

## CO2ヒートポンプによる生乳冷却システムのエネルギー削減

誌名	農業施設
ISSN	03888517
著者	石田, 三佳 中久保, 亮 大竹, 雅久 藤井, 敏造 向山, 洋 野中, 和久 池口, 厚男 長谷川, 三喜
巻/号	42巻4号
掲載ページ	p. 24-33
発行年月	2012年3月

CO<sub>2</sub> ヒートポンプによる生乳冷却システムのエネルギー削減<sup>\*1</sup>

石田三佳<sup>\*2</sup>・中久保亮<sup>\*2</sup>・大竹雅久<sup>\*3</sup>・藤井敏造<sup>\*3</sup>・  
向山 洋<sup>\*3</sup>・野中和久<sup>\*4</sup>・池口厚男<sup>\*2</sup>・長谷川三喜<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 2010 年度農業施設学会大会, 2011 年度農業施設学会大会にて一部発表

<sup>\*2</sup> (独) 農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所, 〒305-0901 つくば市

<sup>\*3</sup> (株)三洋電機, 〒370-0596 邑楽郡大泉町

<sup>\*4</sup> (独) 農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究, 〒329-2793 那須塩原市

## 要 旨

自然冷媒である CO<sub>2</sub> をヒートポンプに使用したアイスビルダによる生乳用のプレクーリングシステムを開発し, エネルギー収支, 熱効率等を明らかにするため実証試験を行った。開発したシステムは, アイスビルダで氷生成すると同時に廃熱を回収して約 85℃の温水を生成できる。温水はミルクラインやバルククーラなどの洗浄に利用できる。栃木県の酪農家 2 軒に開発システムを導入したところ, 熱交換率は約 45～79%であり, 導入前と比較して年間当たり, エネルギー消費量としては約 34～49%, ランニングコストとしては約 19～39%, 金額では約 9～14 万円, CO<sub>2</sub> 排出量としては約 21～40%の削減効果があることが明らかとなった。

キーワード: 生乳, CO<sub>2</sub> ヒートポンプ, バルククーラ, 消費エネルギー, ランニングコスト, CO<sub>2</sub> 排出量

## 1. はじめに

酪農における搾乳関連機器は毎日の稼働が常であり, 多くのエネルギー (電気, 水, 石油) を使用している。生乳の冷却および一時貯蔵には, バルククーラが用いられ, 日本国内のほとんどの酪農家で使用されている。生乳冷却に必要な能力は規格 (ISO5708 (1983)) により定められており, 現在市販されている冷凍機には代替フロン (ハイドロクロロフルオロカーボン: HCFC) などが使用されている。しかし代替フロンは, 温暖化係数が高く, 日本国内では廃棄機器の回収率も低い問題となっている。また国際的には代替フロンである HCFC の削減スケジュールの前倒しに係る議定書の調整が決定され, かつオゾン層破壊効果がないが温室効果が高いハイドロフルオロカーボン (HFC) の扱いが議論され, 低温室効果物質への代替を促進するために適切な措置を講じること等が関係国によって宣言されている (ウィーン条約/モントリオール議定書)。

日本国内において, 近年家庭用での普及が進んでいる自然冷媒である二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を冷媒としたヒートポンプ給湯器 (通称エコキュート) は, CO<sub>2</sub> 排出量低減が可能な環境機器とされ注目を集めている。ヒートポンプは, 農業分野では特に園芸など施設栽培での暖房などに利用され, 従来の重油利用の場合と比べより効率的な利用方法 (佐瀬ら 2009) や従来機とのハイブリッド使用した場合 (川島ら 2008) の研究が進められている。

一方, CO<sub>2</sub> 冷媒のヒートポンプ技術は「85～90℃程度の高温水を高効率で生成できる」という特長を有している。そこで著者らは生乳を冷却しながらその廃熱を利用して温水生成を行い, 酪農現場で必須となるミルクライン・バルククーラなどの洗浄に利用することを想定し, CO<sub>2</sub> 冷媒のヒートポンプ技術を使用したアイスビルダ (氷蓄熱槽) および直膨式バルククーラのシステムを開発してきた (向山ら 2007, 石田ら 2010, 石田ら 2011)。

本報では, 既存のバルククーラに開発したアイスビルダ, プレートクーラおよび貯湯タンクから構成されるプレクーリングシステムを追加し洗浄まで含めた生乳冷却システムの年間のエネルギー効率, エネルギー消費量, ランニングコスト, 直接投入エネルギーの消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果を, 現地農場での実測データから明らかにすることを目的とした。

## 2. 試験装置および方法

## (1) 開発システムの概要

開発システムは, CO<sub>2</sub> ヒートポンプ (株)三洋電機製: CGU-V300MA, 3.0 kW, 表 1), アイスビルダ (株)三洋電機製: SPK-IS200B, 熱容量 200 MJ, 表 2), プレートクーラ (株)デラバル製: P30A-PR37 (40 mm)), 貯湯タンク (株)三洋電機製: SPK-HTB460, 460 L, 表 3) から構成される (図 1)。プレートクーラ以外の型式は開発中のため仮番である。

本システムでは, アイスビルダの冷凍機に CO<sub>2</sub> ヒートポンプを用いており, アイスビルダでの氷生成時の廃

原稿受理 2011 年 9 月 12 日

照会先: 石田三佳 e-mail: ishida32@affrc.go.jp

熱を回収し、設計上約 85℃の温水生成が可能である。アイスビルダの蓄熱槽内には、CO<sub>2</sub>冷媒用伝熱管が配置されており、伝熱管の回りに生成される氷の量は、氷厚センサーにより制御される。

本システムでは両農場ともに、搾乳時 35℃程度である生乳は、ミルクラインを通りプレートクーラに投入され、ここでアイスビルダ内の冷水と熱交換したのち 7～9℃に冷却されてバルククーラに投入される。吸熱した冷水はアイスビルダ内に戻り、循環しながら氷で再度冷却された後、冷却水としてプレートクーラへ投入され利用される。搾乳時以外のときに、アイスビルダ内では自動生成される。氷はアイスビルダ内の貯留水をヒートポンプの蒸発器で CO<sub>2</sub>冷媒に吸熱させて氷となる。冷媒に回収された熱は凝縮器によって貯湯タンク側の水に放熱されて約 85℃の温水が生成される。

