

大阪大学工学部

荒田 吉明

1) 緒言

1870年 Crookes はすでに電子ビームによって物体が加熱されることを述べており、Nicolai Tesla は彼が得た“光の発生法”というパテントの中で真空ガラス球内のグラファイトを電子ビームで衝撃加熱するのがよいと述べている。その後 X線管球の開発者の一人である Von Pirani は X線ターゲットが電子衝撃で容易に溶融するのを知って、これを逆用することによって X線管球を加熱装置として活用し、1907年電子ビーム溶解炉についてのパテントを得ている。彼はこれによって高融点材料の溶解に成功したが、この装置には電子ビームの収束 (focusing) を考えていなかったため電子衝撃面積が広くいわゆる“エネルギー密度あるいはパワ密度”が小さくそのため通常のアーク熱源と同じように浅くて広い溶込みの溶融部しか得られなかったため、惜しいことに実際の溶接には用いられなかったのである。

その後電子ビームの制御技術がエレクトロニクスの発達とともに進歩したが、この制御は静電レンズと磁界レンズの二つの基本的制御要素によって行われ、いわゆる“電子光学”の発展を促した。そしてこれは電子ビーム溶接・溶断・穿孔などの場合においてまさにその根底をなす電子ビームの収束・制御に役立つことになった。すなわち1938年 M. Von Ardenne は電子ビームを加工熱源として用いることができることを提案、1948年 K. H. Steigerwald は深度の深い電子銃を開発し金属の穿孔および切断加工に採用、1954年 C.E.A. (フランス原子力委員会) が核燃料エレメントの接合に始めて“電子ビーム溶接”を用いた。そして1957年この C.E.A. の J. A. Stohr はパリで開かれた“Technical Symposium on Fuel Elements”の席上で最初の電子ビーム溶接機とこれを用いて得た溶接結果について詳しい報告を行った。この場合の電子銃は25000ボルトの通常の X線管球と同じものであるが、加工物を陽極とし、電子ビームをその面上で静電的に収束するようにしたもので極めて単純な構造をしていた。その後間もなく Stohr の発表と同じ年にこれとは独立的に米国の W. L. Wyman が実用的な電子ビーム溶接装置を作り核燃料の高融点材料の溶接を行った。このように Stohr の発表後1年を過ぎずして世界各国で新しい電子ビーム溶接技術についての研究・開発の報告がせきと切ったようになされ、10数年を経て今日の輝かしい電子ビーム溶接技術の基礎も確立したのである。

このような新しい電子ビーム熱源がアークなどの熱源と比較して本質的に相違しすぐれている点は Table 1 に示すようにエネルギー密度が極めて高く、その上これを自由に制御できることである。一般性のあるすぐれた熱源とは大きなパワ (出力) が得られることとそのパワ密度が高く、かつこれらの制御が自由にできることである。とくに溶接・溶断・穿孔などの加工熱源の場合には必須の条件である。

このような大出力超高エネルギー密度を持つ熱源の最大の特徴はその照射面で瞬間に溶融・沸騰・飛散の過程すなわち“穿孔現象”が進行し、深く細いセーム孔を作るが、それはセームとともに移動し、その周囲の溶融層によって移動領域が埋められる。これがいわゆる“深溶け込み”(deep penetration)溶接といわれるものであり、現在10~20cm程度の厚さのものでも一回のパスで溶接されてしまうのである。従来のアーク熱源であると100回以上のパスを必要とするのでこれを比較しても電子ビーム熱源がいかにすぐれた熱源であるかということがわかる。

電子ビーム熱源はこのような利点を最大限に活用するために今後益々大出力化に向うことが予想され数十cmにおよぶ超厚板材料の溶接とあるいは1インチ程度の厚さのものごと毎分数十m程度の驚くべき速さの超高速溶接法の開発がすすめられることになるとと思われる。

