消弧媒体としてのCO₂ガスの基礎特性と実規模モデル遮断器による熱的遮断性能の検証

正員 内井 敏之* 正員 河野 広道*
正員 中本 哲哉* 正員 溝口 均*

Fundamental Properties of CO₂ Gas as an Arc Quenching Medium and Thermal Interruption Performance of Full-Scale GCB Model

Toshiyuki Uchii*, Member, Hiromichi Kawano*, Member, Tetsuya Nakamoto*, Member, Hitoshi Mizoguchi*, Member

Fundamental properties of CO₂ gas, as an alternative arc quenching medium of SF₆ gas, in a puffer-type gas circuit breaker were investigated theoretically and experimentally, focusing particularly on its thermal interruption performance. It was found that utilizing arc energy for enhancing puffer pressure is a good solution to construct a CO₂ gas circuit breaker due to the physical properties of CO₂ gas. Based on these fundamental investigations, the 72 kV-31.5 kA-class CO₂ gas circuit breaker model, which does not contain SF₆ gas at all, was designed, manufactured, and tested. As a result, the CO₂ gas circuit breaker model achieved the specified interruption performance for short line fault.

キーワード：ガス遮断器，地球温暖化，代替ガス，CO₂ガス，熱的遮断，実規模モデル

Keywords: gas circuit breaker, global warming, alternative gas, CO₂ gas, thermal interruption, full scale model

1. まえがき

SF₆ガスは電気絶縁性能および消弧（電流遮断）性能に非常に優れており，現在，数kVから1,000kV級のガス絶縁開閉装置（GIS），ガス遮断器（GCB），ガス絶縁変圧器などの絶縁，消弧媒体として広く適用されている。しかしながらその一方で，SF₆ガスはCO₂ガスの23,900倍という高い地球温暖化効果を有しており，1997年に京都にて開催されたCOP3（気候変動枠組み条約第3回締約国会議）において規制対象ガスの1つに指定された⁽¹⁾。現在においてはガス回収，リサイクルを徹底することで対応しており^{(1)~(3)}，実質排出量は着実に削減されつつあるが，SF₆ガスの大気寿命（大気中濃度が初期の1/e倍（約37%）にまで減少するのに要する時間）は3,200年（IPCC，1995年）と極めて長く，一度大気排出されると将来にわたってその影響が累積的に効いてゆくため，長期的には使用量自体を削減してゆくことが望ましい。また，製造やメンテナンス時などにおいてSF₆ガスの厳重な管理，回収が必要となるため⁽¹⁾，必然的に作業効率が低下することも懸念される。

SF₆ガスの使用量を削減する，あるいは温暖化効果を低減するという観点で，これまでSF₆/N₂混合ガスやSF₆よりはGWP（地球温暖化係数）が小さいCF₄などの代替フロン系ガスに関する研究が多く行われているが⁽⁴⁾，筆者らは完全な脱SF₆ガス化，脱フロン系ガス化を指向した。毒性，オゾン層破壊効果，地球温暖化効果，沸点，安定性，規制状況の観点から電力機器に使用可能な環境適合ガスを絞り込むと，候補ガスは空気，N₂，O₂，CO₂，H₂，希ガス類（He，Arなど）などの天然に存在するガスに限られる⁽⁵⁾。この中で筆者らはその電氣的諸特性から特にCO₂ガスに着目した^{(5)~(8)}。CO₂ガス自身も代表的な地球温暖化ガスであるが，その効果はSF₆ガスの23,900分の1と著しく小さいこと，また，仮に現在我が国において電力機器に使用されているSF₆ガス⁽¹⁾が全てCO₂ガスに置き換わったとしても，その総量は現在の日本の年間CO₂ガス総排出量⁽⁹⁾の10⁻⁶オーダーとほとんど無視できる程度の量であると試算されることから，CO₂ガスも電力機器用の代替ガス候補となりうる。

SF₆ガスは絶縁性能に優れることもさることながら，遮断性能，特に熱的遮断性能に著しく優れていることが知られており，代替ガスを適用した開閉機器の開発においては，熱的遮断性能の達成が最も困難な課題の一つになると考えられる⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾。しかしながら，消弧媒体としてのCO₂ガス

* ティーエム・ティーアンドディー（株）
〒210-0862 川崎市川崎区浮島町 2-1
TMT&D Corporation
2-1, Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210-0862

