

高電圧パルス水処理装置の紹介

High Voltage Pulse Water Treatment System



(技)研究開発部
小倉 正裕
Masahiro Ogura

高電圧パルス水処理装置は、オゾン、ラジカル、衝撃波を同時に作用させることにより、有機物の分解、殺菌を行う新しい促進酸化プロセスの装置である。非常にシンプルな構造であり、上下水の高度処理への適用が期待される。一方、その構造から排ガス、悪臭ガスの処理にも適用する可能性がある。

純水にイソプロピルアルコール (IPA) を溶解した模擬液の処理実験において、高電圧パルスによる水処理はオゾン単独処理の場合の約 3 倍の TOC 除去率であった。

High Voltage Pulse Water Treatment (HVPWT) is a new advanced oxidation process. It promotes the oxidation of the organic compounds and disinfection because of ozone, radicals and shock waves. The structure of HVPWT is very simple. It is expected the application to the purification process of drinking and sewage water. On the other hands, it is expected to treat noxious gases and odors because of the construction.

HVPWT is third times as large TOC removal ratio as the ozone single treatment in the purification experiment of water which contain isopropanol.

Key Words :

高電圧パルス	High voltage pulse
放電	Discharge
オゾン	Ozone
促進酸化	Advanced oxidation
水処理	Water treatment

まえがき

高電圧パルスとは比較的小さい電気エネルギーを時間的に圧縮することにより瞬間的に大きな電力を発生させる技術であり、レーザー発振、電子ビーム、X線リソグラフィ¹⁾、核融合などに利用されてきた。近年、環境機器²⁾への応用が急速に進展しており、水処理、VOC処理³⁾などへの適用が期待されている。

今回紹介する高電圧パルス水処理装置は、放電により発生するオゾン、ラジカル、衝撃波等を同時に

処理対象物に作用させる新しいプロセスの装置である。

オゾンは強力な酸化剤であり、脱色、脱臭、トリハロメタン前駆物質の低減、殺菌、生難分解性有機物の酸化分解などに使用されている。しかし、オゾンは単独では有機物を炭酸ガスと水に分解することは出来ない。環境中の難分解性物質の増加が深刻となっている現在、より強力な酸化力が必要となっている。そこで、オゾンの酸化力をさらに強めるため

に過酸化水素、紫外線、放射線照射、触媒、超音波、高 pH などを併用した促進酸化プロセスが開発されている⁴⁾。

一般に水中の有機物のオゾンによる酸化分解過程には2つの経路がある。一つは分子状オゾンとの直接反応であり、もう一方はオゾンの分解や反応によって生じたヒドロキシルラジカル (OHラジカル) による反応である。この OH ラジカルは非常に反応性の高い酸化剤であり、水素引き抜き反応、二重結合への付加反応、電子移動反応により有機物と反応する。オゾンを分解することによって、更に酸化力の強い OH ラジカルを多く生成し、有機物の酸化分解を行おうとするのが促進酸化プロセスである。

本装置は、放電電極部に直接原水を滴下することによりオゾン、ラジカル、衝撃波を同時に原水に作用させる新しい促進酸化プロセスであり、分解性能の向上により、処理時間の短縮や装置の小型化が期待できる。

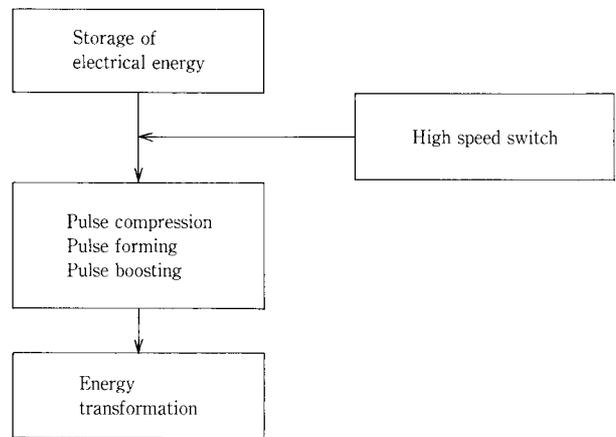
1. 高電圧パルスの発生

高電圧パルスを利用するためには急峻な立ち上がりで短いパルスを得ることが重要である。そのため、その発生には特有のシステム構成が必要である。基本的には第1図のようなダイアグラムとなる。蓄積された初期エネルギーは高速スイッチにより急速に放出され、パルス圧縮、成形⁵⁾、昇圧が行われ、負荷である放電電極に投入される。

