碍子形油遮断器を開発した。この多重切遮断器は、Hoover Dam-Los Angeles 間の世界最高電圧送電線に導入され、遮断時間 3 サイクルという当時最短記録を達成し、注目を集めた。しかし、後にこの碍子形もタンク形に更新された。米英でタンク形が支持され続けた理由として、遮断容量の大きい系統に適していること、複数のブッシング変流器を安価に取り付け可能な構造であること、占有面積が小さいことなどが挙げられる。また、長年の運用経験を持つ保守要員の継続的な活用も一因とされる。日本では、高電圧系統では碍子形油遮断器が主流となったが、10～30 kV の配電クラスでは経済的な理由から普及しなかった。

芝浦製作所（現・東芝）は、1900 年初頭に GE 社から技術を導入し油入開閉器を国産化した。図 2.9 は 1914 年に王子製紙苫小牧工場向けに製造された

油入開閉器原寸模型の写真（東芝提供）である。木製タンク内の油中で高圧電流を開閉でき、45～55 kV送電に適用された。また、1920年代に、154 kV-600 MVAタンク形油遮断器を、1930年代に230 kV節油タンク形油遮断器を開発した（図2.10参照、東芝提供）。

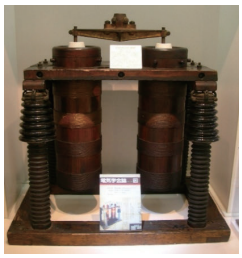


図2.9　芝浦製作所製45 kV-250 A油入開閉装置（1917）[20]

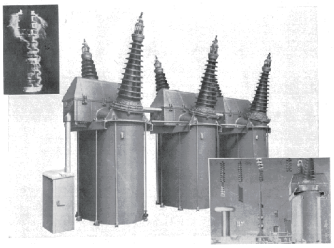


図2.10　芝浦製作所製155 kV-600 MVA（400 A）タンク形油遮断器（1922）

東芝は1930年頃、米国GE社が開発したインパルス型油遮断器の技術を導入し、1936年には大同電力へ187 kV-2000 MVAの油遮断器を納入した。当時は実系統試験による性能検証が主流であったが、1938年に鶴見工場に42/35 MVAの短絡試験設備が完成し、遮断器の性能試験が可能となった。この設備を用いて、鉄道省武蔵境変電所向け69 kVおよび161 kVタンク形油遮断器の検証が行われた。さらに、1938年頃から米国の経済制裁により鉱油供給が逼迫し、小油量碍子形油遮断器の開発が国策として奨励された。これを受け、東芝は朝鮮・満州向け230 kV送電に対応する遮断時間50 msのインパルス型遮断器を開発し、満州電業の大連変電所に納入した。図2.11は、1952年に運用開始された関西電力新北陸幹線系統に納入された287.5 kV碍子形油遮断器を示す。

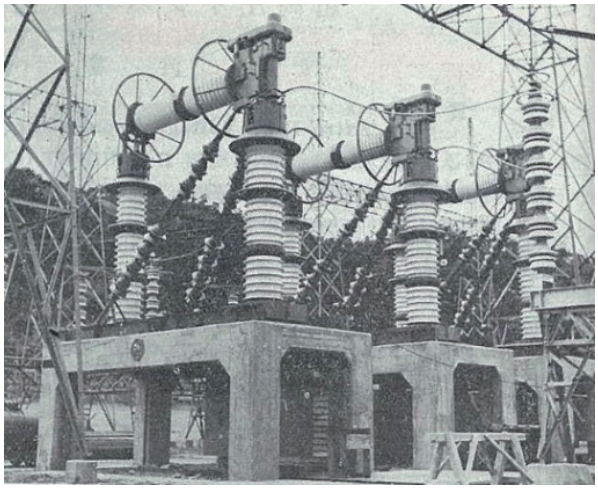


図2.11　関西電力枚方変電所納東芝製287.5 kV-5000 MVAインパルス型油遮断器（掲載許諾）

日立製作所は1926年、154 kV-1500 MVA（遮断電流5.6 kA、通電電流400 A）のタンク形油入遮断器2台を製造し、日本電力岐阜変電所（現：中部電力パワーグリッド）へ納入した。その後、欧米との技術提携によらず、1939年には265 kV-3000 MVA（遮断電流6.5 kA、通電電流1000 A）の制弧型油遮断器を自主開発した。当初は気中絶縁方式で設計されたが、1942年に油中絶縁方式を開発し、1948年には月産25台のペースで生産され、当時の国内市場でトップシェアを占めた。さらに、1954年までに多重切方式を採用することで、24～300 kVまでの碍子形油遮断器のシリーズ化（図2.12、13参照、掲載許諾）を達成し、同年、関西電力新愛本変電所および東北電力会津変電所において、287.5 kV制弧型油遮断器を用いた系統試験を実施している[21]。

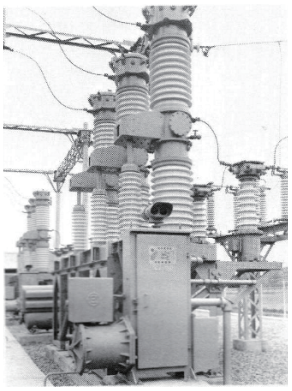


図2.12　東京電力納 日立製作所製72 kV-2500 MVA制弧型（碍子形）油遮断器[21]

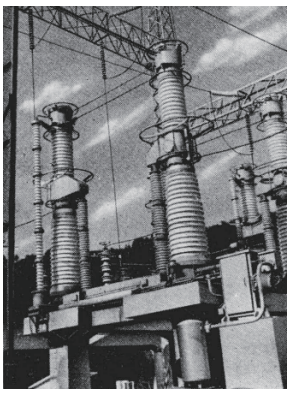


図2.13　関西電力 愛本変電所納日立製作所製287.5 kV-5000 MVA制弧型（碍子形）油遮断器[21]

1957～1958年には、国鉄東北本線の電化に伴い、80.5 kV-2500 MVA（通電電流800 A）の制弧遮断器を国鉄へ35台納入、1959～1960年には、台湾電力へ69 kV-2500 MVA（遮断電流20.9 kA、通電電流1200 A）制弧遮断器18台、インド・アンドラ州へ66 kV-1500 MVA（遮断電流13.1 kA、通電電流400 A）制弧遮断器31台を輸出した。

1965年、小電流遮断性能の向上を目的として、他力併用方式の圧油ピストンを備えた一点切84 kV制弧型油遮断器を開発した。1975年には、インドのTELK社において、この機種をベースに開発された66 kV-1500 MVA制弧型油遮断器の現地生産を開始した。また、1961年には東京電力向けに24～168 kV制弧型油遮断器235台を納入し、1967年から1972年にかけては、東京電力向けに72 kV-2500 MVA（遮断電流20 kA、通電電流800 A）の制弧型油遮断器を年間約50台のペースで生産した。

2.1.7　タンク形油遮断器の開発・変遷

1920 年代後半、消弧理論の研究成果に基づき、米国 WH 社は消イオン（deion grid）消弧室を適用した 69 kV 油遮断器を開発した。この技術により、アークの制御と消イオン作用を促進して、アーク持続時間の短縮と遮断電流能力の向上を実現した。

最終的には、消イオングリッドを 8 ユニット直列に接続することで、345 kV–63 kA まで対応可能な油遮断器シリーズを完成させた[22]。

図 2.14 は、後期に開発されたタンク形油遮断器の断面図である。ブッシングは接地電位のタンクから導体を絶縁しており、導体は 2 つの消弧室に接続されている。さらに、絶縁された操作ロッドを介して操作機構と連動する構造となっている。

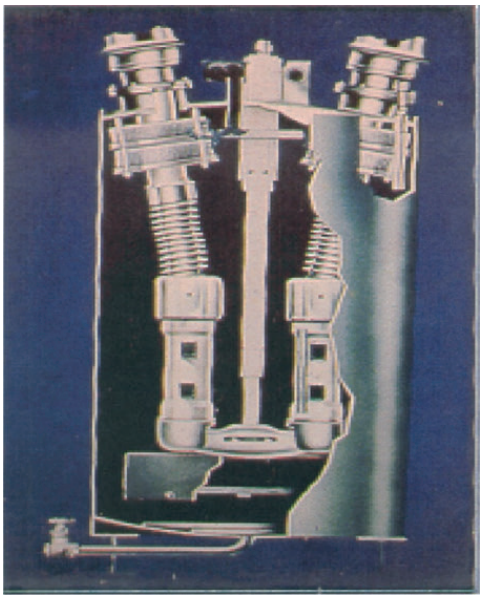


図 2.14　米国 WH 社製 145 kV–63 kA 消イオン（deion grid）消弧室の断面図[5),23)]

表 2.3 は、WH 製各定格電圧のタンク形油遮断器の遮断能力の年次推移を示す。図 2.15 は、WH 社における当時の 242 kV 初期タンク形油遮断器の製造ラインを示す。

表 2.3　タンク形油遮断器の高電圧・大容量化[5),23),24)]

Year	Voltage Rating (kV)	Current Rating (kA)	3 phase MVA Rating (V × I)
1934	287	5	2500
1941	287	7	3500
1945	138	15	3500
1947	230	25	10000
1949	138	25	6000
1951	161	36	10000
1954	330	44	25000
1960	245 / 362	63	27000 / 40000

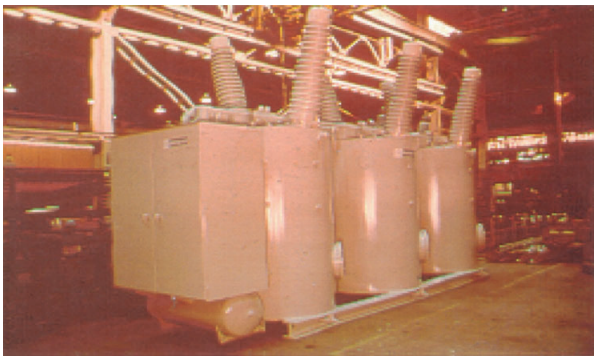


図 2.15　WH 製 242 kV 初期タンク形油遮断器の製造ライン（1960 年頃）[5),23)]

油遮断器の普及期に、特に、欧州および日本において、必要な鉱油を低減したい要求が強まった。このため、内部の高電圧部品周辺の電界設計を見直して、タンク容積を低減した節油タンク形が製品化された。具体的には、米国では、従来の円筒状タンクを上下に絞りを加えたレンズ型、英国では、ドラム形状にしてウォッチケース型と呼ばれる鉱油の使用量を削減した節油タンク形油遮断器が開発された。また、油量が 4 分の 1 に減少した一方で、冷却効率が向上し、遮断能力が 2500 MVA から 10000 MVA へ 4 倍に増加した（図 2.16 参照）[5),23)]。

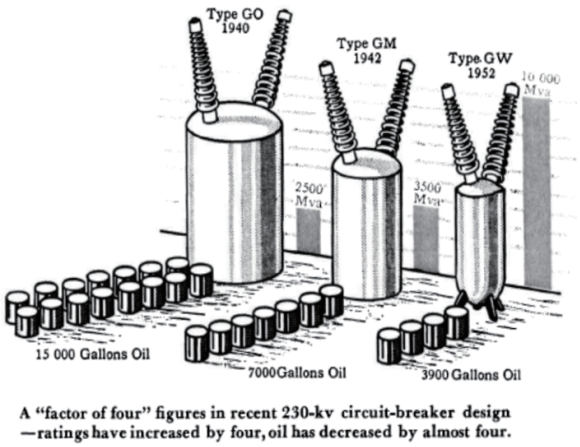


図 2.16　230 kV タンク形油遮断器の油量削減[5),23),24)]

1950 年、米国 WH 社は 230 kV–7500 MVA（遮断電流 18.8 kA）の節油タンク形油遮断器（楕円形状のウォッチケース型）をボンネビル電力庁（BPA）に納入した。この機種は米国市場で広く普及し、超高圧遮断器の過半数のシェアを占めるまでに成長した。

当時、碍子形に注力していた GE 社なども、節油タンク形の開発に追随する動きを見せた。英国では、British Thomson-Houston（BTH）社が 220 kV–5000 MVA（遮断電流 13 kA）のレンズ型（球を押しつぶした形状の）節油タンク形油遮断器を開発し、その

成功は技術提携先である GE 社の方針転換に影響を与えた可能性がある。

当時、200 kV クラスの高電圧油遮断器は三相分離タンクで製造され、操作装置は 1 個で三相連結して動作していた。また、132 kV–5000 MVA まで三相一括タンク油遮断器が製造されていた。節油タンク形油遮断器は、碍子形油遮断器や新たに登場した圧縮空気遮断器と並び、戦後の一時期に市場競争を展開した。現在でも米国ではタンク形ガス遮断器が主流であることから、この技術競争の歴史的意義は大きい（図 2.17、18 参照）。

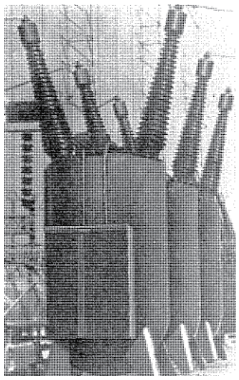


図 2.17　米国 WH 社製 330 kV–25000 MVA 楕円状ウォッチケース型節油タンク形遮断器 [25)]

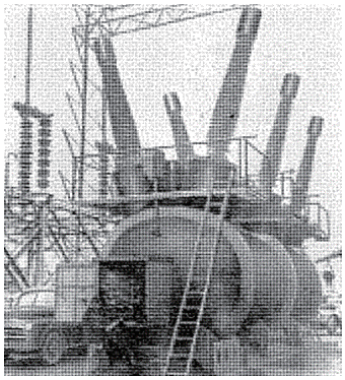


図 2.18　英国 GE 社製 330 kV–25000 MVA 円形レンズ型節油タンク形油遮断器 [25)]

1940 年代、三菱電機は米国 WH 社との技術提携に基づき、消イオングリッド消弧室を 2～4 直列に配置した 69～161 kV の碍子形油遮断器を製造し、国内電力会社のほか、朝鮮電業（現・韓国電力公社）や満州電業に納入した。1950 年には、日本発送電姫路変電所で 161 kV 碍子形遮断器の実系統遮断試験を実施、良好な結果を得た。

戦後、三菱電機は WH 社との技術提携を再開し、230 kV–5000 MVA（遮断電流 12.6 kA）の節油タンク形油遮断器を開発。1955 年に電源開発および北海道電力へ納入し、翌年には人工地絡試験で遮断時間 2.6 サイクルを達成し、運用を開始した。同機種は関西電力にも納入された（図 2.19 参照）。

当時、空気遮断器が市場を席巻しつつある中、三菱電機は、圧縮空気絶縁ユニットを多数直列配置して三相同時操作を可能とする空気遮断器の改良や、碍子構造の耐震性向上といった課題に取り組む一方で、3 サイクル遮断を実現する超高圧節油タンク形遮断器の開発も並行して進めた。

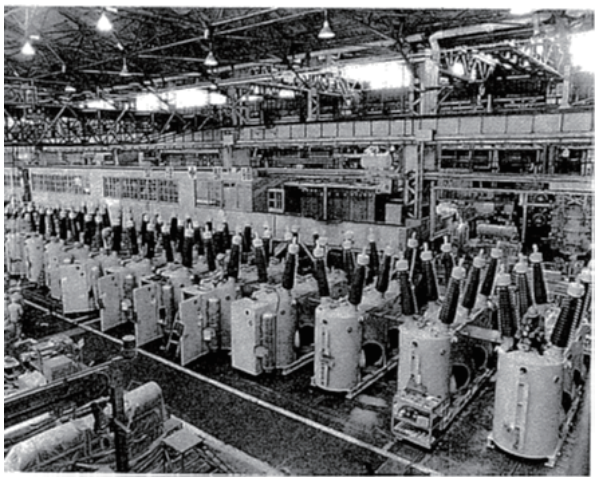


図 2.19　三菱電機における油遮断器の製造ライン（1970 年頃）[26)]

当時、287.5 kV 節油タンク形油遮断器は 6 点切構成、230/195.5 kV 機種は 4 点切構成で、消弧室上部には最大 3000 A 程度の小電流遮断用として、ばね駆動の他力式ピストンを備えられていた。大電流遮断時には、アークによる分解ガスの圧力上昇により自力で消弧室外へ流れが生じ、電流が遮断される。ガス圧が高い場合、ピストンは動作しないが、遮断後に油を消弧室内へ押し戻すことで、再閉路時の遮断遅延を抑制する効果がある。1959 年には、定格 300 kV–5000 MVA の節油タンク形油遮断器が関西電力枚方変電所および新愛本変電所に納入され、現地で充電電流試験（114 A、無再点弧）および励磁電流遮断試験（5 A、1.65E, E：系統電圧の波高値）を実施した。図 2.20 は、当時世界最高定格電圧である WH 社製 345 kV タンク形油遮断器である。この遮断器は当初 40 kA の遮断電流に対応して設計されたが、後に内部シールドを追加することで 63 kA に対応可能となった。三菱電機は WH 社との技術提携によりこの遮断器を製作し、関西電力など国内電力会社に納入、これらの油遮断器は近年まで運用されていた。



図 2.20　米国 WH 社製 345 kV–63 kA 節油タンク形油遮断器 [5), 23)]

2.1.8　油遮断器のまとめ

油遮断器は 1980 年代まで、電力供給システムの高電圧化および大容量化の要求に応えて使用されてきた。多重切構成の採用により、超々高圧 300 kV 級まで対応可能な碍子形およびタンク形遮断器の製造技術が確立された。

現在でも、碍子形油遮断器およびタンク形油遮断器は世界各地でその役割を果たしているが、新たな油遮断器の開発はすでに終了している。2016 年時点では、世界各国で約数千台の油遮断器がなお現役で稼働している。

2.2　空気遮断器の開発・変遷

空気遮断器は 1931 年に実用化され、多重切構成の採用により 800 kV から 1200 kV までの高電圧化を達成した。この技術は、各国における最高系統電圧を有する電力系統の構築に大きく貢献した。

2.2.1　空気遮断器の誕生

空気遮断器（Air Blast Circuit Breaker）は、圧縮空気を接触子間に発生するアークに吹き付けることで消弧（電流を遮断）する装置である。油遮断器は、遮断時に油が炭化するだけでなく、遮断に失敗した場合には火災が発生するリスクがあった。空気は空気絶縁変電所の機器や高圧送電線の絶縁媒体として広く使用されているが、大気圧下では遮断性能が低く、絶縁性能も鉱油に比べて劣るため、油遮断器に匹敵する絶縁性能を確保するには空気を数 MPa まで圧縮する必要があった。

米国 WH 社は 1898 年頃に 25 kV 空気遮断器を開発した。その後、1928 年に WH 社のカール・スレピアン（Carl Slepian）が提唱した油遮断器の消弧理論が遮断現象の理解を深めるとともに、消弧室の高性能化に大きく貢献した。当時の技術では空気遮断器においてユニット電圧を高くすることが困難であったため、WH 社は高電圧・大電流用途において油遮断器の開発に注力する方針を取った。

空気遮断器の開発は 1920 年代に欧州の複数のメーカーによって始められた。英国電気研究協会（British Electrical Research Association：ERA）は、油遮断器の消弧原理を研究する過程で、アークによって油が分解されて発生する水素が高い消弧作用（電流遮断能力）を持つことを発見した。ERA の W. B. Whitney および E. B. Wedmore は、1926 年にアーク発生時にその周囲に気体を吹き付けることで消弧する技術に関する特許（British Patent 278764, 1943 年登録）を出願した。しかしながら、空気遮断器の実用化には高圧力に耐える遮断器容器の開発が不可欠であり、技術的な課題が残されていた。ドイツ Siemens 社は当時、空気吹付による消弧の基礎研究を活発に行っていたが、製品化には至らなかった。空気遮断器の実用化は 1931 年、ドイツ AEG 社（Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft）により達成された[5]。

ドイツ AEG 社は 1931 年、「フライシュトラール（Freistrahl, Free-jet）型」と呼ばれる空気遮断器を開発した。この方式は電流遮断時にアークを大気中に放出する構造を採用しており、接触子は回転する碍子の先端に固定され、接触子を取り囲むノズルから圧縮空気を大気中に噴出することでアークを引き伸ばすとともに、複数の金属板でアークを分割することでアーク電圧を供給電圧より高くし、限流効果によって消弧を促進する特徴を持っていた。AEG は 1932 年に 110 kV、1933 年に 220 kV–2500 MVA クラスの空気遮断器を開発し、プロイセン電力レルテ変電所へ納入した。

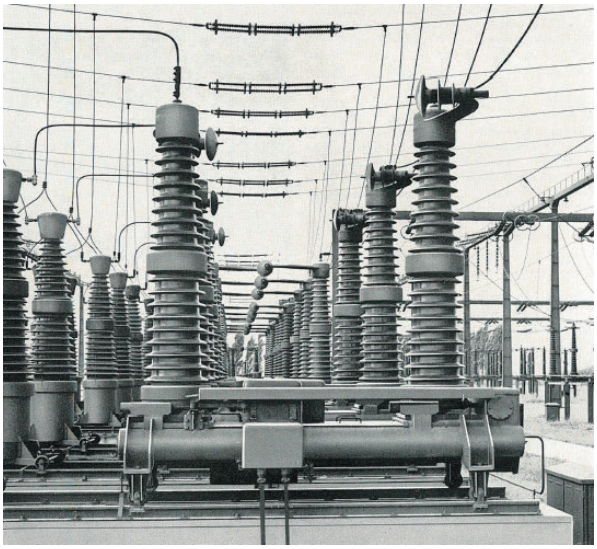


図 2.21　ドイツ AEG 社が実用化したフライシュトラール型 220 kV 空気遮断器 [27]

2.2.2　消弧室のアークの吹き付け方式

空気遮断器においても油遮断器と同様、接触子極間に発生するアークの長手方向に空気を吹き付ける「軸方向吹付方式」と、アークの横手方向から空気を吹き付ける「横方向（半径方向）吹付方式」の性能が比較された。

「横方向吹付方式」は、アークの半径方向から空気を吹き付けることで接触子電極間に形成されるアークを引き伸ばし、磁石を備えた側壁や分割板（スプリッター）によって外力を加えることでアークを細分化する方式である。細分化されたアークは、アーク電圧の上昇により遮断電流を限流し、さらに分割板との接触

や周囲の空気との乱流混合による冷却効果によって遮断性能が向上する。この方式は 30 kV 程度までの中電圧領域において、遮断電流が非常に大きい機器に適用された。

「軸方向吹付方式」は、圧縮空気をラバール（収縮－拡大）ノズルから超音速で噴出させて空気流を形成し、ノズル内に発生したアークを断熱膨張によって冷却する方式である。ノズルには金属製で電極を兼ねるものと、絶縁物で構成されたものの 2 種類があり、初期の空気遮断器では前者が主流であった。その後、接触子とは別に絶縁ノズルを備えた構造へ移行していった。この方式では電流の遮断限界は主に消弧室（特にノズル）の形状と圧縮空気の圧力に依存する。また、遮断性能は再起電圧（電流遮断後の接触子間に現れる過渡的な電圧）の上昇率の影響を受けやすいという特徴がある。このため、近距離線路故障（遮断器端子から数百 m～数 km 先の線路上の地絡・短絡故障）など遮断後に高い再起電圧上昇率が想定される場合には、遮断部に並列抵抗を接続する「抵抗遮断方式」が効果的であった。

空気遮断器では、ガス圧を高めて絶縁耐力を向上させるとともに、アーク冷却のための吹き付け方式が従来の油遮断器で採用されていた横方向吹き付け方式から、軸方向吹き付け方式へと変化した。さらに、ラバールノズルを用いてより高速のガス流を吹き付ける構造へ進化し、ノズル材料も金属から絶縁物へ移行したことで、現在のガス遮断器の消弧室構造に近づいていった。

図 2.22 左に示すノズルを持たない消弧室では、高圧ガスが固定側接触子の周囲から可動側接触子の中空内部へ吹き込む構造となっている。一方、右に示す消弧室は、固定側接触子周囲に設けられたラバールノズルによってガスを高速に加速し、可動側接触子へ吹き付ける構造である。空気遮断器の改良・最適化のノウハウが、後年のガス遮断器の急速な発展と高性能化を可能にした。

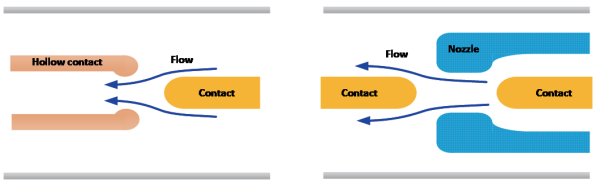


図 2.22　空気遮断器のアークへの吹き付け方式の構造例 [5)]

2.2.3　多重切方式による高電圧化

スイス・ブラウン・ボベリ社（BBC：Brown, Boveri & Cie.，1988 年に ASEA と合併、ABB：Asea Brown Boveri，現在 Hitachi Energy）は 1935 年に屋内用 6～50 kV 空気遮断器、1943 年に 110 kV 空気遮断器を開発した。1939 年に勃発した第二次世界大戦で欧州が戦地となる中、中立国スイスの BBC 社やスウェーデンの ASEA 社は空気遮断器の改良を継続し、欧州では小油量碍子形遮断器に代わって次第に碍子形空気遮断器が主流になった。BBC 社は常時充気方式の空気遮断器を開発し、高圧空気により絶縁性能を向上させるとともに、接触子の動作距離を短縮し、遮断時間を大幅に短縮することに成功した。

図 2.23 に示すように、BBC 社製空気遮断器は 36 kV から 380 kV まで同一構造の消弧室ユニットを直列接続する方式を採用し、1946 年に 220 kV-3000 MVA、1952 年 に 380 kV-8000 MVA、1953 年 に 380 kV-13000 MVA の遮断器を開発し、断路器を省略した 36～735 kV の多重切空気遮断器シリーズ化を達成した。この成功により、AEG、ASEA、English Electric、Reyrolle、British Thomson Houston、Merlin Gerin、Alsthom など欧州各社が多重切空気遮断器の製品化を加速し、1950 年代には空気遮断器が油遮断器を凌ぐ性能を持つまでに進歩した。

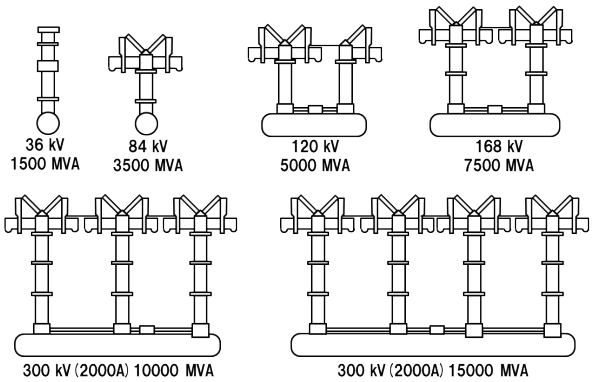


図 2.23　スイス BBC 社による多重切空気遮断器のシリーズ化 [28)]

空気遮断器は、高い遮断能力と短い遮断時間を実現できるという長所を持ち、1950 年頃には定格 132 kV から 420 kV までの世界各地の電力系統に導入された。さらに、1960 年、世界で初めてソ連（現ロシア）の 525 kV 送電線に適用された。

空気遮断器は、1 ユニットあたりの絶縁耐力が約 100 kV という限界があり、定格 420 kV の空気遮断器では、1 相あたり最大 6～10 個の遮断ユニットを直列に接続する必要があった。さらに、定格 800 kV 用の空気遮断器では、12 個の遮断ユニットを直列接続して設計された。アーク消弧には最大約 3 MPa の圧縮空気が必要となるため、多重切構成でシール箇所が増えるほど、空気漏れの故障リスクが高くなり、保守・修理のコストも増加するという課題があった。

もちろん、空気遮断器は、遮断部を複数直列接続する「多重切構成」により高電圧・大容量化に対応できるという大きな利点を有している。さらに、絶縁油を使用しないため火災の危険がなく、地球環境面や保守面でも優れており、油遮断器と比べて安全性・信頼性に優れていた。

この空気遮断技術は、1965 年にカナダで定格 800 kV の空気遮断器が導入されたのを皮切りに、米国、南アフリカ、ブラジルでも 765 kV 系統が運開された。また、ソ連（現ロシア）では 1985 年に定格 1200 kV の空気遮断器が導入され、電力系統の高電圧化を支える重要な役割を果たした。

さらに、空気遮断器は遮断媒体が液化するリスクがないため、カナダやロシアなどの低温条件下でも安定した開閉極動作が可能であり、寒冷地での運用にも適していた。



図 2.24　カナダ・ハイドロケベック納 Delle-Alsthom 製（現 GE）765 kV–40 kA 空気遮断器（ハイドロケベック提供）

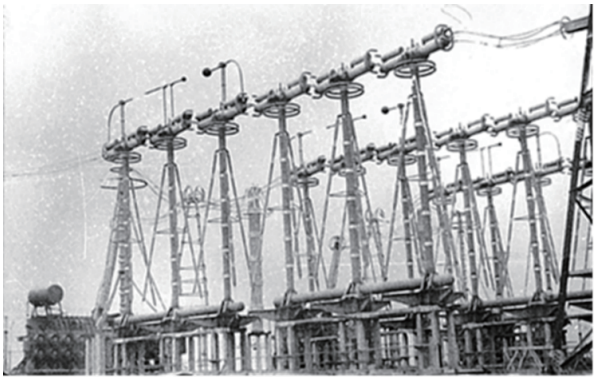


図 2.25　ロシア 1200 kV 空気遮断器（1985）[29]

図 2.26 は、フランス・アルストーム（現 GE）が製造した 800 kV 空気遮断器を示す。消弧室は、圧縮空気を接触子に吹き付けると共に、他方の接触子を兼ねる、中空金属ノズル内の下流に配置された弁を開極することで、逆方向にも気流を作るダブルフロー方式を採用している。ダブルフロー方式の消弧室は、SF_6 ガス遮断器でも主流となっている。



図 2.26　800 kV 空気遮断器（Alstom 製、GE Vernova 提供）[5]

空気遮断器は、油遮断器と競合するようになり、それぞれの長所と短所が議論された。油遮断器、特に他力併用の自力消弧方式は構造が簡単で、低い機械的動力で操作可能という利点があった。しかし、鉱油を使用するため火災の危険性があり、保守作業にも手間がかかるという課題があった。

一方、空気遮断器は、強力なコンプレッサーが必要であり、開極動作時に大きな騒音が発生する。特に、大気中に排気される構造では爆発音が問題となることがあった。また、圧縮空気中の水分管理が必要であり、万一遮断に失敗した場合には、酸素の存在により消弧室が重大な損傷を受ける可能性もあった。それでも、空気遮断器は絶縁油を使用しないため、環境面でクリーンな装置とされており、消弧室の保守には時間を要するものの、作業自体は比較的容易であるという利点がある。このため、油遮断器と比べて、安全性および環境適応性に優れていると評価されていた。

油遮断器と空気遮断器の開発はほぼ同時期に進められたため、それぞれの技術を支持する海外メーカーの意見は二極化した。時には過剰な熱意をもって、それぞれの利点が語られた。1955 年には「空気遮断器は高電圧クラスにおいて、他のいかなる遮断技術よりも優れている」と主張し、空気遮断器を最終的な解と位置づけるメーカーも登場した。しかしその後、ガス遮断器が油遮断器・空気遮断器の両方を凌駕する性能を示したことで、いずれも最終解ではなかったことが歴史によって証明された。

2.2.4　米国と英国における空気遮断器の開発

米国では当初、欧州ほど空気遮断器が普及していなかったが、GE 社および WH 社は 1940 年頃から 138 kV 級までの空気遮断器を開発し、一部の電力会社への供給を開始した。GE 社は AEG 社製の Freistrahl 型 220 kV-500 MVA 空気遮断器を製造し、1947 年にボンネビル電力庁（Bonneville Power Administration）の実系統において試験を実施したところ、送電線の充電電流遮断試験では油遮断器に比べて性能が劣る結果となったが、その他の遮断試験では良好な結果が得られた。

1950 年代に入ると、スイス BBC 社、スウェーデン ASEA 社、英国 Reyrolle 社などが、米国 GE 社や WH 社が高圧空気遮断器の市場参入に消極的であった隙を突き、北米市場に対して同定格の油遮断器よりも低価格で空気遮断器を提供する安値攻勢を仕掛けた。1956 年には BBC 社が最新型の 69 kV-5000 MVA、138 kV-10000 MVA、230 kV-15000 MVA、330 kV-25000 MVA 多重切空気遮断器の製品シリーズ化を発表、米国市場における「空気では高電圧化が難しい」という固定概念を打破するべく、IEEE や CIGRE での学会発表活動を強化した。

その影響を受け、同 1956 年、カナダ WH 社（Canadian Westinghouse Co.）は鉄タンク内に軸方向吹付方式の消弧室を配置し、ノズルから噴出した空気をタンク底面から大気に放出する構造の 69 kV-2500 MVA、138 kV-5000 MVA、161 kV-7500 MVA、230 kV-10000 MVA 空気遮断器を製品化した。これを受けて、米国 WH 社も、138 kV-10000 MVA 空気遮断器を製品化してコンソリデーテッド・エジソン社（Consolidated Edison of New York）へ供給した。米国 GE 社は空気遮断器の開発に積極的に取り組み、1959 年、15 kV-10,000 MVA、1964 年、500 kV-38,000 MVA の空気遮断器を開発した[5),6)]。

英国 English Electric（EE）社も空気遮断器の開発に積極的に取り組んだ。当時、英国電力庁（現：ナショナルグリッド）ではタンク形油遮断器が主流であり、特殊仕様が求められていたため、欧米諸国の空気遮断器に比べて寸法・重量が大きく、過酷な使用条件に耐える設計が必要とされた。

EE 社は 115/132 kV 空気遮断器を 2 点切、150/230 kV は 4 点切、275/330 kV は 6 点切、380/500 kV は 10 点切構成でシリーズ化した。これらの空気遮断器には、空気圧 2.2 MPa の常時充気方式を採用し、抵抗遮断方式と油圧操作装置を組み合わせた。さらに、碍子をエポキシ円筒で補強し、1 本の支持碍子に 4 個の遮断部を取り付ける構造とすることで、高信頼性と省スペース化を実現した[31)]。

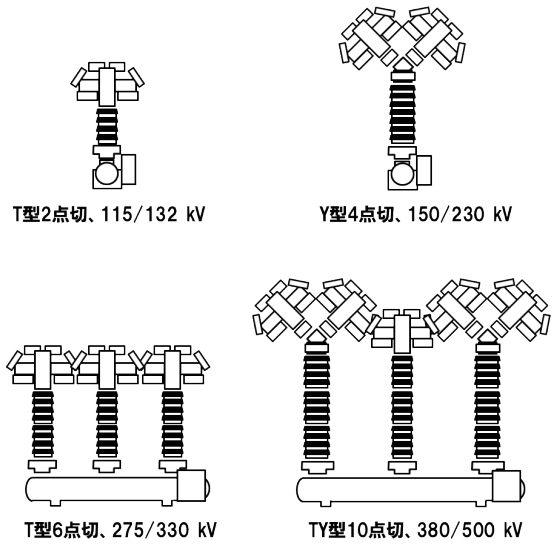


図 2.27　英 EE 社の空気遮断器の 132/230/330/500 kV シリーズ化[31)]

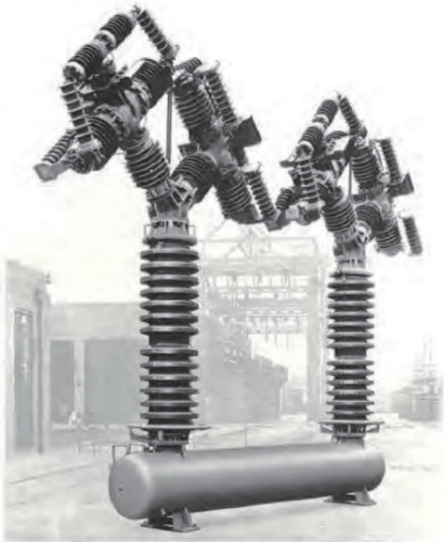


図 2.28　英 EE 社 550 kV、8 点切単相空気遮断器（1957）[31)]

2.2.5　日本における空気遮断器開発

日立製作所が 11 kV クラスの空気遮断器を試作するなど、1930 年代に国内各社が空気遮断器の研究を開始していたが、いずれも製品化には至らなかった。そうしたなか、東京芝浦電気は陸軍立川航空技術研究所から「鉱油を使用しない遮断器」の製作を命じられ、1944 年に国産初となる 23 kV-500 MVA 空気遮断器（定格電流 400 A）を開発し、同研究所に納入した。

戦後、東京電力は配電系統を 12 kV から 24 kV へ昇圧し、都内の送電容量増強を計画した。これに応じて各社、は遮断器の開発を再開し、1952 年に東芝と三菱電機が 24 kV-1000 MVA（遮断電流 25 kA）

の屋内用空気遮断器を製品化した。翌 1953 年、東京電力日比谷変電所に 24 kV 空気遮断器を納入。さらに、東芝は、1955 年、関西電力湊川発電所に 84 kV-2500 MVA 空気遮断器（遮断電流 17.2 kA）を納入した。

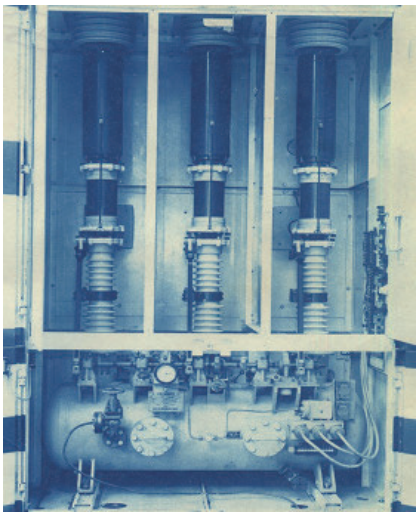


図 2.29　東京電力日比谷変電所納東芝製 24 kV-1000 MVA 空気遮断器（1952）（東京電力提供）

三菱電機は 1956 年、関西電力小曾根変電所における空気遮断器の実系統試験に参加し、定格 72 kV-1500 MVA の遮断性能を有することを実証した。当初は油遮断器と同様に圧縮空気を横方向から吹き付ける方式を採用していたが、1962 年に軸方向空気吹付へ変更し、同年に、72/84 kV-2500 MVA 空気遮断器を東北電力および日本国有鉄道へ納入した。この空気遮断器は圧縮空気タンクの上部に垂直に立てられた支持碍子の上部に V 字形の遮断部を配置し、その周囲に断路部を設けることで、全体として逆 W 字形の構造をしていた。遮断部には電圧分布の均一化および異常電圧の抑制を目的とした並列抵抗が接続され、断路部には遮断抵抗が内蔵されていた。遮断指令が発せられると、空気タンク上部の操作弁が動作し、圧縮空気が支持碍子内部の空間を通って消弧室へ送られる構造となっていた。この方式は 168 kV-5000 MVA、240 kV-10000 MVA までシリーズ化された。

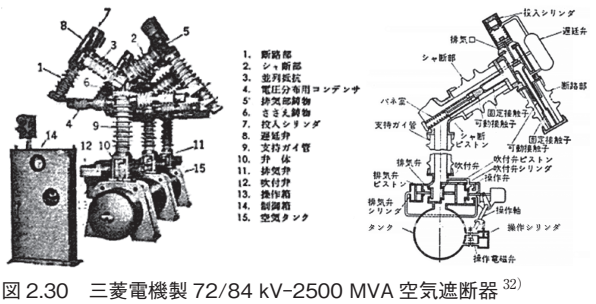


図 2.30　三菱電機製 72/84 kV-2500 MVA 空気遮断器 [32]

この時期、スイス BBC 社（後の ABB 社、現：日立エナジー社）製の高電圧多重切空気遮断器が注目され、中部電力は BBC 製の 34.5 kV-1500 MVA（定格電流 800 A、遮断電流 25 kA）空気遮断器を輸入し、1953 年に山口町変電所へ導入した。日立製作所は関西電力小曾根変電所に 80.5 kA-2500 MVA の自社製空気遮断器を納入し、これ以降、各社において BBC 製の多重切構造を参考にした高電圧空気遮断器の開発と電力系統への導入が進んだ。

東芝は 1953 年に BBC 社と技術提携を結び、1955 年には佐久間幹線に 287.5 kV-6500 MVA（遮断電流 13 kA）の空気遮断器を納入した。佐久間東幹線では、空気遮断器を用いた単相再閉路試験や充電電流遮断試験などの現地試験が実施され、良好な結果が得られた。これを契機に、超高圧系統への空気遮断器の適用が拡大した。

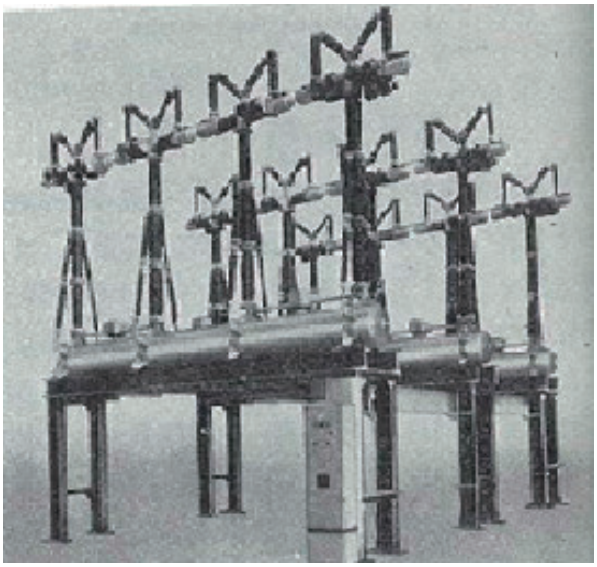


図 2.31　電源開発佐久間発電所納東芝製 300 kV-6500 MVA 空気遮断器（1955）（東芝提供）

一方、日立製作所および三菱電機は独自に空気遮断器の開発を進め、日新電機はフランスのマランジェラン（Merlin Gerin、後にシュナイダー社が買収）と技術提携を行った。30～70 kV クラスの空気遮断器は鉄道会社の変電所にも多数導入され、信頼性の高い遮断技術として活用された。1960 年代頃より国内の電力需要が拡大し、大容量火力発電所の建設が急増、都市内に送る 275 kV 送電線と変電所が多数建設された。この要求に応えるため、各社は空気遮断器の大容量化開発を進め、東芝は 1965 年に中部電力東名古屋変電所へ 300 kV-15000 MVA（定格電流 4000 A）の空気遮断器を納入した。

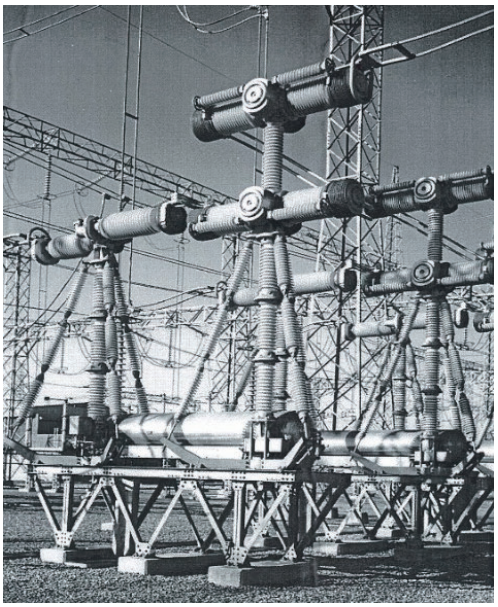


図 2.32　中部電力東名古屋変電所納東芝製 300 kV-15000 MVA 空気遮断器（1965）（東芝提供）

日立製作所は、1960 年、中国電力山口変電所に 240 kV-5000 MVA（定格電流 1200 A、遮断電流 12 kA）空気遮断器、東北電力仙台変電所に 300 kV-5000 MVA（定格電流 800 A、遮断電流 10 kA）空気遮断器、関西電力成出変電所に 300 kV-15000 MVA（定格電流 2000 A、遮断電流 28.8 kA）空気遮断器を納入した。

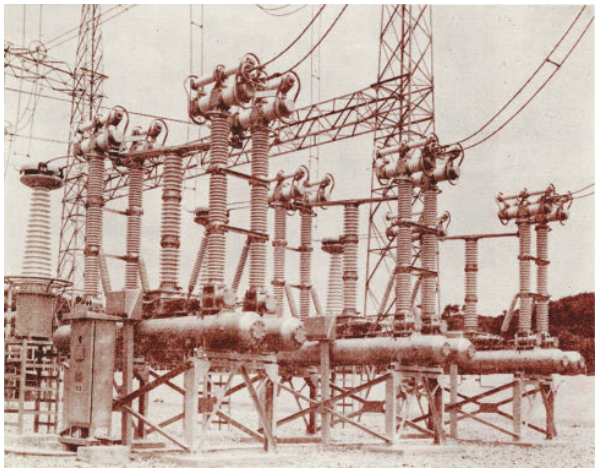


図 2.33　東北電力仙台変電所納日立製作所製 300 kV-5000 MVA 空気遮断器（1960）（日立製作所提供）[33]

日立製作所は 1963 年、それまでの瞬時充気方式に代わり、常時充気方式の空気遮断器を開発した。84/72 kV 遮断部を基本ユニットとして、168 kV を二点切、300 kV を四点切でシリーズ化を完成させ、関西電力北大阪変電所に 300 kV-15000 MVA 空気遮断器を納入した。

電力用途では、300 kV クラスに続いて 500 kV クラスの遮断器開発が進み、1971 年には東京電力が房総および新古河変電所に東芝製 550 kV-50 kA 空気遮断器を導入した。東京電力は、1973 年に房総変電所から新古河変電所間の送電線を 500 kV に昇圧し、国内初の 500 kV 送電を開始した。また、日立製作所は、1976 年、関西電力北摂津変電所に 550 kV-50 kA（4000A）空気遮断器を納入した。

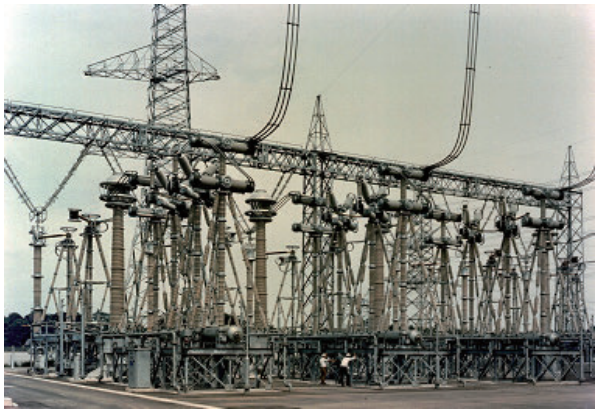


図 2.34　東京電力房総変電所納東芝製 550 kV-50 kA 空気遮断器（1971）（東芝提供）

電力需要の拡大に伴い、電力用遮断器に対して、系統の短絡容量の増大や無負荷送電線の開閉性能の向上といった性能面の要求に加えて、不燃性・安全性の確保、保守点検作業の改善、さらには経済性への対応が求められるようになった。これらの要求に応える技術として、高電圧・高性能空気遮断器の開発が推進された。

これら空気遮断器の開発を通じて蓄積された技術は、次に登場するガス遮断器の開発にも活用された。なお、このような高電圧・大容量遮断器の開発が円滑に進められた背景には、各メーカーおよび電力中央研究所において、短絡発電機やコンデンサバンクなどからなる短絡試験設備の増強がタイムリーに実施されたことが挙げられる。

2.2.6　空気遮断器のまとめ

空気遮断器の消弧室はノズル軸方向吹付方式が主流となり、標準設計された消弧室を多重切構成（必要な個数を直列配置）することにより、当時の最高送電電圧（1200/800/550 kV）まで対応できただけでなく、以下のような多くの技術的恩恵を提供した。

- 標準化設計された消弧室の量産化を可能にした。
- 並列抵抗により各消弧室に印加される電圧の均一分布が達成され、ユニット試験を可能にした。
- 高圧圧縮空気の高絶縁耐力により、接触子開離距離が数cm 以下に短縮され、高速再閉動作が容易になった。
- 圧縮機により高速の気流を発生させるため、操作力の大きな操作装置が不要であった。

一方、遮断可能な電流が固有再起電圧の苛酷度によって大きく左右されるという課題があった。また、空気遮断器は開極動作時に圧縮空気を噴き出す際に大きな騒音が発生するため、都市部での使用には制限があった。

2.3 真空遮断器の開発・変遷

真空中でアークを消弧できる可能性は古くから指摘されていたが、1965年頃に真空密封などの製造技術が確立されたことで、真空遮断器は米国、英国、日本などでほぼ同時期に実用化された。真空遮断器は、鉄道、工場、電力分野における72 kV以下の配電系統に広く適用されており、最近、ドライエア絶縁タイプによる高電圧化の開発も活発に進められている[34),35),36)]。

真空の優れた絶縁性能および遮断性能を活用した開閉装置には、真空遮断器のほか、真空開閉器、真空断路器、真空接地開閉器などがある。真空遮断器（VCB：Vacuum Circuit Breaker）においてスイッチング機能を担う電極が封入された真空容器は、真空バルブ（VI：Vacuum Interrupter）、真空スイッチ（Vacuum Switch）などと呼ばれているが、本稿では、真空バルブ（VI）と表記する。

2.3.1 真空中の電流遮断原理

真空中の電流遮断原理は、アークに気体を吹き付けて冷却するガス遮断器とは大きく異なる。真空遮断器は約10^{-4} Paの高真空に維持された容器内に一対の電極を収めた構造である。通電中に電極を開くと、接触面積が急激に減少し、最後まで接触していた部分に電流が集中して局所的に表面温度が上昇する。その部位の温度が電極材料の沸点を超えると金属が蒸発し、蒸発した金属粒子の一部は高温により電離して正イオンと電子に分離する。また、電極の高温部（カソードスポット）からは熱電子が放出され、これにより開極した電極間にアークが形成されて電流が流れる。

形成されたアークを構成する中性粒子、正イオン、電子からなるプラズマは真空中に拡散し、アークシールドや対向電極に捕捉される。また、電極間に磁界が印加されている場合、正イオンと電子はローレンツ力を受けて円運動を行い、電極表面への荷電粒子の偏在が抑制される。これによりアークの温度が低下し、電極の損耗が抑えられる。

電流が零点に近づくと、カソードスポットからの金属蒸気の供給が減少し、アークを維持することが困難となる。アーク消滅後、電極間は再び高真空状態となり、その優れた絶縁耐力によって遮断後に電極間に加わる回復電圧や系統電圧に対して絶縁が維持される。

図2.35は、真空中における電流遮断過程において、アークの挙動を電流の半サイクルにわたって模式的に示したものである。真空アークには、「拡散アーク（diffuse arc）」と「集中アーク（constricted arc）」の2つのモードが存在する。

集中アークは、通常10～15 kA以上の大電流時に発生し、高いプラズマ密度を有する。この状態は、ガス遮断器において観察される単一で太いアークに類似している。このモードでは、金属蒸気を供給する陰極の消耗が大きくなる。一方、磁界を印加することで、より大きな電流領域でも拡散アークへの移行が可能となる。電流が減少すると、集中アークは多数の小さな陰極スポットから陽極に向かって円錐形のプラズマを形成する拡散アークへと変化する。拡散アークは、電極表面上を非常に速く移動しながら真空中に拡散し、電流零点において消滅する。なお、アーク発生中の電極間電圧は、ガス遮断器における値（数kV）と比較して非常に低く、電極間隔にほとんど依存せず、概ね20 V程度である。