の特性についてはこれまでほとんど明らかになっていない。本論文は消弧媒体としての CO₂ ガスの特性を、主に熱的遮断性能に焦点をあてて明らかにすることを目的としている。具体的にはパuffa型 GCB における CO₂ ガスの基本的な特性を実験的、理論的に考察するとともに、CO₂ ガスに適した消弧方式について検討を行う。さらに、これらの知見に基づき、実際に 72 kV-31.5 kA 級 CO₂ ガス遮断器（以下、CO₂-GCB）モデルを設計、試作し、熱的遮断性能の検証試験を行った結果について報告する。

2. 消弧媒体としての CO₂ ガスの基礎特性と CO₂ ガスに適した消弧方式の検討

2.1 CO₂ ガスの基礎消弧特性 熱的遮断性能は、一般にアークコンダクタンスの過渡応答特性の問題としてとらえることができる。これはアーク内の複雑な物理現象により決定付けられるが、アークを一つの非線形抵抗体として大局的にとらえた場合、アークの特性は (1) 式に示すいわゆる Mayr 型アークモデルにおける 2 つのパラメータ、すなわちアーク時定数、およびアーク損失に集約できる⁽¹¹⁾。

$$\frac{d}{dt}(\ln G) = \frac{1}{\theta} \left(\frac{vi}{N} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 G ：アークコンダクタンス、 v ：アーク電圧、 i ：電流、 θ ：アーク時定数、 N ：アーク損失である。

すなわち、アーク時定数 θ が小さく、また損失 N が大きいほどアークコンダクタンスの過渡的回復が速く、熱的遮断性能に優れると考えられる。

これらのアークパラメータの値は実測値として報告されており、CO₂ ガスのアーク時定数としては、Yoon ら⁽¹²⁾による実測値 15 μ s が一般的に良く知られている。図 1 に Yoon らによる各種ガスのアーク時定数の圧力依存性を示す。同図によると、CO₂ ガスのアーク時定数は SF₆ ガスと比較すると 1 桁程度大きく、SF₆ ガスより熱的遮断性能が劣ることが分かる。しかしながら、N₂ ガスや空気と比較す

るとアーク時定数はずっと小さく、代表的な環境適合ガスであるこれら両ガスに比べると CO₂ ガスが消弧ガスとして優れることが推測される。なお、He は環境適合ガスであり、図 1 におけるアーク時定数も CO₂ ガスより小さいが、He ガスの電気絶縁性は SF₆ ガスの 1 割以下であり⁽¹³⁾、絶縁の問題を考えると、少なくとも単ガス、あるいは混合ガスにおけるベースガスとしての使用はあり得ないと考えられる。また、1 章で述べた他の代替ガス候補、すなわち Ar、O₂、H₂ についても、消弧性能だけでみると CO₂ ガスと同等かそれ以上と考えられるが⁽¹⁵⁾、絶縁性が極めて低いこと (Ar、H₂)、可燃性および支燃性を有すること (H₂、O₂)、酸化など機器構成材料の変質の懸念があること (O₂) などの理由で、やはり単ガス、あるいはベースガスとしての使用は実用上困難であると考えられる。

2.2 CO₂ ガスの吹付け効果 Yoon らによる図 1 のデータはガス吹付け等がないいわゆるフリーリカバリーアークにおける測定値である。アーク時定数はアークの状態により大きく異なることが知られており、例えば空気の場合、アーク軸方向の吹付けを高圧力で行うことによりアーク時定数が 100 分の 1 程度にまで低下することなどが報告されている⁽¹⁴⁾。すなわち、アークへのガス吹付けを適正に行うことにより、ガスの消弧性能を高めることが可能である。CO₂ ガスにおける吹付け効果については、アーク内の各種損失項を考慮した数値的検討により、吹付けによりアーク時定数が低下することが報告されているが⁽¹⁵⁾、ここではより大局的なとらえ方を行う。ガス吹付けの効果は Swanson ら⁽¹⁶⁾により理論的に示された (2) 式としてとらえることができる。

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_C \propto P^\alpha \cdot \left(\frac{di}{dt} \right)^{-\beta} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $(dv/dt)_C$ は遮断可能な電流零点における電圧勾配の上限値、 (di/dt) は電流零点における電流勾配、 P は吹付け圧力である。 α および β (いずれも正の値) はガス種に依存する定数であり、比例係数は主に消弧室の形状に依存する⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾。サージインピーダンスが一定の条件においては、(2) 式は次のように変形できる。

