



# 極低温用真空断熱容器の構成材のアウトガス低減方法とその評価

猪股, 昭彦  
奥村, 健太郎  
後神, 一藤  
武田, 実

---

(Citation)

低温工学, 53(1):10-16

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 公益社団法人 低温工学・超電導学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005308>



## 極低温用真空断熱容器の構成材のアウトガス低減方法とその評価

猪股 昭彦<sup>\*1,†</sup>, 奥村 健太郎<sup>\*2</sup>, 後神 一藤<sup>\*2</sup>, 武田 実<sup>\*1</sup>

### Method for Reducing Outgas from Materials Used at the Vacuum Layer in Cryogenic Vessels and Its Evaluation

Akihiko INOMATA<sup>\*1,†</sup>, Kentaro OKUMURA<sup>\*2</sup>, Kazuto GOKAN<sup>\*2</sup> and Minoru TAKEDA<sup>\*1</sup>

**Synopsis:** The outgas from constituent materials in the vacuum jacket of a cryogenic vessel may seriously affect the degree of vacuum and it leads to deterioration of heat insulation performance. We measured the outgassing rates from each material that comprises the vacuum vessel. We also measured the effect on outgassing rate when the materials are heated to remove the gas from the materials before measurement. Based on experimental results, the effect of heat treatment for each material based on the outgassing model was discussed. It was found that coating the materials with GFRP is effective for reducing the outgassing rate.

**Keywords:** vacuum insulation, gas release, super insulation, glass-fiber-reinforced plastic

#### 1. はじめに

我が国では、2014 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」の中で、水素社会の実現に向けた取り組みが明記されるとともに、経済産業省では、2014 年 6 月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し、2015 年に燃料電池自動車の市場投入、2030 年頃には水素発電の本格導入について記載している。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、海外の未利用エネルギーを活用して水素を製造・貯蔵・輸送し、日本国内で利用する大規模な水素エネルギー利用システムの技術開発プロジェクトを開始した。

水素社会の実現においては、大量の水素需要に対応するために、上記の通り海外で製造した水素を、効率的に日本に輸送する必要がある。その一つとして、液化天然ガス（LNG）と同様に、水素を製造地で液化する方法が考えられる。

液体水素は LNG と比較して、低沸点（メタン（LNG 主

成分）：111 K、液体水素：20 K）であり、かつ体積当たりの蒸発潜熱が低い（メタン：216 MJ/m<sup>3</sup>、液体水素：31.6 MJ/m<sup>3</sup>）ことから、輸送貯蔵のプロセスにおいて、容器の断熱性能を大幅に向上させることが重要である。そのため、液体水素の輸送、貯蔵容器には一般的に、侵入熱を大幅に低減するために、二重構造として内槽と外槽の間を真空にする真空断熱方式を採用している。

数百 m<sup>3</sup> 以上の大容量の容器に本方式を採用する場合は、真空層の容積が大きくなるため、真空排気工程に長期間を要する。真空排気期間を短縮化するためには、容器を 100℃程度に加温して真空排気を行う手法（ベーキング）が用いられている。ベーキングによって、真空層に存在する材料からのガス放出を促進することにより、真空排気期間を短縮できる。しかしながら、真空層には構造材や断熱材、支持材と多種の材料が存在しているため、アウトガスの問題が避けられない。

真空断熱では、輻射伝熱を抑制するために積層真空断熱材（SI）が用いられることが多いが、その断熱性能は真空度に依存する。例えば、Fesmire<sup>1)</sup>が示す断熱材の性能において、「double-aluminized Mylar & net」を適用した場合、熱伝導率 0.1 mW/(m・K)を満足するためには、10<sup>-1</sup> Pa オーダーの全圧真空度が求められる。真空中のアウトガス放出速度について、石川<sup>2)</sup>は、ステンレス鋼を中心とした放出速度を測定し、かつ事前に真空中で加温して、放出速度を抑制するベーキング効果についても測定を行った。また、Young<sup>3)</sup>は、SUS304 について、ショットブラストや電解研磨など、様々な表面処理を行った場合のガス放出速度

Received May 18, 2017

<sup>\*1</sup> 神戸大学大学院 海事科学研究科  
〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1  
Kobe University Graduate School of Maritime Science,  
5-1-1 Fukaeminamimachi, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo  
658-0022, Japan

<sup>\*2</sup> 川崎重工業(株)  
〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1  
Kawasaki Heavy Industries, Ltd.,  
1-1 Kawasakicho, Akashi, Hyogo 673-8666, Japan

