遮断器の歴史と日本独自技術開発への期待

正員 吉岡 芳夫* 正員 吉永 淳**
正員 柳父 悟***

History of Circuit Breakers and Expectations of Japanese Original Development

Yoshio Yoshioka*, Member, Kiyoshi Yoshinaga**, Member, Satoru Yanabu***, Member

This paper studies the history of high voltage circuit breaker engineering. Methods of analysis are (1) to collect facts in regard to its development, (2) to review the history in order to find essential factors and (3) to identify its pros and cons from engineering point of view. The amount of electric power consumption has increased and gradually the circuit breaker concept was developed. At first the oil circuit breakers were developed in Europe and the air circuit breaker and vacuum circuit breaker were developed. Finally the SF₆ gas circuit breakers are developed together with the gas insulated switchgear and what is next? The future research and development policy is also discussed.

キーワード：歴史，遮断器，開発

Keywords : history, circuit-breaker, development

1. まえがき

遮断器は電力系統にあって開閉保護の役割を果たす機器である。したがって要求される機能，性能は発電・送電容量，系統電圧や系統構成，運用方法により大きく影響を受ける。遮断器の変遷で特徴的なことは，一つは電流遮断時の消弧媒体が変遷してきたこと，もう一つはその形態が時代の要請とともに変化してきたことである。いずれの遮断器も初期には欧州や米国で開発されたが，いち早く国内にも技術導入されたものが多い。その後社会環境や系統の変化に沿って改良されていった。その結果，500kV 主幹系統導入時には国産遮断器が使用されるようになり，また独自の形態で GIS 化に関する自主技術を確立していった^{(1)~(3)}。

本論文では電力系統とともに発展してきた遮断器の大きな流れを中心にその背景や技術の展開を考察するものである。技術の発展には開発，改良そして新しい技術へと発展していくが，それぞれの過程で推進，転換する要因や動機がある。これらの分析から技術の現在と今後を見てみるこ

とも意義のあることと考える⁽¹⁾。

2. 遮断器開発^{(4)~(8)}

スミソニアン博物館で見たものは大変大きな気中開閉器である。多分アークを気中で引き伸ばして遮断するタイプでアーク長が 1m 程度になるような接触子がついていた。この程度のアーク長にならないと遮断できないことは当然であるがとても経済的ではないように見えた。

〈2・1〉 油遮断器^{(9)~(13)} その頃から何時の間にか油遮断器の時代になった。油は万一遮断不能した場合や被災により火災になる恐れがあり，最初に遮断試験をやった人は独創性のあった人だと思う。日本で最初に油遮断器を製作したのは現存する最古の図面(当時は油入三極開閉器と呼ばれた)から推定して 1897 年(明治 30 年)頃と先輩から聞いている。

1904 年には現在と同じ工業図面があり 6kV-15kV, 200A-250A を始め各種開閉器が生産された。従って欧米で開発されたのはそれよりかなり以前の話であると想像できる。当時は並切り電極と称して単に電極を開閉するだけであった。当時は電源も小さく，かつ遮断器もなく開閉するだけであった。その内，発電機の容量が上がると事故時に発電機の停止だけでなく，開閉器の爆発など起こり，徐々に遮断器の必要性が生じてきた。最初は地絡を防ぐためアークを絶縁筒で蓋うことや，鉄タンクのボルトを強化することから始まり，1920 年ころから消弧室の開発が始まった。しかし日本でも大正年間(1912-1926 年)に遮断容量増加が始

* 金澤工業大学 電気系
〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1
Kanazawa Institute of Technology
7-1, Ohgigaoka, Nonoichi-cho, Ishikawa-gun, Ishikawa 921-8501

** 福井工業大学 電気電子工学科
〒910-8505 福井市学園 3-6-1
Fukui University of Technology

3-6-1, Gakuen, Fukui 910-8505
*** 東京電機大学 電気工学科
〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2
Tokyo Denki University
2-2, Kandanishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

