

氷蓄熱式ヒートポンプユニットの研究開発と実証（その2）

— 冷・暖房期の実用試験評価 —

川島 実 (技術研究所)	若王子 高広 (設計本部)
五十嵐 征四郎 (設計本部)	郷 正明 (設計本部)
竹林 芳久 (設計本部)	中辻 哲也 (設計本部)

§ 1. はじめに

前報では、開発方針の検討から試作機の性能試験までを報告した。具体的には、まず一般的な事務所建築の空調負荷パターン例を検討することによって、冷房時の予測負荷制御^{注1)}と暖房時のカスケード運転^{注2)}の必要性を明らかにした。次に、目標とした氷充填率^{注3)}50%を達成するため、カットモデルによる製氷実験とそのシミュレーションプログラムの作成を行なって槽内コイル量を決定し、最後に製作した試作機の性能試験を行ない、本ユニットが当初の設計性能を十分満足していることを報告した。

本報では、ユニットを実際の事務所に設置し、実用運転時の性能を約1年半にわたり調査した結果について述べる。特に、冷房時の予測負荷制御と暖房時のカスケード運転については詳しく解析し、その有効性について述べる。また、最後に経済性についても報告する。

§ 2. ユニットの特徴

本ユニットは、前報でも述べたようにスタティック型の氷蓄熱^{注4)}ユニットであり、冷房期には槽内銅パイプ表面に製氷し、暖房期には約50℃の温水を蓄えることができる。写真—1に外観を示す。主な特徴は以下の3点である。

(1)スタティック型の中では、限界に近い50%という高

注) 1: いまの時点より先の空調負荷を予測して適切な制御を行なう方法。詳細については後述する。

2: 蓄熱温水を温度レベルに応じて段階的に使う方法。詳細については後述する。

3: 槽内の水重量に対する氷重量の割合。IPF (Ice Packing Factor) ともいう。

4: 蓄熱槽の内部に冷却コイルを設置し、その周囲に氷を成長させるタイプの氷蓄熱方式。

い氷充填率を実現している。これにより、槽容積は従来の冷水蓄熱槽に比べて約1/9となっている。

(2)制御用にパソコンを組み込み、全自動による運転を可能としているが、特に冷房期には新たに開発を進めてきた“修正予測負荷制御”のアルゴリズムを採用し、最適運転制御を実現している。

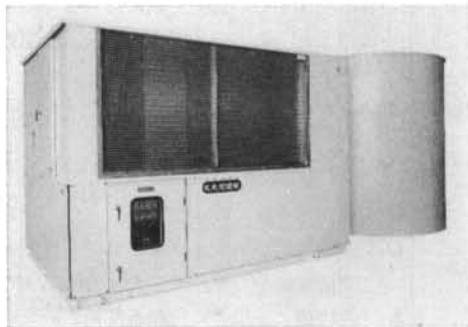
(3)暖房時には、蓄熱温水をカスケード利用することで暖房用蓄熱量を大量に確保し、かつ負荷パターンに合致した高出力を出すことができる。

§ 3. 予測負荷制御について

3.1 予測負荷制御の必要性

予測負荷制御とは、いまの時点より先の空調負荷を予測し、エネルギー管理の面から最適な運転を実現しようとする制御法をいう。空調を行なう際には、室内環境を要求どおりに維持するよう制御することはいうまでもないが、運転に必要なエネルギーやコストを最小に抑えることも重要である。

本ユニットのように、熱源と氷蓄熱槽を組み合わせた空調方式では以下のような特徴があるため、従来のように温度だけ（例えば、1次・2次側送水温度等）の制御では望ましい運転を実現することはできない。



写真—1 ユニット外観

(1)蓄熱式であるため、非蓄熱式としたときより熱源容量を小さくすることが可能であるが、このことは大負荷時に蓄熱されたエネルギーと熱源からのエネルギーとの併用運転が必要で、ピーク負荷に備えて蓄熱側のエネルギー取り出しを制限する必要がある。

(2)槽の性能として、蓄熱された総熱量には限界があると同時に、単位時間当たりの最大取り出し熱量は残存蓄熱量が減れば同様に減る傾向にある。また、特に氷充填率の高い氷蓄熱では氷が無くなった後の槽からの取り出し熱量は急激に低下するため、制御を間違えると能力不足は深刻な状況となる。

