

# 水和物スラリー新空調システム

## New Air Conditioning Systems Using Hydrate Slurry

高雄 信吾 エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 主幹  
 生越 英雅 エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 主査  
 松本 繁則 エンジニアリング研究所 エネルギー研究部  
 高土 弘一 京浜製鉄所 環境・エネルギー部 開発室  
 杉山 正行 エネルギーシステム技術部 統括スタッフ  
 秋山 俊一 鉄鋼技術センター 環境・エネルギー部 統括スタッフ  
 福嶋信一郎 鉄鋼技術センター 環境・エネルギー部 主席

当社が開発した水和物スラリー(CHS)は高い冷熱密度と優れた熱輸送性能を持っている。CHSを空調システムに適用すると、搬送動力の低減、配管・貯槽のコンパクト化による経済性の向上が期待される。当社京浜製鉄所内の事務所建物にCHSを用いた空調システムを設置し、夏季に運転した結果、搬送システムの動力を約50%低減することが確かめられた。また、大型ビルに適用した場合の省エネルギー性を実験データに基づいて試算した例を示す。

Shingo Takao, Hidemasa Ogoshi,  
 Shigenori Matsumoto, Kouichi Takashi,  
 Masayuki Sugiyama, Toshikazu Akiyama  
 and Shinichiro Fukushima

NKK has developed a CHS (Clathrate Hydrate Slurry), which has great cooling capacity and pumpability. The utilization of CHS in air-conditioning systems is expected to reduce pumping power consumption and capital cost due to downsized piping and tanks. The CHS air-conditioning system has been applied to an office building in NKK Keihin Works. The operation during Y2000 summer revealed that the pumping power consumption was reduced to 50% of that for chilled water system. Based on the obtained data, we also conducted a feasibility study on the CHS air-conditioning system applied to a large office building.

### 1. はじめに

日本で排出される温室効果ガスの95%は炭酸ガスであり、またその90%がエネルギー消費に伴うものとされている。現在、一次エネルギーの大部分を化石燃料に依存しているため、エネルギー消費活動の増加に伴い炭酸ガスの排出量が増加し、地球の温暖化を助長している。

ビルなどの空調システムの消費エネルギーはOA機器の増大などにより年々増大している。炭酸ガス発生量の低減は産業部門だけでなく民生部門にも強く求められており、今後も継続して増大すると考えられる冷房空調エネルギーに対する省エネルギー技術開発が望まれている。また、冷房負荷が夏季の昼間に集中することから電力需要ピークの平準化に対する技術開発も同時に求められている。

現在のセントラル空調システムでは氷や冷水が空調システムの冷熱の蓄熱や搬送の媒体として用いられている。床面積の大きいビルで採用されているセントラル空調システムでは一般に5~7の冷水が各室内空調機に搬送されている。一般的な事務所ビルにおける一次エネルギー消費量の内訳をFig.1に示す。ビルのエネルギー消費量の概ね50%が空調機器に使われており、その中で冷熱媒体の搬送系エネルギー消費量が冷熱を製造する冷凍機のエネルギー消費量に匹敵している。空調システムでは冷凍機器の省エネルギー開発は進んでいるものの、搬送系のエネルギー消費量の低減技術が大きな課題として残されている。

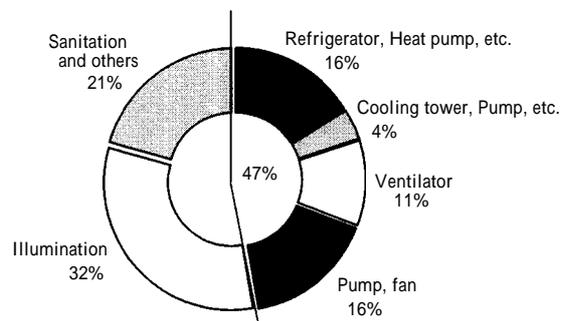


Fig.1 Energy consumption of office building

氷蓄熱空調システムでは夜間に氷を製造し、昼間に氷を融解して冷水を作って空調用に供給している。しかし、氷を製造する段階で氷点以下の低温度が必要であるために冷凍機の効率が冷水製造と比べて低くなる。そのため、冷凍機の消費電力量が同じ熱量の冷水を製造した場合と比較して30~40%も大きくなる。一方、冷水蓄熱空調システムの場合、同じ蓄熱槽容積では氷蓄熱と比べて蓄熱量が少ないので、電力負荷平準化の効果が小さくなる。また、地域冷暖房では、導管工事費の低減や冷熱輸送動力の削減あるいは冷熱需要の増大への対応が課題となっている。

