



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



# 三菱電機技報

12

2017

Vol.91 No.12

## 持続可能な社会に貢献する環境技術



## 目 次

### 特集 「持続可能な社会に貢献する環境技術」

先行き不透明な中、大局を見据えた行動を……	<b>卷頭言</b>	1
松野泰也		
三菱電機の環境経営と国連の持続的開発目標……	<b>卷頭論文</b>	2
櫻井光一		
電磁開閉器のカドミウムフリー化……………	7	
稲川克輝・竹本智彦・河合秀泰・牧野智史		
誘導電動機の高効率化技術……………	11	
米谷晴之・阿知和典弘・川崎啓宇		
省電力化を推進するSiC-MOSFET技術……………	15	
友久伸吾・田中梨菜・香川泰宏・日野史郎・川原淳太朗		
SiCデバイスを活用したパワーエレクトロニクス機器の省エネルギー技術……………	19	
大井健史		
欧州市場向け暖房給湯システム用省エネルギー対策デバイス……………	23	
飯島 茂・執行和浩・野田清治・南迫博和・鈴木一隆		
超高濃度オゾン製造システム……………	27	
松浦洋航・和田 昇		
自己循環リサイクルでのプラスチック改質技術……………	31	
松尾雄一・栗原浩二・筒井一就・大石 隆・鈴木章元		
IoT技術を活用した省エネルギー工場の実現……………	35	
北田亮平		
環境情報統合管理システム“ECOMelco”……………	40	
豊国明子・杜澤優一・霜田圭介		
パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーに貢献するパワー半導体デバイスの進展……………	44	
多留谷政良		
ハイブリッド蓄電システム……………	48	
高口雄介・高坂一郎・清水恒夫		
業務用空調機の製造現場での冷媒規制への取組み……………	52	
都築祐一・石橋章佳・今野憲昭・田黒孝二		

### 特許と新案

「再生ポリオレフィン系樹脂組成物」	
「半導体装置、半導体装置の製造方法」	56
「オゾン濃縮装置」	57
三菱電機技報91巻総目次	58

### Environmental Technologies for Sustainable Society

While Uncertain About the Future, Take Behaviors from a Broad Perspective  
Yasunari Matsuno

Mitsubishi Electric's Environmental Management and UN's Sustainable Development Goals  
Koichi Sakurai

#### Cadmium Free of Magnetic Contactor

Takashi Inaguchi, Katsuki Hotta, Tomohiko Takemoto, Hideyasu Kawai, Satoshi Makino

#### Technologies of High Efficiency for Induction Motors

Haruyuki Kometani, Norihiro Achiwa, Keiu Kawasaki

#### SiC-MOSFET Technologies for Promoting Power Saving

Shingo Tomohisa, Rina Tanaka, Yasuhiro Kagawa, Shiro Hino, Kotaro Kawahara

#### Energy Saving Technologies of Power Electronics Applications Using SiC Devices

Takeshi Oi

#### Energy Saving Device for Air To Water System in European Market

Shigeru Iijima, Kazuhiro Shigyo, Seiji Noda, Hirokazu Minamisako, Kazutaka Suzuki

#### Ultra-high Density Ozone Generation System

Yoko Matsuura, Noboru Wada

#### Material Modification Technologies for Plastics in Closed-loop Recycle System

Yuichi Matsuo, Koji Kurihara, Kazunari Tsutsui, Takashi Oishi, Akimoto Suzuki

#### Realization of Factory Energy Conservation Based on IoT

Ryohei Kitada

#### Environmental Information Management System "ECOMelco"

Akiko Toyokuni, Yuichi Tozawa, Keisuke Shimoda

#### Recent Advances in Power Semiconductor Device for Energy-saving Power Electronics

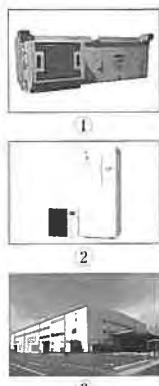
Masayoshi Tarutani

#### Hybrid Battery Energy Storage System

Yusuke Takaguchi, Ichiro Kosaka, Tsuneo Shimizu

#### Approach to Refrigerant Regulation at Packaged Air Conditioner Manufacturing Site

Yuichi Tsuzuki, Akiyoshi Ishibashi, Noriaki Imano, Kouji Taguro



### 表紙：持続可能な社会に貢献する環境技術

三菱電機グループは、2015～2017年度を計画年とする第8次環境計画を推進しており、この特集号では、低炭素社会へ向けての省エネルギー技術や、循環型社会へ向けてのリサイクル技術を用いた持続可能な社会に貢献する製品やシステムを紹介している。

①は低消費電力を実現するSiCパワーモジュールでモータ損失と空気ブレーキ損失を低減することによってシステム全体の省エネルギーを実現する鉄道車両用インバータ装置、②はスケール補足デバイスに内蔵した金属螺旋(らせん)繊維を用いてその表面に付着したカルシウムを結晶成長させ水中のカルシウムを除去する欧州ヒートポンプ式給湯システム、③は家電リサイクルにおける大規模・高純度プラスチックリサイクル事業を行うリサイクル工場である。

## 巻/頭/言

**先行き不透明な中、大局を見据えた行動を**

While Uncertain About the Future, Take Behaviors from  
a Broad Perspective

松野泰也  
*Yasunari Matsuno*



2017年6月1日に、米国のトランプ大統領は、ホワイトハウスで演説し、地球温暖化対策の国際的な枠組み“パリ協定”から離脱すると表明した。ある程度予想されていたことであったが、生放送でのテレビ映像を見て大きな失望を禁じえなかった。

地球温暖化に関する自然科学的根拠の最新の知見が取りまとめられ、2013年から2014年にかけて公表された、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5)、そしてそれを受けた形で、2015年12月に採択された気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定であるパリ協定などの一連の動きは、将来にわたって人類が生存できた場合に、“歴史的な転換点”になり得たはずであった。

されど、米国が国としてのパリ協定から離脱するのを表明してもなお、カリフォルニア州をはじめとする米国内の自治体や企業が独自に気候変動対策に取り組む動きが出てきていることに希望の灯を感じている。先行き不透明な中、大局を見据えた行動を取ることが重要である。

今後、日本(及び世界)が目指す持続可能な社会の実現のためには、低炭素及び循環型の社会の構築が2大柱であると言えよう。この特集号では、低炭素・循環型社会を中心とした、持続可能な社会に貢献する三菱電機の環境技術が紹介されている。

釈迦(しゃか)に説法と思えるが、低炭素社会のためには、たゆまぬ省エネルギー技術の開発と普及、再生可能エネルギーの利用及び脱温室効果ガス排出への転換が不可欠である。私は、20年以上にわたり、ライフサイクルアセスメント(LCA)をはじめとするシステム思考の研究に従事してきた。製造段階で環境負荷の排出が相対的に大きい製品であっても、使用・廃棄段階も含めたライフサイクル全体では環境負荷を著しく低減させるものが多くある。また、パワーデバイスでは、SiC(シリコンカーバイド)による高性能化やそれに伴う小型化によってエネルギー効率の向上を可能にし、自動車、家電、FA機器等に組み込まれるこ

とで省エネルギーと温室効果ガス排出低減に貢献している。近年では、IoT(もののインターネット)技術が注目されている。将来、IoTがもたらすビッグデータによって、非常に精緻で正確な天気予報が可能になった場合、太陽光をはじめとする再生可能エネルギーの利用がどこまで効率よくできるようになるのか、そしてその効果をどう評価すべきか、システム思考を用いた評価手法の構築にも挑戦がありそうである。

循環型社会に関しては、東京2020オリンピック・パラリンピックでは、入賞メダルの原材料となる金・銀・銅を、携帯電話をはじめとする小型家電等から抽出されるリサイクル金属によって調達する国民参画型のプロジェクトが実施されるなど、機運が盛り上がっている。しかし、貴金属、レアメタルだけでなく、鋼材、非鉄金属そしてプラスチックと全ての素材の循環が必要なことは言うまでもない。いまや、カドミウムは、ほとんどの電気・電子機器に使用されなくなっている。しかしながら、脱カドミウム化をシステム思考に基づいて検討している人は少ないようだ。カドミウムは亜鉛鉱石に含まれていて、亜鉛の副産物である。亜鉛の主用途は、家電製品にも使用される亜鉛めっき鋼板である。要は、鋼材は、環境中に放置されればさびやすいため、亜鉛めっきすることで耐食性を持たせている。亜鉛めっき鋼板の需要に応じ、亜鉛鉱石を用いて亜鉛を生産する限り、必然的にカドミウムが生成される。現時点では、日本はカドミウムのほとんどをニカド電池等に用いて輸出しているが、世界の全ての国がカドミウム(製品)を使用しなくなると、カドミウムがあふれてくることは必至である。それでは、どのようにしてカドミウムのサイクルを閉じていくのか。気候変動対策と同じく資源循環についてもシステム思考に基づき、大局を見据えた対策を講じることが必要である。

持続可能な社会の構築に向けて、三菱電機には、今後も大局を見据えながら活発な議論をしていただけることを願う。

# 巻頭論文

## 三菱電機の環境経営と 国連の持続的開発目標



櫻井光一\*

Mitsubishi Electric's Environmental Management and UN's Sustainable Development Goals  
Koichi Sakurai

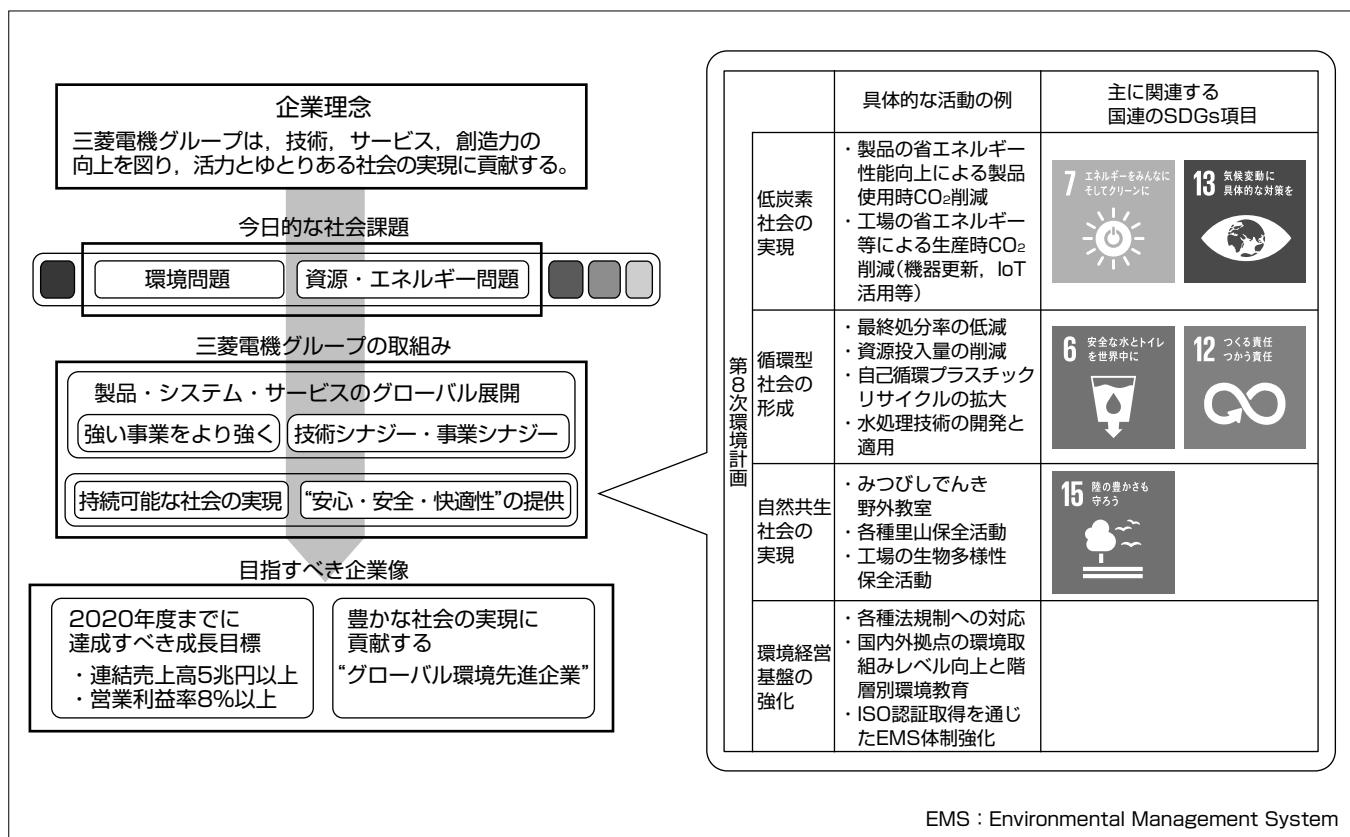
### 要旨

三菱電機は2021年に創業100年を迎える。“持続可能な社会”と“安心・安全・快適性”的両立は今日的な社会課題であり、当社は、それらが両立する豊かな社会の実現に貢献する“グローバル環境先進企業”を目指している(要旨の図左)。のために、世界各国の事情を考慮しながら長期的な視点で、製品・システムの省エネルギー化と事業拠点を始めとした環境負荷低減に取り組んでいる。

現在遂行中の“第8次環境計画”は、これらの社会貢献を目指した具体的な取組みであり、低炭素社会の実現、循環型社会の形成、自然共生社会の実現、環境経営基盤の強化の4つの柱で構成している(要旨の図右)。この計画は、生産時温室効果ガス排出量や廃棄物最終処分率の削減等、順調に進捗中であり、国連の持続的開発目標(Sustainable

Development Goals : SDGs)とも方向性を共有している。生産現場での地道な環境活動に加えて、近年注目されている環境情報公開にも積極的に取り組んだ結果、社外から高評価を受けた。

この特集号の論文を含め、“グローバル環境先進企業”を目指した取組みは、当社が2020年度までに達成すべき成長目標として掲げる経営数値の実現にもつながっていくと考えている。現在、次期環境ビジョンを策定中であるが、こうした地球環境に関する具体的な取組みを、現状に満足せずに常に深化・発展させることで、“社会”“顧客”“従業員”“株主”というステークホルダーの期待に応え、社会に貢献していく。



### 当社の目指すべき企業像“グローバル環境先進企業”及び第8次環境計画と国連のSDGsの関係

環境分野を始め世界各国で先進的な技術を駆使し、“持続可能な社会”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に貢献する企業を“グローバル環境先進企業”と定義し、目指すべき企業像とした。現在遂行中の第8次環境計画はその具体的な取組みであり、その4つの柱である各種環境負荷低減(低炭素化、資源循環、自然共生)と環境経営基盤強化の具体的な活動の例と国連のSDGsとの関連を示す。

## 1. まえがき

2015年に，“国連持続可能な開発サミット”が国連本部で開催され、150を超える加盟国首脳が参加した。成果文書として，“持続可能な開発目標(SDGs)”を中心とする“持続可能な開発のための2030アジェンダ”が全会一致で採択された<sup>(1)</sup>。そこでは、2030年までに達成すべき17の目標(図1)と169のターゲットからなる広範な行動計画が掲げられた。貧困や飢餓のほか、気候変動等の地球環境関連の目標が多く含まれ、改めて環境問題の重要さが示された。

気候変動問題は、最も重要な環境問題の1つである。2015年のCOP21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)で“パリ協定”が採択され、2016年11月に発効した。パリ協定では、世界共通の目標として、世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃より低く保ち、1.5℃に抑える努力目標を掲げている。そのために、今世紀後半に人為的な温室効果ガス排出と除去の均衡を達成することも合意された。2017年夏には、フランスと英国から、2040年までにガソリン車とディーゼル車を販売禁止とする方針が打ち出された。

2016年の国連環境計画(United Nations Environment Programme : UNEP)の国際資源パネル報告書“資源効率性：潜在的可能性和経済的意味”では、2050年に人口が97億人、世界の物質採掘量が現在の2倍以上の1,830億トンに達すると予測され、資源利用とそれに伴う環境影響を経済成長から分断する必要性が指摘されている<sup>(2)</sup>。換言すれば、地球上の資源供給には限界があり、循環型社会形成が必須である。一方、最近の国内統計(2014年)では、最終処分量は10百万tと減少傾向だが、産業廃棄物総排出量は393百万tと前年比約2%増加している<sup>(3)</sup>。

世界の生物多様性の状況について、愛知目標の中間評価を行うため、生物多様性条約事務局が公表した地球規模生物多様性概況第4版(Global Biodiversity Outlook 4 : GBO-4)では、愛知目標の多くの項目について進捗が見ら



図1. 国連の“持続可能な開発目標”<sup>(1)</sup>

れたものの、鳥類、哺乳類、両生類ほかの平均的な絶滅リスクは減少する兆しがなく、生物多様性の状況は悪化し続ける<sup>(4)</sup>とされる。他方、世界全体で淡水系からの取水量が2050年には2倍近くになり、世界の多くの地域で水不足が増加することが見込まれている<sup>(4)</sup>。

これらのような予断を許さない状況のもと、当社は2021年に創立100周年を迎える。当社は2021年を目標年とした“環境ビジョン2021”を掲げ、これに基づいた3年ごとの中期計画を策定・実行してきた。2017年度は、第8次環境計画の最終年に当たり、2018年度から活動開始となる第9次環境計画、及び2021年以降の長期ビジョンを現在策定中である。

本稿では、これら中長期計画を策定する上で礎となる当社の基本理念と、それを基にした“グローバル環境先進企業”的考え方について述べる。次に、その考えに立脚した当社グループの具体的施策である、現在遂行中の第8次環境計画について述べる。この計画は、低炭素社会の実現、循環型社会の形成、自然共生社会の実現、環境経営基盤の強化の4つの柱で構成しており、各々の柱の取組み状況や具体的成果をSDGsやこの特集号の論文と関連付けながら述べる。

## 2. 当社の目指すべき企業像

### 2.1 グローバル環境先進企業

三菱グループには、事業活動の究極の目的が社会貢献であることを示す“所期奉公(しょきほうこう)”という指針があり、当社グループは“技術、サービス、創造力の向上を図り、活力とゆとりある社会の実現に貢献する”ことを企業理念に定めている。近年、環境分野を始め世界各国で先進的な技術を駆使し、“持続可能な社会”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に貢献する企業を“グローバル環境先進企業”とし、目指すべき企業像として掲げた(図2)。身近な例を挙げると、エアコンは快適な生活

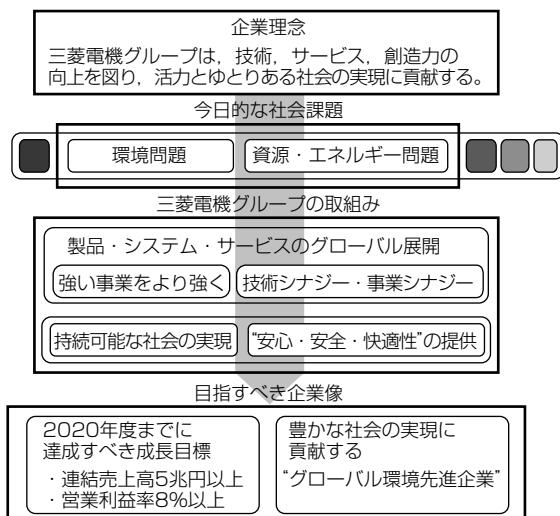


図2. 企業理念と目指すべき企業像

の必需品だが、同時に電気エネルギーを消費し、温室効果ガス排出につながる。この矛盾を少しでも軽減する省エネルギー製品を社会に提供することが社会貢献につながる、と当社は考えている。一般的に、製品使用時の温室効果ガス排出量は製品生産時のそれよりはるかに大きい。事業拠点での生産活動を通じた環境負荷低減は当然の責務として進めるが、顧客に提供する製品・システムの省エネルギー推進は、ライフサイクルで考えた場合、CO<sub>2</sub>排出量抑制(低炭素化社会)につながる。その抑制量(CO<sub>2</sub>削減貢献量)は、生産活動による排出量と比較すると約45倍である<sup>(5)</sup>。この特集号では、各種省エネルギー機器・技術の開発に加え、水処理システムや環境負荷の小さい材料を用いた代替製品の開発等、環境面で社会貢献に寄与する当社製品や技術開発の事例について述べる。

## 2.2 中長期ビジョンの策定について

図3に、現在検討中の新たな中長期ビジョンの基本的考え方を示す。環境経営度を年々向上させる中で、SDGsの達成にも寄与できるように、SDGsの目標の一部と方向性を共有すべきであると考える。

当社は、2018年度に“環境ビジョン2021”の達成に向けた最後の3か年計画(中期計画)である第9次環境計画(2018~2020年度)をスタートさせる。基本的には、第9次環境計画は、環境ビジョン2021の達成が目標である。しかしながら、この計画の目標数値は、環境ビジョン2021の目標数値を機械的に引用はしない。例えば、このビジョン策定当時(2007年)に予測した以上に環境負荷低減が進んでいる項目(主要製品の省エネルギー性能等)も存在するからである。

2017年現在、環境ビジョン2021は、もはや長期ビジョンとは呼べなくなってしまい、新たな長期ビジョンを策定する必要がある。社外で多くの企業の長期ビジョンが2050年を目標年としているのは、主要項目の1つである温室効果ガスに関する日本の目標年が2050年だからであろう。現在、社内外関係者の意見を集め、検討を進めている。

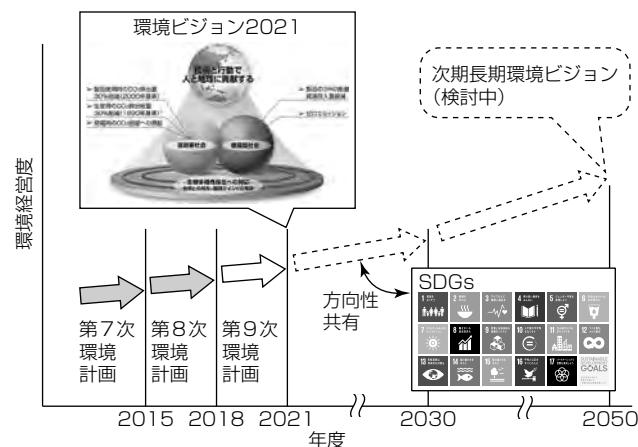


図3. 第9次環境計画と中長期ビジョンの考え方

## 3. 第8次環境計画の遂行状況

当社の環境計画は、1996年の第1次環境計画以来、3年ごとに進化を続けて“成熟”を重ねている<sup>(5)</sup>。

当社は2015年、地球温暖化への影響の総合的な評価・管理、グローバルレベルでの環境対応力向上等を目指した“第8次環境計画”を策定し、活動を開始した。具体的には、温室効果ガス排出量算定の国際標準に従い、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量削減とCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス削減を合算した目標を設定し、削減指標に織り込んだ。加えて、世界の各拠点での環境管理レベルを同じ指標で評価する“環境取組み評価”を開始し、改善活動の見える化を図る等、第7次計画から環境管理のレベルアップを図っている。

第8次環境計画は、低炭素社会の実現、循環型社会の形成、自然共生社会の実現、環境経営基盤の強化の4つの柱で構成している。次に、各々の柱に関する取組み状況を、SDGs及びこの特集号の論文と関連付けながら述べる。

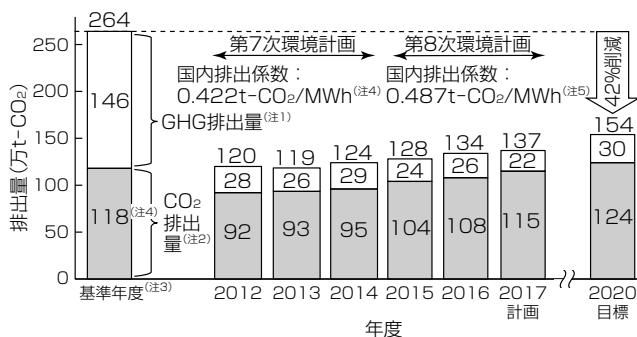
### 3.1 低炭素社会の実現

気候変動対策に関する当社環境活動は、主に、SDGsでは目標13(気候変動及びその影響の軽減)と、目標7(持続可能なエネルギーの確保と利用拡大)に関連する。

目標13に対しては、温室効果ガスの排出量をバリューチェーン全体で把握し、目標を立てて削減を図っている。主な事業・取組みは、省エネルギー製品の提供と、生産時に発生する温室効果ガスの排出削減である。

近年実用化された省エネルギー製品としては、例えば、SiC(シリコンカーバイド)デバイス搭載製品や高効率な誘導電動機等が挙げられる。詳細は、この特集号の“SiCデバイスを活用したパワーエレクトロニクス機器の省エネルギー技術”(p.19)と、“誘導電動機の高効率化技術”(p.11)を参照願いたい。

当社グループの生産時に発生する温室効果ガス排出量の推移を図4に示す。2016年度の実績値は海外関係会社を含めて134万t-CO<sub>2</sub>(国内排出係数: 0.487t-CO<sub>2</sub>/MWh)



(注1) CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス(GHG)の地球温暖化係数はIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第二次評価報告書の公表値(1995年)を参考し算出。  
(注2) 海外の排出係数は一般社団法人日本電機工業会の公表値(2006年)を参考して算出。  
(注3) 基準年度: CO<sub>2</sub>: 当社単独1990年度、国内関係会社2000年度、海外関係会社2005年度

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス: 当社単独及び国内関係会社2000年度、海外関係会社2005年度

(注4) 一般社団法人 日本電機工業会の公表値(1997年)

(注5) 第8次環境計画策定期の電気事業連合会公表値(2013年、原発2基稼働時)

図4. 当社グループの生産時温室効果ガス排出状況

であり、年初計画値以下を達成した。2016年度は、ポンプのインバータ化や設備更新等に加え、IoT(Internet of Things)を活用した省エネルギー施策が削減に寄与した。IoT活用の一例として、平成28年度省エネ大賞(省エネ事例部門)を受賞した事例について述べる。詳細は、この特集号の“IoT技術を活用した省エネルギー工場の実現”(p.35)を参照願いたい。2017年度(第8次環境計画最終年度)の目標値は、137万t-CO<sub>2</sub>で2016年度実績値とほぼ同等で、様々な観点から省エネルギー施策を実行中である。

SDGsの目標7に対しては、省エネルギー・創エネルギー・スマート社会の実現に貢献する技術やシステムの開発を進めている。当社は、社会インフラを始め多種多様な製品を開発・製造している強みを生かし、様々な場面でそれらを組み合わせ、システム全体として省エネルギーを実現するソリューションを提供できるのが強みと考えている。例えば、発電・送電・配電システムやHEMS(Home Energy Management System)等である。一例を、この特集号の“ハイブリッド蓄電システム”(p.48)で述べる。

### 3.2 循環型社会の形成

当社の環境活動は、SDGsの目標12(持続可能な生産消費形態の確保)と目標6(水と衛生の利用可能性と持続可能な管理の確保)に関連する。

目標12に関しては、製造時の資源投入量の削減、使用済み製品のリサイクル、廃棄物最終処分量の低減、グリーン調達等を推進している。例えば、当社は2004年から自己循環プラスチックリサイクル<sup>(6)</sup>の実用化に注力している。例えば、この特集号の“自己循環リサイクルでのプラスチック改質技術”(p.31)を参照願いたい。

図5に廃棄物の最終処分(直接埋立)率の推移を示す。当社国内工場及び国内関係会社は2010年で0.1%未満を達成し、当社国内工場は2016年実績で0.02%である。2014年には海外関係会社も平均1%以下に抑制された。ただし、一部の海外工場は、近隣に適切なリサイクル工場がなく、やむをえず埋立て処理をしている。今後は分別徹底や廃棄物リサイクル推進等、地道な活動を継続して改善を図る。

目標6に関しては、当社は水処理に関する技術を持っており、上下水道向けプラントシステム、オゾナイザ等、安全な水を供給するための技術やシステムを社会に提供している。自社内で使用する工場用水に関しても、半導体工場を中心、排水をリサイクル処理して再利用する等、水資

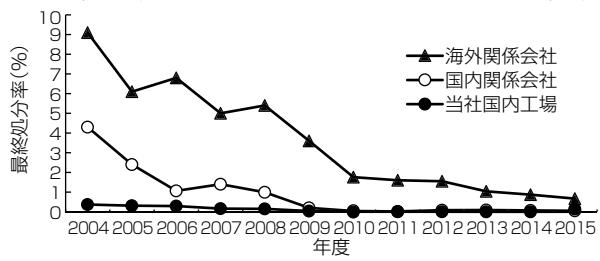


図5. 国内外拠点の最終処分率削減状況

源の有効利用に努めている。

当社は世界各国に生産拠点を展開しているが、国内外の各製造拠点の採水量、水の再利用量をモニタしている。その中には、水資源が豊富でない国や地域も存在し、事業活動を進める上では、渇水や洪水等の水リスクを考慮する必要がある。当社は世界資源研究所(World Resources Institute : WRI)発表のAQUEDUCT(Aqueduct Overall Water Risk map)<sup>(7)</sup>を用いて、拠点近傍の流域ごとの水リスクを評価し、投資家に公開している。AQUEDUCTは、世界中の1万を超える流域に関する情報が搭載されており、リスクが相対的に高い拠点では、工場用水の再利用施設を設置する等の対策を実施している。

### 3.3 自然共生社会の実現

自然共生社会の実現はSDGsの目標15(生態系の保護・回復、生物多様性損失防止)と関連する。製品分野では、海洋や森林の状況を把握する観測衛星を開発・提供しており、生態系のマクロな動態監視ツールとして活用されている。

現場の活動では、当社の各事業所で周辺環境との共生を図る取組みを進めている。具体的には、“みつびしでんき野外教室”“里山保全プロジェクト”等を継続開催し、参加者も計(累計3万人)に向け、順調に増加している。

事業所内に生息する生物の保護は、その第1歩となる生物調査を外部専門家の協力を仰ぎながら進めている。2016年度は国内24拠点中17拠点で調査が完了した。例えば、福岡県の当社パワーデバイス製作所構内では、1944年の工場建設前に流れていた旧松本川の水路が、護岸工事がほとんどされないまま残されている(図6)。昔ながらの生態系を知る上で貴重な場所となっており、環境省絶滅危惧種II類に指定されているミナミメダカも確認されている。

### 3.4 環境経営基盤の強化

化学物質を始めとした環境法規制への対応は、企業の社会的責任(CSR)として万全の対応を期している。近年のトピックスとしては、有害なカドミウムを含まない電気接点をいち早く実用化した。詳細は、この特集号の“電磁開閉器のカドミウムフリー化”(p.7)を参照願いたい。

全ての環境活動の土台となる“人”に対しては、国内外の当社グループの事業所で様々な階層に対応した環境教育を継続実施し、知識と意識レベルの向上を図っている。例えば、当社環境経営を学べる“基礎編”的e-Learningは、2016年度、国内外で10万人超の当社関係者が受講した。

環境経営を進める上での仕組みである環境マネジメン



図6. パワーデバイス製作所構内の旧松本川とミナミメダカ(絶滅危惧種II類)

トシステム(EMS)に関しては、国際規格であるISO14001の第三者認証を取得している。現在、当社の国内工場や国内外関係会社、約100の拠点で第三者認証を取得しており、2015年度版に順次移行中である。移行によって、リスクと機会のマネジメント強化や、事業プロセスとの統合等、2004年度版と比較して経営との一体化が図れると考えている。

第8次環境計画から、当社グループの国内外工場の環境リスクとその取組み状況について“大気”“水質・土壌”“化学物質”“温暖化”“廃棄物”的5分野で、グループ内の統一指標を策定して取組みレベルを評価している。レベルが相対的に低かった海外工場を中心に環境リスクを低減する等、拠点ごとの改善活動に活用している。

年々改善を進め、各拠点のEMSレベルを向上させるにしたがって、国や地域による違い(法律やインフラ、環境に対する法的基準や視点が異なること)が、顕在化してきた。例えば、先に述べた近隣にリサイクル工場のない海外工場の廃棄物である。今後とも、世界各国の地域事情を考慮しながら、全ての事業拠点で環境負荷低減に努めていく。

#### 4. 積極的情報開示

近年、UNEP公認のGRI(Global Reporting Initiative)から、企業の持続可能性報告書に対する国際基準“サステナビリティレポートティングガイドライン”第4版<sup>(8)</sup>が発行された。一方、環境対策や企業統治に積極的に取り組む企業に優先的に投資するESG(Environment, Society, Governance)投資を志向する機関投資家が増加しており、情報開示の重要性が高まっている。

情報開示に関しては、正確性と透明性が求められる。環境側面を評価する指標は多数あるが、最も代表的な指標である温室効果ガス排出量に関しては、国際的に認知されている会社の外部監査を受け、2016年から現地調査を含んだ第三者検証を取得している。集計方法等に関して一定の評価が得られたと考えてはいるが、今後とも継続改善に努めていく。

本稿で述べた、生産現場での地道な温室効果ガス排出量削減や省エネルギー製品開発、水リスクのような積極的情報開示に加え、気候変動に対応したビジネス展開などが認められ、世界的な投資家向け評価NGOであるCDPから、“気候変動”“水”分野で2016年の最高評価“Aリスト”企業に選定された。同様に、製品を納入する顧客への環境負荷データの提供(情報開示)を評価する“サプライヤー”でもAリスト企業に選定された(図7)。

社会的責任投資分野で国際的に高い信頼を得ている指標で、ESGに関するリスク管理に優れた企業が選定される“FTSE4Good Index Series(フィッチーフォーグッド・インデックス・シリーズ)”の構成銘柄に、2017年に選定された。



図7. 国際NGOのCDPから、最高評価を獲得した3分野

#### 5. むすび

当社は2021年に創業100年を迎える。当社ならではの技術や事業を通して持続可能な社会の実現に貢献することが重要と考える。世界各国の事情を考慮しながら長期的な観点で、製品・システムの省エネルギー化や事業拠点の環境負荷低減に取り組み、“グローバル環境先進企業”と社会から認められるよう努力していく。

本稿では、現在推進中の第8次環境計画に関し、国連のSDGsと関連付けながら、当社の具体的な取組みの一部について述べた。現在、次期の環境長期ビジョンを策定中であるが、“グローバル環境先進企業”を目指した取組みは、2020年度までに達成すべき成長目標として掲げる経営数値の実現にもつながっていくと考えている。こうした地球環境への取組みを、現状に満足せずに深化・発展させることで、“社会”“顧客”“従業員”“株主”というステークホルダーの期待に応え、社会に貢献していく。

#### 参考文献

- (1) 2030アジェンダ、国際連合広報センター オフィシャルWebサイト (2015)  
[http://www.unic.or.jp/activities/economic\\_social\\_development/sustainable\\_development/2030agenda/](http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/)
- (2) 環境省報道発表資料 (2016年5月16日)  
<http://www.env.go.jp/press/102533.html>
- (3) 環境省報道発表資料 (2015年12月22日)  
<http://www.env.go.jp/press/101858.html>
- (4) 地球規模生物多様性概況第4版(GBO4)日本語版  
<http://www.env.go.jp/nature/biodic/gbo4.html>
- (5) 南原智彦：もう一段高いレベルの環境経営、三菱電機技報、88, No.12, 740~744 (2014)
- (6) 高木 司、ほか：プラスチックの自己循環マテリアルリサイクル技術三菱電機技報、78, No.11, 735~739 (2004)
- (7) 世界資源研究所 Webサイト  
<http://www.wri.org/our-work/project/aqueduct>
- (8) GRIオフィシャルWebサイト、G4 GUIDELINES  
<https://www.globalreporting.org/Pages/resource-library.aspx>

# 電磁開閉器のカドミウムフリー化

稻口 隆\* 河合秀泰\*\*\*  
堀田克輝\*\* 牧野智史†  
竹本智彦\*\*\*

Cadmium Free of Magnetic Contactor

Takashi Inaguchi, Katsuki Hotta, Tomohiko Takemoto, Hideyasu Kawai, Satoshi Makino

