

特 集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

“熱のリサイクル”を応用した排水濃縮・減容工程での省エネ革新

Energy Saving Innovation in Wastewater Concentration and Volume Reduction Process by Applying "Heat Recycling"

坂 口 勝 俊* · 井 上 智 裕**

Katsutoshi Sakaguchi · Tomohiro Inoue

1. はじめに

本取り組みは、化学工場における排水濃縮工程のエネルギー使用を、ヒートポンプメーカー等の支援により大幅に削減した省エネルギー活動である。三洋化成工業(株)鹿島工場では蒸気使用量が多く、中でも同使用量の21%を排水の濃縮工程で使用していた。同社では様々な省エネ技術を探査する中で、MVR技術 (Mechanical Vapor Recompression Type 自己蒸気機械圧縮型) によるヒートポンプ式濃縮装置に適用可能性を見出し、メーカ等と技術検討を行った。現地での小型テスト機を用いた試験を経て2015年に実機稼働させたが、運転後も改善等を加え新しいプロセスとして完成させた。2019年2月には最終省エネ評価を行い、従来に比べ画期的な省エネとなることを確認した。こうした取り組みで、濃縮工程におけるエネルギー使用量を従来の95% (年間1,184kL) も削減した (工場全体使用量の6.5%に相当)。

2. 三洋化成工業(株)の会社概要

三洋化成工業(株)は、1949年に界面活性剤メーカーとして京都で操業を開始し、現在は、多様な技術と迅速な開発

力を持つ機能化学品メーカーとして、同社の製造品は生活・健康関連、自動車、電子部品など、様々な分野に供給されている。鹿島工場は、関東地区における生産と物流の拠点で、1976年に操業を開始。主に、複写機で活躍するトナー用材料、車の省エネに寄与する潤滑油添加剤、永久帶電防止剤などを生産している。従業員は約200名(2019年4月現在)、生産数量 約10万t/a/年規模で、第1種エネルギー管理指定工場に該当する。

3. 背景や経緯、目的等

鹿島工場の特定製造過程で発生する排水は、有機成分を多く含むため下水処理が出来ず、減容化せずに産業廃棄した場合に処理費用が高額となることから、従来は蒸気加熱により濃縮・減容化していた。しかし、製造量の増加と共に排水量は年々増加し、同濃縮工程に必要なエネルギーコストも年々増加していた。また、濃縮設備の処理能力も不足していたことから更なる能力増強が迫られていた。加えて、当時の濃縮設備は常圧沸点(100°C)で水を蒸発させる構造であったことから、排水中の樹脂が融け出し、伝熱面への固着が著しく、この掃除に関わる人件費も増加の一途を辿っており、省エネを通じた運転コスト削減が早急に

