UDC 621.373:621.375.826

100W級YAGレーザ発振器

城所　勲(きどころ　いさお)　　新妻　正行(にいづま　まさゆき)　　長嶋　崇弘(ながしま　たかひろ)

1 まえがき

YAGレーザ（ヤグレーザ）は，炭酸ガス(CO_2)レーザに次ぐ高出力（数W～数百W）のレーザ装置として，広く産業界で使用されている。富士電機では，昭和57年からYAGレーザ刻印装置を発売し，自動車産業・工具製造業その他の分野で多数採用され，好評を得ている。

金属に刻印するためのレーザ発振器としては，専ら50WのYAGレーザ発振器（Qスイッチ付）が使用されている。金属によって刻印の難易は異なり，刻印に対して要求される鮮明度や深さも様々であるが，レーザのエネルギー密度を制御する手段もいろいろあって，50Wの発振器でも幅広い対応が可能である。例えば，エネルギー密度を高める必要がある場合には，入力値を増し，Qスイッチの繰返しサイクルを減らすという通常の制御のほか，①集光レンズに短焦点のものを使用する②ビームエキスパンダは倍率の高いものを使用する③走査（刻印）速度を遅くし，場合によっては重ね書きする，などの手段が用いられる。

しかしこのような手段が常にとり得るわけではなく，刻印範囲の制約から集光レンズの焦点距離は制限され，タクトタイムの制約から刻印速度も制限される。より高出力の発振器が必要となるゆえんである。富士電機では，このような高出力化の要請にこたえて，このたび100W級発振器を開発したので，その概要を紹介する。なお，この発振器は刻印用としてのみならず，はんだ付け装置への適用も図っている。また，パルスレーザ発振器は，マスク式刻印並びに金属微細加工への適用を図るものであるが，その概要も併せて紹介する。

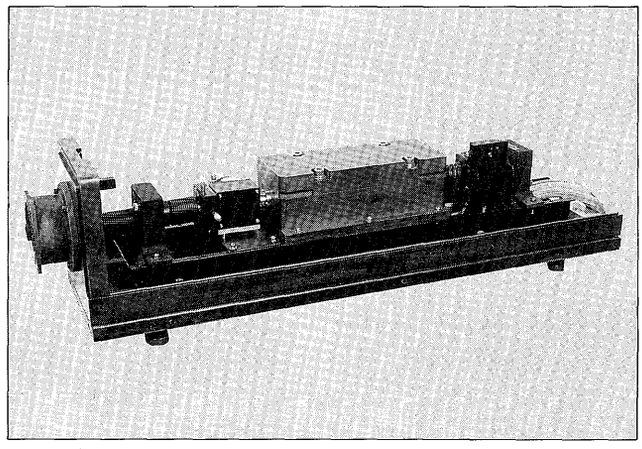
2 YAGレーザの概要

YAGレーザは，YAG（イットリウム・アルミニウム・ガーネット：$Y_3Al_5O_{12}$）結晶中に，不純物としてネオジウム(Nd)を重量比で0.7%程度混入したロッドに，励起ランプの光を照射して得られる，波長1.06μmの近赤外光レーザである。

表1　YAGレーザの分類

励起方式	発振方式	主な用途	富士電機製品
連続励起	連続発振（CW）	・はんだ付け	50SD 100SD
	Qスイッチ発振	・トリミング ・マーキング(刻印) ・金属の微細加工 切　断 穴あけ ・セラミックの スクライビング ・マスクリペア	50M 100M
パルス励起	ノーマルパルス発振	・金属の微細加工 切　断 穴あけ ・金属の溶接 ・マーキング	100P (500P)
	モード同期 パルス発振	理化学応用	

図1　100W級YAGレーザ発振器



YAGレーザの波長は，CO_2レーザの波長10.6μmの1/10であるため，金属表面における反射率が低く金属の刻印や加工には，YAGレーザの方が適している。また，光ファイバに対する透過率が高く，光ファイバによって伝送できることもYAGレーザの特長の一つとなっている。

