

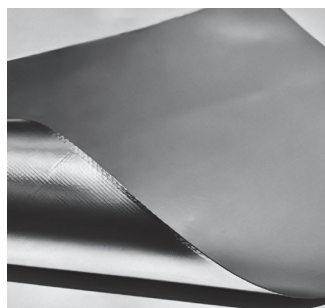
遮断熱施工による 炉の放熱ロス大幅削減実践法

安部貴巳弘* 池田 滋**

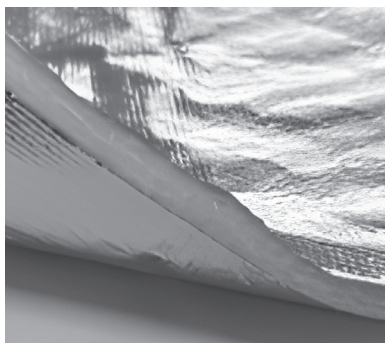
カーボンニュートラルが叫ばれ久しいが、実効は十分上がっておらず、夏場の気温上昇が顕著な中、国からの対策要請も加わり、炉周辺作業環境の改善が急務となっている。加えてデータセンター増設に伴う電力需給ひっ迫等のエネルギー安定供給懸念と、GX推進と相まって、省エネによるコストダウン・CO₂削減ニーズはますます高まりつつある。

これらの背景により、当社では塗装乾燥炉をはじめとする各種炉の対策相談を多数頂戴しており、対策の結果、投入エネルギーに対する省エネ率50%（電気炉例）～8%（ガス炉部分施工例）という結果も出ている一方、「遮熱は見聞きしたが、どうアプローチして良いかわからない」という声がまだ多い。

そこで本稿では、そのような方のために、遮熱シート（写真－1参照）や、遮断熱マット（遮熱シートの間に断熱材を挟んだ高機能品：写真－2参照）の活用による、炉壁からの放熱ロス大幅削減について、現場での実践方法を中心に述べる。



写真－1 遮熱シート例



写真－2 遮断熱マット例

1. 期待効果

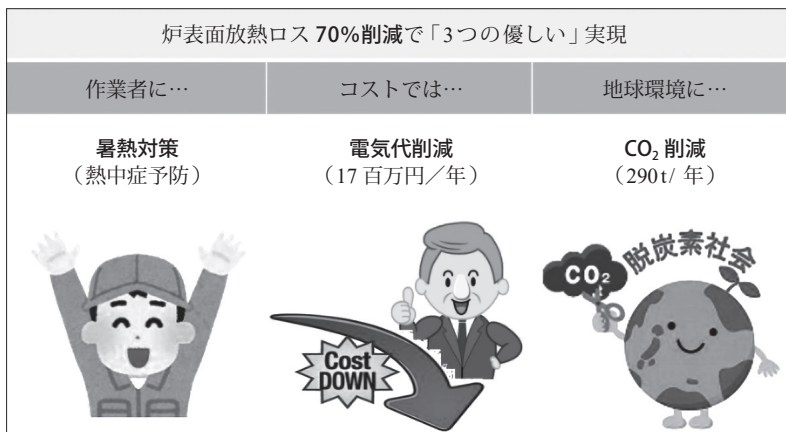
(1) 主な狙いと定量的イメージ

遮（断）熱施工の狙いを第1図に示す。また定量的効果例を第2図に示す（計算の詳細は2.項参照）。

* あべ きみひろ (株)エステック 21 代表取締役
** いけだ しげる 同社 中部サテライト



第1図
炉遮断熱の狙い



第2図
遮断熱マットの効果
試算例

今、炉の遮熱問い合わせで最も多い目的は作業者の暑さ対策であるが、前述のとおりコストダウン効果も大きく、利益性が高い合理化対策としても魅力ある案件が多い点にも注目いただきたい。