図2.36は、真空バルブ（VI）の代表的な内部構造を示す。真空遮断器に使用される真空容器は、円筒状のアルミナセラミック製であり、両端には金属製フランジがろう付けされており、封じ切り構造を形成している。このセラミック容器には、開極時に接点間に加わ

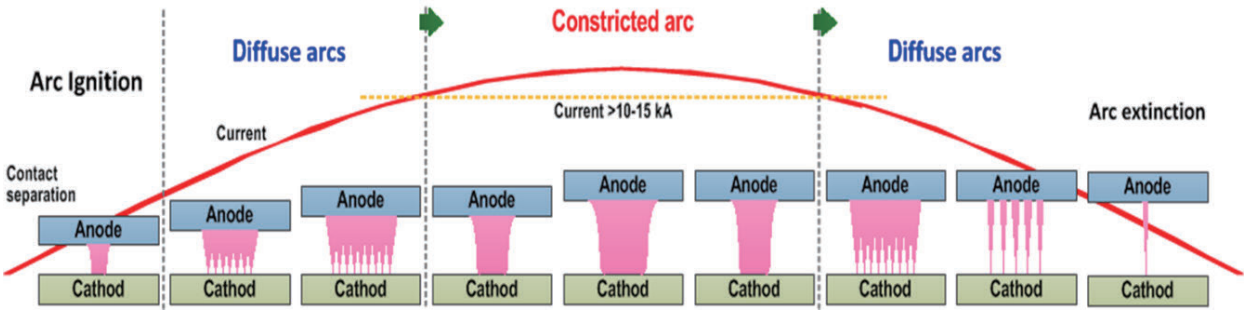


図2.35　真空中における電流遮断過程におけるアークの挙動[5)]

る過電圧に耐える絶縁強度が求められる。容器内部には、固定側電極（固定接点）と可動側電極（可動接点）が配置されており、可動電極は蛇腹状のベローズに取り付けられている。操作装置の動作によりベローズが伸縮し、可動電極が開閉極動作を行う。また、両電極の周囲にはアークシールドが配置されており、遮断時に発生する金属蒸気を捕捉することで、アルミナセラミック表面の汚損を抑制する。

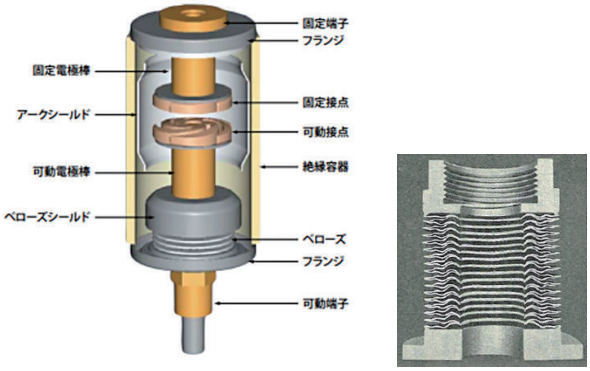


図 2.36　真空バルブの内部構造（左）とベローズ断面（右）[37), 38)]

真空遮断器（VCB）には、ガス遮断器で使用されているものと同様のばね操作装置のほか、低操作力の電磁操作装置、モーター駆動操作装置などが採用されている。ただし、真空遮断器の電極は、閉極時に平面同士が接触するだけで、ガス遮断器のような機械的な噛み込み構造を持たないため、必要とされる操作エネルギーは非常に小さくなる。このため、VCB に用いられる操作装置は小形・低コストで済み、装置全体のコンパクト化や長期的な信頼性の向上につながっている。

2.3.2　真空の発見と基礎研究

真空に関係する歴史的発見は文献[39)]によると以下の通りである。

- 1640 年：ペルチエが真空の実験
- 1643 年：トリチェリが水銀気圧計で真空を発見
- 1648 年：パスカルが大気圧を証明
- 1675 年：ピカールが真空放電現象を確認
- 1889 年：パッシェンの法則を発見

古代ギリシアの哲学者アリストテレスは、キリスト教的な世界観の影響もあり、「真空は存在しない」と主張し、その考えは長い間欧州で支持されてきた。17 世紀にガリレオは、地下約 10 m を超える深さの井戸からはポンプで水を汲み上げることができないという現象に気づき、弟子のトリチェリが水銀柱を用いて人工的に真空を作り出し、真空の存在を実証した。さらに、19 世紀後半にはエジソンが発明した電球に真空が利用され、これが真空を利用した初めての工業製品となった。

1890 年代に、真空中でアークを消弧できる可能性が指摘され、1893 年には真空中での遮断原理に関する特許が登録された。しかし、当時は真空容器を製造する技術が未発達であり、実用化には至らなかった。

なお、真空とは、通常の大気圧（1.01325×10^5 Pa）よりも低い圧力の気体が存在する空間の状態を指し、その圧力の程度に応じて、表 2.4 に示すように分類される。真空バルブ（VI）は 10^{-4} Pa 程度の超高真空に維持されており、電子の平均自由行程は 10^5 mm と、VI 内部のギャップ長（開極時の電極間隔）に比べてはるかに大きい。

表 2.4　真空度の分類

分類	圧力（Pa）	電子の平均自由工程（mm）
低真空	10^2–10^5	$< 10^{-1}$
中真空	10^{-1}–10^2	10^{-1}–10^2
高真空	10^{-5}–10^{-1}	10^2–10^6
超高真空	10^{-9}–10^{-5}	10^6–10^{10}
極高真空	$< 10^{-9}$	$10^{10} <$

1920 年代に、米国カリフォルニア工科大学の Robert Millikan と Royal Sorensen が真空スイッチ Vacuum Switch の開発に着手した。図 2.37 はスミソニアン博物館が保有する Millikan と Sorensen 真空スイッチ（1923 年製作）である[40)]。1926 年に彼らは米国電気学会（AIEE）会議で研究開発成果を発表し、真空スイッチの商業利用を予測した[41)]。

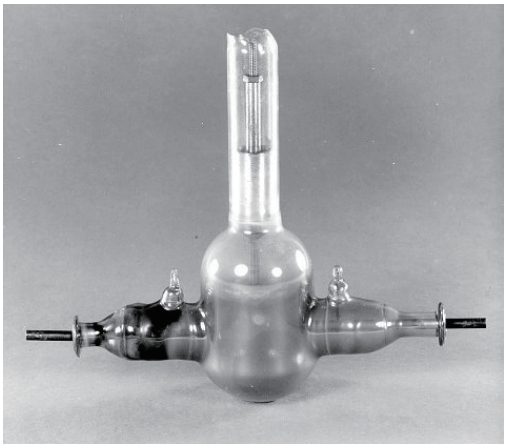


図 2.37　Millikan と Sorensen の真空スイッチ、スミソニアン博物館 HP より[40)]

1920 年代は、各種絶縁媒体の絶縁性能に関する研究が大きく進展した時期である。

絶縁破壊電圧は、試験条件や電極の形状などによって大きく左右される。図 2.38 は、平等電界下におけ

る代表的な測定例[55),56)]を示している。SF_6は空気の約3倍の絶縁耐力を有し、非常に優れた絶縁媒体である。一方、真空は短い絶縁距離において、SF_6や絶縁油よりも高い絶縁破壊電圧を示すが、ギャップ長が大きくなるにつれて絶縁耐力が頭打ちになる傾向がある。

たとえば、定格電圧 36 kV の真空遮断器に要求される過渡回復電圧 71 kV は、約 2 mm の電極ギャップで確保可能である。しかし、定格電圧 84 kV の VCB に対して要求される過渡回復電圧 165 kV を満たすには、8 mm 以上のギャップが必要となる。これは、真空バルブを単一接点で構成する場合、高電圧になるほど長い絶縁距離の確保が必要となることを意味しており、高電圧真空バルブの大型化につながる要因となっている。

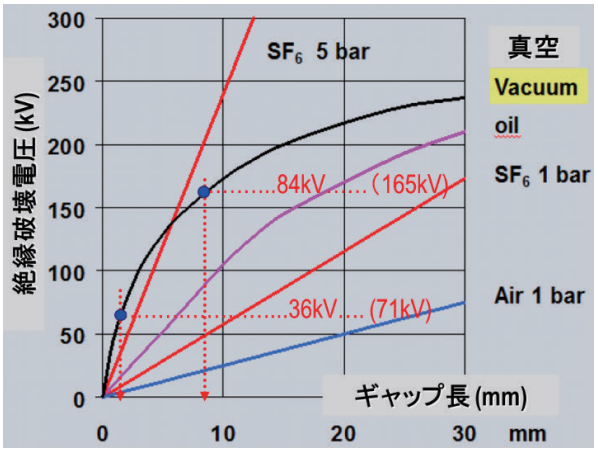


図 2.38　各種絶縁媒体の絶縁耐力（平等電界印加時の交流耐電圧波高値）[5),42)]

2.3.3　米国と英国における真空遮断器の開発

米国 GE 社は、1930 年頃、真空バルブの商業的な開発に着手した。同社は、定格電圧 14.4 kV、遮断電流 12 kA（定格電流 600 A）の真空バルブ（VI）を開発している。この VI は外形寸法が 159 mm と大型であり、電極材料には銅・ビスマス合金（Cu-Bi）製のスパイラル電極（図 2.39 参照）が採用された。しかし当時は、油入遮断器の性能が向上していたことに加え、真空技術、材料技術、清浄な組立技術などが未成熟であったため、GE 社は真空遮断器の開発を縮小。その結果、1950 年代まで真空バルブの実用化に関する研究はほとんど行われなかった。

真空遮断器の開発は、戦後の 1953 年に米国、英国、日本でほぼ同時に再開された。米国では GE 社および WH 社が開発を開始し、英国では English Electric 社と、後に GEC Alstom に買収される Associated Electrical Industries（AEI）社が、英国研究組合 Electrical Research Association（ERA）に参画して真空バルブの開発に着手した。

この時期は、真空技術、材料技術、そして絶縁理論の進歩により、真空遮断器の実用化に向けた研究が大きく前進した重要な節目であった。

1956 年、米国 Jennings Radio Manufacturing 社の Hugh C. Ross らは、定格電圧 15 kV、遮断電流 200 A の高周波回路用 VI（US Patent No.2863027A）を実用化した。1961 年、米国 GE 社の Thomas H. Ree らが、定格電圧 15 kV、遮断電流 12.5 kA の VI を実用化、翌 1962 年に市場投入した。さらに 1966 年には、定格電圧 15 kV、遮断電流 25 kA および 31.5 kA の VI が開発され、真空遮断器の大容量化が進展した[5)]。

真空遮断現象において、約 7 kA 以下の低電流時にはアークは拡散モード（diffused arc）となり、電極表面に均一に広がって自然に消滅する。一方、高電流時には集中モード（constricted arc）へ移行し、アークエネルギーが電極表面の限られた領域に集中することで局所的な過熱が発生し、金属の損耗や遮断失敗の原因となる。この現象は、当時「遮断電流 7 kA の壁」と呼ばれていた。

この課題に対しては、接点部で発生する自己誘導磁場を利用してアークを拡散させる技術が開発された。米国 GE 社は、電極を流れる電流を利用して横磁界（TMF：Transverse Magnetic Field）を発生させ、アークを電極表面に均一に分散させることで局部的な損耗を防止する技術を開発した（図 2.39 参照）。

- 回転型スパイラル電極（US Patent No.2949520A, 1958 出願、1960 登録）
- 溝付円筒カップ電極（US Patent No.3089936A, 1960 出願、1963 登録）
- 中空円筒カップ電極（US Patent No.35193764A, 1964 出願、1970 登録）

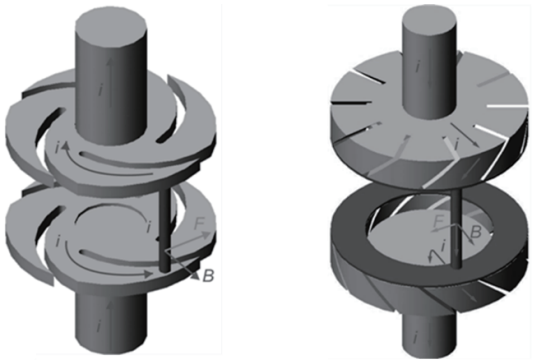


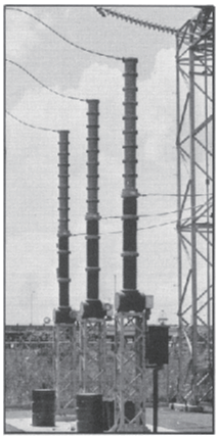
図 2.39　スパイラル電極（左）、溝付中空円筒カップ電極（右）[5)]

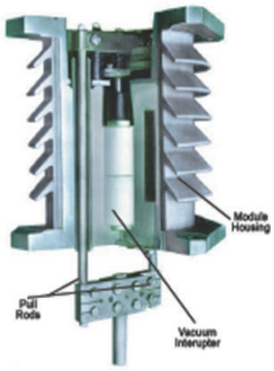
一方、英国 VIL 社は 1983 年に折り畳み花弁電極（Folded Petal Contact）を開発した[43)]。この電極は、円筒カップ状電極の側壁に設けられたスロット（溝）により電流経路を形成し、軸方向（縦方向）の磁界を発生させる構造である。この磁界により、アークにローレンツ力

を作用し、アークは回転運動を起こすことで電極表面上に分散される。その結果、従来のコントレート電極と比較して遮断性能が大幅に向上し、定格 12 kV で直径 32 mm の 20 kA 真空バルブの開発に成功した。なお、東芝は、後述するように、1976 年に「縦磁界電極」(RMF：Radial Magnetic Field) を開発、大容量化を実現している[44]。1990 年代には、縦磁界電極の開発が各社で継続された。

また、真空遮断器の初期の製造技術において、水素炉を用いたろう付け (brazing) 技術が導入され、VI 内部を約 400 ℃ に加熱しながら真空排気を行い、封止する工程が採用されていた。この方式は後に、米国 WH 社によって開発された真空炉による一括ろう付け技術に置き換えられた。この新技術により、複数部品の同時封止や製造工程の効率化が図られ、真空遮断器の量産性と信頼性が大きく向上した。

WH 社は、1960 年代初頭に 5～15 kV クラスの真空 VI を製品化した。これらの VI には、電極表面に螺旋状の溝やスリットを設けることにより横磁界を発生させる「スパイラル電極」構造が採用され、アークの均一分散と電極損耗の抑制が図られた。また、WH 社は英国企業との共同開発により、銅クロム合金 (Cu-Cr) を接点材料とする電極を導入した。Cu-Cr 合金は、優れたアーク耐性と溶着防止性能を有しており、真空遮断器の信頼性向上に大きく貢献した。





定格電圧 (kV)	直列接点数
72	4
121	7
145	8
242	9

図 2.40　米国 Eaton 社製多重切 72～242 kV 真空負荷開閉器[45]

米国では、GE 社と WH 社に続き、Jennings 社、McGraw-Edison 社、Allis-Chalmers 社などが真空バルブの生産を開始し、真空遮断器の商業化が加速した。1994 年、Eaton 社が WH 社の配電・制御事業を買収し、真空遮断器を含む多くの製品シリーズを引き継いだ。

前述したとおり、英国では、English Electric 社と Associated Electrical Industries (AEI) 社が中心となり、英国研究組合 Electrical Research Association (ERA) を組織し、真空バルブの実用化開発に取り組んだ。ERA では、マイケル・リース (M. P. Reece) が中心となって、真空遮断器 (VCB) の研究開発が進められ、遮断性能向上を目的とした真空中の遮断プロセス解析が行われた。その成果として、1960 年にコントレート電極 (contrate electrode) に関する特許 (British Patent No.1,835,253) を取得した。なお、12 kV-16 kA の VI はロンドン科学博物館に所蔵されている[46),47)]。

英国 AEI 社はアーク制御技術の研究を推進する一方、英国 English Electric (EE) 社は接点材料の研究に注力した。EE 社は、1960 年に銀系接点材料の特許を取得するも実用化されなかった。その後、1970 年、銅クロム (Cu-Cr) 接点材料を発明し、特許化した。この接点材料は、米国 WH 社との技術提携による共同開発成果であった。AEI 社は、1967 年に当時としては最高定格電圧 132 kV 真空遮断器を開発した。これは真空バルブ (VI) を 8 直列に構成したものであった。また、1960 年代後半、EE 社と AEI 社は GEC 社に合流し、1968 年に GEC と Reyrolle-Parsons の合弁企業 VIL (Vacuum Interrupters Limited) が設立された。VIL 社は、ERA/AEI の Contrate 電極、English Electric の銅クロム接点材料「CLR」、両社の真空技術と製造能力を結集し、当時最高水準の真空遮断器を市場に供給した[43] (図 2.41、42 参照)。

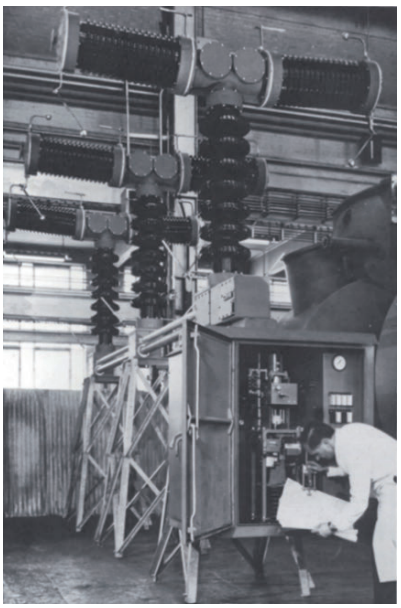


図 2.41　英国 AEI 製 132 kV-15 kA 真空バルブ 8 直列構成真空遮断器 (1967)[45]

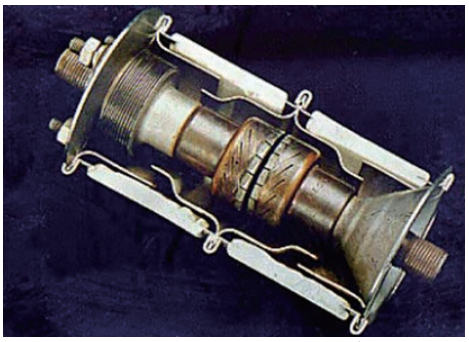


図 2.42　1970 年代の英国 VIL 製真空バルブ [43)]

2.3.4　日本における真空遮断器の開発

東芝は 1962 年頃から真空バルブ（VI）の製品化に着手し、1965 年に定格 7.2 kV-100 A クラスの真空バルブを製品化した（図 2.43 参照）。当時は「真空スイッチ管」と呼ばれており、構造は現在の VI とほぼ同じだが、サイズは現在の約 2 倍であった。また、絶縁容器にはセラミック管ではなくガラス管が使用されていた。

初期の製品では、単純な円板状電極を採用していたが、円板径を拡大しても遮断性能は約 4 kA 程度にとどまった。前述のように磁界を印加しない場合、遮断電流 7 kA 付近に限界があり、遮断時に電極間に発生したアークが一点に集中・停留することで、局所的な過熱による電極の溶解が発生し、遮断失敗の原因となっていた。

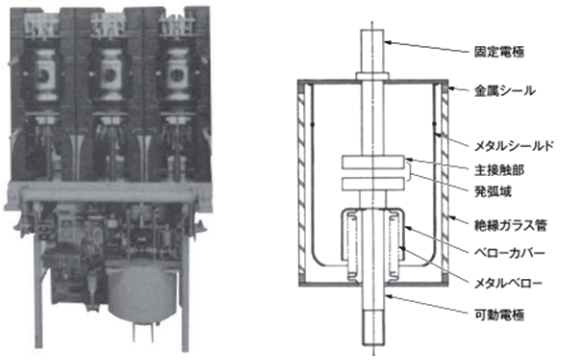


図 2.43　7.2 kV-100 A 級真空バルブ（左）とその構造（右）（1965）（東芝提供）

電極の局所的な溶融を防ぐために、電極間に磁界を加えてアークを電極表面で駆動させる電極構造が考案された。代表的なものとして、スパイラル形電極やコントレート形電極があり、これらの技術により遮断電流は約 20 kA まで向上した。

東芝は真空遮断技術の研究に注力し、1976 年に「縦磁界電極」を開発した。これにより、真空遮断器（VCB）の遮断電流は最大 40 kA まで向上した。「縦磁界電極」は、電極にコイルを取り付けて縦方向の磁界を発生させる構造であり、この磁界によってプラズマ中の荷電粒子を磁場内に閉じ込め、電極表面に均一に分散させることで、局所的な損耗を抑制する技術である。

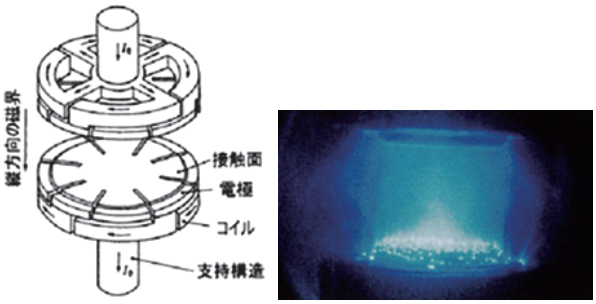


図 2.44　縦磁界電極における電極間のアーク（東芝提供）[44)]

東芝は、1976 年に縦磁界電極を用いた遮断電流 40 kA の VCB を製品化し、火力発電所の所内設備に納入した。さらに 1980 年、遮断電流 63 kA の VCB を原子力発電所向けに開発。1981 年に、定格電圧 13.8 kV、遮断電流 100 kA という当時最高レベルの遮断電流性能を持つ VCB を開発した。この VCB は、多頻度調相用途として、電源開発の 300 kV 変電所における変圧器三次回路に適用された。

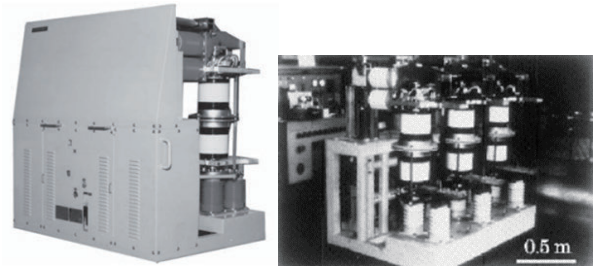


図 2.45　13.8 kV-100 kA 真空遮断器（1982）（東芝提供）[44), 48)]

明電舎は、1964 年に真空遮断技術の研究に着手し、1968 年に米国 GE 社と真空バルブ（VI）に関する技術提携を締結した。翌 1969 年には、7.2 kV 以下の真空遮断器（VCB）の製造を開始し、1971 年に 24 kV VCB、1972 年には 36 kV VCB の開発に成功した。さらに 1974 年からは、7.2 kV クラスの VI において、絶縁筒を従来のガラス管から、現在主流となっているセラミック管へと変更した。加えて、真空中で VI をろう付けする技術を確立し、排気工程を不要とする製造プロセスを実現した。

明電舎は、1975 年、72 kV-20 kA の VI を適用した配電用 VCB を、東京電力富士根変電所に納入した。また同年、国内初となる大容量高圧 VI を用いた一接点構成の 84 kV-25 kA VCB を開発にも成功した。その後、1976 年に GE 社との技術提携を解消し、それ以降は独自技術による VCB の開発を推進している。

明電舎は、1976 年、電力用 84/72 kV 碍子形 VCB

および 145 kV（二接点構成）VCB を開発し、防衛医科大学および国鉄酒折変電所へ納入した（図 2.46 参照）。しかし、1978 年に発生した宮城沖地震により、碍子形 VCB が甚大な被害を受けたことを受けて、1979 年には電力用 84/72 kV タンク形 VCB を製品化した（図 2.47 参照）。同年には、145 kV 碍子形 VCB の形式試験を KEMA 試験所で実施し、これを契機に中東地域から多数の受注を獲得した。

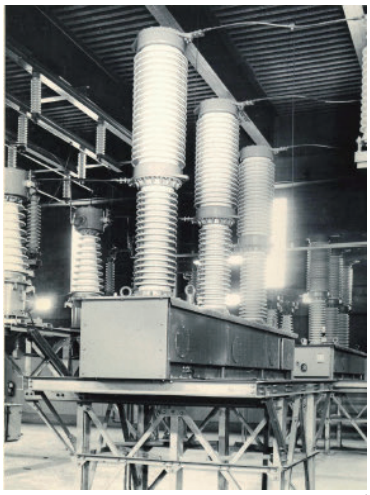


図 2.46　84/72 kV 碍子形真空遮断器（明電舎提供）[49]



図 2.47　84/72 kV-25 kA タンク形真空遮断器（明電舎提供）[50]

1980 年には、電極材料として銅・クロム（Cu-Cr）合金を採用した。なお、米国 GE 社から技術供与を受けた VI のスパイラル電極は、中心部に銅・ビスマス合金、周辺部に銅を用いた複合構造であったが、1985 年以降はすべての電極が自社製に切り替えられた。

1981 年には、当時最大定格となる 168 kV-40 kA 碍子形 VCB を製品化し、新日本製鉄へ納入した。また、2012 年に、当時世界最高定格電圧の 204 kV-40 kA タンク形 VCB を北海道新幹線（新青森～新函館間）の変電所へ納入した。この VCB は、低圧（0.15 MPa）の SF_6 ガスを絶縁媒体として使用している（図 2.48 参照）。



図 2.48　204/168 kV-40 kA タンク形真空遮断器（2012）（明電舎提供）[51]

三菱電機は、1967 年、7.2 kV-150 MVA（12 kA）の VCB を製品化、電鉄・工場などに納入（図 2.49 参照）。現在、この定格の VCB は年間 2 万台以上が生産される主力機種（市場シェア約 60 % 程度）となっている。



図 2.49　7.2 kV-12.5 kA 真空遮断器（三菱電機提供）

電力用高電圧 VCB では、2013 年に 72/84 kV タンク形 VCB（SF_6 絶縁）を開発。その後、SF_6 ガス遮断器の代替技術として環境負荷の低減を目的に、ドライエア絶縁の 72 kV-31.5 kA 一点切 VCB を 2023 年に関西電力送配電長田野変電所へ納入した。また、翌 2024 年にはこの VI を適用した複合開閉装置も開発した。



図 2.50　関西電力送配電長田野変電所納三菱電機製 72 kV ガス遮断器（左：更新前）、タンク形ドライエア絶縁真空遮断器（右：更新後）（関西電力提供）[52]

2.3.5　ドイツにおける真空遮断器の開発

Siemens は、2010 年頃から、145 kV 以上の高圧 VI の開発に注力してきた。その成果として、VCB を適用した 145 kV ドライエア絶縁開閉装置を開発し、欧州の複数の電力会社に納入している。現在は、245 kV-63 kA 対応の VI を開発中であり、この VI を多重切構成とすることで、VCB とドライエア絶縁を採用した、420 kV および 550 kV クラス開閉装置の製品化を計画している。

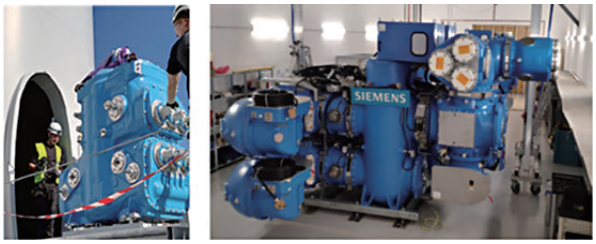


図 2.51　ノルウェー STATNET にて運転中の 72.5 kV ドライエア絶縁開閉装置（左）と 145 kV ドライエア絶縁開閉装置（右）[53]

2.3.6　中国における真空遮断器の開発

2000 年以降、中国における VCB 生産台数が急速に増加している。西安交通大学を VCB 開発の国家重点開発センターに指定して、特に寒冷地用途の高圧遮断器開発に注力している。図 2.52 は 126 kV 40 kA（一接点構成）VCB の開発状況（2012 年撮影）を示す。電極構造は、三分割したコイルを組み込んだ縦磁界電極と推察される。2019 年、中国は、VI を 12 直列に構成した VCB の試験を実施し、定格電圧 363 kV、短絡定格 63 kA を達成したと報告している[54]。

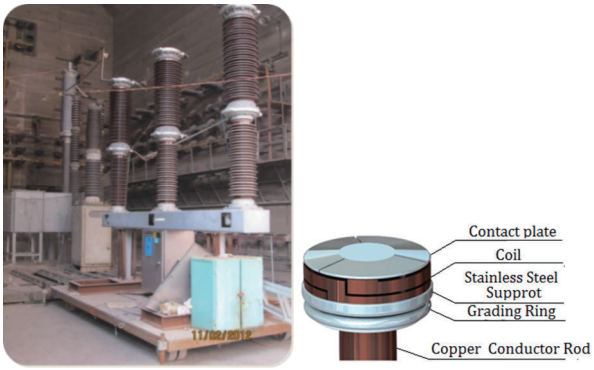


図 2.52　中国西安交通大学における 126 kV 40 KA 真空遮断器開発状況（2014）（西安交通大学提供）

2.3.7　真空バルブ電極構造・材料の変遷

VI 内部に使用される電極構造は、遮断性能に大きな影響を与える。一般的に使用されている電極構造は、図 2.53 に示す四種類に分類される[5),45)]。また、表 2.5 に各電極の構造と特徴を纏める。

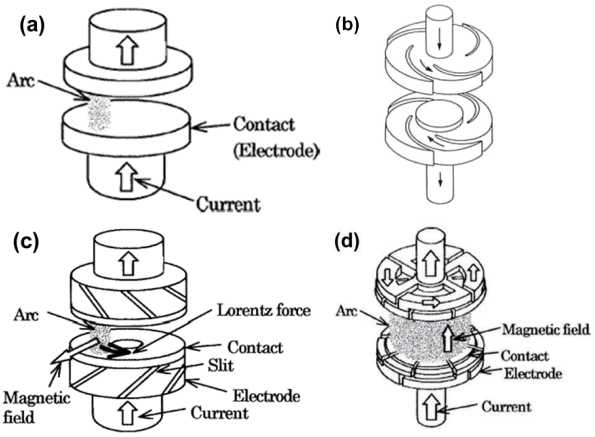


図 2.53　(a) 円板電極（磁界無）、(b) スパイラル電極、(c) 溝付横磁界電極、(d) 四分割コイル縦磁界電極[5)]

表 2.5　真空遮断器用電極構造

電極	円板電極	スパイラル・溝付電極	縦磁界電極
構造	単純な円形の平面電極で、接触面が広い。	電極周囲の螺旋状の溝が電流を誘導し、横磁界を生成する。	電極構造の電流経路により、アークに縦磁界が印加される。
特徴	構造が簡単で製造しやすい。遮断電流は数 kA が限界	磁界によってアークが回転、電極全体に分散され、電極の損傷を抑制	アークが広範囲に分散され、遮断性能が高い
用途	断路器、接地開閉器	中～高容量の真空遮断器	大容量の真空遮断器

図 2.53 (a) は、磁界制御を行わない平板電極である。構造が単純で安価に製造できるが、遮断電流が約 7 kA を超えると、ピンチ力によりアークが集中し、電極表面に局所的な損傷が生じやすい。ピンチ力とは、アーク電流によって生じる自己磁界と電流との相互作用により、アークが中心方向へ収縮する電磁力であり、これがアーク集中の原因となる。このため、大電流の遮断には適さず、小電流用の真空開閉器に適用される。

図 2.53 (b) は、電極表面に螺旋（スパイラル）状の溝や突起を設けた電極構造である。対向する電極には互いに逆方向のスパイラル形状を設け、電流を螺旋形状に沿って流すことで、接点間に横磁界を発生させる。この横磁界により、アークにはローレンツ力が作用し、アークは電極中心から外周方向へ移動する。これにより、アークの局所集中を防ぎ、電極表面への損傷を低減するとともに、安定した消弧性能を実現する。

図 2.53 (c) は、電極周辺に逆向きの螺旋状溝を設けた電極構造であり、スパイラル電極と同様に、電流の流れによって横磁界を発生させる。この磁界によりアークを駆動し、電極表面に分散させることで、ローレンツ力によるアークの外周方向への移動を促進し、消弧性能の向上と電極損傷の抑制を図る。

図 2.53 (d) は、アーク電流と平行な縦磁界を印加し、アークを電極間に均一に拡散させる方式である。平板電極の背面に配置されたコイル導体により、主電流が分流され、アークと同方向の磁界が形成される。この

縦磁界の作用により、アークは回転および拡散運動を起こし、電極表面への熱集中が抑制される。これにより電極の損傷が低減され、大電流の遮断が可能となる。

明電舎は VI 開発初期において米国 GE 社から技術移管された銅－ビスマス（Cu-Bi）系電極を採用していた。しかし、1980 年代に入ると優れた耐電圧性能と遮断性能を兼ね備えるとともに、電流裁断現象および再点弧を抑制可能な銅－クロム（Cu-Cr）系電極へと移行した。電流裁断（Current Chopping）とは、遮断器が交流電流の周期的な零点に達する前に強制的に電流を遮断してしまう現象である。この現象はリアクトルなど誘導性負荷を遮断する際に発生しやすく、遮断後に回復電圧が急激に上昇することで過電圧の発生や絶縁破壊を引き起こす可能性がある。また、再点弧（Restrike）は遮断器が電流を遮断した後、接点間に再びアークが発生し電流が流れる現象である。これは遮断後の回復電圧によって接点間の絶縁が破壊され、放電が再発することで生じる。再点弧により発生する過電圧は遮断器の信頼性や系統安定性に悪影響を及ぼす可能性がある。現在、Cu-Cr 電極はさまざまな元素が添加され、遮断性能の向上や電極消耗の低減が図られている。具体的には、Co、W、WC など高融点材料を添加してアーク耐性を高める一方、Ag、Te、Se など低融点材料を加えることでアークを安定的に維持し、電流遮断時のサージ電圧の発生を抑制する開発が進められている（表 2.6 参照）。

2.3.8　真空遮断器のまとめ

電力用真空遮断器は、従来は 72 kV 以下の配電系統や電鉄、工場向けの用途が主流であったが、近年では 145 kV、168 kV、さらには 204 kV や 245 kV クラスまで適用範囲が拡大した。遮断電流は最大 40 kA、通電電流は最大 3000 A 程度まで実用化されている。また、SF_6 ガスの代替としてドライエアや固体絶縁を用いた環境低負荷型の開閉装置の開発が活発であり、真空バルブを適用した 145 kV ドライエア絶縁タンク形開閉装置も実用化された。さらに、420 kV や 550 kV クラスを視野に入れた研究開発も進行中である。

2.4　SF_6 ガス遮断器の開発・変遷

2.4.1　SF_6 ガス遮断器の誕生

SF_6 ガスを消弧媒体とする開閉装置は、米国ウエスチングハウス（WH）社によって実用化された。WH 社は、1953 年、油遮断器の技術を応用し、0.4 MPa の SF_6 ガスを封入した密閉碍子筒内で開閉試験を行い、SF_6 の高い絶縁耐力と優れたアーク消弧性能を活用した「単一圧力方式」によるプロトタイプ遮断器（115 kV-1000 MVA、遮断電流 5 kA および 46 kV-250 MVA、同 3 kA）[55),56)] を開発した（図 2.54 参照）。当時の操作装置では、遮断可能な電流は数kA 程度の負荷電流レベルに留まっていた。

表 2.6　電極構造・材料の発明まとめ

電極構造・材料	開発経緯・発明者
回転型スパイラル電極	米国GE社が回転型スパイラル電極に関する特許取得 US2949520A(1958) 米国WH社が回転型スパイラル電極を適用した5～15 kVクラスの真空バルブを製品化(1960年代初頭)
横磁界中空円筒状電極	米国GE社は、電極周辺に溝を設けた横磁界電極に関する米国特許US3089936A(1960)を取得。横磁界中空円筒状銅電極（hollow copper cylinder）電極を適用、周辺に溝を設けると共に、電極周辺接触面に溶融耐性のある突起部を形成。GB1056902A(1965)
横磁界コントレート電極	英国研究組合ERA開発リーダー・M. P. Reeceがコントレート(RMF)電極に関する特許取得 Improvements relating to vacuum switch contact assemblies, British Patent No. 1 098 862(1968) Improvements relating to vacuum switch contacts, British Patent No. 1 100 259(1968)
縦磁界分割コイル電極	東芝は、1976年、電極自体にコイルを取り付けた縦磁界電極を発明、遮断電流を40 kAまで飛躍的に向上させた。US3935406A (1976)
縦磁界折り畳み花弁電極	英国Vacuum Interrupters Limitedは、 1983年、折り畳み花弁電極(Folded Petal Contact)と呼ばれる縦磁界(AMF)電極を開発
銅クロム電極材料	英国English Electricは、1970年、銅クロム電極を発明、特許を取得。ZLR British Patent No. 8521984 (1985) English Electricは、この接点材料に関して、米国WH社と技術提携を締結、電極を共同開発。 明電舎は、1980年、電極材料としてCu-Cr材料を適用

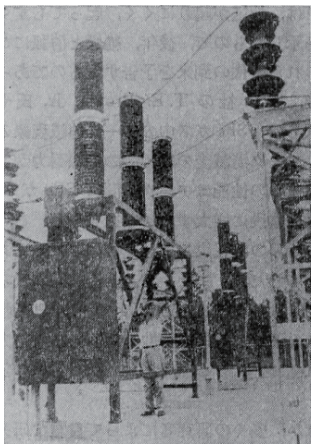


図 2.54　米国 WH 社が実用化した 115 kV-1000 MVA ガス遮断器（1955）[56]

さらに、WH 社は、1958 年、常時充気方式の空気遮断器の技術を応用して「二重圧力方式」による定格 230 kV-15000 MVA（遮断電流 37.65 kA）ガス遮断器を開発した。この方式は、接地されたタンク内で次のように動作する。

- 高圧タンクに約 1.5 MPa に圧縮された SF_6 ガスを消弧室へ導入する。
- 遮断時に弁を開放し、0.2～0.3 MPa に保たれた低圧ガス空間へ排出する。
- 排出されたガスは電極間のアークに吹き付けられ、電流を遮断する。

この密閉サイクル構造は、現在のタンク形遮断器の原型となった。

また、1964年、定格 69 kV-2500 MVA（遮断電流 20.9 kA）まで対応する単一圧力式の碍子形 SF_6 ガス遮断器が開発された。この方式では碍子内部に 0.3～0.4 MPa の SF_6 ガスを充填したシリンダ状タンクに消弧室を配置し、可動接触子と一体化した絶縁管を組み込み、開閉動作に伴ってピストン室内のガスを圧縮し、ノズル部で形成されたアークに向けてガスを吹き付ける構造であった。この構造は、後に広く採用されたパッファ方式の原型となった。

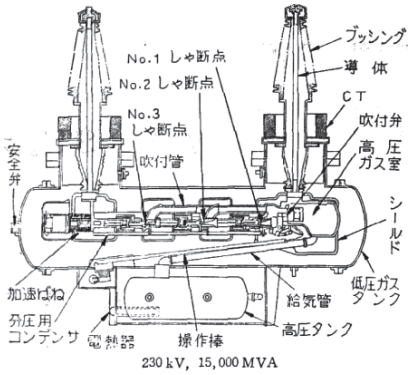


図 2.55　WH 社製 230 kV-15000 MVA 二重圧力式タンク形ガス遮断器（1958）[56]

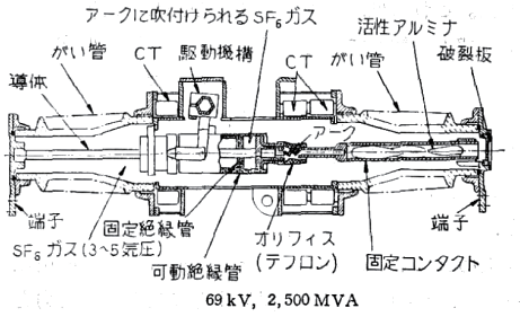


図 2.56　WH 社製 69 kV-2500 MVA 単一圧力式碍子形ガス遮断器（1964）[56]

図 2.57 および表 2.7 は、二重圧力方式と単一圧力方式の概念図および比較を示す。

二重圧力方式は、あらかじめガス圧縮機で消弧室内のガスを十数気圧に加圧し、開極時に低圧室の弁を開放してガス流を形成し、アークに吹き付ける方式である。比較的小さな操作力で高い遮断性能を実現できるため、開発当初は大容量ガス遮断器に採用された。

単一圧力方式は、操作装置による接触子の開極動作時にパッファ室内の SF_6 ガスをピストンで圧縮し、アークに吹き付ける方式である。当時の操作装置では遮断電流は約 20 kA 程度で、中容量ガス遮断器に適用されていた。現在では、操作装置の大出力化に伴い、単一圧力方式が主流である。

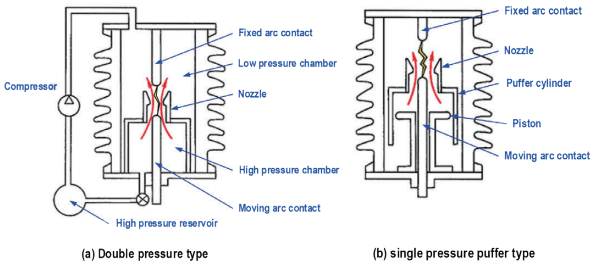


図 2.57　(a) 二重圧力方式、(b) 単一圧力方式による消弧室の概念図

表 2.7　二重圧力方式と単一圧力方式遮断器の比較

項目	二重圧力方式	単一圧力方式（パッファ方式）
動作ガス圧	高圧タンク（約 1.5 MPa） 低圧タンク（約 0.2～0.3 MPa）	単一圧力（約 0.3 ～ 0.4 MPa）
ガス供給方法	遮断時に弁を開放、高圧ガスを消弧室へ吹付け	可動接触子の動作でピストンがガスを圧縮し吹付け
操作機構	圧縮機、高圧タンク・弁機構が必要、操作装置は大出力	大出力の操作装置が必要
構造	構造が複雑、大型化	構造が簡素、小型化、高信頼性

SF_6 ガス遮断器は、優れた消弧性能により高い信頼性と機器の小型化を可能にし、現在では世界中の電力系統で広く使用されている。

2.4.2　SF_6 ガスの発見

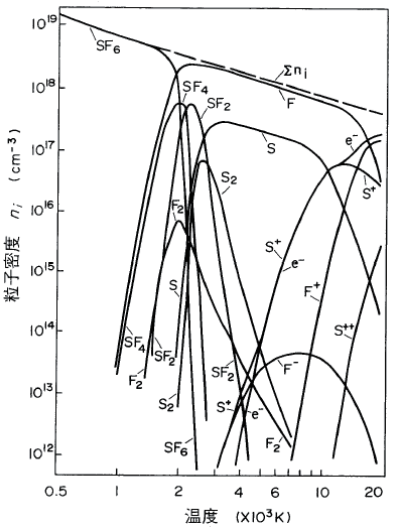
ガス遮断器の消弧・絶縁媒体として使われている六フッ化硫黄ガス（SF_6）は、天然には存在せず、1901 年にフランスの化学者アンリ・モアッサン（Henri

Moissan）とポール・ルボー（Paul Lebeau）が、フッ素中で硫黄を燃焼させて初めて合成した[57),58)]。フロン類は炭素とハロゲンの組み合わせで多様な用途があるが、硫黄とフッ素の組み合わせでは SF_6 のみが安定で、絶縁性に優れ、今日ではガス遮断器に広く適用されている。他のハロゲンとの化合物（SCl_6, SBr_6 など）や、硫黄を他の元素に置き換えた類似構造は存在しても安定せず、SF_6 は唯一無二の「奇跡の化合物」として、電力供給の信頼性向上と機器の小型化に貢献している。

1930 年代、米国 GE 社はハロゲン化合物の電気特性を調査、1937 年に Charlton と Cooper が SF_6 の絶縁性能を研究、翌年に絶縁用途の特許（US Patent No.2155554）を出願した。

1950 年代、米国 WH 社の T.E. Brown Jr. が SF_6 中のアーク消滅現象を研究し、1953 年に SF_6 を遮断器の消弧媒体として用いる基本特許（US Patent No.2757261、1956 年登録）を出願した。

図 2.58 は、高温状態における、SF_6 ガスの分解生成物を解析した結果例を示す。このように、SF_6 はアーク発生時に分解され、数千 K 以上の高温状態では低フッ化物やイオンを生成して導電性を示す。アーク遮断後に冷却され常温になると、安定な絶縁体である SF_6 に可逆的に戻る。この可逆特性により、SF_6 は長期にわたり安定したスイッチング（絶縁体⇔導電体の可逆変化）性能を維持している。なお、下記表は、この解析結果に基づいて、主要な分解生成物および主要な荷電粒子を示した。



温度 1000 K 以下（絶縁体）	SF_6
温度 2000～4000 K（ほぼ絶縁体）	SF_6, SF_5, SF_4, SF_3, SF_2, S, S_2F_2 F_2, ...
温度 4000 K 以上（導体）	SF, F, S, S^+, F^+, S^{++}, F^{++}, S^{n+}, F^{m+}, e^- ...

