

# 全熱交換素子向け湿度透過膜

Moisture-Permeable Membrane for Energy-Recovery Core

浜田 洋 祐  
Yousuke Hamada

藤本 真 司  
Shinji Fujimoto

福本 将 秀  
Masahide Fukumoto

松居 栄 太 郎  
Eitaro Matsui

畑 元 気  
Motoki Hata

## 要 旨

熱交換形換気装置に搭載される全熱（エンタルピー）交換素子は、換気の際に排出される温度（顕熱）や湿度（潜熱）を、湿度透過膜を介して回収することにより、換気によるエネルギーロスを軽減する省エネルギーデバイスである。全熱交換素子に用いる湿度透過膜の透湿樹脂層の最適化と薄膜化により、従来の湿度透過膜と比べ透湿度を約40%向上した。さらに、開発した全熱交換素子を用いた熱交換形換気装置は、透湿度の向上により排気から給気へ回収する湿度量を増加させ、室外の気温が-30℃まで低下する寒冷地での通常運転を実現した。

## Abstract

An energy-recovery core mounted on an energy-recovery ventilator can reduce the amount of energy lost during ventilation. It exchanges sensible and latent heat through a moisture-permeable membrane. To optimize a thin plastic membrane, we developed a moisture-permeable membrane having a moisture permeability that was approximately 40% higher than a conventional membrane. The amount of moisture transferred from exhaust air to supply air was increased by improving the moisture permeability of the developed membrane. Hence, we were able to develop an energy-recovery ventilator using the developed energy-recovery core, and it operated normally even when the ambient temperature was -30 degrees Celsius.

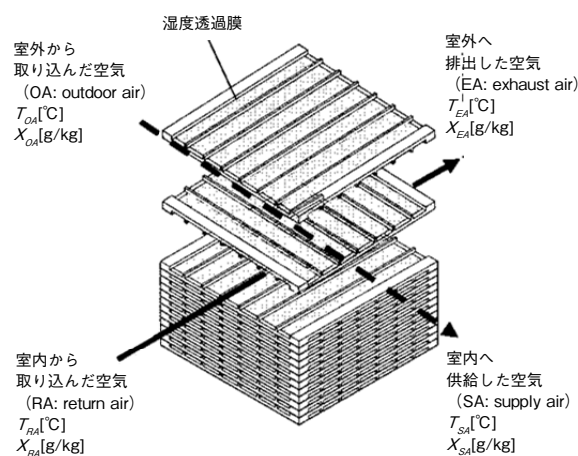
## 1. はじめに

近年、地球環境保護や二酸化炭素排出削減の観点から、住宅で使用するエネルギーの削減が注目されている。例えばネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）と呼ばれる年間の1次エネルギー消費量が収支でゼロとなる住宅がある。日本は2020年を目標に、標準的な新築住宅でのZEHの実現を目指している[1]。アメリカ合衆国のカリフォルニア州でも2020年までに全ての新築住宅でZEHの実現を目指している[2]。

ZEHをはじめとする省エネ住宅は、断熱などの住宅性能の向上や太陽光パネルなどのエネルギー創出設備のほかに、換気による熱ロスの削減も重要な項目となる。熱交換形換気装置は、排気中の温度や湿度を全熱交換素子により回収し、室内の快適性を保ちつつ換気に伴う熱ロスを削減できる装置である。

第1図に示すように、全熱交換素子は所定の間隔を設けて積層された複数枚の湿度透過膜から構成される。湿度透過膜はガスバリア性と伝熱性、透湿性を有し、室内の汚れた空気と室外の新鮮な空気が湿度透過膜を挟んで上下を通過することで、換気しながら湿度透過膜を介して温度と湿度を回収できる。

特に寒冷地は、室内外の温湿度差が大きく換気による熱ロスが大きいため、熱交換形換気装置のニーズは年々高まっている。しかし寒冷地は、全熱交換素子の凍結に



第1図 全熱交換素子の分解図

Fig. 1 Exploded view of energy-recovery core

よる換気量の低下が課題である。これは室外から取り込んだ空気の温度 ( $T_{OA}$ ) が低く室外へ排出した空気の温度 ( $T_{EA}$ ) も氷点下の場合、 $T_{EA}$  における空気の飽和水蒸気量を  $X_{EA}$  が上回ると全熱交換素子の排気する風路内部に結露が生じ、その結露水が凍結するためである。その結果、排気する風路に氷が付着し、通風できないため換気量が低下する。氷の除去には追加エネルギーが必要であり、エネルギー削減を目的とする熱交換形換気装置の効果を損なっていた。

