

## Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels

## Part3- Experimental study on a manufacturing process to suppress pressure increase after sealing of Translucent Vacuum Insulation Panel

Takato MIYATA<sup>\*1‡</sup> Takao KATSURA<sup>\*2</sup> Kanato KIMURA<sup>\*3</sup> Takaharu MATSUI<sup>\*3</sup>  
 Katsunori NAGANO<sup>\*4</sup> Kentaro SEKINE<sup>\*5</sup> Kazuyoshi HARIMOTO<sup>\*5</sup> Miyuki WATANABE<sup>\*5</sup>

## 光透過性を有する薄型真空断熱材の開発に関する研究

## 第3報 光透過型真空断熱材の封止後の圧力上昇を抑制する製造プロセスに関する実験的検討

宮田天和<sup>\*1‡</sup>葛 隆生<sup>\*2</sup>木村奏人<sup>\*3</sup>松井孝遥<sup>\*3</sup>長野克則<sup>\*4</sup>関根賢太郎<sup>\*5</sup>張本和芳<sup>\*5</sup>渡邊深雪<sup>\*5</sup>

## Abstract

This paper is the third report that aims at developing translucent vacuum insulation panels (TVIPs) to contribute retrofitting insulation for windows. In this paper, the authors constructed an apparatus applying the pressure-rate-of-rise method to establish a manufacturing process that suppresses pressure increase after sealing TVIP. As the result, 31 conditions that can be suppressed to less than 1 Pa at 30 minutes after stopping vacuuming were obtained. After estimating the additional costs, it would be better to prioritize extending the heating and vacuuming times rather than adding getter agents. Finally, the TVIPs were produced in the process that suppresses pressure increase and measured its thermal conductivity. As a result, the thermal conductivities of the vacuum layers were reduced to less than 0.011 W/(m·K), which is the lowest value in previous study.

**Keywords:** Vacuum Insulation Panels, Retrofitting Insulation for Windows, Slim and Translucent, Outgassing  
 キーワード: 真空断熱材, 窓の断熱改修, 薄型・光透過性, ガス放出

## 1. はじめに

筆者らは既存建築の断熱改修, 特に熱損失の大きい窓などの開口部に使用できる, 光透過性を有する真空断熱材 (Translucent Vacuum Insulation Panel:以下 TVIP とする) について提案し, TVIP を開発するための研究を行っている. TVIP は Fig. 1 に示すように光透過性を有する材料をスペーサーとして用いて透明ガスバリアフィルムで作成した外袋に挿入し, 真空包装機により真空封止を行い, 真空層を形成することで, 軽量で高い断熱性能を得ることが出来る. 第一報<sup>1)</sup>においては構造計算と伝熱計算により, 真空層を保持することが可能で, 熱橋を最小に抑えることが可能な芯材の仕様について検討し, 数種類の芯材を選定して TVIP の試作を行った. さらに第二報<sup>2)</sup>においては, TVIP の熱伝導率を評価するための真空排気と熱伝導率の同時

測定実験と, TVIP の熱伝導率を予測するための 3 次元数値計算を用いて, TVIP の熱伝導率を評価し, フレーム型芯材の熱伝導率として 0.007~0.008 W/(m·K)を得た. 熱伝導率 0.007 W/(m·K)を目標値とし, 製造工程を変えて TVIP を試作したところ, ガスバリアフィルム外袋にゲッター剤を封入することで, 目標値に最も近い 0.011 W/(m·K)を得た. しかし, 目標値までは到達することが出来ず, 原因として, TVIP 内部の圧力が 1 Pa に達していない可能性が示唆された. TVIP 内部の圧力上昇の原因を調べるため封止前と封止後の内部の圧力測定を行った結果, ヒートシールによる封止直後 1 分で圧力が 1.1 Pa まで上昇することが確認された. TVIP の実現のためには, 封止後も 1 Pa 以下を維持することが出来るガス放出抑制方法を確立することが課題である.

芯材からのガス放出は, 真空封止後の TVIP 内部の圧力上昇の最も一般的な原因である. 真空中の材料からのガス

\*1 Panasonic Housing Solutions Co., Ltd.  
 1006, Kadoma, Kadoma City, Osaka 571-8501, Japan  
 ‡e-mail: [takamiya427@gmail.com](mailto:takamiya427@gmail.com)

\*2 Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University

\*3 Master Course Student, Graduate School of Engineering Hokkaido University

\*4 Principal, National Institute of Technology Tomakomai Collage

\*5 Taisei Corporation

Received: February 19 2026, Accepted: April 20 2026

\*1 パナソニックハウジングソリューションズ  
 (当時 北海道大学大学院 工学院 修士課程)  
 (〒571-8501 大阪府門真市大字門真 1006 番地)  
 ‡e-mail: [takamiya427@gmail.com](mailto:takamiya427@gmail.com)

\*2 北海道大学大学院 工学研究院 教授

\*3 北海道大学大学院 工学院 修士課程

\*4 苫小牧工業高等専門学校 校長

\*5 大成建設

(原稿受付: 2026 年 2 月 19 日, 受理日: 2026 年 4 月 20 日)

