



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

7

2020

Vol.94 No.7

大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ



目 次

特集「大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ」	
デジタル技術によるパリ協定長期目標と持続可能な開発目標の同時解決への期待	卷頭 言 1 秋元圭吾
2050年に向けた三菱電機グループの環境活動	卷頭論文 4 中野博文
■ ライフ	
地球温暖化対策としての建物省エネルギーへの取組み	9 幸田美沙紀・四十宮正人
R32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコン“HVRF”	13 池田宗史・石村亮宗・本村祐治
宇宙利用による地球環境観測への貢献	16 田中 敦・野口龍宏・岡根功治・赤木茂樹
水蒸気・風速同時計測向け コーヒーレント方式差分吸収ライダー	20 今城勝治・田中久理・廣澤賢一・柳澤隆行・龟山俊平
■ インダストリー	
エネルギー計測の有効性及びFEMS等による継続的な省エネルギー推進活動	23 森脇照雄
混合プラスチック高度選別技術の進展と自己循環リサイクルの拡大	28 岸間康人・筒井一就・中 慶朗
■ インフラ	
再生可能エネルギー導入拡大を支える蓄電池制御技術とその適用事例	33 小島康弘・清水恒夫・熊野純一
持続可能な社会に向けた電力用変圧器への植物油適用	38 西村亮岐・岩本直樹・吉田成是・加藤福太郎
膜洗浄にオゾン水を用いた 膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”	41 林 佳史・今村英二・安永 望・後藤伸介
下水処理プロセスの曝気量制御技術	45 吉田 航・今村英二・野田清治・木本 熱・橋爪弘二
■ モビリティ	
モビリティでの環境負荷低減	50 加藤裕彦・藤田暢彦
■ 共通領域	
省エネルギー・省資源化に貢献するSiCパワーデバイス	54 今泉昌之・松岡 徹
Webサイト紹介(エコエンジサイト)	58
特許と新案	
「空気調和装置」	59
「レーザレーダ装置」	60

Protect the Air, Land, and Water with Our Hearts and Technologies to Sustain a Better Future for All
Expectations for Achievements both of the Long-term Goals under the Paris Agreement and of the Sustainable Development Goals by Digitalization Technologies

Keigo Akimoto

Mitsubishi Electric Group's Environmental Actions towards 2050
Hiroyuki Nakano

Energy Saving of Houses and Buildings as Measures against Global Warming
Misaki Koda, Masato Yosomiya

“HVRF”: Multi Air Conditioner for Buildings Using R32 Refrigerant and Water
Soshi Ikeda, Katsuhiko Ishimura, Yuji Motomura

Contribution of Space Use to Earth Environment Observations
Atsushi Tanaka, Tatsuhiko Noguchi, Koji Sekine, Shigeki Akagi

Coherent Differential Absorption LIDAR for Simultaneous Measurement of Water Vapor and Wind Velocity
Masaharu Imaki, Hisamichi Tanaka, Kenichi Hirosawa, Takayuki Yanagisawa, Shunpei Kameyama

Effectivity of Energy Measurement and Successive Energy Conservation Promotion Activities with Factory Energy Management Systems
Teruo Moriwaki

Progress of Advanced Sorting Technologies for Mixed Plastics and Expanding of Closed-loop Recycling
Yasuto Iseki, Kazunari Tsutsui, Jiro Naka

Battery Control Technologies for Renewable Energy Penetration and their Application Cases
Yasuhiro Kojima, Tsuneo Shimizu, Junichi Kumano

Application of Vegetable Oil to Electric Power Transformers for Sustainable Society
Ryoki Nishimura, Naoki Iwamoto, Shigeo Yoshida, Fukutaro Kato

Membrane Bioreactor “EcoMBR” Using Ozonated Water for Membrane Cleaning
Yoshifumi Hayashi, Eiji Imamura, Nozomu Yasunaga, Shinsuke Goto

Aeration Control Technology for Sewage Treatment Process
Wataru Yoshida, Eiji Imamura, Seiji Noda, Isao Kimoto, Koji Hashizume

Reduction of Environmental Load in Mobility
Yasuyiko Kato, Masahiko Fujita

SiC Power Devices Contributing to Energy and Resource Saving
Masayuki Imai, Toru Matsuoka

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを申し上げますとともに、
罹患(りかん)された皆さまとご家族及び関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。



表紙：大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ

三菱電機は、2050年に向けた当社グループの環境課題への長期的な取組み姿勢を定めた“環境ビジョン2050”を策定しました。様々な環境課題の解決に向けて、当社グループは一人ひとりの想いをつなぎ、新しい価値の創出に挑戦し、持続可能な未来の実現に貢献します。

表紙には、この環境ビジョン2050のシンボルマークと、守るべき大気、大地、水のイメージグラフィックを配置しました。

卷頭言

デジタル技術によるパリ協定長期目標と持続可能な開発目標の同時解決への期待

Expectations for Achievements both of the Long – term Goals under the Paris Agreement and of the Sustainable Development Goals by Digitalization Technologies



秋元圭吾 Keigo Akimoto

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループリーダー・主席研究員
Chief Researcher, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

1. 気候変動問題の現状

毎年のように、台風、豪雨による大きな被害が日本を襲うようになってきている。また世界でも多くの気象被害が見られてきている。人為的な温室効果ガス排出増大が少なくとも一定程度は影響を及ぼしていると見るべきであり、大幅な排出削減を実現しなければならない。

2015年に合意されたパリ協定は、全ての国が排出削減に取り組む枠組みとなったが、気候変動対応で世界は一枚岩ではない。また、国連に提出されている2030年頃の国別貢献(NDCs)の排出削減目標(日本は2013年度比で26%削減)でも、特段の努力なしに、なりゆきで達成可能な目標しか提出していない国も多い。2019年のCOP25(締約国会議)ではNDCs目標の野心度向上等を目指したが、国連事務総長が“失望した”と述べるなど、期待された成果は上げられなかった。

21世紀に入って、多くの先進国は排出量を低減させてきた。大きく低減したのは、皮肉にも京都議定書を離脱し、パリ協定も離脱表明した米国である。大きな理由は二つあり、一つにはシェールガスが安価に生産できるようになり、経済自律的に石炭からガスへの転換が進んだためで、二つ目は、米国製造業が国際競争力を落とし、中国等の途上国に取って代わられたためである。代わりに、GAFA(Google, Amazon, Facebook, Apple)のような少数のプラットフォーム企業が富を生み出している。なお、二つ目は、米国内で排出が減っても、他国で代わりに排出するため、世界全体では排出は減らない。そしてこれは欧州でも同様の傾向が見られる。日本は、これまで製造業の競争力を比較的維持してきたが、電気料金の上昇などを背景に、欧米同様の懸念を持たなければならない状況にもある。世界全体で排出削減ができなければ意味がない。

2013～2016年の間、世界経済は順調であったが、世界のCO₂(二酸化炭素)排出量はほぼ横ばいになり、気候変動対策が成功しつつあるとされ、再生可能エネルギー拡

大効果の指摘もあった。しかし、実際は2009～2013年頃に、中国等が鉄鋼製品等のエネルギー多消費の素材製品の生産を急拡大し、世界の排出量が急上昇したことに対して、2013年以降、その生産調整がなされた影響が大きく、これに米国のシェールガス拡大が加わったためである。この間、再生可能エネルギーも拡大し、排出低減に一定の貢献はした。再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT)などの政策措置で他電源に比べて費用の高い電源を導入すれば、導入時は大きな投資が必要になり、その分GDP(Gross Domestic Product)が押し上げられる。しかし、その後長い期間にわたって、電気料金等を介して負担増になるため、後になってGDP押し下げ効果になることにも留意が必要である。このような中、中国の生産調整が一段落し、鉄鋼生産が回復した2016年を境に、世界のCO₂排出量は再び増大傾向に戻った。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響で2020年の世界排出量は大幅に減少すると見込まれるが、同時にGDPも大幅な減少が予想される。2008～2009年にかけてのリーマンショックの際も同様だが、これは望ましいCO₂排出量削減の姿ではない。GDPを増やしながら、CO₂排出量を減少させて、SDGs(Sustainable Development Goals)を同時達成して長期にわたっての幸福度を高めていくことが求められる。

世界のCO₂排出量の大幅な削減を考えるとき、米国シェールガスの成功が好事例になる。イノベーションによって安価にガス生産が可能になり、経済自律的に選択され、CO₂排出量削減にも貢献した。製造業の海外移転を抑え、自国も世界も同時に大幅な排出削減を実現するには、このようなイノベーションが不可欠である。国際的な眞の協調体制の確立が期待薄な中、強力な国際協調がなくとも排出削減に取り組める安価な対策オプションが広がらなければ、掛け声だけで大幅な排出削減にはつながらない。

パリ協定では2℃や1.5℃目標、また正味ゼロ排出といった長期目標が掲げられた。これらの目標達成は技術的には可能である。しかし、最大の課題は費用である。排出を大きく削減し、ゼロ排出に近付けようとすれば、費用は大き

く上昇する。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)1.5℃特別報告書では、各種技術の漸進的な費用低減を見込み、かつ費用最小の場合でも、2050年に2℃目標のうち排出高位の場合でも45~1,050\$/tCO₂(中央値130\$/tCO₂程度)、1.5℃未満では245~14,300\$/tCO₂(同2,800\$/tCO₂程度)の大きな限界削減費用(これ以下の費用の対策を世界で全て実施したとき、目標達成が期待できる水準)が推計されている。欧州排出量取引制度の炭素価格は最近上昇して25€(ユーロ)/tCO₂前後になっているが、比較してもいかに高いかが理解できる。排出削減費用をかけ過ぎれば、貧困問題などを含む持続可能な発展を却(かえ)って実現できない。

2. 大幅な排出削減に向けた方向性

世界のCO₂排出量を大幅に削減し、気候変動リスクを抑制するために、特に二つの取組みが重要と考えられる。一つは、ライフサイクル全体での排出削減の志向を強めることである。従来、産業の生産プロセスでの排出を管理する志向が強くあったが、結果は、先進国では排出の増加は抑制できてきたが、途上国では排出が加速し、世界全体での排出増に歯止めがかからなかった。また、産業部門での排出は抑制できてきたが、民生部門など、エネルギー最終利用段階での排出の抑制はうまくいかなかった。よって、製品のライフサイクル全体をグローバルな視点で考え、排出削減に寄与する製品を創り出していき、世界に展開していくことが重要である。

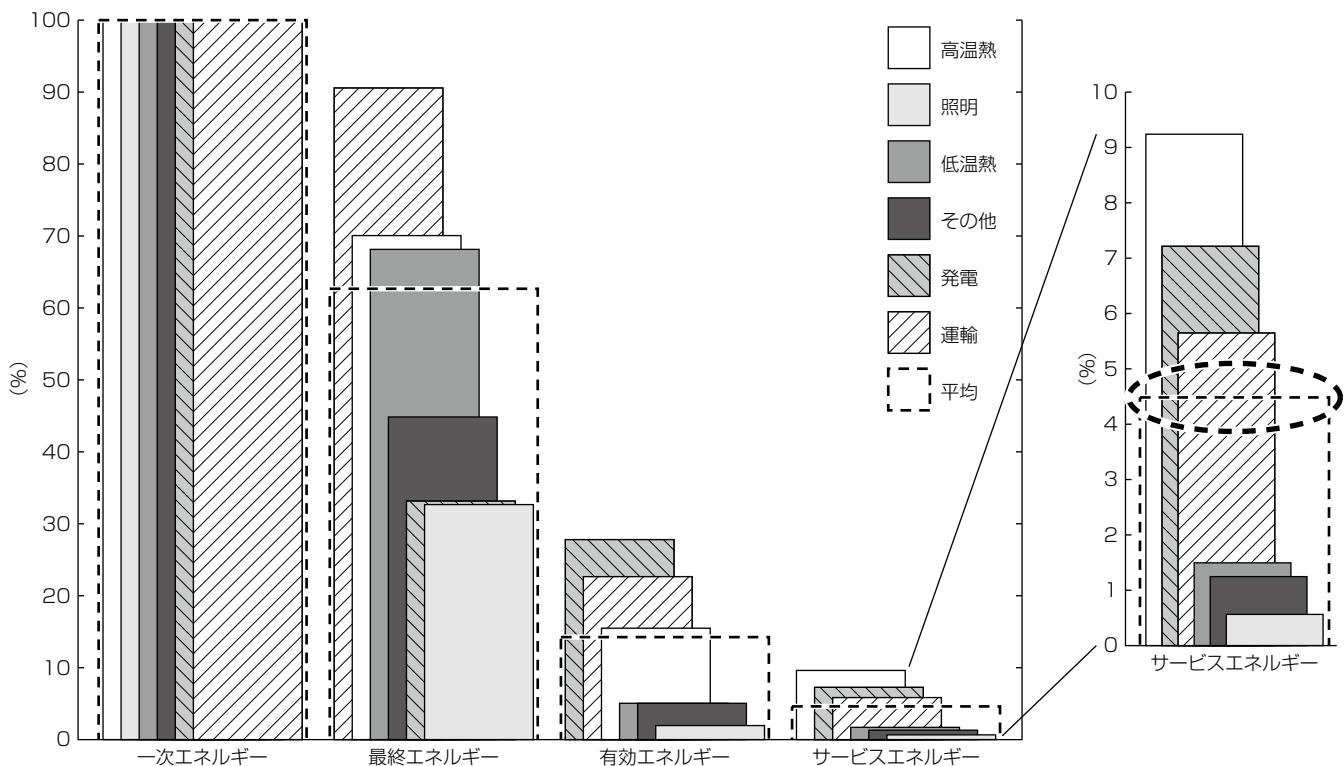
二つ目は、何と言ってもイノベーションである。イノベーションによって安価な対策オプションを創出する必要がある。政府は、2050年以降に向けた戦略として、2019年6月に“パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略”を策定した。そこでは、“最終到達地点として“脱炭素社会”を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す”とした上で、イノベーションを推進し、環境と経済の好循環を実現するとした。再生可能エネルギー、CO₂回収利用・貯留(CCUS)、水素、蓄電池、バイオ関連技術などは有望である。また、共通基盤技術としてのパワーエレクトロニクスやICT(Information and Communication Technology)などはシステムとして支える上で、大変重要である。例えば、太陽光や風力発電などの変動性再生可能エネルギーを大きく拡大するためには、高度な制御、蓄電池などのエネルギー貯蔵といった技術が不可欠であり、ICTには大きな役割が期待される。そしてこれらが全体システムとして機能したときに大きな効果を發揮し得る。

“脱炭素社会”ではエネルギーのカーボンニュートラリ

ティー(正味ゼロ排出)が必要になるが、その際でも最も重要なのは、エネルギー需要側の省エネルギーと考えられる。エネルギー供給サイドやエネルギー多消費産業では、省エネルギーが相当進んできている。我々は、エネルギーを消費したいがためにエネルギーを使っているわけではない。サービスを享受したいがために、そこにエネルギーが体化され、消費されていることを認識する必要がある。まず重要な点として、より良いサービス提供と一体でなければ、広範なる社会での省エネルギー実現にはつながりにくいということである。そして、次に強く認識すべき点は、そのサービスを得るために、特に最終需要に近いところで多くのエネルギーが無駄に使われているという点である(図1)。最終的に必要なサービスのためのエネルギーは、一次エネルギー消費全体の5%前後しか利用されていないとされている。しかし、我々の利便性を阻害する“隠れた費用”を含めると、それが合理性を持っているため、社会のエネルギー需給がこのような形で成り立っていた。ところが、技術進展とともに変わりつつある。例えば、人がいないときには照明は自動的に消灯し、人が現れれば自動的に点灯することが比較的安価にできるようになり、サービスの低下を抑えつつ省エネルギーにつながってきた。また、エアコンも人のいるところを集中的に冷やすことが可能になり、サービスの低下を抑えつつ省エネルギーにつながった。一方、社会システムとして見たときにまだまだ無駄が多い。

自動車部門ではCASE(接続化、自動化、サービス化・シェア化、電動化)が注目されている。デジタル技術が進展し、他技術の進展と相まったとき社会イノベーションが実現し得る。シェアリングやサーキュラーエコノミーはその代表である。自家用車は4~5%程度しか稼働していない。CASEによって必要なときに必要な車を利用できるようになり、カーシェアリング、ライドシェアリングによって稼働率が高まれば、より低費用で利便性の低下を小さく抑えながら自動車の利用が可能になる。また、乗用車の稼働率の上昇によって台数が低減し、自動車部品である鉄鋼、プラスチック、また駐車場の鉄鋼・コンクリートなどの素材製品の生産を減らすことが可能になる。ライドシェアによる直接的なエネルギー消費の低減だけでなく、間接的なエネルギー消費まで減らすことが可能になる。

その他の部門でも、書籍、アパレル、オフィス、食料など、デジタル技術の進展と高度な活用によって、必要なときに必要なだけ生産したり、稼働率を上昇させるなどしたりすることで、モノとサービスに体化されたエネルギーを含めて低減できる可能性が見えてきている。デジタル技術は一見、排出削減対策ではないが、デジタル技術の高度な利用と、関連した幅広い技術の進展が一体となって初めて、低排出・ゼロ排出社会の扉が開くだろう。再生可能エネル



出典 Grubler, A.: Post COP21 and Thereafter, ALPS国際シンポジウム2016

図1. 各利用段階での世界のエネルギー利用の現状

ギーなど、代表的な温暖化、エネルギー技術の研究開発・実証・展開が重要である。だが、直接的ではない技術の開発・進展を図ることにもっと注力することが必要である。

3. 三菱電機への期待

三菱電機では、環境ビジョン2050で、三つの環境行動指針を提示している。一つ目として“多岐にわたる事業を通じて環境課題を解決する”とし、その重点取組みとして、気候変動対策や資源循環を掲げている。気候変動問題はグローバルでの対策が重要であり、この点を強調しているが、筆者も強く同意するところである。また、資源循環であるが、サーキュラーエコノミーをICTで誘発することは、気候変動問題の解決とともに、持続可能な開発目標の達成にも寄与できるものである。二つ目として“次世代に向けてイノベーションに挑戦する”としている。正に、本

稿で述べたように、イノベーションなくして気候変動問題の解決はない。直接的な気候変動緩和策と見なされるような技術は大切だが、広範なデジタル技術等によって、間接的に気候変動緩和や適応に貢献できるようなイノベーションも、経済と環境の両立による根本的な気候変動問題の解決のために、より一層重要と考えられる。そして、三つ目として“新しい価値観、ライフスタイルを発信、共有する”としている。前述したように、シェアリングエコノミーなどは、ICT等の技術が後押しして社会システムが変化し、オーナーシップからユーザーシップへのシフトなどのライフスタイルの変化も誘発し得る。そして、新しい価値観がまた新たな技術ニーズを発掘し、技術の発展を促し、それらが新結合してイノベーションを誘発する。

気候変動問題の解決と、そしてより高位の目標である持続可能な発展の実現に向けて、三菱電機が大きな貢献を果たすことを強く期待している。

2050年に向けた三菱電機グループの環境活動

Mitsubishi Electric Group's Environmental Actions towards 2050



中野博文*
Hirofumi Nakano

要 旨

2019年は日本列島に大型台風が立て続けに上陸して甚大な被害を及ぼすなど、観測史上、類を見ない気象現象が発生し、地球温暖化の影響がますます深刻さを増している。

国際社会では2015年にパリ協定が採択され、各国に温室効果ガスの削減目標と目標達成のための計画を作成・提出することが課せられた⁽¹⁾。同時に、“SDGs(持続可能な開発目標)”が採択され、この実現に向けて、企業では、経営そのものにSDGsの考え方を組み込むことが必須になっている。また、欧州域では、“サーキュラーエコノミー”が、“環境政策”としてではなく“経済政策”として提唱されるなど、社会システムや価値観の大きな変革点に来ている。

三菱電機グループは、“7つの行動指針”的に“環境”を据え、積極的な取組みを進めてきた。今後、このような

社会変化に対応していくため、電機メーカーとして、エネルギー使用の削減や製品の高効率化、廃棄物の削減や資源投入の抑制など、事業を通じた貢献の拡大に加えて、革新的イノベーションの創出など、社会からの期待に応えていく必要がある。今後のキーワードは戦略的なビジョンとその実現に向けた意欲的かつ具体的な取組み、及び積極的な情報開示にあると考える。このような背景から、2050年に向け環境問題に取り組む企業姿勢を明確にするため、2019年6月に“環境ビジョン2050”を策定した⁽²⁾。グループの総力を結集しつつ、外部との協力を通じて環境活動の幅を広げ、持続可能な社会の実現に貢献していくとともに、リスクに対するレジリエンスを高め、タイミングに機会を捉えることで事業の継続的発展につなげていく。

環境宣言

大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ



Environmental
Sustainability
Vision 2050

三菱電機グループは、
環境問題につながる
様々な要因の解決にむけて、
一人ひとりの想いをつないで、
新しい価値の創出に挑戦し、
持続可能な未来をつくります。

三つの環境行動指針

1

多岐にわたる事業を通じて
環境課題を解決する

2

次世代に向けて
イノベーションに挑戦する

3

新しい価値観、ライフスタイル
を発信、共有する

重点取り組み

気候変動対策
資源循環
自然共生

長期的活動
イノベーション
人材育成

ニーズの把握
新しい価値の共創、発信
地域共生

環境ビジョン2050のシンボルマーク

当社は2019年6月に環境ビジョン2050を発表し、“大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ”ことを環境宣言として掲げた。大気、大地、水それぞれの課題解決を目指して、当社グループ内だけでなく、外部と協力し、全社員が情熱を持って行動することで、持続可能な未来へつなげていきたいという思いを込めてている。

1. まえがき

2019年から2020年にかけての冬は、全国153の観測地点のうち111地点で観測史上最高となる気温を記録し、2020年のサクラの開花も、東京で平年より12日早く、統計開始以来最早日を更新した⁽³⁾。暖冬や一足早い春の訪れなど、日常に不都合のない気候の変化も、その反面で大きな脅威になる。2019年秋には、大型の台風15号、19号が立て続けに日本列島に上陸し、関東・甲信・東北地方を中心に、甚大な被害をもたらした。被災された皆様には心からお見舞い申し上げる。これまで日常で感じる気候変動の影響は緩やかなものであったが、通常の生活が奪われる厳しい現実を目の当たりにし、地球温暖化を自身の問題として感じるを得ない。

グローバルの潮流では、2015年に気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)で採択された、“パリ協定(世界の平均気温の上昇を、産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする)”に基づき、各国に温室効果ガスの削減目標と目標達成のための計画を作成・提出することが課せられた。日本は、2030年度での温室効果ガスの排出を2013年度の水準から26%削減することを目標にしている。また、2019年に大阪で開催された“G20エネルギー・環境相会議”では、気候変動と並び大きな社会問題になっているプラスチックごみの削減に向け、2050年までに海洋プラスチックごみによる追加的な汚染をゼロにまで削減することが合意され、日本では2035年までに使用済みプラスチックを100%有効利用する(熱回収を含む)との具体的目標を掲げている。一方で、パリ協定採択と同じ2015年に国連サミットで、“SDGs”が採択され、持続可能な世界を実現するための17のゴールと、169のターゲットが掲げられた。この実現に向けて、企業の社会的責任として、経営そのものにSDGsの考え方を組み込むことが必須になっている。さらに、欧州域では、社会の無駄を価値に変え、資源と経済を循環させる“サーキュラーエコノミー”が、“環境政策”としてではなく“経済政策”として提唱されるなど、社会システムや価値観の大きな変革点に来ていると認識している。

当社グループは、“7つの行動指針”的一つに環境への取組みを据え、積極的に進めてきた。低炭素社会の形成に向けたエネルギー使用の削減や製品の高効率化、循環型社会の形成に向けた廃棄物の削減や資源投入の抑制など、具体的な施策を推進してきたことで社外からも一定の評価が得られていると考えている。しかしながら、今後、環境への取組み、ひいてはこのような社会の変化に対する感度と対応力が、社会での企業の持続可能性評価の基準の一つとし

て定着してきており、更なる取組みの拡大や社会との連携、革新的イノベーションの創出が期待されている。キーワードは戦略的なビジョンとその実現に向けた意欲的かつ具体的な取組み、及び積極的な情報開示にあると考える。グループ内にとどまらない外部との協力を通じて、環境活動の幅を広げ、当社グループを核とした環境負荷低減を進めていく。

この環境特集号では、2019年6月に発表した当社グループの“環境ビジョン2050”と、社会への貢献と企業価値の向上を両立させる環境関連の技術開発並びにその成果について、具体的に述べる。

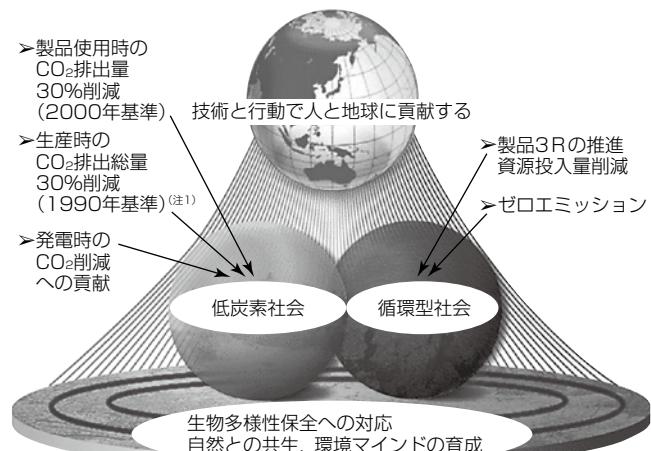
2. これまでの取組み

2.1 環境ビジョン2021達成に向けた環境計画の推進

当社は、1991年にグループ全体の環境活動を推進する環境保護推進部を設置し、1993年から3年ごとの“環境計画”によって、定量・定性目標を伴う具体的活動を実行に移し、継続的な環境改善を推進してきた。2007年には、創立100周年を迎える2021年を目標年とする“環境ビジョン2021”を策定し、“低炭素・循環型・自然共生社会の実現”的め、企業グループとしてのるべき姿を描き、バックキャスティングによって環境計画を遂行中である(図1)⁽²⁾。

2.2 低炭素・循環型・自然共生社会の実現に向けた取組み

“低炭素社会”的実現に向けては、まずは工場での生産時のCO₂(二酸化炭素)排出量の削減を進めてきた。エネルギー起源のCO₂については省エネルギー設備投資や、生産ラインの改善を進め、CO₂以外の温室効果ガスについて回収装置の計画的な導入・更新や運用改善を行ってきた。その結果、基準年度に264万トン-CO₂であったCO₂排出量が、環境ビジョン2021の目標である30%削減を達成し、



(注1) 単独：1990年、国内関係会社：2000年、海外関係会社：2005年
3R：Reduce Reuse Recycle

図1. 環境ビジョン2021

147万トン-CO₂に抑制できる見込みである。また、当社グループ製品の省エネルギー性向上や温室効果ガスの抑制にも精力的に取り組んできた。省エネルギーと創エネルギーの組合せで、エネルギー収支をゼロ化できるビル(net Zero Energy Building: ZEB)や家(net Zero Energy House: ZEH)、自動車による排ガスのクリーン化と低燃費化を実現する車載用電装品、顧客の生産現場での生産性や品質の向上に併せて省エネルギーに貢献するFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”など、幅広い分野に製品やソリューションを提供してきた。また、製品組込み時に、大幅な電力損失低減を実現するSiC(炭化ケイ素)を用いた半導体デバイスを広く顧客に活用してもらうとともに、エアコンなど多くの自社製品にも活用することで、製品使用時のCO₂排出量は2000年度に比べて、35%の削減を実現する見込みである。これらの製品やシステムによる省エネルギー効果はCO₂換算で約7,700万トンに上り、当社グループが2018年度に排出したCO₂の60倍に相当する。製品やサービスを通じた温室効果ガスの排出抑制は、ますますその重要性や社会からの期待が大きくなっていると感じている。

“循環型社会”の形成に向けては、事業所での廃棄物の徹底分別によるリサイクルを進め、埋立ての最少化を図ってきた。2018年の実績では、国内の事業所での直接埋立て率は0.01%になり、海外関係会社では0.52%になっている。また、事業所での水の使用について、使用量の抑制、循環利用を進め、年間の使用量をグローバルで前年度比1%の改善を継続している。資源循環を実現する顕著な活動として、家電製品の素材化(リサイクル)事業がある。再利用が難しいプラスチック部品を処理し、その80%を再生し、素材化している。この事業は、社外からも注目され、官公庁、企業、地元小・中学生の見学を受け入れ、2018年度の見学者数は1,351人であった。

家電プラスチックのリサイクルのほか、循環型社会の形成に向けた事業として、エレベーターで、既存の昇降路を活用したリニューアルを積極的に提案するなど、製品を長く使ってもらうビジネスを推進している。

廃棄物を最少化し、また、資源として活用して、環境負荷の最小化、天然資源の保全につなげることも、持続的に事業を続ける上での重要な責務であると考える。

“自然共生社会”への貢献に向けては、地域の人々や行政と対話しながら、グループ社員による親子向けの自然観察教室“みつびしでんき野外教室”と“里山保全プロジェクト”を全国で定期的に実施している。全国の事業所内では、構内の生物種調査、ビオトープ造成や建屋の緑化など生態系を育む取組みを進めている。2019年2月には、当社受配電システム製作所(香川県)が公益財団法人都市緑化機構か

ら生物多様性の観点で優れた事業所であるとして“Excellent Stage1”に認定された。従業員や地域の人々に、このような活動の意義を広く知ってもらうとともに、各地域の環境保全に貢献していく。

3. 環境ビジョン2050

3.1 環境ビジョン2050の策定

2019年6月には、2021年度以降の長期ビジョンである、“環境ビジョン2050”を策定し、“大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ”ことを宣言した。地球環境を“大気、大地、水”に大別して守るべき対象を明らかにかつ身近に整理した上、課題解決に当たるグループ従業員の情熱と子や孫に向けた思いを“心と技術”に込めた。この決意の下、当社グループが環境課題に取り組むに当たっての三つの環境行動指針を定めた(図2)。

3.2 環境ビジョン2050と三つの環境行動指針

行動指針の一つ目、“多岐にわたる事業を通じて環境課題を解決する”には、幅広い分野にわたる事業を通じて、バリューチェーン全体で気候変動対策、資源循環、自然共生といった課題に立ち向かうことによって、複雑な環境問題の解決や環境負荷の低減に結びつけていきたいという思いを込めた。特に四つの貢献領域、“ライフ”“インダストリー”“インフラ”“モビリティ”(図3)で、当社グループが100年培った技術を最大限に活用し、事業を通じた環境課題解決に貢献していきたいと考えている。

二つ目の“次世代に向けてイノベーションに挑戦する”は、グループ内外の力を結集し、全従業員が情熱を持って新たな課題解決に挑戦し続けることを示している。環境に配慮した電力を安定して供給する次世代電力システム、地球環境の観測で暮らしやすい街づくりに貢献する人工衛星、多様化する課題の解決をサポートする人工知能技術など、革新的な技術・ソリューションを創出していきたいと考える。

三つ目の“新しい価値観、ライフスタイルを発信、共有

環境宣言		
大気、大地、水を守り、心と技術で未来へつなぐ		
 Environmental Sustainability Vision 2050		三菱電機グループは、環境問題につながる 様々な要因の解決にむけて、一人ひとりの 想いをつないで、新しい価値の創出に挑戦し、 持続可能な未来をつくります。
三つの環境行動指針		
1 多岐にわたる事業 を通じて環境課題 を解決する	2 次世代に向けて イノベーション に挑戦する	3 新しい価値観、 ライフスタイルを 発信、共有する

図2. 環境ビジョン2050のコンセプト

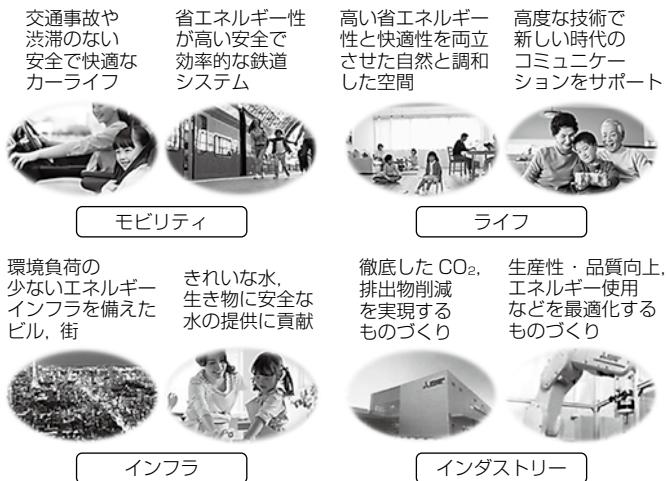


図3. 貢献する四つの領域

する”では、ステークホルダーと広く積極的な対話・連携・共創を進め、自然と調和する生活が心地いいと思えるような新しい価値観・ライフスタイルを提案していく。

2050年を見据えたビジョンの実現に向け、国際的合意に基づく長期目標を尊重し、原材料の調達から製造、販売、流通、使用、廃棄に至るまで、グローバルバリューチェーン全体を見据えた環境計画に基づいた事業活動を当社グループの全従業員が高いモチベーションを持って推進し、環境課題に対する企業責任を果たすとともに、社会から必要とされる企業として存続できるよう努力していく。

3.3 環境課題を解決する事業

この特集号では、四つの領域(ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティ)での環境貢献事業の11の事例と、全領域に跨(またが)って製品組み込み時に電力損失を低減させるSiCパワーデバイス(54ページ)について述べる。

3.3.1 “ライフ”領域の環境貢献事業

日本政府は、国内のエネルギー需要を“産業(生産に起因)、運輸、業務(ホテル、病院、学校など、建物内での需要)、家庭、その他”的5分野に分け、対策に取り組んでいる。過去10年の分野別需要増減のトレンドを見ると、産業、運輸に関しては減少しているのに対し、業務、家庭では増加している。これを減少に転じさせる切り札として、この特集号では、機器固有の効率向上だけではなく、建物全体で無駄を排除して省エネルギーを実現する複合ソリューションである、ZEH・ZEBを、国内省エネ法への対応を含めて述べる(9ページ)。また、ビルで活用される空調で、地球温暖化係数の低い冷媒の適用と、水利用による省冷媒化で、温室効果ガスの使用量をCO₂換算で最大84%削減したビル用マルチエアコン“HVRF(Hybrid Variable Refrigerant Flow)”について述べる(13ページ)。

また、地球温暖化に対して、安心・安全・快適性を提供

する二つの適応策を述べる。一つ目は人工衛星による地球環境観測である。当社はこれまでに気象衛星ひまわり7号～9号、温室効果ガス観測衛星1号・2号、マイクロ波放射計の開発を成功させ、地球環境の観測強化に貢献している(16ページ)。二つ目として、地表の水蒸気の発生を検出し、積乱雲の発生を事前に検知(光学的な検知と測距)するライダーについて述べる。頻発するゲリラ豪雨の対策技術として期待されている(20ページ)。

3.3.2 “インダストリー”領域の環境貢献事業

モノづくりを牽引(けんいん)する製造会社である当社グループの、“インダストリー”領域でのCO₂削減と、資源循環に寄与する最新技術について述べる。

当社グループは、生産時に排出するCO₂の削減に取り組み続けると同時に、そのノウハウを製造業界で活用してもらうために、省エネルギー支援機器の開発製造に注力してきた。この特集号では、生産性と生産時CO₂の削減を両立させる“e-F@ctory”ソリューションを適用した当社福山製作所での省エネルギー活動の事例と、それを支える機器・生産管理システムについて述べる(23ページ)。また、家電製品に使われていたプラスチックを分別回収し、再び家電製品の素材として活用する“自己循環リサイクル”について、最新の取組みを述べる(28ページ)。

3.3.3 “インフラ”領域の環境貢献事業

当社グループは、電気、水といったライフラインを提供する“インフラ”領域で持続可能な社会の実現に向けた環境負荷低減にも取り組んでいる。

電力供給について、この特集号では、再生可能エネルギー導入拡大に対して、周波数変動や供給力の余剰・不足といった電力品質問題を回避するための蓄電池制御技術と実際の電力系統への適用事例(33ページ)と、電力の使用で欠かせない変圧器に、カーボンニュートラルな絶縁油を適用した植物油入変圧器“MELCORE-NEO”について述べる(38ページ)。

世界的に水不足が危ぶまれる状況下、水再生へのニーズが高まっており、水処理に関する最新技術として、この特集号では、オゾンを利用した水処理用ろ過膜洗浄技術(41ページ)と、AI(Artificial Intelligence)技術“Maisart”を活用して下水の曝気(ばっき)処理を最適化する技術(45ページ)について述べる。

3.3.4 “モビリティ”領域の環境貢献事業

“モビリティ”領域では、自動車を取り巻く事業環境が、CASE(Connected-Autonomous-Shared-Electric: コネクテッド、自動運転、シェア・サービス、電動化)に向

けた大きな変革期を迎えており、内燃機関（エンジン）も引き続き多くの車両に搭載され続け、環境負荷物質の排出量低減、燃費向上が必要になると考えられる。この特集号では、エンジン車の排ガスをクリーン化する製品群と、市場が拡大するマイルドハイブリッド車の燃費を改善するキーパーツについて述べる（50ページ）。

