

高強度・高断熱セラミックス断熱材の実用化

国立研究開発法人産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門
福島 学

1. テーマ設定の背景

我が国産業界（製造）の総消費エネルギーのうち、セメント・ガラス・セラミックス産業のエネルギー消費は約7%で、総排熱量では約4.7%を占める。これらの製造には高温処理が必須であるが、製品加熱に用いられるエネルギーは1～数%程度（バッチ炉）であり、残りは排熱として廃棄されている。この分野で商用される既存のセラミック繊維質断熱材は断熱性に優れる（0.2W/mK以下）が低強度で飛散しやすく、断熱レンガは荷重や構造を担保（10MPa以上）できるが断熱性に乏しい課題があった。次世代断熱材実現には、「高強度と高断熱の両立」を満たす必要があった。こうした背景から、筆者らは、これら諸課題を解決し、高断熱（0.2W/mK以下）、高強度（10MPa以上）を発現し、廃棄物が水である「ゲル化凍結法」を開発し、断熱材への適合性を検証した¹⁾⁻³⁾。

2. 素形材分野との関連性

本研究開発で対象としたセラミックス断熱材は、ファインセラミックス原料を成形により形を整え、高温で焼結させて製造される素形材である。筆者らが開発した新たな成形方法である「ゲル化凍結法」は、成形時に「水から氷への状態変化」を活用するため、水から氷への体積膨張により原料粉体が圧粉され、超高気孔率であっても高強度を発現できる新しい素形材製造プロセスであることを特徴とする。加えて、廃棄物が水となるため環境にもやさしい。こうした独創的素形材を活用する分野として筆者らは高温断熱材に着目し、その適合化研究を進めてきた。

3. 研究開発の成果

窯業・土石産業で、800℃以上の高温で使用される焼成炉に投入される熱エネルギーのうち、製品加熱に用いられるエネルギーは1～数%程度（バッチ炉）で、残りは使用されず廃棄されている（図1）。これを原油換算すると964万kLとなり、我が国総排熱量の約4.7%に相当し、甚大なCO₂排出を伴う。この解決のため、筆者らは高耐熱、高断熱、高強度を有し、発がん性が指摘されるセラミックス繊維を全く含まない断熱材の先進製造プロセス技術であるゲル化凍結法を新たに開発し、この全く新しい素形材を実用化させるまでの一貫通貫の一連研究を成し遂げた。

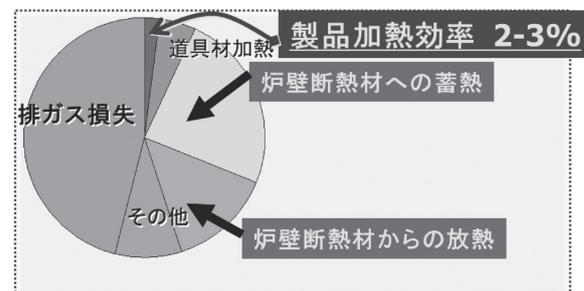


図1 工業炉におけるエネルギーバランス

この開発法は「最高99%の水分を保水できる高分子ゲルに微量のセラミックス粉末を分散させ、これを凍結することで後に気孔源となる氷が形成されると共に氷の体積膨張により原料粉体が圧粉され、氷結晶を取り除いた乾燥ゲルを焼結」²⁾することでセラミックス断熱材を製造する手法である。一方向に凍結すれば一方向に配向した気孔構造が得られるため、軸方向での強度を高めることが可能である。加えて保水する水分量を調整すると世界最高気孔率98%の多孔体を得ることが出来る。本技術により（1）0.2W/mK以下の熱伝導率、10MPa以上の高圧縮強度⁴⁾、（2）

1500℃での高温で劣化・収縮しない卓越した耐熱性、を有する断熱材を開発した(図2)。加えてNEDOプロジェクトに参画し、開発材を施工したプロトタイプ焼成炉は、従来材使用時より約38%消費電力量を削減できることも実証し⁵⁾、社会実装への道筋を開拓することが出来ている。

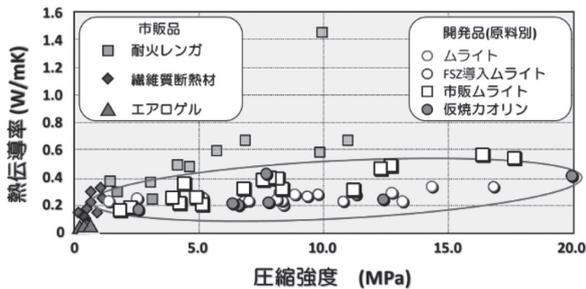


図2 開発した断熱材と市販品の性能比較

4. 訴求点

本手法により85%超の気孔率、0.20W/mK以下の熱伝導率、10MPa以上の高圧縮強度、1500℃での耐熱性を有する断熱材を開発した。固体の熱伝導率に比べ1/100～1/10000低い空気を大量に含むため、開発材の熱伝導率は極めて低く、一方向配向気孔は軸方向での強度を高めることができるため超高気孔率でも高い機械的信頼性を得ることが出来る。プロセス中で使用する氷への体積膨張により開発断熱材の骨格は(超高気孔率にも関わらず)極めて緻密であり、再加熱収縮率は1%未満であり、再加熱して水中投下後も強度低下は極めて小さく卓越した耐熱性を示した。

加えて、気孔の三次元配置と物性(熱導率・強度)のモデル化、氷結晶の異常成長を抑えサイズを均一にして強度のばらつきを低減する添加物の発見など学術的なアプローチを進めると共に、終点である焼成炉への実装へ定量的に結び付ける一貫通貫の研究を進めたことは比類なく極めて独創的である、なお社会への貢献・実用性、波及効果として下記を考えている。

・ファイバーフリーであるにも関わらず開発材の熱伝導率は繊維質断熱材に匹敵し、耐火レンガのそれより75%低く、その強度は耐火レンガと同等以上を発現することが出来た。

- ・水と反応しない限り本技術は原料を問わずに超高気孔率体を製造できるため、他の用途展開も可能である。超高気孔率・一方向配向気孔を活かし、1) 日本企業が世界シェアの約60%を占める積層セラミックコンデンサ(MLCC)用の焼成道具、2) 半導体製造用の吸引板、3) 医療用多孔質材料、など他分野においても各企業への展開が期待される。
- ・本断熱材の焼成炉への施工は、化石燃料使用量削減に直結するため地球温暖化対策に大変有望である。現在まで本手法ではマイクロメートルサイズの気孔径しか成形できないが、将来的にナノサイズの気孔径を成形できれば真空断熱材に匹敵する熱伝導率の断熱材を実現できる可能性があり、更なる温暖化対策になりうる。これは高強度化にもつながるため超薄板化も可能になり、焼成炉内の有効体積を増大することも期待できる。

参考文献

- 1) M. Fukushima, Y. Yoshizawa, T. Ohji, Adv. Eng. Mater., 16 (6), 607-620, (2014).
- 2) M. Fukushima and Y. Yoshizawa, J. Am. Ceram. Soc., 97 [3] 713-717, (2014).
- 3) M. Fukushima and Y. Yoshizawa, J. Eur. Ceram. Soc., 36, 2947-2953 (2016).
- 4) M. Fukushima and T. Ohji, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 19 (2) 847-855 (2022).
- 5) 産総研など高強度断熱材を開発, 日刊工業新聞 2017/2/15.