

半導体業界の常識を知恵と工夫で打破！ 水冷ヒートポンプ有効活用による純水加 温蒸気量 1/2 への挑戦

Introduction of Our Challenge for 50% Reduction of Pure Water Heated Steam Amount Achieved by our Breaking Through Idea using “Water-Cool Heat Pump Method”

山下 幸四郎
Koshiro YAMASHITA

In order to achieve carbon neutrality at our factory, we have been continued challenging efforts. The efficiency of utility facilities at our semiconductor factory were drastically improved based on our breakthrough ideas, and we achieved great energy saving effects.

Three successful efforts are introduced. They are achieved by our unique ideas suggested from the new point of view apart from our industrial common sense.

① Lower : Power consumption has been LOWERED by operating the air conditioning systems in the clean rooms as “Just in Time” even with the existing facilities with less investment and construction period.

② Stop : The existing system required the continuous makeup water supply to keep the pure water quality even though such supply is not necessary. The brand-new seal pot system has been developed and this system STOPS “the continuous makeup water supply”, then realizes the intermittent makeup water supply at the right timing. With this seal pot system, we achieved 96% reduction of the water consumption with the same pure water quality. This system now becomes the industrial standard for the water treatment makers.

③ Change : The pure water heating method has been CHANGED from the industrial common method using “steam” to “water-cooled heat-pump” method with our unique ideas. Then 50% reduction of heated steam amount was achieved by the application of the water-cooled heat pump method.

Key words :

- ① *Challenges to achieve energy reduction by half in 2025*
- ② *Breaking through ideas at the aged semiconductor factory*
- ③ *Realization of energy saving by revolutionally pure water heating method*

1. まえがき

本事例は、半導体工場の純水設備におけるエネルギーを、業界初となる水冷ヒートポンプの有効活用で大

幅削減した事例である。業界では安価な蒸気加温が常識の中、蒸気加温より効率の優れた電気加温のひとつである水冷ヒートポンプに着目し導入を検討。当初メーカーとの共同設計では、2つの課題により実効果は定格

効果の59%に留まる事がわかった為、①まず24時間連続運転の実現に向け、水冷ヒートポンプ設置位置を見直し運転効率を最大化、②更に加温効率最大化をめざし、環境の外乱に左右されないクッションタンクを用い、水冷ヒートポンプ入口温度を理想水温である16℃以上を保つ事に成功した。

蒸気量62%減の3,299t/年、CO₂排出量533.7t/CO₂年の削減を達成した事例である。又、その他にも投資、工期を抑えたクリーンルーム空調JIT（ジャストインタイム）、水処理メーカの標準仕様となったシールポット補給水の間欠化、2つの事例も合わせて紹介する。

2. 省エネ活動の背景、経緯、目的

当社は、すべての企業行動を通じて、環境問題やエネルギー問題の解決と自然との共生を図り、2025年に持続可能な地域・社会を実現するためのアクションプランとして「デンソーエコビジョン2025」を2015年度に策定した。エコビジョン2025では、2025年度に達成すべき3つの目標（ターゲット3）として「エネルギー1/2」「クリーン2倍」「グリーン2倍」を定め、この3つの目標を「製品」「工場」「社員」「経営」のそれぞれの段階で実現すべく、10の具体的な行動「アクション10」を推進することで、2025年CO₂原単位50%削減（2012年比）と定め、全社一丸となって目標達成に向け挑戦している（Fig. 1）。

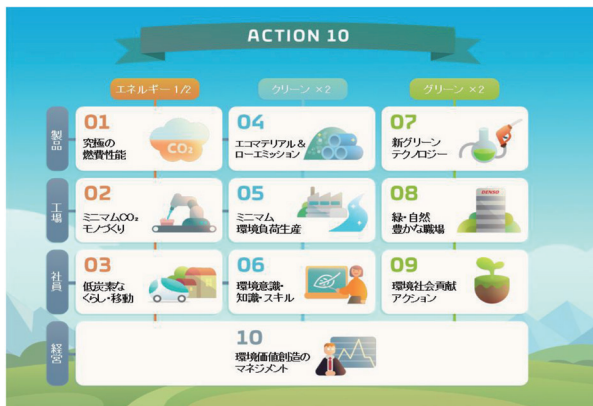


Fig. 1 Denso Eco Vision 2025, Action 10

当製造部では、半導体センサ、ASIC、パワーモジュールなどに搭載するICウエハを、本を含む全5拠点で

生産し社内全製造部へ供給。半導体製品を通じて、全社の競争力強化に貢献している（Fig. 2）。

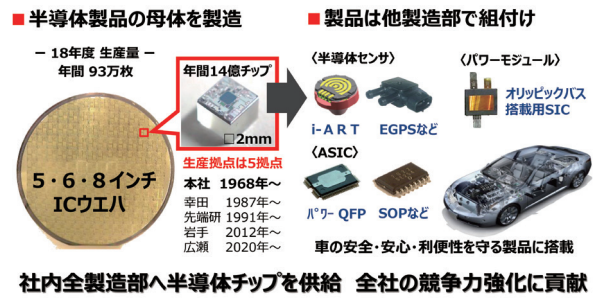


Fig. 2 Overview of Semiconductor Manufacturing Department 2nd

私達が生産するICウエハは、温湿度を一定に保った24時間365日連続稼働のクリーンルームで生産。

空調、純水、エア、冷却水など10のユーティリティを連続供給している（Fig. 3）。

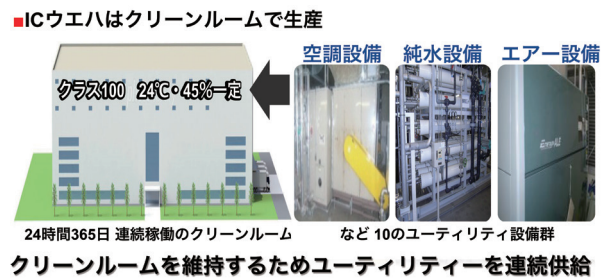


Fig. 3 Clean Room Overview

こうした工場環境からCO₂排出量は全社でも上位となっており、全社目標2025年CO₂原単位50%減（2012年比）を3年前倒し、22年迄に達成する高い目標を設定した（Fig. 4）。

