

© 1983 ISIJ

## 溶接材料の最近の進歩



奥田直樹\*

## Recent Progress in Welding Materials

Naoki OKUDA

## 1. はじめに

溶接継手の品質は、構造物の安全性を左右する上で大きな役割をはたしていることはいままでもない。

最近のように、船舶、海洋構造物などの活動範囲が極寒地方にまで拡大されてくると、今までにないようなきびしい靱性値が溶接継手に要求されるようになり、また、その評価方法も従来のシャルピー衝撃値だけでなく、COD試験など継手全体の破壊靱性値で云々されることが多くなっている。

低温度における靱性が溶接のままでも容易に得られる手段として、溶接金属中に微量の Ti, B を添加し、そのフェライト組織を非常に細かくする方法が広く用いられるようになり、これによつて靱性値が画期的に改善できるようになった。

石油ショック以来世界の経済はますますきびしい状態となり、それに加えて発展途上国もいちじるしく競争力を身につけて来ている。このような状況下での各企業は、技術力の強化をますます要求されるが、さらにコストダウンが受注レースに打ち勝つためには必順である。溶接作業の高能率化、省人化に対する関心が非常に強くなりつつある。

溶接施工法自体も、狭間先溶接法や大入熱溶接法が開発されている。狭間先溶接法では、ワイヤ先端が開先内で自動的にウイービングして完全な溶けこみを確保しようとするガスシールドアーク溶接法（以下 GMAW 法）による方法や、従来になかったような優れたスラグ剝離性をもつたフラックスをもちいるサブマージアーク溶接法（以下 SAW 法）による方法が実用化の域に達した。鋼材の溶接性、とくに溶接継手熱影響部の靱性が大幅に改善されるようになって、低温用鋼板も大入熱で能率よく溶接できるようになって来ているが、それに伴つて、片面自動溶接などの大入熱溶接でも低温靱性が確保できる溶接材料が開発されている。さらに手溶接にかわつて、GMAW 法による半自動溶接の伸びも最近の大きな傾向である。

溶接中に溶接金属中に溶解した水素は、応力下で微小

割れの原因となることはよく知られている。溶接材料の水含有量や吸湿性をおさえた極低水素あるいは難吸湿溶接材料が実用化され、とくに高張力鋼の溶接部の健全性が改善され、また、予熱、後熱温度を低くすることが可能となつてコストダウン、能率向上の一助となつている。

最近の溶接材料は上記したような非常に広い分野で種々の開発改善がなされ、構造物の健全性の確保、コストダウンなどに貢献してきているが、以下にその一例を簡単に紹介して参考に供したい。

## 2. 溶接継手の低温靱性の向上

天然ガス運搬船やタンク、寒冷地向海洋構造物およびパイプラインなど低温度で使用される構造物用溶接材料でもつとも顕著な進歩は、Ti と B の複合添加の効果を活用して開発された Ti-B 系の溶接材料である。これまでの低温用鋼用溶接材料としては、Ni, Mo あるいはその双方を主成分とするものが使用されてきたが、それらによると、シャルピー値はともかく、COD 値は最近の要求値（例えば  $-10^{\circ}\text{C}$  で 0.25 mm 以上）を満足することは容易ではない。Ti-B 系溶接材料の出現により、これらの要求値を容易にクリアできるようになった。Ti-B 系溶接材料と従来の溶接材料による被覆アーク溶接法（以下 SMAW 法）と SAW 法溶接金属の性能比較例を Table 1 に、SMAW 法の場合の顕微鏡組織を Photo. 1 にそれぞれ示すが、Ti-B 系では溶接金属の結晶粒が非常に微細化され、衝撃値および COD 値の改善に極めて有効であることがよくわかる。

溶接施工法の面では、低温用鋼溶接の能率向上の妨げとなつていた熱影響部の脆化を軽減する方法として大極間 SAW 法が開発され<sup>3)</sup>、低温用鋼への片面自動溶接の適用を可能とし、溶接作業の高能率化に寄与している。この方法では、多電極溶接においてその極間距離を通常より長くとることにより、先行極による溶接金属が凝固してある程度冷却したあと、後行極によつて引き続き溶接が行われるもので、溶接入熱を分散して熱影響部の脆化を抑制し、さらに、電極数を増やすことによつてある

昭和 58 年 1 月 6 日受付 (Received Jan. 6, 1983) (依頼技術資料)

\* (株)神戸製鋼所溶接棒事業部 (Welding Division, Kobe Steel, Ltd., 100 Aza-Urakawachi Miyamae Fujisawa 251)

Table 1. Typical chemical compositions and mechanical properties (As welded).

