超高压パuffer式ガス遮断器の日立自力研究開発の歴史

正 員 吉岡 芳夫* 正 員 平澤 邦夫**
正 員 筑紫 正範**

History of the Research and Development of Extra High Voltage Puffer Type GCB by Hitachi's Own Ability

Yoshio Yoshioka*, Member, Kunio Hirasawa**, Member, Masanori Tsukushi**, Member

The puffer type GCBs are now widely used in many power transmission lines to switch or to protect those lines from various electrical faults. This type GCB was developed at first as medium capacity GCB with a limited short circuit interrupting capacity. Engineers in Hitachi Ltd. had been continuing challenges to develop high capacity puffer type GCB by their own ability, as Namihei Odaira established the company with a philosophy to develop electrical apparatus by the Japanese ability. This paper describes the situation of Hitachi at the starting point and efforts to have made a success in developing the world first 2-cycle high capacity puffer type GCB without any available engineering data on SF₆ and GCB.

キーワード：ガス遮断器の歴史，パuffer式，研究史，遮断性能

Keywords：History of gas circuit breaker, Puffer type GCB, Research history, Interrupting performance

1. はじめに

日立製作所は，小平浪平創業社長の大きな志を受け，日本人の手と力で電気機器を製造しようとして誕生した会社である。以来日立製作所には，技術導入に依存しない自力技術開発の精神が流れている。戦後の混乱期から高度成長時代に入って，原子力をはじめとする巨大技術など，技術導入したものも多い。しかし遮断器や変圧器などの送配電機器・システムについては，創業社長の国産技術開発の精神を受け継いで自力開発を続けてきた。SF₆ガス遮断器（以下 GCB と略す）は，米国 Westinghouse 社（以下 WH 社と略す）の技術者が SF₆ガスの優れた消弧性能を持つことを発見したのが始まりである。欧米の有力各社が，空気遮断器（以下 ABB と略す）の開発を進める中で WH 社は SF₆ガスを 15 気圧に圧縮しておき，電流遮断時にアークに吹き付けるタイプの大容量 2 重圧力式 GCB を次々と開発してきた。国内では WH 社と提携関係にあった三菱電機がいち早く GCB の開発に取り組み実用化を図っている。本論文の主題であるパuffer式 GCB は，欧州で最初に開発された

が，国内で最初の製品を開発したのは三菱電機である。さて，国産技術の開発といっても日立製作所における GCB の開発は，厳密に言えば欧米や国内に先行技術があった中で，それに追いつき追い越せという日本的な後進性の中での自力開発であったことは否めない。しかし技術導入に依らない自力開発は，先に成功者がいたという精神的な支えがあるものの，会社内に GCB の設計図面や SF₆ガスに関する技術的資料がまったくない状況での研究開発であったわけで，まさに 0 からの出発であった。この点では，技術提携をベースに GCB を開発された会社とは違った研究開発だったと思う。以下，特にパuffer式による超高压の 50kA, 2 サイクル GCB 開発にかかわる 1970 年代後半までの研究開発を中心にその歴史を述べてみたい。

2. 日立製作所におけるパuffer式ガス遮断器開発の歴史

〈2・1〉 日立ガス遮断器開発にいたる背景 GCB の開発は，先に述べたように米国 Westinghouse 社（以下，WH 社と略す）とそのグループ企業の先行で進んできた。電力系統での短絡電流遮断性能は，回路固有の過渡回復電圧と電流ゼロ点直後の遮断器極間の絶縁耐力の回復速度との競争で決まると考えられた時期があった。しかし，急峻な立ち上がりの過渡回復電圧があらわれる近距離線路故障遮断のような場合には，電極間に残留したアークプラズマの過

* 金沢工業大学
〒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, Ishikawa 921-8501
** (株) 日本 AE パワーシステムズ
〒316-8501 日立市国分町 1 丁目 1-1
1-1, Kokubu, Hitachi 316-8501

渡回復電圧による加熱に対してガス吹き付けによる冷却が勝れば遮断に成功するとする熱バランスによって決まるとする考え方が正しいことが明らかにされてきた⁽¹⁾。実際に電力系統では、変電所から数キロメートルの場所で起こった短絡故障を ABB が遮断失敗するという事故が現実になり、当時全盛を謳歌していた ABB は、過渡回復電圧の立ち上がり速度を低くするため、遮断電流を一旦抵抗回路に転流してから遮断するという抵抗遮断方式を採用しなければならなかったといった大幅改良を余儀なくされる事態も起こっていた。この時期になって、ABB を製造しているメーカでも、近距離線路故障遮断に優れた遮断能力を発揮する GCB の優位が予見されるようになった。このまま ABB の開発を続けるか、それとも GCB の開発に切り替えるかは、1964 年ごろの大きな社内論議であった。そこで、電鉄用の定格電圧 24kV の ABB を改造し、SF₆ ガスをあらかじめ圧縮しておき、アークに吹き付ける 2 重圧力式の GCB をつくり、GCB の遮断可能電流は本当に大きくなるのかを確かめてみようと言うことになった。その結果、SF₆ ガスの消弧能力は空気の 100 倍といったガス吹き付けのない場合の消弧性能の向上は認められなかったが遮断可能電流が大きくなることが確かめられた。その時点でもまだ、ABB はアークに吹き付ける空気の圧力をそれまでの 15 気圧から 30 気圧まで高めることで近距離線路故障遮断も可能であり、空気は無料だが SF₆ ガスはお金がかかるなどの理由で、全面的に GCB に切り替えようと言うコンセンサスはなかった。一方欧州では、SF₆ ガスを絶縁媒体としたガス絶縁開閉装置が開発され、人口の都市集中の激しいわが国にもやがてはガス絶縁開閉装置が必要になっていくことは十分予想できるようになった。そうすると、遮断器は ABB とし、母線や断路器を SF₆ ガスで絶縁したガス絶縁開閉装置を作るわけには行かないので、GCB の開発を急がなければならない。WH 社のもつ GCB の基本特許は 1969 年に失効する。その時期を目指して WH グループ以外の会社も開発を進めるだろうから、特許切れ時点で一齐に製品化が行われるであろう。そのためにはもう開発を遅らせることはできないと考えるにいたった。1965 年、それまで磁気遮断器開発を担当してきたグループや 34.5kV 級の ABB の開発を担当してきた技術者を集めて、GCB 開発プロジェクトが結成された。

