



Title	水酸化物を蓄熱材とする深夜電力利用暖房機の性能評価
Author(s)	近久, 武美; Chikahisa, Takemi; 南里, 尚宏 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 175, 21-35
Issue Date	1995-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42461
Type	departmental bulletin paper
File Information	175_21-36.pdf



水酸化物を蓄熱材とする深夜電力利用暖房機の性能評価

近久武美 南里尚宏
沢田信之* 本間工士*

(平成7年6月30日受理)

Performance of Electric Heaters with Hydroxides as Heat Storage Medium

Takemi CHIKAHISA, Naohiro NANRI, Nobuyuki SAWADA, and Norio HONMA

(Received June 30, 1995)

Abstract

The overall efficiency of energy utilization would be improved if it was possible to balance the consumption of daytime and late-night electricity. Electric heaters with storage for heat generated using electricity tapped late at night is one promising method for flattening electricity demand. However, the heaters generally consist of brick as a heat storing substance, and its heavy weight is a major problem in practical applications. The present paper investigates and evaluates performance of heaters equipped with hydroxides as the heat storage medium. The estimate is made in a thermodynamic one-dimensional calculation of the system. The results show that the weight can be reduced to one fourth that of the conventional brick system by the use of calcium oxide, one of the most promising hydroxides for this system. The paper also indicates factors necessary to be considered in development of a hydroxide heater system.

1. ま え が き

エネルギーの総合的利用効率を高めていく上で、電力関係では深夜電力の利用を促進し、常時最適な発電効率でシステムを運転できるように負荷の平準化を図っていくことが必要である。深夜電力利用蓄熱式暖房機はそのひとつであり、ガス暖房機と価格的に競合できるレベルにあることから、集合住宅等で近年次第に普及しつつある。しかし、その課題として、重量が大きく移動が困難であること、比較的大型であること、数日間放置後の急速暖房が不可能であること等、改善が望まれる点はいくつかある。

そこで本研究は、水蒸気の水和により大きな発熱特性を示す酸化カルシウムや酸化マグネシウム等の水酸化物を対象とし、それらを蓄熱式暖房機に用いた際の熱的特性や問題点等について、検討を行おうとするものである。

2. 計算方法

図1に示すような系において、入口空気状態を室内温度ならびに湿度40%とし、その空気の一部が蓄熱材に流入して過熱された後、バイパスしてきた空気と混合されて、室内に供給されるものとした。この場合、室内に供給される空気のエンタルピーが所定の暖房熱量となるようにバイパス比が設定されようになっている。なお、蓄熱槽を通った空気の出口温度は蓄熱材温度と一致するものとした。この温度は、実際には蓄熱槽温度よりもかなり低くなると考えられるが、この影響はバイパス比の値が実際と多少異なることになるだけで、他の計算精度に影響を及ぼすことはない。

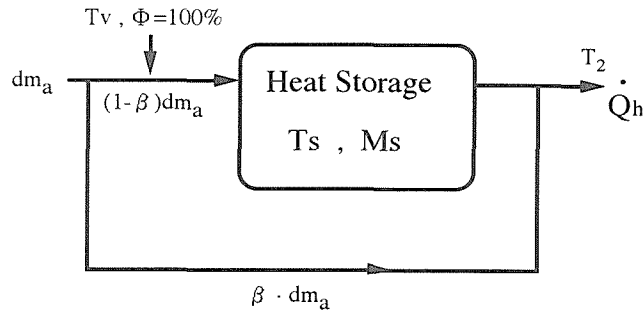


図1 計算に用いたシステム図

蓄熱槽内の温度や水水量は一樣であるとして計算をおこなった。今後、さらに詳細なシミュレーションを行う場合には、この部分を多次元モデルとし、槽内の熱伝導や物質拡散を解く必要があるものと考えられる。

蓄熱過程では、蓄熱槽内に電気ヒータからの熱を与える一方、夜間の暖房をまかなうのに必要な空気を流し、一部放熱を行うものとした。水酸化物の乾燥過程では高温の水蒸気が発生するので、これを夜間の暖房に用いることとした。ただし、暖房量に比べて発生水蒸気のエンタルピー量が上回る場合には、暖房過多となる。

水酸化物の水和反応過程では、蓄熱槽に流入する空気を相対湿度100%の湿り空気とし、その温度を種々設定して比較を行った。なお、この湿り空気は系の外部から供給されるものとし、その発生方法等については本研究とは別途検討するものとした。

室内の温度設定条件や外気条件は、図6に示すような暖房機カタログに例示された温度例を図7のように模式化して与えた。室内温度は5時から23時まで22度、それ以外は16度になるように設定した。この場合の必要暖房負荷は、室内からの放熱が室温と外気温の差に比例するものとし、電気ヒータ1kW当たりについて計算を行った。すなわち、部屋の放熱面積をA、熱通過率をU、室内外温度差を ΔT とすると、部屋からの放熱率は次式の通りとなる。

$$\frac{dQ}{dt} = AU \Delta T \quad (1)$$

したがって、これを24時間について積分すると1日当たりに必要な暖房熱量が計算され、これが6時間の蓄熱量(6kW・h)と概ね一致するように AU/\dot{Q} (面積×熱通過率/ヒータ加熱率)を以下のように設定した。

$$\frac{AU}{\dot{Q}} = \frac{1}{100} (K^{-1}) \quad (2)$$

この値から暖房床面積を概算することができ、断熱性の良い部屋では面積を大きくとれることになる。

ここで、蓄熱槽内の熱計算を詳述すると以下の通りである。

図2は、乾燥時の蓄熱槽内のエネルギーバランスを模式化したものである。図では蓄熱材の上方を空気通っているが、実際には空気は蓄熱材にまんべんなく接している。空気の入口状態は温度 T_1 、絶対湿度 x_1 、比エンタルピー h_1 とし、出口ではそれぞれ T_2 、 x_2 、 h_2 とした。

