



解説

# 電子ビーム励起プラズマ源 (EBEP 源)

市来 龍大<sup>1)</sup>, 原 民夫<sup>2,3)</sup>

<sup>1)</sup>大分大学工学部, <sup>2)</sup>豊田工業大学, <sup>3)</sup>株式会社プラズマ総合研究所

(原稿受付: 2011年 8月25日)

原子分子の電離・解離など多くの電子衝突反応が100 eV付近に反応断面積の最大値を有しているが、この付近のエネルギーを持つ電子ビームを数 A/cm<sup>2</sup> もの大電流密度で引き出し可能な装置が電子ビーム励起プラズマ (EBEP) 源である。ここでは、EBEP 源の電子ビーム引き出しの原理と応用例について解説を行う。

**Keywords:**

electron-beam-excited plasma, nitriding, nitrogen atom, electron beam, dissociation, ionization

## 1. 緒言

多くのプラズマ応用では、電子による原子分子の電離のみならず解離や励起、またそれに伴う化学反応の活性化を利用している。通常、低圧放電プラズマ中ではエネルギー分布の裾野に位置する高エネルギー電子がこれらの反応促進を担っている。しかし電子の加熱には限界があり、例えば窒素分子の電離もしくは解離反応の反応断面積は電子エネルギーが100 eV付近で大きな値をとるが(図1(a)) [1], 通常プラズマ装置中で100 eVの電子を十分供給できるまでに電子温度を上昇させるのは容易ではない。

ここで紹介する電子ビーム励起プラズマ (Electron-Beam-Excited Plasma: EBEP) 源は、100 eV程度の電子ビームを~数 A/cm<sup>2</sup> という大きな電流密度で引き出すことが可能であり、この電子ビームを各種気体に照射し目的の原子分子反応を大幅に促進させることができる [2]。図1(b)の電子のエネルギー分布と図1(a)の電離・解離断面積を照らし合わせると、熱化電子と比べて電子ビームがいかに効率よくN<sub>2</sub>を電離・解離できるか感じ取れるだろう。本解説では第2章でEBEP源の原理を解説する。EBEP源には差動排気型EBEP源および小型EBEP源の2種類が存在する。それらの違いとメリット・デメリットについて説明する。第3章においてEBEP源の応用例を紹介する。

## 2. EBEP 源の原理

### 2.1 差動排気型 EBEP 源

図2(a)は差動排気型EBEP源の概略図である。装置は放電領域、電子加速領域、EBEP領域の3領域に分かれている [2]。放電領域はカソードKとアノードS<sub>2</sub>の間の区間であり、ここにArガスを導入し直流放電によりArプラズマを生成する。このプラズマが電子の供給源となる(プラズマカソード)。図中のV<sub>D</sub>はプラズマカソード放電電圧、I<sub>D</sub>はプラズマカソード放電電流である。I<sub>D</sub>を大電流で安定

に流すため、電極KにはLaB<sub>6</sub>ディスクを使用する。アノードS<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>は耐熱金属製のディスクであり、中心に直径数mmのオリフィスを持っている。プラズマカソードはK-S<sub>1</sub>間で点火を行うが、その後アノードをS<sub>2</sub>へ移しS<sub>1</sub>は回路から切り離して浮遊電位にする。電極S<sub>1</sub>が必要なもう一つの理由は、2重のオリフィスにより気体のコンダクタンスを下げ、放電領域の圧力(~10<sup>2</sup> Pa)と電子加速領域の圧力(~10<sup>-2</sup> Pa)の差を保つためである。電子加速領域は陽極S<sub>2</sub>と電子加速電極Aの間の区間である。差動排気系によりこの領域のpを減少させ、pd積を阻止放電状態まで低下さ

