

水和物スラリーを用いた省エネルギー空調システム

Air-Conditioning System Using Clathrate Hydrate Slurry

生越 英雅 OGOSHI Hidemasa JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 グループマネージャー
高雄 信吾 TAKAO Shingo JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 主幹

要旨

JFE エンジニアリングは、従来の冷水と比べて 2-3 倍の熱容量を保有し、かつ輸送性に優れた冷熱媒体（水和物スラリー）およびこれを用いた空調システムを開発した。本空調システムでは、冷熱の搬送動力を大幅に低減でき、空調システムの省エネルギーが可能となる。本報では、水和物スラリーの特性および事務所ビルに適用した場合の省エネルギー効果の試算例について述べる。

Abstract:

JFE Engineering has developed CHS (clathrate hydrate slurry), which has great cooling capacity and pumping ability. CHS has latent heat over the temperature range of 5-12°C. The air-conditioning system using CHS is expected to reduce pumping power consumption. This paper describes the characteristics of CHS and feasibility study on the air-conditioning system, using CHS, applied to an office building.

1. はじめに

民生部門における空調用エネルギー消費は年々増加傾向にあり、CO₂ 排出量削減の観点からも、より一層の省エネルギー対策が必要である。さらに、冷房負荷が昼間に集中することから負荷平準化に対する技術開発も求められている。

そこで現在、水蓄熱や氷蓄熱などの蓄熱式空調システムが普及している。冷水による蓄熱は、冷凍機の成績係数が高い状態での運転が可能であるが、同じ蓄熱槽容積では氷蓄熱と比べて蓄熱量が小さくなる。一方、氷蓄熱では冷凍機の成績係数が低くなるため消費電力が大きくなってしまふ。

冷房で使用される温度域（約 5-12°C）で冷水よりも高密度の熱を保有し、蓄熱と輸送が可能な媒体を用いれば、空調システムにおいて大きな省エネルギー効果が期待できる。

開発した冷熱媒体は、液系の包接水和物の微小粒子と水溶液の固液混相流体（以下、水和物スラリーまたは CHS）であり、5-12°C の範囲で高い熱密度を有し、輸送にも優れた特性を持つ新しい冷熱媒体である¹⁻³⁾。

本稿では、水和物スラリーの特性と事務所ビルに適用した場合の省エネルギー効果の試算例について述べる。

2. 水和物スラリーの特長と諸特性

フロンガスやメタンガスなどのガスをゲスト分子としたガス系包接水和物があるが、本水和物は、ゲスト分子に臭化テトラ n-ブチルアンモニウム (TBAB) を用いた液系包接水和物の一種である。TBAB を水に溶解させた水溶液を流動させながら冷却していくと 10-100 μm の水和物粒子が水溶液中に生成し、Photo 1 に示すような流動性のある水和物スラリーを得ることができる。

TBAB は「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」に登録されている薬品であり、安全衛生法、毒物・劇物取締法、消防法には該当しない。Table 1 に急性毒性試験結果を示す。また、この水溶液は繰り返し使用しても熱物性に変化なく長期にわたって安定である。

水和物スラリーをビル空調システムに適用する場合の概念を Fig. 1 に示す。水和物スラリーを用いたビル空調シス



Photo 1 CHS (clathrate hydrate slurry)

Table 1 Results of acute toxicity test

LD ₅₀ (Rat, Oral)	Male : 1 414 mg/kg Female : 1 542 mg/kg
LC ₅₀ (Cyprinodont, 96 hrs)	3 340 mg/ℓ

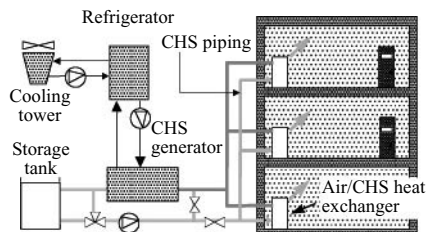


Fig. 1 Air-conditioning system using CHS

テムは、熱源機部分においては、水和物スラリを製造する熱交換器と蓄熱槽が追加される。一方屋内にある二次側設備では、輸送媒体の冷水を水和物スラリに置き代えるもので、従来の水仕様と同等の配管、ポンプ、熱交換器が使用できる。