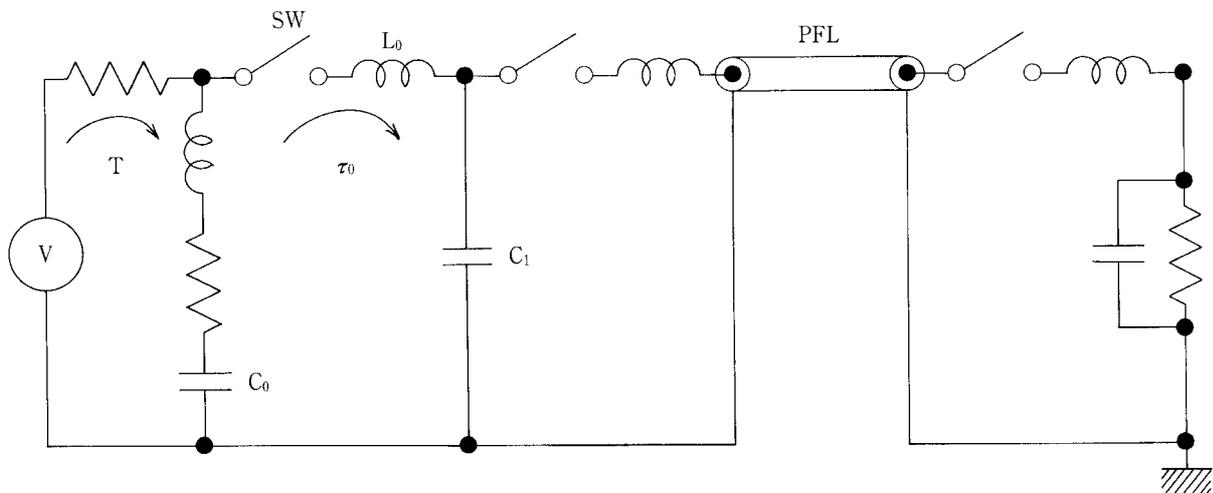
第2図に高電圧パルス発生装置の代表的な回路を示す。スイッチ SW の投入により充電されたキャパシタ C_0 が放電しインダクタンス L_0 を介して

C_1 に送られる。このとき C_0 から C_1 へのエネルギーの伝送時間 τ_0 は C_0 の充電時間 T よりも短縮されている。この回路をパルス圧縮と呼び、複数段のパルス圧縮により必要とする短いパルス幅を得ることが出来る。圧縮されたパルスは、パルスフォーミングライン (PFL) で成形される。PFL では出力波形を整え、急峻な立ち上がりのパルスとする。高電圧のパルス成形や圧縮は困難であるため、低電圧の段階でパルス圧縮と成形を行い、その後昇圧して高電圧パルスを得ている⁶⁾。