Welding process	Weld metal type	Chemical composition (%)							Yield point (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Charpy impact value (kgf-m)		COD value (mm)	
		C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	B			-45°C	-60°C	-10°C	-50°C
SMAW*	Conventional Ti-B bearing	0.06	0.50	1.10	1.50	—	—	—	52	61	7	5	1.0	0.15
		0.08	0.25	1.50	—	—	0.03	0.003	50	58	12	10	—	0.5
SAW**	Conventional Ti-B bearing	0.08	0.25	1.60	—	0.25	—	—	54	63	7	5	0.3	—
		0.08	0.15	1.40	—	—	0.02	0.003	49	56	25	20	>2.0	1.5

\* Plate thickness : 25 mm, Heat input : 45 kJ/cm (Vertical position)  
 \*\*Plate thickness : 65 mm (Nb-V steel), Heat input : 45 kJ/cm (Flat position)

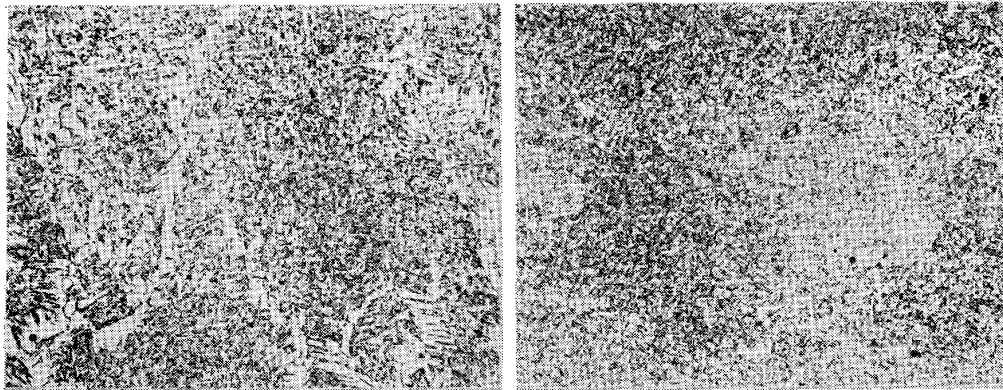


Photo. 1. Microstructure of welded metal by SMAW process (×150×11/14)

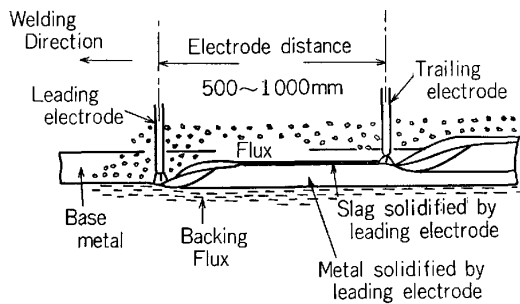


Fig. 1. The schematic diagram of long electrode distance SAW<sup>3)</sup>.

程度の厚板まで一層溶接が可能であり、非常に高能率な溶接法である。先行極により形成され、すでに凝固したスラグの電気伝導度を大幅に改善し、後行極が凝固スラグを通して容易にアークを持続できるようにくふうされた特殊なフラックスが開発され、このような施工法が可能となった。本法の概念図を Fig. 1 に、16 mm の低温用鋼を 2 電極 SAW 法で片面自動溶接した時の 極間距離と -60°C における熱影響部の衝撃値の関係を Fig. 2 にそれぞれ示す。

### 3. 溶接金属の焼もどし脆化の改善

石油精製装置、ボイラー、原子力発電装置などに各種の Cr-Mo 鋼が使用されているが、脱硫リアクター、ハイドロクラッカーなどに使われる 2 ¼ Cr-1Mo 鋼、3Cr-1Mo 鋼用溶接材料に対し低温靱性の要求が厳しくなつ

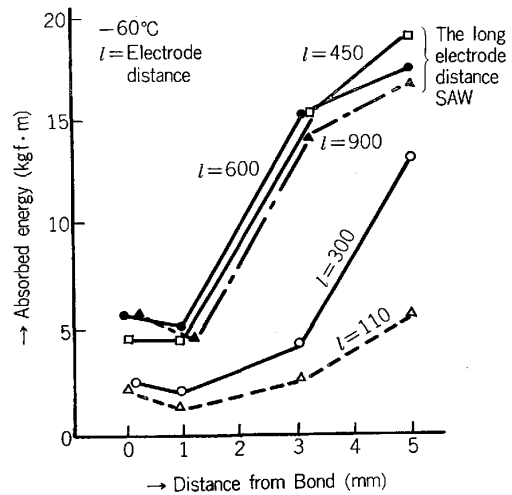


Fig. 2. The relation between the electrode distance and the toughness of HAZ<sup>3)</sup>.

てきている。この種の圧力容器の操業温度 (430~480°C) において、Cr-Mo 鋼は焼もどし脆化を生じ、中でも 2 ¼ Cr-1Mo 鋼および 3Cr-1Mo 鋼の溶接金属が最も脆化しやすい<sup>4)</sup>。このため、寒冷地に設置されるリアクターなどのシャットダウンスタートアップの際の脆性破壊の防止の観点から靱性向上の要求が強く、ステップクーリング脆化処理後 -29°C での衝撃値が 5.5kgf·m 以上といった要求が出ている。

最近開発されたこれらの要求を満足する溶接材料による溶接金属の衝撃値の例を、従来のものと比較して Fig.

