



エネルギー使用合理化技術実用化開発
「水和物スラリ空調システム開発」プロジェクト

蓄熱媒体「水和物スラリ」で賢く冷房 省エネルギー空調システム

JFE エンジニアリング株式会社

凝固温度は水より高い **7°C!**

その時、蓄熱密度は、水の **2** 倍に!

水よりも効率的にコンパクトに冷熱を蓄えることのできる「水和物スラリ」蓄熱空調システム

オフィスビルやショッピングセンターなど、多くの人々が利用する業務用建築物などを快適な環境に保つために欠かせないのが、冷風や温風をつくり出す空調システムです。部屋ごとにエアコンを設置する家庭用冷暖房と違い、業務用建築物の空調システムは、はるかに大きなエネルギーを消費します。そのため、空調システムの省エネルギー化は、業務用建築物のオーナーや管理者にとって重要な関心事です。また、業務用建築物を含む民生部門のエネルギー消費は年々増加傾向にあります。地球温暖化防止の観点からも、空調システムのより一層の効率化が必要とされています。JFE エンジニアリング株式会社（以下、JFE エンジニアリング）は、従来からあった水や氷を利用して蓄熱する空調システムに代わって、「水和物スラリ」という化合物を利用した、新しい蓄熱空調システムを開発し、業務用建築物の空調システムの省エネ化に効果を上げています。基礎研究から、実証・実用化に至る NEDO の各種研究開発プロジェクト支援を、継続的に利用した研究成果が実を結んだ形です。2011 年 9 月現在、神奈川県の川崎駅地下街、横浜市のショッピングセンター、岡山県備前市のベアリング工場など、計 8 施設で、実際に設置、利用されています。

より小さなエネルギーで冷熱を貯めるには

日本のエネルギー消費量のうち、オフィスや商業施設などの「民生（業務）」という部門が 20% を占めています。さらに民生（業務）部門の消費エネルギーのうち、冷房などの空調用に使われるエネルギーが 4 割強を占めています。

オフィスや商業施設などではこれまで、冷房空調システムの省エネルギー対策の一つとして、氷蓄熱システムが採用されてきました。しかし、氷として冷熱を蓄熱するには、水を0℃以下にしなければなりません。それには、-5℃といった低温環境が必要で、大きなエネルギーを使う必要があります。そこで、「冷房に適した5℃から10℃の温度で液体が固体になるような物質を使った蓄熱技術」が求められてきました。氷よりも高い温度で蓄熱をする物質を利用すれば、エネルギー消費も少なく済み、省エネルギー効果をさらに高めることにつながります。

水和物スラリ、蓄熱効果は水の2倍以上

JFE エンジニアリングは、前身の日本鋼管株式会社時代*からエネルギーを多く使う製鉄会社として、省エネルギーは企業課題で、新しい技術を生み出そうとする気運がありました。そうした中、同社は「水和物スラリ」(商品名:「ネオホワイト」)という化合物を利用した省エネ型空調システムを開発しました。

*2002年、川崎製鉄株式会社(川鉄)と日本鋼管株式会社(NKK)の経営統合によりJFEグループが発足。
2003年、日本鋼管は川崎製鉄のエンジニアリング部門を継承し、JFEエンジニアリングに社名変更した。

水和物スラリは、臭化テトラ-n-ブチルアンモニウム(TBAB)という物質を冷やすことで出来る水分子で包まれた構造をした固体と液体の混ざり合った流体です(写真左)。この水和物スラリを使った空調システムを使えば、省エネルギー化と二酸化炭素排出量の削減を図ることができます。



TBAB (右) と、冷却後の水和物スラリ (左)。

TBAB の水溶液は冷やされてスラリになると無色透明から白色に変わる

水和物スラリの特徴は、多くの熱を保有することにあります。同じ質量、同じ温度の水と比べて、水和物スラリは2倍以上の熱(冷熱)エネルギーを蓄えておくことができます。つまり、同じ温度の水よりも2倍以上の時間、冷たさを保つことができるわけです(表1)。

また、水和物スラリが液体からスラリになるときの温度は、6~12℃くらい。これは、オフィスの冷房として使うのに問題のない温度です。氷蓄熱システムで水を0℃まで下げて氷にするより、TBAB水溶液を6~12℃に下げてスラリにするほうが、冷却エネルギーを少なく抑えることができます。

	水蓄熱	氷蓄熱	水和物スラリ蓄熱
蓄熱	顕熱蓄熱 (7℃)	0℃での 潜熱蓄熱	7℃での 潜熱蓄熱
省エネルギー性	○ 冷凍機効率低下なし	× 冷凍機効率低下“大”	○ 冷凍機効率低下なし
熱密度 (蓄熱容量 / m ³)	△ 熱密度“小”	◎ 熱密度：水和物の3倍	○ 熱密度：水の2倍以上
総合評価 (蓄熱、省エネの両立)	△	○	◎

