
狭開先サブマージアーク溶接法—NSA 法—

Narrow Gap Submerged Arc Welding (NSA) Process

平井 征夫(Yukio Hirai) 徳久 正昭(Masaaki Tokuhisa) 山下 至(Itaru Yamashita)
西尾 要(Kaname Nishio) 赤秀 公造(Kozo Akahide) 浮辺 輝男(Teruo Ukebe)

要旨：

極厚鋼材の狭開先サブマージアーク溶接におけるスラグはくり性の改善，溶接欠陥の防止に重点をおいて検討した結果，高塩基性焼成型フラックス KB120 を用いる NSA 法を開発した。スラグの熱収縮挙動がはくり性を支配する最重要因子であり，溶接冷却過程における 700℃ 付近での変態膨張を抑制することによって最大のスラグ収縮量が得られた。MgO-BaO-SiO₂ 系の高塩基性フラックス KB120 は溶接金属の水素量，酸素量をも低減できる特長を有している。本法の高信頼性および高能率性は種々の現場適用によって確認された。板厚 200mm までは 1 層 1 パス法で積層でき，開先面積は従来法の 1/2 以下に低減できる。

Synopsis：

With main emphasis on improving slag detachability and preventing weld defects, study was made on heavy steel plate welding in the narrow gap submerged arc welding, leading to the development of the NSA process that uses an MgO-BaO-SiO₂ type high-basiscity agglomerated flux, KB-120. With thermal contraction behavior of slag found to be the most important factor that determines slag detachability, the maximum contraction was obtained by suppressing transformation expansion occurring around 700°C during cooling. It was found that KB-120 can also produce weld metal of low level hydrogen and oxygen. High reliability and productivity of this process has been confirmed by its wide application to the fabrication of pressure vessels, offshore structures and machinery. Since the "one layer-one pass" welding method is used to build up for steel plates up to 200mm in thickness, the crosssectional area of the groove and arc time are reduced to 1/2 to 1/3 of those in the conventional process. The use of very low hydrogen flux provides additional advantages such as elimination of intermediate postweld heat treatment and lowering of preheating temperature.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

狭開先サブマージアーク溶接法—NSA 法— Narrow Gap Submerged Arc Welding (NSA) Process

平井 征夫*
Yukio Hirai

徳久 正昭**
Masaaki Tokuhisa

山下 至***
Itaru Yamashita

西尾 要****
Kaname Nishio

赤秀 公造*****
Kozo Akahide

浮辺 輝男*****
Teruo Ukebe

Synopsis:

With main emphasis on improving slag detachability and preventing weld defects, study was made on heavy steel plate welding in the narrow gap submerged arc welding, leading to the development of the NSA process that uses an $MgO-BaO-SiO_2$ type high-basicity agglomerated flux, KB-120.

With thermal contraction behavior of slag found to be the most important factor that determines slag detachability, the maximum contraction was obtained by suppressing transformation expansion occurring around $700^\circ C$ during cooling. It was found that KB-120 can also produce weld metal of low level hydrogen and oxygen.

High reliability and productivity of this process has been confirmed by its wide application to the fabrication of pressure vessels, offshore structures and machinery. Since the "one layer-one pass" welding method is used to build up for steel plates up to 200mm in thickness, the crosssectional area of the groove and arc time are reduced to 1/2 to 1/3 of those in the conventional process. The use of very low hydrogen flux provides additional advantages such as elimination of intermediate postweld heat treatment and lowering of preheating temperature.

1. 緒 言

溶接構造物の大型化によって極厚肉鋼材の適用個所が多くなり、製造工程で多大の工数を要する溶接作業の高能率化と継手部の高性能化を同時に満たしうる溶接法および材料の開発が強く要望されている。従来これらの溶接は開先断面積の広いサブマージアーク溶接法 (SAW) やエレクトロスラグ溶接法 (ESW) によって行われてきたが、上記の要求にこたえうる一つの方法として狭開先溶

接法がある。

1970 年頃、Battelle Memorial Institute においてガスシールドアーク溶接法 (GMAW) を用いた狭開先溶接法が開発され、国内でもさらに種々の改善を加えた方法で 1975 年頃から実用化されはじめた¹⁾。この方法では従来の開先断面積に比較して $\frac{1}{2}$ 以下に削減はできるが、高品質の溶接部を安定して得るための適正溶接条件範囲が比較的狭く、高精度の溶接作業が要求されるため一般に普及するまでには至っていない。

いっぽう、SAW 法は GMAW 法に比較して融

* 技術研究所第 2 研究部溶接研究室主任研究員・工博
*** 溶接棒鉄粉工場技術管理室主査(課長)
***** 構造技術研究所構造研究室主任研究員・工博
(昭和 56 年 8 月 24 日原稿受付)

** 技術研究所第 2 研究部溶接研究室
**** 溶接棒鉄粉工場技術管理室
***** 人事部付川鉄鉄構工業(株)出向(部長)

合不良、気孔などの溶接欠陥が発生しがたく、高品質の溶接部を得るための熱源としてすぐれている。しかし、狭開先部に対して従来のフラックスを用いて溶接したのではスラグのはくりが極めて困難であるために、これまで狭開先 SAW 法が現場適用されるまでには至っていなかった。著者らはスラグ物性とはくり性の関係を基礎的に検討した結果、高塩基性焼成型フラックス KB 120を用いた狭開先 SAW法 (Narrow-Gap Submerged Arc Welding Process, NSA 法) を開発した。

2. NSA法の概要

狭開先 SAW 法の実用化にあたっては、

- (1) スラグはくり性
- (2) 溶接継手品質
- (3) 溶接効率
- (4) 設備投資

について検討する必要がある。Table 1 に示すこ

とく、NSA 法ではこれらの課題を特殊フラックス、不純物の少ない共金ワイヤおよび専用ノズル (Fig. 1 参照) の開発によって解決した。Photo. 1 に NSA 法と従来の SAW 法による板厚 200mm 継手の断面マクロ組織を示す。