(2) 広い視点での期待効果

さらに期待効果の詳細を述べる。

① 生産への影響

1) 省エネ

定常運転中の熱ロス削減に加え、起動停止頻度の多い炉の場合は起動中の熱ロス削減効果もある。

2) 上記1)に伴う CO₂ 削減

3) 生産性向上

フル稼働時の能力アップが図れる(特に冬)。また起動停止頻度の多い炉では起動時間短縮による増産も期待できる。

4) 品質安定化

室温変化の影響を受けにくくなることで品質安定向上につながる場合もある。

② 周辺への影響

以下を総合的に捉えて対策方針を設定することが望ましい。

1) 直近の作業環境改善

周辺作業者の体感温度を大幅に低下でき、熱中症予防に貢献できる。

2) 部屋全体への効果

部屋全体の環境も改善され、エアコン設置の場合はその能力不足対策や省エネにもつながる。

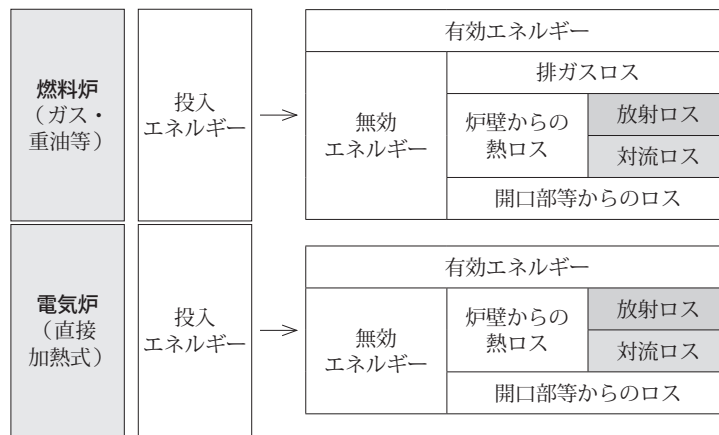
3) 周辺設備の保護

炉近傍の制御盤内の電子機器の故障予防になる。また油冷式スクルー圧縮機のオーバーヒート防止や、温度変化に伴う熱伸びが品質に影響する精密加工工作機械の精度確保にも寄与できる。

2. 炉遮(断)熱の基礎理論

(1) 炉の熱バランス

一般に炉の熱バランスは第3図となる。今



第3図 炉の一般的な熱バランス

回の狙いは炉壁からの熱ロス削減であり、遮熱シートは放射ロスをほぼ全てカット、遮断熱マットはこれに加えて対流ロスも削減できる。熱源が電力でも熱風式で循環ガスの一部を廃棄している場合は燃料炉と同様になる。

(2) 炉壁からの放熱ロス計算

炉壁からの2種の放熱ロス(第4図参照)は以下の算出式で求まる¹⁾。

対流による損失熱量 Q [W]

(周囲の空気の流れによって生じる熱ロス)

$$Q = A \cdot C \cdot (T_1 - T_2) \quad (1) \text{式}$$

放射による損失熱量 Q [W]

(放射熱が周囲の固体に生じる熱ロス)

$$Q = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2) \text{式}$$

ここで各記号は、

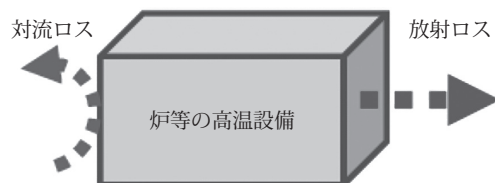
A 表面積 [m^2]

C 対流熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

ε 放射率 [-]

σ ステファン・ボルツマン定数

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$



第4図 対流ロスと放射ロスのイメージ

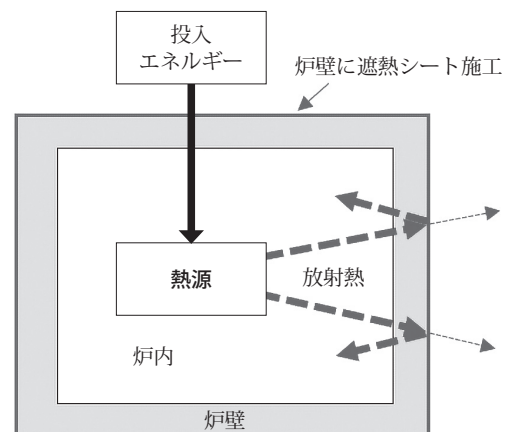
T_1 表面(絶対)温度 [K]

T_2 周囲(絶対)温度 [K]

これらの式から改善前後それぞれの放熱ロスを算出でき、その差から省エネ効果を算出できる。上記の式は機械工学の基礎式であるので疑う余地はないが、入力データが実情と合わないと誤差が大きくなる可能性がある。これについては3.項で述べる。