水和物スラリ空調システムの特長と効果は以下のとおりである。

(1) 冷熱の搬送動力を最大 80% 低減できる。

水和物スラリの熱密度は、冷水の 2-3 倍の 10-17 Mcal/m³ となるため、冷水に比べて流量を 1/2 から 1/3 に低減できる。そのため、冷熱の搬送動力を大幅に低減可能である。

(2) 氷製造と比べて 40% の省エネルギーとなる。

生成温度が冷水と同じ温度域 (5-12℃) であるので、氷製造より高効率で冷凍機が運転できる。

(3) 室内空調機へ直接搬送可能である。

凝集性がなく、配管および室内空調機内での閉塞が発生しないので、冷水と同様に水和物スラリを直接搬送することができる。

以下に、水和物スラリの生成、輸送、伝熱特性について述べる。

2.1 TBAB 水和物の生成特性

Fig. 2 は、TBAB 水和物の生成温度と水溶液濃度の関係 (水和物生成線) を示したものである。

水和物中の TBAB の重量割合が、水溶液濃度と同じ場合、水溶液の冷却ともなると水和物スラリ中の水和物が増加しても水溶液濃度は一定である。この時、水和物スラリの温度もほぼ一定に保たれる。実験では水溶液濃度を 40.5 mass% の場合に約 11.8℃ で一定になることから水和物の水和数はおおよそ 26 程度であると推定された。この水和物を「第一水和物」と呼ぶことにする。

水溶液濃度が 40.5 mass% より低い水溶液を冷却していくと、水和物スラリ中の水和物割合の増加ともなるとス

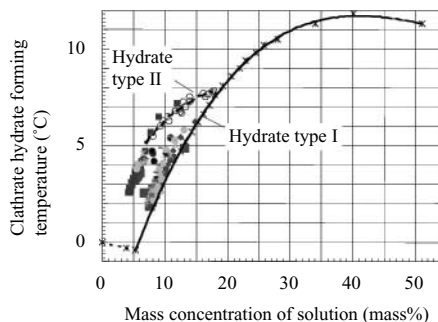


Fig. 2 Formation of TBAB hydrate

ラリ中の水溶液濃度が低下する。そのため水和物生成温度は水和物生成線に沿って低下する。これまでの実験から、水和物スラリの温度が約 8℃ 以下になると、水和数が約 36 の水和物へ移行する。以下では、この水和物を「第二水和物」と呼ぶことにする。Fig. 2 では、8℃ 以下では二つの水和物生成線が描かれている。冷却過程では一時的に第一水和物が生成されるものの、第二水和物が安定であるため、最終的には第二水和物となる。

2.2 TBAB 水和物、水和物スラリの物性

Table 2 に、第一、第二水和物の密度、比熱、潜熱の測定値を示す。

濃度の異なる水溶液について、水溶液の温度と密度の関係を調べた結果を Fig. 3 に示す⁴⁾。なお、それぞれの水溶液の濃度において、水和物の生成温度より低い温度の水溶液は過冷却状態である。

第一水和物スラリ、第二水和物スラリの温度と密度の関係は、熱電対と振動式密度計を用いて計測した。Fig. 4 に結果を示す。

Fig. 4 の振動式密度計の計測値は 20.2 mass%、15.0 mass% の水溶液から生成した水和物スラリの温度と

Table 2 Thermophysical properties of TBAB hydrate

Thermophysical property	TBAB hydrate	
	Type I	Type II
Density (kg/m ³)	1.08 × 10 ³	1.03 × 10 ³
Specific heat (kJ/kgK)	2.22	—
Latent heat (kJ/kg)	193	205