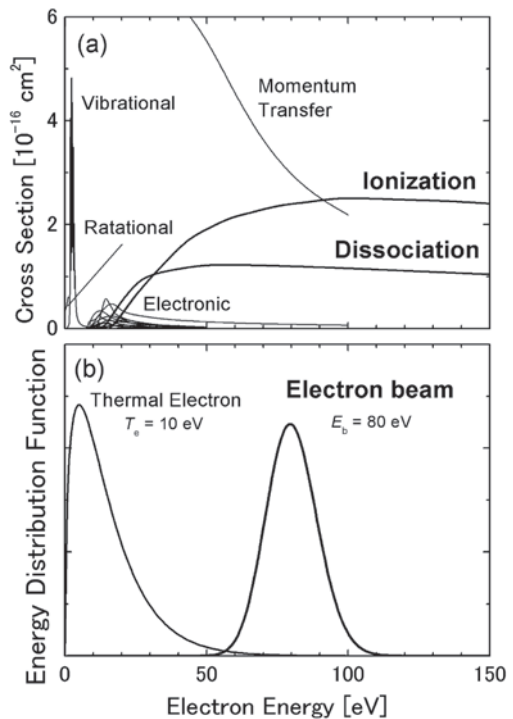


図1 (a) N<sub>2</sub>分子の電子衝突による各種反応断面積 [1]. (b) 電子ビームおよび熱化電子のエネルギー分布。

Electron-Beam-Excited-Plasma Source

ICHIKI Ryuta and HARA Tamio

corresponding author's e-mail: ryu-ichiki@oita-u.ac.jp

せ電子を無衝突で加速する．ここで  $p$  はガス圧力， $d$  は  $S_2$ -A 電極間距離である．図中の  $V_A$  は電子加速電圧， $I_A$  は電子ビーム電流である．電極 A のオリフィスに電子ビームを通すため，コイルにより 0.05 T 程度の軸方向磁場を印加して電子ビームをガイドする必要がある．EBEP 領域にはターゲットとなるガス（図 2 の場合  $N_2$ ）を  $\sim 1$  Pa 導入し，電子ビーム照射により目的の電子衝突反応を起こす．原子分子の解離や励起のみが目的の場合も必ず電離が起こるためプラズマが発生し，このプラズマを電子ビーム励起プラズマ (EBEP) と呼ぶ．

次に述べる事項は極めて重要である．通常，プラズマから真空中へ電子を引き出そうとしても，高々  $V_A=100$  V 程度の加速電圧では空間電荷制限のためごく微量の電子ビームしか引き出せない．一方 EBEP 源においては，生成された EBEP を構成する正イオンの一部が電子と逆に加速を受け電子加速領域へ流入する．これが電子加速領域の電荷を中和し，空間電荷制限を低減する．その結果，EBEP 源では 100 eV 程度の電子ビームを数 A/cm<sup>2</sup> の高電流密度で引き出すことが可能となる．文献[3]では，140 eV の電

子ビームを 15 mm のオリフィスから  $I_A=63$  A もの電流値で定常的に引き出すことに成功し，生成された He プラズマは  $10^{13}$  cm<sup>-3</sup> のオーダーであったと報告されている．また通常の電子ビーム源と異なり，EBEP 源では電子ビーム電流とエネルギーを独立に制御することが可能であり，前者はプラズマカソード放電電流  $I_D$  によって，後者は電子加速電圧  $V_A$  によって制御される．差動排気型 EBEP 源の典型的な電子ビーム引き出し効率  $I_A/I_D$  は 0.7~0.8 である．

2.2 小型 EBEP 源

差動排気型 EBEP 源の短所は，図 2 (b) に示されるように差動排気系と磁場コイルのため装置が大型であり，かつ高価なことである．これを克服すべく，小型 EBEP 装置が開発された[4]．図 3 (a) は小型 EBEP 源の概略図である．差動排気型との違いは，電子加速領域の電極間距離  $d$  が 1 mm 以下と短い点である．すなわち，作動排気型では  $p$  の減少により  $pd$  積を阻止放電状態まで低下させていたのに対し，小型 EBEP 源では  $d$  の減少により  $pd$  積を低下させる．したがって，差動排気系および磁場コイルが不要となり，これが装置の小サイズ化（図 3 (b)）・低コスト化

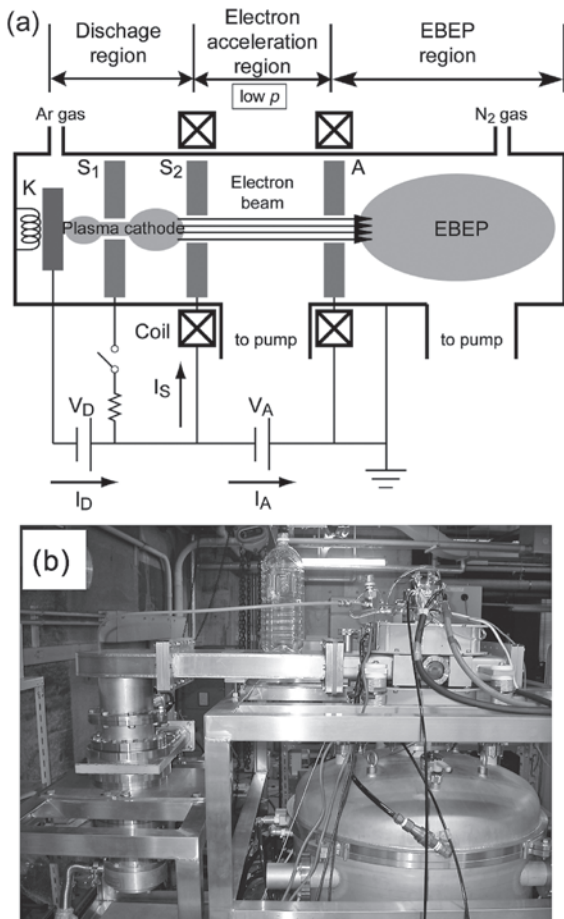


図 2 (a) 差動排気型 EBEP 源の概略図．K—カソード， $S_1$ —一点火用アノード， $S_2$ —アノード，A—電子加速電極， $V_D$ —プラズマカソード放電電圧， $I_D$ —プラズマカソード放電電流， $V_A$ —電子加速電圧， $I_A$ —電子ビーム電流， $I_S$ —電極  $S_2$  に流れ込んだ電子の電流．(b) 差動排気型 EBEP 源の装置写真．右側に磁場コイルを有した EBEP 源，左側に作動排気系が位置している．大きさの比較のため，中心に 2L のペットボトルを置いている．右下のチャンバーは窒化処理炉である．