(3) 遮熱シートの効果

第5図は遮熱効果を図示したものである。遮熱シートにより炉外への放射熱が減少した分、投入エネルギーを減らすことができる。表面 70°C で算出すると、対流・放射両ロス



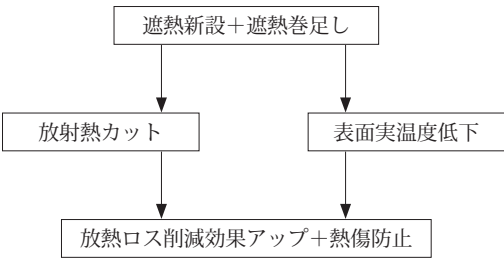
第5図 遮熱効果のモデル図

はほぼ同じ値になる。つまり炉壁放熱ロスの約半分を削減できることがわかる。

(4) 遮断熱マットの効果

遮熱シートは放熱ロスには大きな効果を発揮するが、炉壁に直接施工した場合には表面実温度を下げる効果がなく、対流ロスを削減する効果も熱傷防止効果もない。一方、断熱材には表面実温度を下げる効果があるが、一般に追加工事は面倒である。ということで遮熱と同時に断熱強化を手軽に可能にしたのが遮断熱マットである（第6図参照）。

写真－3はグラスファイバー厚み8mmを遮熱シートで包み込んだ遮断熱マットの施工写真である。遮熱シートに包まれているので施工が容易だが、断熱性能維持のため、断面切り口にはアルミテープ養生が必要である。また異物混入（＝コンタミネーション）を嫌う環境では、それに合った断熱材の選定が望ましい。



第6図 遮断熱マットの効果

(5) 省エネ試算例

2.－(2)項の式に以下の前提を入力した結果を第1表に示す。前述の第2図はこれをイラスト化したものである。

【前 提】

- ・施工対象表面積：100m²
- ・稼働時間：8千時間／年
- ・電気単価：25円 /kWh
- ・炉壁表面平均温度：100℃
- ・周囲平均温度：20℃
- ・放射率：施工前 0.95 → 施工後 0.03
- ・対流熱伝達率：7.0W / (m²・K)（屋内想定）
- ・CO₂ 排出係数：0.429t-CO₂/MWh（一般送配電事業者代替値）²⁾

第1表より、遮断熱マットの効果が大きいことがわかる（ただし施工の密着度で差が出る）。



写真－3 遮断熱マット施工例

第1表 省エネ試算結果

	施工前	施工後	
		遮断熱マット（断熱厚8mm品）	遮熱シート
放射ロス（kW）＊	120.6	36.1	58.1
削減量（kW）	—	84.5	62.5
削減率	—	70%	52%
省エネ量（MWh／年）	—	676	500
省エネ額（百万円／年）	—	16.9	12.5
CO ₂ 削減量（t／年）	—	290	214

＊施工対象面の放熱ロス

(6) 体感温度

暑さ対策というと、気温・湿度・風が注目されがちであるが、放射熱の影響が大きいことを再認識する必要がある。湿度・風を除外すると、体感温度は以下の簡易式³⁾で表現できる。

$$\text{体感温度} = (\text{部屋温度} + \text{周囲表面温度}) \div 2$$

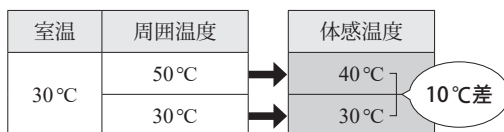
建物を例にとると、第7図に示すように、室温 30℃ 時に周囲平均温度が 20℃ 低下すると、気温が変わらなくとも体感温度は約 10℃ 低下する。

これに対して、たとえば遮熱施工した屋根下は、第8図に示す例のように 20-30℃ 低下しており、大きな体感温度の低下が高く評価されている。

3. 対策の進め方

(1) 目的の明確化

1.-(2)項を参考に着眼点を広く捉え、達成レベルを設定する。本検討に限らず課題解決には、まず課題(ありたい姿と現状のギャップ)を明確にし、課題を"見える化"する必要がある。



