

大気圧誘導熱プラズマを用いた 電力用遮断器消弧媒体の消弧基礎特性の診断

正員 田中 康規 (金沢大学)

正員 作田 忠裕 (金沢大学)

Diagnosis of Arc Quenching Property of SF₆ Gas
using Inductively Coupled Thermal Plasma Technique

Yasunori Tanaka, Member, Tadahiro Sakuta, Member (Kanazawa University)

The Ar-SF₆ inductively coupled thermal plasma (ICTP) at atmospheric pressure was successfully generated for different SF₆ admixture ratios in order to investigate the quenching effect of SF₆ injection on thermal plasma from the viewpoint of elucidating a remarkable interruption ability of SF₆. Spectroscopic observation was carried out to measure the radial distributions of the radiation intensity of Ar lines and temperature for the Ar-SF₆ ICTP. It was found that only 0.5% SF₆ injection caused a 1/2 decrease in the radiation intensity and 1000 K decline in the temperature on the centre axis at 10 mm below the coil end. A two-dimensional hydrodynamic model was developed for Ar-SF₆ ICTP to simulate flow and temperature fields on the assumption of the local thermal equilibrium. The results obtained from the calculation indicated that a little SF₆ addition to Ar ICTP decreased high temperature area above 9000 K drastically. This temperature decaying tendency agreed with the experimental results.

キーワード：高気圧，誘導熱プラズマ，SF₆ガス，環境適応型ガス，放射強度，温度

1. ま え が き

大容量電力用遮断器の消弧媒体としては、現在SF₆ガスが主流となっている。このSF₆ガスは極めて安定度の高い化合物で、0.1 MPa、300 K程度の条件下では不活性、不燃、無臭、無毒の物質であり、その消弧能力は空気の100倍程度といわれている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、SF₆ガスは、温室効果指標のGWP(Global Warming Potential)がCO₂の23900倍と非常に大きいため、1997年気候変動枠組み条約第三回締結国会議COP3において排出削減対象ガスに指定された⁽³⁾。このように環境問題が大きくなっていく中で、遮断器消弧媒体においても、高性能で環境に優しいガスが切望されている。これまでも、様々なガスあるいはSF₆混合ガスに対する遮断性能、アーク基礎特性を実験的理論的に検討した例はある^{(4)~(18)}。しかしながら、環境負荷を考慮した新しい概念で、環境適応型ガスの中から遮断器消弧媒体を探索した例はほとんどない。今後はこのような概念からの消弧媒体探索が必要とされる。

これまで消弧媒体の消弧能力を検証する実験室規模の基礎装置として器壁安定化アーク装置などのアーク装置が用いられてきた⁽⁴⁾⁽¹⁹⁾。しかし、これらの装置においてはアーク

クに電極あるいはノズルなどからの材料混入が避けられないなどの理由から、ガス自身の消弧効果あるいは材料混入の影響を基礎実験的に検討するのは極めて困難であった。

筆者らは、消弧媒体プラズマを基礎的に検討する新しい手法として、「高周波誘導熱プラズマ(Inductively Coupled Thermal Plasma; ICTP)装置」を使用することを提案している⁽²⁰⁾。高周波誘導プラズマの特徴として、(1)無電極でクリーンなプラズマ空間を生成できる、(2)再現性がよい、(3)クリーンなプラズマ自身の基礎特性を検討できる、(4)電極およびノズル材料を意図的に混入すれば、それらがプラズマに与える影響を検討できる、などがあげられる。これまでは、圧力200 Torr(=27 kPa)の条件において、SF₆ガス混合の影響を検討した⁽²⁰⁾。しかし、遮断器においては圧力は数百kPaであり、そこで発生するアークプラズマも熱プラズマといわれる高気圧、高温、高衝突頻度状態にあるはずである。そこで本論文では、誘導熱プラズマ発生装置において、圧力を大気圧まで上昇させてクリーンな熱プラズマを点弧し、遮断器消弧媒体が熱プラズマに与える影響を実験的に検討している。具体的には、電源入力電力50 kW、トーチ内圧力0.1 MPaの高出力・高気圧のAr誘導熱プラズマを点弧している。さらに本論文においてはSF₆ガ

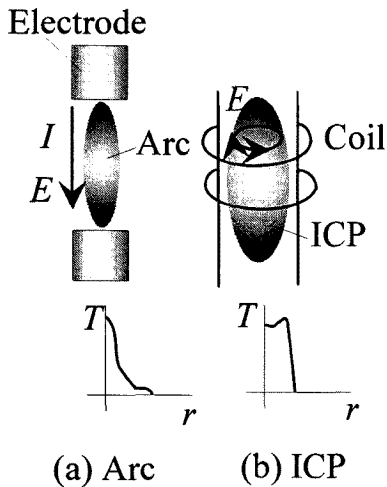


図1 アークと誘導熱プラズマ
Fig. 1. Arc and ICP.

スの混合比を0.0, 0.2, 0.5, 1.0および2.0%と変化させた場合についてプラズマからの放射および温度の径方向分布変化を測定し、SF₆ガスの混合の量的な影響をも検討している。ここでベース熱プラズマとしてArプラズマを用いている理由は、Arが(1)プラズマの維持が容易なガスである、(2)希ガスで反応性に乏しく、混入ガスがプラズマに与える影響を検討できる、ためである。このような測定によりSF₆ガスが熱プラズマに与える影響を基礎実験的に容易に検討できる。

さらに理論的アプローチとして、圧力0.1 MPaのAr-SF₆誘導プラズマを対象として局所熱平衡(LTE)を仮定した二次元数値熱流体解析モデルを構築し、SF₆ガスを混入したArプラズマの温度分布を数値的に求めている。この結果と、実験的に得られた結果とを比較、検討している。

