ボロンドープによるダイヤモンドの電気化学的特性の向上とその応用

Electrochemical Property of Diamond Enhanced with Boron Doping, and its Application

吉田 茂*・小林 豊*・中島 猛*

Shigeru YOSHIDA, Yutaka KOBAYASHI and Takeru NAKASHIMA

Key Words: Diamond. Electrochemistry. Chemical Vapor Deposition. Wastewater Treatment. Metal Recycling.

1. 緒言

ダイヤモンドは物質中最高の硬度・熱伝導性を有し、また化学的安定性にも優れた物質である。その優れた性質を利用し、研削・切削工具（高硬度）や半導体レーザー用ヒートシンク材料（高熱伝導性）など工業的に様々な用途に使用されている。このようなダイヤモンド固有の特性に加え、ボロンをドーピングすることでダイヤモンドはp型半導体となり、導電性が付与される。

ボロンドープ導電性ダイヤモンド(BDD: Boron Doped Diamond)の応用研究は、CVD法(Chemical Vapor Deposition: 化学気相合成法)によるダイヤモンド合成技術が普及した1980年代から急速に進んだ。BDDの応用は、電解反応の電極として用いる電気化学的応用と、パワーデバイスなどの半導体素子への応用に大別される。当初は半導体の開発が先行していたが、n型のドーピングおよび低欠陥エピタキシャル成長の技術課題が克服できず難航している。これに対し、電気化学的応用では、多結晶薄膜で十分であり、結晶成長技術のハードルは半導体応用に比べ低い。今世紀に入り、BDD電極に用いた新しい電解反応の発見が相次ぎ、実用化に向けた開発が急速に進展した¹⁾。

BDD電極の主な特徴として次の3つがある、

- ①広い電位窓（酸素発生過電圧と水素発生過電圧が高い）
これにより陽極・陰極どちらに用いても他の電極材料では得られない特異な酸化・還元反応が可能。
- ②物理的・化学的に安定
ダイヤモンド自体が高硬度・高耐食性物質のため、汚れが激しい環境や、強酸・強アルカリ・有機溶媒中であっても長期間安定して使用可能。
- ③小さなバックグラウンド電流
シグナル/バックグラウンド比が大きいため電気化学分析における高感度センサとして使用可能。

本稿では、用途に適したBDDの製造方法、および電気化学的特性を利用した廃水処理（脱色処理、窒素性汚染物

Fig. 1 BDD electrode.

Fig. 2 Cyclic Voltammogram (CV) of various electrode materials. (Reprinted from Ref. [2] by courtesy of Prof. Einaga.)

質の処理)および銅のリサイクルを例に取り、BDD電極の特徴を報告する。

2. BDD電極の特性と製造条件の関係

BDD電極の用途は、センサ、廃水処理等の多岐に渡る。特に重要となるBDD電極の特性は、これらの用途で異なる。

*住友電工ハードメタル株式会社 (〒664-0016 兵庫県伊丹市昆陽北 1-1-1)
Sumitomo Electric Hardmetal Corp (1-1-1, Koyakita, Itami, Hyogo 664-0016 Japan)

例えば、分析などで用いられるセンサ用途では、高い酸素発生過電圧、小さなバックグラウンド電流が重要である。一方、工業的な廃水処理や機能性薬液生成などでは、高い耐久性や高い導電性が重要視される場合が多い。

BDD 電極の特性は、金属などの電極材料とは異なり、BDD を合成する時のパラメータでコントロールが可能である。つまり、用途に合わせて合成パラメータを選択すれば良い。合成パラメータによる特性の変化を以下に示す。

熱フィラメント CVD 装置 (Fig. 3) を用いて、Table 1 に示す条件で BDD を合成した。このとき、原料ガス中のメタン濃度と、導電性を与えるドーパントであるボロンの濃

