

ナノ断熱材の適用シミュレーションとカーボンニュートラルへの貢献

Simulation of Applying Nano Thermal Insulation and Its Contribution to Carbon Neutrality

鶴賀俊光*

Toshimitsu TSURUGA*

1. はじめに

2015年9月の国連サミットで採択されたSDGs達成に向け、国内外で脱炭素社会の実現に向けた動きが加速している。我が国においても、2020年10月の臨時国会での所信表明演説で2050年までにカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、その取り組みを始めている¹⁾。

CO₂をはじめとした温室効果ガスの削減に有効な対策の一つとしては省エネルギーへの取り組みが挙げられる。この省エネルギー対策において熱損失を低減する断熱技術は極めて重要な技術課題の一つである。断熱を必要とする製品は数多くあり、様々な断熱材、断熱技術が適用されている²⁾。その中でも製造業でのエネルギー消費量の大きい鉄鋼³⁾、並びに水素社会の実現を踏まえて今後の普及が期待される燃料電池⁴⁾等は断熱材の適用温度域が700～1000℃と高いため、断熱性だけでなく耐熱性も不可欠となる。

黒崎播磨(株)が取り扱うナノ断熱材「WDS®(図1)」はヒュームドシリカを主原料とした世界最高レベルの高耐熱・低熱伝導率の断熱材である。本稿では、ナノ断熱材の特性と適用シミュレーション例、並びにCO₂削減について述べる。

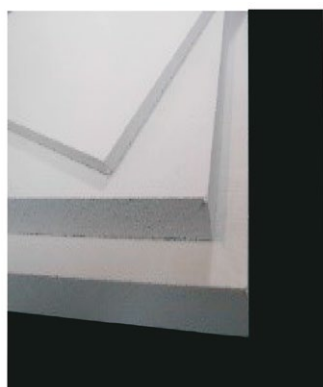


Fig. 1 WDS® Appearance

1 Introduction

Towards the achievement of SDGs adopted at the UN Summit meeting in September 2015, there is an accelerating move towards realizing a decarbonized society domestically and internationally. In Japan, during the general policy speech opening the October 2020 extraordinary session of the Diet, the Prime Minister declared a vision to seek carbon neutrality by 2050 and the start of efforts towards that goal¹⁾.

Energy saving initiatives can be given as one effective measure in eliminating greenhouse gases including CO₂. One of the most important technical issues in these energy saving measures is thermal insulation technology that can reduce heat loss. Many products require thermal insulation and there are applications to diverse kinds of materials and technologies²⁾. In particular, regarding steel in the manufacturing industry which consumes a large amount of energy³⁾, and fuel cells which are expected to spread moving forwards to achieve a hydrogen society⁴⁾, the range of temperatures that thermal insulation will be subjected to can reach 700 to 1000°C, so heat resistance is also imperative alongside insulating characteristics.

Krosaki Harima Corporation's nano thermal insulation "WDS® (Fig. 1)" is a thermal insulation material based primarily on fumed silica that features world best-in-class heat resistance and low thermal conductivity. In this document, I explain the characteristics of nano thermal insulation, give examples of simulation and describe the reduction in carbon dioxide emissions.

* セラミックス事業部 サーマルセラミックス部 マネージャー Manager, Thermal Ceramics Dept., Ceramics Div.

2. ナノ断熱材の概略

WDS[®] はヒュームドシリカを主原料とし、その他に赤外線不透過材と繊維を含む断熱材である。用いられるヒュームドシリカは粒子径が数十 nm 程度であり、その二次粒子は多くの微細気孔（およそ 100nm 以下）を形成している（**図 2**）ので、静止空気より更に低熱伝導率という特徴を有している（**図 3**）。また、ステファン—ボルツマンの法則（ $E = \sigma T^4$ ）で表されるように、放射（輻射）エネルギーは高温になるほど影響が強くなるので、放射伝熱の抑制のために散乱効果の高い物質（高屈折率）である赤外線不透過材（例えばジルコン、チタニア、炭化珪素等）が使用温度に応じて適宜使い分けられている。これにより、ナノ断熱材は他の断熱材に比べて高温環境下でも低熱伝導率を実現している。

ナノ断熱材の品種例および代表的な特性、特長を表 1 に示す。WDS[®] はボードタイプとシートタイプに分けられる。ボードタイプはシートタイプと比べて、かさ密度が小さいため低熱伝導率だが、圧縮強度は低い。シートタイプは反対に、圧縮強度は高いが、ボードタイプより高熱伝導率である。最高使用温度は 950 ～ 1050℃ であり、シートタイプはボードタイプより少し高い温度域での使用が可能である。これらは製品や用途に応じて適宜使い分けられる。

