

解 説

UDC 621.791.72

特殊溶接技術の進歩*

荒 田 吉 明**

Advanced Special Welding Process

Yoshiaki ARATA

1. 結 言

特殊溶接法 (Special welding process) の定義はむしろかしい。これはそれぞれの溶接法の適用可能範囲とも関連し、また時代に応じて変遷する性格もあり、さらにはそれぞれの国情にも左右されるなど多くの要素が複雑にからみ合つて、その枠決りをむずかしくしている。スポット溶接のように、現在の適用分野は限定はされているが、非常によく利用されているものもあり、ガス溶接のように、もつとも古くから開発され、ある時期には溶接技術の主役を果たしながら、現在では局限されているものもある。そしてよく知られているように、近年アーク熱源が現代溶接技術の中核をなすものとして大いに活用されている。しかしそのためこれ以外のものをすべて特殊溶接とするにはやはり問題がある。ここでは新鮮な技術を重視した立場より特殊溶接法をとらえることにする。

国際溶接会議 (International Welding Institute, 略称 IIW) の第IV委員会は特殊溶接法を看板にした一種の分科会である。この委員会では電子ビーム溶接、レーザ溶接、プラズマ溶接、超音波溶接、冷間圧接、爆接、マイクロ溶接、拡散溶接、摩擦溶接などで構成されているが、最近拡散溶接はろう付の分野 (第I委員会) に、摩擦溶接は抵抗溶接の分野 (第III委員会) に委譲されている。このような分類の仕方が妥当なものであるかどうかは、前述のように大いに疑問のあるところであるが、それぞれの国の事情や各委員会の考え方に左右されていることも見逃せない事実である。しかしいずれにしても現在の第IV委員会では、電子ビーム溶接がもつとも重要視され、つづいてレーザ溶接、プラズマ溶接への関心が強く、発表件数も多い。そこでここでもこの委員会の考えと同様に、将来アーク溶接のような一般性のある溶接法に発展可能と思われる“高エネルギー密度ビーム溶接法”をまず取りあげることにした。しかし特殊溶接法は上記

のようにこれ以外にも多岐にわたっているもので、これらのすべてをここで同時に取りあげることにすれば、紙数の関係上単に紹介程度にとどまることになり、とうてい解説するまでには至らない。したがって、これらについては次の機会に取りあげることとし、これを補完することが可能と考えている。

2. 電子ビーム溶接

2.1 特徴と概要

電子ビームやレーザビームの最大の特徴はエネルギー密度の高いことと、その密度が自由に制御できることである。換言すれば現代溶接技術をささえているアーク熱源はエネルギー密度が $10 \sim 50 \text{ kW/cm}^2$ (代表的なアルゴンアーク 200 A では約 15 kW/cm^2) で、ほぼ一定であり、かつこの密度を制御することが通常は極めて困難であるのにたいし、電子ビームやレーザビームでは、この密度を $10 \sim 1000$ 倍程度にすることは容易であり、その密度や照射方向の制御も困難ではない。このようなエネルギービームの性質は、溶接熱源としては極めて重要なものといえる。物質の結合エネルギー以上のエネルギー密度が集中すれば、それは瞬間に蒸発し、照射点は穿孔される。材料によつて異なるけれども、鋼材の溶接に必要な実用的エネルギー密度は、連続照射ではほぼ 600 kW/cm^2 以上あればよい。実際に使用されている電子ビーム溶接の場合はいいたい 1000 kW/cm^2 前後のものが多い。アーク熱源の場合はこの 100 分の 1 程度であるから、穿孔現象は当然起こらず、電子ビームのような“深溶込み溶接”は得られない。その溶込み深さも通常 10 mm 以下であつて、数 mm 程度のものが多い。従つて厚さ 10 cm 程度の鋼材をアーク溶接で行う場合は、通常数 $10 \sim$ 数 100 層の溶接を行う必要がある。これにたいし電子ビーム溶接では、数 10 cm の厚さの鋼材にたいしても貫通一層溶接の可能性もある。さらに Fig. 1 に示すように 1 cm の長さを溶接するのに必要なエネルギー (入熱, q_B) は電子

* 昭和 54 年 2 月 26 日 受付 (Received Feb. 26, 1979) (依頼解説)

** 大阪大学溶接工学研究所 工博 (Welding Research Institute, Osaka University, Yamadakami Suita 565)

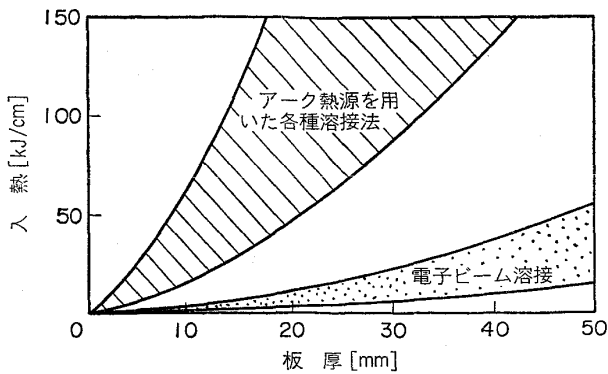


Fig. 1. アークおよび電子ビーム溶接における入熱の比較

ビーム溶接のほうがはるかに少量であり、この性質は板厚の増すほど効果を発揮し、省エネルギー的であることがわかる。問題があるとすれば、それは溶接以前の施工準備段階にあるといえる。

さて電子ビーム溶接の場合、その出力 W_b (W) はビームの加速電圧 V_b (kV) とビーム電流 I_b (mA) によって与えられる ($W_b = I_b V_b$)。溶接の場合、このようなビームは被加工材までの空間 (作業距離) を飛行するため、この空間のビーム特性が極めて重要で、溶接結果を左右する。密度 ρ (g/cm³) の空間を飛行するビームの到達可能距離 “飛程” Re (cm) は $V_b = 50 \sim 100$ (kV) の場合

$$Re \approx 2.1 \times 10^{-6} \frac{V_b^2}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

である。 V_b がこれ以上の場合には筆者らの報告¹⁾を参照されたい。溶接の場合、この Re は重要なパラメータの1つであり、作業距離としては $Re/100$ 程度、あるいは少なくとも $Re/10$ 以下でなければ実用的でない。電子ビーム溶接の実用機は以下述べる各種特性によって分類される。まずビーム特性の立場からいえば、上記 Re を支配する V_b と ρ によって分けられる。すなわち V_b の立場では、超高電圧型 (≥ 300 kV)、高電圧型 (100~300 kV)、低電圧型 (10~100 kV)、極低電圧型 (≤ 10 kV) の4段階であるが、実際には高電圧型と低電圧型がもつともよく利用されている。 ρ によるものは、高真空型 ($\leq 10^{-4}$ Torr)、低真空型 ($10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr)、低気圧型 (10~100 Torr)、大気圧型があり、現在は特に高真空型と低真空型が広く用いられている。このほか電子の発生法によって熱電子型、プラズマ電子型、電界型があるが、現在はほとんど熱電子型である。またビームの方向性によって、それぞれ “鉛直ビーム”、これに直交する “水平ビーム”、斜方向の “傾斜ビーム” があり、特に 10 cm 以上で板厚の増大するほど、水平ビームが効果的とされている。さらに電子銃の立場からは固定型と移動型があり、また真空方式では施工上の立場から、全真空型と局所真空型がある。前者は被加工物全体を真空作業室

