

パワーエレクトロニクス応用技術による 省エネルギー、CO₂削減への取り組み

Approach to Energy Saving and CO₂ Reduction by Power Electronics Technology

豊田 昌司 秋田 佳稔 宮田 博昭
Toyota Masashi Akita Yoshitoshi Miyata Hiroaki
加藤 修治 黒須 俊樹
Kato Shuji Kurosu Toshiki

省エネルギーを実現するキー技術は、電気エネルギーの有効活用であり、そのためには電気の形を最適に変えるパワーエレクトロニクス技術が必須となる。インバータによる電動機の変速ドライブや、太陽光・風力などによる不安定な直流または交流の電力を電力系統に安定的に連系するパワーコンディショナー(PCS)など、パワーエレクトロニクス機器はCO₂削減による継続可能な社会を築くキーコンポーネントとして注目を浴びている。

日立グループは、パワーエレクトロニクスにシステム制御技術、および主要部品であるパワーデバイス技術を融合して電力、産業などの社会インフラ分野でのCO₂削減に貢献するシステム、製品およびサービスを提供している。

1. はじめに

パワーエレクトロニクスは、パワーデバイスを使用して電気の形を使いやすいように効率よく変える技術である。さまざまな機器の省エネルギー化と高性能化を実現するキーコンポーネントとして、電力、産業、輸送、家庭など幅広い分野で、CO₂削減による持続可能な社会実現と豊かで快適な社会実現の両立に貢献している。

日立グループは、電力・産業などの社会イノベーション事業分野でパワーエレクトロニクスとシステム制御技術とを融合することによって、安全・安心で、快適なシステムを提供している(図1参照)。