図 2.58　六フッ化硫黄ガス（SF_6）の温度に対する主要生成物と荷電粒子（三菱電機技術資料を参考に作成）

絶縁性能に優れた気体は、米国、ドイツ、日本などで詳細に調査された[59)]。絶縁耐力が SF_6 を上回る気体も複数存在する。例えば、フロン 12（CCl_2F_2）は SF_6 に匹敵する絶縁耐力を有するが、液化温度が－30 ℃と低い。また、四塩化炭素（CCl_4）は同じ気圧条件で SF_6 の 2 倍以上の絶縁耐力を有するが、液化温度が 76 ℃と高く、実用性に制約がある。一方、SF_6 の特筆すべき性能は、遮断器におけるアーク放電に対する優れた消弧特性である。

米国電力研究所（EPRI：Electric Power Research Institute）は、1970 年頃にあらゆる気体および混合ガスの遮断性能を調査した。二重圧力方式遮断器を用い、同一設計・同一遮断条件で熱的遮断性能（アークの熱エネルギーを効率的に除去し、電離度を低下させる性能）および絶縁的遮断性能（アーク消弧後、接点間に十分な絶縁耐力を回復させる性能）を比較した結果、SF_6 と比較して CO_2 の遮断能力は約 10 %、空気の遮断能力はわずか 1～2 %であると報告している。この研究に基づき、EPRI は「SF_6 と同等の消弧能力を持つガスは存在しない」と結論づけた[60)]。

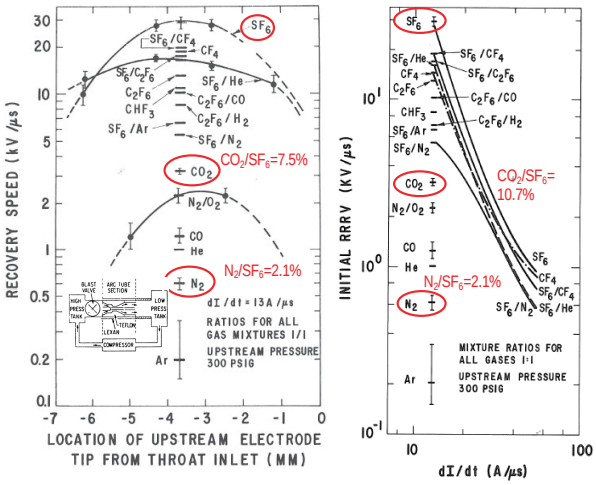


図 2.59　二重圧力式ガス遮断器で評価された各種気体の遮断限界比較、文献[60)]を参照して作成

2.4.3　SF_6 ガス遮断器の黎明期における各国メーカーの参入

SF_6 ガスのもつ消弧媒体としてのすぐれた性能に着目して、日本では三菱電機、欧州はドイツ・シーメンス（Siemens）、イタリア・マグリニ（Magrini）など数社が米国 WH 社との技術提携を結び、ガス遮断器の特許使用権を獲得して、開発製品化に着手した。

例えば、ドイツ Siemens は、1964 年に 220 kV-15000 MVA のガス遮断器を製品化、1968 年に 765 kV-50000 MVA 級までのシリーズ化を達成した。

イタリア Magrini 社は、1969 年に単一圧力方式によ

る 72.5 kV-5000 MVA から 525 kV-45500 MVA 級のガス遮断器を製品化した。フランス Delle-Alsthom 社および Merlin Gerin 社は、1966 年に 245 kV-12000 MVA の碍子形ガス遮断器を開発、スイス BBC 社も同年、245 kV-20000 MVA の碍子形ガス遮断器を開発した。

2.4.4　日本における SF_6 ガス遮断器の開発

三菱電機は、WH 社との長期的な技術提携（1929 年に全製品を対象にした包括的な技術協力契約を締結、戦後 1951 年に契約が復活）を通じて、1955 年頃から中央研究所が主体となり、SF_6 を用いた消弧性能に着目した基礎研究に着手した。また、国内における実用化の第一歩として、1962 年、米国 WH 社製 240 kV-15000 MVA 二重圧力式タンク形ガス遮断器と同一設計の遮断器を試作し、WH 社が保有するガス遮断器の実用経験を学ぶために、超高圧電力試験所（現・電力中央研究所）武山試験所において、広範囲な遮断性能検証試験を実施した。その結果、優れた遮断性能を有することを確認した[61]。

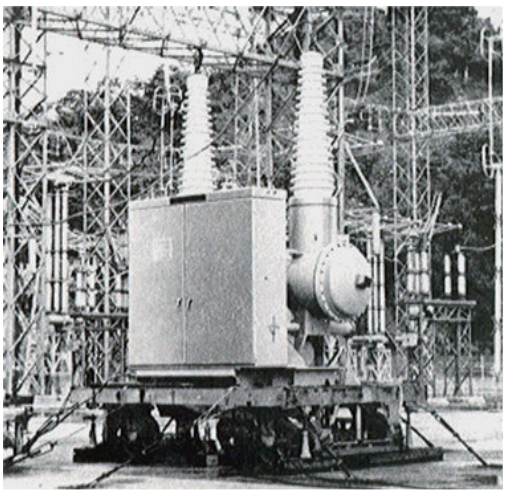


図 2.60　超高圧電力試験所で試験中の三菱電機製 240 kV-15000 MVA ガス遮断器（1963）[61]

ガス遮断器の開発においては、多数回の遮断履歴によるガス特性の劣化や、ガス漏れによる不具合が懸念されたため、シール材料やシール方式の改良にも注力した。また、絶縁スペーサ、絶縁ロッド、PTFE（Polytetrafluoroethylene、ポリテトラフルオロエチレン）ノズルなどの材料についても、海外製品の検証試験を重ねたうえで、国内材料メーカーと協力し、国産化の目途を立てた。

開発初期における特記事項として、1965 年頃、米国で 550 kV ガス遮断器の絶縁事故が多発したが、当初は発生原因がよくわからなかった。三菱電機中央研究所の再現試験により、SF_6 ガス中の水分が一定以上になると絶縁破壊を起こすこと、さらにゴムシール部を持つ密閉容器に水分が侵入することが明らかになった[62]。この知見をもとに WH 社との共同研究が進められ、水分対策としてタンク内に吸着剤（ゼオライト）を適用することが決定した。

超高圧電力試験所で 240 kV ガス遮断器を試験した結果、SF_6 の優れた性能は確認されたが、WH 社からの技術移管製品では、電圧階級ごとの統一設計が困難であり、550 kV 級の超超高圧への応用も難しいと判断された。そこで、独自設計によるユニット形ガス遮断器を自主開発することを決断した。開発構想として、以下の仕様を設定した。

- 遮断ユニット：定格電圧 84/72 kV、遮断容量 5000 MVA（遮断電流 40 kA）、定格電流 4000 A
- 方式：15 気圧常時高圧充気の二圧式消弧室、油圧操作装置を採用
- シリーズ化：168 kV を二点切、300 kV を四点切で実現

三菱電機は、1965 年、将来の 550 kV 遮断器開発に備え、大容量短絡発電機を備えた武山試験所と同一試験設備を建設した。同年、国内電力会社や国鉄関係者を招待して、84 kV-5000 MVA 二重圧力式ガス遮断器の試験を実施した。この初号機は関西電力・新神戸変電所に設置され、実系統における試験運用が行われた。コンデンサバンク開閉に使用され、1980 年まで運用された結果、累計動作回数は 1 万回に達し、多数回開閉性能を実証した[63]。

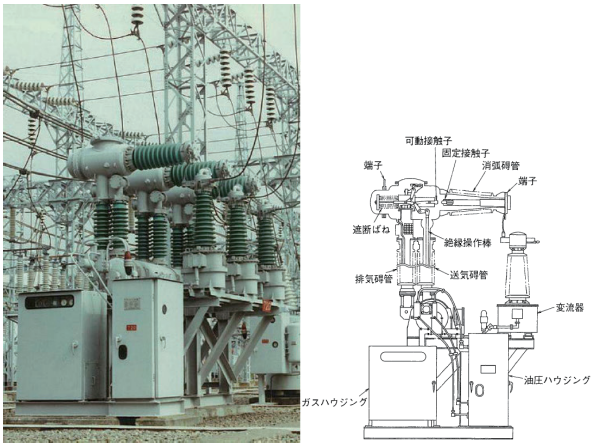


図 2.61　関西電力新神戸変電所納三菱電機製 84 kV-5000 MVA 二重圧力方式ガス遮断器（1965）（掲載許諾）

翌 1966 年、関西電力湖南変電所へ 300 kV-15000 MVA 碍子形ガス遮断器を導入した。この遮断器は、二点切碍子形ガス遮断器を 2 台直列に配置、全体として四点切構成としたものである。

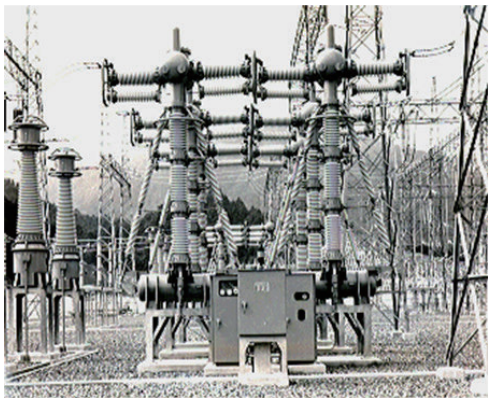


図 2.62　関西電力湖南変電所納三菱電機製 300 kV-15000 MVA 二重圧力方式碍子形ガス遮断器（1966）（掲載許諾）

1965 年の実系統試験を契機に、国内各社は SF_6 ガスの優れた性能に注目し、高電圧・大容量化開発を加速した。1969 年、三菱電機が保有していた SF_6 ガス関連の特許が失効したことを契機に、各社が一斉に SF_6 ガス遮断器の開発に着手した。各メーカーは電力会社と連携しながら、遮断性能や信頼性の向上を図り、SF_6 遮断器の市場参入を進めた。開発初期には、既存の空気遮断器の技術を応用しつつ、操作装置の高出力化が進展した。その結果、従来の圧縮機を必要とする二重圧力方式に代わり、単一圧力方式（パッファ形）が主流となった。

単一圧力方式は、構造が簡単・小型・軽量・低圧・保守容易という利点があり、最初はシングルフロー方式、次にダブルフロー方式が導入され、遮断電流・ユニット電圧が大幅に向上した。また、1960 年代後半までは碍子形が主流であったが、塩害・耐震対策の必要性から、1970 年以降はタンク形遮断器が主流となり、周辺装置を複合化して、ガス絶縁開閉装置（GIS）へと発展していった。SF_6 ガス遮断器のユニット大容量化技術については、電気学会技術報告第 497 号[64] に詳しく報告されている。

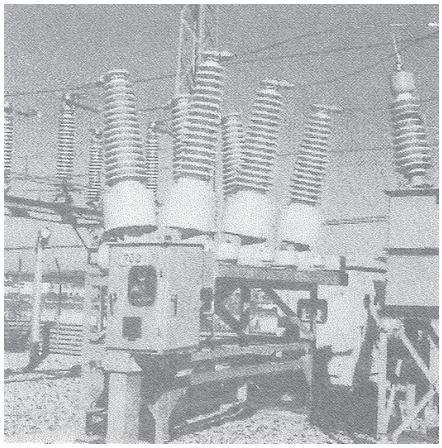


図 2.63　東京電力多摩変電所納東芝製 66 kV-20 kA 単一圧力方式ガス遮断器（1978）（掲載許諾）

1970 年、東京電力北多摩変電所、中部電力西濃変電所などにおいて、300 kV ガス遮断器が導入され、1973 年、550 kV GIS タイプのガス遮断器が関西電力猪名川変電所において世界で初めて運転が開始され、世界をリードする発展をもたらすことになった。

高圧ガス遮断器は、実系統への導入からわずか数年で 550 kV クラスまで製品化され、その開発スピードは驚異的であった。1970 年代初期には四点切が必要であった 550 kV 遮断器は、1980 年代には二点切、1990 年代半ばには一点切での遮断が可能となり、技術は大きく進化した。また、消弧性能の向上および操作装置の大出力化に伴い、ガス圧縮機により消弧室内のガスを十数気圧に維持する二重圧力方式から、開極動作時にパッファ室内の SF_6 ガスをピストンで圧縮し、アークに吹き付ける単一圧力方式へと移行した。

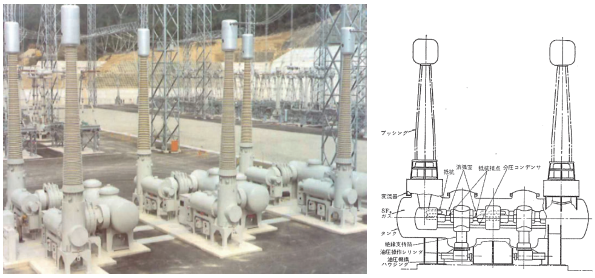


図 2.64　関西電力猪名川変電所納三菱電機製 550 kV 二重圧力式四点切タンク形ガス遮断器（1973）（掲載許諾）



図 2.65　東京電力新榛名変電所納日立製作所製 550 kV 四点切タンク形ガス遮断器（1981）（掲載許諾）

東芝は、1984 年、145 kV-40 kA の三相一括形 GIS 開発を機に、駆動エネルギーの低減を目的とした新消弧方式の開発を開始した。従来のダブルフロー方式に代わり、シングルフローとダブルフローの利点を融合した「ハイブリッドパッファ方式」[65] と呼ばれる方式を開発、開極動作の初期において、シングルフローで圧力を高め、後半はダブルフローで排気を促進して、消弧性能向上（結果的にパッファ室容積：1/2）と操作装置（操作エネルギー：1/4）の操作力低減を両立させた。初号機はオランダ試験機関 KEMA で IEC 規格に準拠した形式試験を実施、以降、72～1100 kV（UHV）

まで展開され、東芝製全遮断器に採用される代表技術となった。東芝は、操作エネルギーのさらなる低減を目指し、アークエネルギーを利用する自力消弧方式の研究を開始。これに従来の他力消弧方式を組み合わせた「直列パッファ方式」[66]を開発した。この方式は、機械式パッファ室と自力消弧室を直列に配置し、機械式ピストン効果とアークエネルギーの両方で圧力を高める構造である。2008 年、300 kV-63 kA GIS 用遮断器として東京電力・北多摩変電所に納入。さらに、420 kV GIS や 245/550 kV 碍子形遮断器にも展開した。

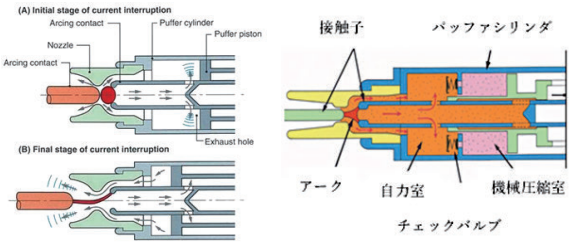


図 2.66　ハイブリッドパッファ方式と直列パッファ方式による消弧室（東芝提供）

日立製作所は、1960 年代後半、独自技術で中容量の単一圧力方式ガス遮断器から開発を開始。1970 年代、240/300 kV-40 kA クラスの 2 サイクル単一圧力（パッファ）方式遮断器を開発、九州電力などに納入した。遮断性能向上を目指して、軸方向同期吹付方式（シンクロパッファ方式）を開発[67),68)]、高速制御バルブと同期吹付け技術により、遮断時間の短縮と性能向上を実現した。1980 年代に 550 kV-50 kA クラスの遮断器を開発。さらに 1100 kV ガス遮断器も開発し、抵抗投入・抵抗遮断方式などの新技術も導入した。また、国際試験場（図 2.67 はオランダ試験所 KEMA における 550 kV ガス遮断器の形式試験状況）[69)]における形式試験を通じて、世界市場への展開も進めた。



図 2.67　KEMA で形式試験中の日立製作所製 550 kV 一点切タンク形ガス遮断器（1996）（掲載許諾）



図 2.68　中国電力（現・中国電力ネットワーク）新山口変電所納三菱電機製 550 kV 一点切タンク形ガス遮断器（1995）（掲載許諾）



図 2.69　東京電力新筑波変電所納東芝製 550 kV 一点切タンク形ガス遮断器（1994）（掲載許諾）

2.4.5　操作装置の変遷

遮断器は、常時閉路状態で静止して、電気を供給している。いわゆる待機状態にあるが、地絡や短絡などの系統故障が発生した場合に、故障を速やかに除去するために、系統の保護・制御指令に応じて、高速度で遮断（開極）動作を行うことが要求される。また、故障除去後には系統の擾乱を最小限に抑制するため、速やかな投入（閉極）動作を行う必要がある。このように遮断器に適用される操作装置は、前触れなく不規則に、極めて特殊な動作を要求され、開極操作に必要とされる操作力も極めて大きい。

遮断器の操作装置は、大きな操作エネルギー、多頻度の開閉動作に対する機械的耐久性、長期休止後の希頻度動作でも確実な動作が求められる。遮断器の開発初期段階では、主に「空気操作装置」が適用された。空気操作装置は、比較的簡単な構造で、大出力化が可能であることに加え、シール技術が未熟であっても操作媒体の漏洩が環境に影響を与えない特徴があった。ただし、都市部への設置では大きな操作音が問題となった。

三菱電機は、1961 年、高電圧ガス遮断器の開発を進める中で、大きな操作力を必要とするこの装置には油圧操作方式が適していると判断し、フランス電力局

表 2.8　各操作装置の比較

種別	空気操作装置	油圧操作装置	ばね操作装置
特徴	大出力 圧縮機・高圧ﾀﾝｸ要	大出力 安定的な動作	当初、高出力化に課題 550 kV遮断器まで適用済
保守性	圧縮機の定期的な点検、 空気シール部品の交換要	油圧ﾎﾟﾝﾌﾟの定期点検要	省保守作業
信頼性	構造簡素のため高信頼性、 空気漏れの可能性有	構造やや複雑、 油漏れの発生事例多い	動作の温度依存性小、 安定した動作特性、高信頼性
費用	小	大	中
その他	水分への設計配慮要、 操作音が過大	温度に対する動作特性、 油中気泡による動作不安定有	比較的大きな補機電源要

への納入実績があったフランスの ETNA 社と油圧操作装置の共同開発を開始した。航空機用途（コンコルド機の油圧 280 気圧）を上回る 320 気圧という高圧油圧を採用することで、小型化と高速動作の両立を実現した。また、油漏れ対策として油配管を極力排除し、油圧部品をブロック化・直結方式で構成することで、油漏れの問題を解消した。当初、ETNA 社の技術者は「油にじみは許容範囲」と考えていたが、三菱電機はより厳格な品質基準を求め、両社の間で基準のすり合わせを行いながら開発を進めた結果、共同開発を成功裏に完了し、最終的には装置の国産化を達成した。

1980 年頃より、遮断器の大容量化が進み、より高速で大出力の安定的な動作が要求されると、空気操作装置に比べて操作時の騒音が低く、かつ大きな操作力を安定して得られる油圧操作装置が主流となった。一方、ばね操作装置は、保守作業が少なく、また信頼性が高いという特徴を有したが、当初、操作力が限られていたため、定格電圧の低いクラスから、次第に適用が拡大していった。三菱電機は、1988 年、トーションばねを適用したばね操作装置を開発、ばね操作の大出力化を進めて、1998 年に、300 kV-50 kA 一点切ガス遮断器、2011 年に、550 kV-63 kA 二点切ばね操作ガス遮断器をそれぞれ開発し、中国電力東山口変電所納入した。表 2.8 にて各操作装置の特徴を比較する。

(a) 空気操作装置

開極および閉極動作の駆動力として、1.5 MPa 程度の圧縮空気を用いる。空気圧シリンダのサイズを変えることで、出力を広範囲に変えられるため、全定格電圧の遮断器に適用されている。開極のみを空気圧で行い、開極動作時に蓄勢されたばね力により閉極動作を行う方式も多い。図 2.70 に空気操作装置（開極動作：空気圧駆動、閉極動作：ばね駆動）の一例を示す。空気操作装置は、圧縮機の保守・点検に手間がかかること、操作時における圧縮空気の解放音が非常に大きいなどの理由から、日本では油圧操作装置およびばね操作装置が好まれ、次第に使われなくなっている。装置の構造は簡単で信頼性が高いため、欧米における適用事例は少なくない。図 2.71 は、1987 年に米国ジョージア電力へ納入された空気操作装置を適用した米国三菱電機製 550 kV-63 kA 一点切ガス遮断器で、同機は北米市場で約 700 台導入されている。

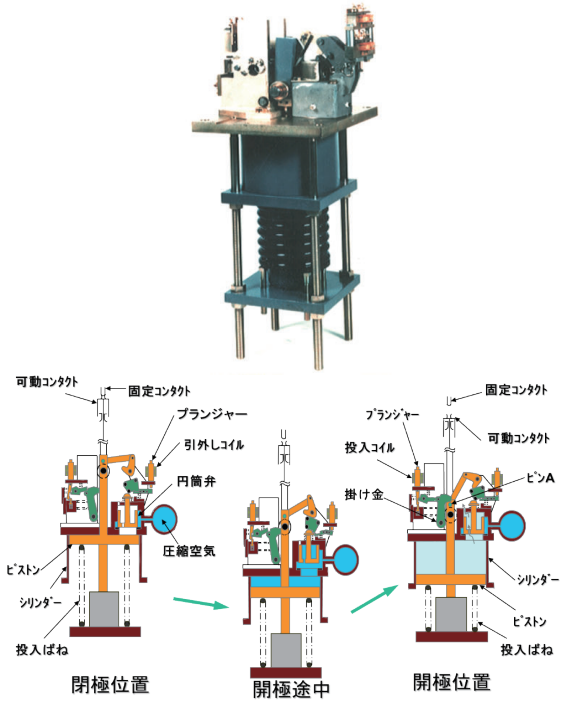


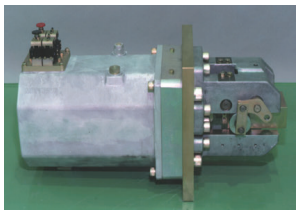
図 2.70　空気操作装置の構造例と動作原理



図 2.71　北米電力納入米国三菱製 550 kV 空気操作ガス遮断器（1987）

(b) 油圧操作装置

アキュムレータに蓄積された高圧油を駆動力の伝達媒体として用いる方式で、開極・閉極の両動作を油圧によって駆動する。アキュムレータ内のエネルギー蓄積媒体としては、通常、窒素ガスを使用する。油圧方式では、空気操作圧よりも高い 32.5 MPa の油圧を使用するため、操作装置の小型化が可能となるという利点がある。また、油はほぼ非圧縮性であるため、駆動力の伝達媒体として動作応答性に優れており、高電圧・大容量の遮断器に広く適用されている。初期の油圧操作装置は、シリンダ、ピストン、切換弁、逆止弁などの各部品を配管で接続する「配管方式」で構成されていたが、この方式では配管接続部からの漏油が課題となっていた。そこで 1970 年代には、配管接続部を排除し、各部品を直接接続する「ブロック方式」が開発され、漏油問題の解消と信頼性向上が図られた（図 2.72 参照）。



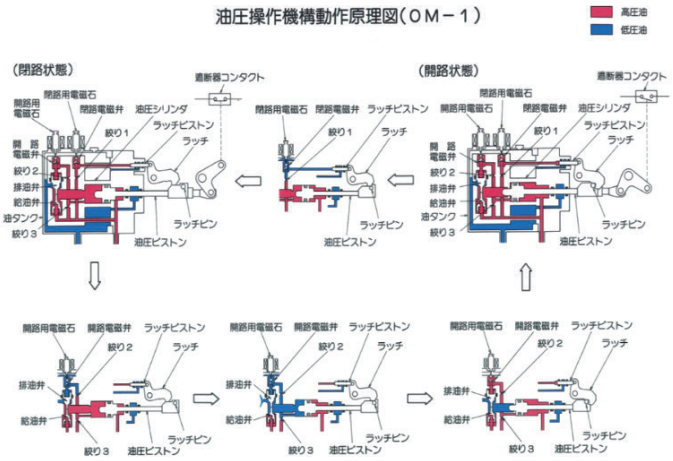
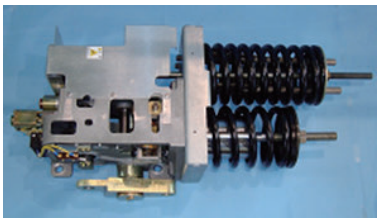


図 2.72　ブロック方式の油圧操作装置の構造例

(c) ばね操作装置

遮断器の開極・閉極動作の駆動力として、ばねに蓄えたエネルギーを利用する方式である。一般的に、投入ばねと、それを電動機で蓄勢し、蓄勢状態を保持するラッチ機構を備えている。開極指令が出されると、投入ばねのエネルギーが放出され、遮断器が閉極すると同時に遮断ばねが蓄勢され、この遮断ばねに蓄えられたエネルギーによって遮断動作が行われる（図 2.73 参照）。

ばねをエネルギー蓄勢手段として用いる方式では、操作力を大きくすることが難しいという課題があったが、従来のコイルばねに代わり、エネルギー効率の高いトーションバー（ねじり棒）を採用したばね操作装置が実用化され、定格 550 kV クラスまでの遮断器に対して、ばね操作方式の適用が可能となった。



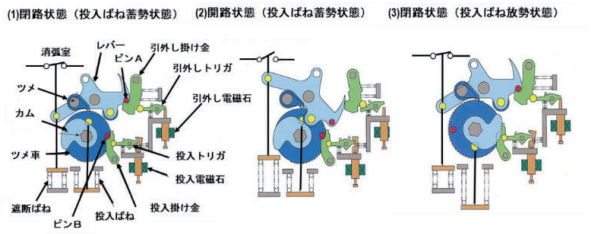


図 2.73　コイルばね操作装置の構造例

トーションバーは、主に自動車や軍用車両のサスペンションシステムに広く使用されている。トーションバーは、コイルスプリングに比べてスペース効率が高く、車両の内部空間を有効に活用できるため、他の重要な機器や装備を搭載する余地が増える。トーションバーは、耐久性が高く、経年劣化による性能低下が少なく、長期間にわたって安定した性能を維持できる（図 2.74 参照）。

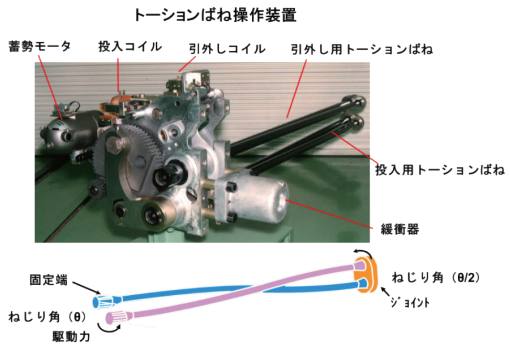


図 2.74　トーションバー方式ばね操作装置 [70)]

図 2.75 に示す円グラフは、CIGRE 国際信頼性調査に参加した各国の電力会社における遮断器の操作装置の適用割合の推移を示す。1988～1991 年に運用されていた高圧遮断器を対象とした第 2 回調査では、油圧操作装置が 51.4 % を占め、ばね操作装置の割合は 18.5 % であった。2004～2007 年の第 3 回調査では、ばね操作装置の割合が 51.7 % に増加した。さらに、2014～2017 年の第 4 回調査では、ばね操作装置の割合は 51.7 % に達した。なお、第 4 回調査において日本のデータを除外すると、ばね操作装置の割合は 71.4 % に達しており、世界的には、ばね操作装置が広く採用されている状況がわかる。

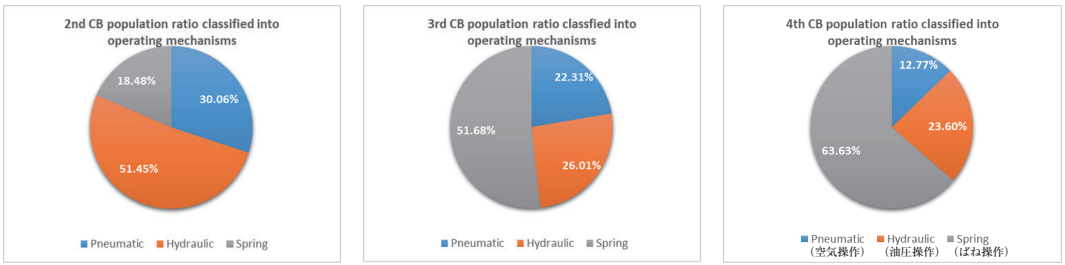


図 2.75　CIGRE 国際信頼性調査における遮断器に適用された操作装置の割合推移 [71)]

2.4.6　遮断器規格の変遷

遮断器に関する規格には、国際規格である IEC 62271-100、北米規格である IEEE 規格 C37、国内規格である JEC-2300、日本電機工業会の JEM 規格などが存在する。これらの規格はいずれも遮断器の構造そのものを規定するものではなく、電力系統において必要とされる電気的および機械的性能を検証するための試験要件を定めている。ただし、これらの試験条件は当初から網羅的に規定されていたわけではなく、実系統における故障の経験、解析ツールの進歩による系統現象の解明、遮断器の性能向上を踏まえて、必要な試験項目が段階的に追加･改訂されてきた。

国内の交流遮断器に関する JEC 規格は、JEC-17（1924 年）の発行を起点として、国内電力系統における遮断・開閉責務の調査（大電流遮断性能：短絡試験、近距離線路故障遮断試験、小電流遮断性能：進み小電流開閉試験、遅れ小電流開閉試験）や、遮断器の構造的特徴を考慮しながら、新たな試験項目の追加や内容の見直しが継続的に行われてきた。さらに、1995 年の TBT 協定（WTO 加盟国が製品仕様を定める際に国際標準への準拠を義務化）を受けて、1990 年代以降、国内規格と国際規格（IEC）との整合化が進んだ。約 10 年ごとの改正を経て、現在では JEC-2300（2020 年版）が最新の規格として運用されている。表 2.9、国内の交流遮断器規格の変遷と、主な改正内容を示す。

表 2.9　JEC 交流遮断器規格の規定内容・改正の変遷

規格名（発行年）	規定および改正内容
JEC-17（1924）	定格遮断容量：定格電圧に対して 2 分間に 2 回遮断可能な電流を規定、油遮断器を想定
JEC-57（1940）	日本電気工業会標準規定として発刊 定格電圧標準：3.45～230 kV（油遮断器および空気遮断器を想定） 定格遮断容量：（定格電圧）×（定格遮断電流）×$\sqrt{3}$ 標準動作責務：甲乙丙号の 3 種類を規定（高速動作責務は無） 形式試験項目：開閉試験、温度試験、短時間耐電流試験、絶縁耐力試験、短絡試験他 固有再起電圧：定格電圧毎に基本固有周波数と減衰時定数を規定
JEC-145（1959）	電気学会電気規格調査会標準規格として発刊、空気遮断器、磁気遮断器を考慮 定格遮断時間：3、5、8 サイクルを標準とした。 標準動作責務：一般用（甲号、乙号）、高速度再投入用の 3 種類を規定（高速度再投入用　O-（0.35 秒）-CO-（1 分）-CO） 絶縁耐力試験：商用周波耐電圧試験と衝撃耐電圧試験へ区分。 短絡試験：試験動作責務 1 号から 5 号の 5 種類に細分化（定格遮断電流の 10 %、30 %、60 % 及び 100 % での電流遮断） 定格再起電圧：波形の振幅率と周波数（それぞれ規約振幅率、規約周波数）を規定。
JEC-181（1971）	真空遮断器、ガス遮断器を考慮、IEC 国際規格にとの整合 定格電圧標準：550 kV を追加。 定格遮断電流：定格遮断容量に替え。定格遮断電流の標準値を規定。 定格再起電圧：単一周波数波形を二パラメータ法、複周波数波形を四パラメータ法で表記 定格遮断時間：2 サイクルを追加。 形式試験：進み･遅れ小電流試験を追加。参考試験：コロナ試験、近距離線路故障遮断試験、異相地絡遮断試験、脱調遮断試験、合成試験法を追加。
JEC-181（1975）	衝撃耐電圧試験を雷インパルスと開閉インパルス試験へ区分。 10000 回連続開閉試験を参考試験項目に追加。
JEC-2300（1985）	定格過渡回復電圧：再起電圧を過渡回復電圧と改正。 初期上昇率：定格 120 kV 以上、1 kV/μs から 2 kV/μs へ変更。初期過渡回復電圧を導入。 遅れ小電流遮断試験：参考試験として追加。 近距離線路故障遮断試験、脱調遮断試験：内容を見直し形式試験に追加。
JEC-2300（1998）	IEC 国際規格との整合をより一層を図るために改正。 短絡電流の直流分減衰時定数：標準値 45 ms に加えて、準標準値 90 ms を規定。 短絡試験後の状態確認：IEC 規格に合わせて絶縁試験を規定。 進み小電流試験：架空送電線路充電電流の見直し、地中線路充電電流の標準値とコンデンサバンク容量の参考値を記載。
JEC-2300（2010）	短絡試験：IEC 規格に合致させ、T10, T30, T60, T100 s, T100 a へ変更。 高速再閉路用動作責務：再閉極時間 0.35 s を IEC 規格に準じて無電圧時間 0.3 s へ変更。 短絡電流の直流分減衰時定数：標準値 45 ms を超える場合、90 ms を 120 ms へ変更。 試験値の許容範囲：形式試験全般にわたって明記した。 進み小電流試験：再点弧確率が低いクラス JC1 と確率が極めて低いクラス JC2 に区分。 定格電圧 1100 kV の遮断器に関する定格事項：IEC 規格に先立ち、参考に記載。
JEC-2300（2020）	遮断器内のガス：SF_6 ガスのみの表現から、絶縁媒体は代替ガス、ドライエア等を追加。 進み電流開閉試験：IEC 規格に準じてクラス分け表示を変更。 主接点を目視確認できない遮断器の電流開閉後の状態確認法：VCB を考慮し規定。

2.4.7　SF_6 ガス遮断器のまとめ

SF_6 ガス遮断器は、1950 年代後半、米国の WH 社によって実用化され、日本では 1965 年に、これまでの油遮断器や空気遮断器の技術的経験を活かした自主開発による 84 kV ガス遮断器が実系統に導入された。その後、わずか数年で 550 kV まで製品化され、世界をリードする技術的発展を遂げた。以降も、接点数の削減や、故障の主因であった操作装置の改良が継続的に行われ、電力会社との連携による取り組みにより、遮断接点数を減らすことで小型化が進められ、非常に高い信頼性が確立されてきた。一方で、SF_6 ガスは地球温暖化係数が高いため、近年では代替技術の開発が活発に進められている。

遮断器市場では、国家電網傘下の中国メーカーの台頭に加え、各国における再生可能エネルギーの普及に伴う送電系統の変化や老朽設備の更新といった要因が重なり、技術的な転換期を迎えている。特に、温室効果ガスである SF_6 ガスを使用した遮断器に代わる技術の評価が各国で継続されており、環境負荷の低減と性能の両立を目指した開発競争が進んでいる。今後の市場動向や技術革新の行方が注目される。

コラム３　欧米における遮断器事業の再編と集約

20 世紀中盤まで、油遮断器、空気遮断器、そして初期の SF_6 ガス遮断器の開発において遮断器技術の発展を牽引していた米国の WH 社および GE 社は、1980 年代に遮断器事業を売却し、送配電機器分野から撤退した。これに伴い、米国における遮断器の製造技術は、米国内の事業を買収した欧州メーカーへと移行した。

欧州では、かつて十数社が高圧遮断器を製造していたが、1990 年代以降、業界再編が進み、企業統合が加速した。その結果、スイスの ABB 社、フランスの Alstom 社、ドイツの Siemens 社が主要メーカーとして残った。

その後、さらなるグローバル再編が進み、ABB の送配電部門は 2020 年に日立製作所との合弁を経て日立エナジーとして再編された。一方、Alstom の送配電部門は GE によって買収され、現在は GE Grid Solutions として事業に復帰している。

米国の WH 社と長年にわたり技術提携を結んでいた三菱電機は、1985 年に遮断器およびガス絶縁開閉装置（GIS）事業の合弁会社を米国ペンシルベニア州ピッツバーグ市に設立した。1989 年に、WH 社の送変電部門が ABB に買収されたことに伴い、WH 社との合弁を解消し、社名を三菱電機パワープロダクツ（MEPPI: Mitsubishi Electric Power Products）へ変更した。その後、1991 年より遮断器の現地生産を開始し、米国市場における供給体制を強化。現在では、最大 800 kV までの遮断器を製造しており、2023 年には高圧遮断器の累計出荷台数が 3 万台を超えている（図参照）。



MEPPI 製 362 kV–63 kA 三相一括ばね操作遮断器の据付状況（2002）

参考文献

1) 「わが国における電気技術国産化の歴史」、電気学会技術報告、第 603 号（1996）
2) Electricity Control, Leonard Andrews, Charles Griffin & CO., LTD.（1904）
3) 中西邦夫他、電気学会大学講座「電力用しゃ断器」、電気学会（1975）
4) 山内高雄、しゃ断現象と消弧のメカニズム、pp. 284-290、電気書院（1974）
5) H. Ito (editor), "CIGRE Greenbook on Switching equipment", Springer（2018）
6) R. Wilkins and E. A. Cretin, "High voltage Oil Circuit Breakers", Mac Graw Hill（1930）
7) 福田節雄、「遮断器発達の歴史的展開」、電気学会論文誌 77 巻、825 号、pp. 111-126（1957）
8) B. P. Baker, H. W. Wilcox, "Use of Oil in Arc Rupture" , Trans. AIEE, Vol. 49, pp. 431-441（1930）
9) D. C. Prince, W. F. Skeats, "Oil Blast Circuit Breakers" , Trans. AIEE, Vol.81, pp. 506-512（1931）
10) 潮恒郎、「しゃ断器・避雷器」、標準電気講座、精興社（1969）
11) CIGRE WG 13.01, "Applications of Black Box Modeling to Circuit Breakers", Electra, No.118, pp. 65-79（1988）, Electra No.149, pp. 41-71（1993）
12) A.M. Cassie, "Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory", CIGRE Paper, No.102（1939）
13) Mayr, "Beitrage zur Theorie des statishen und des dynamishen Lichtbogen", Arch. Elektrotech., 37, pp. 588-608（1943）
14) J. Slepian, "Extinction of an A-C. Arc", Trans AIEE, Vol.47, No.4, pp. 855-861（1928）
15) H. Kesselring, "Zur Theorie des Lichtbogens in Wechselstromschaltern", Archiv für Elektrotechnik（in Germany）, Vol.21 pp. 487-496（1929）
16) H. H. Price, J. R. Mayer, "A New Theory of Interruption of A.C. Arcs", Trans AIEE, Vol.55, pp. 870-877（1936）
17) 吉岡芳夫他、遮断器の歴史と日本独自技術開発への期待、電気学会論文誌 A、124 巻、8 号、pp. 688-694（2004）
18) 日本発送電社史、技術編（1954-1955）
19) 富永正太郎、電気学会技術史ニュースレター 第 34 号（2004）
20) https://www.city.kawasaki.jp/kawasaki/page/0000029253.html（Browsing : 2025-10/31）
21) 森田誠一、「新型制弧遮断器」、日立評論 1952 年 9 月号、pp. 39-44、1955 年 3 月号、pp. 43-48
22) J. Slepian, "Theory of the Deion Circuit Breaker" , Trans AIEE, vol.48, pp. 523-530（1929）
23) Westinghouse catalogue, "Outdoor Oil Breakers Type GM Floor Mounted",（1966）
24) Russ Yeckley, John Perulfi, "Oil Circuit Breakers: A Look at the Earlier Generation" , IEEE Power & Energy Magazine, Vol.16, No.3, pp. 72-81, May-June（2018）
25) 節油型タンク形高圧遮断器、三菱電機技報 Vol.31, No.2, pp.139-148（1957）
26) 三菱開閉機器データブック（1990）
27) Josef Biermanns, "AUS DER GESCHICHTE DER HOCHSPANNUNGSTECHNIK", Festschrift zur Eröffnung des Instituts in Kassel（1953）、「高電圧技術の歴史から」、カッセル研究所開設記念論文集 1953 年
28) 中西邦夫他、電気学会「電力用しゃ断器」、電気学会大学講座（1975）
29) CIGRE WG A3.22, "TECHNICAL REQUIREMENTS FOR SUBSTATION EQUIPMENT EXCEEDING 800 kV", CIGRE technical Brochure 362（2008）
30) V.V. Ilyinichnin, V.S. Rashkes, et.al., "Service Experience and Field Tests Summarizing: The protection and Control Devices Improvement in EHV-UHV Transmission" CIGRE Session report 34-102（1992）
31) J. H. C. Peters, "History of Air-Blast Circuit Breaker Experience, Problems Encountered and Solutions", High-Voltage Air-Blast Circuit-Breakers their Development and Testing, English Electric, Stafford England（1961）、英国ナショナルグリッド提供
32) 潮恒郎他、「Y 形空気シャ断器」、三菱電機技報、Vol.38, No.8, pp. 40-44（1964）
33) 日立評論 1960 年 7 月号、P. 70, 日立ニュース
34) 調査専門委員会編「真空遮断器開閉器の適用について」、電気学会技術報告Ⅱ部、No.197（1985）
35) A. Greenwood, "Vacuum Switchgear", IEE, ISBN 0 85296 855 8（1994）
36) Paul. G Slade, "The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application", CRC Press, first edition（2008）, second edition（2020）
37) 岡田武夫、「真空スイッチ管の実用性能」、三菱電機技報、Vol.43, No.10 pp. 1400-1405（1969）
38) 古賀博美、「真空開閉用真空バルブ」、三菱電機技報、Vol.88, No.11, pp. 23-26（2014）
39) 小薗秀明他、「真空遮断器および関連技術の最新動向」、IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.128-B, No.12, pp. 1423-1426（2008）
40) https://americanhistory.si.edu/collections/search, vacuum switch（Browsing : 2025-10/31）
41) R. W. Sorensen, and H. E. Mendenhall, "Vacuum switching equipment at California institute of technology" , Trans. AIEE, Vol.45, pp. 1102-1105（1926）
42) 宅間董、「SF_6 とはどんなものか」、電気学会誌 115 巻、8 号、pp. 488-491（1995）
43) L. Falkingham, M. Waldron, "Vacuum for HV applications, Thirty Years Service Experience of 132 kV vacuum Circuit breaker", 22nd Int. Symp. On Disch. and Electr. Insul. in Vacuum, Matsue, pp. 331-334（2006）
44) 丹羽芳充、金子英治、「大容量真空遮断器の開発、真空アークの制御」、J. Plasma Fusion Res. Vol181, No.1, pp. 31-38（2005）
45) CIGRE WG A3.27, "The impact of the application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages", CIGRE Technical Brochure 589（2014）
46) Reece, "The Vacuum Switch and its Application to Power Switching", J of IEE No.5, pp. 523-530（1959）
47) Reece, "The Vacuum Switch", Proc of IEE, No.110, pp. 775-782（1963）
48) Y. Sunada, et.al., "Research and development on 13.8 kV 100 kA Vacuum Circuit Breaker with huge capacity and frequent operation", CIGRE Session Report 13-04（1982）
49) 明電時報第 129 号、No.4（1976）
50) 明電時報第 156 号、No.1（1981）
51) 勝又清仁他「120–204 kV タンク形真空遮断器の製品化」、明電時報第 340 号、No.3, pp. 22-27（2013）
52) R. Itotani, et. al., "Sustainable improvement on substation resilience and reliability by using eco-friendly equipment and remote maintenance systems", CIGRE Paris Session Report 11092,（2024）
53) S. Kosse, et. al., "First CO2-neutral 145 kV and up to 63 kA Dead Tank Circuit Breakers based on Vacuum Switching and Clean Air Insulation Technology", CIGRE Paris 2020, A3-106（2020）
54) Ai Shaogui, Yu Xiao, Huang Yongning,et. al., "Study on voltage distribution characteristic of a 363 kV fast multi-break vacuum circuit breaker", IET Journal of Engineering, Vol.2019, pp. 1-6（2019）
55) Cromer and Friedrich, "A new 115 kV, 1000MVA gas filled circuit breaker", AIEE Transactions Part III, Vol.75, pp. 1352-1357（1956）

56）富永正太郎他、「SF_6 ガス遮断器」、電気学会雑誌、92 巻 5 号、pp. 367-371（1977）
57）Henri Moissan, Paul Lebeau, “Sur un nouveau fluorure de soufre”, Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l’ Académie des Sciences, Tome 132（1901）
58）H. Moissan and P. Lebeau, Comptes Rendus, Ann. Chim. Phys., Vol.26, p. 145（1902）
59）宅間薫、「SF_6 とはどんなものか」電気学会誌、115 巻 8 号、pp. 488-491（1995）
60）Fundamental Investigation of Arc Interruption in Gas Flow, US EPRI EL-284（Final Report）prepared by GE（1977）
61）富永正太郎他、「新形大容量 SF_6 ガス遮断器」、三菱電機技報、Vol.39, No.8, pp. 37-45（1965）
62）Tominaga, et.al., “Practical problems on SF_6 Gas Circuit Breakers”, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-90, No.5, pp. 2166-2174（1971）
63）SF_6 ガス遮断器特集、三菱電機技報、第 39 巻、第 8 号、pp. 2-62（1965）
64）ガス遮断器のユニット大容量化への要求とその基本技術、電気学会技術報告第 497 号（1994）
65）岩本勝治他、「ハイブリッドパッファ形ガス遮断器消弧室内の熱ガス流解析」、東芝レビュー Vol.62, No.1, pp. 54-57（2007）
66）新海健他、「直列パッファ消弧室の形状最適化手法と熱的遮断性能の向上」、電気学会論文誌 B、Vol.130, No.9, pp. 819-825（2010）
67「240/300 kV-40 kA, 2 サイクルパッファ形ガス遮断器」、日立評論 1973 年 10 月号、pp. 7-12（1973）
68）「超々高圧用 63 kA パッファ形ガス遮断器の技術開発」、日立評論 1978 年 7 月号、pp. 503-508（1978）
69）“90 years of high voltage and high power laboratories at KEMA”, KEMA（2017）
70）奥野満晴、「ガス遮断器の大出力操作機構におけるサージ解析と新ねじりばねの最適化の研究」、大阪大学、博士論文（1994）
71）CIGRE WG A3.48, “Fourth CIGRE International Reliability of Equipment serviced in 2014-2017, Part 1: General results”, CIGRE Technical Brochure 947（2024）

3 電気を守る

ガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）は、遮断器（CB：Circuit Breaker）をはじめ、断路器（DS：Disconnecting Switch）、接地開閉器（ES：Earthing Switch）、母線（Bus：Busbar）、計器用変成器（CVT：Current and Voltage Transformer）、避雷器（LA：Lightning Arrester）などの各種機器を、絶縁性能と消弧性能に優れた SF_6 ガスで満たされた密閉金属容器内に収納した設備である。第3章では、まず、GISに収納される避雷器、計器用変成器、断路器について紹介した後、ガス絶縁開閉装置の変遷について述べる。

3.1 避雷器の開発・変遷

3.1.1 避雷器の誕生

避雷器は、雷撃や開閉動作時に電力系統に発生する過電圧から機器を保護する装置である。避雷器は名称に反して、自ら雷エネルギーを受け止めて、周囲の設備を守る役割を果たす。

1752年、米国の政治家・物理学者・気象学者であるベンジャミン・フランクリンが嵐の中で凧を揚げ、雷雲が帯電していることを証明するとともに、避雷針を発明した（図3.1参照）。

避雷針の発明から約100年後の1880年頃、電信線に避雷装置が設置され、雷保護装置が初めて電力システムに導入された。この装置はギャップを有しており、「アレスタ（Arrester）」と命名された。1940年代には炭化ケイ素（SiC）を用いたギャップ付き避雷器が実用化され、1970年代には初のギャップレス金属酸化物サージアレスタが市場に登場した。

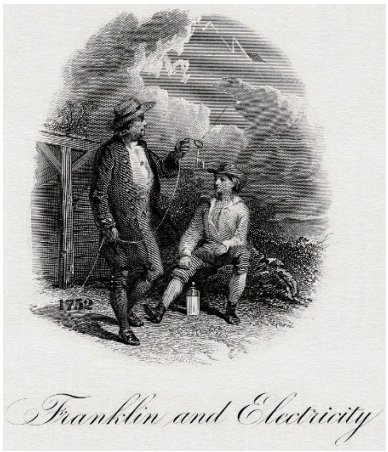
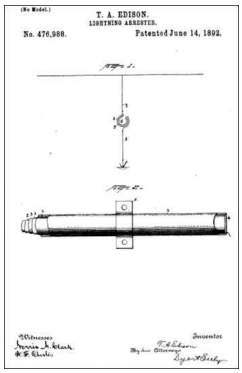


図3.1　1860～1890年発行の10ドル紙幣に描かれた凧の実験の銅版画[1]

初期の避雷器には「ギャップ（空隙）」が設けられており、これにより通常時にはバリスタ素子に電圧がかからず、素子の劣化を抑制する効果があった。過電圧時にはギャップが放電を開始し、避雷器が動作する。避雷器は、保護対象の機器よりも低い電圧で動作するように設計されており、過電圧が加わると避雷器が先に絶縁破壊を起こして電流を逃がし機器を守る。現在の避雷器は、過電圧が収まった後に絶縁状態へ回復する機能も備えており、繰り返し使用が可能である。

19世紀末、電力網の拡大に伴い、雷による過電圧から機器を保護する技術が求められるようになった。米国Thomas Edisonは、絶縁紙を巻いた構造の避雷器を考案し、1892年に米国で特許を取得した。この構造は、雷エネルギーを処理した後に機能を失う使い捨て型の避雷器であり、動作後に交換が必要であった。また、米国E.A. Sperryは、電磁石を用いた機械式避雷器を開発し、アークの持続を防ぐ構造を採用した[2]。さらに、米国WH社J. Slepianは1920年代に、カーバイド粒子を埋め込んだ多孔質粘土ブロックを用いた避雷器を開発し、自己回復性を備えた構造として注目された（図3.2参照）。



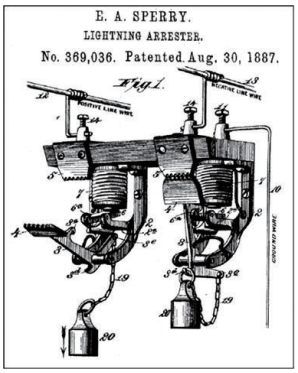


図3.2　（左）Edisonの避雷器特許（US Patent, No.476988, 1892）、（右）Sperryの避雷器特許（US Patent, No.369036, 1897）

避雷器の普及は、電力システムおよび電気機器の信頼性を向上させ、その急速な発展を促進した。アルミニウムセル型避雷器や酸化皮膜型避雷器（絶縁巻紙型）[3]は、バリスタ特性を示す、炭化ケイ素（SiC）を用いた多重ギャップ付き避雷器に取って代わった。

3.1.2 酸化亜鉛形避雷器の発明

松下電器（現：パナソニック）は、1964年頃、家電用トランジスタ保護を目的とした新しいバリスタ（6～12 V程度）の開発に着手した。当時は、酸化亜鉛（ZnO）

と電極との界面にバリスタ特性が生じると考えられていた。しかし、1967 年、壊れた実験炉で通常より高温で焼成された ZnO サンプルにおいて、電極のガラス成分が反応し、ZnO 自体が 200～300 V のバリスタ特性を示すことが発見された。翌 1968 年に、松下電器は、ZnO バリスタ素子を実用化、テレビなどの家電製品の保護に適用した[4),5),6)]。図 3.3 は、ZnO 素子の微細構造を観察したもので、ZnO 結晶粒界がバリスタ特性を担っている。

明電舎は 1970 年、松下電器によるバリスタ素子の実用化に関する新聞記事をきっかけに、松下電器と共同で、電力用 ZnO 素子の応用研究を開始した。1975 年に、世界初の酸化亜鉛形避雷器が九州電力の 66 kV 系統隼人変電所に導入された（図 3.4 参照）[7)]。

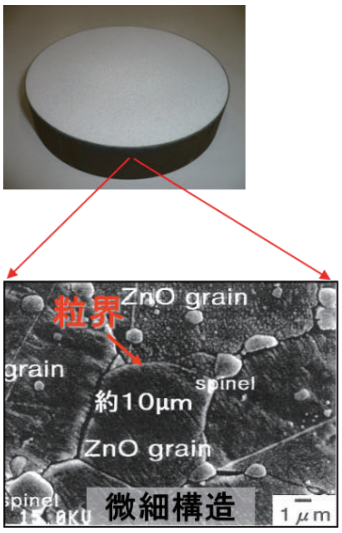


図 3.3　酸化亜鉛素子の微細構造（ZnO 結晶粒界がバリスタ特性を示す）

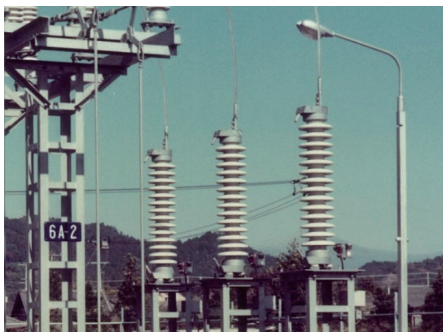


図 3.4　九州電力隼人変電所納明電舎製 66 kV 酸化亜鉛形避雷器（世界初）（1975）（掲載許諾）[7),8)]

金属酸化物避雷器（MOSA）は、保護レベル、電気的耐久性、耐汚損性能、そして簡素でコンパクトな構造といった多くの利点を備えている。GIS への適用としては、最初のタンク形 550 kV MOSA（図 3.5 参照）が 1978 年に設置され、翌 1979 年には最初の碍子形 550 kV MOSA（図 3.6 参照）が導入された。さらに、1985 年には 6.6 kV の柱上変圧器にも適用され、配電系統への導入が進んだ。



図 3.5　九州電力西九州変電所納三菱製 550 kV タンク形酸化亜鉛形避雷器（1978）（掲載許諾）

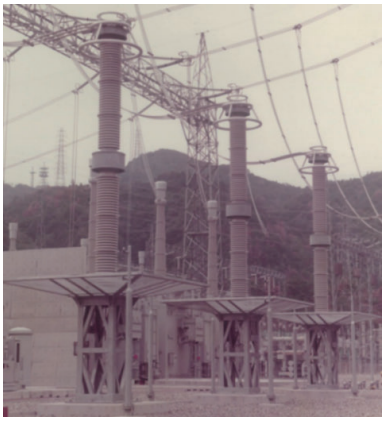


図 3.6　関西電力西播変電所納三菱製 550 kV 碍子形酸化亜鉛形避雷器（1979）（掲載許諾）

図 3.7 は 275 kV 碍子形および 550 kV タンク形酸化亜鉛形避雷器の構造例を示す。MOSA の長さが 1.5 m から 2 m 以上の場合、長手方向の電界分布を均一化する電界緩和リングが必要となる。この電界緩和リングを設置しない場合、頂部（高電圧側）は接地端に比べて、著しく高い電界強度を受ける。なお、遮断器と同様、海外では、気中絶縁形の碍子形避雷器が主流、一方、地震が多い日本では、SF_6 で絶縁されたタンク形避雷器の適用が多い。



図 3.7　275 kV 碍子形避雷器および 550 kV タンク形 GIS 用避雷器の構造例

図 3.8 は MOSA 素子の等価回路を示す。金属酸化物避雷器（MOSA）は、スパークギャップを使わずに電力系統に直接接続できる特徴がある。ただし、これは素子の電圧－電流特性が安定しており、使用時の電圧ストレスに対して適切に選定されている場合に限られる。作動電圧下では、バリスタ素子を流れる電流が特性範囲内に収まっていなければならない。電流が容量性である場合、素子間の電圧は静電容量によって決まり、浮遊容量の影響を受ける。特に接地方向の浮遊容量は、避雷器内部の電圧分布を乱し、上部素子に過大な電圧ストレスを与えることがある。このような電圧分布の偏りを改善するために、電界緩和リングの挿入が有効となる。

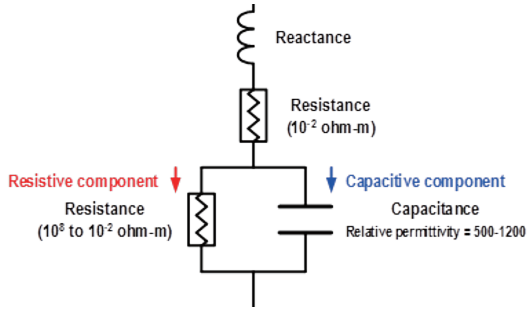


図 3.8　酸化亜鉛形避雷器の等価電気回路

図 3.9 は避雷器が有する電流（I）－電圧（V）特性を示す。避雷器が有するバリスタ特性とは、電圧の上昇に伴い抵抗値が急激に低下する非線形特性であり、通常電圧ではほぼ絶縁状態を保ち、異常時のみ電流を流すことで過電圧を抑制する機能を指す。

初期の避雷器は、炭化ケイ素（SiC）素子と多重ギャップを組み合わせた構造を採用していた。SiC は非線形特性を持ち、瞬時的な過電圧（サージ）が加わった場合に電流を制限するが、残留電流の遮断性能が低いため、ギャップで遮断する必要があった。このため、ギャップの設計が複雑で、装置が大型化しやすく、保守にも時間を要した。

