

# 60~70 kg/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼の溶接性, 加工性および水力機器への応用 (その二, 製作実績)

Studies on Weldability and Workability of 60~70 kg/mm<sup>2</sup> High-strength Steels and Their Application to Hydraulic Turbine Parts (Part 2—Manufacture)

妹島 五彦\* 大国 哲男\* 石原 政男\*  
Itsuhiko Sejima Tetsuo Ôkuni Masao Ishihara  
高坂 七三\* 伊藤 栄郎\*  
Shichizô Kôsaka Hideo Itô

## 要 旨

われわれはさきに 60~70 kg/mm<sup>2</sup> 級各種高張力鋼(以下 HT 鋼という)の溶接性, 溶接継手性能, 加工性などについて基礎試験を行ない, 実用化上の問題点, 施工条件などについて報告した<sup>(1)</sup>。

本文ではこれら基礎試験をもとに日立製作所で製作されている HT 鋼製水車ケーシング, および圧油タンクの製作事例について紹介し高張力鋼使用上の問題に言及し, 今後の動向について述べる。

現在, 日立製作所における水力機器の大半は溶接構造物で作られており, 構造上の改善, 進歩と合わせて, 材料面でも積極的に高張力鋼が採用されている。高張力鋼製水力機器の製作は溶接自動化の方向にそい自動溶接化が進められている。本文は最近における水力機器に高張力鋼を使用した場合の製作事例について紹介するものである。

## 1. 緒 言

さきに報告したように<sup>(1)</sup>, われわれは水力機器部品, 特に水車ケーシング, 圧油槽のように大形圧力容器の製作に関し, HT 鋼の採用が技術的, 品質的, 経済的にみても望ましいと考え, 主として現場施工上の問題について検討を加え, HT 鋼標準作業条件の確立につとめてきた。

これらの結果, 日立製作所ではすでにこの分野で数多くの実績と経験を持つにいたっており, 本報では, 水力機器のうち特に水車ケーシングと圧油槽について製作内容を紹介し, 合わせて水力機器製作技術の変遷と今後の問題点について報告することにする。

## 2. 水力機器に应用せる HT 鋼溶接技術の推移について

水力機器に溶接技術が広範囲に採用されてきて以来, 水車材料の構成比率も大きく変化してきている。図1は日立製作所における水車本体の材料構成比率と水車本体溶接構造の発展過程を示したもので, 現在水力機器材料のうち 90% が鋼板を使用しており, 溶接構造物が主体を占めていることがわかる。また最近厚肉鋼板と HT 鋼の占める割合が多くなってきている。

また水車本体溶接構造の発展過程, 溶接技術的発展過程をここ 20 年にとってみると第1期から第4期に大別してみることができる。

HT 鋼の開発研究はちょうど第3期(1960年)にはいって実施され, 1964年電源開発株式会社池原発電所納 110,000 kW 水車ケーシングに HT 60 鋼が採用されて以来, 現在まで数多くの HT 鋼使用水車ケーシング製作の経験を持っており, 完全に HT 鋼の実用期にはいっているといえる。

表1は日立製作所において製作された HT 鋼使用水車ケーシングおよび圧油槽の製作実績の一例を示したものである。表1で明らかなように HT 鋼を使用した水車ケーシングは国内の大形ポンプ水車, たとえば池原, 新成羽川, 長野, 喜撰山発電所に多く採用されたのを初めとし, 輸出水車にもイラン国パーラビ発電所用 2 基を初め,

\* 日立製作所日立工場

現在韓国, 清平発電所納現地溶接構造水車ケーシングの現地溶接工事が完成している。またわが国では最初に HT 70 鋼製水車ケーシングが北海道電力株式会社金山発電所に納入され, 現地溶接工事も完了, 1967年5月より運転にはいっている。

また圧油槽としては鏡板, 胴体とも HT 60 鋼を使用した全 HT 鋼製圧力容器が完成している(電源開発株式会社長野発電所納圧油槽)。

一方, HT 鋼を水力機器に使用する場合, 実用化上の問題点とその対策の一例を示したのが表2である。表2に明らかなように, HT 鋼実用化上の問題点は大きく分けて, 設計上の問題(関係法規, 設計基準のとり方, 溶接構造の制約, 溶接強度など)と製作上の問題に分けられる。このうち製作上の問題中入熱制御, 溶接割れ, 応力除去焼鈍の影響, 加工性の検討などについてはすでに第一報で報告したとおりである。

図2は水車ケーシング材として, 軟鋼, HT 鋼を使用した場合の軟鋼と HT 60, HT 70 の重量比, 材料費, 加工費の比較を示すものである。HT 鋼の採用により重量は大幅に低減できる(HT 60 鋼で 25% 減, HT 70 鋼で 40% 減)。しかし現状では HT 鋼の価格が高いため材料費においては 10~36% の割高となり, 加工費の低減により, 総合的には HT 60 鋼で 5%, HT 70 鋼で 4% の節減を図ることがで

