

パルス放電プラズマを用いた水からの水素生成に対する電極配置等の各種パラメータの影響

香川高等専門学校 機械電子工学科

山下 智彦

1. はじめに(背景・目的)

水素は多様な資源から製造可能であることから、わが国ではエネルギー供給・調達リスクの低減に資するエネルギーとして注目されており、水素の社会実装が推進されている。水素を生成する手法として、天然ガス等から水素を生成する水蒸気改質法や水から水素を生成する電気分解法などが一般的である。水蒸気改質法では、都市ガスなどの化石燃料を改質温度 700℃、触媒 (Ni 系, Ru 系)、水蒸気を利用して水素を生成する。しかしながら、副生成物として一酸化炭素や二酸化炭素が発生するため、これらを除く装置の設置にコストがかかり、大がかりにもなってしまうという課題が挙げられている^[1]。電気分解法には様々な種類があるが、一般的に電極材料にはレアメタルなどの高価な材料が使用されており、溶液としてアルカリ溶液などを用意する必要もあり、設備コストが課題として挙げられている^[2-3]。

そこで、近年ではパルスパワーに注目が集まっている。パルスパワーとは瞬間的に発生する力のことであり、電気分野においては電力となる^[4]。蓄積した電気エネルギーを時間的に圧縮して瞬間的に放出することで、MW-GW 級の電力を発生させることができる。パルスパワーを適用することで極限的反応場が生成されるため、医療・材料・環境・食品加工・バイオなど様々な分野への応用が期待されており、研究が盛んに行われている^[5-7]。このパルスパワーによって放電プラズマを生成することで、様々な水からの水素生成が可能である。

パルス放電を用いて水を原料とした水素生成については現在研究が進められており、水上で発生する放電プラズマの面積が広いと水素生成量が多くなることや水の導電率が高い方が水素の増加率が急峻であること、電圧の極性の影響などが明らかとなっている^[8-9]。しかしながら、雰囲気ガス種やガスの導入方法、電極と水面との間隔、水の部分の抵抗の影響、電極の針の数の影響などといった各パラメータが水素生成に与える影響については報告されていない。したがって、本研究ではパルス放電プラズマを水面で発生させ、水から水素を生成する技術の実用化を目指し、電極配置等の各種パラメータが水素生成に与える影響を明らかにし、少ない投入エネルギーで多くの水素を生成する水素生成装置を開発することを目的とする。

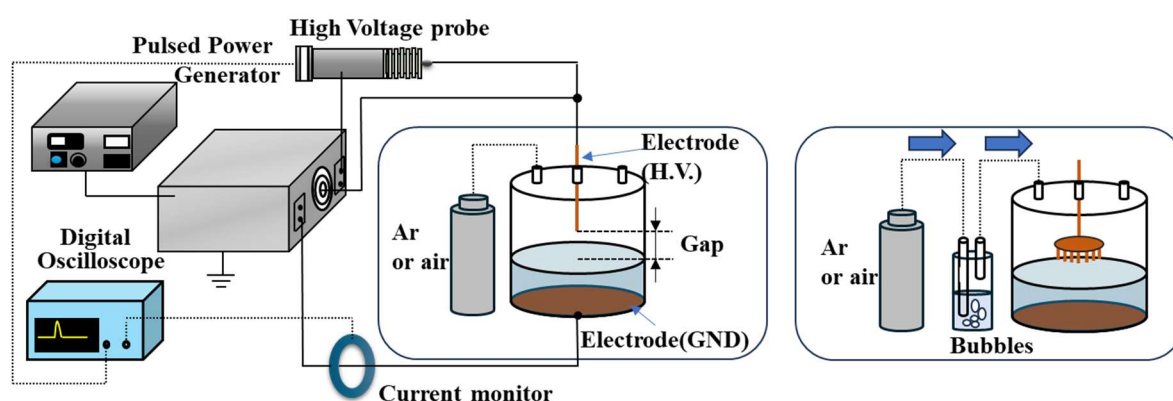
2. 実験装置および実験方法

図 1 に本研究の実験装置概略図を示す。図 1 に示すように、水の入った容器の水面上及び水中に電極が設置された放電リアクタにパルスパワー発生器によってパルスパワーを適用し、水面上で放電プラズマを発生させて水素を生成する。本研究では水の導電率を変化させて実験を行うため、精製水に塩化カリウム (KCL) を入れることで導電率調整を行った。本研究では、充電エネルギー 5 J/pulse、最大電圧 30 kV、パルス幅 300~350 ns のパルスパワーを適用した。なお、パルスパワー適用時の電圧電流波形は、高電圧プローブおよびカレントモニタによって減衰させ、オシロスコープに取り込むことで測定した。本研究では雰囲気ガスの種類 (アルゴン Ar, 空気 Air) や導入法、電極形状が水素生成量に与える影響を調査するため、図 1(a), (b) のように様々なパラメータを変化させることができよう放電リアクタを設計・製作した。