4. 環境問題と事業の継続的発展

こうした環境活動を積み重ねてきたことで、当社グループは投資家の注目度が高い国際NGO（非営利団体）であるCDP^{(注2)(4)}から2019年度まで4年連続で“水”の分野で最高評価のAリストに選定された（図4）。“気候変動”については2018年度まで3年連続でAリスト、2019年度はA-となった。リーダーシップレベルの評価ではあるが、今後改めて高みを目指す。

また、2030年に向けて策定した当社グループの温室効果ガス削減目標が、“パリ協定”での“地球の気温上昇を産業革命前の気温と比べて2℃未満に維持する”ための科学的な根拠に基づいていることが認められ、2019年12月にSBTi^{(注3)(5)}の認定を取得した。設定した目標は、Scope1^(注4)、Scope2^(注5)（生産時の排出量）を2016年度基準に-18%、Scope3^(注6)（その他の排出量）は2018年度の排出量を基準に-15%の削減とした。今後この目標達成に向けて活動を推進していく。

環境問題が企業の経営活動にとっての脅威になるとの認識が一般化しつつある。各国首脳や世界的企業の経営者で構成される世界経済フォーラムでも、2019年の報告書で“今後10年間に起こり得る世界的なリスクとしては、影響・被害の大きさと発生確率の高さから環境関連のリスクが最大である”と報告し、2020年度の報告では気候変動や生物多様性の損失などの環境問題が、次の10年間に起こり得るリスクの上位5位を占めた⁽⁶⁾。

環境問題の解決は、社会に貢献することと同時に、当社の事業を存続させるまでの最大の課題であり、全力で取り組むべき課題であることを肝に銘じなければならない。

（注2） CDP：企業や都市の環境への取組みを調査・評価・開示する国際NGOで、“気候変動”“ウォーター”“森林”に関する“投資家質問票”を企業に送付し、企業から回答を収集・評価している。“サプライヤーエンゲージメント”は、企業が自身のサプライヤーに対する“気候変動”などに関する調査をCDPに委託し、サプライヤー企業の環境への取組みを評価するもの。旧称Carbon Disclosure Project。

（注3） SBTi：国際的イニシアチブで、国連グローバル・コンパクト、世界自然保護基金、CDP、世界資源研究所によって構成される。企業に対して、気候変動による世界の平均気温の上昇を、産業革命前と比べて最大でも2℃未満に抑制するという目標に向けて、気候科学の知見に整合した削減目標を設定することを推進している。

（注4） Scope1：燃料や工業プロセスによる直接排出

（注5） Scope2：購入したエネルギーによる間接排出

（注6） Scope3：Scope1、Scope2以外の間接排出



図4. CDP(水)Aリストのロゴ

5. む す び

狭い国土と急峻（きゅうしゅん）な地形が特長である日本では、1950年から1960年の高度成長期に、短期間で公害が発生した。また、1970年代には二度にわたるオイルショックが起きた。そんなさなか、当社では1972年の社長信で、全管理者に対して“わが社は環境整備機器メーカーとしても公害の防止はもとより、環境問題改善という高い認識に立ち、地域社会との融和を第一に企業活動を見直し、達成のために万全の体制をとる必要がある”と通達された。当時より、公害防止・遵法はもとより、事業を通じた環境貢献が当社経営方針に息づいていたことを感じる。1991年に全社環境管理部門を設置して以降、環境活動を公害防止、法規制の遵守から拡大し、3か年ごとの環境計画を道しるべにして、守り（事業活動での環境負荷低減）と攻め（社内省エネルギーの活用を活用した事業への展開と、環境性能面での他社差別化）の両輪で着実な活動を続けてきた。

48年前の社内通知は今になってなお重要性を帯び、全社環境活動開始から30年目の節目にこれを一層際立たせるのが、環境ビジョン2050である。これまでの事業を通じた環境貢献に加え、次世代を開くイノベーションに挑戦し、より広い社外との共創と新しい価値観、ライフスタイルの発信に向け取組みを具体化していく。

昨今、新型コロナウイルスという突発的に発生した危機は、世界にライフスタイルの変革を余儀なくさせている。一方で環境問題という今後も間違なく迫る脅威に対しては、主体的に計画することで準備と対策をしていくことが可能であると確信している。

参 考 文 献

- 外務省：気候変動
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiho/kankyo/kiko/index.html>
- 三菱電機株式会社オフィシャルサイト
<https://www.mitsubishi-electric.co.jp/>
- 気象庁：日本の季節の天候
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/seasonal/>
- CDPジャパン ホームページ
<https://www.cdp.net/ja/japan/>
- WWFジャパン ホームページ
<https://www.wwf.or.jp>
- 世界経済フォーラム：グローバルリスク報告書2019年版（2019）

地球温暖化対策としての 建物省エネルギーへの取組み

Energy Saving of Houses and Buildings as Measures against
Global Warming

幸田美沙紀*

Misaki Koda

四十宮正人*

Masato Yosomiya

1. まえがき

1992年国連で、温室効果ガスの濃度を安定させることを目的にした“気候変動に関する国際連合枠組条約”が採択され、1995年の“気候変動枠組条約締約国会議(COP)”を皮切りに気候変動に対する国際的な取組みが進められてきた。

本稿では、地球温暖化に対する世界の取組み状況と政府方針である建物全体のエネルギー規制の内容を改めて整理するとともに今後の動向を考える。

2. 地球温暖化に対する取組み

2.1 COPと海外諸国の目標

第21回COP(COP21)で採択された“パリ協定”で、締結国は平均気温の上昇を2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑

える努力を追求することになっている。気候変動抑制を目的にした多国間の国際的な合意である。この協定の実行のためには図1に示すように、直接起因と間接起因であるエネルギー生成時と使用時それぞれの温室効果ガスの削減が必要になる。各国は温室効果ガス(GHG)の削減目標を設定(表1)し⁽¹⁾⁽²⁾、再生可能エネルギーの拡大とともに石炭火力発電等の縮小を2050年の長期目標として掲げた。日本は、2030年度で2013年比26%の削減水準とし、最終到達点として脱炭素社会を今世紀後半のできるだけ早期実現を目指し、2050年までに2005年比80%のGHGの排出削減を目標に設定した。

2015年には国連サミットで“持続可能な開発のための2030アジェンダ”として持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)が採択され、国際社会の共通行動計画の動きが高まっている。しかしながら、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の“1.5℃特別報告書”で、現在の取組みは不十分で、2100年までに約3℃の平均気

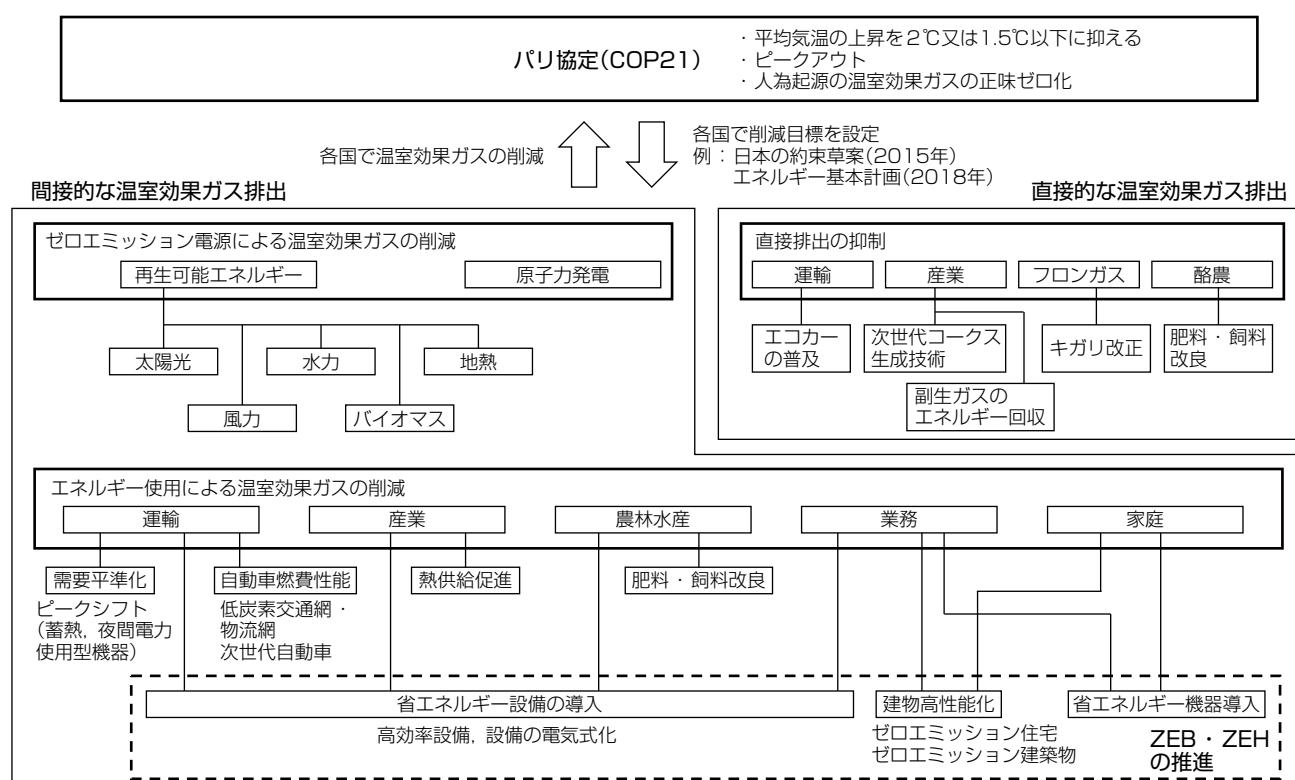


図1. パリ協定に向けた施策の枠組み

表1. 主要国の2020年以降の削除目標

2020年以降の目標 (INDCs約束草案)	温室効果ガス削減のための施策(一例)	
	エネルギー生成起因	エネルギー消費(民生)起因
アメリカ 2025年に (2005年比) 26~28%削減	・クリーンパワープラン に基づく、石炭火力の 高効率化や再生可能エ ネルギー増大	・2030年までに、建物 のエネルギー効率を 50%向上
EU 2030年に (1990年比) 40%削減	・2030年までに、再生 可能エネルギーが最終 エネルギー消費に占め る割合を27%にする	・公共建築物の3%につ いてエネルギー性能要 件が適合するように改 修を義務化
ロシア 2030年に (1990年比) 25~30%削減	・共同融資 ・エネルギー効率化の情 報システム支援 ・エネルギー効率改善の 基準化	・エネルギー消費量計測 メータの義務化 ・建築物のエネルギー効 率にかかるラベリング 規定
日本 2030年に (2013年比) 26%削減	・再生可能エネルギーの 導入促進 ・原子力発電の活用 ・火力発電の高効率化	・新築建築物の省エネル ギー基準適合推進、既 築建築物の断熱改修 ・高効率機器の導入

INDCs : Intended Nationally Determined Contributions

温上昇の可能性があるとされた。実際に、世界の温室効果ガス排出量は増大を続けており、目標達成は厳しい。

2.2 温室効果ガスの排出量推移

各国の温暖化対策を見ると、様々な措置が取られているが、温室効果ガス(GHG)の削減が停滞している国が多く、エネルギー供給の低炭素化(非化石電源の増大)と世界的な省エネルギーによるGHG削減を推進する対策の強化が急がれる。GHGの削減対策として世界各国では、エネルギーの使用によって排出されるGHGに関して使用部門をセクタごとに分類して排出量を算出し、削減目標を設定している。日本でも同様の対策が取られている。

日本では東日本大震災以降、原子力発電の再稼働が停滞

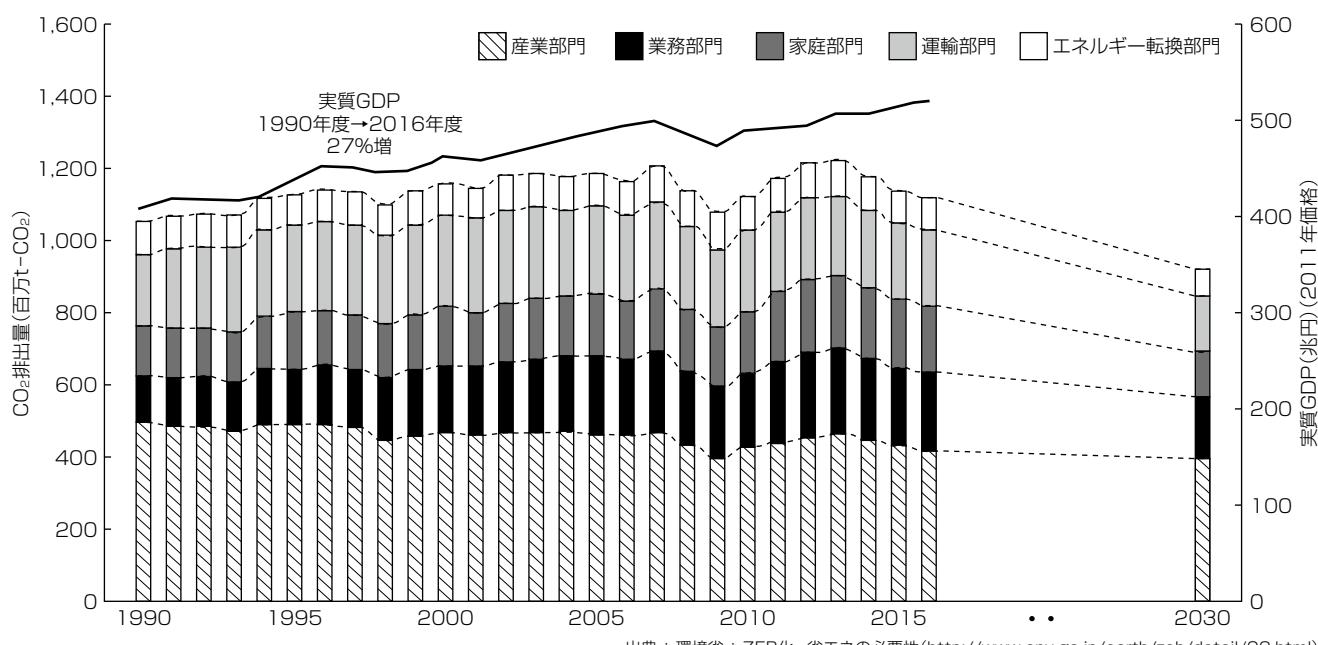
して火力発電依存から抜け出すことができていない。また、CO₂排出量を抑制しつつ経済成長を続けているものの絶対値では増大している。その内訳は図2のとおり、工場等の産業部門を対象に省エネルギーが進められたことから、産業・運輸部門起因のCO₂排出量は減少しているが、業務・家庭部門でのエネルギーの消費量は増加傾向にあり、この増加に対しては歯止めをかける必要がある。

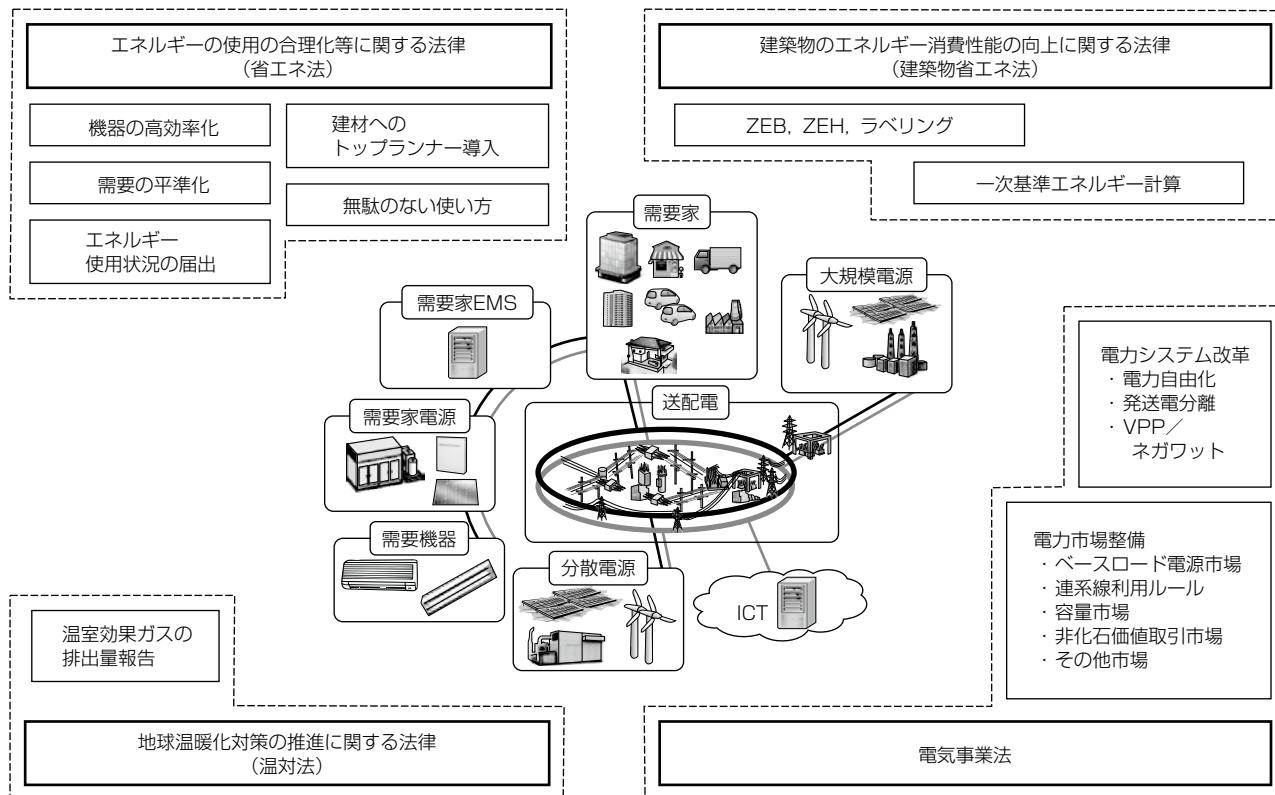
このことから業務・家庭部門の省エネルギーの更なる強化のため、日本は約束草案で2030年度の排出量を2013年度比でそれぞれ約40%削減する目標を設定している。

2.3 エネルギーに関する法令

“ゼロエミッション東京”として2050年にCO₂実質ゼロを実現すると宣言した東京都を含め、脱炭素宣言や気候非常事態宣言を表明する自治体は世界的に増加し、再生可能エネルギーの推進及び設備・機器の省エネルギーとエネルギー管理の徹底、建築物の省エネルギー対策を重要な施策にしている。

日本のエネルギーに関する法令は、図3に示すトップランナー制度として自動車や電気機器等の省エネルギー化を図るエネルギーの使用の合理化等に関する法律(省エネ法)や2015年に新設された建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律(建築物省エネ法)がある。従来は機器単体での効率改善に関する法律がメインであったが、各セクタのエネルギー使用量を削減するためにはこれだけでは不十分で、建物全体でのエネルギー消費という視点で施策を打つことがより有効であると考えられる。

図2. 日本での部門別のCO₂排出量の推移



EMS : Energy Management System, VPP : Virtual Power Plant, ICT : Information and Communication Technology

図3. 日本のエネルギーに関する主な法令

3. 建築物での省エネルギー

3.1 建築物での省エネルギーに対する取組み

建築物の省エネルギーに対する取組みは世界的に行われている。欧州では、欧州全体の消費エネルギーの約40%が建物に起因することから、EU(European Union)加盟国や有志によってEPBD(Energy Performance of Buildings Directive)として建築物のエネルギー消費性能改善を目的にした指令を施行している。加盟国に対して2020年末までに新築する建物で、再生可能エネルギーを含めて建物内で使用するエネルギーをゼロに近づける取組みであるnearly ZEB(net Zero Energy Building)を義務付けている。建物に影響する空調・換気機器等の性能と温熱負荷及び気候条件並びに室内環境を算出し、再生可能エネルギー量を加味し、健康・快適かつ建物全体で消費するエネルギー評価をするものである⁽³⁾。ZEBにかかる費用の原低活動も見られるほか、アメリカやオーストラリアでも省エネルギー建築物の評価システムが設けられ、ZEB化推進体制の構築は進んでいる。

日本でも、業務・家庭部門に起因する割合が大きく、その対応策として建築物の省エネルギーであるZEBやZEH

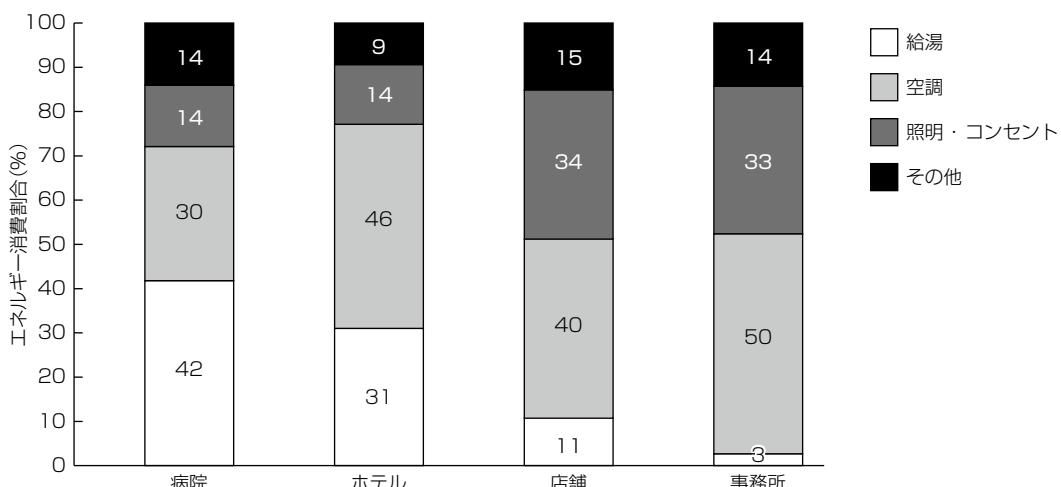
(net Zero Energy House)が推進されている。2018年に日本で閣議決定されたエネルギー基本計画では、建築物の省エネルギー化は業務・家庭部門で高い効果が期待されるとして、2030年までに新築建築物の平均でZEBの実現と新築住宅の平均でZEHの実現を目標にした。

3.2 日本でのZEB・ZEHの定義

日本のZEB・ZEHの考え方を示す。ZEB・ZEHとは、建物全体としてのエネルギー収支を0にすることを目指す建物である。ZEBの建築・設備計画方針は、ZEB設計ガイドライン⁽⁴⁾によると、周辺環境の適正化からスタートし、建物内負荷抑制や自然エネルギーの利用の後に、高効率機器や再生可能エネルギーを導入し、建物完成後は適切な運用のためエネルギー管理を行うものである。空気調和・衛生工学会でも“室内及び室外の環境品質を低下させることなく”と定義⁽⁵⁾し、適正な環境を維持することを前提にしている。

3.3 建物エネルギーの削減

建築物のエネルギー収支をゼロに近づけるためには、創エネルギーの普及と省エネルギーの更なる促進が必要になる。創エネルギーは敷地面積や建物による制約が大きいため、省エネルギーは継続して追求が必要な課題である。



出典：経済産業省：省エネルギーに関する情勢及び取組の状況について（2014）

図4. 各設備の建物全体に占めるエネルギー消費割合

省エネルギーの方法として、第一に機器の性能向上がある。一般的に建物全体の消費エネルギーのうち、照明・空調・給湯が多くを占めており（図4）、照明のLED化や空調機の高効率化、給湯器の電気式化が効果的と考えられる。

高効率機器の導入に限らず、建物の外皮性能向上は建物外の温熱負荷を軽減し、空調負荷削減に寄与する。また建物全体でエネルギー消費量を評価することで、一つの機器の性能に加え、周辺機器との連携によるエネルギー削減も期待できる。ZEB・ZEHの推進によって、機器単体の性能以上の省エネルギーを図ることが可能になる。

3.4 ZEB・ZEHを支える製品

建物での消費エネルギーの多くを占める空調の省エネルギー性向上は特に重要である。空調の省エネルギーに役立つ三菱電機の製品について述べる。

店舗・事務所用パッケージエアコンの省エネ自動モードでは“人感ムーブアイ360”が人の位置を検知し、人のいるエリアを中心に体感温度制御を行うことで、消費電力の節約に貢献⁽⁶⁾し、さらに独自のAI(Artificial Intelligence)で室温の変化を予測する“ムーブアイmirA.I.”は先読み運転を行い、冷やし過ぎや暖め過ぎを防止し、快適性と省エネルギー性を向上させる⁽⁷⁾。

機器連携による省エネルギーも考えられる。建築基準法等で定められるように建物では適切な換気が必要だが、室内で温調した空気の排出や外気の導入のため空調機の負荷が大きくなる課題がある。全熱交換器“ロスナイ”は内蔵のロスナイエレメントによって、屋外へ排出する空気と取り込む空気の熱交換を行うため、換気時の空調負荷の低減が可能になる。

4. むすび

大規模な台風、竜巻、高温乾燥による森林火災等、地球温暖化が要因と思われる異常気象が増え、私たちの生活に影響が出始めている。パリ協定達成のためにこれまで以上の取組みの検討と実施は喫緊事である。産業・運輸部門の事業主だけの課題ではない。今後省エネルギー規制が厳しくなっていくことが予想される。活動しやすい、適切な環境を整えることで、仕事のパフォーマンス向上も見込める。機器を使う人々の意識の変遷に加え、環境や建物、人の暮らしに沿った機器を作り、使っていくことが、GHGの抑制や経済発展及び技術革新の継続につながると考える。

当社は2020年度から稼働予定のZEB関連技術実証棟で省エネルギー技術の開発と実証実験を加速し、省エネルギー性に優れた快適な居住空間の実現を目指す。

建物性能の向上に加えて、働き方や暮らしの変化によって機器も運転環境や使用条件が変化することを考慮し、これからビルや住宅で省エネルギー性と快適性を両立、向上させる技術開発を進めていく。

参考文献

- 秋元圭吾：パリ協定国別貢献NDCの排出削減努力・政策評価、革新的環境技術シンポジウム（2017）
- 財日本エネルギー経済研究所：海外における省エネルギー政策等動向調査概要（2016）
<https://www.meti.go.jp/metislib/report/2016fy/000471.pdf>
- EPB CENTER：Modular Structure
<https://epbcenter/epb-standards/modular-structure/>
- ZEBロードマップフォローアップ委員会：ZEB設計ガイドライン（2018）
- 空気調和・衛生工学会 空気調和設備委員会 ZEB定義検討小委員会：ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法（2015）
- 三菱電機株：スリムエアコン総合カタログ（2019）
- 三菱電機株：スリムエアコン店舗・事務所用カタログ（2020）

R32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコン“HVRF”

"HVRF": Multi Air Conditioner for Buildings Using R32 Refrigerant and Water

池田宗史*
Soshi Ikeda
石村亮宗†
Katsuhiro Ishimura
本村祐治†
Yuji Motomura

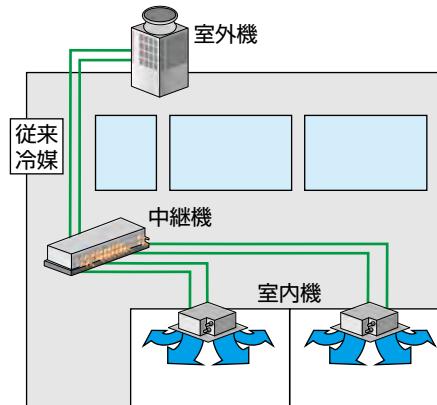
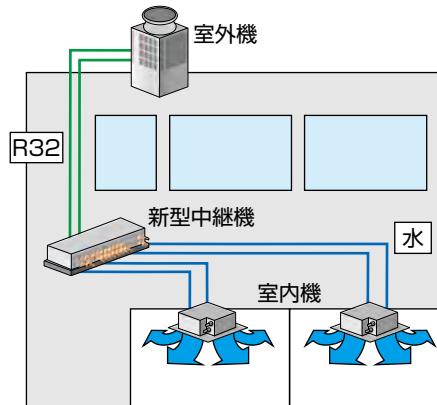
要旨

地球温暖化防止の観点から、温室効果ガスの生産量・消費量の削減を目的として各国の冷媒規制が強化され、空調機器に対しては、温室効果(GWP)が低い冷媒への転換が求められている。ルームエアコン等の小型空調機では、GWPが従来比1/3になるR32への切替えが進んでいる。しかし、冷媒使用量が多いビル用マルチエアコン等の大型空調機は、燃焼性を持つR32を適用した場合、居室への冷媒漏洩(ろうえい)に備えた安全装置が必要になるため、設備設計・施工の複雑化とコストアップが課題である。そこで三菱電機は、R32を使用しながら、追加の安全装置が不要で、従来システムと同等の省エネルギー性⁽¹⁾、機能、施工性を実現しつつ、温室効果ガス使用量を84%削減したR32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコン“HVRF”

(Hybrid Variable Refrigerant Flow)"を開発した。

このHVRFは、新たに開発した新型中継機を用いて、室外機から中継機までを冷媒で熱搬送し、中継機から室内機までを水で熱搬送する。熱搬送効率に優れる冷媒を室外機近傍の熱搬送に使用することで省エネルギー性を高め、毒性・燃焼性がない水を室内機近傍の熱搬送に使用することで居室への冷媒漏洩を抑制した。この技術によって、施工性の維持と、R32適用による低GWP化と水利用による省冷媒化で温室効果ガス使用量削減を実現した。

欧州のようにフロン規制の厳しい地域では、低GWP化と省冷媒化による地球環境保全への貢献及び施工の容易性から、ビルやホテルの空調機としてのHVRFの普及が期待できる。

	従来システム	R32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコン“HVRF”
システム構成		
温室効果ガス使用量	100%	16%(84%削減)
冷媒のGWP ^(注1)	100%	32%(68%削減)
冷媒の使用量 ^(注2)	100%	48%(52%削減)

(注1) 従来冷媒(R410A): GWP=2,088, R32: GWP=675, GWP値は、IPCC4次報告値

(注2) 試算条件は、室外機が冷房定格能力33.6kW(12HP)×1台、室内機が2.2kW(0.8HP)×20台、中継機が16分岐+4分岐、室外機から中継機までの配管長が40m、中継機から室内機までの配管長が11.2m

ビル用マルチエアコン(2管式冷暖同時タイプ)の新旧システム比較

R32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコンHVRFは、新たに開発した新型中継機を適用し、毒性・燃焼性がない水を中継機と室内機との間の熱媒体として使用することで、燃焼性を持つR32を使用しても、居室への冷媒漏洩抑制のための追加の安全装置が不要で、従来システムと同等の施工性と温室効果ガス使用量の削減を実現した。

1. まえがき

低炭素社会の実現と、地球温暖化防止に貢献するため、温室効果が高いフロン(HFC(ハイドロフルオロカーボン))の排出抑制は重要と考えられる。このような背景から、欧州F-gas規制に代表される冷媒規制が強化されており、空調システムの低GWP化と省冷媒化の開発が進められている。ルームエアコン等の小型空調機では、GWPが従来比1/3になるR32への切替えが進んでいる。しかし、冷媒使用量が多いビル用マルチエアコン等の大型空調機は、燃焼性を持つR32を適用した場合、居室への冷媒漏洩に備えた安全装置が必要になるため、設備設計・施工の複雑化とコストアップが課題である。そこで当社は、R32を使用しながら、追加の安全装置が不要で、従来システムと同等の省エネルギー性⁽¹⁾、機能、施工性を実現しつつ、温室効果ガス使用量を84%削減したR32冷媒適用と水利用のビル用マルチエアコンHVRFを開発した。

本稿では、HVRFの概要と導入技術について述べる。

2. ビル用マルチエアコンHVRF

2.1 HVRFの概要

HVRFは、従来システムと同様に、室外機、中継機、室内機で構成され、室外機と中継機の間及び中継機と室内機の間がそれぞれ2本の配管で接続される。HVRFは、新たに開発した新型中継機を用いて、室外機から中継機までを冷媒で熱搬送し、中継機から室内機までを水で熱搬送する。熱搬送効率に優れる冷媒を室外機近傍の熱搬送に使用することで省エネルギー性を高め、毒性・燃焼性がない水を室内機近傍の熱搬送に使用することで居室への冷媒漏洩を抑制している。そのため、HVRFでは、燃焼性を持つR32を適用しても、居室には安全装置の取付けが不要になる。また、HVRFは、中継機と室内機との間の冷媒量を削減できる。これらの結果、従来システムと同等の施工性と、R32適用による冷媒のGWP68%削減と水利用による冷媒の使用量52%削減で温室効果ガス使用量の84%削減を実現した。

2.1.1 新型中継機“ハイドロ分流コントローラ”

図1に新型中継機であるハイドロ分流コントローラを示す。ハイドロ分流コントローラは、2台のプレート式の冷媒-水熱交換器、2台のポンプ及び弁ブロックで構成される。プレート式熱交換器は、室外機から供給される冷媒と室内機から流れてきた水とを熱交換する。ポンプは、中継

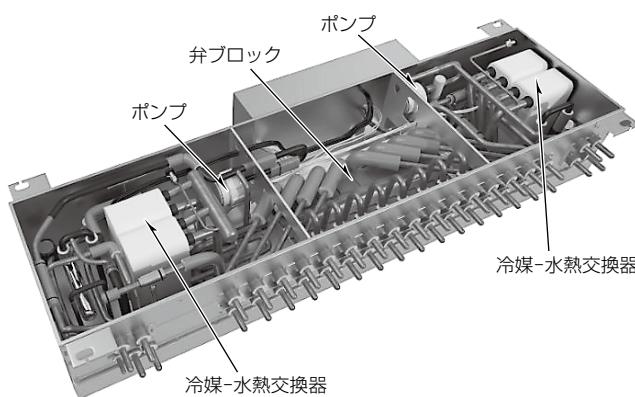


図1. ハイドロ分流コントローラ

機と室内機との間で水を循環させる。弁ブロックは、複数の切替弁で構成されており、複数の室内機ごとに、2台ある冷媒-水熱交換器のどちらか一方に水が流れるような循環経路を形成する。

3. 冷温水を用いた冷暖同時運転

図2に冷温水を用いた冷暖同時運転を示す。従来のビル用マルチエアコンと同等の機能を実現するためには、複数の室内機が冷房及び暖房を混在して運転する冷暖同時運転の実現が課題である。そこで、室外機から供給される冷媒の圧力を制御し、2台の冷媒-水熱交換器それぞれで冷水と温水を同時に生成する当社独自の技術を開発した。2台のポンプと弁ブロックの切替えによって、冷房する室内機には冷水を供給し、暖房する室内機には温水を供給することで、冷暖同時運転を実現した。HVRFが持つ冷房運転、暖房運転、冷暖同時運転の各運転モードでの動作について述べる。

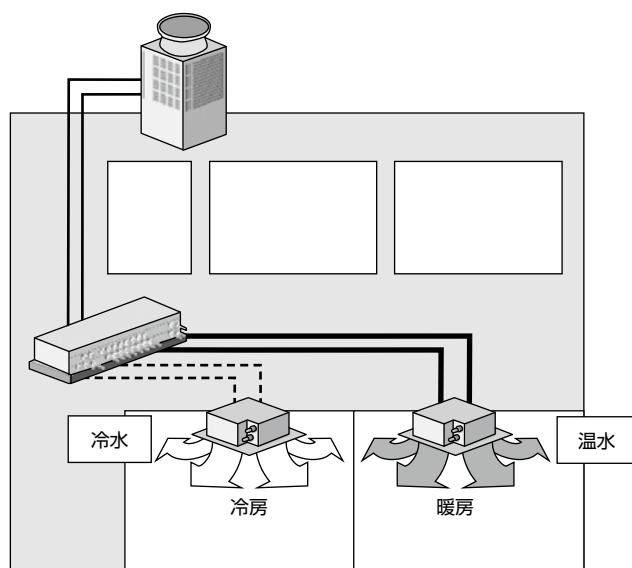


図2. 冷温水を用いた冷暖同時運転

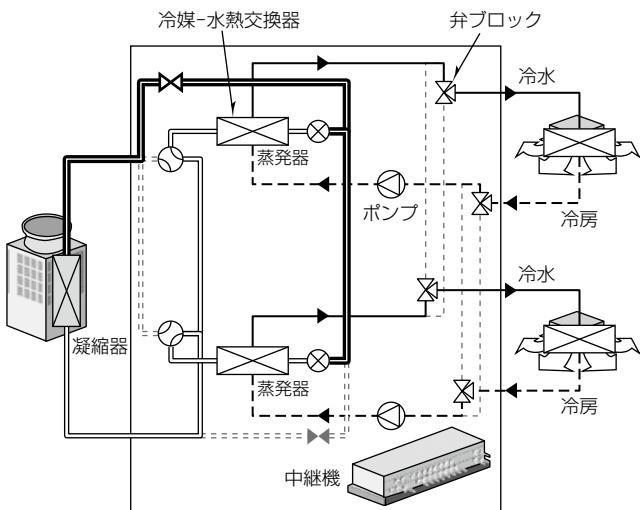


図3. 冷房運転時の動作

3.1 冷房運転

図3に冷房運転時の動作を示す。図中の二重実線及び実線はそれぞれ冷媒及び水の回路を示し、太線及び細線はそれぞれ高圧／高温及び低圧／低温を示す。

冷房運転に必要な冷水を生成するため、二つの冷媒-水熱交換器はどちらも蒸発器として作用する。室外機から供給された冷媒は、減圧され低温低圧になったのち、冷媒-水熱交換器に流入する。冷房する室内機を循環する水は、冷媒-水熱交換器で低温低圧の冷媒と熱交換し、冷却されて冷水になったのち、室内機へ供給される。

