

Ⅲ. 研究開発成果について

Ⅲ.研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1.1 プロジェクトの概要

1.1.1 熱移動のメカニズムと断熱の方法論（図Ⅲ.1.1-1）

本プロジェクトは、住宅・ビル、電気機器、輸送機器、加熱炉などの断熱壁や断熱窓などに広く適用できる画期的な断熱材料技術を開発するため、ナノ多孔体構造を有する複数のセラミックス膜・素材を用いて、熱移動を支配する三要素である「格子振動」、「対流」、「輻射」のすべてを抑制するマルチセラミックス膜新断熱材料の開発基盤技術を開発することを目的とする。

熱の移動は、以下の3つのメカニズムで起こる。

- ①伝導：固体中の格子の振動や電子の移動による。
- ②対流：気体や液体などが流動することによる。
- ③輻射：光や電波などの放射エネルギーとして空間移動することによる。

断熱の方法論として、本プロジェクトではナノ構造制御により

①伝導の抑制

マクロ的には固体の密度が小さいほど伝導は低下する。また、ミクロ的には固体の多孔構造（孔径）が小さいほど伝導は低下する。（ナノ多孔質構造が有利）

②対流の抑制

圧力が低いほど、また固体（多孔体）の空間径（孔径）が小さいほど対流が低下する。（真空およびナノ多孔質構造が有利）

③輻射の抑制

固体と空間が層状となり、層状構造が細くなるほど輻射が散乱され、熱移動が抑えられる（羽毛構造あるいは層状構造が有利）

1.1.2 マルチセラミックス構造の例（図Ⅲ.1.1-2）

断熱性の高いマルチセラミックス構造として、超断熱壁材料としては、ナノ積層構造膜とナノ多孔体粒子の複合構造化シラミネートフィルムで封止した構造、超断熱窓材料としては、ナノ積層構造膜と透明多孔体をガラスで封入した構造などが挙げられる。ナノ積層構造による輻射の抑制効果、ナノ多孔質構造による気体熱伝導および固体熱伝導の抑制効果の複合化により、超断熱特性が得られると期待できる。ナノ多孔体材料では、断熱材料として二大利点がある。ナノ多孔

質体を封入した断熱材は、低真空下でも高真空下並の低熱伝導率となるとともに、従来の断熱材と比較して優れた圧縮強度を示す。

1. 1. 3 プロジェクトの概要（図Ⅲ.1.1-3）

本研究開発は、セラミックスのナノ多孔体構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造等からなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって、熱を伝える三要素（格子振動、対流、輻射）の何れも抑えるマルチセラミックス膜新断熱材料技術の開発を行い、住宅やビル等の冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料の実用化を目指すものである。具体的な研究開発項目として、以下の研究開発を実施する。

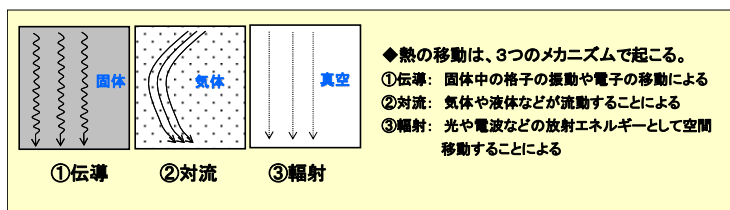
【共通基盤技術】

- ①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発
- ②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発
- ③透明多孔質セラミックス合成技術の開発
- ④複合化技術および真空セグメント化技術の開発

【実用化技術】

- ⑤超断熱壁材料の開発
- ⑥超断熱窓材料の開発

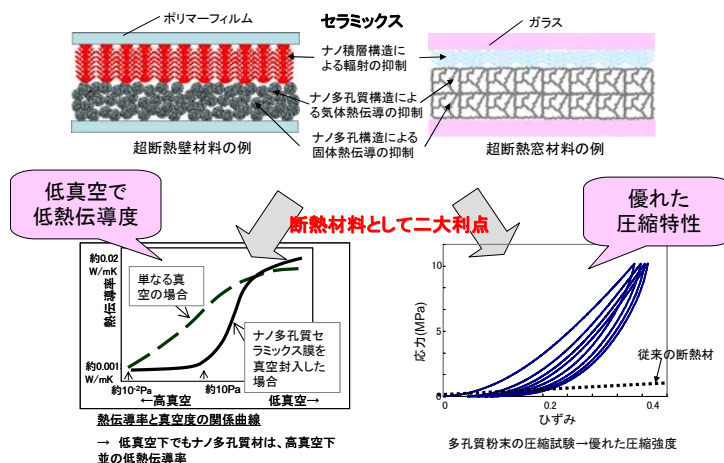
図Ⅲ.1.1-1 熱移動のメカニズムと断熱の方法論



◆断熱の方法論と本プロジェクトの作戦（構造制御の効果・有利性）

- ①伝導の抑制 → マクロ的には固体の密度が小さいほど伝導は低下する。また、ミクロ的には固体の多孔構造（孔径）が小さいほど伝導は低下する。**（ナノ多孔質構造が有利）**
- ②対流の抑制 → 圧力が低いほど、また、固体（多孔体）の空間径（孔径）が小さいほど対流が低下する。**（真空及びナノ多孔質構造が有利）**
- ③輻射の抑制 → 固体と空間が層状となり、層状構造が細かくなるほど輻射が散乱され、熱移動が抑えられる。**（羽毛状あるいは層状構造が有利）**