まり昭和に入ってから飛躍的に遮断容量が伸びた。

図1は大正年代初期の絵葉書である。1928年米国のSlepianが消弧原理を解明し、それ以降飛躍的に遮断容量は増加した。彼によると交流消弧は原則として電流が零値を通過するときに行われ、その時に電気入力がなくなった接触子間のガス・アークの冷却、消イオン等による極間絶縁耐力と再起電圧の上昇と何れが勝つかによって、消弧に至るか続弧に至るか決まるといふ説で、それ以降この考え方で消弧室の開発が進められるようになった。消弧室を設け、アークのエネルギーを利用して圧力などを蓄え電流を遮断することが行われ始めたが、欧州の中でもドイツの貢献は大きい。遮断のメカニズムとしては(1)加圧されたアーク・ガスの急膨張による体積冷却(膨張消弧)、(2)アーク・ガスの固体壁への接触によるイオンの壁面上中和(壁面消弧)、(3)アーク・ガスを包む油の流れやタービュランスによるアーク・ガスと油との接触によるアーク・ガスの冷却(伝熱消弧)、(4)油流によるアーク・ガスの極間よりの吹き払いとその冷油との置換(置換消弧あるいは油衝消弧)、などである。そのうち何に重きを置くかによって各種商品名がつけられている。図2に消弧原理を示してあるが、いずれもこのような方式に分類できる。

米国では消弧室をタンクに入れたタンク型油遮断器が用いられるようになり、多分最近まで第一線の遮断器として使用されていた。その後、消弧室を碍子に入れるタイプ、即ち碍子形少油量遮断器が普及されるようになった。日本で

東京電燈絵葉書で右側が GE の 50kV の油入開閉器

図1 開閉器と母線

Fig. 1. Very old switchgear room at TEPCO.

Axial Blast Type

Radial Blast Type

図2 油遮断器の遮断の2方式

Fig. 2. Interruption principle in OCB.

も開発の最初はタンク形であったが、順次碍子形が採用されるに至った。1932年に154kVの遮断器が、1952年には275kVのそれができ、北陸幹線の送電が開始された。

また当時、朝鮮や満州でも日本の技術により水力発電と超高压送電が普及し、油遮断器が使われた。多くの場合図3に示すように275kVで6点切りではあるが3サイクル遮断が可能で、遮断容量は5,000MVAであるが定格電流は1,000A以下であった。この遮断器は遮断電流も40kAが遮断できるなど技術的に大変な進歩をし、国内の超高压送電に使われた。高速再閉路や開閉サージ抑制なども採用されるに至り、戦後の一時期は大いに普及した。各メーカは製品開発に務めたが、当時はメーカに短絡設備がなかったため、各電力会社は自社の実系統を使って短絡試験を行った。1939年に東芝に35,000kVAの短絡設備が完成し大変な注目を浴び、各メーカの製品の試験が行われた。尚、当時から合成試験法が確立するまで遮断試験は電流試験と電圧試験を区別して実施され、遮断容量は現地試験に頼っていた。これが今で云う産・官・学の交流の場となった。

〈2・2〉 空気遮断器⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾ 油遮断器は遮断すると油が炭化(黒化)するだけでなく、保守も大変である。欧州の短絡試験場に行くと、試験室が真っ黒になっており、聞くと遮断不能の時火災を起こした後であるという。空気遮断器はこのような欠点がなく、空気遮断器の方が良いとの認識になってきた。高速気流を使って遮断する空気遮断器は欧州において AEG や BBC で開発され 1931 年頃から実系統に採用された。AEG の遮断器はフライシュトラール型と称し遮断時にアークを大気中に放出する方式であった。BBC も同時期に製品化し、GE や WH(ウエスティングハウス)もそれに続いて開発を始めた。BBC は遮断部を高気圧空気で充填した常時充気式遮断器を開発し、遮断時間は極めて短くなった。このタイプは遮断能力が向上し、電極間距離も小さい等の特徴があった。また遮断部がユニット方式で生産される方式を採用したため大量生産に向くことなどから大変注目を浴びた。

以降当分の間空気遮断器が主流を占めるに至った。消弧のための空気圧力も高いものでは30気圧まで使われるようになった。遮断時間については空気遮断器では50kAの電流

287.5kV-800A-2,500MVA

図3 少油量形油遮断器

Fig. 3. Minimum oil circuit breaker.