NSA 法では通常の SAW 電源を用い、狭開先 GMAW 法のような高価な設備投資を必要としない。U 開先の場合、板厚 150~200mm まで 1 層 1 パス法の高効率溶接が可能である。板厚 100mm 以下ではガス切断加工による V 開先で 30° までの狭角化ができ GMAW 法にない特徴も有している。

Table 2 に各種鋼材に対する溶接材料を一覧表で示した。KB 120 は Neutral タイプのフラックスであり、溶接金属への合金添加は共金ワイヤにより行っている。Cr-Mo 鋼などにおける使用中ぜい化防止の観点から、ワイヤ中の不純物元素 (P, Sn, Sb, As など) は極力低減されている。また、低温割れ防止のための予熱管理および中間焼鈍工程を簡略化できるよう、フラックスへ炭酸塩を添

Table 1 Subjects of narrow gap submerged arc welding and their countermeasures in NSA process

Subjects		NSA process				
1.Slag detachability	[]	Increase of thermal contraction.....	Fragile slag			
2.Joint qualities	[]	Prevention of weld defects	hot crack			
				cold crack	Improvement of notch toughness	
		uniform fine micro structure	low oxygen and nitrogen.....			
		low temper embrittlement.....	homoginity of chemistry			
		3.Efficiency	[]	Small sectional groove area	High deposition rate.....	
						One pass each layer technique
4.Welding facilities						
		Flux				
		1) High basicity				
		2) Agglomerated flux				
		3) Reduced expansion due to transformation				
		4) MgO-BaO·SiO ₂ -CaO				
		5) Neutral flux				
		Wire				
		1) Alloyed wire				
		2) Pure wire				
		Welding parameters				
		1) Large tolerance				
		2) Groove angle: 3°				
		Root gap: 12mm				
		Welding machine				
		1) Rectangular nozzle				
		2) Conventional SAW machine (AC power)				

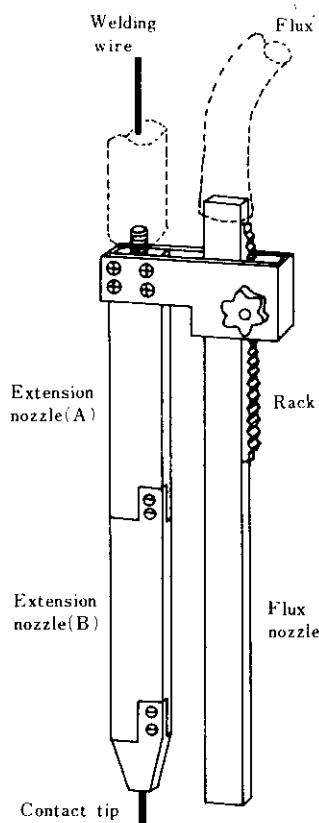


Fig. 1 Rectangular nozzle for NSA process
(Thickness: 8 mm)

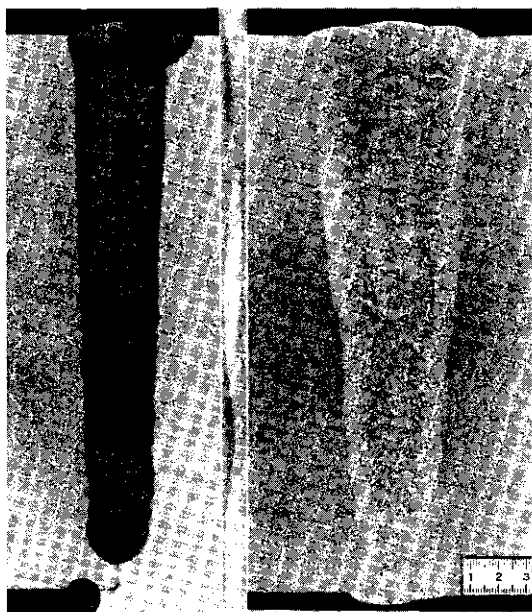


Photo. 1 Macro structure of 200mm thickness weld joint

Table 2 Welding Materials for NSA-process

Steel grade	Welding Material	
	Wire	Flux
SM 41	KW 30T KW 30C	KB 120
SB 46, 49	KW 30T	
ASME SA515 Gr. 60, 70	KW 50C	
ASME SA516 Gr. 60, 70	KW 30T KW 50C KW 101B	
ASME SA204, 182 F1 SA336 F1	KW 50C KW 101B	
ASME SA387 Gr. 11, 12 SA336 F11, F12	KWT105	
ASME SA387 Gr. 22 SA336 F22	KWT210	
ASME SA387 Gr. 21 SA336 F21	KWT310	
60kgf/mm ² HT	KW 101 B	
80kgf/mm ² HT	KW 103 B	

加して溶接金属中の水素量を従来法の $\frac{1}{2}$ 以下に減らしている。

3. 高塩基性焼成型フラックスKB 120の開発

3-1 基本成分系の決定

狭開先溶接部でもスラグはくりが容易なフラックスの基本成分系を決めるため6種類のフラックスを準備し、ルート間隔15mm、開先角度6°の開先部に600A、28~30V、25cm/minの条件で1パス溶接を行った。その場合のスラグはくり性、ビード形状およびスラグの状態をTable 3に示す。

スラグが部分的にでもガラス質でこわれやすい酸性フラックス (BF 1, BF 2, FF 1), また結晶質でもスラグに横割れが発生する塩基性フラックス (BF 3) では良好なはくり性を示すことが明らかとなった。溶接金属中酸素の低減およびCr 酸化物生成によるスラグと溶接金属との結合力軽減などの観点からは後者の塩基性フラックスが高じん性を要求される鋼に適している。また焼成型と熔融型フラックスを比較した場合、高塩基性熔融型フラックスでは水素量の低減が困難であるのに対して、焼成型はフラックスへの炭酸塩の添加が可能でかつ塩基度が高いほど溶接金属中水素を低

Table 3 Relationship between flux type and slag detachability in narrow gap U-groove welding

