

鋼板製溶接構造大形水車ランナの製作

Fabricated Steel Structure of Large Capacity Welded Hydroric Turbine Runner

Runners for the world's largest 343 MW pump turbines delivered to the Rudington power plant, U.S.A., were made by welding extrathick plate steel and split cast steel, because their overgrown size and weight prohibited to use usual integral casting techniques. This article introduces the consumable nozzle type electroslag welding method, thick plate hot machining techniques and other advanced techniques adopted.

妹島五彦* *Itsuhiko Sejima*
 喜多久直* *Hisanao Kita*
 六谷隆志* *Takashi Rokutani*
 和田 武* *Takeshi Wada*

1 緒 言

水車発電機の単機容量は、図1に示すように年々増加する傾向がある。昭和35年ごろまでは100 MW程度であったものが、最近の10年間に600 MWを超えるという急速な進歩をとげている。

このうち、ポンプ水車分野でのわが国の活躍は、めざましいものがある(図2)⁽¹⁾⁽²⁾。最近、日立製作所では、アメリカ向けラディングトン、ブレンハイム・ギルボア、キャストイクの3発電所のポンプ水車を製作したが、特に、ミシガン湖岸に建設したラディングトン発電所納めのポンプ水車は、単機容量が343 MWと世界最大容量でその製作に当たっては、画期的な溶接技術を種々採用する必要があった。

従来、ランナは、一体鋳鋼で製作されるケースが多かったが、ラディングトンの場合には、図3に示すよう⁽³⁾に、直径8,375mmφ、高さ4,097mm、重量約300 tに達し、形状的にも一体鋳鋼の製作限界を超えるものであった。このため、クラウンをはじめ、シュラウドバンド、ペーン、フランジなどすべて、鋳鋼あるいは鋼板で個別に製作し、溶接により一体化す

