

# 高性能真空断熱材の開発および冷蔵庫への適用

Development of High-Performance Vacuum Insulation Panel and Application in a Refrigerator

湯 浅 明 子

Akiko Yuasa

井 下 美 桃 子

Mitoko Ishita

栗 山 誠

Makoto Kuriyama

杉 本 修 平

Shuhei Sugimoto

上 迫 豊 志

Toyoshi Kamisako

## 要 旨

真空断熱材とは、多孔質構造の芯材を外被材で覆い、外被材内部を減圧にして密封封止した、非常に熱伝導率の低い断熱デバイスである。昨今の省エネニーズに応えるため、家庭用冷蔵庫筐体（きょうたい）への真空断熱材適用による断熱性能向上は必要不可欠なものとなっている。当社では、2002年に真空断熱材「U-Vacua」を冷蔵庫筐体に適用、その後も独自の研究開発を進め、現在では、2002年当初の2.4倍の断熱性能を得ている。さらに、冷蔵庫への適用工法開発により、2013年度商品化冷蔵庫において、省エネルギー効果6 kWh/年を実現している。（2012年度同等機種比較）。

## Abstract

Vacuum Insulation Panel is a heat insulation device with a very low thermal conductivity in which core material with a vesicular structure is covered by exterior covering material, and the inside of exterior covering material is vacuumed and sealed. In order to meet the current needs for energy-saving, it is essential to improve insulation efficiency by making use of a vacuum insulation panel for refrigerator applications.

In Panasonic, vacuum insulation panel "U-Vacua" was applied for refrigerators from 2002, and independent research and development activities showed that insulation efficiency has been improved by 2.4 times compared with the initial vacuum insulation panel used in 2002.

With engineering development that focuses on improving the insulation efficiency of a vacuum insulation panel, and with application process development for refrigerators, an energy-saving effect of 6 kWh/year has been realized in the commercialization of refrigerators in fiscal year 2013. (Comparison with the model in fiscal year 2012.)

## 1. はじめに

家庭用冷蔵庫の基本構成は、コンプレッサや熱交換器を中心とする「冷却システム」と、作り出した低温状態を効率的に保温する「断熱筐体（きょうたい）」から成り立っている。断熱筐体は、冷蔵庫の冷却・保鮮という本質機能と密接に関係しているだけでなく、断熱性能を高めることにより、昨今の地球温暖化防止や省エネニーズに応え、消費電力量が少ない冷蔵庫を提供し続けている。

当社では、2002年に真空断熱材「U-Vacua<sup>[1]</sup>（注1）」を冷蔵庫筐体に適用し、消費電力量の低減に大きく貢献した。その後も、独自の研究開発を進め、「U-Vacua」を進化させている。

本稿では、省エネ技術の追求を目的とした真空断熱材の断熱性能向上に向けた要素技術開発の取り組みと冷蔵庫への適用効果について紹介する。

## 2. 真空断熱材とは

真空断熱材の外観を第1図に示す。



第1図 真空断熱材の外観

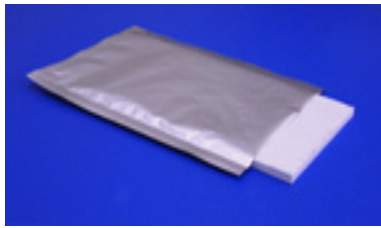
Fig. 1 Outside of vacuum insulation panel

その構成は、基本的には、金属ラミネートフィルムからなる高ガスバリア性の外被材と、多孔質構造の芯材とからなり、内部を減圧にして密封封止したものである。必要に応じて気体吸着材を適用することもある。