図 2 に放電リアクタおよび放電の様子を示す。放電リアクタはアクリル製の密閉容器内に針電極（H.V.）と平板電極（GND）が取り付けられており、容器上部のバルブによって容器内を密閉することが可能である。本研究では、様々なパラメータを変化させながらパルスパワーを適用して水素を生成し、生成した水素を含んだ容器内のガスをシリンジによって採取する。採取したガスをガスクロマトグラフ（GC）に導入し、熱伝導検出方式（TCD）検出器によって水素濃度・水素生成量を測定し、評価を行った。

本研究で検討を行ったパラメータは以下のとおりである。

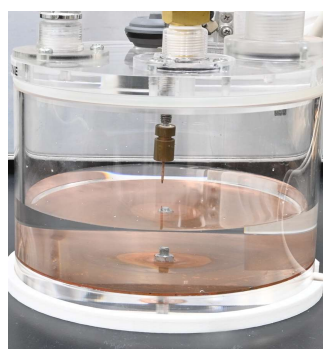
- (1) ショット数と水素濃度・水素生成量の関係
- (2) 水の部分の抵抗の影響（水量・導電率）
- (3) 電極と水面との間隔（ギャップ）の影響
- (4) 電極形状（針の本数）および雰囲気ガス種・導入法の影響（Ar, Air）



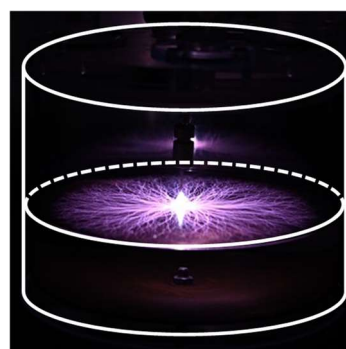
(a) 実験装置概略図（乾燥 Ar および空気）

(b) 湿潤 Ar および空気生成図

図 1．実験装置概略図



(a) 放電リアクタ



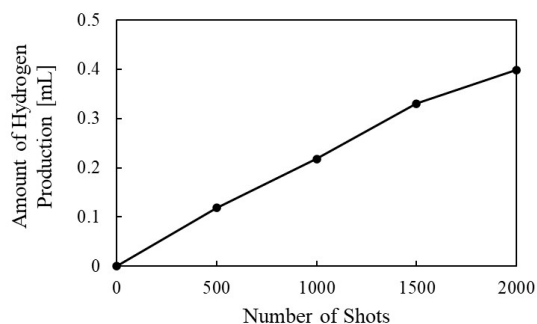
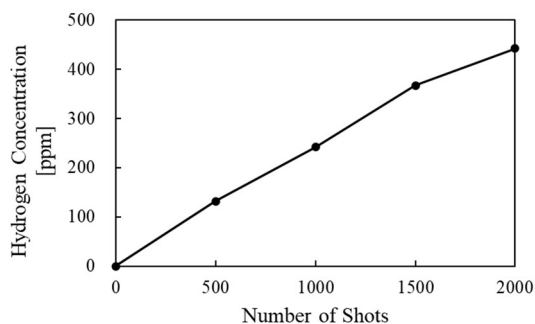
(b) 放電の様子

図 2．放電リアクタおよび放電の様子（単針）

3. 実験結果

(1) ショット数と水素濃度・水素生成量の関係

図 3 にパルスパワーのショット数と水素濃度および水素生成量の関係を示す。このとき、電極には単針電極を使用して針電極と水面との距離を 0 mm に設定し、水の導電率は $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、水量は 600 mL、雰囲気ガスは空気（Air）の条件において実験を行った。本実験では、パルスパワーを 500 ショット適用するごとに密閉容器にシリンジを挿入して容器内のガスを採取し、



