

自己消弧デバイスとその応用動向

Recent Turn-Off Devices and Their Applications

関 長隆
N. Seki

村山 康文
Y. Murayama

斎藤 涼夫
S. Saitoh

秀島 誠
M. Hidemitsu

松田 秀雄
H. Matsuda

自励式変換装置の応用は鉄道、一般産業から電力用途へとしだいに拡大し、容量の拡大と信頼性の向上がいつそう求められている。これにこたえるため、GTO (Gate Turn Off thyristor) のウェーハの口径を最大4インチから6インチに増し、6,000V定格のGTOでは6,000Aの電流を遮断可能にした。IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) は制御性能と取扱いの利便さから、適用領域を中小容量域はもちろん1MVAを超える容量域や1,000Vを超える電圧領域に拡大を図っている。パッケージはモジュール型だけではなく、直列接続に適し高負荷変動に対する信頼性の高い平型構造も、世界に先駆けて登場させた。応用技術面では、高電圧用に最適なゲート電力自給方式、スナバエネルギー回生方式などを開発中である。

Self-commutated converters are being applied to systems not only in the transportation and general industrial sectors, but also to power systems that demand higher reliability and larger capacity. In order to meet these requirements, we have introduced a 6-inch wafer which enables a 6,000V-6,000A gate turn-off thyristor (GTO) to be realized.

The application of insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) at capacities exceeding 1 MVA and at voltages exceeding 1,000 V is gradually increasing, thanks to their excellent controllability and performance. We have recently developed the world's first press-packed 2,500 V IGBT. For higher voltage applications, we have also developed a new gating power supply system and a snubber energy recovery system.

自己消弧デバイスの応用動向

Trends in Turn-Off Device Applications

一部の小容量分野に限られているが、共振型インバータもEMI(電磁誘導障害)などの面から今後の適用拡大が期待されている。さらに電流形インバータも電圧形と同様に多重化構成により大容量化が可能で、用途によっては有利な場合がある。

自励式変換器を他励式変換器と比較すると運転特性に大

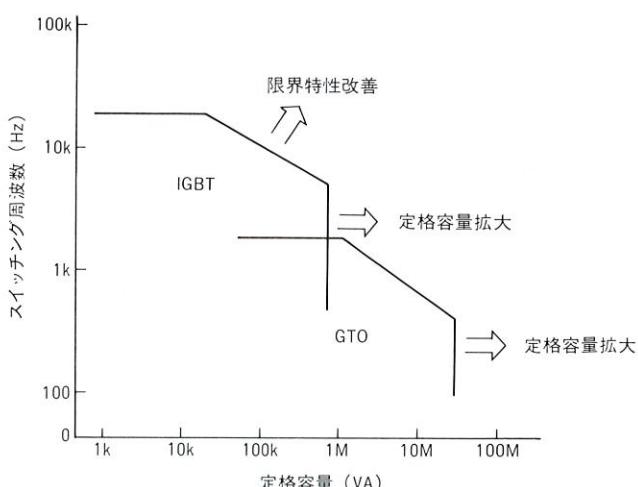


図1. 自己消弧デバイス応用の動向 GTOとIGBT装置の容量はますます拡大し、GTO装置の容量の低い部分はIGBT装置に置き換わっていく。

Trends in GTO and IGBT applications

きな違いがあるが、最大の特長は、系統電圧の条件にかかわらず運転が可能で、厳しい系統事故のもとでも、運転が継続できることである。この利点から自励式変換器の電力分野への適用拡大が期待されている。

2.2 応用

図1にデバイス応用の面から見た自己消弧デバイスの技術動向を示す。GTO、IGBTの定格容量拡大とIGBTの限界特性改善の傾向が顕著である。

このような自己消弧デバイスを使用した変換器の製作実績例を図2に示す。スイッチング周波数が増えるに従って損失が増加し、この損失による温度上昇を抑えるために種々の冷却手段が必要であることから、装置として経済的に実現できる容量限界があることがわかる。

