赤外線加熱技術の開発とその経緯[†]

森田 政明*

1. はじめに

最近、遠赤外線を使用していると称する商品が出回り、これにつれて遠赤外線の効果や作用を書いた書籍が何種類も出版され、テレビ、新聞などの情報媒体も遠赤外線を取り上げるようになった。これらを通じて遠赤外線の効用について多くの人の眼や耳にはいり、赤外線加熱技術があらためて見なおされている。

照明学会でも、遠赤外放射調査研究委員会（委員長・松井松長・福山大学教授）が設置され、その作用・効果の吟味や測定法の基準化についての討議が進められている。遠赤外放射の利用分野の多くは、現在すでに使用されている赤外線加熱技術の分野とほぼ同じであり、両者を比較検討し、赤外線加熱を知ることが遠赤外放射の効用を理解することにつながるであろう。

赤外線加熱技術は、戦後導入された技術の一つである。その後約 10 年間研究・開発が行われ、ほぼ技術的に完成したものと考えられていた。ところが先に述べたように遠赤外線を使用した加熱技術が最近 10 年ほどの間に、新たに研究されるようになってきている。筆者は編集委員会のお勧めを受け、赤外線加熱技術の発展の経緯を、筆者の記憶と若干の資料とをもとに記して見たい。

赤外線加熱技術の内容は、加熱、乾燥、焼付けの 3 項目があり、それぞれの目的に応じて最適の条件で使用されている。今回はこれらをあわせて赤外線加熱として取り扱うこととする。

2. 赤外線加熱技術発展の経緯

文献によれば 1938 年（昭和 13 年）11 月にアメリカの自動車会社 Ford 社で車体の表面の塗装焼付けに使用されたのが最初とされている。赤外線加熱技術は、戦後わが国に高周波誘導加熱技術とともに導入され、当初は、両者の特性を活かした使用分野が拡大し、両者のテリトリ争いもあったようである。その後試行状態が続き、それぞれの分野において現在の用途に固定してきたと言える。

わが国に導入された戦後間もなくの頃は、塗料の乾燥方

法は天日乾燥が主で一部には空気加熱炉を使用した乾燥法が用いられていた。その時代に貴重な電力をエネルギー源として使用するようになったことから、赤外線加熱がもつ、優れた効果が驚きをもって迎えられたものと伺える。

一方、使用する塗料の研究も進み、従来の天然素材を使用したものから、合成樹脂を使用した赤外線加熱に適した塗料が開発され、一層赤外線加熱の用途が広がった。

塗装方法も、刷毛塗りから、スプレーガンによる手塗りへ、さらに自動静電塗装の方法へと進歩し、塗料の利用効率の向上と共に、生産工程への導入が可能となり自動化に大きな貢献をした。

3. 文献から見た赤外線加熱技術

赤外線加熱技術の発展の経緯を知る手段として、照明学会雑誌を中心に文献を調査し、どのような問題が取り上げられ、解決されてきたかについて、保有している少数の資料をもとに推測を交えて技術の経過を追ってみた。誤りについて諸兄の叱正をお願いする次第である。

(1) 照明学会編、“最近照明工学大観”（委員長・巽良知氏）昭和 25 年 2 月 10 日に発行された本の輻射応用の項には赤外線加熱のことは一言も触れられていない。この書物は昭和 15 年から昭和 22 年までの技術の総括であり、その当時はこの赤外線加熱技術はまだ無かったものと言えよう。

1947 年に出版された J. D. Hall 氏著“Industrial Application of Infrared”（McGraw-Hill）が輸入され、アメリカにおける赤外線加熱の実情に初めて接することになった。

(2) 照明学会雑誌、34 巻 117 頁、144 頁（昭和 25 年 3、4 月合併号）に、東莞氏が技術総説“赤外線乾燥”（Ⅰ）（Ⅱ）を書いておられる。ここには、赤外線乾燥の偉力として、250 W の赤外線電球を 2000 個使用したトンネル炉を用い、戦車の表面塗装の乾燥が 4 分間で完成することを紹介している。これは従来の空気乾燥では 24 時間に相当する。当時わが国では、天日乾燥が主で、お天気の良い日にのみ塗装作業を行っていたことと比較して説明されている。このなかで、熱の移動の形態、赤外線電球の特性、赤外線加熱のためのバンク、赤外線電球炉、乾燥のために必要な放射照度の算定法、各種材料の赤外線にたいする特性