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_C \propto P^\chi \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $(di/dt)_C$ は遮断可能な電流零点における電流勾配の上限値、 P は吹付け圧力であり、 χ (正の値) はやはりガス種に依存する定数である。このように、吹付け圧力を高くすることで遮断可能電流値は向上し、パラメータ χ はその効果を表す指標と考えることができる。また、本式によりある条件を遮断するために必要となる吹付け圧力を求めることができるため、機器設計上非常に有用である。

今回パuffa型の基礎実験用モデル遮断器により、SF₆ ガス、CO₂ ガス、N₂ ガスの χ を実験的に求めた。充填ガス圧力 0.4 MPa-g、サージインピーダンス 450 Ω 一定の条件で実験を行った。図 2 に電流零点におけるパuffa吹付

図 1 各種ガスのアーク時定数の圧力依存性
実測値⁽¹²⁾

Fig.1. Measured arc time constant of various gases as a function of pressure.

図 2 吹付け圧力と遮断限界との関係

Fig.2. Interruption limit for various gases as a function of blasting pressure. (: SF₆, : N₂, : CO₂, : CO₂ + Ablation; White: Success, Black: failure)

表 1 各種ガスの χ の値Table 1. Obtained χ for various gases.

Reference	Gases	χ
Swanson <i>et al.</i> ⁽¹⁶⁾ (Theoretical)	SF ₆	0.4~0.63
Frind <i>et al.</i> ⁽¹⁷⁾ (Experimental)	SF ₆	0.47
	Air	0.33
Nishikawa <i>et al.</i> ⁽¹⁸⁾ (Experimental)	SF ₆	0.47
	N ₂	0.32
The present work (Experimental)	CO ₂	0.41
	CO ₂ + Ablation	0.43

け圧力と遮断限界 (di/dt)_C の関係を示す。図 2 においては、遮断成功したケースを白抜き印で、遮断失敗したケースを黒印でプロットし、それらから推定される遮断限界曲線を (3) 式に基いてフィッティングした。この際、比例係数は主に消弧室の形状に依存すると考えられるため、全てのガスに対して同一とした。実験結果と最も良く一致した χ の値を表 1 に示す。表 1 においては比較のため、空気および SF₆ ガスに関する Frind ら⁽¹⁷⁾ や Nishikawa ら⁽¹⁸⁾ による値もあわせて示す。今回、(a) SF₆ ガス、(b) N₂ ガス、(c) CO₂ ガスのケースに加え、(d) CO₂ ガス充填において供試器パuffaシリンダー内にポリマー材料を配置したケースも実施した。これは電流遮断時のポリマー材料の溶発（アブレーション）現象により吹付け圧力向上、およびアブレートガス混入による消弧性能向上を狙ったものであり、遮断実験後の分解点検結果より、実際にポリマー材料のアブレーションが行われたことを確認している。図 2 および表 1 より以下のことが分かる。

(1) いずれのガスも吹付け圧力が上昇することにより遮断性能が上昇し、その効果を示す指標である χ の値は N₂、CO₂、SF₆ の順に大きくなる。

(2) 同じ吹付け圧力で比較した場合、CO₂ ガスの遮断性能は N₂ ガスと SF₆ ガスとの間に位置する。

(3) 同じ条件の電流を遮断するのに、CO₂ ガスは SF₆

表 2 各種物性値⁽¹⁹⁾ の比較 (300 K, 0.1 MPa-abs)Table 2. Comparison of physical properties between SF₆ gas and CO₂ gas.

Items	SF ₆	CO ₂
Molecular mass: M	146	44
Density: ρ (kg/m ³)	5.92	1.77
Ratio of specific heat: γ	1.09	1.29
Specific heat at constant volume: C_V (kJ/kgK)	0.66	0.66
Sonic velocity: a (m/s)	134.9	269.4
ρC_V (kJ/m ³ K)	3.89	1.17
ρa (kg/m ² s)	798.6	476.8
$\rho a / M$	5.4	10.8

ガスよりも高い吹付け圧力が必要となる。本実験用モデルで比較した場合においては、例えば $di/dt = 8 \mu\text{s}$ の条件を遮断するのに、CO₂ ガスは SF₆ ガスの約 6 倍もの圧力が必要となる。