図Ⅲ.1.1-2 マルチセラミックス構造の例



図Ⅲ.1.1-3 プロジェクトの概要

本研究開発は、セラミックスのナノ多孔体構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造等からなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって、熱を伝える三要素（格子振動、対流、輻射）の何れも抑えるマルチセラミックス膜新断熱材料技術の開発を行い、住宅やビル等の冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料の実用化を目指すものである。具体的な研究開発項目として、以下の研究開発を実施する。

【共通基盤技術】

- ①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発
- ②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発
- ③透明多孔質セラミックス合成技術の開発
- ④複合化技術および真空セグメント化技術の開発

【実用化技術】

- ⑤超断熱壁材料の開発
- ⑥超断熱窓材料の開発

1.2 各研究項目の主な研究内容

①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発（図Ⅲ.1.2-1）

熱移動の三要素のうち「格子振動」による伝導を抑制するためには、温度差をもつ2つの領域の境界に存在する固体の接触面積を低下させ、熱抵抗を向上させることが有効である。また、「対流」を抑制するためには、対流空間を気体分子の平均自由行程以下にすることが効果的である。さらに、「輻射」を抑制するためには、赤外領域の光を反射する、もしくは吸収して再輻射を防ぐために熱に変換する層を高温境界側に設ける必要がある。この3つの要求を同時に満たす素材として、本提案ではナノ多孔体構造を有するセラミックス粒子を合成する。このナノ多孔構造粒子を充填させた構造をもつ断熱セラミックスの基本構造とすることで、その多孔性に起因した粒子内部での高い熱抵抗だけでなく粒子間接触点での熱抵抗により「格子振動」による熱の伝導を抑制する。また、多孔体の孔径制御および充填率向上によって、気体分子の平均自由行程以下のナノ空間を形成することで「対流」を抑制し、より低真空下での断熱性能を向上させる。さらに、微量の遠赤外線高吸収ナノ粒子を添加した複合粉末とすることで「輻射」を抑制させる。

また、このナノ多孔構造を有するセラミックス粒子は、断熱性能を発現させる機能材料としての役割に加えて、壁材料として応力を担う構造材料としても貢献させる。これにより、真空断熱における熱橋（構造材を経路とする熱伝導）を低減できるという効果をもたらし、応用面において極めて重要な利点となる。

水ガラスを油性溶媒および界面活性剤と共に攪拌混合して W/O コロイド状態にした後に、沈殿、乾燥の処理によって水成分が抜けたほぼ球形のナノ多孔体粒子を合成させる。ナノ多孔質粒子の径は小さければ小さいほど理論的な断熱性能は優れているが、粉体の流動の際の粒子の運動エネルギーが粒子間のファンデルワールス力に比べて小さいと粉体は強く凝集して壁材料に加工する際のハンドリングや高耐圧縮性の実現に大きな支障となる。そこで今回の開発では粉体の良好な流動性が得られる最小の粒子径である 5-10 ミクロンの径の粒子を開発する。また粒子の断熱性と耐圧縮性のバランスから、多孔率 85-90%程度の粒子の合成を行う。このナノ多孔体粒子の合成は、主にシリカ粒子（石英ガラス）の組成で行うが、さらには輻射を抑える機能のためのシリカに添加物を加えた新たな組成のセラミックス粒子あるいはシリカ表面に赤外吸収を持つ官能基を表面修飾したシリカ粒子あるいは、ナノ多孔質粒子粉体に微量の遠赤外線高吸収ナノ粒子を添加した複合粉体を開発する。また、ナノ多孔質粒子の生理活性の評価をあわせて行う。

②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発(図Ⅲ.1.2-2)

熱伝導の三要素のいずれも抑えるマルチセラミックス膜の開発に必要な第二の材料開発は、ナノ構造を有するセラミックス膜のコーティング技術の開発である。ナノ構造セラミックス膜は、柱状かつ羽毛状といった特異なナノ多孔構造を有することから、熱伝導の三要素をすべて抑えることが期待できる。羽毛状構造は、セラミックス結晶の反射板がナノオーダーで多層化された構造となっているため、輻射による伝熱を抑えるのに最も効果的な構造であることが期待できる。したがって、ナノ構造セラミックス膜は、超断熱壁および超断熱窓における輻射を抑えるために必要な材料であるといえることができる。