3.2 暖房運転

図4に暖房運転時の動作を示す。暖房運転に必要な温水を生成するため、二つの冷媒-水熱交換器はどちらも凝縮器として作用する。室外機から供給された冷媒は、高温高圧のまま、冷媒-水熱交換器に流入する。暖房する室内機を循環する水は、冷媒-水熱交換器で高温高圧の冷媒と熱交換し、加熱されて温水になったのち、室内機へ供給される。

3.3 冷暖同時運転

図5に冷暖同時運転時の動作を示す。冷暖同時運転に必要な温水と冷水を生成するため、二つの冷媒-水熱交換器はそれぞれ凝縮器及び蒸発器として作用する。室外機から供給された冷媒は、高温高圧のまま、凝縮器として作用する冷媒-水熱交換器に流入する。凝縮器を通過した冷媒は、減圧され低温低圧になったのち、蒸発器として作用する冷媒-水熱交換器に流入する。暖房する室内機を循環する水は、凝縮器として作用する冷媒-水熱交換器で高温高圧の冷媒と熱交換し、加熱されて温水になったのち、室内機へ供給される。冷房する室内機を循環する水は、蒸発器

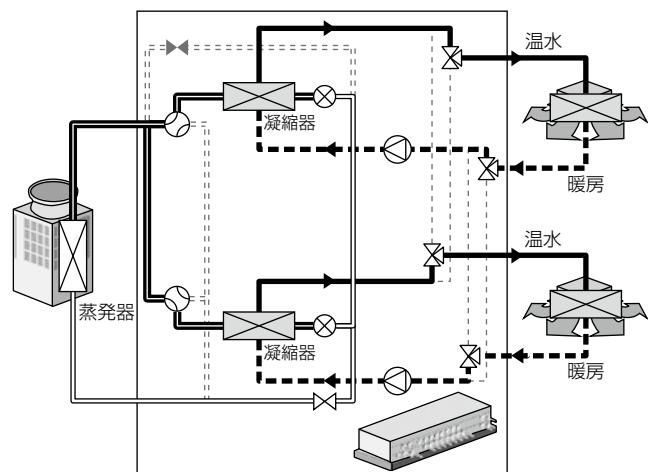


図4. 暖房運転時の動作

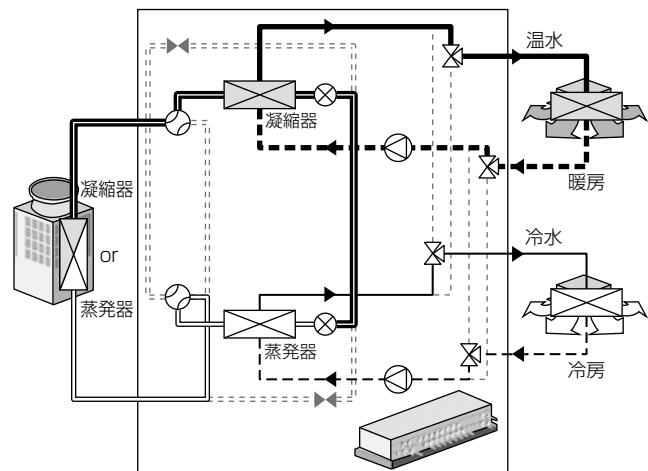


図5. 冷暖同時運転時の動作

として作用する冷媒-水熱交換器で低温低圧の冷媒と熱交換し、冷却されて冷水になったのち、室内機へ供給される。

4. むすび

R32冷媒と水を利用したビル用マルチエアコンHVRFの開発によって、R32適用による冷媒のGWP68%削減と水利用による冷媒の使用量52%削減で温室効果ガス使用量の84%削減に成功し、従来システムと同等の省エネルギー性⁽¹⁾、機能及び施工性を実現した。

HVRFは、冷媒規制が先行する欧州で、ビル用マルチエアコンへの主要な能力範囲である冷房能力22.4～56.0kWの全てで製品化を完了した。低GWP化と省冷媒化による地球環境保全への貢献及び施工の容易性から、ビルやホテルの空調機としてのHVRFの普及が期待できる。

参考文献

- (1) Ikeda, S., et al.: Development of Hybrid VRF using R32 refrigerant. The 25th IIR International Congress of Refrigeration, TS-407.4 (2019)

特集論文

宇宙利用による地球環境観測への貢献

Contribution of Space Use to Earth Environment Observations

田中 敦*

Atsushi Tanaka

赤木茂樹*

Shigeki Akagi

野口龍宏*

Tatsuhiko Noguchi

関根功治*

Koji Sekine

1. まえがき

Society 5.0への対応として，“気候変動の緩和策と気候変動の影響への適応策”の推進が求められており、この分野で人工衛星による地球環境観測が不可欠な要素になっている。三菱電機は、これまでに静止気象衛星(ひまわり7号～9号)、温室効果ガス観測衛星(いぶき、いぶき2号)、衛星搭載マイクロ波放射計(AMSR、AMSR-E、AMSR2)の開発を成功させ、現在いぶき3号、AMSR3の開発を進めている(図1)。

現在運用中のひまわり8号(9号はバックアップとして軌道上待機中)は、ひまわり7号からの大幅な観測性能の向上によって、従来よりも高い頻度、高い密度、多様な高度、高い精度での観測が可能になり、定常的な気象観測に加え、防災のための監視機能が強化され、気象観測だけでなく火山噴煙・海氷・黄砂等の観測も行っている。海面の温度、海氷の分布、大気中の微粒子等の観測を、より高精度に実施することで、地球環境の監視機能を強化している。いぶき2号では、フーリエ変換分光計や一酸化炭素バンドの追加等観測センサの高度化、エアロゾルセンサによるエアロゾル観測機能の強化を図った。さらに、現在開発中の

いぶき3号によって、地球大気全体の二酸化炭素／メタン濃度の継続把握、パリ協定に基づく各国の温室効果ガスインベントリ報告の透明性の確保、大規模排出源の監視に貢献していく。AMSR3は、高周波数チャネル追加による観測対象の追加、地上処理高度化によるプロダクトの高分解能化等の取組みによって、台風進路予測の向上など、新たな利用ニーズに応えていく。

2. 気象衛星ひまわりの観測性能

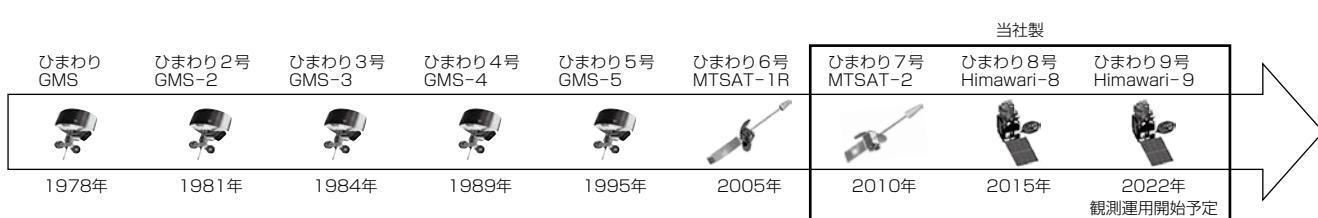
2.1 概 要

ひまわりは、1978年に観測を開始した初号機で観測バンド2ch(可視1ch／赤外1ch)、全球観測頻度が14回／日であったのが、ひまわり8号／9号で16ch(可視3ch／近赤外・赤外13ch)、全球観測頻度142回／日・領域観測576回／日と飛躍的に向上している。観測分解能も0.5km(可視)／2km(赤外)と初号機から2倍以上に向上していて、8号／9号からカラー観測が可能になった。図2にひまわりの変遷を示す。6号までは米国製であったが、7号以降当社が開発・製造を担当している。



図1. 当社製観測衛星と観測センサの変遷

2020年7月現在

図2. 気象衛星ひまわりの変遷⁽¹⁾

2.2 ラジオメトリック性能

ひまわり8号／9号搭載の可視赤外放射計の観測性能を評価する指標の一つとしてS/N(信号対雑音比)があり、S/Nを向上させるために冷凍機による検出器の冷却が必要で、可視バンドは170K、赤外バンドは60Kで安定して維持されている(温度安定度は±0.5K以内)。また、検出器は素子ごとに複数の冗長素子を持っており、最も性能が良い素子を選定できるように設計されている。月2回各バンドのS/Nを算出し、観測性能が維持されていることを確認していく。S/N算出では、可視バンドは太陽光観測データ／深宇宙観測データを、赤外バンドは内部黒体観測データ／深宇宙観測データを使用している。図3のS/N算出結果が示すとおり、各バンドとも余裕を持って仕様値を満足している。特定のバンドに対しては画像内に発生する電源干渉ノイズの補正処理を適用してS/Nの改善を図っている。この補正処理の適用前後の実測値を図3の中で対比させてお

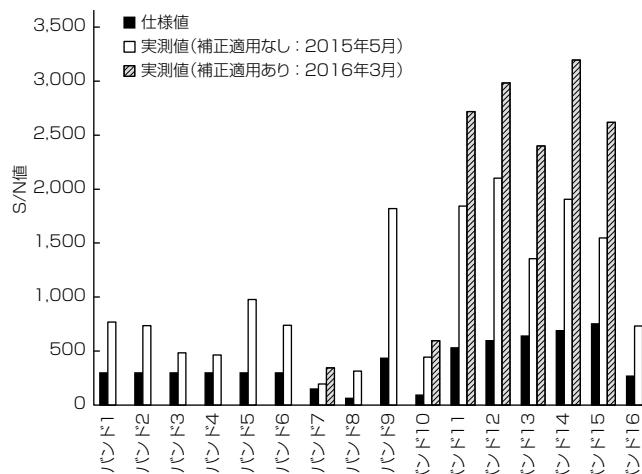


図3. ひまわり8号可視赤外放射計のS/N

り、補正前でも仕様値を満足しているが、補正後は更なる向上が確認されている。図4にはひまわり8号の運用を開始した2015年7月からの評価結果の推移を示す。データの配信運用開始からS/Nの劣化傾向はなく、観測性能が安定的に維持されていることを確認できる。図4で2016年2月に見られる上昇は、この処理の向上効果を示すものである。

2.3 ジオメトリック性能

(1) 高精度化の手法

気象状況の正確な把握と予測には、2.2節のラジオメトリック精度とともにジオメトリック(幾何)精度の向上が重要である。図5はひまわり8号／9号の高精度ジオメトリック校正処理のプロック図を示す。観測画像と地形標本とのマッチング処理によって画像のバイアス校正を実施し、変動分に関しては恒星センサ・低／高周波レートセンサ・加速度計データを最適なフェージョンフィルタで処理

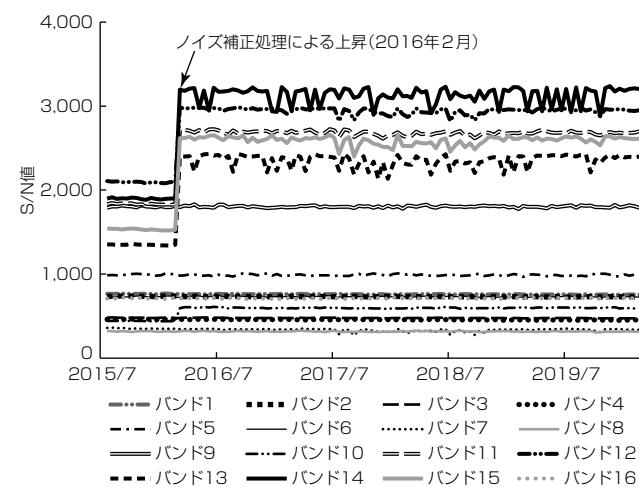


図4. ひまわり8号可視赤外放射計S/Nの推移

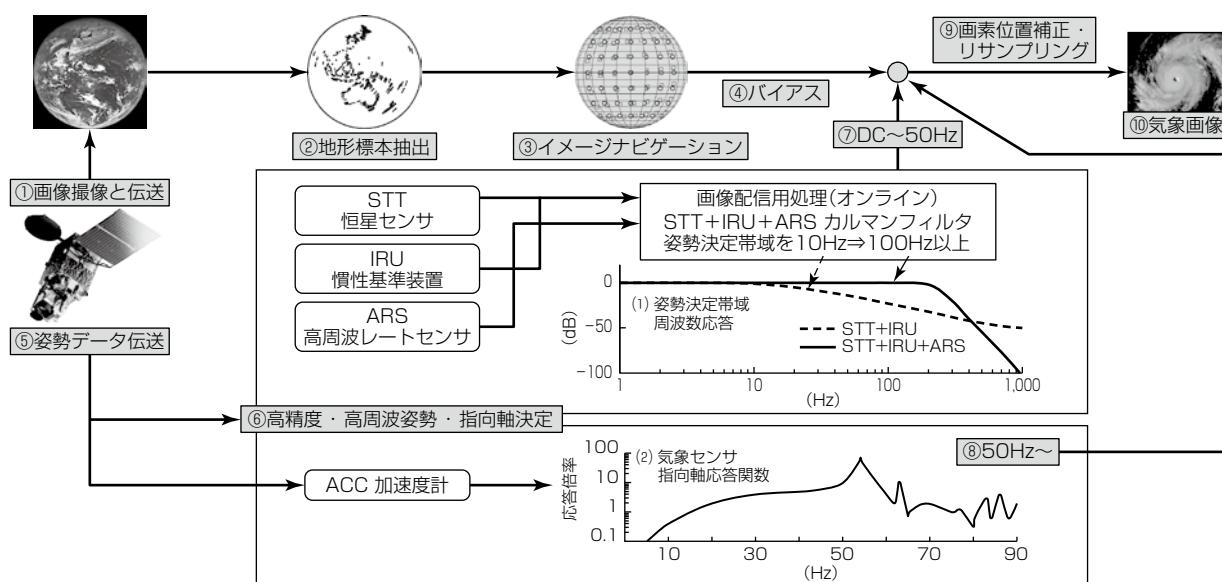


図5. 高精度ジオメトリック校正処理のプロック図

し、姿勢又は指向軸を高精度・高周波に推定している。図6に示すとおり、走査鏡の走査に伴う数 μ radの軌道上姿勢変動も推定できており、その結果10分間の姿勢安定度(表1)及び擾乱(じょうらん)(表2)も非常に安定している。

(2) 画素位置精度

先に述べた方式でバイアスから高周波までの姿勢・指向軸推定をオンライン処理で行っており、図7の赤外チャネル13の例で示すとおり、1画素以下の精度を実現している⁽²⁾。

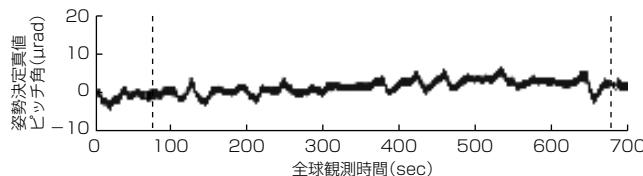


図6. オフラインによる姿勢決定真値(ピッチ角)
(2019年12月実測値)

表1. 姿勢決定値の安定度(推定誤差の一時回帰直線)
(2019年12月実測値)

定義	軸	ロール安定度	ピッチ安定度	ヨー安定度
性能仕様(600秒間)		14 μ rad(p-p)以下		
軌道上評価結果(600秒間)		5.8 μ rad	11.1 μ rad	2.6 μ rad

表2. 姿勢決定一次回帰直線(表1)からの擾乱
(2019年12月実測値)

定義	軸	ロール安定度	ピッチ安定度	ヨー安定度
性能仕様(各時間)		4.0 μ rad以下		
軌道上評価結果	30秒間	0.1 μ rad	0.1 μ rad	0.1 μ rad
	150秒間	0.2 μ rad	0.3 μ rad	0.2 μ rad
	600秒間	0.3 μ rad	0.5 μ rad	0.2 μ rad

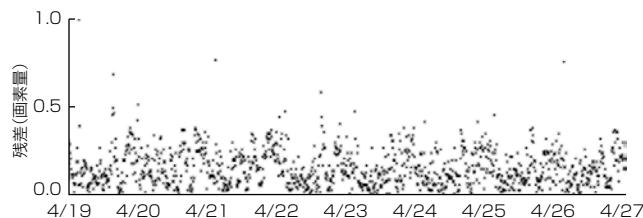


図7. 位置合わせの処理後のデータについて行ったずれ量の
残差評価の一例(2015年4月19~27日, 赤外チャネル13)⁽²⁾

表3. 観測周波数と物理量プロダクト⁽³⁾

	中心周波数(GHz)	偏波	帯域幅(公称)(MHz)	温度分解能(150K観測時)	ビーム幅(地表分解能)(公称)
土壤水分 海面水温	6.925	H/V	350	<0.34K	1.80° (34km × 58km)
	7.30	H/V	100	<0.70K	1.20° (22km × 39km)
	10.65	H/V	500	<0.34K	1.20° (22km × 39km)
	10.25	H/V	200	<0.70K	0.65° (12km × 21km)
海水観測 気象利用	18.70	H/V	400	<0.60K	0.75° (14km × 24km)
	23.80	H/V	1000	<0.70K	0.35° (7km × 11km)
	36.50	H/V	3000	<1.20K	0.15° (3km × 5km)
	89.00 A/B ^(注2)	H/V	2000 × 2	<1.50K	0.30° (6km × 10km)
水蒸気 鉛直分布 降水量	165.50	V	4000	<1.50K	0.28° (5km × 9km)
	183.31 ± 7	V	2000 × 2	<1.50K	0.28° (5km × 9km)
	183.31 ± 3	V	2000 × 2	<1.50K	0.28° (5km × 9km)

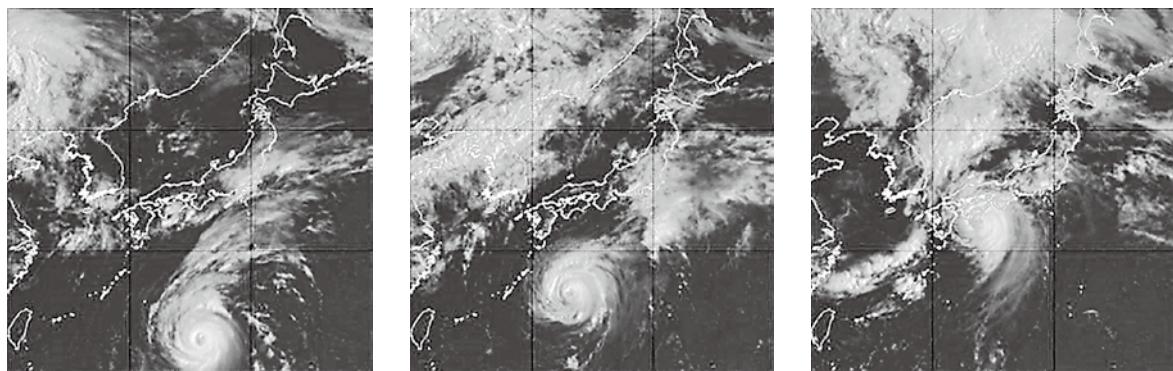
網掛け部分はAMSR2からの追加チャネル

(注2) 89GHz帯はビーム方向の異なるA系、B系の独立した2系統で走査間のアンダーラップを生じない構成としている。

3. マイクロ波放射計の観測性能

マイクロ波放射計(AMSR)は水循環に関する全球的な水蒸気量・降水量・海面水温等を観測する受動型の電波センサであり、地球規模の水循環のモニタリングとモデリングに全世界で有効利用されている。AMSR、AMSR-E及びAMSR2のAMSRシリーズセンサによって、2002年から2020年現在まで18年以上にわたって観測データを継続して取得中である。運用中のAMSR2は、2012年5月の打上げから現在に至る8年以上の期間、安定した観測データを提供し続けている。前号機のAMSR-Eでは打上げ後、約5年経過時に回転モータのトルク変動の兆候が見られ始め、約9年半後に回転停止に至ったが、AMSR2は8年以上経過した現在も回転トルクが安定しており、AMSR-E以上の長寿命で観測データを提供することが期待される。AMSR2までは6.9~89GHzの多周波、多偏波輝度温度観測によって海面水温・土壌水分・海水等の観測を実施してきた。現在開発中の後継機AMSR3では、166/183GHz帯の追加搭載による全球の降水(降雨+降雪)分布の観測、及び10GHz帯のチャネル追加による海面水温プロダクトの高精度化(分解能50km→20km)が計画されている(表3)。

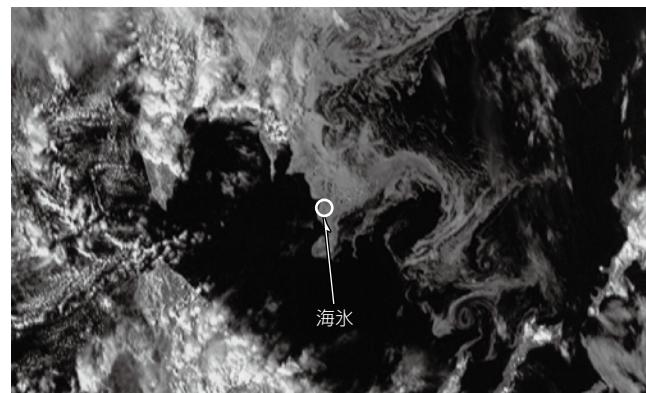
AMSRシリーズのデータは、気象予報・防災分野での現業利用の継続と高度化、全球水循環変動・気候変動の予測精度向上、水資源管理、洪水・旱魃(かんばつ)予測、農業への応用、沿岸域への漁場予測の拡張等、様々な分野への利用が期待され、実現されている。既にAMSRは世界的に極軌道の気象衛星の位置付けで利用されており、これらのサービスを継続して観測精度を上げていく上でも、今後も複数のセンサによる長期的な観測を継続することが期待されている。

図8. 2018年台風21号の監視⁽¹⁾

4. 観測データ利用

ひまわりの観測データは，“衛星画像”として台風や低気圧の動きを把握するといった利用が行われるほか、計算機で処理することで、上空の風・雲の高度や種類、海面水温などの様々な情報を算出するために利用されている。日本のはるか南の海洋上で発生する台風の場合、海上には観測点が少ないため、台風の監視に“ひまわり”が大きな役割を発揮する。ひまわり8号から“領域観測機能”による台風の追跡観測が可能になり、台風の発生、移動、強さなどを把握するために活用されている(図8)。また、雲と氷で反射する光の強さが波長によって異なるという性質を利用し、ひまわりの観測データから海氷を判別もできる(図9)。海氷は海水と大気を遮断することで、両者の熱や水蒸気の交換に大きな影響を与えるほか、海面に比べて太陽光の反射率が高く日射によって得られる熱量も大きく減少させるため、気象や気候の実態把握や予測には海氷の状況の正確な把握が欠かせない。

このように、衛星観測によって、海上及び陸上の区別なく、台風や低気圧に伴う雲域の移動など気象の変化を観測できる。観測した画像は、気象実況に関する有益な情報として、防災や気象予報の現場で幅広く活用されている。ひまわりは、1978年の初号機の運用開始以来40年以上にわたって観測を継続していて、長期にわたって安定した観測を継続することによって、国民の安全安心の確保や、アジア・太平洋地域の防災力の向上、気候変動の監視などに貢献している。さらに、JAXA(宇宙航空研究開発機構)／EORC(JAXA地球観測研究センター)では、ひまわり8号のデータと電波センサを搭載する複数の衛星からの観測

図9. オホーツク海の海氷を捉えた画像⁽⁴⁾

データを組み合わせて世界の雨分布を準リアルタイムで配信するGSMP(Global Satellite Mapping of Precipitation)⁽⁵⁾サービスを提供している。この情報をベースにしたアジアの降水予報アプリケーションのサービスも開始されており、GSMPのデータを利用する登録ユーザーは世界117か国に広がっている。

参考文献

- (1) 気象庁：気象業務はいま2019／第1部 国民の安全・安心を支える気象業務
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2019/index3.html#toc-113>
- (2) 別所康太郎：新しい静止気象衛星ひまわり8号及び9号、日本気象学会機関誌「天気」、63、No.12、1015～1023 (2016)
- (3) JAXA：温室効果ガス・水循環観測技術衛星GOSAT-GWプロジェクト移行審査の結果について、科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、宇宙開発利用部会、資料52-1 (2019)
<https://www.mext.go.jp/kaigisiryo/content/000020148.pdf>
- (4) 気象庁：気象衛星による気象監視
<http://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/kanshi.html#ice>
- (5) JAXA：衛星全球降水マップ(GSMP)の活用に向けた気象庁と宇宙航空研究開発機構の技術開発連携について
https://www.jaxa.jp/press/2019/03/20190328b_j.html

特集論文

水蒸気・風速同時計測向け
コヒーレント方式差分吸収ライダー

Coherent Differential Absorption LIDAR for Simultaneous Measurement of Water Vapor and Wind Velocity

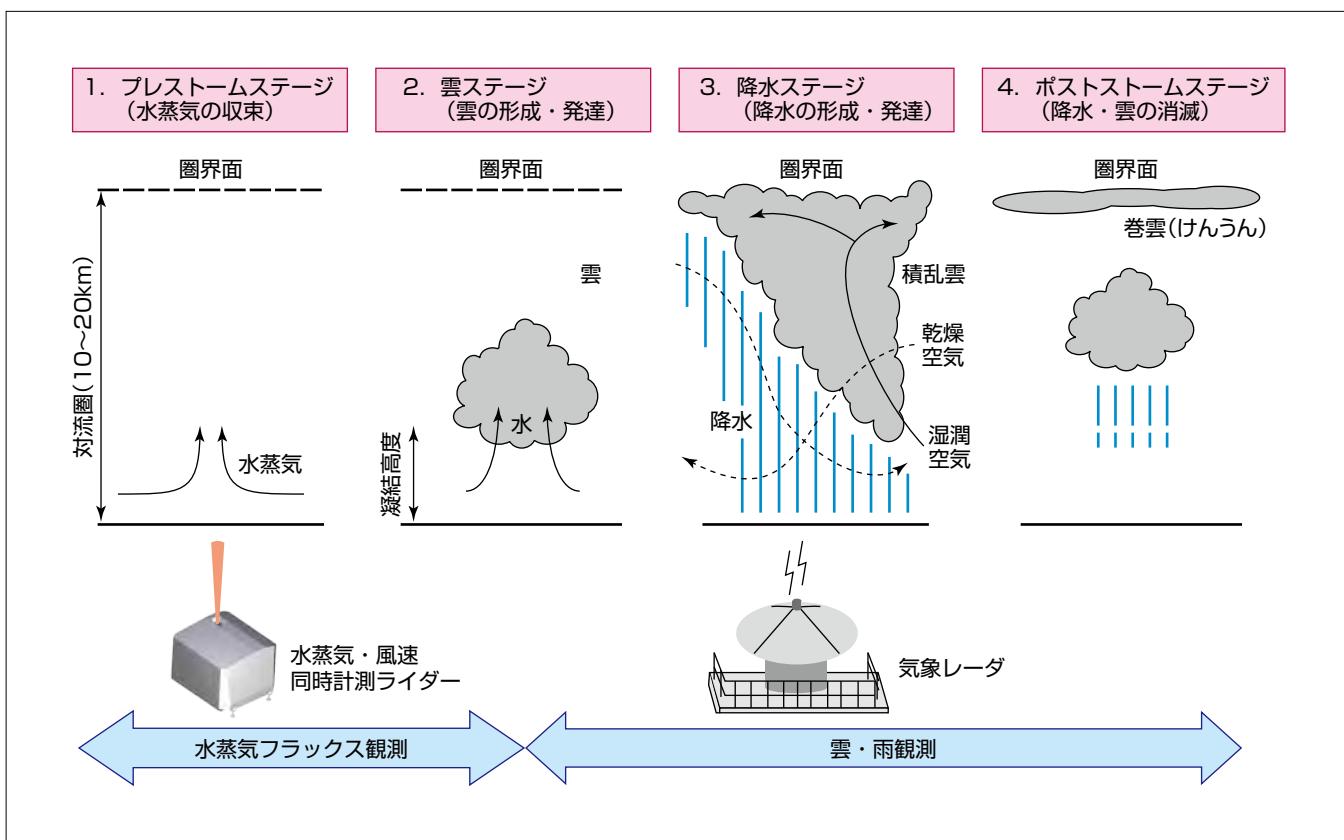
今城勝治*
Masaharu Imaki
田中久理†
Hisamichi Tanaka
廣澤賢一*
Kenichi Hirosawa柳澤隆行†
Takayuki Yanagisawa
龜山俊平‡
Shunpei Kameyama

要旨

豪雨による洪水や土砂崩れといった災害による被害が世界中で増加しており、その対策が求められている。特に、集中豪雨やゲリラ豪雨は、雲が発生してから短時間で集中的に降雨が発生し、豪雨発生箇所以外にも広域に被害が発生するため、インフラ面での対応策に加え、豪雨予測の高精度化や被害予測、安全に避難する時間の確保が課題となっている。

高精度豪雨予測の一つとして、降雨の種となり得る水蒸気フラックスを把握し、実測データをデータ同化して気象数値モデルで予測する手法が研究されている⁽¹⁾。さらに、ライダー(Light Detection and Ranging: LIDAR)を用いて水蒸気量や風速分布を測定し、水蒸気フラックスを高精度・高分解能に把握する手法が報告されている⁽²⁾。しか

し、使用されている従来の水蒸気計測ライダーの光検出手法では、受信光の光量から算出するため、背景光量に依存して測定高度が変化する課題がある。そこで、ローカル光と受信光をヘテロダイン検波し、光の干渉性を利用した水蒸気計測向けコヒーレント方式差分吸収ライダーを開発した。この方式では、太陽光のようなランダム位相の背景光はローカル光と干渉しないため、受信信号には信号成分だけ抽出でき、背景光量に依存することなく昼夜安定して計測できる。さらに、受信光の位相情報からドップラーシフト周波数を算出することによって風速分布も同時に計測できることが特長である⁽³⁾。この装置によって、高精度豪雨予測を可能にして、被害を最小限に抑えることのできる防災・減災社会への貢献を目指す。



水蒸気・風速同時計測ライダーと気象レーダを用いた高精度豪雨予測向け観測システムのイメージ

水蒸気・風速同時計測ライダーで降水の要因となる雲になる前の水蒸気密度の増加や上昇気流を観測し、気象レーダで雲や降雨を観測する。雲が発生する前から大気の状態を把握することで、早期の豪雨予測を目指す。

1. まえがき

ライダーは、大気中に照射したレーザ光に対する空気分子やエアロゾルからの散乱光を集光・検出し、レーザ発光からの遅延時間に基づく受信光量や位相情報の変化を基に、風速や分子濃度、エアロゾル濃度などの空間分布を測定する光波レーダである。三菱電機は、水蒸気と風速の同時計測を実現するための1.5μm帯コヒーレント方式差分吸収ライダーを開発した。

2. 水蒸気・風速計測同時計測ライダー

2.1 装置構成

1.5μm帯コヒーレント方式差分吸収ライダーの装置構成を図1に示す。水蒸気に対する吸収波長は、1.5μm帯の中でも吸収強度が強く、温度特性の小さい1,531.383nmを選定し、非吸収波長は1,531.555nmを選定した⁽³⁾。それぞれの波長に後述する波長ロック回路で安定化したレーザ光を光スイッチで選択した後、レーザ光を光分配器で分け、一方を強度変調器でパルス化して光アンプで増幅した後、光アンテナを通して大気中に照射する。大気中に照射したレーザ光に対する空気分子やエアロゾルでの散乱光を光アンテナで集光し、光分配器のもう一方の光と合波する。合波した光をバランスド検出し、信号処理機で所定の時間領域ごと(=距離ごと)での周波数解析を行う。

吸収波長の受信強度は、非吸収波長の受信強度に対して、水蒸気量の吸収分だけ減衰するため、吸収波長と非吸収波長のレーザ光を交互に照射し、その受信強度の差分からその領域の水蒸気量を算出できる。また、大気中に浮遊しているエアロゾルは風の流れとともに移動するため、その散

乱光にはドップラーシフトが発生する。したがって、非吸収波長のピーク周波数から視線方向の風速値を測定できる。さらに、スキャナ等によってビームを走査し、角度ごとの水蒸気分布や風速分布として取得することで、三次元分布の測定が可能になる。

2.2 コヒーレント方式差分吸収ライダーの要素技術

2.2.1 波長ロック回路

吸収波長光源に対しては光波長に対して7桁小さい0.1pmオーダーの安定度が求められる。この値を実現するため、測定対象のガスを封入したセルを用い、吸収スペクトルに吸収波長光源の波長を安定化させることが必要である。

1.5μm帯での水蒸気の吸収強度は小さく、長さ10cmの光路長では透過率99.95%程度と、十分な吸収量を得ることができない。そこで、1.5μm帯に強い吸収のあるシアン化水素(HCN)の吸収線に波長を安定化させ、さらに安定化した光源と水蒸気の吸収波長光源とのビード周波数が所定の周波数になるように制御することで、水蒸気の吸収波長に安定化させる回路を開発した⁽⁴⁾。図2に波長ロック回路の構成を示す。この回路で波長安定化を行った結果、水蒸気の吸収波長1,531.383nmに対して、長期安定度として標準偏差0.123pmの波長安定化光源を実現できた。一方、非吸収波長に対しては、温度制御とレーザダイオードに流す電流制御だけで安定化した。

2.2.2 受信強度・ピーク周波数演算

水蒸気分布を米国標準大気モデル1976と仮定した場合、差分距離100mとしたときの吸収波長と非吸収波長の差分は、地上から高度3km付近で0.015~0.03dB程度である。この差分条件に対して水蒸気量を誤差10%で計測するには、吸収波長と非吸収波長に対する受信信号の受信信号対雑音比(受信SN比)は、約30dBが必要になる⁽³⁾。

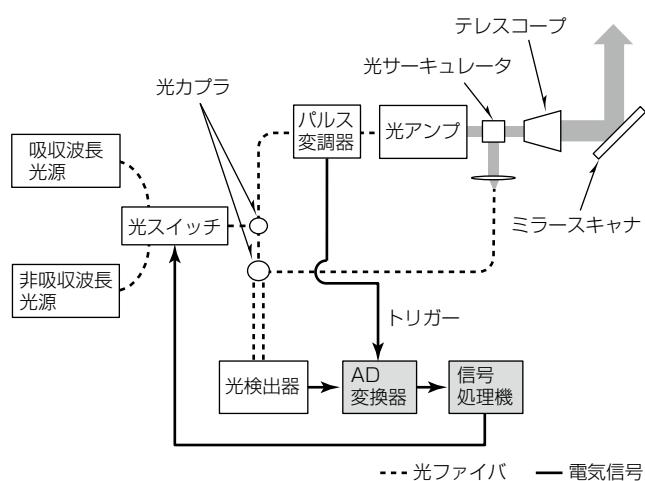


図1. コヒーレント方式差分吸収ライダーの装置構成⁽³⁾

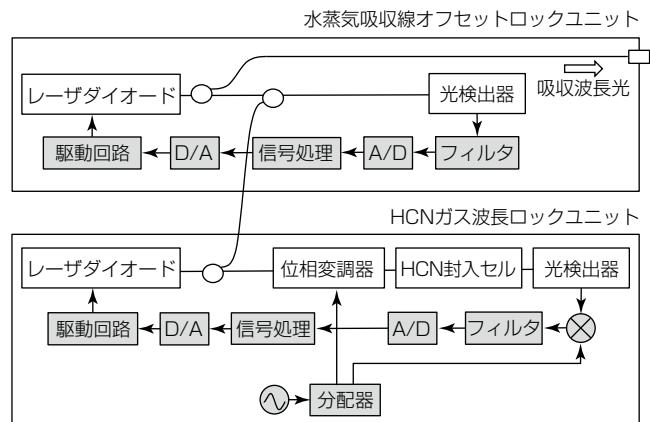


図2. 波長ロック回路の構成⁽⁴⁾

コヒーレント方式ライダーで周波数解析した受信スペクトルは、レーザ線幅や乱流等によってその線幅が広がる。つまり、受信スペクトルのピーク値だけでの測定では、水蒸気量算出時の誤差の要因になる。そのため、この装置では複数の周波数ビンでの受信振幅を加算して受信強度を算出することで、乱流等によって受信スペクトルが広がった場合でも高精度な受信強度の算出ができるように対策した。また、ドップラー周波数算出についても、ピーク値の周辺での1次モーメントからピーク周波数を算出している⁽⁵⁾。

