

# 固体高分子水電解セルにおけるオゾン水生成の 多層電極等による特性改善

学生員 大庭 貴弘\*

学生員 楠 博敦\*

非会員 砂川 大輔\*

正員 荒木 拓人\*

正員 恩田 和夫\*

## The characteristics improvement of ozone water production by multi-layer electrodes at water electrolysis cell by solid polymer electrolyte

Takahiro Ohba\*, Hironobu Kusunoki\*, Daisuke Sunakawa\*, Takuto Araki\*, Kazuo Onda\*

Ozone is recently used for many purposes as an environmental friendly oxidant, so the ozone production device with high ozone concentration and low production energy is desired. One of the candidates for such device is the ozone water production by water electrolysis cell using the solid polymer electrolyte with  $\text{PbO}_2$  anode catalyst, which has merits to be compact and to produce high-concentration ozone water directly by the deionized water electrolysis. In this study, we have tested ozone water production by changing electrodes and electrolytes constitution in order to improve the ozone production performance. Tested two electrolytes are Nafion117 and a membrane-electrode assembly (MEA) with Pt catalyst on cathode side of Nafion117. Tested two electrodes are mono-layer of Ti expanded metal and four different mesh layers of Ti expanded metal. Ozone water production tests are performed under long-term operations changing temperature and flow rate to optimize experimental conditions. The voltage-current characteristic for electrolysis cell have been improved significantly, when the electrode is four layers of Ti metal and the electrolyte is the MEA with Pt catalyst. The stable ozone water concentration has been obtained by operating the cell for about 8 hours. The optimum temperature and water flow rate for ozone water production are 25 ~ 30 °C and 33L/h, respectively. Furthermore, the optimum overpotential was measured by a reference electrode at the cathode-side MEA, and the anode catalyst suitable for ozone water production was identified to be  $\text{PbO}_2$  by the X ray diffraction pattern.

キーワード：オゾン水，固体高分子膜，水電解セル， $\text{PbO}_2$  アノード触媒，多層電極，参照電極

**Keywords** : Ozone water, Solid polymer electrolyte, Water electrolysis cell,  $\text{PbO}_2$  anode catalyst, Multi-layer electrode, Reference electrode

### 1. はじめに

オゾンは強力な酸化力を持ち、後処理が簡単で二次公害が少ないことから、今日では殺菌、酸化、脱臭や脱色など幅広い分野で利用されている。そのため、高濃度で高効率のオゾン生成装置が要求されてきた。現在は、無声放電などで高濃度気体オゾンをまず作り、それを水に溶解させてオゾン水として殺菌や脱色などに用いられている。これに対し、近年、 $\text{PbO}_2$  アノード触媒を用いた固体高分子電解質

膜 (SPE) による水電解で、高濃度オゾン水が直接生成できることが期待されているが<sup>(1-5)</sup>、オゾン生成エネルギーが高く、安定した性能が得られていない。本研究はこの SPE による水電解オゾン水生成法を小型水電解セルで実験的に研究し、電極を多層化したり、供給水流量や運転温度、運転時間を変えて特性を向上させることを検討した。つまり、 $\text{PbO}_2$  アノード触媒を用いた SPE による水電解セルで高濃度オゾン水を生成したこれまでの我々の実験<sup>(6)</sup>を更に発展させ、セルの電圧・電流 (V-I) 特性を改善するため電極や SPE の構成を変えて実験した。更に  $\text{PbO}_2$  アノード触媒を X 線回折により構造解析した。この時、電極には多孔度の同じ単層と多孔度を変えた多層電極を、SPE には Nafion117 と Nafion117 のカソード側に Pt 触媒を析出させた膜電極接合体

\* 豊橋技術科学大学 電気電子工学系  
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1  
Toyohashi University of Technology,  
Electrical and electronic Eng.  
1-1 Hibarigaoka, Tenpaku, Toyohashi, Aichi 441-8580

(MEA)を用いて実験した。また、運転時間や電流遮断によるオゾン水濃度の変化やセル供給水温度や供給水流量のオゾン生成に与える影響を実験した。更に参照電極により両極の過電圧を測定し、オゾン生成との関連性を調べたので報告する。

## 2. オゾン水の生成法

SPE を使った電解セルによるオゾン水の生成原理を図 1 に示す。ここでオゾンを生成するには、アノード触媒として酸素反応過電圧の高い PbO<sub>2</sub> 触媒を用いる。図 1 で両極にはイオン交換膜を通したイオン交換水を供給し、電圧を印加し、水を電気分解する。このとき、アノードとカソード側では次の反応が起こる。

