

大気圧誘導熱プラズマを用いた各種環境適応ガスの 熱プラズマ冷却効果の診断

正員 田中康規 (金沢大学)

正員 作田忠裕 (金沢大学)

Plasma Quenching Effect of Different Environmentally-benign Gases at Atmospheric Pressure using ICTP Technique

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

The Ar inductively coupled thermal plasma (ICTP) including different environmentally-benign gases was established under the atmospheric pressure condition for the purpose of finding alternative gases for SF₆ as an arc quenching medium in circuit breakers. Seven kinds of gases such as N₂, O₂, Air, CO₂, He, H₂ and Ar were used as an additional gas to Ar ICTP. The effect of the additional gases on the Ar ICTP was investigated to measure the radiation intensities of Ar lines and the temperature of the plasma. The result revealed that 3%CO₂ inclusion remarkably declined the radiation intensity and the temperature while other gas inclusions did not. This may indicate that CO₂ has high quenching capability of thermal plasma. Furthermore, a two-dimensional simulation was carried out to obtain the gas flow and temperature distributions in Ar ICTP including the different gases. The results showed that CO₂ inclusion caused the similar temperature decaying characteristics to the experiment.

キーワード：電力用遮断器，消弧媒体，環境適応型ガス，誘導熱プラズマ，放射強度，温度

1. まえがき

電力用遮断器において現在主流となっているのは、SF₆ガス吹付け消弧方式である。これは消弧媒体としてSF₆ガスを用い、遮断時に電極間に発生するアークにSF₆ガスを吹き付けて電流零点でアークを消弧するものである。SF₆ガスは (i) 消弧性能が空気の100倍程度⁽¹⁾⁽²⁾と極めて高い、(ii) 絶縁性能も極めて優れている、(iii) 通常の使用条件下では無毒、不燃、不活性である、などの理由からこれまで遮断器消弧媒体として広く利用されてきた。しかしながら、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年京都で開催された気候変動枠組条約第三回締結国会議(COP3)において、削減対象ガスの一つに指定された⁽³⁾。このように社会的にも地球環境問題が取り沙汰される中で、遮断器消弧媒体においても消弧性能がより良好で、かつ環境に対してより低負荷なガスが求められている。

これまでにも、SF₆ガス以上の消弧能力を持つガスあるいは混合ガスを探す試みはなされてきた⁽⁴⁾⁻⁽¹⁹⁾。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

後は環境問題を考慮に入れて消弧ガスを見直し、最終的には、現在のSF₆あるいはフッ素系ガス依存からできる限り脱却した環境に優しい遮断器消弧媒体を探求することも望まれると予想される。

一方筆者らは、消弧媒体プラズマを基礎実験的に検討する装置として、高周波誘導熱プラズマ (ICTP; Inductively Coupled Thermal Plasma) 装置を使用することを検討している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。高周波誘導プラズマの特徴は、無電極でクリーンなプラズマ空間を再現性よく生成できるため、プラズマ自身の基礎特性を比較的簡単に実験的に検討できる点にある。これまでに本装置を用いて、Ar ICTPに遮断器消弧媒体SF₆を微量混合させて、SF₆が熱プラズマに与える影響について検討してきた。その結果、SF₆混合が熱プラズマからのスペクトル放射強度およびプラズマ温度を著しく低下させることを見出している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。

本論文では、SF₆に替わる環境適応型消弧媒体を見出す手がかりを得るために、環境に優しいガスとして自然界に存在するN₂, O₂, Air, CO₂, HeおよびH₂の7種を取り上げて、これら各種ガスがAr誘導熱プラズマに与える影響について検討している。ここでは、Ar ICTPから放射されるArスペクトルの放射強度と、局所熱平衡(LTE)を仮定し

た場合の温度とを測定、算定および比較している。さらに、Ar-各種ガス混合誘導熱プラズマを対象として、LTE 状態を仮定した二次元熱流体モデルを構築し、各 Ar-混合ガス誘導熱プラズマ内の流速および温度分布を数値計算により求め、実験で得られた結果を熱流体力学的に説明することを試みている。これらの結果と実験結果とを比較して、各種ガスがプラズマに与える影響について検討し、プラズマ冷却効果が最も優れたガスを実験的に見出そうとしている。