3. 水蒸気・風速分布の観測例

図1の装置を作製し、鎌倉市大船にある当社情報技術総合研究所で連続観測を実施した。ライダーで取得した水蒸

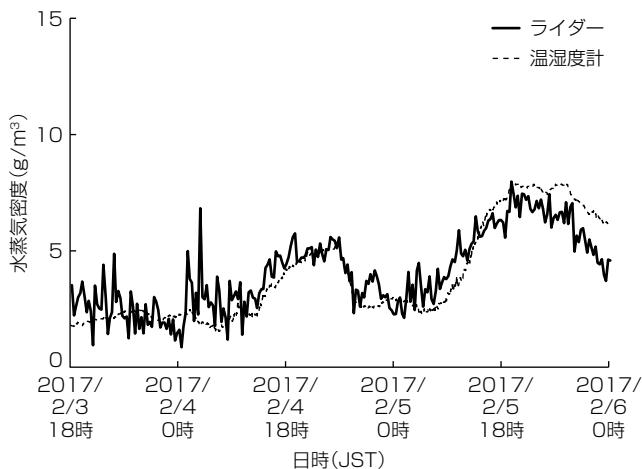


図3. ライダーと温湿度計の水蒸気測定値比較⁽⁶⁾

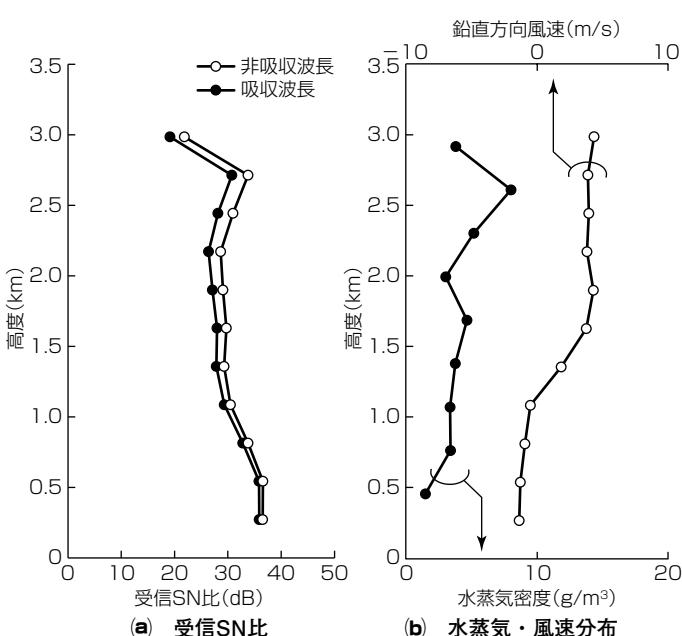


図4. ライダーで取得した受信SN比と水蒸気・風速分布の例

気密度の妥当性を検証するため、水平方向に照射して取得したライダーの第1レンジの水蒸気測定値と、観測地点に設置した温湿度計から算出した水蒸気測定値の時間変化特性を比較した。2017年2月3日18時から2月6日0時の観測結果を図3に示す。水蒸気量の時間変化が両機器で一致していることを確認した⁽⁶⁾。

図4に、2018年3月30日に取得した水蒸気・風速の鉛直分布を示す。図中、(a)は受信SN比、(b)は水蒸気分布と鉛直方向風速分布である。レーザ光は天頂角35.4度に照射し、取得したデータを高度方向の分布に変換している。(a)の受信SN比はエアロゾル濃度に依存しており、高度2.8kmにエアロゾル濃度が高くなっている層があることが分かる。また、その下層部で、(b)の水蒸気密度が増加している様子を観測できた。風速分布については、正の値が下降気流で負の値が上昇気流を示しており、対流が発生している様子を観測できた⁽⁷⁾。

4. むすび

高精度豪雨予測で被害を最小限に抑えることを目指して、水蒸気フラックスを高精度・高分解能に把握するための水蒸気・風速同時計測向けコヒーレント方式差分吸収ライダーを開発し、水蒸気と風の同時計測を実施した。この装置では、別途開発した光導波路増幅器⁽⁸⁾を光アンプに用いることで、広域での観測を実施することも可能である。

今後は、ライダー取得データ水蒸気フラックスを算出し、その値を数値予測シミュレーションに反映した豪雨予測技術の開発に取り組む予定である。

参考文献

- 1) Nelman, P., J. et al.: A water vapour flux tool for precipitation forecasting, Water Management, **162**, 83~94 (2009)
- 2) Giez, A., et al.: Water vapor flux measurements from ground-based vertically pointed water vapor differential absorption and Doppler lidars, Journal of Atmospheric And Oceanic Technology, **16**, 237~250 (1999)
- 3) Imaki, M., et al.: Wavelength selection and measurement error theoretical analysis on ground-based coherent differential absorption lidar using 1.53μm wavelength for simultaneous vertical profiling of water vapor density and wind speed, Applied Optics, **59**, 2238~2247 (2020)
- 4) Imaki, M., et al.: Development of wavelength locking circuit for 1.53 micron water vapor monitoring coherent differential absorption LIDAR, in Proc. of ILRC28 (2018)
- 5) 今城勝治, ほか: レーザレーダ装置, 特許第6505343号
- 6) 今城勝治, ほか: 1.53μm帯コヒーレント差分吸収ライダによる水蒸気分布の計測結果, 第35回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2017)
- 7) 今城勝治, ほか: コヒーレント差分吸収ライダによる水蒸気・風分布の同時計測結果, 第36回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2018)
- 8) Hirosawa, K., et al.: 7.4mJ laser amplifier at 1531.4nm for water vapor differential absorption lidar(DIAL), in Conference of Advanced Solid State Lasers 2017, JTh2A 23 (2017)

エネルギー計測の有効性及びFEMS等による継続的な省エネルギー推進活動

森脇照雄*
Teruo Moriwaki

Effectivity of Energy Measurement and Successive Energy Conservation Promotion Activities with Factory Energy Management Systems

1. まえがき

三菱電機福山製作所(以下“当所”という。)では、配線用低圧遮断器・電力量計等を生産している。1997年にISO14001の認証を取得し、環境目標のトップに“工場省エネルギー”を掲げた。当社製省エネルギー支援機器(エネルギー計測器等)を活用し、“e-F@ctory”ソリューションを適用した工場全体を挙げた活動を推進している。

本稿では、エネルギー計測の有効性とともに、当所が継続的に推進してきた活動事例の一部について述べる。

2. エネルギー計測の有効性

2.1 適切な計測の必要性

エネルギー管理には適切な計測が欠かせない。ここでいう適切な計測とは、使用部門や設備別、月・日・時間単位の計測の記録である。例えば、家庭で支出されている電気料金は、前月の電気使用量・日数とともに各電力会社から通知されるが、併記してある前年同月と差異があったとしても、月間使用量だけではその増減要因は推測の域を脱することは難しい。当所では、月・日・時間単位の計測記録を確認することで、増減要因分析・エネルギーの過剰消費抑制等、工場全体のエネルギー管理に役立てている。図1にエネルギー計測管理対象例を示す。

2.2 エネルギー原単位管理の必要性

生産設備のエネルギー管理には、エネルギー消費量と生産情報を突き合わせたエネルギー原単位を用いる手法がある。例えば、消費電力量を生産数量で除した生産設備の原単位(kWh/個)は、エネルギー消費効率の指標であるとともに、作業者や生産品目によらず過去と現在を同じ尺度で比較することが可能な生産性の指標そのものである。一方、原単位に頼らずとも、管理者や作業者の目線で現場を観察すれば生産性の良しあしは把握可能という意見もあるが、24時間連続操業等、常時管理者の目が届かない職場でも、管理者が深夜時間帯の設備消費電力量(発停状態)に

着目した結果、作業者意識が向上し、納期に追われていた生産設備の停止時間短縮につながり、生産数量が増加したというケースもある。

2.3 設備改善投資計画の精度向上

投資を伴う設備改善の場合、対象の優先順位付けや費用対効果を検討する上で、計測による実態把握が欠かせない。例えば、ポンプの回転数を調整するインバータ導入を検討する場合、その実効果(削減電力量)は運転時間等の使われ方に大きく左右される。もしも実態把握を怠って期待効果を過信してしまうと、十分な費用対効果を得られないばかりか、対象を見誤ることで大切な資金を失うおそれさえある。また、計画段階の試算効果と実効果の差異を検証することで、以降の計画の精度向上に加え、最適案選択による費用対効果の最大化を図ることができる。

2.4 設備更新時の適正容量の見極め

建築電気設備容量又は設置台数を選定する際、建物ごとの様々な与条件と将来的な使われ方を考慮して容量(台数)を選定するが、この時点で将来の使われ方の変化を捉える

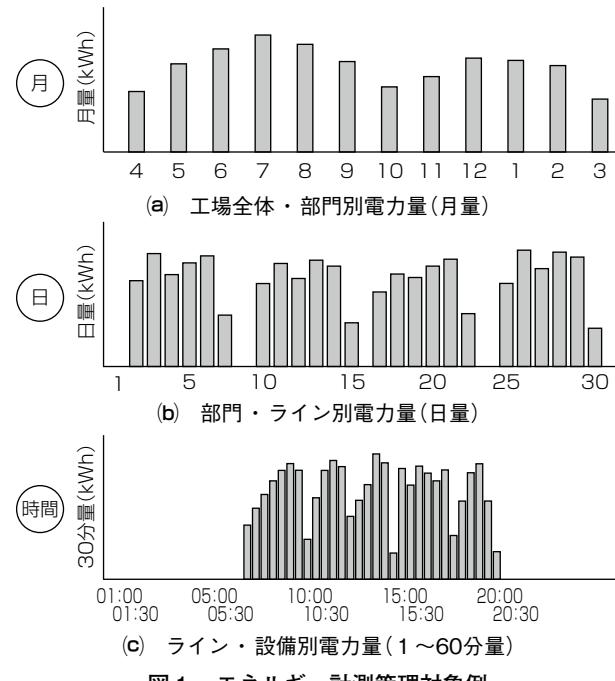


図1. エネルギー計測管理対象例

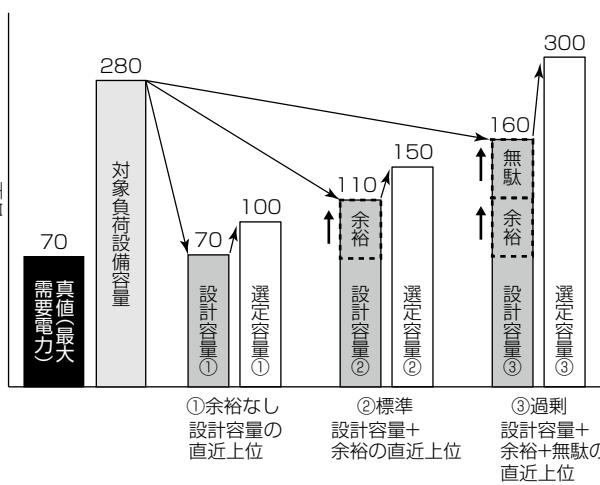
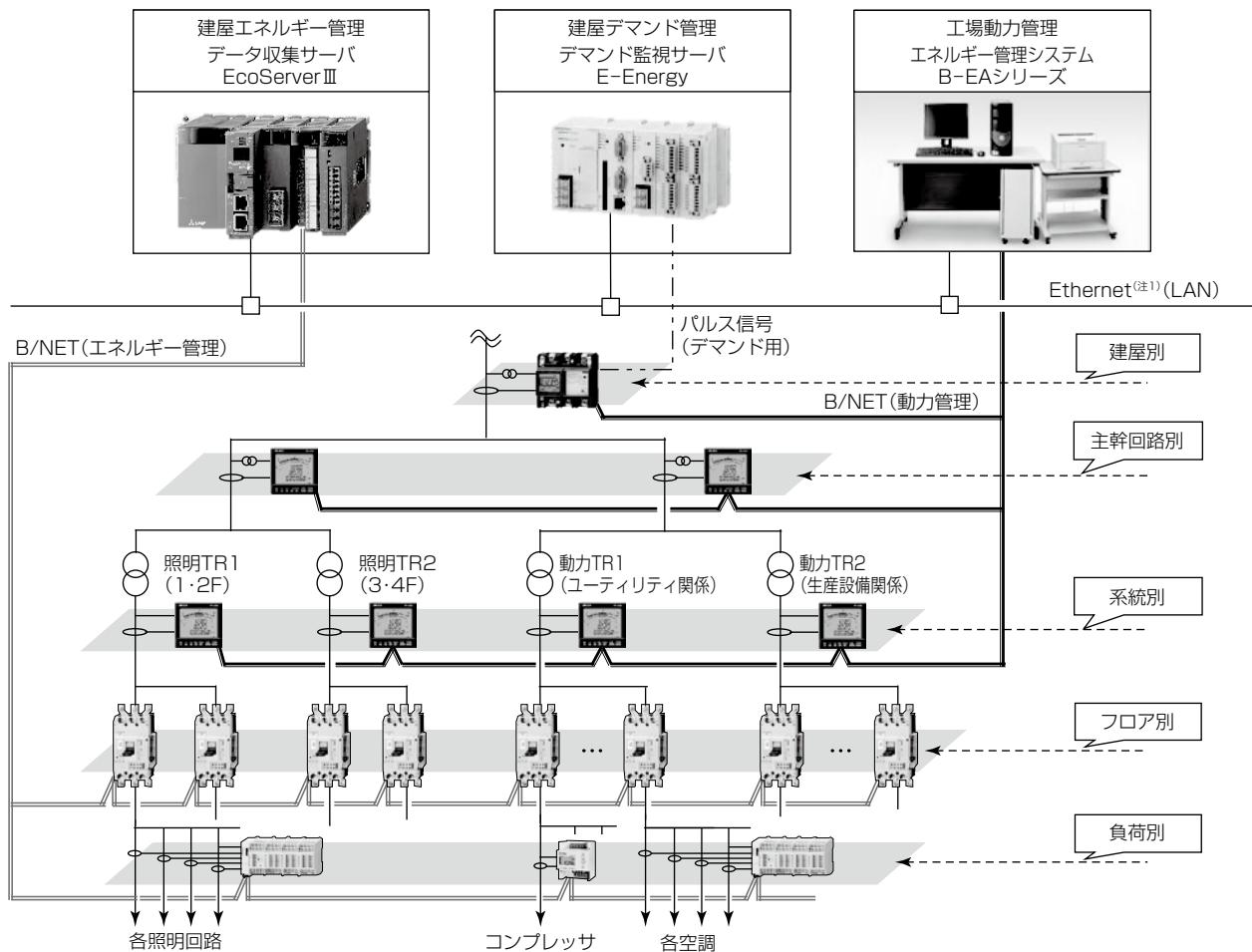


図2. 容量選定の考え方のイメージ



(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

図3. スマートメータ生産棟竣工時のエネルギー管理システム

のは難しく、与条件も建物・用途ごとに異なるため最適値の設定が困難であることが少なくない。そのため、過去の類似物件等の需要率を想定して設備必要容量を設計するが、その際に想定する需要率と余裕率の違いによって、選定される設備容量は、①余裕なし、②標準、③過剰のように大きく異なる(図2)。設計値に上乗せされる“過剰な余裕”(無駄)は、据付け時だけでなく長期の運用にわたって経済的・環境的な影響を残し続ける。

例えば、100/150/300kVA等機器ごとに定格容量が決まっている変圧器では、実運用時の最大需要電力(真値)が定格容量を超えないよう直近上位の容量を選定する必要があるため、過剰な余裕を加味してしまった結果、過大な容量を選定してしまう可能性がある。新設時は不確定要素が多くて把握困難な真値であるが、既設更新時は実運用データを計測することで把握することが可能になり、ライフサイクルでの経済的損失や環境への悪影響を低減できる。

3. 当所の省エネルギー活動事例

3.1 FEMSによる新生産棟のユーティリティ電力削減

2013年竣工(しゅんこう)のスマートメータ生産棟では、図3に示すエネルギー管理システムを建設時に導入して原単位等によるエネルギー管理を推進してきたが、組立て工場の特性上、照明・空調等のユーティリティ設備の固定工

エネルギーが半分程度を占めていた。一方で、当社エネルギー計測器に対して計測以外の付加価値を求める市場ニーズが高まっており、開発部門では“見える化・分かる化”から“できる化”へ進化させる必要性を感じていた。そこで、開発・製造・環境管理部門が連携し、賢く・快適に・使いやすいシステムをコンセプトにしたFEMS(Factory Energy Management System)の導入に取り組んだ。

3.1.1 生産設備電流監視による照明・空調の出力制御

一般的には、生産設備の出力信号を用いて発停を検知し、人感センサを用いて人の有無を検知する方法があるが、レイアウト変更によって設備や人の位置が変わるたびに、接

点信号線再敷設やセンサ移設などの改修が必要になる欠点がある。そこで、図4のようにエネルギーデータ収集サーバに取り込んだ生産設備ごとの計測電流値から設備停止及び作業者有無を検知し、シーケンサで照明・空調の出力を自動制御することで、非生産時の待機電力を削減した。

3.1.2 炭酸ガス濃度による排気ファンの風量可変制御

法定義務によって、人の有無によらず24時間連続運転していた換気装置(排気ファン)の固定エネルギーに着目した。

図5のように室内炭酸ガス(CO₂)濃度を常時計測し、最適化させるようシーケンサで演算し、排気ファンの風量(回転数)を可変制御することで節電を図った。

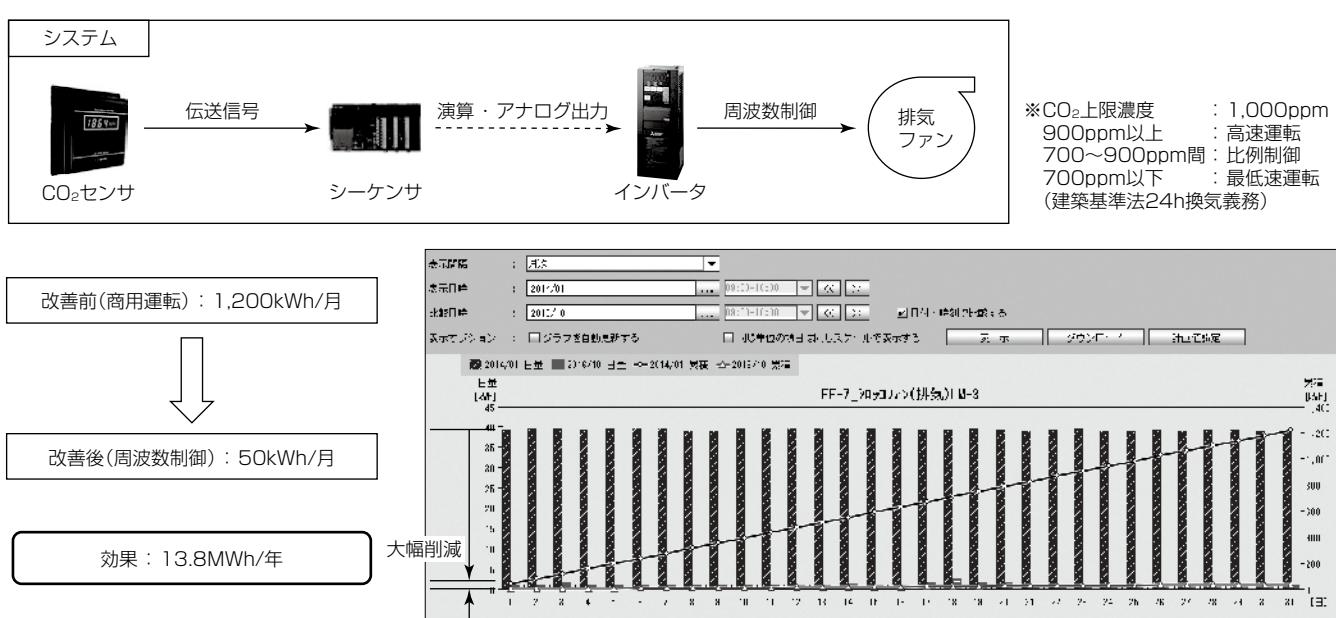
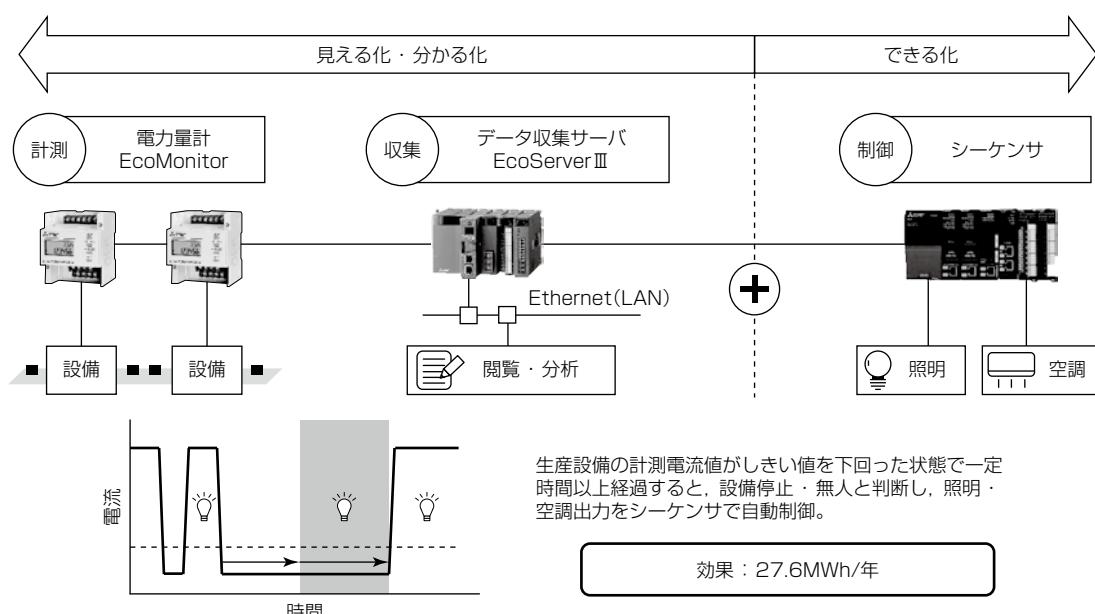




図6. EcoAdviserのダッシュボード画面例

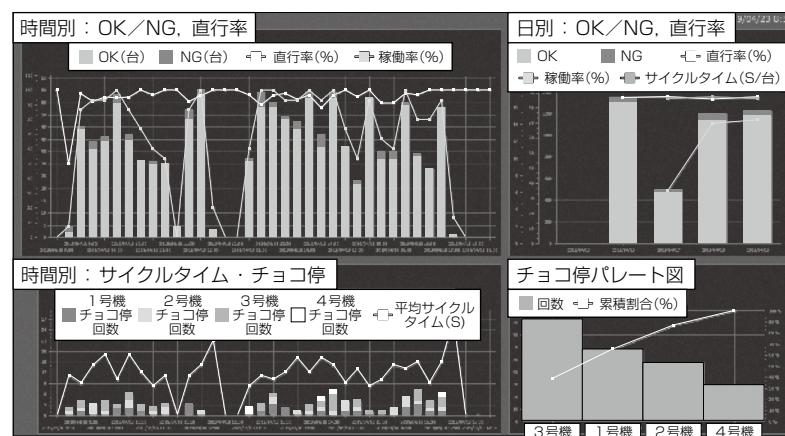


図7. EcoAdviserの工程別チョコ停情報等表示画面例

3.3 製造部門を主体にした生産設備等の改善活動

当所では、環境管理課(環境推進事務局)が主体の動力設備や空気圧縮機等の工場ユーティリティ設備の改善に加え、工場全体のエネルギー消費量の約50%を占める生産設備の省エネルギーを強化するため、2011年度に所内関係会社を含む製造部門担当者をメンバーにした省エネルギー推進委員会を発足し、生産設備等の改善に取り組んでいる(図8)。この活動では、省エネルギー推進委員の啓蒙(けいもう)(勉強会)に

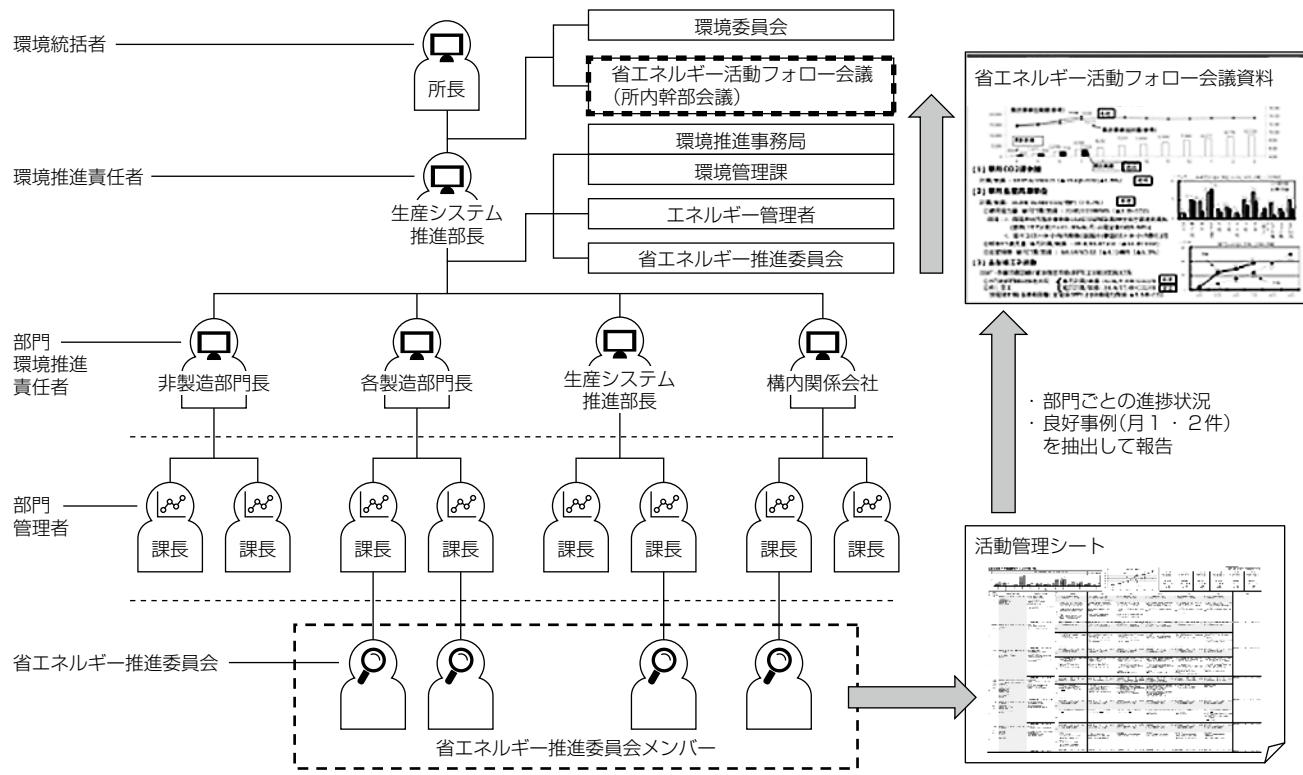


図8. 省エネルギー推進委員会の活動イメージ

表1. 良好事例(省エネルギーフォローアップ会議で毎月報告)

年月	改善事例	改善効果(年間)		
		kWh	m ³	kL
2015/04	稼働監視システム(電流監視)によるNC加工機のドカ停防止	4,502	–	1.2
2015/05	銘板重なりロス改善(○○総組ライン)他	20,616	–	5.3
2015/06	NG排出方法変更による生産性改善	3,246	–	0.8
2016/12	マグネットスイッチ追設によるマシニングセンタ付帯コンプレッサの間欠運転化	7,938	–	2.0
2017/01	チラー冷却水循環ポンプのインバータ化	33,814	–	8.7
2017/02	ブラックス補充管理の定量化によるロウ付け手直し削減	6,801	–	1.7
2017/03	油圧装置の劣化作動油交換による電力削減	1,588	–	0.4
2017/04	接続各設備停止確認による冷却水ポンプ夜間等停止	8,294	–	2.1
2018/02	金型温調構造最適化による○○成形ハイサイクル化	11,848	–	3.0
2018/03	安全弁修復による蒸気漏れロス削減	–	3,031	3.6

NC : Numerical Control

始まり、良好事例(表1)の水平展開、毎月の省エネルギー活動フォローアップ等によって、約10年にわたって省エネルギー改善を継続している。

3.4 その他の事例

- (1) 高効率機器への計画的な更新(変圧器・空気圧縮機・大型空調設備・照明器具等)
- (2) 空気圧縮機の吐出圧力・ボイラの蒸気圧力見直し(低減)による過剰エネルギーの削減
- (3) エア漏れ・スチームトラップ点検保修によるエネルギーロス削減
- (4) 空調制御システムのスケジュール制御による切り忘れ防止及びデマンド監視による出力制御
- (5) 中間期の空調機主電源OFF及び夏季の手洗い温水器電源OFFによる待機電力削減
- (6) 環境推進責任者による省エネルギーパトロール(2・8月)

3.5 工場全体のエネルギー原単位推移

ここまで述べてきた活動の結果、図9に示すとおり、工場全体のエネルギー原単位の改善率は31%を達成した。

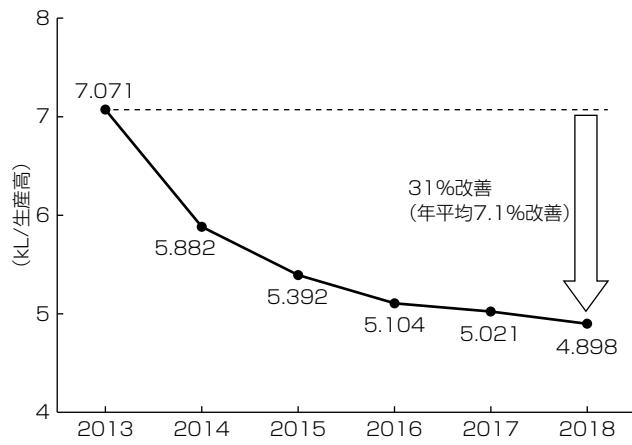


図9. エネルギー原単位推移

この実績とともに、たゆまず継続してきた活動が評価されて、2018年度エネルギー管理優良事業者等中国経済産業局長表彰を受賞した。

4. むすび

日本では1979年の省エネ法制定以来、省エネルギーの必要性が唱えられて久しく、工場の省エネルギーは乾いた雑巾を絞るようなものだという声を耳にすることが多い。しかし、世の中の情勢が常に変化し続けるように、工場の生産品目・人・設備・レイアウトは変化し、その変化のたびに改善すべき無駄が生じるため、省エネルギー活動に終わりはない。また、少子高齢社会に伴う就労年齢人口減少によって人手不足が深刻化する中、迅速かつ容易に改善を実行でき、変化にも柔軟に対応できる製品やサービスが求められる。このようなニーズに貢献できるよう、引き続き開発・製造・環境管理部門で連携し、当所の省エネルギー支援機器・ソリューションの価値向上に努めていく。

参考文献

- (1) 電気設備学会 地球環境委員会：電気設備システムの余裕と無駄に関する調査について、電気設備学会誌、30, No.6, 457~462 (2010)

混合プラスチック高度選別技術の進展と自己循環リサイクルの拡大

Progress of Advanced Sorting Technologies for Mixed Plastics and Expanding of Closed-loop Recycling

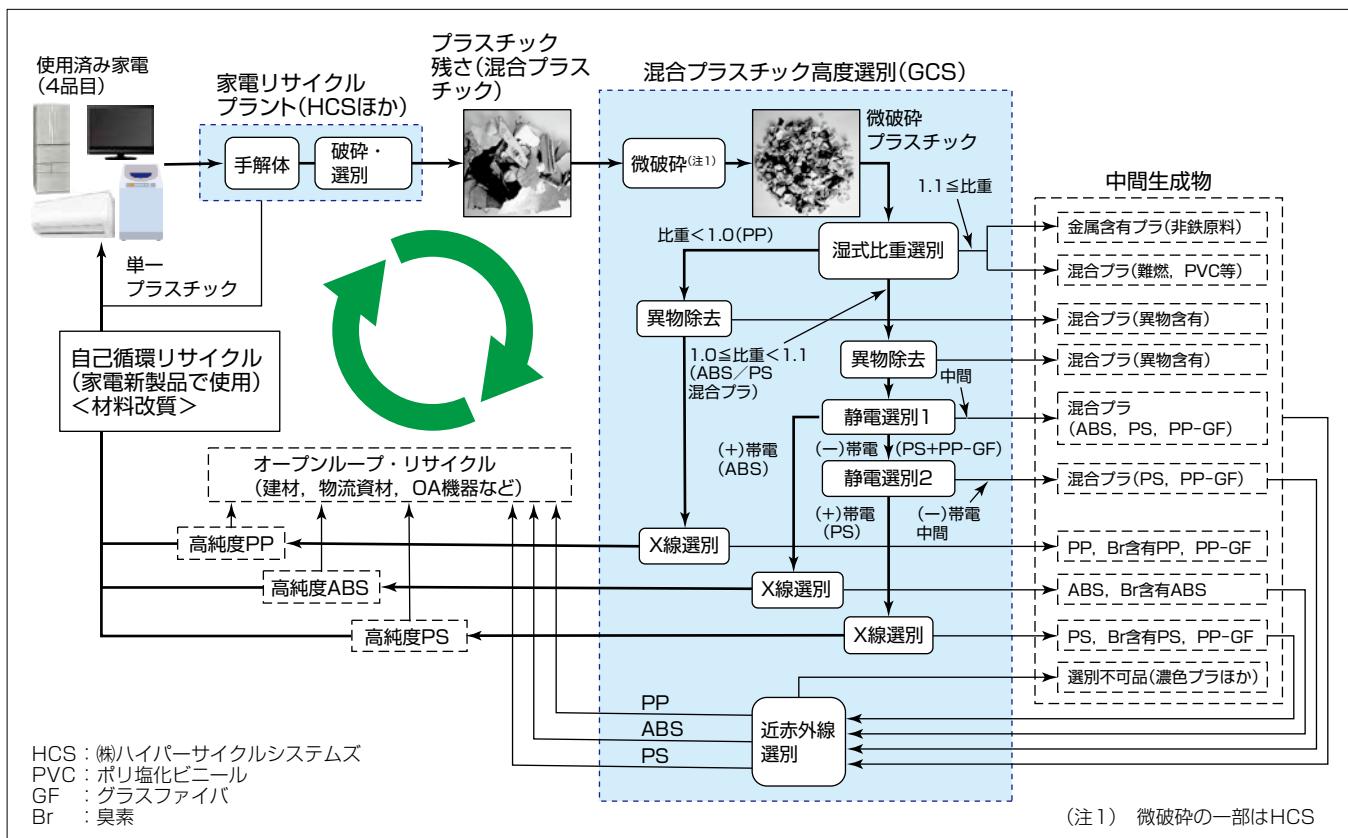
井関康人*
Yasuto Iseki
筒井一就*
Kazunari Tsutsui
中 慶朗†
Jiro Naka

要旨

三菱電機は、2001年4月の家電リサイクル法施行当初からプラスチックリサイクルを重要課題として位置付け、長年、技術開発に取り組んできた。その結果、リサイクルが困難であった破碎後の混合プラスチックから、ポリプロピレン(PP)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)、ポリスチレン(PS)を高純度に分離する技術を確立した。そして2010年4月、(株)グリーンサイクルシステムズ(GCS)で、年間15千トンの使用済み家電由來の混合プラスチックを処理する大規模なリサイクル事業を実現した。高品質な再生材を大量かつ安定的に調達可能になったことによって、回収プラスチックを自社製品に再利用する“自己循環リサイクル”的拡大が可能になった。

選別で、純度と回収率はトレードオフの関係にあるが、静電選別やX線選別の性能改善や選別工程で発生する中間生成物の再選別によって、高純度を維持したままで回収率の向上を実現した。また混合プラスチックは、混色で異物もゼロではないことから、意匠性や高い強度を求める部品には適用できなかった。色彩選別や様々な改質技術の導入によってこうした制約を補い、白色部品や難燃性、耐候性、耐衝撃性などが要求される部品への展開が可能になり、自己循環リサイクル量が飛躍的に増加した。

今後も技術を進展させ、環境配慮と経済性が両立する自己循環リサイクルの拡大を推進していく。



1. まえがき

近年、海洋プラスチック問題や中国に端を発してアジア諸国にまで広がっている廃プラスチック輸入規制等によって、国際的にプラスチックの3R(Reduce・Reuse・Recycle)への関心が高まっている。これを受け、国は、2019年5月に“プラスチック資源循環戦略”を立案し、3Rの推進に積極的に取り組むことになっている⁽¹⁾。

当社は、1999年にHCSで家電業界初⁽²⁾の商用家電リサイクルプラントを立ち上げて以来、プラスチックリサイクルを重要課題と位置付け、長年、技術開発に取り組んできた。その結果、最も再利用が困難であった破碎後の混合プラスチックから、PP、ABS、PSを高純度で選別する“高度選別技術”と、回収されたプラスチックを当社家電製品に再利用する“自己循環リサイクル”を確立し、2010年にGCSで事業化を実現した⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では、その後の混合プラスチック高度選別技術の進展と自己循環リサイクルの拡大について述べる。

(注2) 1999年5月12日現在、当社調べ

2. 混合プラスチック選別技術の進展

2.1 静電選別の高度化⁽⁴⁾

図1に静電選別の原理を示す。静電選別は、帯電工程と選別工程で構成される。帯電工程では、回転する円筒内で異種のプラスチックを衝突させる。各プラスチック片の表

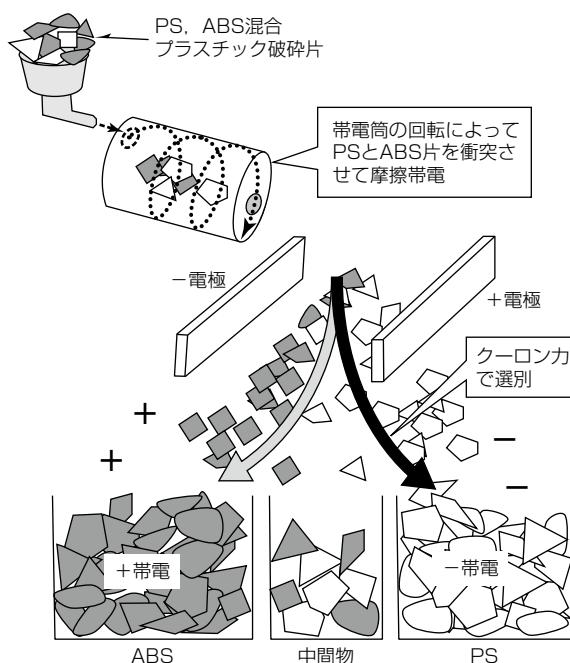


図1. 静電選別の原理

面は、帯電列に従って異なる極性の静電気を帯びる。選別工程では、直流高電圧を印加した電極間に帯電プラスチック片を落下させ、クーロン力によって軌道を変化させて回収箱に選別する。