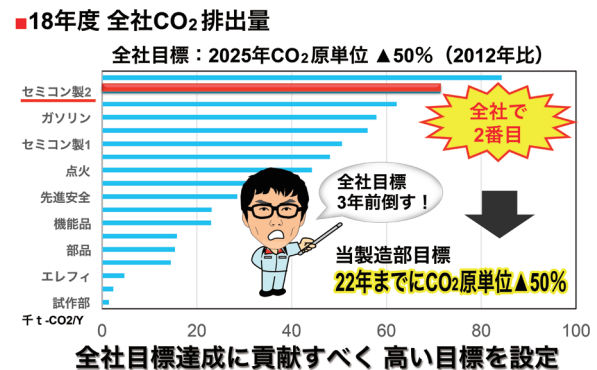


Fig. 4 Company – Wide CO₂ Emissions and Targets

特に本社工場は、60～80年代にかけて建てられた超老朽化工場で、近年の最新半導体工場のエネルギー割合と比較すると、ユーティリティ設備の占める割

特
集

合が6割と高い。そのためユーティリティー設備のエネルギー低減が課題であり、ユーティリティー設備に特化した省エネ活動に取り組んできた (Fig. 5)。

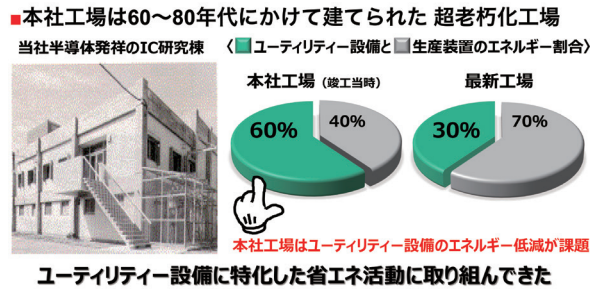


Fig. 5 Challenges and Offensives Points of the Head Office Factory

3. エネルギー管理体制

当社では環境経営の最高意思決定機関として1992年12月に「環境委員会」を設置し、年2回の方針策定、活動の進捗状況の検証、課題や解決策の検討を行っている。2016年度からエコビジョン2025を強力に推進するため、経営役員を委員長とした「エコファクトリー小委員会」を設置し、全社横断的に推進 (Fig. 6)。特に工場の省エネルギー活動においては、下部組織のエネルギー分科会にて「エネルギー1/2」必達に向け、20部会 (製造部) 毎に年5%原単位低減計画の立案、毎月の実績管理を含め活動を展開している (Fig. 7)。本事例は16～19年度に大きな成果を上げた、セミコンダクタ製造2部本社工場の取り組みを紹介する。

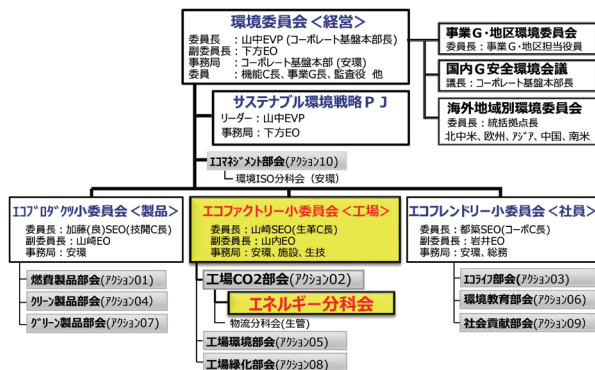


Fig. 6 Environmental Management System

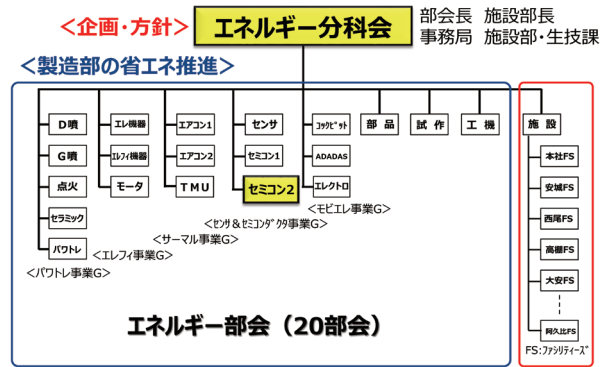
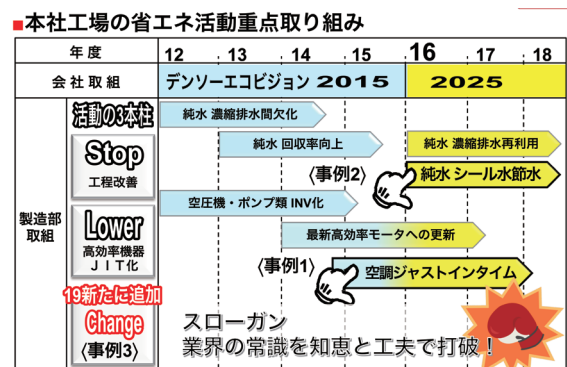


Fig. 7 Energy Saving Promotion Organization

4. 省エネ事例

本社工場ではエコビジョン2025達成に向け、省エネ活動の活性化と工場の一体感醸成を狙い、16年度に工場メンバー全員からスローガンを募集。「業界の常識を知恵と工夫で打破！」を掲げ、スタートを切った。また活動の推進力を更に増すため、切り口である「止める・Stop」「下げる・Lower」に、19年度「代える・Change」を新たに追加。3本柱としエネルギー1/2の3年前倒し必達に向け、工場一丸となって挑戦してきた。今回は16～18年度に行った「Stop」「Lower」に加え、19年度に大きな成果を上げた「Change」の代表事例を説明する (Fig. 8)。



エネルギー1/2の3年前倒し必達に向け 工場一丸となって挑戦!