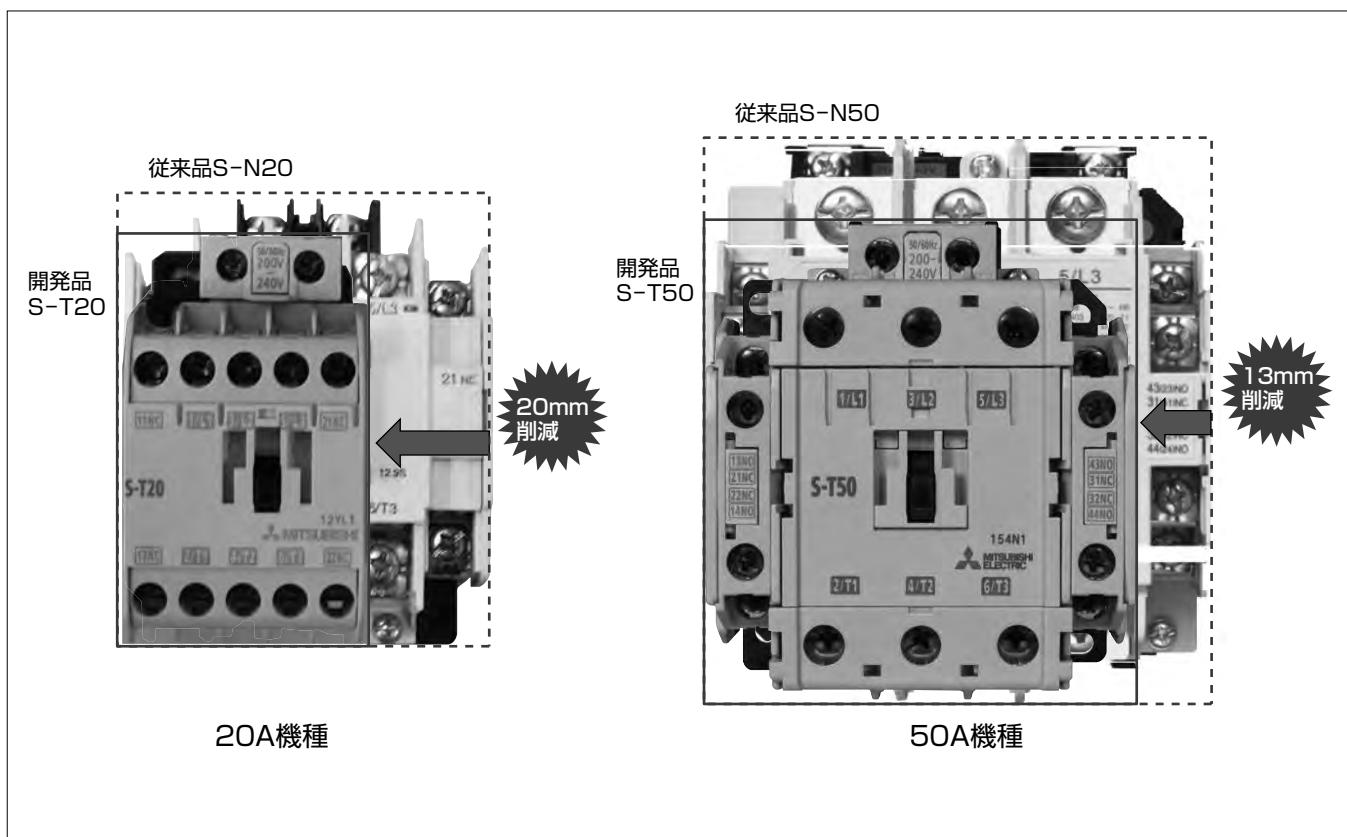
## 要旨

産業用モータ、パワーコンディショナなどの自動制御に広く用いられている電磁開閉器での電気接点のカドミウムフリー化を業界最小クラスの筐体(きょうたい)サイズで実現した。

環境保護や人体に与える影響の観点から、欧州RoHS(Restriction of Hazardous Substances)指令によってカドミウムなどの使用が規制されている。現在、電気接点のカドミウムは規制対象外であるが、将来的にカドミウムフリー化が求められる見通しである。電磁開閉器で負荷電流を遮断する際には、遮断性能に優れた銀酸化カドミウムが一般に使用してきた。

今回、電磁開閉器の電気接点をカドミウムフリー化して

環境リスクを低減することを目的に、電気接点で発生するアーケ放電の制御能力を従来方式に比べて20%以上向上させる等の改良を行い、電気接点の消耗や筐体の損傷を大幅に低減できた。これによって、筐体サイズを従来品に対して40%小型化(20A、50A機種)し、業界最小クラスのサイズで電磁開閉器の電気接点のカドミウムフリー化を実現した。新たにカドミウムフリー化した電磁開閉器は1年間に約0.6t／年のカドミウムの使用を削減可能な見通しである。これは1年間に日本国内で電気接点などに使用されるカドミウムの約14%に相当する試算である。この開発で2017年環境賞(国立環境研究所・日刊工業新聞主催、環境省後援)優秀賞を受賞した。



## カドミウムフリー化と小型化を実現した電磁開閉器

環境保護の観点から、電気接点のカドミウムフリー化を業界最小クラスの筐体サイズで実現した。左側が20A機種で、開発品“S-T20”は、従来品“S-N20”と比較して幅サイズで20mm削減、体積で40%縮小した。右側が50A機種で、開発品“S-T50”は、従来品“S-N50”と比較して幅サイズで13mm削減、体積を40%縮小した。

\*三菱電機(株)先端技術総合研究所(工博) \*\*同社 同研究所  
\*\*\*同社 名古屋製作所 †三菱電機エンジニアリング(株)

## 1. まえがき

電磁開閉器は電磁石の動作によって電気回路を遠隔で開閉(ON/OFF)できる産業用スイッチであり、エレベーターや工場設備などに使用されるモータの自動制御用途を中心に、最近では太陽光発電向けパワーコンディショナや家庭用蓄電池向けにも広く用いられている。電磁開閉器には通常時の電流開閉に加え、異常時の過電流を遮断して機器を保護する責務がある。そのため高信頼であることが求められているが、同時に狭い設置スペースに取り付けられるように小型であること重要なニーズとなっている。

電磁開閉器で回路電流を遮断(OFF)する際には、そのキーパーツである電気接点でアーク放電が発生する。回路電流を遮断するためには、アーク放電を消滅させる必要がある。このアーク放電を消滅させる上で、銀酸化カドミウムは優れた性能を持っており、高信頼な電磁開閉器の実現のために電気接点の材料として広く一般に使用されてきた。しかし、環境保護や人体に与える影響の観点から、最近では電磁開閉器のカドミウムフリー化が求められている。例えば、欧州RoHS指令では産業用の制御機器でもカドミウムの使用が規制されている。今のところ電気接点のカドミウムについては規制の対象外であるが、将来的にはカドミウムフリー化することが望まれている状況である。

今回、環境リスクの低減と小型化のニーズに同時に応えるため、電気接点をカドミウムフリー化して環境負荷を低減するとともに、小型化を実現する電磁開閉器を開発した。

本稿ではカドミウムフリー化及び小型化するに当たり工夫した電流遮断技術の幾つかについて述べる。次いでカドミウムフリー化がコストに及ぼす影響を述べ、最後に環境負荷の低減化について述べる。

## 2. カドミウムフリー化及び省スペース電流遮断技術

従来の電磁開閉器で電気接点をカドミウムフリー材料に置き換えると、電気接点で発生するアーク放電の抑制性能が不十分となり、十分な安全性を確保するために筐体サイズを大型化する必要があった。これは省スペース

化の要求が強い電磁開閉器ではデメリットが大きく、現実的ではなかった。この問題に対して、三菱電機はアーク放電を効率良く制御する技術を開発し、業界最小クラスの筐体サイズで電磁開閉器での電気接点のカドミウムフリー化を実現した。

**2.1節で50A機種、2.2節で20A機種について開発した技術を述べる。**

### 2.1 アークランナのアーク吸引力向上と熱ガス排気機構の開発(50A機種)

電気接点で発生したアーク放電を素早く消すために磁性体(鉄)で構成されるアークランナという

部品が用いられる。図1にアークランナを接点回りに配置した図を示す。アーク放電による電流でアークランナが磁化され、アーク放電はアークランナに引き寄せられ、引き伸ばされる。引き伸ばされることによって、アーク電圧が高くなる。また引き伸ばされたことによって、冷却されやすくなることもアーク電圧を高める効果がある。さらにアークランナに達したアーク放電が再度接点に放電することでアークランナ近傍に陰極降下電圧が発生する。これらの効果でアーク電圧が高くなり、遮断しやすくなる。

今回開発した50A機種でのアークランナは電磁界解析によって形状最適化を行い、アーク放電が発生する磁束の漏れを少なくし、効率良く磁束がアークランナを通過することでアークランナの磁束密度を高め、アーク放電をアークランナに引き寄せる電磁力(ローレンツ力)を従来品に対して20%以上強化した。図2にアークランナの磁束密度分布と、高速カメラによるアーク挙動の撮影写真を示す。アークランナの効果が分かりやすいようにアークランナがない場合と、今回、形状最適化したアークランナがある場合のアーク挙動を示す。

アーク放電は高温であり、高温環境化では遮断性能が劣化する。また発生した熱ガスは電気接点だけでなく樹脂でできた筐体を損傷させる。このため、筐体を大型化するか、それを避けるために熱ガスを排出するため大きな排気口を設ける必要がある。しかし単純に排気口を大きくすると塵埃(じんあい)の侵入を許すことになり、トラブルの原因となる。そこで今回、塵埃を防ぐとともに、熱流体解析に

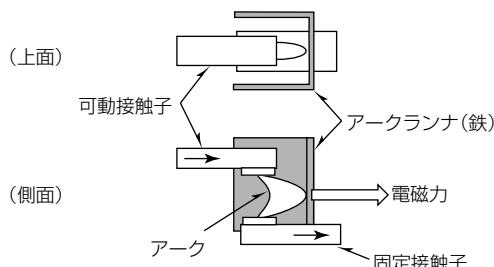


図1. アークランナによるアーク吸引の模式図

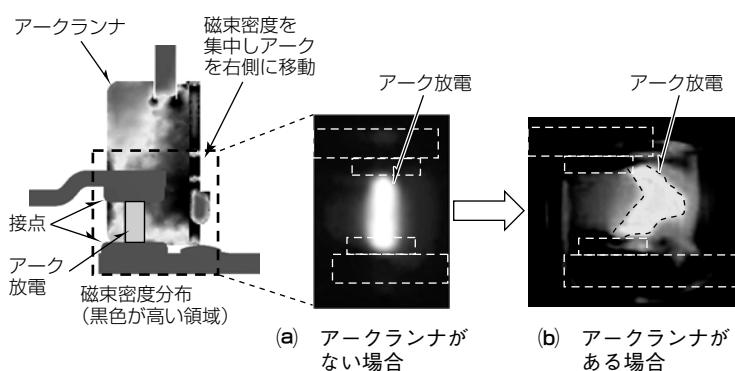


図2. アークランナの磁束密度分布解析結果と高速カメラによるアーク挙動の撮影写真

よって効率的に熱ガスを排気する構造を探査し、排気構造を開発した。これによって、従来機種に対してアーク放電の冷却能力を7倍に向上させることができた(図3、図4)。

このようにして横幅を従来比で13mm削減、体積を40%縮小した。図5に従来品S-N50と開発品S-T50のサイズ比較を示す。

## 2.2 アークランナによる側壁保護と遮断性能向上<sup>(1)</sup> (20A機種)

20A機種は50A機種より小型であるため、相間壁のより

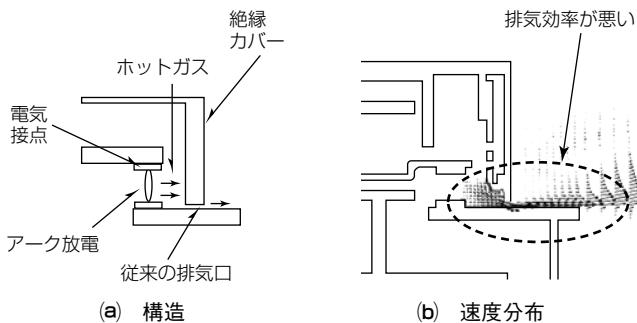


図3. 従来の排気構造と速度分布の解析結果

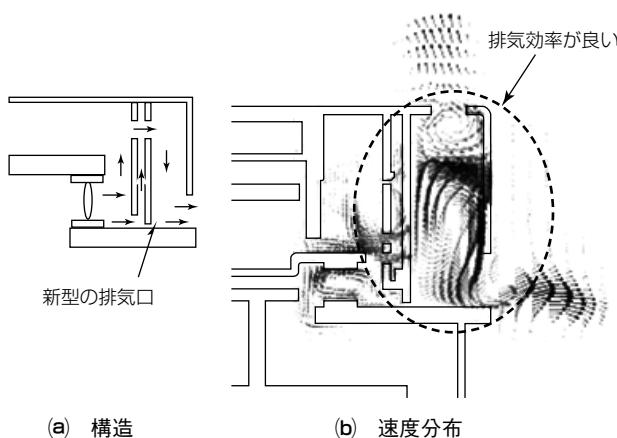


図4. 開発した排気構造と速度分布の解析結果

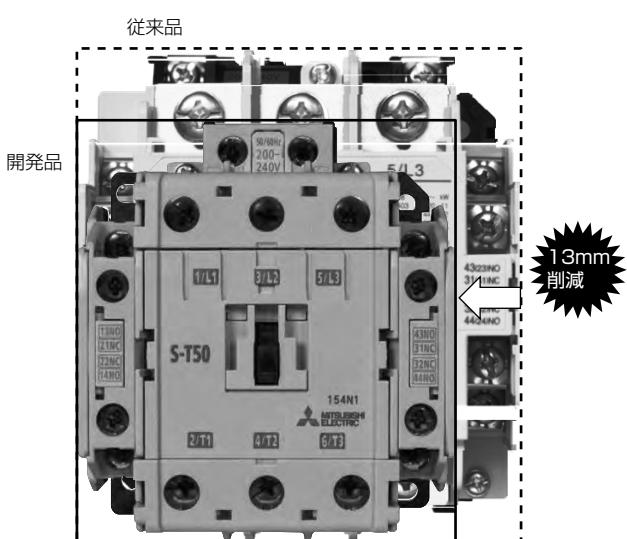


図5. 従来品と開発品のサイズ比較(50A機種)

近傍でアーク放電が発生する。このため相間壁がアーク放電に繰り返しされ、炭化が進行し、場合によっては相間壁に穴があいて相間短絡を起こす可能性がある。また消弧空間が狭いため、アーク放電の冷却が不十分となり、アーク電圧が上がり、遮断性能が劣化する可能性がある。そこで、20A機種では図6(b)に示すような放熱部を持つアークランナを設置した。アークランナは磁性体(鉄)で構成され、アーク放電を引き寄せれる。また放熱部を設けているのでアーク放電の冷却を促進する効果がある。またアークランナは遮断性能を上げることだけでなく、相間壁保護の役割も兼ねる。

図6にアークランナによる相間壁保護の挙動を示す。アークランナがない場合、アーク放電は相間壁に触れる可能性があるが、アークランナがある場合はアーク放電がアークランナに引き寄せられ、相間壁に触れることがない。アークランナに引き寄せられたアーク放電は分断され、また放熱部によってアーク放電の熱が放熱されるため、アーク電圧の上昇を早め、遮断性能を向上させる。

この構造を採用することによって従来機種S-N20から開発品S-T20は幅20mm、体積40%縮小が可能になった(図7)。

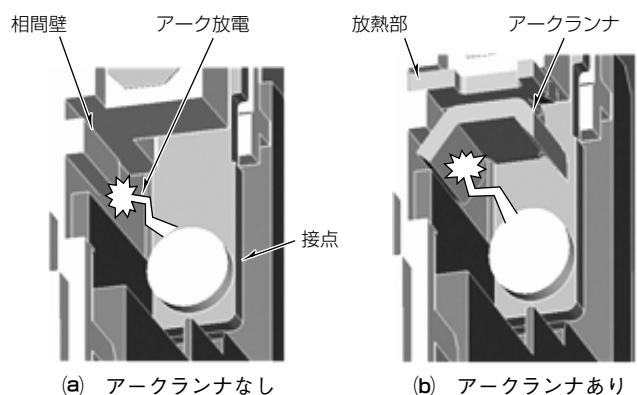


図6. アークランナによる相間壁の保護の挙動模式図

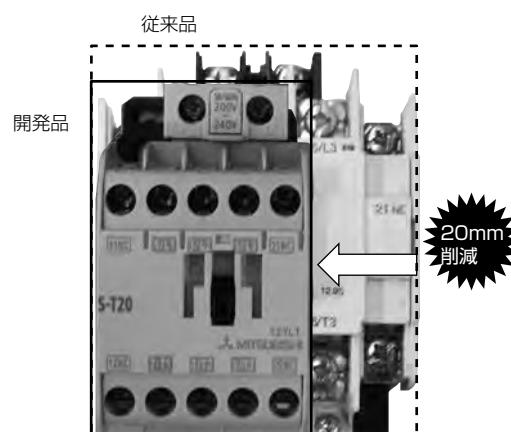


図7. 従来品と開発品のサイズ比較(20A機種)

### 3. コストへの影響

電気接点自体のコストは、カドミウムフリー電気接点の方が銀酸化カドミウムを使用した電気接点より高価である。また、電気接点で発生するアーク放電を抑制する性能が銀酸化カドミウムより劣るカドミウムフリー電気接点は、消耗に耐えるように電気接点の銀使用量を増やす必要があり、従来の電磁開閉器の電気接点をカドミウムフリー電気接点に置き換えるだけでは電気接点のコストは増加する。電磁開閉器で電気接点のコストの比重は大きいため、電気接点のコスト増加が製品コストや損益に与える影響は極めて大きい。多くの電磁開閉器メーカーにとって、電気接点のカドミウムフリー化に伴うコスト増加は大きな課題であり、電磁開閉器のカドミウムフリー化がなかなか進まない原因の1つとなっている。

三菱電機は、今回開発したアークランナによって、電気接点で発生したアーク放電を効率良く制御できるようになったため、カドミウムフリー電気接点で従来の銀酸化カドミウムと同等以上の遮断能力を確保できた。さらに熱ガスの排気路を最適化することと併せて、電気接点の消耗や筐体樹脂の損傷を低減し、電気接点の銀使用量を削減することでコストダウンを実施した。またアークランナに相間壁保護の役割を持たせることで相間距離を縮小し、放熱部を設けることでアーク放電の冷却を促進した。これらによって、筐体の40%小型化が可能になったことで目標コストを達成し、製品の値上げを実施しなくとも現実的なコストでカドミウムフリー電磁開閉器の生産を実現できた。

### 4. 環境負荷の低減化

カドミウムはRoHS指令で使用制限が設けられる前から、公害などの原因として問題になっていた。人の健康に悪影響を与えないカドミウム摂取量は1週間当たりに $14.4\mu\text{g}/\text{kg}$ (体重)以下という調査結果もあり、カドミウムの流出や拡散を防止するために厳しい管理基準が設けられている。今回、電磁開閉器の電気接点をカドミウムフリー化することによって、電磁開閉器のユーザーだけでなく、電気接点を供給している協力会社を含めた製造に携わる全

ての人のカドミウムへの接触をなくすことができる。

現在、日本でのカドミウムの用途は主に産業用であり、そのほとんどはニッケル・カドミウム電池などの製品に使用されている。しかし、ニッケル・カドミウム電池は回収・リサイクルが可能であり、再資源化率は74%と言われている。一方、使用済みの電気接点は基本的に廃棄処分となるため、最終的に大気や土壤に流出する可能性がある。三菱電機が行った電磁開閉器のカドミウムフリー化によって、1年間に約0.6tのカドミウムを削減可能な見通しで、日本国内で電気接点などに使用されるカドミウムの約14%を削減することが可能になる試算である。

電磁開閉器はモータの制御用だけでなく、幅広く製品に適用されている。最近では電気自動車やその給電設備、太陽光発電所向けのパワーコンディショナや太陽光パネルによって発電した電力を蓄積する蓄電池の自動制御用、安全対策用の開閉器としての用途が増加してきた。このように、電磁開閉器の適用範囲はますます広がっており、様々な分野にカドミウムフリー電磁開閉器を普及させていくことで環境リスクの低減に貢献していく。

なお、この開発によって2017年環境賞(国立環境研究所・日刊工業新聞主催、環境省後援)優秀賞を受賞した。

### 5. む す び

電磁開閉器での電気接点のカドミウムフリー化を業界最小クラスの筐体サイズで実現した。50A機種ではアーク放電を減衰させるアークランナを改良してアーク放電減衰能力を従来品比で20%以上強化した。またアーク放電による熱ガスを排気する独自機構を開発して冷却能力を7倍向上させた。20A機種ではアークランナに相間壁保護の役割を持たせ、放熱部を設けることでアーク放電の冷却を促進した。これらによって筐体サイズを従来品に対して40%小型化した。

### 参 考 文 献

- (1) 稲口 隆, ほか: 電磁開閉器新シリーズ「MS-Tシリーズ」の開発, 電気評論, 99夏季増刊号, 66~68 (2014)

米谷晴之\*  
阿知和典弘\*\*  
川崎啓宇\*\*\*

# 誘導電動機の高効率化技術

*Technologies of High Efficiency for Induction Motors*

Haruyuki Kometani, Norihiro Achiwa, Keiu Kawasaki

## 要旨

各国でいわゆる“省エネ法”がIEC(International Electrotechnical Commission)国際規格に沿った形で制定され、2015年4月には国内でもトップランナー規制が開始されている。また、世界の全電力消費量の40~50%を占める誘導電動機で、2015年から三相誘導電動機だけでなく単相誘導電動機もIEC規格が適用されるようになった。

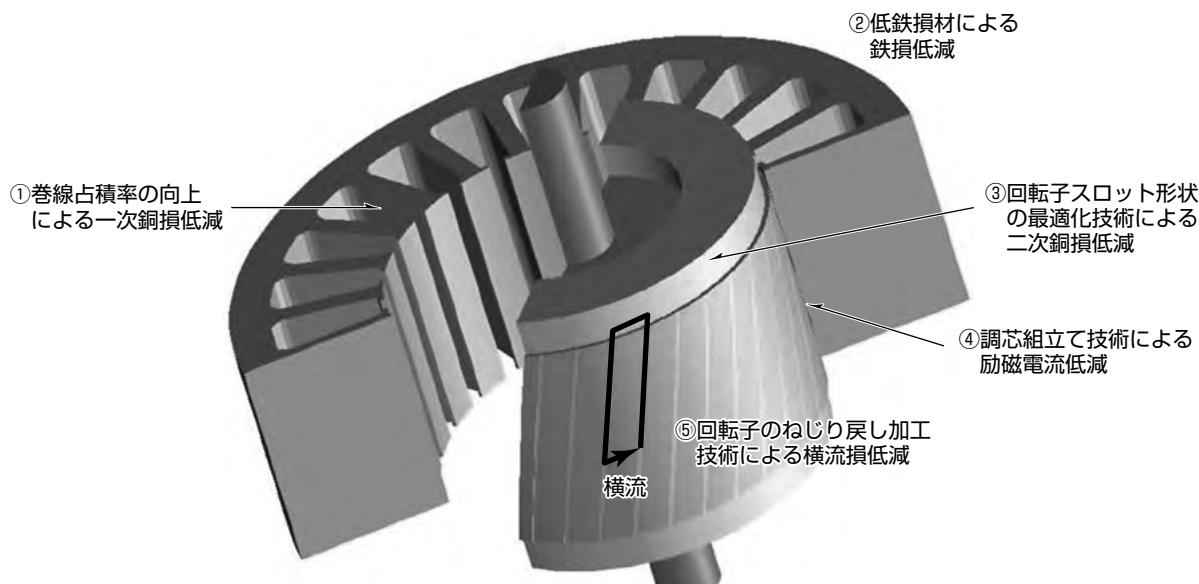
三菱電機では、IE3(プレミアム効率)を大幅に更新するとともに、使いやすさを考慮した従来機との互換性(停動トルク、始動特性、力率など)を確保した三相誘導電動機“SF-PRシリーズ”を市場投入している。

互換性を維持しつつ高効率化する技術として、始動時と定格運転時では回転子二次導体内で電流の流れる場所が変化することに着目し、始動時には高抵抗で定格時には低抵

抗となるスロット形状を最適化した。

また、対向コイルの電圧差を最小化しながら圧入を行い、回転子の偏心を極小化する調芯組立て技術を開発し、電磁騒音の増加なしに空隙長を縮小することに成功した。これによって励磁電流の低減が可能となった。

さらに、空間高調波による損失として漂遊負荷損に計上される、二次導体間の積層鋼板に発生する渦電流損失(横流損)を低減する方法として、“ねじり戻し加工”を開発した。これは、回転子鉄心を周方向にねじり戻すことによって、二次導体と鉄心の間に隙間を作り、電気的に絶縁するものである。これによって、漂遊負荷損の大幅な低減を達成しただけでなく、製品の特性ばらつきも抑制することができた。



## 誘導電動機の高効率化技術

誘導電動機の損失低減のための技術として、①巻線占積率の向上による一次銅損低減、②低鉄損材による鉄損低減だけでなく、③始動特性の互換性を確保しつつ二次銅損を低減する回転子スロット形状の最適化技術、④電磁騒音を抑えつつ空隙を縮小して励磁電流を低減する調芯組立て技術及び⑤空間高調波による横流損を低減する回転子のねじり戻し加工技術がある。

## 1. まえがき

近年、国内外でのエネルギー消費量の著しい増加、国際的な地球環境問題への関心の高まりなどの状況下で、エネルギー需要の伸びを抑えていくことが緊急の課題となっている。このような状況の下、各国でエネルギー使用の合理化等に関する法律いわゆる“省エネ法”が制定され、製造及び輸入業者に対して規制が実施されている。

誘導電動機は、産業全般で幅広く利用されており、これによる全消費電力量は世界の消費電力量の40～50%を占め、国内でも産業部門の消費電力量の約75%，全体として約55%を占めている<sup>(1)</sup>。この状況に鑑み、国際規格IEC60034-30-1<sup>(2)</sup>との整合をとった国内トップランナー規制<sup>(3)</sup>が2015年4月から開始され、IE3効率が義務化されることになった<sup>(4)</sup>。これに伴い、当社では三相誘導電動機SF-PRシリーズを新規に市場投入し<sup>(5)</sup>、IE3効率を大幅に更新するとともに、使いやすさを考慮した互換性を達成している。

また、2015年には単相誘導電動機に対してもIEC規格が適用されるようになり、小型の換気扇用ファンモータの高効率化も急ピッチで実現している。

本稿では、三相誘導電動機の高効率化技術と互換性を達成する技術、及び、小型誘導電動機に対して開発した高効率化技術についても述べる。

## 2. 前提条件

### 2.1 誘導電動機の損失

誘導電動機の損失は、一次銅損、鉄損、二次銅損、機械損及び漂遊負荷損に分類される<sup>(6)</sup>。

一次銅損は固定子巻線に流れる電流と固定子巻線抵抗によって決まるため、巻線抵抗を低く、定格電流を小さくすることで高効率化が図れる。固定子スロット内の巻線の占積率を向上させる工作技術の開発によって、大幅な高効率化を達成している。鉄損は、無負荷同期回転時の入力から励磁銅損及び機械損を差し引いた損失であり、主に固定子の積層鋼板で発生するヒステリシス損及び渦電流損である。鉄損を低減するためには、磁束密度を抑えつつ低鉄損材を適用することで損失低減を達成している。二次銅損は回転子二次導体に発生する損失である。二次導体の抵抗を低くすることで定格回転数を高くすることができ、同一出力に対する二次銅損を低減することができる。機械損は、回転子の回転を支える軸受の摩擦損失及び回転子の回転に伴う風損が主成分である。風損の低減には、機内温度とのトレードオフを考慮した範囲内で回転子フィンを小さくすることで達成することができる。漂遊負荷損は、誘導電動機の全損失からこの損失を差し引いた残りの損失であり、誘導電動機の内部に発生している空間高調波による損失が主

成分である。漂遊負荷損の低減には、空間高調波を小さくする固定子巻線配置を採用することや、固定子で発生した高調波が回転子二次導体に鎖交しにくい回転子スロット数を選定する、又は回転子スロットを軸方向に斜めにする回転子スキーを採用することで低減されている。

### 2.2 互換性

この節では、2.1節に述べた損失を単に低減するだけでなく、製品として保有すべき互換性について述べる<sup>(7)</sup>。

まず、同一出力のモータのサイズ(枠番)を大きくすると銅損や鉄損の低減につながり、比較的簡単に高効率化が図れるが、モータを使用する負荷機に取付けが困難になる場合があり避けなければならない。誘導電動機は量産工場で製造されるため、極端に難しい工作法を採用しないで量産性を確保する必要がある。定格条件は、各国で異なっており、国内でも200V系では200V/50Hz, 200V-220V/60Hz等の定格条件がある。これら全てを1種類のモータでIE3効率を満足することが望ましい。

#### 2.2.1 停動トルク

停動トルクは、定格電圧、定格周波数でモータができる最大のトルクのことであり、低くなると負荷変動に対応できなくなるおそれがある。停動トルクは主磁束に対する漏れ磁束の大小によってほぼ決まっているため、互換性を確保するためには巻数、漏れリアクタンスを大幅に変更することが難しい。

#### 2.2.2 始動特性

二次抵抗を減少させると、定格すべりが小さくなり二次銅損が低減するが、始動時のインピーダンスが減少して始動電流が増加する。始動電流が増加すると、ブレーカや電源の容量を大きくする必要があり、避けなければならない。また、始動電流を減少させるために巻数を増加させると、始動トルクが減少し、起動できなくなる可能性がある。このため、単に二次抵抗を低減することでの高効率化は難しい。

#### 2.2.3 力率

高効率化を図ることで、負荷電流(定格電流-励磁電流)を減少させ、励磁電流に近くなってくると、力率が悪化する。力率が悪化すると無効電力が増加し、電源容量が増加する。このため、励磁電流に対する負荷電流を極端に低減することは避けねばならない。

## 3. 高効率化技術

この章では、2.1節に示した損失の低減を2.2節に示した互換性を確保しつつ達成するための技術、及び短いタクトタイムで量産性を確保したまま高効率化する技術について述べる。

### 3.1 回転子スロット形状の最適化技術

二次銅損の低減には二次導体の抵抗を小さくする必要が

あるが、二次抵抗を小さくすると始動電流が増加するという問題があった。図1に始動時のT-II型等価回路を示す。始動時には励磁回路を無視することができるため、始動電流は $R_1, X_1, X_2, R_2$ の回路インピーダンスで概略計算できる。すなわち、 $R_2$ が小さいと始動電流が大きくなることが理解できる。定格負荷時には回転子に鎖交する磁束はすべり周波数であり、比較的低い周波数であるが、始動時には定格周波数の磁束が鎖交する。回転子周波数 $sf(s)$ ( $s$ :すべり、 $f$ :周波数)に対して表皮深さ $\delta$ は次式で表される。

$$\delta = 1/\sqrt{\pi sf\mu_0\sigma} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $\mu_0$ : 真空の透磁率、 $\sigma$ : 導電率である。導体の深さ $h$ に対して、等価電流深さ $h_{er}$ は次式で表される<sup>(8)</sup>。

$$h_{er} = h/\phi(\xi) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 $\xi$ 、 $\phi(\xi)$ は次式で表される。

$$\xi = h/\delta \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$\phi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

すなわち、図2で $h_{er}$ の範囲の抵抗が高く、全体の抵抗を低く設計することで始動電流を低減しつつ二次抵抗を低く設計できる。また、回転子スロットは軸方向にスキーされており、アルミダイカストによって製造されているため、スロット内にアルミが流れやすいようにすることで二次抵抗を低減できる。図2ではA部を回転子径と同心円に近くすることで二次抵抗を低減している<sup>(9)</sup>。

### 3.2 調芯組立て技術

励磁電流を低減することで定格電流を低減することは、先に述べた力率低下の懸念もなく効率向上に効果的である。励磁電流は、図1の等価回路で $X_m$ に流れる電流であり、

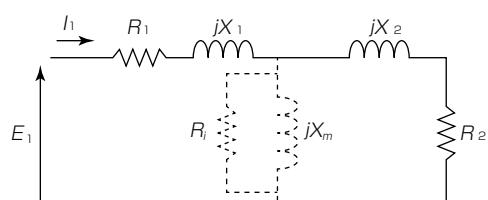


図1. 始動時のT-II型等価回路  
R<sub>1</sub>: 一次巻線抵抗、X<sub>1</sub>: 一次漏れリアクタンス、X<sub>2</sub>: 二次漏れリアクタンス、R<sub>2</sub>: 二次抵抗、X<sub>m</sub>: 励磁リアクタンス、R<sub>f</sub>: 鉄損抵抗、j: 虚数記号、I<sub>1</sub>: 一次電流、E<sub>1</sub>: 一次相電圧

図1. 始動時のT-II型等価回路

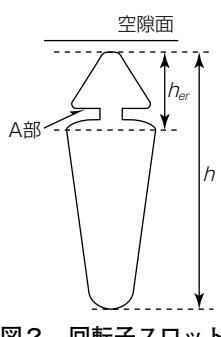


図2. 回転子スロット

固定子と回転子の空隙を縮小することで低減できる。しかし、空隙を縮小すると工作精度の影響を大きく受け、特に、回転子が固定子の中心に通らなくなる偏心状態となりやすくなる。回転子が偏心すると電磁騒音が発生し、製品となりえない。このため、空隙は0.3mm程度が限界であった。

回転子が偏心すると、対向するコイルに電圧差が発生し、この電圧差が図3に示すように偏心率(偏心量/平均空隙長)にほぼ比例し、かつ偏心方向に対して正弦波的に変化することが分かった。これをを利用して対向コイルの電圧差を0に近づけながらフレームプラケットへの圧入を行う調芯組立て<sup>(10)(11)(12)</sup>と呼ばれる生産技術を確立した。また、この生産技術は2方向以上の対向コイル電圧差を用いて調芯するので、短いタクトタイムで達成できるため、量産性を損なわないことが分かった。図4に小型換気扇用ファンモータの空隙長に対する効率(設計計算値)の変化を示す。この図から、空隙縮小によって効率が向上することが分かる。この調芯組立て技術を採用することで、電磁騒音の増加を抑えつつ効率を向上させることができた。

### 3.3 回転子のねじり戻し加工技術

固定子巻線は限られたスロット内に格納されているため、空隙に発生する磁束密度分布は周方向に正弦波にはならず、空間高調波を含んでいる。この空間高調波が二次導体に鎖交すると高調波二次銅損と呼ばれる漂遊負荷損を発生させる。空隙を小さくすれば、固定子で発生する空間高調波はさらに回転子二次導体に鎖交し、高調波二次銅損が大きくなる。この高調波二次銅損を低減するために、回転子のスロット数を最適化し、回転子を軸方向に斜めに積層する回転子スキーを施すことがなされている。しかし、二次導

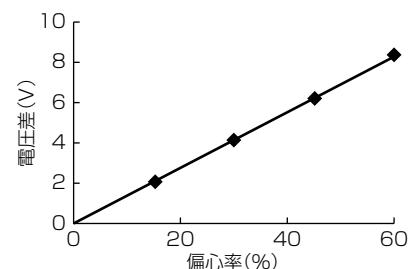


図3. 偏心率に対する対向コイル電圧差(100V印加時)

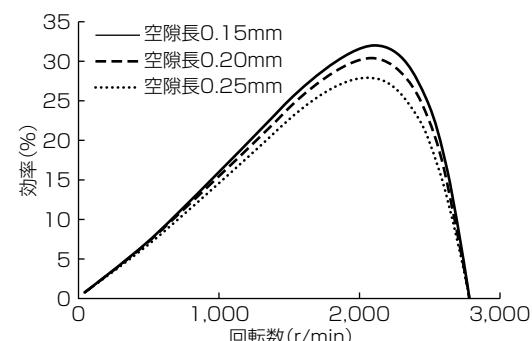


図4. 空隙長に対する効率



図5. 電磁界解析による横流損失密度分布

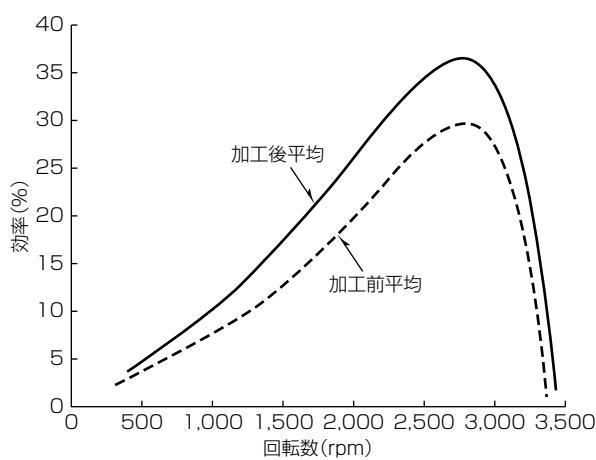


図6. 効率の比較

体はスロットに溶融アルミニウムを流し込むことによって製造されるため、二次導体とスロット横の積層鉄心間に導通し、バー間に流れる電流(横流)が発生する<sup>(13)</sup>。この横流による損失を横流損(図5)という。

横流を抑制するには、二次導体と回転子鉄心を電気的に絶縁すればよい。従来は、アルミと鉄心の熱膨張率の差を利用して回転子組立て後に加熱するポストヒーティング法が提案されていたが、加熱後のシャフトの信頼性やタクトタイムを考えると採用が難しい状況であった。

