

ボイラ用精密鋳鋼製分岐管の開発

Development of Investment Casting Bifurcate Tubes for Boiler

技術本部 古河洋文^{*1}

神戸造船所 古賀勝弘^{*2} 萩原鹿男^{*3}

渡邊 潔^{*4} 粥川愛仁^{*5}

ボイラの耐圧部に使用される分岐管は、従来塑性加工法とグラインダあるいは放電加工法の組合せで製造されている。しかし最近の高温・高圧用ボイラでは、厚肉でかつ高寸法精度の分岐管が必要になり、その製造に多大の工数を要している。そこで複雑形状部品をネットシェイプで製作する精密鋳造法に着目し、熱間静水圧加工法との組合せで、高品質な分岐管を低コストで量産する技術を開発した。本精密鋳鋼製分岐管は、従来品に比較して材料性能面で遜色なく、寸法精度面では格段に優れている。約20 000 hの実ボイラ耐久試験でも何ら問題ないことを検証し、一部で実用を開始した。

The bifurcate tubes used as pressure parts in boilers are usually made by plastic deformation, and grinder, or electric discharge, machining. Recently high temperature, high pressure boilers, however, need bifurcate tubes which have more accurate dimensions and thickness which requires many man-hours to achieve. We have established a new technology employing hot isostatic pressing and precision casting which allows the manufacture of complicated parts with net shape. This new technology enables the manufacture of high quality bifurcate tubes at low cost. The high quality bifurcate tubes made by this new method are by no means inferior to conventional ones in material performance, and are far superior in accuracy of dimensions. Their durability in actual boiler tests of over 20 000 hours was verified, and they are now partly coming into practical use.

1. ま え が き

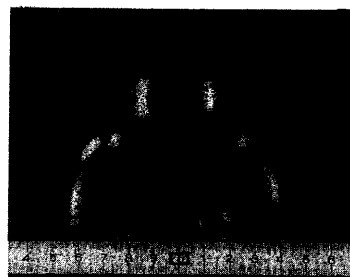
ボイラの耐圧部に使用される分岐管（バイファクトチューブあるいはYピース）は、継目無鋼管を液压成形し、その後につば出し加工、曲げ加工、外径面の金型成形加工及び内径面のグラインダあるいは放電加工による形状修正加工等の工程により製造されている。

しかし、最近の高温・高圧用ボイラ、特に超臨界圧ボイラ等では、厚肉でかつ高寸法精度の分岐管が必要になり、その製造に多大の工数、納期を要している。そこで複雑形状部品をネットシェイプで製作するロストワックス精密鋳造法に着目し、熱間静水圧加工法（HIP）との組合せで、高品質、高寸法精度の分岐管を低コストで製造する技術を開発し、耐熱・耐圧部品としての精密鋳鋼材の材料性能を把握した。

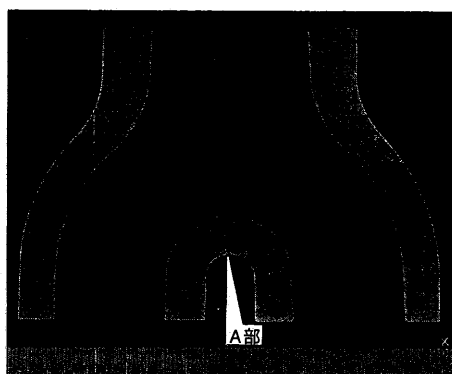
2. 分岐管の形状と材質

ボイラ用の分岐管は、使用温度、圧力等により種々の形状、肉厚、材質がある。精密鋳鋼製分岐管の外観形状及び断面形状の一例を図1に示す。

精密鋳鋼製分岐管の形状は、凝固解析と応力解析結果に基づいて、耐圧性能を満足する範囲で二また部を薄肉にして元管部を厚肉にすることにより、鋳造凝固時に指向性凝固させて引け巣欠陥の防止を図る肉厚分布にしている。“発電用火力設備の技術基準”において高温・高圧部に使用が認められている鋳造材の範囲で、これまでに表1に示す材料について精密鋳鋼製分岐管の製造技術を開発し、品質及び材料性能を把握したが、本報では炭素鋼鋳鋼であるSCPH 1製分岐管について述べる。SCPH 1の化学組成例は表2に示すとおりである。



(a) 外観



(b) 断面形状

図1 精密鋳鋼製分岐管の外観及び断面形状 精密鋳鋼製分岐管の外観形状と断面のマクロ組織を示す。

Appearance and section of bifurcate tube made by precision casting and hot isostatic pressing process