これに対して、1970 年代に登場した酸化亜鉛形避雷器（MOSA）は、酸化亜鉛（ZnO）素子の非常に強い非線形特性を活用し、ギャップレス構造を実現した。これにより、避雷器は瞬時的な過電圧が加わった場合に迅速に動作し、応答速度と信頼性が飛躍的に向上した。また、構造が簡素化され、小型・軽量化が可能となり、メンテナンスフリーで長期運用を実現した。

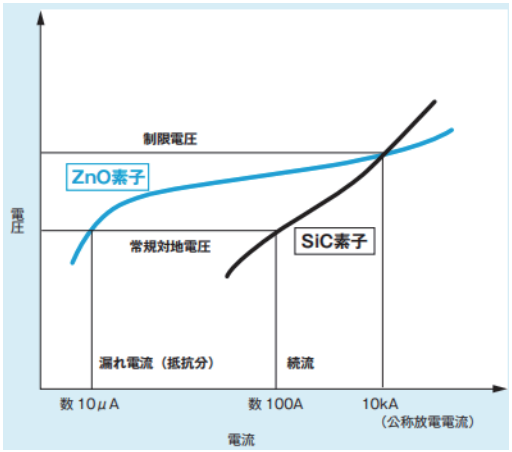


図 3.9　バリスタ特性：電圧によって抵抗値が変化する非直線抵抗素子（掲載許諾）[8)]

過去 30 年間で避雷器の設計と動作は大きく進化し、従来のバルブ式やスパークギャップ式の SiC 避雷器から、ギャップレス構造の金属酸化物（MO）避雷器へと移行した（図 3.10 参照）。金属酸化物サージアレスタ（MOSA）は、数十億個の微細な金属酸化物粒子の接合で構成され、マイクロ秒単位でオン・オフを切り替えることで、上端から接地端子への電流経路を形成する。これは、通常時は開放状態となる超高速電子スイッチ

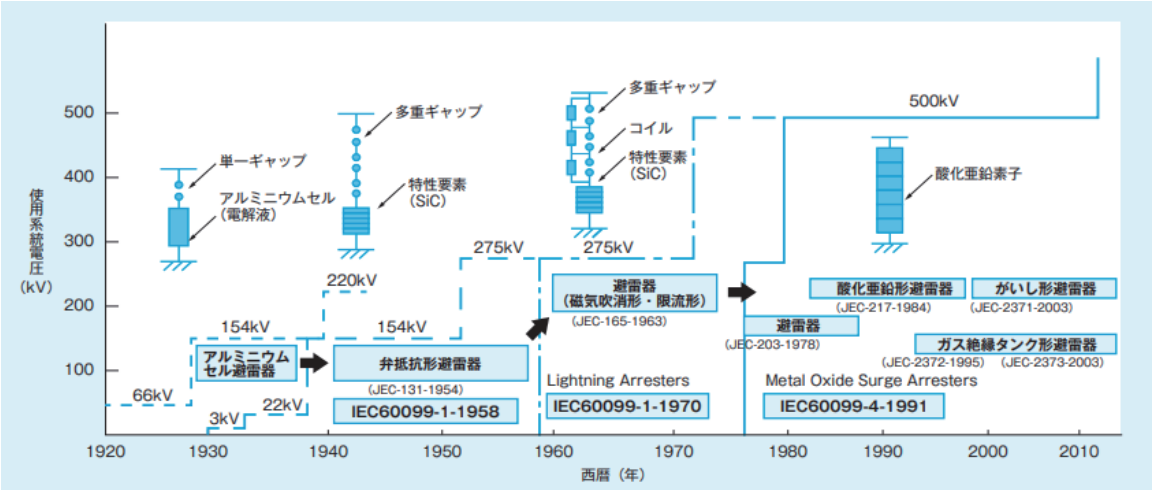


図 3.10　電力用避雷器の変遷（掲載許諾）[8)]

として機能している。MOSA は、過電圧時には高い保護性能を発揮し、通常時にはエネルギー損失を抑制するという、相反する要求を満たす非直線特性を有する。この特性により、MOSA はあらゆる過電圧から電力機器の保護に適している。

3.1.3 GIS への適用

酸化亜鉛形避雷器が発明される以前、初期の相分離形 GIS には、SF_6 ガス（0.09 MPa）を封入したタンク内に、直列ギャップと SiC 素子で構成された避雷器要素が収納されてた。過電圧が加わると、まず直列ギャップが動作して電流が流れ、その電流はバリスタ特性を持つ SiC 素子によって制限される。同時に、磁気駆動コイルを備えたギャップがアークを伸長させて消弧を行う仕組みとなっていた。一方、全三相一括形 GIS には、同時期に開発された酸化亜鉛形避雷器（MOSA）が適用された。この避雷器は、酸化亜鉛素子を 1 柱ずつ直列に接続したものを三相分配置し、三相一括スペーサを介して GIS 母線に接続された。

1987～1991 年に東京電力新信濃変電所において、東芝、日立製作所、三菱電機製の 550 kV タンク形高性能避雷器のフィールド試験が実施された（図 3.11、12 参照）。高性能避雷器の開発により、定格 550 kV 変電機器に対する雷インパルス耐電圧試験値（LIWV）は 1800 kV から 1425 kV へ低減され、開閉装置の小型化と信頼性向上に大きく貢献した。

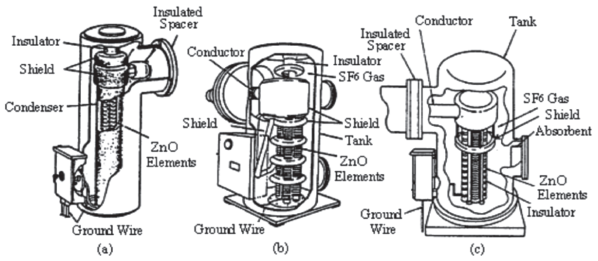


図 3.11　550 kV 高性能避雷器の構造（(a) 東芝、(b) 三菱電機、(c) 日立製作所製）[9)]

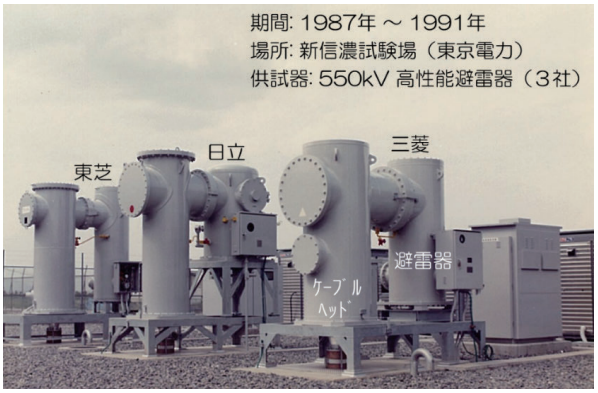


図 3.12　東京電力新信濃変電所における 550 kV タンク形避雷器の試験状況（掲載許諾）[9)]

3.2 計器用変成器の開発・変遷

3.2.1 各種計器用変成器の原理

計器用変成器は、交流電力系統に印加される電圧や電流を測定し、計測器、保護装置、制御システムなどに情報信号を提供することを目的とした機器である。その基本的な機能は、送配電系統における高電圧・大電流を、測定や制御に適した低電圧（110～120 V）および低電流（5 A）レベルに変換することである。「計器用変成器」という用語は、変流器（CT）と変圧器（VT または PT）の両方を包含する。

表 3.1　計器用変成器の種類

名称	略称	概要
計器用変流器	CT（Current Transformer）	電流を測定のため一次電流に比例した低電流に変換
計器用変圧器	VT（Voltage Transformer）	高電圧を安全に測定できるように低電圧に変換
計器用変圧・変流器	VCT（Voltage and Current Transformer）	VT と CT を一体化した装置。主として低圧配電盤に使用される
コンデンサ型計器用変圧器	CVT（Capacitor Voltage Transformer）	コンデンサにより分圧して高電圧を測定。経済的
光変成器	光 CT/ 光 VT（Optical CT/VT）	光ファイバーとファラデー効果を利用して電流・電圧を測定。高絶縁性・高精度
電子式変成器	ECT/EVT（Electronic CT/VT）	ロゴスキーコイルなどの電子部品を用いて電流・電圧を測定。デジタル変電所に適用

なお、コンデンサ型計器用変圧器は、かつて「PD（Potential Device）」と呼ばれていたが、国内計器用変成器 JEC 1201 において「CVT（Capacitor Voltage Transformer）」と表記することが推奨されている。この CVT は、電力用変圧器とは異なり、測定誤差を小さくするために巻線の電気抵抗や磁束漏れを抑えていること、また二次側に大きな電流を流す必要がないため、小容量であることが特徴である。

CT や VT の一次側巻線は、通常、二次側の計器やリレーが接続される巻線から絶縁され、電力系統の高電圧・大電流を、測定や制御に適した低レベル（例：5 A、110 V、図 3.13 参照）に変換し、小容量の計器での測定を可能にする。図 3.13 は CT および VT の原理図を示す。また、図 3.14 は、550 kV 計器用変流器（CT）の適用例を示す。

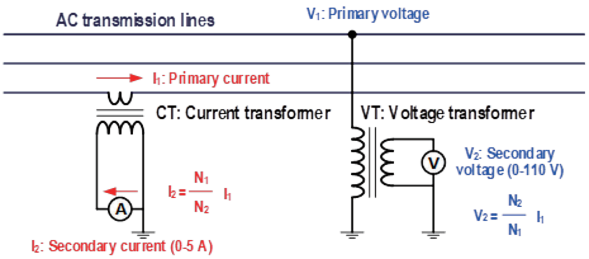


図 3.13　従来型計器用変流器（CT）と変成器（VT）の原理図

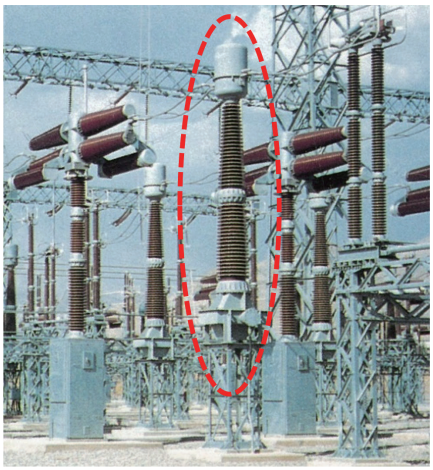


図 3.14　550 kV 計器用変流器（周囲は 550 kV 碍子形遮断器）

従来の変流器（CT）の一次側巻線は、わずか数巻程度、あるいは一次導体のみで構成されており、これは実質的に 1 巻のみを意味する。一方、CT の二次側巻線は通常、多数の巻数を有している。二次巻線は電流計に直接接続されるが、電流計には漏れインピーダンスが存在するため、CT の二次回路は主に短絡状態で運用される。過電圧の発生を防止するため、二次回路の一端は接地される（図 3.15 参照）。

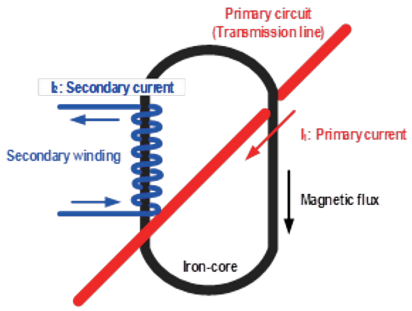


図 3.15　計器用変流器（CT）の電流変換原理

従来の鉄心式 CT は交流電力系統で広く使用されてきたが、近年では、非飽和特性、広いダイナミックレンジ、小型・軽量といった利点から、エアコア式 CT、ロゴスキーコイルを用いた電子式 CT（ECT）、光式 CT などの非従来型 CT の導入も広まりつつある。

鉄心 CT に用いられる磁性コアは、外部磁界が一定の強さを超えると磁化が飽和し、それ以上電流が増えても二次電流が一次電流に追従しなくなるという問題がある。この現象は、特に大電流や短絡時に顕著であり、測定誤差の要因となる。特に、超高圧（EHV）や極超高圧（UHV）システムでは、GIS 用途においてコアの飽和を防ぐために、大型で重い鉄心が必要とされてきた。

空芯変流器やロゴスキーコイルは鉄心を使わないため、コア飽和の影響を受けない。これらの非従来型 CT は電圧信号を出力し、一次電流による磁束が二次巻線に誘導電圧を発生させることで電流を検出する。空芯 CT は低インピーダンスで保護装置に直接接続できる。一方、ロゴスキーコイルを用いた電子式 CT（ECT）は高インピーダンスで、出力信号は変電所でデジタル（光）信号に変換されて保護装置へ伝送される（図 3.16 参照）。さらに、ファラデー効果を利用する光 CT もあり、磁場による偏光面の回転を検出して電流を測定する（図 3.17 参照）。

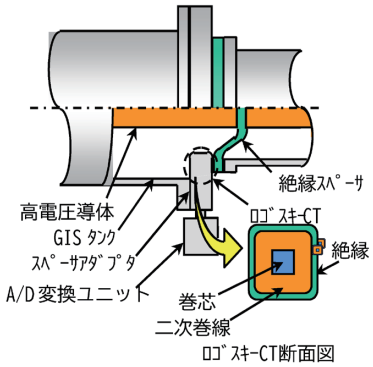


図 3.16　超高圧 GIS 用空芯鉄心変流器の構成例

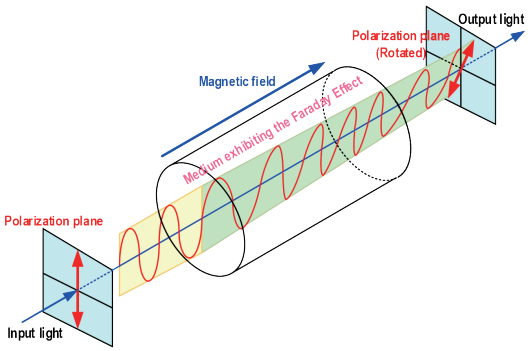


図 3.17　ファラデー効果（ファラデー回転）を利用した光 CT

ロゴスキーコイルは強磁性コアを使わず、高インピーダンスを持つ CT の原理に基づいている。図 3.18 にロゴスキーコイルセンサの概略図を示す。出力信号は電流の微分値であり、二次巻線は絶縁材料製のトロイドに巻かれる。通常、増幅器を介して計測機器や保護装置に接続される。表 3.2 に、異なる原理に基づく CT の原理をまとめる。

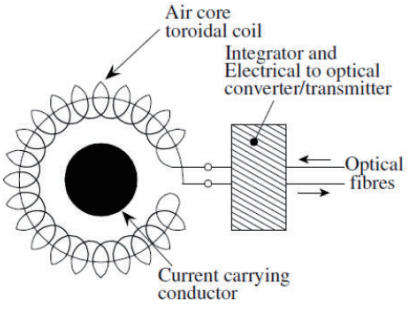
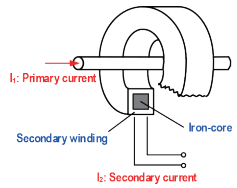
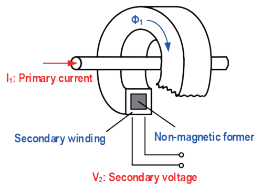
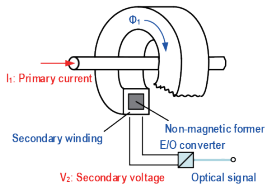
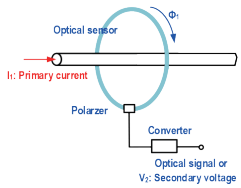


図 3.18　ロゴスキーコイル（Rogowski coil）変流器の概略図

表 3.2　各種計器用変流器（CT）の原理

従来型変流器（CT）	空芯型変流器（CT）	Rogowski coil（ECT）	光 CT
			
変圧器と同様、一次巻線と二次巻線で構成され、二次電流は、二次巻線と一次巻線の巻数比に反比例する。 $I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 = \frac{1}{N_2} \cdot I_1$	磁性体の鉄心を使わず、空間を通る磁界を検出する。二次電圧は、二次巻線を通る（一次電流によって誘導される）磁束に比例する。 $V_2 = \frac{d\Phi_1}{dt} = M \cdot \frac{dI_1}{dt}$	空芯型変流器で計測した二次電圧をデジタル（光）信号に変換される。ロゴスキーコイルは、断面積が一定である非磁性体のコアに巻かれる。	一次電流によって誘導される磁場は、光ファイバーを通過する光の偏光角を回転させる。このファラデー効果（Faraday Effect）を利用し、偏光の変化を計測することで電流値を算出する。

変流器（CT）の二次側出力は通常 1 A または 5 A であり、接続される保護リレーはこの出力に応じて入力設定を調整することが可能である。CT は複数の変流比を備えており、たとえば 3000/2000/1000/1 A のように、負荷電流の増加に応じて適切な比率に切り替えることができる。これにより、初期段階では小電流を精度良く測定し、将来的な電流増加にも柔軟に対応することが可能となる。例えば、2000/1600/1200/800/600/500/400/1 A の変流比を持つ CT は、一次電流 400～2000 A の範囲に対応し、広い運用範囲をカバーする。

VT や PT は主として、従来型電磁誘導式、コンデンサ分圧式、光学式の 3 種類がある。

- 従来型電磁誘導式 VT は、一次巻線と二次巻線を持つ変圧器構造を採用している。
- コンデンサ分圧変圧器（CVT）は、容量性分圧器を利用して電圧を測定し、特に高電圧用途において電磁式 VT と比較して経済的な利点がある。
- 光学式変圧器は、ファラデー効果を利用して偏光角の回転を検出し、電圧を計測する。

図 3.19 は、計測用や保護リレー駆動用に低電圧信号を提供するコンデンサ型電圧変成器（CVT）の構成例を示す。CVT は通常、以下の 3 つの要素で構成される。

- 分割コンデンサ（C_1, C_2）
- ライン周波数に調整するためのインダクタンス
- 計量装置や保護リレーと電圧を絶縁する電圧変成器

分圧コンデンサ C_1 は、直列接続された小型コンデンサの積層構造で構成されることが多く、C_1 両端には大きな電圧降下が生じる。一方、C_2 両端の電圧降下は比較的小さい。

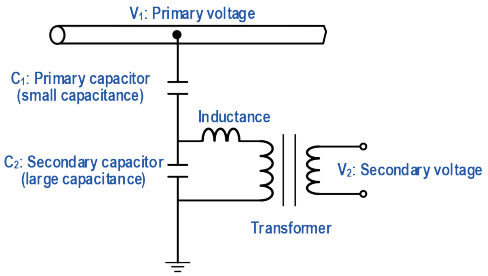
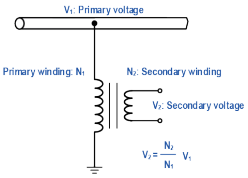
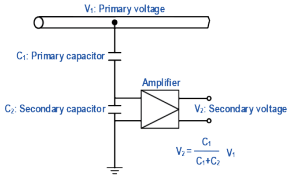
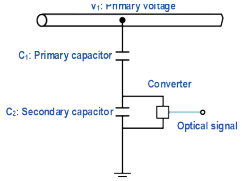
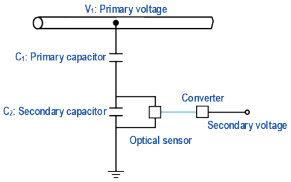


図 3.19　コンデンサ型電圧変成器（CVT）の構成例

表 3.3 は、異なる原理に基づく電圧変成器の原理をまとめたものである。

表 3.3　各種計器用変圧器（VT）の原理

従来型計器用変圧器（VT）	増幅器付コンデンサ型変圧器 VT（CVT）	分圧型電子式分圧器（EVT）	光式変圧器（Optical VT）
			
変圧器と同様、一次巻線と二次巻線で構成され、二次電圧は、二次巻線と一次巻線の巻数比に反比例する。 $V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_1$	二次電圧は、直列に接続された二つのコンデンサ C_1 と C_2 間の分圧比から得られる。 $V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V_1$	二次電圧は、複数のコンデンサ間の分圧により計測される。二次電圧はデジタル信号に変換される。	二次電圧は、複数のコンデンサ間の分圧により計測される。二次電圧はデジタル信号に変換され、再び二次電圧に変換される。

3.2.2　コンデンサ型変成器（CVT）の開発

日新電機は、従来、低電圧クラスにおいて乾式および油絶縁型の変成器を製造していた。

戦後、日本国内では電力線を利用した変電所間通信が行われており、その際、通信用の高周波成分を取り出すために結合コンデンサが使用されていた。1950 年、日本発送電株式会社東北支社より「結合コンデンサを利用して電圧を計測できないか」との問い合わせがあり、日新電機はコンデンサ型変圧器（CVT）の開発に着手した。1952 年に製品化に成功し、東京電力東千葉変電所に 154 kV CVT の初号機（図 3.20 参照）を納入した[92]。



図 3.20　日新電機製 154 kV コンデンサ型変圧器（CVT）初号機（1952）（掲載許諾）[10]

日新電機は、CVT の開発と並行して、CT（計器用変流器）の開発にも注力した[92]。

1954 年には、80.5 kV クラスの油密封方式 CT を製品化。これは従来の開放型や窒素封入型に比べ、絶縁信頼性を大幅に向上させた。その後、1961 年から 1967 年にかけて、115 kV、161 kV、287.5 kV と定格電圧を順次拡大した。CVT は特許取得により国内シェア 100 %を達成した。一方、CT は遮断器と同一メーカーでの発注が多く、生産台数が伸び悩んだ。この状況を打開するため、1967 年頃から高電圧化と競争力強化に取り組み、362 kV クラスの CT を開発。その結果、カナダ BC Hydro 社、ブラジル CEMIG 社・FURNAS 社に納入し、米国 BPA 社には 500 kV CT 初回品 6 台を納入した（図 3.21 参照）。

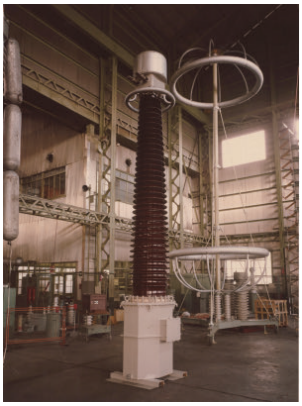


図 3.21　日新電機製 420 kV 海外向 CT（掲載許諾）[10),11)]

国内 500 kV 送電への対応として、日新電機は 550 kV CVT を開発。1970 年には懸垂型 550 kV CVT を実用化し、翌 1971 年には東京電力房総変電所および新古河変電所に合計 30 台を納入した。さらに 1972 年には、関西電力能勢変電所に自立型 550 kV CVT（図 3.22 参照）を納入した。

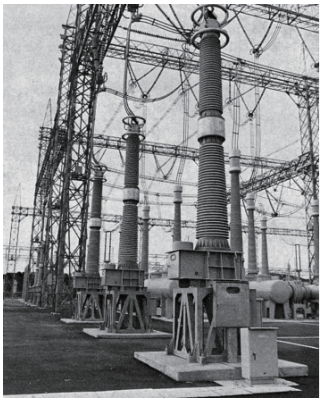


図 3.22　日新電機製自立型 550 kV CVT（掲載許諾）[11]

ガス絶縁開閉装置（GIS）用の計器用変圧器には、当初ガス絶縁型 VT が存在せず、代替としてモールド型、増幅型、GIS 用 CVT などが使用されていた。しかし、モールド型 VT は高圧 GIS への適用が難しく、絶縁性能も低かった。また、GIS 用 CVT は油絶縁で体積が大きく、設置性に課題があった。

一方、1973 年に西ドイツ（当時）のメスバンドラバウ（MWB）社が、一次コイルの絶縁にプラスチックフィルムを用いた巻線型ガス絶縁 VT を世界で初めて商品化した。日新電機は 1976 年に MWB 社と提携契約を締結し、翌 1977 年には GIS 用ガス VT の生産を開始した。製品は単相分離形（66/77 kV、154 kV、275 kV）および三相一括形（66/77 kV）であった（図 3.23 参照）。1978 年には、154 kV 単相形の巻線型ガス絶縁 VT 初号機を電源開発・手取川第一発電所に納入。その後も高電圧化に対応し、1980 年には 400 kV クラス、1982 年には 500 kV クラスのガス VT を納入し、国内外の GIS の高電圧化に合わせて生産を拡大した。



図 3.23　日新電機製 154 kV GIS 用単相形ガス VT の初号機（掲載許諾）[10]

3.2.3　GIS 用計器用変圧器の変遷

初期の GIS 用計器用変圧器は、現行のガス絶縁巻線型 VT は未開発であったため、22 kV で使用されていたエポキシモールド型 VT が高電圧用として適用されていた。この VT は、高圧コイルと低圧コイルをそれぞれ個別にモールドし、鉄心とともに後から一体化する構造であった。また、高圧コイルの表面には SF_6 ガスを封入することで絶縁距離を短縮し、GIS 用途に適した構造としていた（図 3.24 参照）。

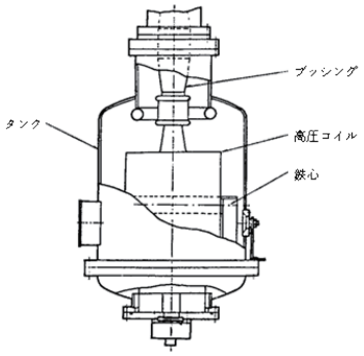


図 3.24　初期の GIS 用計器用変圧器の構造

三相一括形 GIS 用では、小型化と信頼性向上の観点から、従来のエポキシレジン絶縁形変成器に代わり、ガス絶縁計器用変圧器が開発・適用された。内部構造は図 3.25 に示す通り、巻線層間の絶縁にプラスチックフィルムを用い、対地および相間絶縁には SF_6 ガスを採用している。

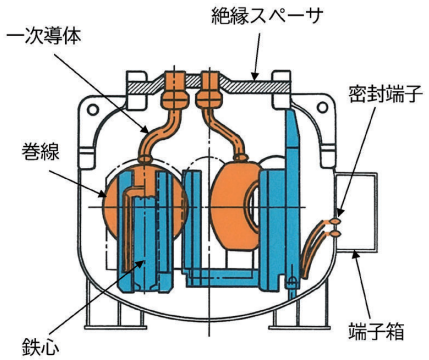


図 3.25　三相一括形 GIS 用計器用変圧器の内部構造（三菱電機技術資料）

3.3　断路器の開発・変遷

3.3.1　断路器の種類

断路器（DS：Disconnecting Switch、Disconnector）は、遮断器が開極された後に、無負荷状態の電力回路を開閉するための開閉装置であり、基本的には電流を遮断する能力を持たない。ただし、一部の断路器には、変圧器の励磁電流や回路の充電電流（1 A 以下の残留電流）を開閉可能な機種もある。また、DS は、気中絶縁タイプとガス絶縁開閉装置に組み込まれるタイプが存在する。断路器と遮断器の誤操作を防止するため、両者にはインターロック回路が設けられており、遮断器が投入された状態では断路器を開放することができない。

気中絶縁断路器には、図 3.26 に示すように、中央開閉型、二重接点回転型、垂直開閉型、パンタグラフ型、膝折曲型など、複数の基本構造が存在する。垂直開閉型断路器は通常水平に設置されるが、垂直設置型も存在する。中央開閉型および二重接点回転型断路器は、より広い相間隔を必要とする。一方、膝折曲型断路器は、上部空間に制約がある場合に適しており、パンタグラフ型断路器は最もコンパクトな設計である。

気中絶縁断路器が残留電流を遮断する際には、接点間にアークが発生し、大きな音を伴うことがある。なお、国内では、ガス絶縁開閉装置（GIS）を構成するタンク形断路器が広く使用されている。

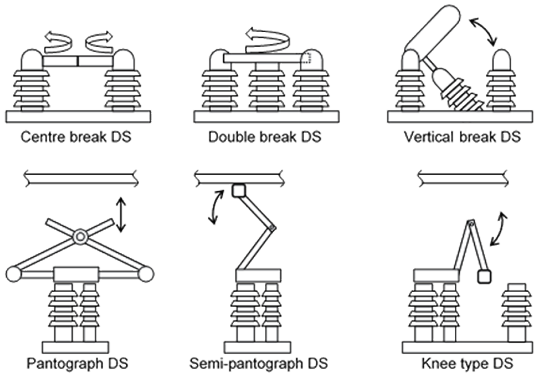


図 3.26　各種方式の気中絶縁断路器 [12)]

3.3.2　GIS 用断路器の構造

ループ電流開閉責務（母線に接続された複数の回線の負荷電流を開閉する責務）が要求される母線用断路器（DS）には、接触子の先端に銅やタングステンなど、耐アーク性に優れた材料が使用される。さらに、より高い遮断能力が必要な場合には、ガス吹付方式、ガス吸引方式、磁気消弧方式などのアーク消弧技術が採用される（図 3.27 参照）。

三菱製 550 kV GIS 用断路器（DS）は、定格電流 4000 A 以上の開閉に対応するため、1970 年代までは固定側電極内にガス吹付ピストンを設け、アークにガスを吹き付けて遮断する消弧方式を採用していた。1970 年代後半には、金属スパッタ粒子の飛散による極間絶縁の信頼性低下を防ぐ目的で、ガス吸い込み方式へと変更された。この方式では、可動側にピストンを設け、開極動作に連動してピストンが動き、シリン

ダー内の容積が増加することで、接触子先端のガスを内部へ吸い込み、ガス流を発生させると共に、アークも接触子内部に吸い込むことで、空間への広がりや伸長を抑制する構造となっている。

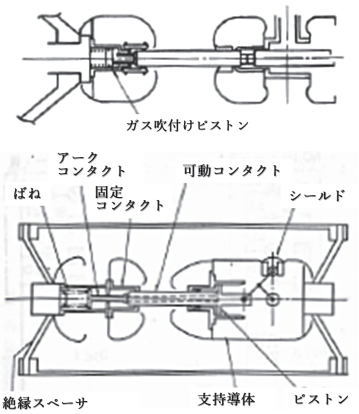


図 3.27　GIS 用断路器の構造例（上：ガス吹付け方式、下：ガス吸込み方式）

ガス吸い込み方式の断路器（DS）は、比較的大きな操作力を必要とするため、操作装置が大型化する傾向があり、磁気消弧方式などを採用した改良が図られてきた。一例として、三菱電機は、定格電流 8000 A の大電流を低操作力で遮断可能な手段として、抵抗限流遮断方式 DS を開発した。

図 3.28 は、抵抗限流遮断方式 DS の構造例を示している。この DS は、投入状態（a）では、中空円筒形状の可動側接触子が、内径および外径の 2 箇所で固定側接触子と接触している。外径側は主接点、内径側は抵抗接点であり内周部が抵抗体要素を構成する。開極動作（b）では、まず主接点が開極し、アークが発生する。電流は抵抗接点に転流され、主接点間のアークが消弧される。さらに開極距離が拡大すると（c）、抵抗接点も開極し、抵抗体を通じて流れるアークが限流され、最終的に遮断される。

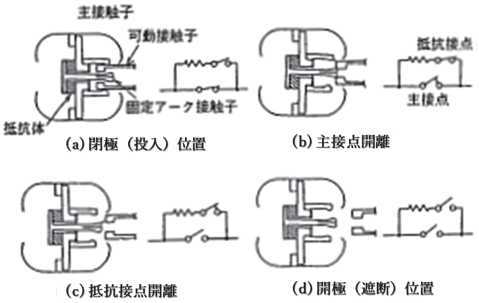


図 3.28　抵抗限流遮断方式断路器の電流遮断過程

図 3.29 は、GIS 製品化初期の断路器（DS）と、電路が直角配置および直線配置の断路器の内部構造例を示している。直角形と直線形は GIS の構成に応じて使い分けられる。直角配置では、回転シャフト軸からレバーを介して絶縁操作ロッドが直線動作を行い、直線配置では、回転シャフト軸に接続された絶縁操作ロッドが振り子運動を行う。いずれも可動コンタクトは直線動作である。接地開閉器（ES）は、DS の電極側に固定側接触子を収納し、それと対向する位置に ES の可動コンタクトが直線動作を行い、主回路を接地する構造となっている。

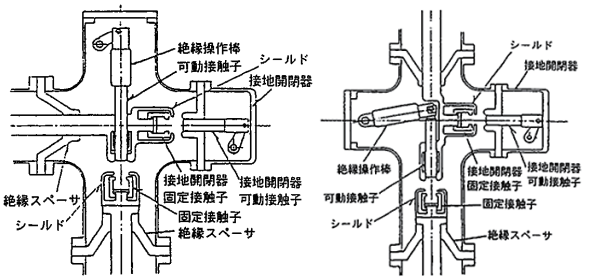


図 3.29　左：72/84 kV 直角型 GIS 用断路器、右：72/84 kV 直線型 GIS 用断路器

全三相一括形 GIS 用断路器では、配置構成上、母線側には電路が直角となる断路器、線路側には電路が直線となる断路器が配置される。母線側断路器はループ電流遮断責務を有するため、極間部に耐アーク性材料による接点やシールドを配置し、遮断時のアークによる電極損傷を防止し、極間絶縁性能を確保している。線路側の接地開閉器（ES）は誘導電流の遮断を担うため、同様の極間構造が採用されている。

3.4　ガス絶縁開閉装置の開発・変遷

3.4.1　ガス絶縁開閉装置の概要

変電所は、発電機、変圧器、送電線に接続される母線が配置され、①電圧の変換（変圧器）、②電力の集約（発電機、変圧器、送電線より受電）、③電力の分配（需要各地への送電）を担っている。この役割を果たすため、変電所内は変圧器、遮断器、断路器、避雷器、計器用変成器などの電力機器で構成される。

ガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）は、発電所や変電所に設置される、遮断器（CB：Circuit breaker）、断路器（DS：Disconnecting switch）、接地開閉器（ES：Earthing switch）、母線（Bus：Busbar）、計器用変成器（計器用変流器 CT：Current transformer, 計器用変圧器 VT：Voltage transformer）、避雷器（LA：Lightning arrester）などの各種機器を、絶縁性能と消弧性能に優れた SF_6 ガスで満たされた密閉金属容器に収納した設備である[13),14),15),16),17),18)]。

ガス絶縁開閉装置（GIS）は以下のような種類がある。

- Full-GIS：変電所の主要構成機器（遮断器、断路器、接地開閉器、母線など）を SF_6 ガス絶縁されたタンク内に密閉したタイプ。
- H-GIS（Hybrid-GIS）は、遮断器などの主要機器のみをガス絶縁されたタンク内に収納し、母線や一部の機器を空気絶縁で構成した、ガス絶縁と気中絶縁のハイブリッド型開閉装置である。なお、CIGRE では、このような気中絶縁（AIS）とガス絶縁（GIS）の複合技術による開閉装置を、MTS（Mixed Technology Switchgear）と呼称することを提唱している。
- C-GIS：SF_6 ガスやドライエアで絶縁された方形の金属容器内に電力機器をユニット化して収納した中・低容量（22～66 kV）クラスの受電設備（キュービクル形ガス絶縁開閉装置）。遮断器は主として VCB を適用、ビル・地下施設など限られたスペースに設置される。

気中絶縁形変電所（AIS：Air Insulated Substation）は、主要な個別電気設備を大気で絶縁する方式である。広い敷地が必要となるが、設備の工事費は比較的安価となる。一方、ガス絶縁変電所（GIS：Gas Insulated Substation）は、空気よりも絶縁性能が高い SF_6 ガス（表 3.4 参照）を使って、電気設備を密閉されたタンク内に収める方式で、AIS に比べて設置面積は約 1/20、容積は約 1/100 程度に縮小できる（図 3.30 参照）。

表 3.4　各種媒体の絶縁強度

絶縁媒体	絶縁強度
空気	1～3 kV/mm（0.1 MPa）
鉱油	10～15 kV/mm
SF_6	23～30 kV/mm（0.4～0.6 MPa）
真空	30 kV/mm（ギャップ：d < 5 mm）

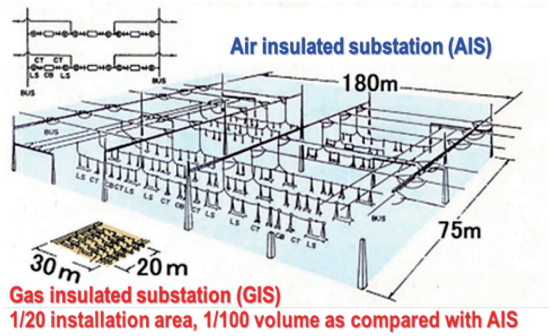


図 3.30　AIS と GIS の据付面積比較

図 3.31 は、主母線三相一括相分離形 550 kV ガス絶縁開閉装置（Full-GIS）の内部構造例を示す。この装置は、変電所の二重母線方式に対応するため、断路器を備えた三相一括形の主母線タンクが 2 セット配置されている。母線は各相に分離されており、相分離形の二点切遮断器に接続されている。遮断器の両端には計器用変流器が設けられている。さらに、線路用断路器およびガスブッシングを介して導体が気中に導出され、送電線へと接続される。

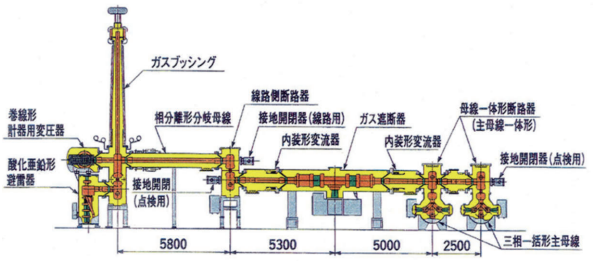


図 3.31　主母線三相一括相分離形 550 kV ガス絶縁開閉装置の内部構図例

3.4.2　ガス絶縁開閉装置の適用事例

変電所は、N-1 故障に対して電力供給に支障がないことが要求されるため、基本的に複母線方式で構成される。第 1 章にて解説したとおり、主要な構成例として、複母線を一台の遮断器で連結した 1 ブスタイ方式、複母線を二台の遮断器で連結すると共にそれぞれの母線を分割して遮断器で連結した 4 ブスタイ方式、複母線間に三台の遮断器とその両端に断路器を配置した構成を複数設けた 1-1/2 遮断器方式がある。

図 3.32 は二重母線 1 ブスタイ（1 台の母線連結 CB）方式で構成された中部電力新三河変電所を示す。1982 年に導入された 550 kV GIS は主母線三相一括相分離形で設計され、遮断器は単一圧力方式四点切が適用された。二重母線は変圧器側から二回線が遮断器および断路器を介して、それぞれの母線に接続され、送電線側も二回線が遮断器および断路器を介して分配されている。



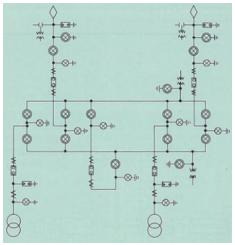

図 3.32　二重母線 1 ブスタイ方式の中部電力新三河変電所（1982）（掲載許諾）

図 3.33 は二重母線 4 ブスタイ（2 か所の母線連絡 CB は二重化され、合計 4 台、また、母線区分 CB は甲乙母線に各 1 台、合計 2 台）方式で構成された中部電力豊根開閉所を示す。1991 年に導入された 550 kV GIS は主母線三相一括相分離形で設計され、遮断器は単一圧力方式二点切が適用された。二重母線は受電側、送電側共にそれぞれ四回線が遮断器および断路器を介して、それぞれの母線に接続されている。

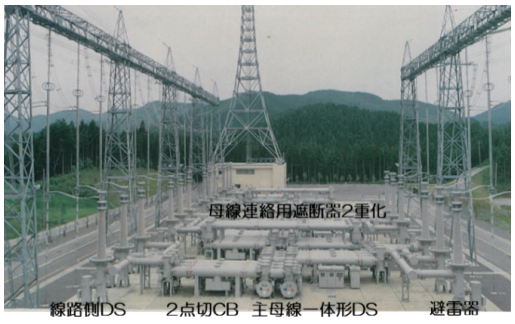


図 3.33　二重母線 4 ブスタイ方式の中部電力豊根開閉所（1991）（掲載許諾）

図 3.34 は 1-1/2 遮断器方式で構成された関西電力西京都変電所を示す。1975 年に導入された 550 kV GIS は相分離形で設計され、遮断器は二重圧力式および単一圧力方式四点切が適用された。二重母線は受電側、送電側共にそれぞれ六回線が遮断器および断路器を介して、それぞれの母線に接続されている。

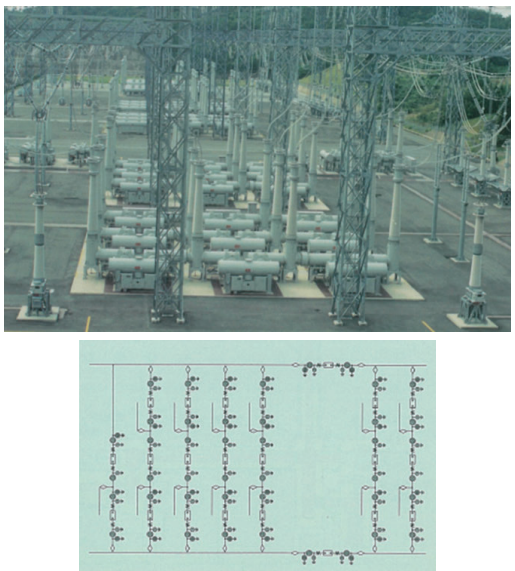


図 3.34　1-1/2 遮断器方式の関西電力西京都変電所（1975）（掲載許諾）

3.4.3　油絶縁および空気絶縁による複合開閉装置の誕生

遮断器などの各種変電機器を密閉された容器内に収納するという概念は、1916 年にオランダ・ユトレヒトで H. A. Hiddle Nijland が設立した COQ 社によって考案された。

COQ 社は、1935 年に 12 kV 油絶縁密閉形開閉装置を製品化（図 3.35 参照）、さらに 1953 年には 150 kV 圧縮空気絶縁を利用した複合開閉装置（遮断器も空気遮断方式、図 3.36 参照）を開発した。この密閉型空気絶縁開閉装置では、絶縁および遮断媒体として圧縮空気を使用しており、母線部には 12 気圧（1.2 MPa）、四点切遮断部の低圧側には 6 気圧（0.6 MPa）、高圧側には 25 気圧（2.5 MPa）を採用、母線は水平に配置され、機器は垂直に配置される構成で実用化され、現在もオランダの電力会社 TenneT において運用されている。



図 3.35　12 kV-100 MVA 油絶縁開閉装置（1935）（TenneT 提供）[19),20)]

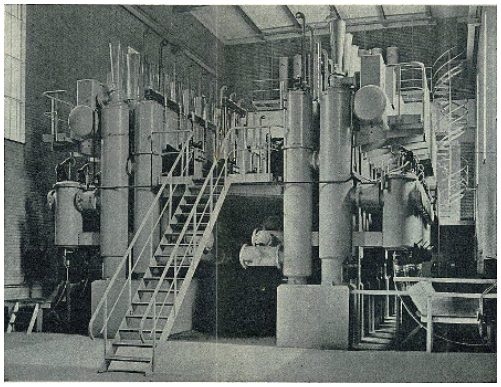


図 3.36　150 kV 空気絶縁開閉装置（1953）（TenneT 提供）[19),20)]

3.4.4　SF_6 ガス絶縁開閉装置の開発

表 3.5 は、国内外における SF_6 ガス絶縁開閉装置の初期の開発・実用化の取組みを示す。

表 3.5　SF_6 ガス絶縁開閉装置の開発変遷 [21),22),23),24)]

国内 GIS 開発	海外 GIS 開発
84/72 kV GIS 共同開発（1966） 84/72 kV GIS 実系統試験（1968） 168 kV GIS 実系統試験（1969） 84/72 kV GIS 運用開始（1969）	仏 245 kV GIS 実系統試験（1966） 独 145 kV GIS 運用開始（1968） 仏 245 kV GIS 運用開始（1969）
550 kV GIS 長期課電試験（1970） 300 kV GIS 運用開始（1970） 168 kV GIS 運用開始（1970） 550 kV GIS 運用開始（1973） 550 kV Full-GIS 運用開始（1976） 1100 kV GIS 実証試験開始（1996）	米 345 kV GIB 運用開始（1971） 欧 420 kV GIS 長期課電試験（1972） 南ア 800 kV GIS 運用開始（1986） 中国 1100 kV GIS 運用開始（2009）

国内では、1960 年頃から三菱電機、東芝、日立製作所などで研究開発が開始され、その後電力会社との GIS 共同開発体制が開始された。60 年代末から 70 年代初めに 77 kV から 500 kV 系統での実系統試験が精力的に行われ、GIS の長期信頼性を確認すると共に、電力会社とメーカー間で問題点や対応策を共有化してきた。日本では 84 kV GIS の実系統試験開始からわずか 5 年という極めて短期間で 550 kV GIS の商用運転開始が実現できたのは、この共同開発体制が大きな役割を果たしており、GIS を短期間に開発・実用化できる電力会社と機器製造メーカーの協力・連携関係が築かれてきた[13),14),15)]。

欧州では 1960 年代に、フランスの Delle-Alsthom、西ドイツの Siemens、スイスの BBC などのメーカーによって、SF_6 ガスを利用したガス絶縁複合開閉装置（GIS）の実用化が進められた。フランス電力公社（EdF）は、1966 年 9 月、Plessis-Gassot 変電所において、Delle-Alsthom & COQ France（空気絶縁方式）、Merlin et Gerin、Delle-Alsthom の 3 社が参加した、245 kV–12 GVA のガス絶縁開閉装置に関する実系統試験を実施した。この実系統試験結果を受けて、EdF は、1969 年、Merlin et Gerin および Delle-Alsthom 製 245 kV GIS の商用運転を開始した。Delle-Alsthom 社のガス絶縁開閉装置は、タンク内の絶縁用 SF_6 ガスの圧力を 3.5 kg/cm² (0.35 MPa) に設定され、適用された単一圧力式（パッファ方式）六点切ガス遮断器も同じ圧力で設計され、ガスの液化を防ぐための加熱装置は不要とした[12),25),26)]。

一方、スイス BBC 社は、ガス絶縁開閉装置の基礎研究を重ねた後、1969 年にチューリッヒ電力会社の Sempersteig 変電所に、170 kV 10 GVA ガス絶縁開閉装置（5CB 構成）を導入した（図 3.37 参照）。また、ドイツ Siemens 社は 1968 年に、ベルリン電力会社 Berlin 変電所およびケルン電力会社 Dagobert 変電所に、それぞれ 123 kV ガス絶縁開閉装置を導入した。その後、欧州では 10 社を超える GIS メーカーが市場に参入した。

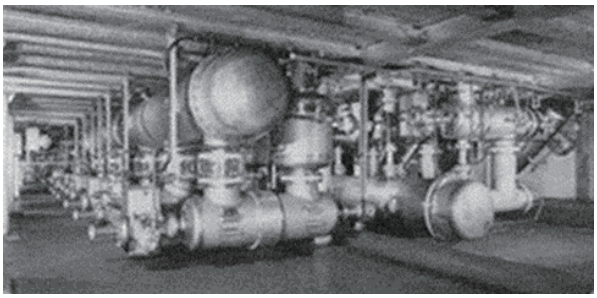


図 3.37　スイス BBC 製 170 kV-10 GVA ガス絶縁開閉装置（1969）（掲載許諾）[13),25)]

図 3.38 は、海外および国内における GIS（ガス絶縁開閉装置）の縮小化に関する変遷を示す。海外 GIS で

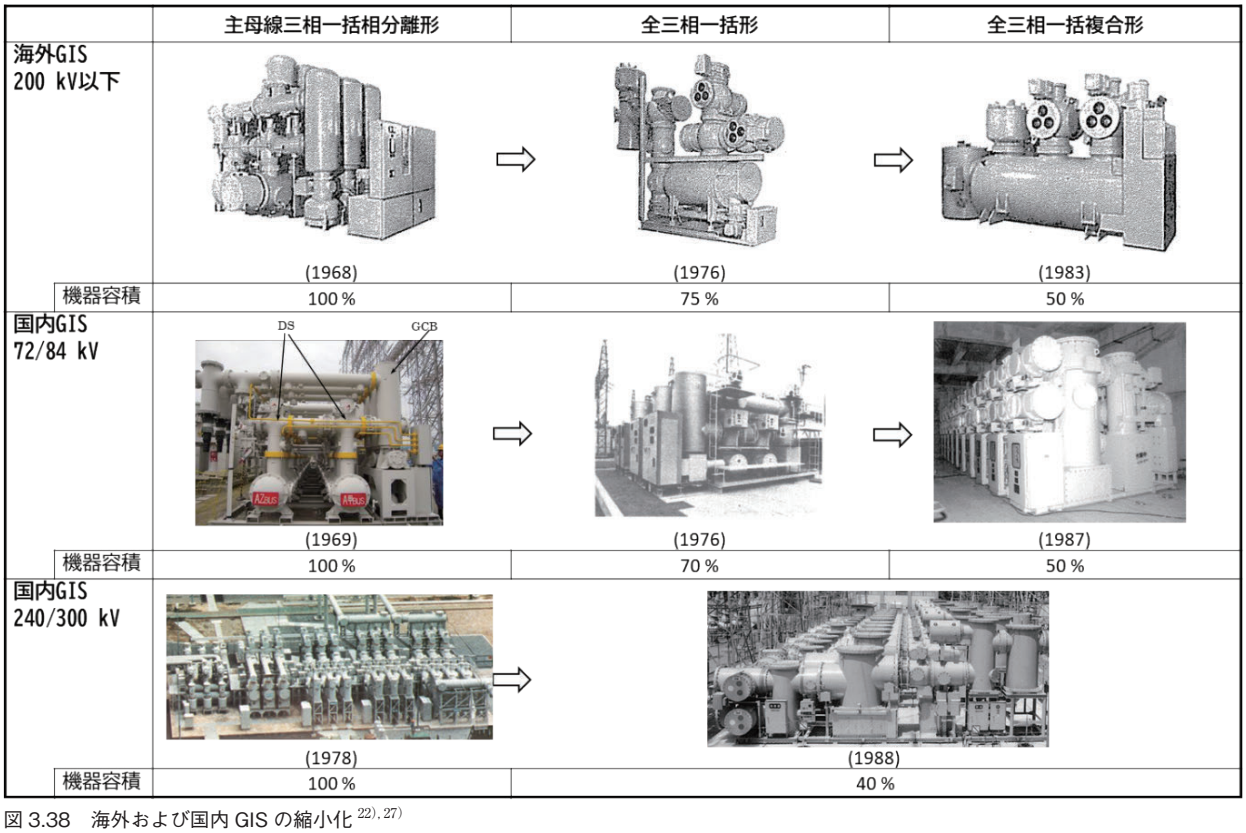


図 3.38　海外および国内 GIS の縮小化[22),27)]

は、200 kV 以下のシステムにおいて、主母線三相一括形、全三相一括形、構成機器の複合形といった発展ステップに応じて、装置の容積が 100 %から 75 %、50 %へと縮小されてきた。全三相一括形は、ガス遮断器を横方向に配置し、その上部に母線側および線路側の機器を積層配置する構造であった。複合形は、横形遮断器タンク内に分岐母線、変流器、点検接地開閉器などを一体化して収納し、装置全体を低層化するとともに、一体輸送が可能な構造とした。海外における全三相一括形および複合形開閉装置いずれにおいても、電流開閉機能を備えた母線断路器の下部には、絶縁スペーサが水平に配置されている。なお、国内の GIS においては、1980 年代半ば以降、水平スペーサの設計は一般的に避ける傾向がある。