2) 高エネルギー密度電子ビームの特性

電子ビーム溶接は電子ビームの運動エネルギー($=\frac{1}{2}mv^2$; m, v はそれぞれ電子の質量と速さ)を利用している。電子に運動をあたえるもっとも有効な方法は電子を電場の中におくことつまり電位差(電圧) V_b [ボルト]を電子にかけて加速することである。電子は1個あたり e [クーロム]の負電荷を帯電しているため電子は V_b によって電場から eV_b [ジュール]のエネルギーを吸収して速度 v , 運動エネルギーとして $\frac{1}{2}mv^2$ をもつことになる。たとえばFig. 1に示すように電子に V_b をあたえるもっとも簡単な装置は真空室内にある2つの平行板である。電子を発生する陰極(電子の発生の仕方によって熱陰極形、冷陰極形、プラズマ陰極形がある)とこれを吸収する陽極との間に V_b [ボルト]をかけると電子は陰極表面を離れ陽極に向う。この場合陽極に吸収されずにこれを通過するよ

Table 1 各種熱源のエネルギー密度

熱 源		エネルギー密度 [W/cm ²]
電子ビーム レ ー ザ	パルス*	10 ⁸ 以上
	連続*	(10 ⁸ ~10 ⁹) 以上
	パルス*	10 ⁸ ~10 ¹¹
	連続*	(10 ⁸ ~10 ⁹) 以上
アルゴン・アーク (200 A)*		1.5×10 ⁴
酸素酸素ジェットバーナ*		3×10 ⁴
酸素—アセチレン炎*		10 ⁴
黒 体 放 射**		
6 500 °K		10 ⁴
11 500 °K		10 ⁵
20 500 °K		10 ⁶
36 500 °K		10 ⁷
65 000 °K		10 ⁸
115 000 °K		10 ⁹

(注) *: 実測値 ** : 計算値

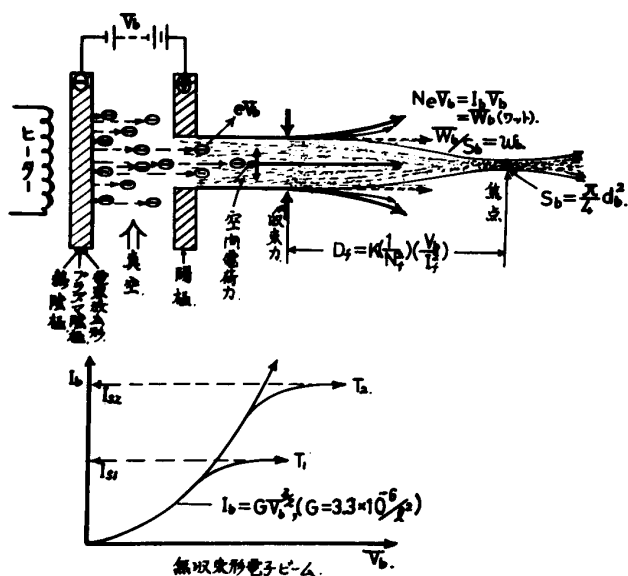


Fig. 1 平行板電場加速形電子ビームの I_b-V_b 特性
(ラングミュアの $3/2$ 乗法則)

うな工夫がされてあると電子はそれぞれ一個あたり

$$eV_b = \frac{1}{2} m v_b^2 \quad (1)$$

なるエネルギーをもって陽極をくぐりぬけて自由空間を飛行して放けることになる。そこで1秒間に陽極をくぐりぬける電子の総数を N 個とすればこれらは電子群の流れつまり I_b ($=Ne$) [アンペア]なるビーム電流をもつ電子ビームとなって自由空間を流れる。

$$NeV_b = I_b V_b = W_b \quad \text{[ワット]} \quad (2)$$

このような電子ビームの I_b と V_b はそれぞれ勝手に選ぶことができず Fig. 1 に示したようにいわゆる Langmuir の $\frac{3}{2}$ 乗法則にしばられる。

$$I_b = G V_b^{3/2} \quad (3)$$

ここに G はパービエンスと呼ばれここでは板間距離 l だけに左右される。(たとえば $G = 3.3 \times 10^{-6} / l^2$)。そこで電子ビームの出力は適当な G と V_b を選ぶことによって幾らでも大きくすることが原理的には可能であることがわかる。これは電子ビーム熱源がアーク電圧のほぼ一定なアーク熱源とは本質的に異なる1つの大きな特徴である。しかし実際にはたとえば陰極に熱陰極形を採用すると、その温度制限により(3)式は成立せず V_b を幾ら大きくしても I_b は一定となり、また V_b も実用的には制限があるので出力の実用的限界があらわれる。しかし1000キロワット程度は実用的に不可能ではない。このように電子ビームの出力は実用上自由にかつ容易に広範囲に変化させることが可能であることさらには電子ビームが軽くて電磁力に極めて鋭敏であるため大きな出力の場合でもその急速な変動やビーム軸、ビーム照射位置の急速な変動にも十分耐えることができるのでこのような性質は電子ビーム溶接の大きな特徴の一つになっている。