このセラミックス膜の形態を柱状および羽毛状などからなるナノ多孔構造、積層構造とすることで、熱移動の三要素をすべて抑えることが期待される。すなわち、この多孔構造によって、「格子振動」によって熱が伝えられる断面積を低減でき伝導による熱移動を抑えるとともに、対流空間を気体分子の平均自由行程以下として「対流」による熱移動も低減できる可能性がある。さらに、この羽毛状構造は柱状結晶の表面にナノオーダーの薄板が向きを揃えて密集した構造であり、「輻射」の抑制効果も期待できる。つまり、この多層構造を構成するセラミックス膜に、赤外光に対してのみ高い反射率を示す素材を適用することで、各層での反射が積算され赤外での高い反射率が期待できる。また、この羽毛状構造のサイズを数十から数百 nm のオーダーで精密に制御することができれば、光の干渉現象によって赤外領域を選択的に反射できる可能性も秘めている。

③透明多孔質セラミックス合成技術の開発(図Ⅲ.1.2-3)

建造物の壁面の多くには外部から光を採り入れるための窓があり、近年のオフィスビルや住環境では快適性の向上や照明電力の削減などのために窓面積を拡大する傾向にある。この窓材における断熱性能が低ければ、例えば研究項目①に示したナノ多孔構造粒子により壁材の断熱性能を向上させても総合的に高い断熱性能を得ることはできない。したがって、可視波長領域における透光性を確保しつつ熱を遮る材料の開発が必須である。

そこで、超断熱マルチセラミックス膜の実現に必要な第三の材料開発として、透明(透視性)多孔質セラミックス合成技術の開発を挙げる。多孔質化と真空技術の組み合わせにより、熱移動の3要素のうち格子振動と対流による熱移動を抑制する、というコンセプトは上記までと同様であり、細孔径の制御によって低真空下での低熱伝導の実現を目指す。ここで、光吸収の小さいシリカなどを母構造とし、光の波長よりも十分小さいナノオーダーの孔径をもつ多孔質フラクタル構造とすることで、フレネル散乱やミー散乱の影響を排除し、透光性を付与する。このナノオー

ダーの多孔構造を形成する手法として、ゾルゲル法、エアロゲル法およびメチル化キセロゲルによる方法の3つの手法について検討する。

④複合化技術及び真空セグメント化技術（図Ⅲ.1.2-4）

多孔質セラミックス粒子およびナノ構造セラミックス膜からなる材料に極めて優れた断熱性を与えるためには、これら多孔質セラミックス粒子などをポリマー膜にて被覆（包装）し、内部を真空化する技術の開発が必要である。また、真空断熱材料の壁材料としての実用性を高めるためには、施工時に切断、穴明け等の加工が行われても優れた断熱性が維持できるように真空封止する空間をセグメント化する技術を開発する必要がある。今回、研究開発を進める多孔質セラミックス粒子は、低真空化においても優れた断熱性能を有することが期待されており、真空封止加工性が良く、セグメント化においても有利な材料であることから壁材料への適用が最適な材料であるといえる。

これら多孔質セラミックス粒子などの真空封止環境下における性能を評価すべく、真空断熱材としての性能評価が可能な真空封止装置のテスト機を設計・検討し、導入する。そして該真空封止装置にて多孔質セラミックス粒子の真空度と断熱性能及び試作したサンプルの機械的強度を評価する。またセグメント構造を検討の上、各種のセグメント形状を有したサンプルを試作し、その加工性・実用性を評価する。その際、真空を長期間維持できるガスバリア性能および真空セグメント化するための成形性（賦形性）・接着性（融着性）の要求性能を満たす最適な構成材料を、ポリマー単層、ポリマー複層、ポリマー／無機複合層等の中から検討する。

上記検討結果を踏まえて、出来る限り低真空でかつ優れた断熱性能を有する条件及びセグメント形状をベースとし、実用化が可能な壁用断熱材の試作プロセスを開発する。本研究開発において、真空度によってセグメント化方法及び真空封止の方法が異なることから、真空度の設定は実用化が可能な試作プロセスを開発する上で非常に大きなポイントとなる。また、断熱材を開発する上で必要な、低熱伝導率材料の断熱性能の計測技術についてもその開発を行う。