アノード反応



カソード反応



室温で(1)式の反応に必要な理想的電圧は水素標準電極を基準に 1.51V である<sup>(7)</sup>。このオゾンを電解セルに流す水に溶解させるのがオゾン水生成の原理である。(2)式に必要な理想的電圧は 1.23V である。1.51V に対応するオゾン生成に必要な理論生成エネルギーは 5.06kWh/O<sub>3</sub>-kg<sup>(7)</sup>となる。しかし、実際の生成エネルギーは過電圧などの損失により、理論エネルギーの十倍以上が使われている<sup>(1-3)</sup>。水電解オゾン水生成法は高濃度オゾン水を小形装置で簡便に生成できるが、この高い生成エネルギーを下げるのが本法を工業化する上で重要となる。

水電解でオゾンを生成する際、(2)式の反応の方が必要エネルギーが低いため、酸素が発生し易い。そこで、(2)式の反応を抑えオゾン効率良く生成するため、PbO<sub>2</sub><sup>(1-6)</sup>や Ta<sup>(8)</sup>、ダイヤモンド<sup>(9)</sup>などのオゾン生成触媒を使う。これらの触媒の中で PbO<sub>2</sub> が現在最も優れた触媒である。また、PbO<sub>2</sub> の中でも、PbO<sub>2</sub> よりも PbO<sub>2</sub> がオゾン生成に適していることが実験的に確認されている<sup>(1-5)</sup>。

オゾン生成の性能を評価するため、電流効率 や生成エネルギー E<sub>p</sub> が用いられる。 は水電解によって生成されたオゾンの割合を表し、(4)式で与えられる。

$$= \frac{6FQ}{MI} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ただし、F はファラデー定数[C/mol]、Q は液相と気相オゾンの発生量[kg/h]、M はオゾンの分子量[g/mol]、I はセル電流[A]を表す。なお、(2)式より、(4)式右辺の分子の 6 を 4 とし、M を酸素の分子量[g/mol]、Q を酸素発生量とすれば、発生酸素割合を表す電流効率を得られる。生成エネルギー E<sub>p</sub> はオゾン 1 kg を生成するのに消費したエネルギーを表し、液相と気相のオゾン濃度と V-I 特性より、以下の式で求められる。

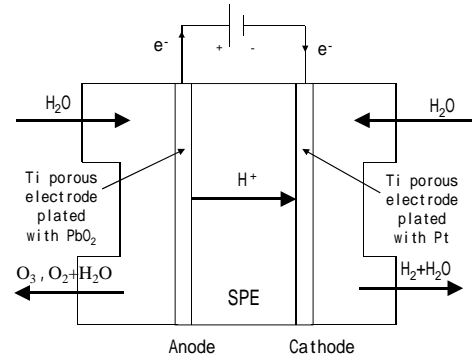


図 1 オゾン水の生成図

Fig.1 Schematic diagram of ozone water generation

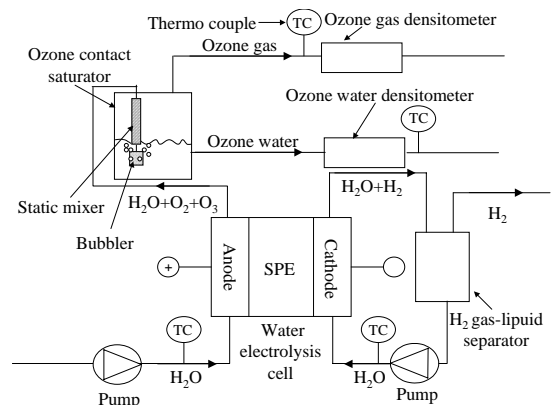


図 2 実験装置構成

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

$$E_p = \frac{IV}{Q_g \cdot v_g + Q_{aq} \cdot v_{aq}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、I はセル電流[A]、V はセル電圧[V]、Q<sub>g</sub> は気相オゾン濃度[kg/L]、v<sub>g</sub> はガス体積流量[L/h]、Q<sub>aq</sub> は液相オゾン濃度[kg/L]、v<sub>aq</sub> は水流量[L/h]を表す。