表1 蓄熱空調システムの蓄熱媒体の比較

夜冷やして、昼間に使う

JFE エンジニアリングが開発した水和物スラリ蓄熱空調システムでは、夜、冷たさの素（冷熱）をつくらせて、昼、冷房を運転する仕組みとなっています。まず、電気料金の安い夜のうちに、TBAB 水溶液を冷やして水和物スラリを蓄熱槽とよばれるタンクに貯めておきます（図1）。そして空調を使う昼間、タンクに貯められた水和物スラリの冷たさで水を冷やし、その冷水で空調機の冷房を運転させるのです。また一部の建物では、水和物スラリそのものが直接、冷房のための媒体として使われてもいます。

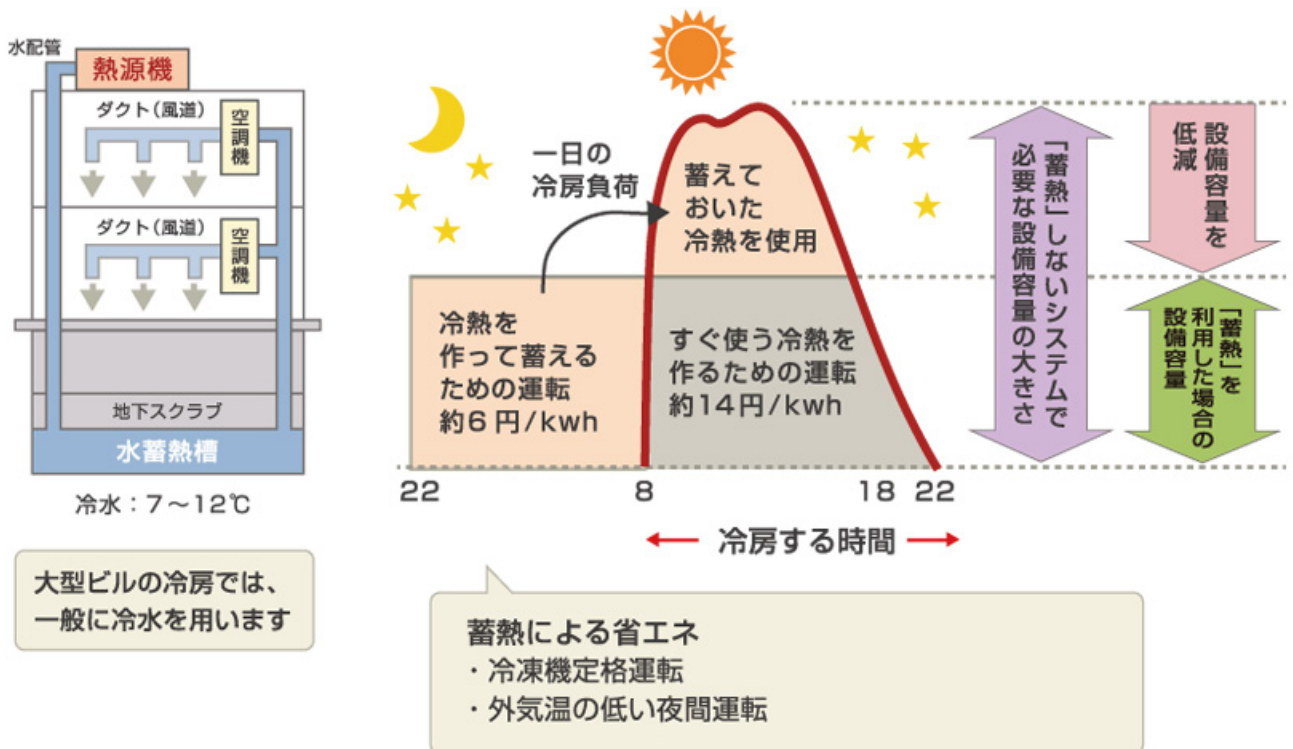


図1 蓄熱空調システムのイメージ。夜、冷熱をつくることで、深夜電気料金の活用、設備容量の抑制、外気温の低いなかでの運転による省エネルギーなどのメリットがある

水和物スラリ実用化のためのステップアップ

JFE エンジニアリングは、日本鋼管株式会社時代の1996年、この蓄熱空調システムの実用化に向けた基礎研究を始めました。はじめに基礎調査として行ったのは、蓄熱にふさわしい物質を選ぶことです。同社にはそれまでに、南極観測船の航行シミュレーションのための南氷洋模型づくりや、人工降雪システムの開発、それに氷蓄熱システムの開発といった、“冷やす技術”の蓄積がありました。

同社の総合研究所エネルギー技術研究部の生越英雅さんらは、そうした技術から、氷と似た性質をもつ物質の情報収集をしてきました。「社内ディスカッションで別の部署の社員から、「包接水和物」（なるほど基礎知識参照）を使えるかもしれないというヒントを得ることができました」と、生越さんは当時のことを話します。この結果、約3,000の候補から、TBAB水和物が有力候補になっていきました(図2、3)。