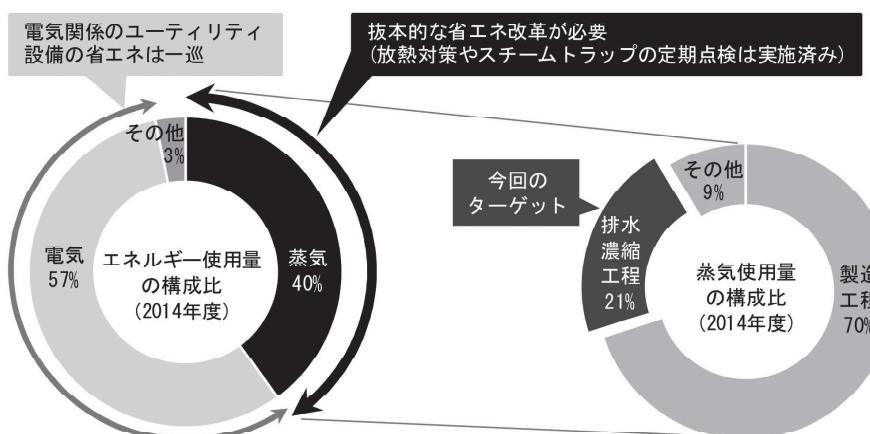


図1 鹿島工場のエネルギー消費の構成比

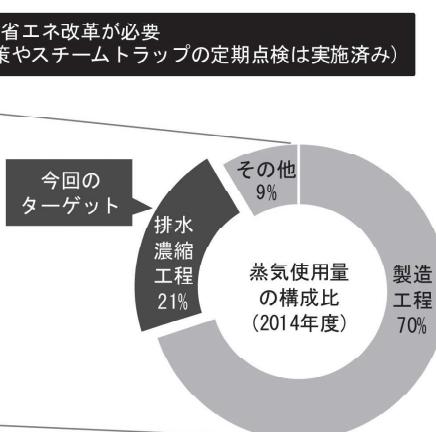


図2 蒸気消費量の構成比

必要とされていた。

当時の鹿島工場におけるエネルギー消費の内訳を図1に示す。蒸気使用量が40%と高く、この内、排水濃縮では21%程度を占めていた(図2)。そこで同濃縮工程の省エネを推進することにより、製造コストの削減を目指すこと

*一般社団法人日本エレクトロヒートセンター 業務部 課長

〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町13-7

(現 四国電力株式会社)

**株式会社ササクラ 東京支社 水処理事業部

東京水処理営業室 室長

〒104-0032 東京都中央区八丁堀4-10-4

とした。

本案件においては、ササクラが排液濃縮に関する技術検討や、省エネルギーシステム構築に関する技術検討を担い、日本エレクトロヒートセンターがエネルギー消費量の計測・評価、ならびに本案件で活用された省エネルギー技術の普及・拡大を外部に発信する役割分担としている。

4. 従来設備の概要

従来設備（ディスク式ドライヤー）は、外部より供給された蒸気で100°C以上に熱したディスク（円盤）に排水を噴霧し、排水中の水分を気化させる仕組みである（図3）。

濃縮水は、スクレーパーにより連続的にかきとられ、ある濃度以上になると濃縮液として設備外部に回収される。

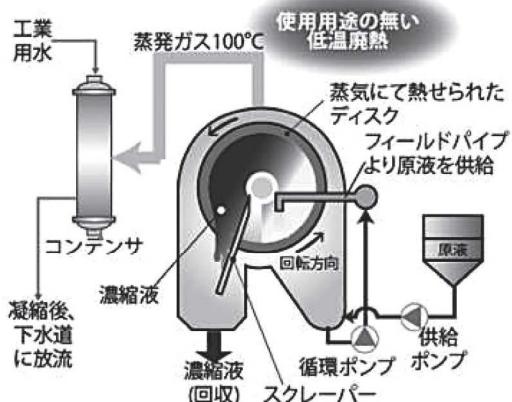


図3 従来の濃縮設備のイメージ図

一方、排水から気化した蒸発ガス（水）は、蒸発潜熱としての膨大なエネルギーを有しているものの、温度が100°C弱と使用用途が無いことから、コンデンサにて冷却・凝縮させた後、下水排水していた。本設備は単効用方式であることから、投入された蒸気エネルギーは、そのまま全量が排水中から気化した蒸発ガスとしてのエネルギーに変換され、廃棄されていたこととなる。

このように、多くの工場の加熱プロセスに共通して言えることは、都市ガスやLPGといった価値の高いエネルギー（＝エクセルギー）は、燃焼により蒸気や直火・熱風などに形態を変え、原料やワークを加熱していく中でトータルのエネルギー量を保存しながら、最終的には価値の低い低温エネルギーに変化していることである。投入エネルギー

はその大半が廃熱となり、地球を温めていることになる。今回はこの点に着目し、建築設備の空調や給湯分野で自立普及しているヒートポンプ技術を活用し、低温で価値の低いエネルギーの質を高めて再利用する（＝熱のリサイクル）こととした。

5. 濃縮設備における省エネルギー化等の検討

排水濃縮において省エネ化を図るには、コンデンサにて発生している廃熱を質の高いエネルギーに再生させ、投入する熱源に活用させるといった「熱エネルギーの循環利用システム」を構築する必要がある。コンデンサの廃熱は、エネルギー量は十分あるが、温度が低下していることから、MVR等の活用が重要となる。検討においては、MVRの他にも技術的には確立している多重効用蒸発方式（蒸発潜熱をカスケード利用）についても検討を実施した。

5.1 方策1：MVR（機械式蒸気再圧縮）の活用

廃熱は蒸発ガス（気体）の形態で存在するので、圧縮機に吸い込み、同ガスを圧縮することで容易に必要な温度まで昇温することができる。本方策は、コンデンサにて発生していた廃熱の質（＝温度）を高めることで、加熱用スチームとしての再生・再利用を図るものである。また、蒸発缶内を減圧に保つことで、真密度に応じて蒸発温度を任意な温度にまで下げることが出来るので、排水中に含まれる樹脂の融着を防ぐと共に、新設備におけるシール類を始めとする部材の熱損傷を緩和出来ると判断した。