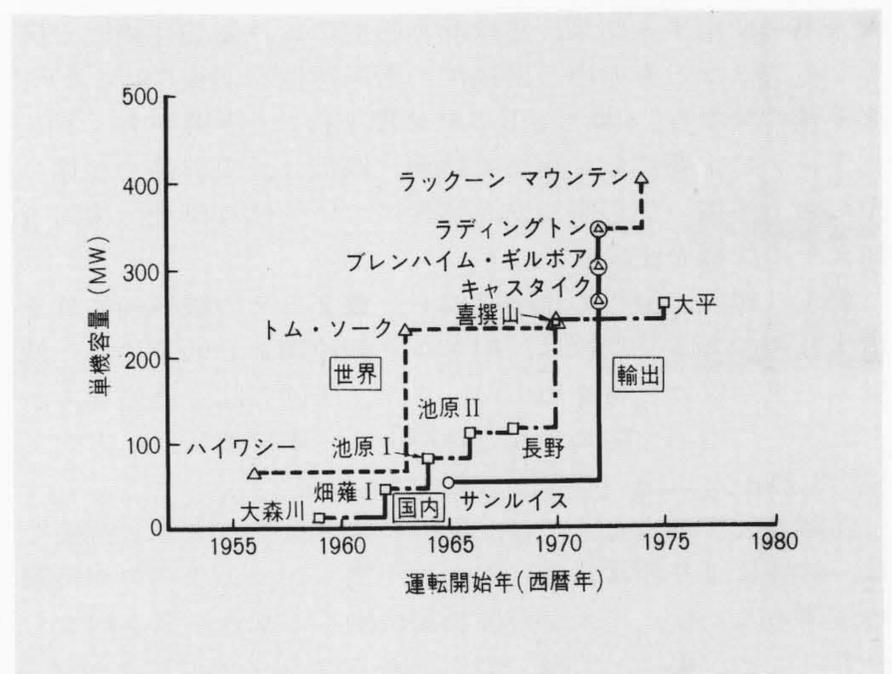


図2 ポンプ水車単機容量記録の推移 ポンプ水車は、発電するための水車としての働きと、水をくみ上げるポンプとしての働きを、兼ね備えている。

Fig. 2 Record of Unit Capacity of Pump Turbine

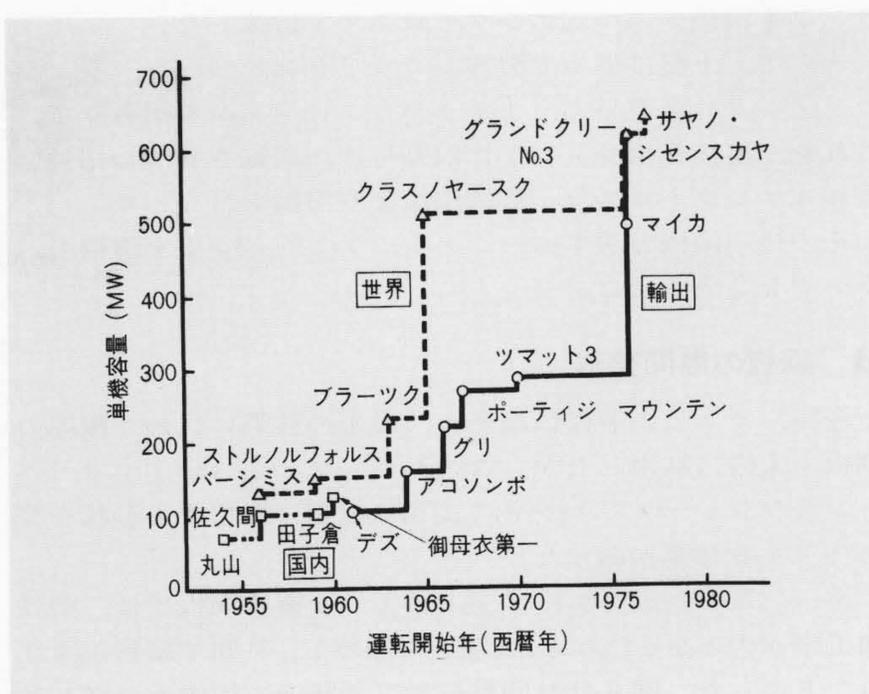


図1 水車専用機単機容量記録の推移 昭和35年ごろまでは、100MW程度であったが、最近10年間に600MWを超える傾向である。

Fig. 1 Record of Unit Capacity of Turbine Pump

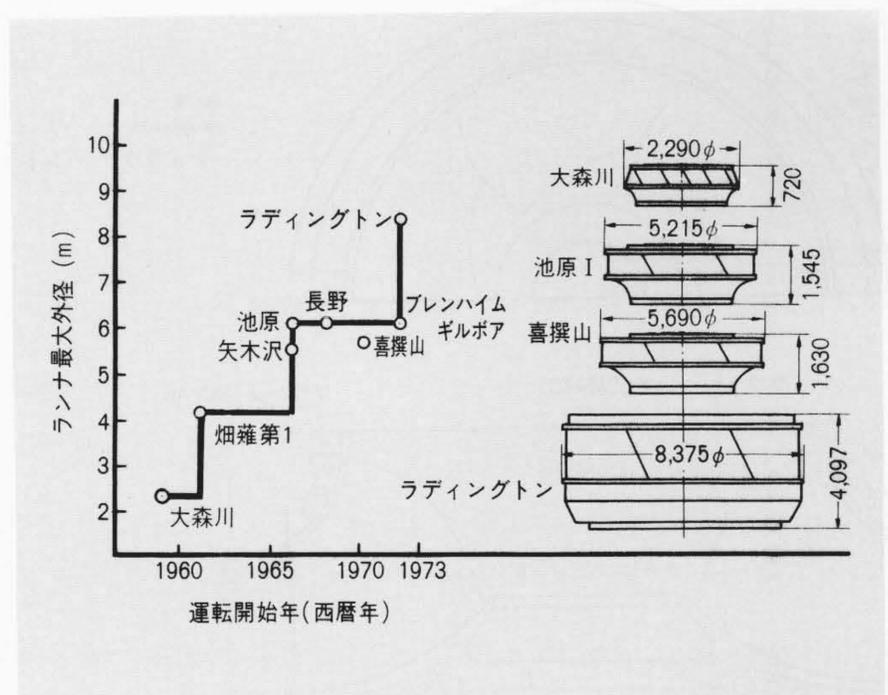


図3 ランナの直径推移 単機容量の増大に伴い、ランナ直径も非常に大きくなってきている。

Fig. 3 Past Record of Runner Diameter

* 日立製作所日立工場

る溶接構造方式を採用しなければならなかった。

ランナの溶接線は、三次元で複雑に変化し、継手部の最大厚さが約 330 mm、最大長さが 8 m に及び溶接量が多く、これらの条件に合致する消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法を採用した。

以下、ラディングトン発電所納めの溶接構造式水車ランナの製作について報告し、関係各位の参考に供したい。

2 ランナの材質

ランナは、図 4 に示すように肉厚が厚く、複雑な形状をしている。このうち、厚肉のクラウン ボスとフランジは鋳鋼 (SC-46) 製、ペーンとシュラウド バンドは、鋼板 (SM-41C) 製である。

鋳鋼、鋼板の製造に当たっては、(1)ランナは回転体で動荷重を受けること。(2)使用温度が低く、低温での衝撃特性が要求されること。(3)消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接では、大入熱を使用する結果、溶接熱影響部における脆化範囲が広くなることなどを考慮し溶接部の衝撃特性を回復させるため、溶接後に焼ならし-焼もどしの熱処理を行なう必要があった。

ランナの主要部分に用いる鋳鋼、鋼板は、実製品の製作に先だち、溶接の熱影響及び熱処理について種々研究、検討を加えその仕様を決定した。

表 1 は鋳鋼、鋼板の化学組成を、表 2 はその機械的性質を示すものである。鋼板は、Alキルド細粒鋼とし低イオウ、低炭素の真空脱ガス材を用いた。また、圧延方法、熱処理方法を改善して内部欠陥の少ない材料とし、衝撃値は、C 方向で平均 3.8 kg・m 以上の確保が必要であった。

鋳鋼の製作に当たっては、厚板のエレクトロスラグ溶接では、溶接により非常に強い収縮力が働くが、この応力が鋳鋼の炭素あるいは、イオウの偏析部に働くと割れを引き起こしやすいこと、更に、鋳鋼で製作されるクラウンボスとかフランジ部は、重強度メンバーになるが引巣、砂かみなど鋳鋼欠

表 1 ランナ材の化学成分 材料は C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Al など、添加量により機械的性質は影響を受ける。特に低温での衝撃値に配慮がなされている。

Table 1 Chemical Composition of Runner Material

No.	材質	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo	Al
1	SM-41C	≤0.18	≤0.35	≤1.40	≤0.040	≤0.040	—	—	—	—	—	0.020 ~0.045
2	SC-46	0.18 ~0.24	0.15 ~0.60	0.65 ~1.00	≤0.03	≤0.03	≤0.50	≤0.40	≤0.50	—	≤0.25	—

表 2 ランナ材の機械的性質 ランナは、回転体で動荷重を受けるうえ、低温で使用されるため、機械的性質、特に低温での衝撃値が必要である。

Table 2 Mechanical Properties of Runner Material

No.	材質	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	衝撃値 (2 V E ₀ kg・m)
1	SM-41C (C 方向)	≥22	41~52	≥24	3 個平均 ≥4.8 1 個の最底 ≥3.4
2	SC-46	≥23	≥46	≥30	3 個平均 ≥2.8 1 個の最底 ≥ 2.1

陥が存在した場合、溶接時に大きな割れに発展するおそれがあるため、押湯方法、押湯位置、冷し金の当て方などを詳細に検討し欠陥の少ない鋳造方案を採用した。

3 ランナの溶接と適用箇所

ランナの製作は、図 5 に従って実施した。溶接は、高能率化、品質の安定化を目的としてサブマージ アーク溶接法、エレクトロスラグ溶接法及び消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法など自動溶接を大幅に採用した。

ランナのクラウンは、クラウンボス、フランジ、内リング及び外リングより構成されているが、クラウンボスとフランジは鋳鋼とし、内リングと外リングは鋼板として熱間整形した。一方、ペーン及びシュラウド バンドは、鋼板を熱間プレス整形し、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接したものである。シュラウド バンドでは、この後更に、鋳鋼で製作したフランジを消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接した。

次いで、上記に従って製作したクラウン、ペーン、シュラウド バンドの各部品を、まずクラウンにペーンを組み立て、これを、溶接専用シャフトに取り付け、回転させつつ消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法により溶接を行なった。