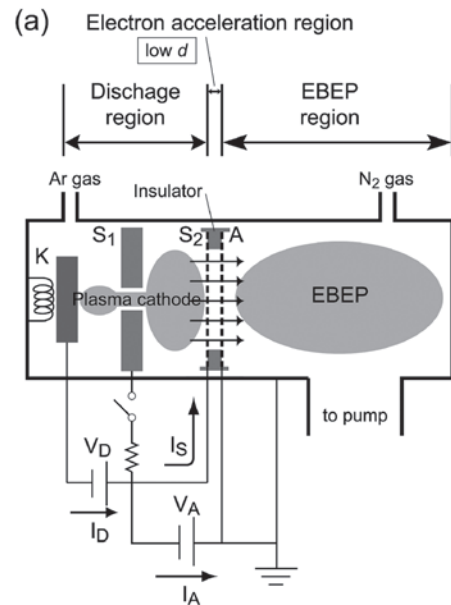


図 3 (a) 小型 EBEP 源の概略図．各記号は図 2 と同様．(b) 小型 EBEP 源の装置写真．大きさの比較のため，横に 2 L のペットボトルを置いている．

を実現させるのである。アノード  $S_2$  および電子加速電極 A は図 4 に示されるグラファイト製の多孔電極で作られている。したがって電子ビームを磁場で閉じ込める必要はない。小型 EBEP 源の放電領域および EBEP 領域の構造は基本的に差動排気型と同様である。小型 EBEP 源の典型的な電子ビーム引き出し効率  $I_A/I_D$  は 0.5 程度である。

小型 EBEP 源は圧倒的に小サイズ・低コストであるが、次に説明するように引き出し可能な電子ビーム電流に限られるという問題があった[5]。図 5 の黒点は“見かけ上の”電子ビーム電流  $I_A$  を増加させた際に生成される窒素 EBEP 密度の変化を表している。ここで  $I_A$  を見かけ上の値と呼ぶのは、電極 A を通過して実際に EBEP 領域に照射された正味の電子ビームの電流と、電極 A に直接流れ込んだ電子の電流の和が  $I_A$  であるという理由からである。図 5 からわかるように、 $I_A$  を 6 A 以上に増加させても EBEP 密度は  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  で飽和している。これは、 $I_A$  を増加させても正味の電子ビーム電流が増加していないことを意味している。直接的な原因はまだ明確ではないが、電極  $S_2$  と A の熱膨張の差によりそれぞれの多孔部の位置がずれてしまい、電極 A に直接流れ込む電子が増加した可能性が考えられる。

この問題は、多孔電極の過熱を防止することにより克服されている[5]。まず、多孔電極の冷却を高効率化するため電極形状を図 4 (a) に示される円形から図 4 (b) 矩形にし、電極中心部と水冷されている電極設置用フランジ壁の距離を短くする。しかし電極の矩形化により、電極中を長手方向に流れる電流がもたらす電圧降下が顕著となる。その電位差により電子ビームが電極の片側に集まり、結局図 6 (a) のように局所過熱が発生してしまう。次に、矩形電極の多孔部の周囲にグラファイトよりも低抵抗の電流バスを設け、電圧降下を低減する。その結果、図 6 (b) のように局所的な過熱が抑えられ熱が電極全体に分散する。こうして改良された小型 EBEP 源では、図 5 の白点で示されるように  $I_A$  を 6 A 以上に増加させた場合でも、EBEP 密度は

飽和せずに線形に増加する。また、次章で解説する窒化処理においても性能が向上することが明らかとなっている[5]。これらの改良により、小型 EBEP 源が産業応用に耐えうる性能を獲得した。

### 3. EBEP 源の応用例

#### 3.1 金属表面の窒化処理

EBEP 源を用いた応用例は多く存在するが、本節では最も実用化に近いと思われる窒化処理について重点的に解説を行う[4-17]。ここでいう窒化処理とは、金属表面の結晶中に窒素 (N) 原子を 500°C 前後で熱拡散させ固溶させることにより表面の硬さを上げ、材料の耐摩耗性や疲労強度などの機械的強度を向上させる技術のことを指す。産業界では金型、摺動部材、工具に適用されており、とりわけ現代の自動車産業になくてはならない技術のひとつである[18]。現場で多用される窒化処理法のひとつに、低圧 DC グロー放電を用いたイオン窒化法がある。図 7 (a) はイオ