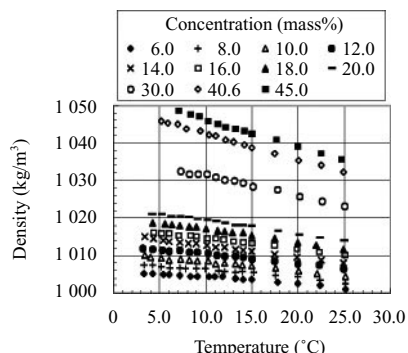


Fig. 3 Density vs. temperature of aqueous solution

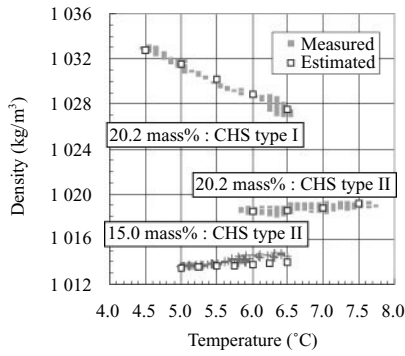


Fig. 4 Density vs. temperature of clathrate hydrate slurry

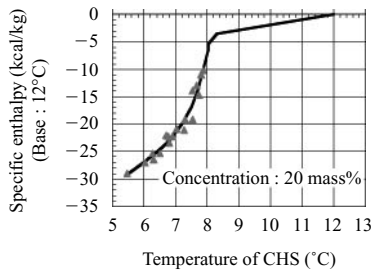


Fig. 5 Specific enthalpy of CHS vs. temperature

密度の関係を示している。20.2 mass%の水溶液は約8.1°Cで第一水和物を生成するので、Fig. 4の第一水和物スラリの密度は、過冷却度が約1.5–3.5°Cの範囲の計測結果を示している。

第一水和物スラリは、同じ濃度の水溶液と比べて密度は大きい。第二水和物スラリは、水溶液の密度とほぼ同じである。

水和物生成線と水和物の潜熱、比熱、水溶液の比熱とにより、水和物スラリの熱密度（比エンタルピ）や固相分率（水和物スラリ中の水和物粒子の重量割合）を求めることができる⁵⁾。Fig. 5に、水溶液濃度20 mass%における水和物スラリの温度と比エンタルピ（12°Cを0とした比エンタルピとして表現している）の関係を示す。約7.6°Cで、冷水の2倍（温度差を7°Cとした場合）の熱密度を持つ水和物スラリを得ることができる。

2.3 水和物スラリの輸送特性

水和物スラリは、蓄熱媒体としてのみならず、高密度の冷熱輸送媒体として用いられることが、大きな特徴である。水和物スラリは、ソフトクリーム状の流体であり、配管内や空調用熱交換器内、弁などで凝集や閉塞は見られず安定した流れが得られる。

Fig. 6は、50 A配管での輸送実験データをもとに、一定の輸送熱量（115 kW）について水和物スラリの熱密度（比エンタルピ）に対する、水和物スラリの輸送動力と冷水の輸送動力との比を示したものである⁶⁾。水和物スラリは往路5–8°Cの水和物スラリ、復路は12°Cの水溶液で、冷水は往路5°C、復路12°Cである。輸送熱量115 kWでは冷水の

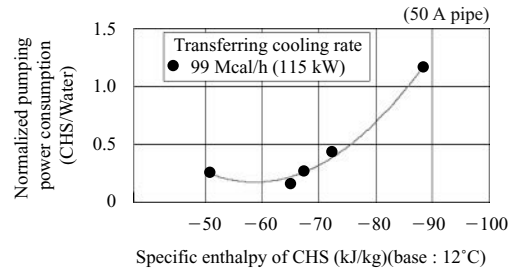


Fig. 6 Comparison of power consumption for CHS

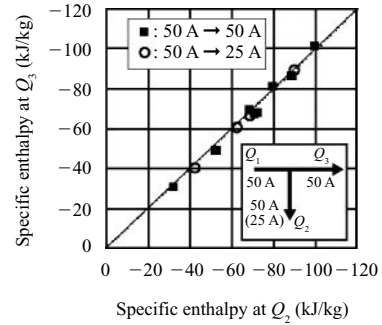


Fig. 7 Distribution characteristics of Tee pipe element

流速は2 m/sに相当する。

–50–72 kJ/kgの熱密度を持つ水和物スラリを用いることで、冷水に比べて約1/5から1/2に輸送動力を低減できることが分かる。また、輸送配管の小口径化や輸送熱量の増大も可能である。

また、固液混相流体の場合、直管から枝管に分岐するところで固体粒子の偏流によって固相割合が等分に分配されないことが懸念される。そこで、配管分岐による水和物粒子の偏流を調べるため、50 A直管から50 Aおよび25 Aに水平に90°分岐した後の各水和物スラリを採取して比エンタルピを比較した。分岐流量比（分岐枝管側流量 Q_2 /直管側流量 Q_1 ）は0.08–0.92の範囲である。実験結果をFig. 7に示す。水和物スラリの粒子は均等に分配されており分岐のある配管システムに適用できることが確かめられた。