本稿は、寒冷地における氷の発生抑制を目的とし、湿度透過膜の透湿性向上に向けた要素技術開発の取り組みと、熱交換形換気装置へ適用した効果を報告する。

## 2. 湿度透過膜材料

### 2.1 湿度透過の評価手法と性能指標

換気により室内から汚れた空気や不快な臭いを排出するために、全熱交換素子は給気へ排気が混ざること防ぐ必要があり、湿度透過膜は空気や臭いを通さないガスバリア性が重要である。

ガスバリア性の評価手法は一定の圧力をかけて空気を押し込むことにより、透気度を評価するJIS P8117法がある。

また全熱交換素子の温度と湿度の回収性能は、下記(1)式、(2)式で表される。

$$\eta_{TSU} = (T_{SA} - T_{OA}) / (T_{RA} - T_{OA}) \quad \dots \quad (1)$$

$$\eta_{XSU} = (X_{SA} - X_{OA}) / (X_{RA} - X_{OA}) \quad \dots \quad (2)$$

$T$ : 温度[°C],  $X$ : 絶対湿度[kg/kg]

$\eta_{TSU}$ : 顕熱交換効率[%],  $\eta_{XSU}$ : 潜熱交換効率[%]

後述する凍結課題に対し、特に $\eta_{XSU}$ に着目した。 $\eta_{XSU}$ は、総括透湿単位を用いて、実験式化されている。例えば湿度透過膜の単板であれば(3)式で表される[3]。

$$\eta_{XSU} = -0.0002NTU_{Lat}^4 + 0.052NTU_{Lat}^3 - 0.0638NTU_{Lat}^2 + 0.3759NTU_{Lat} + 0.015 \quad \dots \quad (3)$$

$NTU_{Lat}$ : 総括透湿単位

$NTU_{Lat}$ はさらに、湿度透過膜の表面積と通過する風量に加え材料の性能指標である統括透湿係数を用いて(4)式で表される。

$$NTU_{Lat} = K \cdot At / V \quad \dots \quad (4)$$

$K$ : 総括透湿係数[m/s]

$At$ : 湿度透過膜の表面積[m<sup>2</sup>]

$V$ : 湿度透過膜表面を通過する風量[m<sup>3</sup>/s]

この材料の性能指標である $K$ は(5)式で表される。

$$K = 1 / \left\{ (1/k_i) + (r_m) + (1/k_o) \right\} \quad \dots \quad (5)$$

$K$ : 総括透湿係数[m/s]

$k_i$ : 低温側の境膜透湿係数[m/s]

$k_o$ : 高温側の境膜透湿係数[m/s]

$r_m$ : 湿度透過膜の透湿抵抗[s/m]

ここで材料側の特性である透湿抵抗 $r_m$ に着目した。 $r_m$ は(6)式で表される。

$$r_m = \rho_a t \psi / (\rho_m D_{wm}) \quad \dots \quad (6)$$

$\rho_a$ : 空気の密度[kg/m<sup>3</sup>]

$t$ : 湿度透過膜の厚み[m]

$\psi$ : 湿度透過膜の拡散抵抗係数[-]

$\rho_m$ : 湿度透過膜の密度[kg/m<sup>3</sup>]

$D_{wm}$ : 湿度透過膜の水分拡散率[m<sup>2</sup>/s]

湿度透過膜の拡散抵抗係数はさらに(7)式で表される。

$$\psi = \left\{ 10^6 (1 - C_1 + C_1 / \varphi)^2 \varphi^2 \right\} / (e^{(5294/T)} W_{max} C_1) |mf \quad \dots \quad (7)$$

$C_1$ : 吸着等温線に基づく定数,

$\varphi$ : 相対湿度,  $T$ : 温度[K],

$mf$ : 膜の吸着等温線を評価した条件

$W_{max}$ : 膜の重量当たりの最大吸収水分量[-]