通常冷凍機に用いられる冷媒は R22 などの指定フロンや HFC、HCFC などの代替フロンであり、バルククーラでは R404A 等が用いられる。代替フロンである R404A は塩素を含まないが、温暖化係数 (GPW) が約 4000 (IPCC 第 4 次報告書 2007, 100 年換算値) であり環境への配慮の面から問題がある。開発システムは、自然冷媒である R744 (二酸化炭素, CO<sub>2</sub>) を用いているため温暖化係数は 1 である。牛乳冷却の廃熱利用は古くから行われてきている。その場合の熱交換にはフロン

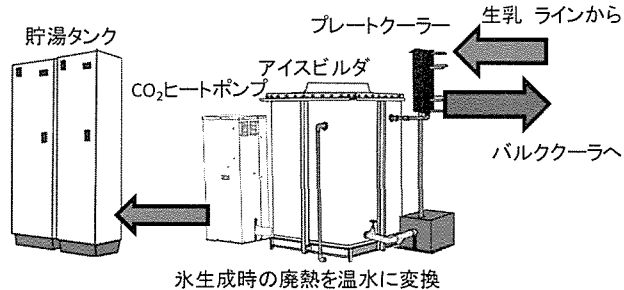


図1 開発したプレクーリングシステムの構成 (アイスビルダ, プレートクーラ, 貯湯タンク)

表1 CO<sub>2</sub>ヒートポンプ (CGU-V300MA) の仕様

呼称出力	kW	3.0	
定格能力 冷却/加熱	kW	6.5/9.0	
電源		3φ 200V 50/60 Hz	
使用雰囲気温度	℃	-15 ~ +40	
蒸発温度	℃	-10 ~ +12	
設計圧力	MPa	高圧 14 / 低圧 8	
圧縮機	方式	二段圧縮, 内部中圧	
	駆動方法	DC インバータ	
	回転数範囲	S <sup>-1</sup> 45 ~ 80	
ガスクーラ		プレートおよび細管接合方式	
蒸発器		プレート式	
ユニット	高さ	mm	1 239
	幅	mm	450
	奥行き	mm	354

のヒートポンプが用いられているが、得られる温水は 50～60℃である (保科 2009, 北海道中央農試・機械部 1981)。そのためライン洗浄など 70℃以上のより高温の水が必要となる場合には、灯油ボイラなどで加温が必要である。両農場では、開発システム導入前は灯油ボイラにより温水生成を行っており、導入後は貯湯タンクからの給湯ラインを既存ボイラに接続した。これは温水の温度が足りない場合や湯量が足りない場合に、フェイルセーフとして機能させるためである。

両農場では、既存のバルククーラにアイスビルダおよびプレートクーラのシステムを追加した機器構成となる (表 4)。B 農場は、中古のバルククーラを用いて冷水を作り、これを既存のプレートクーラに循環させる独自のプレクーリングシステムを導入していたが、それを撤去し、開発システムに変更した。また B 農場ではラインなどの洗浄以外に多量の温水を使用する意向があったた

表2 氷蓄熱ユニット (SPK-IS200B) の仕様

蓄熱方式		スタティック, アイスオンコイル, 外融式	
蒸発器	伝熱管	銅管 OD8.0 T1.0 L250 m	
	使用冷媒	R744	
	設計圧力	MPa 8	
蓄熱槽	構造	一体成型 3 層サンドイッチ構造	
	防水層	ポリエチレン樹脂 T4mm × 2 層	
	断熱槽	硬質ポリウレタンフォーム T34 ~ 42mm	
	内容積	m <sup>3</sup> 1.5	
	耐震	G 水平震度 1.0 / 鉛直震度 0.5	
蓄熱性能	蓄熱容量	MJ 200	
	製水量	kg 600	
	保有水量	m <sup>3</sup> 1.2	
運転制御	製氷制御	方式	タイマー & 氷厚センサー併用
		運転信号出力	AC200V ON/OFF 信号
	解氷制御	運転信号入力	AC200V ON/OFF 信号
		出力	ポンプ駆動 / プロワー駆動
電源		3φ 200V 50/60Hz	
外形寸法	高さ	mm	1 898
	幅	mm	1 234
	奥行き	mm	1 234

表3 貯湯タンクユニット (SPK-IHTB460) の仕様

タンク材質		特殊ステンレス鋼板	
内容積	L	460	
最高使用圧力	kPa	190 (減圧設定 170)	
貯湯温度	℃	85	
本体内蔵部品		減圧弁, 圧力逃がし弁	
安全装置		漏電遮断器	
外形寸法	高さ	mm	2 235
	幅	mm	630
	奥行き	mm	730

表4 農場別システムの導入前後の比較

導入前後 構成機器	A 農場		B 農場	
	前	後	前	後
バルククーラ (使用冷媒)	従来機 HCFC (R22)	同左	従来機 HFC (R404A)	同左
給湯方法	灯油ボイラ	足りない場合のみ ボイラが稼働	灯油ボイラ	足りない場合のみ ボイラが稼働
給湯タンク (台)	なし	2	なし	6
プレートクーラ アイスビルダ	なし	プレートクーラお よびアイスビルダ を新規導入	中古バルククーラ およびプレート クーラを使用	既存プレートクー ラ利用およびアイ スビルダ2台新規 導入
アイスビルダ台 数 (台)	なし	1	なし	2

A 農場は、2009 年 10 月より稼働開始、B 農場は 2009 年 12 月よりシステム稼働開始。

め、アイスビルダ2台と貯湯タンク6台を設置した(表4)。

なお供試 CO<sub>2</sub> ヒートポンプは、通常の冷媒 (3 MPa 程度) に比べて高压 (14 MPa) で使用するため、冷却パネルの耐圧改造が必須となるが直膨式バルククーラに適応可能である。