表1 開発した分岐管の精密鋳鋼材料
Materials of bifurcate tube made by precision casting

鋳造材料	相当するチューブ材料	概略組成
SCPH 1	STB 410	炭素鋼
SCPH 11	STBA 12	0.5 Mo 鋼
SCPH 21	STBA 23	1 ¼ Cr-½ Mo 鋼
SCPH 32	STBA 24	2 ¼ Cr-1 Mo 鋼

表2 STB 410, SCPH 1の組成の規格とSCPCH 1の分析値

Standard of chemical composition of STB 410 and SCPH 1, and practical composition of SCPH 1

	C	Si	Mn	P	S
STB 410の規格	≤0.32	≤0.35	0.30~0.80	≤0.035	≤0.035
SCPH 1の規格	≤0.22	≤0.60	≤0.70	≤0.040	≤0.040
SCPH 1の分析値	0.15	0.25	0.57	0.012	0.004

*1 高砂研究所製造技術開発センター主査

*2 原動機技術部主査

*3 原動機技術部ボイラ設計課

*4 プラント工作部開発グループ主務

*5 プラント工作部開発グループ

3. 精密鑄鋼製分岐管の製造プロセスと特徴

精密鑄鋼製分岐管の製造法は、図2に示すようにロストワックス精密鑄造後に更に熱間静水圧加圧法を適用して内外部共無欠陥な製品を保証する工法を採用した。熱間静水圧加圧とは、材料が塑性変形しやすい高温で、アルゴンガスを媒体として高压の静水圧を付与することにより、X線探傷では検出されないような微細な空孔が分岐管内部に存在していてもこれを圧着する工法である。図3(a)に示すような空孔を模擬した人工欠陥の存在する材料を、温度1423 K、圧力 1.22×10^2 MPa、処理時間3 hで熱間静水圧加圧した後の試験片の断面の状況を図3(b)に示す。これから、前

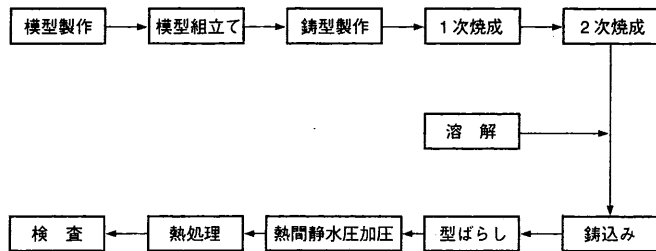
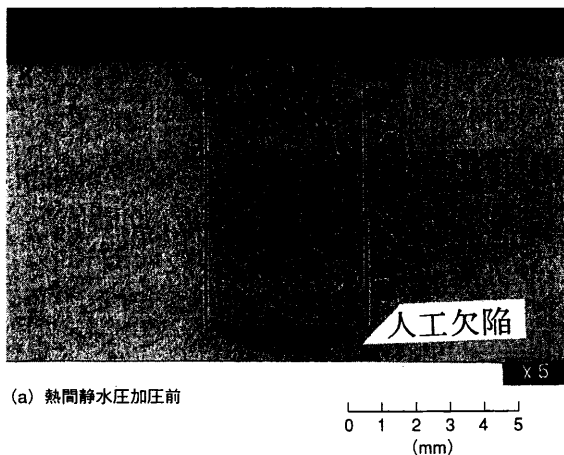
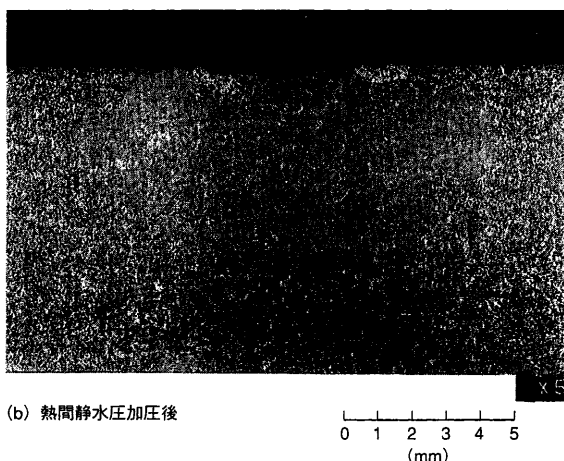