小型モータで、短いタクトタイムで確実に二次導体と鉄心を絶縁する方法として、回転子鉄心を周方向にねじって戻す“ねじり戻し加工”<sup>(14)(15)</sup>の実用化に成功した。この加工によって、二次導体と鉄心の間に隙間を作ることが可能となり、横流損が大幅に低減された。小型換気扇用ファンモータでの実測結果として、図6に示すように効率の大幅な改善が図られた。さらに、横流による性能ばらつきも極小化させることができた。

#### 4. む す び

世界の消費電力量の40~50%を占める誘導電動機での、停動トルク、始動特性、力率などの互換性を確保しつつ、損失を低減する高効率化技術について述べた。

回転子スロット形状の最適化技術によって二次銅損を低

減しつつ始動特性の互換性を確保した。また、空隙を縮小して励磁電流を低減し、量産性も確保した調芯組立て技術によって、電磁騒音の増加なしに励磁電流を低減させることができた。さらに、空間高調波による損失となる回転子二次導体間の横流損失を低減するねじり戻し加工技術によって、横流損が大幅に低減された。

今後も更なる誘導電動機の高効率化技術の開発を行い、消費電力量を低減することで低炭素社会の実現に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：2009年度エネルギー消費機器実態等調査報告書（2009）
- (2) IEC60034-30-1 (2014)
- (3) 法律：エネルギーの使用の合理化等に関する法律（トップランナー制度関連条文：第78条、第79条、第80条、第81条、第87条、第95条）
- (4) 阿部倫也：国内トップランナー規制とモータ効率IEC規格、電気学会誌, 137, No. 5, 281~284 (2017)
- (5) 仲 興起：トップランナー規制対応プレミアム効率モータSF-PRシリーズ、TECHNO-FRONTIER2015、第35回モータ技術シンポジウム (2015)
- (6) 廣塚 功、ほか：汎用誘導機の損失と高効率化、電気学会誌, 137, No. 5, 258~288 (2017)
- (7) 米谷晴之：トップランナー誘導電動機の注意点と高効率運転、電気学会誌, 137, No. 5, 289~291 (2017)
- (8) R.Richter : Electrische Maschinen, Verlag Birkhauser (1954)
- (9) 米谷晴之、ほか：特許第5084980号「2重かご形回転子」
- (10) 吉桑義雄、ほか：特許第5592688号「回転電機の偏心推定方法と偏心推定システム」
- (11) 吉桑義雄、ほか：モータの振動騒音低減方法、日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, No. 09-1, 75~76 (2009)
- (12) 米谷晴之、ほか：対向コイルの電圧差による回転子の偏心検出、電気学会回転機研究会資料, RM-10-141, 43~47 (2010)
- (13) 鶴見祐輔、ほか：三相かご型誘導電動機における横流電流の検討、平成27年電気学会全国大会論文集, No. 5-054 (2015)
- (14) 大石晋也、ほか：特許第5843980号「かご形回転子の製造方法および誘導電動機の製造方法」
- (15) 大石晋也、ほか：小形誘導モータの横流れ電流を低減する加工法の開発、第63回大河内記念技術賞業績報告書 (2017)

# 省電力化を推進する SiC-MOSFET技術

友久伸吾\* 日野史郎\*\*\*  
田中梨菜\* 川原洸太朗\*\*\*  
香川泰宏\*\*

*SiC-MOSFET Technologies for Promoting Power Saving*

Shingo Tomohisa, Rina Tanaka, Yasuhiro Kagawa, Shiro Hino, Kotaro Kawahara

## 要旨

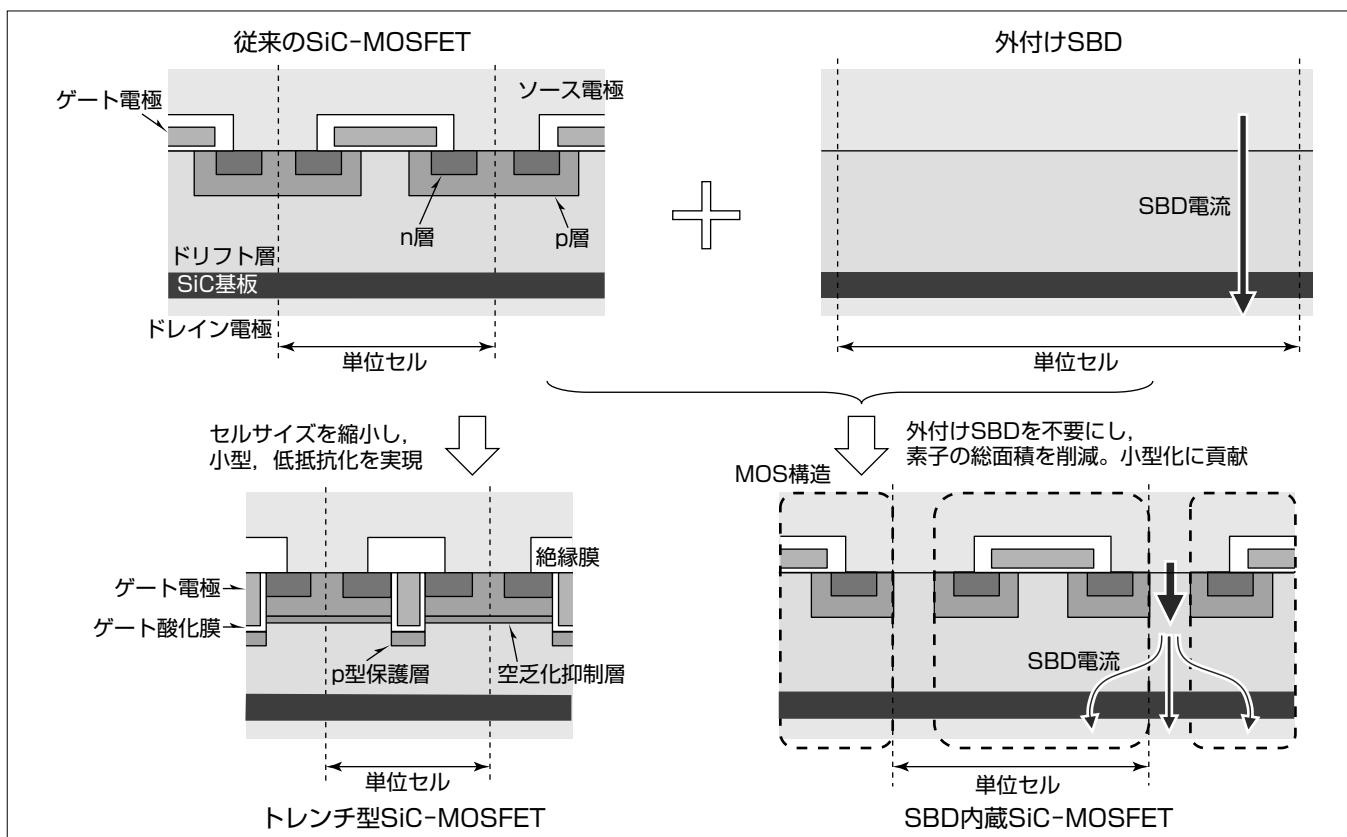
パワーエレクトロニクス機器に一層の省電力化をもたらすSiC(シリコンカーバイド)-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)は、従来のSi(シリコン)パワーデバイスに比べて素子抵抗を低くでき、損失低減、省電力化が可能である。幅広い耐圧や用途に適した特性が必要であり、新しい構造の開発が進められている。三菱電機では、実用化を目指して、トレンチ型SiC-MOSFETとSBD(Schottky Barrier Diode)内蔵SiC-MOSFETを開発中である。

トレンチ型SiC-MOSFETは、従来のプレーナー型より単位セルの縮小が可能なため、多くの電流を制御でき、素子抵抗低減が期待できる。当社は独自のp型保護層を適用し、トレンチ型の課題であるゲート酸化膜への電界集中を

抑制している。さらに、その接地化や空乏層制御によって、短絡耐量向上と素子抵抗低減を実現した。

インバータなどで必要となる外付けのSBDはパワーモジュールでMOSFETと並列接続され、高耐圧になるほど素子面積は大きくなる。SBD内蔵SiC-MOSFETでは、MOS構造を利用して耐圧と大きなSBD電流を実現している。その結果、6.5kV耐圧素子で、MOSFETの3倍程度の面積が必要な外付けSBDを不要とし、素子面積の削減が可能なことを確認した。

今後、これらの新規素子に対し、各種パワーエレクトロニクス機器への適用を目指して、信頼性確認とモジュール動作実証を進め、省電力化に貢献していく。



## 新構造SiC-MOSFETの断面模式図

トレンチ型SiC-MOSFETでは、ゲート電極を埋め込むことによって素子の小型化を可能にするとともに、p型保護層の適用によるゲート酸化膜電界低減を実現した。また、外付けで必要であったSBDを省スペースでSiC-MOSFETに内蔵させる技術を開発し、6.5kV耐圧構成で、MOSFETに対して3倍程度の素子面積が必要な外付けSBDを不要にできることを確認した。

## 1. まえがき

パワーエレクトロニクス機器に一層の省エネルギー化をもたらすSiC-MOSFETの開発を進めている。SiC-MOSFETは従来のSiパワーDEバイスに比べて素子抵抗を低くできることから、損失低減、省電力化が可能であり、600Vから3,300Vの耐圧領域で既に実用化されている。具体的には、鉄道車両向けインバータなどへ適用可能な高耐圧・大容量プレーナー型SiC-MOSFETや過電流検知に必要な電流センシング機能を内蔵させた高機能SiC-MOSFETなどが開発されてきた。SiC-MOSFETの素子抵抗は、機器の電力損失につながるため、その低減が求められているが、幅広い用途に対応するためには多様な特性要求に適した構造設計が必要であり、開発が進められている。

図1(a)は、SiC-MOSFETの素子抵抗の構成を断面構造に対して示した模式図であり、図1(b)は素子抵抗の主な構成割合を耐圧ごとに簡単に比較した例である。ドリフト層抵抗( $R_{drift}$ )は耐圧によって大きく変化し、チャネル抵抗( $R_{ch}$ )及び基板抵抗( $R_{sub}$ )は耐圧による変化は小さい。このように低耐圧素子ではチャネル抵抗、高耐圧素子ではドリフト抵抗の割合が大きいことから、各要素抵抗を低減した場合の全体抵抗への寄与は耐圧によって異なる。それらを考慮しながら、本稿では、実用化を目指して開発しているトレンチ型SiC-MOSFETとSBD内蔵SiC-MOSFETについて述べる。

プレーナー型SiC-MOSFETに比べて小型・低損失化が期待できるトレンチ型SiC-MOSFETは、単位セルを縮小できるため、チャネル密度の向上が可能であり、チャネル抵抗の割合が大きな低耐圧用途で高い効果が得られると期待されている。

SBD内蔵SiC-MOSFETは、インバータなどで必要となる外付けのSBDをMOSFET内に組み込んだ素子である。高耐圧になるほど必要となるSBDの素子サイズは大きくなるため、高耐圧時のメリットが大きいと期待している構造であり、本稿では6.5kV耐圧素子について述べる。

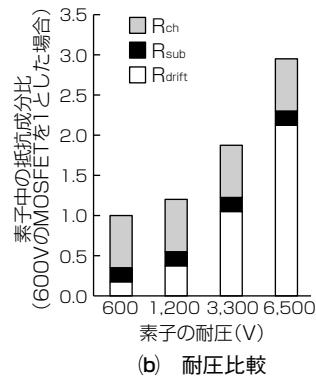
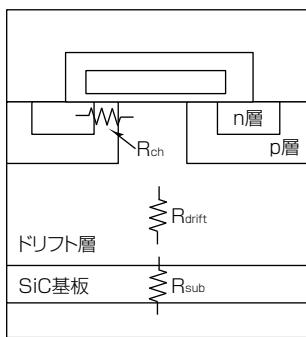


図1. SiC-MOSFETの抵抗構成例

## 2. トレンチ型SiC-MOSFET

### 2.1 トレンチ型SiC-MOSFETの構造

これまで開発を進めてきたトレンチ型SiC-MOSFETの斜視模式図及びソース電極形成前の走査型電子顕微鏡(SEM)像を図2に示す。大きな特徴は、トレンチ底部に形成されている“p型保護層”とセルを間引きしてこのp型保護層とソース電極を接続する“保護層接地セル”である。p型保護層は、トレンチ底部のゲート酸化膜に対する電界を緩和するためにトレンチ底に形成されている。トレンチエッチング後に注入工程を行うため、大幅な工程増なく選択的に形成できる。また、このp型保護層は活性セルを間引いて形成される保護層接地セルによってソース電極と接続され、電気的に接地されている。

### 2.2 トレンチ型SiC-MOSFETの特性

保護層接地セルの適用によって図3に示すように、ゲート酸化膜への電界緩和と短絡耐量の向上が期待される。図3(a)は、ドレン電圧とゲート酸化膜に生じる最大酸化膜電界の関係をシミュレーションした結果である。p型保護層の接地によって600Vのドレン電圧でのゲート酸化膜の最大電界は約60%低減され、寿命を含めた信頼性向上に対する効果が期待される<sup>(1)</sup>。

保護層接地セルは活性セルを間引いて作成するため、チャネル密度が減少し、素子抵抗は増加する。しかしながら

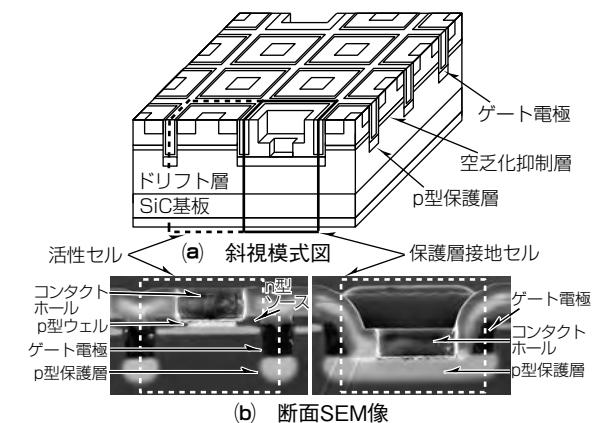


図2. 開発したトレンチ型SiC-MOSFETの構造図

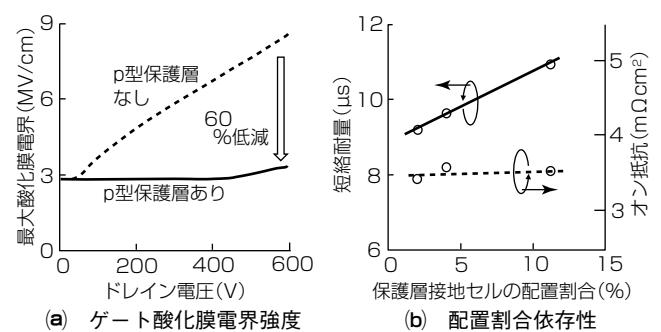


図3. p型保護層と接地セルの効果

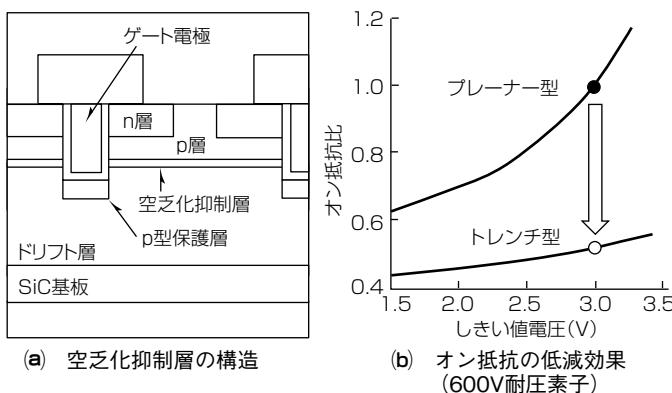


図4. 空乏化抑制層の効果

ら、素子抵抗とトレードオフ関係にある短絡耐量を改善することが可能になる。短絡耐量は負荷短絡の発生によって素子に大電流が流れた場合に、短絡事故発生から素子破壊にいたるまでの時間で議論されることが多い、回路的に検知され電流が遮断されるまでの時間よりも長いことが必要である。図3(b)は保護層接地セルの配置割合を変化させた際の短絡耐量及びオン抵抗の変化を示したものである。保護層接地セル割合の増加に伴って短絡耐量も増加していく、配置割合11%で約11μsに達した。これは短絡発生が回路によって検知され、電流が遮断されるまでに十分な時間である。この場合でもオン抵抗の増加は僅かに抑えられており、保護層接地セルの適用による抵抗増は限定的である。発光解析から、短絡時の素子破壊箇所は保護層接地セルから遠い部分に集中していることが明らかとなっている。保護層接地セルの配置割合が増加することで、過渡応答時に流れる変位電流の経路が短くなり、ゲート酸化膜にかかる電界を抑制できているものと考えられる<sup>(2)</sup>。

トレンチ底にp型保護層を設けることで、空乏層の広がりによる電流経路の狭窄(きょうさく)が生じ、抵抗増を引き起こす。その対策として、p型ウェルの下に適切なn型層(空乏化抑制層)を導入する構造を開発している。図4(a)は、その構造の断面模式図であり、図4(b)はオン抵抗比をプレーナー型と比較したものである。600V耐圧素子での比較の結果、空乏化抑制層を導入したトレンチ型では、しきい値電圧3.0Vでプレーナー型より45%オン抵抗を低減させることができる。

このように、チャネル抵抗の占める割合の大きな低耐圧用途で低抵抗化が期待されるトレンチ構造に対し、ゲート酸化膜電界緩和及び短絡耐量向上の取組みを示した。高い信頼性を保持しつつ、小型・低損失化の実現が期待される。

### 3. SBD内蔵SiC-MOSFET

この章では、チャネル部の抵抗低減が大きな効果をもたらす低耐圧用途と異なり、ドリフト層の抵抗が大きな割合を占める高耐圧用途で有用なSBD内蔵技術について述べる。

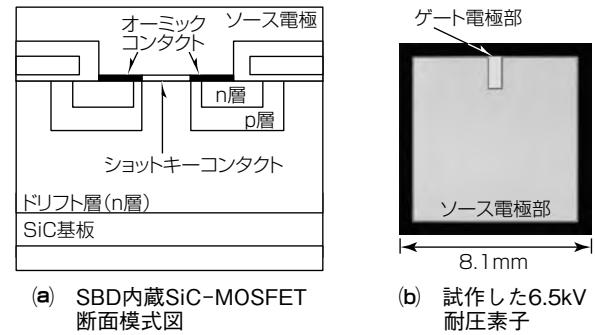


図5. SBD内蔵SiC-MOSFET

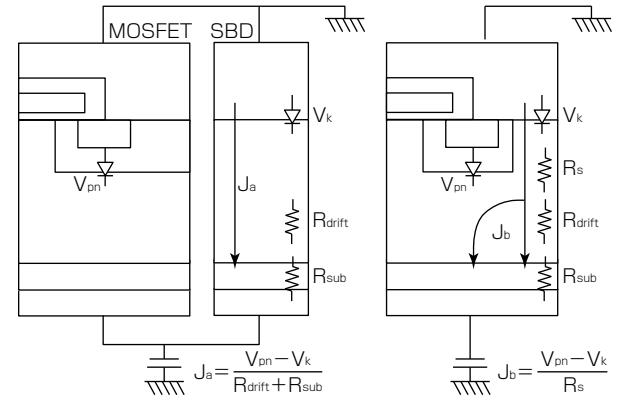


図6. 電流経路の模式図

### 3.1 SBD内蔵SiC-MOSFETの構造

SiC-MOSFETでは、基板やドリフト層に結晶欠陥が存在している。ボディダイオードと呼ばれるpn接合部を通じて流れるバイポーラ電流は、SiC膜中に存在している欠陥を拡大し、耐圧低下などの特性劣化を引き起こす原因となることが知られている<sup>(3)</sup>。その対策として、MOSFETに並列にSBDを接続することでMOSFET内に流れるバイポーラ電流を抑制することや、マージンを持った素子設計や良品選別、又は欠陥の少ない高品質な基板の活用などが対策とされているが、いずれもコスト増などの課題を伴う。

当社はこの課題に対し、MOSFETにSBDの機能を搭載させ、バイポーラ電流を抑制させるSBD内蔵構造を考案した。図5は素子断面構造と試作した8.1mm角の6.5kV耐圧素子の外観を示す<sup>(4)</sup>。ソース電極は、同一コンタクトホール内でオームコンタクトとショットキーコンタクトを持つ構造となっており、工程増を抑制している。

MOSFETにSBDを内蔵せる場合には、SBD部分に十分な電流が流れることに加えて、ボディダイオード部に電流が流れないことと、十分な素子面積削減効果が得られることが要求される。

図6は、SBDを外付けした場合と開発したSBD内蔵素子の場合の電流経路を示した模式図である。 $V_{pn}$ は先に述べたバイポーラ電流が流れ始めるpn接合部の電圧であり、 $V_k$ はショットキー接合部に発生する電圧である。 $R_s$ は

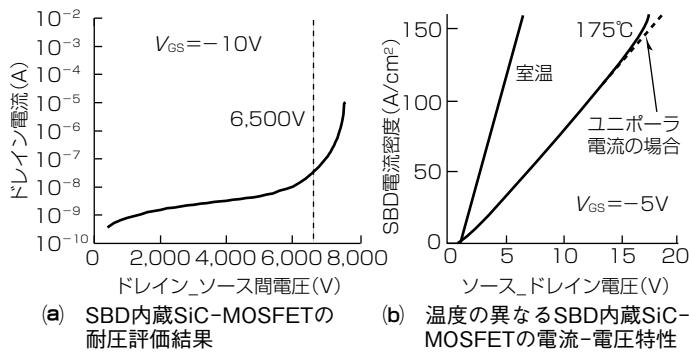


図7. SBD内蔵SiC-MOSFETの特性

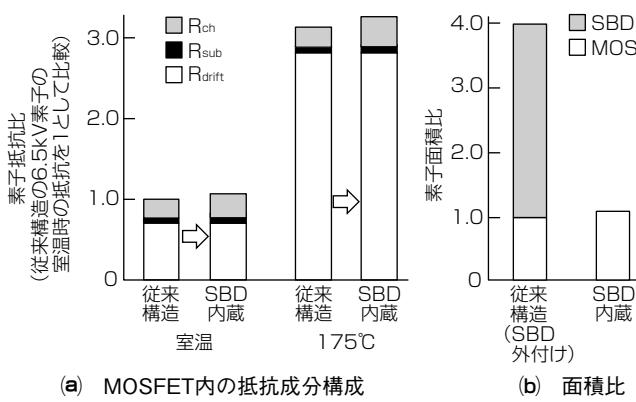


図8. SBD内蔵SiC-MOSFETと従来構成の比較

SBD内蔵でのJFET (Junction Field Effect Transistor) 抵抗を示す。それぞれの場合にショットキー接続部を通して流れるユニポーラ電流は、図中の $J_a$ ,  $J_b$ となる。言い換えると、 $J_a$ ,  $J_b$ 以上の電流を流す場合にpnダイオード部にバイポーラ電流が流れることになり、この $J_a$ ,  $J_b$ を大きくすることが重要となる。図中に示すように、外付けSBDではドリフト層の抵抗が影響するため、高耐圧素子では大きな面積が必要となる。一方、SBD内蔵の場合にはドリフト層の抵抗に依存しないため、高耐圧でも $R_s$ を抑制することで素子面積の増大を抑制できる。

### 3.2 SBD内蔵SiC-MOSFETの特性

図7は、SBD内蔵SiC-MOSFETの耐圧評価結果と室温及び175°Cでの電流-電圧特性を示す。リーク電流も抑制した6.5kV以上の十分な耐圧が得られていることが分かる。175°Cでも10V以上の電圧までバイポーラ電流が発生しておらず、ユニポーラ電流として流せる最大電流密度は120A/cm<sup>2</sup>程度であり、十分な電流密度と言える。

SBDを内蔵することによって単位セルが大きくなりチャネル密度が減少するため、抵抗は増加することになる。しかしながら、図1に示したように、高耐圧素子ではドリフト抵抗( $R_{drift}$ )の占める割合が大きく、チャネル抵抗の割合は小さいため、SBDを内蔵することによって生じるチャネル抵抗の増加分の影響は小さい。図8は6.5kV耐圧SBD内蔵SiC-MOSFETのオン抵抗についてSBDを

内蔵していない従来のMOSFETと比較したものである。室温、175°Cのどちらの場合でも抵抗増加は10%程度である。同程度のユニポーラ電流を流すためには、外付けSBDではMOSFETの3倍程度の素子面積が必要なことから、素子サイズの縮小効果は非常に大きい(図8(b))。

このように、SBD内蔵SiC-MOSFETで、所望のSBD特性が得られ、課題であったボディダイオードへのバイポーラ電流抑制が可能であることが確認できた。このようなSBD内蔵SiC-MOSFETに対し、通電劣化特性やモジュール動作特性の評価を進めている。今までのところ、SBDを内蔵することによるMOSFETの信頼性劣化は確認されておらず、良好な結果が得られており、実用化に向けて開発を推進している。

## 4. むすび

パワーエレクトロニクス機器の低損失化の実現を目指して開発中である2種の新しい構造のSiC-MOSFETについて述べた。

600V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETでは、p型保護層とその接地構造及び空乏化抑制層の導入によって、短絡耐量向上と抵抗低減を実現した。

一方、高耐圧化時の課題である厚膜SiC層へのバイポーラ電流による特性劣化対策となるSBD内蔵技術を6.5kV耐圧MOSFET素子で実現し、SBDを外付けする場合と比較して約10%の素子抵抗増でSBDを不要化できることを確認した。

幅広い耐圧のSiC素子に対し、それぞれの課題や効果を見極めた新構造の開発を進めている。今後はこれらの実用化を図るとともに、更なる高性能・高信頼のSiCデバイス開発を進め、パワーエレクトロニクス機器の省電力化実現に貢献していく。

この研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構(NEDO)から委託された“低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト／高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発”によってなされたものである。

## 参考文献

- Kagawa, Y., et al.: Materials Science Forum, 919, 778~780 (2013)
- Tanaka, R., et al.: IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 75 (2014)
- Bergman, P., et al.: Materials Science Forum, 389, 9~14 (2002)
- Kawahara, K., et al.: IEEE 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 41 (2017)

# SiCデバイスを活用したパワーエレクトロニクス機器の省エネルギー技術

大井健史\*

Energy Saving Technologies of Power Electronics Applications Using SiC Devices

Takeshi Oi

## 要旨

パワーエレクトロニクスの重要な役割の1つが省エネルギーへの貢献である。VVVF(Variabe Voltage Variable Frequency)インバータの実用化に伴い、パワーエレクトロニクス機器(以下“パワエレ機器”という。)は飛躍的に普及拡大した。パワーデバイスはその性能進化によって、パワエレ機器の発展を支えてきた。

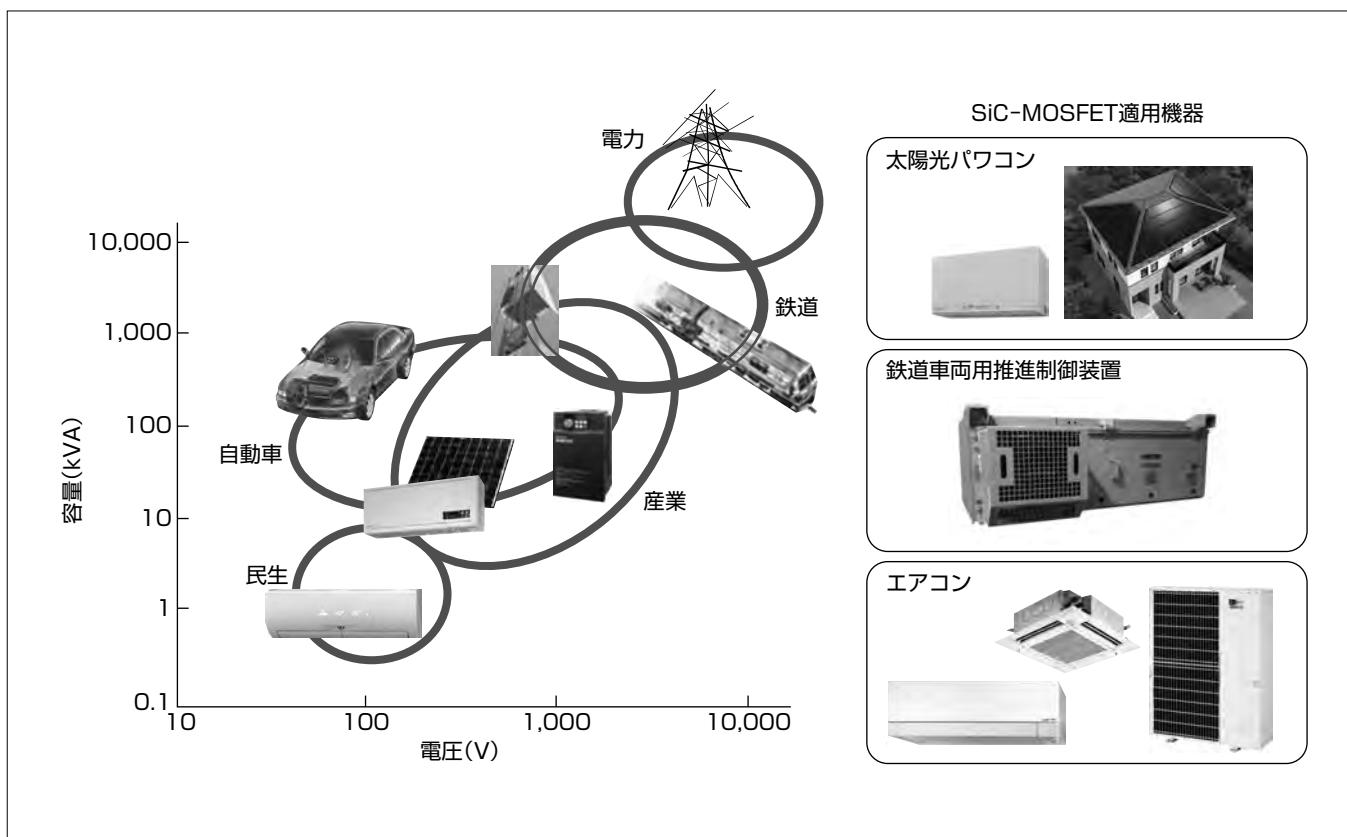
SiC(シリコンカーバイド)デバイスは、Si(シリコン)デバイスの限界をはるかに超えた性能を実現でき、これまで省エネルギーに貢献してきたパワーエレクトロニクスを更に進化させるキーデバイスとして期待されている。

SiCデバイスを活用して省エネルギーを実現する方法として、パワエレ機器そのものの損失を低減し、電力変換効率を向上させる方法と、パワエレ機器を含むシステム全

体の損失を低減して省エネルギーを実現する方法がある。前者の代表例として、太陽光発電用パワーコンディショナ(以下“太陽光パワコン”という。), 後者の代表例として、鉄道車両用推進制御装置が挙げられる。三菱電機は住宅用太陽光パワコンにSiCを適用し、業界最高<sup>(注1)</sup>の98%の電力変換効率を達成した。鉄道車両用推進制御装置では、SiCを適用することによって、主回路システムの主要な消費電力損失である、空気ブレーキとモータ損失を大幅に低減し、主回路システム全体として、従来比約40%の省エネルギー効果を実証した。

今後もSiCデバイスの更なる普及拡大に向けた開発を進めしていく。

(注1) 2014年7月24日現在、当社調べ



## 当社でのSiC適用パワーエレクトロニクス機器

パワーエレクトロニクスは民生から産業、自動車、鉄道、電力までの広範な分野での省エネルギーに貢献している。当社は、2010年からSiC適用機器を市場投入し、その省エネルギー性を実証してきた。太陽光パワコン、鉄道車両用推進制御装置、エアコンは省エネルギー要求が強く、既にSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を適用した機器を製品化している。今後もSiC適用機器の普及拡大に向けた開発を進める。

## 1. まえがき

1950年代のサイリスタの発明によって、パワーエレクトロニクスが始まったと言われている。バイポーラパワートランジスタやGTO(Gate Turn-Off)サイリスタなどの自己消弧型デバイスの発明に伴い、VVVFインバータが実用化されると、パワーエレ機器は飛躍的に普及拡大した。パワーエレクトロニクスの性能指標であるパワー密度(単位体積当たりの変換器出力)は、30年間で2桁進化したと言われている。

パワーエレクトロニクスは省エネルギーのキー技術の一つであり、地球環境問題が重要視される中、更なる進化が期待されている。

パワーデバイスはその性能進化によって、パワーエレクトロニクス機器の発展を支えてきた。現在、低耐圧領域ではMOSFET、600V以上の高耐圧領域では、主にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が使用されている。

SiCはバンドギャップがSiの約3倍、絶縁破壊電界強度が約10倍という、パワーデバイスとして優れた特性を持つ半導体材料であり、Siの次のパワーデバイスとして期待されている。

当社は、1990年代にSiCデバイスの開発に着手し、2010年から、SiCダイオード適用製品の市場投入を開始した。最初の製品はルームエアコン“霧ヶ峰”である。SiC-MOSFETを適用した最初の製品は直流1,500V架線向けの鉄道車両用VVVFインバータであり、2014年に鉄道車両に搭載されて走行試験を実施し、その後営業運転に投入されている。その後、フルSiC適用太陽光パワコン、フルSiC-DIPIPM(Dual-In-line Package Intelligent Power Module)<sup>(1)</sup>適用パッケージエアコン及びルームエアコンを市場投入している。

SiCデバイスは、Siデバイスの限界をはるかに超えた性能を実現することができ、これまで省エネルギーに貢献してきたパワーエレクトロニクスを更に進化させるキーデバイスとして期待されている。

SiCデバイスを活用して省エネルギーを実現する方法として、パワーエレ機器そのものの損失を低減し、電力変換効率を向上させる方法と、パワーエレ機器を含むシステム全体の損失を低減して省エネルギーを実現する方法がある。前者の代表例として太陽光パワコンが挙げられる。太陽光パワコンは、パワーデバイスの性能改善、高効率電力変換回路方式の開発などによって、高効率化を実現してきた。後者の代表例として、鉄道車両用推進制御装置が挙げられる。後述するように、鉄道車両駆動システムでは、パワーエレ機器だけの高効率化ではなく、システム損失の中で主要な損失源を特定し、パワーエレクトロニクスの技術を活用して、それらの損失を低減することが重要である。

## 2. SiCデバイスの特長

パワーエレ機器はパワーデバイスがオンとオフ状態を切り替えることによって電力変換を行う。パワーデバイスは、オン状態とスイッチング時に損失が発生する。パワーデバイスはオフ期間中の高電圧を維持しなければならず、耐圧維持層が設けられている。耐圧維持層は耐圧が高くなるほど、不純物濃度が低くかつ厚くなり、MOSFETのようなユニポーラデバイスでは、オン電圧の主成分となる。

IGBTはバイポーラデバイスであり、オン状態では耐圧維持層にホールが注入され、キャリア濃度が数桁上昇する(伝導度変調)。この特性によって、高耐圧であっても低オン電圧が得られる。現在定格電圧6.5kVまで製品化されている。

IGBTのようなバイポーラデバイスは、オフ時に、オン時に蓄積されたキャリアを全て吐き出さなければならず、大きなターンオフ損失が発生する。IGBTのオン電圧とターンオフ損失はトレードオフの関係にある。

SiCはSiに比べ絶縁破壊電界強度が10倍であるため、耐圧維持層を高濃度化し、かつ薄くできる。このため、高耐圧領域でも、Si-IGBTと同等のオン電圧をスイッチング損失の小さいMOSFETで実現できる。現在、定格電圧3.3kVのSiC-MOSFET<sup>(2)</sup>が実用化されている。

MOSFETの有利な点は、スイッチング損失だけでなく、出力特性(主電流-主電圧特性)にもある。MOSFETの出力特性は、原点を通る抵抗特性を示すのに対し、IGBTの出力特性は、ダイオードと同様に一定電圧(Siでは0.8V程度)を超えた電圧以上で電流が流れ始める特性を示す。定格電流でのオン電圧が同じ、MOSFETとIGBTを比較すると、定格電流以下のオン電圧はMOSFETの方が低い。インバータのように交流を扱うパワーエレ機器や、エアコンや太陽光パワコンのように、定格出力だけでなく軽負荷時の効率が重要なパワーエレ機器では、MOSFETの方が有利である。

## 3. SiC適用太陽光パワコン

太陽光パワコンは、太陽電池の直流電圧出力を正弦波交流電力に変換する装置である。変動する太陽電池の出力電圧を調整するDC/DC変換回路(チョッパ)，直流電圧を交流に変換するDC/AC変換回路(インバータ)，インバータ出力を正弦波出力に変換するフィルタからなる構成が基本である。太陽光パワコンは電力変換効率が重要視される装置の一つであり、そのためには、チョッパ、インバータ及びフィルタの損失低減が必要である。

図1に住宅用太陽光パワコンで基本的な構成である、2レベルPWM(Pulse Width Modulation)インバータ方式を示す。2レベルPWMインバータ方式では、出力電圧は図のようにパルス電圧波形となる。この電圧はフィルタで正弦波出力に変換される。