の中にセットし、後者では溶接に必要な局所だけ真空にする。最近局所真空方式の必要性も増大し、その研究・開発は盛んである。

さて電子ビームが加工熱源として役立つことは、すでに 1879 年 CROOKS によって提案されていたが、1948 年 STEIGERWALD によって深度のおおきなすぐれた長焦点型電子銃が開発され、その加工熱源としての新しい機能と実用的有効性が実証された。1954 年フランス原子力委員会の STOHL が通常の 15 kV の X 線管球の改造型電子銃を用いて、始めて核燃料エレメントの溶接を開始し、1957 年その成果を公報した²⁾。その後1年を出でずして、世界各国よりせきを切つたように、この種の報告がなされ、今日に至っている。そして新しい溶接技術としての重要性が認められ、前述のように 1968 年電子ビーム溶接を中心とした IIW 第IV委員会(特殊溶接法)が設置された。我国でも 1970 年溶接学会に電子ビーム溶接委員会が設置され、活発に研究発表が行われている。

2.2 大出力電子ビーム溶接

電子ビーム溶接の特徴は Fig. 1 に示したように、板厚の増大するほどその機能が発揮される。そのため Fig 2 に示すように、その板厚に応じた大出力の電子ビーム装置が必要となる。筆者らはこの点に着目し、1972 年世界で始めて 100kW 級電子ビーム溶接装置を開発し、大出力電子ビーム溶接法の端著を開いた³⁾。これによつて

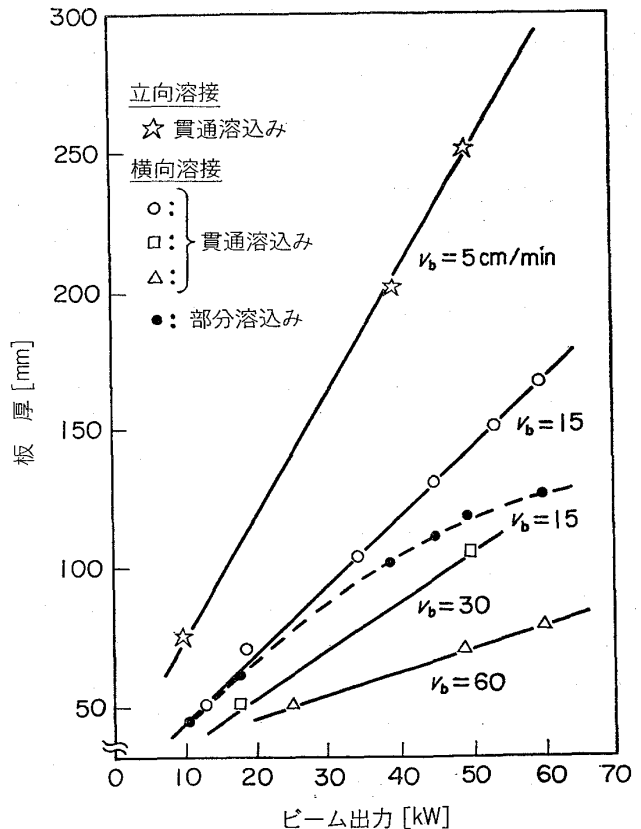


Fig. 2. 横向、立向姿勢貫通溶接における板厚とビーム出力との関係 ($V_b = 100$ kV, HT80 材)

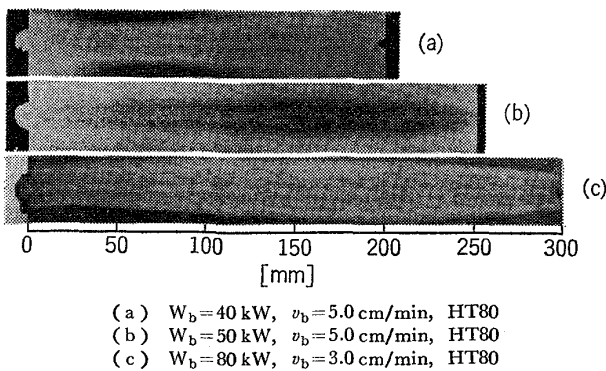


Photo. 1. 立向上進溶接における超厚板材（高張力鋼）の一層貫通溶接のビード横断面

Photo. 1 に示すように、厚さ 30 cm 程度の鋼材の貫通一層溶接を可能とした。その後世界各国で、この実用化についての多くの研究がなされた^{4)~10)}。しかし Fig. 3 よりわかるように、鉛直ビームを用いる“下向溶接”では、厚さ 10~10 数 cm で飽和し、それ以上の溶込み深さを得るのが困難となる。また Fig. 2, Photo. 1 よりわかるように、水平ビームを用いる“立向上進溶接”では、出力にほぼ比例した溶込み深さが得られるが、100 kW 程度ではまだ出力不足であり、高速溶接ができないため、結晶粒は粗大化し、板厚によつては十分な継手性能の得られないことがわかつた。そこで、1975 年同じ 100 kW であるが、電圧 300 kV、電流 350 mA の全く新しい多段加速法の開発とその装置の試作により、さらに大出力化のための基礎資料を求めた。これにもとづいて、1980 年には 300 kW (600 kV, 500 mA) 級電子ビーム溶接装置の開発・完成を予定している。これを用い、鋼材であれば、厚さ数 10 cm までの電子ビーム溶接技術の確立を期待している。