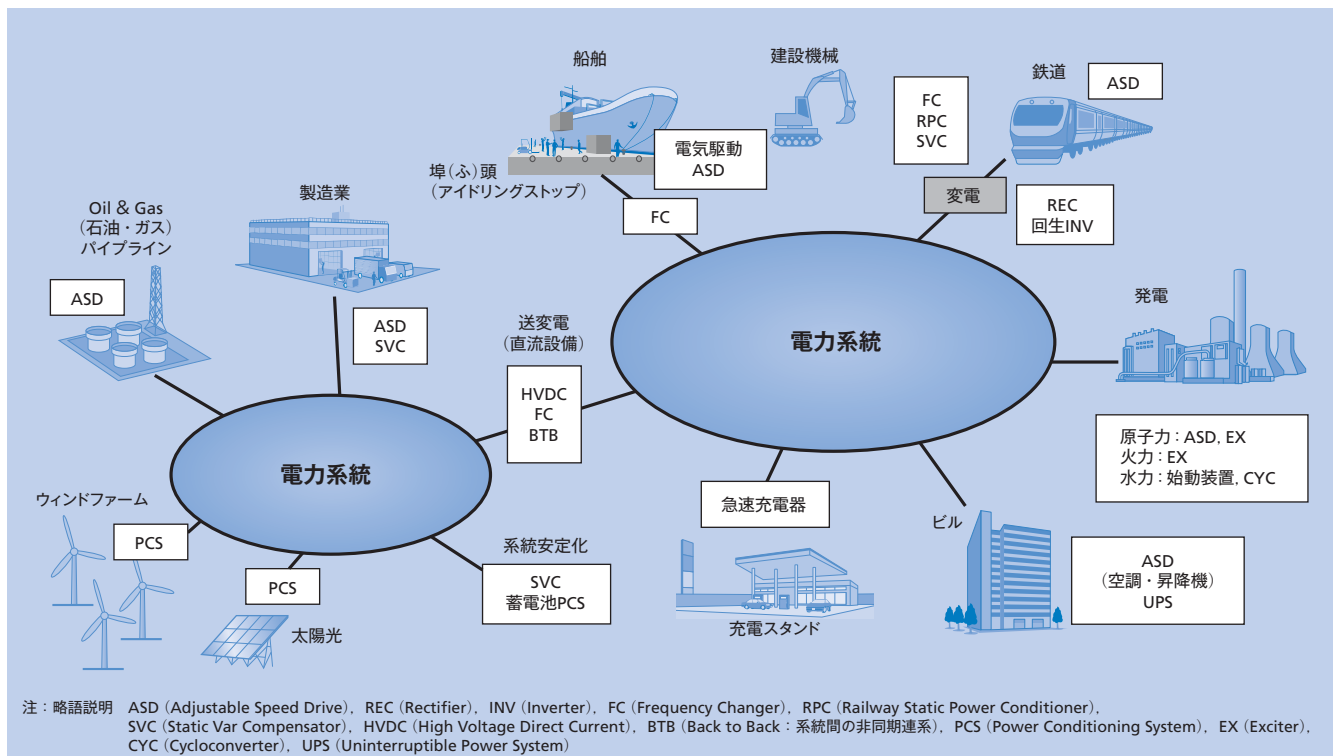


図1 | 電力・産業分野のCO₂削減に貢献するパワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスは、省エネルギー、再生可能エネルギーの系統連系安定化、機器の高性能・高機能化に大きな役割を果たしている。

ここでは、パワーエレクトロニクスおよびパワーデバイスの再生可能エネルギー分野、産業分野への適用事例と、CO₂削減に向けての技術展望について述べる。

2. 再生可能エネルギー分野におけるCO₂削減

各国が再生可能エネルギーをCO₂削減の切り札として政府レベルの取り組みを実施しており、2008年の世界市場における新規導入量は、風力発電が28 GW、太陽光発電は5.5 GWに上った。今後も2けたの成長率が見込まれており、この急激な導入量の増大による電力系統品質問題がクローズアップされてきた。こうした再生可能エネルギー大量導入時の電力品質問題に対する日立グループの取り組みについて以下に述べる。

2.1 風力発電向けPCS

風力発電は、すでに商業ベースで採算のとれる発電事業となっており、米国、中国、欧州を中心に導入が加速している。

日立グループは、2001年に100 kWクラスのPMG (Permanent-magnet Generator：永久磁石発電機) 用のフルコンバータ方式PCS (Power Conditioning System：パワーコンディショナー) を市場に投入した。また、現在主流である1.5～2.5 MWクラスの二次励磁方式PCSを、2006年

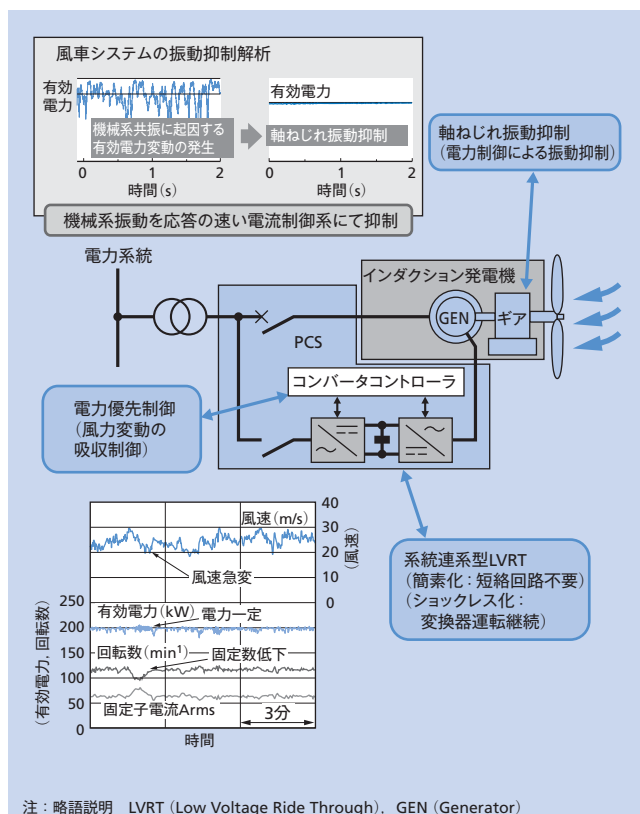


図2 | 二次励磁風力発電用変換制御システムの特徴

電力優先制御、軸ねじれ振動抑制、各国のグリッドコードに対応したLVRT機能を備えている。

から製作している。特徴的なのは、各国のグリッドコード（系統連系規定）に対応したLVRT (Low Voltage Ride Through：瞬時電圧低下時運転継続) 機能などを備えている点である（図2参照）。さらに、今後の風力発電機大型化に向けてアベイラビリティの高いPCSを継続的に開発している。