<sup>†</sup> E-mail: inomata\_akihiro@khi.co.jp  
DOI: 10.2221/jcsj.53.10

を測定した。小針ら<sup>4)</sup>は、150℃以下の低温ベーキングによるステンレス鋼からのアウトガス抑制効果や、減少するガス成分について測定を行った。石川ら<sup>5)</sup>は、繰り返しベーキングを行った場合の効果について研究している。さらに、Battesら<sup>6)</sup>は、ステンレス鋼について、空気条件下と真空条件下でベーキングを行った場合のアウトガス抑制効果を測定しており、双方とも効果にほぼ差のないことを確認している。

樹脂材料からのガス放出特性に関するデータは不足しており、加温処理による効果も含めた実験については、佐藤ら<sup>7)</sup>の測定例があるのみである。

また、沸点の高い真空層中のガス成分は、容器に液体水素を入れることで冷却されて固化あるいは液化することにより、真空度が向上することが知られている（クライオ効果）。そのため、アウトガス成分を把握することは、液体水素を充填した際の真空度を予測するために重要である。

そこで本研究では、真空容器に用いる鋼材、支持構造材および積層真空断熱材について、真空層中のガス放出特性を調べた。また、それらの材料を加温（ベーキング処理）して真空層でガス放出特性を調べ、加温がない場合と比較し、その特性から反応機構を推定することにより、材料によって異なる加温による効果の違いを考察した。さらに、支持構造への適用が見込まれるガラス繊維強化プラスチック（GFRP）について、ガス放出速度を低減することを目的として、表面をメッキ加工したものについて、放出速度を測定することによって、その効果を定量化した。なお、鋼材および積層真空断熱材については、真空層中に放出されるガス成分を計測し、材料による成分の違いおよび経時変化を測定し、アウトガスに影響する材料およびそのガス成分について考察を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験装置

材料の真空層におけるガス放出（アウトガス）特性を測定する試験を行うために、ステンレス製の容器の中に測定サンプルを設置した。測定法はスループット法を採用した。スループット法とは、コンダクタンスが既知のオリフィスで仕切られた2つのチャンバー間の圧力差を計測する方法で、下流側のメインチャンバーに試料を設置した場合と、設置しない場合（ブランク試験）とを比較して、試料から放出されるガスの放出量を測定する。2つのチャンバーの真空状態の形成は、ターボ分子ポンプ（セイコー精機製 STP301）および後段にドライポンプを設置して真空排気を行った。真空度は2つのチャンバーそれぞれに、電離真空計（アルバック製 GI-N7）を設置して測定した。ガス成分については、質量分析計（キャノンアネルバ製 MQA-200TS）を用いて計測した。2つのチャンバー間に設置するオリフィスの口径は直径 5.0 mm であり、この

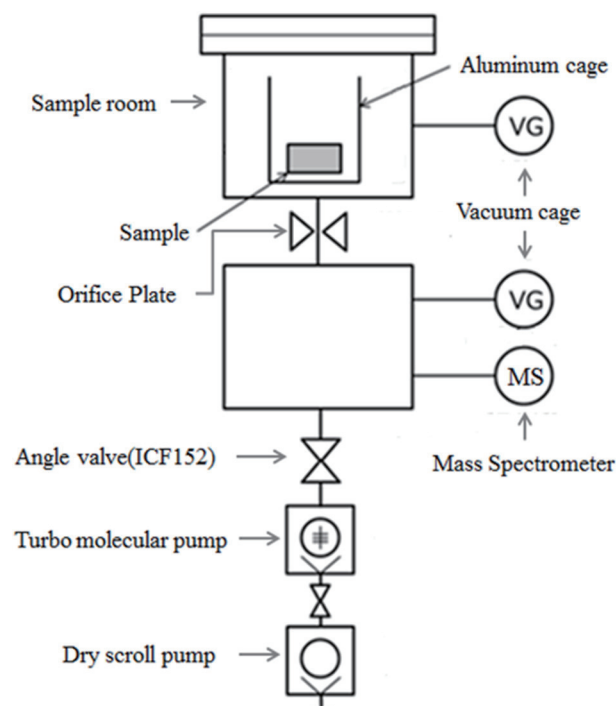


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

オリフィスのコンダクタンスは  $2.27 \times 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>/s] である。試験装置の概略フローを Fig. 1 に示す。