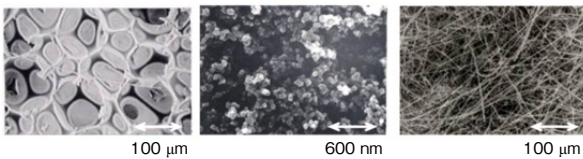
第2図に真空包装前の芯材と外被材の外観写真を示す。

一般に、伝熱は、物質自体の熱伝導、輻射（ふくしゃ）による熱伝達、対流による熱伝達により生じる。一方、真空断熱材の内部は減圧されているため、気体の対流熱伝導による影響は無視できる。また、低温から常温のような使用温度領域であれば輻射の影響もほとんどなく、常温領域で使用する真空断熱材の伝熱は、わずかな残存ガスによる気体熱伝導と、芯材による固体熱伝導とが支

（注1） 当社の登録商標または商標



第2図 真空包装前の芯材と外被材  
Fig. 2 Core material and outer bag before a vacuum package



第3図 芯材（発泡体・粉体・繊維体）の顕微鏡写真  
Fig. 3 Micrograph of core material

配的となる[2]。よって、これらの熱伝導を低減することが、真空断熱材の高性能化には必要不可欠となる。

断熱性能に最も影響する芯材は、大気圧縮からその形状を保持するスペーサーとしての機能を有するものであり、第3図のような発泡体、粉体、および繊維体などが利用できる。これらの芯材材料は、大気圧を受けた状態でも、いずれも空隙率が90%以上の多孔質体であり、真空断熱材の断熱性能はこの芯材特性によってほぼ決定される。

工業的に芯材材料として適している条件としては、

- 安価な汎用材料であること
- 内部ガス圧力が工業的に取り扱いやすい10 Pa程度の低真空領域でも高い断熱性能が得られること

の2点であり、この観点から繊維体であるグラスウールを選定した。

グラスウールは、一般に、その繊維径を細くすることで断熱性能を高めることができる[3]。しかし、繊維径を細くするには、多量の熱エネルギーが必要であり、繊維化時のエネルギー消費量、および製造コストが飛躍的に増大する[3]。

そこで、「U-Vacua」においては、繊維化プロセスとして、生産性が高く、省エネルギーで低コスト化に有利な遠心法を選択し、この工法で最も細くし得る平均繊維径3 μmを芯材として採用している。

また、外被材は、真空断熱材内部圧力を減圧状態で保持するものであり、金属箔（はく）と樹脂膜からなるラミネートフィルムである。「U-Vacua」の芯材はグラスウールを採用しているため、一般的に食品に使用されているものよりも高強度のラミネートフィルムを採用している。

また、真空断熱材に使用する気体吸着材としては、水分吸着材および空気吸着材がある。水分吸着材は、芯材表面に付着した水分[4][5]が真空断熱材内圧を高め断熱性能に悪影響を及ぼすことを防ぐ効果がある。また、真空断熱材製造に際しては、真空ポンプによる減圧環境にて外被材を熱封止しているが、工業的に製造可能な真空引き時間では、真空断熱材内部にはわずかな空気成分が残存する。この空気成分を吸着除去し得る吸着材料を適用することにより、断熱性能の向上が得られる。

### 3. 高性能化の具体的取り組み

当社では、2000年の真空断熱材商品化以来、主に芯材材料と気体吸着材の開発によって断熱性能の向上を図ってきている。

#### 3.1 芯材繊維配向度の向上

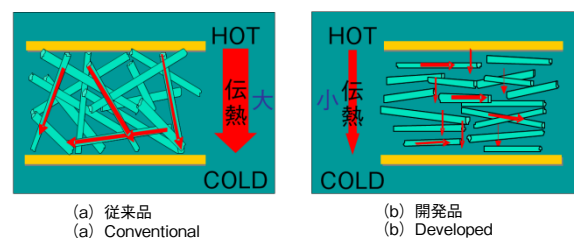
当社が2000年に商品化した真空断熱材「S-Vacua」の芯材は、グラス繊維を懸濁液化させ、紙すきの要領で懸濁液を抄紙、脱水、乾燥してボード状に形成するものであった。

そのため、第4図(a)の模式図に示すように、成形した芯材の繊維方向状態は不規則となり、繊維自身が熱伝導経路となるなど、繊維体の特徴である高い接触熱抵抗を十分に活用できていなかった。

