

大気中電子ビームの発生装置とその応用

大阪大学工学部 荒田 吉 明

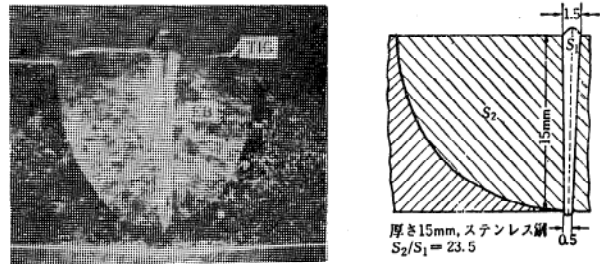
従来電子ビームは一般に真空容器内で利用されてきた。電子ビームがX線源ならびにすぐれた熱源であることは周知のごとくであるが、特に表1に示すように現在知られている熱源のうちでは最高のエネルギー密度をあたえ、 10^9 [watts/cm²] 以上にも達する。これはアーク熱源の実に10万倍に相当している。このような電子ビームの利点は図1に示すように従来真空中電子ビーム溶接の熱源として、すぐれた性能を発揮していることがわかる。しかしそれにも抱らず電子ビーム熱源がアーク熱源にくらべ、実用上熱源としての一般性に欠けていたのは全く電子ビームが真空容器内だけでしか利用できなかった点にある。すなわちこの真空作業室の大きさによって被加工物の大きさ・重量が制限されかつその出し入れのたびに排気操作の必要があり、作業の非効率化は著しいものがあって実用上熱源としての一般性に欠けたのである。

そこで筆者は真空作業室の全く不要な新しい大気中電子ビーム発生法を考案し、昨年我国で始めての大気中で操作可能な大気中電子ビーム熱源装置の試作に成功した。この装置によって大気中に誘導された電子ビームは容易に溶接・溶解・切断・穿孔などの加工熱源として、また真空状態から大気圧以上の高気圧状態に至る各種ガス圧中で連続的に生成される「ビーム・プラズマ」(電子ビームによって作られるプラズマを言う。この生成機構は主として直接ビームによって作られた低密度プラズマとそのビームとの相互作用で誘発される強い高周波電界—プラズマ振動近傍のモード—に基づく放電によるものと推論される。従ってこのような高密度ビームプラズマの形式現象を特に「ビームプラズマ放電」と呼んでいる。)の発生エネルギー源として利用されるが、さらに非破壊検査用としてはすぐれたX線源となり、また化学・冶金反応用点熱源として用いられる。

さて大気中電子ビーム発生装置の基礎は高エネルギー大容量の電子銃の開発と真空加速室から大気に至るまでのビーム誘導法にある。従来大気中電子ビームの実現が困難とされていた大きな理由の1つは電子ビームの加速室と大気との間のガス圧力差があまりにも大きいため、加速真空室を必要な真空度に維持するための真空ポンプの排気容量があまりにも巨大なものとなり、技術的に実現困難とされていたのである。電子ビームの加速はよく

表1 各種溶接熱源のエネルギー密度

熱 源	エネルギー密度 (Watts/cm ²)
レーザー	10^9 以上
電子ビーム	10^9 以上
アルゴンアーク(200A)	1.5×10^4
酸素—アセチレン焰	10^3
酸素—水素 ジェットバーナー	3×10^3