Fig. 8 Semiconductor Manufacturing Department 2ND Energy Saving Activity Plan

<事例1 空調設備「下げる・Lower」>

投資、工期を抑えたクリーンルーム空調 JIT (ジャストインタイム)

本社工場のクリーンルーム空調は、当時主流の複数エリアを1台の大型ファンで全体的に空調する全体循環方

式で、ゾーン内の高負荷エリアに合わせ送風するため、ムダが多く消費電力が高い。一方、最新のクリーンルーム空調は、複数の小型ファンを台数制御し、ゾーンではなくエリア負荷に合わせ送風する個別循環方式で、ムダが少なく消費電力は低い。全体循環方式の消費電力を下げるには、個別循環方式への更新が一般的だが、多額の投資と工期が必要となることから、既存方式のまま消費電力を下げることをめざした (Fig. 9)。

■ 本社工場の空調方式は数十年前の方式

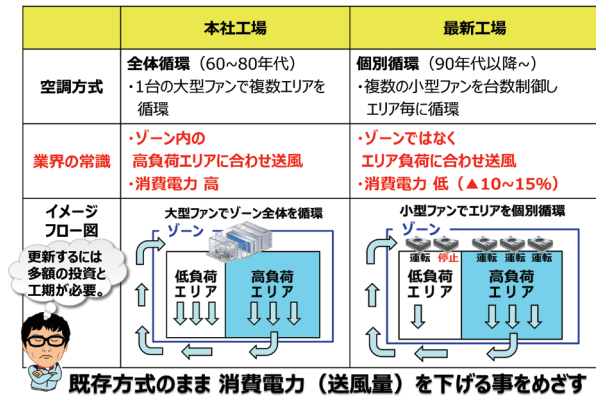


Fig. 9 Clean Room Air Conditioning System Comparison

そこで、現状は大型ファンにぶら下がるエリア毎で考えていた空調負荷を、視野を広げ、大型ファン毎に区画されているゾーンで考えてみた。高負荷ゾーンから中、低負荷ゾーンへ負荷を分散できれば工場全体の消費電力 (送風量) を下げる事が出来ると考えた (Fig. 10)。

■ 工場全体の空調負荷イメージ

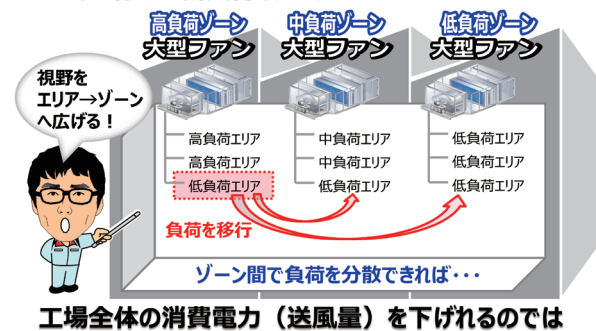
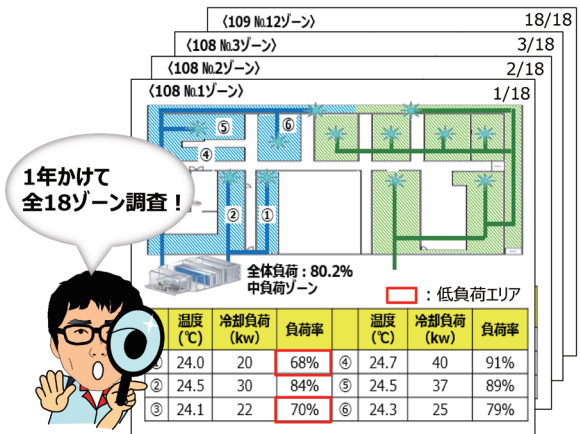


Fig. 10 Consider the Air Conditioning Load for the Entire Factory

1年かけて工場全18ゾーンの空調負荷を調査しマップに落とし込み見える化した結果、高負荷ゾーンの中の、低負荷エリアの負荷を、中負荷ゾーンへ分散すれば、計算上、消費電力 (送風量) を下げれるゾーンがあることを突き止めた (Fig. 11)。

■ ゾーン毎の空調負荷マップ



負荷分散で消費電力を下げれるゾーンを発見

Fig. 11 Factory Air Conditioning Load Visualization

負荷分散はダクトの繋ぎ替えて、更新に比べ、投資額 1/30、工期 1/3 で行い、消費電力▲13%を達成。

全体循環方式は負荷に合わせた送風が難しいという、業界の常識を打破することに成功した (Fig. 12 (a)) またこの改善を、16~18年度にかけ工場全体へ横展開し、18年度末でCO₂排出量▲46%を実現した (Fig. 12 (b))

■ 全体循環方式同士で空調ダクト繋ぎ替え (a)

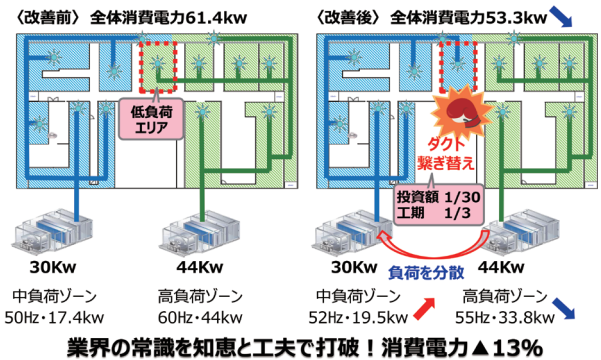


Fig. 12 Air Conditioning "JIT" Realized with the Whole Circulation Method

〈改善横展開後のCO₂排出量〉 (b)

