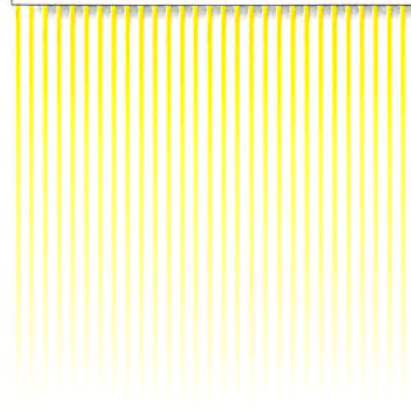


MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.82 No.8

2008 8

特集 「エコファクトリー化技術」



目次

特集「エコファクトリー化技術」

| | |
|---------------------------|----|
| エコファクトリー化技術特集に寄せて | 1 |
| 水野 彰 | |
| エコファクトリー化技術 | 2 |
| 佐々木 明 | |
| マイクロバブルを用いた環境配慮型洗浄技術 | 7 |
| 宮本 誠・松井久恵・上山智嗣・柴田洋平・葛本昌樹 | |
| 事業所における水リサイクル技術の展開 | 11 |
| 安永 望 | |
| 工場におけるエコファクトリー活動 | 15 |
| 鐘尾 茂・井上秀勝・吉岡央人 | |
| 省エネルギー変圧器の技術動向と省エネルギー性能 | 19 |
| 平 哲・南井良文 | |
| 炭酸ガスレーザ加工機の技術変遷と加工コスト低減 | 23 |
| 宮崎隆典・杉原和郎・棚橋邦浩 | |
| 省エネルギー用途の瞬発力型キャパシタ | 27 |
| 光田憲朗・竹村大吾・相原 茂・久保一樹 | |
| “JIT”を旗印に環境改善活動 | 31 |
| 津守秀成・服部 彰・武田安史 | |
| 工場省エネルギー活動の現状と今後 | 35 |
| 柴田輝幸・津田高弘・神生清一 | |
| IT技術を適用した省エネルギー支援システムの構築 | 39 |
| 石井俊直・石原 鑑・柳原慎太郎・佐々木和也 | |
| 工場トータルエネルギー管理システム | 43 |
| 森 一之 | |
| グリーン調達システム | 47 |
| 樋熊弘子・名塩 優・丹羽由樹子・富本佳彦・鬼山 基 | |
| 化学物質排出削減 | 51 |
| 宇佐美 亮 | |
| VOC除害装置 | 54 |
| 稲永康隆・生沼 学・谷村泰宏・葛本昌樹 | |
| 鉛フリーはんだ中のAu含有量が信頼性に与える影響 | 59 |
| 前田 晃・前田智佐子・山田 朗・小山正人 | |

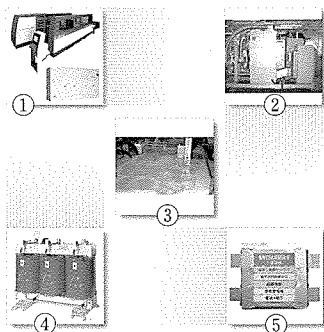
| | |
|--|--|
| Eco Factory Technology | |
| “Eco-Factory” — A Key Concept of Technological Development for Better Life and Sustainable System | |
| Akira Mizuno | |
| Eco-factory Technology | |
| Akira Sasaki | |
| Non-chemical Cleaning Technology by Utilizing Microbubble | |
| Makoto Miyamoto, Hisae Matsui, Satoshi Ueyama, Yohei Shibata, Masaki Kuzumoto | |
| Application of Water Recycling Technology to Offices and Factories | |
| Nozomu Yasunaga | |
| Eco-factory Activity in Factory | |
| Shigeru Kanao, Hidekatsu Inoue, Hisato Yoshioka | |
| Technological Trend and Energy Performance of Energy-saving Transformer | |
| Satoshi Taira, Yoshifumi Minami | |
| Technology Transition of CO ₂ Laser Processing System and Its Processing Cost Reduction | |
| Takanori Miyazaki, Kazuo Sugihara, Kunihiko Tanahashi | |
| Momentary-load Electric Double-layer Capacitors for Saving Energy | |
| Kenro Mitsuda, Daigo Takemura, Shigeru Aihara, Kazuki Kubo | |
| Environmental Improvement Activity with the Slogan of “JIT” | |
| Hideshige Tsumori, Akira Hattori, Yasushi Takeda | |
| Current and Future Activities for Factory Energy Saving | |
| Teruyuki Shibata, Takahiro Tsuda, Kiyochi Shinsei | |
| Application of Information Technology to Integrated Visualization for Energy Conservation | |
| Toshinao Ishii, Akira Ishihara, Shintaro Yanagihara, Kazuya Sasaki | |
| Total Energy Management System for Factories | |
| Kazuyuki Mori | |
| Green Procurement System | |
| Hiroko Higuma, Masaru Najio, Yukiko Niwa, Yoshihiko Tomimoto, Motoi Oniyama | |
| Decrease in Chemical Emissions | |
| Ryo Usami | |
| VOC Abatement Equipment | |
| Yasutaka Inanaga, Gaku Oinuma, Yasuhiro Tanimura, Masaki Kuzumoto | |
| Effect of Au Content on the Reliability of Pb-free Solders | |
| Akira Maeda, Chisako Maeda, Akira Yamada, Masato Koyama | |

特許と新案

| | |
|-----------------------------|----|
| 「空気浄化装置」「排水の高度処理装置及び高度処理方法」 | 63 |
| 「オゾン発生装置」 | 64 |

スポットライト

三菱住宅用太陽光発電システムの特長



表紙：エコファクトリー化技術

二酸化炭素排出による地球温暖化の防止及び循環型社会形成のために、工場内の省エネルギー化とゼロエミッション化を推進することが、これまで以上に求められている。この特集号ではこれらを実現するエコファクトリー化技術について、現状と今後の展望について述べる。

表紙写真は、①が最新型レーザ加工機NXと発振器CF-Rシリーズ、②が高効率にVOCを除去可能なVOC除害装置、③がマイクロバブル洗浄装置による部品洗浄時の様子、④が省エネルギートランスモールド変圧器EX-2シリーズ、⑤は省エネルギー用途の瞬発力型の電気二重層キャパシタである。

エコファクトリー化技術特集に寄せて

“Eco-Factory” — A Key Concept of Technological Development for Better Life and Sustainable System

水野 彰
Akira Mizuno



二酸化炭素排出量の抑制が喫緊の課題となっている。このために排出権取引などのインセンティブの議論もされている。生産現場である工場の省エネルギー化は相当程度に進んでおり、更なるエネルギー消費削減は相当厳しいように思われる。こうした中“エコファクトリー”というキーワードは、これからの省エネルギー・技術開発の進め方を考える上でたいへん重要であり、時宜を得たものである。

工業技術は社会に大きな影響を与えてきており、我々の幸せな生活環境を実現する上で重要な役割を果たしてきている。技術者はより良い製品の開発に努力し、製造過程の効率化を進めてきた。効率化は低コストで信頼性の高い製品を供給するために必要であり、日本の工業製品が世界を席巻している事実は、日本の製造業の省エネルギーや省力化などを含めた工業技術が世界トップレベルであることを示している。一方、技術革新は働き手の労力を削減することでもあった。幸せな生活の基本は、やりがいのある仕事を通じて社会や家庭に貢献することであろうが、その基本的土台を技術者自らの技術革新の努力によって揺るがしてきている。

“エコファクトリー”というキーワードからまず連想することは、エネルギー効率の一層の向上である。地味ではあるが、モータやトランス、照明装置など、極めて数の多い機器の効率をほんの少しでも向上できれば、世界的なレベルで大きな省エネルギー効果を発揮できる。このような、すでに大量に使用されている製品には、省エネルギー技術革新による高付加価値化の可能性が大いに秘められている。加えて、キャパシタの開発など、今まで捨てていたエネルギーを回収できる装置の実現による省エネルギー化も期待される技術である。また“エコファクトリー”からは、より安全性を高めるために製品の質を変えていくことも連想する。例えば化学薬品のなかには、今まで良いと思われていたものが有害であることが判明したものも多く、これらに

代わる薬品や技術の開発も急務である。オゾン層は殺菌や脱臭・脱色など酸化処理に有効であり、最終的に酸素に戻るため、環境への負荷が小さい。これを今までの化学薬品に代わって利用することは環境を維持する上で効果的である。また環境影響の少ない冷媒や既存の冷媒の再生技術の開発もいっそう進める必要がある。さらに、“もったいない”という言葉も連想する。水や貴金属など、限られた資源を一層有効に利用するためには、できる限りリサイクルをすることが課題であり、その技術開発も今後ますます重要になるだろう。

このように考えると、エコファクトリーは自らが高効率であるのみならず、持続社会の実現に貢献できる高いエネルギー効率の製品を産み出す現場ともいえる。その現場からは健康を守る高付加価値の製品も産み出されることが期待できる。たとえば感染予防のための装置、医療用治療装置、安全な野菜や食糧の生産工場など、今後の発展が見込まれる分野には“エコファクトリー”の概念が多く含まれている。

このようなエコファクトリーの実現と、高付加価値化技術革新こそ、企業そして国全体で努力すべきことである。国レベルでは省エネルギーや環境に対する規制や指針、長期技術開発投資を行う企業へのインセンティブ付与の具体案の策定や会計法の改善など、エコファクトリーを実現し、高付加価値化による職の機会を増やすための政策をいっそう進めることが必要である。排出権取引はマネーゲームになる可能性も指摘されているが、マネーゲームは基本的にゼロサムである。付加価値を生む原動力は生産現場であり、エコファクトリーはそのための重要な概念である。このことを基本に据えて技術革新の努力を進めることで、工業技術への信頼を高め、将来の世代への責任を果たしていくべきであろう。

エコファクトリー化技術

佐々木 明*

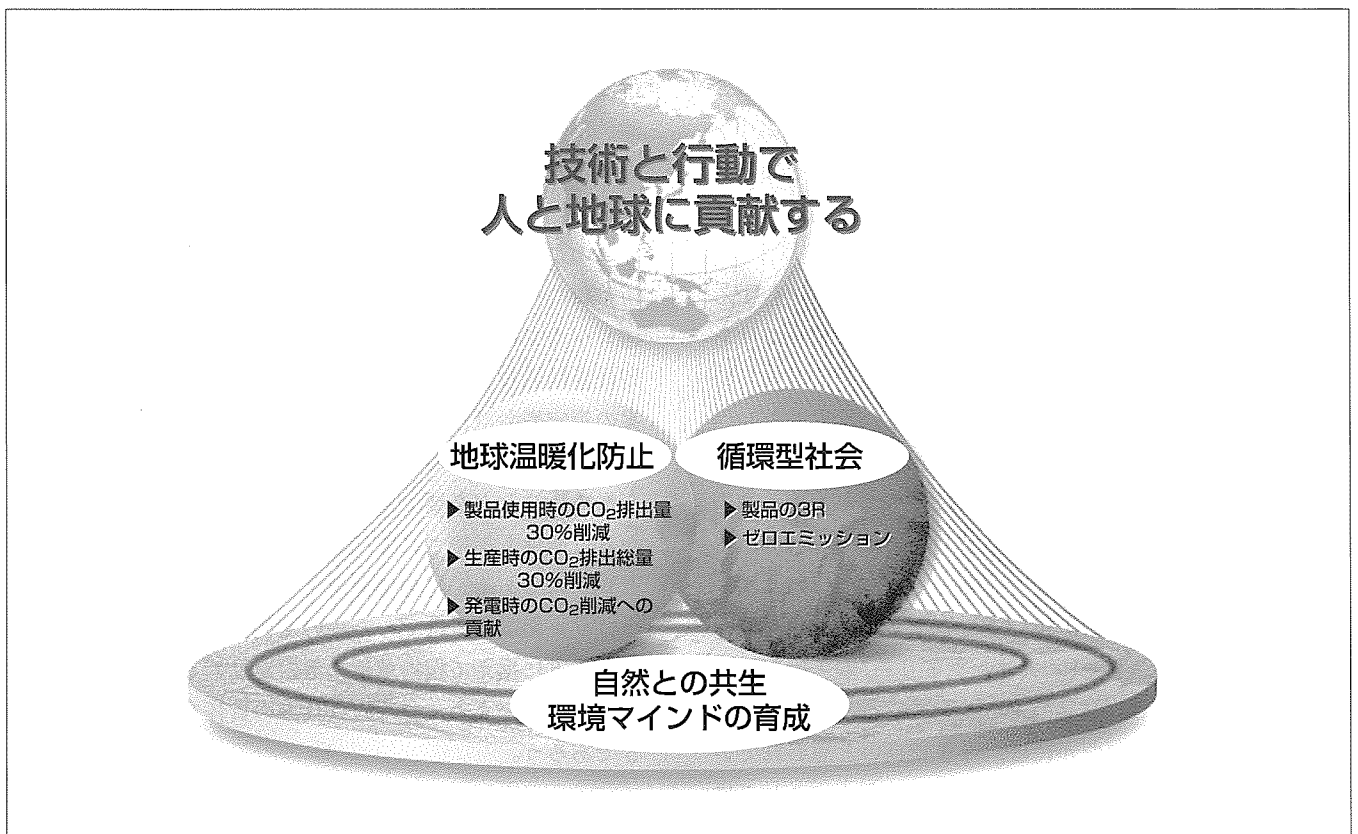
Eco-factory Technology

Akira Sasaki

要 旨

21世紀は“環境”の世紀と警鐘が鳴らされ、確かにIPCC（気候変動に関する政府間パネル）発表の“地球温暖化はもはや疑う余地がない”というコメントを日常生活でも実感する昨今である。三菱電機が創立100周年を迎える2021年を目標として策定した“環境ビジョン2021”の達成を目指し、この特集号では生産現場の諸課題に焦点をあてた“エコファクトリー化技術”を、特に基礎技術・基盤技術の位置付けで特集する。本稿では“エコファクトリー化技術”を当社環境技術行政に則り“資源の有効活用(Material)”“エネルギーの有効活用(Energy)”“環境リスク物質の排出回避

(Toxicity)”, いわゆるMETを軸に述べる。資源(M)では、“洗浄”“水”に注目しマイクロバブル技術とオゾンによる水リサイクル技術について述べる。エネルギー(E)では、省エネルギー推進に資する個別要素技術4件と省エネルギー戦略立案に供する総合技術4件について述べる。環境リスク物質(T)では、まず当社独自の管理システム2件について述べた上で、トピックスとして揮発性有機化合物(VOC)分解・除害技術と電極の金めっきに対する鉛フリーはんだの高信頼性技術についても述べる。



三菱電機グループ環境ビジョン2021

“技術と行動で人と地球に貢献する”を指針に定め、特長である幅広い高度な“技術”と社員の積極的・継続的な“行動”の推進によって、事業活動を通じ、持続可能な社会の実現に貢献する。地球温暖化防止に対しては製品使用時のCO₂排出量30%削減、生産時のCO₂排出総量30%削減、発電時のCO₂削減への貢献を目指す。また循環型社会形成に対しては製品の3R(リデュース、リユース、リサイクル)とゼロエミッションに資する諸施策を推進する。

1. ま え が き

21世紀は“環境”の世紀と警鐘が鳴らされてからまだ10年は経過していない。しかし、温帯モンスーン気候帯に位置し四季の風情が特徴であった日本本土でも、生物分布が変わってきたのではないかと実感する昨今である。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は2007年、“地球温暖化はもはや疑う余地がない”との結論を出し、人類にとって地球温暖化対策は待ったなしの最優先課題であるといっても過言ではない。日本政府は2007年5月24日、地球温暖化に関する内閣総理大臣のイニシアティブ“美しい星50（クールアース50）”を発表し、この中で世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を提案した。この目標の実現には革新的技術の開発が不可欠であるとされている。企業でも長期的視点に立った環境問題への積極的な取り組みが求められ、当社は創立100周年を迎える2021年を目標とした“環境ビジョン2021”を策定し、地球温暖化防止と循環型社会形成に向けた方針を2007年10月22日に公開した。

このビジョンは、地球温暖化防止に対し製品使用時のCO₂排出量30%削減、生産時のCO₂排出総量30%削減、発電時のCO₂削減への貢献を目指す。また循環型社会形成に対しては製品の3R（リデュース、リユース、リサイクル）とゼロエミッションに資する諸施策を立案・実行する。

三菱電機グループでは、1993年度から環境保全の自主的取り組みを“環境計画”として体系化し、これを推進している。現在、第5次環境計画(2006年4月～2009年3月)を執行中である。この“環境計画”は“環境基本理念”“環境行動指針”を中心とし、これらを実現するための“環境マネジメントシステム”と“環境行動目標”から構成されている。“MET(メット)の花を咲かせよう”を合言葉に、M(Material)：資源の有効活用、E(Energy)：エネルギーの効率利用、T(Toxicity)：環境リスク物質の排出回避という3つの視点から、すべての事業活動で環境負荷低減を推進する。M軸では、あとで述べる水資源以外に、製品・部品のリユース、プラスチックの自己循環サイクルなどに、E軸では、太陽光発電、系統連系、省エネルギーモータなどに、T軸ではオゾンによる浄化技術、リスク物質の高速分析技術などに注力している。“エコプロダクツ”“エコファクトリー”“エコロジスティクス”及び“環境コミュニケーション”の4分野で、METを基軸とする活動によって、継続した成果に開花・結実させる方針である。図1に三菱電機グループ環境計画の全体像を示す。

この特集号では“エコファクトリー化技術”について、主として生産現場の諸課題に焦点をあて、地球温暖化防止と循環型社会形成に資する基礎技術、基盤技術を集める。本稿では個別エコファクトリー化技術を、その適用対象からMETを基軸に述べる。

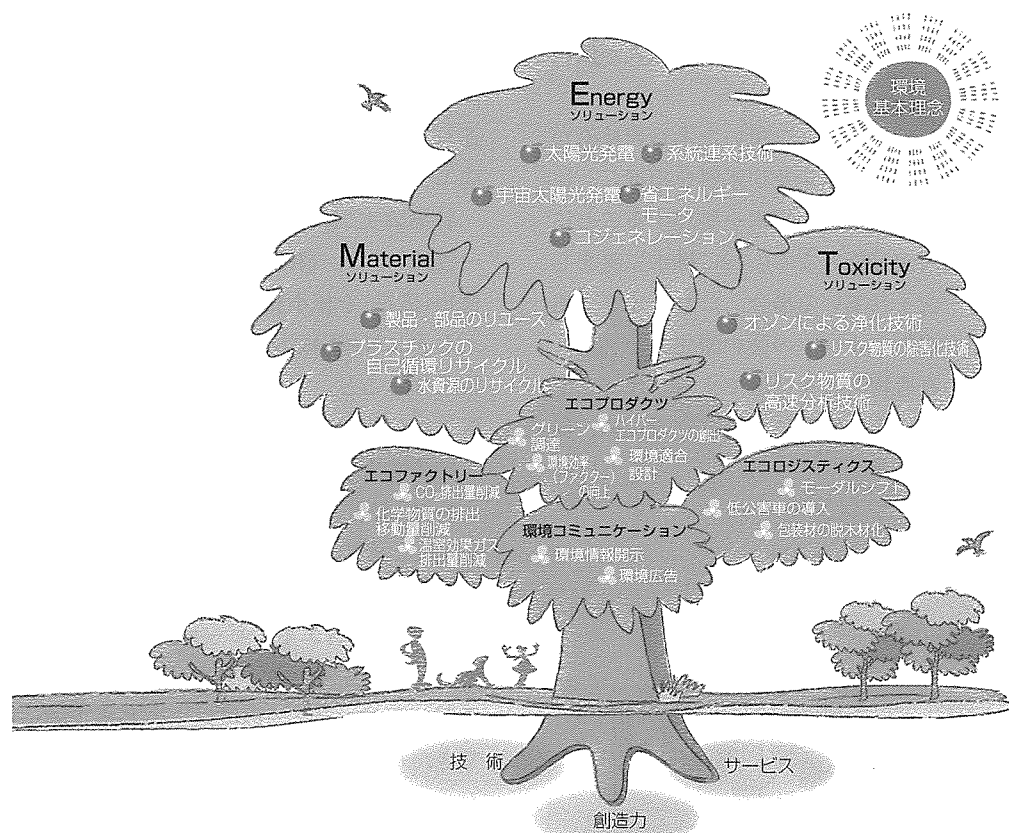


図1. 三菱電機グループ環境計画の全体像

2. “資源の有効活用(Material)”対応策の原理

物質を切り口とするエコファクトリー化技術の目標は、絶対使用量の削減と、リサイクルのように使い回しによる新規投入量の削減に寄与することである。物質を限りある貴重な資源ととらえ、生産現場を概観すると、洗浄に供する“水”使用量削減が一つの重要課題となる。大容量発電機から半導体デバイスまで製造する総合電機メーカーである当社は、各工場に多種多様な洗浄工程が存在する。洗浄対象は機械加工時の油類、エッチングなどの表面化学処理後の残余反応物質・生成物質などが代表的である。あとで述べる“環境リスク物質の排出回避”の観点からも、洗剤、薬品を使用しない“水”のみによる洗浄工程が好ましい。また水資源有効利用の観点から、洗浄排水の絶対使用量削減と再利用に資する技術はエコファクトリー化に非常に有効である。

マイクロバブル洗浄は、この要求仕様を実現できる有望な技術である。図2にマイクロバブル洗浄技術の原理を示す。微細気泡の生成機構及び生成した微細気泡の合一抑制が技術のポイントであり、ミクロンオーダーの微細な気泡群を洗浄対象に接触させることによって、油分などの汚染物質を洗剤レスで除去可能である。マイクロバブル洗浄は、従来の溶剤を用いた洗浄方法とは異なり、気泡の浮力によって汚染物を分離することが可能であるため、洗浄水の再利用性を高めることができる。当社の複数事業所内ですでに実用化され、高い環境負荷低減効果を発揮しており、エコファクトリー化技術の一つの目玉として適用拡大が期待される。

水資源有効利用に関して、オゾンを用いた水処理技術がある。事業所からの洗浄排水の水量及び水質を把握し、比較的水量が大きく、かつ水質の良い排水を処理することによって効率的な水再利用が可能となる。特に排水に望ましくない濃度の有機物が含まれている場合、これをオゾン処理することによって有機物をオゾンの強い酸化力を利用して無機化して排水中の有機物濃度を低減できる。オゾンそのものは有機物等との反応後に酸素に分解されるため、環

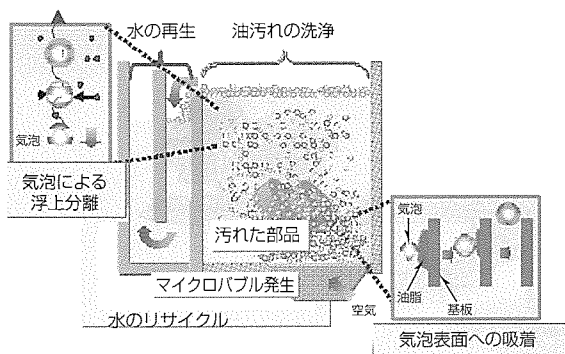


図2. マイクロバブル洗浄技術の原理

境への負荷は小さい。

このように排水を効率的に処理して再利用することによって、これまで使用していた水道や地下水の使用量削減が可能となり、無駄・ロスの排除による生産効率や地域・環境と共生する事業所活動の推進を図ることができる。

3. “エネルギーの有効活用(Energy)”対応

エネルギーの観点からみたエコファクトリー化技術は、ともかく省エネルギーを効果的、計画的、戦略的に達成することである。省エネルギー推進は、まずムダの所在を“見える化”することから着手し、徹底的にムダ取りを進めることに加え、“クールアース50”で言及するように革新的な技術を開発し、即適用することが肝要である。この目的のためには個別コンポーネント機器、システム構成、システム運用監視・診断、システム運用方式の意思決定支援、省エネルギー推進PDCA (Plan Do Check Action) のための仕組み構築など複数分野、多階層にわたる基礎技術、基盤技術を充実させ、各工場の現状とミッションに応じ総合的な適用を図る必要がある。この観点からこの特集号に掲載する論文項目は、省エネルギーを推進するための個別要素技術と戦略立案に関する広義の総合技術に大別される。

3.1 個別要素技術

特集論文“工場におけるエコファクトリー活動”では、工場でのエコノミー&エコロジーを追求するエコファクトリー活動実践の経験を踏まえ、使用電力量節減に供するノウハウを注入した省エネルギー管理システム・機器について述べる。図3にシステム構成を例示する。当社が開発した多回路電力計測ユニットは受配電設備、照明設備、空調関連設備、動力設備など設備分野に応じ現状を計測・診断し、省エネルギー化の対策・運営管理方式立案を支援する。

特集論文“省エネルギー変圧器の技術動向と省エネルギー性能”では、詳細な電磁界解析によって、いわゆる無負荷損(鉄損)を極小化したことについて述べる。鋼を磁化したときにN極S極の方向が良くそろった高配向性電磁鋼帯を使用すること、電磁鋼帯表面を溝加工することで多数の磁区に細分化することが技術のポイントである。

特集論文“炭酸ガスレーザー加工機の技術変遷と加工コスト低減”では、最新のレーザー加工機導入に伴う生産性向上を示し、その結果としての省エネルギー性すなわちランニングコスト低減効果を述べる。

特集論文“省エネルギー用途の瞬発力型キャパシタ”では、電気二重層キャパシタの開発状況を述べる。アルミニウム電解コンデンサの100倍以上のエネルギーを貯めることができ、バッテリーより短時間で充放電可能で、充放電サイクル寿命の長いことが特長である。さらに従来は放熱させていたモータ減速時のエネルギーを回生エネルギーとして電力貯蔵デバイスに蓄積し再利用することで、省エネルギ

一性を向上することを目指す。図4に電気二重層キャパシタ電極構成を示す。電極及び電解質材料の改良による高電圧化，電極薄肉化，内部抵抗低減による時間応答性向上が技術のポイントである。

3.2 総合技術

ここまで述べたように工場省エネルギー促進のポイントは，正確な現状把握と時宜を得た改善活動の継続である。この目的に即した仕組み構築と遂行のためのツール整備がこの節の主題となる。

特集論文“JITを旗印に環境改善活動”では，業務の課題・問題点を“見える化”し，ムダ，ムリ，ムラを減らして効率を上げるJIT（無駄取り）活動を省エネルギー活動に適用した事例について述べる。“カエル”“ヤメル”“トメル”“サゲル”“ナオス”“ヒロウ”の6つの視点からエネルギーの使用状況を検証し，省エネルギーを継続して推進するスキームについて述べる。

特集論文“工場省エネルギー活動の現状と今後”では，当社の省エネルギー工場の例として三田製作所における具体的な活動内容について述べる。このような工場の省エネルギー推進に対するスキームと活動事例を分析すると，より速く実効的な成果を導出するためのツール開発が求められていることが分かる。

特集論文“IT技術を適用した省エネルギー支援システムの構築”では，要素技術で述べた多回路電力計測ユニットの収集情報をWeb環境で“見える化”するツールについて述べる。例えば工場レイアウト図上に各設備を配置し，運

転情報をリアルタイムで表示する画面をWeb環境上で容易に作成できる。工場関係者は各自の机上パソコンで画面を見ながら更なる省エネルギー対策を立案，また立案した対策を適用した場合，その効果を同時に確認することができる。

一方，特集論文“工場トータルエネルギー管理システム”は省エネルギー推進策をシミュレーションするツールについて述べる。図5に省エネルギー支援システムの例を示す。主として各設備の計算機モデル，制御方式モデル及び最適化モデルから構成される。これらのツールを駆使して，対象設備に対し，まず現状把握のための省エネルギー診断を実施する。この結果，更なる省エネルギー推進のための対策をあらかじめ計算機シミュレーションで比較検討した上で最良の方策を制御方式・運用方式として適用提案する。

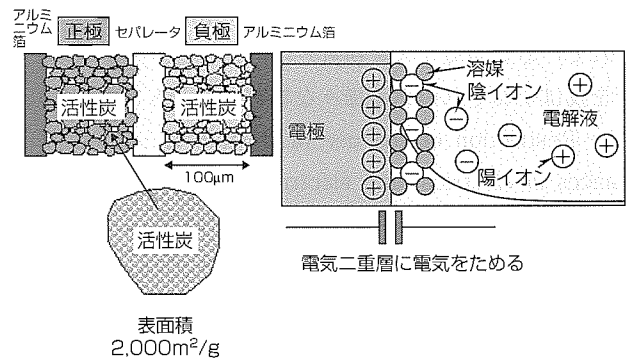
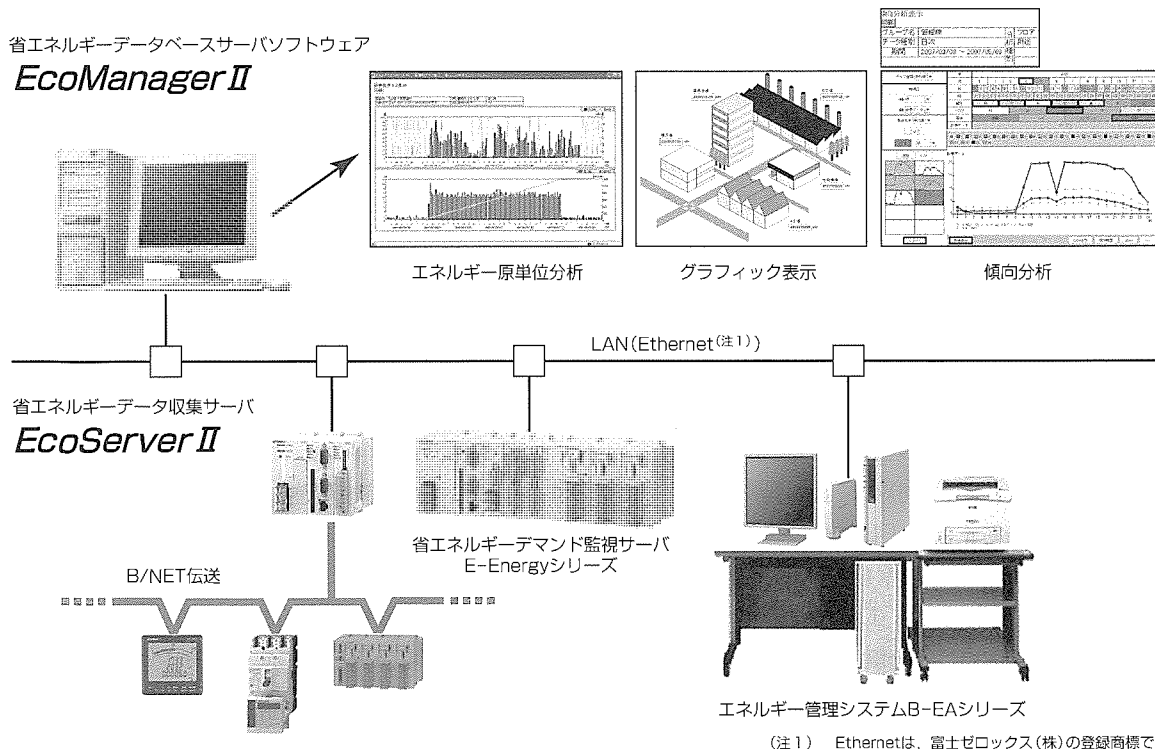


図4. 電気二重層キャパシタ電極構成



(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

図3. 工場におけるエコファクトリー活動

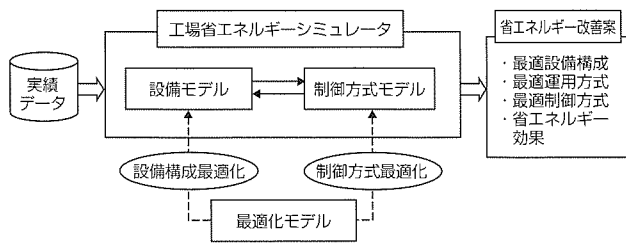


図5. 省エネルギー支援システムの例

また、省エネルギー推進に対し、より最適なシステム構成を検討し、適用に関する費用対効果を明確にした上で新設・増設提案する場合もある。

4. “環境リスク物質の排出回避(Toxicity)”対応

エコファクトリー化のもう一つの主要な基軸は環境リスク物質の取り扱いである。21世紀に入り欧州発信の環境リスク物質に関する複数の切り口、種々階層での規制が施行されている。環境リスク物質とは、人の健康や生態系に影響を及ぼすおそれのある様々な物質のことを指す。RoHS (the Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment)は、特定の環境リスク物質を電機電子機器に含有することを規制し、REACH(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction Chemicals)は、環境リスク物質の安全性を調べ、得られた情報を登録し、伝達することを求めるものである。RoHSの場合は極めて低い濃度管理値が制定され、REACHの場合は既存化学物質(規制が開始された時点ですでに市場に流通している化学物質)と新規化学物質の扱いをほぼ同等に規制する。これらの規制への対応を誤ると、ブランドイメージ失墜に加え、市場そのものを失うおそれもある。

特集論文“グリーン調達システム”ではREACHを念頭に置いた当社の取り組みについて述べる。有害物質対応はサプライヤーとの良好な信頼関係構築とデータ共有がポイントである。さらに、分析技術力向上とトレーサビリティ(規制物質混入経路を追跡)のある仕組みを構築することが重要である。

特集論文“化学物質排出削減”では、当社独自の“化学物質管理システム”(化学物質把握管理促進法(化管法)制定2年前の1997年から実施の自主規制)の最近の動向について述べる。とくに大気汚染防止法改正(2004年)に伴い揮発性有機化合物(VOC)削減への取り組みを述べる。

特集論文“VOC除害装置”では、工場内での塗装、洗浄などで排出される低濃度VOCの分解・除害技術について述べる。50ppm程度の低濃度VOCガスを吸着材で濃縮し

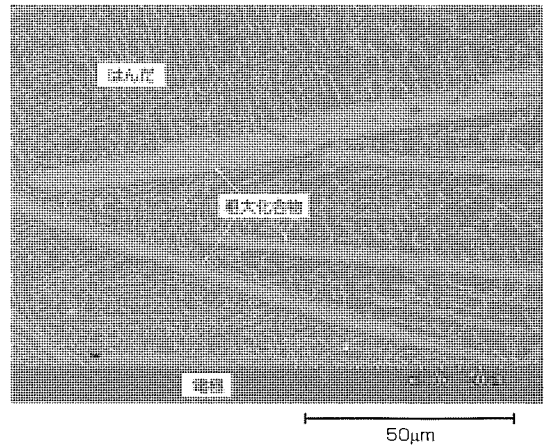


図6. はんだ中に析出した粗大化合物(信頼性低下要因となる)

たあと、脱着ガスを放電と触媒を併用して高効率に二酸化炭素と水に分解する技術である。

特集論文“鉛フリーはんだ中のAu含有量が信頼性に与える影響”では、鉛フリーはんだによる高密度実装の信頼性課題について述べる。特に電極めっきから混入する金によるはんだ接合部の脆化(ぜいか)について述べる。図6にははんだ接合部に混入した金の断面分析例を示す。

5. むすび

北海道洞爺湖サミット(2008年7月7日～9日)が開催され、あらゆる面で環境問題への取り組みが注目されている。ここで述べる技術は“エコファクトリー化”に特化したものに限ったが、当社は高度で広範囲な環境関連技術を保有し、さらに開発中である。創立100周年を目指した環境ビジョン2021のコンセプトを特長的な技術開発とその迅速な適用によって具体的に実現し、地球温暖化対策に関する当社の先行性を提示するとともに、日本のリーダーシップ発揮の一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 経済産業省：Cool Earth-エネルギー革新技術計画，経済産業省，
<http://www.meti.go.jp/press/20080305001/20080305001.html> (2008)
- (2) 角本輝充，ほか：我が国のエネルギー分野における技術戦略，電気学会誌，127，No.10，648～663 (2007)
- (3) 吉田敬史：“持続可能な社会”へのチャレンジ，三菱電機技報，79，No.5，300～304 (2005)
- (4) 池邨善満，ほか：エコファクトリー・エコオフィスの推進，三菱電機技報，81，No.6，377～380 (2007)
- (5) オゾン利用浄化技術の実際，サンユース書房 (1999)

マイクロバブルを用いた 環境配慮型洗浄技術

宮本 誠* 柴田洋平***
松井久恵** 葛本昌樹*
上山智嗣**

Non-chemical Cleaning Technology by Utilizing Microbubble

Makoto Miyamoto, Hisae Matsui, Satoshi Ueyama, Yohei Shibata, Masaki Kuzumoto

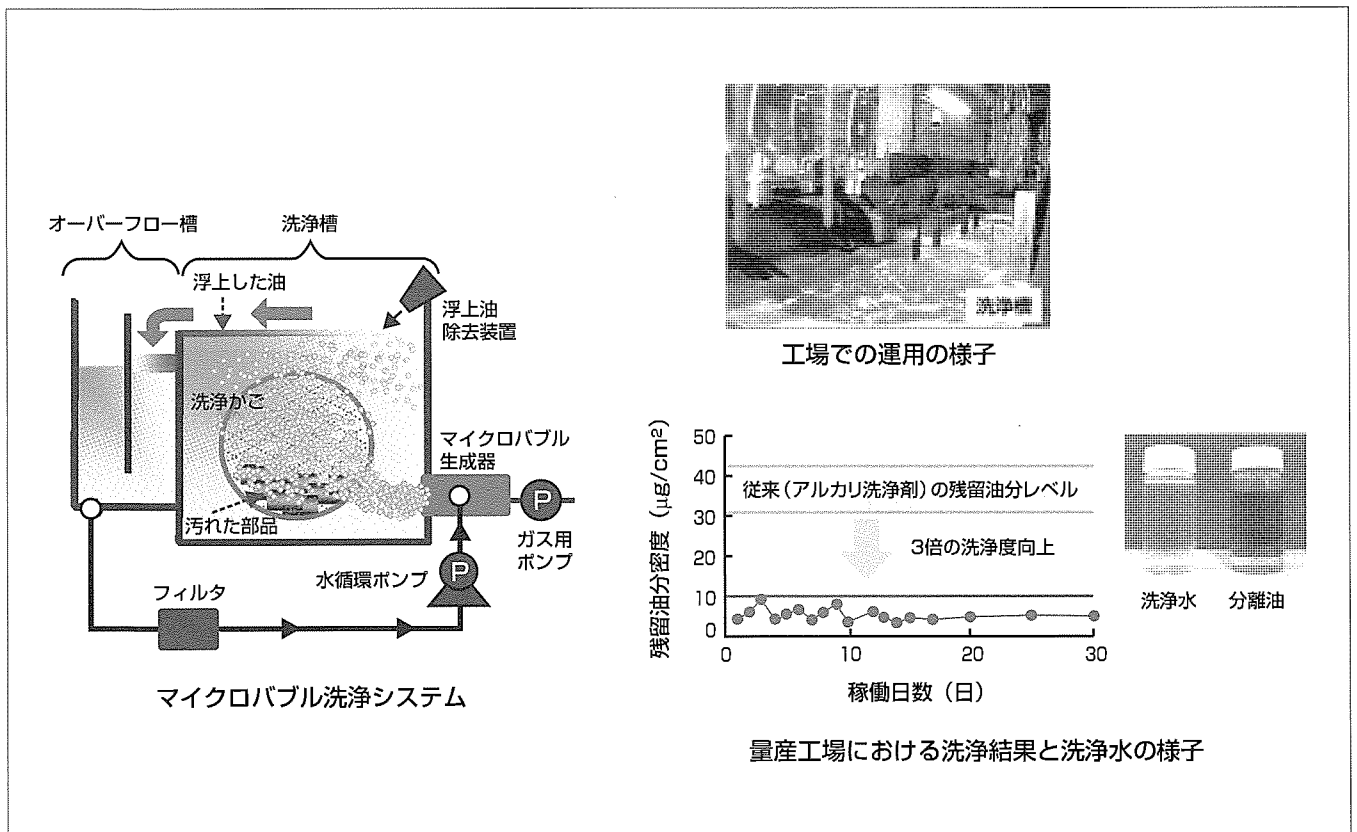
要 旨

地球温暖化の進行が日々報告される中、温暖化防止の取り組みを加速することが強く求められている。エレクトロニクス分野の洗浄工程における大量の溶剤消費は、地球温暖化はもちろん、大気汚染、水質汚濁などの観点からも大きな課題である。その抜本的な解決を目的として、マイクロバブルといわれる直径0.1mm以下の微細な気泡を用いた溶剤レスの洗浄技術を開発し、世界で初めて実用化した。

エレクトロニクス分野の製造工程での大量・短時間処理に適應するため、環境にやさしく安全な気泡合一防止剤の

開発によって高密度マイクロバブルを実現、その多大な表面積に基づく高い洗浄能力と分離能力を特長とする洗浄方法である。

この洗浄方法はすでに三菱電機の複数工場で使用されており、大幅な環境負荷の低減、1けた以上のランニングコスト削減、安定な洗浄品質の実現など大きな成果を得ている。将来的にはスタンダードな環境配慮型洗浄方法として全業界規模で広がり、地球環境に対する大いなる貢献が強く期待される。



マイクロバブルによる低環境負荷・低コスト洗浄の実現

マイクロバブル洗浄は、気泡表面への油脂の吸着と気泡の浮力による分離作用を洗浄原理とする。当社が世界で初めて実用化し、現在は複数の量産工場の主洗浄方法として使用している。洗浄水は高い油水分離作用によって長期間にわたり安定な洗浄力を発揮し、低環境負荷、低コスト、高い洗浄能力を同時に満たす新しい洗浄方式として認められている。これらの成果によって2007年環境賞・優良賞を受賞した。

1. ま え が き

近年様々な異常気象が報告されるようになり、先進諸国を中心とする世界的な環境改善への取り組みが強く望まれている。我が国でも京都議定書に基づく炭酸ガスの排出量削減が大きな課題である。これらを背景にPRTR (Pollutant Release and Transfer Register)法、改正省エネ法などの法整備も急速に進められている。企業経営でもEHS (Environment, Health and Safety)⁽¹⁾⁽²⁾を考慮したプロセス開発など環境配慮型の企業活動が極めて重要となっている。

半導体などのエレクトロニクス分野の製造工程の中でも洗浄工程は多種多様な化学物質を大量に用いており、環境負荷及びコスト削減が強く求められている。特に、電子機械部品の洗浄では、加工、切削工程などで用いられる工業用油脂を除去するため、大量の有機溶剤や強アルカリの溶剤を用いており、大量の有機汚染を効率的に除去するための新しい洗浄方法が強く求められている。