図2 精密鑄鋼製分岐管の製造プロセス ロストワックス精密鑄造と熱間静水圧加圧工法を組合せた精密鑄鋼製分岐管の製造プロセスの概要を示す。
Process of manufacturing of bifurcate tube made by precision casting and hot isostatic pressing



(a) 熱間静水圧加圧前



(b) 熱間静水圧加圧後

図3 人工欠陥試験片の熱間静水圧加圧処理前後の断面の状況 内部に存在する大きな人工欠陥も、熱間静水圧加圧処理によって完全に圧着、消滅する。
Section of test pieces before and after of hot isostatic pressing

記条件による熱間静水圧加圧にて、内部に存在する空孔を完全に圧着することが可能であることが分かる。精密鑄鋼製分岐管の主な製造条件は表3に示すとおりであり、焼ならし熱処理は分岐管の内外表面の酸化を防止する目的で真空熱処理を実施し、冷却は炉内での窒素ガス冷却を実施した。SCPH 1では、適正な化学組成と前記の熱処理により、強度と延性のバランスが確保されるので焼戻し熱処理は不要である。

従来工法による分岐管に対して、ロストワックス精密鑄造法と熱間静水圧加圧法を組合せたプロセスにより製作した分岐管の主な特徴は、以下のとおりである。

- (1) 三次元の複雑形状品の製造が容易である。
- (2) 高い寸法精度で、特に重要な内径、肉厚部のばらつきの少ない精密な製品が得られる。また製品表面が極めて滑らかである。
- (3) 量産が容易であり、工期の短縮が可能である。

表3 精密鑄鋼製分岐管の主な製造条件
Conditions for manufacturing of bifurcate tubes

工 程	施 工 条 件
鑄型2次焼成温度	1273 K
鑄造温度	1853 K
熱間静水圧加圧条件	温度：1423 K 圧力： 1.22×10^2 MPa 時間：3 h
熱処理条件	1193 K-1 h (真空中) 窒素ガス冷却

4. 精密鑄鋼製分岐管の品質保証及び材料性能

4.1 品質検査方法

耐熱・耐圧部品である分岐管は、表面及び内部共無欠陥であることが要求される。表面品質については浸透探傷法で内外表面とも無欠陥を保証している。一方、分岐管の内部品質は、従来工法では素管(直管)を超音波探傷にて検査していたが、精密鑄造工法では、直接分岐管形状を製造するために超音波探傷が困難であり、それに代る検査としてX線探傷法を採用した。本形状の分岐管の場合、X線探傷法で検出可能な最小欠陥サイズは0.3 mmである。

精密鑄鋼製分岐管の寸法精度は、性能及び強度の観点から重要な内径及び肉厚は ± 0.3 mm以内で、それ以外の部分では ± 0.5 mm以内であり、従来品に比較しても良好な精度である。内径寸法精度の保証法として、例えば直径23.02 mmの鋼球が通過し、直径25.40 mmの鋼球が通過しないことを確認するボール通し検査が行われているが、ロストワックス精密鑄鋼製分岐管では、これより一けた良好な寸法精度を有している。

4.2 材料性能

内径14 mm、外径34 mm、長さ100 mmの直管を精密鑄鋼で製作し、表2に示した分岐管と同一の熱間静水圧加圧、熱処理を実施して、引張試験、常温衝撃試験、へん平試験、押し広げ試験、クリーブ破断試験、低サイクル疲労試験及び溶接性試験等を行った。また耐圧性能検査としての検定水圧試験は、実形状の分岐管にて実施した。

4.2.1 引張及び衝撃試験結果

常温及びSCPH 1材の使用温度に近い673 Kでの精密鑄鋼材の機械的性質をボイラ熱交換器用炭素鋼鋼管でSCPH 1の相当材であるSTB 410材と比較して図4に示す。強度及び延性共常温での

