



# 大容量真空遮断器の開発 - 真空アークの制御 -

丹羽 芳充, 金子 英治<sup>1)</sup>

(株東芝 電機応用システム開発部, <sup>1</sup> 琉球大学電気電子工学科)

## Development of High Interruption Capability Vacuum Circuit Breaker - Technology of Vacuum Arc Control -

NIWA Yoshimitsu and KANEKO Eiji<sup>1)</sup>

Electrical & Mechanical Application Systems R&D Dept., Toshiba corporation, 1, Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo, 183-8511, Japan

<sup>1)</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, University of the Ryukyus, 1, Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

(Received 12 October 2004)

Vacuum circuit breakers (VCB) have been widely used for power distribution systems. Vacuum Interrupters, which are the current interruption unit, have been increased its interruption capability with the development of vacuum arc control technology by magnetic field. There are three major type electrodes: disk shaped electrodes, radial magnetic field electrodes, axial magnetic field (AMF) electrodes. In the disk shaped electrode, the vacuum arc between the electrodes is not controlled. In the AMF electrode, the vacuum arc is diffused and stabilized by an axial magnetic field, which is parallel to the arc current. In the last type of electrodes, the vacuum arc column is rotated by magnetic force generated by the current flowing in the electrodes. The interruption current and the voltage of one break VCB is increased to 100 kA, 144 kV respectively.

This paper describes basic configurations and functions of VCB, vacuum arc control technology in vacuum interrupters, recent researches and applications of VCB.

Keywords:

vacuum arc, vacuum circuit breaker, vacuum interrupter, magnetic field, current interruption, insulation

### 1. はじめに

遮断器は短絡などの事故が発生した際に、事故電流を遮断するため用いられている。遮断器には、様々な媒体を用いたものがある。主なものとしては、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)、空気、真空の3種類がある。SF<sub>6</sub>ガスは優れた絶縁性能を持つことから、送電系統など高電圧の系統で広く用いられている。空気はSF<sub>6</sub>ガスや真空より絶縁性能が劣るため、数kV以下の低い電圧の機器で用いられることが多い。それに対し、真空は数10kV以下の受配電系統などで広く用いられている。真空は環境負荷の少ない媒体として、適用範囲の拡大が期待されている。

真空遮断器(Vacuum Circuit Breaker: VCB)は、遮断部に真空中で電極を開閉する「真空バルブ」と呼ばれるユニットを用いている。真空バルブは、セラミックなどの絶縁物製の容器内に一對の電極を設け、容器内を10<sup>-4</sup> Pa以下の真空としている。通電中に真空バルブの電極を遮断器の操作機構により開くと、電極間にアーク放電が生じる。アークは電極の接触部に設けられた接点が蒸発し、金属蒸気となり電極間で電離することで維持されている。電極より放電の媒体が供給される点が、ガス中での放電と異なってい

author's email: yoshimitsu.niwa@toshiba.co.jp, kaneko@eee.u-ryukyuu.ac.jp

る。VCBは安全性の高さや保守点検の容易さなどの利点を活かして、実用開始から約30年の間に急速な発展を遂げ、現在では定格電圧3.6~36kVの範囲の遮断器では主流となっている。また、真空バルブの電極間に生じるアークに磁界を印加し、アークを制御する電極が広く用いられるようになって、VCBの大容量化が飛躍的に進んだ。磁界によるアーク制御の手法により、真空バルブの電極は大きく3種類に分類される[1]。1つは磁界による制御を行わない平板電極であり、遮断電流の小さいVCBに用いられている。2つ目は、縦磁界と呼ばれるアークと平行な磁界を印加し、アークを電極間に均一に拡散する方法である[2,4]。3つ目は、アークに直角の磁界を印加し、ローレンツ力によりアークを特定の位置に停滞しないように駆動する方法である[5,7]。また、縦磁界方式を改良し、より遮断性能を向上した自発拡散と呼ばれる方式が開発された[8,9]。さらに、外部回路により強制的に電流を零として遮断するVCBの研究開発が進められており[10,11]、重要負荷や自家発電機を持つ系統や、電車に電力を供給する直流系統に適用されている。

本解説では、一般的なVCBとその適用状況、最近の研

究，大容量化，高電圧化技術を紹介する。

## 2. 真空遮断器の基礎

一般的な3相交流用のVCBの一例をFig. 1に示す。真空遮断器は、遮断部である真空バルブと、真空バルブの電極を開閉する操作機構、回路と接続する導体からなる。真空バルブはFig. 2のような構造となっている。外形は円柱形で、セラミックスなど絶縁物の円筒内に一對の電極が設けられている。一方の電極は回路を開閉できるように、導体にベローズが設けられており、電極が軸方向に動かせる構造となっている。電流遮断のためにロッドを動かし、電極間の接触を開放した際に電極間に生じるアークは、電極から生じた金属蒸気により構成されている。この金属蒸気の一部が容器の内壁に付着すると、電極間の絶縁耐力が低下するため、電極の周囲をシールドと呼ぶ金属円筒で蔽い、絶縁耐力の低下を防止している。