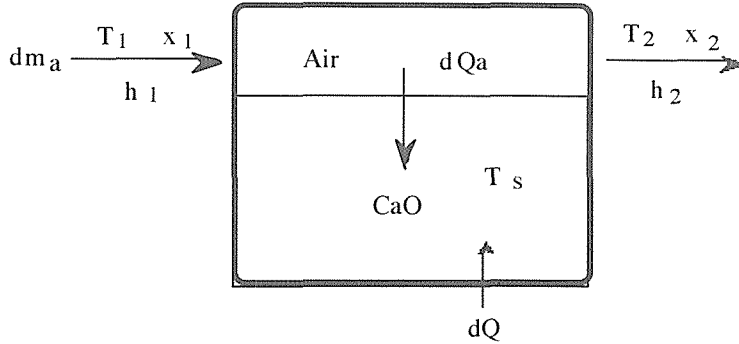


図2 蓄熱槽のエネルギーバランス

また空気流量を dm_a とし、一定に保った。蓄熱材は質量 m_s 、温度 T_s 、吸収水分量 dm_w とし、空気から蓄熱材に与える熱量を dQ_a とした。

微小時間における空気のエネルギー式は次の通りである。

$$du = dm_a(h_1 - h_2) - dQ_a - dm_w \cdot Hv \quad (3)$$

ただし、 Hv は水の蒸発潜熱である。

蓄熱槽内における空気の内部エネルギーは無視できる程度に小さいと考えられるので、

$$du = 0 \quad (4)$$

次に蓄熱槽に関するエネルギー式を考える。蓄熱槽は空気から微小時間に熱 dQ_a を与えられる。したがって内部エネルギーの変化は、

$$dU_s = dQ_a + dQ \quad (5)$$

と表される。蓄熱槽の内部エネルギー変化は反応熱を考え、以下の通りとなる。

$$dU_s = m_s c_s dT_s - H_a dm_w \quad (6)$$

ただし、 H_a は水酸化物の反応熱である。

一方、空気の比エンタルピーは次式で与えられる。

$$h = C_{pa}(T - T_0) + x[H_v + C_{pw}(T - T_0)] \quad (7)$$

C_{pa} : 乾き空気の定圧比熱

C_{pw} : 水蒸気の定圧比熱

T_0 : 基準温度

ここで、蓄熱槽を出るときの空気温度は蓄熱槽温度と等しくなると仮定すると、

$$T_2 = T_s \quad (8)$$

また、

$$x_2 = x_1 - dm_w / dm_a \quad (9)$$

なお、絶対湿度 x は、 T 、 ϕ (相対湿度) の関数となり、

$$x = \frac{0.622\phi \cdot p_s}{p_0 - \phi \cdot p_s} \quad (10)$$

と表せられる。ただし、本計算では飽和蒸気圧を以下のような近似式で与えた。

$$\begin{aligned} T < 373(K) \cdots p_s &= 1.1502 \times 10^5 \times 10^{\frac{-2253.6}{T}} \\ T > 373(K) \cdots p_s &= 0.42 \times 10^5 \times 10^{\frac{-2095.35}{T}} \\ T > 473(K) \cdots p_s &= 0.25 \times 10^5 \times 10^{\frac{-2020.11}{T}} \end{aligned} \quad (11)$$

以上の式を連立させると、未知数に対し式が1本不足することになる。そこで、先に説明したように脱水反応はこの平衡温度において、ヒータからの熱と水和反応熱ならびに水蒸気が持ち去るエンタルピーに関するエネルギー式を解き、蓄熱槽の温度が一定に保たれる分だけ脱水するものとした。一方、水和反応では出口状態が入り口の絶対湿度と同一な乾燥空気となって排出されるものとした。そして、水和熱により蓄熱槽の温度が水和設定温度よりも高くなった場合には入口空気を室内空気としてこまめに冷却し、こうした制御により水和過程では蓄熱槽が一定に保たれるようにした。なお、水和温度は通常の運転では脱水反応温度よりも低くなるのが普通であるので、今回の計算では平衡温度よりも50°C低くなるように設定した。

これらより、蓄熱槽内の温度変化を逐一計算することができる。

3. 計算結果および考察

3.1 水酸化物の水和・乾燥特性

図3は酸化カルシウムの水和反応における平衡曲線と、10mgの酸化カルシウムが所定の温度ならびに水蒸気分圧条件で水蒸気と完全に反応するのに要する時間とをプロットしたものである。図から水蒸気分圧が高いほど反応完了までに要する時間が低下しており、平衡温度よりも低い温度領域では水和時間にほとんど大差がないことがわかる。一方、平衡温度に近づくにつれて急激に反応時間が増大し、それを越えた温度になると逆に脱水反応に移行することになる。これらの結果から酸化カルシウムの水和反応は水の凝縮・沸騰現象と類似しており、平衡温度以下では水蒸気の供給量分だけ水和が生じ、逆に脱水は供給熱量に応じた分だけ平衡温度近傍で反応が生じると考えて良いことが示唆される。

この図における平衡曲線を脱水温度として用い、酸化カルシウムの水和反応特性について数値シミュレーションと実験結果との比較を行った。図4はその結果であり、水酸化カルシウムの水和率の時間変化を種々の供給水蒸気分圧について示した。ただし、実験条件として、10mgの酸化カルシウムに所定の分圧の水蒸気を含むヘリウムを、100°C大気圧状態で200cc/mim.の流量で試

