

極低エネルギー広域電子線照射装置の開発

Ultra-Low-Energy Wide Electron Exposure Unit

神戸造船所 米子明伸^{*1} 大野幸彦^{*2}
 徳永一敏^{*2} 岸本純一^{*2}
 技術本部 若元郁夫^{*3}

印刷等塗布物の表面乾燥，樹脂・建材等の表面加工，食品容器等の表面殺菌などの分野では，従来，熱や紫外線が利用されてきたが，近年，これらの処理法より広い領域を同時に，高速かつ低運転コストで処理することができる低エネルギー広域電子線処理が注目を集めている．しかしながら，従来法と比較して，初期投資が大きいこと，保守性が劣ること等から一般工業界への普及が進んでいないのが実状である．これらに対応すべく，装置コストを抑え，保守性を向上させた一般工業界向けの極低エネルギー広域電子線照射装置 MIWEL (Mitsubishi Wide Electron Exposure Unit) を開発した．

Heat and ultraviolet ray processes are used in surface dryness of paint, surface treatment of construction materials and surface sterilization of food containers. A process using a low-energy wide-area electron beam (EB) has been developed that features high speed and low drive cost. EB processing is not widespread in general industry, however, due to high equipment cost and difficult maintenance. We developed an ultra-low-energy wide-area electron beam exposure unit, the Mitsubishi Wide Electron Exposure Unit (MIWEL) to solve these problems.

1. ま え が き

電子線や紫外線が物質表面に照射されると，被照射物質の重合反応，架橋反応や細胞の活性化（破壊）などを引起す．これを利用して，印刷インクの乾燥処理，高分子樹脂の表面硬化処理，建材の表面加工，食品容器表面の殺菌処理などが行われている．この表面加工処理に使用されるのが低エネルギー電子線照射装置や紫外線ランプである．前者は，真空中で加速した低エネルギーの電子線を射出窓を介して大気中の物質に照射させる装置である．ここで，加速エネルギーが 300 keV 以下のものを低エネルギー，そのうち，100 keV 以下のものを極低エネルギーと称する．電子線の加速エネルギーが低いほど，射出窓での吸熱が大きく温度が上昇することから，エネルギーの低減には限界があった．このため，従来の電子線照射装置では，装置の小型化や電源の低コスト化に限界があり，また，電子線の影響を与えてはならない物質内部にまでその影響が及んでしまうという問題を有していた．さらに，陰極，陽極等の交換部品の取扱いが複雑で，紫外線ランプに比べて保守性が劣ることから，紫外線ランプが一般工業界で先行して普及しているのが実状である．しかしながら，加工処理能力が高く，熱に弱い対象物も加工可能である等，生産性，機能性の観点で優れる電子線照射加工のニーズは大きく，これに対応して，当社では，射出窓の熱問題を解決した極低エネルギー電子線照射の実現により装置コストを抑え，かつ，保守部品のカートリッジ化による保守性に優れた極低エネルギー広域電子線照射装置 MIWEL (Mitsubishi Wide Electron Exposure Unit) を開発した．本装置では，物質の極く浅い表面のみを広域に高速処理することが可能である．本報

では，この装置の特徴を解説するとともに，電子線照射装置の適用先について紹介する．

2. 装置構成概要

低エネルギー電子線照射装置の構成を図 1 (a) に，概要を以下に述べる⁽¹⁾．

2.1 基本構成

低エネルギー電子線照射装置では，三極管と同様，熱電子を放出する熱陰極と，そこから電子を引出すグリッドと，その電子を加速させる陽極とから成る．この加速に要する陰極－陽極間の電位差を加速電圧といい，電子に与えるエネルギーとなる．主な構成要素は加速電源，照射部及び制御部であり，詳細は以下のとおりである．

- (1) 電子加速電源は，電子の加速に必要な高電位差を作り出し，電子線照射部に供給する．
- (2) 電子線照射部は，熱陰極，グリッド及び陽極で構成される．電子の加速にはガスが障害物となるため，電子線照射部は真空排気装置により高真空に保たれている．そして，この電子を陽極の機能を持合せた射出窓（真空隔壁）を介して大気中に取り出し処理物に照射させる．
- (3) 電子線制御部は，陰極の温度を所定の温度に保つ加熱電源，熱陰極から電子を引出すグリッド電圧（高電圧ほど電子は引出されやすくなる）を操作するグリッド電源及びこれらの電源等を制御するシーケンサで構成される．

2.2 装置外観

今回開発した極低エネルギー電子線照射装置外観を図 1 (b) に示す．研究施設に設置したもので，照射部を収納する真空容器と電源タンクが見えている．また，製品 (MIWEL) イメ

