「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

【対策効果算定シート】

対策の種類	対策名称	シート番号	対策メニュー名
部分更新・機能付加	工業炉の断熱・保温の強化	C25022	工業炉の断熱・保温の強化
工程名	加熱	対象設備	加熱炉
システム／設備区分名	工業炉		
対策内容	加熱炉や熱処理炉等の工業炉では、炉表面から対流と放射により周囲への熱放散がある。工業炉外壁の保温が不十分な箇所を断熱材で補強して熱放散を防止することで燃料使用量を低減させ、CO_2 排出量を削減する。		

1．計画時の効果算定

効果算定のポイント		① 対策実施前の燃料使用量は使用実績記録や購入量記録による。 ② 実施計画の CO_2 削減量は断熱補強によって低減した放散熱量に燃料の CO_2 排出係数を乗じた値とする。 ③ 本シートは、工業炉の炉壁の断熱補強により放散熱を現状の約 9[%]に削減する対策の効果算定手順例を示す。
対策実施前	活動種別	A 重油
	年間活動量	対策実施前の A 重油使用量 F1 は購入記録による。A 重油を使用している設備が複数ある場合には、利用実態に合わせて按分する。 F1＝12.8[kL/年]
	エネルギー使用量	対策実施前のエネルギー使用量 PE1 は、対策実施前の A 重油使用量 F1 に A 重油の単位発熱量 H を乗じて下記になる。 PE1＝F1×H ＝12.8[kL/年]×38.9[GJ/kL]＝498[GJ/年]
	CO_2 排出量	対策実施前の CO_2 排出量 C1 は、対策実施前のエネルギー使用量 PE1 に A 重油の CO_2 排出係数αを乗じて下記になる。 C1＝PE1×α ＝498[GJ/年]×0.0708[t-CO_2/GJ]＝35.3[t-CO_2/年]

表 1　対策実施前の A 重油使用量と加熱炉の稼働状況

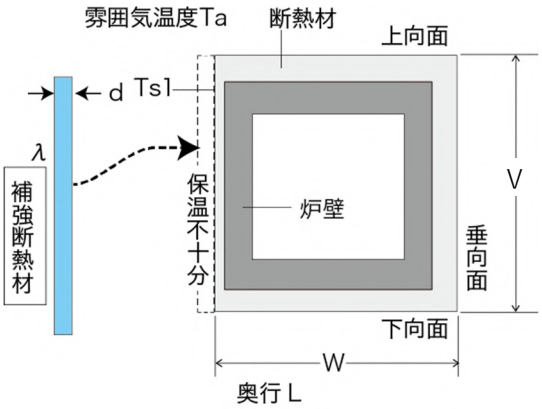
記号	項目	数値	根拠
F1	対策実施前の A 重油使用量	12.8[kL/年]	購入記録
T0	炉内温度	150[℃]	設定値
T1	対策実施前の炉壁表面温度	100[℃]	計測値
Ta	雰囲気温度	30[℃]	計測値
t	稼働時間	4,800[h/年]	24[h/日]×200[日/年]
ε1	炉壁の放射率（耐火れんが）	0.75	物性値（表 4）
Q1	対策実施前の放散熱	2.97[kW]	補足説明①
H	A 重油の単位発熱量	38.9[GJ/kL]	SHIFT 事業モニタリング報告ガイドライン
α	A 重油の CO_2 排出係数	0.0708[t-CO_2/GJ]	同上

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

<table>
<tr><td rowspan="3">実施計画</td><td>活動種別</td><td>A 重油</td></tr>
<tr><td>年間
活動量</td><td>実施計画の A 重油使用量を表 1、表 2 に示す数値例を用いて算定する。
F2＝F1－ΔF
＝F1－(Q1－Q2)×t×he÷（HL×ηf÷100）　(1)
ここで、F2 ：実施計画の A 重油使用量 [kL/年]
ΔF ：A 重油削減量 [kL/年]
Q1 ：対策実施前の放散熱 [kW]（補足説明①）
Q2 ：実施計画の放散熱 [kW]（補足説明①）
t ：稼働時間 [h/年]
he ：熱量換算係数 [kJ/kWh]
HL ：A 重油の低位発熱量 [GJ/kL]
ηf ：工業炉の熱効率 [%]
表 1 および表 2 の数値を式(1)に代入して、実施計画の A 重油削減量を求める。
F2＝F1－{(2.97[kW]－0.259[kW])×4,800[h/年]×0.0036[GJ/kWh]}
÷(36.7[GJ/kL]×0.85)
＝F1－1.50[kL/年]＝12.8[kL/年]－1.50[kL/年]
＝11.3[kL/年]

