

大型発電用電縫ボイラ鋼管の品質特性

Properties of ERW Boiler Tube for Large-sized Generator

住 本 大 吾^{*(1)}
Daigo
SUMIMOTO

片 山 喜 一^{*(2)}
Kiiti KATAYAMA

岡 本 潤 一^{*(3)}
Jyunichi
OKAMOTO

高 宮 誠^{*(4)}
Makoto
TAKAMIYA

抄 録

電縫ボイラ鋼管は大型発電用ボイラに広く採用され高い評価を得ているが、更に採用の動きが多くなってきている。新日本製鐵では電縫ボイラ鋼管を1968年から製造を開始し、現在までに、炭素鋼・低合金鋼ボイラ鋼管を累計で約60万t製造してきており、広く国内外に送り出している。種々の製法上の開発を実施し、優れた品質特性を得てきたとともに、長期間実機の大型発電用ボイラで使用した経年変化調査でも耐食性を含めて良好な品質であることを実証した。

Abstract

The ERW (electro-resistance-welded) tube has been widely adopted for boilers for a larger-sized power generator and its resultant valuation is placed high, and further, there is an increasing demand for applying it to the boilers because of its superior quality. In 1968, Nippon Steel started manufacturing the ERW boiler tube, and the amount manufactured so far has reached about six hundred thousands ton, which have been shipped inside and outside the country. Various manufacturing methods for the ERW boiler tube have been developed, and it has been attained to obtain superior quality characteristics. The results of a long term investigation on the aged deterioration of material, which was practically applied to the boiler for a large-sized generator, have proved its good quality including the corrosion resistance.

1. 緒 言

現在、産業の発展、生活様式の多様化により、電力需要は増加傾向にあり、今後とも堅調な電力供給が必要となっている。これは国内のみならず世界的な視野でみても同様で、特に欧米以外の地域においても潜在需要は極めて大きい。一方、供給面においては、火力発電は原子力発電とともに将来にわたり重要な位置を占めることが予測されている。

これらの発電プラントにおける課題は省資源、省エネルギーの立場から、高効率、高経済性であり、火力発電プラントも、大容量化、高温高圧化、石炭焚き化、複合発電化、流動床焚き化等様々な検討がなされている。これらに伴いボイラも使用条件が過酷になり、より高品質で安価な材料が要求されてきている。

新日本製鐵では火力発電用ボイラの主要構成部品であるボイラチューブを高周波電気抵抗溶接(以下ERWと略す)により1968年から製造を開始した。当初、炭素鋼ボイラ用鋼管STB340級からスタートし、STB410級に拡大し、1976年には低合金ボイラ鋼管STBA22(1%Cr-0.5%Mo)級の開発に成功した。また、1980年には高強度炭素鋼ボイラ鋼管STB510Iも開発、製造を開始した。これ等の炭素鋼・低合金鋼ボイラERW鋼管は現在、累計で60万tに迫っており、市場にお

いて高い評価を得て、海外の事業用発電ボイラを始めとして、近年では国内の電力会社の発電ボイラにも広く使用されるようになった。

以下に新日本製鐵のERWボイラ鋼管の製法の特徴、品質特性及び長時間実機で使用した経年変化調査を報告する。

2. ERWボイラ鋼管の製造技術

ERWボイラ鋼管の製造工程と高品質なERWボイラ鋼管を製造する上で重要な技術を図1に示す。各工程には多年の技術開発の蓄積による固有技術が装備されている。

2.1 高純度鋼製造技術

高純度鋼製造技術は近年、大幅に進歩し、その波及効果は著しく大きい。鋼中の不純物として存在するP、S、O等は大幅に低減されるとともに成分的中率も向上した。P、S、Oは、偏析、介在物等で鋼中に存在し、強度、加工性、溶接性、靱性、耐食性等の特性を大幅に劣化させる。これらを低減させる技術を長年にわたって開発してきた結果、製造工程上では、上底吹転炉(LD-OB : LD Oxygen Bottom Blowing)の主精錬工程の前で予備精錬(ORP : Optimum Refining Process)で脱硫を、更に二次精錬(KIP : Kimitsu injection Process, RH : Rheinstahl Huttenwerke & Heraus)で脱硫及び脱酸を行