さて当然のことながら、溶接欠陥は板厚の増大につれ

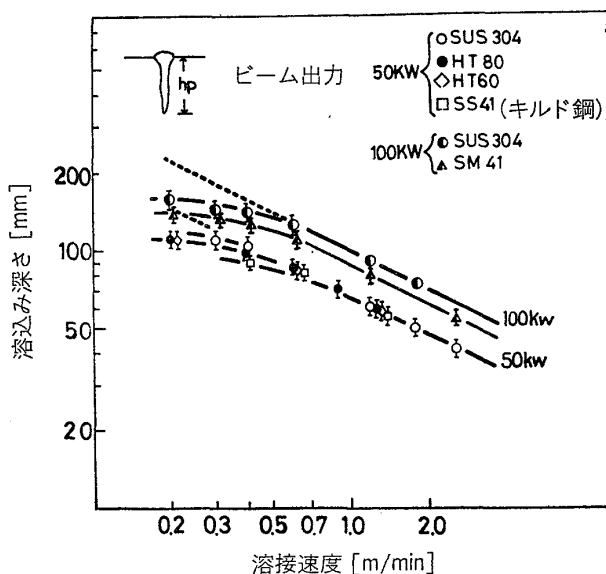


Fig. 3. 下向溶接の溶接速度と溶込み深さとの関係

て形成されやすくなる。このような諸欠陥は (a) A ポロシティ (ビーム焦点近傍に分布するビームエネルギー密度のもつとも高い領域すなわち“ビーム活性域”, Active zone, によつて形成されるポロシティ), (b) R ポロシティ (溶接ビードの底部, Root, に発生するポロシティ), (c) AR ポロシティ (ビーム加速室の汚染による放電, 特にアーキング, Arcing, によつて瞬時発生するパルス大電子ビームにより形成された極めて深い針状ビードに随伴するポロシティ), (d) 湯不足ポロシティ (溶接ビードの表面, 裏面から溶融金属が異常に流出し, ビード内容融池の不足に起因して形成されるポロシティで, 厚板材に発生しやすい.), (e) シュリンケージキャビティ (ビード中央部近傍に発生しやすい.), (f) コールドシャット (激しい溶融池揺動にもとづく不連続凝固線(リップル線)の形成が不完全な場合起こるもので, 通常リップル線の延長線上に多い。その界面にはよく Mn, Zn, Mg などの揮発性添加物の蒸着が認められる) (g) 鋭いスパイク (溶融池揺動, ビーム孔形成過程の不整等にもとづき, ビード底部に到達するビームエネルギーの変動に起因して形成される溶込み深さの不整で, その形状が通常スパイク状を呈する。揮発性添加元素を含む Al 合金などでは特に激しい.), (h) 各種割れ (凝固, 偏析, 化合物, 過飽和, リクエーション等にもとづく脆化によるケースが多く, 縦割れ, 水平割れ, ミクロ割れなどを形成)。これらの諸欠陥は施工の適正を欠く場合を除外すれば, ビーム特性に依存するものと材料特性によるものとがある。ビーム特性で重要なものは (a) 焦点近傍 (活性域) の特性 (形状・エネルギー密度・長さ) と $a_b (=D_0/D_F : D_F$ は焦点距離, D_0 は対物距離) 値である。この a_b 値は溶込み深さや欠陥形成を左右するほどの重要なパラメータとなる。(b) 材料内でのビーム先端部特性, 特に先端部曲率が重要で, その半径として, たとえば 0.5 mm 前後が R ポロシティ発生の特長値とされている。材料特性では, 特に含有ガス (O_2, N_2 など) および揮発性添加元素 (Mn, Mg, Zn など) の影響が大きく, ポロシティ発生に極めて鋭敏である。たとえば構造用鋼材にたいするポロシティ発生時の O_2 と N_2 の許容限界の 1 例を Fig. 4 に示したが, それは入熱 q_B が増大するにつれて緩和されることを示している¹¹⁾。また湯の流動性も重要で, ポロシティ発生域 $\Delta a_b (=a_{b1}-a_{b2}; a_{b1}, a_{b2}$ は a_b-W_b あるいは a_b-I_b 曲線において, それぞれ上限と下限に相当する。) はパラメータ $[Si]/[Mn][O+N]$ を用いて整理するとき, Fig. 5 のように, ある数値 (ここでは 5 程度) で A ポロシティは消失する。しかし R ポロシティは減少するだけで消失しない。これはビーム先端部特性に依存するもので, 材料特性を改善するだけでは成果は得られない。そこでビーム特性の改善のため, いろいろ検討されている。たとえばビームに適正な振動 (周波数・振幅・方向) をあたえること, さらに一本の電子ビーム

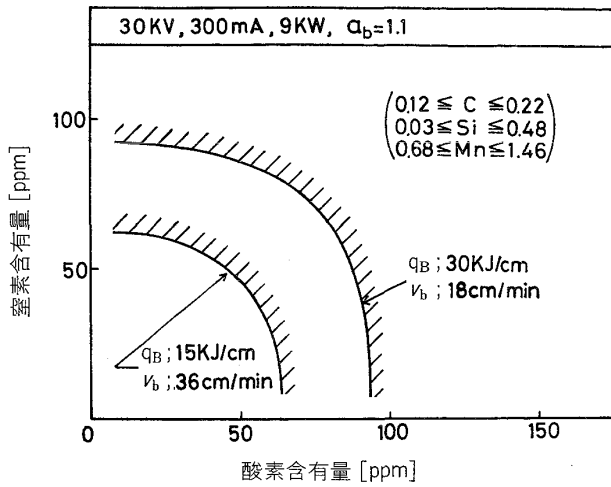


Fig. 4. ポロシティ発生に対する酸素、窒素の含有許容限界

でなく、二本あるいはそれ以上のビーム（タンデム電子ビーム）を採用することなどである。前者については Photo. 2 のように、大きな湯不足ポロシティでも、ビームに適正な振動をあたえると、その形成を全く抑止する

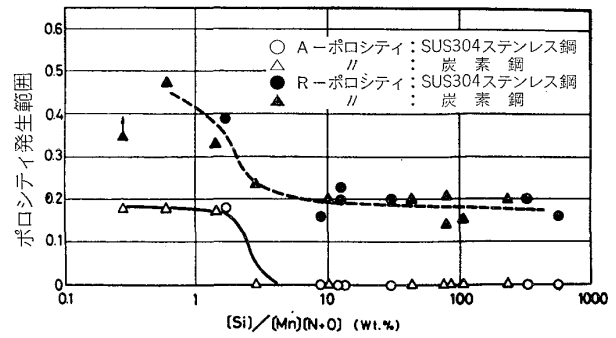
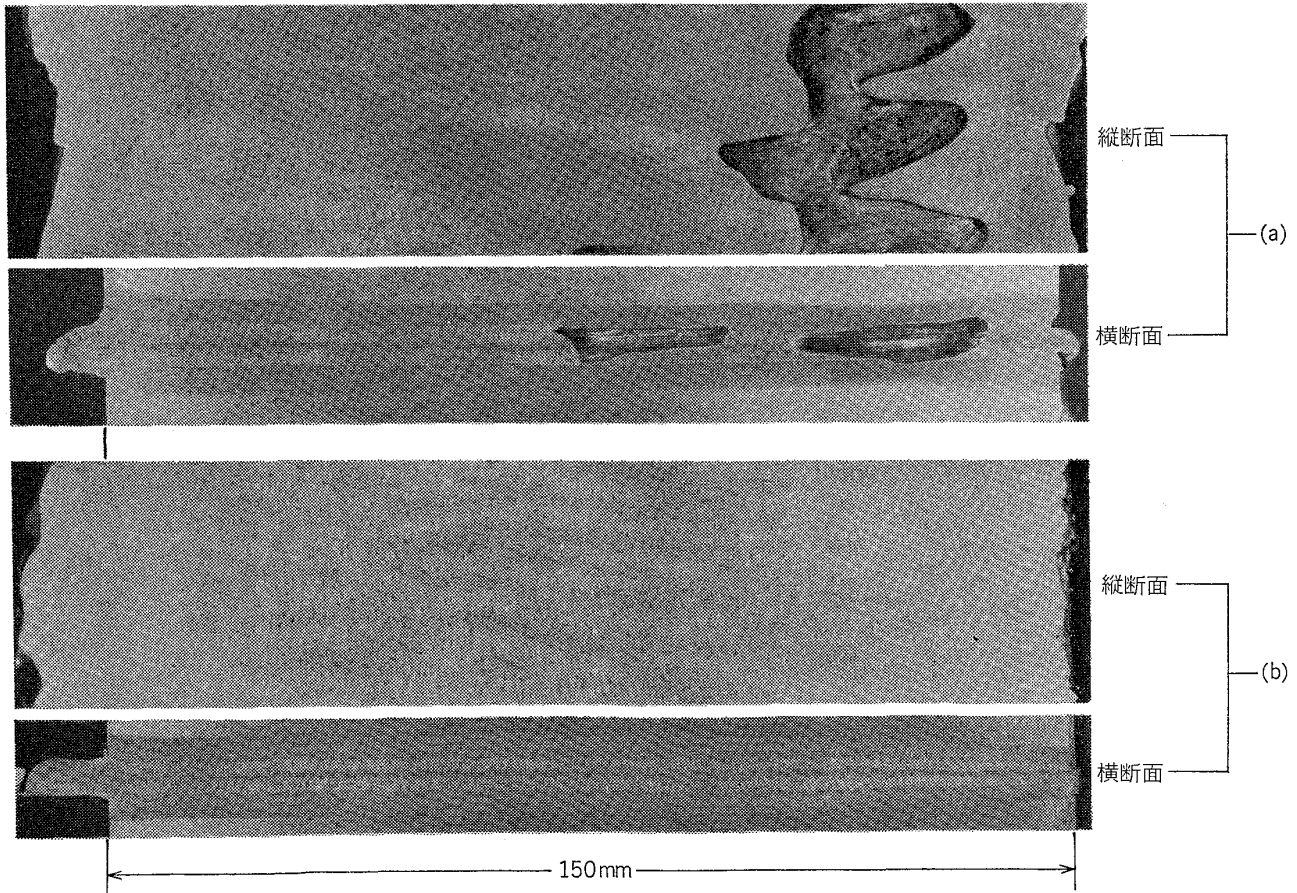