2. 誘導熱プラズマ装置による熱プラズマ冷却効果の判定

ここで対象としている遮断器内高気圧アークと、大気圧誘導熱プラズマはいずれもプラズマ分野では「熱プラズマ」に属する。その共通点は、(i) 両者とも圧力が高いため、電子-重粒子間および重粒子-重粒子間の衝突が著しい、(ii) 重粒子温度と電子温度とがほぼ等しい、(iii) その温度は数千から数万ケルビンに達する、(iv) この高温による熱電離機構で電子を供給している、など点があげられる。

SF₆ ガスの強い消弧能力は、(1) 温度 2000K 付近におい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、すなわち冷却して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⁽²⁰⁾。実際、SF₆ を Ar 誘導熱プラズマに混入させた場合には、現象 (1)(2) を見出している⁽²⁰⁾。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⁽²⁰⁾。

3. プラズマトーチおよび実験条件

図 1 は、実験で使用した高周波誘導熱プラズマトーチの断面図を示している。プラズマトーチは石英管の二重管構造になっており、内管の内径は 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は室温の冷却水が下方向から旋回して流れており、これにより石英管壁をほぼ 300 K に保持している。石英管内部には、上部から外半径および外回転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、3000×1100 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-各種ガスの混合ガスを用いている。本実験においては各種ガスとして、自然界に存在する環境適応ガス N₂, O₂, Air, CO₂, He および H₂ の 7 種を対象としている。ガスの総流量を 100 liters/min(=1.67×10⁻³ m³/s) 一定として、付加ガスの混合比を流量比で 3.0 %に

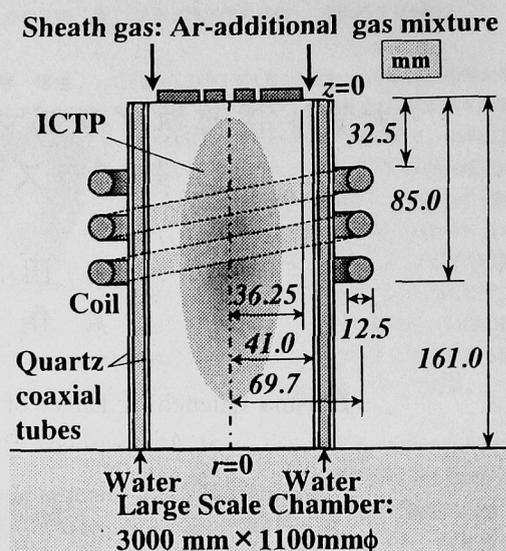


図 1 プラズマトーチ

Fig. 1. Schematic diagram of plasma torch.

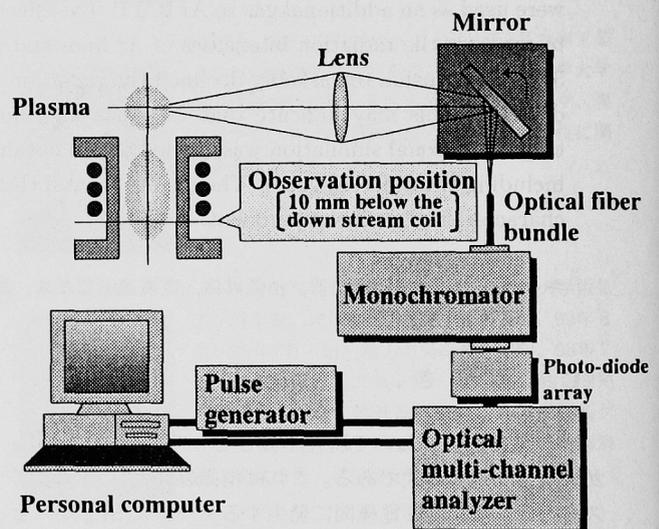


図 2 スペクトル観測システム

Fig. 2. Spectroscopic observation system.