(6)式(7)式より、湿度透過に影響する材料の特性は、材料の水分吸着特性および水分脱着特性を示す $C_1$ と、材料内部の水分拡散特性を示す $D_{wm}$ である。この透湿度の評価手法は、大きく分けると測定物の上下を気体に接触させる方式と液体に接触させる方式がある。前者はJIS L1099 A法やJIS Z0208法などがあげられ、後者はJIS L1099 B法などがあげられる。

全熱交換素子の湿度の回収性能は $\eta_{XSU}$ であり、このうち、(5)式に示すように材料の特性項目は $r_m$ である。 $r_m$ には空気と材料との吸脱着の特性である $C_1$ を含むため、前記透湿度の評価手法として気体に接触させる方式が適しており、JIS Z0208法を採用した。

以上の背景から、湿度透過膜で評価が必要な主要性能は、透気度と透湿度の2点となる。本稿での性能評価手法を以下にまとめる。

- 透気度: JIS P8117ガーレー試験機法
- 透湿度: JIS Z0208

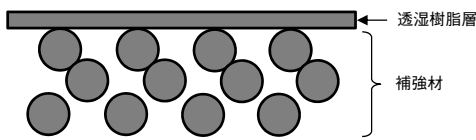
### 2.2 高透湿化による寒冷地対応

寒冷地条件において、湿度回収ができず温度回収のみ行う顕熱交換素子と、温度と湿度回収を行う全熱交換素子を比較すると全熱交換素子は顕熱交換素子よりも内部にたまる結露水の量が少ない[4]。

全熱交換素子は排気のもつ水分量を給気側へ回収できるため、この結露水の量の差が生じたと考えられる。したがって、水分回収量の向上、すなわち潜熱交換効率の向上によって、寒冷地における氷の発生という課題を回避できる可能性を見いだした。

本開発では、湿度透過膜の高透湿化により全熱交換素子の潜熱交換効率を向上させ、 $X_{EA}$ が $T_{EA}$ における空気の飽和水蒸気量を下回ることを狙った。また、結露水が発生する条件も想定し、結露水による性能劣化の抑制のため、耐水性も必要な項目とした。

開発品は第2図に示すように、ガスバリア性と透湿性を備えた透湿樹脂層に補強材を積層した構成とした。



第2図 開発した湿度透過膜の断面図

Fig. 2 Cross-sectional view of developed moisture-permeable membrane

透湿樹脂層によりガスバリア性を担保し、補強材は空隙率が高く、透湿抵抗となりにくいものを用いた。透湿樹脂層の透湿抵抗は(4)式～(6)式に示すように厚み $t$ が薄く、拡散抵抗係数 $\psi$ が小さく、水分拡散率 $D_{vm}$ が大きいほど低下する。また、(7)式に示すように拡散抵抗係数 $\psi$ は湿度透過膜の最大吸収水分量 $W_{max}$ が大きいほど低下する。これらの傾向から、水分を含みやすく拡散しやすい透湿樹脂の選定と、透湿樹脂層の薄膜化を検討した。

### 3. 高透湿化の具体的取り組み

#### 3.1 透湿樹脂の選定

透湿は、湿度透過膜内部の親水性官能基に水分子が吸着され、吸着された水分子が脱着し、別の親水性官能基に吸着されるという繰り返して、水分子の濃度の高い側から低い側へ拡散する現象である。水分子は分子間を押し広げながら拡散するため、電荷の偏りが大きく、水分子を引きつけやすい親水性官能基をもち、分子構造が柔らかい透湿樹脂が水分を含みやすく拡散しやすい[5]。

そこで第1表に示すように、電荷の偏りが大きな官能基として、酸性の官能基群と塩基性の官能基群のどちらかをもつ代表的な透湿樹脂材料を選出し、その透湿度を評価した。

第1表 官能基別の透湿度比

Table 1 Functional group list with ratio of moisture permeation to conventional membrane