〈2・2〉 ガス遮断器に関する基礎研究と 2 重圧力式ガス遮断器の開発 日立製作所は、ABB の技術を持っていた。手っ取り早く GCB を開発するには、ABB の技術をそのままに SF₆ ガス系統をクローズドサイクルとした遮断器を作ればよい。それほど苦労はしなくてもよさそうにも思われた。しかし、SF₆ ガスは、大電流アークで分解し有害な生成物を作る、腐食性のガスであるから構成材料を吟味しなければならない、特に高電圧を支えるエポキシ樹脂製の支持絶縁体の材料として SiO₂ 充填材が入ったものは Si とフッ素が反応して SiF₄ を生成するので使えない、遮断器内に有毒なフッ化水素を生成させないためには徹底した水分の排除が必要だ、ブッシングも SiO₂ の入った従来の碍子は使え

ないのではないか、アーク接触子材料も ABB で使っていた銀タングステン焼結合金 (AgW) が使えるのだろうか、等々多くの課題を解決する必要がある。自力開発では、これらについて技術資料を得るすべもなかった。1965 年に自力開発の方針が決まってから、社内研究所の化学と絶縁材料の専門家が加わり、遮断電流による SF₆ ガスと分解生成物の同定、分解ガス吸着剤の選定、分解ガスによって絶縁性能が損なわれない絶縁材料、すなわちアルミナを充填材としたエポキシ樹脂や操作ロッド用のボイドレス FRP 材料(繊維強化プラスチック)の開発、GCB に適した電気接点材料の開発など多くの研究が並行して進められた。それから 1968 年までの 3 年間で、SF₆ に関する基礎データと数々の知見を得ることができた⁽²⁾⁽³⁾。

SF₆ ガスと材料に関連する基礎的な研究が進む一方で、次節で述べるようにパuffer 式 GCB の研究も並行して進められた。また、あらかじめ SF₆ ガスをガス圧縮機で高圧にし、電極の開離と同時に電極間のアークに吹き付ける 2 重圧力式の GCB 開発も並行して行われた。そして、ABB の経験が活かせる 2 重圧力式の GCB は、設計陣の努力で形をなし、1971 年には 300kV、50kA、2 点切り 2 サイクル GCB として電源開発(株)西東京変電所に納入されるようになった。しかし、2 重圧力式は、15 気圧のガス圧を使うので、低温では SF₆ ガスの液化を防止するためのヒータが必要になる。耐酸性の圧縮機も必要になる。このままでは、本当に ABB より良いといえるのかといった疑問を感じながらの開発であったといえよう。そのような中で、1968 年には、三菱電機が中容量ながらパuffer 式 GCB を発表している⁽⁴⁾。定格電圧 84kV、遮断容量 3,500kVA (遮断電流 24kA) で、3 サイクル遮断の碍子型と呼ばれる遮断器であった。アークを吹き消す圧力は、遮断動作と同時にパuffer 室を圧縮して作る。このため大電流遮断に必要な高い圧力を作ることや、2 サイクル遮断に必要な高速度遮断は難しいかもしれないと考えられた。しかし、2 重圧力式の GCB と比べると誰の目にもシンプルであることが分かる。もし、大電流が遮断できるようになり、また 2 サイクルで遮断可能になれば将来主流の遮断器になるだろうことは十分予想できた。遮断性能に関する研究陣はかくしてパuffer 式 GCB の研究に注力することになった。

〈2・3〉 パuffer 式ガス遮断器の開発の初期 パuffer 式 GCB は、絶縁物製のノズルを用いてアークにガスを吹き付け遮断する。一方 ABB は、金属製のノズルを使う。これがアークにガスを吹き付ける方法に関する両者のもっとも大きな違いである。この違いはあとで述べるように ABB で大容量化の常套手段であった技術が、パuffer 式 GCB ではまったく逆に働き、ABB の考えにとらわれない逆転の発想こそがパuffer 式 GCB のキーテクノロジーに通じていたのである。さて、パuffer 式 GCB を開発するにあたって、どれくらいの吹き付け圧力があれば絶縁物ノズルの遮断器で電流が遮断できるのか、パuffer 圧力を高めるのにどうしたらよいのか、遮断時の電極の動作速度

はどれくらい必要か、電極の全開離距離（ストローク長）はどれくらいが必要なのかといったデータが必要であった。GCBのような電力機器は変電所で移動中であり、家電品や自動車のように他の会社が作った製品を購入して分解調査するといったリバースエンジニアリングをすることはできない。参考にできるのは、欧米の製品カタログや技術文献だけである。当然のことながら、これらの資料は他社に技術がもれないように注意深くつくられている。したがって、ここでもすべてを自力で考え、開発していくしかなかった。