表 2　実施計画の A 重油使用量の算定に使用する数値とその根拠
<table>
<tr><th>記号</th><th>項目</th><th>数値</th><th>根拠</th></tr>
<tr><td>S</td><td>断熱補強部の面積</td><td>3.0[m^2]</td><td>V×L＝1.5[m]×2.0[m]</td></tr>
<tr><td>dg</td><td>補強する断熱材の厚さ</td><td>0.05[m]</td><td>設定値</td></tr>
<tr><td>ε2</td><td>断熱材の放射率
（アルミニウム粗面）</td><td>0.07</td><td>物性値（表 4）</td></tr>
<tr><td>λg</td><td>断熱材の熱伝導率
（グラスウール（48K））</td><td>0.043[W/(m･K)]</td><td>物性値（表 3）</td></tr>
<tr><td>Q2</td><td>実施計画の放散熱</td><td>0.27[kW]</td><td>補足説明①</td></tr>
<tr><td>he</td><td>熱量換算係数</td><td>0.0036[GJ/kWh]</td><td></td></tr>
<tr><td>HL</td><td>A 重油の低位発熱量</td><td>36.7[GJ/kL]</td><td></td></tr>
<tr><td>ηf</td><td>工業炉の熱効率</td><td>85[%]</td><td>メーカー仕様書</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>エネルギー
使用量</td><td>実施計画のエネルギー使用量 PE2 は、実施計画の A 重油使用量 F2 に A 重油の単位発熱量 H を乗じて下記になる。
PE2＝F2×H
＝11.3[kL/年]×38.9[GJ/kL]＝440[GJ/年]</td></tr>
<tr><td>CO_2
排出量</td><td>実施計画の CO_2 排出量 C2 は、実施計画のエネルギー使用量 PE2 に A 重油の CO_2 排出係数αを乗じて下記になる。
C2＝PE2×α
＝440[GJ/年]×0.0708[t-CO_2/GJ]＝31.2[t-CO_2/年]</td></tr>
</table>

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

実施計画の エネルギー削減量	対策実施前と実施計画のエネルギー使用量の差異より下記になる。 PE1－PE2＝498[GJ/年]－440[GJ/年]＝58[GJ/年]
実施計画の CO_2 削減量	対策実施前と実施計画の CO_2 排出量の差異より下記になる。 C1－C2＝35.3[t-CO_2/年]－31.2[t-CO_2/年]＝4.1[t-CO_2/年]
補足説明	① 対策実施前の放散熱 Q1 炉壁は断熱材で覆われているが、垂向面の一つは断熱材の被覆がなく保温が不十分だったため、正常部と同じ断熱材（グラスウール（48K））で断熱補強するとする。  図１　加熱炉の設置状況 1）対流伝熱 自然対流の場合、対流伝熱による熱伝達係数αc は下記になる。 $\alpha c = k \times \Delta T^{0.25}$ [W/(m^2·K)] （k：垂向面 2.6、水平上向き面 3.3、水平下向き面 1.7）、ΔT：温度差[K]） ☆出典：『2025 省エネルギー手帳』（省エネルギーセンター）p. 86「3.1 伝熱計算式 (2)対流伝熱」 垂向面、表面温度：100[℃]、雰囲気温度：30[℃]であるため断熱補強前は $\alpha c = 2.6 \times (100-30)^{0.25} = 7.52$[W/(m^2·K)] 2）放射伝熱 放射伝熱による熱伝達係数αr は下記になる。 $\alpha r = 5.67 \times \varepsilon 1 \times [\{(T1+273)/100\}^4 - \{(Ta+273)/100\}^4] \div (T1-Ta)$ [W/(m^2·K)] （ε1：炉壁の放射率、T1：表面温度[℃]、Ta：雰囲気温度[℃]） ☆出典：『2025 省エネルギー手帳』（省エネルギーセンター）p. 86「3.1 伝熱計算式 (3)放射伝熱」 放射率：0.75、表面温度：100[℃]、雰囲気温度：30[℃]であるため断熱補強前は $\alpha r = 5.67 \times 0.75 \times [\{(100+273)/100\}^4 - \{(30+273)/100\}^4] \div (100-30)$ ＝6.64[W/(m^2·K)] 3）放散熱量 1)、2)から断熱補強前の放散熱 Q1 は下記になる。 $Q1 = (\alpha c + \alpha r) \times (T1-Ta) \times S$ ＝(7.52[W/(m^2·K)]＋6.64[W/(m^2·K)])×(100[℃]－30[℃])×3.0[m^2] ＝2,974[W]＝2.97[kW] （S：断熱補強部の面積[m^2]）