### (2) 試験農場

開発システムを試験導入する酪農家は、飼養形態、頭数を考慮して選定した(表5)。選定した農場は栃木県那須塩原市にあり、搾乳頭数が約 80～110 頭、日生産量約 2 600～3 500 kg の酪農家である。両農場ともに酪農地帯の栃木県那須塩原市に位置した。A 農場はつなぎ飼いで飼養で搾乳方法は搾乳装置搬送ユニット方式、B 農場はフリーストール飼養で搾乳方法は 8 頭複列パラレルパーラー方式である。搾乳は両農場とも一日二回搾乳で、集乳は朝搾乳終了後の午前中であり、作業者は家族とヘルパーを含め 3～4 人で行っている。開発システムの導入は、A 農場は 2009 年 9 月、B 農場は 2009 年 11 月に行った。搾乳作業は、A 農場では 7 時頃および 19 時頃、B 農場では 6 時頃および 17 時頃行われる。

### (3) 評価項目および方法

両農場では、消費電力量および灯油のエネルギー消費量、ヒートポンプからの給湯流量、供給水、乳およびバルククーラ内の温度を計測した。水、乳およびバルククー

ラの温度、各機器およびラインに T 型熱電対を取り付けて計測した。温度の計測箇所は、給水部と給湯部ライン、バルククーラ、ミルクライン、プレートクーラ入口および出口の循環水および乳である。各データの計測は、LabVIEW (株)日本ナショナルインスツルメンツ、バックプレーン:cFP-BP-4、12 ビットアナログ入力モジュール:cFP-AI-100、16 ビット熱電対入力モジュール:cFP-TC-120) によって自動計測を行い、15 秒ごと内部メモリーに保存した。農場でのデータ計測は、2009 年 5 月より順次行った。電力量は、既存のバルククーラ、新規のアイスビルダについて計測した。ボイラ用の灯油使用量は、配達伝票および農場主への聞き取りから算出した。なお灯油使用量には、搾乳準備など日常的に農場内で使用するための温水生成の使用量も含まれている。貯湯タンク内の生成温水量は、流量計の値から積算して求めた。日生産乳量は、バルククーラの出荷伝票の値を用いた。

評価項目は、年間のエネルギー消費量、ランニングコスト、CO<sub>2</sub> 排出量、およびシステムのエネルギー収支である。

エネルギー消費量は、計測した電力使用量から年間消費量を求めたものと、灯油使用量と発熱量(灯油低発熱量: 9.58 kWh/L) を乗じて算出したものの和である。ランニングコストは、電気は 12.68 円/kWh (東京電力 2011 年 2 月時点掲載値、低圧電力)、灯油は栃木県 2010 年の平均価格 80.40 円/L より年間使用量に乗じて求めた。CO<sub>2</sub> 排出量は、電力は 0.384 kg-CO<sub>2</sub>/kWh、灯油は 2.52 kg-CO<sub>2</sub>/L を元に算出した(事業者別排出係数の算出について 2010)。なお本報では、直接投入エネルギーの消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を、「CO<sub>2</sub> 排出量」と表記した。

開発システムの導入は、A 農場は 2009 年 9 月、B 農場は 2009 年 11 月に行った。システム導入前後の比較、評価を行うために、電力量については、A 農場では導入前のデータは 2009 年 5 月および 2010 年のメンテナンス

表5 試験農場の概要

酪農家	A 農場	B 農場
飼養形態	つなぎ	フリーストール
搾乳頭数	80～90	105～110
出荷乳量 [kg]	2 600～2 800	3 300～3 500
バルク容量 [L]	3 200	5 200
使用冷媒	HCFC (R22)	HFC (R404A)
給湯形式	灯油ボイラ	灯油ボイラ

搾乳頭数、出荷乳量は調査時(2008)の概算値、B 農場では、古いバルククーラ(2000 L)を利用しバルク投入前にプレクールしている。

のためプレクーリングシステムが停止したときの稼働時のデータから求めた値とし、導入後のデータは2010年1月から7月のデータの平均値とした。同じく、B農場では導入前のデータはメンテナンスのためプレクーリングシステムが停止したときの稼働時のデータから求めた値を、導入後のデータは2009年3月から2010年2月のデータから求めた平均値とした。灯油使用量は、両農場ともに導入開始前後の伝票のデータおよび農場主からの聞き取りから年間使用量を求めた。

開発システムのエネルギー収支は以下の様になる。システム全体に投入した総投入エネルギー  $E$  は式 (1) で求められる。

$$E = \sum_{i=1}^3 E_i \quad (1)$$

このとき

$i = 1$  : バルククーラが使用した電気エネルギー

$i = 2$  : アイスビルダおよび貯湯タンクが使用した電気エネルギー

$i = 3$  : 温水生成に使用した灯油ボイラのエネルギーである。

システム全体のエネルギー収支は式 (2) で求められる。

$$W_{in} + M_{in} + E = W_{out} + M_{out} + L_{WH} + L_{MC} \quad (2)$$

このときの加熱エネルギー:  $\Delta W$ , 冷却エネルギー:  $\Delta M$  は式 (3) (4)

$$\Delta W = W_{out} - W_{in} (> 0) \quad (3)$$

$$\Delta M = M_{in} - M_{out} (> 0) \quad (4)$$

となる。

ここで

$\Delta W$  : 加熱エネルギー

$\Delta M$  : 冷却エネルギー

$W_{in}$  : 投入前の水 ( $T_{Win}$ ) の顕熱

$W_{out}$  : 投入後の水 ( $T_{Wout}$ ) の顕熱

$M_{in}$  : 冷却前の乳 ( $T_{Min}$ ) の顕熱

$M_{out}$  : 冷却後の乳 ( $T_{Mout}$ ) の顕熱

$L_{WH}$  : 水の加熱における損失など

$L_{MC}$  : 生乳の冷却における損失など

$\Delta W, \Delta M$  は、乳量  $M_y$  および生成温水量  $W_h$  から式 (5), (6) のように計算できる。

$$\Delta W = (T_{Wout} - T_{Win}) \times CpW \times W_h \quad (5)$$

$$\Delta M = (T_{Min} - T_{Mout}) \times CpM \times M_y \quad (6)$$

ここで

$CpW$  : 水の平均比熱 (20℃～85℃), 4.19 [kJ/kg・K]

$CpM$  : 生乳の平均比熱 (35℃～4℃), 3.90 [kJ/kg・K]

$W_h$  : 生成温水量 [L] もしくは [L/d]

$M_y$  : 生産乳量 [kg] もしくは [kg/d]