*(1) 技術開発本部 君津技術研究部 主任研究員

*(2) 君津製鐵所 鋼管部 部長代理

*(3) 君津製鐵所 鋼管部 掛長

*(4) 君津製鐵所 鋼管部 部長

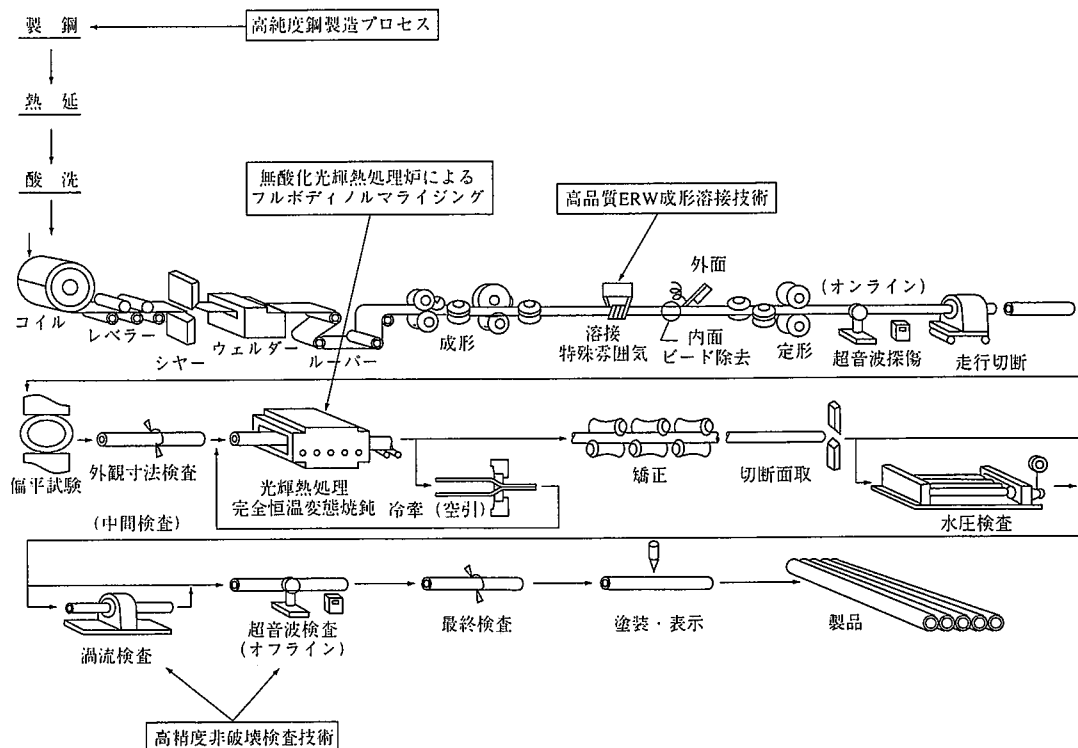


図 1 ERWボイラ鋼管の製造工程

い高純度化を実現している。

2.2 高品質ERW成形溶接技術

ERWボイラ鋼管の造管工程の中で重要な技術は成形技術と溶接技術である。成形技術では高精度成形を目指し、各スタンドの成形配分、孔型形状を最適化するとともに、CRE(Cross Roll Edge Forming)成形技術²⁾を開発し、安定成形を達成している。その結果、図2に示すようにシームレスの冷間仕上材(SML COLD)と比べても優れた厚さ精度が得られている。

ERWボイラ鋼管は、基本的な品質が溶接によって決定されるため

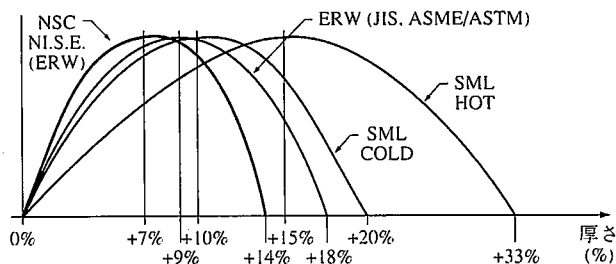


図 2 厚さ精度

に特に種々の溶接技術を開発している。代表的なものの第一は自動溶接制御システムである。ERW溶接時の温度を最適値に制御するために、溶接入熱を肉厚、溶接速度を連続的に測定した結果を基に制御補正している。この結果、温度の変動範囲が激減し、品質の安定化に寄与している。

第二は合金鋼の溶接に適用されるシール溶接技術である。Cr含有鋼のERW溶接を大気中で行うとCrはFeより O_2 と結合しやすく、容易に高融点のCr酸化物を生成し、ERW銜合部に残存して溶接欠陥を

形成する場合がある。これを回避する手段の一つがシール溶接技術である。不活性ガス雰囲気中で O_2 濃度を低下させ、Cr酸化物の発生を抑制する。図3にシール装置を示した。不活性ガスとして N_2 , Ar, He等を用い溶接雰囲気中の O_2 分圧を約30ppmまで低下させることにより健全なERW溶接部が得られる。

2.3 無酸化光輝熱処理によるフルボディノルマライジング

一般にERW溶接においては溶接時の加熱・冷却により、ERW溶接部は母材部と組織的に異なり硬化している。そこで全管体を無酸化光輝熱処理炉にてノルマライジング(焼準)し、管表面の肌を維持しながら、組織的な均質化を図っている。写真1にERW溶接部の金属組織、図4にERW溶接部の硬さ分布を示す。ノルマライジングすることにより、ERW溶接部は母材部と同じフェライト・パーライト組織になり、十分な均質化が図られる。

2.4 高精度非破壊検査(NDI)技術

前述のような素材製造技術、ERW成形溶接技術により安定した高品質なERWボイラ鋼管が製造されることはいうまでもないが、品質

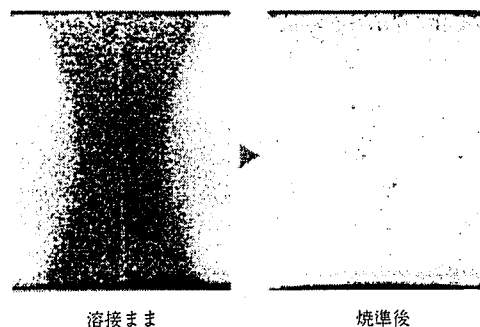


写真 1 金属組織(STB310)