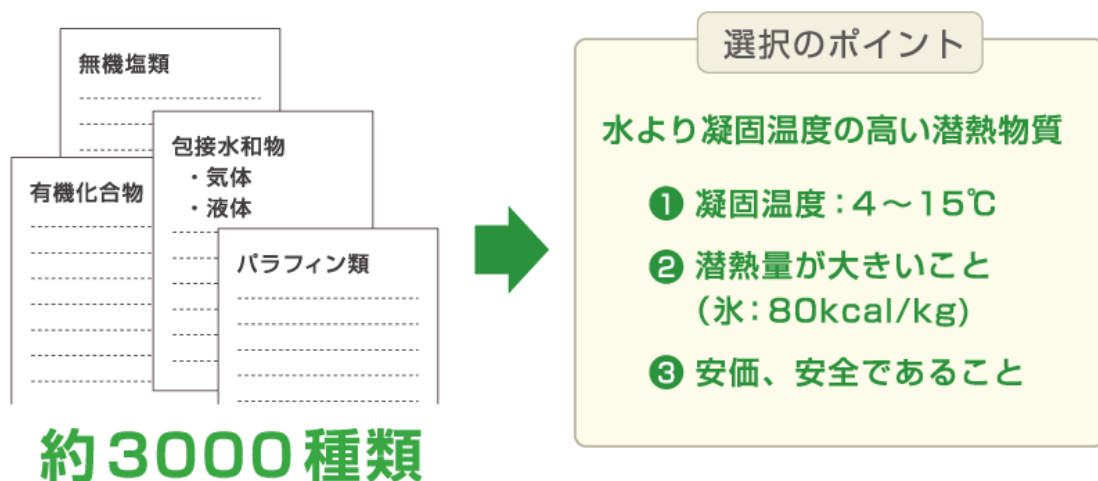


図2 蓄熱媒体選択のポイント

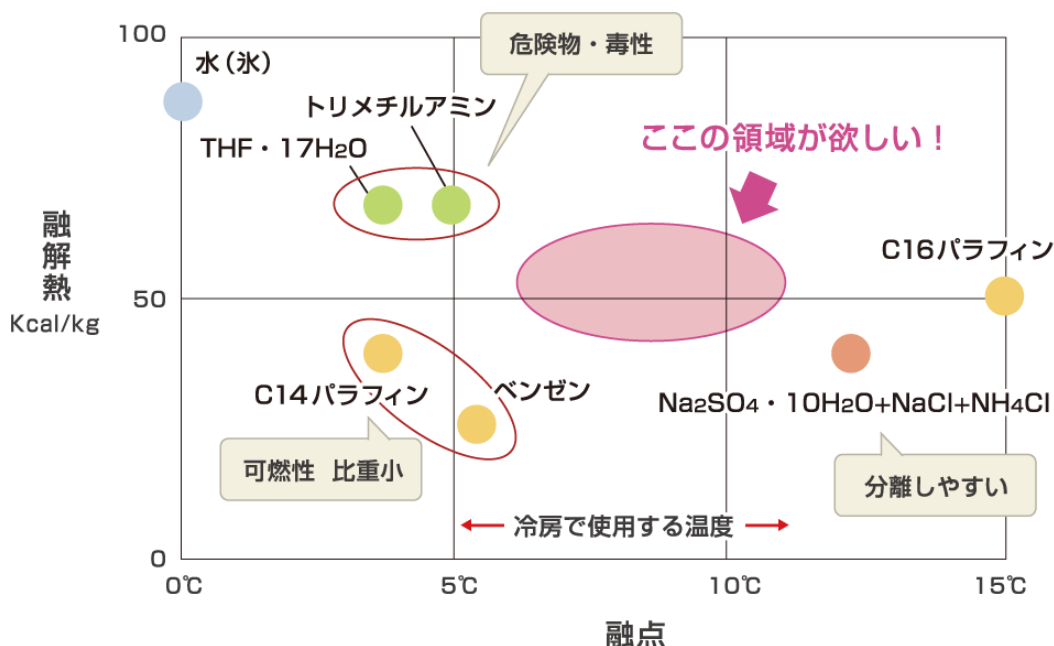


図3 蓄熱媒体の候補

その後、同社は基礎研究から実用化研究へと段階を進めていきます。1997年度から2000年度までの基礎研究期間では、NEDOの「ニューサンシャイン計画 広域エネルギー利用ネットワークシステム」のプロジェクトにより、利用する物質をTBAB水和物に決定し、実際に使えるかを確認すると共に、伝熱性や流動性などの特性データ把握するための研究を行いました。

また、2001年度から2003年度までの実用化研究では、同じくNEDOの「エネルギー使用合理化技術 戦略的開発 (実用化開発)」のプロジェクトにより、水和物スラリを空調に使うための機器システムの開発や、一般ビルでの実証実験などを行いました。そして、2004年度から「エネルギー使用合理化技術 戦略的開発」実用化段階に入り、2005年5月、鶴見事業所1号館に水和物スラリを用いた空調システムを導入するに至りました。



JFE エンジニアリング本社1号館の地下にある水和物スラリの製造システム (左)
容量 350 m³の蓄熱槽 (右)