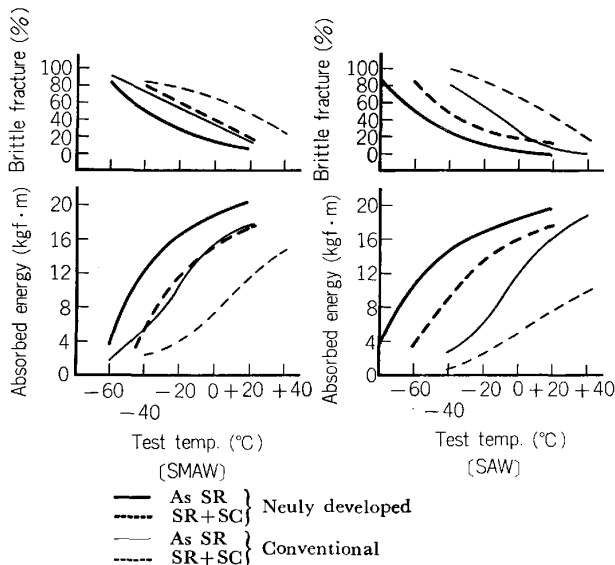


Fig. 3. Transition curves of Charpy V notch impact value (2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>%Cr-1%Mo).

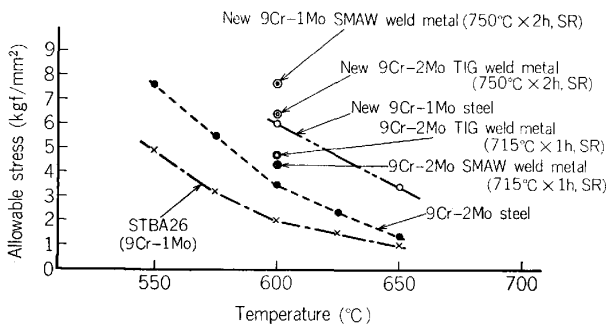


Fig. 4. Allowable stresses of 9Cr steels and weld metals.

3 に示す。これらの溶接金属は、その成分において、C, Mn, Ni などのオーステナイト生成元素の調整, P, Sb, Sn, As などの脆化作用を起こす不純物の低減化, さらに微量の窒化物の生成による結晶の細粒化効果などにより靱性の改善に成功したものである。

#### 4. 超高温高圧ボイラー用溶接材料の開発

発電用蒸気動力プラントの操業条件は、圧力 3 500 psi、温度 1 000°F が主流となっているが、さらに省エネルギーを目指して、より高温高圧で高効率の蒸気動力プラントが検討されている<sup>5)</sup>。ステップ I では圧力 4 500 psi、温度 1 100°F、さらにステップ II では 5 000 psi-1 200°F のプラントが計画され、それに適した高温材料とその溶接材料が開発されている。Fig. 4 は高温強度およびクリープ破断強度などから求めた 9Cr 鋼およびその溶接金属の許容応力の 1 例を示したものであるが、いずれも満足すべき強度の溶接継手が得られることが明らかである。

#### 5. 耐中性子照射脆化性能の優れた溶接材料の開発

PWR 型原子炉の圧力容器における中性子照射脆化問題はよく知られているが、とくに P および Cu を鋼材および溶接金属に多く含有している場合、その脆化が著しいことが明らかになっている。ASME Sec. II Part C SFA 5.23 の N Grade では、溶接金属として P ≤ 0.012%, Cu ≤ 0.08% の規定があり、それらを十分満足する溶接材料が開発され、実用化されている。Fig. 5 は SAW 法溶接金属の靱性を中性子照射前後で比較したものであるが、衝撃値遷移曲線で約 20°C のシフトに

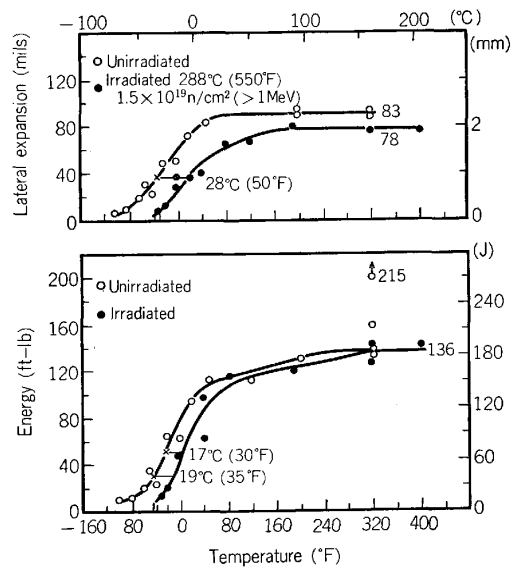


Fig. 5. Charpy-V notch test results of submerged arc welded metal before and after irradiation<sup>6)</sup>.

