

5 | 溶接材料の発展経過

わが国のアーク溶接は、被覆アーク溶接法の発明から遅れること10年、1914（大正3）年に三菱長崎造船所がスウェーデンから被覆アーク溶接棒を輸入し実用化検討を始めたことに始まる。そして、1925（大正14）年には被覆アーク溶接棒の国産化が始まり、艦船を中心に压力容器や橋梁などにも適用が拡大していった。1950（昭和25）年になるとサブマージアーク溶接機が輸入され、造船所で使用が始まった。その後1960（昭和35）年頃までに、ティグ溶接・ミグ溶接・マグ溶接（含炭酸ガス溶接）などのガスシールドアーク溶接が導入された。

アーク溶接に用いられる溶接材料その国内生産量は、図5.1に示すように推移してきた。1970年代前半までの溶接材料の急激な進展は、ほとんどが被覆アーク溶接棒によるものである。1950年代から1973（昭和48）年の第1次石油ショックまでの、高度経済成長に伴う重厚長大産業の発展期には、被覆アーク溶接棒が溶接材料の主役であった。溶接構造物は大型化・高級化が進み、新しい鋼材が開発され、それに伴って溶接材料の低水素化・高強度化・高靱性化が進められた。1973年における被覆アーク溶接棒が溶接材料の生産量に占める比率は73%に達し、被覆アーク溶接は最盛期を迎えていた。また高効率な溶接法も積極的に開発され、人と物を大量に投入して増産を図る技術、例えば、被覆アーク溶接棒を用いたグラビティ溶接、片面サブマージアーク溶接あるいはフラックス入りワイヤを用いたエレクトロガスアーク溶接などが発達した。

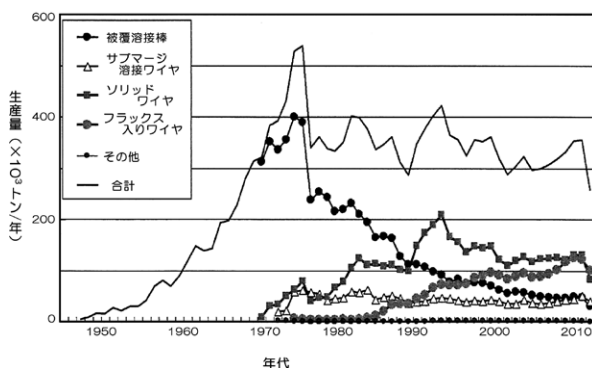


図 5.1 溶接材料生産量の推移¹⁾

石油ショック以降は重厚長大産業の成長も鈍化し、被覆アーク溶接棒から、より効率の高いソリッドワイヤの使用量が増え始めた。特に自動車産業や建築・鉄

骨業界におけるソリッドワイヤの需要が伸び、1988（昭和63）年には被覆アーク溶接棒とソリッドワイヤの生産比率が逆転し、ソリッドワイヤが生産量の首位となった。また当時の造船業界は韓国の追い上げを受け、大幅な効率化に取り組みざるを得なくなっていた。その結果、被覆アーク溶接棒よりも効率の高いフラックス入りワイヤの需要が、この頃から急激に増加することとなった。すなわち、造船を始めとした重厚長大産業の国際競争力強化および自動車産業の急成長に対応するために、溶接材料の開発は「ワイヤ」に主軸が移った。そして、細径（直径1.2mm）を中心としたマグ溶接用ソリッドワイヤや、全姿勢溶接用およびすみ肉溶接用のフラックス入りワイヤの開発が活発に展開された。また、高強度鋼・耐熱鋼・高合金鋼に対応する溶接材料の開発も行われた。1985（昭和60）年に実用化された細径フラックス入りワイヤは、造船業界などの強い要望を背景に数量を伸ばし、2009（平成21）年にはソリッドワイヤを抜き、溶接材料生産量の首位となっている¹⁾。

ガスシールドアーク溶接には、アルゴン（Ar）・炭酸ガス（CO₂）・ヘリウム（He）の単体ガスの他、Ar+CO₂、Ar+O₂およびAr+H₂などの二元混合ガス、あるいはAr+He+CO₂やAr+He+O₂などの三元混合ガスなど、多種多様なガスがアーク溶接のシールドガスとして用いられている。しかし、業種によってシールドガスの種類および使用比率は異なり、近年での一例を示すと図5.2のようである。最も多く使用されているシールドガスはCO₂で、全業種平均で全体の70%を占めている。特に、建築・鉄骨、造船、橋梁といった中・厚板を用いる産業分野での使用比率が圧倒的に高い。一方、輸送機（自動車や車両など）・

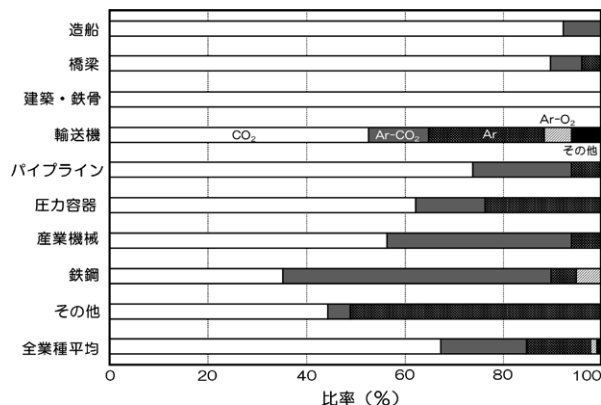


図 5.2 各業種のシールドガス使用比率¹⁾

パイプライン・圧力容器・産業機械・鉄鋼などの産業分野では、Ar、Ar+CO₂の混合ガスあるいはAr+O₂の混合ガスなどのAr系ガスが比較的多く用いられている。

5.1 被覆アーク溶接棒

5.1.1 黎明期の被覆アーク溶接

1914（大正3）年に、三菱・長崎造船所の稲垣鉄郎と工具2名がスウェーデンのチェルベルヒ社に赴き、被覆アーク溶接棒の製造方法や使用方法などを学んで帰国した。また翌1915（大正4）年には、チェルベルヒ社から購入した多人数形の直流溶接機（前述第4章図4.2参照）が届けられた。そして長崎造船所では、稲垣鉄郎の指導のもとに、チェルベルヒ社の被覆アーク溶接棒を使用した溶接を開始し、汽缶部品の試作や肉盛溶接に適用した。溶接棒の被覆剤の成分は、炭酸石灰：20%、重炭酸ソーダ：13%、黄血塩（フェロシアン化カリウム）：5%、木炭粉末：10%、ホウ酸：24%、二酸化マンガン：20%、酸化ケイ素：8%であった。しかしこの成分と比率は極秘扱いで、長い間公表されなかった。一方、大阪製鎖は1920（大正9）年に英国のクアシアーク溶接棒を輸入し、適用分野の開拓に尽力した。クアシアーク溶接棒は、心線にアスベストを巻き、その上に炭酸石灰を塗布したきわめて簡単なものであったといわれている。

以上のように、わが国への被覆アーク溶接棒の導入は、チェルベルヒとクアシアークとの二種類の溶接棒が先鞭をつけた。チェルベルヒの溶接棒はガスシールドタイプ、クアシアークの溶接棒はスラグシールドタイプであった。それぞれ様式の異なる代表的な被覆アーク溶接棒が、ほぼ時を同じくしてわが国に導入され、比較されながら普及した。

1914～1919（大正3～8）年の第1次世界大戦中、諸外国で溶接の利用価値が認識され、溶接の適用範囲は次々に拡大した。その成果はわが国へも伝えられ、造船に溶接を採用する機運が次第に高まった。そして1920（大正9）年には、排水量421トンの全溶接船諏訪丸が長崎造船所において建造された。また、ほぼ同期に、英国でも326トンの全溶接船フラガー（Fullager）号が竣工した。東西で竣工された2隻の溶接船の建造に使われた溶接棒は、前者はチェルベルヒの溶接棒、後者はクアシアークの溶接棒である。それぞれタイプの異なる被覆アーク溶接棒が、いずれも良好な溶接結果を示したことは、溶接に対する信頼感をより一層高めることとなった。

第1次大戦後の1922（大正11）年、ワシントンで世界列強による軍縮会議が開かれた。その結果、わが国では戦力増強のために予定していた八八艦隊の建造が中止となり、以後の新造軍艦の重量も制限されることとなった。そのため、制限重量内ですべての装備のよい軍艦を作るために溶接の採用が重視され、軍艦の建造に溶接が広く採用されるようになった。一方、艦隊建造のために準備されていた大量の鋼材は、民需産業に放出され、この時期を境にして民需産業でも本格的に溶接が適用されるようになった。従来、造船関連分野を中心に発展してきた溶接が民需産業にも普及し、陸上の重工業分野で溶接の採用が進んだ。その結果、溶接だけでも企業として成り立つようになり、日本溶接工業（大正11年）や片山工業所（大正14年：後のアジア溶接工業）などの溶接専門業者が出現した。

民間工事にも溶接が多用されるにつれ、溶接に関する民間の統括機関が必要となったため、1926（昭和1）年に孕石元照を会長とする電気溶接協会（後の溶接学会）が設立された。しかし当時は規模も小さく、大きな成果を挙げることはできなかった。その後、1931（昭和6）年に本部を大阪帝国大学に移し、基礎固めと会務の拡張がなされた。この頃になると、各大学を始めとして各種研究所でも溶接の研究が総合的に行われるようになり、技術・経済の両面から広く一般にも溶接が認識され、溶接を採用・適用する産業分野は一気に拡大した²⁾。

5.1.2 被覆アーク溶接棒の国産化

第1次世界大戦後、欧米を始めとする各国は深刻な不景気に見舞われた。その例にもれずわが国も不景気に見舞われ、政府は輸入抑制・国産奨励の措置を発動した。そしてこの措置を契機にして、ほとんどを輸入に頼っていたアーク溶接棒の国産化が真剣に検討されることとなり、溶接棒に用いる心線はもちろんのこと、被覆剤に関する種々な研究・開発が行われた。

国産の被覆アーク溶接棒を初めて製造したメーカは角丸工業と新宮鑄工所である。1925（大正14）年に、角丸工業は軟鋼用被覆アーク溶接棒を、新宮鑄工所は鑄物用被覆アーク溶接棒を試作した。1930（昭和5）年の国際連盟脱退、1931（昭和6）年の満州事変勃発と続く不安定な政治情勢の下、溶接を取り巻く環境は、外国依存主義を脱して、完全な自給体制を築くことが強く要請された。そのため溶接棒国産化の流れは、以前にもまして重要視されることとなった。この頃被覆アーク溶接棒の製造を開始したメーカは、前述

の角丸工業と新宮鋳工所の他、1929（昭和4）年からの帝国酸素および三葉電熔社（後の不二電極）、1931（昭和6）年からの日本油脂、1933（昭和8）年からの田村アークおよび特殊電極、1934（昭和9）年からの東洋電極工業および日本電極工業などである。また井口庄之助、今城亀之助ならびに孕石元照などは、個人的に被覆アーク溶接棒の研究・開発を行っていた。当時の主な溶接棒とその特徴は表5.1に示すようである。イルミナイト系被覆剤はチタン鉄鉱（ FeTiO_3 ）を主成分とするスラグタイプの溶接棒、セルロース系被覆剤は有機物を被覆剤に含むガスシールドタイプの溶接棒である。これらの溶接棒のうち、ホウ酸系被覆剤を塗布した帝国酸素の16番・17番と呼ばれた溶接棒が好評で、当時の代表的な被覆アーク溶接棒とされていた。

表5.1 初期の国産溶接棒メーカーと主な被覆アーク溶接棒²⁾

会社名	溶接棒の名称	特徴
帝国酸素	16番	ホウ酸系被覆剤塗布
	17番	16番の2度塗り
	18番	イルミナイト系被覆剤塗布
	120番	セルロース系被覆剤塗布
今城	イマシロード	アスベスト巻・スラグシールドタイプ
田村アーク	不明	ホウ砂カルシウム系太径棒
角丸工業	アスベストロード	上向溶接専用棒
	不明	特殊鋼用溶接棒
関東工業	不明	セルロース系・紙巻（内部にベニガラ）
日本油脂	不明	軟鋼用溶接棒
孕石（個人）	G棒	イルミナイト系被覆剤塗布

上述した溶接棒メーカーの他、日立製作所・石川島重工業・三菱長崎造船所・神戸製鋼所などの比較的大手造船機・造船メーカーは、自家消費溶接棒の被覆剤についての改良や研究を行った。そして、それぞれ独自に被覆アーク溶接棒を開発し、種々な構造物の溶接に積極的に使用した。日立製作所では、1928（昭和3）年にガスシールドタイプとスラグシールドタイプの、特性が異なる二種類の被覆アーク溶接棒を開発している。また同社は1933（昭和8）年に、溶着金属の性能向上を目的とした被覆の厚い溶接棒も実用化している。鉄道技術研究所においても溶接および溶接棒の研究が行われ、特性の優れた被覆アーク溶接棒が開発されている。