当社が開発した新しい冷熱媒体<sup>1)-4)</sup>は、液系の包接水和物の微粒子と水溶液の混合媒体(以下、水和物スラリーと略記する)である。水和物スラリーは冷房で使用される温度域である5~12で冷水よりも高い熱密度を保有しており、熱輸送性能にも優れている。水和物スラリーを空調シ

システムに用いることによって、搬送系動力の大幅な省エネルギー、搬送熱量や蓄熱量の増大あるいは配管や貯槽のコンパクト化による経済性向上が期待されている。

水和物スラリーを用いた空調システムを当社京浜製鉄所内の事務所建物に設置し、実負荷における冷房運転を行った。本稿では、この空調システムの運転結果と、水和物スラリーを大型ビルに適用した場合の省エネルギー性の試算結果について述べる。

## 2. 水和物スラリーの特徴

潜熱を持つ媒体として、包接水和物(クラスレートハイドレート)がある。包接水和物は、水分子が網状構造など(包接格子)をつくり、その隙間にゲスト分子(水和剤)が入り込んだ構造をなす化合物である。水和物を生成する水和剤としてはさまざまな物質があり、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知られている。ここで用いた水和剤はテトラn-ブチルアンモニウム塩で、生成される水和物は液系包接水和物の一種である。この水和剤は常温常圧で白色の固体であり水に可溶である。水和剤を溶解した水溶液を容器内で流動させながら冷却していくと、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ソフトクリーム状の水和物スラリーを得ることができる。



Photo 1 CHS (Clathrate Hydrate Slurry)

以下に、水和物スラリーの主な特徴を示す。

- (1) 大気圧下で生成
- (2) 空調利用の温度域5～12℃で潜熱を保有
- (3) 輸送配管、ポンプ、空調用熱交換器は、冷水仕様の機器が使用可能
- (4) 搬送および冷熱蓄熱媒体として使用可能

したがって、通常の冷水仕様の設備と大きく変わらない空調システムを構築でき、氷と比べて冷熱製造の成績係数(COP)が有利である。

ここで用いた水和剤は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。また、この水溶液は繰り返し使用しても熱物性に变化なく長期に安定である。

## 3. 実負荷での運転結果

### 3.1 設備の機器構成

水和物スラリーの実用性などを確かめるため、当社京浜製鉄所内の事務所建物に水和物スラリーを用いた空調システムを設置した。Photo 2 に空調設備を示す。また、Fig.2 に概略フローを示す。

建物は、延床面積が約4000m<sup>2</sup>の2階建てであり、水和物スラリー空調設備の対象空調面積は、1階および2階の事務室の約1700m<sup>2</sup>である。屋外設備は、冷凍機、冷却塔、

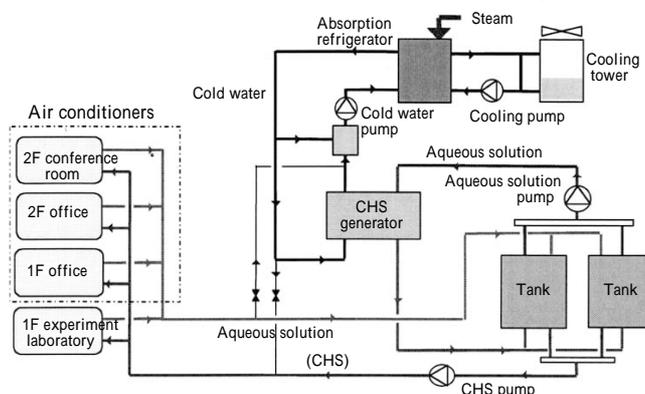


Fig.2 Flow of CHS air conditioning system



Photo 2 Equipment of CHS air conditioning system

水和物スラリー製造熱交換器および蓄熱槽で構成されている。なお、冷凍機には二重効用型吸収式冷凍機を使用し、熱源には製鉄所内の排熱回収蒸気を用いた。

一方、屋内設備は、建物2階の空調機械室に負荷用熱交換器として空調機2台、2階会議室と屋外の計測室にファンコイルユニット(口径10mmの銅管製のプレートフィン型)各1台を設置した。なお、一般的な冷水仕様の負荷用熱交換器の性能を確認するため、同形式のファンコイルユニット(冷水定格流量約5kg/min)を用いて水和物スラリー供給時の熱交換特性を調べた。冷水と水和物スラリー供給時の熱通過率と流量の計測結果の一例をFig.3に示す。流量が定格より少なくなっても定格流量で冷水を供給した場合より水和物スラリーの方が熱通過率は高くなっている。このような伝熱促進効果によって、水和物スラリーの熱密度を倍にして流量を半減させた場合でも冷水の定格時とほぼ同等の熱交換特性が得られた。また、空調機内熱交換器の細い銅管や弁における閉塞もなく、搬送系の問題もないことが確かめられ、冷水仕様の熱交換器を使用できることが確かめられた。