開発システム構成におけるCO<sub>2</sub>ヒートポンプ1台の搾乳作業1回あたりの冷却可能量  $X_m$  は、式 (7) より35℃から4℃冷却に必要な熱量と生成した冷却熱量から計算され最大1650kg程度、稼働時間  $T_C$  は、式 (8) より生成氷の融解熱量と生成した冷却熱量から試算され約8.6時間である。

$$X_m = Q_{HPC} \times 3600 \times T_C / CpM (T_{Min} - T_{Mout}) \quad (7)$$

$$T_C = \frac{333.6 \times 600}{Q_{HPC} \times 3600} \quad (8)$$

このとき

$X_m$  : 冷却可能乳量 [L/回]

$Q_{HPC}$  : ヒートポンプ定格冷却能力 [kW] (表1)

3600 : 換算値, 1 [kW] = 3600 [kJ/h]

$T_C$  : アイスビルダ稼働時間, 8.6時間

333.6 : 氷の融解熱 [kJ/kg]

600 : アイスビルダ定格製氷量 [kg] (表2)

また冷却・加熱における損失の和を  $L$  として、式 (4) を変形すると式 (9) となる

$$\Delta M + E = \Delta W + L \quad (9)$$

このとき開発システムの加熱および冷却 COP は式 (10), (11) で表される。

$$\text{加熱 COP} = \frac{\Delta W}{E_2} \quad (10)$$

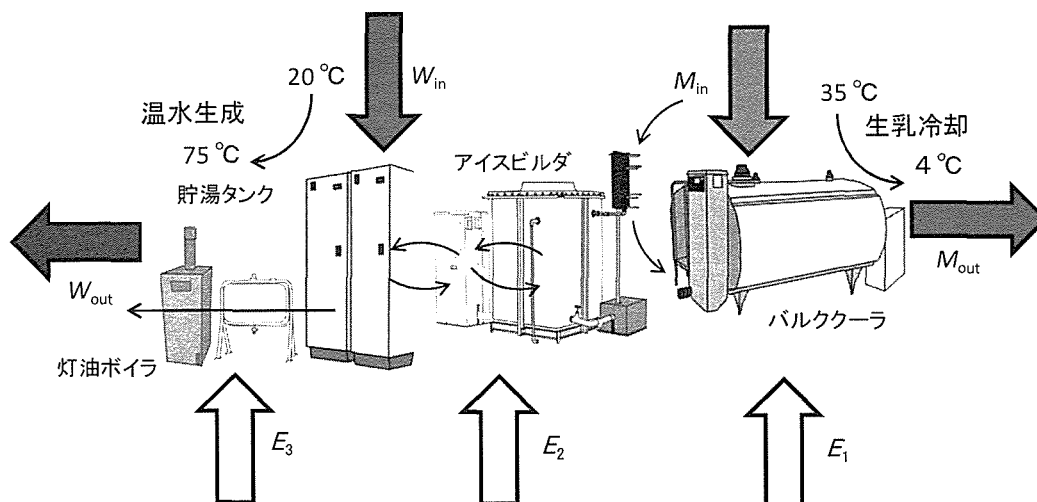


図2 開発したシステムのエネルギー収支の概略

$$\text{冷却 COP} = \frac{\Delta M}{E_1 + E_2} \quad (11)$$

またシステム COP は式 (12) で求まる。

$$\text{システム COP} = (\Delta M + \Delta W) / E \quad (12)$$

式 (12) において  $E = E_1 + E_2$  つまり  $E_3 = 0$  であるときは、ボイラを使用することなく、ヒートポンプのみで温水生成が行われている場合である。開発システムは、冷却と同時に灯油の使用量を削減して加熱投入エネルギーを抑えながら温水を得られるため、システム COP の向上が期待できる。

本報では、開発システムの熱交換率として加熱エネルギー  $\Delta W$  に対する冷却エネルギー  $\Delta M$  と投入エネルギー  $E$  の和の割合を、式 (9) の  $L$  を除く実測値を用いて式 (13) より求めた。これは生乳の冷却エネルギーを加熱エネルギー

に交換できた割合を示す。

$$\text{熱交換率 (\%)} = \frac{\Delta W}{\Delta M + E} \times 100 \quad (13)$$

### 3. 結果および考察

#### (1) 電力・温度の計測データの概要

アイスビルダは、搾乳作業以外の時に稼働するように設定しており、搾乳中は、プレートクーラの冷水循環のための冷却ポンプの電力のみが消費され、既存バルククーラは、主に保冷のために電力が消費される。B 農場では、アイスビルダ 2 台が稼働するため、消費電力は A 農場の約 4 kW に対して倍の約 8 kW である (図 3, 4)。

生乳の温度は、プレートクーラ (熱交換器) 内のミルクラインの入口では 35 °C 程度であり、その後のバルク

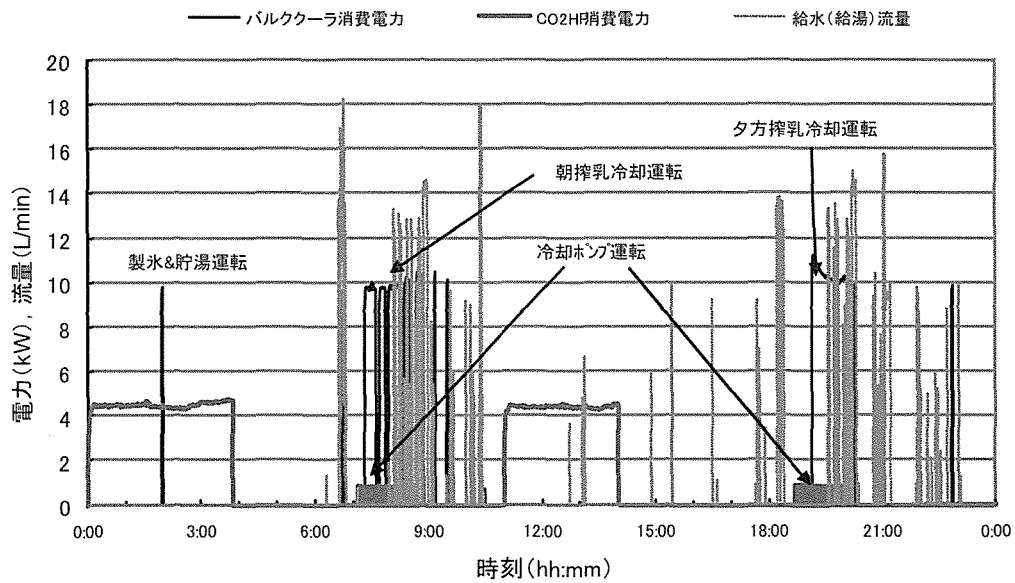


図 3 A 農場における消費電力および給湯量の日内経時変化の例 (2010.5.25)