放出を減少させる方法には、ベーキング<sup>3)</sup>や芯材のコーティング<sup>4)</sup>、芯材から放出されるガスの吸収<sup>5),6)</sup>がある。ベーキングは最も一般的な方法で、ベーキングによるガス放出の低減はアレニウスの法則<sup>7)</sup>に従った拡散係数の温度依存性に基いている。したがって、焼成温度が高くなるほどガス放出は大きく減少する。一方 TVIP の場合、芯材にプラスチックを使用しているため、ベーキング温度には制限がある。筆者らは、TVIP を作製する際に 60°C の低温で加熱 (ベーキング) すると、真空封止後の TVIP の実効熱伝導率が低下することを示した<sup>8)</sup>。しかし、ガス放出の低減効果は定量化されていない。コーティングによるガス放出の低減効果は、Kwon らがポリカーボネート芯材を用いた実験で定量化している<sup>4)</sup>。Kwon らの実験結果によれば、コーティングは低温ベーキングとともに TVIP の芯材からのガス放出を低減する有望な方法である。筆者らは試料小片に有機ポリシラザンコーティングをすることでガス放出速度が小さくなることを確認している<sup>9)</sup>。芯材から放出されるガスを吸収する方法として吸着材であるゲッター剤<sup>6)</sup>がある。ゲッター剤は水蒸気やガスを吸着できる合金と酸化カルシウムを組み合わせたもので、同封することで圧力上昇を抑えることができる。

筆者らは既報<sup>10)</sup>においてガス放出低減に寄与する各種方法の効果を評価するため、蓄積法を応用したガス放出定量化実験を提案・実施した。そして 8 時間以上の長時間の真空引きと、真空引き中の同時加熱、ゲッター剤の同封を組み合わせることによって、TVIP 封止後の圧力を 1 Pa 以下に維持できる可能性があることを示した。一方で既報<sup>10)</sup>においては真空引きや加熱の時間の延長や、同封するゲッター剤の種類や数量の変更が TVIP 封止後の圧力に与える影響については示されていない。また、実際に試作した TVIP の熱伝導率を測定する実験は行っていない。

本報では TVIP を開発するための研究の第 3 報として、TVIP を実現するために、TVIP 封止後も 1 Pa 以下を維持することが出来るガス放出抑制方法を確立すること、ガス放出を抑制可能な方法のうち最も追加コストを小さくできる方法を明らかにすることを目的とした研究内容を実施した。まず、蓄積法によるガス放出定量化実験を実施し、ガス放出低減に寄与する各種方法の効果を評価した。そして、得られた条件において追加コストを算出し、比較を行った。最後に圧力を低減できる工程で TVIP を試作し、熱伝導率の測定を行い、TVIP の性能を検証した。

## 記号

- $\varepsilon$ : 放射率 [-]
- $Q$ : 真空容器からの全ガス放出速度 [Pa·m<sup>3</sup>/s]
- $V$ : 真空容器の内容積 [m<sup>3</sup>]
- $p$ : 圧力 [Pa]
- $t$ : 時間 [s]

## 2. 光透過性を有する真空断熱材の概要と特長

本研究の開発の対象となる TVIP の作成方法の概要を Fig.1 に示す。本研究では VIP に光透過性を持たせるため、透明なガスバリアフィルムを用いた外袋に中空層(真空層)を形成することが可能な芯材を封入することで作成する。また、内部で発生するガスや外部から侵入するガスを吸着するためにゲッター剤を、放射による伝熱を抑制するために低放射フィルム( $\varepsilon = 0.28$ )を同封する。

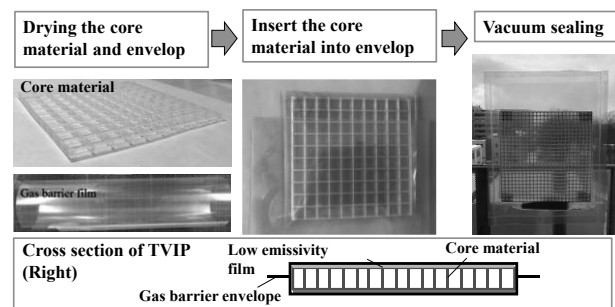


Figure 1 Production process and cross section of TVIP

## 3. 蓄積法を応用したガス放出定量化実験

### 3.1 実験概要

封止後のガス放出量の変化を定量化させるために、蓄積法を応用したガス放出定量化実験<sup>10), 11)</sup>を行った。Fig. 2 に示す真空装置において、真空排気した後に、真空ポンプ前のバルブを閉じ真空ポンプを停止すると、真空容器側の圧力が上昇する。このとき、実効排気速度はゼロのため、

$$Q = \frac{V dp}{dt} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。真空容器内圧力の上昇率  $dp/dt$  [Pa/s] に真空容器の内容積  $V$  を乗じることにより真空容器からの全ガス放出速度  $Q$  を求めることができる。本研究では Fig. 3, 4 のように装置を構成し、ストロー付きのガスバリアフィルム外袋に封入した TVIP 本体を真空容器として蓄積法を行うことで、実物大での測定や真空引き中の加熱、吸着剤の同封の効果、芯材の真空乾燥、アルミ蒸着させた芯材の効果などの検証を可能にした。またストロー付きガスバリアフィルム外袋は、ストローの部分を除くと TVIP で使用する既報<sup>1)</sup>で示したガスバリアフィルムであるため、ポンプ停止後の圧力変化は、真空封止後の圧力変化をほぼ再現できる。真空計はデータロガーに接続可能なピラニ真空計で測定可能圧力範囲が  $1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^5$  Pa、測定精度は  $\pm 20\%$  である。真空ポンプは 1~3 の 3 台を使用した。真空ポンプ 1 はアルバック社 Desktop YTP で、ターボ分子ポンプの排気速度は  $N_2$ : 70 L/s,  $H_2$ : 49 L/s である。真空ポンプ 2 は同 YTP-50MB で、同排気速度は同じである。真空ポンプ 3 は島津製作所 TMP-203LM で、同排気速度は  $N_2$ : 190 L/s,  $H_2$ : 120 L/s である。実験で用いた TVIP