1966年、絶縁物ノズルを持つGCBの遮断性能を効率よく調べようとして、日立独自のタイプになるかもしれないひとつの実験装置が作られ、遮断実験が始まった。それは、パuffer圧力を形成するガス圧縮室を接地電位のGCB容器の底に設けて、ピストンで圧縮されたガスを絶縁筒を経由して電極間のアークに吹き付けるようにしたものであった。しかし、この遮断器は、ガス通路が大きなデッドボリュウムとなるためパuffer圧力があまり上がらず、十分な遮断性能が得られないことが分かった。以後、文献にあるオーソドックスなパuffer方式で実験をすることに切り替えた。しかし、参考とする技術資料がまったくない状況では、どれだけのパuffer室容積、ノズルスロート径、電極の動作速度があればよいのかが分からない。研究陣が考えたことは、大型コンピュータを使って、ばねで駆動されるパuffer式GCBの吹き付け圧力を計算することであった。遮断部の重量やばねの強さ、パuffer室容積、ストローク長などとパuffer圧力の関係が解析された。結論は、ノズルスロート断面積を S_n 、パuffer室容積を V 、パuffer室受圧面積を S 、操作力を F とすると、パuffer圧力は、 S_n/V と F/S が支配的なパラメータであることが分かった⁵⁾。つまり、パuffer圧力を高めようとするれば、 S_n/V を小さくし、 F/S を大きくすればよい。これは現在でも通用するパuffer式GCB設計の基本的なパラメータであるといえる。

計算を進める一方、プロトタイプのパuffer式GCBを作った。基本構造は、図1のように通電電極（main contactとfixed contact）及びアーク電極（arcing contactとfixed contact（通電電極兼用））をすべて絶縁ノズル（insulating nozzle）内に設けるものであった。3,000Aの通電を考える

と固定側の通電電極（fixed contact）の直径は35から40mmにせざるを得ない。そうすると通電電極が絶縁ノズルを離れた後は、ガスは大きな直径の絶縁ノズルから噴出するのでその量が多く、したがって、それに見合った大きなパuffer室容積と操作力が必要となる。このような理由で、操作力を大きくできる空気操作機を用いることにした。ノズルスロートの直径が決まると操作力やパufferシリンダーの直径なども計算ではば求めることができた。しかし、このGCBはノズルスロートの直径が大きかったため、全体として大きすぎる設計になってしまったことは否めない。ABBで常用されていた技術、すなわち通電とアーク接触子を同じ場所に置くこと、ノズル閉塞を避けるためにノズルスロート径は大きいほうがよいという固定概念は、パuffer式GCBの技術開発にはむしろ障害であった訳である。大きな操作力を出せる空気操作機、高強度で絶縁特性のよいFRP操作ロッド、電界を緩和するシールド電極の採用などを経て、1969年WH社の特許失効と同時に最初の日立パuffer式GCBが完成し、中部電力(株)との共同研究となったガス絶縁変電所用の84kV, 2,000A, 遮断容量2,500kVA（遮断電流17.2kA）のGCBとして実用化された⁶⁾。

この後、同じ基本構造で遮断電流の31.5kA, 40kAへの性能向上の研究が行われた。1972年までに、電圧も168kVから、300kV 2点切りGCBまで開発が進んだ⁷⁾。パuffer圧力解析面では、アークによってノズル内のガス流量が制限されることを考慮した圧力解析法や空気操作機の動作と連動した実用的なプログラムも整備された。さらに、製品開発の第2段階として、小型化を図った改良を行うことにもなったが、通電電極とアーク電極をノズルの中に通す基本構造ではなかなか性能が向上しない。また、その頃から、基幹電力系統の主力遮断器とするには50kAの遮断と、2サイクル遮断が必要ことが確認され、これに挑戦するために新たな技術の開発が研究課題になった。

〈2・4〉 2サイクル遮断技術 パuffer式GCBでは、遮断の動作を利用して圧力を高める方式であるから、どうしても圧力の上昇に時間がかかる。電極の開離するスピードを速くすればよいが、操作力が大きくなりすぎてよい解決法とはいえない。またパuffer式GCBは大きな操作力を使うので、GCBがトリップ信号を受けてから、大きなピストン装置に高圧の空気を供給するようになるまでの機構のデッドタイムをいかに短くするかが鍵となる。ここでは、ABBの技術が生きてきた。ABBでは2サイクル遮断をさせるために、電磁石ラッチ機構をはずした力で小さなパイロット弁を動かし、パイロット弁の動作で主弁動作につながる圧縮空気を排出して、大きな空気ピストンに作用する大量の圧縮空気を供給する機構である。パイロット弁の作動まではABBの技術をそのまま使い大きな空気ピストンが、10数cmの長いストロークをできるように図2のような2サイクル遮断用の操作機を考案した。解析によると遮断器が動き始めるまでの時間を0.6サイクル程度にできることがわかった。早速、実験用の操作機が試作された。

図1 ノズル内部に通電用接触子を持つ遮断部構造
Fig. 1. Interrupter structure having current carrying contact inside of nozzle.

図2 最初の2サイクル操作機のバルブ構造
Fig. 2. The first valve structure for 2 cycle operation system.

図3 製品の2サイクル操作機
Fig. 3. 2 cycle operating mechanism for product.