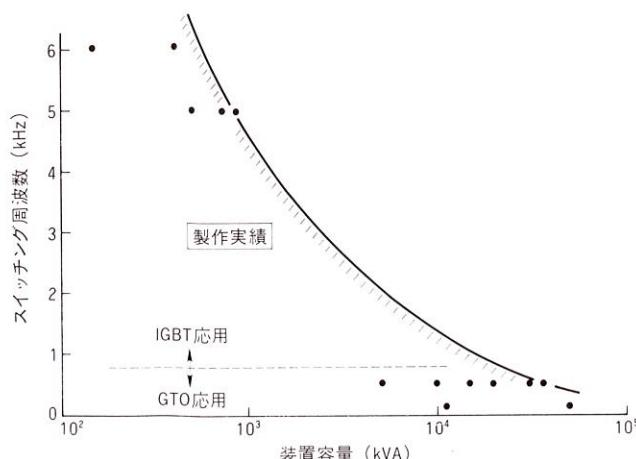


図2. 自励変換器の実績 ●が過去に製作した製品の容量とスイッチング周波数を表す。

Relationship between capacity and switching frequency in past products

3 大容量GTO適用の開発技術とメリット

GTOは高圧・大電流向きであることから、電力分野の主流デバイスとして、6,000 V-6,000 Aの世界最大容量デバイスを開発している。

以下に大容量GTOを高圧自励式変換器に適用するための開発技術と適用メリットについて述べる。

3.1 高圧自励式変換器に適用するための回路技術

3.1.1 ゲート電力自給方式 高圧変換器においてもGTOのゲート電力を低圧側から絶縁変圧器を介して供給する方式とすると、高電圧化するほど絶縁耐圧の高い変圧器が必要となり、外形が大きくなる。このため、高圧側の直流主回路から直接ゲート電力をとる方法として図3に示す回路を開発した⁽¹⁾。GTOターンオフ時に蓄えられたコンデンサ C_{G1} のエネルギーをGTOターンオン時にコンデンサ C_{G2}

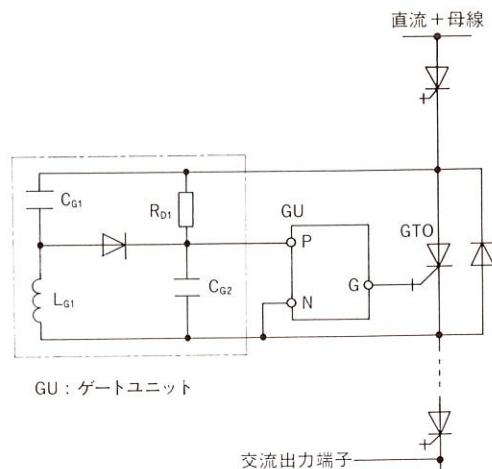


図3. ゲート電力自給方式 GTOのゲートを駆動するために必要な電力を主回路から自給するものである。

New gating power supply system

に移動してゲート電源のエネルギーとする方式である。

3.1.2 スナバエネルギー回生方式 高圧GTO変換器ではGTOと直列に保護用のリクトル(AL)が必要となる。GTOターンオフ時にALのエネルギーはいったんスナバコンデンサに移るが、そのままスナバ抵抗で消費してしまうと、変換器効率低下の大きな原因となる。このため、GTOモジュール単位に図4に示すような回生回路を設ける方式

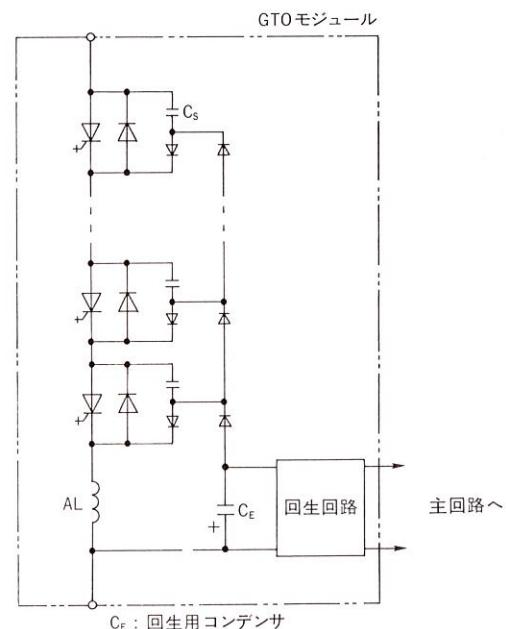
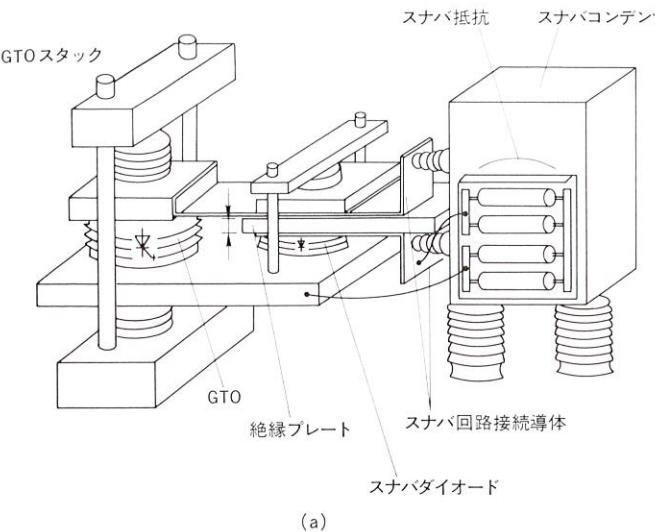
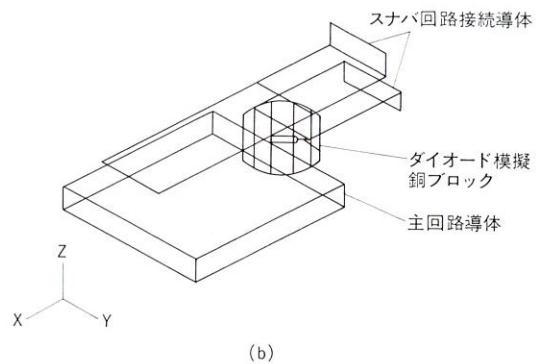