[†] Report of Development on Infrared Radiant Heating

* 松下電器産業㈱照明研究所

Masaaki Morita

〒573 守口市八雲中町 3 - 15

を解説している。

(3) 電気学会雑誌, 70 巻 177 頁 (昭和 25 年 5 月) に、有馬文次氏が“赤外線による乾燥に就いて”の報告をしている。各種の試料を、赤色と透明の電球及び電熱器で乾燥させ、その乾燥率を比較している。

(4) 電気試験所彙報, 14 巻 327 頁, 419 頁 (昭和 25 年 6, 7 月合併号) に岡田喜義、佐土根範次両氏が“赤外線電球による輻射加熱及び乾燥の基礎的研究 (第 1 報, 第 2 報)”を報告されている。これには赤外線加熱の特長と、赤外線電球の放射配光、放射照度分布など照明工学的特性とその測定法の解説がされている。

(5) 照明学会雑誌, 35 巻 16 頁 (昭和 26 年 1, 2 月合併号) に岡田喜義、佐土根範次両氏が“赤外線電球の二三の特性について”の報告がなされている。ここでは、題名通り国内外の代表的な赤外線電球の特性と、各種の配列にたいする輻射照度分布の求めかたについて論じている。

(6) 照明学会雑誌, 35 巻 137 頁 (昭和 26 年 4, 5 月合併号) に第 1 報, 35 巻 237 頁 (11, 12 月合併号) に第 2 報, 36 巻 68 頁 (昭和 27 年 2 月) に第 3 報として、浅野澄忠氏が“SiC 発熱体による赤外線ユニットについて”の報告がなされている。エレマ、シリコニット、テコランダムなどの各社の製品と、赤外線電球との比較、また単体やユニットにした場合の特性の比較検討を行い、利用についての根拠を与えている。電球以外の赤外線放射体の数少ない報文である。

(7) 照明学会雑誌, 35 巻 229 頁 (昭和 26 年 11, 12 月合併号) に、飯田省三氏が“工業用赤外線装置の規格”を東京電力㈱の電気用品標準規格の制定内容として解説している。

(8) 電気学会雑誌, 71 巻 529 頁 (昭和 26 年 12 月) に東兎氏が技術綜説として“赤外線乾燥について”を解説している。この資料のなかで、赤外線乾燥の沿革、赤外線乾燥のメカニズム、効果について述べている。

(9) 電気評論, 39 巻 156 頁 (昭和 26 年 6, 7 月合併号) に赤外線加熱特集が発行されている。当時、明確になっていた技術内容の集大成である。この特集には 8 編の報文が採録され、いずれも核心をついたもので、その題目を紹介する。この特集 1 冊で赤外線加熱の基礎的な事項の総べてが網羅されていると考えられる。

- ・赤外線加熱に依る温度上昇の理論的計算

加藤信義、竹屋芳夫両氏

- ・近赤外線領域に於ける分光吸収特性

松田長三郎、阪口忠雄、松田長生の各氏

- ・減率乾燥に対する一考察

篠原卯吉、岩田幸二両氏

- ・赤外線加熱に就いて

佐々木正、高木益太郎、萩森勝則各氏

- ・赤外線電球による輻射加熱に関する二三の問題について

岡田喜義、佐土根範次両氏

- ・新型赤外線加熱装置とその工業的応用

加藤信義、高木亨両氏

- ・赤外線の工業上への応用

須賀太郎氏

- ・綿布の染色に赤外線を利用する実施例に就いて

西岡敬二氏

- ・栗の剥皮に赤外線を利用する実例

西岡敬二氏

またこの特集のなかで昭和 26 年 7 月 6 日に赤外線技術連合会 (現、赤外線技術研究会の前身) が発足したことが報道されている。

(10) 照明学会雑誌, 36 巻 287 頁 (昭和 27 年 9 月), 加藤信義、竹屋芳夫両氏が“赤外線加熱における計算図表”を発表している。これは、当時活発に施設されていた赤外線加熱装置の設計を簡易化するために計算図を作成されたもので、所要温度上昇又は恒率乾燥速度にたいする必要放射照度が図上から求めることができる。