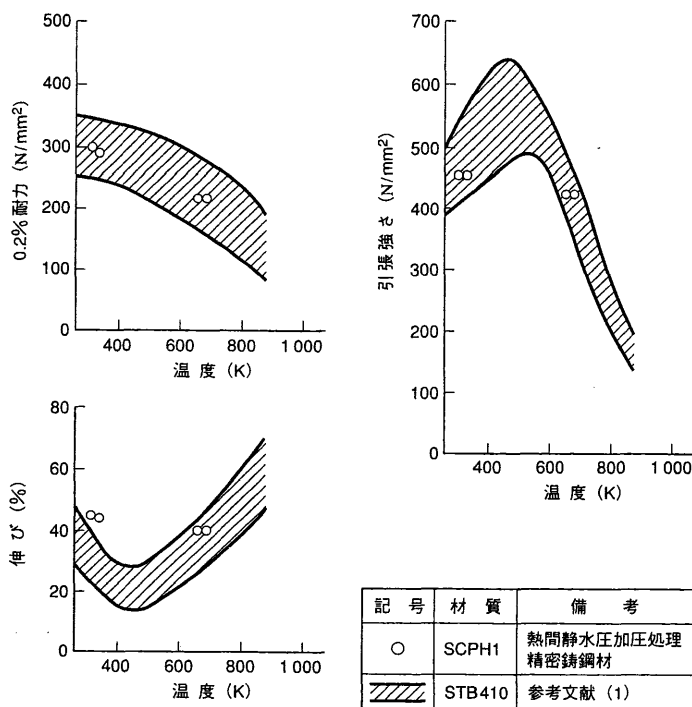


図4 常温及び高温での引張試験結果 熱間静水圧加圧を実施した精密鋳鋼材の常温及び高温 (673 K) の機械的性質は、従来材である STB 410 材と比較してもそんな色ない。
Mechanical properties of precision casting material at room temperature and at 673 K

規格を満足しており、常温及び高温共 STB 410 材並みの材料性能⁽¹⁾を有している。また、常温のシャルピー衝撃値は 157 J/cm²であり、十分な靱性も有している。

4.2.2 クリープ破断強度及び低サイクル疲労強度

高温用材料としてのクリープ破断強度を図5に示す。また精密鋳造と熱間静水圧加圧を組合せた材料のクリープ破断伸びは 45～65%，破断絞りは 85～90%であり、これから精密鋳造と熱間静水圧加圧処理の組合せ材は、STB 410 材⁽¹⁾と比較してクリープ破断強度の面でもそんな色ないことが分かる。

最近の商用発電用ボイラの運用は、デイリースタート・ストップが基本であるために、熱疲労強度すなわち低サイクル疲労強度が問題となる。SCPH 1 材の使用温度に近い 673 K での低サイクル疲労試験結果を図6に示す。SCPH 1 材の 673 K における低サイクル疲労強度は、ボイラ及び压力容器用炭素鋼鋼板で SCPH 1 の相当材である STB 410 材の常温でのデータ⁽²⁾とほぼ同程度の疲労強度である。同一ひずみ範囲では、温度の上昇につれて低サイクル疲労寿命は低下するが、本製造工法による SCPH 1 材は STB 410 材の常温での疲労寿命とほぼ同等であり、SCPH 1 材の試験温度が 673 Kであることを考慮すると、熱間静水圧加圧処理を施した精密鋳鋼材の低サイクル疲労強度は、従来材に比較して全くそんな色ないと考ええる。

4.2.3 精密鋳鋼材の鋼管としての適用性

ボイラ・熱交換器用鋼管は、へん平性能及び押し広げ性能の規定がある。したがって JIS G 3461 に基づいて精密鋳鋼材のへん平試験、押し広げ試験を実施した。所定のひずみ量を付与しても割れ、きずは発生せず、本工法による精密鋳鋼は鋼管としての適正を十分に有していることを把握した。また、SCPH 1 と STB 410 の溶接部（予熱温度は約 353 K で、初層は TIG 溶接、2 層以降は被覆アーク溶接、溶接後熱処理は 881 K・0.5 h 炉冷とした）のミク

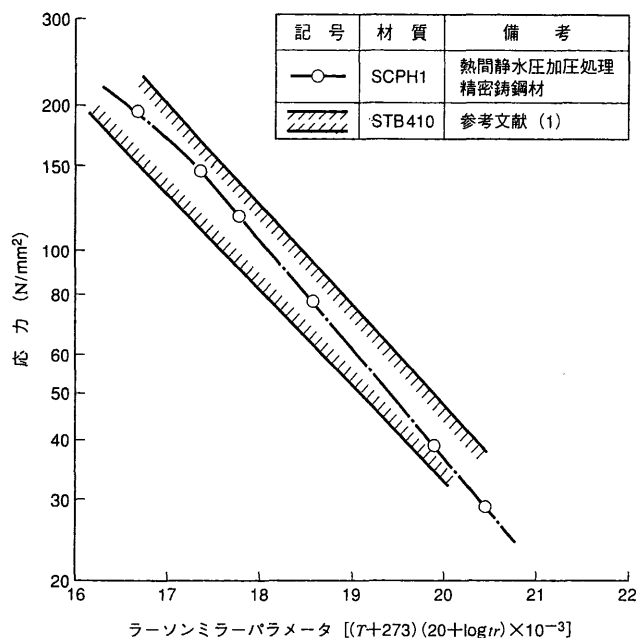


図5 クリープ破断強度 熱間静水圧加圧を実施した精密鋳鋼材は、従来材である STB 410 材と同等のクリープ破断強度を有している。
Creep rupture strength of precision casting material