そこで、第4図(b)のように、熱伝導方向に対して垂直にグラスウール繊維を配向させ、高度な積層構造を実現するための芯材成形プロセスの開発を行った。

この芯材成形プロセスは、あらかじめ繊維を積層配列させたグラスウール集合体を原材料とし、繊維の方向性を制御し、その後、バインダーを用いた圧縮成型で配向状態を熱伝導方向に対し垂直に固定化するものである。

その結果、汎用的な工業材料を適用しながらも、繊維と繊維とを点接触で配設することによって、熱伝導方向の熱抵抗を増大させ、固体成分の熱伝導率低減を実現した。この取り組みにより、固体熱伝導率が半減し、断熱性能の飛躍的な高度化が達成できた。



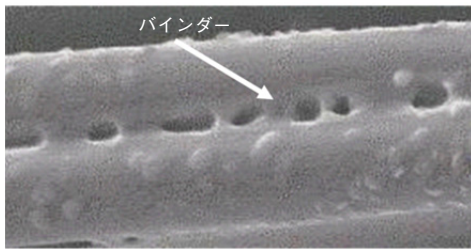
(a) 従来品 (a) Conventional (b) 開発品 (b) Developed

第4図 芯材（繊維）の固体成分の熱伝導模式図  
Fig. 4 Mimetic diagram of core material

### 3.2 バインダーレスによる芯材成形

当初、「U-Vacua」の芯材は、第5図のようにグラスウールを熱伝導方向に垂直に積層し、バインダーで繊維同士を結合させた成形体を適用していた。

しかし、バインダーによる結合部位が熱橋となり、この部分において熱伝導が生じてしまう。そこで、バインダーによる熱橋のない、バインダーレス芯材を真空断熱材に適用する取り組みを行った。

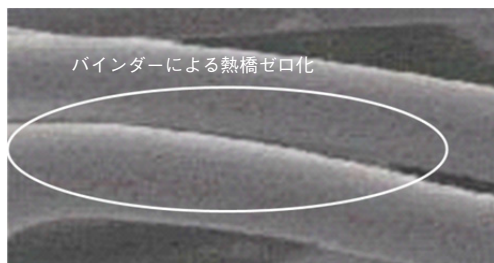


第5図 バインダーを適用した芯材の顕微鏡写真  
Fig. 5 Micrograph of the core material with a binder

バインダーを使用しないと、製造時の取り扱い性の悪化、作業性の悪化、熱伝導率の悪化が懸念されるが、ガラス材料の温度-粘度特性に着眼し、高温下でのガラスの粘性流動を利用することにより、繊維同士には結合部位を形成せずに芯材の圧縮成型を行う手法を確立した。

その結果、第6図に示すようにグラスウール繊維同士が、バインダーによる結着部がないにもかかわらず、寄り添って形状を保っていることがわかる。

この取り組みにより、バインダー成分に起因する熱橋を排除し、固体成分の熱伝導を低減することが可能となり、その結果、断熱性能を約25%改善することができた。



第6図 バインダーレス芯材の顕微鏡写真  
Fig. 6 Micrograph of the no-binder core material

### 3.3 ガラス繊維物性の改善

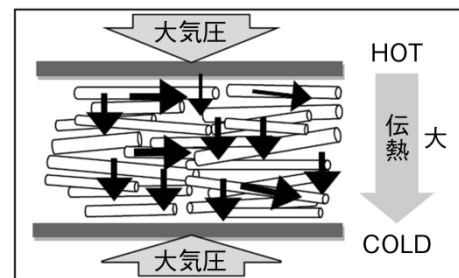
さらなる熱伝導率の改善を行うために、素材にさかのぼった見直しをする必要があると考え、原料となる個々の繊維物性に着目した検討を行った[6].