ブレークスルー

この技術にフォーカス

装置を3つにわけて問題解決

水和物スラリの能力の高さや安全性は基礎研究で確認できましたが、実際にオフィスビルなどの空調システムで水和物スラリを利用するには、さまざまな課題もありました。

大きな課題の一つは、TBAB水溶液を熱交換器で冷やしていくと、装置内部側面に水和物が付着してしまい、伝熱量が落ちたり、熱交換器内の配管が詰まったりしました。この課題を解決するために、熱交換器のなかにブラシを取り付け、側面に付着した水和物をこそぎとる方法が考案されました。しかし生越さんは、「実用化を想定した熱交換器では、非常に大がかりな仕組みになり、採用には至りませんでした」と言います。他にも、熱交換器の形を変えるなどして工夫を試みましたが、水和物による詰まりは解消しません。

「そこで、われわれは、水和物スラリをつくる過程を3段階にわける方法を考えました」と生越さんは言います。それまでは、1台の熱交換器によって、水溶液をスラリに変えようとしていました。しかし、熱交換器のなかでは、冷やしてもなかなかスラリにならない「過冷却」という現象が起こります。その条件で一気にスラリをつくろうとしてもうまくいかず、その結果、内部壁面に水和物が付着してしまっていたのです。

システム開発を担当したエネルギー本部新空調事業部の杉山正行さんは、「過冷却の水溶液と過冷却段階を経てできたスラリを連続して流すというのは、一つの機器ではできないという結論になりました」と話します。そこで、熱交換器だけで全ての過程をこなすといった無理をせず、過程を3段階に分けることにしたのです(図4)。

第1段階は、水溶液を冷やして過冷却の状態の水溶液をつくる「水溶液過冷却器」です。第2段階は、適した状態の水和物スラリをつくるために過冷却を解除する「過冷却解除器」です。そして第3段階は、水和物スラリを増やしていく「ネオホワイト冷却器」です。「過冷却の状態を少しくつって、それをあとで解除するということです。現象にあわせて装置の機能をわけて、制御しやすいようにしました」(生越さん)。

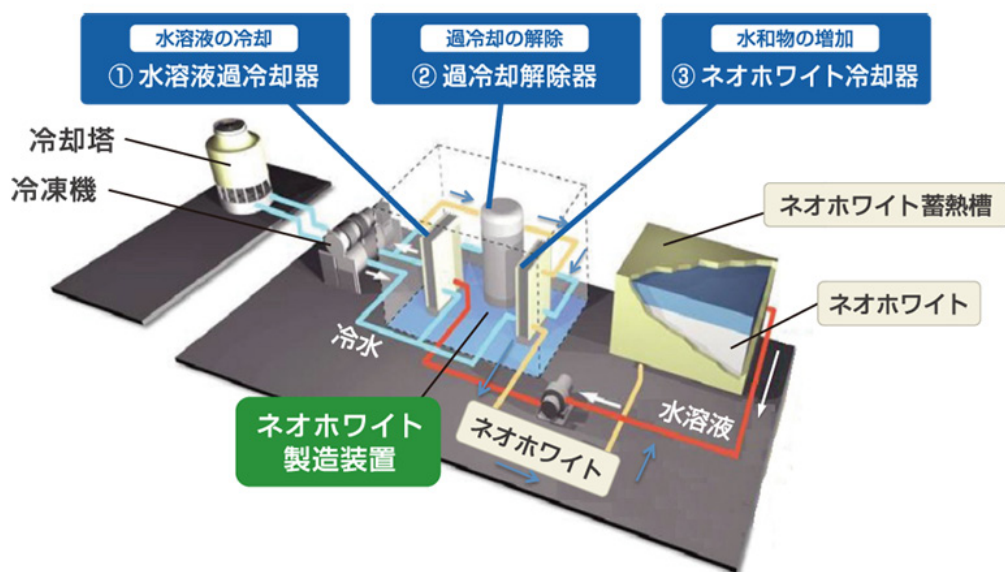


図4 3段階の装置による水和物スラリ製造。水溶液過冷却器、過冷却解除器、ネオホワイト冷却器の作動順



川崎駅地下街「アゼリア」の空調システムに取り付けられた水和物スラリの製造装置。水溶液過冷却器とネオホワイト冷却器(左写真)、過冷却解除器(右写真)

蓄熱槽の型を工夫してスラリだけを取り出す

夜につくっておいた水和物スラリを、昼に使うまで貯めておく蓄熱槽といわれるタンクにも課題がありました。蓄熱槽のなかでは、水和物スラリと水溶液が混在した状態になっています。この状態から、水和物スラリだけを取り出すことが難しかったのです。なぜなら水和物スラリの粘度が水溶液の30倍程度高いため、水和物スラリを取り出そうとしても、そのままでは温度の高い水溶液ばかりが出てきてしまうのです。