2.2 太陽光発電向けPCS

太陽光の分野では、各国で大規模太陽光発電（メガソーラー）が計画されている。日立グループは、メガソーラー向けにLVRT機能と最適無効電力制御による電圧変動抑制機能を備えた500 kWクラスのPCSを提供している。このPCSは、トランスレス方式で最大効率は97%を超える（図3参照）。

2.3 再生可能エネルギー大量導入拡大に向けての取り組み

風力、太陽光などの再生可能エネルギーは、CO₂削減に寄与する一方、不安定なエネルギー源が電力系統に接続されるため、大量導入に向けては電力系統品質維持対策が必須となる。

日立グループは、パワーエレクトロニクスとシステム制御技術、さらに蓄電池などのコンポーネントを含めて広分野でこの課題に取り組んでいる（表1参照）。特に風力、太陽光では前述したPCS単体の電圧変動抑制機能に加え、ウィンドファームなどのシステムとして、複数台の分散電源を協調制御して発電所全体の安定化と発電量の最大化を図る研究を行っている。

将来的には、各ウィンドファームやメガソーラーを中央給電指令所と連携制御して電力系統の安定化を行うスマートグリッドに発展させていく。



図3 | メガソーラー向けPCS

大規模太陽光発電（メガソーラー）用の大容量PCS（400 kW、420 V三相）の外観を示す。

表1 | 再生エネルギー大量導入に対する日立グループの取り組み
分散電源側、余剰電力、配電、電力系統全体についての対応策と日立グループの取り組みを示す。

区分	対応策	日立グループの取り組み
分散電源側	電圧変動抑制制御	無効電力最適化による変動抑制機能付きPCS
	発電電力変動抑制のための出力抑制	協調形ウィンドファーム制御による系統安定化と発電出力最大化の研究
余剰電力	蓄電池	負荷平準化および短周期電力脈動補償機能付きPCS
		負荷平準化用長寿命鉛蓄電池（LL形） 産業用リチウムイオン電池
	揚水発電	可変速揚水発電システム
配電	SVC	フリッカ抑制機能付き大容量SVC
電力系統全体	系統間連系	超高压直流設備および系統安定化制御保護装置（HVDC、FC、BTB）
	発電電連携	スマートグリッドシステム

3. ドライブ・UPS関連の省エネルギー技術

3.1 一般産業用ドライブシステム

近年の地球温暖化防止のためのCO₂削減推進策として、ファンやポンプなどの機器をドライブ装置によって最適な速度に可変速駆動して省エネルギーを行うニーズが高まってきた。こうした需要に対応するため、日立グループは、標準電圧3 kV、6 kVクラスの電動機を、昇圧トランスを介することなく直接駆動する高圧ダイレクトインバータ装置HIVECTOLシリーズを製品化した。製品ラインアップを図4に示す。

出力電圧6 kVのインバータは8 MVAまでの製品があり、さらなる大容量化のニーズを受け、水冷式5レベルインバータ装置を開発した。装置の外観と全体構成を図5に示す。3レベルインバータユニットを2台直列に接続し、出力電圧レベルを5レベルとする制御方式を採用した。30 MVA変換器を2バンク構成とし、出力電圧7.2 kV、最大出力容量60 MVAに対応している。また、グローバル化への対応として11 kVを出力するシリーズも製品化した。

インバータの導入時には、顧客設備の多様性・高精度化に応じてプラントごとに最適なドライブシステムが必要である。日立グループは、解析技術を駆使して、変換器の高効率化、高密度化を行っており、特に負荷機側で課題とな