図2に当社独自の方式である、階調制御方式の構成を示す。階調制御方式インバータでは、電圧の異なるインバータを直列に接続することで、より正弦波に近い電圧を出力できる。このため、フィルタ損失の大幅な低減が可能である。この方式を適用することで、住宅用太陽パワコンとして、当時業界トップの97.5%の電力変換効率が得られている。この効率は、後述するSiC適用太陽光パワコンが出現するまで、トップの位置を維持していた。

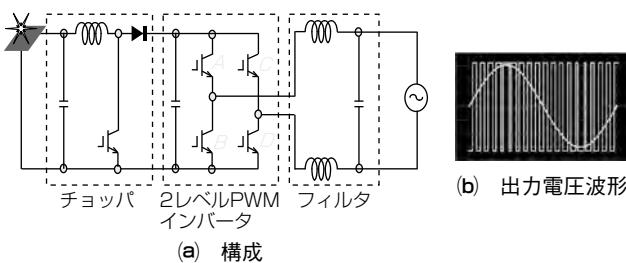


図1. 2レベルPWMインバータ方式

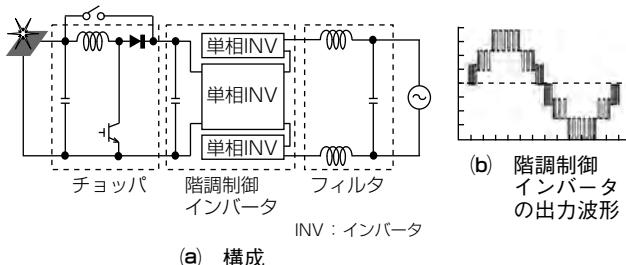


図2. 階調制御方式インバータ方式

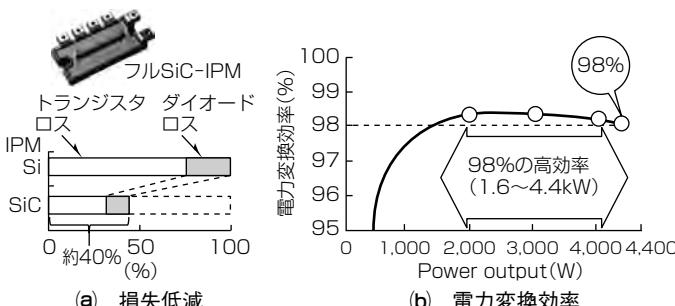


図3. フルSiC-IPM適用によるパワーデバイスの損失低減とSiC適用パワコンの電力変換効率

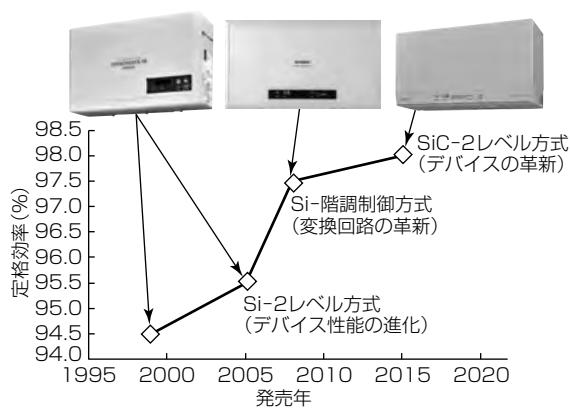


図4. 当社製住宅用太陽光パワコンの効率改善の推移

当社は、フルSiC-IPM(Intelligent Power Module)を開発し、太陽光パワコンに適用した。IPMはトランジスタのゲート駆動や短絡等の保護機能を内蔵するパワーモジュールである。IPMには、チョッパ回路と2レベルインバータ回路が内蔵されている。図3に示すように、パワーデバイスの損失がSiに比べて、約60%低減でき、業界最高の98%の効率(定格出力時)を実現した。

図4に当社製住宅用太陽光パワコンの効率改善の推移を示す。Siデバイスの性能の進化や変換回路の革新によって、電力変換効率を改善してきたが、2015年にSiCデバイスを適用することで、Siデバイスの限界を超えた変換効率が実現できている。

#### 4. SiC適用の鉄道車両用推進制御装置

鉄道車両用推進制御装置は、運転台からの指令に基づき、架線の電力を交流電力に変換し、主電動機(モータ)を制する装置である。加速時には架線からの電力を変換してモータに供給する(力行動作)。減速時には、車両の運動エネルギーを変換して架線側に供給する(回生動作)。回生されたエネルギーは、他の鉄道車両や、駅舎補助電源装置を介して駅舎の空調やエレベーターなどに供給される。

図5に鉄道車両システムの主回路消費電力分析結果の例を示す。インバータ損失は全体の2%であり、SiC適用によってインバータ損失を半減したとしても、全体としての省エネルギー効果が小さいことが分かる。そこで、SiCの性能を活用して、消費電力の主要成分であるモータ損失と空気ブレーキ損失を低減することを検討した。

まず、モータ損失低減方法について検討した。基本周波数に対して、スイッチング周波数が十分高くない場合、高調波成分が大きくなっている、大きな損失が発生する。従来の制御方式では、Siデバイスのスイッチング損失が大きいため、スイッチング周波数が制限されていた。このため、モータ電流の高調波成分が多く、高調波損失が大きかった(図6)。SiCデバイスはスイッチング性能が優れており、高周波スイッチングによるモータ損失低減が可能である。図に示すように高周波スイッチングによって、高調波の少ない、モータ電流が得られている。

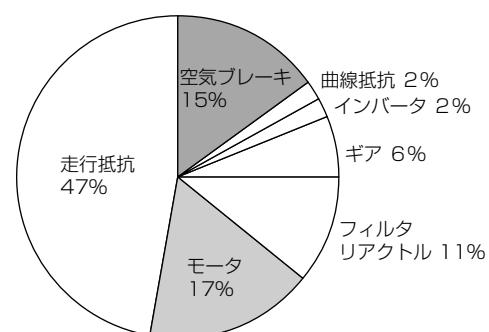


図5. 主回路消費電力分析結果

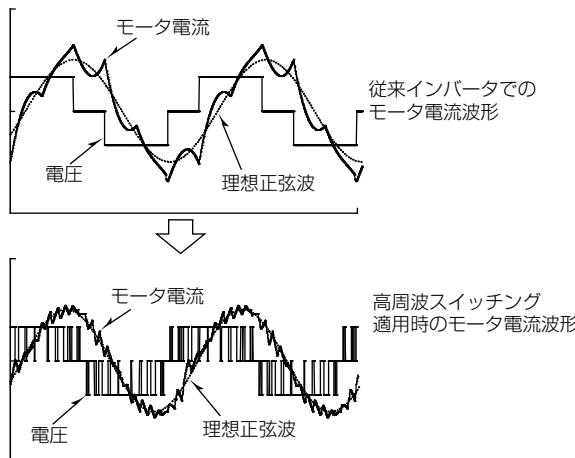


図6. 高周波スイッチングによるモータ損失低減

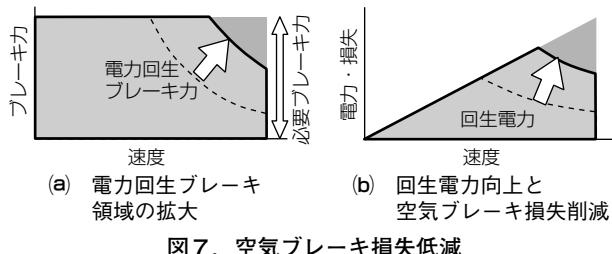


図7. 空気ブレーキ損失低減

次に、空気ブレーキによる発生損失の低減を検討した。従来、高速域ではブレーキ力が低下するため、空気ブレーキが使用されていた。空気ブレーキでは、車両の運動エネルギーは熱に変換され損失となる。電力回生ブレーキ領域を高速域に拡大することで、空気ブレーキによる損失を低減できる(図7)。しかし、停動トルクを拡大するためには、モータ電流を増加させる必要があり、インバータ損失が増大する。SiCデバイスの低損失性能を活用することで、インバータ損失の増大を抑え、回生ブレーキ領域を拡大することができる。

まず、2011年にSiCダイオードとSi-IGBTを搭載する1.7kVパワーモジュールを適用した直流600／750V架線対応の鉄道車両用インバータを製品化し、現在地下鉄などで営業運転中である。続いて、3.3kV SiC-MOSFETを適用した直流1,500V架線対応の鉄道車両用インバータを製品化した(図8)。

2014年の走行試験を経て営業運転に投入され、約4か月間の省エネルギー効果の検証の結果、主回路システム全体として従来比約40%の省エネルギー効果を実証した。

2015年には新幹線用のSiC適用主変換装置を開発し、新幹線車両に搭載されて、走行試験を実施中である。

図9に示すように、鉄道分野では、地下鉄から新幹線までSiCデバイスの適用が進み。鉄道車両システムの省エネルギーに貢献している。



入力電圧	直流1,500V
主回路方式	2レベル方式電圧型PWMインバータ (電力回生ブレーキ付き)
制御方式	180kW級モータ×4台並列制御
冷却方式	走行風自冷方式

PWM : Pulse Width Modulation

図8. 直流1,500V架線対応SiC適用鉄道車両用インバータ

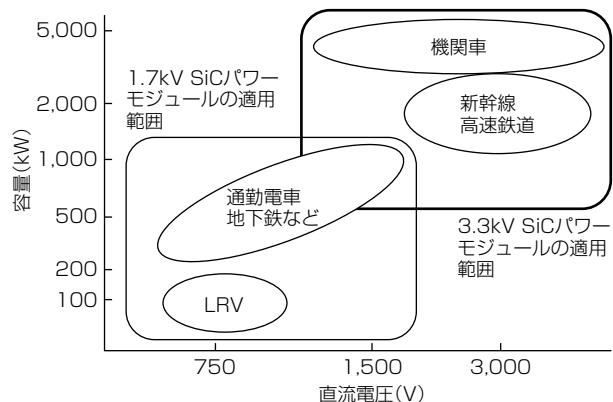


図9. 鉄道分野でのSiCデバイスの展開

## 5. む す び

SiCデバイスは、長い開発期間を経て、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーのキーデバイスとして実用化を開始した。今後は自動車や、電力機器などの高耐圧機器の領域を含め、パワーエレクトロニクスの全領域に普及拡大し、地球規模での省エネルギーに貢献していく。そのためには、SiCデバイスとその応用機器の一層の高性能化、高耐圧化、高信頼化及び低価格化に向けた開発が必須である。

本稿で述べた開発の一部は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施した。

## 参 考 文 献

- (1) 古橋壯之, ほか:超小型DIPPM用SiC-MOSFET, 三菱電機技報, 91, No.7, 377~380 (2017)
- (2) 濱田憲治, ほか:鉄道車両用フルSiC適用インバータを実現する3.3kV耐圧SiC-MOSFETの低抵抗化技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 373~376 (2017)

# 欧州市場向け暖房給湯システム用省エネルギー対策デバイス

飯島 茂\* 南迫博和\*\*\*  
執行和浩\*\* 鈴木一隆\*\*\*  
野田清治\*\*

Energy Saving Device for Air To Water System in European Market

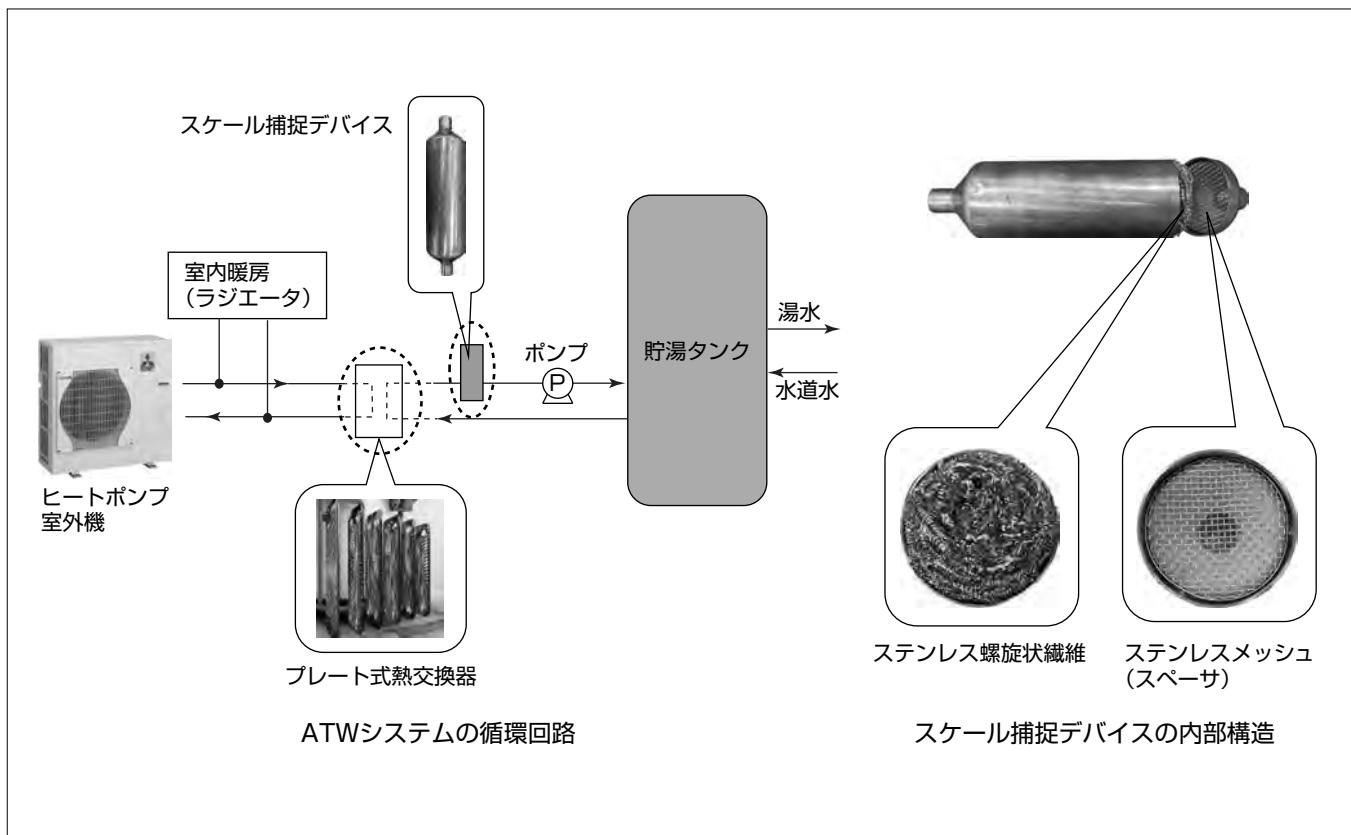
Shigeru Iijima, Kazuhiro Shigyo, Seiji Noda, Hirokazu Minamisako, Kazutaka Suzuki

## 要旨

三菱電機の欧州市場向け暖房給湯システム“ecodan”はATW(Air To Water)システムと呼ばれる製品である。ATWシステムは、ヒートポンプ室外機を使用することで空気中の熱を高効率で熱エネルギーに変換し、この熱エネルギーを温水の沸き上げに使用するため、省エネルギーかつCO<sub>2</sub>排出の少ない熱源として注目されている。

ecodanは、2014年製品から伝熱効率向上による省エネルギーとシステムコスト低減を目的として、加熱方法をコイルインタンク方式から、外付けプレート式熱交換器方式に変更した。ecodanの主要市場である欧州地域は水道水中のカルシウム硬度が高いことで知られ、プレート式熱交換器内部への炭酸カルシウムスケール付着による熱交

換効率低下が懸念される。そこで、炭酸カルシウムスケール(以下“スケール”という。)を効率良く捕捉し、プレート式熱交換器を保護する働きを持つ捕捉デバイスを開発した。このデバイスの形状は円筒容器で、その内部に螺旋(らせん)状のステンレス繊維を充填している。その繊維上に炭酸カルシウムの結晶を成長させ、水中のカルシウムを除去する。ecodanにプレート式熱交換器とスケール捕捉デバイスを導入した実証試験で、スケール全析出量の81%がこのデバイス内にとどまり、熱交換器へのスケール付着抑制効果を確認した。その結果、このデバイスを搭載したecodanを2014年に欧州市場に投入した。



## スケール捕捉デバイス

スケール捕捉デバイスは銅管にステンレス螺旋状繊維を充填し、両端をステンレスメッシュで固定する構造を持ち、水道水内のスケール成分を内部に捕捉して成長させることで、プレート式熱交換器を保護する。スケール捕捉デバイスを搭載することで、欧州の高カルシウム硬度地域でも暖房給湯システムにプレート式熱交換器を導入することが可能になり、給湯性能向上による省エネルギーと原価低減に貢献した。このデバイスを2014年製品に搭載し、欧州市場に投入した。

## 1. まえがき

当社は2007年から欧州市場向け暖房給湯システムecodanを市場に投入した。ecodanはATWシステムと呼ばれる製品である。ATWシステムは、ヒートポンプ室外機を使用することで空気中の熱を高効率で熱エネルギーに変換し、この熱エネルギーを温水の沸き上げに使用するため、省エネルギーかつCO<sub>2</sub>排出の少ない熱源として注目されている。

ecodanの主要市場である欧州の水道水は、日本の水道水に比べてカルシウム硬度が高い。そのため欧州では、暖房給湯システムの水道水流路へのスケール付着が日本より発生しやすい傾向にあり、熱交換性能の低下や圧力損失の増加が懸念される。

2014年以前のモデルのecodanでは熱交換器へのスケール付着による圧力損失の低下を防止するために、貯湯タンク内にコイル式熱交換器を持つコイルインタンク方式が採用されていた(図1)。コイルインタンク方式では、高カルシウム硬度の水道水がコイル式熱交換器の外側を連続的に流れるため、タンク内のコイル表面でスケールが成長する。しかし、コイル式熱交換器は貯湯タンク内部に設置されており、十分広い空間が確保されているため、スケール付着による熱交換器部分の圧力損失上昇の問題は発生しない。一方で、コイルインタンク方式はタンク内の大量の水道水を同時に加熱するため伝熱効率が低く、さらにタンク内にコイルの設置が必要であることから、システムコストが高いという課題がある。

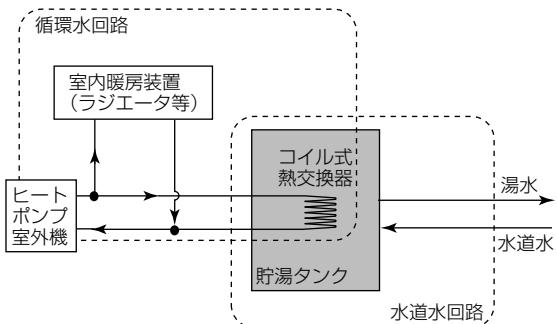


図1. 2014年以前のモデルのecodanの循環回路図

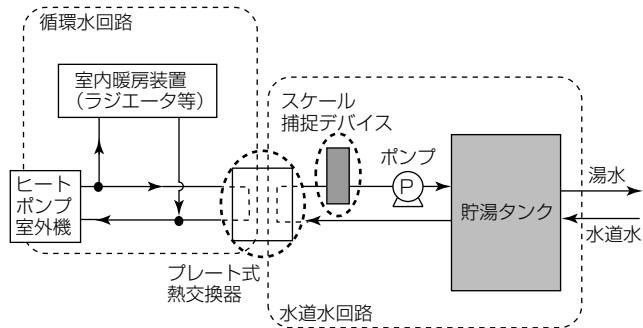


図2. 2014年モデルのecodanの循環回路図

これらの課題を解決するため、2014年のecodanのモデルチェンジで、給湯方式をコイルインタンク方式から外付けプレート式熱交換器方式に変更した。外付けプレート式熱交換器方式は、プレート式熱交換器とポンプを設置し、プレート式熱交換器で貯湯タンク内の水道水を高温の循環水と熱交換させる方式である(図2)。プレート式熱交換器は伝熱効率が高く、コイルインタンク方式と比較すると小型で、低コストである。一方でプレート式熱交換器はスケール析出によって伝熱面が覆われると、流路断面積が減少し、システムの圧力損失の増加によるポンプの故障といった不具合につながる可能性がある。

そこで、ecodanにプレート式熱交換器を導入するためには、ATWシステム用のスケール捕捉デバイスを開発した。

本稿ではこのスケール捕捉デバイスの構造や、実証試験の結果について述べる。

## 2. スケール捕捉デバイスの設計

### 2.1 設計目標

スケール捕捉デバイスは①スケールが高効率で捕捉され、プレート式熱交換器へのスケール付着を抑制すること、②メンテナンスフリーであることの2点を設計目標とした。

新型ecodanは貯湯タンクに水道水をため、貯湯タンクの外に設置したポンプ、プレート式熱交換器、スケール捕捉デバイスを含む回路内に貯湯タンク内の水道水を約5回、合計1時間循環させ、加熱するシステムである。そこで、高温で析出しやすいスケールの特徴とプレート式熱交換器を含む回路内を複数回循環する新型ecodanシステムの特徴に着目し、スケール捕捉デバイスを設計した。

### 2.2 構造

スケール捕捉デバイスの構造を図3に示す。スケール捕捉デバイスは銅管を使用し、ecodanの配管径に合わせて入り口部分と出口部分を円すい台状に縮管し、ステンレス螺旋状纖維を捕捉材として銅管内部の円筒部分に充填した。さらに円すい台部分に捕捉材が入り込まないように、円状のリングの内側にステンレス製のメッシュを持つスペーサを設置した。またスケール捕捉デバイスは図に示すように垂直方向に設置し、水の入り口を下側、出口を上側とした。

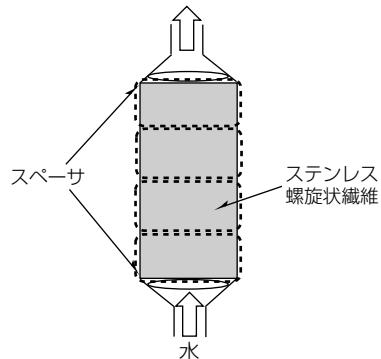


図3. スケール捕捉デバイスの構造

### 3. スケール捕捉デバイスのスケール捕捉メカニズム

開発したスケール捕捉デバイスのスケール捕捉メカニズムは次のとおりである。また図4にそのスケール捕捉メカニズムのモデル図を示す。

図4(a)に示すように、水中で析出したスケール粒子がスケール捕捉デバイスの中に入る。スケール捕捉デバイスに充填された捕捉材と衝突したスケール粒子は、捕捉材表面に付着する。捕捉材は三次元的な構造を持つ螺旋状纖維であり、螺旋部の開口径は5 mmである。そのため水中で発生するスケール粒子の粒子径(μmオーダー)より十分に大きい。よって螺旋部をスケール粒子が容易に通過可能であり、スケール粒子は場所によらず一定の確率で捕捉材に衝突すると考えられる。したがってスケール捕捉デバイスの入り口部分にスケール付着が集中することなく、図4(b)に示したように入り口から出口にわたって一定の確率で付着する。螺旋状纖維の開口径はスケール粒子より大きいが、螺旋状纖維の螺旋部の向きは不規則であり、大部分のスケール粒子は通過するまでに螺旋状纖維に衝突して捕捉される。一部のスケール粒子は付着せずスケール捕捉デバイスから出るが、ecodanでは貯湯タンク内の水は熱交換器とスケール捕捉デバイスを含む流路を5回循環するため、ほぼ全てのスケール粒子がスケール捕捉デバイスに捕捉される。プレート式熱交換器もスケール捕捉デバイス同様、スケール粒子を含む水が5回通過することになるが、プレート式熱交換器は捕捉材のような障害物が置かれることがなくプレート間にmmオーダーの流路が存在するだけであり、スケール粒子の衝突の可能性はスケール捕捉デバイスのそれと比べて十分低いと考えられる。さらにスケール捕捉デバイスをプレート式熱交換器の後段に設置することで、システム内で最高水温となる水が流入することになる。この水が螺旋状纖維上に付着したスケール粒子の周りを流れるため、図4(c)に示したように螺旋状纖維上に付着したスケールを起点として結晶成長が起り、水中のスケール

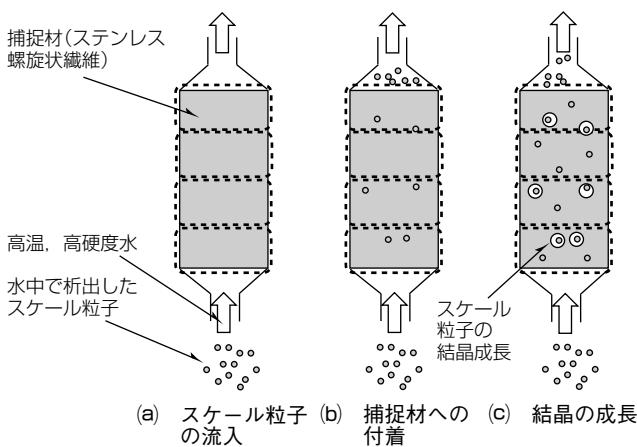


図4. スケール捕捉デバイスのスケール捕捉メカニズム

成分が効率良く捕捉されると考えられる。また螺旋状纖維が三次元的な構造を持つため、螺旋状纖維上で纖維に沿った結晶成長が生じることで三次元的に成長することになる。よってスケール捕捉デバイスの三次元的な構造全体を使用して、スケールを捕捉するため、スケール捕捉デバイス自体の閉塞を防止するとともに捕捉量を増加させる。

### 4. スケール捕捉デバイスの実証試験

#### 4.1 試験方法

スケール捕捉デバイスの性能を評価するために、ecodan実機を用いた実証試験を行った。図5及び表1にそれぞれスケール捕捉デバイス実証試験の試験装置の概略図、試験条件を示す。試験装置はecodan実機にプレート式熱交換器、スケール捕捉デバイス、ポンプを貯湯タンクに接続した構成を持つ。また給湯回路とは別にバイパス回路を設置し、貯湯タンクに冷却用のファンコイル、模擬水製造装置、ポンプ、排水流路を接続した。バイパス回路は模擬水の調製、供給、及び冷却に使用した。

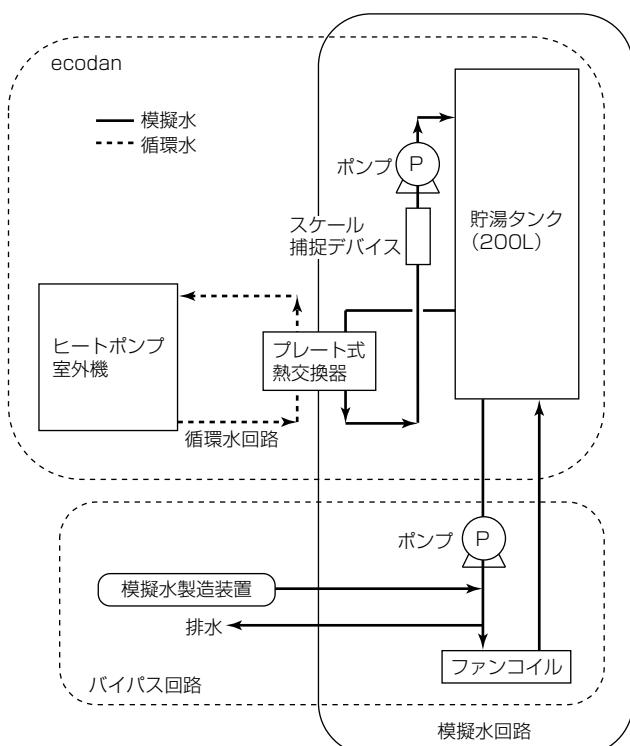


図5. スケール捕捉デバイスの実証試験装置

表1. スケール捕捉デバイスの実証試験条件

項目	値
模擬水量	200L
初期カルシウム硬度	350mg/L
初期Mアルカリ度	250mg/L
模擬水出湯温度	58°C
模擬水流量	16~18L/min
試験時間	340~1,100時間
模擬水交換頻度	1週間に2回

模擬水製造装置は200Lタンク、かくはん機、及びポンプによって構成した。模擬水は欧州水道水の水質を模擬し、目標水質をカルシウム硬度350mg/L、Mアルカリ度250mg/Lとした。この試験では時間経過とともに模擬水からスケールが析出するため、カルシウム硬度及びMアルカリ度が低下する。しかし、実際の使用環境では、高カルシウム硬度の水道水が隨時追加され、カルシウム硬度、Mアルカリ度は変化しないことが想定される。そこで、模擬水の上記水質を維持するため、1週間に2回のペースで模擬水を新たに調製して交換した。また、模擬水の交換前後で水質を測定し、カルシウム硬度の変化量からスケールの析出量を計算した。

この試験の試験時間は340~1,100時間とし、試験後には、プレート式熱交換器とスケール捕捉デバイスへのスケール付着量を測定した。またスケール捕捉デバイス実証試験は、比較のためにスケール捕捉デバイスを設置しない条件でも試験を実施した。

ecodanの一般家庭での給湯運転は1日約1時間だが、スケール捕捉デバイス実証試験では1日24時間の連続給湯運転によってスケール析出を加速させ、最長で一般家庭での使用期間17年間に相当する実証試験を行った。

#### 4.2 試験結果

スケール捕捉デバイスを使用した実証試験で、一般家庭での使用期間17年相当の試験を行った結果を次に述べる。

スケール捕捉デバイスに捕捉されたスケール量は全体で190gであり、充填した4個のステンレス螺旋状纖維に均等に付着した。一方、プレート式熱交換器へのスケール付着量は3gであった。システム全体のスケール析出量に対する熱交換器とスケール捕捉デバイスへの付着比率を図6に示す。なお、図中のその他は、スケールの全析出量からプレート式熱交換器とスケール捕捉デバイスへのスケール付着量を差し引いた値である。その他に該当するスケールの大部分は、給湯タンク内部、配管内部に付着したと考えられる。図から、システム全体のスケール析出量に対する付着比率はプレート式熱交換器の1%に対し、スケール捕捉デバイスは81%となった。これによって、スケール捕捉デバイスによってスケールの大部分が捕捉され、プレート式熱交換器へのスケール付着が抑制されたことを確認した。

スケール捕捉デバイス実証試験の試験時間に対するプレート式熱交換器へのスケール付着量の変化を図7に示す。なお図の横軸は、試験時間を一般家庭の使用期間に換算した値で示した。図に示すようにスケール捕捉デバイスを設置することで、プレート式熱交換器へのスケール付着速度を示すグラフの傾きは6.20g/yrから0.11g/yrと1/56に減少した。

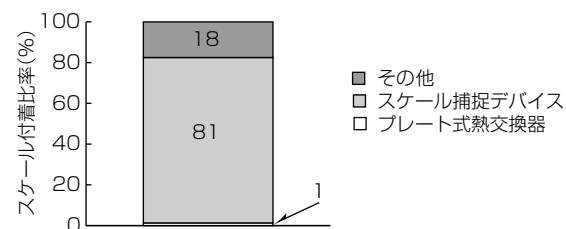


図6. 热交換器とスケール捕捉デバイスへのスケール付着比率

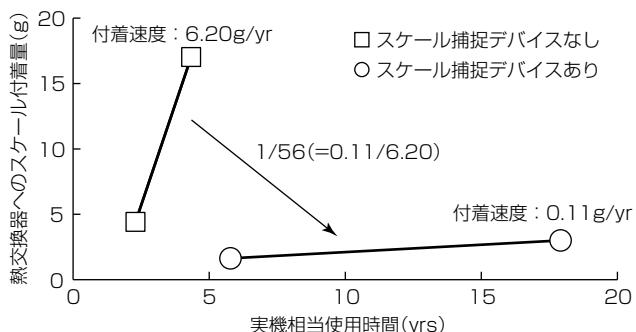


図7. スケール捕捉デバイスの有無による熱交換器へのスケール付着量の比較

この結果から、スケール捕捉デバイスを用いることで、スケールが高効率で捕捉され、プレート式熱交換器へのスケール付着を抑制するとともに、製品使用期間15年間にについてメンテナンスフリー運転が可能であることが分かった。よって、2014年からプレート式熱交換器とスケール捕捉デバイスを搭載したecodanを欧州市場に投入した。

#### 5. むすび

当社の欧州向け暖房給湯システムecodanの伝熱効率向上のため、加熱方式を従来のコイル状の熱交換器からプレート式熱交換器に変更した。プレート式熱交換器へのスケール付着対策として捕捉材を充填するスケール捕捉デバイスを開発した。

ステンレス螺旋状纖維を充填したスケール捕捉デバイスとプレート式熱交換器を用いてecodan本体を使用した実証試験で、スケール捕捉デバイスにはスケールの全析出量の81%が捕捉され、プレート式熱交換器へのスケール付着速度が1/56まで減少した。また、スケール捕捉デバイスは三次元的な構造を持つステンレス螺旋状纖維上でスケール粒子の結晶を成長させ、スケールを高効率に捕捉する効果があった。

これらの試験結果から、欧州の高カルシウム硬度地域でもプレート式熱交換器が正常運転できることを確認し、スケール捕捉デバイスとプレート式熱交換器を搭載したecodanの2014年モデルを欧州市場に投入した。

# 超高濃度オゾン製造システム

松浦洋航\*  
和田 昇\*

*Ultra-high Density Ozone Generation System*

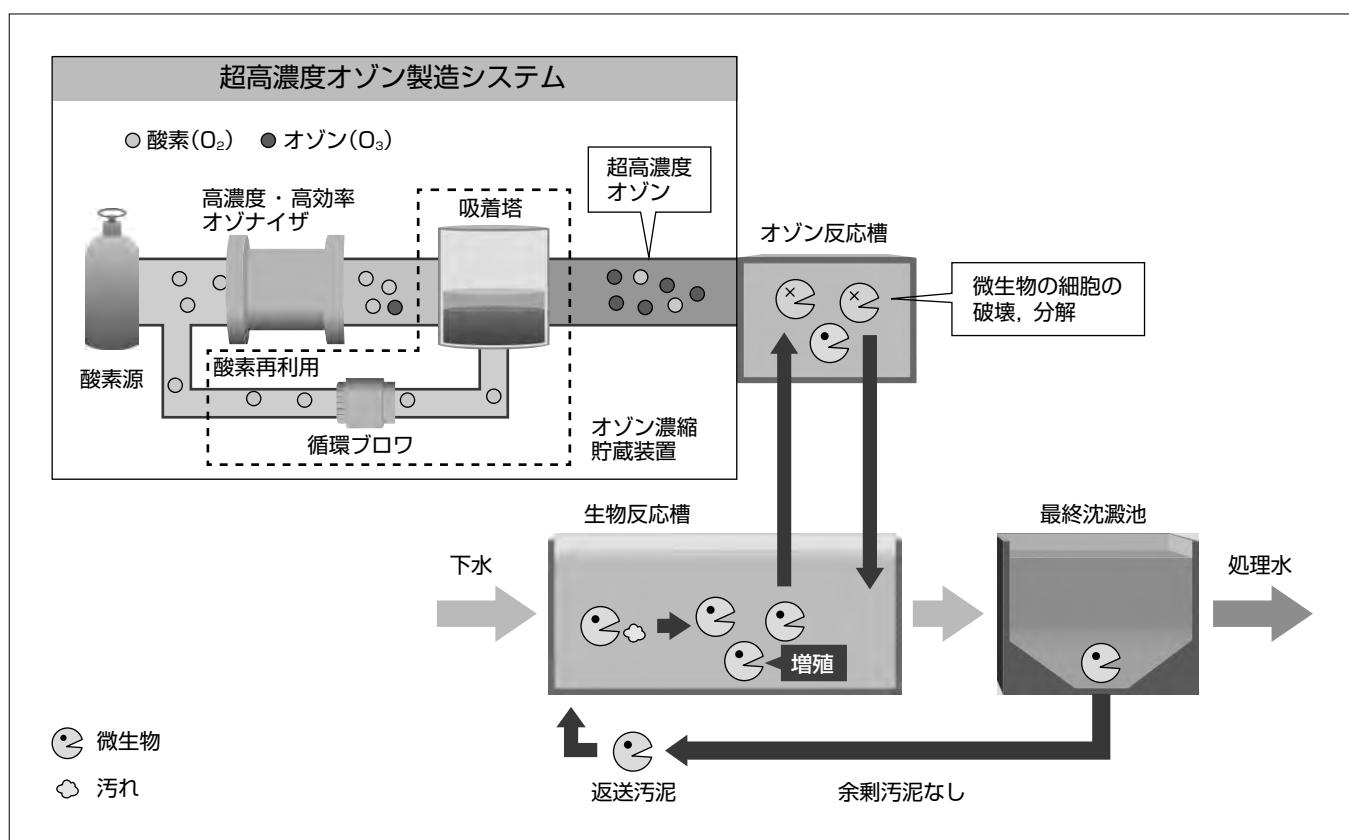
Yoko Matsuura, Noboru Wada

## 要旨

有機性物質を含有する廃水処理方法として、活性汚泥法が広く用いられているが、その際に発生する大量の余剰汚泥の廃棄処理が、中国やアジア新興国で大きな社会問題となっている。最終処分場の能力をはるかに超える余剰汚泥の発生によって、焼却処分時の排気ガスや埋立てによる大気汚染及び土壌汚染が深刻化しており、早期対策が必要な状況である。余剰汚泥を減容する施策として、オゾンの酸化作用を利用し、汚泥を微生物によって消化する方法があるが、オゾンの製造コストが大きく、幅広い普及は困難であった。

