

熱流体—化学平衡複合モデルによるハロゲン電球タングステン輸送現象の検証

正会員 別所 誠 (東芝ライテック株) 非会員 大河 正志 (新潟大学)

Examination of Tungsten Transport in Operating Halogen Lamp by Fluid Dynamics and Thermo-Chemical Simulation

Member Makoto Bessho (Toshiba lighting & Technology Corp.) and Non-member Masashi Ohkawa (Niigata University)

ABSTRACT

Tungsten transport in halogen lamp operation was examined by fluid dynamics and thermo-chemical simulation. Partial pressures of almost all species dramatically increased around the coil leads. The cause appears to be a stagnant flow of filling gases. Results of a life test showed that tungsten was slightly deposited at the coil leads. Such a tungsten deposit can be attributed to a high concentration of tungsten compounds during the gas phase.

KEYWORDS : halogen lamp, equilibrium, halogen cycle, CFD, tungsten, blackening

1. 緒言

ハロゲン電球は白熱発光を利用した光源である。白熱発光の一般的な特徴として、発光する物質が高温であるほど放射スペクトルは短波長側へシフトする。その結果として、投入エネルギーに対する可視放射の比率が増し、発光効率が高くなる。これが金属の中で最も高融点であるタングステンをフィラメントとして利用する理由である。タングステンは融点近くまで加熱されるため、タングステンの平衡蒸気圧が高くなり、気体になったタングステン原子はバルブ内を拡散と対流により輸送されて、バルブ内壁に付着する。通常の白熱電球にはいわゆるハロゲンサイクル反応がないため、バルブ内壁に付着したタングステン原子はそのまま残り、その結果、光束維持率が徐々に低下する。室温近くの温度領域における金属原子の蒸気圧は通常極めて低いが、ハロゲン元素と化合して生成されたハライドやオキシハライドの多くは500K付近では気体であり、さらに低温の室温付近では固相を形成しても蒸気圧が非常に高い。そのため、バルブ内壁に付着したタングステンもハロゲン化合物として蒸発するので、バルブ黒化を防ぐ設計が可能となる。タングステンがフィラメントから蒸発し、ハロゲンと化合して内部を移動し、高温部で再びハロゲンと乖離する動きをハロゲンサイクルと呼んでいるが、このハロゲンサイクルはハロゲン電球の性能に直接影響を及ぼす要素となっており、ハロゲンサイクルの適正化は、ハロゲン電球の寿命の延長、効率の向上、高い光束維持率、製造工程における不純物のコントロールなどに影響を及ぼす重要な課題となる¹⁾⁴⁾。点灯中のハロゲン電球のバルブ内部は、化学反応を繰り返しながら熱流体が密閉系を移動する反応系とみなすことができる。

本研究では、熱流体-化学平衡複合計算モデルを提案してハロゲンサイクルを再現し、実際の寿命試験による観察結果および従来の解析方法との比較を通して、タングステンやハロゲン化合物の輸送過程について考察する。また、今回提案したモデルの有効性、ハロゲン電球設計上の留意点等に関する考察を行った。

2. 解析

2.1 熱流体-化学平衡複合モデルの概要

我々はハロゲン電球におけるタングステン輸送現象を明らかにするため、熱流体-化学平衡複合モデルを提案している。熱流体-化学平衡複合モデルとは、(1)熱流体場の解析、(2)化学平衡解析、および(3)それらのインターフェイスの3つの解析ソフトウェアを組み合わせることで、実際の管内現象を熱流体と化学平衡とを関連させながら同時にシミュレーションする方法である。このフローを図1に示す。まず、ハロゲン電球の温度分布と対流を再現する熱流体モデルを作成し、各化学種を対流に乗せて単位時間分移動させる。次に、移動先のセルで平衡計算を行い、セル内の生成物が確定した後に拡散を考慮して各化学種を隣接するセルへ移動させる。生成物の分圧の変化があらかじめ設定した閾値未満になった場合には解が収束したと判断して計算を終える。一方、収束しないと判断された場合には時刻 t を設定した時間 Δt だけ進め、再計算を行う。シミュレーションコードとして、熱流体場の計算には FLUENT[®]、化学平衡計算は FactSage[™]、インターフェイスとして ChemApp を用いた。

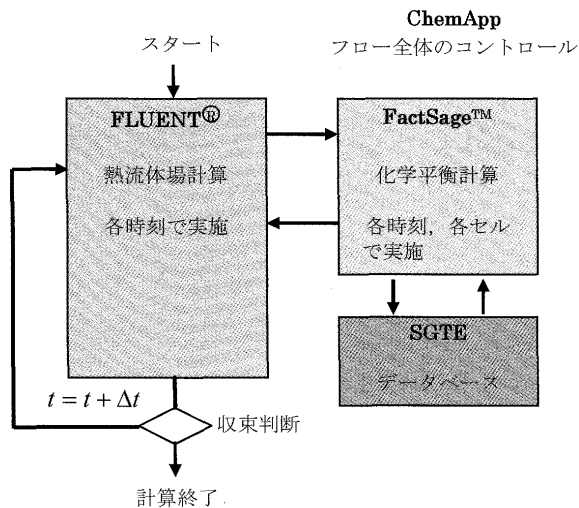


図1 繰り返し計算のフローチャート
Fig.1 Transport of species by convection and diffusion.

生成物の移動プロセスのモードを図2に示す。熱流体場を計算するためにバルブ内部を分割して作成したセルをx-y座標を分割して作成した格子点で代表して示す。対流による動きは温度場が決まれば一義的に決まるので、化学平衡計算を行う前に確定しておく。化学平衡計算により各セルにおける化学種の分圧が求まるので、分圧分布の影響として現れる拡散による移動を先にもとめた対流による移動に追加して全体の流れ場を構成する。図2に対流による移動のうちの流入分を実線の矢印で、拡散による移動の流入分を点線の矢印で表す。図が複雑となるため流入方向のみを記しているが、流出分の移動方向は逆向きの矢印で考える。移動と同時に時刻を Δt だけ進め、解が安定したと判断されるまでこの計算を繰り返す。

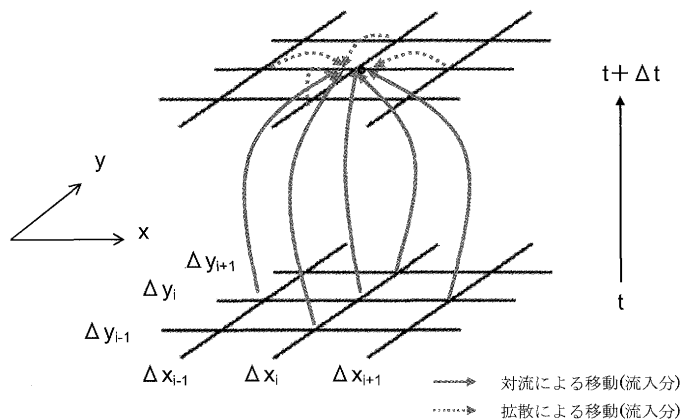


図2 対流と拡散による生成物の移動(流入分)
Fig. 2 Species flown into the cell by convection and diffusion.