## 3. 実験方法

3.1 実験装置構成 図 2 に示す実験構成において、ポンプは水電解セルのアノードとカソードにイオン交換水を供給し、セルに印加される電圧は水を電気分解する。セルと気液分離器、オゾン飽和器は恒温水で一定温度に保つようにし、オゾンが水に一定温度で溶解するように注意した。アノードで生成したオゾンはセルで供給水と混合しながら水に溶解し、更にオゾン飽和器で水に溶け込み、そこで液相オゾンと気相オゾンに分離され、それぞれの濃度は紫外線吸収型の液相オゾン濃度計(荏原実業, EL-550)と気相オゾン濃度計(荏原実業, EG-500)で測定される。ここで、アノードからオゾン飽和器へ導かれる配管中には 17 エレメントのスタティックミキサーが挿入されており、その先にバブラーが設置されている。スタティックミキサーは発生した気泡を半分に分割し水との接触を改善し、図 3 に示すように液相オゾン濃度を増加させる。更に、バブラーを通す事によって発生ガスをより小さな気泡とし、水への溶

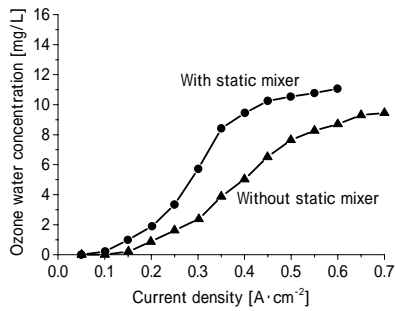


図3 スタティックミキサーによる液相オゾン濃度の改善

Fig.3 Different of ozone water concentration by static mixer

解を促進している。一方、カソード側に生成した水素は気液分離器で分離した後排出し、分離された水は再びセルへ戻される。

**3.2 水電解セルの構成** 図4に示すように本研究で用いた水電解セルは SPE を電極で挟み、その外側を通電板で挟み、更に絶縁板で挟む。また、セルにはアノードとカソードの過電圧が測定できるように、カソード側に参照電極が図4のように取り付けられている。

両電極は単層構成のもの多層構成のものを用いた。多層電極は図5に示すように4層構造で、SPE に近づく程細かい目となっている。多層電極の2層目と3層目は同じ目の細かさ・厚さで、それぞれの目が交差するように重ね合わせた。単層電極は多層電極の2層あるいは3層目と同じで、厚さが 200 μm のものを用いた。それぞれの電極は Pt メッキした Ti エキスパンドメタルで、カソードとアノードは共に多層電極か単層電極で実験し、アノード側の SPE に接する層だけに PbO<sub>2</sub> を電解メッキした。多層電極は SPE との接触面積が単層電極より増加し、V-I 特性が改善され、供給水の流入や発生オゾンの抜けが良くなると考えられる。

SPE は Nafion117 だけと、Nafion117 のカソード側にのみ Pt 触媒を析出させた MEA の2種類を用いた。カソード側に Pt を析出させた MEA はカソード側の過電圧が減少し、V-I 特性が改善されると考えられる。それぞれ2種類の電極と SPE を組合せた4種類の実験を行い、オゾン生成に優れた構成を実験した。

図6に参照電極の取付け方を示す。この場合参照電極は水電解を大気圧で行なうので水素標準電極 (SHE) となる。参照極は 0.5mm の Pt 線で、SPE と接触する部分は渦巻き状に Pt 線を巻き、膜と十分接触するようにしてある。この参照電極を基準に、アノードとカソードの電極電位を測定した。アノード電位には膜抵抗による IR と理論分解電圧 E<sub>Nernst</sub> が含まれるため、アノード電位からそれらを引いてアノード過電圧  $\eta_a$  とした。ここで、膜抵抗 R は約 10kHz の LCR メーターで測定し、水素標準電極の水素分圧による補正は小さいため無視した。