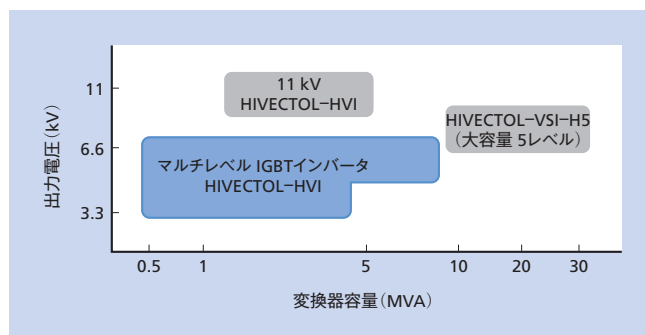


図4 | 高圧ダイレクトインバータ装置の製品ラインアップ
HIVECTOLシリーズは、従来の3 kV、6 kVに加え、大容量5レベルと11 kVを製品化した。

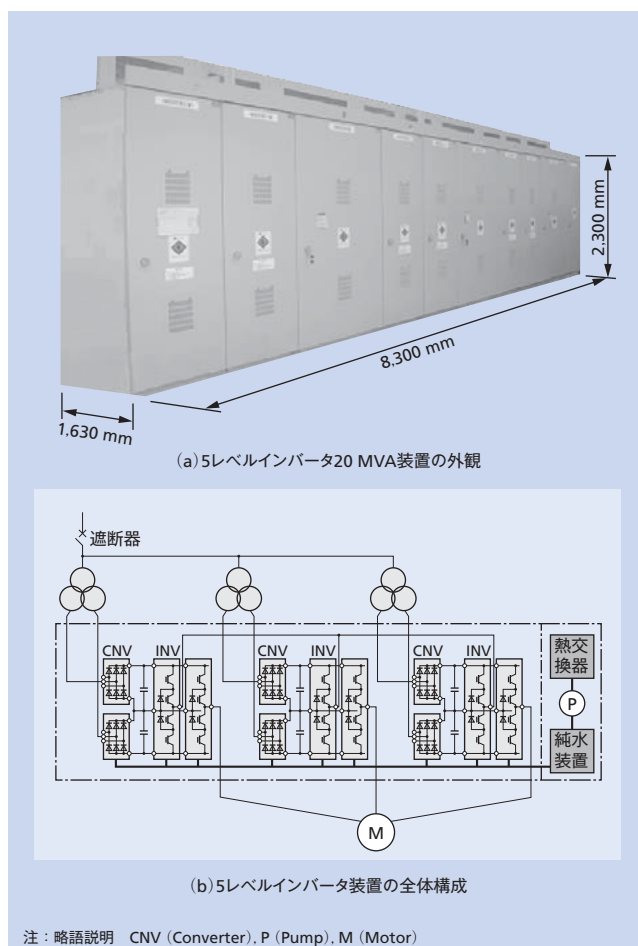


図5 | 大容量水冷式5レベルインバータ
3レベルインバータユニットを2台直列に接続し、5レベルの出力電圧を出力する制御方式を開発した。

るトルク脈動を低減する制御技術などトータルドライブソリューションの提案をめざしている。また、顧客のイニシャルコストなしで、省エネルギーという機能をサービスする事業「HDRIVE（エイチドライブ）」によるインバータ導入を推進している。

日立グループは製品ラインアップおよび機能の拡充を図り、これまで多種の分野において省エネルギーに貢献してきた。今後も Oil & Gas（石油・ガス）市場への参入や、機械式駆動の鉱山用ダンプトラックや船舶などの電気駆動化など、日立のドライブ技術による省エネルギー化の適用拡大をめざしていく。

3.2 UPS

情報社会を支える情報・通信システムの安定稼動のための電源設備として、UPS（Uninterruptible Power System：無停電電源装置）が広く導入されている¹⁾。UPSの重要性は年々高まっているとともに、ユーザーのニーズは高度に多岐に拡大しており、信頼性に加えて省エネルギー性・経済性が要求されるようになってきている。例えば、データセンターにおけるUPS設備のエネルギー損失は全体の7～

18%程度であり、これを低減させることが求められている^{2), 3)}。

大型UPSのUNIPARAシリーズは、入出力電圧の400 V系化や、トランスレス方式の採用などによって効率向上を図り、UPS本体の損失を従来モデルに比べて40%以上低減している(400 kVA機、540 kVA機で効率95%以上)⁴⁾。トランスレス方式の採用にあたっては、偏磁抑制制御技術と高周波フィルタ回路構成の工夫によって、従来はUPS内部の絶縁トランスが担っていた直流成分の流出防止や高周波漏れ電流抑制などの対策を行っている。UPSは定格容量の30~70%程度で運用されることが多いことから、低損失IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の選定、適切なスイッチング周波数、リアクトルの鉄損・銅損の適切な配分などによって軽負荷時でも効率が下がらないようにすることで、実運用においても高効率となるように配慮している。

