

パルス電源応用技術

🔊 パルスパワー (Pulsed Power), 磁気パルス圧縮回路, エキシマレーザ, EUV, アオコ処理

* 笹本栄二 Eiji Sasamoto

概要

パルス電源は瞬間的な大電力を出力する装置である。当社のパルス電源は、コンデンサ充電器と磁気パルス圧縮回路方式によるパルス発生回路で構成されており、高精度で安定的な高繰り返し運転ができる電源となっている。その応用例として、エキシマレーザ、EUV光源、アオコ増殖防止装置を紹介した。これらには、出力パルス幅が100ns以下、繰り返し周波数が20kHz、出力電圧が120kVなどそれぞれの特長があり、多種多様な電源が活躍している。



パルス電源外観

1. ま え が き

パルス電源とは、マイクロ秒やナノ秒という極短時間のパルス状の大電力を出力する装置である。特に高電圧・大電流を瞬間的に出力するパルス電源では、磁気パルス圧縮回路と呼ばれる回路技術が有効である。磁気パルス圧縮回路は、磁性材料の飽和特性を利用したスイッチング機能とLC共振を利用して立ち上がり時間の短いパルスに時間圧縮するものである。このパルス電源は、パルスパワー (Pulsed Power)⁽¹⁾と呼ばれる技術分野で使用され、広く応用が進められている。本稿では、当社のパルス電源の技術とその応用例を紹介する。

2. パルス電源の技術

当社のパルス電源は、コンデンサ充電器と磁気パルス圧縮回路方式によるパルス発生回路とて構

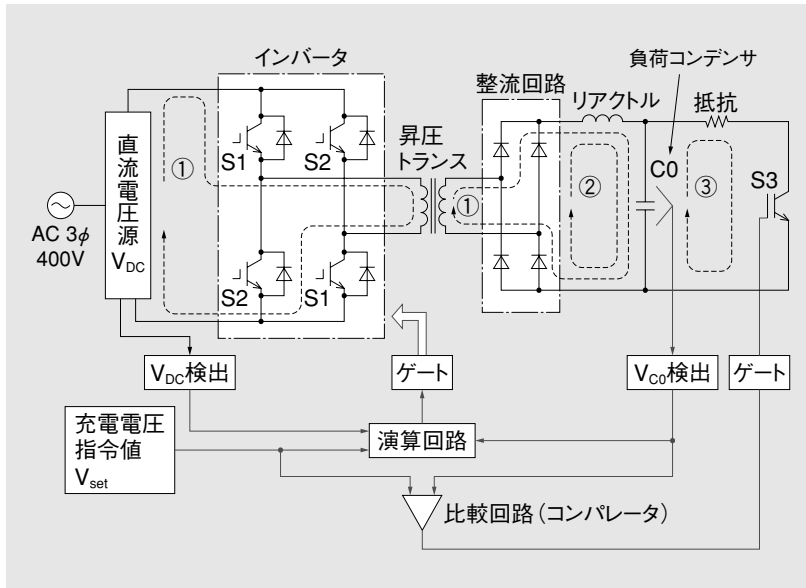
成している⁽²⁾⁽³⁾。本項では、その回路技術と動作原理を紹介する。

2.1 コンデンサ充電器

第1図に充電器部分の主要な回路構成を、第2図に直流電圧源 V_{DC} から負荷コンデンサ C_0 を2.5kVに充電する場合の波形例を示す。直流電圧源は三相交流400Vの整流回路と電解コンデンサなどで構成している。しかし、商用系統の電圧は変化するため、単純にインバータによる電圧パルス生成と昇圧トランス及び整流回路で充電器を構成しただけでは、充電対象の負荷コンデンサ C_0 の電圧を正確に制御できない。そこで、下記のような制御を適用している。

