

## 電力用開閉装置における SF<sub>6</sub> ガス代替技術の開発動向

### Development trends on the SF<sub>6</sub>-free technology for switching equipment for the electric power system

浦井 一\*

Hajime Urai

#### Summary

The electric power industry is accelerating to reduce the SF<sub>6</sub> gases used as insulating gas for high-voltage equipment in the course of carbon neutrality. SF<sub>6</sub> is a potent greenhouse gas with 25,200 times higher global warming potential than CO<sub>2</sub>. This report reviews recent engagements by the electric power industry, including utilities, manufacturers, and governments. There were significant changes in the strategies to reduce SF<sub>6</sub> usage in electric power equipment in 2021. California Air Resources Board announced the new regulations for the phase-out of the SF<sub>6</sub> used in switchgear and became effective from January 2022. Corresponding to such a trend, manufacturers have accelerated the development of SF<sub>6</sub> alternative technologies. There exist two SF<sub>6</sub>-free measures for gas-insulated switchgear as of now. One is alternative gases of fluorinated gases for replacing the SF<sub>6</sub> gas, and another is vacuum interruption and air insulation technology. Two groups of manufacturers are formed to adopt these strategies. GE and Hitachi Energy adopted the F-ketone gas developed with 3M under a cross-license agreement. On the other hand, ten manufacturers, including Meidensha, Mitsubishi Electric, and Toshiba Energy Systems, chose the utterly free of fluorinated gas solution as air-insulated switchgear with vacuum circuit breaker, and released joint statements “Toward T&D equipment free of fluorinated gases for sustainable, climate-neutral power grids.” The last part of this report addresses the future development plans and their technological challenges.

**キーワード** : 六フッ化硫黄ガス, 温室効果ガス, ガス絶縁開閉装置, 遮断器, 脱 SF<sub>6</sub>

**Keywords** : Sulfur hexafluoride gas, Greenhouse gas, Gas-insulated switchgear, Circuit breaker, SF<sub>6</sub>-free

#### 1. 緒言

日本の高度経済成長期における電力需要の増大とともに、長距離・大容量送電が実現されてきた。長距離送電における損失低減のため、送電電圧の高電圧化が進められてきており、国内では 500kV の送電系統が整備されている。1990 年代後半には、1,000kV の UHV (Ultra high voltage) 送電が計画されていた。日本では 1,000kV への昇圧には至っていないが、北米では 756kV、中国では 1,000kV の UHV 送電が実用化されている。

送電系統の高電圧化には、絶縁性能に優れた SF<sub>6</sub> ガス

を用いたガス絶縁機器の開発が大きく貢献している。SF<sub>6</sub> ガスは 1900 年パリ大学においてはじめて製造された人工的に合成されたガスである。1920 年代には優れた絶縁媒体であることが発見されている。電力機器(コンデンサ, ケーブル)への適用に関しては、1940 年に General Electric (GE) が特許を取得している<sup>1)</sup>。また、SF<sub>6</sub> ガスは電流の遮断(消弧)にも優れた特性を有しており、現在では、高電圧遮断器には SF<sub>6</sub> ガスが用いられている。SF<sub>6</sub> ガスを用いたガス遮断器 (GCB; gas circuit breaker) は、1953 年に Westinghouse が基本特許を取得している。国内では SF<sub>6</sub> ガス使用の基本特許の実施権が失

\* 工学部 電気電子工学科 教授

効したのを契機に製品化され、1972年には550kVのGCBが納入されている<sup>2)</sup>。

電力システムの拡張とともに、GCBの高電圧、大電流機種が開発が進められ、1990年代に国内メーカ各社が、世界に先駆けて550kVの1点切りGCBを製品化している。また、1,100kVのUHV実証器が開発されるなど、高い技術力が蓄積されてきた。最近では、中国向け1,100kV 63kAガス遮断器<sup>3)</sup>が開発されている。

SF<sub>6</sub>ガス絶縁を適用した機器として、GCBや断路器などの開閉器を密閉金属容器に一体化して収納したガス絶縁開閉装置(GIS; Gas-insulated Switchgear)が開発されている。国内では、用地の取得難や塩害汚損などの日本固有の立地条件に適した設備として、世界に先駆けて開発・実用化されている。

GCBやGISで用いられているSF<sub>6</sub>は、CO<sub>2</sub>の25,200倍の地球温暖化係数を有しており、COP3(気候変動枠組み条約第3回締約会議、1997年)で規制対象ガスのひとつに指定されている<sup>4)</sup>。このため、ガス回収、リサイクルにより排出量が削減されてきた。2015年にパリで開催されたCOP21(気候変動枠組み条約第21回締約会議)以降、温室効果ガスの排出削減の取組が強化されるようになり、欧米を中心に、SF<sub>6</sub>使用機器の仕様・保有を規制する取り組みが始まっており、SF<sub>6</sub>代替技術の開発が活発化している。

## 2. SF<sub>6</sub>ガス削減に向けた取り組み

### 2.1 SF<sub>6</sub>ガスの温室効果について

SF<sub>6</sub>ガスは大きな赤外線吸収係数を有しており、また安定したガスであるため大気寿命が約3,200年と長い。そのため、温室効果が大きいガスである。CO<sub>2</sub>を基準とした地球温暖化係数(GWP; Global Warming Potential)は

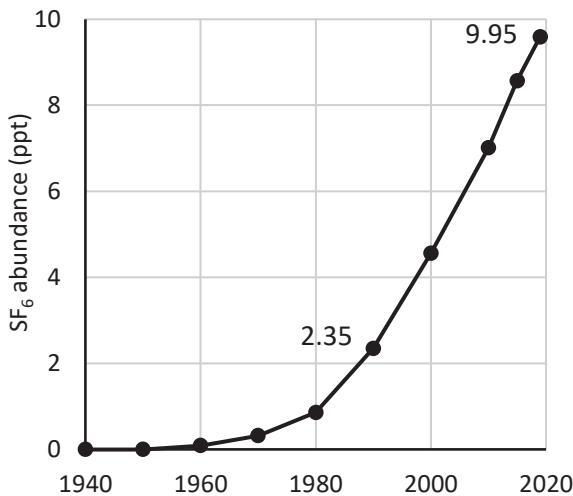


Fig. 1 Historical abundance of SF<sub>6</sub> from IPCC's 6<sup>th</sup> assessment report<sup>6)</sup> (pp. 2141–2142).

25,200(GWP/100yr; GWP value over a time period of 100 years)である<sup>5)</sup>。SF<sub>6</sub>は送変電機器のほか、マグネシウム鋳造や半導体の製造(クリーニングガス)に用いられている。Fig. 1にSF<sub>6</sub>の大気濃度の変化を示す。2019年時点で9.95 ppmであり、1990年から4.2倍に増加している<sup>6)</sup>。

電力分野においては、SF<sub>6</sub>ガスは密閉された状態で使用されることから、回収することにより排出量の削減が進められてきた。国内では、京都議定書(COP3)が発効されてから、電力機器における点検時の排出割合を3%以下に、廃棄時の排出量を1%以下にする自主削減目標が定められており、2005年までに達成している<sup>7)</sup>。電気絶縁機器からのSF<sub>6</sub>ガス排出量の年次変化<sup>8)</sup>をFig. 2に示す。SF<sub>6</sub>ガスの排出量が大幅に削減されてきたことがわかる。1996年のピークに対して2020年は5%に低減されている。また、温室効果ガス全体の排出量に対して、電気絶縁機器からのSF<sub>6</sub>ガスの排出量はCO<sub>2</sub>換算で約0.05%である。Fig. 3にSF<sub>6</sub>ガス製造時の漏出およびその他の排出量の年次変化を示す。電気絶縁機器とガス製造時の漏出は1997年以降大幅に削減されている。なお、その他は、粒子加速器等、マグネシウム鋳造、半導体製造、液晶製造からの排出である。また、参考として米国のSF<sub>6</sub>ガス排出量をFig. 4に示す。日本と同様の傾向である。