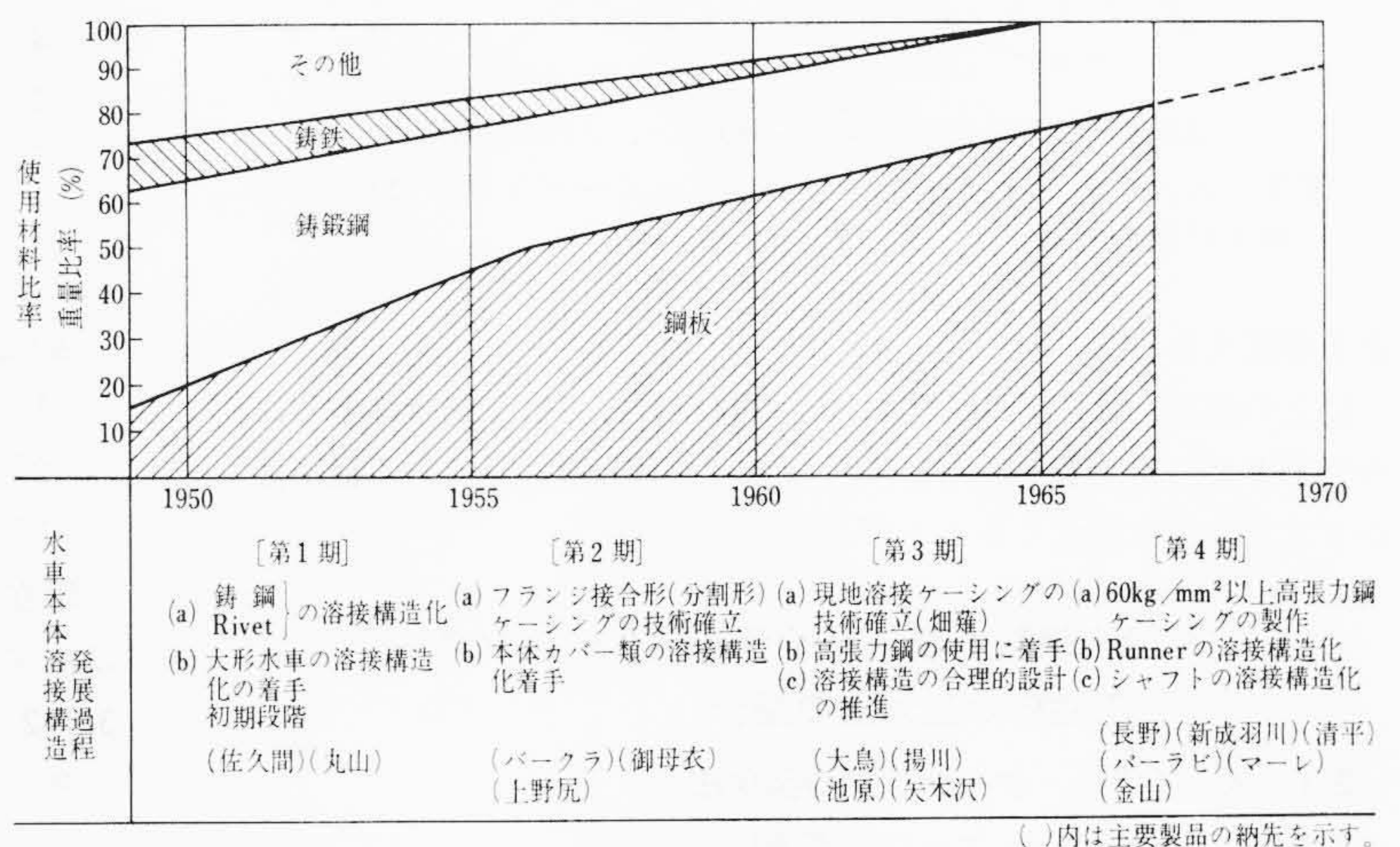


図1 水車の材料構成比率と水車本体溶接構造の発展過程

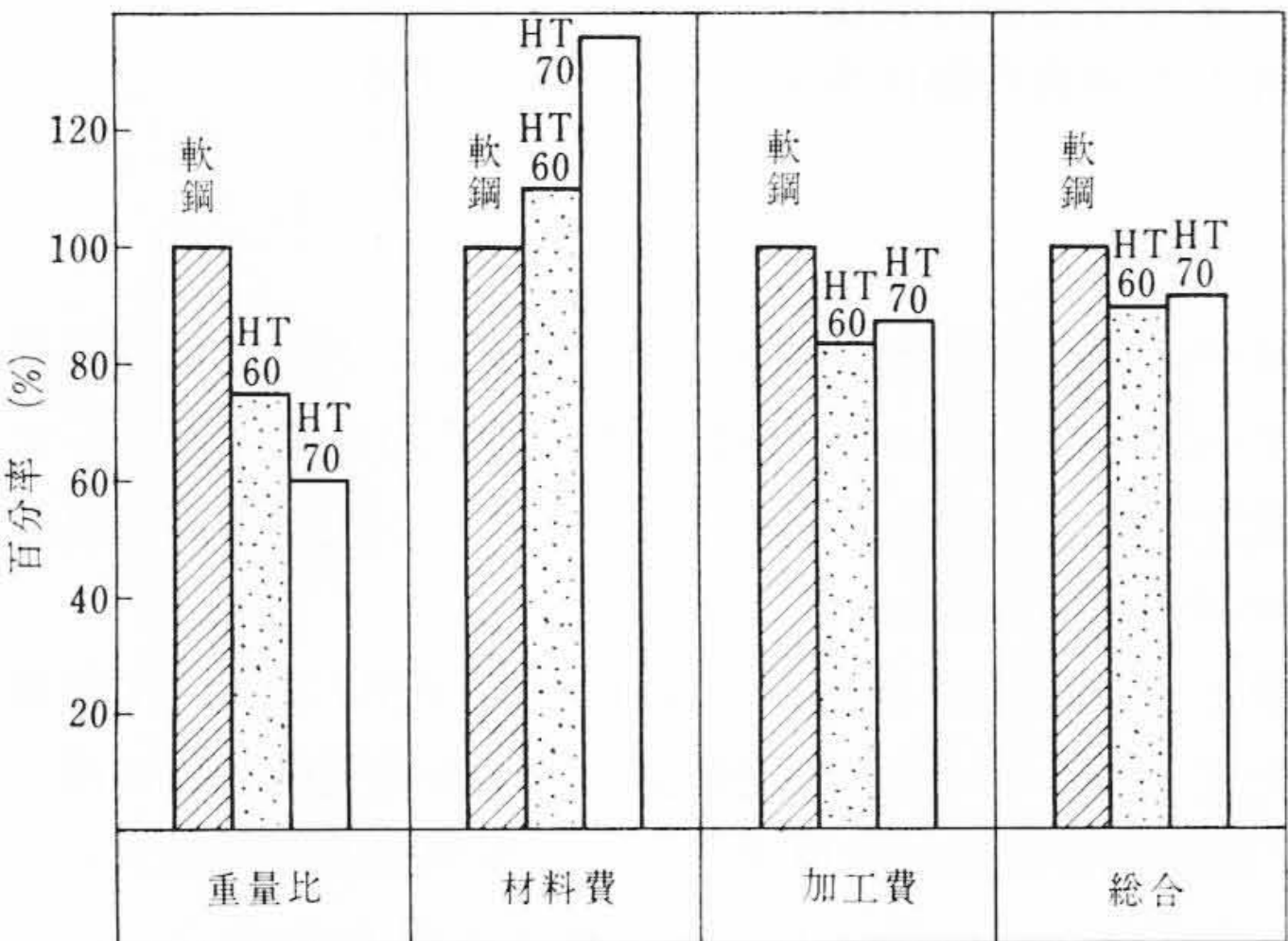


表1 日立製作所において製作された高張力鋼使用の水力機器実績の一例

| 納 先                      | 水 車          |                     |                    |                |                |                     |                |                     |                    |                 | 圧 油 槽                         |              |       |       |
|--------------------------|--------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|--------------|-------|-------|
|                          | 関電黒四         | 電発池原                | オーストラリア<br>Murry 2 | 北電金山           | イラン<br>ペーラビ    | 電発長野                | 中 電<br>新成羽川    | 中 電<br>新成羽川         | 四電蘆平               | 韓国清平            | 納 先                           | 東 電<br>矢 木 沢 | 電発池原  | 電発長野  |
| 納 入 台 数 (台)              | 1            | 2                   | 4                  | 1              | 2              | 2                   | 1              | 3                   | 1                  | 1               | 納入台数 (台)                      | 1            | 2     | 2     |
| 製 作 年 度                  | 1961         | 1965                | 1965               | 1966           | 1966           | 1966                | 1966           | 1966                | 1966               | 1967            | 製作年度                          | 1966         | 1966  | 1967  |
| 最 大 出 力 (kW)             | 95,000       | 110,000             | 161,000            | 27,000         | 103,600        | 113,000             | 78,500         | 78,000              | 47,700             | 41,500          | 全 容 積 (l)                     | 8,200        | 6,700 | 8,900 |
| 形 式                      | 立 軸<br>ベルトン  | フランシ<br>ス形ポン<br>プ水車 | フラン<br>シス          | カプラン           | フラン<br>シス      | フランシ<br>ス形ポン<br>プ水車 | フラン<br>シス      | フランシ<br>ス形ポン<br>プ水車 | 斜 流 形<br>ポンプ<br>水車 | プロペラ            | 使用圧力<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 70           | 70    | 70    |
| 最 高 落 差<br>(最 大 揚 程) (m) | 580          | 129.5<br>[132]      | 290                | 72.3           | 180            | 107.5<br>[111]      | 95             | 94.7<br>[96.4]      | 89.7<br>[94]       | 24.5            | 許容応力<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 18.4         | 18.4  | 18.4  |
| 回 転 数 (rpm)              | 360          | 150                 | 333                | 300            | 250            | 150                 | 200            | 144                 | 240                | 150             | 胴板使用材                         | HT60         | HT60  | HT60  |
| ケーシング使用材                 | HT50<br>+ 鋳鋼 | HT60+<br>SM41A      | HT50<br>(BS968)    | HT70+<br>SM41A | HT60+<br>SM41A | HT60+<br>SM41A      | HT60+<br>SM41A | HT60+<br>SM41A      | HT60+<br>SM41A     | HT60+<br>SM41A  | 胴板板厚<br>(mm t)                | 45           | 40    | 42    |
| HT部ケーシング板厚 (mmt)         | 55~28        | 32~16               | 51~29              | 30~9           | 35~20          | 36~20               | 25~12          | 28~17               | 33~14              | 12~9            | 鏡板使用材                         | SM41A        | SM41A | HT60  |
| スピードリング使用材               | —            | SM41A               | HT50<br>(BS968)    | SM41A          | SM41A          | SM41A               | SM41A          | SM41A               | SM41A              | SM41A           | 鏡板板厚<br>(mm t)                | 45           | 40    | 46    |
| ケーシングの構造                 | フランジ<br>接続   | 現地溶接                | フランジ<br>接続         | 現地溶接           | フランジ<br>接続     | 現地溶接                | 現地溶接           | 現地溶接                | 現地溶接               | 現地溶接            | —                             | —            | —     | —     |
| スピードリングの構造               | —            | フランジ<br>接続          | フランジ<br>接続         | 現地溶接           | フランジ<br>接続     | フランジ<br>接続          | フランジ<br>接続     | フランジ<br>接続          | フランジ<br>接続         | フランジ<br>接続+現地溶接 | —                             | —            | —     | —     |