YAGレーザは，励起方式と発振方式によって**表1**のよ

城所　勲

昭和32年入社。計測器，制御リレー，紙幣識別機及びレーザ装置の開発設計に従事。現在，東京工場メカトロ機器部課長。

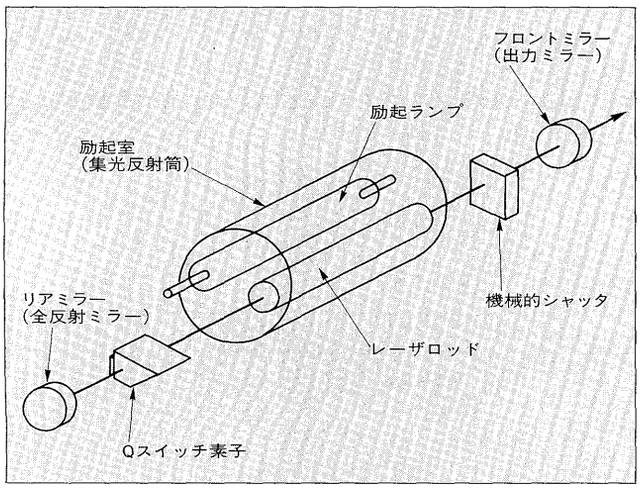
新妻　正行

昭和42年入社。計測機器，レーザ装置の開発・設計に従事。現在，東京工場メカトロ機器部主任。

長嶋　崇弘

昭和60年入社。レーザ装置の開発，特に100W級YAGレーザ発振器の開発に従事。現在，東京工場メカトロ機器部。

図2　YAGレーザ発振器の基本構成



うに分類され，用途に適した方式が選定される。YAGレーザは，長期間の安定性と制御性に優れ，発振出力も数Wから数百W（単機にて）を得ることができるため，用途はますます拡大してきている。特に産業用として，自動化された加工・製造ラインへの導入が増加しつつあるが，この場合，レーザビームの質と安定性が良いことと，信頼性・操作性・保守性に優れた装置であることが重要である。

富士電機では，産業用に適したYAGレーザ装置として**表1**の右欄に示す機種をシリーズ化している。

図1に100W級YAGレーザ発振器の外観を示す。

3　発振器の構成

YAGレーザ発振器の構成を**図2**に示す。励起ランプとしては，連続励起の場合はクリプトンアークランプが使われ，パルス励起の場合はクリプトン（又はキセノン）フラッシュランプが使われる。励起ランプの光が効率よくYAGロッドに集中するように，だ円断面を有する円筒状の励起室が設けられ，だ円の二つの焦点に，励起ランプとYAGロッドが並行して置かれ，両者は純水によって冷却される。励起ランプは光と同時に多量の熱も放射するので，YAGロッドは加熱され，熱ひずみを起こしてレンズ効果（熱レンズ効果と呼ぶ）を生じる。熱レンズ効果の影響を少なくすることが共振器設計の重要な要素である。

共振器を構成するリアミラーは100%反射鏡で，平面鏡又は凹面鏡が使用される。フロントミラーは，反射率が90～70%の平面鏡が多く使用されるが，何%を選定するかは，発振効率と発振の安定性に影響する。

Qスイッチは，その名が示すとおり，共振器のQ値を切り換える素子であり，そのオン・オフによってレーザ出力はジャイアントパルスと呼ばれるパルス出力となる。ジャイアントパルスは，Qスイッチングの周波数に応じてそのピーク値が変化するので（周波数が高くなるとピーク値は下がる），励起ランプの電流調整と並んで，YAGレーザ発振器の出力制御の主要な手段となっている。

4　100W級YAGレーザ発振器の特長

4.1　出力安定性が高い

レーザ出力の安定性は，そのまま加工品質の安定性に直結するため極めて重要である。富士電機のYAGレーザ発振器は，シミュレーションと実験を重ね，YAGロッドのNd濃度と端面形状，共振鏡の反射率，形状及び配置などについて最適値を見いだし，発振の不安定領域を除去した構成としている。また，短時間内の変動は，冷却水の温度変化や不均一な流れに起因するので，冷却水の温度は，±0.5℃の精度でコントロールし，YAGロッド，クリプトンランプ，だ円励起室の各部の水路は直列として，軸対称の断面を持たせ，流量・流速を均一化し，出力の安定化を図っている。

4.2　ビーム集光性が良い

凸レンズでレーザビームを集光させた場合の焦点の直径は，ビームの強度分布がガウス分布（正規分布）であるとき（シングルモードと呼ぶ）最小となり，モード次数が増加する（マルチモードと呼ぶ）につれて大きくなる。したがって，シングルモードが理想であるが，シングルモード発振は効率が低く，高出力が得られないジレンマがある。一般にレーザ発振器では，出力が大きくなるほどモード次数が増加し，ビームの強度分布は台形状となり，ビーム広がり角が増加し，集光性は悪くなる。このため，出力が大きい割には，加工深さは大きくならないという問題が生じる。