2.4 水和物スラリの伝熱特性

熱交換器の一例として、一般に空調機として使用されているファンコイルユニット（定格流量 $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 、冷房能力3.66 kW）を用いて水和物スラリと水とで熱交換した場合の水和物スラリ流量に対する交換熱量の関係をFig. 8に示す⁷⁾。

実験で使用した水和物スラリの熱密度は約–50–70 kJ/kg、流量の測定範囲は 1.5×10^{-5} – $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ である。また、ファンコイルユニットの風量は約 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 一定である。

空気熱交換器内に水和物スラリを用いた場合、本実験の測定範囲内において負荷熱量は水と比べて増加し、流量が 1.5×10^{-5} – $8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で水の約2.3–3.5倍であ

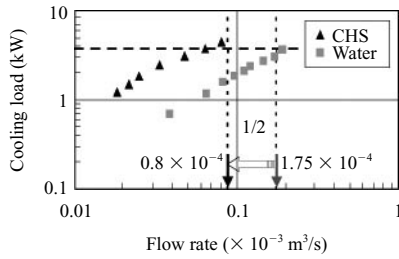


Fig. 8 Performance of heat exchange for fan coil unit

る。本装置の定格流量の $1.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ で水を供給した場合と同等の冷房能力を水和物スラリの場合では約 $0.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ で実現できることが分かった。

3. 省エネルギー量の試算例

3.1 試算条件

15 000 m^2 規模の業務ビル空調システムに水和物スラリ空調システムを適用した場合について、年間の冷房用電力消費量を試算した。比較として非蓄熱方式の冷水空調システムの年間消費電力量も試算した。

なお、冷熱負荷は冷熱負荷原単位 = $93 \text{ W}/\text{m}^2$ 、冷房全負荷相当時間 = 1 462 時間、年間冷房運転時間 = 7 200 時間、月別・時刻別負荷パターンは都内業務ビルの設計用負荷（年間を通じて昼夜間とも冷房負荷がある）を使用した。電気料金は、業務用電力とし、基本料金は 1 560 円 /kW / 月、電力量料金は夏季 12.02 円 /kWh、その他季 10.93 円 /kWh、夜間は 3.25 円 /kWh を用いた。

Fig. 9 に、冷水空調システムのフロー、Fig. 10 に水和

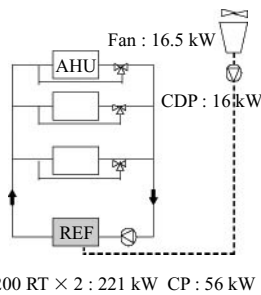


Fig. 9 Air-conditioning system using chilled water

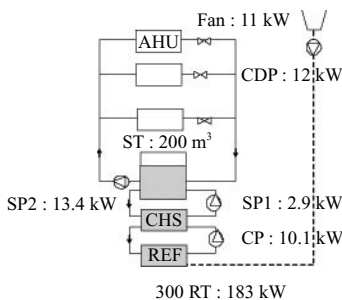


Fig. 10 Air-conditioning system using CHS

物スラリ空調システムのフローを示す。

冷水空調システムの冷凍機は 200 RT \times 2 台（成績係数 COP = 6.36, 7/12 $^{\circ}\text{C}$ ）、冷水ポンプは $121 \text{ m}^3/\text{h} \times 50 \text{ m} \times 28 \text{ kW} \times 2$ 台でクロードシステムとしている。

また、水和物スラリ空調システムの冷凍機は 300 RT \times 1 台（成績係数 COP = 5.76, 4/9 $^{\circ}\text{C}$ ）、CHS 製造ユニットは 300 RT \times 1 式、CHS 蓄熱槽は 200 m^3 （蓄熱量 2 570 Mcal、蓄熱密度 15 Mcal/ m^3 ）、冷水一次ポンプ $181 \text{ m}^3/\text{h} \times 12 \text{ m} \times 10 \text{ kW}$ 、CHS 一次ポンプ、 $90.7 \text{ m}^3/\text{h} \times 7 \text{ m} \times 2.9 \text{ kW}$ 、CHS 二次ポンプ $121 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ m} \times 13.4 \text{ kW}$ （変流量制御）とした。

