

連通ウレタン真空断熱材と冷蔵庫への応用

The Development of Open-Cell Polyurethane Evacuated Panel Insulation and Its Application to Refrigerator-Freezer

佐々木 敬 治*
Keiji Sasaki

後 藤 泰 芳*
Yasuyoshi Goto

要 旨

連通ウレタン真空断熱材は、従来の冷蔵庫に使用されているウレタン断熱材の約2.5倍の断熱性能を持ち、重量が粉末真空断熱材の1/4と軽量である全く新しい真空断熱技術である。

この技術は、特に優れた断熱性能が要求される冷凍冷蔵庫への応用に適している。

本報告は、連通ウレタン真空断熱材の構造、原理、特徴、冷凍冷蔵庫への応用について述べる。

Open-cell polyurethane Evacuated Panel Insulation (EPI) represents an entirely new vacuum insulation technology with the insulation efficiency of approximately 2.5 times as large as that of the conventional polyurethane insulator used for refrigerator, and it weighs only one-fourth of silica particle EPI.

This technology is especially suitable for application to refrigerator and other appliances which require high degree of insulation efficiency.

This report will discuss the structure, principle, features and application to refrigerator-freezer of open cell polyurethane EPI.

まえがき

1992年第4回モントリオール議定書締結国会合により、1995年末特定フロン(CFC)全廃が決定され、これまでの冷蔵庫の断熱材であるポリウレタンフォームの発泡剤として使用していたCFC-11、及び冷媒に使用していたCFC-12が使用できなくなり、脱CFC対策が必要となった。

当社は1990年オゾン破壊係数“ゼロ”とする高性能真空断熱材の開発に着手し、1993年2月大型冷蔵庫の商品化に成功した。

第2段階として、HFC-134aの冷凍サイクルの開発と共にシクロペンタン処方ウレタンフォームとシリカ(SiO₂)方式真空断熱材の複合断熱システムを採用し、1994年2月業界で初めてオゾン破壊係数“ゼロ”冷凍冷蔵庫を商品化した。

第3段階として、1995年2月シリカの代わりに連通ウレタンを芯材とした軽量の真空断熱材の量産化を世界で初めてスタートさせ1997年2月基幹部品の効率化と合わせ、ODS(Ozone Depleting Substances)“ゼロ”の省エネ冷凍冷蔵庫を商品化した。この商品は、ODS“ゼロ”と共に消費電力量を1/3(当社94年比)に削減している。

現在当社は業界No.1省エネ冷蔵庫の商品化で、内外からその技術を高く評価されており、1997年秋には真空断熱材と省エネ冷蔵庫をテーマに97EPA(米国環境保護局)成層圏オゾン保護賞を受賞した。本誌は受賞時に報告した技術解説で、冷蔵庫の省エネ基幹部品である連通ウレタン真空断熱材の概要を報告するものである。

1. 連通ウレタン真空断熱材の概要

1・1 連通ウレタンの構造

図1は、連通ウレタン真空断熱材の基本構造図である。芯材(スパーサ材)とゲッター剤を外包材の中に入れ、真空炉内で排気後、封止したものである。今回開発した真空断熱材は、芯材に連通ウレタンを利用したもので、特にセル径の微細化技術を開発したことにより、工業的に容易に得られる0.1~0.5Torrで高断熱性能を得ることができた。

1・2 連通ウレタン真空断熱材の原理

伝熱には、伝導(固体の熱伝導、気体の熱伝導)・対流・放射の3要素があり、断熱とは、これらをいかに

* 電化システム事業本部 冷蔵システム事業部 技術部

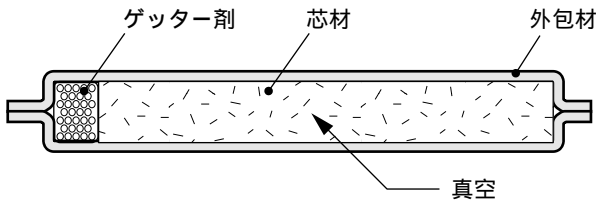


図1 連通ウレタン真空断熱材の構造図
Fig. 1 Structural drawing of open-cell polyurethane evacuated panel insulation.