図4 空気遮断器の遮断原理

Fig. 4. Interruption principle of ABB.

を2サイクルで遮断できるようになった。

国内では1943年になり、絶縁油が不足することと、火災の心配が無いことから、当時の立川航空技術研究所に23kV-500MVAの空気遮断器が納入された。爆撃されて実用化には至らなかったがこれが最初の製品である。1953年になると東京日比谷変電所に24kVの空気遮断器が導入され、実用化が始まった。各社は海外から技術を導入したり、海外の製品を調査したりして製品化にこぎつけた。このように空気遮断器は、油が無く清潔で、多頻度の開閉が可能なので、電力系統用の他にも製鉄所用(多頻度型)や電鉄用など屋内用にも多く使われた。この一般産業用の空気遮断器は後述する高圧用とは形状が異なる。

他方、前述のようにBBCの技術は他を抜きん出ているような印象を受けたため、東芝は1953年BBC技術を導入をして空気遮断器の製品化を行った。当初は80.5kV, 8,000A, 2,500MVA程度であったが、次第にその容量は増加して、最終的には550kV, 1,200A, 50kA (15GVA)のものまで開発されるに至った。

遮断については図4に示すように電極開極とともに高圧空気を外に向って吹き付ける構造になっている。圧力は10-30気圧である。アーク期間中に電流ピークを迎えるとアークの半径が大きくなり、ノズルを塞ぐことになり、いわゆるノズルクロッキング現象が起こる。すると高圧空気が流れなくなるため、高温ガスが排出されなくなり、遮断不能となる。その為、電流値、気圧とアーク径の関係が重要になる。また当時認識されるようになった圧力、電流、固有再起電圧上昇率とノズル径の関係が最大のポイントになった。多くの研究が行われ、近距離線路故障(SLF)遮断現象やアークのMayrやCassieのモデルも研究された。空気遮断器ではアーク期間中にクロッキングを起こさないようにすることが原則であったが、後に述べるSF₆ガス遮断器では逆にこの現象を起こさせアーク期間中のエネルギーを遮断に使用することが異なる。

図5に300kVの空気遮断器を示す。小電流特性も良好であり、図6に示すようにユニット式の生産ができるので、昭和40年代には超高压迄のシリーズ化が簡単にでき、50kA, 2サイクル遮断が可能であるなど大きな利点があっ

図5 江東変電所 300 k V 空気遮断器

Fig. 5. 300kV ABB indoor substation.

昭和40年代主流の空気遮断器

図6 ユニット式構造

Fig. 6. Block production for ABB.

た。しかし空気遮断器は碍子の上部に遮断部を設けるため、頭部の重い構造になり、耐震性に問題があること、SLFに弱いため抵抗遮断方式を採用せざるを得なかったこと、断路部を設けなくてはならなかったこと、550kVで8点切りと多点切りであることなどに加え、遮断時に爆発音がすることなど問題点があった。また欧州で開発されたSF₆ガス絶縁による縮小型変電所用の遮断器としては、空気遮断器が採用できない点も問題になってきた。これが後のSF₆ガス遮断器の開発につながる訳である。

日立を除く国内各メーカーが欧米の同業メーカーと技術提携した。1953年頃から話題になったSLF遮断は合成試験で1953年ごろには国内でも検証可能となり、積極的に試験されるようになった。以降、遮断試験設備が大きく開発を左右することになってきた。SLF遮断や高再起電圧への対応は、空気遮断器では抵抗遮断で対応することが可能となった。また耐震性能は支持碍管を柔構造にするなどの対応が取られた。1985年300kV用が南川越変電所に、550kV用が房総変電所に納入された。