最近の持続可能社会に向けた環境意識の高まり、2015年のパリ協定での取組強化などの背景から、SF<sub>6</sub>ガスの一層の削減に向けて、電力機器におけるSF<sub>6</sub>ガス代替技術の開発が進んでいる。特に、欧米では脱SF<sub>6</sub>の機運が高まっており、SF<sub>6</sub>使用機器の使用規制が議論されている。以下、国内外での脱SF<sub>6</sub>の取り組みを述べる。

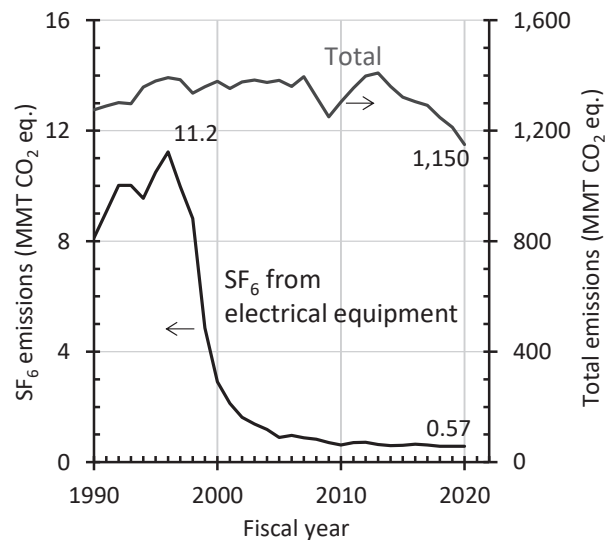


Fig. 2 SF<sub>6</sub> emission from electrical equipment and total greenhouse gas emissions from 1990 to 2020 in Japan<sup>9)</sup>. MMT CO<sub>2</sub> eq.: million metric tons of carbon-dioxide equivalent.

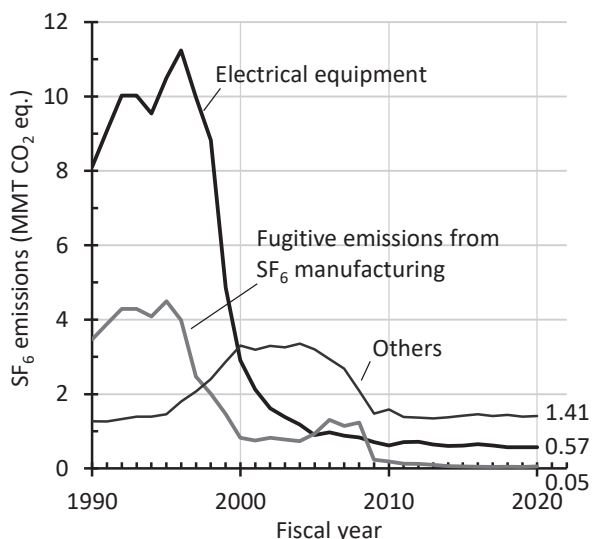


Fig. 3 SF<sub>6</sub> emission from 1990 to 2020 in Japan<sup>9)</sup>. MMT CO<sub>2</sub> eq.: million metric tons of carbon-dioxide equivalent. Others include accelerators, magnesium foundries, semiconductor manufacturing, and liquid crystals manufacturing.

## 2.2 海外での使用規制

米国で先行して気候変動対策に取り組むカリフォルニア州では、電力機器に対する SF<sub>6</sub> ガスの規制が 2022 年 1 月に発効している。Table 1(a)にカリフォルニア大気資源局 (CARB; California Air Resources Board) の電力機器に対する SF<sub>6</sub> ガス規制を示す<sup>10)</sup>。CARB は SF<sub>6</sub> 機器の廃止 (Phase-out) 時期を規定しており、定格電圧 38kV 未満の機器 (地下設置の定格遮断電流 25kA 以上を除く) を 2025 年に廃止するとしている。また、定格電圧 145kV 以下も、定格遮断電流 63kA 未満を 2025 年に、

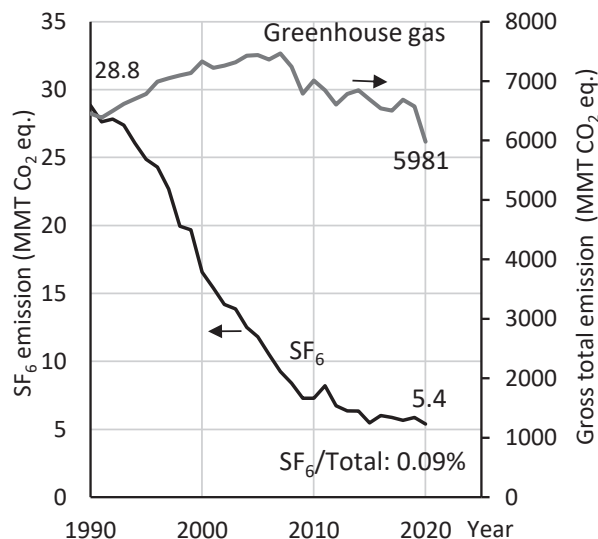


Fig. 4 Estimated U.S. SF<sub>6</sub> gas and total greenhouse gas emissions from 1990 to 2020. MMT CO<sub>2</sub> eq.: million metric tons of carbon-dioxide equivalent.

63kA 以上を 2028 年に廃止するとされている。さらに、2033 年にはすべての機器を脱 SF<sub>6</sub> 化するとしている。

欧州では、EU が 2022 年 4 月に新しい F ガス規制 (F-gas regulation) の提案を発表した<sup>11)</sup>。中電圧 (Medium voltage; 1~54kV) の SF<sub>6</sub> ガスを使用した電力機器に対して、定格電圧 24kV 以下は 2026 年から、54kV 以下は 2028 年から SF<sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置 (GIS) を廃止とするものである (Table 1(b))<sup>12)</sup>。2014 に発効した EU の F ガス規制では、SF<sub>6</sub> ガス廃止の日時は設定されていなかった。これは SF<sub>6</sub> 代替技術がまだ実用的でなかったためであるが、昨今の技術開発の進展により、実現可能とな

Table 1 Regulation for reducing SF<sub>6</sub> emissions by CARB<sup>10)</sup> and EU<sup>12)</sup>

(a) Regulation for reducing SF<sub>6</sub> emissions from GIS by California Air Resources Board (CARB)

>245																All
≤245									< 63 kA							≥ 63 kA
≤145									< 63 kA							≥ 63 kA
38																All
<38									All (Aboveground), < 25 (Belowground)						≥ 25 kA (Belowground)	
Voltage (kV)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	>2033	
	Year															

(b) The use of SF<sub>6</sub> to be prohibited in MV electrical equipment for applications by the European Union (EU)

52																MV electrical equipment
24																MV electrical equipment
Voltage (kV)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	>2033	
	Year															

Table 2 Members of SF<sub>6</sub> alternative study committee<sup>7)</sup>

幹事会社	東京電力パワーグリッド	電力中央研究所
電力会社	北海道電力ネットワーク	中国電力ネットワーク
	東北電力ネットワーク	四国電力送配電
	東京電力ホールディングス	九州電力送配電
	中部電力パワーグリッド	沖縄電力
	北陸電力送配電	電源開発送配電
	関西電力送配電	ネットワーク
電機メーカー	東芝エネルギーシステムズ	富士電機
	日立製作所	日新電機
	三菱電機	東光高岳
	明電舎	
学術有識者	東京大学	九州工業大学
	東京電機大学	金沢大学
	名古屋大学	埼玉大学

