

professional report

パワー半導体がつくる快適な低炭素社会

Power Semiconductor Devices Creating Comfortable Low-carbon Society

森 睦宏 Mutsuhiro Mori

地球温暖化問題に対応するため、CO₂排出量削減への取り組みが緊急の課題となっている。2008年の北海道洞爺湖サミットでは「2050年までに世界全体の温室効果ガス排出の少なくとも50%削減を達成する」という目標が共有され、日本政府も「現状から60~80%の削減を掲げて、低炭素社会の実現をめざす」と宣言しており、化石燃料を使わない新エネルギーなどへの転換と省エネルギーが求められている。パワーエレクトロニクス機器とパワー半導体は、それらを実現するうえで、キーとなるシステムであり、デバイスである。

日立グループはこれまで、電力、鉄道車両、自動車、産業、家電などの分野で、主にシステムとの協創を通して新しいパワー半導体を開発してきた。

本稿では、「CO₂排出量半減」の低炭素社会におけるパワー半導体の分野別市場規模を概算するとともに、これまでの日立グループのパワー半導体開発を振り返りながら、最新の技術を紹介し、今後、パワー半導体に求められる役割を概観する。

1 はじめに

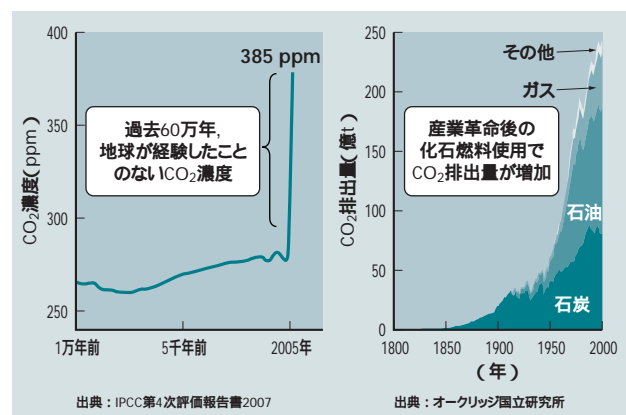
地球温暖化問題が世界共通の重要な課題となっている。2008年7月の北海道洞爺湖サミットでは、米国をはじめとする主要8か国(G8)が「2050年までに世界全体の温室効果ガス排出の少なくとも50%削減を達成する」という目標を共有し、BRICS(ブラジル、ロシア、インド、中国)を含む気候変動に関する国際連合枠組条約の締約国に、今後この目標を採択することを求める¹⁾としている。また、日本政府は「クールアース推進構想」を掲げ、「2050年までに、世界全体でCO₂排出量の半減をめざし、日本としても、2050年までの長期目標として、現状から60~80%の削減を掲げて、世界に誇れるような低炭素社会の実現をめざす」と宣言している²⁾。

近年の空気中のCO₂濃度は、地球が過去60万年経験したことがないレベルに達している(図1参照)。産業革命以来の化石燃料の大量使用が主因で、気候変動に関する政府間

1979年日立製作所入社
日立研究所 所属
現在、システムパワーデバイス・応用の研究開発に従事
博士(工学)
電気学会会員、IEEE Senior Member



パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の第4次評価報告書2007³⁾によると、2100年には地球の平均気温が最大6.4 上昇し、海面水位が最大59 cm高くなると予測している。



注: 略語説明 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

図1 CO₂濃度の変化と化石燃料によるCO₂排出量

化石燃料の使用で、地球が過去60万年に経験したことがないCO₂濃度に達している。

ここでは、2050年にCO₂排出量を半減した低炭素社会を実現するために、パワーエレクトロニクス機器のキーデバイスであるパワー半導体に期待される役割と、その市場規模を展望する。また、パワー半導体の一つで、近年、年率19%で伸び、低炭素社会に向けて当面必須であるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の日立の開発状況とシステム応用について概説する。

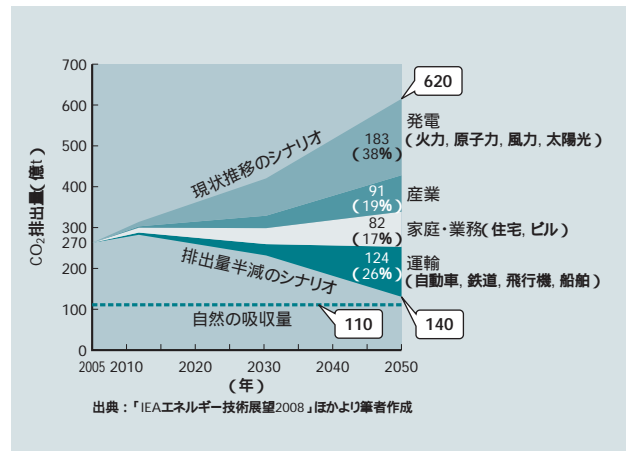
2 2050年におけるパワー半導体

2.1 パワー半導体に期待される役割

2050年にCO₂排出量を現状の半分に削減するシナリオを図2に示す。国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)では、「エネルギー技術展望2008 (Energy Technology Perspectives 2008)⁴⁾」で、現状の成り行きに任せた場合のベースラインシナリオ(ここでは「現状推移のシナリオ」と呼ぶ。)を基準として、CO₂排出量を半減するブルーマップシナリオ(ここでは「排出量半減のシナリオ」と呼ぶ。)を仮定し、分野別の削減量を算出している。「現状推移のシナリオ」では、CO₂排出量は2050年に620億tに達し、「排出量半減のシナリオ」を実現するには140億tまで低減しなければならぬ。その差480億tが2050年に向けての削減量となる。2050年には世界の人口は約92億人になると見込まれ、一人当たりの排出量は年間1.5tとなる。現在、日本は一人当たり年間10t排出しているの、仮に世界の一人当たりの排出量を平等にすると、日本は2050年までに85%削減する必要がある。また、140億tまでの低減が達成できたとしても、この値は、自然の吸収量110億tを上回り、空気中のCO₂濃度は年々上昇し、450ppmになると見積もられている。