2. 従来の洗浄方法の課題とマイクロバブル洗浄のねらい

汎用的な溶剤(超音波を併用することが一般的)による従来の洗浄方法の基本的除去原理は、溶剤による溶解力や物理的な剥離(はくり)力である。その根本的な課題は、溶剤と除去物との親和性が強いために溶剤中から汚染物を分離できないことである。このため処理量が多くなるほど、除去対象物が溶剤中に蓄積してしまい、安定な洗浄力の確保が困難となる。

これらの課題を抜本的に解決するために、気泡の持つ特性に着目した。水中に気泡を存在させれば気泡表面への油脂の吸着が期待される。また気泡は浮力を持つので付着した油脂を水面まで浮上させ、分離できると推察される。

量産工場の洗浄工程では多様な大きさや複雑形状を持つ数百個の被洗浄物を一括で洗浄する必要がある。その要求仕様は主に次の3点である。

- 数分以内で溶剤レベルの高清浄度を達成
- 処理の均一性の確保
- 洗浄性能の長期的な維持

溶剤レベルの清浄度を実現するには、大量の油脂を短時間で除去しなければならず、気泡全体の表面積をなるべく大きくする必要がある。直径 d の気泡の体積 V は $\pi d^3/6$ 、気泡の表面積 S は πd^2 であり、単位体積あたりの表面積は、 $S/V = 6/d$ となる。この式から単位体積あたりの表面積は気泡径に反比例することがわかる。したがって気泡径の縮小と気泡の高密度化が生産性の確保の観点から重要となる。気泡径の縮小は、固体表面の隅々に気泡を作用させ、処理の均一性を確保するためにも必要となる。

マイクロバブルは100 μm 以下の微細気泡であり、これま

で洗浄工程への適用を目的とした研究・開発例はほとんどない。そこで、高密度のマイクロバブルを用いた低環境負荷と高清浄度を両立する洗浄技術の開発をねらいとした。本稿では、気泡合一防止効果を持つ添加剤を用いた高密度マイクロバブルの生成、マイクロバブルによる油分除去のメカニズムや洗浄効果について述べる⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3. 気泡合一防止の添加剤による高密度マイクロバブルの生成

マイクロバブルは気液2相流のせん断(大きな気泡を物理的な力で砕いて小さくすること)や微小孔からの噴出などによって生成させる。マイクロバブルの高密度化の課題は、いかなる生成手段を用いても純水中で気泡同士が頻繁に接触すると、合一が起こり大きくなってしまふことである。そこで特定の化学物質が気泡の合一防止の効果を持つことに着目した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。洗浄に適した添加剤として次の5条件を設定し、化学物質の分子量、極性、官能基の種類・数など種々の因子を考慮した数多くの検討を行った。そして最終的にすべての仕様を満たす添加剤を開発した。

化学的性質の観点：

- (1) 水に任意に可溶
- (2) 安全な化学物質(劇毒物、PRTR対象外)
- (3) 低濃度での効果発揮

洗浄の観点：

- (4) 低発泡性
- (5) 温水(50 $^{\circ}\text{C}$ 以上)での効果維持

図1に、開発した添加剤をごく微量加えて生成させた高密度マイクロバブルと添加剤なしの場合の写真を示す(両装置は同一構成)。添加剤がある槽では、高密度のマイクロバブルの存在によって槽内がまるでミルクのように白濁している様子がわかる。このように気泡合一の防止効果を

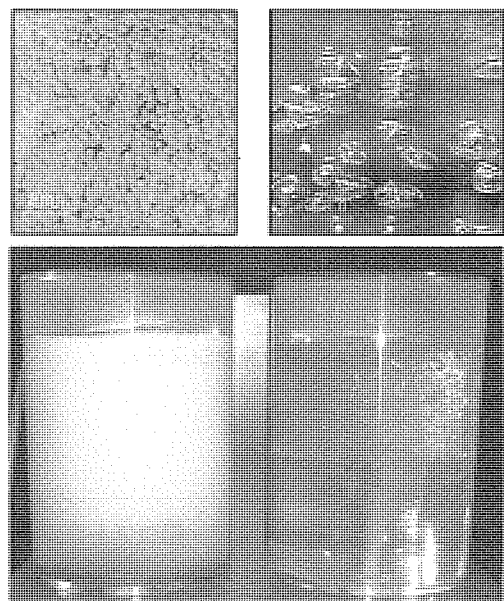


図1. 気泡合一防止の添加剤を用いた高密度マイクロバブルの生成と槽内の拡大写真(左:添加剤あり, 右:添加剤なし)

持つ添加剤の効果は絶大である。添加剤による合一防止の原理は、添加剤分子が気泡表面に吸着することに起因しており、吸着安定性と、気泡表面での物理化学的性質の違いに依存すると考えられる。

4. マイクロバブルによる油污れの除去原理

マイクロバブルの重要な役割の一つは、気泡の表面に加工油や切削油などの油脂成分が吸着することである。これに対して可視化による証明を試みた。スライドガラス上に機械油を塗りつけ、その下方に設置した注射針からゆっくと連続的に気泡を供給し、その様子を高速顕微ビデオカメラで撮影した(撮影速度：2,000フレーム/s)。気泡表面に油が吸着し、被洗浄物表面から油が除去される様子を撮影することに成功した。図2①～④に取得した動画から抜き出した代表的なイメージを示す。シリンジを離れ下方から浮上した気泡は、油表面にしばらくの間とどまり、その間に油が気泡表面全体に展開した(②)。その後気泡は油表面から脱離した(③)。気泡表面は元来の光沢を失い薄い油膜が付着している様子がみられた。浮上した気泡は破裂し水面に油が残った。気泡が脱離した後の付着油は初期状態よりも明らかに小さくなり、数秒以内に基板上的油はほぼ完全に除去された(④)。

このように疎水性である油は水中で不安定な状態で存在する。そこに気泡という形で疎水場を提供すれば、油分子はその親和性によって疎水基を気泡側に向けて表面付着する。気泡一個が吸着可能な油の量は極微量であるが、その繰り返しによって基板上的油を除去することが可能となる。これがマイクロバブルによる油の除去原理である。

5. マイクロバブル洗浄システムとその特長

前章までに、ごく微量の添加剤を用いた高密度のマイクロバブルの生成、マイクロバブルによる油脂の除去原理を示した。これらの特性を生かしたマイクロバブル洗浄システムを開発した。図3に、新たに開発したマイクロバブル洗浄システムの簡易イメージ図を示す。システムの主要機能はマイクロバブル発生器で生成したマイクロバブルをかご内の被洗浄物に効率よく作用させることである。また、マイクロバブル洗浄の場合には、油水分離作用によって水面に油膜が形成するので、洗浄槽に浮上した除去機構とオ

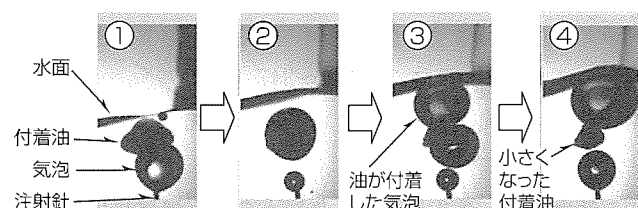


図2. 高速顕微ビデオカメラによる油除去過程の観察

ーバーフロー槽を設けた。このシステムの特長は次のとおりである。

- 低コスト：水ベースの洗浄水による低ランニングコスト
- 低環境負荷：水ベースの洗浄液で下水にそのまま放流可能
- 安全：無毒の化学物質の微量添加のみ

6. マイクロバブルの洗浄効果

図4に、機械部品に付着した難洗浄性疎水性切削油のマイクロバブル洗浄(10秒)前後の写真を示す。洗浄前に表面にべっとりと付着した油は、マイクロバブル洗浄によって完全に除去され、リンス後に付着した水滴の濡れ性から、油が除去されて部品表面が親水的になっている様子がわかる。

次に、マイクロバブルの定量的な洗浄効果を示す。円柱型部品の全面に難洗浄性の疎水性油を塗布し、マイクロバブル洗浄(2min)を行い、純水でのリンス、窒素ガスでの吹きつけ乾燥を行った。洗浄前後の残留油分を堀場製作所製の油分濃度計OCMA300を用いて測定し、油分密度($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)を算出した。図5に代表的な結果を示す。洗浄前に $1,280\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった残留油分は、気泡なしの洗浄(流水のみでの洗浄のこと)では約半分、添加剤なしの数mmオーダーの気泡では、 $180\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、油脂の残留が目視できた。これに対して、マイクロバブル洗浄では残留油分は $4.8\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、気泡なしより約100倍、通常の気泡と比較しても約30倍以上高い清浄度であった。この値は市販のアルカリ洗浄剤と比較して同レベルの清浄度であった。気泡の微細化によってもたらされた表面積の増大と

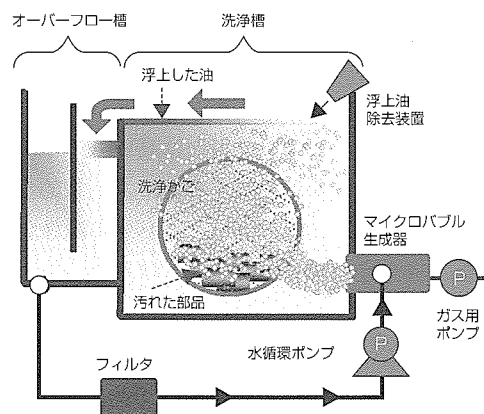


図3. マイクロバブル洗浄システムのイメージ図

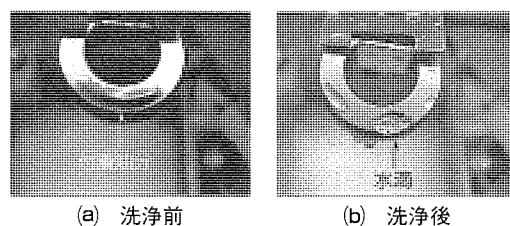


図4. 難洗浄性油が付着した部品のマイクロバブル洗浄前後の写真

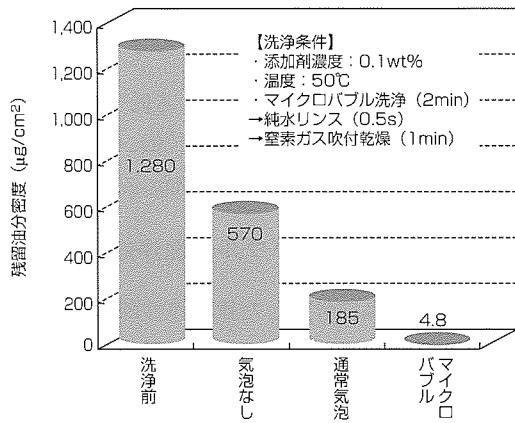


図5. マイクロバブルによる難洗浄性油脂の洗浄結果

複雑形状の固体表面への均一拡散によって、マイクロバブルのみで溶剤レベルの高い清浄度を実現可能なことを証明した。

マイクロバブル洗浄で最も重要なことは、洗浄水の繰り返し使用を可能にすることである。ごく微量の添加剤しか含まないとはいえ、洗浄水を頻繁に交換するようでは実用性に欠ける。図6に、この洗浄システムを用いて、数百個の部品を繰り返し洗浄した結果を示す。処理回数に依存せず洗浄度はほぼ一定に保たれることがわかった。また、同時に処理したいずれの部品でも清浄度に差はなかった。一定回数ごとに洗浄水中のTOC(Total Organic Carbon)濃度を測定したが、繰り返し回数に依存せず一定であった。このようにマイクロバブル洗浄は高い洗浄効果と油水分離の両機能をあわせもち、それらに基づき良好な繰り返し特性が得られることを確認した。

7. 量産工場における実用化検証

量産工場に適用した清浄度の推移を従来のアルカリ洗浄剤を用いた場合の清浄度範囲とともに示す。従来のアルカリ洗浄剤の場合には、初期の清浄度は高いものの、処理が進むごとに洗浄液中へ油が蓄積するため、定常的な清浄度は30µg/cm²以上であった。マイクロバブル洗浄方法を適用した場合、清浄度は10µg/cm²以下であり、その清浄度は変化をみせることなく、1か月以上にわたり安定であった。図7の右側には6か月間連続使用後に採取した洗浄水と分離された油脂を示す。マイクロバブルによる完全な分離性能によって数万個の部品を洗浄したあとでも洗浄水は完全な透明性を維持していた。すでにこの洗浄方法は複数の量産工場実用化されており、環境負荷低減、コスト削減に大いに役立っている。

開発したこの洗浄方法を有機溶剤の洗浄工程に適用した場合、CO₂排出量換算は約1,000分の1、アルカリ洗浄剤代替ではCO₂排出量は約12分の1となる。国内の溶剤洗浄の約20%にマイクロバブル洗浄を適用したと仮定すれば、約40万トンのCO₂排出量の削減が可能となる。このような大

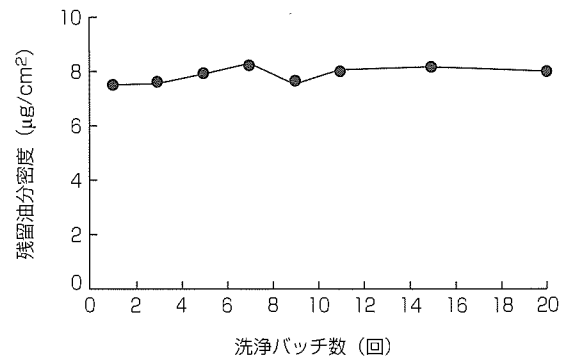


図6. マイクロバブル洗浄システムを用いた大量部品の繰り返し洗浄特性(液温:50°C, 洗浄時間:2min)

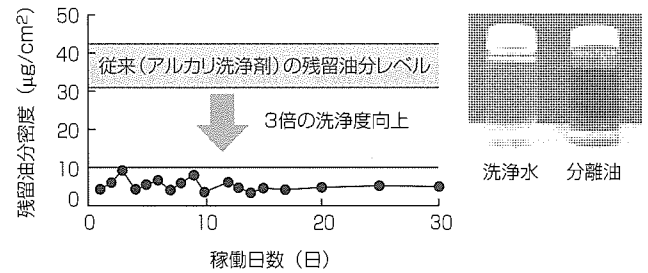


図7. 量産工場における洗浄結果と洗浄水の様子

きな環境負荷低減効果に加え、溶剤洗浄と比較してランニングコストは10分の1以下となる実績を得ている。さらに、安定な洗浄工程の構築による製品品質の向上も実現されている。

8. むすび

21世紀は環境の世紀と呼ばれ、ますますエレクトロニクス分野の製造工程における環境負荷低減に対する取り組みが重要となる。特に洗浄工程の中では、大量の有機汚染を除去するために大量の溶剤を消費している。

高密度マイクロバブルを用いた洗浄方法は、多大な表面積に基づく高い洗浄能力と高い油脂分離能力を特長として、環境負荷低減、コスト削減効果が大きい期待できる。この新たな界面制御型の洗浄方法は、将来低環境負荷の標準的な洗浄方法になることに疑いはなく、地球環境保護に大きく貢献することを強く確信する。

参考文献

- (1) 工業洗浄技術ハンドブック, リアライズ社, 3~12 (1994)
- (2) 工業洗浄剤に関する調査報告書, 日本産業洗浄協議会, 56~71 (1993)
- (3) 丸山茂夫編: マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック, (株) エヌ・ティー・エス, 340~347 (2006)
- (4) 日本産業洗浄協議会編: はじめての洗浄技術, 工業調査会, 168~177 (2005)
- (5) 宮本 誠: マイクロバブルによる低環境負荷洗浄技術, クリーンテクノロジー, 17, No.1, 24~27 (2007)

事業所における水リサイクル技術の展開

安永 望*

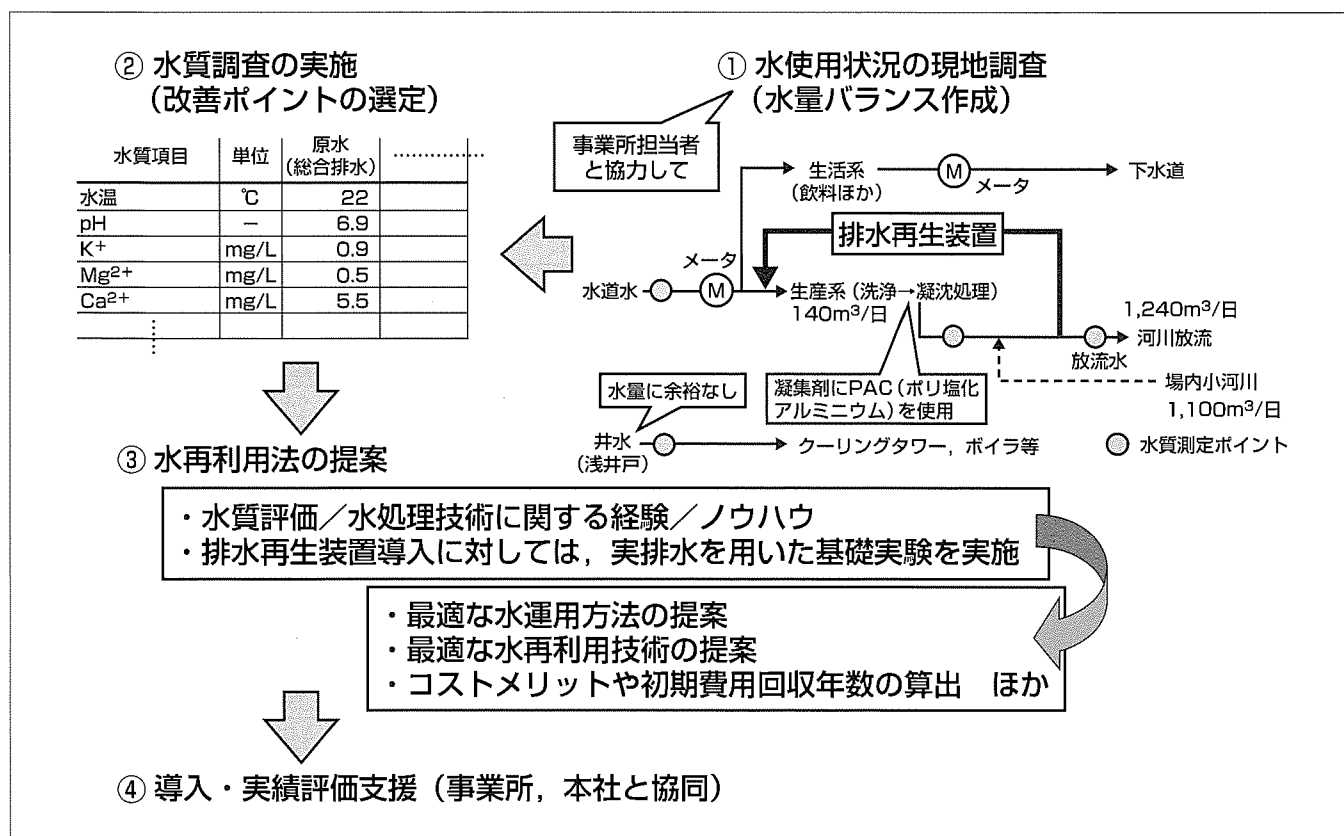
Application of Water Recycling Technology to Offices and Factories

Nozomu Yasunaga

要旨

三菱電機では、現在実施中の第五次環境計画で“エコファクトリー・エコオフィス(地域と共生する事業所)”の実現を掲げており、“見える化”活動を徹底し、無駄・ロスの排除による生産効率、地域、環境と共生する事業所活動の推進を図っている。当社ではその活動の一環として、事業所内の水有効利用に関する検討を進めるため、当社全事業所の水使用量を把握し、水に関するコストの大きい事業所をピックアップした。さらに、その中から一つの事業所の水利用状況を詳細に調査し、排水再利用の可能性について評価した。次にその結果をまとめる。

- (1) 事業所からの排水の水質を調査した結果、濁度と有機物を除去できれば排水を水道水質と同等レベルまで高品質化できることが分かった。
- (2) 上記排水を対象に当社が研究開発を進めているオゾン/過酸化水素処理法を実施した結果、濁度と有機物を効率的に除去できることが分かった。
- (3) 排水再利用システムとして、砂ろ過(濁度除去)+オゾン/過酸化水素+活性炭処理(有機物除去)法を提案した。今後は、これらの結果をもとに排水再利用システムの適用可能性について検討を進め、事業所内の水使用量削減に貢献したい。



事業所水利用診断のフロー

まずは、事業所内の水使用状況の現地調査(水量バランス作成)を実施し、水質調査を行う。続いてこれらの結果をもとに、再利用に必要な水処理の条件や仕様を決めるために、必要に応じて排水処理実験も実施し、最適な排水再利用案を提案する。

1. ま え が き

当社では、現在実施中の第五次環境計画で各工場・オフィスの環境配慮活動を評価し、課題を明確化するために“エコファクトリー・エコオフィス指標”を策定し、情報の共用化を図ることによって改善活動を加速させようとしている⁽¹⁾。この指標には資源、エネルギー、水及び化学物質の無駄の排除が含まれており、水の有効利用は当社の環境効率改善に大きく寄与できると考えられる。当社では上記活動の一環として、水コスト削減を目的として、事業所内の水有効利用に関する検討を進めている。まず、当社の全事業所の水使用量を把握し、水に関するコストの大きい事業所をピックアップした。さらに、その中から一つの事業所(A事業所)の水利用状況を詳細に調査し、排水の再利用方法について検討した。本稿ではその結果について述べる。

2. オゾンを用いた促進酸化処理

当社ではオゾンを用いた水処理法、とりわけOHラジカルを用いた促進酸化処理法(オゾン/過酸化水素処理(O_3/H_2O_2)法)の研究開発を進めている⁽²⁾。図1にオゾン(O_3)処理法と O_3/H_2O_2 処理法を比較した結果を示す。 O_3 処理法は O_3 の酸化力を利用する水処理法であるのに対し、 O_3/H_2O_2 処理法はオゾンと過酸化水素を混合させて生成するOHラジカル($\cdot OH$)が反応の中心となる。 O_3 処理法及び O_3/H_2O_2 処理法はいずれも色、臭い、濁度の除去や殺菌、消毒に非常に有効な水処理法であるが、 O_3 が有機物の低分子化までで反応がとどまるのに対し、 $\cdot OH$ ラジカルは有機物を無機化することが可能である。これは O_3 の酸化還元電位が2.07Vであるのに対し、 $\cdot OH$ のそれが2.81Vと大きいためである。本稿では上記の検討に引き続いて、A事業所内の排水再生装置への O_3/H_2O_2 処理法の適用可能性について検討した結果について述べる。

3. 水利用調査方法及び調査結果

A事業所内の水フローを調査した結果を図2に示す。図の実線(細)に示すように、A事業所ではめっき工程で生じ

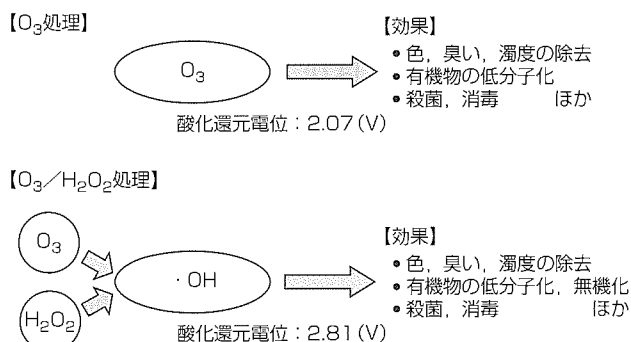


図1. O_3 処理と O_3/H_2O_2 処理の比較

る排水(140m³/日)を凝集沈澱処理して河川放流している。そこで図に示す水質測定ポイントで採水を行い、水質分析を実施した。その結果を表1に示す。表に示すように、放流水のほとんどの水質項目が水道水水質基準値をクリアしたが、TOC(総有機炭素)及び濁度の2項目が水道水水質基準値をオーバーし、それぞれ6.5mg/L(水道水水質基準値：5mg/L以下)、6度(水道水水質基準値：2度以下)であった。したがって、放流水のTOC及び濁度を改善することができれば、図2の実線(太)で示すように、放流水を処理して上流側に返送、再利用することによって水道使用量の削減を図れると考えられる。そこで、排水再生装置としての O_3/H_2O_2 処理法の適用可能性を検討するため、放流水を採取してラボスケールの実験を実施した。

4. O_3/H_2O_2 処理法の実施

4.1 実験方法

放流水は、あらかじめ大きいゴミを取り除いたあと、所

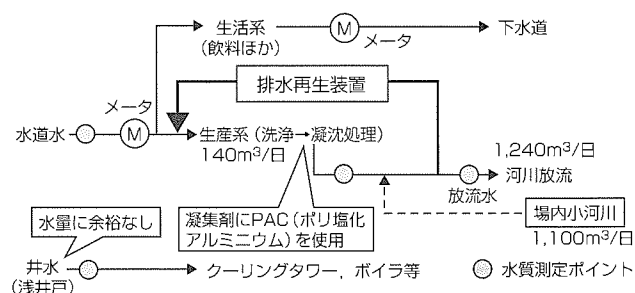


図2. A事業所内の水フロー

表1. A事業所の水道水、井水及び排水の水質

| 項目 | 単位 | 水道水 | 井水 | 放流水 | 水道水水質基準値 |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------------|
| 水温 | ℃ | 22 | 23 | 23 | - |
| pH | - | 7 | 7 | 7 | 5.8~8.6 |
| 導電率 | μS/cm | 60 | 130 | 190 | - |
| TOC | mg/L | 0.1 | 0.2 | 6.5 | 5mg/L以下 |
| F ⁻ | mg/L | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.8mg/L以下 |
| Cl ⁻ | mg/L | 4.8 | 4.8 | 28 | 200mg/L以下 |
| NO ₂ ⁻ | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | - |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | 1.3 | 12 | 2.9 | 10mg/L以下 |
| PO ₄ ³⁻ | mg/L | N.D. | N.D. | 2.5 | - |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | 5 | 17 | 22 | - |
| Na ⁺ | mg/L | 3.5 | 12 | 29 | 200mg/L以下 |
| NH ₄ ⁺ | mg/L | N.D. | N.D. | 0.9 | - |
| K ⁺ | mg/L | 0.9 | 2.1 | 1.2 | - |
| Mg ²⁺ | mg/L | N.D. | N.D. | 0.2 | - |
| Ca ²⁺ | mg/L | 5.2 | 15 | 5.2 | - |
| 亜鉛 | mg/L | N.D. | N.D. | 0.04 | 1.0mg/L以下 |
| 鉄 | mg/L | N.D. | N.D. | 0.10 | 0.3mg/L以下 |
| マンガン | mg/L | N.D. | N.D. | N.D. | 0.05mg/L以下 |
| 硬度 | mg/L | 16 | 40 | 17 | 300mg/L以下 |
| 蒸発残留物 | mg/L | 42 | 75 | 110 | 500mg/L以下 |
| 色度 | 度 | N.D. | N.D. | 1.8 | 5度以下 |
| 濁度 | 度 | N.D. | N.D. | 6 | 2度以下 |
| アルミニウム | mg/L | 0.03 | 0.07 | 0.18 | 0.2mg/L以下 |
| 溶性シリカ | mg/L | 110 | 130 | 130 | - |

N.D.未検出

定量の過酸化水素を注入して被処理水とした。反応塔に連続的に被処理水とオゾンガスを注入する連続式反応塔で実験した。実験装置のフローを図3に示す。オゾン発生器で酸素を原料として所定濃度のオゾンガスを生成し、流量を一定に保ちながらオゾン反応塔に散気管を介して被処理水に注入してO₃/H₂O₂処理を実施した。注入オゾンガス濃度を変化させることによってオゾン注入率を変えて実験を行い、処理水のTOC、過酸化水素濃度、濁度を測定した。実験条件を表2に示す。なお、反応塔から排出された未溶解のオゾンは、触媒を用いて酸素に無害化処理して大気へ放出した。また、注入オゾンガス濃度及び排オゾンガス濃度のモニタ値補正をヨウ化カリウム法、TOCをTOC-5000（株島津製作所製）、過酸化水素を過酸化水素計スーパーオリテクターModel-5（セントラル科学株製）、濁度を分光光度計UV-2550（株島津製作所製）で測定した。

4.2 実験結果及び考察

図4に被処理水TOCを1としたときのオゾン注入率に対するTOCの変化(C/C₀)を示す。図に示すように、O₃処理ではTOCは全く減少しなかったが、O₃/H₂O₂処理ではオゾン注入率15mg/Lで大幅にTOCが減少し、減少量は約40%であった。これは、放流水中の有機物はO₃のみでは無機化されず、・OHが生成されて初めて無機化されることを示している。図5に被処理水濁度を1としたときのオゾン注入率に対する濁度の変化(C/C₀)を示す。図に示すように、濁度は、O₃処理でもO₃/H₂O₂処理でもオゾン注入率に対してほぼ等しい割合で減少し、オゾン注入率15mg/Lでほぼ半減した。以上の結果から、放流水をO₃/

H₂O₂処理することによってTOC及び濁度を十分に低減できることが分かった。さらに後段の活性炭処理によって、TOC及び濁度の更なる低減が見込める。したがって、O₃/H₂O₂処理水の水質は、表1に示したA事業所の水道水ほど高品質ではないものの水道水質基準値を満たすことが可能であり、放流水をO₃/H₂O₂処理することによって再生し、水道水の代わりに使用できると考えられる。

以上の結果をもとに図6に示す排水再生装置を提案した。すなわち、放流水の一部を採取して、砂ろ過→O₃/H₂O₂処理→活性炭処理と実施して、処理水をめっき工場で洗浄水として再利用する。各処理工程では、最初に砂ろ過で放流水の浮遊物や濁質の一部を除去し、次のO₃/H₂O₂処理で濁度や有機物を除去し、最後の活性炭処理で処理水に残留しているオゾンや過酸化水素等を除去する。さらに活性炭では、有機物や濁度のより一層の除去も期待できる。

5. むすび

この研究では当社A事業所の水利用状況を詳細に調査し、排水再利用の可能性について評価した。次にその結果をまとめる。

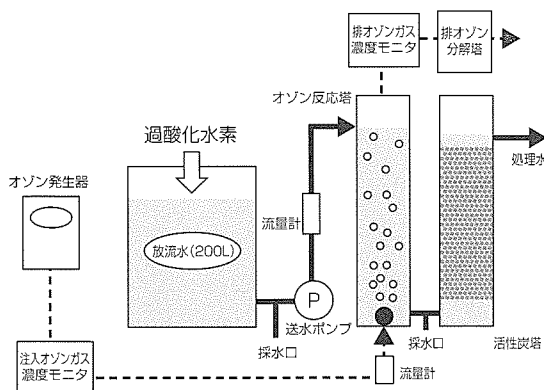


図3. 実験装置のフロー

表2. 実験条件

| 項目 | 値 |
|----------------------------|-------|
| 被処理水水温(°C) | 21 |
| 被処理水pH(-) | 6.9 |
| 被処理水流量(L/min) | 0.75 |
| オゾンガス濃度(g/m ³) | 21~46 |
| オゾンガス流量(L/min) | 0.5 |
| オゾン注入率(mg/L) | 14~31 |
| 過酸化水素注入率(mg/L) | 0~11 |

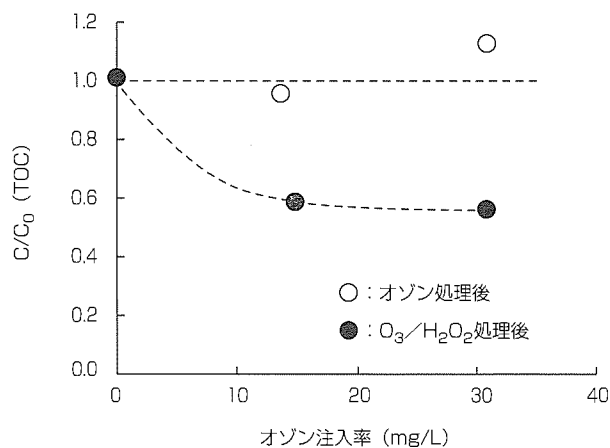


図4. オゾン注入率に対するTOCの変化

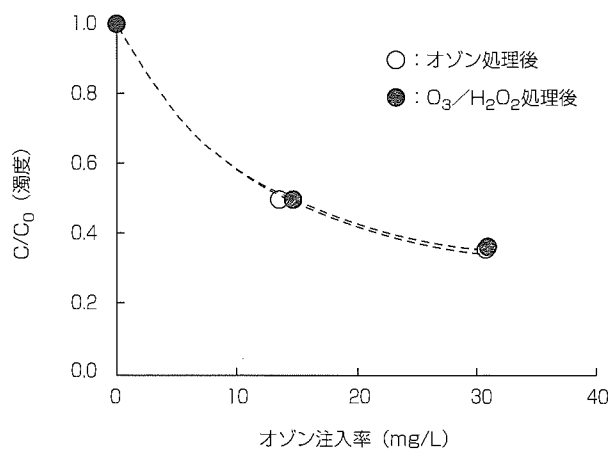


図5. オゾン注入率に対する濁度の変化

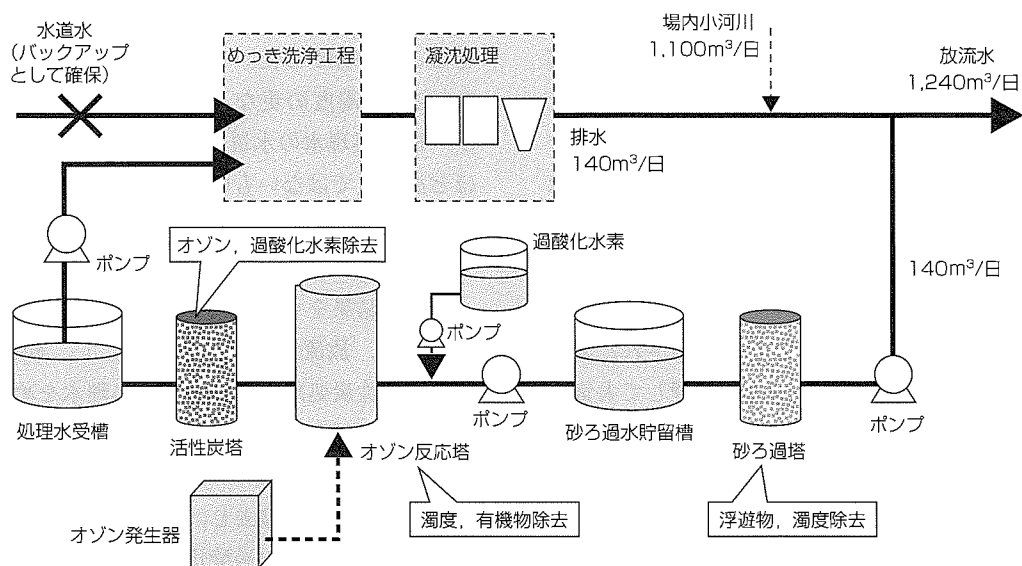


図6. 排水再生装置

- (1) 事業所からの排水の水質を調査した結果、濁度と有機物を除去できれば排水を水道水質基準値を満たすレベルまで高品質化できることが分かった。
- (2) 上記排水を対象に当社が研究開発を進めている O_3/H_2O_2 処理法を実施した結果、有機物と濁度を水道水質基準値レベルにまで除去できることが分かった。
- (3) 排水再利用システムとして、砂ろ過(濁度除去) + O_3/H_2O_2 + 活性炭処理(有機物除去)法を提案した。
この排水再利用システムを構築するためには、システムを構成する水処理装置の設置スペース、再利用水の配管取り回し、このシステムに関係する初期投資や維持管理費用

と水道水の削減費用との評価等が必要であり、今後はこれらの項目について検討を進め、事業所内の水使用量削減に貢献したい。

参考文献

- (1) 池邨善満, ほか: エコファクトリー・エコオフィスの推進, 三菱電機技報, 81, No.6, 377~380 (2007)
- (2) 安永 望, ほか: オゾン処理, 過酸化水素添加オゾン処理, 生物活性炭処理による下水二次処理水の高度再生処理の性能評価, 水環境学会誌, 25, No.6, 343~348 (2002)

工場におけるエコファクトリー活動

鐘尾 茂*
井上秀勝*
吉岡央人*

Eco-factory Activity in Factory

Shigeru Kanao, Hidekatsu Inoue, Hisato Yoshioka

要 旨

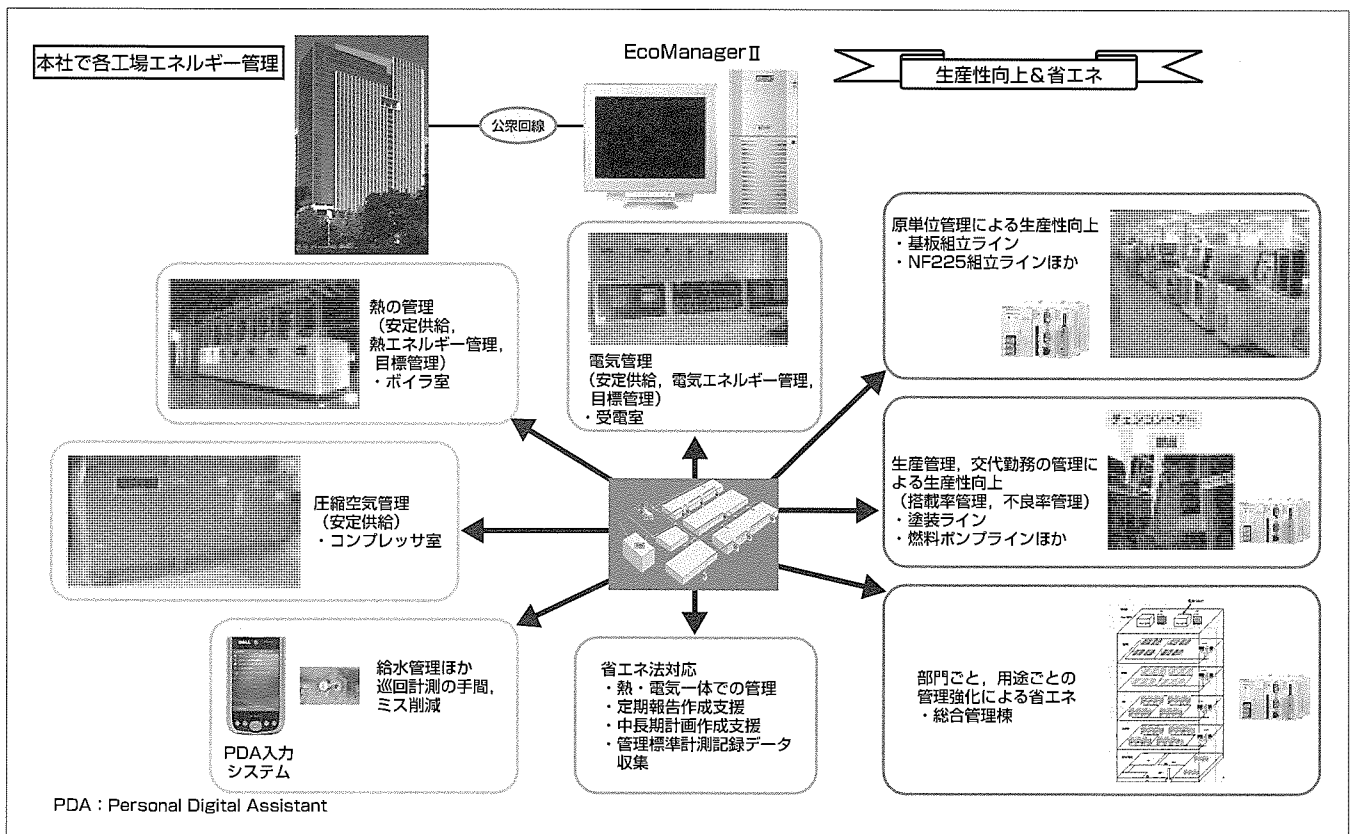
1997年に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(京都会議)以降、国は様々な省エネルギー対策を行い、各企業もそれらの対策に沿った省エネ活動に積極的に取り組んできた。

三菱電機も省エネ法に対応することはもちろんであるが、自主目標を掲げて目標達成のため、各工場でエコファクトリー活動に取り組んできた。

本稿では、当社福山製作所のエコファクトリー活動、及

びエコファクトリー活動の実現のために重要となってくる“攻めの省エネ”“見える管理”について述べる。

またエコファクトリー活動を実践する中で、省エネの見える化のノウハウを蓄積してきたが、これらのノウハウと最新技術を基に製品化した省エネデータベースサーバ“EcoManager II”システム及び省エネデータ収集サーバ“EcoServer II”，エネルギー計測ユニット“EcoMonitor-Pro”などの省エネ支援システム、機器について述べる。



工場全体のエネルギー管理のイメージ図

このイメージ図は、エコファクトリー活動の中から生まれた省エネデータベースサーバ、省エネデータ収集サーバ、エネルギー計測ユニットなど省エネ支援機器を使用した工場全体のエネルギー管理を示す。

これらのシステム、機器を使用することで、工場の省エネルギー活動を支援することが可能となる。

1. ま え が き

1997年に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(京都会議)以降、国は1999年4月の省エネ法の改正、2001年4月の新スキーム導入による規制強化、2003年4月のオフィスビルへの規制強化、2006年4月の熱と電気の一体化による工場・事業場の管理強化など様々な省エネルギー対策を行ってきた。一方、企業の各工場・事業場はそれらの省エネルギー対策に対応してきたが、国内の温室効果ガスの削減は思うように進んでいないのが現状である。しかしながら、京都議定書の約束期間(2008~2012年度)がスタートし、各工場・事業場には更なる省エネルギー努力が求められている。

このような状況の中、当社では省エネ法の遵守に加え、温室効果ガス削減のため自主目標を設定し、この目標達成のためエコノミー&エコロジーを追求したエコファクトリー活動を実践している。

本稿では、エコファクトリー活動、及びこの活動の中から生まれた省エネ支援システム、省エネ支援機器について述べる。

2. エコファクトリー活動

エコファクトリー活動は工場でエコノミー&エコロジーを追求する活動であるが、実現のためには、“攻めの省エネ”“見える管理”が重要となってくる。次にその詳細について述べる。