*1 原子燃料・バックエンド設計部量子システムグループ長

*2 原子燃料・バックエンド設計部量子システムグループ

*3 広島研究所応物・振動研究室長

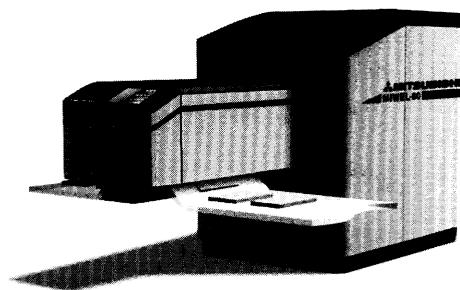
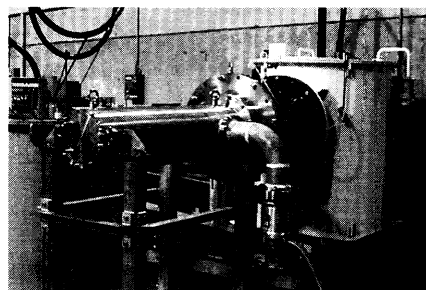
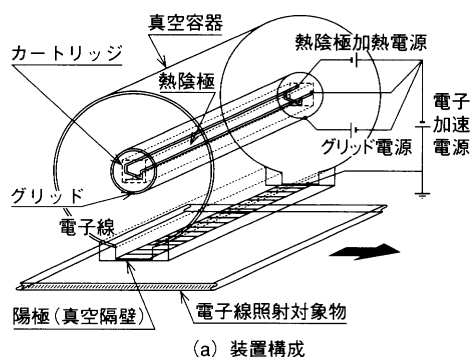


図1 装置の構成及び外観 熱陰極等が真空容器に収納され、電源タンクとつながっている。これら全体がX線遮蔽機能を持つケーシングで覆われている。

View of Mitsubishi wide electron exposure unit

ージを図1(c)に示す。図1(b)の真空容器等がケーシングに収納されたものとなる。

3. 装置の特徴

極低エネルギー電子線照射装置の主要仕様を表1に示す。これらの仕様を満たすための装置の特徴は以下に述べるとおりである。

3.1 出力特性

熱陰極から放出される電子電流の大きさは、熱陰極の材料物性及び温度の関数として以下の式で表される⁽²⁾⁽³⁾。

$$J = AT^2 \exp(-e\psi/kT)$$

ここで、

J : 放出電流密度 (A/cm^2)

T : 熱陰極絶対温度 (K)

A : Richardson 定数 [$A/(cm^2 \cdot K^2)$]

e : 単位電荷 [$=1.6 \times 10^{-19}$ (C)]

ψ : 仕事関数 (V)

k : ボルツマン定数 [$=1.38 \times 10^{-23}$ (J/K)]

熱陰極又は熱陰極を加熱するヒータに所定の電流を流して熱陰極を所定の温度まで加熱することにより、必要な放出電流密度を得る。出力特性の一例として、熱陰極を所定の温度に上昇させた状態で、グリッド電圧をパラメータとした加速電圧とビーム電流との関係を図2に示す。ビーム電流及びグリッド電圧はそれぞれビーム電流の最大値を1として規格化、また、グリッド電圧の最小値を1として規格化した値である。加速電圧 80 keV 以上でビーム電流依存性は見られず、また、グリッド電圧が高いほど、ビーム電流が大きくなっている。

3.2 照射均一性

電子線照射装置の適用先は、シート状のものが多く、照射幅は最大で2 m クラスまで要求されることが多い。この照射幅に対応し得るか否かは、得られる電子線の幅方向での均一性が確保できるか否かにあるが、電子線の放出特性は前述のとおり熱陰極の温度で決まるため、熱陰極温度分布を均一にすることが必要となる。そこで、陰極形状を面状とする等表面積を大きくして陰極の局所的な温度上昇を抑え、温度分布が生じにくい構造を採用するとともに、加熱電流を供給する電極を太くすることで電極抵抗を極力小さくし陰極に流れる加熱電流の分布を抑えるようにしている。この陰極の採用によ

表1 MIWEL 基本仕様
Specification of MIWEL

項目	仕様
電子エネルギー	80~120 keV
電流値	1 mA/10 mm 照射幅 @80 keV 時
照射幅	450~1 000 mm
酸素濃度	20 ppm @搬送速度 400 mm/min 時
X線遮へい	自己遮へい型

