

多段昇温型蒸気生成吸収ヒートポンプの開発

福住 幸大* 山田 宏幸*
入江 智芳* 井上 修行**

Steam Generation by a Three-stage Temperature Boosting Absorption Heat Pump

by Yukihiro FUKUSUMI, Hiroyuki YAMADA, Tomoyoshi IRIE, & Naoyuki INOUE

Heat sources, such as hot water of 100°C or less and waste gas of 250°C or less emitted from plant processes, are often wasted because their temperature is too low to be utilized. We have developed a three-stage temperature boosting absorption heat pump and built a test apparatus based on it that boosts the waste heat temperature to generate 150°C steam. An operation test of the apparatus has been conducted to verify its effectiveness. Maintaining the shell pressure below the atmospheric pressure during operation ensures exemption from regulations for pressure vessels and significantly reduces the burden of periodic inspection. By generating steam from waste heat, the heat pump is expected to reduce the load on existing boilers and to decrease fossil fuel consumption in the boilers.

Keywords: Waste heat, Waste hot water, Steam generation, Absorption heat pump, Multi-stage, Temperature boosting, Co-generation system

1. はじめに

わが国の工場から排出される排熱は、平成12年度調査では、100°C以上のガス排熱、40°C以上の温水排熱が、年間1110 PJあると推計され、そのうち100°C未満の温水、250°C未満のガスは、温度が低いため、エネルギーとして工場内での再利用が難しいとされている¹⁾。著者らは、60～99°Cの温水排熱と200°C未満のガス排熱の合計743 PJ/年¹⁾を対象に、吸収ヒートポンプで使い勝手のよい高温・高圧の蒸気に昇温して有効利用することを目標に開発を進めている。わが国の工場における蒸気の消費量は1360 PJ/年²⁾と、総排熱量以上に膨大な熱量を必要としており、前述の排熱743 PJ/年を全て回収しても利用可能である。

排熱を有効に利用する技術である吸収ヒートポンプ³⁾については、熱交換器の仕様に関するシミュレーション⁴⁾、太陽熱を利用したヒートポンプの検討^{5, 6)}、サイクルの理論解析とシミュレーションによる最適化⁷⁾、実験装置による性能試験と解析⁸⁾などが報告されている。

吸収式ヒートポンプは、単段昇温型（媒体：水/LiBr）が製品化されており、性能評価指標であるCOP（昇温熱量/投入排熱量）が0.5に近く、エクセルギー効率も高いが、生成蒸気温度の上限は120°C程度となっている。工場で使用する蒸気は、蒸気配管のサイズを抑えるため、少なくとも0.5 MPa (abs)以上の蒸気（飽和温度で表示すると150°C以上の蒸気）の要求があるが、低温排熱を利用して吸収式ヒートポンプで150°C以上の高温蒸気を生成するには、機器を多段に組合せて昇温する必要がある。

一方、吸収ヒートポンプの蒸気生成温度を上げていくと、ヒートポンプの缶胴内圧が大気圧を超えて法規制の対象となり、定期点検時には開放点検が必要になる。吸収ヒートポンプは作動媒体の特性上、缶胴の大気開放を避けたいため、本開発では缶胴内圧が大気圧未満で高温（150°C蒸気）を得ることができるサイクルを検討した。また、3段昇温の吸収ヒートポンプによって、80°C程度の温水を駆動源として150°Cの高温蒸気を発生する実用的なサイズの試験装置を設計製作し、運転試験を実施してその有効性を確認した。排熱から蒸気を生成することで、既設ボイラの負荷を軽減し、ボイラで消費する化石燃料を削減することができる。導入イメージを図1に示す。

* 荏原冷熱システム(株)

** 早稲田大学 基幹理工学部 工学博士

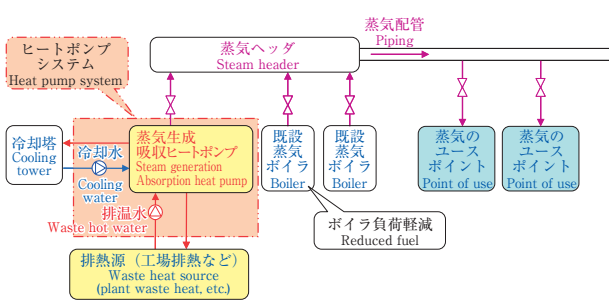


図1 蒸気生成吸収ヒートポンプの導入イメージ
Fig. 1 Schematic diagram

2. 吸収ヒートポンプの概要

排熱を駆動源とし、蒸気を取り出すことのできる昇温型吸収ヒートポンプの説明図を図2に示す。動作原理としては、再生器と凝縮器の温度差を駆動力として、蒸発器から吸収器への昇温能力を生み出すものである。この昇温型吸収ヒートポンプは第二種吸収ヒートポンプとも称されるもので、第一種吸収ヒートポンプと称される通常の吸収冷凍機とは、吸収器・蒸発器と再生器・凝縮器の圧力関係が逆になっている。