図4. スナバエネルギー回生方式 スナバコンデンサ C_s とリクトルALのエネルギーはいったん C_E に蓄積された後、主回路に回生される。

New snubber energy recovery circuit



(a)



(b)

図5. 大口径GTOスタック構造と三次元インダクタンス解析モデルを解析するためのモデル(b)を示す。

GTO stack used for analysis of inductance, and analysis model of GTO stack

解析に用いたGTOスタックの構造(a)と、そのインダクタンス

を開発した。この方式ではALのエネルギーとスナバコンデンサ(C_s)のエネルギーを一括して主回路に回生でき、変換器の低損失化が図れる。

3.2 大口径GTOの実装技術

6,000 V-6,000 A GTOはウェーハ径が6インチにもなるため、従来以上に構造・実装技術が重要である。特にGTOターンオフ時のスパイク電圧を抑えるため、スナバ回路内の浮遊インダクタンス値を極力低減する必要がある。これに対し、構造とインダクタンスの関係を解析で求めることを研究しており、その一例として図5に大口径GTOスタックの構造と電磁界解析によってインダクタンス値を求めるためのモデルを示す⁽²⁾。この解析から求めたインダクタンス値を使って計算したスパイク電圧と実測したスパイク電圧はよく一致することから、精度の良い解析ができていることがわかる。

3.3 大容量GTO応用のメリット

6,000 V-6,000 A 大容量GTOの応用により、装置の小型化、部品削減による高信頼度化でメリットのある変換器を実現できる見通しを得た。

4 IGBT装置の開発技術とメリット

IGBTは民生用から工業用まで、さまざまな分野で汎(はん)用的に使用されているデバイスである。電力分野でも高電圧用途でない中小容量の変換器を中心に多くのデバイスが使われると期待される。ここでは、電力・産業分野で大容量IGBTを応用する際の開発技術と応用した場合のメリットについて述べる。

4.1 IGBT応用の回路技術

IGBTはGTOに比べて、高速スイッチングが可能である。また、過電流時でもゲート操作により電流を遮断できるという特長がある。したがって、次のような技術課題に対して、開発、製品化が行われている。

- (1) 高速スイッチングによって発生するサーボ電圧の抑制、あるいはスイッチング損失の低減など
- (2) 過電流の検出方法、保護方式など

4.2 IGBTの実装技術

モジュール型IGBTの最大定格は電圧で1,800 Vクラス、電流で800 Aクラスである。したがって、数百kVAを超える容量を得るには、一般に多数のデバイスを並列接続して大電流化するので、電流バランスには配線の低インダクタンス化が不可欠である。図6に低インダクタンス配線部品