(11) 照明学会雑誌, 37 巻 37 頁 (昭和 28 年 2 月) に加藤信義氏が“関西における赤外線装置の普及現状”と云う資料を発表している。当時すでにわが国には、相当数の赤外線装置が稼働しており、さらに増加の傾向であった。それらの新設備の設計に資するために、現状を調査する必要があるものであろう。第一段階として、関西地方を中心に 43 箇所 49 設備の集計がなされている。設備電力の合計は、3,477.9 kW であった。

(12) 電気試験所彙報, 17 巻 81 頁 (昭和 28 年 2 月) に佐土根範次、佐々木敏郎、横田穰、三国哲男の各氏が“赤外線乾燥の煙草工業への応用”を発表している。煙草の乾燥に赤外線を応用した場合の条件を明らかにしたものである。

(13) 照明学会雑誌, 37 巻 213 頁 (昭和 28 年 6 月) および電気試験所彙報, 17 巻 347 頁 (昭和 28 年 5 月) に岡田喜義、佐土根範次両氏が“赤外線電球の全放射束を球形光束計によって測定することの可否について”の報告がなされている。赤外線電球の全放射束の測定はサーモパイルを使用してゴニオ的に測定するため、手数がかかっていた。多数の赤外線電球の測定を行う場合、簡易法として検討されたものである。実際には、色温度、放射配光が近いときには精度よく測定できる可能性を示している。

(14) 昭和 31 年 3 月に加藤信義氏を代表とする赤外線技術連合会施設調査委員会が“赤外線技術—加熱とその応用” (電気書院) を出版された。この内容としてはそれまでの研究の成果がまとめられている。

構成は全 7 章から成り立ち、24 人が執筆されている。

- ・赤外線技術概説

加藤信義氏

- ・赤外線理論および測定

須賀太郎氏

- ・放射測定及び温度測定

岡田喜義、佐土根範次氏

- ・赤外線反射・透過および吸収
藤野清久氏
- ・赤外線電球の工場試験
山本徳太郎氏
- ・赤外線加熱装置の設計
竹屋芳夫氏
- ・赤外線炉設計上の諸問題
萩森勝則氏
- ・赤外線炉の自動制御
高木亨氏
- ・赤外線装置の実用例
萩森勝則氏
- ・車両塗装における赤外線的应用
宝迫 一郎氏
- ・車両塗装用赤外線焼付炉
東芳夫、伊藤努氏
- ・インフロッドとその工業的应用
根岸清一、塩見聰、中口寛一郎各氏
- ・赤外線乾燥器について
寺村智四郎、森島省三氏
- ・インフロッドによる織布の樹脂加工について
明石国助氏
- ・塗料の赤外線加熱処理
野口正名氏
- ・緑茶の赤外線乾燥
立山安雄氏
- ・赤外線加熱装置の応用
西岡敬二氏
- ・静電塗装及赤外線加熱装置について
伴 隆夫氏
- ・赤外線的应用例
東 堯氏
- ・赤外線加熱装置調査一覧
- ・石英ガラス管型赤外線電球とその応用
佐土根範次氏

(15) 照明学会雑誌, 48 巻 110 頁 (昭和 39 年 3 月) に藤井克人、掛札武治、片瀬豊、行田尚義の各氏が“石英管型赤外線電球”について報告されている。ちょうどそのころ実用化が始まったハロゲン電球と同じくこれまでの電球型の赤外線電球と異なり、両端子細管型の小容積で高出力の赤外線電球で、数 100 W/cm² の放射照度が得られるなどの特長があり、多方面への応用が述べられている。石英管型赤外線電球の資料として数少ないものである。