### 2.2 測定材料、測定方法

測定する材料は、ステンレス鋼（SUS304L）、液体水素容器の支持構造への適用が考えられる GFRP、積層真空断熱材（SI）を対象とした。GFRP のガラス繊維は E ガラスを、強化プラスチックにはエポキシ樹脂を用いた。SI については、ポリエステル樹脂の両面にアルミを蒸着した輻射断熱フィルムと、このフィルム同士の相関熱伝導を抑制するために、フィルム間にスペーサーとしてポリエステルネットを挿入したものを用いた。測定装置内に設置したサンプルの形状は、GFRP については縦横 50 mm、厚さ 5 mm とし、SI については、縦横 100 mm、10 層とした。これらについて、加温しなかった場合と、ベーキング処理（120℃、30 日間）した場合について、スループット法により、真空度の変化を計測することでアウトガスの放出速度を測定した。計測は約 48 時間行った。

メインチャンバーの圧力を  $P_1$ 、下流チャンバーの圧力を  $P_2$  とすると、アウトガス放出速度は、下式により表される。

$$Q = Q_s - Q_m = C \{ (P_1 s - P_2 s) - (P_1 m - P_2 m) \} \quad (1)$$

これをサンプルの表面積で割って、面積当たりのガス放出速度  $q$  として評価した。

$$q = Q/A \quad (2)$$

Q : 放出速度 (Pa・m<sup>3</sup>/s)  
 C : オリフィスコンダクタンス (2.27×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/s)  
 q : ガス放出速度 (Pa・m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>・s))  
 A : サンプルの表面積 (m<sup>2</sup>)  
 添え字 :  
 s : サンプル入り  
 m : サンプルなし  
 1 : メインチャンバー  
 2 : 下流チャンバー

以上の結果から、加温がアウトガス特性に及ぼす影響およびその機構について考察した。

さらに、GFRP については、アウトガスを抑制する目的で、表面に無電解ニッケルメッキを施したサンプルについても、アウトガスの放出測度を計測し、その効果を確認した。

### 3. 測定結果と考察

#### 3.1 各材料のベーキング効果および反応機構の考察

Fig. 2～Fig. 4 に、それぞれ SUS304L、GFRP および SI について、事前ベーキングの有無によるアウトガス速度の相違を測定した結果を示す。

SUS304L については、ベーキング処理により、測定した時間範囲においてガス放出速度が約 1/2～1/10 に抑制された。GFRP については、ベーキングにより、ガス放出速度は約 1/10 に低減された。また、SI に関しては、初期段階（約 180 分まで）ではガス放出速度の低減効果が見られたが、それ以降ではベーキングの有無に関わらずほとんど変化がなかった。

以上の結果を基に、ベーキングによるガス放出速度の低減効果と反応機構の因果関係について考察する。

ガスの放出速度は、固体表面に吸着しているガスや、固体内部に存在するガス、材料の蒸発によるガスの量などに依存することが知られており<sup>2)</sup>、材料、温度履歴などにより異なる。ガス放出速度の時間依存性を  $g(t)$  として、固体表面に吸着しているガス分子が放出する場合と、固体内部から拡散する場合について、以下のような関係にあることが知られている<sup>7)</sup>。

(a) 面に吸着しているガス分子が放出する場合

$$g \propto t^{-1} \quad (3)$$

(b) 固体内部からの拡散を伴う場合

$$g \propto t^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Fig. 2 より、SUS304L については、ガス放出速度は、 $t^{-1}$  に比例する傾向が見られることから、表面に吸着しているガス分子が放出する速度が律速段階であると考えられる。

Fig. 3 より、GFRP についても、ベーキング処理を行っていないものについては、 $t^{-1/2}$  に比例する傾向が見られたため、固体内部からのガス分子の拡散が律速段階であると考えられる。

一方、SI については、100 分ほど経過するまでの初期段階については、 $t^{-1/2}$  に比例するが、その後、傾きが変化し、400 分程度経過した後においては、 $t^{-1}$  に比例する傾向が見られた。このことから、SI のガス放出は、初期段階においては、固体内部からのガス分子の拡散が律速になるものの、その後、表面に吸着しているガス分子が放出する速度が律速になると考えられる。以上のことから、ベーキングによるガス放出速度を減少させる効果は、放出反応の律速段階と相関があることが推測される。

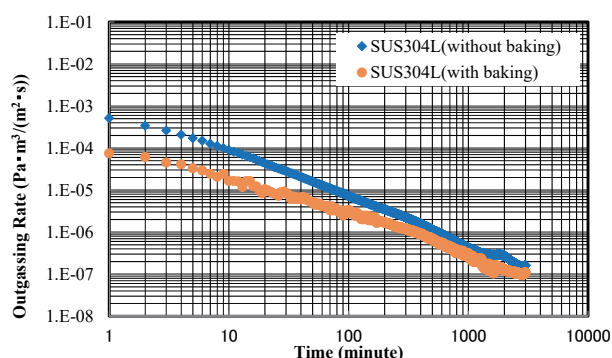


Fig. 2 Outgassing rate from SUS304L.