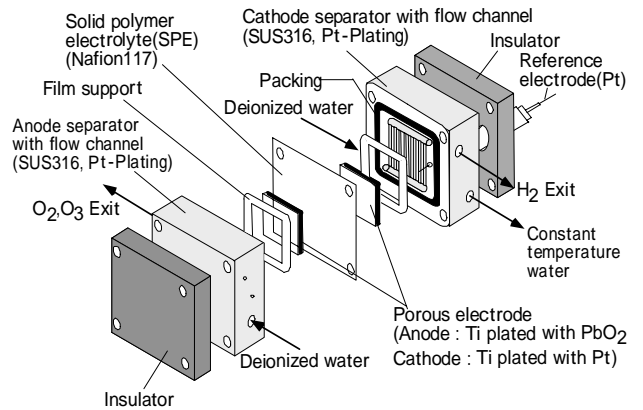


図4 水電解セルの構成

Fig.4 Schematic diagram of water electrolysis cell

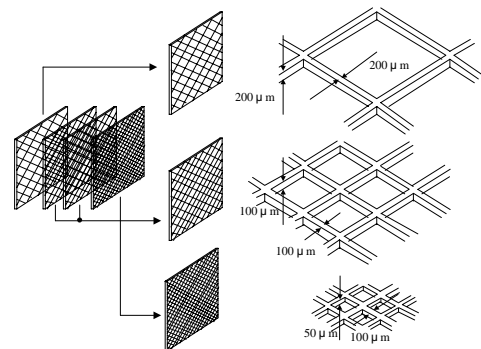


図5 多層電極構成

Fig.5 Schematic diagram of multi-layer porous electrode

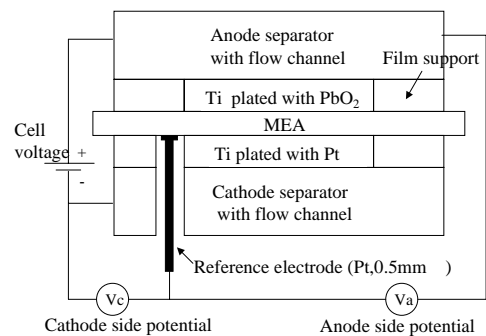


図6 参照電極の設置法

Fig.6 Schematic diagram for setting reference electrode

表1 セルの実験条件

Table.1 Experimental conditions for electrolysis cell

Electrode area [cm <sup>2</sup> ]	10
Current density [A/cm <sup>2</sup> ]	1.0
Cell supply water temperature [ ]	10,20,25,30,40,50
Supply water flow [L/h]	0.6,3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33

オゾン生成には PbO<sub>2</sub> 触媒が不可欠であり、PbO<sub>2</sub> には PbO<sub>2</sub> と PbO<sub>2</sub> があり、オゾン生成には後者が適している<sup>(1)</sup><sup>(3)</sup>。そこで、今回、我々が実験した PbO<sub>2</sub> が か か X 線回折で調べた。

**3.3 セル実験条件** 表1に電解電流密度、電極面積、セル供給温度や水流量の実験条件を示す。本研究ではまず電極とSPEの組合せを変えて実験し、V-I特性に優れた組合せを選び出した。次に電流密度を1.0A/cm<sup>2</sup>として、約80時間運転し、長時間特性を計測した。また、電流を実験途中で切り、30秒後に再び流し、その後の電流遮断効果を計測した。その後セル供給水温度と供給水流量の影響を実験した。ここで、セル供給水流量は、本研究で使用している抜きポンプの最大流量33L/hまで実験した。

**4. 実験結果と考察**

**4.1 電極とSPEの組合せによるV-I特性の変化**

図7に電極とSPEの組合せによるV-I特性の変化を示す。実験はセル供給水温度を25℃、供給水流量を3L/hとした。電極とSPEの組合せを変えると図7のようにV-I特性も変わり、電極を多層構造とし、SPEをPt触媒付きMEAとしたとき最も優れたV-I特性を示した。この理由は、電極を多層にすることにより電極とSPEの接触面積が増え、カソード側にPtを担持させたMEAによりカソード側の過電圧が低下したためと考えられる。以下の実験では最も優れたV-I特性を示したPt触媒付きMEAと多層電極を用いた。

**4.2 長時間運転特性**

図8に運転時間による電流効率の変化を示す。実験は電流密度1.0A/cm<sup>2</sup>、セル供給水温度25℃、供給水流量3L/hで約80時間行なった。図8のように、(オゾン濃度)は時間と共に一度ピークを迎え、その後ほぼ一定となり、竹中らの報告<sup>(3)</sup>と同様の結果が得られた。これは、通電時間と共にPbO<sub>2</sub>がオゾン生成に適した結晶構造になるためと思われる<sup>(3)</sup>。本研究では、通電後約8時間で安定した高い電流効率を得る事ができると考えられる。

**4.3 電流遮断の効果**

図9に約1時間半通電した後に30秒間電流を遮断した後の電流効率の変化を示す。図9のように、電流を一時遮断すると電流効率は大きく減少し、その後約3時間経過しても元の性能に戻らなかった。この結果は

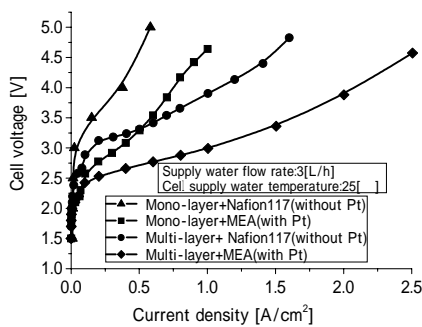


図7 電極とSPEの組合せによるV-I特性の変化  
Fig.7 Change of V-I characteristics by combination of electrode and SPE