これを解決するため、生越さん、杉山さんらは、さまざまな蓄熱槽の形を考案しました。現在、実用化されたシステムでは、以下の三つのタイプがあります。

一つは「成層型」です。スラリの比重を大きくして蓄熱槽の下のほうに貯め、上の水溶液と分離させるタイプの蓄熱槽です。

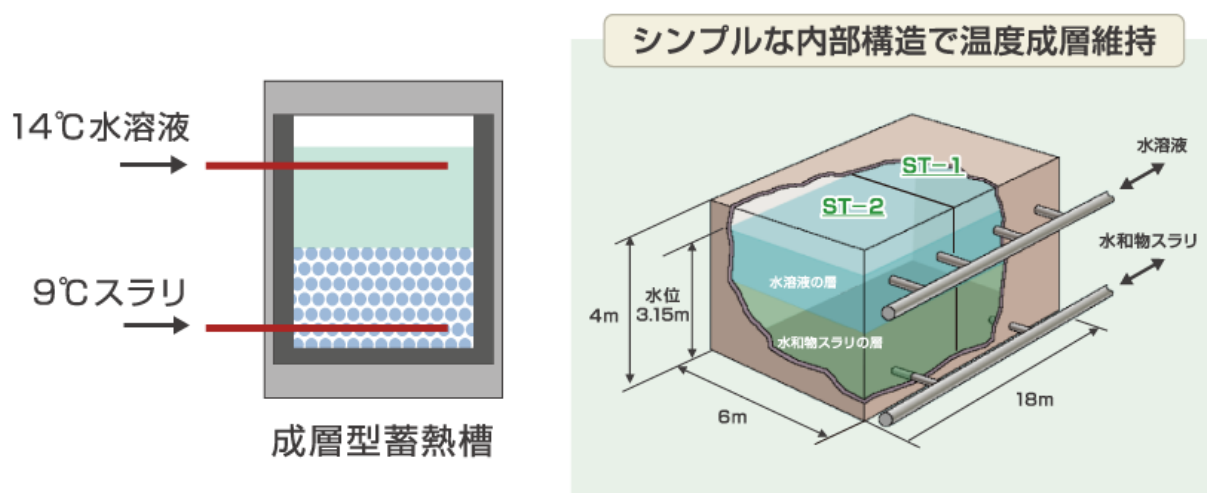


図5 成層型蓄熱槽の概念図。前ページ掲載写真のJFEエンジニアリング1号館の蓄熱槽がこの方式

また、「連結混合型」は、小さな蓄熱槽がいくつも並び連通管で連結されているタイプです。小さな槽を有効利用することができ、槽によりスラリと水溶液の状態が分かります(図6左)。

よく使われているのは「マルチタンク型」です。こちらも蓄熱槽をいくつも並べておきます。そしてスラリを取り出して使い、溶けて水溶液の状態になったものは、別の槽に戻すというものです(図6右)。

これらの課題があったほかに、TBAB水溶液を使うと水よりも金属管によっては腐食がやや大きいため、防食の技術を高める必要もありました。この課題に対しては、蓄熱槽の空間部分に微圧の窒素を入れて、腐食の原因となる酸素を遮断する対策や、はじめから腐食の心配のないステンレス鋼を使うといった対策が取られました。