また、部品交換周期を長くするように回路設計、部品選定をすることで定期交換部品の削減を図っており、効率の向上とあわせて、消費エネルギー削減、廃棄物削減、ランニングコスト低減を実現している(図6参照)。

今後、低損失スイッチング素子の適用やスイッチング回路構成・スイッチングパターンの工夫による損失低減、低損失磁性体を使用したリアクトルの適用などによって、UPSのさらなる高効率化を行っていく予定である。また、世界的に見ても電力供給信頼度が非常に高い日本においては、現在大型UPSにおいて主流となっている常時インバータ方式に加えて、より高い効率とすることができる常時商用方式の大型UPSの適用も拡大していくものと考えられ、これらも含めた形態でラインアップ拡充を図っていく。

3.3 船舶電源供給用周波数変換装置

現在、CO₂削減を目的とした船舶の港湾接岸時のアイ

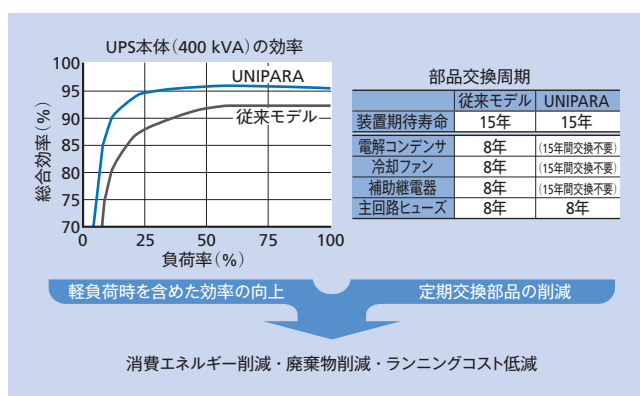


図6 高効率化と部品長寿命化によるランニングコスト低減の例
実際に運用されることが多い30~70%負荷時を含めた効率の向上と、定期交換部品の削減によって、消費エネルギー削減、廃棄物削減、ランニングコスト低減を図っている。

ドリングストップ拡大が広く計画されている。従来、大型船舶は船内用電力の発電のために停船中であってもエンジン運転を行っていたが、接岸時には陸上から電力を供給することでエンジン停止を図ろうというものである。

船舶内の電源は通常60 Hzであることから、50 Hz商用電源地域においては周波数変換したうえで電力供給する必要がある。周波数変換装置は、船舶の必要電源容量に合わせて500~1,000 kVA程度となるが、UPSの派生製品として、こういった用途での半導体電力変換による周波数変換装置の製品化を進めていく予定である。

4. パワーエレクトロニクスの技術展望

4.1 省エネルギーに向けたパワーエレクトロニクス技術

CO₂削減をめざし、新エネルギー機器、電動化などパワーエレクトロニクス技術の応用範囲が急速に広がっている。パワーエレクトロニクス技術は、省エネルギー応用製品を支えるだけでなく、変換器自体の高効率化も追求する必要がある。

日立グループはこれまで、(1)3レベルNPC (Neutral Point Clamped) インバータ⁵⁾、高圧ダイレクトインバータ⁶⁾などのマルチレベル技術、(2)低スイッチング周波数でもトルクリプルの少ない予見PWM (Pulse Width Modulation) 技術⁷⁾、(3)スナバレス化技術などを開発してきた。今後は、PWMパルスをも最適化した高効率変換器やトランスレス変換器、およびフィルタレス化をねらった変換器を製品展開していく。

また、SiC適用による変換器の高効率化にも取り組んでおり、3 kV級SiCダイオードを用いたパワーモジュールを製作し、交流架線で走る電船用変換器で従来に比べて約30%損失低減できることを検証した⁸⁾。

4.2 産業用中容量、電力用大容量変換器の新技術

IGBTを直列接続した3レベルNPC変換器を製品化した⁹⁾。直列接続のIGBTを過電圧から保護するアクティブゲートコントロールを採用し、汎用IGBTで大容量化を実現した(図7参照)。汎用IGBTを用いることで製品ライフサイクルの長期化が見込まれる。さらに大容量化に向け、前述した3レベルNPC変換器をベースとした60 MVA級の5レベルインバータを製品化し、さらに送電系統連系周波数変換設備やSTATCOM (Static Synchronous Compensator) など100 MVA級の電力用変換器にもこの技術を適用拡大していく。IGBT適用の系統連系変換器は、GCTなどのサイリスタ系デバイスを用いた電力用変換器に比べて、パルス自由度が高く制御性に優れるほか、特殊変圧器が不要などの特徴がある。