さて出力の大きい強力なビームは電子集団の空間電荷力のために発散し、ビーム直径が飛行距離とともに次第に広がってそのエネルギー密度が小さくなり、溶接には役に立たなくなる。そこで Fig. 1 に示すようにこの空間電荷力に打ち勝ってさらにビームを絞りあげるような電磁力が必要になる。特に溶接用電子ビームの場合は磁気レンズ(収束コイル)が用いられる。電子ビームは磁界の作用を強く受け($\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$)、Fig. 1 のように収束され焦点でもっとも強く圧縮されて、そのエネルギー密度は極大になる。このように磁界による電子ビームの収束性・圧縮性が極めてよく、そのエネルギー密度を自由にかつ容易にしかも急速に制御することが可能であり、Table 1 のような超高エネルギー密度が得られる。これはエネルギー密度一定であるアーク熱源とは根本的に相違するもっとも重要な性質であり、電子ビームが加工熱源として本質的にすぐれた点ということができる。いまこのようなビームの焦点でのビーム直径を d_b あるいはビームスポット $S_b (= \pi/4 d_b^2)$ 、その場合のエネルギー密度を W_b とすれば

$$d_b = K_c \left(\frac{I_b^{1.36}}{V_b^{2.05}} \right), \quad W_b = K_s \left(\frac{V_b^{5.1}}{I_b^{1.7}} \right) \quad (4)$$

ここに電子銃は Fig. 1 のような平行板ではなく焦点距離 f 、球面収差 C_f (C は収差定数)の電界レンズ系を持っているが、これと収束コイルによって得られるビームの実際の焦点距離(D_f)が得られると K_c , K_s は定数と考えてよい($K_s = f(D_f \cdot C_f) = \frac{1}{4} K_c^2$)。いまビ

ームパラメータとして任意の規準量にたいする無次元量の電流ファクタ $I_b^* (= I_b/I_{b1})$, 電圧ファクタ $V_b^* (= V_b/V_{b1})$, パワファクタ $W_b^* (= W_b/W_{b1})$, パワ密度(あるいはエネルギー密度)ファクタ $w_b^* (= w_b/w_{b1})$ を用いると(4)式は

$$\left. \begin{aligned} W_b^* &= I_b^* V_b^*, & \alpha_b^* &= I_b^{*1.4} / V_b^{*2.1}, & w_b^* &= V_b^{*5.1} / I_b^{*4.7} \quad \text{--- (a)} \\ W_b^* &= \text{const} \rightarrow & \alpha_b^* &= V_b^{*-3.4}, & w_b^* &= V_b^{*-6.8} \quad \text{--- (b)} \\ V_b^* &= 1 \rightarrow & \alpha_b^* &= I_b^{*1.4}, & w_b^* &= I_b^{*-4.7} \quad \text{--- (c)} \\ I_b^* &= 1 \rightarrow & \alpha_b^* &= V_b^{*-2.1}, & w_b^* &= V_b^{*5.1} \quad \text{--- (d)} \\ w_b^* &= \text{const} \rightarrow & I_b^* &= V_b^{*3} \quad \text{--- (e)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

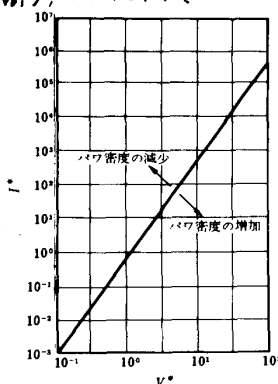
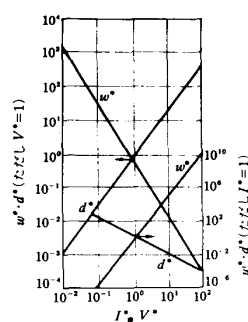