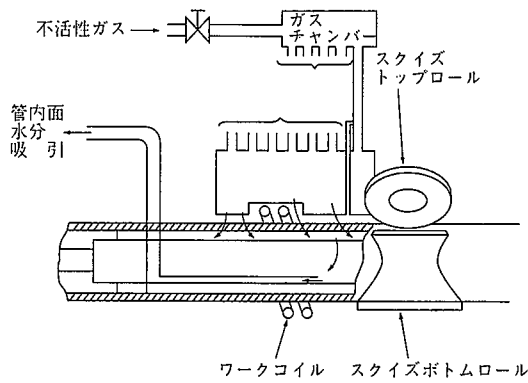


図3 不活性ガスシール装置

保証という面から必要十分なNDIが重要である。表1にNDI装置の概要を示す。ERWボイラ鋼管はこれらすべてのNDIを行う。オンラインでは、斜角及び表面波UST(超音波探傷)により溶接部とその周辺、及び管の外表面の欠陥を検査し、オフラインでは、斜角USTによる管全体の欠陥検査を行うとともに、ECT(渦流探傷)による表面疵の検査を行っている。これらのNDIは自動探傷装置であり、感度調整、探傷、欠陥検出時の警報・マーキング、検査結果の記録等が自動的に行われる。

3. ERWボイラ鋼管の品質特性

ERWボイラ鋼管の品質特性を、炭素鋼鋼管JIS G 3461 STB410及び合金鋼鋼管JIS G 3462 STB22(1%Cr-0.5%Mo)を代表例として述べる。

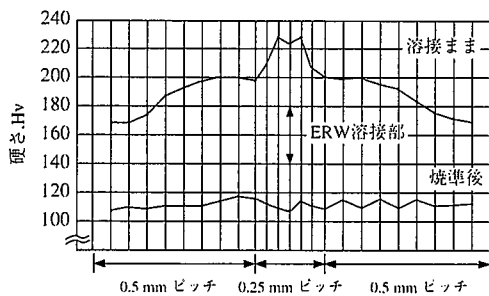


図4 ERW溶接部の断面硬さ分布(STB310)

表1 非破壊検査装置の概要

設備名	探触子×台数	探傷範囲	設備仕様
超音波探傷機	造管ライン 斜角UST	6×1	溶接部全長
	造管ライン 表面波UST	2×1	外表面全長
	検査ライン 斜角UST	10×1	全断面全長
貫通型渦流探傷機	検査ライン	1台	全断面全長

3.1 高温特性

ボイラ鋼管に要求される最も重要な特性の一つは高温特性である。図5、6にSTB410、STB22の母材部の高温引張試験結果を示す。試験片は管の長手方向に切り出し、弧状で行ったが、ERW溶接部を含むものと含まないものと比較した。結果は降伏点、引張強さとも“発電用火力設備に関する技術基準”(通産省)(以下、火力発電基準と略す)を満足しているのはもちろんであるが、全般的に良好な特性を持っている。また、ERW溶接部を含むものと含まないものと比較も行ったが、差は無くERW溶接部も十分な強度を有している。

図7、8にクリープ破断特性を示す。10万時間破断応力は火力発電基準許容応力を満足するとともに、シームレス鋼管と比較しても同等以上の特性を有している。また、ERW溶接部を含んだ管としての特性を調査するために、図9に示すように、管に内圧を負荷した内圧クリープ試験で評価している。ほとんどが母材部破断で、ERW溶接部も含め、十分な特性を有している。

3.2 加工性

ボイラ製造する際には、ボイラ鋼管は各種の加工が行われる。一般的な評価方法としては、従来から、へん平、押上げ、縦圧、つば出し試験等がある。これらの試験は管状で行うため、ERW鋼管の場合はERW溶接部の健全性も合わせて評価できるわけで、一定水準の加工で割れが発生しないことが必要条件である。写真2はこれらの内の代表的なものの試験結果を示したもので、いずれも良好な加工性を備えていることが分かる。特に、へん平試験後実施した密着へん平試験でもERW溶接部を含めて亀裂の発生はない。

写真3に曲げ試験の結果を示す。ERW溶接部が曲げ外側になるように配置して、冷間、熱間、密着曲げ加工試験を行った。いずれも

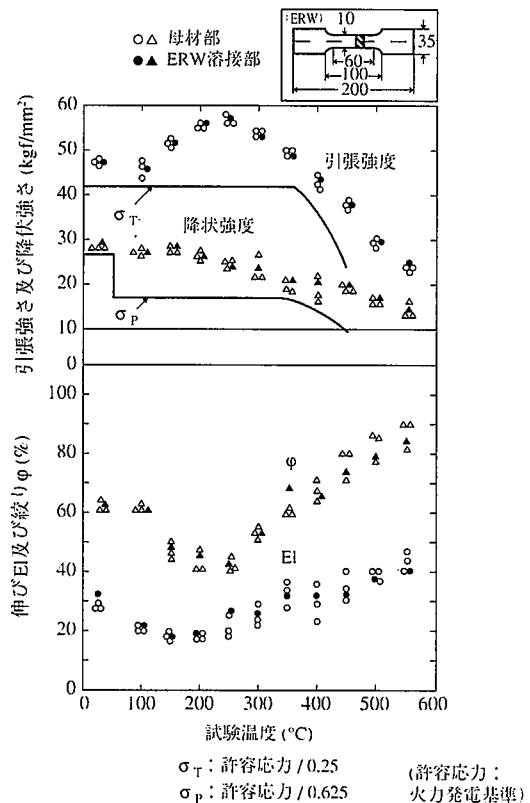


図5 高温引張特性(STB42W)

