

# オンサイト燃料電池発電装置用インバータ

八田 恭典(はった やすのり)

田之倉 一夫(たのくら かずお)

日野 浩二(ひの こうじ)

## 1 まえがき

現在、代替エネルギーの確保、エネルギーのクリーン化などを目的として、太陽電池や燃料電池などの新エネルギーの開発が進められている。特に、燃料電池発電装置は、発電量が安定している、発電効率が高い、排熱が利用できる、などの利点から実用に一番近いシステムとして期待されている。オンサイト用燃料電池発電装置は、数十kW～数百kWの発電プラントで、ビル、病院、レストラン、ホテルなどに設置されることを目的に開発が進められている。

このシステムに用いられるインバータは、燃料電池が発電する直流電力を交流電力に変換する装置であるが、装置が必要家端に設置されるため、小形・軽量、低騒音化が強く要求される。さらに、発電効率の向上のため、変換器の高効率化も重要な課題となる。

一方、パワーエレクトロニクスの分野においては、パワー MOSFET や IGBT などの高速スイッチングデバイスの性能向上と電流容量増大に伴い、小形・軽量、低騒音、高効率化が同時に達成できる高周波スイッチング技術の適用が盛んに進められている。

今回、富士電機では、東京ガス(株)、大阪ガス(株)、東邦ガス(株)と共同で進めているオンサイト燃料電池発電装置用として、パワー MOSFET と IGBT を用い高周波スイッチング技術を適用した小形・軽量、低騒音、高効率の50kW および 100kW 燃料電池用インバータを開発したので、その仕様、特長、回路構成および特性について紹介する。

## 2 特 長

今回開発した燃料電池用インバータは下記の特長を持っている。

### 2.1 小形・軽量

従来のチョッパ+インバータ方式からインバータの直接

方式とすることで変換段数の低減をしたこと、高周波 PWM 制御を採用したため AC フィルタが小形になったこと、などの効果で、例えば 50kW 機においては、従来品に比べ体積が 83%，質量が 67% に小形・軽量化されている。

### 2.2 高効率

燃料電池電圧によってスイッチングデバイスの最適選定を行い、50kW 機では MOSFET、100kW 機では IGBT を適用し、変換効率 91% 以上を達成している。

### 2.3 低騒音

高周波スイッチング素子の適用により、変圧器、リアクトルなどの磁気騒音を大幅に低減したため、騒音の発生源は冷却ファンが主となり、50kW 機で 55dB と、低騒音化を実現している。

表 1 インバータの仕様

項目	50kW 機	100kW 機
直流入力	電圧範囲 定格点	88～154V 98V/602A
交流出力	定格容量 電圧 周波数 相数および線数	53.5kW/63kVA 200V または 220V 50Hz または 60Hz 三相 3 線
自立運転	電圧波形ひずみ率	5 % 以下 (整流負荷含む)
連系運転	制御方式 電流波形ひずみ率	定電圧、定周波数制御 総合 5 % 以下、各次 3 % 以下
その他	制御方式	P (有効電力)/Q (無効電力) 制御
	変換効率	91% 以上
	外形寸法	W : 1,750 × D : 870 × H : 1,000 (mm)
	質量	800kg
	騒音	55dB
		W : 2,600 × D : 650 × H : 900 (mm)
		1,000kg
		57dB

### 八田 恭典



昭和61年入社。産業用電力変換装置の開発設計に従事。現在、千葉工場パワエレ部。



### 田之倉 一夫

昭和61年入社。燃料電池用インバータの開発設計に従事。現在、千葉工場パワエレ部。

### 日野 浩二



平成3年入社。燃料電池用インバータの開発設計に従事。現在、千葉工場パワエレ部。

## 2.4 高性能

高周波 PWM 制御の採用により、下記の性能を得ている。

(1) 自立運転時の出力電圧波形ひずみが小さい。

総合 5 %, 各次 3 % 以下 (整流器負荷含む)