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

補足説明	② 実施計画の放散熱 Q2 炉壁および断熱材を通過する熱と炉外表面からの対流および放射による炉外への放散熱は等しいことから、断熱補強後の断熱材表面温度 T2 を仮定し、これらの熱流が等しくなる放散熱 Q2 を繰返し計算により算出する。 1) 炉壁、断熱材の熱抵抗 炉壁の熱抵抗 r w[(m^2·K)/ W]は、対策実施前の炉壁を通過する熱流束 q1 [W/m^2]より以下となる。 q 1＝Q1÷S ＝λw÷dw×ΔT より λw÷dw＝Q1/S/ΔT＝2.97×1,000［W］÷3［m^2］÷（150-100）［℃］ ＝19.8［W/m^2K］ r w＝1÷（λw÷dw）＝0.0505[(m^2·K)/ W] （λw：炉壁の熱伝導率[W/(m·K)]、dw：炉壁の厚さ[m]、ΔT：温度差[K]） 2) 断熱材の熱抵抗 r g[(m^2·K)/ W] r g＝1÷（λ÷d） ＝1÷｛0.043[W/(m·K)]÷0.05[m]｝ ＝1.1627[W/(m^2·K)] 3) 伝導熱抵抗 以上より、炉壁および断熱材を貫流する熱伝導に対する熱抵抗 r c は以下となる。 r c ＝ rw＋rg ＝0.0505+1.1627＝1.2132＝1.213[W/(m2·K)] 4）実施計画（断熱補強後）の放散熱量 断熱材の外表面温度を T2［℃］と仮定すると、放散熱量 Q2 は以下の Q21 および Q22 と等しくなる。 1．貫流熱 炉壁および断熱材を貫流する熱量 Q21 は以下となる。 Q21＝（1/rc）×（T0－T2）×S ＝（1/1.213）×（150－T2）×3　（2） 2．対流、放射熱 対流および放射による熱量 Q22 は以下となる。 Q22＝《2.6×(T2－Ta)$^{0.25}$×(T2－Ta)＋5.67×ε2×［{(T2+273)/100}^{4} －｛(Ta+273)/100｝^{4}］》×S ＝《2.6×(T2－30)$^{0.25}$×(T2－30)＋5.67×0.07 ×［{(T2+273)/100}^{4}－｛(30+273)/100｝^{4}］》×3　（3） Q21＝Q22 を満たす外表面温度は、T2＝45.3［℃］で、放散熱量 Q2 は、Q2＝Q21＝Q22＝259W＝0.259kW となる。