3.4.5　日本における SF_6 ガス絶縁開閉装置の開発 [12),21),22),23),24)]

日本でも欧州と同時期に、タンク形ガス遮断器技術の延長として、ガス絶縁複合開閉装置（GIS）の実用化が進められ、著しい進歩を遂げた。

1960 年代、日本でも SF_6 ガスの優れた絶縁・遮断性能に注目が集まり、「変電所全体を SF_6 ガスで覆えば、非常にコンパクトな設備が実現できるのではないか」との着想から、三菱電機は社内に「ガス絶縁変電所研究会」を設立し、実現可能性の検討を開始した。

当初は懐疑的な意見もあったが、500 kV 送電時代の到来を前に電力会社の関心を集め、1966 年には三菱電機と関西電力が共同で 84 kV GIS の開発を開始した。遮断器の技術を活かし、将来的には 550 kV までの GIS 化を目指して、実機の試作、性能検証、実系統試験を継続的に実施した。また製造面では、GIS の重要部品であるエポキシ注型絶縁物の開発と性能検証を先行して進めた。

東芝は、東京都心における電力需要の増加を受けて、275 kV 系統の都心導入が計画されたことを背景に、275 kV 地下変電所の建設を可能にするガス絶縁開閉装置（GIS）の開発に着手した。1964 年には社内に調査委員会が発足し、1966 年には東京電力と「変電所小型化共同研究」を開始。従来の気中絶縁開閉装置に比べて、設置面積を 1/10 以下に抑えることを目標に、GIS の開発が進められた。

このように、各社ともガス遮断器の開発と並行して、ガス絶縁開閉装置の実用化に取り組んだ。三菱電機は 1968 年より、関西電力姫路変電所において 84 kV GIS の実系統試験を開始（図 3.39 参照）。東芝は東京電力西堀変電所に 66 kV-2.5 GVA GIS を納入し、実運用を開始した（図 3.40 参照）。

関西電力姫路変電所納 84 kV GIS は、碍子形遮断器をベースに構成され、絶縁支持には乾式ブッシングを使用。2 年間の長期運転試験では、遮断器と断路器が計 2650 回動作し、その後、工場に持ち帰り、初期の性能維持を確認した。1969 年に、関西電力泉大津変電所に GIS 初号機を納入し、商用運転を開始（図 3.41 参照）。屋内形変電所として、2 階に GIS、1 階に配電設備を配置。遮断器は構造が簡素化され、避雷器や変成器もコンパクトな設計に。主母線は三相一括形を採用し、省スペース化を実現した。この GIS は約 50 年間にわたり運用された後に更新された。

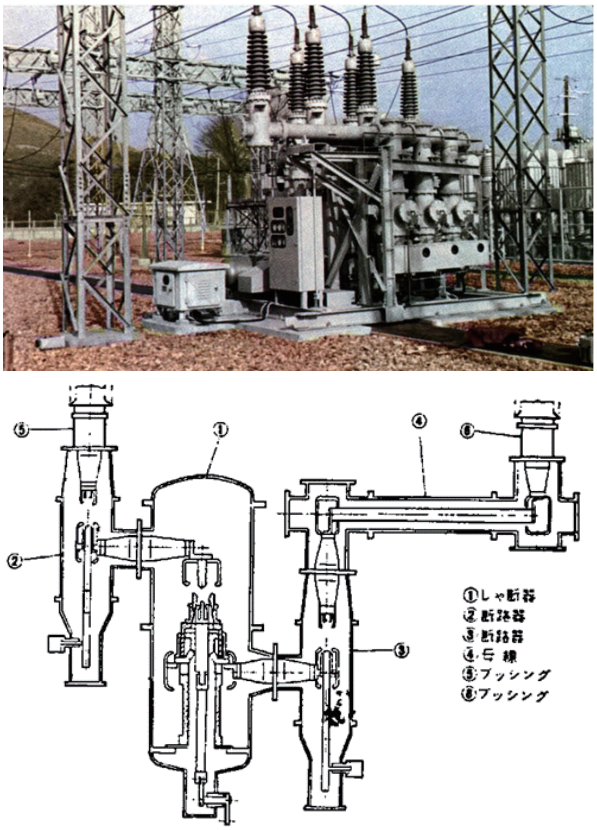


図 3.39　関西電力姫路変電所における 84 kV GIS フィールド試験を実施（1968-70）（掲載許諾）[21)]

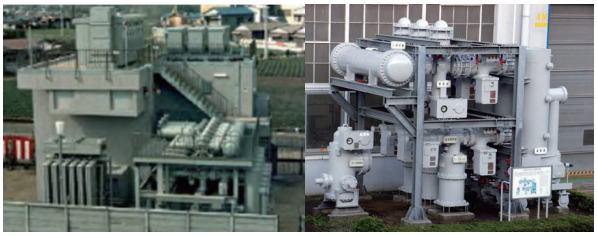


図 3.40　（左）東京電力西堀変電所における 66 kV-2.5 GVA GIS の実運用を開始（1969）、（右）当該 GIS は 27 年運用後、現在は東芝・浜川崎工場に展示中（東芝提供）

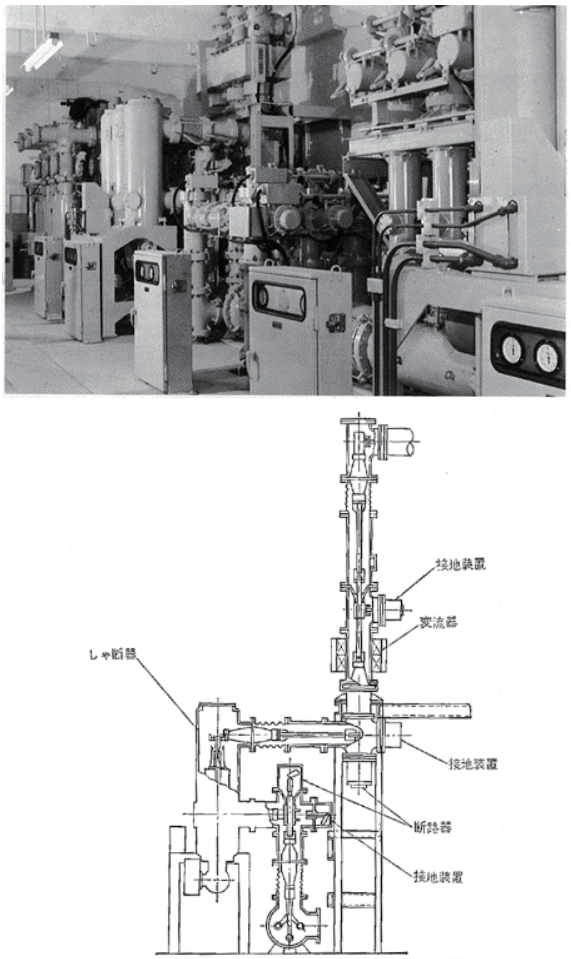


図 3.41　関西電力泉大津変電所納 84 kV 主母線三相一括相分離形 GIS（1969）（掲載許諾）[21]

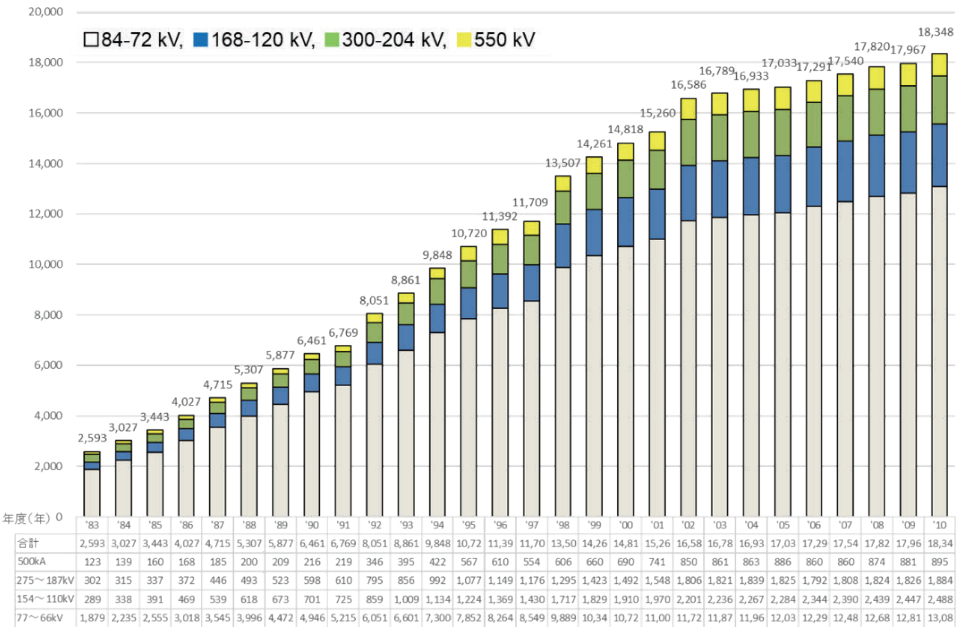
1971 年、関西電力南大浜開閉所に、定格電流 3000 A のガス絶縁二重母線と遮断器 20 台を備えた 84 kV GIS が設置された。製造工程では、絶縁スペーサなどの重要部品を含め、現地据付部位までを工場で一貫して組み立てる方式が採用された。この方式により、現在の GIS 製造スタイルの原型が確立、据付期間は従来の気中変電所と比べて大幅に短縮され、GIS の利点が明確に示された。この GIS は、臨海部の厳しい環境下で約 40 年間にわたり安定運用された後に更新された（図 3.42 参照）。



図 3.42　関西電力南大浜開閉所納 84 kV 主母線三相一括相分離形 GIS（1971）（掲載許諾）[21]

これ以降、各電力会社における GIS 導入が増え、東芝は、1969 年、中部電力守山変電所に 77 kV 2.5 GVA GIS、1970 年、東京電力柏井変電所に 154 kV 2.5GVA GIS、1970 年、東京電力北多摩変電所に、275 kV GIS、等が設置され、定格電圧ならびに容量の増大開発が急ピッチで進められた。

図 3.43 は 1983～1991 年における GIS の導入が活況を呈した時期における国内電力会社のガス絶縁開閉装置の年度別、電圧別の設置数の推移を示す。当時、定格電圧ならびに容量の増大と共に使用台数の伸びは



年度（年）	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10
合計	2,593	3,027	3,443	4,027	4,715	5,307	5,877	6,461	6,769	8,051	8,861	9,848	10,72	11,39	11,70	13,50	14,26	14,81	15,26	16,58	16,78	16,93	17,03	17,29	17,54	17,82	17,96	18,34
500kA	123	139	160	168	185	200	209	216	219	346	395	422	567	610	554	606	660	690	741	850	861	863	886	860	860	874	881	895
275～187kV	302	315	337	372	446	493	523	598	610	795	856	992	1,077	1,149	1,176	1,295	1,423	1,492	1,548	1,806	1,821	1,839	1,825	1,792	1,808	1,824	1,826	1,884
154～110kV	289	338	391	469	539	618	673	701	725	859	1,009	1,134	1,224	1,369	1,430	1,717	1,829	1,910	1,970	2,201	2,236	2,267	2,284	2,344	2,390	2,439	2,447	2,488
77～66kV	1,879	2,235	2,555	3,018	3,545	3,996	4,472	4,946	5,215	6,051	6,601	7,300	7,852	8,264	8,549	9,889	10,34	10,72	11,00	11,72	11,87	11,96	12,03	12,29	12,48	12,68	12,81	13,08

図 3.43　定格別 GIS 導入台数（1983-2010）（電気協同研究 [14),15)] を参照して作成）

著しいものがある。国内 GIS は 1960 年代前半から研究開発が開始され、わずか 10 年程度で世界初となる 550 kV GIS の運転が開始された。その良好な運転実績と電力需要の堅調な増加の中で、電力用開閉装置として基幹系統にまで急速に適用が拡大したことを読み取ることができる。

3.4.6 GIS の小型化と信頼性向上

GIS は以下のような形態の進化を通じて、変電所の小型化と信頼性向上を実現してきた。

- 相分離形：各相の機器および導体をそれぞれ独立のタンク内に収納した GIS
- 主母線三相一括相分離形：母線のみ三相分を一つのタンク内に収納した GIS
- 全三相一括形：三相の機器および導体すべてを一つのタンク内に収納した GIS

図 3.44 は GIS の発展段階を特徴づける形態の変遷を纏めたものである。初期 GIS は、各構成機器を各相独立の密閉タンクに収納した「相分離形」で構成され、次に、主母線導体三相分を同一タンクに収納した「主母線三相一括分離形」を経て、各構成機器三相分を同一タンクに収納した「全三相一括形」へと集積度を高めてきた。全三相一括形 GIS は 1975 年から 72/84 kV クラスが開発された。

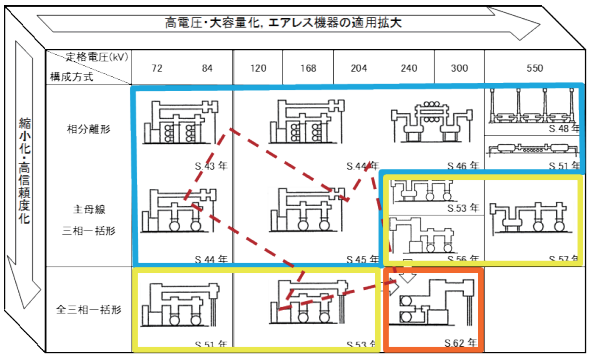


図 3.44　ガス絶縁開閉装置の形態変遷 [22)]

図 3.45 は 84/72 kV GIS の基本形態の変遷を示す。1969 年の製品化開始から主母線三相一括相分離形 GIS が適用された。その後、1976 年に全三相一括形 GIS が適用された。1980 年代に入ると全三相一括形 GIS は、CB·DS の操作装置が空気操作からばね操作となり、操作装置のコンプレッサの省略による保守点検の省力化が図られた。さらに 1980 年代半ば以降、GIS の小型化と信頼性向上を目的に、三相一括化に加え、複数機器を 1 つのタンクに収める「複合形 GIS」が製品化された。これにより、構造が簡素化され、部品点数が減り、信頼性がさらに向上した（図 3.46 参照）。



図 3.46　関西電力加古川変電所納三菱電機製 84 kV 全三相一括複合形 GIS（1988）（掲載許諾）

東芝は保守の簡素化要求に応え、単一圧力式・電動ばね操作遮断器を適用した 72 kV GIS を製品化し、1971 年に東京電力阿佐ヶ谷変電所に納入した。さらなる小型化要求に対応するため、単一圧力式・三相一括操作遮断器を用いた全三相一括形 72 kV GIS を開発し、1976 年に東京電力豊島変電所に納入した。また、油圧操作遮断器を採用した全三相一括形 GIS を開発した。さらに、遮断器タンク内に変流器（CT）や接地開閉器（ES）を収納した複合縮小形 GIS に加え、母線の前面配置、DS/ES の一体化、線路側の DS/ES と CT の複合化を実現した全三相一括複合形 72 kV GIS を開発、九州電力周船寺変電所、東北電力泉町変電所などへ納入した（図 3.47 参照）。

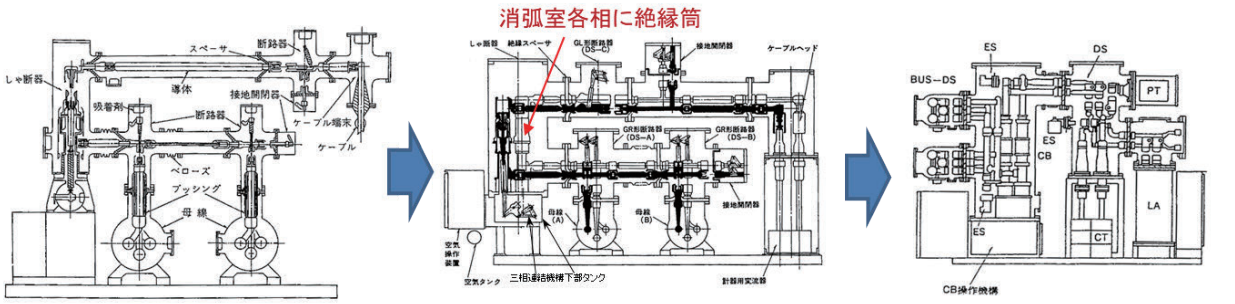


図 3.45　84/72 kV GIS の基本形態の変遷



図 3.47　九州電力周船寺変電所納東芝製三相一括複合形 72 kV GIS（1997）（掲載許諾）

図 3.48 は 300/240 kV GIS の基本形態の変遷を示す。1970 年代前半、300/240 kV GIS は主母線・回線ともに相分離構造の「完全相分離形」が採用された。その後、三相一括技術の進展により、1970 年代末には主母線の三相一括化が実現した（図 3.49 参照）。遮断器も 2 点切から 1 点切へと簡素化され、GIS の小型化と信頼性向上が進んだ。その後、三相一括技術と機器の複合化を活用し、240/300 kV クラスの「全三相一括形 GIS」が実用化され、三菱電機は、1988 年、300 kV 全三相一括形 GIS（単一圧力式一点切油圧操作 CB 適用）を中部電力南武平町変電所に納入した（図 3.50 参照）。なお、全三相一括形の場合、遮断器タンクなどが大型化し、一体輸送範囲が限定される。このため、主母線以外の機器は相分離形とし、各機器を小型化・高密度に配置して GIS 全体を小型化した GIS を 1990 年代末に開発した。これにより、制御盤まで含めた 300 kV GIS の 1 回線一体輸送が実現した。GIS の一体輸送が可能となることで、工場で組立・試験・品質確認された状態のまま、ガスを開放することなく現地へ輸送・据付できるため、現地での開放部位は最小限となり、信頼性が向上する。併せて、現地工事と試験工程が短縮され、変電所の建設期間短縮と建設コスト削減にも寄与する。図 3.51 は、一点切ばね操作遮断器（CB）を適用した 300 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS の適用例である。

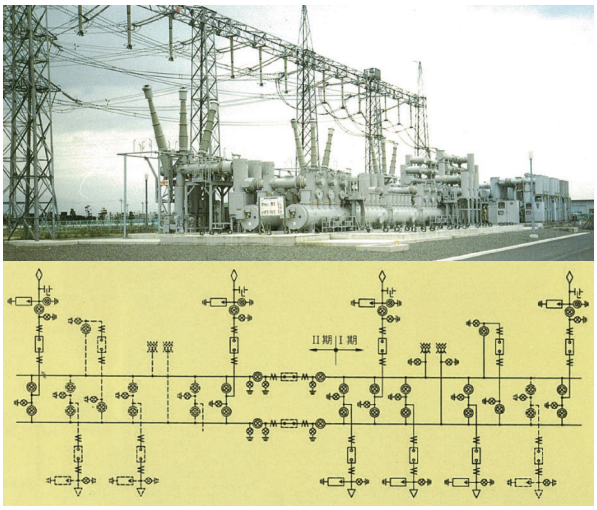


図 3.49　中部電力西尾張変電所納三菱電機製 300 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS（1983）（掲載許諾）



図 3.50　中部電力南武平町変電所納三菱電機製 300 kV 全三相一括形 Full-GIS（1988）（掲載許諾）



図 3.51　北海道電力泊原子力発電所納三菱電機製 300 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS 一点切ばね操作 CB 適用（2006）（掲載許諾）[23]

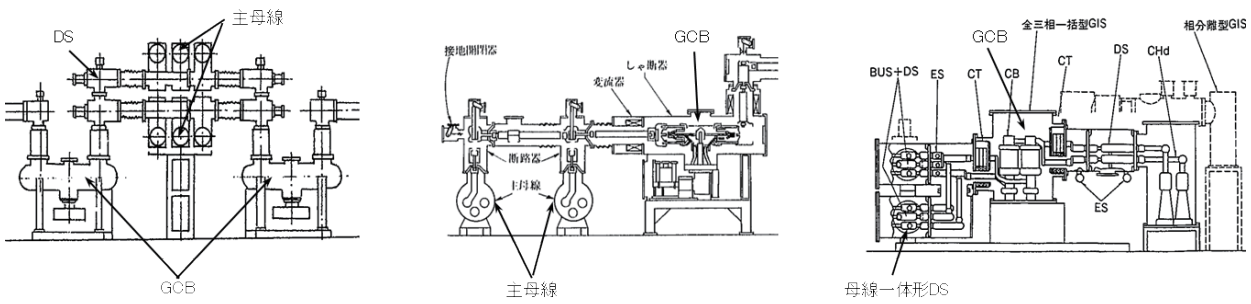


図 3.48　300/240 kV GIS の形態変遷

東京電力による275 kV系統の都心導入が本格化するのに対応し、東芝は1968年から300 kV GISの開発に着手した。1970年に、東京電力北多摩変電所において、300 kVガス絶縁母線および断路器を部分的に適用した。その後、二重圧力式CBを採用した300 kV相分離形GISを、1973年に東京電力花見川変電所、1974年に南多摩変電所に納入した。さらに1974年には、定格電流8000 A、300 kV-50 kA GISを新多摩変電所に納入した(図3.52参照)。その後、168-550 kV単一圧力式空気操作遮断器を開発し、これらをGISに適用。1976年に168 kV GISを東京電力鎌ヶ谷変電所へ、1977年に300 kV GISを東京電力北相模変電所のほか、中部電力、関西電力、九州電力へ納入した。また、1982年に中部電力新三河変電所へ納入したGISでは、変圧器との接続に三相一括形ガス絶縁母線を初めて適用した。



図3.52　東京電力新多摩変電所納東芝製300 kV 50 kA相分離形Full-GIS(1974)(掲載許諾)

300 kV GISのさらなる小型化を目指し、1977年から300 kV一点切CB開発に着手、1982年に一点切油圧操作CBを製品化した。この遮断器を適用した300 kV GISを、同年に東京電力花見川変電所に納入した(図3.53参照)。さらに、この一点切遮断器の技術を応用して550 kV二点切CBを開発し、1984年にはこの遮断器を採用した550 kV相分離形Full-GISを九州電力豊前変電所に納入した。



図3.53　東京電力花見川変電所納東芝製300 kV主母線三相一括相分離形Full-GIS(1982)(掲載許諾)

東芝は、1988年、自力併用他力消弧方式CB(「ハイブリッドパッファ」および「直列パッファ」と呼称)を適用した72 kV GISを、東京電力上野変電所に納入した。また、1990年、この消弧室を適用すると共に、母線側断路器の小型化、線路側断路器の複合化、断路器・接地開閉器の三相一括操作化により更に縮小化された300 kV GISを東京電力上野地下変電所に納入した。また300 kV全三相一括形GIS(従来消弧室適用)を開発、北海道電力西野変電所に1987年に納入した。更に1989年、自力併用消弧方式CBを適用した300 kV全三相一括形GISを、東京電力新坂戸変電所に納入した(図3.54参照)。

図3.55は、日立製作所製300 kV全三相一括形Full-GISの適用事例を示す[28]。



図3.54　東京電力新坂戸変電所納東芝製300 kV全三相一括形Full-GIS(1989)(掲載許諾)



図3.55　中部電力下広井変電所納日立製作所製300 kV全三相一括形Full-GIS(1992)(掲載許諾)

さらに、東芝は、遮断部は300 kV消弧室を4点直列に構成して、当時世界最高電圧800 kV GISを製品化、1985年に南アフリカ・エスコム電力公社へ納入した(図3.56参照)。



図3.56　南アフリカESKOM BETA変電所納東芝製800 kV GIS(1985)(東芝提供)

3.4.7　550 kV GIS の開発

1973 年、日本において系統電圧 500 kV 送電の開始が決定され、各電力会社で 500 kV 変電所の建設計画が進められた。東京電力は、新古河変電所および房総変電所に 550 kV 空気遮断器を導入し、500 kV 送電を開始した。

一方、関西電力は変電所のコンパクト化とコスト削減を目的として、500 kV 送電にガス絶縁複合開閉装置（GIS）を採用する方針を決定。1968 年に三菱電機と「550 kV ガス絶縁開閉装置開発研究会」を発足、1970～1971 年にかけて 550 kV GIS プロトタイプによる長期課電試験を実施した。1973 年に、母線を除く部分をガス絶縁化した 550 kV H-GIS（二重圧力式四点切 CB 適用）を関西電力猪名川変電所に導入し、翌 1974 年より 500 kV 送電を開始した。

また、東京電力は、1973 年に房総変電所にて、東芝製 550 kV GIS の実系統試験を開始した。このように、GIS の高電圧化は驚くべきスピードで進展し、84 kV GIS の導入からわずか数年で 550 kV GIS の実用化に至った。

図 3.57 は 1-1/2 遮断器方式による 550 kV H-GIS 配置図とその外観を示す。二重圧力方式の四点切遮断器は、横π形引出し方式で構成され、気中絶縁寸法で決まる相間方向に遮断部を配置して遮断部の組立性・保守性を向上させた。母線は従来の架空線を利用した。

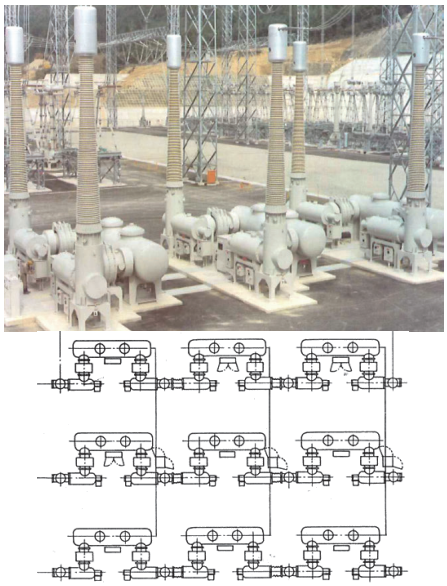


図 3.57　関西電力猪名川変電所納三菱電機製 550 kV 相分離形 H-GIS（1973）（掲載許諾）[21)]

塩害対策が必要となる海岸地区に開閉装置を設置する場合、気中母線方式では大きな建屋が必要となるため、母線を含む GIS 全体をガス絶縁化した Full-GIS の適用 が経済面で有利となる。この場合、複数の回線間を接続する主母線長さが数十メートルと長尺になるため、1974～76 年、関西電力奥多々良木変電所において、550 kV 長尺ガス絶縁母線を用いた長期課電試験（4000 A 通電）を実施した（図 3.58 参照）。良好な試験結果を踏まえ、1976 年に関西電力大飯原子力発電所に、550 kV Full-GIS を導入した。

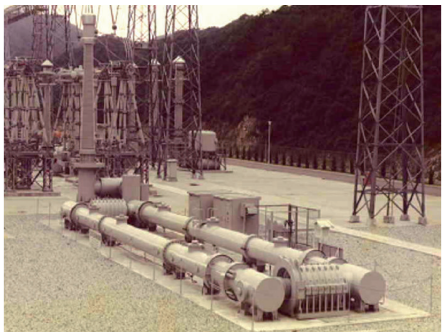


図 3.58　550 kV ガス絶縁母線の長期課電試験（1974-76）（掲載許諾）

図 3.59 は主母線もガス絶縁化した全ガス絶縁の二重母線 4 ブスタイ（母線連結用 CB 4 台）方式の大飯原子力発電所納 550 kV Full-GIS 外観を示す。なお、配置図は増設前の I 期工事における単母線構成である。主母線を平面配置とし、主母線の両側に二重圧力方式四点切遮断器や断路器などの機器を配置し、主母線方向の寸法を極小化した。また、据付性、耐震性、事故時対応性などを考慮し、GIS は全体的に低層化配置とした。これら 550 kV H-GIS、Full-GIS は関西電力と三菱電機の共同開発により、世界で初めて実用化された。この後、国内原子力発電所は Full-GIS が採用されるようになった。この GIS は、1976 年の I 期工事では単母線構成で運転開始し、1989 年に複母線（CB 8 台）増設が行われ、現在 CB 台数 14 台で運転される大規模の開閉所となっている。

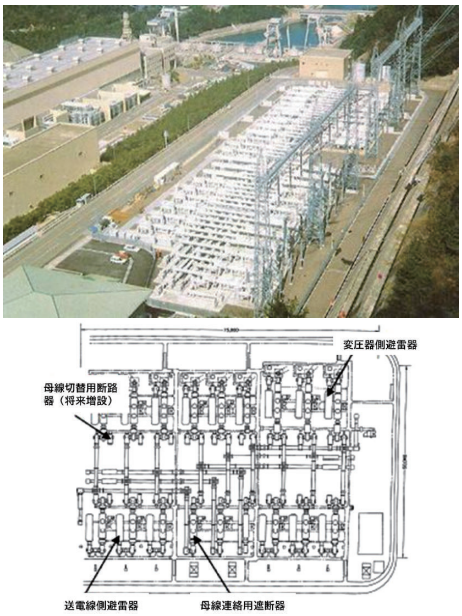


図 3.59　関西電力大飯原子力発電所納三菱電機製 550 kV 相分離形 Full-GIS（1989）（掲載許諾）[21)]

三菱電機は、1977 年、550 kV50 kA 単一圧力方式パッファ形四点切遮断器を適用した 550 kV GIS を関西電力奥吉野揚水発電所へ納入した（図 3.60 参照）。

現在、最新の遮断器に採用されている単一圧力方式のパッファ形が GIS に適用され、各社のパッファ形遮断器の性能が飛躍的に向上した。これにより、日本は世界有数の GIS 大国としての道を切り開くこととなった。

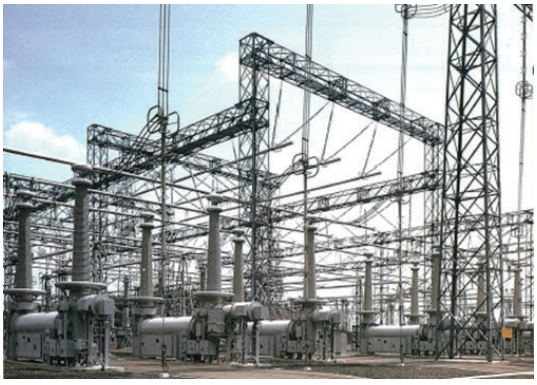


図 3.60　関西電力奥吉野揚水発電所納三菱製 550 kV H-GIS（1977）（掲載許諾）

東芝は、1970 年代、電力会社における 500 kV 送電計画に対応して、300 kV CB の遮断部を 2 個直列にした 550 kV 単一圧力式四点切 CB を開発した。この CB を適用した 550 kV H-GIS の長期通電試験を行い、実用性能を確認後、1978 年から 1981 年にかけて、東京電力新信濃変電所他、各電力会社に 63CB の 550 kV H-GIS を納入した（図 3.61 参照）。また、1981 年、四点切 CB を適用した 550 kV 相分離形 Full-GIS（GCB 横置き主母線上部配置構成）を東京電力新野田変電所に納入した（図 3.62 参照）。

また、550 kV 主母線三相一括相分離形 H-GIS 二点切 CB 適用は、1986 年、東京電力新いわき開閉所に納入した。更に、1988 年、550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS を、東京電力新京葉変電所に納入した。四点切 CB を適用した新野田変電所納入器に比べて、二点切 CB 適用 GIS は、据付面積で 74 %、設備体積は 40 %に縮小化された。



図 3.61　東京電力新信濃変電所納東芝製 550 kV H-GIS（1978）（掲載許諾）



図 3.62　東京電力新野田変電所納東芝製 550 kV 相分離形 Full-GIS（1981）（掲載許諾）

1973 年から 1991 年まで続いた安定経済成長期に電力需要も伸び、良好な運転実績と GIS の優れた利点から GIS の適用が著しく進んだ。この時期は、電力ユーザのニーズに応えるべく、GIS の三相一括化による小型化、定格電流・遮断電流増大による大容量化を実現するとともに、遮断器・避雷器など GIS 構成機器技術が大きく技術進歩し、GIS の小型化と性能・信頼性向上が図られた。

東芝は、300 kV 一点切 CB 技術を用いた 550 kV 二点切 CB を開発、1984 年、この CB を適用した 550 kV 相分離形 Full-GIS を 1984 年、九州電力豊前変電所に導入した。二点切 CB を適用した 550 kV H-GIS は、1986 年、東京電力新いわき開閉所に導入した。また、主母線三相一括化を実現した 550 kV GIS を 1988 年、東京電力新京葉変電所に導入した。この 550 kV GIS は、四点切 CB 適用の新野田変電所納 GIS に比べて据付面積を 74 %、体積を 40 %に縮小化を達成した。

高性能避雷器の開発により、定格 550 kV 機器に対する雷インパルス耐電圧試験値（LIWV）が 1800 kV から 1425 kV に低減されたため、550 kV 主母線三相一括形 GIS の母線は更に縮小化された。LIWV 低減の 550 kV 主母線三相一括形 Full-GIS（長尺の三相一括ガス母線適用）は、1991 年、東京電力西群馬開閉所に納入した（図 3.63 参照）。この GIS には長尺の三相一括ガス母線も適用された。また、図 3.64 は、日立製作所製 550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS の適用事例を示す。



図 3.63　東京電力西群馬開閉所納東芝製 550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS（1991）（掲載許諾）



図 3.64　中部電力岐阜開閉所納日立製作所製 550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS（1996）（掲載許諾）

三菱電機は、300 kV 主母線三相一括形 GIS の実用化に続き、1982 年、中部電力との共同研究により、550 kV GIS 用主母線三相一括相分離形（単一圧力式四点切 CB 適用）Full-GIS を実現した（図 3.65 参照）。

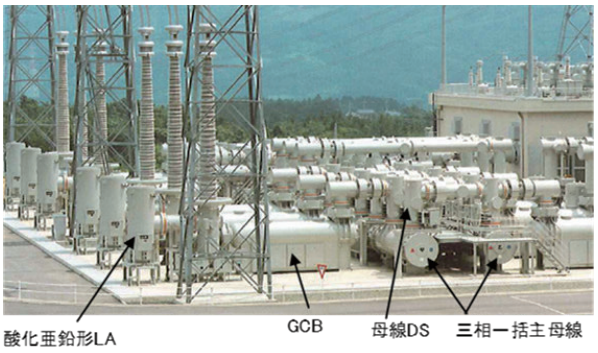


図 3.65　中部電力殿新三河変電所納三菱電機製 550 kV 主母線三相一括相分離形 GIS（1982）（掲載許諾）[22),29)]

次に、各社共、550 kV 一点切 GCB の開発を 1985 年頃より開始した。

東芝は、遮断器接点の開極速度を増加させるため、固定側接触子も移動させる、デュアルモーション機構を採用した。550 kV 一点切 CB の開発により、CB 縦形配置の GIS 設計が可能となり CB の設置スペーサが縮小され、また、三相一括主母線および単相母線の一層の縮小化を実現した。この 550 kV GIS 初号器は 1996 年、東京電力南いわき開閉所に導入した。さらに縮小化の利点を生かして、1998 年、世界初の 550 kV 地下変電所である東京電力新豊洲変電所に納入した。

三菱電機は、1995 年、中部電力南信変電所（変圧器回線側）へ単一圧力式一点切 CB を適用した、550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS を納入した（図 3.66 参照）。

東芝は、現地工事の大幅短縮や保守省力化の要求に応えるため、CB 横置き配置＋主母線上部配置構成を採用した、回線一体輸送が可能な 550 kV GIS を開発した。2018 年、4000 A GIS を東京電力新信濃変電所、2019 年、8000 A 送電線回線を東京電力新佐原変電所（単一圧力式一点切 CB 適用）に導入した（図 3.67 参照）。

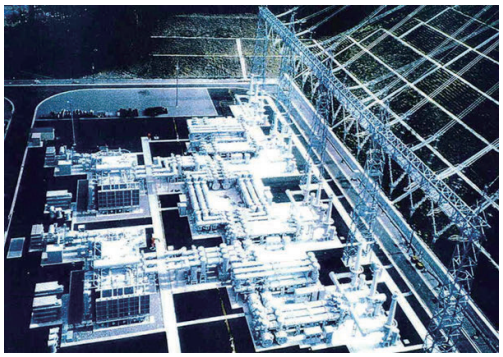


図 3.66　中部電力南信変電所納三菱電機製 550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS（1995）（掲載許諾）



図 3.67　東京電力新佐原変電所納東芝製 550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS（2019）（掲載許諾）

550 kV ガス絶縁開閉装置（GIS）においては、遮断点数が四点切から二点切、さらに一点切へと減少するにつれて、GIS のレイアウトはよりコンパクトになった。図は、三菱製 550 kV GIS における遮断点数の削減に伴うレイアウトの変遷を示すとともに、装置の軽量化（一点切は四点切の約 30 %）および SF_6 ガス使用量の削減（一点切は四点切の約 40 %）の程度を示している。各遮断点数の開発完了時期は、油圧操作四点切：1971 年、二点切：1982 年、一点切：1993 年である（図 3.68 参照）。

また、GIS のさらなる小型化および高信頼性、保守点検の省力化のニーズに対応するため、三菱電機は定格 550 kV 遮断器のばね操作化を進め、2013 年、二点切ばね操作遮断器およびポリマーブッシングを適用した縮小形 550 kV H-GIS を開発。2016 年には関西電力金剛変電所へ納入された。これにより、550 kV GIS の小型・軽量化、保守性・耐震性向上を実現した（図 3.69 参照）。

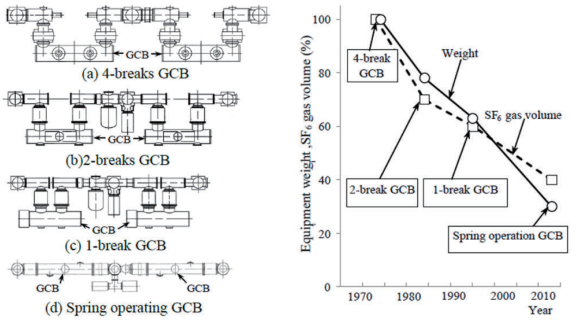


図 3.68　550 kV ガス絶縁開閉装置における遮断器点数の低減に伴う小型化[24)]



図 3.69　関西電力金剛変電所納三菱電機製 550 kV H-GIS ばね操作 CB 適用（2016）（掲載許諾）[24),30)]

ガス絶縁開閉装置で構成された変電所は、高い信頼性と安全性、コンパクトな設計、環境への配慮、保守点検の省力化、建設工事の簡素化など、数多くの利点を備える。日本はその導入実績において世界をリードしており、都市部の地下変電所や狭小地での設置など、豊富な実績を有する[31),32)]。

海外では、GIS が主として屋内に設置されているのに対して、日本では基本的に屋外設置が主流となっている。日本は、GIS の実用化が始まった 1970 年代から 1980 年代初頭にかけて設置された機器において、タンクフランジ部への雨水の侵入による錆の発生や、絶縁スペーサ部のボルト穴における氷結による割れに伴うガス漏洩といった不具合を経験してきた。これらの対策として、フランジ部のボルト穴や絶縁スペーサ部、フランジ接続面にガスシール剤を塗布・注入するなど、シール構造の改善を図ってきた。その結果、国内におけるガス漏れ率は 0.1 %／年以下と非常に低く抑えられており、海外で報告されている 2 %／年程度と比較して、一桁以上低い水準を達成している。

1990 年頃、バブル経済の崩壊により厳しい経済情勢を迎え、変電設備には大幅なコスト低減が求められる時代となった。さらに、1997 年の COP3（京都議定書の採択）以降、地球温暖化対策が国際的に注目されるようになり、特に海外では SF_6 代替ガスの研究や機器開発が活発に進められるなど、地球環境問題が重要なテーマとなってきた。

3.4.8　1100 kV GIS の開発

日本では、第一次オイルショックを契機に、1973 年、将来における電力の安定供給と効率化を目指した UHV（1100 kV）送電技術の検討が東京電力を中心にオールジャパン体制で開始された。関連機器メーカーは、UHV-GIS、変圧器の開発・実用化に着手した。

1100 kV 変電機器は、高電圧・大容量化に伴う機器の大型化や、山岳地への設置に伴うスペース・輸送制約に対応するため、設備の極力コンパクト化が求められた。また、雷撃時や遮断器の開閉動作時に発生する過電圧を低減するための高性能避雷器の開発をはじめとして、変圧器や開閉装置（GIS）など従来の 550 kV 機器にはない新技術・新方式の開発が必要とされた。

これらの技術開発の一環として、新榛名変電所構内の UHV 機器試験場に、実機相当の設備を実際の変電所とほぼ同じ条件で設置、1996 年から実運転状態を模擬した総合検証試験が開始された（図 3.70 参照）。この試験は、UHV 技術の確立に大きく貢献した。さらに、実証試験で得られた成果や知見は、550 kV 以下の変電機器の高性能化に反映され、信頼性の向上、設計の合理化、保全の高度化などに寄与し、送変電技術全体の発展に大きく貢献した。

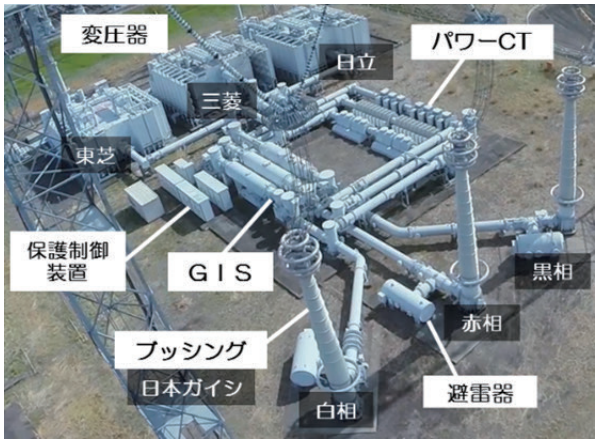


図 3.70　東京電力新榛名変電所構内 UHV 機器試験場（1996～現在）（掲載許諾）

UHV（系統電圧 1000 kV）送電に関する技術開発は、1978 年から 1982 年にかけて、電力中央研究所主催の「UHV 送電特別委員会」により開始された。この委員会では、絶縁仕様の選定、UHV 系統解析、送電線および機器開発に関する基本仕様が検討された。その後、東京電力を中心に、メーカー各社が定格電圧 1100 kV 機器の開発に着手、変圧器や GIS の要素モデルおよびプロトタイプの製作・検証が進められた。また、酸化亜鉛形避雷器（MOSA）の素子特性改善による高性能化は、UHV 機器の信頼性および経済性の向上において重要な課題であった。

UHV-GIS の開発においては、気中絶縁距離の抑制を目的に、500 kV 系統で採用されていた投入抵抗に加え、遮断時のサージ抑制のために抵抗遮断方式が採用された。さらに、UHV 固有の仕様として、高速接地開閉器、抵抗付断路器、防爆形ブッシングなどの開発も進められた。各社による機器単体の開発・検証

を経て、1996 年には、東京電力新榛名 500 kV 変電所構内に設置され UHV 機器試験場において、UHV 変圧器 1 バンクおよび GIS（ライン回線）1 ユニットによる実証試験が開始された。日本が GIS 開発において、世界をリードした時期と言える。

各国における UHV 送電計画の進展を受け、CIGRE（国際大電力システム会議）は IEC（国際電気標準会議）からの要請を受けて、UHV 送電および変電機器の国際標準化に関して、関連機器に対する UHV 仕様の調査を開始した。2006 年に、CIGRE 内に作業会 WG A3.22「800 kV を超える変電設備に対する技術仕様」が設立され、筆者が主査に就任した。最初、同 WG は全 CIGRE 研究会委員長を集めて組織され、UHV 送電における具体的な課題抽出に取り組んだ。その後、WG は各種変電機器の専門家を招集し、各国における UHV 実証試験や系統電圧 800 kV 以上の商用運転の経験、さらに EHV と比較した UHV 交流の特殊性に関する情報を収集、技術仕様の背景に関する詳細な調査を実施した。CIGRE WG A3.22 は、2008 年に技術報告書 TB 362、2011 年に TB 456 の 2 件を発行、さらに 2008 年、IEC TC17 に対して UHV 開閉装置に関する推奨規格を提案、IEC における規格標準化作業が開始された。その後、CIGRE の各研究会において UHV 関連の多数の作業会が設立され、IEC における標準化作業を支援した（表 3.6 参照）。

1980 年代には、ロシアにおいて 1200 kV 送電の運用経験（送電線長 2362 km）があったが、現在は気中絶縁設備の老朽化により 500 kV で運用されている。また、イタリアや米国では UHV 送電の実証試験が行われ、日本でも UHV 送電の実証運用が進められてきた。こうした各国の取り組みや経験を踏まえて、中国は 2009 年 1 月、1000 kV の UHV 交流送電を送電容量 1800 MW、送電線長 640 km で運転開始した。その後、UHV 送電プロジェクトを段階的に拡大し、2023 年までに交流 1000 kV 送電線を東西方向に 22 本、直流 ± 1100/800 kV 送電線を南北方向に 22 本整備し、世界最大規模の UHV 送電網を構築している。一方、日本の UHV 送電計画は、2011 年の東日本大震災以降、延期されている。

3.4.9　ガス絶縁開閉装置のまとめ

日本における GIS の高い技術・品質レベルは、これまで携わってきた技術者および関係者の努力と研鑽に加えて、電気事業者・研究機関・製造者間の連携と協力体制が、大きな役割を果たしてきたと考える。

2000 年以降、電力需要は横ばいとなり、電力自由化に伴い設備投資が大幅に減少する中、地球環境問題や経済のグローバル化と国際競争の激化への対応を余儀なくされている。さらに東日本大震災の影響を受けて変電機器の市場環境や電力ユーザを取り巻く環境が大きく変化してきた。このような状況の中でグローバル化を考慮し、国内外共用化を図った GIS 機種開発をベースに、据付性向上・保守省力化によりライフサイクルコスト低減および環境負荷低減を図った GIS の開発・実用化が進められている。

GIS の技術も成熟化し、これまでのコンパクト化・信頼性・経済性向上に加えて、高経年機器対策、環境負荷低減、レジリエンス（系統強靭性および災害時の復旧性向上）など多方面の課題への対応が求められている。加えて、1990 年代半ばから SF_6 ガスは温室効果ガスとして排出規制対象ガスとなり、日本では産学官が連携して、国際規格より厳しい漏洩基準を設けて、SF_6 ガス排出量の大幅な削減を行ってきた。2018 年頃より、欧米における F ガス対象規制が強化され、絶縁媒体として、SF_6 ガスを用いない電力機器の開発とその実系統試験が進められ、GIS を取り巻く環境は大きな転換期にきている。

なお、ガス遮断器およびガス絶縁開閉装置に関する技術情報については、電気学会の技術報告など、豊富な文献が発行されているため、適宜ご参照いただきたい。

表 3.6　CIGRE から IEC へ提出された UHV 変電機器の仕様調査報告書

WG A3.22	TB 362 “Technical requirements for substation equipment exceeding 800 kV AC”	December 2008
WG B3.22	TB 400 “Technical requirements for substation exceeding 800 kV”	December 2009
WG A3.22	TB 456 “Background of technical specifications for substation equipment exceeding 800 kV AC”	April 2011
WG D1.03	TB 519 “VFTO in Gas insulated UHV substations”	December 2012
WG B3.29	TB 562 “Field tests on UHV substation”	December 2013
WG C4.306	TB 542 “Insulation coordination for UHV AC systems”	June 2013
WG A3.28	TB 570 “Switching phenomena for UHV & EHV Equipment”	February 2014
WG A3.33	TB 693 “Experience with equipment for series and shunt compensation”	July 2017
WG A3.25	TB 696 “MOSA surge arresters for emerging system conditions”	August 2017
WG C4.26	TB 704 “Evaluation of lightning shielding analysis methods for EHV and UHV DC and AC lines”	October 2017
WG C4/A3.26	TB 921 “Low-residual-voltage surge arresters to suppress overvoltages in UHV AC System”	December 2023

参考文献

1) https://ja.wikipedia.org/wiki/BEP-JONES-Franklin_and_Electricity.jpg（Browsing : 2025-9/23）
2) CIGRE WG A3.25, “MO surge arresters - Metal oxide resistors and surge arresters for emerging system conditions”, CIGRE Technical Brochure 696（2017）
3) Arresterworks, “US History of Arresters 1890-1930”, http://arresterworks.com/history/（Browsing : 2025-9/23）
4) 内藤克人、「雷を吸う石」、夕刊フジ連載、匠の時代、No.491-506（1979）
5) 三谷和夫、「電力用ギャップレス避雷器」、電気新聞連載（1979-80）
6) M. Matsuoka, Nonohmic of Zinc Oxide Ceramics, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.10, No.6, pp. 736-746（1971）
7) 林正夫、小林三佐夫、「酸化亜鉛形避雷器の開発」電学論 B、128 巻 3 号、pp. 516-519（2008）
8) 「電力用酸化亜鉛形ギャップレス避雷器の歩み」、明電時報通巻 346 号、pp. 7-15（2015）
9) 「避雷器の技術展開で見る日本の電力技術」、電気学会技術報告第 1132 号（2008）
10) 小林賢司他、「変成器事業のあゆみ」、日新電機技報 Vol.62, No.1, pp. 97-104（2017）
11) 狩野敬治他、「当社の変成器事業の歩みとグローバル展開」、日新電機技報 Vol.56, No.2, pp. 3-16（2011）
12) H. Ito（editor）, “CIGRE Greenbook on Switching equipment”, Springer（2018）
13) 河村達雄、「SF_6 ガス絶縁開閉装置」、電気学会雑誌、第 97 巻、第 5 号、pp. 349-366（1977）
14) 「ガス絶縁変電技術」、電気協同研究、第 36 巻、第 3 号（1980）
15) 「ガス絶縁開閉装置の標準化」、電気協同研究、第 39 巻、第 6 号（1984）
16) 佐々木幸司他、「最近のガス絶縁開閉装置」、日立評論、Vol.65, No.5, pp. 29-36（1983）
17) 桑原宏他、「ガス絶縁開閉装置の現状と将来」、三菱電機技報、Vol.57, No.9, pp. 601-603（1983）
18) 鎌田功他、「ガス絶縁開閉装置の技術動向」、東芝レビュー、第 40 巻、第 10 号、pp. 881-884（1985）
19) The electrification of the Netherlands, Electrotechniek（Dutch magazine）（1935）
20) 150 kV air-blast switchgear, COQ technical manual（1961）
21) 笹森他、GIS の開発・製品適用の変遷に関する技術史（1）、電気学会論文誌 A、Vol.137, No.6, pp. 348-355（2017）
22) 笹森他、GIS の開発・製品適用の変遷に関する技術史（2）、電気学会論文誌 A、Vol.138, No.9, pp. 449-456（2018）
23) 笹森他、GIS の開発・製品適用の変遷に関する技術史（3）、電気学会論文誌 A、Vol.139, No.2, pp. 130-139（2019）
24) 笹森他、GIS の開発・製品適用の変遷に関する技術史（4）、電気学会論文誌 A、Vol.140, No.8, pp. 407-416（2020）
25) “GIS: State of the Art 2008”, CIGRE Technical Brochure 381（2009）
26) The history of Gas-Insulated Substations, Homepage of GE VERNOVA, https://library.grid.gevernova.com/articles/the-history-of-gas-insulated-substations,（Browsing : 2025-8/31）
27) H. Karrenbauer, et. al., “Design Criteria for Modern Compact SF_6 insulated Switchgear（GIS）for General Applications with Special Consideration of Reliability and Economy”, CIGRE Session Report 23-06（1986）
28) 西田功他、「ガス絶縁開閉装置の電力流通技術への対応」、日立評論、Vol.73, No.6, pp. 41-46（1991）
29) 石田秋男他、「中部電力新三河変電所 550 kV ガス絶縁開閉装置」、三菱電機技報、Vol.57, No.6, pp. 431-434（1983）
30) 中内慎一郎他、「ばね操作 GCB 適用新形 550 kV GIS の開発」、電気学会研究会資料、ED-12-77, SA-12-68, SP-12-20（2012）
31) 「変電設備の点検合理化」、電気協同研究、第 56 巻、第 2 号（2000）
32) 「ガス絶縁開閉装置の保全高度化、電気協同研究、第 70 巻、第 2 号（2014）