グラスウールは、真空断熱材の芯材として適用するこ

とにより大気圧縮を受ける。従来品が大気圧縮を受けた際の熱伝導模式図を第7図に示す。

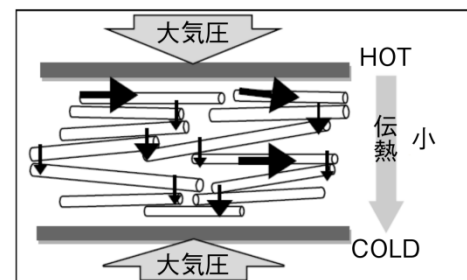
第7図より、グラスウール積層体が大気圧縮を受け高密度化することにより、1本1本のグラスウール繊維が互いに接触しやすくなり、接触点数が増すことがわかる。

そこで、個々の繊維強度を高めることにより、グラスウール積層体は大気圧による圧縮応力を受けてもなお、高反発性を有し、繊維相互間においてより少ない接触点数で同等の減圧空間を保持でき、その結果、芯材部分における繊維密度を低減し、固体熱伝導経路を長くとることができるため、熱伝導率が低減できると考えた。



第7図 従来芯材（繊維）の固体成分の熱伝導模式図  
Fig. 7 Mimetic diagram of conventional core material

グラスウールの繊維強度向上による芯材固形成分の熱伝導率低減模式図を第8図に示す。



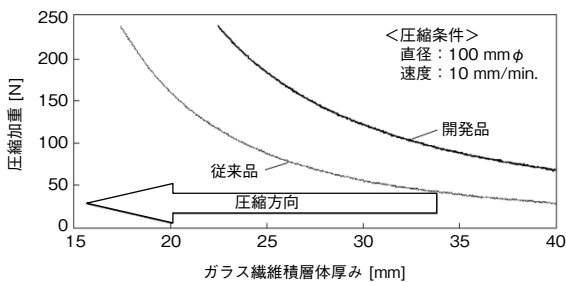
第8図 開発芯材（繊維）の固体成分の熱伝導模式図  
Fig. 8 Mimetic diagram of developed core material

第8図の考えに基づき開発したグラスウール積層体の圧縮強度特性を第9図に示す。

開発品の芯材は、グラスウール繊維物性を改善することにより、ガラス繊維積層体厚みが同等であっても、従来品よりも大きな圧縮荷重に耐えられる、すなわち、圧縮荷重に対する強度が向上していることがわかる。

この取り組みにより、より熱伝導点の少ない芯材とすることで固体熱伝導経路を長くすることが可能となり、さらなる固体成分の熱伝導の低減を実現し、断熱性能を

30%改善した。



第9図 圧縮強度特性におけるグラスウール繊維物性改善効果  
Fig. 9 Effect that improving the physical properties of glass wool has on compressive strength

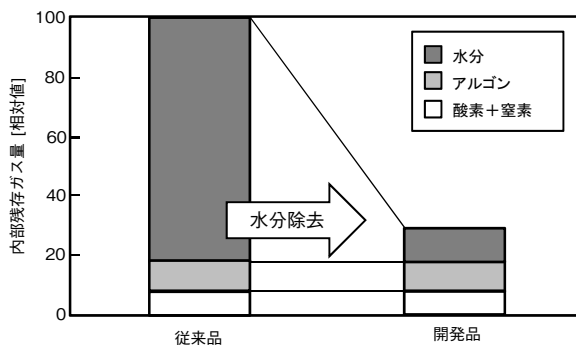
### 3.4 水分吸着材料に対する取り組み

「U-Vacua」の断熱性に影響を及ぼす内部ガスは、その大部分がグラスウール表面に付着した水分からなる[4][5]。

そこで、「U-Vacua」内部圧力低減を目的として2002年商品化当初から水分吸着材として酸化カルシウムを充填していたが、さらに、出発原料・作製条件を見直し、低圧力条件であっても水分を効果的に吸着できる高活性水分吸着材仕様の検討に取り組むとともに、吸着加速プロセスの条件最適化を図った。