以上の点を反映させたテスト機をササクラにて用意し、三洋化成工業株鹿島工場の現場に持ち込み、実液による確認運転を実施した。真空操作により排水の沸点を下げることで、樹脂の融着を防ぐことを念頭に置きながら、最初のテストでは蒸発温度70~80°Cを目安とした蒸発操作を行うことで、ベストな運転（温度）条件を探った。しかし、同温度域では原液成分中の樹脂が融け出し、テスト機内の熱交換器表面に固着してしまい、テスト機が稼働不能となってしまった。一度固着すると、薬品には溶解しないため、物理的な洗浄（ブラシや高圧ジェット洗浄）が必要となり、数日間を要する物理洗浄を行うなどしてトライアルを複数回重ねながら、最適な蒸発温度60°Cを見出した（図4）。これにより、従来設備で発生していた伝熱面から樹

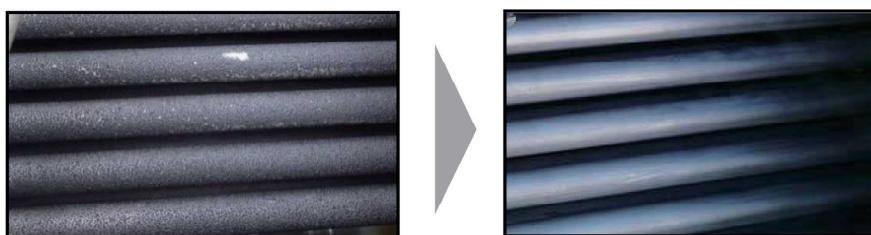


図4 伝熱部への樹脂固着状況

（左：蒸発温度80°C / 熱交換器表面に樹脂が固着、右：蒸発温度60°C / 樹脂の固着は確認されない）

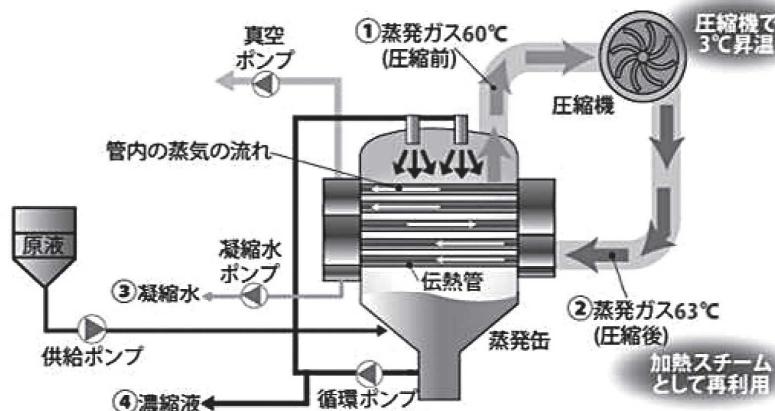


図5 廃熱回収を可能とするヒートポンプ式濃縮設備のイメージ図

脂を取り除く掃除自体は無くなり、作業員の負担軽減が見込まれた。

上記の他、以下の6点についても考慮しながら、排水濃縮および省エネシステムに関する技術検討、さらには導入設備の開発・制作を主にササクラが実施した。

①スケーリングの汚れ

汚れは熱交換器の伝熱性能や設備の省エネ性能の低下を招いてしまうことから、重要な確認項目である。綿密な事前テストを複数回実施した結果、年に2回の薬液循環洗浄により性能が維持されることを確認した。

②材質選定

排水の腐食性有無や、含まれる樹脂等を考慮するとともに、熱効率を悪化させないことも考慮し、伝熱管の材質としてチタン、蒸発缶の材質としてステンレス(SUS316)を選定した。

③発泡性

テスト機での運転の結果、減圧下で蒸発を開始すると急激に泡立ちが発生し、泡沫がヒートポンプ本体に吹き上がる現象が確認された。泡立ちは設備の故障を招く恐れがあることから、様々な消泡剤の選定検討を行い、連続的に消泡剤を滴下することで泡立ちを抑制し安定運転を実現出来ることを検証した。