この試作機は、予想どおりに高速に作動し、パuffer式による2サイクル遮断の可能性が見えてきたので、次に40kA GCBの操作機として取り付け、2サイクル遮断実験を行った。また2サイクル遮断のためには、最小遮断時間は1.5サイクル以下でなければならない。実験の結果最小遮断時間は1.5サイクルを切り、また、もっとも過酷な条件として40kAの非対称電流の遮断を試みたが、これも2サイクル以内に入る結果となった。1973年2月23日のことである。そして、これは、パuffer式GCBによる2サイクル遮断が可能であることを実証できた瞬間だった。パuffer式2サイクルGCB開発成功のニュースはまだ無かった。開発陣は世界初の2サイクル遮断に向かって意気が上がったのは言うまでもない。この初の2サイクル遮断操作機には、稀頻度操作の点で問題が指摘された。中間弁の機構にOリングを使用したため長期間不動作のままにすると、Oリングが圧力で変形し摺動面に食い込んで動作開始が遅れるのではないかという指摘であった。研究所ではモデルの装置を作り、圧力を高め、温度を高めるなどの加速実験によって

図4 300kV, 40kA 2サイクルパuffer式GCB
Fig. 4. 300kV, 40kA 2 cycle puffer type GCB.

信頼性を実証しようとした。しかし、短期間で、長時間動作させない場合の信頼性を完全に証明するのは無理として、設計陣から新しい案が出された。図3に示す2重弁座方式で、小容積の空気室に空気を注入すると弁のバランスが崩れて、大きなピストンにつながる弁が開き、一気に大きな操作ピストンを動作させる。この開発には、他工場の機構技術に詳しいエンジニアも参加した。かくして、稀頻度動作にも本質的に問題のない2サイクル遮断器用空気操作機が完成し40kA遮断部と組み合わせられた図4に示すような世界初の300kV級40kA2サイクルパuffer式GCBが完成した⁽⁸⁾。1973年10月のことである。

〈2・5〉パuffer式遮断器の大容量化 300kV, 40kAまでの開発で課題になったのは、パuffer圧力を高めるのに大きなパuffer室と強い操作力を使うのは限界があり、非効率的であるといった点だった。ノズルスロット径を小さくしさえすれば、パuffer室も操作力も小さくできることは、解析で分かっていたので、研究陣では、通電接触子をノズルの外側に配置してノズル直径を小さくし、ノズルからパuffer室までの距離を最小にするとともに、パufferシリンダーの直径も2回りほど小さくした図5のような遮断部を実験用パuffer式GCBに組み立て実験をはじめた。これは、画期的な遮断性能の向上をもたらすことになった。既開発の技術も継続して改良していけば徐々に性能は向上していくものであるが、背伸びをした状態からはジャンプすることはできない。一旦ひざをかめれば大きくジャンプすることができ、飛躍がもたらされる。製品の40kA GCBに比べるとちっぽけな実験用遮断器が驚くほど高性能を発揮したことに工場関係者も喜んだ。高性能化した理由には2つあった。ひとつは、ノズルスロット径の縮小でパuffer室から流れるガス量が減り、不要にパuffer室容積を大きくしなくても済んだほか、電流遮断によるパuffer圧力の増加が著しいことも確認された。今で言う熱パuffer方式である。この考えをさらに効果的にするため、遮断過程の初期はアーク空間

図5 新構造の実験用遮断部
Fig. 5. A new interrupter structure.

図6 軸方向同期吹き付け遮断部の構造
Fig. 6. Interrupter structure based on axially synchronous gas blast.

の熱ガスをノズル内部に閉じ込め、遮断可能なストロークに達したら一気に開放するという図6のような軸方向同期吹き付け方式も熱パuffer式の圧力上昇に効果があった。これらの技術を適用することにより、40kAはもとより50kAの遮断も短時間で可能になった。

ノズル閉塞による熱的な圧力上昇は、パufferピストンの圧縮による圧力上昇よりも短時間で起こるので、アーク時間の短縮にも有効なこともわかった。1972年10月、300kV、50kA 2点切りパuffer式GCBの製品開発がスタートした。パuffer式GCBによる2サイクルの50kAの遮断は、ノズルスロート径を小さくし、空気遮断器(ABB)の技術とはまったく逆にノズル閉塞を起こさせて高いパuffer圧力を発生させる方式で1973年には成功した。製品の完成は1974年9月のことである⁽⁹⁾。そして、このパuffer方式50kA 2サイクルGCBは、国内ばかりでなく欧米でもまだ未開発であったため大きなインパクトを業界に与えた。次は、550kV GCBの開発であったが、550kVをパuffer方式で開発しようとする戦略についての研究所内でのコンセンサスは、1972年6月、50kA遮断に可能性が見えてきた頃に得られている。実際には、300kV用の遮断部を4点にして、操作機を4点駆動が可能ないように大型にし、設計陣中心で開発が行われた。そして1975年11月に

図7 ノズル閉塞現象を検討した実験用遮断部
Fig. 7. Experimental interrupter used for nozzle clogging phenomena.

図8 ノズル閉塞現象とノズル材料によるパuffer圧力の上昇の変化
Fig. 8. Nozzle clogging phenomena and difference of puffer pressure.