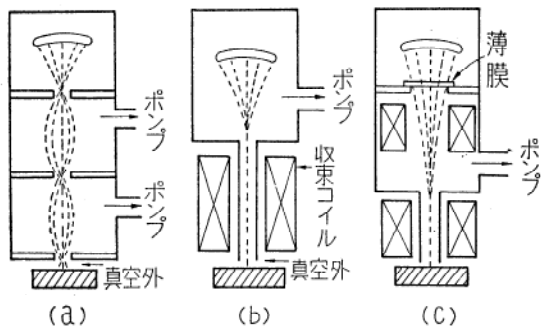


TIG アークと電子ビームによる溶融部の比較

図1 電子ビーム溶接法の特徴

知られているように、 10^{-4} [mmHg] 以上の高真空状態でないと、容易に放電を伴うので、有効に高エネルギーに達することは困難である。大気中電子ビームに必要なエネルギーは後述するように大体10万ボルト以上が望ましいので、加速真空室は大体 10^{-4} [mmHg] 以上の高真空度を必要としている。そこで大気中電子ビームはこのような高真空状態で加速された後、大きなガス圧の勾配領域をくぐりぬけて大気に突入することになる。このようなガス圧の大きな落差のために大気が加速真空室に向かって激しく流入するので、加速室を適当な真空度に維持するためには大容量の排気ポンプを必要とする。大気と加速真空室との間を「ビーム誘導路」と呼ぶことにすれば、この誘導路のガスの流通抵抗の大きさがもっとも重要な問題となる。流通抵抗の小さなものを選ぶと必要な排気ポンプの容量が天文学的なものになって大気中電子ビームを発生することはできなくなる。また流通抵抗をあまり小さくすると、熱源として必要な電子ビームを大気中に誘導することができなくなる。そこで問題は必要な

多量の電子ビームを誘導させることができると同時に、できるだけ経済的な立場から要求される最小の容量の排気ポンプですむような流通抵抗を持ったビーム誘導路をどのように設計したらよいかということになる。この問題解決のために現在原理的には図2に示す方式が提案されている。図2(a)²⁾は諸外国において利用されており、図2(b), (c)は筆者が1961年に提案したものであり、昨年試作に成功している¹⁾。(a)方式は小さな径をもったスリットを組合せたもので、ディフェレンシアル・ポンピングの方法によって大気と加速室との間のガス圧の落差を維持している。(b), (c)方式は細長いパイプ状の誘導路を用いたもので、排気系の技術的な配置を考慮すると、筆者の(b), (c)式の方がかなり流通抵抗を大きくすることが可能であるので、原理的にすぐれており、必要な排気ポンプの容量も小さくてすむことが知られている。(c)方式は(b)よりもさらに排気ポンプの容量は小さくてよいが、10万ボルト程度の低エネルギーには不向きで、1(MeV)



従来装置の原理図 現有装置の原理図
筆者の提案した装置の原理図

図2 大気圧電子ビーム発生装置の原理図

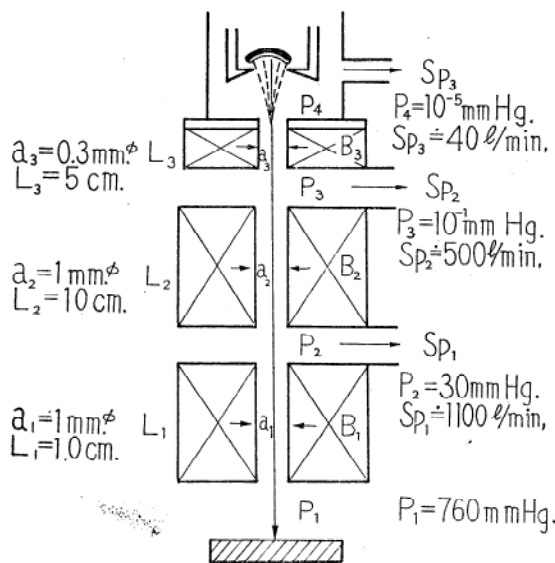


図3 大気圧電子ビーム装置の設計例

程度以上の高エネルギービームにたいして有効である。そこで(b), (c)に示すような誘導路の細管の直径を a 、長さを L とし、この中を通過するガスの流れを粘性流として、これにたいする細管のコンダクタンスを g_V とすれば、必要な排気ポンプの能力 S_P は

$$S_P = g_V(p_1 - p_2)/p_2 \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに $g_V = g^* g_m$ で g_m は分子流に対応し、 $g_m = 12.1 a^3/L$ である。また $g^* = 14.9 a \langle p \rangle$ であたえられ、 p_1 を高圧側、 p_2 を低圧側の圧力とすれば、 $\langle p \rangle = (p_1 + p_2)/2$ である。図2(b)および(1)式に従って計算した大気中電子ビーム装置の1つの設計例を図3に示した。さて次に問題になるのはこのような細管を通過する電子ビームの誘導方法である。誘導路の中は 10^{-4} (mmHg) 以上の高真空から大気圧に至るガス圧まで連続的に分布しており、ビームがこの中を通過するため、これらのほぼ全域にわたってビームプラズマが発生している。そこで高速度で通過するビームとこれによって作られたビームプラズマとの相互作用特にその高速ビームの巨視的挙動を知ることはビーム誘導法を求めるのに極めて重要になる。すなわち高速ビームの空間電荷は図4あるいは図5に示すように、そのビームプラズマによって中和され、ビームの発散現象(ビーム直径の拡がり)がほとんど認められなくなる。このような現象はビームのイオン収束あるいは electrostatic pinch effect (静電ピンチ効果) として知られており²⁾、ビームの磁氣的収束作用あるいは magnetic pinch effect (磁氣的ピンチ効果) と類似の作用を有しているので、ビームは拡がらずほぼ層流を形成する。このような層流ビームプラズマは細管中を通過するのに都合がよい。さてビームはガス圧 p_0 以下の低真空中で形成されることが知られている。