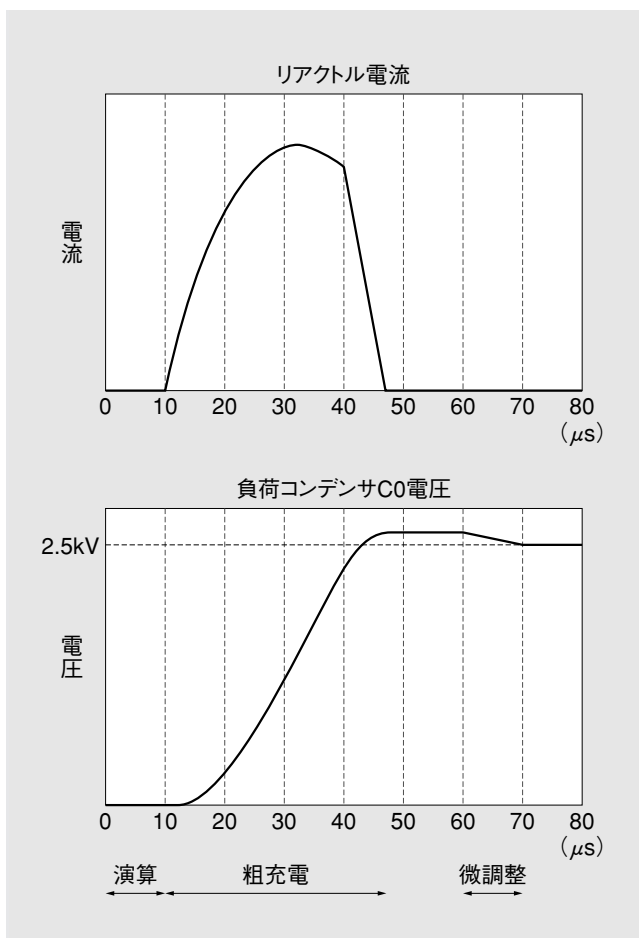
(1) インバータのパルス幅演算 直流電圧源の電圧 V_{DC} と負荷コンデンサの初期電圧 V_{C0} ($t=0$) 及び C_0 の充電電圧指令 V_{set} を入力として、インバータのパルス出力時間を演算し、スイッチ $S1$ のオン

*製品開発部



第1図 充電器の回路構成

充電器の主要な回路構成及び制御ブロックを示す。



第2図 充電器の動作波形 (模式図)

充電器の動作波形の模式図を示す。演算・粗充電・微調整の3ステップで充電している。

時間を決定する。ここでパルス幅は、負荷コンデンサC0を充電電圧指令値 V_{set} より僅かに高く充電するように設定する。

(2) 粗充電 (1)で演算した時間幅だけ第1図のスイッチS1をオンすると、図中の破線①で示したように、インバータから昇圧トランスを介し整流回路とリアクトルを通してコンデンサC0を充電する。ここで、リアクトルとコンデンサC0により共振するが、第2図のように $40\mu s$ のタイミングでS1をオフするとリアクトルに残っていたエネルギーはすべて破線②の経路によりC0に充電される。

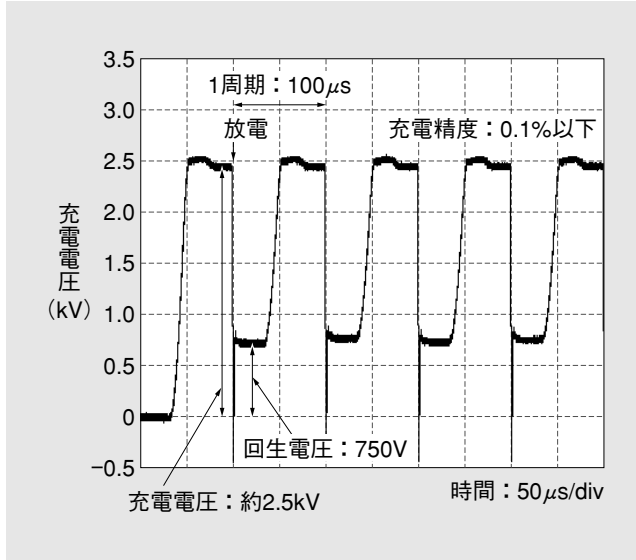
(3) 微調整 この時点ではコンデンサC0の電圧は充電電圧指令 V_{set} よりわずかに高く充電されているので、次に抵抗とスイッチS3による回路で放電して微調整する。第2図のように $60\mu s$

でスイッチS3をオンすると図中の破線③の経路で電流が流れ、C0に充電されたエネルギーが抵抗で消費され電圧が低下する。この電圧 V_{Co} を計測しておき V_{set} と一致した時点でS3をオフさせることにより、精度のよい充電電圧を得ている。