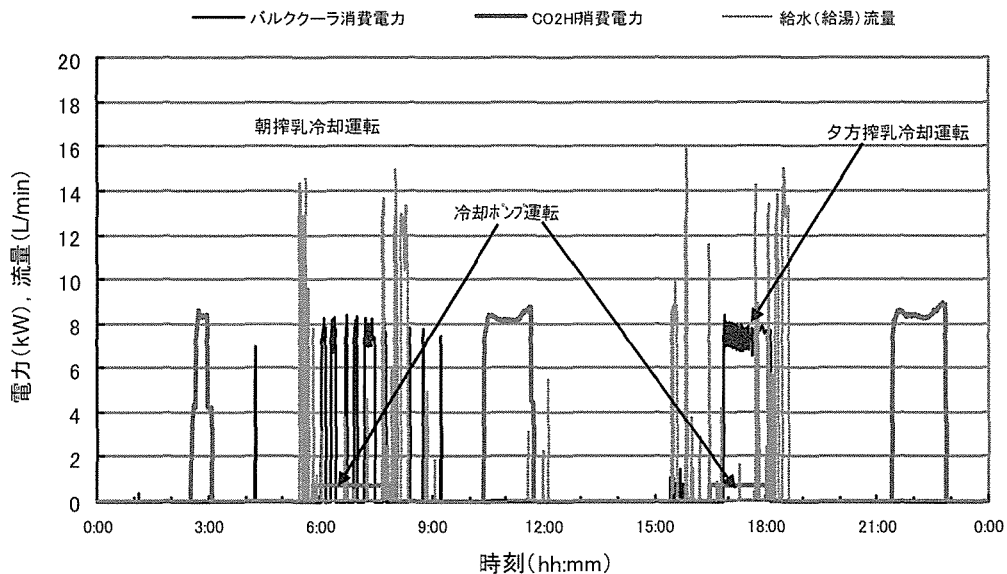


図 4 B 農場における消費電力および給湯量の日内経時変化 (2010.11.14)

クーラ（タンク）に入る直前では7～9℃となり、また熱交換用の冷却水は、プレートクーラ投入前には2～8℃であり、循環後は生乳の熱が移動して20℃前後となった（図5、6）。両農場では、冷水温度および戻り温度の変動が異なる。これはミルクライン内に流れる単位時間当たりの生乳量が同じパイプライン方式であっても牛舎内を配管させるA農場ではパーラー方式のB農場に比べて低流量であることが影響し、冷却水量に対して生乳からの吸熱が少ない状態で循環することが多いためと推測される（図5、6）。

(2) 開発システムの評価

開発したシステムでは、生産乳量やヒートポンプの台数などの機器構成により投入エネルギー量、生成温水量、加熱・冷却エネルギーが左右される。

総投入エネルギー  $E$ （表6）のデータを元に、両農場における年間のエネルギー消費量、ランニングコスト、CO<sub>2</sub> 排出量の試算を行った。

A農場では、エネルギー消費量は導入前に比べて約49%の削減、ランニングコストは約39%、金額で約37万円が23万円となり約14万円の削減、CO<sub>2</sub> 排出量は約

