

東日本大震災後の電力需給問題や地球温暖化問題を受けて平成26年4月に発表されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの導入加速、石炭火力や天然ガス火力の発電効率の向上と併せて、「徹底した省エネルギー社会の実現」が明記されている。日本においては現状一次エネルギーの7割が未利用のまま排出されているとされており、機器側のエネルギー利用効率向上と並行して、未利用エネルギーの有効利用を進めることが省エネルギー社会の実現につながるものと考えられる。しかしながら、この未利用エネルギーの多くは200°C以下の低温の温水や排ガスなどの状態であり、且つ様々な場所に分散している利用の難しいエネルギーでもある。このような未利用低位熱の有効利用についてはこれまで様々な取り組みが実施されてきているが、平成25年度から経済産業省のプロジェクトが開始されるなど、近年改めて注目されている。以上のような背景を受け、本特集では未利用低位熱の活用技術として、熱の使用量低減(断熱、遮熱)、熱を変換して利用(熱電・熱音変換)、熱の再利用(ヒートポンプ)、これらの技術を統合的に活用する熱マネジメントの各分野について最新動向を紹介する。

(編集担当：久米高生)†

## 中～低温用断熱材の概要と新規断熱材料の開発

依田 智

### 1. はじめに

断熱材は、熱に関わるエネルギー消費の抑制により直接的に省エネルギーに貢献するだけでなく、低品位の未利用熱を有効に利用する上で、他の技術の効率化や性能向上にも重要な役割を果たすことが期待されている。本稿では、室温から数百°Cまでの、一般に中～低温といわれる温度領域の断熱材料について、概要と我々が取り組んでいる開発内容を紹介します。

### 2. 中～低温領域の断熱に関する現状と問題点

我が国のエネルギー消費は2004年をピークに減少傾向



Thermal Insulation Materials for Use at Medium to Low Temperature: An Overview and Developments of New Materials  
Satoshi YODA (正会員)  
2000年 東北大学大学院工学研究科応用化学専攻博士後期課程修了  
現在 (国研)産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門 研究グループ長  
連絡先：〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1 産総研つくば中央第五事業所  
E-mail s-yoda@aist.go.jp

2016年1月8日受理

にあるものの、長期的に見ると1973年基準で業務他部門(ビル、卸小売業、ホテル、病院等)が2.5倍、家庭部門が2.0倍と増大している<sup>1)</sup>。これらの部門は省エネルギー化の進んだ産業部門のエネルギー消費と比較して、削減の余地があるとされる。冷暖房用のエネルギーの割合は、業務他部門で32%、家庭部門で25%であり<sup>1)</sup>、省エネルギー技術の進展により抑制される傾向にあるが、依然大きな割合を占めることに変わりはない。

冷暖房用エネルギーの抑制で課題とされるのが、窓からの熱の出入りと、既存の断熱性の低い住宅への対応である<sup>2)</sup>。住宅の熱の出入りのうち、窓からの熱の出入りは、夏場で73%、冬場で58%という試算があり<sup>3)</sup>、窓の断熱化が省エネルギーには重要である。また、既存の住宅のうち、約半数が無断熱の状態であることに加え、新築住宅でも省エネルギー基準を満たす住宅の割合が低いことが指摘されている<sup>3)</sup>。

電気自動車やハイブリッド車では、これまでエンジンの排熱を利用してきていた冬季の暖房の負荷が大きくなり、燃費への悪影響が無視できなくなっている。そのため、ボディやエンジン周囲の高断熱化が検討されるようになった。自動車は複雑な形状を持ち、断熱材を導入する空間にも乏しいことから、高い断熱性能、柔軟性、成型性を併せ持

† Kume, T.