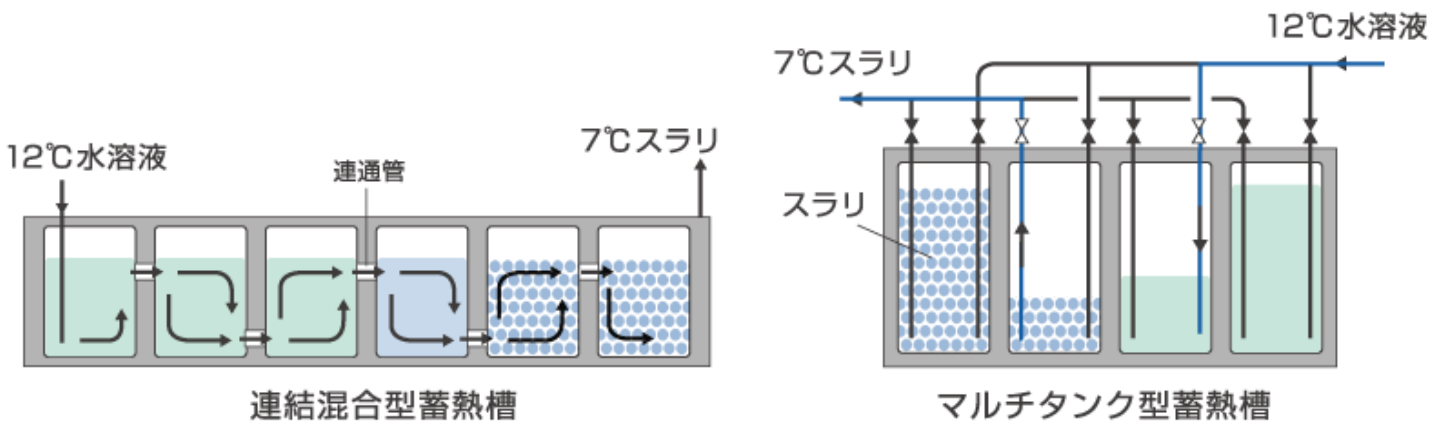
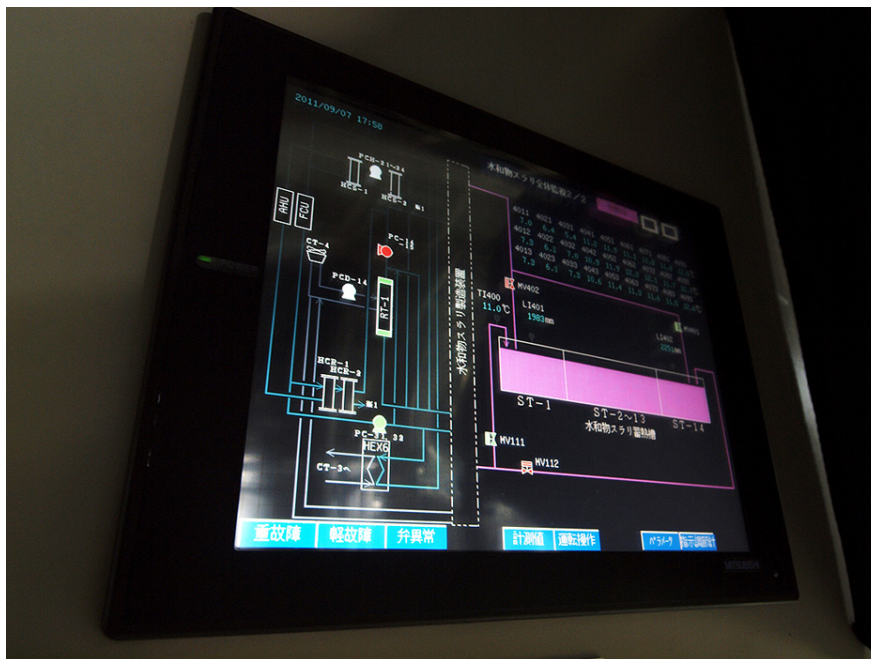


図6 連結混合型蓄熱槽（左）と、マルチタンク型蓄熱槽（右）



川崎駅地下街の駐車場の下に置かれている連結混合型蓄熱槽。
左が冷熱を蓄えて白色の水和物スラリー、右が熱を放出して透明になった水溶液



蓄熱槽の管理パネル画面。右側のピンク部分が蓄熱槽、左側が水和水物スラリー製造装置を含む冷熱製造部分

技術を海外や自動車にも展開

水和物スラリを利用した空調システムは、2011年9月現在、合計8施設で実用化されています。JFEエンジニアリングのオフィスビルや川崎駅地下街のほか、横浜市のショッピングセンターや、岡山県備前市のベアリング工場などにも導入されています。

また、海外での導入実績も増えており、すでに米国カリフォルニア州の鉄鋼企業のオフィスビルに導入されています。同州では、省エネルギーと電力安定化のために非住宅向け建物について蓄熱技術の利用が奨励されており、その対象技術の一つとして水和物スラリ蓄熱空調システムが指定されています。今後は、タイ・バンコク市のオフィスビルへの導入工事が実施されているほか、シンガポールの省エネビルでの実証事業なども、NEDOの支援を受けて調査を実施しています。

水和物スラリを利用した蓄熱空調システムの省エネルギーの効果も明らかになってきています。JFEエンジニアリング1号館の省エネ効果として、以前のガス吸収式冷温水機から水和物スラリ蓄熱空調システムへの変更により、2009年度実績で年間およそ9%の使用エネルギー削減を果たしており、その他の省エネルギー技術を組合わせて、建物全体では30%近くの省エネを達成しています。

また、JFEエンジニアリングでは、NEDO「エコドライブ用蓄熱空調システムの研究開発プロジェクト(2007年～2009年)」で、水和物による空調システムの応用として、アイドリングストップ車への蓄熱技術の応用に向けた技術開発も進めています。車載空調システムに蓄熱材を充填した熱交換器を取り付け、アイドリングストップ時に車内冷房として使用します。

これにより、アイドリングストップ中でも、完全にエンジンを停止しながら冷房を続けることが可能になります。NEDOの「エコドライブ用蓄熱空調システム」において都市内の道路を3万キロ走行し、10%の実燃費の向上効果が確かめられました。