Fig. 2 (a)
ビームエネルギー密度を一定にする場合の電圧・電流の関係



(b)
ビームエネルギー密度とビーム径に及ぼすビーム電圧・電流の影響

$$\begin{aligned} w_b^* &= w_b/w_{b1} \\ V_b^* &= V_b/V_{b1} \\ I_b^* &= I_b/I_{b1} \\ \alpha_b^* &= \alpha_b/\alpha_{b1} \end{aligned}$$

w_b, V_b, I_b, α_b はそれぞれ
基準エネルギー密度, 電圧,
電流, ビーム直径

これを図解したもののが Fig. 2 であるがこれらを見てもわかるように空間電荷力の大きなビームでは加速電圧の作用はビーム電流にくらべて極めて大きくビームを絞りあげる作用は絶大である。ビーム電流はこの反対にこれを広げるように作用するがビーム電圧はこれをはるかにしのいで絞りあげるのに役立っている。空間電荷力のないとした場合は

$w_b^* = V_b^{*7} I_b^{*2.5}$ となりそれぞれの作用強度は小さくなるがビーム電流の作用は空間電荷力のある場合とは反対に僅かながらビームを絞るのに役立っている)

このような空間電荷力の強い電子ビームを加工熱源として用いる場合、同じパワであればビーム電圧の高いほどビームの特性を生かすことが容易に推測されるが、この点はビーム溶接現象の極限である穿孔加工のような場合に特に強調されるところである。しかし実際の電子ビーム溶接の場合には経験上(4)式あるいは(5)式で表えらるるほどこれらの作用強度は強くない。これは次のように考えられる。すなわち実際の溶接ビームは真空度がたかだか 10^{-4} mmHg 程度までであり 10^{-2} mmHg 前後の真空度から大気圧までの圧力空間で利用される場合が多い。このような場合はビーム自身の作るプラズマあるいはイオン(これをビームプラズマと呼ぶ)によって空間電荷がかなり中和され、空間電荷力のない場合に接近することとさらに後述するようにビームプラズマの存在によって収束磁場と同じようなプラズマレンズ作用による収束力がビームに作用するので(5)式とは違った新しい関係が発生するものと考えられる。このようなビームプラズマは V_b [ボルト] のビームがガス圧 p [Torr] のガス中を通過するとそので秒後に形成され、ビーム空間電荷の中和現象をひきおこす。

$$\tau = 1.7 \times 10^{-8} \left(\frac{1}{p \sqrt{V_b} \alpha_0} \right) \text{ (秒)} \quad \text{--- (6)}$$

ここに α_0 は微分電離係数で $V_b = 100$ [kV] とすれば空気の場合 $\alpha_0 = 0.2$ である。そこで $p = 10^{-4}$ [Torr] とすれば、 $\tau = 3$ [usec] となる。ビーム穿孔加工のような場合 $p = 10^{-6}$ [Torr] とすれば

ば $\tau = 300 [\mu\text{sec}]$ となり、 μsec 程度のパルスビームを用いるときは(5)式のようにビームパラメータの作用強度は強いことが考えられる。しかしビーム溶接の場合は一般に連続ビームを用いるのでビームプラズマの作用が十分作動しているとみなされる。ビームプラズマが形成されると Fig. 3 のように空間電位分布が著しく異なり、むしろビーム中心軸の電位がもっとも高くなり、その周辺に向かって僅かの電位降下を伴うようになる。これがビームに収束ピンチ力をもたらえることになり、いわゆるプラズマレンズを形成することになる。そこでビームパービエンス $G_b = (I_b/V_b^{3/2})$ をもつビームにたいし通常、収束コイルを用いた磁気レンズ的ピンチ力 F_m^* とプラズマレンズ的ピンチ力 F_p^* とを比較してみると

$$F_m^* = 0.06 G_b V_b^2; F_p^* = T_e^* (ボルト) \text{----- (7)}$$

これらのピンチ力の単位はボルトであらえている。 T_e^* は電子温度のボルト表示値である。このようなピンチ力によって最初のビーム径 d_{b0} は次のようにそれぞれ D_{fm} , D_{fp} の距離(焦点距離)に収束され焦点を結ぶ。

$$\left. \begin{aligned} D_{fm} &= 2.55 d_{b0} \sqrt{\frac{1}{G_b V_b}}; D_{fp} = 0.62 d_{b0} \sqrt{\frac{V_b}{T_e^*}} \text{----- (a)} \\ D_f^* (= D_{fm}/D_{fp}) &\approx 4 \sqrt{T_e^*/G_b V_b^2} \text{----- (b)} \end{aligned} \right\} \text{ (8)}$$