その後、同様方法でペーンとシュラウド バンドを溶接し、ランナを完成させた。

4 鋼板の熱間整形

今回、ランナの製作に当たり、従来の鋳鋼に代わり極厚の鋼板を大幅に採用したが、このため、プレス ロールによりペーン及びシュラウド バンドのように複雑に変化する形状を整形加工する必要があった。

ペーン及びシュラウド バンドのような極厚鋼板では、塑性加工率が大となるため A₁ 点以上に加熱し、熱間で整形加工することにした。図 6 は熱間整形加工の状況を示すものである。

5 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接

一般に用いられているエレクトロスラグ溶接では、図 7 に示すように水冷銅当て金で囲った溶接部の溶融スラグに、非消耗の銅製ノズルを介し、溶接心線を連続して供給し、溶融スラグの電気抵抗により溶接する方法である。この方法では

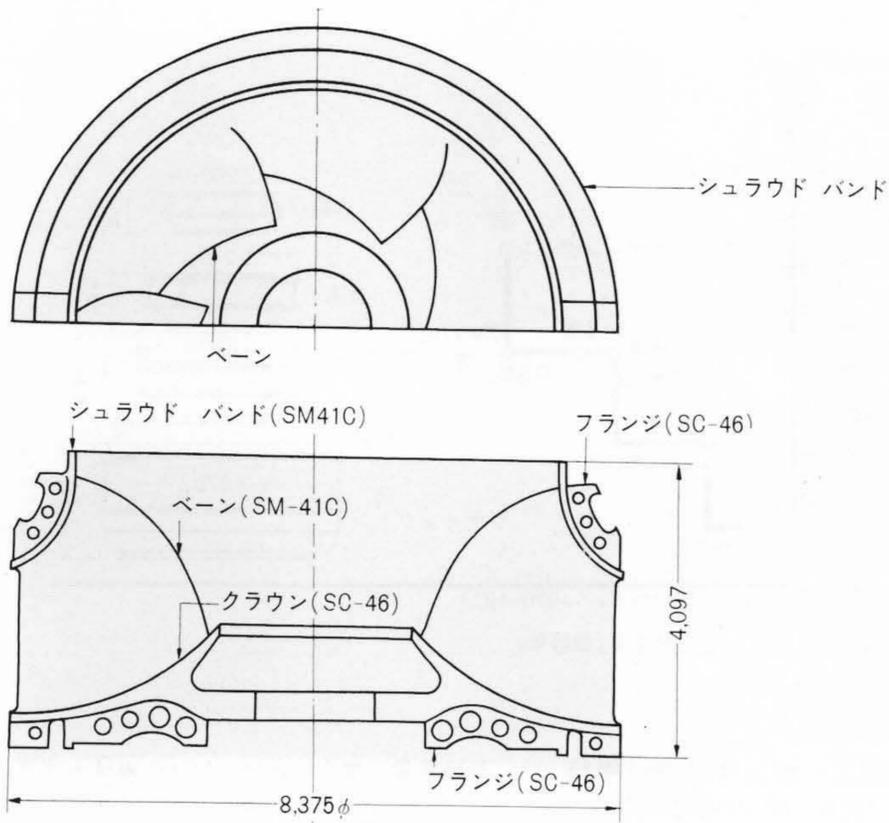


図 4 ラディングトン発電所水車ランナの形状と適用材質

ランナは、形状的に複雑なため、従来は一体鋳鋼で製作されていた。今回は製品が大きく、一体鋳鋼の製作限界を超えるため、鋼板及び分割鋳鋼を採用した。

Fig. 4 Shape and Material of Rudington Turbine Runner

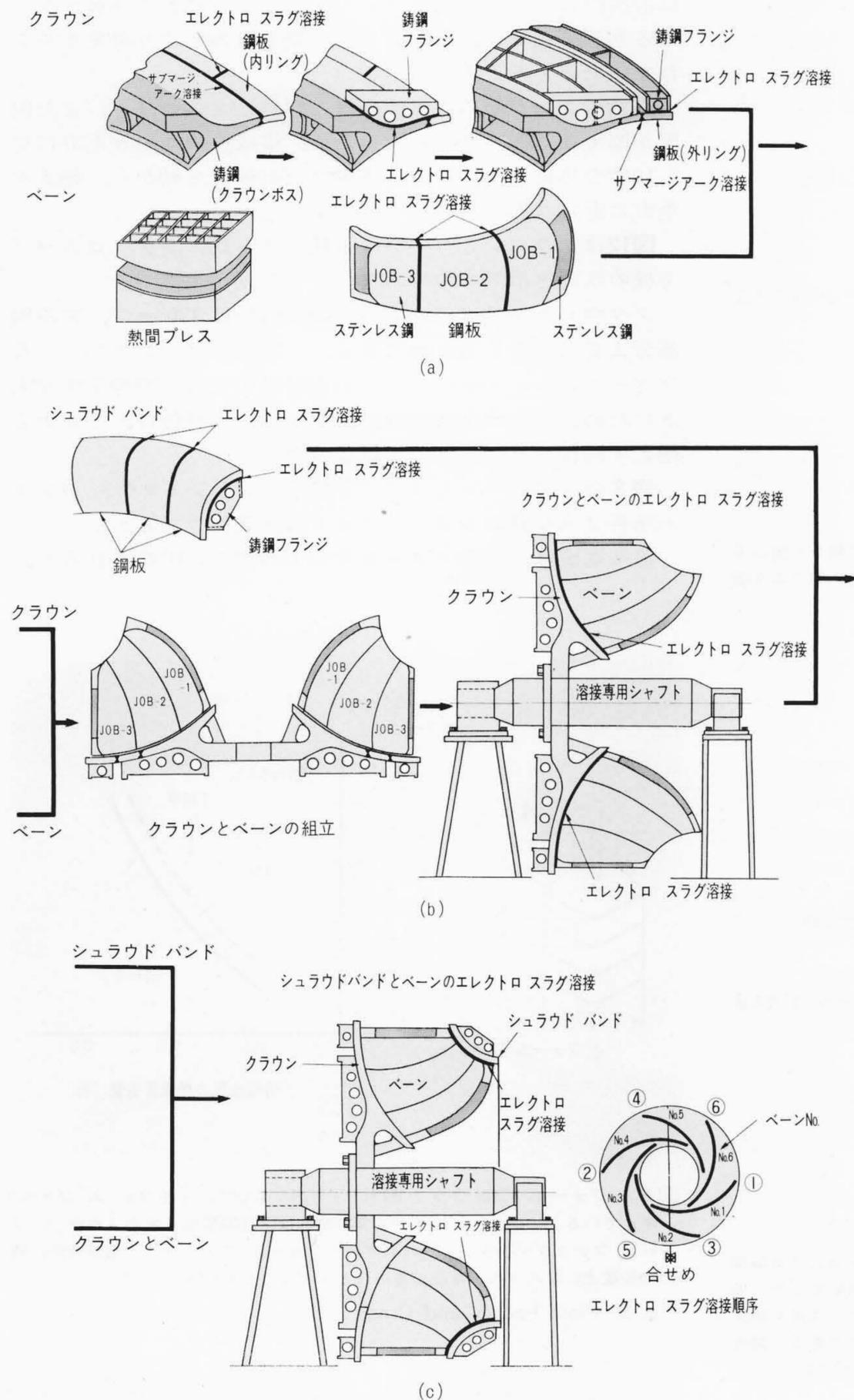


図5 ランナの溶接適用箇所 ランナの形状は複雑であり、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接の導入により溶接の自動化を図っている。

Fig. 5 (a, b, c) Welding Spots of Rudington Turbine Runner

ノズルは、溶接の進行方向に従って、少しずつ継手に沿って上昇させる必要があり、平板の直線のような単純な継手の溶接に適している。

消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接は、図8に示すように開先内に固定した被溶接材と同材質の消耗ノズルを介し溶接部に溶接心線を連続的に供給して溶接する方法で、この方法では、非消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接のように溶接の進行に従ってノズルを少しずつ上昇させる必要がなく、複雑な形状の継手の溶接も可能になる。

ランナはその機能上、複雑な形状をしており、適用される溶接継手もかなり複雑で、しかも厚板になるため消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接が適している。