以上のように続々と国産化された被覆アーク溶接棒は、各産業分野のアーク溶接に幅広く活用されるようになったが、時折思わぬ事故も発生し、その事故の原因は不十分な溶着金属性能ならびに不適切な溶接施工にあることが指摘された。そのため不慮の事故を未然に防止する措置として、海軍および各都市の水道局は

1930（昭和5）年に、帝国海事協会、鉄道省および陸軍工廠などは1933（昭和8）年に、それぞれ個別の溶接規格を公布した。

これらの溶接規格公布に対応するために、溶接協会（後の溶接学会）が中心となって、1934（昭和9）年に当時の市販溶接棒66種の機械的性質についての調査が行われた。その結果、引張強さが $41\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上かつ伸びが20%以上の良好な溶接継手は全体の23%しかなく、国産被覆アーク溶接棒の品質性能は極めて悪いことが判明した。そして溶接規格の公布は、溶着金属の性能を向上させようという強い意欲を溶接棒製造メーカーに与えることとなった。市販の被覆アーク溶接棒の中には機械的性質の良好なものもあったが、十分な信頼は得られていなかった。そのため重要構造物の溶接には、アークス社（ベルギー）のスタビレンド溶接棒が使用されていた。特に海軍関係の溶接では、スタビレンド溶接棒の使用が必須事項となっていた。

1940（昭和15）年になって、市販溶接棒108種についての調査が再び溶接協会を中心に行われた。その結果は、引張強さが $41\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上で伸びが20%以上のものは全体の25%、引張強さが $30\sim 39\text{kg}/\text{mm}^2$ で伸びが10~14%で所定の性能を満足していないものが大多数であった。翌年には、鋼用被覆アーク溶接棒の臨時日本標準規格（第196号）が、引張強さは $41\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上、伸びは1級の場合に32%以上、2級の場合に26%以上、シャルピー衝撃値が1級の場合に $12\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上、2級の場合に $6\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上といった内容で公布された。しかし1942（昭和17）年に実施された市販被覆アーク溶接棒50種について再々調査でも、引張強さが $40\sim 44\text{kg}/\text{mm}^2$ のものが全体の40%、伸びが30~34%のものが全体の28%、シャルピー衝撃値が $10\sim 14\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ のものが全体の32%という結果で、必ずしも満足できる結果は得られなかった。なお当時の海軍が採用していた造船用被覆アーク溶接棒の規格値は、引張強さが $41\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上、伸びが32%（当時の暫定措置として28%）以上、シャルピー衝撃値がノッチなしで $30\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上となっており、臨時日本標準規格より厳しい規格であった²⁾。

5.1.3 被覆アーク溶接棒の性能向上

被覆アーク溶接棒の国産化は国策として活発に行われたが、比較的良好な機械的性質を示す溶接棒も一部存在したものの、国産溶接棒全体としての性能は不満足なものであった。そのため、重要構造物の溶接には

依然として輸入品のアーコス社・スタビレンド溶接棒が使用された。しかし、1936（昭和11）年の日独伊3国同盟締結、1937（昭和12）年の日華事変勃発などによる国際情勢の極度の悪化に伴って、わが国に対する海外列強の経済封鎖が進展した。そのため、重要構造物の溶接に用いられていた高性能溶接棒（スタビレンド溶接棒）の輸入も困難となり、国産化して自給自足しなければならない事態に直面した。軍部が主唱者となって、アーコス社のスタビレンド溶接棒より良好な性能の被覆アーク溶接棒を作ること为目标に、各所で高級被覆アーク溶接棒の研究・開発が精力的に行われた。そして大阪造兵廠の犬飼末雄は、アーコス溶接棒に匹敵する、引張強さが $52\sim 53\text{kg/mm}^2$ で伸びが27~28%の被覆アーク溶接棒を完成した。

一方、1938（昭和13）年に東光社および日本油脂が、1939（昭和14）年に神戸製鋼所が、また1941（昭和16）年に富士鋼業などが海軍の依頼で、高性能な被覆アーク溶接棒についての本格的な研究を開始した。これらの会社では、専門技術者を溶接棒の開発担当者とし、被覆アーク溶接棒の学術的な見地からの研究が行われた。その結果、従来の外国製品模倣の傾向は徐々に薄れ、国産原料を活用した日本独自の被覆アーク溶接棒の開発へと進展していった。

また、それまでの溶接棒の被覆材塗布は手塗りで、生産は極めて非能率的であるとともに、被覆の厚さも不均一で品質管理の点からも不適切であった。そのため、生産の能率化・製品の均一化についての考慮がなされ、解決策として機械塗装の導入が検討された。神戸製鋼所は1939（昭和14）年に海軍から、国産原料を活用してアーコス・スタビレンド棒同等の品質性能を備えた被覆アーク溶接棒を機械塗装で作るよう依頼された。そして翌年の1940（昭和15）年には、溶接棒被覆剤の機械塗装装置の開発を終え、被覆剤の機械塗装による被覆アーク溶接棒の生産を開始した。また被覆剤の研究においても、海外に例のないイルミナイト（チタン鉄鉱・ FeTiO_3 ）を主成分とする極めて性能の優れた被覆剤を開発した。さらに新しい品質良好な溶接棒心線も開発され、この心線とイルミナイト系被覆剤を組み合わせた被覆アーク溶接棒は、輸入溶接棒に代わって海軍の重要構造物の溶接に本格的に使用されるようになった。神戸製鋼所は1943（昭和18）年に、わが国初の本格的な機械塗装装置を備えた被覆アーク溶接棒製造工場（日高工場）を建設している。また東光社や富士鋼業なども、性能に優れた被覆アーク溶接棒を開発し、海軍関係の工事に使用されるようになった。

1935（昭和10）年以降に設立された被覆アーク溶接棒メーカーには、1936（昭和11）年の東洋酸素・アジレ社・三菱金属鉱業、1938（昭和13）年の万興電極、1939（昭和14）年の東京化学・東亜製作所（後の北日本電極）、1940（昭和15）年の日鋼熔材、1941（昭和16）年の神東電極・吉川金属工業、1943（昭和18）年の中山製鋼所・福島熔材などがある。

5.1.4 戦前・戦中の被覆アーク溶接棒

1939（昭和14）年以降、他の鉄鋼製品と同様に、民間に出回っていた手塗りの被覆アーク溶接棒も統制品となり、自由に売買することができなくなった。メーカーの製造した被覆アーク溶接棒は、全て溶接棒組合に納入され、この組合から民間需要家に配給されていた。このような統制は、当時としてはやむを得ない措置であったかもしれないが、多くの溶接棒製造メーカーの意欲を消失させた。統制によって各メーカーは、溶接棒を売り込む努力が不要となり、現状維持の状態に甘んじてしまった。一方これらのメーカーとは別に、軍部から特命を受けた特定メーカーもあり、好むと好まざるに関わらず、軍部からの厳しい要求で高性能な被覆アーク溶接棒の開発を行わなければならなかった。しかし現状維持に甘んじた一般メーカーと、常に溶接棒の性能向上に取り組んだ特定メーカーとの技術的な相違は、後日（戦後）に大きな格差として現れることとなる。

1941（昭和16）年の太平洋戦争開始以来、夜を日についての兵器・艦船の製造が行われた。このような戦時体制下では能率向上が絶対の目標であり、溶接においても能率の向上が強く求められ、自動アーク溶接の採用が検討された。しかし自動アーク溶接装置に不可欠な電気部品は、ほとんど全てが電波兵器の製造に割り当てられており、装置の実用化には至らなかった。仮に必要な電気部品が入手でき、装置の開発に着手できたとしても、当時の技術水準では短期間で自動アーク溶接を実用化することはできなかったように思われる。

戦争が激化するにつれて熟練溶接工も続々と応召され、生産現場での熟練溶接工不足が大きな問題となった。特に造船・造機関係職場の熟練溶接工不足は深刻であった。このような熟練溶接工不足に対応するために、各事業所とも独自で“呉船式”、“日立式”、“横船式”、“長船式”、“赤崎式”などと呼ばれた被覆アーク溶接の自動溶接方法を考案・実用化した。これらの溶接法では、被覆剤を塗布した太径（直径 $8\sim 12\text{mm}$ ）心線の溶接棒を用い、溶接棒を人の代わりに機械で支

え、自動的に溶接を進行させるという手法が採用されている。誰にでも容易に取り扱え、熟練を必要としない高能率な溶接法であった（前述 3.2.2 項参照）。

上記自動溶接法の採用は積極的に推進されたが、当時は太径溶接棒用に製造された心線がなかったため、最初のうちは細径のリベット・バーを流用していた。しかし戦局が次第に不利になり、鋼材不足が目立つようになるとリベット・バーも入手できなくなった。そこで、伸鉄材を利用して太径溶接棒を作ったり、直径 3~5mm の細径溶接棒心線を 2 本合体させてその上から被覆剤を塗布して 1 本の溶接棒としたりして、太径溶接棒線材の不足を補った。後者の被覆アーク溶接棒は、双子棒・親子棒・ひょうたん棒などと呼ばれた。この頃は、輸入の途絶と国産資源の不足から、一般鋼材はもとより特殊鋼材に至るまで極度に不足し、国策として鋼材の節約が強く要求されていた。そのため、以前に増して、継手効率の高い溶接の採用がさらに重要視されるようになっていった²⁾。

5.1.5 戦後生産再開時の被覆アーク溶接棒

1945（昭和 20）年の太平洋戦争終結後、わが国のあらゆる産業は麻痺状態に陥った。溶接棒メーカーもこの例に漏れず、市場には戦時中の軍部や組合のストック品が大量に出回り、溶接棒の生産は一時休止同様の状態に陥った。終戦前までは製品の大部分が軍需関係に使用され、軍需に頼る比率が極めて高かった。そのため他の軍需産業と同様に、軍の解体によって大きな苦境を迎えることとなった。終戦前に存在した溶接棒メーカー（約 75 社）の大半は、この混乱した時期に直面して、将来展望の暗さから生産再開の努力を取りやめた。しかし、神戸製鋼所は将来の平和産業での発展を期待して、溶接棒の量産化に踏み切った。上述したように、神戸製鋼所は重要構造物の溶接に使用できるイルミナイト系被覆アーク溶接棒を 1942（昭和 17）年から機械塗装で生産し、終戦前には約 600 トン/月の生産を行っていた。その他、東洋電極工業・富士興業・ツルヤ工場・永岡興業・日本油脂・吉川金属工業も、生産量は極めて少なかったが生産を続けていた。

戦後の復興期には戦時中のストック品が大量に出回ってはいたものの、あらゆる物資が不足していた。そのため戦災からの復旧はもとより、その他の民間需要も極めて旺盛で、被覆アーク溶接棒は羽が生えたようによく売れ、被覆アーク溶接棒は全くの売手市場となった。1947（昭和 22）年以降には、生産の再開を見送っていたメーカーも続々と被覆アーク溶接棒の生産を再開している。1945（昭和 20）年の角丸工業、

1946（昭和 21）年の神東電極、1947（昭和 22）年の日本電極工業、1948（昭和 23）年の大同製鋼と富士溶接棒、1950（昭和 25）年の新報国製鉄と特殊電極などである。またその後、万興電極・中山製鋼も被覆アーク溶接棒の生産を再開した。

しかし物資不足は深刻で、被覆アーク溶接棒の製造に適した線材や被覆剤原料の流通量は少なかった。とりわけまだ統制が解除されていなかった鉄鋼と有機物の不足は甚だしく、各溶接棒メーカーは溶接棒に用いる線材や有機物の獲得に苦慮し、溶接棒の生産は極めて困難な状態に陥った。そのため、戦災で焼け残った焼線を線引きして作った心線を用いたり、溶接棒用の心線材として不適切な雑線を使ったりした、粗雑な溶接棒がかなり生産され市場に相当量が出回っていたようである²⁾。