は、550kV、50kA GCBが4点切りで開発され⁽¹⁰⁾、1978年7月には300kV、63kA GCBも2点切りで開発された⁽¹¹⁾。もちろん国内外の主要電機メーカーも同時期にパuffer式GCBの大容量化に成功している。

〈2・6〉 ノズル閉塞現象に関する基礎研究 新方式のきっかけとなった小型実験用GCBや50kAパuffer式GCBは、絶縁物ノズルの閉塞現象を利用している。ノズル閉塞現象はパuffer式GCB開発のキーテクノロジーであると考えて、1972年ごろからこの現象を詳しく調べる研究をスタートさせた。パuffer式GCB開発の初期段階から、テフロン製のノズルがアークで損傷することが問題となっていた。一方、テフロンから出るフッ素系のガスは電気的負性気体だから、アーク遮断に効果があるのではないかとする意見もあったが、電流零点では強いSF₆のガスフローがあるのだから、CF₂、CF₄ガスが出てきてもその量はわずかで性能を改善するよりは、むしろ有害だと考えていた。そのような議論もヒントになってノズルからのアブレーションが圧力上昇に関与しているのではないかと考え基礎実験が計画されたものである。

図7に小型実験用GCBを示す。このGCBでノズル材料をいろいろと変えて遮断性能や圧力上昇を調べた。この実験の結果、1974年秋ごろであったが、図8に示すようにノズル材料は遮断性能というよりもパufferの圧力上昇に

大きな影響を与えることが分かった。これはノズル閉塞現象とノズル材料のアブレーションがパuffer圧力の上昇現象に関係していることを強く示唆するものであった⁽¹²⁾。そこで、アークの電流密度に関する諸文献を調べ、エンタルピーフローアークモデル⁽¹³⁾を参考にしながら、ノズル閉塞を考慮した圧力解析プログラムの開発をはじめた。通常、ガス流中で決まるアークの断面積がノズルスロートの断面積を超えるような電流になると、アークはノズル全体を占め、エンタルピーフローによるアークエネルギーの排出ができなくなり、ノズル上流のアークエネルギーの一部がパuffer室へ逆流する。この現象によって、パuffer室内の SF_6 ガスが加熱され熱的にガス圧力が高まる。ノズルからのアブレーションガスは、ノズルスロート部分の圧力をパuffer室よりも高く維持するのに必要であり、アブレーション量が多いほどノズル内のガス圧力が高まり、パuffer室への熱の移動が多くなるという考えである。このような考えのもとで、アークによるノズル閉塞を考慮した圧力解析が可能になり、50kA GCB の実験結果と照合すると、驚くほどよく一致することが分かった。パuffer圧力の時間的変化だけでなく、圧力の急上昇現象が、遮断電流をノズル面積で割り算した値が約 $4\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上で顕著になるなど実験データとよく一致した。この研究は、1978年の IEEE Summer Meeting で論文発表した⁽¹⁴⁾が、この種論文発表としては世界最初のものであった⁽¹⁴⁾。またこの時開発された解析プログラムは、改良を加えられながら、それ以来社内で活用されている。

〈2・7〉 高電圧 1 点切り GCB の開発 研究陣としては、次は 300kV 遮断を 2 遮断部直列で製作していたものを、1 遮断部すなわち 1 点で遮断できる遮断部の開発を目標にした。この場合、遮断点一つでほぼ 2 倍の電圧を遮断するので、開極距離を長くし電極の動作速度を速くする方法が用いられる。これは必然的にパuffer吹付け圧力も増加させるので、近距離線路故障遮断と端子短絡故障遮断については、新しい技術がなくても開発可能と考えた。しかし、問題は高電圧化に伴って急速に困難になる進み小電流の遮断性能確保である。このために開発に取り組んだのは次の 2 点であった。第 1 は、ノズル材料の改良であった。パuffer式 GCB に用いられているノズルは、初期には純テフロン製であったため、大電流の遮断によりクレータ状の窪みができ、遊離炭素と思われる黒い色の痕跡がクレータの周りにできていることが分かっていた。それまで、さほど問題にならなかったこのクレータは高電圧 1 点切り化で大きな問題になってきた。すなわち、大電流遮断をさせない新品の GCB では、進み小電流を無再点弧で遮断できるのに、一旦電流を遮断すると性能が劣化し再点弧が起こるのである。そこでノズル材料の研究が始まった。 SF_6 ガスの中で、しかも高温に晒されても耐えられる材料でなければならず、電極がノズルを抜け出る位置での局所電界強度を高めないためには、誘電率の低い材料でなければならない。これより、テフロンに充填物として適切なセラミックスを混

図 9 耐アーク性ノズル材料の開発 (左: テフロンノズル, 右: 耐アーク性ノズル)

Fig. 9. Development of arc resistive nozzle material (left: teflon nozzle, right: arc resistive nozzle).

入するのがよいとの方針が決まった。研究所の材料関係研究者の知恵を集めて、アルミナ、BN、着色材などがためされた。ここで、着色剤は、アークの強烈な紫外線がノズル内に侵入しないように、高エネルギー光線をノズル材料の表面近くで吸収してしまおうと云うアイディアである。小さなサンプルによる基礎実験と実遮断器による実験とを繰り返した結果、テフロンに BN を充填した材料が最良であることが分かった。この材料は、図 9 に示すように大電流を繰り返し遮断した後もほとんどクレータができず、一見新品ノズルのような表面であった。BN の効果は、明らかにアークの強烈な放射線の侵入を防止する効果であった。着色材の顔料を入れたノズルもクレータはできず、少量のカーボンを混入したねずみ色のノズルも有望と思われたが、消耗量が少ない BN 充填ノズルのほうが良好であり、これを採用することにした。BN の効果は、紫外線の反射であるとする見解が支持された。