料に供給した。図から実験と計算結果とは比較的良好に対応していることがわかる。また、水蒸気分圧による水和速度の差異も良くシミュレートされており、上述の計算方法が概ね適切であることが確認できる。

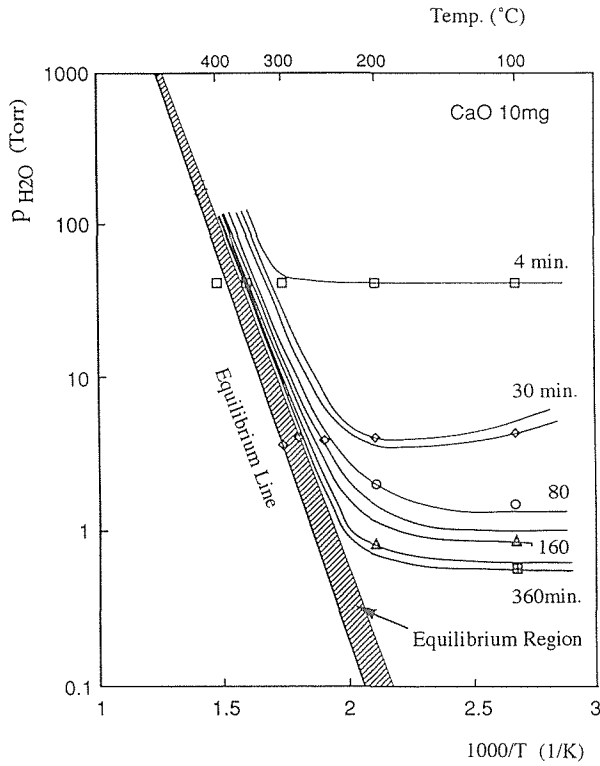


図3 水酸化カルシウムの平衡曲線と水和反応に要する時間曲線

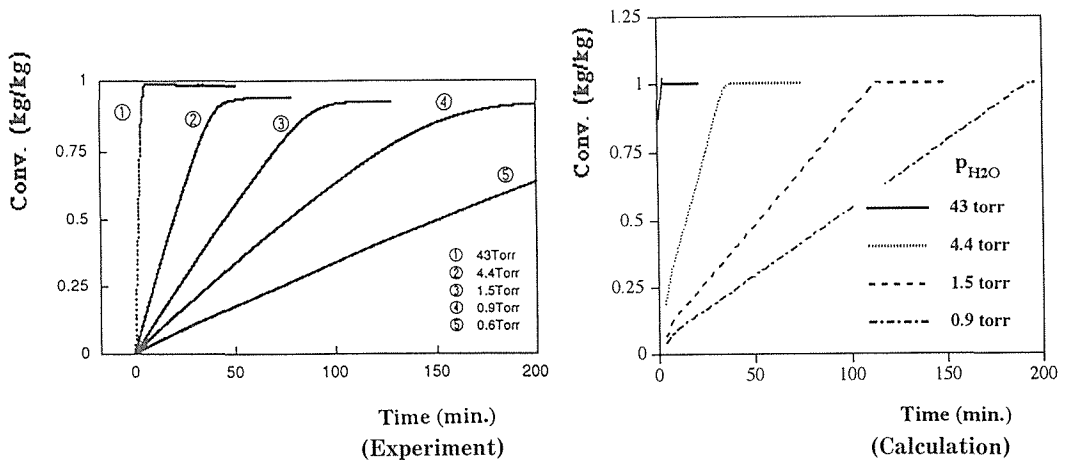


図4 酸化カルシウムの水和反応に関する実験値と計算値との比較

次に、乾燥特性に関して同様な比較を行った。図5は酸化カルシウム10mgを400°Cに保ち、乾燥空気を流した際の水和率の時間変化を示した結果である。ただし、計算では加熱熱量を3通りに与えた。計算ではほぼ直線的に乾燥が進んでいるのに対して、実験では滑らかな曲線状に変化しているのがわかる。これは計算では供給ヒータ熱量を一定としたのに対して、実験ではヒータ加熱量に変化しているために、図のような差異が生じたものと推定される。

以上、乾燥過程では実験結果と比較し多少の差異があったものの、本シミュレーションは水酸化物の水和・乾燥特性を比較的良好に表しているものと判断される。

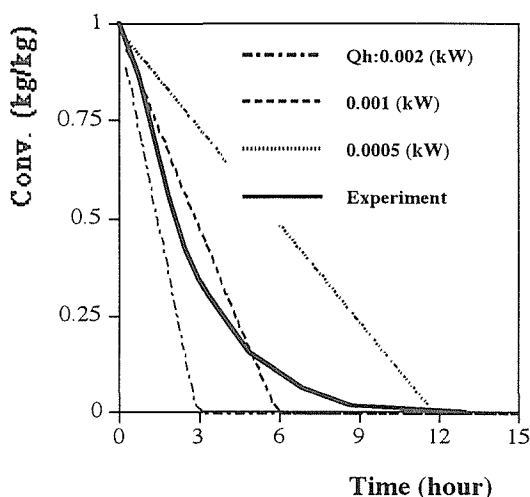


図5 水酸化カルシウムの脱水反応に関する実験値と計算値との比較

3.2 レンガ蓄熱システムの温度変化

図7はレンガを蓄熱材とした従来の蓄熱暖房機をシミュレートした結果であり、暖房負荷条件は図6の実測条件に概ね対応している。すなわち、図7に示されるようにスムーズ化された外気条件に対して、夜間は16°C、日中は22°Cに室温が維持されるように暖房機からの放熱が行われるようになっている。シミュレーション結果ではヒーターの通電に対応してレンガの温度が上昇し、通電の終了とともに放熱によりレンガの温度低下が開始している。この間のレンガの温度変化は実測値と非常に良く対応していることがわかる。これより、本計算方法は蓄熱システムのエネルギーバランス計算を概ね適切に表現しているものと言える。