の基本構成を Fig. 5 に示す。フレーム形状の芯材に低放射フィルムを被せ、ガラス 2 枚で挟んで外袋で包んだ構造となっている。芯材の寸法は ABS 樹脂の芯材が厚さ 3 mm、一辺 151 mm、ポリプロピレン(PP)の芯材が厚さ 4.5 mm、一辺 135 mm である。芯材、低放射フィルム、ガラスは実験前に 24 時間以上 70 °C に設定した乾燥庫で乾燥させた。

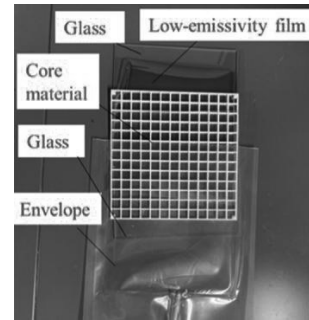


Figure 5 Basic configuration of TVIP

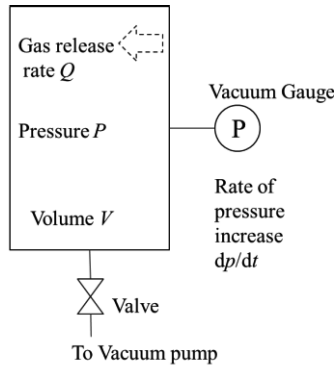


Figure 2 Concept diagram of gas emission volume quantification by pressure-rise-rate method

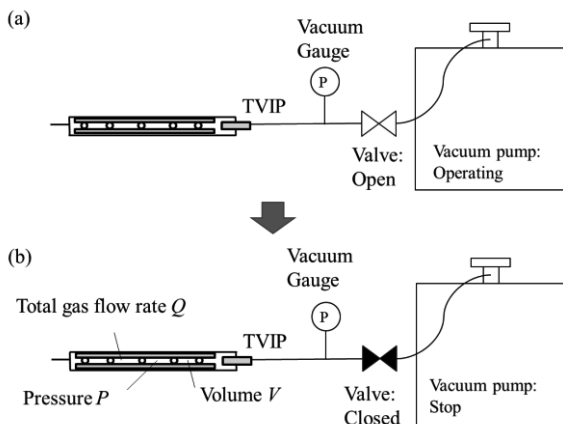


Figure 3 (a) Schematic diagram showing evacuation of TVIP, (b) pressure measurement in TVIP after vacuuming

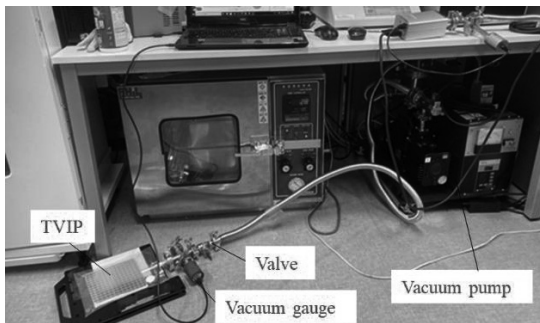


Figure 4 Appearance of experimental apparatus

### 3.2 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。実験は全合計で 118 の条件を実施した。また、実験結果における条件の符号化については Fig. 6 に示す通りに行った。条件は真空引き時間、加熱温度、加熱時間、ゲッター剤の種類と個数、予備真空乾燥の有無、コーティングの有無、芯材の種類、ゲッター剤の配置方法、補強材の種類を変数として行った。真空引き時間は真空引き時間の延長で効果があった 8 時間を基本とした<sup>10)</sup>。条件によって 2 時間、4 時間、8 時間、16 時間、24 時間、48 時間の真空引きをした。芯材は ABS 樹脂のフレーム型芯材を基本使用し、他に 4 マスの ABS 樹脂、9 マスの ABS 樹脂、PP、PP の片面のみを用いた。

Table 1 Experimental conditions

1. Vacuuming time	Standard: 8h(8h) 2h(2h), 4h(4h), 16h(16h), 24h(24h), 48h(48h)
2. Heating temperature	70 °C(H70), 115 °C(H115), 50 °C(H50), No heating(NH)
3. Getter agent	No getter agent (NG), Round getter company A (G), Paste getter (Pg), Round getter company B (Rg), Square getter (Sg)
4. Pre-vacuum drying	No pre-vacuum drying(N), Core material(C), Envelope (E)
5. Coating	No coating (N), Organic polysilazane for envelop (OE), Organic polysilazane for core material (OC), Aluminum deposit for core material (AC)
6. Type of core material	Standard: ABS frame (S), Polypropylene frame (P)
7. Location of getter agent	Standard: Place getter agent upstream side of vacuum pump (S), Place getter agent downstream side of vacuum pump (DS)
8. Reinforcement plate	Standard: 2 glass plate (S), 2 biaxially oriented PET (P), 2 acrylic plate (A), 2 Polycarbonate plate (PC)

