

© 1991 ISIJ

/////////
論 文
 ///////////

100%水素雰囲気焼鈍炉の設備と特性

田島 滋*・小峰一晃*²・芝下寿夫*・白水正輝*

Facility and Characteristics of 100% Hydrogen Atmosphere Annealing Furnace

Shigeru TAJIMA, Kazuaki KOMINE, Toshio SHIBASHITA and Masaki SHIROUZU

Synopsis:

The new type batch annealing furnace, which utilized high convection in the inner cover with 100%H₂ atmosphere, was developed in early 1970's in Austria for brass industry. The technology was converted for steel industry at the end of 1970's. These annealing furnaces were introduced first in Europe for higher productivity and better surface for automobile panels. The performance is evaluated excellent.

This type of annealing furnace was installed at Wakayama Steel Works for the first time in Japan for estimation. The main facilities and fundamental characteristics are reported here in detail.

The results so far are quite satisfactory in productivity, uniformity, running cost and safety.

Key words: cold strip mill; steel coil; annealing; coil annealing; hydrogen; convection; batch annealing; atmosphere gas; annealing furnace; energy consumption.

1. 緒 言

冷延工場の焼鈍工程は連続焼鈍を中心に飛躍的に進歩してきた。しかしながら、連続焼鈍は設備費との兼ね合いからある規模以上の生産量が必要とされ少量の場合はコストパフォーマンスが悪く、また、高炭素鋼等の特殊品には適さないという問題があり、バッチ炉の改善は依然大きな課題であった。

和歌山製鉄所は薄物、特殊品の比率が多く焼鈍工程のレベルアップ、リフレッシュについて長らく検討を続けてきたが、種々の基礎調査の結果、100%水素雰囲気炉の実機導入テストを行うこととした。

テスト導入の目的としては、Fig. 1 に示す 100% 水素

雰囲気炉の期待特性を見極めその結果として

- (1) 特殊品の品質向上
- (2) 能率向上によるリードタイムの短縮
- (3) 製造コストダウン

等がどの程度改善されるかを特に念頭において行った。

当初コイルを欧州に運搬し現地にてテストすることも考えたが総合判断を早くするため、実機テスト炉を導入することとした。

本報では水素の基本特性の整理に続き、装置概要、実機焼鈍結果から 100% 水素雰囲気炉の基本特性について既設炉と比較し検討した。

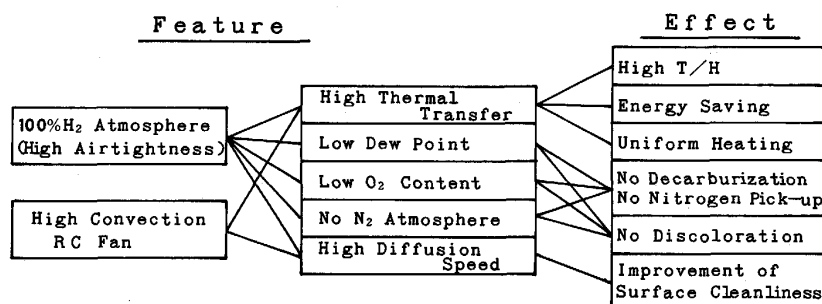


Fig. 1. Expected effects of 100% H₂ atmosphere annealing furnace.

平成元年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 11 月 8 日受付 (Received Nov. 8, 1990)

* 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1850 Minato Wakayama 640)

*2 住友金属工業(株)東京本社 (Head Office (Tokyo), Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Physical properties of hydrogen and nitrogen.

Item	H ₂ (A)	N ₂ (B)	A/B
Thermal conductivity [W/(m·k)]	168×10^{-3}	24.0×10^{-3}	$\div 7$
Viscosity [Pa/s]	8.41×10^{-6}	16.6×10^{-6}	$\div \frac{1}{2}$
Diffusion coefficient [cm ² /s]	H ₂ -CO ₂ 0.629	N ₂ -CO ₂ 0.160	$\div 4$
Density [kg·s ² /m ⁴]	9.04×10^{-3}	126×10^{-3}	$\div \frac{1}{14}$
Explosion limit [%]	4~75	—	—

T=0°C P=0.1 MPa

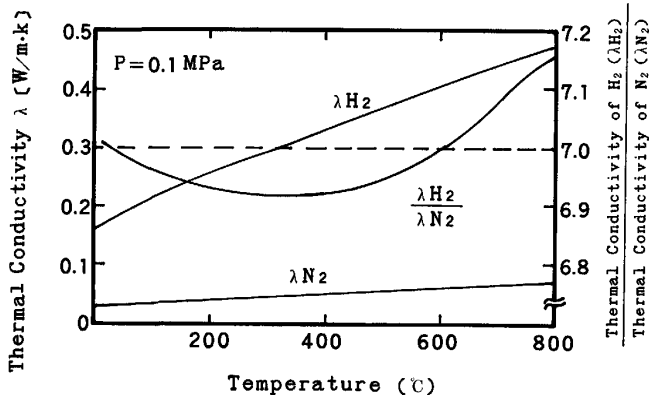


Fig. 2. Thermal conductivity of hydrogen and nitrogen.

