

池田 久利 H. Ikeda 花井 正広 M. Hanai 石川 雅之 M. Ishikawa

高電圧・大電流技術は、電界やアークなどの解析、放電を代表とする現象、あるいは高電圧・大電流測定などを代表的な技術分野としている。高電圧・大電流技術を機器の絶縁や遮断性の性能向上に用いるのが絶縁技術と遮断技術である。

電力機器に用いられる絶縁・消弧媒体のうち、優れた絶縁・遮断特性をもち機器の小型化を可能とするSF<sub>6</sub>ガスは、66 kV以上の高電圧・大容量の電力用機器で多く用いられている。当社は、世界最高レベルにある試験設備を用いて、このSF<sub>6</sub>ガスの絶縁・遮断特性に関する基礎研究とともに解析および実験を行い、電力機器の性能向上に努め成果を上げている。

High-voltage and high-current technologies include analyses, represented by electric field analysis; phenomenology, represented by the study of discharge phenomena; measurement technology, represented by the measurement of high-voltage and high-current phenomena; and many other technologies. It is the purpose of insulating and interrupting technology to apply high-voltage and high-current technologies in the development of high-power equipment.

SF<sub>6</sub> gas is usually used in high-voltage and high-power equipment exceeding 66 kV since it enables downsizing of the equipment due to its excellent insulating and interrupting characteristics. This paper reviews the basic research conducted on these characteristics and the contribution of this basic research to improving the capacity of power equipment. Toshiba's testing facilities, which are at the highest level in the world, are also introduced.

## 1 まえがき

電力機器には、経済性を追求するため、大容量・縮小化、コストダウン、信頼性の維持・向上が強く求められている。また、需要の増加に伴う電力系統・機器構成の変化に対応して、電力機器を高度化することも重要である。

高電圧・大電流技術は、図1に示すような技術分野を代表的な対象としている。図に示すように高電圧技術を用いて機器の絶縁性能を向上させることが絶縁技術である。また、大電流技術を用いて遮断性能の向上を追求することが

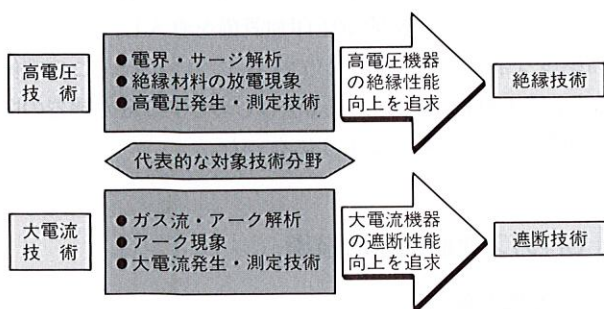


図1. 電力機器における高電圧・大電流技術 絶縁・遮断技術は、電力機器に高電圧・大電流技術を適用することである。

High-voltage and high-current technologies for power equipment

遮断技術である。

高電圧、特に66 kV以上の電力機器にはSF<sub>6</sub>ガスが用いられることが多い。この理由としてはこのガスが絶縁・遮断特性に優れており、前述した大容量・縮小化などのニーズにマッチしたからである。図2は当社におけるSF<sub>6</sub>ガスを用いたガス絶縁機器の変遷を示したもので、500 kV送電が実現された1970年ころからSF<sub>6</sub>ガス絶縁の機器が広く用いられ