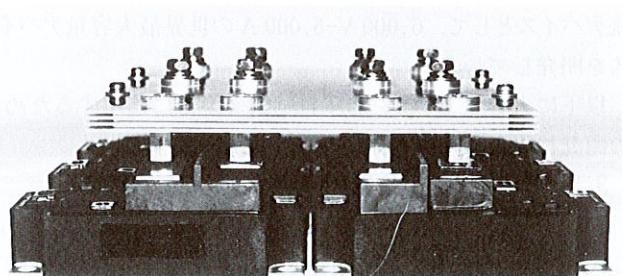


図6. 低インダクタンス配線部品 インダクタンスを極力減らすため密着積層板を用いている。

Laminated panels with lowest inductance

の一例を示す⁽³⁾。この例では、主回路の配線による自己インダクタンスを 50 %に低減し、さらに電流アンバランスも±10 %以内を実現している。

4.3 IGBT 装置のメリット

IGBT を用いることで、1 MVA 程度までの装置では、低損失化、小型化、高スイッチング周波数による高調波低減などのメリットのある変換器が期待できる。

5 パワーエレクトロニクス装置の将来動向

5.1 新しい適用事例

エネルギーの需要は今後も増大し、21世紀になっても年率数%で伸び、さらにエネルギー利用における電力化比率は急速に進むものと予想されている。このような状況でも環境との調和を保つためには省エネルギー、非化石エネルギーへの変換が重要で、この際に自励式変換器などを含むパワーエレクトロニクス装置の需要が世界的に増加するものと考えられる。

特に電力分野におけるパワーエレクトロニクスとして注目されているものが FACTS (Flexible AC Transmission Systems) である。FACTS は電力系統における交流電圧の振幅と位相、およびインピーダンスを自由に制御できるシステムで、電力系統の安定化と効率的運用に寄与できるものと考えられている。FACTS に適用される自励式変換器の例としては二次電池貯蔵、SMES (超電導エネルギー貯蔵システム)、自励式直流送電、自励式位相調整器、自励式 SVC (Static Var Compensator) などが挙げられる。

5.2 パワーエレクトロニクス装置の進化

パワーエレクトロニクス装置は日々発展しているが、その変化を装置損失とパワー密度の変化でとらえてみる。これは装置の評価において損失が重要であり、扱う電力を体積で除したパワー密度がユーザに密着した総合的な技術のレベルを示す量として妥当と考えられるからである。当社の無効電力補償装置における 1987 年と 1994 年の 7 年間の損失とパワー密度の動向を例にとると、損失は 51 %、パワー密度は 197 %となっており、技術の進歩を明確に示している。今後もパワー密度の増大が課題と考えられる。

6 あとがき

以上説明したように、電力分野における自励式変換器の適用は今後いっそう増大する。特に FACTS 装置の導入が進むことにより、系統の安定度向上に寄与するなどその重要性もますます大きくなろう。これを実現するにあたっては、GTO、IGBT などの自己消弧デバイスの大容量化、高性能化に向けた開発と、ここでいくつか紹介した開発技術の適用が重要である。
(関／村山／斎藤)

最近の自己消弧デバイス

Recent Turn-Off Devices

1 まえがき

GTO は、高耐圧化、大容量化、特性改善が急速に進み、6,000 V-4,000 A 定格まで製品化され、車両駆動用装置、一般産業用可変速駆動装置、自励式 SVC などの電力変換装置に採用されている。

IGBT はゲート制御回路が簡素化できること、動作周波数が高いことなどから、従来のバイポーラトランジスタ、サイリスタ、中小容量 GTO に置き換わり、民生用をはじめ、モータ駆動、UPS (無停電電源装置)、エレベーターなど産業用機器に広く適用されてきている。高耐圧化の要請から、600 V 系、1,200 V 系、1,700 V 系に加え、1,800 V、2,500 V 級も開発、製品化している。高耐圧化に併せ、セルサイズの微細化により飽和電圧とスイッチング特性のトレードオフも改善されている。飽和電圧、スイッチング特性、破壊耐量のトレードオフの改善はチップ単体では困難である。そこでゲート回路、異常検出センサ、保護回路などを組み合わせてインテリジェント化することで改善し、装置の小型化、高性能化に寄与している。

ここでは、高耐圧大容量 GTO と IGBT の現状と将来について述べる。

2 GTO

表 1 に当社の GTO の一覧を示す。現在 6,000 V-4,000 A まで製品化しており、6 インチウェーハを採用した 6,000 V-6,000 A も開発した。当社 GTO の特長は以下のとおりである。

アロイフリー技術を GTO に適用し、パターンおよび不純物拡散プロファイルを最適化し大幅な特性改善と高信頼性化を達成した。この技術を採用した SG3000GXH24 (4,500 V-3,000 A) は車両駆動用素子として、国内および海外でその評価が定着している。さらにリニア新幹線山梨実験線の駆動電源部にも採用されている。

カソードエミッタパターンの微細化によりターンオフ能力が向上する。この技術を採用した SG4000GXH26 (4,500 V-4,000 A) は装置の大容量化と高効率化に寄与している。