ったため、新しく廃止規定が追加される予定である。

電力事業者として、英国の National Grid 社は 2026 年までに SF<sub>6</sub> 使用機器の購入を終了し、2050 年までに SF<sub>6</sub> 使用機器の保有を終了する計画である。また、仏国の RTE 社は 2024 年までに 63~420kV クラスで SF<sub>6</sub> 使用機器の購入を終了する予定である<sup>13)</sup>。

### 2.3 国内の検討状況

国内では 2000 年代に、CO<sub>2</sub> を用いたガス遮断器が提案され、モデル遮断器により有用性が確認されている<sup>14)</sup>など、環境負荷低減のための技術開発が海外と比較して先行していた。また、真空遮断器の高電圧化も進んでおり、固体絶縁や乾燥空気絶縁による SF<sub>6</sub> フリーの開閉装置が製品化されている。しかし、SF<sub>6</sub> ガスを回収することで、排出量の削減が進んでいることから、脱 SF<sub>6</sub> 機器の導入は限られていた。

2010 年代に入り、海外メーカーの SF<sub>6</sub> 代替ガスが発表されるなど、状況が変化しており、海外での取り組みが急速に進んでいる。国内においても、電力会社、機器メーカー、大学、研究所の専門家が集まり、2017 年に「SF<sub>6</sub> 代替ガス検討会」<sup>7)</sup> が立ち上がり、情報が共有され、技術的な議論がなされている。検討会メンバーを Table 2 に示す。

本検討会から、SF<sub>6</sub> ガス代替技術に求められる 7 つの要件が提案されている (Table 3)<sup>15)</sup>。特に、(1)耐環境性・人体への影響・安全性、(2)使用環境 (JEC-2390 では -20℃ から +40℃ が常規使用状態と定義されている)、(3)入手性 (ガスの入手性に加えて、機器のサプライヤも複数あることが望ましい)、(4)ガスの取り扱いが重要なポイントとされ、これに加えて (5)トータルコスト、(6)設備の体格、(7)電圧カバー範囲が従来同等であることが望ましいとされている。

Table 3 Requirements for SF<sub>6</sub> alternative technology<sup>15)</sup>

No.	カテゴリ	要件
(1)	Environment, Health, Safety (耐環境性, 人体への影響・安全性)	分解ガス・分解生成物を含め毒性に対する取り扱いが SF <sub>6</sub> と同等である。
(2)	Service Condition (使用環境)	規格に定める常規使用状態で使用可能である。
(3)	Stable Supply (入手性)	代替ガスは将来に亘り安全供給が可能であることが望ましい。
(4)	Gas handling (ガスの取り扱い)	SF <sub>6</sub> 代替ガスの取り扱いが簡便であることが望ましい。
(5)	Life Cycle Cost (トータルコスト評価)	トータルコスト (機器・付帯工事費、運転保守費用) が SF <sub>6</sub> ガス機器と同等であることが望ましい。
(6)	Footprint (設備の体格)	屋内・地下変電所等の据付空間に制限のある場所でのリプレースが可能であることが望ましい。
(7)	Voltage Coverage (電圧カバー範囲)	将来的には、系統の最高使用電圧 550kV まで対応可能とすることが望ましい。

### 3. SF<sub>6</sub> 代替技術の開発状況

現在、脱 SF<sub>6</sub> ガスに対するソリューションとして、SF<sub>6</sub> ガスと同等の絶縁耐力を有する新規ガスを用いるものと、真空遮断器 (VCB; Vacuum circuit breaker) を適用して、絶縁には自然由来のガス (主として空気) を用いるものの 2 種類が提案されている。

Table 4 に、現在製品化もしくはパイロットプラントで評価されている代表的な SF<sub>6</sub> ガス代替技術を適用したガス絶縁機器を示す。表中の (1) と (2) が新しいフッ素系人工ガス (F-ケトン; C5 パーフフルオロケトン [C5F10O], F-ニトリル; イソ-C4 パーフフルオロニトリル [C4F7N]) とであり、欧州メーカーと 3M が共同で開発したものである。

また、真空遮断器は中電圧クラスで広く用いられてきているが、高電圧化により 100kV を超えるクラスへの適用が始まっている。

以下、第 4 節で代替ガス絶縁・遮断を、第 5 節で真空遮断と空気絶縁を適用した取り組みについて述べる。

### 4. 代替ガス絶縁・遮断

2010 年代に欧州の Alstom と ABB が 3M と共同で代替ガスを開発しており、2015 年頃に 145kV の代替ガス GIS の試作器を発表し、パイロットプラントでの検証を開始している。以下、代替ガスの特徴と 2022 年時点における製品化の状況について述べる。

Table 4 Overview of power equipment adopting SF<sub>6</sub> alternative technology<sup>13)</sup>

No.	Alternative gas	Voltage, Apparatus	Gas composition, Gas Pressure	GWP	Min. op. temperature
(1)	C5-FK (F-Ketone) mixed gas	170 kV, GIS	CO <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> : C5-FK (82 : 12 : 6) 0.78 MPa abs (CB) 0.83 MPa abs (the others)	< 1	5 °C
		24 kV, GIS	Dry air : C5-FK (92.4 : 7.6) 0.14 MPa abs	< 1	-25 °C
(2)	C4-FN (F-Nitrile) mixed gas	420 kV, GIL	CO <sub>2</sub> : C4-FN (94 : 4) 1.06 MPa abs	320 ~ 460	-25 °C
		145 kV, GCB	CO <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> : C4-FN (89 : 5 : 6) 0.85 MPa abs (CB) 0.8 MPa abs (the others)	320 ~ 460	-25 °C
(3)	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	145 kV, GIS	CO <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> (70 : 30) 0.8 MPa abs	< 1	-50 °C
(4)	Dry air with VCB	145 kV, GIS	N <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> (80 : 20) 0.6 MPa abs	0	-60 °C

GIS: Gas-insulated switchgear, GIL: Gas-insulated line, CB: Circuit breaker, GCB: Gas circuit breaker, VCB: Vacuum circuit breaker, abs: absolute pressure

Table 5 T&D Properties of alternative gases<sup>16)17)18)</sup>

ガス種	F-ニトリル (C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> N)	F-ケトン (C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O)	六フッ化硫黄
化学式	(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CFCN	CF <sub>3</sub> C(O)CF(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub>
地球温暖化係数 (GWP)	2,100	< 1	25,200
大気寿命 (年)	39	0.04	3,200
沸点 (°C)	-4.7	26.9	-63.9
分子量 (g/mol)	195	266	146.06
オゾン層破壊係数 (ODP)	0	0	0

#### 4.1 代替ガスの特徴

代替ガスは 3M が開発した Novec™ 4710 (F-ニトリル)<sup>16)</sup>および Novec™ 5110 (F-ケトン)<sup>17)</sup>をベースとしている。それぞれの物性値を Table 5 に示す。GWP は、F-ニトリルが 2,100、F-ケトンが 1 未満と、SF<sub>6</sub> と比べて小さい。ただし、沸点が高いことから、低温時 (-25°C) には液化することから、単体ガスでの GIS への適用ができない。このため、CO<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> を混合したガスが用いられている。CO<sub>2</sub> は消弧能力が比較的高いガスである。CO<sub>2</sub> に O<sub>2</sub> を添加することで電流遮断後のカーボン粉末の生成が抑えられる<sup>19)</sup>ため、CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> の混合ガスの遮断器も開発されている。この CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> に Novec™ を数%添加することで、絶縁性能を SF<sub>6</sub> 同等に高めることができる。なお、CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> と混合することで、Novec™ の分圧を下げ、液化温度を下げている。

