
学生に伝えたいと思う技術

(1) 白熱電球について

1-1. 白熱電球の長所短所 (の考え方)

現在、照明用の白熱電球はほとんど製造されず、LED電球が主流となっています。その理由は、電気エネルギーを照明用の可視光放射に変換する効率が悪いからです。

白熱電球は電極であるタングステン線を二千数百度で赤熱させ、その温度放射による光を照明に利用しています。その電気入力から光へ変換の80%以上です。ただ、照明用の可視光への変換は10%程度であり、残りの70%以上が赤外放射です。このように、赤外光放射光源としては非常に効率が良いものです。現在大阪大学等で研究されている「アンチストークス発光」がもし社会実装され、このランプに応用される状況になれば、非常に効率の良い照明用光源になります。

そうなったとした場合、白熱電球は「構造が簡単」「材料(ガラス・金属)を分離しやすい」等々資源回収しやすい光源であり、サーキュラーエコノミー光源として優等生になります。そのとき、白熱電球をすぐに再製造できるかということ、意外に多くのノウハウがあり、それを伝承していかなければならないと思える技術が幾つか在ります。また、その技術に関する知識は、別の領域で活用可能な技術であり、学生に伝えていくことに価値があると考えています。

1-2. 白熱電球に関して伝えたい技術

白熱灯は、1879年にエジソンにより発明されたのは非常に有名です。日本ではあまり知られていませんが、同じ時期にイギリス人のスワンも同様に白熱電球を発明しています。我々が良く知っている白熱電球の口金部分はエジソンベースと呼ばれ、エジソンが考案し、現在世界中で広く使用されています。しかし、これと違うタイプの口金(スワンベースと呼ばれています)がイギリスやオーストラリアでは使用されています。日本では1890年(明治23年)に、東芝の前身である白熱舎の創業者である藤岡市助氏によって製造されました。この当時使用されていたのはカーボンフィラメントで、色々改良された後も実用上1600℃程度(効率が3.4ルーメン/ワット)までしか上げることが出来なかったようです。18世紀にスウェーデンで発見されたタングステンは融点が3422℃と最も高く、1904年にオーストリアのアレクサンダー・ユストフランツ・ハナマンがほぼ純粋なタングステン線の作成に成功することで、1906年に現在の白熱電球の原型が出来上がった(効率は7.5ルーメン/ワット)。

このタングステンをジュール加熱させ、その温度放射を利用している白熱電球について伝えたい技術が以下の2つです。

(I) ジュメット線

一般照明用の白熱電球は軟質硝子(シリカ硝子とよばれる)を使用したバルブ内部にタングステン線を挿入し、その内部を真空にし、不活性ガス(窒素やアルゴンなど)を封入し、そこに電流を流し、タングステン線を赤熱させ、その温度放射による発光を照明用に利用しています。

ランプの外部から内部に電流を流すには金属線を使う必要があります。そして電球は寿命(タングステンの消耗による断線)まで機密性を維持しなければなりません。(維持できなければタングステン線が酸化してしまいます)。この部分を封止部分と言います。この封止部分は、ガラスと金属を同じ温度(高温)にして溶かし込んで作成しますが、冷える段階で両者の膨張率が異なるためその界面にクラックが発生し、機密性を維持することが困難です。それを可能にしているのがジュメット線と呼ばれるものです。ジュメット線とは鉄ニッケル合金の表面に銅を被覆したものです。実際に封止するとき、その銅表面部分を少しだけ過熱し、薄い亜酸化銅膜を作成します。この亜酸化銅膜がシリカ硝子と金属の膨張率の違いを緩和してくれる役目を果たします。言葉にすると簡単ですが、実際の製造現場(あるいは商品化した後)でトラブルになるのはこの部分が不完全なことが原因である場合が多いです。