8h-H70-G2-N-N-S-S-S  
 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑  
 1 2 3 4 5 6 7 8  
 Number of getter agent

Figure 6 Coding of conditions in the experimental results  
 (The numbers correspond to Table 1)

加熱は真空引きの開始とほぼ同時にホットプレートで下面が 70 °C 程度になるようにして加熱を開始した。加熱温度の条件は 70 °C の他に 50 °C にしたものがある。加熱

後 TVIP を室温に戻すため、条件の真空引き時間経過後ヒーターを取り除いて 15 分程真空引きを継続してから測定を開始した。コーティングは、有機ポリシラザンで芯材または外袋をコーティングしたもの、芯材にアルミ蒸着したもの、外袋の縁をエポキシ樹脂接着剤で塞いだものがある。予備真空乾燥は芯材または外袋を事前準備として真空乾燥させたものである。ゲッター剤は通常 1 個で、条件によって 2 個から 4 個を同封した。ゲッター剤は同封することで圧力上昇を抑えることができる。用いたゲッター剤の種類を Table 2 に示す。既報<sup>2)</sup>でも使用していた A 社丸形ゲッターの他に B 社丸形・四角形ゲッター、A 社塗布型ゲッター、A 社丸形ゲッターの内側の粉末を取り出した条件を実施した(Fig. 7)。芯材の上下に挟んだ補強材は基本ガラスで、二軸延伸 PET、アクリルにした場合もある。

なお後述する実験結果は真空ポンプ 1~3 のいずれかを使用して得られたものであるが、真空ポンプの違いが実験結果に与える影響は小さく、無視できる範囲であることを確認している。

Table 2 Type of getter agents

	Inside material	Outside material
Round type (G)	BaLi0.09g/CaO2.7g/CO <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.45g	Stainless steel
Past getter (Pg)	Unknown (Probably CaO)	None
Round type (Rg)	BaLi0.15g/CaO2.7g	Stainless steel
Square type (Sg)	BaLi/CaO Total 10g	Synthetic paper

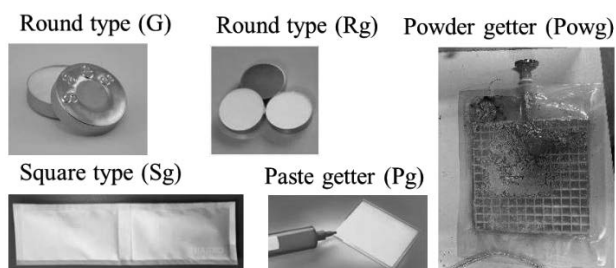


Figure 7 Appearance of getter agents

### 3.3 実験結果及び考察

実験結果の一例として、8 時間の真空引き、同時加熱、および 1 つのゲッター剤を同封した条件 (8h-H70-G-N-N-S-S-S) と、同時加熱を除外した条件 (8h-NH-G-N-N-S-S-S) とゲッター剤を除外した条件 (8h-H70-NG-N-N-S-S-S) における真空引き後の圧力を Fig. 8 に、およびガス流量の変化を Fig. 9 に示している。真空引き後の圧力変化から、同時加熱を排除した条件および封入ゲッター剤を排除した条件では、経過時間 1800 秒における圧力が 10 Pa を超えることが確認できる。一方、複合条件 (8h-H70-G-N-N-S-S-S) 下での圧力は約 1 Pa であり、圧力上昇を抑制するには 8 時間の真空引き、同時加熱、ゲッター剤封入の 3 条件をすべて組み合わせる必要があることを示している。さらに、複合条件下でのガス放出率は Fig. 9 に示すように最小であった。