F-ケトンと F-ニトリル単体での絶縁破壊電圧<sup>16)17)</sup>を SF<sub>6</sub> と比較して Fig. 5 に示す。F-ケトンの絶縁破壊電圧は SF<sub>6</sub> より約 35% 高く、F-ニトリルは約 95% 高い。F-ケトンと CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> の混合ガス (F-ケトン:CO<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> = 6:82:12)

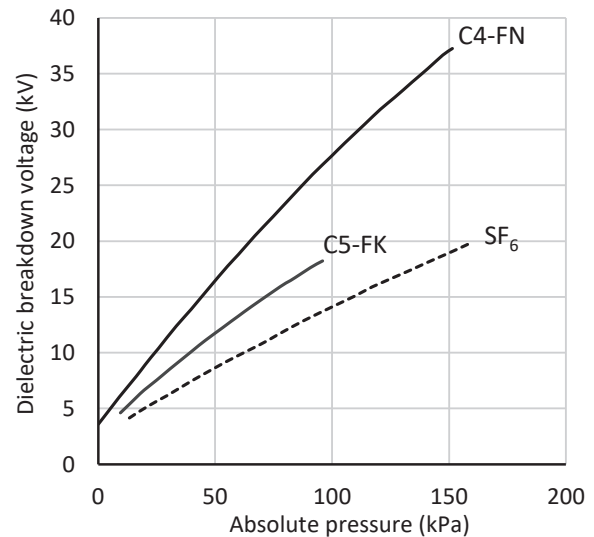


Fig. 5 Dielectric breakdown voltages for F-ketone and F-Nitrile gases in comparison with SF<sub>6</sub>. Uniform field using parallel disk electrode with 2.5 mm / 0.1-inch gap at 25°C<sup>16)17)</sup>.

では、0.7MPa の圧力で 0.55MPa の SF<sub>6</sub> の絶縁耐力の 86% である。F-ニトリルの 4~6 mol% を CO<sub>2</sub> に混合した場合の、絶縁耐力は圧力 0.67~0.88MPa で、0.55MPa の SF<sub>6</sub> の 0.87~0.96 である<sup>20)</sup>。

#### 4.2 クロスライセンス

GE (旧 Alstom) と ABB Power Grid の 2 社は、それぞれが開発した F-ケトンと F-ニトリルをベースとしたガスによる開発競争を進めてきた。しかし 2021 年 4 月 21 日に、GE と Hitachi ABB Power Grids (現 Hitachi Energy)

がクロスライセンスを締結したことが発表された<sup>21)</sup>。これにより、代替ガスは F-ニトリル混合ガスに統一されることになった。以下に、プレスリリース内容を抜粋して示す。

*GE and Hitachi ABB Power Grids sign landmark agreement to reduce environmental impact in the electrical transmission industry GE Renewable Energy's Grid Solutions business and Hitachi ABB Power Grids Ltd. announced today a nonexclusive, cross-licensing agreement related to the use of an alternative gas to sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) used in high voltage equipment. This fluoronitrile-based gas mixture has a significantly reduced impact on the environment compared to SF<sub>6</sub>.*

F-ケトン は沸点が高く、CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> の混合ガスでも最低運転圧力は-5℃とされており、7つの要件の(2)使用環境を満足していないことが短所である。F-ニトリルは GWP が 2,100 と大きいですが、SF<sub>6</sub> と比較して 1/10 以下であり、実用面を考慮して F-ニトリルに軍配が上がったと思われる。

### 4.3 代替ガス絶縁機器の開発状況

#### 4.3.1 ガス絶縁開閉装置 (GIS)

F-ケトンと CO<sub>2</sub> および O<sub>2</sub> の混合ガスを用いた GIS が製品化されている。GE は g<sup>3</sup> (g-cubed) と呼称しており定格電圧 145kV、定格遮断電流 40kA の GIS を販売している<sup>22)</sup>。温室効果ガスの排出を SF<sub>6</sub> と比較して 99%削減できており、ライフサイクルで気候変動へのインパクトが 72%削減されるとしている。

Hitachi Energy は GE とのクロスライセンスを受け、F-ケトンと CO<sub>2</sub> および O<sub>2</sub> の混合ガスを用いた GIS (145kV, 40kA)<sup>23)</sup>をはじめとする環境適合型の電力機器を EconiQ™ というブランド名で展開している。

#### 4.3.2 ガス絶縁送電線路 (GIL)

英送電事業者のナショナル・グリッドが保有する 420kV のガス絶縁線路の一部で、絶縁ガスを SF<sub>6</sub> から F-ケトン混合ガスに入れ替えたことが発表された (2021 年 12 月 13 日 電気新聞)<sup>24)</sup>。GIL は絶縁ガスが封入された線路であり、構造物を残したまま SF<sub>6</sub> ガスを置き換えるだけよく、比較的簡便に SF<sub>6</sub> を削減できる。

#### 4.3.3 420 kV 遮断器

2022 年に 420kV 遮断器の開発が GE および Hitachi Energy から発表された<sup>25)26)</sup>。タンク形 GCB は米国のエネルギー会社 Eversource に EconiQ™ 420 kV タンク形遮断器を 2023 年中旬までに納入予定である<sup>27)</sup>。また、SF<sub>6</sub>-free 420 kV GIS を TennetT (ドイツとオランダの TSO: Transmission system operator) に納入することが発表された (2022/09/11)<sup>28)</sup>。プロジェクトは 2026 年完了予定である。

## 5. 真空遮断と空気絶縁

ガス絶縁よりも低い電圧階級で用いられてきた真空遮断器を用いて、絶縁媒体を空気として、フッ素系ガスを用いない脱 SF<sub>6</sub> の対策も進められている。現在、真空遮断器は 1 接点 (1 点切) にて定格 145 kV のものまで製品化されている。Fig. 6 に真空遮断器の遮断容量の進展を示す。現在、SF<sub>6</sub> 代替技術として適用範囲の拡大 (高電圧化) が進められている<sup>13)</sup>。

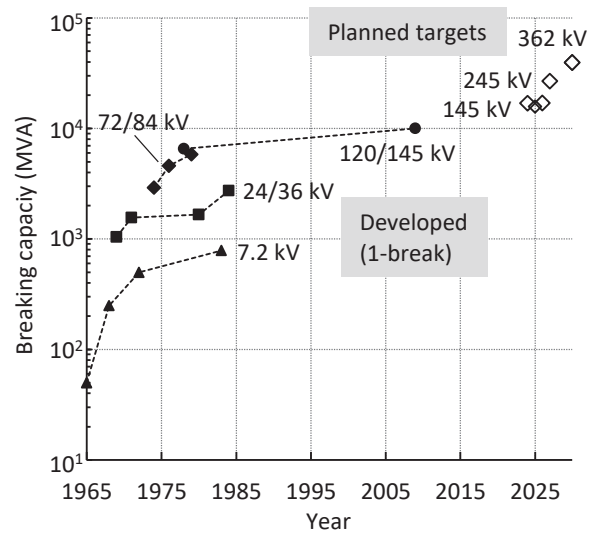


Fig. 6 Enhancement of breaking capacity of vacuum circuit breaker in Japan.