2. 誘導熱プラズマの発生維持機構とそのアーク消弧特性解明への適用

図1はアークと誘導熱プラズマの発生維持機構の概略図である。いずれも大気圧程度で維持され、ガス粒子の温度が数千から数万Kと非常に高い「熱プラズマ」に属する⁽²¹⁾。アークは通常、電極を有し、アーク軸方向に電流を流して導電性を維持している。これに対し、誘導熱プラズマはコイルに高周波交番電流を流し、トーチ内に軸方向交番磁界を発生させ、周回方向の交变电界を発生させる。これによりプラズマ内に高周波電流を周回方向に流すことにより熱プラズマを維持する。アークの場合にはアークプラズマ軸上が最も電流密度が大きくなるが、誘導熱プラズマの場合は軸上で電流密度は零であり、径方向のある位置で極大値を取る。したがって、アークにおいては中心付近で温度極大値が存在するのにに対し、誘導熱プラズマにおいては電流路である中心と壁の間において温度の極大値が存在する。

SF₆ガスの強い消弧能力は、(1)温度2000K付近におい

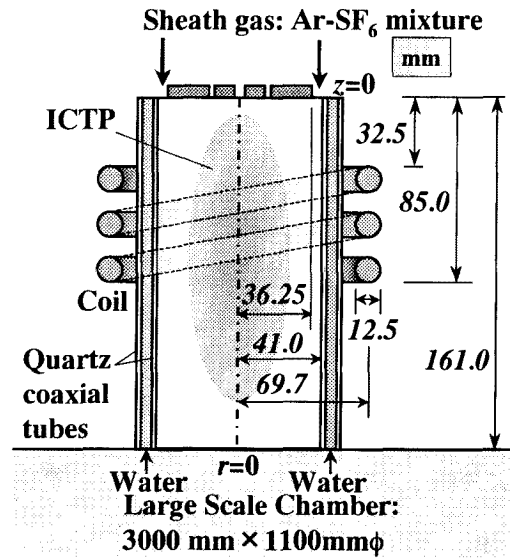


図2 プラズマトーチの概略図
Fig. 2. Schematic diagram of plasma torch.

て大きな熱伝導率を有するため、アークプラズマが径方向に細く絞られてアークプラズマが細くなり過渡応答が速い、(2)F原子などSF₆ガス分解フッ化物が大きな電子付着断面積を有し、電子を移動度の小さい負イオンに変換する、ためとされている⁽¹⁶⁾。これらは定常ICTP内においては、(1)によりICTPが径方向に収縮する、(2)により供試気体の混合比を増加させると電子密度が減少し、ひいては電子温度およびガス温度が低下して熱プラズマが消弧される、と予想され、これらがガスの消弧能力の一判定材料となると考えられる。

アークの消弧現象は基本的に過渡現象であり、一方、今回導入する誘導熱プラズマは通常定常現象である。しかし、上述の判定基準により消弧性能を決める上記(1)(2)の事項を判断できるものと考えている。

3. 実験装置およびスペクトル観測システム

〈3・1〉 プラズマトーチ 図2に、本実験において使用した高周波誘導熱プラズマトーチの断面図を示す。トーチは石英管二重構造になっており、その内径は82 mmφ、外径は100 mmφ、長さは161 mmである。この内管と外管との間に冷却水を下方向から旋回させて流すことによって石英管壁をほぼ300 Kに保持している。石英管内部には、上部からシースガスを管壁に沿って流し、プラズマが管壁に触れるのを防いでいる。トーチ下部には、3000 mm×1100 mmφの大容量チャンバが取り付けられている。ガスとしてはArあるいはAr-SF₆の混合ガスを用いている。表1に本実験における混合ガスの流量を示す。本実験においては、総流量を100 liters/min(=1.67×10⁻³ m³/s)一定として、SF₆ガスの混合比を流量比で0.0, 0.2, 0.5, 1.0および2.0%の計5

表1 実験における設定ガス流量

Table 1. Gas flow condition.

SF ₆ ratio(%)	Ar (liters/min)	SF ₆ (liters/min)
0.0	100.0	0.0
0.2	99.8	0.2
0.5	99.5	0.5
0.8	99.2	0.8
1.0	99.0	1.0
2.0	98.0	2.0

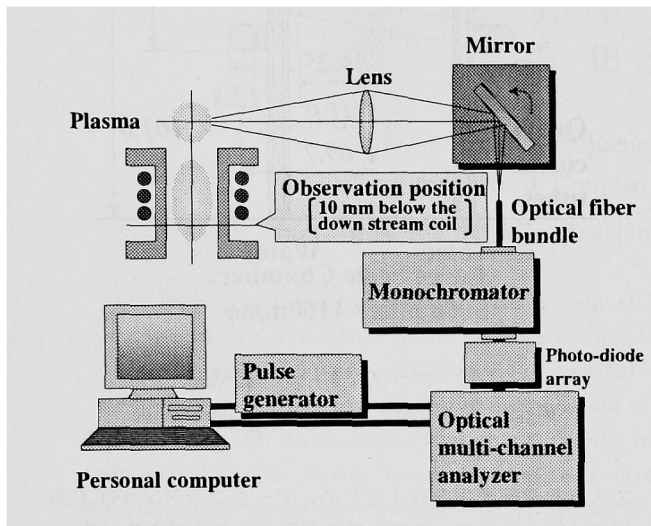


図3 スペクトル観測システム

Fig. 3. Spectroscopic observation system.