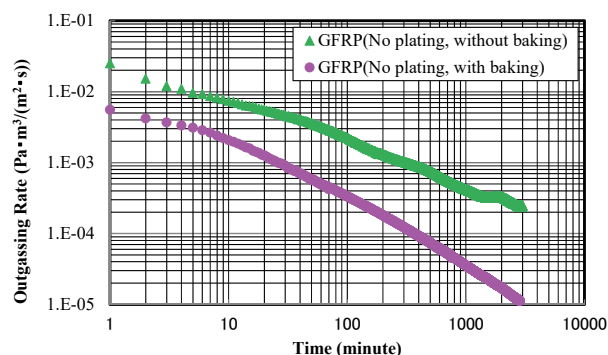


Fig. 3 Outgassing rate from GFRP.

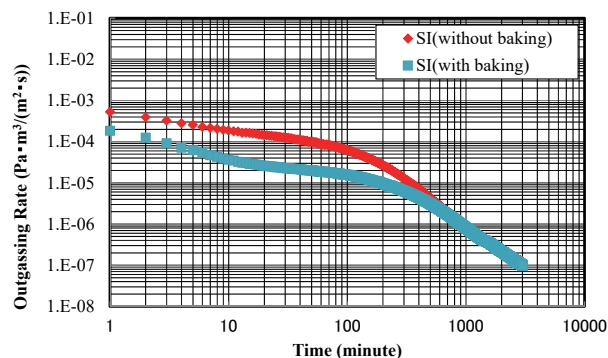


Fig. 4 Outgassing rate from SI.

**Table 1** Coefficient of outgassing rate for each material.

Material	Baking	Outgassing rate ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )		
		Coefficient	term of time	correlation coefficient
SUS304L	No	$2.8 \times 10^{-2}$	SUS304L	No
	Yes	$1.5 \times 10^{-2}$		Yes
GFRP	No	$1.1 \times 10^{-1}$	GFRP	No
	Yes	$5.4 \times 10^{-3}$		Yes
SI (after $10^3$ min)	No	$2.8 \times 10^{-2}$	SI (after $10^3$ min)	No
	Yes	$2.7 \times 10^{-2}$		Yes

ガス放出が固体内部からの拡散律速の場合（GFRP および SI（初期））では、ベーキングによるガス放出速度を減少させる効果が大きいものの、表面反応律速が支配的となる、SUS304L および SI の排気後半箇所では、ベーキングによる効果が小さいと考えられる。

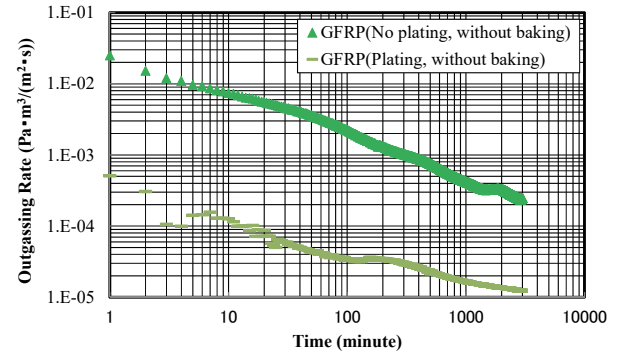
以上の通り律速段階を仮定して、ガス放出速度を近似したものを **Table 1** に示す。いずれの場合においても、良好な相関係数が得られた。長期間の真空排気を行う場合には、これらの反応速度式を用いることにより、真空層内の真空度の経時変化を予測することが可能となる。しかし、実際には表面反応および固体内拡散の両方の反応が起きていることが推測されることから、長期間経過後のガス放出速度を計算する場合には、Table 1 の近似式よりも精度の高い定式化を行う必要がある。

### 3.2 GFRP へのメッキ処理によるアウトガス抑制効果

**Fig. 5** に、GFRP について、表面に無電解メッキの施工有無によるアウトガス速度の相違を測定した結果を示す。メッキ処理により、速度が約 1/10 に抑制されたことがわかる。また、本図中において、いずれのプロットも傾きに大きな差はないことから、いずれも拡散律速であることが推測される。このことから、表面のメッキ処理により、固体内の拡散律速により放出されるガスの速度が、大幅に抑制されることがわかる。