三菱電機では、これを解決する新たな方法として、当社独自の高濃度・高効率オゾナイザ、及びオゾン濃縮貯蔵装置

を適用した超高濃度オゾン製造システムを開発した。このシステムは、オゾナイザの後段にシリカゲルを充填した吸着塔を導入し、シリカゲルの吸脱着作用によってオゾンを濃縮する。濃縮されたオゾンの濃度は1,600g/Nm<sup>3</sup>程度に至る。また、オゾン濃縮時に分離された酸素ガスを原料ガスとして再利用することによって、従来のオゾナイザ単独運転時と比較して、ランニングコストを約70%に低減できる。このシステムを用いた汚泥減容プロセスの実現によって、余剰汚泥の減容及び大幅な低成本化が期待でき、中国やアジア新興国での大気汚染及び最終処理場不足問題の解決に貢献できる。



## 超高濃度オゾン製造システムの汚泥減容処理への適用

高濃度・高効率オゾナイザで生成したオゾンガスをオゾン濃縮貯蔵装置のシリカゲルを充填した吸着塔で濃縮し、生成した超高濃度のオゾンガスをオゾン反応槽内の汚泥に注入する。その後、オゾンとの反応によって分解した汚泥中の微生物は生物反応槽に返送された後、槽内の別の微生物に分解・消化されることで、槽内の汚泥を減容できる。その結果、最終沈殿池で発生する余剰汚泥がなくなり、廃棄物処理として別途処分する必要がなくなる。

## 1. まえがき

有機性物質を含有する廃水処理方法として、微生物の代謝を利用して廃水中の有機物を除去する活性汚泥法が広く用いられている。活性汚泥法では、廃水処理に伴い活性汚泥が増殖して大量の余剰汚泥が発生するため、これを産業廃棄物として廃水処理系外へと引き抜き、処分する必要がある。一般的に発生した余剰汚泥は、図1のように、引き抜いた汚泥を脱水した後、埋立て、又は焼却処分されている。しかしながら、中国やアジア新興国では、社会経済の発展及び下水道普及率の向上などによって、発生する余剰汚泥量に対する最終処分場の処理能力は大きく不足しており、大きな社会問題となっている<sup>(1)</sup>。また、余剰汚泥の焼却時の排気ガス、埋立地への輸送や露天での積み置きによる大気汚染や土壤汚染が深刻化しており、余剰汚泥の減容が急務となっている。

余剰汚泥を減容する方法として、高い酸化作用を持つオゾンを利用した減容方法が考案されている<sup>(2)</sup>。この方法では、廃水処理系内の活性汚泥の一部をオゾンの酸化作用によって処理することで汚泥の生分解性を高める。それを再び廃水処理系に戻すことによって、汚泥中の有機物をすみやかに酸化分解し、余剰汚泥量の減容を実現する。しかしながら、オゾンを用いた汚泥の減容プロセスでは、オゾンを発生するオゾナイザのランニングコストが大きく、埋立てや焼却といった現行の方式と比べ、コスト競争力が低いという課題があった。

当社のオゾナイザは、誘電体バリア放電を用いて酸素ガスからオゾンガスを生成する。放電式オゾナイザのランニングコストは、放電による電力コストと原料である酸素ガスのコストの大きく2種類に分けられる。オゾナイザのランニングコストが大きい原因として、次の2点が挙げられる。第1に、一般的なオゾナイザの発生効率はおよそ10kW/kg-O<sub>3</sub>であるため、オゾン生成に必要となる放電電力コストが大きい点である。第2に、オゾナイザの発生濃度は200g/Nm<sup>3</sup>程度であるため、原料酸素の約9割がオゾンになることなく、酸素ガスのまま排気されている点である。

余剰汚泥の廃棄が必要なくなるオゾンによる汚泥減容方

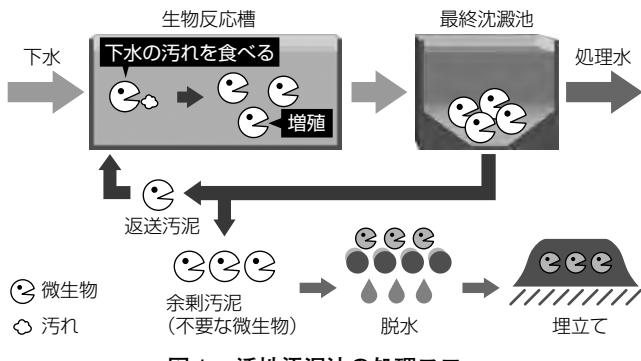


図1. 活性汚泥法の処理フロー

式の普及には、これらの問題を解決し、オゾン製造でのランニングコストを大幅に低減する必要がある。当社は、これを解決する新たな方法として、独自の高濃度・高効率オゾナイザとオゾン濃縮貯蔵装置によって構成される超高濃度オゾン製造システムを開発した。このシステムの適用によって、汚泥減容の大幅な低成本化が期待でき、中国やアジア新興国での大気汚染及び最終処理場不足問題の解決に貢献できる。

## 2. 超高濃度オゾン製造システムの構成

図2に、超高濃度オゾン製造システム全体の構成を示す。酸素源から入力された酸素ガスを原料にして、高濃度・高効率オゾナイザが放電によって高濃度オゾンガスを発生させる。発生したオゾンガスは、オゾン濃縮貯蔵装置で超高濃度に濃縮され、供給対象に輸送される構成となっている。

## 3. 高濃度・高効率オゾナイザ

この章では、超高濃度オゾン製造システムに適用する高濃度・高効率オゾナイザについて述べる。

近年、当社独自の技術である高ガス圧力・短ギャップ放電技術<sup>(3)</sup>によって、図3のようにオゾン発生の高濃度・高効率化が実現されている。これは、ガス圧力を高く、かつ放電空間の放電ギャップ長を短くすることによって、放電空間の換算電界強度を増加させ、生成したオゾンの分解作用を低減させたことに起因する。

図4に、当社オゾナイザのオゾン濃度に対するランニングコストの変化を示す<sup>(4)</sup>。オゾナイザのランニングコストには、電力コストと原料ガスコストの兼ね合いからコストミニマムを示すオゾン濃度が存在する。高濃度型オゾナイザでは、図のように従来型と同じ消費電力で高濃度のオゾ

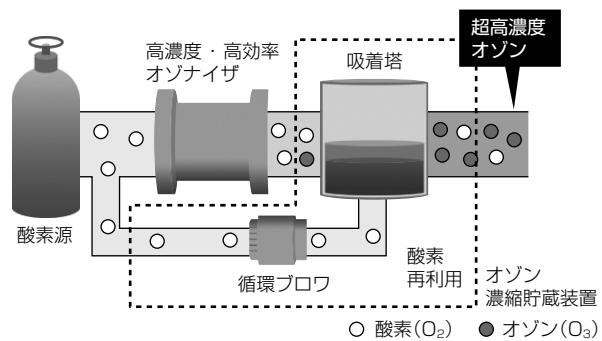


図2. 超高濃度オゾン製造システム全体の構成

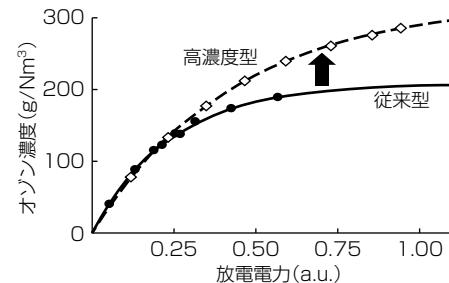


図3. 放電電力に対する発生オゾン濃度の関係

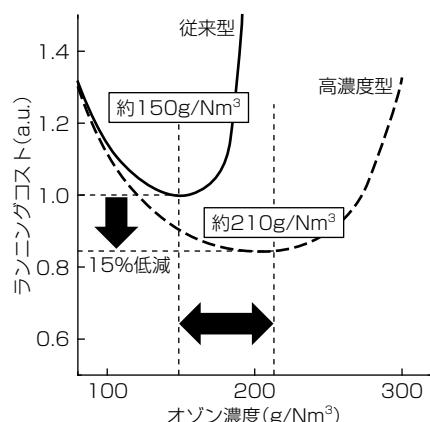


図4. 発生オゾン濃度に対するランニングコスト

ンを発生可能であるため、従来型に比べてランニングコストを低減できる。また、従来型がオゾン濃度 $150\text{g}/\text{Nm}^3$ で最も効率的であるのに対し、高濃度型オゾナイザは従来型よりも高濃度である $210\text{g}/\text{Nm}^3$ でランニングコスト極小となる。コストミニマムとなるオゾン濃度での運転では、従来型と比べて約15%のランニングコスト低減を実現している。

#### 4. オゾン濃縮貯蔵装置

この章では、オゾン濃縮の原理、オゾン濃縮貯蔵装置の動作及び装置適用の利点について述べる。

##### 4.1 オゾン濃縮の原理

オゾンの濃縮には、シリカゲルの吸脱着作用を利用する。シリカゲルは二酸化ケイ素の微粒子が緻密に集まって微細な孔(あな)を形成しており、その表面には化学吸着によって極性分子を選択的に吸着する性質を持つシラノール基を無数に持つ。オゾナイザから出力されるガスの主成分は酸素分子とオゾン分子であり、折れ線構造であるオゾン分子だけ極性を持っている。そのため、オゾナイザの後段にシリカゲルを充填した吸着塔を設置することによって、オゾン分子を選択的に吸着させることができる。また、吸着後にシリカゲルを減圧すると、吸着力の低い酸素分子が優先的に脱着されるため、オゾン濃度を更に向上させることができる。

##### 4.2 オゾン濃縮貯蔵装置の動作

次に、図5を用いてオゾン濃縮貯蔵装置の動作について述べる。①の吸着工程では、吸着塔内に充填されたシリカゲルの酸素よりもオゾンを吸着しやすい特性を利用し、シリカゲルにオゾンを選択的に吸着させる。その際、シリカゲルに吸着されずに吸着塔を通過した酸素は、吸着塔後段に備えた循環プロワによってオゾナイザの前段に入力され、再び原料ガスとしてリサイクルされる。②の酸素脱着工程では、正圧状態でオゾナイザ出力ガスが吸着された吸着塔を吸引手段によって減圧し、酸素を優先的に脱着する。これによって、シリカゲルに吸着されたオゾンは超高濃度に濃

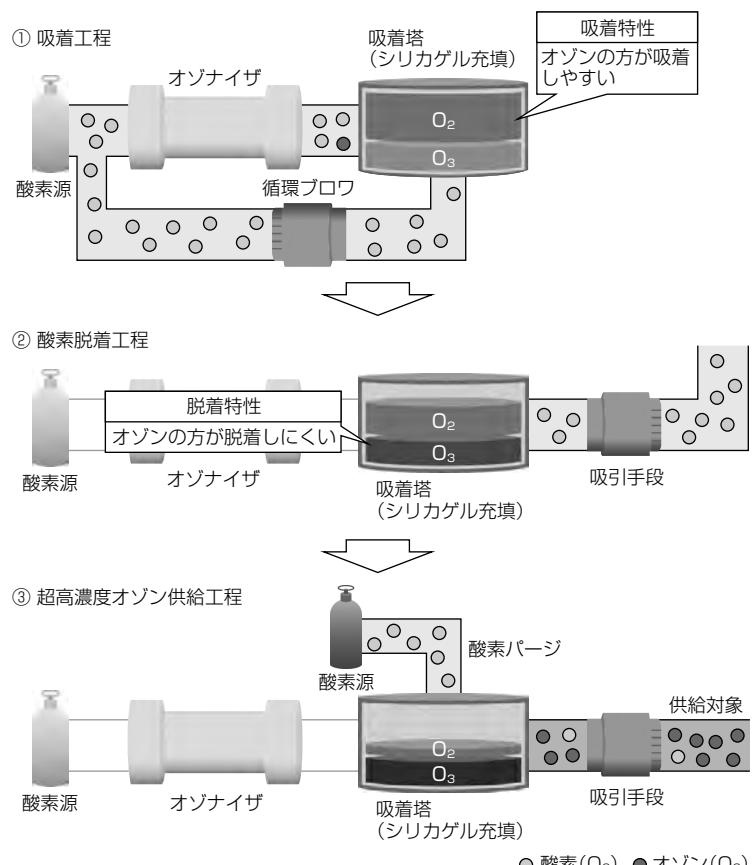


図5. オゾン濃縮貯蔵装置の動作フロー

縮される。③の超高濃度オゾン供給工程では、酸素バージによるガス置換によってオゾンの脱着を促進し、対象に向けて超高濃度オゾンガスを供給する。

##### 4.3 オゾン濃縮貯蔵装置適用の利点

オゾン濃縮貯蔵装置を適用する最大の利点は、酸素リサイクルによって酸素コストを大幅に低減できる点にある。先に述べたとおり、従来のオゾナイザ単独での汚泥処理では、無効消費される酸素の割合が約9割であった。しかし、シリカゲルによるオゾン濃縮によって、例えば、汚泥に供給するオゾン濃度を $1,000\text{g}/\text{Nm}^3$ 程度まで向上させた場合、無効消費される酸素の割合を5割に低減できる。そのため、同量のオゾンを供給する場合、オゾン濃縮貯蔵装置の利用によって、酸素コストを従来比20%と大幅に低減でき、低コストでの運転が可能になる。

#### 5. 超高濃度オゾンの高効率発生技術

この章では、先に述べたオゾン発生技術、及びオゾン濃縮貯蔵技術を駆使した超高濃度オゾンの高効率発生技術について述べる。

先に述べたとおり、高濃度・高効率オゾナイザは、当社独自の技術によって、コストミニマムとなるオゾン濃度での運転でランニングコストを従来比15%低減させるだけでなく、オゾン濃度を従来の $150\text{g}/\text{Nm}^3$ から $210\text{g}/\text{Nm}^3$ に向上させることにも成功している。この高濃度オゾンの高



# 自己循環リサイクルでの プラスチック改質技術

松尾雄一\* 大石 隆\*\*\*  
栗原浩二\*\* 鈴木章元†  
筒井一就\*\*

Material Modification Technologies for Plastics in Closed-loop Recycle System

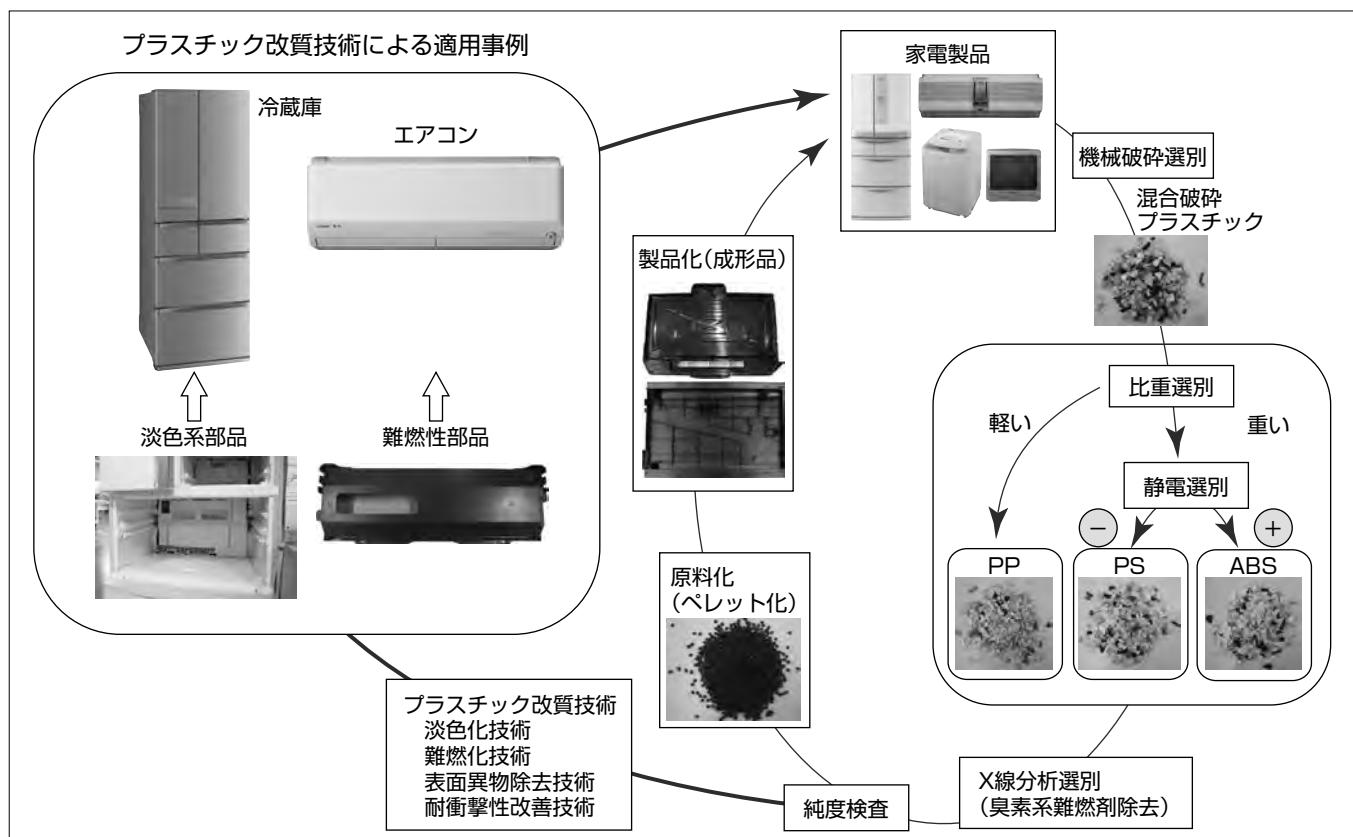
Yuichi Matsuo, Koji Kurihara, Kazunari Tsutsui, Takashi Oishi, Akimoto Suzuki

## 要旨

三菱電機では、使用済み家電混合リサイクルプラスチックについて、2010年4月に年間約15,000トンの処理能力を持つポリプロピレン(PP)、ポリスチレン(PS)、アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合体(ABS)の自動選別ラインを、関係会社の株式会社グリーンサイクルシステムズに導入し、エアコンや冷蔵庫等の家電製品に適用する“家電製品から家電製品への自己循環”を実現した。自己循環リサイクルの適用部品及び適用量拡大には、外装部品や機能性部品への適用のための改質技術が必要となる。これまでの適用部品は、濃色(黒色やグレー色)系の内部部品に限られていたが、まず、淡色系部品適用を目的に、色彩選別装置を用いたリサイクルPPの淡色化技術を開発し、淡色

系部品である冷蔵庫の内部部品への適用を可能にした。次に、使用済みテレビバックキャビネット材を用いたリサイクルPSの難燃化技術によって、高価な難燃剤の添加量を低減させた低成本難燃リサイクルPSを開発し、エアコンの基板周り部品への適用を可能にした。さらに、意匠性及び耐熱性寿命の改善に有効なプラスチックフレーク表面の研磨によるリサイクルPPの表面異物除去技術、家電製品由来以外の安価なリサイクル添加材を用いたリサイクルPPの耐衝撃性改善技術を開発した。

今後、リサイクルプラスチックの更なる適用量拡大に向けて、プラスチック改質技術の開発を進めていく。



使用済み家電製品の機械破碎選別で得られた混合破碎プラスチックを、比重選別、静電選別、X線分析選別によって、単一種の樹脂(PP, PS, ABS)に選別回収し、素材化(原料化)、製品化して、新しい製品に適用するプラスチックの自己循環リサイクルを構築してきた。さらに、プラスチック改質技術である色彩選別による淡色化や低コスト難燃化技術などによって、外装部品や機能性部品への適用が可能になり、自己循環プラスチックの適用量拡大が実現できる。

## 1. まえがき

三菱電機では、循環型社会を形成するために、廃棄物の排出そのものを減らす“リデュース”，資源を再利用する“リユース”，そして、使用が済んだ資源を再生して再利用する“リサイクル”を推進して、持続可能な資源循環の実現を目指している。特に、使用済み家電混合リサイクルプラスチックについては、2010年4月に年間約15,000トンの処理能力を持つポリプロピレン(PP)，ポリスチレン(PS)，アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合体(ABS)の自動選別ラインを、関係会社である(株)グリーンサイクルシステムズに導入した。使用済み家電混合プラスチックから、リサイクルPP，PS，ABSを選別回収し、エアコンや冷蔵庫等の家電製品に適用する“家電製品から家電製品への自己循環”を実現した<sup>(1)</sup>。三菱電機が構築した自己循環リサイクルフローを図1に示す。

自己循環リサイクルの適用部品及び適用量拡大には、外装部品や機能性部品への適用のための改質技術が必要となる。

本稿では、これまで濃色(黒色やグレー色)系の内部部品に限られていた<sup>(2)(3)</sup>適用部品を外部部品や機能性部品に適用可能とする、自己循環リサイクル拡大に必要なプラスチック改質技術について述べる。

## 2. 自己循環リサイクル拡大に向けて

自己循環リサイクル拡大に向けたプラスチック改質技術としては、現状のリサイクルプラスチックから不要物を取り除いて材料の価値を高める技術と、リサイクルプラスチックに別のものを添加して機能性を付与する技術の2種類がある。前者として、色彩選別装置を用いたリサイクルPPの淡色化技術、プラスチックフレーク表面の研磨によるリサイクルPPの表面異物除去技術があり、後者として、使用済みテレビバックキャビネット材を用いたリサイクルPSの難燃化技術、安価なリサイクル添加材を用いたリサ

イクルPPの耐衝撃性改善技術がある。なお、改質に用いたりサイクルPP、PSフレークは、図1に示す自己循環リサイクルフローによって得たものである。

## 3. プラスチック改質技術

### 3.1 リサイクルPPの淡色化技術

家電製品の中でも冷蔵庫、エアコン、洗濯機は、白物家電と呼ばれ、白色系部品が多く使用されている。自己循環リサイクルの適用部品拡大には、白色系(淡色系)部品への適用が必要となる。しかし、図1に示すリサイクルプラスチックフレークは、リサイクルPPに限らず、白色、黒色、グレー色等の混色であり、溶融混練して原料化(ペレット化)した場合、灰色(リサイクルPPでマンセル明度5.2)のペレットとなる。マンセル明度とは、十進法に基づいて尺度化された色の明るさ度合いであり、最低明度の黒が0、最高明度の白が10で表される(図2)。

プラスチックを淡色化する一般的な方法として、白色着色剤である二酸化チタンを添加する方法がある。リサイクルPPに二酸化チタン5 wt%を添加した場合、マンセル明度は5.2から7.7まで上昇するが、二酸化チタン添加による衝撃強度低下の懸念があり、白色着色剤による淡色化には限界があると考える。そこで、リサイクルPPの淡色化を目的に、色彩選別装置を用いて、濃色系フレークを分離することにした。リサイクルPPの淡色化方法を図3に示す。

混色系リサイクルPPフレークから、所定のマンセル明度(例えば、マンセル明度7.6)以下のフレークを分離することで、マンセル明度7.9の淡色系ペレットが得られた。さらに、少量の二酸化チタンを添加することでマンセル明度8.0以上に調整することができ、淡色系部品への適用が可能になった。なお、濃色系フレークの分離による淡色化は、着色剤の添加量を最小限にでき、衝撃強度の低下を最小限にできる利点がある。リサイクルPPの淡色化による

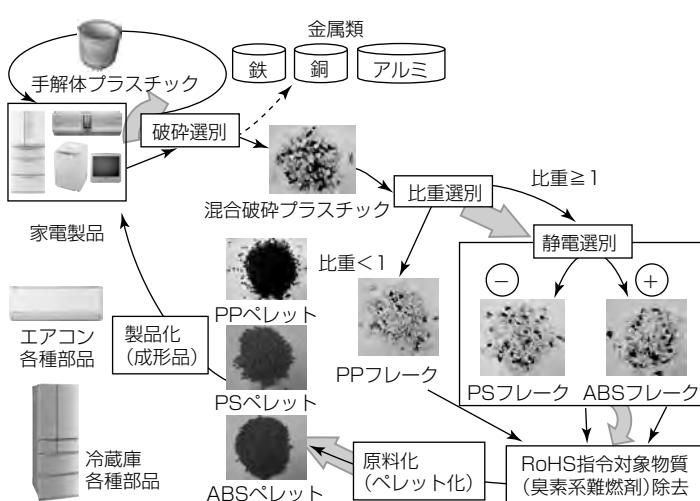


図1. 自己循環リサイクルフロー

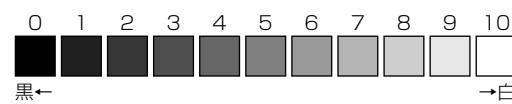


図2. マンセル明度

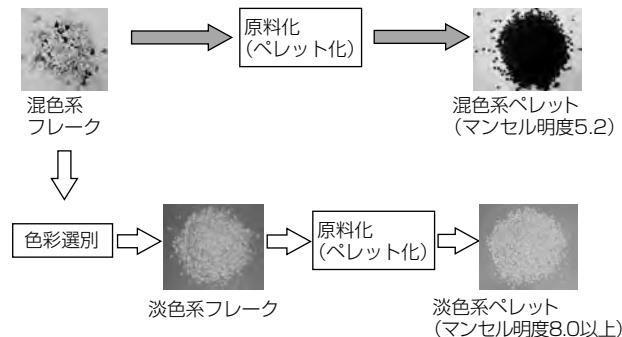


図3. リサイクルPPの淡色化方法

製品適用例としては、図4に示す冷蔵庫の各部屋の仕切り壁(食品に触れない部分に限定)等が挙げられる。

### 3.2 リサイクルPPの表面異物除去技術

リサイクルプラスチックへの異物混入は、微量の残存異物でも破壊の起点となり、衝撃強度が低下する問題がある。また、異物が成形品表面に露出した場合、意匠性不良となる。リサイクルプラスチックに混入する異物は、単体で混入したものと、フレーク表面に付着したもの2種類ある。ここでは、フレーク表面に付着した異物は、フレーク表面を削ることで、除去可能と考え、3.1節で分離した濃色系及び淡色系リサイクルPPフレークを用いて、乾式研磨機による表面研磨を1, 2回行った。これに、長期耐熱性を付与するために、酸化防止剤を所定量配合して、ペレット化し評価用試験片を作製した。リサイクルPP(濃色系と淡色系)の表面研磨回数別の異物の面積と異物数の関係を、表1に示す。異物数は、きょう雑物測定図表((独)国立印刷局)を参考に、試験片(観察領域7,200mm<sup>2</sup>)上にある可視化領域(0.05mm<sup>2</sup>以上)の異物を面積別に算出した。

リサイクルPP(濃色系と淡色系)は、表面研磨回数が多いほど、異物数が減少し、異物面積も小さくなる傾向にあった。淡色系リサイクルPPは表面研磨2回で、可視化領域の異物数が100%削減(1個→0個)、異物面積0.05mm<sup>2</sup>以下に対して、濃色系リサイクルPPは可視化領域の異物数が91%削減(11個→1個)、異物面積0.05~0.10mm<sup>2</sup>であり、濃色系リサイクルPPは、淡色系リサイクルPPに比べて、異物が多く、異物面積が大きいことが分かった。

次に、リサイクルPP(濃色系と淡色系)の表面研磨回数と耐熱性寿命の関係を、図5に示す。ここでは、寿命しきい値を引張強度の物性保持率の75%<sup>(4)</sup>と設定し、140°Cでの長期耐熱性寿命を算出した。



図4. リサイクルPPの淡色化による適用事例

表1. 表面研磨回数別の異物面積と異物数の関係

異物面積(mm <sup>2</sup> )	平均異物数(個)	表面研磨回数[回]					
		濃色系PP			淡色系PP		
		0	1	2	0	1	2
不可視化領域	<0.05	294	247	68	17	11	9
	0.05~0.10	8	3	1	1	0	0
	0.10~0.20	2	1	0	0	0	0
	0.20<	1	0	0	0	0	0
可視化領域異物合計(個)		11	4	1	1	0	0
異物低減率(%)		—	64	91	—	100	100

濃色系及び淡色系リサイクルPPとともに、表面研磨回数が増加するに従って、耐熱性寿命は長くなる傾向にあり、耐熱性寿命と異物数の間で明確な相関が得られた。濃色系リサイクルPPの耐熱性寿命は、可視化領域だけでなく、不可視化領域も含めて、劣化促進物質である異物数が多いことから、淡色系リサイクルPPの1/2以下であった。

リサイクルPPの表面研磨による異物除去は、意匠性及び耐熱性寿命の改善に有効であることから、外装部品への適用に目処(めど)を得た。なお、この技術は、経済産業省の平成26年度エネルギー使用合理化技術開発費補助金(省エネ型リサイクルプロセス実証支援事業費補助金)の成果として得られたものである。

### 3.3 リサイクルPSの難燃化技術

家電製品の基板周り部品は、難燃性が要求される部品が多く、かつ、適用量も多いため、リサイクルプラスチックを難燃化することで、適用量の拡大が見込める。しかし、難燃剤は、樹脂に比べて高価な材料であり、高い燃焼性が求められるほど、多量に添加する必要があり、材料コストが高くなる傾向にある。そこで、難燃剤の代わりに、家電リサイクルプラントである株ハイパーサイクルシステムズで回収した使用済みテレビバックキャビネット材(RoHS指令規制対象外の臭素系難燃剤使用のものに限る)を使用することにした。リサイクルPSと使用済みテレビバックキャビネット材の材料特性を表2に示す。

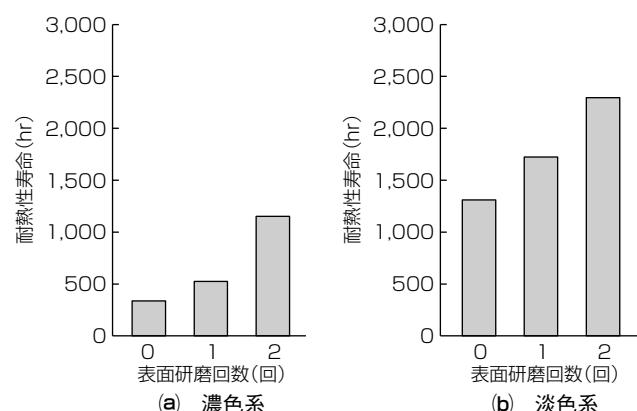


図5. リサイクルPPの長期耐熱性寿命

表2. リサイクルPSと使用済みテレビバックキャビネット材の材料特性

物性項目	リサイクルPS	使用済みテレビバックキャビネット材
MFR(g/10min)	5	10
比重(g/cm <sup>3</sup> )	1.05	1.16
引張強度(MPa)	33	26
引張破断伸び(%)	30	48
曲げ弾性率(MPa)	2,300	2,090
曲げ強度(MPa)	48	36
シャルピー衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> )(ノッチなし)	42	53
燃焼性(UL94規格)	HB/1.5mm 自己消化性なし	V-2~V-0/1.5mm 自己消化性あり

MFR : Melt mass-Flow Rate



図6. リサイクルPSの難燃化による適用事例

表3. リサイクル添加材の材料特性

物性項目	材料	リサイクル添加材		
		キャップ材	フタ材	チューブ材
融点(°C)		123, 166	107	108
MFR(g/10min)		6	28	3
比重(g/cm <sup>3</sup> )		0.94	0.92	0.93
シャルピー衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> ) (ノッチなし)		NB	NB	NB
主成分		PP, HDPE	LDPE	LDPE

NB: Non-Break(未破断), HDPE: 高密度ポリエチレン,  
LDPE: 低密度ポリエチレン

使用済みテレビバックキャビネット材の燃焼性は、V-2～V-0とばらつきはあるものの、V-2以上の燃焼性を持っており、添加によって、難燃剤の添加量低減が可能な材料であった。開発した難燃リサイクルPSは、エアコンの基板周り部品適用を目的に、要求される燃焼性1.5mmV-0を満足するように、リサイクルPSと使用済みテレビバックキャビネット材を等量配合し、難燃剤を追加添加したものである。なお、この開発材料は、使用済みテレビバックキャビネット材を添加せずに、リサイクルPSだけで難燃化した材料に比べて、難燃剤の添加量が半減でき、難燃リサイクルPSの低コスト化が図れることが分かった。リサイクルPSの難燃化による製品適用例としては、図6に示すエアコンの基板周り部品等が挙げられる。

### 3.4 リサイクルPPの耐衝撃性改善技術

家電製品の外装部品は、落下に対する衝撃に耐えうる衝撃強度が必要とされる。しかし、従来の改善方法では、PPと相溶性の高いポリオレフィン系エラストマー(TPO)等の耐衝撃性改善剤を添加することが知られている。ここでは、比較的安価で入手可能な使用済み家電製品以外のリサイクルプラスチックである使用済みペレットボトルのキャップ材、飲料のフタ材、日用品のチューブ材の3種類を用いて、耐衝撃性改善を行った。ちなみに、リサイクル添加材の価格は、TPOの約1/5～1/3(2017年6月時点)であった。なお、材料特性の比較対象として、TPOを添加したものを準備した。リサイクル添加材であるキャップ材、フタ材、チューブ材の材料特性を表3に示す。リサイクル添加材は、シャルピー衝撃強度がNB(未破断)であり、耐衝撃性改善材として有用であることを確認した。

リサイクル添加材による耐衝撃性改善効果を確認するために、シャルピー衝撃強度がリサイクルPPの約2倍(140kJ/m<sup>2</sup>)になるように、リサイクル添加材の添加率

表4. 耐衝撃性を改善したリサイクルPPの材料特性

物性項目	材料	耐衝撃性リサイクルPP	
		リサイクルPP チューブ材 10wt%添加	TPO 10wt%添加
MFR(g/10min)		25	19
比重(g/cm <sup>3</sup> )		0.92	0.92
引張強度(MPa)		25	22
引張破断伸び(%)		23	31
曲げ弾性率(MPa)		1,210	990
曲げ強度(MPa)		34	27
シャルピー衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> ) (ノッチなし)		70	133
		136	

を調整し、材料特性評価を行った結果を表4に示す。リサイクルPPのシャルピー衝撃強度を約2倍にするためには、チューブ材及びTPOをそれぞれ10wt%添加する必要があった。なお、キャップ材ではリサイクルPPの耐衝撃性が改善できず、フタ材では20wt%添加が必要であった。チューブ材は、TPOと添加率が同じで耐衝撃性の改善ができるところから、比較的安価で耐衝撃性改善を行えることが分かった。リサイクルPPは、リサイクル低密度ポリエチレン(LDPE)を添加することで、比較的安価で耐衝撃性を改善できることから、耐衝撃性が必要な部品への適用に目処を得た。

## 4. むすび

三菱電機では、使用済み家電製品から回収したプラスチックの自己循環リサイクルに積極的に取り組んできた。その結果、ルームエアコン“霧ヶ峰MSZ-ZW, ZXVシリーズ”ではファンモータ固定用部品、フィルタフレーム、クロスフローファンに、冷蔵庫“MR-JX, WX, B, Rシリーズ”では各部屋の仕切り壁、ファン支え、基板ケースに、自己循環リサイクルプラスチックを適用できた。なお、自己循環リサイクルプラスチックの使用率は、エアコンでは、使用されているプラスチックの約10wt%，冷蔵庫では17～21wt%を占めている。今後、リサイクルプラスチックの更なる適用量拡大に向けて、リサイクルプラスチック改質技術の開発を進めていく。

## 参考文献

- 松尾雄一, ほか: 使用済み家電回収プラスチックの高純度選別・再生素材化技術, プラスチック成形加工学会誌, 23, No.10, 599～604 (2011)
- 高木司, ほか: 家電製品における自己循環リサイクル, 三菱電機技報, 84, No.6, 351～354 (2010)
- 井関康人, ほか: 最先端の家電リサイクル技術, 三菱電機技報, 87, No.9, 537～540 (2013)
- 冠木公明: 構造用プラスチック成形品の信頼性設計技術, プラスチックス, 53, No.2, 91～93 (2002)

# IoT技術を活用した省エネルギー工場の実現

北田亮平\*

Realization of Factory Energy Conservation Based on IoT

Ryohei Kitada

## 要旨

近年、製造業ではIoT(Internet of Things)を活用した生産性や品質の向上への取組みが加速しており、省エネルギーの分野でもセンサ情報やネットワークを活用したエネルギー管理システムの高度化・エネルギー使用の合理化が注目を浴びている。