種類に設定している。石英管の外側には、管を取り巻くように3ターンの誘導コイルが設置してある。このコイルには真空管型の高周波発振回路が接続されており、1.67 MHzの高周波電流が流れる。これにより、管内に高周波電磁場が発生しプラズマが点弧する。実験においては、いずれのSF₆ガス混合比においてもチャンバ内圧力をほぼ0.1 MPaに保っている。発振回路内の真空管プレート端子での入力電力を50 kW一定としている。真空管は電力変換効率が約60%と悪いため、プラズマには30 kW程度が入力されている⁽²⁰⁾。

〈3.2〉 スペクトル観測システム 図3に、スペクトル観測システムを示す。実験においては、コイル下約10 mmの位置からの放射光を測定している。この位置から放射された光は凸レンズおよび反射鏡を介して光ファイバ束の一端に集光している。反射鏡にはステッピングモータが取り付けられており、モータを回転させることにより、観測位置をプラズマの径方向に掃引することができる。光ファイバ束の他端は分光器のスリット前面に固定してある。分光器の出力焦点面には一次元マルチチャンネル検出器が搭載されており、波長域100 nmのスペクトル分布を一括測定できる。本測定においては、Ar原子スペクトルが多く存在する700±50 nmの範囲を対象としている。本システムの波長分解能は約0.3 nmである。

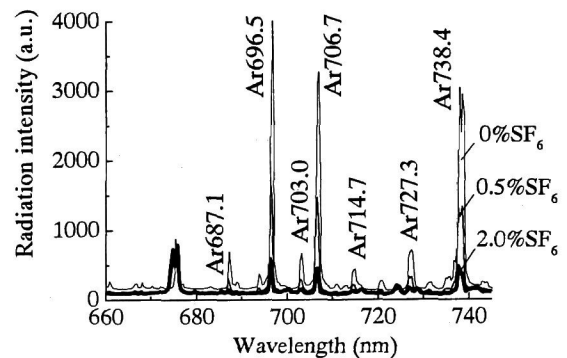


図4 ArあるいはAr-SF₆ ICTPから放射されるスペクトル

Fig. 4. Spectra emitted from Ar or Ar-SF₆ ICTP.

4. SF₆ガス混入によるAr ICTPへの影響

〈4.1〉 放射強度 図4は、100%Ar, 99.5%Ar-0.5%SF₆および98.0%Ar-2.0%SF₆ ICTPのコイル下10 mmのトーチ中心部で観測したスペクトル分布である。同図から、7本のArスペクトルが確認できる。これらのスペクトルの放射強度はいずれもSF₆ガス混合比が大きくなると顕著に低下している。例えば、0.5%SF₆ガスを加えるだけで、放射強度はほぼ半分にまで減少する。図5は、7本のスペクトルの放射強度を、横軸をSF₆ガス混合比として示したものである。いずれのスペクトルの放射強度もSF₆ガス混合比が増加すると、ほぼ同様に指数関数的に減少している。SF₆ガス混合比を3%以上にするとICTPが不安定になり、維持が難しくなることも確認している。

これらのスペクトルの放射強度は、それぞれの上準位励起エネルギーに励起された粒子の数に比例している。これらの励起エネルギー準位は準安定状態ではなく、励起されると数百ns程度で直ちに光を放出するため、ここでの放射強度は励起過程に密接に関係している。また、本実験におけるプラズマの圧力は大気圧と高いため、励起過程はArと電子との衝突が主要原因と考えられる。このことから、放射強度の大小は衝突する電子の運動エネルギーすなわち電子温度の大小に密接に関係していると考えられる。実験では、数%程度のSF₆ガス混合によってでも放射強度が顕著に低下しており、これは電子温度の低下を意味している。

比較のため、N₂を3%まで混合させた場合についても同様の実験を行った。図6は、Arスペクトル放射強度のN₂混合比依存性である。同図から、N₂を3%混合させた場合、これら7本のスペクトル放射強度はほとんど変化していないことがわかる。したがって、放射強度の大きな減少はSF₆ガスの消弧性能の高さを示す一指標と考えられる。

次に、反射鏡に取り付けたステッピングモータを動作させることにより、スペクトルの径方向分布を測定した。図7は、測定されたスペクトル線のうち、例として波長703.0

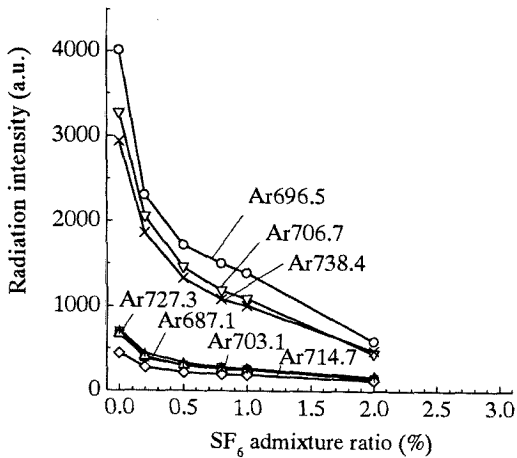


図5 放射強度のSF₆ガス混合比依存性

Fig. 5. Dependence of radiation intensities of Ar lines on SF₆ admixture ratio.

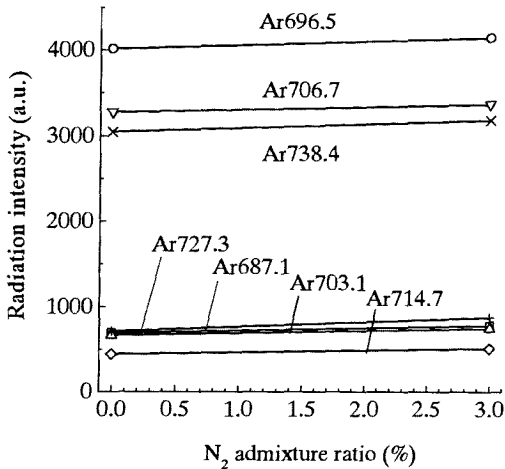


図6 放射強度のN₂ガス混合比依存性

Fig. 6. Dependence of radiation intensities of Ar lines on N₂ admixture ratio.