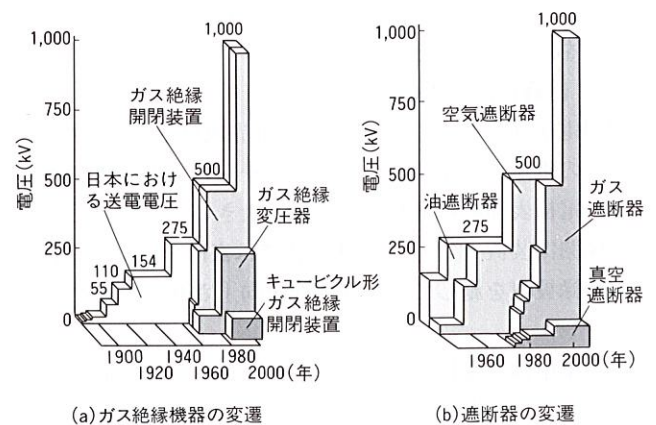


図2. SF<sub>6</sub>ガス絶縁機器・遮断器の変遷 66 kV以上の電力機器にはSF<sub>6</sub>ガスが広く用いられている。

Trends in SF<sub>6</sub> gas-insulated equipment and circuit breakers



れている。

以下に、SF<sub>6</sub>ガスを用いた絶縁・遮断技術および高電圧・大電流技術が電力機器に対するニーズにどのようにこたえているかを紹介する。

## 2 SF<sub>6</sub>ガス絶縁技術

### 2.1 基礎現象

ガス中の絶縁破壊は、主に図3に示すプロセスを経過する。高電圧が印加されたガス中で初期電子が発生すると、この電子が電界で加速される。高速になった電子が中性のガス分子に衝突すると電離を生じて電子が増加し、電子なだれを形成する。電子なだれが発生すると、ますます電界が集中し、より導電性の高いリーダ放電を経て全路破壊に進展する。

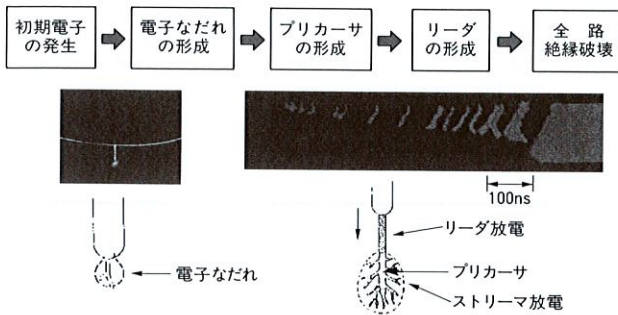


図3. ガス中の絶縁破壊プロセス ガス中の絶縁破壊の防止には初期電子の抑制と電子なだれの抑止が重要である。

Process of dielectric breakdown in gas

絶縁破壊を防止するには、絶縁破壊を起こす機構を把握し、その機構を途中でくい止める必要がある。SF<sub>6</sub>ガス中では電子なだれの形成が電界に大きく依存する特性がある。このため、初期電子の発生と電子なだれを引き起こす電界の集中を防止することが重要である。

### 2.2 絶縁性能向上の施策

初期電子は、主に電極表面からの電界放出やSF<sub>6</sub>ガス中のイオンの電離で発生する。電極表面からの電界放出の抑制には、電極表面の絶縁被覆の効果が大きい。このため、ガス絶縁開閉装置 (GIS) の高圧導体では表面をアルマイトなどの絶縁被覆を施して、絶縁性能を向上させることができる。

電界集中は、電極形状によるもの、あるいは欠陥によるものがある。電極形状によるものとしてはガス絶縁変圧器に多く存在するくさびギャップがある。ガスギャップには誘電率の関係から電界が集中しやすいため、図4に示すようにガスギャップ形状の絶縁物詰め物によりガスギャップ

部分の電界緩和が可能となり、破壊電圧が向上する。

一方、欠陥によるものとしては金属異物や絶縁物中のボイドなどがある。これらの欠陥は、検出技術の向上によって発見され除去されている。例えば、GIS 内部の金属異物が電圧印加による静電気で跳ね上がる現象を利用し、図5に示すように異物がタンクに衝突する振動を超音波センサで検出でき、長さ2 mm以上の異物を検出・除去できる。