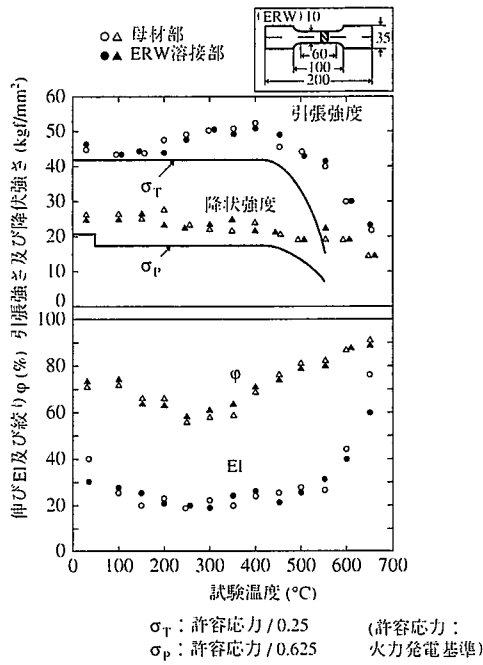


図6 高温引張特性(STBA22)

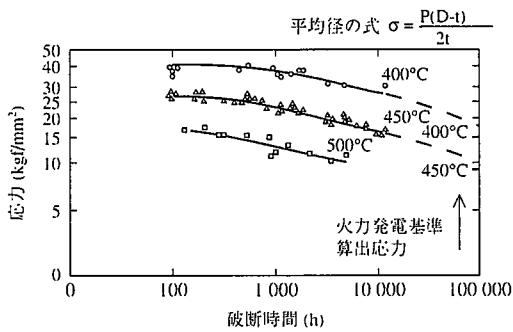


図7 クリープ破断強度(STB410)

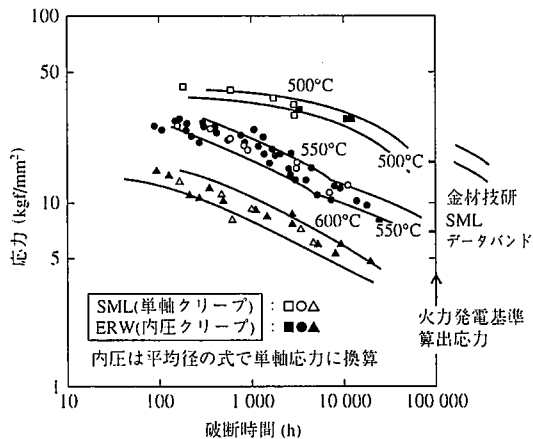


図8 クリープ破断強度(STBA22)

ERW溶接部を含めて割れ等は発生せず、また、外径厚さの変動、組織、硬さの変化も少なく、優れた加工性を示している。

3.3 継手溶接性

STB410の継手引張及び曲げの試験結果を写真4、5に示す。継

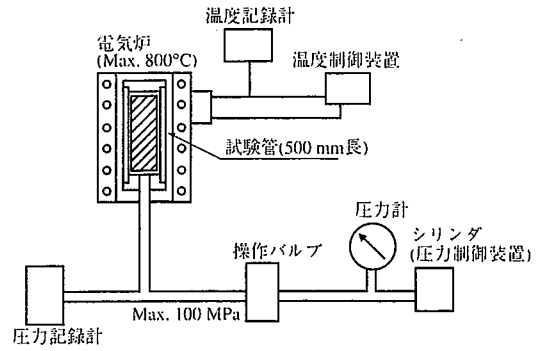


図9 内圧クリープ試験装置

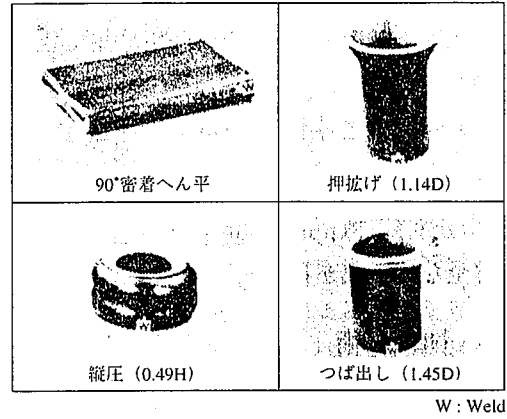
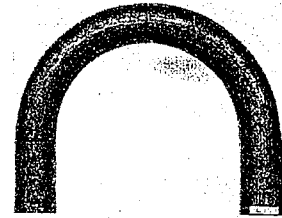


写真2 加工特性(STBA22)



(a) 冷間曲げ(2.5D)



(b) 熱間曲げ(1.5D)



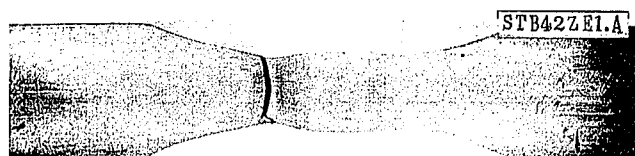
(c) 密着曲げ

写真3 曲げ加工試験(STB410)

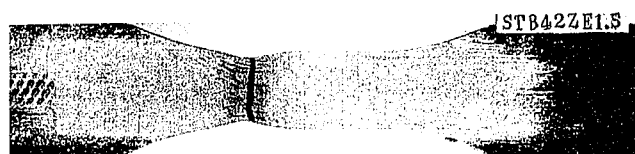
手の溶接方法は、全姿勢で初層がTIG溶接及び二層以降が被覆アーク溶接であり、TIG溶接にはTGS-50(φ2.4)及び被覆アーク溶接にはLB-26(φ2.6)の溶材を用い予熱無しで行った。また、溶接後の応力除去焼きなまし(PWHT)の条件は625±25°C×1/2h、ACであるが、溶接まま材についても試験した。引張試験では片側にERW溶接部を含めた切出し試験片で行ったが、破断部は溶接まま材及びPWHT材ともに母材側であり、且つ、ERW溶接部を含まない側であった。引張強度は溶接まま材が519N/mm²、PWHT材が500N/mm²と素管(470N/

mm²)より大きな値であった。また、曲げ試験ではいずれも割れの発生もなく良好であった。

写真6に継手溶接部のマクロ組織を示す。継手左側がERW部である。ボンド近傍HAZの組織は母材側がフェライト・パーライト組織であるのに対し、溶接まま材及びPWHT材ともに、針状フェライト及びパーライトからなる急冷組織であるが、特に異常は認められず良好な組織となっている。また、ERW溶接部と非ERW溶接部との間に差はない。

