

# 電子ビームの工業応用

大阪大学工学部通信工学科 熊谷三郎  
中西義郎

## 1. はじめに

高真空中で加速された電子が物体に衝突すると、電子のもつていた運動エネルギーのほとんどすべて（90～95%）が熱エネルギーに変換される。したがって物質を高速度に加速した電子ビームで衝撃することによつて衝撃部分を加熱し、熔融あるいは蒸発させ、結果として溶解・溶接あるいは穿孔・切断・蒸着などの機械的な加工を行なうことができる。

電子ビームのこのような形での応用が“電子ビームの工業応用”と呼ばれる技術分野であるが、最近とくに脚光を浴びるようになってきたのは電子ビームを応用した加工装置がいままでの旋盤・ボール盤・アーク・電気炉などの加工装置にない優れた特徴をもつこととそのような特徴をもつた加工が絶対不可欠といつていい程の高級な加工技術を要求する加工対象が続々と登場してきたことによる。

このような装置の研究開発は全然新しいというものでなく、その動きは10年以上も前にさかのぼることができる。すでに Curl Zeiss (西独)・Saclay (仏)・General Electric (米)・Edward High Vacuum Ltd (英) をはじめとする欧米の各社で電子ビーム溶接機・電子ビーム加工機などが手がけられており、とくに溶接機は多くの工場で実用の段階に入つているともいわれている。

わが国でも、多少遅れた感はあるが、すでに学界で取上げられているほか、日本電子光学研究所において溶接機が、電々公社と日立製作所との間で加工機が、また日本真空技術株式会社では熔融炉が一応の完成をみている。

以上のように電子ビームを応用した工業装置は現段階でもかなり具体化しているが、今後さらに開発が進められますますます発展を遂げることは想像に難くないので、ここではこの種の装置のもつ特徴を焦点にして具体化されている装置を概説することにする。

## 2. 電子ビームを応用した工業装置概説

### 2・1 電子ビームの熱源としての応用

電子ビームが物体に衝突すると、もつていたエネルギーは熱エネルギーに変換され、衝突部分を加熱すること

は陰極線の発見当時から知られていたことであり、またこれまでの数多くの電子ビームの応用において経験されてきたことである。

電子ビームのこのような加熱作用に注目した場合、電子ビームを熱源として利用する可能性が出てくる。しかし、ただそのような現象があるだけでは実用的な熱源として成立つものでないが、電子ビームには

- (1) 電磁界によつてその通路が制御され、その場合極めて光線と類似した挙動を示す。
- (2) 放出された後において電界によつて加速され放出時にもつていたエネルギー以上の高いエネルギー状態にすることができる。\*

という性質があるので、これらの性質をうまく利用すれば、高速度に加速した電子ビームを光学的に制御することができる。したがって、電子ビームによつて光学的な精密さで極めて大きなエネルギー密度を取扱うことができ、エネルギー密度においてまた精密性において今までに知られている熱源よりはるかに優れた熱源を実現することが期待できる。

このような見通しをもちうることで電子ビームを工業的な熱源として物質あるいは物体の加工処理に応用しようとする基本的な立場になると考えられる。

### 2・2 電子ビーム応用装置の特徴

前項の線から熱源として電子ビームを応用した装置によつて極めて特徴のある加工処理ができる筈でありまたその特徴を活かすところにそれを実用する意味があるといえるが、その特徴とするところを以下にもう少し具体的にしてみる。

- (1) エネルギー集中度が極めて高い。

電子ビームの加速電圧を  $V$  [ボルト]、ビーム電流を  $I$  [アンペア] とすれば、このビームのもつ電力は  $IV$  [ワット] であるが、この電子ビームが  $A$  [ $\text{cm}^2$ ] の断面積に集束されて被加工物を衝撃したとすると、そこでの発熱量を決めるエネルギー密度は

$$VI/A \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

となる。この値を数値的にあたってみると、現在の技術

\* この性質は電子ビームが光線と本質的に区別されるもので、光線ではそのエネルギーは放射線の温度に依存し、放出後においてそのエネルギーを高めることはできない。

で $10^9$ 程度にまで上げることが可能であり、表1に大体的な比較を示すように、溶接焰やアークなどに比べて著しく大きなエネルギー密度である。

第 1 表

熱 源	最小加熱断面積 ( $\text{cm}^2$ )	最大エネルギー密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
溶 接 焰	$10^{-2}$	$10^4$
ア ー ク	$10^{-3}$	$10^5$
電 子 線	$10^{-7}$	$10^9$