(2) 連系運転時の出力電流波形ひずみが小さい。

総合 5 %, 各次 3 % 以下

図 1 主回路ブロック図

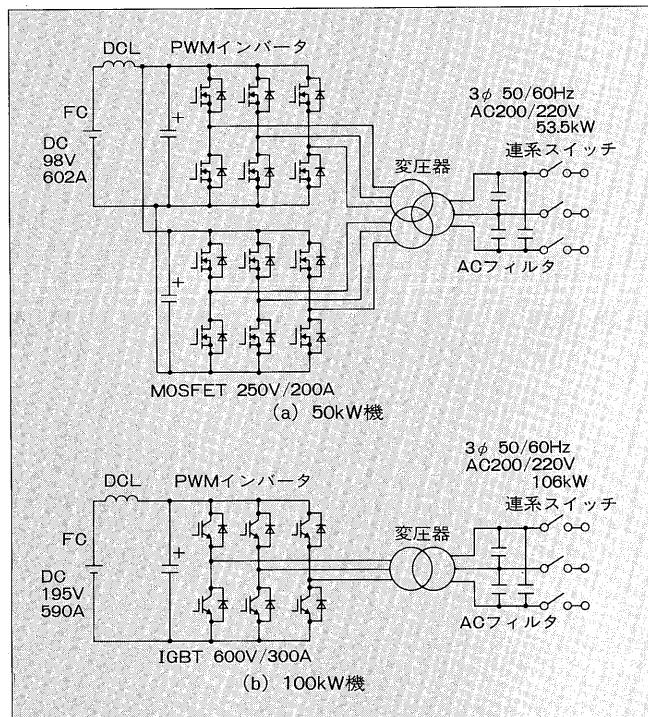
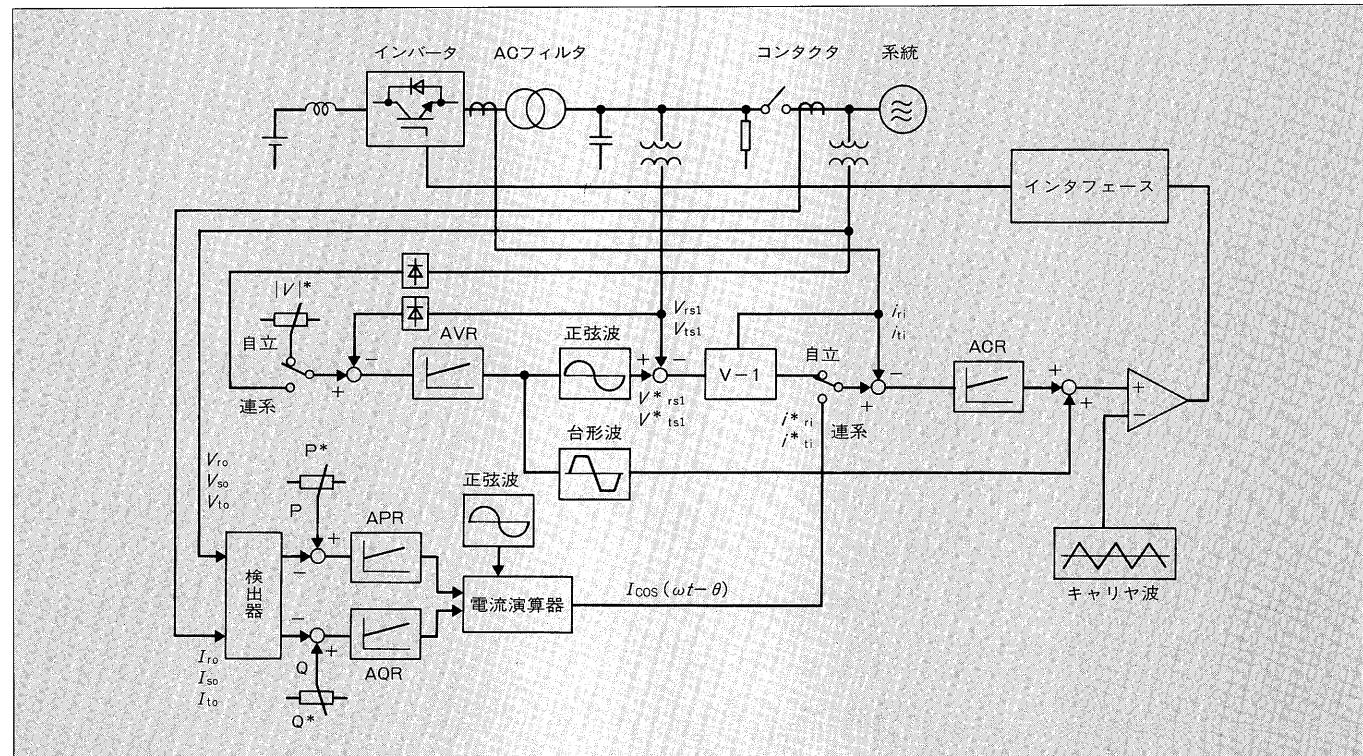