高電圧パルスの波形の例を第3図に示す。横軸が時間、縦軸が電圧であり、立ち上がり時間 (ピーク電圧の10%~90%) が約60 nsecで、パルス幅が約



第1図 高電圧パルス発生装置のダイアグラム
Fig. 1 Schematic diagram of high voltage pulse generation



第2図 高電圧パルスの回路例
Fig. 2 Example of high voltage pulse circuit

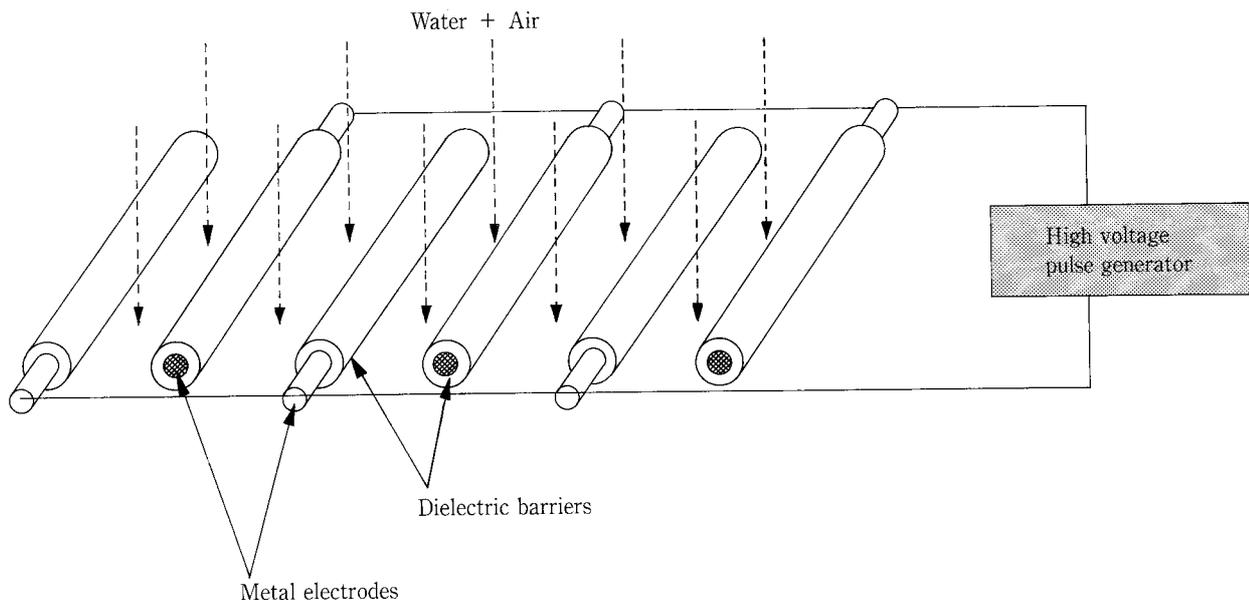
520 nsec, ピーク電圧が約18 kVの場合を示している。このようなパルスを1秒間に100~1000回程度の繰り返し回数で連続して発生させるのが高電圧パルスの発生装置である。

2. 高電圧パルスの特長

一般に不純物を多く含む水は導電率が大きく、水中で直流高電圧を電極間に印加すると大きな電流が流れるため、発熱あるいは電気分解が生じる。ところが、直流高電圧を極めて短時間印加すると水が誘電体のような性質を示す。この短時間の直流高電圧を高電圧パルスと呼ぶ。高電圧パルス幅が1 μ sec よりも短くなると、水中の各種イオンが電極間を移動することが出来なくなる。これは、水中でのイオンの移動速度が電子と比べて小さいためである。これにより、気液混合状態で高電圧パルスを印加すると電気エネルギーが発熱や電気分解に消費されず、気中放電や液滴表面での放電により消費され、オゾンやラジカルが効率的に生成される。

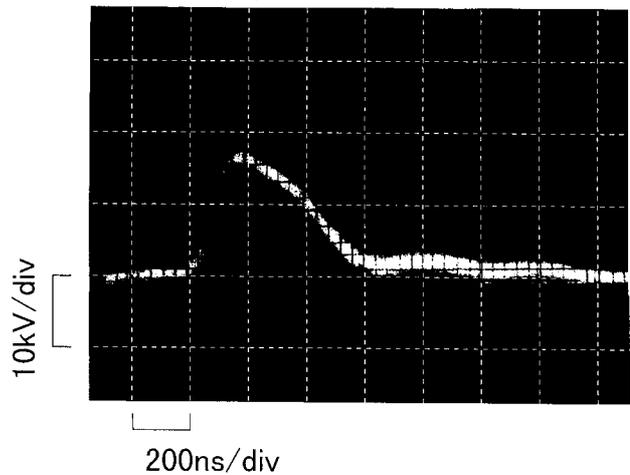
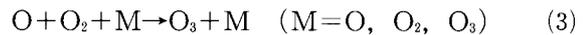
3. 高電圧パルスによる水処理