なるように Ar 97 liters/min + 各種ガス 3 liters/min 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、コイルに 1.67 MHz の高周波電流を流している。管内にはコイル電流によって発生した高周波電磁場によりプラズマが点弧・維持される。実験においては、いずれのガス実験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。真空管は熱効率が悪いので、プラズマには実際にはその約 60% の 30 kW 程度がプラズマに入力されている⁽²¹⁾。

4. スペクトル観測システム

図2は、スペクトル観測システムの概略図である。スペクトル観測位置はコイル下約10 mmである。この位置からの放射光を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プラズマの径方向を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設置してある。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、700±50 nmの範囲を対象とした。これはこの波長域にAr原子スペクトルが多く存在するためである。本システムの波長分解能は約0.3 nmである。

5. 各種ガス混合によるAr ICTPへの影響

〈5・1〉放射強度 図3(a), (b), (c), (d) および (e) は、100%Ar, 97%Ar-3%N₂, 97%Ar-3%O₂, 97%Ar-3%H₂ および 97%Ar-3%CO₂ 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(f)は参考のため、98%Ar-2%SF₆ ICTP の場合を掲載している。同図(a)において、7本のArスペクトルが出現している。さらに図(b)–(f)では、ガスを混合するとそれぞれのガス固有の原子スペクトル線が検出できる。これらのスペクトル線はガス混入率を10%程度にまで上昇させた場合、放射強度が大きくなることから、これらスペクトルの出現でガスが混合できていることを確認できる。同図から、Arスペクトルの放射強度は、N₂, O₂ あるいはH₂を3%混合した場合には、これらのガスを混合しない場合と同じ程度で維持されているが、CO₂を3%混合させた場合には、Arスペクトルの放射強度が極端に小さくなり、100%Arの場合に比較して1/3.5程度にまで低下していることがわかる。遮断器消弧媒体SF₆を2%混合させた場合、混合量が他の場合よりも小さいにも関わらず、放射強度は100%Arの場合の1/7にまで低下している。放射強度は励起温度に最も影響をうけており、このことから、CO₂, SF₆には励起温度を低下させる作用があるものと推論できる。

次に、反射鏡の取り付けにある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4は、測定されたスペクトル線のうち、例として波長703.0 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。同図から、いずれの径方向位置においてもCO₂を3%加えるだけでArスペクトル放射強度が極端に小さくなっていることがわかる。この傾向は、消弧媒体SF₆を2%加えたものにもみられる。他の波長におけるArスペクトルについても同傾向がみられることは確認している。

〈5・2〉温度 誘導プラズマの場合、プラズマ軸上においては電界強度が0であるため電子が加速されずジュール発熱も0である。また、今回対象としているプラズマの圧力は大気圧と比較的高い。これらのことから、プラズマ

軸付近においてはほぼ局所熱平衡状態(LTE)になっているものと考えられる。そこで、今回対象のICTPの軸付近においてはLTEが成立すると仮定して、相異なる二波長に存在する同種粒子スペクトル線の放射強度比から相対強度法によりプラズマ温度を算出した。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。その理由は、これらのスペクトル線における上準位エネルギーレベルの差が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⁾。ここで算定される温度は、当該二準位間の励起温度であり、これは励起衝突させる粒子すなわち電子の温度に近いものと考えられる。プラズマ軸付近においては、ほぼLTEが成立すると考えられることから、温度はガス温度にも近いと考えられる。

図4での放射強度分布は、測定方向に積算されたものであるため、Abel逆変換を施して真の放射強度分布を求め、その分布から温度分布を算出した⁽²⁰⁾。図5は、様々なガスを3%混合したAr ICTPの温度の径方向分布である。同図において、N₂, O₂, Air, H₂ および Heのいずれのガスを3%混合させた場合についても、温度は10000–11000 Kとなっている。しかし、CO₂を3%混合させた場合については、温度が10000 K以下にまで低下している。一方、遮断器消弧媒体SF₆を2%混合させた場合についても10000 K以下になっている。このように、SF₆あるいはCO₂を混合させた場合にのみ温度の低下がみられ、CO₂は、SF₆のつぎにプラズマを冷却させる能力が大きいのではないかと考えられる。