三菱電機名古屋製作所はFA(ファクトリーオートメーション)機器を中心に多様な製品・サービスを開発・生産する当社FA事業の中核事業所であり、2013年に生産体制整備の一環として“FA機器新生産棟”を建設し、2014年末にかけ順次稼働開始した。FA機器新生産棟ではIoT技術の活用、FA技術とIT技術を連携させた当社FA統合ソリューション“e-F@ctory”によって、生産設備稼働率向

上による生産性とエネルギー原単位の向上、建屋設備と生産設備との連係制御による設備省エネルギー運用の取組みを行った結果、電力使用原単位-30%の省エネルギーを実現し、名古屋製作所全体のエネルギー使用量でも、新棟建設に伴う増加見込みに対し抑制効果-13%を実現した。

この取組み事例は、平成28年度省エネ大賞(省エネ事例部門)で“資源エネルギー庁長官賞”を受賞した。

今後、システムの汎用性を活用し、生産設備との連係の拡大・強化、海外工場への展開を進めることで、システムを有効活用したエネルギー使用の合理化を進め、また地球温暖化対策にも貢献していく。

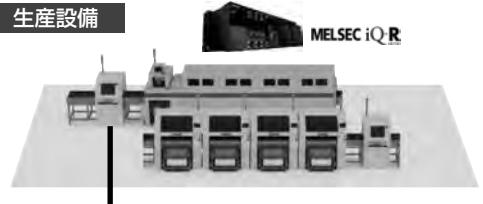
## エネルギー管理システム構築

“汎用シーケンサ+ネットワーク接続”であらゆる情報の見える化、分析・改善の容易化



## FA-IT連携による生産性向上

ラインを構成する各設備の稼働状況を集約・分析、作業者に適切な段取り手順を指示。生産性・稼働率が向上、エネルギー原単位を改善



平成28年度

省エネ大賞

(省エネ事例部門)

主催：一般財団法人資源エネルギー機構

資源エネルギー庁長官賞

受賞

資源エネルギー庁長官賞受賞

## 建屋設備



## MELSEC iQ-R



## シーケンサ



## 高効率設備の導入



## 建屋と生産設備の連係制御



## MELSEC iQ-R



## 生産設備稼働に応じた建屋設備の最適運転



HMI : Human Machine Interface

## FA機器新生産棟での取組み

新生産棟の建設で、空調機や熱源、外調機などに高効率設備を積極導入するとともに、IoT技術の活用、FA技術とIT技術を連携させた当社FA統合ソリューション“e-F@ctory”による“エネルギー管理システム構築”“FA-IT連携による生産性向上”“建屋設備と生産設備の連係制御”的3点に注力し、生産性の向上・設備省エネルギー運用によるエネルギー原単位の削減に取り組んだ。

## 1. まえがき

当社では、創立100周年となる2021年を目標とした“環境ビジョン2021”を策定し、地球温暖化防止に向けた取組みとして当社グループ全体で製品生産時でのCO<sub>2</sub>排出量の30%削減(1990年基準)を目指している。

名古屋製作所は1924年に汎用電動機量産工場として操業を開始し、現在はFA機器を中心に多様な製品・サービスを開発・生産する当社FA事業の中核事業所となっている。

近年、世界的にも生産現場の自動化推進に伴ってFA機器の需要が拡大しており、また、震災以降は、安定供給に対する市場要求も高まっている。これに対応する生産体制整備の一環として、名古屋製作所では“FA機器新生产棟”(以下“新生产棟”という。)を建設し、2014年末にかけ順次稼働開始した。

新生产棟では、建物・機器の性能向上に加え、IoT技術の活用、FA技術とIT技術を連携させた当社FA統合ソリューション“e-F@ctory”による生産性の向上及び設備省エネルギー運用の取組みを行った。

本稿ではその取組みの内容と成果について述べる。

## 2. 省エネルギーの視点と取組み内容

新生产棟は地上6階建て、免震構造を持つ建物である(図1)。垂直搬送による部品投入から製品組立て・出荷までの一貫生産体制を構築しており、大規模震災が発生した場合でも、FA機器の市場供給継続を可能とした。新生产棟では建築物の省エネルギー化に加え、自社製品・ソリューションを活用した“高効率設備の導入とエネルギー管理システムの構築”“FA-IT連携による生産性向上”“建屋設備と生産設備の連係制御”の3点に注力し、省エネルギー化の取組みを推進した。

### 2.1 高効率設備の導入とエネルギー管理システムの構築

#### 2.1.1 高効率設備の導入

名古屋製作所の生産機種であるスーパー高効率変圧器、



図1. 名古屋製作所の新生产棟

高性能省エネモータ、インバータを始め、当社の高効率空調機やLED照明等を全面的に採用した。これら高効率設備の導入による削減効果は原油換算-361kl/年である(2008年竣工(しゅんこう)の名古屋製作所ビル棟導入設備を基準とした場合)。

#### 2.1.2 エネルギー管理システムの構築

新生产棟ではエネルギー使用状況だけでなく、あらゆる設備や環境の見える化、生産設備との連係を行うことで、高度なエネルギー監視・制御を実現できるエネルギー管理システムを目指し、FA技術とIT技術を連携させた“e-F@ctory”によるシステムを構築した(図2)。この構成の特長は汎用シーケンサとオープンネットワーク、センサの活用によって、センサ情報や内部設定の見える化を可能にした点である。また、運用開始後の制御変更やチューニングによる最適化に際しても、専用コントローラや調節器に比べプログラムやパラメータの変更が簡単になり、省エネルギー改善活動の推進に多大な効果を發揮するとともに、先々予想されるフロアのレイアウト変更など、生産体制変更への追従も容易になる。

ユーザーインターフェースには、入居者が日常使用するための当社製タッチパネル付き表示器“GOT(Graphic Operation Terminal)”と、施設管理者やエネルギー管理者、省エネルギー推進員等が管理・分析を行うための当社製SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)ソフトウェア“MC Works64”を採用した。各インターフェースの詳細を次に述べる。

##### (1) タッチパネル付き表示器GOT

図3に示すような制御画面を持つタッチパネル付き表示器GOTを各フロアに数面設置した。各フロアの空調・照明・エネルギーの使用状況をグラフィカルに表示し、直感的な操作と一元管理が可能である。また、最終退出時にはワンタッチでフロアの全ての空調・照明機器の電源をOFFにすることができ、消灯見回り不要化とエネルギーのムダ削減を実現している。

##### (2) SCADAソフトウェアMC Works64

1万点以上に及ぶ収集項目点数を基に、ユーザーに対して視覚的に分かりやすく見える化し、的確に使用状況の把握・分析を行うために、SCADAソフトウェアMC Works64を導入した。図4に示すような管理画面を通じて、新生产棟全体の設備・エネルギーの使用状況をリアルタイムで統括管理(監視・制御・記録)することが可能となった。

#### 2.2 FA-IT連携による生産性向上<sup>(1)</sup>

生産規模拡大によって増加する使用電力量を、建屋設備だけでなく生産設備側でも抑制するために、“e-F@ctory”を活用した生産性向上の取組みを行った。

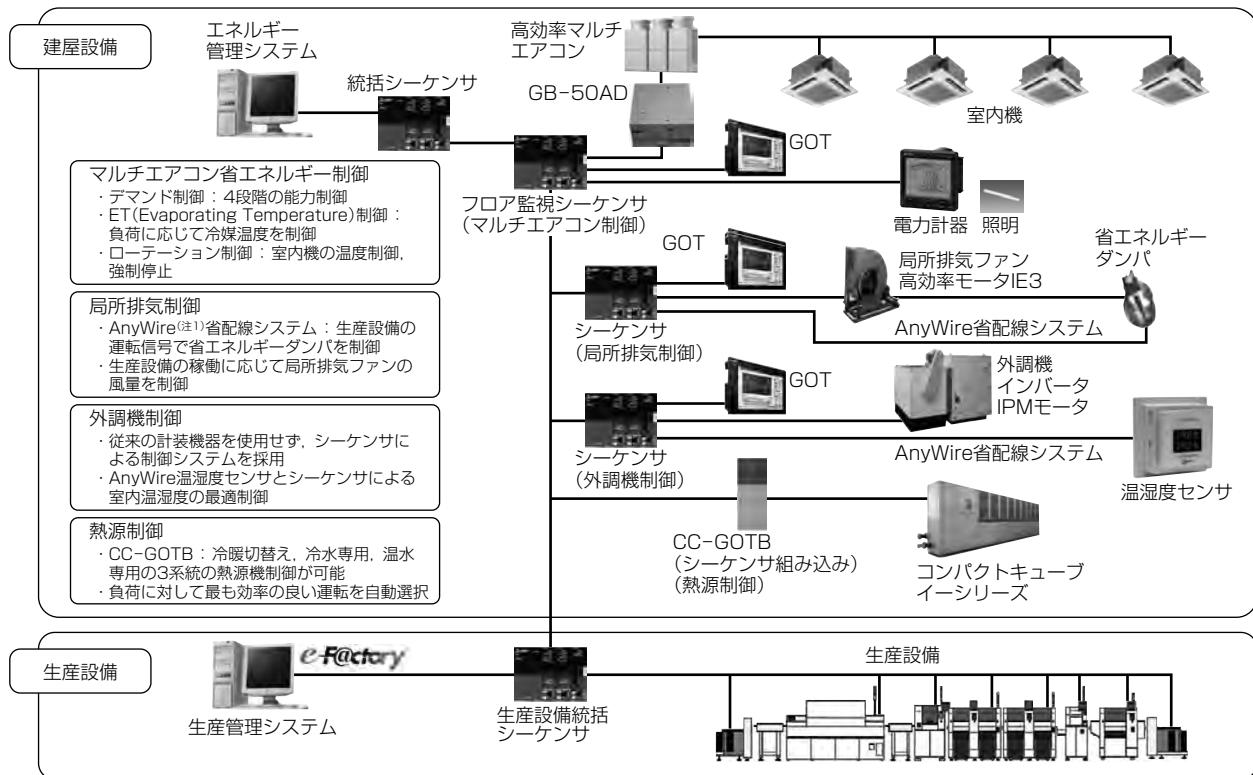
#### 2.2.1 概要

生産ラインの中でも、特に使用電力量の多い“基板の面

実装ライン”に着目した。このラインにはリフロー炉(リフローはんだ付け用電気炉)が組み込まれており、消費する電力はライン全体の約6割を占める。その使用電力量は稼働時間にほぼ比例することから、ライン全体の稼働率を向上させることができれば、生産性向上に加え、待ち時間削減による消費電力量の削減効果が見込める。

## 2.2.2 取組み事例

ライン全体の稼働状態見える化して一元管理するため、図5に示す面実装ライン管理システムを開発した。各設備の稼働状況や装着部品残数、エラー回数をデータベースに集約して分析することによって、稼働率を下げている要因を洗い出した。このシステムで収集した改善前の稼働状況



(注1) AnyWireは、(株)エニイワイヤの登録商標である。

GB-50AD, CC-GOTB: 空調管理システム集中コントローラ, IPM: Interior Permanent Magnet

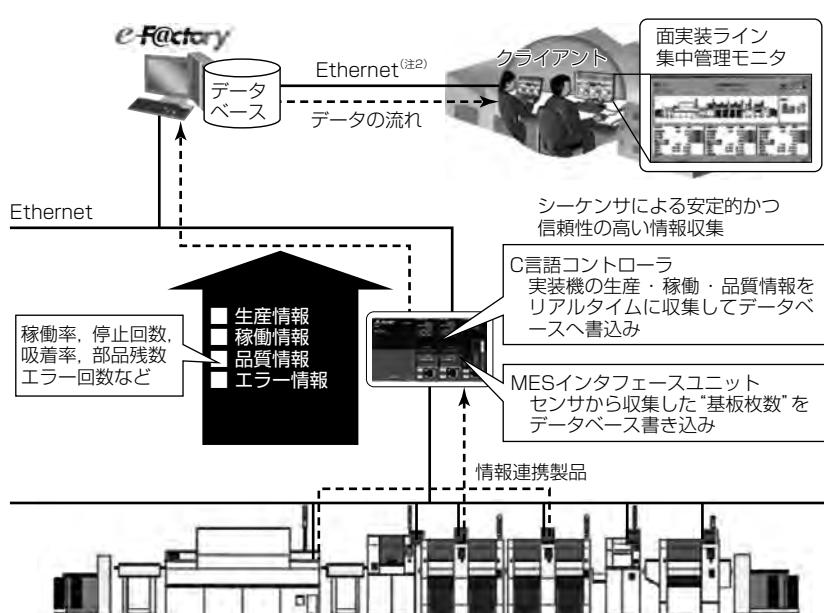
図2. システムの全体構成



図3. GOTの照明制御画面



図4. MC Works64の空調管理画面



MES : Manufacturing Execution System (注2) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

図5. 面実装ライン管理システム

を図6(a)に示す。その結果、生産機種変更時の段取りによる待ち時間の割合が大きく、稼働率悪化の要因であることが判明したため、段取り改善を進めることにした。このシステムと生産管理システムの情報を連動させ、複数ラインに対する段取りの優先順位付けを行い、作業者に対して各ラインの稼働残時間の見える化、適切な段取り順の指示を行うシステムを開発・導入し、作業者待ち時間の削減を図った。

このシステム運用後の稼働状況を図6(b)、改善効果を示したグラフを図7に示す。待ち時間の削減によって、改善前に比べ稼働率・生産高が向上し、エネルギー原単位を改善した。

## 2.3 建屋設備と生産設備の連係制御

建屋設備側と生産設備側それぞれの取組みに加え、FA機器とオープンネットワークの汎用性を活用して双方を接続し、建屋設備(空調設備、局所排気設備)と生産設備の連

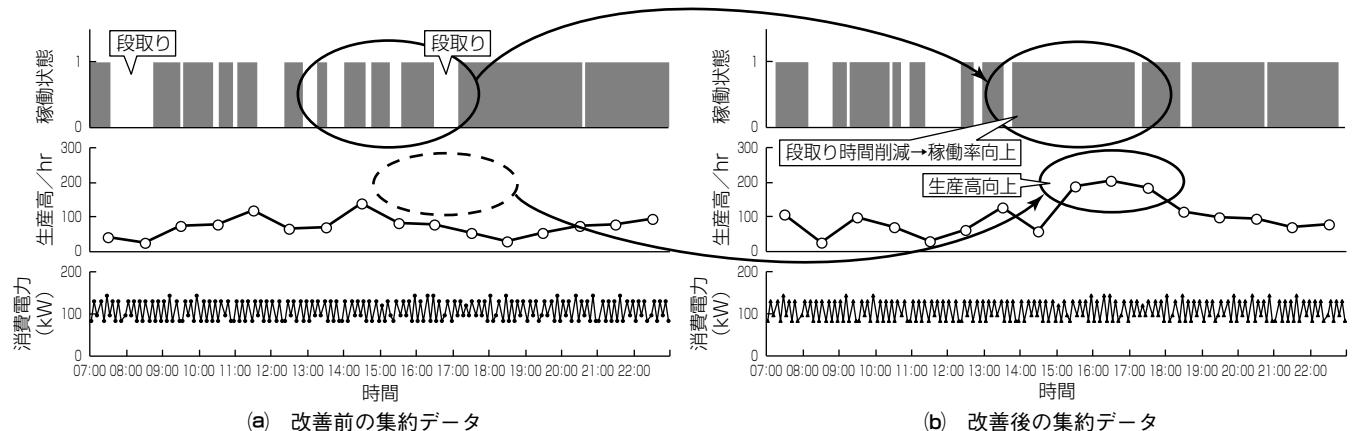


図6. 稼働状況の集約データ

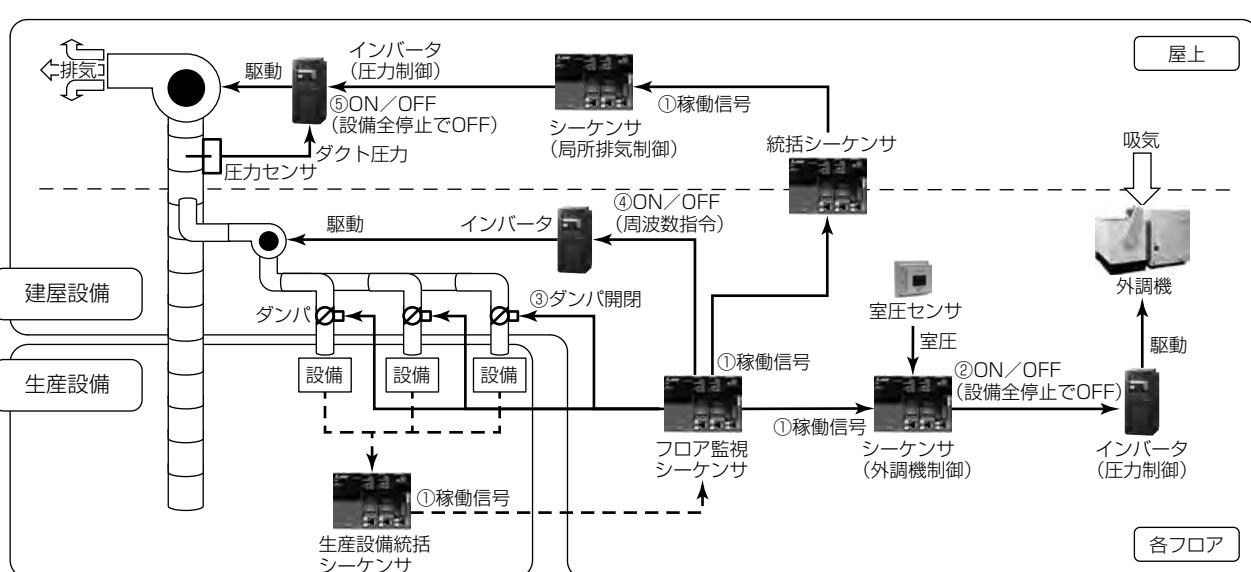
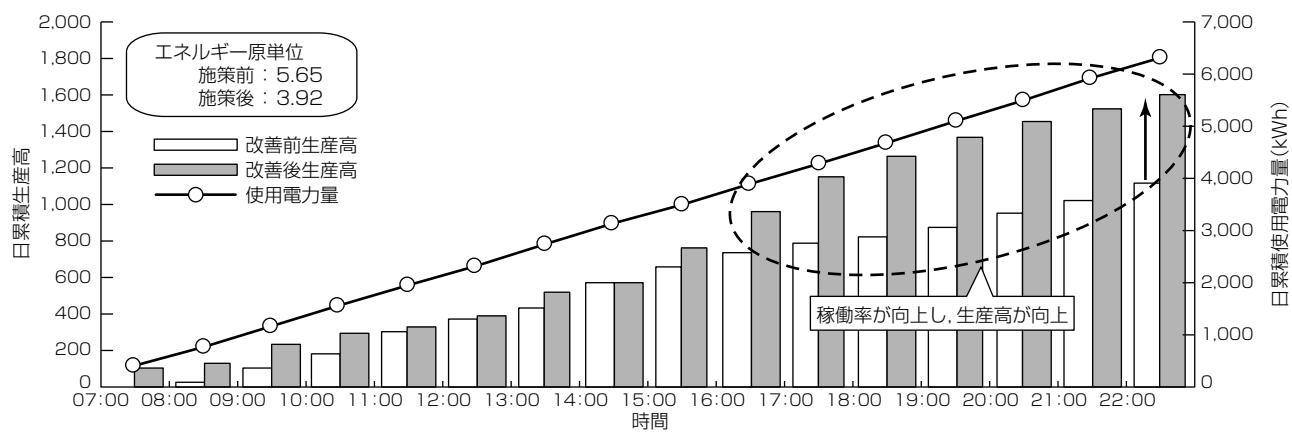


図8. 連係制御のシステム構成

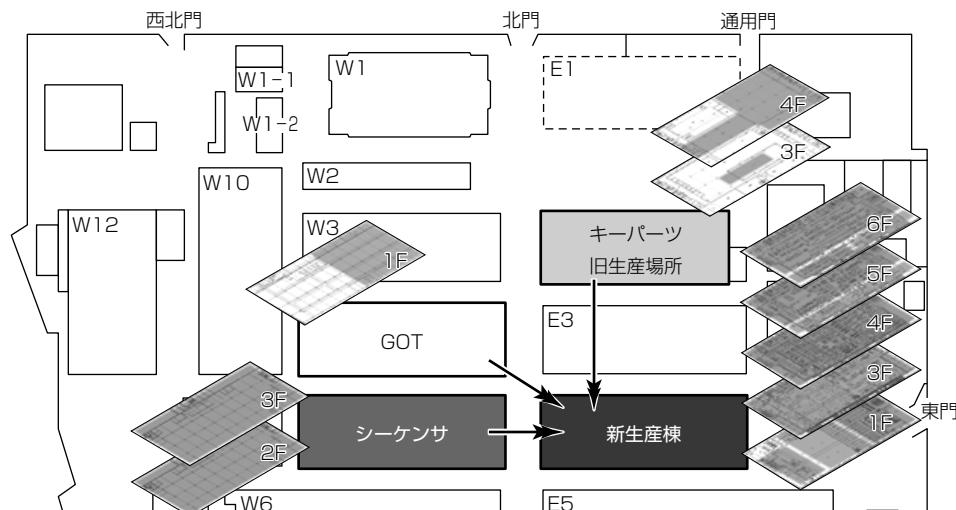


図9. 各品目生産場所の移動イメージ

係制御による、更なるエネルギー削減を実現した。

連係制御に係るシステムの構成を図8に示す。局所排気を必要とする生産設備の稼働信号は、建屋側のエネルギー管理システムに送られる(図8①)。設備の稼働信号に基づき、建屋側では“外調機起動”“局所排気ダクトダンパ開”“局所排気ファンインバータ起動”(図8②～⑤)を行う。

また、稼働する生産設備の種類・台数に応じて局所排気ファンのインバータ速度制御を行う。これらの制御によって、生産設備稼働に応じて建屋側設備が必要なときに必要な分だけ稼働する仕組みを実現した。

### 3. 成 果

新生産棟ではシーケンサ、GOT、駆動系キーパーツ(以下“キーパーツ”という。)の3品目を主に生産している。新生産棟建設前はそれぞれ別の建物で、フロアも分散した状況で生産を行っていたものを、新生産棟に集中させることで、2章の取組みに必要な投資の効率化を図った(図9)。

これら3品目について、移転前後での面積・生産高の変化を考慮した電力使用原単位( $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ )を定義し、品目別の電力使用原単位の変化を計算した。その結果、シーケンサは-37%，GOTは-37%，キーパーツは-22%となり、3品目全体では移転前に比べ電力使用原単位で30%( $362\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ )の削減を実現した(図10)。

また、従来製作所全体で実施している高効率機器への更新、エネルギー削減等の地道な省エネルギー改善を含めた一連の活動による製作所全体使用電力量の抑制効果を、移転後(2015年)の実績値と、特に取組みを行わない場合の推定値との比較によって算定した。その結果、新生産棟建設に伴う年間使用電力量の増加に対する抑制効果は、製作所全体で-13%(-9,273kWh/年(原油換算-2,351kl/年))と推定する(図11)。

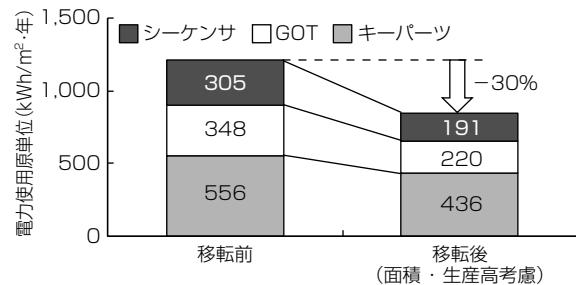


図10. 移転前後での電力使用原単位比較

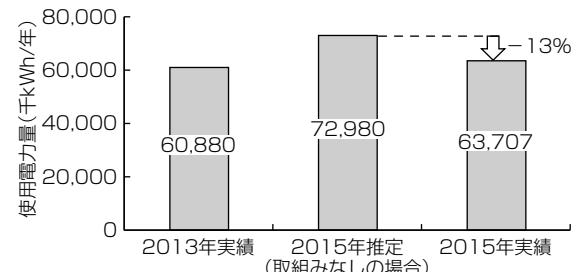


図11. 製作所全体の年間使用電力量削減効果

### 4. む す び

新生産棟は稼働から約3年が経過し、実運転データが大量に収集できることで更なる改善の可能性も見いだせている。今後は、蓄積したデータを基に分析からチューニング・運用改善による改善サイクルを継続的に実施し、省エネルギー活動を進めていく。また、システムの汎用性を活用し、生産設備との連係の拡大・強化、海外工場への展開を進めることで、システムを有効活用したエネルギー使用的合理化を進めていく。

### 参考文献

- (1) 神原一博, ほか: IoTを活用した生産技術の革新, 三菱電機技報, 91, No.4, 249~252 (2017)

豊国明子\*  
杜澤優一\*\*  
霜田圭介\*\*\*

# 環境情報統合管理システム“ECOMelco”

*Environmental Information Management System "ECOMelco"*

Akiko Toyokuni, Yuichi Tozawa, Keisuke Shimoda

## 要旨

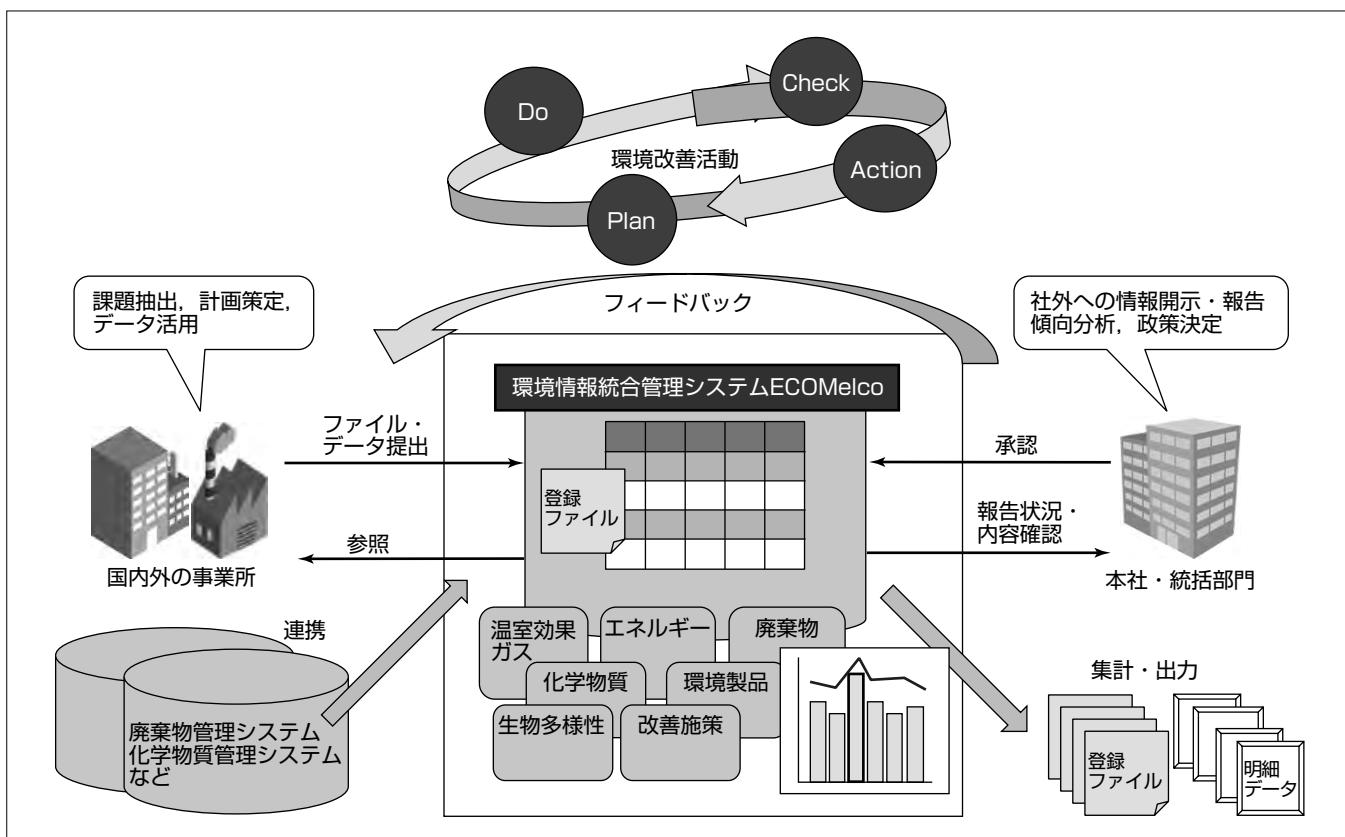
近年、企業価値を評価する上で非財務情報開示への関心が高まっており、その中で環境にかかる情報もますます重要視されるようになった。企業の環境経営を磐石(ばんじやく)なものにするためには適切な環境情報管理が不可欠であるが、環境部門の業務は取り扱う分野やデータの種類が多岐にわたり、情報量も多いことから、環境情報を効率的かつ正確に処理し、活用していくことは易しいことではない。

三菱電機グループは、過去からITシステムを活用した環境情報管理を行っていたが、報告する拠点側・管理する本部側双方での業務負荷が高く、収集データを十分に活用しきれていないという課題があった。そこで、報告作業の負荷軽減及び確認・修正作業の削減による業務効率の改善

と環境情報の見える化・共有化を目的に、環境情報統合管理システム“ECOMelco”を構築した。このシステムは2015年から運用を開始し、環境実施計画やその他環境対策の進捗管理、法規制への対応、環境報告の作成等に幅広く利用している。

このシステムの特長として、調査票データの自動インポート、外部システムとの連携、異常値や記入漏れ等の誤りチェックや報告の期限管理、自動集計・グラフ化、組織・報告内容の変更への柔軟な対応が挙げられる。この結果、速報作成や分析期間の短縮、自主的な目標管理、部門間でのタイムリーな情報共有につながった。

今後も使用者の利便性や環境業務での活用拡大を目指し、継続的にシステムを改善していく。



## 環境情報統合管理システム“ECOMelco”による環境改善活動の加速化

環境情報統合管理システムECOMelcoでは、国内外の事業所から環境パフォーマンスデータや各種調査ファイルの登録を受け、環境CSR(Corporate Social Responsibility)レポートやアンケート、法規制などの社外への情報開示・報告、環境活動の進捗確認や課題分析、政策決定などの環境目標管理に活用している。このシステムを通じて、環境改善活動でのPDCA(Plan, Do, Check, Action)サイクルを支え、三菱電機グループの環境計画や環境ビジョン2021の達成を目指す。

## 1. まえがき

三菱電機グループは、環境計画や環境ビジョン2021で定めた目標達成や情報開示のため、国内外の事業所に対し、環境パフォーマンスデータや改善施策に関する実績調査を長年行ってきた。近年、事業の成長や環境経営の重要性の高まりとともに、対象組織や把握すべき内容も拡大する一方であり、環境情報をどのように収集・管理・活用するかは、環境経営を推進する上で、大変重要な課題である。

本稿では、2015年に運用を開始した三菱電機グループの環境情報統合管理システムECOMelcoについて述べる。このシステムの導入によって、環境情報の取扱いでの報告側・管理側からの多様な要望に応え、業務効率の向上と環境改善活動(PDCA)の加速化を取り組んだ。

## 2. 新システム導入の背景と目的

### 2.1 従来システムの課題

三菱電機グループは、2010年から環境統合情報システム<sup>(1)</sup>を導入するなど、ITシステムを活用した環境情報管理を行っていた。しかし、国内の環境パフォーマンスデータ管理にだけ適用されていたため、環境業務や対象組織の広がりに伴い、システムでの取扱いを想定していない情報については、メールによる実績収集・進捗管理を行うことが主流となっており報告状況の確認や事業所別の情報管理が非常に煩雑であるという問題があった。

そこで、2011年に、海外拠点を含め、報告側が環境実施計画の実績・計画データを全て調査票ファイルとしてアップロードするWebシステムを構築した。これによって、報告状況の確認や事業所別の報告の管理は容易となったが、あくまでファイル単位でのデータ管理のため、数値情報の集計・分析に時間を要し、情報共有にも手間がかかっていた。また、法規制対応として、廃棄物管理システム<sup>(2)</sup>、化学物質<sup>(注1)</sup>管理システムも個別に稼働していたが、これら外部システムに登録されている類似情報について再度報告を求める運用になっており、報告側から改善を求める声も多かった。

(注1) 化学物質排出移動量届出制度(PRTR)の対象となる物質

### 2.2 新システム開発の目的

従来システムでの課題を踏まえ、次の目的で新システムECOMelcoを開発することになった。

#### (1) 環境情報の報告及び管理業務の効率化

各事業所の報告側には、従来システムからの利用環境を継承したい、入力作業ができるだけ楽にしたいという要望がある一方で、管理側の統括部門は、詳細で正確な情報を迅速に入手する必要がある。そこで、報告にかかる作業負荷を軽減するとともに、入力や操作での誤りを防止することによって、確認・修正作業にかかる時間を短縮し、双方の要件を実現する。

#### (2) 環境情報の見える化・共有化

自動集計・一覧化・グラフ表示等によって、登録された情報を見える化し、スムーズな情報共有を可能にすることで、傾向分析、拠点へのフィードバックといった改善活動(PDCA)の加速化を支援する。

#### (3) 組織・報告内容変更への柔軟な対応

従来システムでは、組織や報告内容の変更への対応が難しく、機能を十分に活用できない反省もあった。報告が必要とされる組織や情報は刻々と変化するため、対象組織、報告内容、期間や形式等の変更が生じた場合でも、設定変更や軽微なシステム改訂ですむようにし、開発・運用コストの低減とシステム寿命の長期化を図る。

## 3. 新システムECOMelcoの開発

### 3.1 開発方針

#### (1) システム開発方式

ECOMelcoの開発に当たり、①既存の従来システムへの機能追加、②他社システムのカスタマイズ、③完全な自社開発のいずれを採用するか検討した結果、三菱電機インフォメーションネットワーク(株)のパッケージ製品“環境統合情報システムECORates”をベースにしたカスタマイズ開発が、最も要件に近く、開発効率も良いと判断した。初期投資が少ないと稼働開始までの期間が短いという点では、より条件の良い他社製品もあったが、カスタマイズの適応性を優先した。

#### (2) グローバル対応

このシステムは、海外も含め、環境実施計画を策定している三菱電機グループの環境実施計画を策定している各事業所が全て利用できることを前提に、現在は英日2か国語での運用であるが、言語辞書を追加すれば、ほかの言語への切替え表示が可能である。また、海外独自の単位の設定や集計変換も実装した。

### 3.2 基本機能

ECOMelcoの利用イメージを図1に示す。

#### (1) 環境情報の報告

各事業所は、統括部門からの依頼に基づき、報告内容の

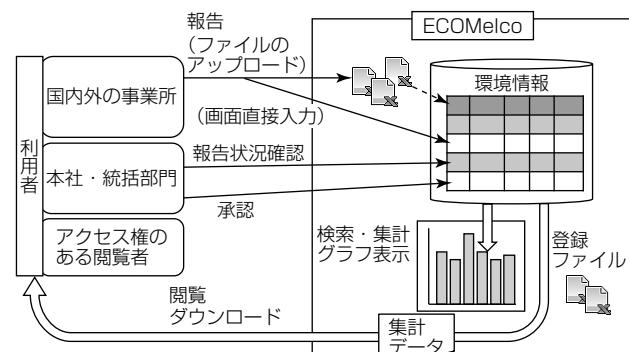


図1. ECOMelcoの利用イメージ

記入を完了した調査票ファイルのアップロードとシステム上の画面直接入力のいずれかの方法で環境情報の報告を行う。

三菱電機の場合、項目の新設や変更に対応しやすい調査票ファイルのアップロードを主に使用しているが、操作性や運用面を考慮し、分野によって画面直接入力も使い分けている。

#### (2) 環境情報の報告状況確認・承認

統括部門は、各事業所からの提出状況を確認し、承認する。報告内容に問題がある場合は差戻しとなり、事業所が再度登録する必要がある。調査期間外や承認後に事業所は許可なくデータの差し替えはできない。

#### (3) 環境情報の閲覧、ダウンロード

登録された情報は、自部門以外の情報も閲覧及びダウンロードすることが可能である。閲覧方法には2つあり、組織ツリーから閲覧したい登録情報を個々に参照・保存する方法と、検索によって複数の組織や報告期間など抽出したい範囲を指定し、複数の報告をまとめて確認・一括取得する方法である。

ただし、登録情報によっては、非公開とすべき内容もあるため、組織の属する区分によって、あらかじめ閲覧できる範囲を設定し、アクセス制御を行っている。

#### (4) 環境情報の集計・グラフ表示

数値情報については、組織別・項目別・全体合計の集計をサポートする。特に、エネルギーと温室効果ガスの計算では、項目ごとに異なる単位変換が必要で、換算係数パターンを社内と社外で区別するケースもあるため、自動集計による業務効率改善効果は非常に大きい。