2.2 複合モデルによるシミュレーション結果

熱流体-化学平衡複合モデルによるシミュレーションを、表1に示す初期組成比の系に対して行った。実際のランプではバルブ内部に不純物として微量の H_2O と O_2 が残留するため、シミュレーションにおいても系内に若干量の O_2 と H_2O を含めた。なお、Case_1は実際のランプ製造工程において残留し得る正常なレベル、Case_2では、 H_2O の分率を10倍大きくして、材料の枯化が不十分であった場合を想定した。

表1 初期封入物の組成比
Table 1 Filling amount of initial states.

封入物質	初期封入物の分率	
	Case_1	Case_2
Kr	9.00×10^{-1}	9.00×10^{-1}
N_2	9.93×10^{-2}	9.93×10^{-2}
CH_2Br_2	6.00×10^{-4}	6.00×10^{-4}
O_2	5.00×10^{-5}	5.00×10^{-5}
H_2O	2.00×10^{-5}	2.00×10^{-4}

速度場、温度場をそれぞれ図3および図4に示す。流速が最大となるのはフィラメント発光部の上端部周辺で、この付近における流速および温度はそれぞれ 1.10×10^{-1} m/sec, 1700~2000 Kである。一方、流速はバルブ最冷部で最小となり、 1.77×10^{-4} m/secある。この部分の温度は430 Kである。また、フィラメントの両端部付近の流速は極めて遅く、下側では約 4.65×10^{-4} m/secで温度は1200 K, 上側では約 5.0×10^{-3} m/secで温度は1500 Kである。この部分では対流が滞留している。

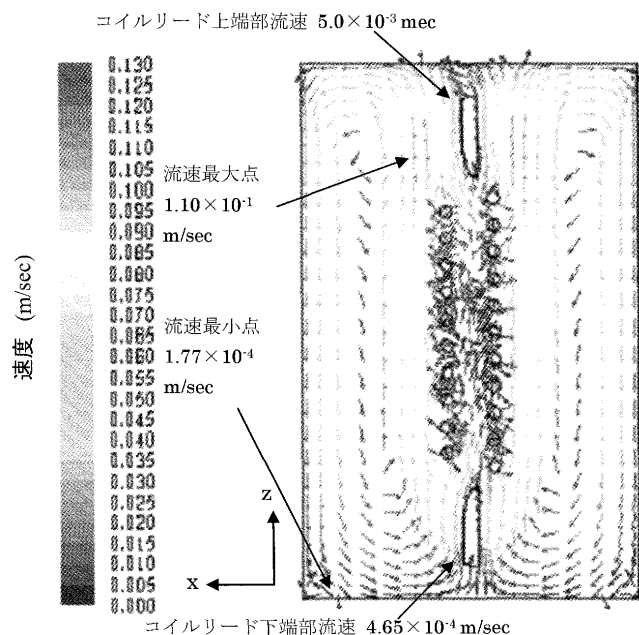


図3 2次元モデルにおける速度場
Fig.3 Vector contour in 2D model.

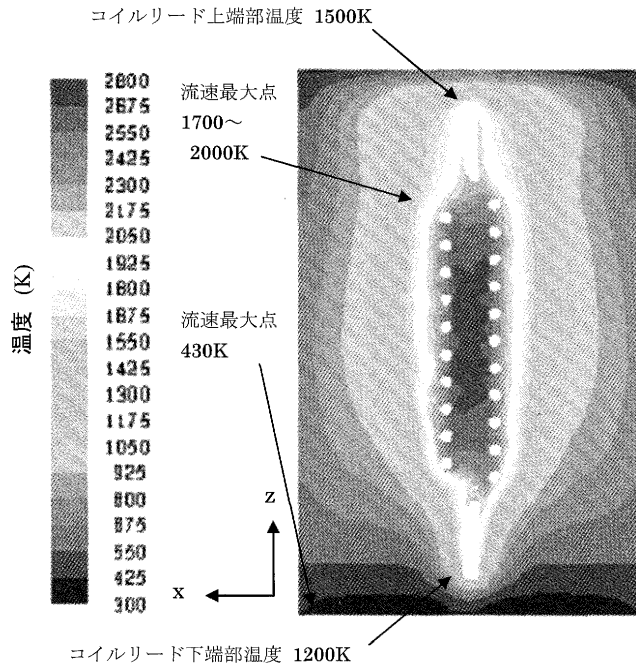
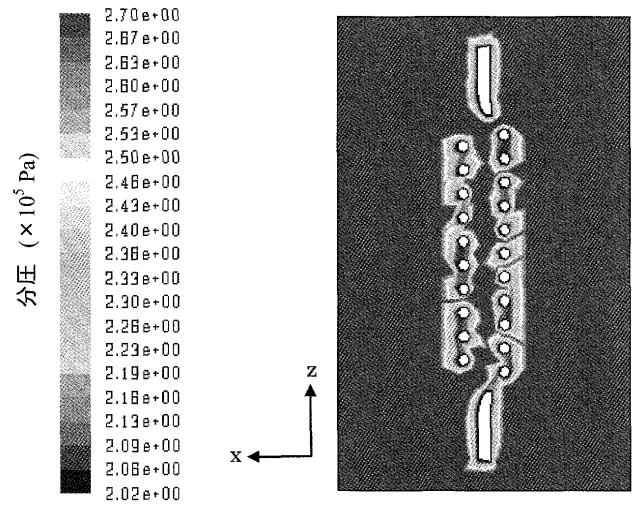


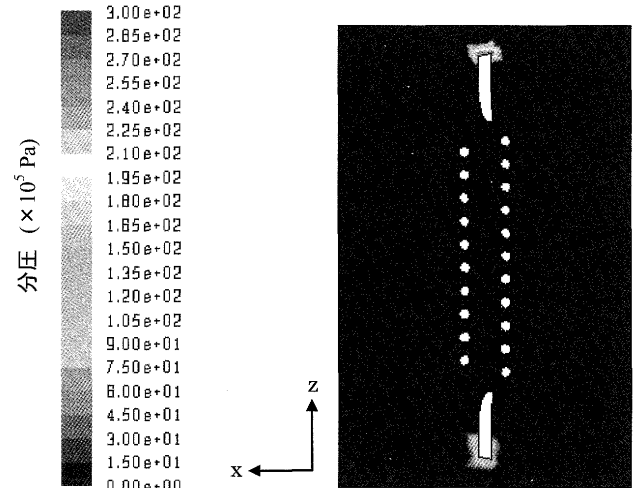
図4 2次元モデルにおける温度場
Fig. 4 Temperature distribution in 2D model.