5.1.6 被覆アーク溶接棒の復活

戦後わが国の鉄鋼・造船などの重工業メーカーのほとんどは、戦災にあって壊滅に近い状態となっていた。また戦災にあわなかったメーカーも、原料不足・輸送の麻痺・深刻な食糧難などによって復活は思うように果たせなかった。さらに賠償や企業の解体など、占領軍の管理化での問題も山積していた。しかし 1947（昭和 22）年になると、米・ソの対立をめぐる微妙な変化が現れ、これが対日政策の上にも反映されて、占領軍の方針が“苛酷”から“融和”へ、“制限”より“緩和”へと切り替えられた。それに伴って、わが国重工業メーカーも復活の速度を速め、その年に始まった復興金融金庫の重工業に対する重点融資によって完全に復活した。時を同じくして、政府の財政的な保護のもとに、わが国の海運復興を目的とした計画造船が実施された。この計画造船は回を重ねるにつれて建造量が増加したため、それに伴って被覆アーク溶接棒の固定した需要が確立された。そして建造量の増加にほぼ比例して、被覆アーク溶接棒の生産量も次第に増大することとなった。

造船業の復活に伴って、外国船の修理さらには将来の外国船建造も予想されるようになり、溶接棒メーカーは被覆アーク溶接棒に対するアメリカ船級協会（ABS）やロイド船級協会の認定を取る必要にせまられた。溶接棒メーカーはこれらの認定取得のために競って受検した。1948（昭和 23）年には神戸製鋼所が、1949（昭和 24）年には東洋電極工業がロイド船級協会の認定を取得している。また 1950（昭和 25）年には、ツルヤ工場・東洋電極工業・神東電極・神戸製鋼所・白山鉄業・由基製作所がアメリカ船級協会の認定

を取得し、神戸製鋼所・東洋電極工業・由基製作所は日本海事協会（NK）の認定を取得した。また翌年の1951（昭和26）年には神戸製鋼所・東洋電極工業・福知山溶接棒が、翌々年の1952（昭和27）年には日本電極工業が日本工業規格（JIS）の認定を取得した。

わが国経済の自立と安定とのために実施された、均衡財政の実施・為替レートの1本化・補助金の削減などの財政金融引き締め政策（ドッジ・ライン）によって、戦後長い間続いたインフレに終止符が打たれ、経済界はようやく戦後の混乱期から抜け出した。そして、戦後の物資不足のために行われていた重要物資の統制も次々に解除され、わが国の経済は従来の統制経済から自由経済に移行した。溶接棒業界においても、統制されていた溶接棒用線材の統制が解除され、公定価格も廃止されて完全な自由競争時代に突入した。

1951（昭和26）年になると輸出船の建造が開始され、年を経るにしたがってその建造量は増加し、計画造船による建造量を合わせた全体の建造量は莫大な量に達した。そのため造船における溶接継手の採用は飛躍的に増加し、1948（昭和23）年頃の採用率は継手全体の30～40%程度であったが、1951（昭和26）年頃には70～80%に達し、1953（昭和28）年以降はほぼ限界に近い90%以上に達した。このような造船分野の旺盛な需要を中心に、電源開発計画も加わって、鉄鋼・機械・車両・化学・繊維など、溶接を取り巻くあらゆる産業分野の生産が活発化した。また設備の合理化を目的として、外国の先進技術も続々と取り入れられた。

被覆アーク溶接棒の需要量の急激な増加に伴って、生産設備の合理化・工場の拡大や増設が行われ、各溶接棒メーカーはいずれもそれぞれの工場の新設や増設を活発に行うこととなった。しかし当時の溶接棒の被覆剤塗布作業は、図5.3に示すように、旧態依然とした手塗り塗装（a）を行っているメーカーと、専用装置を用いた機械塗布（b）しているメーカーとが混在していた。機械塗布設備で溶接棒を生産する方が合理的で生産性も高いが、機械塗布装置を備えた工場は極めて少なく、戦後直後のメーカーのほとんどは手塗り生産であった。1949（昭和24）年頃になると被覆剤の機械塗布装置も国産化されるようになり、資金力のあるメーカーはこの装置を設置するようになった。しかし被覆剤の塗布設備が完備されると、次に問題となるのは溶接棒の乾燥設備である。機械化によって被覆材の塗布速度が速くとも、塗布能力に合った乾燥設備がないと円滑な溶接棒の生産はできない。そのため、1950（昭和25）年には、塗布装置と離れた場所に設

置されていた乾燥設備（乾燥炉）が、塗布装置と直結した流れ作業のラインの中に取り入れられるようになった。被覆剤塗布装置と連続乾燥炉の一例を図5.4に示す。

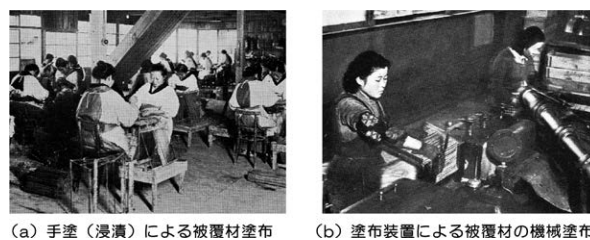


図 5.3 被覆アーク溶接棒の被覆剤塗布作業¹⁾

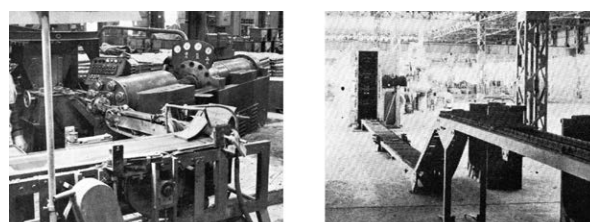


図 5.4 被覆アーク溶接棒の製造装置¹⁾

1951（昭和26）年になると被覆アーク溶接棒の需要は著しく伸長し、それまでの生産設備では需要を消化できない状態となり、各メーカーともに設備の増強や新工場の建設に踏み切った。被覆剤塗布設備についても、さらなる能率化を目指して、海外から高性能な被覆剤塗布装置が輸入された。しかし、このような高性能の被覆剤塗布設備を備えることができたのは比較的大手のメーカーのみで、いまだに手塗り作業で溶接棒を生産していた中小メーカーもかなり存在していた。

1953（昭和28）年にアメリカ船級協会が、認定を取得して被覆アーク溶接棒を製造していたメーカーを対象に、抜打的な品質検査を行った。そして手塗りで作成された被覆アーク溶接棒を生産していたメーカーに対し、被覆剤の機械塗布装置を使用して製品を作らなければアメリカ船級協会の認定を取り消すとの声明を出した。品質管理の徹底と製品の統一化が目的である。当時は国産の塗布装置も市場に出回り、高性能な輸入塗布装置も自由に購入できるようになっていた。これらの装置を導入することによって問題は容易に解決できるが、多くの中小メーカーは装置の購入資金および工場改造資金の調達に苦しみ、溶接棒の製造を断念した。

1953（昭和28）年には川崎製鉄が溶接棒の生産を開始し、これを契機として他の製鉄会社の被覆アーク溶接棒生産への進出が始まった。1955（昭和30）年には、八幡製鉄が福知山溶接棒と共同出資の形で日本溶接棒を設立し、系列化の先鞭をつけた。翌1956（昭

和31)年には溶接棒メーカーの系列化がさらに促進され、神戸製鋼所・川崎製鉄・富士製鉄・住友金属工業・住友電工といった製鉄・製鋼メーカーは、自社工場あるいは傘下メーカーに対する設備投資、原料供給および役員派遣などを行ってその関係を強化した。そのため、大企業およびその傘下メーカーと、この流れに残されたその他の中小メーカーとの企業格差は大きく拡大することとなった。1957(昭和32)年になると製鉄会社による系列化はさらに進み、富士鋼業と日鋼熔材の技術提携(住友系)、富士製鉄の東京化工への心線供給、八幡製鉄系の東洋電極工業と日本溶接棒との合併検討など、系列内での体制固めがさらに進んだ。そして1958(昭和33)年には、東洋電極工業と日本溶接棒が合併した八幡溶接棒が発足した。これによって、神戸製鋼所と八幡溶接棒の二大主流が形成され、川崎製鉄・住友金属工業・富士製鉄がそれに続くといった製鉄・製鋼メーカーによる系列化は表5.2に示すような組み合わせでほぼ完了した。なおこの年には、従来の極めて非能率的な天秤による被覆剤の秤量・配合に代わって、自動配合装置による被覆剤の自動秤量・自動配合が導入されている。

表5.2 鉄鋼メーカーによる溶接棒メーカーの系列化²⁾

	系列溶接棒メーカー
神戸製鋼	なし(自社工場:茨木・日高・藤沢)
八幡製鉄	八幡溶接棒東京工場(元東洋電極工業) 八幡溶接棒福知山工場(元福知山溶接棒) ツルヤ工場・神東電極・吉川金属工業 永岡興業・万興電極棒・四国熔材製造所 不二電極
富士製鉄	富士溶接棒(元東京溶接棒) 北日本電極・福島熔材
住友金属	富士興業・角丸工業
川崎製鉄	なし(自社:千葉製鉄所内)
日本金属工業	日本油脂
日本冶金	日本ウェルディングロッド

鍋底景気にあえいだ1958(昭和33)年が過ぎ翌年になると、産業界は再び活況を呈し始め、被覆アーク溶接棒の需要も急激に伸長した。そして1960(昭和35)年の被覆アーク溶接棒生産量は、10,000トン/月を突破した。その後所得倍増計画が発表されたこともあり、各溶接棒メーカーの設備更新・増強計画は他産業と同様に一段と活気を帯び、生産設備の増強あるいは新工場建設が急務となった。1960(昭和35)年には神戸製鋼所が関東地方(藤沢)で新工場の建設を始め、それに続いて八幡溶接棒や富士溶接棒なども新工場の建設に着手した。また川崎製鉄・富士鋼業・日本電極工業、さらに特殊電極・日本油脂・日本ウェルディングロッドなど特殊溶接棒メーカーも、次々と被覆

剤塗布装置その他の増設を行った²⁾。

5.1.7 被覆アーク溶接棒の進展

1950(昭和25)年頃までのわが国の被覆アーク溶接棒は、イルミナイト系溶接棒のみの生産であった。しかし米国からの新しい情報で、数種の被覆剤が開発され、用途によって溶接棒をそれぞれ使い分けていることが分かった。そのためわが国でも、1949(昭和24)年以降新しい被覆剤の研究・開発が開始された。当時のわが国と米国との被覆アーク溶接棒を比較すると、わが国のイルミナイト系溶接棒は、被覆剤の資源面と溶着金属の機械的性質とにのみ重点が置かれ、作業性は軽視されていた。それに反して、米国の被覆アーク溶接棒は作業性に重点を置き、それに若干の機械的性質を加味した溶接棒が作られていた。溶接棒の被覆は高セルロース系、高酸化チタン系および高酸化鉄系の3種類である。

以上のような事情から、わが国のイルミナイト系溶接棒も作業性の面から再び検討されるようになった。また、高セルロース系および高酸化鉄系の被覆剤の研究も始められた。そして1950(昭和25)年に、従来のイルミナイト系溶接棒より作業性の良い改良型イルミナイト系溶接棒、高セルロース系溶接棒および高酸化鉄系溶接棒が完成した。1950(昭和25)年の貿易再開によって、高酸化チタン系被覆剤の原料であるルチール(チタニヤ:TiO₂)がオーストラリアから輸入できるようになり、酸化チタン系の被覆アーク溶接棒の研究・開発が可能となった。また欧州で古くから使用されていた、石灰石(CaCO₃)が主原料で有機物は全く含まない低水素系溶接棒の研究も本格的に実施されるようになった。

1951(昭和26)年に完成した高酸化チタン系溶接棒は、従来のイルミナイト系、セルロース系および酸化鉄系などの溶接棒に比べ、スパッタの発生が少なく溶込みも浅いため薄板の溶接に適した。またビード外観が美しく作業性が良く、立向下進溶接も可能であった。石灰石を主成分とする低水素系溶接棒も同年に完成し、従来の各種被覆アーク溶接棒と異なる特性を示した。溶接金属中の水素は極めて少なく、脱酸剤としてフェロシリコン(Fe-Si)を含有しているため、耐割れ性や機械的性質、特にじん性に優れ、厚板や鋳鋼品の溶接に極めて優れた性能を発揮した。また米国から紹介されて注目を集めていた、鋳物溶接用の共晶合金被覆アーク溶接棒についても国産化の研究が各所で行なわれた。そして1951(昭和26)年に、アジア溶接工業所で国産化に成功し、輸入品の被覆アーク溶接棒

と肩を並べて、鋳物の溶接に使用されるようになった。

1952（昭和27）年には、戦時中にわが国で開発された太径溶接棒が造船界で再認識され、酸化鉄系の被覆剤を塗った太径溶接棒が大々的にすみ肉溶接に使用された。また、火力発電および船舶のボイラやタービンの高温・高圧化に伴って、これらの装置内のパイプには耐熱鋼であるCr-Mo鋼が使用されるようになった。そのため、Cr-Mo鋼用の被覆アーク溶接棒の研究・開発が行われ、1951（昭和26）年には数種類のCr-Mo鋼用溶接棒が市販された。