〈2・3〉 高圧磁気吹消形気中遮断器 油遮断器に対応して、高圧磁気吹消気中遮断器の開発が、以前から実用化されていた直流気中遮断器あるいは低圧用交流気中遮断器の開発と共に進んでいた。1930年頃から開発が開始し、1951年には最初の高圧磁気吹消形遮断器が納入された。遮断する電流を磁気吹消コイルに流して強い磁界を発生させ、ロ

ーレンツ力でアークをアークシュート内に駆動する。アークは磁器製のアークバーリヤに接触して冷却され壁面消弧される。この遮断器は電圧敏感形の特徴を持つので、高電圧化が難しく、国内では 7.2kV 用として多数生産された。一方米国では 13.8kV まで開発された。また欧州では、磁気回路や吹消コイルを使わず、アーク自身をループ状に伸張させる方式（ソレナーク）で 24kV まで開発された。磁気遮断器は、小電流遮断時にサージ電圧を発生しない特徴があり、油を使っていない高圧遮断器としてビルディング内変電所のように火災に対する懸念を重視する場所とかユニットサブステーションや工場動力制御用などに適用され保守点検の容易なことが必要となるに使用された。この遮断器は 1970 年代まで使用され、その記録品は 7.2kV-63kA であったが、後に述べる真空遮断器に代わっていった。

〈2・4〉 真空遮断器⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 真空は良好な絶縁媒体であるので古くから遮断器としての実用化が検討されてきた。1920 年代になって米国の Sorensen によって先駆的开发が始まったといつてよいであろう。日本では GE が開発を始めたという話が伝わり各メーカーが検討を始めていた。当時の 14.4kV-600A-12kA の GE の図面を見ると外径は 159 mm あり、今日の同定格の製品とは比較にならないほど大きい。当時は、電極はスパイラル形が用いられ、接点材料も Cu-Bi であった。欧州でも English Electric の M.P. Reece が真空遮断器の開発を始め、Cu-Cr 電極もここで開発された。現在多くの遮断器で Cu-Cr を使用している。

真空遮断器は経済性がより要求されるため、経済的に製品を作ることが優先された。しかし開発が進むと、困ったことに遮断電流が 40kA 以上になると、幾らバルブを大きくしても遮断電流が増えないという壁にぶつかった。この時点で各メーカーとも縦磁界を印加すると遮断可能な電流が増加することは分っていた。真空遮断器に本格的に縦磁界を印加して試験を行ったのは 1975 年で一挙に 12kV-200kA まで遮断可能であることを実験で確認した。

図 7 に現在使われている電極を示す。平板電極は単なる平板であるが、スパイラルとコントレート電極は電極上のループを利用してアークを外側にはじき飛ばす構造である。その点縦磁界電極は磁界をアークに並行に働かせ、プラズマの散逸を防ぐ方法であり、大変安定化し、無数のアークが分散して電極上に点弧し接点消耗も比較にならない

図 7 真空遮断器の各種電極
Fig. 7. Electrode configuration of VCB.

くらい少ない。

真空バルブでは電圧には限界があり、遮断電流は幾らでも増加できると認識されている。電圧の高い領域ではユニット電圧が 100kV-84kV が現状では限度である。しかし高電圧や大電流では日本は圧倒的に世界を技術的にリードしている。現在では欧州や日本では更に高い電圧にチャレンジすべく開発が行われている。図 8 は 72kV 一点の真空遮断器をキュービクルに入れ、大気圧の SF₆ に入れたキュービクルタイプの GIS である。図 9 は 2 点切りの高電圧真空遮断器を示す。今後の日本の開発が期待されている。

〈2・5〉 SF₆ ガス遮断器^{(15)~(17)(20)(21)} 1900 年になってパリ大学で SF₆ が合成された。SF₆ ガスが優れた絶縁性能を持つことは、日本で最初に発見されたが、1950 年代になって WH の T.E. Brown, Jr. らがこのガスを使用して遮断器ができることを発見した。その後は WH で次々新製品が開発されたが、主に高圧の SF₆ ガスを吹き付けるタイプであり空気遮断器と同じ方式であった。国内では湖南変電所に 275kV GCB が 1966 年に納入された。1969 年に SF₆ の特許が切れたため各社が入り乱れて開発競争に参加し、次々新しい遮断器が開発された。最初は WH のガス吹き付け構造を各社が追随したが、遮断容量が当初は小さかった。方式も改良

図 8 72kV C-GIS
Fig. 8. 72kV C-GIS.