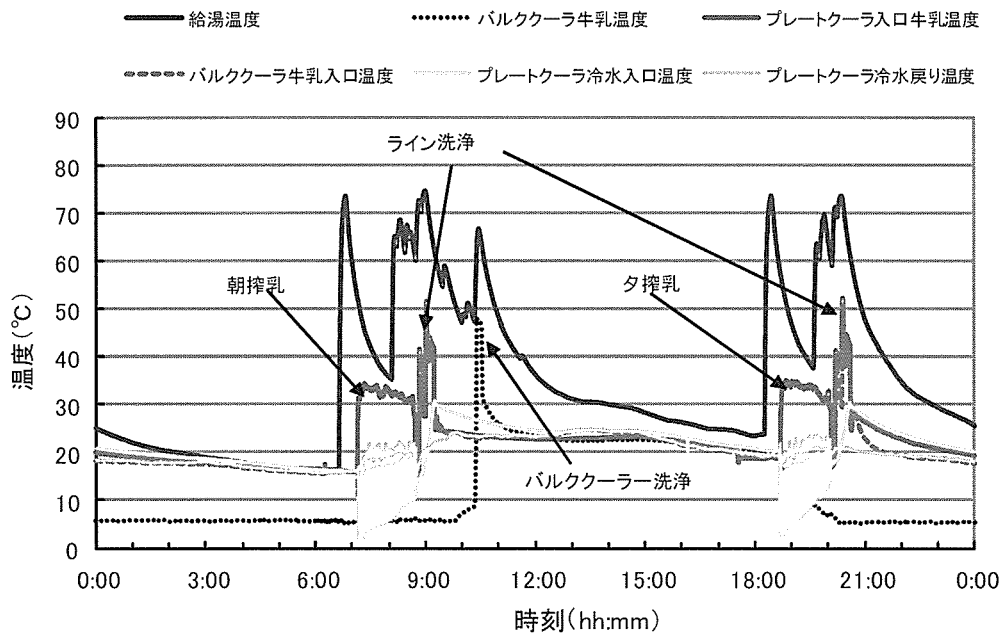


図5 A農場における水温および乳温の各部における日内経時変化の例（2010.5.25）

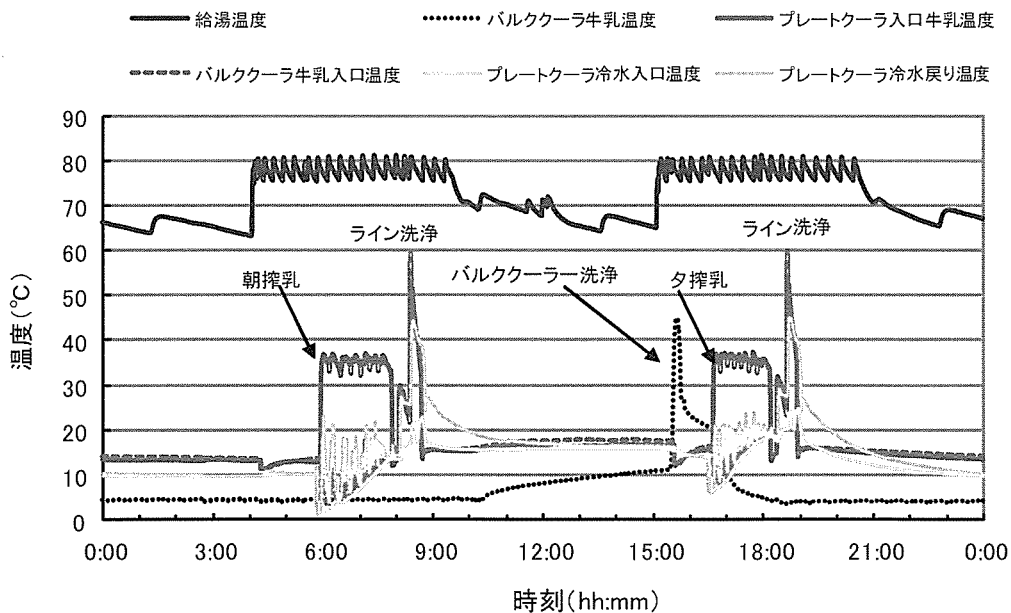


図6 B農場における水温および乳温の各部における日内経時変化の例（2010.11.14）

40%, 4 490 kg-CO<sub>2</sub> の削減ができ, B 農場ではエネルギー消費量は導入前に比べて約 34% の削減, ランニングコストは約 19%, 金額で約 47 万円が 38 万円となり約 9 万円の削減, CO<sub>2</sub> 排出量は約 21%, 2 970 kg-CO<sub>2</sub> の削減ができた (図 7)。

開発システムの導入コストは, 主要機器が開発中であり市販品でないため未定であるが, 貯湯タンクや CO<sub>2</sub> ヒートポンプなどの新規購入機器部分は, ランニングコスト削減の 5 ~ 10 年分で賄えることを目標としている。

投入エネルギー  $E_1$  (バルククーラが使用した電気エネルギー量) は, 導入前, A 農場では約 149 MJ/d, B 農場では約 173 MJ/d であり, 導入後, A 農場では約 72 MJ/d, B 農場では約 41 MJ/d となり減少した。

投入エネルギー  $E_2$  (アイスビルダおよび貯湯タンクが使用した電気エネルギー量) は, 導入前, 両農場ともに機器がないためゼロであり, 導入後, A 農場では約 94 MJ/d, B 農場では約 237 MJ/d となった。B 農場では A 農場と比べて 2 倍以上の電力消費量であった。これはアイスビルダ 2 台を導入したためである。

総電力投入エネルギー  $E_1 + E_2$  は, 導入前は A 農場では約 149 MJ/d, B 農場では約 173 MJ/d であり, 導入後は A 農場では約 166 MJ/d, B 農場では約 278 MJ/d となった。電気の総消費量は, A 農場では 1 割程度, B 農場では 6 割程度増えた。

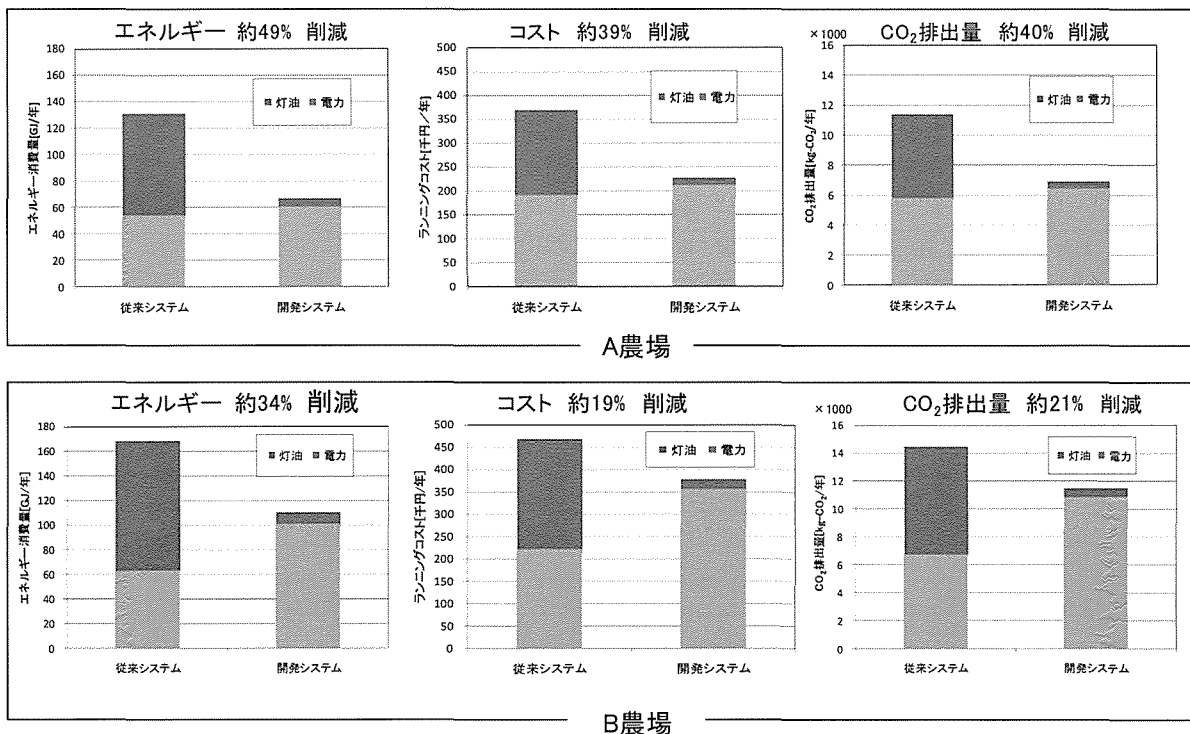
投入エネルギー  $E_3$  (温水生成に使用した灯油ボイラのエネルギー量) は, 導入前, A 農場では約 213 MJ/d (約 6.2 L/d), B 農場では約 286 MJ/d (約 8.3 L/d) であり, 導入後, A 農場では約 17 MJ/d (約 0.5 L/d), B 農場では約 23 MJ/d (約 0.7 L/d) となり大きく減少した。計測期間中, メンテナンスなどで温水生成が出来なかった以外は, 洗浄用のボイラの使用は無かった。

