

反 射 断 熱 法

—Reflective Insulation—

長 野 悌 介



アルミフイルで断熱した天井

冷蔵室内の温度上昇を防ぐために、反射能の大なる金属の板または箔を用いて、放射熱を遮断する方法がとられる。これが反射断熱法である。わが國で研究されてきたアルミニウム箔を用いる方法、アメリカで行われている鋼板及びアルミニウム板を用いる方法等の性能を検討し、その展望をこゝろみよう。

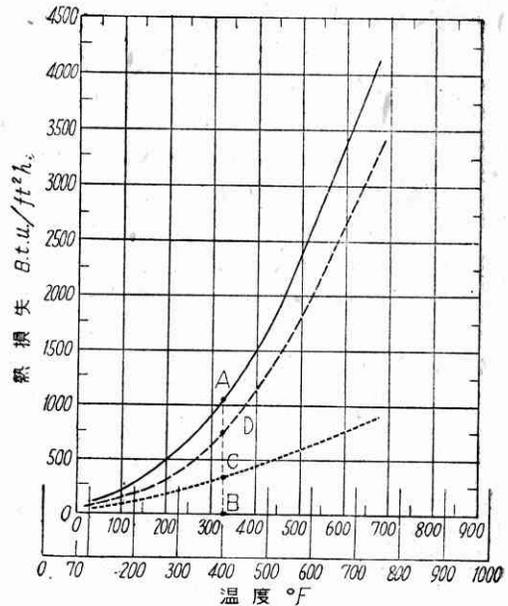
1. ま え が き

静止している空氣の熱傳導率は 0°C において $0.0204 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ 程度であつて現在知られている固体保温材の如何なるものよりも小さい。この保温力の利用についてはすでに 1909 年 Nusselt⁽¹⁾ が二重鐵管を用いて實驗を行つている。彼の實驗によれば温度によつて多少の相違はあるけれども空氣層を通じて熱が傳わる場合放射による熱傳達が全體の $66\sim 85\%$ 、傳導及び對流によるものが $34\sim 15\%$ 程度であつて、放射による熱傳達が非常に大きいのである。

第 1 圖は Mellon Institute of Industrial Research⁽²⁾ で行つた實驗結果であるが Nusselt とほぼ同様な結果を得ている。一般に金属の表面は放射熱に對する反射能力がきわめて大きい。International Critical Table によればその値は第 1 表のようになる。すなわち此等放射熱に對する反射能の大きな金属の表面と空氣層とを巧みに組合せて、對流による熱の移動を極度に小さくするとともに放射熱の大部分を反射させることによつて熱の移動を防止することがいわゆる反射断熱法の原理である。

反射断熱法に應用できる金属としては鋼鐵、アルミニウム、銅、錫、亜鉛等であるが實際問題として使用されるのはアルミニウムがもつとも適當しており、次に鋼鐵であつてその他は價格の點で問題にならぬと思われる。

現在わが國で使用されているのはアルミニウムの箔であつて米國で實用化されている Almiseal と稱するものはアルミニウムの板であり、Ferro-therm とよばれているものは鋼板に耐腐蝕性の合金を張つたものである。



第 1 圖 上段 温度差 70°F 以上
下段 温度差 70°F 以下
AB=Total loss
BD=Radiation loss
BC=Convection loss
AB=BD+BC