この(1)から(3)の充電サイクルを繰り返し周波数 $10kHz$ (1秒間に1万回の充電動作) という高繰り返しで動作させた例が第3図である。約 $2.5kV$ という高電圧まで充電した後、次段のパルス発生回路により瞬時にコンデンサC0の電圧を零まで放電し、最後に余ったエネルギーをコンデンサC0に回生して $750V$ まで回復させた例であり、以降はこの状態で充電と放電及び回生を繰り返す。この方式により、 0.1% 以下の充電電圧の精度が得られている。

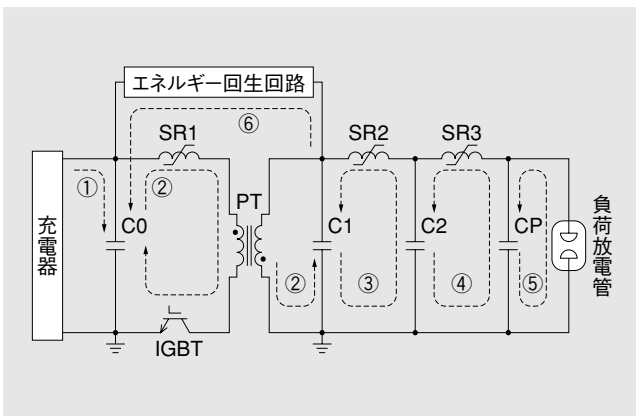
2.2 エネルギー回生回路付きパルス発生回路

コンデンサC0に充電されたエネルギーは、次段のパルス発生回路によってパルス状に圧縮されて負荷に出力される。第4図にこのパルス発生回路の主要な回路構成を示す。パルス発生回路は電圧パルスを発生する電力用半導体スイッチIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) とパルストランスPT、及び可飽和リアクトルSR1~SR3とコンデンサC1・C2・CPから構成されている。可飽和リアクトルは磁性材料の特性に特長があり、電流の小さい非飽和領域では非常に高い透磁率であるが、電流が増加して磁束密度が磁気飽和レベル



第3図 充電電圧波形の例

充電電圧波形の例を示す。充電電圧約2.5kV，繰り返し周波数10kHzである。

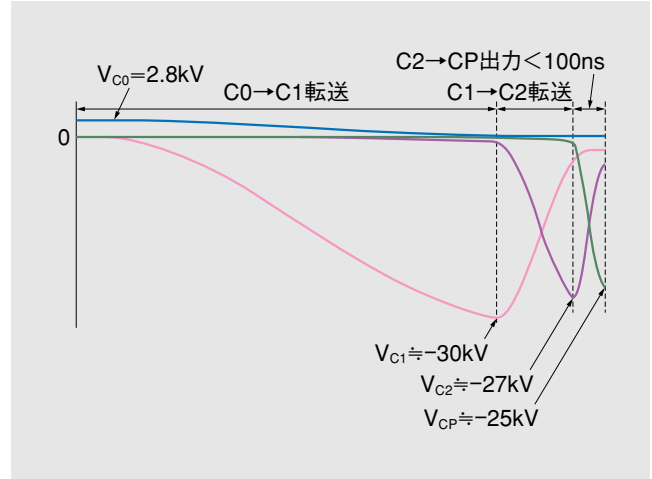


第4図 パルス発生回路の回路構成

パルス発生回路の回路構成を示す。磁気パルス圧縮回路により負荷へ短パルス出力し，エネルギー回生回路によりC0にエネルギー回生している。

に達してしまうとそれ以降はほとんど磁束が増加しないという特性がある。そのため，この可飽和リアクトルに電圧を加えると，電流が少ないうちは大きなインダクタンスとして電流の変化を抑制するが，ある電流を超えるとあたかも空心リアクトルのようにインダクタンスが小さくなり，電流が急激に増加する。このように電流の大きさにより2つのインダクタンスが切り替わるスイッチ特性とコンデンサを組み合わせれば，第5図のパルス発生回路の動作波形（シミュレーション波形）に示すように，次のような動作でパルス圧縮を行うことができる。

(1) まず前述の充電器により第4図の破線①の電流路によりコンデンサC0を所定の電圧に充電す



第5図 パルス発生回路の動作波形
(シミュレーション波形)