静電選別は、選別対象に合わせて選別条件を最適化しないと安定した選別が難しい。当社では選別工程をモデル化し、高電界中の帯電片の軌道解析を行うことによって、電極形状や印加電圧の最適化を図り、回収率や純度などの選別性能を向上させている。図2に選別空間の電界及び軌道解析の例を示す。プラスチック片は、フィーダの右端から落下し、左右の電極(図2(a)中の白抜き部)間に生成された高電界中でクーロン力を受けて、図2(b)に示した軌道で落下する。電界強度が過剰であったり、フィーダからの飛び出し初速が大きすぎたりする条件では、選別電極への衝突が起こることがある。図2(b)では右側の電極に衝突した粒子が左側へ落下し純度を低下させていることが分かる。図3に落下位置分布の軌道解析結果と実測結果を示す。図3(a)は粒子の電極衝突がある条件での解析・実測結果を示す。図中の太矢印部が、衝突によって反対側に落ちた粒子の分布を示している。解析結果は、実測とよく整合している。図3(b)は、粒子の電極衝突がない条件での解析・実測結果を示す。衝突が解消され純度良く選別されていることが分かる。このような解析手法を用いて選別結果を予測することによって、純度や回収率等の向上を効率的に行うことができる。

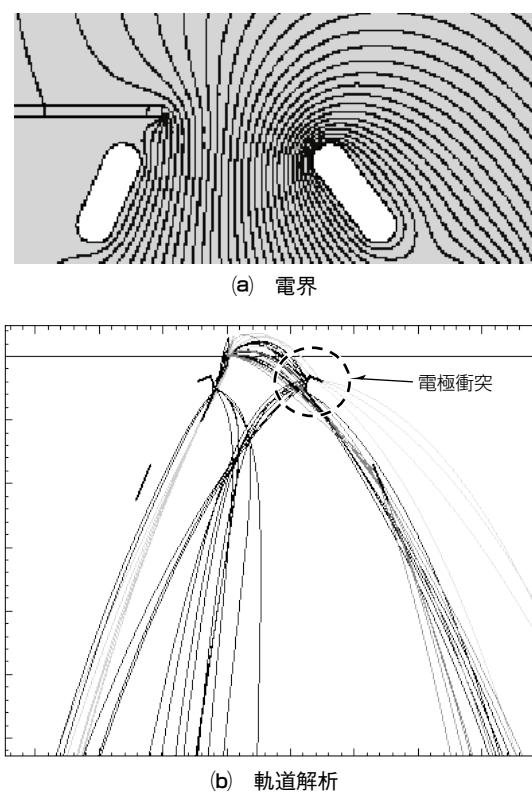


図2. 選別空間の電界及び軌道解析の例

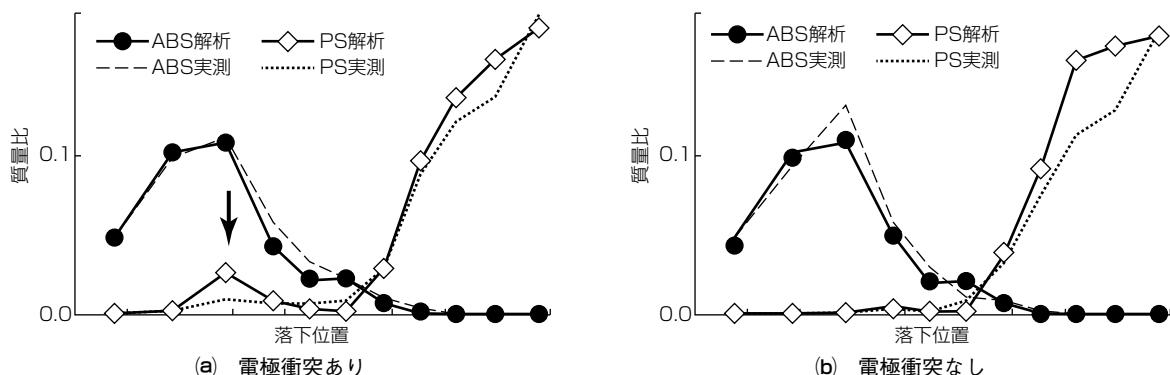


図3. 回収分布

2.2 異物除去の高度化

乾燥機能付洗濯機の水槽等には、高温時に剛性低下を防止するためグラスファイバ(GF)を15~20%程度添加したPP(PP-GF)が使われている。PP-GFがごく僅かでも混入すると、押出機でペレット化する際にGFが異物になってスクリーンの目に詰まって生産性が著しく低下するため、これを除去したい。PP-GFは比重が重く1.0を僅かに超えるため、湿式比重選別で $1.0 \leq \text{比重} < 1.1$ の比重帯に混入する。その後、静電選別工程で帯電列の違いを利用して除去される。しかしながら、PPとPSの帯電序列は近傍にあるため、PSの回収率を高めようすると、PP-GFがPSに混入して純度を低下させてしまう。混入したPP-GFを除去するため、RoHS対応で導入したX線選別を改良して、Br含有プラスチックとGF含有プラスチックの両方を検知して除去できるようにした。

従来Br含有プラスチックを除去するために利用していた長波長X線に加え、短波長X線も検出できるデュアル検出器を導入し、両X線の透過強度を基にプラスチック片の厚さばらつきの影響を排除することで、GF含有プラスチック

チック片を高精度に検出し、エア噴射で除去する。これによって、一波長での検出・除去に比べ、回収率を損なわずに回収プラスチック中のGF含有量を半分以下に低減可能にした(図4)。

2.3 中間生成物の再選別

選別精度と回収率の間にはトレードオフの関係があり、高精度で選別しようとすると、中間生成物が多く発生して回収率が低下する。このため、2.1節と2.2節で述べたように、個々の選別工程の技術改善によって精度と回収率の両立を図ってきたが限界がある。静電選別とX線選別の中間生成物は、前工程の比重選別や異物除去によってリサイクルを阻害する異物等が除去されており、PP、PS、ABSを主成分とする良質な混合プラスチックになっている。GCSでは、回収率向上のため2018年4月に近赤外線選別を導入し、この中間生成物からPP、PS、ABSを再選別している。市販の近赤外線選別は、処理能力が小さい上に濃色のプラスチックを選別できないという欠点があるため、選別の主幹に使うには不十分であるが、発生規模の小さい中間生成物の選別手段としては有効になる。これによって、

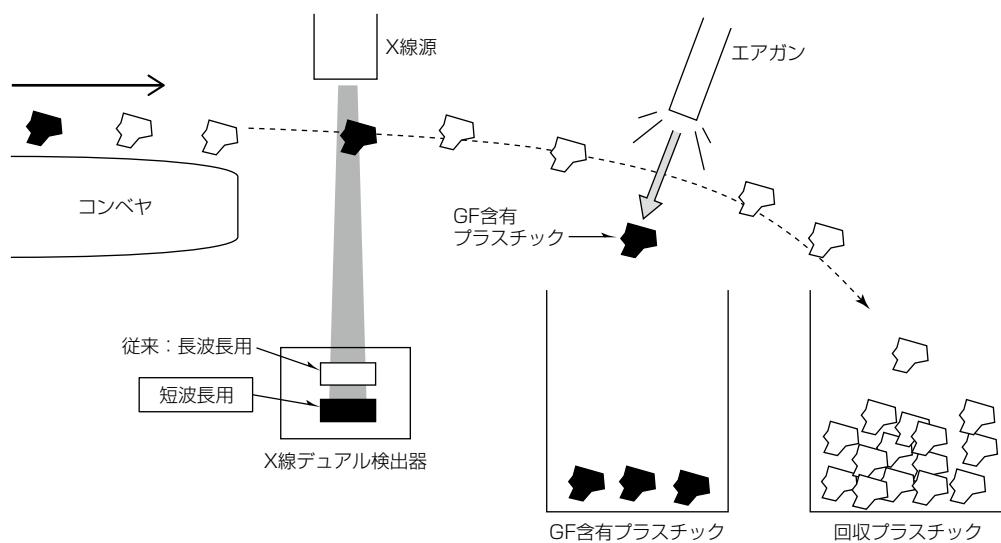


図4. デュアルX線選別

図5に示すとおりPP, ABS, PSの回収率が大幅に向上了した。なお、この近赤外線選別導入に当たっては、環境省の平成29年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(省CO₂型リサイクル高度化設備導入促進事業)を活用した。

2.4 品質管理の強化

RoHSが2019年7月に改正され、フタル酸エステル類の4物質が新たに規制対象物になった。リサイクル材は過去の様々な製品から回収されるため、サプライチェーンによる規制対象物の非含有保証は不可能である。GCSでは、事業開始当初から蛍光X線分析装置を導入し、サンプリング検査を行うことで非含有保証を行ってきた。

改正RoHSでフタル酸エステルが追加されたが、蛍光X線分析装置では検知できない。このため、GCSではIEC62321-8で新たにスクリーニング方法として採用された熱分解ガスクロマトグラフィー(Py-GCMS)(島津製作所:GCMS-QP2020NX)を2019年5月に導入し、フタル酸エステルにも対応している。Py-GCMSはポリ臭化ビ

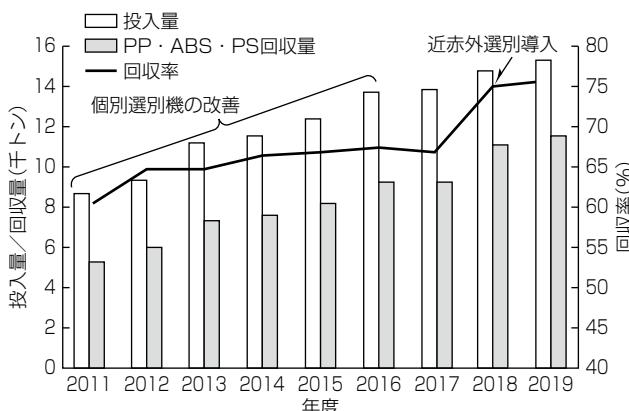


図5. 回収率の推移

フェニル(PBB), ポリ臭化ジフェニルエーテル(PBDE)も直接検知できるため、従来の蛍光X線でBr濃度を測定してスクリーニングする方法からPy-GCMSによるスクリーニングに切り替える予定である。

X線選別前のPP, ABS, PSの2019年5~12月のPy-GCMSによる濃度測定結果を表1に示す。フタル酸エステル, PBB, PBDE共にスクリーニング判定基準の500ppmを十分に下回っており非含有と判定できるレベルにある。

2019年5~10月のX線選別前後の蛍光X線によるBr濃度測定結果を表2に示す。X線選別前ではスクリーニング判定しきい値300ppmを上回る濃度が検出されるが、X線選別後は300ppmを下回っており非含有と判定できるレベルにある。一方、表1で示したとおり、X線選別前であってもPBB, PBDEは非含有であることから、X線選別で除去しているのはPBB, PBDE以外のBr系難燃剤を使用したプラスチックであることが分かる。PBB, PBDEは2006年にRoHS規制物質となり国内家電メーカーは使用を中止している。中止から既に12年が経過しており、家電リサイクル回収品に含まれるPBB, PBDEは今後も減少していくことを踏まえると、Py-GCMSの導入によって、将来的にはX線選別に依存せずにRoHSに対応可能と考える。今後更にデータを蓄積して検証を行う。

3. 自己循環リサイクルの拡大

混合プラスチックから選別されたフレークは、様々に着色されており、これを押出機で混練してペレット化すると灰色になってしまう。また、異物を完全に取り除くことはできないため、成形品の表面に黒点として露出して意匠性

表1. RoHS対象物質濃度測定結果

単位: ppm

分析方法	分類	物質名	RoHSしきい値	PP(N=105)			ABS(N=27)			PS(N=27)		
				平均	最大	3σ	平均	最大	3σ	平均	最大	3σ
Py-GCMS	フタル酸エステル	DIBP	1,000	3.2	7.9	4.2	2.4	5.4	5.0	0.0	0.0	0.0
		DBP	1,000	8.0	19.0	8.2	8.8	13.6	5.6	7.4	13.0	7.2
		BBP	1,000	1.0	59.0	20.0	16.0	63.9	44.0	18.0	26.0	24.0
		DEHP	1,000	35.0	54.0	24.0	54.0	169.0	94.0	94.0	281.0	175.0
	Br系難燃剤	PBB ^(注3)	1,000	0.4	20.0	7.3	0.2	6.7	3.9	0.0	0.0	0.0
		PBDE ^(注4)	1,000	13.0	288.0	126.0	17.0	165.0	128.0	9.0	121.0	89.0

(注3) DecaBB

(注4) Tetra~DecaBDEの合計

DIBP: フタル酸ジソブチル, DBP: フタル酸ジブチル, BBP: フタル酸ベンジルブチル, DEHP: フタル酸ジ-2-エチルヘキシル, DecaBB: デカブロモビフェニル, TetraBDE: テトラブロモジフェニルエーテル, DecaBDE: デカブロモジフェニルエーテル

表2. Br濃度測定結果

単位: ppm

分析方法	物質名	Br濃度基準 ^(注5)	サンプリング	PP(N=120)			ABS(N=120)			PS(N=120)		
				平均	最大	3σ	平均	最大	3σ	平均	最大	3σ
蛍光X線	Br	<300 ^(注5)	X線選別前	497	1,924	630	492	1,292	1,001	764	1,393	719
			X線選別後	151	223	90	143	257	153	106	242	95

(注5) スクリーニング判定基準

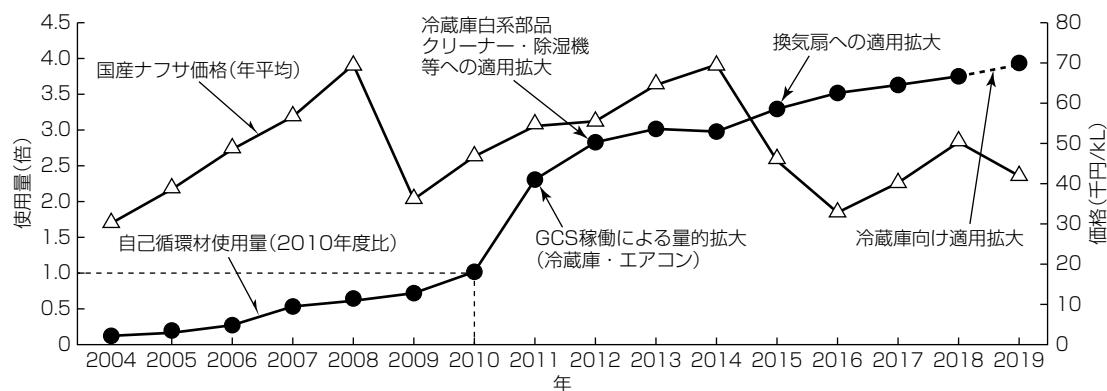


図6. 自己循環使用量及び国産ナフサ価格の推移

を損なう。また残存異物が破断の起点になりやすいため、衝撃強度が低下する。このような欠点があるため、適用可能な部品は、色が黒又は灰色の非意匠で、かつ高い強度を要求しない部位に限定されていた。自己循環リサイクルを更に拡大するために、本稿で述べたような選別技術の進展のほか、このような欠点を補う様々なプラスチック改質技術を開発し、意匠性や強度を要求する部位への展開を進めてきた⁽⁵⁾。

自己循環材の当社製品への使用量を、GCSが稼働したことによって、高純度のPP, PS, ABSを安定的に調達可能になり、冷蔵庫、エアコンを中心に使用量が飛躍的に増加した。2011年度には色彩選別機を導入し、白系PPフレークから白色ペレットを生成して冷蔵庫の白色系部品に適用することによって更に使用量が増加した。また、改質技術によって難燃性、耐候性、耐衝撃性などを付加することで、クリーナー、除湿機、換気扇などを含む幅広い製品群に適用範囲を拡大しており、年々使用量が増加している。

図6に国産ナフサ価格の推移を示す。ナフサ価格は原油価格にほぼ連動する。2008年のリーマンショックによって大幅に下落、以降回復するが、世界景気の不透明感、シェールガス／オイルの生産拡大による供給過剰などの影響によって2014年をピークに再び下落した。PP, ABS, PSのバージン材価格は国産ナフサ価格に連動して変動する。今後も原油価格の先行きは不透明であるが、枯渇資源であることを考えると長期的にはバージン材価格が高騰する可能性もある。

一方、自己循環材価格は製造コスト(人件費、動力費など)が大幅に変動しない限り変動しない。GCSのように大規模かつ高度な自動化設備によってコストを低減し、バージン材に対する価格優位性をある程度維持できるならば、価格変動リスクが少ないことは、需要側にとっても供給側

にとっても大きなメリットになる。

このように、技術の進展に加えて原油価格の変動に対しても安定した需給体制を維持できたことが、自己循環リサイクルの拡大に大きく寄与した。

4. む す び

サーキュラーエコノミー(CE)への移行が欧州主導で進みつつある⁽⁶⁾。これは、単なる環境政策ではなく、企業をも巻き込んだ経済・産業戦略となっている。日本の3R政策は決して世界に劣るものではないが、環境政策の域を超えるものにはなっていない。CEへの移行には、家電、自動車、OA機器などものづくりの企業がドライビングフォースとなって、3R技術やビジネスモデルを構築する必要がある。その点で、環境配慮と経済性を両立させた当社の自己循環リサイクルはCEの実践と言える。今後も引き続き技術を進展させ、自己循環リサイクルの拡大を推進していく。

この研究の一部は、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)によって実施したものである。

参 考 文 献

- (1) 環境省報道発表資料:「プラスチック資源循環戦略」の策定について
<http://www.env.go.jp/press/106866.html>
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 稲永康隆: プラスチックリサイクルにおける静電選別技術, 粉体技術, 7, No.8, 738~742 (2015)
- (5) 松尾雄一, ほか: 自己循環リサイクルでのプラスチック改質技術, 三菱電機技報, 91, No.12, 671~674 (2017)
- (6) 経済産業省 第5回 循環経済ビジョン研究会: 資料4-1 欧州のサーキュラー・エコノミー政策について
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/pdf/005_04_01.pdf

再生可能エネルギー導入拡大を支える蓄電池制御技術とその適用事例

Battery Control Technologies for Renewable Energy Penetration and their Application Cases

小島康弘*
Yasuhiro Kojima
清水恒夫†
Tsuneo Shimizu
熊野純一†
Junichi Kumano

1. まえがき

近年、低炭素社会実現に向けたエネルギー供給力の一つ、また国内のエネルギー安全保障を担うエネルギー供給力の一つとして、太陽光発電(PV: Photo Voltaic)、風力発電(WT: Wind Turbine)などの再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)の系統連系が加速している。一方、再エネは天候の影響を受けやすく発電量の変動が大きいため、電力品質の低下が懸念されている。図1にPV導入量の推

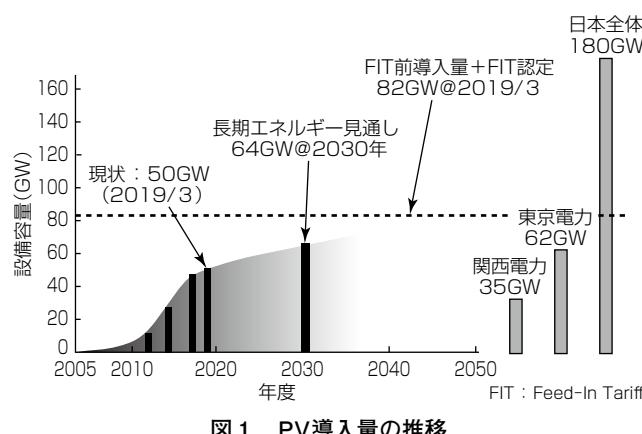


図1. PV導入量の推移

表1. 再エネ導入時に発生する電力品質課題

項目	イメージ	現象と課題
変動	PV出力変動例	出力は天候次第で出力調整が困難 ↓ 需給アンバランスの発生 周波数変動
余剰・不足	余剰発生 揚水発電 WT 火力 水力 原子力	軽負荷時にPVが高出力 発電予測は精度が低い ↓ PV発電の余剰 予測外れ時の供給力不足
電圧	電力 配電線 電力 需要 電力 逆流	需要家から系統に電力が逆流 ↓ 配電系統電圧の変動 電圧上限値を超過

移と、表1に再エネ導入時に発生する電力品質課題を示す。

本稿では、電力品質課題のうち、周波数変動や余剰・不足への対策として、再エネ導入拡大を支える蓄電池制御技術について述べる。需給運用は、系統全体の需要と供給のバランスを制御するもので、中長周期の需給計画で需給バランスを保つための制御対象機器の運転を決定し、短周期の需給制御によって系統の周波数を一定に保つ。また、実際の電力系統への適用事例として、令和元年度の新エネ大賞(資源エネルギー庁長官賞、新エネルギー財団会長賞)を受賞した二件について述べる。

2. 需給運用での蓄電池制御技術

2.1 需給運用システム

需給運用では、需要変動に対して火力発電・揚水発電など制御可能な発電機の運転台数と発電量を決定する。これによって需要と供給をバランスさせ、周波数の変動を適正範囲に維持している。需給運用システムは、大きく分けると需要予測機能、需給計画機能、需給制御機能で構成される。需要予測は、気象・地域特性に基づいた実績から回帰分析モデル等によって翌日の需要を予測する。この予測情報に基づいて、需給計画で一日を通じた発電機の起動停止を決定、さらに時々刻々と変化する需要に基づいてリアルタイムの需給制御が行われる。

しかし、電力系統に発電出力が不安定なPVやWTが大量に連系した状況では、需要の予測・監視に加え、PVやWTに対する発電出力の予測・監視、これらの変動に備えた需給制御が必要になる。再エネの出力変動には、瞬時の短周期の成分と、一日を通じた長周期の成分がある。このような不確定な需給バランスへの対策として、蓄電システムは蓄電池そのものの低コスト化という課題があるものの、建設候補地の確保のしやすさ、着工から運用開始までのリードタイムの短さ等から、揚水発電機の代替として期待される。

このように、従来の制御対象である発電機を新たなエネルギー貯蔵装置と協調を取りながら、PVやWTの発電を最大限活用する高度な需給制御の実現が求められている。

図2に蓄電池を活用した需給制御技術の概念図を示す。次に、再エネ大量導入に対応するための、蓄電池制御技術を述べる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2.2 再エネ導入拡大に対応した中長周期需給計画

需給計画では、一日分の需要予測・再エネ発電予測に合わせて発電機の起動停止状態と出力を最適化する。

(1) PV発電出力予測技術

需給計画を立案するには翌日の需要予測が重要だが、PV導入の拡大を受け、翌日の再エネ発電量の予測も重要な一つである。図3にPV発電出力予測の概念図を示す。図のように、大気外での日射量は緯度・経度・日時を与えることで算出が可能である。一方PV出力に大きく影響を及ぼすのは地表面での日射量となる。気象事業者から提供される数kmメッシュ・1時間の分解能で将来の雲量の数値を用いて、地表面での日射量を予測し、対象地点・地域でのPV導入量を考慮することで、対象地点・地域のPV発電量予測値を得ることができる。

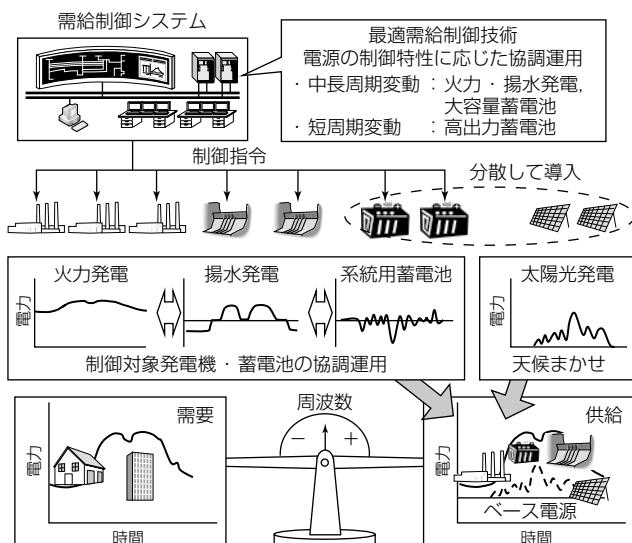


図2. 需給運用での蓄電池の活用

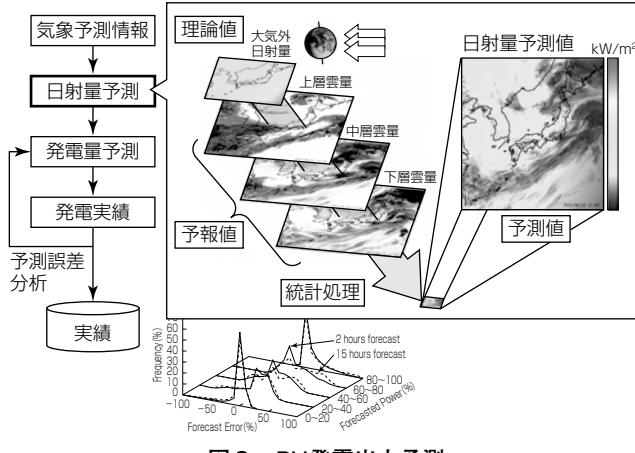


図3. PV発電出力予測

一般にPV発電量のような自然変動電源の予測値は需要予測値に比べて予測誤差が大きい。したがって、再エネ予測情報と合わせて、過去の予測と実績を統計分析することで、どの程度の信頼度の予測なのか、予測外れの場合は最大どこまで外れるかという情報を合わせて提供することにした。このような仕組みは需要予測でも同様に重要になる。

(2) 需給計画・需給制御技術

需要や再エネの一日を通じた大きな変動には中長周期の需給計画・需給制御で対応する。需要・再エネ出力の予測結果に基づき、制御対象である複数の効率特性の異なる内燃力発電機と蓄電池の出力を最適配分する。この問題は、図4に示すように内燃力発電機の運転状態を決定する離散値最適化問題に、内燃力発電機の起動停止を既知として内燃力発電機と蓄電池の出力配分を決定する連続値最適化問題が内包されている。

外側の問題は発電機の起動停止状態（離散値）を制御変数として、各種の運用制約のもとで発電コストが最小になる運転状態を決定する。内包される問題は運転中とされた各発電機出力を制御変数として、需要と供給のバランスを保つという制約条件の下で発電コスト最小になる出力（連続値）を決定する。再エネ拡大対策としては、再エネ出力予測が外れた場合にも供給支障を発生させないための適切な予備力・下げ代の確保と、短周期変動に対する調整力確保を、需給計画段階で考慮することが必要になる。

2.3 蓄電池制御による系統安定化

離島などの小規模系統では、本土系統に比べて発電機の慣性力が小さいこと、再エネのならし効果が期待できないことから、再エネ導入時に周波数問題が発生しやすい。

このため、離島の周波数を運用目標値内に維持するための蓄電池の有効電力制御として、周波数変動を検出する△F方式に追加して、新たに連系線潮流変動を検出する△P

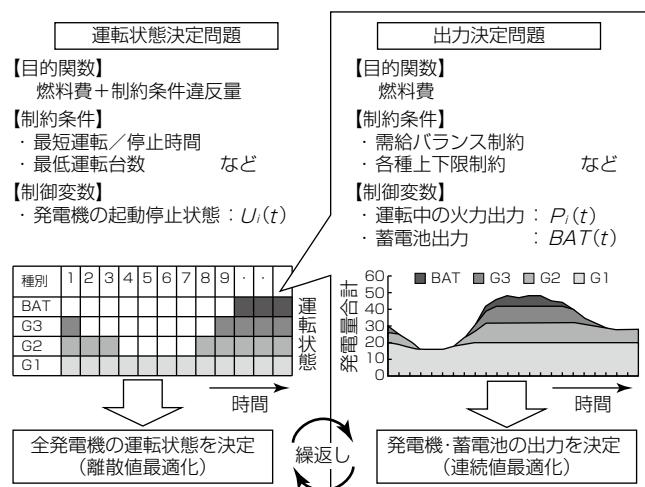


図4. 蓄電池を考慮した需給最適化

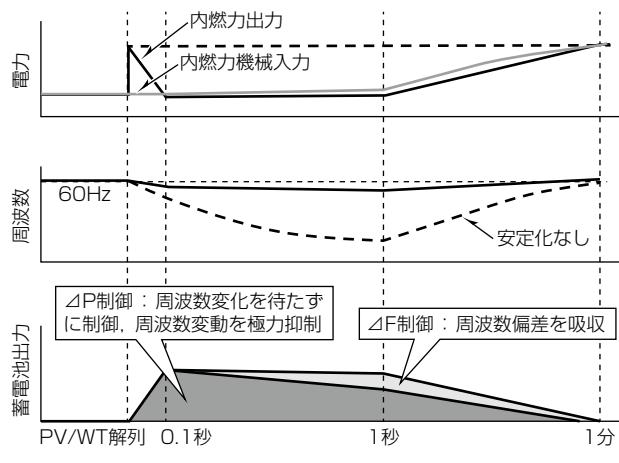


図5. 蓄電池による△F制御+△P制御

制御を開発した。これらは単独でも使えるが、図5のように△F制御+△P制御として組み合わせることも可能である。

(1) △F制御

基準周波数との偏差に応じたフィードバック制御であり、従来の制御手法である。この方式は、周波数偏差が需給アンバランスによって発生することに基づいている。どのようなケースでも正しく動作するというメリットがあるものの、周波数偏差が発生しなければ制御できないため、△P制御に比べると制御動作は遅くなる課題があった。

(2) 連系線△P制御

離島系統では、再エネの出力変動は、離島系統の供給力である内燃力発電機の出力を変化させる。一方、発電機の燃料供給量は即座には変化しないため、内燃力発電機では機械入力と電気出力のアンバランスが発生して回転速度が変化し、その結果、周波数変動が発生する。△P制御は、発電機が接続する送電線潮流を計測することでアンバランス量を直接とらえ、その短周期変動成分を蓄電池で分担することで、周波数変動を抑制する。

3. 蓄電池導入量の検討

2章で述べたように、再エネ導入に対して蓄電池制御技術の適用は有効である。一方で、その効果や経済性についての考慮も必要になる。

一般的に、蓄電池導入に関わる費用は、蓄電池の導入量に比例する。それに対して電力品質の向上や燃料費削減効果は蓄電池導入が低い場合は効果が導入量に比例するが、導入量がある程度増えるとその効果は飽和していく。図6にその概念図を示す。図から、蓄電池の導入量には最適値が存在することが明らかである。

導入コストの算定には、必要になる制御要件や運用・保守条件から蓄電池の種別やメーカーの選定が重要である。また蓄電池の効果の算定には、導入時の制御仕上がりや経

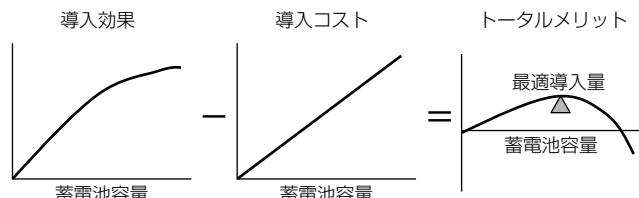


図6. 蓄電池導入メリットの考え方

済性など各種のシミュレーション結果を複合的に判断する必要がある。

4. 導入システム例

4.1 離島マイクログリッド用蓄電システム

電力系統が本土とつながらない離島では、天候によって出力が大きく変動する再エネ導入は電力品質の面で課題がある。この課題に対処するために、中国電力(株)の隠岐ハイブリッドプロジェクトでは、NaS(ナトリウム・硫黄)電池とリチウムイオン電池から構成されるハイブリッド蓄電システムが採用された。一日を通じたゆっくりとした大きな変動には時間容量の大きなNaS電池、再エネの早くて小さい出力変動には高出力が可能なリチウムイオン電池と、特性の異なる2種類の組合せによって設備導入コストの低減を図っている。図7に隠岐ハイブリッドプロジェクトの設備を示す。なお、このプロジェクトは平成26年度の環境省実証事業であり、2015年9月から3.5年間の実証運用期間を経て、現在も運用を継続している。

当社はこのプロジェクトの中で、最新の需給運用技術を適用したエネルギー管理システム(EMS)の開発及び納入と、2種類の蓄電システムの納入を担当した。このEMSでは、2.2節の中長周期需給計画並びに2.3節の蓄電池制御技術を採用し、ハイブリッド蓄電池と既存の内燃力発電機を制御対象にして、離島全体の需給の一体運用を実現した。ハイブリッド蓄電システムを用いた需給制御結果の一例を図8に示す。図から、再エネの短周期出力変動に対してはリチウムイオン電池が、日中のPV出力余剰に対してはNaS電池がそれぞれ動作し、既存内燃力発電機の出力は極度に低下することなく、また比較的緩やかに制御されていることが分かる。

この取組みによって、隠岐諸島では電力品質を確保しながら(周波数滞在率の向上)(図9)、最低需要約9MWに対して、再エネ導入量は約2.3MWから8.0MWまで拡大できた。またこの実績から、令和元年度の新エネ大賞では日本初の最新技術を活用して地域一体での再エネ導入拡大に貢献したとして導入活動部門で資源エネルギー庁長官賞を受賞している。

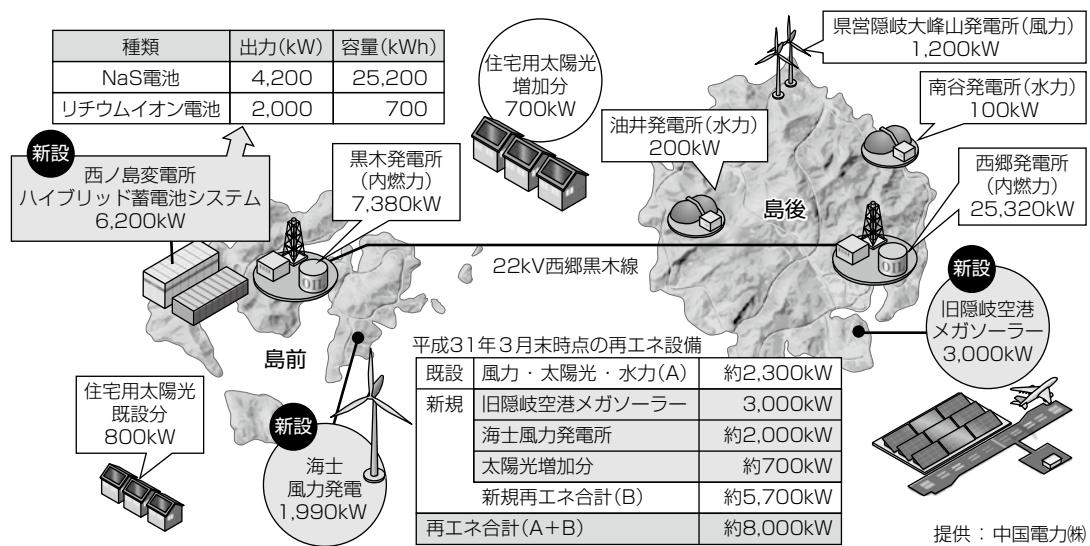


図7. 隠岐ハイブリッドプロジェクトの設備

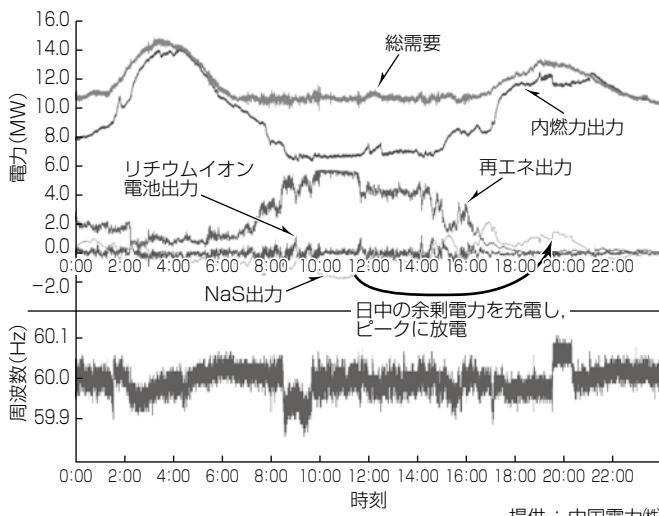


図8. ハイブリッド蓄電システムの需給制御結果例

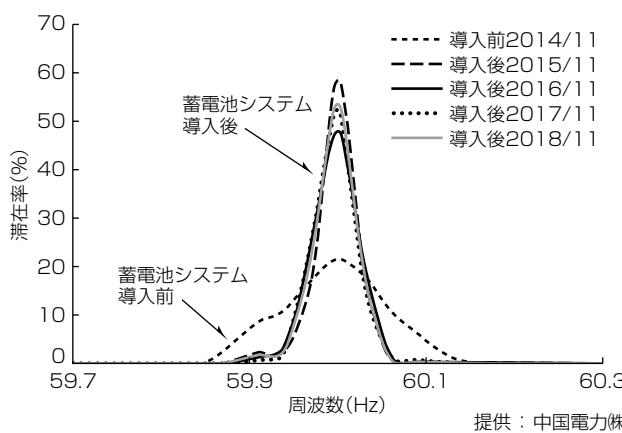


図9. 蓄電システム導入前後の周波数滞在率

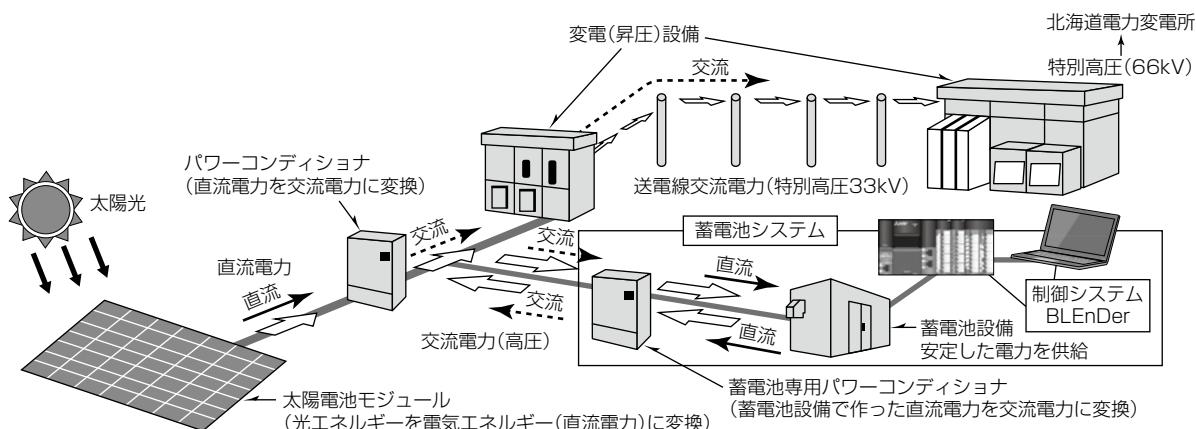
容量が小さいため、2,000kW以上のPV発電所に対しては、系統との受電点での電力変化の1分間当たりの変化量を、PV定格の1%以内に抑えるという系統連系要件がある。(株)大林組取りまとめの系統連系用蓄電システムでは、17.9MWのメガソーラー(インバータ出力は14.5MW)に対し、リチウムイオン電池(10MW, 6.75MWh)による連系用蓄電システムを構築した(図10)。この中で当社は最適な蓄電池容量の算定、系統連系協議支援、並びに系統連系用蓄電池制御システムと蓄電池用インバータ納入を担当した。