Type	No.	Flux		Test results			
		Composition	B ₁	Slag removal	Bead shape	Slag characteristics	Remarks
Bonded	BF 1	SiO ₂ -MgO-Al ₂ O ₃	-1.0	Easy	Concave	Glassy + Crystalline	Easily broken
	BF 2	SiO ₂ -MgO-Al ₂ O ₃ -CaF ₂	-0.5	"	"	"	"
	BF 3	MgO-BaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃	+1.3	"	"	Crystalline	Many cracks
	BF 4	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-CaF ₂	+1.6	Difficult	"	"	Not easily broken
Fused	FF 1	TiO ₂ -BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	-2.6	Easy	Convex	Glassy	Easily broken
	FF 2	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -MnO-CaF ₂	+0.2	Difficult	"	"	Not easily broken

減しやすい²⁾。したがって、本溶接法をCr-Mo鋼あるいは高張力鋼の厚肉鋼材へ適用することを考慮してKB 120の基本系をMgO-BaO-SiO₂-Al₂O₃系焼成型フラックスに決定した。

3-2 スラグ物性とスラグはくり性の関係

BF 3を基本としてMgO, BaO, SiO₂などの成分調整を行い、スラグの融点および熱収縮量とスラグはくり性の関係を調べた。Table 4にフラックス組成を示す。

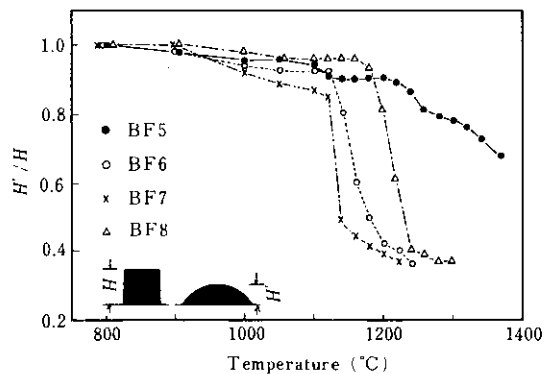
これらの溶接スラグの融点および熱収縮特性を以下の方法で測定した。径10mm、高さ10mmに成形した粉末状の溶接スラグをAr雰囲気中で10°C/minの速度で加熱して、その形状変化をSilhouette法によって観察記録し軟化温度、融点を求めた。その結果がFig. 2およびTable 5であり、軟化温度は H'/H が急激に小さくなる温度で、融点は $H'/H=0.5$ になる温度で代表させた。

Table 4 Chemical compositions of flux used

Code	Composition of flux (%)		
	MgO	BaO	SiO ₂
BF 5	40	12	20
BF 6	25	13	19
BF 7	22	12	20
BF 8	15	17	22

つぎに熱収縮挙動を調べるためにこれらの溶接スラグをカーボン電極でアーク溶解して径8mm、長さ50mmの棒状試料を作った。Fig. 3が熱膨張測定装置であり、約5°C/minの速度で加熱したときの試料の長さ変化を石英管を通してダイヤルゲージによって測定した。

実際の溶接におけるスラグのはくりに対しては冷却過程でのスラグの熱収縮挙動を考慮する必要はあるが、ここでは昇温時と冷却時の変形挙動が類似しているものと仮定して、加熱時の試料の長さ変化を測定した。スラグの軟化温度以下での収縮挙動について整理したのがFig. 4である。

**Fig. 2** Physical properties of weld slag determined at elevated temperatures with Silhouette method**Table 5** Relationship between detachability and physical properties of weld slags

Code	Softening temperature (°C)	Melting point (°C)	Thermal contraction behavior		Weld performance	
			Expansion due to transformation	Total contraction (%)	Bead shape	Slag detachability
BF 5	1210	1350	No	1.75	Concave	Very good
BF 6	1120	1170	Small	1.23	Concave	Good
BF 7	1120	1130	Moderate	0.86	Concave	Slightly difficult
BF 8	1170	1240	Large	0.30	Concave	Difficult

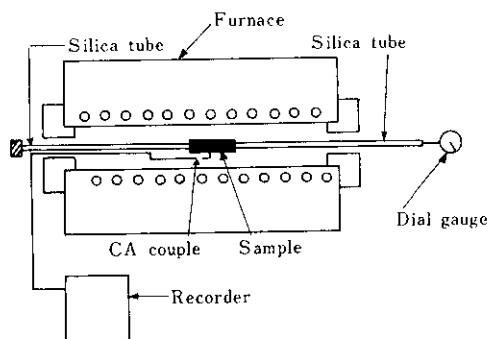


Fig. 3 Apparatus for measuring thermal expansion of slag

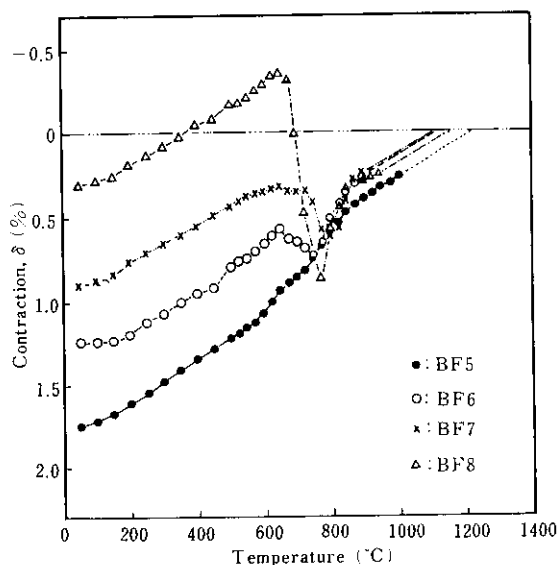


Fig. 4 Contraction behavior of weld slag during cooling

BF5は1000°Cから常温まで単調に収縮するが、他のフラックス(BF 6, 7, 8)は700°C~800°Cの間で結晶構造の変化にもとづく変態膨張が生じている。軟化温度および熱収縮係数よりもこの温度域での変態膨張量の差が冷却後の収縮量に大きく

影響をおよぼすことが明らかである。

これらのスラグ物性と溶接作業性をTable 5にまとめたが、いずれのフラックスでも凹型ビードでアンダカットの発生もない。スラグはくり性はBF 5がもっともすぐれており、BF 7, 8は極めて悪い。BF 6とBF 8のスラグはくり性を比較すると、軟化温度および融点ともに高いBF 8がBF 6より劣っており、軟化温度と融点が高いスラグでもはくり性は必ずしも改善されないことがわかる。いっぽう、熱収縮特性とはくり性とは明瞭な相関関係が認められる。すなわち、冷却過程において変態膨張を生じないBF 5がもっともはくり性が良く、反対に変態膨張の大きいBF 8ではスラグのはくり性はほとんど不可能であった。