1953（昭和28）年には、被覆剤の系統が全く新しいライムチタニヤ系の被覆アーク溶接棒が開発された。ライムチタニヤ系溶接棒は、戦後の欧州で開発された溶接棒で、溶着金属中の水素が比較的少なく、機械的強度が優れていた。またアングカッは生じにくく、溶込みはイルミナイト系溶接棒より浅いがスラグの包被性が良好で、美しいビード外観が得られた。この年には、前年（昭和27年）以来、造船分野で多く使われるようになった太径の酸化鉄系被覆アーク溶接棒の改良・深溶込み被覆アーク溶接棒・高張力鋼用被覆アーク溶接棒などの研究・開発も活発に行われた。

上述したように、この年（昭和27年）にはアメリカ船級協会が手塗り被覆アーク溶接棒の採用を拒否する声明を出しているが、同時に、わが国独自のイルミナイト系被覆アーク溶接棒もアメリカ船級協会では認めないとの声明が出された。手塗り溶接棒の問題とは異なり、わが国の代表的な被覆アーク溶接棒であるイルミナイト系溶接棒が、海外で認められるか否かは極めて重大な問題である。溶接棒メーカーと日本溶接協会は一丸となってこの措置に反対し、イルミナイト系溶接棒の優秀性を指摘した論文を作成して反駁した。論文提出後も再び認められないとの回答がなされるなど幾多の屈折を経たが、1954（昭和29）年にはわが国の主張が認められた。そしてアメリカ船級協会本部は、特別証明書を発行してイルミナイト系溶接棒の使用を認めた。

1954（昭和29）年には、当時の造船分野で多用され高能率を発揮していた太径の酸化鉄系被覆アーク溶接棒のさらなる能率向上が提案された。そこで、従来の酸化鉄系被覆剤に鉄粉を添加することが検討され、すみ肉溶接用の鉄粉酸化鉄系被覆アーク溶接棒がこの年に完成した。また数年来の懸案であった、深溶込み被覆アーク溶接棒と高張力鋼用被覆アーク溶接棒もこの年に完成し、市販されるようになった。そして、高張力鋼を艦船に使用する検討を始めていた防衛

庁は、国内溶接棒メーカーに高張力鋼用被覆アーク溶接棒の提出を求めた。神戸製鋼所、福知山溶接棒および東洋電極の高張力鋼用被覆アーク溶接棒が選定され、防衛庁での採用が決定した。さらに1955（昭和30）年には、高張力鋼を用いた船舶・橋梁・車両・タンクなどが続々と作られるようになり、これらの溶接に用いる高張力鋼用被覆アーク溶接棒は次第に普及した。

鉄粉酸化鉄系被覆アーク溶接棒は1956（昭和31）年に完成したが、完成当初はそれほど注目されなかった。しかし造船業界が活況になるにつれて、能率面で認識され始め、その使用量は次第に拡大した。1950（昭和25）年頃から始まった諸外国企業との技術提携も年を経るにしたがって急激な増加を示し、火力発電・航空機・応用化学・石油精製などの分野では続々と生産設備の近代化が行われた。それに伴って特殊被覆アーク溶接棒は、品種と品質の高度化が要求されるようになった。そのため被覆アーク溶接棒の研究は、極めて広範囲におよび、あらゆる材料の溶接について、あらゆる角度からの研究・開発が行われた。

1957（昭和32）年には、化学工業の発達とともに、冷凍機器・ガスの液化・石油精製・LPGタンカーなど、低温で使用される圧力容器や装置の需要が増加した。そのため低温で使用される低温用鋼材の溶接も必要となり、2.5%および3.5%のNiを含む低温鋼用被覆アーク溶接棒が開発された。その他、化学機器で 사용되는異種金属継手の溶接に適した各種被覆アーク溶接棒、および耐熱鋼用の9Cr-1Mo系被覆アーク溶接棒も開発された。

1955（昭和30）年に米国から超高張力鋼“Carilloy T-1”が紹介され、実用化によって利点や優秀性などが認められた。そして1958（昭和33）年には、従来の52kg/mm²級高張力鋼に加えて、55および60kg/mm²級高張力鋼が続々と国産化されるようになった。それに伴い種々な高張力鋼用被覆アーク溶接棒も次々に開発され、大々的に使用されるようになった。

裏側から溶接ができないパイプの溶接などでは、表面からの溶接で裏側まで完全に溶融することは困難で、裏面に未溶融部を残したまま実用に供されていた。しかし、溶接棒の被覆を低水素系の被覆剤で二重被覆とすることによって、裏側まで完全に溶融して完全な裏波ビードを形成できることが判明した。そして二重被覆の裏波溶接棒が開発され、1959（昭和34）年には広範囲な産業分野で実用化されるようになった。また、溶接棒メーカーは一重被覆の裏波溶接棒の開発も始め、この年には二重被覆の溶接棒に勝るとも劣らな

い、一重被覆の裏波溶接棒を完成した。その他、従来の各種タイプの軟鋼用被覆アーク溶接棒については品質の向上、作業性の向上を目指して各メーカーはさらなる研究を継続するとともに、需要増加に伴って一層の品質の向上が望まれていたステンレス鋼溶接棒および表面硬化溶接棒の品質向上や新しい溶接棒の開発に重点を置いた研究が推進された。

1960（昭和35）年以降は、新しい被覆剤に関する開発研究は行われず、すでに開発された被覆アーク溶接棒の品質や作業性を向上させるための改良研究が行われるようになった。また、能率向上を目的として被覆剤に鉄粉を添加し、従来と同様の作業性・溶接性を備えた被覆アーク溶接棒を作ることにも重点が置かれた。特殊被覆アーク溶接棒では、化学工業の設備増強に対処するために、品質の向上とともに作業性に重点を置いた開発が行われた²⁾。

上述した溶接棒の被覆剤として用いられた主な物質とその効果をまとめると表5.3に示すようであり、アークの安定化・スラグの生成・シールドガスの発生・作業性の改善など、目的に応じて種々な物質を組み合わせて被覆剤としている。また軟鋼用被覆アーク溶接棒の主な種類と特徴は次のようである。

- ・イルミナイト系溶接棒：被覆剤にイルミナイト（チタン鉄鉱・ FeTiO_3 ）を30%程度含んだ、わが国独自の溶接棒である。スラグの流動性は比較的良好で、全ての溶接姿勢に適用が可能である。アークはやや強く、溶込みは深い。スラグの除去が容易で、ビード波は細かく美麗であるため、あ

らゆる構造物の溶接に広く使用されている。

- ・セルロース系溶接棒：被覆剤に有機物を20%以上含んだ溶接棒である。有機物の燃焼で多量のガスを発生して溶着金属を保護するガスシールドタイプの溶接棒で、アークは強く、溶込みは深い。
- ・酸化鉄系溶接棒：酸化鉄を主成分とした被覆剤の溶接棒である。主に水平すみ肉溶接で使用され、溶滴はスプレー移行するためスパッタは少ない。スラグは完全に溶着金属を覆い、剥離性も良好である。ビード表面は滑らかで、等脚長に近い平らなすみ肉形状を形成する。
- ・低水素系溶接棒：石灰石などの塩基性炭酸塩を主成分とした被覆剤の溶接棒である。被覆剤中の水素源が少なく、炭酸塩が分解されて発生する炭酸ガスでアークをシールドする。溶接割れに影響を及ぼす水素量は極めて少なく（低水素系：4~7ml/100g）、機械的性質に優れるため、厚鋼板の溶接などに適する。
- ・チタニア系溶接棒：被覆剤に酸化チタンを35%程度含む溶接棒である。アークはおだやかで、スパッタの発生は少ない。スラグの粘性は大きく、溶着金属の被包も良好で、全ての溶接姿勢に適用できる。溶込みは浅く、薄板の溶接に適し、軽構造物の溶接に使用される。
- ・ライムチタニア系溶接棒：被覆剤に酸化チタンを約30%、石灰石などの塩基性物質を約20%程度含む溶接棒である。アークはおだやかで、全ての溶接姿勢に適用が可能であるが、特に下向・立向すみ肉溶接に適する。チタニア系溶接棒と同様に

表 5.3 被覆剤に用いられる物質とその効果²⁾

物質名	アーク安定剤	スラグ生成剤	脱酸剤	還元ガス発生剤	酸化剤	合金剤	流動性改善	固着剤	スラグ剥離改善
炭酸ソーダ (Na_2CO_3)、重炭酸ソーダ (NaHCO_3)、酸性白土	○	○							
炭酸カリ (K_2CO_3)、石灰 (CaO)、石灰石 (CaCO_3)	○	○							
黄血塩 ($\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$)	○	○					○		
螢石 (CaF_2)	○	○					○		○
ホウ砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)、ホウ酸 ($\text{B}(\text{OH})_3$)、苦土 (MgO)、製鋼スラグ		○							
炭酸マグネシウム (MgCO_3)、アルミナ (Al_2O_3)		○							
氷晶石 (Na_3AlF_6)		○					○		
珪砂 (SiO_2)、二酸化マンガン (MnO_2)	○	○			○		○		○
酸化チタン (TiO_2)、石綿	○	○					○		○
ペニガラ (Fe_2O_3)、ミルスケール (Fe_3O_4)、砂鉄	○	○			○		○		
フェロシリコン (FeSi)、フェロチタン (FeTi)、フェロバナジウム (FeV)			○			○			
酸化モリブデン、酸化ニッケル					○	○			
マンガン (Mn)、フェロマンガン、クロム (Cr)、フェロクロム			○			○			
アルミニウム (Al)、マグネシウム (Mg)			○						
ニッケル (Ni)、クロム線、銅 (Cu)						○			
水ガラス (ケイ酸ソーダ・ Na_2SiO_3)、ケイ酸カリ (K_2SiO_3)	○	○						○	
小麦粉	○		○	○				○	
綿糸、綿布、紙、木材鋸屑	○		○	○					
炭粉			○	○		○			
フノリ、膠、カゼイン、ゼラチン、アラビア護膜、糖蜜				○					○

酸化チタンを多量に含むが、チタニア系溶接棒より機械的性質に優れる。

上述したようなわが国の被覆アーク溶接棒の技術は海外でも認められるようになり、1959（昭和34）年には、八幡溶接棒がイルミナイト系溶接棒の製造技術をスイスのエリコン社へ技術輸出した。1960（昭和35）年には、神戸製鋼所が中国の鋸条公司に対して技術輸出を行った。また同社は、わが国の被覆アーク溶接棒開発当初の目標であったスタビレンド溶接棒の開発国であるベルギーへ、被覆アーク溶接棒を輸出するようにもなった。

1955（昭和30）年頃を境にして電源開発や道路建設が盛んになると、ブルドーザーその他建設機械が続々と国産化された。それらの部品補修に、古くから機械部品や鋳山機械の補修に使用されていた表面硬化肉盛溶接棒が盛んに使用されるようになった。また部品補修とは別に、新品への肉盛溶接も行われるようになり、年を経るにつれて表面硬化肉盛溶接棒の需要は増大した。さらに各工業での活発な設備増強によって工業用地が不足し、海岸を埋め立てた臨海工業地帯の造成が、千葉を皮切りに名古屋・堺・岡山など続々と行われた。この埋め立て工事に使用されるサンドポンプ・ケーシングの内面およびカッターナイフの刃先は、砂礫と岩盤による摩耗が著しく、これらの補修に大量の表面硬化肉盛溶接棒が用いられた。そのため埋め立て工事の増大とともに、溶接棒の需要も急激に増加し、品質の改良や新しい表面硬化肉盛溶接棒の開発が積極的に推進された。

極低温海域で使用される海洋構造物や低温用アルミキルド鋼が用いられるLPGタンカーやタンクなど、低温環境で使用される構造物用の溶接材料として、Ti-B系およびNi-Ti-B系の低温用鋼用被覆アーク溶接棒も実用化された。海洋構造物の溶接には厳しい低温靱性が要求され、靱性の向上には、低酸化とともに、溶接金属組織の微細化が必須である。YP550MPa以下の鋼材用の溶接棒では被覆剤にTi-Bを複合添加して、YP600MPa以上の鋼材用の溶接棒では被覆剤にNiを添加することによって、組織の微細化が図られている。

代表的な大型構造物の一つである水圧鉄管（ペンストック）では、重量軽減や溶接工数低減を目的として早くから高強度化への取組みが行われていた。近年では、東京電力・神流川発電所の水圧鉄管に国内で初めて950MPa級の高張力鋼が採用されている。950MPa級高張力鋼用被覆アーク溶接棒では、脆性破壊の発生を防止するために高靱性化が必要であり、フラックス

