高 Mn 鋼構造物の電子ビーム溶接*

—非磁性鋼の溶接（第3報）—

喜多 久直**, 中崎 隆光**, 上田 和彦**, 舟本 孝雄**, 唐津 義憲***

Electron Beam Welding of High Manganese Steel Structure*

—Welding of Non Magnetic Steel (Report 3)—

by Hisanao Kita**, Takamitsu Nakazaki**, Kazuhiko Ueda** Takao Funamoto** and Yoshinori Karatsu***

High power electron beam welding was applied to manufacture heavy plate welded structure made of high manganese steel in production.

The electron beam welding machine was of high vacuum type with maximum output of 110 KW, the types of steel were 14%Mn-2%Cr-2%Ni-0.6%C, 18%Mn-5%Cr-0.5%C and 18%Mn-5%Cr-0.6%C with V and N, and the penetration depth was 40 to 70 mm.

This report described an effect of P and N content on the solidification crack occurrence, characteristic penetration depth and mechanical properties in electron beam welded joints of these high manganese steels and practical welding of heavy plate products.

Key Words: High Power Electron Beam Welding, High Manganese Steel, Properties of Weld Joint, Penetration Depth, Solidification Crack, Phosphorus, Nitrogen

ビーム溶接機を用いて実用化した結果を報告する。

1. 緒 言

核融合エネルギー開発研究のため日本電子力研究所が建設を進めている臨界プラズマ試験装置（JT-60）ではコイル支持棒、架台など各種支持構造用材料として高強度、低透磁率及び磁気特性安定などの特性を有する各種高 Mn 系非磁性鋼（以下高 Mn 鋼と略す）が採用され、さらに高耐力化を目的とした含窒素高 Mn 鋼も用いられている。

上記構造物の製作に電子ビーム溶接を適用するに当たり各種高 Mn 鋼のうち 14 Mn-2 Gr-2 Ni 鋼を用いて電子ビーム溶接性の検討を行い、溶接条件の入熱量、焦点位置によるデンドライトアームスペーシング、ビード幅およびビード形状と熱影響部割れとの関係¹⁾ および熱影響部割れの冶金学的検討²⁾ を行い健全な溶接が可能な条件を明らかにし報告した。

本報では上記構造物に用いられる各種高 Mn 鋼の電子ビーム溶接性を溶接割れ性、溶込み特性および継手特性の一部を明らかにし、42 kw および 110 kw 大型電子

2. 各種高 Mn 鋼板の溶接割れ性

2.1 供試材料および実験方法

Table 1 に供試材料の化学成分を示す。これらは次の

Table 1 Chemical compositions of material used

No.	Classification	Thickness (mm)	Chemical Compositions (wt %)									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	O	
A	18Mn steel	90	0.43	0.46	17.89	0.018	0.006	4.93	0.18	0.020	0.014	
B		100	0.48	0.58	17.94	0.021	0.008	4.64	—	0.0146	—	
C		"	0.32	0.58	17.55	0.026	0.006	4.69	—	0.0128	—	
D		"	0.14	0.48	18.14	0.020	0.006	4.69	—	0.0175	—	
E		"	0.30	0.58	17.82	0.006	0.007	4.70	—	0.0127	—	
F		"	0.31	0.54	18.06	0.015	0.008	4.63	—	0.0119	—	
G		93	0.50	0.47	18.47	0.025	0.007	4.73	0.19	0.0857	—	
H		100	0.57	0.50	17.55	0.052	0.003	4.95	0.23	0.0780	—	
I		120	0.53	0.51	17.82	0.026	0.006	4.85	0.17	0.0610	—	
J	14Mn steel	90	0.57	0.25	14.16	0.021	0.004	2.05	2.10	0.0212	0.0039	
K	15Mn steel	90	0.70	0.30	15.61	0.035	0.005	0.17	1.24	0.0120	—	
L	18Mn-N-V steel	120	0.48	0.53	17.96	0.021	0.009	4.54	—	0.1220	0.22V	
M	18Mn-N-V steel	"	0.52	0.48	17.92	0.028	0.006	4.73	0.15	0.1050	0.21V	
N		"	0.56	0.51	18.40	0.019	0.003	5.26	0.24	0.1010	0.22V	