電極にはアークの制御方法により大きく分けて3種類がある。3種類の電極の概略図をFig. 3に、それぞれの電極でのアークの画像をFig. 4に示す。平板電極と縦磁界電極では、電流ピークでのアークの画像を、磁気駆動電極ではアークが電磁力により駆動される様子が見られるように0.5 msごとで3コマの画像を示す。3種類の電極のうち1つ目は、アークを制御しない平板電極である[1]。ピンチ力により集中したアークによる電極の損傷が生じやすく、大電流が遮断できないため、遮断容量が小さい真空バルブの電極として用いられている。2つ目は、縦磁界電極である

[2 4]。電極に流れる電流により電極間にアーク中を流れる電流と平行な向きの磁界を印加することにより、電極間のアークを拡散させ均一な分布とする。アークによる電極への熱入力が均一となり、電極の損傷や温度上昇を低減できるため、大電流の遮断が可能であることから、大容量の真空バルブに用いられている。3つ目は、アークを特定の位置に停滞しないように電磁力により駆動する磁気駆動電極である[5 7]。Fig. 3(c)では一例としてカップ型の電極にスリットを設けたコントレート電極と呼ばれるものを示した。縦磁界電極ではアークを拡散させ均一な分布としたのに対し、ピンチ力により集中状態にあるアークをローレンツ力により駆動する。このようにすると、アークによる電極の局所的な損傷や加熱を防げるため、温度上昇を低減できる。磁気駆動電極には主にコントレート型、スパイラル型と呼ばれるものがある。どちらの電極においても、電極に流れる電流により電極間のアークに半径方向の磁界を印

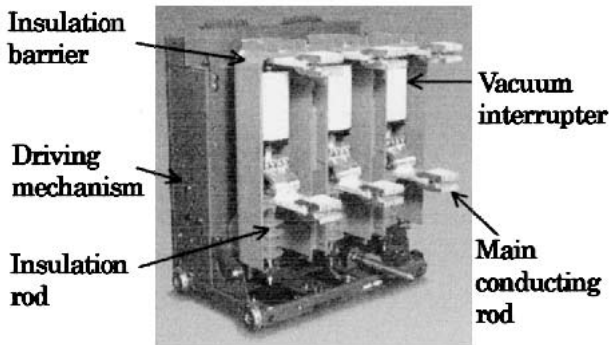


Fig. 1 3 phase VCB.

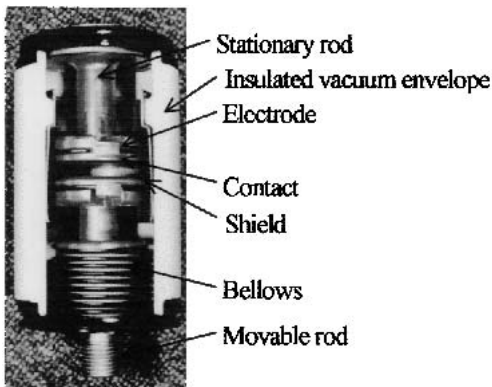


Fig. 2 Inner view of vacuum interrupter.

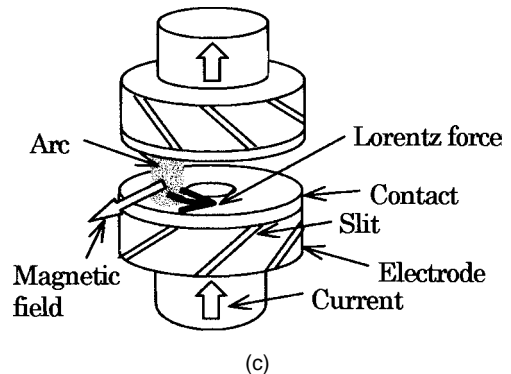
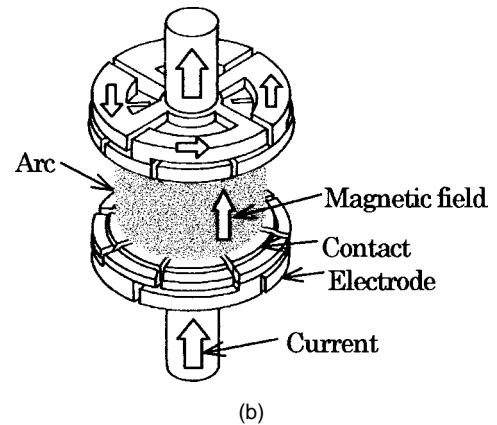
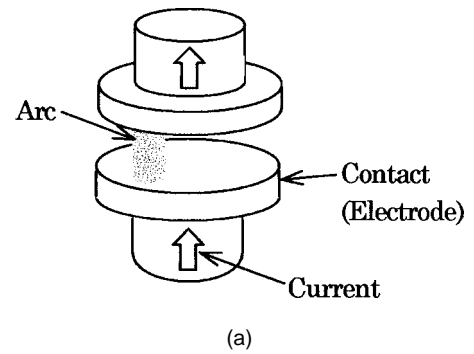
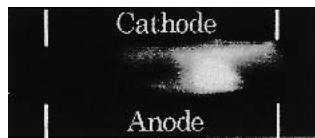
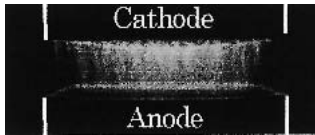