2. 水 素 特 性

本炉の最大の特徴である水素雰囲気の影響を理解するために最初に水素について整理する。

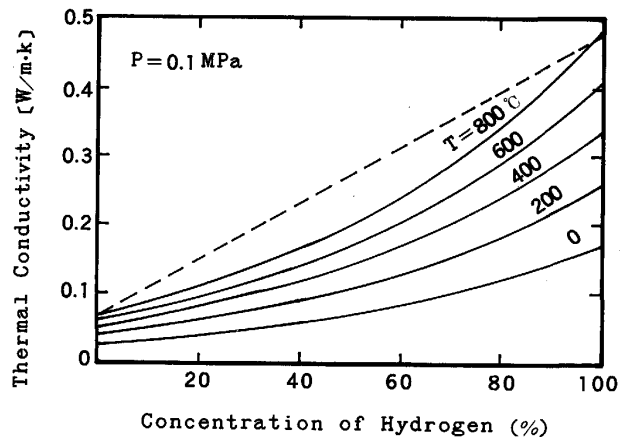
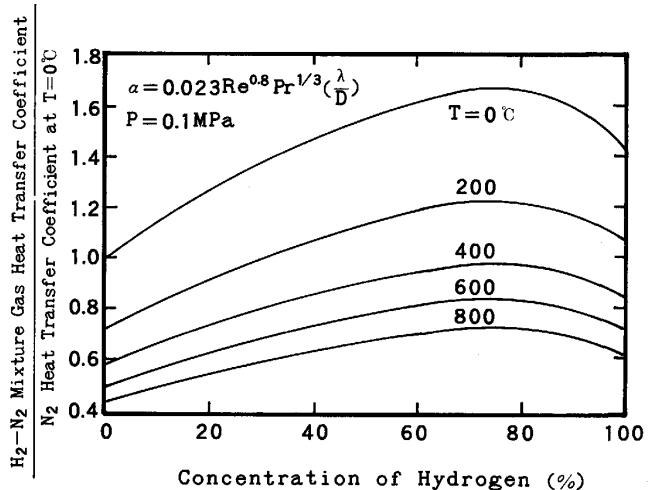
Table 1 に焼鈍特性にかかわる水素の一般特性を示す¹⁾。水素の熱伝導率は Fig. 2 に示すように、温度上昇により高くなるが、窒素との比較ではほぼ全域にわたって約7倍となっており熱を伝えるという意味において極めて良好な値となっている。

水素の粘性係数は窒素の約半分、炭酸ガスとの混合雰囲気中で比べた場合、気体拡散係数は約4倍であり鋼板表面の油分等を飛ばすのに効果が期待される。

水素の密度は窒素の 1/14 であり、リサーキュレーション (RC) ファンの回転抵抗が少なくなるため、電力原単位低減をもたらす。

水素-窒素混合雰囲気の熱伝導率は Fig. 3 に示すとおりであり、水素濃度の増加により指数的に高くなる。

同じく、熱伝導率はある水素濃度でピークを持つ。円管内での乱流モデルを用いて熱伝達率を計算したものが Fig. 4 であり純水素は純窒素の約 1.5 倍となる。

Fig. 3. Thermal conductivity of H₂-N₂ mixture gas.Fig. 4. Heat transfer coefficient of H₂-N₂ mixture gas.

実際のコイルへの熱の伝わり方は、これらの熱伝導率、熱伝達率、雰囲気気の拡散及び鋼中の熱伝導によるものであり、炉の形状、コンベクター形状、コイルの大きさ等により影響を受けるが、水素はあらゆるガスの中で最小の密度と最大の拡散率を持ち、また、非常に大きい熱伝導率、熱伝達率を有し、爆発性の気体であるという使用上の心配を除けば、焼鈍雰囲気ガスとして理想的な特性を有しているといえる。

3. コイル内の熱伝導シミュレーション

水素を使用したときにコイル内の熱伝導はどのように変化するのか傾向を知るため、Fig. 5 (a) のモデルでコイルをアップエンドに置いたときの水平方向、すなわち、板厚方向の熱の伝わり具合をコイル面の接触はなく、また熱伝導が支配的であるとして計算してみた結果を Fig. 5 (b), (c) に示す³⁾。これから分かるように、窒素