$$n_e p_0 \approx 3 \times 10^5 \dots \dots \dots (2)$$

ここに n_e はビーム電子密度 [1/cm³] である。従っ

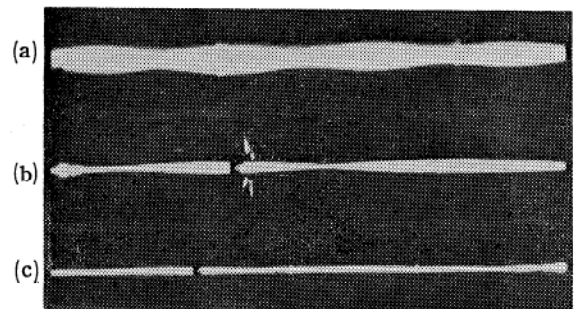


図4 静電ピンチ効果の説明図

- (a) 網目状管の電子ビーム (加速電圧700V)
- (b) ない場合の電子ビーム (加速電圧300V)
- (c) 軸に平行な電子ビーム (加速電圧4000V)

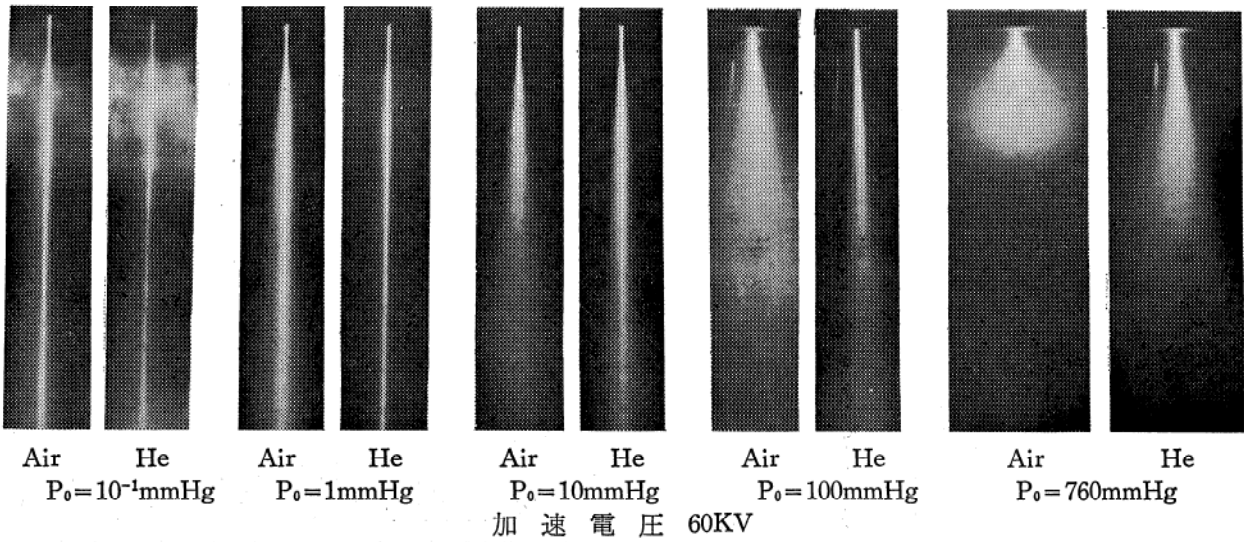


図5 各種ガス圧中におけるビームとビームプラズマ

てビームは p_0 (mmHg) 以上の高真空状態ではその空間電荷のために発散するが p_0 以下の低真空状態では空間電荷の中和現象がすすみ、発散現象が減少する。ビームの誘導路中には(2)式からわかるように、 p_0 前後の両方のガス圧が存在するので、両者の現象をひっくるめてさらにできるだけビームを細く絞るために磁氣的ピンチ効果を併用すれば、ビームはさらに細くて長いパイプ中を通過することが可能になる。すなわちプラズマ中を通過しながら磁場の軸に沿うと同時にピンチされ、誘導路中を通過し、大気中に射出されるのである。従って筆者の提案しているビーム誘導法つまり大気中電子ビーム発生装置はプラズマによるイオン収束と磁界収束の両作用が同時に作動し、その重畳効果を発揮できるように工夫されている。次にその両作用に基づくビームピンチについて述べる。