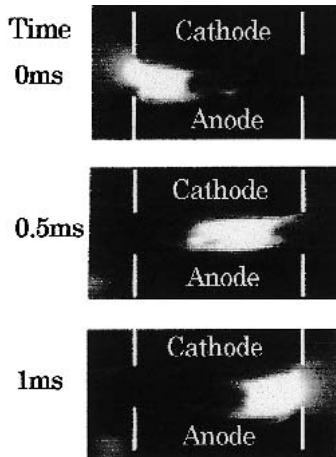
Fig. 3 Electrode configuration. (a) Disk shaped electrode, (b) axial magnetic field electrode, (c) contrate electrode.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Arc appearances. (a) Disk shaped electrode, (b) axial magnetic field electrode, (c) conrate electrode.

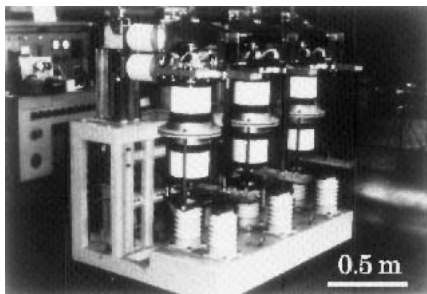


Fig. 5 13.8kV - 100kA VCB.

加し、この磁界とアークに流れる電流によるローレンツ力により、アークを電極の円周方向に駆動する。

次に各種 VCB を紹介する。まず、遮断電流の大きい3相交流 VCB の例として定格電圧 13.8 kV 定格遮断電流 100 kA の大容量の VCB を Fig. 5 に示す [12]。真空バルブに縦磁界電極を用いることで大電流遮断が可能となった。

絶縁技術の進歩により VCB の高電圧化が進んでいる。高電圧 VCB では、これまで複数の真空バルブを直列接続していたが、1本の真空バルブで対応できるようになりつつある。84 kV クラスでも 3 相交流のそれぞれの相を 1本の真空バルブとした VCB がよく用いられるようになっている。定格電圧 84/72 kV のキュービクル型ガス絶縁スイッチギヤ (Cubicle type Gas Insulated Switchgear: C-GIS) の写真

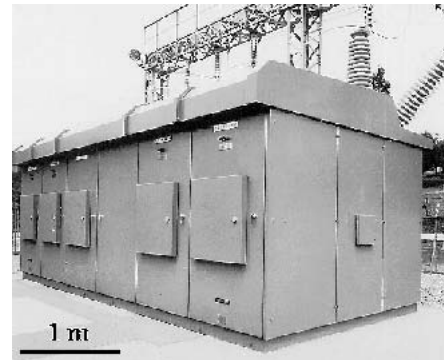


Fig. 6 84/72kV Cubicle type Gas Insulated Switchgear(C-GIS).

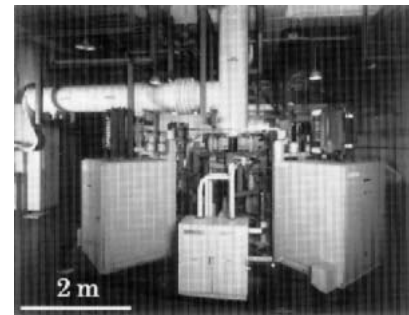


Fig. 7 DC VCB for Tokamak nuclear fusion system JT-60.

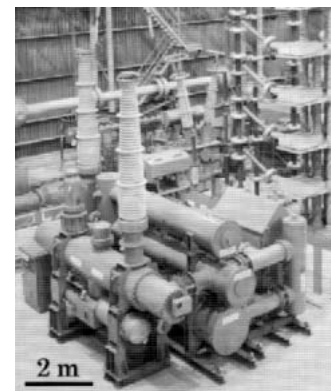


Fig. 8 Prototype DC250kV circuit breaker.