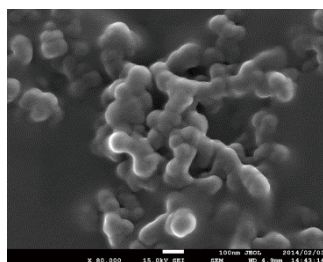


Fig. 2 SEM Image of Fumed Silica

2. Overview of Nano Thermal Insulation

WDS[®] primarily consists of fumed silica and is a thermal insulation that additionally features infrared shielding material and fibers. The fumed silica used in WDS[®] has a particle size of only dozens of nanometers and many of the secondary particles form fine pores (approximately 100nm or less) characterizing them (**Fig. 2**) with even lower thermal conductivity than still air (**Fig. 3**). Further, as indicated by the Stefan-Boltzmann law ($E = \sigma T^4$), radiant energy has a stronger impact as temperature increases, so an infrared shielding material (such as zircon, titania, or silicon carbide) that has a high scattering effect (high refractive index) can be used appropriately based on the used temperatures in order to limit radiant heat. This enables nano thermal insulation to demonstrate a low thermal conductivity even in high temperature environments when compared to other thermal insulations.

Types of nano thermal insulation material, the representative characteristics and features are shown in **Table 1**. WDS[®] can be divided into a board type and sheet type. The board type has lower thermal conductivity but lower compression strength because it has lower bulk density than the sheet type. The sheet type conversely has higher compression strength but higher thermal conductivity than the board type. The maximum used temperature is 950 to 1050℃ and therefore the sheet type can be used at slightly higher temperatures than the board type. This allows each type to be used optimally based on the product and application.

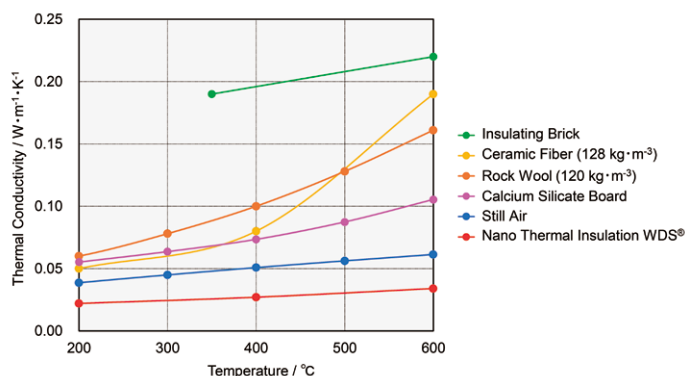


Fig. 3 Thermal Conductivity Characteristics of Various Insulations

Table 1 Types of Nano Thermal Insulation

Type		Board	Sheet
Model		WDS® Ultra, etc.	WDS® LambdaFlex™ Super, etc.
Thickness / mm		10~50	3~10
Covering		None or Laminate Film, Woven Fabric, Metal Foil, etc.	None or Laminate Film, Woven Fabric, Metal Foil, etc.
Max. Used Temp. / °C	Core	950	1050
Bulk Density / kg·m ⁻³		230	400
Compression Strength / MPa		0.42	0.93
Thermal Conductivity / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	200°C	0.022	0.032
	800°C	0.044	0.060
Workability (Complex Shape/Drilling)		Can be supported	Can be supported
Handling	Cutting	Possible without specialized tools	Possible without specialized tools
	Dust	Avoid dust leakage by covering	Avoid dust leakage by covering
Major Applications		Industrial Furnaces, Fuel Cells	Steel, Industrial Furnaces

3. ナノ断熱材の適用シミュレーション

前項で述べた通りナノ断熱材は多くの特長を有するため、鉄鋼、工業炉、燃料電池、住宅等の幅広い用途に使用されている。本断熱材による製品への適用効果について、一次元定常熱伝導計算によりシミュレーションした例を2例示す。

3.1 鉄鋼

製鉄用途において、ナノ断熱材が適用される混鉄車、溶鉄鍋、取鍋等は施工面が曲面になっているため柔軟性を持つシートタイプが主に用いられる。施工設備によっては稼働面温度が1600°C近くに達するため、耐熱性を考慮し、ナノ断熱材は基本的に鉄皮側に近い配置が推奨される。本シミュレーションでは、**図4**で示すように溶鉄鍋、取鍋を例に取って一般的なライニングを想定した。厚さ5mmのナノ断熱材(WDS® LambdaFlex™ Super)を鉄皮-パーマレンガ(ろう石れんが)間に配置した場合の定常熱伝導計算結果とCO₂削減量の試算結果を**表2**に示す。溶鉄鍋、取鍋へのWDS®適用効果はそれぞれ鉄皮温度▲152K、▲88K、放散熱量▲60%、▲45%となり、それぞれ大幅に低減可能であることが分かる。稼働面温度は溶鉄鍋の方が低いが、ライニングにおけるAl₂O₃-SiC-Cれんがの熱伝導率が高いため、取鍋に対して溶鉄鍋におけるWDS®の適用効果がより大きくなっている。