次に、タングステン輸送現象を考察する上で、重要と思われる生成物の分圧分布の推移を代表例として図5～図11に示す。Case_1とCase_2とでは、結果に有意な差が現れなかったため、代表してCase_1の結果を示す。

図5はKr分圧分布で、点灯後1secおよび300secのシミュレーション結果である。Krは反応性のない不活性ガスなので、化学反応が無い場合の分圧分布を知る際の参考となる。点灯直後の1secにおいては、ほとんどの領域において分圧は 2.7×10^5 Paであり、初期封入分圧と同じである。ところが、分圧が安定する300secになると、ほとんどの領域において分圧は約 10.0×10^5 Pa(図5の表示スケールでは $0 \sim 1.5 \times 10^6$ Paで示されている)で、平均圧力の計算方法⁹⁾から推定される値と良く一致する。ただし、他の生成化合物と同様、コイルリード部両端においては極めて高い分圧分布を示す。これは、コイルリード部両端で分圧の高くなる原因が、対流が滞留していることによることを示している。



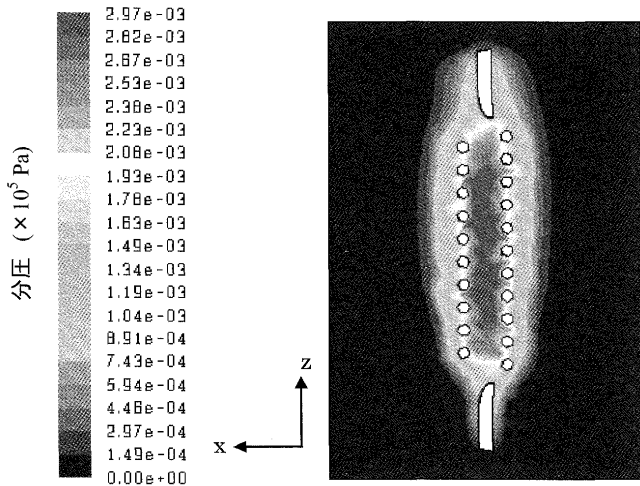
(a) $t = 1\text{sec}$ での分圧分布



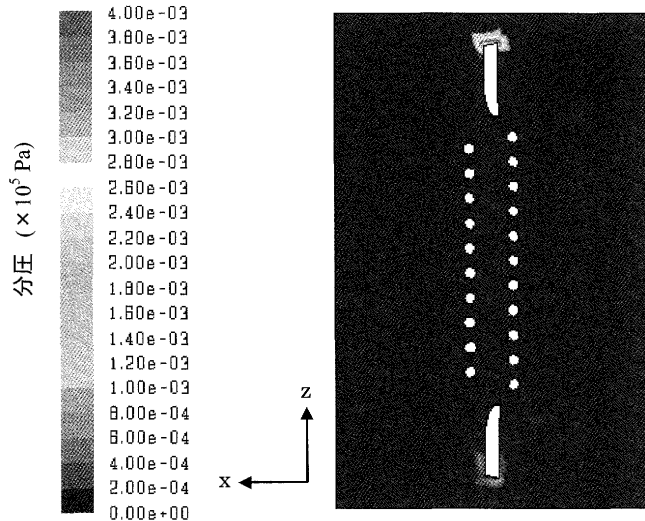
(b) $t = 300\text{sec}$ での分圧分布

図5 Kr分圧分布の推移
Fig. 5 Transition of Kr partial pressure.

Brは CH_2Br_2 の分解により生成する。 CH_2Br_2 は点灯によりすぐに分解されて生成する。点灯直後の分圧分布を図6(a)に示すが、まだ対流と拡散の影響が現れる前の分圧の様子が残っている。Br分圧が安定した300sec後の状況を図6(b)に示す。Br分圧の高い領域は低温部のコイルリード周辺に限定している。これは、対流と拡散による影響と考えられる。分圧分布はもはや温度に対して一義的に定まらない。図6より、分圧の高くなる領域の温度は1200~1500 Kで、図3の示す対流速度が遅い領域と一致していることが分かる。



(a) $t = 1\text{sec}$ での分圧分布



(b) $t = 300\text{sec}$ での分圧分布

図6 Br 分圧分布の推移

Fig.6 Transition of Br partial pressure.

分圧が安定した後ではコイルリード周辺部のみで分圧が高くなる現象は各生成物に対して同じであったため、以下 $t = 300\text{sec}$ の結果のみを図示する。

図7は H_2O の分圧分布の解析結果である。バルブ内に H_2O が一定量以上混入すると、バルブ内面へのタングステンの輸送現象が発生し、黒化を生ずる。これはウォーターサイクルと呼ばれている。分圧分布が安定すると、 H_2O 分圧の高い部分は低温部のコイルリード周辺部のみとなる。この部分は Br 分圧と同様、対流速の遅い領域と一致している。従って、ウォーターサイクルが顕著になり得る領域もレグ周辺部になると予想される。一方、Case_2 では H_2O 初期分圧が Case_1 の10倍あるにもかかわらず、分圧安定時の H_2O 分圧の分布は Case_1 とほとんど同等である。

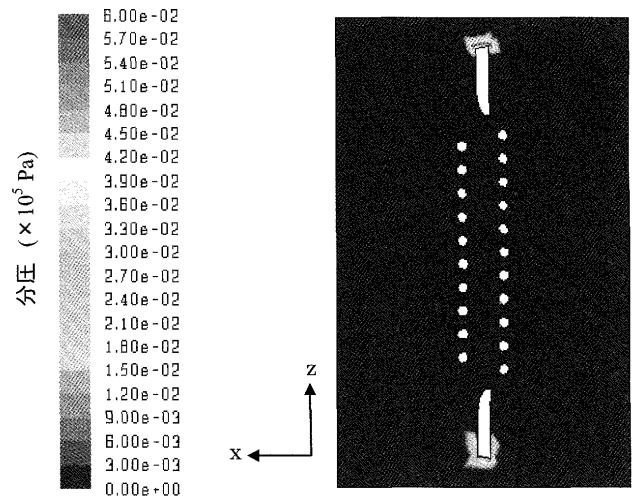


図7 H_2O 分圧分布

Fig.7 H_2O partial pressure.

図8は W の分圧分布の解析結果である。点灯直後の W 分圧が最大となる点は Case_1, Case_2 ともにフィラメントの周辺部で、 10^{-5} Pa のオーダーである。ところが、分圧安定後に W 分圧が最大となる領域はコイルリード上端の低温部で、W 分圧は点灯直後のフィラメント周辺部の分圧に近い $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Pa のオーダーである。W 分圧が時間とともに変化する理由は、蒸発した W が対流と拡散により移動したことによる。コイルリード上端の温度は約 1500 K と低温で、対流を考慮に入れない化学平衡モデルではこのような移動現象を再現することはできない。

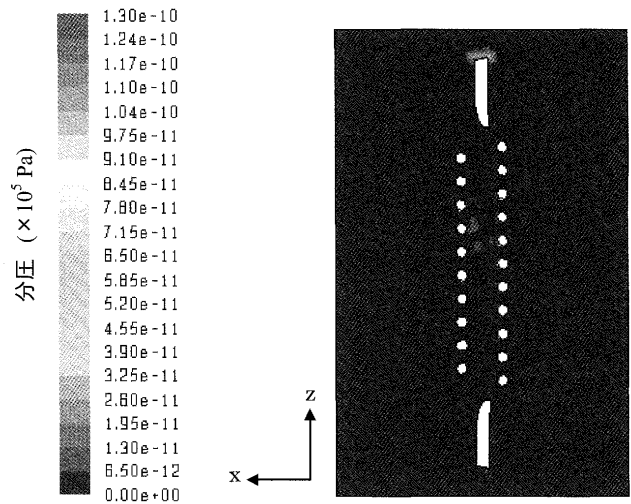


図8 W 分圧分布

Fig.8 W partial pressure.