nmにおけるArスペクトルの放射強度の径方向分布を示している。横軸0 mmの位置はプラズマ軸上を示しており、41 mmの位置が管内壁を示している。測定は径方向に32点とっている。同図から、SF₆ガスを0.2%加えるだけでArスペクトル放射強度が径方向全体で極端に小さくなり、プラズマ中心では約2/3になる。このため、発光空間が径方向に収縮した様子となっている。別途、N₂を混合させたAr ICTPからのArスペクトル放射強度を観測したが、放射強度の径方向分布はほとんど低下せず、そのままの形が維持された。プラズマ空間の径方向への収縮はプラズマ過渡特性とも関わっており⁽⁶⁾、ICTPを使用した本手法においても収縮現象を捉えられることを確認できた。

〈4・2〉 温度 局所熱平衡(LTE)が成立する場合、相異なる2本の同種粒子からのスペクトル線の放射強度比から相対強度法により温度を算出できる。誘導熱プラズマ

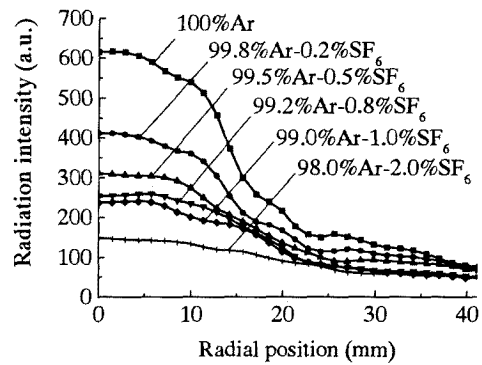


図7 コイル下10 mm位置におけるArスペクトル放射強度の径方向分布

Fig. 7. Radial distribution of radiation intensity of Ar lines at 10 mm below the coil end for different SF₆ admixture ratios.

表2 原子定数

Table 2. Atomic constants.

λ (nm)	g	A (s ⁻¹)	E (cm ⁻¹)
703.0	5	0.0278 × 10 ⁸	119683
714.7	3	0.0065 × 10 ⁸	107132

では、プラズマ中心付近においては電界強度が極めて小さいためほぼLTEが成立し、壁付近においては電子温度がガス温度より高くなり、いわゆる熱的非平衡性が存在すると考えられる⁽²⁶⁾。本実験条件においては、プラズマの圧力が大気圧と比較的大きいことから、中心から径方向20mm程度までの領域でLTEを仮定⁽²⁶⁾して温度を求めた。ここで、波長 λ_1 および λ_2 におけるスペクトル線の放射強度をそれぞれ I_1 および I_2 とすると、温度 T は次式で求められる⁽²²⁾。

$$T = \frac{E_1 - E_2}{k \left(\ln \frac{g_2 A_2 \lambda_1}{g_1 A_1 \lambda_2} - \ln \frac{I_1}{I_2} \right)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 k : Boltzmann定数、 g : 上準位の縮退度、 E : 上準位エネルギー、 A : 遷移確率である。本算出においては、波長703.0および714.7 nmにおけるArスペクトルを選んだ。これらのスペクトル線の原子定数を表2⁽²³⁾に示す。これらのスペクトル線を選んだ理由は、上準位エネルギーレベルの差 $E_1 - E_2$ が1.51 eVと比較的大きく、温度を精度よく算定できると考えられるためである⁽²²⁾。また、これらの二本のスペクトルの二線強度比法で得られる温度は、7本の波長687.1, 696.5, 703.0, 706.7, 714.7, 727.3および738.4 nmにおけるArスペクトルを用いたBoltzmann plot法により得られる温度と同程度であることも確認している。ここで得られる温度は上述のエネルギーレベル間のAr励起温度である。これは、電子温度に比較的近いとされ、今回のように高気圧プラズマでは本算定範囲でガス温度にも近いと考えられる。

図7の放射強度分布は、径方向に積算されたものである。このため、Abel逆変換⁽²⁴⁾を施して真の放射強度分布を求

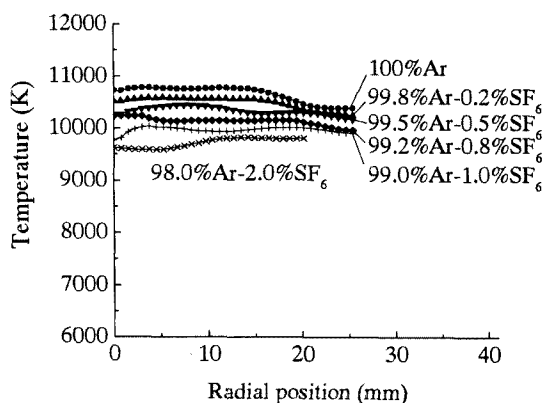


図8 ArおよびAr-SF₆ ICTPの温度径方向分布
Fig. 8. Radial temperature distribution of Ar or Ar-SF₆ ICTP.

めて、温度を式(1)により算出した。図8は、様々なSF₆ガス混合比におけるAr-SF₆ ICTPの温度の径方向分布である。同図からいずれの混合比においてもプラズマ温度分布はほぼ平坦で10000 K前後であり、SF₆ガス混合比を増加させると温度も次第に低下している。SF₆ガス混合比が2%では、100%Arの温度よりも1000 K程度低下している。このように、SF₆ガスを微量混入させるだけで、観測位置における温度が低下することを実験的に見いだした。これはSF₆ガスの強い消弧性能と関わっているものと考えられる。

5. Ar-SF₆ ICTPのモデリング

前節までに得られた放射および温度低下を説明するために、本節ではAr-SF₆ ICTPのモデリングを行う。

〈5.1〉 支配方程式 誘導熱プラズマが、(i) 定常状態である、(ii) 局所熱平衡状態にある、(iii) 光学的に薄い、(iv) 流れは層流であって乱流の効果が無視できる、と仮定できるとき、誘導熱プラズマは次の支配方程式に従う⁽²⁵⁾。

質量保存式:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

運動量保存式:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\eta r \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \mu_0 \sigma \Re \{ \dot{E}_\theta \dot{H}_r^* \} \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \eta \frac{v}{r^2} + \mu_0 \sigma \Re \{ \dot{E}_\theta \dot{H}_z^* \} \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

