

1. はじめに

「高反射率塗料」に関する大きなトピックスとして、JIS K 5675「屋根用高日射反射率塗料」の制定があげられます（JIS K 5675:2011 平成23年7月20日）。このJIS規格により、「高反射率塗料」の定義やその性能について標準化が成されました。この意義は非常に大きく、これまで「高反射率塗料」の定義や性能について“ややもすれば言いたい放題”であった現状の問題が解消されるものと期待できます。

他方、海外（特に米国）においても「高反射率塗料」と同様の塗料製品（Cool roof paint）があり、この性能評価手法について既に10年以上も前から検討されています。それによると、SRI値（Solar Reflectance Index value；日射反射指数）と呼ばれる指数によって「Cool roof paint」製品の性能を評価することになっています。このSRI値については、最近、日塗検に対しても、概ね以下のようなFAQ（Frequently Asked Questions；多くの方々より繰返し受ける質問）を多く受けています。

- ① SRI値とは何ですか？
- ② SRI試験（SRI値を求める試験）は可能ですか？
- ③ 海外取引先からSRI値を提出するよう求められていますが、日塗検で試験できますか？
- ④ 日塗検で試験してもらったJIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」の試験報告書があります。これからSRI値の報告書に変換することはできますか？
- ⑤ SRI値を求めるには、具体的にどうすれば良いのですか？ 計算方法を教えてください。

日本では、近年、大人気の「高反射率塗料」ですが、海外においてもトレンドになっている現状を知ると共に、市場ではグローバルな展開が始まっているものと痛感しているところです。

そこで、今回は、制定されたばかりのJIS K 5675「屋根用高日射反射率塗料」について、主に「高反射率塗料」の定義と性能についての説明と、海外で展開されているSRI値による性能評価指数についてご紹介いたします。

2. JIS K 5675「屋根用高日射反射率塗料」

2.1 定義（適用範囲）について

JIS K 5675を見ると、最初に適用範囲が記載されています。非常に簡潔な文ですが、原案作成委員会では多

くの時間をかけ、難しい懸案事項を回避するために知恵を絞り、時に激しい議論を交わしながら決定した大変奥深い内容になっています。まさにJIS K 5675の“心”であり、命が吹き込まれている文面なのです。ここでは、その真意についてももう少し噛み砕いた解説をいたします。

JIS K 5675に記載されている適用範囲

この規格は、建築物の屋根及び屋上の塗装に用いる自然乾燥形エナメル系の屋根用高日射反射率塗料について規定する。この規格は、防水層の仕上げ材として施す塗料及び焼付け形塗料には適用しない。

①この規格は、建築物の屋根及び屋上

用途を建築物の屋根と屋上に限定しています。これ以外の用途（例えば道路（遮熱舗装）や船の甲板等）に義務的に適用するような利用は意図していません。

②塗装に用いる自然乾燥形

主に、現場で塗装される場合を想定しています。工場で生産される焼付け塗装（トタン板等のPCM塗装材）を除外する意図があります。PCM塗装に関しては、既にその分野の規格があり規格間の干渉（ダブルスタンダード）が懸念されるためです。工場で塗装する自然乾燥形塗料の場合は、「屋根及び屋上の塗装に用いる」という部分が解釈を濁しています。率直に解釈すれば、あくまでも「現場で塗装」する塗料を対象としています。

③エナメル系

不透明（顔料を含む）塗料に限定しています。この意味は極めて重要です。ビヒクルだけからなる塗料（クリア塗料やワニス等）を除外したい意図がありました。耐候性能の低さを補う目的で上塗りにクリアを施工する塗装仕様を実施したところ、長期耐久性が劣っていた事例（ラボの試験成績は良好）があった事、また多くの塗料メーカーでは上塗りクリア塗膜に頼らなくても十分な長期耐久性を担保できる技術が確立されている事があげられます。

④屋根用高日射反射率塗料

壁に施工する場合を除外する意図がありました。高反射率塗料が反射した日射光線が地上に降り注いだ場合の(悪い)影響について、現時点で十分な知見が無く懸案点を完全に払拭できなかったため、その恐れが無い屋根用に限定することになりました。これは、「建築物の蓄熱を可能な限り抑えたい」、「この塗料製品を広く活用したい」といった本意に対して苦渋の決断でした。

