

真空断熱システム —— 応用の可能性とデザインの要件

ジャン・クリーマーズ

Vacuum Insulation Systems - Possible Applications and Design Considerations

Jan Cremers

真空断熱システムは建設業界における現在もっとも重要な技術革新のひとつであり、あらゆる分野から多くの注目を集めている。建設業界で現在用いられている主な断熱材とは反対に、それは高度に複合的なシステムである。したがってそれらを用いることは失敗の可能性というリスクを負うことを意味し、設計者と建物使用者の双方には高い能力が要求される。既存の断熱材における一般的な熱の移動の内訳は、熱放射によるものが 20 ～ 30%、構造材料における熱伝導が 5 ～ 10%、そして内包される気体における熱伝達が約 65 ～ 75% となっている。そこで代表的な真空断熱システムの作用原理は、製品を真空化することによって、これらの熱移動のうちもっとも大きな部分である気体による熱伝達を最小化することである。このような種類の断熱システムにおける真空状態を長期間維持するためには、真空とされた空間を内包する容器となる材料が、たとえばガラス、金属、プラスチック、プラスチック複合材などといった、通気性のない素材で構成されている必要がある。内部の空間は空洞でもよいし、あるいは空気が抜けるように完全に通気性のあるセル構造を持ったコア材を充填してもよい。このシステムの性能はつくられる真空状態の気圧レベルに依存するものであるため、その構造は大きな気圧に耐えうるものでなければならない(気圧は最大約 10.3t/ m² にもなる)。



3

- 1 エルレンバッハの病院のファサードにおける VIP を用いた外観 (ZAE)
- 2 真空断熱パネル(VIP)における一般的な構造とその要素
- 3 現在あるいくつかの真空断熱パネル製品
- 4 真空断熱システムにおける要素の組み合わせと光の透過性

図 4 は、いろいろな真空断熱システムにおける個々の構成材料とそれらの組み合わせ、光の透過性についての概要を示すものである。

コア材

現時点において、建設業界でまず集中的に研究されているものは、極小の多孔体である断熱コアを内蔵した不透明な断熱システムである。これらのほとんどはグラスファイバーで補強されたフェームド・シリカ(いぶしシリカ。数ナノメートルの粒径の粒状シリカによってつくられた多孔性材料)により構成され、図 2 に示されるような構造となっている。

このような材料が用いられる理由は、それが非常に小さな孔径の多孔体であるため、気体の対流による熱伝達効果を高度に抑制することができることである。そのため標準大気圧における熱伝導率の約 0.018W/mK という値は、通常の空気の 0.026W/mK と比較してかなり小さい。これらの差は、比較的弱い真空状態においても熱伝導率が急激に低下するという特性によってより顕著となり、約 10 ミリバールの気圧においてすでに最小値に近い約 0.004W/mK に達している。このことによって、製造プロセスに要求される厳密さは低減され、容器となる材料および接合部(シールまたは溶接)の空気透過率の許容値を上げることが可能となった。特に重要なことは、システムの許容気圧上昇値によって決定される製品の性能寿命が長くなることである。

容器材料

これについては大きく分類してふたつの材料があり、それぞれまったく異なったシステムがつくられている。ひとつは金属蒸着膜とプラスチックの複合材料であり、もうひとつはステンレス板である。資料によれば一般に前者による製品が VIP (Vacuum Insulating Panel) と呼ばれ、後者による製品が VIS (Vacuum Insulating Sandwiches) と呼ばれている(図 7)。高分子化合物を基盤としてシリカ膜コーティングが施された透明な皮膜については、現時点で必要とされる空気透過率に抑えることはできていないが、さらなる研究が進められている。