したがってエネルギー利用の点で極めて能率的な熱源となるほか、高融点材料の加工処理および極めて微細な加工処理に特色を発揮する。

(2) 加工による変形が少い。

被加工物は電子の衝撃によつて圧力をうけるが、電子の質量 $9,1085 \times 10^{-31} [\text{kg}]$ という極めて小さいものであり、かなりの速度となつたとしても運動量は極めて小さくよつて圧力もまた小さい。圧力 $P$ は

$$P = \frac{I}{A} (2mV/e)^{1/2}$$

$V$  : 加速電圧

$I$  : ビーム電流

$A$  : 断面積

$m$  : 電子の質量

$e$  : 電子の荷電量

となるが、 $V = 100 [\text{KV}]$ 、 $I = 1 [\text{mA}]$ 、 $A = 2 \times 10^{-3} [\text{mm}^2]$ の数値例で $P$ は約 $5 [\text{g}/\text{cm}^2]$ となり、加工にあつて考慮する必要のない程度に小さいものである。

このように機械的な圧力をほとんど加えずに加工できるので、被加工物に歪を発生させることが少なく、歪の発生を避けねばならないという意味での質的に高度な加工処理が可能となるほか、機械的に脆い物質（宝石、陶磁器など）の加工処理を可能にする。

(3) 工程の清潔さ。

高速電子ビームを用いるため、製造内部は常に $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mmHg}$ 程度の高真空に保たれる必要があるが、このため大気中やガス中の加工処理に比べて酸化などの汚染現象の極めて少い加工処理になる。

したがって加工部の均一性を望む加工処理に適當であるほか、化学的に活性な物質の加工処理に適用できる。

(4) 工程に優れた管理性をもつ。

電子ビームでは電流値の制御、したがって加熱温度の制御が容易で、広い範囲にわたつて温度が得られまた急冷急熱の操作も可能である。さらに電磁的な偏向によつて衝撃位置の制御もできる。

したがつていずれの加工処理においても工程管理を行ない易く、さらに全自動化も可能である。

### 2・3 電子ビーム応用装置の構成

後節で述べるように目的とする加工処理の種類によつて、装置の構成もかなり違つたものになるが、基本的には、

(1) 電子銃部：電子放射陰極から電子を放出し、これを加速する。

(2) 集束レンズ系：電子銃を出た電子ビームを集束しその焦点を被加工物にあわせる。

(3) 偏向系：電子ビームをふらせて、衝撃位置を制御する。

(4) 加工室部：単に被加工物を保持するだけでなく、必要に応じ水平、廻転、傾斜、上下運動を行なえるようにする。

(5) 観測系：電子ビーム衝撃位置を確認する。

を密閉室中に配置し、内部を真空に保つための

(6) 排気装置

および別にユニットとしてまとめた。

(7) 電源装置

からできあがることはいままでに述べてきたところから推察できよう。

したがつて、電子ビームを熱源として応用する装置は電子工学の分野で開発されてきた諸装置からみると加熱作用を応用するという点で違つたものであるが、電子ビームを放出し、加速し、制御するという技術は本質的に異なつたものでない。よつて装置の構成に関しては電子工学の分野で開発された電子ビームに関する技術が主体的な役割を演ずる。電子顕微鏡に関する技術、高出力マイクロ波音における技術はもつとも参考になるものである。