2. アルミニウム フォイル断熱法

この方法はきわめて薄いアルミニウム箔、例えば 0.007

第1表 金属表面の熱線反射能

鋼		アルミニウム		銅		錫		亜鉛	
波長 (micron)	反射能 %								
0.188	22	1.06	73.8	0.251	25.9	1.06	54.0	0.55	56.0
0.200	27	1.71	80.8	0.305	25.3	1.71	59.3	0.60	57.5
0.251	38	3.06	88.3	0.357	27.3	3.06	68.6	0.70	61.0
0.305	44	3.96	91.4	0.420	32.7	3.96	71.7	0.90	55.5
0.460	55.5	5.24	93.8	0.500	43.7	5.24	76.7	1.00	49.0
0.500	56.0	6.75	95.2	0.600	71.8	6.75	80.3	1.20	74.7
0.540	56.0	8.02	96.9	0.700	88.6	8.02	83.2	1.40	85.8
0.580	57.3	9.38	97.4	0.800	88.6	9.38	87.0	2.00	94.0
0.620	57.3	10.49	96.9	1.00	90.1	10.49	87.0	3.06	95.5
0.660	58.0	12.03	97.3	2.00	95.1	12.03	86.9	5.24	97.2
0.700	58.0			3.00	97.1			6.75	98.1
1.00	63			4.00	97.3			9.38	98.3
2.00	77			5.00	97.9			12.03	98.3
3.00	83			6.00	98.3				
4.00	88			11.00	98.4				
9.00	93			14.00	97.9				

mm乃至0.050 mmの範囲のものを使用し適当な空気層をおいて重ね合はせて保温材とする方法である。この問題については筆者及び長岡順吉博士⁽³⁾等で1933年以來研究をつづけてきたのである。この方法には二つの種類がある。一つは0.007~0.010 mm程度の厚みのアルミニウムフォイルを用い、これに適当なしわを付けて重ね合せ中間に約10 mm~12.5 mm程度の間隔を自然に附する方法である。これをしわ附法またはアルフォル法という。アルフォルとはこれが最初ドイツで實用化されたときに世界にむかつて登録した商品名である。これに對して他は厚み0.020~0.030 mmの比較的厚い箔を用いて中間に間隔片として木片を挟んで平面に張つて行く方法であつてこれを平面法といつておる。前記アルミシール等は此の平面法の一様である。

しわ附法は箔と箔とがしわの山で直接接觸しているため傳導による熱の損失があり、平面法に比し約50%程度劣つている。

(A) しわ附法

この方法は前述の通り0.007 mm~0.01 mmのアルミニウムフォイルを幅において約15%ちぢまるくらいにしわを附けたものを重ね合はす方法でその熱傳導率は間隔約10 mmの場合筆者等の行つた實驗⁽³⁾⁽⁴⁾によれば次式で表わされる。

$$\text{熱傳導率 } \lambda = 0.042 + 0.00011 t_m \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$t_m = \text{平均温度}$$

ドイツの Schmidt⁽⁵⁾の實驗によれば

$$\lambda = 0.041 + 0.00011 t_m$$

となつておりほとんど一致した結果となつた。

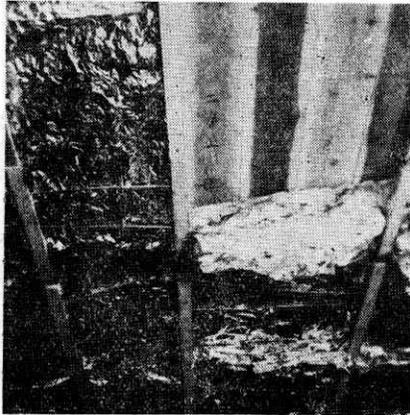
横置平板の厚み30 mmのものを用いて測定した場合の温度及び熱傳導率は第2表に示す通りとなる。

ただし平板の厚み30 mmの中に0.00833 mmのアルミニウムフォイルを幅15%縮める程度にしわを附し約10 mmの間隔をおいて3枚重ね合わせたものを使用したのである。なおこの表中には比較のためにコルク粉末についての測定結果も記入しておいた。