4 直流を切る

4.1 交流送電 対 直流送電

19 世紀末、直流送電を推進するトーマス・エジソンと、変圧器によって電圧の調整が容易な交流送電の利点を提唱したニコラ・テスラおよびジョージ・ウェスティングハウスとの間で、「電流戦争」と呼ばれる激しい論争が繰り広げられた。

表 4.1 は、交流送電と直流送電の技術比較を示す。交流送電は、発電した電気を変圧器で昇圧して送電し、需要地で家庭用電圧へ降圧することで送電による電力損失を低減できる。また、遠方における電圧低下の問題も解決できるため、交流送電が大規模・集中発電・遠距離送電方式の主流となり、世界各国で普及した。

表 4.1　交流送電と直流送電の技術比較

	交流送電	直流送電
発電	○交流発電	○直流発電
電圧変換	○交流変圧器	×不可（直交直変換は高価）
電流遮断	○交流遮断器（多地点送電）	△直流遮断器（二端子送電）
送電損失	◎長距離送電可	×損失大
系統安定化	△無効電力制御	○系統間の同期不要
送電線建設	○三相送電線	◎正負二本の送電線

しかしながら、離島などへの交流送電では、海底ケーブルの使用に伴う技術的課題が存在する。海底ケーブルは長距離かつ絶縁体で覆われた構造であるため、静電容量が大きくなり、交流送電では無効電流が増加し、有効電力の伝送効率が著しく低下する。さらに、ケーブルのインピーダンスによって電圧降下が生じ、受電端での系統電圧の維持が困難となる。これに対して、高圧直流（HVDC）送電は静電容量の影響を受けにくく、無効電流が発生しないため、海底ケーブルを用いた離島や国際間の電力連系の手段として再評価されている[1)]。

交流送電と直流送電の選択においては、送電線の敷設費用、変電所・交直変換所の建設費、そして送電ロスが比較検討される（図 4.1 参照）。一般に、交直変換所の建設費は交流変電所よりも高額であるが、送電距離が長くなるほど直流送電のコスト優位性が高まる。架空送電線の場合、600～800 km 以上では直流送電がコスト的に有利とされており、送電ケーブルの場合は 40～70 km 以上で直流送電の方が効率的とされる。特に海底ケーブルが 40 km を超える場合には、ほぼ例外なく直流送電方式が採用される。

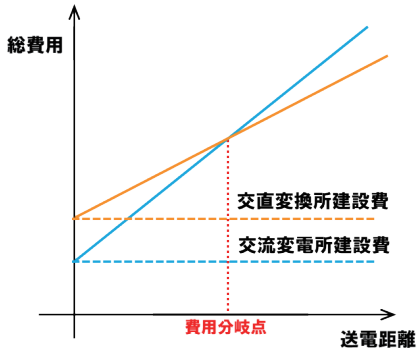


図 4.1　直流送電と交流送電の送電距離に対する建設費比較

直流送電の復権は、1954 年、ASEA 社によってスウェーデン本土とゴットランド島を結ぶ約 100 km の海底ケーブルが敷設されたことに始まる。このプロジェクトでは、送電電圧 100 kV、送電容量 20 MW の直流送電が実現された。当時は交直変換に適用できる半導体技術がまだ存在せず、大型の水銀整流器（Mercury Arc Rectifier）が採用された（図 4.2 参照）。

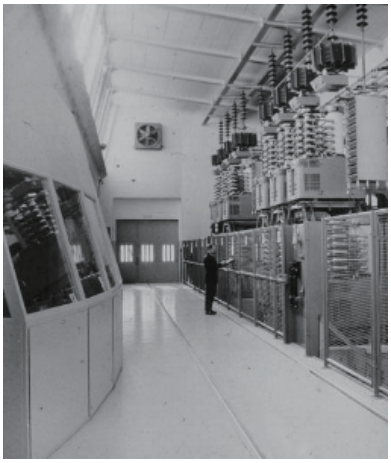


図 4.2　水銀整流器を用いたスウェーデン・ゴットランド島 100 kV-20 MW HVDC（掲載許諾）[2)]

1960 年代になると、水銀整流器に代わってサイリスタ整流器が実用化された。サイリスタを用いた直流送電は「他励式（LCC：Line Commutated Converter）」と呼ばれ、大容量送電を可能にした。ただし、サイリスタは自力でオフ（電流を切ることが）できないため、交流系統の電圧波形（ゼロクロス）を利用して消弧する必要があり、起動時に交流系統を必要とした。一方、1990 年代に登場した IGBT や GTO を用いた直流送電は「自励式（VSC：Voltage Source Converter）」と呼ばれ、素子自体でオン（電流を通電）／オフ（電流を遮断）制御が可能なため、交流系統がなくても動作でき

（ブラックスタートが可能）、より柔軟な運用を可能にした。また、送電方式も従来の「二端子送電」から、複数拠点を結ぶ「多端子送電」へと進化し、国際連系や再生可能エネルギーの導入拡大に対応できる技術が開発されている[3),4),5),6)]。

4.2 交直変換装置の開発・変遷

4.2.1 水銀整流器の誕生

水銀整流器（図 4.3 参照）は、1902 年、米国の発明家 Peter Cooper Hewitt が発明（US Patent 1314592A）し、1905 年には米国 GE 社および WH 社が製品化、1913 年にペンシルバニア州の鉄道に適用されている。真空に排気したガラスまたは鉄製容器内に封じ込んだ水銀を陰極とし、黒鉛の陽極との間に発生する水銀アーク放電を利用して交流を直流に変換する装置であり、半導体を適用したサイリスタ整流器が開発されるまで、電力分野、鉄道分野に限らず、あらゆる産業における交直変換装置の主流であった[7),8),9)]。

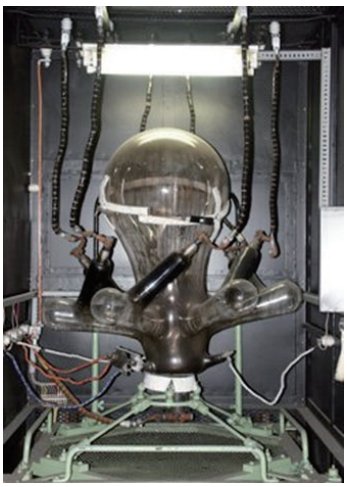


図 4.3　水銀整流器、川崎市「電車とバスの博物館保有」（掲載許諾）[10)]

図 4.3 に示す水銀整流器は、日本電池（現・GS ユアサ）によって製作され、真空に排気されたガラス管内に構成されていた。水銀アークの整流作用を利用して交流を直流に変換する装置である。交流入力電圧：300 V、直流出力電圧：600 V、直流側電流：600 A × 2。東京横浜電鉄（現・東急）の元住吉変電所で 1927 年から 1955 年まで運用された。形状から「たこ」と呼ばれていた。

1920 年頃、欧州で鉄製水銀整流器の研究が始まり、日本でも調査を開始した。東京電燈（現・東京電力）はスイス BBC 社製を輸入したが、関東大震災で焼失した。その残骸を芝浦製作所（現・東芝）が研究し、1927 年に国産初の 600 V-300 kW 鉄製水銀整流器（図 4.4 参照）を開発した。この整流器は 6 個の陽極と冷却機構を備えていた。芝浦製作所は 1927 年、鉄製水銀整流器を盛岡電灯花巻温泉電軌鉄道の花巻変電所に納入した。1930 年には鉄道省が水銀整流器の採用を決定し、1500 V-1000 kW の整流器を納入した。さらに、当時の東京地下鉄道（株）から日本初の地下変電所用水銀整流器を受注した[11),12)]。

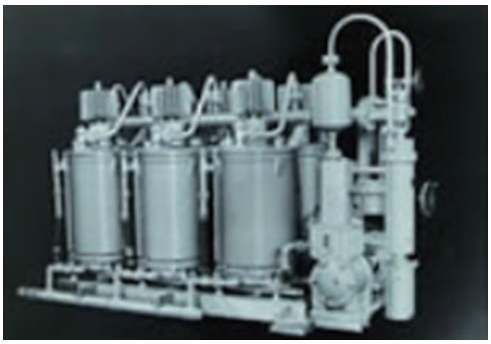


図 4.4　東芝製鉄製水銀整流器（掲載許諾）[12)]

4.2.2 シリコンサイリスタ整流器の開発

1957 年、米国 GE 社が世界初のシリコン制御整流器（SCR：Silicon Controlled Rectifier）を開発した（US Patent 3040270, 1962 年登録）[13)]。SCR は後に「サイリスタ」と呼ばれるようになり、IEEE において 1963 年に正式名称となった。1960 年代、サイリスタ整流器が日本を含む世界各国で実用化・量産され、電力系統、鉄道設備、工場など大電力用途で水銀整流器からの置き換えが急速に進んだ。サイリスタはオン（ON）／オフ（OFF）制御が容易で、制御電力が小さく大電力の制御を可能にする。1970 年代になると、サイリスタ素子の高耐圧化・大電流化が進み、数千 A・数千 V クラスの素子が実用化され、HVDC（高圧直流送電）や大規模な電力変換設備にも適用されるようになった。サイリスタ整流器による交直変換は、オン・オフ制御によって「交流」の正または負の一方向だけを通すことで「直流」を作る。逆に直交変換では、複数のサイリスタを組み合わせて、正の「直流」と負の「直流」が流れるタイミングを調整し「交流」を作り出す。

4.2.3 ゲートターンオフサイリスタ（GTO：Gate Turn-Off Thyristor）変換装置の開発

1970 年代初頭、ゲートターンオフサイリスタ（GTO）は、従来のサイリスタ（SCR）では困難だったゲート信号によるターンオフ（消弧）を可能にする素子として開発が進められた。1977 年には、日立製作所が世界で初めて実用化に成功した[14)]。これにより、

外部回路を用いずに大容量電力の ON/OFF 制御が可能となった。1980 年代から 1990 年代にかけて、GTO は大容量インバータやコンバータ、特に鉄道車両（新幹線など）や電力用変換装置（DC/AC 変換装置）に広く採用された（図 4.5～4.7 参照）。GTO による交直・直交変換の基本原理は、サイリスタ整流器とほぼ同様である。



図 4.5　電源開発北本連系函館変換所 GTO サイリスタ変換装置（1979）（掲載許諾）[15)]

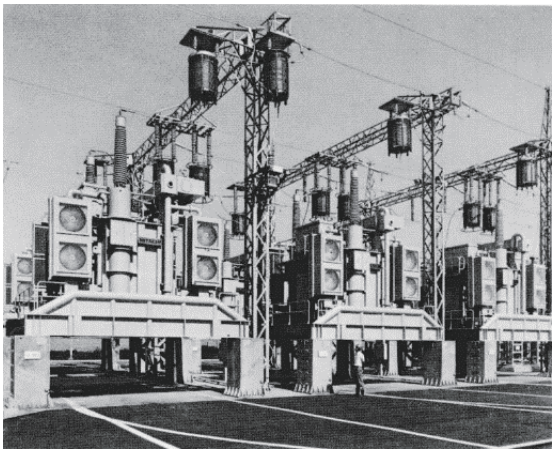


図 4.6　東京電力新信濃周波数変換所 GTO サイリスタ変換装置（1977）（掲載許諾）[16)]



図 4.7　関西電力紀北変換所 GTO サイリスタ変換装置（2000）（8 kV-3500A 光トリガー式サイリスタ素子を採用）（掲載許諾）[17)]

4.2.4　絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistor）変換装置の開発

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistor）は、MOSFET のゲート電圧によるスイッチング機能と、BJT（バイポーラ接合トランジスタ）の電流増幅特性を融合した半導体素子であり、高電圧・大電流の制御に適している。

1968 年に三菱電機の山上・赤桐らが IGBT の基本構造に関する特許を出願（特許公報昭 47-21739）。1982 年には米 GE 社の Becke と Wheatley が IGBT の基本原理を論文で発表（US Patent 4364073）[18)]、1984 年には東芝の中川らが現在の IGBT の基本技術を確立した[19)]。2000 年以降、IGBT は電力用途で広く使われるようになり、EV、鉄道、再生可能エネルギー分野での採用が拡大している。また、近年は高耐圧・高温動作・低損失に優れる SiC（炭化ケイ素）や、高速スイッチングに適した GaN（窒化ガリウム）などの新材料を用いた大容量・高性能 IGBT 素子の開発も進んでいる[20),21)]。



図 4.8　新北本連系自励式 IGBT 変換装置（2019）（掲載許諾）[22)]

4.3　日本の直流送電および周波数変換設備

国内における直流送電は、北海道本州間直流連系（北本連系）と本州四国間直流連系（紀伊水道連系）の 2 箇所に設置されている（図 4.9、表 4.2 参照）。

北本連系は、電源開発送変電が保有する国内初の本格的な直流送電設備であり、1979 年に運用を開始した。本州側の上北変換所と北海道側の函館変換所を結び、送電距離は 167 km（うち海底ケーブル 43 km）で構成され、系統電圧は ± 250 kV、送電容量は 600 MW である。

これに加え、北海道電力が保有する新北本連系設備が 2019 年に運用を開始した。新設備ではモジュラー

マルチレベルコンバータ（MMC：Modular Multilevel Converter）方式の自励式交直変換装置を採用し、送電距離は 122 km（架空線 98 km、ケーブル 24 km）で構成され、青函トンネル内に地中ケーブルが敷設されている。系統電圧は ± 250 kV、送電容量は 300 MW である。さらに、2028 年には新々北本連系設備として送電容量を 300 MW 増強する計画があり、北本直流連系容量は合計で 1200 MW に達する予定である[23]。

紀伊水道連系は、電源開発送変配電、関西電力送配電、四国電力送配電の三社が共同で保有する直流送電設備であり、2000 年に運開した。本州側の紀北変換所と四国側の阿南変換所を結び、送電距離は約 100 km（うち海底ケーブルは約 46.5 km）で構成されている。

本設備は、系統電圧 ± 250 kV、送電容量 1400 MW を有し、設計上は ± 500 kV-2800 MW まで拡張可能な構造となっており、世界最大級の直流送電設備である[24]。

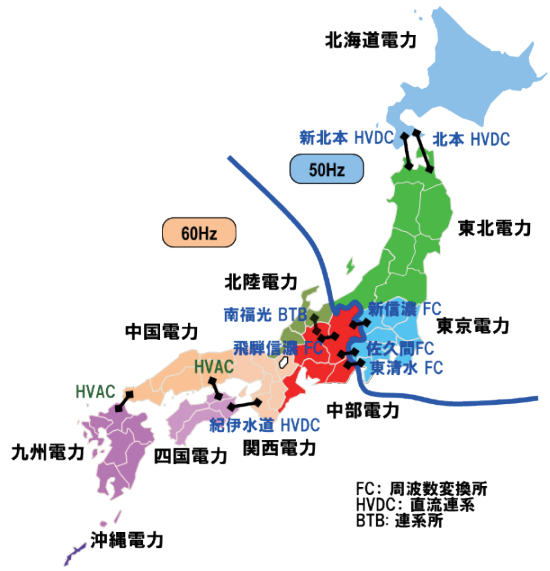


図 4.9　国内の直流連系と周波数変換所

また、日本では、東日本が 50 Hz、西日本が 60 Hz という異なる商用周波数を採用しているため、地域間で電力を融通するには周波数変換が不可欠である。これを実現するために、送電線長 0 km の交直変換・直交変換技術を用いた設備が複数設置されている。

- 佐久間周波数変換所（静岡県、電源開保有）、1965 年運開（国内初）
- 新信濃周波数変換所（長野県、東京電力保有）、1977 年 1 号機、1992 年 2 号機運開
- 東清水周波数変換所（静岡県、中部電力保有）、2006 年仮運用、2013 年本格運用
- 飛騨信濃周波数変換設備（岐阜県～長野県、東京電力、中部電力保有）、2021 年運開
- 南福光連系所（富山県、中部電力、北陸電力保有）、1999 年運開

表 4.2　国内直流送電、周波数変換所（*増強計画有）

名称	運転開始［年］	送電電圧［kV］	送電容量［MW］	送電線長［km］
北海道本州間連系設備	1979	± 250	600	167
新北海道本州間連系設備（自励式）	2019	± 250	300*	122
紀伊水道直流連系設備	2000	± 250	1400	100
佐久間周波数変換所	1965	125	300*	—
新信濃変電所周波数変換設備	1977	± 125	600	—
飛騨信濃周波数変換設備	2021	± 200	900	90
東清水変電所周半数変換設備	2006	125	300*	—
南福光非同期連系設備	1999	125	300	—

4.4　直流送電システムの構成

直流送電システムの代表的な回路構成例を説明する[25]。

4.4.1　単極一回線大地帰路方式（図 4.10 参照）

単極一回線構成の最も単純な直流送電システム、建設費は最小。運転時には常に大地電流が流れる。故障時は送電停止となるため、大容量系統への適用例が少ない。世界初のゴットランド直流送電システムの主回路構成は、大地帰線を用いる非対称単極一回線送電であった。

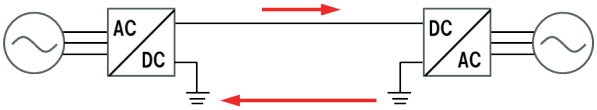


図 4.10　単極一回線大地帰路方式

4.4.2　単極一回線導体帰路方式（図 4.11 参照）

単極一回線構成の直流送電システム、帰線を有するため、帰路の電流も導体を流れ、大地電流による腐食や電磁干渉、地絡事故のリスクが低減する。



図 4.11　単極一回線導体帰路方式

4.4.3　双極一回線中性点接地方式（図 4.12 参照）

双極一回線構成（正極と負極が独立した導体による）の直流送電システム、双極がバランス運転している場合、大地電流は流れない。一回線に故障が発生した際には、片極を停止することで、単極一回線の送電を継続することができる。片極運転時は大地電流が流れる。

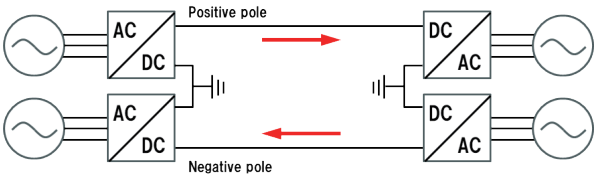


図 4.12　双極一回線中性点接地方式

4.4.4　双極一回線中性線帰路方式（図 4.13 参照）

双極一回線構成（正極と負極が独立した導体による）の直流送電システム、双極がバランス運転している場合、大地電流は流れない。一回線に故障が発生した際には、片極を停止することで、単極一回線の送電を継続することができる。片極運転時は中戦線に帰路電流が流れる。

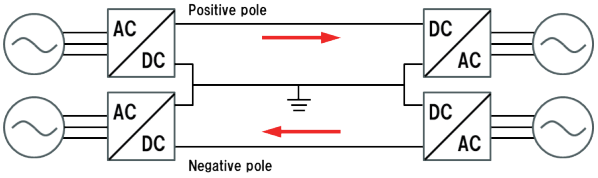


図 4.13　双極一回線中性線帰路方式

4.4.5　双極複数回線中性点接地方式（図 4.14 参照）

正・負極が二組（複数組）の変換器を有する双極二回線構成の HVDC 送電系統、双極がバランス運転している場合、大地電流は流れない。一回線に故障が発生した際には、1/4 極を停止することで、健全回線の送電を継続することができる。中性線を有する構成も可能である。

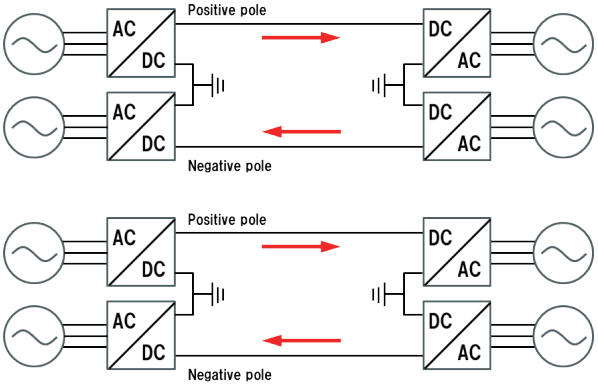


図 4.14　双極複数回線中性点接地方式

4.4.6　双極複数回線中性線帰路方式（図 4.15 参照）

複数群の変換器を有する双極一回線構成の直流送電システム、双極がバランス運転している場合、中性線に電流は流れない。一回線に故障が発生した際には、1/4 極を停止することで、健全回線の送電を継続することができる。双極構成の中には、直流電圧が ± 1100 kV、送電容量が 12 GW に至るプロジェクトがある。3 GW を超過する直流送電システムでは、片極の事故時に片極の全容量を喪失すると交流系統に与える影響が大きくなるため、極を直列する複数の群構成とする事例がある。

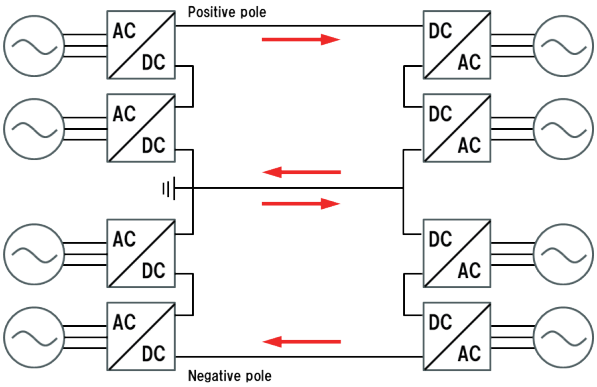


図 4.15　双極複数回線中性線帰路方式

4.4.7　多端子 HVDC 送電システム

2000 年以降、風力や水力などの再生可能エネルギーの導入が進み、遠隔地からの電力送電ニーズが高まったことで、直流送電が急速に普及した。直流送電は交流送電に比べて長距離でも損失が少なく、系統の安定性にも優れる。低損失で長距離・大容量の送電が可能な他励式直流送電は、定格電圧 ± DC800 kV・送電容量 8 GW まで実現しており、中国では ± 1,100 kV・12 GW の送電も実現している[26]。

一方、フレキシブルな系統運用に対応できる自励式直流送電は、2015 年に定格電圧 ± DC320 kV・送電容量 800 MW のプロジェクトが運開し、現在では ± DC525 kV・送電容量 2.6 GW の送電が可能となっている（図 4.16 参照）。さらに、中国では高圧直流遮断器を用いた自励式多端子直流送電システムの実証試験も開始されている。

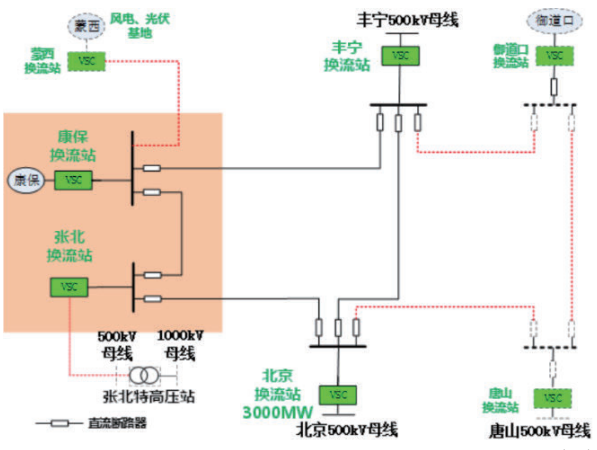


図 4.16　中国河北省張北地区 ± 500 kV 四端子自励式直流送電[26),27)]

欧州では「20-20-20 目標（温室効果ガス排出量：1990 年比 20％削減、再生可能エネルギー利用比率：20 ％へ引き上げ、エネルギー効率：20 ％向上）」に基づき、温室効果ガスの削減や再生可能エネルギーの導入が進められてきた。技術革新により風力発電のコストが低下し、ドイツ、スペイン、イタリアなどでは再エネ比率がすでに 20 ％を超えている。2018 年に目標が引き上げられ、2030 年までに温室効果ガスを 1990 年比で 40 ％削減、再エネ比率を 32％（発電構成では約 50 ％）と設定された。これに伴い、国際連系を視野に入れた多端子 HVDC 送電システムの計画が進行中である。特に英国やドイツでは、洋上風力の拡大と電力価格の抑制を目的に、安価な電力を国際的に融通できる HVDC 電力網の整備中で、欧州全体では、DC 525 kV/320 kV 送電の標準化が進められている（図 4.17、18 参照）。



図 4.17　欧州における HVDC 送電（掲載許諾）[28]

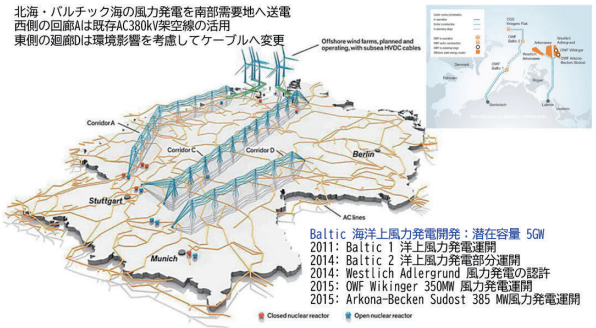


図 4.18　ドイツ洋上風力発電と HVDC プロジェクト[29]

4.5　直流送電に適用される直流開閉装置

表 4.3 に HVDC 送電システムに適用される代表的な開閉装置を示す。

二端子 HVDC 送電システムでは、送電停止時に直流遮断器を使用せず、まず変換器により電流を遮断し、その後断路器を開いて回路を切り離す。一方、多端子 HVDC 送電システムでは、各送電区間の両端に遮断器を設置し、他の回線を運転したまま対象区間の電流を遮断器で停止する。その後、断路器を開いて当該区間を切り離す。

表 4.3　HVDC 送電に適用される代表的な開閉装置

直流開閉装置	適用回路	用途	動作条件
直流断路器、接地開閉器	直流送電線、変換所主回路等	運転停止時における回路切り離し・接地用途	無電圧で動作
バイパススイッチ	直流主回路または変換器と並列に接続	変換所の直流回路の一部停止、追加起動用途	運用・通電中
帰線電流転流開閉装置	架空帰線送電線	帰線事故除去	帰線保護装置動作
直流遮断器	多端子直流送電本線送電線	線路事故除去	線路保護装置動作

4.5.1　直流用断路器および接地開閉器の適用事例

直流用断路器および接地開閉器は、無課電かつ通電停止時に動作するため、高電圧交流設備で使用されている単相用断路器および接地開閉器が適用されている。なお、気中絶縁方式（碍子・碍管使用）においては、直流回路では分圧が抵抗成分（表面リーク電流）のみによって決まるため、塩分付着量（ESDD：Equivalent Salt Deposit Density）による絶縁性能への影響が大きくなる。このため、交流用途と比較して絶縁距離を約 20 ％長く設定する事例が多い。図 4.19 は、紀伊直流連系の直流送電システムにおける単極図と関連する主な断路器（DS）および接地開閉器（ES）を示す。一般に、直流送電システムにおける DS と ES の役割は、交流システムで使用される DS と ES と類似しているが、一部の機器は用途に応じて追加の責務が課される。

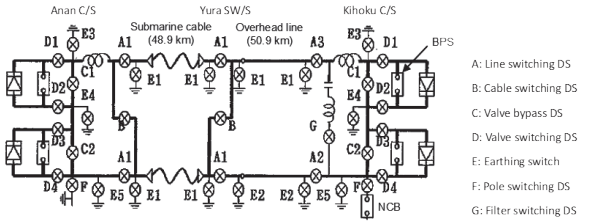


図 4.19　双極一回線中性線帰路方式の紀北直流送電における断路器の配置[26]

- グループ A：この DS は、比較的大きな容量（約 20 μF）を有する海底ケーブルに残留する電荷によって発生する線路放電電流を遮断する必要がある。コンバーター停止後、線路に誘導される残留電圧は、両端の変換所に設置された変換器のスナバー回路を介して接地へ放電される。放電の時間定数は約 40 秒であり、これは約 3 分間の放電時

間に相当する。放電電流は、残留電圧 125 kV と変換器のスナバー回路における抵抗値に基づいて、0.1 A に設定されている

- グループ B：この DS は通常、故障した送電線を健全な中性線に切り替えるために使用される。システムが完全に停止した後、送電線として一時的または永久的に中性線を使用する用途で使われる。グループ A の DS と基本的に同じ仕様が要求される。
- グループ C：この DS は、変換器バンクと並列接続されたバイパススイッチ（BPS：Bypass Switch）に DS から定格負荷電流（2800 A）を転流し、変換器ユニットを再起動する用途で使われる。
- グループ D：この DS は、変換器ユニットが停止した際に、変換器バンクの充電電流を遮断する用途で使われる。変換器が停止しても、変換器バンクの残留容量を介してリップル電流が流れる。解析結果によれば、変換器側の残留直流電圧と、リップル成分を含むライン側の直流電圧との電位差によって生じる回復電圧は、70 kV 未満である。

4.5.2　バイパススイッチ（BPS：Bypass Switch）の適用事例

BPS は、双極構成の直流送電システムにおいて、双極運転から一方の極を停止する場合や、片極運転から双極運転に復帰する場合に使用される。また、双極複数回線の直流送電システムでは、各極が 2 群の変換装置でカスケード接続されている構成から 1 群への切り替え、あるいは 1 群から 2 群運転への復帰時にも使用される。佐久間周波数変換所は、当初リジッドバイポーラ方式の直流送電システムで構成されており、正極・負極が完全に絶縁され、中性点が存在しないため、片極が故障してももう一方の極で運転を継続できる構成であった。

図 4.20 は、水銀整流器を使用していた旧変換所の単線結線図と、通常時における Pole#1（極 1）および Pole#2（極 2）の双極運転状態を示している。この状態では、両極の BPS は開、BPS は停止中である。Pole#2 のみを停止して Pole#1 の運転を継続する場合は、まず Pole#2 の BPS を起動し、変換器を停止した後、BPS（L-33）を閉じる。その後バイパスバルブを停止すれば、全電流が BPS に流れ、Pole#1 単独運転に移行する。逆に、Pole#1 単独運転から双極運転に復帰するには、Pole#2 の BPS を起動し、BPS（L-33）を開く。電流がバイパスバルブに転流した後、Pole#2 の変換器を起動し、バイパスバルブを停止すれば双極運転に戻る。

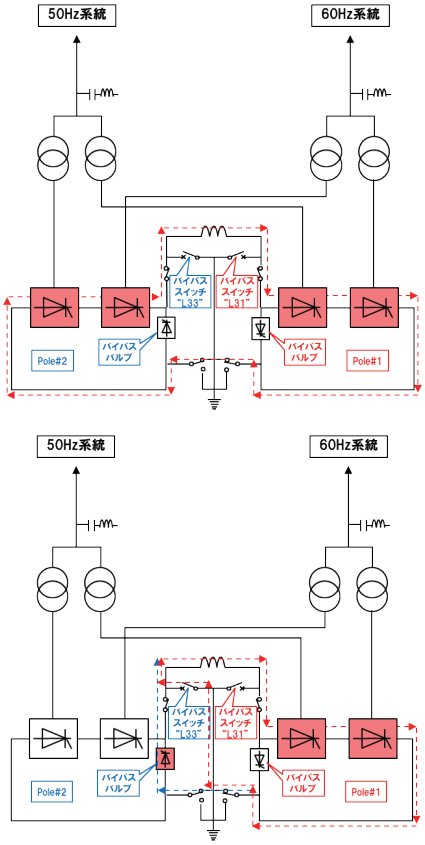


図 4.20　BPS 動作による双極運転状態（上）から片極運転（下）への移行過程

図 4.21 は、佐久間周波数変換所で使用していた BPS の動作時を撮影したものである。BPS へ転流する時には、極間において大きな直流アークが確認できる。

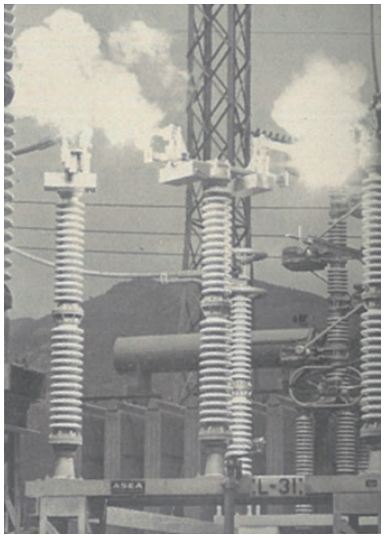


図 4.21　佐久間周波数変換所の BPS 動作状況、電源開発提供（掲載許諾）

直流送電容量が系統に対して大きい場合、事故や保守時の影響を抑えるため、双極設備の各極に複数群の変換装置をカスケード接続する構成が採用される。この構成では、各群の個別停止・起動を可能にするため、

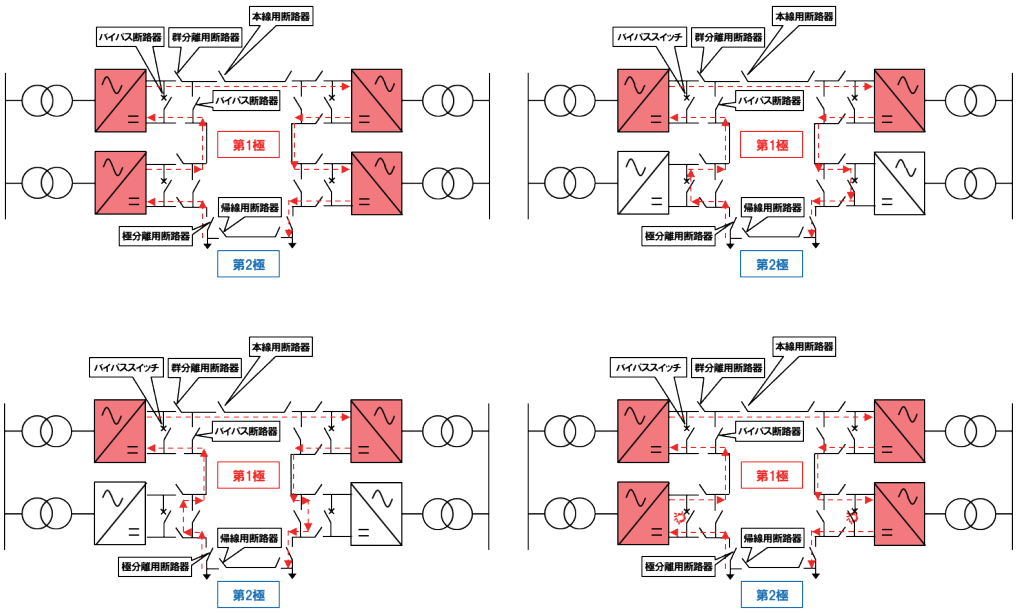


図 4.22　双極運転から片極停止、片極運転から双極運転への切り替え動作過程

並列に BPS と DS が設置されている。通常運転時は群分離用 DS が閉、BPS とバイパス DS は開状態である。群を停止する際は、BPS を閉じて変換器を停止し、電流を BPS に転流させた後、バイパス DS を閉じて電流を DS 側に転流し、群分離用 DS を開く。起動時は、まず、群分離用 DS を閉じ、BPS を閉じて変換器を充電後、BPS を開くとアークが発生し、アーク電圧が変換器の点弧電圧に達すると導通状態となり、電流が変換器に転流して起動が完了する（図 4.22 参照）。図 4.21 に示す定格 DC250 kV-1200 A の BPS は、交流用空気遮断器の 1 相分を改造して製造された。

4.5.3　帰線電流転流開閉装置（MRTB）の適用事例

帰線電流転流開閉装置は、国内では MRTB（Metallic Return Transfer Breaker）と呼ばれてきたが、IEC では MRTS（Metallic Return Transfer Switch）と定義されている。MRTB は導体帰路方式の HVDC に適用され、帰線事故時でも変換装置の運転を継続しながら事故除去が可能である。第 1 極の単極運転中に帰線架空線へ雷撃があると、地絡が継続して碍子が破損する恐れがある。対策としては、①変換器を一時停止して二次アーク消弧後に再起動する方法（ただし潮流が一時停止する）、② MRTB を投入してアーク電流をバイパスし、消弧後に電流を通常回路へ戻す方法がある。

北海道・本州間連系の第Ⅰ期・第Ⅱ期では、MRTB として交流用空気遮断器の 1 相分 2 台を改造した装置が採用された（図 4.23 参照）。この MRTB は電力中央研究所の協力のもと日立製作所が開発したもので、帰路導体の非接地端に設置される。定常運転時は開放状態だが、帰線事故時に投入されて帰路導体の両端を接地状態にし、地絡アークを消滅させる。その後、MRTB を開放し、並列に配置されたコンデンサとリアクトルで電流（1200 A）を自励振動させて電流零点を形成し、電流を帰線に転流して定常運転に復帰する。なお、直流の電流零点形成方法については後述する。

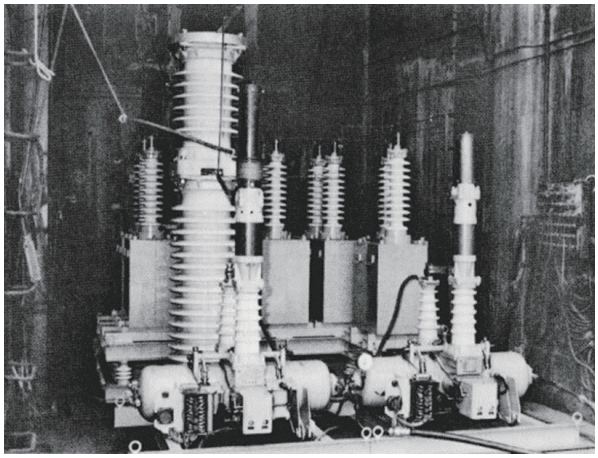


図 4.23　北本連系納日立製作所製 MRTB（1979）（掲載許諾）[30)]

4.6　直流遮断器（DC-CB）の開発

多端子直流送電系統では、送電線の一部に故障が発生しても、他の健全な系統を停止させることなく運転を継続する必要がある。このため、直流遮断器には故障を迅速に切り離す性能が求められる。HVDC 系統は AC 系統に比べて回路インピーダンスが低く、地絡等の事故による電圧低下が系統全体に速やかに広がる

傾向がある。遮断器の動作時間は、系統構成、変換器の種類、送電容量、DC リアクトルやケーブルのインピーダンスなどによって決定される。

多端子 HVDC 系統向けには、さまざまな方式の直流遮断器が提案されており、事故時の波及防止や通常時の損失低減が重要な課題である。ただし、実用化された事例は中国の実系統試験のみである。洋上風力の中継基地や都市部の地下変電所では、設備の小型化が求められている。日本においては、2000 年に世界初の 500 kV DC-GIS が実用化され、2019 年には新北海道・本州 HVDC 連系に 250 kV の DC-GIS が導入された。今後、HVDC 系統に使用される直流開閉装置のさらなる展開が期待される。

交流電流の遮断は、開極後に電極間に発生するアークを高速気流によって冷却するか（ガス遮断器）、磁場によって真空中に拡散させる（真空遮断器）ことで、アークへのエネルギー供給がなくなる周期的な電流の零点において消弧する。一方、直流電流は周期的な電流の零点が存在しないため、交流遮断器で直流電流を遮断するには人工的に電流の零点を作り出す必要がある。図 4.24 は、直流系統における電流遮断を可能にするため、強制的に電流零点を生成する代表的な 4 方式を示している。

4.6.1　アーク電圧限流方式

直流系統に接続された気中遮断器を開極すると、電極間にアークが発生する。このアークは約 100 V/mm の電圧を持ち、例えば 10 mm の長さであれば約 1 kV のアーク電圧となる。アーク電圧は系統電圧と逆向きに働き、電流を制限する効果があるため、極間のアークが伸びるとアーク電圧が上昇し、電流が徐々に減少する。最終的にアーク電圧が系統電圧を超えると電流零点が形成され、電流が遮断される。このアーク電圧限流方式では、磁界を加えてアークを伸ばすことで、より高いアーク電圧を得て、効果的に電流を遮断する工夫がされている。この技術は 1900 年代初頭に米国で開発され、鉄道用の直流遮断器として使用された。遮断の仕組みは現在とほぼ同じであり、アークを消弧室に移動させて引き伸ばし、電流を遮断している（図 4.25 参照）。

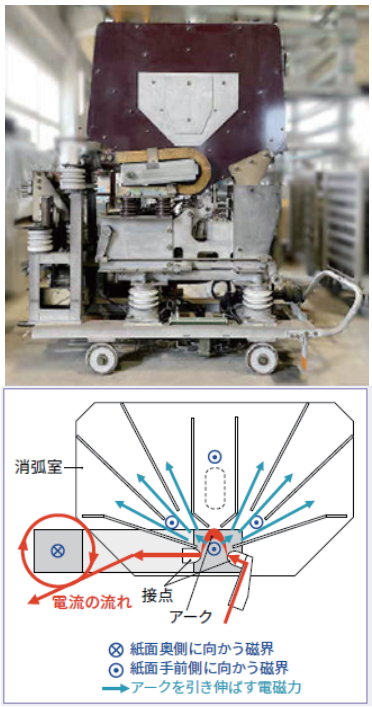


図 4.25　鉄道用直流気中遮断器とその構造（掲載許諾）[32)]

三菱電機は 2017 年に、DC 1500/700 V に対応する直流気中遮断器を開発した。この遮断器は、鉄道用高速遮断器に関する JIS 規格で定められた最大遮断電流 100 kA を、遮断時間 13 ms で安全に遮断できる性能を確認した。この遮断器は、電流が閾値を超えると内蔵された異常電流検出装置が機械式ラッチを解除し、接点を開極する構造である（図 4.26 参照）。

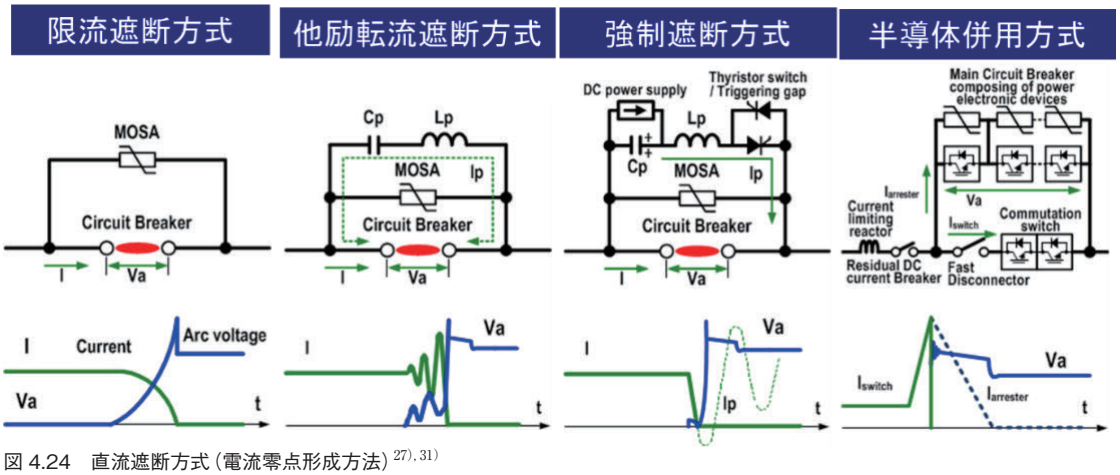


図 4.24　直流遮断方式（電流零点形成方法）[27),31)]

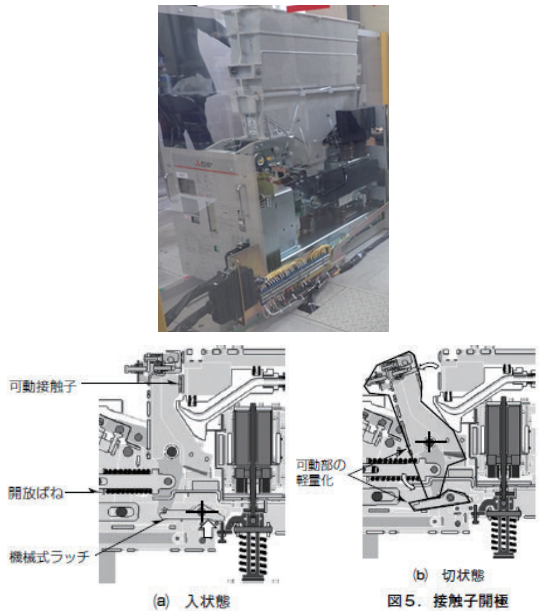


図 4.26　DC 1500/700 V-100 kA 電鉄用直流気中遮断器（掲載許諾）[33]

4.6.2　自励発振電流零点形成方式

遮断器と並列にキャパシタンス（C）とリアクタンス（L）を接続し、遮断器極間に発生したアークを利用して LC 回路との相互作用により電流振動を増大させ、電流が零になる状態を発生させて遮断する技術である。この方式は、帰線用直流電流の転流開閉装置（MRTB）に適用されている。MRTB は、DC-CB とは異なり、帰線における地絡事故を除去した後、MRTB を流れる電流を帰線に転流する役割を担っている。図 4.27 は、2000 年に運開した紀伊水道直流連系の関西電力紀北変換所に初適用された MRTB である。

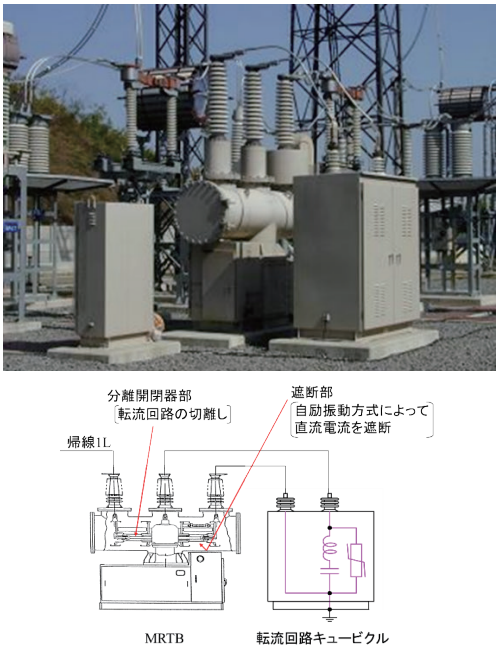


図 4.27　関西電力紀北変換所納三菱電機製 MRTB（2000）（掲載許諾）[34),35),36)]

遮断器の極間に発生するアークは、回路中のキャパシタンス（C）およびリアクタンス（L）との相互作用によって、回路条件に応じて 1 ～ 3 kHz の周波数範囲で電流振動を拡大させることが可能である。特に、リアクタンスには振動を増幅させる最適値が存在し、これが振動の急速な拡大に寄与する。遮断器の極間でより高いアーク電圧を生成できる遮断器は、このような振動を速やかに形成する上で有利である。この特性を活かし、空気遮断器および SF_6 ガス遮断器を用いた転流開閉装置（MRTB：Metallic Return Transfer Breaker、帰線用電流転流開閉装置。図 4.27 参照）が実用化されており、他励方式の直流送電システムに適用されている。直流系統に適用された MRTB は、雷撃によって架空帰線に発生した故障を MRTB の閉路操作によって除去した後、開路操作により故障除去後の数千アンペアの電流を HVDC 送電線の中性線へ切り替える役割を果たしている。この方式では、数千 A 規模の故障電流を遮断するために、電流零を発生させる必要があり、一般的に 20 ～ 40 ms の遮断時間を要する。図 4.28 は、2019 年、東芝が新北本連系に導入した 25 kV-1200 A MRTB を示す[37]。また、米国 WH 社は、1984 年、米国太平洋沿岸直流連系において、550 kV-2200 A 直流遮断器（MRTB）を用いた実証試験を実施している[38]。



図 4.28　電源開発上北変換所納東芝製 MRTB（2019）（掲載許諾）[36]

4.6.3　他励（強制）発振電流零点形成方式

遮断器と並列に外部電源により予め充電されたキャパシタンス（C）からリアクタンス（L）を通じて放電させることで、遮断器極間のアーク電流に逆特性の電流を重畳し、強制的に電流零点を形成して遮断する方式である。この方式では、コンデンサに充電された電荷により直ちに電流零点を形成できるため、自励発振電流零点形成方式に比べて短い遮断時間（約数 ms）で直

流を遮断できる。欧州研究組合 Promotion プロジェクト[39]にて実用化検証が進められるなど、将来の多端子 HVDC 送電系統への適用が検討されている。

図 4.29 は、強制発振電流零点形成方式による 525 kV-16 kA 機械式直流遮断器の構想を示しており、機械式 DC-CB は、真空遮断器を 8 直列構成した遮断部、電流零点を形成する電流重畳用 LC 回路、遮断後に回路のエネルギーを処理するエネルギー吸収素子で構成される。

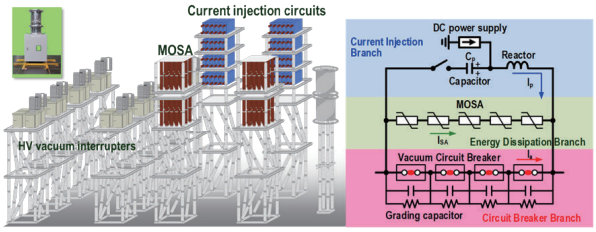


図 4.29　525 kV-16 kA 機械式直流遮断器の構想[40),41),42)]

中国南方電網は、広東省南澳（Nan'ao）諸島で進めている三端子直流送電実証プロジェクト実証プロジェクト（± 160 kV DC、三端子双極方式）に強制発振による電流零点形成方式を採用した 160 kV-9 kA の機械式直流遮断器を導入した（図 4.30 参照）。この遮断器は、真空遮断器を 4 接点直列に接続して構成されており、実系統において人工地絡試験を実施し、DC 1.4 kA の電流を遮断時間 3.5 ms で遮断することに成功した。また、避雷器のエネルギー耐量は 10 MJ である。



図 4.30　強制発振電流零点形成方式の 160 kV-9 kA 機械式直流遮断器（2013）[26),43)]

4.6.4　半導体を利用したハイブリッド方式の直流遮断器[42),44),45)]