また、「高日射反射率塗料」という用語について、JIS K 5675の中で定義しています。すなわち、明度(L*)によって次の2つの塗料を「高日射反射率塗料」と定義しています。

- (a) 明度(L*)が80未満の塗料
(低明度・中明度領域)
一般塗料に対して日射反射率を高くするための特別な設計がなされている塗料。
- (b) 明度(L*)が80以上の塗料(高明度領域)
日射反射率が高い塗料(特別な設計がなされていない一般塗料も含む)。

⑤防水層の仕上げ材として施す塗料及び焼付け形塗料には適用しない

これも前述した②と同様、既存規格との干渉が懸念されました。建築用防水材に関しては、既にJIS A(建築関係)で取りまとめられており、そこにJIS K 5675が踏み入るとダブルスタンダードができてしまう恐れがありました。そこで、防水材は除外することになりました。

2.2「高反射率塗料」の性能

JIS K 5675では、日射反射性能のみならず屋根用の塗料として要求される性能についても規定しています。言うまでも無く、日射反射性能が世界一優れていたとしても、短期間で剥がれてしまったり、被塗物を保護できなくなってしまっただけでは役に立ちません。屋根用塗料として十分な基本性能を持っていて、かつ、優れた機能性(高い日射反射性能)を長期間維持することが求められています。ここでは、屋根用塗料の基本性能については当然の事として割愛し、「高反射率塗料」の機能である日射反射率についてご紹介いたします。

JIS K 5675では、近赤外領域(波長780~2500nm)の日射反射率を指標にして日射反射性能を規定しています。日射反射率は色の影響を強く受けるため、全波長域の日射反射率では“塗膜の色”についても同時に考慮しなければ一般塗料と「高反射率塗料」の明確な区別が困難になったためです。“塗膜の色”は塗料メーカーの標準色だけをとっても非常に多彩であり、受注時に決まる調色品まで含めると無限大とも言える種類になってしまいます。色による分類は不可能でした。

一方、近赤外領域の日射反射率を用いても“塗膜の色”による影響は受けてしまいます。図1は、「高反射率塗料」の白色と黒色の分光反射率を比較したものです。可視光領域の反射率が異なるのは、色を表現するために当然の結果(仕様)なのですが、色とは無関係の近赤外領域の反射率においても黒色塗膜は白色塗膜より低い反射率を示しています。顔料の分光反射率は、その物質の化学構造や結晶構造によって決まり、我々が任意にコントロールすることができません。顔料物質の化学構造と我々の目が感応できる可視光波長域とは何の関係も持っていないため、たまたまこの波長領域に目的の吸収(色)がある化学物質で塗料の顔料として適しているものを見つけなければなりません。任意の色が表現できる「高反射率