平成27, 28年度化工誌編集委員(4号特集主査)  
東京ガス(株)基盤技術部 基礎技術研究所

つ断熱材が求められている。

その他、冷蔵庫、自動販売機などの冷蔵、冷凍、保温機器などでも高断熱化と断熱材に必要なスペースの抑制（内部空間の確保）が課題である。化学、電力などの産業プラント、工場施設等の配管や設備等でも高断熱化が課題となっているが、これについては他の拙稿を参照されたい<sup>4)</sup>。

### 3. 主要な断熱材料の概要と技術課題

中～低温領域用の汎用断熱材は、グラスウールなどの無機繊維系と発泡ポリマー系が中心である。マーケットとしては住宅用建材の割合が大きく、全断熱材の60%を占めるといわれる。建材のうち、低価格のグラスウール、ロックウールが全体の7割を占め、ポリマー系が3割弱、他の材料は割合としては少ない<sup>5)</sup>。無機繊維系断熱材の熱伝導率は0.04-0.05 W/(m・K)（室温）程度、発泡ポリマー系で0.03-0.04 W/(m・K)（室温）程度<sup>6)</sup>である。ハイドロフルオロカーボン発泡の硬質ウレタンフォームや炭化水素発泡のフェノールフォームは0.020-28 W/(m・K)（室温）程度<sup>6)</sup>の熱伝導率を示す。ポリマー系では未だ環境調和性に難がある発泡ガスが多用されており、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>などを用いた発泡体は断熱性能が劣ることが課題である。

高性能断熱材としては真空断熱パネル（Vacuum Insulation Panel, VIP）がまず挙げられる。VIPは空気による伝熱がなく、極めて低い熱伝導率（0.01 W/(m・K)（室温）以下）を示す。切断や穴あけなど、加工性に欠けることが最大の欠点であり、柔軟性にも乏しい。また長期間真空を維持するためのシール技術や、シール部分の熱伝導も課題である。

近年、シリカエアロゲルを用いた複合材も上市されている。シリカエアロゲルは極めて高い空隙率（90%以上）と、平均径が10-50 nmの細孔構造を合わせ持つシリカの多孔体であり、真空や環境負荷の大きい発泡ガスを使わずに0.012-15 W/(m・K)（室温）という低熱伝導率を実現できる。柔軟性が無く強度（特に引っ張り）が非常に小さいこと、製造コストが高いことが欠点である。粉末状のものを不織布等に複合化した材料が中心であるが、価格がネックであり、シリカの粉落ちや発塵性も問題視される。

窓の断熱には光透過性のある断熱材が必要であるが、材料として一体性を持つ実用材料は少ない。住宅、ビル用には真空断熱窓や低熱伝導率のアルゴンガスを封入した複層ガラス窓が使用される。また、半透明ではあるが、上記のシリカエアロゲルのビーズを封入した二重窓なども使用される。いずれも価格や重量が大きいこと、曲面への対応が問題と思われる。

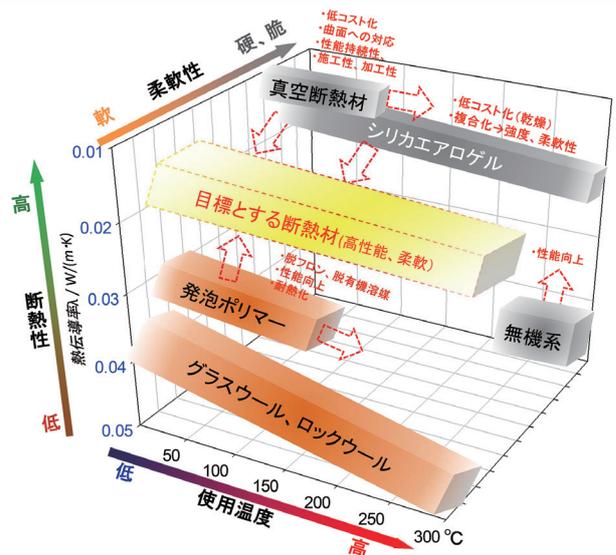


図1 断熱材の熱伝導率、使用温度、柔軟性と開発目標

### 4. 開発ターゲット—高性能で柔軟な断熱材—

断熱性能からみた場合、VIPを上回る材料はない。断熱材の開発は、温度や使用状況の制約の中での性能向上、断熱性能以外の柔軟性、加工性、強度の向上や付加価値の付与、環境調和性の向上、そして低コスト化が目的となる。中～低温領域では高性能断熱材の性能と汎用断熱材の使い勝手や価格を両立した材料、特に、複雑な形状に対応できる柔軟性や成型性を持つ断熱材のニーズが高い。図1に開発ターゲットとなる断熱材の特性を示した。