④沸点上昇

排水濃度が上がると、沸点上昇を引き起こすケースもあるが、今回はほとんど確認されなかった。

⑤圧縮機の選定

圧縮機については、遠心式あるいはルーツ式等の種類の中から選定することとなる。サンプルテストの結果より、排水濃縮時の溶液の沸点上昇がほとんど確認されなかったことから、大容量かつ効率性に優れたターボ式を選定した。

⑥凝縮水の水質

従来の濃縮設備で発生していた凝縮水と同様に、サンプルテストで収集した凝縮水も下水排水に何ら影響の無い水質であることが確認された。

以上の項目を慎重に確認しつつ、ササクラが開発したヒートポンプ式濃縮設備の原理は次の通りである。まず、原液中の水分は高温に加熱された伝熱管表面に触れることで60°Cの蒸発ガスとなる(図5の①)。蒸発ガスは圧縮機で圧縮されることで、温度は3°C程度上昇し、熱源として伝熱管内部に供給される(同②)。原液を蒸発させた後の蒸発ガスは、凝縮水として排出される(同③)。また、濃縮排水は回収後に産業廃棄される(同④)。以上により起動時のみ外部からの蒸気を必要とするが、定常時はほぼ電力のみで濃縮が進み、廃熱がほとんど発生しない“熱エネルギーの循環利用システム”を実現した。

5.2 方策2：多重効用蒸発方式の活用

多重効用蒸発方式(図6参照)とは、蒸発ガスを加熱用蒸気として別の蒸発缶に用いる手法(蒸発操作)であり、既に技術的には確立している。単効用方式に比べ、二重効用や三重効用方式とすることで、必要な蒸気量はそれぞれ1/2、1/3と削減可能であるが、最後の蒸発缶からは最終的に蒸発ガスとして廃熱が発生する。技術的には、効用段数を増やすことで熱効率は向上するが、蒸発缶数の増加に伴う初期コストの増大や、設置面積が課題となる。本方策について検討したものの、方策1と同程度の省エネ率95%を実現するには、効用数を20段にまで増やす必要がある。しかし、蒸発缶を20個も設置するスペースがないこと、更には費用対効果が大幅に悪化することから、本方策は不採用とした。

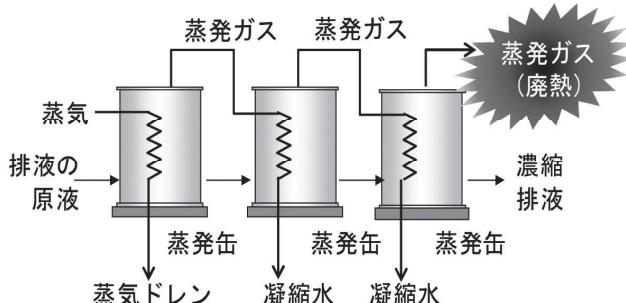


図6 三重効用蒸発方式のイメージ図



図7 従来の濃縮設備外観

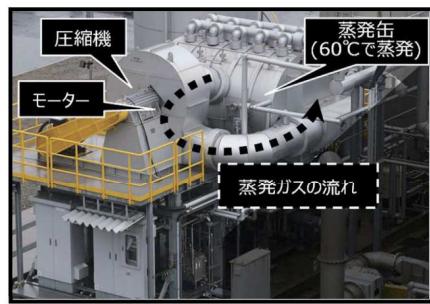


図8 導入後の濃縮設備外観

以上により、MVR方式の採用を決定した。

従来の濃縮設備外観を図7、導入後のヒートポンプ式濃縮設備の外観を図8に示す。

6. 排水濃縮工程におけるオートメーション化の検討

従来の設備では、排液残量の確認のため、作業員が何度も現場に出向き、残量に応じて現場で設備の起動・停止を行うなど手間を要していたため、省人化についても検討を行った。導入後の設備では、計器室から遠隔での起動・停止を可能にするとともに、排液残量に応じて設備が自動発停出来るようにすることで、現場作業員の負担を軽減し、その分、省エネに繋がるユーティリティ設備の保守に時間を割くことが可能となった。

7. 省エネルギーの達成状況

日本エレクトロヒートセンターが中心となり、ヒートポンプ式濃縮設備のエネルギー使用量等の計測を行い、表1

の結果を得た。排水濃縮工程で95%（原油換算1,184kL/年），鹿島工場全体では6.5%（2014年度比/設備導入前年）の削減を実現し、まさに異次元と言える省エネ効果が確認された。なお、単純な投資回収年は0.72年であり、非常に高い費用対効果を得ることが出来た。