を Fig. 6 に示す [13]。スイッチギヤは、VCB、断路器、接地装置といったスイッチが収められた受配電機器である。このスイッチギヤは、工場やビルなど大口需要家の受電用に広く用いられている。SF<sub>6</sub>ガス絶縁、絶縁物と SF<sub>6</sub>ガスによる複合絶縁の適用により小型化を図っている。さらに高電圧の遮断器への適用例としては、定格電圧 145 kV の VCB がある [14]。

遮断器では、電流が零とならないと電流を遮断することができない。そこで、直流電流を遮断する場合は、外部回路により、遮断する電流と逆向きの電流を真空遮断器に注入することにより、電流を零として遮断している。核融合実験装置用の直流 VCB で、DC44 kV - 130 kA の遮断に成功している。日本原子力研究所の核融合実験装置 JT-60 で用いられている直流 VCB の写真を Fig. 7 に示す [15]。電力系統で用いられている直流遮断器の一例として、本州 -

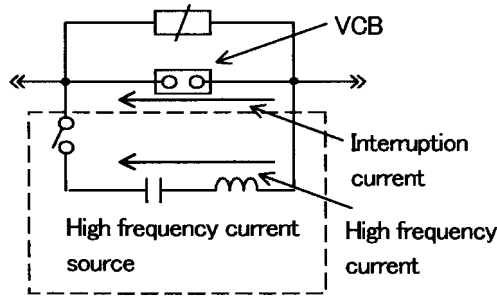


Fig. 9 Circuit of high speed VCB.

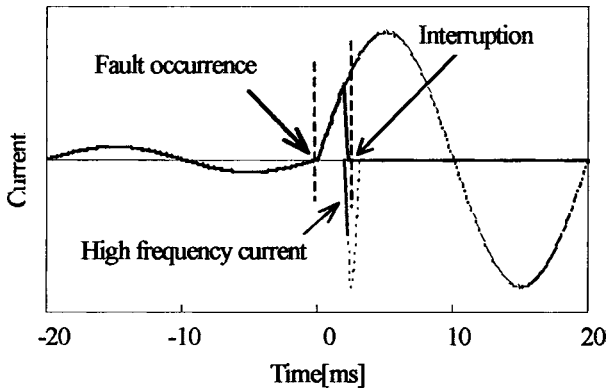


Fig. 10 Typical current wave forms.

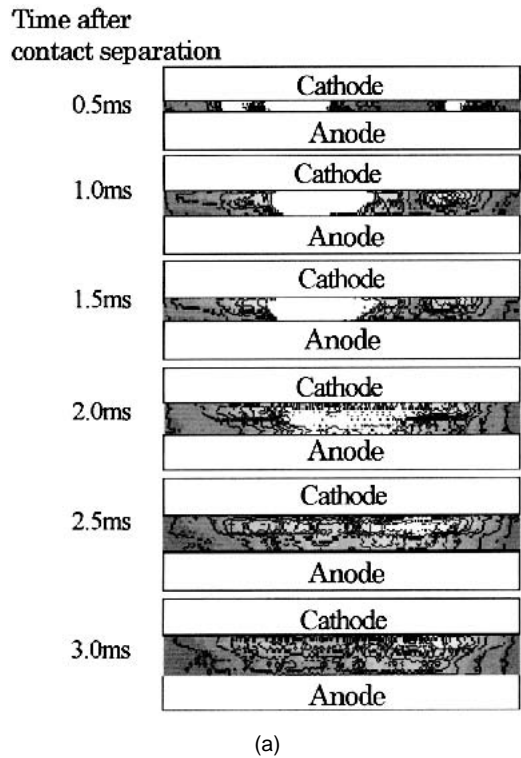
北海道間の 250 kV 直流送電系統で用いられている直流 VCB を Fig. 8 に示す [16]. 高電圧に耐えられるように VCB と SF<sub>6</sub> ガス遮断器を直列接続している.

このように VCB は, 交流の大容量, 高電圧遮断器だけではなく, 直流遮断器などへ適用範囲が広がっている.