### 3. 各種装置

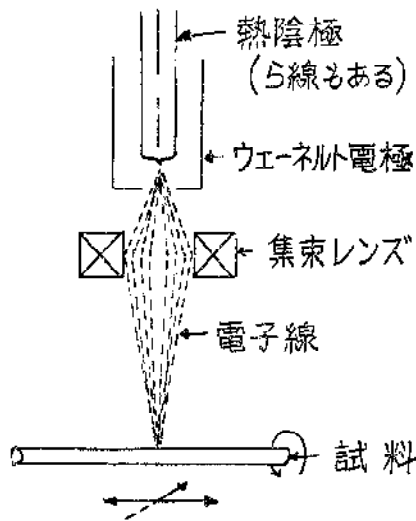
電子ビームを応用した加工処理はその対象によつては極めて有効な加工手段となるので、今後大いに開発が進められるものと見られるが、現段階でも各種の装置として具体化されているのでそれらを参考にして個別に述べてみる。

(1) 溶 接 機

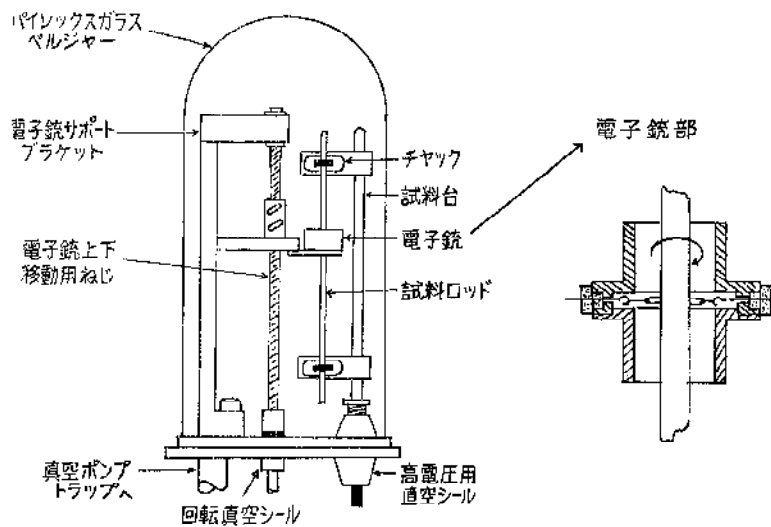
電子ビームを応用した加工装置のうちではもつとも早くから商品化され、すでに欧米で実用の段階にある。とくに原子力工業、ロケットおよび航空機工業、エンジンおよびタービン工業あるいは電子工業などの分野で利用度が高いとされているが、それは電子ビームによる溶接では従来の方法に比べてエネルギー集中度が極めて高いため溶解中に対して溶解の深さが著しく大きく、かつ歪の発生が少く汚染が少いので質点にみて完全な溶接部が

得られ易いこと、局所的な溶接ができることおよび難融点金属（タングステン、モリブデンなど）の溶接ができることによる。

現在のところ溶接機に対する考え方には2通りあるようで、米国系の精密度では劣るがなんでも簡単に溶接しようとするものとドイツ系の精密加工すなわち微細部分の溶接を重点にするものがある。したがって構造的にもちがったものになり、前者では電圧が低くて大電流を扱いはば図1に示すようなものになるが、後者では後述するような微細加工機と類似したものになり高電圧・小電流装置となる。



第 1 図



第 2 図

(2) 溶解炉

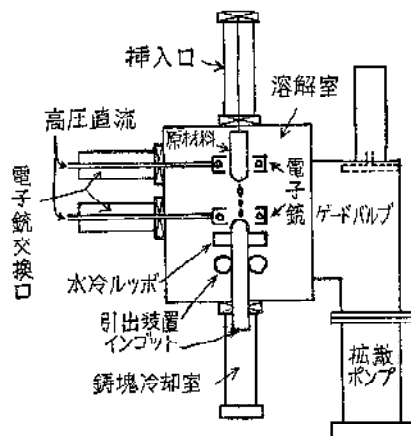
電子ビームを熱源とする物質の溶解では、難融点物質の溶解が可能であることおよび化学的に活性な物質の溶解において汚染が少ないことが期待できるほか、加工処理技術において広い範囲にわたって温度が変えられること、加熱冷却速度の選択制御ができることおよびルツボを使わないで溶解のできることが特色として取上げられ、電子ビーム溶解炉は以上の特質を活かした物質の処