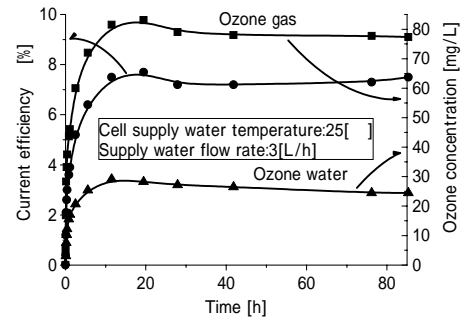


図8 長時間運転による電流効率の変化  
Fig.8 Change of current efficiency by operation time

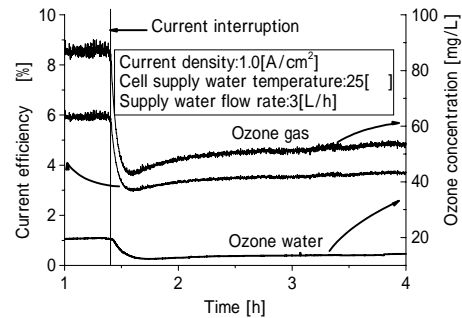


図9 電流遮断による電流効率の変化  
Fig.9 Change of current efficiency by current interruption

Beaufilsらの報告<sup>(4)</sup>と同じで、長時間運転によってPbO<sub>2</sub>のオゾン生成に適した結晶構造が電流遮断により元の結晶構造に戻ってしまうのではないかと考えられる。この実験では電流遮断後約3時間では元の性能に戻らなかったが、3時間後の液相オゾン濃度は約14mg/Lであり、一般的に工業用としては10mg/L以下の濃度で使用するため<sup>(10)</sup>、それと比べると高く、十分に利用可能な濃度であった。

**4.4 供給水流量によるオゾン生成特性の変化**

図10に供給水流量による電流効率の変化を、図11に生成エネルギーE<sub>p</sub>と時間当たりのオゾン発生量[g/h]の変化を、1.0A/cm<sup>2</sup>の電流密度、25℃のセル供給水温度の実験に対して示す。図10のように供給水流量を増加させると電流効率は増加し、33L/hで約12%となったが、Stuckiら<sup>(2)</sup>の19%より低い。また、図11のように、供給水流量を増加させるとE<sub>p</sub>は減少し、33L/hで約95kWh/O<sub>3</sub>-kgとなり、これはStuckiら<sup>(2)</sup>の60kWh/O<sub>3</sub>-kgより高い値となった。なおカソードで発生したH<sub>2</sub>を発電効率50%の燃料電池で利用した場合、消費エネルギーは約86kWh/O<sub>3</sub>-kgとなる。図11に示すように水流量が低い6L/h以下では、液相オゾンより気相オゾンの発生量が多い。しかし、水流量を増加させていくと、液相オゾンの発生量が増え、33L/hでは発生したオゾンの6~7割が水に溶け込んでいる。このようにして、オゾン収率を上げるためには、水流量を増やし、発生したオゾンガスを効率的に水に溶かし込むことが重要と考えられる。

図 12 にオゾン飽和曲線<sup>(11)</sup>と流量変化による液相オゾン濃度を示す。25℃でのオゾン飽和濃度は約 15mg/L であるが、水流量の小さい 3L/h では飽和濃度を超えた値(約 24.4mg/L)が測定された。水流量を増やすと液相オゾン濃度は低下し、水流量 33L/h では約 9mg/L となった。過飽和となった理由としては、水電解セルによるオゾン水生成ではセル内の三相界面で生成されたオゾン 1 分子に対して水が多数存在するため、無声放電法に比べてオゾンが水に溶け易いためと考えられる。

図 13 に水流量に対する両極の過電圧変化を示す。水流量を変えてもセル電圧は余り変化せず、オゾン生成反応に重要なアノード過電圧が僅かに増加し、カソード過電圧が僅かに減少した。また、図 10 の電流効率と比較すると水流量に対するアノード過電圧の増加と電流効率の増加が対応しているため、水流量が多い程、電流効率の低下と共に、僅かであるがアノード過電圧が増加し、オゾン生成に有効であると考えられる。

現在、オゾン水は無声放電で気体オゾンを生じ、それを水に溶け込ませる方法が一般的で、生成エネルギーは空気をを用いた場合で約 14kWh/O<sub>3</sub>-kg<sup>(2)</sup>程度である。本研究の生成エネルギーは約 95kWh/O<sub>3</sub>-kg であり、無声放電法と比較すると非常に高い。しかし、本研究の水電解によるオゾン