当社の開発した系統連系用蓄電池制御システムでは、PV出力変動によって変化する受電点電力を高速で計測・制御演算し、蓄電池の充放電制御によって平滑化する。系統連系要件の実現は、蓄電池容量(kWh)が大きいほど容易であるが、事業性の面では蓄電池容量を抑える必要がある。このため、蓄電池が満充電に近い場合は太陽光発電の出力抑制も併用することで、必要蓄電池容量を削減している。このような制御ロジックを年間シミュレーションで確認し、蓄電池容量の最適化を行っている。トータルメリットの評価の一例を図11に示す。この結果から導入する蓄電池容量、インバータ容量ともメリットの最適点が存在することが分かる。なお、実際の蓄電池容量選択には制御特性の制約条件も考慮している。

このシステムは、2017年4月から運用を開始し、現地天候の傾向や運用結果を反映して、制御パラメータを適宜チューニングすることによって、制御性能の改善を図っている。図12に制御結果の一例を示す。図に示すとおり、PVの急激な出力変動に対して、蓄電池を高速に充放電制御することで、発電所合計電力の変化率を規定の範囲(定格の1%以内/1分)に抑えられていることが分かる。

4.2 再エネ系統連系用蓄電システム

北海道では、再エネの潜在的導入可能量に対して系統



提供: OCE釧路町メガソーラー(株)

図10. 統系連用蓄電システムの全体像

発電可能電力量と蓄電池導入コストの差分で10年間のメリットを評価
⇒蓄電池容量増加はすぐに効果が飽和するが、インバータ容量はある程度
増やしても導入効果が持続する

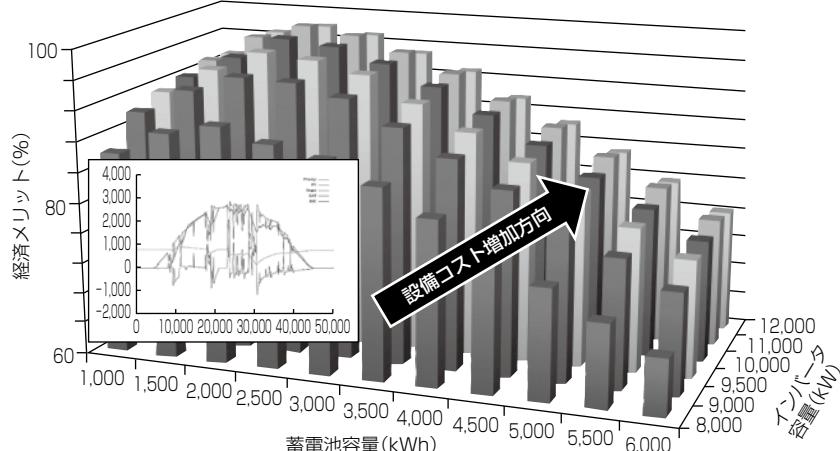


図11. 経済性評価シミュレーション結果例

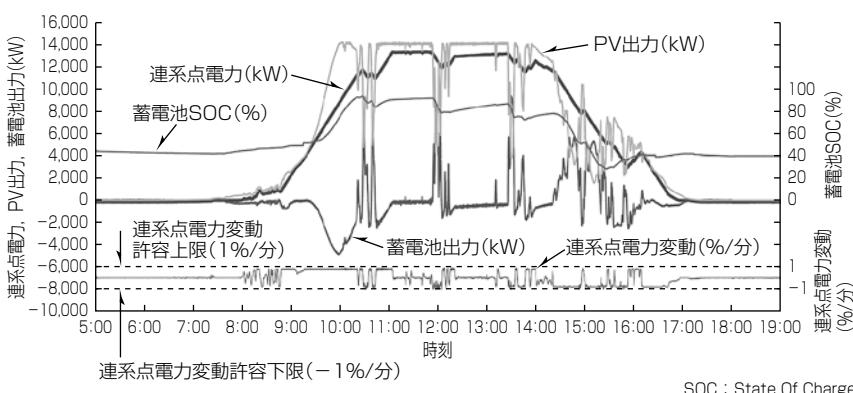


図12. 統系連用蓄電池制御システムの制御例

5. む す び

再エネの系統接続によって発生する系統運用上の課題に対し、特に需給運用面での対策として蓄電池を活用した制御技術について述べた。どれも所望の結果が得られており、

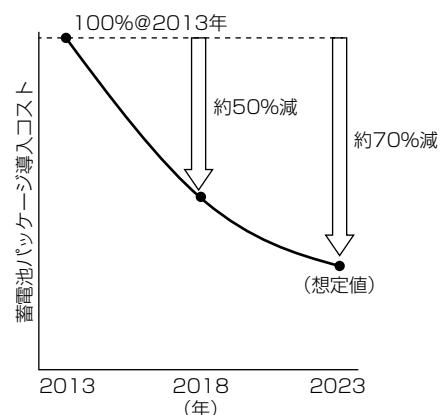


図13. 蓄電池パッケージ導入コストの想定推移

再エネの大量導入時にも電力網を安定に制御でき、安心・安全な電力供給の維持と低炭素化社会の実現に貢献できると考えている。

また、今後の蓄電池ビジネスの発展にはシステム構築費用の低減が重要である。図13に蓄電池パッケージの導入コストの想定推移を示す。EV(Electric Vehicle)導入拡大を受け、この10年間で約70%のコスト低減が見込まれており、今後は蓄電システムを含めた再エネ事業がビジネスとして成立することを示唆するものである。

参 考 文 献

- 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)
- 小島康弘、ほか:再生可能エネルギー導入のための系統用蓄電池システム、日本電機工業会機関誌「電機」、771, 11~14 (2014)
- 小島康弘、ほか:再生可能エネルギーの系統接続技術、三菱電機技術報、88, No.12, 773~776 (2014)
- 小島康弘:再生エネルギー導入を支える蓄電池制御技術、計測と制御、55, No.7, 609~612 (2016)

持続可能な社会に向けた 電力用変圧器への植物油適用

Application of Vegetable Oil to Electric Power Transformers
for Sustainable Society

西村亮岐*
Ryoki Nishimura

加藤福太郎*
Fukutaro Kato

岩本直樹†
Naoki Iwamoto

吉田成是†
Shigeyoshi Yoshida

1. まえがき

近年、国連のSDGs(Sustainable Development Goals)に代表されるように、各所で持続可能性に対する関心が高まっている。その中で、三菱電機では多種多様な電力機器を製造しており、エネルギー分野でも持続可能な社会に向けて電力流通システムの開発に取り組んでいる。

従来の電力用変圧器では、内部の絶縁油として、有限な資源である石油由来の鉱油が主に使用されてきた。一方、世界的に、環境配慮及び防災性の観点から、植物を基材にした絶縁油(以下“植物油”という。)の適用が進んでいる。当社では、植物油を使用した三菱植物油入変圧器“MELCORE-NEO”を2016年に開発し、次世代の変圧器として公共施設、産業、交通分野への市場投入を進めている。

本稿では、MELCORE-NEOの特長、最新の技術動向及び適用事例について述べる。

2. 絶縁油の特性

2.1 植物油

植物油は、植物の実又は種子から抽出・精製することで作られており、抽出された後の粕(かす)は飼料として有効に用いられている。表1に植物油と鉱油の物性値を示す。

それぞれの項目で鉱油とは異なる特性を示しており、これらの特性の違いから、従来の鉱油入変圧器とは異なる設計・保守管理基準が必要になる。例えば、絶縁面では、比誘電率が高いことで、絶縁油側の電界集中が抑制でき、絶縁紙を含めた複合絶縁全体の耐電圧は高くなる。当社では、

表1. 植物油と鉱油の物性値

項目	植物油	鉱油	条件
密度(g/mm ²)	0.92	0.88	@15°C
動粘度(mm ² /s)	34	8	@40°C
引火点(°C)	>320	152	開放式
生分解度(%)	99	23	OECD301b
比誘電率	2.9	2.2	@80°C

これらの特性について解析や試験等を実施することで、変圧器設計基準を策定している。

2.2 カーボンニュートラル

植物油は、基材となる植物の発育時にCO₂(二酸化炭素)を大気から吸収するため、ライフサイクル全体の排出CO₂等価量が約90%削減される試算が示されている(図1)^(注1)。特に、当社が適用している植物基材の絶縁油は、カーボンニュートラル(BEES(Building for Environmental and Economic Sustainability)4.0)の特長を持っている(図2)。

(注1) NIST : Determining the Environmental Preferability of a Biobased oil(2002)

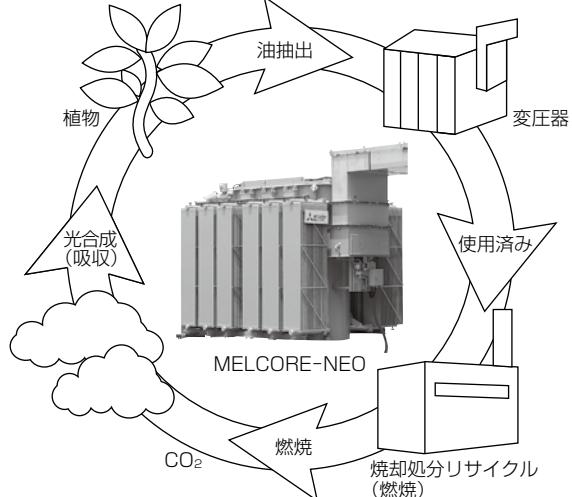
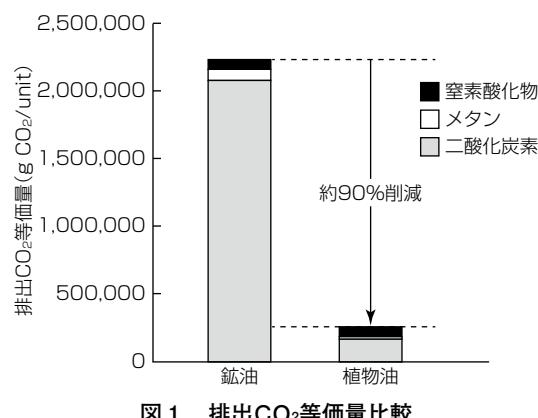


図2. 植物油のカーボンニュートラル(イメージ)

2.3 生分解性

表1から、植物油の生分解度は鉱油に比べて約4倍と、万が一土壤に漏洩(ろうえい)した場合でも、速やかに分解される特長を持っており、環境リスクを低減できる。また、水生生物に対する影響度を検証する魚類急性毒性試験(OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development)203)でも、エコマーク認定基準をクリアしている。

2.4 防災性

表1から、植物油は引火点が鉱油に比べ非常に高いことから、火災のリスクを低減する。この安全性が一部の企業向け保険会社に認められ、植物油入変圧器を使用する工場の保険料を割安にするといった事例もある。変圧器は、市街地やビル内に設置されることも多く、居住環境への配慮という面からも、植物油入変圧器は優れた特長を持つ。

3. 技術動向

変圧器に用いる絶縁油は、電気的な絶縁の役割、並びにコイルといった発熱体に対する冷却の役割を担っている。また、変圧器運転時の異常を診断する上で、絶縁油を採油・分析する方法が一般的であり、これらの技術を発展させることが高品質な変圧器を提供する上で重要であり、当社では日々技術の蓄積を行っている。次に取組み内容について述べる。

3.1 絶縁特性

絶縁油と絶縁紙で構成された、変圧器を模擬した複合絶縁モデルでインパルス絶縁試験を行うことによって、絶縁に対する検証試験を実施した⁽¹⁾。絶縁試験モデルを図3、試験結果を図4に示す。図4から、植物油の部分放電発生電圧(Partial Discharge Inception Voltage: PDIV)は鉱油に比べて約20%高い値であることが分かる。これは2.1節で述べたとおり、絶縁油と絶縁紙の比誘電率が植物油では高く、絶縁油の電界集中が抑制されたためと考えられる。このような検証試験を積み重ね、さらに電界解析手法を用いて、絶縁に関する設計手法を確立している。

3.2 冷却特性

鉱油に比べ、冷却に関わる密度、動粘度、比熱が異なり、これらを考慮した設計を行う必要がある。この点に対し、図5に示すような変圧器を模擬したモデルを構築し、検証試験及び解析(図6)との評価を行うことで、植物油の冷却特性把握を実施した。これらの要素モデルで得られた

知見を基に、変圧器内部での油の流れを詳細にモデル化し、油の流路を適正化することで、従来に比べて冷却特性の10%改善を達成した。

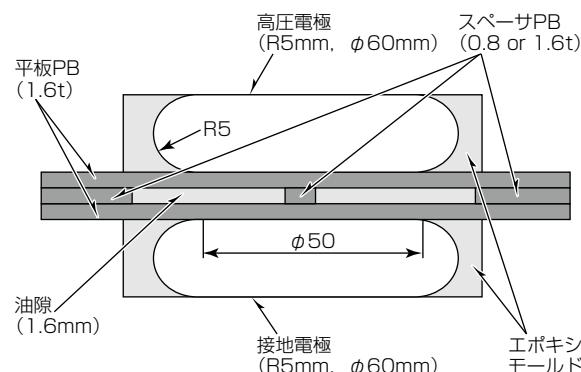


図3. 絶縁試験モデル

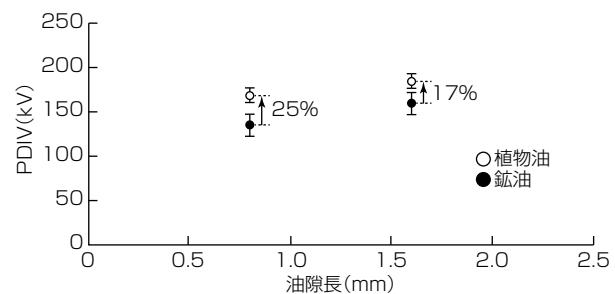


図4. 部分放電特性の比較

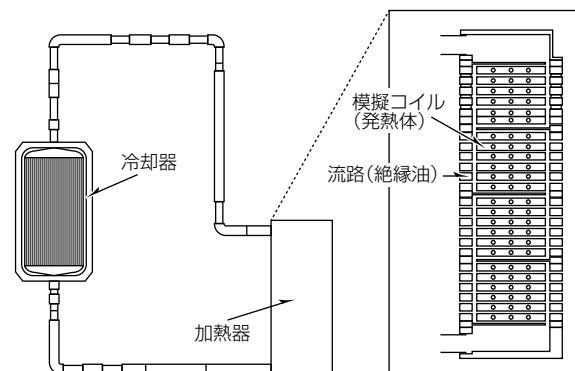


図5. 冷却試験モデル



図6. 熱流体解析結果例(異なる流路による温度分布)

3.3 診断技術

変圧器は期待寿命が30年であり、非常に長期間使用されることを想定している。また、一度使用されると内部の確認は容易ではなく、外部からの限られた方法で状態監視を行う必要がある。このような状況で、鉱油入変圧器では状態監視方法として、絶縁油中のガス分析が一般的に用いられており、変圧器の保守・更新の指針として用いられている。

変圧器内部で異常(放電、過熱)が発生した場合、変圧器を構成する絶縁物及び絶縁油などが分解することによってガスが発生し、絶縁油中に溶解する。鉱油と植物油では組成が異なるため、植物油を使用する場合、従来の鉱油の診断指針ではなく、植物油入変圧器に対応した植物油のガス発生特性を把握する必要がある。当社では、製品納入後の運用を見据え、植物油入変圧器の異常診断技術確立にも取り組んでいる⁽²⁾。

図7に、異常時の2種類のガス発生の組成比からなる、異常診断図の一例を示す。フィールドの変圧器の場合、経年劣化など異常以外の要因で発生するガスは異常診断の妨害要因になる。これらの妨害要因の影響低減のため、2種類のガスの組成比からなる異常診断図を構築することで、高精度に異常診断が可能になった。

また、当社ではこのガス分析をリアルタイムで監視するため、IoT(Internet of Things)技術を活用した、無線通信方式でのオンライン油中ガス分析装置のシステムを提案

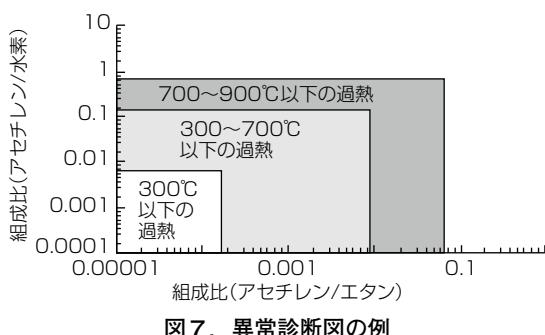


図7. 异常诊断图の例

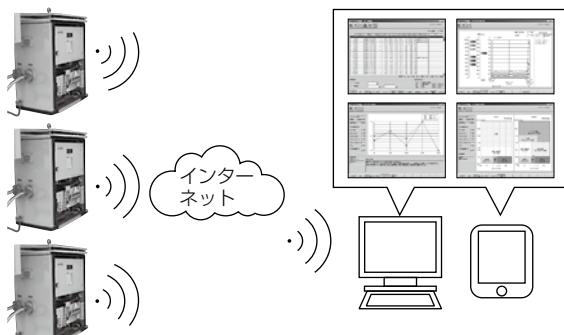


図8. オンライン油中ガス分析装置のシステム構成例

表2. 納入実績

納入年(年)	2017	2018	2019	2020
納入台数(台)	2	9	8	10(見込み値)



図9. 植物油入変圧器(3相 60Hz 20MVA 77kV/6.6kV)

しており、その構成例を図8に示す。変圧器内部の絶縁油を常時監視するため、停電、採油の手間がなく、信頼度の高い診断を実現できる。このシステムはMELCORE-NEOにも適用可能である。

4. 納入実績

当社では、MELCORE-NEOの開発が2016年に完了後、2017年5月に初号器を納入し、その後も環境配慮の点で評価され、鉄道、空港、産業施設など、納入実績を重ねている(表2、図9)。このような需要拡大に応えるため、MELCORE-NEOの製造に特化した生産設備の導入を進めており、無圧密封式コンサベータ及び負荷時タップ切替器等、対応できる仕様範囲を広げることで、顧客ニーズに応える体制を整えている。

5. むすび

鉱油を用いた変圧器は100年以上の歴史があるが、現在はまさに転換期になっている。SDGsに代表されるように持続可能性や環境配慮の観点から、植物油の需要は高まっており、植物油を使用した変圧器は既に世界で100万台以上導入されている。今後もこの需要は拡大していく見込みであり、当社では、より広い領域で植物油入変圧器の開発・製造と診断技術の確立に取り組み、環境配慮と安定した電力供給の両立を実現する。

参考文献

- (1) Yamada, T., et al.: Discharge Characteristics with Impulse Voltage Application in Ester Oil/Pressboard Composite Insulation System, IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids, S8-4 (2019)
- (2) Kuriyama, R., et al.: Investigation of Indicator Gas for Internal Fault on Ester Oil-immersed Transformer, International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance 2017, #123 (2017)

膜洗浄にオゾン水を用いた 膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”

Membrane Bioreactor "EcoMBR" Using Ozonated Water for Membrane Cleaning

林 佳史*
Yoshifumi Hayashi

後藤伸介†
Shinsuke Goto

今村英二*
Eiji Imamura

安永 望†
Nozomu Yasunaga

要旨

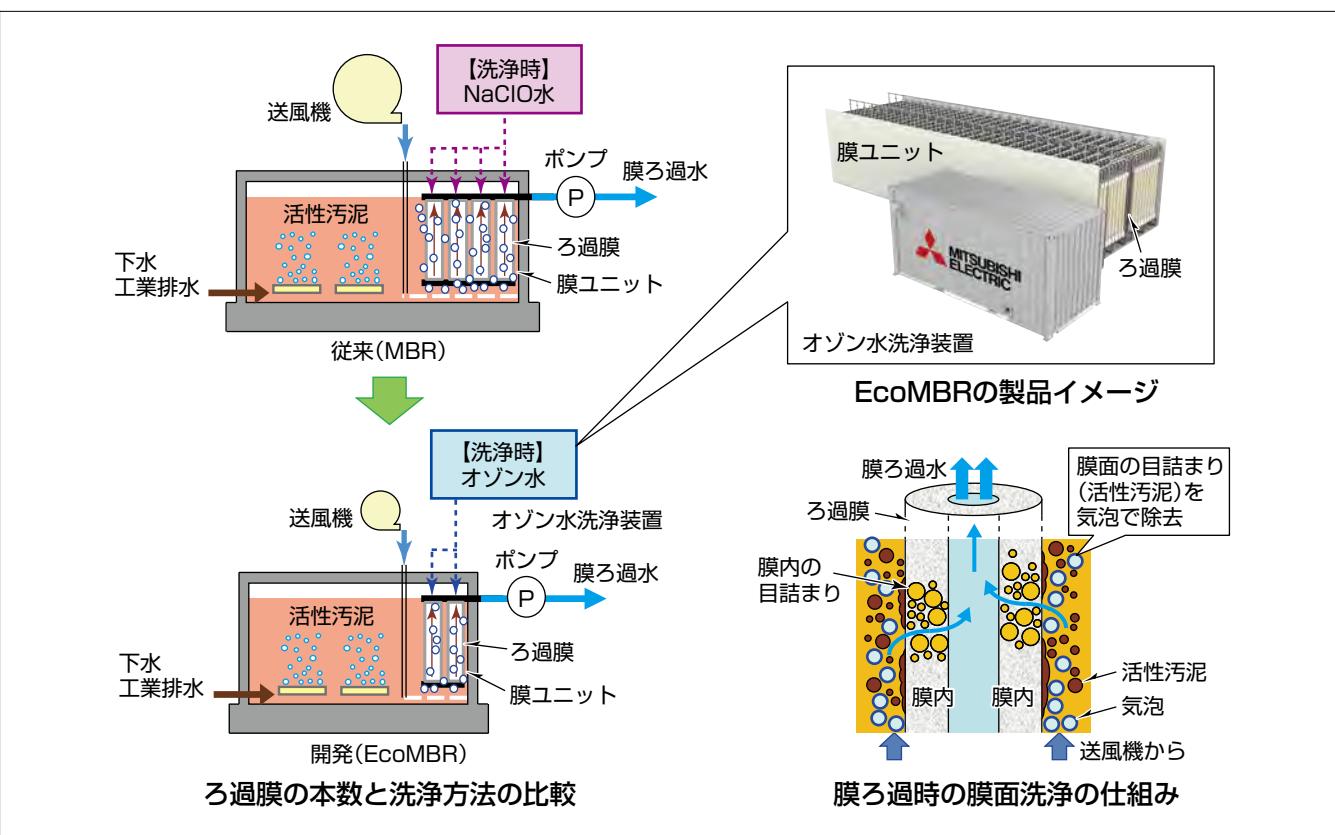
気候変動による水資源の偏在、人口増加・産業発展による水需要の拡大、人口集中による水質汚濁等によって、水資源不足が地球規模で問題になっている。そのため、下水や工業排水の農業・工業用水としての再利用が進められ⁽¹⁾⁽²⁾、水再利用装置が果たす役割はますます重要になっている。

近年、従来の標準活性汚泥法より処理水質が良好な膜分離バイオリアクタ(Membrane BioReactor: MBR)の排水処理や水再利用装置としての適用が広がっている。MBRは膜装置で処理水と活性汚泥を分離する。しかし、膜面に付着する活性汚泥を剥離するために常時行う膜面曝気(ばっき)の消費エネルギーが大きく、省エネルギー化が課題である。

三菱電機の“EcoMBR”は、NaClO(次亜塩素酸ナトリウ

ム)水の代わりにオゾン水(洗浄力の大きいオゾンガスを溶解させた水)を用いてろ過膜を洗浄することで、従来のMBRよりも2倍以上に膜ろ過速度を高め、ろ過膜の本数を低減して膜面洗浄用の曝気風量を削減する省エネルギー型水処理装置である。EcoMBRの更なる省エネルギー化のためにはオゾン水生成に必要な電力の低減が課題であったが、オゾン水のpHを酸性にすることで効率的に高濃度オゾン水を生成する技術を開発した。実排水を用いた実証試験ではオゾン水生成に必要な電力を従来の1/3以下に低減可能であることを検証した。

今後はこの技術を搭載したEcoMBRを実用化し、更なる省エネルギー化による環境負荷低減や豊かな水循環社会の実現に貢献する。



“EcoMBR”的特長

EcoMBRは、従来の膜内洗浄剤であるNaClOより大きい酸化力を持つオゾンを溶解した水(オゾン水)を用いた膜分離バイオリアクタである。膜装置当たりの流量を大きくして膜装置を削減し、膜面の洗浄に必要な膜面曝気風量を低減して省エネルギー・省スペースとメンテナンス性向上を実現する。

1. まえがき

1.1 MBRとEcoMBR

膜分離バイオリアクタ(MBR)は、流入水中の有機物を微生物である活性汚泥で除去し、膜ユニットで処理水すなわち膜ろ過水と活性汚泥を分離する水再利用装置である。従来の活性汚泥法と比較すると、膜で活性汚泥と膜ろ過水を分離することから、処理水に浮遊物質が含まれず、再利用に適した処理水が得られる。さらに活性汚泥法では最終沈殿池で時間をかけて活性汚泥を沈降させて処理水と分離するが、MBRではろ過膜で活性汚泥と処理水を分離するため最終沈殿池が不要になり、処理に必要な装置面積を低減できる。これらの利点から、現在は下水・工業排水の再利用処理に広く活用されている。

しかしMBRは膜処理のため、活性汚泥による膜面及び膜内の目詰まり物質の除去対策が必要である。通常、膜面の目詰まり物質に対しては膜ユニット下部から送風機で曝気して除去する。そのため膜面は常に曝気されており、その消費電力量はポンプ等の他の機器の消費電力量よりも大きくなる傾向がある。一方、膜内の目詰まり物質はNaClO水等の洗浄水をろ過時と反対方向に注水することによって除去する。

当社は、NaClO水の代わりにそれよりも酸化力の強いオゾン水でろ過膜を洗浄するEcoMBRを実証実験中である。

オゾン水を使用することで従来よりもろ過膜内の洗浄力が高められ、十分に膜内の目詰まりを解消できる。よって、膜1本当たりの膜ろ過水量を増大できるためにろ過膜の本数を低減でき、NaClO水での洗浄に比べて膜面曝気風量を削減したMBRの運転が可能になる⁽³⁾。したがって、EcoMBRを実用化することで、豊かな水循環社会の実現や省エネルギー化による環境負荷低減に貢献できる。

1.2 EcoMBRのシステム構成

図1にEcoMBRのシステム構成を示す。EcoMBRは膜ろ過と膜面洗浄及び膜内洗浄を繰り返しながら運転する。次にこのシステムの動作フローについて述べる。

(1) 膜ろ過と膜面洗浄

膜ろ過を継続すると、徐々に膜面及び膜内が目詰まりするが、常時、膜面曝気(図1の①)することで膜面の活性汚泥を剥離して目詰まりを抑制できる。一方で活性汚泥中の有機物等が徐々に膜内に蓄積し、目詰まりが進行することによって膜内の目詰まりを示す指標である膜間差圧が上昇する。

(2) 膜内洗浄

膜間差圧が所定値に達すると、一旦膜ろ過を停止して、膜内洗浄に切り替える。オゾン水による膜内洗浄では、膜ろ過水の一部をオゾン水タンクに引き込み(図1の③)，pHを調整した後、オゾンガスをオゾン水タンクに注入して(図1の④)オゾン水を生成する。続いて、膜ろ過とは反対方向からオゾン水を膜装置に注入し(図1の⑤)，オゾン

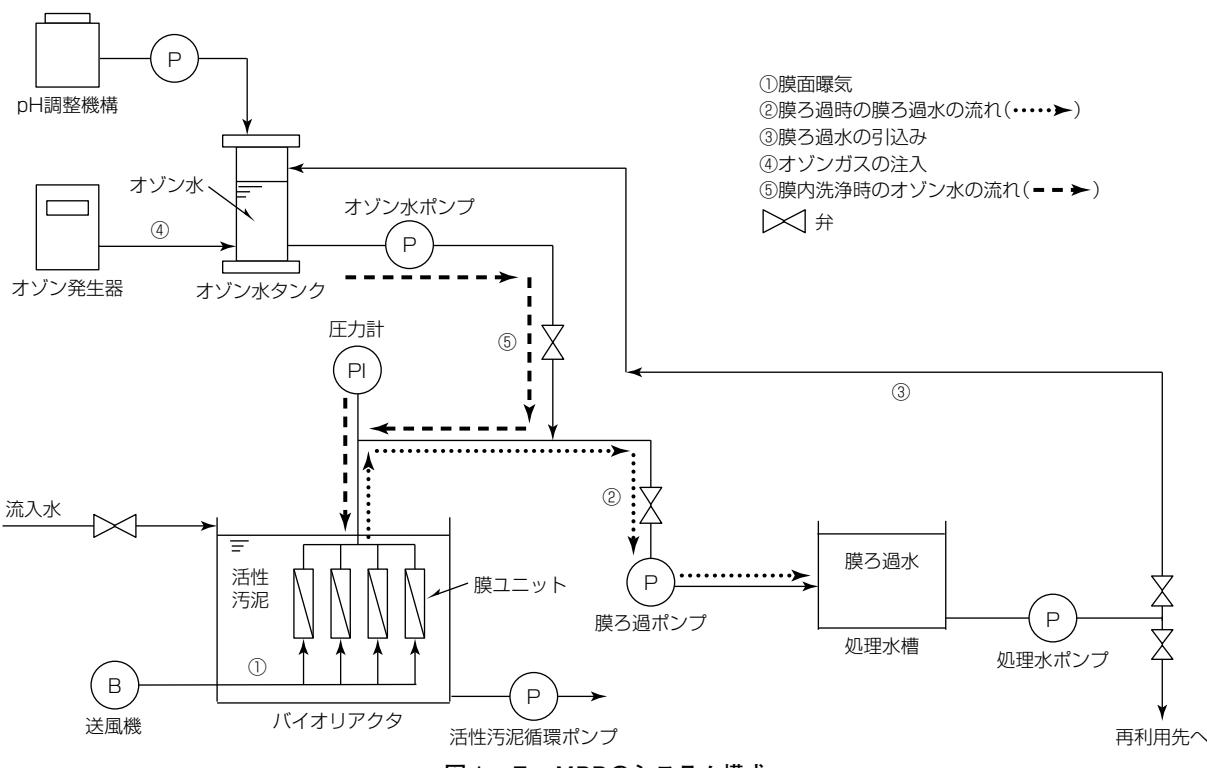


図1. EcoMBRのシステム構成

水で膜内の目詰まり物質を酸化分解させることで膜内を洗浄する。膜内の洗浄完了後、膜ろ過を再開し、これらを繰り返してEcoMBRの運転を継続する。

1.3 EcoMBRのユーザーメリット

EcoMBRはオゾン水でろ過膜を洗浄する省エネルギーMBRであり、そのユーザーメリットは次の3点である⁽³⁾。

(1) 省エネルギー

従来のMBRと比較して膜面曝気風量の削減による送風機電力の低減量が大きいため、オゾン水の生成に必要な電力が増加するもののトータルで約25%の省エネルギー化ができる。

(2) 省スペース

高い洗浄力を持つオゾン水を使用することで膜1本当たりの膜ろ過水量を増大でき、その結果、膜本数を半分以下に削減することによって膜ユニットの設置面積を50%以下に低減できる。

(3) メンテナンス性向上

高い洗浄力を持つオゾン水の使用による膜内洗浄時間短縮や、膜ユニット削減によるろ過膜の定期交換作業時間の削減が期待できる。

2. 高効率オゾン水生成技術の開発

2.1 EcoMBRの課題とオゾン水生成の高効率化検討

EcoMBRではオゾン発生器によって発生したオゾンガスをオゾン水タンクで溶解させることによってオゾン水を生成する。そのため、更なる省エネルギー化のためには、オゾン水生成に必要な電力の低減が課題であった。

水中に溶存するオゾンは不安定なため自己分解を引き起こし、酸素へと変換される。そのため、溶存オゾン濃度の低下を招くおそれがあり、洗浄に必要な濃度を維持するためには、高濃度又は大流量のオゾンガスを供給する必要があった。

当社はこの課題を解決するため、オゾン水生成の高効率化について検討した。pHを酸性にすることでオゾンの自己分解が抑制されることが知られており⁽⁴⁾、オゾン水生成でpHは重要な制御パラメータであった。そこで、オゾン水のpHを酸性にすることで溶存オゾン濃度を向上させる高効率オゾン水生成技術を開発した。

2.2 ラボ試験での検証

所定のpHに調整して生成したオゾン水を用いてあらかじめ目詰まりさせた試験用ろ過膜(膜ろ過面積0.01m²)を洗浄するラボ試験を行った。ラボ試験条件を表1に示す。

表1. ラボ試験条件

	試験条件1 ^(注1)	試験条件2	試験条件3	試験条件4
水溶液	MBR処理水(10L)			
pH	2.7	5	7	8
オゾンガス流量(NL/min)			0.7	
オゾンガス濃度(gO ₃ /m ³)			200	

(注1) 試験条件1はオゾン水生成試験だけ実施

オゾンガス流量と濃度は一定とし、pHの影響を確認するため、オゾン水のpHを酸性条件(pH = 2.7及び5)、中性条件(pH = 7)、アルカリ性条件(pH = 8)の4条件で実施した。ただし、pH2.7の条件はオゾン水生成だけ実施し、洗浄試験は実施しなかった。

各pH条件で生成したオゾン水の溶存オゾン濃度の推移を図2に示す。pHが低いほど溶存オゾン濃度が高くなつた。また、どの条件でも生成開始から30~90分の間に溶存オゾン濃度は極大点を迎え、その後緩やかに減衰する傾向であったが、酸性条件下ではその減衰量は小さかった。すなわち、酸性条件下でオゾン水を生成することでオゾンの消費を抑制でき、効率的に高濃度オゾン水を生成できることが示された。

次に各pH条件で生成したオゾン水を用いたらろ過膜の洗浄結果について述べる。ろ過膜が目詰まり前の透水性に回復するのに要した各pH条件での洗浄時間を図3に示す。pHが低いほど溶存オゾン濃度を高く維持できたため、洗浄時間はpHが低いほど短くpH = 5ではpH = 7の条件に対して約10%短縮できた。したがって、酸性条件下でオゾン水を生成することで洗浄時間も短縮できることが示された。