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

留意事項	① 断熱材選定時は耐熱温度に留意すること。 ② 炉壁に鋼材が被覆されている場合は鋼材温度が 350[℃]を超えないこと。 ③ 推定による数値を用いる場合には、必ず根拠を明確にすること。 ④ 数値は参考値なので、実際に即して適宜変更すること。 ⑤ CO_2 排出係数など係数の値は、最新のものを確認して使用すること。 ⑥ 炉壁表面温度のように実測データを使用する際は、実測に使用した計測機器の名称・型式及び精度等を示し、精度管理されていることを説明する必要がある。 （記載例） 温度計の仕様は、以下の通りである。 メーカー名　：〇〇精機 型式型番　：PA-123 計測精度　：±〇 [%] 精度管理方法　：毎年〇月に〇〇計器にて校正
備考	① 断熱材の物性を表 3 に示す。 ② 放射率は実測が望ましいが、参考に各種材料の放射率を表 4 に示す。 ③ 断熱材表面からの放散熱量の断熱材向きや放射率による影響の試算結果を図 2 ～図 5 に示す。 ④ 非定常操業が頻繁に行われる工業炉の場合、熱容量の小さい断熱材を選定するほど CO_2 削減に有効である。

2．対策実施後の効果算定

対策実施前	活動種別	A 重油
	エネルギー使用量	計画時の効果算定で得た対策実施前のエネルギー使用量 PE1。 PE1＝498[GJ/年]
	CO_2 排出量	計画時の効果算定で得た対策実施前の CO_2 排出量 C1。 C1＝35.3[t-CO_2/年]
対策実施後	活動種別	A 重油
	年間活動量	① 購入記録から加熱炉の A 重油の年間使用量を算定する。 ② 対策実施前に算定した実施計画の A 重油使用量 F2 と比較し、大きな差異がないことを確認する。 A 重油使用量：11.3[kL/年]
	エネルギー使用量	対策実施後の年間 A 重油使用量に A 重油の単位発熱量 H を乗じて対策実施後のエネルギー使用量の実績値 PE3 を求める。 PE3＝11.3[kL/年]×38.9[GJ/kL]＝440[GJ/年]
	CO_2 排出量	対策実施後のエネルギー使用量 PE3 に A 重油の CO_2 排出係数αを乗じて対策実施後の CO_2 排出量の実績値 C3 を求める。 C3＝440[GJ/年]×0.0708[t-CO_2/GJ]＝31.2[t-CO_2/年]
対策実施後のエネルギー削減量		対策実施前と対策実施後とのエネルギー使用量の差異より下記になる。 PE1－PE3＝498[GJ/年]－440[GJ/年]＝58[GJ/年]

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

対策実施後の CO_2 削減量	対策実施前と対策実施後の CO_2 排出量の差異より下記になる。 C1－C3＝35.3[t-CO_2/年]－31.2[t-CO_2/年]＝4.1[t-CO_2/年]
補足説明	
留意事項	① 対策実施後の加熱炉の運転状況（起動停止、運転時間、負荷変動等）から、対策実施前後で、加熱炉の運転状況に大きな差がないことを確認する。 ② 対策実施前後で、運転状況（起動停止、運転時間、負荷変動等）の変化があった場合は、その影響を考慮に入れる。
備考	

３．対策効果の検証・有効性評価

効果検証と有効性評価の手順	① 対策実施前（診断・計画時）に算定した CO_2 削減量と対策実施後（報告時）に算定した CO_2 削減量を比較する。 ② 対策によって、他のシステムの CO_2 排出量に与える影響があれば調査する。 ③ ①、②を総合的に判断して、対策の有効性を評価する。