この技術を知っていること、知っていても実際に作りこむことが簡単ではないことを学生に伝えることは意義があると思っています。

(II)ハロゲンランプ

(II-1) ハロゲンサイクル

ハロゲンランプはハロゲンサイクルを利用してタングステン線をより高温にし、可視光の放射率を向上させているランプです。タングステン線を単純に高温にするだけでは蒸発量が多くなり、短時間でタングステン線が細くなり断線し寿命となります。これを防ぐために利用されたのがハロゲンサイクルの利用です。ハロゲンサイクルとは、ハロゲン（よく使用されるのが臭素ですが）とタングステンの化学反応を利用するものです。ランプの中に臭素を封入し、フィラメントを加熱するとフィラメントから少し離れた低温領域（1400℃より低い領域）で臭素はフィラメントから蒸発したタングステン原子と結合し臭化タングステンになります。臭化タングstenは250℃以上であれば気体の状態で空間中に存在します。そしてそれが移動しフィラメント近傍（1400℃以上の領域）にくると再び臭素とタングステン原子に分離します。離れたタングstenは再び電極に戻ります。分離した臭素は、移動し低温領域（1400℃より低い領域）で再び臭化タングstenとなります。ランプの管壁を250℃以上に保つ限り、この反応がランプ内部で永遠に繰り返されることとなります。つまり、電極温度を上昇させてもタングsten蒸発によるフィラメントの消耗が抑えられ、結果として長寿命で高効率なランプとなります。このランプは照明用だけでなく、ヒーター用光源としても多く利用されています。

(II-2) ハロゲンランプ用のガラスバルブと封入線の封止

ハロゲンランプは、上述のようにランプバルブの温度を250℃以上にする必要があります。この温度に耐えうる硝子材質は石英しかありません。そしてランプ内部に電流を流すための金属は高温で問題の無いタングstenロッドを用います。そしてこのランプの機密を保持する部分（封止部分）には非常に薄い（20～30μm）のモリブデン箔を使用します。この薄さが膨張率の差を緩和してくれます。

ハロゲンランプは、上述のように温度をある程度高温に維持する必要があり、調光（電流を制御することで光出力を調整する）を行う場合には十分な注意が必要である。光出力を弱めるために入力を低下させるとガラス管温度が低下しハロゲンサイクルが起きなくなりかえって短寿命になります。

このランプに使用される石英硝子は、SiO₂の純度が高いもので、融点が1700℃と非常に高く、膨張率は小さい。このガラスを素手で触ることは安全上好ましくありません。表面に不純物が付着した状態のまま高温で使用すると失透を促進させ寿命が短くなります。特に汗に含まれる塩分のナトリウム成分が石英ガラスと融合し融点が大きく低下するため危険です。

(2)放電による発光

2-1. 歴史（開発の経緯）

気体放電からの発光はルミネッセンスとして知られています。歴史的に最も早いのは、1808年にイギリスの化学者ハンフリー・デービーが空気中で炭素棒の間にアーク放電を発生させた光源（アーク灯）です。これはエジソンが白熱電球を発明するより前です。これは19世紀後半に街路灯として使われたようです。日本では、1878年（明治11年）3月25日（後の電気の日）虎ノ門にあった工学大学校（今の東大工学部）で初めてのアーク灯が点灯しました。しかし、アーク灯は多くの電力を必要とし、当時の電力供給能力では普及しにくかったようで、白熱灯が普及したようです。

2-1.1 水銀放電

水源は常温で液体の金属であり、かつ最も蒸気圧が高い。そのため（危険性を考慮しなければ）取り扱いが容易であり、色々な場所で利用されていた。それを照明用の放電に利用したのが米国の発明家 ピーター・クーパー・ヒューイトであり、彼が1901年に低圧水銀灯が発明しました。これは青白い光（現在の殺菌灯の発光と同じ色）で演色性は悪いが白熱灯より効率が良かったため、工業分野での照明に普及しました。このランプはその後、二つの方向に進化しました。一つは蛍

光ランプで、もう一つは高圧水銀ランプです。

蛍光ランプは、1938年にアメリカのゼネラル・エレクトリック（GE）社のインマン氏らにより発明されました。これには2つの技術があります。一つ目は蛍光体をガラス管壁内面に塗布し、水銀原子から放射される紫外線（254nm）を可視光に変換することで、演色性と効率の向上を成し遂げました。二つ目は熱陰極を利用したことであり、これにより一般家庭に供給されている低電圧での点灯が可能となりました。このことにより、白熱電球の市場を大きく奪うことに成功しました。日本では1940年（昭和14年）に東京芝浦電気（現・東芝）によって製造が開始されています。