全自動アイドリングストップ車に蓄冷熱交換器と温水循環ポンプを搭載

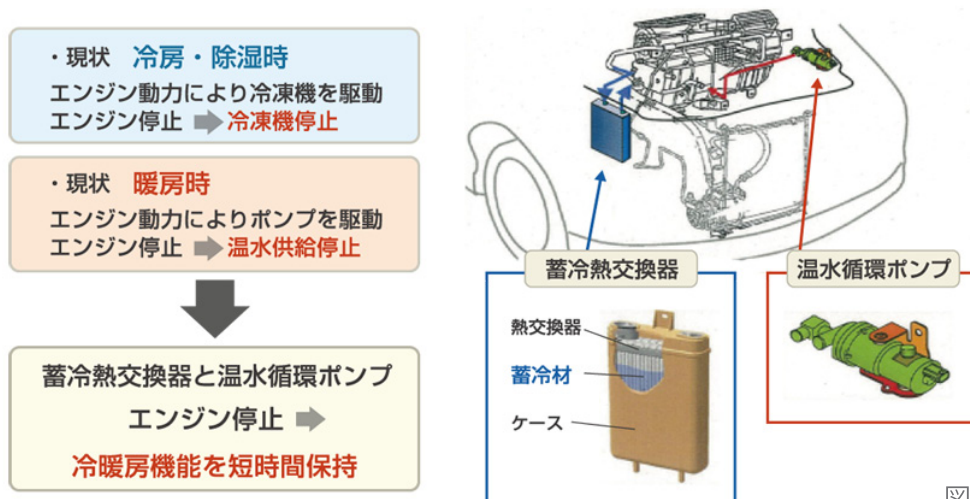


図7

水和物スラリ蓄熱空調システムの
アイドリングストップ車への応用

コストダウンで普及を促進

JFE エンジニアリングは、水和物スラリ蓄熱空調システムの実用化のため、基礎調査から基礎研究、そして実用化研究へと、確実に研究開発ステージを進めていきました。生越さんは、「一企業が製品を開発しようとする場合、時間も費用も掛かるため研究を継続することが難しくなるときもあります。今回、NEDO のプロジェクトを各段階で利用したことは、研究を継続するという点で大いに助かりました」と話します。

今後、水和物スラリ蓄熱空調システムを普及させるには、コストダウンが重要となります。現在、同社は NEDO 「先導研究」（2009～2010 年度）、「実証研究」（2011 年度）により、コストダウンのための新型システムの開発を続けています。スラリの付着が起きていた伝熱面をなくした熱交換器を開発して、システムの簡素化を図ろうとしています。（2011 年 9 月取材）

<関連プロジェクト>

- ・ニューサンシャイン計画制度

「広域エネルギー利用ネットワークシステム（エコ・エネ都市プロジェクト）」

- ・エネルギー使用合理化技術実用化開発 水和物スラリ空調システム開発

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g61114a06j.pdf>

- ・住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g61114a06j.pdf>

- ・エネルギー使用合理化技術戦略的開発 省燃費型乗用車用蓄冷空調システム開発

- ・エネルギー使用合理化技術戦略的開発 エコドライブ用蓄熱空調システムの研究開発

<http://www.nedo.go.jp/content/100184146.pdf>

この
プロジェクトの
ここに注目!!

エネルギー使用合理化技術実用化開発 「水和物スラリ空調システム開発」プロジェクト

Q. このプロジェクトがはじまったのは？

ここがポイント：

我が国におけるCO₂排出量の約20%は、業務用ビルなどの民生業務部門によるものです。中でも空調システムのエネルギー消費量は大きく、民生業務部門の4割を空調用が占めています。そこで、従来から使用されてきた水よりも効率良く冷熱を蓄えることのできる熱媒体と、それを使用したシステムの開発を目指し、本プロジェクトは開始されました。

Q. プロジェクトのねらいは？

ここがポイント：

「水和物スラリ」は、冷熱を水よりも効率的に、コンパクトに蓄えることができる上、従来の空調システムでも利用できる熱媒体です。本プロジェクトでは、水和物スラリを、ビル、工場などの冷房空調システムで利用し、既存システムに比べ、エネルギー消費量を約1/5～1/2に低減することを目標としています。そのためには、システムに供給する冷水温度、水溶液濃度などの検討、熱交換の仕組みや蓄熱槽の形状など、さまざまな研究開発が必要でした。

Q. NEDO の役割は？

ここがポイント：

水和物スラリを利用した空調システムは、これまでにない物質を使った研究開発のため、民間企業単独では大きなリスクを伴います。そこで、基礎研究（水和物スラリ開発、生成装置開発）から、実用化研究（水和物スラリ製造装置、空調システムの研究開発）、導入普及（ユーザへの導入補助金）まで、NEDOでは10年以上にわたりシームレスな支援を行ってきました。その結果、すでに国内外で導入例を増やし、省エネルギー効果を上げつつあるほか、ビル空調システム以外にも、エコドライブ用蓄熱空調システムなど、研究成果の応用展開も始まっています。

なるほど 基礎知識

TBAB を水分子で包む 水和物スラリーとは？

私たちにとって身近な水という分子は、大きさや形が合った特定の物質を包み込むことができます。例えば、日本近海の海底に大量に眠っているエネルギー資源として注目されている「メタンハイドレート」は、メタンを水分子が包んだ構造をとっています。水と他の物質が結合してできた物質を「水和物」（ハイドレート）といいます。

水和物スラリーで水に含まれているのは、臭化テトラ-n-ブチルアンモニウム（TBAB：Tetra Butyl Ammonium Bromide、化学式 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3]_4\text{NBr}$ ）という物質です。界面活性剤などに使われる「第4級アンモニウム塩」という種類に含まれます（下図）。