3.2 試算結果

Fig. 11 に、各システムの年間冷房用電力消費量（空調機ファン動力は除く）を示す。冷水空調システムの消費電力量に対して水和物スラリ空調システムがおよそ 36% 削減される。削減の主な理由は、CHS 蓄熱により効率の低い冷凍機部分負荷運転時間が短縮されたためと、熱密度の高い水和物スラリを二次側空調機に直接供給することによる搬送動力低減によるものである。

Fig. 12 に、各システムの年間冷房用電気料金を示す。水和物スラリ空調システムでは、冷水空調システムに対して契約電力が 77 kW 低減できることと、安価な夜間電力

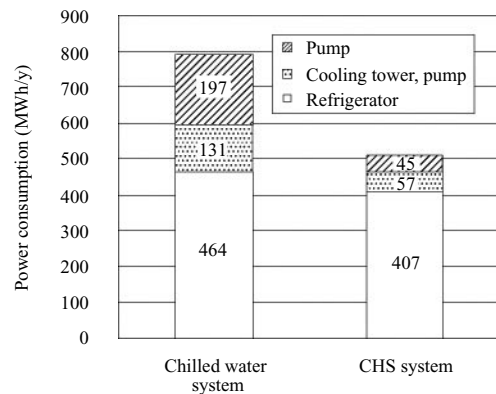


Fig. 11 Power consumption for chilled water system and CHS system

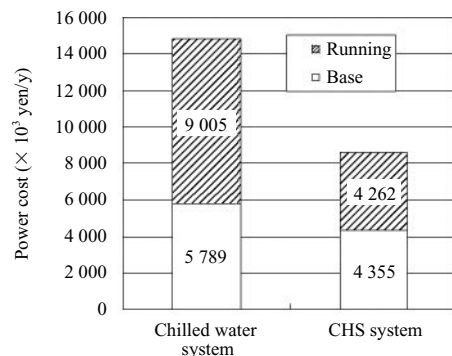


Fig. 12 Electric power cost for chilled water system and CHS system

の利用によっておよそ42%低減できる。

以上より、水和物空調システムでは、従来の冷水空調システムに比べて大幅に消費電力量、電気料金を削減できる可能性があることが分かった。

4. おわりに

高密度で冷熱を蓄熱・輸送できる水和物スラリは、従来の冷水と比べて輸送動力の大幅な削減などによる省エネルギーが期待できることが分かった。また、蓄熱槽や輸送配管の小口径化による設備費の削減や既設配管での輸送熱量の増大も可能である。

この水和物スラリの開発により、民生部門の冷房需要の増大に対する新しい省エネ型次世代空調システムへの展開が考えられ、省エネルギーによるCO₂削減と電力の負荷平準化に大きく貢献するものとする。

今後、水和物スラリを用いた空調システムの実用化に向けて、機器・システムの最適設計技術と水和物スラリの運転管理技術についてさらに開発を推進していく予定である。

なお、本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究開発事業として実施しているものであり、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 福嶋信一郎ほか. 液系包接水和物を用いた高密度冷熱媒体. NKK 技報. no.166, 1999-06, p.65-70.
- 2) 生越英雅, 高雄信吾. 液系包接水和物を用いた高密度冷熱蓄熱・輸送媒体の紹介. 地域冷暖房. no.61, 1999-12, p.20-22.
- 3) 生越英雅, 高雄信吾. 液系包接水和物を用いた高密度冷熱蓄熱・輸送媒体とその空調システム. 建築設備と配管工事. no.511, 2001-01, p.40-45.
- 4) 松本繁則, 高雄信吾, 生越英雅. “水和物スラリの生成に関する実験的研究 (水和物・水和物スラリの密度)”. 日本機械学会. 2001-05.
- 5) 松本繁則, 高雄信吾, 生越英雅. “水和物スラリの生成に関する実験的研究”. 第35回空気調和・冷凍連合講演会. 2001-04, p.149-152.
- 6) 高雄信吾, 園田克樹, 林謙年. “水和物スラリを用いた搬送動力の低減”. 空気調和衛生工学会講演会. 2002-11.
- 7) 松本繁則, 古本直行ほか. “水和物スラリの融解伝熱に関する実験的研究”. 日本機械学会熱工学講演会. 2001-11.
- 8) 高雄信吾, 生越英雅ほか. 水和物スラリ新空調システム. NKK 技報. no.174, 2001-08, p.6-11.



生越 英雅



高雄 信吾