仮想的な断熱材料として、Nano Insulation Materials (NIM) の概念が知られている<sup>7)</sup>。気体の平均自由行程以下の微細な空間を集積した構造を持つ多孔質材料においては、微細空間内での空気中の気体分子の相互衝突頻度が下がるために、気体による伝導伝熱が抑制され、静止空気を下回る熱伝導率が得られる<sup>7,8)</sup>。また、このような材料は、シリカエアロゲルと同様、光散乱が少なく、光透過性を持つと想定される。柔軟性のある材質でNIMの構造を実現できれば、高い断熱性、柔軟性、光透過性を併せ持つ材料となり、そのインパクトは高い。ナノサイズの気泡を持つ発泡ポリマー（ナノセルラー）が理想的な材料の一つと考えられ、世界的に開発も盛んであるが、実用的なサイズ of 材料を製造するための技術的なハードルは現状相当高いと言わざるを得ない。

### 5. 発泡ポリマー・シリカコンジット断熱材の開発

#### 5.1 コンセプト

我々は、シリカエアロゲル状の低密度シリカが、発泡ポリ

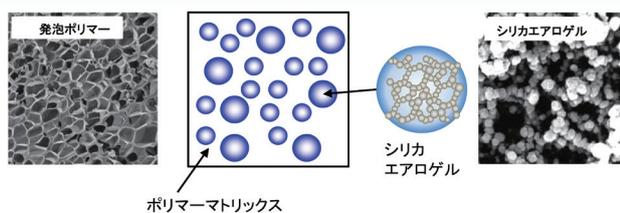
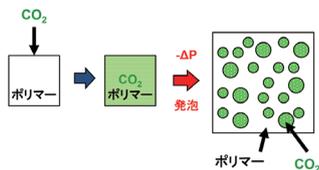


図2 発泡ポリマー・シリカコンポジット断熱材のコンセプト

■ 発泡ポリマーの製造 (物理発泡)



■ 発泡ポリマー・シリカコンポジットの製造

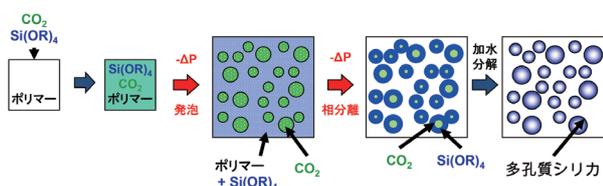


図3 発泡ポリマー・シリカコンポジットの製造プロセス

マーの独立気泡の内部に充填された構造を持つ材料 (図2) が、低コストで製造できれば、柔軟で高性能な断熱材としての展開が期待できると考え、検討をおこなってきた。

独立気泡ではなく連続気泡型のポリマーフォームを用い、シリカの前駆体を含浸して超臨界乾燥をおこなうことでシリカエアロゲルとの複合体が作製できる。このような複合体では、シリカエアロゲルの断熱性能を維持しつつ、柔軟性、加工性の大幅な向上が達成できた<sup>9)</sup>。

一方、独立気泡の内部にシリカを充てんする手法として、我々は図3のようなプロセスを提案した。高压の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) は、ゾルゲル法でシリカ系の材料製造に用いられるシリコンアルコキシド類、および各種ポリマーとの親和性があり、化学種と温度圧力条件を適切に設定すれば、三成分の均一相を形成することができる。この均一相を減圧することによって、発泡 (相分離) を誘起させ、シリコンアルコキシドを独立した発泡セル内に凝集させた構造とすることができる。ポリマーの物理発泡において、発泡ガスの代わりにCO<sub>2</sub>とシリコンアルコキシドの混合物を使う、と言い換えてもよい。凝集したシリコンアルコキシドを加水分解することで、内部にシリカを含む構造が得られる。

この方法は、(1) 様々なポリマー系に適用可能である、(2) 分子レベルの混合状態からボトムアップで構造が作製されるため、原理的にはナノレベルの構造制御が可能、(3) 発泡ポリマーの製造と同様に押出成形機を用いた連続的な製造プロセスを構築できる可能性があり、実現すれば既存の材料と十分なコスト競争力を持つことが期待できる、と