6. Ar-各種ガス混合ICTPのモデリング

前節で取り上げた各種ガスをAr ICTPに投入した場合の影響を、熱流体的見地から検討するために、Ar-各種ガス混合ICTPのモデリングを行った。

〈6・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。

質量保存式:

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

運動量保存式:

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

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

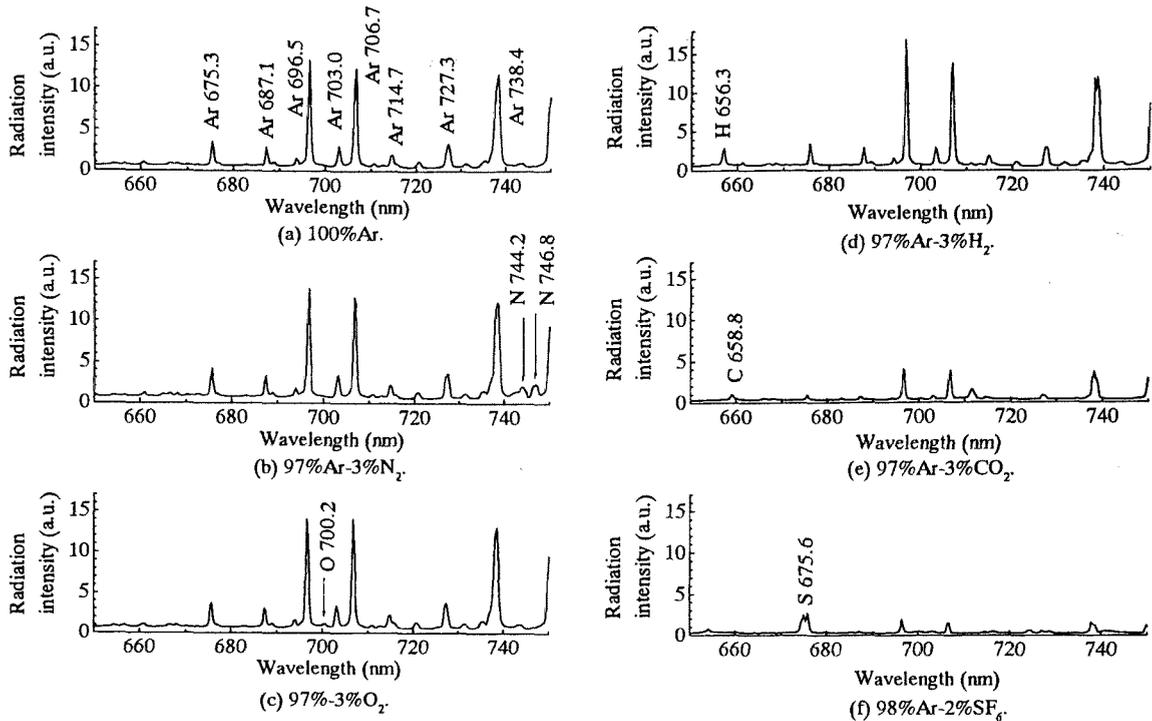


図3 各種環境適応型ガスを混入した Ar ICTP からのスペクトル
 Fig. 3. Spectra emitted from Ar ICTP including different gases.