2.1 攻めの省エネ

当社が提案する“攻めの省エネ”は、エネルギー原単位^(注1)を経営指標として取り込むことでエネルギー生産性を向上させる省エネルギー手法の一つである。

老朽化した設備の更新時に、効率の良い設備を導入することは、従来の省エネルギーの発想であり、点の改善になってしまう。省エネルギー施策としての改善活動を点の改善にとどまらせないためには、見える管理が重要になってくる。

“原単位”をリアルタイムに“見える化”し、それを全員が共有できる環境を構築することで、“わかる化”までステップアップさせ、改善活動に結びつける。そして改善で得られたコスト改善効果を、新たな投資へ活用することで設備改善と運用改善を総合的にリンクさせた“面の改善”へ転換できる。これが当社の提案する“攻めの省エネ”である(図1)。

2.2 見える管理

省エネルギーの目標管理で重要なことは、生産に必要なエネルギーを、“必要なとき・必要なところで・必要な量だけ使う”エネルギーの“ジャストインタイム”という考え

(注1) エネルギー原単位とは、使用エネルギー量を生産数量等で除した値である。

方を徹底させることである。それには、エネルギーの消費動向を月1回から週1回、日1回、時間1回のデータ管理へと移行し、日々目標管理を行うことが重要となる(図2)。

また、エネルギーの消費動向を計測し、把握するだけでは省エネルギーを達成できない。実際に省エネルギーを実現するためには、設備ごとの原単位管理が不可欠となる。

電力の消費動向をリアルタイムにグラフ化することで、様々な問題点、すなわち原単位の悪化要因を視覚的に発見することができ、それを取り除くことで省エネルギーで最も重要な、生産に必要なエネルギーの“ジャストインタイム”が実現できる。

3. “攻めの省エネ”“見える管理”取り組み事例

当社の福山製作所では、設備ごとの分電盤に、電力計測ユニット(EcoMonitor II)を設置し、電力量と生産数量を計測し、省エネデータ収集サーバ(EcoServer II)で電力エネルギーの原単位を監視するシステムを導入することで、“攻めの省エネ”“見える管理”を実践している。計測結果をグラフ化することで問題点を顕在化し、悪化要因と照合することでより具体的な改善策を導き出せる(図3)。

また、対策後の改善効果を目に見える形で確認できるため、従業員一人ひとりの省エネルギーに対するモチベーションの維持、向上にも貢献できる。“見える管理”は今の状況をリアルタイムで把握でき、問題点の発生と同時に、迅速な対策を実施できることも大きなメリットである(図4)。

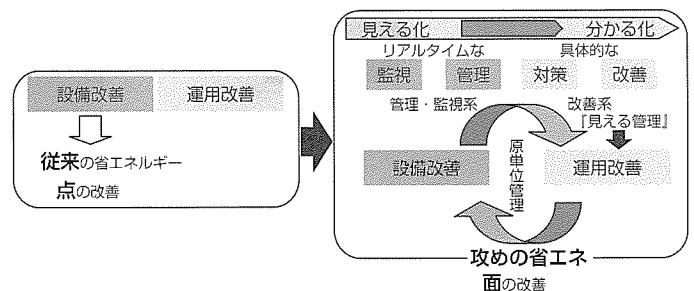


図1. 攻めの省エネ

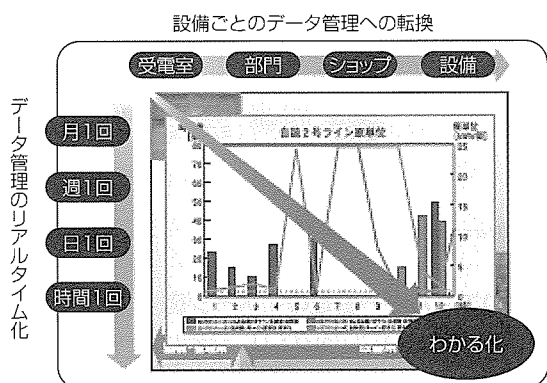


図2. 見える化からわかる化へ

4. “攻めの省エネ”“見える管理”導入効果

当社の福山製作所では、ISO14001認証取得を契機に1997年以降“見える管理”の構築，“見える管理”を利用した設備改善と運用改善を総合的にリンクさせる“攻めの省エネ”の実施によって工場内でエコファクトリー活動を推進してきた。

その結果次の成果を挙げた。

- ①原単位を17.3%削減(2005年実績1990年比)
- ②電力基本料金を約2,300万円削減(2005年実績1997年比)
- ③電力料金トータルで約1億円を削減(2005年実績1997年比)

そして、現在もその成果を維持し続けている。

この活動を通して蓄積したノウハウを基に様々な製品を開発してきたが、次にそれらのうち代表的なものについて述べる。

5. 省エネルギー支援システム

5.1 省エネデータベースサーバシステム (EcoManager II)

EcoManager IIは、データの共有化を図るため既設のイントラネット/インターネットを利用し、下位の省エネデータ収集サーバ、省エネデマンド監視サーバや電力エネルギー管理システムからのデータを利用し、グラフ化、帳票

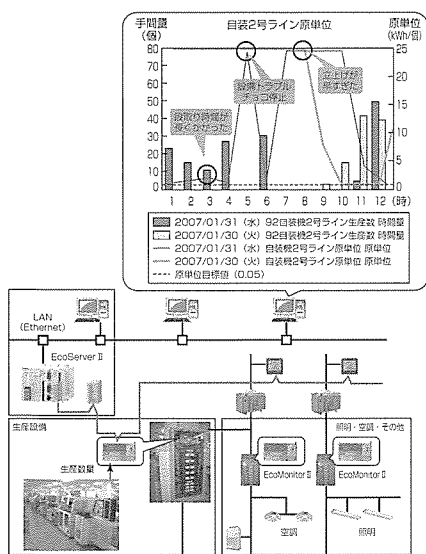


図3. 原単位管理導入事例

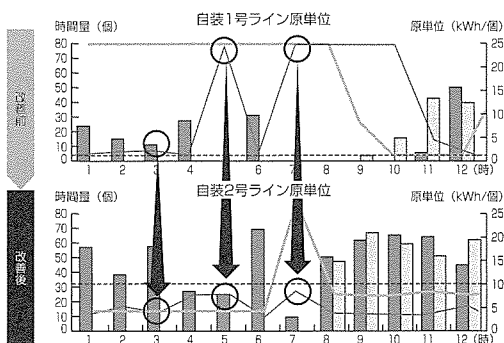


図4. 改善対策後の効果の確認

出力、保存することで、工場全体、部門別、工程別、設備単位での電力使用量の把握及び原単位管理を実現でき、省エネルギー管理の支援が可能なシステムである(図5)。

次に特長を述べる。

- (1) 省エネデータ収集サーバ、省エネデマンド監視サーバ、電力エネルギー管理システムから各種エネルギー計測データを収集し、データベース化を行うことで工場内のデータの一元化を実現
- (2) Webブラウザによってエネルギーの“見える管理”を実現
- (3) 新様式に対応した定期報告書・中長期計画書の基本フォームを収録し、作成を支援
- (4) オプションの傾向分析ソフトウェアによって、データマイニング技術^(注2)を駆使した高速アルゴリズムによって、データベースに蓄積された多数の計測データからエネルギー消費の全体傾向を容易に把握可能

6. 省エネルギー支援機器

6.1 省エネデータ収集サーバ(EcoServer II)

EcoServer IIは、フィールドネットワークであるB/NET伝送上に接続された計測機器の計測データを収集し、また収集した計測データはWebブラウザを使用してグラフ化、現在値表示させることができ省エネルギーに必要なデータ分析が簡単に行える機器である(図6)。

(注2) データマイニング技術とは、大量に蓄積されたデータを解析し、その中に潜む項目間の相関関係やパターンなどを探し出す技術である。

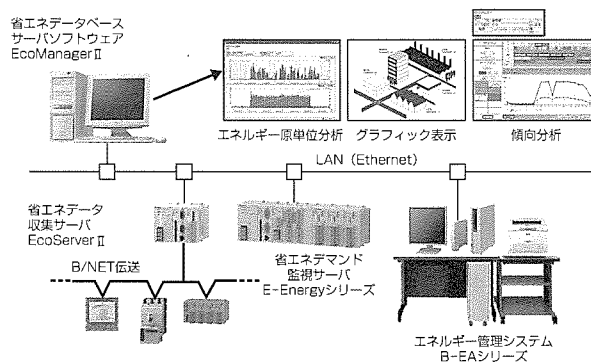


図5. EcoManager II システム

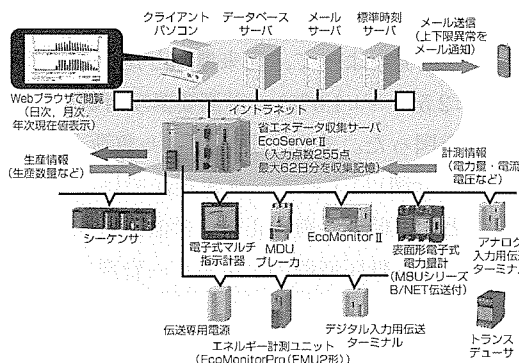


図6. EcoServer II

次に特長を述べる。

- (1) エネルギー計測ユニット(EcoMonitorPro), MDU (Measuring Display Unit)プレーカ, 伝送機能付き電子式マルチ指示計器などの計測機器からの計測情報を収集することが可能である。また“MELSECシーケンサ”が管理している生産情報をRS-485(計算機リンクプロトコル制御手順4)によって同様に収集し, 内部に記憶することが可能である。
- (2) B/NET計測端末機器からの計測情報とMELSECシーケンサからの生産情報は, EcoServer II上のコンパクトフラッシュ^(注3)メモリへ収集データの書き込みを行い, 1時間ごとのデータであれば最大62日間分のデータ蓄積が可能である。
- (3) Ethernet^(注4)(10Base-T)を持っており, かつ内部のHTTP(Hyper Text Transfer Protocol)サーバ機能によって, イン트라ネット/インターネットへの情報発信が可能である。イン트라ネット上のクライアントパソコンであればWebブラウザを使用し生産情報, 計測情報をどこからでも監視, 閲覧することが可能である。
- (4) EcoServer IIに接続された計測端末機器の上下限監視を行うことができ上下限異常が発生した場合イントラネット上のメールサーバに自動的に通報メールを送りメールサーバから設備管理者の携帯電話へメール通報を行うことも可能である。これらの機能によって設備管理者の作業負担を軽減し業務効率改善を行うことが可能となる。
- (5) EcoServer IIはハードディスクやファンなどの可動部品を一切使用せず, すべて半導体メモリで構成している。また, OSは組み込み用途で実績のあるVxWorks^(注5)を使用しており, いままでのパソコンを使用するケースと比較し安価でかつ信頼性の高いシステムが実現可能である。
- (6) アプリケーションソフトウェアをワンパッケージ化し顧客でのソフトウェアの作成が不要となり, 簡単な設定のみで動作可能である。

6.2 エネルギー計測ユニット(EcoMonitorPro)

EcoMonitorProは, 省エネルギーを目的として電気を計測・監視, 記憶, 表示する機器である(図7)。

次に特長を述べる。

- (1) 高精度計測専用ASIC(Application Specific Integrated Circuit)の開発によって, 従来機種と比較して計測精度(許容差 $\pm 2.5\% \rightarrow \pm 1.0\%$), 計測要素項目数(4 \rightarrow 11)の大幅向上を図った。また, 短サイクル負荷計測(全周波数サイクル計測)によって, 従来製品では困難であった溶接機などの短時間負荷の正確な計測が可能
- (2) 高圧回路から低圧回路のエネルギー管理に必要な電気

(注3) コンパクトフラッシュは, SanDisk Corp.の登録商標である。
 (注4) Ethernetは, 富士ゼロックス(株)の登録商標である。
 (注5) VxWorksは, Wind River Systems, Inc.の登録商標である。

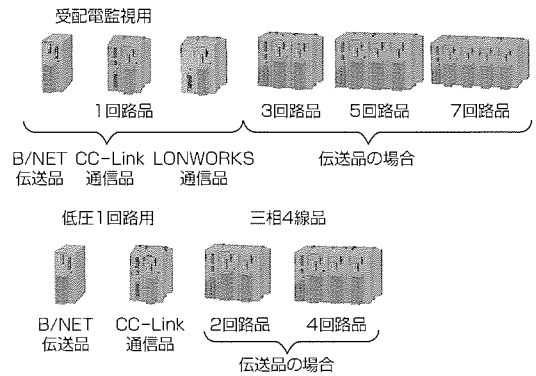


図7. EcoMonitorPro

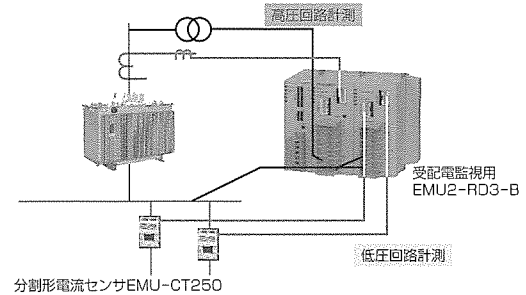


図8. 高圧回路から低圧回路までを1台でサポート

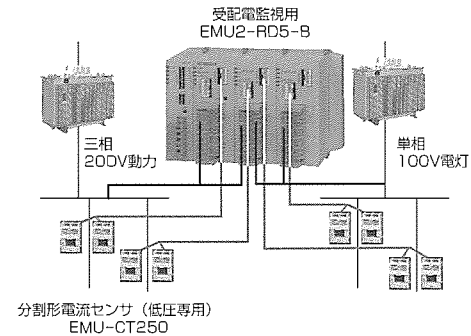


図9. 異なる電圧の複数回路, 異なる相線式の複数回路を1台で計測

- 量(電力量, 電流, 電圧など最大11要素)を計測可能(図8)
- (3) 異なる電圧の複数回路, 異なる相線式の複数回路(受電電圧, 低圧動力回路(三相3線), 低圧電灯回路(单相3線)など)を1台で計測可能(図9)
- (4) B/NET, CC-Link, LONWORKS^(注6)の各種ネットワークに対応

7. むすび

現在, 当社はエコファクトリー活動のノウハウの中から誕生した, 省エネデータベースサーバ, 省エネデータ収集サーバなどの省エネルギー支援システム, 省エネルギー支援機器を提供しているが, 今後も引き続き, 市場で要求される省エネルギー管理を提供する総合的なエネルギー管理システムを必要とする顧客に効果的に提供できる製品開発に取り組んでいく予定である。

(注6) LONWORKSは, 米国Echelon Corp.の登録商標である。

省エネルギー変圧器の技術動向と 省エネルギー性能

平 哲*
南井良文*

Technological Trend and Energy Performance of Energy-saving Transformer

Satoshi Taira, Yoshifumi Minamii

要 旨

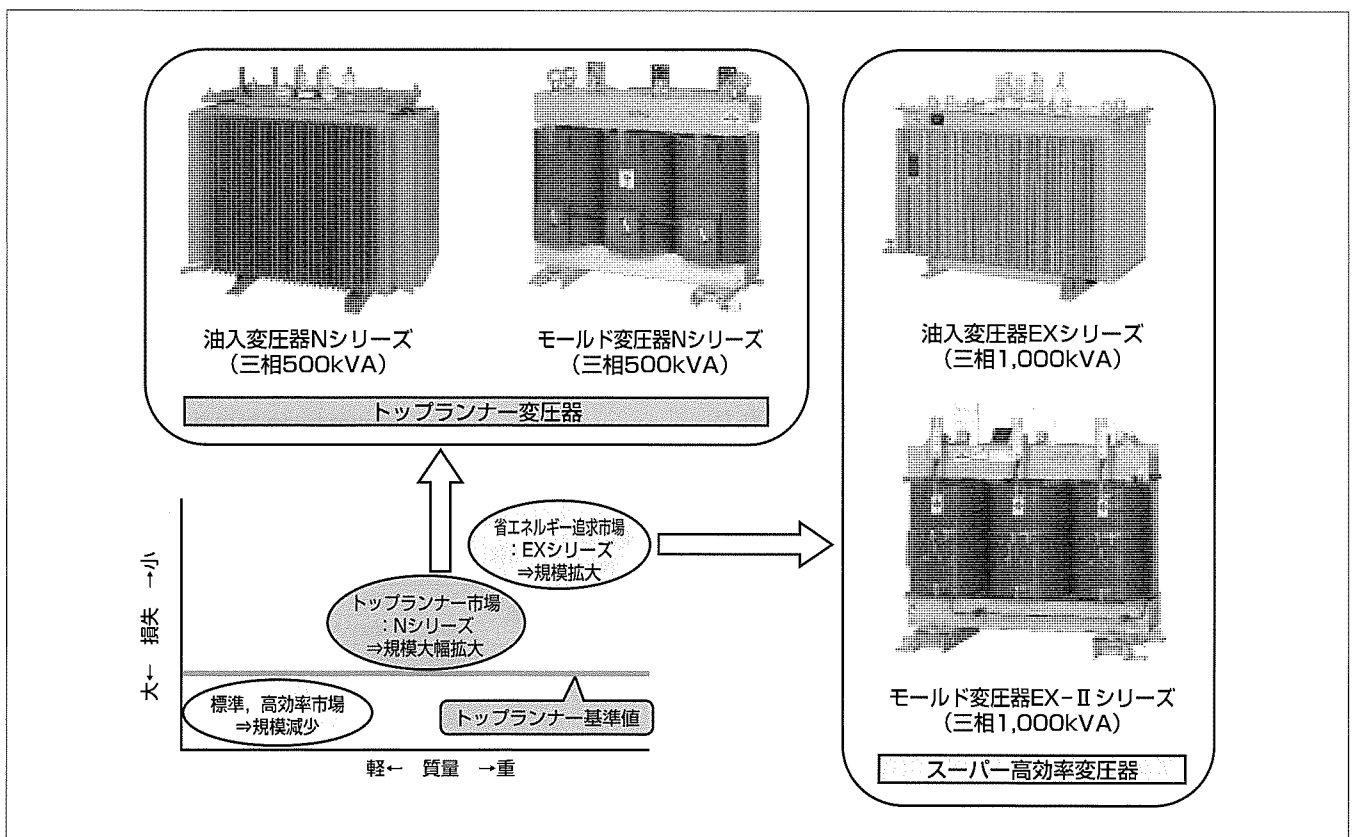
変圧器は、従来97～98%程度と高い効率の機器であるが、近年、特に鉄心材料の革新的な進歩と設計・製造技術開発によって、更に効率を向上させることが可能となり、省エネルギー変圧器として使用されるようになった。また、配電用変圧器はビル・工場などの配電に広く使用され、20～30年と長寿命の機器であること、国内で大量に運転されている機器であること、変圧器全体の損失は膨大な量となることなどから、配電用変圧器の省エネルギー推進は急務の課題であった。

これらの状況から、高压配電用変圧器は、2001年に省エネ法(エネルギーの使用の合理化に関する法律)によって特定機器として指定され、トッランナー方式による高効率

化が義務付けられ、その後、油入変圧器は2006年4月以降、モールド変圧器は2007年4月以降トッランナー変圧器に全面的に移行し現在に至っている。

現状の配電用変圧器市場はトッランナー変圧器をメインとして、一方で更なる省エネルギー追及品のニーズが拡大しつつあり、三菱電機では、これらの要求に対応した製品としてトッランナー変圧器“Nシリーズ”及び磁区制御電磁鋼帯をベースとして省エネルギーを追及したスーパー高効率変圧器“EXシリーズ”をラインアップしている。

本稿では、最近の省エネルギー変圧器の技術動向とその省エネルギー性能について述べる。



配電用変圧器の市場構成

現状、配電用変圧器市場は、トッランナー変圧器市場と省エネルギー追及市場で構成される。トッランナー変圧器は、標準仕様だけでなく準標準的な特殊仕様まで広く適用され、ほとんどの配電用変圧器で使用されている。一方で更なる省エネルギーを求めるニーズにも対応するため、省エネルギー性能を追及した変圧器としてスーパー高効率変圧器をラインアップして、これらの市場のニーズにこたえている。

1. ま え が き

配電用変圧器の高効率化(低損失化)は、1990年代の後半になると急速に進み、更なる高効率形の製品が開発、使用されるようになった。この背景となったのが、鉄心材料の進歩であり、従来の汎用的な方向性電磁鋼帯に代わり、高配向性電磁鋼帯や磁区制御電磁鋼帯といわれる新しい低損失の材料が広く使用されるようになったことによる。また、この頃から変圧器の高効率化は、従来の無負荷損主体の低減から、実際の運転でエネルギーロスとなる負荷損を含めた全損失を如何に低減するかという点に重点がおかれるようになった。この結果、高効率変圧器の効率は、従来の無負荷損のみの低減に比べて飛躍的に向上した。

2003年の省エネ法の改正によって、特定機器の基準値が示され、同年、いわゆるトッランナー変圧器^(注1)の基準値としてJEM1482^(注2)及びJEM1483^(注3)が制定された。

この中で、当社は、1990年代後半から、当社独自の高効率形の変圧器を開発し市場に展開、2001年には、省エネルギー性能を追求したスーパー高効率変圧器EXシリーズを投入し、省エネルギー変圧器の普及拡大を推進した。

現在の配電用変圧器市場は、トッランナー変圧器市場をメインとし、更なる省エネルギーを求める省エネルギー追及市場とで構成され、当社はこれらの市場に対応した製品をラインアップしている。

2. 省エネルギー変圧器の種類

2.1 トッランナー変圧器

省エネ法に準拠したトッランナー基準値を満足する変圧器で、広く汎用的に使用されている。鉄心に高配向性電磁鋼帯を適用し従来の標準シリーズからエネルギー消費効率で約30%を低減している。

(1) 対象範囲(図1)

トッランナー変圧器は、より広範囲の高効率化を求める主旨から容量、電圧などの仕様がJISなどで規定された標準仕様のみでなく準標準的な特殊仕様まで含まれる。

- ・ 高圧受配電用油入変圧器
単相10~500kVA, 三相20~2000kVA
- ・ 高圧受配電用モールド変圧器
単相10~500kVA, 三相20~2000kVA

(2) エネルギー消費効率(W)

変圧器の場合、基準負荷率(500kVA以下は40%, 500kVA超過は50%)における全損失(無負荷損+基準負荷

(注1) 特定機器対象変圧器を示し、目標基準値に適合した変圧器を(社)日本電機工業会で定めた呼称

(注2) 特定機器対応の高圧受配電用油入変圧器におけるエネルギー消費効率の基準値

(注3) 特定機器対応の高圧受配電用モールド変圧器におけるエネルギー消費効率の基準値

率の2乗×負荷損)をエネルギー消費効率として規定している。

(3) 目標基準値

標準仕様品の目標基準値は、表1のとおり算定式で与えられ、準標準仕様品については、標準品の目標基準値に乘率(油入変圧器1.1, モールド変圧器1.05)を用いて求められる。

2.2 スーパー高効率変圧器

省エネルギー追及市場に対応し省エネルギー性能改善に特化した変圧器で、鉄心に最高級グレードの磁区制御電磁鋼帯を適用し、更に巻線の銅設計化で、従来の標準的な製品の損失特性に対して、全損失を約60%低減している。

3. 省エネルギー変圧器の技術動向

3.1 変圧器の損失

変圧器の損失には無負荷損と負荷損があり、これらは更に図2のように分けることができる。省エネルギー変圧器の高効率化は、無負荷損及び負荷損の両方の損失を低減して実現している。

3.2 無負荷損の低減

(1) 低損失材料の適用

図3に示すとおり、高配向性電磁鋼帯は従来の材料より約25%、磁区制御電磁鋼帯は更に15%程度の低損失化を実現している。

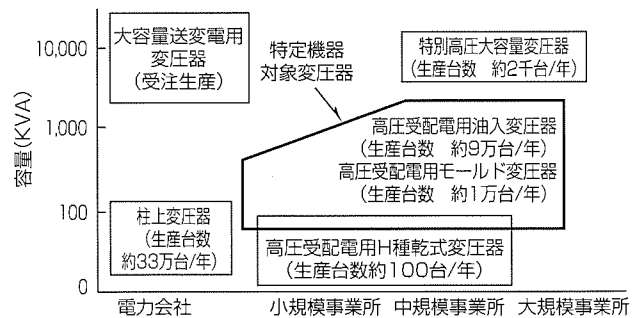


図1. 特定機器対象変圧器

表1. トッランナー変圧器の目標基準値算定式

| 変圧器の種類 | 相数 | 定格周波数, 定格容量 | 標準品の目標基準値算定式(容量:kVA) |
|---------|----|----------------|---------------------------------------|
| 油入変圧器 | 単相 | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 15.3 \times (\text{容量})^{0.696}$ |
| | | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 14.4 \times (\text{容量})^{0.698}$ |
| | 三相 | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 23.8 \times (\text{容量})^{0.653}$ |
| | | 50Hz, 500kVA超過 | $E = 9.84 \times (\text{容量})^{0.842}$ |
| | | 60Hz, 500kVA以下 | $E = 22.6 \times (\text{容量})^{0.651}$ |
| | | 60Hz, 500kVA超過 | $E = 18.6 \times (\text{容量})^{0.745}$ |
| モールド変圧器 | 単相 | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 22.9 \times (\text{容量})^{0.647}$ |
| | | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 23.4 \times (\text{容量})^{0.643}$ |
| | 三相 | 50Hz, 500kVA以下 | $E = 33.6 \times (\text{容量})^{0.626}$ |
| | | 50Hz, 500kVA超過 | $E = 24.0 \times (\text{容量})^{0.727}$ |
| | | 60Hz, 500kVA以下 | $E = 32.0 \times (\text{容量})^{0.641}$ |
| | | 60Hz, 500kVA超過 | $E = 26.1 \times (\text{容量})^{0.716}$ |

(注1) Eは、基準負荷率における全損失(W)を示す。

① 高配向性電磁鋼帯

方向性電磁鋼帯は、圧延方向に磁束を通しやすい性質を持っているが、結晶単位を見た場合、磁束を通しやすい磁化容易方向は、圧延方向に対して完全には一致しておらず、若干のずれを生じている(図4)。そのずれ角度(α)の大きさは、従来の方向性電磁鋼帯が約7度なのに対して、高配向性電磁鋼帯は約3度にまで精度を向上させた材料である。これは無負荷損の内ヒステリシス損の低減に寄与している。

② 磁区制御電磁鋼帯

磁性材は、原子レベルの小さな磁石(磁気モーメント)の集合体と考えることができる。材料の内部は磁区と呼ばれる部分に分かれ、一つの磁区の中では磁気モーメントは同じ方向を向いている。このとき、磁区と磁区の境界を磁壁と呼ぶ(図5)。無負荷損(W_i)は、ヒステリシス損(W_h)と渦電流損(古典的渦電流損(W_e)と異常渦電流損(W_{ae})からなる)からなり、次式で表される。

$$W_i = W_h + W_e + W_{ae} \dots\dots\dots(1)$$

$$W_h \propto f \cdot B_m^n \dots\dots\dots(2)$$

$$W_e \propto (t \cdot f \cdot B_m)^2 \dots\dots\dots(3)$$

$$W_{ae} \propto (B_s \cdot V)^2 \cdot t \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

f : 周波数, B_m : 動作磁束密度, t : 板厚, B_s : 飽和磁束密度, V : 磁壁の移動速度, n : 係数 (1.6~3.0)

式(4)から、異常渦電流損は磁壁の移動速度に依存していることがわかる。磁区制御電磁鋼帯は、高配向性電磁鋼帯に溝加工を施し、磁区を細分化、磁壁の移動速度を低減し異常渦電流損の低減を図った材料である。

(2) 動作磁束密度の最適化

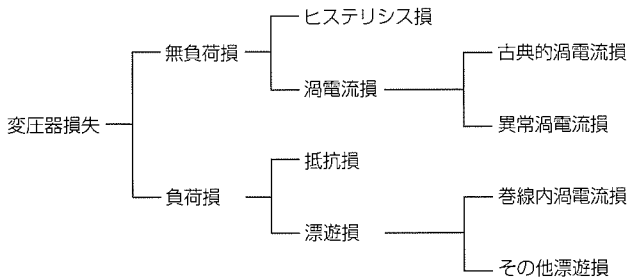


図2. 変圧器の損失

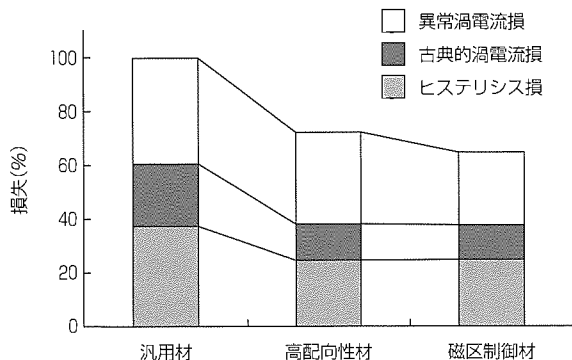


図3. 方向性電磁鋼帯の損失構成比較

鉄心の損失は、動作磁束密度を下げると単位質量あたりの損失は小さくなる。一方、動作磁束密度を下げた設計は、製品としては大型化する傾向があり質量増となる。トプルランナー変圧器は、基準負荷率での効率を満足するように、巻線で発生する負荷損も含め最適な動作磁束密度を検討し、動作磁束密度は、従来品に対して若干の低下にとどめ、汎用品として要求される小型、軽量を重視、既設品の更新需要への対応を容易にしている。

一方、省エネルギー追求形のスーパー高効率変圧器の動作磁束密度は、負荷損を含めた全損失が最小になるように、トプルランナー変圧器よりも更に低い動作磁束密度で設計している。これがスーパー高効率変圧器のもう一つの特徴である大幅な低騒音を実現している。

3.3 負荷損の低減

負荷損(W_c)は一次、二次巻線に負荷電流が流れることによって発生する損失で、次式で表される。

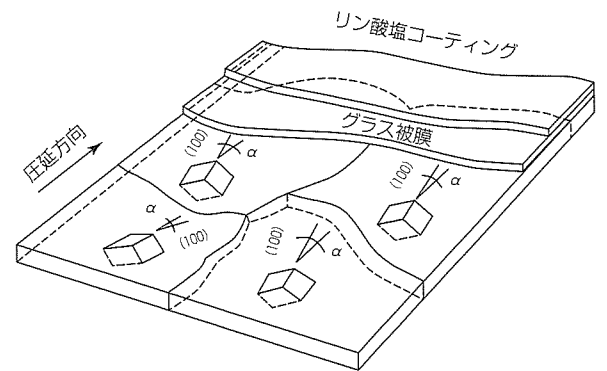
$$W_c = W_{c1} + W_{ce} + W_{cs}$$

ここで、

W_{c1} : 抵抗損 ($W_{c1} = I^2 \cdot R$, I : 負荷電流, R : 導体抵抗)

W_{ce} : 巻線の渦電流損, W_{cs} : 巻線以外の渦電流損

負荷損の低減には、従来の導体に使用されていたアルミニウムから導電率の優れた銅の積極的な採用に加え、導体面積を大きくして導体抵抗をより小さくする方法がとられる。この場合、導体断面積を大きくすると渦電流損も増加する。これは、導体を交流磁界中におくと起電力が生じ渦



(汎用材: $\alpha \approx 7$ 度, 高配向性材: $\alpha \approx 3$ 度)

図4. 電磁鋼帯の磁化容易軸方向(100)からの分散角

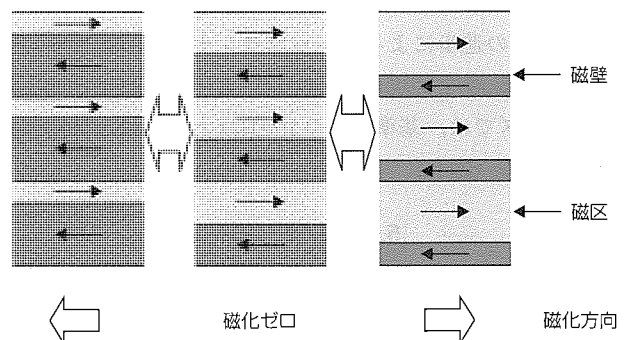


図5. 磁化による磁壁の移動

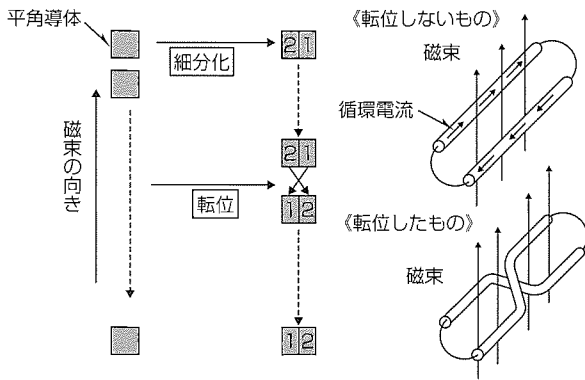


図6. 巻線の導体細分化と転位

電流が流れるためであり、次式が成り立つ。

$$W_{ce} \propto (t \cdot I)^2 \quad t: \text{導体巾}$$

この関係から、磁束に直角方向の導体巾が大きくなると渦電流損も大きくなる。このため図6に示すように導体の細分化と転位によって、巻線内の循環電流を打ち消し、渦電流損を低減している。

4. 省エネルギー変圧器の性能比較

当社は、トッランナー変圧器の特性基準値を満足する変圧器として、油入変圧器、モールド変圧器ともに“トッランナー変圧器Nシリーズ”と更に省エネルギーを追及した“スーパー高効率変圧器EXシリーズ”をラインアップしている。これらの変圧器シリーズと旧標準シリーズ及び30年前の製品との比較を次に示す。

4.1 損失性能

現状の主流となっているトッランナー変圧器は、30年前の製品から約60%の損失を低減、EXシリーズでは更に約20%を低減、大幅な省エネルギーを実現している(図7)。

4.2 床面積及び質量

トッランナー変圧器Nシリーズ及びスーパー高効率変圧器EXシリーズは、30年前及び旧標準品に対しても小型化を実現しており、旧型の変圧器の更新に対しても容易に対応できる。質量は、負荷損も含めた損失低減を図っており、旧標準からは若干増加しているが、30年前の製品から軽量化が図られており、変圧器の設置上、支障なく対応できる範囲にある(図8)。

4.3 騒音性能

鉄心材料の進歩によってトッランナー変圧器でも、従来品から低騒音を実現しているが、スーパー高効率変圧器EXシリーズでは、基準値より10dB以上の大幅な低騒音を実現している(図9)。

5. むすび

配電用変圧器が特定機器に指定され、油入変圧器、モールド変圧器とも全面的にトッランナーへ移行、変圧器の省エネルギー化が加速している。変圧器は20~30年の長期

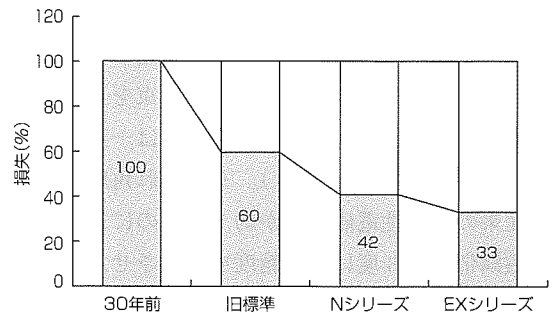


図7. 損失比較(油入三相500kVA50Hz 負荷率=40%)

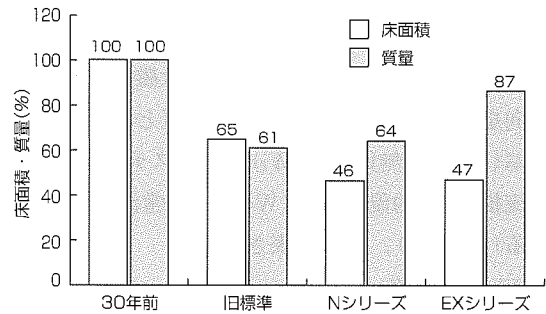


図8. 床面積及び質量比較(油入三相500kVA50Hz)

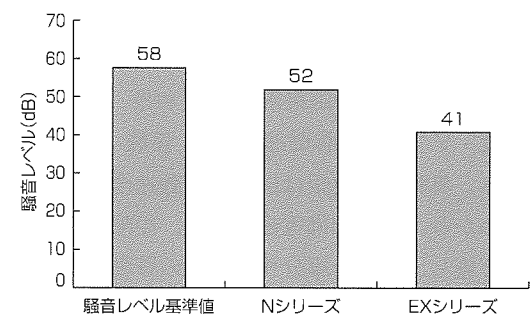


図9. 騒音レベルの比較(油入三相500kVA50Hz)

間にわたり使用される製品であり、市場では約270万台以上運転され、試算によればエネルギー損失総量は約165億kWh/年(CO₂換算約92億kgCO₂/年)という数値になる。トッランナー変圧器などの省エネルギー変圧器の採用は約30%の損失低減につながり、CO₂の削減に大きな効果をもたらすものである。その中でも、40~50万台は特に年式が古く、トッランナー品への更新によって、より大きな省エネルギー効果が期待される。

今後、ますます強まる地球環境保護の観点から、更なる省エネルギーを目指し、鉄心材料をはじめとした研究開発、適用技術の開発によって、一層の高効率化を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 日本電機工業会, 地球環境保護・温暖化防止に貢献するトッランナー変圧器, (社)日本電機工業会 (2006)
- (2) 南井良文: 高効率配電用変圧器の取り組みについて, 省エネルギー, 59, No.12, 34 (2007)

炭酸ガスレーザ加工機の技術変遷と 加工コスト低減

宮崎隆典*
杉原和郎*
棚橋邦浩*

Technology Transition of CO₂ 2D Laser Processing System and Its Processing Cost Reduction

Takanori Miyazaki, Kazuo Sugihara, Kunihiro Tanahashi

要旨

炭酸ガスレーザ加工機は、任意軌跡の切断が可能な工作機械として、現在では多くの産業分野で単品試作から大量生産まで適用されている。切断用炭酸ガスレーザ加工機が市場に登場してから20年以上が経過したが、飛躍的な技術進歩と市場の拡大によって、今や板金加工分野をはじめとした製造現場に不可欠な工作機械としての地位を確立した。近年では、レーザ加工機の普及に伴う加工賃の低下、素材価格の高騰に加え、地球温暖化を背景とした省エネルギー化の影響によって、レーザ加工による一層のコスト低減が要求されている。

これら市場の要望を受け、三菱電機では加工機、発振器、加工技術の開発によって、レーザ加工での生産性向上を実現し、ユーザーからのコスト低減の要望にこたえている。

本稿では、レーザ加工機の性能推移について述べ、生産性向上、及び省電力化によるコスト低減技術についても述べる。

【コスト低減を実現する各種技術】

(1) 加工機

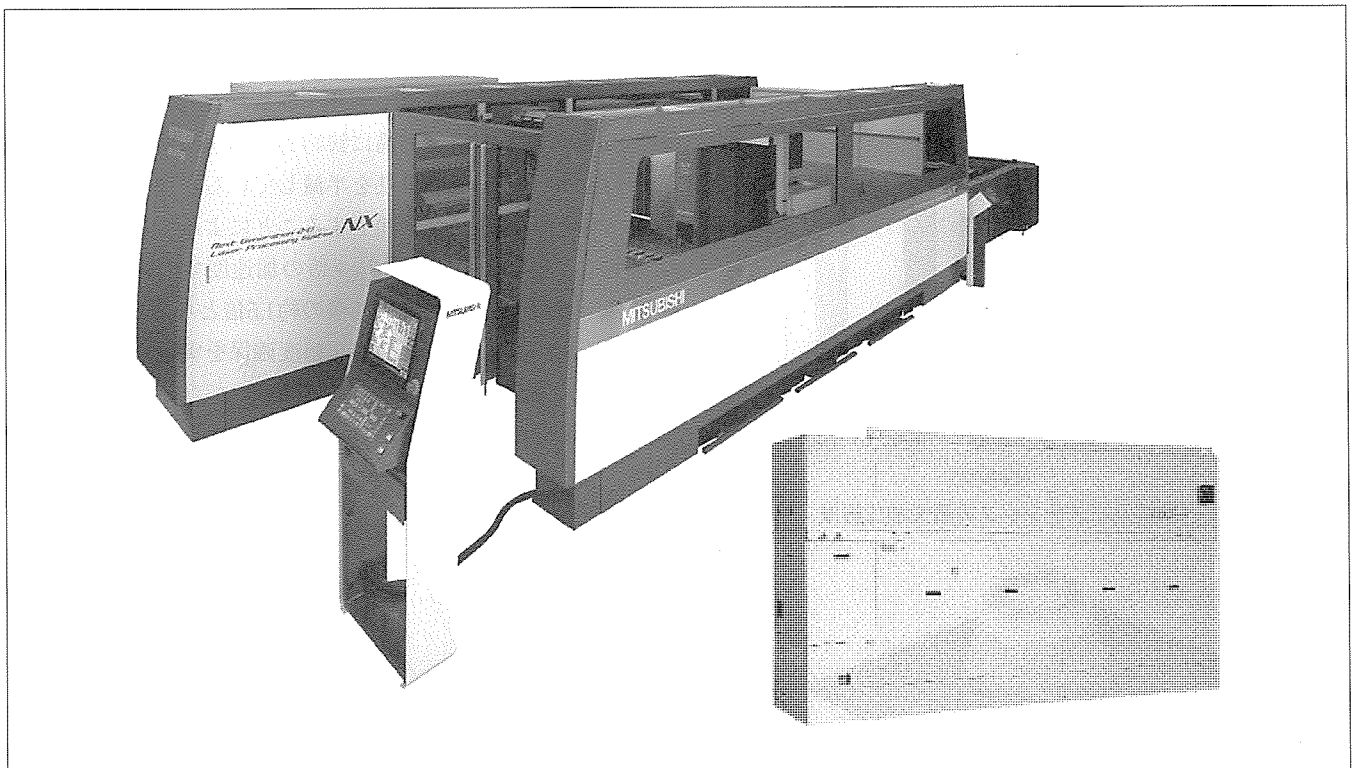
最新加工機である“NXシリーズ”では、加工機剛性の向上、高速追従俊い、高速制御という技術開発によって、加工時間の短縮を図った。これによって、ユーザーからの生産性向上の要求にこたえている。

(2) 発振器

最新の発振器“CF-Rシリーズ”ではモード次数の最適化、ジャストオンタイム方式の採用という従来技術に加え、筐体(きょうたい)内部から有機物を削減することで、レーザガスの劣化を抑制した。その結果、投入電力の増加を抑制し、消費電力削減を実現した。