一方、図7右図はヒータ1kW当たりのレンガ重量を種々変化させた際の蓄熱槽温度変化を示したものである。温度上昇幅はレンガ重量に概ね反比例しており、設計最高温度に対応したレンガ重量を設定すべきであることが明らかである。なお、これらの結果より、最高温度を約600°Cとするには、実機と同様に約38kg/kWとすべきであるといえる。

以上、本計算により実機を比較的良好にシミュレートできることが確認されたほか、レンガを用いる限り現状の重量とならざるを得ないことが示されたと言える。

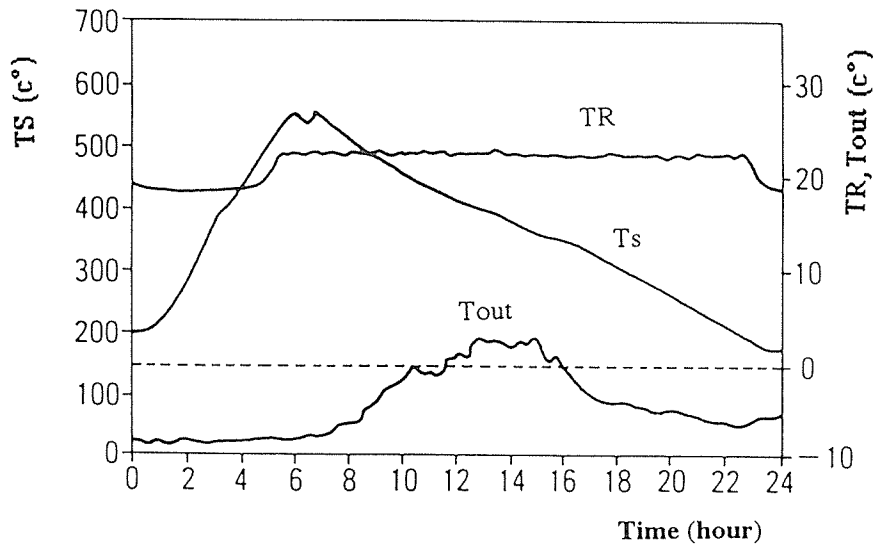


図6 レンガを用いた実際の蓄熱式暖房機の温度計測結果の一例

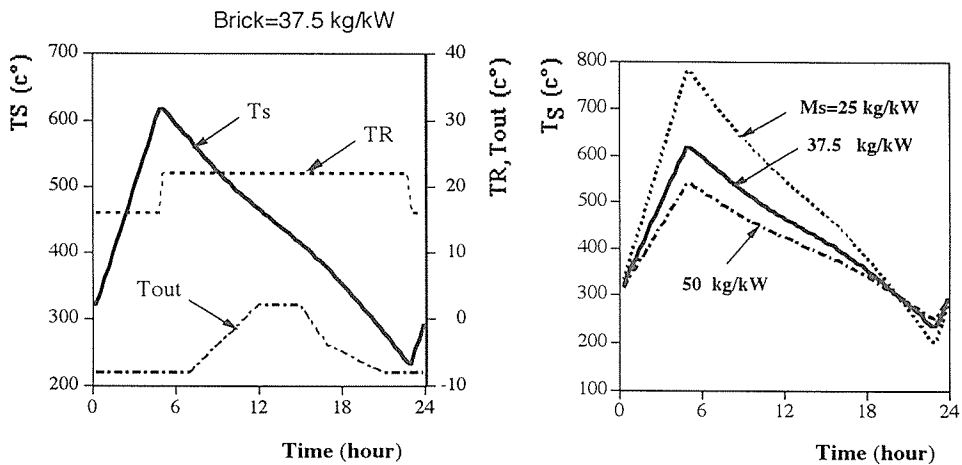


図7 レンガを用いた蓄熱暖房機の計算結果

3.3 酸化カルシウムを用いた蓄熱システムの温度変化

次に、前節と同一の負荷条件において、酸化カルシウムを蓄熱材とした際の計算を行った。図8はその結果であり、この場合の酸化カルシウム量は10kg/kWとなっている。図において、ヒータの通電とともに蓄熱材が急速に温度上昇するが、脱水温度に達すると脱水が完了するまで一定温度に保たれている。

通電が終了すると放熱モードとなり、飽和湿り空気が供給されて酸化カルシウムの発熱反応によって蓄熱槽温度が上昇する。この場合、水と平衡温度は脱水平衡温度よりも50°C低く設定されているが、図3に示すように供給水蒸気分圧が高くなると平衡温度も高くなるので、水和反応時の温度は脱水時よりも高い温度で一定となっている。この間、水蒸気供給量が多ければ発熱反応が過大となり蓄熱槽温度が設定温度を超えてしまうので、その場合にはこまめに飽和湿り空気と

室内空気とを交互に流すようにしている。そのため、図には蓄熱槽温度に小さなでこぼこが生じている。なお、この場合の湿り空気温度は 50°C とした。水和量には負荷に対応した変化が示されており、外気温が高い場合には水蒸気の水和反応が緩やかで、気温の低下とともに水蒸気供給量が増加しているのがわかる。