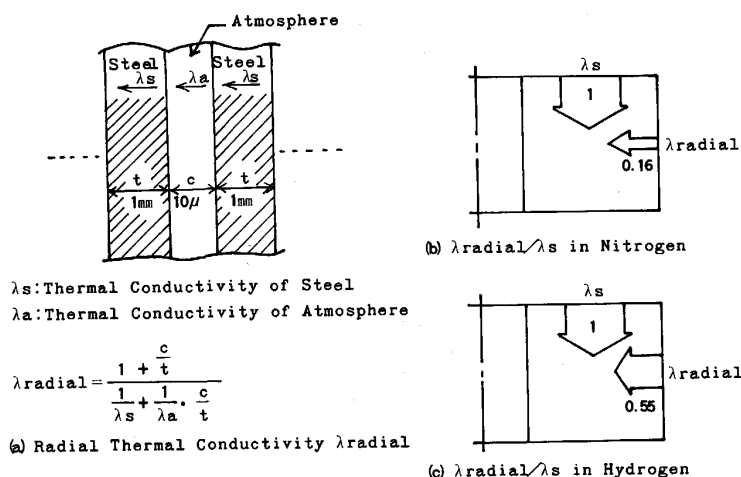


Fig. 5. Calculation of radial thermal conductivity λ_{radial} for steel coil in hydrogen and nitrogen atmosphere.

雰囲気の場合は熱は板幅のエッジ方向から大半伝わり板厚方向からは極めて少ない。一方水素雰囲気の場合は板厚方向からの入熱が窒素雰囲気と比べ約 3.5 倍になっており板厚方向からの入熱もコイルの昇熱に大きく寄与している。これにより高エネルギーが実現でき、コイル内の最熱点と最冷点の温度差が少なくなりコイルの均一加熱に効果があることが分かる⁴⁾⁵⁾。

実際の熱伝導は、さらに複雑であるがこのシミュレーションで雰囲気の違いによる基本的な差は説明ができたと考える。

4. 100% 水素雰囲気炉の設備

4.1 装置の特徴

Table 2 に主仕様を示す。装置の特徴としては

- (1) 雰囲気として純水素、純窒素、AX ガス及びこれらの混合ガスが使用可能
- (2) コイル最高温度は 850°C
- (3) 雰囲気ガスのシールは O リングを用いた油圧クランプ方式
- (4) 大容量大口径 RC ファン-57 kW, 850 ϕ (既設炉 11 kW, 600 ϕ)

Table 2. Main specifications of 100% hydrogen annealer.

Item	Specification
Charging measurement	2 000 mm diameter 4 300 mm height Maximum 100 t
Charge weight	850°C~250°C
Coil temperature	H ₂ , N ₂ , AX+N ₂
Atmosphere	57/32/17 kW 1 200/900/600 rpm 4.8×10 ⁸ J/h×12
RC fan	Hydraulic clamping cylinder
Burners	Air/Water
Clamping mechanism for inner cover	
Cooling system	

- (5) ベースはガスタイト構造
- (6) 冷却は空冷と水冷の両用
- (7) 燃料は C ガス仕様

Fig. 6 に全体図を示す。今回導入した炉は地下構造を持たず RC ファンの部分だけ掘り下げる構造になっている。また、ベース構造が在来とは異なり厚いので炉高が高くクレーンの揚程の制限から炉全体を FL-1.75 m に設置した。

炉はベース上の架台に載り、炉下部のセラミックスファイバー製断熱材とインナーカバーフランジにより燃焼空間をシールしている。

バーナーは 3 段に配置されており、1 段当たり 4 本のロングフレームバーナーをタンジェンシャルに配置して局部加熱にならぬように配慮している。断熱材は、バー

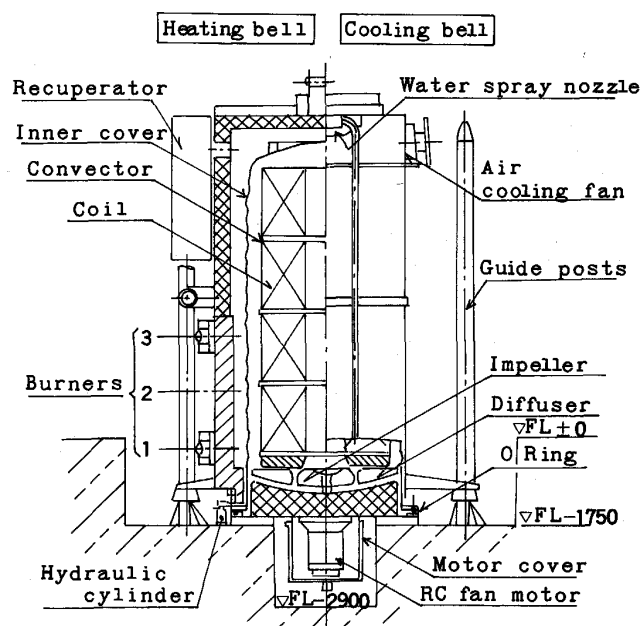


Fig. 6. General assembly.