第2表 平板にて測定(横置)せる温度及熱傳導率

試料	内壁温度 t_i	外壁温度 t_a	平均温度 t_m	熱傳導率 λ	冷水又は ブライン 温度 t_r
アルミニウム箔3枚 (厚30mm)	22.6	-7.2	7.7	0.0412	-8.2
	27.8	-5.1	11.4	0.0420	-6.7
	38.0	0.0	19.0	0.0426	-2.4
	47.0	-2.5	22.3	0.0431	-4.2
	54.5	23.8	39.2	0.0412	22.6
	76.9	25.2	51.1	0.0466	21.5
	77.0	25.0	51.0	0.0464	21.0
	71.0	24.3	47.7	0.0430	22.1
	88.1	25.2	56.7	0.0469	22.2
	135.5	26.3	81.0	0.0520	21.6
	139.6	28.6	84.1	0.0513	21.4
	154.5	28.7	91.6	0.0511	22.0
156.7	28.2	92.5	0.0535	21.5	
159.3	30.6	95.0	0.0527	24.0	
コルク粉末 (比重0.25, 炭化)	18.2	-7.2	5.5	0.0513	-8.3
	29.1	-9.0	10.1	0.0517	-10.0
	32.3	-7.4	12.5	0.0520	-9.6
	40.7	-0.1	20.3	0.0531	-2.1
濡れるコルク 粉末, (比重 0.43, 炭化, 水分 125%)	14.4	-4.5	5.0	0.1510	-6.4
	30.4	1.4	15.7	0.1500	-1.1

しわ附法は實際に應用するには比較的容易でかつ安價である。コルクアスベスト等の保温材に比し約 40% 以上も安價にできる。またこの種のアルミニウム箔保温材は材料の目方はきわめて小さく保温材としての密度は、 3kg/m^3 程度である。しかし表面の補強を必要とするから全體としてはコルク板と比較して約 1/5 位となる。第 2 圖は天井に施工したしわ附法を示す。



第 2 圖 しわ附法を施した天井

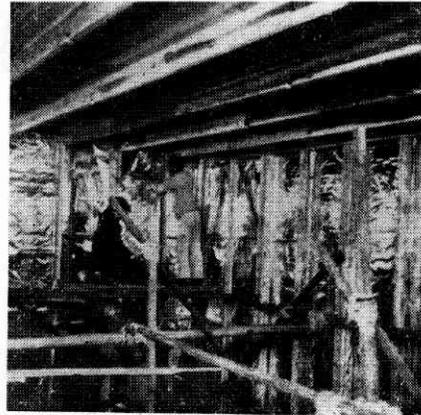
(B) 平面法

この方法はアルミニウムフォイルの厚み $0.030\sim 0.020$ 程度のものを用い中間に木製の間隔片を入れてしわを附せず平面に張つて行くのである。間隔は $10\text{mm}\sim 12.5\text{mm}$ ($1/2$ 吋) 程度が適當である。もつと厚い板を使用することももちろん可能である。張るには厚い方が容易なのであるが價格が高くなつて他の保温材に比して使いきれないのではないと思われる。平面法では直接接觸する部分がないので熱傳導率はいちじるしくよくなる。これについては多くの文献があるが長岡博士⁽⁶⁾のやられた實驗によれば第 3 表に示すような結果となつている。すなわち平面法では $0.027\sim 0.03\text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 程度の熱傳導率を有しておりこれをしわ附法と比較すると約 50% 小さくなる。

第 3 表 平面法の熱傳導率

試料	低温 °C	高温 °C	平均温度 °C	熱傳導率 kcal/mh °C
アルミ箔 3 枚張 箔の厚み 0.3mm	18.5	40.5	29.5	0.0311
	19	69	44	0.0348
アルミ箔 3 枚張 厚さ 0.3 mm	8.5	42	25.5	0.057
	19.5	70.5	45.0	0.0575
濃ラッカー塗アルミ箔 4 枚	-5.4	20.0	7.1	0.029
	-5.1	21.5	8.2	0.030
	17.3	45.3	31.2	0.035
	20.0	81.5	50.8	0.042