エレクトロスラグ溶接では、溶接条件、特に溶接電流により、凝固形態が左右され、図9に示すように凝固形態を示す

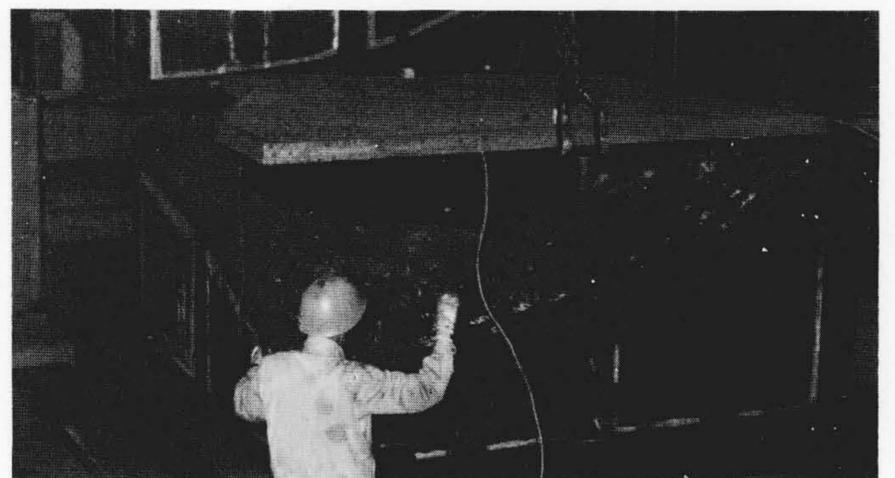


図6 熱間整形の加工状況 ベーン及びシュラウドバンドは、塑性加工率が高いため、赤熱(900℃程度)して整形加工している。

Fig. 6 Vane and Shroud Band under Hot Shaping Process

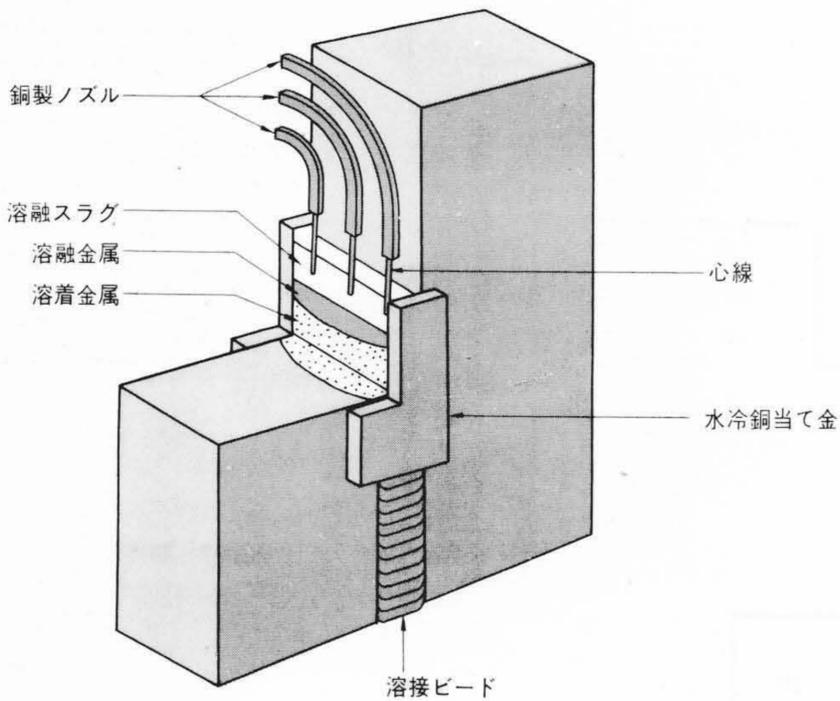


図7 エレクトロ スラグ溶接 一般に溶接は、アーク熱を利用して行なうのに対し、エレクトロスラグ溶接は、熔融スラグの電気抵抗熱により溶接を行なう。

Fig. 7 Electroslag Welding

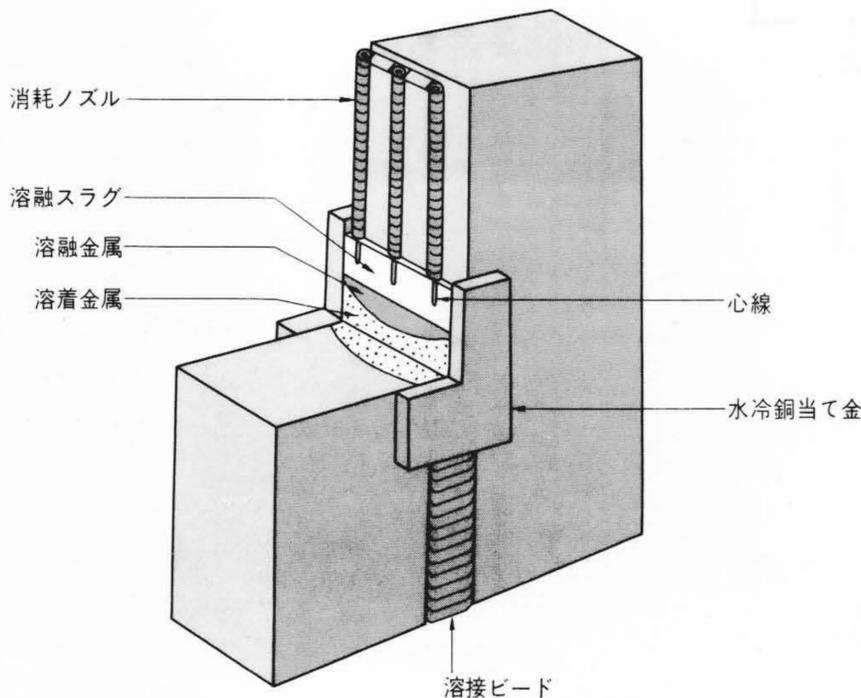


図8 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接 エレクトロスラグ溶接は、一般に非消耗の銅製ノズルをガイドにして心線を溶接部に送給するが、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接では、被溶接材と同材質の消耗ノズルを開先内に挿入し、消耗ノズルをガイドに心線を送給して溶接するものである。開先内にあらかじめ消耗電極をセットすることにより曲線の自動溶接も可能になる。

Fig. 8 Consumable Type Electroslag Welding

フォームファクタ ($\frac{b}{h}$) は、溶接電流が高いほど、小になる。エレクトロスラグ溶接金属の熱間割れは、このフォームファクタ及び炭素含有量に左右され、フォームファクタが小さいほど、また溶接金属の炭素量が高いほど、割れやすくなる^{(4)~(6)}。この種の現象は、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接でも全く同じである。このため、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接の溶接電流は400~500A/本にした。

ランナの溶接では、溶接線が複雑に変化するため、垂直に対し多少傾斜させて溶接せざるを得ない。溶接線を傾斜させて溶接すると、溶接の溶け込み形状は、図10のようになり、溶接線をはさんで、上側になった部分は溶け込みが大きくなり、下側になった部分の溶け込みは少なくなる。

これは、図11に示すように、上側になった部分の開先壁で

は溶接熱により開先面は、えぐられるようにして溶接が進行するが、下側では、ほとんどこの開先面のえぐり現象がみられないためと考えられる。

当然のことながらこの傾向は、傾斜が大きいほど、また肉厚が厚くなるほど激しくなるため、溶接中の傾斜が垂直に対し10度を越えた場合は、溶接中に被溶接材を動かし、絶えず垂直に近い状態で溶接するのが望ましい。

図12はクラウンとベーンの消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接の状況を示すものである。

クラウンとフランジの溶接では、板厚は330mmで、すみ肉部分まで含めると390mmになる。一方、クラウンとベーン及びベーンとシュラウドバンドの溶接継手では、姿勢変化が大きいため、ランナを溶接専用シャフトに取り付け、ランナを絶えず回転させつつ溶接を行なった。

表3は、クラウンとベーン及びベーンとシュラウドバンドの消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接条件である。

溶接電流は、消耗ノズルを介して溶接部に供給されるが、

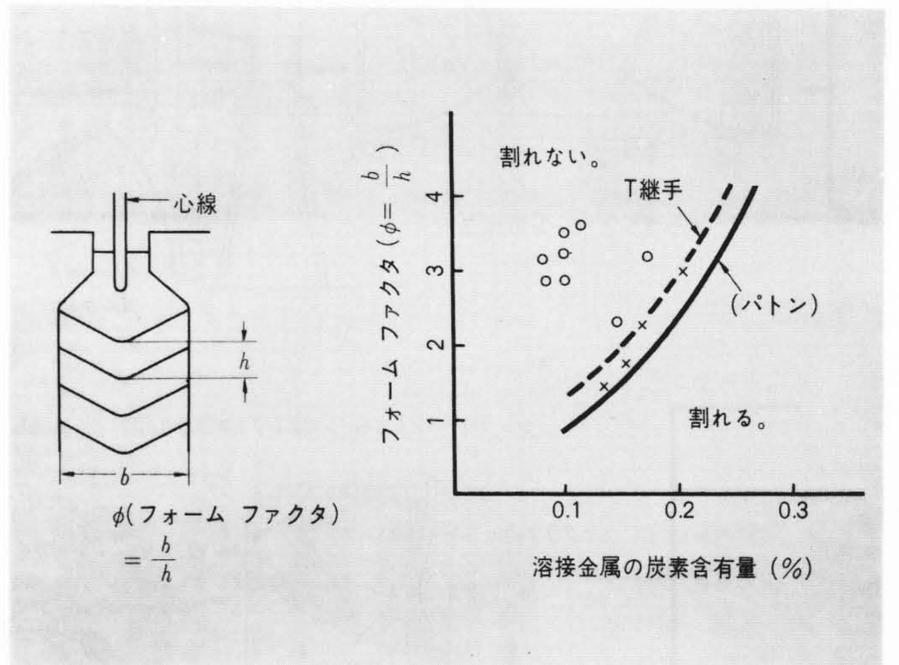


図9 フォームファクタと割れ 図において、 $\frac{b}{h}$ をフォームファクタと呼んでいる。エレクトロスラグ溶接の割れは、炭素量にも左右されるが、フォームファクタが小さいと割れやすい。フォームファクタは、溶接条件、特に溶接電流に左右され、電流が高いほど小となり割れやすい。