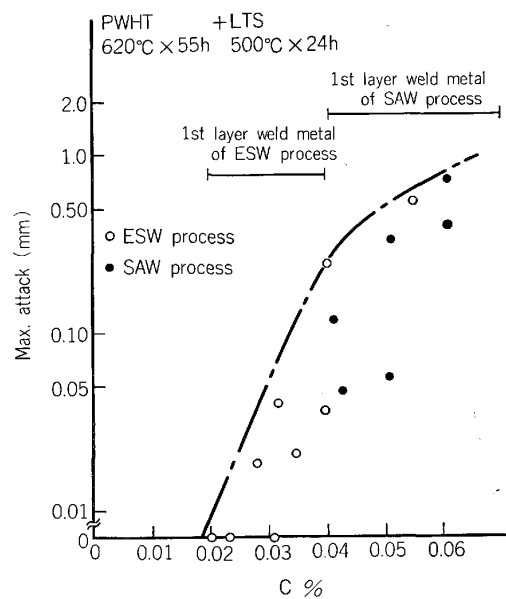


Fig. 6. Effect of carbon content of weld metal on maximum corrosion attack of modified strauss test<sup>7)</sup>.

とどまっている。

## 6. ステンレス肉盛溶接材料と溶接法の進歩

各種肉盛溶接法の中で、带状電極肉盛溶接法は高能率で、しかも肉盛部の健全性が優れていることから、原子力や石油精製関係の圧力容器内壁の肉盛溶接に広くもちいられている。この方法において、従来からの SAW 法にかわり、エレクトロスラグ溶接法 (以下 ESW 法) の適用が広がっている。

ESW 法では、ビードが平滑で母材希釈率が低く、SAW 法にもちいられるフラックスのように  $\text{CaCO}_3$  などの炭素源がないことから溶接金属の C 含有量が低く、その耐食性がよい。例えば Fig. 6 は、150 mm 幅の带状電極による Type 308 溶接金属の改良型 Strauss 試験の結果を示す。

溶接法も改善されてきており、最近では 150 mm 幅の带状電極がもちいられている。広幅化にともない使用される電流も 2000 A を越えるが、このような広幅大電流溶接では偏磁場が発生しやすく、アンダーカットや溶接ビードの偏向が問題となる。その解決策として Fig. 7 に示すような磁気制御法により溶接部に強制磁場を与え、溶融プールの安定化を計っている。Fig. 7 の例では、溶接電流により形成される強力な磁場により带状電極の周囲に設置された磁性体枠と鉄片が励磁され、鉄片の先端で形成される磁界が溶融プールおよびアークにフレミングの左手の法則に従って磁力が作用し、ビードに広がりを与える。

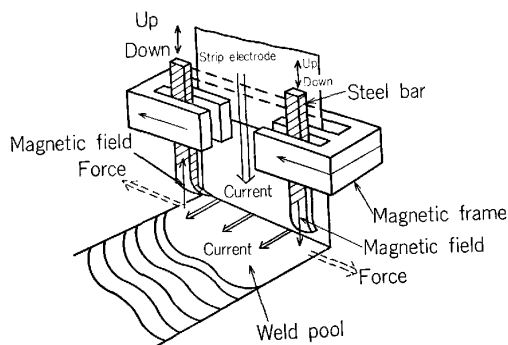
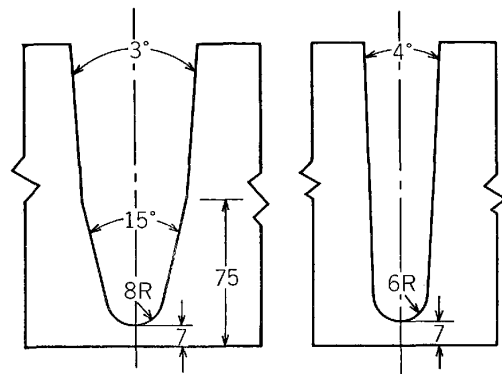


Fig. 7. Example of magnetic control method for strip cladding<sup>9)</sup>.

ステンレス肉盛溶接部における問題点として、脱硫リアクターのように高温高圧水素雰囲気中で操業される装置において、シャットダウン時に肉盛溶接金属と母材の境界部に高濃度の水素が集積し、Photo. 2 に示すような剝離割れが発生することがある<sup>9)</sup>。この現象を Disbonding と称し、その対策が種々提案されている。大入熱になるほど、また、SAW 法より ESW 法の場合に剝離割れ感受性が大きい。直接脱硫リアクターのような場合、肉盛溶接の初層には 75 mm 幅電極による SAW 法が推奨される。

## 7. 狭開先溶接法の実用化

構造物の大型化に伴い、溶接工数を減らす目的で厚板を 10~20 mm 幅の工開先に近い狭開先で、主として 1 層 1 パスで行うラナローギャップ溶接の実用化が進んでいる<sup>10)</sup>。もちいる溶接法は SAW 法と GMAW 法が主体であり、SAW 法<sup>11)</sup>では、スラグの剝離性を従来より大幅に改善することによってその適用が可能となった。軟鋼に対しては作業性のよい  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  系、低合金鋼には耐割れ性および機械的性能のすぐれた  $\text{CaO-SiO}_2$  系のフラックスが主にもちいられる。GMAW 法は SAW 法より早くから実用化されて来ている。2本のワイヤを縄状により合わせることによってアークを回転させる方法、細径ワイヤを用いてそれに周期的に左右に曲げぐせをあたえたりトーチをオッシレートさせてアーク



(a) Conventional SAW (b) Narrow SAW  
Fig. 8. Comparison of the groove between conventional and narrow SAW.