図9に導入前後のエネルギー収支を模式的に示した。従来の設備では、排水中の水分を蒸発させるために必要なエネルギーを100%とした場合、115%に相当する蒸気エネルギーを投入する必要があった。すなわち、システムとしての熱効率は87%であった。それに対し、導入後の設備では、必要なエネルギーのたった5%に相当する投入エネルギーで濃縮が出来ることが実測により確認された。これは、排水から発生する蒸発ガスを機械的に圧縮することで温度上昇した蒸発ガスは、その全量が加熱蒸気としての再生（=熱のリサイクル）を果たし、自己熱再生技術の原理で再利用が出来たためである。これにより、外部から供給していた蒸気エネルギーは劇的に削減され、システムとしての工

表1 排水濃縮工程の省エネルギー等の達成状況

	導入前	導入後	比較
エネルギー原単位 ^{*1}	117L/kL(排水)	6.5L/kL(排水)	110.5L/kL削減(▲94%)
エネルギー使用量 ^{*2}	1,249kL/年	65kL/年	1,184kL/年削減(▲95%)
二酸化炭素排出量 ^{*2}	2,052t-CO ₂ /年	104t-CO ₂ /年	1,948t-CO ₂ /年削減(▲95%)

(前提) * 1：エネルギー原単位は、排水1kL当たりのエネルギー使用量（原油換算）とする。

* 2：年間排水量は10,766 kLとする。（実績値/2018年1月～12月）

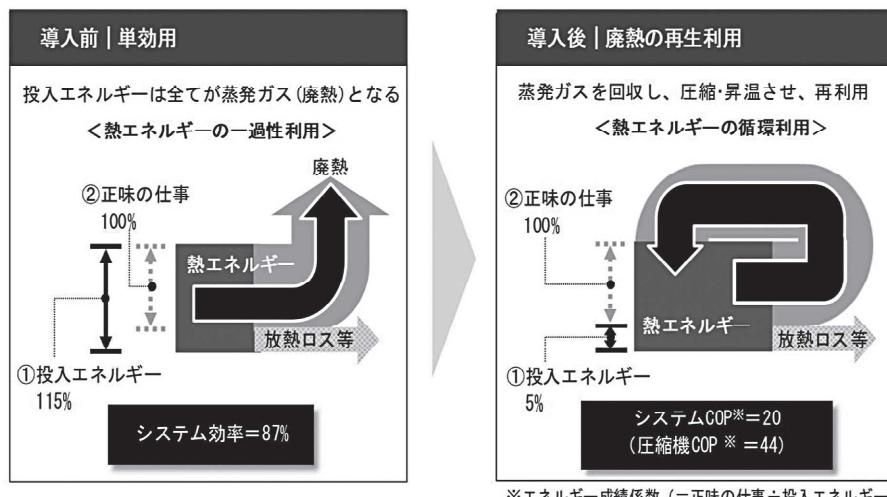
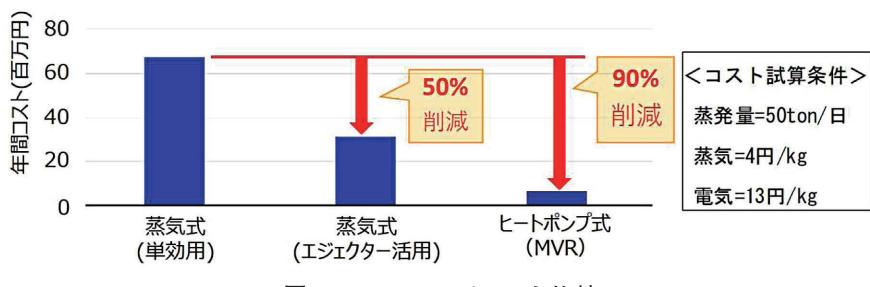