第7図 体感温度低下イメージ

(2) 構造確認

外観や図面を確認し、目的と照らし合わせて施工範囲を仮設定する。炉本体だけでなく、付属高温配管・ダクト等も検討対象とする。

① 炉壁材質と放射率

非塗装金属面、特に SUS では低放射率により、サーモグラフィ表示よりも実温度が高い点に注意を要する。代表的素材の放射率を第2表⁴⁾に示す。

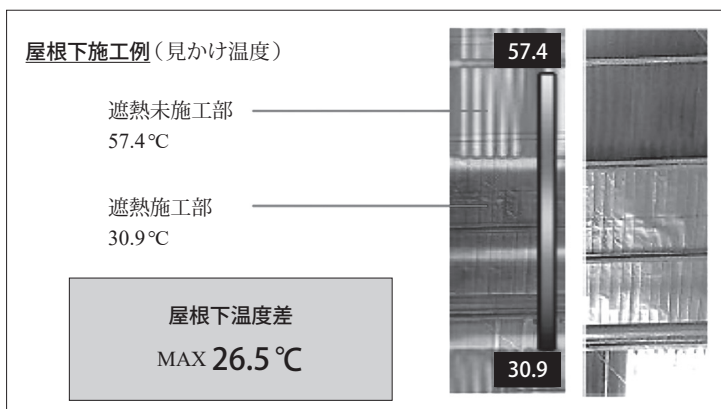
他の物質については WEB サイトを検索いただくが、温度、金属の場合は酸化や研磨の有無等で大きく異なるので注意いただきたい。

② 汚れ・錆の確認

ホコリや油煙等による汚れありの場合、あるいはガス漏れや断熱不足により高温腐食を起こしている場合はテープの付着性が悪くなるので、事前の錆落としや清掃が必要であ

第2表 放射率の例

表 面		温度 ℃	放射率 ε
塗装面	白色	20-1,600	0.95-0.35
	暗色	20-1,600	0.95-0.75
アルミニウム	研磨面	220-580	0.04-0.06
	酸化面	200-600	0.11-0.19
	市販板	100	0.09
鉄	研磨面	420-1,030	0.14-0.38
	赤さび面	20	0.69
	暗灰色酸化面	100	0.31



第8図 屋根下 温度低下イメージ

る。また施工後に汚れ付着が考えられる場合は、性能低下対策のため施工方法に工夫を要する。

③ ガス漏れの確認

点検口等の隙間からの燃焼ガスの吹き抜けは、劣化したシール材の交換等で極力修理する。漏れによる熱ロス削減はもちろん、漏れで高温に晒(さら)されることによる遮熱素材の熱劣化を防止するためである。

(3) 稼働状況調査

稼働時間は効果額計算に大きく影響する。また、頻繁に起動停止する場合は立ち上げ中の熱ロスも無視できないため、温度パターンも調べたい。

(4) 熱源単価調査

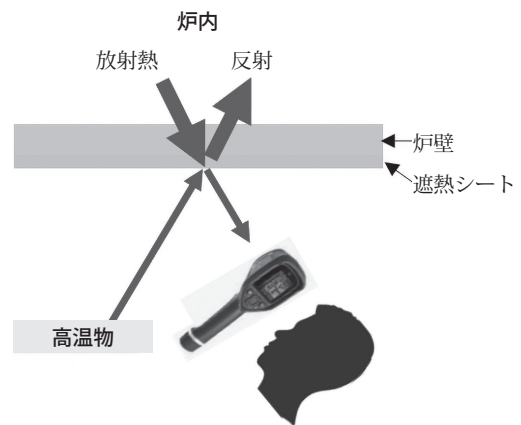
省エネ計算に必要な現状の熱源単価と今後の見通しを調査する。また発生 CO₂ 削減のコスト評価も必要である。

(5) 表面温度分布測定

表面温度分布と周囲温度(気温)を調べ、施工範囲を検討する。さらに時間的空間的に最大温度推定値を求め素材選定(耐熱性)に資する。省エネ計算には施工対象面の時間的空間的平均温度を使用する。温度計は放射式と接触式、両方での測定が良い。放射式はホットスポットを見落とさないため全体を見られるサーモグラフィが望ましい。これは原理的に放射熱を測定し計算で温度換算し表示している。その計算に必要な放射率は一般に 0.95 に初期設定されているが、放射率は第 2 表に示すように物質で異なるため補正をしなければならない。このような場合は接触式で計測すると実表面温度がわかる。特に塗装のない金属面や白色やシルバー色塗料の場合は接触式での測定が必須である。さらに金属面等では背面の熱の映り込みによる誤差にも注意が必要である。特に試験的に遮熱施工した面の測定では背面に高温設備があると高い値となる(第 9 図参照)。