吸収ヒートポンプは、排熱そのものを駆動源として高温を発生できることが大きな特徴である。これまでに実用化されている吸収ヒートポンプは、80～90℃程度の排温水あるいは排蒸気から120℃程度の蒸気を生成するものである。実用化されている吸収ヒートポンプの構成機器とフローを図3に示す。

吸収溶液による1段当たりの昇温幅は30～50℃程度であり、150℃を超えるような蒸気を生成するには、昇温した熱を更に昇温する多段昇温サイクルが必要になる。多段昇温型は構成機器が多く複雑になるため、まだ実用化には至っていない。また、運転中の缶胴内圧が大気圧以下であることは、缶胴が圧力容器とならないため保守の面から有利である。缶胴内圧を抑えるには溶液を結晶限界ぎりぎりまで濃縮し、さらにこの濃縮溶液を用いて大気圧ぎりぎりまで昇圧すれば、この制約条件の下、最高温度の蒸気を取り出すことができる。本開発で採用したサイクルは、濃度方向と圧力方向を組み合わせた図4のような3段昇温サイクルである^{9, 10)}。

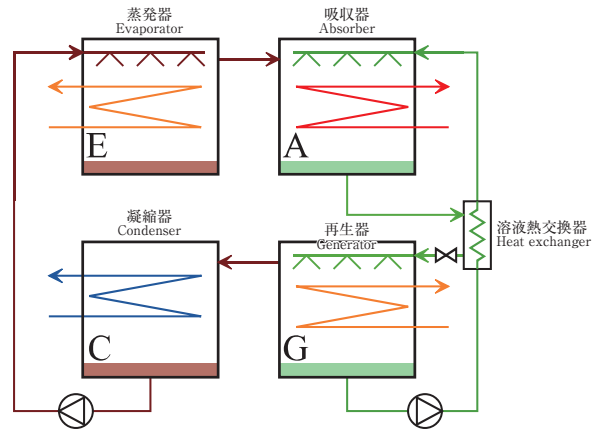
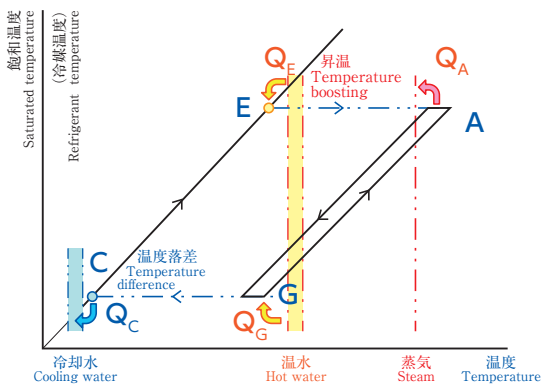
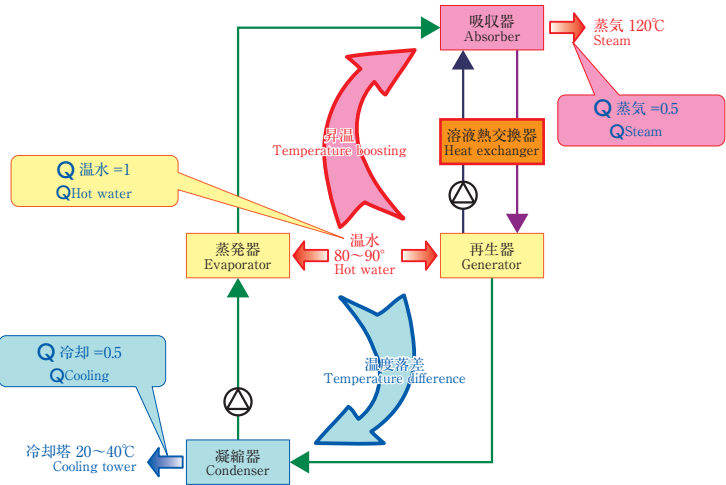