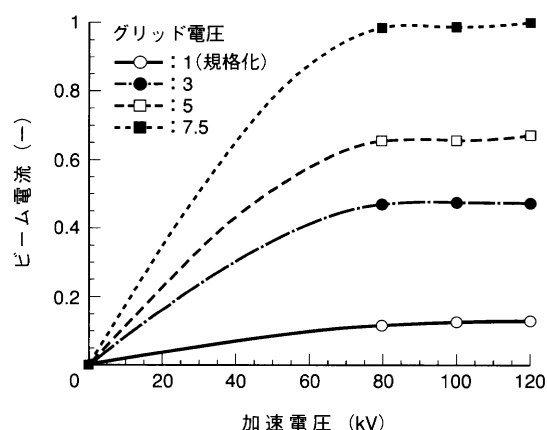


図2 加速電圧とビーム電流特性 加速電圧 80 kV 以上ではビーム電流一定で、グリッド電圧が高いほど、ビーム電流は大きくなっている。
Properties of electron beam current and accelerate voltage

り、照射幅の拡張性にも対応できるようになっている。

3.3 出射窓の冷却機構

従来の電子線照射装置では、出射窓での熱問題により 100 keV 以下のエネルギーを持つ電子線を出射することは困難であった。これは、低エネルギー型電子線照射装置が真空中で加速した電子のエネルギーを利用して出射窓を透過させる方式であり、エネルギーが低いほど窓での電子エネルギーの吸収が大きくなるため、窓が加熱されることに起因している。例えば、電子のエネルギーが 300 keV の場合の窓の加熱量を1とすると、150 keV の場合は2、100 keV の場合は3、80 keV の場合は4となる。通常、出射窓の大気側に冷却ガスを吹付けて加熱された窓を冷却する対策を行っているが、吹付

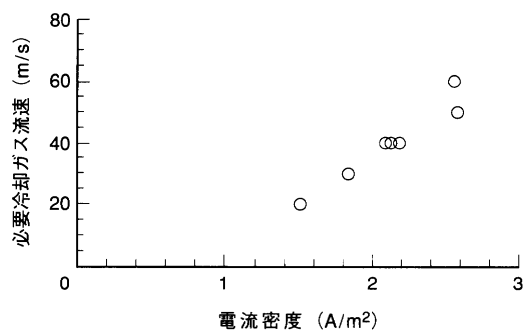


図3 出射窓の冷却特性 電子エネルギー 80 keV, 出射窓材質 Ti (膜厚 5 μm) の場合の、電流密度と必要冷却ガス流速の関係を示す。
Properties of window cooling

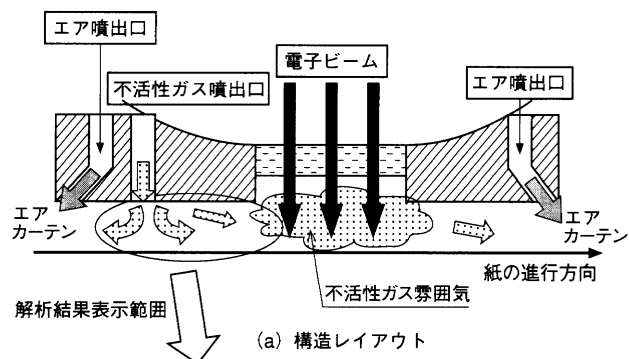
けによる除熱効率が悪く、電子のエネルギーが 100 keV 以下となると、吹付けガス量が膨大となり、運転コスト増やガス圧上昇による窓材料の破損につながる可能性があるため、この対策は有効ではなかった。そこで、本装置では窓を二重構造とし、中空域に限定して冷却ガスを循環させ、効率良く窓材料を冷却する構造を採用し、80~100 keV のエネルギーにも対応し得る冷却ガス流速を確保できるようにした。電子線照射電流密度に対する必要な冷却ガス流速の関係を図 3 に示す。なお、本装置では、電子線は窓を 2 回透過する必要があるため、エネルギー損失が大きくなるため、真空隔壁としての機能が要求される真空側窓には、強度や密封性を兼ね備え、かつ、電子が透過しやすいように 5 μm のチタン薄膜を、真空隔壁としての機能が要求されない大気側窓は透過性を優先しアルミニウム合金等を採用する工夫を行った。