Fig. 9 Form Factor and Crack

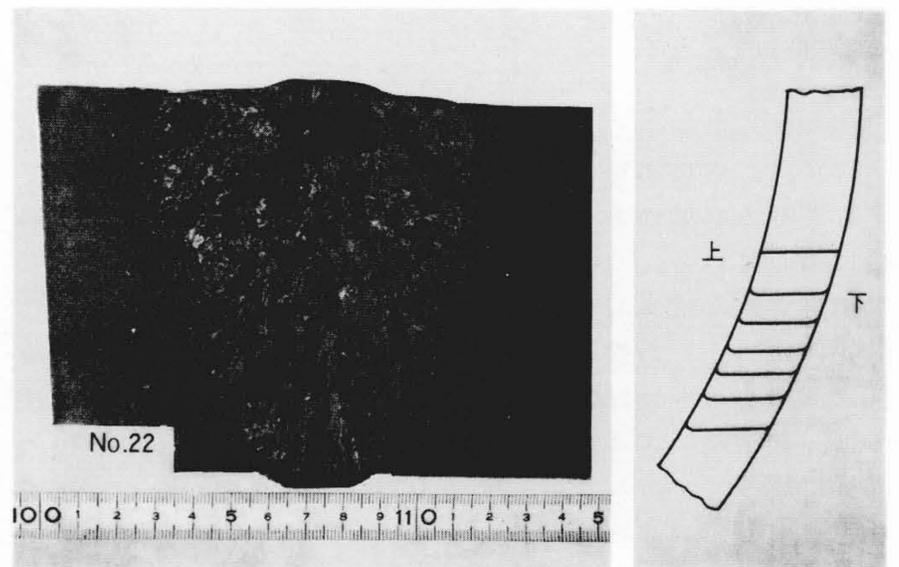


図10 傾斜溶接による溶け込みのかたより 傾斜溶接では、溶接線をはさんで上側になった部分の溶け込みは大きくなり、下側になった部分では溶け込みが少なくなる。

Fig. 10 Uneven Melting in Inclined Welding

クラウンとベーン及びベーンとシュラウドバンドのエレクトロスラグ溶接では、溶接長は非常に長く、使用する消耗ノズルの長さは約10mに及ぶため、消耗ノズルの抵抗による発熱と消耗ノズル1m当たり0.5~1V程度の電圧降下が生ずる。このため、数個所で途中給電を実施しこの影響を減少させた。

溶接は、数人一組になって行なわれたが、溶接中の作業者間の連絡は、製品の形状が大きく複雑で互いに相手の顔が目視できないため、トランシーバーが使用された。

溶接時間は、1シーム当たり、スタートから終了まで連続30時間前後を要した。

6 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接部の機械的性質

ランナには、高レベルの応力が働き、しかもランナが回転体であることから、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接部の機械的性質を、実製品の溶接に先だち、実製品並みのモデルを用いて確認する必要がある、これを実施した。

また、実製品についても溶接線延長上に取り付けた試験材を用いて溶接部の溶け込み及び機械的性質の確認を行なった。

図13は、溶着金属の衝撃値をAs Weld, 焼鈍(SR), 焼ならし, 焼もどしについて比較した例を示すものである。

焼ならしにより0°C近辺の衝撃値は、かなり改善されることが分かる。

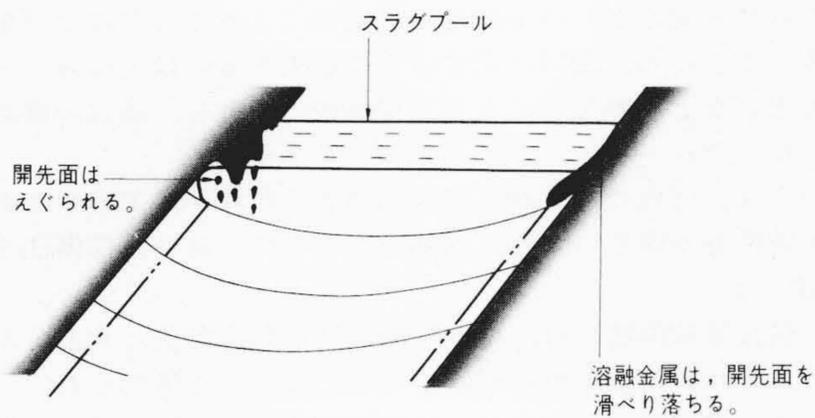


図11 傾斜溶接における開先面の想像図 傾斜溶接を中断して、開先の状況を観察すると、上側では開先面が非常にえぐられているが、下側ではそれがほとんどない。これに基づいて、溶接中の開先面の状況を推察した。

Fig. 11 Imaginary View of Welding Edge by Inclined Welding

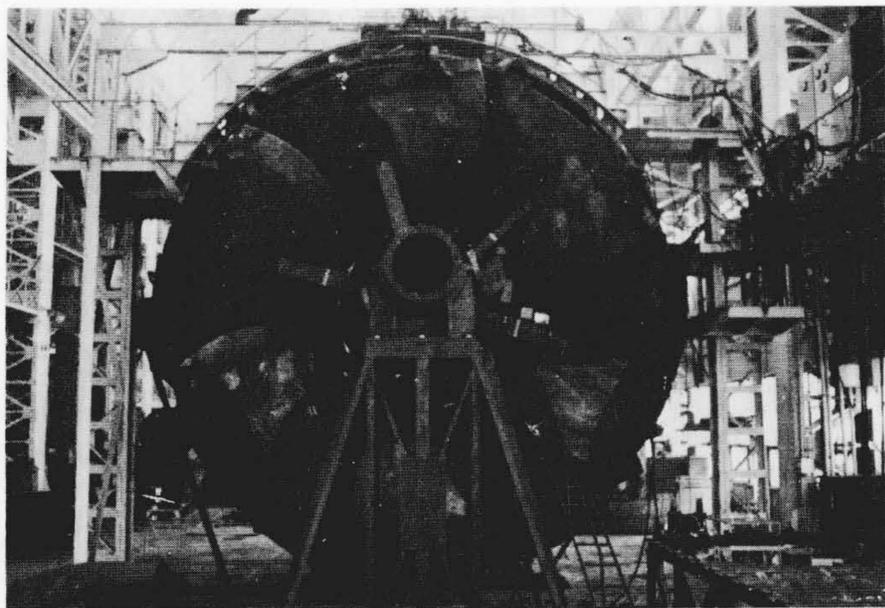


図12 クラウンとベーンの溶接 エレクトロスラグ溶接では、たえず溶接部は垂直にしておく必要があり、溶接中は、クラウンとベーンにシャフトを取り付け、被溶接材を回転させつつ溶接した。

Fig. 12 Welding of Crown and Vane

表3 クラウンとベーン及びベーンとシュラウドバンドの溶接条件 エレクトロスラグ溶接の良否は、電流、電圧、スラグプール深さ、電極数、心線、フラックスなどの溶接条件に左右される。