図3は、480億tを削減するために、分野別にどんな技術でどれくらい削減するかをIEAが算出したものである。発電分野では、燃料転換やCO₂回収貯留(CCS: CO₂ Capture and Storage)と、風力や太陽光の再生可能エネルギー、原子力発電などへのエネルギー転換が挙げられている。産業や家庭・業務の分野では、産業機器や家電製品などの効率向上による省エネルギーが重要な課題となる。運輸の分野では自動車などのエンジンの電動化が必須となる。ハイブリッド自動車だけでなく、電気自動車や燃料電池車など、燃費がきわめてよい電動化した自動車が広く普及することが求められている。これらには技術開発が必要なものが多く、「排出量半減のシナリオ」実現のための追加的な費用は、2050年までに45兆ドルと算出している。これは年間1.1兆ドルで、世界のGDP(Gross Domestic Product: 国内総生産)の1.1%であると言う。

CO₂排出量削減の480億tのうち、パワー半導体が活躍す



注: 略語説明 IEA (International Energy Agency)

図2 2050年CO₂排出量半減のシナリオとその対策分野

現状の成り行きに任せた場合(現状推移)のシナリオに対して、CO₂排出量を現状から半減するには、2050年に480億tの削減が必要である。

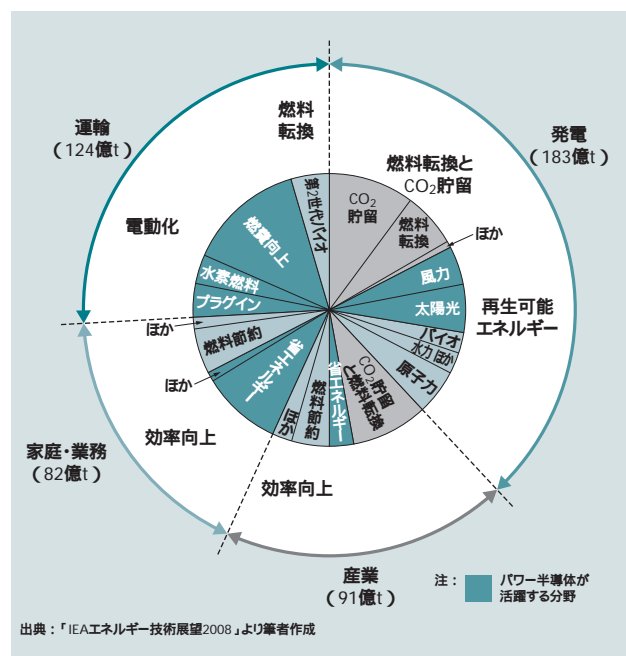


図3 2050年CO₂排出量半減の分野別削減量とその手段

CO₂排出量半減の480億tのうち、パワー半導体が主に活躍する分野だけでも、風力・太陽光発電などの再生可能エネルギー分野やプラグインハイブリッドなどの自動車分野、インバータを使った省エネルギーの家電・産業機器分野など、合計217億t、45%に達する。

る分野は、風力・太陽光発電などの再生可能エネルギーにおける電力変換の分野、プラグインハイブリッド車や電気自動車などの運輸の分野、インバータを使った省エネルギーの家電製品・産業機器の分野など、主な分野だけでも、合計217億t、45%に達し、パワー半導体が「排出量半減のシナリオ」実現のためにきわめて重要な役割を担っていることがわかる。

2.2 2050年のパワー半導体の市場規模とその世界

ここでは、「排出量半減のシナリオ」を実現するためにはどれくらいのパワー半導体が必要なのか、IEAの報告を基にその市場規模を予測する。さらに、「排出量半減のシ

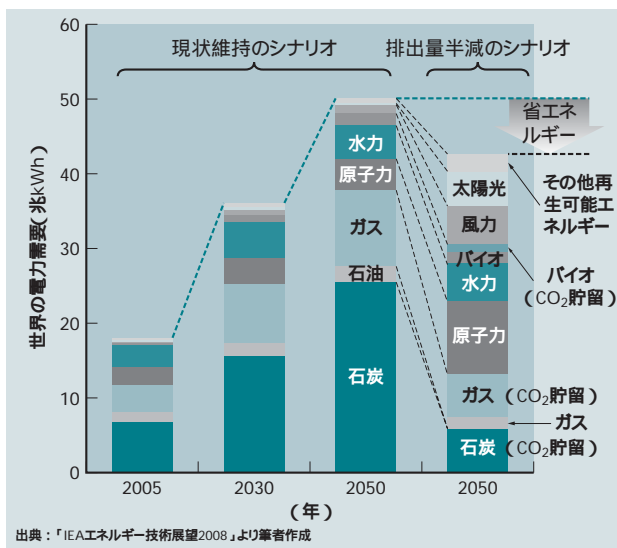


図4 2050年CO₂排出量半減に向けての電力源の変化

「排出量半減のシナリオ」を実現するには、化石燃料を使った発電で出るCO₂はそのほとんどを貯留し、太陽光・風力などの再生可能エネルギーや原子力発電への大幅な電力源のシフトが必要である。さらに、約15%の省エネルギーも必要である。