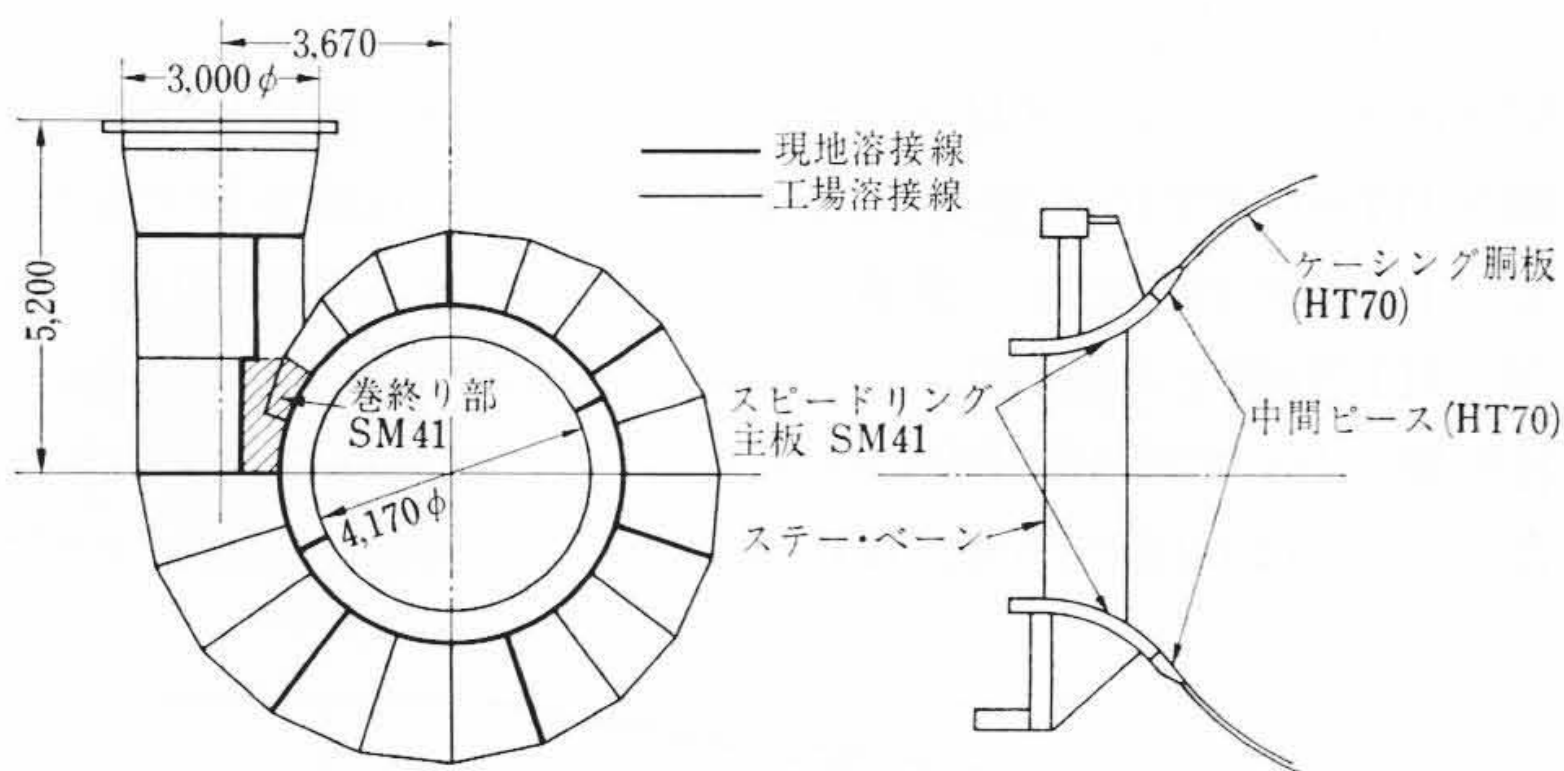
表2 HT鋼実用化上の問題点とその対策

| 問 題 点  |            | 対 策                                                                                                                                         |
|--------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 設計上の問題 | 法規         | 通産省技術基準「高圧ガス取締法」との関連                                                                                                                        |
|        | 許容応力       | 明確な規定なし(高圧ガス取締法, ASMEとの関連)                                                                                                                  |
|        | 剛性         | ヤング率は軟鋼なみである                                                                                                                                |
|        | 溶接構造       | 局部応力の発生と不連続溶接継手の関連                                                                                                                          |
|        | 異強度材料の溶接強度 | 軟鋼との継手部の溶接棒の選定                                                                                                                              |
| 製作上の問題 | 疲労強度       | 静的強度の割合に疲労強度が低い                                                                                                                             |
|        | 入熱制限       | 特に自動溶接による許容最大入熱の検討                                                                                                                          |
|        | 溶接割れ       | 小形実験室的な研究と現場施工条件との関連                                                                                                                        |
|        | 応力除去焼鈍     | 焼鈍割れ (HT80以上) と材料強度                                                                                                                         |
|        | 加工性        | ガス切断面のかたさ, ひずみ硬化, 切欠き                                                                                                                       |
| 検査基準   | 高能率溶接の適用   | フィラメタル法, 片面自動溶接の適用                                                                                                                          |
|        | 検査基準       | HT鋼におけるアンダーカットの許容量, 内部欠陥度との関連                                                                                                               |
|        |            | HT鋼の項目がない。規格整備<br>規格の整備 (現在比較的低い許容応力がとれているが応力限界の決定)<br>溶接構造の検討が必要, 引張応力部材への応用が望ましい<br>板厚差による局部応力に対し中間ビースを <sup>1</sup> 入れる。または溶接整形による板厚差の減少 |



(軟鋼を 100% とした場合)

図2 水車部品における軟鋼とHT鋼の原価および重量比較



(北海道電力株式会社金山発電所納 HT70 ケーシングの場合)

図3 スパイラル・ケーシングおよびスピードリングの形状および概要寸法

きる程度である。

以上の結果、HT 鋼の採用において材料費の占める割合は多く、今後 HT 鋼の材料費がさらに安くなれば、HT 鋼採用による経済性がますます増大してくることがわかる。

3. HT 鋼製水車スパイラル・ケーシング、  
圧油槽の製作法の紹介

3.1 スパイラル・ケーシングの製作法

3.1.1 スパイラル・ケーシング製作法の変遷

スパイラル・ケーシングの一般的形状は図3に示すとおりで、

機能としては圧力容器であること内部の流水をできるだけなめらかにすることなどが要求される。すでに図1の水車本体構造発展過程で述べたように、スパイラル・ケーシングの製作法は[リベット構造]→[溶接フランジ構造]→[現地溶接構造]と変遷している。特に現地溶接構造方式は

- (1) 気密性の点
- (2) 水力発電所の大形化に伴い、ケーシングの分割数を自由に選べる点
- (3) 製作が容易である点
- (4) 材料が軟鋼から HT 鋼まで使用できる点
- (5) 経済的に材料の節減、製作費の低減、輸送費の低減が得られる点

など多くの利点を有している。

また、反面、現地溶接構造の採用は

- (1) 現地据付期間が長い。
- (2) 現地溶接による変形を制御する必要がある。
- (3) 現地溶接による残留応力が問題となる可能性がある。

現在、これらの問題も解決されつつありこれからの傾向としてはますます現地溶接方式が採用されることは明らかである。

3.1.2 スピードリング・スパイラル・ケーシングの使用材質

スパイラル・ケーシングへの使用実績のある鋼板は表1に示したように、最近のわが国、鉄鋼メーカーの技術革新による溶接性良好な高張力鋼の出現により、ほとんど HT 60 鋼で占められるよ



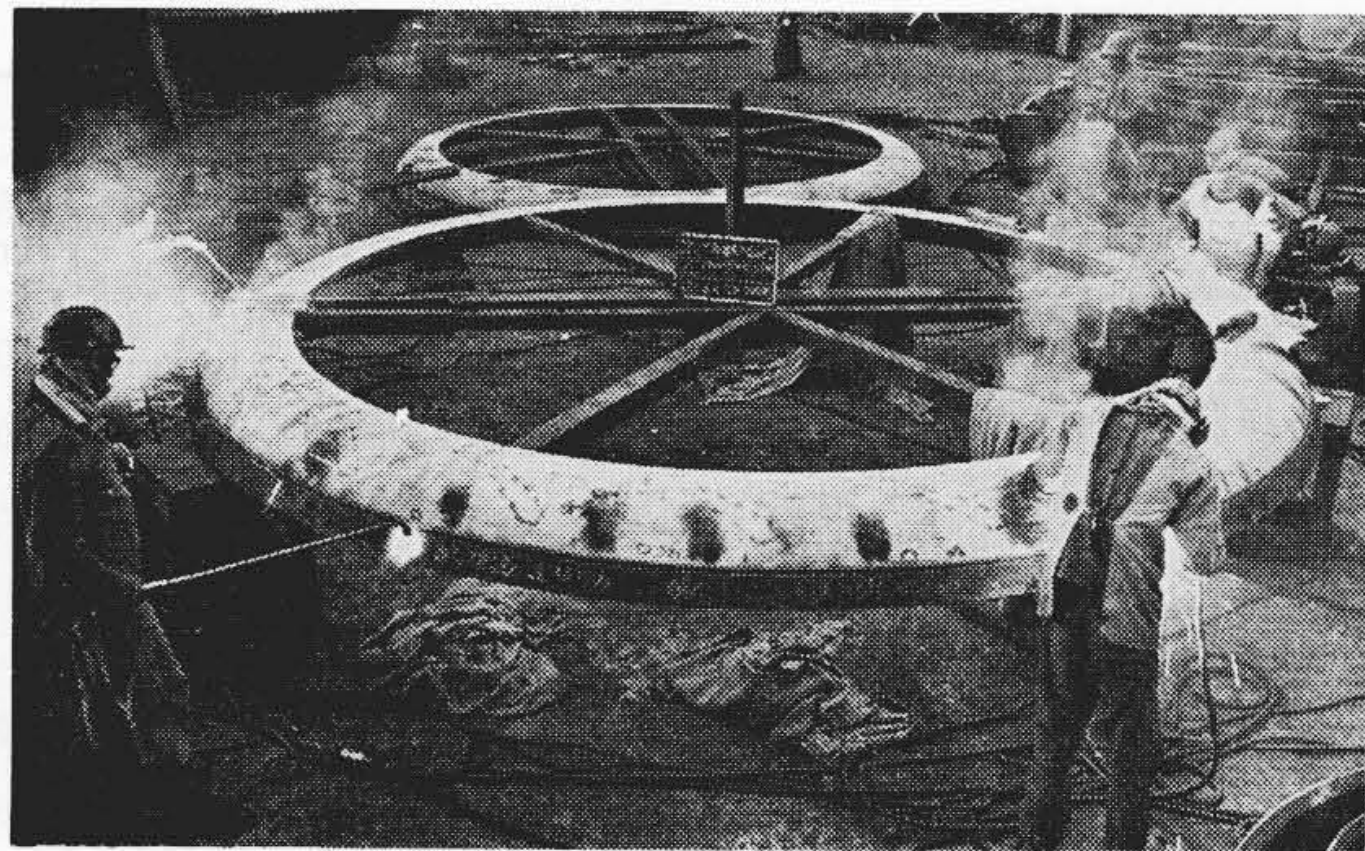


図4 スピードリング主板と中間ピース(HT鋼)の溶接状況

うになっている。スピードリングについては製作段階で熱間プレスで主板を成形するため、調質HT鋼が使用できず、一般にSM 41, SM 50材が使用されているが、厚肉になるに従い製作の可能性が増大するので、現在非調質HT 60鋼のスピードリングの製作を検討中である。スピードリングに軟鋼板を使用し、スパイラル・ケーシングにHT鋼を使用した場合、両者の接合部に板厚差が生ずるため応力を検討する必要がある。これを解決するため図3, 4に示す中間ピースをスピードリング外周に工場溶接する方法（この場合中間ピースの材質はスパイラル・ケーシング材質に合わせている）か、または設計上の工夫によりできるだけ板厚差を減らし、段付部を肉盛する方法が採用されている。通常スピードリングは輸送限界から2~4分割されるのが普通である。スピードリングの合わせ目は従来からフランジ構造を採用してきているが、この構造では厚肉フランジと大径ボルトが必要であり、このため最近ではスピードリング合わせ目継手も現地溶接構造化をとりつつあり、二、三の実績をもっている。