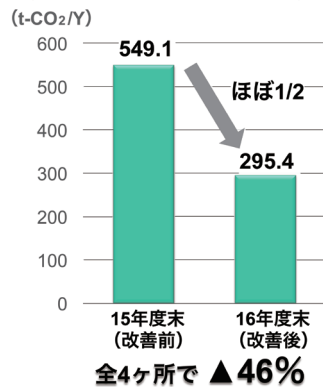


Fig. 12 Air Conditioning "JIT" Realized with the Whole Circulation Method

<事例2 純水設備「止める・Stop」>

水処理メーカーの標準仕様となったシールポット補給水の
間欠化

過去から純水設備における水削減活動に力を入れ、RO濃縮排水間欠化や、生産現場からの回収率向上など純水1m³製造するために必要な水を40%削減してきた。今回、削減率1/2をめざし、省エネ改善が唯一手つかずで、連続補給が業界の常識であった、シールポット補給水の間欠化に取り組む事とした (Fig. 13)。

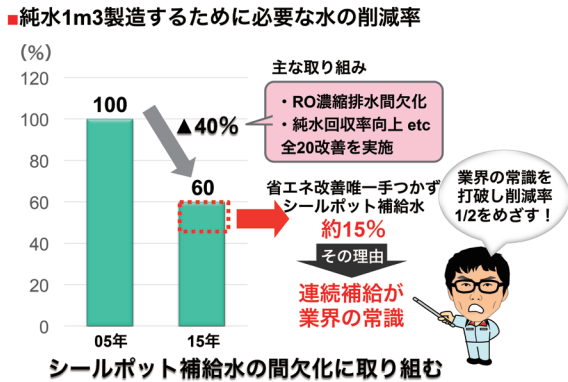


Fig. 13 Water Reduction Activities in Pure Water Facilities from the Past

純水は空気に触れると品質（水質）が低下する。そのため純水槽内は常に窒素シールされており、窒素水封機器がシールポットで、①純水槽の水位上昇により窒素はシールポットへ押し出され気泡となり排出。②シール水の水位が上昇しドレンとしてオーバーフローする。この繰り返しにより、シール水が低下し水封が切れ、外気が純水槽内へ逆流し品質（水質）が低下する。③この水位をレベル制御すれば間欠補給できるが、窒素がシールポットへ排出される際、水面が大きく波立ち誤検知が発生するため、業界では品質を優先し連続補給で水位を確保。また、波立ちによる誤検知の解決策も見いだせずいた (Fig.14)。

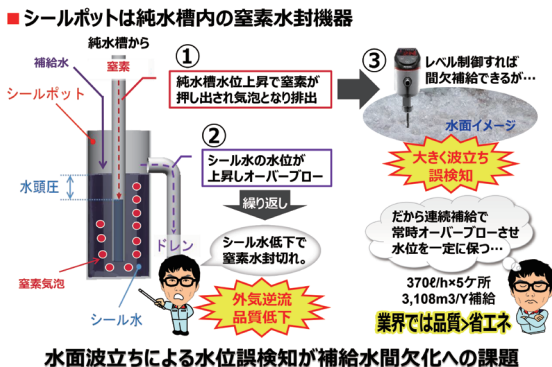


Fig. 14 The Role of the Seal Pot and the Issue of Intermittent Make-up Water

そこで発想を転換し、水面の波立ちを抑えるのではなく、波立ちのない場所を作れば良いと考えた。

水位測定部①を、連通管②でシールポットとは別に作る形状をメーカーへ提案し、共同でテスト機を制作。

テストを繰り返し、窒素排出時の波立ちに影響を受けず、水位を正常に検知できる事を確認。業界の常識を打破し、補給水間欠型のシールポットを完成させた (Fig. 15 (a)) このシールポットを本社工場内、全5ヶ所へ横展開しシールポット補給水CO₂排出量▲96%を達成した事で、水削減率1/2も達成した。また社内へ横展開すると共に、水処理メーカーの標準仕様として全国へ横展開しており、大きな波及効果が生まれている (Fig. 15 (b))。

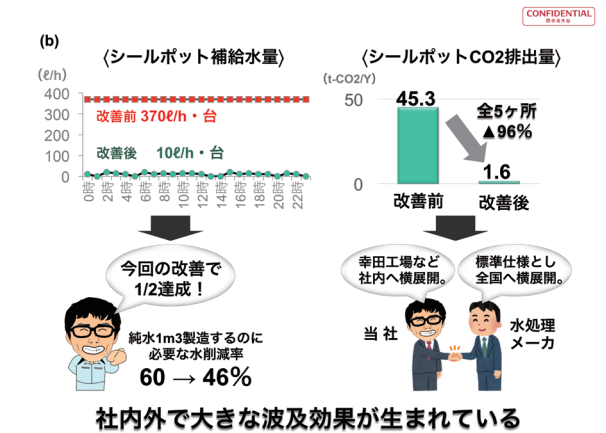
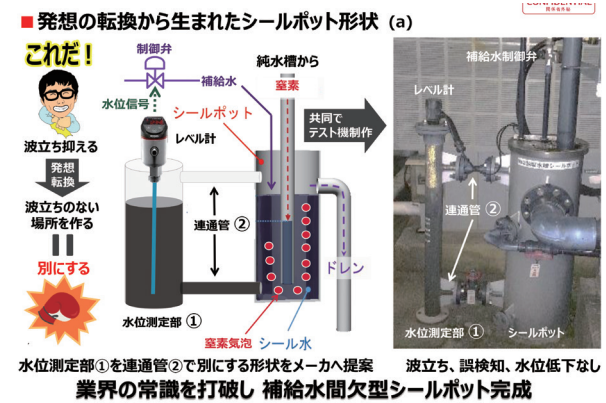


Fig. 15 Collaborative development of Intermittent Make-up Water Seal Pot with Water Treatment manufacturer

<事例3 純水設備「代える・Change」>

水冷ヒートポンプ有効活用による純水加温蒸気量1/2

純水設備は工業用水を、ろ過器、ろ過膜、純水器などで水分中の不純物を除去し、水質17.5MΩ以上の水にする設備で、蒸気は熱交換器で水の加温に使用。年間を

通し 25～30℃で、ろ過膜へ供給している (Fig. 16) これは ①ろ過膜が水温の影響により流量が変動するため、25℃以上なければ必要供給量を確保できない。このため ②水温が 10℃以下になる冬場は特に多くの蒸気が必要となっている (Fig. 17)。