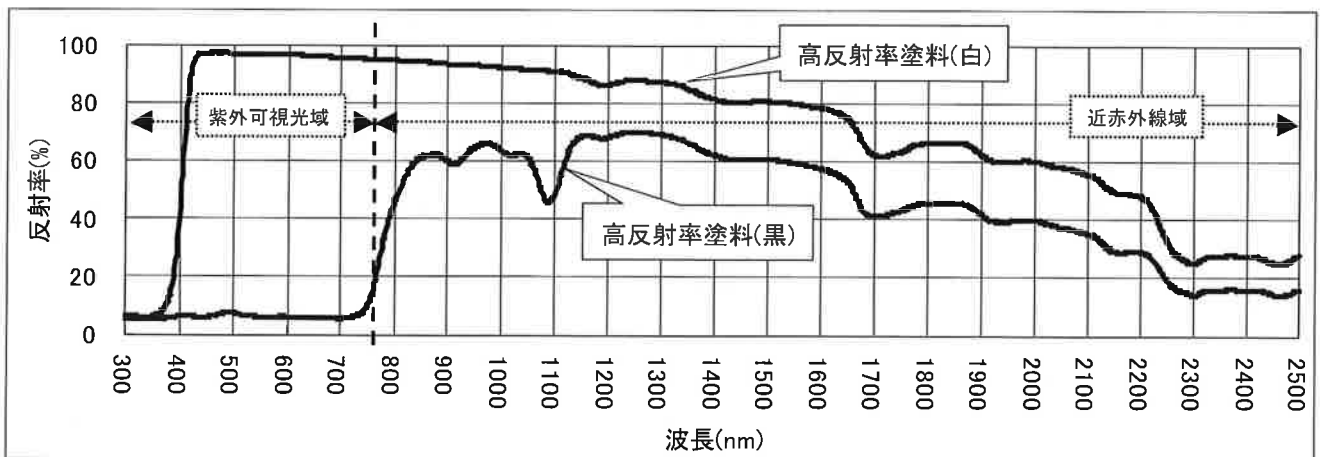


図1 高反射率塗料(白色)と高反射率塗料(黒色)の分光反射率

塗料」は、非常に高度な技術に裏打ちされた塗料製品なのです。

以上のように、「塗膜の色」を考慮しなくても性能の評価が可能な指標として近赤外領域の日射反射率を考えたのですが、それでも「色」の影響を排除しきれない結果となりました。しかしながら、現在普及している多くの塗料について、塗膜の明度 (L* 値) と近赤外領域の日射反射率の関係を調べると、一般塗料と「高反射率塗料」との間である程度のグループ分けが出来そうな事が分かりました (図2)。

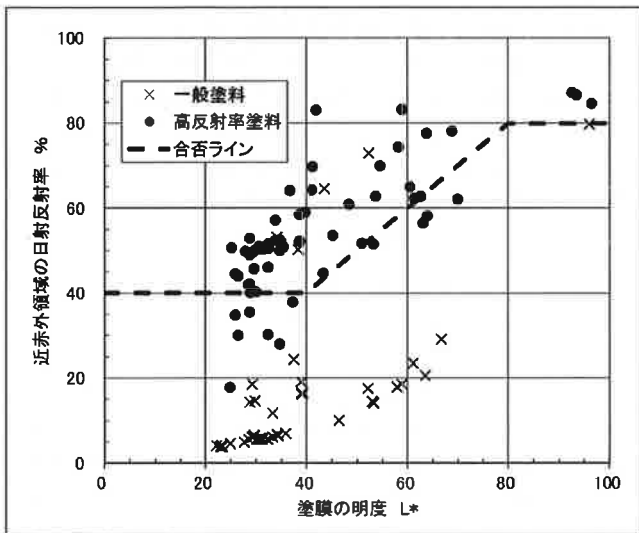


図2 普及している一般塗料と高反射率塗料の日射反射率 (近赤外領域) (JIS K 5675 解説図2)

図2に示した塗料は、実際に普及している塗料製品を実測したのですが、特に低明度の「高反射率塗料」ではその性能 (近赤外領域の日射反射率) に比較的大きなバラツキが見られました。原案作成委員会では、現状で普及している「高反射率塗料」の全てが包含するような合格ラインを定めることはせず、(市場が混乱しない程度に) 何社かが達成している性能レベルで合格ラインを決めました。また、スペックの範囲 (下限と上限) は設定せず、下限値以上であれば上は理論的限界まで許容しています。JIS K 5675 は、技術革新に対する挑戦を含めた規格になっています。

このような経緯から、JIS K 5675 では日射反射率の

要求性能を以下のように決めています (図2中、合否ラインより上にある場合が合格)。

(a) 低明度・中明度領域

明度 (L*) が40以下の塗料:

近赤外領域の日射反射率が40%以上

明度 (L*) が40を超え80未満の塗料:

近赤外領域の日射反射率が明度の値以上

(b) 高明度領域

明度 (L*) が80以上の塗料:

近赤外領域の日射反射率が80%以上

3. 「高反射率塗料 (Cool roof paint)」に関する海外の動向とその性能評価手法

3.1 Cool roof paint の海外動向

米国では、CRRC (Cool Roof Rating Council; クールルーフ評価委員会) といった組織¹⁾ が1998年に結成され、公正な方法で評価されたCool roof paint 製品が登録されています。現時点で2283もの製品が登録されていました (H24年1月現在)。表1にその例を示します。

興味深い点として、カテゴリー分けされた色の分類と初期及び3年暴露後の日射反射率と放射率、そして日射反射率と放射率から算出されるSRI値と呼ばれる指標が公開されています。なお、色のカテゴリーは以下の分類がされているようです。