スパイラル・ケーシング材はほとんどHT鋼で製作されるが、スパイラル・ケーシング巻終り部は熱間プレスが必要であるため調質HT鋼が使用できず、軟鋼および非調質HT 60鋼が使用されている。

### 3.1.3 製作工程

HT鋼を使用したスパイラル・ケーシングの製作工程概要は次のとおりである。

#### (1) 板取り、野引作業

所要材料はすべて材料として所定の検査に合格したものを入材し、あらかじめ鋼板の歩留りの向上と、HT鋼の場合できるだけ溶接線を減らす二つの目的に沿って板取り原図作業を行なう。野引作業の際の注意事項はポンチ先端を丸くしたポンチを用いること、ケーシングの内側にのみ打つこと、特に切断線以内には用いないこと、各種基準線の明示などに工夫をすること、などである。

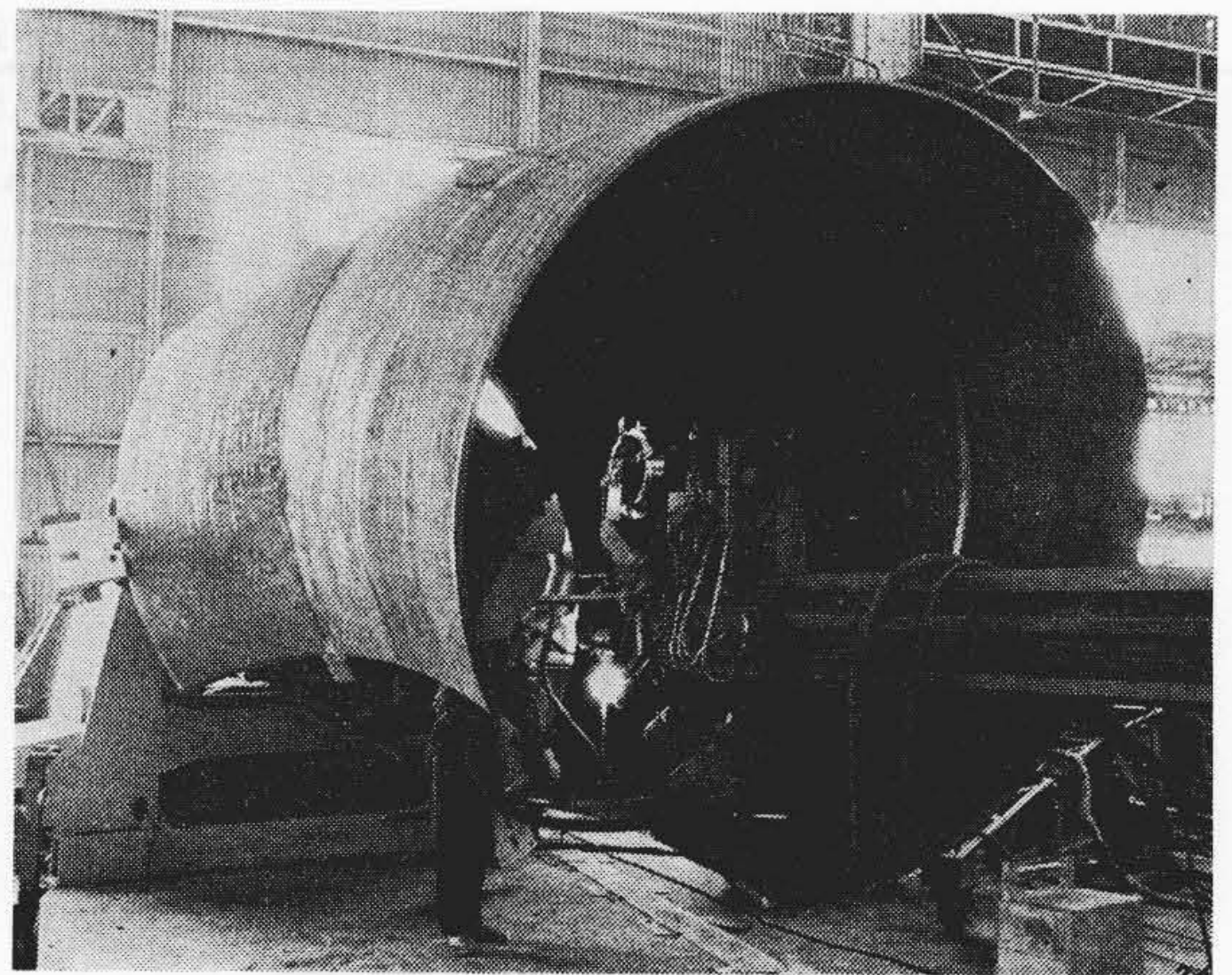
#### (2) ガス切断作業

ガス切断の際、調質HT鋼は予熱を必要としないが、厚板非調質HT鋼では50℃以上の予熱を行なう。ガス切断はすべて、自動および半自動ガス切断機によって行なわれ、ガス切断面に切欠きなどの欠陥を残さないよう平滑にガス切断される。また万一欠陥の生じた際はグラインダで平滑に仕上げられる。また板取り時平板のうちに開先取加工が可能なものは自動ガス切断機により加工される。

#### (3) ロール曲げ作業

HT鋼スパイラル・ケーシング胴体のロール曲げ作業はすべて室温で行なわれ、素材溶接線も焼鈍を行なわずに曲げられたが割れは発生せず問題はなかった。

HT鋼は降伏点が高いため、スプリング・バックも大きく、曲げ作業は一般的に困難である。したがってロール曲げ作業の能力

図5 サブマージアーク溶接による  
スパイラル・ケーシングの円周溶接状況

範囲を定めるため、軟鋼と比較して等価板厚を(1)式により求めることができる。

$$t_{eq} = t \sqrt{\frac{\sigma_y}{35}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $t_{eq}$ : 軟鋼に対する等価板厚 (mm)

$t$ : HT鋼の板厚 (mm)

$\sigma_y$ : HT鋼の降伏点 (kg/mm<sup>2</sup>)

(1)式の結果によると軟鋼に比較して約1.5倍の板厚と考えてよい。

#### (4) 組立、製作作業

スパイラル・ケーシングの製作は、まずロール曲げされたケーシング胴板を2個1体に組み立て、サブマージアーク溶接される(図5参照)。さらにこのブロック2~3個を1体に組み立て1分割のケーシングとする。このケーシングはあらかじめスピードリングと仮組合せを行ない現地溶接構造化方式のものは開先修正をして現地へ発送する。

これらHT鋼ケーシングの組立作業中の作業注意は次のようなものである。

(a) 仮付作業 予熱温度には本溶接と同じ予熱温度を採用し、ビード長を50mm以上とする。溶接棒は低水素系とする(表3参照)。

(b) アークストライクの禁止とその補修方法 アークストライクを絶対行わないこと、万一生じたアークストライク部分には予熱テンパービード補修法<sup>(1)</sup>を実施する。

(c) スター、合わせ金具 釣り金具などをケーシングに取り付ける場合の予熱および溶接法は本溶接と同様にする。

(d) ハツリおよびピーニング作業の際は特に慎重に行ない、母材、HT鋼にキズをつけぬこと。ピーニングはビードの初層および最終層については行なわない。

(e) 手動ガス切断による合わせ作業は過度の熱を与えないよう手際よく作業を行なう。

(f) 調質HT鋼では点熱急冷や、熱間加工を絶対に行なわない。

(g) 溶接ビードを仕上げる場合は平アークエアガウジング棒を用いて行なうが、この際、母材表面より0.5mmまでで止め、残りはグラインダ仕上で行なう。

(h) スパイラル・ケーシング組立時は適当な足場を作成し、アングルなどを直接HT鋼に溶接しない。

以上各項目の注意事項を厳守してスパイラル・ケーシング組立作業が行なわれている。



| 表 3 HT60～HT70 鋼 の 標 準 入 熱 条 件         |             |                |             |                     |             |                |             |                     |              |                |             |                     |
|---------------------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------|--------------|----------------|-------------|---------------------|
| (手溶接およびサブマージーク溶接)                     |             |                |             |                     |             |                |             |                     |              |                |             |                     |
|                                       | 調 質 HT60 鋼  |                |             |                     | 調 質 HT70 鋼  |                |             |                     | 非 調 質 HT60 鋼 |                |             |                     |
|                                       | 板 厚<br>(mm) | 予 熱 温 度<br>(℃) | 層間温度<br>(℃) | 許 容 入 熱 量<br>(j/cm) | 板 厚<br>(mm) | 予 熱 温 度<br>(℃) | 層間温度<br>(℃) | 許 容 入 熱 量<br>(j/cm) | 板 厚<br>(mm)  | 予 熱 温 度<br>(℃) | 層間温度<br>(℃) | 許 容 入 熱 量<br>(j/cm) |
| 手<br>溶<br>接                           | <22         | 50             | 200         | 制 限 な し             | <12         | 100            | 200         | 35,000              | <16          | 100            | 200         | 35,000              |
|                                       | <30         | 80             |             | 制 限 な し             | <16         | 100            |             | 35,000              | <30          | 150            |             | 45,000              |
|                                       | <34         | 100            |             | 制 限 な し             | <30         | 150            |             | 制 限 な し             | <45          | 200            |             | 制 限 な し             |
|                                       | <50         | 150            |             | 制 限 な し             | <40         | 200            |             | 制 限 な し             |              |                |             |                     |
| サブ<br>マ<br>ー<br>ジ<br>ー<br>ク<br>溶<br>接 | <20         | RT             | 200         | 65,500              | <12         | RT             | 200         | 35,000              | <16          | RT             | 200         | 30,000              |
|                                       | <22         | RT             |             | 71,500              | <16         | RT             |             | 35,000              | <30          | 100            |             | 43,000              |
|                                       | <25         | RT             |             | 80,000              | <30         | 100            |             | 40,000              | <45          | 100            |             | 47,000              |
|                                       | <28         | RT             |             | 制 限 な し             | <40         | 100            |             | 50,000              |              |                |             |                     |