*原稿受付 昭和59年12月1日（昭和54年度秋季全国大会にて発表）

**正 員（株）日立製作所 Member, Hitachi, LTD.

***（株）日立製作所 Hitachi, LTD.

系統に分類できる。すなわち、(1)18 Mn-5 Gr 系 (以下 18 Mn 鋼と略す) (No. A~I), (2)14 Mn-2 Cr-2 Ni 系 (以下 14 Mn 鋼と略す) (No. J), (3)15 Mn-1 Ni 系 (以下 15 Mn 鋼と略す) (No. K), (4)18 Mn-5 Cr-0.1 N-0.2 V (以下 18 Mn-N-V 鋼と略す) (No. L~N) の 4 種類で、板厚 90~120 mm の圧延または鍛造材である。なお含窒素高 Mn 鋼は(1)の No. G~I, (3)および(4)である。

電子ビーム溶接は試験当時保有した最大容量機である、42 kw 電子ビーム溶接機 (60 kV~700 mA) を用い、

Table 2 Electron beam welding conditions

penetration depth P	accelerat. volt.	beam current	weld speed	G-to-W	focal point
mm	kv	mA	mm/min	mm	mm
50	50	300	200	150	-125
100	60	450	200	150	-150

Fig. 1 Effect of P, N content on weld metal crack in the flat position electron beam welding of high manganese steel

Fig. 2 Crack photograph of electron beam weld metal of high manganese steel

熱影響部割れの発生のない、①溶込み形状がくさび形で、②ビード幅は 6 mm 以下となる Table 2 に示す条件¹⁾を用いた。溶接後、溶接線に直角な等間隔の 5 断面で 50 倍の顕微鏡観察を行い、0.5 mm 以上の凝固割れの有無を調べ溶接割れ性を判定した。

2.2 実験結果と検討

上記の実験における溶接金属部の凝固割れ発生の有無を各供試材料の N と P 含有量で整理し Fig. 1 に示す。P 含有量が 0.035% 以上では溶込み深さ 50, 100 mm の場合とも Fig. 2 (a) に示すような凝固割れが発生した。一方、溶込み深さ 50 mm の場合は N 含有量が約 1200 ppm まで凝固割れの発生はないが、溶込み深さ 100 mm の場合は N 含有量が約 900 ppm 以上になると Fig. 2-(b) に示す微細な凝固割れが発生した。前者は粒界における P の偏析によるものであるが後者は真空中での溶融において過飽和の N がガス状になり溶込み深さが大きいビード表面からの放出が十分でなくなりガスの一部がビード内部に残留したため凝固が乱され微細な凝固割れを生じやすくなったものと思われる。

以上の結果、本実験の範囲では溶込み深さ 100 mm 以下の高 Mn 鋼の電子ビーム溶接において、 $P \leq 0.025\%$, $N \leq 600$ ppm の範囲において凝固割れが発生しないことが確認された。

3. 電子ビーム溶接継手部の特性

3.1 供試材料、溶接および実験方法

供試材料は Table 1 に示すものの中 2.2 項の検討結果より P および N 含有量を規制した Mn 鋼の No. J, 18 Mn 鋼の No. A および 18 Mn-N-V 鋼の No. N を用いた。それらの機械的性質を Table 3 に示す。実験には大型チャンバを備えた 110 kW (150~180 kV-610 mA) 電子ビーム溶接機を用いた。

溶込み特性は 14 Mn 鋼および低炭素鋼 SB42 を用い Table 4 に示す溶接条件で下向非貫通および横向貫通溶接を行い横断面のマクロ組織試験により試験した。

溶接継手は高磁場下で使用される非磁性鋼構造物用高 Mn 鋼に要求される条件として溶接のままで引張、衝撃、曲げ、硬さ、ミクロ組織試験および比透磁率測定を行って評価した。試験板は各鋼種とも板厚 90 mm とした。溶接要領と試験片の採取位置を Fig. 3 に示す。引張

Table 3 Mechanical properties of base metals

	$\sigma_{0.2}$	σ_B	E.L.	R.A.	2vEo	Permeability
14Mn steel	33 $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$	84 $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$	73 %	61 %	20 $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$	1.003
18Mn steel	37	85	59	54	22	1.004
18Mn-N-V steel	58	104	41	38	15	<1.01

Table 4 Welding conditions for test of penetration of electron beam welding

welding position	accelerating volt.	beam current	weld speed	G-to-W	focal point	figure of test or penetration of weld
flat position	150	40~200	200	600	±0
horizontal position	150	65~320	100	400~750	±0

Fig. 3 Layout of specimen and welding condition

試験片は JISZ 2001, 4 号, 衝撃試験片は JISZ 2202, 4 号 (サイドノッチ), 曲げ試験片は JISZ 3122, 1 号とし, 試験温度は引張, 曲げ試験は室温 (20℃), 衝撃試験は 0℃とした。また, 比透磁率は溶接部切断面について天秤式透磁率計を用いて室温で測定した。