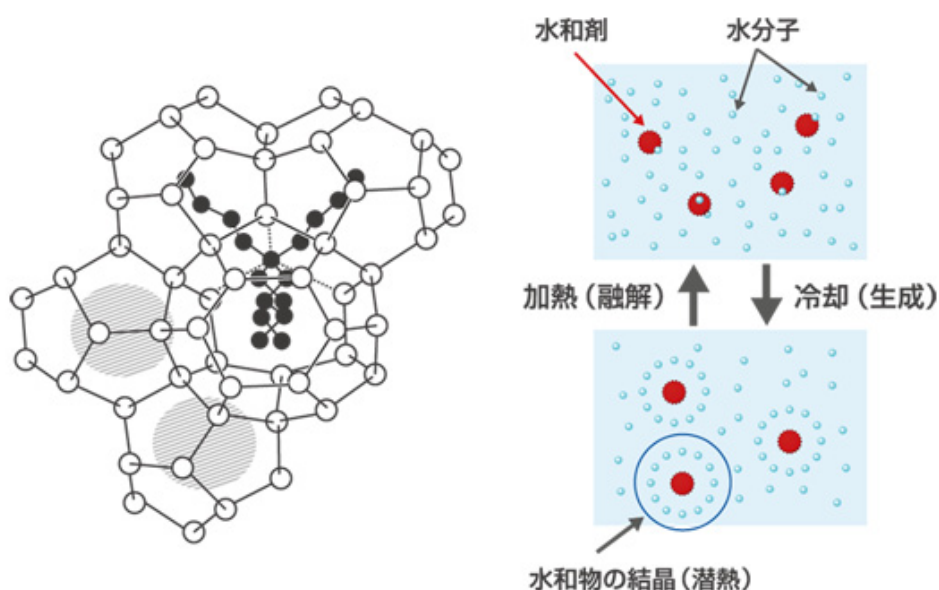
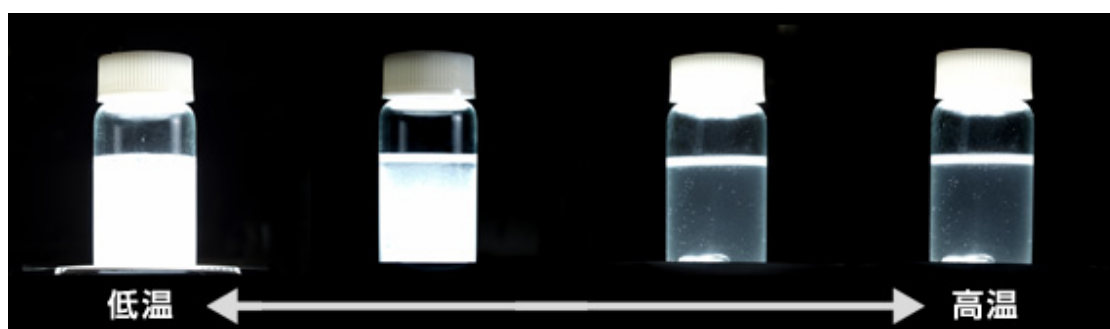


図 TBAB 水和物の構造（左）（W. Shimada, T. Ebinuma, H. Oyama, Y. Kamata, S. Takeya, T. Uchida, J. Nagao and H. Narita, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (Pt.2, No.2A), L129, 2003.）
中央の TBAB を水分子が包み込む。加熱・冷却時の分子の変化を現した模式図（右）

TBAB は水に溶けやすく、その水溶液は 20℃ といった常温では無色透明です。一方、水溶液の温度を下げていくと、濃度 40% のときは 12℃、濃度 20% のときは 10℃ ほどで白く濁っていきます。TBAB 水和物が、長さ 50～100 マイクロメートルほどの結晶となり、水溶液は固体と液体の二相流体つまり「スラリー」の状態になります。光の屈折によって液が白く見えるのです。



温度変化と TBAB 水溶液の色

開発者の 横顔



「氷を超える効果に挑む」

水に代わる蓄熱媒体を求めて

生越さんは、蓄熱媒体の選定から始まり、水和物スラリ蓄熱空調システムの開発に最初から携わってきた一人です。以前は、氷蓄熱システムの開発も手掛けていました。「日常的で、使いやすいのは水・氷だろうと思っていました。しかし、水・氷を超える効果を得るには、別のものをもってくるしかありません。新しいものを使うときは、うまくいかないことも伴います。振り返ってみると、ここまで長くやってきたなと思います」

難しいスラリの制御を簡潔なシステムで

杉山さんは、水和物スラリ蓄熱空調システムの開発に携わる以前、各種プロジェクトの計画、設計、施工を担当する部署で、地域冷暖房や省エネルギーの技術を提案する仕事をしてきました。「スラリを制御することは確かに難しい技術です。最低限の制御で使ってもらえるように、システムが複雑にならないように心がけています」



(左) 生越さん、(右) 杉山さん