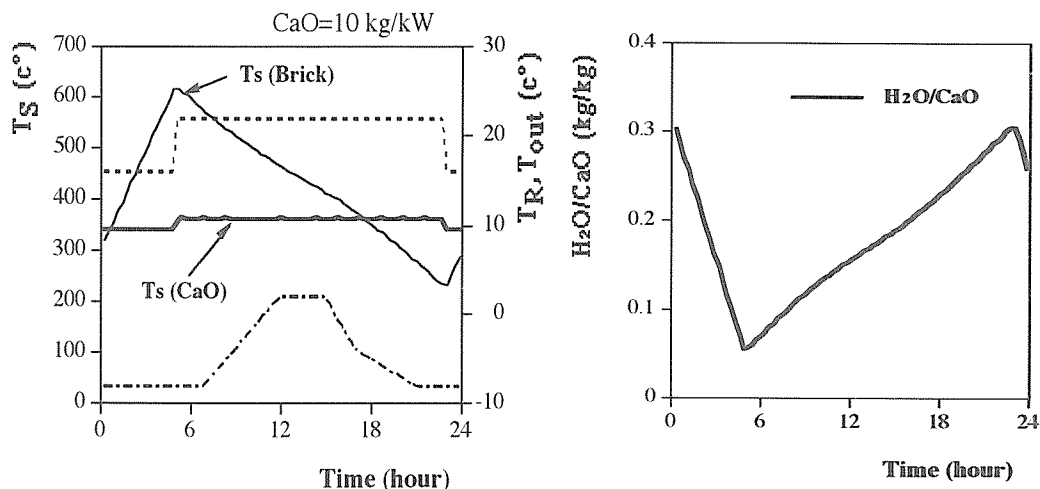


図8 酸化カルシウムを蓄熱材とした際の温度ならびに水和率の時間変化
(レンガ $37.5\text{kg}/\text{kW}$ に対する温度変化を比較としてプロットしている)

以上のように、水酸化物を蓄熱材とした場合には大部分が水蒸気の脱水・水和反応によっており、その間の蓄熱槽温度は概ね一定に保たれることがわかる。なお、湿り空気中の水蒸気発生に要する熱量は外部的に供給されており、この熱源の確保については別途検討しなければならない課題といえる。

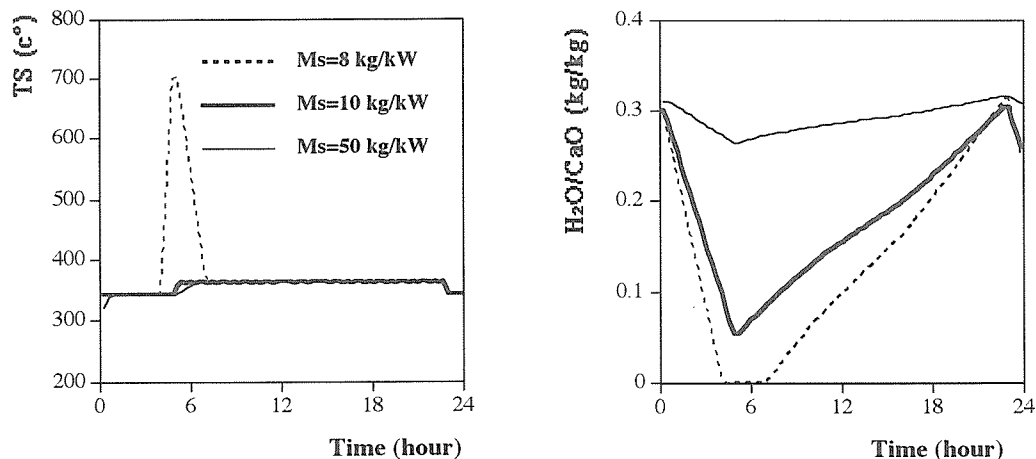


図9 酸化カルシウム量を変化させた場合の温度ならびに水和率の比較

一方、図9は酸化カルシウム量を変化させた際の蓄熱材温度変化ならびに水和率を示したもの

である。図から、酸化カルシウム量が多い場合には蓄熱期間中に乾燥を完了せず、その場合には蓄熱材重量にかかわらず蓄熱槽温度が脱水・水和温度に保たれることがわかる。ただし、蓄熱材重量が増すと顕熱による蓄熱分が増大し、通電中の蓄熱槽温度上昇が緩やかになっている。これに対し、蓄熱材重量が過小な場合には、乾燥や水和が完了した後で急速に温度変化することがわかる。したがって、蓄熱材を効率的に用いるためには、蓄熱期間中にほぼ脱水が終了する程度の蓄熱材重量とするのが良いと言える。酸化カルシウムではこの量は約10kg/kW程度であるといえる。

3.4 通電量期間中の余剰暖房熱

図10はヒータからの発生熱量と必要暖房熱量との差、すなわち余剰暖房熱量の時間経過を示したものである。図から、ヒータ通電時には多量の水蒸気が発生し、そのエンタルピーは0.2kW/kW、すなわちヒータ供給熱量の20%程度に当たる熱量分、必要暖房熱量を上回ることがわかる。また、蓄熱材重量を変えても脱水熱量が保有する暖房余剰熱量はほぼ同一となることがわかる。これは、水蒸気発生量は供給ヒータ熱量と暖房負荷とによって決まり、蓄熱材重量にはほとんど影響されないことによるものである。なお、図では蓄熱材量によって僅かな差異が見られるが、これは平衡温度に達するまでの時間的差異によるものである。