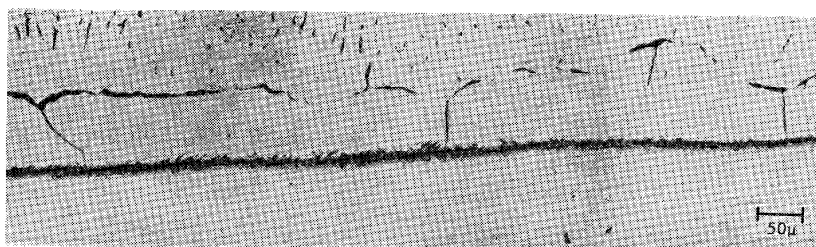


Photo. 2. Disbonding crack propagating along coarse-grain boundaries in the overlay close to the transition zone<sup>9)</sup>

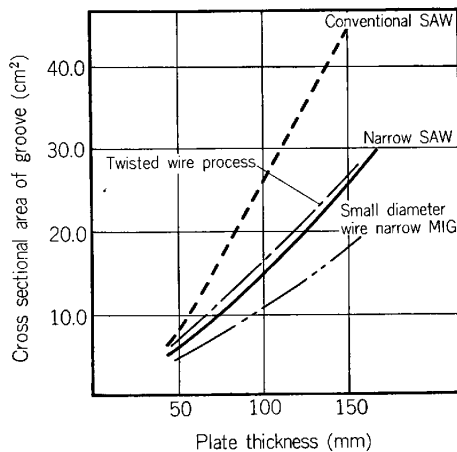


Fig. 9. Comparison of cross sectional area of groove<sup>10)</sup>.

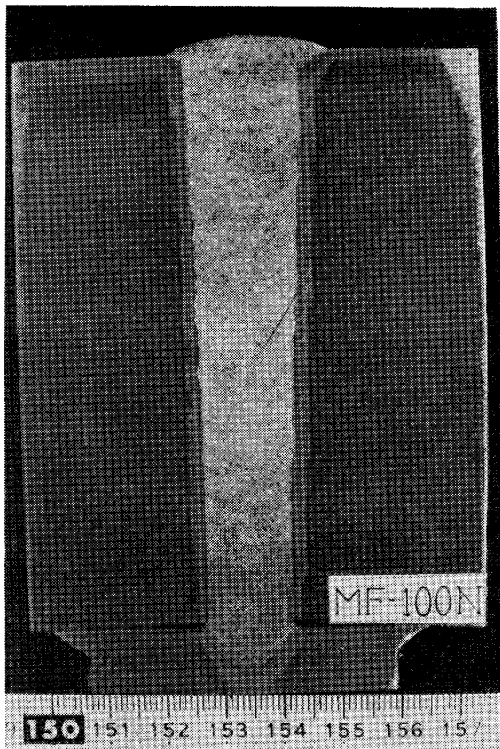


Photo. 3. Example of macrosection of narrow SAW.

を左右にする方法などがある。いずれも狭い開先内の両壁面への溶けこみを確保するためにくふうをこらしている。

Fig. 8 に SAW 法による従来法開先と狭開先法開先の比較例を、Fig. 9 に各狭開先法にもちいる各板厚の開先面積例をそれぞれ示す。

狭開先溶接は炭素鋼から低合金鋼まで多くの鋼種に適用され、強度、靱性ともに優れた性能の継手が得られる溶接材料が数多く開発されている。Photo. 3 は、狭開先 SAW 法溶接継手の断面写真の 1 例であり、安定した溶け込みの良好な溶接がおこなわれていることがわかる。

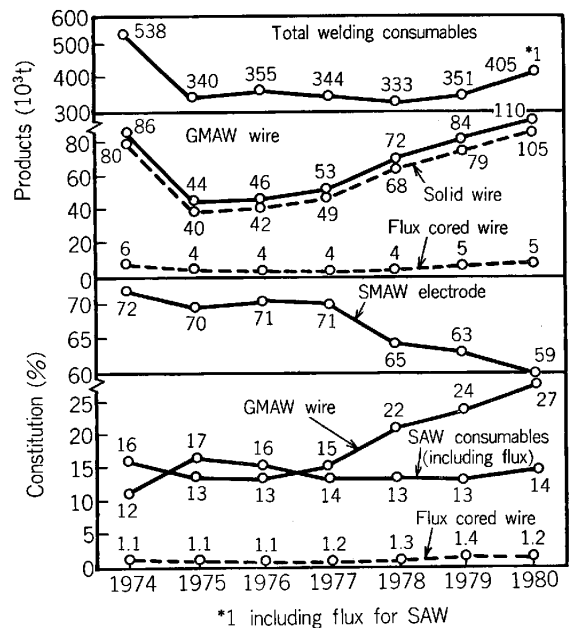


Fig. 10. Annual products of welding consumables of Japan and its constitution.