トータルで小さくするかということである。多孔質・繊維質・粉末は、固体の熱伝導はかなり小さく、対流・輻射も抑えるので大気圧下においても断熱材の働きがある。しかし、これら材料の見掛けの熱伝導は図2¹⁾に示すように80%以上が気体の熱伝導である。よって断熱性能の改善には気体の熱伝導を極力小さくする事が重要である。

対流による熱伝導は、気体圧力をさげるに従って減少し、100Torr以下の減圧または1mm程度の空隙間距離から影響がなくなるので、連通ウレタン真空断熱材における熱伝導は、ウレタン樹脂の固体熱伝導と輻射および真空度依存による気体熱伝導の問題となる。

真空度依存による気体の熱伝導を説明するには、気体分子の平均自由行程という概念が便利である。平均自由行程とは気体分子が他の分子と衝突せずに自由に飛び回る距離であり、これが短いほど気体の熱伝導が活発になる。平均自由行程は(1)式²⁾で表され、表1で見ると真空圧力が低いほど長くなる。

平均自由行程の方が連通セルで形成された壁間距離(空隙間距離)より長くなると、気体分子同士のぶつかる確率が殆ど無視できるオーダーとなる。従って、セル径を100μ以下にすることにより工業的に容易に得られる0.5Torr程度の真空圧力で優れた断熱性能を得ることができる。これが連通ウレタン真空断熱材の原理である。

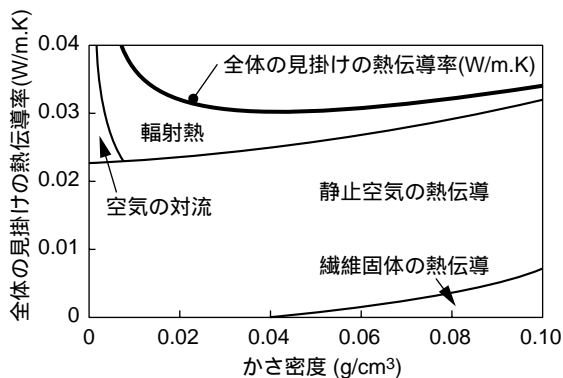


図2 ガラス繊維断熱材の熱伝導成分
Fig. 2 Constituent of thermal conductivity of glass fiber insulator.

表1 空気の圧力と平均自由行程
Table 1 Pressure of gas and mean free path.

圧力 (Torr)	平均自由行程 (at 25 °C)
760	0.06 μ
100	0.5 μ
10	5 μ
1	50 μ
0.1	500 μ
0.01	5mm
0.001	50mm
0.0001	500mm

$$L = 2.33 \cdot 10^{-20} T / (P \cdot r^2) \text{ ----- (1)}$$

L : 平均自由行程 [cm]

T : 温度 [K]

P : 圧力 [Torr]

r : 気体分子半径 [cm]

1.3 連通ウレタン真空断熱材の特徴

(1) 断熱性能

連通ウレタン真空断熱材の真空度と熱伝導率の関係(P-λ曲線)を図3に示す。工業的に容易に得られる真空度0.5Torrで0.008W/m.Kであり、ポリウレタンフォームに比べ1/2.5の値である。

(2) 圧縮強度

連通ウレタンフォームは通常90%以上の空隙を有する構造になっており、断熱性能は優れているが圧縮強度では劣っている。開発した真空断熱材は、真空構造に耐えうる圧縮強度と高断熱性能を両立させるため、連通ウレタンフォームの樹脂強度向上とセルの方向性を改善した。

表2は、真空断熱材に使用している連通気泡ウレタンフォームと、一般的な断熱材として使用されている独立気泡ウレタンフォームの圧縮強度を示したものである。連通ウレタンフォームは、独立気泡ウレタンフォームの約1.4倍の圧縮強度を示している。