### 5.1 共同声明と技術提携

#### 5.1.1 メーカー 9 社の声明

真空遮断器と空気絶縁による GIS は 72/84kV クラスでは国内メーカーが先行しており、高い技術力を有している。2000 年代には複数の日本メーカーが乾燥空気を用いた 72/84kV 定格の GIS を発表している。2010 年代に、Alstom と ABB の代替ガスの発表を契機に、Siemens は真空遮断器とクリーンエア (N<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> を 8:2 の割合で混合したガス) に注力し、145kV 定格の GIS を製品化している。

代替ガス陣営 (GE, Hitachi Energy) との主導権争い激しくなる中、日本のメーカー 3 社 (明電舎, 三菱電機, 東芝エネルギーシステムズ) と Siemens を含むメーカー 9 社がフッ素ガスフリーの方針を打ち出し、共同声明「Toward T&D equipment free of fluorinated gases for sustainable, climate-neutral power grids」を 2021 年 11 月 2 日に発表した<sup>29)</sup>。Table 6 に共同声明に署名しているメーカーを示す。なお、現在は Eaton が加わり 10 社となっている。

共同声明の主要部分を以下に示す。「フッ素化ガスを用いない」との記載が重要である。国内では自然由来ガスを用いたソリューションとも表現されることがある。

Table 6 T&D manufacturers signed on the joint statement<sup>29)</sup>

Company	Country
ILJIN Electric Co., Ltd.	Korea
MEIDENSYA CORPORATION	Japan
Mitsubishi Electric Corporation	Japan
Mitsubishi Electric Power Products, Inc.	USA
Nuventura GmbH	Germany
Schneider Electric	France
Siemens AG	Germany
Siemens Energy Global GmbH & Co. KG	Germany
Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	Japan
Eaton	USA

*As equipment manufacturers, we embrace our responsibility to society and are fully committed to the net zero goal. Each of the undersigned has already developed or is in the process of developing T&D equipment completely free of fluorinated gases. The phase-out of fluorinated and PFAS-gases (per- and polyfluoroalkyl substances) in electrical T&D equipment, where alternatives are available, would accelerate progress toward a more sustainable future.”*

*Each of the undersigned is committed to delivering T&D equipment free of fluorinated-gas and PFAS-gas needed to enable this transition. The first F-gas free products are successfully in operation, and each of the signing companies is committed to close the remaining portfolio gaps in the upcoming years in order to deliver on science-based net zero targets (SBTI) that companies are setting.*

### 5.1.2 ドライエアを用いた GIS の共同開発

東芝エネルギーシステムズと明電舎は自然由来ガスを用いた GIS の共同開発を加速することを 2021 年 6 月 21 日に発表している<sup>30)</sup>。2020 年から進めてきた、SF<sub>6</sub> を全く用いない自然由来系ガスを使用した 72kV および 84kV の GIS の共同開発の製品化を加速し、2022 年 3 月までに、形式試験を完了し、2022 年度中には量産化の体制を確立し、製品化を目指すとされている。本開発では、電流遮断部に明電舎が担当する真空遮断器を用いて、絶縁および、電流開閉部(断路器、接地開閉器)にドライエアを用いるもので、後者を東芝エネルギーシステムズが担当している。

本製品は、東芝エネルギーシステムズが東京電力パワーグリッドから受注し、2022 年 12 月末までに据付を完了する予定である<sup>31)</sup>。これは、国内初となる自然由来ガスを用いた電力会社向け GIS である。なお、東芝エネルギーシステムズは、自然由来ガスを用いた電力機器を AEROXIA™ ブランドとして製品拡充する計画である。

### 5.1.3 245kV タンク形真空遮断器の実現性検討

三菱電機は Siemens と真空バルブ(真空遮断器で用いられる真空遮断部, VI; Vacuum interrupter と呼ばれる)による電流遮断および空気絶縁方式を採用した 245kV タンク形遮断器の共同開発に向けた実現性検討を開始すると 2021 年 6 月 8 日に発表している<sup>32)</sup>。世界的な脱炭素化への動きに伴い、温室効果や毒性が全くない空気を使用した環境負荷の低い新しい開閉装置の早期実現に向け「245 kV タンク形遮断器の共同開発」を行うことについての実現性を検討している。

## 5.2 真空遮断・空気絶縁機器の開発状況

### 5.2.1 145kV タンク形真空遮断器 (VCB)

明電舎が、世界初の SF<sub>6</sub> ガスを使用しない 145kV タンク形真空遮断器の販売を 2020 年に開始した<sup>33)</sup>。乾燥空気を絶縁媒体としており、乾燥空気は -50℃でも液化しないため、寒冷地においても液化防止のヒーターが不要であること、真空遮断器を用いており、電氣的に長寿命で、内部点検不要であるため、メンテナンスコストを大幅に削減可能であることといった特長がある。

本 145kV 真空遮断器は、米アラスカ州フェアバンクスで電力の供給や販売を手掛けるゴールデン・バレーエレクトリック・アソシエーションに 3 台納入済みである<sup>34)</sup>。

Siemens は碍子(Live tank)形の 145kV 40kA 遮断器<sup>35)</sup>を製品化しており、2022 年にタンク(Dead tank)形 145kV 真空遮断器を製品化する予定となっている<sup>36)</sup>。真空遮断器を用いることで、定格短絡電流遮断回数を 30 回(SF<sub>6</sub> CB: 10~12 回)にできること、負荷電流の開閉が 10,000 回(SF<sub>6</sub> CB: 6,000 回)、温度範囲を -60~+55℃(SF<sub>6</sub> CB: -30~+55℃)に性能向上ができています。

### 5.2.2 145kV ガス絶縁開閉装置 (GIS)

Siemens が 145kV 40kA 定格の GIS を製品化<sup>37)</sup>している。絶縁媒体には人工的に合成した N<sub>2</sub> 80%, O<sub>2</sub> 20%のクリーンエア(Clean air)が用いられている。真空遮断器は 1 点切の真空バルブが適用されている。定格の封入圧力は 0.8 MPa である。Siemens はクリーンエアを用いた GIS および遮断器を Blue high-voltage switching product として、Zero F-gas であることを PR している。

## 6. 開発ロードマップと技術課題

フッ素系の代替ガスを適用するグループ(GE, Hitachi Energy)と真空遮断器と自然由来ガスを用いるグループ(Siemens, 明電舎, 三菱電機, 東芝エネルギーシステムズ他)が、それぞれの方式でガス絶縁開閉装置の脱 SF<sub>6</sub> 化を推進している。ここでは、それぞれの開発計画を示し、技術課題と今後の展望について考察する。

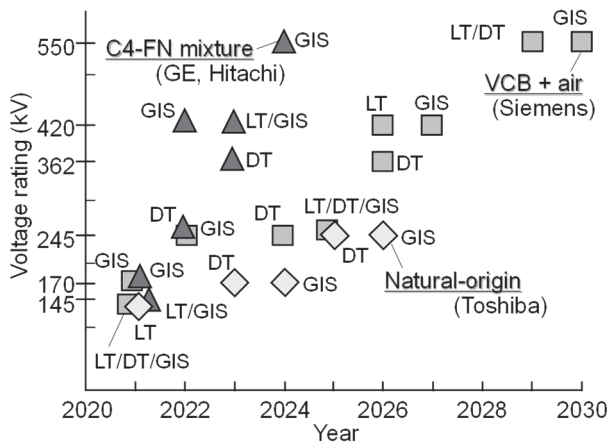


Fig. 7 Roadmaps of SF<sub>6</sub>-free high-voltage switchgear and circuit breaker development in various manufacturers. LT: Live-tank circuit breaker, DT: Dead-tank circuit breaker, GIS: Gas-insulated switchgear.