この新ノズルは、画期的な効果があり、直ちに 300kV 50kA 1 点切り GCB に適用され⁽¹⁵⁾、1981 年には第 1 号器が関西電力紀ノ川変電所に納入された。さらに既開発品も含めた全機種にも採用されることになった。300kV 1 点切り遮断器については、国内各社も当時独自の力で精力的に開発を進めており、三菱電機も 1981 年に同様な 1 点切り GCB を納入したとの発表がある⁽¹⁶⁾。

高電圧 1 点切り GCB の開発には、もうひとつの技術開発があった。それは、気流の制御である。高電圧 GCB の進み小電流遮断における再点弧現象は、アーク電極がノズルスロートを離れる瞬間に起こることが詳細な検討で分かってきた。それは、ノズルと電極が作る狭い隙間に高速気流が流れ、ベルヌーイの定理に基づく圧力の低下が原因になっているので、狭い隙間があっても気流をよどませ、局部圧力を下げないようにすればよいと考えた。そのためには、ノズルを流線型にするのではなく、N 字型に切込みをいれて、気流が切込みにぶつかってよどみを起こさせればよい。気流解析プログラムで、どれくらいの切込みを入れれば圧力の低下が避けられるかを検討し妥当な形状を決めた。早速長波尾の電圧が出せる特製のインパルス電圧発生装置を使い、GCB の開極動作過程の絶縁回復特性を詳細に測った。

図10 新型(N型)ノズルと絶縁回復特性
Fig. 10. A new type N shape nozzle and characteristics of dielectric recovery voltage.

図11 362kV 40kA 1点切りパuffer式 GCB
Fig. 11. 362kV 40kA single break puffer type GCB.

この実験の結果は図10に示すように通常のノズルでは電極がノズルスロートを離れるあたりで、一時的に絶縁回復が停滞するのに対して、N型ノズルでは順調に絶縁が回復することが確かめられた⁽¹⁷⁾。実際に進み小電流遮断実験を行った結果も、362kV 1点切りの仕様を見事に無再点弧で遮断した。実器としては、図11に示すように米国市場向けの362kV、40kA 1点切り遮断器として製品化された。この技術は、1986年度の電気学会進歩賞受賞の榮譽を受けることにもなった。この技術はそれに続く420kV 1点切り、1000kV 2点切り、及び500kV 1点切り GCB に引き続き採用されている。

〈2・8〉 1985年頃までに取組んだ極限技術への挑戦

超高压パuffer式 2 サイクル GCB, 高電圧 1 点切り GCB, 63kA GCB とパuffer式 GCB が電力系統用の主力遮断器として発展していく中で、1985年頃までにいくつ

図12 吸い込み室を設けた1サイクル遮断器の構造
Fig. 12. 1 cycle interrupter having a suction chamber and a puffer chamber.

かの新しい技術や極限技術への挑戦も行われた。その中に1サイクルパuffer式 GCB, 直流高電圧遮断器⁽¹⁸⁾, 及び電磁パuffer式 GCB⁽¹⁹⁾がある。このうち、電磁パuffer式 GCB は、パuffer式 GCB が大きな操作力を必要とする欠点を補うため、遮断する電流で大きな電磁力をつくりパuffer室の圧縮に利用する原理である。この技術は、WH 社が1966年に34.5kV 1,500MVA GCB に採用したのが最初であるが⁽²⁰⁾, 高電圧 GCB に適用できるような新しい電磁力機構を考案して試作開発を進めた。1970年5月には、50kA の遮断に成功している。しかしパuffer式による大電流遮断の可能性を実証したとはいえ、遮断する電流からエネルギーをもらう自力方式としては、熱パuffer式の方が優れており、300kV 63kA 2点切り電磁パuffer式 GCB は、実機開発の段階で中止した。

次に、1サイクル遮断器は、技術の極限ともいえるパuffer式の1サイクル遮断化に挑戦したもので、研究所の次世代プロジェクトとして1974年11月にスタートした。電力系統で1サイクル遮断が可能になると、電力系統の過渡安定度が向上し、基幹系統の送電容量が増加するほか、短絡点のアーキによる損傷が大きく減少するなど利点が多い。また、2サイクル遮断器の遮断時間を分析すると、トリップ信号が与えられてから電極が開くまでに0.9サイクル、アーキが切れる最大時間が1.1サイクル、これを合わせて2サイクル遮断であった。これを1サイクル遮断にするには、電極が開くまでを0.3サイクル、最大アーキ時間を0.7サイクルとしなければならない。いずれも、これまでの延長線上の改良では不可能である。しかし、操作機と電流遮断の両方について、それぞれフィージビリティスタディをした結果、可能性があるとして要素試作をすることにした。まず操作機については、油圧エレベータの高速制御に使われていたムービングコイル方式の駆動装置と、軽量の弁を駆動する超高压の油圧操作機を試作し模擬負荷を駆動する方法で、0.15サイクルの開極時間達成を目指した。一方、電流遮断については、図12に示すように、パuffer室のほかに吸い込み室を設けた新しい GCB を試作した。この方式では、遮断動作でパuffer室は圧力が上昇し、吸い込み室では負圧が発生するので、パuffer室と吸い込み室の間には極短時間で大きな圧力差が生じる。このため、短

図 13 パッファー式 GCB による 1 サイクル遮断
のオシログラム

Fig. 13. Oscillogram of 1 cycle interruption by
puffer type GCB.