(1) 磁氣的ピンチ効果

$$r_0 = 0.2 l_{rm} \sqrt{I_0 V_0^{2/3}} \dots \dots \dots (a)$$

(2) 静電ピンチ効果

$$r_0 = 0.8 l_{fe} \sqrt{T_e^* / V_0} \dots \dots \dots (b)$$

} (3)²⁾

ここに r_0 はビーム半径、 V_0 はビーム加速電圧、 T_e^* はボルト表示の電子温度、 I_0 はビーム電流、 l_{rm} および l_{fe} は図4に見られるようなそれぞれ磁氣的ピンチおよび静電ピンチの場合の第1ピンチまでの距離である。

次にすでに述べたように大気中電子ビーム装置には上記ビーム誘導法以外に新しく高エネルギー大容量の電子銃を開発しなければならない。大気中電子ビームは文字通り高密度の大気中を通過するのであるからビームの散乱や非弾性衝突が激しく、消耗が著しいので、長い距離を飛ぶことが容易でない。そこで大気中ビームは次式か

表2 各種金属・空気に対する電子の浸透深さ

金属	密度 ρ [g/cm ³]	浸透深さ h ($\mu = 10^{-4}$) [cm]		
		[30KV]	[50KV]	[100KV]
Al	2.7	7.0	20	78
Ti	4.5	4.2	12	47
Fe	7.9	2.4	6.7	27
Cu	8.7	2.2	6.0	24
Ta	16.6	1.1	3.2	13
W	19.3	1.0	2.7	11
空気	1.3×10^{-3}	1.5	4.0	16

らわかるように高エネルギーで飛程の長いものでなければならぬ。

$$h = 2.1 \times 10^{-12} V^2 / \rho \text{ [cm]} \dots \dots \dots (4)$$

ここに h は飛程 [cm]、 ρ は密度 [g/cm³]、 V は加速電圧 [V] である。この式は大体 5~10万ボルトのエネルギーをもつ電子ビームに適用される。これを各種の物質にあてはめて計算したものが表2である。また図6は約25万ボルトまでのビームについて大気圧の He, N₂ および Al. 中での飛程をあたえたものであるが大気中ビームの大体の飛程は N₂ の曲線を参考にすることができる。しかし後述するように実際の空気中ビームの場合はビームの軌跡およびその近傍にビームプラズマが発生しその温度が高くなるのでその領域の密度が減少し、そのため飛程は上記データより実際には長くなることが予想されるが図7に示すように筆者はこれを実証している¹⁾。しかし4式からも分るように物質の粒子の重さに