### 6.1 製品開発ロードマップ

それぞれの陣営の開発計画をまとめたロードマップを Fig. 7 に示す。F-ニトリル混合ガスでは、420kV の GCB および GIS が 2022 年に発表されており、計画通りに進んでいる。真空遮断器と空気絶縁に関しては、2022 年には 245kV 機種のリリースが予定されているが、2022 年 12 月の時点では、まだ発表されておらず、遅れが出ていると思われる。

なお、東芝エネルギーシステムズの開発計画を、自然由来ガスとして別に記載しているが、これは詳細な情報がないため、開発が進められてきた CO<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の混合ガスを用いる可能性があるためである。

F-ニトリル混合ガスと真空遮断・空気絶縁は、今後高電圧機種が開発が進められる計画であるが、それぞれ長所・短所があり、また、克服すべき技術的な課題も存在する。以下に、技術的な課題と今後の展望を述べる。

### 6.2 技術課題と今後の展望

高電圧電力機器では、高い耐電圧をコンパクトな筐体で満足する必要がある。また、開閉装置では電流を開閉する機能、さらに大電流を遮断する機能が必要となる。絶縁と遮断(消弧)を両立できるのが SF<sub>6</sub> ガスであり、開閉装置および遮断器の高電圧・大電流化は SF<sub>6</sub> ガスにより実現されてきた。Fig. 8 に遮断器の 1 接点当りの遮断容量の進展を示す。1990 年代に 550kV 63 kA (遮断容量 20 GVA) の SF<sub>6</sub> ガス遮断器が複数の国内メーカーにより開発されている。2010 年代にフッ素系の代替ガスが開発され、SF<sub>6</sub> ガスを F-ケトン混合ガスに置き換えたガス遮断器の開発が進んでおり、420kV の遮断器が 2022 年に発表されている。

真空遮断器は主として 22kV 以下の配電系統で用いられてきた、100kV を超える機種も開発されていたが、

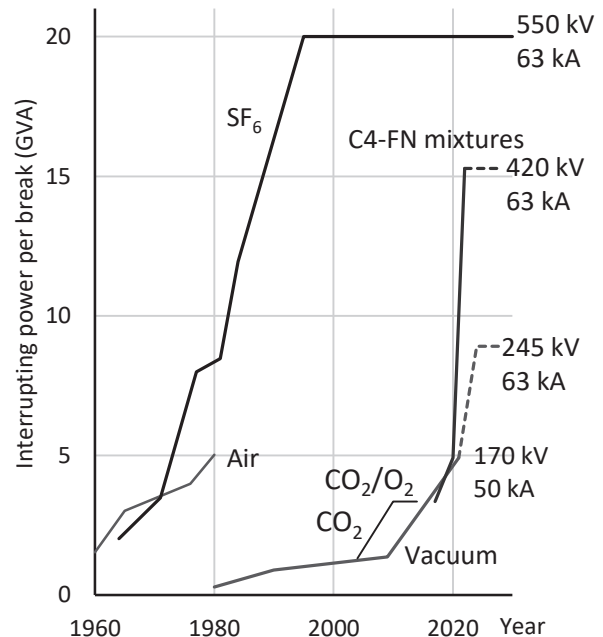


Fig. 8 Time evolution of interrupting power for various circuit breakers and recently developed SF<sub>6</sub> alternative circuit breakers and future plans. Reference trend data comes from Fig. 1.2 in reference 1).

SF<sub>6</sub> ガス遮断器よりも高価であることから、極低温仕様など特殊な用途に限られていた。2000 年代から環境負荷低減の観点から 72/84kV の乾燥空気 GIS で採用されるなど、真空遮断器の適用範囲拡大が徐々進んできた。2010 年代には、脱 SF<sub>6</sub> ガスの流れが加速する中で、さらに注目されるようになってきた。1 接点当たり 170kV の真空バルブが開発されるなど高電圧化が進展しており、2 点切りでは 204kV の遮断器も発表されている。

今後は、上記の代替ガスを用いる方式と、真空遮断器・空気絶縁を用いる方式のそれぞれにおいて、高電圧機種が開発が進むと考えられる。

次に代替ガスと真空による絶縁・遮断技術について比較し、技術課題を整理する。

#### 6.2.1 真空とガスの比較

真空から高圧力までのガス圧力と耐電圧の関係を Fig. 9 に示す。真空における放電現象と、高圧力下での放電現象は、パッシェンの法則に従う。電極間の絶縁破壊電圧  $V$  はガス圧力と電極間距離  $d$  の積の関数で表される。この関数  $V=f(pd)$  はパッシェン曲線と呼ばれ、絶縁破壊電圧が最小となる  $pd$  の値が存在する。これは、電子が気体分子と衝突し、気体を電離させることによって絶縁破壊(放電)が生じることによる。

高圧力では、電子が衝突までに十分に加速されにくくなるため、放電に必要な電圧が高くなる。ガス絶縁では、このパッシェンの最小値よりも右側の、高ガス圧力領域を用いており、ガスの圧力を高めることと、極間距



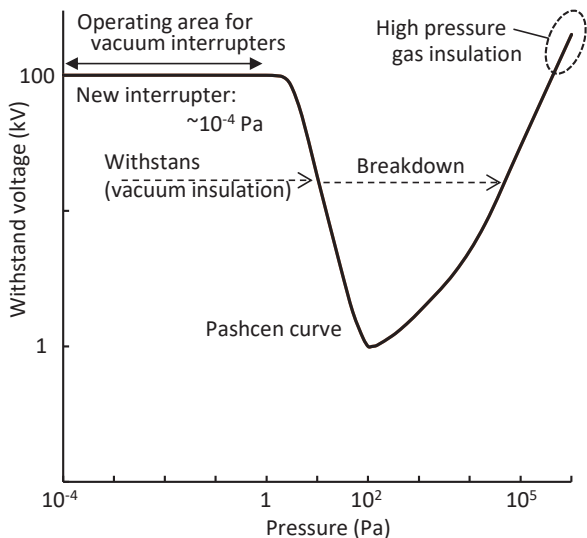


Fig. 9 Operating pressure of vacuum interrupter considering the Paschen curve and high-pressure area suitable for gas insulation. The withstand curve is traced from reference 38).

離を伸ばすことで、 $pd$  積を大きくして、高い絶縁耐力を実現できる。

一方、圧力が低い場合には、電子と気体の衝突が起こりにくくなるため、放電が起こりにくくなる。真空遮断器では、パッシェンの最小値よりも左側の領域で、かつ十分な高真空が用いられる。絶縁破壊は、電子と気体の衝突電離が生じない領域であり、電極からの電子の電界放出や二次電子放出現象により支配される。

真空領域での絶縁は、ガス圧力による影響がなく、耐電圧には限界がある。絶縁耐力を高めるには電極表面での電界値を高めることが有効であるが、電極間距離を長くすると、パッシェンの法則に従うようになり、絶縁破壊電圧が低下することになる。Fig. 10 は、各種ガスおよび真空における電極間距離に対する耐電圧を示したものである。真空では、極間距離に対して、絶縁耐力が飽和することが知られている。

ガス絶縁では、ガス圧力の増加と体格寸法の増加により高耐圧化が可能であり、技術課題は高電圧化を小形かつ低圧力で実現することである。SF<sub>6</sub>ガスと同等の絶縁性能を有する代替ガスを用いる場合には、比較的容易に、同等サイズの機器を実現できる。一方、真空絶縁では、高耐圧化には、例えば放電バリヤや電極材料の変更など、技術的なハードルは高く、ブレークスルー技術の開発が必要となる。