図3 昇温型吸収ヒートポンプの構成
Fig. 3 Configuration of the temperature boosting absorption heat pump



吸収ヒートポンプのデュリング線図
Dühring diagram



吸収ヒートポンプによる昇温イメージ
Schematic diagram

図2 昇温型吸収ヒートポンプ
Fig. 2 Temperature boosting absorption heat pump

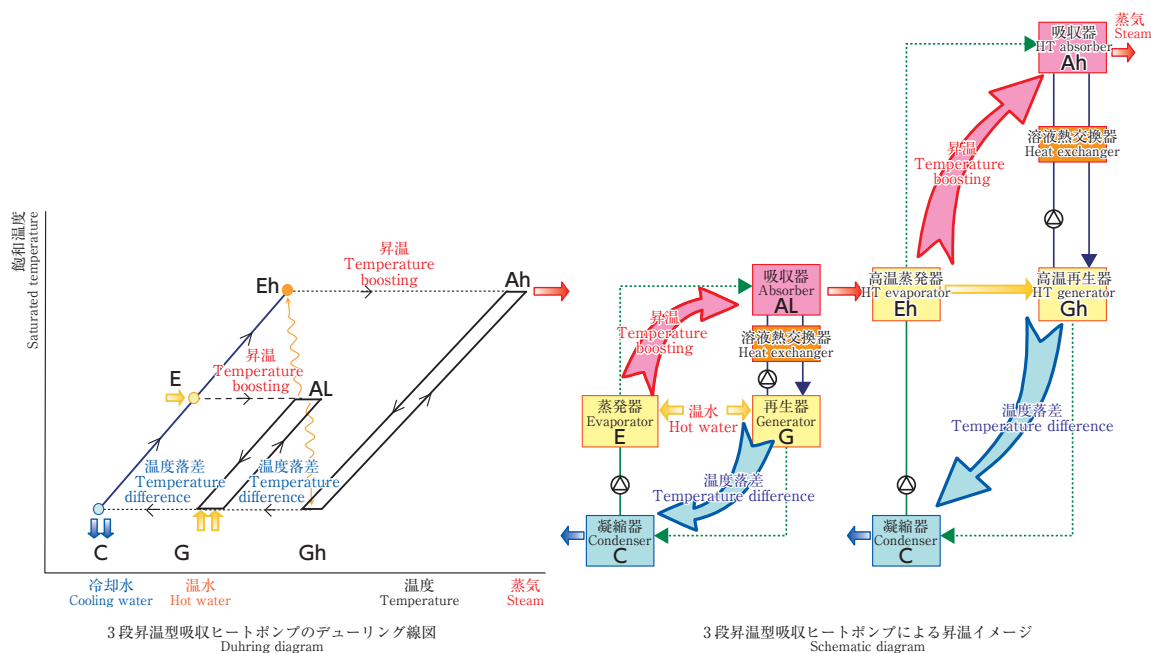


図4 3段昇温型吸収ヒートポンプサイクル
Fig. 4 Cycle of the three-stage temperature boosting absorption heat pump

3. 試験機

本開発では3段昇温サイクルで150℃蒸気を発生する実用サイズの試験機を設計製作した。吸収器 (AL) で発生した吸収熱の高温蒸発器への伝達は、吸収器と高温蒸発器 (Eh) を一体構造とした吸収蒸発器で行い、高温再生器 (Gh) の熱源として、吸収蒸発器で発生した冷媒蒸気を導入し、吸収蒸発器の吸収熱を利用している。本試験機では、実運転における缶胴の内圧を計測して、運転中の缶胴の内圧が大気圧以下となることを確認するとともに、吸収サイクルや伝熱について知見を得ることを目的とする。

試験機は、製品化が見込まれる容量で、なおかつ社内試験設備に見合った大きさとして、発生蒸気量を150 kW (=224 kg/h) として設計した。

排熱源は温水とし、コージェネレーションシステムの温水仕様を参考にして温水入口温度は88℃で設計した。冷却水は冷却塔循環水を使用するものとし、通年運転を想定して外気湿球温度の年間平均値から、冷却水入口温度は25℃で設計した。給水はボイラ給水相当で給水温度は80℃とし、発生蒸気は150℃の飽和蒸気で圧力は0.47 MPa (abs) とした。