Table 3 Welding Conditions for Crown and Vane and for Vane and Shroud Band

電流 (A/本)	電圧 (V)	スラグプール深さ (mm)	電極数 (本)	心線	フラックス
350~450	45~55	45~55	2	ES-50 3.2φ	MF-38

7 ステンレス鋼の肉盛及び板張り

ランナでは、その機能上、高速の流水がランナの表面を通過するためキャビテーション対策が必要であり、特に摩耗あるいは、キャビテーションコロージョンの大きいベーン、クラウン、シュラウドバンドのそれぞれの入口部、出口部には、18-8系のステンレス鋼の肉盛及び板張りを実施した。

クラウンあるいはシュラウドバンドとベーンの付け根のように、応力レベルの高い部分では肉盛を採用し、付け根よりはずれた応力の低い部分には、ステンレスの板張りを採用した。

今回、加工の容易な点から18-8系のステンレス鋼を肉盛した。18-8系のステンレス鋼では、焼ならしまたは焼もどしを目的として500~800°Cに長時間保持すると炭素濃度の高い軟鋼のベースメタルから、炭素濃度の低い溶着金属側へ炭素が移行することにより、炭素濃度の高い領域が溶着金属側ポンド近傍に形成される⁽⁷⁾。

この炭素濃度の高い領域では、機械的性質の劣化が激しく、延性が極端に低下する。このため、ステンレス鋼の肉盛は、主に焼ならし後に実施し、ステンレス鋼の肉盛部及び板張り部が高温で保持される時間を最小限にした。