(4) CO₂ ガスの場合においてアブレーションを適用することにより χ の値が向上している。そのため、同じ吹付け圧力で比較した場合、遮断可能な電流値がアブレーション適用により向上している。

2.3 パuffa型消弧室における吹付け特性 現在新規に開発、製造されている SF₆ ガス遮断器には、構造がシンプルで小形化、低コスト化が可能な単圧式のパuffa型消弧室が広く採用されている⁽¹¹⁾。パuffa型消弧室においては、所定のアーク時間幅すべてにわたり遮断に必要な圧力上昇が得られなければならない。そのため、パuffa型消弧室の遮断性能においては、採用するガス自体の消弧性能が重要であることはもちろんであるが、それに加えパuffa動作時のシリンダ内圧力上昇特性が重要なファクターとなる。パuffa動作時のシリンダ内圧力上昇特性は採用するガスの物性値に大きく依存するため、この観点からの考察も必要となる。

表 2 にパuffa型消弧室において特に重要と考えられる各種物性値⁽¹⁹⁾ を SF₆ ガスと CO₂ ガスとで比較する。表 2 より定性的に下記のことをいえる。

(1) 密度と定積比熱の積 ρC_V は、容積一定の条件において単位体積当たり温度を 1 K 上昇させるために必要なエネルギーを意味している。この値が小さい場合、同容積のパuffa室に同じエネルギーが与えられた時に温度が上がりやすく、そのため圧力が急峻に上昇する。表 2 によると、 ρC_V の値は SF₆ > CO₂ となっており、アークから同じエネルギーが与えられた場合、CO₂ ガスは SF₆ ガスに比べてパuffa圧力が上昇しやすいと予想される。

(2) 密度と音速の積 ρa は、音速で流れるガスが単位時間に単位断面積を通過する流量を意味している。消弧室のノズルスロート部でのガス流速を音速とした場合、同じパuffa容積の消弧室においては、 ρa と分子量との比 $\rho a / M$ の値が大きいほど圧力（密度）低下のスピードが速いと考えられる。表 2 によると、比 $\rho a / M$ は SF₆ < CO₂ となっており、CO₂ ガスは SF₆ ガスに比べてパuffa圧力の低下率が大きいものと予想される。

(3) 比熱比 γ が大きいほど断熱膨張による冷却効果が大きい。比熱比 γ の値は $\text{SF}_6 < \text{CO}_2$ となっており、断熱膨張によるアーク冷却効果は CO_2 ガスの方が SF_6 ガスよりも優れると考えられる。

上記の(1)および(2)の検討から、同じパuffa型消弧室で考えた場合、 CO_2 ガスは SF_6 ガスよりも急峻にパuffa圧力が上昇し、速く減衰してしまうと考えられる。図3に CO_2 ガスと SF_6 ガスの電流遮断時におけるパuffa吹付け圧力の違いを示す。本データは前述の基礎実験用モデル遮断器において全く同一条件の電流遮断を行った場合の実測値である。このように、実測結果は上記の考察を裏付ける結果となっている。

2.4 CO_2 ガスに適した消弧方式の検討 上記の検討結果に基づき、 CO_2 ガスに適する消弧方式について考察を行う。2.2節で述べたように、同一の遮断性能を得るために、電流零点において CO_2 はどうしても SF_6 よりも高い吹付け圧力が必要となる。したがって、パuffa型消弧室においてパuffa圧力が急峻に上昇する CO_2 ガスの特性自体はアーク遮断に好ましいと考えられる。しかしながら、GCBにおいて遮断性能を満足するためには、所定の遮断可能アーク時間幅を確保する必要があるため、圧力が早期減衰してしまう特性は望ましくない。つまり、2.3節の(1),(2)項で述べたパuffa圧力が急峻に上昇し、早期に減衰するという CO_2 ガスの特性は、短いアーク時間の条件においては好ましいが、長いアーク時間の条件においては電流遮断に必要なパuffa圧力が得られずに遮断が困難となる可能性がある。これを避けるために、 CO_2 -GCBにおいてはパuffa容積をある程度大きくすることが必要と考えられるが、その場合、遮断時に必要な高いパuffa圧力を得るために、より大きなパuffaピストンと強力な操作駆動力が必要となり、結果的にGCBが大形化することが懸念される。

図3 パuffa型消弧室における吹付け圧力特性の違い(実測値、遮断電流 28.4 kA)

Fig. 3. Difference of puffer pressure properties between SF_6 gas and CO_2 gas during a current interruption (measured in 28.4 kA interruption).