透湿樹脂	A	B	C	D
酸と塩基	強塩基性	弱塩基性	弱酸性	強酸性
透湿度 従来比[-/]*	109	29	14	72

\* 従来湿度透過膜の透湿度を100とした場合。

電荷の偏りが大きな官能基をもつ強塩基性、強酸性の透湿樹脂が高い透湿度を示し、今回の検討範囲では酸性の官能基に比べ塩基性の官能基がより高い透湿度を示した。

この結果をもとに、最も透湿度の高い官能基をもつ透

湿樹脂Aの分子構造を検討した。官能基は共通とし、水分子の拡散性を向上させるため、水分子の吸着部位である親水性官能基の配置を変化させて第2表に示すように透湿樹脂Eと透湿樹脂Fの2種類の透湿樹脂を追加比較した。

- 高分子鎖を網目状に絡み合わせたもの (A)
- 高分子構造内に結晶部位をもたせたもの (E)
- 直鎖状の高分子鎖を一部架橋したもの (F)

第1表で使用した透湿樹脂Aに対し、透湿樹脂Eは結晶部位と親水性官能基を組み合わせ、親水性官能基をまとめて配置することで、水分子の通り道を備えた構造とした。また透湿樹脂Fは透湿樹脂Aに比べ架橋点を減らすことで、分子内部を自由に親水性官能基が移動できるようにし、水分子を吸着するスペースが親水性官能基周囲に生じやすい構造とした。

透湿樹脂Aと透湿樹脂Eとの比較では透湿樹脂Eは結晶部位を付与し官能基が集中する部位を備えることで、透湿樹脂Aより透湿度が向上した。さらに透湿樹脂A、透湿樹脂E、透湿樹脂Fの比較では、透湿樹脂Fの架橋点を減らして官能基が移動しやすい構造が、最も透湿度が高いことが判明した。

第2表 立体構造別の透湿度比

Table 2 Polymer structure images with ratio of moisture permeation to conventional membrane

透湿樹脂	A (網目状)	E (結晶性)	F (直鎖状)
高分子構造 イメージ <sup>*1</sup>			
透湿度 従来比[-/]* <sup>*2</sup>	109	114	119

\*1 線が分子鎖、●部分が官能基を示す

\*2 従来湿度透過膜の透湿度を100とした場合

これら透湿樹脂の最適化により、従来湿度透過膜と比べ、同等の耐水性を維持したまま19%の透湿度向上を実現した。

#### 3.2 透湿樹脂層の薄膜化

##### [1] 透湿樹脂層の複合化

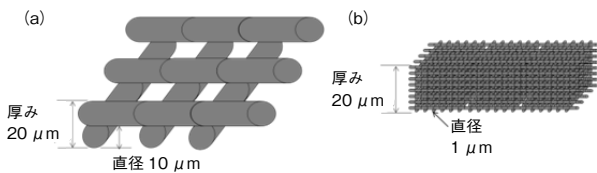
水分子は透湿樹脂に吸収されて内部を拡散するため、透湿樹脂は周囲の相対湿度に応じて伸縮し、寸法安定性が得られない。そこで、透湿樹脂に水分を吸収しない基材を複合化し、透湿樹脂の伸縮を抑制した。基材に必要な条件は下記3点である。

- 薄いこと
- 湿度に対して伸縮しないこと
- 空隙率が大きいこと

基材は伸縮抑制を目的とし、透湿樹脂層以下の厚みとした。また、湿度に対し伸縮しない材料は、水分の吸収が少なく、透湿性が低いため、透湿樹脂層に含まれる基材の体積率は小さいほど透湿抵抗となりにくい。

従来の湿度透過膜の透湿樹脂層厚みは約20 μmであった。空隙率の大きい基材として不織布があげられるが、不織布の繊維径は10 μm～20 μmが一般的であるため、第3図 (a) に示すように通常の不織布では、前記20 μmの厚みは実現できない。そのうえ、空隙率を大きくすると繊維が疎になるため基材として維持できない。

第3図 (b) に繊維径を変更した場合の模式図を示す。繊維径が細いほど繊維間の空隙は細かくなり、空隙率を上げても繊維が疎になりにくい。そこで、繊維径の小さなナノファイバーと呼ばれる素材に着目し、薄く、湿度に対して伸縮しない空隙率の大きい基材を得た。



第3図 基材の模式図  
Fig. 3 Pattern diagram of base material

複合材料の課題として、基材と透湿樹脂の間隙が透湿抵抗となることがあげられる。水分子は間隙内部で蒸発し、間隙内を水蒸気として拡散、別の面で再度吸着されるといいう過程を経るため、間隙は大きな透湿抵抗となる。