### 8. 溶接の半自動化の推進と溶接材料の進歩

GMAW 法の溶着速度は被覆棒によるそれに比し普通 2~3 倍に達する。従つて半自動 GMAW 法は手軽な高能率溶接法として近年急速度で普及しつつある。Fig. 10 は我が国における全溶接材料の生産量と各種溶接材料の消費割合の推移を示すものであるが、1978 年頃から大きな変化がうかがえる。すなわち、70% を占めていた被覆棒が 1980 年には 50% 台におちこみ、代わつて GMAW 法用ワイヤが 30% に近づきつつある。

GMAW 法用ワイヤは、大別してソリッドワイヤとフラックス入りワイヤがあり、我が国ではソリッドワイヤの割合が高い。ソリッドワイヤは被覆棒に比べて溶着速度が速く高能率であるが、立向溶接では使用電流が 200 A 以下に制限され低能率となる。1980 年頃より、立向姿勢でも上向姿勢でも下向姿勢や水平姿勢と同程度の高電流で溶接できる各種の全姿勢溶接用フラックス入りワイヤが開発されるにおよんで、GMAW 法の普及とくに溶接の半自動化に拍車がかかった。フラックス入りワイヤは、被覆棒の被覆剤や SAW 法のフラックスと同じように熔融し、スラグとして溶接ビードを覆い、炭酸ガスシールドアーク溶接でも美しい性能のよい溶接金属を得ることができる。フラックスを調整することによつて一般軟鋼用だけでなく、50 kgf/mm<sup>2</sup> ハイテン、低温用鋼用ワイヤも実用化されている。とくに低温用鋼用フラックス入りワイヤは、衝撃値の優れた溶接金属が得られ、全姿勢溶接に使用できるため、LPG 船や海洋構造物の溶接にまで適用されるようになった。

ステンレス鋼の溶接の多くは被覆棒や SAW 法で行われ、GMAW 法としては Ar 主体のシールドガスをも

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of all weld metal in stainless steel with CO<sub>2</sub> welding.

Wire Type	Chemical Composition (%)								Mechanical properties	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	TS N/mm <sup>2</sup> (kg/mm <sup>2</sup> )	El %
308	0.060	1.48	0.57	0.020	0.010	20.15	10.02	—	570 (58.1)	42
308L	0.034	1.43	0.57	0.019	0.009	19.98	10.10	—	575 (58.6)	41
316	0.050	1.65	0.59	0.027	0.010	19.41	12.24	2.33	559 (57.0)	40
316L	0.036	1.68	0.59	0.026	0.010	19.28	12.24	2.35	564 (57.5)	41
309	0.051	1.60	0.58	0.026	0.010	24.63	12.69	—	607 (61.9)	33
309L	0.037	1.59	0.61	0.026	0.011	24.57	12.91	—	616 (62.8)	32
309MoL	0.038	1.63	0.61	0.025	0.009	24.14	12.61	2.38	730 (74.4)	32

ちいる MIG 溶接が一部使われて来たが、この分野でもフラックス入りワイヤによる炭酸ガスシールドアーク溶接が実用化され、経済的、能率的な点で成果を上げている。Table 2 に、炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤによる溶接金属の化学成分と機械的性能の1例を示す。

9. 低水素化による溶接継手の耐割れ性の向上

厚鋼板あるいは高張力鋼板の溶接施工でもつとも留意すべきことは、溶接割れとくに遅れ割れの防止である。この割れは、1) 組織、2) 拡散性水素、3) 拘束の3つの要因が重畳して発生することはよく知られている。従つて、溶接金属中の拡散性水素量の低減は割れ防止に非常に有効であり、予熱およびパス間温度を低くでき、中間熱処理を省略できるなど経済的効果も大きい。

とくに高張力鋼溶接用として、その被覆剤成分と製造条件をくふうした難吸湿で水素量の非常に低減されたいわゆる超低水素溶接棒が使われている。Fig. 11 は一般被覆棒と吸湿速度を比較したものであり、Fig. 12 は窓型拘束割れ試験によつて両者の割れ感受性を比較した結果である。

一方 SAW 法でも、溶接金属中の拡散性水素量がごく低くなる焼結型フラックスが開発されている。フラッ

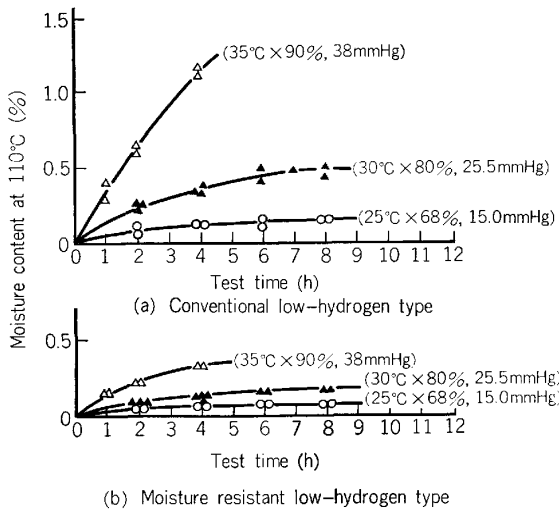


Fig. 11. Relationship between moisture content and moistening time.