品質管理

真空断熱システムにおける熱伝導率は、内部の気



1

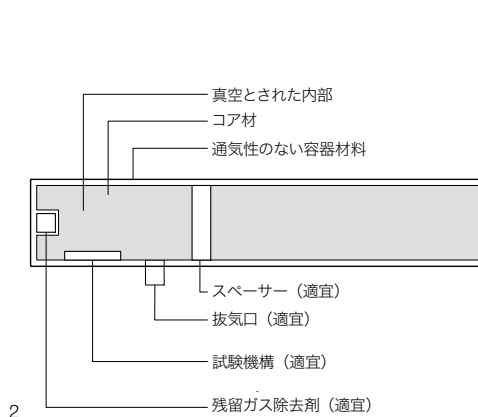
圧とコア材料の水分含有量によって基本的には決まってくる。それゆえシステムの初期内部気圧と水分含有量がわかっていれば、原理上は初期の物性値を算定して品質管理を行うことが可能である。気体の変化など内部における現象を無視すれば、内部気圧の上昇は基本的に容器材料と端部のスペーサー材の品質に起因する。空気の漏洩のあるパネルを純粋に視覚的に見つけ出すことは、特にそれらがすでに取り付けられ覆われてしまったあとではほぼ不可能であるため、考えられる品質管理の唯一の方法は、内部気圧の計測である。これと関連した真空断熱システムの難しさとして、実際の品質保証のためでもある製品チェックが、製造工程のはじめから終わりまで、製作から始まって、輸送、保管、取り付けにいたるすべての段階をカバーする必要があることが挙げられよう。このようなチェックがいろいろな場所で何度も行われるため、即座に結果のわかる簡単な手段が特に必要とされる。その手段は、容器材料に孔をあける必要がなく、パネルのどの部分からでもできるものであることが望ましい。原理的には、設置された真空断熱システムの効果はサーモグラフィの記録技術によっても立証される。ステンレスの容器材料を用いるシステムでは、パネルごとに追加の空気抜きもできるようになっている。

熱伝導率 —— 等級分類

真空断熱システムの分野の製品で、建設用として認定されたものはまだない。一般的に言えば、製造者が述べている熱伝導率の性能値は障害のないパネル表面の中央部分における数値のみである。しかし実際にはこのパネルが取り付けられた状況においてこの数値が達成されることはない。実際の熱貫流率(すなわち、平均熱伝導率)は基本的に形状、材料の選択、端部の形状と接合方法で決まってくる。

エコロジー

現在わかっている範囲の情報においては、真空断熱システムを採用した場合の総材料コストは、その断熱効率のよさゆえに小さくなるといわれている。これまでに建設に使われたシステムにおいては(VIS におけるステンレス鋼は別として)、シリカ板がその重量の大部分を占めている。シリカ板は容器材料のステンレス鋼と同様に、容易に再生利用が可能な材料



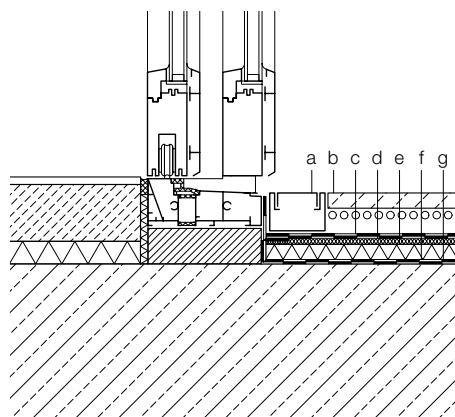
2

である。システムに通気孔をあければ、それらの材料をそれぞれの部材ごとに分解することはたいした手間ではない。そのように分解されれば各部材はまったくの単一素材であるため、再生利用が可能となる。すでに用いられてきた複合素材の容器材料はそのまま再生利用できるものではないが、重量としては小さな割合であり、部分的には再生利用も可能である。

〈設計における注意事項〉

被破壊性

特に薄膜の容器材料に包まれたパネルは非常に壊れやすいものである。それゆえ建設現場で養生されていないパネルを持ち運ぶことはすべきではない。また高度な工場製作品であるがゆえに、それらは保護され、調整可能である良好な下地の上に設置されなければならない。パネルの表面を保護するために柔らかい膜層を付加することはより望ましい。また真空断熱システムには孔があけられないということも心にとめておくべきである。さらに設置に際して張力を加えてはいけないという条件もあり、これらの条件によってこのシステムの設置方法の種類は著しく制限されている。それに加えて、断熱が施されている範囲にドリルや釘によって何かを固定するようなことは完成後



高性能断熱材を使用した段差のないテラスの構成

- a 排水溝。排水ふた 厚50mm
- b 砂利入りコンクリート床板 厚52mm
- c フリース下地シート 厚2mm
- d アスファルト防水シート 厚7mm
- e 建設用保護マット 厚8mm
- f 高性能断熱材 (VIP) 厚20mm
- g 保護マット 厚5mm
- アスファルト防湿シート 厚3mm

もいっさいしてはならないということを、建物使用者に説明しておくことも必要である。

ヒートブリッジ

すべてのヒートブリッジは、断熱材の平均特性値を下げるものである。それによって必要なエネルギー量は上昇し、結露の危険性も出てくる。真空断熱システムの形状の特徴として、その端部においては中央部分よりも高い熱伝導率となることが常であり、そのためヒートブリッジの発生は避けられない。これらのジョイント部分における潜在的な熱伝導効果の影響度は、システムの端部形状がどのようなものであるか、システムの全体形状と寸法、システムが設置される部位の特殊な状況などによって左右される。この断熱システムの高い断熱性能ゆえに、ヒートブリッジの問題はより際立ったものとなる。製品の厚さが非常に薄く、また主な部分については熱伝導率が極小に抑制されているために、そこにおけるヒートブリッジの影響は従来の断熱材と比較してより大きなものになってしまうのである。真空断熱システムはまったく透湿性を持たないため、それ自体の内部に結露が発生することはないのだが、これに関してもジョイント部分が弱点となることはシステムの仕様上の必然である。そこでジョイント部が破壊されないような変