エネルギー保存式:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial h}{\partial z} + \rho v \frac{\partial h}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \\ &+ \sigma |\dot{E}_\theta|^2 - P_{rad} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ベクトルポテンシャルに関する Maxwell 方程式:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\dot{A}_\theta}{r^2} = j \mu_0 \sigma \omega \dot{A}_\theta \dots \dots (5)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial}{\partial r} (r \dot{A}_\theta), \quad \dot{H}_r = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_\theta}{\partial z} \dots \dots (6)$$

$$\dot{E}_\theta = -j \omega \dot{A}_\theta \dots \dots \dots (7)$$

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/m^3), 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/m^3), 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, $\vec{A}(r, z, t) = (0, \dot{A}_\theta \exp(j\omega t), 0)$ とかける。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。

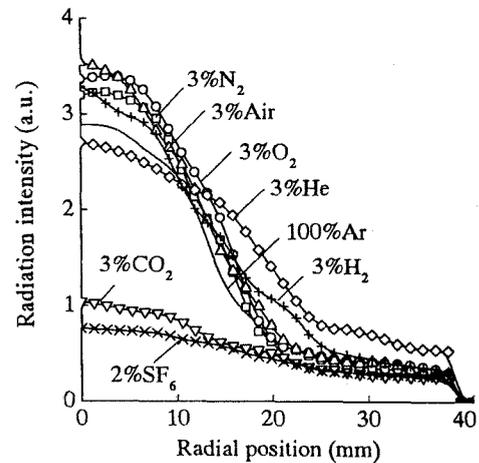


図4 各種ガスが混入した Ar ICTP からの Ar スペクトル放射強度の径方向分布
 Fig. 4. Radial distribution of radiation intensity of Ar lines in Ar ICTP including different gases.

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。

〈6-2〉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 (1)-(5) をコントロールボリューム法により差分化している。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

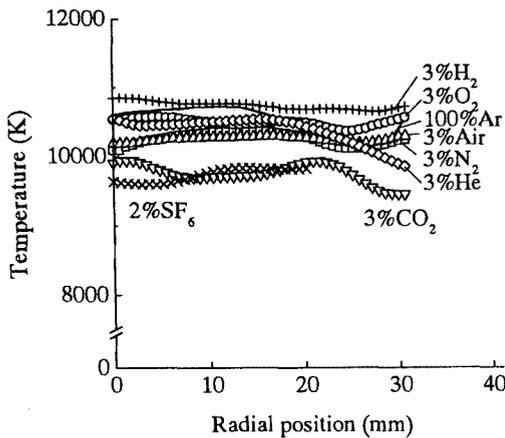


図5 各種ガスを3%混入したAr ICTPの温度径方向分布

Fig. 5. Radial temperature distribution of Ar ICTP with 3% inclusion of different gases.

条件としている。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、自由流出としている。これらの差分方程式を Patankar の SIMPLER 法⁽²³⁾により解いている。プラズマへの入力電力は30 kW一定としている。

〈6・3〉 各種ガスの熱力学・輸送特性 本計算においては、各種ガスが混合したArの熱力学・輸送特性として、0.1MPaにおける熱平衡値を求め、を使用した。図6に、97%Ar-3%各種ガスの混合ガスプラズマの熱平衡状態における熱伝導率温度依存性を示す。これらは圧力が0.1MPaのものである。同図から、各ガス特有の温度において熱伝導率の極大がみられる。例えば、SF₆混合の場合、温度1800、2200および2400 K、H₂混合の場合、温度4000 K付近に大きな極大値をもっている。これらの極大は分子の解離反応により等価的に熱伝導が大きくなった結果である。図7はAr-各種ガス混合プラズマからの放射係数を示している。放射係数の計算においては、共鳴線以外の線スペクトル放射と連続スペクトル放射とを考慮し、吸収については簡単化のため考慮していない。したがって、ここで算定した放射係数は正味の放射係数より大きく、以下の計算での温度をより低く見積もっていることになる。図7において、SF₆の場合、特に温度12000 K以下の領域において他のものよりも顕著に大きくなっている。これはS線スペクトルがこの温度域において大きな放射光を出すことに起因している。CO₂混合ガスの場合も温度域6000-12000 Kにおいて100%Arの場合より放射パワーが特に大きくなっている。