エネルギー保存式:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial h}{\partial z} + \rho v \frac{\partial h}{\partial r} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \\ + \sigma |\dot{E}_\theta|^2 - P_{\text{rad}} \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ベクトルポテンシャルに関するMaxwell方程式:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\dot{A}_\theta}{r^2} = j \mu_0 \sigma \omega \dot{A}_\theta \quad \dots\dots (6)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial}{\partial r} (r \dot{A}_\theta), \quad \dot{H}_r = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_\theta}{\partial z} \quad \dots\dots (7)$$

$$\dot{E}_\theta = -j \omega \dot{A}_\theta \quad \dots\dots (8)$$

ここで r : 径方向位置 (m), z : 軸方向位置 (m), u : 軸方向の流速 (m/s), v : 径方向の流速 (m/s), ρ : 質量密度 (kg/m³), p : 圧力 (Pa), η : 層流粘性係数 (Pa·s), h : エンタルピー (J/kg), λ : 層流熱伝導率 (W/m/K), C_p : 定圧比熱 (J/kg/K), σ : 導電率 (S/m), P_{rad} : 放射損失 (W/m³), μ_0 : 真空中の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ F/m), \dot{A}_θ : ベクトルポテンシャル, ω : コイル電流の角周波数 (rad/s), \dot{E}_θ : 電界強度 (V/m), \dot{H}_z , \dot{H}_r : 軸および径方向の磁界強度 (A/m), j : 虚数 ($j^2 = -1$). ベクトルポテンシャル $\vec{A}(r, z, t)$ は周回方向成分のみ存在し、 $\vec{A}(r, z, t) = (0, \dot{A}_\theta \exp(j\omega t), 0)$ と書ける。ここで、ドットはフェーザで、例えば $\dot{A}_\theta = A_{\theta R} + j A_{\theta I}$ のように実部と虚部を持ち、その大きさは実効値である。記号 \Re は実部を表し、例えば $\Re \{ \dot{A}_\theta \} = A_{\theta R}$ である。また、* は共役複素数を表している。

〈5.2〉 解析空間、境界条件および計算手法 解析空間は図1に示す長さ161 mm、径41 mmの円柱断面の半面である。この空間を軸方向に85、径方向に42のグリッドに非等分割している。このグリッドに対して式(2)–(6)をコントロールボリューム法により差分化している⁽²⁹⁾。境界条件としては、壁温度を管壁における熱伝達を考慮して与えている。壁位置における流速は0 m/sに固定し、いわゆる滑りなし条件としている。壁位置におけるベクトルポテンシャルについては、コイル電流とプラズマ内に流れる渦電流とを考慮して計算している。プラズマ中心軸においては、円柱対称条件を適用している。 $z=161$ mm位置においては、ガスおよび熱流束は自由流出としている。

Ar-SF₆混合ガスの熱力学・輸送特性については、0.1 MPaにおける熱平衡値をChapman-Enskog法の一次近似により計算によって求めた⁽²⁷⁾。輸送特性の例として、Ar-SF₆混合ガスプラズマの熱伝導率を図9に示す。図9から、100%SF₆には温度1800、2200および2800 Kに特徴的な極大が存在することがわかる。これらは、それぞれSF₆、SF₄およびSF₂の解離にともなう等価的な熱伝導率の増加である⁽²⁸⁾。SF₆ガス混合比を上昇するとこれらの極大が顕著にみられるようになる。図10はAr-SF₆混合ガスプラズマの放射パワーの温度依存性である。放射パワーの計算においては、共鳴線を除く線スペクトル放射と連続スペクトル放射とを

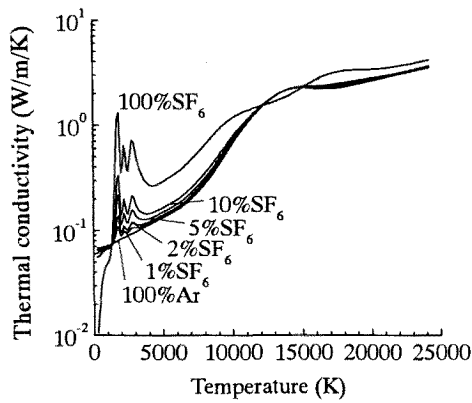


図9 大気圧 Ar-SF₆混合ガスの熱伝導率の温度依存性

Fig. 9. Thermal conductivity of Ar-SF₆ gas mixtures at atmospheric pressure for different SF₆ admixture ratios.

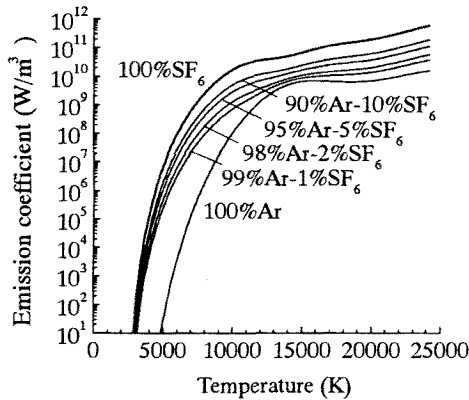


図10 大気圧 Ar-SF₆混合ガスの放射係数の温度依存性

Fig. 10. Radiation power of Ar-SF₆ gas mixtures at atmospheric pressure for different SF₆ admixture ratios.