また、空気絶縁を用いる場合には、Fig. 10 に示したように SF<sub>6</sub>ガスより空気の絶縁能力が低いことから、耐電圧を高めるためには、装置寸法の増大が避けられない。よって、今後は、装置が大きくなることによる製造時の CO<sub>2</sub> 排出量の増加も加味した、ライフサイクルで

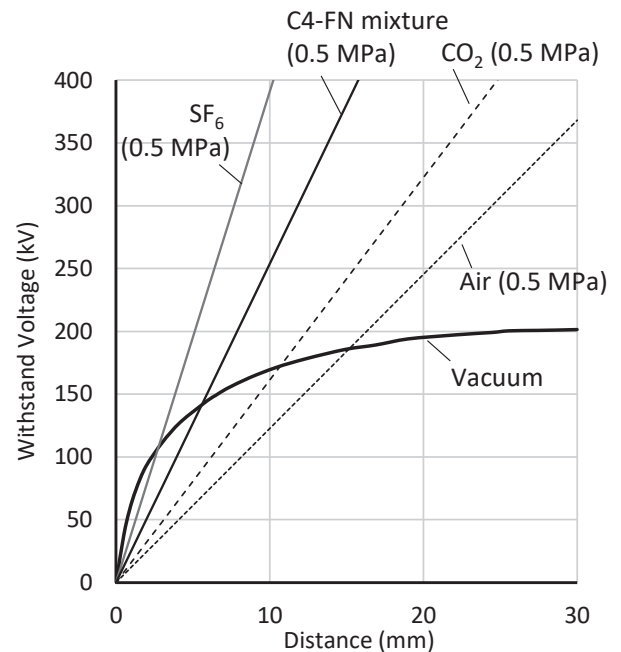


Fig. 10 Voltage withstands as a function of the distance between electrodes with comparison for various insulating media. The breakdown voltages are presumed from references with a linear conversion by pressure for gases. The withstand curves are rough values estimated with linear dependency on pressure by reference 20)38).

の CO<sub>2</sub> 削減効果で、どちらの方式を採用するか検討されることになると思われる。

## 7. 結言

カーボンニュートラルの一環として、電力業界において、地球温暖化ガスである SF<sub>6</sub>の削減に向けた対応が加速している。政策的に SF<sub>6</sub>が規制される中で、電力事業者も SF<sub>6</sub>ガス使用機器を廃止する計画を打ち出し始めている。電力機器メーカーでは、代替ガスを採用する陣営と、真空遮断器・空気絶縁を適用する陣営に二分されることになった。

代替ガス陣営の GE と Hitachi Energy は 2 種類のガスの開発で競争していたが、クロスライセンスを結び F-ケトンの混合ガスに統一し、電気事業者への売り込みを強めている。2022 年のパリ大会で 420kV の遮断器および GIS が発表されるなど、全階級への適用が順調に進んでいる。

真空遮断器・空気絶縁の陣営は、明電舎、三菱電機、東芝エネルギーシステムズを含む国内外 10 社がフッ素化ガスを用いない開発方針の共同声明を発表している。145kV の GIS と遮断器の製品化が発表されており、高電圧化に向けた開発が進められている。自然由来ガスを用いることで、環境負荷が低い、真空遮断器の高電

圧化および、乾燥空気絶縁での機器体積縮小の課題があり、ブレークスルー技術の開発が必要である。

SF<sub>6</sub>代替技術の実用化が始まったことで、今後、SF<sub>6</sub>ガスの削減が一層加速すると考えられる。SF<sub>6</sub>代替技術には研究課題が多く、ガス絶縁および遮断技術の高度化に向けて研究開発を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee A3: High Voltage Equipment, “Switching Equipment,” CIGRE Green Books, Springer (2001).
- 2) 吉永淳, 荒川文生「高電圧遮断器技術開発の歴史的分析」電気学会論文誌 A, Vol.12, No.1, pp.11–19 (2001).
- 3) Rei Hemmi, Michiru Onodera, Yoshikatsu Enokida, Naoyuki Yamamoto, and Kunio Hirasawa, “Development and Delivery of 1100 kV 50 kA Double-Break Gas Circuit Breaker”, 2009 National Convention Record IEE Japan, 6-212, p.356 (2009).
- 4) United Nations, “Kyoto Protocol – Targets for the first commitment period,” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-first-commitment-period> (2022/11/17 accessed).
- 5) IPCC AR6 WGI, “7. SM Chapter 7: The Earth’s energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity – Supplementary Material,” Final Government Distribution, p.7 SM-29 (2021).
- 6) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2021 The Physical Science Basis,” Sixth Assessment Report, [https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf) (2022/11/17 accessed).
- 7) 武田康一, 塚尾茂之, 川北浩司「国際的な SF<sub>6</sub>ガス代替技術の動向を踏まえた国内の状況と対応について」令和 3 年電気学会全国大会シンポジウム S5-4 (2021).
- 8) 国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2020 年度) 確報値」日本の温室効果ガス排出量データ, <https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html> (2022/11/17 accessed).
- 9) United States Environmental Protection Agency, “Greenhouse Gas Inventory Data Explorer,” <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/inventoryexplorer/#allsectors/allsectors/fluorinatedgases/gas/all> (2022/11/15 accessed).
- 10) California Air Resources Board (CARB), “Proposed Amendments to the Regulation for Reducing Sulfur Hexafluoride Emissions from Gas Insulated Switchgear,” <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2020/sf6/fro.pdf> (2020/11/17 accessed).
- 11) European Commission, “Green Deal: Phasing down fluorinated greenhouse gases and ozone depleting substances,” [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/I\\_P\\_22\\_2189](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/I_P_22_2189) (2022/04/05 accessed).
- 12) Maik Hyrenbach, “How do F-gas Regulations Affect Switchgear?” EETech Media, LLC, Technical Article, August 26, 2022, <https://eepower.com/technical-articles/how-do-f-gas-regulations-affect-switchgear/> (2022/11/17 accessed).
- 13) 浦井一, 飯島崇文, 富安邦彦, 稲垣卓志, 浅沼岳「持続可能な社会に向けた高電圧開閉技術の開発動向」電気学会論文誌 B, Vol.141, No.11, pp.650–655 (2021).
- 14) 内井敏之, 保科好一, 宮崎健作, 森正, 河野広道, 中本哲哉, 平野嘉彦「環境低負荷型 72kV 級 CO<sub>2</sub> ガス遮断器モデルの開発」電気学会論文誌 B, Vol.124, No.3, pp.476–484 (2004).
- 15) 塚尾茂之「SF<sub>6</sub>ガス代替技術の動向と要件」電気評論, 2020年9月号, pp.45–55 (2020).
- 16) 3M, “3M™Novec™4710 Insulating Gas,” Technical Data, <https://multimedia.3m.com/mws/media/1132124O/3m-novec-4710-insulating-gas.pdf> (2022/11/17 accessed).
- 17) 3M, “3M™Novec™5110 Insulating Gas,” Technical Data, <https://multimedia.3m.com/mws/media/1132123O/3m-novec-5110-insulating-gas.pdf> (2022/11/17 accessed).
- 18) 新開裕行, 神足将司, 三坂英樹, 足立和郎「SF<sub>6</sub>代替ガスとしての 3M™Novec™絶縁流体の基礎絶縁性能および分解生成物の毒性に関する検討」電力中央研究所報告 H17009 (2018).
- 19) 横水康伸「SF<sub>6</sub>ガス代替技術を支える最新の基礎研究の取組 3: アーク消弧過程における気相分子種, 凝縮相炭素の生成と誘電破壊特性」, 令和 3 年電気学会全国大会講演論文集, S5-53 (2021)
- 20) 規格改訂に向けた交流遮断器の仕様と開閉責務調査専門委員会「交流遮断器規格 JEC-2300 改正の背景・根拠」電気学会技術報告 第 1474 号, p.79, p.106 (2020).
- 21) Hitachi, Ltd., “Hitachi ABB Power Grids and GE sign landmark agreement to reduce environmental impact in the electrical transmission industry,” New Release April