いアーク時間での電流遮断が可能になるはずだと考えたものである。遮断実験は、2 サイクル用の操作機を使って行い目標達成を目指した。その結果それぞれで目標を達成できる結果が得られたので、1977 年 4 月、第 2 ステップとして、245kV 31.5kA 1 サイクル遮断を目指した実器を試作することにした。この試作器は目標を超えて、245kV 40kA を 1 サイクルで遮断できることを実証した⁽²¹⁾。最後の試作器の定格は、1 サイクル遮断器が必要とされる基幹系統すなわち、550kV 50kA 2 点切りとした。研究者にとって大変な目標であったが、勇気をもってチャレンジすることになった。そして 1984 年 4 月、図 13 に示すように、世界初のパッファー式による 550kV 50kA、2 点切り 1 サイクル遮断実験に成功した⁽²²⁾。残念ながら、1 サイクル遮断器のニーズが見えない中、製品化は見送られたが、油圧操作機の技術は 2 サイクル仕様の油圧操作方式の大容量 GCB 開発に活かされた。

3. これからの研究開発に思う

以上述べてきたように、日立製作所では自力でパッファー式 GCB を研究開発してきた。本論文で述べたように特に開発の前半は、他所からの技術資料がまったく入手できない状態からの開発であり、複数の社内研究所の多様な専門技術の研究者、製造工場の優れた技術者、関連会社の主として材料に関する技術者の総合力の賜物であると思う。

一方、2 サイクルパッファー式 GCB の開発は、成功すれば 2 重圧力式 GCB に比べれば明らかに勝ったものになり、マーケットも確実にある状況下の開発であった。また、同業他社も競って同じ方向に向かっていくと云う安心感もあったといえる。300kV 1 点切り遮断器が実現した頃、次世代技術と考えて研究開発を進めた 1 サイクル GCB や直流高電圧 GCB は、技術開発が先行しマーケットの方は不確定か、あればよいといったもので、対象となるシステムにおける必然性が薄かった点が実用化にいたらなかった原因と

考えられる。翻って最近のわが国の研究開発を考えると、欧米で完成していない先行技術開発に挑戦して技術的には開発に成功してもマーケットへの導入が進まないケースが散見されるように思われる。技術力が高められ次の研究開発に活かされる期待はあるものの、大きな努力が直接には報われないケースを考えると、戦後日本は基礎研究をせずに改良研究で欧米を追い越し、繁栄を得たとする欧米側の批判の意味は、マーケットの確かな技術のみを選んで導入して改良し成功しただけで、マーケットに受け入れられるまでに捨てられた多くの技術開発の損失を負担していないと云う点にあるように思う。技術力が高い今、考えなければならないことは、先行開発は必ずしもマーケットでの成功を保証されていないということである。新規な開発を行うときは、それが無理をしない素直な技術なのか、マーケットへの導入に必然性があるか、あるとしてその時期はいつ頃か、などを真剣に考えて開発計画と投資計画を練るべきだと思う。自力開発の 2 サイクルパッファー式 GCB が、その後 550kV 63kA 1 点切りや UHV 2 点切りまで発展したのは、マーケットと技術に必然性があったからだと思えてならない。そしてマーケットがあるならば、継続は力なりという言葉があるように画期的な性能向上がなされた後でもさらに技術開発への執念を燃やすのがよいと思われる。近年各社がパッファー圧力形成にアーク熱を最大限に活用する熱パッファー技術を極めることによって、遮断器の小型化とばねを使った低操作エネルギーの高性能遮断器の開発がなされているのは、そのよい例であると思う。

(平成 15 年 7 月 31 日受付, 平成 16 年 3 月 5 日再受付)

文 献

- (1) F. Mori, T. Ushio, and T. Ito : "Study of Interruption of SLF that led the Development of SF₆ Circuit Breaker", The Papers of Technical Meeting, IEE Japan, HEE-03-3, pp.13-21 (2003) (in Japanese)
森 英夫・潮 恒郎・伊藤利朗 : 「SLF 遮断の研究とガス遮断器への展開」, 電気学会電気技術史研究, HEE-03-3, pp.13-21 (2003)
- (2) Y. Arikawa, F. Nakajima, Y. Yoshioka, and S. Yanagisawa : "Some Chemical Problems of Sulfurhexafluoride Circuit Breaker", *Hitachi Hyoron*, Vol.51, No.12, pp.80-84 (1969) (in Japanese)
有川喜次郎・中島史登・吉岡芳夫・柳沢省三 : 「ガス遮断器管理上の化学諸問題」, 日立評論, 51, No.12, pp.80-84 (1969)
- (3) S. Tokuyama, Y. Yoshioka, F. Nakajima, and Y. Arikawa : "Analysis of SF₆ Gas Decomposition Due To Current Interruption", *Proc. of Gas Discharge*, pp.200-202 (1972)
- (4) S. Tominaga, T. Tanabe, and K. Sato : "New intermediate capacity series SFL SF₆ gas circuit breaker", *Mitsubishi Denki Engineer*, No.23, pp.26-34 (1968)
- (5) 吉岡芳夫・徳山俊二 : 「パッファー式ガス遮断器の圧力特性の理論計算」, 昭和 44 年電気学会全国大会, No.755 (1969)
- (6) T. Hirukawa, K. Anjo, N. Niimura, S. Nakano, and S. Sasaki : "SF₆ Gas Insulated Switchgear at Moriyama Substation", *Hitachi Rev.*, Vol.19, pp.2-10 (1970)
- (7) S. Nakano, T. Tsubaki, H. Ishikawa, and T. Goto : "Development of a large capacity single pressure puffer type gas circuit breaker", *Hitachi Hyoron*, Vol.54, p.1071 (1972) (in Japanese)
中野清蔵・椿 徹・石川 皓・後藤登喜男 : 「大容量単一圧力パッファー形ガス遮断器の開発」, 日立評論, 54, p.1071 (1972)
- (8) S. Nakano, T. Tsubaki, and K. Hirasawa : "300kV 40kA 2-cycle