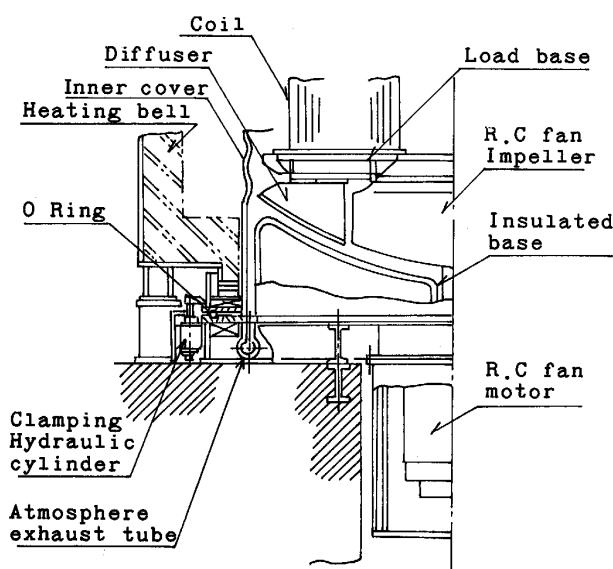


Fig. 7. Detail of base.

ナーより下部はセラミック成形品、上部はセラミックファイバーを採用し炉体の軽量化と断熱強化を図っている。

炉の上部にはレキュベレーターを1基設置し排ガスの熱回収を行う。

冷却ベルの上部には4.6 kWのファンを2台設置し、また上部と中間部の2か所に散水ヘッダーを設けてインナーカバーの散水冷却を行う。

冷却時インナーカバーのヒートショックを防止するために、冷却初期の高温度時は空冷を行いある程度温度が下がってから水冷を行う。また、インナーカバー外面は均一に水が流れないと熱歪みを生じるためコルゲートは縦方向にしている。

100%水素雰囲気炉の一つのポイントとなるベース部の構造をFig. 7に示す。ベースは鋼板溶接製でガスタイトに作られ内部には断熱材を充填している。

雰囲気空間はインナーカバーフランジとベース間にOリングを入れ、かつ、この間を油圧シリンダーでクランプしてシール性を確保している。

インナーカバーフランジとベースプレートは水冷のジャケット構造を有しOリングの温度上昇を防止しており、焼鈍中のOリング周辺の温度は50°C前後である。

4.2 安全対策

水素ガスを使う場合の懸念は爆発の危険性があるということであるが、安全対策として装置の異常検知や警報の点数は従来炉がせいぜい15点程度であるのに対し、今回の炉では、33点設けてあり、その他に、自動モ-

ドやバルブ構成等にも安全性に対して十分配慮されたものとなっている。

系統別にその一例を示す。

(1) 燃焼系

①Cガスバルブのリークチェックをチャージごとに自動で実施。

②Cガスコネクターのリークチェックをチャージごとに自動で実施。

③全バーナーに失火検知用フレイムディテクターを設置。

④運転中はCガスの圧力上限・下限、燃焼空気圧力下限を常時監視。

(2) 冷却水系

①ベース冷却水の圧力、流量の下限を監視。

②冷却ベル用冷却水の流量の下限を監視。

(3) 雰囲気系

①水素ガスを安全に使うため、緊急時パージに使用するN₂ガスは必須。このためN₂ガスの供給系は2系統設置し異常時は自動で切替え。

②H₂ガスのバルブはチャージごとに自動でリークチェックを実施。

③H₂ガスバルブを2台直列に設置し、この間をN₂ガス充填しシール。

④インナーカバー内雰囲気空間の漏れチェックをチャージごと、加熱前と冷却前の2回実施。

⑤操業中の雰囲気空間圧力は常時監視され、17.5～70.0 mbarの間に制御。

⑥空気から窒素、水素から窒素への置換完了はパージングガスの流量で検知し、かつ、この流量検知器は二系統ダブルに設置。

⑦雰囲気のH₂ガスを放散する前に、放散管内の空気を窒素でパージ。

(4) 油圧系他

①カバークランプ用の油圧はアキュムレーターを設け、停電時もクランプ圧力の保持が可能。

②バルブ操作用圧空圧力を常時監視。

③各バルブは停電時すべて安全側に働くように設計。

5. 実機操業テスト結果

5.1 操業サイクル

Fig. 8に和歌山における代表的な操業サイクルを示す。一焼鈍サイクルあたり2回のリークチェックが行われる。最初は焼鈍スタート前、2回目は冷却開始直前である。このリークチェック時に圧力低下が検出されると、次シーケンスに進まないか、ただちに窒素パージに入る。