図9はWBrの分圧分布の解析結果である。従来WBrは高温域のハロゲンサイクルにおいて主要な物質であると考えられてきた。ところが、今回のシミュレーションの結果、分圧が安定した後に分圧が高い領域は、低温部の上側レグの先端である。WBrによるフィラメント周辺部でのハロゲンサイクルは過去の文献⁹⁾などから予想される程活発ではなく、むしろ、ハロゲンサイクルが活発なのはコイルリード先端の低温領域に限定されている。WBr₂など、他のハライドに対しても同様の結果であった。

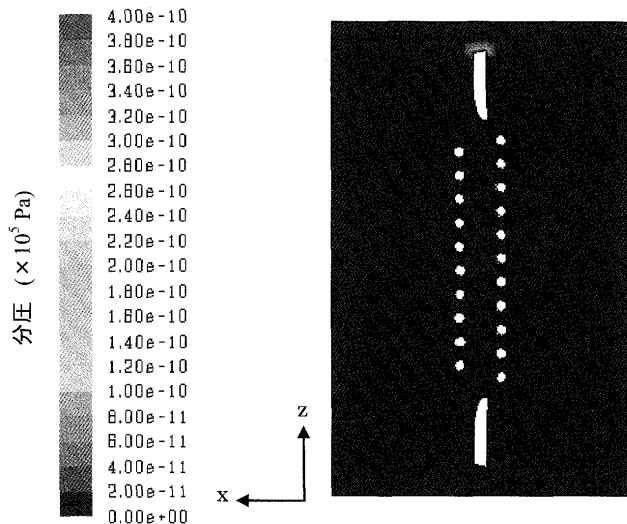


図9 WBr 分圧分布
Fig.9 WBr partial pressure.

図10はWO₂Br₂の分圧分布の解析結果である。WO₂Br₂はWBr₄とともに最も高い平衡分圧を示すタングステン化合物の1つである。分圧が高い領域はその他のハライドと同様、点灯時間の経過とともにコイルリード両端部へ移る。ただ、コイルリード両端における分圧は、後述する化学平衡計算のみから計算された値(図14および図15参照)ほど高くない。また、分圧が高い領域もコイルリード先端部である。

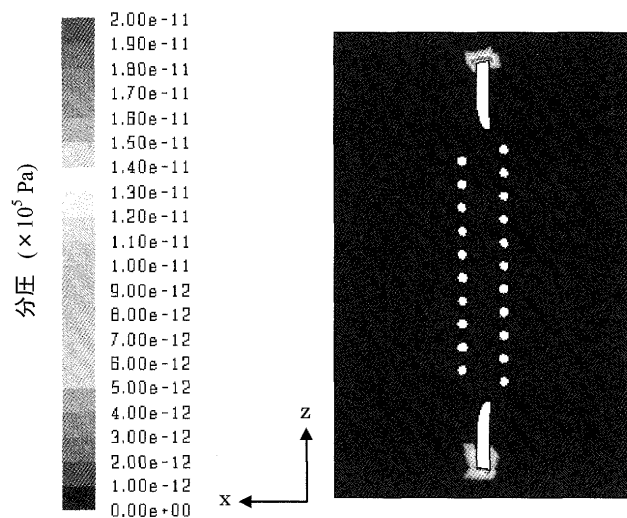


図10 WO₂Br₂ 分圧分布
Fig.10 WO₂Br₂ partial pressure.

図11は、SPW分圧分布の解析結果である。SPWとはSummed pressure of W compoundsの略である。SPWはタングステン化合物の分圧をWの価数で重み付けして合計した値として定義され、単位体積中に含まれるWの総量に対応する。ハロゲンサイクルへのタングステン供給源は、フィラメントから蒸発するタングステン原子である。しかし、図11はフィラメント近傍におけるSPWよりも、コイルリード周辺のSPWの方が高いことを示している。SPWが低温部の方で高くなるのは、コイルリード周辺部でWO₂Br₂やWBr₄などの生成物の分圧が高く、それらがSPWの値をほぼ決定しているためである。フィラメントから蒸発したタングステンが、ハライドやオキシハライドという形態でコイルリード周辺に集積することを示している。要約すると、Wが析出するレグ周辺とはSPW値が高くなる領域である。そして、SPWが高くなる場所は、図3が示すように対流が滞留し、かつ、温度が約1200Kとなる点でシミュレーション結果と実験は良好に一致している。ただし、封入物の組成およびハロゲン電球の構造が変われば、対流が滞留する場所および析出点の温度は変化するが、SPW値の高い領域であることには変わりないと考える。

その他、図示していないが、次のような知見も得られた。O₂分圧についても、H₂Oと同様にCase_1とCase_2との間に分圧や分布に有意な差は認められず、分圧が高くなる領域はコイルリード先端部であった。WO₂やWOなどのタングステン酸化物においても、分圧が高くなる領域はコイルリード先端部であった。最冷部へは固相のBrH₄N(s)、CW₂(s)、CW(s)、WO₂(s)などが析出する様子も再現された。WO₂(s)は低温部で生成する典型的なハライドであることが知られている。

なお、計算の収束判定時間は特定のセルと化学種をモニターし、継続して計算された平衡分圧の差が10⁻⁸ Pa以下となり、ほぼ安定した場合に収束とみなした。2つのケースともに300 secで分圧はほぼ安定した。WO₂Br₂を一例として、分圧をモニターした位置を図12に、分圧の推移を図13に示す。WO₂Br₂の分圧をモニターした位置は、安定時に分圧が低くなると予想されるフィラメント近傍とした。分圧が安定化する推移は物質により異なるが、初期における変化が大きい傾向にある。

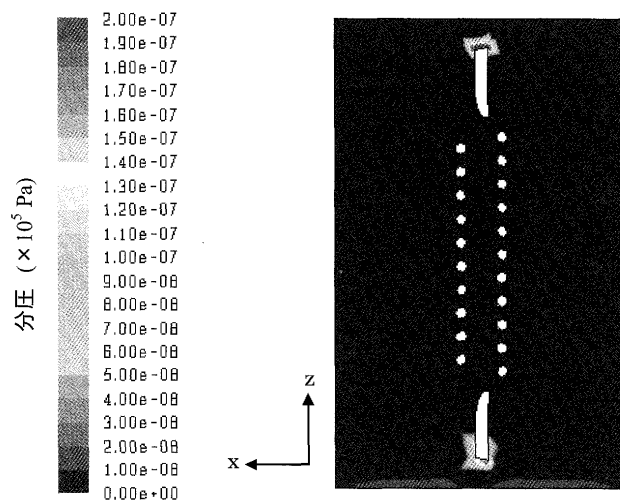


図11 SPW 分圧分布
Fig.11 SPW partial pressure.