(a) ショット数と水素濃度の関係

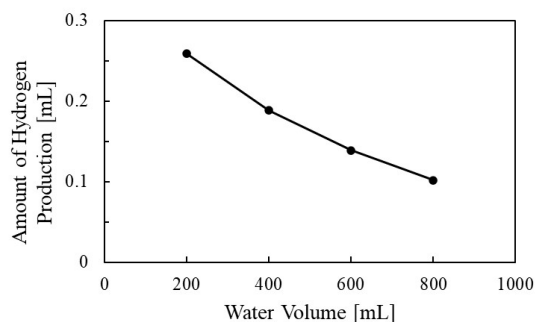
(b) ショット数と水素濃度生成量の関係

図 3. ショット数と水素濃度および水素生成量の関係

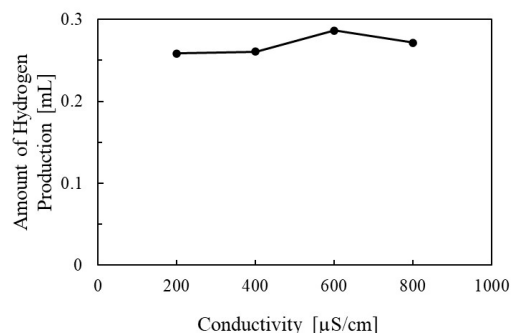
ガスクロマトグラフに注入することで水素濃度・水素生成量を算出した。図 3(a), (b)に示すように、ショット数が増加するに伴い、水素生成量は比例的に増加することが明らかとなった。なお、500 ショット適用したときには、ガスクロマトグラフにて 132 ppm の水素濃度、0.12 mL の水素生成量の結果を得た。本研究では、水素生成の高効率化を目的としているため、以降の実験では 500 ショットにショット数を固定して実験を行い、水素生成においてエネルギー効率の良い条件について検討を行う。

(2) 水の部分の抵抗の影響（水量・導電率）

図 4 に水の部分の抵抗と水素生成量の関係を示す。電極間の負荷の抵抗値は水の水量・導電率で変化する。したがって、図 4(a), (b)に示すように、水の水量および導電率を変化させながらパルスパワーを適用して水面で放電を発生させて水素を測定し、水の部分の抵抗が水素生成に与える影響について検討した。本実験では、水の水量を 200 ~ 800 mL の間で 200 mL ずつ、導電率を 200 ~ 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の間で 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ずつ変化させ、各条件で放電プラズマを水上で発生させて水素生成量の測定を行った。図 4(a)の水量と水素生成量の関係を取得する際には、単針電極を使用して針電極と水面との距離を 0 mm に設定し、水の導電率は 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ショット数を 500 ショット、雰囲気ガスを空気 (Air) として実験を行った。図 4(b)の導電率と水素

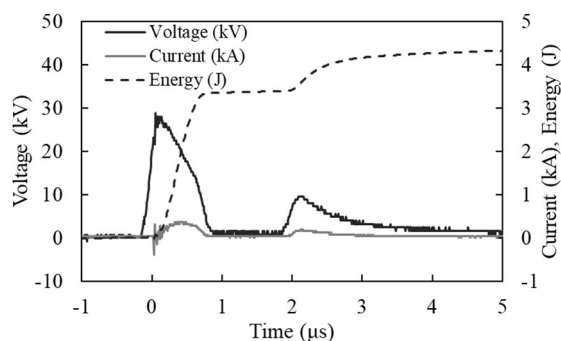


(a) 水量と水素生成量の関係

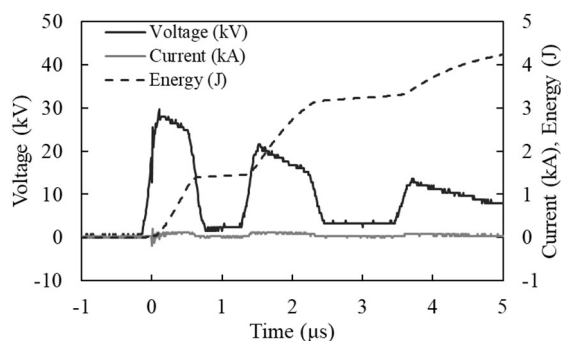


(b) 導電率と水素生成量の関係

図 4. 水の部分の抵抗と水素生成量の関係



(a) 水量 200 mL



(b) 水量 800 mL

図 5. 電圧電流エネルギーの波形

生成量の関係を取得する際には、単針電極を使用して針電極と水面との距離を 0 mm に設定し、水量を 200 mL、ショット数を 500 ショット、雰囲気ガスを空気（Air）として実験を行った。

図 4(a)に示すように、水量が多くなるに連れて水素生成量は少なくなっていくことが明らかとなった。図 4(b)に示すように、水の導電率による変化は導電率が高くなるにつれて多少の水素生成の変化はあるが、あまり大きな違いは見受けられなかった。図 5 に水量 200 mL および 800 mL のときの電圧電流波形を示す。図 5 のように充電エネルギー 5 J が 1 度のパルスによって消費されない場合、残存エネルギーが繰り返し負荷に投入されて消費される。図 5(a)および (b)を比較すると、水量 200 mL の場合、1 度のパルスで消費されるエネルギー量が多いため、繰り返し負荷に投入される回数が少ない。なお、放電プラズマを用いた水素生成の場合、エネルギーは放電プラズマおよび水において消費される。放電プラズマは 1 度目のパルスにおいて発生していると考えられるため、1 度目のパルスでエネルギーが多く消費された水量 200 mL において、水素生成量が多かったのではないかと推測される。