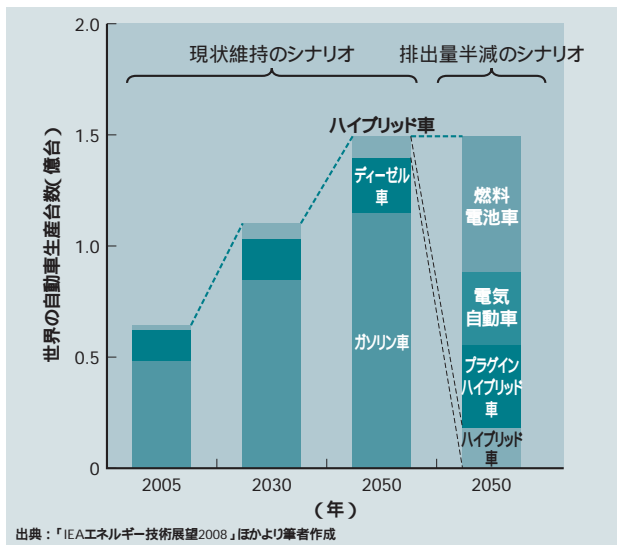


図5 2050年CO₂排出量半減に向けての自動車の電動化

「排出量半減のシナリオ」を実現するには、自動車のほとんどを電動化する必要がある。ハイブリッド自動車などのエンジンにも第二世代バイオ燃料が使われる。

ナリオ」で浮かび上がる社会インフラや生活環境の変化を予想する。

「排出量半減のシナリオ」に向けての電力源の変化とその発電量を図4に示す。2050年には新興国の発展により、「現状推移のシナリオ」のままでは世界の電力需要は50兆kWhになると推定されており、現在の2.7倍に拡大する。「排出量半減のシナリオ」では、化石燃料の発電で出たCO₂はそのほとんどが貯留され、太陽光・風力などの再生可能エネルギーや原子力発電への大幅な電力源のシフトが必要とされている。太陽光や風力の発電量は、10兆kWhに達し、現在の日本における年間発電量1.2兆kWhの実に8倍強になる。これらの電力変換器に必要なパワー半導体の市場規模を概算

すると、太陽光発電で年間約1兆円、風力発電で年間約0.3兆円と見積もられる。さらに、「排出量半減のシナリオ」を実現するには約15%の省エネルギーも必要であり、この分野のパワー半導体の市場規模は、年間約2.6兆円と概算される。

世界の自動車生産台数と、「排出量半減のシナリオ」に必要な自動車の電動化を図5に示す。「排出量半減のシナリオ」を実現するには、従来の化石燃料を使ったガソリン車やディーゼル車はほとんど電動化され、プラグインハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車になると推定されている。これらを広く普及させるためには、市場価格に合ったコスト低減が必要であるが、まだそれぞれに課題が多く、燃料電池車が成功するシナリオや電気自動車が成功するシナリオなどもある。いずれも電動化が「排出量半減のシナリオ」には必須であり、インバータによる加減速制御が必要である。電動化に伴う自動車分野のパワー半導体の市場規模は、年間約5.1兆円と概算される。このほか運輸分野では、燃費節減や省エネルギーのために、トラックやバス、鉄道、建設機械、船舶でもインバータ化が進むと考えられ、その規模は少なくとも年間約1兆円に達すると見られる。

以上を合計すると、「排出量半減のシナリオ」を実現するために必要なパワー半導体の市場規模は、年間約10兆円と概算される。これは、約1兆円と言われる現在の市場規模の約10倍で、今後、年平均5.6%の成長が見込まれる。

ここまで述べてきた「排出量半減のシナリオ」が描く世界はどのようなものか、筆者なりに予想してみた。例えば、各家庭では、耐震強度設計と同じようにトータルエネルギーを最小化する設計がなされ、エアコン1台で冷暖房を賄えるほどに家屋は高断熱化し、太陽電池の設置があたりまえになる。ガレージには、数日分の電力を充電して供給できる電動化された自家用車があり、太陽電池で発電した電力を自家用車の電池などで平準化する。非常時には復旧までの自家発電の役目も果たす。また、日本ではあたりまえの「省エネ家電」が、インバータやモータなどの改良でますます省エネルギーになり、細やかに制御された快適な生活空間を創出し、これらが世界中に普及する。ほとんどの自動車やトラック・バス、鉄道がインバータ化され、排気ガスをほとんど出すことなくスムーズに発進・加速し、停車時にはエネルギーを回収して静かな車内を実現する。

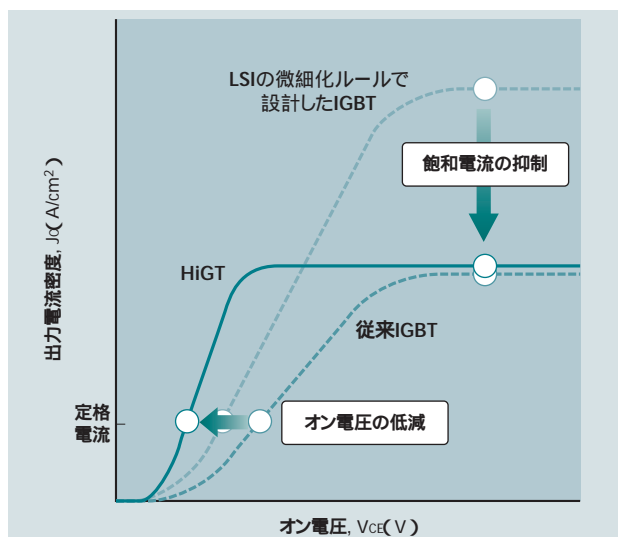
このように「排出量半減のシナリオ」が描く世界は、産業革命以来のエネルギー革命で、コストも含めて技術課題も大きいですが、持続可能な社会を開拓し、自然と共生した快適な空間を実現するチャンスでもある。そのために必要とされる投資を、IEAは世界のGDPの1.1%と予測している⁴⁾。