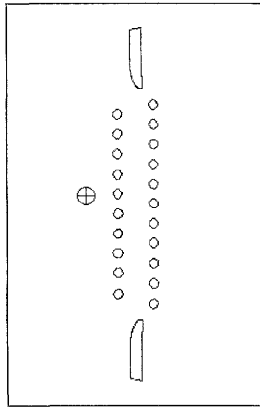


図12 WO₂Br₂分圧の推移観察点

Fig.12 Monitor point of WO₂Br₂ partial pressure.

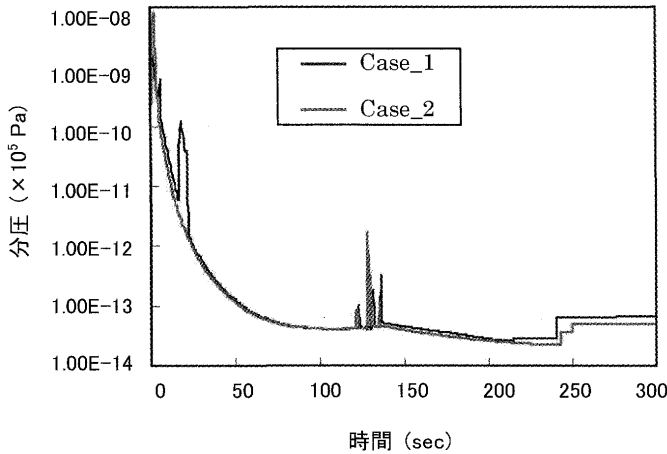


図13 WO₂Br₂分圧分布の推移

Fig.13 Transition of WO₂Br₂ partial pressure.

図13には分圧の推移の途中にスパイク状およびステップ状の変化が現れている。図13だけでは明らかではないが、変化が現れる時間付近で再計算することにより、これらは観測点で生成されたのではなく、近くで生成されて運ばれてきたものであることが分かる。生成する期間は一瞬なので、条件が揃って生成し、その現象がピークやステップとして現れたものである。

2.3 化学平衡計算

複合計算は化学平衡計算を否定するモデルではなく、発展させたモデルである。シミュレーションするには分割した各セル、各時刻で化学平衡計算を行っているが、対流と拡散の効果が考慮されている点が化学平衡モデルと大きく異なる。そこで、この違いが結果に及ぼす影響を調べるために、化学平衡計算を行った。結果を図14～図17に示す。全封入圧は 3×10^5 Paで一定、温度範囲は500～3200 Kである。生成化合物の種類が多いため、主要なタングステン化合物の分圧のみを選択して示した。分子量の大きな化合物は低温領域で、軽い化合物は高温領域で分圧が高くなる傾向がある。Case_1およびCase_2ともに、1000 K前後の低温部におけるタングステン化合物としてはWO₂Br₂の分圧が支配的で、分圧のピークは 10^2 Paオーダーである。一方、3000 K付近の高温部においてはW分圧が 10^0 Paオーダーでタングステン化合物中最も大きい。

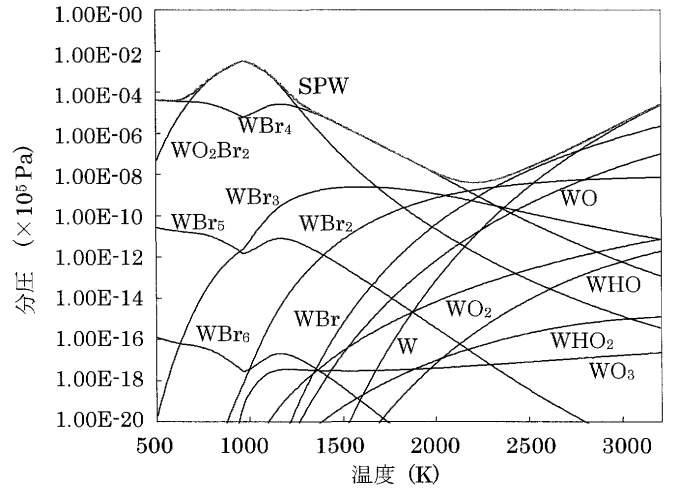


図14 Case_1におけるタングステン化合物の平衡分圧

Fig.14 Partial pressure of tungsten compounds in Case_1.

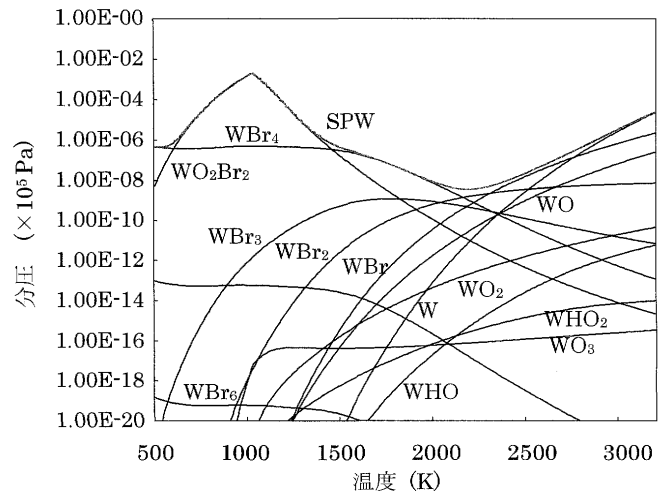


図15 Case_2におけるタングステン化合物の平衡分圧

Fig.15 Partial pressure of tungsten compounds in Case_2.

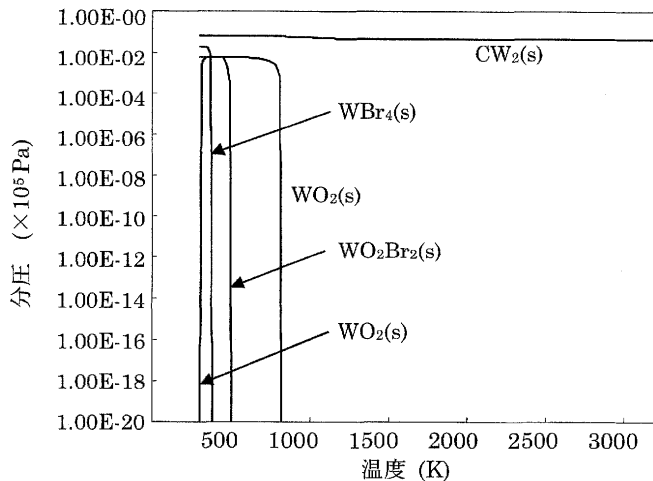


図 16 Case_1 における固相の析出

Fig. 16 Partial pressure of condensed compounds in Case_1.