度を Table 1 に示す組み合わせを用い 3 種類の試料 (No.1, No.2, No.3) を作製した。

合成した BDD の SEM 観察像・膜厚・電気抵抗率などを Fig. 4 に示す。合成時のメタン濃度が高い No.1, 2 はダイヤモンドの成長速度が大きいので、膜厚が大きい。更に、No.1 においては、原料ガス中のボロンの濃度も大きく導電性も高い。

各試料の酸素発生過電圧側の CV を Fig. 4 に示す。各試料の CV の電流密度が 1 mA/cm^2 , 2 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 となる電位を抽出し、Fig. 5 にプロットした。その結果、No.3 > No.2 > No.1 に順に電位が高くなる傾向がみられた。

No.1, 2 の CV を見ると、一般的な BDD 電極の酸素発生過電圧 (2 V) より低い 1.7 V 付近にピークがある (Fig. 4 太矢印部)。一般に原料ガス中の炭素濃度が高い条件でダイヤ

Fig. 3 Hot-filament CVD reactor.

Table 1 Synthesis conditions of BDD.

Substrate		P-type Si	
Filament temperature		2000-2050 °C	
Substrate temperature		800-850 °C	
Pressure in reactor		4 kPa	
Synthesis time		10 hours	
Composition ratio of source gases		CH ₄ /H ₂	B/C
	Sample No.1	3 %	3000 ppm
	Sample No.2	3 %	300 ppm
	Sample No.3	1 %	300 ppm

Fig. 4 Properties of synthesized BDD.

Fig. 5 Electrode potential of samples at constant current.

モンド合成した場合、ダイヤモンドの結晶中に SP² 結合が増えることが判っており、このピークは SP² 結合によるものである。また、ボロン濃度が増えると酸素発生過電圧が低くなることが報告されており³⁾、今回の No.1, 2 を比較した場合も同様に、ボロン濃度が高い No.1 の方が低い傾向にある。一方、メタン濃度もボロン濃度も小さい No.3 では肩が見られる程度である。

以上のことから BDD の合成条件と BDD 電極の特性が確認できた。耐久性（厚いダイヤモンド膜）・高い導電性が必要な場合は、No.1 のように高炭素濃度、高ボロン濃度で合成し、高い酸素発生過電圧や、小さなバックグラウンド電流が必要な場合は、No.3 のように低炭素濃度、低ボロン濃度で合成するのが良いことがわかる。

3. BDD の電気化学的特性の応用

3.1 廃水処理

BDD 電極の高い酸素発生過電圧・水素発生過電圧を利用した廃水の浄化に関する研究が多数報告されている。ここでは、脱色処理及び窒素系汚染物質の処理を中心に紹介する。

1) 脱色処理

染色工場からの染色廃水や、牧場からの畜産廃水などの着色廃水は、水辺の景観を損ねる要因となるため、脱色処理されることが望まれる。しかし、従来の廃水処理で用いられている、生物学的手法である活性汚泥法や、物理化学的手法である凝集沈殿法では、色素成分の除去が不十分であり、着色された（色素成分が残留した）状態で自然界に放出されているのが実情である。

近年、脱色処理法として電解酸化法が注目されてい

Fig. 6 Electrolytic treatment system for experimental waste water.

る。高い酸素発生過電圧を持つ BDD 電極は廃水中の COD（Chemical Oxygen Demand：化学的酸素要求量）処理などへの応用が報告されており⁴⁾⁶⁾、また、電解酸化という形での着色分子処理への応用も期待できたため、廃水の脱色処理について検討した。

実験方法

まず始めに、BDD と従来多く用いられている他の機能性電極（Pt, IrO₂）の脱色性能を比較した。試験廃水として、染色廃水を想定して繊維製品や食品などの工業製品に広く使用されている Acid Orange7 (C₁₆H₁₁N₂NaO₄S) の水溶液を用い、濃度を 200 mg/l に調合した水溶液を準備した。また、支持電解質として Na₂CO₃ と NaHCO₃ をそれぞれ 1.0 g 添加した。