2.3 実排水を用いたパイロット試験での検証

液晶ディスプレイ工場の有機排水を流入水としたMBRのパイロットスケール試験で、先に述べたpH調整による溶存オゾン濃度向上効果と洗浄効果の検証を行った。こ

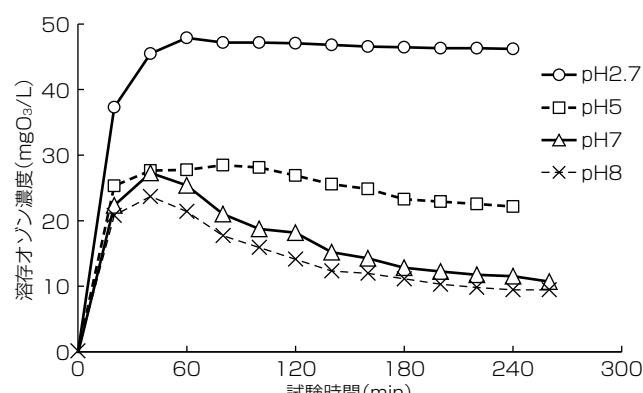


図2. 溶存オゾン濃度の推移

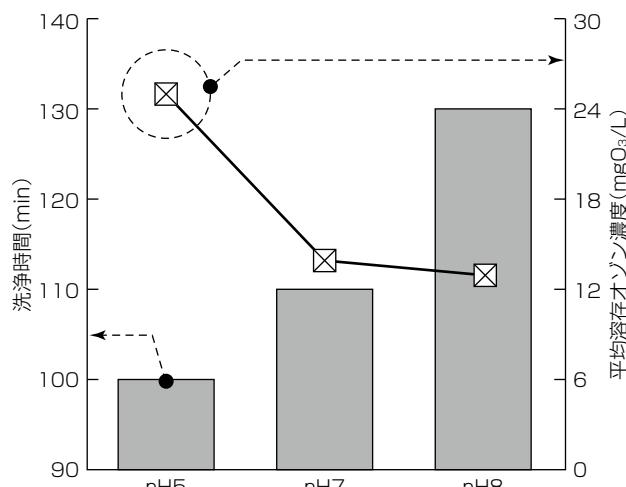


図3. 各pH条件での洗浄時間

の実験では小型のろ過膜(膜ろ過面積0.5m²)5本を用いて、ろ過流束0.55m³/日で運転し、1週間に1回の頻度でろ過膜をオゾン水で洗浄した。パイロット試験条件を表2に示す。この試験ではオゾン水をpH=5に調整してオゾン水を生成した。その結果、オゾンの消費を抑制できたためにオゾン水生成時のオゾン水変換効率(供給したオゾン量のうち、オゾン水に変換された割合)は従来の3倍以上に当たる18%まで向上し、溶存オゾン濃度も37~41mgO₃/Lまで上昇した。さらに変換効率が向上したことで必要なオゾンガス量を低減できた。その結果、オゾン水生成に必要な電力を従来の1/3以下に低減した。したがって、酸性条件下でオゾン水を生成するこの技術を用いることで更なる省エネルギー化が可能であることを検証した。

この試験の膜間差圧の推移を図4に示す。膜間差圧はろ過によって1週間で膜間差圧は最大30kPaまで上昇した。しかし、図中の矢印で、高濃度オゾン水を用いて膜内を洗浄した結果、図中の破線で示したように膜間差圧は膜内の目詰まりの解消を示す膜ろ過前の約7kPaまで低減した。このことから、酸性条件下でオゾン水を生成することで効率的に高濃度オゾン水を生成でき、その高濃度オゾン水で膜内を洗浄することで、膜内の目詰まりを十分に解消できることが実排水を用いたパイロット試験でも確認できた。

表2. パイロット試験条件

水溶液	MBR処理水(150L)
pH	5
オゾンガス流量(NL/min)	8.4
オゾンガス濃度(gO ₃ /m ³)	200
洗浄時間(min)	60

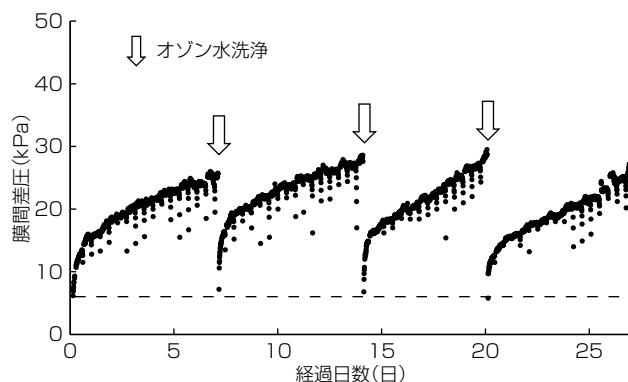


図4. 時間経過に伴う膜間差圧の推移

3. む す び

膜分離バイオリアクタEcoMBRのシステム構成、及びその特長について述べた。またEcoMBRの更なる省エネルギー化を目的として開発した高効率オゾン水生成技術についても述べた。今後はこの技術を搭載したEcoMBRを実用化し、更なる省エネルギー化による環境負荷低減や豊かな水循環社会の実現に貢献する。

参 考 文 献

- 山縣弘樹：米国カリフォルニア州モントレー郡における下水処理水の農業灌漑利用、環境システム計測制御学会誌、14, No.2・3, 83~86 (2009)
- 伊藤禎彦：下水処理水の飲用再利用におけるリスクの取り扱いについて、水環境学会誌、39, No.6, 187~196 (2016)
- 安永 望, ほか：下水・工業排水処理向け省エネルギー・省スペース型膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”，三菱電機技報、91, No.9, 508~511 (2017)
- 日本オゾン協会：オゾンハンドブック 改訂版 (2016)

下水処理プロセスの曝気量制御技術

Aeration Control Technology for Sewage Treatment Process

吉田 航*

Wataru Yoshida

木本 勲*

Isao Kimoto

今村英二*

Eiji Imamura

橋爪弘二†

Koji Hashizume

野田清治†

Seiji Noda

要旨

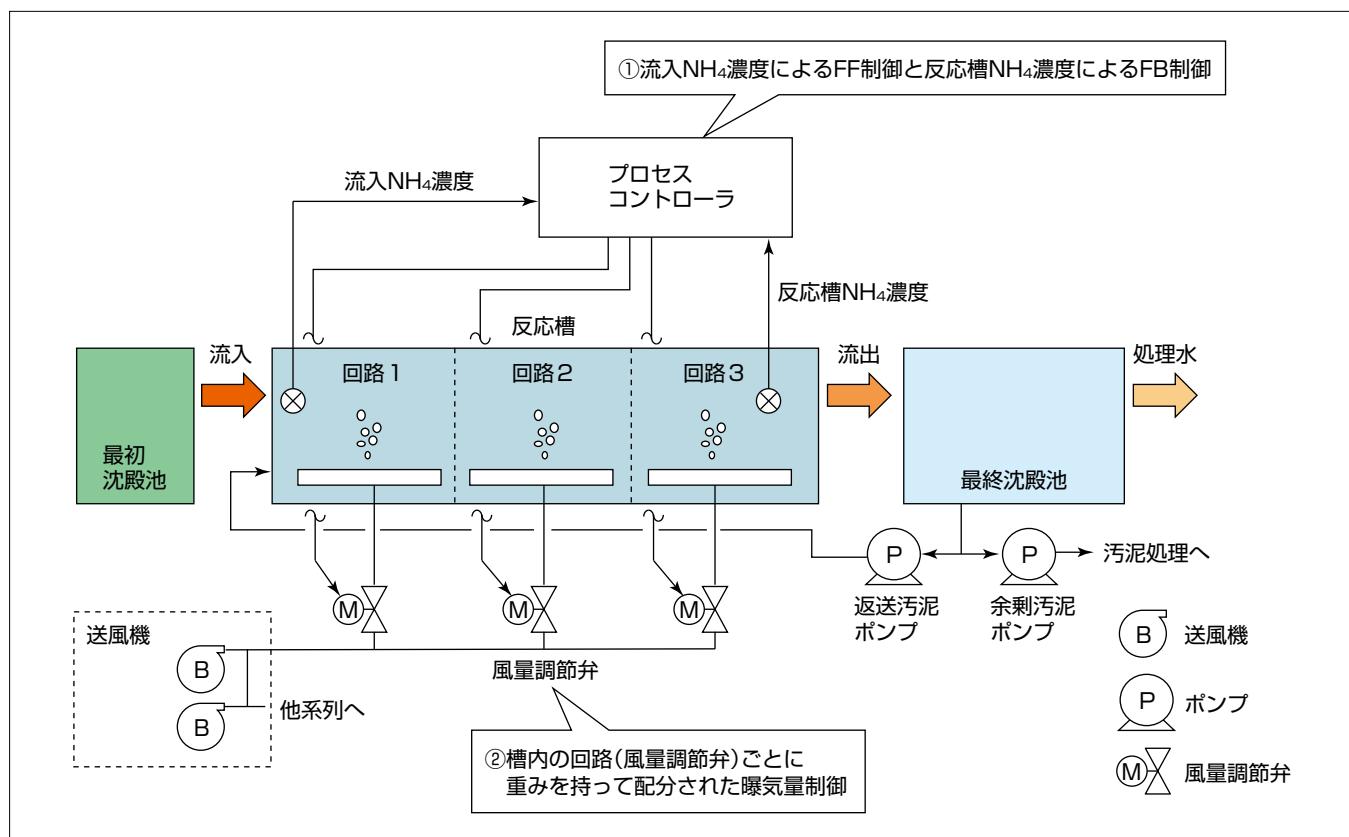
国連総会でのSDGs(Sustainable Development Goals)採択を受け、持続可能な社会の実現に向けて、水環境保全に関する関心が一層高まっている。下水処理場は都市部の水環境保全のために大きな役割を果たしているが、汚濁物質を除去する水処理反応槽で処理場全体の約半分の電力を消費している。特に、下水に含まれる窒素の除去には多量の空気供給(曝気(ばっき))が必要であり、目標にする処理水質を維持しつつ、過剰な曝気を削減する曝気量制御技術が求められている。

三菱電機では、従来開発してきた反応槽内のアンモニア(NH_4)濃度によるフィードバック(FB)制御に、反応槽流入部で計測した NH_4 濃度の変動に応じたフィードフォワード(FF)制御を加えた曝気量制御技術を開発中である。こ

の制御技術は、反応槽前段でFF制御を主体とした制御を行い、反応槽後段で従来のFB制御を行う。従来のFB制御にFF制御を組み合わせたことで流入負荷の変動に素早く対応し、反応槽 NH_4 濃度を目標値に制御できる。

シミュレーション評価によって、周期的な流入負荷変動に対して処理水質を一定に制御でき、一般的な溶存酸素(DO)制御と比べて14%の曝気量削減効果が得られることを確認した。また、反応槽前段のFF制御によって効率的な NH_4 除去が可能であることを明らかにした。

この技術を適用した曝気量制御の実用化を行い、良好な処理水水質を確保しつつ省エネルギーを実現することで、持続可能な水環境保全に貢献していく。



曝気量制御技術

下水処理場の反応槽流入部に設置した NH_4 計の計測値によるFF制御と、反応槽内の NH_4 濃度を使ったFB制御を組み合わせて、反応槽内の回路ごとに曝気量制御を行うことで、流入負荷の変動に安定して追従できる曝気量制御方式である。

1. まえがき

国連総会でのSDGs採択を受け、持続可能な社会の実現に向けて、水環境保全に関する関心が一層高まっている。下水処理場は都市部の水環境保全で重要な役割を果たしており、下水道管渠(かんきょ)から流入する下水を浄化して河川や海域に放流する。下水に含まれる窒素、リンなどの栄養塩類は、海や河川に放流されると富栄養化を引き起こし、赤潮など水域環境の悪化を招くおそれがあることから、生物学的高度処理の導入が進められている。

図1に下水処理場の消費電力を示す。下水道事業は下水の処理に7,554百万kWhという大量の電力を消費しており、これは172万世帯の年間電力使用量に相当するが⁽¹⁾、その約半分は下水処理場の水処理施設によって消費される。よって、水処理施設で最も多く電力を消費する送風機の消費電力削減が求められている。

処理水質と消費電力はトレードオフの関係にあるため、処理水質を改善すると消費電力が増加する傾向がある。流入水中の汚濁物量の変動に応じた適切な曝気量制御によって、目標とする処理水質を維持しつつ、過剰な曝気量を削減できる。

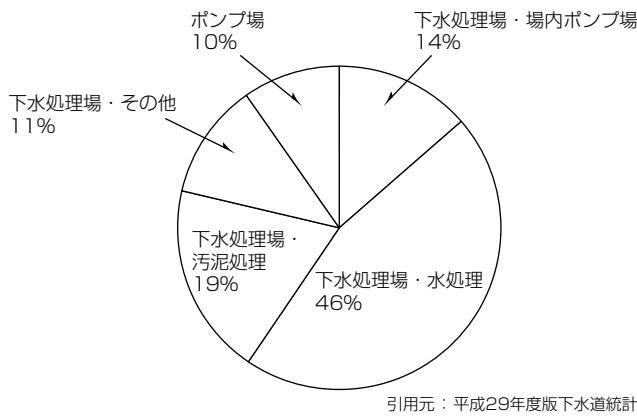


図1. 下水処理場の消費電力(平成29年度)⁽¹⁾

2. 流入・流出データを活用した曝気量制御

2.1 下水処理場の生物処理

下水処理場の処理フローを図2に示す。反応槽内では活性汚泥と呼ばれる微生物が下水と混合し、送風機から空気が供給されることによって酸素の多い好気状態を作り出す。これによって、下水中の有機物の分解とアンモニア性窒素を硝酸に変換する硝化反応が進行する。高度処理では積極的に硝化反応が行われるように運転条件が設定されている。

2.2 従来型曝気量制御の課題

従来の曝気量制御としてDO制御が一般的である。DO制御は槽内のDOを一定値に保つ制御であるが、硝化反応の進行状況に基づく制御ではない。また、近年ではアンモニア計を反応槽内に設置して、硝化反応の進行状況を直接測定するFB制御が開発されている。

図3に曝気量制御の概念図を示す。流入NH₄濃度の変動と各制御による反応槽末端のNH₄濃度の変化を示しており、

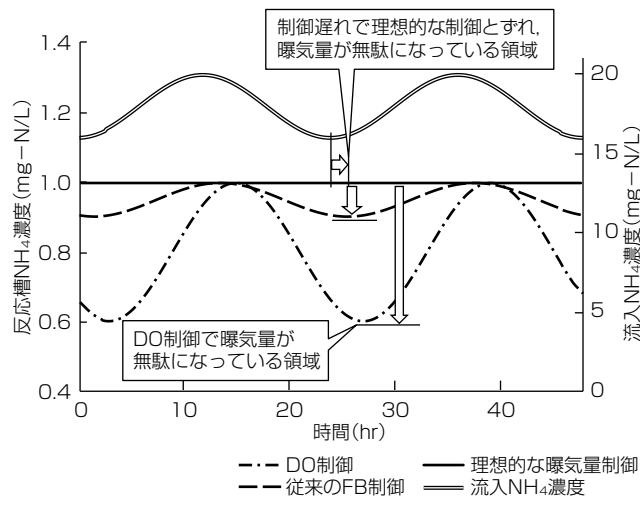


図3. 曝気量制御の概念図

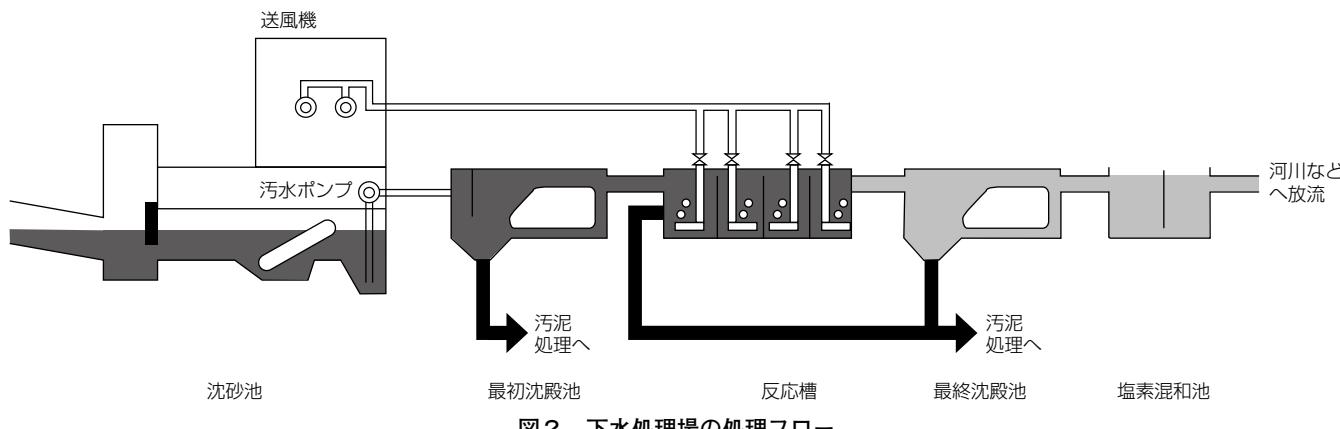


図2. 下水処理場の処理フロー

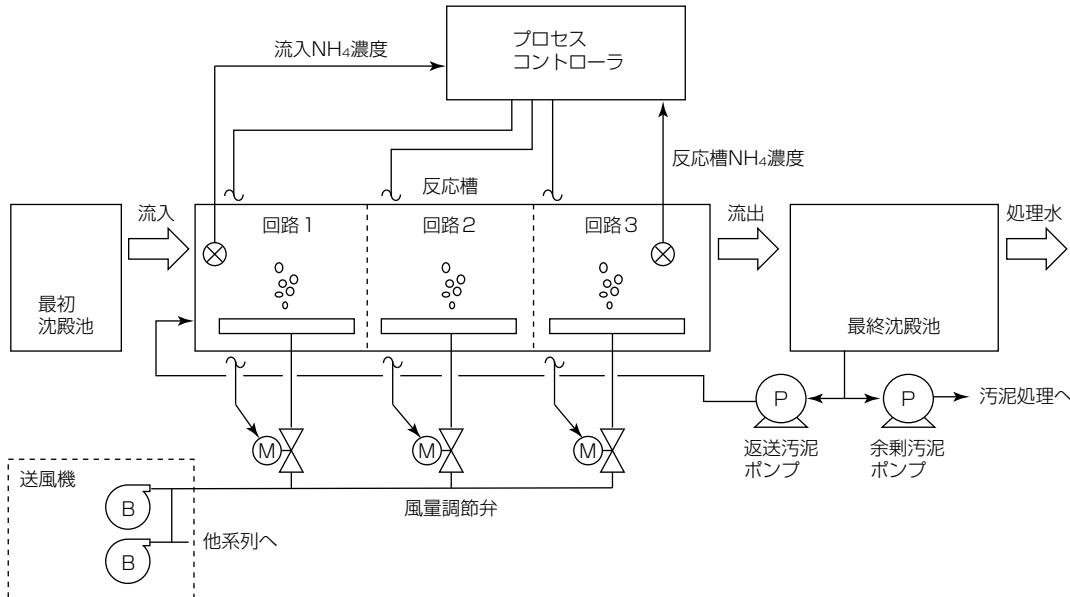


図4. 曝気量制御

理想的な曝気量制御は反応槽末端のNH₄濃度が常に目標値に追従するよう制御する。

これに対し、DO制御は流入変動に関わらず槽内のDOを一定にするよう制御するため、必要以上に空気を供給する時間帯が生じてしまう。また、従来のFB制御では反応槽の滞留時間経過後のNH₄濃度に基づいて曝気量を制御するため、流入NH₄濃度の変動に対する制御遅れが発生し、追従性に課題があった。

2.3 流入・流出水質データを活用した曝気量制御

今回開発した曝気量制御は、図4に示すとおり、反応槽出口(処理水)NH₄濃度の計測値によるFB制御に加えて、反応槽へ流入する流入NH₄濃度によるFF制御を組み合わせるとともに、複数設置された風量調節弁を個別に制御することで最適な曝気量制御を行うものである。

従来型のFB制御は、式(1)に示すとおり、処理水NH₄濃度の計測値と目標値との差分に応じた比例項と、差分の積算値による積分項によって曝気量(Q)を算出するPI(Proportional Integral)型FB制御である。

$$Q = K_p \times ((\text{NH}_4, \text{eff} - \text{NH}_4, \text{target}) + \frac{1}{T_i} \times \sum (\text{NH}_4, \text{eff} - \text{NH}_4, \text{target})) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 K_p : FB比例定数

NH_4, eff : 処理水NH₄濃度

$\text{NH}_4, \text{target}$: 目標処理水NH₄濃度

T_i : 積分時間

今回開発した制御(提案制御)は、式(2)に示すとおり、従来型のPI型FB制御に流入NH₄濃度に比例するFF項を追加するとともに、反応槽内の回路ごとに設置された風量調節弁を個別に制御するよう改良したものである。

$$Q_i = K_{a, i} \times \text{NH}_4, \text{inf} + K_{p, i} \times ((\text{NH}_4, \text{eff} - \text{NH}_4, \text{target}) + \frac{1}{T_i} \times \sum (\text{NH}_4, \text{eff} - \text{NH}_4, \text{target})) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 $K_{a, i}$: 回路*i*のFF比例定数

$K_{p, i}$: 回路*i*のFB比例定数

NH_4, inf : 流入NH₄濃度

また、反応槽は通常複数の回路に分かれており、活性汚泥と混合した汚水が流入側から流出側に流れつつ生物処理が進行する。比例定数($K_{a, i}$, $K_{p, i}$)を反応槽の回路ごとに重みを付けて配分することによって、反応槽前段の回路では主に流入NH₄濃度の変動に応じて曝気量を変動させ、負荷変動に対する追従性を向上させることができる。一方、後段の回路は反応槽NH₄濃度によるFB制御を主体とすることで、目標とするNH₄濃度に安定的に追従できる制御が可能である。

3. シミュレーション評価

反応槽内部の生物処理を模擬できる、国際水協会の活性汚泥モデルNo.1⁽²⁾を利用してシミュレーション評価を行った。

3.1 シミュレーションモデルと条件

図5に示す嫌気・好気活性汚泥法を模擬した槽列モデルによってシミュレーション評価を行った。シミュレーション条件を表1に示す。

図6にこのシミュレーションに使用した流入水量と流入NH₄濃度の時間変化を示す。流入NH₄濃度の平均値を24mg-N/Lとし、朝方と夕方に流入ピークになるように晴天時の流入負荷を正弦波曲線で模擬して設定した。

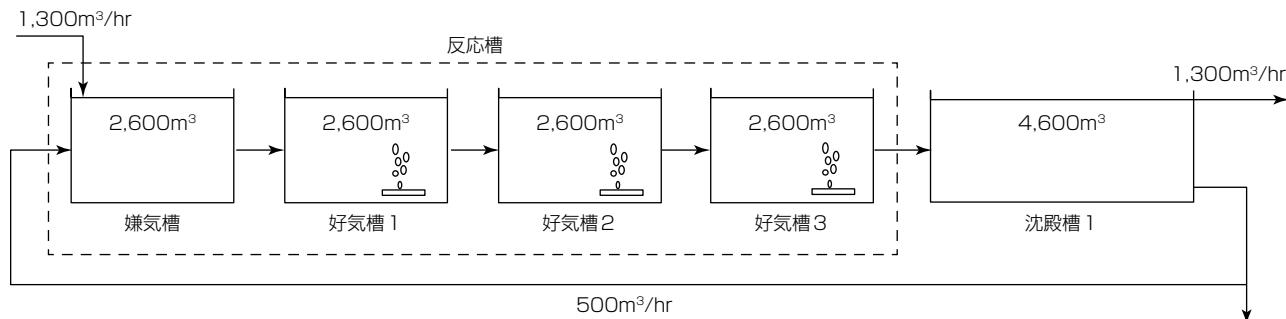


図5. シミュレーションモデル

表1. シミュレーション条件

項目	設定値
平均処理水量	31,200 m³/日 (1,300 m³/hr)
反応槽容積	嫌気槽 2,600 m³
	好気槽1 2,600 m³
	好気槽2 2,600 m³
	好気槽3 2,600 m³
水理学的滞留時間(HRT)	8.0hr
返送汚泥流量	500 m³/hr (一定流量)
反応槽内MLSS濃度	2,000 mg-COD/L

MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids

COD : Chemical Oxygen Demand

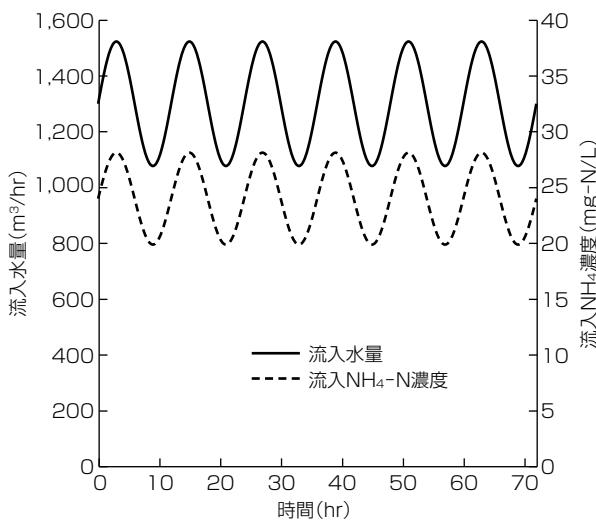


図6. 流入条件

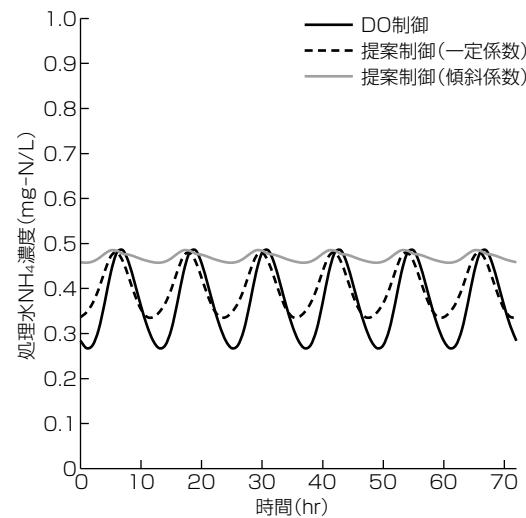
3.2 制御の安定性・負荷変動への応答性の評価

反応槽回路ごとに重みを付けて配分した曝気量制御の有効性を確認するため、表2に示す制御係数を各回路で一定にした場合と傾斜配分した係数で制御した場合のシミュレーションを行った。なお、処理水の目標NH₄濃度(NH₄_{target})は、処理水NH₄濃度が常に0.5mg/Lを超えないようそれぞれ設定している。また、比較例として、好気槽2のDO目標値を2mg/LとするDO制御のシミュレーションを行った。

図7に処理水NH₄濃度の経時変化を示す。どの方式も放

表2. 制御係数

	制御係数設定			NH ₄ _{target} (mg-N/L)
	好気槽1	好気槽2	好気槽3	
一定 係数	K_a (流入項)	a	a	0.40
	K_p (流出項)	p	p	
傾斜 係数	K_a (流入項)	1.5a	a	0.47
	K_p (流出項)	0.5p	p	

図7. 処理水NH₄濃度

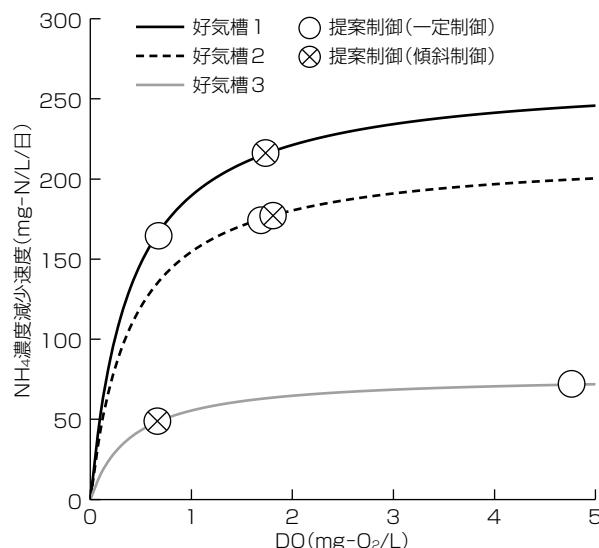
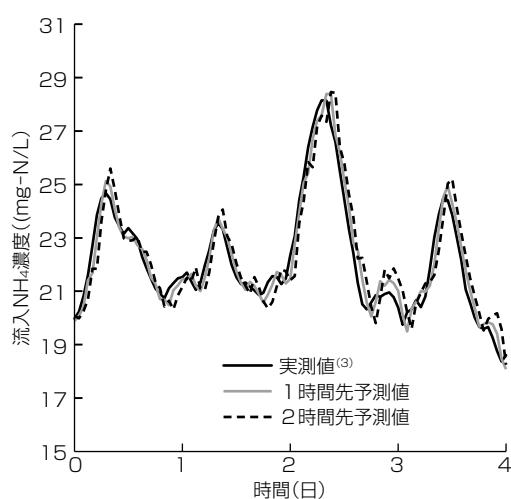
流水質基準(1.0mg/L未満)を満たしている。DO制御の場合、流入負荷の変動に対して処理水のNH₄濃度が変動幅0.23mg-N/L(0.27~0.5mg-N/L)で変動した。一方、一定係数で制御した提案制御の場合、処理水のNH₄濃度が変動幅0.16mg-N/L(0.34~0.5mg-N/L)で変動し、傾斜係数で制御した場合、0.04mg/L(0.46~0.5mg/L)の変動幅で制御できており、処理水の水質変動が抑えられ、目標値に追従した制御になっていることが分かる。

3日間のシミュレーションによる各制御方式の合計曝気量とDO制御に対する曝気量削減率を表3に示す。提案制御は、どちらの方式もDO制御に対する曝気量削減効果が得られているが、係数を傾斜配分する制御が最も曝気量削減効果が高く、DO制御比で14.0%曝気量が削減された。

図8にASM(Activated Sludge Models)1の生物反応式

表3. 曝気量削減率(対DO制御)

制御方式	3日間の合計曝気量(m ³)	曝気量削減率(対DO制御)(%)
提案制御	傾斜係数	3.02 × 10 ⁵
	一定係数	3.41 × 10 ⁵
DO制御	3.51 × 10 ⁵	

図8. NH₄濃度減少速度の溶存酸素(DO)依存性図9. 流入NH₄濃度予測結果

に基づいて算出した各好気槽での硝化菌増殖に伴うNH₄濃度減少速度とDOの関係性を示す。なお、一定係数、傾斜係数でそれぞれ制御した提案制御の計算結果でのNH₄濃度減少速度の平均値も図8のグラフ上に示す。傾斜係数にした提案制御で、好気槽1では流入NH₄濃度に比例する曝気量制御を主体にして行ったことでDOが増加し、一定係数

にした提案制御に比べてNH₄濃度減少速度が増加した。一方、好気槽3では傾斜係数にした提案制御でDOが大幅に低下したが、NH₄濃度減少速度は一定係数にした提案制御と同等であった。よって、傾斜係数にした提案制御では好気槽前段で効率的にNH₄濃度減少速度を増加させ、好気槽後段での過剰な曝気量を抑制したと考えられる。

さらに当社では、独自のAI(Artificial Intelligence)技術“Maisart (マイサート)”によって、生物反応槽への流入NH₄濃度を数時間先まで高精度に予測する技術を持っている。このAIは、過去の流入NH₄濃度を蓄積したデータベースから、現在の流入NH₄濃度の変動を解析し、数時間後の水質を予測する。図9に下水処理場の流入NH₄濃度変動⁽³⁾をこのAIで予測した結果を示す。1時間先、2時間先の予測値はともに実測値と良く一致しており、晴天時の流入NH₄濃度変動は約10%の誤差で予測できた。

このAIが予測した流入NH₄濃度に基づいてFF制御を実施することで、流入負荷の変動に対する曝気量制御の追従性を更に向上させることができる。具体的には、流入NH₄濃度の減少が予測される場合には、前もって曝気量を減少させるように制御することで、曝気量の更なる削減が可能になる。

4. むすび

反応槽へ流入するNH₄濃度に比例するFF制御と反応槽出口のNH₄濃度によるFB制御を組み合わせて、反応槽の回路ごとに制御を行う曝気量制御を開発した。本稿ではシミュレーション評価によって、流入負荷の変動に対して、目標にする処理水質に安定して制御できることを示した。また、これによって過剰な曝気量を削減する効果が得られることを確認した。さらに、当社AI技術Maisartによって晴天時の流入NH₄濃度を約10%の誤差で予測できた。

この制御技術を適用した曝気量制御装置は、今後実プラントでの実証を行い、2020年度を目指して製品化する予定である。処理水質を確保しつつ省エネルギーに寄与するこの制御技術を下水処理場に適用することで、持続可能な水循環系の構築に貢献していく。

参考文献

- 日本下水道協会：平成29年度版下水道統計、日本下水道協会(2019)
- 味塗 俊：活性汚泥モデル：ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3、環境新聞社、21~72(2005)
- 東京都下水道局技術調査年報、40, 77~87(2016)

モビリティでの環境負荷低減

Reduction of Environmental Load in Mobility

加藤裕彦*
Yasuhiko Kato
藤田暢彦†
Masahiko Fujita

1. まえがき

地球環境や自然環境を適切に保全し、持続可能な社会を築くために、温室効果ガスの排出量削減や環境汚染物質の抑制が世界的に求められ、各国で規制強化が進められている。自動車メーカー、トラックメーカー、オートバイメーカー、農業機械や建設機械メーカーは、燃費を向上させ、走行／使用によってその内燃機関／エンジンから排出される環境負荷物質を低減させることに日夜奮闘している。また自動車の燃費向上とCO₂排出量削減に有効となるハイブリッド車を始めとする電動車両の開発・量産化が進められ、その普及が加速している。

三菱電機では、ハイブリッド車を含めた内燃機関／エンジンを持つ車両で貢献する各種製品を開発・生産し、これらのメーカーに納入している。

本稿では、2章で内燃機関の燃費向上と排出ガスクリーン化に貢献する製品群について、3章で電動車両による燃費改善について述べる。

2. 燃費向上と排出ガスクリーン化貢献製品群

2.1 排出ガス規制動向

内燃機関を持つ車両に対し、世界各地域の排出ガス規制は、年々強化されている(図1)。

欧州ではEURO6d規制が、中国では国6a規制が、そしてインドではBS6規制が2020年から導入され、NOx(窒素酸化物)、PM(粒子状物質)、CO₂(二酸化炭素)の、車両からの排出量の更なる削減が求められている。車両の燃料供給口などからわずかに大気に放出される燃料蒸散ガスの排出に関しても、既にアメリカで適用されているものと同等の規制が、中国とインドで導入される。

2.2 EGRバルブ

EGR(Exhaust Gas Recirculation: 排気ガス再循環)バルブは、エンジンに取り付け、排気ガスを再度燃焼室に戻

すことで、排出ガス中のNOx低減と燃費向上のために使用する。図2にEGRバルブと2.3節から2.5節で述べる製品群の外観及び車両での搭載位置を示す。

エンジン内で燃料が燃焼する際に、その燃焼温度が高すぎると燃焼室内でNOxが生成される。その対策として、エンジンが吸入する空気と排気ガスを再循環させて混合させるEGRが採用されている。再還流した排気ガスは燃焼室内では燃料の燃焼には寄与せず、発生した熱を奪うことで燃焼室の温度を下げ、NOxの生成を抑制する。また、再還流を行うことで、エンジンが新しい空気を燃焼室に吸入する抵抗を低減して燃費も向上するため、特に乗用車用ガソリンエンジンでは、積極的にEGRが採用されている。

EGRバルブは先に述べた再還流させる排気ガス量を調整する装置であり、当社では、その駆動源に乗用車用にはステッピングモータを、トラック、農業機械、建設機械用にはガス量調整を更に高速で行うことが可能なDCモータを採用している。この高速での制御は、エンジン内での燃

地域	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
欧州		EURO6c			EURO6d			(Euro7)
	NOx 60mg/km				→ RDE導入			
	PM 4.5mg/km							
インド		BS4			BS6			
	NOx 80				→ 60			
	PM —				4.5			
中国		国5		国6a		国6b		
	NOx 60			→ 60			35	
	PM 4.5			4.5				3.0

RDE: 実際の運転状態の排出ガス規制

図1. 乗用車用ガソリンエンジンの排出ガス規制

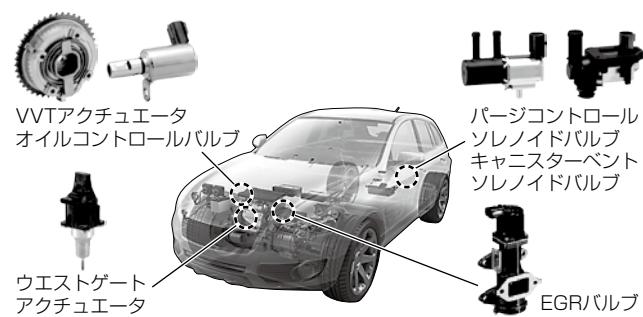


図2. 燃費向上と排出ガスクリーン化貢献製品群

焼を的確に行うことに役立ち、PM発生を抑制できる。当社のEGRバルブは、車両の運転状況に応じて的確かつ緻密に制御を行うことを可能にし、排出ガス中のNOxの低減と燃費向上に貢献している。

2.3 VVTアクチュエータとオイルコントロールバルブ

VVT(Valuable Valve Timing: 可変バルバタイミング)アクチュエータとオイルコントロールバルブは、エンジンの吸気・排気弁の開閉タイミングを変化させ、エンジンの運転状態を向上させることに用いられる。

VVT機構は、エンジン回転数に応じて吸気・排気弁の開閉タイミングを変化させ、エンジンの出力を向上させる目的で採用が始まった。最近では、更にシステムの使用範囲が広がり、燃費向上と排出ガス中の有害物質低減にも活用される。排気弁が開くタイミングを遅らせ、吸気弁が開くタイミングを早めることで、双方の弁が同時に開いている時間を長くすることができる。この状態は、エンジンのピストンが降下する際の抵抗を下げ、無駄な負荷を減らすことができ、燃費を向上させることができる。また同時に、ピストンが降下する際に燃焼室に発生する吸引力を利用して、排気ガスの一部をもう一度燃焼室内に引き込むこともでき、EGRバルブと同様の排気ガス再還流を直接燃焼室で行うことができ、NOxの生成低減も可能になる。