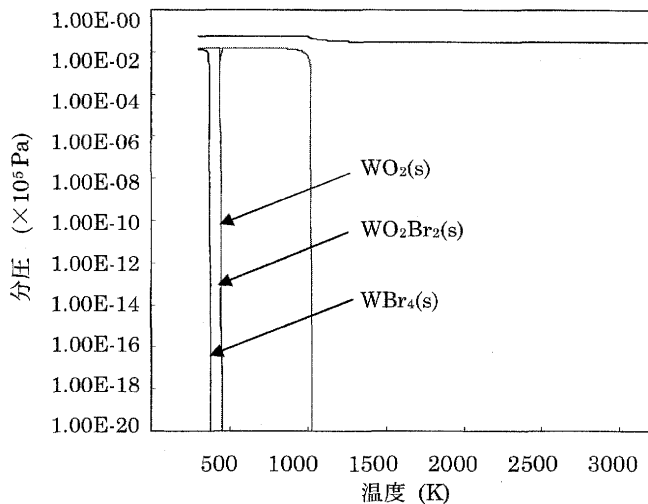


図 17 Case_2 における固相の析出

Fig. 17 Partial pressure of Br condensed compounds in Case_2.

低温領域で生成する固相の状況を調べると、 $WBr_4(s)$ 、 $WO_2Br_2(s)$ 、 $WBr_4(s)$ はいずれも約 500 K で、 $WO_2(s)$ は約 1000 K で消滅する。これより高温では、 $CW_2(s)$ と、グラフでは省略しているが $W(s)$ が安定に存在する。なお、固相の生成量は分圧に換算し、**図 14** および **図 15** に単位を Pa に換算して表示した。この換算では、固相として生成するモル数を気相のモル数とみなし、分圧を計算した。 W の平衡分圧は、**図 14** に示す Case_1 の場合には、2750K のとき 1.26 Pa である。一方、低温部で生成する WO_2Br_2 の分圧は、例えば 1000 K で 2.7 Pa に達し、フィラメント近傍での W の平衡分圧を上回っている。低温部における W 化合物の蒸気圧がフィラメント近傍よりも高いことは、フィラメントから蒸発するのと同様以上のタングステン化合物がバルブ内壁から気化することを意味しており、ハロゲンサイクルが正常に機能することの従来の説明であった⁴⁾。

拡散した W は高温、低温の両側から、SPW 曲線が極小値を取る温度領域へ移動すると解釈されている¹⁾⁻⁴⁾⁻²¹⁾。現象的には、バルブが黒化しないことをうまく説明しているが、対流と拡散による化学種の移動が検討できない点に平衡モデルの欠点がある。

個別の化合物について Case_1 と Case_2 とを比較してみると、 WBr_5 や WBr_3 など多くの化合物の分圧の値と温度依存性は異なっているものの、低温領域における WO_2Br_2 と、高温領域における W の分圧はほとんど変わらない。そして、これらの分圧が支配的であるため、結果として両者の SPW 曲線はほぼ同一となっている。これは、タングステンの析出状況にはほとんど差がないという予測につながる。しかし、SPW 曲線の極小値は 2 つの場合ともに約 2200 K で、従来の解釈に従えば、この温度領域に W が析出することになる。この 2200 K は白熱領域で、複合モデルで予測される析出点の温度よりも 300~500K 高くなっている。

3. 実験

3.1 ランプの仕様

ハロゲンサイクルの結果としてフィラメント周辺部に析出するタングステンの様子を観察するために、ハロゲン電球を試作し、寿命試験を行った。この試験に用いたハロゲン電球の仕様を表 2 に示す。近年、店舗照明で普及している商用電圧ミラー一体型ハロゲン電球を想定した。

表 2 ハロゲン電球の仕様

Table 2 Specification of the lamp.

特性		寸法	
消費電力	85 W	フィラメント長	8×10^{-3} m
全光束	1500 lm	バルブ外径	12×10^{-3} m
寿命	3000 hr	バルブ円筒部長さ	20×10^{-3} m

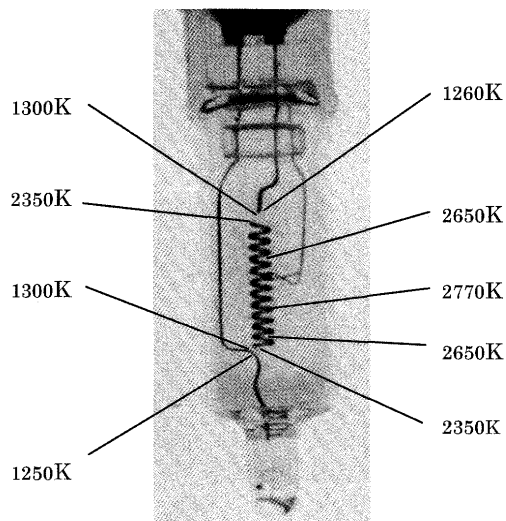


図 18 温度分布

Fig.18 Temperature profile of the burner.

Case_1 および Case_2 の 2 つのグループのハロゲン電球に対して定格電圧で寿命試験を行なった。評価数は各 3 pcs で、下向き点灯である。3000 hr 経過後にフィラメントの状態を観察し、初期状態と比較した。パイロメータによる点灯時の温度測定結果を **図 18** に示す。フィラメント両端とそれ続く導入線との間の温度差が非常に大きく、フィラメントに接続する導入線の温度は約 1500 K である。

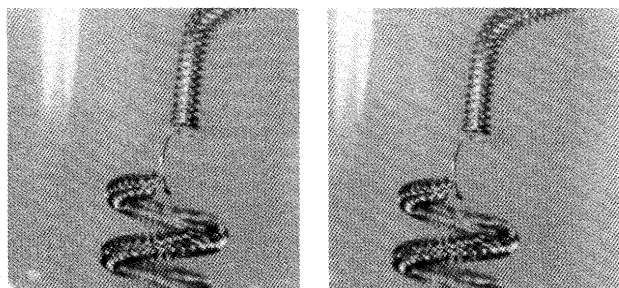
3.2 寿命試験の結果

初期状態と 3000 hr 点灯後のフィラメントの状態を **図 19** および **図 20** に比較して示す。 **図 19 (b)** および **図 20 (b)** に示す 3000 hr 点灯後のランプは寿命末期で、フィラメントが断線する直前の状態である。いずれのフィラメントにも変形、細りやタングステンの析出、バルブ黒化、バルブ内面への異物の析出などはなく、正常な外観を示しているため、代表して Case_1 および Case_2 の中からそれぞれ 1 つのフィラメントの拡大写真を示した。

図 19 に示す Case_1 のランプにおいては、アンカー表面にごくわずかのタングステンの析出が見られるが、短寿命にはつながらない問題のないレベルである。また、この析出が見られる場所の温度は約 1200 K であり、これより高温の領域ではタングステンの析出は認められなかった。

図 20 に示す Case_2 の電球では、フィラメント両端に続く継線部および中央部のアンカーに、若干のタングステン析出が見られるが、いずれも短寿命につながる心配のないレベルである。これらの部分の温度は、アンカーが約 1000 K、コイル上端部が約 1800 K、コイル下端部が約 1400 K である。