考慮した。近年、吸収を考慮したプラズマからの正味の放射係数の算出がなされている⁽¹⁵⁾。しかし、これらはプラズマを均一円筒形と仮定した計算結果であり、Ar-SF₆混合ガスに対するものはほとんどない。このため、本計算においては簡単化のため、吸収については考慮していない。この結果、ここで計算した放射係数は実際にプラズマから放出されるパワーより大きくなり、後の温度の計算結果も実際より低く見積られることになる。図10において、放射パワーはSF₆ガスを混入させると特に温度10000 K以下で大きく増加している。これは温度10000 K以下において波長200 nm以下におけるS線スペクトル放射が特に大きいためである。

導出した差分方程式については、プラズマへの入力電力30 kW一定条件のもと、PatankarのSIMPLER法⁽²⁹⁾により収束解を得ている。

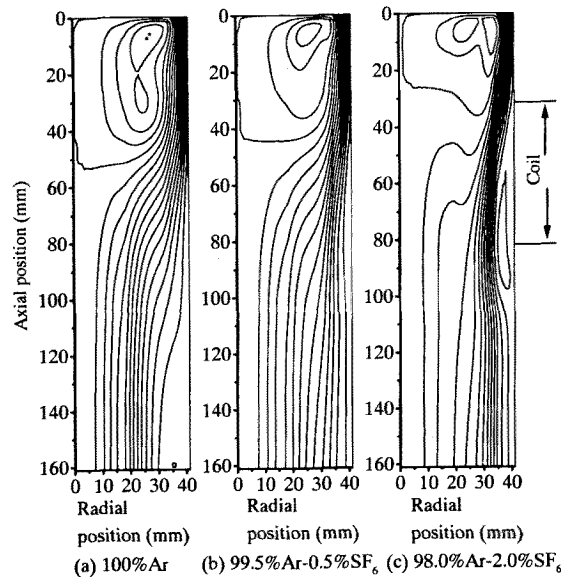


図11 ArあるいはAr-SF₆ ICTP内の流線図の計算結果

Fig. 11. Stream lines in Ar or Ar-SF₆ ICTP.

6. 計算結果

図11は、それぞれ100%Ar, 99.5%Ar-0.5%SF₆ および98.0%Ar-2.0%SF₆ ICTPにおける流線を示したものである。流線の接線方向にガスは流れ、流線と流線の間には同流量が流れる。同図から、管壁に沿って上部から流したガスの一部が、ICTPの上部に渦を形成していることがわかる。これはコイル中心z=60 mm付近において、プラズマにLorentz力 $[E_{\theta} \hat{H}_z^*]$ が働き、径方向の内側方向へガスが加速されるためである。SF₆ガス混合比を増加させると、この渦は次第に小さくなる。SF₆ガス混合比が2.0%になると、z=60 mmの管壁付近において新たな渦が発生している。これは、SF₆ガス混合比が大きくなるとプラズマが径方向に収縮し、それを補うようにガスが導入させるためである。

図12(a),(b) および(c)は、それぞれ100%Ar, 99.5%Ar-0.5%SF₆ および98.0%Ar-2.0%SF₆ ICTPにおける温度分布を等温線表示したものである。等温線は1000 K毎に描いてある。同図から、100%Ar ICTPにおいては、広い空間にわたって温度9000 K以上の高温領域が存在する。それが、SF₆ガスの混合比を0.5%とすると、温度9000 K以下の領域は断面積比で1/4程度にまで小さくなっている。また、高温領域は径方向に縮まって中心付近に存在し、管壁付近には1000 K以下の低温域が形成されている。SF₆ガス混合比を2.0%に増すと、この傾向はますます顕著になり、管壁から約10 mmの幅の領域は1000 K以下の低温域となっている。

次に、この温度低下がどのような物理機構により生じているのかを調べるために各点におけるエネルギーバランス

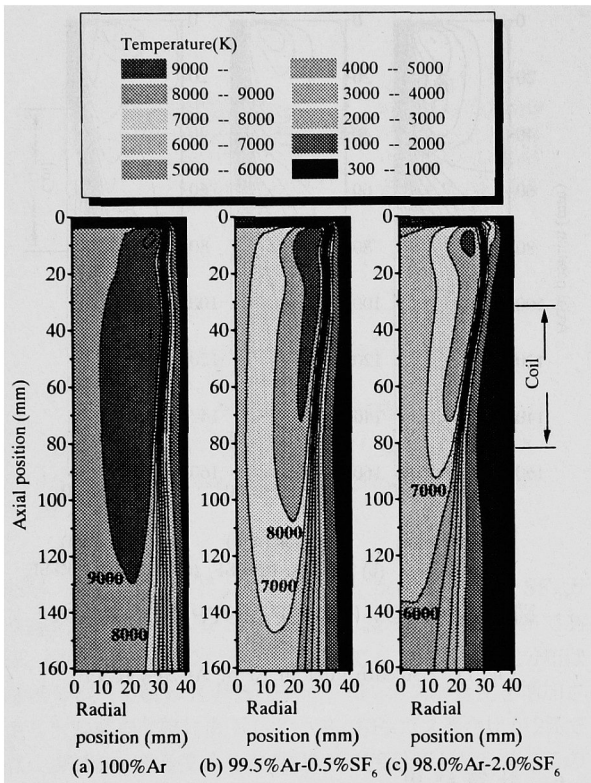
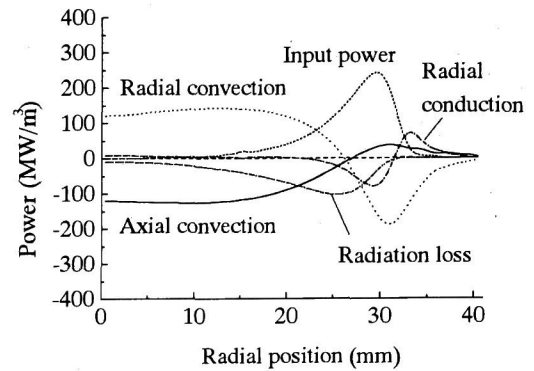


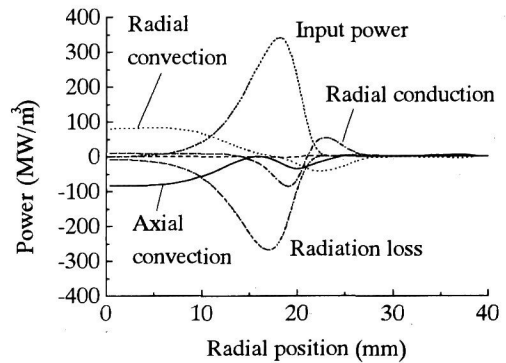
図12 ArあるいはAr-SF₆ ICTP内の温度分布の計算結果

Fig. 12. Isothermal contours for Ar or Ar-SF₆ ICTP.