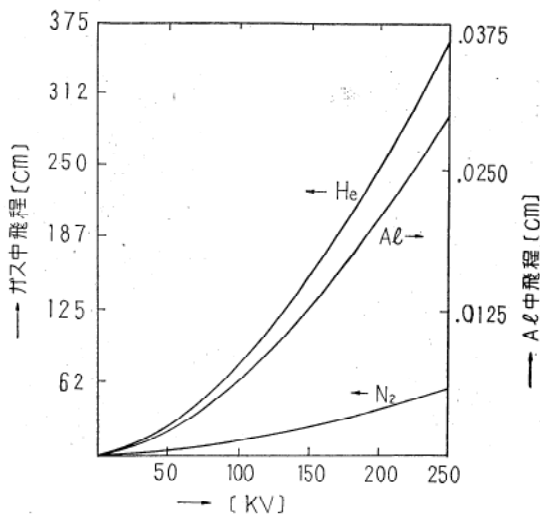


図6 Al と 1 気圧における N_2 , He ガス中における電子ビームの飛程曲線

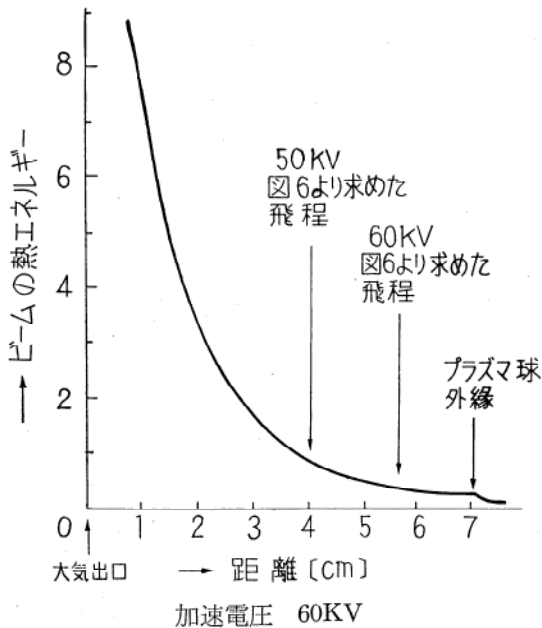


図7 図6より求めた飛程とプラズマ球外縁との関係

よって飛程が変化することになるので同じビームエネルギーの場合飛程を長くするには軽い粒子程よいことになる。そこで少なくともビームの通過する領域だけ、He, H_2 などの軽いガスを流すべきである。但しビームを熱源として利用する場合は被加工物の化学反応などを考慮してガスの種類を選択すべきである。以上より大気中ビームは10万ボルト以上の高エネルギーを有する電子が望ましいがビームが被加工物に衝突し熱転換するとき同時に放射線も発生するがビームエネルギーが大きくなるにつれてその損失も著しくなるのみならず放射線防護についても難かしくなる。以上の点から考えて大気中ビーム熱源装置としては大体10~20万ボルト程度の加速電圧が望ましい。

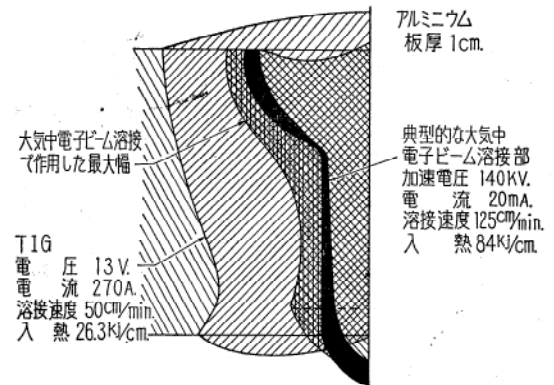


図8 大気中電子ビーム溶接 (Al) の特徴

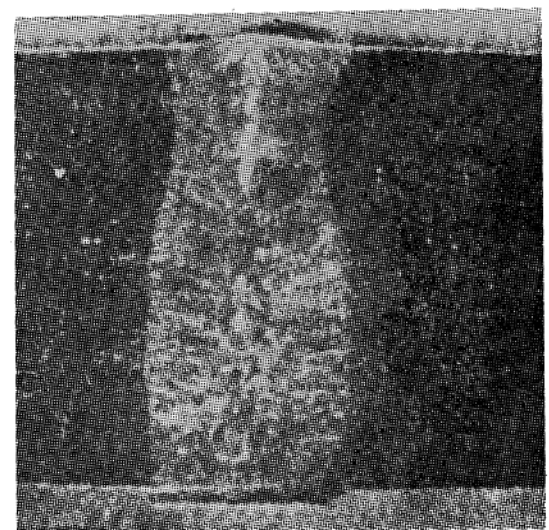


図9 大気圧電子ビーム溶接法による溶接例
厚さ約7mm、302ステンレス鋼

図1は現在代表的な溶接熱源であるTIG(タングステン不活性ガスアーク溶接法)溶接法にくらべてビーム溶接法がいかにすぐれているかということがわかる。溶接法の理想状態は接合面にのみエネルギーをあたえて他の部分に材質的变化や熱応力などをあたえることなくそのまま接合できることである。ビーム溶接法は従来の溶接法にくらべてかなりこの理想状態に接近していることがわかる。TIGアーク溶接法は図1にみるように接合に不要な部分まで溶融するので、大きな入熱を必要とし材質的变化領域や熱応力も大きくなる。図8は大気中ビームとTIG溶接法をくらべたものであるが $1/3$ 程度の入力でも約3倍程度大きな溶接速度をあたえることができる。図9および表3は大気中ビーム溶接の1例を示しており、図10は真空中溶接の結果とあまり大差のないことを示している。150kV, 80mA, 12KWatts程度の大気中ビーム溶接装置を用いると、炭素鋼の場合約30mm, Al板では約2cm程度の厚さのものを溶接することができる。このような厚板の場合でも溶接材料への入熱は