上記検討結果を踏まえて、出来る限り低真空でかつ優れた断熱性能を有する条件及びセグメント形状をベースとし、実用化が可能な壁用断熱材の試作プロセスを開発する。

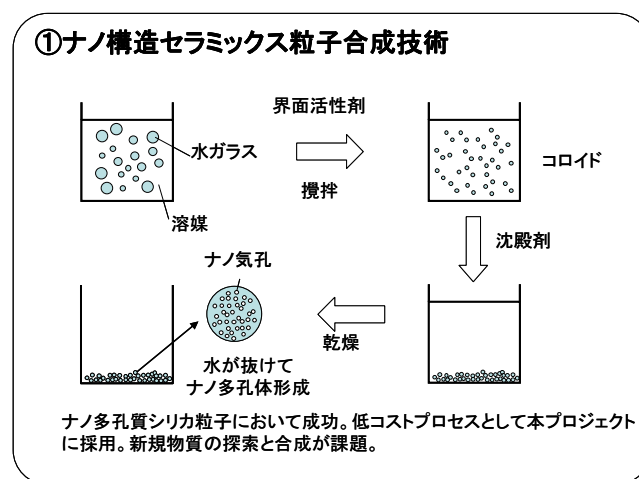
また、超断熱窓材料の開発において、透明多孔質セラミックスおよびナノ構造セラミックス膜からなる材料を窓材料として適用し、極めて優れた断熱性を発揮させるためには、それらセラミックスの両面をガラス板にて挟みこみ、ガラス板と透明多孔質セラミックスを複層化した後、内部を真空に保持しながら密閉化する必要がある。そのための基盤技術として、(1) ガラス窓とし

ての透明性を失わず、さらには透明多孔質セラミックスの破壊や特性劣化を伴うことなく、セラミックス材料をガラス板の間に挟みこんで複層化する組み立て技術、(2) 内部を真空排気した状態で封止する技術、を開発する必要がある。また、形成した窓材料の性能を評価するために、断熱性能（熱伝導率、熱貫流率）に関する熱的特性、光透過率・ヘイズ率などの光学的特性、さらには強度などの機械的特性、といった様々な特性評価が必要になる。

本開発では、大きさとして最大で 90000mm² (300mm×300mm) 程度のガラス板を用い、②、③で開発される透明多孔質セラミックス、あるいは透明多孔質セラミックスとナノ構造セラミックスの複合材料を2枚の板ガラスの間に挟みこむ方法を検討する。さらに、ガラス板／透明多孔質セラミックス／ガラス板の構成にて組み立てた後、封止する際の接着材料、接着方法および内部を真空化する技術を検討する。封止のための接着技術としては、長期間所定の真空状態を維持する必要性を考慮した接着材料、接着方法を検討する。さらに得られた低熱伝導率材料の断熱性能の計測技術の開発を行い、試作した窓用断熱材料の断熱性能を評価するとともに、光学的特性、機械的物性についても評価を行う。なお、特性の計測に際しては、必要に応じて樹脂封着などの簡便な接着技術も適用する。これらの開発を通じて、窓材料としての透明性・強度・生産性などを考慮しつつ、超断熱窓材料の実用化に向けた設計・製造指針を明確化する。

以上、各研究項目①から④の全体的な関連性について図Ⅲ.1.2-5 にまとめた。

図Ⅲ.1.2-1 ナノ構造セラミックス粒子合成技術

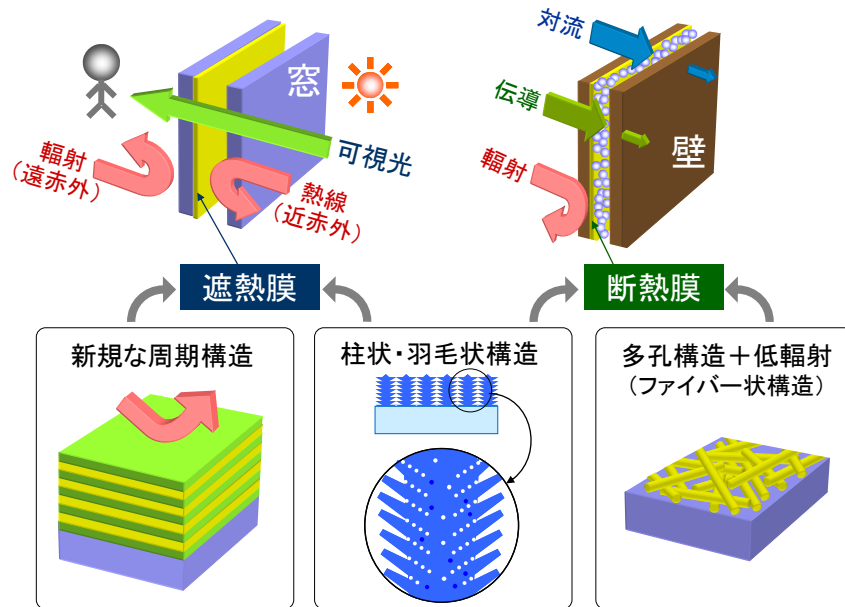


「格子振動」による伝導を抑制 ←ナノ多孔構造により、固体の接触面積を低下させ熱抵抗を増大
「対流」による伝導を抑制 ←ナノ多孔構造により、対流空間を気体分子平均自由行程以下に減少