8 ランナの熱処理

エレクトロスラグ溶接による脆化部の機械的性質の改善と応力除去を目的として、溶接後900°Cの焼ならし、625°Cの焼もどしを行なった。

焼ならしの冷却速度は速いほど衝撃値は回復されるが、冷

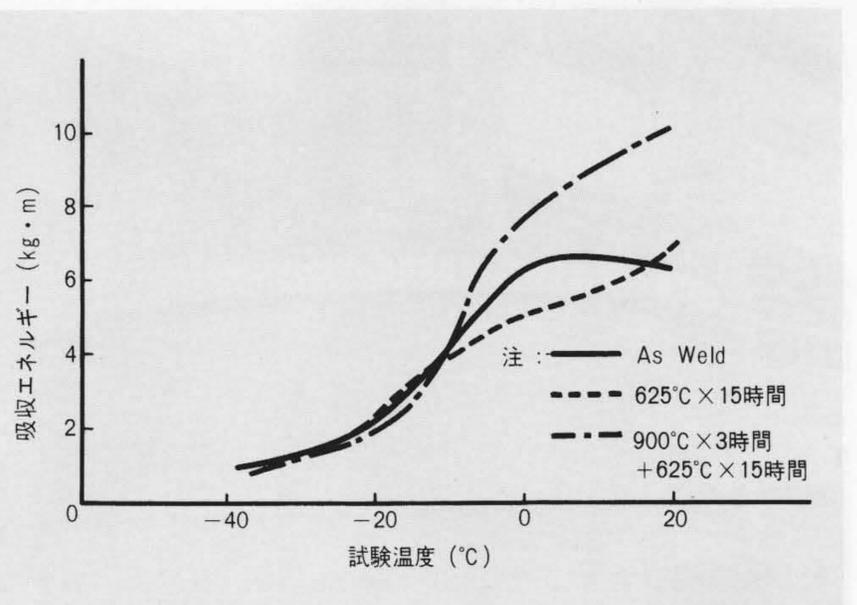


図13 溶着金属の衝撃値に与える熱処理の影響 溶着金属の衝撃値は熱処理により左右される。

Fig. 13 Influence of Heat Treatment on Impact Value of Deposit Metal

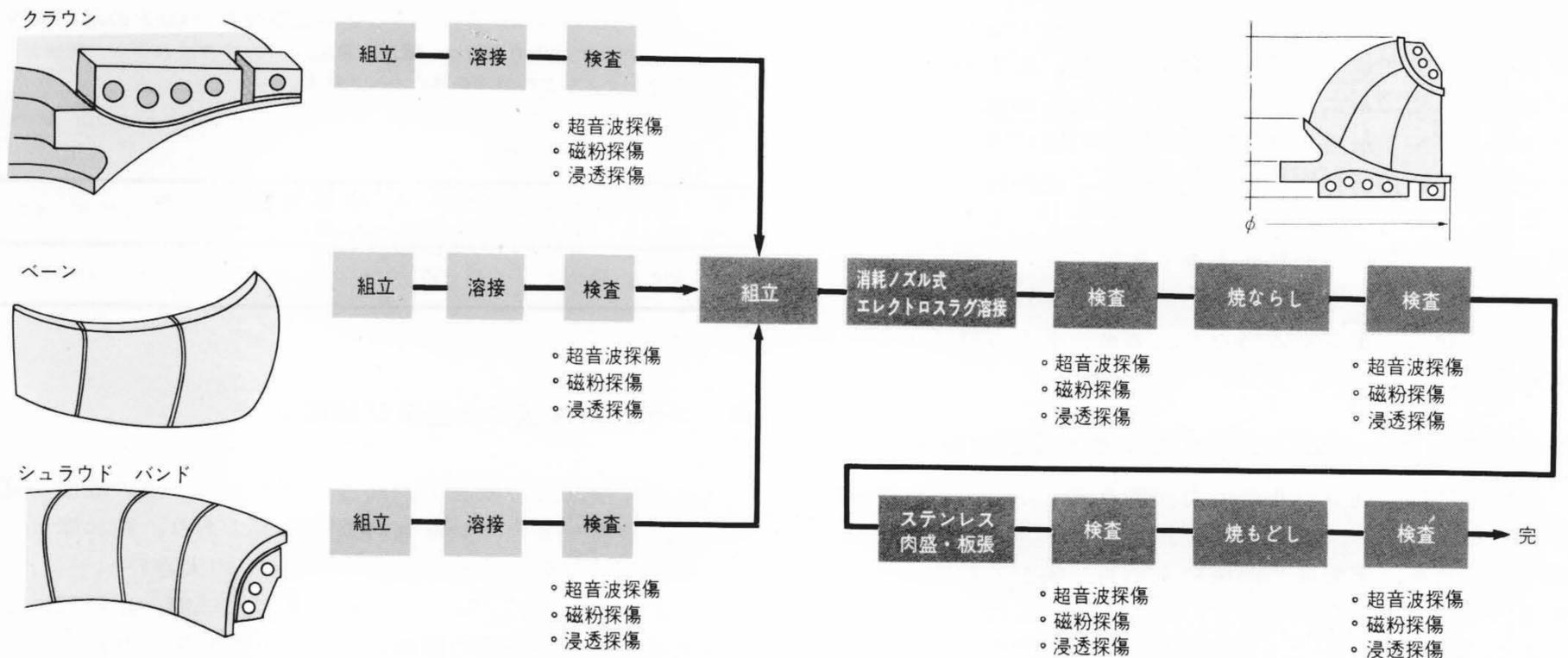


図14 ランナの検査工程 溶接とか熱処理工程の前後で超音波磁粉浸透探傷検査を行ない品質の確保に万全を期した。

Fig. 14 Runner under Check

却速度を高めるとランナのように肉厚の厚い部分と薄い部分の差の大きいものでは、変形、割れの危険が高くなるため、実際作業ではこの点を留意した。

9 ランナ溶接部の検査

ランナに発生する割れなどの欠陥は、不適當な溶接及び焼ならし-焼もどしの冷却時の温度差による熱応力により生ずる。このため、図14に示すように溶接あるいは焼ならし-焼もどしなどの熱を加える各工程前後で検査し、品質の確認を行なった。

今回、厚板で、しかも溶接部の継手形状が、T継手でありX線検査が難しいため、内部検査として、超音波探傷法を採用した。

超音波探傷法には、垂直探傷法と斜角探傷法とがあるが、それぞれの特徴と継手形状を考慮しこれらを併用した。