■蒸気加温は一次工程内で実施

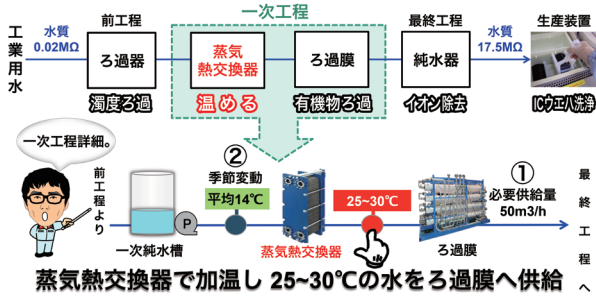


Fig. 16 Overview of Pure Water equipment

■ Fig. 16 ①・②参照

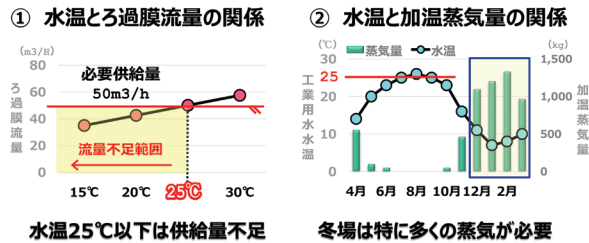


Fig. 17 Relationship with Water Temperature

過去から「止める・Stop」「下げる・Lower」の切り口で、加温蒸気量を▲20%低減してきたが、更なる低減に向け、新たな切り口「代える・Change」で、加温蒸気量低減に挑戦する事とした (Fig. 18)。

■蒸気低減の考え方

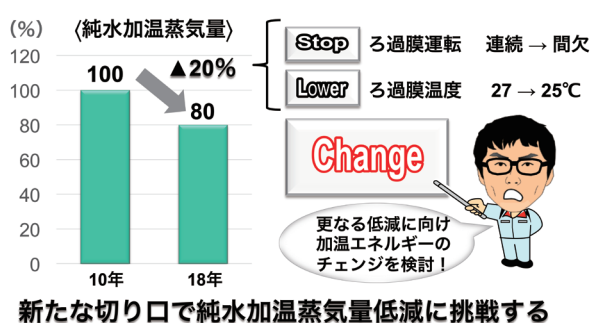


Fig. 18 New Way of Thinking

水の加温に使うエネルギーは大きく分け、蒸気と電気があり、大量の水を瞬時に 25℃にするには、加温効率の良い蒸気加温が業界の常識であった。しかし近年、ヒートポンプ (以降 HP) の普及により、加温効率が逆転したことに着目。業界の常識を打破すべく、HP 有効活用の検討を開始した (Fig. 19)。

■蒸気の加温効率を100とした場合

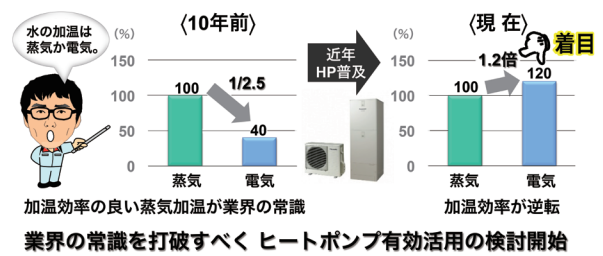


Fig. 19 Steam and Electricity Heating Efficiency

最初に検討したのが HP の方式選定である。HP は ①空気から熱を奪い加温する空冷式と、②水から熱を奪う水冷式、熱源が異なる 2 種類があり、水冷式の方が熱源から多くの熱を奪う＝効率が良い方式である。半導体工場には空調用冷水、生産装置冷却水など、電気を使い水温を下げる設備が数多くある。

これら設備の水を熱源とし水冷 HP で熱を奪えば、水温を下げるための電力を低減でき、HP 本体電力が増える分を相殺できると考え、より大きな効果が期待でき効率も良い、水冷 HP を採用する事とした (Fig. 20)。次に熱源の選定として、水の温度を冷やす設備をリストアップ。もっとも消費電力の多い、クリーンルーム空調用冷水を熱源とした。純水とクリーンルーム空調、半導体工場を象徴する設備間で全国初となる設備の垣根を超えた水冷 HP 省エネ改善に取り組んだ (Fig. 21)。

■HPの熱源は2種類

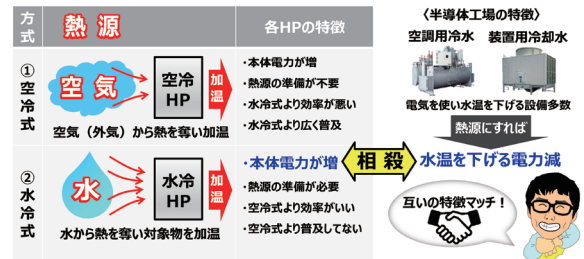


Fig. 20 Heat Pump Type Selection

■電気をを使って水の温度下げる設備をリストアップ

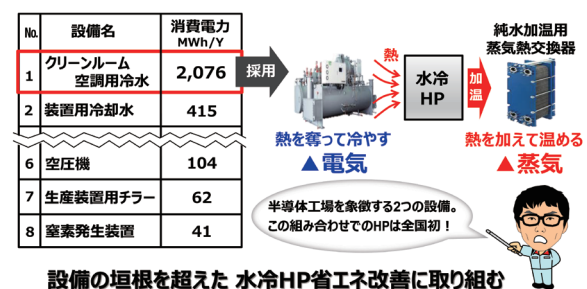
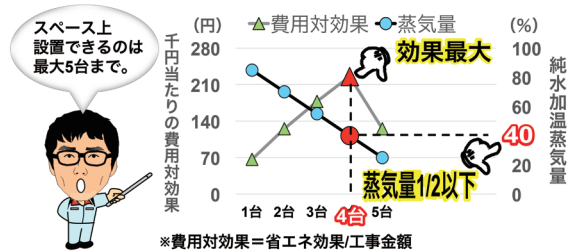


Fig. 21 Selection of Heat Source for Water-cooled Heat Pump

続いて水冷 HP の台数（能力）を選定するため、設置スペースを加味し効果を算出した結果、純水加温蒸気量が目標としている 1/2 以下で、費用対効果が最大になる 4 台設置で設計を進める事とした (Fig. 22).