使用電圧が高いと宇宙線によりパワーデバイスが破壊することが確認された。高い直流電圧でも使用可能な対宇宙線対策素子もラインアップした⁽⁴⁾。

GTO と逆並列に使用される FRD (高速ダイオード) を GTO と同一ウェーハ内に形成した逆導通型 GTO SG3000GXH26 (4,500 V-3,000 A) も車両駆動用を中心に

表1. GTO ラインアップ

GTO lineup

V_{DRM}	I_{TQGM}	600 A	800 A	1,000 A	2,000 A	3,000 A	4,000 A	5,000 A	6,000 A
アノードショート型	2,500 V		800 A			3,000 A			
	4,500 V		800 A			3,000 A			
	6,000 V					3,000 A			
低スナバ アノードショート型	2,500 V				2,000 A		4,000 A		
	4,500 V		600 A			4,000 A			
	6,000 V						4,000 A		
高直流耐圧 アノードショート型	4,500 V	600 A				4,000 A			
	6,000 V								6,000 A
逆導通型	2,500 V					3,000 A			
	4,500 V					3,000 A			
逆阻止型	2,500 V		800 A		1,400 A				
	4,500 V		800 A			3,000 A			

表2. IGBT ラインアップ

IGBT lineup

V_{CES}	I_C	5 A	10 A	20 A	50 A	100 A	200 A	500 A	1,000 A
6 in 1	600 V		8 A					450 A	
	1,200 V		8 A				300 A		
	1,700 V			30 A		180 A			
2 in 1	600 V			25 A			400 A		
	1,200 V		15 A				300 A		
	1,700 V			30 A		180 A			
1 in 1	600 V			25 A				800 A	
	1,200 V			25 A				600 A	
	1,700 V				200 A		400 A		
	1,800 V							400 A	
複合モジュール	600 V			20 A		50 A			
	1,200 V		15 A		25 A				
インテリジェント モジュール	600 V			20 A				400 A	
	1,200 V				75 A		200 A		

実用化されている。逆方向に対しても順方向の同じ耐圧をもつ逆阻止型 GTO シリーズは電流形インバータに使用されている。

上述の技術と当社の大口径ウェーハ拡散技術を併せ、6インチウェーハを採用した 6,000 V-6,000 A GTO を開発した⁽⁵⁾。これは高電圧大容量可変速駆動装置、揚水発電電動機駆動装置、SVC などに採用される予定である。

3 IGBT

表2に当社の大電力用モジュール型 IGBT の一覧を示す。高耐圧化の要求にこたえ、600 V シリーズ、1,200 V シリーズ、1,700 V シリーズに加え、1,800 V までシリーズ化した。平型 2,500 V-1,000 A 定格も開発済みである。

IGBT の単位セルの微細化により、高速化と同時に飽和電

圧とスイッチング損失のトレードオフを改善し、装置の高効率化に寄与してきた。IGBT のスイッチングスピードが高速化すると、サージ電圧による素子破壊防止の観点から IGBT と逆並列に使用される FRD の特性改善も必要となる。拡散プロファイルと少数キャリアのライフタイムの最適化により逆回復特性をソフトリカバリー化した。

IGBT は高耐圧大容量化・高速化に加え、高短絡耐量化も要求される。1,700 V 系および 1,800 V 系では、高抵抗層の不純物濃度が一様な NPT (Non Punch Through) 構造の採用とプロトンの局所照射により、フルスクエア SOA (安全動作領域) を実現した⁽⁶⁾。現在この技術を 1,200 V 系にも適用中である。

飽和電圧、スイッチング特性と破壊耐量間のトレードオフをさらに向上させ高性能化を図ること、異常状態を検出・保護しさらに高信頼性化させることを目的に、検出回路、

保護回路、駆動回路などをモジュール内に取り組み、インテリジェント化した IGM (Intelligent GTR (Giant Transistor) Module) も製品化している。

現在のパワー IGBT は、扱いやすさ、並列接続の容易さ、低価格などのメリットからプラスチックモジュールが主流である。しかし、より過酷な使用条件でさらに高い信頼性を長期にわたり要求される装置や、直列接続して使用される高電圧装置には、GTO と同様に圧接して使用する平型構造が適している。この観点から圧接型 2,500 V-1,000 A IGBT を開発した⁽⁷⁾。図 7 に示すように IGBT と FRD を一つのパッケージ内にアッセンブリしている。外観は図 8 に示すように 3,000 A GTO と同型である。各種の長期信頼性テストにより、GTO と同程度の高信頼性を確認している。