Black (黒)、Brown (茶)、Multicolor (マルチカラー)、Blue (青)、Bright White (明るい白)、Off-White (暗い白)、Grey (灰)、Tan (褐色)、Green (緑)、Metallic (メタリック)、Orange (オレンジ)、Yellow (黄)、Purple (紫)、Red (赤)

ここで、SRI値とは、Solar Reflectance Index value (日射反射指数値) のことで、Cool roof paint の性能を示す指標として用いられています。このSRI値が大きいほど日射反射性能が高い塗料を意味します。このSRI値については、「求め方を教えてほしい」等の問合せを多く頂いていますので、次に、具体的な計算方法をもう少し詳しく紹介いたします。

3.2 SRI値の求め方

SRI値は、一般的な黒い面 (一般塗料の黒と考えて良いでしょう) の温度を0 (ゼロ)、一般的な白い面 (一

表1 CRRCに登録された塗料の情報 (例)

Model	Color Category	Product Type	Solar Reflect.		Therm Emit.		SRI	
			init.	3yr	init.	3yr	init.	3yr
Onyx IR 3900	Black	Field-Applied Coating	0.40	0.40	0.90	0.89	45	45

般塗料の白)の温度を100として、評価対象の塗膜(Cool roof paint)の温度は0(黒面)~100(白面)の間のどの程度に位置するのかを示した指標になります。

ここで興味深いのは、“温度”で評価している点が挙げられます。JIS K 5675では、近赤外領域の日射反射率を指標に評価していますが、これでは数値を見ただけで上昇する温度をイメージすることは困難です。実際に近赤外領域の日射反射率だけで温度を知ることは不可能であり、同時に報告される全波長域の日射反射率を用いて、これを建築や熱学の専門家に計算してもらう必要があるでしょう。一方、SRI値では、例えばSRI=70と与えられた場合、「白面の温度と黒面の温度の中間より少し白面よりに近い温度になる」といったイメージしやすい性能指標になっています。

具体的には、以下の計算式によって算出される値です。

Tb : 黒面の温度 (K)
Tw : 白面の温度 (K)
Ts : 対象塗膜の温度 (K)

$$SRI = \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \times 100 \quad \text{式 1}$$

この時の「温度」を決める諸条件 (ASTM E1980)

黒面の日射反射率 (全波長領域) Rb = 5%
白面の日射反射率 (全波長領域) Rw = 80%
黒面の放射率 Eb = 0.90
白面の放射率 Ew = 0.90
太陽の照射日射量 I = 1000(W/ m²)
空の温度 Tsky = 27(°C)
周辺気温 Ta = 37(°C)
塗膜裏面への熱還流 hc = 5, 12, 30(W/ m²·K)
(5, 12, 30の中から選択する)

より詳細には、ASTM E1980 ” Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces” で標準化されています。

SRI値の定義は単純でした。そして、その計算も比較的容易だと思われたかもしれませんが、ところが、この温度(白面Tw、黒面Tb、対象塗膜の温度Ts)を求める方法が非常に厄介でスマートではありません。

この温度を求める計算式を次式に示します。

$$(1 - \alpha) I = E \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + hc (T_s - T_a) \quad \text{式 2}$$

Ts : 対象塗膜の温度

$$(1 - R_b) I = E_b \cdot \sigma (T_b^4 - T_{sky}^4) + hc (T_b - T_a) \quad \text{式 3}$$

Tb : 黒面の温度

$$(1 - R_w) I = E_w \cdot \sigma (T_w^4 - T_{sky}^4) + hc (T_w - T_a) \quad \text{式 4}$$

Tw : 白面の温度

ただし、α : 対象塗膜の日射反射率
(0.00 ~ 1.00の値)

E : 対象塗膜の放射率 (0.00 ~ 1.00の値)

Eb : 黒面の放射率 (0.00 ~ 1.00の値)

Ew : 白面の放射率 (0.00 ~ 1.00の値)

Rb : 黒面の日射反射率 (0.00 ~ 1.00の値)

Rw : 白面の日射反射率 (0.00 ~ 1.00の値)