Fig. 5. 溶接鋼材中の成分とポロシティ発生範囲の関係

ことができる。Fig. 6 はこの周波数とポロシティ発生率を整理したものであるが、ほぼ 10 Hz で消失している¹²⁾。これらの数値は材料とその板厚およびビーム特性に依存する。後者についての詳細は後述する。

2.3 局所真空溶接

これは真空作業室に收容しがたい大型重量物、長尺のパイプ、大型の圧力容器、タンクあるいは平板状継手構造の持つ単純な形状の溶接線にたいし、その近傍だけを



$v_b=15\text{ cm/min}$, $^{21/4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼
 (a) $W_b=54\text{ kW}$, ビーム振動無し
 (b) $W_b=50\text{ kW}$, ビーム振動有り (方向: 溶接線, 周波数 $f=10\text{ Hz}$, 振幅 $d_x=3\text{ mm}$)

Photo. 2. 100 kV 無振動および振動ビームによる横向貫通溶接のビード断面

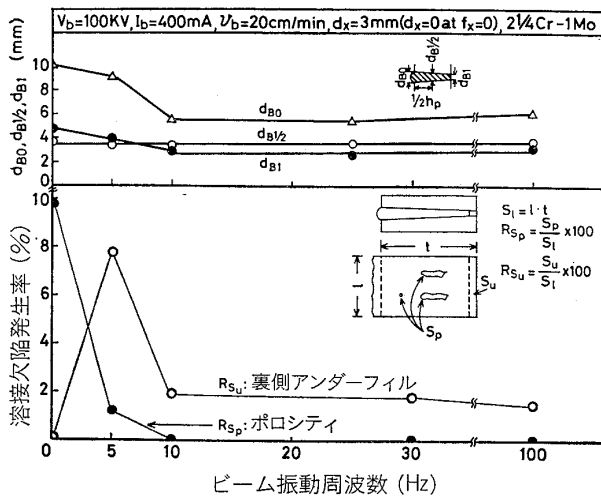


Fig. 6. 横向溶接における溶接欠陥発生率、ビード幅とビーム振動周波数の関係

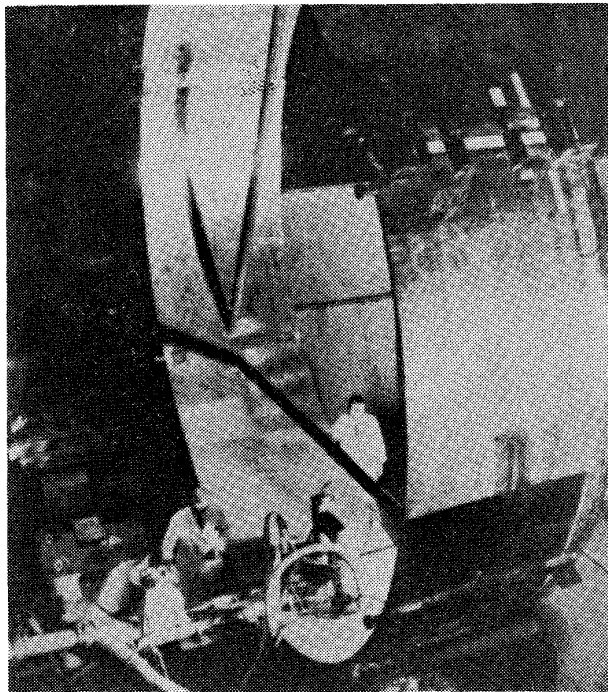


Photo. 3. 電子銃移動型溶接機による原子炉压力容器の溶接実施例

局所的に真空 ($10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr 程度の低真空が多い) にするもので、実用的にかなり有効な溶接法といえる。この場合電子銃を真空内あるいは真空外で移動させる方法、あるいは、被溶接体を移動させる方式もある。この溶接法のキーポイントは、被溶接体にたいするビーム発生装置の移動接触部の真空維持機構にあり、これが本方式の実用的かどうかを決定する。この溶接結果は当然のことながら、全真空型のものとはほとんど変わらないので、ここでは割愛する。Photo. 3 はサブマージアーク溶接法のように電子銃移動型であり、压力容器への実施例¹³⁾である。局所真空溶接法は現在我国も含め、世界各国で熱心に研究・開発が進められている。