(3)空調終了時に氷を残すことは、深夜電力へのシフト率低下と槽からの放熱損失増加を招く。

(4)スタティック型氷蓄熱の場合、槽内の一部だけ氷が融け残った状態で製氷を繰り返すと、その部分の氷が団子状になり融解が進みにくくなる（これをブリッジングという）。

これらの特徴を考慮したうえで、

①小さな容量の熱源と氷蓄熱槽をうまく使い、一日の総負荷を賄うと同時にピーク負荷にも十分対応する、

②深夜電力で作った氷を空調終了時には使い果たす、という技術的に高度な空調を行なうためには、エネルギー管理の観点から運転制御する予測負荷制御が必要となる。

3.2 修正予測負荷制御の方法

実際の制御方法は、空調開始から30分毎に「残存蓄熱量」と「空調終了時までの予測負荷総量」を比較し、その時点での熱源運転モードを決定することになる。残存蓄熱量は浮力感知の水量センサ値から演算して求める。予測負荷は、空調設計時に求めた負荷プロフィールから各時刻の補正係数として演算しておき、その値をインプットしてある。しかし、負荷プロフィールは外気条件等により一日毎に変化するため、ステップが進むたびに予測負荷をその日の現在までの負荷実績に合わせて修正してゆく方法を採用した。そこで、本方式を修正予測負荷制御と呼ぶこととした。

運転モードの決定には以下の式を使用した。

$$F(t) = Q_L - \frac{Q_c}{t} \times K_t \times t_L \times \alpha \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 Q_L : 残存蓄熱量 (Kcal)

Q_c : 空調開始から現在までの負荷 (Kcal)

t : 空調開始から現在までの経過時間 (h)

K_t : 各時刻に使用する予測負荷補正係数(-)

t_L : 空調停止時までの残り時間 (h)

α : 空調負荷の全体補正係数

そして、 $F(t) > 0$ の場合、コンプレッサを停止し槽単独運転とする。しかし、 $F(t) \leq 0$ の場合は槽・熱源併用運転とする。実際には、空調開始時と同時に槽・熱源併用運転が始まり、毎回の判定により熱源を停止する最適時刻を決定することとなる。

以上の内容は空調時の制御方法であるが、予測負荷制御としては前の晩に次の日の負荷総量を予測し、製水量を制御する蓄熱側の制御も考えられる。しかし、この方法は予測が誤った場合危険険になること、またもともと最大蓄熱量は設計最大日負荷の半分程度と小さいことなどから採用せず、常に満杯まで製氷する方式とした。

§ 4. カスケード運転について

カスケード運転とは、深夜蓄熱した温水を温度レベルによって段階的に使って暖房するものである。具体的には、朝までに約50℃の蓄熱を行ない、暖房スタート時には槽内水を直接空調機に送って暖房を行なう（直接暖房運転）。槽内水温約40℃から10℃まではヒートポンプが水熱源として作動し、熱を汲み出す（水熱源運転）。槽内

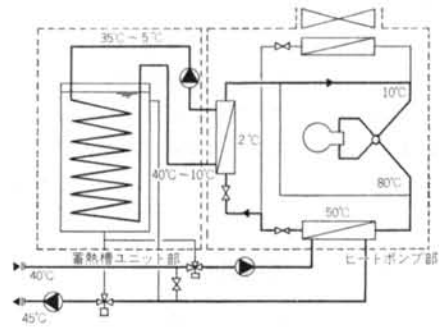


図-1 水熱源運モード模式図

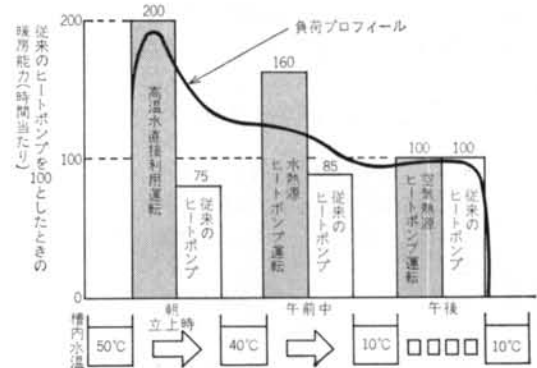


図-2 カスケード運転方式の暖房能力

水温 10°C 以下では蓄熱槽を切り離し、通常の空気熱源ヒートポンプとして運転する(空気熱源運転)。実際には、これらの運転モードがマイコン制御で自動的に変化する。このカスケード運転方式は他の氷蓄熱ユニットでは見られない特徴であるが、それを可能としている水熱源運転状況の模式図を図-1に示す。