高圧水銀ランプは、点灯条件により水銀ランプの発光状態に変化が観測されたことから開発に繋がりました。水銀蒸気圧を徐々に上げていくと、中圧で一旦効率は下がりますが、さらに高圧にすると100kPa程度から放電が管軸に収縮し発光が変化し効率が上昇することがわかりました。そして1930年代になって各社（フィリップス社、オスラム社など）が相次いで開発・商品化しました。この過程で、蒸気圧を上げるための保温構造（二重管構造）や大電流を効率よくプラズマ空間に注入するための熱陰極等の新技術が開発されました。特徴は、非常に小さな空間に高密度プラズマをつくることで、大光束を得ることが出来ることです。このため、公園などの屋外照明に使用されました。その後、さらに数十気圧まで蒸気圧を上昇させると発光スペクトルが連続になり、演色性が大きく改善されることが分かり、超高圧水銀ランプの開発に繋がりました。これらは、小さい容積から高演色で大光束な出力が得るため、プロジェクタ用光源として利用されました。

メタルハライドランプは、高圧水銀ランプに金属蒸気を追加封入し、それから放射される金属発光を加えることで演色性を改善する目的で開発されました。ただ金属の蒸気圧は非常に低く、高圧水銀ランプの管温度程度では十分な蒸気が得られません。そこで、ハロゲンランプで実績のあるハロゲンサイクルの利用が検討され、1960年代半ばに発明されました。Na、Tl、In、Sc、Dy、Snなどの金属がハロゲン化（主としてヨウ素と結合）され使用されました。これは点光源で配光制御が容易なこと、大光束で高演色なこと等からスタジアム等の光源として利用されました。

2-1.2 ナトリウム放電

ナトリウムは水銀の次に蒸気圧が高い金属であるが、それでも水銀の蒸気圧に比べ、3~4桁低い値である。しかし、（人間の視感度のピークになる55nmに近い）D線（D1: 589.6 nmとD2: 589.0 nm）と呼ばれる放射スペクトルを出すことから、管壁温度を上げる工夫をした低圧ナトリウムランプが、オランダのエルス・ホルストによって1932年に発明された。このランプは、効率が良いことから道路照明やトンネル正目に使用されたが、演色性が非常に悪いことから徐々に廃れていった。

水銀ランプで蒸気圧の変化が光出力と演色性の改善に寄与することが分かっており、このナトリウムランプも蒸気圧を上昇させる試みがなされた。蒸気圧を上昇させるには発光管の温度を昇させる必要がある。しかし、水銀とことなりナトリウムは石英と高温で反応し軟質硝子（低融点硝子）になるため、石英バルブは使用できない。多くの検討がなされ、高圧ナトリウムランプは1963年にアルミナを発光管に使用することで開発に成功した。このランプも水銀ランプと同様に、超高圧にすることで高演色な発光管を得ることが出来る。高圧ナトリウムランプは主に道路照明に使用され、超高圧ナトリウムランプはその暖かい色温度と高演色性を活かして店舗照明に使用された。

これらの放電灯について伝えたい技術が以下の2つです。

（I）安定器の必要性

最初に発明されたアーク灯を含め、すべての放電灯には安定器というものがが必要です。理由は気体放電の電気抵抗が（抵抗などの固体と異なり）負特性であり、電圧源で点灯すると電流が無限に流れようとして火災（もしくは電源の焼損）を引き起こすため、限流要素が必要なためです。余談ですが、高電圧工学分野での気体の絶縁破壊電圧測定用の電源にコンデンサーを使用しているの、絶縁破壊させた後の安全性・利便性を考慮してのことだと思えます。（電源を直接つなぐと限流要素が必要になりコスト高になりますし、限流要素が壊れたときには非常に危険です）。

上述した安定器の機能は、放電プラズマを安定的に維持するためのものですが、このほかにランプを始動させるための回路が必要になります。放電を起こす前の気体は絶縁物です。この期待を絶縁破壊し、放電プラズマを形成するには高い電

圧が必要になります。高い電圧で絶縁破壊し作成した放電プラズマは導電状態のためそれを維持する電圧は非常に低いものになります。放電灯の安定器（始動回路を含む）の設計の難しさは、始動時には高い電圧を要求され、始動した後は低い維持電圧である程度の電流（低圧放電灯では0.数～数アンペア、高気圧放電灯では数～十数アンペア）を流し続ける性能を有する回路を低コストで作らなければならない、という所にあります。