この関係は Fig. 4 に示している。 $D_f^* > 1$ であればプラズマ作用が強く $D_f^* < 1$ であれば磁気ピンチ力が強い。 $D_f^* \approx 1$ であればほぼ同程度の作用である。従ってこの場合のビーム電圧は $V_b = 4 \sqrt{T_e^*/G_b} \text{----- (9)}$

となるのでビーム電圧がこの V_b 値よりも小さければプラズマレンズが強く作用し、大きければ磁気レンズが強く作用する。たとえばビームプラズマの温度が 10^4K すなわち $T_e^* = 1 [\text{V}]$ では $G_b = 10^{-7}$ とするとビーム電圧が 10^4 ボルトでもなおプラズマレンズ作用がまぎっており、さらに $G_b = 10^{-8}$ では数万ボルトのビームにたいしても磁気レンズ作用に打ち勝つことになる。このような場合はプラズマの存在しない場合にくらべて各種ビーム関係式は成立しなくなる。



(a) $V_b = 700$ (b) $V_b = 350$ (c) $V_b = 4000$
(単位: mm)
Fig. 4 (a) プラズマレンズ作用

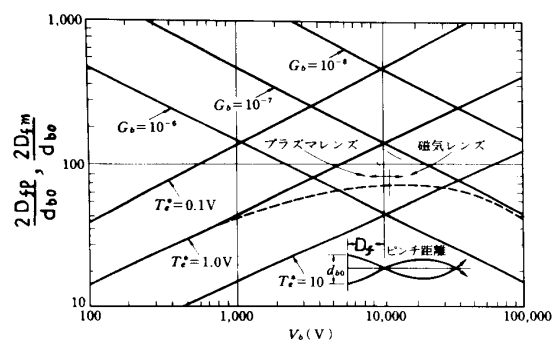


Fig. 4 (b) プラズマレンズと磁気レンズ作用強度の比較

いづれにしても溶接用電子ビームは出力を高くすることができ、ビーム電流を増大してもビーム電圧と収束コイルの電流を適当に調整することによってビーム直径を細くし電子ビーム溶接にもっとも重要なパラメータであるエネルギー密度を極めて高くすることができる。

さてこのようにエネルギー密度の高い電子ビームでも被加工材に十分な量だけ到達しなければ役に立たない。電子銃のノズルから射出された電子ビームはある程度のかす圧 (10^{-4} mmHg 程度から大気圧程度まで) をもった空間を飛行し溶接物に到達する。この距離を「作業距離」あるいは「溶接距離」(working distance あるいは welding distance) と呼び、また電子ビームの飛行可能な最大距離を「飛程」(Range) と呼んでそれぞれ D_w , R_e で示している。実用上 D_w は R_e の $1/10$ 以下にすることが必要である。すなわち発射ノズルから射出された電子ビームの 90% 前後のものが被加工材に到着することが望ましいのである。5 万ボルト程度までのビームについての飛程は

$$\begin{aligned} R_e &\approx 2.1 \times 10^{-12} V_0^2 / \rho, \text{ (cm)} \quad \text{--- (a)} \\ &\approx 2.8 \times 10^{-34} \left(\frac{T}{m} \right) V_0^2, \text{ (cm)} \quad \text{--- (b)} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} R_e &\approx 2.1 \times 10^{-12} V_0^2 / \rho, \text{ (cm)} \\ &\approx 2.8 \times 10^{-34} \left(\frac{T}{m} \right) V_0^2, \text{ (cm)} \end{aligned}} \right\} (10)$$