次に二、三、スパイラル・ケーシング組立作業時の問題点をあげると次のようになる。

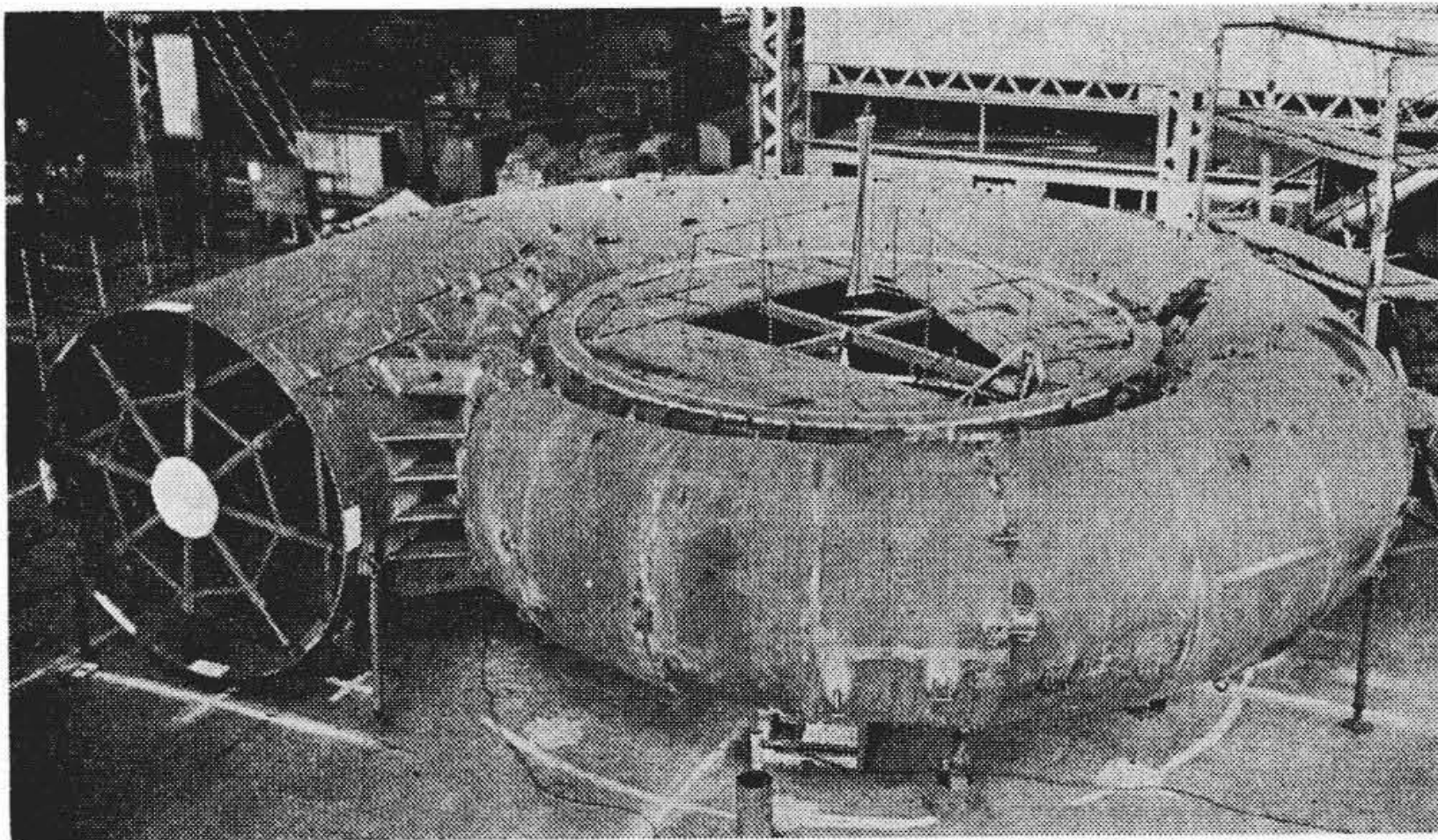
- (a) スパイラル・ケーシングとスピードリングの開先修正にフレームガウジングを行なうと、入熱量が多くなり脆(ぜい)化するおそれがあるため、フレームガウジングは止め、組み立てた状態で正しい形状になるよう野引線を入れ、ケーシング解体後、ガス切断により切断して形成する必要がある。
- (b) 開先段違いの修正は、治工具を用いて行なうが、これらの治具をHT鋼に溶接することは極力さけなければならない。また仮組時、これらの治工具で修正してもHT鋼の剛性、スプリング・バックが強いため、解体時、正しい形状にならない場合が多い。軟鋼であれば点熱、急冷による修正が可能であるが、HT鋼ではこれらの操作はできない。したがってケーシング単独の形状、寸法を正確に作るためロール作業を初め部品作業の精度向上、溶接変形を極力防止することなどに留意し、寸法精度のよいスパイラル・ケーシングの製作を行なうことが必要で、われわれはこの点に関し多くの工作技術を持っている。

(5) 溶接作業

溶接施工条件は、基礎実験の結果求められた表3に示す標準入熱条件範囲で行なっている。溶接作業はスパイラル・ケーシング製作作業の中心をなすものであり、細心の注意を払って行なわれている。溶接作業中の作業注意は次のようなものである。

- (a) 溶接部の使用区分は表4に示すとおりである。HT60鋼と軟鋼の突合せ溶接部はHT50、またはHT60溶接棒を使用して行なう。HT60鋼と軟鋼のすみ肉溶接部には軟鋼低水素系溶接棒を使用する。
- (b) 溶接棒の乾燥には300~400℃×1時間とし、半日以上炉から出してあるものには再乾燥を行なう。
- (c) アークのスタートにはアークスタート板を使用しないで、運棒は後戻法で行なわれる(HT用溶接棒はすべて先端加工したものを使用する)。
- (d) 裏ハツリはアークエアガウジングにより行なわれ、アークエアガウジング部はグラインダ仕上される。HT鋼は特に湿気をきらうため開先の清掃を十分に行なう。
- (e) プロパンガス・バーナで予熱を行なう。この際バーナを適宜移動させ局部的に加熱しないこと、予熱温度の確認はテンペレステックスを用いて行なう。
- (f) HT鋼の溶接では溶接完了直後水素をすみやかに放出することが溶接割れ防止上有効で、特に厚板HT60鋼、HT70鋼では200℃前後に局部後熱を行ない、石綿布でおおうことが必

| 表4 溶接棒の使用区分 (HT鋼およびHT鋼と軟鋼) |         |     |                                |           |                |
|----------------------------|---------|-----|--------------------------------|-----------|----------------|
| 鋼板の組合せ                     |         | 継手  | 使用区分                           | 手溶接       | サブマージーク溶接      |
| A                          | B       |     |                                |           |                |
| 調質HT60鋼                    | 調質HT60  | 突合せ | ケーシング胴板                        | HT60棒     | HT60用ワイヤ・フラックス |
| 調質HT70鋼                    | 調質HT70  | 突合せ | ケーシング胴体                        | HT70棒     | HT70用ワイヤ・フラックス |
| 非調質HT60鋼                   | 非調質HT60 | 突合せ | スピードリング主板<br>ケーシング巻終り鏡板        | HT60棒     | —              |
| 調質HT60鋼                    | 非調質HT60 | 突合せ | ケーシング胴板、圧油槽                    | HT60棒     | HT60用ワイヤ・フラックス |
| 調質HT60鋼                    | 軟鋼      | 突合せ | スピードリングとケーシング<br>スピードリングと中間ピース | HT50棒     | —              |
| 調質HT70鋼                    | 軟鋼      | 突合せ | スピードリングとケーシング<br>スピードリングと中間ピース | HT60棒     | —              |
| 調質、非調質HT60、70鋼             | 軟鋼      | スミ肉 | ケーシング胴板とリブ足、<br>つり金具           | 軟鋼低水素系溶接棒 | —              |