(3) その他の特徴

連通ウレタンフォームの発泡剤には全くフロンを使用していない。

粉末真空断熱材に比べ重量が約1/4と非常に軽量である。

廃棄処理する際の粉塵の問題がなく処理しやすい。

外包材全面に金属箔を採用すると共に真空パネル内に透過する微量ガスを固定するゲッター剤を採用し、長期信頼性を確保している。

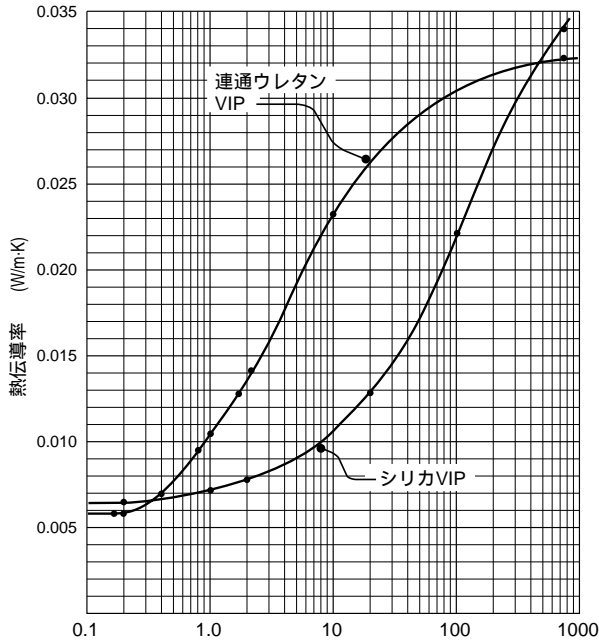


図3 連通ウレタン真空断熱材の真空度と熱伝導率の関係
 Fig. 3 Relationship between vacuum pressure and thermal conductivity for open-cell polyurethane evacuated panel insulation.

表2 連通気泡と独立気泡ウレタンフォームの圧縮強度
 Table 2 Compression strength of two type polyurethane foam.

	10% 圧縮強度 (kPa)
連通気泡ウレタン	200 ~ 250
独立気泡ウレタン	140 ~ 170

2. 連通ウレタン真空断熱材の応用

2.1 複合断熱システム

これまで述べてきた連通ウレタン真空断熱材とシクロペンタン処方ウレタンフォームの複合断熱システムで高断熱性能“オゾン破壊係数”ゼロの冷蔵庫断熱材を開発した。その概要について述べる。

図4は、当社が真空断熱材とウレタンフォームの複合断熱システムを冷凍冷蔵庫の断熱材に応用した断面図である。

図5は真空断熱材カバー率と熱漏洩量の関係をシミュレーションにより求めたものである。

2.2 冷凍冷蔵庫での複合断熱システムの断熱性能評価

(1) 熱漏洩量測定結果

雰囲気温度を-5 に保った恒温室の中に冷凍冷蔵

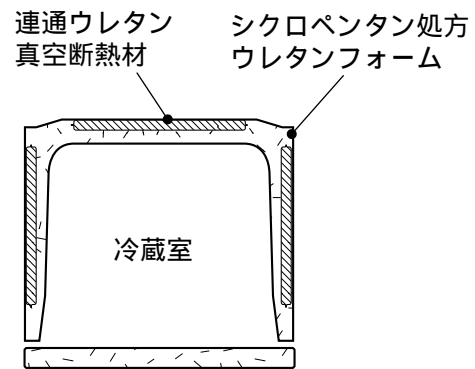
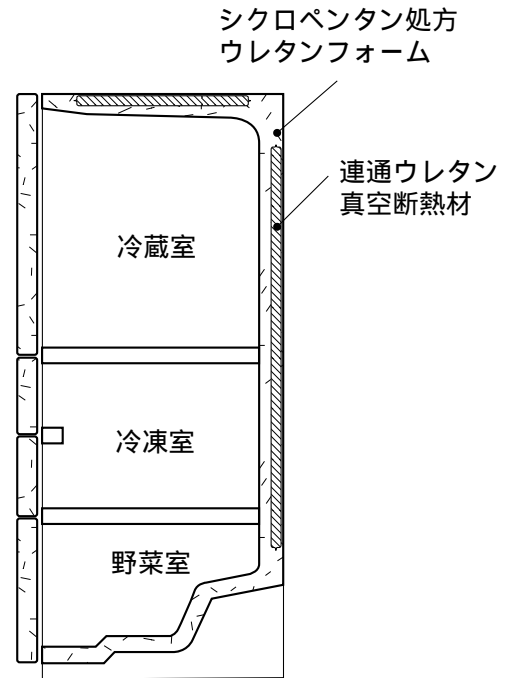


図4 複合断熱システムを採用した冷凍冷蔵庫の断面図
 Fig. 4 Cross-sectional view of refrigerator using combined insulation system.