(3) 電極と水面との間隔（ギャップ）の影響

図 6 に電極と水面との間隔（ギャップ）と水素生成量との関係を示す。本実験では、電極と水面との間隔（ギャップ）を 0 ~ 6 mm の間で 2 mm ずつ変化させ、各条件において放電プラズマを水上で発生させて水素生成量の測定を行った。このとき、電極には単針電極、水の導電率は 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、水量は 200 mL、雰囲気ガスは空気（Air）、ショット数は 500 ショットの条件において実験を行った。図 6 に示すように、本条件においては電極と水面との間隔を変化させても水素生成量の大きな違いは見受けられなかった。変化させた間隔が 2 mm ずつと小さいこともあり、さらに大きく変化させると結果が異なるのではないかと推測する。

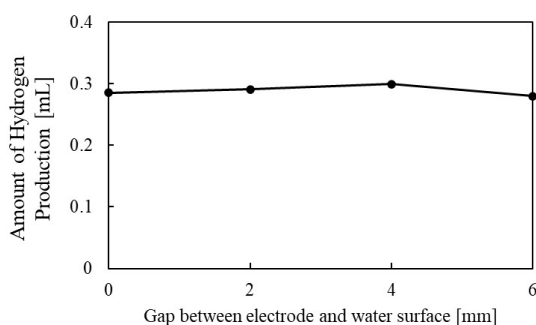


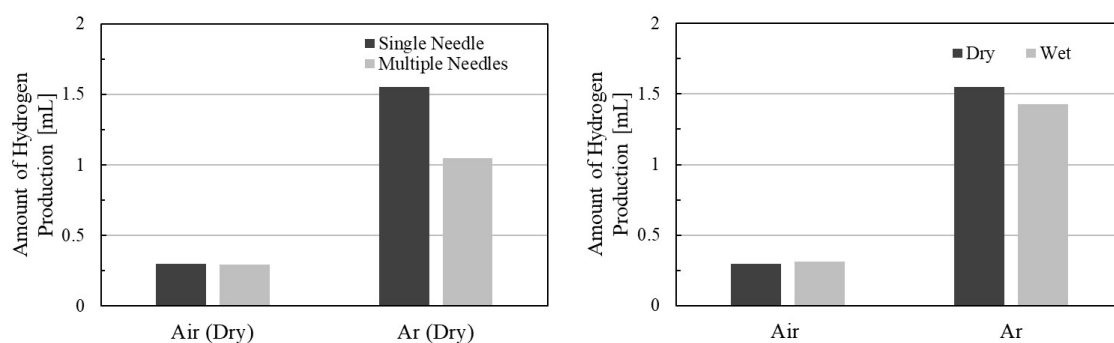
図 6. 電極と水面との間隔と水素生成量の関係

(4) 電極形状（針の本数）および雰囲気ガス種・導入法の影響（Ar, Air）

図 7 に電極形状（針の本数）および雰囲気ガス種（アルゴン Ar, 空気 Air）・導入法と水素生成量との関係を示す。このとき、電極間距離は 4 mm、水の導電率は 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、水量は 200 mL、ショット数は 500 ショットの条件において実験を行った。図 7(a) には、乾燥した Ar および Air を雰囲気ガスとして、電極形状（針の本数）を変化させたときの水素量の結果を示す。結果として、雰囲気ガスを Ar とした場合、水素生成量が増加することが明らかとなった。また、電極形状（針の本数）の影響については、雰囲気ガスが Air の場合はあまり違いは見受けられなかったが、雰囲気ガスが Ar の場合は単針電極を使用すると水素生成量が多くなることが明らかとなった。