半導体のスイッチング機能を利用、電力用 IGBT 素子を多数並列および直列に接続して構成した直流遮断器。通常送電時は、電流を機械式開閉機器へ転流して、半導体による通電ロスを低減している。中国国家電網は、中国浙江省舟山諸島 ± 200 kV DC 五端子直流送電実証プロジェクト（± 200 kV DC、五端子双極方式）を進めており、このプロジェクトに図 4.31 に示すハイブリッド方式の直流遮断器を導入した。また、535 kV-26 kA ハイブリッド方式（半導体＋機械式）直流遮断器の開発を進めている（図 4.32 参照）。



図 4.31　中国国家電網張北変換所納ハイブリッド方式直流遮断器[26),42)]



図 4.32　中国 535 kV-26 kA ハイブリッド方式直流遮断器[27),42),44)]

4.7　直流ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）の開発

HVDC 送電では、変換器が屋内に設置されるため、開閉装置も同じ建屋内に配置されることが一般的であり、気中絶縁方式の開閉装置が多く採用されている。しかしながら、建屋の建設費用を抑制する目的から、洋上風力発電と接続される洋上プラットフォームや沿岸地域においては、ガス絶縁方式の開閉装置（DC-GIS）を導入したいというニーズが高まっている。

日本において、沿岸部の重塩害地域に位置する紀伊水道直流連系の紀北変換所および阿南変換所では、世界で初めて DC ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）が導入された。この DC-GIS は、断路器（DS）、接地スイッチ（ES）、過電圧保護装置（MOSA）、電流変成器（CT）、および電圧変成器（VT または PT）で構成されている[46),47),48)]。

図 4.33 は、阿南変換所に設置された 500 kV DC-GIS の写真と断面図が示す。この DC-GIS は、世界で初めて導入されたもので、2000 年に運用を開始した。DC-GIS は、625 kV（定格の 125 %）に対応する絶縁要件を満たすため、絶縁設計に一定の冗長性を持たせているが、それでも、従来の気中絶縁構成と比較して大幅な小型化を実現した。

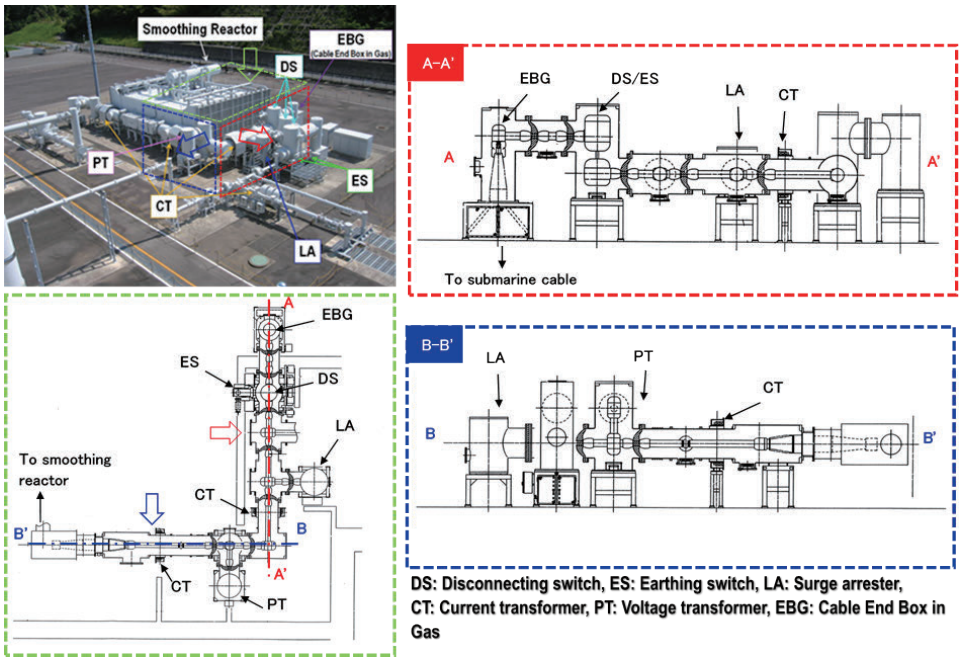


図 4.33　四国電力納阿南変換所納三菱電機製直流ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）（掲載許諾）

なお、万が一、DC-GIS 内部に微小な導電性異物が存在した場合、直流環境下では、導体と筐体の間で微小な導電性異物が往復移動する「ファイヤーフライ（ホタル）現象」が観察されることがある。この現象が発生すると、GIS の絶縁性能が著しく低下するため、対策として半コーン型絶縁スペーサが採用された。

図 4.34 は、四国電力阿南変換所に導入された 500 kV DC-GIS の断路器・接地開閉器部分の外観を示す。金属異物がタンク底部の低電界部に落下するよう縦型配置に構成されている。



図 4.34　四国電力阿南変換所納東芝製 500 kV DC-GIS（断路器・接地開閉器）（掲載許諾）

東芝は、2019 年、北海道と本州を結ぶ新北本連系設備に 250 kV DC-GIS を納入した（図 4.35 参照）。この GIS は、2000 年以降の直流絶縁に関する最新の知見を反映し、コンパクト化を達成した。



図 4.35　北海道電力北斗変換所納東芝製 250 kV DC-GIS（2019）（掲載許諾）[49]

4.8　直流開閉装置のまとめ

多端子 HVDC は、再生可能エネルギーの広域連系や海底ケーブルを用いた国際連系において、今後さらに適用事例が増加すると予想される。これらの系統の安定化を図るため、直流遮断器（DC-CB）をはじめとする保護技術の確立が進められている。DC-CB には、半導体素子と機械式開閉装置を組み合わせたハイブリッド型のほか、真空遮断器を用いた機械式タイプの開発が進められており、すでに中国国内の多端子 HVDC プロジェクトにおいて実運用されている。

DC-CB の普及に向けては、高額な機器コストと信頼性の確保が課題である。現状では、500 kV クラスの DC-CB に対して定格電圧での検証が可能な試験設備が整っておらず、実運用例も限られているため、系統運用者は慎重な姿勢を取っている。

こうした状況を踏まえ、電力会社とメーカーが連携した共同開発が普及の鍵を握ると考えられる。また、DC-CB の動作には高度な制御技術と保護協調が不可欠であり、国際標準の整備も重要な課題である。現在、CIGRE 技術文書（TB873 など）を中心に、標準化に向けた議論が進められている。一方、日本で実用化された DC-GIS は、洋上風力発電設備や沿岸部への設置が進む中で、今後の適用拡大が期待される。

コラム４　水銀整流器の原理

水銀を陰極、金属および黒鉛を陽極とする整流器。水銀溜りに負の電位が印加されると、水銀から真空中に熱電子が放出され、アーク電流が流れる。一方、水銀溜りに正の電位が印加されると、水銀中の熱電子は水銀電極側に引き寄せられるため、熱電子放出が止まり、アークが消滅する。この原理により、交流が半波整流に変換される。水銀整流器は、ひとつの陰極に対して、通常、複数の陽極を配置して、多相半波整流を発生させている。

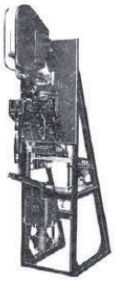
コラム５　鉄道の給電方式

日本の鉄道では、新幹線を除く多くの路線で直流 1500 V または 750 V の給電方式が採用されている。これは、交流方式では無効電力の影響により電圧や位相の管理が難しく、変電所の同期が困難であるためである。鉄道の電化初期から直流方式が選ばれ、米国から限流方式の直流遮断器が導入された。なお、新幹線では長距離・高速運転に対応するため、交流 25 kV（単相 60 Hz）方式が採用されている。交流方式は高電圧で送電でき、送電ロスが少なく、変電所の間隔を広く取れるため、長距離運行に適している。新幹線では、架線から集電した交流を車載変圧器で低電圧に変換し、インバータで三相交流や直流に変換してモーターを駆動するとともに、照明や空調などの補助設備にも電力を供給している。交流給電方式は、国際的にも高速鉄道の標準となっている。

表は、直流気中遮断器の開発の流れを示す。日本の電気鉄道は、1895 年に京都電気鉄道が蹴上水力発電所から電力供給を受け、直流 500 V で運行を開始したことから始まった。当時は送変電設備の故障が多く、故障時に電力系統を遮断できる保護装置が必要とされた。

鉄道用直流気中遮断器の技術開発

年	できごと
1895（明治 28）年	京都にて日本初の電気鉄道が開業
1924（大正 13）年	大井町変電所にて直流高速度遮断器使用開始
1955（昭和 30）年	二宮直流遮断実験所開設
1956（昭和 31）年	新宿変電所にて直流高速度遮断器が遮断不能となる事故が発生
1961（昭和 36）年	直流高速度遮断器の国内規格が初制定
1985（昭和 60）年	札幌市営地下鉄にて GTO サイリスター遮断器が実用化
1988（昭和 63）年	相模鉄道にて直流高速度真空遮断器が実用化



初期の国産気中遮断器

1923 年の関東大震災後、鉄道省は復旧にあたり、直流 600 V や 1200 V などが混在していた電圧を直流 1500 V に統一する方針を決定。翌 1924 年には、米国 GE 社製の直流気中遮断器を輸入し、大井町変電所に導入した。戦後の 1950 年には、鉄道電化協会に「電鉄直流回路遮断研究委員会」が設立され、国産化に向けた技術開発が本格化。明電舎や富士電機などが製品化を進めた。さらに、1985 年には半導体を用いた遮断器、1988 年には真空遮断器を使った他励発振方式の直流遮断器も実用化された。

1945 年以降の戦後復興、鉄道網（東海道線の変電設備強化など）の増強に伴い、遮断電流が増加、大容量化が要求された。当時、国内に直流短絡試験設備がなかったため、1955 年、神奈川県の二宮に試験設備を建設した。図は、1979 年に実施された二宮試験所における直流気中遮断器の試験状況で、気中で引き伸ばされたアークの閃光が撮影されている。



二宮直流遮断試験所における試験状況

参考文献：生出珠之助他、鉄道技術来し方行く末「直流高速度遮断器」、RRR（Railway Research Review）, Vol.89, No.10（2021）

参考文献

1) 横山明彦、「高圧直流送電技術の現状と課題および将来への展望」、電気学会誌、Vol.137, No.11, pp. 693-696 (2017)
2) "50 years HVDC, Part I, Part II", ABB Review 4 (2003)
3) 直流送電の現況と適用技術、電気学会技術報告第 2-346 号 (1990)
4) 交直連系系統の相互作用、電気学会技術報告第 628 号 (1997)
5) 自励式変換器の電力系統への適用技術、電気学会技術報告第 919 号 (2003)
6) 電力系統用新方式自励交直変換器の技術動向、電気学会技術報告第 1374 号 (2016)
7) ハーバード大学博物館、https://chsi.emuseum.com/objects/5877/mercury-arc-rectifier-tube (Browsing : 2025-9/30)
8) O. K. Marti, H. Winograd, "Mercury Arc Power Rectifiers", McGraw-Hill (1930), https://www.worldradiohistory.com/BOOKSHELF-ARH/Technology/Technology-Vacuum-Tube/Mercury-Arc-Power-Rectifiers-Othmar-Marti-and-Harold-Winograd-1930-%28478-pages%29.pdf (Browsing : 2025-9/30)
9) 秋山良、「九州帝国大学における水銀整流器の研究」、九州総合博物館研究報告、第 14 号 (2016)
10) 電車とバスの博物館、https://www.city.kawasaki.jp/280/page/0000006285.html (Browsing : 2025-9/30)
11) 宮本茂業「水銀整流器 30 年間の発達と東芝」東芝レビュー第 9 巻 第 3 号、pp. 269-288 (1954)
12) https://toshiba-mirai-kagakukan.jp/history/ichigoki/products.htm?morebox=y1927rectifier-more#y1927rectifier (Browsing : 2025-9/30)
13) Milestones:SCR/Thyristor, 1957-Engineering and Technology History Wiki (Browsing : 2025-9/30)
14)「パワースイッチング素子：ゲートターンオフサイリスタとその応用」、日立評論 1977 年 12 月号、pp. 1035-1040 (1977)
15) 電源開発、でんきの礎「北海道・本州間電力連系設備」、電気学会 (2021)
16) 尾形文夫他、東京電力新信濃周波数変換所納サイリスタバルブ、日立評論 Vol.61, No.2, pp. 103-108 (1979)
17) 十見百聞「紀伊水道直流連系設備」、電気学会誌 122 巻、第 2 号、pp. 108-111 (2002)
18) Jayant Baliga, IEEE Power Electronics Magazine, Vol. 2, Issue 2, pp. 16-23 (2015)
19) A. Nakagawa et al., "Non-Latch-Up 1200V, 75A Bipolar-Mode MOSFET with Large SOA", IEEE IEDM Digest of Technical Papers, pp. 860-861 (1984)
20) 寺島知秀他、「パワー半導体デバイスの最新技術動向」、電気学会論文誌 C、第 130 巻、第 6 号、pp. 1001-1006 (2010)
21) 山口浩、「SiC パワー半導体研究開発の現状と展望」、電気学会論文誌 D、第 135 巻、第 6 号、pp. 513-518 (2015)
22) 内海貴徳、「新北海道本州間連系設備に適用した大容量自励式直流送電システムの開発・実用化」、電気学会論文誌 D、141 巻、第 6 号 (2021)
23) 三浦昭彦、「新北海道本州間連系設備について」、電気学会誌、139 巻 8 号 , pp. 498-501 (2019)
24) 三谷康範、「紀伊水道直流連系設備」、電気学会誌、、122 巻 2 号 , pp. 76–79 (2002)
25) 最近の直流及び交流系統に要求される遮断器の技術動向、電気学会技術報告 第 1559 号 (2023)
26) CIGRE JWG A3/B4.34, "Technical Requirements and Specifications of state-of-the-art HVDC Switching Equipment", CIGRE Technical Brochure 683 (2017)
27) L. Nilsson (editor), H. Ito, et al., "HVDC circuit breakers", Springer (2025)
28) 西岡淳、「世界で加速する HVDC の現在」、日立評論、Vol.105, No.3, pp. 28-33 (2020)
29) 伊藤弘基、「欧州 HVDC 国際連系の技術動向と海外展開への将来展望」、電機、No.801 (2018)
30) 竹之内達也他、「北海道・本州間電力連系計画の概要と函館変換所用変換設備」、日立評論、Vol.61, No.2, pp. 103-110 (1979)
31) H. Ito (editor), "CIGRE Greenbook on Switching equipment", Springer (2018)
32) 生出珠之助他、鉄道技術来し方行く末「直流高速度遮断器」、RRR (Railway Research Review), Vol.78, No.10, pp. 24-27 (2021)
33) 遠矢将大他、「電鉄変電所向直流高速度遮断器」、三菱電機技報、Vol.91, No.11, pp. 629-633 (2017)
34) S. Hara et al., "Fault protection of metallic return circuit of Kii channel HVDC system", IEE GD-95, pp.132-1
35) Y. Oue et al., "Field Experience of HVDC equipment of Kii Channel HVDC link", CIGRE SC A3 & B3 colloquium, Tokyo 211 (2005)
36) H. Ito et. al., "Instability of DC Arc in SF_6 Circuit Breaker", IEEE trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, pp.1508-1513 (1997)
37) 東芝レビュー 2014 年 3 月号
38) A. Lee et al., "The development of a HVDC SF_6 breaker", IEEE Trans. PAS 104 (10) pp. 2721-2729, (1985)
39) PROMOTioN: Progress On Meshed HVDC Offshore Transmission Networks, Final report (2020)
40) N. A. Belda, et. al., "Full Power Short-circuit Tests of HVDC Circuit Breakers using AC generator operated with reduced power Frequency" CIGRE Session report, A3-115 (2018)
41) K. Tahata et al., "HVDC circuit breakers for HVDC grid applications", CIGRE AORC Technical meeting 2014, No. 1120 (2014)
42) Tahata, et. al., "HVDC circuit breaker for HVDC grid applications", 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (2015)
43) CIGRE JWG B4/A3.80, "Design, test and application of HVDC circuit breakers", CIGRE Technical Brochure 873 (2022)
44) R. Derakhshafar, T. Jansson, U. Steiger, M. Habert, "Hybrid HVDC breaker, A solution for future HVDC system", 2014 CIGRE Session Report B4-304, (2014)
45) B. Yang, D. Dao, W. Shi, W. LV, W. Wang, B. Liu, "A novel commutation-based hybrid HVDC circuit breaker", 2017 CIGRE Winnipeg SC A3/B5/D1 colloquium, A3/B4-15, (2017)
46) 吉田義男他、「± 500 kV 直流 GIS の開発」、三菱電機技報、Vol.70, No.5, pp. 493-500 (1996)
47) 四方学他、「直流送電用 GIS の開発・設計」、電気学会論文誌 B、117 巻、5 号、pp. 737-742 (1997)
48) M. Nakai, et. Al., "Low loss DC circuit breakers and DC GIS equipment", CIGRE Session Report A3-105 (2020)
49) Y. ABE, "Development of 250 kV DC Gas Insulated Switchgear", CIGRE-IEC 2019 Conference on EHV and UHV (2019)

5 おわりに

5.1 遮断器の技術変遷

遮断器は、地絡や短絡などの異常が発生した際に、数十 kA に達する故障電流を速やかに遮断し、故障箇所を電力系統から切り離すことで、事故の影響を最小限に抑える重要な役割を果たす。遮断媒体としては、水、油、空気、真空、SF_6（六フッ化硫黄）などが用いられ、高電圧・大容量化する電力系統の要求に応えてきた。

日本は、欧米で確立された消弧室構造、ガス吹付方式、多重切構成などの基盤技術を体系的に導入・発展させ、独自の技術体系を構築してきた。その成果として、ガス遮断器やガス絶縁開閉装置（GIS）において、世界水準を上回る高い信頼性を実現した。

図 5.1 は、日本電機工業会（JEMA）の統計に基づき、国内における各種遮断器の出荷台数の推移を示す。戦後、国内の電力需要の増加に伴い、電力系統の整備が進められた。当初は油遮断器や空気遮断器が使用されていたが、その後、ガス遮断器が主流となった。また、72 kV 以下の系統では、真空遮断器も数多く適用されている。国内の遮断器出荷台数は、1964 年の東京オリンピック開催時期を境に急増、高度経済成長を支えてきた。この時期は、ガス遮断器が市場に投入された時期とも重なる。

5.2 遮断器の信頼性

遮断器の故障は、電力の安定供給に深刻な影響を及ぼす可能性があるため、CIGRE（Conseil International des Grands Réseaux Électriques：国際大電力システム会議）は、遮断器を含む変電機器の重故障（機器の機能が損なわれ、即時に停電措置と復旧が必要となる故障）率について、定期的に調査・分析を実施している。過去 4 回にわたる CIGRE の信頼性調査によると、日本国内の遮断器は、海外製品と比較して重故障率が 1/10 以下と非常に低く、高い信頼性を示している（表 5.1 参照、著者は第 4 回調査の主査を務めた）。

日本は世界でも例を見ない GIS 大国であり、国内変

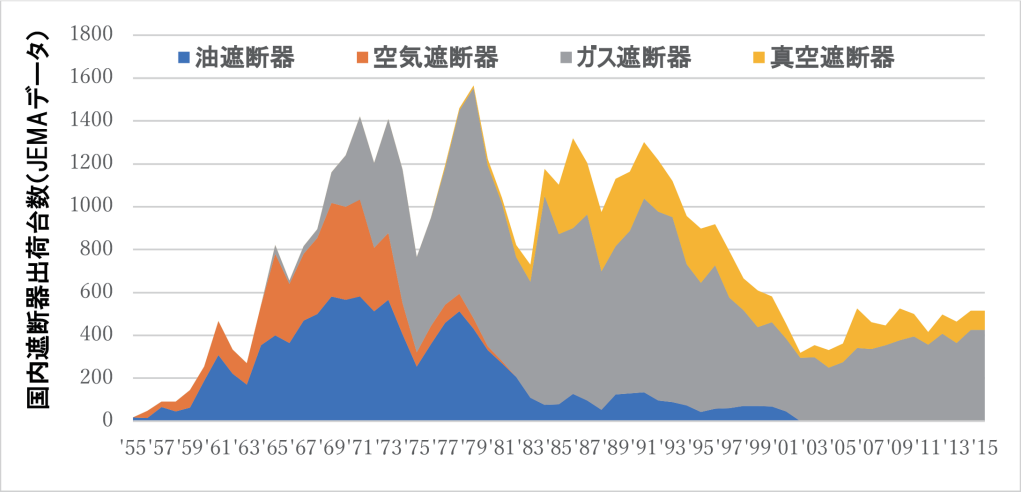


図 5.1　日本における各種遮断器の出荷台数推移（JEMA 統計）[1)]

表 5.1　CIGRE 信頼性調査における遮断器の重故障率 [2),3),4),5)]

CIGRE信頼性調査	第一回調査	第二回調査	第三回調査	第四回調査
調査期間	1974-1977	1988-1991	2004-2007	2014-2017
調査対象遮断器（CB）	1964年以降に導入された各種CB	1978年以降に導入、単一圧力式SF_6ガスCB	単一圧力式SF_6ガスCB	単一圧力式SF_6ガスCB
定格電圧	63 kV 以上	63 kV 以上	60 kV 以上	60 kV 以上
参加国・電力会社数	22ヶ国120電力会社	22ヶ国132電力会社	26ヶ国83電力会社	15ヶ国25電力会社
調査CB台数	77,892 CB-year	70,708 CB-year	278,480 CB-year	605,258 CB-year
世界平均重故障率	1.58 %	0.67 %	0.30 %	0.48 %
日本の重故障率	0.14 %	0.07 %	0.13 %	0.02 %

電機器の高い信頼性は、国内電力各社の機種戦略、保守最適化（定期周期保全 TBM & 状態監視保全 CBM）、更新基準、電気事業者・研究機関・製造者間の連携と研究・協力体制による不具合の真相解明と同機種への水平展開、規格・標準類へ反映など、長年に渡る取り組みの成果で達成されたものである。

GIS の仕様・基本コンセプト・設計構造・試験法の策定、GIS 内の水分や金属異物に関する設計方法、SF_6 ガスの取り扱い、劣化保全技術の高度化など、GIS の小型・高信頼度化、経済性向上、環境負荷低減などに係わる様々な課題解決に関しても、電気協同研究会を組織して調査を行うと共に 国内規格（JEC）において、電気事業者、製造者、大学・研究機関など各専門家が参画した委員会を組織して策定・改訂が行なわれてきた。

表 5.2 は、各国における遮断器の開閉責務別重故障率を集計した結果を示す。日本の重故障率は、世界データと比較して 20 分の 1 以下と極めて低い。

さらに、日本データおよび世界データの双方において、変圧器や送電線につながる遮断器に比べて、コンデンサやリアクトルなど調相設備（電力系統の電圧や電力品質を安定させるために無効電力を調整する設備）につながる遮断器の重故障率が高い傾向が認められる。

表 5.2　CIGRE 信頼性調査における遮断器適用用途別の重故障率 [5)]

CIGRE 調査	第四回世界データ	第四回日本データ
調査期間	2014-2017	2014-2017
全CB	0.4757 % /605,258 CB-year	0.0222 % /112,835 CB-year
変圧器用途CB	0.8494 % / 50,388 CB-year	0.0597 % / 28,489 CB-year
架空線用途CB	1.4478 % / 77,705 CB-year	0.1099 % / 57,330 CB-year
ケーブル用途CB	0.0380 % / 23,674 CB-year	0.0816 % / 8,575 CB-year
リアクトル用途CB	1.3634 % / 5,061 CB-year	1.0621 % / 2,448 CB-year
コンデンサ用途CB	2.6192 % / 4,467 CB-year	0.4673 % / 3,210 CB-year
母線連絡用途CB	1.6333 % / 18,674CB-year	0.1064 % / 9.398 CB-year
適用不明	0.1942 % /425,289 CB-year	0.0477 % / 2,095 CB-year

海外におけるコンデンサバンク用途遮断器は、稼働年数に関係なく、据付直後から重故障が発生、経年劣化も著しい傾向がみられるが、日本はコンデンサバンクに第五高調波を抑制するために直列リアクトルが設置されており、コンデンサバンク開閉時の突入電流およびそれに伴う過電圧が抑制されるため遮断器の故障率が低く抑えられている。このため、海外では、コンデンサバンク用途において開閉極位相制御を仕様として採用する事例が多い。

この技術は、系統の電圧や電流の位相角に応じて遮断器の開閉タイミングを制御することで、開閉時に発生する過電圧などの過渡現象を抑制する。特にコンデンサバンク用途では、系統電圧の零点付近で閉極することにより、極間に発生する突入電流やそれに伴う過電圧を抑制し、機器の長寿命化に貢献する。国内では、変圧器およびリアクトルに接続される遮断器に開閉極位相制御技術が適用される事例が増えており、機器の長寿命化、更なる信頼性向上に貢献している [6),7),8),9)]。

5.3　環境負荷低減と SF_6 ガス排出削減

近年は、温室効果ガスの抑制やゼロエミッションを目指す循環型社会の形成に伴い、変電設備の開発・製造・運用においても環境負荷の低減が求められている [10)]。特に、地球温暖化係数が極めて高い SF_6 に代わる遮断器技術の研究が進められており、F-ketone や F-nitrile などの混合ガスを用いた遮断器・開閉装置が提案され、現在フィールド実証試験が実施されている。また、真空遮断器の高電圧化や、直流送電向けに開発されている半導体遮断器も、環境負荷が極めて低い技術として注目されている。

SF_6 ガスは高い地球温暖化係数（24300）を持ち、1997 年の COP3 で規制対象となった。日本では 1998 年に「電力用 SF_6 ガス取扱基準」を策定し、業界全体で漏えい削減に取り組み、2005 年には自主削減目標を達成した。その後も継続的に排出量削減が進められている（図 5.2 参照）。

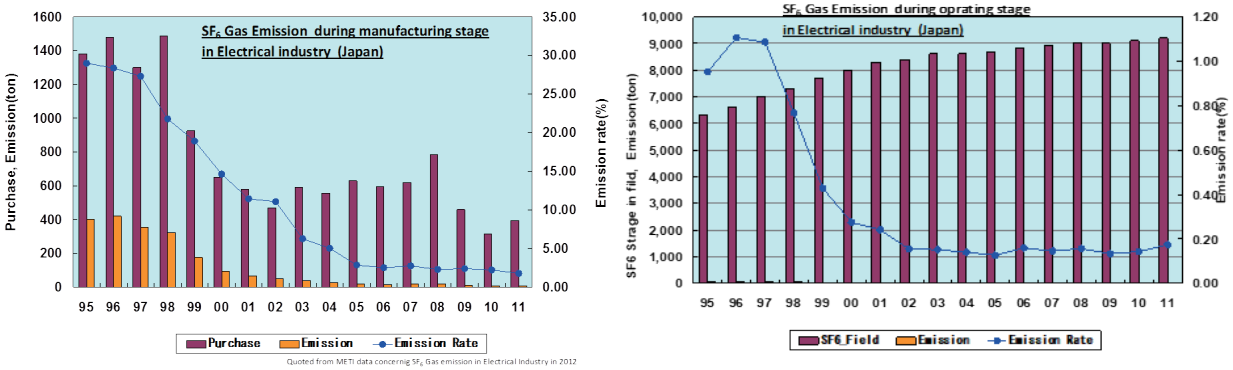


図 5.2　（左）国内製造者の SF_6 ガス購入量、排出量、漏洩率、（右）国内電力会社が保有する SF_6 ガス量、排出量、漏洩率（JEMA 統計）[11)]

表 5.3　SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの特性値比較 [12)]

	CAS number [3)]	Boiling point/°C	GWP	ODP	Flammability	Toxicity LC50 (4h) ppmv	Toxicity TWA [1)] ppmv	Dielectric strength /pu at 0.1 MPa
SF_6	2551-62-4	-64 [2)]	23500	0	No	-	1000	1
CO_2	124-38-9	-78.5 [2)]	1	0	No	>300000	5000	≈0.3
C5-PFK	756-12-7	26.5	<1	0	No	>20000	225	≈2
C4-PFN	42532-60-5	-4.7	2100	0	No	12000	65	≈2

表 5.4　SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの絶縁特性比較 [12)]

	C_{ad} [1)]	p_{min}/ MPa [2)]	T_{min}/°C [3)]	GWP	D.S. [4)]	Toxicity LC50 ppmv
SF_6	-	0.43…0.6	-41…-31	23500	0.86…1	-
CO_2	-	0.6…1	≤ -48 [6)]	1	0.4…0.7	>3e5
CO_2/C5-PFK/O_2 (HV)	≈6/12	0.7	-5…+5	1	≈0.86	>2e5
CO_2/C4-PFN (HV)	≈4…6	0.67…0.82	-25…-10	327…690	0.87…0.96	>1e5
Air/C5-PFK (MV)	≈7…13	0.13	-25…-15	0.6	≈0.85 [5)]	1e5
N_2/C4-PFN (MV)	≈20…40	0.13	-25…-20	1300…1800	0.9…1.2	>2.5e4

表 5.5　SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの遮断特性比較 [12)]

	Operating pressure [MPa]	Dielectric strength/ pu	SLF performance compared to SF_6 /pu [1)]	Dielectric recovery speed/ pu
SF_6	0.6	1	1	1
CO_2	0.8…1	0.5…0.7	0.5…0.83	≥ 0.5
CO_2+C5-PFK/O2	0.7…0.8	close to SF_6	0.8…0.87	close to SF_6
CO_2/C4-PFN	0.67…0.82	close to SF_6	0.83…(1) [2)]	close to SF_6

5.4　SF_6 代替ガス技術の研究

欧州メーカを中心として盛んに研究開発が進められている SF_6 代替ガスの一つである F-ニトリル（C_4F_7N，Novec™ 4710，C4-FN と呼称）および F-ケトン（$C_5F_{10}O$，Novec™ 5110，C5-FK と呼称）は高い絶縁性能を持つが、沸点が高い。これらの新規化学物質を SF_6 代替ガスとして導入する際には、REACH 規制など国際的な化学物質規制に基づき、安全性（EHS：環境・健康・安全）を定量的に評価する必要がある。以下に、その特性を紹介する。

表 5.3 は、SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの特性値を示す。C4-FN および C5-FK 共に、SF_6 と比べて、凝縮点が高く、これらのガスを単独で使用した場合、寒冷地においてガスが液化、絶縁性能が低下する。このため、CO_2、O_2 との混合ガスとして、使用することが検討されている。なお、SF_6 の地球温暖化係数（Global Warming Potential; GWP）については，国連気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC）第 6 次報告書では 24300 と記載がある。

表 5.4 は、SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの絶縁特性を示す。C4-FN と CO_2 との混合ガス、および C5-FK と CO_2/O_2 との混合ガスは、絶縁性能を確保するため、SF_6 と比べて、約 1.5 倍のガス圧で使用される。この圧力条件において、代替ガスの絶縁性能は、SF_6 と比べて、0.8～1 倍程度と報告されている。また、表 5.5 は、SF_6 代替ガスと SF_6 ガスの遮断特性を示す。代替ガスの遮断性能は、SF_6 と比べて、0.8 倍程度と報告されている。

5.5　SF_6 代替ガス開閉機器の開発

SF_6 代替ガス技術は、SF_6 と比較して絶縁性能や遮断性能が劣るため、機器の大型化に加え、運用面や高電圧・大容量化への対応などに課題がある。

日本では、JEMA（日本電機工業会）の「SF_6 ガス代替検討会」において、SF_6 代替技術の適用に向けたガイドラインとして、表に示す 7 つの要件が定められている [13)]。

表 5.6　SF_6 代替ガス技術に求められる 7 つの要件

分類	要件
環境適合性・安全性	人体への影響が少なく、環境負荷が低いこと。毒性や可燃性がないか、極めて低いこと。分解ガス・分解生成物を含め毒性に対する取り扱いが SF_6 と同等であること
運用使用条件	規格に定める常規使用状態で使用可能であること。
供給安定性	代替ガスは将来にわたり、複数の供給元から安定供給が可能であること
電気的性能	絶縁性能や遮断性能が SF_6 と同等以上であり、信頼性の高い動作が可能であること。
経済性	導入・運用コスト（機器・付帯工事費用，運転保守費用など）が SF_6 と同等であること。
据付面積・更新性	既存設備との互換性や更新性があること。屋内・地下変電所等の据付空間に制限のある場所での更新が可能であること。
電力系統要求への適応性	最大定格 550 kV までの高電圧機器への適用が可能であること。長期的な視野で全定格に対して対応可能であること。

SF_6 に匹敵する絶縁性能および遮断性能を有する代替ガスは現時点では存在しないため、SF_6 ガスフリー技術を採用するには、上記 7 要件のいずれかの課題を克服する手段を講じるか、技術的なブレイクスルーが求められる。

過去において、どの技術の遮断器を採用するかに関して、土瓶（碍子形）対 鉄瓶（タンク形）、油圧遮断器 対 空気遮断器、空気遮断器 対 ガス遮断器などに関して様々な論争があったが、決して、各国の電力会社の意見が一致し、ひとつの技術を最終解としたことはなかった。現在、SF_6 ガス遮断器および SF_6 ガス絶縁開閉装置が主流である。しかし、環境対応の代替技術に対する取り組みには温度差が存在する。新しい SF_6 代替ガス技術についても、特定の技術に集約する動きにはならない可能性も考えられる。そこで、現状における開発課題を整理する。

SF_6 と比較して遮断性能が劣る C5-FK や C4-FN などを含む CO_2/O_2 との混合ガス（F ガスを含まない CO_2/O_2 混合ガスを含める）は、SF_6 と同等のタンクサイズで同等の遮断性能を得るために、ガス圧の上昇と操作装置の操作力の強化が必要となる。しかし、ガス圧を高めることでガス漏洩のリスクが増加する懸念があり、操作装置の機械的耐久性の向上が求められる。

また、地球温暖化係数が高い SF_6 は長期的に安定した特性を示す一方で、温暖化係数が低い F ガスは化学的に分解しやすく、高温のアークに繰り返し曝されることで電気的耐久性に課題が生じる可能性がある。そのため、信頼性確保の観点から、保守頻度の最適化が必要となる。かつて空気遮断器は多重切構成によって電力系統の全定格をカバーしていたが、C5-FK や C4-FN などの混合ガスを用いた遮断器では、SF_6 と同等の接点数で遮断性能を確保できる見込みがあり、ガス絶縁開閉装置（GIS）の小型化も期待されている。中部電力パワーグリッドは国内初となる 300 kV SF_6 ガスフリー（C4-FN を含む CO_2/O_2 混合ガス適用）ガス遮断器を 2028 年に導入予定である。

真空遮断器は、多重切構成により 300 kV クラスの実現が可能であり、複数の真空バルブを直列に配置しても、操作力が小さいため、機械的な耐久性はむしろ SF_6 遮断器を上回る。遮断電流についても、100 kA 程度の性能が示されており、SF_6 と遜色ない性能を有している。

さらに、145 kV クラスまで実用化されているドライ絶縁タイプは、機器組み立て後の運用時における環境負荷が極めて低く、環境面でも優れた特性を持つ。

一方で、真空バルブの通電電流は、真空の断熱性の高さにより 3000～4000 A が限界とされており、550 kV クラスで要求される 8000 A 級の通電電流を実現するには、真空バルブの並列配置などの技術的ブレイクスルーが必要となる。また、超々高圧クラスの機器では多重切構成となるため、ドライエア絶縁を採用した場合、機器が大型化し、コストも高くなる傾向がある。これに対して、真空バルブをポリマー碍管で直接モールドするなどの小型化技術が、今後の課題として挙げられる。

半導体遮断器は非常に高価ではあるが、すでに 535 kV-20 kA クラスの直流遮断器が実現している。直流遮断器は、交流電流の遮断にも対応可能である。半導体素子である IGBT を直列および並列に接続することで、原理的にはあらゆる定格電圧・定格遮断電流に対応できると考えられる。ただし、半導体は常時通電時の損失が大きいため、通電性能を確保するには機械的スイッチを並列に配置する必要がある。このため、遮断時には、まず機械的スイッチから半導体素子へ電流を転流させる必要がある。一方で、半導体遮断器はスイッチング機能を半導体自身が担うため、従来のような操作装置は不要である。コストの大部分を占める半導体素子の高性能化と価格低下が、今後の普及に向けた鍵となる。



図 5.3　C4-FN を含む CO_2/O_2 混合ガスを適用した 170 kV-50 kA GIS[14)]



図 5.4　明電舎製 145 kV-40 kA ドライエア絶縁タンク形 VCB（掲載許諾）[15)]

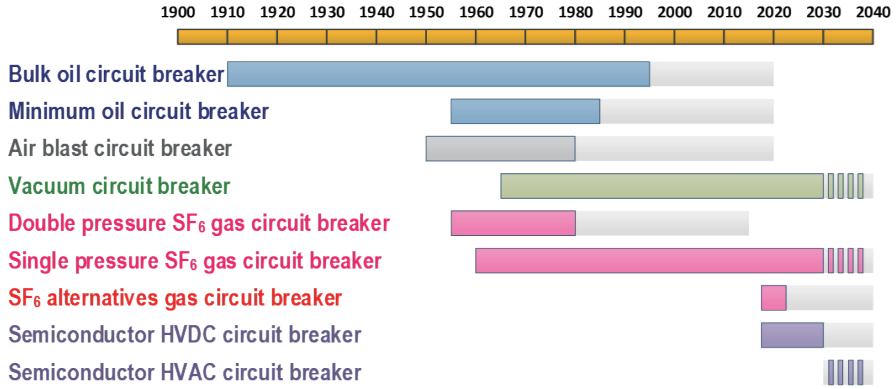


図 5.5　各種遮断技術による高圧遮断器の製造期間 [6)]

安全で保守性に優れ、高い信頼性を有する遮断器の研究・開発が継続された結果、遮断媒体と絶縁媒体として、油、空気、真空、SF_6 ガスを用いた遮断器が開発された。図 5.5 は、各種媒体を用いた遮断器が製造された期間を示したものである。直流遮断用途にはパワー半導体を用いた遮断器も開発されている。半導体で電流をブロックして遮断するため、交流も問題なく遮断することができる。

AI の普及により、生産現場や日常生活では、電力供給に対してこれまで以上に高い信頼性が求められている。こうした状況の中、製造者として、SF_6 ガス遮断器やガス絶縁装置を超える新たな技術を提供し、次世代の電力インフラの安定性に貢献していきたいと考える。

5.6　系統図の解説とまとめ

系統図は関連する遮断技術を一括して網羅しているため、個別の技術動向が読み取りにくくなっている。そこで、各遮断技術について個別の開発年表を追加して、それぞれの技術的な流れを説明する。遮断技術は、各国において、一律に油遮断器から空気遮断器、空気遮断器から SF_6 ガス遮断器へ変遷してきたわけではない。各国の電力会社において、異なる技術や構造方式が選択されてきた経緯がある。例えば、米国や英国では節油タンク形油遮断器が選好される一方、欧州では小油量碍子形油遮断器や多重切碍子形空気遮断器が主として採用される傾向があった。優れた遮断性能と絶縁性能を有する SF_6 ガス遮断器の登場により、この技術が各国に急速に普及したが、タンク形と碍子形という構造形式の選択は引き続き存在した。

図 5.6 は油遮断器の技術開発の変遷を示す。十九世紀末に繰り広げられた電流戦争の結果、交流による大規模な集中型発電・遠距離送電方式が普及した。電力系統網が拡大する中で、ナイフスイッチやヒューズに代わる、安全性・信頼性・保守性に優れた保護装置が求められるようになり、1889 年、米国および英国において、鉱油中で接点を開閉する並切形油入遮断器が

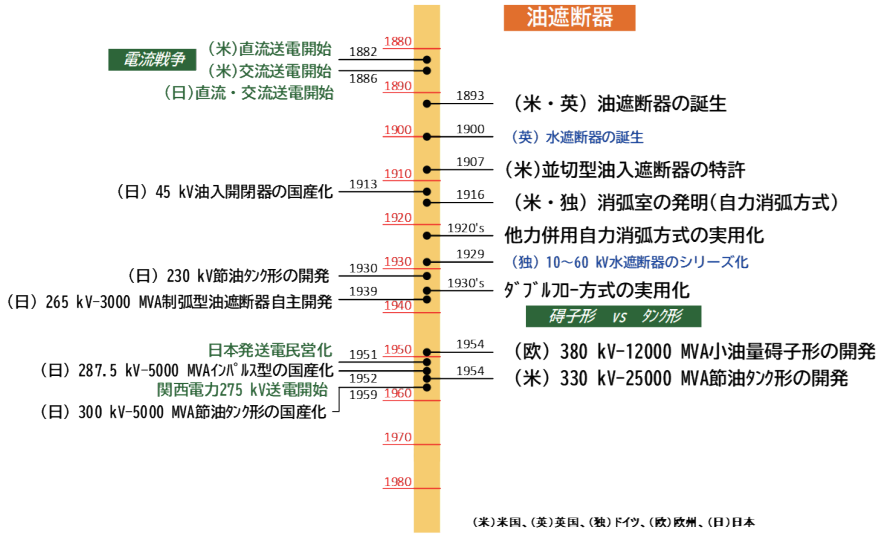


図 5.6　油遮断器の開発変遷

実用化された。

油遮断器は、1900～1920 年頃に開発の最盛期を迎え、現在のガス遮断器にも応用されている消弧室技術が発明されるなど、遮断性能の高性能化が著しく進展した。

1930～1960 年頃、日本では日立製作所が自主開発を推進する動きがみられた一方、欧米メーカーとの技術提携が進められ、油遮断器の国産化が図られた。構造方式としては、欧州では小油量碍子形、米国・英国では節油タンク形が好まれる傾向にあった。油遮断器は 1950 年頃には 362 kV クラスまで実用化され、交流電力供給網の発展と拡大に大きく寄与した。

図 5.7 は空気遮断器の技術開発の変遷を示す。油遮断器は火災や爆発のリスクを伴うため、より安全な遮断技術が求められた。こうした背景から、1898 年には米国で空気遮断器が発明され、続いて 1926 年には英国が空気遮断器の特許を出願した。しかし、空気は絶縁耐力が小さいため、装置の小型化を実現するには高圧に耐える容器やそのシール技術など製造技術の確立が必要であった。このため、開発は一定期間停滞した。

1931 年にはドイツが 110 kV のフライシュトラール型空気遮断器を実用化したが、その後の戦禍により開発が中断され、第二次世界大戦中は戦争の影響を受けなかったスイスで開発が継続された。空気遮断器の開発は戦後に最盛期を迎え、スイスでは 36～735 kV の多重切空気遮断器のシリーズ化に成功した。この技術は欧州をはじめ世界各国へと波及し、1965 年にはカナダが 765 kV 送電を開始、1985 年にはロシアが 1150 kV 送電を開始している。

空気遮断器はユニット化構造の採用により最大 1200 kV クラスの遮断器が実現され、電力系統の高電圧化に大きく寄与した。

図 5.8 は SF_6 ガス遮断器の技術開発の変遷を示す。1953 年、米国において SF_6 ガス遮断器が実用化され、わずか数年のうちに 550 kV クラスまで製品化が実現した。その優れた遮断性能と絶縁性能により、この技術は各国へ急速に普及した。1970 年以降は、日本は遮断部の接点数削減やガス絶縁開閉装置（GIS）の形態集約化を推進し、変電所設備の大幅なコンパクト化を実現した。これにより、SF_6 ガス遮断器技術は開発の最盛期を迎えた。SF_6 ガス技術は、その極めて高い信頼性により、電力の安定供給に多大な貢献を果たしている。

2000 年以降、中国で UHV（超高電圧）送電が開始されたが、SF_6 ガス遮断器そのものの開発速度は相対的に鈍化した。一方、2010 年以降は、低環境負荷技術への関心の高まりを背景に、SF_6 代替技術の開発が活発化している。

図 5.9 は真空遮断器の技術開発の変遷を示す。1923 年、米国で真空スイッチが試作され、真空中が高い消弧性能を有することが示唆された。しかし、当時は製造技術が未成熟であり、真空密封技術などの確立まで開発の停滞を余儀なくされた。1953 年頃、英国･米国･日本において真空バルブの研究開発が再開され、電極材料や電極構造の大幅な進歩が得られた。一方、真空は短いギャップにおいて高い絶縁破壊電圧を示す一方、ギャップが大きくなるにつれて絶縁耐力が頭打ちとなる傾向があり、高電圧化には装置の大型化やコスト増という課題が伴った。

このため、真空遮断器は 84/72 kV 以下の配電系統や工場用電源を中心に普及し、1960～1980 年にかけてこの電圧クラスの開発最盛期を迎えた。生産自体は順調に継続されたものの、開発活動は一時的に鈍化した。しかし、2010 年以降、低環境負荷技術（真空バルブ＋ドライエア絶縁）として再び脚光を浴び、各国で高電圧化に向けた開発が活発化している。

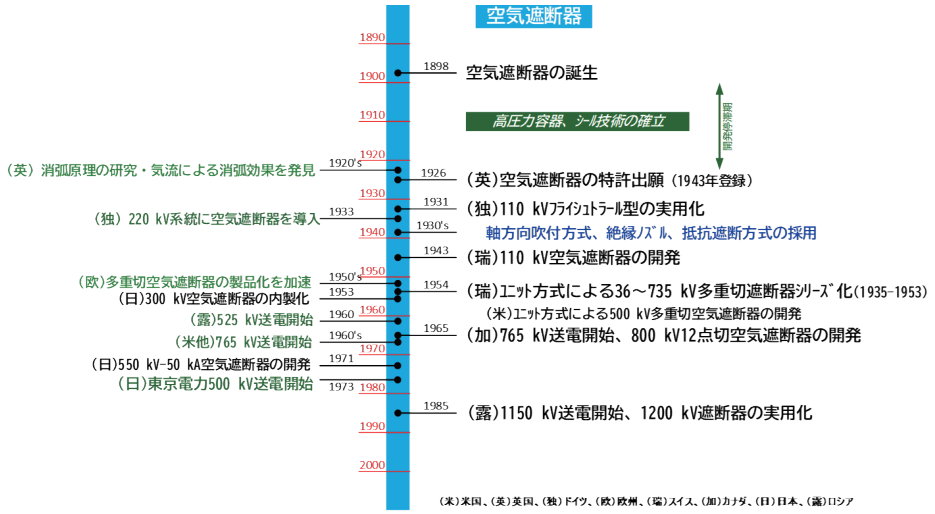


図 5.7　空気遮断器の開発変遷

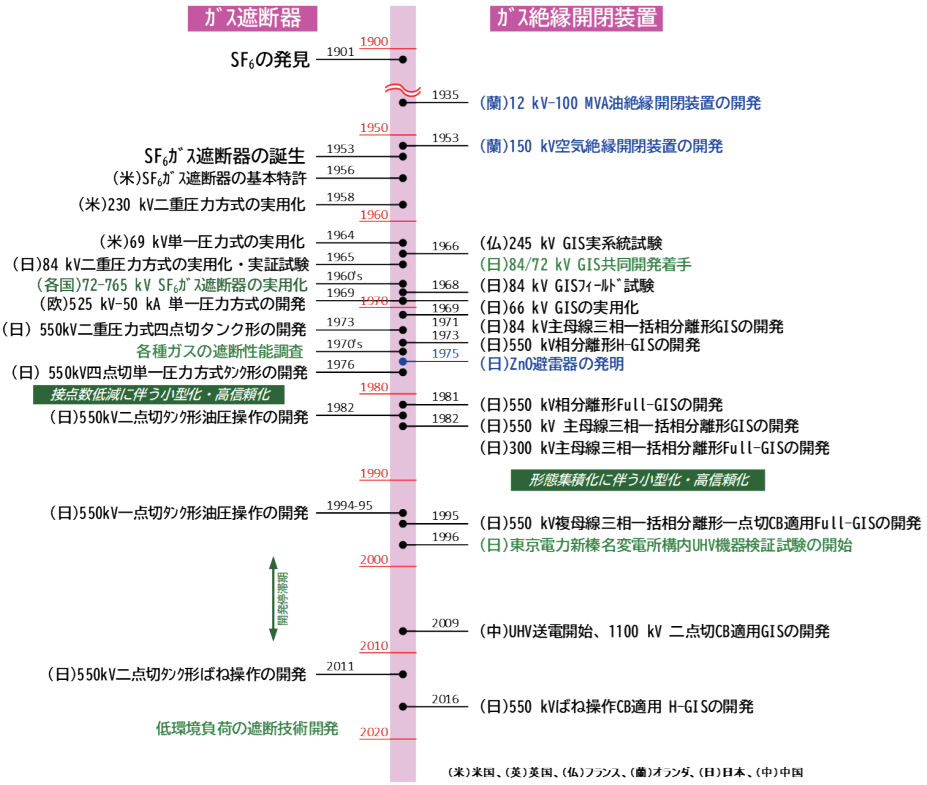


図 5.8　SF6 ガス遮断器の開発変遷

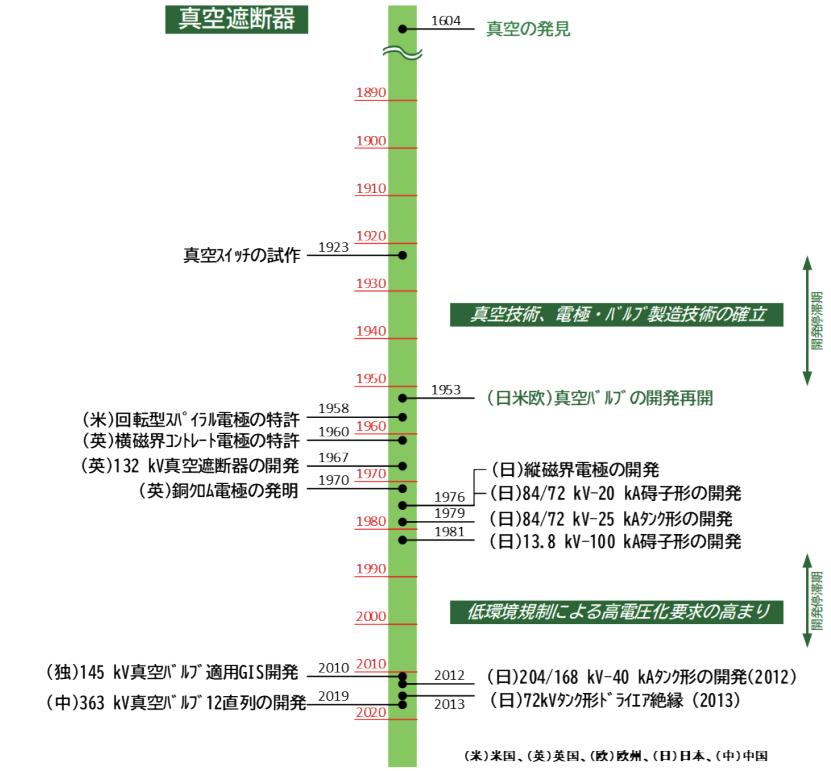


図 5.9　真空遮断器の開発変遷

コラム６　電気料金の国際比較

電気料金は、電気事業の制度改革、世界的なエネルギー需給の変動、そしてカーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギーの導入状況に応じて大きく変動している。近年、AIの普及に伴い、各国で大規模・小規模のデータセンター建設が急増している。産業競争力を維持するためには、こうした状況下において安価かつ安定した電力の確保が一層重要である。変電機器の開発においては、長期的な性能確保に加え、電力インフラの経済性を支えるため、機器のライフサイクルコスト（価格、運用・保守費用）を考慮した開発が一層重要となっている。