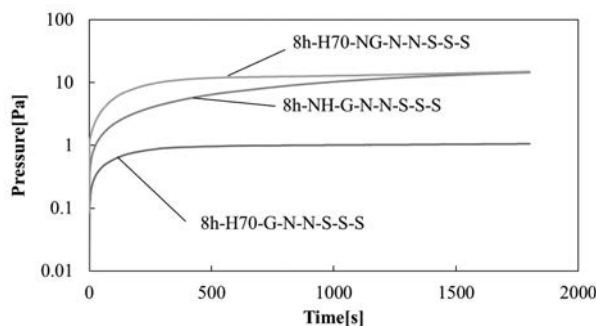


Figure 8 Change in pressure after vacuuming

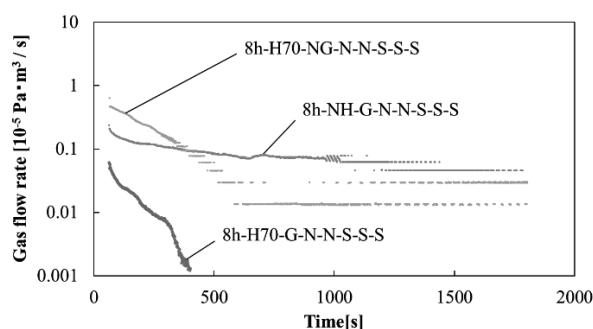


Figure 9 Change in Gas flow rate  $Q$  after vacuuming

Fig. 10 にゲッター剤の個数、Fig. 11 に真空引き時間に対する最終圧力 (バルブを閉めてから 30 分後の圧力) の変化を示す。Fig. 10 ではゲッター剤の個数が多い程、加熱の有無では加熱有の方が最終圧力は小さかった。四角形ゲッターは個数に対する減少幅が小さかった。個数増加による減少幅は加熱無の方が大きい傾向となった。加熱の有無にかかわらず、A 社丸形ゲッターが個数の変化による圧力低減効果が最も大きかった。Fig. 11 では真空引き時間は長い程、ゲッター剤を同封の有無では同封有の方が、加熱の有無では加熱有の方が最終圧力は小さかった。加熱無の場合、8 時間まではゲッター剤の同封の有無で明確な傾向はなかったが、16 時間以上ではゲッター剤を同封した方が圧力上昇を抑えられた。真空引き時間の延長での圧力上昇の抑制効果は加熱無の方が大きかった。加熱有の場合、ゲッター剤を同封した方がどの真空引き時間でも最終圧力が小さく、B 社丸形ゲッターを同封した場合に一番最終圧力が小さかった。ゲッター剤無の場合 8 時間未満で圧力上昇が大きいが、ゲッター剤有の場合 2 時間でも 3.4 Pa 未満であった。B 社丸形ゲッターを同封して 48 時間加熱しながら真空引きした条件が実施した 118 条件の中で最も最終圧力が小さく、0.18 Pa となった。

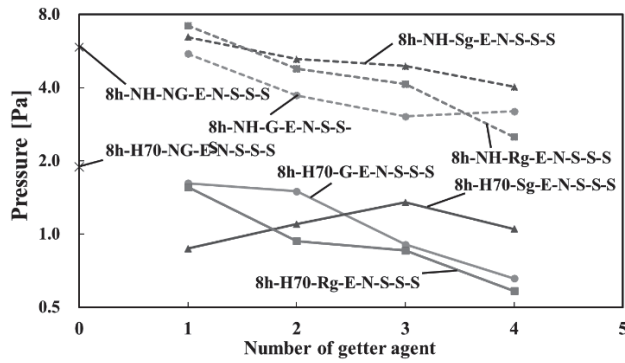


Figure 10 Change in number of getter agent and final pressure

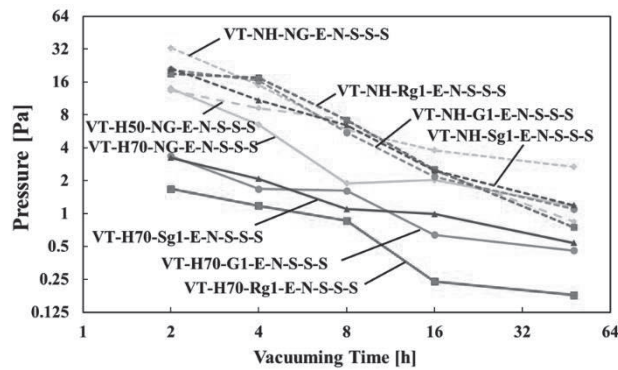


Figure 11 Change in vacuuming time and final pressure

Table 3 は、真空引き後 30 分以内に 1 Pa 未満を達成した 31 条件の結果を示している。1 Pa 未満達成に影響を与えた主な要因は、8 時間以上の長時間の真空引き、同時加熱、ゲッター剤の同封であった。長時間の真空引き、同時加熱、ゲッター剤の同封の効果は、一番下の条件の様に例えば加熱時間を 48 h としゲッター剤の同封を無とする等、他の要因の変数を大幅に増大させることで 1 Pa 以下の圧力を維持できる点で、相互に代替可能であることが判明した。しかしながら、27 の条件で、長時間の真空引き、70 °C 以上での同時加熱、ゲッター剤の同封の 3 要素を組み合わせていることから、この 3 要素の組み合わせが最も重要であると言える。さらに、封入容器の前段階での真空乾燥も減圧に有効であることが判明した。一方、コア材料のコーティングはガス放出量を低減できるものの、大きくてもその効果は半減程度であり、ガス放出量を 1 桁低減する同時加熱や封入ゲッター剤ほどの顕著な効果はなく、決定的要因とは見なされなかった。また、今回の実験では乾燥庫から芯材とガラス板、低放射フィルムを取り出してから、外袋に入れて外袋の開口部をシールしてポンプに接続し真空引きを開始するまでの作業の間に、実験室内の空気中の水蒸気等を吸着してしまう可能性があった。そのため、全ての材料が完全に乾燥した状態のまま真空引きを開始することができた場合には、真空引き時間や加熱時間、加熱温度をより減らすことができる可能性がある。

1 Pa 以下を達成した条件について圧力上昇を抑えるための追加費用が最小となる条件を求めるために、加熱、ゲ

ッター剤、真空乾燥、真空引きにかかる費用 (Table 4) を求めた<sup>注1</sup>。加熱と真空乾燥、真空引きにかかる費用は、ホットプレートと真空ポンプで測定した平均電力から電力量を求め、2025 年時点の電気料金の目安単価 31 円/kWh をかけて求めた。ポンプ動作時間は加熱停止後室温に戻すための 15 分間も含めた時間としている。ゲッター剤は 1 個あたりの費用である。費用は全て約 15 cm 角の芯材 1 つで TVIP を作製した場合で算出した。各条件の圧力上昇を抑えるための追加費用を Fig. 12 に示す。最も追加費用が最小となるのはゲッター剤無、50 °C で加熱しながら 48 時間真空引きした 48h-H50-NG-E-N-S-S-S の 169 円であった。結果よりゲッター剤の個数が多い条件は追加費用が高く、ゲッター剤の個数が追加費用に最も大きく影響していることが伺える。一方で、加熱時間や真空引き時間の延長による追加費用の増大は比較的小さいことが伺える。Fig. 10 や Fig. 11 で加熱時間や真空引き時間の延長による圧力の低減効果はゲッター剤の追加と同等であるため、TVIP 内部の圧力をより下げる場合には加熱時間や真空引き時間の延長を優先した方が良い。また、低コストでの TVIP の実現にはゲッター剤のコスト低減が課題であると言える。