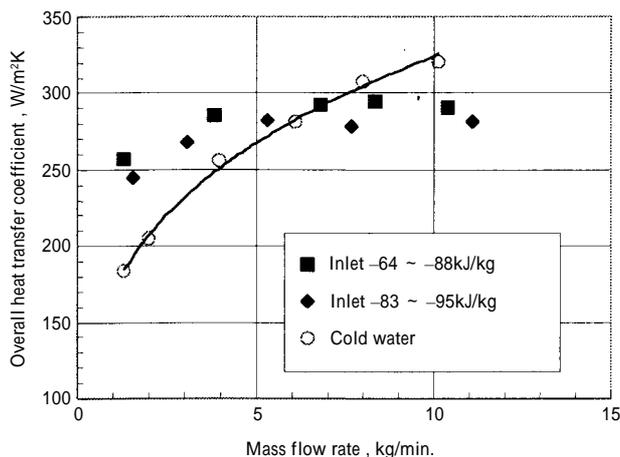


Fig.3 Characteristic of heat exchange on air conditioner

### 3.2 設備の運転

水和物スラリー製造運転では、吸収式冷凍機から冷水を製造熱交換器に循環する。同時に製造熱交換器に蓄熱槽内から水溶液を供給して冷却することにより水和物スラリーが製造される。水和物スラリーは蓄熱槽に貯蔵されるとともに、蓄熱槽から水和物スラリーを取り出して屋内空調機に供給される。

2000年の夏季に、実負荷による水和物スラリーを用いた冷房運転を行い、水和物スラリーの実用性能および空調システム機器の機能確認実験を実施した。この結果、水和物スラリーの製造および輸送システムは安定して運転することができ、水和物スラリーが実用可能な媒体であることを確認した。以下にその結果を述べる。

### 3.3 搬送ポンプの消費動力

Fig.4は、約59MJ/m³(14Mcal/m³)の熱密度を持つ水和物スラリーを負荷に供給した場合の流量および搬送ポンプ動力を、ほぼ同じ負荷で冷水を供給した場合の流量、ポンプ動力と比較した計測結果の例である。流量は約半分で、搬送ポンプ動力はおよそ1/4に低減されることがわかった。

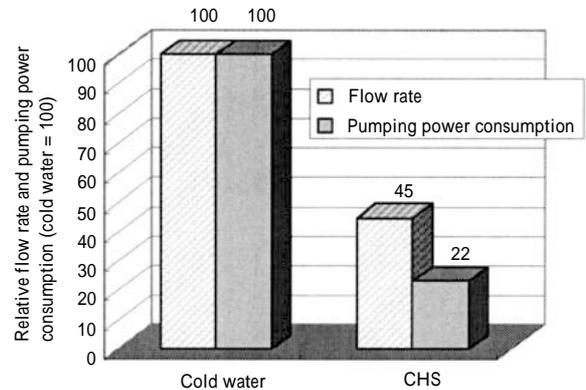


Fig.4 Comparison of the ratio of pumping power consumption (example of experimental results)

Fig.5は、本設備において空調システムの行き配管(水和物スラリー)と戻り配管(水溶液)における水和物スラリーと冷水の場合それぞれについて空調配管と空調機内の熱交換器内を通過する総圧力損失(差圧)と流量の関係を計測した結果である。冷水と水和物スラリーの流量が同じときには、水和物スラリーの方が総圧力損失は約20%程度増加する。これは水和物スラリーの粘性が水より高いからである。しかし、水和物スラリーの熱密度が2倍であるので同一熱量を負荷に供給するには流量を1/2とすることができる。その結果、同じ熱量を供給する場合には、水和物スラリーの総圧力損失は冷水と比べて1/2以下となる。搬送ポンプ動力は圧力損失と流量の積に比例するので1/4以下に低減される。このように、実用規模の設備においても水和物スラリーの搬送動力が大幅に低減できることが確認できた。