中の脱酸性原料の選択と適正化などが行われた²⁾。

5.2 サブマージアーク溶接材料

わが国のサブマージアーク溶接は、1951（昭和26）年に、大阪変圧器が米国のユニオンカーバイド社と自動溶接に関する技術提携契約を締結し、ユニオンメルト溶接装置として製造販売を開始したことに始まる。当初はその需要がほとんどなかったが、1954（昭和29）年頃から徐々に需要が増加し始め、溶接の能率化が重視されだした1955（昭和30）年には、造船を始めとして造機関係などでも採用されるようになった。サブマージアーク溶接の需要の増大に伴って、輸入品に頼っていた溶接ワイヤの国産化も検討され、神戸製鋼所および大同製鋼が国産のサブマージアーク溶接用ワイヤを開発した。当初は炭素鋼の溶接を対象としたSi-Mn系のワイヤのみであったが、その後、高張力鋼用のNi系およびNi-Cr-Mo系ワイヤ、耐熱鋼用のMo系およびCr-Mo系ワイヤ、耐候性鋼用のCu-Cr系およびCu-Cr-Ni系ワイヤなどが次々に開発された。

溶接装置、溶接ワイヤの国産化に続いて、1959（昭和34）年には、阪神溶接機材がフラックスの国産化に成功した。翌1960（昭和35）年には、ユニオンメルト溶接法の特許が期限を過ぎて失効した。それまでは特許の関係で、溶接ワイヤ、フラックスともに限られたメーカーでしか製造できなかったが、特許の失効と同時に川崎製鉄や八幡溶接棒なども溶接ワイヤとフラックスの生産・販売を開始した。この頃のフラックスは熔融型で、原料鉱石を混合・溶解し、それを急冷凝固させた後に粉碎・整粒したものである。熔融型フラックスには、ガラス状のものと軽石状のものがあるが、いずれも表面はガラス状で耐吸湿性に優れる。また一般に、フラックスの融点が低いため、高速溶接に適する。

しかし熔融型フラックスには、得られる溶着金属の切欠きじん性が低いという欠点がある。この欠点改良についての研究が行われ、1961（昭和36）年に、じん性に富む溶着金属が得られる焼結型のフラックスが開発された。焼結型フラックスはわが国独自の画期的なフラックスで、海外にはこの種のフラックスはない。焼結型フラックスは、石灰石（CaCO₃）・ほたる石（CaF₂）・酸化マグネシウム（MgO）・アルミナ（Al₂O₃）などを主成分とする原料粉や金属粉・合金粉を混合し、それに水ガラスを添加して造粒した後、

600℃程度で焼成する。そのため脱酸成分や合金成分を任意に添加することが容易であり、炭酸塩・金属粉・合金粉などの添加によって、溶接金属の低水素化・低酸素化ならびに溶着速度の向上などが可能となる。またフラックスの耐熱性は高いため、大入熱溶接などにも適用できる。しかし、溶融フラックスに比べると吸湿性が大きいため、通常は、使用前に300℃で1時間程度の乾燥を行うことが必要である（溶融型フラックスと焼結型フラックスの主な特性の比較は3.3.3項・表3.2参照）。

さらに高いじん性が要求される高張力鋼用のフラックスについての研究・開発も行われ、種々な高張力鋼用の焼結フラックスが開発・市販された。近年では、フラックス中の脱酸剤成分とその成分比率を適正化して高じん性を確保した、950MPa級高張力鋼用のフラックスも開発されている。

発電プラント用ボイラの分野では、地球環境問題(CO₂低減)の関係から、高い発電効率が求められ、蒸気条件の高温・高圧化が進められた。鋼材には、従来から使用されているMod. 9Cr-1Mo耐熱鋼の他、さらに高温強度特性を改善した高Cr-W系の鋼材の適用が検討された。それに対応して開発されたサブマージアーク溶接用の12Crフェライト系耐熱鋼用フラックスでは、Crを増加させることによって耐酸化性を向上させるとともに、Wを添加して固溶強化やNb・Vの増加による析出硬化などが図られた²⁾。

昭和50年代後半には、狭開先サブマージアーク溶接への適用を目的として、狭い開先角度・狭い開先幅においてもスラグの剥離性が良好なフラックスが開発された。

5.3 マグ・ミグ溶接ワイヤ

5.3.1 ソリッドワイヤ

炭酸ガスをシールドガスに用いるマグ溶接では、前述(3.6.1項(1)参照)したように、適切な脱酸成分を含んだワイヤを用いることによって満足すべき溶着金属を得られることが、1953(昭和28)年にリユーバフスキーとノボシロフとによって見出された。そしてオランダのフィリップス社が、溶接ワイヤにSiおよびMnなどの脱酸剤を0.3%以上添加して酸素を除去する方法を発明し、1956(昭和31)年に日本での特許が成立している。またわが国では1950年代前半に、名古屋大学の関口教授が炭酸ガスと酸素の混合ガスでシールドするCO₂-O₂アーク溶接法を提案し、それに用いるワイヤとしてSiおよびMnを通常より多く含む低炭素のワイヤ(いわゆる関口心線)を開発した。1971(昭和46)年には、フィリップス社が持っていた炭酸ガス溶接用ワイヤに関する日本特許が失効し、それ以後国産溶接材料メーカーが競ってこの分野に参入し、ワイヤ成分の改良などによって種々なタイプのマグ溶接用ワイヤを開発した²⁾。1970年代後半には、溶接ワイヤを多量に消費する造船や建築分野などでマグ溶接の採用が大幅に増加し、1984(昭和59)年になると国内のマグ溶接用ワイヤの年間生産量は、それまで首位であった被覆アーク溶接棒の生産量を追い抜くまでに増大した¹⁾。

軟鋼・高張力鋼のマグ溶接に用いられる主なソリッドワイヤは表5.4に示すようであり、JIS規格(JIS Z 3312)では、ワイヤの化学成分および溶着金属の機

表 5.4 軟鋼・高張力鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3312 : 2009 抜粋)

記号	シールドガス	ワイヤの化学成分 (vol%)									溶着金属の機械的性質				
		C	Si	Mn	P	S	Cu*	Mo	Al	Ti + Zr	引張強さ (MPa)	降伏点 0.2% 耐力 (MPa)	伸び (%)	温度 (℃)	吸収エネルギー (J)
YGW 11	CO ₂	0.02~0.15	0.55~1.10	1.40~1.90	0.030以下	0.030以下	0.50以下	—	—	0.02~0.30	490~670	400以上	18以上	0	47以上
YGW 12			0.50~1.00	1.25~1.90						—		—			
YGW 13			0.55~1.10	1.35~1.90						0.10~0.50	0.02~0.30	430~600	330以上	20以上	27以上
YGW 14			1.00~1.35	1.30~1.60						—	—				
YGW 15	Ar+CO ₂	0.02~0.15	0.40~1.00	1.00~1.60	0.030以下	0.030以下	0.50以下	—	0.02~0.15	490~670	390以上	18以上	-20	47以上	
YGW 16			0.85~1.60	—											—
YGW 17			0.20~0.55	1.20~2.10						—	—	430~600	330以上	20以上	27以上
YGW 18	0.55~1.10	1.40~2.60	0.40以下	0.30以下	550~740	460以上	17以上	0	70以上						
YGW 19	0.40~1.00	1.40~2.00								—	—				

* 鋸めつきが施されている場合は、めっきの鋼を含む。

機械的性質が規定されている。YGW11 ワイヤは、シールドガスに 100% CO₂ を用いるマグ溶接の大電流域で使用するわが国独特のワイヤである。溶接金属中の酸素を低減させるために、酸素 (O₂) との親和力が強い Ti・Zr・Al が微量添加されている。酸素を低減させることによって溶接金属の粘性は増大するため、水飛沫のように溶融池から飛び出すスパッタを抑制する効果が得られる。

シールドガスの種類によって、溶接に用いるワイヤは異なる。シールドガスに 100% CO₂ を用いる YGW11 や YGW12 などワイヤでは、Ar-CO₂ 混合ガスを用いる YGW15 や YGW16 などと比べ、ワイヤ中の Si と Mn の量を多く規定している。CO₂ の酸化力は Ar-CO₂ 混合ガスより強いため、溶接金属の脱酸に Si と Mn がより多く使用され、溶接金属中に残存するそれらの量が少なくなるのを避けるためである。表 5.5 は同一のソリッドワイヤ (YGW16) を用い、シールドガスの Ar 混合比を変えた場合の溶接金属の化学成分の変化を示したものである。シールドガス中の CO₂ の比率が増加するに従って溶融金属中の酸素量も増加し、酸素との親和力が強い Si および Mn による脱酸が進行して、溶接金属中の Si および Mn の歩留まりは減少する。したがって 80% Ar + 20% CO₂ 混合ガス用ワイヤを、誤って 100% CO₂ のシールドガスで使用すると、溶接金属中の Si と Mn が減少し過ぎ、表 5.6 に示すように、溶接継手の強度は低下し、じん性は高くなる。反対に 100% CO₂ のシールドガス用ワイヤを、80% Ar + 20% CO₂ 混合ガスで使用すると、継手強度は高くなるが、じん性 (吸収エネルギー) は低下する。

表 5.5 シールドガス組成と溶着金属の化学成分

シールドガス	化学成分 (Vol.%)				
	C	Si	Mn	P	S
CO ₂	0.10	0.22	0.62	0.015	0.009
Ar + 20%CO ₂	0.10	0.39	0.80	0.014	0.007
Ar + 10%CO ₂	0.09	0.39	1.06	0.014	0.007

表 5.6 シールドガス組成と溶着金属の機械的性質

シールドガス	機械的性質			
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	吸収エネルギー (J・0°C)
CO ₂	400	500	36	140
Ar + 20%CO ₂	420	540	34	120
Ar + 10%CO ₂	460	550	30	110

YGW17 は、自動車部品のパルスマグ溶接の改善を目的として、1986 (昭和 61) 年に開発された低 Si 系のワイヤである。ワイヤ中の Si を低減させることに

よって、ワイヤ先端に形成される溶滴の粘性は低下し、溶滴のワイヤ端からの離脱が容易になる。その結果、ワイヤ端から離脱する溶滴径は小粒となり、アーク長を短くしても短絡が生じにくくなるため、溶接速度の高速化が可能になる。

YGW18 および YGW19 は、大入熱・高パス間温度に対応するために、1997 (平成 9) 年に開発されたワイヤである。建築鉄骨の溶接施工では、近年、より厳格な溶接施工管理が要求されるようになってきた。日本建築学会の鉄骨工事技術指針では、溶接部の健全性確保のために、「溶接入熱 40kJ/cm 以下かつパス間温度 350°C 以下」を溶接時の熱管理の目安としている。建築鉄骨の柱-梁仕口溶接部の溶接長は、一般の溶接構造物に比べて短く、連続で溶接するとパス間温度が 300~600°C まで上昇することがある。パス間温度が高くなると、溶接部の冷却速度が遅くなり、溶接金属の引張強さもじん性も規格値を満たさなくなる。そのため、Mo を添加した Ti-B 系 (高じん性) のソリッドワイヤが開発され、YGW18 および YGW19 として JIS 規格に追加された。これらのワイヤでは、従来ワイヤ (YGW11) の場合より溶接入熱を大きく、パス間温度を高くしても、良好な機械的性質の溶接金属が得られる。すなわち入熱管理の煩わしさを軽減できるばかりでなく、パス間温度の拡大による冷却待ち時間の短縮が可能となり、高品質・高能率な施工が可能となる。

ソリッドワイヤでは、一般に、通電性・送給性の向上と防錆を目的として、ワイヤ表面には銅めっきが施されている。従来常識とされていたこのような銅めっき処理を行わない、銅めっきレスワイヤが 2000 (平成 12) 年開発された。特殊な表面処理を施すことによって銅めっき処理を省き、優れたワイヤ送給性や通電性を確保して、良好なアークの安定性や低スパッタ化などを実現した。両者の通電抵抗の変化を比較すると図 5.5 のようであり、銅めっきワイヤではめっき被膜の微小クラックの影響でめっき部と地金露出部で通電抵抗値が変化する。一方、銅めっきレスワイヤでの通電抵抗値はやや高い値となるが、その変動は少なく均一な通電状態が得られる³⁾。

その他、耐候性鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3315)、モリブデン鋼およびクロムモリブデン鋼用ソリッドワイヤ (JIS Z 3317)、鋳鉄用ソリッドワイヤ (JIS Z 3252)、ニッケルおよびニッケル合金用ソリッドワイヤ (JIS Z 3334)、銅および銅合金用ソリッドワイヤ (JIS Z 3341) が開発され、規格化されている。またティグ溶接に用いる溶加材として、高張力鋼および