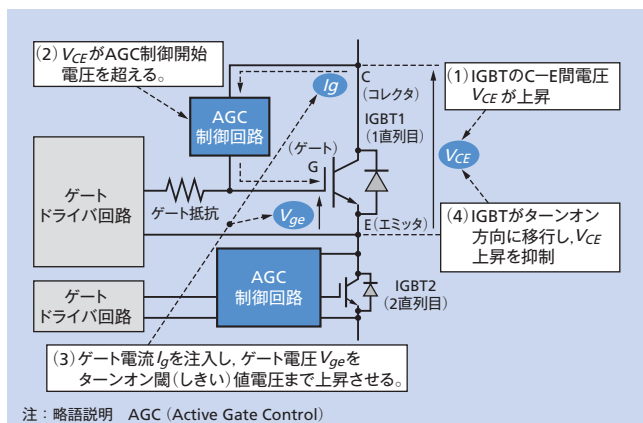


図7 | アクティブゲートコントロール制御回路

IGBTエミッタとコレクタ間の電圧を制御することで、直列接続された電圧分担を適正化する。

将来の電力用大容量高電圧自励式変換器は、MMC (Modular Multilevel Converter) など¹⁰⁾ のマルチレベル変換器が主流になると考えられる（図8参照）。MMCはチョップ構成の単位セルをカスケードに接続した構成であり、さまざまな課題はあるが、高調波がきわめて小さく、高電圧化が容易で、フィルタレスで系統連系できるという長所がある。日立グループは、マルチレベル技術を用いた

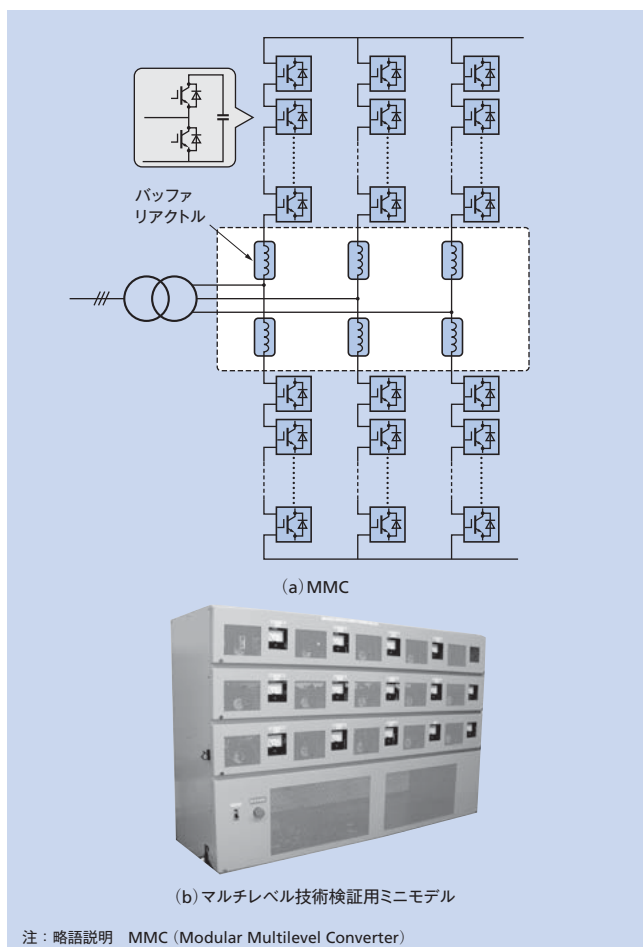


図8 | 次世代マルチレベル変換器

MMCなどのマルチレベル変換器は高調波が小さく、高電圧化が容易という優れた特徴がある。実用化に向けてミニモデルを用いた制御検証を行った。

変換器実用化をめざしてミニモデルで動作原理を検証し、製品化に向けた取り組みを進めている。

5. パワーデバイスの技術展望

パワーエレクトロニクスの高効率、小型化に寄与するパワーデバイスとして、駆動電力が少なく大容量化が可能なIGBTが現在主流となっている。IGBTは、基本性能を実現するセルと呼ばれる微細構造を同一チップ内で多数並列接続された構造となっている。基本的なIGBTセル構造を図9 (a) に示す。MOSFET (Metal-oxide Semiconductor Field Effect Transistor) とpnpトランジスタを複合した構造をもっており、MOSの簡易駆動、高速動作とトランジスタの大容量化を実現するデバイスである（図10参照）。