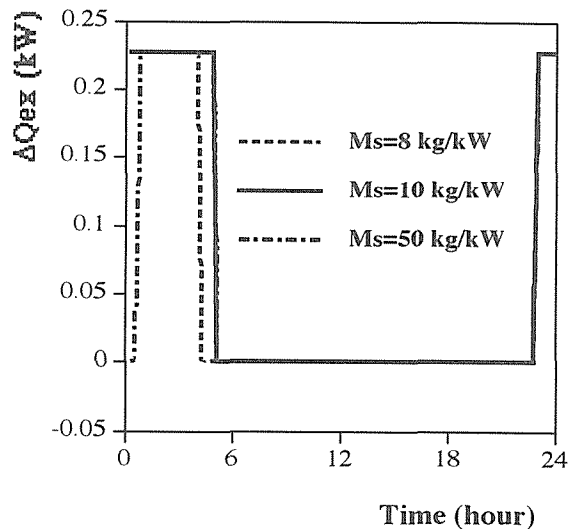


図10 余剰暖房熱量の時間経過

これに対し、図11はヒータ加熱量を変化させた際の余剰熱量を示したものである。すなわち、夜間の暖房負荷を一定とし、供給ヒータ熱量のみを1kWから徐々に低下させた。図において、供給ヒータ熱量が小さくなると発生水蒸気量が減少するので余剰熱量が低下することがわかる。ただし、その低下量は供給ヒータ熱量の減少量とは必ずしも一致しておらず、0.2kW/kWの余剰熱量をなくするには約0.5kWの加熱としなければならないことがわかる。ただし、その場合には必要熱量を蓄熱するために、蓄熱時間を約2倍にする必要がある。したがって、春や秋等の暖房熱量が比較的少ない時期には、短時間で乾燥をするよりも少ない通電量で時間をかけて加熱するのが良いといえる。

以上、蓄熱時に発生する余剰暖房熱量の有効利用が本システムのもう一つの課題と言える。

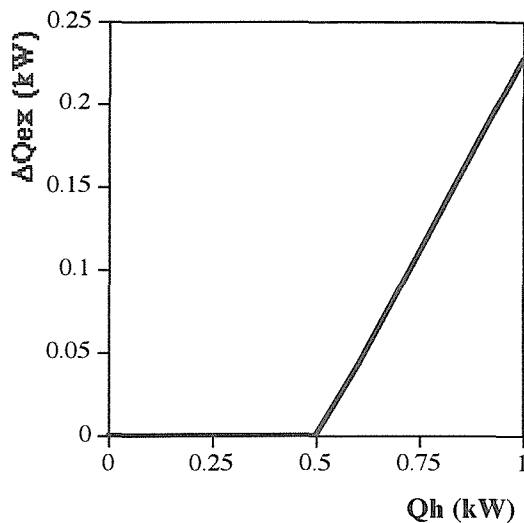


図11 ヒータ加熱量に対する余剰暖房熱（暖房負荷は先の1 kW に対する場合と同じ）

3.5 供給湿り空気状態と蓄熱槽温度特性

本節では水和反応過程における供給湿り空気状態と水和温度との関係について述べる。図12は相対湿度100%の湿り空気を供給した際の、空気温度に対する蓄熱槽の温度変化を示したものである。空気温度が高い場合には暖房熱量に比べて十分な量の水蒸気が供給されるので、水和反応による発熱が暖房需要を上回り、水蒸気の供給は断続的となる。そして、その場合の蓄熱材温度は水和反応設定温度に維持されることになる。しかし、徐々に空気温度を下げていくと水和反応が減少し、次第に蓄熱槽温度が低下する。蓄熱槽温度が低下すると、暖房熱量を確保するために蓄熱槽に送る空気量が増加し、最終的に設定温度よりも低い蓄熱槽温度で一定となる。

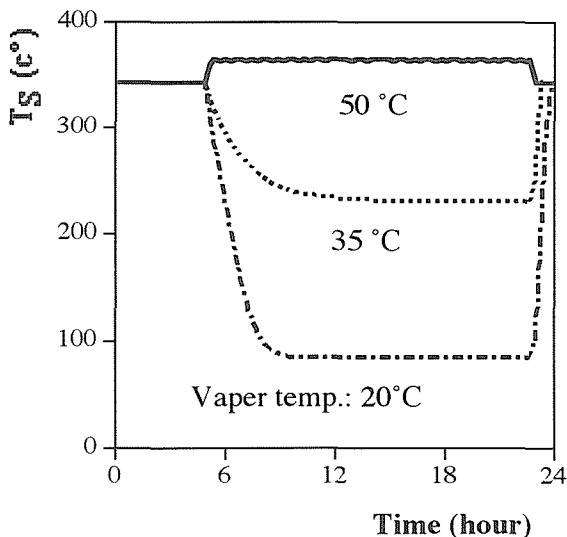


図12 水和反応時の供給空気温度に対する蓄熱槽温度変化（相対湿度100%）

図13は横軸に供給空気温度をとり、縦軸に温度が一定となった際の蓄熱槽温度をプロットした

ものである。図において上述の変化が明瞭に示されており、空気温度が40°C以上では蓄熱槽温度が供給水蒸気分圧に対応した設定水和反応温度になっている。これに対して、空気温度が低下すると蓄熱槽温度が急激に低下し、一方、供給空気のバイパス比が減少して多量の空気が蓄熱槽に送られることになる。そして、供給空気温度が20°C以下になると発生熱量が熱負荷を下回り、必要な暖房を行うことができなくなる。