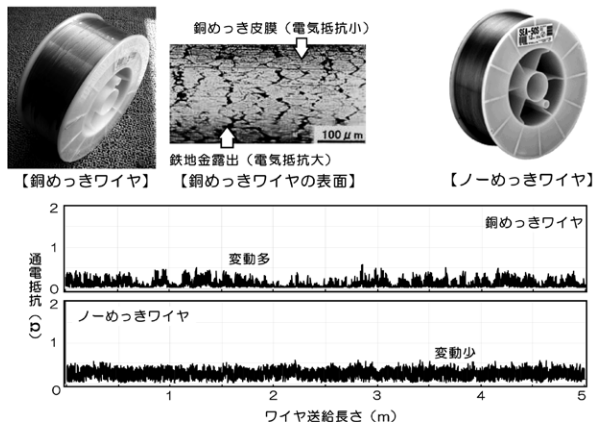


図 5.5 銅めっきワイヤとノーめっきワイヤの比較³⁾

低温用鋼用ワイヤ (JIS Z 3316) と 9% ニッケル鋼用ワイヤ (JIS Z 3332) が開発され、規格化されている。なお、ステンレス鋼およびアルミニウムのソリッドワイヤについては後述する。

5.3.2 フラックス入りワイヤ

わが国初のフラックス入りワイヤは、日立製作所が開発した炭酸ガス溶接機 (ハイアーク溶接機) に用いられるワイヤとして、1961 (昭和 36) 年に国産化された。神戸製鋼所、八幡溶接棒および富士溶接棒が、それぞれ異なった形式のフラックス入りワイヤを開発して市販している。しかし、いくつかの新技術も自社開発されてはいるものの、依然として外国の技術に依存する度合が極めて大きかった²⁾。

1973 (昭和 48) 年のオイルショック以降、造船分野では船の建造量が激減し、1980 (昭和 55) 年にはピーク時の約 1/3 にまで落ち込んだ。そのため造船メーカーは生き残りを賭けて徹底したコストダウンに取り組み、建造工数に占める比率の高い溶接作業の合理化 (生産性向上) が重点的に取り上げられた。被覆アーク溶接やグラビティ溶接に替わる新しい溶接法についての検討がなされ、自動車分野や建築鉄骨分野で先行していたソリッドワイヤによる半自動マグ溶接の適用が進められた。マグ溶接は多量のスパッタ発生や操作性の悪さが問題となったが、それ以上の致命的な問題点として、船殻の製作特有の全姿勢溶接に十分な対応ができないことが判明した。

ソリッドワイヤを用いるマグ溶接では、下向や水平姿勢で高電流・高能率な溶接が可能であるが、立向や上向姿勢では低電流・低能率の溶接に限定され、作業能率は大きく低下する。また船殻の溶接継手には、水平、下向、立向および上向の溶接線がある。そのため溶接作業者は溶接姿勢が変わる度に、溶接条件を再調

整するために遠方の溶接機まで往復しなければならず、高能率は一層阻害されることとなった。そこで強く望まれたのは、同一高電流で全姿勢溶接が可能な新たなワイヤの開発であった。そしてこのニーズに応えるには、重力に逆らって溶融池を支えるスラグに頼るしかないと考え、新しいフラックス入りワイヤの開発が始められた。ソリッドワイヤの欠点としては、上記した溶接姿勢による能率低下の他、多発するスパッタの除去、少量の硬い付着スラグの除去、ビード外観不良の手直しなどの後処理工数の増大も大きな問題であった。

立向下進溶接で良好な作業性を示すチタニア系および低水素系被覆アーク溶接棒には、主要スラグ形成剤として、アークを安性化しかつ溶融スラグの粘度を適正化する酸化チタン (チタニア: TiO_2) が含まれている。そこで、この TiO_2 の作用と効果に着目した研究が行われ、チタニア系細径フラックス入りワイヤが 1965 (昭和 40) 年に開発された。その頃ある造船所で、溶接ビード表面の平滑度に厳しい基準を設定した船が連続して建造されることとなり、スパッタの除去はもちろんのこと、溶接ビードの全長でグラインダ研削が必要とされた。新しいフラックス入りワイヤのビード表面の平滑さに着目した溶接スタッフは、発注者にその溶接ビードを見せて説得し、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接のビードはグラインダ研削が不要であるとの見解を引き出した。そしてフラックス入りワイヤを全面的に採用することによって、膨大な後処理工数が不要となって、大幅な工数低減を達成した。その後、下向溶接などに限定して安価なソリッドワイヤを使用することも検討されたが、溶接作業者の反対が強く、部分的なソリッドワイヤの使用は取りやめとなった。それまでの被覆アーク溶接に比べて溶接材料 (ワイヤ) の価格は高くなるが、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接の溶着効率は極めて高いため、高溶着率化と手直し工数の削減で、単位溶接長あたりのトータルコストは従来の 1/2 以下となった⁴⁾。

その後、伸線技術、潤滑技術、表面処理技術さらには低水素化技術などの実用化研究も短期間で集中的に行われた。造船溶接技術者の強い要望に応じて開発された、高電流で上向溶接も立向溶接も可能な全姿勢溶接用の細径フラックス入りワイヤは、瞬く間にわが国の造船業界へ驚異的に普及した。1980 (昭和 55) 年の生産量は約 2,000 トン/年であったのが、5年後の 1985 (昭和 60) 年には約 25,000 トン/年に急増し、1990 (平成 2) 年には 60,000 トン/年を超え、20年後の 2000 (平成 12) 年には 100,000 トン/年近くに

まで増大した⁵⁾。

フラックス入りワイヤは、一般に、連続的に供給される外皮帯鋼をU型に成形し、その中にフラックスを充填した後、外皮帯鋼を造管整形して製造される。そのため外皮金属の表面には、造管整形時の合わせ目（シーム）が残り、フラックスの吸湿に起因する溶接欠陥（例えばピットやガス溝など）が発生しやすい。また銅めっきなどの湿式表面処理もできない。このような問題を解決するために、外皮金属に造管整形時の合わせ目が残らないフラックス入りシームレスワイヤが1981（昭和56）年に開発された。このワイヤの製造では、フラックス充填後の造管工程に溶接を採用し、外皮金属の造管溶接によってフラックス充填管を作る。銅めっきを施すことができるフラックス入りシームレスワイヤは、ワイヤとコンタクトチップ間の通電性を改善し、チップの耐摩耗性も向上させる。そのため、アークの安定性やワイヤの送給性を向上させる効果が得られ、フラックスの吸湿に起因した溶接欠陥の発生も抑制できる。

造船や橋梁などの部材ではすみ肉溶接継手が大きい比率を占め、その大部分が水平すみ肉溶接として施工される。しかし水平すみ肉溶接で得られる最大の脚長は8mm程度で、それ以上の脚長を得ようとしても、図5.6に示すようなアンダカットやオーバラップが発生し、良好なすみ肉溶接ビードは得られない。そこで、フラックス中の鉄粉添加量を増加させるとともにフラックスの特性も改良した、大脚長すみ肉溶接用フラックス入りワイヤが1985（昭和60）年に開発された。このワイヤを使用した溶接では、表5.7に示すように、脚長8mmを超える水平すみ肉溶接が可能となり、1パス溶接で最大10.5～11mm程度の脚長を得ることもできる。

また、フラックス中にスラグ形成剤を含まない新しいタイプのフラックス入りワイヤとして、メタル系フラックス入りワイヤも開発されている。このワイヤのフラックスは鉄粉、合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成され、スラグ形成剤は全く含まれていな

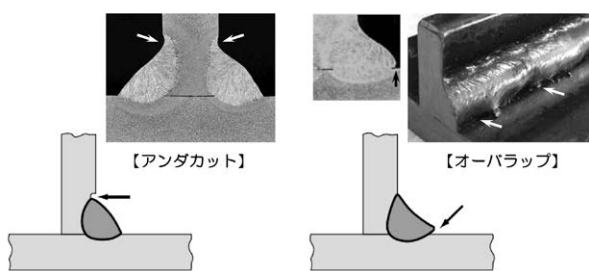


図 5.6 大脚長水平すみ肉溶接で生じやすい溶接欠陥

表 5.7 大脚長水平すみ肉溶接⁵⁾

脚長 (立板×下板)	断面マクロ	スラグ被包状態	ビード外観
8.5mm × 9.0mm			
9.5mm × 9.6mm			
10.5mm × 11.0mm			

φ1.4mmワイヤ、溶接電流：320A、アーク電圧：32V
* 一般に、水平すみ肉溶接での脚長の上限は8mm程度。

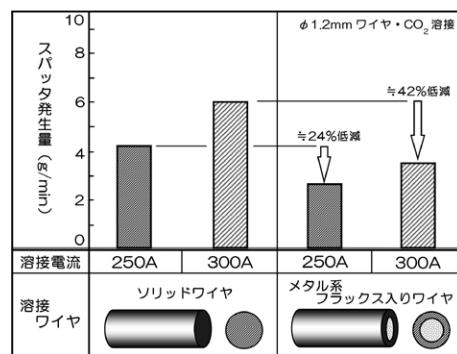


図 5.7 メタル系フラックス入りワイヤの効果

い。メタル系フラックス入りワイヤの効果の一例を示すと図5.7のようであり、ソリッドワイヤを用いた溶接に比べ、発生するスパッタは大幅に低減される。

1990年代中頃になると、職場の環境改善への関心が高まり、溶接作業現場においても「脱3K」への取り組みが進められ、特に溶接ヒュームへの対策が強化されるようになった。フラックス入りワイヤを用いた溶接は、一般に高電流を使用した溶接となるため、単位時間当たりの溶接ヒューム発生量が多く、溶接作業者の健康管理のためにも低ヒューム化が大きな課題であった。このような市場ニーズを背景に、ヒューム発生現象についての基礎研究が行われ、ワイヤの低炭素化やフラックスへのアルカリ金属の添加などが溶接ヒュームの低減に有効であることが明らかにされた。そして、フラックス入りワイヤの特性・特徴を保ちながら、ヒュームとスパッタの発生量を大幅に低減させた低ヒューム・低スパッタのフラックス入りワイヤが、1995（平成7）年に開発・実用化された。このフラックス入りワイヤでは、従来のフラックス入りワイヤに比べ、ヒューム発生量とスパッタ発生量はいずれも約40%減少し、作業環境の大幅な改善に寄与した。その他、塩基性フラックスの使用が常識とされていた

溶接金属の低酸素化をチタニア系フラックスで実現し、低温じん性を向上させたフラックス入りワイヤや、焼戻しぜい化を抑制するフラックス入りワイヤなども開発された⁶⁾。

フラックス入りワイヤの構造は図5.8 (a) のようであり、チューブ状の外皮金属（シース）の内側にフラックスが充填されている。その代表的な断面形状は (b) のようであり、①および②の形状は主に直径1.2～1.6mmの細径ワイヤに適用され、外皮金属に合わせ目（継目）がないシームレスタイプ（①）と合わせ目があるタイプ（②）に大別される。③および④の形状は主に直径2.4～4.0mmの太径ワイヤに適用され、アーク発生時に生じやすいフラックス柱（外皮金属に比べて溶融しにくいフラックスが半溶融状態となってワイヤ中央部に残存する現象）の発生を抑制する効果がある。しかし、近年は太径ワイヤの使用量が大幅に減少し細径ワイヤの適用が拡大しているため、フラックス入りワイヤの大部分は①または②の形状となっている。また、②の外皮金属に合わせ目（継目）があるタイプでも、造管時の工夫で合わせ目の間隔をより狭く整形できるようになっており、フラックスの耐吸湿性はシームレスワイヤと遜色ないレベルに達している。