以上のことから、スラグはくりの改善に対する重要な因子はスラグの軟化温度、融点よりむしろ冷却過程における変態膨張量であり、変態膨張をなくしてスラグの熱収縮量を大きくすることがスラグのはくり性改善に効果的であることが明らかとなった。KB 120はBF 5を基本成分としている。

3-3 溶接金属の拡散性水素量

JIS グリセリン法およびガスクロマトグラム法にもとづいて測定したフラックスKB 120とワイヤKW103Bの溶接金属中拡散性水素量をTable 6に示す。KB 120では市販の溶融型フラックスの1/2以下に低減しており、かつ特殊処理を施すことによって極低水素難吸湿化をはかるとさらにKB 80Cにはほぼ匹敵するレベルまで水素は下がる。

4. NSA法の実用化に関する検討

4-1 開先形状

開先角度およびルート間隔は溶接能率上小さいほうが望ましいが、これらを制限する要因として

Table 6 Diffusible hydrogen content in deposited metal (Wire:KW 103B)

Flux		Diffusible hydrogen content (ml/100g of deposited metal)	
		JIS glycerine method	IHW mercury method
KB 120 for	Normal type	1.2	3.5
NSA process	Extra low hydrogen type	0.5	2.8
KB 80C (Agglomerated flux for HT 80)		0.2	2.0
Fused flux for HT 80		3~5	—

スラグはくり性の劣化と高温割れの発生があげられる。**Fig. 5** に U 形開先におけるルート間隔および開先角度とスラグはくり性の関係を示す。開先角度およびルート間隔がともに広いほどはくり性は向上するが、とりわけ開先角度の影響が大きい。スラグはくり性と作業能率の兼ねあいから判断して最適の U 開先形状は角度 3° 、ルート間隔 12mm と考えられる。

板厚 70mm 以下の場合には、**Fig. 6** に示すごとく、開先角度 $30^\circ \sim 40^\circ$ の X または V 開先のほうが U 開先より断面積が小さくなり、かつスラグはくりがさらに容易になる利点がある。V 開先継手における第 1 パス目のスラグはくり性、高温割れ傾向と開先角度の関係を **Table 7** に示す。アーク電圧がスラグはくりおよびアンダカット発生におよぼす影響は開先角度が小さいほど著しく、このため実用上は V 継手の開先角度は $30^\circ \sim 35^\circ$ が最適と考えられる。なお、圧力容器の長手溶接では溶接はずみは周溶接の場合より大きいため、開先角度は若干余裕をみて $2^\circ \sim 5^\circ$ 大きくする必要がある。

4.2 標準溶接条件

溶接欠陥（アンダカット、高温割れ、融合不良）の有無およびビード形状をもとにして決定した U および 30° V 開先の標準溶接条件を **Table 8** に示す。

4.3 溶接条件、開先形状および電極位置変動の許容範囲

4.3.1 溶接条件の変動

一般に狭開先内の溶接においては、ビード形状、アンダカット、融合不良の発生に対してはアーク電圧変動の影響が大きい。しかし、**Photo. 2** のご

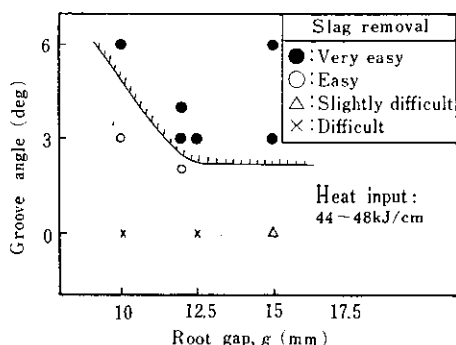


Fig. 5 Effect of groove preparations on slag detachability

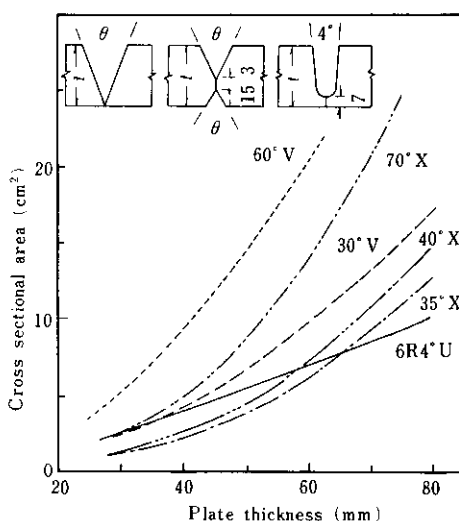


Fig. 6 Relationship between plate thickness and cross sectional area of various types of groove

とく、NSA 法の場合には電圧が $25 \sim 30\text{V}$ では適正ビードが得られており、かなりアーク電圧の許容範囲が広いことがわかる。 25V 以下の低電圧域では凸ビード、 32V 以上の高電圧域ではアンダカットが発生してスラグはくりが困難であるとともに次パスで融合不良などの欠陥が生じやすい。

Table 7 Effect of bevel angle on weld performance in V-groove joint
(Wire dia.: 3.2 mm , Current: 450 A , Travel speed: 15 cm/min)

Bevel angle (deg.)	Optimum arc voltage for root pass (V)	Weld defects	Slag detachability
20	22~23	Hot crack undercut	Slightly difficult
25	22~24	Slight undercut	Slightly difficult
30	22~25	No defect	Easy
35	23~27	No defect	Very easy
40	24~30	No defect	Very easy

Table 8 Standard welding condition for NSA process

a) U-groove

Groove width (mm)	Single Electrode Process				2-Electrode Process				
	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Flux height (mm)	Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Flux height (mm)
12	425	27	18	50	L T	425 —	27 —	18 —	50
14	500	28	25	50	L T	500 500	29 25	45	50
16	550	29	25	50	L T	550 550	30 26	45	50
18	600	31	25	50	L T	600 600	32 28	45	50
20	625	32	23	50	L T	625 625	33 29	40	50
22	625	34	23	50	L T	625 625	35 31	40	50

b) V-groove

No. of passes	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)
1	425	25	10~15
2. 1'	500	27	20~25
3. 2'	550	29	20~25
4	550	29	20~25
5	600	30	20~25
6	650	31	20~25
7. 8	500	27	20~25