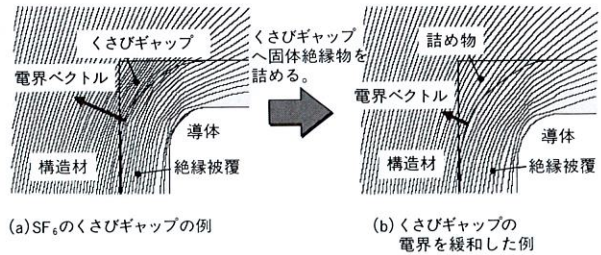


図4. くさびギャップ部分の電界緩和 個体絶縁物の詰め物によってくさびギャップ部分の電界を抑制できる。

Electric field relaxation of wedge gas gap

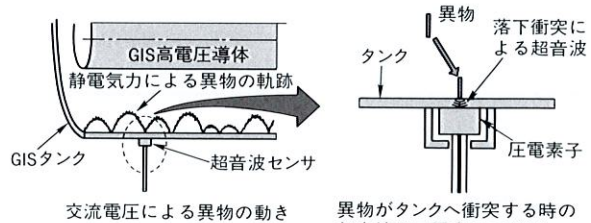


図5. GIS中の金属異物の検出技術 長さ2 mmの異物の挙動を超音波センサによりタンク外部から検出できる。

Technology for detection of metal foreign matter in GIS

### 2.3 高電圧試験技術

高電圧試験においては、微小な放電を感度よく検出することが重要である。このため外部ノイズの侵入を防止し、検出感度を向上させる必要がある。当社は、図6に示すような単相としては世界最高の電圧2,300 kVの試験用変圧器とGISとを直結した交流電圧印加設備を導入し、1 pCという高感度な部分放電の検出ができるようにした。この設備により、1,000 kV (UHV) 機器をはじめとする電力機器の開発を短期間で進められるようになった。

## 3 SF<sub>6</sub>ガス遮断器遮断技術

### 3.1 基礎現象

ガス遮断器では接触子が開くことによって発生するアークに高圧力のガスを吹き付け、交流電流のゼロ点でアークを消弧して電流を遮断する。



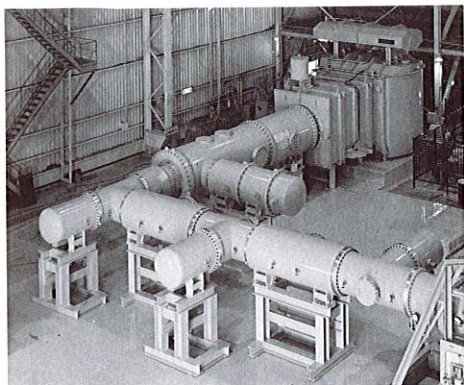
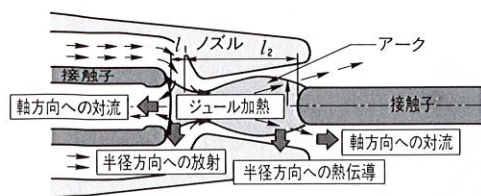


図6. GIS直結型2,300kV試験用変圧器 密閉型のため1pCレベルの高感度な部分放電測定が可能である。  
2,300 kV testing transformer directly connected to GIS

大電流を遮断する場合、アークがもつ抵抗成分中を電流が流れるためにアークからジュール熱の形でエネルギーが発生する。このエネルギーはガスの流れによる対流、熱伝導、光放射などの形で放散される。この概念を図7に示す。

アークから発生するエネルギーが十分に放散せずにアーク空間に滞留すると、アーク領域の電気伝導性が増し、またアーク周囲のガスはアークから発生する熱エネルギーを吸収して高温となる。いずれも電流遮断後に接触子間の絶縁が速やかに回復することを阻害する要因となる。したがって大電流遮断の際にはアークを効率よく冷却することが重要である。

図7に示すアーク冷却の特性を定量的に把握するには、温度、圧力、ガス流速などの基礎量を測定することが必要である。これらの測定法の例として、図8にアーク温度の測定結果の一例を示す。アークから放射される光には、アーク中の分子、原子、イオンに特有の波長の成分が含まれ、アークの温度によってこの光の成分の強度が変化することを利用して温度を求める。同図はノズルスロット部に置いたスリットによりアーク光を取り出し、この部分の発光成



$$\text{アーク内部のエネルギー変化} = \text{ジュール加熱} - \text{軸方向への対流} + \text{半径方向への熱伝導} + \text{半径方向への光の放射}$$