図-2にあるように、通常非蓄熱型空気熱源ヒートポンプは外気温の低い朝方には出力が小さくなる傾向にあるが、本ユニットの直接暖房運転時には槽内の高温水が2次側に送れるため昼間の空気熱源時の約2倍、水熱源運転時には約1.6倍の出力を持つことになる。また、一般的に間欠空調している事務所建築では朝までに躯体が冷えきっているため、負荷プロフィールは図-2に示すようになる。このため、小さな熱源容量でも午前中は大きな出力可能という性能が望ましい。熱容量的な意味からは、カスケード運転時の槽内水利用温度差は約 40°C であり、一般的な 5°C 差利用の蓄熱槽に比べて約8倍の蓄熱量を持っていることになる。

§ 5. 実証試験結果

5.1 設置ビル概要

本ユニット1号機を、当社第六別館(設計本部)屋上に設置した。写真-2にビルの外観を、図-3に空調システム図を示す。当ビルは建築面積 240m^2 、延床面積 $1,858\text{m}^2$ 、空調面積 $1,360\text{m}^2$ 、8階建の事務所ビルである。

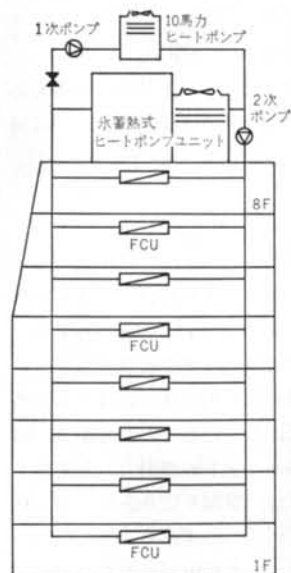


図-3 空調システム図



写真-2 設置ビル外観

本ユニット(圧縮機 22kW 、氷蓄熱槽 7m^3 、呼称 30 馬力)の他に、補助として 10 馬力の空気熱源ヒートポンプが設置されている。総契約電力 120kW のうち、約 30kW が深夜電力契約となっている。

5.2 実測概要

計測期間は、竣工後の 1986 年 9 月から 1988 年 5 月まで行なった。測定にはパソコンとデータロガーを使い、各部温湿度(配管内温度を含む)・電力量・流量・接点信号等、合計 50 点を 1 分間隔で収集し、グラフ出力・エネルギー解析等をシステム化して行なった。

5.3 冷房期間の運転結果

5.3.1 室温挙動と暖房負荷

冷房期の運転実績として、 1987 年 6 月 16 日～ 9 月 17 日までのデータを使用する。図-4は全空調日の外気温、4階室温挙動を示す。外気温の変動にもかかわらず、空調時間帯(8時～22時まで)の室温は約 26°C 一定に維持されており、精度の高い制御が行なわれていたことを示している。図-5に全空調日の冷房負荷を重ねて示す。負荷は、流量と2次側出入口温度差から演算した。当ビルは東面に日射のあたる窓を持っているため、一般的なビルに比べて午前中の負荷が大きい傾向にある。