3 日立のIGBT開発状況とシステム応用

3.1 システムパワーデバイスとHiGTコンセプト

前章で述べた分野で使われるパワー半導体は、電源電圧100 V以上を制御する、耐圧が数百ボルト以上のもので、現在そのほとんどはIGBTである。日立グループは、IGBTの開発を1986年より開始し、グループ内のシステム関連の事業部門に生まれ、またそれらとの協創の中で、新しい技術を開発してきた。システムメリットの最大化を求め、あるときにはIGBTの特性を徹底して改善し、あるときにはシステム仕様まで踏み込んでIGBTの性能を引き出す工夫をしてきた。その意味で、われわれはパワー半導体のことを「システムパワーデバイス」と呼んでいる。

図6は、日立のIGBTの特徴であるHiGT (High-conductivity IGBT: 高伝導IGBT^{5), 6)}の基本コンセプトを示す。従来のIGBTをLSI (Large-scale Integration) の微細化ルールを使って設計すると、出力電流密度が向上し、定格電流付近のオン電圧(IGBT内に生じる電圧降下)を低減することができ、IGBTを低損失化できる。しかし、同時に飽和電流も上昇してしまい、事故時などの過電流を抑制することができず、破壊しやすくなる欠点がある。そこでHiGTでは、高破壊耐量と低損失化の両立を目的に、従来のIGBT並みに飽和電流密度を抑制するとともに、定格電流付近の出力電流密度を向上し、オン電圧を低減することを基本コンセプトとしている。このようなコンセプトを実現する手段の一つとして、新たにIGBTのスケーリング則を考案し⁷⁾、日立のすべてのIGBTに適用してきた。以下、システムへの応用例を基にIGBTの開発状況を述べる。



注：略語説明 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), HiGT (High-conductivity IGBT: 高伝導IGBT)

図6 HiGTの基本コンセプト

HiGTのコンセプトは、飽和電流密度を抑制することで過電流時の破壊耐量を高めて、定格電流付近の出力電流密度の向上によってオン電圧を低減し、低損失化することである。



注：略語説明 CTRL (Channel Tunnel Rail Link)

図7 世界初の鉄道用IGBTモジュールとIGBTを搭載した車両

世界で初めてIGBTを搭載したインバータ電車が東京地下鉄株式会社日比谷線に導入され、1992年の試験運転を経て、翌年営業運転を開始した。東日本旅客鉄道株式会社キハE200形車両のハイブリッド駆動システムは、ディーゼルエンジンで発電してリチウム電池に蓄電し、モーターで駆動する。ドーバー海峡トンネル連絡線 (CTRL線) 車両は、2009年12月の運転開始に向けて現在試験運転中である。

3.2 鉄道車両への応用

日立におけるIGBTの鉄道車両応用は、1992年に世界で初めて開発した2,000 V 300 A IGBTモジュールに始まる⁸⁾ (図7(a)参照)。当時、インバータ電車のパワー半導体には、ゲートターンオフサイリスタ (GTO: Gate Turn-off Thyristor) が使われていた。一方、IGBTは産業用途に最大1,400 Vクラスのモジュールが市販されていた。IGBTを鉄道車両に適用するために、駅間の発進・停車の繰り返しにも耐える高信頼のモジュールと、高電圧の架線にも使える高耐圧2,000 VのIGBTチップを開発した。これを使ったIGBTインバータを世界で初めて東京メトロ (東京地下鉄株式会社、旧帝都高速度交通営団) の日比谷線03系電車⁹⁾ に搭載し、1993年に営業運転が始まった (図7(b)参照)。それまでのGTOインバータに比べ、インバータの大きさや重さをそれぞれ40%減らし、騒音レベルも15 dB低減した。また、1編成当たりの最大損失を60%低減でき、IGBTの鉄道応用への可能性を一気に広げた。モジュールはさらに改善が加えられ、IGBTチップのシリコンの熱膨張係数に近い、低い熱膨張係数の基板を持つモジュール¹⁰⁾ とすることで、量産安定性を高めた。その後、この低膨張基板を使ったモジュール構造は、鉄道分野では事実上の世界標準となり、現在も広く使われている。また、ハイブリッド自動車の一部でも適用されている。

東日本旅客鉄道株式会社キハE200形車両¹¹⁾ のハイブリッド駆動システム¹²⁾ では、ディーゼルエンジンを最も効率の高い回転数で動かして発電する (図7(c)参照)。この交流電圧を、IGBTを使ったコンバータで直流電圧に変換し、リチウム電池に蓄電する。IGBTを搭載したインバータで再び交

流に変換し、モータを駆動する。ハイブリッド駆動システムとすることで、従来のディーゼル車両に比べ、低燃費（-10%）低騒音（-30 dB）、窒素酸化物と粒子状物質の排出量低減（-60%）を実現している。このシステムは長距離高速鉄道向けにも展開されており、現在既存のHST（High Speed Train）¹³⁾に搭載され英国内で走行試験が繰り返されている。

今回、鉄道発祥の地・英国で、日本のメーカーとしては初めての受注となったドーバー海峡トンネル連絡線（CTRL線：Channel Tunnel Rail Link）車両¹⁴⁾は、このような日本国内で培ってきた新幹線などの高速鉄道車両をはじめ、各種鉄道車両における日立の長年にわたる実績と、最新の鉄道技