Table 3 Conditions under which 1 Pa or less was achieved at 30 minutes after vacuuming

Code	Vacuuming time [h]	Heating temperature [°C]	Getter agent	Vacuum drying	Others
8h-H70-G2-N-N-S-S-S	8	70	G2		
8h-H70-Rg1-N-N-S-S-S	8	70	Rg1		
8h-H70-Rg2-N-N-S-S-S	8	70	Rg2		
8h-H70-Pg-N-N-S-S-S	8	70	Powg		
48h-H70-G1-N-N-S-S-S	48	70	G1		
8h-H70-G1-E-N-S-S-S	8	70	G1	Envelope	
8h-H70-G2-E-N-S-S-S	8	70	G2	Envelope	
8h-H70-G3-E-N-S-S-S	8	70	G3	Envelope	
8h-H70-G4-E-N-S-S-S	8	70	G4	Envelope	
8h-H70-G1-EC-N-S-S-S	8	70	G1	Envelope + core	
8h-H70-Rg1-E-N-S-S-S	8	70	Rg1	Envelope	
8h-H70-Rg2-E-N-S-S-S	8	70	Rg2	Envelope	Place getter agent downstream side
8h-H70-Rg3-E-N-S-S-S	8	70	Rg3	Envelope	
8h-H70-Rg4-E-N-S-S-S	8	70	Rg4	Envelope	
8h-H70-Sg1-E-N-S-S-S	8	70	Sg1	Envelope	
8h-H70-G2-E-N-S-DS-S	8	70	G2	Envelope	
4h-H70-Rg2-E-N-S-S-S	8	70	Rg2	Envelope	
8h-H115-G1-E-N-S-S-S	8	115	G1	Envelope	Place getter agent downstream side
8h-H70-Rg1+Sg1-E-N-S-S-S	8	70	Rg1+Sg1	Envelope	
8h-H70-Rg2-E-N-S-DS-S	8	70	Rg2	Envelope	
8h-H70-G1+Rg1-E-N-S-S-S	8	70	G1+Rg1	Envelope	
8h-H70-G1+Sg1-E-N-S-S-S	8	70	G1+Sg1	Envelope	
16h-H70-G1-E-N-S-S-S	16	70	G1	Envelope	
24h-H70-G1-E-N-S-S-S	24	70	G1	Envelope	
48h-H70-G1-E-N-S-S-S	48	70	G1	Envelope	
16h-H70-Rg1-E-N-S-S-S	16	70	Rg1	Envelope	
48h-H70-Rg1-E-N-S-S-S	48	70	Rg1	Envelope	
16h-H70-Sg1-E-N-S-S-S	16	70	Sg1	Envelope	
48h-H70-Sg1-E-N-S-S-S	48	70	Sg1	Envelope	
16h-NH-Rg1-E-N-S-S-S	16	70	Rg1	Envelope	
48h-H50-NG-E-N-S-S-S	48	70	No getter	Envelope	

Table 4 Additional cost conditions

	Cost (JPY)		Cost (JPY)
Heating 4h	3	Square getter (Sg)	200
Heating 8h	6	Pre-vacuum drying 24h	65
Heating 115°C 8h	10	Pumping 4h + 15min	9
Heating 16h	11	Pumping 8h + 15min	17
Heating 24h	16	Pumping 16h + 15min	33
Heating 48h	32	Pumping 24h	49
Heating 50°C 48h	7	Pumping 24h + 15min	49
Round getter (G)	700	Pumping 48h + 15min	97
Round getter (Rg)	200		