(16) “Infrared and Its Thermal Application” M. La Toison が 1964 年に Philips Technical Library の 1 冊として出版されている。電球型の赤外線電球から石英管型赤外線電球までの全てを含み、赤外線基礎、測定、ランプの特性から応用面まで網羅し、よくまとめられている。

(17) 照明学会編・照明のデータブック関連

- ・昭和 28 年に発行された“照明のデータブック”第 1

版の赤外線加熱の項には、約 9 頁の記載がある。

- ・昭和 43 年に発行された“新編 照明のデータブック”第 2 版では、赤外線加熱は約 4 頁になっている。

・昭和 53 年に発行された“照明ハンドブック”では、放射加熱は約半頁である。

・昭和 62 年に発行の“ライティングハンドブック”では、放射加熱は 10 行余りの 1 表のみで扱われている。

4. 赤外加熱の一般事項

(1) 赤外加熱の特長

①赤外加熱と高周波加熱の特長

・赤外線は、物質の表面または表面のごく近傍で吸収され熱に変換される。高周波加熱は電磁波のエネルギーが物質の内部で吸収され熱に変換される。したがって、赤外加熱は薄板、繊維布、皮革などの表面積が大きく熱容量の小さいものの表面加熱に適している。高周波加熱の場合は、これとは反対に内部からの加熱、乾燥に適し、木材の柱や、塊状の物体の加熱、乾燥に用いられる。

②簡易乾燥と作業時間の短縮

- ・スイッチ一つで容易に運転できる。
- ・点灯直後からほぼ全出力になり、一般加熱炉の場合のように加熱炉の温度上昇の待ち時間の必要がない。
- ・赤外線電球の数や点灯電圧を調節することにより、放射照度の調節が容易である。

③据付場所の節約と可般性

- ・赤外線加熱炉は、比較的軽量に造れ、工場内天井近くの空間を使用出来るので床面の有効利用が出来る。
- ・赤外線電球を複数個組み合わせたユニット、ユニットを複数組み合わせたバンク、所定の加熱能力をもたせた加熱炉といくつかの要素部分で構成出来るので必要に応じて組み合わせて使用出来る。

④安全性と衛生性

- ・直接高温の空気や燃焼材が加熱物に当たることがないので、火災の心配がない。
- ・燃焼ガス、煙などの排出がなく環境に対する影響が少ない。

⑤設備費と維持費の軽減

- ・赤外線加熱炉は比較的廉価に造れる。
- ・使用効率をあげるように操作出来る。

(2) 赤外加熱の放射源

①赤外加熱の放射源としては、一般に赤外線電球が用いられているが、振動や衝撃のある場所ではニクロムヒータが使用されている例もある。

②赤外線電球の特性

- ・入力：125 W, 250 W, 375 W, 500 W
- ・フィラメント温度：2300 K～2500 K
- ・放射効率：73 %～85 %
- ・放射特性の測定法：赤外線電球の特性と測定法については JIS C-7514 に規定されている。

(3) 物質の赤外線に対する特性

①物質（塗料）の色と温度上昇の関係

- ・フィラメントの色温度の高いものは、同一放射照度でも塗料の色によって温度上昇が異なる。

②水の赤外線に対する透過特性

- ・1 mmの厚みの水は2.4 μm以上の波長の赤外線は透過しない。

③金属（反射材料）の赤外線分光反射特性

- ・赤外線炉の効率向上の目的に使用する反射板などの基礎データは整備されている。

④物質（塗料）の種類と硬化温度

- ・合成塗料、天然素材のいずれも最適硬化温度は、明らかになっている。

⑤赤外線の放射照度と温度上昇速度

⑥水分の蒸発速度と物質の温度

(4) 赤外加熱の放射照度の設計

$$\text{放射照度} = \frac{\text{電球の大きさ (W)} \times \text{電球と反射板の効率}}{\text{電球1個当たりの面積 (cm}^2\text{)}} \quad (\text{W/cm}^2)$$

ランプの配列を、方形、千鳥形に配列したときの設計放射照度を求める方法を図1に示す。

図1 赤外線電球の間隔と平均放射照度
(照明データブック、第1版より抜粋)

図2 赤外線加熱による温度上昇曲線

図3 赤外線加熱における鉄板の温度上昇の算出図の例
(照明データブック、第1版より抜粋)