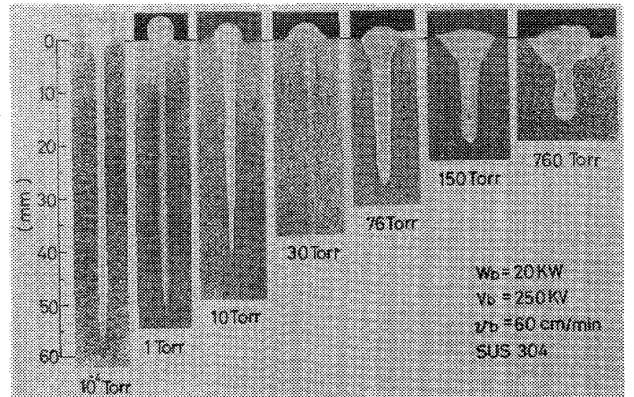


Photo. 4. 高真空から大気圧までの各種ガス圧中における下向溶接のビード横断面

2.4 大気中電子ビーム溶接

電子ビームは必ず真空室で加速されるため、溶接作業室も真空室がよいのは当然である。しかし作業性の立場からは、真空作業室は不便であり、大気中での加工が期待されるが技術的には種々困難な問題を含んでいる。たとえばビーム特性の立場からは (a) 加速室から大気圧に至る大きな圧力勾配にたいする対処、(b) (1) 式からわかるように、大気中での極端に短い作業距離とその場合のビーム集束・偏向性能の著しい低下である。さらに材料特性の立場からは (a) ビーム孔よりの激しい蒸気ジェット (b) 熔融池の大きな揺動と対流などである。このため大気中電子ビームは当初もつとも重要な溶接熱源に発展するものと期待されながら、その研究・開発の速度は最近鈍化している。

大気中電子ビームのアイディアは 1951 年 SCHNEIDER の特許¹⁴⁾の中に含まれているが、1956 年に HERAEUS が 150 kV, 2.5 kW の発生装置を初めて完成した。当初溶接に用いることは全く考えていなかったが、1960 年代初頭に大気中電子ビーム溶接の考えが起こると、HERAEUS はただちにこれを用いてそのサンプルを試作した。1962 年米国では Hamilton Standard 社がこの技術を導入し、大気中電子ビーム溶接の研究を始め、その実用化についての指導的役割を果たしてきた。現在までに米国では数 10 台以上の販売実績を有しており、25 kW 級がその主体を占めている。最近 Westinghouse 社で 50 kW 級の装置が試作され、英国溶接研究所でこれを用いた溶接研究が行われている。

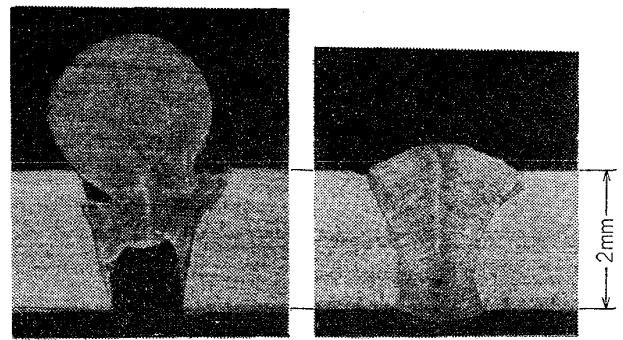
筆者はこれとは全く独立的に核融合プラズマ造出の目的で、1957 年大出力電子ビームの加速法(トランストロン加速器)を提案¹⁵⁾、これを基礎として 1962 年大気中電子ビーム溶接装置の新しい原理を公表¹⁶⁾、1967 年我国で初めて大気中電子ビーム溶接装置を開発¹⁾、これを基礎として 1975 年世界最大の 100 kW 装置を試作し、現在に至っている。筆者らはこの装置を用い、現在大気中で 30 kW、低気圧中で 60 kW、高真空中で 100 kW 程度までの実験を行っている。Photo. 4 は SUS304 ステン

レス鋼にたいし、 $V_b=250$ kV, $W_b=20$ kW のビームを用い、高真空から大気圧までの溶込み深さの変化を調べたものである。Fig. 7 はこれを整理したものであるが、10~30 Torr 前後で溶込み深さをあまり犠牲にしないで、ビード形状のよい領域の存在することがわかる。筆者らはこれを“低気圧型”と呼び特徴づけた。

現在大気中電子ビーム溶接は板厚 10 mm 前後までの高速溶接に適しており、機械部品、パイプなど自動車・原子力・宇宙航空や軍需産業分野に多く用いられている。

2.5 タンデム電子ビーム溶接法

周知のように電子ビーム溶接といえば、すべて一本の電子ビームで溶接されてきた。筆者らはほぼ同一点に2本の電子ビームを入射させた新しい“タンデム溶接法”を提案した¹⁷⁾。Fig. 8 はその原理の解説図である。シン



(a) : シングルビーム溶接 (ハンピングビード)
 $V_b=60$ kV, $W_b=6$ kW, $v_b=6$ m/min, SUS304
 (b) : タンデムビーム溶接 (正常ビード)
 $V_b=60$ kV, $W_b=10$ kW, $v_b=10$ m/min, SUS304

Photo. 5. シングルおよびタンデム電子ビーム溶接結果の比較

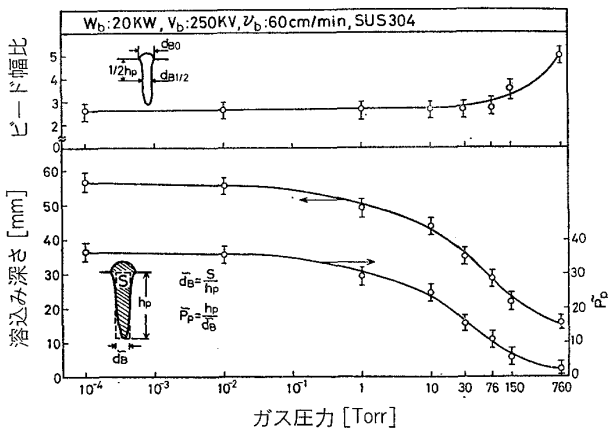


Fig. 7. 溶接室のガス圧と溶込み深さ、ビード幅比、実効溶込み変数の関係
 (ビード幅比: $d_{BO}/d_{B1/2}$)

グルビームではこの (a) 図の EB-1 で示すように、 $a_b \approx 0.9$ 程度で最高の溶込み深さを示すが、各種の欠陥を伴いやすい。しかし、たとえば $a_b \leq 0.5$ あるいは ≥ 1.2 のような低密度ビーム EB-2 を用いるとその発生率は少なくなる。そこで2本のビームを発生させ、これらに EB-1 と EB-2 のすぐれた機能を持たせ、1つのビード上で適当に結合させると、アンダーカットなどの表面欠陥や各種内部欠陥を防止するとともに、この安全領域を高速の溶接速度域まで広げることができる。今後実用化にたいし、その効果を大いに期待することができる。Photo. 5 はシングルとタンデムビーム溶接の比較例であり、タンデムのすぐれた機能を見ることができる。