電気料金の国際比較は、為替レートの影響を受けるとともに、国によっては再エネ賦課金が電気料金に含まれる場合があり、単純な比較は困難である。図は、電力中央研究所の研究資料から引用した電気料金を示している。a：トレンド比較は 2022 年為替レートで円換算、b：水準比較はそれぞれの年次の為替レートで円換算されている。

1995 年頃、日本の家庭用および産業用電気料金は国際的に高水準であり、これが電力自由化の推進や供給効率の向上を目的とする制度改革を促す一因となった。

ドイツは 1990 年代からすでに電気料金が高水準であったが、近年では突出して高くなっている。福島原発事故を受け、ドイツは 2011 年より原子力発電所の閉鎖を順次進め、2023 年にすべての原発を停止し、商業運転を終了した。その結果、再生可能エネルギーによる発電を推進し、固定価格買取制度（FIT）の導入により電気料金が上昇している。アイルランドは 2050 年に発電における再生可能エネルギー比率 100％を目指しており、順次火力発電所を停止して、エネルギー構造改革を進めているが、家庭用電気料金は 90 円/kWh に達している。英国は 2000 年代中頃までは日本やフランスに比べて安価であったが、近年では同水準となっている。一方、米国は 1990 年代から一貫して低い価格を維持している。

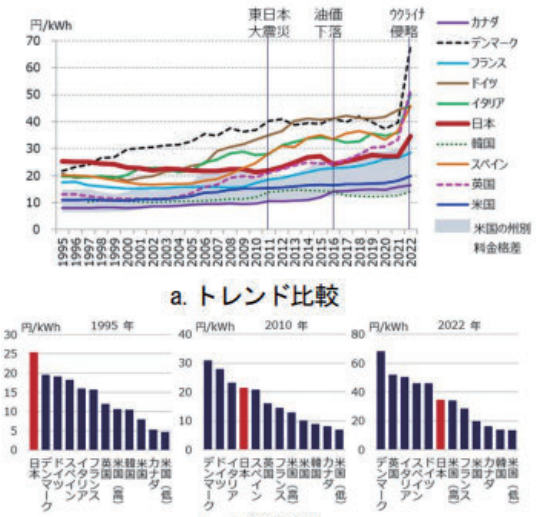


図 1　家庭用電気料金

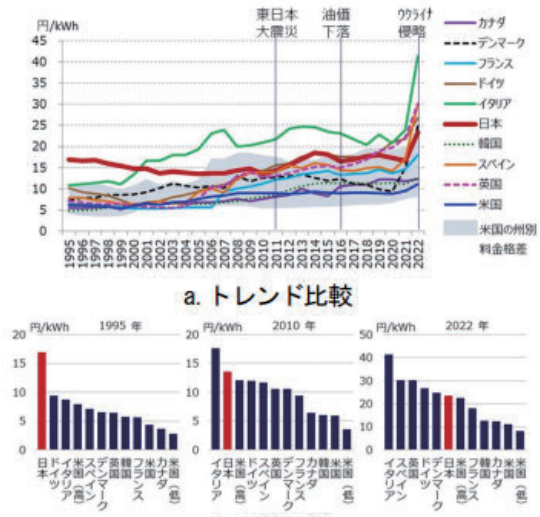


図 2　産業用電気料金

※図 1 、2 共通に、名目税込み価格。a. は 2022 年為替で、b. は各年為替で日本円に換算。米国については、州によって料金が大きく異なるため、参考として、料金が割高な州（マサチューセッツ州）と割安な州（ワシントン州）の料金の幅も示している

出典：国際エネルギー機関（IEA）の Energy Prices and Taxes にもとづいて作成

各国家庭用および産業用電気料金の推移

参考文献：筒井美樹、澤部まどか、「電気料金の国際比較」、電力中央研究所研究資料 No.SE23501,
https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/research/files/1557/pdf/SE23501.pdf（Browsing : 2025-10/30）

参考文献

1） 電気学会技術報告Ⅱ部、290 号（1989）
2） CIGRE WG 13.06, “Final report of the second international enquiry on high voltage circuit-breaker failures and defects in service”, CIGRE Technical Brochure 083（1994）
3） CIGRE WG A3.06, “Reliability of High Voltage Equipment - Part 2: SF_6 Circuit Breakers”, CIGRE Technical brochure 510（2012）
4） CIGRE WG A3.06, “Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 5: Gas Insulated Switchgear”, CIGRE Technical Brochure 513（2012）
5） CIGRE WG A3.48, “Fourth CIGRE International Reliability of Equipment serviced in 2014–2017, Part 1: General results”, CIGRE Technical Brochure 947, November（2024）
6） H. Ito（editor）, “CIGRE Greenbook on Switching equipment”, Springer（2018）
7） CIGRE WG13.07, “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application”, Part 1: ELECTRA No.183, pp. 43–73, Part 2: ELECTRA No.185, pp. 37–57,（1999）
8） CIGRE WG A3.07, “Controlled switching of HVAC CBs”, CIGRE Technical Brochures 262-264,（2004）
9） CIGRE WG A3.35, “Guidelines and Best Practices for the Commissioning and Operation of Controlled Switching Projects”, CIGRE Technical Brochure 757（2019）
10） 電気学会：「遮断器の設置環境適応技術と環境負荷低減技術」、電気学会技術報告、第 1430 号（2018）
11） CIGRE Position Paper, “Application of SF_6 in Transmission and Distribution Networks,”, ELECTRA, No.274, pp. 34-39（2013）
12） M. Seeger, et. al., “Recent development and interrupting performance with SF_6 alternative gases”, ELECTRA, No.293, pp. 34-39（2017）
13） 塚尾茂之、「SF_6 ガス代替技術の動向と要件」、電気評論 9 月号、pp. 45–55（2020）
14） H.E. Jung, et., al., “Development of SF_6-free 170 kV 50 kA 60Hz GIS with Fluoronitile（C_4F_7N）Mixtures”, CIGRE Session Report A3-114（2020）
15） 山本秀治他、「145 kV 乾燥空気絶縁タンク形 VCB の開発」、電気学会全国大会、6-014（2021）

6 謝辞

本調査報告書の作成にあたり、これまで電力系統に適用され、目覚ましい進歩を遂げてきた様々な方式の遮断器および開閉装置に関する歴史的な変遷や技術的なブレイクスルーに関する詳細情報を提供、内容に関する貴重な助言とご指導いただいた以下の皆様に謹んで心より御礼申し上げます。

- 英国ナショナルグリッド
  Mark Waldron 様（遮断器、空気遮断器）
- オランダ試験機関 KEMA
  Rene Smeets 様（遮断器全般）
- 東芝エネルギーシステム株式会社
  小坂田昌幸様（遮断器、開閉装置）
- 明電舎株式会社
  齋藤仁様（真空遮断技術）
- 日立エナジー株式会社
  山根雄一郎様（遮断器、開閉装置）
- 元電源開発株式会社（現・三菱電機）
  境武久様（直流送電技術）
- 三菱電機株式会社
  佐藤伸治様（真空遮断技術）
- 三菱電機株式会社
  笹森健次様（開閉装置）

関係者のご支援、ご協力がなければ、短期間に一世紀以上に渡る電力用遮断器および開閉装置調査報告書を仕上げることは困難であったと考えます。

また、電力事業の黎明期より、各電力会社の電力系統へ導入されてきた各種遮断器および開閉装置に関する写真や情報を提供頂いた以下の皆様に厚く御礼申し上げます。

- 東京電力パワーグリッド株式会社
  塚尾茂之様
- 中部電力パワーグリッド株式会社
  川北浩司様
- 関西電力送配電株式会社
  初崎昭典様
- 一般財団法人　電力中央研究所
  佐藤浩章様

電力会社と関連メーカーの緊密な協力体制で築き上げてきた、世界を凌駕する高い信頼性を維持している遮断器および開閉装置が引き続き、電力供給の安定性に貢献し続けることを祈念いたします。

電力用遮断器および開閉装置の系統図

1920 1930 1940 1950 1960

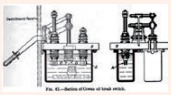
油遮断器

油遮断器の誕生(1893)　消弧室の発明(1916)　287.5 kV−2500MVA碍子形の開発(1934)　330 kV−25000MVAタンク形の開発(1954)

碍子形 vs タンク形

並切型油入遮断器の特許(1907)　他力併用自力消弧方式の実用化　ﾀﾞﾌﾞﾙﾌﾛｰ方式の実用化　関西電力275 kV送電開始(1952)

消弧室の発明・ｶﾞｽ吹付けによるアーク冷却
他力併用による小電流遮断性能の向上
ダブルフロー方式による効率的なｶﾞｽ排出


並切型(1900年頃)


40 kV並切型(1901)


287.5 kV-5000 MVA 制弧型(1954)


287.5 kV-5000 MVA碍子形


242 kV初期ﾊﾞﾙｸﾀﾝｸ形


345 kV-63 kA 節油ﾀﾝｸ形(1960)

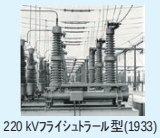
空気遮断器

空気遮断器の誕生(1898)　110 kVﾌﾗｲｼｭﾄﾗｰﾙ型の実用化(1931)　消弧技術に関する基本特許(1943、出願1926)

高圧力容器、ｼｰﾙ技術の確立

軸方向吹付方式、絶縁ﾉｽﾞﾙ、抵抗遮断方式の採用　ユニット方式による36〜735 kV多重切遮断器ｼﾘｰｽﾞ化(1935-1953)

消弧室の改良・遮断電流の向上
密閉空間の高ｶﾞｽ圧化による絶縁強度強化
標準化設計された消弧室の量産化
多重切方式による高電圧化
常時充気方式による遮断時間短縮


220 kVﾌﾗｲｼｭﾄﾗｰﾙ型(1933)


24 kV-1000MVA 碍子形(1952)


550 kV8点切単相(1957)


300 kV-15000 MVA 碍子形(1965)

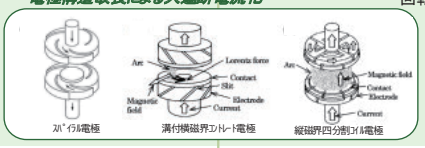
真空遮断器

真空の発見(1604)　真空ｽｲｯﾁの試作(1923)　真空ﾊﾞﾙﾌﾞの開発再開(1953)　横磁界ｺﾝﾄﾚｰﾄ電極の特許(1960)

真空技術、電極・ﾊﾞﾙﾌﾞ製造技術の確立

電極構造改良による大遮断電流化　回転型ｽﾊﾟｲﾗﾙ電極の特許(1958)


真空ｽｲｯﾁ、スミソニアン博物館(1923)

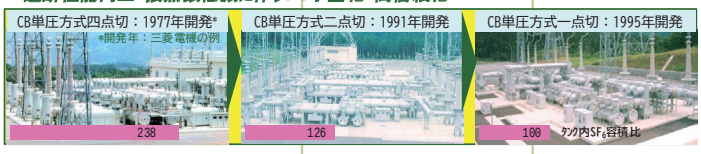


ｽﾊﾟｲﾗﾙ電極　溝付横磁界ｴﾝﾄﾚｰﾄ電極　縦磁界四分割ﾘﾝｸﾞ電極

ｶﾞｽ遮断器

SF_6の発見(1901)　SF_6ｶﾞｽ遮断器の誕生(1953)　230 kV−15000 MVA二重圧力方式の実用化(1958)

遮断性能向上・接点数低減に伴うGIS小型化・高信頼化



SF_6を遮断器に応用する基本特許(1956、出願1953)

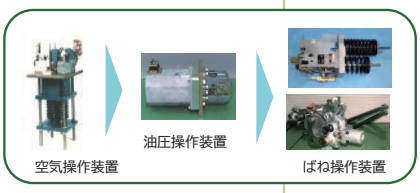

115 kV-1000 MVAｶﾞｽ遮断器(1953)


240 kV-15000 MVA 二重圧力方式(1963)

二重圧力式

遮断性能向上・接点数低減による小型化・高信頼化

操作装置の変遷に伴う保守省力・高信頼化

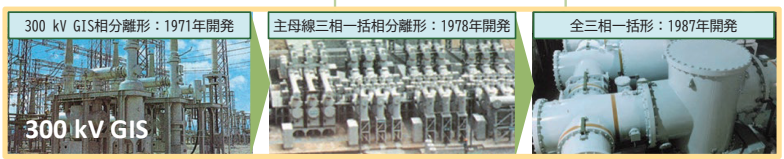


12 kV−100 MVA油絶縁開閉装置の開発（1935）　日84/72 kV GIS共同開発着手（1966）

ｶﾞｽ絶縁開閉装置

SiCｷﾞｬｯﾌﾟ付避雷器の実用化（1940年代）　150 kV空気絶縁開閉装置の開発（1953）　仏245 kV GIS実系統試験（1966）

形態集積化に伴うGIS小型化・高信頼化






12 kV-100 MVA油絶縁開閉装置(1935)

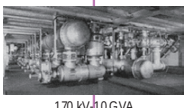

84 kVGISﾌｨｰﾙﾄﾞ試験を実施(1968-70)


84 kV主母線三相一括相分離形GIS(1969)

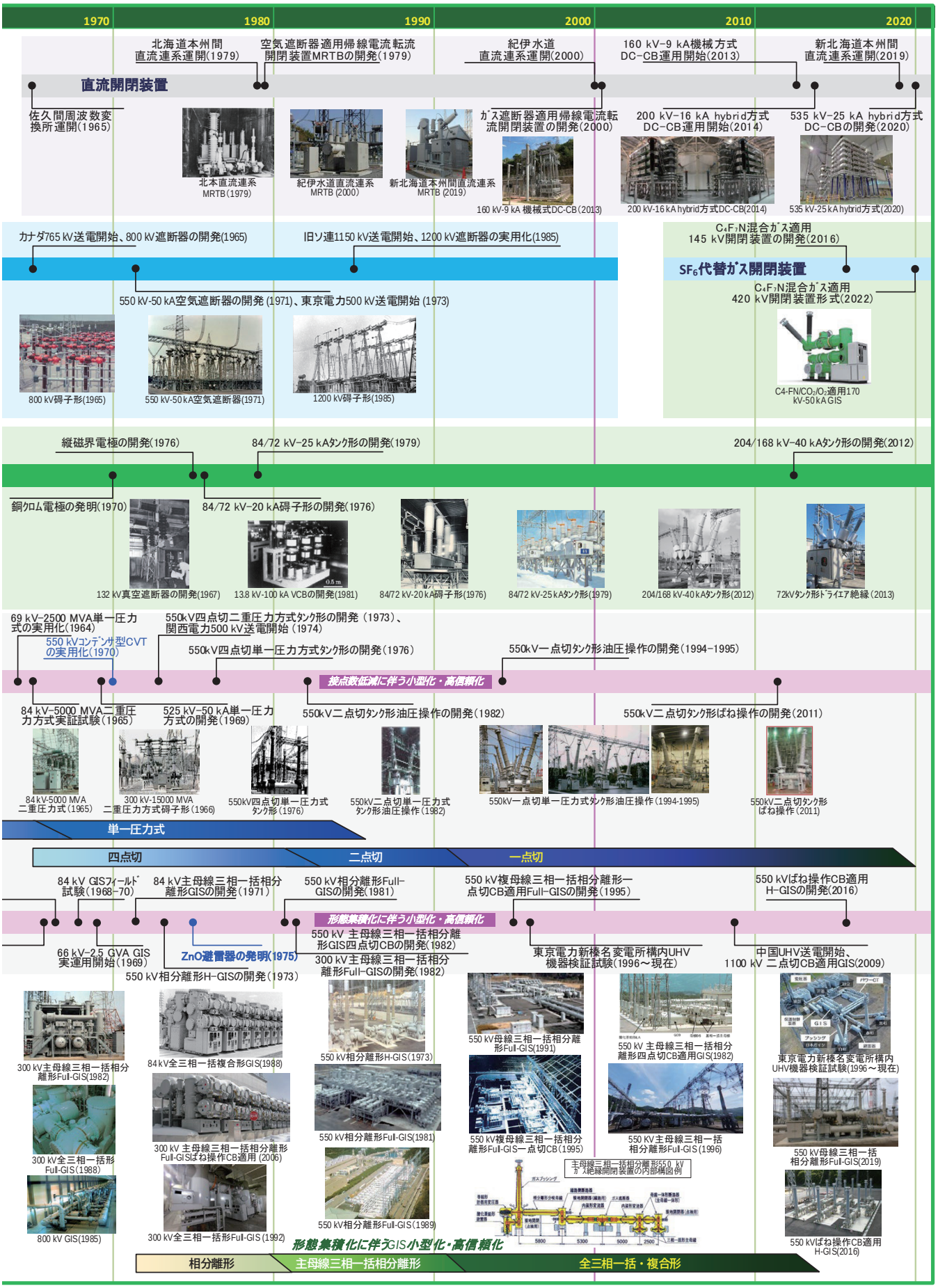

150 kV空気絶縁開閉装置(1953)


66 kV-2.5 GVA GIS実運用開始(1969)


84 kV主母線三相一括相分離形GIS(1971)


170 kV-10 GVA ｶﾞｽ絶縁開閉装置(1969)


300 kV 50 kA相分離形 Full-GIS(1974)


1970
1980
1990
2000
2010
2020
北海道本州間
直流連系運開(1979)
空気遮断器適用帰線電流転流
開閉装置MRTBの開発(1979)
紀伊水道
直流連系運開(2000)
160 kV-9 kA機械方式
DC-CB運用開始(2013)
新北海道本州間
直流連系運開(2019)
直流開閉装置
佐久間周波数変
換所運開(1965)
北本直流連系
MRTB(1979)
紀伊水道直流連系
MRTB(2000)
新北海道本州間直流連系
MRTB(2019)
ガス遮断器適用帰線電流転
流開閉装置の開発(2000)
200 kV-16 kA hybrid方式
DC-CB運用開始(2014)
535 kV-25 kA hybrid方式
DC-CBの開発(2020)
160 kV-9 kA 機械式DC-CB(2013)
200 kV-16 kA hybrid方式DC-CB(2014)
535 kV-25 kA hybrid方式(2020)
カナダ765 kV送電開始、800 kV遮断器の開発(1965)
旧ソ連1150 kV送電開始、1200 kV遮断器の実用化(1985)
C4F7N混合ガス適用
145 kV開閉装置の開発(2016)
SF6代替ガス開閉装置
550 kV-50 kA空気遮断器の開発(1971)、東京電力500 kV送電開始(1973)
C4F7N混合ガス適用
420 kV開閉装置形式(2022)
800 kV碍子形(1965)
550 kV-50 kA空気遮断器(1971)
1200 kV碍子形(1985)
C4-FN/CO2/O2適用170
kV-50 kA GIS
縦磁界電極の開発(1976)
84/72 kV-25 kAタンク形の開発(1979)
204/168 kV-40 kAタンク形の開発(2012)
銅クロム電極の発明(1970)
84/72 kV-20 kA碍子形の開発(1976)
132 kV真空遮断器の開発(1967)
13.8 kV-100 kA VCBの開発(1981)
84/72 kV-20 kA碍子形(1976)
84/72 kV-25 kAタンク形(1979)
204/168 kV-40 kAタンク形(2012)
72kVタンク形ドライエア絶縁(2013)
69 kV-2500 MVA単一圧力
式の実用化(1964)
550kV四点切二重圧力方式タンク形の開発(1973)、
関西電力500 kV送電開始(1974)
550 kVコンデンサ型CVT
の実用化(1970)
550kV四点切単一圧力方式タンク形の開発(1976)
550kV一点切タンク形油圧操作の開発(1994-1995)
接点数低減に伴う小型化・高信頼化
84 kV-5000 MVA二重圧
力方式実証試験(1965)
525 kV-50 kA単一圧力
方式の開発(1969)
550kV二点切タンク形油圧操作の開発(1982)
550kV二点切タンク形ばね操作の開発(2011)
84 kV-5000 MVA
二重圧力式(1965)
300 kV-15000 MVA
二重圧力方式碍子形(1966)
550kV四点切単一圧力式
タンク形(1976)
550kV二点切単一圧力式
タンク形油圧操作(1982)
550kV一点切単一圧力式タンク形油圧操作(1994-1995)
550kV二点切タンク形
ばね操作(2011)
単一圧力式
四点切
二点切
一点切
84 kV GISフィールド
試験(1968-70)
84 kV主母線三相一括相分
離形GISの開発(1971)
550 kV相分離形Full-
GISの開発(1981)
550 kV複母線三相一括相分離形一
点切CB適用Full-GISの開発(1995)
550 kVばね操作CB適用
H-GISの開発(2016)
形態集積化に伴う小型化・高信頼化
66 kV-2.5 GVA GIS
実運用開始(1969)
ZnO避雷器の発明(1975)
550 kV相分離形H-GISの開発(1973)
550 kV 主母線三相一括相分離
形GIS四点切CBの開発(1982)
300 kV主母線三相一括相分
離形Full-GISの開発(1982)
東京電力新榛名変電所構内UHV
機器検証試験(1996～現在)
中国UHV送電開始、
1100 kV 二点切CB適用GIS(2009)
300 kV主母線三相一括相分
離形Full-GIS(1982)
84 kV全三相一括複合形GIS(1988)
550 kV相分離形H-GIS(1973)
550 kV母線三相一括相分離
形Full-GIS(1991)
550 kV 主母線三相一括相分
離形四点切CB適用GIS(1982)
東京電力新榛名変電所構内
UHV機器検証試験(1996～現在)
300 kV全三相一括形
Full-GIS(1988)
300 kV 主母線三相一括相分離形
Full-GISばね操作CB適用(2006)
550 kV相分離形Full-GIS(1981)
550 kV複母線三相一括相分
離形Full-GIS一点切CB(1995)
550 kV主母線三相一括
相分離形Full-GIS(1996)
550 kV母線三相一括
相分離形Full-GIS(2019)
800 kV GIS(1985)
300 kV全三相一括形Full-GIS(1992)
550 kV相分離形Full-GIS(1989)
主母線三相一括相分離形550 kV
ガス絶縁開閉装置の内部構図例
550 kVばね操作CB適用
H-GIS(2016)
形態集積化に伴うGIS小型化・高信頼化
相分離形
主母線三相一括相分離形
全三相一括・複合形

遮断器および開閉装置の系統化調査　産業技術史資料　所在確認（導入時点の社名を記載）

番号	名称	製作年	製造社	所在地		選定理由
1	45 kV-250 A 油入開閉器、155 kV-600 MVA タンク形油遮断器	1917 年、1922 年	芝浦製作所（現・株式会社東芝）	撤去後、（株）東芝東芝未来科学館保有	神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34	芝浦製作所は、1900 年初頭に GE 社から技術を導入し 1911 年に油入開閉器を国産化。博物館に 1917 年に王子製紙納入器を保有。1920 年代に 154 kV-600 MVA タンク形油遮断器を、1930 年代に 230 kV 節油タンク形油遮断器を開発。
2	550 kV-50 kA 空気遮断器	1971 年	株式会社東芝	東京電力（株）房総変電所、新古河変電所、撤去済	（房総）千葉県市原市荻作 71、（新古河）茨城県猿島郡境町大歩 933	1971 年、東京電力は、房総変電所から新古河変電所間の送電線を 500 kV に昇圧し、国内初の 500 kV 送電を開始。東京電力房総および新古河変電所に東芝製 550 kV-50 kA 空気遮断器を導入。
3	真空遮断器用縦磁界電極	1976 年	株式会社東芝	多くの真空遮断器に適用		東芝は真空遮断技術の研究に注力し、1976 年に「縦磁界電極」を開発。これにより、真空遮断器の遮断電流は最大 40 kA まで向上した。「縦磁界電極」は、電極にコイルを取り付けて縦方向の磁界を発生させる構造。
4	定格電圧 13.8 kV-100 kA 真空遮断器	1981 年	株式会社東芝	電源開発（株）		東芝は、1976 年に縦磁界電極を用いた遮断電流 40 kA の真空遮断器を製品化、火力発電所へ納入。さらに 1980 年、遮断電流 63 kA の真空遮断器を原子力発電所向に開発。1981 年に、定格電圧 13.8 kV、遮断電流 100 kA 真空遮断器を開発。
5	72 kV- ガス絶縁開閉装置（GIS）の実運用開始	1969 年	株式会社東芝	東京電力（株）西堀変電所から撤去後、東芝浜川崎工場に展示	神奈川県川崎市川崎区浮島町 2-1	東芝は、1966 年東京電力と「変電所小型化共同研究」を開始。1969 年、東京電力西堀変電所に 66 kV-2.5 GVA GIS を納入し、実運用を開始。西堀変電所の GIS は日本で初めて実運用を開始した GIS。
6	ハイブリッドパッファ方式の開発	1984 年	株式会社東芝	多くのガス遮断器に適用		東芝は、1984 年、駆動エネルギーの低減を目的とした新消弧方式の開発を開始。従来のダブルフロー方式に代わり、シングルフローとダブルフローの利点を融合した「ハイブリッドパッファ方式」と呼ばれる方式を開発、72 ～ 1100 kV まで展開。
7	直列パッファ方式の開発	2008 年	株式会社東芝	多くのガス遮断器に適用		東芝は、操作エネルギーのさらなる低減を目指し、アークエネルギーを利用する自力消弧方式の研究を開始。従来の他力消弧方式を組み合わせた「直列パッファ方式」を開発。2008 年、300 kV-63 kA GIS 用遮断器として東京電力・北多摩変電所に納入。
8	550 kV 一点切タンク形ガス遮断器	1994 年	株式会社東芝	東京電力（株）新筑波変電所	茨城県結城郡八千代町新地 996	定格電圧 550 kV 遮断電流 63 kA の一点切遮断器を世界で初めて開発、運転開始した。この 1 点切遮断器を用いた 550 kV GIS は国内で採用された。またこの遮断。点を 2 つ直列に接続して 1100 kV 遮断器を開発。
9	72 kV 三相一括複合形 GIS	1997 年	株式会社東芝	九州電力（株）周船寺変電所	福岡県福岡市西区飯氏 939-1	単一圧力式・三相一括操作遮断器を用いた全三相一括形 72 kV GIS を開発、1976 年に東京電力豊島変電所へ納入。また、全三相一括形 GIS、並びに全三相一括複合形 72 kV GIS を開発、九州電力周船寺変電所などへ納入。
10	300 kV 50 kA 相分離形 Full-GIS	1974 年	株式会社東芝	東京電力（株）新多摩変電所	東京都八王子市上川町 141	1970 年に、東京電力北多摩変電所において、300 kV ガス絶縁母線および断路器を部分的に適用。その後、二重圧力式 CB を採用した 300 kV 相分離形 GIS を、1973 年に東京電力花見川変電所、1974 年に南多摩変電所に納入。
11	300 kV 母線三相一括相分離形 Full-GIS	1982 年	株式会社東芝	東京電力（株）花見川変電所	千葉県千葉市花見川区畑町 2037-1	300 kV GIS のさらなる小型化を目指し、1977 年から 300 kV 一点切 CB 開発に着手、1982 年に一点切油圧操作 CB を製品化。この遮断器を適用した 300 kV GIS を、同年に東京電力花見川変電所に納入。
12	300 kV 全三相一括形 Full-GIS	1989 年	株式会社東芝	東京電力（株）新坂戸変電所	埼玉県坂戸市青木 129	東芝は、1988 年、自力併用他力消弧方式 CB を適用した 72 kV GIS を、東京電力上野変電所に納入。更に 1989 年、自力併用消弧方式 CB を適用した 300 kV 全三相一括形 GIS を、東京電力新坂戸変電所へ納入。
13	800 kV GIS	1985 年	株式会社東芝	南アフリカ ESKOM BETA 変電所	7PG2+WJ Dealesville, 南アフリカ	東芝は、遮断部は 300 kV 消弧室を 4 点直列に構成して、当時世界最高電圧 800 kV GIS を製品化、1985 年に南アフリカ・エスコム電力公社へ納入。

14	550 kV H-GIS	1978 年	株式会社東芝	東京電力（株）新信濃変電所	長野県東筑摩郡朝日村小野沢	東芝は、1970 年代、電力会社における 500 kV 送電計画に対応して、300 kV CB の遮断部を 2 個直列にした 550 kV 単一圧力式四点切 CB を開発。1978 年から 1981 年に、東京電力新信濃変電所他、各電力会社に 550 kV H-GIS を納入。
15	550 kV 相分離形 Full-GIS	1981 年	株式会社東芝	東京電力（株）新野田変電所	千葉県野田市西三ケ尾 28	1981 年、四点切 CB を適用した 550 kV 相分離形 Full-GIS（GCB 横置き主母線上部配置構成）を東京電力新野田変電所に納入。
16	550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS	1991 年	株式会社東芝	東京電力（株）西群馬開閉所	群馬県吾妻郡中之条町四万 377	高性能避雷器の開発により、定格 550 kV 機器に対する雷インパルス耐電圧試験値（LIWV）が 1800 kV から 1425 kV に低減され、LIWV を低減した 550 kV 主母線三相一括形 Full-GIS は、1991 年、東京電力西群馬開閉所へ納入。
17	550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS	2019 年	株式会社東芝	東京電力（株）新佐原変電所	千葉県香取市片野 205	CB 横置き配置＋主母線上部配置構成を採用した、回線一体輸送が可能な 550 kV GIS を開発。2018 年、4000 A GIS を東京電力新信濃変電所、2019 年、8000 A 送電線回線を東京電力新佐原変電所（単一圧力式一点切 CB 適用）へ導入。
18	550 kV 地下変電所向 GCB 縦置形 Full-GIS	1998 年	株式会社東芝	東京電力（株）新豊洲変電所	東京都江東区豊洲 6 丁目 2	550 kV1 点切 GCB の開発により GCB の縦形配置が可能となり縮小化を実現、縮小化の利点を生かして 1998 年に世界初の 550 kV 地下変電所である東京電力新豊洲変電所へ納入。
19	1100 kV GIS の開発と UHV 実証試験	1996 年	株式会社東芝、株式会社日立製作所、三菱電機株式会社	東京電力（株）新榛名変電所内 UHV 機器試験場	群馬県吾妻郡東吾妻町川戸	東京電力を中心にメーカ 4 社（東芝、日立製作所、三菱電機、日本ガイシ）による機器単体の開発・検証を経て、1996 年に世界で初めて定格電圧 1100 kV のガス絶縁開閉装置を開発、新榛名変電所内 UHV 機器試験場のおいて実証試験を開始。
20	550 kV 単一圧力式四点切タンク形ガス遮断器	1973 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）猪名川変電所	兵庫県川辺郡猪名川町鎌倉	550 kV GIS タイプのガス遮断器が関西電力猪名川変電所において世界で初めて運転が開始された。高圧ガス遮断器は、実系統導入後わずか数年で 550 kV クラスに到達、異例の開発スピード。
21	550 kV 一点切タンク形ガス遮断器	1995 年	三菱電機株式会社	中国電力（株）新山口変電所	山口県美祢市豊田前町嶽 141-5	550 kV 単一圧力タンク形ガス遮断器を一点切で実現。
22	362 kV-63 kA 三相一括ばね操作遮断器	2002 年	三菱電機パワープロダクツ	北米電力に多数導入	米国ペンシルバニア州ピッツバーグ市	362 kV-63 kA 単一圧力タンク形ガス遮断器を三相一括構成として、ばね操作装置（トーションバー方式）を適用して実現。
23	空気操作装置（AM 操作機構）	1977 年	三菱電機株式会社	北米電力会社などに多数導入	三菱電機系統変電システム製作所、兵庫県尼崎市塚口本町 8 丁目 1-1	空気操作装置は、日本では油圧操作装置およびばね操作装置が好まれ、次第に使われなくなっているが、装置の構造は簡単で信頼性が高いため、欧米における適用事例は少なくない。米国 550 kV-63 kA 一点切ガス遮断器に約 700 台適用済。
24	油圧操作装置（OM-1 操作機構）	1987 年	三菱電機株式会社	国内電力会社へ多数導入	同上	油圧操作装置は、駆動力の動作応答性に優れており、550 kV クラスの高電圧・大容量の遮断器に広く適用。1970 年代に、配管接続部を排除し、各部品を直接接続する「ブロック方式」が開発され、漏油問題の解消と信頼性を向上。1983 年特許出願。
25	コイルばね操作装置（BM-1）	1982 年	三菱電機株式会社	国内および海外電力会社へ多数導入	同上	安価で構造簡素なため高信頼性、温度依存性が少なく安定した動作特性を保有。
26	トーションバー式ばね（ねじり棒）を採用したばね操作装置（BM-2）	1988 年	三菱電機株式会社	国内および海外電力会社へ多数導入	同上	ばね操作では、操作力を大きくすることが難しいという課題があったが、従来のコイルばねに代わり、エネルギー効率の高いトーションバー式ばねを採用したばね操作装置が実用化、定格 550 kV クラスまでの遮断器に対して、ばね操作方式の適用が可能に。
27	550 kV 四点切タンク形ガス遮断器	1981 年	株式会社日立製作所	東京電力（株）新榛名変電所、撤去済	群馬県吾妻郡東吾妻町川戸	高圧ガス遮断器は、84/72 kV クラスの実系統導入からわずか数年で 550 kV クラスまで製品化。
28	550 kV 一点切タンク形ガス遮断器	1996 年	株式会社日立製作所	各電力会社へ納入		遮断性能向上を目指して、軸方向同期吹付方式（シンクロパッファ方式）を開発、1980 年代に 550 kV-50 kA クラスの遮断器を開発。また、国際試験場（KEMA における形式試験を通じて、世界市場への展開。

29	84 kV 全三相一括複合形 GIS	1988 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）加古川変電所	兵庫県高砂市米田町古新 210-2	1980 年代半ば以降、GIS の小型化と信頼性向上を目的に、三相一括化に加え、複数機器を 1 つのタンクに収める「複合形 GIS」が製品化された。これにより、構造が簡素化され、部品点数が減り、信頼性が向上。
30	550 kV 相分離形 H-GIS	1973 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）猪名川変電所	兵庫県川辺郡猪名川町鎌倉	関西電力は 500 kV 送電にガス絶縁複合開閉装置（GIS）を採用する方針を決定。1970 ～ 1971 年にかけて 550 kV GIS プロトタイプによる長期課電試験を実施。1973 年に 550 kV H-GIS を猪名川変電所に導入、翌 1974 年より 500 kV 送電を開始。
31	550 kV ガス絶縁開閉装置（フル GIS）	1976 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）大飯原子力発電所内特高開閉所	福井県大飯郡おおい町大島 1 字吉見 1-1	1976 年に母線まで含めてすべての機器をガス絶縁化した 550 kV フル GIS が世界で始めて実現。現在においても良好に運転継続、GIS の高い長期信頼性と塩害地区での優れた耐環境性を立証。以降、国内原子力発電所の変電設備は Full-GIS を採用。
32	550 kV H-GIS	1977 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）奥吉野揚水発電所	奈良県吉野郡十津川村旭	550 kV 50 kA 単一圧力方式パッファ形四点切遮断器を適用した 550 kV GIS が関西電力奥吉野揚水発電所へ納入。現在、最新の遮断器に採用されている単一圧力方式のパッファ形が GIS に適用され、各社のパッファ形遮断器の性能が飛躍的に向上。
33	550 kV H-GIS ばね操作 CB 適用	2016 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）金剛変電所	大阪府河内長野市天見	GIS のさらなる小型化および高信頼性、保守点検の省力化のニーズに対応するため、三菱電機は定格 550 kV 遮断器のばね操作化を進め、2013 年、二点切トーションばね操作遮断器およびポリマーブッシングを適用した縮小形 550 kV H-GIS を開発。
34	1-1/2 遮断器方式変電所納 550 kV GIS	1975 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）西京都変電所	京都府京都市西京区大原野外畑町	1-1/2 遮断器方式で構成された関西電力西京都変電所へ、1975 年に相分離形 550 kV GIS を導入、遮断器は二重圧力式および単一圧力方式四点切を適用。
35	二重母線 1 ブスタイ方式主母線三相一括相分離形 550 kV GIS	1982 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）新三河変電所	愛知県新城市川田新間平	二重母線 1 ブスタイ（1 台の母線連結 CB）方式で構成された中部電力新三河変電所へ 1982 年に、主母線三相一括相分離形 550 kV GIS を導入、遮断器は単一圧力方式四点切を適用。
36	二重母線 4 ブスタイ方式 550 kV GIS	1991 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）豊根開閉所	北設楽郡豊根村三沢	二重母線 4 ブスタイ（方式で構成された中部電力豊根開閉所へ、1991 年に主母線三相一括相分離形 550 kV GIS を導入、遮断器は単一圧力方式二点切を適用。
37	550 kV 複母線三相一括相分離形 Full-GIS	1995 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）南信変電所	長野県駒ヶ根市中沢	1995 年、中部電力南信変電所（変圧器回線側）へ単一圧力式一点切 CB を適用した、550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS を納入。
38	550 kV 主母線三相一括相分離形 GIS	1982 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）新三河変電所	愛知県新城市川田新間平	300 kV 主母線三相一括形 GIS の実用化に続き、1982 年、中部電力との共同研究により、550 kV GIS 用主母線三相一括相分離形（単一圧力式四点切 CB 適用）Full-GIS を実現。
39	300 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS	1983 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）西尾張変電所	愛知県愛西市森川町宮西	1970 年代前半、300/240 kV GIS は主母線・回線ともに相分離構造の「完全相分離形」が採用された。その後、三相一括技術の進展により、1970 年代末には主母線の三相一括化を実現。
40	300 kV 全三相一括形 Full-GIS	1988 年	三菱電機株式会社	中部電力（株）南武平町地下変電所	愛知県名古屋市中区栄 5 丁目 2-2	三相一括技術と機器複合化により、240/300 kV クラスの全三相一括形 GIS を実用化、1988 年、300 kV 全三相一括形 GIS（単一圧力式一点切油圧操作 CB 適用）を中部電力南武平町変電所へ納入。
41	300 kV 主母線三相一括相分離形フル GIS ばね操作 CB 適用	1989 年	三菱電機株式会社	北海道電力（株）泊原子力変電所	北海道古宇郡泊村大字堀株村字山の上 219-1	GIS 一体輸送により工場で組立・試験・品質確認された状態のまま、現地へ輸送・据付を可能にした。併せて、現地工事と試験工程が短縮され、変電所の建設期間短縮と建設コスト削減、機器信頼性向上に寄与。
42	300 kV 全三相一括形 Full-GIS	1992 年	株式会社日立製作所	中部電力下広井変電所	愛知県名古屋市中村区下広井町	名古屋都心の地下変電所に設置された 300 kV 全三相一括形 Full-GIS。
43	550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS	1996 年	株式会社日立製作所	中部電力岐阜開閉所	岐阜県郡上市美並町大原	高性能避雷器の開発により、定格 550 kV 機器に対する雷インパルス耐電圧試験値（LIWV）が 1800 kV から 1425 kV に低減され、550 kV 主母線三相一括相分離形 Full-GIS を開発、岐阜開閉所へ導入。

44	72 kV-20 kA 配電用真空遮断器	1975 年	明電舎株式会社	東京電力富士根変電所	静岡県富士市水戸島 2 丁目 1-33	1975 年、72 kV-20 kA の真空バルブを適用した配電用真空遮断器を、東京電力富士根変電所に納入した。また同年、国内初となる大容量高圧真空バルブを用いた一接点構成の 84 kV-25 kA VCB を開発にも成功。
45	電力用 84/72 kV 碍子形真空遮断器	1976 年	明電舎株式会社	防衛医科大学、国鉄酒折変電所	山梨県甲府市酒折 3 丁目 12-27	国内初の高電圧真空遮断器の製品化。
46	84/72 kV-25 kA タンク形真空遮断器	1979 年	明電舎株式会社	東北電力など国内電力会社へ多数導入		1978 年に発生した宮城沖地震により、碍子形 VCB が甚大な被害を受けたことを受けて、1979 年には電力用 84/72 kV タンク形 VCB を製品化。
47	168 kV-40 kA 碍子形真空遮断器	1981 年	明電舎株式会社	新日本製鉄名古屋 製鉄所	愛知県東海市東海町 5 丁目	当時最大定格となる 168 kV-40 kA 碍子形 VCB を製品化し、新日本製鉄へ納入。
48	204 kV-40 kA タンク形真空遮断器	2012 年	明電舎株式会社	北海道新幹線（新青森～新函館間）新函館変電所	木古内－新函館北斗間	2012 年に、当時世界最高定格電圧の 204 kV-40 kA タンク形 VCB を北海道新幹線（新青森～新函館間）の変電所へ納入。この真空遮断器は、低圧（0.15 MPa）の SF_6 ガスを絶縁媒体として使用。
49	72 kV-31.5 kA ドライエア絶縁真空遮断器	2023 年	三菱電機株式会社	関西電力送配電（株）長田野変電所	京都府福知山市長田野町 2 丁目	環境負荷の低減を目的に、ドライエア絶縁の 72 kV-31.5 kA 一点切真空遮断器を 2023 年に関西電力送配電・長田野変電所へ納入した。また、翌 2024 年にはこの VI を適用した複合開閉装置を開発。
50	66 kV 酸化亜鉛形避雷器	1975 年	明電舎株式会社	九州電力隼人変電所	鹿児島県霧島市隼人町小田	1970 年、松下電器と共同で、電力用 ZnO 素子の応用研究を開始した。1975 年に、世界初の酸化亜鉛形避雷器が九州電力の 66 kV 系統・隼人変電所へ導入。
51	550 kV タンク形酸化亜鉛形避雷器	1978 年	三菱電機株式会社	九州電力（株）西九州変電所	佐賀県伊万里市南波多町谷口	金属酸化物避雷器は変電機器や電力系統で発生する異常電圧を抑制、電力供給の安定化に貢献。国内最初のタンク形 550 kV MOSA が 1978 年に GIS へ初適用。
52	550 kV 碍子形酸化亜鉛形避雷器	1979 年	三菱電機株式会社	関西電力（株）西播変電所	兵庫県相生市矢野町小河	同上、1979 年には国内最初の碍子形 550 kV MOSA を導入。
53	帰線用直流電流転流開閉装置（MRTB）	1979 年	株式会社日立製作所	電源開発（株）上北変換所	青森県上北郡東北町塔ノ沢山 134-1	北海道・本州間連系の MRTB として交流用空気遮断器の 1 相分 2 台を改造した装置が採用された。この MRTB は電力中央研究所の協力のもと日立製作所が開発。
54	帰線用直流電流転流開閉装置（MRTB）	2000 年	三菱電機株式会社 株式会社東芝	関西電力（株）紀北変換所	和歌山県伊都郡かつらぎ町志賀 1305-18	遮断器極間に発生したアークを利用して LC 回路との相互作用により電流振動を増大させ、電流が零になる状態を発生させて遮断する技術を、SF_6 ガス遮断器を適用して実現、2000 年に国内で初めて紀北変換所へ適用。
55	帰線用直流電流の転流開閉装置（MRTB）	2019 年	株式会社東芝	電源開発（株）上北変換所	青森県上北郡東北町塔ノ沢山 134-1	技術は上記記載、雷撃によって架空帰線に発生した故障を MRTB の閉路操作によって除去した後、開路操作により故障除去後の数千アンペアの電流を HVDC 送電線の中性線へ転流。
56	500 kV 直流ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）	2000 年	三菱電機株式会社 株式会社東芝	四国電力納（株）阿南変換所、関西電力（株）由良開閉所	（阿南）徳島県阿南市橘町幸野 106、（由良）和歌山県日高郡由良町大字小引	紀伊水道直流連系の紀北変換所および阿南変換所では、世界で初めて直流ガス絶縁開閉装置（DC-GIS）を導入。この DC-GIS は、断路器、接地スイッチ、過電圧保護装置、変流器、変成器で構成。
58	250 kV DC-GIS	2019 年	株式会社東芝	北海道電力（株）北斗変換所		2019 年､北海道と本州を結ぶ新北本連系設備に 250 kV DC-GIS を納入した。この GIS は、2000 年以降の直流絶縁に関する最新の知見を反映し、コンパクト化達成。
59	自立型 550 kV コンデンサ型変圧器 CVT	1970 年	日新電機株式会社	東京電力房総変電所、関西電力能勢変電所など	千葉県市原市荻作 71、大阪府豊能郡能勢町吉野	国内 500 kV 送電への対応として 550 kV CVT を開発。1970 年には懸垂型 550 kV CVT を実用化、1971 年、東京電力房総変電所等に計 30 台を納入。1972 年、関西電力能勢変電所に自立型 550 kV CVT を納入。
60	77 kV ～ 550 kV 巻線型ガス絶縁 VT	1977 ～ 1982 年	日新電機株式会社	国内電力各社へ導入		1976 年に MWB 社と技術提携、1977 年より GIS 用ガス VT の生産を開始。1978 年、154 kV 単相形の巻線型ガス絶縁 VT 初号機を電源開発へ納入。1980 年に 400 kV クラス、1982 年に 500 kV クラス VT を製品化。

※この所在確認リストは、例外的に変電所から撤去済の機器を含む。

「電力用遮断器および開閉装置の系統化調査（2025 年度版）」

報告書冊子との相違点（正誤表）

ページ	段落	行	第 35 集 冊子版 2026 年 3 月	全文 PDF 版 2026 年 6 月 （正）
229	要旨	下から 11 行目	小形化	小型化
230	Abstract	下から 4 行目	United Stats	United States
231	Profile	4 行目	1974 年 4 月	1984 年 4 月
232	右	下から 19 行目	送電距離が 1 km を超えると電圧が著しく低下するため、遠方への送電は困難であった。	低電圧のまま長距離送電を行うと電流が大きくなり、線路損失および電圧降下が増大するため、遠方への送電は困難であった。
232	右	下から 10 行目	交流送電を開始した。	交流送電を実証した。
233	右	下から 7 行目	さらに一次変電所で 6.6 kV まで降圧され、	さらに配電用変電所で 6.6 kV まで降圧され、
233	右	下から 3 行目	残りの電力は二次変電所に送られ、さらに 2.2 kV まで降圧されて一般需要家へ供給される。	残りの電力は、6.6 kV 配電線を経て需要家に供給され、柱上変圧器によって使用電圧（100/200 V）に降圧される。
235	左	下から 14 行目	分離する断路器、そして落雷や遮断器の	分離する断路器、落雷や遮断器の
237	左	下から 2 行目	図 1.8 に示す単一母線方式の変電所は、変圧器を有する受電回線が二系列、送電回線も二系列がひとつの母線に接続されている。この場合、母線で短絡事故が発生した場合、すべての回線が停止、全停となる。	図 1.8 に示す単一母線方式の変電所は、変圧器を有する受電回線が 2 系列、送電回線も 2 系列あり、これらがひとつの母線に接続されている。この場合、母線で短絡事故が発生すると、すべての回線が停止、全停となる。
240	コラム 1	9 行目	人類は初めて電流を得た。	人類は初めて持続的な電流を得た。
242	右	下から 5 行目	並切型油遮断器	並切型油入遮断器
251	右	下から 9 行目	絶縁耐力が約 100 kV 程度という限界があり、	絶縁耐力が約 100 kV という限界があり、
254	左	9 行目	1962 年に軸方向空気吹付方式変更し、1962 年に、72/84 kV-2500 MVA	1962 年に軸方向空気吹付方式へ変更し、同年に、72/84 kV-2500 MVA
255	右	11 行目	これらの要求を応える技術として、	これらの要求に応える技術として、
255	右	下から 10 行目	最高送電電圧（800/550 kV）	最高送電電圧（1200/800/550 kV）
258	右	下から 4 行目	この電極では、円筒カップ状電極の側壁に設けられたスロット（溝）によって電流が誘導され、縦方向の磁場を発生させる。	この電極は、円筒カップ状電極の側壁に設けられたスロット（溝）により電流経路を形成し、軸方向（縦方向）の磁界を発生させる構造である。
269	表 2.8	—		
276	左	下から 5 行目	耐汚染性能	耐汚損性能
278	左	4 行目	あらゆる開閉過電圧	あらゆる過電圧
282	図 3.25	図題	計器用変成器	計器用変圧器
283	左	下から 10 行目	内径側は主接点、外径側は抵抗接点であり外周部が抵抗体要素を構成する。	外径側は主接点、内径側は抵抗接点であり内周部が抵抗体要素を構成する。
283	右	下から 14 行目	①電圧の変換（変圧器）	①電圧の変換（変圧器）、
284	左	2 行目	変電所のすべての構成機器（遮断器、断路器、接地開閉器など）	変電所の主要構成機器（遮断器、断路器、接地開閉器、母線など）
286	左	9 行目	大きな役割を果しており	大きな役割を果たしており
287	右	6 行目	大津変電所に GIS 初号器機を納入し、	大津変電所に GIS 初号機を納入し、
287	右	11 行目	約 50 年間にわたり運用後に更新	約 50 年間にわたり運用された後に更新
288	右	5 行目	の利点が明確に示さた	の利点が明確に示された
288	右	8 行目	これ以降、各電会社における	これ以降、各電力会社における
288	右	下から 1 行目	使用台数の伸びは目覚しいものがある。	使用台数の伸びは著しいものがある。

ページ	段落	行	第 35 集 冊子版 2026 年 3 月	全文 PDF 版 2026 年 6 月 （正）
289	左	10 行目	各相の機器および導体をそれぞれ独立したタンク内に収納した GIS	各相の機器および導体をそれぞれ独立のタンク内に収納した GIS
289	左	下から 7 行目	各相独立した密閉タンクに収納した「相分離形」	各相独立の密閉タンクに収納した「相分離形」
289	左	下から 4 行目	「主母線三相一括形」を経て	「主母線三相一括分離形」を経て
290	図 3.49	図題	300 kV 主母線一括相分離形	300 kV 主母線三相一括相分離形
290	図 3.50	図題	300 kV 全相分離形 Full-GIS	300 kV 全三相一括形 Full-GIS
290	図 3.51	図題	泊原子力変電所	泊原子力発電所
291	図 3.53	図題	300 kV 母線三相一括	300 kV 主母線三相一括
293	左	2 行目	550 kV GIS が関西電力	550 kV GIS を関西電力
293	右	3 行目	GIS の適用拡大が著しく増加した。	GIS の適用が著しく進んだ。
293	右	下から 8 行目	550 kV 母線三相一括形 GIS の母線	550 kV 主母線三相一括形 GIS の母線
294	左	11 行目	縮小され、、また、三相母線および	縮小され、また、三相一括主母線および
294	左	下から 6 行目	現地工事の大幅短縮や保守省力化	東芝は、現地工事の大幅短縮や保守省力化
296	右	15 行目	電力ユーザ殿を取り巻く環境	電力ユーザを取り巻く環境
308	右	下から 8 行目	電圧変成器（PT）	電圧変成器（VT または PT）
315	左	4 行目	各国の電力会社がひとつの技術を最終解とする意見の一致は見なかった。	各国の電力会社の意見が一致し、ひとつの技術を最終解としたことはなかった。
321	謝辞左	2 行目	目まぐるしい	目覚ましい
322	系統図	～ 1920 年 1 段目（油遮断器）	並切型油遮断器の特許（1907）	並切型油入遮断器の特許（1907）