富士電機の100W級YAGレーザは，YAGロッド，励起室，共振ミラー，Qスイッチなどの形状と配置を工夫し，出力を大きくした場合でも，モード次数の増加を抑え，光ビームの強度分布がガウス分布のように中心に集中するようになっているので，集光性が良く，深い加工ができる。

4.3　励起ランプの交換が容易

連続励起の場合，クリプトンアークランプは，500～1,000時間（使用電流により異なる）で光量が減少するので，定期的に交換が必要である。交換作業は，ユーザーが行わなければならないので，できるだけ簡単で安全で，しかも確実でなければならない。この発振器では，ヘッドカバーのねじ4本と，励起室のねじ2本を外すことによって，ランプに無理な力を全く加えることなく着脱できるので，簡単でかつ安全である。

5　仕様及び性能

発振器の主な仕様と性能を**表2**に示す。

YAGレーザ発振器の性能は，励起ランプの光をいかに効率よくYAGロッドに集めるか，YAGロッドが励起光を吸収して発熱し，それをロッドの表面から冷却するために生じる熱レンズ効果を，いかに共振器設計の中にとり込ん

表2　富士電機YAGレーザの主要性能・仕様

項目＼形名		100W級		50W級		備考
		100M	100SD	50M	50SD	
CW発振出力	(W)	100以上	120以上	50以上	55以上	
発振モード		マルチモード※	マルチモード	マルチモード※	マルチモード	※印はモードセレクト付
ビーム径	(mm)	約6	約6	約4	約4	
YAGロッドサイズ	(mm)	φ6.3×105	φ6.3×105	φ4×80	φ4×80	発振波長1.06μm
Qスイッチ性能(2kHz)	最大せん頭出力 (kW)	約120	(Qスイッチ無し)	約50	(Qスイッチ無し)	
	最小パルス半値幅 (ns)	約120		約120		
	せん頭出力変動 (%)	±5以下		±5以下		
CW出力変動	(%rms)	±2以下	±2以下	±2以下	±2以下	
ビーム広がり角	(mrad)	12以下	25以下	10以下	10以下	
偏光		無偏光	無偏光	無偏光	無偏光	
励起ランプ定格	(kW)	5	5	3.5	3.5	すべてクリプトンアークランプ

図3　発振器の入出力特性

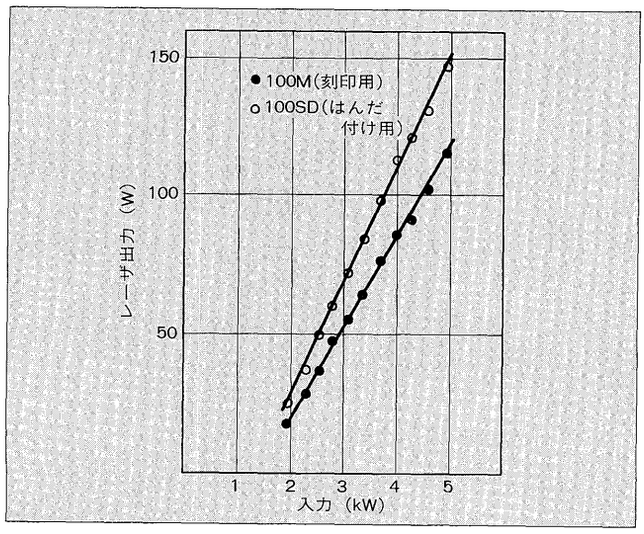
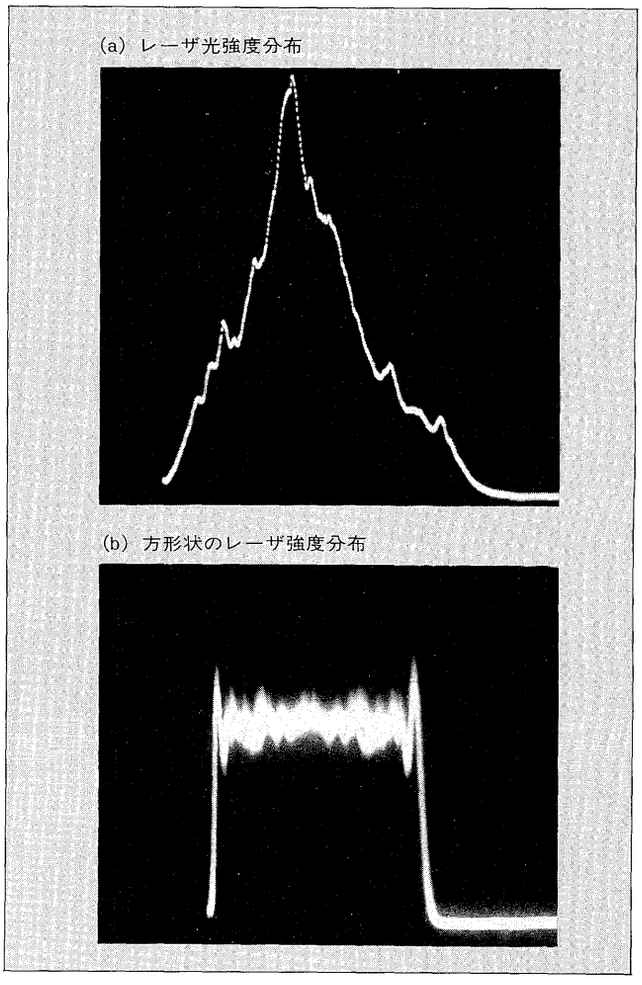