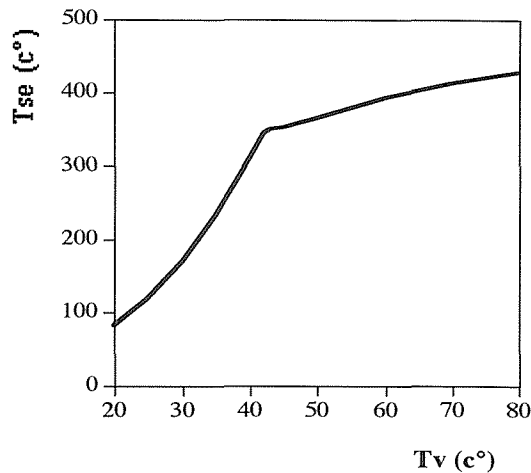


図13 水和反応時の供給空気温度に対する最終（平衡）蓄熱槽温度

以上より、相対湿度100%の湿り空気を供給する場合には、空気温度を最低約20°C以上とすることが十分な水蒸気量を確保する上で必要であると言える。

3.6 送風量と温風温度

送風空気量は前節までの計算結果に影響を及ぼさず、単にバイパス比が変わることによって暖房機から室内へ出る温風温度が変化するのみであると言える。本節では送風量による出口温度ならびにバイパス比の変化について示す。

図14は温風出口温度とバイパス比の時間変化を2種類の送風空気量に対して示したものである。バイパス空気は単に蓄熱槽からの空気温度を低下させるのみで、それ自体は暖房熱量を持たない。したがって、暖房負荷に見合っただけの空気が蓄熱槽に送られ、送風空気量を増すと希釈空気量のみが単純に増加し、温風温度が低下することになる。ただし、図において蓄熱期間中の温風温度パターンが他の時間におけるパターンと空気流量によって異なっているが、これは脱水反応期間中は温風中の絶対湿度が空気流量によって異なることによるものと考えられる。

以上より、目標温風温度を設定することにより、図14からおおよその送風量を決定することができ、それは蓄熱システムの性能に基本的な影響を及ぼさないとと言える。

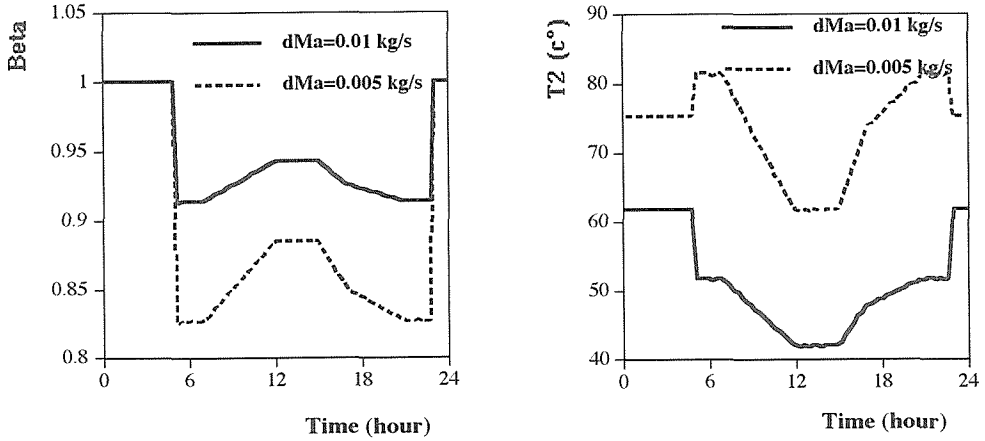


図14 送風空気量に対するバイパス比ならびに暖房機出口温風温度

3.7 水酸化物の物性とシステム特性

酸化カルシウムの特物性のうち、特にシステム性能に影響を及ぼすのは水和反応熱である。図15は酸化カルシウムの特水和反応熱のみを変化させた際の水和割合を示したものである。蓄熱槽の温度変化はこの過程で乾燥もしくは水和しきらない限り同一となるが、水和割合の変化は反応熱によって大きく異なっており、水和反応熱が大きくなるほど水和割合の変化が少なくなり、より少量の蓄熱材で同一の性能を発揮し得ることがわかる。

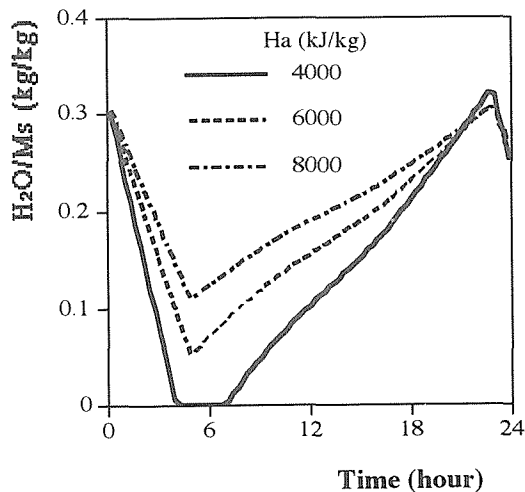


図15 水和反応熱を変化させた際の水和率の時間変化

一方、図16は蓄熱時に発生する余剰暖房熱量を水和反応熱に対して示したものである。ただし、図中の H_v は水蒸気の気化潜熱を表している。水和反応熱が増加するにつれて余剰発生熱量が減少するが、その減少量は直線的ではないことがわかる。また、水和熱が増加すると日中の水和過程

で必要となる水蒸気量も減少するので、システムとして極めて有利となる。さらに、水和熱が水の気化潜熱に比べて大きい場合には、水和熱の一部を用いて自己システム内で水から水蒸気を発生することも可能となる。