なお、いずれのプロットにおいても、時間経過とともに放出速度が減少する途中で、一旦速度が大きくなる箇所が見られた。本挙動については、SI や他の材質に対して測定した時にも見られたものであり、試験装置の特性によるものと推測される。

樹脂へのメッキ処理による真空中のアウトガス放出抑制に関する研究は少ないが、太田ら<sup>8)</sup>がエポキシ樹脂に無電解銅メッキと無電解ニッケルメッキを併用した処理を施してアウトガス放出速度の低減効果を測定した例がある。水分（M/e（分子量）=18）、一酸化炭素または窒素（M/e =28）および二酸化炭素（M/e =44）の各成分について、メッキの有無によるガス放出速度を測定しており、温度の上昇とともに効果は大きくなり、ガス放出速度が 1/10～1/100 オーダーで減少したとの報告がされている。対象材料およびメッキ条件は異なるものの、本研究でも同程度の



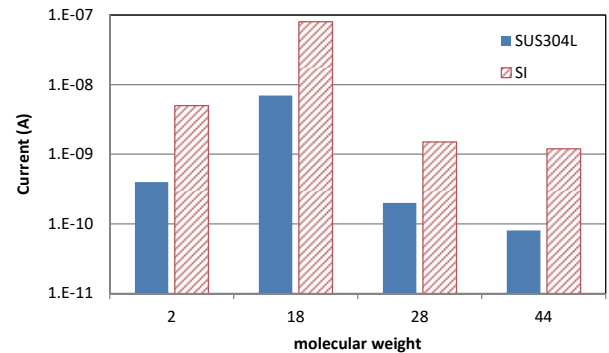
**Fig. 5** Effect of GFRP plating on outgassing rate.

効果が得られたことが確認できた。

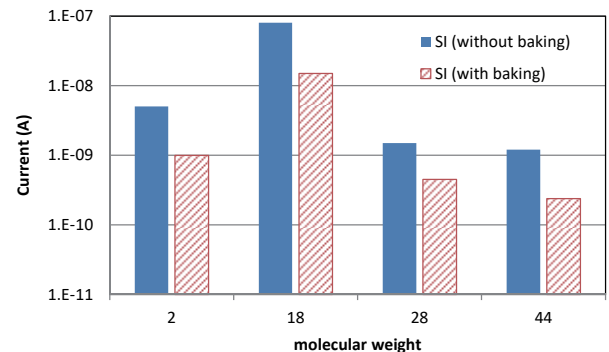
### 3.3 アウトガス成分の分析

SUS304L および SI について、アウトガス成分を測定した。それぞれの材料について、1 時間後の成分を質量分析計で分析した。主なピークが確認された、分子量 2、18、28 および 44 の検出結果を **Fig. 6** に示す。過去の研究<sup>8)</sup>から、主なアウトガス成分として、分子量 2 は水素、分子量 18 は水、分子量 28 は一酸化炭素または窒素、分子量 44 は二酸化炭素が主成分と考えられる。SUS304、SI とともに、水が主成分になっていることがわかる。

また、SI の方が、電流値が 1 桁大きく、アウトガス速度が大きいことがわかる。また、SI について、30 日間の



**Fig. 6** Outgas component from SUS304L and SI.



**Fig. 7** Effect of baking on each outgas component from SI.



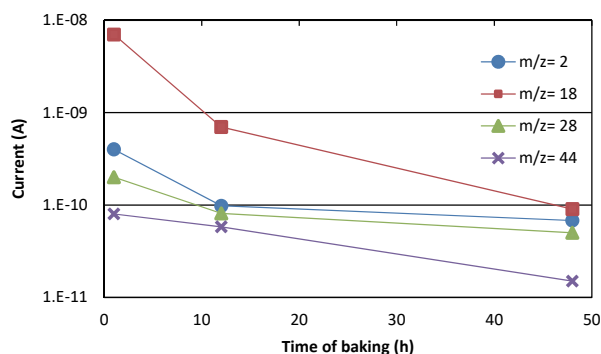
ベーキング前後のアウトガス成分の測定結果を **Fig. 7** に示す。いずれの成分についても、ベーキングの効果があることが確認できた。