(5) 赤外加熱炉の設計

赤外加熱炉は、開放型、片面バンク、両面バンク、トンネル炉に分けられる。

①加熱の場合

$$Q = \frac{MC\theta}{860\eta} \quad (\text{kW})$$

Q = 炉に必要な電力 (kW)

M = 被処理物の重量 (kg/h)

C = 被処理物の比熱 (kcal/kg・°C)

η = 加熱効率 (経験値: 0.5~0.6)

θ = 温度上昇 (°C)

加熱効率 = [電球の効率] × [バンク効率] × [被加熱物の吸収率] × [放射利用率]

放射照度 (W/cm²) q, 処理時間 (h) t, 温度上昇 (°C) θ とすれば、温度上昇は次の式で示される。

$$\theta = 0.86 \frac{q \cdot \epsilon \cdot A}{k \cdot a} \left[1 - e^{-\frac{k \cdot a}{CM} t} \right] \quad (^\circ\text{C})$$

この関係を図2に示す。

ε = 放射率

A = 受熱面積 (cm²)

k = 放射係数 (kcal/h・cm²・°C)

a = 放熱面積 (cm²)

M = 加熱物の重量 (kg)

t 時間に θ の温度上昇を得るために必要な放射照度 q は、

$$q = \frac{\theta \cdot k \cdot a}{0.86 \cdot \epsilon \cdot A} \left[1 - e^{-\frac{k \cdot a}{CM} \theta} \right]^{-1} \quad (\text{W/cm}^2)$$

k は加熱炉内の風速によって異なる。風速を Va とすると $k = (5 + 3.6 Va) \times 10 (\text{kcal/h} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

この関係の一例を図3に示す。

図 4 放射源の温度と塗膜中の温度分布
(赤外線技術 加熱とその応用より抜粋)

図 5 塗膜の色と温度上昇の例
(参考文献(1)より抜粋)

②乾燥の場合

初めの含水率 w (%) の物体を所要温度まで所定の時間で上昇させるに必要な電力 Q_1 と水分を蒸発させるに要する電力 Q_2 の和になる。算出式は省略する。

③焼付け

焼付けは実験的に放射照度を決めるのが好ましい。各種の塗料について最適焼き付け温度が明らかになっている。表

表 1 各種塗料の焼付温度

品 名	焼付温度(℃)	乾燥時間(min)
メラミンフタル酸樹脂塗料	120~130	10~20
フタル酸樹脂塗料	140	20~25
フェノール樹脂	110以下	—
ハイソリッドラッカー	70	20
焼付黒ワニス	180	15
調合ペイント	140	30~
油性プライマー	150	15
油性バテ (膜厚0.2mm)	130	20
油性サーフェーサー	130	20

1 にその例を示す。経験上、 $0.2\text{W}/\text{cm}^2 \sim 0.3\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度が必要である。

加熱放射源の温度と塗料の内部の温度分布との関係を図 4 に示す。温度の違いは放射の波長分布が異なる。原則的に、長波長の塗料の表面近傍で吸収され、それにつれて温度上昇も表面近傍が高いことを示す。

鉄板に塗布した各種の色の塗膜と温度上昇の関係の一例を図 5 に示す。

5. お わ り に

約 40 年前にわが国に導入された赤外線加熱の技術は、その後約 10 年の間活発に開発され、ほぼ完成したと考えられる。その内容は、さきに述べたようにすべて物理的基礎のうえに成り立っている。これが今日の赤外線加熱につながっている。

近年開発が進んでいる遠赤外放射による加熱もこの延長上にあるべきで、物理的根拠に基礎をおかず、化学的な現象や、温度現象のうち加温時間や温度上昇速度によって生じる現象とは分けて考えることが重要であろう。

参 考 文 献

- (1) 佐土根範次：塗料の赤外線乾燥，色材協会関西支部・大阪府金属塗装技術研究会，講演資料（昭和 34 年 8 月 21 日）
- (2) 日本機械学会編：伝熱工学資料，227 頁（昭和 47 年 11 月）
(受付 年 月 日)