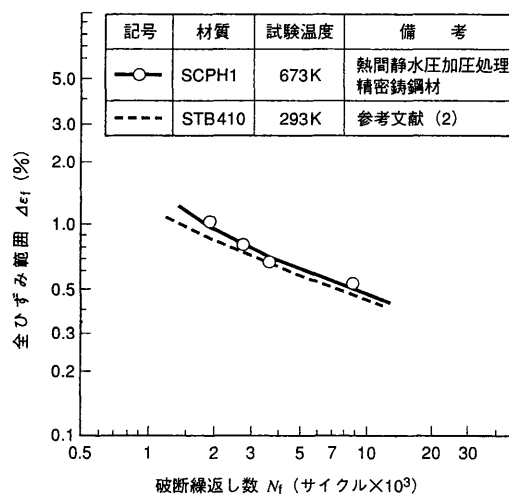


図6 低サイクル疲労試験結果 熱間静水圧加圧を実施した精密鋳鋼材の 673 K での低サイクル疲労強度は、塑性加工材である STB 410 材の 293 K での強度とほぼ同等であり、疲労強度の面でも塑性加工材と同等である。
Low-cycle fatigue strength of precision casting material

ロ組織、硬さ分布共正常なものである。また、溶接部の引張試験により溶金部及び熱影響部共十分な強度を有していることを確認しており、熱間静水圧加圧処理を実施した精密鋳鋼は、チューブ材として使用する上での溶接性についても何ら問題ないことを把握した。

4.2.4 耐圧性能

SCPH 1 製分岐管の使用条件を温度 663 K、最高圧力 20.3 MPa と想定し、あらかじめ三次元応力解析により分岐管に内圧が作用した場合の発生応力分布を計算した。この解析結果に基づいて引張応力が発生すると予想される各位置に抵抗線ひずみ計を張付け、“発電用火力設備に関する技術基準の細目を定める告示”第 3 条に従って検定水圧試験を実施した。すなわち分岐管に 20.3