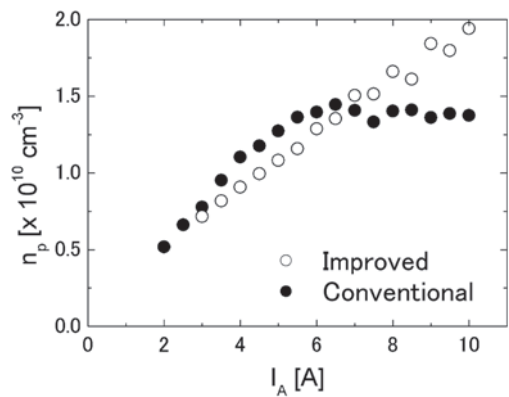


図 5 小型 EBEP 源により生成された窒素 EBEP の密度と“見かけ上の”電子ビーム電流  $I_A$  との関係[5]。使用した多孔電極の面積は 16~18  $\text{cm}^2$  である。

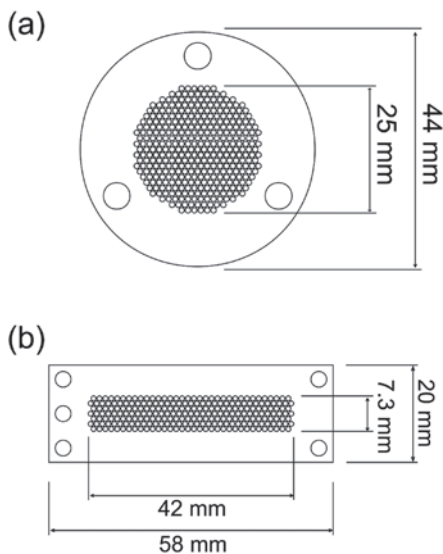


図 4 グラファイト製多孔電極。厚さは 0.7 mm であり、穴の直径は 1 mm である。(a)改良前。(b)改良後[5]。

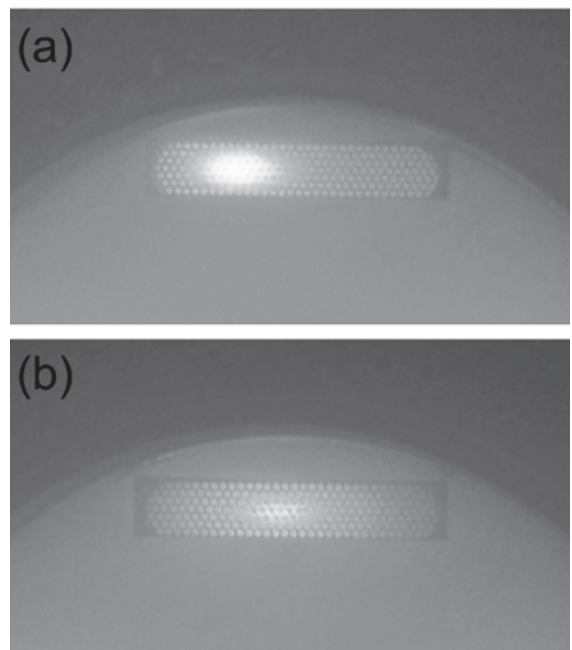


図 6 小型 EBEP 源運転時の電極 A の写真。 $I_A = 10 \text{ A}$ ,  $V_A = 80 \text{ V}$ 。(a)電流バス導入前。(b)電流バス導入後。

ン窒化法の概略図である。この手法では数 100 Pa の  $N_2/H_2$  混合ガス（もしくはアンモニアガス）雰囲気を用い、真空容器をアノード、中に配置した非処理部材をカソードとして数 100 V~1 kV の電圧により異常グロー放電を発生させる [18]。N 原子の直接生成は困難であるため、 $NH_x$  基の生成などを介して最終的に生成された N 原子（素過程は未だ明確になっていない）を金属表面から内部へ熱拡散させ、 $\sim 100 \mu m$  の深さまで硬化させる。

一方 EBEP 源は、 $N_2$  分子の解離が大電流電子ビームにより高効率に達成されるため（図 1 参照）、高密度の N 原子雰囲気を作り出すことが可能である。文献 [19] によると、EBEP 源による  $N_2$  の解離度が 0.16 であったと報告されており、これは材料プロセスなどの応用に適した体積を持つ装置では極めて高い値である。また文献 [20] では窒素 EBEP 中の N 原子密度が計測されており、その値は  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーであると報告されている。EBEP 源を用いた窒化処理では、図 7 (b) に示されるように生成された N 原子雰囲気に非処理部材を配置し、N 原子を表面から内部へ熱拡散させる。すなわち、イオン窒化法では未解明の複雑な化学プロセスを通して N 原子の拡散を実現させるのに対し、EBEP 源による窒化法では生成した N 原子をただただ被処理部材に拡散させるという極めて単純明快なプロセスが可能となる。EBEP 源による窒化処理は以下のような長所を有しており、これまでにない表面硬化技術をもたらす可能性があると考えられる。