要求される高効率（低損失化）に対しては、MOSFET部の微細化、ゲート構造のトレンチ化など、トランジスタ部に対しては電流増幅率の最適化によって改善が進められてきた〔図9 (c) 参照〕。さらには、HiGT (High Conductivity IGBT) と呼ぶ電荷蓄積層をセル内に設け、低オン電圧化の実現と、薄ウェーハ化によるオン電圧とスイッチング損失のトレードオフ改善などが実現されている〔図9 (b) 参照〕。

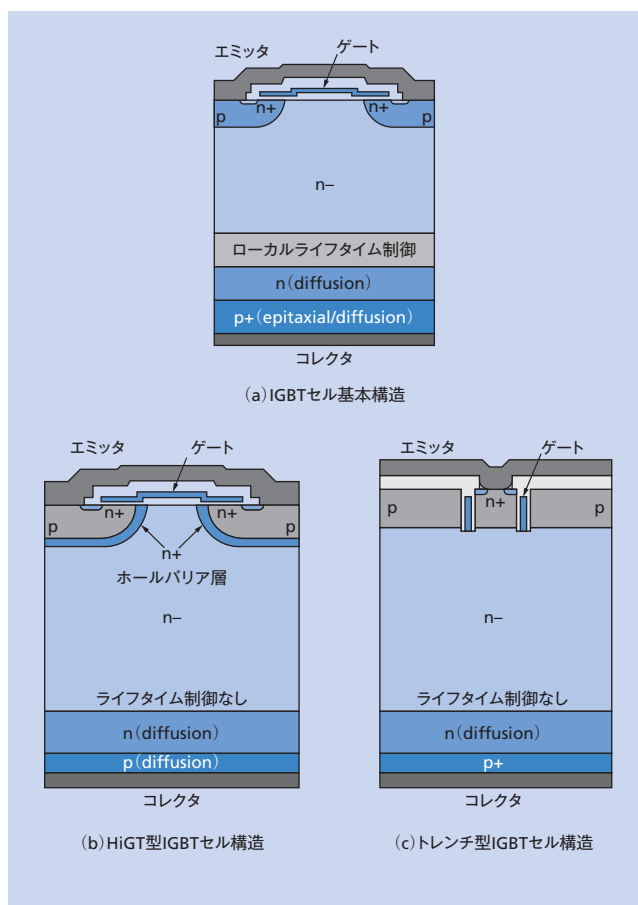


図9 | IGBTのセル構造比較

IGBTセル基本構造を (a)、HiGT型IGBTセル構造を (b)、トレンチ型IGBTセル構造を (c) にそれぞれ示す。

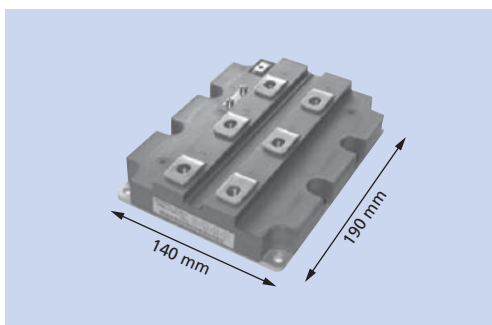


図10 | 大容量IGBTモジュールの外観
IGBTモジュール (1,200 A/3,300 V) の外観を示す。

表2 | パワーデバイス用基板材料比較
Si, SiC, GaNそれぞれの特徴を示す。

	Si	SiC	GaN
バンドギャップ (eV)	1.1	3.3	3.4
破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3
必要デバイス厚さ (対Si比)	1	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$