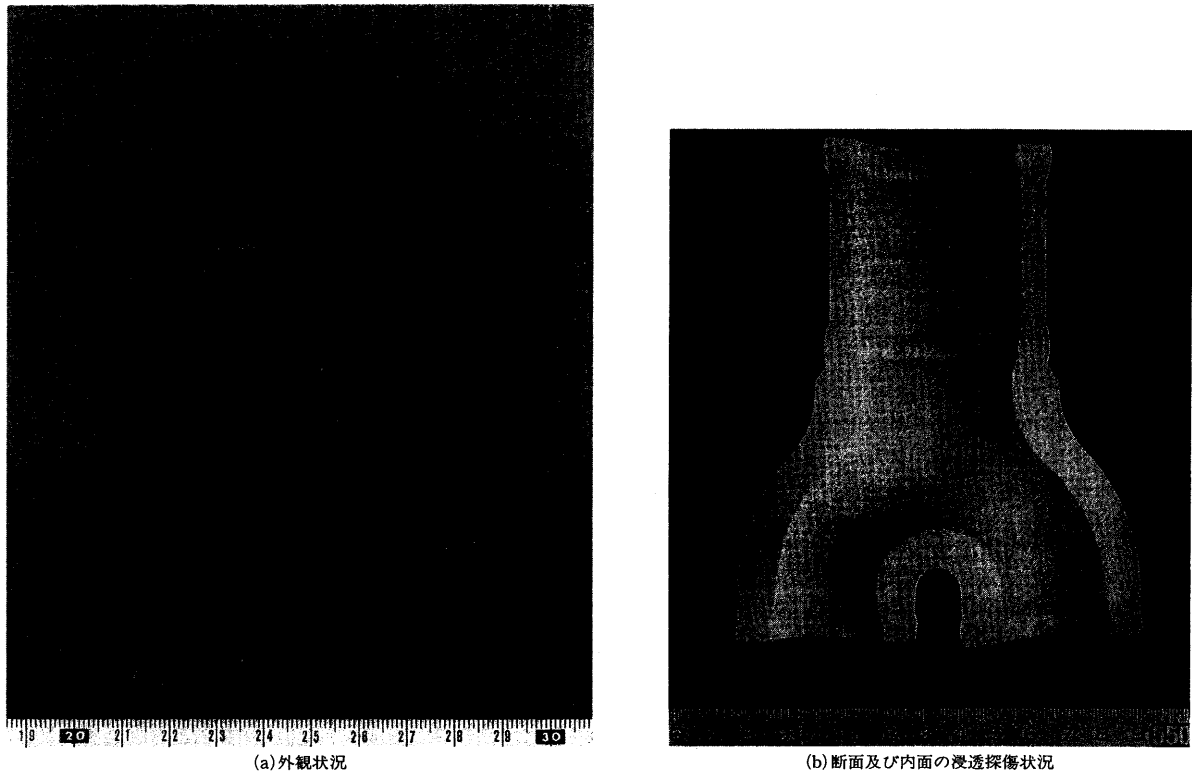


図7 20 000 h 実用耐久試験後の状況 20 000 h の実用耐久試験後の分岐管の外観及び浸透探傷結果を示し、使用時の劣化等の問題は、
Bifurcate tube after 20 000 hours' use

MPa の水压を加えて各箇所が生じるひずみを応力に換算して求めた値のうち絶対値による最大の値を式(1)により検定圧力とした。

$$P = P_0 \cdot S / \sigma_0 \quad (1)$$

ここで、

P : 検定圧力 (MPa)

P_0 : 最高使用圧力 (20.3 MPa)

S : 使用温度 (663 K) における材料の許容引張応力
(72.5 N/mm²)

σ_0 : 最も弱いと推定される箇所に生じた応力 (N/mm²)

本分岐管の場合、二またに分岐した内側の外表面 (図1のA部) に最大引張応力 $\sigma_0 = 44.7$ N/mm² が検出され、これから検定圧力は $P = 32.9$ MPa である。したがって $P/P_0 = 1.62$ であり、十分な耐圧性能を有している。

5. 実ボイラ耐久試験状況

SCPH 1 製分岐管を発電用ボイラの隔壁蒸発管出口部に試験的に入れて、実用耐久試験を実施中である。この部分の環境は、温度 665 K、最高使用圧力 20.3 MPa である。これまでに運転時間約 10 000 h 後 (起動停止回数は 57 回) 及び約 20 000 h 後 (起動停止回数 146 回) に一部を取出して、酸洗前後の外観観察、X 線透過探傷、内外表面の浸透探傷、断面のマクロ及びミクロ組織観察並びに実体から採取した試験片による常温引張試験等の品質評価、材料性能評価を実施した。20 000 h 後に取出した精密鋳鋼製分岐管の外観及び内表面の浸透探傷試験結果は図7に示すとおりである。10 000 h 後、20 000 h 後の試験材共、内外部の割れ、腐食、摩耗等の異常は観察されなかった。マクロ及びミクロ組織観察では、顕著な脱炭層もなく、正常なフェライトとパーライトの混合

組織をしており、また引張試験の結果は実用耐久試験前の強度、延性と有意差がなく、材料劣化の現象は認められなかった。現在約 30 000 h で順調に稼働中である。

6. ま と め

ボイラ用耐熱・耐圧部品である分岐管の高品質、高寸法精度、短納期製造法として、ロストワックス精密鑄造と熱間静水压加圧を組合せた製造工法を開発した。本プロセスで製作した分岐管は、以下の特徴を有している。

- (1) 従来品より良好な寸法精度で、内径及び肉厚等のばらつきが少なく、管内面が極めて滑らかで精密な製品の製造が可能である。
- (2) 熱間静水压加圧工法との組合せで無欠陥の精密鋳鋼製分岐管が製造でき、従来の塑性加工品と比較しても、品質及び材料性能面でそん色ない。
- (3) ロストワックス精密鑄造法は量産が可能であり、製作期間の短縮が可能である。

実プラントでの耐久試験でも材料劣化等の問題はなく、これまで約 30 000 h を経過して順調に稼働中である。これに基づいて、平成 8 年度に発電用ボイラへの一部実用を開始した。

参 考 文 献

- (1) 日本鉄鋼協会編、金属材料高温強度データ集 第3編 (炭素鋼及び鋳鉄編)
- (2) 金属材料技術研究所編、金属材料技術研究所疲れデータシート資料 4