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

参考資料

表３　ロックウール、グラスウールの主な物性

種　類			ホルムアルデヒド放散による区分*	密　度 [kg/m^3] 範　囲	熱　間 収縮温度 [℃]以上 1)	熱伝導率 [W/(m·K)] 以下 [平均温度 70℃]	熱伝導率算出参考式[W/(m·K)]　θ：温度[℃]2)
ロックウール	ウール		F☆☆☆☆	40～150	650	0.044	
	保温板	1号	F☆☆☆☆ F☆☆☆ F☆☆	40～100	600	0.044	0.0337+0.000151·θ　(-20≦θ≦100) 0.0395+4.71×10^{-5}·θ+5.03×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
		2号		101～160		0.043	0.0337+0.000128·θ　(-20≦θ≦100) 0.0407+2.52×10^{-5}·θ+3.34×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
		3号		161～300		0.044	0.0360+0.000116·θ　(-20≦θ≦100) 0.0419+3.28×10^{-5}·θ+2.63×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
	フェルト			20～70	400	0.049	0.0349+0.000186·θ　(-20≦θ≦100) 0.0337+1.63×10^{-4}·θ+3.84×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦400)
	ブランケット	1号		40～100	600	0.044	保温板１号と同じ
		2号		101～160		0.043	保温板２号と同じ
	保温帯	1号		40～100		0.052	0.0349+0.000244·θ　(-20≦θ≦100) 0.0407+1.16×10^{-4}·θ+7.67×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
		2号		101～160		0.049	0.0360+0.000174·θ　(-20≦θ≦100) 0.0453+3.58×10^{-5}·θ+4.15×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
	保温筒			40～200		0.044	0.0314+0.000174·θ　(-20≦θ≦100) 0.0384+7.13×10^{-5}·θ+3.51×10^{-7}·θ^2 (100＜θ≦600)
グラスウール	ウール		F☆☆☆☆		400	0.042	0.0314+1.50×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)
	保温板	24K	F☆☆☆☆ F☆☆☆ F☆☆	22～26	250	0.049	0.0357+1.42×10^{-4}·θ+8.34×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		32K		28～36	300	0.046	0.0333+1.21×10^{-4}·θ+6.56×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		40K		37～44	350	0.044	0.0328+1.10×10^{-4}·θ+5.61×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		48K		45～52	350	0.043	0.0324+1.05×10^{-4}·θ+4.62×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		64K		58～70	400	0.042	0.0320+9.48×10^{-5}·θ+3.30×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		80K		73～87		0.042	0.0317+9.39×10^{-5}·θ+2.48×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
		96K		88～105		0.042	0.0318+9.82×10^{-5}·θ+2.44×10^{-7}·θ^2 (-20≦θ≦200)
	波形保温板			37～105	350	0.050	0.0331+1.00×10^{-4}·θ+7.30×10^{-7}·θ^2 (0≦θ≦100)
	保温帯	A		22～36	250	0.052	0.0384+1.99×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)
		B		37～52	350	0.052	0.0384+1.99×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)
		C		58～105	400	0.052	0.0384+1.99×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)
	保温筒			45～90	350	0.043	0.0324+1.05×10^{-4}·θ+4.62×10^{-7}·θ^2 (0≦θ≦200)
	ブランケット	A		24～40	350	0.048	0.0337+1.99×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)
		B		41～120	400	0.043	0.0314+1.68×10^{-4}·θ　(0≦θ≦100)

注　１）実際に使用する際の諸条件を考慮した使用温度の上限は、附属書Ⅰ参照。

２）熱伝導率算出参考式は、熱伝導率を測定した温度範囲を表示している。

＊ F☆☆☆☆ 放散速度が 5[μg/(m^2·h)]以下、F☆☆☆ 20[μg/(m^2·h)]以下、F☆☆ 1205[μg/(m^2·h)]以下

出典：『JIS A 9504』(2017)

「省エネルギーセンター」ダウンロードファイル（無断転載、翻訳を禁ず）

表４　代表的な固体表面の放射率

固体表面		温度[℃]	放射率ε
アルミニウム	高純度高度研磨	227～577	0.039～0.057
	粗面	37	0.055～0.07
	酸化アルミニウム	499～826	0.42～0.26
黄銅	高度研磨	246～356	0.028～0.031
	圧延面	22	0.06
	酸化面（600[℃]）	199～600	0.61～0.59
銅	電解銅高度研磨	80	0.018
	市販滑面	22	0.072
	厚い酸化被膜	25	0.78
鉄および鋼	鋼の研磨面	100	0.066
（ステンレス除く）	鉄の研磨面	426～1026	0.14～0.38
	鋳鉄の研磨面	200	0.21
	酸化鉄	100	0.74
ステンレス	研磨面	100	0.074
	18-8、褐色面	215～490	0.44～0.36
アスベスト	板	23	0.96
	紙	38～370	0.93～0.94
れんが	凹凸のない赤れんが	23	0.93
	耐火れんが	1,000	0.75
塗装面	油性ペンキ	100	0.92～0.96
	黒または白ラッカー	38～93	0.80～0.95

出典：『エネルギー管理のためのデータシート』（一般財団法人省エネルギーセンター）