(6) 施工範囲検討

上記をもとに施工範囲を検討する。一般に



第 9 図 サーモグラフィ測定時の注意

以下の 3 点は施工対象外とする。

- ① 安全面や作業面から施工が難しい箇所
- ② 温度が低く、あまり効果がない箇所
- ③ 施工してはいけない箇所

特に③が重要で以下の視点でチェックする。

1) 炉内温度制御

一般に炉内温度は自動調整されるため、遮熱すると投入エネルギーを絞る炉内温度は一定に保たれ、通常は品質への影響はない。しかし昇温スピードや温度分布が品質上重要な製品では試験が必要である。

2) 熱に弱い設備

電子機器やモーター等、温度上昇で熱劣化や誤作動が考えられる付属設備に熱がこもるような遮熱をすると故障につながる可能性がある。換気通風口を塞ぐことも厳禁。

3) 可動部

軸受・チェーン等の潤滑箇所に熱がこもると温度上昇で油やグリースの粘度低下で潤滑性能に悪影響を与える可能性がある。

4) 鉄皮設計温度

遮熱や特に断熱強化で表面温度が上昇する可能性があり、運転条件が設計温度に近い場合は注意を要する。たとえば鉄皮が薄い炉の場合に断熱強化で鉄皮が歪んだと過去に聴取したことがある。またバーナータイルの熱劣化が進んでいる場合は、それを加速シメンテ

費アップにつながる可能性もある。さらに熱劣化で鉄皮の溶接ワレにつながる可能性も考えられる。

(7) 素材選定

① 遮断熱マットと遮熱シートの使い分け

以下の着眼点で選定する必要がある。

- ・より大きな効果を得たい場合や直接貼付時に熱傷防止もしたい場合は遮断熱マットが良い。しかし効果が大きい分、鉄皮温度上昇が問題にならないかのチェックが必要である。
- ・以下の個別機能が選定に影響する可能性がある。

② 遮熱シート

1) 放射削減率

基本機能である放射率はアルミ素材に起因するものであり、新品時の差は基本的に大きくない。

2) 耐久性(耐熱性・防蝕・機械的強度)

せっかくの高機能も持続しなければ意味がない。耐久性に影響する主な因子は、耐熱性、耐蝕性、機械的強度である。

【耐熱性】主材であるアルミは問題にならないが、構成する他素材で最大使用温度が決まる。設置後に最大何℃になるかを確認し、適した素材選定が必要である。

【耐蝕性】アルミは腐食に弱いのが欠点。まず両性金属のため、酸・アルカリで腐食、さらに異種金属との接触でも腐食するため、防蝕加工品が望ましい。

【機械的強度】たとえば風雨環境下での長年の使用等で素材の強度低下が課題となる可能性がある。

3) 不燃性

消防法対応エリア等では不燃認定品や同等品へのニーズが高い。

4) 施工性

柔らかく曲面にきれいに貼れるかどうかや、施工効率化につながるカッティングガイド線の有無等の違いがある

5) その他意匠性(見た目)等

③ 遮断熱マット

断熱材の断熱性能の違いはもちろん、異物混入を嫌う製品を扱う現場では、劣化に伴うコンタミリスクにも目を向ける必要がある。

(8) 施工方法検討

状況に応じた施工方法を検討し、規模や難易度により自社社員、身近な施工業者、遮熱専門業者のいずれかを選定する。

施工方法は、まず常設か、脱着可能とするかを判断する必要がある、以下のような場合は脱着式のほうが良いと言える。

- ・高温炉では、内部耐火材や断熱材の劣化による炉壁温度上昇の懸念により、定期的なサーモグラフィで炉壁温をチェックしている場合がある。そのような場合、常設するとサーモグラフィでの测温監視ができなくなる。
- ・夏は遮熱したいが冬は炉からの放熱が暖房代わりになっているので冬は遮熱を外したいとのニーズもある。
- ・点検口等、メンテナンスのために脱着できた方が良いケースもある。

以下に代表的な施工方法を述べる。

① 両面テープ

常設時は、両面テープや接着剤により貼り付けるのが一般的である。ホコリや油分があると接着しにくいので事前清掃が必須である。つなぎ部はアルミテープで仕上げることも多い。