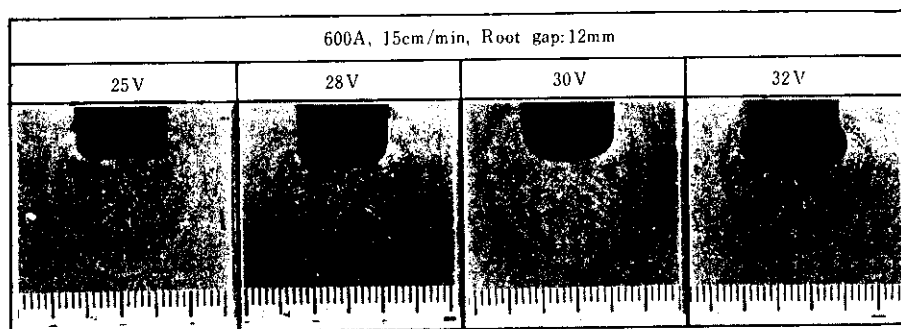
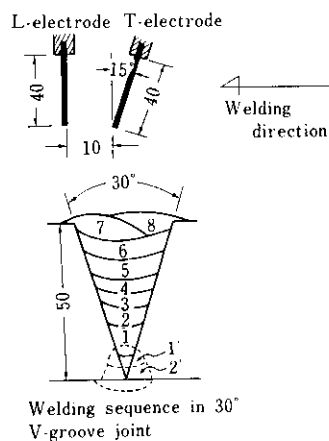


Photo. 2 Effect of arc voltage on bead configuration

4-3-2 ルート間隔の変動

溶接条件 (600A, 32V, 20cm/min) 一定で、ルート間隔 g を 12~26mm に変化させた時の横断面マクロ組織を Photo. 3 に示す。 $g=12\sim 21\text{mm}$ と

いう広い範囲でビード形状および溶込み状態ともに良好である。 Fig. 7 は 600A, 20cm/min の条件でルート間隔 g およびアーク電圧を変化させた場合のビード溶込み幅 P_w を調べた結果である。 g が大きくなるほど P_w は小さくなるが、 $g=20\text{mm}$

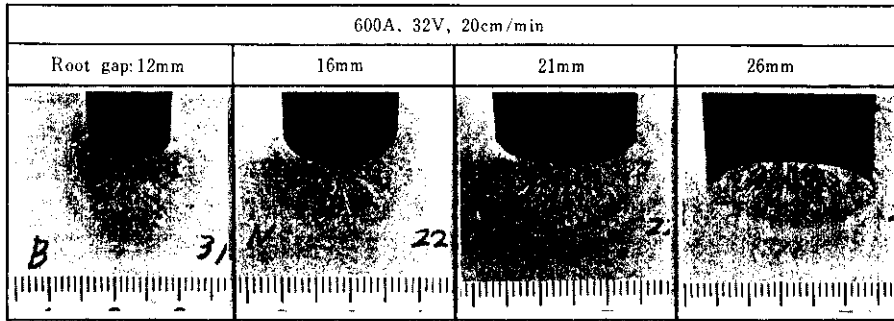


Photo. 3 Effect of root gap width on bead configuration

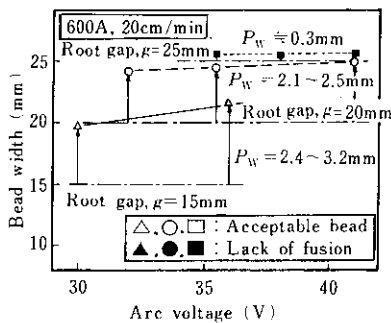


Fig. 7 Effect of arc voltage and root gap on bead penetration width

でも 2 mm 以上の溶込み幅がある。g=25mm の場合には P_w が 0.3mm と小さく融合不良が生じていることから、開先幅が 20~25mm を越えると 1 層 1 パス法から 1 層 2 パス法に変える必要がある。なお、g=15mm と 20mm を比較した場合、 P_w はいずれも 2~3 mm 程度であることから、開先側壁の溶込み形成はアークによる直接溶融よりむしろ溶鋼による二次的溶融の効果が大きく作用していると考えられる。したがって、NSA 法は融合

不良防止の観点からは安定した溶接法であり、ガス切断のごとく開先加工精度が多少悪い場合でも同一溶接条件での施工が可能である。

4.3.3 電極位置の変動

開先中心線とワイヤ設定位置のずれ l が生じたときの横断面ビード形状を Photo. 4 に示す。 $l=1.5\text{mm}$ では、ずれが生じない場合とほとんど変わらない正常なビード形状をしている。 $l=3\text{mm}$ の場合にはアークが近接しすぎた開先壁側でアンダカットが生じるが、この状態では電極ノズルが壁に接触するため一見して電極の偏心がわかる。

このように、NSA 法においては溶接条件、開先形状および電極位置の変動に対する許容範囲が広く、狭開先 GMAW 法におけるほどの厳密な作業管理を行わなくとも安定した溶接が可能である。

4.4 高温割れの防止対策

狭開先溶接では、ビードが“梨の実”形状になりやすいため高温割れの防止を配慮する必要がある。溶接条件およびルート間隔を変化させて、ビ

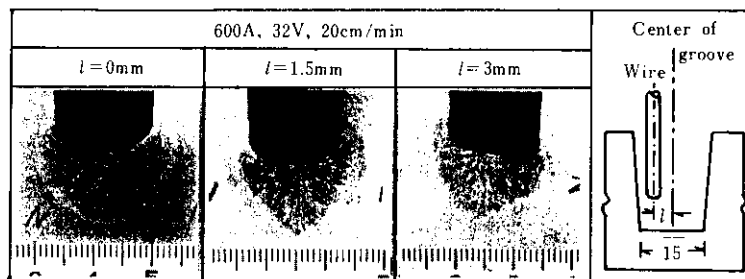


Photo. 4 Tolerance of wire working position in narrow groove

ード形状と高温割れの関係について整理した結果を Fig. 8 に示す。初層の割れ発生に対して鋼材の C 量の影響が大きい。Al キルド鋼 ($C=0.10\%$) および ASTM A515 鋼 ($C=0.26\%$) とともに、高温割れはビード形状係数 f (ビード深さ/ビード幅) が大きく、かつ高電流側で生じている。割れ防止のためには低電流域で、 f が小さくなる溶接条件を選択するべきである。とくに、高炭素鋼でルート間隔が 12mm と狭い場合には、溶接電流を 400 A に下げ、低速度で溶接する必要がある。