図 3 高周波 PWM インバータの制御回路ブロック図



(3) 有効電力  $P$  / 無効電力  $Q$  の制御ができる。

(4) 自立運転、連系運転の相互切換が無瞬断でできる。

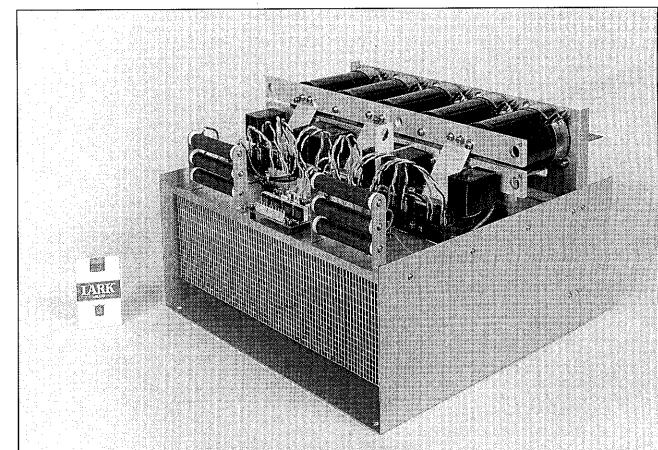
特に、自立・連系運転の無瞬断切換機能は、燃料電池発電装置をコーディネーションとして導入するにあたり不可欠の要素となっている。

## ③ 仕 様

表 1 にインバータの仕様を示す。50kW 機と 100kW 機とも燃料電池のセルを共通化しているため、入力定格は出力容量に比例した関係となっている。

また、系統連系用インバータのガイドラインに沿って、連系時の出力電流波形ひずみを仕様化している。

図 2 インバータスタックの外観



340-11-77

## 4 回路構成および要素技術

ここでは、このインバータの主回路構成とその動作、制御技術などを紹介する。

### 4.1 主回路構成と動作

図1に50kW機と100kW機の主回路構成を示す。内部は、DC フィルタ、PWM インバータ、変圧器、AC フィルタなどで構成される。負荷によって変動が大きい燃料電池の直流電圧は、PWM インバータ部で一定の交流電圧変換され、変圧器で昇圧と絶縁され、さらに AC フィルタで低ひずみの交流電圧、電流に変換される。PWM インバータ部では、スイッチング素子として50kW機でMOSFET(2MI200F-025A, 250V/200A×2), 100kW機でIGBT(2MBI300L-060, 600V/300A×2)をそれぞれ6個並列接続して三相ブリッジインバータの一相を構成している。50kW機の場合は、さらにその三相ブリッジインバータを2並列とし、インバータ部の高効率化を図っている。また、MOSFETモジュールとIGBTモジュールの外形寸法を同じとし、スタック構造を共通化している。図2にインバータスタックの外観を示す。

AC フィルタは、ひずみの小さな正弦波電圧に波形整形する機能と、系統との連系インピーダンスの機能を合わせもっている。今回のインバータは、動作周波数を約8kHzと高周波化することにより、変圧器の漏れインダクタンスをフィルタ部のAC リアクトルとして利用している。