ここで、ベーキング温度によるアウトガス削減効果について考察を行う。石川らはステンレス鋼からのベーキング温度によるガス放出速度の効果の違いについて、過去の測定結果をまとめた<sup>5)</sup>。SUS304 について、ベーキングを繰り返し行いアウトガスが安定化した状態の温度依存性から、120℃では約  $1.0 \times 10^{-9}$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ )、440℃では  $5.0 \times 10^{-8}$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) と、ガス放出速度が 5 割程度の削減効果が見込まれる。大型タンクに適用する場合は、加温に要するコストが大きくなることから、アウトガスの削減効果と経済性のバランスを考慮して、ベーキング条件を決定する必要がある。

**Fig. 8** に、ステンレス鋼から放出される成分の、ベーキング時間による変化を示す。ベーキングを 1 時間、12 時間、48 時間行った後で、質量分析計により測定される各分子量の電流値を示す。図中の  $m/z$  は、分子量を示す。水分のアウトガス量が短時間で大幅に減少することが確認できる。しかし、水素および一酸化炭素の電流値は、ベーキング 1 時間後から  $1.0 \times 10^{-10}$  オーダーであるが、この時間以降から、アウトガス削減効果が小さくなっていくため、長時間のベーキング処理が必要になると推測される。

### 3.4 ベーキングによるアウトガス速度低減の評価

以上のデータをもとに、ベーキングによるアウトガス速度の低減効果について、過去の研究におけるタンクを例にとって評価を行う。WE-NET では、5 万  $\text{m}^3$  タンクの試設計を行っており、内槽にメンブレンを用い、真空層との間を GFRP で支持する構造を提案している<sup>9)</sup>。底部からの入熱については、同研究における平底円筒形の検討結果をもとに、1000 W と仮定した。側面、屋根部については、GFRP からの熱伝導による入熱を考慮した。仕様の要目を **Table 2** に示す。本仕様をもとに、ベーキング有無によるガス放出速度の違いを計算した。内槽表面温度については、液体水素を積載した 20 K の状態と、点検を行う場合等で液体水素がなく内槽温度が高い状態の一例として 80 K の



**Fig. 8** Time dependency on baking to each outgas component from SUS304L.

状態とで、それぞれの真空度劣化挙動を計算した。真空度と SI の熱伝導率の相関については、前出の Fesmire らの研究<sup>1)</sup>から求めた。クライオ効果については、以下のように定量化した。まず、各ガス成分の飽和蒸気圧曲線をもとに、20 K の低温面（内槽表面）からの蒸発速度を(5)式より算出した<sup>10)</sup>。

$$\dot{N} = (1/4)\alpha \bar{V} n = 3.5 \times 10^{23} \alpha P / \sqrt{MT} (\text{molec} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (5)$$

(5)式において、T は温度(K)、P は蒸気圧(Torr)、M は分子の質量数であり、単位面積当たり蒸発する分子数 $\dot{N}$ は気相の分子密度  $n=9.6 \times 10^{18} P/T$  ( $\text{cm}^{-3}$ )、平均熱運動速度  $\bar{V}=1.5 \times 10^4 \sqrt{T/M}$  ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) から導出した。 $\alpha$  は入射した分子が凝縮する割合、すなわち凝縮係数であり、各ガス種について、Dawson らの研究における、低温面温度 20 K、ガス温度 300 K の値を採用した<sup>11)</sup>。

一方、各ガス成分のアウトガス速度を求め、先述の内槽表面積当りの速度に換算した。分子量 28 については、多くの文献で一酸化炭素としているが<sup>5,6,10)</sup>、ここでは窒素と一酸化炭素が等モル量含まれていると仮定した。真空層へのガス放出速度は、これら低温面からの蒸発量とアウトガス速度を比較し、蒸発速度がアウトガス速度より小さい場合は、低温面でクライオ効果が発揮されるものとして、蒸発速度の値を採用した。一方、蒸発速度がアウトガス速度より大きい場合は、クライオ効果が期待できないため、アウトガス速度をガス放出速度とした。これらの値を **Fig. 9** に示す。