このように、高炭素鋼を狭開先溶接する場合には、十分な予熱とともに初層から数パスの間は低電流・低速度の溶接条件で行い、それ以降のパス

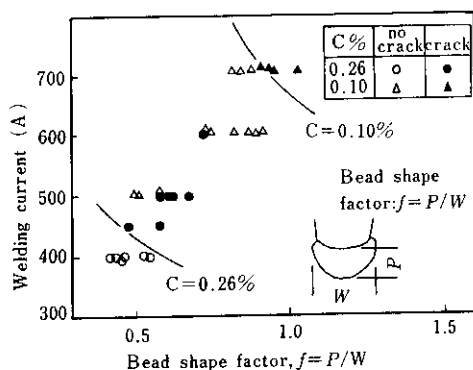


Fig. 8 Relationship between hot cracking tendency and bead shape factor for high and low carbon steels

については電流を徐々に増加する方法が溶接欠陥の防止および作業能率の点から好ましい。また、初層における高温割れ防止の方法として、①低炭素鋼をバックিং材として使用する、②開先内にあらかじめ鉄粉やカットワイヤを添加する、③初層溶接部を D5016 棒でバタリングする、などの手段も有効である。

4.5 低温割れの防止対策

Cr-Mo, HT80 などの極厚高强度鋼では、溶接部に生じる低温割れを防止するために通常 200°C 以上の高温予熱が実施されているが、高塩基性焼成型フラックス KB 120 を用いた NSA 法ではこの予熱温度の低減が可能である。Fig. 9 に WES 3005 鋼種認定試験方法に準拠して行った ASTM A387-22 Cl.2 鋼 (板厚 75mm) の U 形多層溶接割れおよびレ形溶接割れ試験の結果を示す。市販の溶融型フラックスによる結果と比較して示した Fig. 9(a) から、NSA 法では割れ阻止のための予熱・パス間温度が著しく下げることがわかる。これは Table 6 に示したごとく、KB 120 による溶接金属の拡散性水素量が市販のそれよりかなり低いことによる。Fig. 9(b) はレ形拘束試験片に初層溶接だけ行った場合の結果であり、被覆アーク溶接法での割れ阻止の予熱温度が 200°C であるのに対して NSA 法では 150°C である。しかし、連続して多層溶接する場合には (a), (b) のごとく 75°C

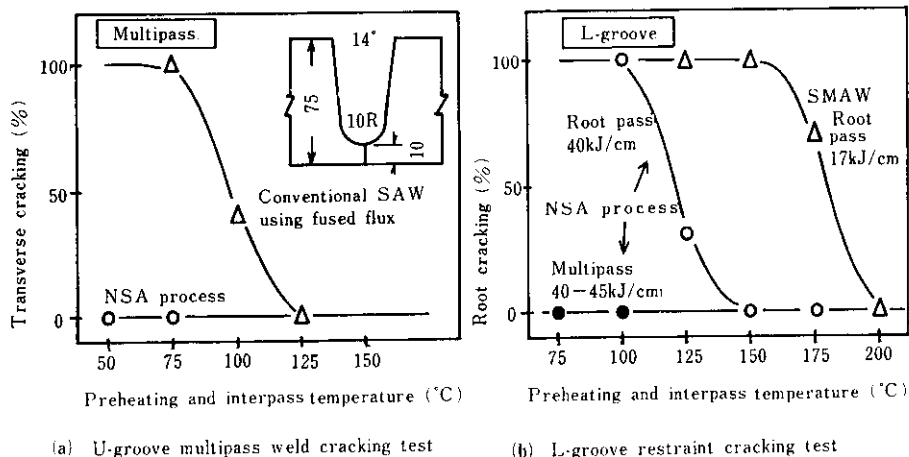


Fig. 9 Restraint weld cracking test results of NSA welding materials for ASTM A387 Gr.22 steel (Test procedure: WES 3005)

予熱でも割れは生じない。

NSA法の現場施工においては、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼およびHT80鋼などの場合、予熱・パス間温度は 150°C で溶接を行い、製造途中での中間焼鈍工程も省略しうる利点がある。

5. NSA法による溶接継手部の性質

狭間先溶接法の適用対象はおもに压力容器などの極厚鋼であるため、低温割れ感受性とともに関手部の機械的特性が重要視される。とくに、最近では安全最優先の社会情勢を反映してCr-Mo鋼などでは使用中ぜい化を考慮して極めて高いじん性値が要求されるようになってきている。

NSA法用溶接材料の開発に際しては上記状況を考慮して、フラックスは高塩基性組成の成分系とし、不純物元素の少ない共金系ワイヤと組合せることによって溶接金属中の酸素、窒素および粒界ぜい化元素(P, As, Sb, Snなど)³⁾の低減を図っている。

各種鋼材に対するNSA継手溶接金属の化学組成と機械的性質の1例をTable 9に示す。

6. NSA法の現場適用例

本溶接法の適用対象はおもに压力容器などの極厚鋼材であるが、最近では溶接能率、スラグはくり性およびじん性がすぐれていることに注目して板厚100mm以下の鋼材にも適用されるケースが増えている。Table 10にNSA法の適用構造物とその開先形状の1例を示す。