シングル電子ビーム溶接

タンデム電子ビーム溶接

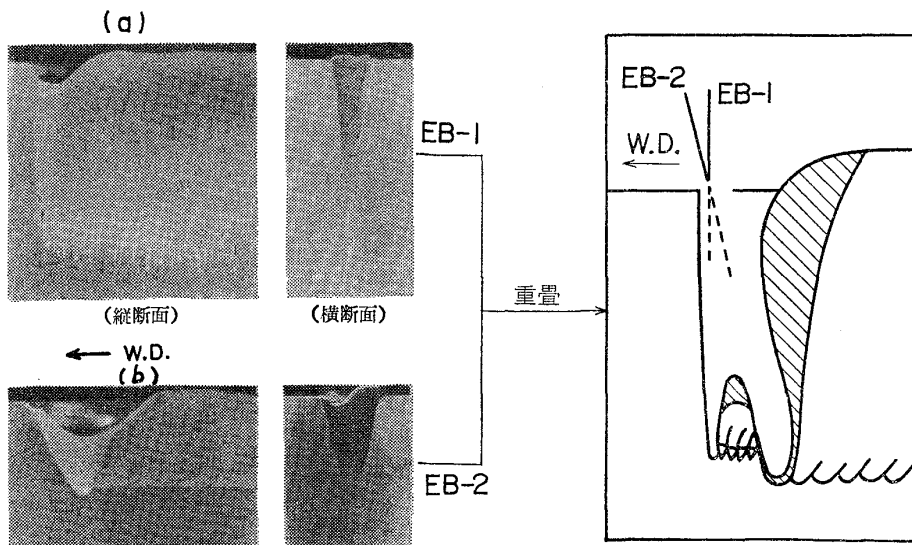


Fig. 8. シングルビーム EB-1 と EB-2 の適正重畳によるタンデムビード生成機構

3. レーザビーム溶接

3.1 特徴と概要

レーザー溶接部の特徴は、電子ビーム溶接部のそれに類似しているが、溶接過程ではいくつかの点で際立つた相異がある。たとえば (a) レーザビームは光であり、ガスとの衝突断面積が小さく、大気中では電子ビームのような激しい減衰はなく、到達距離はけた違いに長い。(b) 大気中での偏向特性が格段にすぐれている。(c) 電子ビームのようにX線を発生しない。これらの性質はレーザービームの大気中での作業性能を著しく有利にしている。これにたいし、電子ビームより弱点とされる点は“効率”の悪さであり、さらにはプラズマあるいは高温ガス中での透過性の悪さである。各種レーザーのうち溶接熱源として、もつとも効率がよく、大出力の得られるものは炭酸ガスレーザーであるが、それでも理論的には約41%、実用的には10~10数%であり、電子ビームにくらべ、かなり低い値である。現在熱源として利用可能なレーザーはザルビレーザー、ガラスレーザー、YAGレーザー、アルゴンイオンレーザー、炭酸ガスレーザーなどであるが、このうち溶接熱源としてもつとも有効に利用できるレーザーは炭酸ガスレーザー(波長 $\lambda=10.6\mu$)である。この場合の実際のレーザーガスは炭酸ガスだけでなく、出力機能をあげるためこれに窒素、ヘリウムを添加し、さらに定常性をよくするため一酸化炭素を添加することが多い。

レーザー溶接に限らず、レーザー熱加工の場合すべてに共通して必要な基礎パラメータは、レーザーの波長 λ 、モード数 M 、射出孔でのビーム直径 D_b 、ビーム焦点でのスポット径 d_b 、ビーム拡がり角 $\Delta\theta$ 、出力 W_b 、その密度 w_b (試料表面を溶融させるのに必要な最小の W_b 、 w_b をそれぞれ W_c 、 w_c)であり、さらにビーム収束のためのレンズの焦点距離 D_F (無収差)、被加工材のビーム吸収率 A_b 、電気比抵抗 η あるいは導電率 $\sigma(=1/\eta)$ 、(溶融温度ではそれぞれ η_M 、 σ_M)、溶融温度 T_M 、熱伝導率 κ 、熱拡散率 κ_D などである。これらの関係式は

$$\Delta\theta = 1.22(\lambda/D_b) \dots\dots\dots (2)$$

$$d_b = 2.44(\lambda/D_b)D_F\sqrt{2M+1} \dots\dots\dots (3)^{18)}$$

$$A_b = 122.2\sqrt{\eta} \dots\dots\dots (4)^{19)}$$

$$W_c = 1.58 \times 10^{-2} \kappa d_b T_M \sqrt{\sigma_M} \dots\dots (a)$$

$$= \sqrt{\pi} \kappa d_b T_M \dots\dots\dots (5)^{20)}$$

(ただし $A_b=100\%$ の場合) ... (b)

$$w_c = W_c / \pi d_b^2 \dots\dots\dots (6)$$

Al, Cuなどの吸収率は悪く、これらは $A_b=2\sim3\%$ であり、もつとも高いSUS304, Fe, Zrの溶融温度でさえ、 $A_b < 15\%$ である。このように、エネルギー伝達率が非常に悪いので、面処理(表面酸化、コーティング、面加工など)を必要とする。たとえば出力があまり大きくない場合とか、あるいは大きくてもその密度を低下させて

行うレーザー焼入れの場合は、表面吸収率を高めるため、コーティング(リン酸塩、グラファイト粉末、塗料など)する必要がある。その場合の A_b は相互作用時間を τ とすれば

$$A_b = \frac{2K}{\tau w_b^2} \left[\left(1 + \frac{\tau w_b^2 A_0}{K} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

(ただし $K = \pi \kappa^2 \theta_0^2 / 16 \kappa_D$) (7)

となる²¹⁾。鋼材表面に厚さ 10μ 程度のリン酸塩をコーティングした場合は $\theta_0=4000$ 、 $A_0=0.87$ であり、 $A_b \approx 90\%$ にも達する。さてFig. 9は(5)式を図示したものであり、吸収率を100%に近くすれば、すべての材料は500W以内で面溶融する可能性のあることがわかる。

3.2 溶接特性

炭酸ガスレーザーが1964年PATEL²²⁾によつて開発されると同時に、筆者はこのレーザーが本格的な溶接・切断の熱源として発展するものと考え、1967年、当時世界最大の1kW溶接装置(放電管長24m)を試作し、レーザービームの集光特性、溶接、切断等に関する多くの結果を得た²³⁾。この拡散冷却型レーザーの最高出力はWHITEHOUSE^ら²⁴⁾による8.8kW(長さ224m)であつたが、実用化するには至らなかつた。1969年TIFFANY^らの強制循環型