(3) 加工技術

各種加工技術である軟鋼中厚板高速切断や軟鋼厚板の高速ピアス、ステンレス厚板でのプラズマ特性を利用する加工によって、加工時間が短縮される。これによって、稼働時間削減によるコスト低減に貢献している。



最新型レーザ加工機NXと発振器CF-Rシリーズ

高速高生産レーザ加工機NXシリーズは、省電力技術が盛り込まれた発振器CF-Rシリーズを搭載し、生産性向上と消費電力削減能力を兼ね備えている。さらに、各種加工技術の実現をとおし、システムとして省エネルギー、省コストに貢献している。

*名古屋製作所

1. ま え が き

炭酸ガスレーザー加工機は、任意軌跡の切断が可能な工作機械として、現在では多くの産業分野で単品試作から大量生産まで適用されている。切断用炭酸ガスレーザー加工機が市場に登場してから20年以上が経過したが、飛躍的な技術進歩と市場拡大によって、今やレーザー加工機は板金加工分野をはじめとした製造現場に不可欠な工作機械としての地位を確立した。近年では、レーザー加工機の普及に伴う加工賃の低下、素材価格の高騰に加え、地球温暖化を背景とした省エネルギーへの取り組みの影響によって、レーザー加工による一層のコスト低減が要求されている。

本稿では、レーザー加工機の普及期から現在に至るまでの性能推移について述べ、生産性向上、及び省電力化によるコスト低減技術について述べる。

2. 技術変遷

2.1 発振器の性能推移

図1は発振器出力に対する軟鋼及びステンレスの加工能力を示したものである⁽¹⁾。過去約20年間で発振器の高出力化が進み、それに伴い最大加工板厚も増大している。1987年当時は最大加工板厚が軟鋼で9mm、ステンレスで3mmであったのに対し、現在では各々25mmの加工を実現している。

図2は定格出力4kWの高出力発振器のビームモード分布を示したものである⁽²⁾。一台の発振器で軟鋼やステンレス、アルミニウムなど各種材質に加え、薄板から厚板までの各種板厚に対する広範囲な用途への要求が高まっている

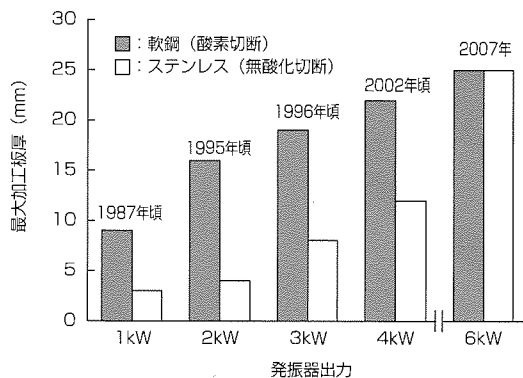


図1. 軟鋼及びステンレスの最大加工板厚

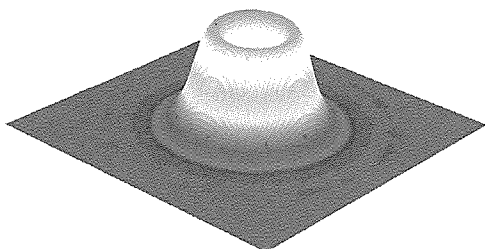


図2. 高出力レーザー発振器のモード分布

現在では、高出力かつ光学系の熱負荷を抑制可能なTEM01*モードの採用が一般的である。

ビーム品質の最適化は加工性能の向上に対して極めて重要な要素である。最適なモード次数の適用のみならず、ビームプロファイルの加工に及ぼす影響も無視できない。例えば軟鋼厚板の切断では、集光ビームプロファイルの“裾野”の急峻さが加工品質に大きく影響することが確認されている。このようなビーム“裾野”や先に述べたモード次数は加工性能に大きな影響を与える因子であり、これらの最適化によって炭酸ガスレーザー加工機の加工性能の向上が図られてきた。

2.2 加工機の性能推移

駆動系の高速化、加工機の高剛性化、制御装置の高速化など加工機の進歩も著しい。次に、加工機の能力向上の一例として真円度の向上について述べる。

図3はφ10mm穴加工時の加工速度と真円度の関係を示したものである。1989年当時は、真円度を25μm以下にするためには加工速度を0.5m/minまで低下させる必要があったが、2003年には8m/minでも25μm以下の精度で加工可能となった。加工機の進歩によって同一精度で約10倍の加工速度が達成され、生産性の大幅向上が実現した。

3. 各種技術によるコスト低減

3.1 加工機性能向上によるコスト低減

3.1.1 加工機剛性

最新のレーザー加工機NXシリーズでは、生産性向上の要求にこたえるために、様々な独自開発内容を盛り込んでいる⁽³⁾。NXシリーズの高速・高精度加工のベースとなるのは、最適化技術によってデザインされた高剛性鋳物フレームである。主要構造部品に鋳物製部品を採用し、従来シリーズと比べ可動部の重量を半減している。加工機本体の剛性を高め、耐振動性を向上することによって光走査方式のX軸とY軸は従来機に対し4倍の加速度での駆動を可能とした。加工送り速度は従来機の約1.5倍となる120m/minに高速化するとともに長期的な精度確保を実現している。

3.1.2 高速追従俊い

高速加工では材料表面へのレーザー光焦点位置の追従性が

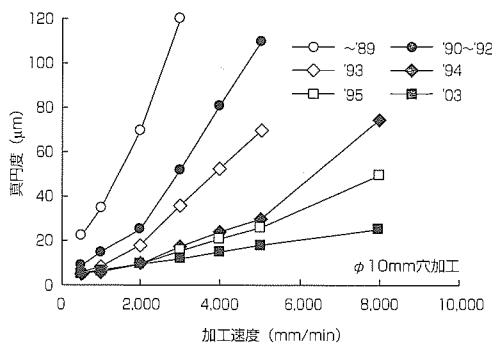


図3. 加工速度と真円度の関係

重要である。金属材料に対しては、高速加工時に発生するプラズマの影響を受けず、安定して焦点位置を検出可能な倣いセンサが不可欠となる。NXシリーズでは、制御方式に改良を加え、高速追従性能が従来機に対し約5倍になるとともに、耐プラズマ性に優れた倣いセンサを開発した。

また、切断品と加工ヘッドの接触を防止するための退避移動軌跡については、加工終了点から次加工点への移動を最適化するアルゴリズムの開発によって加工時間の短縮を図った。さらに、Z軸の加速度4Gの効果によって、退避及びアプローチの時間を従来機に対し約30%の短縮を可能とした。

3.1.3 高速加工制御

軌跡制御では指令値に対する高い追従性能と最適フィードフォワード制御による高速加工時の低振動化を実現し、従来機に対し同一精度で8m/minから20m/minまでの速度アップが可能となった。この結果、NXシリーズでは図4に示す形状で加工時間48秒を達成し、従来機に対し約26%の加工時間短縮を実現している。

また、NXシリーズでは薄板のみならず、中厚板、厚板領域でも大幅な加工時間短縮を実現している。一般にレーザーによる加工時間は、加工点移動、ピアシング、ピアシングの切断、形状切断に分類される。NXシリーズでは形状切断以外に要する時間を分析、削減することによって大幅な全体加工時間の短縮を実現した。図5は板厚9mmの軟鋼における従来機との加工時間比較を示したものである。形状切断以外の時間短縮によって、全体加工時間の約40%の短縮を実現した。

3.2 発振器及び冷却装置の省電力化

3.2.1 発振器の省電力化

発振器における省電力化への取り組みについて述べる。発振器は1991年に発売した“ML3016F2”で定格出力1.6kW発振時の消費電力は28kWであり、レーザー出力1kWあたりの消費電力は17.5kWであった。その後モード次数の最適化、ジャストオンタイム方式の採用などによって、1995年に発売した“ML3020D”は定格出力2kW発振時の消費電力は29.5kW、レーザー出力1kWあたりの消費電力は14.8kWと15%の消費電力削減を果たした。

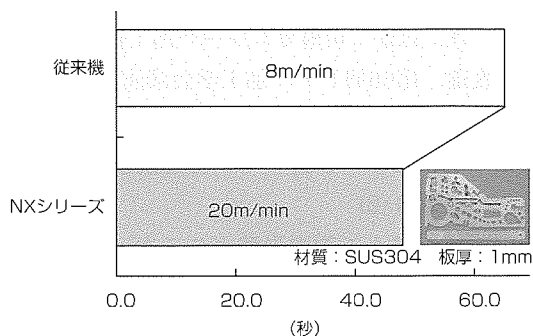


図4. 薄板加工時間短縮例

その後、筐体内部から有機物を削減し、レーザーガスの劣化を抑制することで、ガス劣化による投入電力の増加を抑えた“ML40CF-R”を2007年に発売した。ML40CF-Rの定格出力4kW発振時の消費電力は46kWであり、レーザー出力1kWあたりの消費電力は11.5kWとなっており、1991年発売のML3016F2に対して約35%の消費電力削減を達成している(図6)。

3.2.2 冷却装置の省電力化

発振器及び加工機の冷却を行う冷却装置に関しても省電力化に取り組んでいる。当社の発振器は高速パワーセンサによって出力を常時モニタしその値をフィードバックすることで投入電力をコントロールし定格出力 $\pm 1\%$ 以下に出力を制御している。このため、レーザー出力に大きく影響を及ぼす水温の温度制御が $\pm 3^{\circ}\text{C}$ でよく、コンプレッサのON、OFF動作によって水温の制御が可能である。これは、常時コンプレッサがONで温度調節をしているホットガスバイパス方式に比べ、大幅な消費電力の削減を実施している。

また、2005年からインバータ圧縮機を搭載した、インバータ冷却装置を製品化することによって消費電力を16%削減(ML40CF-R用水冷式冷却装置で定格出力4kW発振時の冷却装置の消費電力)するとともに(図7)、フロンをR22(HCFC)からオゾン破壊係数ゼロのR410a(HFC)へと変更しており、地球環境保護を推進している。

3.3 加工技術によるコスト低減

3.3.1 軟鋼中厚板高速切断技術

軟鋼4.5~12mmの中厚板領域では、 $\phi 1.2\text{mm}$ 以下の小径ノズルを用いた高速切断技術が開発され、アシストガス消

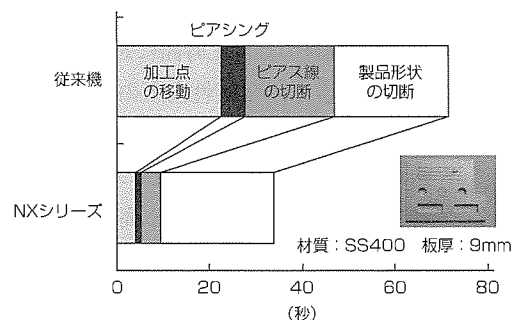


図5. 中厚板加工時間短縮例

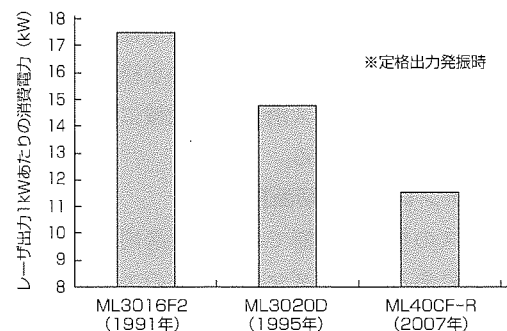


図6. 発振器消費電力の変遷

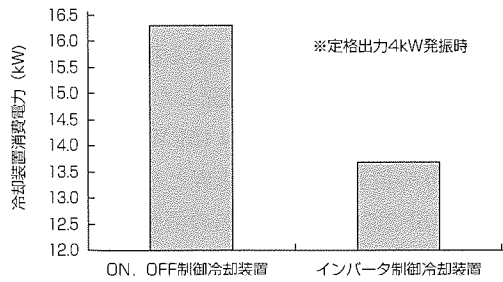


図7. 冷却装置インバータ化による消費電力削減

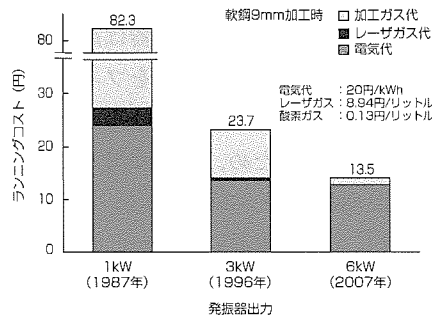


図8. 軟鋼高速切断のランニングコスト変化

費量の削減と加工速度の向上によって低ランニングコスト加工を実現している。

図8は板厚9mmの軟鋼を加工した場合の、各発振器出力における単位切断長あたりのランニングコストを示したものである。高出力発振器の適用とノズル形状の適正化、集光ビーム径の適正化によって加工ガス流量の低減が可能で2m/min以上の加工速度を実現し、大幅なランニングコストの低減が図られた。ガス流量の低減によって、6kW発振器によるアシストガス代は3kW発振器を用いた場合の6.8%にまで大幅に削減されている。

3.3.2 軟鋼厚板ピアシング技術

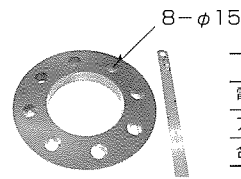
板厚12mm以上の軟鋼材では加工時間に対するピアシング時間の占める割合が大きく、生産性向上の大きな障害となっていた。当社ではレーザー出力、レーザー光の照射スポット径及びアシストガスを最適制御することによって、短時間でピアシング穴を貫通させる技術である高速ピアスを開発し、レーザー加工全体の時間短縮に大きな効果を与えている。

図9は従来ピアスと高速ピアスによるコスト比較を示した一例である。高速ピアスによって板厚19mmの任意形状切断で約60%のコスト削減を実現した。

このピアシングではφ1.7mm以下の小径ノズルを使用しており、軟鋼厚板領域でのピアス穴の小径化と溶融飛散物の低減、及びアシストガス消費量の低減によるトータルコスト削減も可能としている。

3.3.3 ステンレス厚板切断技術

ステンレスの無酸化切断では、切断溝内でプラズマが発生する傾向にある。プラズマはビームのエネルギー密度と窒素ガス、金属蒸気の解離エネルギーに起因し、ビームの吸収、散乱による切断面品質の低下を誘発する。そのため、



| | 従来加工 | 新加工 | 差異 |
|---------|----------|---------|------|
| 電気代 | 116.8円/個 | 73.5円/個 | ▲37% |
| アシストガス代 | 107.0円/個 | 22.6円/個 | ▲78% |
| 合計 | 223.8円/個 | 96.1円/個 | ▲57% |

材質：SS400 板厚：19mm

図9. 高速ピアスによる加工時間短縮例

表1. ステンレス厚板切断例

| | 通常切断 | プラズマ面切断 |
|-------------------|------------|------------|
| 切断面 | | |
| 加工速度 | 300mm/min | 350mm/min |
| アシストガス消費量 | 1,700L/min | 1,300L/min |
| 切断長1mあたりのランニングコスト | 1,200円/m | 800円/m |

材質：SUS304 板厚：14mm

一般的にはプラズマを抑制する加工条件、加工制御が使用されている。しかしながら、故意にプラズマ発生を維持し加工するプラズマ面切断を適用することで、加工速度の向上、アシストガス消費量の削減が可能となる。

表1に4kW発振器による通常切断とプラズマ面切断の切断面比較、及びコスト削減効果の一例を示す。プラズマ面切断によって、通常の無酸化切断に比べ加工速度が向上し、アシストガス消費量も削減されることで、約33%のコスト削減が実現される。加工物の必要精度に応じ、これらの切断方法を選択することで、生産性向上、ランニングコストの低減が可能となる。

4. む す び

炭酸ガスレーザー加工機の技術変遷と、省電力化、及びコスト低減技術について述べた。

今回取り上げた省エネルギー、省コストのように、市場を取り巻く環境によって、ユーザー要求も多岐にわたると考える。今後も総合レーザーメーカーとして更なる性能向上を目指すとともに、生産現場からの各種ニーズに積極的にこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 井上 孝, ほか: 炭酸ガスレーザー加工機の普及とその技術変遷, 第66回レーザー加工学会講演論文集, 137~142 (2006-2)
- (2) 西田 聡, ほか: CO₂レーザー切断技術, プレス技術, 24~28 (2003-2)
- (3) 宇野航史, ほか: 新型炭酸ガス二次元レーザー加工機“NXシリーズ”, 三菱電機技報, 81, No.4, 301~304 (2007)

省エネルギー用途の 瞬発力型キャパシタ

光田憲朗* 久保一樹**
竹村大吾**
相原 茂**

Momentary-load Electric Double-layer Capacitors for Saving Energy

Kenro Mitsuda, Daigo Takemura, Shigeru Aihara, Kazuki Kubo

要 旨

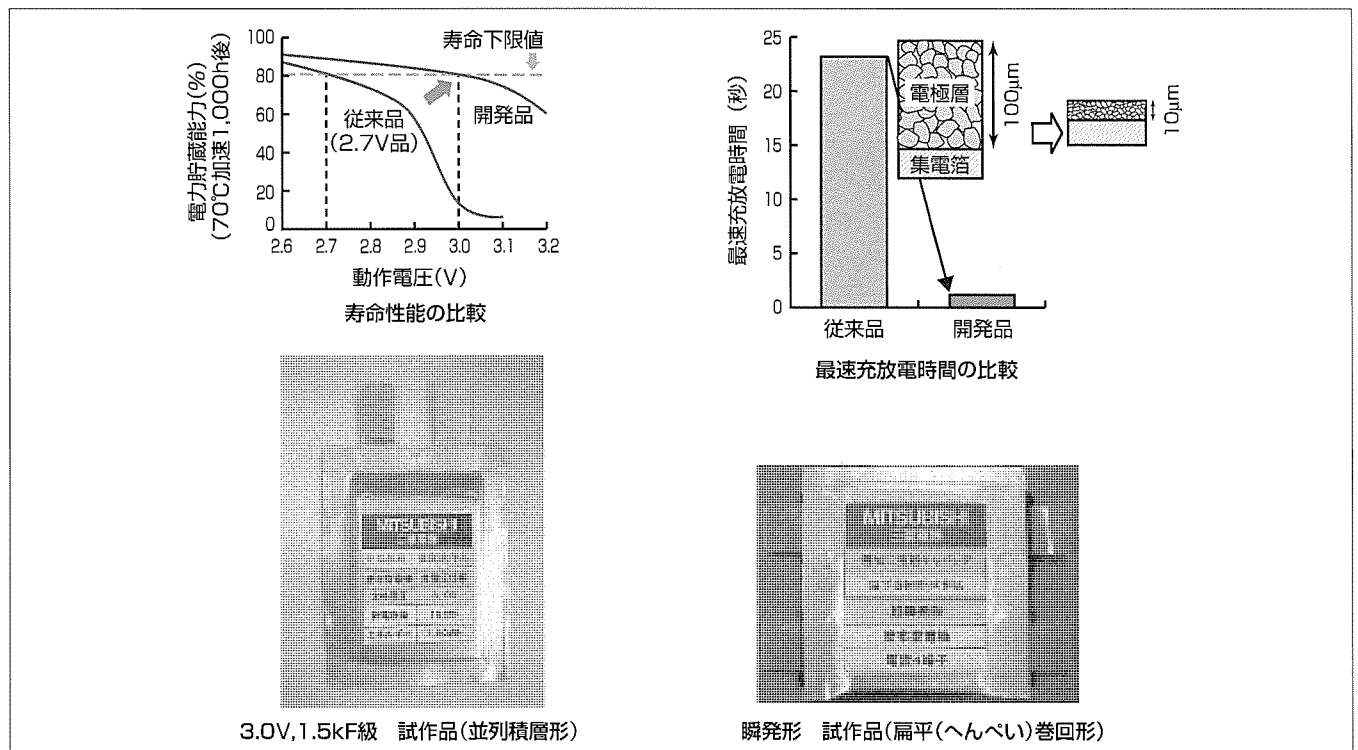
日本の年間電力消費量は約1兆kWhで、この中で工場動力、自動車や鉄道などの交通機関、OA/FA機器、家庭用電気製品など、モータによる電力消費が半分以上を占めている。しかし日本のこれまでの省エネルギー技術によって、モータの効率とモータを駆動制御するパワーエレクトロニクス機器の効率は90%を大きく上回り、100%の限界に迫ろうとしている。したがって、モータが定常的に回転している状態では更なる大幅な省エネルギーは望めない。

しかしながら、モータは停止する際に大きなエネルギーを放出しており、電力の品質保証の問題があってこれを系統電力に戻すことは難しく、熱にして捨てているのが現状である。モータの停止頻度に依存するが、電力消費量の30%近いエネルギーを熱にして捨てている場合がある。ここに省エネルギーの余地がまだ残っている。

モータの回生手段として電力貯蔵デバイスがあるが、残念ながら秒オーダーの短時間で大電力の回生ができる適当

な電力貯蔵デバイスが見あたらない。例えば、アルミニウム電解コンデンサは瞬時に電気を貯めることができるが、貯蔵エネルギーが小さすぎる。バッテリーでは急速な充電が困難でサイクル寿命が短くすぐに寿命が尽きてしまう。これが、モータ停止時に発生する電力を有効に利用できずに捨てざるを得ない理由になっている。

そこで、アルミニウム電解コンデンサの100倍以上のエネルギーが貯められ、バッテリーよりは短時間で充放電ができサイクル寿命の長い“電気二重層キャパシタ⁽¹⁾”に着目した。高電圧化技術を開発するとともに、最速充放電時間を従来の20秒から1秒まで短縮する技術を開発し、省エネルギー用途の瞬発力型キャパシタを試作した⁽²⁾。環境温度など実使用環境での信頼性の確保など課題も残っているが、モータ駆動のトータルシステムの省エネルギーを図る電力貯蔵デバイスとして期待される。



省エネルギー用途の瞬発力型キャパシタ試作品と性能

開発品(並列積層形)は業界トップレベルの高電圧化を可能にしている。また、瞬発キャパシタの開発品は業界最速の1秒の充放電が可能であり、これまで回生が難しかったブレーキ直後の大電流の回生を行うことができ、頻繁に起動停止するモータの回生を担うことで大幅な省エネルギーに貢献できると期待される。

*先端技術総合研究所(工博) **同研究所

1. ま え が き

1kFクラスの大型の電気二重層キャパシタについては、大型瞬低補償装置に用いられている程度で⁽³⁾、まだ市場規模も小さく一般にはあまり知られていない。本稿では、キャパシタの原理の紹介や他の電力貯蔵デバイスとの比較をした上で、開発した高電圧化技術や瞬発力を大幅に向上した技術とその効果について述べる。

2. 電気二重層キャパシタの動作原理と特徴

電気二重層キャパシタの電極は図1に示すように、基本的には、直径数 μm の活性炭粒子で構成した電極層と集電のためのアルミニウム箔(はく)とでできている。活性炭の細孔内部で、電解液との界面が生じ、充電すると電解液のイオンが活性炭に近づいて電気二重層を形成し電圧が生じ、放電するとイオンが離れて電圧が低下する。原理的に化学反応を伴わない物理的な充放電なので信頼性が高くサイクル寿命にも優れている。アルミニウム電解コンデンサは酸化アルミニウムが誘電体となって電気が貯まるが、電気二重層キャパシタの場合には、活性炭の $2,000\text{m}^2/\text{g}$ という広大な細孔表面積に電気二重層を形成し電気を貯める。

電気二重層キャパシタの特徴をアルミニウム電解コンデンサや各種バッテリーと比較する形で表1に示した。また、エネルギー密度(持続力)と出力密度(瞬発力)を比較する形で図2に示した。

電気二重層キャパシタ(以下“キャパシタ”という。)は、アルミニウム電解コンデンサに比べて、100倍を超えるエ

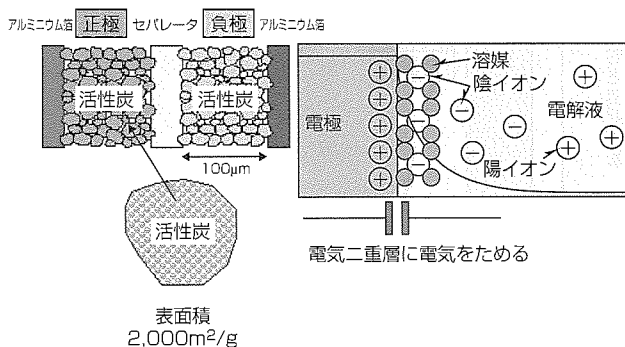


図1. 電気二重層キャパシタの動作原理

表1. キャパシタと他の電力貯蔵デバイスの比較

| | アルミニウム電解コンデンサ | 電気二重層キャパシタ | 鉛蓄電池 | ニッケル水素電池 | リチウムイオン電池 |
|--------------|--|-------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| 電極材料 | Al(Al ₂ O ₃)/Al | 活性炭/活性炭 | PbO ₂ /Pb | NiOOH/MH | LiCoO ₂ /Li |
| 充放電サイクル数 | 100,000回以上 | 100,000回 (~300万回) | 1,000回程度 (深度に依存) | 1,000回以上 (深度に依存) | 1,000回以上 (深度に依存) |
| 出力密度(瞬発力) | 100,000W/kg | 3,700W/kg | 400W/kg | 750W/kg | 1,000W/kg |
| エネルギー密度(持続力) | 0.01Wh/kg 以下 | 7.5Wh/kg | 30Wh/kg | 45Wh/kg | 70Wh/kg |
| セル電圧 | 10~200V | 2.7V | 2.0V | 1.2V | 3.6V |
| 標準的な充放電時間 | 数10ミリ秒 | 20秒 | 1時間 | 数10分 | 数10分 |

ネルギー密度が得られるが、セル電圧が2.7V程度と、アルミニウム電解コンデンサよりも低く、積層しないと高い電圧が得られないのが難点である。サイクル寿命はバッテリーに比べて圧倒的に優れているが、エネルギー密度は鉛蓄電池の1/4、リチウムイオン電池の1/10程度と低い。

キャパシタの標準的な充放電時間は、バッテリーよりも著しく短い、それでも20秒(下限3/4電圧までの充放電で充放電効率80%を想定)とモータ停止時の瞬時電流を受け入れるには長すぎる。

キャパシタのエネルギー密度(持続力)と出力密度(瞬発力)は、ちょうどアルミニウム電解コンデンサとバッテリーの中間に位置している。なお、キャパシタはアルミニウム電解コンデンサと同様に放電によって0Vまで直線的に電圧が変化する。

3. キャパシタの高電圧化

キャパシタの蓄電エネルギーは $1/2CV^2$ に比例するので、高電圧化が図れば蓄電エネルギーが増加し、その分、Whあたりの単価は安くなる。

キャパシタの劣化は、電圧が高いほど、また動作温度が高いほど加速する。キャパシタの寿命について公式な定義はまだないが、静電容量が20%減少した時点か、内部抵抗が2倍になった時点のいずれか早いほうを寿命と考えている。

キャパシタの劣化は、高温高電圧時の正極及び負極での電解液の分解が主な原因である。正極ではCO₂などのガスが溜(た)まって細孔を塞(ふさ)ぐので、静電容量が減少して内部抵抗が増大し、負極では、電解液の分解物が活性炭表面を覆って細孔を塞ぐので、やはり、静電容量が減少して内部抵抗が増大する。

キャパシタにとっては、高い電圧で長時間放置することが厳しいモードになり、寿命試験の目安となる。およそ0.1V上昇することに、寿命は半減する。

また、キャパシタは、25 $^{\circ}\text{C}$ を基準として、10万時間の寿

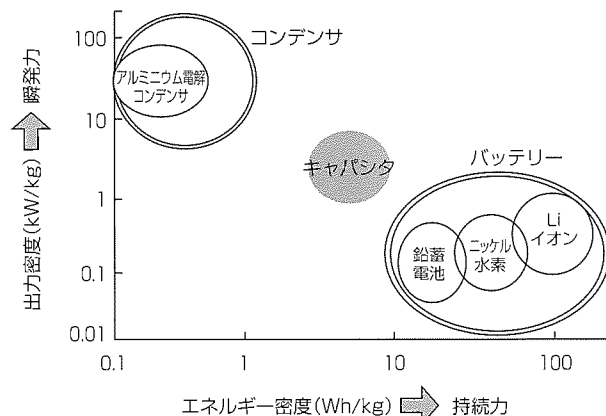


図2. 持続力と瞬発力の比較

命と言われており、その加速試験には、もっとも厳しいモードである最高電圧で温度を高めた試験が行われる。およそ7℃上昇するごとに寿命は半減し、70℃1,000時間後の静電容量と内部抵抗が寿命要件(容量初期値の80%以上、内部抵抗初期値の2倍以内)を満たせば、25℃10万時間相当の実証になると判断している⁽¹⁾。

キャパシタは、動作温度や環境温度に配慮して動作電圧を設定する必要があるが、環境温度が高い場合には、動作電圧を低めに設定して使用される。

したがって、キャパシタの耐電圧を高めることが求められる。劣化原因の究明にはじまり、活性炭電極への添加剤や電解液の改良などによって耐電圧の向上を図り、従来2.7Vであった耐電圧を3.0V(国内トップレベル)まで拡大することに成功し、従来に比べ蓄電エネルギーを2割以上増大させることができた。あわせて、従来の圧延電極よりも量産化に適した塗布型電極を開発した⁽²⁾。

扉ページの左側の写真と図が、塗布型電極を用いて作成した1.5kF級の3.0V高電圧仕様のキャパシタ試作品の写真と寿命性能の電圧依存性である。

4. 超瞬発力型キャパシタの開発

モータを減速した場合に大きな回生電流が流れる。また、回転数が定格に達するまでに大きな力行電流が必要になる。これを模式的に図3に示す。回生電流は抵抗負荷で熱にして捨てるとエネルギーのロスになる。また、力行電流で定常電流よりも余分な電力を消費する分、モータや装置の定格電力をアップさせることになり、契約電力が高くなる。

回生電流をキャパシタで吸収して、力行電流に用いることができれば、エネルギーロスを削減するとともに、定格電力を下げることができ、契約電力料金を節約できる可能性がある。しかしながら、キャパシタの充放電効率が高くないと、省エネルギーにつながらない。図4は、充放電時間と充放電効率と正規化内部抵抗(ΩF値)の関係を示すグラフである。ΩF値は、次元的には秒の単位になる。0.5秒充電、0.5秒放電の1秒充放電の場合に、ΩF値が0.1ΩFで

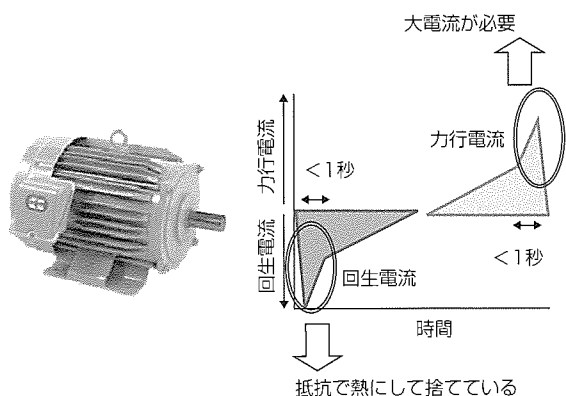


図3. モータの回生電流と力行電流

あれば、定電流で3/4電圧までの充放電を想定した場合、80%の充放電効率を維持できるが、2.0ΩFだと、ほとんど充電できず力行時に電力として利用することができない。

キャパシタ電極は、図5に示すように電極厚さを薄くすると瞬発力が増し、逆に電極厚さを厚くすると持続力が増すことになる。これによって容量(F)が減り、ΩF値を下げるができる。塗布型電極の技術を駆使して、従来100μmが標準であった電極厚さを、10μmレベルにまで薄くする技術を開発した。

しかし、電極厚さを薄くするだけでは不十分であり、内部抵抗についても大幅に下げる必要があった。内部抵抗を下げるために、電子伝導抵抗とイオン伝導抵抗に分けて内部抵抗が何に起因しているかの調査を実施し、一つ一つ低減策を講じて、従来に比べて1/3の内部抵抗に下げることができた。これによってΩ値も下がり、0.1ΩF級の超瞬発力型キャパシタの開発につなげることができた。

開発したキャパシタの小型セルを用いて充放電を行った結果を従来品との比較で図6に示す。1秒充電、1秒放電

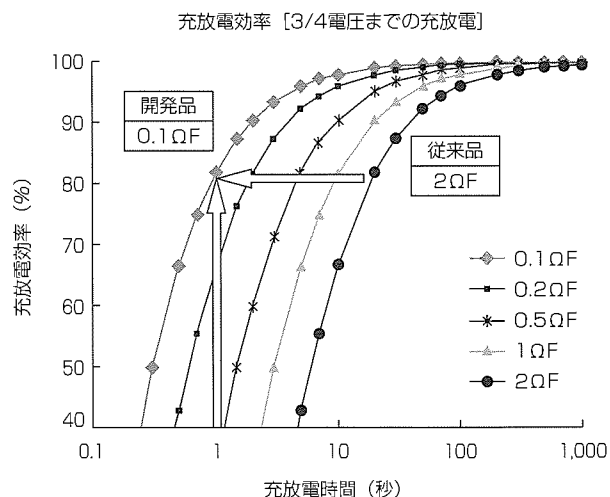


図4. 充放電時間と充放電効率とΩF値の関係

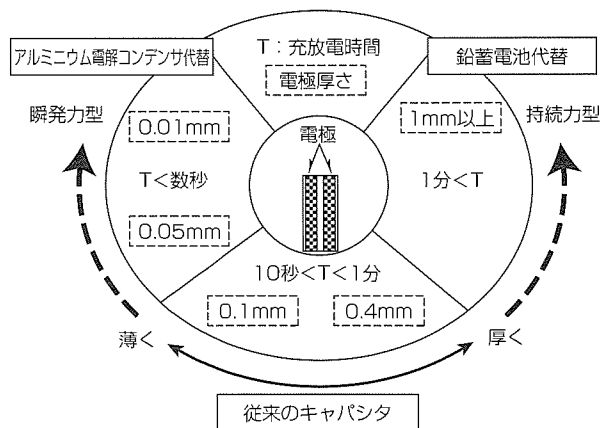


図5. キャパシタ電極厚さと充放電時間

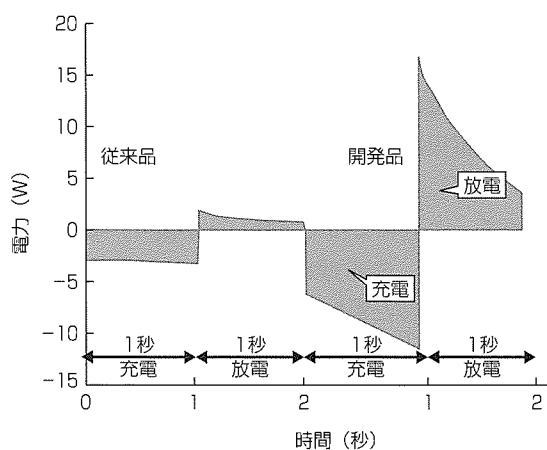


図6. キャパシタ小型セルの充放電比較試験結果

の2秒充放電のパターンであるが、左側の従来品では充電時に電気に換えることができずに熱になり、放電時にもロスがあってほとんど回生できていない。これに対して、開発品では確実に回生し力行に使えていることが分かる。

図7に30秒周期で充放電を継続した時の温度変化を示す。開発品がほぼ一定の温度を保っているのに対して、従来品の温度が急激に上昇している。セル温度がのこぎり状に変化するの、充放電に伴う iR^2 に相当する発熱以外に可逆な充電時の発熱と放電時の吸熱があるためである。

図8は、80秒周期で0Vから2.5Vまで繰り返し充放電したときのセル電圧とセル温度の変化を拡大して示したもので、可逆的に充電時に発熱、放電時に吸熱していることが分かる。これは、充電時には活性炭の細孔にイオンが侵入して拘束されて物理吸着し、放電時には活性炭の細孔からイオンが放出されて自由度を回復することによるエントロピー変化に伴う現象と推定される。結果として、モータ回生時には、大電流による発熱と、活性炭の細孔にイオンが侵入することに伴う発熱が加わる。したがって、超瞬発力が求められるとともに、冷却の容易なセル構造が求められる。

冷却の容易なセル構造として、扉ページの右下の写真に示す4端子の独自の扁平巻回形キャパシタセルを開発した。熱は集電箔を介して4端子から取り出されるとともに、扁平形状の表裏からも取り出されるので、冷却が容易である。瞬発力型キャパシタでは、セル及びセルを積層したモジュールでの冷却構造がセルの寿命を確保する上で重要になる。

5. むすび

電気二重層キャパシタは、基本的には活性炭とアルミニ

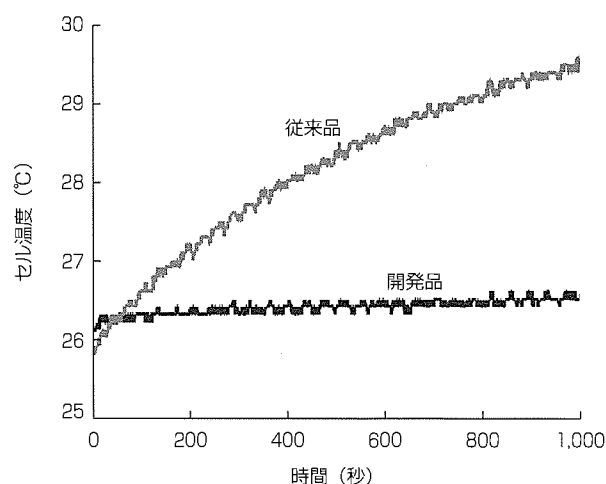


図7. 充放電を継続したときの温度変化

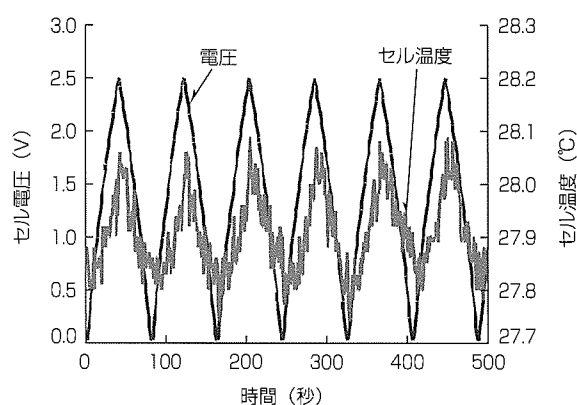


図8. 短時間での温度変化と電圧変化

ウム箔で構成されており、将来利用が進んで量産化されれば、飛躍的な普及が望める電力貯蔵デバイスである。今回、高電圧化するとともに、塗布型電極の特長を生かして、モータ回生に使用可能な瞬発型キャパシタセルを開発した。今後開発した要素技術を更に充実化させ、当社製品群に適用し省エネルギー推進に役立てたい。

参考文献

- (1) 岡村迪夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム第二版，日刊工業新聞社（2001）
- (2) 三菱電機ニュースリリース（2008.2.7）
- (3) 松井啓真：“FARADCAP”による電気二重層キャパシタの市場展開，OHM，86（2006-8）

“JIT”を旗印に環境改善活動

Environmental Improvement Activity with the Slogan of “JIT”

Hideshige Tsumori, Akira Hattori, Yasushi Takeda

要 旨

三菱電機(株)冷熱システム製作所(以下“冷電”という。)が取り組んできた“JIT(Just In Time)生産革新活動”の手法を環境保全部門でも“全所をあげてのJIT活動”の一環として取り入れ、JITの精神である“必要なものを、必要な時に、必要な量だけ”の考え方で取り組んできた活動が“環境JIT”である。

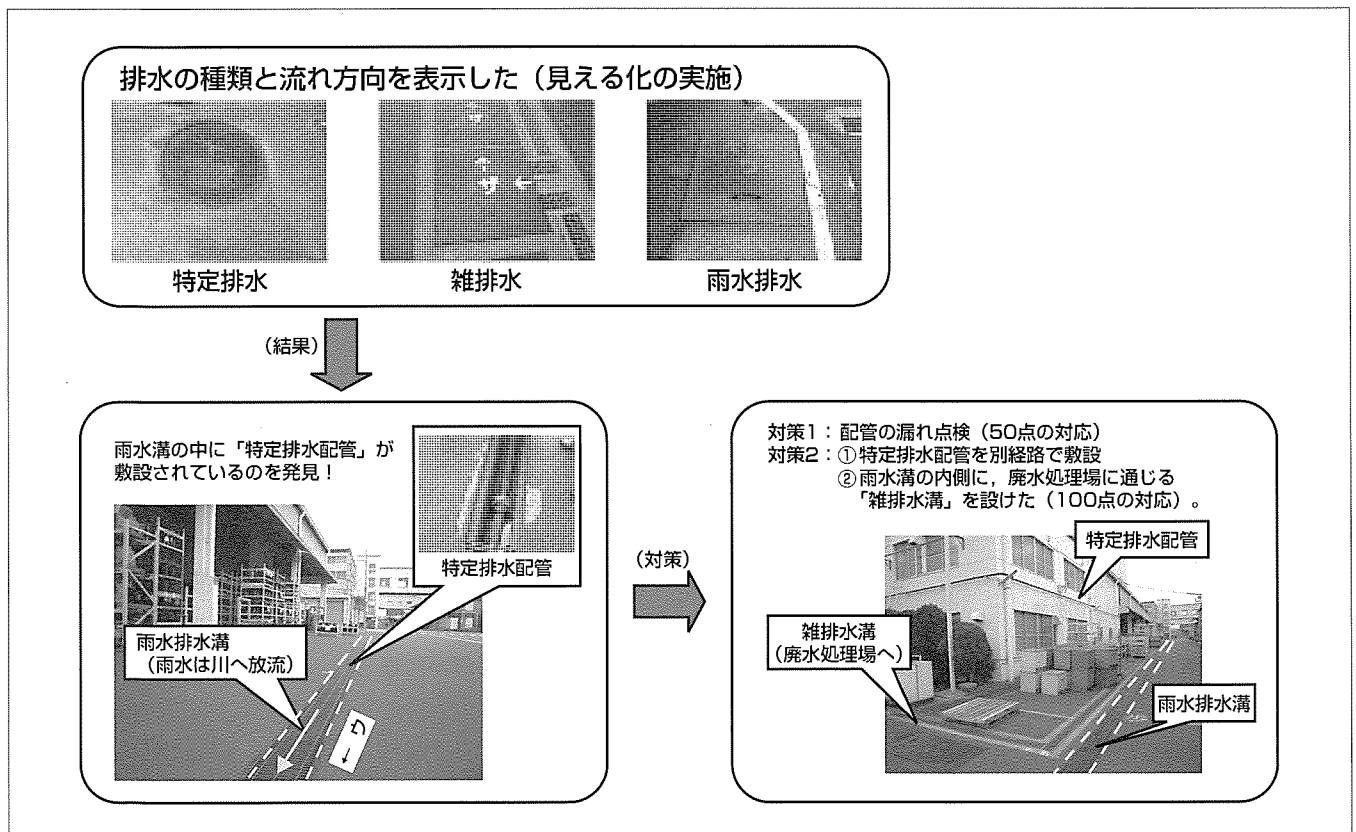
2003年10月にキックオフした“冷電JIT生産革新活動”に遅れること1年、2004年10月から“排水経路の見える化、不適箇所即改善”を“環境JIT”の最初のテーマとして活動を開始した。“環境JIT”は、排水改善、廃棄物削減、省エネルギー推進を“環境保全の3つの柱”に位置付け、活動している。