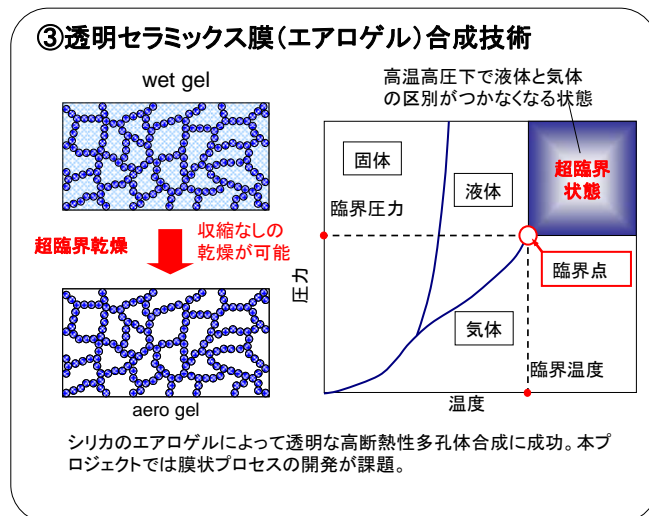
水ガラスを油性溶媒および界面活性剤と共に攪拌混合してコロイド状態にした後に、沈殿、乾燥の処理によって水成分が抜けたほぼ球形のナノ多孔体粒子を合成させる。今回の開発では粉体の良好な流動性が得られる最小の粒子径である5-10ミクロンの径の粒子を開発する。また粒子の断熱性と耐圧縮性のバランスから、多孔率85-90%程度の粒子の合成を行う。

図Ⅲ.1.2-2 ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発

②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発



図Ⅲ.1.2-3 透明セラミックス膜(エアロゲル)合成技術



「格子振動」と「対流」による熱移動を抑制 ←ナノ多孔構造の制御による効果
 「透明性」の実現 ←光の波長より小さいナノオーダーの孔径をもつ多孔質フラクタル構造
 光吸収の小さいシリカなどを母構造とする。ナノオーダーの多孔構造を形成する手法として、ゾルゲル法、エアロゲル法およびメチル化キセロゲルによる方法の3つの手法について検討する。

1.3 成果の概要

①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発

熱伝導精密測定装置（保護熱板法）を導入し、断熱材に用いる要素材料の小さな熱伝導率の値を正確に測る技術、および温度や真空度との関係曲線を精密に測定する技術をほぼ確立した。図Ⅲ.1.3-1 に示すように、水ガラスを原料としてシリカからなる多孔質セラミックス粒子を合成し、同粒子（粉末）の構造解析、熱伝導率等の特性の測定等を行い、約 1Pa の低真空下において約 0.002W/mK という極めて小さな熱伝導率を有するなどの成果を得た。

②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発

図Ⅲ.1.3-2 に成果の概要を示す。

EB-PVD 法により、ZnO:Ga インゴットを用いた成膜により、ZnO:Ga 膜の合成に成功し、可視光透過率、赤外反射率、ヘイズ率について中間目標をクリアすることができた。また、ZnO インゴット、Al₂O₃ インゴットを用いた 2 元蒸着により、ZnO:Al 膜の合成に成功した。

通電加熱法により ZnO 焼結体への通電加熱による新規な成膜方法により、輻射を抑えた超断熱壁材料として期待できる ZnO ナノファイバーの合成に成功した。

反応性スパッタリング法をベースとした Zn ターゲットおよび Al ターゲットによる二元同時成膜により、高キャリア濃度の ZnO:Al 膜の合成に成功するとともに、Al 添加割合の調整によって導電性および赤外反射特性の制御が可能となることが分かった。

③透明多孔質セラミックス合成技術の開発

テトラメトキシシラン(TMOS)またはメチルシリケートをシリカソースとして、溶媒であるエタノール中へ溶解させ、アンモニア水を触媒として加え、加水分解および重縮合させ湿潤ゲルを合成し、続く超臨界乾燥法（流通式超臨界乾燥法）によって、図Ⅲ.1.3-3 に示すような、10cm 角のエアロゲルを安定の合成できる合成法をほぼ確立した。

メチル基を含むアルコキシシランを出発物質とするゾルーゲル反応により、超臨界乾燥を用いなくてもエアロゲル（超臨界乾燥ゲル）と同等な細孔構造を有し、かつ同等な可視光透過性、熱伝導特性、物性を示す、メチル化キセロゲルの作製方法を確立した。

④複合化技術および真空セグメント化技術の開発

壁材料については、図Ⅲ.1.3-4 に示すように、ガスバリア性と成形性を両立できる Al 箔ラミ

ネットフィルムを選択、また $220 \times 220 \times t10\text{mm}$ の 1 面取用金型および 4 セグメント用金型の作製、真空チャンバー内は到達真空度 1.3Pa 以下を可能とする仕様とした真空封入装置の納入を経て、セラミックス多孔質粒子（粉末）を要素材とした真空断熱材を作製し、ピロー形状や容器形状両方の真空断熱材を作製できることが確認できた。

また、窓材料については、考案したガラス真空複合化装置の基本構造と製作方法で 220mm 角ガラス複合サンプルを試作し、図Ⅲ. 1. 3-5 に示すように、中間目標値である熱貫流率 1.0 を下回る値を実現した。試作サンプルの熱貫流値の経時変化がないことから作製後の真空度変化は認められない。真空ガラス貼り合わせ装置を導入し、最大 320mm 角のサンプルを目標真空度で、精度の良い試作を可能にした。