σ : 5.66961 × 10⁸

ステファン・ボルツマン定数

式中の各項に与えられた数値を代入し、温度の変数(Ts, Tb, Tw)を求める方程式を解けば良いのですが、ここで温度の変数には4乗がかかっており(4次方程式になる)、代数的に簡単に求める方法がありません。幸い、ASTM E1980に誤差1K(1°C)以内の正確さをもった解法及び標準的な太陽日射の条件下で近似的に求める簡便法が記載されています。また、表計算ソフトのExcelを活用し、ゴールシーク命令を使えば簡単に正確な温度を求める事が可能です。

① ASTM E1980に記載された式で求める方法 その1

$$T_s = 309.07 + \frac{(1066.07(1-\alpha) - 31.98E)}{(6.78E + hc)} - \frac{(890.94(1-\alpha)^2 + 2153.86(1-\alpha)E)}{(6.78E + hc)^2} \quad \text{式 5}$$

$$T_b = 309.07 + \frac{(1066.07(1-R_b) - 31.98E)}{(6.78E + hc)} - \frac{(890.94(1-R_b)^2 + 2153.86(1-R_b)E)}{(6.78E + hc)^2} \quad \text{式 6}$$

$$T_w = 309.07 + \frac{(1066.07(1-R_w) - 31.98E)}{(6.78E + hc)} - \frac{(890.94(1-R_w)^2 + 2153.86(1-R_w)E)}{(6.78E + hc)^2} \quad \text{式 7}$$

$$SRI = \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \times 100$$

② ASTM E1980に記載された式で求める方法 その2

この方法は、標準的な太陽日射の条件下で回帰を用いて近似的に求める方法です。

$$SRI = 123.97 - 141.35 \chi + 9.655 \chi^2$$

$$\text{ただし、} \chi = \frac{((1 - \alpha) - 0.029E)(8.797 + hc)}{9.5205E + hc} \text{ 式 8}$$

③ Excel による方法 その1 (CRRC 式)

CRRC のインターネット HP 「<http://www.coolroofs.org/coolroofing.html>」より、SRI 値計算用の Excel シー

ト (SRI-calc10.xls) をダウンロードし使用します。

セルに日射反射率 (全波長域) と放射率を入力し、「Click to update SRI」をクリックすると SRI 値が求まります (図 3)。この Excel シートではマクロで GoalSeek 命令を用いています。

④ Excel による方法 その2 (日塗検式)

基本的に上記 CRRC の方法と同じです。マクロを呼び

4	Tool coded by Ronnen Levinson, Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory		
5	For assistance, contact Hashem Akbari at H_Akbari@LBL.gov or Ronnen Levinson at RMLev		
6			
7			
8	Test surface properties		
9			
10	Solar reflectance (0-1)	R	0.75
11	Thermal emittance (0-1)	E	0.89
12			
13			
14			
15			
16	Click to update SRI	SRI=	93
17			
18			
19			
20			
21			
22	Roof surface temperature =		47.4 °C

図 3 CRRC よりダウンロードした SRI 値を算出する Excel シート
<http://www.coolroofs.org/coolroofing.html>

A	B	C	D	E	F	G
1						
2						
3	SRIの計算(ASM E1980-01)					
4						
5	入力量	日射反射率 R=	0.67	入力範囲:0.00~1.00		
6		放射率 E=	0.88	入力範囲:0.00~1.00		
7						
8		SRI=	81.2	SRI計算		
9						
10						
11	計算過程	Tsur =	324.87	塗膜の表面温度(K)		51.7 (°C)
12		TsurB=	355.61	黒板の表面温度(K)		82.5 (°C)
13		TsurW=	317.76	白板の表面温度(K)		44.6 (°C)
14						

H	I	J	K	L	M	N	O
	SRIの計算(ASM回帰法②)			SRIの計算(ASM計算式①)			
	日射反射率 R=	0.67		日射反射率 R=	0.67		
	放射率 E=	0.88		放射率 E=	0.88		
	SRI=	81.0		SRI=	81.6		
	X=	0.311		Ts=	324.85	51.7 (°C)	
				Tb=	355.35	82.2 (°C)	
				Tw=	317.97	44.8 (°C)	