表3 大気圧電子ビーム溶接法による
溶接部の機械的性質

試片	引張強さ kg/mm ²	降伏強さ (0.2%) kg/mm ²	伸び (51mm) %	歪み速度 mm/min
溶接試片1.	58	25	57	1.3
2.	57.5	25.5	53	1.3
3.	59	25.5	63	1.3
4.	59	26	49	1.3
母材				
公様	59.5	24.5	55	
最低保証値	56	21	50	

(原さ約6mm. 304ステンレス鋼, 焼鈍材)

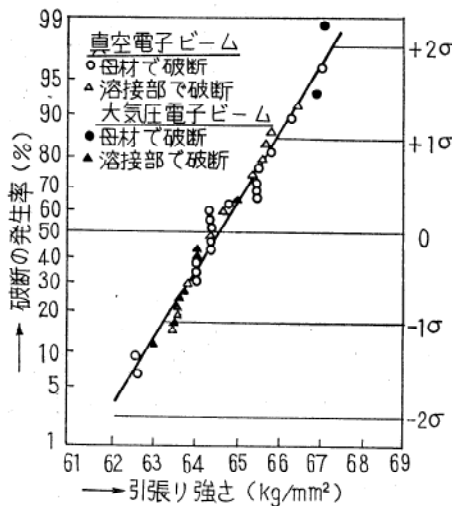


図10 大気圧電子ビーム、真空電子ビーム溶接法による溶接部の引張り強さ
厚さ約1.5mm、302ステンレス鋼、焼鈍材

TIG アーク溶接にくらべて僅か半分以下でよい。また Al 6mm 程度の板厚では 3.5 [m/min] の超スピードの溶接ができる。図11は筆者らの試作した 12kwatts 大気中ビーム溶接装置である。大気中ビーム装置はまた穿孔などに非常に便利であってセラミックや各種金属その他に穿孔できる。焼入材やセラミックなど他の方法では困難な穿孔にも利用できるものであり、図12はセラミックに瞬時穿孔した1例を示している。

さてすでに述べたようにビームは熱源としてのみならずプラズマ発生にも都合がよい。電子ビームはよく知られているように、ビームの半径方向と軸方向にその空間電荷によって次式であたえられるような電界を発生している。

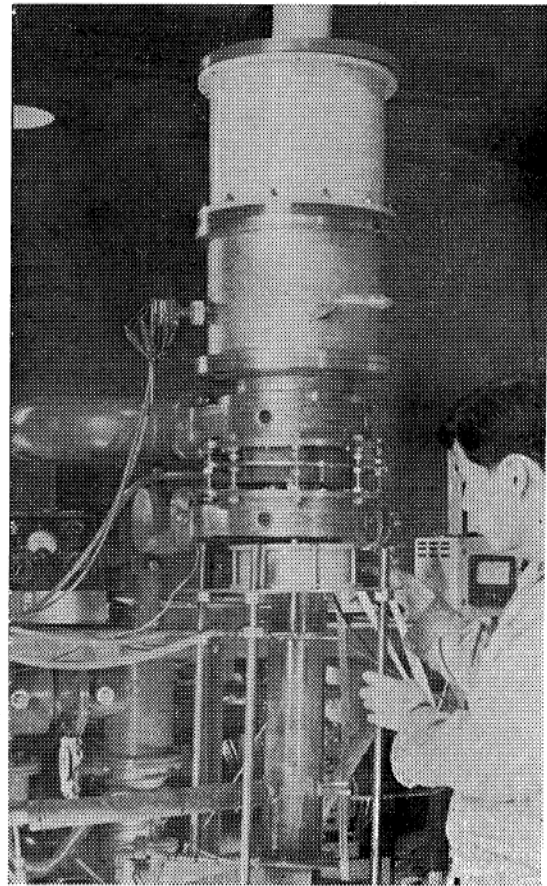
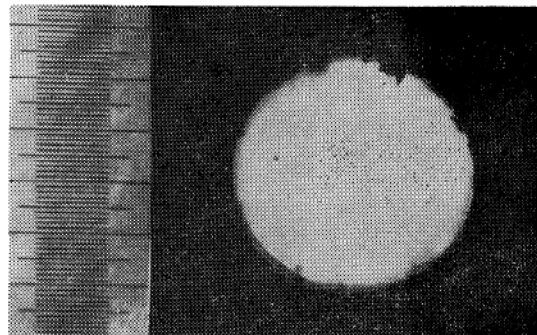