- puffer type gas circuit breaker”, *Hitachi Hyoron*, Vol.55, p.975 (1973) (in Japanese)
- 中野清蔵・椿 徹・平澤邦夫：「300kV 40kA 2 サイクルバッファ形ガス遮断器」，日立評論，55, p.975 (1974)
- (9) T. Tsubaki, S. Nakano, K. Hirasawa and Y. Yoshioka : “Development of 240/300kV 50kA 2,000A, 4,000A, 8,000A, 2-cycle puffer type SF₆ gas circuit breakers”, *Hitachi Rev.*, Vol.23, p.3-351 (1974)
- (10) 本田春雄・細川正男：「550kV 50kA 2 サイクルバッファ形ガス遮断器」，日立評論，Vol.57, pp.911-916 (1975)
- (11) 筑紫正範・平澤邦夫・吉岡芳夫・佐々木幸司・中野清蔵・細川正男：「超高圧・超超高圧用 63kA バッファ形ガス遮断器の技術開発」，日立評論，Vol.60, pp.504-508 (1978)
- (12) 夏井健一・平澤邦夫・吉岡芳夫：「ガス遮断器のノズル閉塞現象について」，電気学会，開閉保護装置研資，SPD-77-3 (1977)
- (13) L.S.Frost and R.W.Lieberman : “Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model”, *Proc. IEEE*, Vol.59, No.4, pp.474-485 (1971)
- (14) Y. Yoshioka, M. Tsukushi, and K. Natsui : “A method and application of a theoretical calculation for on-load pressure rises in puffer type circuit breakers”, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-98, No.3, pp.731-737 (1979)
- (15) 高本 学・西田 功・佐々木幸司・武内茂隆・中野製造・後藤登喜男：「240/300kV 50kA 1 遮断点構成バッファ形ガス遮断器の開発」，昭和 57 年電気学会全国大会，No.1063 (1982)
- (16) 伊吹恒二・懸山 弘・近藤和正・田中正治・尾田真治：「240/300kV 一点切り及び 550kV 二点切りタンク形ガスしゃ断器」，三菱電機技報，Vol.56, No.9, pp.680-684 (1982)
- (17) F.Endou, M.Sato, M.Tsukushi, Y.Yoshioka, K.Saito, and K.Hirasawa : “Analytical prediction of transient breakdown characteristics of SF₆ gas circuit breaker”, *IEEE, PD*, Vol.4, No.3 (1989)
- (18) S.Tokuyama, K.Arimatsu, Y.Yoshioka, Y.Kato, and K.Hirata : “Development and interrupting tests on 250kV 8kA HVDC circuit breaker”, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-104, No.9, pp.2453-2459 (1985)
- (19) I. Takahashi, Y.Yoshioka, K.Hirasawa, and M.Tsukushi : “Research on a new type magnetic puffer gas circuit breaker”, *IEEE Trans., Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-93, No.1, pp.421-428 (1974)
- (20) R.Frink : “SF₆ Magnetic Puffer Circuit Breaker for 34.5kV 1500MVA”, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-87, p.742 (1968)
- (21) K.Natsui, I.Nakamura, O.Koyanagi, Y.Yoshioka, and K.Hirasawa : “Experimental approach to one-cycle puffer type SF₆ gas circuit breaker”, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-99, No.3, pp.833-840 (1980)

- (22) K. Natsui, K. Hirasawa, Y. Yoshioka T. Takasuna, I. Nakamura, and K. Hirata : “Interrupting characteristics of puffer and suction type SF₆ gas interrupter especially in thermal breakdown region”, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.103, pp.803-810 (1984)

吉 岡 芳 夫

(正員) 1937 年 3 月 16 日生。1959 年 3 月大阪大学理学部物理学学科卒業，同年 4 月 (株) 日立製作所入社，日立研究所にて各種遮断器の研究開発他エネルギー関連分野の研究を担当 (副所長)，1988 年 2 月同社国分工場 (主管技師長)，1993 年 6 月同社日立茨城工業専門学院 (学院長)。同社定年退職後 1998 年 4 月，金沢工業大学電気系教授，現在に至る。主として非熱平衡プラズマによる NO_x 除去システムの研究，遮断器の設計法の研究などを実施中。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，日本工学教育協会，IEEE の会員。

平 澤 邦 夫

(会員) 1941 年 12 月生。1964 年 3 月静岡大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 日立製作所入社，日立研究所配属，1990 年同社国分工場転属，2001 年 12 月定年退職し，(株) パワーシステムサービスに嘱託として勤務。現在，(株) 日本 AE パワーシステムズに派遣。その間，GCB・GIS の研究・開発・試験等を担当。IEEE 正員。CIGRE 個人会員。

筑 紫 正 範

(正員) 1945 年 7 月 11 日生。1968 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業，1970 年同大学大学院工学研究科修士課程終了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社，日立研究所配属。1997 年同社国分工場転属，現在，(株) 日本 AE パワーシステムズ R&D センター勤務。この間，ガス絶縁開閉装置の研究開発に従事。工学博士。