7. 計算結果

図8に、各種ガス混合Ar誘導熱プラズマの流線図を示す。同図(a)は100%Ar ICTPの場合の流線図であり、(b)、(c)、(d)、(e)および(f)はそれぞれN₂、O₂、H₂、CO₂およびSF₆を流量比で3%加えた場合のものである。同図にお

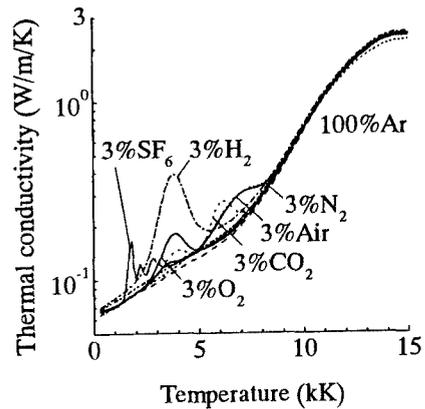


図6 各種ガスが混合した大気圧Ar熱プラズマの熱伝導率温度依存性

Fig. 6. Thermal conductivity of Ar plasma including different gases at atmospheric pressure.

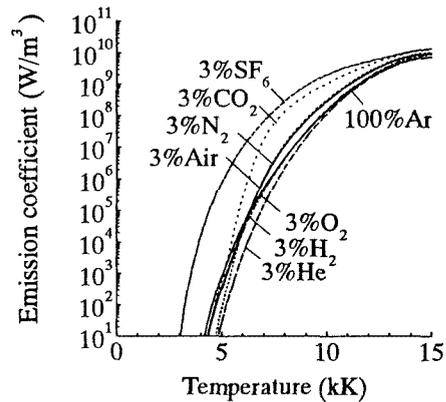


図7 各種ガスが混合した大気圧Ar熱プラズマの放射係数温度依存性

Fig. 7. Emission coefficient of Ar plasma including different gases at atmospheric pressure.

いて、N₂、O₂、H₂を混合させた場合、さほど変わらない。しかし、CO₂を混合させた場合、上部の渦が小さくなり、流れが壁付近に集中するようになっている。SF₆を混合させた場合その傾向はさらに強くみられる。これは、プラズマが径方向に収縮し、冷たく重いガスが管壁付近に流れた結果である。

図9は、各種ガス混合Ar誘導熱プラズマの二次元温度分布を示している。同図(a)は100%Ar ICTPの場合のものであり、(b)、(c)、(d)、(e)および(f)はそれぞれN₂、O₂、H₂、CO₂およびSF₆を流量比で3%加えた場合のものである。同図から、O₂あるいはH₂を混合させたAr ICTPの温度分布は100%Arの場合とほとんど変わらず、N₂を加えた場合は若干高温領域が小さくなっている。一方、CO₂を加えた場合、全体的に温度が低下し、壁付近の1000 K以下の低温領域が大きくなっている。この結果、プラズマは軸近くに存在するようになる。SF₆の場合にはその傾向がさらに大きくなり、 $z=60$ mmの位置においては、 $r > 25$