を計算した。具体的には式(5)の各項をそれぞれのコントロールボリュームで積分して求めた。図13(a)および(b)はそれぞれ100%Arおよび98%Ar-2%SF₆ ICTPのコイル中心位置 $z=60$ mmでのエネルギーバランスの径方向分布を示している。図13の100%Arの場合については、入力電力は $r=28$ mm付近に極大をもっており、この付近のガスの温度を上昇させている。温度が高くなったガスは径方向対流によりプラズマ中心付近に運ばれて、軸方向対流により熱流としてトーチ下側方向に運ばれていく。損失機構として、支配的な要素は径および軸方向対流と放射損失である。一方、図13の98%Ar-2%SF₆の場合には、温度2000K付近において熱伝導率が大きくなるためプラズマ温度分布が径方向に縮まり、入力電力も $r=18$ mm付近に極大をもっている。また、SF₆ガスの混入により特に紫外域におけるS線スペクトル放射による放射損失が増し、損失機構の重要な要素となっている。これらは通常吸収も大きい、これらからの放射を考慮しないと温度の低下は見られない。このことから、紫外域におけるS線スペクトル放射による放射損失の要素となっていると考えている。



(a) 100%Ar.



(b) 98%Ar-2%SF₆.

図13 ArあるいはAr-SF₆ ICTP内の $z=60$ mm位置におけるエネルギー収支

Fig. 13. Energy balance in Ar or Ar-SF₆ ICTP at $z=60$ mm.

7. 計算結果と実測値との比較

実測結果と計算結果とを比較するために、計算結果からコイル下10 mmの位置における温度の径方向分布を求めた。図14に、その結果を示す。SF₆ガス混合比がパラメータとなっている。同図から、Ar ICTPの温度径方向分布はSF₆ガス混合比が増すに従い温度が低下し、かつプラズマの中心軸に近づくように高温領域が移動する。また、温度2000 K付近において温度勾配 $\frac{\partial T}{\partial r}$ がその前後で変化している。これらは、温度10000 K以下の放射損失が大きくなること、温度2000 K付近における熱伝導率が増加するためである。この温度分布の傾向は、図8の実験結果からも得られており、SF₆ガス混入による温度低下現象を定性的に説明できたと考えられる。しかしながら、実測結果と比較して計算結果の方が温度が低くなっている。これは、今回の計算においてはプラズマが光学的に薄いと仮定して吸収を考慮に入れていないため、見積もった放射損失が実際より大きかったためと考えられる。

8. 結論

本論文においては、誘導結合形熱プラズマ (ICTP) を用

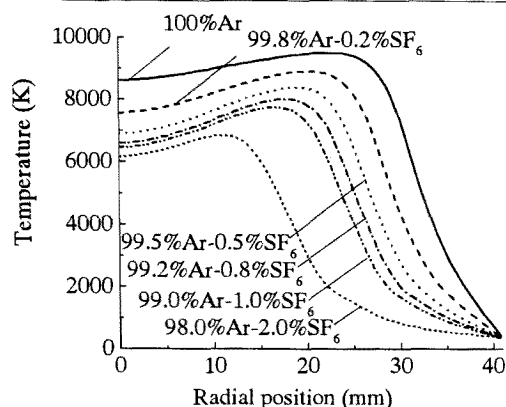


図14 コイル下10 mm位置における温度の径方向分布の計算結果

Fig. 14. Calculated radial temperature distribution of Ar or Ar-SF₆ ICTP at 10 mm below the coil end.

いて、消弧媒体SF₆ガスが熱プラズマに与える影響を検討した。入力電力50 kW、圧力0.1 MPaの高出力・高気圧のAr誘導熱プラズマを点弧し、そこにSF₆ガスを0.0, 0.2, 0.5, 1.0および2.0%と混入した場合のプラズマからの放射および温度の径方向分布変化を実験的に求めた。その結果、SF₆ガスを数%混入させるだけで放射強度、温度ともに大きく低下することが明らかとなった。放射強度分布は径方向に細くなることも確認できた。これらの傾向はN₂などを混合させた場合には見られず、SF₆ガスの高い消弧性能と関連していると考えられ、誘導熱プラズマ発生装置による遮断器用消弧媒体の性能評価試験法としての可能性を見いだせた。さらに理論的アプローチとして、圧力0.1MPaのAr-SF₆誘導プラズマを対象として局所熱平衡(LTE)を仮定した二次元数値熱流体解析を行い、SF₆ガスを混入したArプラズマの温度分布を数値的に求めた。この結果により、定性的に、実験的に得られた温度低下現象を説明できたと考えられる。

9. 謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により、新規産業創造型提案公募事業の一環として実施したものである。

本実験にあたり、大容量誘導熱プラズマ装置を使用させて頂いた(株)三菱重工業長崎研究所に感謝致します。実験にご協力頂いた畑澤重則君(現(株)関西電力)、高橋正文君(現(株)東京電力)に感謝致します。

(平成12年7月27日受付, 平成12年11月24日再受付)