陽極材料には、① BDD 電極、② Ti 基板上に Pt 層が被覆された Pt 電極、③ Ti 基板上に IrO₂ を被覆した IrO₂ 電極の 3 種類を使用した。BDD 電極は、幅 50 mm、長さ 100 mm、厚み 3 mm の Si 基板の両面に熱フィラメント CVD 法でボロンを添加しながら成膜したものであり、電気抵抗率は $1 \times 10^{-1} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ である。陰極には、サイズが 100 mm × 50 mm の Ti 板を使用した。

電解実験は、Fig. 6 に示すように試験廃水を満たしたガラス製ビーカーに陽極と陰極とを電極間距離が 10 mm になるように設置して行った。

このような構成で 1.5 A 電流を流し、電解処理時間による試験廃水の脱色度合いを評価した。脱色度合いの評価方法には、波長 540 nm の光に対する試験廃水の吸光度を測定することにより行った。

実験結果と考察

Fig. 7 に、陽極材質毎の電解処理時間による試験廃水の吸光度変化を示す。Fig. 8 に、電解処理前の試験廃水と、各電極材質で電解処理後の試験廃水の写真を示す。

Fig. 7 に示すように、陽極に IrO₂ 電極や Pt 電極を用いた場合、6 時間の電解処理により Acid Orange7 水溶液の吸光

Fig. 7 Change of absorbance of Acid Orange7 solution.

Fig. 8 Acid Orange7 solutions.

度は 90 % 以上減少した。しかし、Fig. 8 に示すように無色には成らなかった。

一方、BDD 電極を用いた場合、約 3 時間の電解処理により吸光度は 0.001 になり、処理水は無色透明となり、他の電極材質より非常に高い脱色性能を示した。

電解処理による脱色のメカニズムは、主に式 (1) に示すように陽極にて、水分子が電子を失うことで生成されるヒドロキシラジカル ($\cdot\text{OH}$) による着色分子の酸化である⁷⁾。

BDD 電極と Pt 電極・IrO₂ 電極の脱色性能が異なる主な理由は、次の 2 つである。

① 酸素発生過電圧の違い

BDD 電極は酸素発生過電圧が高いため、他の電極材料に比べ水の電気分解以外の電解反応が進み易く、 $\cdot\text{OH}$ の生成効率が高い。

② 電極材料の化学的安定性の違い

Pt 電極や IrO₂ 電極では、電極材料自体の酸化に $\cdot\text{OH}$ が消費されるため、着色分子の酸化に使用される $\cdot\text{OH}$ が減少する。一方、BDD 電極は化学的に安定なため $\cdot\text{OH}$ と反応せず、 $\cdot\text{OH}$ は着色分子の酸化に使用される。これらの違いが脱色性能の差に繋がっている⁸⁾。

2) アンモニア性窒素・硝酸性窒素の処理

次に、廃水中の汚染物質の中でもアンモニア性、硝酸性の 2 種の形態を取り、比較的困難である窒素系汚染物質の処理への BDD 電極の利用を検討した。

窒素は、人間の通常の生活廃水のみならず、農業、畜産業、工業などの産業活動からも排出されており、主要な富栄養化物質であり、湖沼の環境汚染の観点から注目されている。

硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の、電解法による分解では、塩化物イオンの存在下で陰極に Cu 系電極を用いることで、硝酸

イオンをアンモニアに還元し、陽極に Pt 系電極を用いることで、アンモニアを窒素に分解する方法が提案されている⁹⁾。

塩化物イオンの存在下で、陽極表面にて、アンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) が N_2 ガスへ分解されるメカニズムを式 (2) ~ (7) に示す。

電極間バルクでの反応:

陽極で発生する塩素から生成する次亜塩素酸とアンモニアイオンが反応し、“breakpoint reaction” と呼ばれる反応で N_2 ガスへの分解が生じる。この反応は、電極表面で直接アンモニアを酸化する反応では無く、電極表面で生成した塩素が関与する反応である。