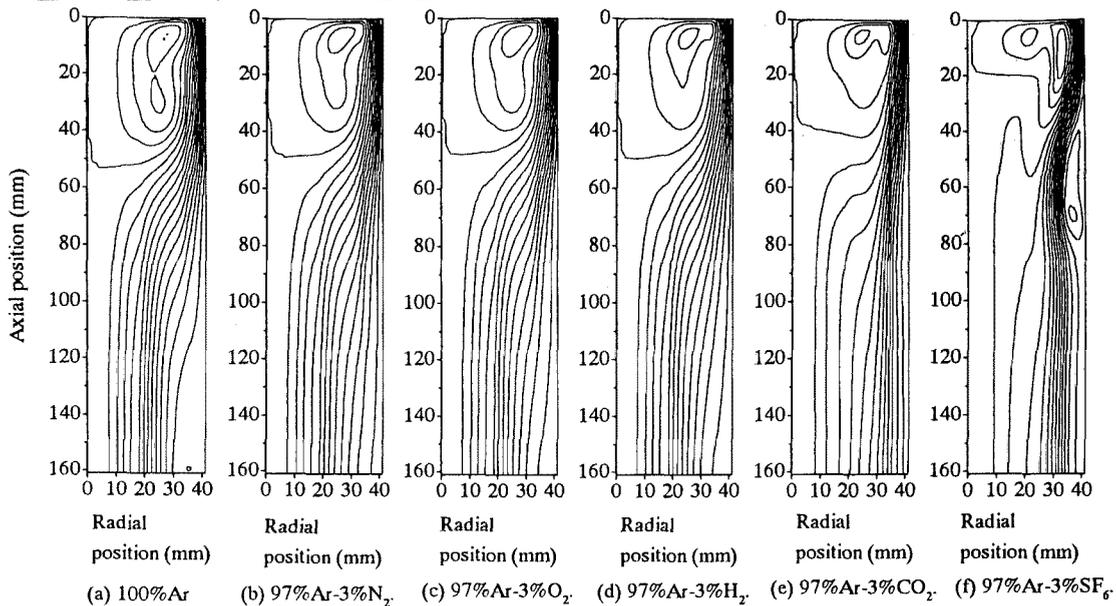


図8 各種ガスが混合した Ar ICTP の流線図の計算結果
 Fig. 8. Stream lines for Ar ICTP including different gases.

mm の範囲が 1000 K 以下の低温領域になっている。このように CO₂ あるいは SF₆ の混合により温度が低下し、プラズマがより径方向内側方向に存在することがわかる。これらは、SF₆ あるいは CO₂ を混入したことにより温度 5000-10000 K において放射係数が大きくなり温度が低下し、温度 2000-4000 K 付近で分子の解離反応に伴って熱を失われ、プラズマが収縮したといえる。

8. 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 10 に、その結果を示す。同図から、N₂, O₂, Air, H₂ あるいは He を混合させても Ar ICTP の温度径方向分布は 100%Ar の場合とさほど変わらないが、CO₂ あるいは SF₆ を混合させた場合には、温度が極端に下がっていることがわかる。この傾向は、実験的にも得られており、CO₂ あるいは SF₆ 混入による温度低下現象の定性的に再現できていると考えられる。これは、これらのガスを混入したことにより温度 5000K 以上の高温部で放射係数が大きくなったことと、温度 2000-4000K 付近で分子解離反応により熱を奪われた結果である。しかしながら、実測結果に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大きかったためではないかと考えている。

9. 結 論

本論文では、圧力 0.1 MPa の Ar 誘導熱プラズマを点弧し、そこに環境適応型ガスとして、N₂, O₂, Air, H₂, He

あるいは CO₂ を 3%混合させ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、CO₂ を数%混入させるだけで放射強度および温度ともに大きく低下することが明らかとなった。この傾向は消弧媒体 SF₆ を混合させた場合と類似しており、今回取り上げた 7 種の環境適応型ガスの中で CO₂ が最もプラズマ冷却能力が高いものと推定できる。さらに理論的アプローチとして、圧力 0.1MPa の Ar-混合ガス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、各混合ガスを混入した 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、CO₂ を混合した場合、温度低下現象がみられ、CO₂ のプラズマ冷却特性を理論的にも見いだせ、放射係数と分子解離反応による吸熱が温度低下およびプラズマの収縮に密接に関連していることがわかった。

10. 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 10 月 27 日受付, 同 13 年 4 月 4 日再受付)

文 献

- (1) H.M.Ryan and G.R.Jones: "SF₆ switchgear", ch.2, 1989, Peter Pregrinus Ltd., London.