高電圧パルスによる水処理は放電部に直接原水を滴下することにより行われる。放電電極部の模式図を第4図に示す。金属をガラスで被覆した電極を櫛形に並べ、その上方より原水を滴下する。金属をガラスで被覆することによりアーク放電を防止し、より安定な誘電体バリア放電となる。電極間に高電圧パルスを印加すると、放電は主として気相および液相の表面で起こり、このとき生じるオゾン、ラジカル、衝撃波が水中の有機物を分解し、殺菌を行う。



第4図 放電電極部の模式図
Fig. 4 Schematic illustration of electrode system

オゾン発生方式には無声放電方式、紫外線方式、水電解方式、放射線照射方式などがある。高電圧パルス水処理装置では主として空気中での放電によってオゾンが発生し、その反応は電子衝突によって生じる励起種の多様性のために複雑である。主反応は次式で表される。



第3図 高電圧パルス波形の例
Fig. 3 Example of high voltage pulse wave oscillograph

(1)式、(2)式の反応で生成される酸素原子や O_2 ラジカルは極めて酸化力が強い。しかし、その寿命は数 μ 秒と非常に短い。通常、放電によって生成されたオゾン水を水へ溶解するには散気管方式やエジェクタ方式がよく用いられている。しかし、発生したオゾン化空気を水に作用させるまでにラジカルは消滅してしまうため、従来の方式では気中放電で発生したラジカルを有効に利用することは出来ない。しかし、本方式では放電電極部に直接原水を滴下することにより、気中放電で発生したラジカルの酸化力を水処理に利用可能となる。

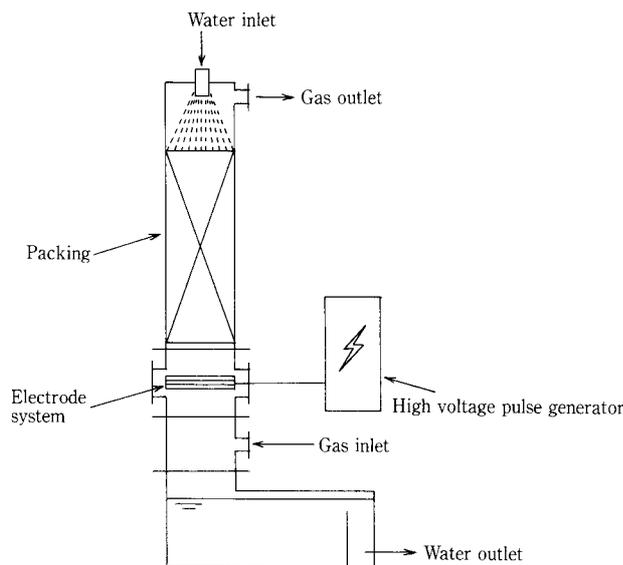
一方、液相の表面で起こる放電は液体中にOHラジカルやOラジカルなどの活性種を生成すると考えられる。これらのラジカルが水中有機物と反応すると効果的な水処理を行うことができる¹⁰⁾。

液相中に高電界を印加すると、液中生物の細胞膜は電気穿孔により破壊されて細胞内容物や原形質分離能の消失により不活性化が起こる⁷⁾。また、放電の衝撃波による殺菌効果もあると考えられる。

まとめると、高電圧パルスによる水処理は次の3つの作用がある。

- ①オゾンによる酸化還元反応
- ②高電界中での水の活性化(ラジカル生成)
- ③放電の衝撃波及び高電界による殺菌作用

これらの相乗効果により、有機物の酸化分解、殺菌が効果的に行われると考えられる。



第5図 高電圧パルス水処理装置の概略図
Fig. 5 Schematic diagram of high voltage pulse water treatment system

4. 高電圧パルス水処理装置の構成

高電圧パルス水処理装置の概略図を第5図に示す。原水は、装置上部より噴霧され、充填塔を通り放電部に滴下される。一方、オゾン発生の原料である空気は放電部の下部より送りこまれる。放電部ではオゾン、ラジカル、衝撃波が同時に作用し、さらに余剰オゾンは充填塔内で気液接触する。これにより、水中有機物の酸化分解、殺菌が効率的に行われる。