これをできるだけ抑制するためには、アークエネルギーをパuffa吹付け圧力の向上に有効利用する方策が効果的と考えられる。これは表2で示した ρC_V の値が小さい、すなわち同じエネルギーが与えられた時の圧力上昇割合が大きいという CO_2 ガスの特性に着目したものである。さらに、一般的に CO_2 のアーク電圧は SF_6 よりも高く⁽²⁰⁾、すなわち CO_2 -GCBにおいてはアークエネルギーが比較的大きくなることも、本方策にとって好都合である。

アークエネルギーを吹付け圧力の増大に有効利用することは、現在の SF_6 ガス遮断器においても効果的な手法であり、最新のGCBにおいては広く採用されているが⁽²¹⁾、上記の検討結果から、 CO_2 -GCBにおいてはよりその効果が顕著に得られると考えられ、 CO_2 ガスの特性を有効に活用した消弧方式であるといえる。

また、2.3節の(3)項で述べたように、 CO_2 ガスの比熱比は SF_6 ガスよりも大きく、断熱膨張によるアーク冷却効果は、 CO_2 ガスの方が SF_6 ガスよりも優れる。空気の比熱比は CO_2 ガスよりもさらに高く $\gamma = 1.4$ であり⁽¹⁹⁾、空気遮断器における消弧メカニズムにおいては断熱膨張によるアーク冷却効果の寄与が大きいことが知られている⁽²²⁾。したがって、断熱膨張による等エントロピー的アーク冷却を加味した消弧方式を採用することも、 CO_2 ガスの性能を引き出す上で有効な手法であると考えられる。

3. CO_2 -GCBモデルの試作と性能検証

3.1 モデル諸元 2章における検討結果をもとに CO_2 ガスの特性に合った消弧室を設計し、72 kV 級 CO_2 -GCBモデルを試作した。モデル外観を図4に、諸元を表3に示す。充填ガス圧力は高くするほど、特に絶縁性能の面では有利となるが、タンク製造コスト、高圧ガス保安上の観点から、実用的にはせいぜい 0.9 MPa-g 程度が限度だと考えられる。試作したモデル器においては、使用した絶縁スペーサ等の強度的な裕度も鑑み、今回はやや低めの 0.7 MPa-g と設定した。本モデル器の特徴としては下記である。

(1) ハイブリッドパuffaTM 消弧方式⁽²³⁾を採用した。

(2) ポリマー材料のアブレーションを適用した。

ハイブリッドパuffaTM 消弧方式は、遮断動作初期にアークからの高温ガスをパuffa室に取り込むことにより、アークエネルギーをパuffa吹付け圧力向上に積極的に利用するタイプの消弧方式で⁽²³⁾、2.4節で述べた CO_2 ガスの特性にマッチしたものと考えられるため今回採用した。さらに、2.2節の図2において遮断性能向上効果の見られたアブレーション材料を、本モデル器にも適用した。

3.2 性能検証試験 熱的遮断性能と最も関連の深い遮断条件として近距離線路故障(SLF)があげられる。そこで、JEC-2300(1998年)の規格に準じ、近距離線路故障SLF90%について遮断試験を実施した。表4に試験結果を示す。このように、今回試作した CO_2 -GCBモデルは、 CO_2 ガスの特性に基づいた消弧室を新規設計、採用すること

図 4 試作した 72 kV 級 CO₂-GCB モデルの外観
Fig. 4. View of the 72 kV-class CO₂-GCB model.

表 3 モデル諸元

Table 3. Specifications for the model.

Items	Value
Filling gas	CO ₂ 100%
Filling gas pressure	0.7 MPa-g
Rated voltage	72 kV
Rated interrupting current	31.5 kA
Power frequency	50 Hz
Rated ACWV	140 kV _{rms}
Rated LIWV	350 kV

表 4 SLF90%条件の遮断試験結果

Table 4. Test result for SLF90%.