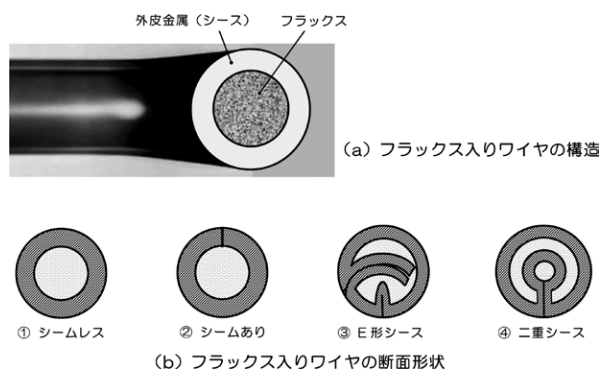


図5.8 フラックス入りワイヤ³⁾

フラックス入りワイヤは図5.9のように分類され、溶接法、フラックスの種類およびシールドガスの組成

に応じて、それぞれ異なったワイヤが使用される。主なワイヤのフラックスの構成は図5.10のようであり、代表的なスラグ系ワイヤであるルチール系ワイヤのフラックスは、スラグ形成剤、合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成されている。もう一つのスラグ系ワイヤであるすみ肉溶接用ワイヤのフラックス構成もルチール系ワイヤと同様であるが、フラックスに添加される鉄粉量が多い。メタル系ワイヤのフラックスは多量の鉄粉と合金・脱酸剤およびアーク安定剤などで構成され、スラグ形成剤はほとんど含まれていない。スラグ系ワイヤを用いた溶接では溶接後のビード表面が凝固スラグで覆われるが、メタル系ワイヤを用いた溶接のビード表面に付着するスラグは極めて微量である。

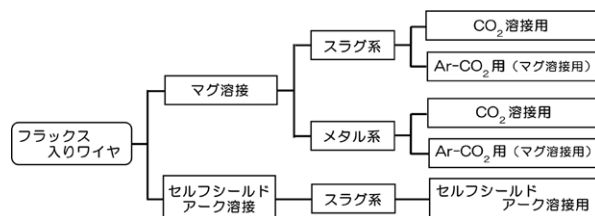


図5.9 フラックス入りワイヤの種類

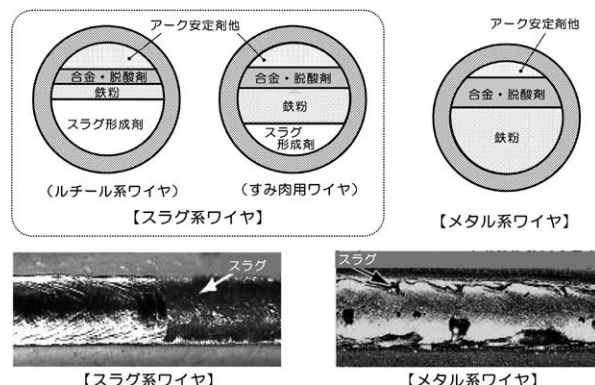


図5.10 スラグ系ワイヤとメタル系ワイヤ⁴⁾

ルチール系フラックス入りワイヤの溶滴移行は図5.11 (a) のようであり、溶滴の移行形態はグロービュール移行となる。このワイヤが使用できる電流域は、中～大電流域（直径1.2mmワイヤでは180～320A程度）

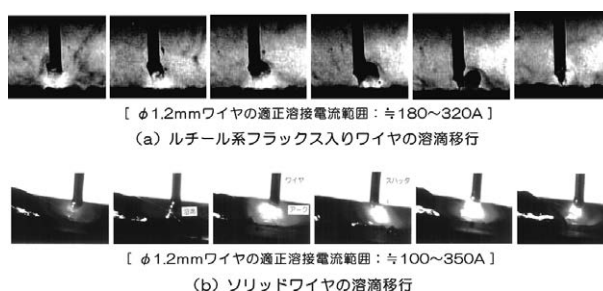


図5.11 溶滴移行形態の比較⁴⁾

に限定される。ソリッドワイヤを用いる溶接では、小電流域（直径1.2mm ワイヤでは200A以下の電流域）での溶滴移行形態が（b）に示すような短絡移行となる。しかしルチール系フラックス入りワイヤを用いる溶接では、溶滴の短絡移行を実現できず、小電流域では安定なアーク状態が得られない。

細径フラックス入りワイヤの適用は造船分野の半自動溶接から始まって、多電極自動すみ肉溶接、簡易車による自動すみ肉溶接ならびに溶接ロボットを用いた自動溶接にも適用を拡大していった。また造船分野の他、橋梁や建築鉄骨分野など、他の産業分野にも急速に普及していった。被覆アーク溶接棒で培った技術を背景に、溶接材料メーカーが競って顧客の要求に対応した各種のフラックス入りワイヤを開発していったことが、被覆アーク溶接の比率が比較的高い米国やソリッドワイヤを使用したマグ溶接の比率が高い欧州とは異なるわが国独自の世界を創りあげた最大の理由であろうと思われる。

5.4 ステンレス鋼用ワイヤ

ステンレス鋼の溶接は1935（昭和10）年頃から検討され、日本油脂が1938（昭和13）年にステンレス鋼用の被覆アーク溶接棒を開発した。当初、ステンレス鋼の溶接は兵器産業で多用されたが、一般構造物でも、鋳鋼バルブの弁や弁座の肉盛溶接、水車ランナの肉盛溶接、圧力容器の溶接、タービンの翼車と車軸の溶接などに使用され始めた。また日本油脂は1943（昭和18）年に、防弾鋼板などの特殊鋼溶接に必要なオーステナイト系ステンレス被覆アーク溶接棒を国産化した。しかし日本油脂が製造した高級ステンレス溶接棒は、ほとんどが陸軍および海軍の軍需品製造に用いられ民間には出回らなかった。民間では、他のメーカーによって作られた手塗りのステンレス溶接棒が使用されていたようである。

戦後の化学工業分野での設備増強・新設に伴って、ステンレス鋼被覆アーク溶接棒の需要は急激に増加した。それまでの化学プラントに用いられた装置や機器は海外で製作され、わが国ではそれらの据付けのみが行われていた。しかし1957（昭和32）年になるとステンレス鋼用の被覆アーク溶接棒のJIS規格が制定され、国産ステンレス鋼材の品質も向上したため、従来輸入に頼っていた化学プラントの装置や機器は次第に国産化されるようになった²⁾。

ステンレス鋼は優れた耐食性や耐熱性を有すること

から、各種工業分野で幅広く適用され、その使用量は年々増加している。ステンレス鋼の溶接には、炭素鋼の場合と同様に、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、ティグ溶接など種々な溶接法が適用されている。最も多く適用されている溶接法はマグ溶接であるが、炭素鋼の場合に比べ、ステンレス鋼のマグ溶接におけるソリッドワイヤとフラックス入りワイヤの使用比率は、フラックス入りワイヤの方がとりわけ高い比率となっている。ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの生産量は1985（昭和60）年頃から飛躍的に増加し、1991（平成3）年にはステンレス鋼用被覆アーク溶接棒の生産量を越え、近年では全ステンレス鋼溶接材料に占めるフラックス入りワイヤの比率は50%近くにまで達している。比較的熟練を要せずに高能率な半自動溶接ができることおよび自動化に適したワイヤであることなどが、フラックス入りワイヤの適用増加の大きな要因であろうと思われる。

ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの規格は、1974（昭和49）年にAWS（米国溶接協会）が“AWS A 5.22 SPECIFICATION for FLUX CORED CORROSION-RESISTING CHROMIUM and CHROMIUM-NICKEL STEEL ELECTRODES”として制定した。わが国では1983（昭和58）年に、“JIS Z 3323：ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ”として14種類のフラックス入りワイヤのJIS規格が制定された。近年ではJISの規格以外のワイヤも開発され、主要なステンレス鋼の溶接にはほぼ全てフラックス入りワイヤが使えるまでに多品種化され、被覆アーク溶接棒からの置換えが進んでいる。

初期のステンレス鋼用フラックス入りワイヤは、直径2.0mm以上の太径ワイヤが主流であった。しかし、その後の製造技術の進歩によってワイヤの細径化が推進され、1979（昭和54）年頃には直径1.6mm、1981（昭和56）年頃には直径1.2mmのワイヤが市販されるようになった。その結果、汎用マグ溶接機の送給装置をそのまま使用できるようになり、適正溶接条件範囲が広いこともあって、フラックス入りワイヤの適用は一層拡大することとなった⁷⁾。近年では、薄板用として直径0.9mmおよび0.8mmの極細ワイヤも使用されるようになっている。初期のステンレス鋼フラックス入りワイヤには、前述した炭素鋼用フラックス入りワイヤ（5.3.2項参照）と同様に、複雑な断面形状が用いられていた。しかし細径化に伴って、ワイヤの断面形状は単純なものへと推移している⁸⁾。

ワイヤの外皮金属（シース）には、通常、溶接金属の組成を安定化するためにステンレス鋼を用い、充填

フラックスには溶接作業性改善のためのアーク安定剤やスラグ形成剤（炭酸塩・ケイ酸塩・フッ化物・金属酸化物など）の他、合金成分の酸化消耗分補充や溶着量向上および合金元素添加を目的とした金属粉末が用いられる。フラックス入りワイヤを使用する場合のシールドガスとしては、通常、溶接金属の性能面を重視してCO₂を使用することが多い。しかし、スパッタの発生を抑制したい場合や母材からの希釈を抑えたい肉盛溶接などの場合には、Ar+20%CO₂混合ガスも使用される。特殊鋼種の溶接では、ワイヤメーカーから専用のシールドガスが指定されていることも多い。

ステンレス鋼の溶接に用いられる主な溶接ワイヤには表5.8のようなものがあり、詳細は“JIS Z 3321：溶接用ステンレス鋼溶加棒、ソリッドワイヤ及び鋼帯”ならびに“JIS Z 3323：ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ及び溶加棒”に規定されている。化学組成（鋼種）に応じて種々なタイプに分類されているが、ソリッドワイヤ・溶加棒は「YS+3桁の数字」で、フラックス入りワイヤ・溶加棒は「TS+3桁の数字」でその種類を表す。また、ワイヤの種類は母材の鋼種に応じて表5.9のように選定される。マルテンサイト系およびフェライト系ステンレス鋼の溶接では、一般に、それぞれSUS410（13%Cr）、430（17%Cr）またはそれらにNbを添加したワイヤ（SUS410NbおよびSUS430Nb）が用いられる。Nbが添加されたワイヤでは組織が微細化し、延性やじん性が向上する。また、じん性向上と低温割れ防止の観点から、オーステナイト系のSUS309（23Cr-13Ni）やインコネル系（15Cr-65Ni-2Nb）のワイヤが用いられることもある。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接では、基本的に母材と同一成分のワイヤを用いて溶接するが、SUS304（18Cr-8Ni）の溶接には母材と多少異なる組成のSUS308（19Cr-9Ni）ワイヤなど、溶接性を考慮してワイヤを選定することもある。

表 5.8 ステンレス鋼用マグ溶接ワイヤ

溶接ワイヤ		主成分	特徴・適用鋼種
ソリッド	フラックス入り		
YS410	TS410C	13Cr	SUS403・SUS410などの溶接 予熱、パス間温度の管理要
YS430	TS430C	18Cr	SUS430の溶接
YS308	TS308C	19Cr-9Ni	SUS304の溶接
YS309	TS309C	22Cr-12Ni	SUS309Sの溶接 炭素鋼とステンレス鋼の溶接
YS310	—	25Cr-20Ni	SUS310の溶接、耐酸化性優 高温割れが発生し易い
YS316	TS316C	18Cr-12Ni-2Mo	SUS316の溶接、耐高温割れ感受性良 耐食性、高温強度、延性比較的優
YS317	TS317LC	18Cr-12Ni-3Mo	SUS317の溶接、耐食性優
YS347	TS347C	19Cr-9Ni-Nb	SUS321・SUS347の溶接

表 5.9 ステンレス鋼母材とワイヤの組合せ

分類	母材		ワイヤ
	JIS 規格	代表組成	JIS 規格
マルテンサイト系	SUS403	18Cr-低Si	YS410・YS309・YS310
	SUS410	12Cr	
	SUS410S	13Cr-低C	
フェライト系	SUS405	13Cr-0.2Al	YS410・YS309・YS310
	SUS430	18Cr	
	SUS434	18Cr-1Mo	
オーステナイト系	SUS304	18Cr-8Ni	YS308
	SUS304L	18Cr-8Ni-低C	YS308L・YS347
	SUS309S	22Cr-12Ni	YS309
	SUS310S	25Cr-20Ni	YS310S
	SUS316	18Cr-12Ni-2.5Mo	YS316・YS316L
	SUS316L	18Cr-12Ni-2.5Mo-低C	YS316L
	SUS317L	18Cr-12Ni-3.5Mo-低C	YS317L
	SUS321	18Cr-8Ni-Ti	YS347

5.5 アルミニウム用溶接ワイヤ

アルミニウムは地球を構成する外殻地層の7.5%を占めるといわれており、ケイ素（25.8%）に次ぐ地球上第2位の金属元素で、その量は鉄（4.7%）よりも多い。しかし、金属アルミニウムとして始めて出現したのは1825年で、デンマークのオルステッド（Oersted）が実験室で製造したとされている。アルミニウムは主に酸化物として存在し、酸素との親和力が強固なため、鉄などに比べると極めて還元されにくい。そのため、化学的方法に頼っていた当時の金属アルミニウム生成はすこぶる困難視されていた。1886（明治19）年に米国のホール（Hall）とフランスのエルルー（Heroult）が、偶然同じ年に、溶融塩によるアルミニウムの電解製造法を工業的生産方式として始めて確立した。この方法はホール・エルルー法と呼ばれ、発明以来100年以上経過した現在も、基本的にはこの製造方法が採用されている⁹⁾。