(四国電力株式会社藤平発電所納)  
図6 工場組立完了したスパイラル・ケーシングの状況

- 要である。
- (g) アースの締め付けには特に注意し、完全に締め付けることが必要で、アークを生じないようにする。
- 図5にサブマージーク溶接によるスパイラル・ケーシング円周溶接状況、図6に工場組立完了したスパイラル・ケーシングの状況を示す。現在、現地溶接スパイラル・ケーシングの工場組立は一部分省略の方向がとられている。この場合は入口部と巻終り部のみについて工場組立を行なっているが、現地組立溶接においても支障の少ないことを確認している。

(6) 応力除去焼鈍

軟鋼製スピードリングに関しては全溶接後625℃±25度の普通焼鈍を実施している。中間ピース(HT鋼)付きのスピードリングに関しては中間ピース(HT鋼)の焼戻温度を考慮し、580~600℃の範囲の焼鈍をしている。スパイラル・ケーシングに関してはやはり同じ考えで580~600℃の範囲の焼鈍を実施している。現地溶接構造スパイラル・ケーシングに関しては現地溶接線の残留応力除去焼鈍はしないで設計上この点を考慮し、十分安全な設計を



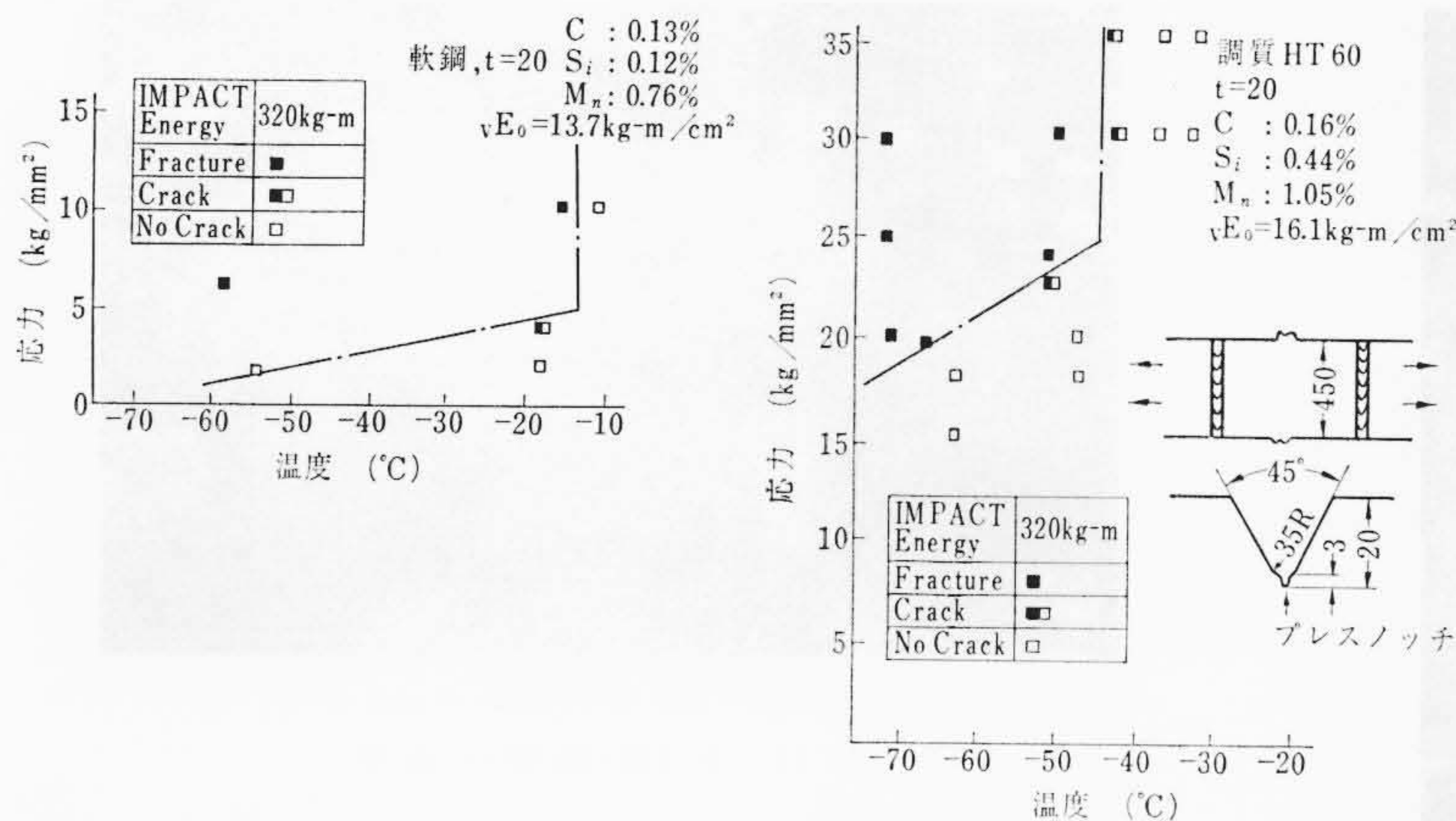
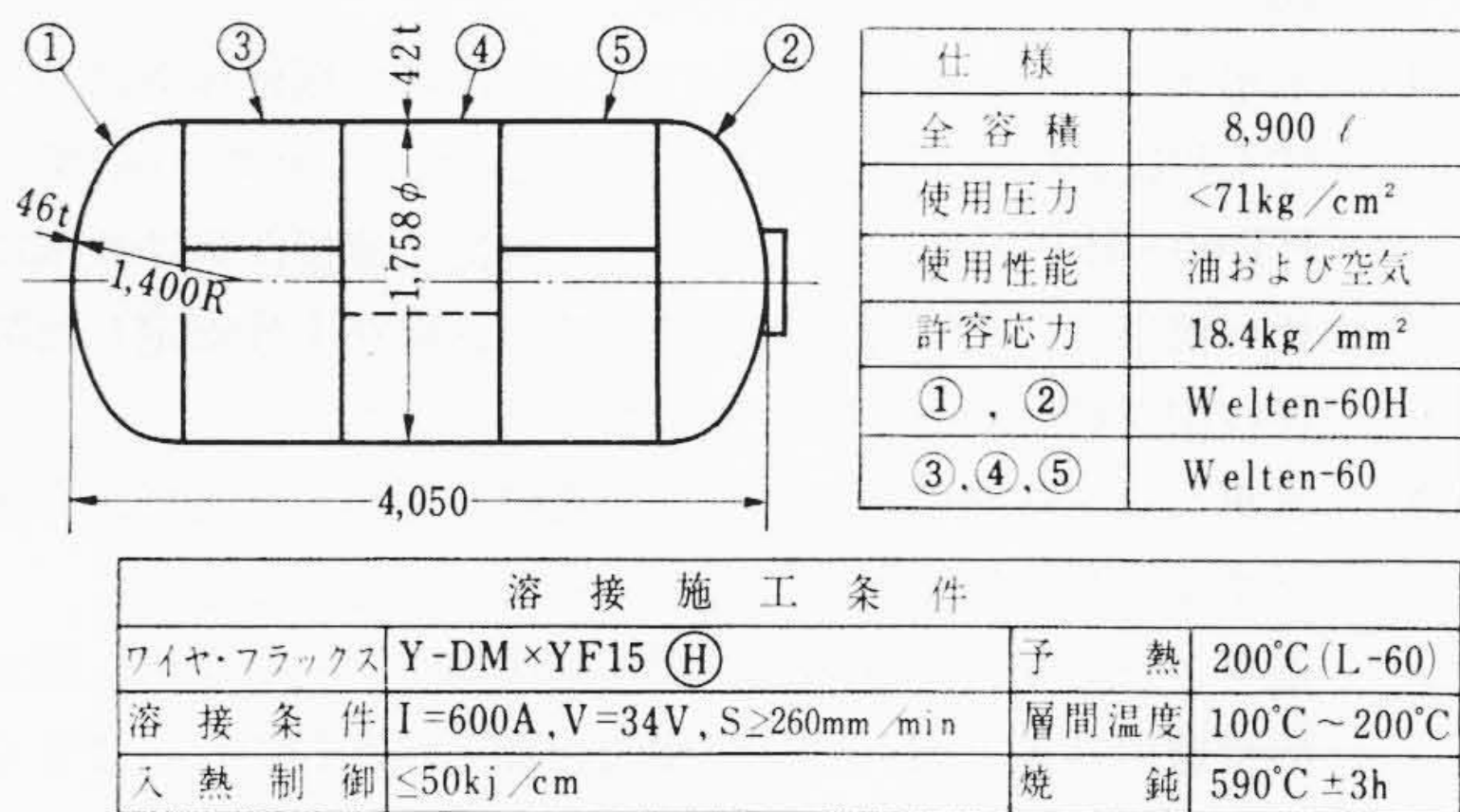
図7 切欠付衝撃広幅引張試験結果<sup>(5)</sup>