また、見える化を支援する手段として、個々の報告値や集計結果のグラフ表示やCSV(Comma Separated Value)出力に対応している。

### 4. ECOMelcoの特長と導入効果

#### 4.1 報告及び管理業務の効率向上

##### 4.1.1 報告作業の省力化

ECOMelcoは、報告作業の省力化のため、次の機能追加を行い、事業所の入力操作を補完している。

###### (1) 調査票データの自動インポート

環境情報をデータベース上で管理することは必須要件であるが、報告側にとって、全てのデータ項目を画面に直接入力するのは負荷も高く、入力誤りが起こりやすい。そこで、汎用のデータ抽出変換ツール(Extract Transform Load : ETL)を利用し、登録時に調査票のファイル上の情報を自動的に抽出し、データベースへ格納することにした。ユーザーの操作性に与える影響を極力抑えつつ必要な情報量を維持できるだけでなく、報告内容の変更があった場合でも、ツールによって調査票の改訂とデータベース項目とのマッピング変更が容易に行えるため、開発工数へのインパクトは小さい。

###### (2) 外部システムデータの取込み

従来システムでは、廃棄物管理システムと化学物質管理システム等の外部システムで類似した実績情報(例えば、廃棄物の発生量、化学物質排出移動量等)があるにも関わらず、毎年の環境実施計画の調査では、廃棄物と化学物質について改めて報告を求めており、報告側にデータ登録の2度手間が発生していた。ECOMelcoでは、外部システムから出力されたデータを、自動又は手動で報告情報として取り込むことができる。外部システムで取得できないデータだけを追加入力してもらえばよく、データ入力の省力化を実現した。

###### (3) 過去データの繰越し

毎回確実に報告が必要だが、変更箇所や変更頻度が少ない情報については、直近の登録データの繰越し機能を利用している。この機能によって、変更のある項目だけ更新することで報告が完了することから、各事業所の責任者名簿の申請等、環境実施計画の実績調査以外の情報収集にもシステムの用途が広がっている。

##### 4.1.2 報告遅れ・誤りの防止

環境データの取りまとめ作業で、集計作業そのものよりも不明点の問合せや修正内容の再報告待ちの方が時間を要する場合が多い。情報の収集漏れや誤りを早期に検出するため、このシステムでは、次の機能強化を行った。

###### (1) 報告状況管理

報告部門には、報告期限間近や報告期限超過の警告がログイン直後の画面で警告表示される、また、統括部門では、所管組織で何の報告が遅れているのか、一覧確認・出力保存でき、期限厳守の報告については、督促の警告メールを自動発信することも可能である。

報告状況管理は一般的な機能であるが、システムの運用管理での重要な役割を担うことから、三菱電機グループの組織構成に準じた表示や登録情報への遷移で、独自形式にカスタマイズしている。

###### (2) 異常値の検出と警告

ECOMelcoでは、不正な値、必須項目への入力漏れ、前年度実績値、計画値に対して事前に設定した基準を超えるデータを検出し、警告と警告理由を表示する。単純な入力ミスの一次チェックを自動化することによって、データ品質と業務効率の向上を図る。

### 4.2 見える化・共有化による改善活動の加速

#### 4.2.1 環境情報の見える化

ITシステムによる見える化で、集計・分析作業負荷の軽減が図ることは大切だが、一番の狙いは、結果を導くまでにかかっていた時間を本来の環境行政に振り向け、収集情報が環境負荷の低減や改善活動(PDCA)に有効に作用することである。

ECOMelcoでは、前年度実績や当年度計画を参照しながらの目標管理が可能であるが、自動集計及びグラフ化によって計画値との比較や実績の推移を視覚的に表示する。グ

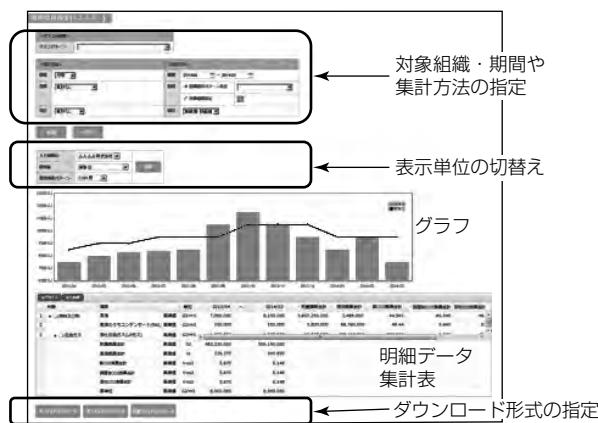


図2. 環境情報の表示画面例

ラフや集計表で求められる表現は、利用者や用途によって切り口や趣向が異なるため、ECOMelcoの集計オプションやグラフ表示はあえてシンプルな作りとし、閲覧者がデータのダウンロード後に自由に加工することを意図している(図2)。

環境情報の見える化によって、統括部門は、自社やグループ全体の実績を短時間で把握し、事業所や所管部門へ報告内容に関する展開、政策への反映を迅速に行うことが可能になる。また、報告部門でも、自部門の実態を認識しやすくなり、自主的に他部門との相対評価や傾向分析、特異的な問題点を見つけるなど、改善活動の加速化が期待できる。

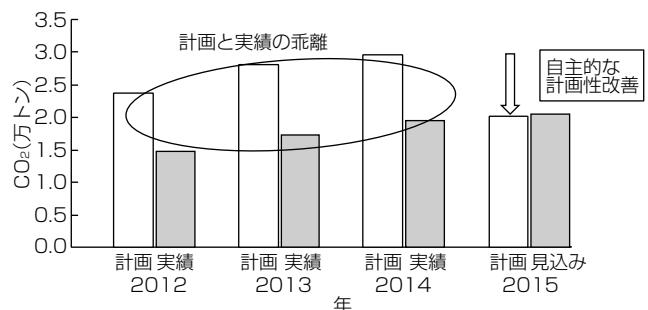
図3は、見える化によって、CO<sub>2</sub>排出量の計画値と実績値の乖離(かいり)が改善された例である。例年、各事業所は、計画値をかなり多めに見積もることが多く、統括部門から個別に計画値の見直しを要請していた。ECOMelcoの導入によって、計画値と実績値の乖離が当事者間で視覚的に共有でき、計画値の自主的な適正管理を導いた。

#### 4.2.2 円滑な情報共有を支えるフォーマット整備

図示化された情報の参照によって、活動の進捗状況や報告内容の誤りを直感的に確認することはできるが、得られた情報の詳細を掘り下げる中で、集計前の元データが必要となることは多々ある。また、環境情報には、パフォーマンスデータのような集計しやすい数値情報だけでなく、文字列情報も多く含まれるため、そのような場合、個々の情報の形式に応じて、個別のデータ加工が必要となる。

膨大な収集データを定型的に整理された形で1度に入手できることもITシステムの利点であり、このシステムでは、編集や二次加工に流用できるよう、複数拠点の集計前の明細データを1つのCSVファイルに統合し、ダウンロードすることができる。さらに、データ管理と同時にファイル管理も充実させ、事業所が登録したファイルそのものを一括ダウンロードすることも可能であり、ファイル一覧を参考しやすいうようにファイル名を統一化した状態で出力する。

これら一連の集計やダウンロード作業では、ユーザー間で選択した対象組織の違いによって結果に差異が生まれやすい。ECOMelcoでは、対象範囲をパターンとして保存

図3. CO<sub>2</sub>排出量の計画性改善の例

し、ユーザー間で共有することによって、範囲のズレを回避する手段も備えている。また、不意のデータのすり替わりを防ぐため、データ更新期間はスケジュール管理されている。

#### 4.3 組織・報告内容の変更への柔軟な対応

事業環境の変化によって、事業所の増減や所管部門(組織階層)の移動といった組織構成の変更は毎年のように発生する。このような場合、組織の有効期間を設定でき、旧組織への誤入力を防ぎつつ、対象外となった組織の過去データも引き継ぐことが可能である。

また、報告内容の変更についても、過去の収集データについて参照できる仕組みとしており、情報の欠損を防ぐ。

### 5. む す び

このシステムの導入から2年以上が経過しているが、従来システムのときに比べ、期限内の報告率が上がり、速報作成までの期間が約半分に短縮されたと実感している。事業所でも、自らの操作や入力の誤りに気付き、自己解決できることが増えたほか、環境情報を報告後も環境データを再確認した上で報告内容の議論ができるなど自律的な運用を認識する機会も多い。

また、三菱電機グループの事業促進の観点からは、三菱電機グループ会社のパッケージ製品をベースとしたシステム開発を行ったことで、製品のバージョンアップ機能をいち早く入手でき、一方、製品パッケージの開発元に利用者の声を届けることによって製品ニーズの掘り起こしやPR活動に役立ててもらえるWIN-WINの関係が築けた。

今後の展開としては、よりきめ細かな目標管理やタスク管理への対応や操作性の改善が挙げられる。ユーザーへのヒアリングを通じてシステム改善を継続し、環境管理レベルの向上を目指す。

### 参 考 文 献

- (1) 池神正晃, ほか: 環境経営を支える“環境統合情報システム”, 三菱電機技報, 82, No.10, 650~653 (2008)
- (2) 奥井秀明: “クリーン情報システム”による管理強化, 三菱電機技報, 88, No.12, 749~752 (2014)

# パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーに貢献するパワー半導体デバイスの進展

多留谷政良\*

Recent Advances in Power Semiconductor Device for Energy-saving Power Electronics

Masayoshi Tarutani

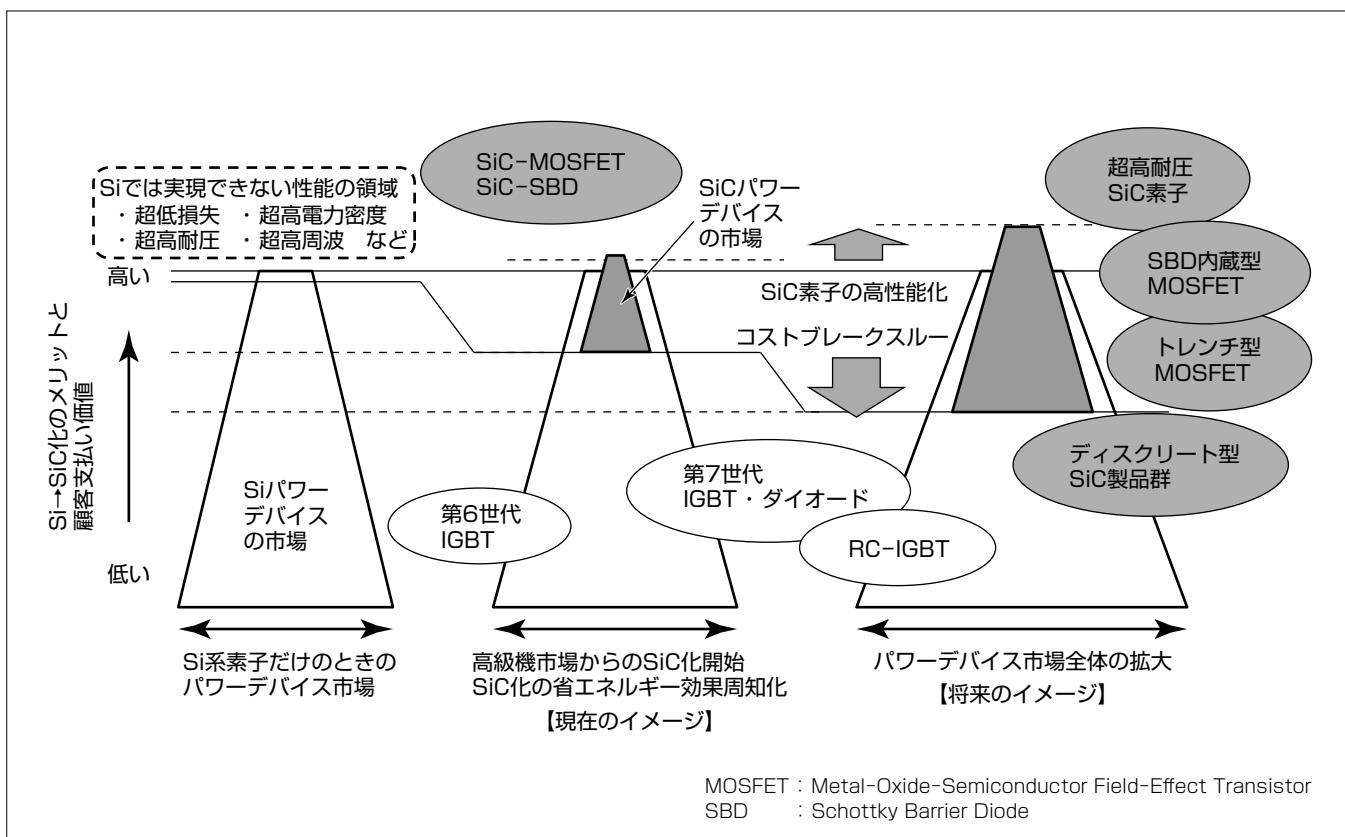
## 要旨

パワーエレクトロニクス(PE)技術は、機器の省エネルギーや創エネルギー(太陽光発電や風力発電、地熱発電などのCO<sub>2</sub>を排出しない電気エネルギーの創造)をより高効率化し、持続可能な社会づくりや環境負荷低減に貢献できる重要な技術である。

三菱電機では民生から産業、自動車、電鉄・電力までの製品用途に最適に設計したチップとモジュールパッケージ技術を組み合わせ、百W級から数MW級までのパワーモジュールを製造し、多様なPE製品に応用してきた。その心臓部がパワー半導体デバイスである。今まで目覚ましい進化を遂げたSi(シリコン)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)やダイオードがその主力であり、これ

らを一体化したRC(Reverse Conducting)-IGBTの適用も進んでいる。デバイスに加えて、製品の耐久性や耐環境性などを決めるモジュール技術についても改善を重ね、信頼性の高い製品を創出してきた。

また、PE機器の更なる高性能化や小型化に向けては、SiC(シリコンカーバイド)デバイスの適用範囲拡大に高い期待と関心が寄せられている。最新デバイスを、価格面や実装形態などの面で、より使いやすくするように改善を続け、それぞれの応用用途に最適なデバイスとモジュール製品を開発・提供することで、持続的・社会での環境の維持向上にますます貢献していく。



## 当社のSi・SiCパワーデバイスの進展

PE技術は、高効率化し、持続可能な社会づくりや環境負荷低減に貢献できる重要な技術である。パワーデバイス市場の拡大を牽引(けんいん)するのは、技術の成熟期にあるSiパワーデバイスと技術飛躍期にあるSiCパワーデバイスである。技術革新による高性能化や製造技術の高度化による低コスト化、製品自体の使いやすさなどが向上することで市場が拡大する。SiCはその顧客支払価値を高めることで適用範囲が拡大していく。

## 1. まえがき

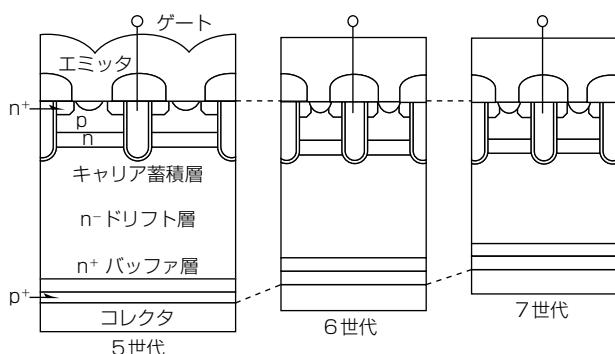
これまで、Si-IGBTを中心としたパワーデバイスは、飛躍的な性能向上を果たし、数Aから数千Aまでの電流容量、数百Vから数千Vまでの定格電圧を持つパワーモジュールとして、様々な分野で実用化されPE機器の省エネルギー化に大きく貢献してきた。例えば、高耐久性を持つ車載用の6世代IGBT、民生用途で最初に実用化された7世代IGBT、高い電圧域までの分野に展開を見せる7世代IGBTとダイオード、7世代のプロセス技術をフル活用した高性能RC-IGBTのなどである<sup>(1)(2)(3)</sup>。デバイスの高性能化とともに、最適に設計されたパッケージや実装技術が製品としてのパフォーマンスを最大限に引き出す鍵となる。これらを高い水準で両立させて総合的性能面で優れた魅力ある製品を提供できるのが、当社の強みである。今後は、Siでは実現できない超高性能が必要となる用途や、高級から中級クラスの製品群の一部に、SiCパワーデバイスの適用が進み、パワーデバイス全体としての市場拡大が期待されている。

本稿では、これまでに三菱電機技報などに掲載されてきた論文を基に、Siパワーデバイス技術を振り返るとともに、SiC化の進展の方向性について述べる。

## 2. Siのパワーデバイス技術の進展

### 2.1 Si-IGBT

現在のパワーモジュールの主力チップはSi-IGBTとSiダイオードである。Si-IGBTは、1980年代半ばの実用化以降、図1に示すように最新の7世代素子まで技術的に飛躍的な進化を遂げ、低損失化が図られてきた<sup>(1)(2)</sup>。Si-IGBTの構造の進化には、トレンチ構造とその微細化、キャリア蓄積層構造適用によるコレクタ-エミッタ間飽和電圧(VCEsat)の低減、接合信頼性や様々な接合方式に対応できるための表面電極平坦(へいたん)化やメタライズ形成技術、薄ウェーハ技術や極薄ウェーハ技術を適用しての薄板化、各素子に最適に調整した裏面構造の採用などがある。最近の7世代素子でも、アクティブなゲートの配列な



CSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)構造を採用し、薄ウェーハ化と構造最適化によって次世代進化を遂げてきた

図1. Si-IGBTの構造の進展

ど用途に応じて細やかな構造の最適化を図ることで、使いやすさを更に向上させている。

### 2.2 Siダイオード

パワーモジュール内でIGBTチップと逆並列に接続される還流用FWD(Free Wheeling Diode)でも、最新の7世代素子では順電圧(VF)と逆回復損失(Erec)のトレードオフ関係を改善するために、極薄ウェーハ技術と裏面パターニング技術を活用して形成するRFC(Relaxed Field of Cathode)構造が適用されている<sup>(2)</sup>。図2のとおり、RFC構造はカソード側(裏面)にp型とn型の領域を作り分け、ウェーハ厚やデバイスの使用条件に応じて、p層の濃度やレイアウトを調整することで、逆回復動作時のn-層中の電荷量を制御している。従来のチップでは、極薄ウェーハ化すると電圧のsnap-offや発振が見られるが、RFC構造では電圧のsnap-offを抑えることができ、従来型ダイオードと同等の破壊耐量を保持したまま、低損失化を実現している。

### 2.3 RC-IGBT

IGBTとダイオードを1つのチップに統合したRC-IGBTも2006年から製造しているが、最新の第7世代プロセス技術(極薄ウェーハ技術と裏面パターニング技術)を適用することで、飛躍的な極薄化と性能改善を実現した(図3)<sup>(3)</sup>。電気特性では、飽和電圧(VCEsat)は従来のRC-IGBTに対して同一チップサイズ比較の場合、50%低減できた。また、ダイオード領域のサイズとレイアウトについても最適化設計を行うことで、素子の放熱性を確保しつつリカバリー電流を最小化するように工夫している。今後の適用範

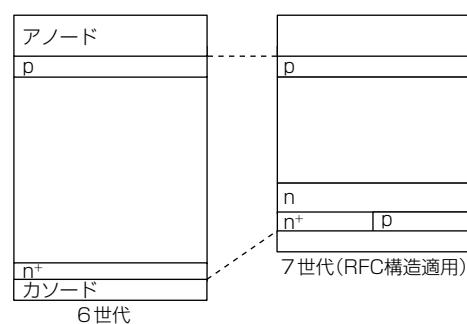
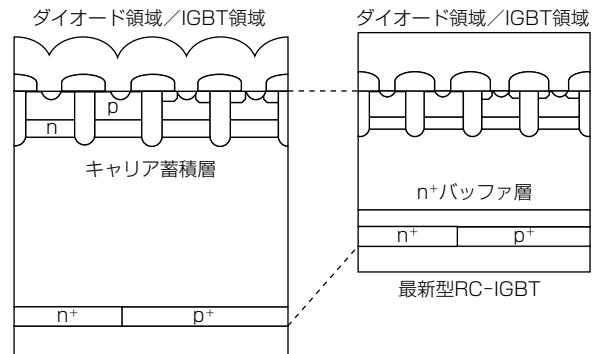


図2. Siダイオードの構造の進展



従来型RC-IGBT  
極薄ウェーハ化し裏面構造やダイオード領域を最適化

図3. RC-IGBTの構造の進展

開の拡大を見越し、更なる研究を加速中である。

### 3. 現在のSiパワーデバイスの応用事例

#### 3.1 6世代と7世代素子の適用事例(車載対応製品)

地球環境保護意識の高まりを受け、EV(Electric Vehicle)・HEV(Hybrid Electric Vehicle)市場が拡大している。国によっては、今後も厳しい排ガス規制をすることや、エコカーとしての認定基準を一層厳しく制限する計画も発表されている。したがって、車載用パワーデバイスへの注目度や期待はますます高まっており、PE技術の競争の中心となっていく。自動車には人を安全に輸送するという命題があり、一段高い安全性が要求される。自動運転の開発の事例と同じく、自動車のモータ駆動に用いるパワー半導体には非常に高い信頼性や耐久性が必要とされる。これを作り出していくのが、デバイス技術と同じく重要なパッケージ技術とこれらを融合する接合部分の技術である。

当社では、1997年に自動車用パワー半導体モジュールを量産開始し、様々なEV・HEVに搭載されている。図4は、EVやHEV用モータのインバータ駆動に用いる自動車用パワー半導体モジュール“JシリーズT-PM”の小型パッケージの外観を示す。構成部品の高集積化で従来製品よりも小型化(実装面積で約36%縮小、製品質量で約42%低減)を実現しており、インバータの小型・軽量化に貢献している。このモデルに搭載されているIGBTは、CSTBT構造を採用した第6世代IGBTで、トランスマルチド構造パッケージ内部の構成部品の高集積化を実現している。また、当社独自のDLB(Direct Lead Bonding)構造の採用で、配線抵抗と配線インダクタンスを低減しており、高性能と高信頼性を両立させている。

この進化版として実用化されたのが、最新の自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”である(図5)<sup>(4)</sup>。J1シリーズでは、第7世代のIGBTとダイオードを各6素子搭載し、冷却フィンとも一体化した直接冷却構造を適用している。最新素子の適用によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧を従来製品と比べて約15%低減している。また、冷却フィン一体型の直接冷却構造を採用することで、従来のJシリーズT-PMで必要であった放熱グリースが不要となり、放熱性能を約40%改善している。モジュールとしての熱抵抗を改善した結果、デバイスの通電能力を更に向上させることに成功している。搭載スペースの面では、従来のJシリーズT-PMを3台並べて配置するよりも、J1シリーズ1台を配置する方がコンパクトとなるほか、アルミ製の放熱フィンは、モジュールの軽量化に大きく貢献している。

どちらの製品でも、製品の寿命を十分に高める必要があり、モジュール部品の形状や材質の選定・組合せ、実装条件の最適化など高度な技術が適用されている。また、DLB構造部でチップと上部電極を接続する部分は、はん

だ付けが用いられるが、動作時に発熱する素子に最も近い異種材料接合部分であり、ここにも数多くのノウハウと特許技術を採用しており、チップ側への発生応力やひずみをあるレベル以下に抑えることで、長寿命性能を実現している。

#### 3.2 RC-IGBTの適用事例(民生対応製品)

当社は業界に先駆けてDIPIPM(Dual-In-line Package Intelligent Power Module)を製品化し、市場要求の変化に対応した製品を次々と開発・量産化してきた。2010年に空調機器業界に新たな省エネルギー基準として導入されたAPF(Annual Performance Factor: 通年エネルギー消費効率)に対しても、2013年に当社独自の第7世代IGBTを内蔵した超小型DIPIPM“Ver. 6シリーズ”を製品化し、通電能力の拡大及び低電流域(定格電流の10分の1程度)の飽和電圧を15%低減することで、インバータシステムの小型化、省エネルギー化に貢献してきた。さらに、新興国市場でもインバータ化が進む中、システムコスト低減が課題となっている。この市場対応として、小型化、低コスト化を実現できる製品として“SLIMDIPシリーズ”を開発した<sup>(5)</sup>。超小型DIPIPM Ver. 6シリーズには、7世代IGBTを搭載して豊富な電流容量やリード形状での多彩なラインアップがある。一方SLIMDIPシリーズでは、IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTを採用することで、従来の性能・機能を損なうことなくチップ搭載の占有面積

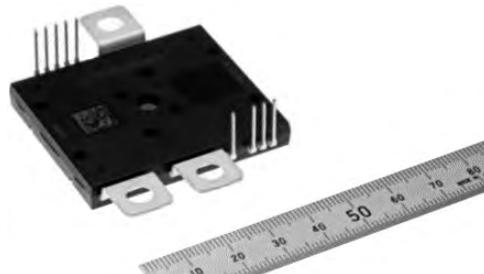


図4. 第6世代IGBTを搭載したJシリーズ  
T-PM “CT300DJG060”

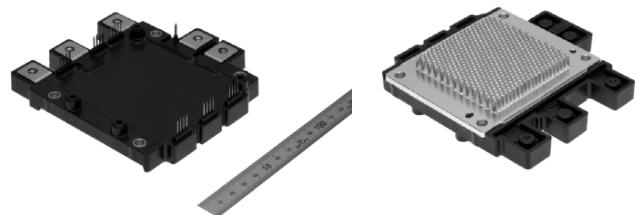


図5. 第7世代IGBTとダイオードを搭載したJ1シリーズ

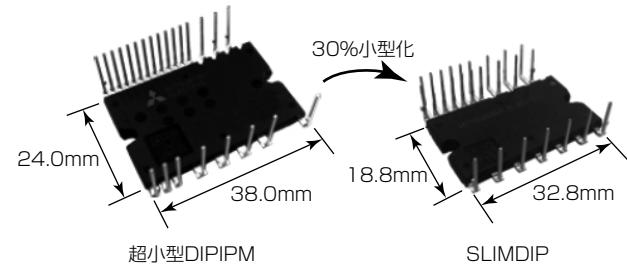


図6. 第7世代IGBT搭載の超小型DIPIPMとRC-IGBT搭載の  
SLIMDIP

を削減し、パッケージ体積を30%小型化した。また、実表面についても生産性が向上している。図6に、従来の超小型DIPIPMとSLIMDIPの外観を示す。

#### 4. パワーデバイスのSiC化

##### 4.1 民生対応製品での事例

高級機種への適用については、更なる高性能化・低消費電力化が競争軸になってくる。そこで、IGBTに比べて低電流動作時の損失を小さくできるSJ(Super Junction)-MOSFETと、急冷などの過負荷動作にも対応できるようIGBTと並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIPIPMを開発・製品化している。更なる高性能化を実現するため、高級機種製品向けをターゲットとしたパワー半導体モジュール“超小型フルSiC DIPIPM”では、当社独自の絶縁膜生成技術によって、高しきい値電圧と低オン抵抗を両立させたSiC MOSFETを搭載することで、当社従来製品(超小型DIPIPM Ver. 6)から電力損失を70%低減して業界トップクラスの低消費電力を実現した<sup>(6)</sup>。また、超小型フルSiC DIPIPMはゲート負バイアス回路を不要とすることで、当社従来製品と外形サイズ・ピン配列の互換性を確保し、インバータシステムの設計簡素化に寄与する。定格電圧600V、電流容量15Aの従来のDIPIPMとSJ-MOSFET内蔵DIPIPM、フルSiC DIPIPMの損失比較を図7に示す。SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIPIPMは、高性能SJ-MOSFET内蔵DIPIPMと比べても50%以上の大幅な損失低減を実現している。高級機向けの素子のイメージがあるが、長時間にわたって連続してPE機器を使用するような環境や施設では、この低損失性能は十分に価値があるものと考えられるため、顧客支払価値の高い製品の好例と言える。

##### 4.2 これからのSiCデバイスの進展

これまで、SiパワーデバイスはPE機器の省エネルギー化に十分貢献してきた。現在は、第7世代技術のIGBT、ダイオード、RC-IGBTを活用した製品の拡大が進んでおり、高性能でより使いやすくコスト面でも魅力ある製品群を送り出し、普及が拡大中である。小型化・低コスト化という方向性でのラインアップ拡充によって、より多くの顧客に活用されると期待している。省エネルギーに適したPE機器の使用拡大を促すことで、気候変動及びその影響の軽減という環境的側面での社会貢献を果たし、持続可能な社会づくりに役立つはずである。

一方、Siデバイスでは実現できない領域の超低損失SiCデバイスへの期待も高まっている。今後、SiCの利用が更に広がるかは、顧客支払価値に見合った性能・コストの製品を生み出せるかにかかっている。SiCの製造に関する全般の製造技術の革新によって、コストブレークスルーが実現できれば、中級機のレンジの機器まで適用が広がると期待している。また、この特集号の論文“省電力化を推進

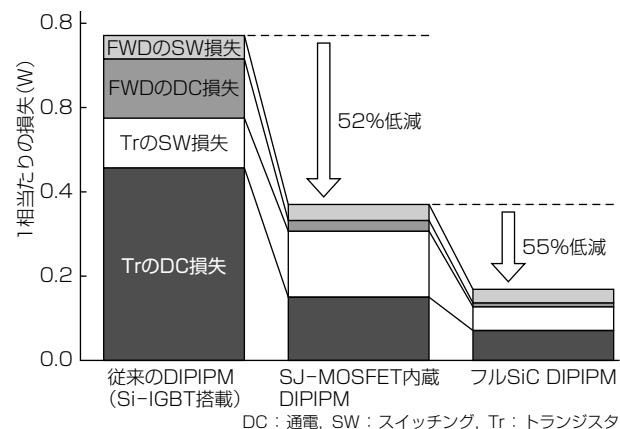


図7. SiとSiC素子を搭載したDIPIPMの性能比較

するSiC-MOSFET技術”で述べられている最先端SiCデバイス技術によって、搭載するチップ数の削減やチップの小型化ができれば、ブレークスルーにつながる。一方で、ディスクリート製品のように単価が低いゾーンのラインアップ拡大も、PE機器のSiC化の進展の鍵になる。

#### 5. むすび

PE機器の省エネルギー化について、近年のSiパワーデバイスの技術動向と適用事例、SiC化の事例と今後の適用拡大の方向性について述べた。なお、SiCの性能を生かし切る技術として、パッケージの更なる進化も必要となる。当社は、たるまざる努力と“Changes for the Better”的精神に基づく製品開発を推し進め、よりよい製品を創出し、より多くの顧客に使ってもらうことで、未来のために貢献していく。

本稿の内容の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究成果である。

#### 参考文献

- 鈴木健司, ほか: 高性能・高破壊耐量第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 281~284 (2014)
- 上馬場龍, ほか: 産業用第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, 90, No.5, 287~290 (2016)
- Yoshida, T., et al.: The second-generation 600V RC-IGBT with optimized FWD, ISPSD2016, 159~162 (2016)
- 石原三紀夫, ほか: 次世代自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”, 三菱電機技報, 88, No.5, 321~324 (2014)
- 柴田祥吾, ほか: RC-IGBT搭載パワーモジュール“SLIMDIPシリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 307~310 (2016)
- 古橋壯之, ほか: 超小型DIPIPM用SiC-MOSFET, 三菱電機技報, 91, No.7, 377~380 (2017)

# ハイブリッド蓄電システム

Hybrid Battery Energy Storage System

Yusuke Takaguchi, Ichiro Kosaka, Tsuneo Shimizu

高口雄介\*  
高坂一郎\*\*  
清水恒夫\*\*

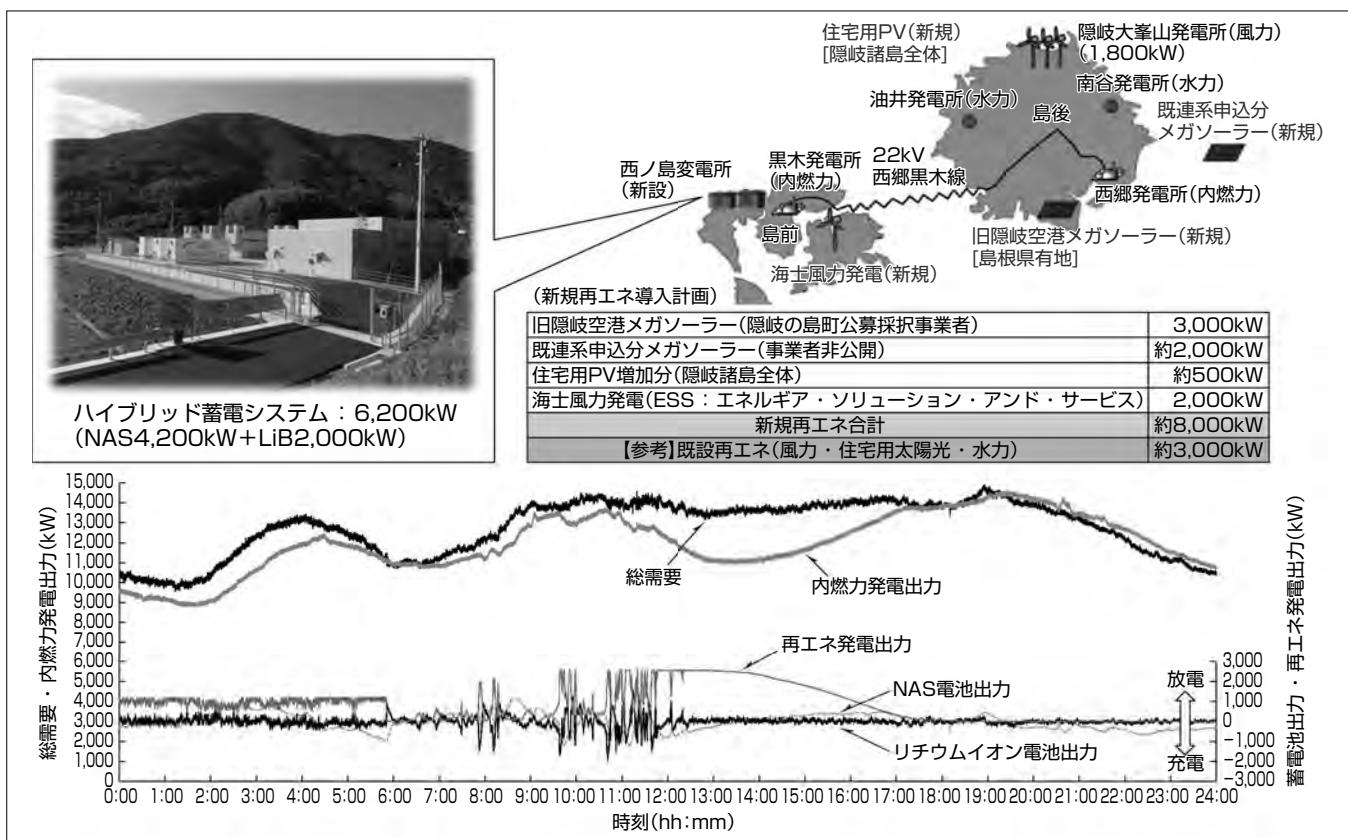
## 要旨

太陽光発電(PhotoVoltaic : PV)や風力発電など、環境への負荷が小さい再生可能エネルギー(以下“再エネ”といふ。)の電力系統への導入が進んでいる。しかし、PVや風力発電は雲の位置や風の強さなど気象状況によって発電出力が変動するため、電力系統への導入量が拡大するに従ってこの出力変動対策が課題となる。特に、本土系統と接続されていない離島電力系統は電力系統の規模が小さいため、出力変動による系統への悪影響が大きくなる。再エネの更なる導入拡大のためには出力変動対策が必要となる。

今回、再エネ導入量の最大化を図るための対策として、異なる2種類の蓄電池を組み合わせた“ハイブリッド蓄電システム”を構築した。このシステムは、経済性向上を目的とした最適化演算によって既設内燃力発電機(以下“内燃

力発電機”といふ。)とNAS(ナトリウム・硫黄)電池充放電の計画を策定して内燃力発電用の燃料費削減を図るとともに、電力検出方式及び周波数検出方式の両手法を適用してリチウムイオン電池(LiB)とNAS電池、内燃力発電機をそれぞれ制御することによって系統周波数の安定化を実現するものである。

このシステムは島根県隠岐諸島に設置され、実証事業に用いられている。最小需要が約10,000kWである島内電力系統に約6,400kWの再エネ発電設備が導入されている状態でこのシステムを動作させた結果、リチウムイオン電池とNAS電池、内燃力発電機が適切に制御されて電力品質の安定化と経済性の両立が実現できることを確認した。



## ハイブリッド蓄電システム

大規模な電力系統と接続されていない離島電力系統で、再エネ発電設備(メガソーラー、住宅用PV、風力発電)の導入時に課題となる短周期及び長周期の出力変動問題を解決するため、異なる2種類の蓄電池を組み合わせたハイブリッド蓄電システムを開発した。この製品はリチウムイオン電池とNAS電池、内燃力発電機を協調制御することによって、島内電力の安定供給と経済性の両立を実現する。