STANDARD	JEC-2300 (1998)
RATINGS	72 kV 31.5kA
RESULT	<p>Arcing time: 20ms 10ms</p> <p>○: Success ×: Failure</p>
JUDGEMENT	Interruption window: 9.5 ms secured <CLEARED>

により、SLF90%遮断について所定の性能を達成することができた。

なお、本 CO₂-GCB モデルは前記定格において他の主要遮断性能、および絶縁性能についても所定の實力を有するものと判断されたが⁽⁸⁾、本論文においては熱的遮断性能に絞った議論を行うので、ここではその詳細説明は省略する。

4. CO₂-GCB におけるハイブリッドパuffaTM 消弧方式の適用効果

4.1 解析モデル 本章では、エンタルピーフローモデル⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を用いて、解析により CO₂-GCB におけるハイブリッドパuffaTM 消弧方式の適用効果を検討する。本解析モデルは遮断動作時のパuffa 吹付け圧力等を計算するためにすでに実用的に使用されており、SF₆ ガス遮断器においてパuffa 吹付け圧力を比較的精度良く求めることが可能である⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。本節ではこのエンタルピーフローモデルを使用し、CO₂-GCB のパuffa 吹付け圧力解析を試みる。

図 5 CO₂-GCB モデルにおけるパuffa 吹付け圧力の解析値と実測値との比較

Fig. 5. Comparison of puffer pressure in CO₂-GCB model between measured and calculated values.

3 章における CO₂-GCB モデルの遮断試験において、遮断性能の検証以外に、CO₂ ガスのアーク電圧特性等に関する基礎データを取得した。これらの実測データ、および CO₂ ガスの物性値⁽¹⁹⁾⁽²⁷⁾を用いてエンタルピーフローモデルにより電流遮断時のパuffa 吹付け圧力の解析を行った。解析結果を実測値とあわせて図 5 に示す。このように解析値と実測値とは比較的良く一致し、本解析モデルが CO₂-GCB のパuffa 吹付け圧力の解析においても有効であることが確認できた。

4.2 ハイブリッドパuffaTM 消弧方式の適用効果

本圧力解析モデルを使用して、CO₂-GCB におけるハイブリッドパuffaTM 消弧方式の適用効果について検討を行う。図 6 に解析により求めた各アーク時間における電流零点でのパuffa 吹付け圧力を示す。同図においては、遮断動作初期にアークからの高温ガスをパuffa 室に積極的に取り込むハイブリッドパuffaTM 消弧室、およびノズルスロートの上下流両方向に常に高温ガス排気流路が確保されている一般的なパuffa 型消弧室（いわゆるダブルフロー型の消弧室⁽²³⁾）のそれぞれのケースにつき、SF₆ ガスと CO₂ ガスに対して計算を行った結果を示す。両タイプの消弧室の違いはアークからパuffa 室への高温ガス取り込みの有無のみであり、電極やノズルなどの各種形状、パuffa 容積などの設計諸元値は全く同一である。計算においては CO₂ ガスおよび SF₆ ガスに対して、実測に基いたそれぞれのアーク電圧値を使用した。同図より以下のことが分かる。

(1) ハイブリッドパuffaTM 型、ダブルフロー型のいずれの消弧方式においても、短いアーク時間においては CO₂ ガスの方が SF₆ ガスよりも吹付け圧力が高いが、長いアーク時間においては両者は逆転し、CO₂ ガスの方が吹付け圧力が低くなっている。

(2) SF₆ ガスおよび CO₂ ガスのいずれの場合においても、ハイブリッドパuffaTM 消弧方式の採用により、特

図 6 SF₆ ガスおよび CO₂ ガスにおけるハイブリッドパッファTM 消弧方式の適用効果 (解析値)

Fig.6. Comparison of puffer pressure enhancing effect by Hybrid-pufferTM-technique between SF₆ gas and CO₂ gas.

に短いアーク時間を中心に吹付け圧力が向上している。そしてその効果は CO₂ ガスの方がより顕著に現れており、より広いアーク時間にわたり吹付け圧力が向上している。

上記の結果は、2・3 節および 2・4 節における考察内容とも良く一致しており、アークエネルギーをパッファ吹付け圧力の向上に有効利用するハイブリッドパッファTM 消弧方式の採用が CO₂-GCB において効果的であることが示された。

5. 結 論

本論文においては特に熱的遮断性能に焦点をあて、パッファ型ガス遮断器における消弧媒体としての CO₂ ガスの基礎特性を把握した。これにより、CO₂ ガスに適した消弧方式について検討を行い、アークエネルギーをパッファ吹付け圧力の向上に有効利用する方策が CO₂ ガスの特性上効果的であることを見出した。さらに、これらの知見に基づき完全脱 SF₆ ガスタイプの 72 kV-31.5 kA 級 CO₂ ガス遮断器モデルを設計、試作し、近距離線路故障 SLF90%遮断において所定の性能を達成することができた。