図4　100MW形発振器のレーザ強度



で最適設計をするかによって左右される。一方，用途の違いによって，ビーム品質を要求される場合と，はんだ付け用のように，連続発振の出力エネルギーだけが重要な場合とがあり，最適設計はおのずから異なってくる。

図3に100M及び100SD発振器の入出力特性を示す。

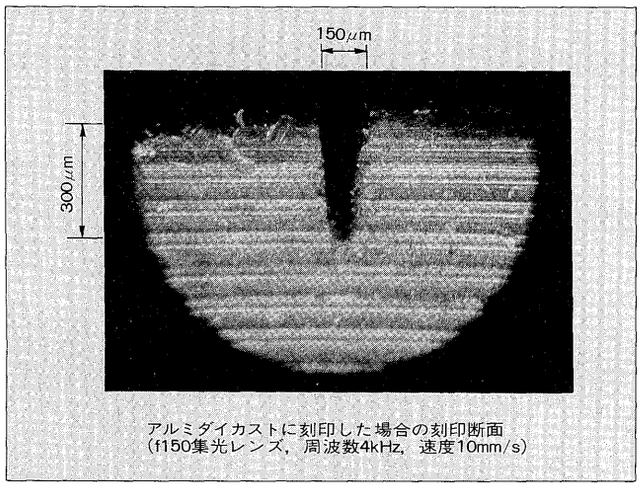
5.1　刻印用発振器100Mの性能と特長

刻印は一種の金属除去加工であるため，高いエネルギー密度を必要とすると同時に，一様で安定した刻印幅を得るため，ビーム品質も良くなければならない。一般にレーザ出力の増大とビーム品質の良さとは相反していて，出力を増大させるとレーザ光は高次横モードとなり，ビームの広がりが大きくなって，集光特性が劣化する傾向がある。特に刻印用としては，集光レンズを通したあとの焦点位置の変化として悪影響を及ぼす。そこで100M形発振器では，発振効率を若干抑え気味にし，ビーム広がり角が小さく，しかもレーザ光の強度分布が中心部にエネルギーの集中したガウス分布に近い分布を得るように共振器設計を行った。

図4(a)にレーザ光の強度分布を示す。なお刻印以外の用途に，レーザ光の強度分布を方形状にした発振器も開発しており，5 kWの入力でCW発振出力は約70Wが得られるいる。**図4**(b)にこの発振器の強度分布の例を示す。