であらえらる。ここに ρ , m , T はそれぞれ雰囲気ガスの密度 [$\frac{g}{cm^3}$], 質量 [g], 温度 [$^{\circ}K$] である。10 万ボルト前後あるいはそれ以上のビームに対しては (10) 式は成立せずさらに複雑な計算を必要とするが筆者等の求めた計算式 R_e と (10) 式の R_e とを比較してデータは Fig. 5 に示す。Fig. 6 は筆者等の得たビーム軌跡およびビームプラズマであるが飛程は計算の結果と可成りよく一致している。

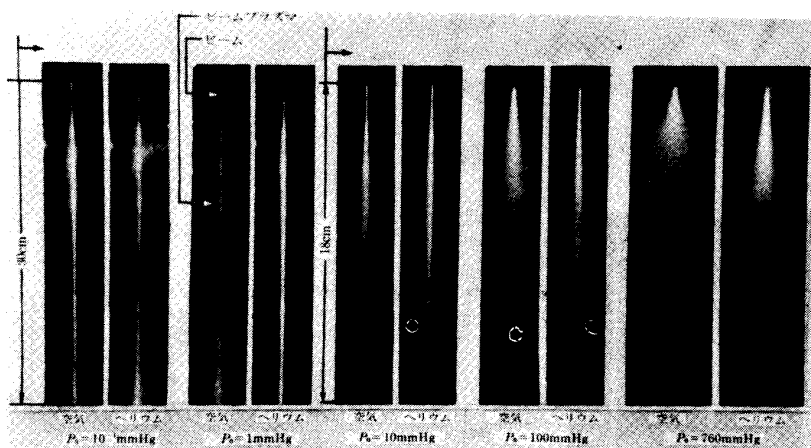


Fig. 5 各種ガス圧中でのビームおよびビームプラズマの挙動

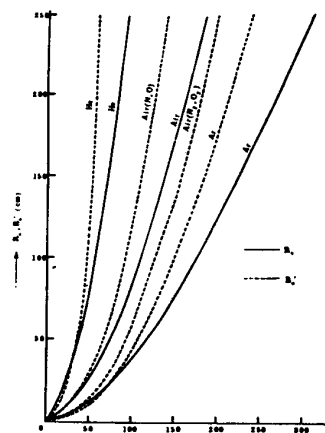
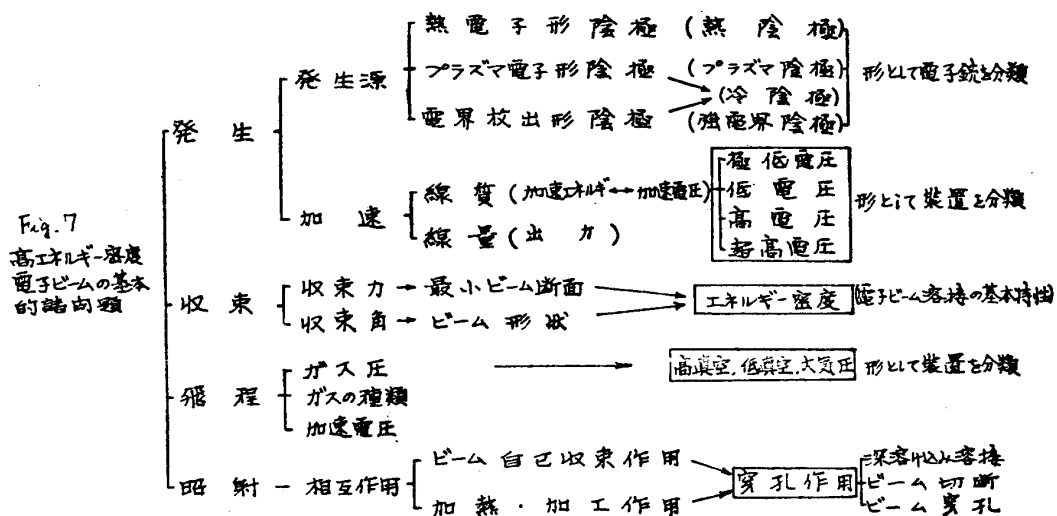