図7. アーク冷却の概念 ジュール熱によって加熱されたアークは、対流、熱伝導、放射によって冷却される。

Conceptual schematic of energy balance in arc

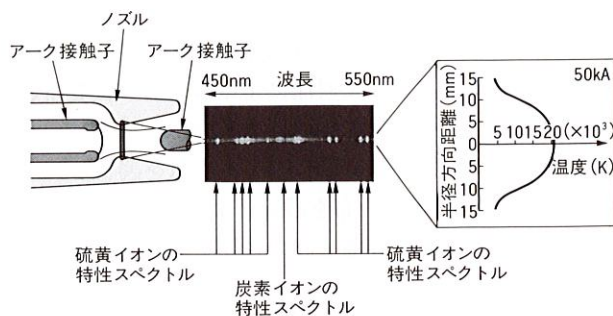


図8. 分光分析によるアーク温度の測定 分子、原子、イオンの種類によって決まる波長の光の強度から温度分布を求める。

Measurement of temperature distribution in arc using spectroscopic analysis

分を分析した例である。SF<sub>6</sub>が分解してできる硫黄がさらに電離してできる硫黄イオン、ノズルの材料であるPTFEに含まれる炭素が電離してできる炭素イオンなどからの発光が観測される。これによって半径方向の温度分布を求めると、50 kAの電流が流れるアークでは中心温度が20,000 Kにも達することがわかる。

一方、小電流遮断の際にはアークの影響が少ないために、接触子間の絶縁は接触子間距離が増加する特性と低温のガス流中のガス密度によって決まる。したがって、小電流遮断の際には接触子が開く速度を増加することと低温ガス流中の密度を高くすることが重要である。ガス流中のガス密度を定量的に把握するために、種々の光学的手法を応用した測定法を開発している。

こうした諸量の測定によって現象を把握し、アーク冷却過程およびガス密度の適正な制御に役だてている。

### 3.2 遮断性能向上の施策

図9には、大電流遮断の際にアークの冷却効率を向上させるための具体的な施策、および小電流遮断の際に絶縁耐力を効率よく向上させるための具体的な施策を示す。

大電流遮断性能の向上施策の一例としてインナノズルを

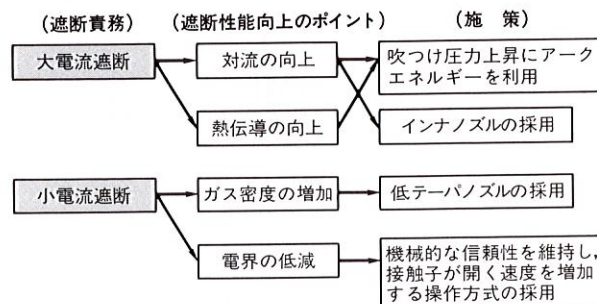


図9. 遮断性能改善のための施策 種々の施策を組み合わせることにより総合的な遮断性能を改善できる。

Measures for improvement of interrupting capability



紹介する。インナノズルは二つの方向に分かれて吹きつけるガス流に対し、それぞれのガス流が吹きつけるアーク長を均等にすることによって対流による冷却効率を増加させる効果をもつ。インナノズルの概念を図10に示す。

小電流遮断では、絶縁ノズルのテーパ角を調整して接触子間のガス圧力(密度)分布を最適化する方法や、接触子が開く速度を向上させて接触子間の電界を緩和する方式などがある。図11には、絶縁ノズルのテーパ角を最適化することにより、過渡的な圧力振動によって一時的に圧力(密度)が低下することを抑止し、絶縁破壊電圧を向上させた例を示す。