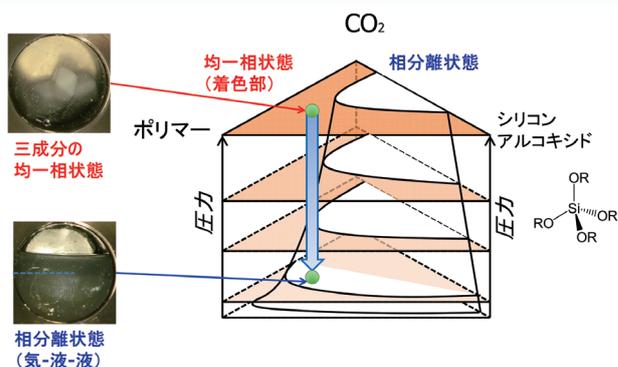


図4 三成分の相平衡とプロセス操作の概念図

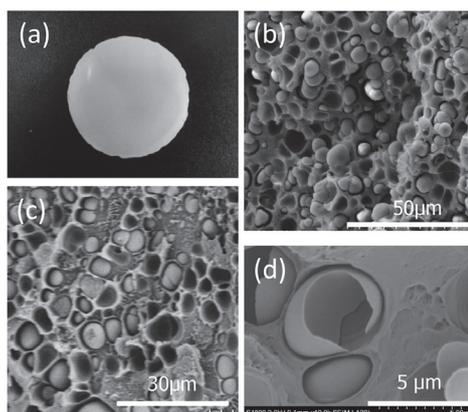


図5 “蜂の子構造”を持つ発泡ポリマー・シリカコンポジット (a)外観 (PMMA) (b)微細構造 (ブレンドPMMA), (c)同 (PS), (d)カプセル構造の例 (PMMA)

いったメリットが考えられる。

5.2 ポリマー、シリコンアルコキシド、CO<sub>2</sub>の高压相平衡

本法で目的とする構造を形成させるためには、シリコンアルコキシド、CO<sub>2</sub>、ポリマーの三成分が、均一相となる条件と相分離する条件を把握し、プロセスの操作をおこなう必要がある。図4に三成分の相平衡と圧力操作の関係の概念図を示す。相平衡は化学種によって異なるため、例えば均一相を形成する条件が実プロセスでは現実的でない温度、圧力となることもある。実際の相平衡の測定は、体積可変型で内部観察可能な窓のついた压力容器を用い、ポリマー、シリコンアルコキシド、CO<sub>2</sub>を所定量導入し、容器の体積を変えて組成一定のまま圧力を変化させ、相の変化を目視観察することによりおこなうことができる<sup>10)</sup>。

5.3 バッチプロセスによるコンポジットの調製<sup>11)</sup>

各種のポリマーをシリコンアルコキシド、CO<sub>2</sub>と共に高压条件下で保持し、急減圧によりバッチ発泡試料を作製する検討をおこなった。シリコンアルコキシド (テトラメトキシシラン、TMOS) と各種ポリマーを压力容器に仕込み、TMOSとCO<sub>2</sub>の均一相条件 (80℃、20 MPa) で平衡とした後、大気圧まで急減圧してポリマーを発泡させ、加水分解処理をしてナノコンポジット発泡体を得た。ポリ乳酸 (PLA)、ポリメタクリル酸メチル (PMMA)、ポリスチレン (PS) など

がTMOSとの親和性が高く、また比較的高い発泡倍率を示した。条件を最適化すると、図5のように、発泡セル内にシリカリッチな粒子が生成した構造(蜂の子構造)を持つ発泡体が作製できた。カプセル状粒子は相分離の際に、まず拡散性の高いCO<sub>2</sub>が先にポリマーマトリックスから分離して気孔を形成し、その後気孔壁からシリコンアルコキシドが緩慢に滲出して加水分解されることにより形成する。

ポリマーとアルコキシドの相溶性が低い材料の場合、均一相が得られないため蜂の子構造は形成しない。また親和性が高すぎて常圧下でも容易に相分離しないようなケースもある。現在、各種ポリマーに強みを持つメーカーに協力を頂きながら、様々なポリマーにおける構造形成を検討している。

#### 5.4 連続製造プロセスと断熱材としての評価

二軸押出成形機をベースとして、前述のプロセスを連続的に起こすための装置を試作した。図6にプロセスの概略と装置の写真を示す。装置にはシリコンアルコキシドとCO<sub>2</sub>を混合して導入するための高圧ポンプ、ミキサーを備え、押出成形機の所定の位置に導入できるようにしている。