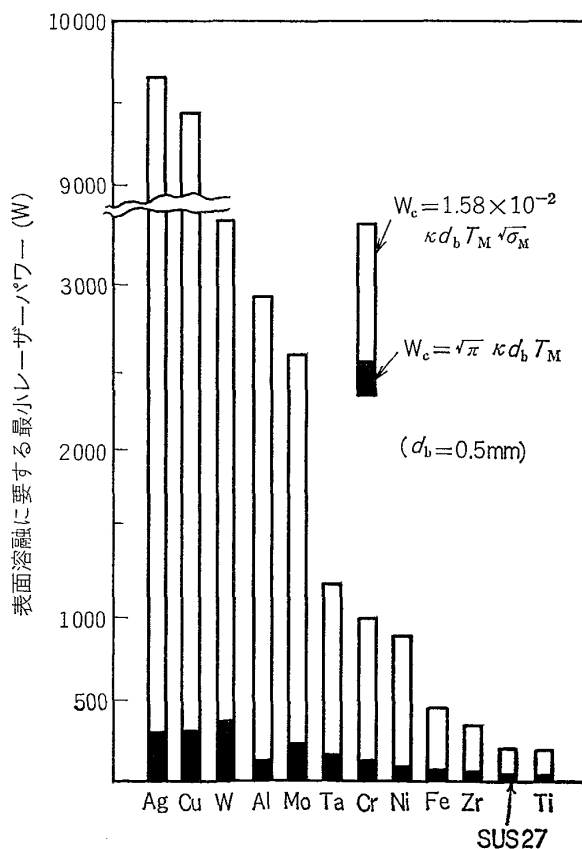


Fig. 9. 炭酸ガスレーザービームによる各種金属材料の溶融特性、ガウス分布する一定強度の集光レーザービーム($d_b=0.5\text{mm}$)が半無限板厚の金属面を溶融せしめるのに必要な最小レーザーパワーを示す。

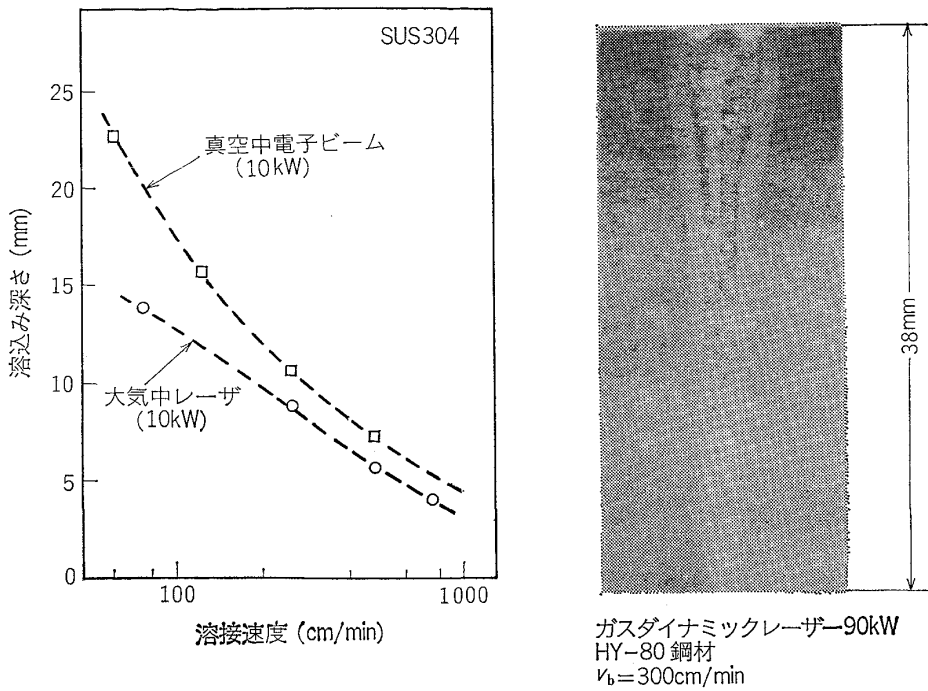


Fig. 10. 溶込み深さとビード形状 (米国 UTRC による)

1 kW レーザの開発²⁵⁾が行われてからつぎつぎに類似の装置が開発され、現在オンライン化しているものは最高 5 kW、研究室段階で市販されているもの 20 kW、市販されていないが実験中のものは約 100 kW である。この大出力ビームによつて短時間ではあるが、溶接結果として板厚 5 cm の船舶構造用鋼の厚板材を 130 cm/min の高速で溶接できたと報告している²⁶⁾。我国で製作し、市販されているものはまだ出力が小さく、最高 1~2 kW クラスであり、諸外国にくらべ非常に遅れている。研究室段階でさえ、筆者らの試作した 3 kW (1970 年) が最大である。しかしようやく産業界でも国家的プロジェクトにささえられ、2~3 年後に 5 kW、数年後 20 kW が計画されている。現在我国で作動中の最大のものは筆者の研究室の 5 kW 装置で、この発振部は米国シルベニア製のものである。今後本格的な溶接用レーザーは 5~20 kW の出力が必須であると考えている。さてこれまでに構造用鋼、耐熱合金、Al 合金、Ti 合金など各種金属材料の溶接が行われているが、従来の溶接法にくらべ、電子ビームと同様かなりすぐれた機械的性質が得られている。Fig. 10 は真空中電子ビームと比較したものであり、高速域での溶込み深さ、ビード形状はかなり類似していることがわかる。低速域では電子ビームより劣るが、高速域ではその機能が十分に発揮できる特徴を有しており、鋼材では板厚 20 mm 前後までの溶接がよいと思われる。Fig. 11 は出力と溶込み深さを示したもので、この結論をよく理解することができる。

さらにレーザー溶接は電子ビームにくらべ、セラミック系など非金属材料にたいし、よい溶接性の得られること

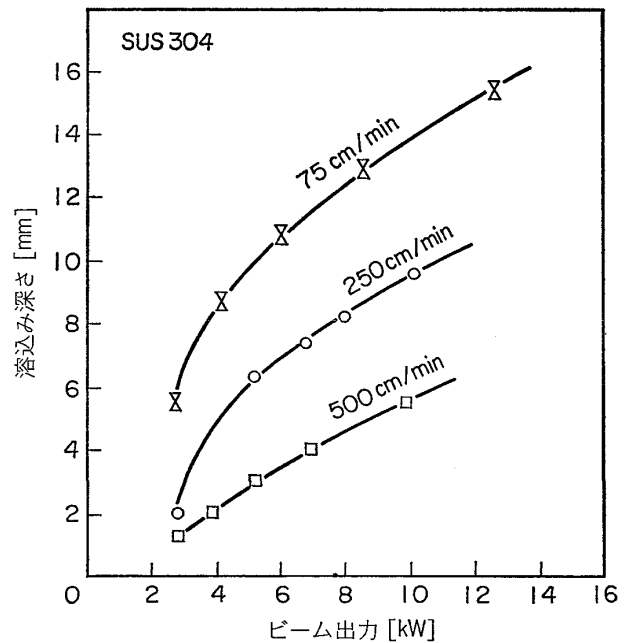


Fig. 11. レーザビーム出力と溶込み深さの関係 (米国 AVCO 社製 20 kW 装置による)

がわかつた²⁷⁾。これは筆者らが世界で初めて開発に成功したもので、Photo. 6 はその T 型継手の一層溶接を示すが、機械的性質のすぐれた継手性能を有している。炭酸ガスレーザーは溶接のみならず、熱切断²⁸⁾、表面焼入れ²¹⁾にたいしても従来の熱源にくらべ、はるかによい成果が得られているが、ここでは割愛する。