本研究の遂行にあたり多大なご協力を頂いた (株) 東芝電力・産業システム技術開発センター 鈴木克巳氏、高温 CO₂ ガスの物性値に関しご助力頂いた金沢大学工学部電気・情報工学科 田中康規助教授に謝意を表す。

本研究は平成 14 年度に (財) エネルギー総合工学研究所が経済産業省資源エネルギー庁から委託された「戦略的電力技術開発調査」の一環として実施した。

(平成 15 年 7 月 2 日受付、平成 15 年 9 月 29 日再受付)

文 献

(1) 「電力用 SF₆ ガス取扱基準」, 電気協同研究, Vol.54, No.3 (1998)
 (2) P. O'Connell, F. Heil, J. Henriot, G. Mauthe, H. Morrison, L. Niemeyer, M. Pittroff, R. Probst, and J.P. Taillebois: "SF₆

in the Electric Industry, Status 2000", CIGRE SC23.02 TF01 (2001)

- (3) U.S. Environmental Protection Agency, Int. Conf. on SF₆ and the Environment: Emission Reduction Strategies, San Diego (2002)
 URL: <http://www.epa.gov/highwp1/sf6/>
 (4) 「SF₆ の地球環境負荷と SF₆ 混合・代替ガス絶縁」, 電気学会技術報告, No.841 (2001)
 (5) (株) 東芝: 「環境低負荷形新絶縁・消弧媒体の開発と電力機器への適用」, NEDO 委託研究報告書, No.98Ec12-0003-4 (2000)
 (6) T. Uchii, T. Shinkai, and K. Suzuki: "Thermal Interruption Capability of Carbon Dioxide in a Puffer-Type Circuit Breaker Utilizing Polymer Ablation", IEEE PES T&D Conf., PO8-1, Yokohama (2002)
 (7) (株) 東芝: 「環境低負荷型ガス絶縁の電力設備への適用に関する可能性調査」, (財) エネルギー総合工学研究所委託業務報告書 (2003)
 (8) T. Uchii, Y. Hoshina, K. Miyazaki, T. Mori, H. Kawano, T. Nakamoto, and Y. Hirano: "Development of 72 kV-Class Environmentally-Benign CO₂ Gas Circuit Breaker Model", IEEE Trans. PE, Vol.124, No.3, pp.476-484 (2004-3) (in Japanese)
 内井敏之・保科好一・宮崎健作・森 正・河野広道・中本哲也・平野嘉彦: 「環境低負荷型 72 kV 級 CO₂ ガス遮断器モデルの開発」, 電学論 B, 124, 3, pp.476-484 (2004-3)
 (9) Greenhouse Gas Inventory Office of Japan, Emissions Data (2003)
 URL: <http://www.gio.nies.go.jp/>
 (10) Westinghouse Research and Development Center: "Gases Superior to SF₆ for Insulation and Interruption", Electric Power Research Institute (EPRI) EL-2620, Final Report 847-1 (1982)
 (11) T.E. Brown: Circuit Interruption, Theory and Techniques, Marde Dekker, Inc. (1984)
 (12) K.H. Yoon and H.E. Spindle: "A Study of the Dynamic Response of Arcs in Various Gases", AIEE, Vol.77, pp.1634-1642 (1959)
 (13) 宅間 重: 「SF₆ に代わる新ガス, 混合ガスの可能性」, 電力中央研究所調査報告, 181002 (1981)
 (14) 電気学会: 放電ハンドブック (改訂新版), pp.161-162 (1989)
 (15) Y. Yokomizu, K. Ito, T. Kojima, and T. Matsumura: "Decaying Processes of Conductances around Current Zero for Wall-Stabilized Arcs in Various Gases", T. IEE Japan, Vol.121-B, No.6, pp.767-774 (2001-6) (in Japanese)
 横水康伸・伊藤一将・小嶋哲夫・松村年郎: 「各種ガスにおける電流零点直後の残留アークコンダクタンスの減衰過程」, 電学論 B, 121, 6, pp.767-774 (2001-6)
 (16) B.W. Swanson, R.M. Roidt, and T.E. Browne, Jr: "Arc Cooling and Short Line Fault Interruption", IEEE Trans. PAS, Vol.90, No.3, pp.1094-1102 (1971)
 (17) G. Frind and J.A. Rich: "Recovery Speed of Axial Flow Gas Blast Interrupter: Dependence on Pressure and di/dt for Air and SF₆", IEEE Trans. PAS, Vol.93, No.5, pp.1675-1684 (1974)
 (18) H. Nishikawa, A. Kobayashi, T. Okazaki, and S. Yanabu: "Arc Extinction Performance of SF₆ Gas Blast Interrupter", IEEE Trans. PAS, Vol.95, No.6, pp.1834-1844 (1976)
 (19) 日本機化学会編: 流体の熱物性値集 (1983)
 (20) (社) 電気学会: 放電ハンドブック (上巻), pp.194-195 (1998)
 (21) T. Shinkai, M. Ooi, T. Uchii, H. Kawano, T. Nakamoto, and H. Ikeda: "Gas Density and Temperature in Thermal Volume for Self-Blast Interrupting Chambers", IEEE PES T&D Conf., OR12-3, Yokohama (2002)
 (22) 中西邦雄・潮 恒郎・大谷和夫・山崎精二: 「電力用しゃ断器」, 電気学会大学講座 (1975)
 (23) S. Yanabu, H. Mizoguchi, K. Suzuki, H. Ikeda, and M. Toyoda: "Development of Novel Hybrid Puffer Interrupting Chamber for SF₆ Gas Circuit Breaker Utilizing Self-Pressure-Rise Phenomena by Arc", IEEE Trans. PWRD, Vol.4, No.1, pp.355-361 (1989)
 (24) L.S. Frost and R.W. Liebermann: "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)
 (25) 柳父 悟・溝口 均・岩本俊夫・尾崎康夫・村山康文: 「単圧式ガスしゃ断器の電流しゃ断時の流量解析と開極特性」, 電学誌 B, Vol.99, No.6, pp.31-38 (1979)