術などの品質と信頼性が評価されたものとする（図7（d）参照）。

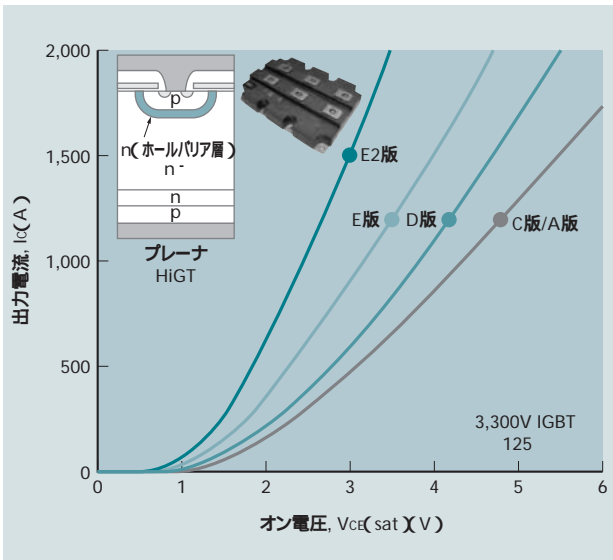
図8は、主に鉄道車両用に使われている3,300 V IGBTモジュールの特性改善を示す。世界初の2,000 V IGBTモジュールを電車で搭載して以来15年、高耐圧・大電流化を図り、損失も低減してきた。E2版の3,300 V 1,500 A HiGTモジュールには、最新のプレーナHiGTチップを搭載した。プレーナHiGTは、シリコン表面にプレーナ型の平坦（たん）なMOS（Metal-oxide Semiconductor）ゲート構造を持ち、HiGTコンセプトを保ちながら、ホールバリア層により、伝導度変調を高めている。これにより、オン電圧を下げ、損失を低減するとともに、出力電流を向上している。

高耐圧大容量のIGBTモジュールをこれまで、主に鉄道車両向けに開発してきたが、最近では、鉄鋼などの大型産業用途だけでなく、風力発電や建設機械、船舶などにも応用されるようになった。鉄道で培った技術が、パワーエレクトロニクス技術とともに社会インフラシステムへ広がってきている。

3.3 ハイブリッド自動車への応用

鉄道車両用で培った高信頼の設計技術を、ハイブリッド自動車用インバータシステムへ展開し、信頼性と低価格という自動車特有のニーズに対応するために、その技術をさらに発展させている。図9は、ハイブリッド自動車用のHiGTモジュールと、ストロングハイブリッド自動車の高出力IGBTモジュール用に製品化した、高駆動能力で高機能なドライバIC（Integrated Circuit）を示す。自動車では、鉄道車両と異なり、エンジンを冷却するための水冷のラジエータがほとんどの自動車にすでにあり、水冷を使うことに違和感がない。このHiGTモジュールは、モジュールの底部（ベース）に水冷フィンが付いており、ラジエータの冷却水で直接冷却することができる。これにより、モジュールと冷却フィンを別々にした間接水冷に比べ、放熱グリスを使用しないため、熱抵抗が約25%低減する。IGBTチップの温度が下がり、モジュールの信頼性が高まるとともに、実装密度を高めることができ、インバータの小型化が可能となる¹⁵⁾。

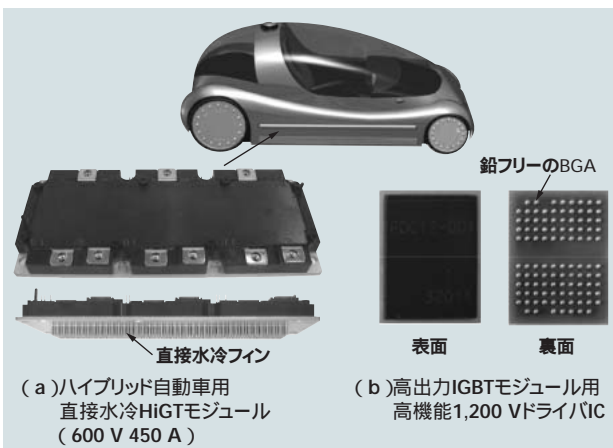
1,200 VドライバIC¹⁶⁾は、IGBTモジュールのゲートを駆動する能力が最大10 Aあり、100 kWクラスのモータを備えたストロングハイブリッド自動車の大容量インバータにも対応できる。上下アームの1相のIGBTを、一つのドライバICで駆動でき、内部にはデッドタイム生成機能や各種の保護回路を持つ。常に上下アームのIGBTの動作を監視、制御することにより、上下のIGBTが同時にオンし、電源短絡することを防いでいる。IC内部でデッドタイムをつくることで、その期間を短縮し、モータのスムーズな回転を実現で



注：略語説明 MOS（Metal-oxide Semiconductor）

図8 プレーナHiGTによる3,300Vモジュールの低オン電圧化

E2版の3,300 V 1,500 A HiGTモジュールのIGBTチップには、最新のプレーナHiGTが搭載されている。プレーナHiGTは、シリコン表面にプレーナ型の平坦なMOSゲート構造を持ち、HiGTコンセプトを保ちながら、ホールバリア層によって電気伝導度を高めることで、オン電圧を低減し、出力電流を向上している。



注：略語説明 BGA（Ball Grid Array）、IC（Integrated Circuit）

図9 ハイブリッド自動車用HiGTモジュールとドライバIC

600 V 450 A HiGTモジュールは3相分のトレンチHiGTが搭載されている。底面はフィン構造となっており、直接水冷ができ、従来の間接水冷に比べ熱抵抗が約25%小さい。ドライバICは最大10 Aの1相分の駆動回路と、デッドタイム生成やソフトゲート、各種保護機能を持つ。パッケージは、鉛フリーのBGAで、小スペースの実装が可能である。