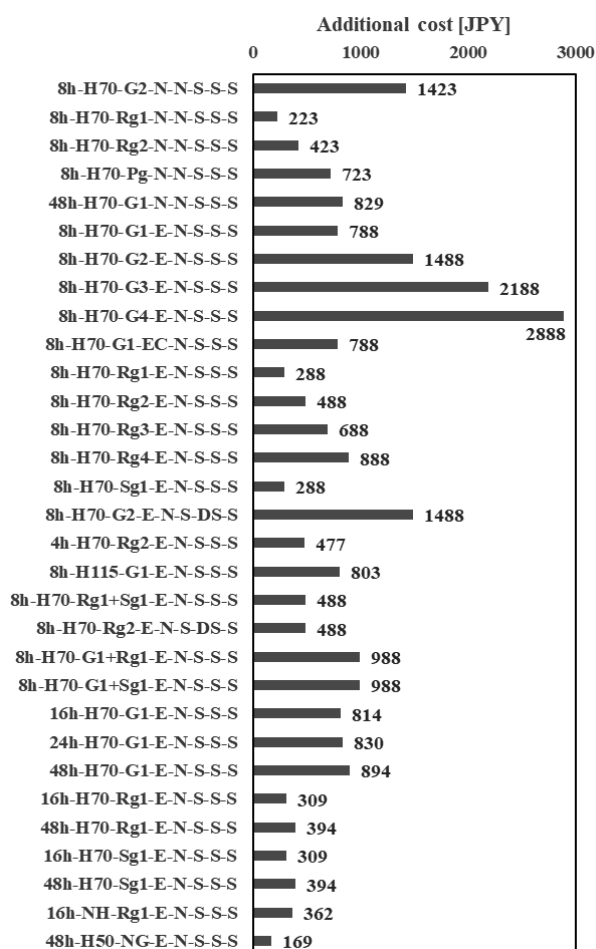


Figure 12 Additional cost for each condition

#### 4. ヒーターを導入した真空封止機を用いた TVIP の試作

##### 4.1 実験概要

長時間真空引き、加熱、ゲッター剤同封を組み合わせた条件での TVIP の試作を行い、既報<sup>2)</sup>と同様に熱流計法を応用した熱伝導率測定装置を用いて TVIP の熱伝導率を測定し、その結果をもとに真空層の熱伝導率を求めた。さらに、熱伝導率測定結果に基づき、既存のガラス窓に TVIP を設置した場合の総合熱伝達率を算出した。TVIP は Fig. 13 に示す真空封止機で作製した。試作工程は 3 辺を閉じ

たガスバリアフィルム外袋内に芯材等の材料を入れ、それらを真空包装機のチャンバー内に設置し、ヒーターを ON にして加熱を行いながら真空引きを開始する。所定の時間経過後、最後の 1 辺をヒートシールによって封止し、真空封止された TVIP を作成した。真空引き中はチャンバー内の圧力は 0.9 Pa 程であることを確認した。

チャンバー内温度はヒーターで 70 °C に保ちながら真空引きを同時に行った。芯材として ABS フレームを使用した。実験条件を Fig. 14 に示す。E-1~E-4 は真空層が 1 層の条件である。E-1 と E-2 は補強板にガラスを、E-3 と E-4 は補強板にポリカーボネートを使用した。真空引きと同時に加熱はそれぞれ 8 時間および 24 時間実施した。E-5 では、コア材の間に PET 板を挟み込むことで二層の真空層を形成した。熱貫流率の計算にあたっては、単板ガラスの熱貫流率を 6 W/(m<sup>2</sup>·K)、複層ガラスの熱貫流率を 3.4 W/(m<sup>2</sup>·K)と仮定した。さらに、室内側の総合(対流+輻射)熱伝達率は 9 W/(m<sup>2</sup>·K)、室外側は 23 W/(m<sup>2</sup>·K) と設定した。



Figure 13 Vacuum sealing machine equipped with heater

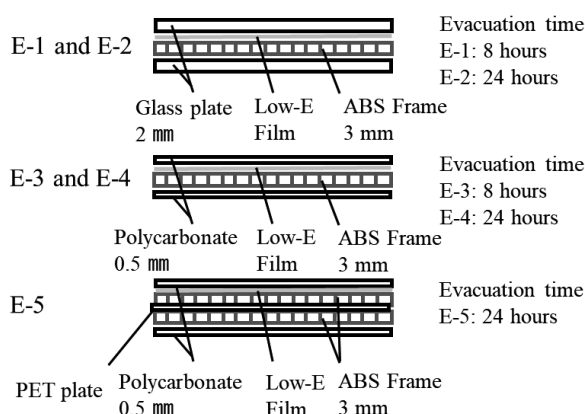


Figure 14 Core material conditions of TVIPs

##### 4.2 実験結果及び考察

経過時間に対する真空層熱伝導率の変化を Fig. 15 に示す。すべての条件で真空封止後 1440 分経過後、既報<sup>2)</sup>で得られた真空層熱伝導率のうち最も低い値である 0.011 W/(m<sup>2</sup>·K)を下回ることができた。このことから長時間真空引き、加熱、ゲッター剤同封を組み合わせた条件が、TVIP

の断熱性能を向上させること確認した。また、E-1 と E-2、E-3 と E-4 を比べると 24 時間真空引きの条件の方が、真空層熱伝導率が低くなることを確認した。また真空層を 2 層にしたものは、真空層熱伝導率が 1 層のものに比べて高くなった。

Fig. 16 に試作した TVIP を既存の窓に張った際の総合熱貫流率を示す。E-5 条件の TVIP を単板ガラスに取り付けた際は設置前後で  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  から  $1.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  に、複層ガラスに取り付けた際は設置前後で  $3.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  から  $1.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  に総合熱貫流率を下げることで、 $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  以下となる結果が得られた。