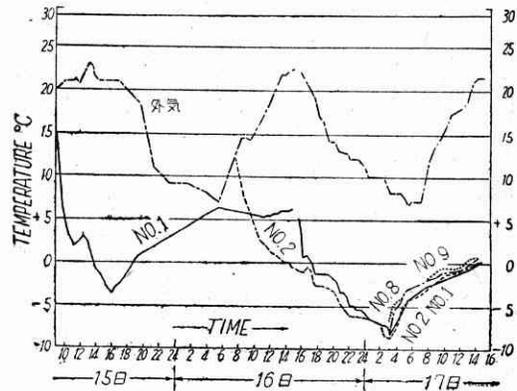
第 3 圖は側壁に施工した平面法を示す。アルミニウムフォイルはアルカリ性、酸性を有する濕氣に對しては耐久力が弱いのであるが純度の高い箔 (99.5% 以上) を使用しかつ透明ラッカーを塗布することによつて防止し得られる。その場合薄いラッカーでは 10% 濃いラッカーでは 25% くらい迄熱傳導率が増加してくる。その外アルミニウムフォイルとダンボール、アスベスト紙等と適當に組合せて相當良好な保温材⁽⁵⁾が得られる。



第 3 圖 アルミニウム箔保温平面法を施した側壁

(C) アルミニウムフォイルしわ附法の實施例

筆者はこの問題について自分の關係している日本總合食品株式會社名古屋冷凍工場の擴張工事に際し實際に使用してみた。その結果第 4 圖の温度上昇試験で大略の様子が判明するようにこの種の保温法としてはだいたい満足すべき結果が得られたのである。



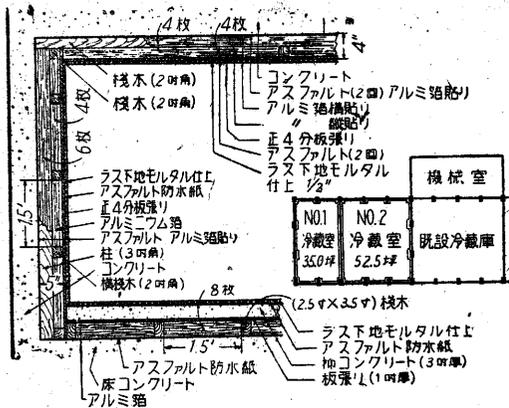
第 4 圖 低温室冷却及び温度上昇試験

(日本總合食品株式會社名古屋工場)

No. 1, No. 2 アルミ箔保温室の温度上昇曲線
No. 8, No. 9 炭化コルク板厚み 5 吋の保温室の温度上昇曲線 (條件のきわめて近似したものを参考までに附加しておいた)

施工箇所は低温室の大きさ幅 7 間、奥行 12.5 間、高さ 22 尺で總坪數 87.5 坪であつて常用室内保持温度は

0°C であるが空室試験では -9°C まで降下せしめて温度上昇試験を行ったのである。保温工事の施工順序は第3圖で判明するようにアルミニウム箔は0.007 mm のものにしわを付したものを床4時に8枚、側壁5時に10枚天井5時に10枚を張つたのであるが天井と側壁とは3時6枚を縦に張りその上に2時4枚を横に張つたのである。外壁に対する防湿はアスファルトでアルミニウム箔を張つたのであるが防湿の點については、充分注意して行く必要がある。これは経費の點から多少不満足の點があつたのであるが、いまま少し入念にした方がよいと思う。



第5圖 冷蔵庫アルミ箔断熱工事仕様 (日本総合食品・名古屋工場)

なお温度上昇試験については判断しやすいようにつて筆者が試験した冷蔵庫のコルク板保温で今回の条件と事情の似た場合の上昇試験の成績を附加しておいた。ただしコルク板の厚みは天井床側壁共に6吋である。すなわち上昇試験の結果はコルク板の場合と大差なく外氣の影響もほとんどなかつた。後からの報告によれば低温室に品物を入れた場合温度を一定に保つには従来の保温に比し容易であるとのことである。

この冷蔵庫の保温がアルミニウム箔でやつた日本最初のものである。しかし外國にはその例は澤山ある。しかししわ付法は保持温度の比較的高い場合及び天井のような保温効果のよい場合には充分使用されるのであるが、保持温度が-15°C以下ともなればむしろ平面法を採用した方がよいと思う。米國にはこの種の保温は種々あるが、いずれも低温に對しては平面法である。

次に米國におけるこの種の保温法の代表的のもの一二について紹介してみようと思う。

3. フェロサーム断熱法(Ferro-therm Insulation)