これらの技術を結集し、当社は550 kV一点切りガス遮断器を世界に先駆けて製品化し、納入した。

また、1,000 kV二点切りガス遮断器にもこの技術が活かされている。図12には1,000 kV二点切りガス遮断器の全点遮断試験の状況を示す。

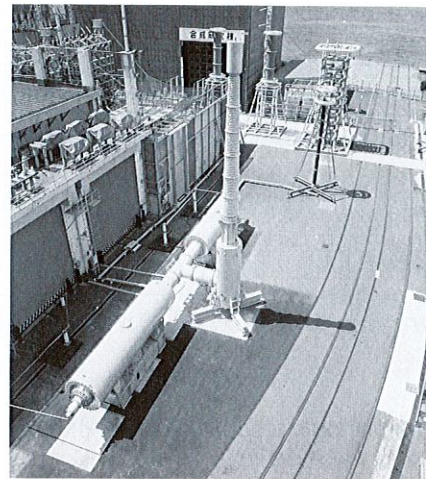


図12. 1,000 kVガス遮断器の全点遮断試験 ユニット試験と全点試験を組み合わせることで1,000 kVガス遮断器の性能を検証した。  
Full-pole short-circuit test of GCB for UHV

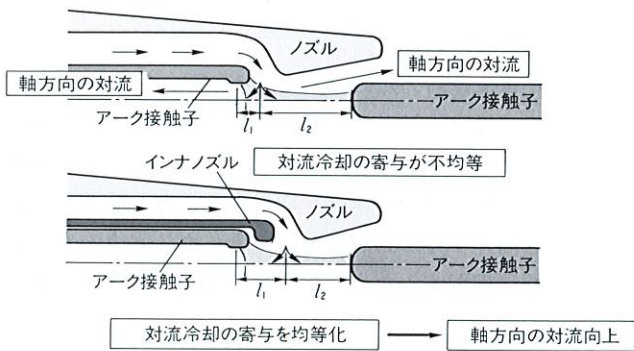


図10. インナノズルによる高温ガス排気効率の改善 対流による冷却の寄与を均等化し、冷却効率を高める。  
Improvement of convective cooling by means of inner nozzle

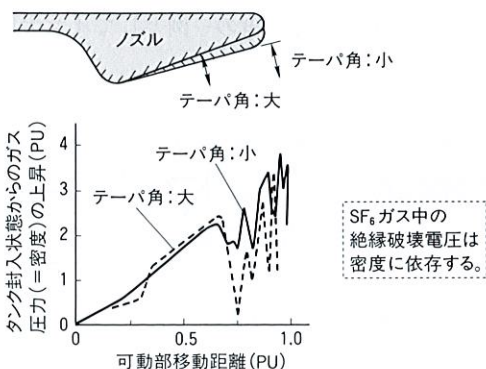


図11. 低テーパノズルによる密度分布の改善 局所的な圧力変動を抑止し、絶縁破壊電圧を向上させた。  
Improvement of dielectric recovery by means of nozzle with low opening angle

#### 4 あとがき

以上、高電圧・大電流技術の代表的な技術である絶縁技術と遮断技術をSF<sub>6</sub>ガスを用いた場合について紹介した。

SF<sub>6</sub>ガスの絶縁技術と遮断技術には、今後さらに高度な技術開発が進められる。

絶縁技術では、光の利用や計測技術の高度化、あるいは複合絶縁やSF<sub>6</sub>ガス特性の極限利用などの新材料の応用によって高性能化を目指す。

遮断技術では、アークエネルギーの利用をより拡大する遮断方式の開発やガス流の密度変動を極小化する制御の高度化、あるいは遮断電流のよりいっそうの増大に対応する新材料の応用などによって高性能化を目指す。

これらを通じてさらに魅力ある次世代機器の開発を目指し、あくなき追求を続けていく所存である。



池田 久利 Hisatoshi Ikeda, D.Eng.

重電技術研究所 電力技術開発部部長, 工博。  
電力用開閉装置の開発設計に従事。電気学会, IEEE Senior 会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



花井 正広 Masahiro Hanai

重電技術研究所 電力技術開発部主査。  
ガス絶縁変圧器などの高電圧技術開発に従事。電気学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



石川 雅之 Masayuki Ishikawa, D.Eng.

重電技術研究所 企画・管理担当副参事, 工博。  
アークプラズマ現象の研究に従事。電気学会, IEEE 会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.