- (26) H. Mizoguchi, M. Toyoda, E. Matsumoto, K. Miyazaki, and S. Nishiwaki: "Calculation of the Opening Characteristics on 3 Phase Current Interruption for 3 Phase Common Operating Mechanism Type GCB", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.10, pp.1402-1410 (2001-10) (in Japanese)
溝口 均・豊田 充・松本詠治・宮崎健作・西脇 進:「3 相一括駆動ガス遮断器の 3 相電流遮断開極特性の計算」, 電学論 B, 121, 10, pp.1402-1410 (2001-10)
- (27) T. Okada, H. Uchiyama, Y. Tanaka, and T. Sakuta: "Thermodynamic and Transport Properties of High-Temperature CO₂ in Pressure Range of 0.1-10 MPa", *Proc. Joint Conf. Hokuriku Chap., IEE of Japan*, No.A-46, p.52 (2002) (in Japanese)
岡田健志・内山博史・田中康規・作田忠裕:「圧力 0.1-10 MPa における高温 CO₂ ガスの粒子組成および熱力学・輸送特性」, 平成 14 年度電気関係学会北陸支部連合大会, No.A-46, p.52 (2002)

内 井 敏 之 (正員) 1972 年 3 月 9 日生。1995 年 3 月東京理科大学理学部応用物理学科卒業。1997 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻博士課程前期課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)変電 R & D センター大電力技術第一グループ在籍。主としてガス遮断器に関する研究・開発に従事。IEEE 会員。

河 野 広 道 (正員) 1961 年 3 月 7 日生。1985 年 3 月京都大学大学院電気工学科修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)変電 R & D センター大電力技術第一グループ長, および浜川崎地区大電力試験所長。主としてガス遮断器に関する研究・開発に従事。

中 本 哲 哉 (正員) 1957 年 2 月 4 日生。1981 年 3 月京都大学大学院電気工学科修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)変電 R & D センター東部研究開発部長, および浜川崎地区高電圧大電力試験所長。主としてガス絶縁開閉装置に関する研究・開発に従事。

溝 口 均 (正員) 1942 年 7 月 18 日生。1967 年 3 月日本大学理工学部電気学科卒業。1961 年 4 月(株)東芝入社。主としてガス遮断器, ガス絶縁断路器, ガス絶縁接地開閉器, 空気遮断器, モールド遮断器の開発, アーク現象の研究に従事。現在, TM 変電テクノロジー(株)に在籍。平成 7 年関東地方発明奨励賞受賞。工学博士。IEEE 会員。