Photo. 5に肉厚123mmのASTM A 336 F 22鋼を用いた熱交換器12基の周溶接へNSA法を適用した場合の状況を示す。Table 11はこの場合のNSA法と従来形SAW法の能率比較であり、所要パス数と溶接時間はそれぞれ $\frac{1}{3}$ および $\frac{1}{2}$ に短縮された。溶接スラグは容易にはくりすることが出来、溶接後のX線および超音波探傷検査でも欠陥は皆無で、欠陥発生率は従来法より低いことが確認された。NSA法では最終パス直前まで1層1パス法で連続して積層できるため、従来法での振分けパスにおける電極ねらい位置の人為的誤操作による欠陥が生じないためと考えられる。また、予熱・パス間温度を 150°C に低減し、かつ溶接直後に

Table 9 Chemical compositions and mechanical properties of NSA weld metal
(Heat input: 40~45 kJ/cm)

Steel	Welding material		Chemical compositions of weld metal (%)										
	Wire	Flux	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	As	Sb	Sn
A516 Gr.70	KW 30T	KB 120	0.06	0.45	1.35	0.016	0.005	—	—	—	—	—	—
HT 60	KW101B	KB 120	0.06	0.33	1.46	0.010	0.003	—	0.44	0.72	—	—	—
HT 80	KW103B	KB 120	0.05	0.28	1.35	0.008	0.004	0.71	0.43	2.20	—	—	—
A204	KW 50C	KB 120	0.09	0.37	1.53	0.010	0.003	—	0.51	—	0.002	0.001	0.001
A387 Gr.11	KWT105	KB 120	0.11	0.42	0.80	0.006	0.005	1.31	0.51	—	0.003	0.001	0.002
A387 Gr.22	KWT210	KB 120	0.10	0.25	0.63	0.007	0.003	2.42	1.01	—	0.003	0.001	0.002

Welding material		P WHT	Tensile strength		Absorbed energy		$v T_{R40}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$v T_{R40} + 1.5\Delta v T_{R40}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Hv
Wire	Flux		(kgf/mm ²)		(kgf·m)				
			RT	450 $^{\circ}\text{C}$	$v E_0$	$v E_{-40}$			
KW 30T	KB 120	As weld	58	-	17.9	15.1	-60	-	195
		625 $^{\circ}\text{C}\times 6\text{h}$	54	-	19.2	14.6	-55	-	175
KW101B	KB 120	As weld	65	-	19.8	10.6	-55	-	209
KW103B	KB 120	As weld	85	-	10.6	8.6	-60	-	257
KW 50C	KB 120	650 $^{\circ}\text{C}\times 5\text{h}$	57	49	16.7	9.2	-53	-35	179
		690 $^{\circ}\text{C}\times 5\text{h}$	56	48	17.2	9.5	-59	-35	170
KWT105	KB 120	690 $^{\circ}\text{C}\times 5\text{h}$	63	53	15.8	10.0	-64	-58	203
		690 $^{\circ}\text{C}\times 12\text{h}$	59	48	16.2	8.6	-50	-34	197
KWT210	KB 120	690 $^{\circ}\text{C}\times 12\text{h}$	62	48	15.0	10.3	-56	-17	194
		690 $^{\circ}\text{C}\times 26\text{h}$	59	47	14.8	8.9	-49	-21	186

Table 10 Recent applications of NSA process

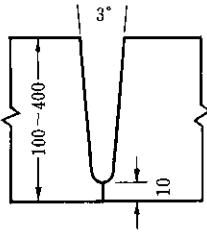
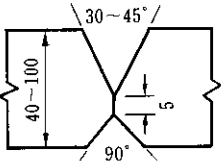
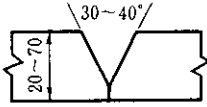
Joint preparation	Type of structures	Steel grade	Thickness (mm)	Welding wire
	Heat exchanger	ASTM A336 F22 Cl.2	123	KWT 210
	Centrifugal casting mold	JIS SC46	250	KW 50C
	Press cylinder	ASTM A148	254	KW 101B
	Impeller shaft	JIS SF50	200	KW 50C
	Semi-sub type drilling rig	EH 36	42	KW 30T
	LNG carrier vessel	N 36E	43	KW 30T
	Pipe for off-shore structure	API 5LX X 52	50	KW 36
	Water heating facilities for nuclear power station	SM 50 & SF 50	20~70	KW 50C
	Boiler	SB 46, 49 49M	20~50	KW 30T
				KW 50C

Table 11 Comparison of efficiency between NSA process and conventional SAW

Welding process	Conventional SAW	NSA process
Cross sectional area of groove (cm ²)	45.6	19.2
Total pass	79	25
Arc time (h)	20.5	12.5

後熱を行って中間焼鈍を省略できる利点もあった。

円周溶接の場合には電極の適正な設定位置を決める必要がある。Fig. 10 は平板溶接における傾斜角度とビード形状の関係を示しており、下りから上り勾配になるとビード表面形状は凹から凸型へ変化する傾向にある。このことから、ビード表面形状が重要となる外面溶接では3°程度の下りが、また裏はつり後の第1パスのごとく深溶込みが必要となる内面溶接では3°の上り相当位置に電極を設定すればよいと考えられる。