一方で、塩化物イオンが存在しない場合は、次式 (8) で示される NO などの窒素酸化物の段階を経て窒素ガスに分解される。これらの反応は、電極表面での反応である。この反応をまとめて、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が N_2 ガスへ分解される一般的な電気化学反応として、式 (9) に示される反応が考えられている¹⁰⁾。

しかしながら、酸化反応が強く、酸化が進み過ぎた場合には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が生成されてしまい、窒素系汚染物質の処理としては、有効な方法ではない。

また、陰極表面にて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が $\text{NH}_4\text{-N}$ へ還元されるメカニズムを、式 (10) ～ (11) に示す。

このように $\text{NO}_3\text{-N}$ も $\text{NH}_4\text{-N}$ に還元されることで、最終的には、上述の $\text{NH}_4\text{-N}$ の分解と同じ反応で N_2 ガスへ分解される。

BDD 電極は、陽極・陰極のいずれの極でも使用可能という特徴をっており、上記の酸化（式 (2) ～ (7)）・還元（式 (10) ～ (11)）反応を BDD 電極だけで行える。両極で使えるのは重要である。実際の廃水中にはカルシウムイオンやマグネシウムイオンが溶解しており、それらのイオンが電解処理中に陰極上に析出し、電解を阻害する。そのため、定期的に陽極・陰極を反転させ析出物を除去する必要がある。もし、陰極の材質が陽極に使用できない物であれば、この転極時に電極表面が酸化され劣化する。しかし、陽極・陰極が BDD 電極のように両極で使用可能な物であれば、このような転極は全く問題なく行える。

今回、陽極・陰極それぞれに BDD を用いた場合の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の分解性能に関する基礎的な検討の結果を紹介する。

2)-1 アンモニア性窒素の分解（陽極反応）

実験方法

まず、BDD 電極と機能性電極 DSE（Dimensionally Stable Electrode：寸法安定電極）の $\text{NH}_4\text{-N}$ の分解性能を比較した。

試験廃水として、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 源としての炭酸水素アンモニウム (NH_4HCO_3) と塩化ナトリウム (NaCl) を混合した液を準備した。溶液の濃度は、初期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 150 mg/l になるように調合した。 NaCl の濃度は 700 mg/l となるように調合した。

陽極材料には、電極材料による分解効果を比較する目的で、① BDD 電極、② Ti 基板上に IrO_2 と RuO_2 層を被覆した DSE を使用した。

BDD の仕様は、上記の脱色試験で用いたものと同じである。また、実験装置の構成は Fig. 6 と同様である。

このような構成に試験廃水を満たし、電極に直流電源を用いて 1.5 A の定電流を流した。

これらの条件で試験廃水を一定時間電解した後 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度変化を調べた。

実験結果と考察

陽極材料による $\text{NH}_4\text{-N}$ の電解特性を調べたところ、Fig.

Fig. 9 Change of $\text{NH}_4\text{-N}$ density.

Fig. 10 Change of $\text{NO}_3\text{-N}$ density.

9 に示すように、反応時間が1時間までは2種類の電極とも $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度は急速に低下した。DSE を用いた場合、延べ1.5時間の反応で $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度はほぼ 0 mg/l となったが、BDD を用いた場合、1時間の反応で 20 mg/l にまで減少した以降は、ほとんど濃度の変化はなかった。

一方、Fig. 10 の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度変化は、BDD を用いた場合、一時的に増加が確認された。この原因は、BDD の酸素発生過電圧が高いことに由来する高い酸化能力により、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の酸化が進み過ぎ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が生成されたためである。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は一旦増加した後、減少に転じているが、このメカニズムは不明である。

よって、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分解においては、BDD 電極は、DSE とは異なり、完全に $\text{NH}_4\text{-N}$ は分解されず、DSE の方が処理能力が高い結果となった。

2)-2 硝酸性窒素の分解（陰極反応）

実験方法

BDD 電極を陰極に用いた場合の $\text{NO}_3\text{-N}$ の分解性能を評価した。試験廃水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 源として硝酸ナトリウム (NaNO_3) を用いた。溶液の濃度は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 50 mg/l となるよう

Fig. 11 Change of NO₃-N density.