VVTアクチュエータは、その内部に注入されるエンジンオイルの量と圧力で駆動するが、それを緻密に調整するのがオイルコントロールバルブである。VVTアクチュエータとオイルコントロールバルブは、車両の運転性を高めるだけではなく、燃費向上と環境負荷物質の生成低減にも貢献している。

2.4 パージコントロールソレノイドバルブとキャニスターべントソレノイドバルブ

パージコントロールソレノイドバルブは、車両の燃料配管路に取り付けられ、燃料タンク内で発生する蒸発燃料の大気放出を抑制するシステム内で使用され、キャニスターべントソレノイドバルブは、そのシステムが正常に作動していることを車両が自己診断するシステムで使用される。

駐車時や給油時に車両の燃料タンク内で燃料の蒸発が起こるが、その蒸気をできるだけ大気中に逃がさないようにする必要がある。この大気蒸散に関して、特にインドでは、2020年からオートバイとスクーターに対する排出量規制が強化され、中国でも乗用車とトラックに対し、燃料タンクにつながる配管の気密が保たれていることを自己診断することが義務化される。当然、車両の蒸発燃料抑制システムも、規制に合わせて高度化している。

パージコントロールソレノイドバルブは、キャニスター

と呼ばれる燃料吸着缶に一時的に蓄えられた蒸発した燃料を、最適なタイミングで吸い出し、エンジン内で燃焼させる量を緻密に制御することに使われる。キャニスターべントソレノイドバルブはシステムの自己診断時に配管を確実に閉塞制御する。これらのソレノイドバルブは、蒸発燃料を車両内で適切に処理する一役を担うことで、環境負荷抑制に貢献している。

2.5 ウエストゲートアクチュエータ

ウエストゲートアクチュエータは、ターボチャージャー付きエンジンに取り付けられ、エンジンの出力を最適化するために使用される。

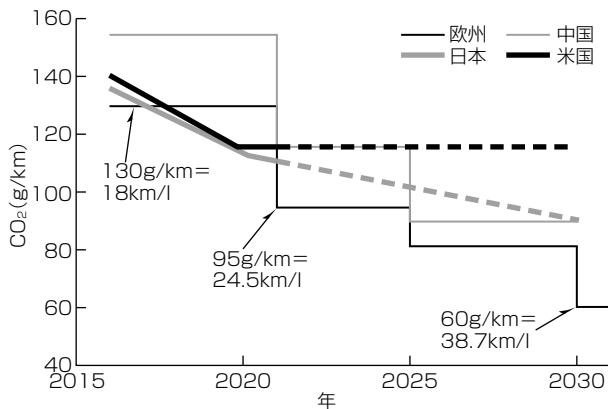
近年、従来の大排気量エンジンの代わりに、低排気量のターボチャージャー付きエンジンを採用する車両が増加傾向にある。例えば、2Lのエンジンの代わりに、1.4Lのターボチャージャー付きエンジンを搭載するケースである。最高出力は小さくなるが、発進時や巡航時は十分快適で、高い燃費も得られる。従来のウエストゲートアクチュエータは、過給圧力が高くなり過ぎないよう、また必要以上の排気圧力がターボチャージャーに掛からないように、ターボチャージャーを回転させる排気ガスの一部を排気管に逃がす用途にだけ使われていた。当社のウエストゲートアクチュエータは、駆動源にDCモータを採用することで、この制御がより緻密、かつ的確にできるだけではなく、あらゆる運転時に使うことが可能なため、始動直後にターボチャージャーを経由させず、排気ガスを直接三元触媒に導き、触媒を早期活性化させることで、排気ガス中の環境負荷物質低減の一役を担い、またエンジンのポンピングロス低減、エンジン出力調整等にも活用され、車両を運転する全ての局面で、排出ガスの有害成分低減と燃費改善に貢献している。

3. マイルドハイブリッドシステムによる燃費改善

3.1 欧州と中国の燃費規制に対する自動車の取組み

地球環境保護の観点から、図3に示すように各国で自動車の燃費やCO₂排出量についての規制が強化されている。中でも欧州と中国は規制値が厳しく罰則もあるため、販売する車種全体の燃費向上が必要になっている。

自動車の燃費向上とCO₂排出量削減には、ハイブリッドやプラグインハイブリッド、電気自動車などのいわゆる電動化が有効だが、燃費向上効果が大きい反面、走行／発電用のモータや、モータを駆動制御するインバータ、電池、充電器等を搭載するため、車両コストが高くなるという課題がある。これに対して、モータでの走行はできないが、

図3. 主要地域の燃費／CO₂排出規制⁽¹⁾

エンジンのアイドリングストップからの再始動性向上とエンジンアシスト・回生発電の出力向上などの機能に限定し、システムコストの増加を抑制するマイルドハイブリッドシステムが普及してきている。燃費向上効果は限定的であるが、システムコストが比較的安く小型車まで含めた幅広い車種に採用可能なため、販売車両全体の燃費を向上させることができ、欧州や中国の燃費規制への対応に有効と考えられている。ハイブリッドシステムは、エンジンを含むパワートレイン系の中のモータ搭載位置によって、大まかにP0からP4に分類され(表1)、この中のP0及びP1がマイルドハイブリッドと呼ばれる。

3.2 ベルト駆動MGシステム

P0マイルドハイブリッドシステムは、従来の自動車の発電機(オルタネータ)をベルト駆動型モータジェネレータ⁽²⁾(Motor Generator: MG)で置き換えたもので(図4)、ベルト駆動MGシステムと呼ばれる。このシステムは、エンジン回りの部品を大幅に変更しないため、開発コスト及びシステムコストが安価になる利点があり、国内では12V電源を用いたシステムを軽自動車を中心に、欧州・中国では48V電源を用いたシステムを中型車やSUV(Sports Utility Vehicle)を中心に適用して急速に市場を拡大している。

表1. モータ搭載位置によるハイブリッドシステムの分類

モータ搭載位置	P0	P1	P2(+P0)		P0+P3	P0+P4
			同軸配置 	並行軸配置 		
ハイブリッド種類	マイルドハイブリッド	フルハイブリッド／プラグインハイブリッド				
EV走行	不可	不可	可	可	可	可
ベルトレス化	不可	可	可(+P0の場合は不可)	不可	不可	不可
回生発電	効果あり (P0より大)	効果あり (P0より大)	効果大		効果大 (P2, P3より小)	効果大 (P2, P3より小)
トルクアシスト	効果あり	効果大	効果大		効果大	効果大
モータ形状	直径 軸長	小型 中間	大型 短い	大型 短い	小型 中間	中型 長い

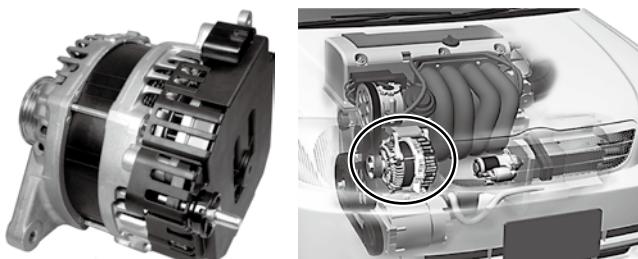


図4. ベルト駆動MGシステム

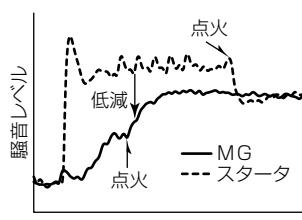
オルタネータの代わりに搭載するために、当社はオルタネータをベースに整流器を小径かつ薄型のインバータに置き換えて、モータとインバータ一体型として、世界最小クラスの製品を開発・量産化した。

ベルト駆動MGは、P0マイルドハイブリッドシステムの燃費向上技術であるアイドリングストップ(エンジンの迅速始動)、減速時の回生発電、走行時の駆動アシストを担うP0マイルドハイブリッド車の主要製品である。

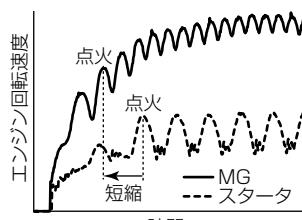
従来、エンジンはスタータで始動されていたが、ベルト駆動MGシステムでは、ベルトを介してエンジンを再始動するため、スタータでの再始動時に発生するギヤの音がなくアイドリングストップから発進時に発生する騒音を低減できる。また、スタータより高回転までトルクが出せるため迅速に始動ができる(図5)。高回転でのトルク出力は、自動車の電動クリープ走行や加速アシストにも適用され、回生で蓄えたエネルギーの有効利用を可能にしている。

発電に関しては、回転子の仕様を変更することで、短時間発電出力を従来のオルタネータに対して約50%向上させ、減速時に回生するエネルギーを増加させている。オルタネータの整流器がダイオードであるのに対して、ベルト駆動MGではインバータのトランジスタを使用して整流し、損失を低減することで発電効率を向上させ、より大きな電力を生み出すことで燃費向上に貢献している。

近年になって、電源を12Vから48Vに変更したベルト駆動MGシステム



(a) 騒音レベルの比較

(b) エンジン回転速度の比較
図5. 駆動特性の比較

が欧州や中国で量産化されており急速に拡大する見込みである。48V対応ベルト駆動MGは、電圧が12Vから48Vで4倍となることから、最大出力も4倍程度の10kWクラスとなり、駆動・発電共に大幅に出力が向上することから燃費改善効果も大きくなる。高電圧になることからインバータの半導体素子の高電圧化、制御方式の変更が必要になり、サイズ、コスト共に大きくなるが、12Vベルト駆動MGシステムと同様にオルタネータの搭載位置に置き換えられるのが利点となっている。電源もリチウムイオン電池のセルが増加することからサイズ、コスト共に増加し、システムコストが増加するため、適用されるのはより燃費改善効果の得られる中型車や大型車になる。当社も48Vベルト駆動を開発中であり、早期量産化を目指している。

3.3 エンジン出力軸直結型ISGシステム

ベルト駆動型MGシステムは既存車両のレイアウト変更が少ないと利点があるが、ベルト伝達能力の制約から高トルクやトルク応答速度には限界がある。そこで、エンジン出力軸上に扁平(へんぺい)薄型モータを搭載する方が検討されている。図6にシステムの構成を、図7に当社が開発したエンジン出力軸直結型48V-ISG(Integrated Starter-Generator)システム⁽³⁾⁽⁴⁾の外観をそれぞれ示す。このシステムの利点としてボディアースを介して様々な車載機器に電力を供給できる点がある。これによって、ターボチャージャー、ポンプやエアコンなど補機電動化や電気加熱触媒などの電費(電力消費率)・排出ガス改善のためのデバイスを多数追加する場合に利点を持つ。

モータは集中巻の永久磁石型同期モータを多極多スロット化することで大径・薄型のレイアウト制約に対応した。ステータには分割コアの巻線技術を採用することで、巻線の太線化と高密度な巻線を両立させた。また、コアと巻線の絶縁を従来の樹脂ボビンから絶縁紙にすることで放熱性向上を図るとともに、フレームに冷却水路を直接形成することで、冷却性能を向上させた。さらに、多極の集中巻構造を採用することでトルク密度を高めるとともに、弱め磁束制御に必要な電流を低減することによって、高速回転域まで高効率運転範囲を広げることを可能にした⁽⁵⁾。

インバータは、モータと一体化して交流配線をシステム内部に配置するために、エンジン周辺に搭載される。そのため、熱や振動に対し過酷な環境になる。熱の課題に対しては、半導体チップを当社独自のパワーモジュール構造であるTPM(Transfer molded Power Module)にして耐熱性を向上させるとともに、平滑コンデンサを水冷化している。振動に対しても、CAEを駆使してインバータの支持方法や内部構造を工夫し、耐振性の向上を図っている。

制御系については、モータが多極機のため高速回転での

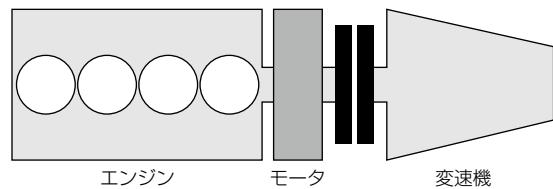


図6. エンジン出力軸直結型ISGシステムの構成

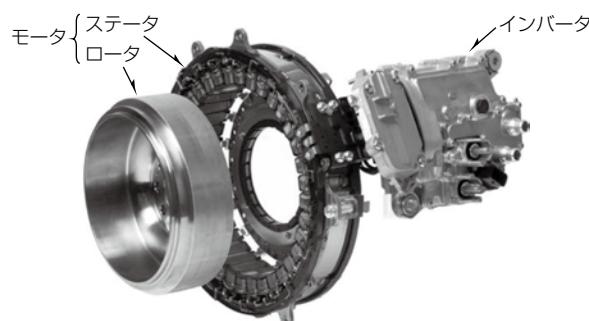


図7. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

制御が難しくなるが、複数コア搭載マイコンのソフトウェアーキテクチャを工夫し、処理負荷を最小化することで制御安定性を確保した。さらに、過電圧や過電流に対するインバータ保護、各種フェールセーフ機能、そして複数コア間でのソフトウェア動作監視や別体LSI(Large Scale Integration)とマイコンとの相互監視などを織り込み、機能安全を実現している。

今後は、更なる小型・軽量・高出力化に向けた開発を行い、自動車の燃費改善によるCO₂抑制に貢献していく。

4. む す び

昨今、電動化への大きな流れがある。しかしながら、モータだけを搭載する車両のシェアは限定的であり、ハイブリッド車が主役と予想され、今後多くの車両には、内燃機関／エンジンが搭載され続ける。各車両メーカーは、引き続き、環境規制に対応した、更なる燃費性能を改善させたエンジンを開発していくことが想定される。当社では、国内外の車両メーカーのエンジン開発のニーズに応える、付加価値の高い製品群を開発・提供し、環境負荷低減に貢献していく。

参 考 文 献

- 和知 敏：自動車のパワートレイン向け発電電動装置、自動車技術会シンポジウムテキスト、12～19、42～47 (2019)
- 藤田賜彦：ベルト駆動式モータジェネレータ、三菱電機技報、90、No.3、199～202 (2016)
- 吉澤敏行、ほか：車載用発電電動機の進化、電気学会 自動車研究会、VT-18-002、7～11 (2018)
- エンジンクランク軸搭載用48V-ISGシステム、三菱電機技報、92、No.1、21 (2018)
- 北尾純士、ほか：エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム用モータの電磁気設計、三菱電機技報、93、No.5、316～319 (2019)

省エネルギー・省資源化に貢献する SiCパワーデバイス

SiC Power Devices Contributing to Energy and Resource Saving

今泉昌之*
Masayuki Imaizumi
松岡 徹†
Toru Matsuoka

要 旨

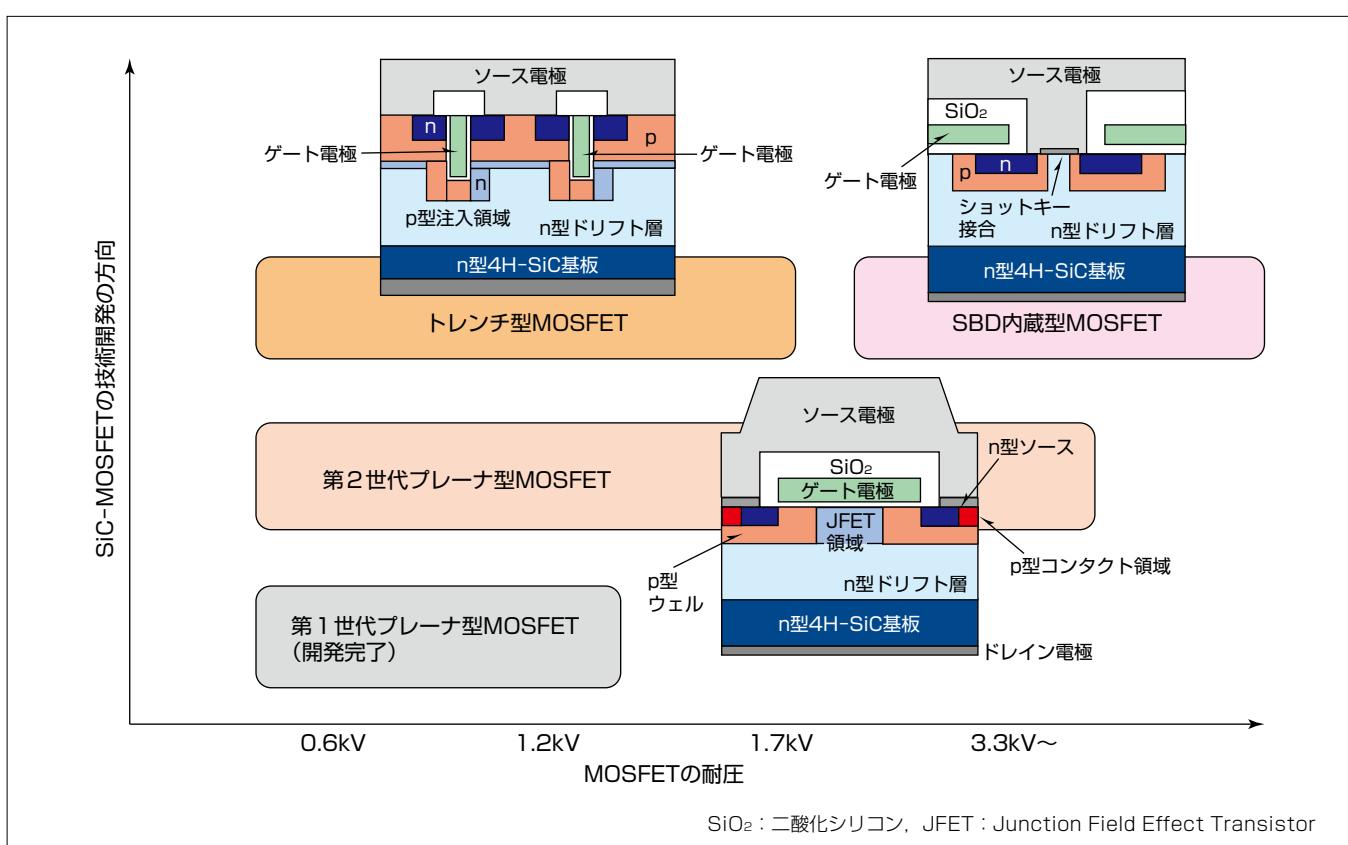
三菱電機は、省エネルギー化・省資源化のキーデバイスであるパワーデバイスを製品ラインアップとして持ち、持続可能な社会の実現に向けて幅広く貢献している。

現状、パワーデバイスには半導体Si(シリコン)によるチップが主に使われているが、Siチップの性能は物理的な限界に近付いている。このため、パワーデバイスの更なる性能向上を可能にする、新しい半導体であるSiC(シリコンカーバイド)によるチップの開発が活発化し、一部のシステムで適用が始まっている。

当社は早期にSiCチップの開発に着手し、特に、パワーデバイスで主要な役割を果たすスイッチング素子

の、MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)の開発に注力してきた。これまで、SiC-MOSFETを組み込んだパワーモジュールを製作し、それらをエアコンディショナ、太陽光パワーコンディショナ、鉄道用インバータなど、各種の製品システムに適用して、SiCパワーデバイスの高性能性、低損失性を実証してきた。

実用化が始まったSiCパワーデバイスであるが、一層の普及には、更なる低損失化、高信頼化、電流容量の増大化、低コスト化など、多くの課題が残されている。当社では、それらの課題を解決する次世代のSiC-MOSFETの開発に注力している。



当社で開発中のSiC-MOSFET技術

当社では、次世代のSiCパワーモジュールに適用するSiC-MOSFETの開発を進めている。低損失化又はチップシルクリングによる低コスト化を狙いとする、第2世代プレーナ型MOSFET、独自構造によるトレンチ型MOSFET、また、特に高耐圧域で低コスト化を可能にする、SBD(Schottky Barrier Diode)内蔵型MOSFETの開発に注力している。

1. まえがき

今日、持続可能な社会の実現が急務であり、省エネルギー・省資源化の取組みが活発化している。当社は、電気エネルギーの効率的な活用に不可欠なパワーデバイスを広く製品ラインアップしており、これらを種々の機器に適用することによって、多岐にわたるシステムの省エネルギー化、小型化などに貢献している。

パワーデバイスには、トランジスタ、ダイオードなどの半導体チップが組み込まれており、電流・電圧の制御で中心的な役割を果たしている。現在、半導体チップはSiによって製作したものが主に使われているが、更なる高性能、低損失化のために、ワイドバンドギャップ半導体のSiCを用いたものの適用が始まっている。SiCの優れた物性値によって、SiCパワーデバイスは電力変換時の損失をおおむね50~70%低減し、また、従来と比べて高周波での動作を可能にする。システムの特徴に応じてSiCパワーデバイスを活用することで、機器の損失低減や、冷却器、受動部品の小型化などが可能になる。

省エネルギー・省資源化に役立つSiCパワーデバイスの一層の普及に向け、当社ではそれらの性能向上、低コスト化に継続的に取り組んでいる。

本稿では、特にSiC-MOSFETの開発に関して、当社が次世代技術として取り組んでいる、第2世代プレーナ型MOSFET、新構造トレンチ型MOSFET、SBD内蔵型MOSFETの開発状況について述べる。

2. SiCチップの開発

2.1 第2世代プレーナ型MOSFET

新たに構築した6インチSiCウェーハラインも活用して開発を進めている当社の第2世代プレーナ型MOSFETは、JFETドーピング技術を用いてMOSセル構造の最適化を進め、低オン抵抗化、低容量化を実現している。例として、1,200V耐圧の第2世代プレーナ型MOSFETのオン特性を図1に、スイッチング損失のゲート抵抗依存性を図2に示す⁽¹⁾。図では比較のため、同じ有効面積を持つ第1世代MOSFETのデータも示している。第2世代MOSFETでは、セルピッチの縮小等によってオン抵抗が約15%低減している。また、容量の低減でスイッチング速度が向上したことなどによって、スイッチング損失が大きく低減していることが分かる。さらに、6インチSiCウェーハラインでは低オン抵抗化のためのSiC基板の薄板化が可能であり、第2世代プレーナ型MOSFETへ適用を始めている。

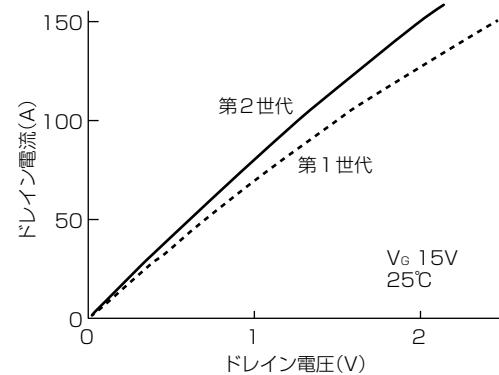


図1. 第2世代プレーナ型MOSFETのオン特性

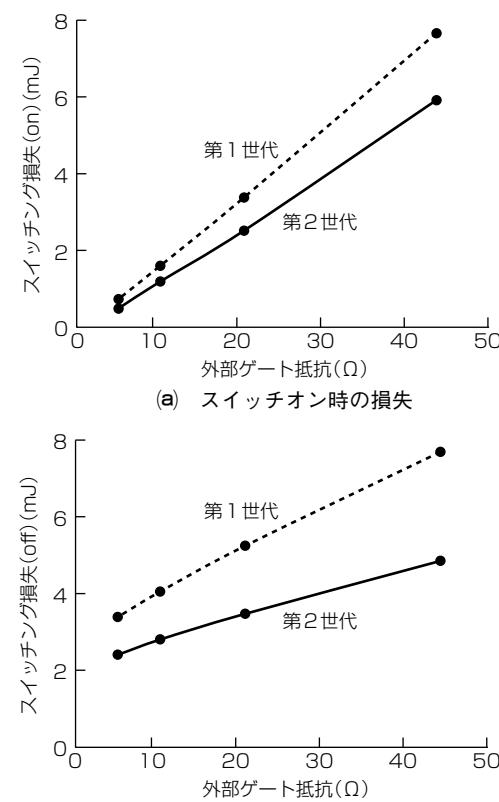


図2. 第2世代プレーナ型MOSFETのスイッチング損失

現在、600V~3.3kV耐圧の種々の第2世代プレーナ型MOSFETを開発しており、順次パワーモジュールへ適用して製品化している。

2.2 新構造トレンチ型MOSFET

SiCパワーモジュールへの適用を目指し、独自構造によるトレンチ型MOSFETを開発している⁽²⁾。SiCは物性値から、チップ内部での電界強度が高くなることが避けられず、特にトレンチ底部のゲート酸化膜にかかる電界強度が高くなるため、SiトレンチMOSFETにはない特別の配慮が必要になる。図3に当社が開発を進めているトレンチ型MOSFETの構造模式図を示す。トレンチ底部のゲート酸化膜にかかる電界を緩和するため、トレンチ下部にp型注

入領域(Bottom P Well : BPW)を形成している。このp型注入領域の電位を安定させるため、トレンチの側壁面に対して斜め方向にp型ドーパントのイオン注入を行って電気的に接続している。トレンチ側壁部の電流経路になる部分には、n型ドーパントの斜めイオン注入を行って電気抵抗を低減している。図4に試作したトレンチ型MOSFETの室温でのオン抵抗を、図5に耐圧特性を示す。プレーナ型MOSFETと比較し、トレンチ型MOSFETの特性オン抵抗は約50%低減して $1.84\text{m}\Omega\text{cm}^2$ が得られており、アバラ

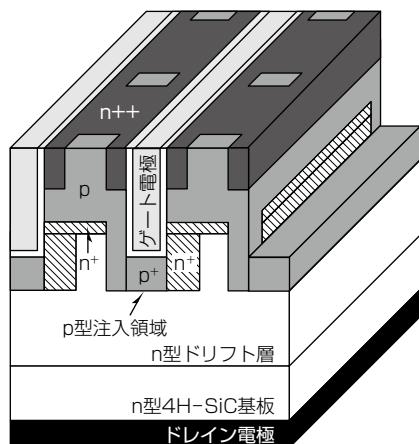


図3. トレンチ型MOSFETの構造模式図

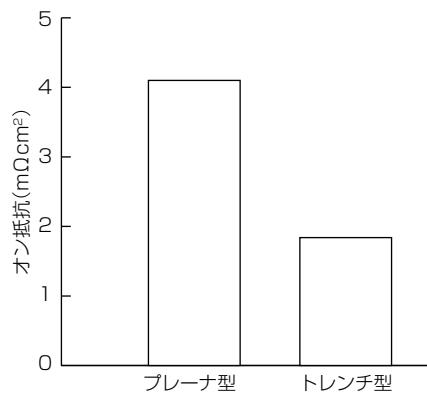


図4. プレーナ型, トレンチ型MOSFETのオン抵抗比較

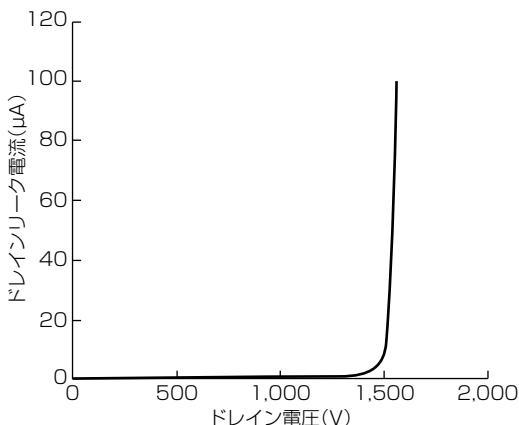


図5. トレンチ型MOSFETの耐圧特性

ンシェ電圧は設計どおりの1,560Vが得られている。

今後、トレンチ型MOSFETの低抵抗特性を活用し、コスト低減に向けたチップシュリンクや、モジュールの容量拡大などにつなげていく。

2.3 SBD内蔵型MOSFET

MOSFETは構造上、逆方向の通電を可能にするpnダイオード(ボディダイオード)が内蔵されており、還流ダイオードとしての利用が考えられる。しかしながら現在のSiC-MOSFETでは、ボディダイオードへの通電でオン電圧の上昇等が見られるものがあり、特に面積の大きな高耐圧MOSFETでは、ボディダイオードへの通電を避けるため、還流ダイオードのSBDの並列接続又はボディダイオードのスクリーニングテストが必要になっている。

当社では3.3kV以上の耐圧のMOSFETに対し、還流ダイオードのSBD及びボディダイオードのスクリーニングを不要とする、SBDをMOSFETの単位セル構造に内蔵したSBD内蔵型MOSFETの開発を継続している⁽³⁾。SBD内蔵型MOSFETの内蔵SBDを通じて逆方向の電流を流した場合、ドリフト層を流れる電流による電圧降下でボディダイオードのpn接合にかかる電圧が抑えられ、ボディダイオードの電流は生じない。

図6に試作したSBD内蔵型MOSFETのオン特性を示す。オン特性はゲート電圧によって制御可能な、通常のMOSFETの特性と同様である。内蔵するSBDの電極面積は小さくてもよいため、通常のMOSFETと比較した場合、特性オン抵抗の増加は小さい。図7にMOSFETのゲートをオフした場合のSBD内蔵型MOSFETの逆方向通電特性を示す。SBDの拡散電圧である約1Vで電流が流れ始め、直線的にユニポーラ電流が流れていることが分かる。MOSFETのゲートをオンした場合、図に示した電流に、MOSFETのチャネルを流れる電流が重畠され、抵抗は大きく下がる。

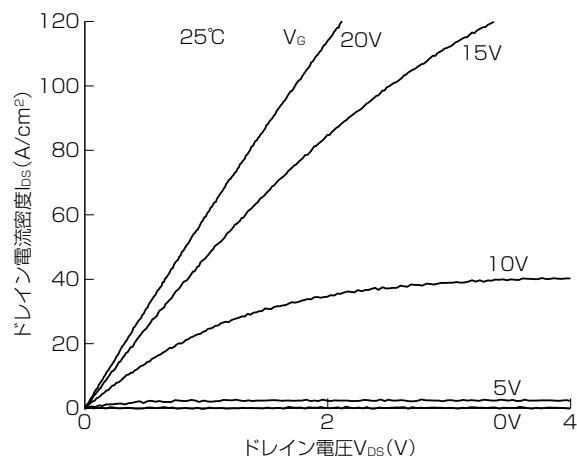


図6. SBD内蔵型MOSFETのオン特性

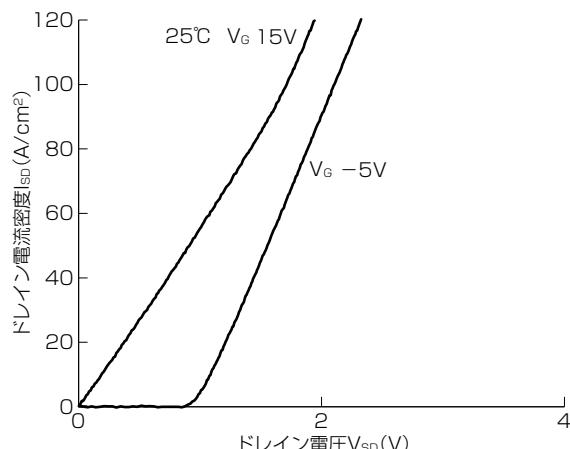


図7. SBD内蔵型MOSFETの逆方向通電特性

SBD内蔵型MOSFETをモジュールに適用することによって、並列接続のSBDの省略とテストの簡略化が可能になり、モジュールの小型化とコストの低減に寄与する。

3. SiCデバイスの応用

SiCによって高耐圧のスイッチングデバイスにMOSFET構造が適用できるようになったことがパワエレ機器の省電力化に与える影響は極めて大きい。耐圧が高くなるにつれて定常損失に比べてスイッチング損失の占める割合が大きくなる傾向があり、従来のSiパワーデバイスの主流であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)ではバイポーラデバイスの特徴であるテール電流が流れることからターンオフ損失が大きく、高キャリア周波数化を妨げる要因の一つであった。

高耐圧応用の代表例として図8に鉄道用途での発生損失の割合を示す。パワーデバイス単体の発生損失低減だけであれば、仮に1/3に低減されたとしてもインバータ部への影響だけであり、全体に占める削減率は1.2%程度にとど

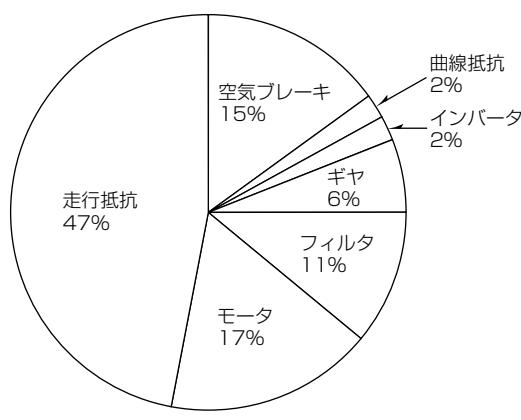
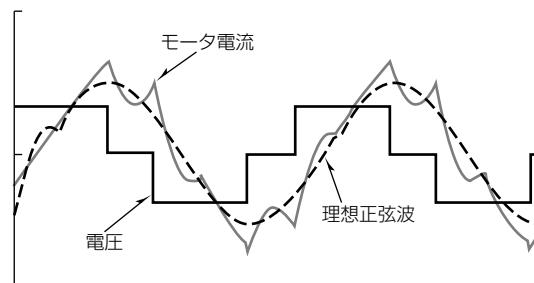
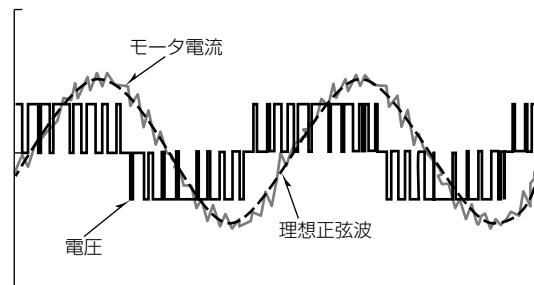


図8. 鉄道用途での発生損失内訳



(a) Siデバイスのスイッチング例

(b) SiCデバイスのスイッチング例
図9. 高周波スイッチングによるモータ損失の低減

まる。しかし、ユニポーラデバイスであるMOSFETにすることでテール電流を低減して発生損失を大幅に削減可能である。図9のように、高周波化することでモータ電流を正弦波電流に近づけることができ、モータ部で発生していた高調波損失の抑制につなげることができた。また、同期整流も行えることから、熱として消散していたブレーキエネルギーも電源側へ回生でき、更なる省エネルギー化に貢献した。

4. むすび

パワーエレクトロニクス機器のキーパーツであるパワーデバイスの更なる性能向上を図るため、第2世代プレーナ型SiC-MOSFETに続き、更に先のトレンチ型SiC-MOSFETの開発も進めていく。また、SBDを内蔵することで、コストを低減する取組みや、高周波化による新たな応用分野での活用などを通じて、様々な分野での省エネルギー・省資源化対策に継続的な貢献を果たしていく。

参考文献

- (1) Tanioka, T., et al.: High Performance 4H-SiC MOSFETs with Optimum Design of Active Cell and Re-oxidation Process, PCIM Europe 2018, 879~884 (2018)
- (2) Fukui, Y., et al.: Effects of Grounding Bottom Oxide Protection Layer in Trench-Gate SiC-MOSFET by Tilted Al Implantation, ICSCRM2019, Mo-1A-02 (2019)
- (3) Hino, S., et al.: Demonstration of SiC-MOSFET Embedding Schottky Barrier Diode for Inactivation of Parasitic Body Diode, Mat. Sci. Forum, 897, 477~482 (2017)



三菱電機グループが、社会をエコに変えていく エコチェンジサイト

大切な地球を守り、未来へとつなげていくために、“私たちの製品や技術で、暮らしを、ビジネスを、社会をエコに変えていく”と。そんな想いを言葉にし、実践していくのが、環境ステートメント“エコチェンジ”です。

エコチェンジサイトでは、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を目指す三菱電機グループの取組みをお子さんを含む一般の皆様に分かりやすく紹介しています。



主なコンテンツ

地球環境への負荷をできる限り減らすエコ
よくわかると、快適で便利な暮らしを両立させるにはどう
エコチェンジ したらいいのでしょうか。

ここでは三つの事例を挙げて、三菱電機グループの取組みを紹介しています。



お子さんに環境問題について楽しく学んで
エコの もらうための、環境の総合的学習サイトです。
わくせい 楽しみながら環境問題への身近な接点を見つける“クイズコーナー”，あこがれの職業についての話題をきっかけに、実験を行う“自由研究のテーマ”は夏休みに大人気です。



私たちの暮らしに生きている三菱電機のエコなテクノロジーを紹介。様々なエコの取組みについて社員が語るとともに、未来の子供たちや、美しい自然を残していくための思いをインタビューしています。2020年7月現在、19のストーリーを掲載しています。



環境のことを理解するために重要な、そして環境の今を理解するための基本的な用語を環境用語 選び、関連して起きていることも取り上げて分かりやすく解説しています。

2020年7月現在の構成は、SDGs、脱プラスチック、サーキュラーエコノミーです。



▶詳しくはWEBサイトでご覧いただけます。

三菱電機 エコチェンジ

検索