② 耐熱マジックテープ(=面ファスナー)

脱着式の手法の1つで比較的簡便で素材を選ばないが耐熱性を確認する必要がある(写真-4参照)。

③ 耐熱強力磁石施工

炉壁が磁性素材の場合の脱着式に適す。遮熱シートはもちろん、厚さ8mmの遮断熱マットでも工夫次第で施工可能である(写真-5参照)。ただし以下の注意が必要である。

- ・強力磁力で周辺に悪影響がないこと。
- ・種類によっては高温で磁力低下がある。

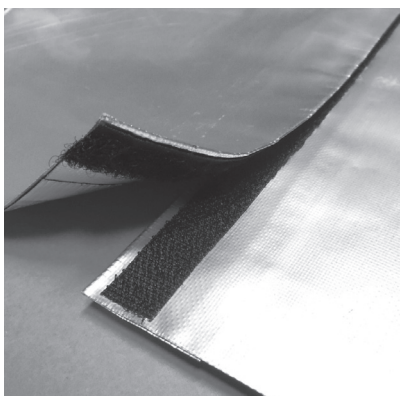


写真-4 マジックテープ施工

- ・耐熱磁石は欠けやすいので取り扱いに注意が必要である。
- ・外れてコンタミネーションのリスクがある場合はテーピング等が必要である。

④ ハトメ加工

端部にハトメ加工しロープや結束バンドで止める方法である。この応用で、カーテン状に吊るしたり、可動式衝立で遮熱することもできる(写真-6 参照)。

⑤ その他

最も簡便な方法として、写真-7 のようにステープラ施工等の方法もある。

以上の例を参考に、運転操作・保守操作・



写真-5 遮断熱マットの磁石施工例

異物混入リスク・美観等を総合的に考え、施工方法を検討いただきたい。

(9) 採算性

これまでの情報をまとめ、省エネ試算する。その一方で、素材・施工の費用も推算し、投資対効果を求め、その結果をフィードバックして素材選定・施工範囲・方法の見直しが必要ないかチェックする。常用の炉であれば、大半の炉で十分な採算性が得られるはずである。



写真-6 ハトメ加工例

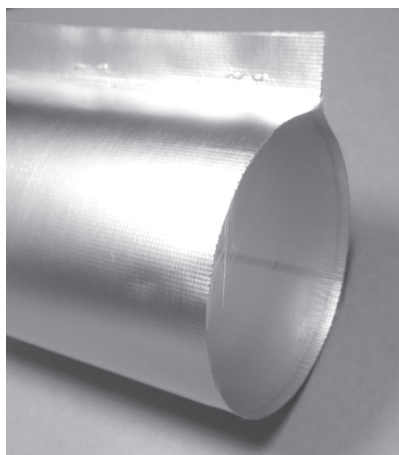


写真-7 ステープラ止めの例

4. 新設炉向け

ここまで既設炉を対象に述べてきたが、今後は新設炉の設計見直しも進むはずである。すでに採用いただいている炉メーカーも複数あり、遮熱を使わない従来法から遮断熱マット方式へ変更した炉メーカーは、約30%の省エネになったとしている。

5. 炉以外への適用

当社には、工場内の高温設備はもちろん、盤や監視カメラ等の電子機器の保護、建屋の屋根・壁・窓ガラス等対策等も含め、日々多くのお問い合わせを頂戴している。本稿では炉を対象に遮断熱実践法を述べてきたが、炉以外でも本質は同じであり参考にしていただけると思う。本稿が読者の皆様のさま

ざまな対策検討の一助となれば幸いである。

《引用文献》

- 1) 吉田 駿『伝熱学の基礎』，オーム社，2019 年，p.5，p.139
- 2) 環境省 HP「電気事業者別排出係数 令和 6 年 報告用換算係数 一般送配電事業者代替値」，2023 年
- 3) 堀 清孝「断熱の基礎知識」，イブロス Tech Note 編集部（Tech Note は 2023 年 6 月 15 日に HP 閉鎖。本内容に関してさらに詳しくは以下参照）
http://fnorio.com/0119Stefan_Boltzmann_law_of_radiation0/Stefan_Boltzmann_law_of_radiation0.html
- 4) 吉田 駿『伝熱学の基礎』，オーム社，2019 年，p.128