Fig. 12 Change of NH₄-N density.

に調合した。塩化物 (NaCl) の濃度は 500 mg/l とした。

陽極材料には、Ti 基板上に IrO₂ を被覆した DSE を使用し、陰極材料には、先の実験と同様の BDD 電極を使用した。実験装置の構成は Fig. 6 と同様である。

このような構成に試験廃水を満たし、電極に直流電源を用いて 3 A の定電流を流した。

これらの条件で試験廃水を一定時間電解した後の NO₃-N と NH₄-N の濃度変化を調べた。

実験結果と考察

Fig. 11 に示すように、反応時間が長くなるほど、NO₃-N の濃度は減少した。逆に Fig. 12 に示す NH₄-N の濃度は一旦増加した。NH₄-N は、BDD 電極により NO₃-N が還元されて生成したものである。

先の NH₄-N の分解の実験において、陽極として用いた DSE は高い NH₄-N の分解能力を示したが、今回の実験においては、BDD 陰極による NH₄-N の生成速度に分解が追い付かず NH₄-N は増加した。

アンモニア性窒素・硝酸性窒素の分解のまとめ

BDD を陽極に用いた場合、アンモニアの分解を確認し、BDD を陰極に用いた場合、硝酸がアンモニアに還元される

Table 2 Recovery methods of copper.

Method	Scrap material	Process	Issues
Dry	Communication line	Crushing →Gravity concentration →Combustion removing resin →Recovering as copper oxides	Heavy environmental load ・CO ₂ emission during the combustion process is large. ・Reduction treatment for copper oxides is needed.
Wet	Printed circuit board of PC or consumer electronics	Eluting Cu with SO ₄ or HCl, etc →Recovering Cu with electrowinning	Heavy environmental load ・A lot of chemicals are used. ・Electricity consumption used at the electrowinning process is large.

Fig. 13 Recovery system of copper using BDD electrode.

ことを確認した。

この結果から、両極とも BDD を用いた構成で、NH₄-N と NO₃-N の両方の分解が可能であり、COD の分解や陰極上の付着物除去を目的とした転極を考えると、BDD を両極に用いることが実用上有効であることがわかる。

3.2 銅のリサイクル

BDD 電極の高い酸化力を用いて、硫酸や炭酸から過硫酸や過炭酸などの強い酸化剤を生成する応用が幾つか報告されている^{7),11)}。

ここでは、このような応用を銅のリサイクルに利用した事例を紹介する。

銅は、需要は大きい埋蔵量が決して多く無い金属である。従って、銅を含有した銅スクラップから銅を回収して再利用することは、資源保護の立場から重要である。

従来の銅の回収方法としては、Table 2 に示すものが代表的である。しかし、これらの方法は何れも、純度が低い、環境負荷が大きい等の課題がある。

BDD 電極は、環境への負荷を大きくすることなく、高純度に銅の回収が期待できるため、以下に実験結果を示す。

BDD 電極を用いた銅の回収方法

実験装置の構成

Fig. 13 に銅の回収に使用する電解槽の構成を示す。陽イ

Table 3 Process of copper recovery system using BDD electrode.