■費用対効果と純水加温蒸気量の関係



蒸気量目標値・費用対効果最大の4台で設計を進める

Fig. 22 Water-cooled Heat Pump Capacity Selection

導入に向け水処理メーカーと共同設計し予想効果を算出。水冷 HP の定格効果（カタログ値）を 100% とすると、実効果は 59% で 41% も低下する事がわかり、その原因として 2 つの課題が浮上した (Fig. 23).

■定格効果と実効果

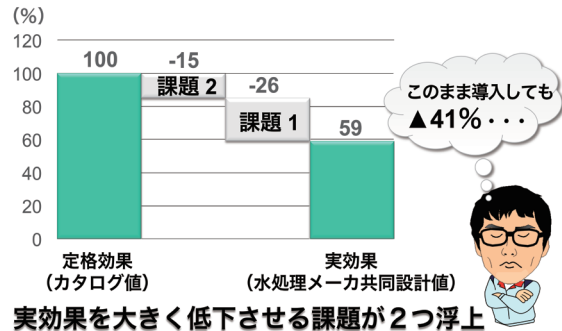


Fig. 23 Expected Effect when Four Water-cooled Heat Pumps are Installed

1 つ目の課題は水冷 HP が連続運転できない事である。その理由は、熱源側のクリーンルーム空調用冷水は 24 時間連続運転に対し、加温側の純水一次工程は間欠運転。このため水冷 HP の運転時間を、純水一次工程の運転時間である 16 時間に合わせる必要があり、運転効率が低下してしまう (Fig. 24).

■水冷HPは両側が通水してないと運転できない

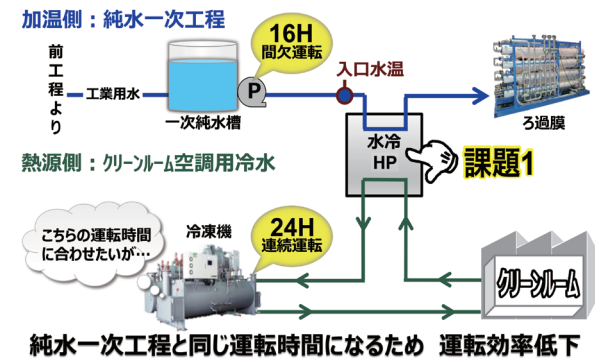


Fig. 24 “Exercise 1” Intermittent Operation of Water-cooled Heat Pump

2 つ目の課題は、水冷 HP の加温側入口水温が低下する事である。水冷 HP の加温効率は加温側入口水温で変動し、理想は 16℃ 以上となる。しかし、純水の元となる工業用水の水温は季節で変動する。より多くの蒸気を消費する冬場 (11 月～3 月) は 16℃ を下回り、加温効率が低下してしまう (Fig. 25).

■水冷HPは加温側入口水温で加温効率に変化

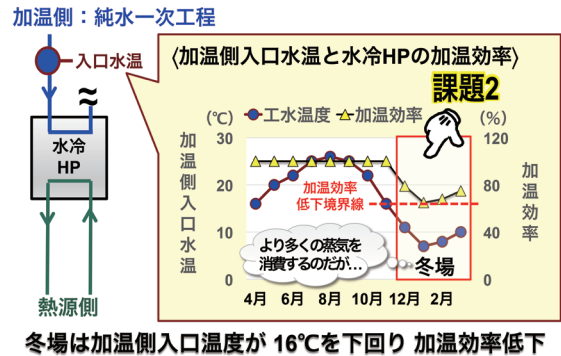
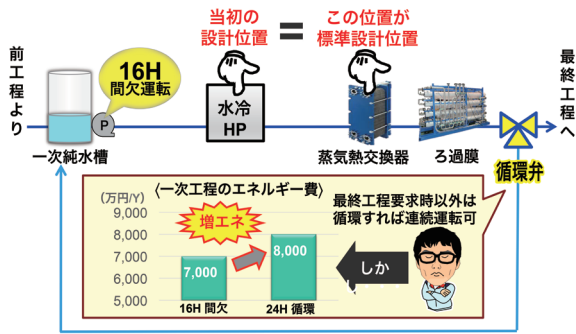


Fig. 25 “Exercise 2” Water Temperature fluctuation at the Inlet of the Water-cooled Heat Pump

水冷 HP の効率を最大限引き出し、純水加温蒸気量 1/2 を達成すべく、2 つの課題解決に取り組んだ。

課題 1 の対策として、水冷 HP の運転効率最大化をめざし、設置位置を再検討。蒸気加温は「止める・Stop」の観点から、ろ過膜の直近で供給量だけを加温する。そのため蒸気熱交換器の位置は、ろ過膜直近が標準で当初、水処理メーカーと設計した水冷 HP の設置位置は、蒸気熱交換器の直近であった。純水一次工程全体を 24 時間連続運転する事は可能だが増エネになるため、水冷 HP のみを 24H 連続運転できる位置はないか、今までの考え方に捉われず検討する事にした (Fig. 26).