以上より、水酸化物の水和反応を蓄熱に用いる場合、水和反応熱のできるだけ大きな物質を選定することが肝要であると結論づけられる。

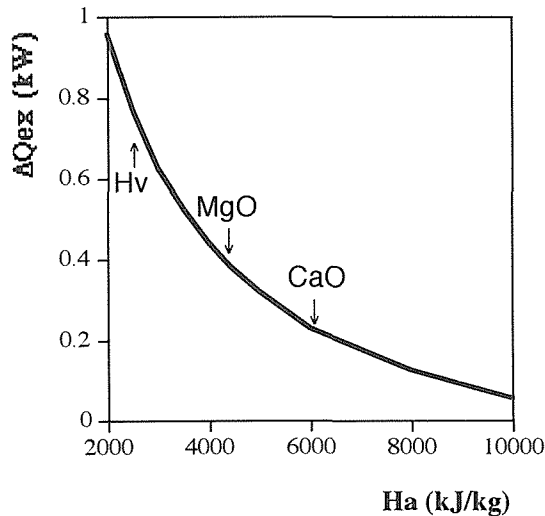


図16 水和反応熱を変化させた場合の余剰暖房熱量

3.8 酸化マグネシウムを用いた際の蓄熱システム特性

本節では酸化マグネシウムを蓄熱材に用いた際の特性について解析を行った。図17は酸化マグネシウムと酸化カルシウムとの温度ならびに水和率の変化を比較したものである。図から、酸化カルシウムは平衡温度が酸化カルシウムよりも低いので、低い温度で蓄熱層が一定温度となっていることがわかる。なお、酸化カルシウムと酸化マグネシウムでは水和過程の温度パターンが異なっているが、これは図3に対応した酸化マグネシウムの平衡曲線が不明だったため、平衡温度を水蒸気分圧にかかわらず一定としたことによるものである。

一方、水和量の変化は酸化マグネシウムの方が水和熱が小さいので、同一の重量でもより大きくなっている。しかし、酸化マグネシウムのほうが最大水和量が大きいので、酸化カルシウムとほぼ同量の蓄熱材重量で充分であることがわかる。

図18は蓄熱時の余剰暖房熱量を蓄熱材重量に対してプロットしたものである。これより、酸化マグネシウムの方が水和反応熱が小さい分、より多くの余剰暖房熱量が夜間に発生することがわかる。

以上、酸化マグネシウムは余剰暖房熱量が大きい分、酸化カルシウムよりも不利であると言える。

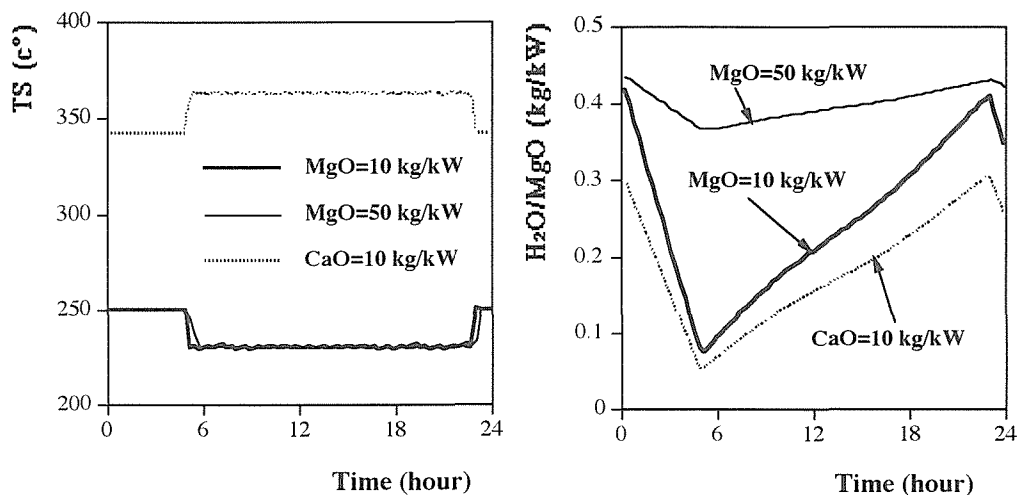


図17 酸化マグネシウムを用いた際の温度ならびに水和量の時間変化（酸化カルシウムを比較としてプロット）

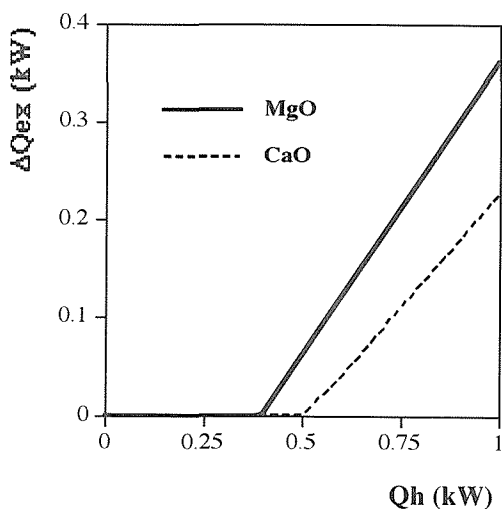


図18 酸化マグネシウムと酸化カルシウムをそれぞれ用いた際の、ヒータ加熱量に対する蓄熱時の余剰暖房熱量の比較

4. ま と め

以上、本研究により、水酸化物を蓄熱材とした際のシミュレーションプログラムを作成することができ、その結果、以下のことを明らかにすることができた。

- 1) 酸化カルシウムを蓄熱材とすることによって、蓄熱材重量をレンガによる場合の約四分の一にすることが可能である。
- 2) 放熱中の蓄熱槽温度はほぼ一定であり、制御が容易であるとともに快適な暖房が可能である。

- 3) 蓄熱材を充分脱水させておくことにより、長期不使用後も通常時と同様な暖房が可能である。
- 4) 深夜蓄熱中に余剰の暖房熱量が水蒸気の形で発生するので、この有効利用が課題である。
- 5) 水和反応時に、20°C以上の湿り空気を供給する必要があり、水蒸気発生に必要な熱源の確保が課題である。
- 6) 蓄熱材として適した水酸化物は、水和反応熱の大きな物質であり、酸化マグネシウムよりも酸化カルシウムの方がより適した熱物性を有していると言える。