第10図に、実験結果に基づく「U-Vacua」内部の残存ガス構成内訳について、水分吸着材従来品を適用した場合と開発品を適用した場合との比較を示す。

従来品では内部残存ガスのうち約80%が水分によるものであったが、開発品適用により、その80%を吸着除去することが可能となったことがわかる。その結果、内部圧力を低減することが可能となり、断熱性能を30%改善した。



第10図 「U-Vacua」内部の残存ガス構成内訳  
Fig. 10 Detail of residual gas composition in the 'U-Vacua'

### 3.5 内部空気除去による高真空化

従来、真空断熱材は真空ポンプにより内部空気の除去を行ってきたが、設備能力や排気時間など、量産性を考慮した上での真空度は10 Pa程度に留(とど)まっていた。そこで、この工程内で除去し切れず真空断熱材内部に残留した空気成分の吸着除去に着目した。

空気成分のなかで、酸素は比較的反応性が高く吸着されやすい気体であるが、窒素は強固な三重結合を有する安定な気体であるため吸着難度が高く、さらに、真空断熱材の内部環境のようなガスが希薄な減圧条件下に、常温で窒素を大容量に吸着することは非常に困難であり、これを可能とする既存素材は存在しなかった。一方で、減圧条件下で窒素を吸着可能な材料は、容易に酸素をも吸着可能であるとも考えられ、新たに真空断熱材の内部環境で窒素(および酸素)を大容量に吸着可能な材料開発を行った。

その結果、真空断熱材内部のような減圧条件下で、窒素および酸素を吸着可能な銅イオン交換型特殊ゼオライトを開発した。この銅イオン交換型特殊ゼオライトは、窒素分子サイズに近い孔径のゼオライト骨格を有するナノ多孔体であり、窒素分子とのファンデルワールス相互作用が生じることに加え、吸着活性点として窒素分子と高親和性の銅イオンを導入することにより、強固な窒素吸着を実現した。

第11図に銅イオン交換特殊ゼオライトの外観写真を示す。



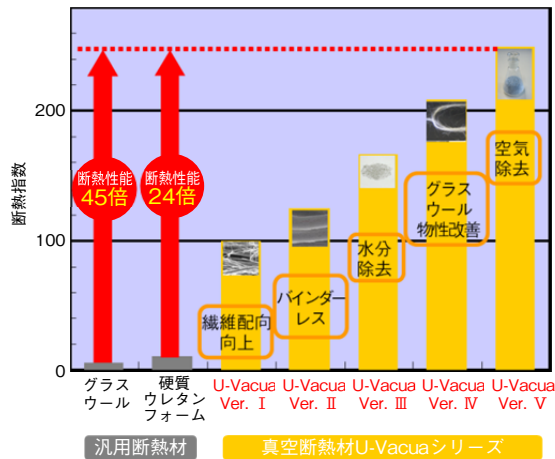
第11図 気体吸着材開発品の外観  
Fig. 11 Outside of gas absorbent

## 4. 真空断熱材の高性能化まとめ

「U-Vacua」における断熱性能改善の取り組みについて、第12図に繊維配向度を改善した「U-Vacua」Ver. Iを基準とした断熱指数にて示した。

第12図に示すとおり、断熱性能は、バインダーレス、

水分除去、グラスウール物性改善の取り組みによって当初Ver. Iの約2倍、さらに空気除去により、約2.4倍まで高めることに成功した。この結果、「U-Vacua」Ver. Vでは、汎用断熱材であるグラスウールの約45倍、硬質ウレタンフォームの約24倍の優れた断熱性能を発揮する。