## 1. まえがき

近年、電力系統への太陽光発電(PV)や風力発電などの再エネの導入が進んでいる。PVや風力発電は気象状況によって発電出力が変動するため、電力系統への導入量が拡大するに従ってこの出力変動対策が課題となる。特に、送電線などによって本土と接続されていない離島電力系統では、電力系統の規模が小さいため出力変動による影響が大きくなることから、再エネの更なる導入拡大のためには出力変動対策が必要となる。

そこで、再エネ導入量の最大化を図るために対策として、異なる2種類の蓄電池を組み合わせたハイブリッド蓄電システムを構築した。このシステムは島根県隠岐諸島に設置され、実証事業に用いられている。

本稿では、ハイブリッド蓄電システムの蓄電池の選定、制御手法、運用実績について述べる。

## 2. 実証事業の概要と目的

再エネの出力変動には、雲の移動に伴う日射量の変化や風速の変化などによる短周期の変動と、太陽の高度及び方向の変化などによる長周期の変動が含まれており、それぞれに対応した対策が必要となる。

この実証事業では、主に短周期変動に対して高出力のリチウムイオン電池を、長周期変動に対して大容量のNAS電池をそれぞれ対応させて協調制御するハイブリッド蓄電システムを構築し、蓄電池と内燃力発電機の協調制御や蓄電池の効率的な充放電管理、制御手法などに関する実証事業を実施している<sup>(1)(2)(3)</sup>。

実証事業の概要を図1に、再エネ導入目標量を表1に示す。ハイブリッド蓄電システムによる蓄電池の活用によって、新たに約8,000kWの再エネ設備の受入れを目指しており、既設分を合わせた再エネ設備容量の合計は、隠岐諸

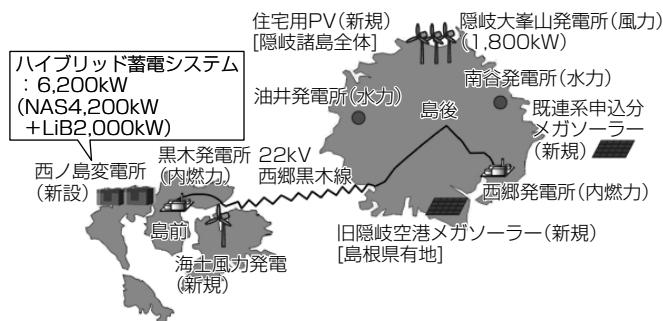


図1. 実証事業の概要

表1. 再工ネ導入目標量

新規導入目標	
新設分	メガソーラー
	約2,000kW × 1
	住宅用PV
既設分	風力発電
	2,000kW
合計	風力発電、住宅用PV、水力発電 約3,000kW
	約11,000kW

島の最小需要(約10,000kW)を上回る、約11,000kWとなる見込みである。

なお、この実証事業は、中国電力(株)が環境省の補助事業“平成26年度離島の再生可能エネルギー導入促進のための蓄電池実証事業”採択を受け、2015年9月30日から実施している。

### 3. 蓄電池の選定

短周期変動の対策として蓄電池を用いるためには、短時間で大きな出力の充放電が必要であり、経済的には出力あたりのコスト(kW単価)の低い電池が有利である。この実証事業では、小容量で高入出力が可能であり、kW単価が安く、かつ、コンパクトで高エネルギー密度という特長を持つリチウムイオン電池を選定した。

長周期変動の対策として蓄電池を用いるためには、電池容量当たりのコスト(kWh単価)の低い電池が有利である。この実証事業では、大容量で長時間運転が可能であり、kWh単価が安く、かつ、コンパクトで高エネルギー密度という特長を持っているNAS電池を選定した。

このように蓄電池を組み合わせることで、1種類の蓄電池だけを使用する場合と比べて、必要な蓄電池容量をより低い導入コストで導入可能となる。

4. 制御手法

このシステムでは、リチウムイオン電池、NAS電池、及び、内燃力発電機を協調制御することによって、経済性を考慮しつつ、電力品質の維持と再エネ設備容量の拡大を両立させる必要がある。そこで、短周期変動対策として、電力検出方式( $\Delta P$ )と周波数検出方式( $\Delta F$ )の両手法によって系統周波数の安定化を図る。また、長周期変動対策として、NAS電池と内燃力発電機の出力分担を適切に行う最適化計算によって、再エネ導入量の最大化を図る。

蓄電池及び内燃力発電機の制御イメージを図2に示す。長周期及び中周期の最適化計算でNAS電池と内燃力発電機の運転台数や出力配分を決定し、これに短周期制御による制御量を合算したものを内燃力発電機及び各蓄電池に指令している。

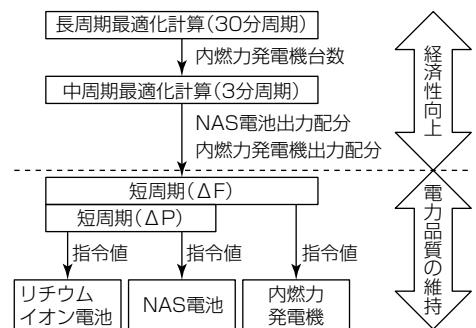


図2. 蓄電池及び内燃力発電機の制御イメージ

#### 4.1 蓄電池と内燃力発電機の短周期協調制御

このシステムでは、短周期変動を抑制するため、電力検出方式( $\Delta P$ )と周波数検出方式( $\Delta F$ )を併用した。リチウムイオン電池、NAS電池、内燃力発電機のそれぞれの特性に合った制御量を配分することによって、系統周波数の安定化を図っている。図3に $\Delta P + \Delta F$ 制御イメージを示す。また、このシステムでの短周期制御ロジックを図4に示す。

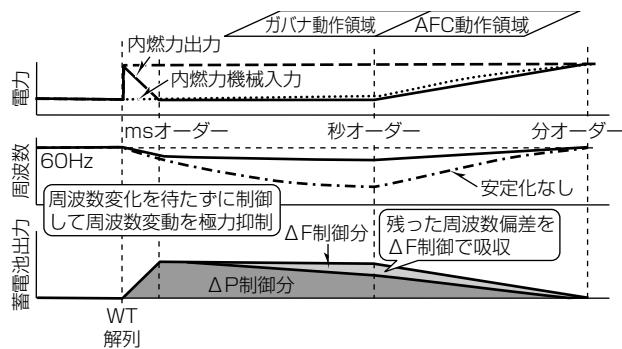
電力検出方式( $\Delta P$ )は、内燃力発電機の出力変化を検出することによって島内全体の需給アンバランスを推定し、リチウムイオン電池に充放電制御を配分することによって周波数変動を抑制する。また、必要に応じてNAS電池へ配分する制御も行う。

周波数検出方式( $\Delta F$ )は、系統周波数の基準値からの偏差を検出することによって、内燃力発電機の出力制御及び蓄電池の充放電制御を行うことで、系統周波数の偏差を補正する。

#### 4.2 蓄電池と内燃力発電機の長・中周期協調制御

これまでに、再エネの系統接続量を拡大させる様々な技術が開発されている<sup>(4)(5)</sup>。このシステムでは、長周期の需給計画及び中周期の需給制御によって、経済的に電力品質を維持する蓄電池と内燃力発電機の協調制御を実現している。

長周期の需給計画は、図5に示すような二重構造の最適化問題として定式化している。外側の運転状態決定問題は内燃力発電機の起動停止状態(離散値)を制御変数として、需要予測結果、再エネ発電出力予測結果に基づいて、需給バランス、運転予備力、発電機下げ代、出力上下限、変化速度、LFC(Load Frequency Control)容量、蓄電池SOC(State Of Charge)及び島間連系線潮流などの制約を満足しつつ発電コストが最小となる運転状態を決定する。内側の出力決定問題は蓄電池の充放電量と内燃力発電機出力を



AFC : Automatic Frequency Control, WT : Wind Turbine

図3.  $\Delta P + \Delta F$ 制御イメージ

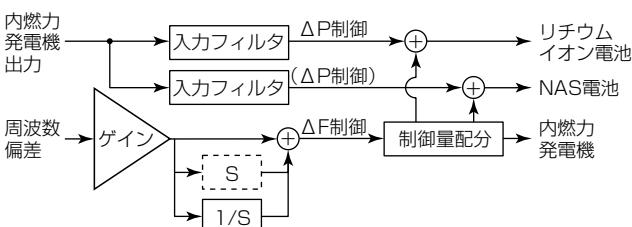


図4. 短周期制御ロジック

制御変数とし、発電コストが最小となる出力値(連続値)を決定する。具体的には、30分刻みで翌日の24時までの需給計画を作成する。

次に中周期の需給制御では、時々刻々と変わる系統全体の需給バランスをオンラインで制御する。需給計画で決められた内燃力発電機の起動停止と、至近の需要実績、数時間先までの最新の需要予測、再エネ発電出力予測結果に基づいて、需給計画と同様に最適化問題(内側の出力決定問題だけ)を解くことで、蓄電池の充放電量及び内燃力発電機出力を決定する。具体的には、3分刻みで5時間後までの需給制御内容を決定する。

#### 4.3 その他機能

##### 4.3.1 島間連系線潮流制御機能

隠岐諸島はハイブリッド蓄電システム及び黒木発電所(小規模発電所)がある“島前”と、西郷発電所(主要発電所)がある“島後”で構成されており、これらの島間を22kV送電線で連系している。一方、再エネを含む供給力の多くが島後の電力系統に接続していることから、連系線潮流は島後から島前に流れている時間帯が多い。ただし、連系線潮流は連系線の運用可能範囲内に維持する必要があることから、両発電所の内燃力発電機出力及び蓄電池の充放電量を制御して連系線潮流を運用範囲内に維持する機能を持っている。

また、落雷や台風による強風などによって連系線の事故が予見される場合には、事故時の供給支障を最小化するための予防運転として、連系線潮流を抑制する機能を持つて

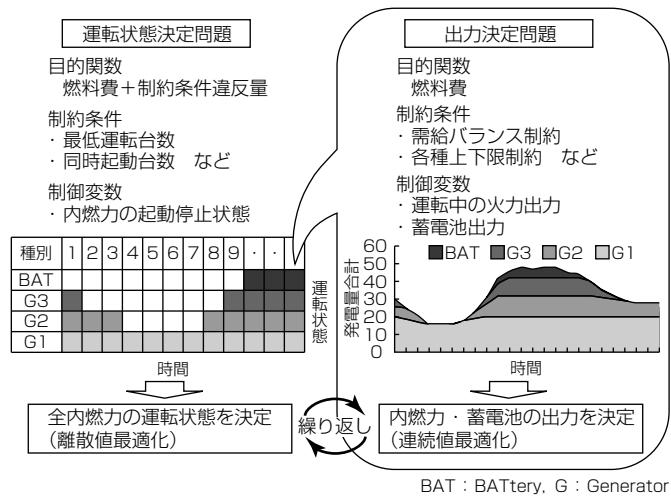


図5. 需給計画(最適化問題)

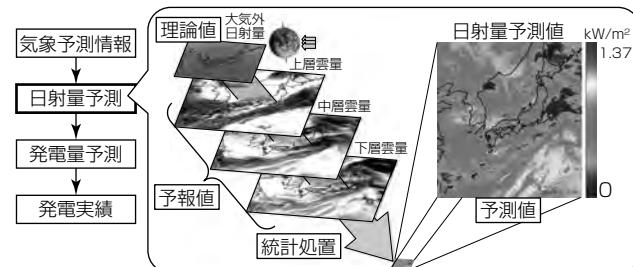


図6. PV出力予測機能

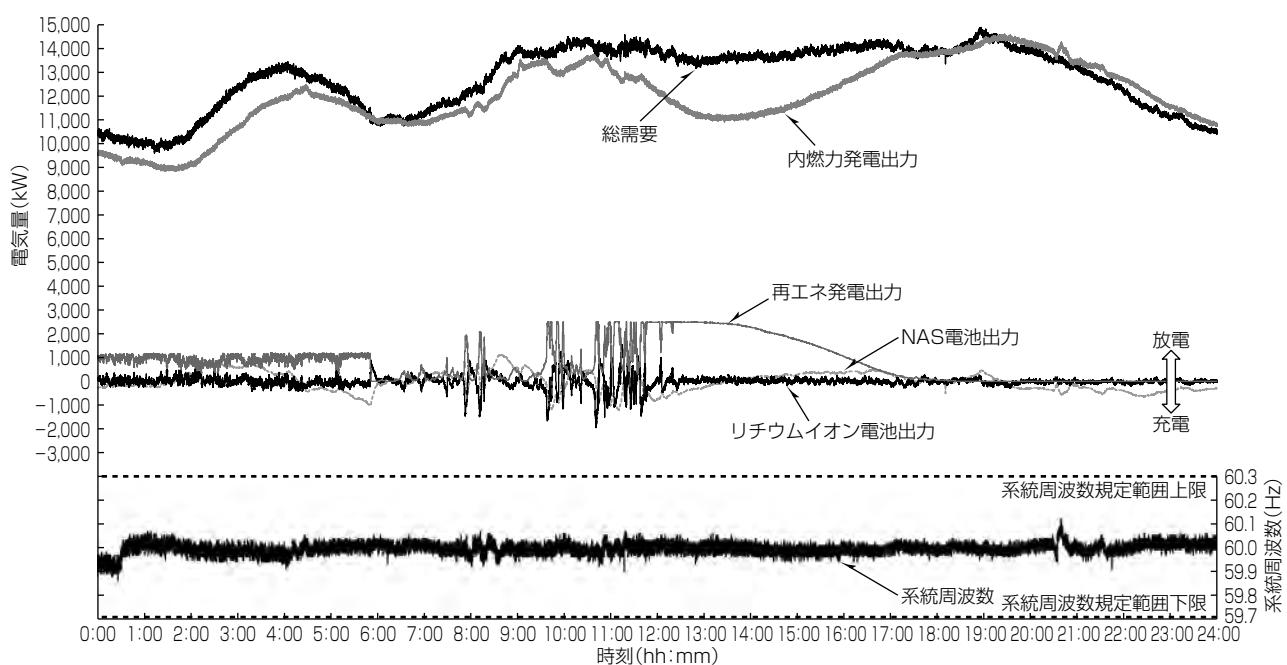


図7. ハイブリッド蓄電システムによる運用動作実績(2016年8月31日)

いる。具体的には、連系線潮流が島後から島前に流れている場合は、島後の内燃力発電機の出力を抑制し、島前の内燃力発電機及び蓄電池の出力を増加させ、それぞれの島内で需給バランスを維持するように制御を行う。

#### 4.3.2 太陽光・風力発電出力予測機能

雲量や風速などの気象予測情報、気象実績情報、及び発電出力実績を基に予測モデルを算出する。図6にPV出力予測機能を示す。これら予測モデルを用いて、PV出力及び風力発電出力の予測を行う。また、必要に応じて、各種予測モデルを学習・更新して予測精度の向上を図る機構も備えている。

#### 4.3.3 需要予測機能

気温などの気象予測情報と曜日などの予測日区分を基に、実績データ(気温実績、需要実績など)を活用して需要予測を行う。ここでは、長周期の需給計画演算に用いる30分値、及び、中周期の需給制御演算に用いる3分値の予測値を算出している。

### 5. 運用実績

現在、再エネ設備容量は合計で約6,400kWとなっており、目標設備容量の約6割に達している。この状況での、ある1日(2016年8月31日)の運用動作実績を図7に示す。8~12時頃に再エネ出力が大きく変動しているが、リチウムイオン電池が動きの速い短周期の変動を吸収し、NAS電池がゆっくりと比較的長周期の変動を吸収していることが確認できる。また、12~16時頃は安定した再エネ出力があり、ここでは内燃力発電機の出力を減少させることによって適切に再エネ出力を活用できていることが確認できる。

### 6. むすび

離島の小規模電力系統での再エネ設備容量拡大を目指して、再エネ出力変動対策の1つとして開発した、2種類の蓄電池と内燃力発電機を協調制御するハイブリッド蓄電システムとその制御内容について述べた。蓄電池の価格は低下傾向にあるが、電力系統用には大容量の蓄電池が必要であり、またシステムの運用開始後も蓄電池の劣化や寿命によって利用が制限されることも予想される。今後は蓄電池の劣化や寿命も考慮した制御方法を開発することによって、電力系統の品質維持とシステムのライフサイクルコスト最小化の実現を検討する。

### 参考文献

- (1) MIKAWA, M., et al.: Demonstration Project Utilizing Hybrid Battery Energy Storage System with High Penetration of Renewable Energy Sources in the Oki-Islands, CIGRE symposium Dublin 2017 (2014)
- (2) 松村昌昭, ほか: 隠岐諸島におけるハイブリッド蓄電池システム実証事業の概要, 電気学会電力系統技術研究会資料, PSE-16, No.1-4.6-20, 7~10 (2016)
- (3) 中国電力(株): 隠岐諸島におけるハイブリッド蓄電池システム実証事業の開始について, プレスリリース (2015年9月30日)
- (4) 小島康弘: スマートグリッド/スマートコミュニティを支えるEMS技術, 計測と制御, 53, No.1, 56~61 (2014)
- (5) 小島康弘, ほか: 再生可能エネルギーの系統接続技術, 三菱電機技報, 88, No.12, 773~776 (2014)

# 業務用空調機の製造現場での 冷媒規制への取組み

都築祐一\* 田黒孝二\*\*  
石橋章佳\*  
今野憲昭\*

Approach to Refrigerant Regulation at Packaged Air Conditioner Manufacturing Site

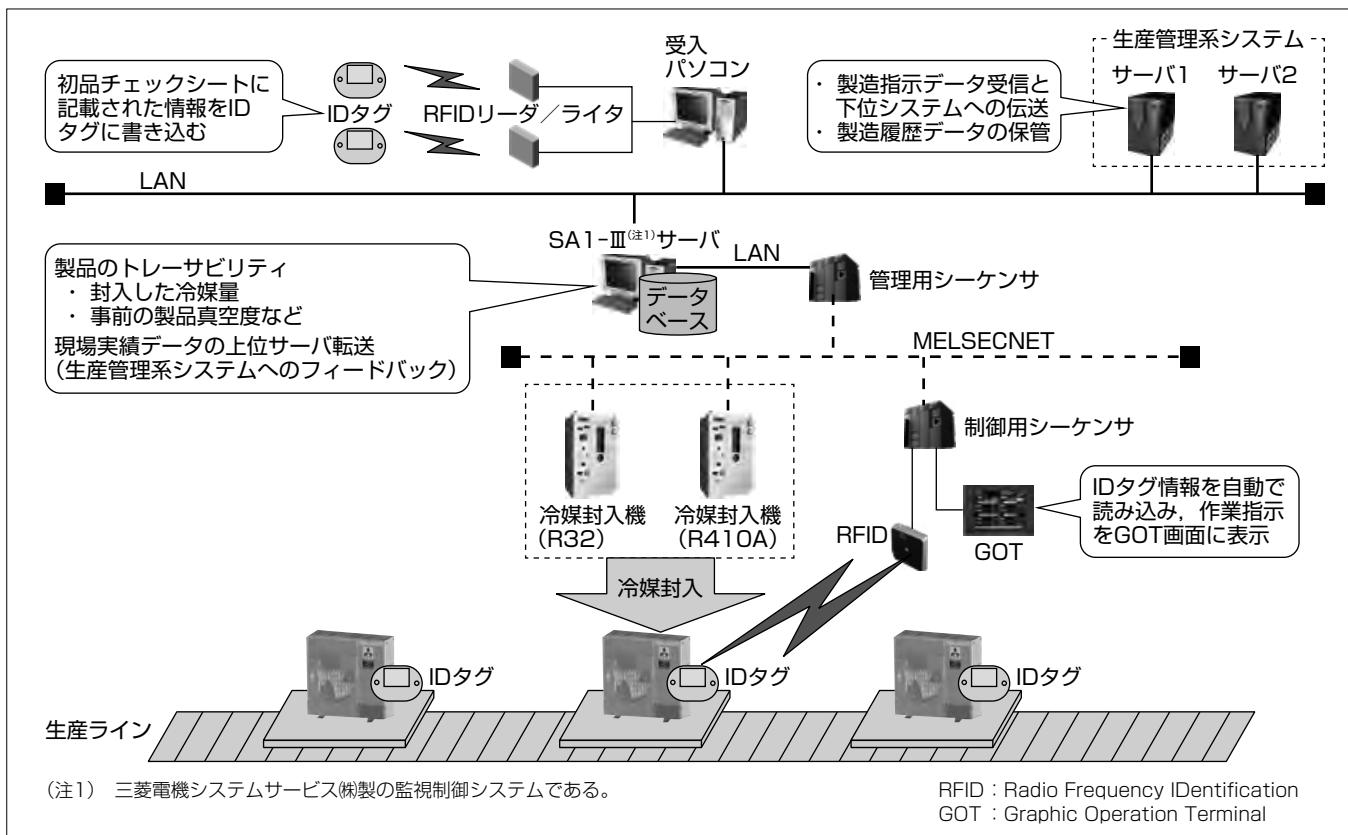
Yuichi Tsuzuki, Akiyoshi Ishibashi, Noriaki Imano, Kouji Taguro

## 要旨

近年、モントリオール議定書やパリ協定によって地球温暖化につながる従来冷媒の使用が強く規制されることになり、ルームエアコン(RAC)に続き業務用パッケージエアコン(PAC)でも、オゾン層を破壊せず地球温暖化係数(GWP)が低い代替冷媒の採用が市場から求められるようになった。加えて製品自体にも高い環境性能(高効率化)が求められることとなり、製品の高効率化競争は激化の一途をたどっている。

三菱電機静岡製作所(以下“静電”という。)ではPACの生産を1968年から開始し、国内及び海外各地への製品供給を行っている。また2015年からは環境性能の高いHFC(ハイドロフルオロカーボン)冷媒であるR32冷媒を採用した

PACの発売を開始し、主に日本国内と欧州向けに製品供給を行っている。しかしながらグローバルに製品供給を行っている静電では、全ての製品の冷媒を一律に切り替える訳にはいかず、従来冷媒(R410A)の製品とR32冷媒の製品を並行して生産する必要があった。したがってR32冷媒の取扱い環境性整備と合わせ、冷媒種を間違うことなくそれぞれの製品を効率良く生産できる体制の構築が必要であり、これを好機と捉えて①異種冷媒製品生産での冷媒種のポカヨケ、②製造管理レベルの1ランク向上を実施した。これによってR32冷媒を採用した製品の発売が実現でき、三菱電機が“環境ビジョン2021”で掲げる“低炭素社会への貢献”にも大きく寄与することができた。



## 業務用空調機の製造現場での冷媒誤封入対策

異種冷媒製品の並行・混合生産に当たっては、冷媒種のポカヨケが最大の課題となる。今回の生産体制整備では、従来は作業者が行っていたバーコード読み取りによる冷媒種の切替えをRFIDタグの情報を用いることで自動化し、新冷媒管理システムと組み合わせて機種個別の製造履歴管理(トレーサビリティ)を可能とした。また冷媒量に関するデータだけでなく、冷媒封入前の製品真空度や商用試験の結果等との連携も容易になつた。

## 1. まえがき

近年、モントリオール議定書やパリ協定によって、オゾン層破壊や地球温暖化につながる従来冷媒の使用が強く規制されることになり、RACに続きPACでも環境性能の高いR32冷媒を採用した製品が市場から求められるようになった。加えて製品自体にも高い環境性能(高効率化)が求められることになり、製品の高効率化競争は激化の一途をたどっている。

静電では1968年からPACの生産を開始し、1978年からは“Mr.SLIM”というブランド名で国内及び世界各地への製品供給を行っている。2015年にはR32冷媒を使用した空調機の生産を開始し、現在では主に日本国内と欧州向けに製品供給を行っている。しかしながらグローバルに製品供給を行っているために、全ての製品の冷媒を一律に切り替えることができず、従来冷媒の製品とR32冷媒の製品を、並行して生産しなくてはならなかった。一方で冷媒の異なる製品を製造する際には、冷媒種の間違いを起こすことなく生産を進めねばならず、もし冷媒種を間違ってしまうと製品が設計どおりの性能を発揮できないばかりでなく、製品の手直しには多くのロスが発生することになる。

本稿では、環境性能の高いR32冷媒を採用したPAC製品の開発及び生産開始を好機として、R32冷媒を利用するための環境整備と、製造現場での冷媒種のポカヨケ対策、生産性改善や品質向上につながる改善を通じて、製品使用時のCO<sub>2</sub>削減に大きく貢献できるPAC製品の発売に至ることができた活動について述べる。

## 2. 空調機を取り巻く環境

### 2.1 オゾン層保護から地球温暖化防止へ

近年の地球規模での平均気温上昇は、人類の経済活動増加によるCO<sub>2</sub>等の温室効果ガス增加が大きな要因だと考えられている。平均気温の上昇によって、異常高温(熱波)や大雨、干ばつ等の地球規模での異常気象が増加し、我々の生活に深刻な影響を及ぼすようになってきている。したがって人間社会と自然環境を守るために、温室効果ガス濃度の安定化及び削減を目的とした具体的な方策が検討された。1997年に先進国に温室効果ガスの排出削減を義務付ける京都議定書が採択され、2015年には全ての国を対象とした2020年以降の枠組みとしてパリ協定が採択され、温室効果ガス削減に向けた取組みがスタートしている。

元々オゾン層保護対策として規制が強化された冷媒は、オゾン層を破壊しない代替冷媒(HFC冷媒)への転換が進められるとともに、温室効果ガスとしても世界的に規制が強化されるようになった。日本国内ではフロン排出抑制法が、フロン類使用製品(冷凍空調機器等)製造業者に対し、ノンフロン・低GWPフロン製品への転換を義務付けている。

### 2.2 空調機用冷媒への要求事項

先に述べたとおり空調機用の冷媒には、①オゾン層破壊係数がゼロであること、②GWPがより小さいこと、③空調機として高い性能が発揮しやすいこと、④安全で扱いが容易であることが求められる(表1)。

実際、空調機用冷媒は2000年頃からHFC冷媒への代替が進み、先進国での代替はほぼ完了したが、今後の新興国でのエアコン普及に伴い、温室効果ガス削減目標達成に向けて、更なる環境性能が求められている(表2)。

現在、三菱電機を含めた空調機メーカー各社は、現実的な選択肢であるR32冷媒を採用した空調機の拡充に力を注いでおり、さらには次世代冷媒の研究開発にも力を注いでいる。

### 2.3 温暖化防止への貢献

地球温暖化防止のため、温暖化ガスの放出を削減していくことは当然の活動として、空調機を使用する上で必要な電力量の削減が、地球温暖化防止には大きな意味を持つ。顧客が空調機を使用する際に消費する電力量は、その電力を製造したときのCO<sub>2</sub>排出量とみなされ、その量は製品を生産する際に排出されるCO<sub>2</sub>量の数十倍になることから、三菱電機グループでは“製品使用時のCO<sub>2</sub>削減”を重要課題と定めている。したがって、製品のエネルギー効率を高めれば製品使用に伴うCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能であることから、製品のエネルギー効率改善に向けた開発を進めている。

表1. 現在の主要冷媒の特徴

冷媒名	R22	R410A	R32	次世代 冷媒
分類	HCFC	HFC	HFC	
オゾン層破壊係数	0.05	0.00	0.00	0.00
地球温暖化係数(GWP)	1,810	2,090	675	△
その他	不燃	不燃	微燃	-
性能(COP <sup>(注2)</sup> ) (%)	100	94	96	△

(注2) COP(Coefficient Of Performance)は、一定の温度条件下でエアコンを運転した場合の効率を示す。

HCFC：ハイドロクロロフルオロカーボン

表2. モントリオール議定書(MOP28)のHFC削減計画

基準年	途上国Gr1		途上国Gr2		先進国	
	2020~2022年		2024~2026年		2011~2013年	
	凍結年	2024年	2028年	-	2019年	2034年
削減率	1st	2029年	▲10%	2032年	▲10%	2019年 ▲10%
	2nd	2035年	▲30%	2037年	▲20%	2024年 ▲40%
	3rd	2040年	▲50%	2042年	▲30%	2029年 ▲70%
	4th					2034年 ▲80%
	Last	2045年	▲80%	2047年	▲85%	2036年 ▲85%



図1. Mr.SLIM ZRシリーズ

静電PACでは、業界に先駆ける省エネルギー技術を多彩な機種に投入し、温室効果ガスの排出削減に貢献している(図1)。

### 3. R32冷媒機種製造の課題

#### 3.1 異種冷媒製品の混合生産での冷媒種ポカヨケ

グローバル市場を相手にしている静電にとって、環境性能が高いとはいえ、R32冷媒を全ての製品に採用するためには準備と時間を要する。表1にあるとおりR32冷媒が僅かに燃性を持つ(微燃性)ために使用が認められていない国があり、各国の事情に応じて製品供給を行っていく必要がある。

一方で“必要なときに必要な物を必要なだけ生産する”というコンセプトの下、PAC生産ラインは小ロット多サイクル生産体制が構築されており、多い日には同一ラインで約60機種の製品を生産している(図2)。したがって、冷媒切替えを忘れてしまった場合や、手直し品の再投入で生産計画とは異なる製品が流れてきた場合などに、絶対に誤った冷媒を使用しない方法(間違いを起こさないで冷媒を切り替える方法)が必要であった。

#### 3.2 冷媒間違いで発生するロスとリスク

室外機の製造工程には“冷媒封入”という作業があり、製品に応じた冷媒を指定どおりの量で1台ごとに封入していく作業になる。この冷媒種及び量を管理する仕組みはロットごとの生産情報管理が基本であった。冷媒封入の作業者は、まずロットの先頭で“組立てカード”上のバーコードを読み込む。読み出したデータはパソコン経由でサーバ内の製造指示情報と照合され、必要な作業指示が現場のモニタに映し出されて冷媒種が決定されていた。したがって作業者がバーコードの読み取り作業を忘れてしまった場合、直前の冷媒種(量)設定で封入作業が行われることになり、最悪はロットレベルの間違いが発生し、①製品が設計どおりの性能を出すことができない、②冷媒間違いを修正するために冷媒回収が必要、③製品に対し配管の付け替え作業が発生、④再度の真空引き、再封入が必要等の無駄な作業が必要となる。例えば100台ロットで冷媒種を間違えてしまった場合、これらの作業に伴う電力量ロスはCO<sub>2</sub>換算で40kg-CO<sub>2</sub><sup>(注3)</sup>となり、生産時CO<sub>2</sub>の削減という意味で誤

封入は最少化を図らねばならない。

(注3) 冷媒回収の電力(0.75kWh/台) + 再真空引き電力(0.15kWh/台) + 再封入電力(0.03kWh/台) = 0.93kWh/台(0.4kg-CO<sub>2</sub>/台)を想定。

### 3.3 R32冷媒の利用環境整備

R32冷媒はASHRAE34(冷媒安全性分類規格)によれば微燃性に分類され、日本の高圧ガス保安法上では明確な区分がなされていなかった。重要なのは万が一冷媒が漏洩(ろうえい)した場合に、空気よりも重いR32冷媒(空気の分子量29に対し分子量52)がどこかへ滞留し、燃焼下限濃度(LFL) 14.4Vol%以上になってしまうことであり、そこへ何らかの着火源が存在してしまうことである。したがってR32冷媒の利用環境を整備するに当たり、どうすれば作業者の安全を確保できるのか対応方法を検討しなくてはならなかった。

## 4. 各課題に対する対応

### 4.1 異種冷媒製品の混合生産での冷媒種ポカヨケの実現

先に述べたとおり人の作業に起因するリスクが存在する以上、従来のシステム(方式)ではR32冷媒を採用する商品の量産化に対して懸念があったため、2つの解決策を検討した。1つは、製品側のガス封入口と製造側のガス封入ノズルの形状を冷媒ごとに変えるというハードウェアによる対策であり、もう1つはソフトウェアによって製品1台1台の封入量をシステムで個別管理化する方法である。しかしながら空調機用冷媒を取り巻く環境を考えた場合、“より環境性能が高い冷媒への切替えが必要になる”ことと“工場内の多種多様なシステムの老朽化対策や統合化”“今後の合理化や自動化への取組みがますます必要になっていく”を考えると、ソフトウェアによる対策がベターとの結論に至った。

そこで製品1台ごとに電子タグ(RFIDタグ)を取り付け、このタグ情報を自動で読み取ることで、製品1台ごとに冷媒量の指示をGOT<sup>(注4)</sup>上で行えるようにした(図3)。



図2. Mr.SLIMの組立てライン<sup>(1)</sup>



初品チェックシートに記載された情報をタグに書き込む。そのタグをこれから製造ラインに乗せる製品1台ごとに取り付けていく。

(a) 書き込み工程



冷媒ガス封入工程でタグの情報を自動で読み込み、作業者への指示をGOTに表示する。

(b) 読み込み工程

図3. 電子タグ書き込み工程と読み込み工程<sup>(1)</sup>

さらに、実際に封入したガス量や、その前工程で製品内を真空中にした際の真空度などの実績もGOT画面上に表示させることにし、作業者はそれらの情報を確認しながら冷媒封入機を操作できるようになり、確実な冷媒封入が実現できるようになった。自動読み取りを実現したことで、作業者の“見逃し”防止ができたことに加え、作業者の“読み取り作業”削減が可能となり、ポカヨケと合理化の両立を実現できた。

(注4) 三菱電機製グラフィックオペレーションターミナル表示器である。

#### 4.2 トレーサビリティによる品質保証精度の向上

生産管理をロット単位から製品個体単位へ切り替えるために、従来の生産管理システムを三菱電機システムサービス(株)製の監視制御システムSA1-Ⅲを活用したシステムへ変更した。変更に当たっては、封入した冷媒量と事前の製品真空度、基準値に対するばらつきなど、製品ごとの品質に関するデータを詳細に記録できる仕組みとし、製品のトレーサビリティレベルを大きく向上させた。

トレーサビリティとは、時系列にさかのぼって製品の流通履歴や製造履歴をたどることができる仕組みである。システムの再構築によって市場からの製品品質の問合せに対し、1台ごとの製造履歴を提示できるようになっただけでなく、ライントラブルが発生した場合にも、ライン上の製品にどれほどの支障が出るのか、正確かつスピーディに特定することも可能になった(図4)。原因解明に至る時間が圧倒的に早ければ、それだけ不良の拡散も防ぐことが可能になる。

さらに、SA1-Ⅲは、現場で収集したデータを上位のサーバへ送ることができるために、事務所のパソコンからでも現場の状況を即座に判断できるようになった。現場のデータを収集するだけでなく、上位の生産管理系システムにフィードバックするまでのフレキシブル性が高いことも、大きな魅力であった。PAC生産現場には、従来の様々な管理システムが混在している。今後はこれらのシステムを統合し、それぞれの情報共有化と活用を図っていくことが、次なる構想である。

#### 4.3 R32冷媒の利用環境整備

R32冷媒の取扱いに関して、①冷媒利用場所での冷媒漏洩警報装置設置による漏洩検知、②漏洩の可能性があるエリアへの空気循環装置設置、③漏洩発生時の冷媒強制排気装置設置の対応を組立てラインで行うことになった。したがって、R32冷媒の封入装置、回収装置などの設置に加え、R32冷媒取扱場所への冷媒漏洩警報装置、空気循環装置、冷媒強制排気装置の設置を実施した(図5)。

なお、2016年11月に高圧ガス保安法が改定され、R32冷媒は特定不活性ガスに掲名されることになり、R32冷媒



図4. 冷媒量封入履歴の確認画面<sup>(1)</sup>



図5. R32冷媒強制排気ダクト

製造設備では可燃性ガスに準じた対応が必要になった。三菱電機が選択した対策は、この基準にも準じたものである。

### 5. むすび

R32冷媒を採用した製品の生産体制整備を行うに当たり、製造合理化や製造品質の向上をねらった対策を実施した。

静電で開発されたPACは、静電から世界各地に送り出されるとともに、タイやUK、中国など海外拠点でも生産が行われている。世界各国には様々な環境規制や省エネルギー規制が存在し、現在は最も要求が厳しい日本向けの製品で高い環境性能が発揮できるよう、製品開発が進められている。今後は欧州向けを筆頭に、アジアや米州向けの製品でも更に高い環境性能が要求されることが予想され、製品設計はもちろんのこと、海外拠点での製品製造での省エネルギー(生産時CO<sub>2</sub>の削減)にも取り組んでいかねばならない。各国の事情に応じた環境性能の高い製品を展開できるよう、静電での取組みを好事例として拠点展開を計画し、グローバルトップへの飛躍につなげていく。

### 参考文献

- (1) 三菱電機システムサービス(株) 監視制御システムSA1-Ⅲ導入事例  
[http://www.melsc.co.jp/business/sa1/case\\_study/introduction\\_example/shizuoka.html](http://www.melsc.co.jp/business/sa1/case_study/introduction_example/shizuoka.html)