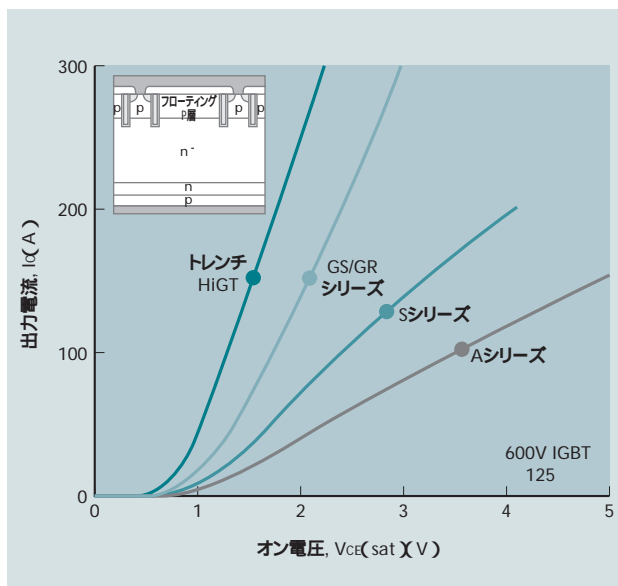


図10 トレンチHiGTによる高出力，低オン電圧化
トレンチHiGTは，Aシリーズに比べると，オン電圧だけでなくスイッチング損失も約半分に低減されており，インバータの損失が約半分に減っている。

きる。また，このドライバICは，ソフトスイッチング機能を持つ。IGBTを低損失で滑らかにスイッチングさせることで，IGBTの発熱と過電圧を抑制している。さらに，過電流，過温度，不足電圧の保護機能があり，インバータを安全・安定に駆動することが可能である。

このような多くの機能を搭載し，実装密度を高めるために，今回SOI(Silicon on Insulator)を使った高耐圧ICを新たに開発し，さらに出力バッファ用のパワーMOSFET(MOS Field-effect Transistor)などを，マルチチップで実装する鉛フリーのBGA(Ball Grid Array)パッケージも新たに開発した。

図10は，**図9**のHiGTモジュールに搭載したトレンチHiGTの出力特性を，それまでに開発したIGBTシリーズと比較している。1980年代後半に開発したAシリーズの高速IGBTを，エアコンの昇圧コンバータに適用した。昇圧コンバータを使うことで，永久磁石同期モータの高速域のトルクを高めることができ，冬でも省エネルギーで80 の温風を出せるエアコンを開発し，1990年に製品化した。現在の日立のPAM(Pulse Amplitude Modulation)エアコンの原型である。その後，オン電圧を低減したSシリーズ，GS/GRシリーズは，産業用やエレベーターなどにも使われた。

トレンチHiGTは，トレンチ(溝)型のMOSゲート構造を持ち，ゲートが間引かれ，フローティング電位のp層を有する。ゲートを間引くことで，HiGTのコンセプトである飽和電流を抑制するとともに，ゲート容量を低減し，駆動しやすくしている。また，フローティングp層を設けることにより，電子の注入を促進し，電気伝導度を高め，オン電圧(損失)を低減している。低損失のトレンチHiGTと低熱抵抗の直接冷却モジュールなどを採用することで，小型で

高出力のハイブリッド自動車用インバータを実現している。

このように，ハイブリッド自動車用で新たに開発した技術をさらに他の分野に展開し，相乗効果を高めている。

3.4 エアコンへの応用

小容量のモータ向けにIGBTとダイオードだけでなく周辺回路も集積化した，高耐圧ICを開発した(**図11**参照)。主にエアコンの室内機・室外機のファンモータに搭載されているワンチップインバータICである。この高耐圧ICは，500 Vの耐圧を持ち，1.5 Aの出力が可能で，最大150 Wクラスのモータをインバータ制御できる。高耐圧のため，交流100 Vや200 Vからの高電圧を直接受電でき，降圧用のスイッチング電源が不要なため，高効率で小さくできることが特長である。その結果，モータの中に内蔵することも可能で，普通の永久磁石同期モータを，加減速制御が可能な「インバータモータ」に変身させることができる。このワンチップインバータICの初代を1990年に世界で初めて開発し^{17), 18)}，IGBTを初めてICに集積化したが，市場は長く低迷した。本格的に普及し始めたのは，1999年に改正省エネ法が施行され，「トップランナー方式」が導入されてからである。

ワンチップインバータICはさらに改良を進め，8ビットのマイコンも同時にモータに内蔵¹⁹⁾することで，高効率が高特長の永久磁石同期モータを，さらに高効率で駆動できるようにした。マイコンを使うことで，モータごとの個体差に依存することなく，消費電力を最大15%(5 W)低減した。また，小型のファンモータでは初めて，モータへの出力電流の電流極性信号を生成する方式を開発した。磁石の位置を示す位置信号との位相差を細かく制御することで，騒音の原因となる速度変動を抑制し，騒音レベルを最大