2 点切りの真空遮断器で碍子形
図 9 168kV-25 k A 真空遮断器
Fig. 9. Two break VCB of porcelain type.

図 10 パッファー式遮断部の一種

Fig. 10 Interruption principle of GCB.

遮断器は2点切りで国内UHVの成果である

図 11 800kV GIS (韓国電力)

Fig. 11. 800kV GIS in KOREA.

され容量も増加して、結局圧力室の圧力を開極動作と共に上昇させ、吹き付けるパッファー式に全て置き換わった。

この頃から合成試験が大変盛んになり、世界中で大容量の試験装置の建設ラッシュが始まった。各種遮断試験も詳細になり、決め細かい試験が行われ始めた。

また遮断原理も大変な工夫がされ、当時はガス圧を一方的に上昇させるタイプであったが、アーク期間中に発生する熱エネルギーを遮断に積極的に使おうとする方式や、中電圧用では磁界を使ってアークを動かし遮断しようとする動きもでてきた。この様にすることにより、遮断器の操作機構が単純化し、操作力もさほど力が要らないため、経済的に作れる。従って油遮断器で行われていたことに似た自力方式に戻ってきた。

図 10 はパッファー式遮断器の一例であるが、パッファーピストンで作った高圧の SF_6 ガス吹き付ける方法で、容量を上げてきた。最近ではノズル閉塞現象を利用し、熱エネルギーを消弧室に取り入れ、後にそのエネルギーで吹き付けるタイプや、磁気駆動でアークを回転して冷却する方式がでてきた。小電流時のエネルギーが小さいため、小さいパッファー機構は必要になっている。図 11 は韓国に建設された 800kV GIS であり、図 12 は国産の 550kV・63kA 1 点切り遮断器である。

また現在は電算機を利用して、電界計算、アークも含む

図 12 550kV-63kA 1 点切り GCB

Fig. 12. 550kV-63kA single break GCB.

図 13 UHV 機器の実証試験場

Fig. 13. UHV long term test area.

ガス流の計算、熱計算、遮断動作の解析計算など大容量の計算が行われるようになってきている。最近では電算機なくては開発が不可能といわれている。また同時に異なる現象を扱う解析も普及しつつある。残念なことに、最近になり、 SF_6 ガスの地球温暖化係数が高いことから、機器からの放出や使用に対する制限が課され代替ガスの研究が始められている。 SF_6 ガスは余りにも消弧性能が優れているため、それに代替できるガスは有り得ないのではないかと考えられているが、今後の方向が大きな問題になってきた。現在、日本では図 13 に示す UHV 開発プロジェクトが実施され、送電線も建設され、GIS を主体に変電機器も開発され、実証試験が行われている。

3. 遮断器開発の歴史を読む

－日本独自技術開発への期待－

まず第一に、遮断器の歴史を読むことにより長期展望が分かる。例えば油遮断器の最大の欠点は遮断不能時の火災、あるいは汚れた油中での定期的点検時の困難などがあるであろう。空気遮断器の欠点は強烈的な爆発操作音、SLF に弱いこと、あるいは GIS への使用に適さず、サイズが大きい等があるであろう。真空遮断器は一点あたりの電圧が上昇できないこと、あるいは定格電流が大きくできないなどの欠点がある。これらの課題に対し技術改良や新しい方法の提案が何度も繰り返され、その間、次々と新しい技術が開発され蓄積されてきた。また系統の使用条件や規格なども高度化してきた。また多くの技術は外国から導入され 1 号機は外国から導入されてきた。