“排水経路の見える化、不適箇所即改善”では工場内に

ある排水溝、マンホール、会所に“どんな水がどの方向に流れているか”を調査して路面に書いたところ、雨水溝の中に“特定排水配管”があったり、油倉庫のすぐ横に雨水ピットがあったりと、“現状が見えると問題点がわかる”ことを体験した。

省エネルギー活動では、JITの基本概念である“必要なところで、必要な時に、必要な量だけを使う”という発想のもとに、“6つの視点”という省エネルギーツールを使って、エネルギー使用状況を検証、具体的改善活動への展開に成功した。

ここでは、行動指針にある“最初から100点をねらうのではなく、50点でも良いからすぐにやる。”という精神で活動してきた内容について事例を交えながら述べる。



排水経路の見える化、不適箇所の即改善

工場内の排水溝、マンホール、会所に“流れる水の種類”“流れる方向”を路面に書いた結果、雨水溝の中に“特定排水配管”が設置されているのを発見した。この“特定排水配管”が地震などで破損すると、雨水溝に“特定排水”が漏洩（ろうえい）、雨水溝を経由して河川へ流れ出てしまうおそれがあるため、“特定排水配管”を別経路で敷設するとともに雨水溝の内側に“雑排水溝”を設置した事例である。

1. ま え が き

当社冷熱システム製作所は、冷熱主幹工場として、ビル用マルチエアコン、設備用パッケージエアコンなどの空調機器や産業用途の低温機器、それらの制御機器システムなどの開発・設計・製造を行っている。コストダウン・短納期生産の要求が一層強まる中、2003年10月に“JIT生産改革活動”をキックオフし、すべての工程で“ムリ・ムラ・ムダ”を省き、生産性向上・リードタイム短縮を図るための製造体質強化に従業員全員で取り組んできた。

この“全所をあげてのJIT活動”の一環として、環境管理部門である環境保全課でも、JITの精神である“必要なものを、必要な時に、必要な量だけ”の思想を取り入れ、活動を始めたのが“環境JIT”である。

2. “環境JIT”に取り組み始めた契機・経緯

2003年10月に当製作所の“JIT革新活動”がスタートした。当初は“工作部門”を主体として、“現状の見える化・わかる化”活動が進められた。その1年後の2004年10月から環境保全課でも、“排水経路の見える化”“不適箇所の即改善”をテーマに“環境JIT”を開始した。

またそれと並行して、JIT活動板設置や所内JIT報告会への参加、社内報への寄稿などを通じて、改善効果のPRを行うとともに、廃棄物分別破棄の徹底や省エネルギー推進などを所内従業員に訴えた。

3. “環境JIT”の基本理念

図1に環境JITの基本理念を示す。

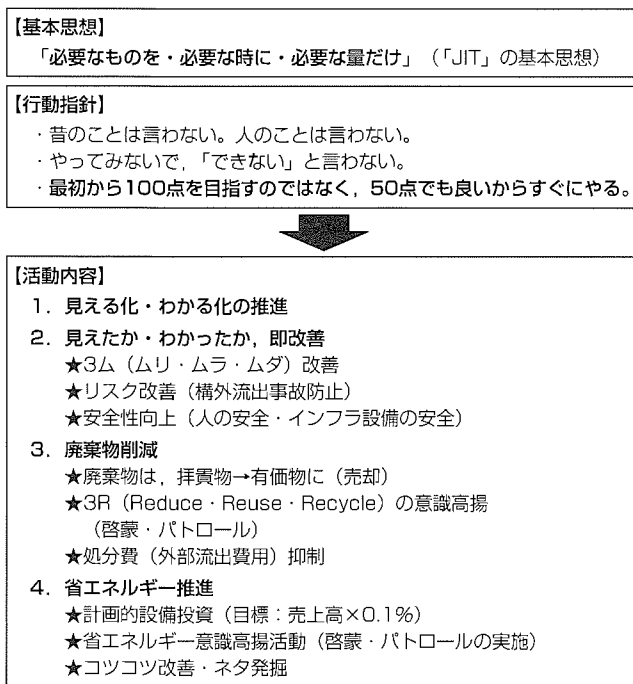


図1. “環境JIT”の基本理念

4. 取 組 事 例

4.1 環境汚染排水の構外流出ゼロ化

4.1.1 排水経路の見える化

まず構内排水溝、マンホール、会所に“どんな水が、どの方向に流れているか？”を調査し、排水の種類、流れる方向を路面に書き、わかるようにした。その結果、雨水溝の中に生産系廃水(特定排水)管が設置されていたり、油倉庫のすぐ横に雨水ピットがあったりした。万一配管が破損したり、ドラム缶が転倒したりすると雨水溝に環境汚染物が流れ込み、環境汚染事故を起こしかねない状況が発見された。これによって、“現状を見えるようにすると問題点がわかる。”ということを実体験し、“改善は最初から100点を目指すのではなく、50点でも良いからすぐやろう。”という行動指針に則って活動した。今日の“環境JIT”には、この精神が定着している。

4.1.2 BOD常時計測と遮断機能追加

当製作所では、ボイラドレンなど“生産系廃水”を廃水処理場で処理した水とトイレや手洗い場から排出される“生活系廃水”を合流させ、和歌山市公共下水道へ放流している。放流する排水は、下水道法によって排水基準が厳密に定められているため、下水道局による立入採水の際、同時採水を行い、外部業者を使っていち早く分析結果が分かるような体制をとっている。

通常BOD(生物化学的酸素要求量)分析は採水後、微生物の培養にある一定期間が必要なため、結果が判明するまで最低1週間程度を要し、自主基準値を超過したことが分かって、1週間前の超過原因を特定することが困難であった。そこで、処理場で処理した水で金魚を飼育し、金魚の健康状態を観察することで水質の見える化を図った。

次に、構内排水ピットにUV(Ultra Violet)計を設置し、BODを常時監視できる仕組みを作り、自主基準値を超過した場合は、最終放流口手前に設置した遮断装置によって、放流を自動的に遮断する機能を追加した。

4.1.3 生活系廃水におけるBOD値上昇の要因分析

生産系廃水は、廃水処理場によって適正水質に処理されて公共下水道へ放流しているが、生活系廃水は、生産系処理水での希釈のみで公共下水道へ放流しているため、生活系廃水の水質管理が課題となってくる。

そこで、食堂の厨房からの廃水や各事務所の流し台・手洗い場から排出される生活系廃水のうち、BOD数値を高くさせるものを予測して、BOD値を測定した生活系排出物の主なBOD値を表1に示す。

測定結果から“カップラーメンのスープを流し台に流すな。”“ペンキが付着したものを手洗い場で洗うな。刷毛(はけ)を洗った水は、環境保全課まで持ってくるように。”などと所内従業員、外部業者などに周知徹底させた。また

表1. 代表的なBOD値

| 品目 | 状態 | BOD |
|-------------|-------|--------|
| カレー | 10倍希釈 | 8,300 |
| チキンラーメンスープ | 原液 | 8,000 |
| しょうゆラーメンスープ | 原液 | 12,000 |
| 水溶性ペンキ | 10倍希釈 | 11,000 |
| コンクリートの上澄み水 | 10倍希釈 | 5.5 |
| 自主管理基準 | | 150 |

食堂では、“カレーが残った場合は洗い流さず、残飯として処理する”ように申し入れた。資格別研修会や社内報など機会があるごとに、“身近なところから環境保全を推進する。”ことを訴え、定着させた。

4.2 廃棄物削減

4.2.1 部品納入時の梱包材削減(“身のみ供給”の展開)

工作部門のJIT活動と連携して、“資材物流JIT”が始まり、部品の納入荷姿改善が進められた。従来段ボール箱・包装紙・木製パレット・フェルト・PPバンドなど多くの梱包(こんぼう)材が部品とともに納入され、部品使用後は“廃棄物”として排出されてきた。そこで、“身のみ供給”を合言葉に、“通い容器(台車)”化を進め、“梱包材レス”にすることで、廃棄物削減につながった。

4.2.2 “廃棄物”から“有価物へ”

従来“廃棄物”として“費用を払って処理”していたものを“有価物”として“売却する”ことを検討した。まず手始めに構内食堂から発生する“使用済み食用油”を、従来は“銭湯のボイラ用燃料”として処理費30円/Lを支払って処理していたものを、地元業者所有のコジェネレーション用バイオマス燃料として5円/Lで売却することから始めた。

これをきっかけに、今では電子部品のリード屑(くず)やろう付けの酸化スケールなど、多岐にわたっている。また従来、廃棄物は環境保全課が担当、有価物は資材部担当と各々担当分けしていたが、すべてを環境保全課で管理することで、一元化を図った。これに合わせて有価物の入札業者の追加、落札価格公表など入札ルールの見直しも行った。

4.3 省エネルギー推進

4.3.1 省エネルギー活動の考え方

“環境JIT”の3つ目の柱である“省エネルギーの推進”も、まさにJIT活動の精神でもある“必要なものを、必要な時に、必要な量だけ”がぴったり当てはまる活動である。工場として当然であるが、加工工程(ものづくり)の効率化が省エネルギー推進には欠かせない項目である。すなわち“生産ラインでのムリ・ムラ・ムダを徹底排除して、省エネルギーにつなげる。省エネルギーとは、エネルギーを使わないことではなく、必要なところで、必要な時に、必要な量だけを使うこと”と定義し、JIT活動を省エネルギーのシンボルとして採用して取り組んできた。

省エネルギー改善目標は、三菱電機の自主行動計画でもある“2010年度までに、エネルギー使用量を生産高原単位で1990年度比25%削減”をそのまま製作所目標と掲げるとともに、昨今注目されている二酸化炭素排出量についても毎年2%削減することを併せて、省エネルギー目標としている。

当製作所の省エネルギーに対する取り組み方として、“高効率機器による省エネルギー”“JIT活動を省エネルギー活動へ拡大展開する”“省エネルギー支援機器を積極的に導入する”を3つの柱として、取り組んでいる。この省エネルギー3つの柱の中で、特に生産に携わる従業員一人一人が推進役となる“JIT活動を省エネルギー活動への拡大展開する”を重視しており、毎月開催しているJIT活動状況報告会では、各職場の改善状況が報告されている。具体例を挙げると、

- (1) 自動加工ラインの設備状態を示す4色の表示灯(シグナルタワー)ランプをLED(Light Emitting Diode)に変更
- (2) 部品倉庫内の整理整頓を徹底し、保管部品数を大幅削減したことによって、自動ラック廃止、保管場所の集約縮小化→自動ラック動力・照明削減に寄与
- (3) 電気炉による真鍮(しんちゅう)部品のろう付け工程で、治具を小型軽量化し、熱伝導性を高めたことで、電気ヒーターの通電時間を短縮

などを実施した。これらはいずれもJITの精神である“必要などころで、必要な時に、必要な量だけのエネルギーを使う”という発想を追求した結果の改善である。

このような考えを基本として、“6つの視点”を省エネルギーツールとして、エネルギー使用状況を検証し、具体的改善活動を進めている(図2)。

4.3.2 省エネルギー事例

前項に掲げた“6つの視点”に則って実施した省エネルギー事例を挙げる。

(1) カエル：高効率照明への更新

当製作所では、いち早く従来の“ラビット式蛍光灯”(40W)から高効率な“Hf(High frequency)蛍光灯”(32W)に取り替えた。これによって総合事務所では、照明器具台数を従来比32%削減、これによる省エネルギー効果は、1か月で6,800kWhにのぼる。

また器具選定時に“プルスイッチ式”を選定することで、従業員に“こまめな消灯”を意識付けることにも成功した。

(2) ヤメル：空調機運転のデマンド制御

夏場の電力負荷の大半を占める空調負荷を空調集中コントローラ“G-50”と電力デマンドコントローラ“E-Energy”との組み合わせによって、契約電力に対して複数段の制御レベルを設定し、電力デマンド管理を行った。これによって契約電力を最大限利用できるようになったとともに、契

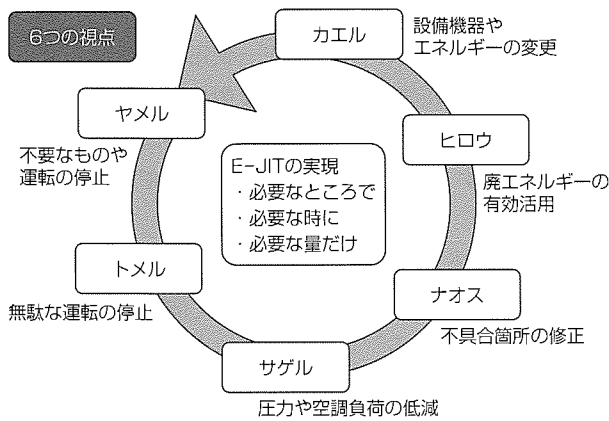


図2. 6つの視点で実践する省エネルギー活動

約デマンド低下による基本料金削減にも大きく寄与した。

(3) トメル：低圧エアコンプレッサの運転台数制御

生産現場へエア供給するエアコンプレッサを台数制御盤を介して、“圧力基準”でコンプレッサ“ON/OFF”自動制御を実施することで、省エネルギーを図った(図3)。

当製作所設置のコンプレッサのほとんどは、最新の“インバータ制御方式”ではなく、一世代前の“一定速”で稼働するものであり、この台数制御盤の採用によって、年間電力量を452,745kWh削減することができた。その経済効果は、697万円にものぼる。

(4) サゲル：射出成形機の設備作動油の変更

室外機のファンガードなど樹脂部品の成形加工時の消費電力を削減するために、潤滑油メーカーとの共同検討で、設備作動油を“低粘度・低比重油”に変更した。作動油の変更は、設備配管内の圧力損失低減に加え、始動時の消費電力を削減でき、単位時間あたりの電気消費量を13%削減した。また従来の油種は、“危険物油”に分類されていたが、新しい油種は“非危険物油”であるため、取り扱いやすくなるという効果も得られた。

(5) ナオス：老朽蒸気配管更新

あと回しになっていた蒸気配管の老朽化対策であったが、配管・ヘッダの更新・再敷設を行い、ボイラの都市ガス使用量を2%削減することができた。また今後の計画として、蒸気配管経路を極力直線化することによって、ボイラ運転の更なる最適化を実現したいと思っている。

(6) ヒロウ：蒸気ドレン熱回収

生産工程で仕事を済ませた飽和蒸気の凝縮水(ドレン)が持っている熱を回収し、都市ガス貫流ボイラで使用する軟水の加温に再利用している。これによって蒸気ボイラによる都市ガス使用量を3%削減することができた。

5. その他の活動事例

製品で使用する塗料で、トルエン・キシレンやエチルベンゼンの含有量を半減させた塗料溶剤を使用することで、“塗料の低溶剤化”を図った。環境では、有害物質を“ゼロ”

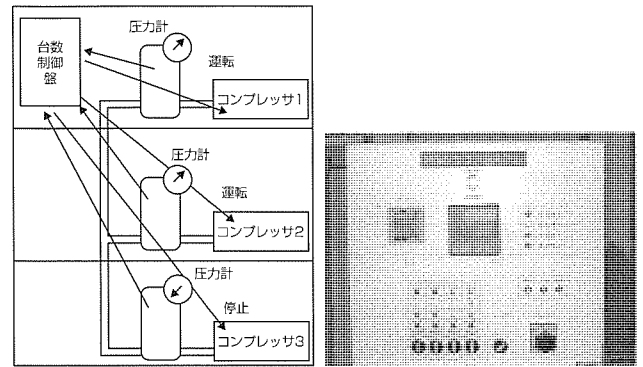


図3. 低圧エアコンプレッサの運転台数制御

にすることがベストであるが、塗膜性能(さびない性能)確保を第一目的として、一気に有害物質を全廃するのではなく、“まずは半減”を目標に低溶剤化した。これによって年間1.3tものトルエン・キシレンやエチルベンゼンを削減した。また廃棄物削減では、従業員の分別廃棄意識を高めるために、中身がわかる“半透明のゴミ箱”を採用した。今後もJIT活動を合言葉に、すべての工程でリードタイムを短縮するための“ムダ取り”を徹底的に行っていく。それには5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))の徹底と現状の見える化を図り、情報を共有する。“時間がかかる100点満点より、50点でも良いからすぐにできることからやる”これを繰り返すことによって、環境保全を推進する高い環境マインドが醸成されると信じている。

6. む す び

価格・機能・納期・機種バリエーションなど従来製作所に求められていたものに加え、“環境”が企業ブランドとして注目されている。いかに企業が“環境”に対してやさしい製品を製造・販売しているかが、消費者の購買選択の一つとなっているといっても良い時代になっている。

当製作所では、JIT生産革新活動を通じて、ものづくり力強化とともに、ますます多様化・高度化する社会的要請への対応と生産効率追求を両立させるための努力を継続する必要がある。

すなわち“営業”“設計”“製造”“管理部門”が一体となり、これに対応するための製品開発・生産ラインのあり方を今後も見直していかなければならない。また今後もJITの基本精神である“必要なものを、必要な時に、必要な量だけ”の考え方を機軸に、“良いものを、早く、安く作る”を追求し、ものづくり改革を通じて、省資源・廃棄物削減・省エネルギーなど環境への取り組みを“環境JIT”という手法で強化していく所存である。

参考文献

- (1) 平野裕之：目で見てわかるジャストインタイム生産方式，日刊工業新聞社（1987）

工場省エネルギー活動の現状と今後

柴田輝幸*
津田高弘*
神生清一*

Current and Future Activities for Factory Energy Saving

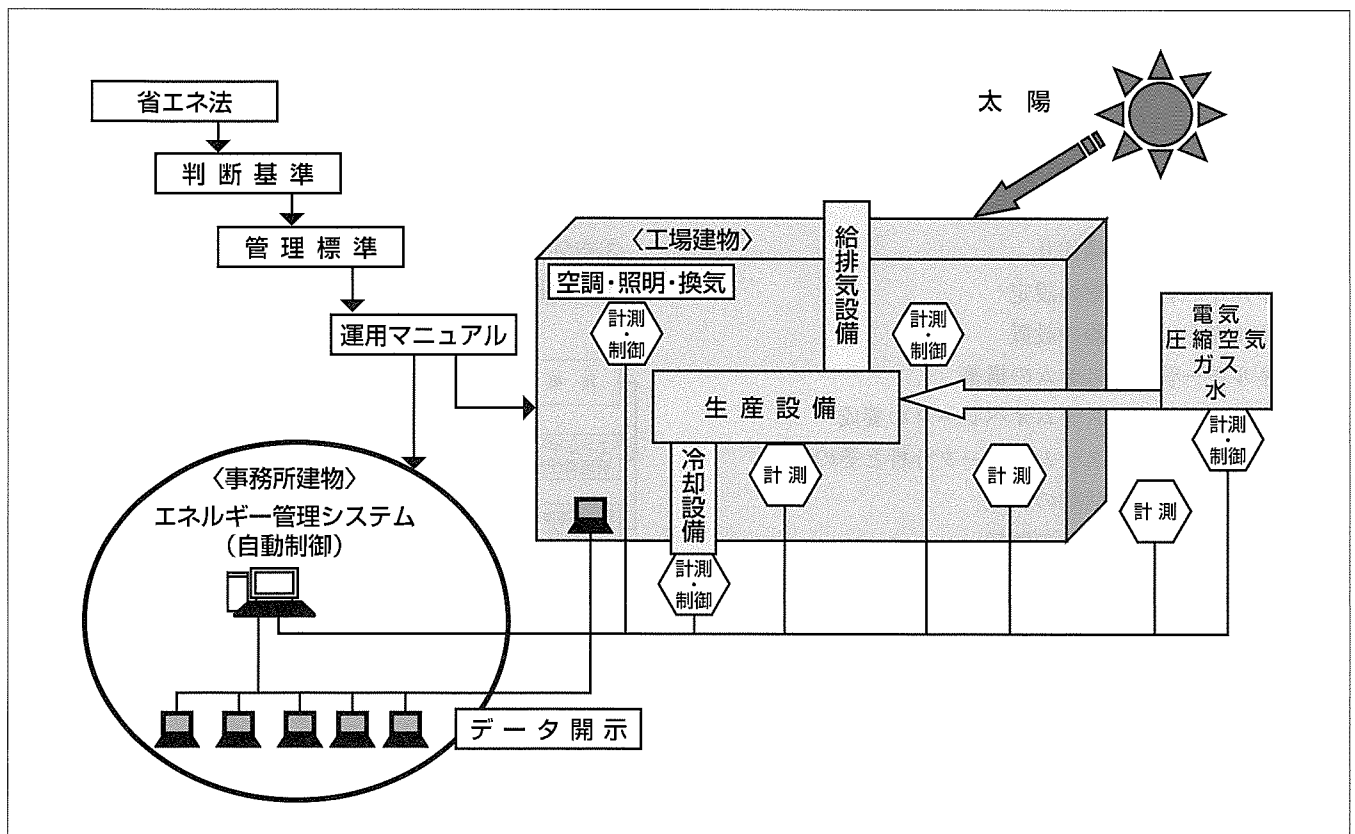
Teruyuki Shibata, Takahiro Tsuda, Kiyochi Shinsei

要旨

2008年7月の北海道洞爺湖サミット開催もあり、地球温暖化問題がクローズアップされている。日本は2008年度からの5か年平均で、温室効果ガス排出量を京都議定書基準年比で6%減らすことが求められているが、CO₂排出量は2006年度に逆に6.4%増加した状況にある。産業部門では従来省エネルギーの取り組みを行っては来たが、更に自主行動計画による削減が求められている。

本稿では、エネルギー管理について触れ、省エネ法の判断基準に従った管理標準を設定して定期的な計測と記録を行い、その結果についてまず応急改善アクションをとり、その後工場に適したエネルギー管理システムを構築して、効率的な運用を自動で行うことを恒久的アクションとする。またこの実現には工場の管理部門の強化が必要となる。工

場省エネルギーの現状では、活動しやすい組織を作り、動力管理部門の技術援助、管理者によるフォロー体制の維持によって、省エネルギー活動を続け毎年成果を出している三菱電機(株)三田製作所の工場省エネルギーについて述べる。工場省エネルギーの今後では、既設の建物や既設設備、新規の建物や新規設備への省エネルギー施策について述べ、その中で直接生産に寄与する直接エネルギーと作業場の環境維持に使われる間接エネルギーに言及して、エネルギーロスのミニマム化、エネルギー供給のジャストインタイム化によって過剰エネルギーの削減を行うことを述べる。さらに建物構造に触れ建物外からの熱影響の低減方法についても述べる。



工場省エネルギーの今後

建物は、太陽光などの熱負荷を低減する目的で断熱構造とする。工場のエネルギー管理は、省エネ法の判断基準に従い、管理標準を設定し既存の設備運用マニュアルを読み込み、計測、記録と運転制御を行う。エネルギー管理システムを構築して、建物内外の温度、湿度などをリアルタイムに計測して、建物内の作業環境のコントロールを行う。また各設備からの計測データを分析して各設備へのエネルギー供給量を適正にする。

1. ま え が き

当社三田製作所は、1986年10月に自動車機器の専門工場として設立された比較的新しい工場である。三田製作所の製品は、カーインフォテイメント、カーオーディオ、カーエレクトロニクス、カーメカトロニクスである。工場省エネルギーは、1998年のISO14001取得に向けた省エネルギー活動に端を発しており、“省エネルギーはまず計測から”との考えで電力計測器を50台、棒温度計を50本購入し、これらを工場内の要所に設置し計測担当部門を決めて計測を行ったのが始まりである。途中マンネリ化したものの省エネルギー推進組織を見直し、グループ編成を小人数にして動きやすくし、こつこつ地道に省エネルギー活動を続けたことの成果として2006年に“資源エネルギー長官賞”を受賞した。本稿では、三田製作所の工場省エネルギー活動の実践とその成果について述べ、さらに今後の工場省エネルギーのあり方について述べる。

2. 工場のエネルギー管理と省エネルギー活動

工場省エネルギーに入る前に、まず工場のエネルギー管理と省エネルギー活動の関係を明確にしておく必要がある。工場のエネルギー管理とは、省エネ法の判断基準に基づき、エネルギー管理標準を定めて、計測・記録、保守・点検して、設備稼働効率の高い状態に維持することである。省エネルギー活動は、設備稼働効率の高い状態の中で、更に必要最小限のエネルギー消費になるように設備改善や運用改善をする活動であり、今後の省エネルギー活動は次のようになると思われる。

- ①エネルギー管理組織作り
- ②エネルギー管理標準の設定
- ③エネルギー計測機器の設置
- ④エネルギー管理システムの構築
- ⑤エネルギー管理システムオペレータの養成
- ⑥エネルギー管理システムのデータ分析とその活用
- ⑦省エネルギー改善活動の実践
- ⑧省エネルギー改善活動の継続

3. 工場省エネルギーの展開(実践と効果)

3.1 工場省エネルギー活動の立ち上げ

三田製作所は、従来空気圧縮機や受変電設備等の動力設備の省エネルギー活動や組織的な活動を展開していたがISO14001^(注1)を取得することになったことに伴って、エネルギー管理体制を整備して組織的な省エネルギー活動を展開した。活動の展開は動力設備にとどまらず空気調和設備、照明設備及び生産設備へと拡大していった。

(注1) 1998年3月に認証取得した。

3.2 こつこつ省エネ分科会活動

しかし、2002年度には省エネルギー活動が停滞し、省エネルギーのアイデアが出なくなり、省エネルギーフォロー会議を開いても積極的な意見が出なくなった。

この状態を打破するために省エネルギー委員の思いを出し合い“同じ設備を使う部門で横断的な小グループを作ったら、省エネルギーのアイデアが出やすくなるのではないか”との結論に達し、省エネルギー対象分野を8つに分けた。

- ①電力系統、②照明設備、③空気調和設備、④自動機、⑤空気圧縮機、⑥真空ポンプ、⑦クーリングタワー、⑧生産ライン

次に管理体制を見直して、現組織の下に8つの分科会を発足させ、この分科会のグループごとに身近な活動アイテムを掘り起こし、こつこつと地道に省エネルギー改善を継続した。

図1にエネルギー管理体制を示す。製造管理部長が省エネルギーの管理責任者となり、“工場省エネルギー部会”と“省エネルギーフォロー会議”から構成している。“工場省エネルギー部会”は、省エネルギーに関する工場全体の方針展開と意思伝達を行う。“省エネルギーフォロー会議”は、工作などエネルギー多消費職場を対象とした省エネルギー活動の情報交換とフォローを行うものである。

そしてさらに次のような“こつこつ省エネ分科会”を新設した(図2)。

(1) 共通の設備を持った職場をグループの単位とする。

- ①電力系統：受電設備、配電設備
- ②照明設備：全体照明、局部照明、常夜灯、外灯
- ③空気調和設備：ヒートポンプチャラー、エアコン
- ④自動機：工作機械、成形機、自動組立て機

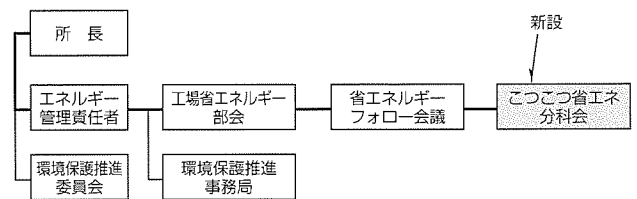


図1. エネルギー管理体制

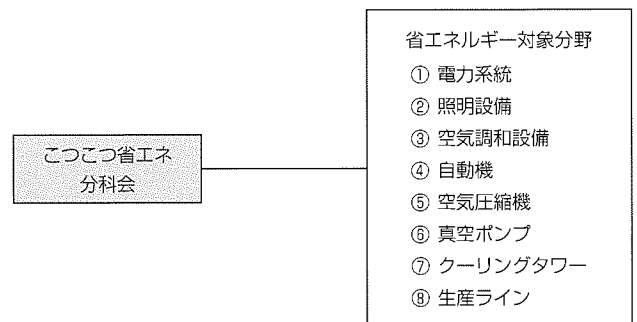


図2. こつこつ省エネ分科会

- ⑤空気圧縮機：エアコンプレッサ
- ⑥真空ポンプ：生産用，実験設備用
- ⑦クーリングタワー：生産用，実験用
- ⑧生産ライン：カーナビゲーション，カーオーディオ，カーエレクトロニクス，カーメカトロニクス

- (2) 各分科会の省エネルギー会議は開催頻度を上げる。
- (3) 工作部門などの現場を施設管理部門と生産技術部門が技術サポートする。

3.3 エネルギー管理システムの導入

こつこつ省エネ分科会組織による地道な省エネルギー活動と同時に、エネルギー管理システムをメーカーと共同開発して導入した。このエネルギー管理システムのリアルタイムモニタによるエネルギーの“見える化”によって明らかになった無駄エネルギーの排除、さらにエネルギー管理システムによる動力設備、空気調和設備、照明設備等の自動運転制御によって、省エネルギー活動の成果を継続することができた。

3.4 活動の成果

図3は工場省エネルギー活動の成果を実質生産高原単位（エネルギー/生産高）推移で表しているが、2002年度を100とした場合2006年度は72.7%と毎年7%以上の改善がされていることを示す。最近5年間のCO₂排出抑制量は2,595トンであった。

4. 工場省エネルギー活動の現状

工場のエネルギーには、生産に直接寄与する直接エネルギーと直接は寄与しないが必要である間接エネルギーがある。直接エネルギーとは、生産設備の電力、蒸気、圧縮エアなどである。間接エネルギーとは、空気調和設備、照明設備、換気設備、昇降設備などのように人の介在によって発生するエネルギーである。工場省エネルギーは、直接エネルギーの利用効率をいかに上げるか、間接エネルギーをいかに下げるかがポイントとなる。

4.1 現状把握

工場省エネルギーを進めるには、まず工場ですぐ電気、燃料用ガス、燃料用油などのエネルギーの種類と年間の使用量を調べ、可能な限り省エネルギー対象分野別に分類して、省エネルギー改善効果を把握する。

図4は三田製作所のエネルギー用途別比率である。

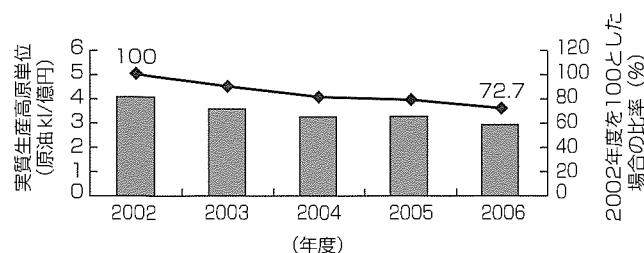


図3. 実質生産高原単位推移

4.2 既設工場の省エネルギー

一般に既設工場の建物は、外の温度・湿度などの影響を受けやすい構造が多い。このため作業場の温度、湿度などの作業環境維持に必要なエネルギーの消費が大きくなっている。また既設設備は、エネルギー利用効率について考慮されているものが少ない。

4.2.1 既設建物への対応

建物は屋根、壁、床、窓、出入口などの開口部からなる大きな容器である。建物はエネルギーの発生もなければ消費もないが、建物内の温度、湿度、照度などの作業環境は、建物外からの熱や光の影響によって大きく変化する。既設建物の省エネルギーは、外からの熱や光の影響を少なくすることであり、具体的には、次のような省エネルギー施策を実施した。

- ①屋根：屋根に断熱塗装，断熱材充填（じゅうてん）の二重屋根構造，天井断熱，屋上緑化，太陽光パネル
- ②壁：外断熱壁，断熱塗装，断熱材による二重壁
- ③窓：窓開口部の縮小，断熱フィルム貼り付け，シーサルーの断熱塗装，熱線反射ペアガラス，採光用天窗は断熱仕様
- ④開口部：出入口に前室を設置，高速シャッターエアカーテンの併用
- ⑤1階の床：Pタイル，カーペット，OAフロア

作業場の省エネルギーは、作業場の温度、湿度、照度の基準を決める（温度：夏28℃ 冬18℃，湿度：70～40%，照度：床75cm 500～700ルクス，CO₂濃度：1,000ppm以下等）。次に対象場所を測定して基準と比べることによって基準に対する現状の過不足が明らかになり、このデータを基に空気調和設備の温度設定の変更、照明の間引きなどを行う。

4.2.2 既設設備への対応

既設設備の省エネルギーは、エネルギー使用状況を知ることから始める。このためにはエネルギー計測装置が必要となるが、各種市販されているので対象設備に見合ったものを購入し、エネルギー計測装置のデータを時間単位、分単位で細かくモニタしてそれを分析する。こうすることによって生産に必要なエネルギーが見えてくる。このことか

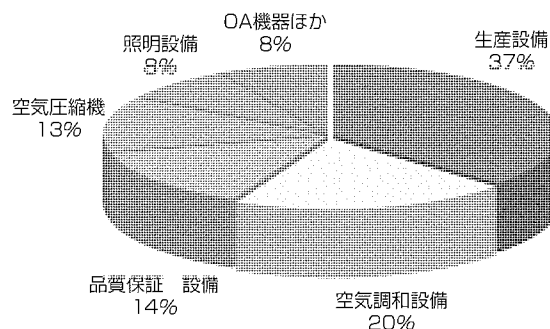


図4. エネルギー用途別比率(2005年度)

ら省エネルギー改善のポイントが明らかになり、設備の空運転の削減や、暖気運転時間の短縮等の改善につながる。また照明等の生産設備以外の設備や空気圧縮機等の動力設備は、生産設備に連動し、かつ必要最小限のエネルギーで運用できるように改善する。設備の運用はまず手動で行い、次のステップでエネルギー管理システムを構築して、動力設備、空気調和設備、照明設備等を自動制御できるようにシステムアップしていくことである。

4.3 新規工場の省エネルギー

新規建物、新規設備については、先に述べた工場省エネルギーの課題が明らかになっているので、従来設備の省エネルギー改善を水平展開することによって実施できる。

4.3.1 新規建物への対応

新規建物は省エネルギー性を重要視して温度、湿度、光などの外部影響を受けにくい構造を検討する。

考慮すべき事項は次のとおりである。

- ①配置：西側に階段、通路、機械室、パイプシャフトなどユーティリティを配置し西日の影響を減らす。
- ②容積：可能な限り小さくし、天井は低くする。
- ③外気活用：外気を室内に取り込み自然冷房する（春季、秋季、夜間）。

4.3.2 新規設備への対応

新規設備計画は、エネルギー管理システムの導入とその活用を前提にすべきである。

生産設備は、生産ライン単位又は設備単位でエネルギー計測ができるようあらかじめ計測器を組み込んだ構成とする。計測項目は、電圧、電流、電力、流量、生産数、温度、湿度などである。計測はリアルタイムとし、伝送機能を持ったシステムであることが望ましい。

生産設備以外の設備（照明設備、給排気設備等）と動力設備（電気、ガス、空気圧縮機）等についても生産設備と同様にエネルギー計測ができるように計測器を組み込んでおく。

また、次のことも考慮しておく必要がある。

- ①負荷変動の大きい設備に使用される電動機は負荷変動を調整しやすいインバータ式
- ②照明設備はインバータ式Hf(High frequency)蛍光灯等の省エネルギー形設備
- ③給排気設備、給排水設備などは、負荷に応じた流量変更の可能なインバータ式
- ④冷却設備（クーリングタワー）等も同様にインバータ式
- ⑤炉等熱発生設備の廃熱は、生産設備と連動させて屋外に排出して、室内熱負荷の増加を低減する。

また、廃熱をダクトで別室に引き込み暖房用に利用するなど廃熱の利用を検討する。

4.4 今後の課題

今後の工場省エネルギーは、エネルギー管理システムの構築と、その運用によるエネルギーロスミニマムの追求である。そのためにはエネルギー管理システムの構築と運用のできる人材が必要となる。

運用面では、エネルギー管理体制の整備を行い、自主性のある小回りの利くグループを作り、継続的にフォローを行う体制の維持が必要となる。

5. む す び

環境問題への最重点課題である地球温暖化防止の取り組みの中で、CO₂排出抑制に更に拍車がかかると考えられる。本稿では工場省エネルギーについて、自主性を重んじた組織作り、省エネルギー活動組織への技術援助、継続的なフォロー体制の重要性について述べた。

今後の工場省エネルギーは、生産高原単位改善から更に厳しいCO₂排出絶対量規制への対応へと大きく舵（かじ）を取らざるを得なくなる。本稿がこの舵取りの一助となれば幸いである。

IT技術を適用した省エネルギー支援システムの構築

石井俊直* 佐々木和也**
石原 鑑*
柳原慎太郎*

Application of Information Technology to Integrated Visualization for Energy Conservation

Toshinao Ishii, Akira Ishihara, Shintaro Yanagihara, Kazuya Sasaki

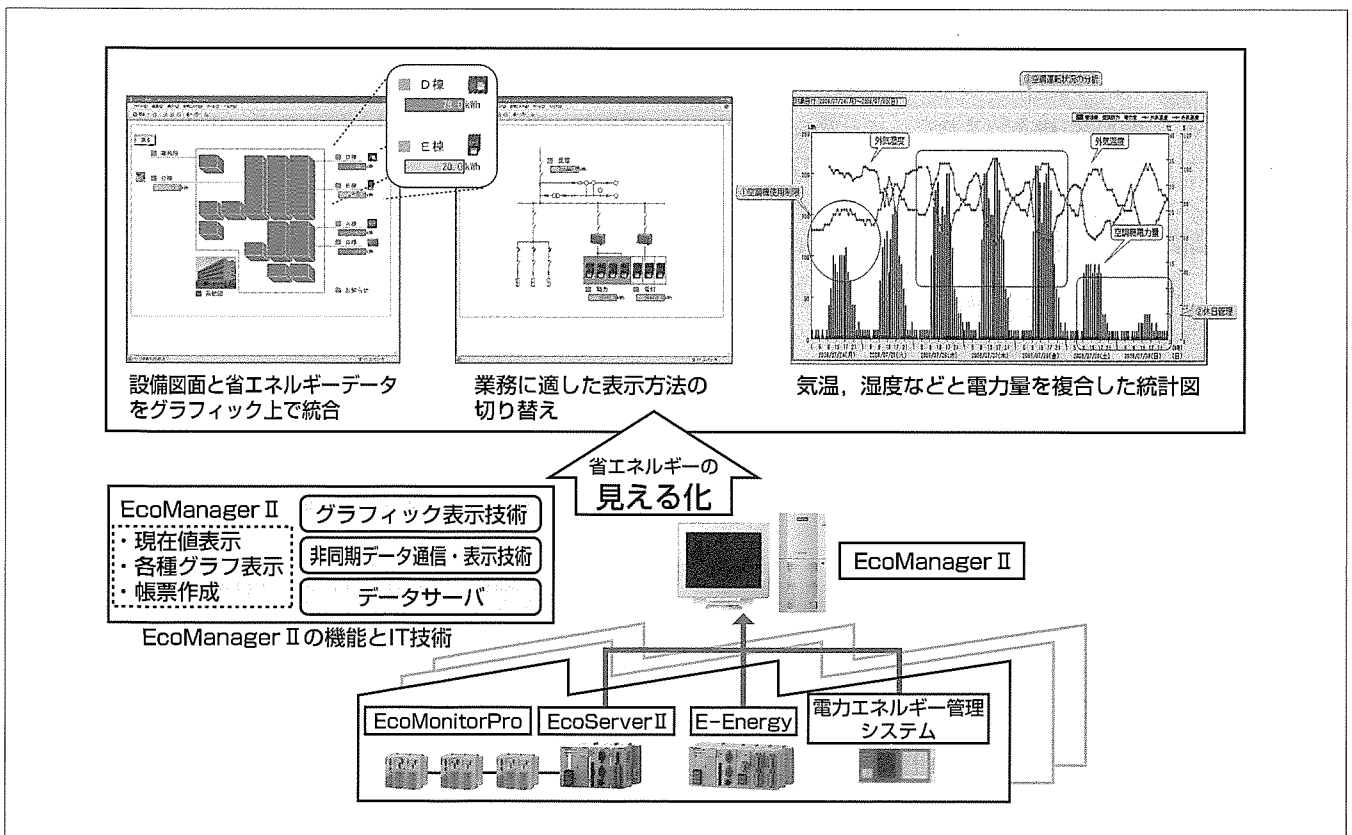
要 旨

IT技術と地球環境問題は、1990年代半ば、ほぼ同時期に私たちの目に現れた。一方のIT技術の発展と広がりによって私たちの日常生活は大きく変化した。ITとビジネスとの一体化は言うに及ばず、今や、小学生からお年寄りまで多くの人があたりまえのようにパソコンや携帯電話でネットを使うようになった。三菱電機オフィシャルウェブサイトの歴史が2000年頃に始まったことを考えると変化の速さに驚かされる。もう一方の地球環境問題は、1997年末に採択された京都議定書に2008年から2012年に達成すべき目標が示され、過去10年間、様々な取り組みが行われてきた。工場の配電分野で三菱電機は“EcoServer II”や“EcoMonitorPro”などの省エネルギー支援機器を展開している。

近年、IT技術と省エネルギーやエコファクトリーの取り組みが融合した事例が多く報告されている。これらの事

例を分類すると、その一つは、IT技術を支える計算機の低消費電力化やITによるペーパーレス化といった直接的な省エネルギー・省資源化であり、もう一つはITによる省エネルギー・省資源化状況の見える化である。