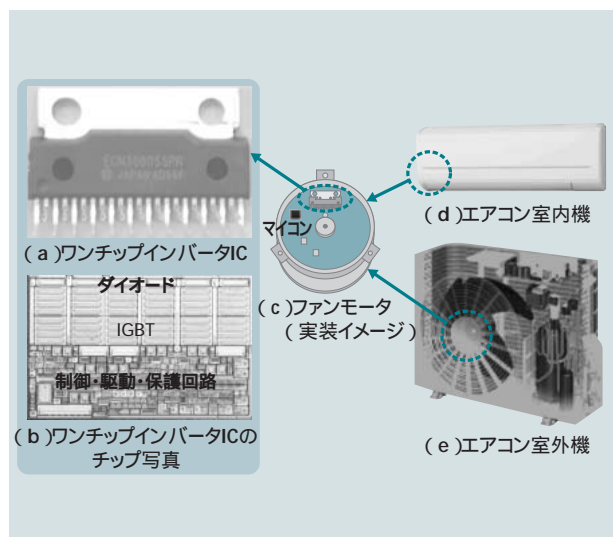


図11 ワンチップインバータICによる小容量モータのインバータ化
ワンチップインバータICにIGBTやダイオード，各種回路を集積化し，モータに内蔵することで，エアコンの室内機や室外機などのような小容量のモータもインバータ化し，省エネルギーと快適性を実現している。

35%(20 dB)低減している。このICの定格電流を2 Aに上げ、オフィスなどのパッケージエアコン用ファンモータにも展開している。ワンチップインバータICは、エコキュート[®]やガス給湯器、空気清浄機、乾燥機などのファン・ポンプや、自動ドアなどにも使われており、省エネルギーで静かな空間、快適な生活環境を創出している。今回の高耐圧ICとマイコンのセットは、日立グループが長年、産業や家電分野で培ってきたモータ制御技術と重電分野のパワーエレクトロニクス技術を融合することで実現できた。

このような小容量のモータまでインバータ化し、省エネルギーと快適性を追求するのは、日本独自の文化とも言い、地球温暖化問題に対する総力を挙げた取り組みが求められる中で、世界に積極的に発信し、普及すべき新たな価値であると考えられる。

エコキュートは、関西電力株式会社の登録商標である。

4 パワー半導体の今後の展望

HiGTの基本コンセプトの下、低オン電圧化を追求してきた結果を、従来IGBTと比較して図12に示す。あわせて、主なパワー半導体の応用分野と定格電圧の関係を同図に示す。IGBTは動作上、図8や図10に示すように、pn接合を順バイアスする約1 Vの電位差が必要で、1 V以下のオン電圧を実現することは難しい。1 Vがシリコンの物性値であるバンドギャップエネルギー(禁制帯幅)で決まるからである。定格電圧が低い600 V付近のIGBTはオン電圧が1 Vに近づいており、格段の損失低減は難しいが、3,300 Vなどの高電圧の領域は、今回紹介したE2版のように、まだ改善の余地がある。このような技術を高電圧領域にとどまらず、より低

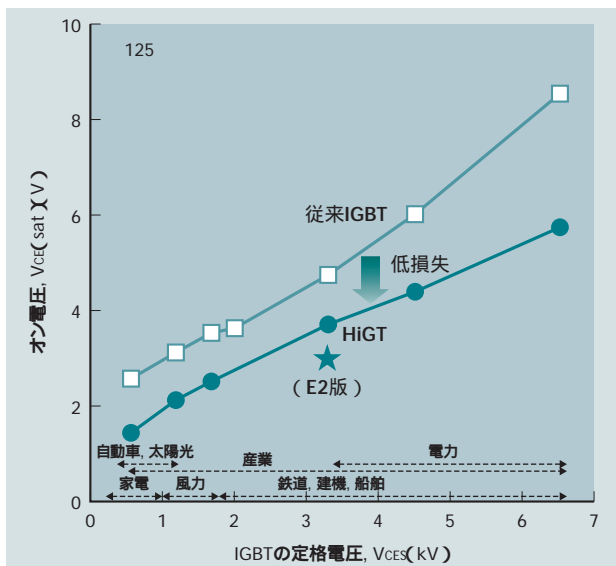
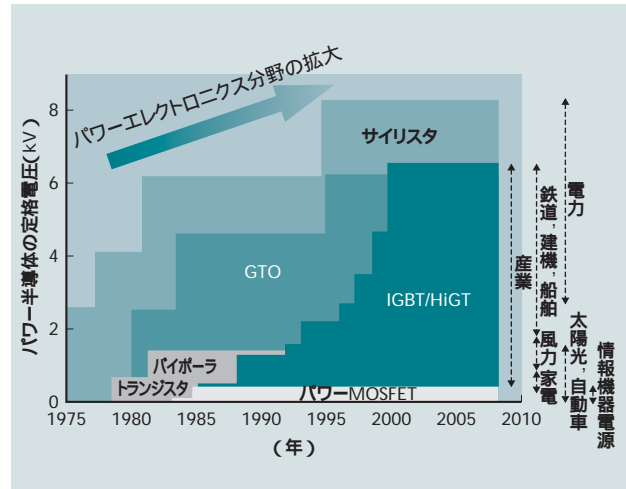


図12 HiGTによる低オン電圧化の追求
HiGTの基本コンセプトの下、あらゆる定格電圧の領域でオン電圧の低減を図り、低損失化を追求している。



注：略語説明 GTO (Gate Turn-off Thyristor), MOSFET (MOS Field-effect Transistor)

図13 パワー半導体の種類と高耐圧化の変遷
パワー半導体の高耐圧化とともに、パワーエレクトロニクス技術の応用分野が拡大し、IGBTの高耐圧・低損失化とともに、IGBT/HiGTがGTOやバイポーラトランジスタに取って代わり、パワー半導体の担い手となった。

電圧領域にも展開し、少しでも損失を下げることで、インバータなどの小型・高効率化を促進し、そしてその普及を進めることが、省エネルギー社会の実現のためには必要である。