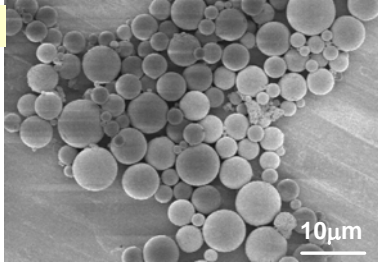
⑤超断熱壁材料の開発

超断熱壁材料に用いる多孔質ナノセラミックス粒子の商業生産可能な価格での量産を行なうために量産設備の設計と製造原価の積算を行なった。図Ⅲ. 1. 3-6 に示すように、設計した量産設備を用いて 1000 トン/年以上の生産規模での粒子製造コスト 750 円/kg という目標は十分達成可能との結論を得た。

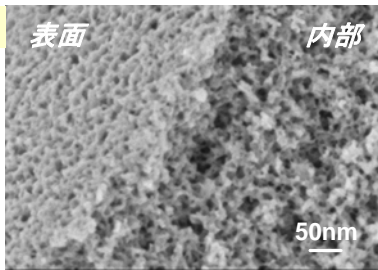
図Ⅲ.1.3-1 ①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発

格子振動および対流の熱伝導を抑制した
ナノ多孔質シリカ粉末を合成

粒子概観

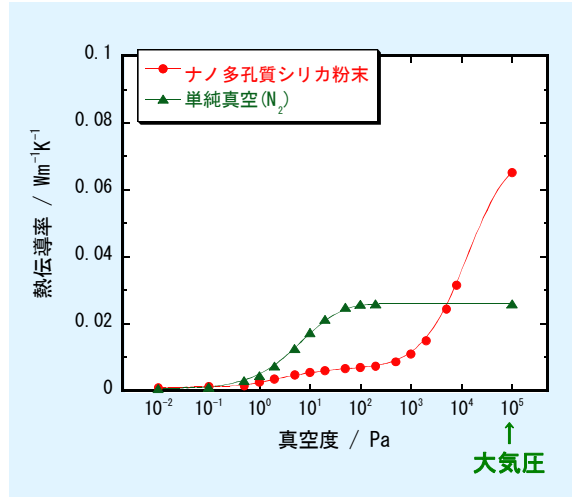


微細構造



真球状で、粒内部にナノ多孔を有する構造

ナノ多孔質シリカ粉末の熱伝導率の真空
度依存性を評価

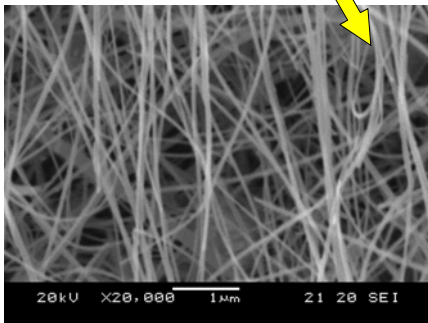


1Paで熱伝導率0.002W/mK以下

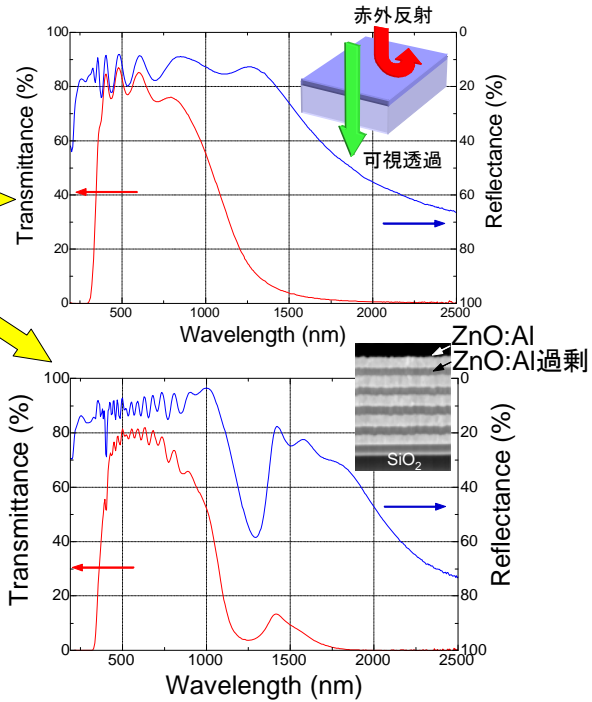
図Ⅲ.1.3-2 ②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発