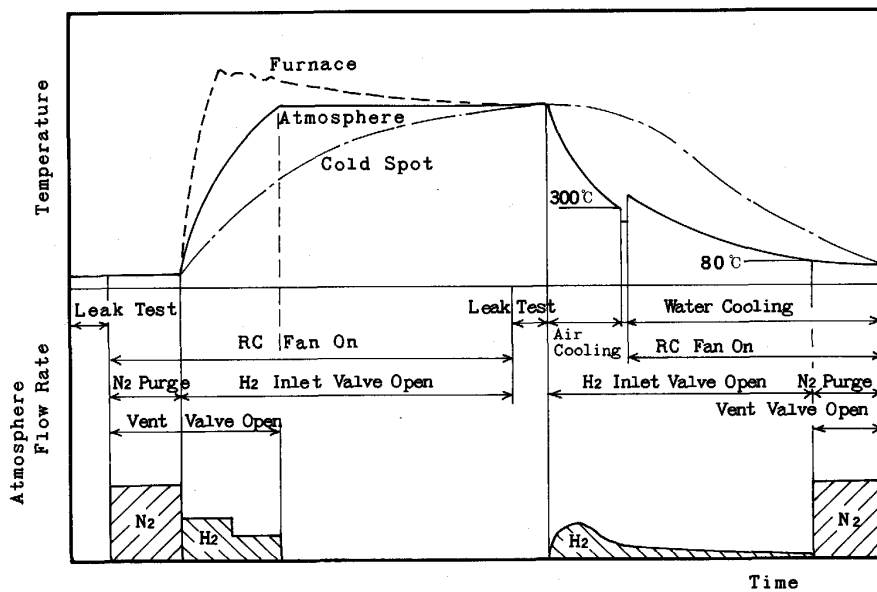


Fig. 8. Typical annealing cycle in 100% hydrogen annealer.

安全対策として、焼鈍中は常時圧力が監視され、異常があれば窒素パージされることとなっている。

最初のリークテスト後窒素パージを行い、加熱と同時に水素吹込みに入る。これは、挿入材が洗浄済みであるため雰囲気ガスの入替えを行う必要がないためである。ヨーロッパの多くのミルではミルクリーンで製造しているため、水素の吹込みを遅らせ加熱途中まで窒素で圧延油の蒸散、燃焼ガスを排出し、その後水素に切り替える方法が取られている。

加熱完了時点で雰囲気ガスの放散管を閉めプラス圧の確保のみとし均熱に入る。冷却直前のリークチェック後空冷を行い制御温度が 300°C に達したところで水冷を開始する。最初に空冷を行うのはインナーカバーへのヒートショックを和らげインナーカバーの変形を防ぐためである。

水冷後制御温度が 80°C に達したところで窒素パージを行いコイルの抽出を行うこととなる。

このサイクルでの水素の使用は加熱時の水素置換と冷却時の体積収縮分送り込まれる量のみであり特に焼鈍前に洗浄された材料を処理する場合には水素の使用量は非常に少なくてすむ。

焼鈍中の最低露点は炉内が高気密に保持されるためマイナス 40°C 以下まで到達可能である。これを利用してテンパーカラーの出やすい材料もカラーの発生無く焼鈍可能である。

本設備の仕様上限温度であるコイル温度 850°C の焼鈍についても操業上および設備上何の支障も生じないことが確認された。

5.2 水素雰囲気の影響調査

5.2.1 加熱冷却能率への影響

加熱冷却能率への影響を調べるために 100% 水素炉と同一炉型式であるシングルスタック炉の既設炉と水素雰囲気炉を同一コイルを使い同一条件で焼鈍を行い純窒素中 RC ファン 600 rpm を基準として比較を行った。

Fig. 9 は水素濃度の加熱及び冷却能力に与える影響を調べたものである。加熱能率は水素濃度に比例してほぼ直線的に上昇している。純水素中での加熱能率は純窒素と比べ約 1.7 倍となっている。

一方、冷却能率は水素濃度の上昇に伴い指数的に上昇しており、純水素中の冷却能率は純窒素中と比べ約 1.5 倍となっている。

RC ファンの回転数で整理したのが Fig. 10 である

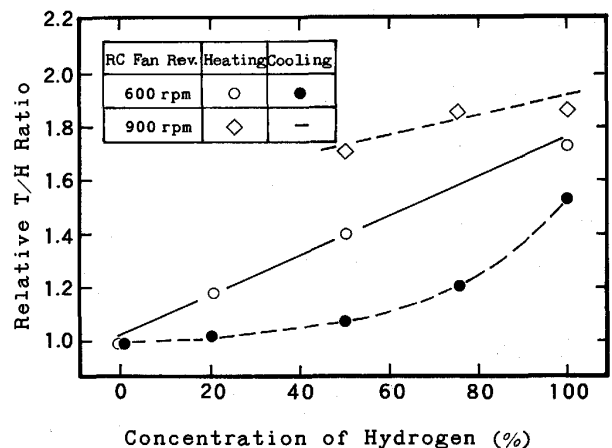


Fig. 9. Effect of concentration of hydrogen on relative T/H ratio in H_2-N_2 mixture gas.