EcoServer IIは、高度な見える化機能を持つ製品で、建物全体にわたって計測機器のデータを収集し、定型的なデータ加工を行い、組み込みのWebサーバで結果を配信する機能がある。しかし、建物を超えた規模のデータ集計、多角的なデータ表示、効果的なデータ表示など、更に高度な省エネルギーデータ分析が求められることが少なくない。“EcoManager II”では、こうした要求を満たす機能がWeb, Ajax (Asynchronous javascript and XML)などのIT技術を使った基盤ソフトウェア“DiaSmash/Web”によって実現されている。



EcoMonitorPro, EcoServer II等を統合するEcoManager IIによる省エネルギーの見える化

EcoServer IIなど機器の省エネルギーデータを統合し、省エネルギーの目的に適した見える化をEcoManager IIが実現する。

1. ま え が き

省エネルギーに取り組むにあたり最も重要なプロセスは、現状を知りその分析に基づいた目標設定を行うことである⁽¹⁾。エネルギー消費の形が千差万別であることを考えると、中でも重要なのは計測データに基づいて現状を把握することである。当社の製品にはEcoMonitorProやMDU (Measuring Display Unit) プレーカなど、電流、電圧、電力、力率、電力量などの計測データを、装置や回路といった細かな単位で計測する機器がある。EcoMonitorProは、オプションユニットを加えることで省エネルギーデータの記録保存を行うことができる。EcoMonitorProは装置や回路が守備範囲であるが、より広い、工場や建屋といった範囲の省エネルギーデータ管理を行うのがEcoServer IIである。EcoServer IIは複数のEcoMonitorProから情報を収集、蓄積するとともに、データをグラフ化して組み込み、Webサーバによってデスクトップパソコンに情報を配信する機能を持っている。

EcoServer IIにWebサーバ機能が搭載されていないければ、専用の閲覧ソフトウェアが状況把握業務のツールとして必要であったであろう。Webによるデータ配信はすでにありきたりの技術であるが、今、改めて考えると、このIT技術によってEcoServer IIといういわば特殊な機器のデータを閲覧するという機能が格段に容易化され、だれもがどこからでも閲覧できるようになったことが重要な進歩であった。

本稿では、複数のEcoServer IIのデータを統合するソフトウェアEcoManager IIに組み込まれた、より進んだIT技術について述べる。EcoServer IIのレベルでは、配信されるのは、あらかじめ固定された様式の、いわば最大公約数的な視点で表現された情報である。これに対しEcoManager IIでは、設備図面上に計測データを表示する原単位など種類の異なるデータとともに計測データを表示するなどの多角的で効果的な見える化機能が、Ajax, DHTML (Dynamic Hyper Text Markup Language)などのIT技術によって実現可能⁽²⁾となっている。

2. EcoManager II が解決する課題

2.1 多角的な表現方法の選択

計測データに基づく現状把握とは、単に測定された数値が印刷されたり、ファイルサーバのどこかに置かれたりすることを意味するものではない。データを人が理解し活用できなくては把握とはいえない。したがって、データを読んでわかりやすい形で表現することや、活用する側にあわせて変換することが必要となる。わかりやすい表現を達成する一つの方法は、読む人が慣れた形で表現することだろう。例えば、工場の総務

部門の業務として現状を把握するならば、建物ごと、フロアごとなど視覚的な配置図面上で計測データを表すのが有効である。電力系統の設備管理部門の業務としての把握であれば、電力系統図面上でデータを表す方がより有効となる。このように、業務やユーザーごとで異なる現状把握に応じた柔軟な計測データ表現方法の選択がEcoManager IIの解決すべき第一の課題である。

2.2 効果的なデータ表現

現状把握には、一定期間収集されたデータをじっくり読んで行うようなタイプの把握のほかに、現在時刻の状況を知って迅速な対応を求められるようなタイプのものがある。例えば、電力消費が契約電力に近づきつつあるような状況では後者のタイプの現状把握が必要となる。このタイプの業務を支援するためには、重要なイベントを特に認知性の高い表現を用いて表示することが有効である。認知性を高めるには、ユーザーの特性や業務実施環境などを考慮する必要があり、機器組み込みの定型的な表現では対処が難しい。したがって、これも表現の柔軟性を担うEcoManager IIに課せられるもう一つの課題である(図1)。

3. EcoManager II の見える化機能を実現するIT技術

EcoManager IIが提供する省エネルギーデータ画面は、Web, Ajax, DHTMLなどのIT技術を応用して構築されている。ここでは、これらの技術について述べる。

3.1 Webブラウザと計測機器間のデータ通信

電力の消費状況を時々刻々表示する画面をWebブラウザウィンドウ内に実現するとき、ユーザーのアクションが不要で、画面全体の遷移が起こらず、変化するデータの表示部分のみが遷移することが必要である。なぜなら、これらの要求のどれ一つを欠いてもユーザビリティが格段に低下するからである。これらの実現は、Webブラウザを制御するために組み込まれているスクリプト言語JavaScript^(注1)のXMLHttpRequestを利用することが標準的処方箋(しよほうせん)で、EcoManager IIでもこの方式が採用されている。この、Ajaxと呼ばれる方式は、従来のJava^(注1) Applet方式と比べ、同様にリッチな画面を小さなプログラムで実現することができ、起動時間が短縮されるなどの点で優れている。

(注1) Javascript, Javaは、Sun Microsystems, Inc. の登録商標である。

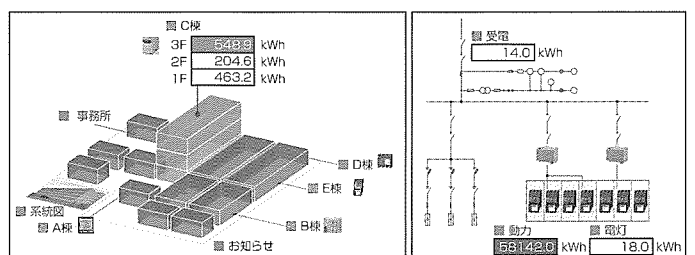


図1. 視覚的配置図(左)と電力系統図(右)上のデータ表現

XMLHttpRequestは、画面遷移と独立にブラウザ(クライアント)がサーバとデータ通信を行い、サーバから取得したデータを任意のJavaScriptプログラムに渡すことができるAPI(Application Program Interface)である。EcoManager IIの現在値表示機能では図2に示すように、サーバから取得したデータが画面更新を行うJavaScriptプログラムに渡され、そのプログラムが画面更新を行ったあとに、再びサーバとデータ通信を行う。この繰り返しによって定期的にEcoServer IIが持つデータを取得してWebブラウザに表示している。

この方式のデータ通信は、任意のhttp(Hyper Text Transfer Protocol)サーバが組み込まれたシステムとの間で成立する。例えば生産管理システムがhttp通信できれば、生産の現在値と電力消費の現在値を同等に扱うことができるようになる。通信相手の数にも制限はない。多種多様なソースからのデータを使う情報表示を、Internetの世界ではMashUpと呼ぶが、これを実現する仕組みがEcoManager IIには組み込まれている。

3.2 図面上での計測データ表示

EcoManager IIの課題として2.1節でユーザーに応じてデータの多様な表現方法が求められることを示したが、この課題には、XMLHttpRequestを使いブラウザがデータを取得したあとのブラウザの描画処理機能が重要で、取得データを業務やユーザーに合わせて、見やすい図面上にデータを描画することが必要である。

業務やユーザーに合った図面は、EcoManager II専用で作られることもあるが、多くは、ほかの目的で業務用に作られた図面であり、それらは様々な形式で記述されている。例えばCADのデータの場合もあるし、印刷された書類の場合もある。こうした図面データをEcoManager IIで利用するには、Microsoft社のVISIO^(注2)(グラフィカルエディタ)に図面データを取り込めば良い。実用上は、JPG(Joint Photographic experts Group)やPNG(Portable Network Graphics)などの画像データとしての図面があれば十分である。こうすることで、その図面がそのままEcoManager II(注2) VISIOは、Microsoft Corp.の登録商標である。

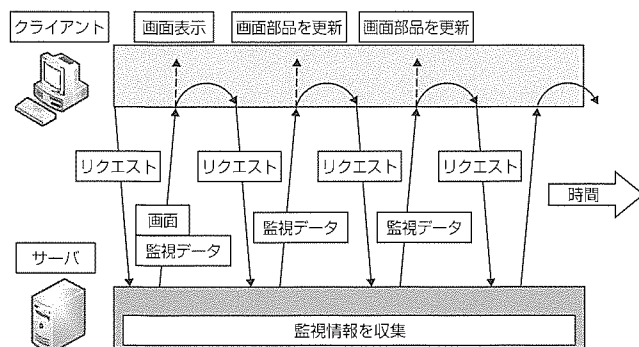


図2. クライアント - サーバ間のデータ通信パターン

IIによる業務で利用できるようになる。

図面を取り込んだあとは、VISIOの機能を使って計測データをWeb画面上でMashUpするためのデータを付加する。具体的には、データを表示するテキストフィールドなどを図面上に書き加え、それらにカスタムプロパティと呼ばれる情報としてEcoManager II用のプロパティ名で計測データソースに対応する値の定義を行う。このカスタムプロパティは、画面上何も影響を与えないデータでメタデータと呼ばれる。EcoManager IIは、VISIOが出力するSVG(Scalable Vector Graphics)形式のファイルで、上記の方法で固定された図面データとメタデータとの関連を利用して計測データの表示を行う。例えば、EcoManager IIの現在値表示画面では、このSVGファイルを基に、図面と時々刻々変わる計測データとを、JavaScriptプログラムによって融合している。JavaScriptプログラムの行う処理は、単純化すると、XMLHttpRequestによって計測データを取得し、次にSVGファイルに埋め込まれているカスタムプロパティ(メタデータ)で指定されたテキストフィールドの表示文字列を取得した計測データの現在値で置き換え、画面を再表示するという処理である。この処理の実現はDHTMLと呼ばれるIT技術を応用している。

プログラムは、単に機能が実現されるだけでなく、ユーザーごとのカスタマイズが容易に行うことができ、しかもカスタマイズとは別に基本機能の拡張が行えることも重要になる。このためEcoManager IIは、当社が開発したDiaSmash/Webという基盤ソフトウェアを用い、基盤部分、インタフェース部分、カスタマイズ部分を分離した構造で実現されている。ソフトウェア構造の問題は、直接ユーザーにかかわることではなく、むしろソフトウェア開発にかかわる問題である。しかし経験上、ユーザーにとって優れたソフトウェアが、優れた開発によって作られるので、DiaSmash/Webのような適切に設計された基盤ソフトウェアの上にシステムを構築することはユーザーメリットにも大いに貢献することとなる。

ここまで述べたように、EcoManager IIで計測データの表示が行われるまでには、図面と計測データソースの静的なリンクをグラフィックエディタによって生成し、時々刻々の計測データと表示画面の動的な表現を、当社独自の基盤ソフトウェアを使い生成している。この中で様々なIT技術が、ユーザーや業務に合わせて適切なデータ表現を柔軟に実現する機能に応用されている。

3.3 効果的なデータ表現

前節で述べたJavaScriptによる計測データのグラフィック画面上での表示は、単にデータ(数字)の書き換えに限られない。計測データを基にしたロジックによって表示を更に効果的に変更する機能がEcoManager IIで実現できている。例えば、計測値がある一定値を超えた場合に、表示背

景を赤くしたり点滅したりすることで画面内に多数ある計測値表示のうち、図3に示すように特定の値を特に目立たせる効果のことである。こうした効果と効果を決定しているロジックを合わせて、UI(ユーザインタフェース)部品の振る舞いなどと呼んでいる。UI部品の振る舞いによく利用されるものには、テキストの色を変える、背景色を変える、アイコンを入れ替える、点滅などアニメーションを行うなどがある。

UI部品の振る舞いには大きな自由度があって、ロジックはEcoManager IIが管理する任意のデータに基づく任意のロジックが実現可能である。複雑なロジックを実装するのであれば、ここまで述べてきたJavaScriptによる実装ではなく、サーバ(EcoManger II)サイドでロジックを実行するServletの技術を使うことが有効な場合が多い。Servletはサーバサイドで実行されるため、計算パワーやデータといったリソース面でJavaScriptによるクライアントサイド処理より有利である。

画面の効果に関しても、単に色や形が変わるだけではなく、新しい画面に遷移したり、新しい図がポップアップして現れたりといった様々な効果が実現可能である。Eco-Manager IIは、Ajaxという総称で呼ばれInternet上で盛んに使われているWeb画面構築のオープンな技術を適用可能なアーキテクチャを採用しているため、UI部品の振る舞いについての拡張性が高い。

4. む す び

本稿では、EcoManager IIという省エネルギーデータの把握を行うための製品に組み込まれたIT技術について述べた。IT技術はこれまで、ユーザーとデータベースシステムを備えたサーバ計算機とをつなぐ“ユーザー～マシン”形のシステム構築技術として発展を遂げてきた。これに対して、EcoManager IIに見られる形態は、“ユーザー～マシン～マシン”という形をしている。ユーザーに接しているマシンがEcoManager IIであり、もう一方のマシンがEcoServer IIや、更に下位の省エネルギー計測機器である。“マシン～マシン”の関係におけるEcoManager IIの役割は、下位のマシンからのデータの収集である。下位のマシンは、

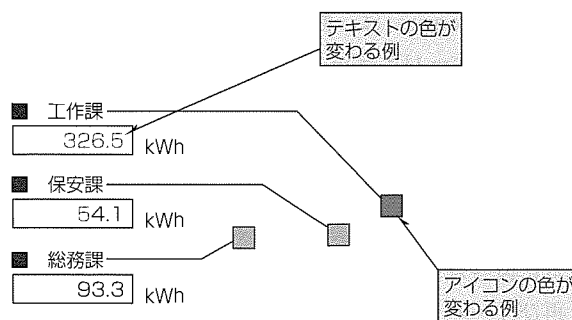


図3. UI部品の振る舞いの例

いわば小さなWebサーバであって、マシン～マシン間でhttpなどのIT技術が利用されデータ通信が行われている。

一方“ユーザー～マシン”の関係におけるEcoManager IIの役割は、ユーザーが行う様々な省エネルギーのための業務に合わせてユーザーインタフェースとデータを提供することである。このための機能は、3章で述べたJavaScriptを中心とするIT技術で実現され、EcoManager IIでは柔軟でユーザーの業務に対して効果的なユーザーインタフェースの構築が行われている。

“ユーザー～マシン～マシン”の形をした計測制御システムは、省エネルギー分野に限らずほかの多くの分野でよく見られるようになった。現在このような形となるまでの発展を振り返ると、機器(マシン)とユーザーインタフェースが一体化しているような単純なアーキテクチャから始まり、ネットワーク化によってシステムに求められる要求が広がり、現在の複雑で大規模な“ユーザー～マシン～マシン”の形に変化してきたとすることができる。この変化は、情報源の多様化のみならず、情報の表現方法への要求の多様化によって駆動されてきていて、今後もこうした流れは加速され、更に多様なデータの新しい目的のための利用が拡大していくことが予測される。

参考文献

- (1) 三菱電機省エネポータルサイト
http://www.mitsubishielectric.co.jp/shoene
- (2) 柳原慎太郎: 産業用WebシステムにおけるUI構築技術の提案, 3-091, 平成20年電気学会全国大会 (2008)

工場トータルエネルギー管理システム

森 一之*

Total Energy Management System for Factories

Kazuyuki Mori

要旨

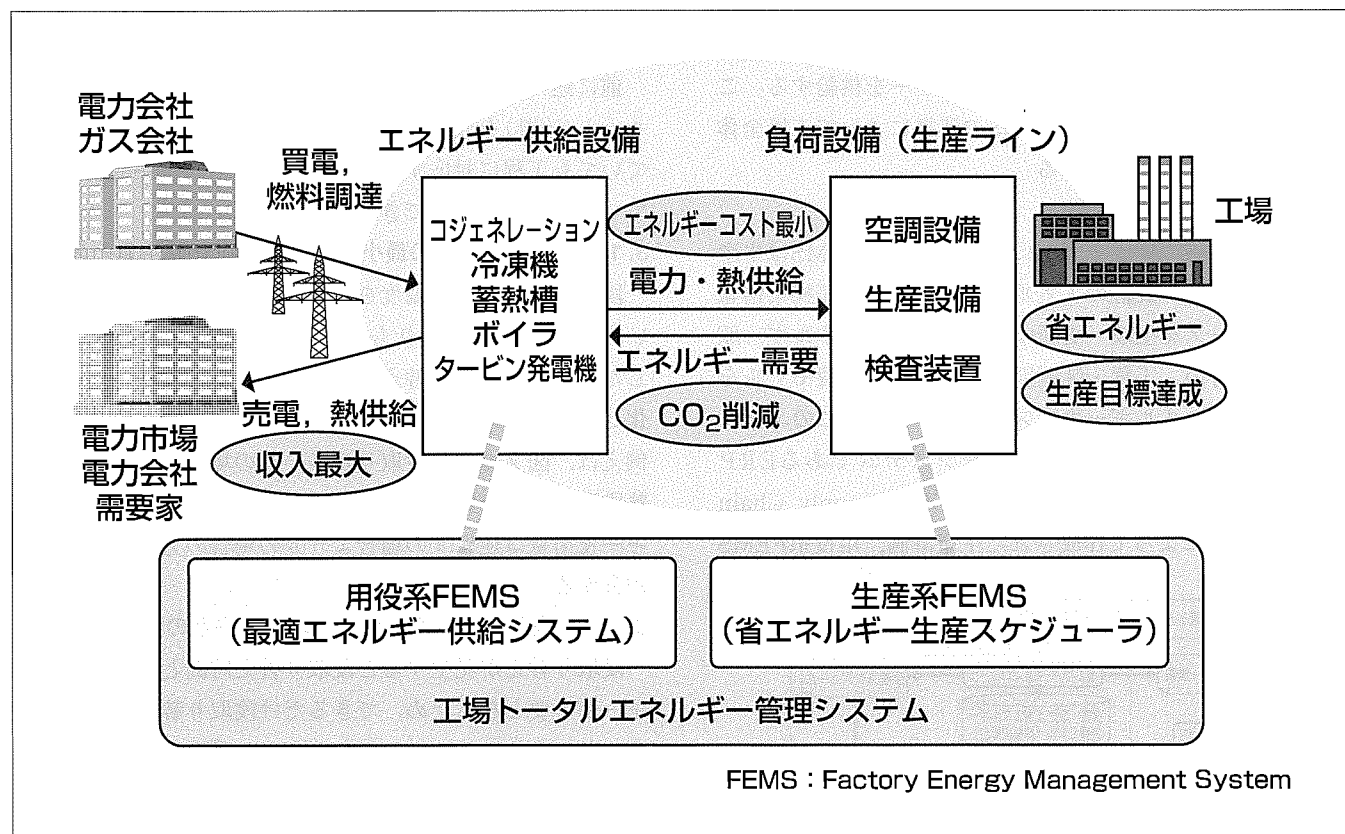
製造業では、省エネルギーとCO₂排出量の削減は経営上不可欠の課題となっており、多くの取り組みが実施されている。特に生産ラインで大量のエネルギーを消費する工場では、コジェネレーション設備の導入によるエネルギー効率の向上と生産設備の省エネルギー化によるエネルギー使用量の削減が実施されている。

三菱電機では、生産ラインへのエネルギー供給システムを最適管理する用役系FEMS(Factory Energy Management System)と、生産ラインの運用を工夫することによって生産ラインで使用するエネルギー(電力、熱)を削減・平準化する生産系FEMSの2つのシステムの連携によって、工場全体のエネルギー削減を実現する工場トータルエネルギー管理システムの研究開発を行っている。

生産系FEMSは、生産目標を達成した上でエネルギー使用量の少ない省エネルギー生産スケジュールを作成する。用役系FEMSは、その生産スケジュールでの生産に必要なエネルギー需要を満たした上でエネルギーコスト最小、一次エネルギー使用量削減、二酸化炭素排出量の削減等の目的を達成する最適なエネルギー供給計画を立案し、生産ラインへエネルギーを供給する。

本稿では、生産系FEMSの構成とそのコア技術となる省エネルギー生産スケジュールリング技術について述べる。また、テスト工程のスケジュールリングを例題としてその効果について述べる。

今後、これらの開発成果の工場への適用を進め、工場全体の更なるエコファクトリー化を目指していく。



用役系と生産系の連携による工場トータルエネルギー管理

工場の生産ラインへのエネルギー供給を最適化する用役系FEMSと生産ラインのエネルギー使用量を削減する生産系FEMSの連携によって、更なる省エネルギーとCO₂削減を実現し、工場全体のエコファクトリー化を目指す。

1. ま え が き

製造業では、省エネルギーとCO₂排出量の削減は経営上不可欠の課題となっており、多くの取り組みが実施されている。特に生産ラインで大量のエネルギーを消費する工場では、コジェネレーション設備の導入によるエネルギー効率の向上と生産設備の省エネルギー化によるエネルギー使用量の削減が実施されている。

本稿では、生産ラインの工程スケジューリングを工夫することによって更なるエネルギー使用量の削減と負荷の平準化を実現する生産系FEMSについて述べる。

2. 工場トータルエネルギー管理システム

2.1 コンセプト

工場トータルエネルギー管理システムは、生産ラインへのエネルギー供給システムを管理する用役系FEMS⁽¹⁾と生産ラインで使用するエネルギー(電力, 熱)をスケジューリングによって削減・平準化する生産系FEMS⁽²⁾から構成される。その連携の仕組みは次のとおりである。

まず、生産系FEMSによって生産計画を達成した上でエネルギー使用量の少ない生産スケジュールを作成する。次に、その生産スケジュールでのエネルギー需要を満たした上でエネルギーコスト最小、一次エネルギー使用量最小、CO₂排出量最小等の目的を達成する最適なエネルギー供給計画を用役系FEMSで立案し、エネルギーを供給する。この生産系と用役系の2つのFEMSの連携によって工場全体の省エネルギー化を実現する

2.2 生産系FEMSの構成

生産系FEMSの構成を図1に示す。生産系FEMSは生産ラインの情報から装置のエネルギー使用量と生産作業情報のデータベースを生成・更新する。次に詳細エネルギー原単位分析を行い、工程・装置別のエネルギー消費モデルを生成する。省エネルギー生産スケジューラは、このエネルギー消費モデル、上位の生産管理システムであるERP(Enterprise Resource Planning)やSCM(Supply Chain Management)によって作成された生産計画、用役系FEMS

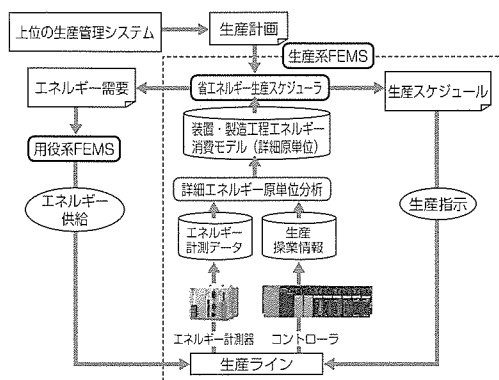


図1. 生産系FEMSと用役系FEMSの関係

から入手したエネルギー使用制約に基づいて省エネルギーかつ種々の生産の制約条件を満たす生産スケジュールとエネルギー需要計画を作成する。用役系FEMSは、ここで作成されたエネルギー需要計画を基に最適エネルギー需給制御を実行し、生産ラインの操業に必要なエネルギーを供給する。

3. 省エネルギー生産スケジューリング

3.1 省エネルギー生産スケジューリングの概要

ここでは、製品のテスト工程のスケジューリング問題を例に、スケジューリングによって省エネルギーが可能なのかについて述べる。本稿のテスト工程は、複数のテストプログラムを各工程に設定された温度(高温, 常温, 低温)で実行することによって製品のテストを行う。各工程は、装置に対応するテストへ治具に対応するチェンジキットを接続することによって行われる。次に、テスト工程の特徴を述べる。

3.1.1 段取り替え時間

工程が異なると段取り替え時間が発生する場合がある。この時間は、設定温度の違いによって、大きく異なる。例えば、設定温度が低いものから高いものへ設定を変更する場合にはヒーターで加熱するため比較的短時間で変更できるが、逆に設定温度が高いものから低いものへ自然冷却によって変更する場合には長時間を必要とする。

3.1.2 治具制約

前に述べたように、工程処理はテスト(装置)にチェンジキット(治具)を設置して行う。したがって、テストが空いていても工程に対応するチェンジキットがほかで使用されていると工程を処理できない。

3.1.3 段取り替えの最小化とエネルギー使用量との関係

段取り替えで設定温度を高いものへ変更する場合は、低いものへ変更するよりも多くのエネルギーを必要とする。したがって、段取り替え時間を考慮すると操業時間の最小化と消費エネルギーの最小化はトレードオフの関係にある。例えば、図2で加熱段取りが多い(a)の場合、操業時間は加熱段取りが少ない(b)の場合よりも短いですが、装置2のエネルギー使用量は逆に(a)の場合より(b)の場合の方が少ないことが分かる。

3.1.4 段取り替えの最小化と納期遵守との関係

段取り替えが発生すると段取り替え時間と余分なエネルギーが必要となるため、できるだけ段取り替えが少なくなることが求められる。しかしながら、段取り替えを行わないと納期を守れない製品が生じるため、段取り替えの最小化(操業時間の最小化)と納期遵守(納期遅れの最小化)はトレードオフの関係となる場合がある。

3.2 スケジューリング方式

3.2.1 スケジューリング方式の概要

本稿では、シミュレーションによるスケジューリング方

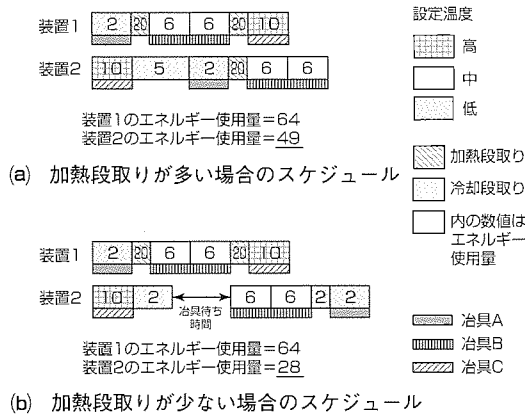


図2. 段取り替えとエネルギー使用量・操業時間の関係

式⁽³⁾と最適化アルゴリズムによるスケジューリング方式⁽⁴⁾⁽⁵⁾を組み合わせたスケジューリング方式を提案する(図3)。この提案方式は、まず、シミュレーションによるスケジューリング方式を用いて、目的の一つである納期制約を満たすスケジュールを複数作成する。その後、更にこれらのスケジュールの条件を基に最適化アルゴリズムを用いて新たな条件を生成し、スケジューリングステップを繰り返すことによって、多目的の最適化が可能となる。

3.2.2 スケジューリングステップの詳細

STEP 1 : 問題の記述

スケジューリング対象を次のような多目的最適化問題として定式化する。

最小化 : 納期遅れ件数, 納期遅れ時間, 操業時間, エネルギー(電力)使用量, 電力使用量目標超過回数, 電力使用量目標超過量

制約条件: 治具制約, 工程順序制約, 工程処理装置制約, 工程/段取り替えエネルギー使用量制約, 納期制約, 投入日時制約, 段取り替え時間制約など

なお, 提案手法では制約条件を離散事象シミュレーションのモデルとして記述する。

STEP 2 : 初期解候補の生成

次に示す投入時刻設定方法に基づいて投入時刻を設定してシミュレーションを複数回繰り返すことによって, 納期を満たす初期解候補を生成する。なお, ディスパッチングルールはランダムに選択する。直前のシミュレーション結果から式(1)によって各ロット p の納期余裕時間 D_p を計算する。

$$D_p = DD_p - CT_p \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで, DD_p と CT_p は, それぞれ, ロット p の納期と最終工程の完了時刻を表す。

$D_p \geq 0$ のとき, すなわち, 納期に余裕がある場合にはロット p の投入時刻 $TT_{p,t}$ を式(2)に基づき更新する(投入時刻を余裕の1/2だけ遅らせる)。

$$TT_{p,t+1} = TT_{p,t} + D_p / 2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

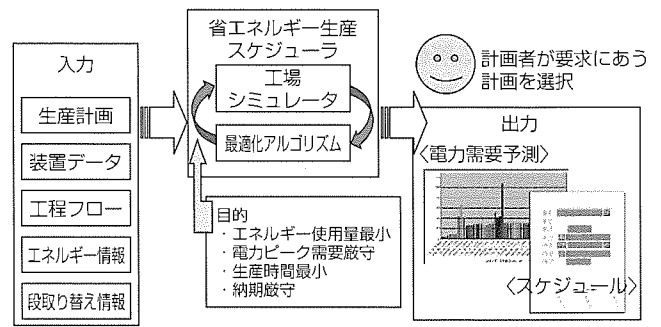


図3. 省エネルギー生産スケジューリングの概要

ここで, t はシミュレーションの実行回数 (t 番目のシミュレーション) を表す。

$D_p < 0$ のとき, すなわち納期に遅れる場合にはロット p の投入時刻 $TT_{p,t}$ を式(3)に基づき更新する(投入時刻を遅れ分だけ早める)。

$$TT_{p,t+1} = TT_{p,t} - D_p \quad \dots\dots\dots(3)$$

これらの投入時刻の設定をすべてのロットに対して行うか, 又は最も大きいものに対して行うかの決定は, シミュレーションの実行の前に行う。

STEP 3 : 評価値の計算

STEP 6 によって得られた設定条件の情報に基づいてシミュレーションを実行し, 各目的の評価値を求める。

STEP 4 : 解候補の記憶

すべての解候補の濃度⁽⁵⁾を計算し, 濃度が閾(しきい)値 T_c 以上の解候補, 又は, STEP 3 で評価値が大きい解を有効解として記憶する。記憶容量を超える場合には, 新しく記憶させる解候補の評価値とすべての記憶した解候補の評価値と比較し, すべての評価値が大きい(記憶された)解候補のみを入れ替え, それ以外のときは記憶しない。あらかじめ決められた計算時間, 又は繰り返し回数に達したときにSTEP 7へ進む。なお, 解候補 v の濃度 c_v は式(4)によって計算する。

$$c_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N ac_{v,w} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$ac_{v,w} = \begin{cases} 1 & \text{解候補 } v \text{ と } w \text{ の設定条件の値が全て同じとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで, N は解候補の数である。

STEP 5 : 解候補の生成促進と抑制

解候補の数がある閾値に達した場合には, 期待値が小さい候補を消滅させる。

STEP 6 : 解候補の生成

解候補の数がある閾値に達しない場合, 解候補の中から改善する可能性の高い(各評価項目の評価値の高い)複数の解候補を選択し, それらの設定条件を組み合わせることによって新しい解候補を生成する。

STEP 7：探索の終了判定

目的を満足する解候補が存在するかを調べる。もし、目的を満足する解候補が得られたならばSTEP 8へ進む。目的を満足する解候補が得られなかった場合は、STEP 2又はSTEP 3へ戻り、探索を進める。

STEP 8：探索の終了

3.3 スケジューリング方式の検証

3.3.1 スケジューリング問題の規模

ここでは、例題を用いて3.2節で述べたスケジューリング方式の効果を検証する。例題で用いる生産システムの規模は次のとおりである。

品種数：3品種、投入量：20ロット、工程フロー数：品種ごとに1つの工程フロー、工程数：2つの品種は2工程。1つの品種は3工程、装置数：4台、治具数：3台、工程処理時間：各工程の処理時間は120分、段取り替え時間：0～190分

なお、工程の消費エネルギーと段取りに要するエネルギーは、前工程の設定温度と自工程の設定温度によって与えられる。

3.3.2 スケジューリング結果

ここでは、3.2節で説明したスケジューリング方式によって3.3.1項のスケジューリング問題を解いた結果について述べる。得られたスケジューリング結果(解)は、2つの評価項目を選択することによって、複数の結果を比較できる。図4は、評価項目としてエネルギー使用量(X軸)と操業時間(Y軸)を選択した場合の解の分布である。この評価項目では、解候補18, 101, 141, 199は、操業時間とエネルギー使用量を同時に改善する解候補がほかにないことが分かる。図中の数字は、解候補の生成順につけられた番号を表す。多目的計画では、複数の関数を同時に改善することが不可能な実行可能解をパレート最適解と呼ぶ。パレート最適解は一般に複数存在するため、評価者(計画者)がパレート最適解の中からどの解を実行解として選択するかを判断する。

次に、図5に解候補の評価項目として納期遅れ件数(X軸)と電力使用量目標超過回数(Y軸)を選択した場合の解候補の分布を示す。この2つの評価項目では解候補199が最適であることが分かる。

このように種々の評価項目で解を評価することによって、評価者が最適解を選択することを容易にする場合がある。ただし、評価者にとって納期遅れが重要でなく、エネルギー使用量の評価指標が重要視される場合には、最適解として解候補141が選択されると考える。

3.4 まとめ

この例題は、多目的最適化問題であり、評価者の評価尺度によって解候補の優劣が異なるため、唯一の最適解を決定することが困難な問題である。しかし、このシステムの

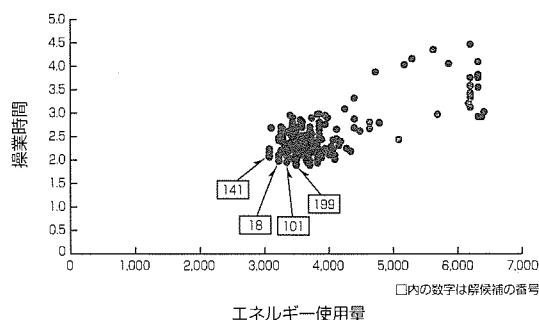


図4. エネルギー使用量と操業時間の関係

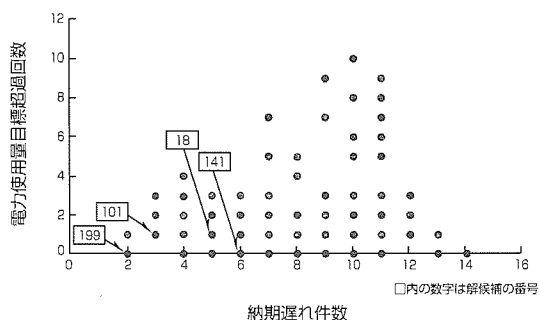


図5. 納期遅れ件数と電力使用量目標超過回数の関係

ように評価項目を変えて様々な視点から評価することによって、評価者の解選択に関する意思決定を支援することが可能であることが分かった。また、納期を遵守するスケジュールの作成には、STEP 2の投入時刻設定方法が有効なことが実験を通じて分かった。

4. むすび

本稿では、生産系FEMSの構成とそのコア技術となる省エネルギー生産スケジューリング技術の概要について述べた。また、テスト工程のスケジューリングを例題としてその効果について述べた。

今後、これらの開発成果の工場への適用を進め、工場全体の更なるエコファクトリー化を目指していく。

参考文献

- (1) 北村聖一, ほか: 改良MOPSOによる工場エネルギー供給計画の多目的最適化, 電気学会論文誌C, **125-C**, No.1, 21~28 (2005)
- (2) K. Mori, et al.: Simulation-based Scheduling System For Saving Energy Consumption, SICE Annual Conference 2004, 1182~1185 (2004)
- (3) 森 一之, ほか: ジョブショップ型スケジューリング問題に対するハイブリッドスケジューリング法, 電気学会論文誌C, **112-C**, No.9, 568~574 (1992)
- (4) 相吉英太郎, ほか編: メタヒューリスティクスと応用, 電気学会 (2007)
- (5) 森 一之: 免疫アルゴリズムとその応用, 平成16年電気学会全国大会予稿集, S19(21)~S19(24) (2004)

グリーン調達システム

樋熊弘子* 富本佳彦*
 名塩 優* 鬼山 基**
 丹羽由樹子*

Green Procurement System

Hiroko Higuma, Masaru Najio, Yukiko Niwa, Yoshihiko Tomimoto, Motoi Oniyama

要 旨

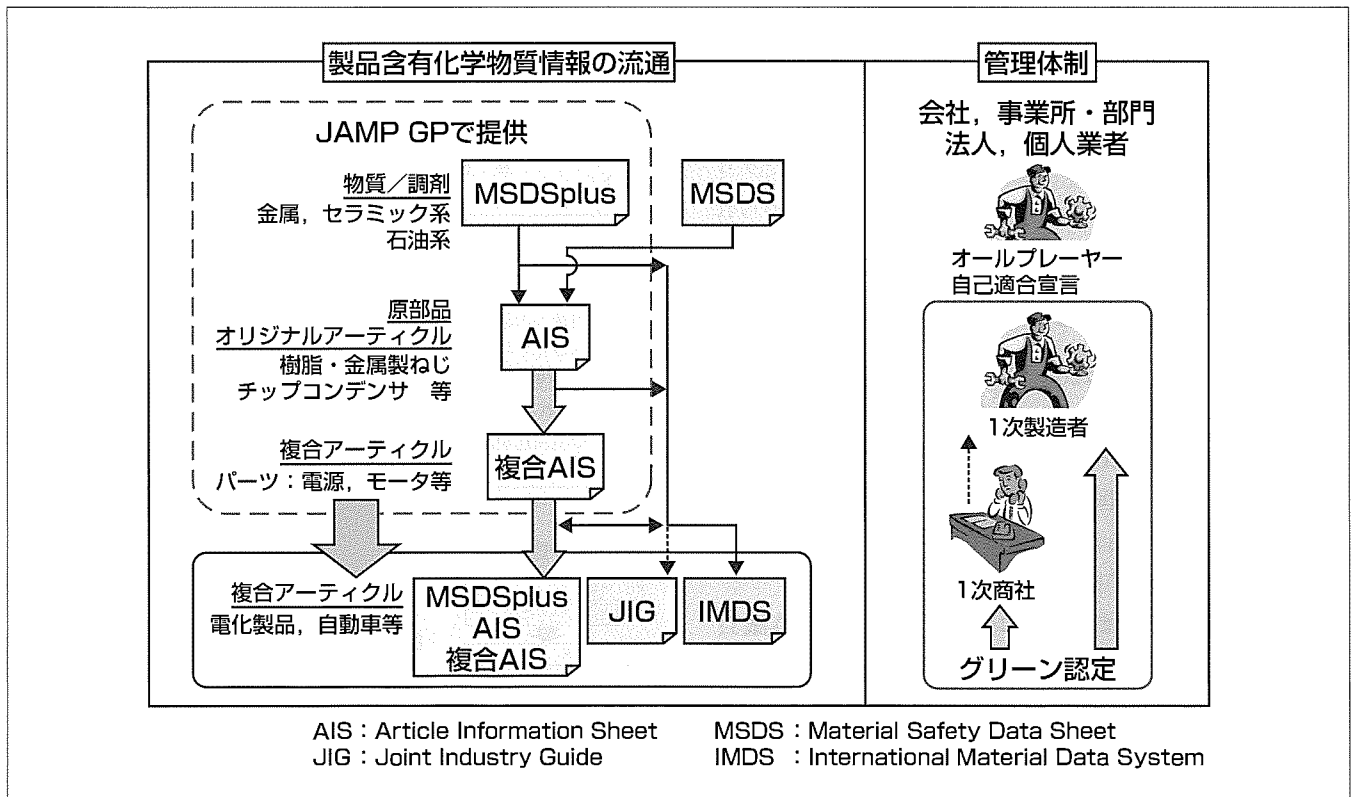
昨年6月、欧州連合(EU)加盟国でREACH(Registration Evaluation Authorisation and Restriction of Chemicals)規則が施行された。2008年末から2009年春頃までに高懸念物質(Substances of Very High Concern: SVHC)が確定され、EU加盟国内では、顧客や消費者へのSVHC含有に関する情報提供義務が始まる。2011年6月からSVHC含有製品の届出義務も始まる。各社各様の方法でサプライヤーへの調査を控えて、業界共通のルールで効率的に対応することが望ましい。

化学、電気、電子、及び自動車等の企業、団体が任意参加する協議会であるアークティクルマネジメント推進協議会(Japan Article Management Promotion consortium: JAMP)は、情報伝達記述様式(MSDSplus, AIS, 及び複合AIS)の提供を2008年6月から開始する。また、2009年4月、グローバルポータルサイト(GP)を開設し、情報伝

達を効率化する予定である。

三菱電機では、今後拡大する製品含有化学物質規制に適合するため、JAMPで提供する上記の様式や仕組みを活用する。迅速に含有情報が入手できるGPを活用して製品含有化学物質情報を収集し、集計、管理する仕組みを構築することを構想している。

入手する情報の質、確度を確保するには、信頼できるサプライヤーから調達することが重要である。そこで1次サプライヤーについては三菱電機グループ“グリーン認定”で化学物質の管理と法規制への対応状況を確認している。サプライチェーンの各プレーヤーが“製品含有化学物質管理ガイドライン第二版”(JAMP, JGPSSI(グリーン調達調査共通化協議会)の協働で作成された)に基づいて自己適合宣言できるようになることが望ましい。



製品含有化学物質情報管理の仕組み

JAMPでは、GPを開設し、製品含有化学物質情報(MSDSplus, AIS, 及び複合AIS)の伝達の効率化を図る。入手・提供する情報の質、確度を確保するには、サプライチェーン全体で製品含有化学物質管理ガイドラインに基づいて自己適合宣言できるようになることが望ましい。三菱電機グリーン認定では1次サプライヤーの管理レベルの確認を行う。

*三菱電機(株) 本社 **三菱電機情報ネットワーク(株)

1. ま え が き

2002年に開催された“持続可能な開発に関する世界首脳会議”(World Summit on Sustainable Development : WSSD)で“2020年までに化学物質の製造と使用による人の健康と環境への悪影響を最小化する”という目標が立てられ、“国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ(Strategic Approach to International Chemicals Management : SAICM)”及び“化学品分類表示調和システム(Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals : GHS)の実施”が決定された。2006年、国際化学物質管理会議でSAICMが採択され、化学物質のリスク評価、ライフサイクルにわたるリスク削減等の文書(ドバイ宣言)がまとめられた。そして、2007年6月、世界に先駆けてEUがSAICMの達成に貢献することをうたってREACH規則(化学物質の登録、評価、認可及び制限にかかわる規則)を施行した。このような背景から日本でも化審法(化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律)の見直しが始まっている。