ZnO系 透明導電膜の
ナノ構造制御

- ・EB-PVD法による赤外反射の発現
- ・Al周期ドープによる熱線反射
- ・ZnOナノファイバー合成

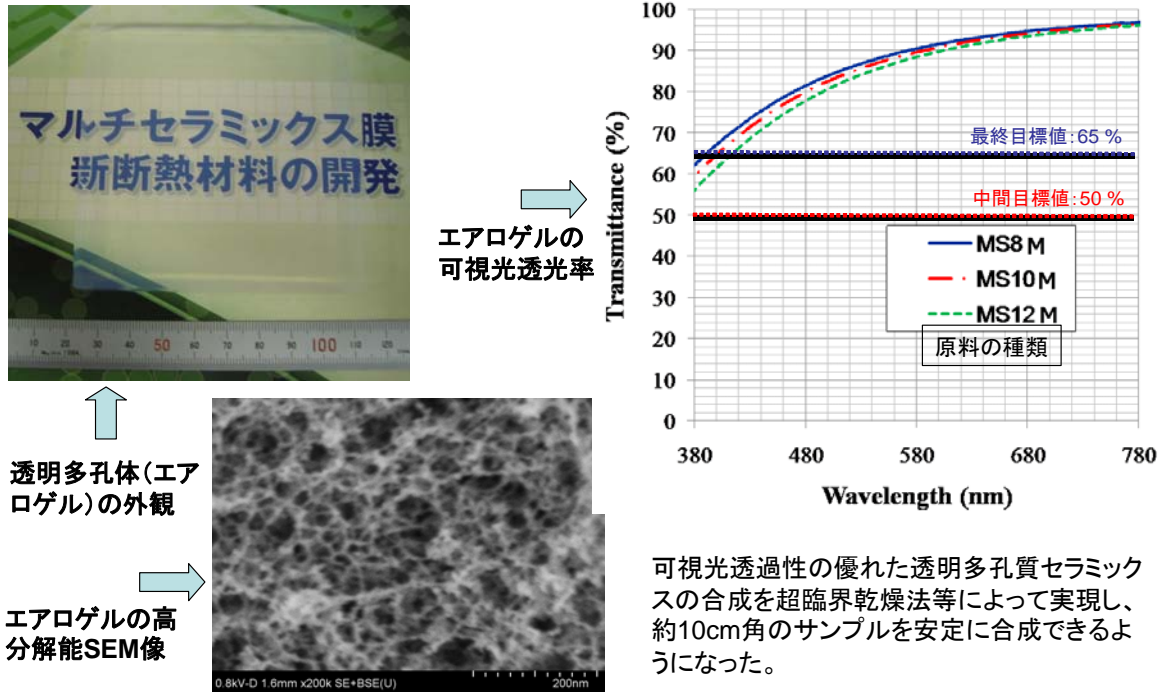


→超断熱「壁」へ



→超断熱「窓」へ

図Ⅲ.1.3-3 ③透明多孔質セラミックス合成技術の開発



図Ⅲ.1.3-4 ④-1 壁材料の複合化技術および真空セグメント化

1) 開発目標及び中間成果

超断熱壁材料開発のため、①および②で開発した要素技術を用いて、複合化・真空化・セグメント化技術を確立する。

検討項目	中間目標	中間成果	最終目標
圧力	10Pa	<0.01Pa (チャンバー内)	—
熱伝導率	—	0.010W/mK	0.002W/mK
熱貫流率	—	今後評価	0.3W/m ² K
面積	10,000mm ² (セグメント化)	40,000mm ² 以上 (セグメント化は検討中)	90,000mm ² (セグメント化)

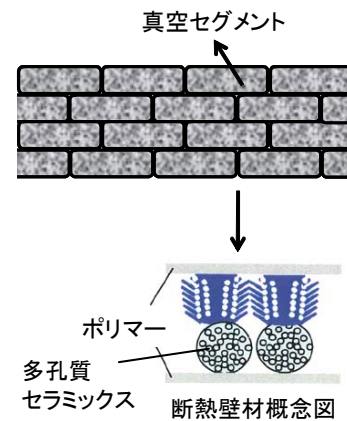
2) 成果の概要

真空封止装置の導入とサンプル試作

- ・チャンバー内圧力10Pa以下可能
- ・面積40,000mm²以上のサンプル試作

技術開発課題

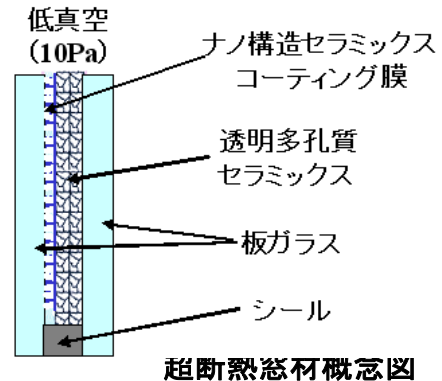
- ・熱伝導率は、最終目標値まで至らず。
→原因を究明して改善を図る。
- ・セグメント化は、今年度中に作製する。



図Ⅲ.1.3-5 ④-2 窓材料の複合化技術及び真空セグメント化技術の開発

1) 開発目標及び中間成果

項目	中間目標	最終目標	中間成果
熱貫流率(W/m ² K)	1.0	0.4	0.71
ヘイズ率(%)	2.0	1.0	4.2
断面積(mm ²)	2500	90000	10000 (90000)