総投入エネルギー  $E$  (エネルギー消費量) は, 導入前, A 農場では約 361 MJ/d, B 農場では約 466 MJ/d であり, 導入後, A 農場では約 182 MJ/d, B 農場では約 301 MJ/d となった。総投入エネルギーは, A 農場ではおおよそ半分, B 農場では二分の一となった (表 6)。

生産乳量  $M_y$  は, A 農場では約 2 620 kg/d, B 農場では約 3 340 kg/d であり, 生成温水量  $W_h$  は, A 農場では約 893 L/d, B 農場では約 2 475 L/d となり貯湯タンクの最大容量程度の十分量の温水が出来た。

加熱エネルギー  $\Delta W$  は, 生成温水量  $W_h$  から,  $T_{Win}$  を 20 °C,  $T_{Wout}$  を 75 °C として式 (5) より, A 農場では約 227 MJ/d, B 農場では約 570 MJ/d と求まる。同じく, 冷却エネルギー  $\Delta M$  は, 生産乳量  $M_y$  から,  $T_{Min}$  を 35 °C,  $T_{Mout}$  を 4 °C として式 (6) より, A 農場では約 326 MJ/d, B 農場では約 416 MJ/d と求まる。

エネルギー収支としては, 式 (9) より, A 農場では左辺は約 509 MJ/d に対して, 右辺は  $\Delta W$  が約 227 MJ/d



#### コスト

電気代: 平均値 (東京電力) 12.68 円/kWh \* 1, 灯油代: 栃木県 2010 年度平均値 80.40 円/L \* 2, 灯油低発熱量: 9.58 kWh /L  
CO<sub>2</sub> 排出係数 \* 3

電気: 0.384 kg-CO<sub>2</sub>/kWh, 灯油: 2.52 kg-CO<sub>2</sub>/L

\* 1: 東京電力 2011 年 2 月時点掲載値, 低圧電力より

\* 2: (財) 石油情報センター データより算出 (配達灯油)

\* 3: 事業者別排出係数の算出について (2010): 電気事業者向け資料 [平成 22 年 5 月], 環境省

図 7 両農場における開発システムのエネルギー消費, ランニングコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量



と  $L$  が 282 MJ/d であり、B 農場では左辺は約 717 MJ/d に対して、右辺は約 570 MJ/d と  $L$  が 147 MJ/d であった。上記の  $L$  は、アイスビルダにおいて氷生成されかつ温水が生成される時刻と、生乳がプレートクーラやバルククーラにより冷却される時刻が異なりタイムラグが生じるための変換ロス、氷生成のための循環ポンプなどの電力や生乳・水の温度を一定として計算しているための誤差が影響していると推測される。

加熱 COP は、式 (10) より両農場共に 2.4 と求まり、設計能力 3.0 には及ばないが、良好な結果が得られた。

表 6 開発システムの導入前後の投入エネルギーの変化

項目	記号	単位	導入	A 農場		B 農場	
				前	後	前	後
電力消費量 (バルククーラ)	$E_1$	kWh/d	前	41.3	48.0	前	148.7
			後	20.0	11.4	後	72.1
		MJ/d	前	148.7	172.8	前	212.7
			後	72.1	41.2	後	16.9
電力消費量 (CO <sub>2</sub> ヒートポンプ)	$E_2$	kWh/d	前	—	—	前	—
			後	26.0	65.6	後	93.6
		MJ/d	前	—	—	前	212.7
			後	93.6	236.3	後	16.9
総電力消費量	$E_1 + E_2$	kWh/d	前	41.3	48.0	前	148.7
			後	46.0	77.1	後	72.1
		MJ/d	前	148.7	172.8	前	212.7
			後	165.6	277.5	後	16.9
灯油使用量 (灯油ボイラ)	$E_3$	L/d	前	6.17	8.33	前	212.7
			後	0.49	0.67	後	16.9
		MJ/d	前	212.7	286.3	前	212.7
			後	16.9	23.1	後	16.9
総投入エネルギー	$E$	MJ/d	前	361.4	466.0	前	361.4
			後	181.6	300.6	後	181.6

電力は計測値、灯油使用量は配達伝票および農場主に聞き取り調査したもの。

冷却 COP は式 (11) より、A 農場では 2.0、B 農場では 1.5 と求まった。B 農場では、アイスビルダおよび CO<sub>2</sub> ヒートポンプを 2 台使用しており、乳量に比べて冷却能力が大きく熱のバランスが悪いと考えられる。

システム COP は、式 (12) より、導入前、両農場ともに 1.5、導入後、A 農場では 3.0、B 農場では 3.3 と求まった。両農場共に開発システム導入により大幅な投入エネルギーの削減効果が確認できた (表 7)。

熱交換率は式 (13) より A 農場では約 45%、B 農場では約 79% となる。

両農場において、開発システムの試験稼働時の集荷乳の品質 (乳脂肪、細菌数) は導入前に比べて大きな変化はなかった。

#### 4. まとめ

開発した CO<sub>2</sub> ヒートポンプを使用したプレクーリングシステムを用いた場合、エネルギー消費量で約 34 ~ 50%、ランニングコストで 19 ~ 40%、金額で 7 ~ 14 万円の年間削減効果があり、CO<sub>2</sub> 排出量も 21 ~ 60%、2 970 ~ 4 490 kg-CO<sub>2</sub> / 年の削減が可能であった。

供試 CO<sub>2</sub> ヒートポンプは、搾乳作業 1 回あたり、生乳を 35 °C から 4 °C に冷却する能力が 1 650kg 程度であり、更なる冷却能力の向上による大容量への適応を可能とすることで対応できる場面が増えると言える。バルククーラの実際の使用年数は 10 年以上と推測され、農場拡張や増頭による大型機導入以外では買い替えが進まない状況である。そのため、今回報告したプレクーリングシステムは、施設の投入コストを抑えつつ、既存のプレートクーラの改修や新規プレクーリングシステムの導入を図りながら、かつ適宜、新規の CO<sub>2</sub> ヒートポンプのバルククーラへの更新というシナリオが想定できる (石田 2010)。