図9 HT 60 鋼製圧油槽の溶接施工条件

採用している。

#### (7) 検 査

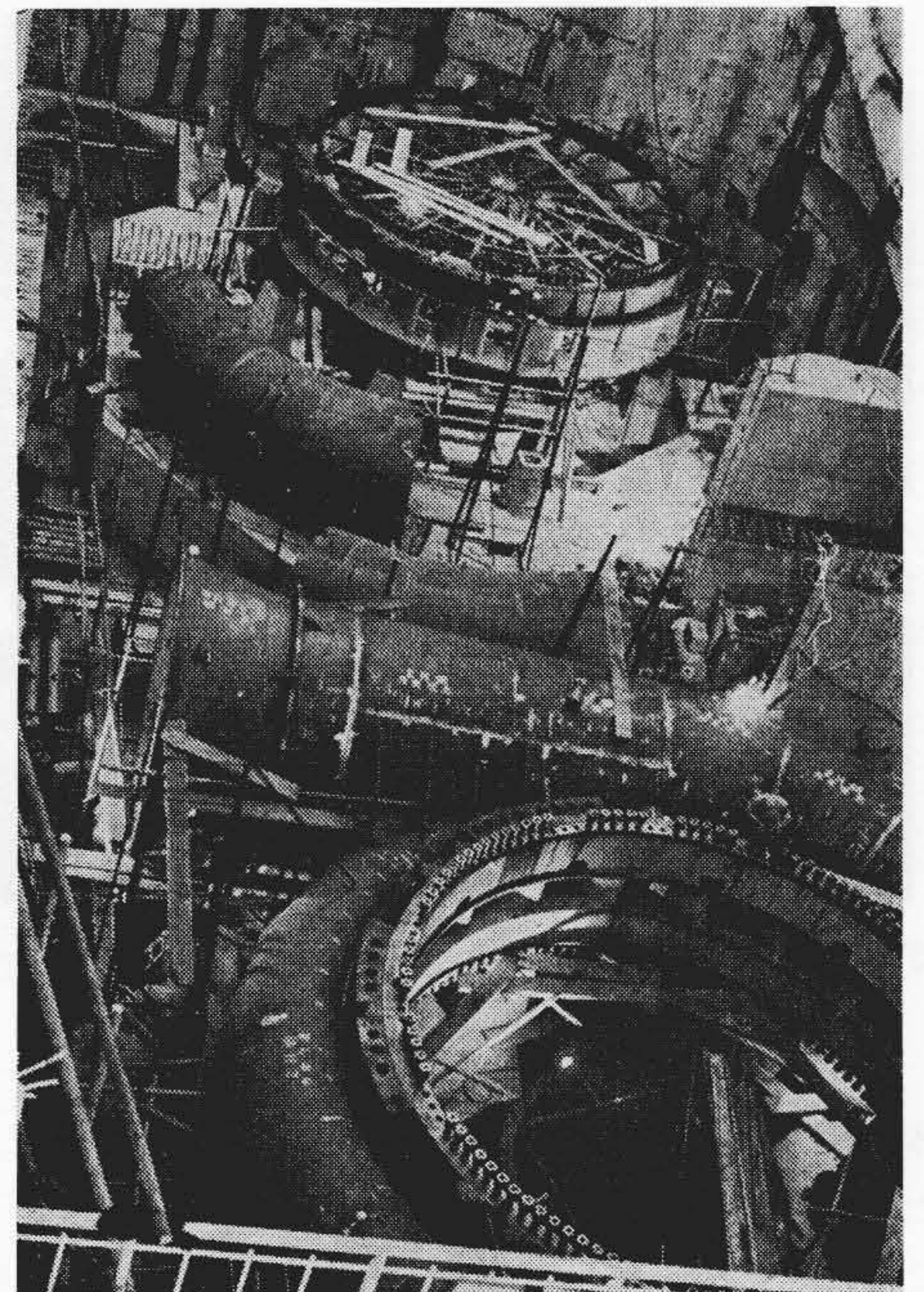
スパイラル・ケーシングは圧力容器であり、特に HT 鋼を使用したスパイラル・ケーシングでは厳重な非破壊検査と品質管理を行なっている。すなわちスピードリングに関してはスピードリング主板とステーベン溶接部の開先検査カラーチェック、磁粉探傷検査、気圧試験を行ない、特にスピードリング主板の溶接には放射線透過検査を実施している。ケーシング胴体の溶接線も全線カラーチェックのほか放射線透過検査を実施している。工場で水圧試験のできる場合は(たとえばフランジ形)は規定の水圧検査が実施されるが、現地溶接構造ケーシングでは現地溶接完了後、X線検査、カラーチェックなどが実施されている。

このほか日常検査として、材料検査、寸法検査、溶接施工試験、外観検査が並行して実施されているのは申すまでもない。

#### 3.1.4 現地溶接施工法

日立製作所ではすでに表1、図1に示したように1964年より HT 鋼製水車ケーシングの現地溶接を行なっているが、軟鋼製水車ケーシングの現地溶接はこれより早く、1960年、畑薙、大鳥発電所工事をはじめ今日まで多くの実績をあげている。さきに述べたように、現地溶接構造スパイラル・ケーシングに関しては現地溶接線の残留応力除去焼鈍を行なわないので、残留応力の影響が問題となる。

軟鋼および低合金鋼の焼鈍条件と残留応力についてはすでに調査されている<sup>(3)</sup>。一般の文献によれば残留応力は降伏点付近の値が存在するといわれているが、水車ケーシングの場合、軟鋼で15~20 kg/mm<sup>2</sup>、HT 60 鋼で20~35 kg/mm<sup>2</sup>程度の値と推定される。これらの値は特に HT 鋼溶接部の降伏点50~55 kg/mm<sup>2</sup>に比べ低い値となっているが、これは HT 鋼の場合 Ar 変態点付近における膨張、弾性回復による応力低下で説明されている<sup>(4)</sup>。また



(池原発電所納 第3号, 第4号)

図8 HT 60 鋼製水車ケーシングの現地据付状況

溶接線方向の残留応力に比較し、それと直角方向の残留応力は通常長手方向の1/2以下であることを考えるとフープ応力に対する残留応力はさらに低くなると考えられる。

残留応力が存在する場合まず問題となるのは脆性破壊との関連である。HT 鋼は軟鋼材に比べて切欠靱性(じんせい)は特にすぐれている。たとえば大形脆性破壊試験法の一つである切欠付広幅引張試験結果の一例を軟鋼と HT 鋼で比較して示すと図7のように求められている<sup>(5)</sup>。

この結果、HT 鋼では30°Cだけ軟鋼に比べ低温側に、脆性破壊の限界値が来ており破壊応力も高くなっている。

また、二重引張試験、ESSO 試験、Deep Notch Test の各試験結果でも脆性破壊発生温度は HT 60 鋼で-50°C以下であることが多く報告されており<sup>(6)~(10)</sup>、これらの点を考慮し20~30 kg/mm<sup>2</sup>の残留応力は水車ケーシングでは脆性破壊の発生、伝播の危険性はないと考えることができる。

水車ケーシングの現地溶接施工では以上の結果なども考慮し、初層および最終ビードを除き入念なピーニング施工による応力緩和を実施している。

現地溶接施工で今一つの大きな問題点は溶接変形である。特に今後ますます現地溶接構造化が進み、スピードリング合せ目も現地溶接構造になってきているので、変形許容値内に現地溶接を行なう技術が重要になってくる。このため水車カバー、ガイドベーン類を仮組立てする方法、スパイダを張る方法などを並用し、各寸法測定を行ないながら溶接順序を決めている方式を採用している。HT 鋼水車ケーシングは軟鋼に比べ、剛性が強く、予熱操作を併用するのでケーシングの変形量は軟鋼製ケーシングに比較し20%程度大きいのが普通である。

現地溶接施工順序の一例を示すと次のとおりである。

- スピードリング合せ目の溶接(シール溶接を含む)
- ↓
- スパイラル・ケーシング組立
- ↓
- スパイラル・ケーシング円周および長手継手部の溶接
- ↓
- スパイラル・ケーシングとスピードリングの溶接
- ↓
- スパイラル・ケーシング入口部の溶接