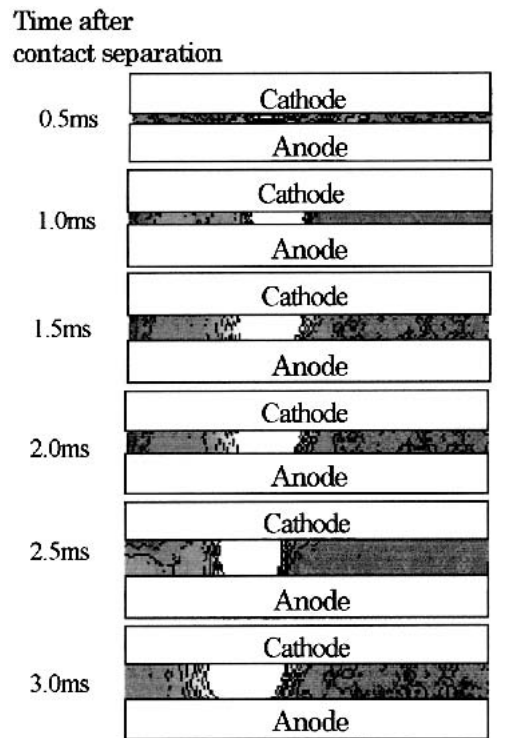
### 3. 真空アークの最新研究動向

重要負荷を持つ需要家は, ガスタービンなど自家発電機を設置するようになってきている. このような発電機をもつ系統では, 発電機の保護のため, 事故が発生し, 事故電流が流れ始めてから遮断までの時間を商用周波数の 1/2 ~ 1/4 サイクル以内と短くすることが望ましい. また, 電車に電力を供給する電鉄の直流系統では, 直流であるため電流は零とならない. 一般的な遮断器では, 電流が零となるまで, 電流を遮断できないため, 事故発生から遮断までの時間短縮には限界があり, 直流電流が遮断できないといった欠点がある. そこで, 遮断器を高速で開極し, 外部回路により真空遮断器に遮断電流と逆向きの高周波電流を注入し, 電流を零とする遮断器が検討されている [10, 11]. 遮断器構成の一例と, 電流波形はそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 のようになる. このような遮断方法を採用した VCB は, 重要負荷や自家発電機の保護用や, 電鉄の直流系統用として使用されている.

遮断までの時間を短縮する場合, 電極開極から遮断までの時間が短くなることから, 真空バルブの電極開極直後におけるアーク状態の把握が重要である. 電極間のアークの変化を Fig. 11 に示す. 事故を想定した電流を通電している際に, 電極を開極し, 高速度ビデオカメラによりアークを



(a)



(b)

Fig. 11 Arc appearance. (a) Axial magnetic field electrode, (b) disk-shaped electrode.

撮影した. 左側に開極からの時間を示した. 縦磁界電極では, はじめアークは集中しているが, 縦磁界の効果により電極間全域に拡散している. 平板電極では, アークは狭い領域に集中した状態が継続している.

電極開極直後のアークの輝度分布をこの 2 種類の電極と比較した. アークの画像ではどちらの電極でもアークが狭

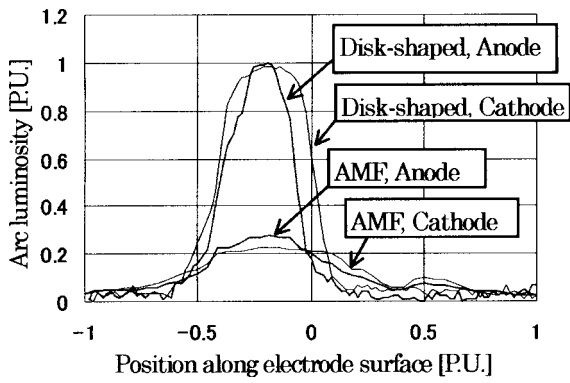


Fig. 12 Distribution of arc luminosity.

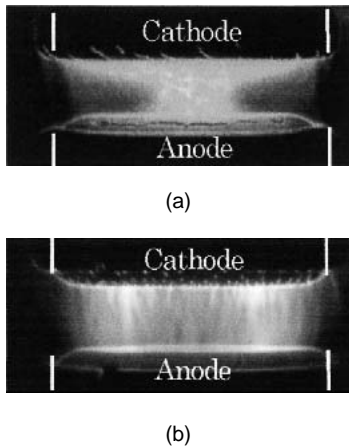


Fig. 13 Arc appearances. (a)Axial magnetic field electrode, (b)Self Arc Diffusion by Electrode (SADE).

い領域に集中しているように見えるが、Fig. 12 より縦磁界電極では縦磁界の効果によりアークの集中が抑制されていることがわかる。これより、強制的に電流を零として短時間で電流を遮断するVCBには、縦磁界電極が適しているといえる。

### 4. 真空遮断器の大電流化技術

電極間のアークの磁界制御による大電流遮断性能の向上について述べる。真空バルブの電極として用いられている縦磁界電極はアークを縦磁界により均一に拡散することができるため、高い遮断性能が得られる。ところが、遮断電流をさらに高くしていくと Fig. 13(a)のように、磁界の高い電極中央部でアークが集中していく。そこで、縦磁界電極においてもアークが集中する大電流で、アークを Fig. 13(b)のように均一に拡散することができる方法が検討された [8 9]。縦磁界電極では Fig. 14(a)のように電極中央で磁界が高いのに対し、磁界分布を Fig. 14(b)のように電極端部で高く、中央で低くなるようにする電極が考案された。この電極は自発拡散電極 (Self Arc Diffusion by Electrode: SADE) と呼ばれている。縦磁界電極と自発拡散電極のアークの発光強度分布を Fig. 15 に示す。遮断電流は自発拡散電極のほうが大きい、縦磁界電極ではアークがアノード側で電極中央に集中しているのに対し、自発拡散電極で