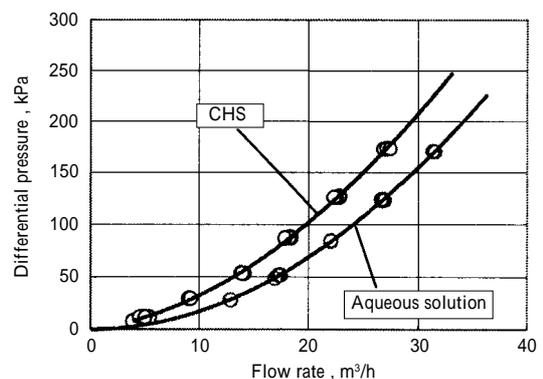


Fig.5 Flow rate vs differential pressure on the piping system of air conditioning side

### 3.4 空調システムの消費電力

本設備の運転時間は、およそ6時から20時までの14時間で、土・日曜日も含めて毎日運転された。

Fig.6は、8月代表日(最大負荷220kW,日負荷2644kWh)における1日の消費電力量およびその内訳を、冷凍機から負荷に冷水を供給した場合と、水和物スラリーを供給した場合について計測データから試算した結果を示したものである。

冷水供給の場合、全消費電力量は、333kWhで、冷凍機補機関係の動力(冷却水ポンプ,冷却塔のファン,冷凍機内の冷媒・溶液ポンプ)が179kWh,負荷側搬送系動力(冷水ポンプ)は154kWhである。それに対して、水和物スラリーで供給する場合、冷凍機補機関係の動力は同じとなるが、冷水ポンプ,水溶液送りポンプ,水和物スラリーポンプの搬送系動力の総和は、82kWhとなり、冷水供給の場合の全消費電力量に対して、約21%の省エネルギーとなった。搬送系のみで比較すると、約47%の省エネルギーになる。

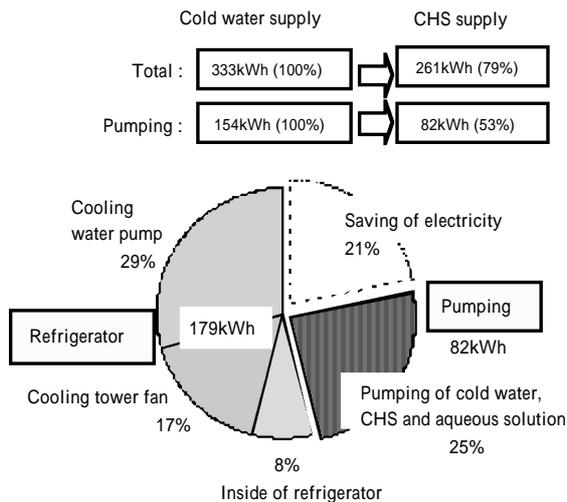


Fig.6 Items of power consumption on CHS system

### 4. 業務ビル電力消費量の試算

20000m<sup>2</sup>規模の業務ビル空調システムに水和物スラリーを適用した場合の蓄熱・供給システム[水和物スラリー蓄熱]について、年間の冷房用電力消費量を試算した。比較対象として非蓄熱・冷水供給システム[非蓄熱(セントラル空調方式)],冷水蓄熱・冷水供給システム[水蓄熱]および氷蓄熱・冷水供給システム[氷蓄熱]の年間消費電力量を試算した。

#### 4.1 前提条件

Fig.7, Fig.8は、冷房ピーク日および月別の負荷パターンを示す。なお、冷熱負荷は冷熱負荷原単位 = 99W/m<sup>2</sup>,全負荷相当時間 = 1000時間,ピーク負荷1977kW,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。