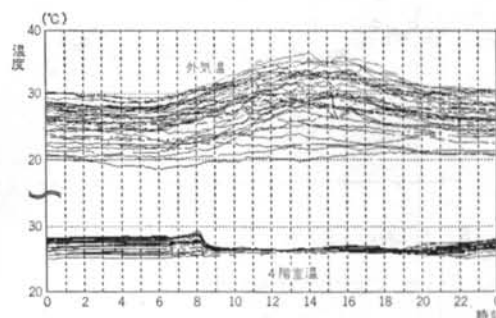


図-4 全空調日(7月～9月)の外気温と室温挙動

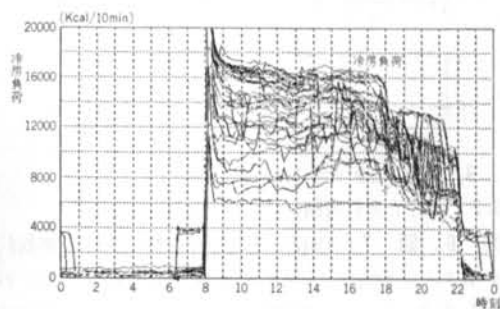


図-5 全空調日(7月～9月)の冷房負荷

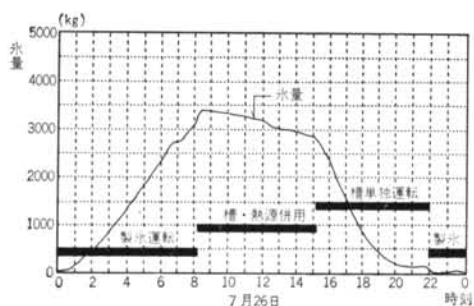


図-6 運転モードと氷量

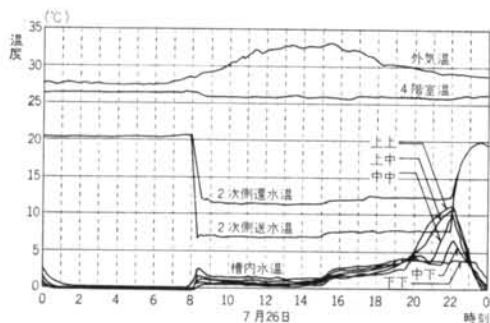


図-7 外気温・室温・送水温・槽内水温の挙動

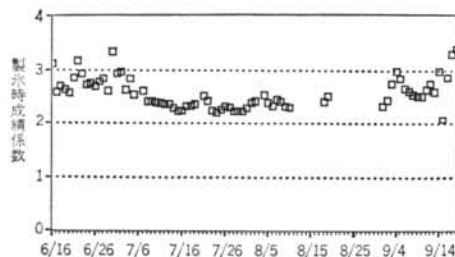


図-8 製氷時の成績係数

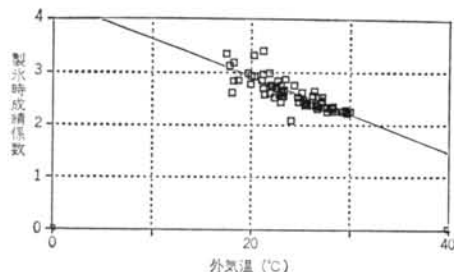


図-9 外気温と製氷時成績係数の関係

5.3.2 修正予測負荷制御による運転状況

図-6, 図-7に1987年7月26日を例にとって運転状況を示す。朝8時まで約3,500kg(氷充填率50%)の製氷を達成している。空調開始とともに槽・熱源併用運転となり、槽からの冷熱取り出しが制限されている。15

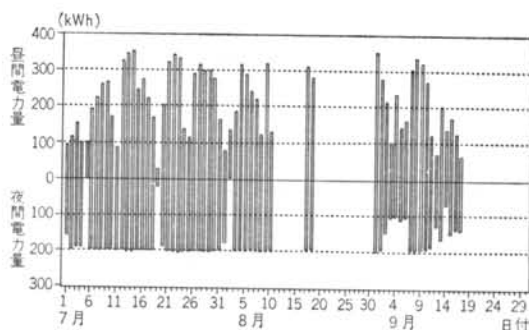


図-10 夏季の昼夜別電力消費量

時には空調終了時刻(22時)まで槽単独運転で冷房可能なものと判断し、熱源が停止している。すると、これ以降は残存氷量が急に減少し始めるが、室温は26°C一定に保たれ、かつ空調終了時に氷を使いきっている。このことから、当初の狙いどおり修正予測負荷制御が適切に機能していることが分かる。

5.3.3 製氷時の成績係数

氷蓄熱時の運転では通常のヒートポンプより蒸発器側温度が低いため、成績係数(Coefficient of Performance, COPともいう)の低下が懸念される。ここでは、一晩毎の製氷量と圧縮機消費電力量から求めたCOPを図-8に示す。7月後半の猛暑時に最低の2.2程度となったが、期間平均で2.51であった。図-9に夜間平均外気温とCOPの関係を示す。回帰直線は $COP=4.33-0.072t$ (t は外気温, 相関係数0.833)となった。東京での夜間平均外気温は22°C程度と考えられるので、この場合平均COPは約2.7程度が期待できる。

5.3.4 冷房期の深夜電力へのシフト率

図-10に昼夜別電力使用量を示す。8月には欠測もあったが、期間中昼間総電力量13.02MWhであったのに対し夜間10.37MWhであり、シフト率は45.2%となった。

5.4 暖房期間の運転結果

5.4.1 室温挙動と暖房負荷

暖房期の運転実績として1987年1月17日から3月30日までのデータを使用する。図-11は全空調日の外気温、4階室温挙動を示す。空調時間内は確実に設定温度24°Cを維持している。また、朝の立ち上がりにはほとんどの日で1時間以内に設定値に達していることが分かる。図-12に全暖房日の負荷(本ユニットの熱出力)を重ねて示す。夜間に負荷のある日は、空調を切り忘れて帰ったフロアのあることを示している。いずれの日も午前中の暖房負荷は午後よりも大きく、事務所ビルの典型的な負荷プロファイルとなっている。