図 4 日塗検で開発した SRI 算出の Excel シート

出し、GoalSeek 命令でつじつまの合う解を探す方法です。セルに日射反射率(全波長域)と放射率を入力し、「SRI 計算」をクリックすると SRI 値が求まります。また、上記 ASTM E1980 の“その 1”と“その 2”による方法についても同時に求まります(図 4)。なお、マクロを使用しており、Excel が「セキュリティの警告」を発するかもしれません。この場合、「コンテンツの有効化」を指定してください。

この Excel シートは、配布も行っていますので興味がございます方は日塗検・清水までお知らせください。電子メール等に添付する形で配布いたします。なお、この方法による計算結果は、CRRC の方法 (SRI-calc10.xls) と完全に合致した SRI 値が求められることを確認しています。

3.3 SRI 値が 100 を超える塗料

前述した通り、SRI 値は、塗膜面の温度について一般塗料の“黒=0”と“白=100”の間のどの程度にあるのかを示した指標値です。

ここで一般塗料とは、

黒：日射反射率= 5%，放射率= 0.90

白：日射反射率= 80%，放射率= 0.90

を想定しています。ところで、「高反射率塗料」の中には、ここで想定している一般塗料の白より高性能な製品も存在します。このような場合の SRI 値はどうなるのでしょうか？ 試に、日射反射率= 92.0%、放射率= 0.90 の「高反射率塗料(白)」のデータを入力し SRI 値を計算したところ、SRI = 117 との値が得られました。SRI 値が 100 を超えてしまいましたが、このような現象について、CRRC の Q&A ページ²⁾に以下の記載がありました。

What is SRI and how is it measured?

The Solar Reflectance Index (SRI) is a measure defined by the Lawrence Berkeley National Laboratory as the roof's ability to reject solar heat, as shown by a small temperature rise. It is defined so that a standard black (reflectance 0.05, emittance 0.90) is 0 and a standard white (reflectance 0.80, emittance 0.90) is 100. Due to the way SRI is defined, particularly hot materials can even take slightly negative values, and particularly cool materials can even exceed 100.

特に cool (高性能) な材料は、100 を超える場合も有り得る

それによると、「SRI 値はあくまでも標準的な黒と白を 0 と 100 に定義しているものであり、これより hot (低性能) 材料ではマイナス値、より cool (高性能) 材料では 100 を超える値も取ることができる」と説明しています。日本で普及している「高反射率塗料」の白色では、SRI 値が 100 を超える製品もたくさん存在することでしょう。

3.4 SRI 値と JIS K 5675 による「高反射率塗料」の性能評価

インターネット等で海外の動向を見ていると、「高反射率塗料」の SRI 値による性能評価はかなり普及しているように見受けられます。海外での報告は、表 1 に示したように、SRI 値に加えて初期及び 3 年暴露後の日射反射率と放射率も併記しています。一般に分かり易い SRI 値だけでなく、専門家にも役に立つ情報が記載されている点で感心します。

これに対し、JIS K 5675 の「近赤外線領域の日射反射率」を指標とする性能評価は、“色の影響”を考慮したために一般にも専門家にも使い難くなってしまった感じがしています。ただし、海外の動向に対し、JIS K 5675 が劣っている訳ではありません。JIS K 5675 は、性能の基準(合否ライン)を設定している点で CRRC の活動より大きくリードしていると思います。SRI 値による評価でも、これに合否ラインを設定しようとする我々同様、途端に“色の影響”をどう解決するか? という難題に直面することでしょう。現状の考え方は解決できないと思います

4. おわりに

今回は、昨今、問合せの多い「SRI 値」について重点的にご紹介いたしました。「高反射率塗料」の SRI 値を指標とする評価がグローバルに普及しつつあるようですが、JIS K 5675 も決して負けてはいません。機能性面の性能基準(合否ライン)を設定しているだけでなく、屋根用塗料に求められる総合的な性能についても基準を設けています。さらに、認証品(JIS マーク付き製品)については、製造者の総合的な品質管理まで確認されています。ユーザーの立場では「安心して採用」できる証であり、これは非常に有意義だと考えます。

「高反射率塗料」は、日本が世界に誇れる素晴らしい技術だと信じています。日塗検では、この塗料製品(技術)の健全な発展と JIS K 5675 の普及に今後も努力してまいります。

5. 参考文献

- 1) <http://www.coolroofs.org/> (平成 24 年 1 月現在)
- 2) <http://www.coolroofs.org/coolroofing.html>