### 4.2 PWM インバータの制御回路

図3にPWMインバータの制御ブロック図を示す。

変調方式は、相電圧の信号波として台形波、キャリヤ波として三角波を用いてオンオフ信号を作り出す方式で、線間電圧は120度位相差のある二つの台形波(例えばU, V)同士の差(U-V)で正弦波となる。台形波変調方式の採用により正弦波変調方式に比べ直角電圧利用率(直角電圧と出力交流電圧の比)が15%上昇でき、インバータ電流の低減が図られている。

自立運転時は、AC フィルタ部の線間電圧を検出し定電圧制御する。整流負荷などの非線形負荷を接続した場合でも出力電流ひずみを小さく抑えるため、制御方式は、平均値制御ループの中に瞬時電圧制御ループを付加した構成としている。この瞬時電圧制御ループは、V-I変換器とインバータ出力電流制御から構成される。V-I変換部は図4の式(1)~(5)に示すように、インバータ出力電流指令*i<sub>ri</sub>\**, *i<sub>ti</sub>\**を、線間電圧指令  $V_{rs1}^*$ ,  $V_{ts1}^*$ 、線間電圧検出  $V_{rs1}$ ,  $V_{ts1}$ とインバータ出力電流検出  $i_{ri}$ ,  $i_{ti}$ から瞬時に求める。図4にこのV-I変換部の瞬時調節量  $\Delta V_r$ ,  $\Delta V_s$ ,  $\Delta V_t$ のベクトル図を示す。この調節量を平衡三相に保つことにより、瞬時的な線間電圧調節量が平衡三相を保つ。

また、V-I変換部に積分器を使用していないため、連系時(連系時はV-I変換器は使用しない)にも、この変

図4 V-I変換器部の瞬時調節量ベクトル図

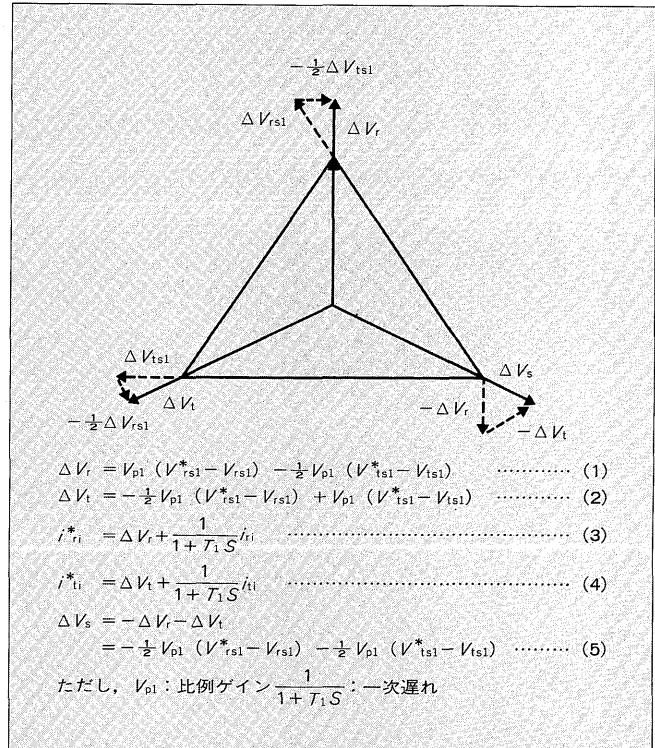
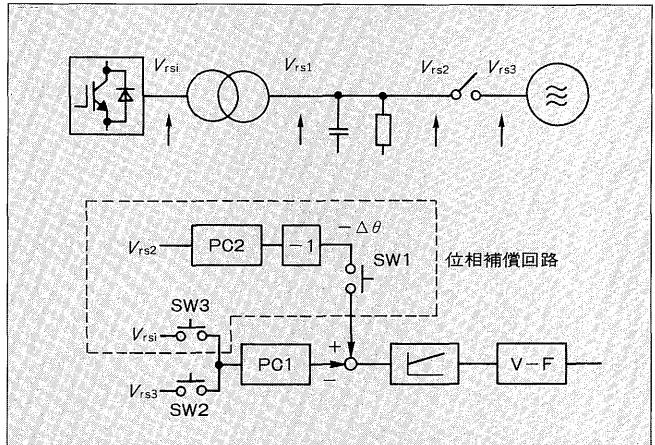