以上の仕様で吸収サイクルの収束計算プログラムを作成し、吸収サイクルの状態量や伝熱について計算を行った。

また、本試験機は製品化を見据え、コストダウンと短納

期化、品質向上のため、ユーザーごとに個別特殊設計するのではなく、標準化されたユニット製品とし、工場で組み立てて現地に輸送して据え付けることを念頭に置いた設計とし、外形寸法は陸送が可能であることとした。

試験機の仕様は表1のとおりである。

表1 試験機の仕様
Table 1 Specification of the test apparatus

項目 Item	単位 Unit	設計値 Design value	
蒸気 Steam	発生蒸気量 Amount	kW	150
	発生蒸気温度 Temp.	℃	150
	発生蒸気圧力 Pressure	MPa(abs)	0.47
冷却水 Cooling water	冷却水入口温度 Inlet temp.	℃	25
	冷却水流量 Flow rate	L/min	1670
温水 Hot water	温水入口温度 Inret temp.	℃	88
	温水流量 Flow rate	L/min	1400
COP		-	0.20
缶胴内圧 Shell pressure		kPa (abs)	95.2
電源 Power supply		-	三相 Three-phase 200V × 50 Hz
外形寸法 Dimensions		mm	2240(L)×2820(W)×2900(H)

蒸発器 (E), 凝縮器 (C), 再生器 (G), 吸収器 (A) といった主要な缶胴は, 物質移動と熱移動に伴う媒体の相変化や流動性, 流体の圧力損失等を考慮し, シェルアンドチューブ型とした。缶胴は内圧が同じものどうしをまとめるとともに, 断面形状を角形にすることでコンパクト化を実現した。缶胴内は高真空に保つ必要があり気密性が要求されるため, 熱交換器は溶接構造とした。熱交換器の材料はコストと製作性から一般構造用鋼材を使用し, 伝熱管は銅製の高性能伝熱管及びボイラ用伝熱管を使用した。

低温蒸発器は小型化とコストダウンのため伝熱を詳細に検討し, 吸収冷凍機では前例のない満液式蒸発器を採用した。溶液のフローは, 低温サイクルと高温サイクルがそれぞれ溶液ポンプと溶液熱交換器をもち, 双方のサイクルが独立して循環運転する構成とした。

試験機のフローを図5に示す。

溶液熱交換器は伝熱性能が良くコンパクトで, かつ気密性に優れたブレイジング型積層プレート式熱交換器を採用した。再生器と吸収器はすべて均一な液散布ができるスプレーノズル方式とし, 溶液ポンプと冷媒ポンプは気密性に優れた遠心式キャンドモータポンプを採用した。

試験機の中で, 高温吸収器の蒸気発生部だけは運転時に大気圧を超えることも想定し, 労働安全衛生法の第一種圧力容器に準拠した設計とした。

試験機の外観を写真に示す。

4. 試験結果

製作した試験機を社内の試験用スタンドに設置し, 運

転試験を実施した。

試験は温水入口温度, 冷却水入口温度, 発生蒸気温度を変化させ, 様々な運転条件でデータを取得した。温水入口温度は70℃から90℃, 発生蒸気温度は130℃から150℃の範囲で試験を実施した。試験時期が夏季で外気温が高かったため, 冷却水温度を低下させることができず, 冷却水温度は30℃と35℃の条件で試験を実施した。

温水入口温度が高いほど, また冷却水入口温度と発生蒸気温度は低いほど, 発生蒸気量が大きくなる特性が確認できた。

試験結果を図6のグラフに示す。設計点である冷却水入口温度25℃は実施できなかったため, 設計計算を用いた性能予測から設計点の性能を十分満足することと, 缶胴内圧が大気圧以下であることを確認した。定格運転時の設計値及び試験データの外挿値を表2に示す。

試験機の制御は起動, 定常運転, 停止についてそれぞれラダーシーケンスを組み, 安定した自動制御が可能であることを確認した。

定常時のトレンドデータを図7に示す。

熱源温水の試験機入口温度が設定値に達した時点で低温溶液ポンプと低温冷媒ポンプを始動し, まず低温側のサイクルを確立させてから高温溶液ポンプと高温冷媒ポンプを始動して高温側のサイクルを確立させる。サイクルの確立に伴って発生蒸気圧が徐々に上昇し, 起動から約1時間で蒸気が発生した。