また、CO₂削減量の試算に際し、2020年度における日本製鉄グループでの粗鋼生産1tあたりのCO₂排出量原単位2.09 t-CO₂·t(-steel)⁻¹(暫定値)⁵⁾を粗

3. Simulation of Applying Nano Thermal Insulation

Nano thermal insulation is used in a broad array of applications including steelmaking, industrial furnaces, fuel cells and housing due to the many benefits described above. Herein I give two examples of the impact of application to products of this insulation material that were simulated by calculating steady state heat conduction in one dimension.

3.1 Steel

In the field of steelmaking, the flexible sheet type of nano thermal insulation is primarily used for torpedo cars, pig iron ladles, and steel ladles since their treated surfaces are generally curved. Depending on the equipment, operating temperatures can approach 1600°C so it is recommended that the nano thermal insulation is essentially arranged in proximity to the steel shell for heat resistance. In this simulation, generic lining was assumed as an example for pig iron ladles and steel ladles as shown in **Fig. 4**. **Table 2** shows the trial calculation results of steady state heat conduction and carbon dioxide reduction when nano thermal insulation (WDS® LambdaFlex™ Super) with thickness of 5mm was arranged between steel shell and permanent bricks (pyrophyllite bricks). The impact of WDS® on the pig iron ladle or steel ladle is estimated steel shell temperature of ▲152K and ▲88K, respectively, and heat leakage of ▲60% and ▲45%, respectively, clearly demonstrating the ability for major reductions. In spite of the lower operating surface temperature of pig iron ladle, the impact of WDS® is larger than steel ladle because of high thermal conductivity of Al₂O₃-SiC-C bricks in the lining for the pig iron ladle.

In calculation of CO₂ reductions, CO₂ emissions per ton of crude steel production at the Nippon Steel Group in FY2020 was given as 2.09 t-CO₂·t(-steel)⁻¹(provisional value)⁵⁾, and it was divided by 24.5 GJ·t(-steel)⁻¹⁵⁾ of energy consumption per ton of crude steel

鋼生産 1t 当たりのエネルギー原単位 24.5 GJ·t(steel)^{1.5)}で除すことで、製鉄にて消費されるエネルギーに対する CO₂ 排出量 $k=0.085 \text{ t} \cdot \text{GJ}^{-1}$ を求めた。このとき WDS[®] 未適用時の放散熱量 $Q_1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、WDS[®] 適用時の放散熱量 $Q_2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ として、受鋼時間 $t=1000 \text{ h}$ とした場合における WDS[®] 施工面積 $S=1\text{m}^2$ あたりの CO₂ 削減量 Vt を以下の式(1)により試算した。

$$V=k(Q_1-Q_2)tS \quad (1)$$

その結果、溶銑鍋、取鍋における CO₂ 削減量 V はそれぞれ 2.8 t、1.3 t と試算され、WDS[®] 適用による CO₂ 大幅削減の可能性が示唆された。

production, and I got $k=0.085 \text{ t} \cdot \text{GJ}^{-1}$ of CO₂ emission per energy consumption in steel production. At this time, with heat leakage without WDS[®] ($Q_1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), heat leakage with WDS[®] ($Q_2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) and each 1000 hours of steel keeping time in ladles ($t=1000 \text{ h}$), CO₂ reduction (Vt) per square meter of WDS[®] surface area ($S=1\text{m}^2$) was calculated with formula (1) below.

$$V=k(Q_1-Q_2)tS \quad (1)$$

As a result, CO₂ emission reduction V for the pig iron ladles and steel ladle was found to be 2.8t and 1.3t, respectively, demonstrating the potential for massive reduction in CO₂ emissions that can be achieved with WDS[®].