2) 成果の概要

- ・熱貫流率(U値)、光透過率、面積では中間目標を達成した
- ・ヘイズ率は多孔質ゲルの改良によって改善を図る
- ・真空ガラス貼り合わせ装置の導入(21年度補正予算)によって、最大320mm角サンプルの試作が可能になった
- ・試作サンプルでU値の経時変化観察中(封着剤の耐久性確認)
- ・基本構造の問題点も抽出
 - ①予測値と実測値の解離(真空封入時の真空度の悪化?) → 原因の究明と対策
 - ②減圧時の接合材の引き込み → 断面構成の最適化

図Ⅲ.1.3-6 ⑤ 超断熱壁材料の開発

1) 開発目標及び中間成果

①、④で開発した断熱材料技術を用いて、優れた断熱性能と機械的強度を兼ね備えた超断熱壁材料を開発する。

項目	中間目標	中間成果	最終目標
多孔質セラミックス粒子製造プロセス	粒子の連続生産プロセス技術を確立する	量産可能であることを確認した	複合粉体の連続生産プロセスを確立する

2) 成果の概要

- 量産ラインの試設計と技術開発課題の抽出
- ・生産原単価の確認 ⇒ 原料等の問題なしを確認
 - ・表面処理工程が追加されたとしても目標到達可能
- 連続プロセスの基本設計
- ・基本フローの作製
 - ・テスト項目の認識と実験課題の策定
 - ・主要機器の実機による性能確認

1.4 基本計画に対する達成度

①多孔質セラミックス粒子合成技術の開発

検討項目	中間目標	最終目標	到達値	達成状況
気孔率	85%以上	—	今後評価	今後検討
圧縮強度	20MPa以上	—	20MPa以上	目標達成
熱伝導率	1Pa以上の 雰囲気 0.002W/mK以下	10Pa以上の 雰囲気 0.001W/mK以下	10Paの 雰囲気 0.002W/mK	目標達成
輻射伝熱 低減率	—	70%以上	今後評価	今後検討
連続生産 プロセス	—	実現可能性を 実証	今後評価	今後検討

②ナノ構造セラミックス膜コーティング技術の開発

検討項目	中間目標	最終目標	到達値	達成状況
気孔率	1～70%	—	50%以上	目標達成
柱状構造	0.1～10 μ m	—	約1 μ m径 以下	目標達成
羽毛状構造	20～200nm	—	20～100nm (ファイバー径)	目標達成
赤外反射率	60%以上	70%以上	60.0% (λ =1290nm) 81.0% (λ =2500nm)	目標達成
可視光透過率	50%以上	65%以上	84.8%	目標達成
ヘイズ率	2%以下	1%以下	0.43%	目標達成
面積	2500mm ² 以上	10000mm ² 以上	10000mm ²	目標達成

③透明多孔質セラミックス合成技術の開発

検討項目	中間目標	最終目標	到達値	達成状況
気孔率	90～95%	—	90～95%	目標達成
孔径制御	50 nm以下	—	50 nm以下	目標達成
圧縮強度	0.5 MPa以上	—	0.5 MPa以上	目標達成
熱伝導率	1Pa以上の雰囲気で 0.004W/mK以下	10Pa以上の雰囲気で 0.002W/mK以下	1Pa付近で 0.004～0.006 W/mK	(ほぼ達成) 輻射の寄与の解析
可視光透過率	50%以上	65%以上	80%以上	目標達成
ヘイズ率	2%以下	1%以下	5 %	表面の平滑化
面積	2500 mm ² 以上	90000mm ² 以上	10000 mm ²	目標達成

④複合化技術および真空セグメント化技術の開発

④-1 壁材料の複合化技術および真空セグメント化

検討項目	中間目標	最終目標	到達値	達成状況
複合・封止・ 真空化技術	10Pa	—	< 0.01Pa (チャンバー内)	目標達成
熱伝導率	—	0.002W/mK	0.010W/mK	—
熱貫流率	—	0.3W/m ² K	今後評価	—
面積	10,000mm ² (セグメント化)	90,000mm ² (セグメント化)	40,000mm ² 以上	目標達成

④-2 窓材料の複合化技術及び真空セグメント化技術の開発

検討項目	中間目標	最終目標	到達値	達成状況
熱貫流率(W/m ² K)	1.0	0.4	0.71	目標達成
光透過率(%)	65	65	65	目標達成
ヘイズ率(%)	2.0	1.0	4.2	今後検討
断面積(mm ²)	2500	90000	10000 (90000)	目標達成

1.5 研究成果の集計

	H19	H20	H21	計
特許出願	0	3	(3) 作成中	3件
論文(査読付き)	15	18	0	33件
研究発表・講演	40	74	0	114件
受賞実績	4	3	0	7件
新聞・雑誌等への掲載	5	11	0	16件
展示会への出展	0	2	1	3件

平成21年7月1日現在