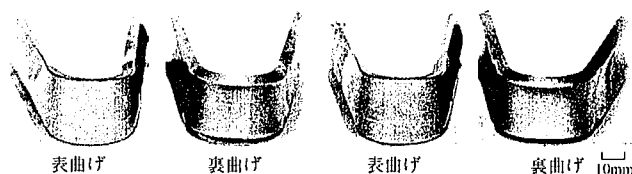


(a) 溶接のまま材



(b) PWHT材

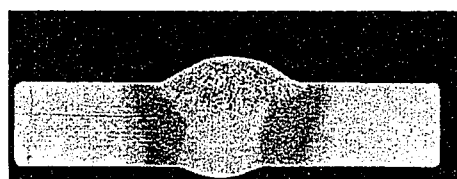
写真4 溶接継引張試験(STB410)



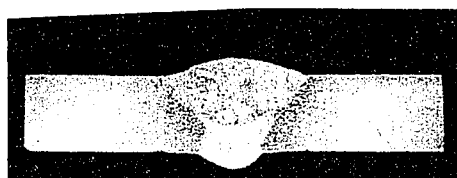
(a) 溶接のまま材

(b) PWHT材

写真5 溶接継手引張試験(STB410)



(a) 溶接のまま材



(b) PWHT材

写真6 溶接継手部の断面マクロ組織(STB410)

3.4 耐食性

ERW溶接部の選択的腐食である溝食について調査した結果を図10に示す。炭素鋼管の溝食試験を表2の条件で実施した。鋼中含有

S量を変化させるとともに、溶接後熱処理有無の影響について調査した。ERWの溝食量はS含有量が減るにつれて小さくなるが、溶接後の熱処理(焼準)ありの場合の方が溝食量ははるかに小さい。比較として、実環境(水道)では溝食が生じないとされている鍛接管の結果も示しているが、ERWでS含有量を低減し、溶接後熱処理を施すことで、鍛接管並の耐溝食性が得られる。溝食の原因³⁾は、鋼中に存在するMnSが、ERW溶接後の冷却により、その周囲にS濃化部を発生し、この相がMnS及びS濃化のない地鉄に対しアノード溶解するためであり、これを防止するためには、上記の試験結果のようにS低減と熱処理が有効である。

写真7、8は実際のボイラーで3年間使用したものを、更に、塩酸腐食試験、水蒸気酸化試験を実施した結果を示したが、いずれの場合も、3年間使用であるにもかかわらず、腐食試験後でも全く溝食は生じておらず、健全な状態を維持している。

3.4 実ボイラーでの経年変化調査

実機大型発電用ボイラーで使用中のERWボイラー鋼管を定期的に抜管し、経年変化の状態を調査している⁴⁾¹⁰⁾が、今回、その内2例について報告する。

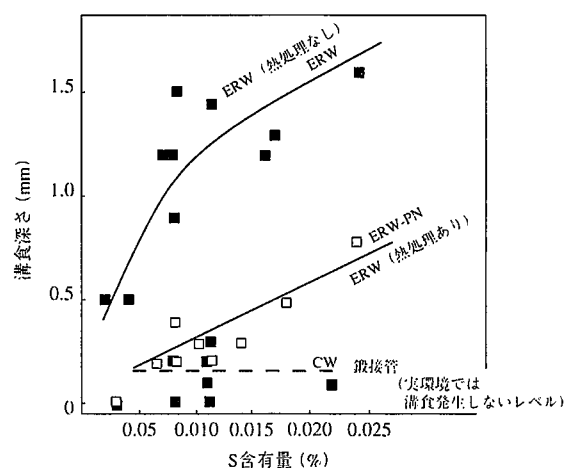


図10 溝食量と鋼中S含有量の関係(浸漬期間3か月、3%NaCl)
(名古屋技術研究部)

表2 腐食試験条件(名古屋技術研究部)

サイズ	40×50mm×t
表面状態	#150研磨, 内面のみ腐食, 外面・周囲は被覆
溶液	NaCl 3.0wt%
温度	40℃
ガス	空気常時吹込み(過飽和状態)
流速	0.3m/分
浸漬期間	3か月

3.4.1 調査対象ボイラーと調査管

表3にボイラーの主仕様と調査管の履歴を示す。STB410は戸畑共同火力4号缶(375MW)の火炉蒸発管での約14年間の使用実績、STBA22は君津共同火力4号缶(350MW)の低温加熱器管での約13年間の使用実績である。両ボイラーの構造はほぼ同じであり、採取位置とともに構造を図11に示した。

<試験条件>

- ・湿度 25℃
- ・時間 168h
- ・HCl 20% (重量%)
- ・試片 1000ml中に2試片
- ・実ボイラで3年使用
- STB410

W: ERW溶接部 2mm



写真7 塩酸腐食試験(STB410: 実ボイラで3年使用后)

<試験条件>

- ・温度 600℃
- ・時間 500h
- ・試片 実ボイラで3年使用
- STB410

W: ERW溶接部 2mm



写真8 水蒸気酸化試験(STB410: 実ボイラで3年使用后)