定常運転時では蒸気発生量, 温水, 冷却水, 蒸気, 温度とも安定して自動制御できていることが確認できた。

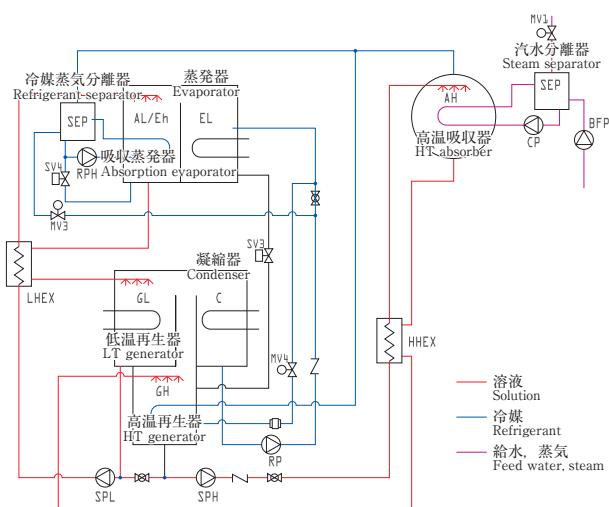
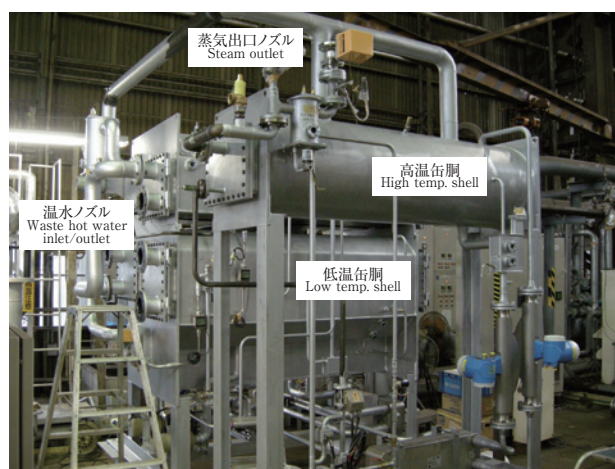


図5 試験機のフロー図

Fig. 5 Flow diagram of the test apparatus



13-62 01/241

写真 試験機外観

Photo External appearance of the test apparatus

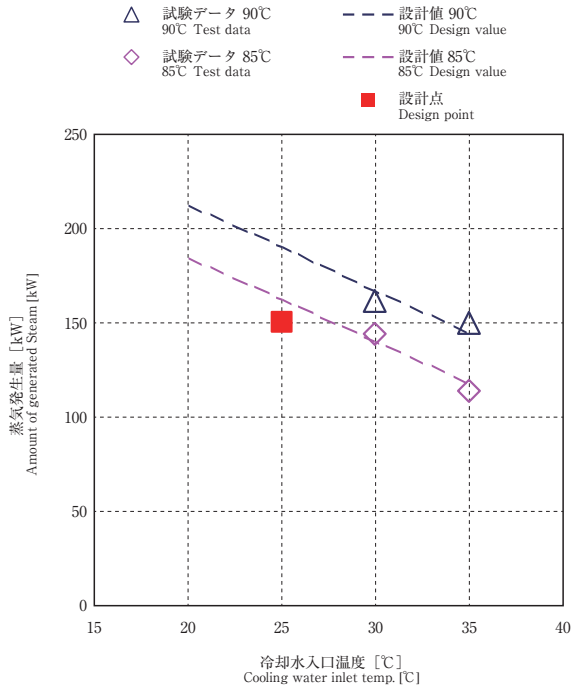


図6 試験結果グラフ
Fig. 6 Test result graph

表2 定格運転の設計値と試験データ外挿値
Table 2 Design values for rated operation and test data extrapolation values

項目 Item		単位 Unit	設計値 Design value	試験データ外挿値 Extrapolation value
蒸気 Steam	発生蒸気量 Amount	kW	150	158.4
	発生蒸気温度 Temp.	°C	150	150
	発生蒸気圧力 Pressure	MPa (abs)	0.47	0.47
冷却水 Cooling water	冷却水入口温度 Inlet temp.	°C	25	25
	冷却水流量 Flow rate	L/min	1670	1655
温水 Hot water	温水入口温度 Inlet temp.	°C	88	85
	温水流量 Flow rate	L/min	1400	1389
COP		-	0.20	0.21
缶胴内圧 Shell pressure		kPa (abs)	95.2	93.9