理装置といえる。

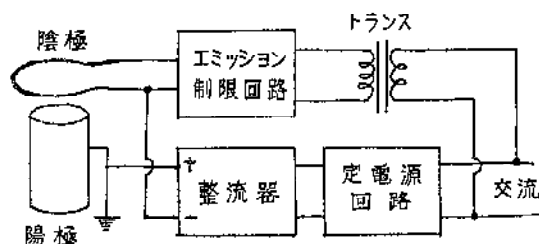
実際には電子ビームはまづフローティング・ゾーン・メルティングにおける熱源として適用されてきているが、これは被処理物の径の大きさに限界があるため装置全体があまり大がかりにならないためと思われる。現に報告されている例もすべて数mm径のものについてであり、必要加熱電力も126W~400W程度で設備している電源も3~5KV×0.3~0.5A程度のもが多くせいぜい10KV×0.5A程度までである。装置は図2に示すように構成されており、電子ビームの扱い方としては極めて簡単なものである。

いわゆる工業的なスケールでの溶解炉は、この種の装置としてはもつとも大きな電力を必要とする装置になるが、とくに大量の溶解を行なうと放出ガスのため真空度が劣化し電子ビームが不安定になるほか溶けた材料からの金属蒸気や飛沫などで熱陰極の損傷度が激しくなるので特別な考慮を必要とする。

図3は Temescal Metallurgical Cop. の炉で、電子ビームの扱いはフローティング・ゾーン・メルティン



第 3 図 (a) 溶 解 炉



(b) 電 源 回 路

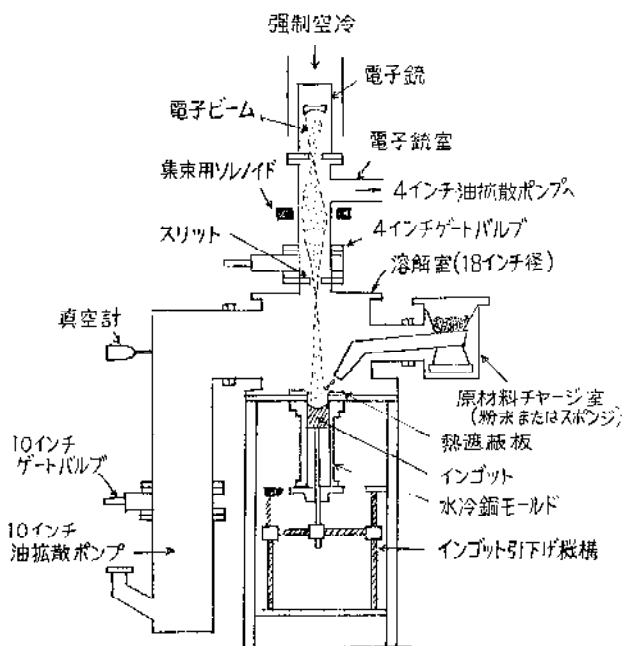
グの場合とほとんど差はないが、大容量の排気系を使うことと溶解室の真空度を破らずに電子銃を短時間で交換できるようにしてあるほか、真空度が下つて放電が起つても電流が増大しないように電源回路に制御装置をつけて装置上の問題を解決しているものである。なお下部の電子銃は上部の電子銃により溶解され滴下した金属を衝撃し溶融状態にある時間を延長するものである。

表2はこの溶解炉のデータの1例である。なお精製のための単位重量あたりの所要電力が Ta で 6~8 KWH/lb, Nb で 3~4 KWH/lb であり, Ta を焼結によつて精製する場合が 500KWH/lb であることから比較すれば電力費が極めて低廉であることをつけ加えておく。

第 2 表

電 源	30KW×2	225 KW
溶解能力	3吋径の Be 鋳塊を製造しうる	3~6吋径の Nb, Ta, Mo の鋳塊を製造しうる
拡散ポンプ	20吋6500l/sec	32吋×2
ブースターポンプ	180l/sec	34000l/sec