図5 PLL回路



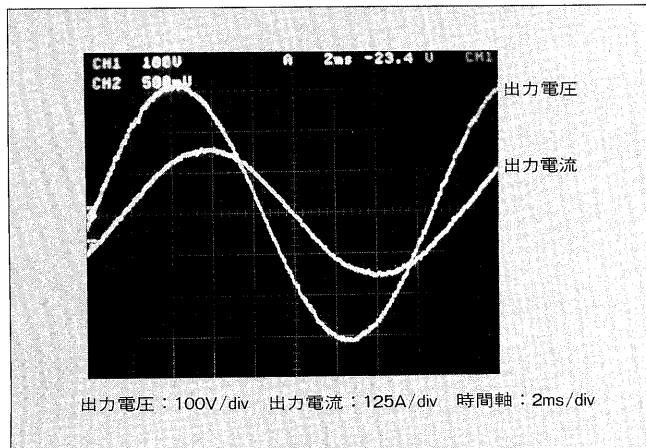
換器は飽和しないため、自立、連系の切換がスムーズに行うことができる。

連系時は、インバータの出力端の有効電力  $P$ 、無効電力  $Q$ を制御する。この制御においても、自立運転時の電圧制御で用いた、インバータ出力電流制御を用いる。構成は、出力端の電圧、電流から  $P$ ,  $Q$ を検出し、有効電流調節器 APR、無効電流調節器 AQRと電流演算回路を介してインバータ出力電流指令  $i_{ri}^*$ ,  $i_{ti}^*$ を求め、最後にこの指令をインバータ出力電流調節器に入力しインバータ出力電流を調節する。このとき、 $P$ ,  $Q$ の検出方式を非干渉することで APR, AQRとも独立で制御している。

### 4.3 自立・連系無瞬断切換方式

今回開発したインバータは、連系スイッチとしてコンタクタを使用し、また、複数の連系点が存在する汎用的なシ

図6 交流出力電流波形（連系運転時）



システムとした。コンタクタは、投入、解列のタイミングが正確に分からぬいため、自立から連系への切換は系統電圧を指令値とした同期 AVR 運転を行い振幅、位相を合わせた後コンタクタを投入し、連系から自立への切換も同期 AVR 運転を行った後コンタクタを解列する方式とした。しかし、この同期 AVR 時に電圧制御を行っている点がフィルタコンデンサ電圧  $V_{rs1}$ ,  $V_{ts1}$  であるため、単に系統電圧  $V_{rs3}$  を検出して PLL を行ったのでは、AC フィルタ、配線および負荷のため、コンタクタ前後の電圧  $V_{rs2}$ ,  $V_{rs3}$  の位相がずれる。このため、投入、解列時に電力急変が発生する。今回のインバータは、図 5 に示すように PLL 回路に位相ずれを補償する回路を付加した。投入時の同期 AVR 時は、SW1 と SW2 を閉じ位相比較器 PC2 でインバータ出力電圧  $V_{rs1}$  と  $V_{rs2}$  間の位相差  $\Delta\theta$  を検出し、この  $\Delta\theta$  を位相調節器に入力することで逆に  $V_{rs1}$  と  $V_{rs3}$  間に  $\Delta\theta$  の位相差を付ける。結果として、 $V_{rs2}$  と  $V_{rs3}$  の位相が一致する。連系時は、SW1 を開き SW3 を閉じる。 $V_{rs1}$  で PLL を行うことにより、 $V_{rs1}$  と電圧指令値  $V_{rs}^*$  が同位相となり、解列時に同期 AVR に切り換えると  $V_{rs1}$  の位相が変化しない。以上のように採用により、自立、連系切換時の電力急変をなくすことができる。また、別の連系点で行う場合は、その連系点前後の電圧を  $V_{rs2}$  と  $V_{rs3}$  とすることでも同様に行える。