■省エネの観点から加温はろ過膜直近が標準



今までの考え方に捉われず 水冷HPを24H連続運転できる位置を検討

Fig. 26 “Measures1-1” Reexamination of Water-cooled Heat Pump Installation Position

そこで見方を変え、加温をする位置から、加温をする目的に視点を移し考えた。加温の目的は、ろ過膜の流量確保のみで他に制約がない。つまり、ろ過膜の手前であれば、設置位置に制約はないと判断し、一次純水槽に着目。前工程より工業用水が自動補給される一次純水槽は、水位制御により常に一定量の水位が確保されている。水槽内で循環加温すれば、水冷HPだけを24時間連続運転出来ると考え、水処理メーカーに提案、設計に落とし込み実現。水冷HPの運転効率を最大化し、26%の効果引き上げに成功した (Fig. 27)。

■加温をする位置から目的に視点を移し考える

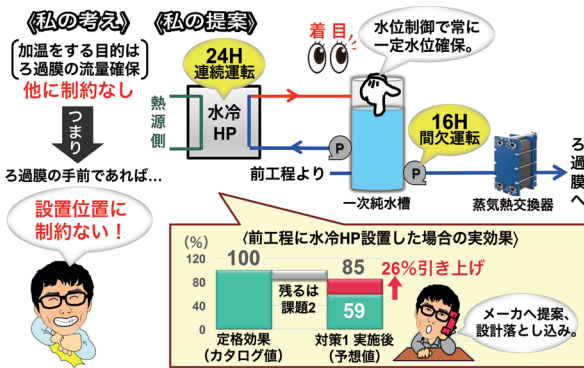


Fig. 27 “Measures1-2” Change of Water-cooled Heat Pump Installation Position

課題2の対策として、冬場の水冷HP加温効率最大化をめざし、加温側入口理想水温である16℃以上での安定化を検討。冬場、前工程から一次純水槽へ5℃・100m³/hが補給されるのに対し、水冷HP4台の循環加温は25℃・50m³/hである。そのため、加温側入口水温は16℃以下の時間が長く効率は低下。加えて水冷HPの安定運転に影響が出てしまう (Fig. 28)。そこで加温側入口水温調整専用タンクを、水冷HPと一

次純水槽の間に設置する、クッションタンク制御を考えた。その制御は以下の様になる。

■冬場は工業用水補給時に水温低下

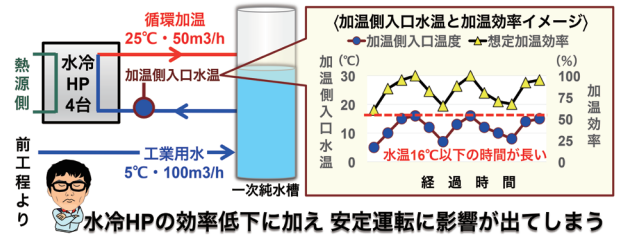
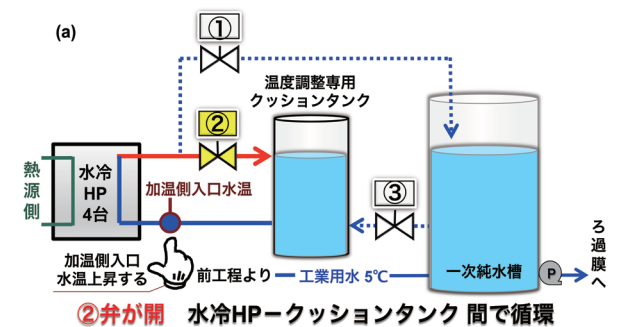


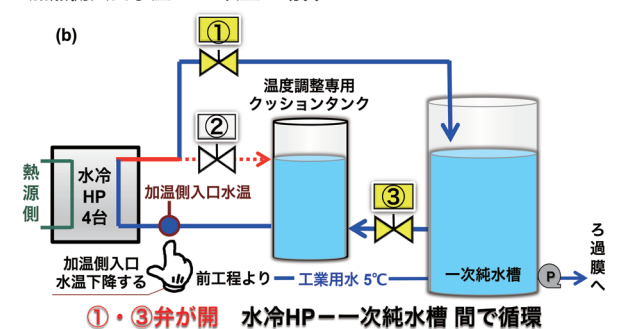
Fig. 28 “Measures2-1” Current Status of Water-cooled Heat Pump Heating Side Inlet Temperature

・加温側入口水温16℃以下の制御：②弁が開、クッションタンクと水冷HP間で循環し、水温が上昇する (Fig.29 (a))
 ・加温側入口水温16℃以上の制御：①弁・③弁が開、一次純水槽と水冷HP間で循環し、水温が下降する (Fig.29 (b)) これを繰り返す事で、水冷HP入口温度を16℃に安定できると、水処理メーカーへ提案すると共に、様々な条件を想定したシミュレーションを行い、水温の低い冬場でも16℃で安定する事を確認。冬場の加温効率を最大化し15℃の効果引き上げに成功した (Fig.29 (c))。

■加熱側入口水温16℃以下の場合



■加熱側入口水温16℃以上の場合



特
集

■対策後の加熱側入口水温推移 (C)

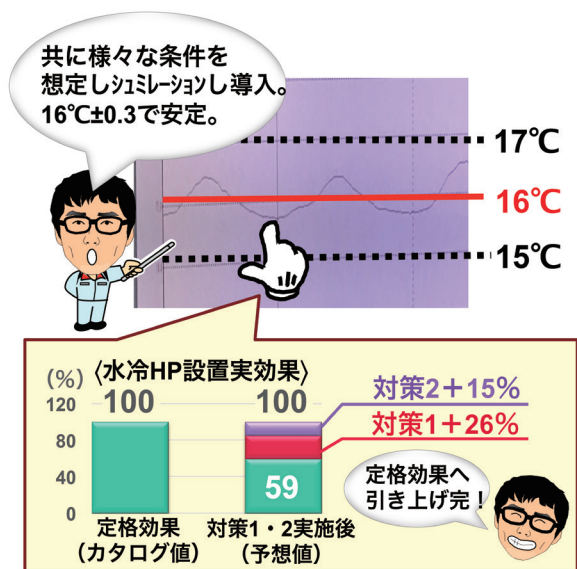


Fig. 29 “Measures2-2” Water-cooled Heat Pump Devised Cushion Tank Control

対策1・2を踏まえ、全国でも前例のない、純水ークリーンルーム空調設備間での水冷 HP を導入した。

運用開始後も細かくデータ取りを行い、夏期（7月～10月）を除く期間の、加熱側入口水温を平均 15.1℃から 21.3℃（+ 6.2）へ上昇、水冷 HP の効率を上げ効果を最大限引出し、有効活用する事に成功した（Fig. 30）。