基材と透湿樹脂の間隙を減少させるため、透湿樹脂を低分子溶液の状態に基材に含ませ、基材内部で重合させる手法を用いた。

低分子溶液を基材内部へ保持する力は毛細管力で説明できる。毛細管力は (8) 式で表される。

$$P = (2\gamma \cos \theta) / Rc \dots\dots\dots (8)$$

$P$  : 毛細管力 [Pa],  $\gamma$  : 表面張力 [N/m],

$\theta$  : 低分子溶液と基材の接触角 [rad],

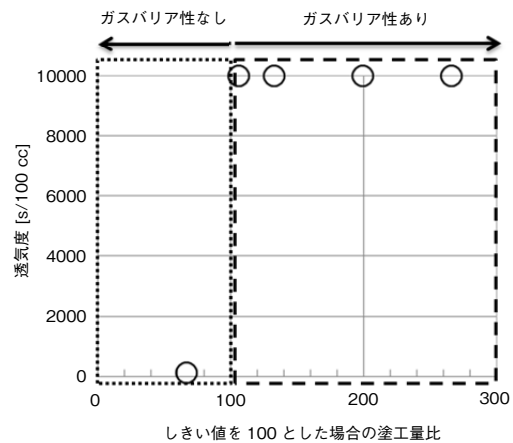
$Rc$  : 細孔径 [m]

単位面積当たりのナノファイバー量と細孔径の関係性を用い、低分子溶液の保持が可能な毛細管力が得られるナノファイバー量を見いだした。この関係性により、低分子溶液の保持が可能な基材仕様を決定し、透湿樹脂を複合化する手法を構築した。

(2) 透湿樹脂量の最適化

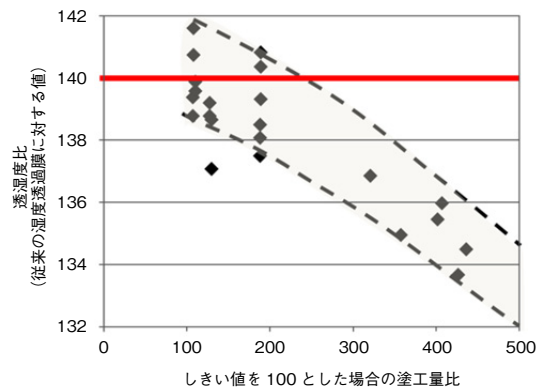
前述の複合化手法に加えて、必要な低分子溶液を均一に塗工する手法を開発し、透湿樹脂層の薄膜化を図った。

透湿樹脂層に欠損が存在すると、欠損を通じて空気が通過しガスバリア性が低下する。一方で低分子溶液は重合により収縮し、収縮により基材の厚みも減少する。つまり収縮後の透湿樹脂量と厚み減少後の基材の空隙量がつりあう点が存在し、それ以下のある値よりも少ない塗工量となると急激にガスバリア性が低下する。第4図に示す塗工量と透気度の関係性から、ガスバリア性を満たす塗工量のしきい値を見いだした。



第4図 塗工量と透気度の関係  
Fig. 4 Correlativity of coating amount and air resistance property of membrane

次に第5図に塗工量と透湿度の関係性を示す。塗工量のしきい値以上の塗工量を検討した結果、塗工量が少ないほど透湿度は高かった。塗工量が透湿樹脂層の厚みと比例し、厚みが薄くなることで透湿度が向上したと推定した。この結果からガスバリア性と透湿度を満たす塗工量を導出した。



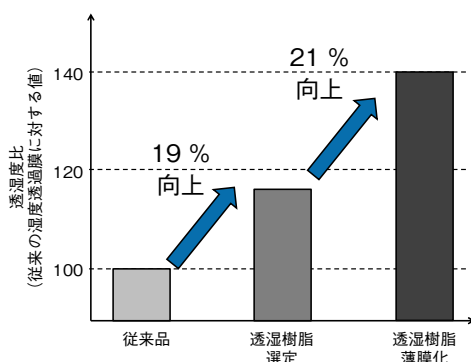
第5図 塗工量と透湿度の関係  
Fig. 5 Correlativity of coating amount and moisture permeability of membrane