この装置を用い、PMMAやPSをベースに、発泡倍率が20倍で、シリカ含有量が10-15 wt%程度、3-5 μm程度の発泡セルが均一に分布した発泡体を作製した。バッチ発泡の場合と比較して発泡倍率を高めており、蜂の子構造は得られていないが、内壁にはシリカリッチな微粒子の析出が確認でき、コンセプトの機構が機能していることが裏付けられた。

これらの試料は0.028 W/(m・K)程度の熱伝導率を示しており、CO<sub>2</sub>で同程度の倍率に発泡させた試料(0.034-40 W/(m・K)程度)より高い断熱性を示した。現状では、蜂の子構造の発達とシリカの低密度化が十分でなく、既存断熱材との差別化が十分でないため、さらに検討を進めている。

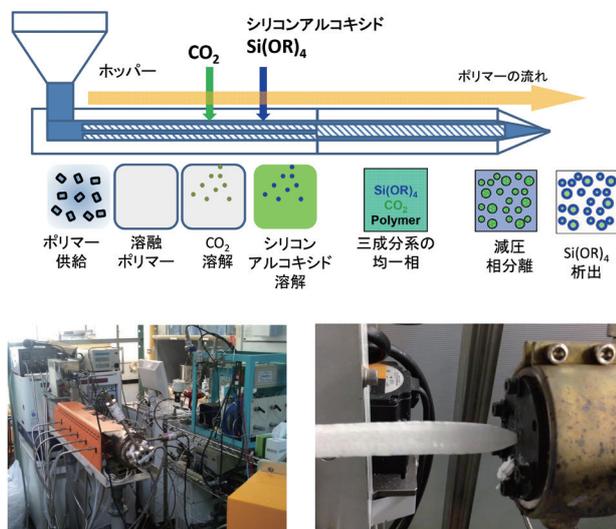


図6 発泡ポリマー・シリカコンポジットの連続製造プロセスの概要

## 6. キトサンエアロゲル断熱材の開発<sup>12)</sup>

シリカエアロゲルのような微粒子凝集構造ではなく、柔軟で繊維質なポリマーの絡み合い構造を持つ低密度な固体を作製できれば、柔軟性、透明性、高い断熱性能を併せもつことが期待できる。このような材料としてセルロースナノファイバーを用いた断熱材の研究がおこなわれている<sup>13)</sup>が、セルロース繊維をナノファイバー化する際に高価で不安定な触媒を使用している。我々はセルロースと類似した分子構造をもつキトサンを用い、高価な触媒を使わない製造プロセスを開発した(図7)。キトサンを酢酸水溶液に溶解し、キトサンの分子を架橋させて湿潤ゲルの状態とした後、高圧CO<sub>2</sub>を用いた超臨界乾燥によってキトサンエアロゲルを得た。生成物は空隙率97%の超低密度な固体であり、直径5~10 nmの微細なキトサン繊維の三次元的な絡み合い構造からなっていた。このキトサンエアロゲルは若干の着色があるものの、光透過性を有している。また薄い試料は手で曲げることも可能であり、高い柔軟性をもっている。熱伝導率は0.022 W/(m・K)で、シリカエアロゲルに近い断熱性能を示した。今後は、耐湿性、耐候性の評価と改善をおこない、幅広い用途での透明断熱材の展開を図るとともに、独特の微細構造を活かして、防振、防音機能の付与も検討したいと考えている。

## 7. 窓の断熱をめぐる諸問題

窓の断熱対策は大きな課題であるが、我が国では季節による変動要因の影響も考慮する必要がある。例えば窓の断熱性が高いと夏場の日射により上昇した室内の熱が逃げにくく、冷房負荷がかえって増大する。透明断熱材と遮熱構造の組み合わせにより、オフィスビルの冷暖房に要するエネルギーを通年で16%節約できるという試算結果(弊所吉村和記首席研究員)が得られている。遮熱、断熱機能の複合化は今後重点的な取り組みが必要である。