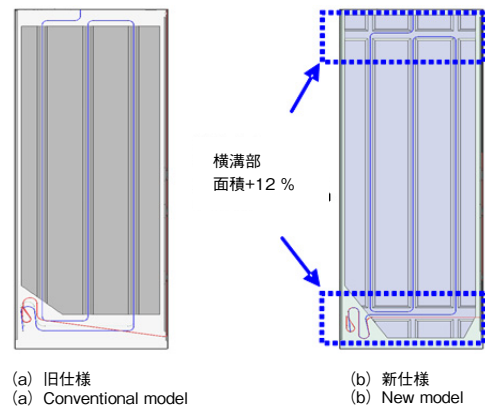
第12図 従来断熱材との断熱性能比較  
Fig. 12 Comparison of insulation efficiency with the conventional insulation

## 5. 当社製冷蔵庫への適用効果

前述のU-Vacuaの高性能化各種取り組みに加え、さらに2013年度冷蔵庫開発では、U-Vacuaの断熱性能をより効果的に活用し、冷蔵庫の熱負荷を低減するため、庫外からの侵入熱、および放熱パイプからの侵入熱を効率よく低減するU-Vacua適用技術の進化に取り組んだ。

具体的には、高い断熱効果が得られる両側面のU-Vacuaの被覆面積の拡大を目指し、従来の縦溝に加えて放熱パイプのターン両端部も被覆可能とする、横溝を設けるU-Vacuaの新工法を開発した。さらに、溝空間の残留空気による外観変形の防止を目的に、独自技術であるトップユニットの強度保持部材を利用した新しい外観保持技術を確認し、商品化を実現した。

これにより、箱体端部を除く放熱パイプのほぼすべてをU-Vacuaで被覆して、被覆率を12%向上（前年度同等適用面比）することにより、上述の侵入熱を効率よく断熱することが可能となり（第13図）、冷蔵庫全体としてU-Vacuaの枚数を削減したにもかかわらず、6 kWh/年の消費電力量の低減効果（2012年度同等機種比較）が得られた。



第13図 横溝付きU-Vacuaの開発  
Fig. 13 Development of U-Vacua with side grooves

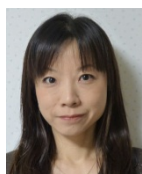
## 6. まとめ

「U-Vacua」高性能化の取り組みは、当社冷蔵庫における消費電力量の低減に貢献してきた。今後、家庭用冷蔵庫への適用だけでなく、さまざまな保冷保温機器において不可欠な断熱性能の改善、および低コスト化に向けた継続的な開発を行うとともに、適用技術の進化、省エネルギー性の追求、リサイクル性向上などに取り組み、地球温暖化抑制の一助となるような断熱デバイスへと進化させていく。

## 参考文献

- [1] 天良智尚 他, “高性能真空断熱材の開発,” 冷凍 vol. 78, no. 906, pp. 233-236, 2003.
- [2] 米野寛 他, “粉末真空断熱材とその冷蔵庫への応用,” National Tech. Rept., vol. 30, no.5, pp.150-160, 1984.
- [3] ガラス工学ハンドブック, 第1版, 朝倉書店, 1999, pp. 519-523.
- [4] 材料と水分ハンドブック, 第1版, 共立出版, 1968, pp. 767-768.
- [5] 佐々木恒孝(編), 表面工学講座〈1〉表面の構造, 朝倉書店, 1971, p. 214.
- [6] 勝部毅 他, “高性能真空断熱材の開発,” Matsushita Tech. Jour. vol.52, no.6, pp. 78-81, 2006.

## 執筆者紹介



湯浅 明子 Akiko Yuasa  
アプライアンス社 技術本部  
Corporate Engineering Div. Appliances Company



栗山 誠 Makoto Kuriyama  
アプライアンス社 冷熱空調デバイス事業部  
Refrigeration and Air-Conditioning Devices  
Business Div., Appliances Company



上迫 豊志 Toyoshi Kamisako  
アプライアンス社 技術本部  
Corporate Engineering Div. Appliances Company



井下 美桃子 Mitoko Ishita  
アプライアンス社 技術本部  
Corporate Engineering Div. Appliances Company



杉本 修平 Shuhei Sugimoto  
アプライアンス社 冷蔵庫事業部  
Refrigerator Business Div., Appliances Company