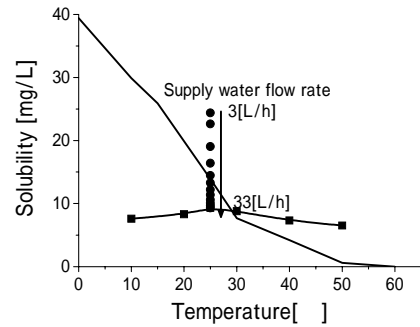


図 12 オゾンの溶解度曲線  
Fig.12 Solubility curve of ozone

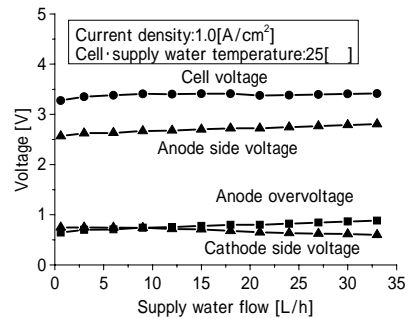


図 13 供給水流量による過電圧の変化  
Fig.13 Change of overpotential by supply water flow rate

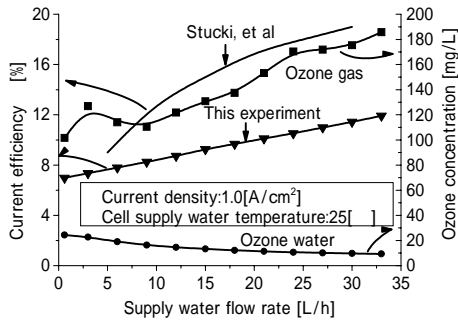


図 10 供給水流量による電流効率の変化  
Fig.10 Change of current efficiency by supply water flow rate

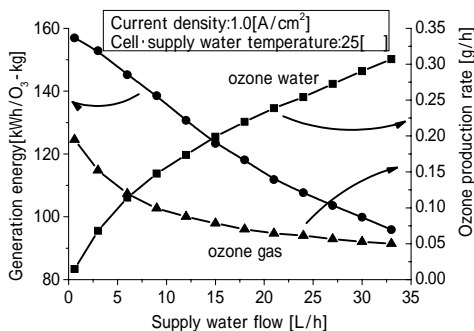


図 11 供給水流量による生成エネルギーとオゾン発生量の変化  
Fig.11 Change of generation energy and ozone production rate by supply water flow rate

水生成は直接オゾン水が生成でき、コンパクト化が可能など利点もあるため、無声放電法と競合できる適用分野(食品工場の殺菌など)もあると考えられる。

#### 4.5 セル供給水温度によるオゾン生成特性の変化

図 14 にセル供給水温度に対する  $E_p$  の変化を、図 15 に  $E_p$  の変化を、1.0A/cm<sup>2</sup>の電流密度、33L/hの供給水流量の実験に対して示す。図 14 のように、セル供給水温度が 25℃付近では約 12%の最大値を取った。また、図 15 に示すように、セル供給水温度が 25~30℃付近で  $E_p$  は約 92 kWh/O<sub>3</sub>-kg の最小値を取った。25℃付近より温度が低いと V-I 特性が悪く、消費電力がオゾン生成に有効に使われず、一方 25℃付近より温度が高いと V-I 特性は良いが生成オゾンが分解し易く、かつ、有効に水に溶け込まないため、25℃付近が最適温度と考えられる。

図 12 にオゾン飽和曲線と温度変化による液相オゾン濃度の変化も示す。25℃の実験によるオゾン水濃度は約 9.3mg/L で、飽和濃度の 15mg/L に達しなかった。これは供給水流量が発生オゾン量に比べて大きかったためと考えられる。

4.4 の供給水流量による変化でも同じであるが、飽和濃度との違いについては今後更に検討する必要がある。

図 16 にセル供給水温度に対する両極の過電圧変化を示す。セル供給水温度を上げるとセル電圧は下がり、V-I 特性は改善させることが分かる。しかし、セル供給水温度を上げると  $E_p$  も下がることが分かる。図 14 の  $E_p$  を見ると、セ