SF₆ガス遮断器はその点、全てに完璧であり、最適消弧媒体と考えられていた。ところが地球温暖化効果が大きいこと、あるいはアーク遮断時に分解ガスが出たり、極めて強い悪臭を発生することなどが最近問題になっている。遮断器の歴史を見ると無火災、定期点検の容易さ、低騒音、小型化、密閉化などが求められてきた。現時点では、少なくとも高電圧用にはSF₆ガスに代わるものは無いと考えられているが、代替遮断技術の追求は、当面の大きな課題のひとつである。

これらの遮断器が開発されてきた経緯を図14と図15に示す。ニーズによって変遷して行くことが理解されるであろう。また表1に示すように系統電圧の上昇による遮断器の変化も示してあるが、やはり高電圧大容量、省スペース

の方向に流れていることがわかる。明治以降、先人たちが大変な努力をされ、技術の導入や国産化に努めてきた。遮断器だけでなく殆どの電気機器は、欧米で開発されてから数年以内に日本に技術導入された。当初は直接製品を輸入していたが、すぐ国内での事業を成功させた。また、導入した技術は国内向けに改善して独自のものにした。しかしそれらの中に国際的に通用するものは多くは無かった。

日本の特殊事情は当然としても、それらがなかなか国際的に受け入れられなかった。逆に欧州ではIECなど上手く使い国際標準が自国の標準と一致するよう指導してきた。しかし日本のこの面の動きは大変遅いような気がする。

日本人には自分自身をグローバル化することができていない人が多く、国内だけでやって行けると思っている人が多いのではないだろうか。日本が国際的に活動する時これが致命的になっているのではなかろうか。自国で原理を發明し、世界がそれを使い、製造力も国際的に考える国にはとてもかなわないと思う。また残念ながら、現在まで遮断器技術の殆ど全てが技術導入され、日本独自のものが無いに近いと言うのが実情である。日本の産業界は力がなくなったと最近云われているが、やはり日本から発信することが必要と思う。今後、環境問題、リサイクルあるいは人類に悪い作用をしないなどキーワードを考えると、国立研究所や電力会社やメーカの研究所がもっと日本独自なものを開発しなければ産業の活性化はありえないと思う。永い間の欧米や国内の技術の歴史をみるにつけ、日本からの情報の発信が必要と考える。若い人に望むことはこれが一番であろう。

日本の戦後は製造力の強さと品質で勝負をしてきた。今でも家電や自動車などで日本の品質は優れているが、開発途上国の製造技術や品質も向上しつつある。日本は何か新しい技術で生きる以外に道はないのではないかと思う。産官学を含めて技術開発を一番に重視せねばならないし、会議や指導よりも、研究者は新しい技術生むことが重要視されなければならないと考える。これまでの遮断器開発は性能本位で走ってきたと思われるが、今後は世界全体を考え、エネルギー配分が適当か、環境にマッチするか、或いはリサイクルが出来るかなどの観点からの研究開発が必要

図14 遮断器開発のサイクル

Fig. 14. Cycle of development.

図15 遮断器開発の流れ

Fig. 15. Flow of development.

表1 系統電圧上昇と遮断器の開発表

Table 1. Increase of system voltage and breaker rating.

Item	Year	1940	1950	1960	1970	1980	1990
System Voltage, & Short-circuit Current		154	220/275	550			
		~10 kA	16~20 kA	31.5 kA	40~50 kA	40~63 kA	
Oil Circuit Breaker (OCB)		Live-Tank Type, mainly	Higher Voltage, Wood-light Chamber	Dead-Tank Type, mainly	Higher Capacity, FRP Chamber		
Air-blast Circuit Breaker (ABB)		Introduction to Medium Voltage	Higher Voltage, 2-cycle Multi-units Interruption	550 kV			
SF ₆ Gas Circuit Breaker (GCB)			Live- to Dead-Tank Type	Double- to Single-Pressure Type	Reduction of Number of Breaks		
Vacuum Circuit Breaker (VCB)			Low Voltage	Development of CuCr Electrode	Higher Voltage Valve	C-GIS	