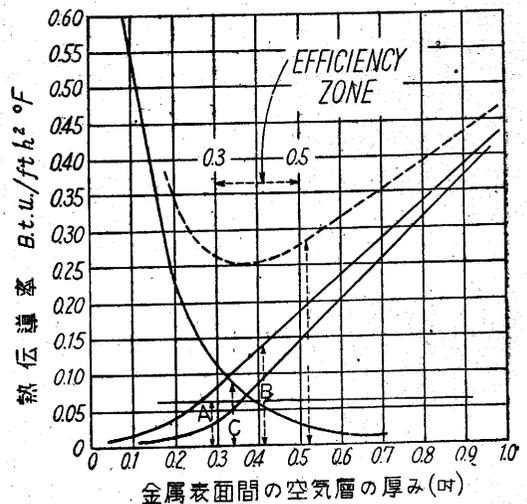
この方法は米國 Flange and Manufacturing Co. Inc. で行つている方法であつて、1934年 Joseph Le Grand (7) のやつた研究にもとづくものである。

これは steel sheet の上に鉛または錫の合金を張つて腐蝕を防止したもので、No. 38 USS ゲージかまたは特

に強度を必要とする箇所には No. 26 USS ゲージの板を 1/2~3/4 吋の間隔をおいて平行に張りつけたもので、間隔片に木材を使用し一枚の標準寸法は幅 24 吋、長さ 32 吋のものを使つている。

Ferro-therm に關する Armour Institute of Technology の Prof. J.C. Peebles の報告によれば、垂直においた場合の低温に對する實驗において、熱傳導率として 0.195 Btu, in/ft² h°F (0.241 kcal, m/m²h°C) という値を得たといつておる。この報告の記事中には測定温度の記載がないので一概にはいえないが、32°F (0°C) 附近で測定したものとするれば非常に良好な數字である。American Society of Refrigerating Engineers の Data Book 中には熱貫流係數として 0.226 Btu/ft² h°F となつている。Massachusetts Institute of Technology の Prof. B. Wilkes は Ferro-therm の板で空氣層を一層形成せしめこれを水平におき上部を高温とし下部を低温とすれば、その保温力はコルク板3吋厚に匹敵し、垂直においた場合はコルク板1吋に匹敵するといつておる。しかしこれは Ferro-therm についてばかりでなくアルミニウム其他の金屬板を使用した場合も同様であるはずである。

一個の空氣層の厚みを如何にすべきかについては種々の議論もあり研究もあるのであるが American Flange Co. は Ferro-therm について、第6圖に示すように、Efficiency zone ということをしていつておる。これは Mason (8) のやつた實驗から得た結果と思われるが、一つの空氣



第6圖 空氣層の厚みと熱傳導率との關係

層の厚みが 0.3 吋 (7.65 mm) 以下の場合は傳導による熱の損失が増加し、0.5 吋 (12.5 mm) 以上の場合は對流による熱損失が増加する。この兩者の間が最も保温効果がよいとするのであつて、これを efficiency zone といつている。これによれば空氣層の厚みは最大限度 1/2 吋 (12.5 mm) とすべきであるが 3/4 吋までは大して保温効果を落さずして使用し得るといつておる。筆者の経験で

は垂直壁の場合 10 mm~12.5 mm 程度が良好な結果が得られると信じているのである。

Ferro-therm に関し室内保持温度と保温の厚みとの關係は第 4 表のようにやつている。

第 4 表 室内保持温度と Ferro-therm の枚數

	外氣温度 80°F~85°F					
	40°	30°	20°	0°	-20°	-40°
室内保持温度 °F						
天井の枚數	2	3	3	4	5	6
側壁及床の枚數	3	4	5	6	7	8

4. アルミシール反射断熱法 (Almiseal Reflective Insulation)