	1. Before current is turned on	2. While current is turned on	3. Dissolving metals in anode chamber	
Anode chamber	<ul style="list-style-type: none"> •SO₄²⁻ solution •Setting BDD electrode 	<ul style="list-style-type: none"> •Generating Caro's acid from SO₄²⁻ (2SO₄²⁻ → S₂O₈²⁻ + 2e⁻) 	<ul style="list-style-type: none"> •Removing BDD electrode •Eluting copper ion from scrap materials. Generating SO₄²⁻ from Caro's acid (S₂O₈²⁻ + 2e⁻ → 2SO₄²⁻) •Copper ion eluted SO₄²⁻ solution 	
Cathode chamber	<ul style="list-style-type: none"> •Copper ion eluted SO₄²⁻ solution •Setting Pt electrode (cathode) 	<ul style="list-style-type: none"> •Depositing Cu on cathode 	<ul style="list-style-type: none"> •Recovering Cu with cathode • SO₄²⁻ solution 	

オン交換膜により、陽極を備えた陽極室と、陰極を備えた陰極室とに仕切られている。

陽極には BDD 電極、陰極には Ti に Pt をコートした Pt 電極を用いた。

銅の回収プロセス

まず銅線の粉砕物をポリプロピレン製の不織布でできた袋に詰めた物を用意した。

次に、上記の金属含有物の粉砕物が詰まった袋を 6 N の硫酸 1 L に 60 g の過硫酸アンモニウムを加えて作成した溶液に浸し、銅イオンを含む溶液を用意した。このとき、式 (12) に示すように過硫酸イオンは還元され硫酸イオンとなる。

Fig. 13 の陰極室に上記で用意した銅イオンを含む溶液を入れ、更に陽極室には、6 N の硫酸 1 L に 60 g の硫酸アンモニウムを溶かした溶液を入れた。

膜を介して陽極と陰極を約 10 cm 離して対向させ両極間に 10 V の電圧を印加して、10 分間通電処理した。

その結果、陰極には純度 99.99 % 銅が析出し、一方、陽極室では硫酸イオンが酸化されて濃度が 80 g/L の過硫酸アンモニウム溶液が生成した。過硫酸イオンは式 (13) で示される陽極反応で生成される。

続いて、陽極および陰極をそれぞれの室から取り出し、上記と同様に準備した金属含有の粉砕物が詰められた袋を陽極室として用いていた室中の溶液に浸し、銅イオンを含む溶液を作製した。そして、当該溶液中に新たに用意した Pt 製の陰極を設置し、もう一方の還元された状態の酸化物を多く含む溶液中に上記の BDD 電極を設置し、両極間に 10 V の電圧を印加し、10 分間通電処理した。

1 回目の通電処理と同様に、陰極の表面には純度が 99.99 % の銅が析出し、陽極室中の溶液は酸化剤が再生して濃度が 80 g/L の過硫酸アンモニウム溶液となっていた。

上記のサイクルをまとめると、陽極室・陰極室において Table 3 に示す反応が起きている。通電の度に陽極室にて

過硫酸イオンが再生するため、薬液（過硫酸アンモニウム等）を追加することなく、繰り返し金属含有粉砕物を溶かすことが可能である。

また、同様の操作を繰り返し行ったら、100 サイクル後においても処理液を交換することなく、連続して利用できることを確認した。

他材質電極との比較

BDD 電極の代わりに Pt 製の陽極を用いた以外は、Fig. 13 と同様にして、電解槽のセッティングを行った。両極間に 10 V の電圧を印加し、10 分間通電処理をしたところ、陰極表面に純度 99.99 % の銅が析出したが、陽極室においては、過硫酸イオンは生成されておらず、先の実験と同様に操作を繰り返したところ、15 ~ 20 サイクル目で銅を溶解させることができなくなった。

BDD 電極と Pt 電極の酸化力（酸素発生過電圧）の差が過硫酸イオンの生成効率の違いに繋がり上記のような結果となった。

銅リサイクルのまとめ

BDD 電極を陽極に用いた系にて、電析で銅を回収する事例を示した。この系において、陽極・陰極間に通電時、陰極に銅が析出すると同時に、BDD 電極の高い酸化力により硫酸イオンが酸化され過硫酸イオンが生成した。このように銅の電析を行いながら過硫酸イオンの再生ができるため、新たに過硫酸イオンを追加すること無く、繰り返し銅廃材から銅を回収することができ、従来の銅回収方法に比べ環境負荷を大幅に低減できる。