形追従性を持ったディテールが注意深く設計されている必要がある。

規格

望ましい寸法規格は既存の長方形パネルのものであり、その直角のコーナー形状はもっとも正確な幾何学的精度を持っている。とはいってもほかの形状ももちろん可能ではあるのだが、それらは通常製造コストの大きな上昇と耐用年数の減少を伴うこととなる。すべての真空断熱システムに共通する基本的な特徴として、ひとつは製品が製造されたらその規格を変更することができないことが挙げられる。あとからパネル形状を変更することは不可能である。それは寸法許容誤差が考慮される設計段階において特に重要な事項である。より大きなヒートブリッジの問題からも、真空断熱システムの採用にあたっては正確な寸法に対する要求度が非常に高い。また経済的な側面からは、あまり使われない規格寸法の製品をもつことには抵抗があるだろう。

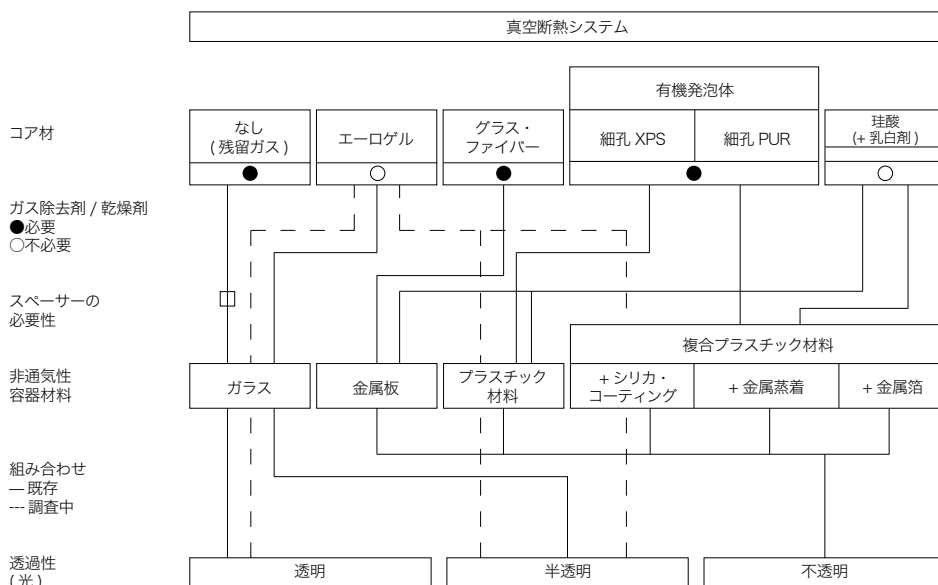
標準規格がもたらす大きなメリットは、それらが常時倉庫に在庫されていてそのたびごとに製造されるものではないため、追加補給材料がすぐに手配できるということである。

可換性／作業性

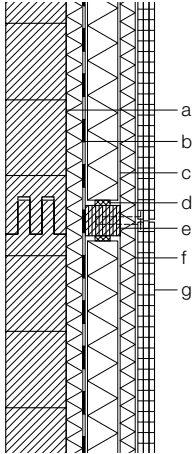
従来の断熱材とはまったく異なって、真空断熱システムには不良品が発生する可能性があるため、簡単に交換できるようになっていることはその助けとなる。そのためその構造はそれぞれのパネル自体あるいはそれらを固定している二次部材システムにアクセスできるようにつくられていなければならない。

使用事例：格子フレーム・ファサードへのパネル取り付け

真空断熱システムは既存の格子フレーム壁面システムへと比較的容易に取り付けることができる。最終的なシステムの厚さが通常の断熱複層ガラスに非常に近いものであるため、それらと交換することもできる。従来のかなり厚い断熱パネルを用いた場合とは対照的に、ガラス面をそれまでと同様に壁面と同一面に納められるということは、これらのシステムの特筆すべき適合性である。このユニットの約32mmという厚さによって、パネル中央では約0.16W/m²K