が、加熱能率は純水素雰囲気中ではさほど大きな影響はなく回転数が600 rpm時と1200 rpm時で10%弱の向上であった。水素濃度50%のテストも行ったが、この時は約20%の向上がみられた。このことは、拡散能の高い水素の濃度が高いほど対流の影響が少なくなっていると考えられる。純窒素雰囲気中で1200 rpmのテストを試みたが、密度が高くモーター電流がオーバーしできなかった。

同様に冷却能力については、600 rpmと1200 rpmで40%の向上が見られた。冷却中の方が加熱中より同じ純水素雰囲気中であってもRCファンの回転数の影響が大きいのはコイルからの熱除去に果たす対流の効果が大きいからであると考えられる。なお、本テストの温度測定はFig. 11に示す位置において行った。

空冷、水冷による冷却能力の比較をFig. 12に示す。100%水素雰囲気中RCファン1200 rpmの時、水冷能率は空冷能率の約2倍となる。純窒素雰囲気600 rpmと比較すると約2.9倍であった。

水冷を行うことでの心配はインナーカバーの変形であ

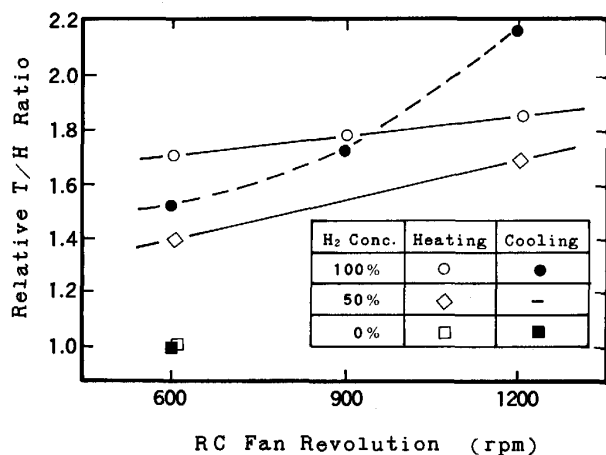


Fig. 10. Effect of RC fan revolution on relative T/H ratio in H_2 - N_2 mixture gas.

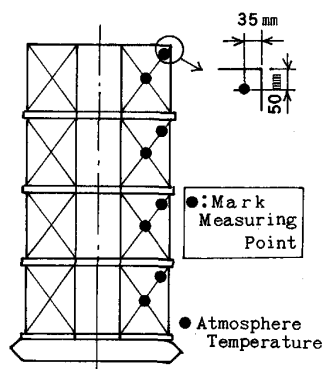


Fig. 11. Measuring point of temperature.

るが、今までのところ全くその兆候はなく問題は起こっていない。

実コイルテスト結果をTable 3に示す。既設炉の雰囲気は18%水素濃度のAXと N_2 の混合ガスである。

焼鈍条件は一般的な絞り用のものである。この場合の結果をまとめると、加熱能率で1.6倍、冷却能率で2.9倍、全能率で2倍となった。このテストは平均的な条件で行ったものであり既設炉に対しこの程度の向上は期待して良いと考えられる。

能率以外にも均熱度が向上することによって焼付き、巻締りの減少が期待されるがまだ処理量が十分多くなく結論を出すには至っていないが、少なくともいままで処理した材料については両者とも発生していない。今後この件については継続してトレースしてゆく。

焼鈍能率の向上はリードタイムの短縮に寄与するが、今回のテスト結果では約2日の短縮が可能と考えられる。100%水素雰囲気炉は単式炉であり、既設の複式炉と比べるとロット集約の必要もなくなりプラスアルファの効果も期待できる。

5.2.2 熱収支比較及びエネルギー原単位

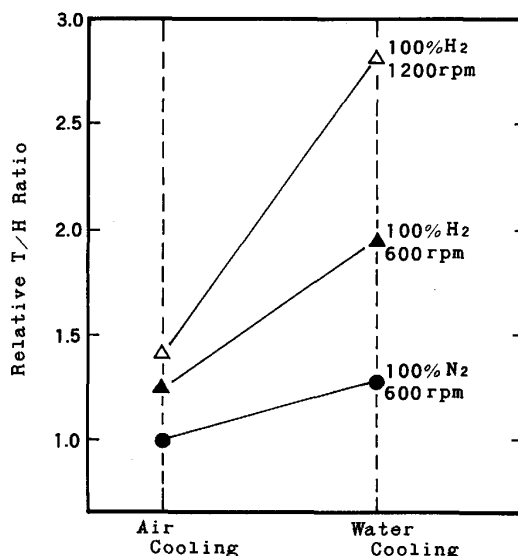


Fig. 12. Effect of atmosphere, RC fan revolution and water cooling on relative T/H ratio.

Table 3. Comparison of T/H between 100% hydrogen annealer and conventional annealer (11% H_2 -89% N_2 mixture gas).