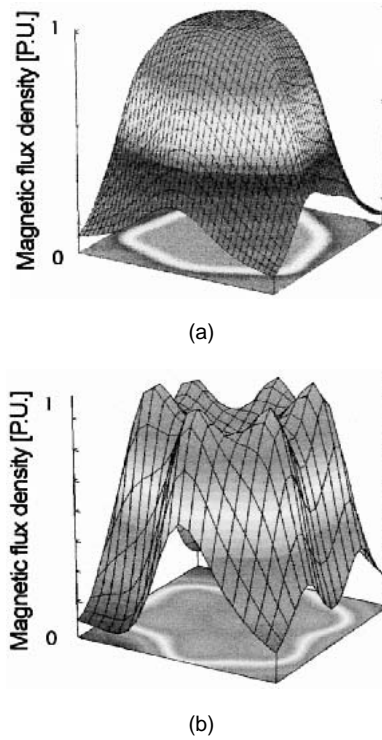


Fig. 14 Axial magnetic flux density distribution between electrodes. (a)Axial magnetic field electrode, (b)Self Arc Diffusion by Electrode (SADE).

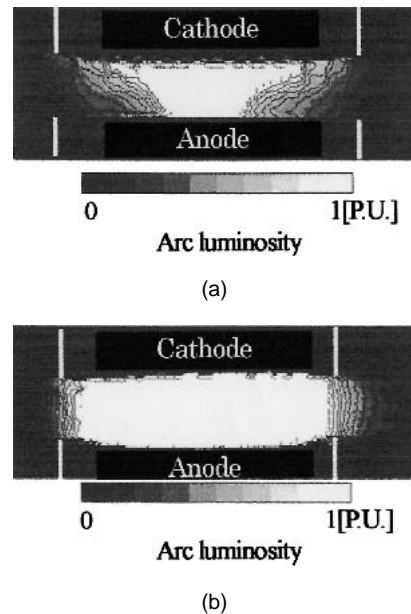


Fig. 15 Arc luminosity distribution between electrodes at current peak of interruption limit. (a)Conventional AMF (Interruption current: 12.5 kArms), (b) Self Arc Diffusion by Electrode (SADE) (Interruption current: 25 kArms).

は電極間の全域に広がっている。同一の電極サイズでの遮断性能は、自発拡散電極では従来の縦磁界電極の約2倍を達成した (Interruption current 12.5 25 kA)。

### 5. 真空遮断器の高電圧化技術

VCBの高電圧化には、真空バルブ内部と、外部の絶縁性能の向上が必要である。まず、真空バルブ内部の真空中の

絶縁技術について、次に真空バルブ外部の絶縁技術について述べる。

真空バルブ内部で絶縁性能が要求される箇所は、電極間、シールド - 電極・通電軸間などの真空ギャップ、絶縁物製の容器表面である。これらのうち、真空ギャップについての絶縁破壊について紹介する。真空中の絶縁破壊では、絶縁破壊を繰り返していくと破壊電圧が上昇するコンディショニング効果という特徴的な現象が知られている [17, 18]。真空バルブの製造工程において、この効果を利用した処理が用いられている。絶縁破壊を繰り返すことにより、電極表面の一部が溶融し、吸着ガスや付着物が除去され、表面が清浄化される。さらに、溶融されることにより、微小突起が除去され表面が平滑化され、電界放射による電子放出が抑制される。表面加工方法が異なる電極での絶縁破壊の回数と破壊電圧の関係を Fig. 16 に示す。加工方法により表面粗さが異なっており、複合電界研磨の方が機械加工より表面が滑らかな方が、コンディショニングが早く完了することがわかる。

高電圧真空バルブの小型化の一例として 84 kV 用真空バルブの変遷を Fig. 17 に示す。真空中の絶縁技術、大電流遮断技術の向上により、真空バルブの小型化が進んだ。

次に真空バルブ外部の絶縁について紹介する。SF<sub>6</sub>ガスは温暖化効果が高いことから、他の絶縁方法が検討されている。その一つとして、固体絶縁技術、固体絶縁と気中絶縁を組み合わせた絶縁技術の研究開発が進められ、すでに