要である。

4. 結 び

遮断器の歴史を簡単に述べ、著者等が係った件も混せて見た。多くの技術開発が行われてきたことに、改めてびっくりした。先人の努力に敬意を払いたい。今後は日本独自の技術で新しい遮断器の開発が望まれる。

本報告執筆に当たっては、カタログや文献、或いは東京電力の変電技術史から引用させて頂いたことをまず感謝したい。又、纏めるに当り電気学会「電気技術史技術委員会」の方々にもお世話になった。尚、この報告がもとより正しいとは考えておらず、ある面から見た観点から書いてあることを確認したい。

(平成 15 年 10 月 14 日受付, 平成 16 年 1 月 30 日再受付)

文 献

- (1) “History of Product Nationalization of Electrical Technology in Japan”, Technical Report, IEE Japan, No.603, pp.3-10, pp.33-41 (1996) (in Japanese)
「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, No.603, pp.3-10, pp.33-41 (1996)
- (2) K. Yoshizumi and K. Tanaka: “History of Manufacturing Nationalization of Power Circuit Breakers in Japan”, The Papers of Technical Meeting, IEE Japan, No. HEE-95-16, pp.93-104 (1995) (in Japanese)
吉永 淳・田中邦典: 「遮断器国産化の歴史」, 電気学会研資, HEE-95-16, pp.93-104 (1995)
- (3) K. Yoshizumi and K. Tanaka: “History of Manufacturing Nationalization of High-Voltage Circuit Breaker Technology”, The Papers of Technical Meeting, IEE Japan, No. DIH-6-5, pp.93-104 (1995) (in Japanese)
吉永 淳・田中邦典: 「高電圧遮断器技術の国産化」, 電気学会研資 DIH-6-5 (1995)
- (4) History of Substation Technology in TEPCO, Tokyo Electric Power Co. (1995-3) (in Japanese)
変電技術史, 東京電力 (1995-3)
- (5) Product Catalogues by Hitachi, Toshiba, Mitsubishi Electric & Meidensha (in Japanese)
日立, 東芝, 三菱, 明電舎のカタログ
- (6) K. Yoshinaga and F. Arakawa: “Historical Analysis on R&D of High-Voltage Circuit Breakers”, *T.IEE Japan*, Vol.121-A, No.1, pp.11-19 (2001-1) (in Japanese)
吉永 淳・荒川文生: 「高電圧遮断器技術開発の歴史的分析」, 電学論 A, 121, 1, pp.11-19 (2001-1)
- (7) 60 Years History of Shibaura Manufacturing Co., Shibaura Manufacturing Co. (1930) (in Japanese)
芝浦製作所 65 年史, 芝浦製作所 (1930)
- (8) S. Ishii and F. Arakawa: Creation of Technology, IEE Japan, Ed., Asakura-Shoten (1999) (in Japanese)
石井彰三・荒川文生: 技術創造, 電気学会編, 朝倉書店 (1999)
- (9) S. Fukuda: “Development of Circuit Breakers --- Its Historical Development and Future Trend”, *J. IEE Japan*, Vol.77, No.825, pp.771-786 (1957) (in Japanese)
福田節雄: 「遮断器の発達---歴史展開と今後の動向」, 電学誌, 77, 825, pp.771-786 (1957)
- (10) G. Yabuno and H. Maki: History of Circuit Breaker Development, *OHM*, pp.901-909 (1955) (in Japanese)
藪野玄石・牧 元: 遮断器の発達史, 電気雑誌 OHM, pp.901-909 (1955)
- (11) S. Fukuda: “Recent Trend of Circuit Breakers”, *OHM*, pp.7-11 (1955) (in Japanese)
福田節雄: 「遮断器の最近の動向」, 電気雑誌 OHM, pp.7-11 (1955)
- (12) M. Shinohara: “Toshiba Live-Tank Type Breakers”, *OHM*, pp.36-42 (1955) (in Japanese)