なお、NSA 法の現場実績での最大板厚は 254

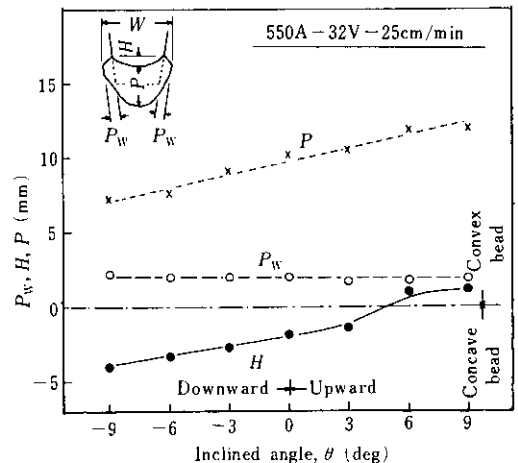


Fig. 10 Effect of inclined angle of plate on bead configurations

mm であるが、実験室的には板厚 400mm の反応塔用 A336F22 鋼 (中空鋼塊製) で問題なく溶接施工しうることを確認している。

いっぽう、セミサブリグや LPG 船の上甲板に

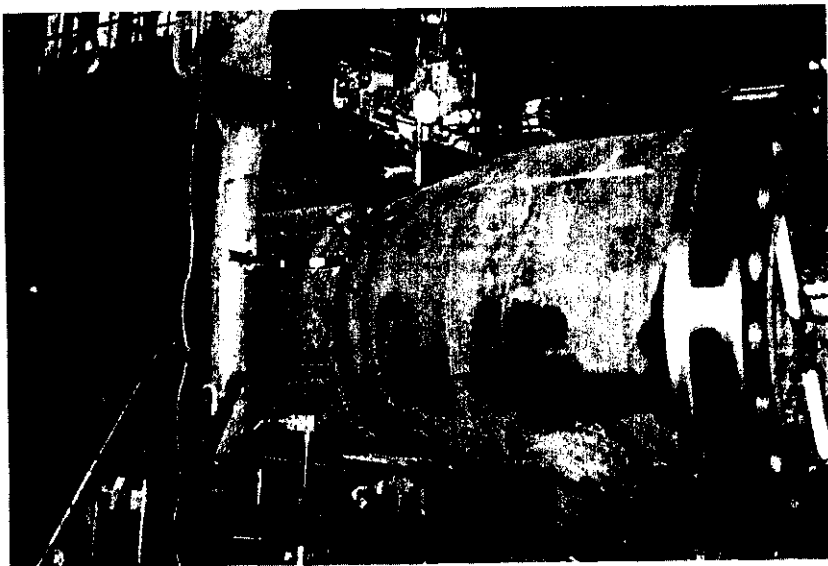
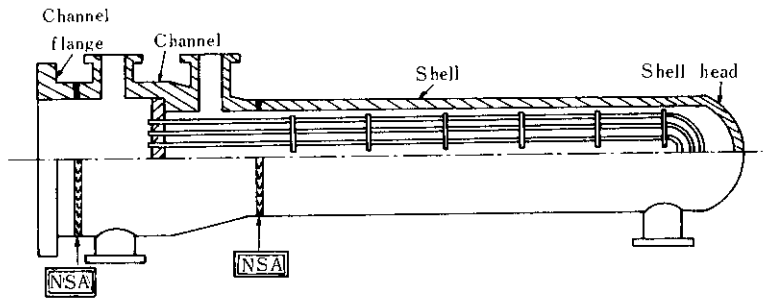


Photo. 5 Circumferential welding of heat exchanger using NSA process
(ASTM A336 F22, Wall thickness:123mm)

は制御圧延による降伏点 36kgf/mm^2 級鋼が最近使用されはじめているが、これらの継手部では使用環境に応じて $-20^\circ\text{C} \sim -60^\circ\text{C}$ で $3.5\text{kgf}\cdot\text{m}$ 以上の衝撃特性が要求される。したがって、板厚が 42mm 前後のものではじん性確保のため入熱量を制限して多層溶接を行うので、従来の SAW フラックスではスラグはくり性および溶接能率の低下が問題となる。この解決策として狭開先溶接用フラックス KB 120 が適用され、溶接能率を低下させることなく高じん性が得られることが確認されている。1 例としてフラックス KB 120 とワイヤ K W30T の組合せによる溶接金属のじん性と入熱量の関係を Fig. 11 に示す。

NSA 法が現場適用されて日は浅いが、一般鋼から高級鋼まですでに適用実績があり、今後もそ

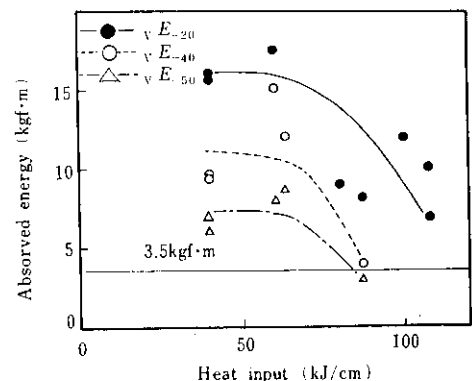


Fig. 11 Effect of heat input on toughness of weld metal deposited using KB 120 and KW 30T

の高能率および高品質性をいかしさらに用途が拡大するものと期待される。

7. 結 言

極厚鋼材の狭開先サブマージアーク溶接におけるスラグはくり性の改善，溶接欠陥の防止に重点をおいて検討した結果，高塩基性焼成型フラックス KB 120 を用いる NSA 法を開発した。

溶接冷却過程におけるスラグの変態膨張量がはくり性の支配因子であるという知見をもとに，狭開先サブマージアーク溶接法における最大の問題点を解決した。さらに，適用対象が水素割れを生じやすい極厚鋼であることを考慮して，溶接金属の水素量を従来法の $\frac{1}{2}$ 以下に下げ溶接欠陥の防止につとめた。高塩基性のフラックスと純度の高いワイヤを用いることによって溶接金属の酸素・窒

素および焼戻しぜい化元素を低減した結果，高品質の継手特性が得られた。

本溶接法を ASTM A336 F22 などの高級鋼，SC46 などの高炭素鋼継手にも現場適用し，高能率であるとともに溶接欠陥発生率が低いこと，予熱温度の低減および中間焼鈍の省略も可能であることを確認した。最近では，高じん性溶接金属が得られ，かつガス切断のままの狭開先継手にも使用しうる利点をいかして，板厚 40mm 前後の降伏点 36kgf/mm^2 級制御圧延材にも適用されるケースが増えている。

おわりに， $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼製熱交換器への NSA 法の現場適用にあたり，御指導・御教示を賜わった千代田化工建設(株)川崎工場各位に対し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sejima et al; IIW Com. Ⅻ-JIW International Colloquim in Nagoya 1981, "Developments and Applications of Narrow Gap Welding Processes in Japan".
- 2) 坪井他; 溶接学会誌, 42 (1973) 4, 7, 8 "厚板 HT80 鋼のサブマージアーク溶接の研究"
- 3) R. Bruscatto; Welding Journal, Vol. 49-4 (1970), 148s-156s, "Temper Embrittlement and Creep Embrittlement of $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ Shielded Metal-Arc Weld Deposits"