これらの取り組みにより、必要な低分子溶液量を均一に基材に塗工する手法を構築し、透湿樹脂層を薄膜化した。透湿度は従来の湿度透過膜に対して約140 %まで向上し、3.1節で達成した従来比119 %の透湿度に対し、さらに従来比21 %の透湿度向上を実現した。

別な視点から捉えると、気体である空気比べて固体である透湿樹脂内部は水分子が拡散しにくいことから、基材の空隙に透湿樹脂を複合化するために、完成した湿度透過膜の透湿度は基材のみの透湿度に比べ低下する。しかしながら、本手法を用いてガスバリア性を保つことができる最小限の塗工量を求めることによって、基材の透湿度に比べ99 %の透湿度を備えた湿度透過膜を得ることができた。すなわち(5)式で表される $K$ に対する $r_m$ の影響がほぼ空気と同等まで低減できたことを示しており、基材のもつ透湿性能を十分引き出すことができた。

#### 4. 湿度透過膜の高透湿化まとめ

湿度透過膜の透湿度向上の取り組みについて、第6図に透湿度の従来比を示す。透湿度は、透湿樹脂の選定により従来の湿度透過膜と比べ19 %の性能向上に成功した。さらに、透湿樹脂の量を最適化することで透湿樹脂層を薄膜化し、さらに、21 %の性能向上に成功した。これにより、後述するような寒冷地での高性能化を実現した。



第6図 従来の湿度透過膜との透湿度比較

Fig. 6 Comparison of moisture permeability with conventional membrane

#### 5. 当社製熱交換形換気装置への適用効果

寒冷地における全熱交換素子の凍結という課題に対し、一般的に下記2点の対策がある[4].

- (1) 外気取り込み口へヒータを追加し、 $T_{Oa}$ を上げることで $T_{EA}$ も増加させ、全熱交換素子内部に氷が

付着することを防止する

- (2) 給気を停止し、室内の空気のみ通風させることで、全熱交換素子を暖めて付着した氷を融解し除去する

(1)は、室内に供給される空気が温まるといった付随効果はあるが、昇温に用いたエネルギーの一部が廃棄され、エネルギー効率が悪い。

(2)は、融解後の排気をそのまま室外へ放出させる方式と、室内へ戻す方式の2通りの方式がある。

室外へ放出させる方式は、ヒータのような大掛かりな追加設計が不要であるが、熱交換形換気装置から排気のみを行うため、室内が負圧になり、壁面から隙間風が室内に吹き込むことで室内の快適性を損なう。

室内へ戻す方式は、上記隙間風が防止できるが、デフロスト制御中に換気できなかった換気量をまかなうため、通常運転の風量を増加する必要があり、消費電力の増加や製品サイズが拡大する。

このようにいずれの方式も寒冷地に対応するために追加のエネルギーを必要とするデメリットが存在した。

これら(1)(2)の方式に対し、本開発は第三の方式を実現した。すなわち、第6図に示す透湿性の向上により、排気から給気への湿度の回収量を増加させ、 $X_{EA}$ を低下させる。それにより $T_{EA}$ における空気の飽和水蒸気量以下に $X_{EA}$ を抑えることで全熱交換素子内部に氷が発生することを防止する方式である。

本方式は全熱交換素子の材料変更により実現できるため、寒冷地対応のための追加エネルギーは必要ない。そのうえ、付随効果として、下記項目を実現した。

- 製品への追加部品や風路が不要であり製品サイズを抑えられること
- 全熱交換素子を通した給気風量を確保できるため、隙間風や低温の吹き出しを回避し、快適性を向上できること
- 給気へ排気の湿度を回収できるため、室内の乾燥を抑制できること

適用例として例えば、中国寒冷地において一般的な室内条件として20℃20%~40%の環境[6]をあげる。従来の湿度透過膜は室外の気温が-10℃の地域まで対応するが、開発品は-30℃まで通常の熱交換気運転を実現できる。

換気量250 m<sup>3</sup>/hの熱交換形換気装置を例に、(1)(2)の方式に必要なエネルギーを試算した。(1)の方式では、 $T_{Oa}$ を従来の熱交換形換気装置が対応可能な-10℃まで昇温させるために必要なエネルギーは1.9 kWである。そのうえ $T_{EA}$ は-1℃まで昇温されることから、1.9 kWのうち1.3 kWのエネルギーが室内に供給されず廃棄されてしまう。