図11 大気圧電子ビーム発生装置の外観



1DIV = 0.1mm セラミック厚さ1.5mm

図12 大気中電子ビームによる穿孔例

$$\left. \begin{aligned} \frac{V(r)}{Vb} &= 0.03G \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{b} - \frac{1}{2} \frac{r^2}{b^2} \right], (0 \leq r \leq b) \quad (a) \\ &= 0.03G \left[\ln \frac{a}{b} \right], (b \leq r \leq a) \quad \dots \dots \dots (b) \\ \frac{V(z)}{Vb} &= 0.03G \sin \frac{\pi z}{L} \ln \frac{a}{b} \quad \dots \dots \dots (c) \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに $V(r)$, $V(z)$ は半径方向および軸方向のビーム空間電荷による電位であり、 Vb はビームの加速電圧である。 G はマイクロ・パービエンス、 a , L はそれぞれドリフト管の半径および長さ、 b はビーム半径である。
(5)式を図示すれば図13のようになる。いまビーム電圧を

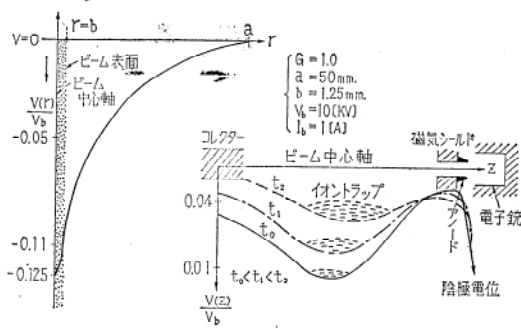


図13 ビームの空間電荷による電界の発生

10[KV] とすればビームの空間電荷によって、軸方向および半径方向に大体 1000[V] 程度の電圧が発生しており、このためプラズマのイオンおよび電子は加速され、プラズマの形成維持に役立っている。すなわちこのようなプラズマ密度がある程度以上になると、このビームとの相互作用の結果、プラズマ振動近傍（磁場があればサイクロトロン振動も）の高周波が励起し、さらに高密度プラズマとなりビーム自身による衝突電離によるものは無視される程度になる。（このような現象はすでに述べたようにビームプラズマ放電と呼ばれている）の状態になると、先程のビーム空間電荷は消失し(5)式あるいは図13のような電界は消失する。ビームが大気中に到達あるいはそれまでの過程において必ずこのような状態があらわれると推測される。図5は各種ガスの各ガス圧状態におけるビームプラズマの形成状態を示している。以上述べたように大気中電子ビームは溶接、溶解、穿孔などの新

らしい熱源として極めて有用であるのみならず、ビームプラズマ発生用エネルギー源として今後活用されることは確かである。特に大気中電子ビーム溶接装置は将来益々その偉力を発揮することと思われる。大気中でのビームはすでに述べたように幾分拡がるので、真空中で同じ電子銃で得られた熱影響部の面積より少し大きくはなるが従来のアーク溶接法にくらべると、非常に狭いものになるので溶接性と経済性を考えた場合、大気中ビーム溶接法はもっとも良い熱源となるのであろう。コストに関係なく、最高級の品質を要求したり、真空チャンバー内で容易に溶接できるようなものは真空内溶接も有効ではあるが、たて向きや上向き溶接あるいは真空チャンバー内では問題になる重量物や自動車・潜水艦・核反応炉などのような大型の物体部品や溶接パイプのような連続的作業を必要とする溶接に対しては大気中ビーム溶接法は益々その効力を発揮するものと考えられる。

文 献

- 1) 荒田吉明：1. 学振荷電ビーム委員会資料 9 (1966).
1 (1967).
2. 超高温研究 Vol 4. No.1 (1967).
3. Technology Rept of OSAKA Univ. Vol. 16 No. 724 (1966).
- 2) 1. L.H. Leonard : Proc 5th Annual Electron Beam Symp.
2. R.R. Irving : Iron Age March 29 (1962).
3. J.W. Meler : welding Jour 42 12 (1963).
4. D.A. Dunn, A.S. Halsted : Proc of the Electron and Laser Beam Symp. March (1965).
- 3) W.D. Getty. : MIT. Technical Rept 407 (1965).