製品に適用されている。

固体絶縁と気中絶縁を複合した絶縁方法の基礎研究の一例を紹介する [19]。金属電極の先端をエポキシでモールドし、空气中で電極間にギャップを設けた Fig. 18 のような装置で、絶縁特性を調べた。絶縁破壊時の放電の写真を Fig. 19 に示す。金属電極、絶縁物沿面、気中ギャップ、絶縁物、金属電極の経路で放電が生じている。金属電極先端のエポキシモールドの効果を知るため、電極間のギャップと絶縁破壊電圧、部分放電発生開始電圧の関係を Fig. 20 に示す。エポキシモールドを設けると絶縁破壊電圧と部分放電開始電圧の両方が向上することがわかる。このことは、固体絶縁と気中絶縁を複合することにより、絶縁性能が向上することを示している。

固体絶縁と複合絶縁を適用した固体絶縁スイッチギヤ (Solid Insulated Switchgear: SIS) の断面図を Fig. 21 に示す [19 20]。SIS は、絶縁媒体として SF<sub>6</sub>ガスを全く使用していない。SF<sub>6</sub>ガスを用いている C-GIS と比較して、重量半減、体積40%縮小を達成した。VCB, 真空断路器 (Vacuum Disconnect Switch: VDS) や導体をエポキシで絶縁し、表面を接地電位としている。VCB と VDS の真空バルブとこれらを開閉する操作機構の接続部分に固体絶縁と気中絶縁の複合絶縁が適用されている。SF<sub>6</sub>ガスは地球温暖化係数が

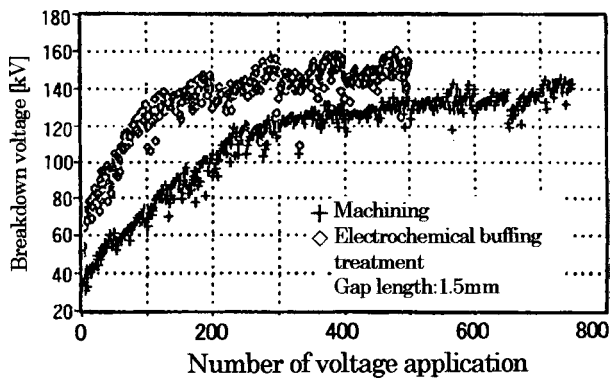


Fig. 16 Conditioning effect for breakdown voltage.

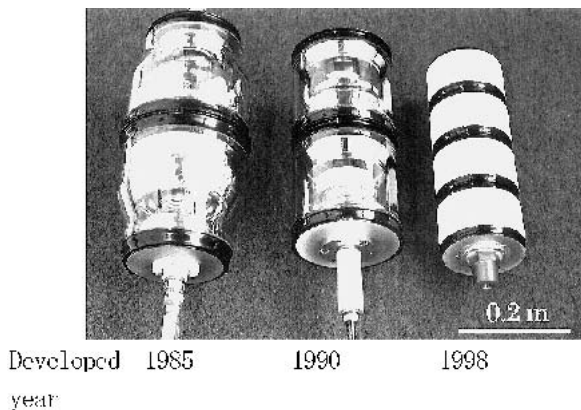


Fig. 17 Size reduction history of vacuum interrupter for 84kV - 31.5 kA.

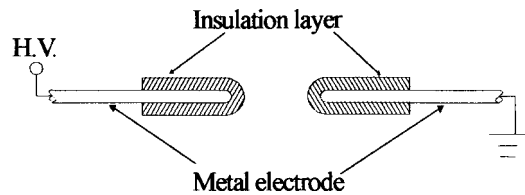


Fig. 18 Composite Insulation configuration.

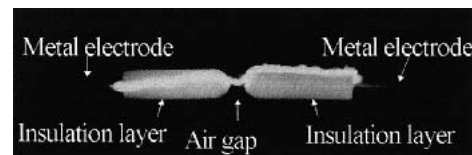


Fig. 19 Discharge channel of molded electrode (gap length L = 30 mm).

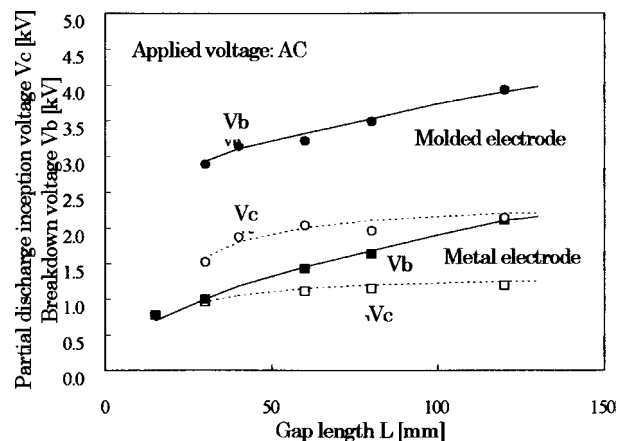


Fig. 20 Relationship between partial discharge inception voltage, dielectric breakdown voltage and gap length.