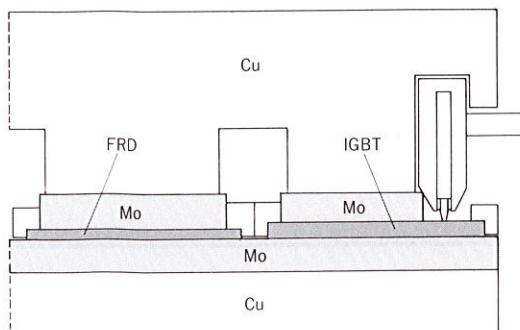


図 7. 2,500 V-1,000 A 平型 IGBT の断面 IGBT チップおよび FRD チップを圧接しているため信頼性が高い。

Cross section of 2,500V-1,000A press-packed IGBT

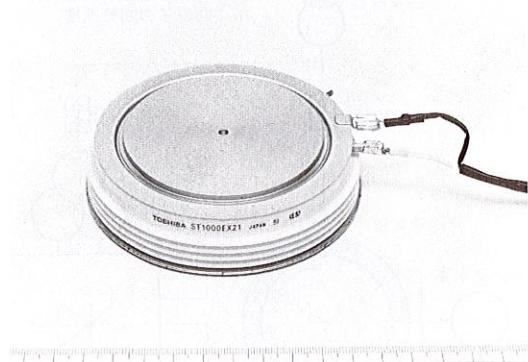


図 8. 2,500 V-1,000 A 平型 IGBT (ST1000EX21) の外観 4,500 V -3,000 A GTO (SG3000GXH24) と同型である。

External view of 2,500V-1,000A press-packed IGBT (ST1000EX21)

4 あとがき

IGBT と GTO を中心に、自励式変換装置に適用されているパワーデバイスについて紹介した。デバイスの高効率化・大容量化を進め、変換装置の高性能化に貢献してきた。今後も IGBT および GTO の大容量化、高性能化を進めていく。さらに、高耐圧 MOS 駆動デバイスも研究開発中⁽⁸⁾であり、今後の変換装置への貢献が期待される。（秀島／松田）

文 献

- (1) H. Tai, et al : Gate Power Supply Circuit for High Voltage Converter, Proc. of IEEE, 95WM271-7WRD, pp.1-6 (1995)
- (2) S. Saito, et al : Evaluation of Large-Capacity GTO's Snubber Circuit from Aspects of Circuitry and Structure, Proc. of IPEC-YOKOHAMA '95, pp. 1145-1150 (1995)
- (3) 田多伸光, 他 : パワーエレクトロニクス装置主回路の低インダクタンス化技術, H 7 年電気学会全国大会論文集 698
- (4) 松田秀雄, 他 : 高直流耐圧 GTO サイリスタ, 東芝レビュー 50, 12, pp. 915-918 (1995)
- (5) H. Matsuda, et al : High Power GTOs : Present Status and Future Trends, Proc. of CIGRE, pp. 605-05-1-5 (1995)
- (6) 村上浩一, 他 : 大電力 1,700 V IGBT, 東芝レビュー, 48, 12, pp.875-878 (1993)
- (7) M. Hirosaki, et al : A 1000A 2500V Pressure Mount RC-IGBT, Proc. of EPE, pp. 1051-1055 (1995), pp.221-225 (1994)
- (8) M. Kitagawa, et al : A 4500V Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor Operating in a Mode Similar to a Thyristor, Proc. of IEDM, pp. 679-682 (1993)

関 長隆 Nagatake Seki



府中工場技監。
パワーエレクトロニクス応用開発に従事。
Fuchu Works

村山 康文 Yasufumi Murayama



電力事業本部変電技術部部長。
国内外の電力会社向け送変電機器の開発、エンジニアリング業務に従事。
Power Systems Div.

斎藤 涼夫 Suzuo Saitoh



重電技術研究所エレクトロニクス技術開発部部長。
パワーエレクトロニクス応用の研究開発に従事。
Heavy Apparatus Engineering Lab.

秀島 誠 Makoto Hideshima



個別半導体事業部大型電力素子技術部課長。
パワートランジスタの開発設計に従事。
Discrete Semiconductor Div.

松田 秀雄 Hideo Matsuda



個別半導体事業部大型電力素子技術部課長。
電力素子の応用技術、開発設計に従事。
Discrete Semiconductor Div.