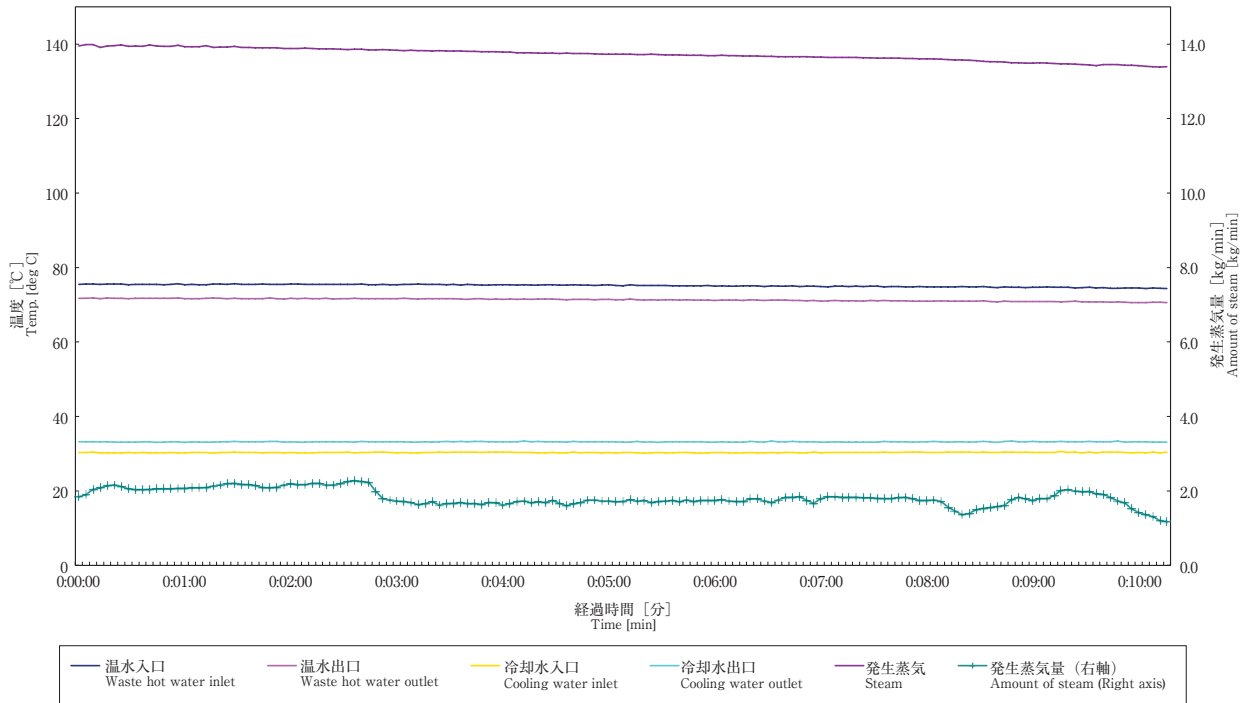


図7 定常時のトレンドデータ
Fig. 7 Trend data during stable operation

5. おわりに

3段昇温サイクルの吸収ヒートポンプによって、排熱から蒸気を発生する装置を開発し、実機試験により以下の事項を確認した。

①3段昇温サイクルを運転し、85℃の温水を熱源とした場合に150℃の蒸気を発生することができた。

②運転時の缶胴内圧は大気圧以下であり、法規制を受けないことが確認できた。

③起動、停止及び定常状態での運転制御は問題なく行うことができた。

今後も引き続き吸収ヒートポンプによる排熱の有効利用について研究開発を進めていく。

6. 謝 辞

本研究は、「省エネルギー革新技术開発事業」として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 「平成12年度工場群の排熱実態調査研究」省エネルギーセンター
- 2) 「平成18年度エネルギー需給実績」経済産業省資源エネルギー庁
- 3) 高田：「吸収冷凍機」, pp.38-41, 日本冷凍協会 (1982).
- 4) 柏木, 伊藤, 黒崎, 加藤：日本機械学会論文集 B, 52 (474), 795 (1986).
- 5) 野邑, 西村, 藪下, 柏木：日本冷凍協会論文集, 6 (2), 151 (1989).
- 6) 野邑, 西村, 藪下, 柏木：日本冷凍協会論文集, 7 (3), 65 (1990).
- 7) 井上, 入江, 福住：日本冷凍空調学会論文集, 22 (2), 173 (2005).
- 8) 福住, 井上：2005年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, C106 (2005).
- 9) 田野, 齋藤, 井上, 福住：2011年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, B324 (2011).
- 10) 大塚, 田野, 齋藤, 井上, 福住：第46回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, 20 (2012).