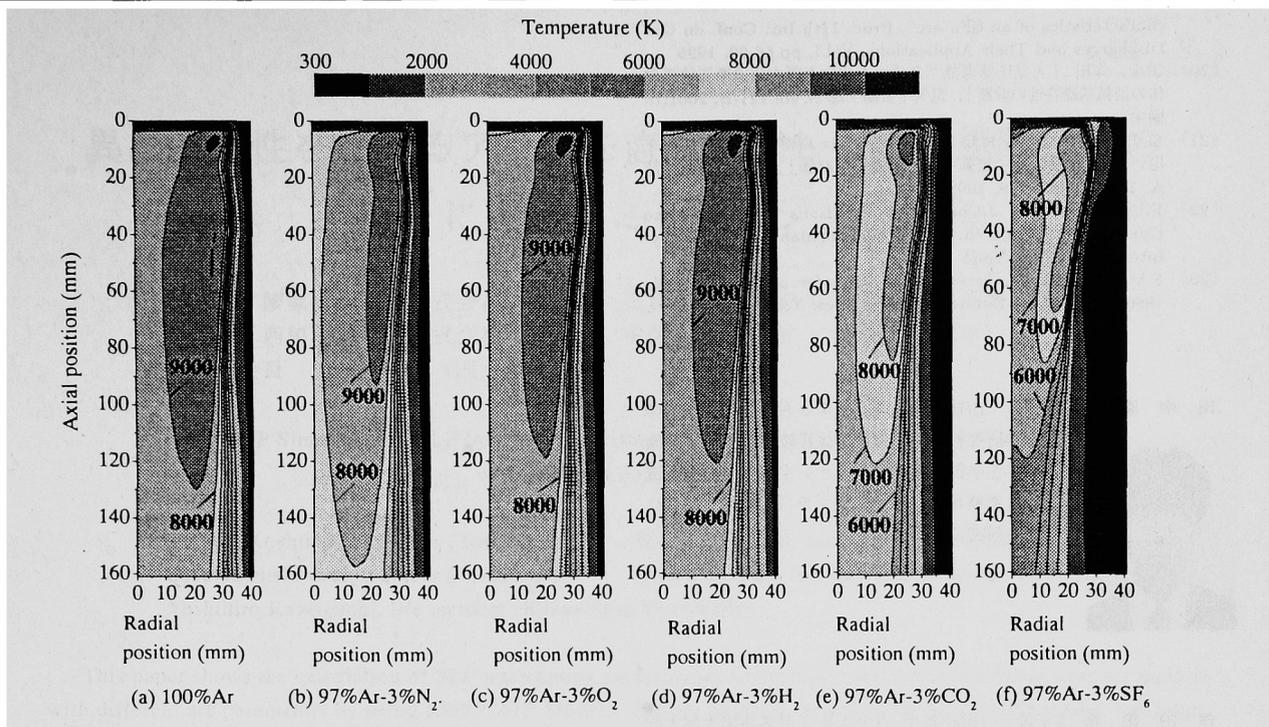


図9 各種ガスが混合した Ar ICTP の温度分布の計算結果
 Fig.9. Isothermo contour for Ar ICTP including different gases.

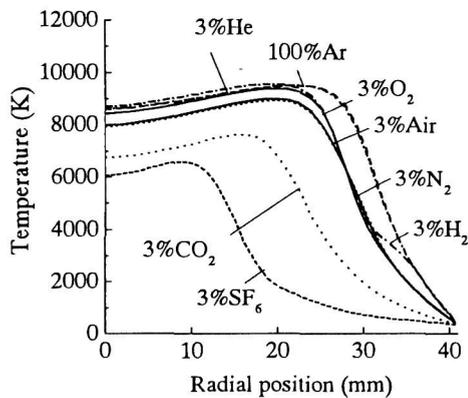


図10 各種ガスが混合した Ar ICTP の温度径方向分布の計算結果
 Fig.10. Calculated radial temperature distribution of Ar ICTP including different gases at 10 mm below the coil end.

(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:「混合ガスを用いたパuffers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.I, pp.66-69, 1995.

- (20) 田中, 作田:「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」, 電気学会論文誌 B, Vol.121-B, 2001(印刷中).
- (21) 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.
- (22) F.Cabannes and J.Chapelle: *Reactions under Plasma Conditions*, Vol.1, ch.7, ed. Venugopalan, 1971, Wiley-Interscience, New York.
- (23) 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。