- 21, 2021,  
<https://www.hitachi.com/New/cnews/month/2021/04/210421a.html> (2022/11/17 accessed).
- 22) GE, “F35g SF6-free g3-Gas-Insulated Substations up to 145 kV,” Hitachi, Ltd.,  
[https://www.gegridsolutions.com/hvmv\\_equipment/catalog/f35g.htm](https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipment/catalog/f35g.htm) (2022/11/17 accessed).
- 23) 日立エナジー「Econiq™ ガス絶縁開閉装置 (GIS) ELK-04 (145 kV)」  
<https://www.hitachienergy.com/jp/ja/products-and-solutions/high-voltage-switchgear-and-breakers/gas-insulated-switchgear/gis-for-72.5-1200-kv/econiq-gis-elk-04-145-kv> (2022/11/17 accessed)
- 24) National Grid, “National Grid and Hitachi Energy announce world first collaboration to replace SF<sub>6</sub> in existing high-voltage equipment,” Press release 9<sup>th</sup> December 2021,  
<https://www.nationalgrid.com/national-grid-and-hitachi-energy-announce-world-first-collaboration-replace-sf6-existing-high> (2022/11/17 accessed)
- 25) GE, “GE unveils world’s 1st 420 kV SF6-free g3 circuit-breaker for gas-insulated substations,” Press Release, March 29, 2022,  
<https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/ge-unveils-world-1st-420-kv-sf6-free-g3-circuit-breaker-for-gas-insulated-substations.htm> (2022/11/17 accessed).
- 26) Hitachi Energy Ltd. “Hitachi Energy showcases the world’s first eco-efficient 420-kilovolt circuit-breaker at CIGRE Session 2022 in Paris,” Press Release 29-08-2022,  
<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/08/hitachi-energy-showcases-the-world-s-first-eco-efficient-420-kilovolt-circuit-breaker-at-cigre-session-2022-in-paris> (2022/11/17 accessed).
- 27) Hitachi Energy Ltd., “Hitachi Energy collaborates with Eversource to install the first Econiq™ 420-kilovolt circuit-breaker in the US,” Press Release 31-08-2022,  
<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/08/hitachi-energy-collaborates-with-eversource-to-install-the-first-econiq-420-kilovolt-circuit-breaker-in-the-us> (2022/11/17 accessed).
- 28) Hitachi Energy Ltd., “Hitachi Energy to provide world’s first SF<sub>6</sub>-free 420 kV gas-insulated switchgear technology at TenneT’s grid connection in Germany,” Press Release 09-11-2022,  
<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/11/hitachi-energy-to-provide-world-s-first-sf6-free-420-kv-gas-insulated-switchgear-technology-at-tennet-s-grid-connection-in-germany> (2022/11/17 accessed).
- 29) nubentura GmbH, “Toward T&D equipment free of fluorinated gases for sustainable, climate-neutral power grids,” Updated: Nov 22, 2021,  
<https://www.nuventura.com/post/toward-t-d-equipment-free-of-fluorinated-gases-for-sustainable-climate-neutral-power-grids> (2022/11/17 accessed).
- 30) 明電舎「東芝 ESS と明電舎が自然由来系ガスを用いた GIS の共同開発を加速— 2022 年度中に製品化を目指し、カーボンニュートラルに貢献 —」ニュースリリース 2021 年 6 月 21 日,  
[https://www.meidensha.co.jp/news/news\\_03/news\\_03\\_01/1236861\\_2469.html](https://www.meidensha.co.jp/news/news_03/news_03_01/1236861_2469.html) (2022/11/17 accessed).
- 31) 東芝エネルギーシステムズ「国内初となる自然由来ガスを用いた環境調和型の電力会社向け GIS を受注～東京電力パワーグリッド株式会社 府中変電所へ納入決定～」ニュースリリース 2022 年 7 月 12 日,  
<https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/07/news-20220712-01.html> (2022/11/17 accessed).
- 32) Mitsubishi Electric and Siemens Energy, “Siemens Energy and Mitsubishi Electric sign MoU to move faster to develop gas solutions with zero global-warming potential in the high-voltage power transmission industry,” Joint press release, June 8, 2021,  
<https://www.mitsubishielectric.com/news/2021/pdf/0608.pdf> (2022/11/17 accessed).
- 33) 明電舎「世界初 SF<sub>6</sub> ガスを使用しない 145kV タンク形真空遮断器の販売開始」ニュースリリース 2020 年 4 月 6 日,  
[https://www.meidensha.co.jp/news/news\\_03/news\\_03\\_01/1233661\\_2469.html](https://www.meidensha.co.jp/news/news_03/news_03_01/1233661_2469.html) (2022/11/17 accessed).
- 34) 明電舎「SF<sub>6</sub> ガス不使用 145kV タンク形真空遮断器を世界初納入」Press Release, 2022 年 1 月 17 日,  
[https://meidensha.co.jp/news/news\\_03/news\\_03\\_01/\\_icsFiles/afieldfile/2022/01/12/20220117.pdf](https://meidensha.co.jp/news/news_03/news_03_01/_icsFiles/afieldfile/2022/01/12/20220117.pdf) (2022/11/17 accessed).
- 35) Siemens Energy, “3AV1 Blue Circuit Breaker™ Your clean air live tank circuit breaker with zero F-gases and zero global warming potential,” Flyer, 2021,  
[https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:49d979a1-2b87-4eee-952f-fe624cf48419/3av1-blue-cb-flyer-en-final-2021-03.pdf?ste\\_sid=f0008745287cfeefdae8cda91f7ec681](https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:49d979a1-2b87-4eee-952f-fe624cf48419/3av1-blue-cb-flyer-en-final-2021-03.pdf?ste_sid=f0008745287cfeefdae8cda91f7ec681) (2022/11/17 accessed).
- 36) Siemens Energy, “3AV1 Blue Circuit Breaker™ Dead Tank Circuit Breakers 72.5-145 kV F-gas free product

- for CO<sub>2</sub> neutral grids” Flyer, 2021,  
[https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uu/id:6a78b6d1-ebf8-40ad-8f22-e68cb17d7d69/3av1-blue-dead-tank.pdf?ste\\_sid=c99a6dd3e2d40976e725900f2d209cc0](https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uu/id:6a78b6d1-ebf8-40ad-8f22-e68cb17d7d69/3av1-blue-dead-tank.pdf?ste_sid=c99a6dd3e2d40976e725900f2d209cc0) (2022/11/17 accessed).
- 37) Siemens Energy, “8VN1 Blue GIS™ up to 145 kV, Vacuum interrupting technology and clean air insulation for CO<sub>2</sub>-neutral insulation,” Flyer, 2021,  
<https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uu/id:14d49890-dc45-4663-8368-d2259c513f2a/2020-11--8vn1-blue-gis-145kv-non-cu-final.pdf> (2022/11/17 accessed).
- 38) Denis Dufournet, “AC High-Voltage Circuit Breakers,” IEEE Switchgear Committee Tutorial,  
[https://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp\\_files/2017-2\\_Tutorial\\_AC\\_HV\\_Circuit\\_Breakers\\_Dufournet.pdf](https://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp_files/2017-2_Tutorial_AC_HV_Circuit_Breakers_Dufournet.pdf) (2022/11/17 accessed).