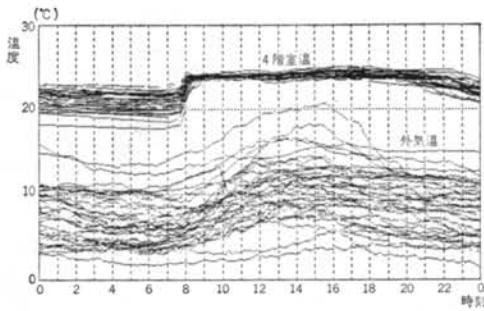


図-11 全空調日(2,3月)の外気温と室温挙動

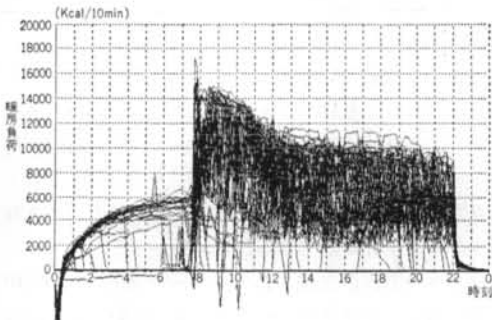


図-12 全空調日(2,3月)の暖房負荷

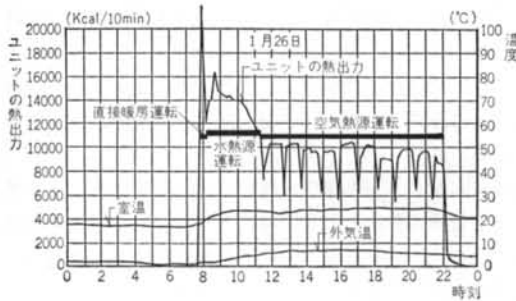


図-13 ユニットの熱出力と室温挙動

5.4.2 カスケード運転による運転状況

図-13に、1987年1月26日を例として暖房運転状況を示す。立ち上がり時の直接暖房、午前中の水熱源運転、午後の空気熱源運転とモードが変化している様子が分かる。厳寒期の直接暖房は30分から1時間で終了するが、このときの出力は空気熱源時の約2倍である。また、水熱源運転では空気熱源時の1.6倍程度の出力があり、午前中の負荷を十分賄っていることが確認できる。

5.4.3 カスケード運転時の成績係数

カスケード運転では暖房するときに2回のヒートポンプサイクルを使うため、成績係数だけを考えて場合不利と考えられがちである。そこで、実際のデータを使い、式(2)～式(4)に示す3種類の成績係数を1日毎に求めた。

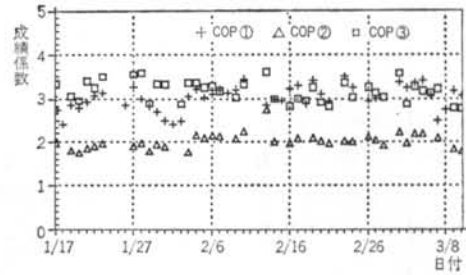


図-14 空気熱源およびカスケード運転時のCOP

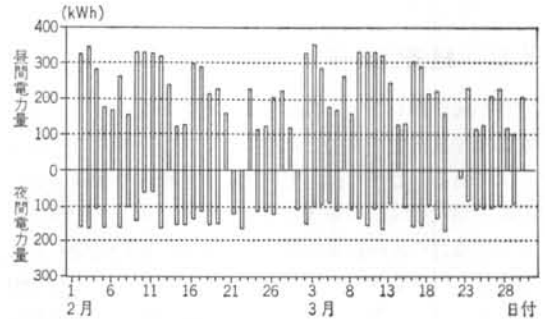


図-15 冬季の昼夜別電力消費量

$$\text{COP } \textcircled{1} = \frac{Q_a}{E_a \times 860} \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{COP } \textcircled{2} = \frac{Q_a + Q_w}{(E_s + E_w) \times 860} \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{COP } \textcircled{3} = \frac{Q_a + Q_w}{(E_s \times K + E_w) \times 860} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 Q : 本ユニットの熱出力 (Kcal)

E : 圧縮機消費電力量 (KWh)