図4はNRC社の炉であるが、電子ビームの取扱いの点で進んだ形をとつており(さきに述べた構造に近い)、こうすることによつて溶解室と電子銃部を分離し被処理物質の溶解によつて発生する金属蒸気や放出ガスによる影響を軽減したものである。結果として真空ポンプも小さくできるし、また電源も大電流を制御する必要がなくなり、さらに被処理物を処理前にロッド状にする必要もないことが加わつて装置系を含めて処理のためのコストがかなり低下している。



第 4 図

生産用炉は20KV×3Aの規模で、径71mm、長さ400mmのTaのインゴットが生産されている。

日本真空技術KKの試作炉も多少異つた点があるが、NRC社のものと類似のものである。

(3) 加工機

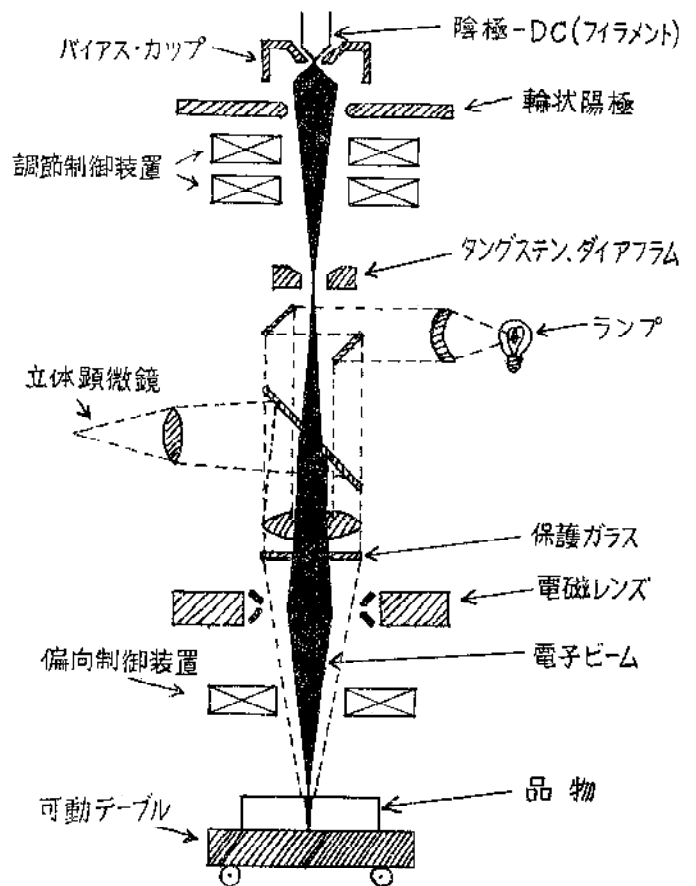
電子ビームによる穿孔、切断などの機械加工機は微細精密な加工を目的とする装置といえる。

したがつて、装置としては電子ビーム集束が十分に行なわれることがまづ必要であり、さらにできるだけ鋭い温度分布を得るために連続照射を避けて電子ビームをパルス状にして常に過渡状態で加熱するというような考慮があるほか、電子ビームの電流値あるいは衝撃位置の正確な制御を必要とする。

このため他の装置に比べてさらに高電圧を必要とし、操作機構が複雑になるので、その構造は技術的に高級なものになる。

図5はCarl Zeiss社の装置\*の主要部を説明したものであるが、ミクロン単位の超微細な加工が可能といわれている。

\*本装置は1962年4月第5回大阪国際見本市に展示されていた



第 5 図

通研および日立製作所の協同研究による電子ビーム加工機はまだ試作機の段階のものであるが、その構成はほ

ば似たものであり、表3に示すような諸元をもつものでタングステン板の穿孔、薄膜抵抗の切断、シリコンやゲルマニウム穿孔および絶縁物の穿孔などの試験加工が極めて容易に行なわれたと報告している。