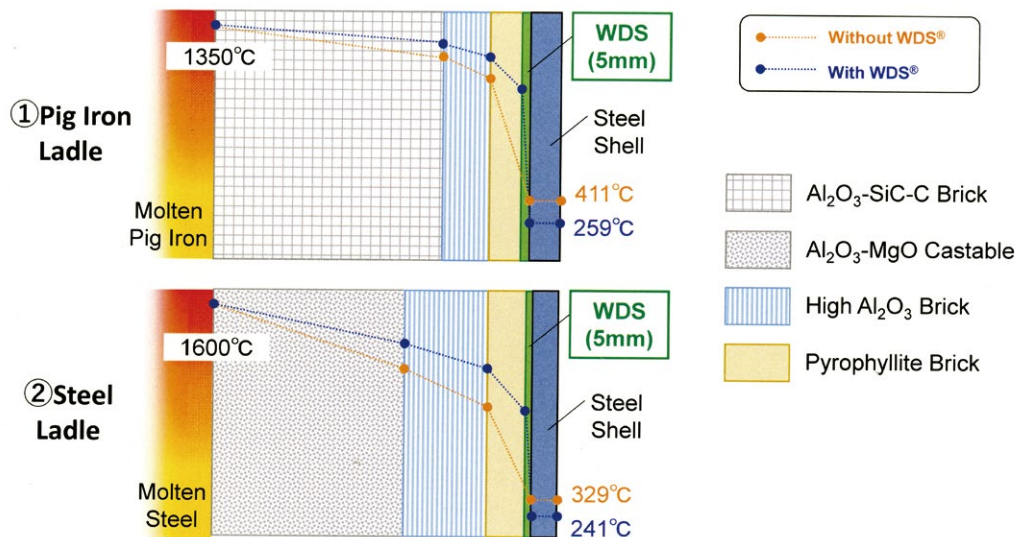


Fig. 4 Lining of the Pig Iron Ladle and Steel Ladle Used for Calculation and Results of Surface Temperature Calculations for Steel Shell

Table 2 Trial Calculation Results of Steady State Heat Conduction and Carbon Dioxide Reduction

Equipment	①Pig Iron Ladle			②Steel Ladle		
	Without WDS [®]	With WDS [®]	Difference	Without WDS [®]	With WDS [®]	Difference
Op. Surface Temp. / °C	1350	1350	-	1600	1600	-
Steel Shell Temp. / °C	411	259	▲152	329	241	▲88
Heat Leakage / W·m ²	15022	6025	▲60%	9512	5274	▲45%
CO ₂ reduction per WDS [®] square meter each 1000 hours of steel keeping time in ladles / t	2.8			1.3		

3・2 燃料電池

発電効率が高い固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の作動温度は約 700 ~ 1000℃であり、発電部であるホットモジュール (改質器とスタックの収容部) 内部が最も高温になる。本断熱材の耐熱性は概ね問題ないが、断熱性が重視されるため、断熱性能が高いボードタイプが主に用いられる。本計算対象となる断熱構成を図 5 に示す。計算条件は断熱材の厚さ (合計) を 60mm とし、ホットモジュールの内部温度 800℃、外気温度 25℃、筐体外面付近の風速は $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。ホットモジュール筐体側面を対象として、ケイ酸カルシウム板とナノ断熱材 (WDS[®] Ultra) を比較した計算結果を表 3 に示す。WDS[®] はケイ酸カルシウム板に対し、外面温度▲ 57K、放散熱量▲ 72% となり、それぞれ大幅に低減可能であることが分かる。これは言い換えるなら、ケイ酸カルシウム板と同等の断熱性能にする場合、WDS[®] の厚さを約 72% 削減 (60 → 約 17mm) できることになる。また、安価な断熱材を組合せて断熱性能を最適化する設計により低コスト化を図ることができる。家庭用燃料電池システム導入家庭における CO₂ 削減量は 1 台あたり年間約 1.3t の効果が確認されており⁶⁾、普及が進めば、より一層の CO₂ 削減効果が期待できる。

3.2 Fuel Cells

Solid oxide fuel cells (SOFC) have high power generating efficiency but action temperature of 700 to 1000℃ with the highest internal temperature at the internal power generating component, the hot module (reformer and fuel-cell stack storage). There are generally no issues with the heat resistance of this insulation but since thermal insulation is prioritized, mainly the board type is used with its high thermal insulation performance. The insulation structure used for this calculation is shown in Fig. 5. The conditions for the calculation below is used an insulation thickness (total) of 60mm, internal temperature of the hot module of 800℃, external air temperature of 25℃ and windspeed near the exterior of the casing of $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Table 3 shows the calculation results for the side surface of the hot module casing comparing calcium silicate board with nano thermal insulation (WDS[®] Ultra). WDS[®] was 57K less external temperature and 72% less heat leakage than the calcium silicate board enabling massive reductions in both aspects. Taken another way, when making WDS[®] the same insulation performance as calcium silicate board, WDS[®] thickness can be reduced by about 72% (60 → about 17mm). It is possible to reduce costs by designing with optimized thermal insulation performance together with a lower cost insulation. CO₂ emission reductions in a residential fuel cell system have been confirmed to be about 1.3t per year per unit⁶⁾, and if it is spread, another level of CO₂ reduction effect can be expected.