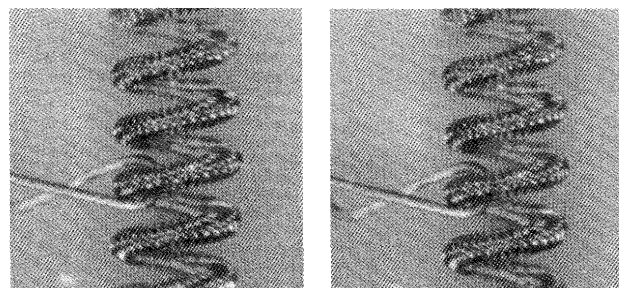
観察結果としては、Case_1 および Case_2 とともにフィラメント周辺部には短寿命に結びつくような細り、タングステンやハライドの析出などの現象は発生せず、 H_2O の封入量を 10 倍にしたことによる有意な差も認められなかった。



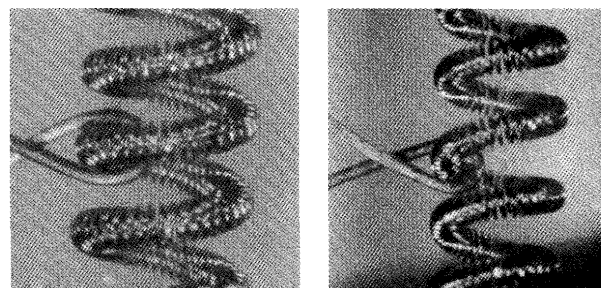
(a) フィラメント上端部



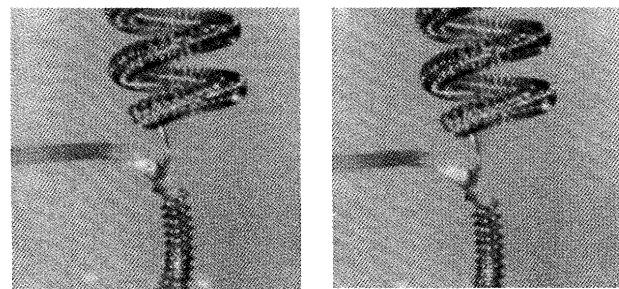
(a) フィラメント上端部



(b) フィラメント中央部



(b) フィラメント中央部

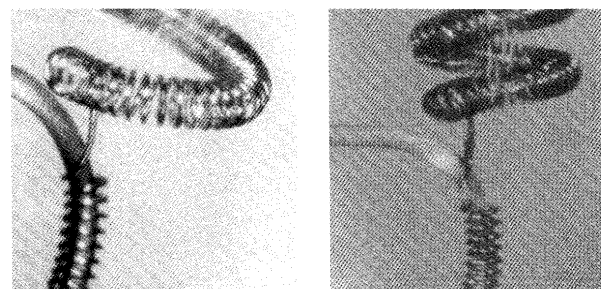


(c) フィラメント下端部

左側は点灯前、右側は 3000 hr 点灯後

図 19 フィラメント表面状態 (Case_1)

Fig.19 Comparison of the filament surface in Case_1.



(c) フィラメント下端部

左側は点灯前、右側は 3000 hr 点灯後

図 20 フィラメント表面状態 (Case_2)

Fig.20 Comparison of the filament surface in Case_2.

なお、今回2つの系に対して差として現れたタングステンのコイルリードおよびアンカーに析出したごくわずかな違いが封入系の違いによるものか、残留不純物のばらつきに起因するものかは明確ではないが、再現性の確保については工程および前処理の安定性が重要であると考えられる。

4. 考察

今回の寿命試験と熱流体-化学平衡複合計算および平衡計算の対比により明らかになったことを以下に記す。

(1) タングステンの析出

タングステンが析出すると予測される点は、平衡計算から SPW 曲線を求めて推定した結果よりも、今回の熱流体-化学平衡複合計算で求めた結果の方が実験の結果に近く、今回考察した方法が有効であると考えられる。

化学平衡モデルでは Case_1 と Case_2 との間では W が析出する温度領域は同一という結果であるが、この温度領域は 2200K でフィラメントの赤熱領域(コイル部)であり、実際に析出が起こったコイルリード部よりも高温であった。また、析出の程度、速度に関しては知見が得られない。

一方、複合計算では、W が析出する場所は Case_1 と Case_2 とでは同一で、コイルリード先端部という予測となり、実際の析出場所と一致した。析出の程度については Case_1 と Case_2 とで同等という予測で、これも実測結果と一致した。

分圧が高くなる点は流れが滞留している点で、かつ、温度が 1200K となる点である。ただし、対流が滞留する場所はハロゲン電球の構造寸法を変えると変化すると考えられる。また、W が析出すると予測した 1200K の温度領域については、初期封入組成と圧力に依存して変化するものと考えられる。対流のプロファイルを決定する要因はフィラメント形状をはじめ、管内封入物の構造と温度分布によるところが大きいため、ランプ設計においてはこれらを適正化する必要がある。ここで、流れが滞留する点における各生成物の分圧は、全圧を $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 一定と仮定して化学平衡計算で求めた値よりもはるかに高くなっていた。この領域では全圧も点灯直後の全圧よりも高く、これが化学平衡計算による予測と実験により得られる結果が一致しない理由の一つとなっている。

化学平衡計算の結果を用いた従来の方法においては、実験結果との間の不一致を指摘する研究結果が公表されているが^{22,23)}、不一致の理由の一つは化学平衡モデルでは対流の効果を考慮していない点にあり、熱流体-化学平衡複合計算ではより正確にタングステンの析出領域の予測が可能となったと考えられる。

タングステンの析出については、従来はバルブ内部を移動するタングステン化合物が SPW 分圧の低い領域に入ると、「溶存」できる量が少ないために SPW が極小値を取る点に析出するという解釈がなされていた。一方、今回の計算結果では、タングステンが析出する点では SPW 分圧が高くなっている。今回の研究ではタングステンが析出し、結晶成長するメカニズムまでは明らかにされないが、対流の効果がなければ「溶存」できないほどの量のタングステンが各生成物の形態でこの低温部に流れ込み、同時に流れが停滞し、急速に冷却される現象が示された。また、今回の設計仕様においては、 H_2O の封入量を 10 倍にしても寿命やタングステンの析出状況、フィラメントの細り等に有意な差異は観察されなかった。この点については、複合計算でも差異は現れず、実験結果と良好に一致する結果が得られている。

(2) 信頼性向上への応用

バルブが黒化しないことは、バルブ内壁付近での W 化合物の分圧が低く生成物が多量に存在し得ないということの説明できる。また、低温部にハライド等の固相が析出する状況も、熱流体-化学平衡複合計算により直接予測することができた。

化学平衡モデルでは計算するには全圧と温度を決めなければならないが、その結果平衡組成は一義的に定まる。一方、複合計算モデルではそれらを定めても対流が滞留する領域が系の形状や境界条件により変化するため、これら条件の変化が生成物の分圧分布に及ぼす変化も予測できる。その結果として、不純物がハロゲン電球の信頼性に及ぼす影響やハロゲンの適正封入量の把握をより高い精度で予測することが可能となる。

点灯中、局所的に超高圧になり得る領域のあることが示された。過去、点灯中の封入圧の推定方法が提案されているが、熱流体-化学平衡複合計算を行うと、より詳細な圧力分布を知ることができる。シミュレーションはバルブの破裂防止など、信頼性向上にも応用できる可能性がある。ただし、この圧力分布は気相の粘性により変化する。現時点では各生成物の粘性はほとんど知られていないため、今後の調査が期待される。