以上の方法で、ベーキング有無における入熱量の経時変化を **Fig. 10** に示す。内槽が 20 K で、ベーキング処理を行

**Table 2** Specifications of imaged tank.<sup>9)</sup>

Inner diameter of inner tank	40 m
Thickness of inner tank	29 mm
Height of inner tank at the cylindrical part	40 m
Heat ingress from the bottom	1000 W
Inner diameter of outer tank	41.9 m
Diameter of cylindrical support made of GFRP	300 mm
Thickness of cylindrical support	3.6 mm
Distance between the supports	900 mm
Number of SI layer	50 (3 layers/mm)
Thermal conductivity of the support	0.334 W/(m·K)
Heat ingress to the inner tank through the supports at the side area and roof	4100 W
Heat ingress through SI on the surface of the inner tank	8500 W (0.85 W/m <sup>2</sup> )
Calculated total heat ingress	13600 W
Target boil-off rate	0.1%/d
Calculated boil-off rate	0.07%/d
Gas temperature of vacuum area	300 K
Thermal conductivity of SI	0.1556 P <sup>0.3</sup> (mW/(m·K)) (P (pressure at the vacuum area) <1 Pa)

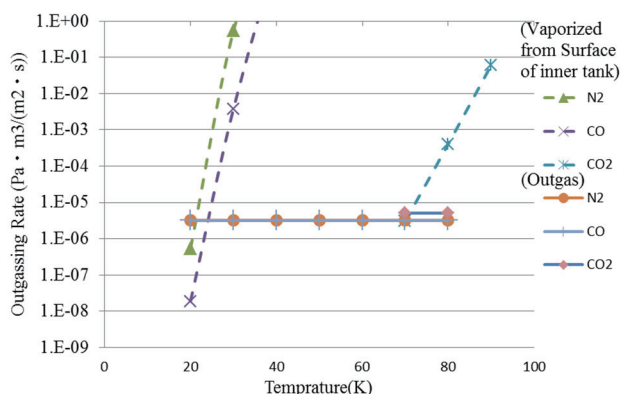


Fig. 9 Rates of vaporization from cold surface and outgas.

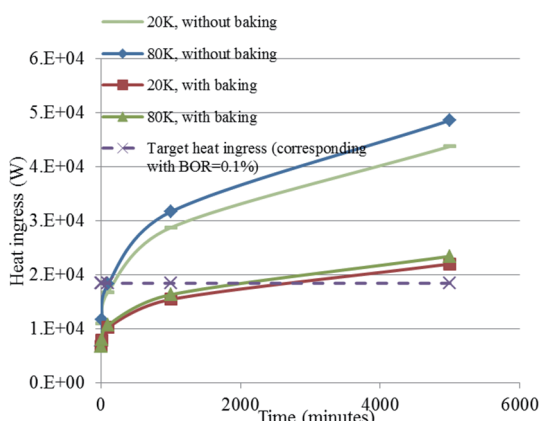


Fig. 10 Time dependency of heat ingress for imaged tank.

わない場合は、数時間で入熱量が目標値を超えることがわかる。この原因として、本設計では、GFRPの支持材を900 mm間隔で設置していることから、GFRPの表面積が大きく、大量のアウトガスが放出されるためと考えられる。ベーキング処理を行った場合でも、数日で入熱量が目標値を超えることから、本設計で入熱量を維持するためには、吸着材によるアウトガス低減を行った上で、定期的に再真空排気を行う、内槽の構造設計を見直し、GFRPの使用量を大幅に削減する等の対策が必要となる。内槽温度が80 Kの場合も同様の傾向が見られるが、80 Kでは窒素、一酸化炭素および二酸化炭素の飽和蒸気圧が大きくなることから、Fig. 9に示す通りクライオ効果が期待できなくなり、真空度の劣化速度は大きくなる。

なお、本計算はいずれも、内槽が一定温度に保持されていると仮定したものであり、時間経過による温度上昇に伴う入熱量を評価する場合は、低温時にクライオ効果で吸着されていた成分が急激に蒸発する現象を計算に考慮する必要があり、複雑な非定常計算となることから、今後の研究課題としたい。

#### 4. まとめ

本研究では、将来の水素社会で必要になると考えられる、大容量の液体水素容器への真空断熱技術を実現するために、構成材料からのアウトガス放出速度を測定し、放出速度のモデル化、および抑制方法を検討してその効果を確認した。

その結果、ベーキングについては、樹脂材料のアウトガス放出速度の律速が、固体内の拡散現象である領域で、アウトガス放出速度の低減効果が確認された。

材料表面にメッキ処理を施すことにより、アウトガス放出速度が1/10程度に抑制できることが確認された。

各材料からのベーキングによるアウトガスの削減効果を成分ごとに分析することにより、ベーキングによる材料、各材料からのアウトガスの削減効果を各成分に対して定量的に把握することができた。

以上のデータを基に、大容量タンクの真空層から放出されるアウトガスの計算を実施し、ベーキングによるアウトガス低減効果、および低温面のクライオ効果を考慮したタンクの真空劣化予測手法を提案することができた。