図9 導入前後のエネルギー収支（イメージ図）



エネルギー成績係数は20(圧縮機単体では40)を発揮している。

8. ササクラが有する濃縮技術の紹介

ササクラは、海水淡水化装置の専門メーカーとして創業以来たゆまぬ研究開発と技術の蓄積を重ね、現在では業界屈指の技術と実績を有するリーディングメーカーの地位を確立している。中東諸国をはじめ世界の多くの国々に当社の製品が納入され、「海水淡水化のササクラ」として絶大な信頼を頂いている。1983年にMVRタイプの海水淡水化装置の初号機を納入し、海水淡水化装置で積み重ねた技術を応用し、1987年には濃縮プロセス用途にヒートポンプ式濃縮装置として販売を開始した。濃縮装置は約900基の導入実績があり、そのうち約8割はヒートポンプ式濃縮装置である。

図10に蒸気タイプ(単効用タイプ)と、それに蒸気エジェクターを活用したタイプ、最後にヒートポンプ式濃縮装置を対象とし、それぞれのランニングコストの比較を示す。蒸気エジェクターの活用により、50%のエネルギー削減が可能であるが、ヒートポンプ式濃縮装置はさらに高い90%もの削減が可能であり、数千万円から規模によっては数億円のエネルギーコスト削減を実現した例もある。

9. 本案件以外のヒートポンプ式濃縮設備導入事例の紹介

9.1 切削油排水の減容化事例

自動車のエンジン工場や自動車部品の加工工場から排出される切削油排水は、ある程度の期間に亘って循環利用されているものの、一定期間使用すると排水となる。この排水は油を多く含むため、通常の水処理が難しいことから、産業廃棄物となる例がほとんどである。そこに濃縮装置を導入することで、廃棄物量を1/10に削減することが出来た。濃縮装置のユーティリティコストはかかるものの、1日50トンの廃液を全量産廃にした場合と比べて年間約1億円のコスト削減メリットが出た。

9.2 廃酸の濃縮・回収事例

製造工程の中では、洗浄や中和などに使用された酸・アルカリは濃度が薄まることから、最終的には産廃廃液として捨てられるケースが多い。しかし、廃液は濃縮して水のみを分離し、高濃度の酸・アルカリに再生できればプロセ

スでの再利用が可能である。例として塩酸濃縮を挙げる。塩酸を濃縮する場合、蒸発したガス(水)に塩酸が混じってしまうため、ヒートポンプ式濃縮装置で濃縮しようと、圧縮機がすぐに腐食してしまう。そこで、塩酸混じりの蒸発ガスについては、縁切りを目的とした熱交換器を介して一旦清水を蒸発させ、その蒸発ガスをヒートポンプで圧縮・昇温することで塩酸濃縮の熱源スチームとして再利用している例がある。1日10トンの廃酸を全量産廃にした場合と比べて、年間約3,000万円のメリットが出た。

9.3 既設濃縮装置へのヒートポンプの後付け事例

(調味料製造工程)

調味料を製造している某工場では、畜肉や魚介類を釜で煮た後、煮液を濃縮することでエキスを製造している。以前は大量の蒸気を用いて濃縮しており、1日60トンの水分を取り除いていた。つまり、少なくとも60トン以上の蒸気が必要となる。この既設装置に対し、ヒートポンプを追加設置することで、省エネ性の高い装置へと改造した。ヒートポンプの動力として、電気代が約2,000万円増えたが、蒸気代が約9,000万円減り、トータルで7,000万円のコスト削減が出来た。

9.4 ヒートポンプ式設備の導入ポテンシャルについて

日本国内の他業種への波及により期待される効果(想定)は次の通りである。まず、(株)富士経済が行った調査¹⁾では、濃縮・蒸留工程において31PJ/年(食品・紙パルプ・有機化学・医薬・石油他)の廃熱ポテンシャル量を推計している(253件のエネルギー管理指定工場に対して、ヒアリング・アンケート調査を実施し、その結果から国内の全体量を推計)。仮に、この廃熱量の10%に対し、本案件と同様の技術を適用し、同熱量において省エネ効率80%を実現出来た場合、2.5PJ/年(6.5万kL・原油換算)の削減効果が期待される。経済効果としては、1.3円/MJの場合、33億円の経済効果が国内で見込まれる。なお、1.3円/MJの根拠としては、都市ガス単価60円/m³、熱量45MJ/m³とした場合の熱量単価 [= 60(円/m³) ÷ 45(MJ/m³)] である。

(備考) 本案件は、2019年度省エネ大賞(主催:一般財団法人省エネセンター、後援:経済産業省)の省エネ事例部門において、「資源エネルギー庁長官賞」を受賞した。

参考文献

- 1) (株)富士経済; 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査
2017, (2017.10), P.15.