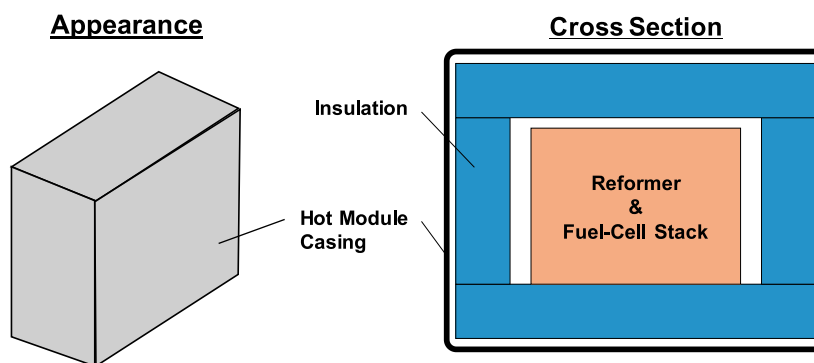


Fig. 5 Structure of Hot Module Insulation

Table 3 Results of Insulation Performance Calculation for Fuel Cell

Insulation		Calcium Silicate Board	WDS [®] Ultra	Difference
Side	Ext. Temp. / °C	115	58	▲57
	Heat Leakage / W · m ²	1209	344	▲72%

4. おわりに

本稿ではナノ断熱材の適用による製品の断熱性能の大幅向上とCO₂大幅削減の可能性を示した。当社では1995年以来、ナノ断熱材の輸入・加工、製造・販売を行うとともに、評価・効果・適用に関する研究、熱解析および顧客への断熱設計の提案、並びに新規ニーズに応じた各種開発を行ってきた^{2,7)}。カーボンニュートラルの実現に向け、様々な製品・用途に対し、当社が持つ断熱材および断熱技術を提供していきたいと考えている。

文献

- 1) 資源エネルギー庁：2050年カーボンニュートラルの実現に向けた需要側の取組(2021年2月19日)。
- 2) 松尾幸久、桂裕氏：微多孔性断熱材の特性と適用方法, セラミックス, 49, 638-642 (2014)。
- 3) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計(エネルギーバランス表) 2019年度。
- 4) 資源エネルギー庁：水素・燃料電池に関する経済産業省の取組について(2019年5月)。
- 5) 日本製鉄株式会社：日本製鉄 サステナビリティレポート2021, p.25。
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：「定置用燃料電池大規模実証研究事業」事業評価(事後評価) 報告書(2011年1月)。
- 7) 松尾幸久：マイクロポーラス断熱材の特性と適用方法, セラミックデータブック, 47, 114-118 (2019)。

4. Conclusion

In this document, it was demonstrated the potential for increasing insulation performance of products and massive reduction in CO₂ emissions by applying nano thermal insulation. At Krosaki Harima, since 1995 we have been involved in the import, machining, production and sales of nano insulation materials as well as the research regarding evaluation, impact and applications, thermal analysis, proposing insulation design to customers and many kinds of development towards answering new needs^{2, 7)}. We would like to supply the thermal insulation materials and technologies of Krosaki Harima for various products and applications towards realizing a carbon neutral future.

References

- 1) Agency for Natural Resources and Energy: Demand Side Efforts for Achieving Carbon Neutrality in 2050 (February 19, 2021).
- 2) Yukihiisa Matsuo and Yuji Katsura: Properties and Application Method of Microporous Thermal Insulation Materials, Ceramics Japan, **49** 638-642 (2014).
- 3) Agency for Natural Resources and Energy: Comprehensive Energy Statistics (Energy Balance Table) 2019 ed.
- 4) Agency for Natural Resources and Energy: METI Efforts Related to Hydrogen and Fuel Cells (May 2019).
- 5) Nippon Steel Corporation: Nippon Steel Sustainability Report 2021, p.25.
- 6) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): Project Evaluation (Ex-Post Evaluation) Report Regarding the Stationary Fuel Cell Large-scale Experimental Study Project (January 2011).
- 7) Yukihiisa Matsuo: Characteristics and Application Method of Microporous Insulation, Ceramic Data Book, 47, 114-118(2019).