#### 4.4 表示・外部インタフェース

このインバータは燃料電池本体と整合した運転を行うこと、さらに操作性と保守性の向上のため、プログラマブルコントローラ (MICREX-F) およびプログラマブル操作表示器を用いて、運転操作、状態表示、計測表示、故障ガイダンスを行っている。

### 5 試験結果

#### 5.1 交流出力電流波形

図 6 に、連系運転時の出力電流波形を示す。瞬時電流波形制御機能を備えた高周波 PWM 制御の採用により、出力電流波形ひずみ率が 2 % 程度と良好な結果を得ている。

図7 自立→連系無瞬断切換オシログラム (25kW→15kW)

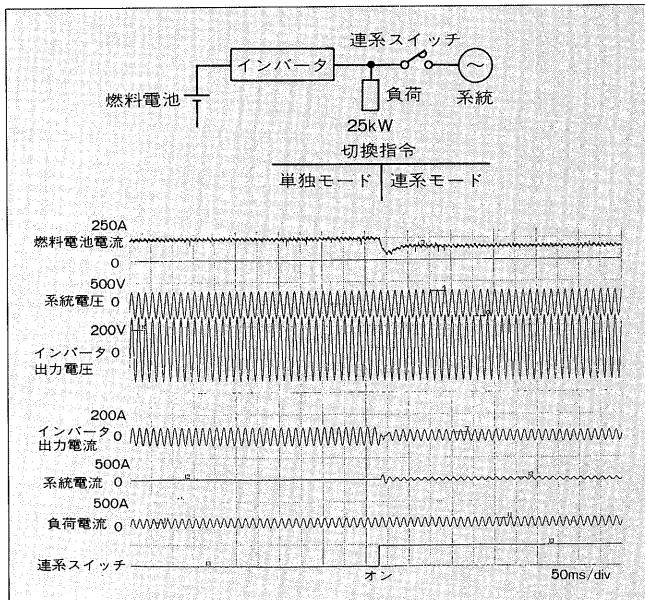
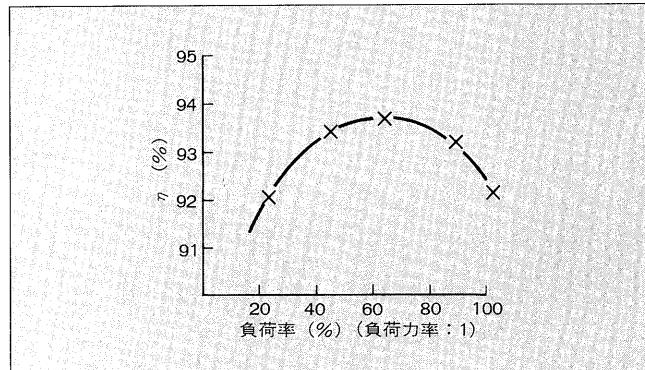


図8 効率特性 (50kW 機)



#### 5.2 自立、連系相互無瞬断切換

図 7 に自立時の負荷 25kW、連系時インバータ出力 15 kW の条件で、自立から連系へ無瞬断切換を行ったオシログラムを示す。補償回路を付加することにより、大きな電力の脈動もなく、スムーズに燃料電池の出力が 25kW から 15kW に変化していることが分かる。

#### 5.3 変換効率

図 8 に 50kW 機における負荷率に対する効率特性を示す。定格負荷時の変換効率は 92.2 % で、65 % 負時に最大 93.9 % を得ている。インバータにとって入力条件が低圧大電流の不利な条件であるにもかかわらず、高効率を達成している。

#### 6 あとがき

スイッチング素子として、MOSFET, IGBT を用い、高周波スイッチング技術を適用したオンサイト燃料電池用インバータを紹介した。燃料電池発電装置は、開発段階から実用段階に入り、インバータにおいても、小形・軽量、