3.4.2 表面状況

写真9, 10に採取したままの管内外面とそれを酸洗してスケールを除去した表面肌を示す。STB410火炉蒸発管では、炉内側の管外面は白灰色及び黒褐色の付着物で覆われており、酸洗後は若干の肌荒れはあるものの比較的健全な状態を維持している。一方、管内面は一様に黒色の薄被膜に覆われており、酸洗後の地肌は管製造時の滑らかさをそのまま残している。外内面とも局部的な腐食、ERW溶接部の溝食等は認められない。

STBA22低温過熱器管もほぼ同様の状態で、管外面炉内側は黒褐色及び茶褐色を呈しており、一部は白色の付着物で覆われている。管内面では黒色の薄被膜が存在する。酸洗後は、外面に若干肌荒れが認められるものの、内面は非常に滑らかであり、外内面ともERW溶接部の溝食等の局部的腐食は認められない。

3.4.3 スケール・付着物厚さ及び減肉量

写真11は管断面の外内表面のスケール・付着物の状態であるが、管外面炉内側はスケールはほぼ Fe_2O_3 で、その上に堆積している付着物層からは燃焼ガスからと思われるV, S, Na, K等が検出されている。管内面では大部分が Fe_3O_4 であった。

図12, 13にスケール・付着物量を示すが、基本的には増加傾向に

表3 ボイラの主仕様と調査管

	項 目	戸畑共同火力 4号缶	君津共同火力 4号缶
ボ イ ラ	発電内容 (MW)	375	350
	最大蒸発量 (t/h)	1180	1130
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	197	197
	蒸気温度 (℃)	569	569
	燃料	高炉ガス コークス炉ガス 重油混焼	
調 査 管	規格	JISG3461 STB410	JISG3462 STBA22
	呼称寸法 (mm)	φ45×t5.0	φ54×t5.5
	抜管位置	火炉蒸発管	低温過熱器管
	使用条件		
	圧力(kg/cm ²)	188	197
	温度(℃)	400	460
	使用開始時期	1977年5月	1975年12月
管	抜管調査回数	4	5
	最終抜管時の 延べ運転時期(h)	107936 (約14年)	104591 (約13年)

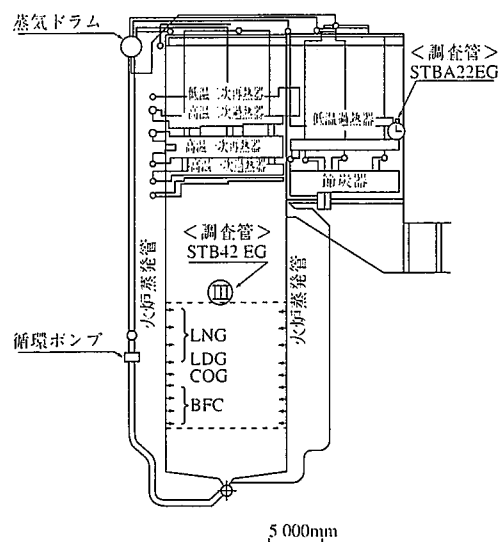


図11 ボイラの構造と調査管採取位置

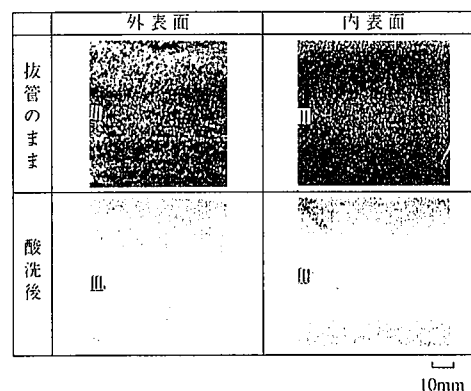


写真9 火炉蒸発管STB410の炉内側の外観(14年使用后)

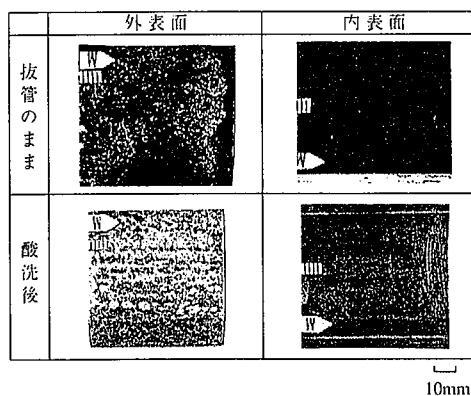


写真10 低温加熱器STBA22の外観(13年使用后)

なっている(但し、定期的に、スケール・付着物除去は実施している)。しかし、図14, 15に減肉量を示すが、減肉量でみると、極くわずかであり、数μm/年程度である。

3.4.4 金属組織

写真12に光学顕微鏡による金属組織を示す。ERW溶接部も含め未使用管と同じフェライト・パーライト組織であり、変化は認められない。

写真13に透過型電子顕微鏡によるフェライト粒内の転位の透過像である。転位の移動凝集は認められず、変化は認められない。

3.4.5 高温引張特性

図16、17に管軸方向の高温引張試験結果を示す。試験片の中央部にERW溶接部を含む溶接部試験片と母材部試験片とで比較したが、いずれも未使用管との間には強さ、伸びとも差は認められない。

3.4.6 クリープ破断特性

図18～19にクリープ破断試験結果を示す。管軸方向、円周方向のERW溶接部及び母材部について実施し、新材との比較を行った結果、試験片によらず、同レベルで経年変化は認められない。実際に使用されている常用圧力から管にかかる応力を計算すると7～8 kg/mm²であり、使用温度での引張強さの15～20%程度であり、実質的な寿命の消耗は極めて小さいと考えられる。