電極にはステンレス棒を石英ガラス管で覆ったものを使用している。ケーシングに近い部分には接地側の電極のみを配置しており、高電圧がケーシングや水を伝わって漏電することは無い。また、なんらかの原因で石英ガラス管が破損した場合にも、回路の安全機構が働き、電源を落とす仕組みになっている。

5. 高電圧パルス水処理装置の用途

適用分野は主に次の4つが考えられる。

- ①上水の高度処理
- ②下水の高度処理
- ③有害ガス・悪臭ガスの脱臭
- ④難分解性有機物の処理

水処理においては主として膜で取り除けない溶解性成分の処理が期待される。上水の高度処理については、殺菌消毒、異種味成分の除去、有機物の低分子化、トリハロメタン前駆物質の抑制などを目的に活性炭の前段への適用が見込まれる。下水については、殺菌、色度除去、脱臭、生物分解性の向上などを目的に塩素処理の前段への適用が見込まれる。

ガス処理についても若干の構造変更で適用が可能である。排ガスを充填塔内で気液接触させ、処理対象物質を水に吸収させた上で分解する。用途としては、排ガス・排煙脱硝、シアン・フェノール処理、悪臭ガスの脱臭に適用が見込まれる。

また、ラジカルの酸化力を利用し、難分解性有機物の低分子化に適用できる可能性がある。

6. テスト装置の紹介

テスト装置の外観写真を写真1に示す。本装置の概要は次の通りである。

- 放電電力：～200 W
- オゾン発生量：最大約15 g/h
- 空気風量：～20 m³/h
- 本体材質：SUS304
- 電極材質：石英ガラス+ステンレス鋼
- 処理水量：～5 m³/h

6. 1 放電による水処理効果

放電処理による有機物分解効果を確認するため、

オゾン単独処理とオゾン・放電併用処理の比較を行った。オゾン単独処理では、放電で発生したオゾンを充填塔に吹き込み、処理を行った。一方、オゾン・放電併用処理では放電部に原水を滴下することで、オゾン・放電併用処理を行った。放電電力はどちらの場合も約200 Wである。原水には純水にIPA 約50 mg/lを溶解した模擬液250 Lを使用し、充填塔内を循環させ処理を行った。第6図に処理結果を示す。