パルス発生回路（C0→CP転送時）のパルス圧縮動作のシミュレーション波形を示す。

る。また，この充電期間中に，第4図では省略しているが，可飽和リアクトルに第2巻線をほどこしてバイアス磁界をかけて初期磁化状態にしておく。(2) 第4図のIGBTを一定時間だけオンすると，破線②のように，コンデンサC0からSR1とPTを介して，PTの二次側のコンデンサC1へ充電が行われる。この時，SR1が非飽和のうちは，電流の増加が少ないためにコンデンサC1の電圧はゆっくりと上昇するが，SR1が飽和に達すると電流が急増してあたかも空心リアクトルとコンデンサの共振のような充電電圧特性となり，第5図中では-30kVまで上昇している。

(3) 次段の可飽和リアクトルSR2にも破線③の電流が流れるが， V_{C1} の電圧が上昇しても最初はSR2が非飽和領域であるため電流増加が遅い。しかし，ちょうど V_{C1} が-30kVの時点で飽和に達すると，電流が急増してコンデンサC2を急激に充電するようになる。ここで，可飽和リアクトルSR2の飽和時インダクタンスをSR1より小さくしておけば，SR1とC0の共振周期よりもSR2とC2の共振周期の方が短くなり， V_{C2} のように短時間の電圧パルスが生じる。

(4) 更に同様にSR3とCPをもう一段構成すると破線④のようなパルス圧縮が行われ，コンデンサCPには第5図に示すような100ns以下という極短時間のパルス幅の電圧が得られる。

(5) コンデンサCPに発生したパルス電圧により，負荷放電管の電極間は高電圧となり破線⑤のよう

に放電を行う。ここで、第5図では省略しているが、負荷が低インピーダンスの場合、この放電時に負荷で吸収されない余剰エネルギーがCPに極性反転して戻ってくる。このエネルギーは共振しながらパルス圧縮回路を逆流しC1まで戻ってくる。(6) この逆流エネルギーを破線⑥のようなエネルギー回生回路を通してコンデンサC0に回生する。このエネルギー回生により、余剰エネルギーが再利用できるため効率が向上し、更にCPが再充電されて再度放電が起こるといった異常動作を防止することもできる。

パルス電源は、この(1)から(6)までの動作を高い繰り返し周波数で行うものであり、第5図に示すような圧縮例では、出力パルス幅100ns以下、出力電圧-25kV、繰り返し周波数6kHzで動作できている。

3. エキシマレーザ用パルス電源

エキシマレーザは、紫外域の波長 (KrF ; 248nm, ArF ; 193nmなど) で発振する大出力高効率レーザであり、半導体フォトリソグラフィに使われている⁽⁴⁾。エキシマレーザでは、レーザガスを瞬間的に励起する必要があり、短パルス出力(例えば100ns以下)のパルス電源が必要となっている。

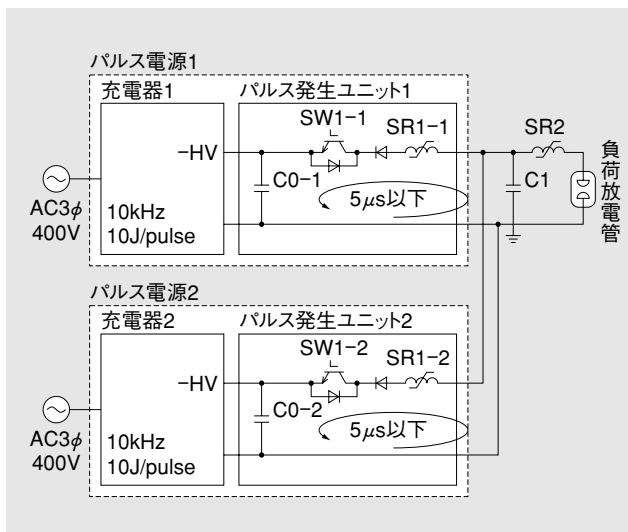
半導体の微細化に伴い、フォトリソグラフィ技術はドライのKrFからArF、そしてArF液浸、ダブルパターンングと進展しており、その光源であるエキシマレーザやパルス電源にも高出力化、高繰り返し化が求められてきた。第1表に現状のエキシマレーザ用パルス電源の仕様を示す。