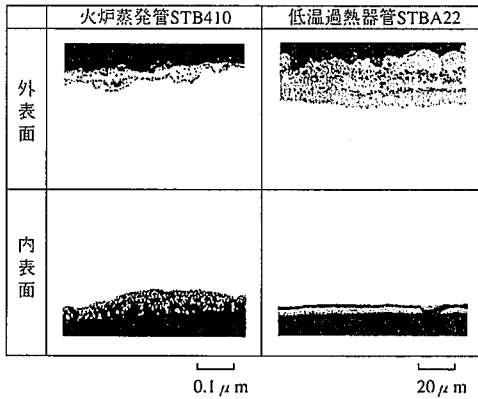


写真11 管断面での表面のスケール・付着物の状態(炉内側)

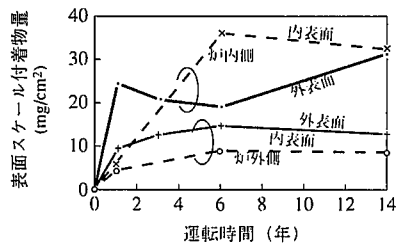


図12 スケール付着物量の変化(火炉、蒸発管)

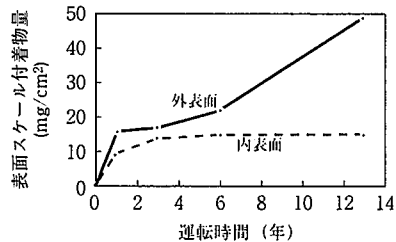


図13 スケール付着物量の変化(低温二次過熱器管)

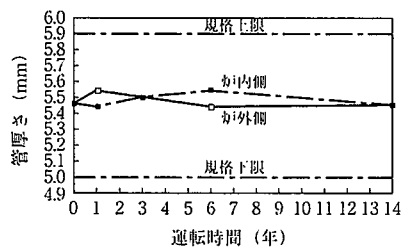


図14 管厚さの変化(火炉、蒸発管)

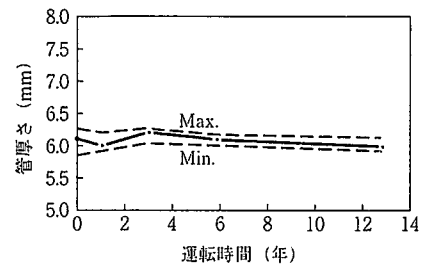


図15 管厚さの変化(低温二次過熱器管)

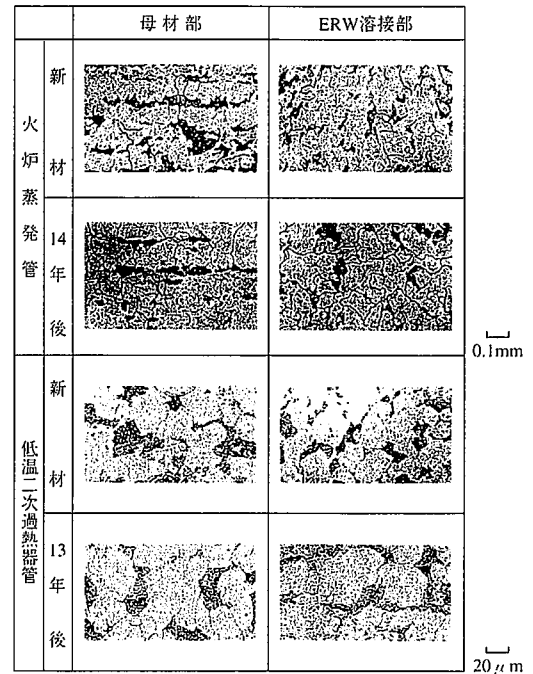


写真12 金属組織

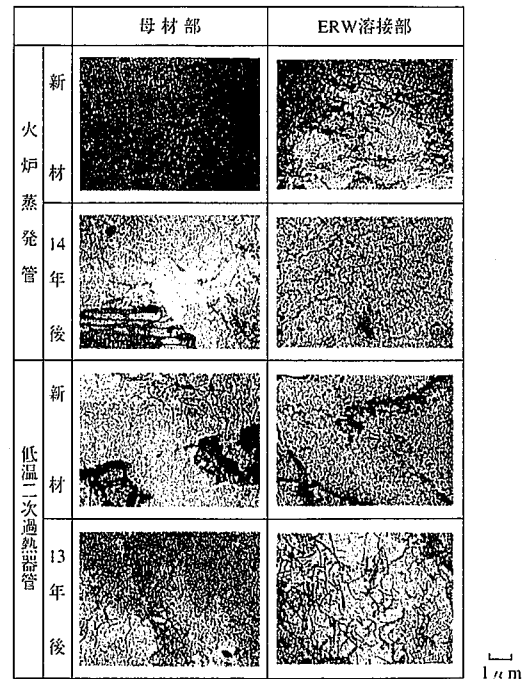


写真13 透過型電子顕微鏡組織

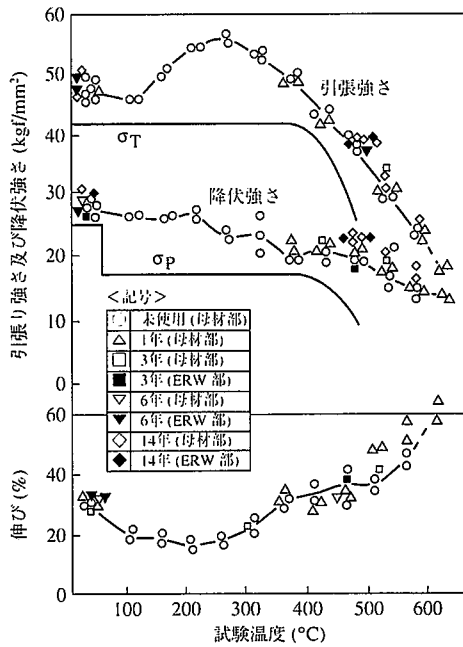


図 16 高温引張特性(火炉蒸発管; STB410)