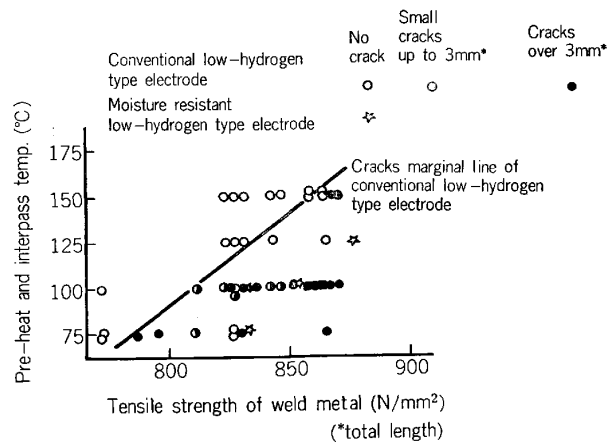


Fig. 12. Window-type restraint cracking test results<sup>12)</sup>.

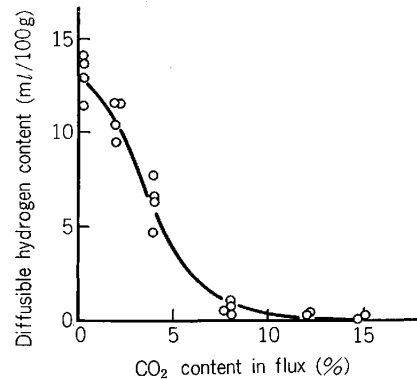


Fig. 13. Relationship between diffusible hydrogen content in weld metal and CO<sub>2</sub> content in flux.

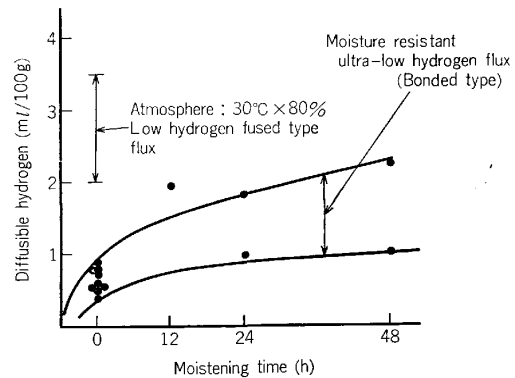


Fig. 14. Relationship between moistening time and diffusible hydrogen content.

Table 3. Multi-weld cracking test results.

Steel	Plate thickness (mm)	Edge preparation	Dia of Wire (mm)	Welding condition				Crack or no crack	
				Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Pre-heat & interpass temp. (°C)	Bonded flux	Fused flux
ASTM A387 G22 Cl 2	50		4.0	600	30/32	30	50	○	—
							75	○	●
							100	○	○●
							150	—	○

Table 4. Amount of fume emission for covered arc welding electrodes<sup>14)</sup>.

JIS Specification	Welding current (A)	Amount of fume emission (mg)		
		per minutes	per g electrode	per g weld metal
D4301	170	415	10.0	16.3
D4303		312	8.06	13.6
D4303		250	6.20	10.0
D4313		256	7.27	10.9
D4327		382	7.26	11.6
D4327		280	6.10	9.7
D4316		272	7.66	11.8
D5016 (A)		308	9.81	15.4
D5016 (B)		297	9.14	14.9
D5016 (C)		693	18.9	40.8

クス中に適量の炭酸塩を添加し、溶接中、溶接熱によつてそれを分解せしめて CO<sub>2</sub> ガスを発生させ、アーク雰囲気中の水素分圧を下げ溶接金属中の水素量を低くするものである。Fig. 13 はフラックス中の CO<sub>2</sub> 含有量と溶接金属中の拡散性水素量の関係を示す。通常、溶接作業性も考慮して 15~20% の CaCO<sub>3</sub> を添加したフラックスが実用化されており、拡散性水素量も 1 ml/100 g 以下と非常に低くなつてゐる。さらに、この種のフラックスの中には被覆棒と同じように難吸湿タイプのももあり、Fig. 14 に示すように吸湿後でも従来もちいられて来ている熔融型フラックスより低い水素含有量の溶接金属が得られるようになった。

以上述べた超低水素溶接材料は高張力鋼のみならず、Cr-Mo 鋼でもこの考え方を適用したものが実用化されているが、Table 3 は、SAW 法で従来使用されていた熔融型フラックスと耐割れ性を比較したものであり、予熱、保持温度が大幅に低減できることが分かる。

### 10. 溶接材料の低ヒューム化

溶接中に発生する煙は溶接ヒュームと呼ばれ、アーク溶接では必然的に発生する。そして、ヒューム発生源の近くに位置する溶接作業者はこれをある程度吸入することは避けられず、近來労働衛生面から注目を集めている問題である。このヒュームを少しでも減らすことは作業者の健康管理の面からも重要なことであり、そのような面からの溶接材料の改良にも力が注がれている。