	100% H_2 (A)	Conventional (B)	A/B
Heating T/H	3.2	2.0	1.6
Cooling T/H	4.4 (Water cooling)	1.5 (Air cooling)	2.9
Total T/H	1.8	0.9	2.0

Fig. 13 にエネルギー原単位の相対比較を示す。また、燃料原単位解析のための熱収支の計算結果を Fig. 14 に示す。

燃料原単位は既設炉の 85% であるが、これは冷却水を含めた炉壁放散が約 1/3 と極めて少ないこと、すなわち、炉自体の高い断熱性によることと、高能率によるトータルの焼鈍時間が短いことによるものであるがその結果として鋼材含熱量は約 7% 増加しており、効率的な熱の使用ができています。

電力原単位は大容量ファンの適用にもかかわらず、水素の低密度の効果により約 1/3 に減少している。

窒素の使用は焼鈍開始及び終了前のパージのみであり大幅な減少となっている。また、水素の使用量も炉の高密封度及び焼鈍途中での放散管の閉鎖により AX ガスと比べても半分以下である。

トータルのエネルギー原単位は既設炉に対し 40% の減少となっている。

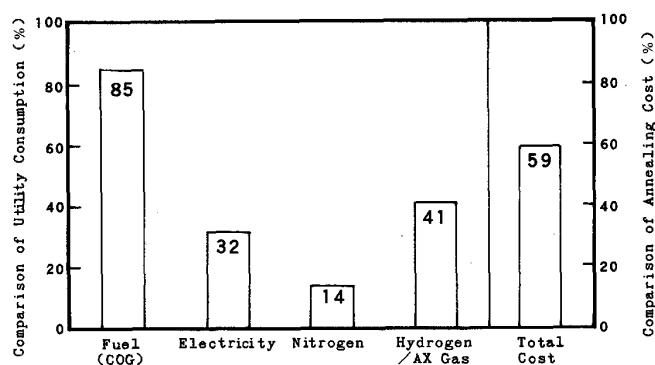
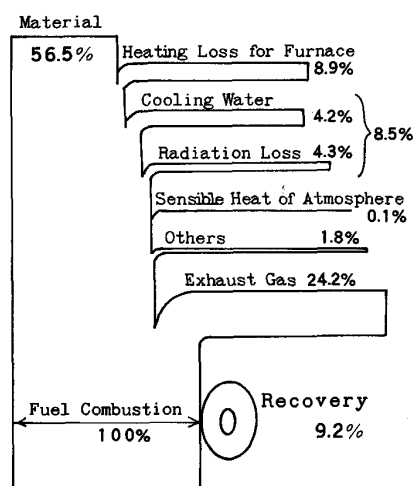
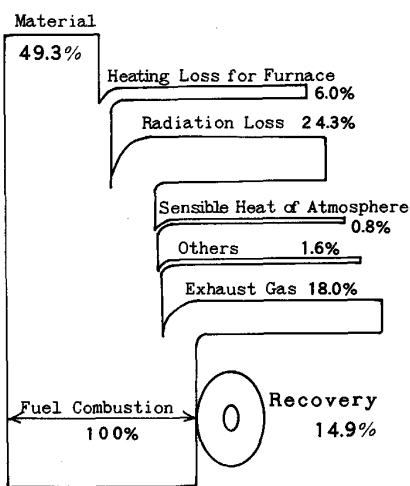


Fig. 13. Comparison of 100% hydrogen annealer utility consumption and total cost with conventional annealer.



(a) 100% H₂ Annealer



(b) Conventional Annealer

Fig. 14. Comparison of heat balance between 100% hydrogen annealer and conventional annealer.

Table 4. Required time to specified difference of coil temperature.

Difference of Coil Temp.	80°C	30°C	20°C	10°C
100% H ₂	19.0 h	28.0 h	32.0 h	46.5 h
Conventional	27.0 h	43.0 h	52.0 h	—

5.2.3 コイル内均熱度及び機械特性

焼鈍特性の中で機械試験値のばらつきに影響を与えるスタック内の均熱性について調査したのが Table 4 である。テストは 4 段積み 86 t チャージで行い、温度の測定は同様に Fig. 11 に示した位置で行っている。評価は最冷点と最熱点の温度差がある値に達するまでの時間で行った。

100% 水素雰囲気炉では Fig. 15 に示すごとく外周部のオーバーヒートも無く、またそれぞれの温度差に到達する時間は既設炉の 60% 程度に短縮されている。

最小スタック内温度差 10°C は既設炉では実現不可能であるが水素雰囲気炉では 46.5 h 後に達成することができた。

均熱性が良好であることは機械試験値の安定向上をもたらしており、Fig. 16 の機械特性の比較で明らかなように特性のばらつきは大幅に改善され、またその結果平均値も向上している⁶⁾。