Fig. 6 各種ガスおよび各種温度における飛程 R_e と加速電圧 V_0 との関係



以上高エネルギー密度電子ビームの主要な特性について簡単にのべていた。これらの基本的諸問題を Fig. 7 にまとめた。

3) 電子ビーム溶接装置

高エネルギー密度電子ビームはFig.7のように発生・収束・搬送・照射の4つの基本的立場について考えらることを述べている。この中で特にビームの特性を決定する本質的な要素はそれによって装置を分類するほどの重要性をもっている。たとえば

Fig.8に示す

ように溶接

装置はビーム

の線質を決定する

加速電圧

によって分類

されまたビーム

搬送を決定

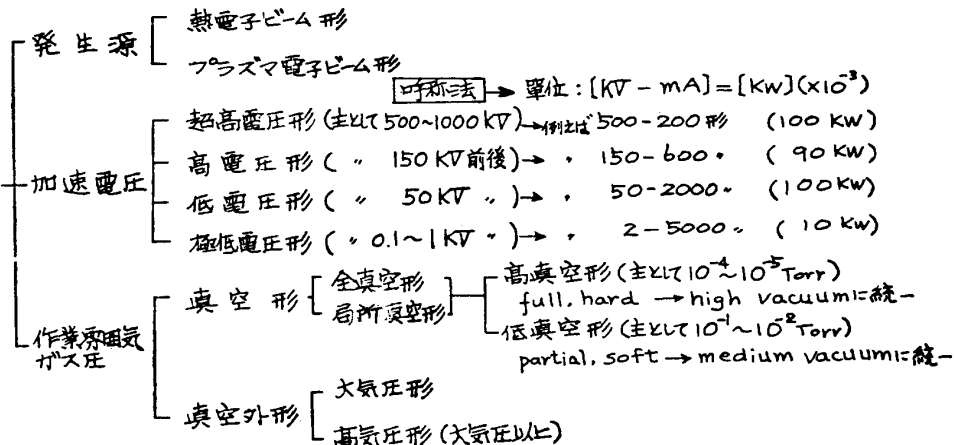
する雰囲気

によっても

Fig. 8

電子ビーム溶接装置

(電子銃固定形, 移動形とともを含む)



分類されている。前者は従来超高電圧形、高電圧形、低電圧形、極低電圧形などと呼ばれ、特にメーカー側の商品的小性能の立場から低電圧形、高電圧形と区別されていたが、これは全く誤っており、使用者側に非常に混乱をあたえている。これは電子ビームの質(kV)と量(mA)を明示する表現法をとるべきであると考えている。そのため筆者はたとえば50kV-300mAあるいは200kV-100mAの電子ビームを発生できる溶接機はFig.8にも示したように[kV-mA]を単位としてこれを50-300形あるいは200-100形電子ビーム溶接機と呼ぶ方が本質的な意味でよいと考えている。また50-300形溶接機を用いても実際の溶接の場合はたとえば40kV-80mAの電子ビームを用いることがある。この場合は"40-80電子ビーム" (簡単に"40-80ビーム")を用いてと明記すればよい。次に後者の場合には作業室のガス圧を基準にして真空形と真空外形(特に大気圧形)と大別され真空形には高真空形低真空形があり、従来メーカー側の商品的立場からそれぞれ full vacuum あるいは hard vacuum type または partial vacuum あるいは soft vacuum type などと呼ばれていたが、筆者が当初から主張していたように、アーク溶接学界でも最近これら high vacuum type と medium vacuum type と呼ぶようにそれぞれ統一されている。たとえば medium vacuum の日本語は中間真空(すべきではなくFig.8のように低真空とすべきである)と考えている。真空形はさらに溶接物全体を真空容器内に入れる"全真空形"と溶接個所だけを真空にする、いわゆる"局部真空形"がある。これらの装置はさらに固定形、移動形が考えらる。将来移動形電子ビーム溶接機(電子銃あるいは真空作業室の何れかが相対的に移動)はアーク熱源におけるサマージドアーク自動溶接法のように重要視されるであろう。Fig.9はFig.7の発想を具体化した熱電子形電子ビーム溶接機の原理図である。プラズマ電子ビーム溶接機は熱電子形にくらべ陰極の寿命は長いものの特性と数分単位以上の高出力化に問題があり、現在主として熱電子形が採用されている。熱電子形の場合でも近く100時間単位寿命をもつ電子銃が開発されるであろう。