Siに代わるパワーデバイス用基材としては、最近SiC、GaNといった材料が研究されている。これらの材料は、表2に示すように、Siに比べてエネルギーバンドギャップが大きいこと、破壊電界強度が高いことが特徴である。この特徴により、現在のパワーデバイスの最大動作温度が150～175℃であるのに対し、200℃以上の高温での動作が可能である。また、高耐圧デバイスのために必要な電流導通距離を短く設計でき、導通損失を大幅に低減できることにある。特に近年の小型・高密度実装、高温動作という要求に対応するデバイスとして研究が進められている。

日立グループは、これらの材料を用いたIGBTに代わるスイッチングデバイスだけでなく、装置の効率向上に寄与する高速ダイオードの試作開発を進めている。

一方、大容量パッケージング技術に関しては、結線の容易なモジュール化が主流であり、セラミック基板上に回路を組み、冷却用のベース基板に搭載されている。内部接続は、はんだおよびアルミニウムワイヤが使用されている。このため、装置の動作、休止時および出力変動時の温度変化による結線部の材料疲労が課題となってくる。日立グループは、結線部に与えるひずみの抑制、高疲労耐量をもつ結線技術として、AlSiC、SiNといった新材料の採用および溶接技術の応用によって信頼性の高いモジュール構造を提案している。

電磁ノイズに関しては、高速スイッチングとの両立が課題となる。インバータの出力段スイッチとしてアナログ回路に使用されるため、スイッチング時のノイズ対策が重要となる。低損失化のために高速動作を実現してもノイズの問題で使用できないというケースがある。スイッチング波形易制御化がデバイスの改善課題として、今後さらに重要になると予想される。

6. おわりに

ここでは、パワーエレクトロニクスおよびパワーデバイスの再生可能エネルギー分野、産業分野での適用事例と、CO₂削減に向けての技術展望について述べた。

パワーエレクトロニクスは、それを支えるパワーデバイスなどの部品および回路、制御技術などの進歩により、ますます小型化・高効率・高性能が進む。日立グループは、CO₂削減と、快適な社会の実現に向け、キー技術としてのパワーエレクトロニクスを進化させていく所存である。

参考文献など

- 1) 情報化社会に安心を与えるUPS (無停電電源装置), 社団法人日本電機工業会 (2009)
- 2) Guidelines for Energy Efficient Data Centers, The Green Grid, <http://www.thegreengrid.org/home>
- 3) 総務省:「地球温暖化問題への対応に向けたICT政策に関する研究会報告書」(2008.4)
- 4) 豊田: データセンタ向け大型UPSの高効率・小型化技術, 電気評論 (2003.3)
- 5) 飛世, 外: 中・大容量鉄鋼用インバータドライブシステム, 日立評論, 78, 6, 457～462 (1996.6)
- 6) 長谷川, 外: 水環境分野に貢献する省・新エネルギーソリューション, 日立評論, 89, 8, 610～615 (2007.8)
- 7) 岩路, 外: 予見PWM制御方式の特性評価, 平成9年電気学会全国大会
- 8) 石川, 外: SiCダイオードを搭載した鉄道インバータ, 第46回鉄道サイバネ・シンポジウム, 506 (2009.11)
- 9) 執行, 外: 熱間圧延設備向け15 MVA 高圧大容量IGBTインバータドライブシステム, 日立評論, 90, 12, 1014～1017 (2008.12)
- 10) Hagiwara, et al.: Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters, IEEE Transactions on Power Electronics (2009.7)

執筆者紹介



豊田 昌司

1981年日立製作所入社, 情報制御システム社 制御システム統括本部 UPS・パワーエレクトロニクスエンジニアリング部 所属
現在, パワーエレクトロニクスのシステムエンジニアリングの取りまとめに従事
電気学会会員



秋田 佳裕

1991年日立製作所入社, 情報制御システム社 パワーエレクトロニクスシステム本部 ドライブシステムセンター 所属
現在, ドライブシステムの開発, 設計に従事
電気学会会員, 計測自動制御学会会員



宮田 博昭

1994年日立製作所入社, 情報制御システム社 パワーエレクトロニクスシステム本部 パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在, 大容量UPSおよび系統連系インバータの開発設計に従事
電気学会会員



加藤 修治

1990年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
現在, インバータの研究開発に従事
IEEE会員, 電気学会会員, 日本セラミックス協会会員



黒須 俊樹

1975年日立製作所入社, 電力システム社 電機システム事業部 所属
現在, パワーデバイスの研究開発に従事
電気学会会員