電子ビーム、レーザービームのような高エネルギー密度ビーム溶接部は一般に各種鋼材、耐熱材料、軽合金その他

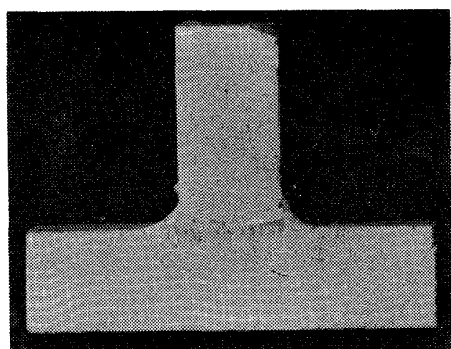


Photo. 6 セラミックスの溶接例
レーザーパワー 600 W
速度 30 cm/min

ほとんどすべての材料にたいし、従来の熱源にくらべ冶金学的、機械的諸特性にすぐれているが、紙数の関係上これらの興味ある個々の問題について述べることができなかつた。また他の特殊溶接法についても同様である。ただ溶接硬化性材料の場合は衝撃、COD、Deep Notchなど各種試験において“破断経路遷移温度” T_F^{29} なる特有な温度が存在し、その温度で破断経路が溶接金属より母材側にそれる際立つた現象のあることを付記する。これは他の溶接法では見られない現象であり、特に衝撃試験ではこの温度で、明確に異なる2種の吸収エネルギー値が存在する。

記号

W_b : ビーム出力 (W)
 V_b : ビーム電圧あるいはビーム加速電圧 (kV)
 I_b : ビーム電流 (mA)
 ρ : 密度 (g/cm^3)
 Re : 飛程 (cm)
 a_b : ビーム活性変数 $(-) \equiv D_0/D_F$
 D_F : 焦点距離 (cm)
 D_0 : 対物距離 (cm)
 q_B : 入熱 (kJ/cm)
 λ : レーザ波長 (cm)
 $\Delta\theta$: レーザ拡がり角 (rad)
 f : 収束レンズ焦点距離 (cm)
 D_b : 射出点でのレーザービーム径 (cm)
 d_b : ビーム焦点でのビーム径 (cm)
 w_b : ビーム出力密度 (W/cm^2) $\equiv W_b/\pi d_b^2$
 W_c : 面溶融限界ビーム出力 (W)
 w_c : その密度 (W/cm^2) $\equiv W_c/\pi d_b^2$
 κ : 熱伝導率 ($\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$)
 κ_D : 熱拡散率 (cm^2/s)
 η : 電気比抵抗 (Ωm)
 σ : 導電率 (G/m)
 A_b : 吸収率 (%)
 τ : 反応時間 (s)
 v_b : 溶接速度 (cm/min)

A_0 : 定数
 θ_0 : 定数 ($^\circ\text{C}$)
 u_b : 溶接速度

文献

- 1) Y. ARATA and M. TOMIE: Trans. JWS, 1 (1970) 2, p. 176; IIW. Doc. IV-28-70 (1970)
- 2) J. A. STOHR: Fuel Elements Conference, Paris, November, 8 (1957)
- 3) 大阪大学溶接工学研究所公開実験: 100 kW, 100 kV 電子ビーム溶接機, 8月 (1972); Y. ARATA and M. TOMIE: Trans. JWRI, 2 (1973) 1, p. 17; 荒田吉明, 富江通雄: 溶接学会誌, 46 (1977) 7, p. 429; 46 (1977) 8, p. 514; 46 (1977) 9, p. 686; 荒田吉明: 材料学会誌, 27 (1978) 301, p. 921
- 4) A. SANDERSON: Metal Const. and Brit. Weld J., 6 (1974) 1, p. 245
- 5) G. SAYAGH, P. DUMONTE, and T. NAKAMURA: The Second International Symposium of JWS, August, (1975)
- 6) 坪井潤一郎, 赤秀公造, 佐々木弘明, 浮辺輝男: 溶接学会全国大会講演概要, 18 (1973), p. 230
- 7) K. S. AKOP'YANTS: Automatic Welding, 28 (1975) 4, p. 57
- 8) 寺井精英, 松井繁朋, 永井裕善, 伊牟田守, 岩上敏男: 溶接学会全国大会講演概要, 21 (1977), p. 226
- 9) 志田朝彦, 岡村久宣, 喜多久直: 溶接学会全国大会講演概要, 21 (1977), 資料 (1978)
- 10) 田中甚吉, 小菅茂義: 溶接学会 25 回電子ビーム溶接委員会資料, (1978)
- 11) Y. ARATA, F. MATSUDA, Y. SHIBATA, Y. ONO, M. TAMAOKI, and S. FUJIHARA: Trans. JWRI, 5 (1976) 2, p. 99
- 12) 荒田吉明, 富江通雄: 関西電力溶接研究委員会資料, (1978)
- 13) R. SAGLIO: Materiel Construction Procèdes de controle non destructifs en metallurgie Techniques nouvelles Nouveaux progres, (1975), p. 3
- 14) British Patent No. 727, 460 (Application date 8 September, 1951).
- 15) 荒田吉明: 超高温研究資料, 1 (1957) 7, 8, 11
- 16) Y. ARATA: Patent No. 531587; 438525. (1972)
- 17) Y. ARATA and E. NABEGATA: IIW. Doc. IV-221-77 (1977); Trans. JWRI, 7 (1978) 1, p. 101; Trans. JWRI, 7 (1978) 2, p. 81.
- 18) M. J. ADAMS: Report No. 3335/3/73, BMI (1973)
- 19) Y. ARATA and I. MIYAMOTO: Trans. JWS 3 (1972) 1
- 20) Y. ARATA and I. MIYAMOTO: Trans. JWS. 3 (1972) 1

-
- 21) Y. ARATA, H. MARUO, and I. MIYAMOTO: IIW. Doc. IV-241-78 (1978); Doc. 212-436 (1978)
- 22) C. K. N. PATEL: Phys. Rev. 136 (1964), A1187
- 23) 荒田吉明, 宮本 勇: 超高温研究, 4 (1967) 2, p. 51; 溶接学会誌, 39 (1970) 12, (第1報) ~43 (1974) 5, (第7報)
- 24) D. R. WHITEHOUSE: Final Technical Report on Contract DA-01-021-AMC-12427 (Z), U. S. Army Missile Command (1967)
- 25) W. B. TIFFANY, R. TARG, and J. D. FOSTER: Appl. Phys. Letters, 15 (1969) 3
- 26) C. M. BANAS: UTRC. Report, No. R76-912260-1 (1976)
- 27) 荒田吉明: 昭和 54 年度電気学会全国大会シンポジウム
- 28) 荒田吉明, 竹内貞雄, 宮本 勇: 高温学会誌, 4 (1978) 3, p. 122
- 29) Y. ARATA, F. MATSUDA, Y. SHIBATA, S. HOZUMI, Y. ONO, and S. FUJIHIRA: Trans. JWRI, 4 (1975) 2, p. 77
-