放電自体が負性抵抗を有することを学生に伝えることと共に、（上述の安定器設計のノウハウを伝えることは非常に困難ですが）このような難しい回路設計が行われていた（実用化されていた）ということを伝えることは非常に意味があると考えます。

（Ⅱ）ガス圧力（蒸気圧）が放電管特性に及ぼす影響

以下に示す現象は気体プラズマの基本的な性質です。プラズマは核融合やプラズマプロセス等に利用されており、その性質を理解することは非常に重要です。ただ、それらの分野においては、流体としての取り扱いが主流であり、放射に関する取扱いはさほど詳しくされていません。放射に関係する現象、特に光学的な現象については、照明分野で説明するのが最も適していると思います。気体プラズマからの放射が、そのガス圧力によってどう変化するかを知っておくことは学生にとって非常に有益だと思います。

（Ⅱ-1）発光スペクトルのガス圧への依存性

放電管の内部の蒸気圧が上昇すると発光スペクトルが大きく変化します。低気圧プラズマ中では、ほとんどの気体（蒸気）原子は基底状態と呼ばれる最も低い（かつ安定した）エネルギーレベルです。そこに電子が衝突し電離・励起を引き起こします。励起状態の原子で最も数が多いのは、励起レベルの中で最もエネルギーのレベルの低い状態（共鳴レベルと呼ばれる）のもので、その励起状態から基底状態へ戻るときに放射するスペクトルが共鳴線と呼ばれるもので、スペクトル放射の大部分を占めます。共鳴線のスペクトルは、水銀ならば254nm、ナトリウムならば589.6nmと589nmです。蛍光灯は254nmのスペクトルを蛍光体により可視光に変換したもので、低圧ナトリウムランプはこのスペクトルを直接に利用したものです。

蒸気圧が上昇してくると、誘導吸収（自己吸収、自己閉じ込め、とも呼ばれる）現象が起きます。この現象は、励起原子が放出した放射光（共鳴線）を近傍に存在する基底状態の原子が吸収し、励起原子になるという現象です。この結果、共鳴線の出力は急激に低下します。蛍光灯の管壁温度が上昇する（一般には管壁温度が40℃を超える）と出力・効率が低下するのはこの現象によるものです。

さらに蒸気圧が高くなると、誘導吸収により共鳴レベルに存在する励起原子が非常に多くなり、その励起原子に電子が衝突しさらに上位のエネルギーレベルの励起状態の原子が多くなります。その励起原子は可視光しか放射できないため、可視光放射が多くなります。そして、その放射スペクトルは広がりを持ってきます。これは、励起原子の熱運動によるドップラー広がりや原子同士の衝突による広がりがあり、これはプラズマ温度の0.5乗に比例します。この金属蒸気からの直接放射される可視光を利用しているのが、高圧水銀ランプであり、高圧ナトリウムランプです。

さらに温度を上げて蒸気圧を上昇させる（超高圧状態）と、スペクトルはさらに広がりを持つとともに、その中心部が凹んだ形になる。これは自己反転と呼ばれる現象です。この状態は、ほとんど連続スペクトルに近い発光になり、高演色なランプとして利用されています。

（Ⅱ-2）放電管の大きさ・ランプ特性（発光以外）のガス圧への依存性

放電管の内部の蒸気圧はランプの維持電圧に影響を与えます。蛍光灯などの低気圧での放電を使用するものは、ランプの入力のある程度高めるために電極間距離を長くし、プラズマ領域（正確には要項中と呼ばれる領域）を増やすことで光束を増加させています。

放電管の内部の蒸気圧が上昇すると、電子の平均自由行程が減るため衝突ロスが大きくなりランプ電圧が上昇します。

そのため、電極間距離が長いと実用的なランプ電圧でプラズマを維持することが出来なくなります。そのため、電極間距離を短くする必要があります。結果として発光管が短くなり、より点光源に近くなり配光制御しやすい光源になります。またランプが一旦消灯すると、蒸気圧が高い間（つまり発光管温度が冷えるまで）は電子の平均自由行程が短いままなので、始動させることが困難になります。

この様に、ガス圧によりプラズマからの発光がどう変わるか、電気特性にどう影響を及ぼすか等を学生に伝えることは非常に意味があると考えています。