アーク溶接におけるアークは 5000~7000°C という高温であり、溶接ワイヤの先端、その先端より溶融池へ移行中の溶滴、溶融池の表面から金属蒸気あるいはフラックスを構成する物質の蒸気がはげしく発生している。この高温蒸気が周囲の空气中に放出されると、蒸気全体

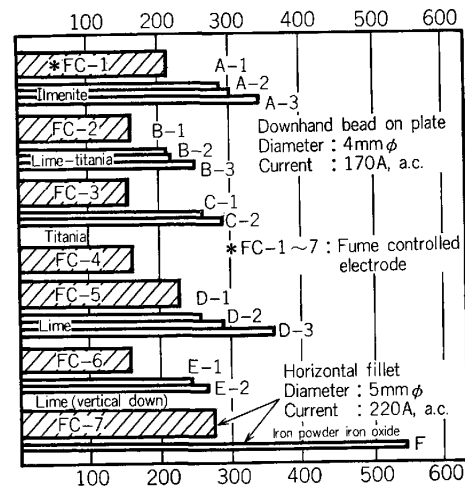


Fig. 15. Amount of fume emission of fume controlled electrodes (mg/min)<sup>15)</sup>.

が急速に冷却固化すると同時に、金属は酸化されて極めて微細な粒子となる。これら微細粒子は多数集合して 2 次粒子を作り、いわゆる溶接ヒュームとなる。

ヒューム発生量は溶接方法によつて異なり、アーク雰囲気が粉状フラックスで覆われている SAW 法が最も少なく、シールドガスをもちいないで自身の分解ガスでアークをシールドするくふうがされているフラックスコードワイヤをもちいるセルフシールドアーク溶接法がもつとも多い。被覆棒はその被覆剤組成によつてヒューム発生量が異なる。Table 4 にその 1 例を示す。たとえば、TiO<sub>2</sub> や CaO は高温での蒸気圧が低いために被覆剤中に多量にあつてもヒュームとなりにくく、また、Na<sub>2</sub>O や K<sub>2</sub>O は蒸気圧が高く、ヒューム中に多量に含まれる<sup>13)</sup>。被覆剤の組成について種々研究が進められ、それをもとに従来の溶接材料に比べてヒューム発生量の少ない被覆棒や炭酸ガスアーク溶接用ワイヤが開発されてい

る。Fig. 15 は、被覆棒について従来の各タイプのも  
とそれぞれのタイプで低ヒューム化したもののヒューム  
発生量を比較したものである。低ヒューム被覆棒では、  
溶接中に時間当たり発生するヒューム量が 30~50% 低  
減されている。

## 11. お わ り に

以上述べたのはごく最近の溶接材料の進歩の 1 例であ  
る。昨今のように、溶接構造物の種類が多様化し、要求  
される溶接継手性能もシビアになつてくると、溶接材料  
の種類もますます多くなり、したがってそれぞれにマッ  
チした溶接材料を、それぞれに適した条件で使用するこ  
とがもつとも肝要なことである。

### 文 献

- 1) COD を要求される低温用鋼の溶接 (溶接協会船  
舶海洋構造物部会第 58 回溶接施工委員会資料)  
(1981・7)
- 2) 低温高靱性 Ti-B 系溶接材料について (同上)
- 3) 奥田直樹, 中野 彰: 溶接学会誌, 51 (1982),  
p. 365

- 4) 服部直次, 山本茂昭, 芳野文人: 圧力技術,  
17 (1979) 6, p. 302
- 5) 中林恭之: 超高温・高圧化蒸気動力プラントの技  
術開発について (日本機械学会第 46 回特別講演  
会資料) (1982・6-3)
- 6) IAEA Coordinated Program in 1982
- 7) 神戸製鋼所溶技報 (1982・6) 539, p. 38
- 8) 最近のサブマージーク溶接材料および溶接施工  
法における進歩 (溶接協会第 116 回化学機械溶接  
研究委資料) (1981・4)
- 9) 酒井忠迪, 浅見 清, 勝亦正昭, 高田 寿, 田中  
治, 竹馬一紘: ステンレス鋼オーバーレイ部の水素  
による剝離割れに影響を及ぼす諸因子 (溶接学会  
第 89 回溶接冶金研究委資料) (1982・8-10)
- 10) 妹島五彦, 五代友和, 河原 稔, 野村博一: 溶接  
学会誌, 50 (1981), p. 1074
- 11) 奥田直樹, 白井昭彦, 芳野文人, 田中和雄: 狭開  
先サブマージーク溶接法とその適用について  
(溶接学会第 81 回溶接法研究委資料) (1981・2)
- 12) 神戸製鋼所溶技報 (1978) 537, p. 9
- 13) 小林 実, 馬來伸吾, 橋本芳造, 菅 哲男: 溶接  
学会誌, 49 (1980), p. 454
- 14) 神戸製鋼所溶参資 (1982) 878, p. 10
- 15) 神戸製鋼所溶参資 (1982) 822, p. 10