パワー半導体の種類と高耐圧化の変遷を図13に示す。パワー半導体の高耐圧化とともに、パワーエレクトロニクス技術の応用分野が拡大してきた。1990年代のIGBTの高耐圧・低損失化とともに、GTOやバイポーラトランジスタに取って代わり、IGBT/HiGTが一挙にパワー半導体の担い手となった。その適用範囲は広く、低電圧では耐圧が数百ボルトの家電製品、自動車から、6,500 Vの電力、鉄道、大型産業をカバーする、これまでにないオールマイティのパワー半導体となっている。この理由は、単に高耐圧化や低損失化が進んだだけでなく、IGBTが堅牢(ろう)で周辺の保護回路をほとんど必要とせず、また、電流集中が起きにくく大電流化のための並列接続が容易で、さらにMOSゲートによる電圧駆動のため非常に制御しやすいなど、理想に近いパワー半導体であることによる。

しかし、図12で示したように低耐圧のIGBTは限界に達しつつあることも事実であり、IGBTがGTOやバイポーラトランジスタを凌駕(りょうが)したように、新しいパワー半導体が求められている。近年シリコンに代わり、SiC(シリコンカーバイド)やGaN(窒化ガリウム)などの半導体が注目を集め、盛んに研究開発が行われ、一部は実用化されていて期待も大きい。しかし、まだ結晶欠陥や製造プロセスなどの課題も多く、図13に示す広範囲の応用分野をカバーするにはいまだ力不足である。当面、より改善された低損失で、低ノイズ、低コストなIGBTが、主役を担っていくであろう。また、パワーエレクトロニクスシステムの応用部

門との協創により、IGBTの性能を限界まで引き出す、トータル設計も重要である。

5 おわりに

日立グループは、2001年の「環境ビジョン2010」、2006年の「環境ビジョン2015」に続き、地球温暖化防止に向けた長期計画「環境ビジョン2025」を策定し、2025年度までに、世界全体で日立グループの製品によって、年間1億tのCO₂排出量抑制に貢献することを2007年12月20日に発表した。パワー半導体は、省エネルギーや新エネルギーの幅広い分野に応用され、すでに重要な役割を果たしている。しかし、今はまだその入り口にすぎない。

ここで述べたように、「排出量半減のシナリオ」実現のためには、エネルギーの生成と利用において、今から40年のうちにエネルギーのパラダイムシフトが必要である。パワー半導体は、削減すべき480億tの約半分の分野に直接かかわっており、その市場規模は2050年には現在の約10倍、年間10兆円に達すると見込まれる。また、「排出量半減のシナリオ」が描く世界は、節約や倹約の息苦しい社会ではなく、むしろ自然と共生した快適な空間であり、そこには、持続可能な心地よい低炭素社会が見える。

このような快適な低炭素社会が一日も早く実現するように、よりよい「システムパワーデバイス」を開発していきたいと思っている。

参考文献など

- 1) 北海道洞爺湖サミット, http://www.g8summit.go.jp/doc/doc080714_ho.html
- 2) 首相官邸, <http://www.kantei.go.jp/jp/hukudaspeech/2008/06/09speech.html>
- 3) 環境省, <http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/ar4syr.pdf>
- 4) International Energy Agency; Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050
- 5) M. Mori, et al. : A Trench-Gate High-Conductivity IGBT (HiGT) with Short-Circuit Capability, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.54, No.6, pp.2011-2016 (2007.8)
- 6) M. Mori, et al. : A Planar-Gate High-Conductivity IGBT (HiGT) with Hole-Barrier Layer, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, No.6, pp.1515-1520 (2007.7)
- 7) M. Mori, et al. : A New Generation IGBT Module with Low Loss, Soft Switch and Small Package, Proceedings of IPEC Yokohama, pp.916-920 (1995)
- 8) M. Mori, et al. : A High Power IGBT Module for Traction Motor Drive, Proceedings of ISPSD, pp.287-291 (1993)
- 9) T. Katta, et al. : Advanced Inverter Control System using High Voltage IGBT for EMU, Proceedings of IPEC Yokohama, pp.1060-1065 (1995)
- 10) A.Tanaka, et al. : 2000 V 500 A High Power IGBT Module, Proceedings of ISPSD, pp.80-83 (1995)
- 11) 東日本旅客鉄道株式会社, http://www.jreast.co.jp/press/2007_1/20070704.pdf
- 12) 和嶋, 外 : 鉄道システムにおける環境負荷低減ソリューション, 日立評論, 90, 5, 408 ~ 411 (2008.5)
- 13) 徳山, 外 : 環境負荷を低減するハイブリッド駆動システムの実用化, 日立評論, 89, 11, 830 ~ 833 (2007.11)
- 14) 川崎, 外 : 欧州鉄道向け車両技術, 日立評論, 89, 11, 872 ~ 875 (2007.11)
- 15) 石井, 外 : 自動車におけるCO₂削減技術, 日立評論, 90, 5, 412 ~ 417 (2008.5)
- 16) N. Sakurai, et al. : A 1200V high-power driver IC with multi-chip mounting for strong HEVs, Proceedings of International Symposium on Automotive Power Electronics, pp.1-7 (September 2007)
- 17) H. Miyazaki, et al. : 250 V 1 A Three-Phase Monolithic Inverter IC for Brushless Motor Drives, Proceedings of IPEC Tokyo, pp.878-885 (1990)
- 18) N. Sakurai, et al. : High Speed, High Current IGBT and Diode for Output Stage of High Voltage Monolithic Three-phase Inverter IC, Proceedings of ISPSD, pp.66-71 (1990)
- 19) K. Sakurai, et al. : Three-Input Type Single-Chip Inverter IC including a Function to Generate Six Signals and Dead Time, Proceedings of ISPSD, pp.323-326 (2008)