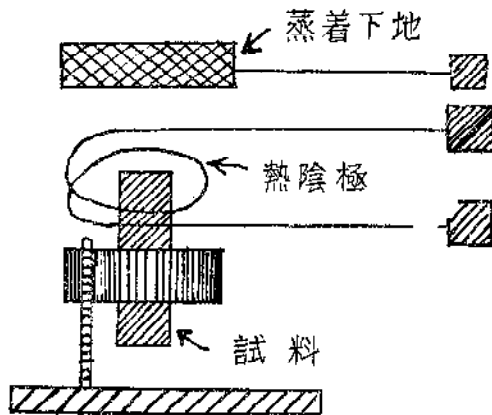
第 3 表

	小電流装置	大電流装置
電子加速電圧	10~100KV	10~100KV
最大放射電流	1mA	30mA
電子光学系	磁界型電子レンズ2段縮少	磁界型電子レンズ1段縮少
最小スポット径	3 $\mu\phi$ 以下	50 $\mu\phi$ 程度
最大電子流密度	10Amp/cm <sup>2</sup>	10Amp/cm <sup>2</sup>

(4) 蒸着装置

蒸着装置では電子ビームは蒸着物質を加熱して蒸発させる働きをするが、とくに電子ビームを用いることによつて真空中でルツボを使わない蒸発ができ不純物の入らない蒸着面を期待できることと縮小面からの蒸発ができるので小面積の蒸着に好都合であるとされている。

装置としては、目的に応じ集束電子ビームも用いられるが、簡単なものでは図6のようなものもある。



第 6 図

4. 今後の問題及び実用化に対する考慮

電子ビームを熱源として応用する装置のうちにはすでに商品化されるまでになつているものもあるが、装置として問題となる点がないわけではない。もちろん対象とする加工処理の種類、程度によつて変つてはくるが、一般的にいつてその主なものとしては、

- (1) 高真空でかつ真空度の一定保持
- (2) 衝撃位置の正確な確認
- (3) 被加工物の帯電防止
- (4) X線の発生(とくに125万ボルト以上の加速電圧になるとその発生量が無視できなくなる)に対する防護

があげられ、いずれも解決されたといつていいまでにはいたつていない。今後の開発を進めるにあたってはどうしても解決しなければならない問題である。

また各種の装置の具体的な設計にあつても、その基本的な技術には問題はないとしても、目的とする加工処理にもつとも適合した構成法や諸元の決定、またさらに機能の高度化を目指す場合における技術などについてはまだまだ検討すべき余地を残している。

さらに、一般工作機として広く実用していくには、従来の装置に比べて高電化、高真空を必要とした使用者が多くの場合この方面の知識にふなれであることも予想されるので、管理運転の面からこれらに対する優れた対策を考えることが重要であろう。このような観点からは思い切つて単能化し操作機構を簡単にした装置にするとか、装置は複雑になつても操作を完全に自動化してしまうというような進み方も考えてよいと思われる。

参考文献

- (1) 菅田；昭和36年度電気関係学会関西支部連合大会論文集 p. 333
- (2) 中村；電気通信学会誌, Vol. 45, No. 4, p. 451 (1962)
- (3) K.H. Steigerwald; Schweissen und Schneiden Tahrang 12, H. 3, p. 89 (1960)
- (4) 小野；電子科学, Vol. 12, No. 7, p. 49 (1962-7)
- (5) A.Lawley; Electronics, Sept. 4, p. 39 (1959)
- (6) 津谷；真空, Vol. 2, No. 5, p. 146 (1959)
- (7) 小宮, エレクトロニクス, Vol. 5, No. 5, p. 510 (1960-5)
- (8) S. panzen; Elek. Rdsch, Vol.15, No12, P. 567

協 会 通 信

日立精機の新研削盤

日立精機はこの程、GU型工具研削盤を発表した。これはフライスカッタータップ、リーマーなどの切削工具の研削を行なう機械で、①非常にコンパクトにできている。②値段が安い、③性能および精度が高いという特徴をもっている。とくに価格はいままでの同いどの機械が1台100万円以上していたのに対し今回のGU型工具研削盤は60万円以下に引下げられている。

三菱樹脂、人事異動

三菱樹脂KKは業務の拡充に応じ次の通り新担当者を決めた。

取締役総務部長、久野繁△経理部長心得、芦田正之△営業部長、尾方良祐△取締役生産部長末松幹△企画部長、武野貞明△取締役長浜工場長、大和田昇△大阪支店長、加藤豊太郎