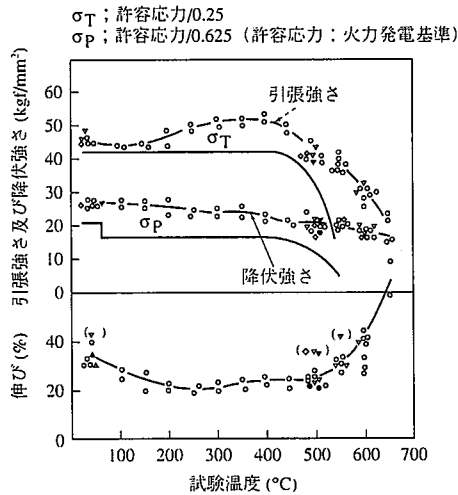
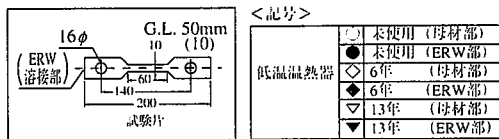


図 17 高温引張特性(低温二次過熱器管; STBA22)

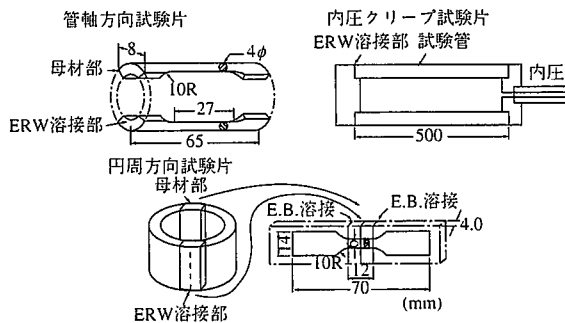


図 18 クリープ破断試験片

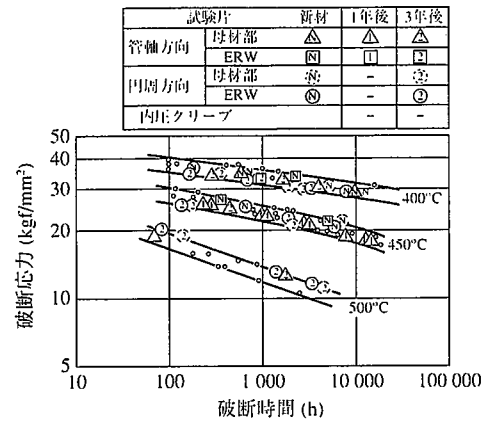


図 19 クリープ破断強度(火炉発管; STB410)

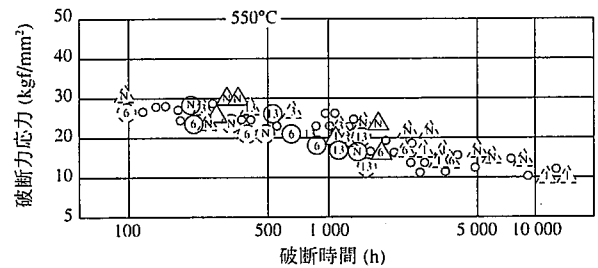


図 20 クリープ破断試験片(低温過熱器管; STBA22)

5. 結 言

大型発電用ボイラに使用されるERWボイラ鋼管の製造法の特徴と品質特性について記述した。加工性、高温特性、耐食性ともERW溶接部を含め良好な特性を有している。実用ボイラによる経年変化の評価でも、耐食性を含めて良好な品質が実証されている。

電縫管製造技術の進歩に伴い、これまでシームレス鋼管分野とされてきた大型発電用ボイラにもERW鋼管が大量に使用されるようになったが、その厳しい要求特性を十分に満たすものであることを以上の結果が立証している。この製造技術は、多年にわたって蓄積された開発技術とそれを裏付ける使用実績により、築き上げられたものである。

その間、社内外の関係各位から多大の御協力を頂いたことを感謝する。

参考文献

- 1) 木村 ほか: 製鉄研究. (315), 80 (1984)
- 2) 羽田 ほか: 新日鉄技報. (362), 31 (1997)
- 3) 加藤, 乙黒, 門: 防食技術. 25, 223 (1976)
- 4) 城野, 仕幸, 能方: 火力原子力発電. 27 (5), 25 (1976)
- 5) 奈良岡, 草刈, 福田, 能方: 火力原子力発電. 27 (8), 31 (1976)
- 6) 野上, 新谷, 吉沢, 住本: 火力原子力発電. 34 (4), 67 (1982)
- 7) 加納, 吉沢, 住本: 火力原子力発電. 35 (6), 49 (1984)
- 8) 住本, 増山, 山本: 火力原子力発電. 43 (5), 69 (1992)
- 9) 住本, 黒田: 火力原子力発電. 47 (6), 67 (1996)
- 10) 木村, 住本: 圧力技術. 24 (5), 47 (1985)