4. EUV (Extreme Ultraviolet) 光源用パルス電源

次世代の最有力フォトリソグラフィ光源として波長13.5nmの極端紫外線EUVがあり、技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構EUVAにおいて研究開発が行われている。EUV発生方式には、放電を用いる方式のDPP (Discharge Produced Plasma) と、レーザを用いる方式のLPP (Laser Produced Plasma) があり、当社のパルス電源はDPP方式の研究に使われている⁽⁶⁾。EUV光源は高出力化が求められており、パルス電源にも高出力

第1表 エキシマレーザ用パルス電源の仕様
エキシマレーザ用パルス電源の仕様を示す。

項目	仕様値
繰り返し周波数	6kHz以下
出力電圧	-30kV以下
出力平均電力	15kW級
出力パルス幅	100ns以下

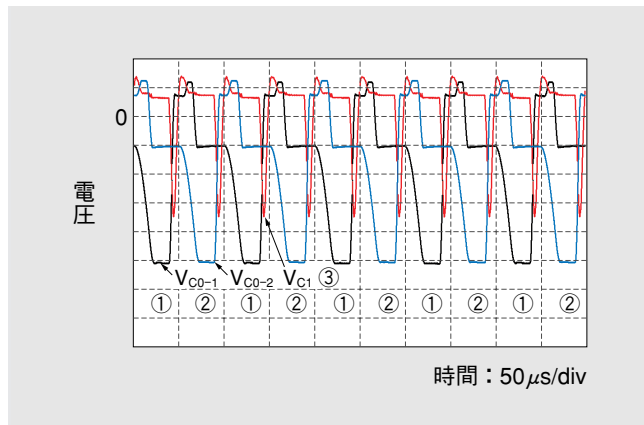


第6図 EUV光源用パルス電源の回路構成
EUV光源用パルス電源の回路構成を示す。パルス電源を並列交互運転で20kHz出力している。

化、高繰り返し化が求められる。そこで、本項では20kHzの繰り返し運転ができるパルス電源の回路方式を紹介する。

第6図にEUV光源用パルス電源の回路構成を示す。パルス電源1とパルス電源2の2個のパルス電源を並列に負荷コンデンサC1へ接続している。それぞれのパルス電源には10kHzで動作できる充電器とパルス発生ユニットが組み込まれており、交互にパルスを出力させる並列運転により最大20kHzという高い繰り返し周波数で動作できる。ここで、充電器はコンデンサC0-1及びC0-2を50μs以下で高速充電しており、充電電圧が約0.2%という高精度を実現している。また、パルス発生ユニットでは半導体スイッチIGBTを使用して、C1への出力パルス幅が5μs以下になるようにエネルギーの転送を行っている。

第7図に20kHz動作時の出力波形を示す。ここでは放電管の代わりに抵抗で負荷を模擬した。第7図の波形①(黒色)がコンデンサC0-1電圧、波形②(青色)がコンデンサC0-2電圧、波形③(赤色)がコンデンサC1電圧である。このように、



第7図 20kHz動作時の出力波形

EUV光源用パルス電源の出力波形を示す。①(黒色)はC0-1電圧、②(青色)はC0-2電圧、③(赤色)はC1電圧である。

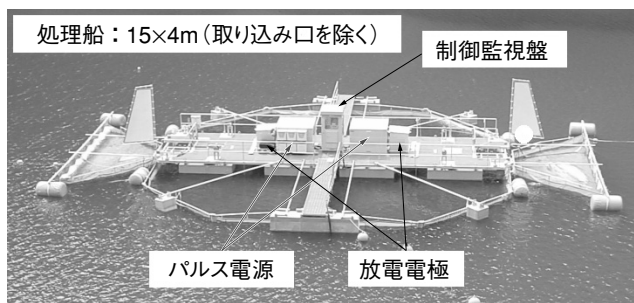
2つのパルス電源を交互に運転させても、安定な20kHzの出力が得られている。

最終的にC1に転送されたエネルギーは、負荷側の可飽和リアクトルSR2でパルス圧縮され、負荷放電管に供給される。このパルスパワーで負荷放電管に高エネルギー密度のZ-pinchプラズマを生成し、EUV光が発生する。この1回の充電エネルギーは10Jであり、これを20kHzで動作させたときの平均電力は200kWにも達しており、これを更に短時間に圧縮していることから、いかにパルス電源の出力エネルギー密度が大きいかが想像できる。