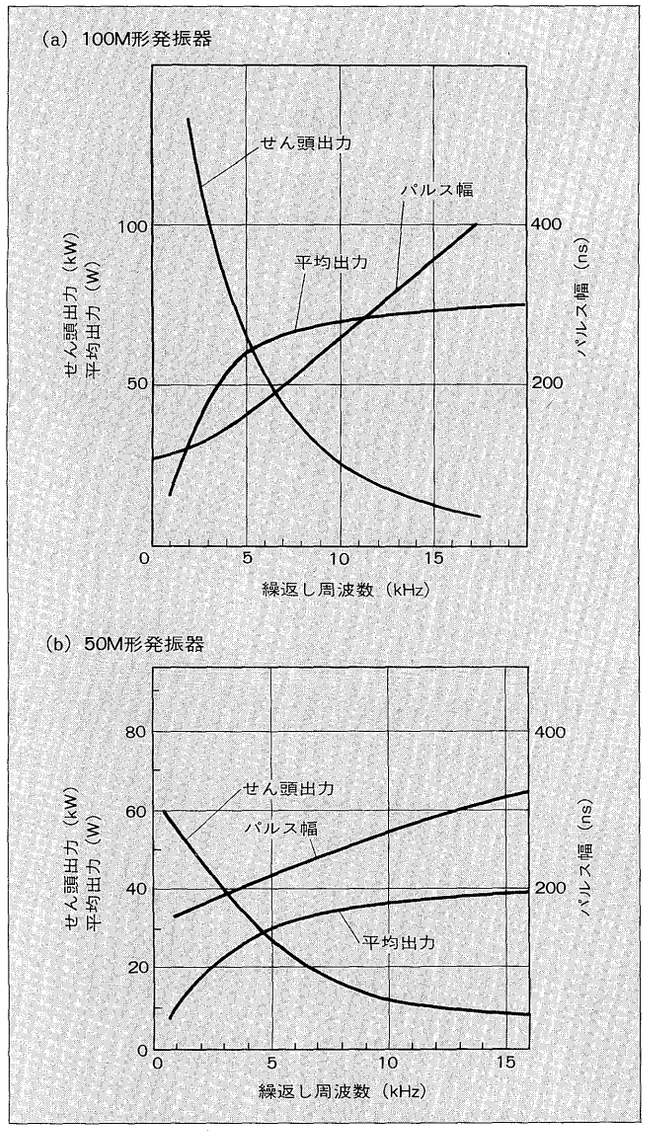
Qスイッチ付発振器の出力性能は，平均出力とジャイアントパルスせん頭値とで表現されるが，このせん頭値自体が平均出力とパルス幅からの計算で求められるため，ビームの集光性まで含めた性能は表現できない。しかし実際に

図5　刻印断面写真



アルミダイカストに刻印した場合の刻印断面
(f150集光レンズ，周波数4kHz，速度10mm/s)

図6　ジャイアントパルスの特性



集光レンズを通して加工をしてみると，その違いは歴然としてくる。**図5**にアルミダイカストに刻印した断面写真を示す。写真は焦点距離150mmの集光レンズを使用したときのものであるが，100mmの集光レンズを使用すれば刻印深さは500μm程度まで達する。

図7　ジャイアントパルスの波形

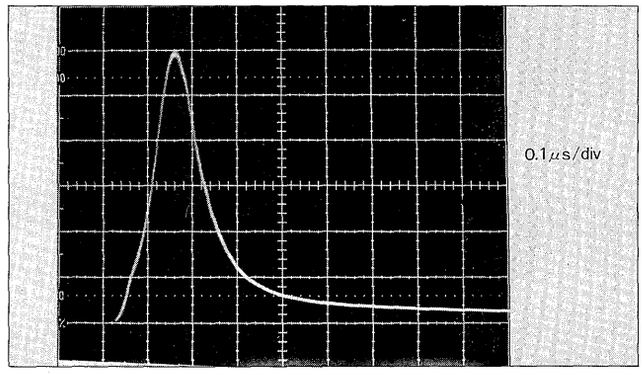


図6(a)にこの発振器のジャイアントパルスの特性を，**図7**にその波形の一例を示す。

5.2　はんだ付け用発振器100SDの性能と特長

この発振器は連続発振専用（Qスイッチ無し）で，レーザ出力は光ファイバを通して伝送し，はんだ付け用の熱源として使用するものである。レーザ光といえども光ファイバに入れると強度分布は変化してしまうので，この場合，ビーム品質は重要ではなく，発振効率が高いことが望まれる。そのため100SD形発振器では，ネオジウム含有量の多いYAGロッドを使用し，更に共振器は発振効率を高めるような構成として，**図3**に示すように定格入力時の出力は140W以上を得ている。これは総合効率で約2.8%であり，非常に高い効率と言うことができる。

5.3　パルス発振器100Pの仕様と性能

この発振器はYAGロッドの両側に2本の励起ランプ（クリプトンフラッシュランプ）を配置している以外は，連続励起の発振器と同様である。励起ランプを2本使用する理由は，ランプの負荷を軽くし，その長寿命化を図るためであるが，YAGロッドに対する励起の均一化という効果もある。この発振器の主な仕様と性能は下記に示すとおりである。

平均出力	：100W以上
最大繰返し周波数	：200pps
最大出力エネルギー	：50J以上/パルス
発振持続時間	：0.1～10ms
ビーム径	：約8 mm
励起ランプ	：クリプトンフラッシュランプ（約4.5kW×2）