また、(2)の方式では、 $T_{OA}$ が $-30^{\circ}\text{C}$ の場合に $T_{EA}$ は $-15^{\circ}\text{C}$ となる。 $T_{EA}$ における空気の飽和水蒸気量を超える水分量全てが氷になると仮定すると、30分の熱交換気運転によって220 gの水が得られる。付着した氷も $T_{EA}$ と同じ温度となると仮定すると、氷を $0^{\circ}\text{C}$ まで昇温し溶解するために、80 kJの熱量が必要となる。10分で溶解すると仮定すれば、氷の溶解だけで133 Wのエネルギーが必要である。

換気量250  $\text{m}^3/\text{h}$ の熱交換形換気装置の運転に必要な消費電力として例えば110 W程度の装置が標準的である。開発品はこの通常運転に必要な消費電力のみで $-30^{\circ}\text{C}$ まで熱交換気運転が実現可能であり、(2)の方式と比較しても54%の消費電力削減が見込める。

(試算条件：外気の温湿度 $-30^{\circ}\text{C}$  75%，室内の温湿度 $20^{\circ}\text{C}$  40%， $\eta_{TSU}$  70%， $\eta_{XSU}$  60%)

## 6. まとめ

高透湿性と耐水性を兼ね備えた湿度透過膜の実現により、熱交換形換気装置の適応を極寒の地域に至るまで広げた。さらに、室内外の温度差が大きいことから、給気された空気の昇温によって室内が乾燥しやすい寒冷地においても、潜熱交換効率の向上により室内の湿度を保ちやすい換気を実現した。

そのうえ、熱帯地域の住宅の断熱性や気密性の向上に伴い、高透湿性の湿度透過膜は、室外の高湿な空気もつ水分が室内に侵入することを抑制できる。

今後、湿度透過膜の性能向上と低コスト化にむけた継続的な開発を行うとともに、全熱交換素子形状の進化、湿度透過膜への付加価値の追加などに取り組み、省エネ性と室内快適性の向上に繋がるような技術へと進化させていく。

## 参考文献

- [1] “エネルギー基本計画,” 経済産業省, 2014.4.11.
- [2] 江村勝治, “ZEB・ZEHの最新動向の調査分析ならびに普及に向けた取り組みに関する検討 米国調査報告,” 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2013.5.30.
- [3] Li-Zhi Zhang, “Progress on heat and moisture recovery with membranes; from fundamentals to engineering applications,” *Energy Conversion and Management*, vol.63, pp.173-195, 2012.
- [4] 竹原成彦 他, “寒冷地の気密住宅における換気システムの研究 (第7報) 顕熱交換素子と全熱交換素子における結露, 結氷の発生と解消の検討,” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (松江), pp645-648, 2003.
- [5] 大矢晴彦, “高機能性分離膜の構造と物性,” 機械繊維学会誌, vol.43, no.9, pp492-500, 1990.

- [6] 吉野博 他, “中国の厳寒・寒冷地域における冬期室内温熱環境に関する調査,” 第21回日本雪工学会誌, vol.20, no.5, pp139-150, 2004.

## 執筆者紹介



浜田 洋祐 Yousuke Hamada  
パナソニックエコシステムズ (株)  
R&D本部  
Corporate R&D Div., Panasonic Ecology Systems  
Co., Ltd



福本 将秀 Masahide Fukumoto  
パナソニックエコシステムズ (株)  
R&D本部  
Corporate R&D Div., Panasonic Ecology Systems  
Co., Ltd



畑 元気 Motoki Hata  
パナソニックエコシステムズ (株)  
R&D本部  
Corporate R&D Div., Panasonic Ecology Systems  
Co., Ltd



藤本 真司 Shinji Fujimoto  
エコソリューションズ社 ものづくり革新本部  
Manufacturing Innovation Div.,  
Eco Solutions Company  
博士 (工学)



松居 栄太郎 Eitaro Matsui  
エコソリューションズ社 ものづくり革新本部  
Manufacturing Innovation Div.,  
Eco Solutions Company