1. 光輝窒化が可能

従来、鉄鋼試料に窒化処理を施すと、最表面には数  $\mu m$  の「化合物層」( $Fe_{2-3}N$ ,  $Fe_4N$  などの窒化鉄) が形成され、その下部に厚さ 100  $\mu m$  程度の「拡散層」(Fe と N 原子の固溶体) が形成される [18, 21, 22]。前者は耐食性・耐焼付性を向上させ、後者は耐磨耗性・疲労強度を向上させる。しかし、用途によっては化合物層の形成は望まれない。例として、化合物層には靱性がなくチッピングの原因となるため、ある種の金型や切削工具を処理する際には化合物層はラッピングなどで除かれる。さらに、窒化処理後の表面に TiN など硬質膜をコーティングすることにより、工具などのさらなる長寿命化を図る技術を複合硬化処理と呼ぶが [21]、複合硬化処理では化合物層と硬質膜の密着性が悪いため剥離が問題となる [23]。化合物層を形成しない窒化処理では、非処理部材は処理前と同様に光沢を持つことから、光輝窒化と呼ばれる。通常のイオン窒化などでは光輝窒化は困難な技術とされる [23]。

しかし EBEP 源では、光輝窒化が容易に達成される [7, 9, 24]。図 8 は EBEP 源により鉄鋼試料 (SKD61) を窒化した試料断面の金属組織写真である。通常の窒化処理では右図のように最表面に白色の層が見られるが、これが化合物層である。一方、EBEP 源を用いた場合、パラメータの制御により左図のような化合物層のない光輝窒化処理が可能である。光輝窒化を達成する手法としては、電子ビームパワーを低減する [7]、試料バイアスおよび雰囲気圧力を低下させる [24]、EBEP 中の正イオンの試料への照射をなくす [9]、などが挙げられる。素過程については完全には

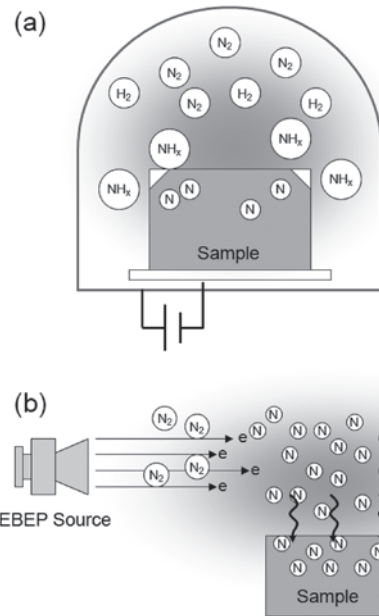


図 7 (a)イオン窒化のイメージ図。(b)EBEP 源による窒化処理のイメージ図。

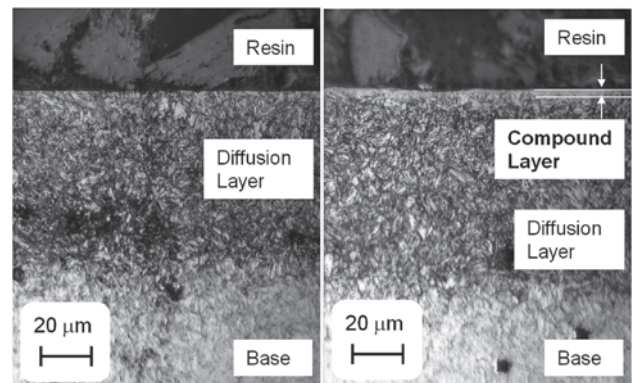


図 8 窒化処理した鉄鋼表面の金属組織写真 [24]。左図が光輝窒化処理であり、右図の通常の窒化処理と比較すると化合物層が見られないことがわかる。黒色に腐食した層が拡散層に対応する。

明らかになっていないが、このような容易なパラメータ制御で光輝窒化が可能となる。また、光輝窒化が可能であるといわれているラジカル窒化処理と EBEP 源による窒化処理で形成された拡散層の硬さ分布を図 9 で比較する [5, 25]。どちらも同様の鉄鋼 (SKD61) を窒化した結果であり、明らかに EBEP 源による窒化処理が短時間で深くまで硬化できることがわかる。

2. 複雑形状試料の均一窒化が可能

イオン窒化では被処理部材を冷陰極放電のカソードとして用いるため、電界集中の強い鋭利部に放電が集中することにより窒化層の不均一化を招く。これは工具や金型の鋭利部のチッピングに繋がる。同様の原因により、穴や狭い間隙の壁など放電が起らない箇所は硬化が困難であるという欠点がある [22]。一方 EBEP 源による窒化では、高密度の N 原子雰囲気に被非処理部材を配置するだけであるから、単純な拡散により穴や間隙の壁にも N 原子が達するため、硬化が可能である。図 10 は、鉄鋼試料 (SCM435) で

作製した 0.8 mm のスリットの内壁を窒化処理した結果であり[7]、極めて狭い間隙であるにもかかわらず 5 mm 強の深さまで内壁が硬化していることがわかる。また EBEP 源による窒化処理では鋭利部の不均一窒化も起こらない。