3.2 実験結果と検討

3.2.1 溶込み特性

Fig. 4 に下向非貫通溶接, Fig. 5 に横向貫通溶接におけるビーム電流と溶込み深さの関係を高 Mn 鋼と低炭素鋼について比較して示す。この結果, 高 Mn 鋼における溶込み深さは炭素鋼における溶込み深さに比較し, 同一溶接条件において, 下向非貫通溶接の場合 10~20%, 横向貫通溶接の場合 30~35%増加していることがわかる。

電子ビーム溶接の溶込み深さと溶接パラメータの相互関係に関する研究^{3,4)}は多数行われているが, 同一条件で溶接した材質差による溶込み特性の比較につき, 被溶接材料の熱的物理特性と関連づけて検討した Hablani³⁾の研究を参考として考察すると, 電子ビーム溶接の溶込み深さは

$$b=C\cdot P/TR\cdot\sqrt{K/Vd} \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし b : 溶込み深さ (mm)

C : 定数

P : ビームパワー (W)

T : 融点 (°K)

k : 熱伝導率 (cal/mm・S・℃)

K : 温度伝導率 (mm²/S)

V : 溶接速度 (mm/S)

d : ビーム径 (mm)

Fig. 4 Relation of beam current and penetration in flat position electron beam welding of high manganese steel

Fig. 5 Relation of beam current and penetration in horizontal position electron beam welding of high manganese steel

で表わされると報告している。

ここで, 高 Mn 鋼と低炭素鋼の溶込み深さを(1)式を用いて比較すると, P , V および d は同一であるから高 Mn 鋼の溶込み深さ (b_m) と低炭素鋼の溶込み深さ (b_c) の比は

$$b_m/b_c=T_c k_c/T_m k_m\cdot\sqrt{K_m/K_c} \quad \cdots\cdots(2)$$

となり, それぞれの物性値 $T_c=1803$, $k_c=0.076$, $K_c=0.0594$, $T_m=1698$, $k_m=0.0542$, $K_m=0.0420$ (k , K の値は 600℃ の値を引用) より

$$b_m/b_c=1.25$$

となり, 高 Mn 鋼の溶込み深さは低炭素鋼のそれよりも約 25% 深くなることとなる。

この計算結果は Fig. 4, Fig. 5 に示す実験結果とはほぼ一致しており, 高 Mn 鋼に対しても溶込み深さ約 200 mm まで(1)式が近似的に成立することが確認された。(1)式の C は加速電圧, ビーム収束性など電子ビーム溶接機の特性や被溶接材の上記パラメータ以外の特性などにより定まる定数と考えられ, 高 Mn 鋼の下向溶接では $C\approx 6.5$, 横向溶接では $C\approx 5.5$ である。

このように高 Mn 鋼において下向溶接の溶込みが横向溶接の溶込み深さに比べて減少する度合が低炭素鋼の場合に比し大きい要因として溶融金属の湯流れが良好であるため溶融孔底への流入が増大しビームの穿孔力が低下することや Fe に比べて高い蒸気圧を有する Mn 蒸気

によりビームの発散効果が増大することなどが推測されるが真の原因を把握するに至っていない。

Table 5 に代表的な断面マクロ組織を示す。高 Mn 鋼の電子ビーム溶接の溶込み形状は下向非貫通溶接では低炭素鋼や Cr-Mo 低合金鋼⁹⁾に比較してスパイクの発生が少なく、ビーム入射側は下向非貫通および横向貫通溶接の場合とも凸形状のビードとなっている。また横向貫通溶接のビーム入射側に生じた余盛量は比較に示した同じ溶込み深さの低炭素鋼の場合に比べて著しく大きく、高 Mn 鋼の溶融金属の湯流れが低炭素鋼に比べて良好であることを示している。

3.2.2 溶接継手特性

Table 6 に 14 Mn, 18 Mn および 18 Mn-N-V 鋼の電子ビーム溶接継手の引張および衝撃試験と透磁率測定結果を示す。電子ビーム溶接継手特性を Table 3 の母材の特性と比較すると 0.2% 耐力は各鋼種とも殆んど変化しないが、引張強さは 18 Mn および 18 Mn-N-V 鋼では若干低下し、伸びは各鋼種とも低下し、吸収エネルギーはほとんど変化ない。また溶接部の透磁率は各鋼種とも 1.01 以下であり母材と変化ない。