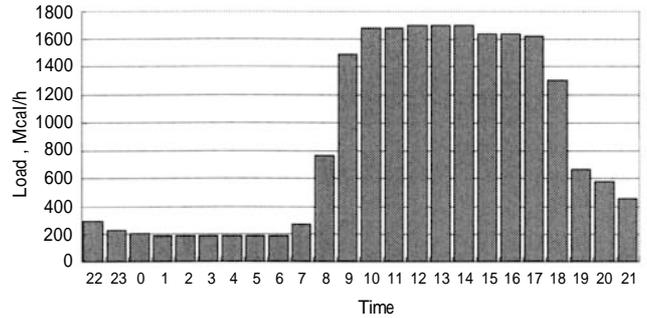


Fig.7 Air conditioning load pattern on the maximum day

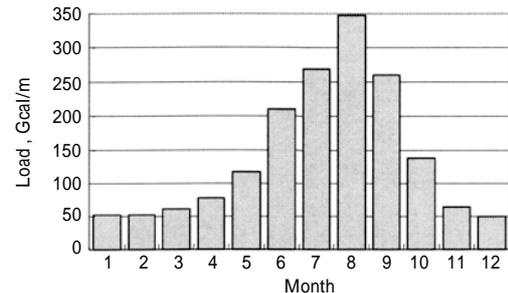


Fig.8 Air conditioning load pattern on respective months

非蓄熱,水蓄熱,氷蓄熱システムは、二次側空調機には冷水(行き5 / 戻り12 で熱密度29MJ/m<sup>3</sup>(7Mcal/m<sup>3</sup>))が供給されるとし、水和物スラリー蓄熱・輸送システムでは、熱密度59MJ/m<sup>3</sup>(14Mcal/m<sup>3</sup>)の水和物スラリーが供給されるとした。

蓄熱槽容量は、氷蓄熱システムでは、27760MJ(6630Mcal)(アイスオンコイル製氷方式, IPF=60%で蓄熱槽効率を0.80,熱損失は考慮せず)としたときの容積148m<sup>3</sup>であり、水蓄熱および水和物スラリー蓄熱においても同一の蓄熱槽容量とした。

蓄熱密度の違いによって、最大蓄熱量および蓄熱率( = 最大蓄熱量 / ピーク日負荷)は、それぞれ以下のようになる。

水蓄熱システム: 1377MJ( 829Mcal) (蓄熱率= 4%)

氷蓄熱システム: 27760MJ(6630Mcal) (蓄熱率=32%)

水和物スラリー蓄熱システム: 13880MJ(3315Mcal)

(蓄熱率=16%)

冷凍機のCOPは、定格値を使用し、夜間と昼間でそれぞれ昼間COP: 5.0,夜間COP: 5.3,氷蓄熱システムの昼間COP: 4.3,製氷時COP: 2.9を設定した。また、冷凍機の部分負荷運転効率を考慮した値を使用した。

非蓄熱システムおよび氷蓄熱システム(Fig.9)の二次側はクロズドシステム,水蓄熱システムおよび水和物スラリー蓄熱・輸送システム(Fig.10)では蓄熱槽で大気開放となるのでオープンシステムとした。