今回は、銅回収の事例を示したが、Fig. 13 の両極間の電圧を制御すれば、溶液中の金属イオンの中からイオン化傾向が小さい元素から順に分けて陰極に析出させることも可能である。

4. 結言

BDD 電極の優れた電気化学的特性を利用した廃水中の汚染物質の処理や、過酸化生成による金属回収の例を示した。これらは BDD 電極の応用のほんの一例に過ぎず、Table 4 のように、BDD 電極に期待される応用分野は微量

Table 4 Applications of BDD electrode.

Field	Applications
Waste water treatment	Removing COD or nitrogen pollutant. Decolorization. Sterilizing. Detoxifying residual agricultural chemicals.
Sensing	Monitoring heavy metals, residual Cl density, poisonous gas, bio-related materials.
Electrolytic synthesis	Synthesis of peroxide, ozone, organic matter, Fluorine gas.
Resource recovery	Recovering metals from scrap materials. Reusing plating waste water. Collecting Mg from sea water. Reprocessing nuclear fuel.

物質検出用のセンサから、CO₂ から有機物の合成¹²⁾、海水から有価資源の回収¹³⁾に至るまで幅広い。それらの研究開発は年々盛んになっており、実用的な段階にまで進んで来たものもある。

しかし、このような BDD 電極にもまだ課題はある。特に、大面積 BDD 電極の製造技術確立と製造コスト削減は重要である。サイズが 50 cm × 100 cm の BDD 電極の製造実績が報告されているが¹⁴⁾、量産性が乏しく価格が課題である。今後、BDD 電極が広く利用されるようになるには、生産技術面でのブレイクスルーが特に必要である。

謝 辞

BDD 電極を用いた脱色処理実験と窒素性汚染物質処理実験のデータを御提供頂いた神戸大学農学部准教授の井原一高様に感謝致します。

引用文献

- 1) 栄長泰明、近藤剛史、錦義則、初代善夫：NEW DIAMOND., **27-1** (2011) 31
- 2) Y. Einaga: J. Appl. Electrochem., **40** (2010) 1807
- 3) N. Katsuki, E. Takahashi, M. Toyoda, T. Kurosu, M. Iida, S. Wakita, Y. Nishiki and T. Shimamune, J. Electrochem. Soc., **145-7** (1998) 2358
- 4) X. Chen, G. Chen, F. Gao and P. L. Yue: Environment. Sci. Technol., **37-21** (2003) 5021
- 5) M. A. Rodrigo, P. A. Michaud, I. Duo, M. Panizza, G. Cerisola and Ch. Comninellis: J. Electrochem. Soc., **148-5** (2001) D60
- 6) A. Kraft, M. Stadelmann and M. Blaschke: J. Hazardous Mater., B, **103** (2003) 247
- 7) 芹川正浩、佐々木賢一、千田祐司：エバラ時報、**223** (2009) 11
- 8) Comninellis, C: Electrochimica Acta., **39** (1994) 1857
- 9) 広瀬潤、広直樹、近藤文剛、河内基樹、黒川喜寛：SANYO Tech. Rev., **35-2** (2003) 15
- 10) K. W. Kim, Y. J. Kim, I. T. Kim, G. I. Park and E.H. Lee: Electrochim. Acta., **50** (2005) 4356
- 11) 速水直哉、田家真紀子：東芝レビュー、**64-5** (2009) 38
- 12) K. Nakata, T. Ozaki, C. Terashima, A. Fujishima and Y. Einaga: Angew. Chem. Int. Ed., **53** (2014) 871
- 13) S. Ikeda and S. Tao: Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., **67-3** (2013) 141
- 14) M. Fryda, Th. Matthée, S. Mulcahy, M. Höfer, L. Schäfer and I. Tröster: The electrochemical Society Interface., Spring, (2003) 40