図 13 は、各化合物の分圧の推移が安定しない時間内に点滅点灯を繰り返すと、連続点灯した場合は全く異なる分圧分布が管内に生ずることを示している。従って、連続点灯時を想定して封入ハロゲン量などを適正化しても、頻繁に点滅を繰り返すような点灯条件下ではハロゲンサイクルが適正に機能せず、タングステン輸送現象、例えば黒化やフィラメントの細り、の生じる可能性のあることが分かる。これは従来の実験事実を裏付ける結果である。

5. 結言

熱流体-化学平衡複合計算を行い、ハロゲン電球の寿命試験による実際の観察結果と対比した。タングステンの析出点については、従来の化学平衡モデルよりも実際に近い結果が予測できた。一方、析出する点の予測については、SPW 曲線が極小値となる点という、従来の説明とは異なる解釈が求められた。析出するメカニズムについては今後の研究の進歩に期待することになるが、生成物の分圧が高く、対流の流速が遅くなる点と析出点が極めて良く一致するという知見を今回得ることができた。今後さらなる検証研究が必要ではあるが、我々が提案する複合計算は、ハロゲン電球の信頼性向上および設計の適正化に有効な手段と考えられる。

参考文献

- (1) G.M.Neumann: Der mechanismus des wolfram - halogenkreisprozesses in halogenleuchtampen, LICHTTECHNIK, 24-12, pp. 606-607 (1972).
- (2) E.Schnedler: Description of tungsten transport processes in inert gas incandescent lamps, Philips J.Res., 38, p. 224 (1983).
- (3) G.Dittmer and U.Niemann: THE INFLUENCE OF SOLID PHASE ON TRANSPORT CYCLES IN HALOGEN-FILLED INCANDESCENT LAMPS, Philips J.Res., 42, pp. 41-57 (1987).
- (4) G.Dittmer and U.Niemann: THERMODYNAMIC CONSIDERATION ON TRANSPORT PROPERTIES OF HALOGEN-FILLED FLOOD-LIGHT LAMPS, International Symposium on the Science & Technology of Light Sources (LS5) 22P pp. 103-104 (1989).
- (5) E.J.Covington: Hot-to-cold pressure ratios in tungsten halogen lamps, Illuminating Engineering, 11, pp.654-658 (1970).
- (6) D.H.Price : Chemistry of tungsten-halogen incandescent filament lamps, GEC journal of science and technology, vol.39, pp.125-130 (1972).
- (7) J.R.Coaton and J.M.Rees: Future of incandescent and tungsten-halogen lamps , IEE. Proc., 124, pp.763-767 (1977).
- (8) J.C.Hill and A.Dolenga: Fluorine-cycle incandescent lamps, J. Appl. Phys., 48, pp.3089-3092 (1977).
- (9) L.A.Zhivechkova, O.B.Tomilin and A.V.Kharitonov: THERMODYNAMICS OF HALOGEN CYCLES IN INCANDESCENT LAMPS, Light & Engineering, 2-4, pp.25-29 (1994).
- (10) J.R.Coaton: Modern tungsten-halogen-lamp technology, IEE. Proc., 117, pp.1953-1959 (1970).
- (11) G.M.Neumann and W.Knatz : Thermodynamik heterogener gasgleichgewichte. I Freie bildungsenthalpie ΔG^0_B der verbindungen in den wolfram-halogen-systemen, Zeitschrift für naturforschung, 26a, pp.863-869 (1971).
- (12) G.M.Neumann and G.Gottschalk: Thermodynamik heterogener gasgleichgewichte. II Gasphasenzusammensetzung und chemische transportreaktionen in den systemen wolfram-halogen, Zeitschrift für naturforschung, 26a, pp.870-880 (1971).
- (13) G.M.Neumann and G.Gottschalk : Thermodynamik heterogener gasgleichgewichte. III Gasphasenzusammensetzung und chemische transportreaktionen im system wolfram-sauerstoff, Zeitschrift für naturforschung, 26a, pp.882-887 (1971).
- (14) G.M.Neumann : Der mechanismus des wolfram-halogen kreisprozess in halogen gluhlampen, Licht technik, 24 pp.605-607 (1972).
- (15) J.R.Coaton : Nitrogen separation in linear tungsten-halogen lamp, IEE. Proc., 119, pp.1698-1700 (1972).
- (16) B.A.Moys : Behavior of incandescent tungsten filaments during life, GEC journal of science and technology, 40, pp.17-24 (1973).
- (17) G.M.Neumann : Einfluss von sauerstoff auf die transport reaktionen beim wolfram-brom-kreisprozess in halogen gluhlampen, Journal of the less-common metals, 35, pp.51-64 (1974).
- (18) P.Eckerlin and S.Garbe: Analysis of tungsten compounds in the wall region of halogen lamps, Philips J.Res., 35, pp.320-325 (1980).
- (19) G.Dittmer and U.Niemann: HETEROGENEOUS REACTIONS AND CHEMICAL TRANSPORT OF TUNGSTEN WITH HALOGENS AND OXYGEN UNDER STEADY-STATE CONDITIONS OF INCANDESCENT LAMPS, Philips J.Res., 36, pp. 87-111 (1981).
- (20) G.Dittmer and U.Niemann : HETEROGENEOUS REACTIONS AND CHEMICAL TRANSPORT OF MOLYBDENUM WITH HALOGENS AND OXYGEN UNDER STEADY STATE CONDITIONS OF INCANDESCENT LAMPS, Mat.res.Bull., 18, pp. 355-369 (1983).
- (21) G.Dittmer and U.Niemann: THE INFLUENCE OF SOLID PHASE ON TRANSPORT CYCLES IN HALOGEN-FILLED INCANDESCENT LAMPS, Philips J.Res., 42, pp. 41-57 (1987).
- (22) P. Heeley, D.D.Bruguier and R.Devonshire: Halogen lamp computer model incorporating LTCE species diffusion, The 7th International Symposium on the Science & Technology of Light sources, 67P pp.229-230 (1995).
- (23) L.Bigio and P.Y.Chang, : Infrared laser measurement of HBr near the filament of a tungsten halogen lamp, J. Electrochem Soc., 141-8, pp.2024-2029 (1994).

(受付日 2009 年 4 月 14 日/採録日 2009 年 8 月 7 日)



大河 正志 (非会員)

新潟大学工学部福祉人間学科

昭和 59 年 3 月大阪大学基礎工学部卒, 平成元年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了. 同年 4 月新潟大学工学部助手. 現在同大学教授. 工学博士. 電子情報通信学会, 電気学会, 応用物理学会, IEEE, OSA, SPIE 等会員.



別所 誠 (正会員)

東芝ライテック株式会社技術本部

昭和 58 年 3 月早稲田大学理工学部卒, 昭和 60 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程終了. 同年 4 月株式会社東芝入社. 平成元年, 東芝ライテック株式会社設立にともない出向移籍. 平成 12 年 10 月から平成 20 年 3 月, オスラム・メルコ・東芝ライティング株式会社へ出向.