三菱電機グループは、合金から、半導体、電子部品、車関連部品、家電製品等幅広い製品を扱い、国内外で製造、販売するグローバル企業である。このため、RoHS(the Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment)指令(電気電子機器に含まれる特定有害物質使用制限指令)、REACH規則といった法規制が三菱電機グループのビジネスに与える影響は大きい。

本稿では、先に述べた製品含有化学物質に関する規制動向とその課題をにらみながら、当社で取り組んできたグリーン調達・グリーン認定、今後グローバル企業に求められる製品含有化学物質管理の仕組みについて述べる。

2. 三菱電機グループのグリーン調達・グリーン認定⁽¹⁾

三菱電機グループでは2000年9月“グリーン調達基準書”を策定した。その後、EUのELV(End of Life Vehicle)指令(廃自動車指令)やRoHS指令、また中国の電子情報製品汚染予防管理弁法(中国版RoHS)等製品に含有する化学物質の法規制に対応するため、2003年、2006年にそれぞれ“グリーン調達基準書”を改訂した。

2006年度改訂ではグリーン調達調査共通化協議会(Japan Green Procurement Survey Standardization Initiative : JGPSSI)及び米国電子工業会の合意のもとに発行された“ジョイントインダストリーガイドライン(JIG)⁽²⁾”に沿って、管理対象物質と管理基準を共通化した。

三菱電機グループ“グリーン認定”は、2006年度から開始した。これは、1次サプライヤーに対し三菱電機グループのグリーン調達基準書で定める認定基準に達しているかど

うかを判定し、認定するものである。1次サプライヤーが商社の場合は、適宜1次製造会社まで調査している。

表1に“グリーン認定に向けた調査票”の採点基準を示す。グリーン認定基準には、次の3つの視点がある。

- ① 環境負荷を低減する取り組みがあること
 - ② 環境規制への取り組みがなされていること
 - ③ 製品含有化学物質管理ができていないこと
- “三菱電機グループから各国化学物質規制への対応を依頼した場合、不使用保証書又は含有物質情報等適法上必要な書類が提供できること”

製品含有化学物質管理が適正かどうかを判断する場合、評価する各社の主観をできるだけ抑えるため“製品含有化学物質管理ガイドライン”⁽³⁾に基づくことが望ましい。“グリーン認定に向けた調査票”における調査項目は、このガイドラインを参照している。

グリーン認定の実務は、独自に開発したグリーン認定システムを利用し、業務の効率化を図っている。図1にグリーン認定実務の手順とグリーン認定システムの関係を示す。調査対象のリスト化、採点・データベース化、“グリーン認定証”“是正依頼書”の発行、サプライヤーへの調査結果の通知までペーパーレスで迅速に行っている。

さらに、三菱電機グループ内では、調査結果を検索、閲覧できるようにしている。このため、重複調査を回避し、信頼できるサプライヤーを迅速に選んで調達できる。また、認定基準に達していないサプライヤーを検索・リスト化した、

表1. “グリーン認定に向けた調査票”の採点基準

| 質問番号 | 概要 | 採点基準 | | 回答対象 | | |
|------|--------------------------|--------|-------|----------|----|----|
| | | 認定条件 | 非認定 | メーカー加工外注 | 商社 | ほか |
| I-1 | 環境マネジメントシステム取得又はそれに準じる管理 | ランクABC | ランクDE | ○ | ○ | ○ |
| I-2 | | | | ○ | ○ | △ |
| I-3 | ○ | | | ○ | △ | |
| I-4 | ○ | | | △ | △ | |
| II | 環境関連規制への取り組み | ランク1 | ランク2 | ○ | △ | △ |

◆グリーン認定実務の手順

- (1) 対象サプライヤーを選定
- (2) リストを作成
- (3) 調査依頼
- (4) 回答督促
- (5) 回答入手
- (6) 採点・データベース化
- (7) 結果送付
- (8) 採点結果を検索
- (9) 要改善サプライヤーを抽出
- (10) 改善策を指導

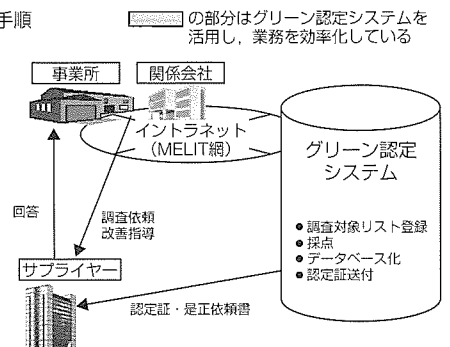


図1. グリーン認定実務の手順とグリーン認定システムの関係

説明会を実施しレベル向上を図っている。また、統計機能を利用し、グリーン認定比率を出すことができる。当社単独のサプライヤーのグリーン認定比率は、2007年度末累計で92.0%であった。2008年度末までにグリーン認定サプライヤー比率を100%に引き上げることを目指している。

3. JAMP情報基盤を活用する製品含有化学物質管理システム

3.1 JAMPの提供する仕組み

JAMPでは、アーティクル(部品や製品;ねじ, コンデンサ, 基板, 家電製品, 自動車等)が含有する化学物質等の情報を適切に管理し, サプライチェーンの中で円滑に開示・伝達するため, 含有情報を開示・伝達するため情報伝達記述様式の共通化と仕組み(情報基盤)作りを進めている⁽⁴⁾。塗料, 接着剤といった物質・調剤の情報を記述するMSD-Plus, 比較的単純な原部品の情報を記述するAIS, 及び基板や家電製品, 自動車といった複雑なアーティクルに用いる複合AISを提供する。さらに, これら3種の様式のデータは, 後で述べるGP等で電子的に情報交換するためにebXML(Electronic Business using eXtensible Markup Language)という言葉で記載されている。JAMPではこの情報交換データを構造や仕様を決め共通化に取り組んでいる。

図2にJAMPで開発を進めている情報基盤のイメージを示す。GPは, 含有情報の情報交換データを登録, 検索, ダウンロード, 要求する等の管理及び処理機能を持っている。アプリケーションサービス(AS)は, GPと情報交換するためのもので, 各社又はプロバイダに設置する。利用者はASからGPを利用することができる。GPはASにつな

で交信する電話交換機のような役割を持っている。

3.2 化学物質情報を収集, 集計, 管理する仕組み

我々はGPを活用して今後製品含有化学物質情報を収集・管理する仕組みを構築することを構想している。GPを利用する第一のメリットは, 迅速に含有情報が入手できることである。GPを利用しない場合, 対応の悪いサプライヤーが入るとそこで情報の流れが止まってしまう。一方, GP利用では, 集まった情報から逐次GPに予備登録することができる。

図3に構想中の化学物質情報の収集, 集計, 管理の仕組みを示す。図中に示した番号ごとの特長を次に述べる。

- (1) 製品構成部品の管理及び環境規制への適合/非適合を迅速に把握可能

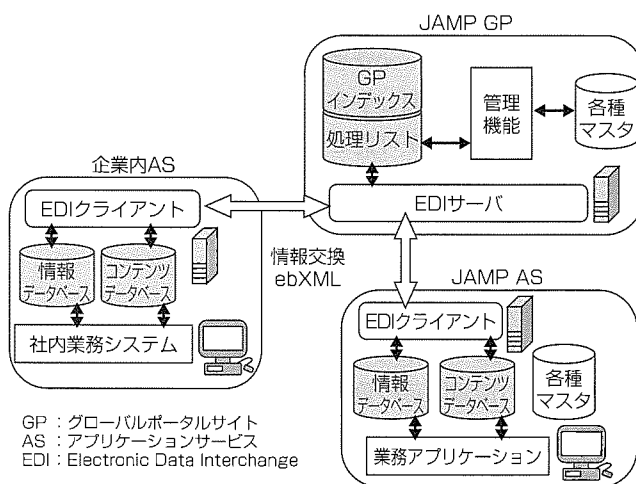


図2. JAMP情報基盤のイメージ

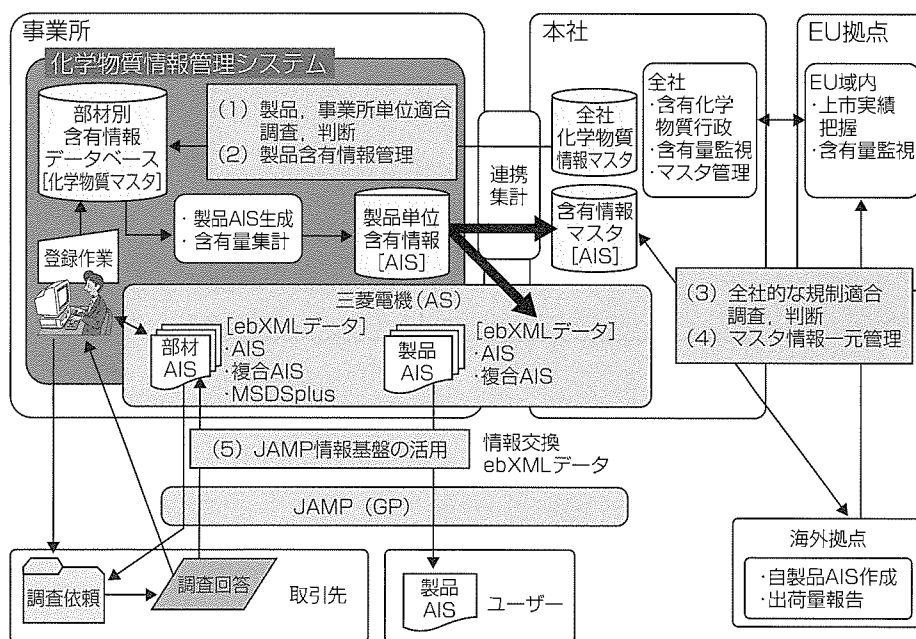


図3. 構想中の化学物質情報の収集, 集計, 管理の仕組み

化学物質情報の管理システムを化学物質情報データベースとともに構築する。新たな環境規制の施行や管理すべき規制物質の増加を想定し、拡張性のある設計とする。化学物質情報データベースを共通化することで、統合管理が可能となる。

(2) 環境規制に抵触しない製品の生産を支援

製品の構成情報を基に規制対象化学物質含有量の積上計算を行う。このことによって、製品単位で規制対応での該当/非該当、又は、適合/非適合が判定できる。

(3) 全社的な規制への適合調査、判断を支援

REACH規則では、サプライチェーン全体で物質集計しないと規制に適合しているか判断ができない。このような規制に対し、事業所、本社、海外各関連拠点間の情報連携によって、全社レベルでの規制適合の調査、判断の支援ができる。

(4) マスタ情報一元管理

化学物質情報など一元管理が必要な情報は、本社で管理する。このマスタ情報と事業所マスタ情報の連携をとることで、全社一元管理が可能となる。

また、含有情報の社内外の交換は、JAMPの情報交換様式 ebXMLとのインタフェースフォーマットや管理項目に統一することで、一元管理ができる。

(5) GPの活用

情報開示方法や情報入手方法をGP、ASに準拠しておけば、顧客別の情報開示の負荷が軽減する。情報収集作業負荷削減、スピードアップがねらえる。

3.3 既存の管理システムを生かした運用

三菱電機では、RoHS 6物質の管理様式、JGPSSIの調査様式、自動車業界の様式、独自様式等、既存管理システムが構築されている。3.2節(4)で述べたように社内外の情報

交換データの仕様を統一しているため、既存システムから出る時のインタフェースフォーマットや管理項目、及び3.2節(1)で述べた共通の化学物質情報データベースを追加することで、既存システムを生かした運用が可能になる。

4. むすび

JAMPとJGPSSIの協働で製品含有化学物質管理ガイドラインの改定作業が進められ、2008年3月第二版が発行された⁽⁶⁾。JAMP会員をはじめ産業横断的にサプライチェーン全体で取り組みが進むと期待できる。

JAMPの含有化学物質の情報伝達記述様式と仕組みに準拠した製品含有化学物質管理の仕組みが広まることで、グリーン調達にかかる時間とコストが大幅に削減されることを期待したい。

参考文献

- (1) 三菱電機：三菱電機グループグリーン調達基準書(2006)
- (2) Electronic Industrial Alliance, Japan Green Procurement Survey Standardization Initiative, JEDOC: JOINT INDUSTRY GUIDE (JIG-101) (2005)
- (3) みずほ総研(株)編：監修グリーン調達調査共通化協議会、製品含有化学物質管理の手引き(第一版)(2006)
- (4) 樋熊弘子：三菱電機のサプライチェーンにおける製品含有化学物質の情報管理とグリーン認定、三菱電機技報, 81, No.6, 421~424 (2007)
- (5) アーティクルマネジメント推進協議会：製品含有化学物質管理ガイドライン(第二版)(2008)

化学物質排出削減

宇佐美 亮*

Decrease in Chemical Emissions

Ryo Usami

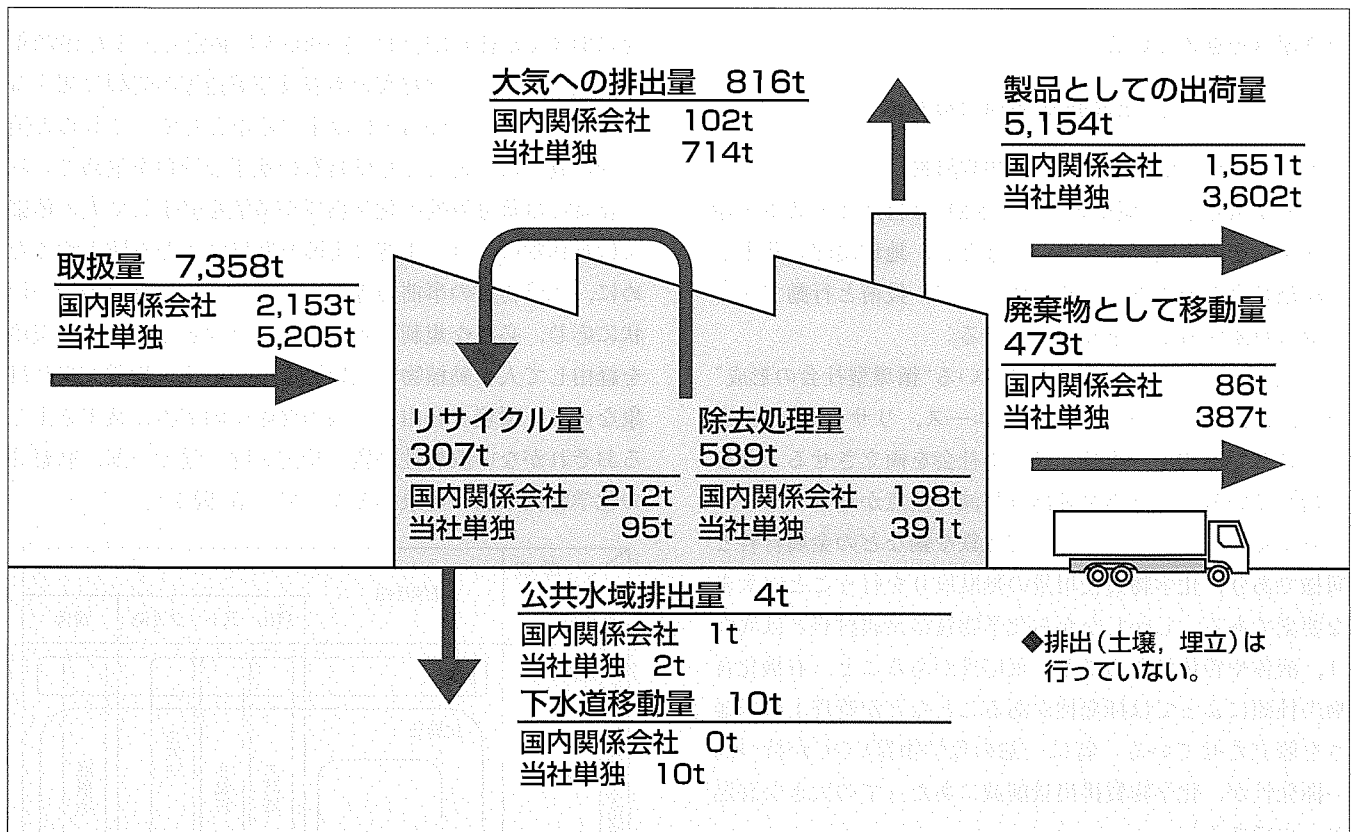
要 旨

三菱電機グループ(国内製造拠点)では1997年から自主的な化学物質管理を進めている。現在の三菱電機グループでの管理対象化学物質はPRTR(Pollutant Release and Transfer Register)管理対象物質(354物質)に自主管理物質226物質を加えた580物質である。

三菱電機は購入部材・部品の購入情報と連携させた“化学物質管理システム”を開発し、化学物質排出量を含めた化学物質のマテリアルバランスを管理している。資材購入データとの自動連携による集計のため、扱う化学物質量に

漏れがなく、高い精度で短期間にマテリアルバランスを集計することができるのが特色である。

2006年度は大気汚染防止法改正とそれを受けた電機電子4団体の自主取り組みに則って、管理対象化学物質を新たに13物質増やした。2006年度の三菱電機グループでは揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds: VOC)を管理対象に追加するとともにトルエン、キシレンの代替を進めている。今後もこれらVOCを中心とした排出量削減への取り組みを更に進めていく。



管理対象化学物質のマテリアルバランス

当社の化学物質管理システムで管理している三菱電機グループ管理対象化学物質のマテリアルバランス(2006年度実績)である。化学物質取扱量のほか、化学物質排出量も短期間に高精度で集計できる。

*本社

1. ま え が き

化学物質は人の生活や社会の維持に不可欠な有用なものであるが、その一方で適切でない取扱い又は処理方法が原因となって、環境に対して悪影響を及ぼす場合があることがこの数十年の間に明らかとなってきた。製造業の企業活動にかかわる化学物質も事情は同様であり、製品の製造・使用・保守の目的には極めて優れた性質を持つ化学物質でありながら、それが暴露した場合には人や動植物に対して有害な影響を及ぼす可能性があることがわかったために、現在では厳重な管理下に置かれたり、使用を規制されている化学物質も少なくない。

ある種の化学物質が不適切に放出されて人や動植物に悪影響を及ぼす場合、環境を経由して悪影響を及ぼすものと直接的な暴露によって悪影響を及ぼすものがあり、またその悪影響についても急性毒性と長期毒性の別があるなど、様々な形態がある。

現在の様々な企業活動は化学物質なしには成り立たず、規模の大小や事業内容にかかわらず、多様な化学物質が様々な事業活動によって環境に排出されている。排出された化学物質の環境への悪影響を防ぐために、又は化学物質の環境への排出を管理するために、国際社会、日本を含む各国、また各企業などがそれぞれの枠組みのなかで種々の取り組みを進めている。

2. 化学物質管理の枠組み

2.1 環境ビジョン2021と化学物質削減

当社が策定した“環境ビジョン2021”は自然との共生・環境マインドの育成という土台を基とし、地球温暖化防止と循環型社会の形成を2大テーマとして、技術と行動で人と地球に貢献することをうたっている。

2大テーマの一つとして掲げている“循環型社会の形成”では、製品3R(リデュース, リユース, リサイクル)を進めることで生態系の維持と豊かな社会を両立させることを目指している。化学物質排出量削減の観点からリデュースを考える場合、基本的な考え方は鉄や銅などの金属材料と同様であり、化学物質使用量の無駄取りを行うことが大きな要素である。しかしながら化学物質は金属材料とは異なり、液体や粉体であること、反応性があること、有機化合物の種類によっては揮発性があることなどが管理上の困難さを際立たせている。特に一部の化学物質VOCが持つ高い揮発性が、化学物質排出量削減にあたっての大きな課題の一つである。

当社はあとで述べる枠組みによってVOC排出量削減を進めているが、電機メーカーである当社では塗料や洗浄剤などに含まれるVOCの排出量削減が大きな課題である。

2.2 国際社会における化学物質管理の枠組み

ひとたび環境に排出された化学物質は、種類によっては国境にかかわらずに拡散していくことから、国際連合は1992年にリオ・デ・ジャネイロで“国連環境開発会議(United Nations Conference on Environment and Development:UNCED, 地球サミット)”を開き、化学物質対策を含めた地球環境問題の解決策として“アジェンダ21”と呼ばれる行動計画書を採用した⁽¹⁾。アジェンダ21では環境に対して有害な化学物質を適切に管理するための項目として次の6項目が挙げられており、これらが現在の化学物質管理の国際的な取り組みの基礎となっている。

- ・化学物質のリスクの国際的評価の拡充と促進
- ・化学物質の分類と表示の調和
- ・有害化学物質及び化学物質のリスクに関する情報交換
- ・リスク削減計画の策定
- ・国レベルでの対処能力の強化
- ・有害及び危険な製品の不法な国際取引の禁止

アジェンダ21では、予防的アプローチの観点から、リスクに基づく化学物質管理の重要性と事業者の自主管理の重要性を明確にしたことが特長であるとされている。

2.3 日本での化学物質管理の枠組み

このような国際的な枠組みに協調して、我が国では“特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律(化管法)”を1999年に制定し、また1973年に制定された“化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律(化審法)”を2003年に改正するなどして、これらの国際的な動きに対応した化学物質の適正な管理を進めている。

化審法は難分解性の化学物質が環境を経由して人の健康又は動植物の生息・生育に支障を及ぼすことを防止するために、化学物質の事前審査制度を設け、化学物質の持つ性状に応じ、必要な規制を行うことを目的としている。環境を経由して人や動植物に悪影響を与える化学物質が規制対象なので、環境を経由して人の健康や動植物に被害を生じるおそれがない放射性物質、特定毒物、覚せい剤、麻薬等の化学物質は法の対象外となっている(図1)。

| 暴 露 | | 環 境 経 由 | | |
|---------|---------|-------------------|-------|-------|
| | | 排 出 ・ ス ト ッ ク 汚 染 | 廃 棄 | |
| 有 毒 性 | 急 性 毒 性 | 劇 毒 法 | | |
| | 長 期 毒 性 | 化 管 法 | 大 防 法 | 土 対 法 |
| 動植物への影響 | | 化 審 法 | 水 濁 法 | 廃 掃 法 |

図1. 化審法と化管法を含む、化学物質に係わる我が国の法体系

一方、有害性が判明している化学物質について、人体等への悪影響との因果関係の判明の程度にかかわらず、事業者による管理活動を改善・強化し環境の保全を図るための枠組みとして、特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律が1999年7月13日に制定され、化学物質の排出量等の届出の義務付け(PRTR制度)とMSDS(Material Safety Data Sheet)制度が発効した。

さらに大気汚染防止法(大防法)が2005年6月10日に改正され、第17条第2項によって、PRTR対象外のVOCを法規制と事業者の自主的取り組みとのベストミックスによって排出削減することが定められた。化学物質管理にかかわるこのような流れを受け、当社を含め各企業は製造時に使用する化学物質の排出量削減に真剣に取り組んでいる。

3. 当社の取り組みについて

当社の化学物質排出削減はこれらの国際的及び我が国の化学物質管理の取り組みに従って行われており、更に当社独自の管理を加えている。

三菱電機グループでは“守りの徹底”“守りと攻めの施策”“攻めへの展開”の3本柱のバランス経営による第5次環境計画(2006年~2008年)を推進し、守りの一環として化学物質排出量の削減に取り組んでいる。

三菱電機グループでの自主的な化学物質管理の取り組みは1997年に本格化した。これは上記のような流れを受けて環境保全対策や社会的な要請への対策として開始したものである。当社では購入部材・部品の購入情報と連携させた“化学物質管理システム”を開発し、化学物質取扱量や化学物質排出量といった化学物質のマテリアルバランスを管理している。資材購入情報を自動的に受けた化学物質管理システムが、システム内に保有するMSDSデータベース等と連動して含有成分を算出し、各化学物質の取扱量・排出移動量等を集計するシステムである。資材購入データとの自動連携による集計のため、扱う化学物質に漏れがなく、高い精度で短期間にマテリアルバランスを集計できるのが特色である。

現在の管理対象物質は、化管法第一種指定化学物質354物質に自主管理物質226物質を加えた580物質である。自主管理物質は冷媒用フロン類、VOC、RoHS(the Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment)対象6物質などである。これらは化審法や化管法などの国内法だけにとどまらず、RoHS指令などの海外規制やモンリオール議定書などの国際条約による環境保全対策や社会的な要請への対策とし

ての自主的規制である。

大防法改正とそれを受けた電機電子4団体の自主取り組み⁽²⁾に則って、当社は2006年度から、PRTR対象外のVOCを中心に管理対象化学物質を新たに13物質増やした。三菱電機グループの製造拠点ではトルエン、キシレン、スチレン等の管理対象VOCについて可能な代替又は使用量削減を進めるために様々な技術開発を行ってきた。

VOC代替技術はVOCの元となる溶剤だけを変更して済むような単純な問題ではなく、製造ライン全体について関連する様々な資材及びそれらに含まれる化学物質の変更を伴う。これらの変更された様々な資材の特性評価や安全性評価などを行い、更に必要に応じて製造設備の変更をも伴う様々な問題を解決しなければならない。これらの技術開発によって得られた成果のうち、実施可能なものは随時製造ラインへ適用することによって、当社各製造拠点ではそれぞれ、VOC削減の成果を挙げている。これらの取り組みによって得られた成果の一例として、2004年度の排出量を100とした場合、2007年度実績としてトルエンでは7%まで、スチレンでは実に2%にまでVOC排出量を削減した製造拠点もある。このように各製造拠点で地道な活動を進めることによって、当社は電機電子4団体の自主取り組みを達成するとともに当社としての環境への取り組みを推進するために、VOC排出量削減に向けて着々と成果を挙げつつある。

2007年度の化学物質排出量を含む化学物質使用実績の全体は本稿の執筆時点で集計中である。今後もこれらVOCを中心とした排出量削減への取り組みを更に進めていく。

4. む す び

国際的な化学物質のリスク管理と我が国での化審法、化管法を主とする化学物質管理に従って、当社は法の遵守を第一義とするとともに当社独自の環境への取り組みを進めている。今後とも様々な製造技術開発などを進めることによって、VOCに代表される化学物質排出量削減を進めていく。

参 考 文 献

- (1) Agenda 21
<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?documentID=52>
- (2) 揮発性有機化合物(VOC)に関する自主行動計画
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g61215b12-1j.pdf>

稲永康隆* 葛本昌樹***
 生沼 学*
 谷村泰宏**

VOC除害装置

VOC Abatement Equipment

Yasutaka Inanaga, Gaku Oinuma, Yasuhiro Tanimura, Masaki Kuzumoto

要 旨

改正大気汚染防止法が2006年4月に施行され、トルエン、キシレンなどの揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compound: VOC) の排出規制が開始された。2010年までに法規制・自主取組を併せて排出量の30%削減が実行される。

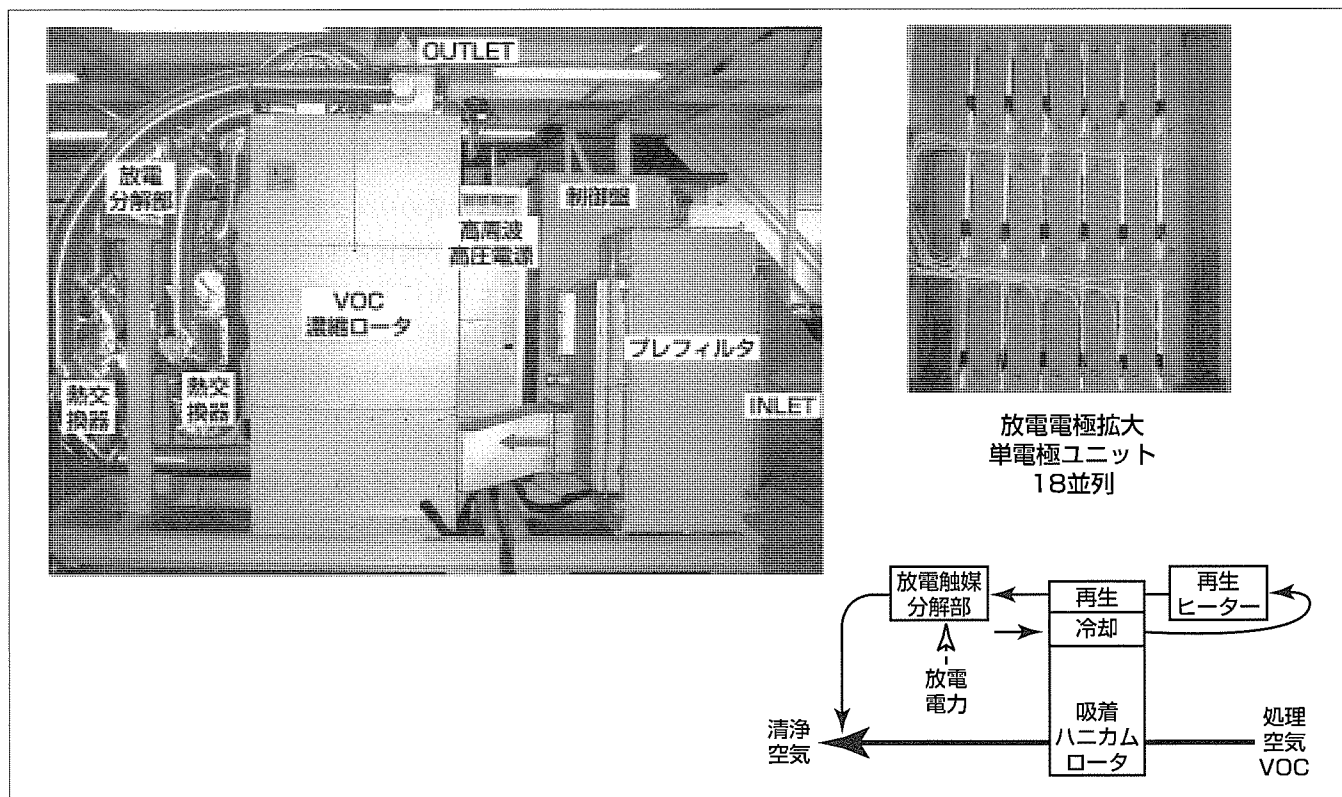
VOC自体は自然性を持つが、塗装や洗浄で排出されるVOCは100ppm前後と自然領域よりもはるかに濃度が低く、大量の助燃用の燃料を必要とするなど、高効率処理を妨げていた。

三菱電機は、50ppm程度の低濃度VOCガスを吸着剤で濃縮したあと、脱着ガスを放電と触媒を併用して高効率に二酸化炭素と水に分解する技術を開発した。放電に用いる誘電体で被覆された高圧電極について200℃以上の高温領域で安定に動作できる電極を設計したことによって、電極の冷却が不要になり、放電によって生じる熱エネルギーを

有効に貴金属触媒に供給することで、高効率分解を実現した。

この技術は塗装ブースなどへの展開を指向しており、今回、工場での実処理流量の1/10相当である処理流量1000m³/hのフィールド試験機を試作した。模擬ガス試験で除害性能を確認したあと、社内の塗装ブース排気に接続してフィールド試験を実施中である。その結果、実ガスに対しても90%以上のVOCのCO₂への分解を確認している(分解効率: 38g/kWh, 触媒温度: 210℃)。本稿では、分解効率を中心とした除害性能の評価とフィールド試験の結果をとおして、開発した装置について述べる。

今後は、フィールド試験の継続によって装置の安定性・信頼性を向上させ、競合方式である燃焼式VOC除害装置に優るイニシャル及びランニングコストを実現し、市場競争力のある装置を目指す。



1/10フィールド実証機

VOC濃縮ロータで低濃度VOCを吸着除去し、清浄な空気として出口から排出する。吸着されたVOCは熱風によって10倍以上の濃度で脱着され、分解部へ送られる。誘電体バリア放電による放電部は放電電力によって200℃以上の高温に保たれており、VOCは触媒の酸化作用で完全に二酸化炭素と水に分解される。放電で発生した熱を有効に利用するため、熱交換器によって濃縮ロータ脱着用のガスと放電前のガスを放電の廃熱を利用して加温している。

1. ま え が き

塗装や洗浄工程を中心として消費されているVOCは浮遊粒子状物質(SPM)や光化学オキシダントの原因物質とされながら、図1に見られるように、その大部分は処理されることなく大気中へ放出されてきた。2006年4月から改正大気汚染防止法が施行され、欧米各国に遅れること十数年ではあるが、ようやくわが国でもVOC排出に規制が導入された。内容は法規制と各種業界の自主的取組のベストミックスがとられ、2010年までに30%の排出量削減目標が設定されている(2000年度ベース)。これを受けて、VOC排出の削減機運が社会的に高まってきている。

当社は、低濃度のVOCを疎水性ゼオライトで吸着濃縮し、誘電体バリア放電と貴金属触媒の併用によるVOC除害技術の開発を行ってきた。この方式は、低濃度のVOCガスを濃縮することと放電処理を組み合わせることで、高効率(低ランニングコスト)で分解・除害できる特長を持つ。本稿では、分解効率を中心とした除害性能の評価とフィールド試験の結果をとおして、開発中の装置について述べる。

2. 吸着濃縮・放電触媒式VOC除去の原理

図2に吸着濃縮・放電触媒分解式VOC除去の原理を示す。

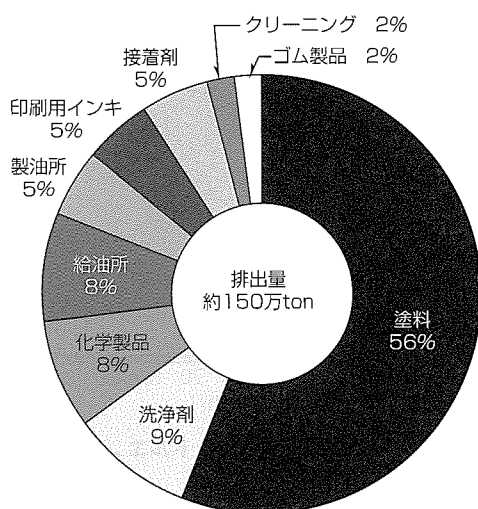


図1. 固定源からのVOC国内排出量統計(2000年度)

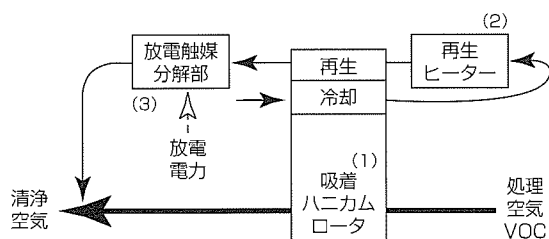


図2. 吸着濃縮・放電触媒分解式VOC除去の原理

- (1) 処理空気を疎水性ゼオライトを吸着剤として使用したハニカムロータを通過させ、VOCを吸着除去する。ハニカムロータは一定速度で回転しており、飽和吸着した部位は(2)に述べる再生工程を経ることで常に吸着可能な部分が吸着を担うようになっている。
- (2) VOCを吸着したロータの一部分を150℃以上の加熱空気中でVOCを脱着して再生する。再生空気量は処理空気の1/15程度に設定し、VOC濃度は入口濃度のおよそ15倍に濃縮され、ロータから排出される。
- (3) 濃縮されたVOCを含むガスを放電場に通過させ、加熱、ラジカル付与、ガス成分の改質を行い、更に200℃以上となった貴金属触媒を通過させることで、触媒の酸化作用によって次式で示すようにCO₂とH₂Oに分解する。

$$O_2 \rightarrow 2O^*$$
 (触媒表面反応)

$$C_7H_8 + 18O^* \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$$
 (トルエンの場合)
 これらの作用によって、VOCを除去する。

3. VOC除害フィールド試験機

3.1 放電触媒分解部の単体性能

放電触媒分解部は、単電極ユニットを複数並列に配置して構成される。ユニット数を増やすことで、より大流量に対応できるスケラブルな設計になっている。それぞれの単電極ユニットは、誘電体バリア放電を行う一枚の高圧電極と2枚の接地電極、さらにその直下流に貴金属が添着されたメタルハニカム触媒から構成される。放電ギャップ長は単ユニットあたりの処理流量と圧力損失、系の絶縁設計を決める放電電圧から勘案して1.5mmに設定した。板状の高圧電極は、高周波高電圧が印加される金属薄膜の両面に誘電体を被覆している。その両側に、放電ギャップだけ離して金属製の接地電極が配置される。高圧電極の部分的な過熱を避けるため、また電極に流入する放電の熱流束を効率よく触媒に伝えるために、接地電極は高圧電極と触媒を一体的に覆うように配置している。また、放電の熱を有効に利用するために、冷却は処理ガス流のみによって行われ、電極外周を断熱材で囲んで外部との断熱を行っている。

図3に単電極ユニットの圧力損失特性を示す。実線は図示したデータ点を基に流速の二乗を仮定してフィッティングした線である。放電ギャップは1.5mmであるが、単ユニットあたり50slmを超えても300Pa程度の圧力損失しかなく、放電式の分解部としては十分低い圧力損失で動作できる。なお、slmは標準状態でのガス流量(L/min at 0℃, 1atm)を示す。

図4に単電極ユニットの電力特性を示す。実線は次式によって規定される誘電体バリア放電における電力値である。

$$P_{calc} = 4fC_dV^* \{V_{op} - (1 + C_0/C_d)V^*\}$$

ただし、 f は駆動周波数で4.5kHz、 C_d は放電時の静電容量、 C_0 は放電ギャップの静電容量、 V^* は放電維持電圧であり

ギャップ長d(mm)を用いて2030d+900(V)で与えた。単電極ユニットあたり100Wを超える電力、電極面積で規格化した電力面密度に換算すると30kW/m²(3W/cm²)を安定に入力できた。電力が上昇すると電極ギャップ内のガスが昇温するため、放電維持電圧一定を仮定した理論的な電力特性よりも低い電力入力となる。バリア放電の特徴として駆動周波数を上げることで低電圧で高入力を得ることができる。流量50slmの条件では10kHzの電源周波数のとき最大200Wまで入力可能であった。

図5に単電極ユニットによるトルエン分解特性を示す。処理したガスは濃縮ロータから排出される濃縮後ガスを模擬するため、MFC(Mass Flow Controller)で調整した空気を液体のトルエン中に通気して発生させた飽和トルエン蒸気と同様に生成した飽和湿潤空気を乾燥空気希釈して、750ppmトルエン、2.1%水分含有の空気にして用いた。トルエン濃度750ppmは濃度50ppmの15倍濃縮に相当する。VOC及び生成物の濃度はFTIRガス分析計(HORIBA FG-120Aセル長10m)によって測定した。処理流量は50slmを設定した。図では時刻0分で放電電力101Wの放電を開始し、時刻35分に至るまでの放電単独での分解ではCOとカルボン酸の発生が見られた。電極温度が150℃に達すると触媒活性が発現しはじめ、CO₂濃度が上昇した。開始後50

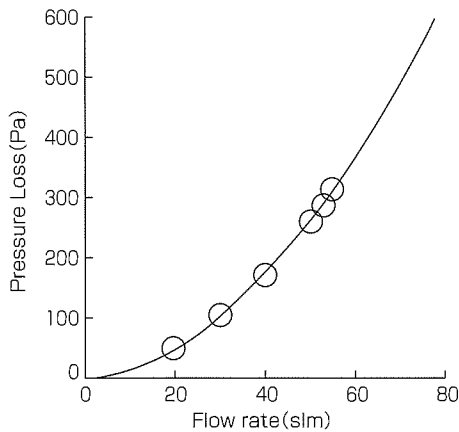


図3. 単電極ユニットの圧力損失特性

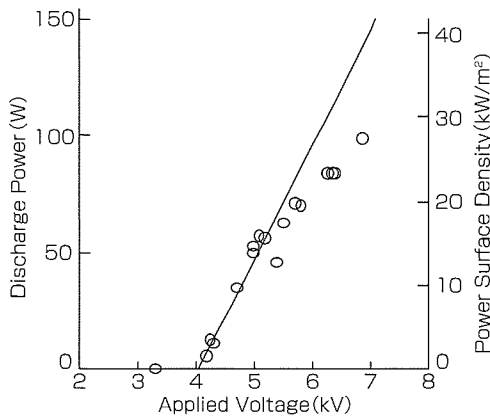


図4. 単電極ユニットの電力特性

分では分解生成物の100%がCO₂であった。トルエンの除去率も放電単独の分解では40%程度であるが、触媒温度の上昇に伴い100%に近づく。熱交換器の使用を前提に放電前ガス温度を100℃とした場合の模擬ガスによる分解効率も放電電力ベースで85g/kWhであった。

3.2 1/10スケールダウン機によるフィールド実証

これらの結果を受けて、工場での実処理流量の1/10相当である処理流量1,000Nm³/hのフィールド試験機を試作した。濃縮ロータには市販のVOC濃縮ロータを用いた。模擬ガス試験で除害性能を確認したあと、社内の塗装ブース排気に接続してフィールド試験を実施中である。

図6にフィールド試験機の処理フローを示す。図2の原理図に加え、塗料や粗塵(そじん)を除去するためのダストフィルタを吸入側に設置し、ロータ再生側には、放電熱を有効に利用するための熱交換器を設置し、再生用のガス及び放電前のガスを放電触媒部の廃熱で加熱している。高周波電源は6kHzで駆動し、単電極ユニット18並列に対して放電を生成する。触媒210℃となる放電電力は1,350W程度であり、その電力値に設定して定常運転している。図7に①吸入ガス、②濃縮ガス、③分解後ガス、④出口ガスの例を示す。各番号は図6中の番号の位置に対応する。吸入ガスのVOC濃度は装置仕様である50ppmより低い、