これは Ferro-therm が steel plate を使用しているに對しアルミニウム板を使用している。原理は全然同一であつて No. 34 Band S ゲージのアルミニウム板を木材の間隔片によつて 3/4 吋の間隔をおいて重ね合はせたものである。この方法は米國 C. T. Hogan & Co. Inc. でやつている。これを低温室の保温に使用した場合には空氣層の間に侵入した空氣中の濕氣が低温側の板の表面に凝縮し、長年の間に板を腐すことが考えられる。従つてこれに使用する板はきわめて純度の高いものを用いる必要がある。しかし薄い箔には純度の高いものを使用するのであるが、厚いものに純度の高いものを使用すれば高價となるためにアルミシールでは特殊の鉛合金のテープを使用し特殊なゴム糊のような接着剤をもつてアルミニウム板の合せ目や末端を moisture tight にしてしまうのである。この特殊なテープはきわめて有効であるといつておる。空氣層の厚みは 1/2 吋乃至 3/4 吋を採用しているが特に 3/4 吋を多く採用しているようである。これは經濟的理由が多く含まれていると思われる。低温室の保温に對しては天井には非常に効率が良いので 1 1/2 吋の間隔をおいている。

アルミシールの熱貫流係數は 3/4 吋空氣層を使用した場合垂直面において平均温度 0°F で 0.23 Btu/ft²h°F 平均温度 50°F で 0.29 Btu/ft² h°F 程度である。水平の場合空氣層の厚み 1 1/2 吋において 0.13 Btu/ft²h°F (平均温度 50°F) となつている。アルミシールの場合の室内保持温度と使用枚數との關係は第 5 表に示す。

空氣層 1 層當りの温度降下は 15°F 以下に取るべきであるといつている。

第 5 表 室内保持温度とアルミシールの使用枚數

温度範圍 °F	天 井		側 壁		床	
	枚數	熱貫流係數 Btu/ft ² h°F	枚數	熱貫流係數 Btu/ft ² h°F	枚數	熱貫流係數 Btu/ft ² h°F
30°~40°	3	0.043	4	0.075	4	0.08
20°	3	0.043	5	0.059	5	0.069
0°~10°	4	0.032	6	0.049	6	0.064
-10°	5	0.025	7	0.04	7	0.057
-20°	6	0.021	8	0.032	8	0.052

6. 結 び

これを要するに空氣層を利用する保温材として熱線の反射能の大きい金屬を使用することは特に有効である。その中でもアルミニウムは有効な保温材である。すなわち目方が軽いこと、純度の高いアルミニウムは容易に腐蝕せぬこと、熱線の反射能が高くかつ表面の汚損はその反射能にほとんど影響しないこと、値段が他に比して非常に安いこと等の特長がある。

特に客貨車、船舶、自動車等の輕量を必要とする場合の保温にきわめて適當している。

ただ従來の保温材の概念と反射断熱法とは根本的に異り特に熱の良導體であるアルミニウムのような金屬を使用することがいかにもむじゆんしたように思われ、一般の理解を得ることに困難があるように思われる。

科學の國米國においてすら反射断熱法が一般に認められて段々使用されはじめて來たのはきわめて最近のことである。

Masachusetts Institute of Technology の Prof. Walker はこの従來と異つた原理の上に立つ方法が一般に認められるまでに實用化されてから 10 年以上かかつたといつている。

参 考 文 献

- (1) Forsch. Arb. Heft 63. 1909. Die Wärme Teilfähigkeit von Wärmeisolerstoffen
- (2) American Society of Mechanical Engineers. 1931. Tests made by Mellon Institute of Industrial Research.
- (3) 理化學研究所報告第 14 卷 1 號 (昭和 10 年) アルミニウム箔保温法の研究。
- (4) 衛生工業協會誌第 10 卷 8 號アルミニウム箔保温法の研究。
- (5) V.D.I. Oct. 1927 Wärmeschütt durch Aluminiumfolie.
- (6) 冷凍協會誌第 13 卷, 151 號 アルミ箔に依る保温法及びガラス綿の保温率に關する研究。
- (7) Refrigerating Engineering. Feb. 1934.
- (8) Industrial and Eng. Chem. Vol. 25. No. 3, 1933.