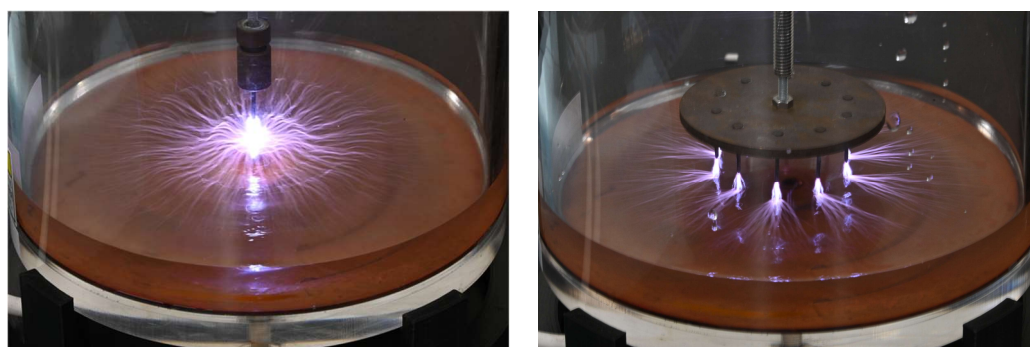
図 7(b) には、Air と Ar をバブリングして雰囲気ガスとして導入した場合の結果を示す。このとき、条件は先述した条件と同じで、電極は単針電極を使用した。結果として、あまり違いは見受けられなかったが、Ar の場合は乾燥した Air の方が高い結果が得られた。

図 8 に雰囲気ガスが乾燥 Ar のときの各電極形状における放電の様子を示す。このとき放電の様子はカメラの露光時間を延ばし、数ショット分の放電を撮影しており、どちらも同じ条件である。結果として、単針電極を用いた場合、発光領域（プラズマ面積）が広いことが明らかである。針の本数が多い場合、針と針との間で電界が干渉してしまい、放電プラズマが水上全体に広がらないことが想定される。したがって、水素生成量にも影響を与えたのではないかと考える。針の本数を増加させる場合は、電界分布を考慮する必要がある。



(a) 電極形状および雰囲気ガス種の影響 (b) 雰囲気ガス種および導入法の影響

図 7. 電極形状および雰囲気ガス種導入法と水素生成量との関係



(a) 単針電極

(b) 10 本針電極

図 8. 乾燥 Ar のときの各電極形状における放電の様子

4. まとめ

本研究では、パルス放電プラズマを水面で発生させ、水から水素を生成する技術の実用化を目指し、雰囲気ガス種やガスの導入方法、電極と水面との間隔、水の部分の抵抗の影響、電極の針の数の影響などといった各パラメータが水素生成に与える影響を詳細に調査した。

結果として、水量が少ない方が良く、雰囲気ガスは Ar、電極には 1 本針の単針電極を使用すると水素生成量が多くなることが明らかとなった。本実験条件においては、雰囲気ガスの導入法や電極間距離を変更することによって水素生成量に大きな影響はないことが明らかとなった。電極の針の本数においては、針の本数が多い場合、針と針との間で電界が干渉してしまい、放電プラズマが水上全体に広がらなくなるため、電界分布を考慮する必要があることが明らかとなった。本研究の成果は、パルスパワーを用いた新しい水素生成技術の実用化に大きく貢献すると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 久保弘輝, 吉田恵一郎, 長田昭義, 「プラズマ改質法を用いたメタンガスからの水素の製造」, 日本真空学会, 58 巻, 4 号, pp.123- 125, 2015
- 2) 光島重徳, 藤田礁, 「水電解による水素製造の現状と展望」, *Electrochemistry*, 電気化学会, 85 巻, 1 号, pp. 38-33, 2017.
- 3) 柴田茂雄, 「水の電気分解：水素発生のメカニズム（話題を巡る）」, 化学と教育, 42 巻, 1 号, pp. 30-34, 1994.
- 4) 江偉華, 「パルスパワー技術の歴史とその仕組み」, プラズマ核融合学会, 87 巻, 1 号, pp. 46-50, 2011.
- 5) T. Furusato, M. Sasaki, Y. Inada, “Two-dimensional electron density imaging of nanosecond-pulsed arc plasma in supercritical CO₂”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 58, No. 25, 255203, 2025
- 6) G. Urabe, T. Katagiri, S. Katsuki, “Intense Pulsed Electric Fields Denature Urease Protein”, *Bioelectricity*, Vol. 2, No. 1, pp. 33-39, 2020.
- 7) T. Koita, Y. Imaizumi, A. Narita, Y. Takaya, Y. Kita, H. Akashi, T. Namihira, C. Tokoro “Separation and recovery of the active material from Cu foils in lithium-ion battery anodes by electrohydraulic fragmentation using pulsed discharge”, *Waste Management*, Vol. 198, pp. 46-54, 2025.
- 8) 猪原武士, 「ナノ秒パルス放電による超小型水素製造装置の開発」, 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 15K18031, 2017
- 9) 杉山祐樹, 「進展方向制御された水面上パルス放電プラズマの時間分解分光計測」, 静電気学会誌, 41 巻, 6 号, pp. 274-279, 2017