- 篠原幹典: 「東芝の碍子型遮断器」, 電気雑誌 OHM, pp.36-42 (1955)
- (13) T. Sakai and T. Ito: “Fuji Expansion-Type Breakers”, *OHM*, pp.48-56 (1955) (in Japanese)
酒井猛夫・伊藤俊夫: 「富士膨張遮断器について」, 電気雑誌 OHM, pp.48-56 (1955)
 - (14) K. Ishiwatari: “Air-Blast Circuit Breakers”, *J. IEE Japan*, Vol.73, No.775, pp.322-325 (1953) (in Japanese)
石渡喜一: 「空気遮断器」, 電学誌, 73, 775, pp.322-325 (1953)
 - (15) S. Tominaga and T. Tanabe: “SF₆ Gas Circuit Breakers”, *T. IEE Japan*, Vol.97, No.5, pp.367-371 (1977-5) (in Japanese)
富永正太郎・田辺俊夫: 「SF₆ガス遮断器」, 電学論, 97, 5, pp.367-371 (1977-5)
 - (16) K. Nakanishi: “Characteristics of SF₆ Gas”, *T. IEE Japan*, Vol.97, No.5, pp.330-337 (1977-5) (in Japanese)
中西邦雄: 「SF₆ガスの特性」, 電学論, 97, 5, pp.330-337 (1977-5)
 - (17) K. Sakata: “Chapter 2 Metal Enclosed Switchgears”, *T. IEE Japan*, Vol.97, No.5, pp.351-354 (1977-5) (in Japanese)
坂田一臣: 「第2章 密閉形開閉装置---最近の技術動向について」, 電学論, 97, 5, pp.351-354 (1977-5)
 - (18) M. Murano, S. Yanabu, and T. Tamagawa: “Interruption Ability of Vacuum Arc”, 3rd International Conference on Gas Discharges, Pub. No.118, London (1974)
 - (19) R. Shimada, K. Tani, H. Kishimoto, S. Tamura, S. Yanabu, S. Yamashita, H. Ikeda, and T. Sasaki: “Development of High Current DC Circuit Breaker for Large Tokamak Fusion Device”, *IEEE PES A78 564-4* (1978)
 - (20) H. Toda, Y. Ozaki, I. Miwa, S. Nishiwaki, Y. Murayama, and S. Yanabu: “Development of 800kV Gas-Insulated Switchgear”, *IEEE, Trans. Power Delivery*, Vol.7, No.1 (1992)
 - (21) K. Suzuki and S. Yanabu: “Interruption Phenomena of Gas Circuit Breaker and Development of 500kV One Break Circuit Breaker”, *IEEE PES T-PWRD*, pp.888-894 (1992)

吉 岡 芳 夫

学教育協会の会員。

(正員) 1937年3月16日生。1959年3月大阪大学理学部物理学科卒業, 同年4月(株)日立製作所入社。同社日立研究所, 国分工場, 日立茨城工業専門学院を経て1998年4月から, 金沢工業大学・電気系教授。主として非熱平衡プラズマによる NO_x の除去法, 遮断器の設計法を研究中。工学博士。技術士(電気電子部門), 応用物理学会, 静電気学会, 放電学会, IEEE, 日本工

吉 永 淳

(正員) 1940年1月13日生。1963年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。主として大電力試験技術, SF₆ガス遮断器消弧現象の研究, ガス遮断器および光計測技術開発に従事。1997年4月より福井工業大学電気電子工学科教授。主として事故電流高速検出, 過電圧解析技術などを研究中。工学博士。電気学会会員, IEEE SM。

柳 父 悟

(正員) 1941年7月15日生。1964年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として高電圧・大電流現象に関する研究と, 高電圧大容量変電機器の開発に従事。2000年より東京電機大学教授。PhD, 工学博士。電気設備学会, 放電学会, 電気学会会員。IEEE および IEE フェロー, Current Zero Club 会員。英国 Royal Academy of Engineering FMG, Gaseous Dielectric, Gas Discharge and Their Application, International Symposium of Discharge And Vacuum Insulation in Vacuum 等の国際企画委員。電気学会 論文賞3件, 進歩賞2件, 著作賞1件。ISDEIV より Dyke 賞など。