本研究は、平成25年度経済産業省「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」による成果の一部である。ご指導いただいた皆様にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) J.E. Fesmire, et al.: "Spray-on form insulations for launch vehicle cryogenic tanks," *Cryogenics* **52** (2012) 251-261
- 2) Y. Ishikawa: "Ultrahigh vacuum materials and outgassing rate—with a special reference to stainless steels—," *J. Vac. Soc. Jpn.* **49** (2006) 335-338 (in Japanese)  
石川雄一:「超高真空材料とガス放出速度—ステンレス鋼を中心として—」, *J. Vac. Soc. Jpn.* **49** (2006) 335-338
- 3) J.R. Young: "Outgassing characteristics of stainless steel and aluminum with different surface treatments," *J. Vac. Sci. Technol.* **6** (1969) 398
- 4) T. Kobari, et al.: "Outgassing rate of the stainless steel chamber after low temperature bakeout," *J. Vac. Soc. Jpn.* **33** (1990) 179-181 (in Japanese)  
小針利明ら:「ステンレス鋼製真空容器の低温ベーキング」, *真空* **33** (1990) 179-181
- 5) Y. Ishikawa, et al.: "Reduction of outgassing from stainless steels with special references to baking temperature and baking history," *J. Vac. Soc. Jpn.* **32** (1989) 444-452 (in Japanese)  
石川雄一ら:「ステンレス鋼の放出ガス速度の低減—ベーキング温度、履歴の効果—」, *真空* **32** (1989) 444-452
- 6) K. Battes, C. Day and V. Hauer: "Outgassing rate measurements of stainless steel and polymers using the difference method," *J. Vac. Sci. Technol. A* **33** (2015) 021603-1-021603-9
- 7) Y. Sato, et al.: "Outgassing rate measurement of the plastics," *J. Vac. Soc. Jpn.* **56** (2013) 422-424 (in Japanese)  
佐藤吉博ら:「合成樹脂を用いた材料の気体放出速度測定」, *J. Vac. Soc. Jpn.* **56** (2013) 422-424

- 8) N. Ota and T. Hamao: "Outgassing characteristics of electroless plated epoxy resin," J. Vac. Soc. Jpn. **45** (2002) 142-144 (in Japanese)  
大田暢彦, 濱尾聡和:「無電解めっき処理エポキシ樹脂のガス放出特性」, 真空 **45** (2002) 142-144
- 9) Engineering Advancement Association of Japan: "WE-NET subtask 5. Development on the technology of hydrogen transportation and storage," vol.3 Development of liquid hydrogen storage facility (1997) 86-87, 97-98  
エンジニアリング振興協会:「WE-NET サブタスク 5. 水素輸送・貯蔵技術の開発」, 第Ⅲ編 液体水素貯蔵設備の開発 (1997) 86-87, 97-98
- 10) K. Okamoto: "The recent ultrahigh vacuum technique on cryopump," J. Plasma Res. **51** (3) (1984) 187-210 (in Japanese)  
岡本耕輔:「最近の高真空技術」, 核融合技術 **51** (3) (1984) 187-210
- 11) J.P. Dawson, et al.: "Cryopumping," Cryogenics **5** (2) (1965) 57
- 

**猪股 昭彦**



1973 年 11 月 19 日生。1996 年東北大学工学部生物化学工学科卒業。1998 年同大学院工学研究科博士前期課程（化学工学専攻）修了。2009 年川崎重工業(株)入社。2016 年神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程入学。低温工学・超電導学会会員。

**奥村 健太郎**

1986 年 9 月 25 日生。2011 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻修了。2011 年 4 月より川崎重工業(株)技術研究所勤務。主に液体水素輸送・貯蔵技術の研究開発に従事。

**後神 一藤**

1986 年 11 月 10 日生。2012 年 3 月神戸大学大学院海事科学研究科海事科学専攻修了。2012 年 4 月より川崎重工業(株)技術研究所勤務。主に液体水素輸送・貯蔵技術の研究開発に従事。

**武田 実**

1961 年 12 月 25 日生。1984 年神戸商船大学商船学部卒業。1986 年大阪市立大学大学院理学研究科修士課程修了。1988 年同大学院博士課程中退。同年 4 月神戸商船大学商船学部（現：神戸大学大学院海事科学研究科）勤務。現在、超伝導応用および極低温流体に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、応用物理学会、日本物理学会、日本マリンエンジニアリング学会会員。博士（理学）。