わが国でのアルミニウム溶接は1951（昭和26）年のアルゴンの輸入に始まり、1953（昭和28）年には全アルミニウム船のティグ溶接が三菱・下関造船所で行われている（前述3.4.1項参照）。また、ミグ溶接も同時期に適用が検討されている²⁾。アルミニウムの溶接に用いられるアーク溶接はほとんどがティグ溶接およびミグ溶接で、溶加材としてはソリッドの溶加棒またはワイヤが用いられる。アルミニウムの特性上、フラックスを用いる被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接およびフラックス入りワイヤを用いたミグ（マグ）溶接が適用されることはない。

アルミニウムおよびその合金の溶接用ワイヤと溶加棒は、“JIS Z 3322：アルミニウム及びアルミニウム合金溶加棒並びに溶接ワイヤ”に規定されている。化学成分によって33種類に分類されているが、多用されている主なワイヤ・溶加棒は表5.10に示す4種類

である。A1100は純アルミニウムならびにAl-Mn系合金の溶接に使用され、溶接性、耐食性および延性いずれも良好である。Al-Si系合金であるA4043は、溶接金属の高温（熱間）割れを抑制する効果が大きいいため、溶接割れを生じやすい熱処理系のアルミニウム合金や鋳物などの溶接に用いられる。ただし溶着金属の延性とじん性はやや劣り、アルマイト（陽極）処理を行った溶接部は母材と異なる灰色に変色する。Al-Mg-Mn系合金のA5183は、溶接性が極めて良好で、溶着金属の延性やじん性に優れ、機械的性質や耐食性も良好であるため、各種アルミニウム合金の溶接に最も多用されている。Al-Mg系合金のA5356は、少量のチタンの添加によって結晶粒の微細化を図ったワイヤであり、溶接性および機械的性質ともに良好で、Al-Mg系合金およびAl-Mg-Si系合金の溶接などに適用される。

表 5.10 主な溶加材の特徴・特性

種類	特徴・特性
A1100	純アルミ (Al≥99.00%) 溶接性・耐食性良、延性・じん性優 溶接継手の引張強さは 74~108MPa 程度
A4043	5.0%Siを標準組成とするAl-Si系合金 耐高温割れ性優、延性・じん性劣、アルマイト処理で変色 溶接継手の引張強さは 167~245MPa 程度 6000系合金・アルミ合金鋳物などの溶接に適用
A5183	4.5%Mg、0.75%Mnを標準組成とするAl-Mg-Mn系合金 溶接性優、機械的性質・耐食性良、延性・じん性優 溶接継手の引張強さは、274~304MPa 程度
A5356	5.0%Mgを標準組成とするAl-Mg系合金 Tiの微量添加で結晶粒を微細化して機械的性質を改善 溶接性良、耐力・じん性はA5183よりやや劣 溶接継手の引張強さは、265~304MPa 程度 広範囲な溶接に適用

溶加材（溶加棒およびワイヤ）の種類は、溶接継手の強度・延性・耐食性および溶接の難易度（耐溶接割れ性）などを考慮して、母材の材質や要求される継手の特性に適したものを選定しなければならない。母材と溶加材との一般的な組合せは“JIS Z 3604：アルミニウムのイナートガスアーク溶接作業標準”に規定されており、その主な部分を抜粋すると表5.11のよう

表 5.11 母材と溶加材の組合せ

	純 Al	Al-Mg 合金		Al-Mg-Si 合金	Al-Zn-Mg 合金	Al 鋳物
	A1100	A5052	A5083	A6N01	A7N01	AC4C
A1100	A1100 (A4043)	A4043 (A5356)	A5356	A4043	A5356 (A4043)	A4043
A5052		A5356 (A4043)	A5356	A4043 (A5356)	A5356	A4043 (A5356)
A5083			A5183 (A5356)	A5356	A5356	A4043 (A5356)
A6N01				A4043 (A5356)	A5356 (A4043)	A4043 (A5356)
A7N01					A5356	A4043 (A5356)
AC4C		(4043)：用途によって用いても良い (5356)：用いても良い				A4043

である。Al-Mg系合金やAl-Zn-Mg系合金の溶接ではAl-Mg系合金のA5356が用いられることが多く、Al-Mg-Si系合金やAl鋳物の溶接にはAl-Si系合金であるA4043が多用される。Al-Si系合金は融点が低く、熱間ぜい性による割れに対する抵抗力が大きいためである。

5.6 シールドガス

溶接部を大気から保護するために用いられるシールドガスには、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He)、炭酸ガス (CO₂)、酸素 (O₂) および水素 (H₂) がある。アルゴン、ヘリウム、炭酸ガスは単体ガスとしても用いられるが、酸素と水素は単体で用いられることはなく、アルゴンや炭酸ガスとの混合ガスとして用いられる。

アルゴンは1894（明治27）年に、レイリー卿とラムゼーとが空気中から発見した。アルゴンという名称は、ギリシャ語の“不活発・不活性”という意味の言葉が語源である。大気の中で3番目に多く含まれている気体で、その容量濃度は0.93%と、炭酸ガス(0.039%)より多い。アルゴンは、空気をマイナス200℃近い極低温まで冷却し、空気の主成分である窒素や酸素との沸点の差を利用して取り出される。ただし、空気中に含まれる量はわずかであるため、一般的には、酸素や窒素を製造する際に併産されている。

ヘリウムは1868（明治1）年に、仏の天文学者ピエール・ジャンサンが皆既日食観察時に太陽光線のスペクトルから発見し、ギリシャ語で「太陽」を表すheriosにちなんで命名された。無色、無臭、無味、無毒で最も軽い希ガス元素である。また、全ての元素の中で最も沸点が低く、加圧下でしか固体とはならない。空気に占める比率は極めて微量（0.0005%）であるが、天然ガスと共に産出する。天然ガスの井戸から採取される成分は主にメタンであるが、時々0.5~1%程度のヘリウムを含むガスが出る井戸があり、このガスを分離してヘリウムを造る方法が商業ベースでは採用されている。わが国にはヘリウムを多く含む天然ガスの井戸はなく、米国・アルジェリア・ポーランド・ロシアなどで生産されている。これらの国のうち最も生産量が多いのは米国で、カンザス州・テキサス州・オクラホマ州などに多くのヘリウム生産工場がある。従来、わが国のヘリウムは全て米国から輸入していたが、近年ではカタールからも輸入されている。

炭酸ガスは1756年に、スコットランドの化学者ジョセフ・ブラックが発見したとされている。また

1577年に、木炭の燃焼時に発生する捉えどころのない気体（実は炭酸ガス）の存在に気付いたベルギーの化学者ヘルモント（J. B. von Helmont）を発見者とする説もある。ブラックは自分が発見した気体を「固定空気」と呼び、その後ラボアジエは同じ物質を「白亜酸」と呼んだと記録されている。この時点ではまだ「酸素」は発見されておらず、「二酸化炭素」と呼ばれるようになったのは酸素の発見（1774年）以降であり、水分の存在下で酸を生じる物質であることから「炭酸ガス」と呼ばれるようになった。

炭酸ガスは、空気中の二酸化炭素としてはごくわずかしか含まれていないため、通常、空気分離で製造されることはない。工業的には、アンモニア合成工業の副生ガス、製鉄所の副生ガスおよび重油脱硫用酸素プラントなどの副生ガス（低純度の粗炭酸ガス）を精製して、高純度の炭酸ガスを製造する。炭酸ガスは無色・無臭／不燃性のガスで、液化炭酸ガスやドライアイスとして使用される。

わが国でのアルゴンは、日本酸素（現大陽日酸）が1949（昭和24）年に国内初のアルゴン分離装置を完成させ、翌年から市販を開始している。国内の溶接メーカーがマグ溶接機の市販を開始したのは1965（昭和40）年頃、フィリップス社が持っていた炭酸ガス溶接用ワイヤに関する日本特許が失効し、国産溶接材料メーカーが参入したのは1971（昭和46）年頃である（3.6.1項（1）参照）。そのため炭酸ガスの本格的な市販は比較的遅く、1973（昭和48）年頃からである。また1976（昭和51）年には、俗にマグガスと呼ばれる80%アルゴンと20%炭酸ガスの混合ガスが、帝国酸素（現日本エア・リキード）から発売されている¹⁰⁾。

わが国の溶接用シールドガスに関する最初の規格としては、“JIS K 1106：液化炭酸ガス”が1954（昭和29）年に、“JIS K 1105：溶接用アルゴンガス”が1958（昭和33）年にJIS規格として制定されている。また日本溶接協会規格として、“WES 5401：アーク溶接用アルゴン-炭酸ガス混合ガス”が1986（昭和61）年に制定されている。しかし、これらのシールドガス規格は数度の改正を経て、現在はISO規格に準拠した“JIS Z 3253：溶接及び熱切断用シールドガス”として新しいJIS規格が制定されている。これらのガスの中、アーク溶接に用いられるのは表5.12に示す24種類であり、溶接時の反応挙動に基づいて、不活性、弱酸化性、強酸化性および還元性の4種類に大別される。アルゴンやヘリウムならびにそれらの混合ガスである不活性ガスは、ミグ溶接、ティグ溶接お

よびプラズマアーク溶接に用いられる。弱酸化性ガスは、炭酸ガスや酸素の添加量が比較的少ないアルゴンとの混合ガスである。強酸化性ガスは、炭酸ガスや酸素の添加量が比較的多いアルゴンとの混合ガス、炭酸ガスおよび炭酸ガスと酸素の混合ガスであり、マグ溶接に用いられる。アルゴンと水素の混合ガスである還元性ガスは、オーステナイトステンレス鋼やニッケル・ニッケル合金のティグ溶接およびプラズマアーク溶接に用いられる。

表 5.12 アーク溶接に用いられるシールドガスの種類

反応挙動	種類		組成 (vol%)					適用溶接法
	大分類	小分類	酸化性		不活性		還元性	
			CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	
不活性	I	1			100			ミグ溶接 ティグ溶接 プラズマアーク溶接
		2				100		
		3			残部	0.5~95		
弱酸化性	M1	1					0.5~5	マグ溶接
		2						
		3			残部			
		4	0.5~5	0.5~3				
強酸化性	M2	0	5~15					マグ溶接
		1	15~25					
		2						
		3	0.5~5	3~10				
		4			残部			
		5	5~15	0.5~3				
		6	15~25	3~10				
	7							
	M3	1	25~50					マグ溶接
		2		10~15				
		3	25~50	2~10	残部			
4		5~25	10~15					
C	1	100					マグ溶接	
	2	残部	0.5~30					
還元性	R	1					0.5~15	ティグ溶接 プラズマアーク溶接
		2					15~50	

参考文献

- 1) 西川：溶接材料に見る溶接の20世紀、溶接技術2000年2月号，PP.105~110，産報出版
- 2) 溶接五十年史編集委員会：溶接五十年史，1962年，産報
- 3) 伊藤 他：高性能銅めっきレスマグ溶接用ソリッドワイヤの開発と適用，溶接技術2000年8月号，PP.68~72，産報出版
- 4) 酒井：新しいフラックス入りワイヤの開発と普及，溶接技術2002年5月号，PP.92~94，産報出版
- 5) 清水：アーク溶接の材料とプロセス，溶接学会誌Vol.80（2011），No.8，PP.21~30
- 6) 菅：溶接材料の現状と今後，神戸製鋼技報Vol.54，No.2（Aug.2004），PP.6~10

- 7) 相原：フラックス入りワイヤによるステンレス鋼溶接の実際，溶接学会誌，Vol.61（1992），No.7，PP.18～21
- 8) 渡辺 他：ステンレス鋼フラックス入りワイヤの開発動向，神戸製鋼技報 /Vol. 54, No. 2 (Aug. 2004), PP.47～51
- 9) 軽金属溶接構造協会編：アルミニウム合金構造物の溶接施工管理《第4版》，軽金属溶接構造協会（2009）
- 10) 田中：溶接作業の改善にあたる“アタールガス”，溶接技術 1976年2月号，PP.45～46，産報出版

本書は、「国立科学博物館 技術の系統化調査報告《第 23 集》」に掲載されているものです。

本書の著作権は、独立行政法人 国立科学博物館が有します。