3. 水素ガスおよびアンモニアガスを用いない

イオン窒化と異なり EBEP 源は電子ビームにより直接 N 分子を解離するため、H<sub>2</sub> やアンモニアといった取り扱いの困難なガスは必要ない。N<sub>2</sub> ガスおよび Ar ガスという環境負荷のないガスのみを使用するため、極めてクリーンな技術であるということが出来る。

4. 拡張性が高い

小型 EBEP 源 1 台のサイズは図 3 (b) に示されるように非常に小さいため、大型の被処理部材や長尺物を処理する目的に対して、処理炉に複数台の小型 EBEP 源を配置することで対応可能である。

鉄鋼材料以外では、アルミニウムやチタンなどの非鉄金属の窒化処理についても報告されている[11-17]。アルミニウムの窒化処理については、母材と窒化層の硬度の違いによる剥離が問題となっている[26]。これを解決すべく、バレル窒化処理と EBEP による窒化処理を併用し、段階的に硬度を上げ剥離を防ぐ手法が提案されている[15-17]。

EBEP による窒化処理と既存の窒化処理の比較をまとめると、表 1 のようになる。これからもわかるように、EBEP 源による窒化処理は他の手法に比べ圧倒的に利点が多いこ

とがわかる。また、処理炉としては試料過熱用のヒーターが付いた真空容器であればよく、特殊な技術を必要としない。図 11 に示される装置が大量処理用の処理炉であり、処

表 1 各種窒化処理の比較.

	EBEP 窒化	イオン窒化	ラジカル窒化	ガス窒化
化合物層の制御	◎	△	○	×
窒化速度				
化合物層あり	◎	◎	◎	△
化合物層なし	◎	×	○	×
均一処理	◎	×	○	◎
表面粗度	◎	×	○	×
複雑形状処理	◎	×	○	○
試料配置方法	単純	複雑	複雑	単純
使用ガス	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>
イオン衝撃	少ない	極めて多い	多い	なし

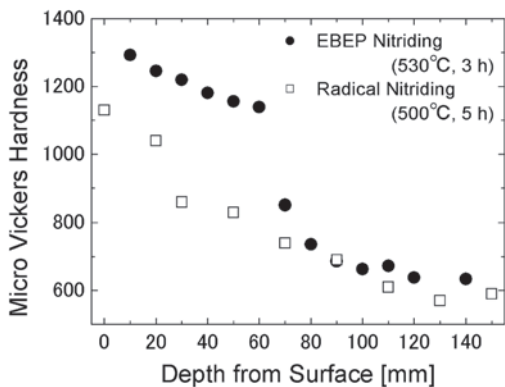


図 9 窒化処理した鋼 (SKD61) 表面の硬さの深さ方向分布 [5, 25].

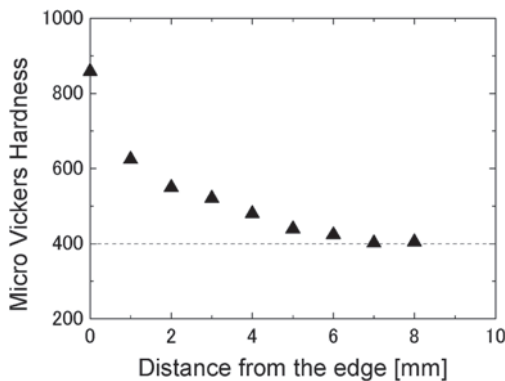


図 10 SCM435 スリット内壁の表面硬さ [7]. スリットの幅は 0.8 mm, I<sub>A</sub> = 2.5 A, V<sub>A</sub> = 100 V, 試料温度は 500°C, 処理時間は 3 h である。

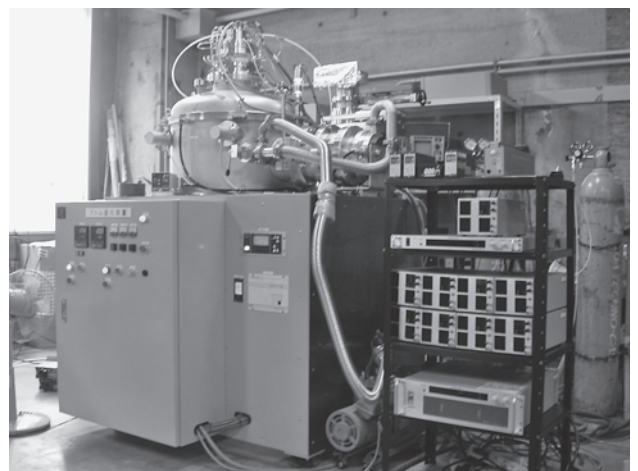


図 11 小型 EBEP 源を搭載した窒化処理炉 (豊田工業大学所有).