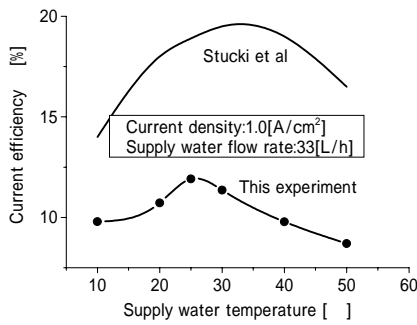


図 14 セル供給水温度による電流効率の変化

Fig.14 Change of current efficiency by cell supply water temperature

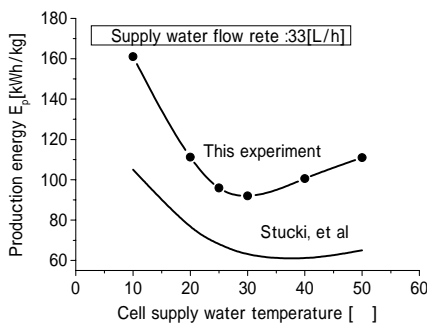


図 15 セル供給水温度による生成エネルギー変化

Fig.15 Change of generation energy by cell supply water temperature

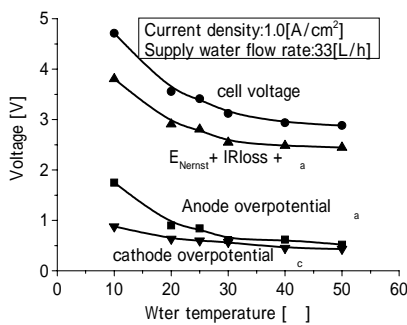


図 16 セル供給水温度による過電圧の変化

Fig.16 Change of overvoltage by cell supply water temperature

セル供給水温度が高いとも低下し、温度が低く過ぎてもは低下する。つまり、 $a$ が高すぎても消費動力が増える割にオゾン生成に有効に働いていないことが分かる。従って、温度上昇に伴う  $a$  や  $c$  の低下による消費動力の低減と、オゾン溶解度の低下をバランスさせることが重要と思われる。

#### 4.6 X線回折

図 17 に  $PbO_2$  触媒の実験前後の X 線回折角を示す。測定試料は実験に用いた  $PbO_2$  触媒付きの電極をそのまま用いた。実験前には  $PbO_2$  のピークが一部

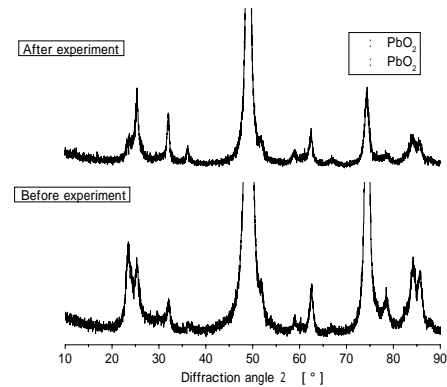


図 17  $PbO_2$  電極の X 線回折角

Fig.17 X-ray diffraction angle of  $PbO_2$  catalyst

確認されたが、 $PbO_2$  のピークが多い。実験後は  $PbO_2$  が少なくなり、 $PbO$  のピークが一層際立った。これにより、我々が使った  $PbO_2$  触媒には  $PbO$  が多く含まれていることが分かった。なお、4.3 で述べた電流遮断による低下と  $PbO_2$  の関係は、通電中に X 線回折角を測定する事ができないので、今後の検討課題である。

#### 5.まとめ

固体高分子電解質膜を用いた水電解セルによるオゾン水生成の特性を改善するため、それぞれ 2 種類の電極と電解質膜を組合せて実験をし、多層構成にした電極とカソードに Pt を担持した膜電極接合体を用いることにより、電解セルの電圧・電流特性を改善することができた。電解セルを長時間運転したところ、電圧印加と共に生成オゾンは増加し、約 8 時間でオゾン生成は安定した。また、本研究の実験範囲で 33L/h の供給水流量と 25~30 のセル供給水温度の時、約 12% の電流効率と約 95kWh/ $O_3$ -kg の生成エネルギーでオゾン水を生成することができた。無声放電法の生成エネルギー約 14kWh/ $O_3$ -kg と比較すると本研究の生成エネルギーはまだ大きな値である。しかし、水電解によるオゾン水生成は直接オゾン水を生成でき、コンパクト化が可能など利点もあるため、無声放電法と競合できる適用分野もあると考えられる。白金参照電極を使ってアノード過電圧を測定し、オゾン生成に適した運転条件との関連も調査した。X 線回折により、実験した  $PbO_2$  触媒は  $PbO_2$  が多く含まれ、通電により  $PbO_2$  が減少し、 $PbO$  が増加することが確認できた。

謝辞： $PbO_2$  触媒電極の作成に当り、(独)産業技術総合研究所・関西センター・山根昌隆様にご指導戴いたことに、参照電極による測定に当り、横浜国立大学太田健一郎教授、学生の笹谷悠子様にご指導戴いたことに感謝申し上げます。