Table 7 に溶接継手の側曲げ試験結果を示す。各鋼種とも溶接部に割れは発生せず良好な延性を有している。

Fig. 6 に溶込み深さの 1/2 位置の水平断面のマクロ組織を示す。14 Mn, 18 Mn 鋼とも中央部がセル状デンドライト組織になっており、縦割れの生じにくい組織と

なっている。Table 8 に 14 Mn, 18 Mn 鋼の電子ビーム溶接部のミクロ組織と硬さ測定結果を示す。ミクロ組織は溶接金属、ボンド、熱影響部ともオーステナイト組織であり、硬さは溶接金属、熱影響部にかけて Hv 200~250 であり、異常硬化は認められない。

Table 7 Results of bend test of electron beam weld joint of high manganese steel

material	14 Mn Steel	18 Mn Steel	18 Mn-N-V Steel
result of test	no crack	no crack	no crack
appearance of tested specimen

(a) 14Mn steel

(b) 18Mn steel

Fig. 6 Macro structure of weld metal at the horizontal sectioned plane in the middle of penetration

Table 5 Macro structure of electron beam welded high manganese steel

Welding position	Sectional figure of weld bead	Welding condition
Flat position		150 kv - 140 mA 200 mm/min G-to-W 600 mm F.P. Surface
Horizontal position		150 kv - 270 mA 100 mm/min G-to-W 450 mm F.P. Surface
Horizontal position (low carbon steel)		150 kv - 320 mA 100 mm/min G-to-W 450 mm F.P. Surface

Table 6 Properties of electron beam weld joint of high manganese steel (as weld)

	$\sigma_{0.2}$	σ_B	E.L.	R.A.	Position of fracture	2VEO	Permeability
14Mn steel	38 kgf/mm^2	84 kgf/mm^2	47 %	53 %	weld metal	20	< 1.01
18Mn steel	37	77	44	65	weld metal	19	< 1.01
18Mn-N-V steel	59	99	38	41	weld metal	14	< 1.01

Table 8 Hardness and micro structure of electron beam weld joint of high manganese steel

	14 Mn steel	18 Mn steel
Hardness Distribution
Micro structure

以上、高 Mn 鋼の電子ビーム溶接部の確性試験より、電子ビーム溶接は高 Mn 鋼製非磁性構造物の製作に採用しうと考えられる。

4. 高 Mn 鋼製構造物の電子ビーム溶接の実用化

4.1 構造物概要

コイル支持枠の形状を Fig. 7 に示す。本品は直径約 6 m、重量約 40 トンの大型溶接構造物であり、外観を Fig. 8 に示す。電子ビーム溶接個所は側板の板継ぎ溶接および側板とリングとの円周溶接で最大溶接深さは 70 mm である。使用材料は 0.2% 耐力 30 kgf/mm² 級の 14 Mn 鋼と 40 kgf/mm² 級の 18 Mn-N-V 鋼であ

Fig. 7 Configuration of coil support of JT-60

Fig. 8 Photograph of machined coil support of JT-60

Table 9 Electron beam welding conditions and macro structure of weld joint of coil support of JT-60

Penetration	Welding condition						macro structure of weld joint
	Va	Is	v	G-to-W	F.P.	beam oscillation	
mm	kv	mA	mm/min	mm	mm	Hz	
40	150	100	200	600	-40	500 φ0.5 circle
50	150	120	200	600	-50	500 φ0.5 circle
70	150	160	200	600	±0	non

り、18 Mn-N-V 鋼の溶接深さは 50 mm である。

4.2 コイル支持枠の溶接

4.2.1 電子ビーム溶接方法

電子ビーム溶接は全て下向非貫通溶接とし、突合せ溶接には同材質の裏当材を用い、溶接後除去した。電子ビーム溶接深さは 40, 50, 70 mm で各溶接条件とその断面マクロ組織を Table 9 に示す。側板とリングとの円周溶接では差動トランス型シームトラッキング装置を用いて開先の追従を行い目外れ欠陥の発生を防止した。

4.2.2 非破壊検査

電子ビーム溶接全線の放射線透過試験および超音波探傷試験の結果を Table 10 に示す。検出された欠陥は全てボイド欠陥であった。最も高い欠陥発生率を示したのは 14 Mn 鋼と 18 Mn-N-V 鋼との異材溶接部である。これは 18 Mn-N-V 鋼からの N の放出とそれに伴う溶融金属の攪拌作用により金属蒸気の発生が増加し、電子銃への蒸気の侵入による電子銃放電が多発したためである⁶⁾。また、14 Mn 鋼の同材溶接部においては溶接深さ 70 mm 部は 40 mm 部に比べて高い欠陥発生率を示している。この原因も前述の電子銃放電であり、溶込み深さの増加により、溶融金属量が増加し、それに伴ない金属蒸気発生量が増加したためと考えられる。