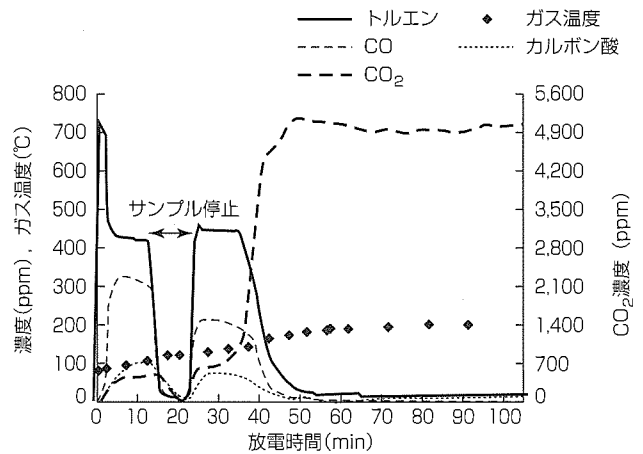


図5. 単電極ユニットによるトルエン分解特性

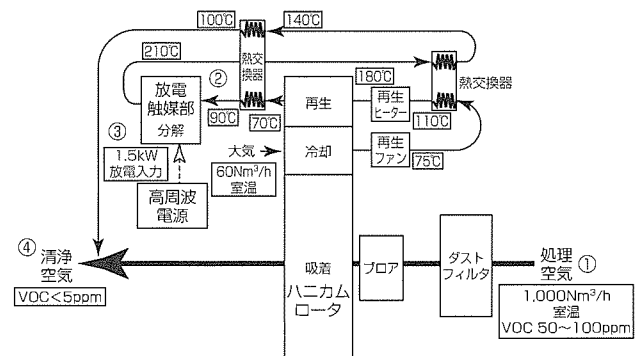


図6. フィールド試験機の処理フロー

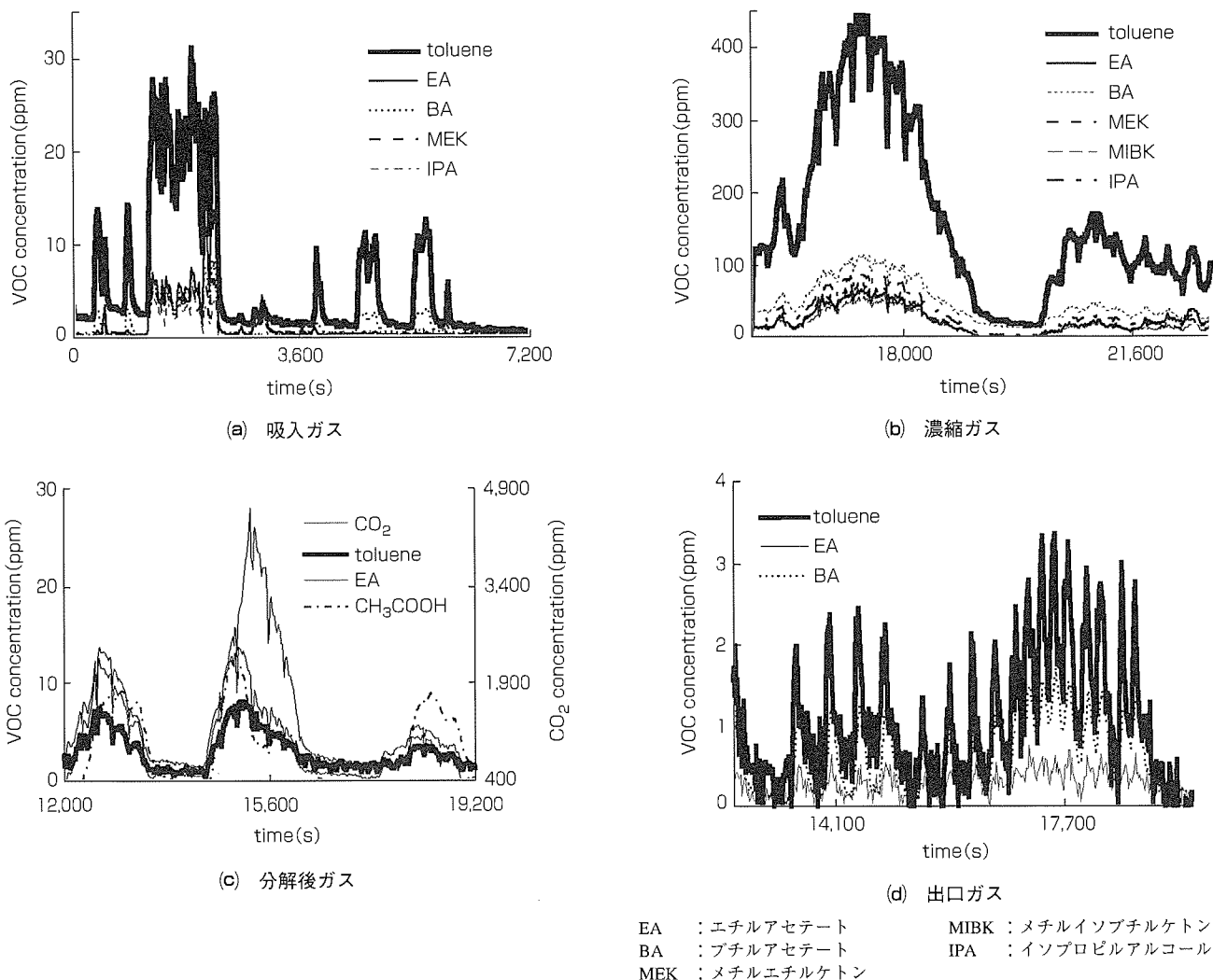


図7. VOC濃度

EA : エチルアセテート MIBK : メチルイソブチルケトン
 BA : ブチルアセテート IPA : イソプロピルアルコール
 MEK : メチルエチルケトン

最大30ppm平均7ppm程度であり、トルエンが主成分であった。入口濃度が低いため再生ファンをインバータで調整し再生側流量を絞り、ロータの濃縮倍率を21倍に設定した。図7(b)に見られるように濃縮VOCの濃度を最大400ppmを超えるまでに引き上げている。表1にまとめたようにトルエン及びアルコールについてはほぼ100%分解できている。酢酸エチルや酢酸ブチルなどのエステル類については触媒での分解温度が高いために現動作条件では完全分解にまで至らず、図7(c)に見られるように分解下流側への漏洩(ろうえい)と酢酸の発生が見られた。エステル類が主成分となる排気に対しては放電電力を増加させ触媒温度を更に上げた動作が必要になる⁽²⁾。この条件では触媒温度210℃で、VOCの90%以上がCO₂に分解され、分解効率38g/kWhが得られた。

装置は現在、1,000時間稼働を目指して運転中である。稼働日数は50日を超え、稼働時間もおよそ400時間に達した。今のところ表1に示した分解率、放電電圧・電流・電力の各値及びその時間波形に変化は見られず、装置稼働上の問題や性能劣化も発生していない。

表1. 各VOCの放電触媒部での分解率

| 稼働時間 | 20時間 | 320時間 |
|--------|-------|-------|
| 触媒温度 | 210℃ | 210℃ |
| トルエン | 98%分解 | 98%分解 |
| 酢酸エチル | 78%分解 | 83%分解 |
| 酢酸ブチル | 96%分解 | 96%分解 |
| MEK | 99%分解 | 99%分解 |
| MIBK | 99%分解 | 99%分解 |
| IPA | 99%分解 | 99%分解 |
| totalC | 97%分解 | 97%分解 |

表2. 想定される製品機の規模と仕様

| | |
|--------|-------------------------|
| 処理風量 | 10,000m ³ /h |
| 処理濃度 | 50 ppm, 15倍濃縮 |
| VOC除去率 | 90%以上 |
| 設備概略寸法 | 4.8×2.4×3.6 (m) |
| 電源容量 | 30kVA + ヒーター25kW |
| 総質量 | 4,200kg |

3.3 製品化検討とその課題

塗装ブースとして標準的な10,000Nm³/hの排気に対してこの方式を適用した場合の装置仕様を表2にまとめる。ここまで述べた結果を踏まえて算出した運転費は212万円/年

であった。ただし、VOC濃度を50ppmとし、電力12円/kWh、稼働時間2,000時間/年、5年に1回の触媒交換を含めて見積もった。

触媒式共通の問題として、処理ガスに触媒被毒物質が含まれていた場合、触媒劣化が生じるため、別途前処理が必要であったり、触媒交換の頻度が高くなり運転費を押し上げることがあげられる。今後、放電による前処理兼用効果^③を検証し被毒物質、特に有機シリコンによる影響を軽減し、被毒物質共存下での低運転費の実現へ結び付けていきたい。

4. む す び

塗装・洗浄工程から排出される低濃度VOCガスを対象に、吸着剤で濃縮したあと、脱着ガスを放電と触媒を併用して高効率に二酸化炭素と水に分解する技術について述べた。

この技術は塗装ブースなどへの展開を指向しており、今

回、工場での実処理流量の1/10相当である処理流量1,000m³/hのフィールド試験機を試作した。模擬ガス試験で除害性能を確認したあと、社内の塗装ブース排気に接続してフィールド試験を実施中である。今後は、フィールド試験の継続によって装置の安定性・信頼性を向上させ、既存の燃焼式VOC除害装置に優るイニシャル及びランニングコストを実現し、市場競争力のある装置を目指す。

参 考 文 献

- (1) 環境省(水・大気環境局大気環境課)：平成17年度VOC(揮発性有機化合物)排出抑制推進セミナー(2003)
- (2) 社産業環境管理協会：有害大気汚染物質対策経済性評価調査第4章，77～86(2002)
- (3) 緒方孝次，ほか：放電式脱臭技術の高濃度臭気への適用研究，東京都下水道局技術調査年報，173～185(2005)

鉛フリーはんだ中のAu含有量が信頼性に与える影響

前田 晃* 小山正人**
前田智佐子*
山田 朗*

Effect of Au Content on the Reliability of Pb-free Solders

Akira Maeda, Chisako Maeda, Akira Yamada, Masato Koyama

要 旨

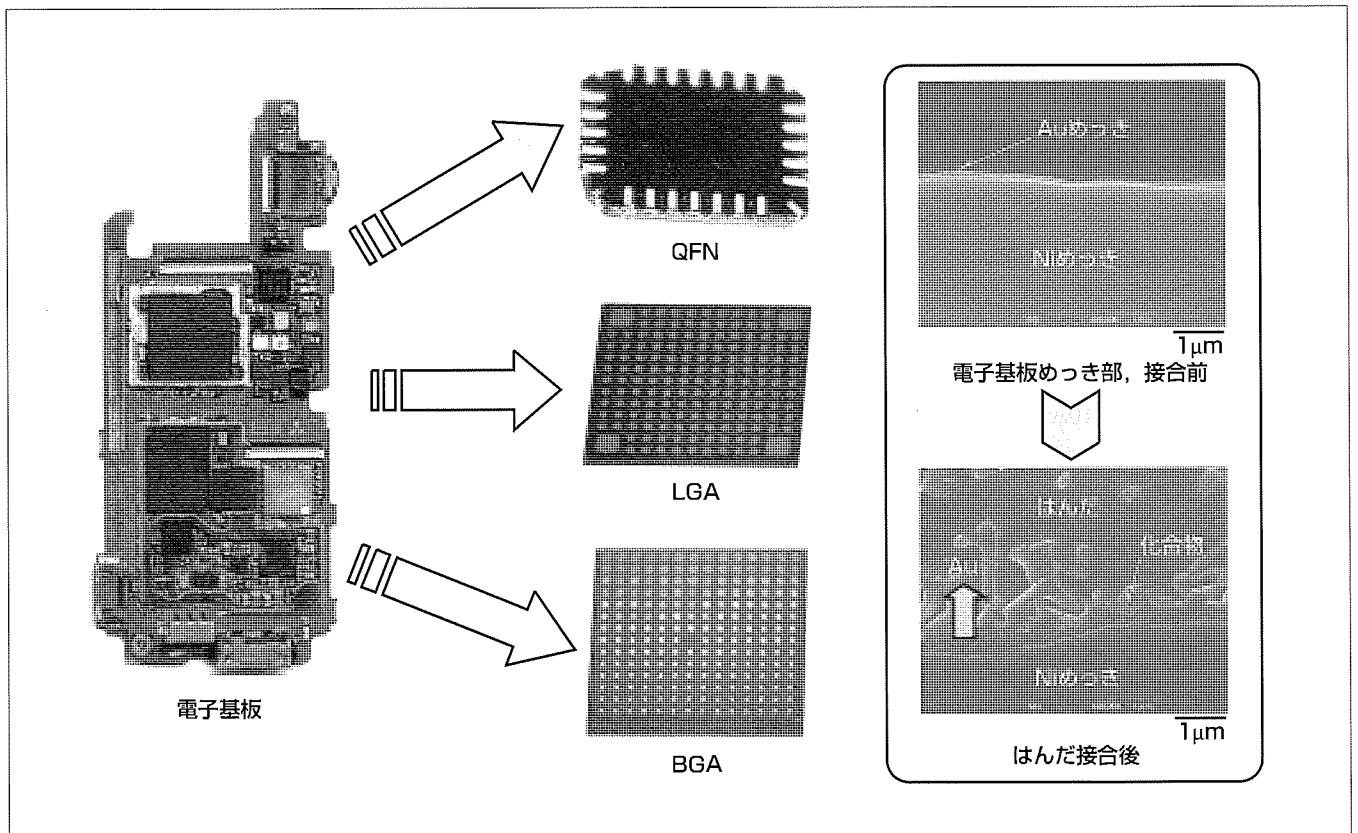
環境負荷低減の観点から鉛フリーはんだが採用されているが、過去に使われてきた鉛含有はんだと比較してまだ詳細挙動が明確でない部分もあり、信頼性確保に注意を要する場合がある。また電子機器の高機能化、小型化、薄型化要求によって、実装部品点数の増大と搭載する電子部品の小型化や、高密度実装のためにQFN(Quad Flat Package Non Lead)やSON(Small Outline Package Non Lead), LGA(Land Grid Array)等のリードがないパッケージや、微細ピッチBGA(Ball Grid Array)等の採用が広がり、はんだ接合部はますます小さくなる状況にある。これに伴い、電子部品や基板電極からはんだ接合部に混入する元素濃度の相対的な増大が、接合面積の狭小化によるはんだ接合部への応力負荷増大とあわせて、接合信頼性の低下を招くことが懸念される。はんだ接合部の脆化(ぜいか)を招く注意

すべき元素の一つとして、電極めっきから混入するAuが挙げられる。特に電子部品の仕様上Auめっきが厚いものもあり、採用には十分検討する必要がある。

上記の課題に対応するために、基板電極や電子部品端子表面のAuめっき厚の管理が肝要であり、接合信頼性上はんだに対して許容できるAu混入量から許容Auめっき厚を算出し、管理を行っている。

本稿では、鉛フリーはんだ中のAu含有量とはんだ接合信頼性との相関に基づいたAu混入量管理による高信頼鉛フリー実装技術について述べる。

今後も、さらなる高密度実装化に対応するため、微小電極部のめっき膜質の管理や信頼性の高い構造部品の採用など、様々な観点から高信頼化に取り組む予定である。



リードレス部品のラインアップとAuの混入例

高密度実装のためにリードレス部品及びBGAの採用が進み、はんだ接合部の信頼性確保が重要な課題になっている。このため、はんだ接合部の高信頼化を目的として、電極表面処理からの元素混入量から許容めっき膜厚を算出し、部品の採用を決定する。

1. ま え が き

三菱電機は、製品の高い信頼性を確保するため、Sn-Ag-Cu系合金であるSn-3.0Ag-0.5Cu(以下すべてwt%)を鉛フリーはんだとして用いている⁽¹⁾。

電子機器の高機能化、小型化と、薄型化要求によって、実装部品点数の増大や搭載される電子部品の小型化に伴うリードがないパッケージ、すなわち、QFN, SON, LGA, BGAなどの採用拡大によって、はんだ接合部はますます小さくなる状況にある。はんだ体積の減少によって、電子部品や基板電極からはんだ内に混入する元素濃度が増大するため、はんだ接合部への応力負荷の増大とあわせて、接合信頼性の低下が懸念される。その中で、注意すべき元素の一つとして、Auが挙げられる。

本稿では、市場ニーズにこたえるためのはんだ接合部高信頼化技術の一例として、鉛フリーはんだ中のAu含有量とはんだ接合信頼性との相関について述べ、また高信頼鉛フリー実装におけるAu混入量管理の重要性について述べる。

2. 評価用Au含有はんだ材

はんだ中へのAu混入量は、基板や部品のAuめっき厚によって変化するが、評価に際し、同一部品仕様でAuめっき厚の異なるものは入手困難であること、最大混入量見極めに必要なAuめっき厚では厚さばらつきの小さいめっきは困難との結論に至った。そこで今回の評価では、Auめっきの厚さを変えたサンプルからAuを混入させるのではなく、あらかじめ所定量のAuを含有させたはんだを試作し、これを用いることとした。はんだ中のAuの混入については拡散が非常に速く、熔融はんだに接触したAuすべてがはんだ内へほぼ一瞬にして拡散することから、混入の場合と同様の接合部が実現できていると考えられる。Au含有量については参考文献⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾をもとに、0.3, 0.7, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10wt%とし、はんだボールとソルダペーストの試作を行った。Auの添加方法は、はんだボールにスパッタで所定厚さのAuを成膜後、フラックスを塗布し、320℃で2分間の再溶融処理を行い、目視でAu膜が混ざったことを確認することで作製した。またペーストは、80Au-20Snはんだ粉末をSn-3.0Ag-0.5Cuはんだ粉末と混ぜ合わせ、フラックスと混練することで作製した。それぞれ均質化処理後にICP(Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer: 誘導結合プラズマ発光分光分析装置)によって組成分析を行い、有効数字 1けたで所定のAuを含有していることを確認した。

3. Au含有量と接合強度

Au含有量と接合強度との相関については、はんだにせ

ん断方向に高速で力を加えて破断させる高速シェアテストと、引張方向に高速で力を加えて破断させる高速プルテストによって評価を行った。φ0.76mmの上記はんだボールをフラックスを塗布したテスト基板の所定パターン上に搭載し、所定条件(プリヒート:175℃×50秒→メインヒート:220℃以上が3.0秒, ピーク温度250℃)で接合後にフラックス洗浄を行い、接合開始後2時間以内に試験を行った。シェアテストはDage社Series4000HSを用いた。テスト条件は、速度を0.1m/秒、ツール高さを基板表面から50μmとした。なおCu配線テスト基板の厚さは1.0mmとし、表面めっき処理は無電解Ni-P/Auとした。

図1, 図2に、それぞれSn-3.0Ag-0.5CuはんだへのAu添加量とはんだボール高速シェア強度, はんだボール高速プル強度との関係を示す。図1から、高速シェアでは3wt%まではAuの添加に伴い強度が向上するが、これをピークとして6wt%ではAu無添加同等まで強度が低下したあと、7wt%からAu添加量の増加に伴い、著しく強度が低下していくことがわかる。また高速プルでは、1wt%まではAuの添加に伴い強度が向上するが、1wt%以上6wt%まではAuの添加量増大に伴い、なだらかに強度が低下し、8wt%以上のAu添加で大きく強度が低下することがわかる。これら高速シェア及び高速プルテストで破壊し

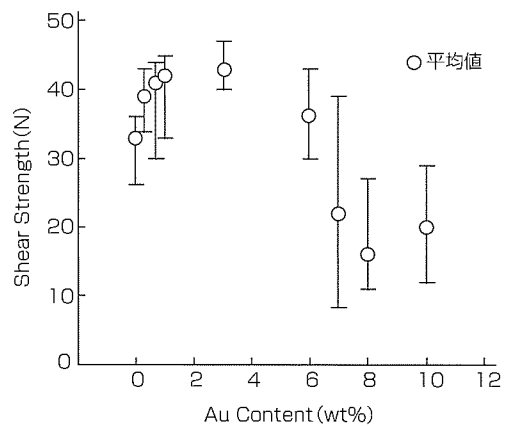


図1. Au含有量と高速シェア強度との関係

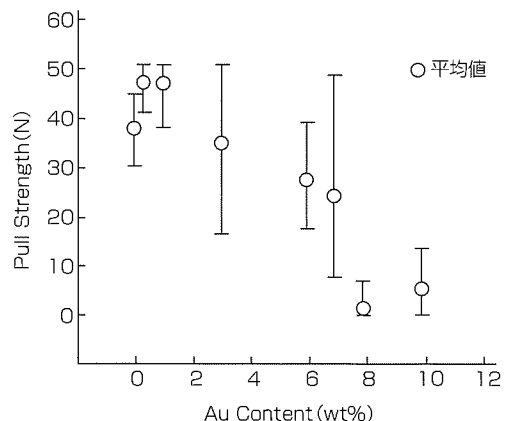


図2. Au含有量と高速プル強度との関係

たモードを調べると、高速シエアではAu添加量が7 wt%以下で、はんだ内又はNiめっき最表面に生成するP 富裕層での破壊面積が25%以下であり、8 wt%以上で、100%はんだ割れであった。また高速プルテストでは、7 wt%以下で、はんだ内又はP 富裕層での破壊面積が75%以上であり、8 wt%以上で、100%はんだ割れであった。P 富裕層での破壊面積が大きいほど接合強度が低い傾向を示すことがわかっており、破壊モードとしてはP 富裕層での破壊面積が小さい方が望ましい⁽⁵⁾。シエア強度からは、Auの混入量を6 wt%以下に管理することで、接合強度を保てることわかる。一方プル強度からは、急激な強度低下が生じない6 wt%以下にAu混入量を管理することが不可欠である。以上のことから、シエア強度が高く、プル強度低下の少ない、Au含有量1~6 wt%の範囲で製品仕様と、要求品質とに応じた設計を行っていく必要がある。

4. Au含有量と金属組織

図3に、Au含有量とはんだボールの金属組織との関係について調査を行った結果を示す。この結果から、はんだ接合部内には多数の金属間化合物相(図中の白い部分)が存在し、それらがAuの含有量増大に伴い増加すること、8 wt%以上のAu添加で粗大で針状の金属間化合物相(図中のA)が析出することなどがわかる。これら金属間化合物相を特性X線による分析結果から同定すると、前者はAg₃Sn, AuSn₄, 及びCu₆Sn₅とからなり、後者はAuSn₄と推定された。Ag₃SnとCu₆Sn₅相は、AgとCu量が一定であるため、ほとんど変化がないと考えられる。これらから、Auの混入量が増大すると、AuSn₄相の析出量が増大し、Snの粒界滑りが生じにくくなり、はんだ接合部の機械的強度が向上するとともに、延性が低下すると考えられる。また、金属間化合物相が硬くて脆(もろ)いことから、粗大

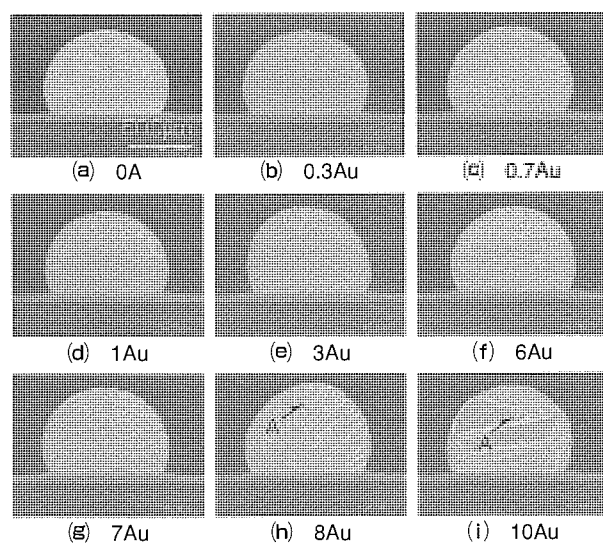


図3. Au含有量とはんだ接合部金属組織

AuSn₄相内又はその近傍で割れが生じやすくなることが推測される。実際、粗大AuSn₄相が析出する8 wt%以上のAu添加で、シエアでもプルでも大きく強度が低下しており、組織変化とよく一致している。したがって、はんだ中に粗大針状AuSn₄相が析出しない、6 wt%以下にAu混入量を管理することで、高信頼な鉛フリー実装が実現可能である。

5. Au含有量と耐熱衝撃性

上記はんだボールを1.5mmピッチφ0.63mm電極：13pin×13pin=169pinのDaisyパターンを持つLGA(電解Ni/Auめっき)に接合することで、0.3~10wt%のAuを含有したBGAを試作した。また1608, 2125, 3216, 6432チップ抵抗を、テスト基板にリフローはんだ付で実装した。ペースト印刷マスク厚は0.15mmとし、リフロー雰囲気は窒素で酸素濃度を500ppmに制御した。なおテスト基板の厚さは1.6mmとし、表面処理は無電解Ni-P/Auめっきとした。気相耐熱衝撃条件は1サイクルあたり-40⇔125℃各30分とし、2,000サイクルまで導体抵抗の変化を連続的にモニタし、耐熱衝撃性の評価を行った。その結果、全サンプルとも抵抗上昇が見られず、Au含有量が10wt%まで耐熱衝撃性の点では、問題がないことが確認された。

6. Au含有量と曲げ疲労特性

上記BGAをテスト基板に実装し、四点曲げによる疲労試験を行った。試験条件は、部品搭載面を凸とし、支持スパンを80mm、押し込みスパンを40mm、押し込み周波数を2Hz、押し込み量2.0mm, 1.5mm, 1.0mmとし、導体抵抗が10Ω上昇するまでのサイクル数を以って優劣の評価を行った。図4に、その結果を示す。押し込み量1.0mmではAu含有量に対する破断サイクル数に有意差は見られないが、1.5mm以上でAuの含有量の増加に伴い耐曲げ疲労性が低下し、押し込み量が増大するとこの傾向が一層顕著に

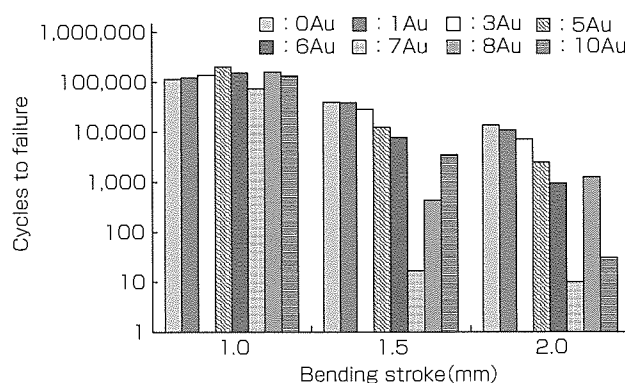


図4. Au含有量と曲げ疲労性との関係

なることがわかる。特に7wt%以上のAu添加で耐曲げ疲労性が大きく低下するため、注意を要する。この原因としては、はんだ接合部内に濃度勾配が生じ、高Au含有部に粗大針状AuSn₄相が析出したためと考えられる。このことから、Au混入量を6wt%以下に管理することで高信頼鉛フリー実装が可能となるが、はんだ接合部にかかる応力負荷が大きい場合は、より低いAu含有量に管理することが必要となる。

7. Au含有量と耐落下衝撃性

耐落下衝撃性は、上記曲げ疲労試験を行ったサンプルと同一仕様で行った。装置は衝撃試験機(Lansmont社製) Model-23を用い、治具にBGAを下向きに80mmスパン、両端固定で取り付け、落下高さは、75mm又は85mmで行った。得られた結果を図5に示す。落下高さが75mmの場合には、Au含有量5wt%までは同等の落下サイクル数であり、8wt%でサイクル数の低下が生じた。また、より条件の厳しい85mmの場合はAuの含有量増大に伴い緩やかに低下した。破壊モードは、すべてP富裕層破壊75%以上であり、これらは高速プル破壊での挙動とよく似ていた。これらのことから、はんだ接合部にかかる応力負荷が75mm相当以下であれば、Au含有量を6wt%以下に管理することで信頼性を保てるが、高速で大きい応力負荷がはんだ接合部にかかる場合は、要求品質に合わせた混入量設計を行うことで、高信頼性が実現できる。

8. むすび

本稿では、高信頼鉛フリー実装技術の一例として、鉛フリーはんだ中のAuの含有量とはんだ接合信頼性との相関とAuの混入量管理の重要性について述べた。必要とされる強度及び信頼性は、製品仕様によって要求レベルが異なるが、各強度及び疲労特性、耐衝撃性の面で、概略6

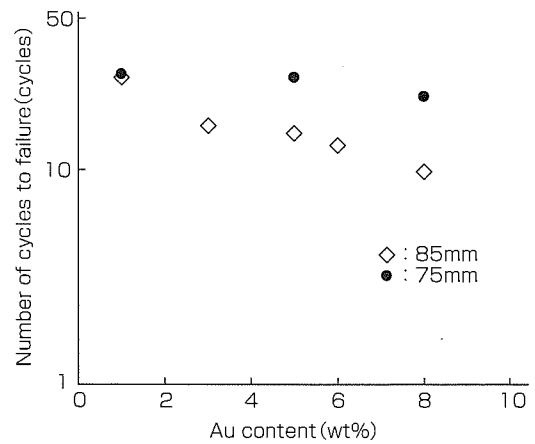


図5. Au含有量と耐落下衝撃性との関係

wt%以下のAu含有量とすることが有効であり、より高い信頼性が必要とされる場合には、より厳しいAu含有量の管理が必要であると思われる。今後も、更なる多機能・高機能化要求に対応できる高信頼性はんだ接合技術の開発を実施していく予定である。

参考文献

- (1) 村上光平, ほか: 鉛フリーはんだ付への取り組み, 三菱電機技報, **79**, No.5, 337~340 (2005)
- (2) 竹本 正, ほか: 高信頼マイクロソルダリング技術, 日刊工業新聞社, 315 (1991)
- (3) 鈴木幸雄, ほか: BGAパッケージ用TABテープのはんだボール接合信頼性, 日立電線, **20**, 63~37 (2001)
- (4) 平森智幸, ほか: Sn-Ag系鉛フリーはんだボールのNi-P/AuめっきCSP接合部強度評価Mate2004, 165~170 (2004)
- (5) 前田 晃, ほか: 移動通信機器用はんだ接合技術, 三菱電機技報, **78**, No.11, 751~756 (2004)



特許と新案 * * *

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

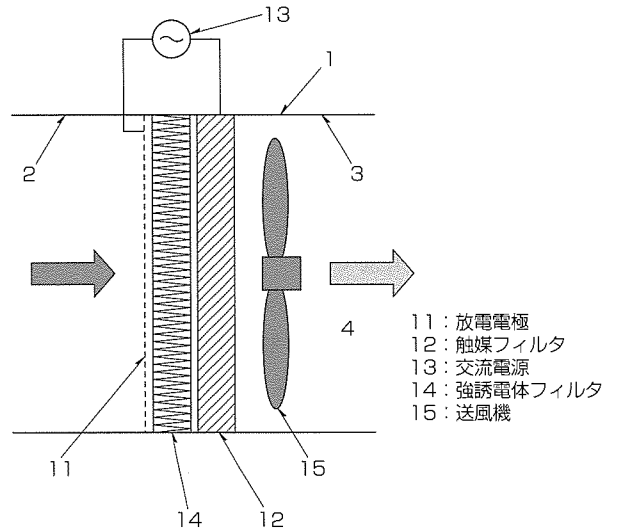
空気浄化装置 特許第3632579号(特開2002-095996)

発明者 守川 彰, 福田正彦, 古橋拓也

この発明は、空気や排ガス中から塵埃(じんあい)、臭気・有害ガス成分、浮遊微生物などを除去する空気浄化装置に関するものである。

臭気・有害ガス成分のほか塵埃やダストなどを含んだ空気を浄化しようとする時、塵埃やダストを除くために風上側に除塵用フィルタが必要であり、コンパクトに構成することが困難であるという問題点があった。

この発明では、風路中に配設された導電性を持つ触媒フィルタと、この触媒フィルタの風上側に対向して設けられ、触媒フィルタとの間に高電圧が印加された放電電極と、この放電電極と触媒フィルタとの間に配置され、繊維状の強誘電体フィルタを設けることで、コンパクトで、省メンテナンスの空気浄化装置を構成できる。



排水の高度処理装置及び高度処理方法 特許第3769093号(特開平10-272479)

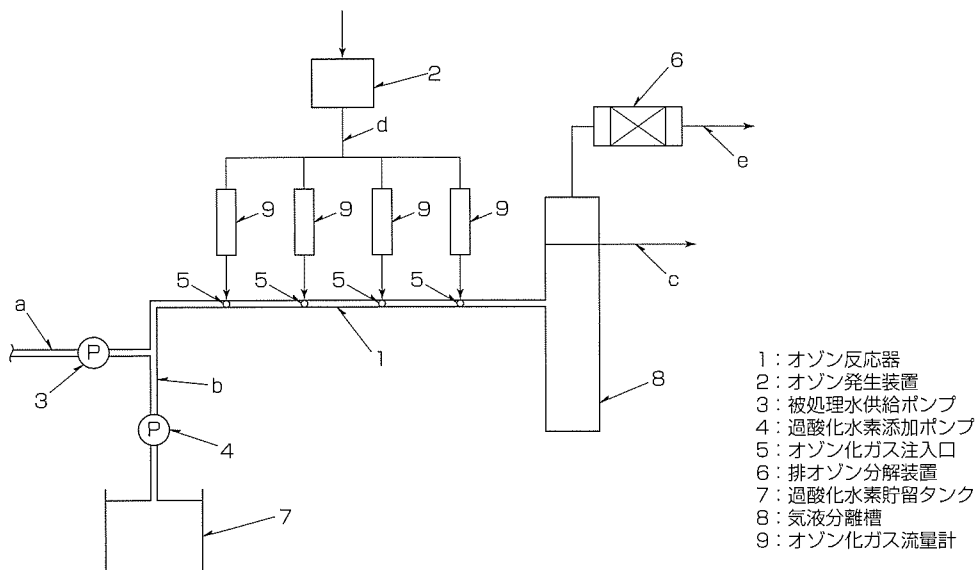
発明者 安永 望, 古川誠司, 河相好孝, 廣辻淳二, 中山繁樹

この発明は、排水に少量の過酸化水素をあらかじめ添加してオゾン処理する過酸化水素併用オゾン水処理方法及び装置に関するものである。

過酸化水素併用オゾン水処理方法は、ラジカル反応で消費されるオゾン量が多いため汚濁有機物の分解除去効率が低く、実用性に乏しいという問題があった。

この発明では、あらかじめ過酸化水素が添加された排水を配管内に通す間に、オゾン化ガスを配管内に少なくとも2か所以上で分割注入することで、汚濁有機物の分解除去効率を高めることができる。

なおこの特許は、(財)エンジニアリング振興協会との共有特許である。



- 1: オゾン反応器
- 2: オゾン発生装置
- 3: 被処理水供給ポンプ
- 4: 過酸化水素添加ポンプ
- 5: オゾン化ガス注入口
- 6: 排オゾン分解装置
- 7: 過酸化水素貯留タンク
- 8: 気液分離槽
- 9: オゾン化ガス流量計



特許と新案***

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

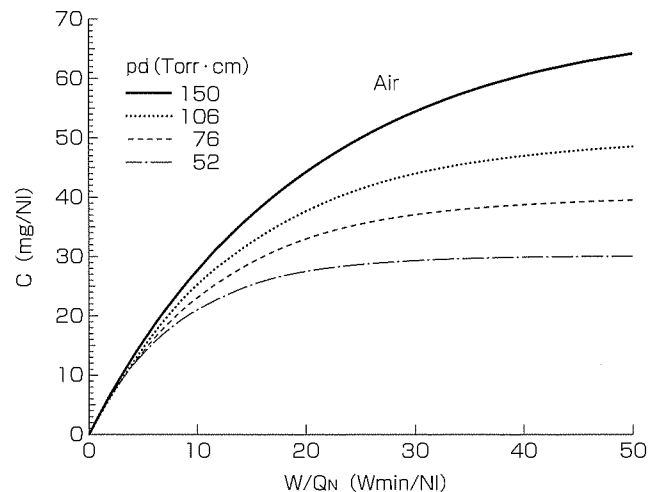
オゾン発生装置 特許第3592700号(特開2004-2185)

発明者 葛本昌樹, 田畑要一郎, 八木重典, 吉沢憲治, 向井正啓, 越智順二, 小沢建樹

この発明は、空気を原料とした無声放電式オゾン発生装置において、高ガス圧力・短ギャップ動作によって高効率に高濃度オゾン発生を実現するものである。

放電空間の電極間隔(ギャップ長)を短くすると、ガスの冷却効果が飛躍的に改善されて、高い電力密度で動作でき、発生装置の小型化に有効である。しかし、ギャップ長を短くすると放電空間の電界強度が高くなり、空気中に含まれる窒素ガスから窒素酸化物が大量に発生する。窒素酸化物はオゾンを分解して、オゾン発生効率を低下させるため、空気を原料とする場合は、短ギャップ技術は適用できなかった。

この発明においては、①短ギャップ化と同時に②高ガス圧力で動作させることによって、放電空間の電界強度を適度な値に抑え、窒素酸化物の発生量を大幅に低減することができる。この結果、空気原料式でも、高ガス圧力・短ギャップ動作によって、小型の発生器から高効率に高濃度のオゾンを発生することができる。



〈本号記載の商標について〉

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.82 No.9 特集「ビル設備 — 安全・安心・省エネルギーを考える —」

| | |
|--|--|
| 三菱電機技報編集委員 委員長 杉山 武史 委員 小林 智里 増田 正幸 滝田 英徳 岩崎 慎司 糸田 敬 世木 逸雄 江頭 誠 河合 清司 種子島一史 安井 公治 逸見 和久 光永 一正 河内 浩明 橋 高大造 事務局 園田 克己 本号取りまとめ委員 葛本 昌樹 | 三菱電機技報 82巻 8号 2008年 8月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 2008年 8月25日 発行 編集人 杉山 武史 発行人 園田 克己 発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&サービス事業部 〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号 日本地所第一ビル 電話 (03)3288局1847 印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス 発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03)3233局0641 定 価 1部945円(本体900円) 送料別 |
| 三菱電機技報 URL 三菱電機技報に関するお問い合わせ先 | URL http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/giho/ URL http://www.mitsubishielectric.co.jp/support/corporate/giho.html |
| 英文季刊誌「MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE」がご覧いただけます | URL http://global.mitsubishielectric.com/company/rd/advance/ |

太陽光発電市場は、地球温暖化防止に向けたCO₂排出削減など環境保全意識の高まりを背景に、世界規模で拡大しており、三菱電機も、2007年10月に発表した“環境ビジョン2021”の中で、太陽光発電事業の積極的な推進、社内施設への積極的な導入を打ち出しています。

太陽光発電システムは、太陽電池モジュールで発電した直流の電気をパワーコンディショナで交流に変換して、家庭内や施設内に電気を供給するもので、太陽電池モジュールの出力とパワーコンディショナの電力変換効率によって、システムとしての発電量が決まります。太陽光発電システムの一層の普及拡大には、太陽電池モジュールとパワーコンディショナ両方の性能向上、高効率化が必要であり、当社では、住宅用の多結晶シリコン太陽電池タイプで業界最大クラス^(注1)の大出力太陽電池モジュール“PV-MX185G”と業界最高の変換効率^(注2)のパワーコンディショナ“PV-PN40G”を開発、高いシステム出力と高信頼性の太陽光発電システムの提供によって、太陽光発電の普及拡大に努めて参ります。

大出力太陽電池モジュール「MXシリーズ」

高変換効率の156mm角の多結晶シリコン太陽電池セルの採用で業界トップクラスの出力185Wを実現。システムを従来よりも少ないモジュール枚数で構成でき、架台類や設置工数の削減が可能になりました。また、大形化による太陽電池モジュールの耐荷重強度の低下を「プロテクションバー」の採用によって、従来品以上の強度を確保し、これまで設置できなかった垂直積雪量1.5mの区域でも設置が可能となりました。さらに、標準モジュール(185W)のほかに、ハーフモジュール、台形モジュール(共に92.5W)をラインアップし、その組み合わせによって、同じ屋根で従来品よりも多くの太陽電池容量が設置可能となりました。

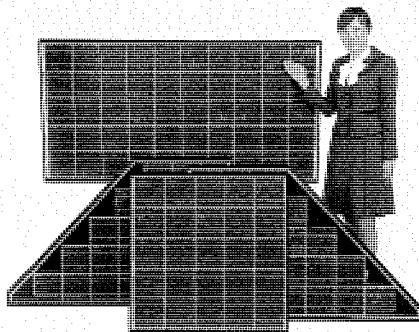


図1. 大出力太陽電池モジュール「MXシリーズ」

住 所：〒508-8666 岐阜県中津川市駒場町1-3

会社名：三菱電機株式会社 中津川製作所 お問い合わせ先：営業部 太陽光発電システム営業課 TEL：0120-314-380

高変換効率の階調制御パワーコンディショナ

業界で初めて、パワーコンディショナに「階調制御インバータ方式」^(注3)を採用し、製品の心臓部となるパワーモジュールに新開発の“階調制御用MOSFETモジュール”を搭載しました。これによって、PV-PN40Gでは電力変換時の損失を従来比44%低減し^(注4)、業界最高の電力変換効率97.5%を達成しました。外観は、ソフトな感覚を醸し出す樹脂製フロントパネルの採用と、使用頻度の少ない操作ボタンの底面配置などで、室内インテリアにマッチした高級感あるデザインに仕上げました。電力変換時の損失によって発生する熱が今回大幅に低減したことで、放熱用の空気流入口が不要となり、密閉度が高まりました。これによって、耐湿能が大幅に向上し、従来設置できなかった脱衣室・洗面所への設置が可能^(注5)となりました。

サポート体制

販売店の販売支援として、三菱太陽光発電システム販売支援システム“MPSシステム”を開発し、提供を行っています。設置する屋根の図面や簡単な外形寸法を入力することで、システム設計、屋根への太陽電池モジュール配置、部材選定から、機器の見積もり、設計したシステム発電量のシミュレーションの作成が可能で、さらに、設置したシステムの10年間の保証申請を行うことができます。高性能なシステムの開発・製造と共に、設計・提案活動の支援、ユーザー保証の充実によって、永く安心してお使いいただけるシステムの提供を行って参ります。

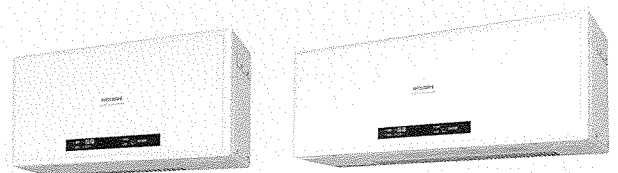
(注1) 国内住宅用太陽電池モジュール(多結晶シリコンタイプ、量産レベル)1枚あたりの公称最大出力において

(注2) 2008年6月20日現在。国内住宅用太陽光発電システム向けパワーコンディショナの量産機種において

(注3) 電圧の異なる複数のインバータを直列に接続し、出力を組み合わせることで擬似正弦波の電圧を生成する方式

(注4) PV-PN40G(損失2.5%)と当社従来品PV-PN33G(損失4.5%)との比較

(注5) 浴室ドアの真上等、製品に湯気があたる場所への設置は除く



三菱電機
住宅用太陽光発電システム向け
パワーコンディショナ



図2. 住宅用太陽光発電システム向けパワーコンディショナ