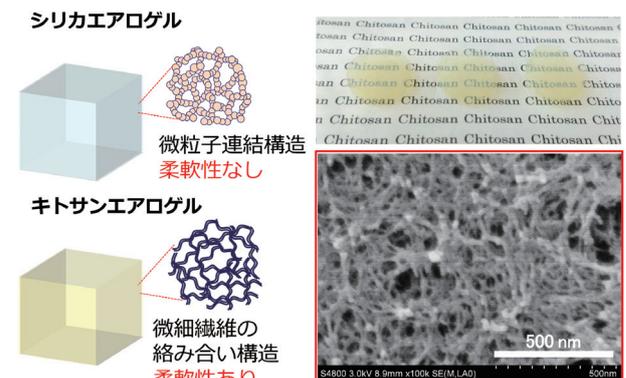


図7 キトサンエアロゲルの概要

最近では“貼るだけで省エネルギー”を謳ったフィルムが市販されている。多くは日射の制御による遮熱機能が主であるが、一部“断熱”を謳うものがあり、アカデミアの中ですらその効果について誤解がある。ここでは以下の二点を強調しておきたい。第一に低い熱伝導率を持つ材料（特に薄いフィルム）を精度よく測定することは難しい。高性能断熱材レベルの熱伝導率を持つ材料の測定を前提とした試験規格はなく、現在、JIS A 1412-1（熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法）について、VIPの測定をおこなうためのJIS改正が検討されている最中である。非真空中で極端に低い熱伝導率（0.01 W/(m・K)以下）を謳う材料は原理的にも疑問がある。第二に、断熱性能は基本的に材料の厚さに比例する。低い熱伝導率を持つ材料であっても、数10 μmレベルのフィルムで得られる温度差や省エネルギー効果はごく小さい。断熱材料の開発と合わせて、性能測定法の標準化や公的機関によるオーソライズについても今後幅広く議論を進めていく必要がある。

## 8. おわりに

本稿では中低温領域の断熱材料の現状と、弊所での取り

組みを紹介した。断熱材の導入効果は直接的、量的に見えにくく、高価な材料を導入するモチベーションにはなかなか結びつかない。建材を中心として高性能断熱材の普及展開に向けた政策面からの対策は着々と強化されているが、材料開発の側からも低コストで高性能な材料の開発を進めていくことが必要と考える。

本稿の内容にはNEDO技術開発機構、中小企業庁の支援のもと、東京理科大学工学部 大竹勝人教授、(株)プラスチック、(株)照和樹脂とおこなった共同研究の内容を含む。またニチアス(株)の技術時報に掲載した内容を引用させていただいた。ご協力いただいた方々に御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書2015
- 2) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会省エネルギー部会 中間取りまとめ、2012年2月
- 3) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会省エネルギー部会資料、2011年12月
- 4) 依田智：配管技術、**57**, 42-46(2015)
- 5) 矢野経済研究所：各種住宅用断熱材の市場実態、2011年度版
- 6) 国土交通省：住宅エコポイントの概要について、(2)エコリフォーム B 外壁・屋根・天井又は床の断熱改修 別添2
- 7) Jelle, B. P. : *Energy and Buildings*, **43**, 2549-2563 (2011)
- 8) 金森主祥, 中西和樹：機能材料、**32**(10), 10-16(2012)
- 9) 依田智, 古屋武：成形加工、**24**(3), 154-158(2012)
- 10) 依田智：ニチアス技術時報、**364**(1), 6-14(2014)
- 11) Yoda, S. *et al.* : *J. Mater. Chem. A*, **1**(34), 9620-9623(2013)
- 12) Takeshita, S. and S. Yoda : *Chem. Mater.*, **27**(22), 7569-7572(2015)
- 13) Kobayashi, Y. *et al.* : *Angew. Chem., Int. Ed.*, **53**, 10394-10397(2014)

## 蒸留—フラスコからプラントまで— ～人材育成センター 夢化学委員会 作成教材の紹介～

私たちの身の回りには化学製品の多くは化学反応によって造り出されます。しかし、反応は、原料AとBから製品Cが作れるわけではありません。必ず副生物が作られますし、原料も完全にすべて消費されるわけではありません。また、反応後の製品を分離する必要もあります。

分離方法にはいろいろありますが、化学プラントで最も多く用いられる分離方法が蒸留です。

蒸留について、フラスコによる蒸留から蒸留塔まで蒸留の原理をわかりやすく説明しています。

続きはこちらのQRコードより  
YouTubeで