オゾン・放電併用処理の場合の TOC 除去率は44%、オゾン単独処理での TOC 除去率は15%である。

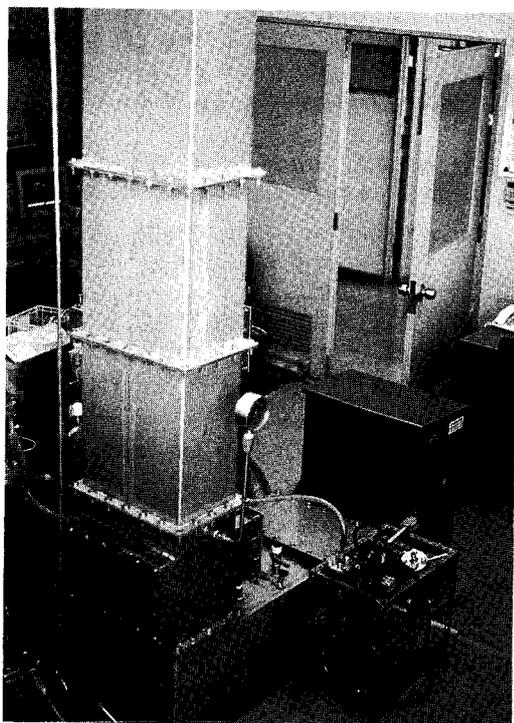


写真1 テスト機外観
Photo.1 Outside view of testing unit

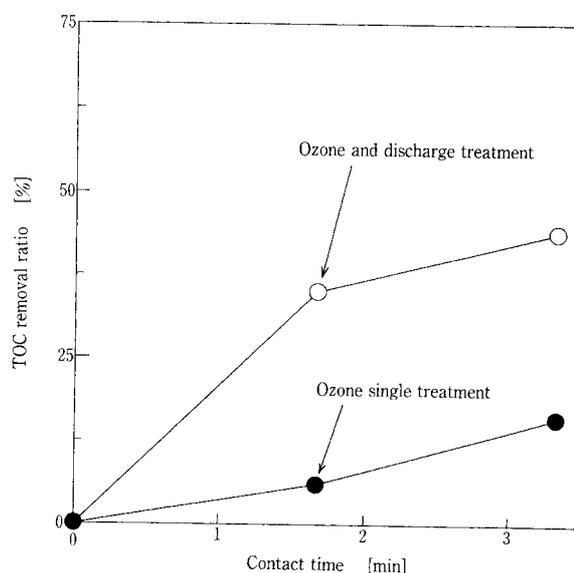
放電処理を併用することで約3倍の TOC 除去率が得られた。

6.2 用水処理への適用例

用水処理のテスト事例を第1表に示す。原水には井戸水を使用した。処理水量は10 m³/h、放電電力は500 Wである。目的は着色成分の分解、CODの除去、悪臭成分の分解及び除鉄である。色度除去率93%、濁度除去率97%、鉄分除去率91%と共に高い結果が得られた。また、CODについても43%の除去率が得られた。

6.3 上水の高度処理への適用例

上水の高度処理への適用例を第2表に示す。原水には凝集沈澱処理後の水を使用した。処理水量は0.2 m³/h、放電電力は約200 Wである。目的はトリ



第6図 TOC 除去率と接触時間の関係
Fig. 6 Relationship between TOC removal ratio and contact time

第1表 用水処理の水質
Table 1 Quality of water for industrial water treatment

	Raw water	Treated water	Removal ratio(%)
pH	7.3	8.1	—
Color	32	2	93
Turbidity	11.6	0.3	97
Conductivity	390	385	—
COD	2.3	1.3	43
Fumic acid	< 0.4	< 0.4	—
Iron	0.625	0.056	91
Manganese	0.004	0.001	75
Phenols	< 0.030	< 0.030	—
Total hardness	198	199	—

第 2 表 上水処理の水質

Table 2 Quality of water for drinking water treatment

		Raw water	Treated water	Removal ratio(%)
pH	[—]	7.5	7.5	—
Color	[deg]	2	1	50
Turbidity	[deg]	1.0	0.4	60
Ammonia nitrogen	[mg/l]	0.14	< 0.10	28
Chlorine demand	[mg/l]	0.7	0.4	42
KMnO ₄ consumption	[mg/l]	2.9	2.6	4
THMFP	[μg/ml]	45.7	27.3	40
General bacteria	[/ml]	2 300	51	98
E. coli group count	[/ml]	0	0	—

ハロメタン前駆物質の除去，異種味成分の除去，殺菌である。トリハロメタン生成能は40%除去，一般細菌は減菌率98%が得られた。

むすび

今回は，高電圧パルス放電によるオゾンと放電を併用した新しい促進酸化プロセスと数例の処理データを紹介した。現在，様々な用途についてテストしつつ，適用分野の探索，処理フローの改良を行っている。次報ではより具体的な案件について報告する予定である。

[参考文献]

1) 秋山秀典，原 雅則：J. IEE Japan, Vol.115, No.3

(1995), p.166.

2) 宗宮 功，山田春美：月刊フードケミカル，Vol.5, No.8 (1989), p.37.

3) 水野 彰：プラズマ・核融合学会誌，Vol.74, No.2 (1998), p.140.

4) 辻 幸男：月刊地球環境，Vol.28, No.6 (1997), p.92.

5) 原 雅則，秋山秀典：高電圧パルスパワー工学，森北出版 (1991)

6) 京都ハイパワーテクノロジー研究会：パルスパワー工学の基礎と応用，近代科学社 (1992)

7) 佐藤正之：食品と容器，Vol.35, No.6 (1994), p.308.

8) 杉光英俊：静電気学会誌，Vol.17, No.3 (1993), p.184.

9) 山部長兵衛，酒井英治：T. IEE Japan, Vol.114, No.4 (1994), p.357.

10) Sato M, Ohgiyama T: IEEE Tans Ind Appl, Vol.32, No.1 (1996), p.106.

連絡先

小 倉 正 裕 技術開発本部
 研究開発部
 TEL 078 - 992 - 6525
 FAX 078 - 992 - 6504
 E-mail m.ogura@pantec. co.jp