低騒音、高効率などにより実用的な電源が要求される。今回開発した 50kW 機、100kW 機は、これらの要求を十分満足する製品であると自負している。

今後は、IGBT など高周波スイッチングデバイスの性能向上、大容量化に伴い MW クラスまでの大容量装置への適用を図る。さらに、燃料電池の特性に一層適合し、また系統などの交流負荷状態に柔軟に対応できるなど、燃料電池発電システムとしてより扱いやすい装置の開発に尽力する所存である。

最後に、この開発に際し東京ガス(株)殿、大阪ガス(株)殿、東邦ガス(株)殿ほか関係各位のご指導、ご協力に対し厚くお礼を申し上げる次第である。

#### 参考文献

- (1) 黒木一男ほか：新系列 IGBT 式 UPS、富士時報、Vol.63, No.6, p.399-405 (1990)
- (2) 高林泰弘ほか：オンライン用燃料電池発電装置の開発インバータ、Vol.63, No.11, p.737-739 (1990)
- (3) 五十嵐征輝ほか：系統連系用インバータにおける瞬時波形制御方式、電気学会全国大会、No.522 (1991)
- (4) 五十嵐征輝ほか：高周波リンク形系統連系用インバータの開発、電気学会産業応用部門全国大会、No.123, p.542-545 (1991)

### 最近公告になった富士出願

#### [特許]

公告番号	名 称	発明者	公告番号	名 称	発明者
特公平 4-43193	るつぼ形誘導炉の集じん保温装置	石橋 秀昭	特公平 4-44988	紙幣識別装置	高橋 誠
特公平 4-43207	圧延コントロール用放射線透過式厚さ計の校正方法	門野 浅雄	特公平 4-44990	販売可判定方法およびデータ転送方法	中嶋 陽 宮坂 和好 高橋 光伸 宮岸外志久
特公平 4-43208	放射線透過式厚さ計	門野 浅雄			
特公平 4-43317	自動販売機の販売情報記録装置	坂本 雅司	特公平 4-44991	前払い、後払い共用カード自動販売機システム	桑木 政美 稻波 勝彦
特公平 4-43318	商品販売装置	田中 敏美	特公平 4-45079	原子炉燃料取扱用グリッパ	児玉 健光
特公平 4-43752	多関節型マニピュレータ	浦入 重人 高橋 未広	特公平 4-45262	加圧式注湯炉	林 静男 上野 定洋
特公平 4-43965	誘導加熱コイル	岡山 栄	特公平 4-45305	操作形マニピュレータ	津田喜一郎 森 俊二
特公平 4-44307	対象物の方向検出装置	大木 孝一 宮川 道明 堀川 博之	特公平 4-45779	堆積石炭用複合センサ	河野 正明 宮本 伸幸
			特公平 4-45843	運転条件監視制御装置	小石 尚之
特公平 4-44315	分散制御の自動販売システム	村上 博武 赤松 孝一 田中 潔 佐藤 光昭	特公平 4-46067	電気機器巻線の絶縁処理方法	南 松太郎
			特公平 4-46461	圧覚センサ	長安 芳彦
特公平 4-44316	自動販売機の売上情報収集装置	郡浜 英一	特公平 4-46462	圧覚センサの製造方法	目黒 謙
特公平 4-44500	絶縁コイル	芳賀 弘二	特公平 4-46463	圧覚センサ	高浜 稔造
特公平 4-44767	プログラマブルコントローラの動作状態監視方式	石橋 景二 吉田 裕	特公平 4-46464	圧覚センサ	高浜 稔造
特公平 4-44768	プログラムコントローラ試験装置	吉田 裕	特公平 4-46471	半導体放射線検出器	関 康和 佐藤 則忠 矢部 正也
特公平 4-44778	コンデンサ開閉式無効電力調整制御方法	元吉 政 小西 茂雄			
特公平 4-44779	無効電力補償装置	桑山 仁平 鯉江 和裕	特公平 4-46486	スイッチング用半導体装置	重兼 寿夫
特公平 4-44946	堆積石炭用複合センサ	森松 良博	特公平 4-47036	電気めっき装置	郡山 哲雄



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。