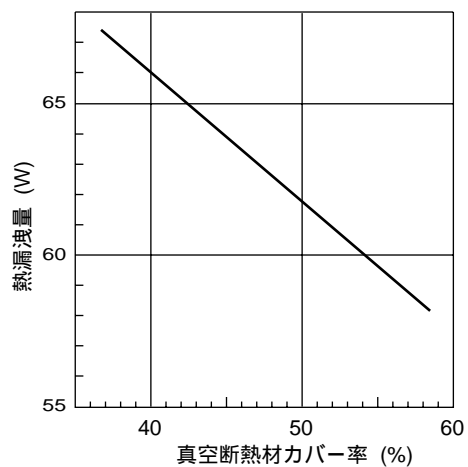


図5 真空断熱材のカバー率と熱漏洩量の関係
 Fig. 5 Relationship between evacuated panel insulation cover-ratio and heat leak.

庫（400リットル4ドア）を設置し、冷蔵室を25℃、冷凍室を45℃となるようヒータで温度コントロールし、庫内温度が±0.3℃、積算電力が±0.5W以内を定常状態とし測定した熱漏洩量を表3に示した。

シクロペンタン処方ウレタンと真空断熱材の複合断熱システムで約20%の熱漏洩量の低減が図られた。

(2) 冷凍冷蔵庫実用試験結果

表4は、連通ウレタン真空断熱材の省エネ効果を示している。400リットルクラスの消費電力量で約12%の効果を得ている。

2・3 ウレタンフォーム中での長期信頼性

金属箔を含むガスバリアー性のラミネートフィルムの採用、熱溶着層等から侵入する微量ガスを固定するゲッター剤の採用により長期信頼性を確保した。

表3 熱漏洩量の測定結果

Table 3 Results of heat leakage measurement.

	断熱材仕様	
	シクロペンタン処方ウレタン	シクロペンタン処方ウレタン + 連通ウレタン真空断熱材
熱漏洩量(W)	72.2	58.0
比率	1.0	0.8

表4 真空断熱材の省エネ効果

Table 4 Energy-saving effect of evacuated panel insulation.

	断熱材仕様			
	シクロペンタン処方ウレタン		シクロペンタン処方ウレタン + 連通ウレタン真空断熱材	
供試品No.	No.1	No.2	No.1	No.2
消費電力量(kWh/月)	39.5	40.5	34.8	35.5
平均	40.0 kWh/月		35.15 kWh/月	
効果	5 kWh/月 (12%)			

400リットル4ドア冷蔵庫試作モデル
テスト条件：JIS C9607 B法

図6は、試作の真空パネルをシクロペンタン処方のウレタンフォーム中に埋め込み、経時変化を測定したデータである。5年経過しても初期真空度を維持していることがわかる。

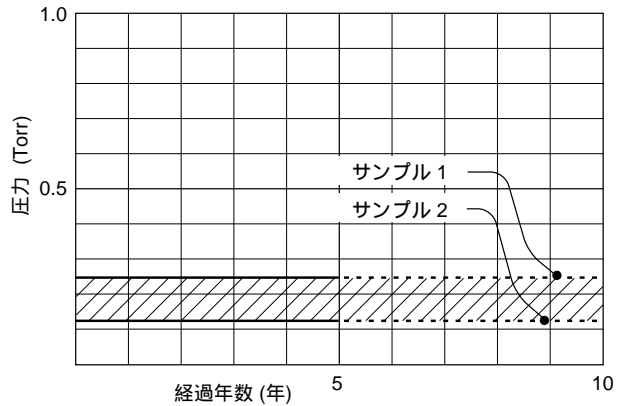


図6 連通ウレタン真空断熱材の経時変化

Fig. 6 Pressure after aging on open-cell polyurethane evacuated panel insulation.

むすび

この複合断熱はフロンを全く使用しないため、“オゾン破壊係数”ゼロであり、地球温暖化係数も小さく、真に高性能と地球環境保全を両立させた断熱システムである。冷蔵庫の省エネは、本誌で紹介した断熱性能改善による熱負荷低減と併せ、圧縮機や熱交換器など、機器の高効率化も重要である。今後、改正される省エネ法で要求されるトップランナー目標実現に向け、更なる技術開発を推進していく所存である。

謝辞

本開発にあたりご協力頂きました武田薬品工業株式会社並びに倉敷紡績株式会社の関係者の方々に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Charles M. Pelannel 1; Engineering Information(IND 3288-2-81)Oohnes-Manville CO , Ind(1981)
- 2) 真空技術講座12;真空技術常用諸表, 日刊新聞社(1965) (1999年1月27日受理)