文 献

- (1) H.M.Ryan and G.R.Jones: "SF₆ switchgear", ch.2, 1989, Peter Pregrinus Ltd., London.
- (2) 家田:「高電圧工学」, p.119, 1981, オーム社
- (3) 黒田:「COP3京都議定書と我が国のエネルギー政策」, 電学誌, 118, pp.697-700, 1998.
- (4) K.H.Yoon and H.E.Spindle: "A study of the dynamic response of arcs in various gases", *AIEE*, 1634-1642, 1959.
- (5) V.G.Frind: "Über das Abklingen von Lichtbögen. I Theoretische Überlegungen", *Z. angewandte Physik*, 5, 231-237, 1960.
- (6) V.G.Frind: "Über das Abklingen von Lichtbögen. II Prüfung der Theorie an experimentellen Untersuchungen", *Z. angewandte Physik*, 11, 515-521, 1960.
- (7) A.Lee: "Interruption capability of gases and gas mixtures in a puffer-type interrupter", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, PS-8, 362-367, 1960.
- (8) 宮本, 鎌谷:「吹付形遮断器の電流零点近傍における現象(主として時定数に関するもの)」, 電学論B, 85, 115-124, 1965.
- (9) R.D.Garzon: "The effect of SF₆-N₂ mixture upon the recovery voltage capability of a synchronous interrupter", *IEEE Trans. on Power Appar. & Sys.*, PAS-95, 140-144, 1976.
- (10) D.M.Grant, J.F.Perkins, L.C.Campbell, O.E.Ibrahim and O.Farish: "Comparative interruption studies of gas-blasted arcs in SF₆-N₂ and SF₆-He mixtures", *Proc. on Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*, 48-51, -.
- (11) A.Gleizes, M.Razafinimanana and S.Vacquie: "Transport coefficients in arc plasma of SF₆-N₂ mixtures", *J.Appl.Phys.*, 54, 3777-3787, 1983.
- (12) 筑紫, 中川, 平沢, 吉岡:「混合ガスを用いたバフファ式ガス遮断器の遮断特性」, 電学論B, 106, 1036-1042, 1986.
- (13) A.Gleizes, M.Razafinimanana and S.Vacquie: "Calculation of Thermodynamic properties and transport coefficients for SF₆/N₂ mixtures in temperature range 1000-30000 K", *Plasma Chem. Plasma Process.*, 6, 65-78, 1986.
- (14) A.Gleizes, I.Sakalis, M.Razafinimanana and S.Vacquie: "Decay of wall stabilized arcs in SF₆-N₂ mixtures", *J.Appl.Phys.*, 61, 510-518, 1987.
- (15) A.Gleizes, B.Rahmani, J.J.Gonzalez and B.Liani: "Calculation of net emission coefficient in N₂, SF₆ and SF₆-N₂ arc plasmas", *J.Phys.D:Appl.Phys.*, 24, 1300-1309, 1991.
- (16) B.Chervy, H.Riad and A.Gleizes: "Calculation of the interruption capability of SF₆-CF₄ and SF₆-C₂F₆ mixtures -Part I: Plasma Properties", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 24, 198-209, 1996.
- (17) B.Chervy, J.J.Gonzalez and A.Gleizes: "Calculation of the interruption capability of SF₆-CF₄ and SF₆-C₂F₆ mixtures -Part II: Arc Decay Modeling", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 24, 210-217, 1996.
- (18) Y.Tanaka, K.C.Paul and T.Sakuta: "Thermodynamic and transport properties of N₂/O₂ mixtures at different admixture ratios", *T.IEE of Japan*, 120-B, 24-30, 2000.
- (19) M.Razafinimanana, M.Bouaziz, B.Chervy, A.Gleizes, J.J.Gonzalez and S.Vacquie: "Influence of copper vapours on the characteristics of an SF₆ arc", *Proc. 11th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*, Vol.1, pp.66-69, 1995.
- (20) G.J.Cliteur, 鈴木, K.C.Paul, 作田:「Ar高周波誘導プラズマを用いたSF₆及びN₂消弧ガスの基礎特性評価」, 電気学会論文誌A, 119-A, 482-489, 1999.
- (21) M.I.Boulos, P.Fauchais and E.Pfender: *Thermal Plasmas Fundamentals and Applications* Vol.I, ch.1, 1994, Plenum Press, New York.
- (22) F.Cabannes and J.Chapelle: *Reactions under Plasma Conditions*, Vol.1, ch.7, ed. Venugopalan, 1971, Wiley-Interscience, New York.
- (23) W.L.Wiese, M.W.Smith and B.M.Glendon: *Atomic Transition Probabilities*, Vol.II, 1969, NBS, Washington DC.
- (24) A.Montaser and D.W.Golightly: *Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry*, Second Edition, pp.383-384, 1992, VCH Publishers, Inc, New York.
- (25) J.Mostaghimi and M.I.Boulos: "Two-dimensional electromagnetic field effects in induction plasma modelling", *Plasma Chem. Plasma Process.*, 9, 25-44, 1989.
- (26) J.Mostaghimi and M.I.Boulos: "A Two-temperature model of the inductively coupled r.f. plasma", *J. Appl. Phys.*, 61, 1753-1760, 1987.
- (27) J.M.Yos: "Transport properties of nitrogen, hydrogen, oxygen, and air to 30 000 K", Research and Advanced Development Division AVCO Corporation, Massachusetts, 1967, Amendments to AVCO RAD-TM-63-7.
- (28) B.Chervy, A.Gleizes and M.Razafinimanana: "Thermodynamic properties and transport coefficients in SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300-30 000 K and pressures of 0.1-1

MPa", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 1193-1296, 1994.
(29) S.V.Patankar: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*,
1980, Hemisphere Publishing Corp., New York.

田中康規 (正員) 1970年生。1998年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月金沢大学工学部助手。工学博士。主として、大電流アーク遮断現象の解明、熱プラズマ診断、応用に関する研究に従事。



作田忠裕 (正員) 1950年生。1980年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月同大学工学部助手。1988年金沢大学工学部助教授、1990年同大学教授。工学博士。主として高気圧熱プラズマ・アーク診断、応用に関する研究に従事。応用物理学会、IEEE会員。