表 7 開発システムの年間評価

項目	年間平均		A 農場	B 農場	
	記号	単位			
生産乳量		kg/d	2620.0	3339.8	
温水生成量		L/d	983.3	2474.7	
加熱	エネルギー	$\Delta W$	MJ/d	226.6	570.0
	投入エネルギー	$W_2$	MJ/d	93.6	236.3
	COP		-	2.4	2.4
冷却	エネルギー	$\Delta M$	MJ/d	326.3	415.9
	投入エネルギー	$E_1 + E_2$	MJ/d	165.6	277.5
	COP		-	2.0	1.5
システム COP	導入前	$(\Delta M + \Delta W) / E$	-	1.5	1.5
	導入後			3.0	3.3
エネルギー	加熱 冷却	導入前*	MJ/d	553.5	705.0
		導入後		552.9	985.9
	投入	導入前	MJ/d	361.4	466.0
		導入後		181.6	300.6

\* 導入前の冷却エネルギー (乳量) は導入後と同じとして試算した。

開発システムは、アイスビルダ 1 台 1 回あたりの対応乳量を 1 500 kg、一日あたり稼働を 1 ないし 2 回、平均個体乳量 35 kg とした場合、飼養頭数規模で 50 から 79 頭の 4 210 戸（総戸数 21 200、構成比 19.9%）には隔日集荷を含めて即時導入可能である（畜産統計 2010）。また今後予想されるあらゆる産業における、フロンおよび代替フロンの規制にも対応可能であり環境に優しい酪農経営の一助となることを期待する。

## 謝 辞

本研究は、社団法人畜産技術協会の委託課題「民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業：自然冷媒冷凍機を利用した冷却加熱同時利用システムの実用化（2008-2010）」における成果の一部である。記して深謝する。

## 引用文献

- IPCC 第 4 次報告書（2007）：A report accepted by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change but not approved in detail, <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf>
- ISO5708（1983）：Refrigerated bulk milk tanks.
- 石田三佳（2010）：Ⅲ. ヒートポンプ・氷蓄熱システムを利用した低コスト・省エネ技術、畜産技術、662, 11-14.
- 石田三佳・大竹雅久・藤井敏造・向山 洋・野中和久・池口厚男・長谷川三喜（2010）：自然冷媒を用いた新型バルククーラーシステムの開発、2010 年度農業施設学会大会講演要旨、41-42.

- 石田三佳・中久保亮、大竹雅久・藤井敏造・向山 洋・野中和久・池口厚男・長谷川三喜（2011）：自然冷媒を用いた新型バルククーラーシステムの開発（第二報）、2011 年度農業施設学会大会講演要旨、95-96.
- ウィーン条約／モントリオール議定書（オゾン層の保護のためのウィーン条約：Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer／オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書：Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer）平成 23 年 2 月、<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/ozone.html>
- 川島浩樹・高市益行・場 勝・安井清登・中野有加（2008）：空気熱源式ヒートポンプを利用したハイブリッド暖房方式による投入エネルギーおよび CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果、野菜茶業研究所研究報告、7, 27-36.
- 財石油情報センター、<http://oil-info.ieej.or.jp/>
- 佐瀬勘紀・奥島里美・石井雅久・高倉 直・林真紀夫（2009）：ヒートポンプ暖房温室における暖房法の比較、農業施設、40（3）、177-184.
- 畜産統計（2010）：平成 22 年 2 月 1 日現在、農鈴水産省、<http://www.maff.go.jp/j/tokei/>
- バルククーラー排熱回収システム、北海道中央農試・機械部、昭和 56 年度成績概要書.
- 保科秀夫（2009）：牛乳熱利用ヒートポンプ給湯システムの開発、農業電化、2009 別冊特集号、2-6.
- 向山 洋・大竹雅久・山口賢太郎・石田三佳・四十万谷吉郎・長谷川三喜（2007）：バルククーラーの廃熱で給湯できる CO<sub>2</sub> 冷媒ヒートポンプシステムの紹介、冷凍、82（951）、23-29.
- 事業者別排出係数の算出について（2010）：気事業者向け資料【平成 22 年 5 月】、環境省、<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/denkihaishutu.html>

## Reduction of Energy Consumed by CO<sub>2</sub> Heat Pump for Raw Milk Cooling System\*<sup>1</sup>

Mitsuyoshi ISHIDA\*<sup>2</sup>, Ryo NAKAKUBO\*<sup>2</sup>, Masahisa OOTAKE\*<sup>3</sup>, Toshizou FUJII\*<sup>3</sup>,  
Hiroshi MUKAIYAMA\*<sup>3</sup>, Kazuhisa NONAKA\*<sup>4</sup>, Atsuo IKEGUCHI\*<sup>2</sup> and Sanki HASEGAWA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Presented at the SASJ Annual Meeting in 2010, 2011

\*<sup>2</sup> National Institute of Livestock and Grassland Science, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba-shi, 305-0901, Japan

\*<sup>3</sup> SANYO Electric Co., Ltd., Oizumi-Machi, Ora-Gun, 370-0596 Japan

\*<sup>4</sup> National Institute of Livestock and Grassland Science, National Agriculture and Food Research Organization, Nasushiobara-shi, 329-2793, Japan

### Abstract

A pre-cooling system for raw milk was developed using a heat pump and an ice builder that employs a natural refrigerant, i.e., CO<sub>2</sub>; in addition, tests were conducted to evaluate the energy balance, thermal efficiency, and other performance parameters of the system. The developed system recovers the waste heat, generated by the formation of ice in the ice builder, in the form of hot water (around 85°C). The hot water can be utilized to wash bulk cooler tanks and milk pipelines. The system was installed by two farmers in Tochigi prefecture. It had a heat exchanger effectiveness of approximately 45-79 %, and its deployment resulted in an annual reduction in energy consumption, running cost, and CO<sub>2</sub> exhaust tonnage of approximately 34-49 %, 19-39 % (90 000-140 000 Yen), and 21-40 %, respectively.

**Keywords:** raw milk, CO<sub>2</sub> heat pump, bulk cooler, energy consumption, running cost, CO<sub>2</sub> exhaust tonnage