3.4 不活性ガス置換機構

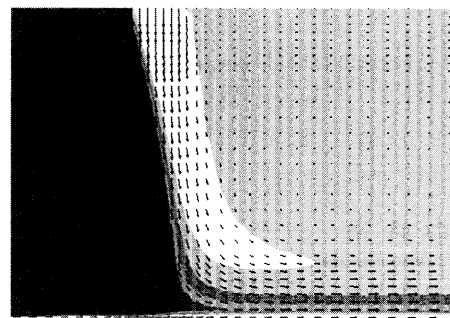
電子線照射の適用先の一つである高分子の架橋反応では、酸素が反応を抑制する作用を及ぼす。したがって、この反応を利用する場合には、電子線が照射される領域を不活性ガス雰囲気とすることが必要となる。従来の電子線照射装置では、電子線照射部の大気側全体をケーシングで覆い、その中を不活性ガスで充填させて酸素を除外する構造となっているが、この方式では、高価な不活性ガスの消費量が多く、電子線加工の運転費を増大させる要因となっている。また、照射対象物の搬送速度が大きくなるとそれに付随する形で酸素が照射環境に侵入するとの問題もある。そこで、当社独自に開発した空気によるエアカーテンとの併用により搬送物付随酸素をシャットアウトし電子線照射部近傍のみを不活性ガスで置換する構造を採用した。構造レイアウトを図 4 (a) に、搬送速度 400 m/min 時における不活性ガス噴出部の酸素濃度分布解析結果を図 4 (b) に、同条件での電子線照射領域での酸素濃度試験結果を図 4 (c) に示す。これにより、不活性ガス消費量を抑えつつ、酸素濃度を 20 ppm 程度にすることが可能となっている。

3.5 保守性

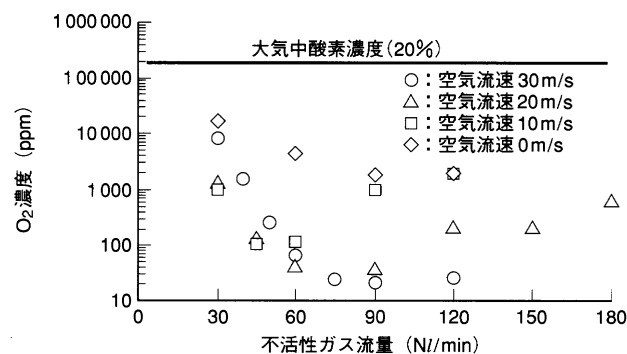
保守性を向上するには、長時間使用により劣化する部材である陰極、陽極等の交換部品の取扱性を向上するとともに、大気状態から真空状態への復帰時間の短縮を図ることが必要である。これらの点に着目し、交換部品をカートリッジ化し



(a) 構造レイアウト



(b) 解析結果



(c) 試験結果

図4 不活性ガス置換 エアカーテンとの併用により、電子線照射部の酸素濃度を 20 ppm 程度とできる。なお搬送物は 400 m/min の速度で送っている。
Exchange of non-activated gas

てワンタッチで取扱うことができるようにし、かつ、真空復帰時間を大きく左右する脱ガス量を極力抑えた材料・構造を採用した。交換部品のカートリッジ化の概念を図 5 に示す。

3.6 X 線遮へい構造

電子線が照射対象物に当たると、そこから X 線が発生する。X 線は人体に影響を及ぼすため、その遮へい構造を必要とする。特に一般工業界で使用する場合には、生産ラインの安全管理等の観点から電子線照射装置のケーシングに遮へい構造を有していることが望まれる。極低エネルギー電子線照射装置では、発生する X 線のエネルギーが低いこともあり、簡単な遮へい構造で防ぐことが可能であることから、電子線照射部近傍のみを遮へいして、既存生産ラインに組み込みやすとした。

4. 利用分野

電子線照射装置の適用先及び本装置のターゲットを図 6 に示す。通常、電子線照射量には吸収線量の単位である (Gy)