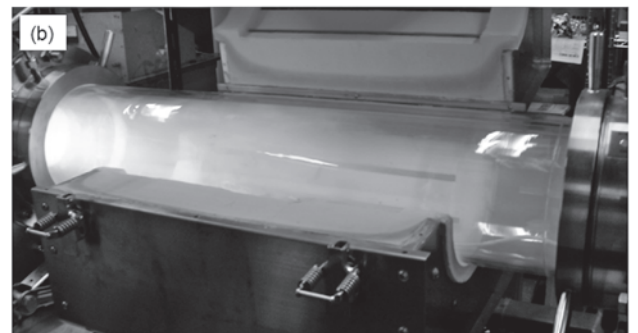
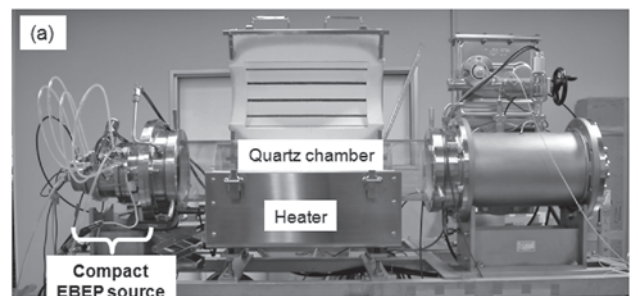


図 12 基礎実験用の窒化処理炉 (豊田工業大学所有). (a) 装置の外観. 石英チャンバーの周囲をヒーターが取り巻く構造となっている. (b) 電子ビームにより生成された窒素 EBEP.

理炉の上部に小型 EBEP 源が搭載されている。図12には基礎実験用の小型処理炉を示す。

### 3.2 その他の応用例

これまでは高効率解離による窒化処理の例を解説してきたが、最後に EBEP 源を用いた励起、電離、その他化学プロセスの高効率性を利用した応用例を簡単に紹介する。EBEP 源の最初の応用例は、 $\text{Ar}^+$  イオンの高効率励起によるイオンレーザーの発振であった[27]。電子ビームの照射により、Ar ガスのみを用いた 488.0 nm CW レーザーの発振に成功している。高効率電離を利用した用途としてはイオン源の開発が報告されており、0.3 Pa で  $7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の Ar プラズマを生成している[2, 28]。その他にもエッチング[29-31]、化学蒸着法 (CVD) [32-36]、物理蒸着法 (PVD) [37, 38]、表面処理[39]、クリーニング[40]と応用例は多岐にわたる。特に近年、カーボンナノウォール (CNW) の製膜において高い成長率が確認されるなど[41]、ナノテクノロジーの分野で有用であることも実証されている。

## 4. 結言

ここでは、原子分子を高効率に電離・解離・励起する能力を持つ EBEP 源の原理およびこれまでに行われた応用研究について解説を行った。しかしここで紹介していない他のプラズマ科学の分野でも、原子分子の反応の促進が重要であることは言うまでもない。したがって今後も EBEP 源を用いた応用が広がることが期待される。