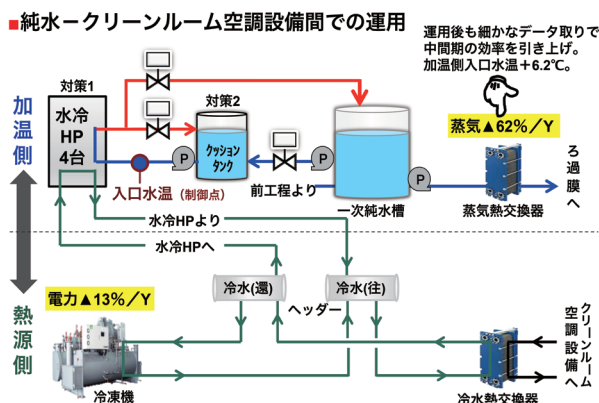


Fig. 30 Water-cooling Heat Pump Final Equipment Flow

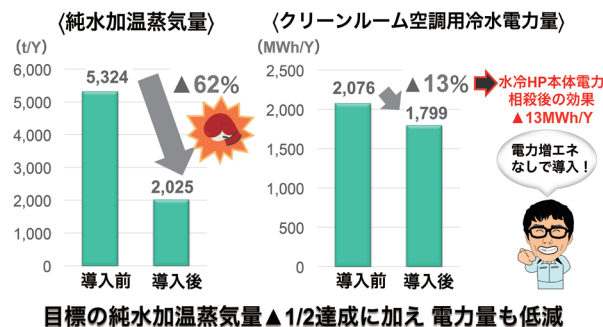
その結果、純水加熱蒸気量は目標としていた 1/2 以上、3,299t/Y (▲ 62%) の低減を達成。また熱源側クリーンルーム空調用冷水電力 13% 低減し、水冷 HP 本体電力を相殺しても 13MWh/Y の低減となった（Fig. 31）

・最終効果／本社工場 19 年 2 月導入完了 CO₂ 排出量：533.7t-CO₂/Y 原油換算：235.8kL/Y

・波及効果／幸田工場 20 年 3 月導入完了 CO₂ 排

出量：593.4t-CO₂/Y 原油換算：263.3kL/Y

■蒸気量と電力量低減効果



目標の純水加熱蒸気量 ▲1/2達成に加え 電力量も低減

Fig. 31 Final Effect After Introduction of Water-cooling Heat Pump

5. 省エネ効果のまとめ

① 事例1 クリーンルーム空調の JIT（ジャストインタイム）

・効果 52.0kL/Y（原油換算）▲46%省エネ 投資回収：4.4年

② 事例2 シールポット補給水の間欠化

・効果 14.9kL/Y（原油換算）▲96%省エネ 投資回収：3.1年

③ 事例3 水冷ヒートポンプ活用による純水加熱エネルギー 1/2

・効果 235.8kL/Y（原油換算）▲62%省エネ 投資回収：4.7年

6. 活動の成果 16～19年度4年間の実績

当工場の省エネ活動の3つの切り口「止める・Stop」「下げる・Lower」「代える・Change」を3本柱とし工場一丸となって、2025年エネルギー1/2の3年前倒しに挑戦してきた。4年間で合計126件の省エネ改善を実施し、CO₂排出量を5,965t削減した結果、3年前倒しという高い目標達成が見えてきた。目標必達に向け「業界の常識を知恵と工夫で打破！」のスローガンのもと、更なる省エネ活動を推進して行く（Fig. 32）。

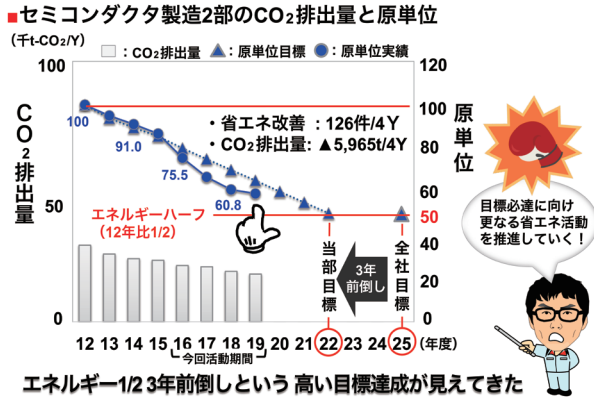


Fig. 32 Results of Activities

7. 今後の課題と取り組み計画

歯止め・標準化

水冷HP改善を当製造部内拠点へ展開。20年3月に幸田工場へ導入し、21年度以降、他拠点でも導入予定。他製造部へエネルギー分科会を通じ情報展開。クリーンルームを保有する他製造部でも導入検討中。

著者



山下 幸四郎

やました こうしろう

セミコンダクタ製造2部
ウエハ施設保全課
半導体工場のユーティリティ管理・改良
保全業務に従事

今後の進め方

全社方針である2035年カーボンニュートラルの実現に向けセミコンダクタ製造2部省エネ3ヵ年推進計画を実行して行くとともに、聖域なき改革も合わせて立案・実行中である (Fig. 33)。

	考え方	20年	21年	22年	CO ₂ 削減量	
生産設備	下げる	設備高効率化 1-1/1/1削減	設備能力向上活動 ドライP高効率化	設備能力向上活動 ドライP高効率化	設備能力向上活動	932
	止める	工程改善 設備統廃合	装置加工時間削減	MPA装置統合	設備片寄せ	
	下げる	設備高効率化 JIT化	空調JIT化 純水ポンプINV化	外調機制御変更	局排スプレー塔化	
ユーティリティ	止める	設備統廃合	純水工程見直し 真空設備統合	純水設備統合	局排設備統合	1,053
	代える	代替1材料 水冷HP設置	冷却塔リークリク	空圧機排熱回収	ヒートドライ化	2,780
CO ₂ 削減量 (t-co ₂ /Y)		3,047	3,014	2,972	9,033	

Fig. 33 Energy Saving 3-Year Promotion Plan