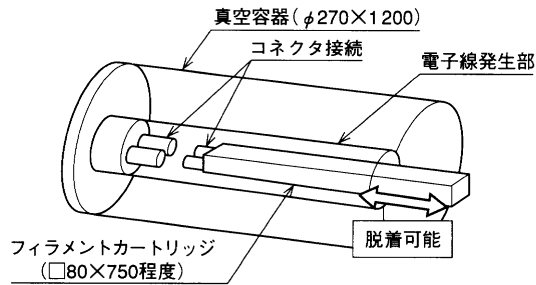


図5 カートリッジ概念 陰極部を簡単に脱着可能なカートリッジ概念を示す。
Concept of cartridge

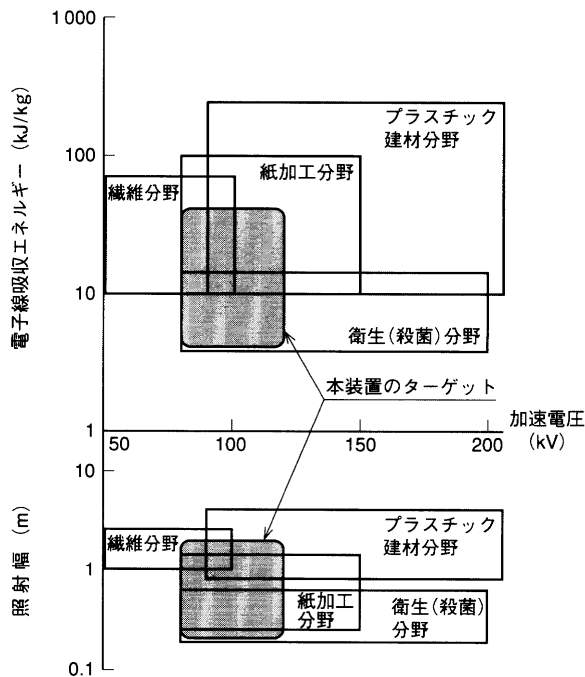


図6 極低エネルギー電子線照射装置の適用範囲・分野
極低エネルギー電子線照射装置を適用できる分野と本装置のターゲットを示す。
Application field of low energy electron exposure unit

が用いられるが、ここでは、照射対象物の単位質量当りの吸収エネルギー(kJ/kg)で表示している。なお、1(J/kg)が1(Gy)に相当する。

4.1 プラスチック・建材分野

プラスチック及び建材の表面に高分子樹脂塗料を塗布し、電子線照射による重合反応で塗料を硬化させ、耐気候性、耐薬品性及び耐熱性等を付与する表面加工が可能である。従来の塗料の場合、乾燥後も残留有機溶媒ガスが時間経過とともに大気に漏出され、シックハウス症候群を引起すことが問題となっており、今後、電子線照射による樹脂塗料硬化方法が普及していくと予測される。

4.2 紙加工分野

電子線を高分子樹脂に照射することで、印刷インクの硬化や、化粧紙加工等が可能である。紙に長時間電子線をさらすと、紙の劣化(しなやかさがなくなる等)が起るため、電子線の作用をインク等の塗布物に限定し得る極低エネルギー電子線の利用がポイントとなる。

表2 法的規制
Legal restriction

タイプ	極低エネルギー型	高エネルギー型
加速エネルギー	80~100 keV	1~10 MeV
原子力基本法に基づく定義	放射線ではない	放射線である
放射線障害防止法 〔加速エネルギーが1 MeV以上の電子線は放射線と定義され、この場合、放射線障害防止法の適用を受ける。〕	文部科学省への申請・届出不要	文部科学省への申請届出(以下)要 ・「放射線発生装置の使用許可申請書」 ・「放射線障害予防規定届」 ・第一種放射線取扱主任者の選定。
労働安全衛生法及び電離放射線障害防止規則(電離則)	所轄労働基準監督署への届出、標識の掲示、電子線照射装置設置計画の届出が必要である。	左記以外に、管理区域の明示、警報装置の設置、定期的な健康診断などが必要である。

4.3 繊維分野

高分子のグラフト重合反応を利用した繊維への難燃性の付与等も可能である。紙と同様、繊維そのものの電子線照射による劣化が問題であり、極低エネルギー電子線の利用が不可欠である。

4.4 衛生(殺菌)分野

電子線により、食品容器表面付着菌の殺菌等が可能である。電子線照射による殺菌は、細菌、かび等の微生物細胞のDNAを破壊する直接作用と、水分中に、殺菌性の高いラジカル水等を発生させる間接作用の複合で行われる。

5. 法的規制への対応

エネルギーの大きさに対応した法的規制の内容を表2に整理して示す。一般的に電子線は放射線の一種と見なされているが、低エネルギー(法的には1000 keV未満)であれば、原子力基本法の範ちゅうに含まれず、厳しい法的規制を受けることはない。

6. あとがき

低エネルギー電子線加工は、熱や紫外線加工などの従来方式より生産性・機能性に優れた面を持っており、近年、その利用分野は徐々に拡大しつつある。しかしながら、設備コストが高い、保守性に劣る等の観点から、一般工業界への普及が十分に進んでいないのが実状である。このような状況の中、これらの課題を改善し得る種々の工夫を施した極低エネルギー広域電子線照射装置を開発した。今後、本装置が一般工業界に受け入れられ、利用が広がっていくことを期待したい。

参考文献

- (1) 坂本良恵, 実務者のための電子線加工(新高分子文庫27), 高分子刊行会(1989)
- (2) Espe, W., Werkstoffkunde der Hochvakuum Technik Band I, Deutscher Verlag der Wissenschaften(1959)
- (3) Smithells, C. J., Metals Reference Book Vol.2, Butterworth Scientific Publication(1955)