各システムで、負荷へ冷熱を搬送する二次ポンプの仕様は、負荷側システム,配管長などから実験で得られた水和

物スラリー、水溶液の圧力損失データをもとにして必要な揚程を計算し、Table 1 のように設定した。なお、二次ポンプは、変流量制御を採用している。

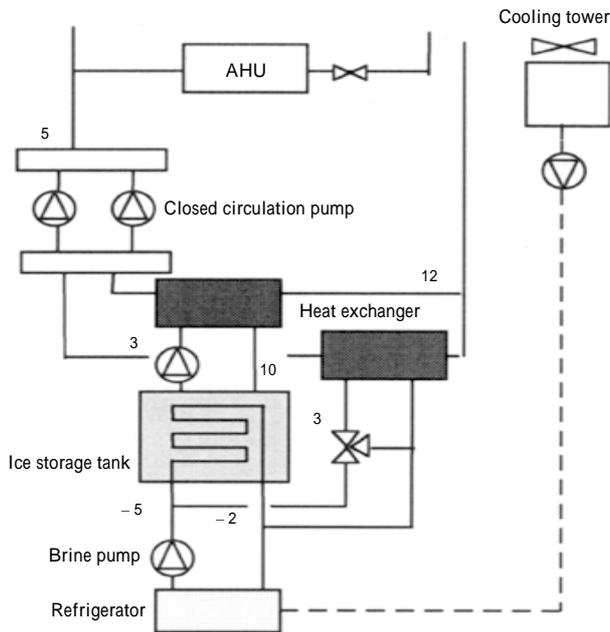


Fig.9 Flow of ice storage system

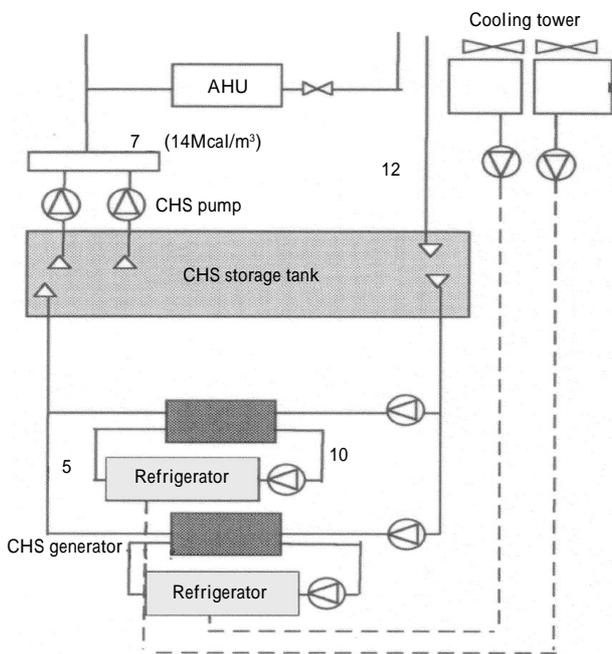


Fig.10 Flow of CHS storage system

Table 1 Specifications of pump on respective air conditioning system

	Piping system	Specifications	Electric power
		Flow rate x total head x number	
Non storage	Closed	121m³/h x 30m x 2	16.5kW x 2
Water storage	Open	121m³/h x 50m x 2	27.7kW x 2
Ice storage	Closed	121m³/h x 40m x 2	22.1kW x 2
CHS storage	Open	61m³/h x 30m x 2	8.3kW x 2

#### 4.2 試算結果

Fig.11に、各システムの年間冷房用の空調機ファン動力を除く電力消費量および消費電力のうち蓄熱に要した電力を示す。水和物スラリー-蓄熱空調システムの場合、搬送ポンプ動力が小さくなるために非蓄熱システムと比べて昼間の最大消費電力が23%低減しており、氷蓄熱システムと同様に負荷の平準化に寄与している。

非蓄熱システムに対して水和物蓄熱システムの消費電力が小さくなっているのは、熱密度の高い水和物スラリー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と、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である。また、氷蓄熱システムでは、蓄熱量が水和物蓄熱システムの2倍あり、かつ製氷時COPが低いため夜間蓄熱に消費する電力量が大きくなっている。

以上より、延床面積20000m²の業務ビルに水和物蓄熱空調システムを適用した場合、年間冷房用電力消費量(空調機ファン動力を除く冷凍機、冷却水ポンプ、冷却塔ファン、一次・二次ポンプの動力)は、従来の空調システムに比べて約53%に低減できる可能性があることがわかった。

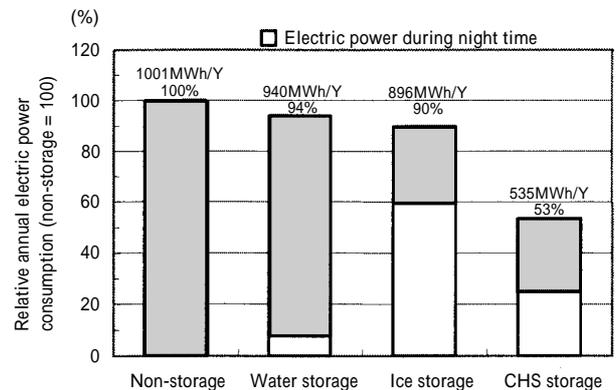


Fig.11 Relative annual electric power consumption on respective air conditioning systems

#### 5. おわりに

高密度で冷熱を蓄熱・輸送できる水和物スラリーは、従来の冷水と比べて冷熱搬送系のポンプ動力などで大幅な省エネルギーが期待できることがわかった。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冷熱供給量の増大への適用などが期待される。

水和物スラリーを適用した新しい省エネ型次世代空調システムは空調システムの搬送系動力の省エネルギーと電力の負荷平準化に大きく貢献するものと考えている。さらに、分散型熱電供給設備や各種工場の排熱を利用した冷熱供給システムなど熱効率向上技術やさまざまな冷熱需要システムにおける省エネルギー技術としての応用展開を図っていきたいと考えている。

なお、本研究開発は、旧通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として実施された「広域エネルギー利用ネットワークシステム研究開発」の1テーマとして新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) (財)省エネルギーセンターを通して行われたものである。

## 参 考 文 献

- 1) 高雄ほか.“非フロン液系水和物を用いた冷熱媒体の開発”. ECO INDUSTRY(1999). Vol.4, No.1, pp.11-19.
- 2) 福嶋ほか.“液系水和物を用いた高密度冷熱媒体”. NKK 技報. No.166, pp.65-70.
- 3) 生越ほか.“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, pp.20-22.
- 4) 生越ほか.“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. Vol.39, No.1, pp.40-45.

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 エネルギー研究部

Tel. 044 (322) 6036 高雄 信吾

stakao@lab.keihin.nkk.co.jp