また表層部の検査には、磁粉探傷法と浸透探傷法とを併用し、溶接品質の確保に万全を期した。

図15は、ランナが完成し、工場内でシャフトと一体化した状況を示すものである。

10 結 言

世界最大容量のラディングトン納め343 MWポンプ水車ランナ6台を、厚板熱間加工、消耗ノズル式エレクトロ溶接など画期的な技術を駆使し、鋼板溶接構造により製作した。

なお本機は、すべて現地据付が完了し現在好調に稼動中である。

参考文献

- (1) 高瀬, 岡田, 立石, 玉造: 「最近のアメリカ向大容量ポンプ水車および発電電動機」日立評論 53, 182, (昭46-2)
- (2) 山本, 神保: 「輸出用水車の動向」日本機械学会誌 75, 1836 (1972)
- (3) 小松: 大型水車の設計と製造上の問題点 日本機械学会誌 75, 1878(1972)
- (4) B.E.Paton: Electroslag Welding A.W.S 40, (1959)
- (5) B.E.Paton: Electroslag Welding A.W.S 161, (1959)
- (6) 妹島, 北村, 和田: 「重電機部品におけるエレクトロスラグ溶接」溶接技術 17, 10, 44 (1969)
- (7) 松田: 溶接冶金 日刊工業新聞社 213, (1972)

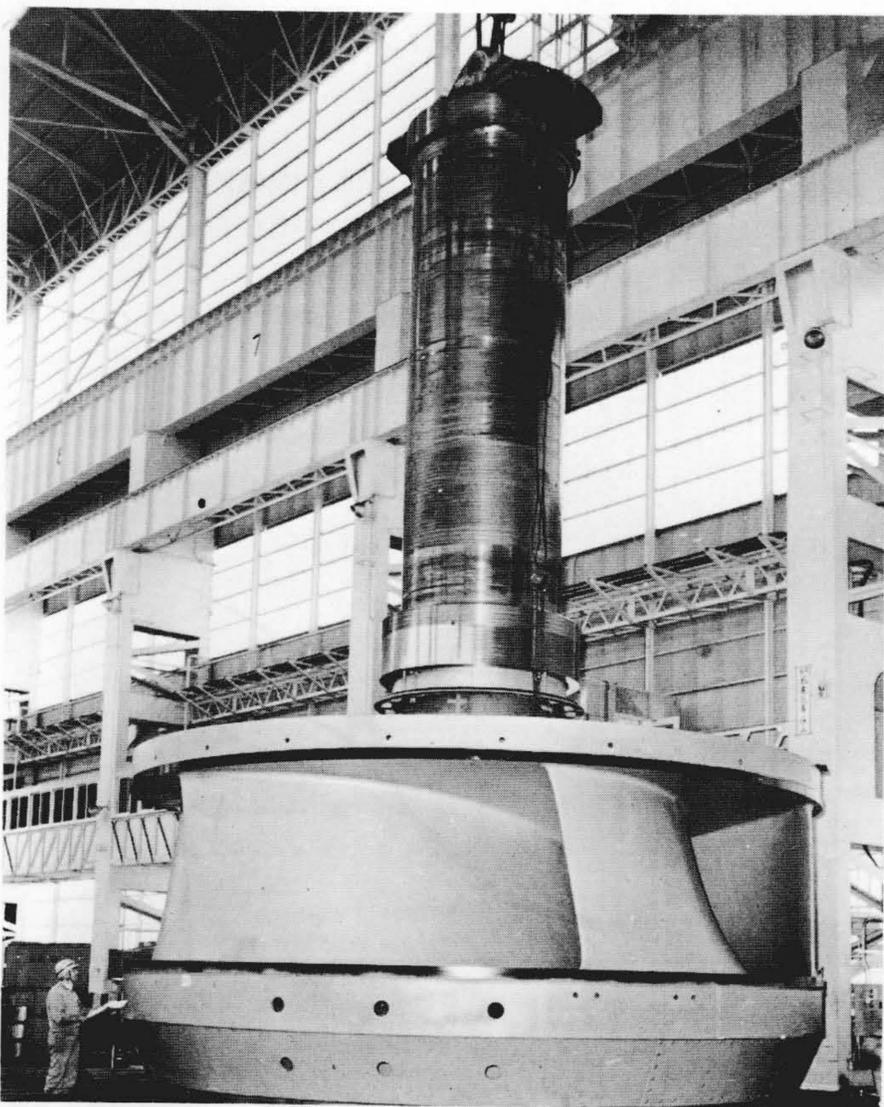


図15 ランナ完成図 ランナ完成後、シャフトと一体化した状況を示す。

Fig. 15 Runner Assembled on Shaft