5. アオコ増殖防止装置用パルス電源

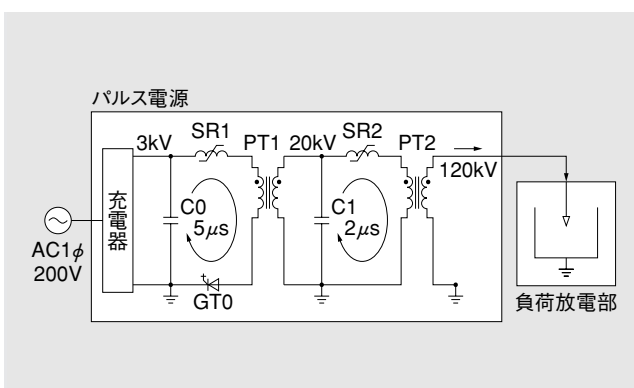
パルスパワーを用いると、気体中に限らず水中でも放電を起こすことができる⁶⁾。水中パルス放電の応用例として、(株)荏原製作所のアオコ増殖防止装置がある⁷⁾。アオコは夏季に湖沼や池などで大量発生して水質汚染を引き起こすため、水中パルス放電による衝撃波でアオコ細胞内部の気泡を破壊して処理するものである。水中で放電を発生させるためには、急峻な電圧の立ち上がりが必要であり、且つ処理量を増やすために大きな放電エネルギーが必要である。そのため、このパルス電源には高電圧、短パルス出力が求められる。

第8図にアオコ増殖防止装置の外観を示す。処理船の中央部に2組の放電部(パルス電源+放電電極)と制御監視盤があり、当社のパルス電源が搭載されている。パルス電源の寸法はW1.6×H1.1×D1.6mである。屋外に設置しているため、飛来物



第8図 アオコ増殖防止装置外観

(株)荏原製作所のアオコ増殖防止装置の外観を示す。処理船中央付近に当社パルス電源が2台搭載されている。



第9図 アオコ増殖防止装置用パルス電源の回路構成

アオコ増殖防止装置用パルス電源の回路構成を示す。出力電圧120kV、出力パルス幅2μsとなっている。

などにより万が一の破損事故が起こっても環境に影響を与えないように、絶縁油を使わない気中絶縁とするなどの配慮を適用している。

第9図にアオコ増殖防止装置用パルス電源の回路構成を示す。入力は単相交流200Vであり、パルス出力の最大繰り返し周波数は40Hzである。初段コンデンサC0の充電電圧は約3kVであり、半導体スイッチとして4.5kV耐圧のGTOを使用して約5μsのパルス幅でスイッチングする。これをパルストランスPT1で約20kVに、磁気パルス圧縮回路で2μsに時間圧縮した後、更にパルストランスPT2で120kVに昇圧してから出力している。

6. む す び

当社のパルス電源技術とその応用例を紹介した。パルス電源は本稿で紹介した応用例以外にも排ガス処理・成膜など様々な分野で使われており、今後ますます用途が拡大すると予想される。これからも技術の向上に努めると共に、製品のバリエーションを増やして適用分野の拡大を図っていく所存である。

《参考文献》

- (1) 原, 秋山: 高電圧パルスパワー工学, 森北出版, 1991
- (2) 片岡: 「最先端の半導体製造に活躍するパルス電源技術」, 明電時報281号, 2001/No.6, pp.44~45
- (3) 佐久川: 「高繰り返しパルスパワー発生技術」, プラズマ・核融合学会誌, Vol.79, 2003/No.1, pp.15~19
- (4) 榎波, 西坂, 溝口, 谷, 渋谷, 山田: 「半導体の超微細加工に用いられるKrF1kHzエキシマレーザー用電源装置」, 明電時報262号, 1998/No.5, pp.39~42
- (5) 佐藤: 「DPP方式EUV光源の開発」, ライトエッジ, No.30, 2008, pp.68~74

- (6) 佐久川, 浪平, 勝木, 秋山, 長田, 小金澤: 「半導体パルスパワー電源のプラズマ応用機器への適用」, プラズマ・核融合学会誌, Vol.81, 2005/No.5, pp.350~354
- (7) 國友, 佐々木, 鮎川, 藤原: 「水中パルス放電式アオコ増殖防止装置」, エバラ時報, No.217, 2007, pp.32~35

《執筆者紹介》



笹本栄二 Eiji Sasamoto
パルス電源の開発・設計に従事