6. ま と め

住友金属和歌山冷延工場に試験炉として導入した 100% 水素雰囲気炉は順調に稼働している。

本報告では 100% 水素雰囲気炉の基本となる水素特性および設備の紹介と実操業による性能評価を行った結果を報告した。使用してみたところ安全対策は十分である

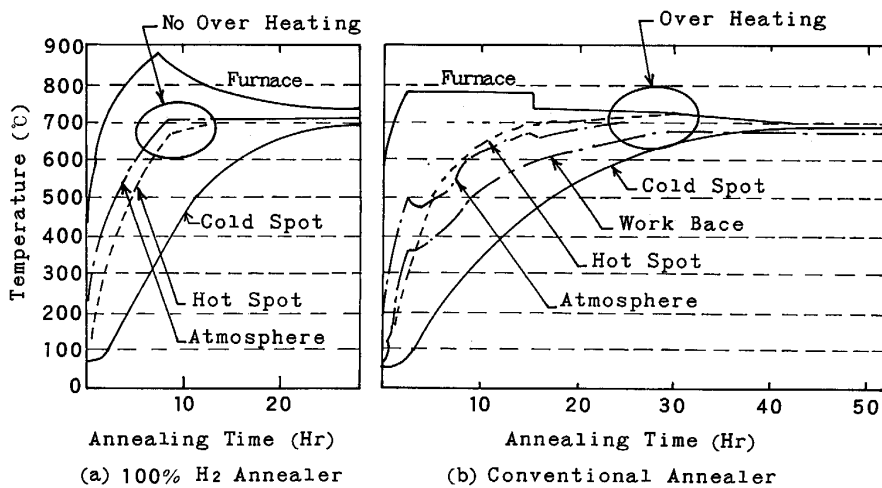


Fig. 15. Heating performance of 100% hydrogen annealer and conventional annealer.

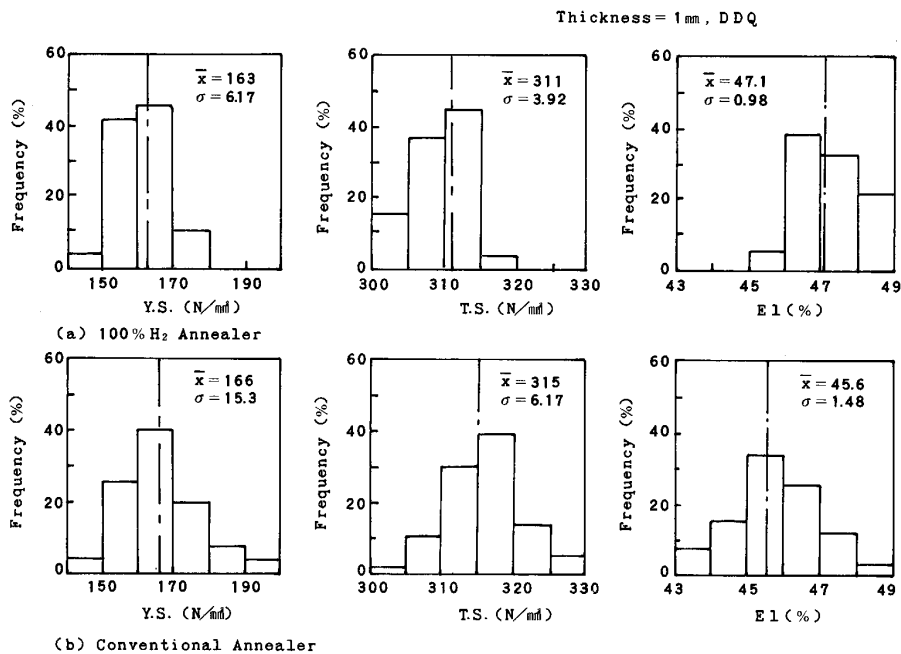


Fig. 16. Comparison of mechanical properties between 100% hydrogen annealer and conventional annealer.

と考えられ、また性能は事前検討のとおりのものであり、既設炉に対し約2倍の能率、約40%の省エネルギーを達成している。和歌山の既設設備は旧タイプのものであるが、それを勘案しても極めて良好なものであると言える。

本炉の特性調査は現在種々の項目にわたり継続しており、まとまった時点で報告の機会を持ちたいと考えている。

文 献

- 1) 流体の物性値集 (日本機械学会編) (1983), p. 28
- 2) W. PÖTKE, R. JESCHAR and G. KEHSE: Stahlu. Eisen, **108** (1988) 12, p. 581
- 3) 伝熱工学資料 (改訂第3版) (日本機械学会編) (1975), p. 98
- 4) H. LOCHNER and A. R. PERRIN: HSLA Steel Metal., **4** (1986), p. 999
- 5) A. R. PERRIN, R. I. L. GUTHRIE and B. C. STONEHILL: 1987 Mechanical Working and Steel Processing Proceedings (1987), p. 261
- 6) H. LOCHNER and G. SCHWEIGER: Iron Steel Eng., **4** (1988), p. 45