K : 深夜電力料金の昼間料金に対する割合
(業務用蓄熱調整契約の冬季従量料金の場合=0.3239)

a : 空気熱源暖房運転時を示す

d : 直接暖房運転時を示す

w : 水熱源暖房運転時を示す

s : 蓄熱運転時を示す

図-14にその結果を示す。COP ①は外気温の高めな午後に空気熱源で運転した値、COP ②はカスケード運転時の値、COP ③は深夜電力の価格比率(昼間の0.3239倍)を加味したカスケード運転時の実質的な値である。期間平均値のCOP ①が3.02に対してCOP ③が3.17となった。蓄熱槽を持たずに朝の立ち上がり時から空気熱源運転を行なった場合、外気温が低い場合COP ①はさらに低くなることは確実である。したがって、非蓄熱に比べてコスト的にはカスケード運転の方が有利であることが分かった。しかし、COPの値はヒートポンプの性能

を評価する一つの指標に過ぎず、最も大きなカスケード運転のメリットは小さな熱源容量で大きな負荷に対応できる点にある。

5.4.4 暖房期の深夜電力へのシフト率

図-15に暖房期の昼夜別電力使用量を示す。深夜電力には若干の残業時暖房分が含まれるが、昼間12.27MWhに対して深夜5.78MWhであり、シフト率32.0%となった。

§ 6. 経済性評価

蓄熱式空調システムを採用することの大きな目的は、安価な深夜電力を有効に利用してコストメリットを出すことにある。ここでは、実証データを使って本ユニットと非蓄熱式のユニット（空気熱源ヒートポンプチャラー）とした場合の比較結果を表-1に示す。比較対象としたユニットは、本ユニットの熱出力と同等のものとして60馬力のものとした。本ユニットの従量料金は実測電力量から求めたが、対象ユニットでは昼間外気温から予想される成績係数を求め、その値と実測負荷から消費電力量を算出し、コストに換算した。その結果、本計測例では年間のランニングコストは非蓄熱式に比べて81.7万円安くなることが分かった。

§ 7. まとめ

約一年半にわたる実用試験の結果から、以下のことが分かった。

- (1)実用時においても設計どおり50%という高い氷充填

	本 ユ ニ ッ ト	空気熱源ヒートポンプチャラー
基本料金	30KW ¥ 1,638/KW・月 59.0万円	60KW ¥ 1,638/KW・月 117.9万円
従量	昼 21,811KWh 41.6万円	37,942KWh 72.2万円
	夜 21,293KWh 11.9万円	
料金	昼 26,675KWh 46.2万円	33,215KWh 57.5万円
	夜 12,874KWh 7.2万円	
合計	165.9万円	247.6万円

表-1 運転コスト計算

率を確実に達成していることが分かった。

(2)実用の負荷でも修正予測負荷制御が狙いどおり適切に機能し、空調終了時にちょうど氷を使いきる運転を実現していることが分かった。

(3)カスケード運転をすることにより、午前中の大きな暖房負荷にも十分対応できることが分かった。

(4)コストの影響を加味したカスケード運転時の COP は、若干ながら空気熱源ヒートポンプの COP を上回ることが分かった。

今回の実用試験によって、本ユニットは当初の開発目標であった項目を十分満足したものであることを確認することができた。1988年12月現在、本ユニットの実績台数は20台を越え、40、50馬力のユニットも商品化を進めている。

謝辞 本ユニットの開発は株式会社東洋製作所、住友軽金属工業株式会社との共同開発として進めてきたものであり、多くの方々の協力を得ました。記して、感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 掛谷, 川島, 他: “氷蓄熱システムの基礎的実験とシミュレーション” 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 (1983年10月)
- 2) 井出, 今別府, 川島: “電力館の設備” 空気調和・衛生工学 第60巻, 第4号 (1986年)
- 3) 川島, 竹林, 他: “氷蓄熱式ヒートポンプユニットの開発, (その1)~(その3)” 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 (1986年10月)
- 4) 川島, 竹林: “中小ビル用氷蓄熱システムに関する研究, (その1)~(その2)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1986年8月)
- 5) 川島: “氷蓄熱式ヒートポンプユニットの開発と検証” '86新テクノロジーシンポジウムテキスト, PART4 (1986年)
- 6) 五十嵐, 郷: “氷蓄熱冷暖房ユニットの実例と普及” 空気調和と冷凍 Vol.28, No.11 (1988年)
- 7) 五十嵐, 中辻: “氷蓄熱式冷暖房ユニット「ストレージマスター」” BE 建築設備 (1989年1月)