(平成 16 年 2 月 23 日受付, 平成 16 年 9 月 24 日再受付)

## 文 献

- (1) S.Stucki, G.Theis, R.Kotz, H.Devantay, and H.Jchristen: "In Situ of Ozone in Water Using a Membral Electrolyzer", J. Electrochem. Soc. Vol.132, No.2, pp367-371 (1985)
- (2) S.Stucki, H.Baumann, H.J.Christen, and R.Kotz: "Performance of a pressurized electrochemical ozone generator", J. Applied Electrochem, Vol.17, pp773-778 (1987)
- (3) H.Takenaka and Y.Kawami: "Lead dioxide electrode in ozone generation by solid polymer electrolyte water electrolysis", Japan Soda Industry Association, pp41-44 (1992) (in Japanese)  
竹中啓恭, 川見洋二: 「固体高分子型水電解利用オゾン生成法における二酸化鉛電極」第16回ソーダ工業技術討論会講演要旨集, pp41-44(1992)
- (4) Y.Beaufils, C.Comminellis, P.Bowen: "Preparation and characterization of Ti/IrO<sub>2</sub>/Pb electrodes for ozone production in a SPE electrochemical cell", Inst Chem Eng Symp Ser, No.145, pp191-200 (1999)
- (5) 太田健一郎: 「水溶液電解によるオゾンの生成」, ソーダと塩素 5 号, pp198-208(1986)
- (6) H.Kusunoki, K.Ito, K.Onda, S.Urusibata, T.Ohba: "Ozone Water Production by Polymer Electrolyte Membrane ", The Institute of Electrical Engineers, #1-027, p1-36 (2003) (in Japanese)  
楠博敦・伊藤衛平・恩田和夫・漆畑正太・大庭貴弘: 「固体高分子膜を用いたオゾン水生成実験」平成15年電気学会全国大会論文集, #1-027, p1-36 (2003)
- (7) 高橋正雄: 「放電及び電解によるオゾン生成のエネルギー理論的考察」ソーダと塩素 6 号, pp225-234 (1986)
- (8) Y.Koizumi, T.Koizumi, M.Iseki, T.Rakuma, D.Tkaoka, K.Takizawa, S.Sata, T.Okajima, and T.Ohsaka: "Effective Generation of Ozone by Catalyst-coated Ti Electrode", The Electrochemical Society of Japan, Vol.70, p105 (2003) (in Japanese)  
小泉ゆかり・小泉友人・井関正博・樂間毅・高岡大造・滝沢貴久男・佐多俊輔・岡島武義・大坂武男: 「触媒被覆 Ti 電極を用いた高効率オゾン生成」電気化学学会大会講演要旨集, Vol.70, p105 (2003)
- (9) N.Katsuki, E.Takahashi, M.Toyoda, T.Kurosu, and M.Iida: "Water Electrolysis Using Diamond Thin-Film Electrodes" J. Electrochem .Soc, Vol.145, No7, pp2358-2362 (1998)
- (10) 畑井耕次, オゾンの利用の理論と実際, リアライズ者, p126(1989)
- (11) 日本化学会, 化学便覧基礎編(改訂2版), p770 (1975)

大庭 貴弘 (学生員) 1980年9月19日生まれ。2003年3月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学, 現在に至る。主として, 固体高分子膜を用いたオゾン水生成に関する研究に従事。



楠 博 敦 (学生員) 1979年7月24日生まれ。2002年3月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学, 現在に至る。主として, 放電脱硝解析と固体高分子膜を用いたオゾン水生成に関する研究に従事。



砂 川 大 輔 (非会員) 1900年00月00日生まれ。2004年3月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学, 現在に至る。主として, 固体高分子膜を用いたオゾン水生成に関する研究に従事。



荒 木 拓 人 (正員) 1975年5月2日生まれ。2003年3月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。2004年1月豊橋技術科学大学電気電子工学専攻助手。主として, 燃料電池, 水電解, 二次電池, 放電脱硝の研究に従事。電気化学会, 機械学会, 伝熱学会会員。工学博士。



恩 田 和 夫 (正員) 1941年6月20日生まれ。66年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年10月電子技術総合研究所入所。95年9月豊橋技術科学大学教授(電気電子工学系)。主として, 燃料電池, 水電解, 二次電池, 放電脱硝の研究に従事。電気化学会, 応用物理学会, 日本機械学会, エネルギー・資源学会会員。工学博士