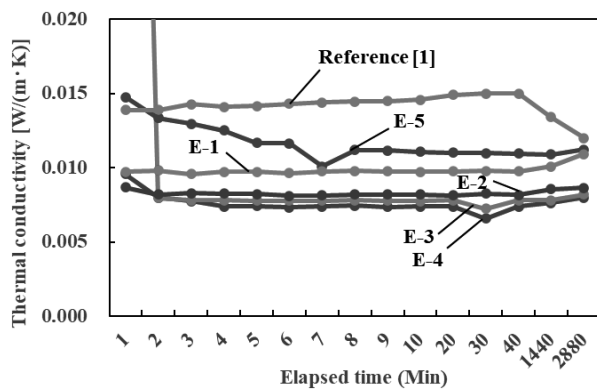


Figure 15 Change in thermal conductivity of the vacuum layer

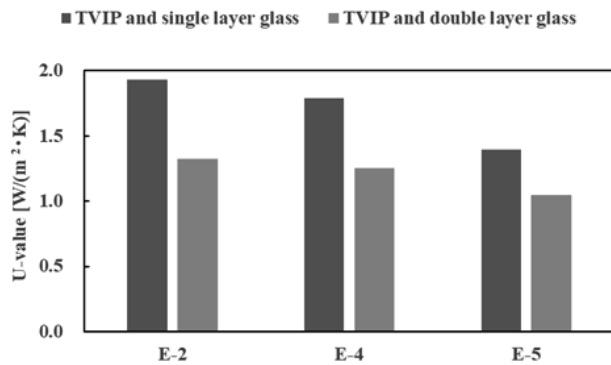


Figure 16 Overall heat transfer coefficient

## 5. まとめ

以下に、本論文のまとめを示す。

- 1) 光透過型真空材の芯材からのガス放出量の低減を目的として、蓄積法を応用したガス放出定量化実験を構築した。そして真空引き時間、真空引き中の加熱、様々なゲッター剤の同封の効果を検証した。
- 2) ゲッター剤の個数や真空引き時間の延長に応じて、真空引き終了後 30 分経過時点の TVIP 内部の圧力が低下する傾向が得られた。また、圧力を 1 Pa 程度に抑えられる条件として、31 条件を確認した。そのうち 27 の条件において、長時間の真空引き、 $70^\circ\text{C}$  以上での同時加熱、ゲッター剤の同封の 3 要素を組み合わせていたこと

から、この 3 要素の組み合わせが最も重要であるという結論を得た。

- 3) 真空引き終了後 30 分経過時点の TVIP 内部の圧力が 1 Pa 以下となる追加費用を検討した。結果よりゲッター剤の個数と比較して、加熱時間や真空引き時間の延長による追加費用の増大は小さいことが分かり、TVIP 内部の圧力をより下げる場合には加熱時間や真空引き時間の延長を優先した方が良いことが分かった。
- 4) ヒーターを取り付けた真空包装機を用いて TVIP を試作し、熱伝導率を測定した。すべての条件下において、既報で得られた真空層熱伝導率のうち最も低い値である  $0.011 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  を下回ることができた。このことにより、長時間の真空引き、同時加熱、ゲッター剤の同封が TVIP の断熱性能の向上に効果的であることを確認した。
- 5) 真空層が 2 層となる TVIP を単板ガラスに設置した場合、総合熱貫流率を  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  から  $1.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  に、2 重ガラスに設置した場合は、 $3.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  から  $1.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  に下げられることが分かった。

## 謝辞

本研究の一部は一般財団法人大成学術財団研究助成によるものである。また、本研究を遂行するにあたって、三菱ケミカル(株)、帝人フロンティア(株)、パナソニックハウジングソリューションズ(株)より御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 注釈

注 1) ゲッター剤の費用については当時筆者らが購入した際にかかった費用をもとに決定している。ただし、実際購入する際にかかる費用はこれらと異なる場合も想定されるため注意が必要である。

## 参考文献

- 1) Katsura T., Yang Z., Aihara M., Nakamura M., Nagano K., Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels, Journal of JSES, Vol.44, No.2, pp.49-57 (2018), <https://www.jses-solar.jp/journal/backnumbers/j244/p49-57>
- 2) Katsura T., Radwan A., MEMON S., Nagano K., Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels, Part2- Establishment of target values for the insulation performance of translucent vacuum insulation panel and experimental investigation of performance improvement after sealing, Journal of JSES, Vol.50, No.5, pp.67-74 (2024), <https://www.jses-solar.jp/journal/backnumbers/j283/p67-74>
- 3) R J Eleyse. "Outgassing of vacuum materials II", Vacuum 25, pp.347-361 (1975), [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(75\)91653-X](https://doi.org/10.1016/0042-207X(75)91653-X)
- 4) Kwon J., Jung H., Yeo I., Song T., Outgassing characteristics of a polycarbonate core material for vacuum insulation panels., Vacuum 85, pp.839-846 (2011),

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2010.12.009>

- 5) Manini P., and F. B. Arluno., Device for maintaining a vacuum in a thermally insulating jacket and method of making such device. U.S. Patent 5544490 (1996).
- 6) Saes Getters s.p.a., 非蒸発型ゲッター「コンボゲッター」, (2024-4), <https://www.ipros.jp/product/detail/2000308921>
- 7) Crank J, Park GS., Diffusion in polymers., New York, Academic Press (1968)
- 8) Katsura T., Memon S., Radwan A., Nakamura M., Nagano K., Thermal performance analysis of a new structured-core translucent vacuum insulation panel in comparison to vacuum glazing: Experimental and theoretically validated analyses., Solar Energy 199, pp.326-346 (2020),  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.030>
- 9) 原田 遵他: 光透過性を有する真空断熱材の大型化と芯材からのガス放出抑制に関する検討, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 55 回学術講演会論文集, AP-1 (2021)
- 10) Takato Miyata, Erkki Hirvonen, Takao Katsura, Katsunori Nagano: Experimental investigation of methods to reduce outgassing from core materials in the fabrication process of transparent vacuum insulation panels, E3S Web of Conf. 396 04008 (2023),  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339604008>
- 11) 日本真空学会【編】, 真空化学ハンドブック, コロナ社 (2018)