Table 10 Results of radiographic and ultrasonic test of weldments of coil support of JT-60

test method	radiographic test			ultrasonic test
	40mm	50 mm	70 mm	50 mm
item	14Mn steel	14Mn steel + 18Mn-N-V steel	14Mn steel	14Mn steel
no. of not accepted	4 films	10 films	6 films	0 m
no. of test	234 films	156 films	156 films	312 m
ratio of not accepted	1.7 %	6.4 %	3.8 %	0 %

Fig. 9 Distortion of coil support of JT-60 by electron beam welding

4.2.3 寸法精度

Fig. 9 に電子ビーム溶接後の寸法精度の測定結果を示す。径寸法は ± 1.5 mm, 側板の平面度は ± 2 mm 以下と高精度であり最終加工仕上代を少なくすることができた。

高 Mn 鋼溶接構造物の製作に 110 kW 大型電子ビーム溶接機を実用化した次の結論を得た。

5. 結 言

(1) 電子ビーム溶接を用いる場合、高 Mn 鋼の化学成分の P, N 含有量は、下向非貫通溶接の場合、溶込み深さ 50 mm 以下では $P \leq 0.025\%$, $N \leq 1200$ ppm の範囲、溶込み深さ 50~100 mm では $P \leq 0.025\%$, $N \leq 600$ ppm の範囲で凝固割れのない溶接が可能である。

(2) 高 Mn 鋼の電子ビーム溶接の溶込み深さは、同一ビームパワーにおいて、低炭素鋼に比較して、下向溶接では 10~20%, 横向溶接では 30~35% 深くなる。

(3) 高 Mn 鋼の電子ビーム溶接部の強度は、14 Mn, 18 Mn および 18 Mn-N-V 鋼について、継手引張強度の 0.2% 耐力は各 38, 37, 59 kgf/mm² であり、溶接金属

の 0℃ 吸収エネルギーは各 20, 19, 14 kgf-m で母材と同程度である。

(4) 高 Mn 鋼の電子ビーム溶接部の組織は、14 Mn, 18 Mn および 18 Mn-N-V 鋼とも安定なオーステナイトであり、透磁率は 1.01 以下である。

(5) 臨界プラズマ試験装置コイル支持枠の高 Mn 鋼製大型溶接構造物の製作に 110 kW 電子ビーム溶接機を実用化した。

参 考 文 献

- 1) 舟本, 志田, 小倉, 喜多, 中崎, 佐藤: 14Mn 鋼の電子ビーム溶接性, 溶接学会論文集 2-2 (1984) 42-47
- 2) 同上: 14Mn 鋼電子ビーム溶接部に発生する割れの冶金学的検討, 溶接学会論文集 2-4 (1984) 111-115
- 3) Hablani, M.H.: A correlation of welding variables, Procs of the Electron Beam Symposium, (1963), 262~268
- 4) Possoja, D.E.: Penetration of solids by high power density electron beams, Brit. Weld. J. 14-1 (1967), 13~16 他
- 5) 志田, 岡村, 鈴木, 喜多: 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究 (第3報) 溶接学会誌 46-12 (1977) 46~51
- 6) H. Kita et al.: Application of Electron Beam Welding to the Heavy Section Structure, IIW Document IV-279-80 (1980)

インサート材を用いた抵抗圧接法における接合現象の研究*

梶原 良一**, 小倉 慧**, 小園 裕三**, 志田 朝彦**, 舟本 孝雄**

Investigation of Welding Phenomena in Resistance Pressure
Welding Using Insert Material*

by Ryoichi Kajiwara**, Satoshi Kokura**, Yuzo Kozono**,
Tomohiko Shida**, and Takao Funamoto**

A resistance pressure welding method using insert material was investigated. In this method, a layer of insert material (BNi-2, SUS304, BAg-1) was placed between two base metals to raise electrical contact resistance, and electric current was passed through the layer causing concentrated heating at the interface. The molten layer of low melting point was pressed out of the joint interface. Various types of insert materials were tried for joining SUS304 stainless steel. Metallography of the joint sections was investigated. It was found that BNi-2 with high hardness with high hardness and reaction for base metal gave better joint characteristics of high tensile strength, small deformation and homogeneity of the joint layer.

Key Words: Insert material, Resistance pressure welding, Bonding, SUS304 Stainless steel

*原稿受付 昭和59年12月8日 (昭和59年度春季全国大会にて発表)

**正 員 (株)日立製作所日立研究所 Member, Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.