4



- 5 ミュンヘンの2世帯住宅。
設計：フロリアン・リヒトプロウ
- 6 真空断熱材を設置した壁面の構成
 - a スプルス材壁 厚80mm
 - b 軟質木毛板 厚22mm
 - c 真空断熱材 厚40mm
 - d 弾性スペーサー材
 - e 受材 集成木材40 × 45mm
 - f 軟質木毛板 厚20mm
 - g 3層集成木板 厚22mm
- 7 真空断熱システムの比較 (VIP と VIS)

の熱貫流率値を十分達成することができる。これは現在あるもっとも有効な断熱複層ガラス(ガラス中央における熱貫流率は約 0.65W/m²K)と比較しても約 75%減少した値となっている。ZAE パイエルン(パイエルン応用エネルギー研究センター)によって開発され、エルレンバッハの病院で用いられたパネルは、このような変更の例である(図 1)。

このような用い方をする場合、ファサード全体での熱貫流率はパネルの大きさおよび平面部分に対する端部(端部スペーサーパネルと格子フレーム部)の割合に大きく左右される。ほかの複合板材料の場合と

同様に、真空断熱システムを工場で製造したあとに運搬して据え付けるという工程を可能とするために、パネルの大部分には機械的保護が施されている。これによって据え付けが完了するまでの工程全体を通しての製品の扱いは非常に容易になる。一方で、保護層の間に挟まれた VIP は、従来の試験方法によって品質チェックをすることができない。現在の技術では、設置されたあとに熱分布計測図によって確認するしかない。VIP の運搬および取り扱いに際して破壊(空気もれ)が起こる可能性のほぼ完全な排除は、このシステムの欠点を補うものである。これらのパネル

を用いた際のもうひとつのメリットは、従来の断熱パネルと比較して軽く、薄いということであろう。これは取り付けられた状態についてはもちろんのこと、それほどではないにしても運搬、取り扱いに際しても同様のことがいえる。

経済性

従来の断熱材を全般的に真空断熱システムに置き換えることは決して得策ではない。しかしながら、現時点では非常に高額な初期投資に十分見合うだけの機能、デザイン、経済性、美学におけるメリットが、最小限の厚さで最大限の断熱性能を発揮するという特徴によってもたらされるという場合には、この新しく高性能なシステムが採用されることになるだろう。多くの場合、それは建物にとって特に重要である特定の部位となる。このシステムが建物全体を覆うようなことは、たとえば有効スペースが非常に貴重である場合など、かなり特殊な場合に限られる。このシステムは新しい建物に用いられるとともに、従来の断熱材を用いて適切な断熱を施すだけの十分な空間がないことも多いリノベーションにおいても重要な材料となるであろう。

	VIP	VIS
容器材料	金属複合プラスチック皮膜 (アルミ層 厚 1 μ m)	ステンレス鋼板 厚 0.6 ～ 4mm
コア材	フュームド・シリカ	フュームド・シリカ
端部材	保護シール	溶接ステンレス箔 0.20 ～ 0.27mm
抜気方法	真空室での製造	抜気口からの吸引
厚さ	mm	10 ～ 50(標準 20)
熱伝導率 (パネル中央部) mW/(mK)	4.2	5.3
初期気圧	ミリバール	5 以下
端部スペーサーにおけるヒート・ブリッジ現象	低い	高い
内部を標準大気圧とした場合の熱伝導率	mW/(mK)	20
熱容量	kJ/(kgK)	0.8(主部分)
重量	kg/m ²	160 ～ 180
通常許容温度範囲	°C	-30 ～ 80
通常許容湿度範囲	% (相対湿度)	0 ～ 60(～ 40° C)
一時許容温度 (15 分以内)	°C	80 ～ 120(容器材料の物性による)
耐圧力値	150 ～ 160kPa(10% の変形時)	7.5t/m ² 以上
曲げ強度	不明	強い。容器材料の板厚による
耐用年数 (カタログ値) 年	データ無し	3 ～ 50 年、現場で抜気すれば 100 年以上
被破壊性	非常に高い	低い
修復可能	なし	アクセス可能なら可
防火性能	最大で B2(可燃)	A1(不燃)
一般建材製品認定	準備中	準備中
最大板寸法、l × w	mm	2200 × 1000 (製造時の真空室の大きさによる)。 標準寸法 1000 × 500/1000 × 600
製品寸法誤差	-5 ～ +2/ ± 1	± 2

ジャン・クリーマーズは建築家であり、建設技術の教授であるトーマス・ヘルツォーク博士(ローマ)のもとで、ミュンヘン工業大学において科学研究を行った。現在では推進プロジェクトの一環として、真空断熱システムの建築外壁への適用の可能性について研究している