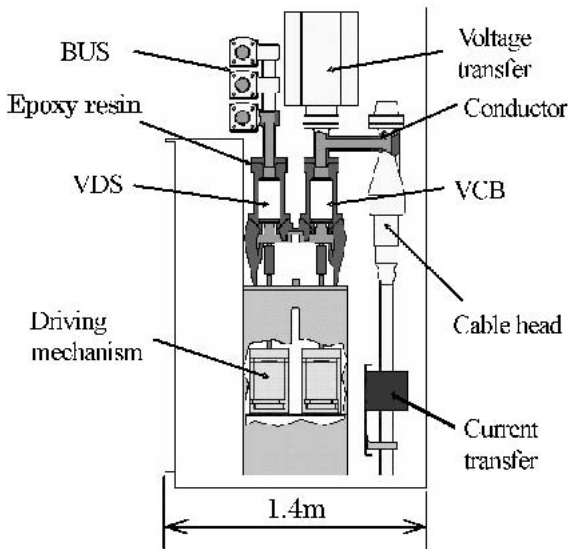


Fig. 21 Inner configuration of 24 kV solid insulated switchgear.


炭酸ガスの 23,900 倍と高いことから，1997年に開催された地球温暖化防止会議（COP3）において，排出規制ガスに指定された．SISは脱SF<sub>6</sub>ガスに成功したスイッチギヤの一つである．

6. まとめ

VCBは，真空アークの磁界による制御技術や絶縁技術の研究開発により，大容量化，高電圧化が進み，さらに適用範囲が広がっている．また，外部回路により強制的に電流を零とすることにより交流電流や直流電流を事故発生から短時間で遮断する新しいVCBの普及も進んでいる．真空は環境負荷の少ない媒体として期待されているが，適用範囲の拡大には真空中の放電現象の解明が重要である．


参考文献

- [ 1 ] A. Greenwood, "Vacuum switchgear", IEE Power Series 18, London, U.K. (1994).
- [ 2 ] S. Yanabu *et al.*, Proc. IEE 126, No. 4, 313 (1979).
- [ 3 ] M. Okawa *et al.*, IEEE Trans. Power Deliv. PWRD-2, No.3, 805 (1987).
- [ 4 ] K. Watanabe *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 25, No.4, 609 (1997).
- [ 5 ] M. Bruce Shulman *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 21, No.5, 484 (1993).
- [ 6 ] Wilfried Hass *et al.*, IEEE ISDEIV 1998 (1998) p.274.
- [ 7 ] J. Teichmann *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 27, No.4, 484 (1999).
- [ 8 ] M. Homma *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 27, No.4, 961 (1999).
- [ 9 ] Y. Niwa *et al.*, IEEE Winter Meeting 2000 (2000).
- [ 10 ] Y. Niwa *et al.*, IEEE PES T & D Conference 2002, Yokohama, Japan (2002) p.1786.
- [ 11 ] Y. Niwa *et al.*, IEEE ISDEIV 2002 (2002) p.435.
- [ 12 ] S. Sunada *et al.*, CIGRE 1982 Session, Report 13-04 (1982).
- [ 13 ] T. Shioiri *et al.*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 6, No.4, 486 (1999).
- [ 14 ] M. Homma *et al.*, IEEE ISDEIV 2004 (2004) p.378.
- [ 15 ] R. Tamura *et al.*, IEEE Trans. PAS, Pas-99, No3, 1119 (1989).
- [ 16 ] T. Senda *et al.*, IEEE PES Summer Meeting 83, SM501-4 (1983).
- [ 17 ] T. Shioiri *et al.*, 8th ISH (1993) p.473.
- [ 18 ] T. Shioiri *et al.*, J.Vac. Soc. Jpn. 43, No.1, 18 (2000).
- [ 19 ] J. Sato *et al.*, IEEE PES T & D Conference 2002, Yokohama, Japan (2002) p.1791.
- [ 20 ] J. Sato *et al.*, IEEE ED-03-170 (2003).



に わ よ し み つ  
丹 羽 芳 充

1968年 8月19日生．1994年 3月東京工業大学大学院修士課程修了，同年 4月株式会社東芝入社，現在に至る．電力・社会システム技術開発センター，電機応用システム開発部に所属．真空放電，真空遮断器の研究開発に従事．電気学会会員．



か ね こ え い じ  
金 子 英 治

1952年 9月16日生．1977年 4月名古屋大学大学院博士課程前期課程修了．同年 4月東京芝浦電気株式会社（現株式会社東芝）入社，真空放電，真空遮断器の研究開発に従事．2002年 4月琉球大学工学部助教授，現在に至る．電磁エネルギー工学講座に所属，電気エネルギーシステムの総合的な研究，教育に従事．放電学会，電気設備学会，応用物理学会，IEEE 会員．工学博士．