6　応用例

6.1　レーザ刻印装置 "LASERMATE-100"

この刻印装置は，LASERMATE-50と同一のスキャニング方式の加工光学系を用いて，深彫り刻印を実現するレーザ刻印装置である。LASERMATEは，Qスイッチによるジャイアントパルスレーザを，二つのミラー（X軸及びY

軸ミラー）によって偏向させ，エフシータレンズ（f・θレンズ）と呼ばれる集光レンズによって，各種ワーク上に集光し，ワーク材料を瞬時に蒸発させて，文字や図形を刻印する装置である。

刻印装置用として，出力100Wの発振器が必要となるケースは，摩耗に耐えるように深く彫りたい場合と，視覚センサによる読取り率を上げるため，太く鮮明に刻印したい場合，刻印時間を短縮したい場合などがあり，特に最近は，アルミダイカストにレーザ刻印した管理データを視覚センサで読み取るケースが増えてきている。特に大物部品の場合は，刻印位置が奥まった位置にあって短焦点のf・θレンズが使用できず，やむなく長焦点のレンズを使用することがある。この場合，50Wの発振器では刻印速度を遅くする必要があるが，100M形発振器を使用すれば，刻印速度を約3倍に上げることができる。

6.2 レーザはんだ付け装置

レーザ光を熱源としてはんだ付けを行う場合，通常10～30Wの出力で十分であるが，ニッケルめっきした端子片などでは，50W程度まで必要とすることがある。

はんだ付け用として，出力100Wの発振器が必要となるケースは，2～3点の同時はんだ付けを行う場合である。YAGレーザの波長は1.06μmで，光ファイバで伝送できることは前に述べたが，レーザ出力を分割ミラーで分割したのち，光ファイバで伝送すれば，任意の位置で2～3点の同時はんだ付けができる。この場合，レーザ光のパワー損失は主として入射及び出射部で発生し，通常8～10%である。

7 あとがき

100W級YAGレーザ発振器について，その概要を紹介した。もとよりレーザ発振器は，共振器のみで性能が発揮できるものではなく，優れたレーザ電源装置（励起ランプ用電源）が不可欠である。幸い富士電機は，パワーエレクトロニクス技術に定評があり，別稿に紹介されているように，レーザ電源装置の分野でも経験が豊富である。その技術と経験を生かし，更に高出力の発振器を商品化して行く所存である。

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
特公昭62-35605	流量計測制御装置	松田　保雄	特公昭62-39354	カップ式飲料自動販売機の水回路	太田　春夫
特公昭62-35804	濾過濃縮装置	吉本　明正	特公昭62-39356	横軸形回転炉の運転制御装置	福田　政克
特公昭62-36538	アンモニアガス分析装置	渡辺　敦夫 金子　輝男 田中　猛夫 齋藤　芳雄	特公昭62-39474	動作および断線表示回路	桜井　和夫 福田　徳幸 鹿野　俊介
			特公昭62-39528	モールド巻線の製造方法	山田　玉吉
特公昭62-37434	磁気ヘッドバイアス方式	宮岸外志久	特公昭62-39709	半波延長方式	森田　公
特公昭62-37437	自動販売機の防盗装置	加藤　栄也 小田　威夫 石井　金吾	特公昭62-40192	積層品用成形プレス	成瀬　志郎
特公昭62-37438	飲料自動販売機	長谷川俊男 尾崎　清輝	特公昭62-40547	電子式点火装置	小宮　優二
特公昭62-37513	誘導炉の運転制御装置	粟谷　宏治 田辺雄三郎 楯野　正雄	特公昭62-40717	音声発生制御装置	佐野　友美 川崎紀久雄
特公昭62-37540	半導体装置	関谷　恒人 伊藤　伸一 重兼　寿夫	特公昭62-40822	マトリックス型燃料電池の電極ーマトリックス結合体およびその製作方法	桜井　正博 田島　博之
特公昭62-37717	電気メッキ装置	東海林茂広			
特公昭62-38755	自動販売機	川崎　治夫	特公昭62-40831	燃料電池の反応ガス給排装置	渡辺　敦夫 安原　毅 鴨下　友義 田島　博之
特公昭62-38806	直流回路しゃ断器の制御回路	西條　喜一 森田　公			
特公昭62-38866	半導体装置の製造方法	石井　重幸	特公昭62-40947	縦続接続サイリスタ変換装置の制御方式	木下　繁則

＊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。