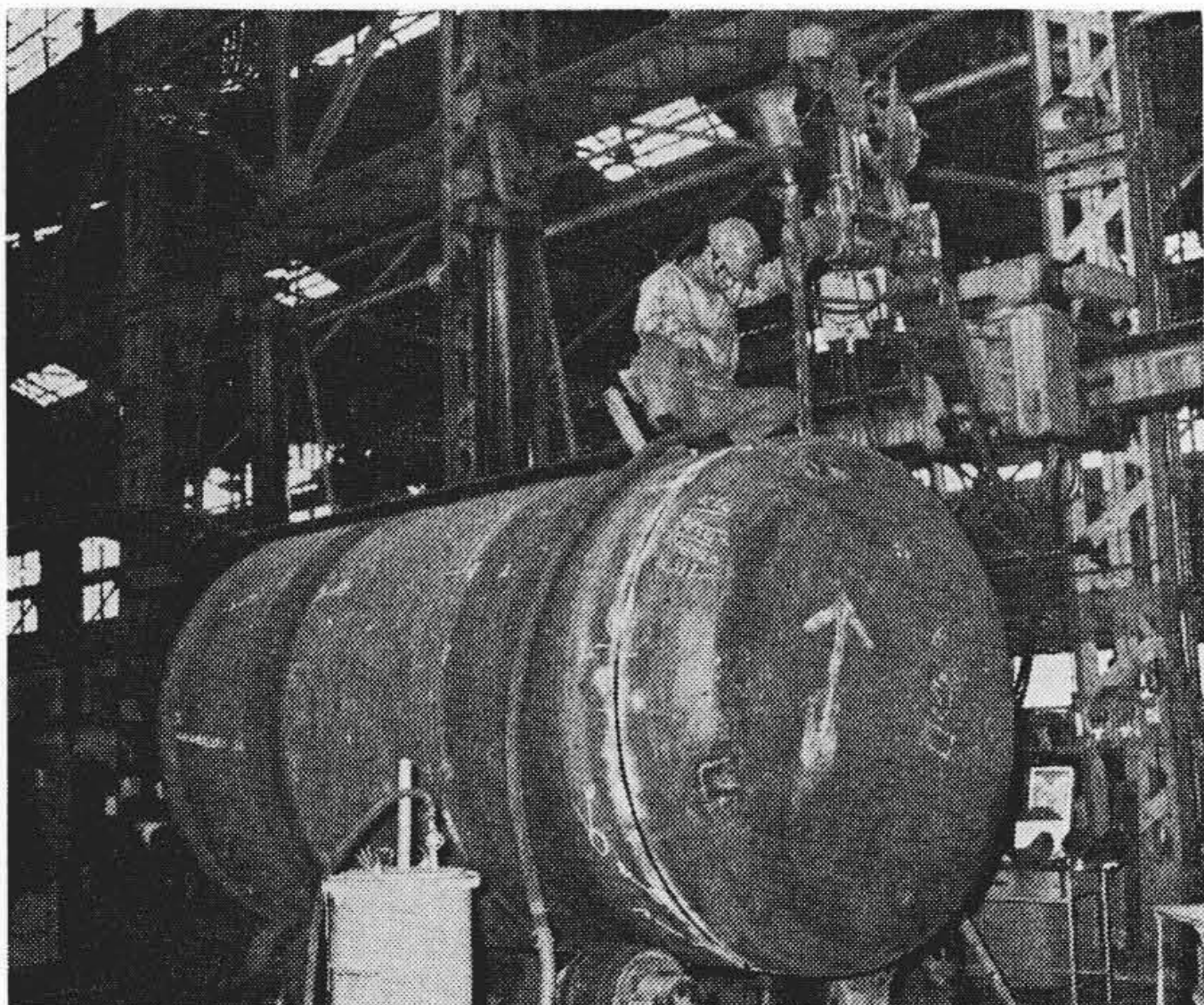


図10 HT60鋼製圧油槽の胴体サブマージアーク溶接状況

図8に現地溶接据付工事の一例を示す。

### 3.2 HT 製圧油槽の製作法

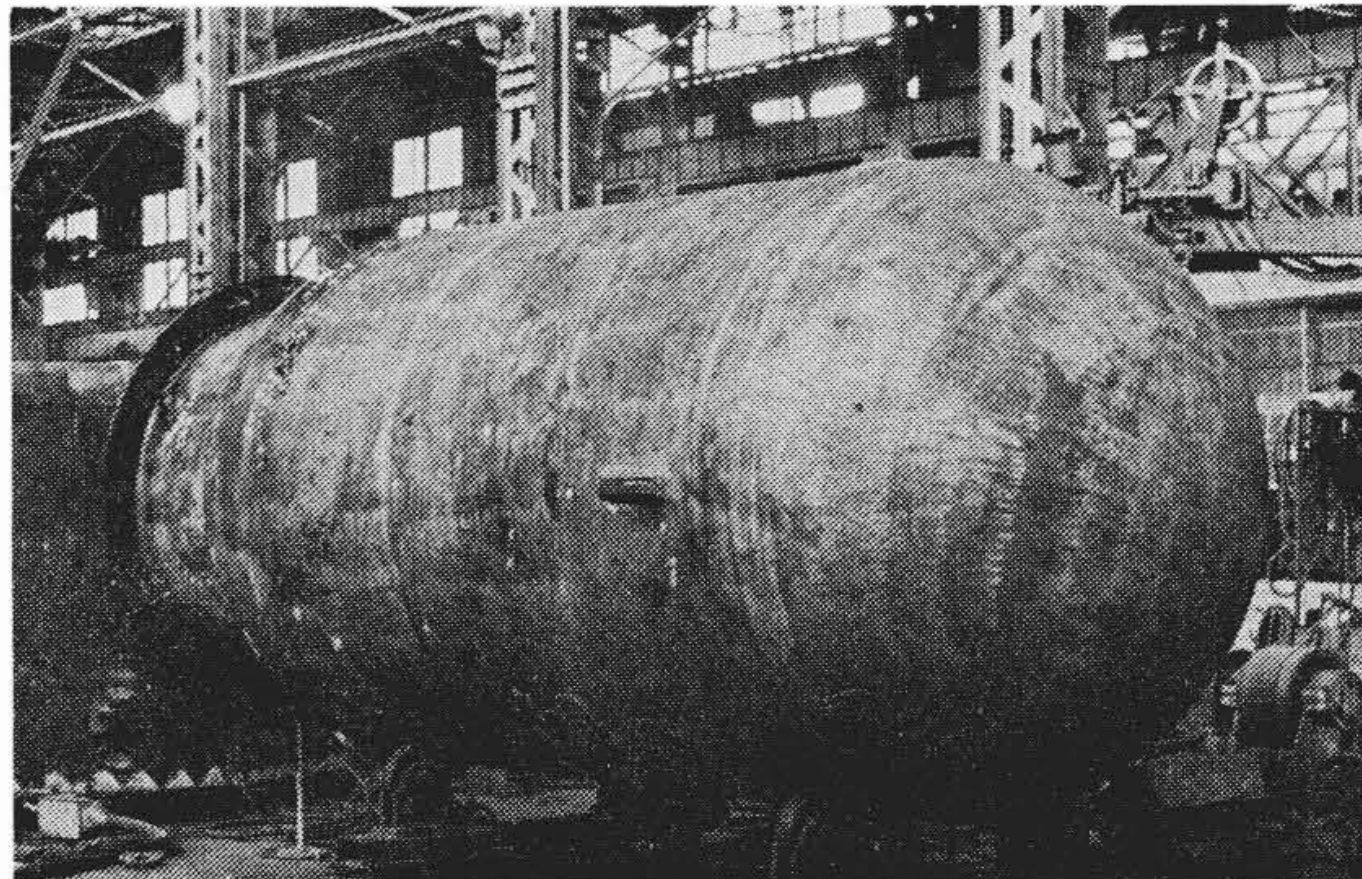
日立製作所においては以前より圧油槽を数多く製作してきたが、最近の大容量化、高圧力化に伴い大形圧油槽はHT60鋼を使用して製作されるようになってきた(表1参照)。特に電源開発株式会社長野発電所納圧油槽は鏡板に非調質HT60(Welten-60H)、胴体に調質HT60(Welten-60)を採用した全HT60油槽である。

これら圧油槽の溶接にはすべてサブマージアーク溶接法を適用し、表3の標準条件を用い施工した。図9に溶接施工条件を示す。圧油槽の溶接は板厚がすべて40mm以上であるため溶接部の割れ防止に重点をおいて予熱を十分行なうこと、厚肉の円周多層盛サブマージアーク溶接部の内部欠陥を皆無にするため、裏ハツリ形状を良好にし、裏ハツリ部の磁粉探傷検査を実施してから裏側の溶接を実施する必要がある。圧油槽の全溶接線について放射線透過検査、規定の応力除去焼鈍、水圧試験が施行されている。製作作業、溶接作業の要領はほぼ水車ケーシングの製作と同様である。図10は圧油槽胴板溶接中の状況を、図11は完成したHT60鋼製圧油槽の外観写真を示したものである。

## 4. 結 言

以上調質HT60~HT70鋼および非調質HT60鋼を使用して製作された水力機器(主として水車ケーシングおよび圧油槽)の製作上の概略について紹介した。これらの結果を要約すると次のとおりである。

- (1) HT60~HT70鋼の溶接性加工性を検討した結果、提案された表3に示す標準条件で実際製作された水力機器は品質的に十分保証された機能を持っている。



(径1,800mm×全長4,600mm 45mm厚み)

図11 HT60鋼製圧油槽

- (2) HT60~HT70鋼を使用した水力機器は軟鋼製に対し5~10%の原価低減が可能である。
- (3) 水車ケーシングの工場製作作業および現地据付作業について工程における問題点を明らかにした。これらの結果、HT60~HT70鋼の下ごしらえ、製缶、溶接作業は軟鋼に比べ慎重な作業管理が必要であるが、現在十分安定した製作技術を持つことが実証された。
- (4) 水車ケーシングの製作、溶接構造の変遷から考えて、今後ますます溶接構造化が高度になってくるものと思う。
- (5) 水車ケーシングのうち特に現地溶接構造ケーシング、現地溶接線の残留応力について検討を加え、問題のないことをたしかめた。
- (6) 全HT60鋼製圧油槽製作の概要について報告した。

終わりにHT鋼の活用はさらに広範囲に進むものと考えられるので、われわれはこれらの研究をさらに進め製作技術の改善と相まって、性能、品質のよりすぐれた水力機器の製作に絶えざる努力を重ねている次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 妹島, 石原ほか: 日立評論 50, 397 (昭43-5)
- (2) 八幡製鉄株式会社: 高張力鋼デザインマニュアル圧力容器編 p.81
- (3) 大内田, 岩崎: 日立評論 41, 997 (昭34-8)
- (4) 佐藤, 松井: 溶接学会誌 66-9 第35巻第9号 p.780-789
- (5) 日本造船研究協会第39部会: “日本造船研究協会報告第27号” S.34/11
- (6) 八幡製鉄株式会社: 高張力鋼デザインマニュアル 共通編 p.82
- (7) 八幡製鉄株式会社: “溶接性高張力鋼 Welten-60”
- (8) 川崎製鉄株式会社: 川鉄の調質高張力鋼板リバエーズ
- (9) 木原, 池田: 溶接学会誌 第35巻第1号 p.40~48 (昭41-1月)
- (10) 木原, 池田: 造船協会論文集 第120号 p.267~280 (昭41-11月)