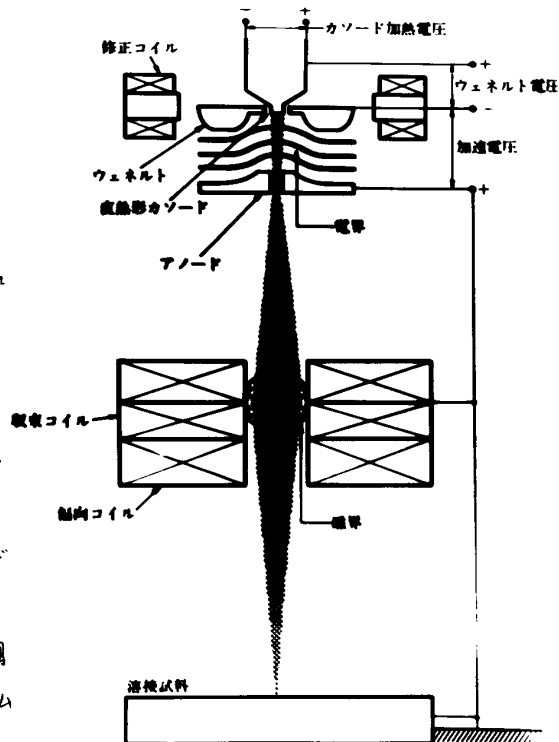


Fig. 9 電子ビーム溶接装置の原理図

毎分数十mぐらいの超スピード溶接が実現されるのではないかと思われる。

(2)移動形および回転形電子銃の開発

従来の溶接は固定形のものであったがちょうどサブマージド自動溶接と同じように自走電子銃あるいは自走作業室によって大形材が溶接できるような移動形電子ビーム溶接法がス〜3年後には実用化されるのではないかと考えている。この場合は溶接箇所だけ真空にする局所真空形および大気圧形が主要な役割を果たすことになるであろう。

(3)大出力大気中電子ビームによる高能率・高精度溶接・溶断法の開発

大気中電子ビームに必要な高電圧電子銃とビームチャネルの技術的確立によって次第に高能率高精度の大気中電子ビーム溶接・溶断法が実用化されるが、このメリットは非常に大きく自動アーク溶接法はもとよりスポットを含むその他の自動溶接法に比肩されるまでに成長するであろう。

(4)無人化あるいはロボット化電子ビーム溶接法の開発

電子ビーム溶接・溶断法は本質的に自動制御化に適しており流水生産工程に組み込むのに都合がよいので近い将来実用性の高い分野と考えられる。

(5)異種材料の電子ビーム溶接

この分野は今後ますます重要視されるであろう新しいインサート溶接法がここでは主役を果たすことになると思われる。

電子ビームあるいはレーザービームのような超高エネルギー密度をもって新しい熱源の今後の発展は目を見事しいものがあると思われる。わが国の現状は諸外国に比べ決して進んでいるとはいえないが今後の実用化の速度はさめめて早いのでその態勢を整える必要がある。

幸い電子ビーム溶接関係では溶接学会内に昨年電子ビーム溶接特別委員会が設置され活動を開始しており、国内はもとより諸外国との密接な連絡がもたれつつある。

最後に電子ビームとレーザービーム熱源の性能の比較であるが連続出力の場合、パワーとその密度はともに現在では前者が一桁以上高くまた効率も数倍まざっている。厚板溶接および高速溶接では前者がはるかにまざっている。しかしレーザービームは電子ビームのようにX線を放出しないし本質的に大気中で使用できるので操作および制御が楽である。おにレーザーは光であるからエネルギーを遠隔地や狭い場所、すみ内のような入りこんで場所あるいは外部から真空内の物体に照射することからできる利点もある。従って電子ビームは超厚材・超高速度溶接にはすべての溶接法に優先するであろうし、レーザービームは0.1mm以下の薄板材から20mm前後までの厚板材には電子ビームにまざる極めてすぐれた熱源として実用化されるものと思われる。すなわち電子ビームは100KW以上、レーザービームは10KW以上のものが溶接などの加工熱源として実用化される日は非常に近いと考えている。