### 参考文献

- [1] Y. Itikawa, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **35**, 31 (2006).
- [2] T. Hara, M. Hamagaki, A. Sanda, Y. Aoyagi and S. Namba, *J. Vac. Sci. Technol. B* **5**, 366 (1987).
- [3] T. Ohgo, T. Hara, M. Hamagaki, K. Ishii and M. Otsuka, *J. Appl. Phys.* **70**, 4050 (1991).
- [4] K. Taniguchi, M. Hashimoto, T. Hishida, H. Shoyama and T. Hara, *Proc. 27th Int. Conf. Phenomena in Ionised Gases*, 2005, No. 10-409 [CD-ROM].
- [5] R. Ichiki and T. Hara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 076001 (2009).
- [6] H. Shoyama, T. Hishida, T. Hara, Y. Dake, T. Mori, H. Nagai, M. Hori and T. Goto, *J. Vac. Sci. Technol. A* **24**, 1999 (2006).
- [7] Y. Hara, Y. Yoshikawa, T. Hara and P. Abraha, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, L1077 (2007).
- [8] アブラハ ペトロス, 吉川泰晴, 神谷和典, 片山裕貴, 原 民夫: *表面技術* **58**, 33 (2007).
- [9] Y. Yoshikawa, T. Hara and P. Abraha, *Tribology Online* **3**, 348 (2008).
- [10] P. Abraha, Y. Yoshikawa and Y. Katayama, *Vacuum* **83**, 497 (2009).
- [11] L. Liu, A. Yamamoto, T. Hishida, T. Hara and H. Tsubakino, *Mater. Trans.* **46**, 687 (2005).
- [12] 奥宮正洋, 恒川好樹, 馬場昭弘, 田村 賢: *熱処理* **46**, 72 (2006).
- [13] 劉莉, 山本厚之, 菱田隆模, 庄山裕章, 原 民夫, 山西哲司, 福本信次, 椿野晴繁: *軽金属* **56**, 10 (2006).
- [14] R. Ichiki, Y. Kubota, M. Yoshida, Y. Fukuda, Y. Mizukamo and T. Hara, *J. Plasma Fusion Res. Series* **8**, 1408 (2009).
- [15] M. Yoshida, M. Okumiya, R. Ichiki, C. Tekmen, W. Khalifa, Y. Tsunekawa and T. Hara, *J. Plasma Fusion Res. Series* **8**, 1447 (2009).
- [16] M. Okumiya, M. Yoshida, R. Ichiki, C. Tekmen, W. Khalifa, Y. Tsunekawa and K. Tanaka, *Plasma Process. Polym.* **6**, S287 (2009).
- [17] M. Yoshida, M. Okumiya, R. Ichiki, W. Khalifa, C. Tekmen, Y. Tsunekawa, T. Hara and K. Tanaka, *Plasma Process. Polym.* **6**, S310 (2009).
- [18] 山中久彦: *イオン窒化法* (日刊工業新聞社, 1976).
- [19] K. Taniguchi, M. Sugimoto, S. Masuko, T. Kobayashi, M. Hamagaki, P. Abraha and T. Hara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L999 (2000).
- [20] S. Tada, S. Takashima, M. Ito, M. Hamagaki, M. Hori and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 4691 (2002).
- [21] Y. Sun and T. Bell, *Mater. Sci. Eng. A* **140**, 419 (1991).
- [22] 日本材料科学会編, *表面処理と材料*, 第2章4節 (裳華房, 1996).
- [23] J.-D. Kamminga, R. Hoy, G.C.A.M. Janssen, E. Lugscheider and M. Maes, *Surf. Coat. Technol.* **174**, 671 (2003).
- [24] 山中準一: *豊田工業大学2007年度卒業研究論文*.
- [25] I. Lee and I. Park, *Mater. Sci. Eng. A* **449-451**, 890 (2007).
- [26] U. Figueroa, O. Salas, J. Oseguera, S. Rodriguez and B. Ruiz, *Surf. Eng.* **19**, 337 (2003).
- [27] T. Hara, Y. Sadamoto, M. Hamagaki, T. Ohgo and T. Dote, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L379 (1983).
- [28] T. Hara, M. Hamagaki, A. Sanda, Y. Aoyagi and S. Namba, *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, L252 (1986).
- [29] T. Meguro, M. Ishii, H. Kodama, M. Hamagaki, T. Hara, Y. Yamamoto and Y. Aoyagi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, 2216 (1990).
- [30] M. Ryoji, T. Hara, K. Ohnishi, M. Hamagaki, Y. Dake, M. Tohkai and Y. Aoyagi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 4357 (1992).
- [31] K. Takeda, T. Ohta, M. Ito and M. Hori, *J. Vac. Sci. Technol. A* **24**, 1725 (2006).
- [32] T. Ito, M. Imaizumi, K. Yamaguchi, K. Okitsu, I. Konomi, M. Yamaguchi, T. Hara, M. Ban, M. Tohkai and K. Kawamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 6035 (2000).
- [33] S. Tada, M. Ito, M. Hamagaki, M. Hori and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 5408 (2002).
- [34] Y. Ohshita, K. Yamaguchi, H. Motegi and M. Yamaguchi, *J. Cryst. Growth* **237-239**, 1394 (2002).
- [35] M. Ban, T. Hasegawa, S. Fujii and J. Fujioka, *Diamond Relat. Mater.* **12**, 47 (2003).
- [36] T. Hasegawa, K. Yamamoto, Y. Kakudate and M. Ban, *Surf. Coat. Technol.* **169-170**, 270 (2003).
- [37] M. Ban, T. Hasegawa, A. Goto, Y. Dake and Y. Kakudate, *Surf. Coat. Technol.* **169-170**, 332 (2003).
- [38] S. Ozawa and M. Hamagaki, *Vacuum* **74**, 417 (2004).
- [39] Y. Hashimoto, Y. Osato, M. Tanaka, M. Hamagaki and T. Sakakibara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 2249 (2002).
- [40] S. Tada, M. Ito, M. Hamagaki, M. Hori and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 6553 (2002).
- [41] T. Mori, M. Hiramatsu, K. Yamakawa, K. Takeda and M. Hori, *Diamond Relat. Mater.* **17**, 1513 (2008).



いち きりゅう た  
市 來 龍 大

大分大学工学部助教。福岡県北九州市出身。主な研究分野は、プラズマによる金属の処理およびプラズマ中の波動。基礎と応用の二足のわらじを履くため、自分なりに努力をしている最中。ジョギングを始めるも、ビールっ腹が全く引込まず。(写真：脂っこいものが苦手なのに中国で機嫌良く北京ダックを喰らう。案の定体調が悪くなり、学会のバンケットを欠席したとかしなかったとか。)



はら たみ お  
原 民 夫

豊田工業大学X線レーザー・プラズマ工学研究室。主な研究分野：プラズマ工学。特に電子ビーム励起プラズマおよび大気圧プラズマの表面改質への応用を研究している。また、再結合プラズマ法による小型X線レーザーの開発の夢を諦めきれず、現在も高出力化の可能性を追求している。