

大形鍛鋼品の脱水素処理について

On the Deflaking Treatment of Large-size Steel Forgings

島 田 隆 介*
Ryusuke Shimada

内 容 梗 概

大形特殊鋼鍛鋼品、たとえばタービンあるいはジェネレータロータシャフトなどの製造においては白点発生
の防止はメーカーの重大関心事であり、白点発生の最大原因の一つである鋼材中の水素量の低減すなわち脱
水素処理に多くの努力が払われてきた。

いまや真空造塊法の採用はこれらの処理を漸次不用のものにしつつあるが、本報告は従来の脱水素処理につ
いての理論と実際ならびに真空造塊法によって得られた鋼塊の処理方法について述べた。

1. 緒 言

大形鍛鋼品メーカーは長い間白点の防止に努力してきたが、白点
というのは主として熱間加工後の冷却過程に Ni-Cr 鋼, Ni-Cr-
Mo 鋼などの構造用低合金鋼鍛鋼品の内部に発生する割れで、その
破面が白っぽい円形に近い形状をしているところからこのように名
づけられている。白点が鍛鋼品の欠陥として大きく取上げられるよ
うになったのは第一次世界大戦中兵器として Ni 鋼, Ni-Cr 鋼が
使用され始めてからで、その後今日に至るまで数多くの研究がなさ
れてきた。これらの研究のうち初期のものは白点の発生原因の究明
がおもであったが、その原因が明らかになるにつれて研究の主体も
防止方法に移行し、近年では白点発生の最大原因の一つである鋼材
中の水素量をいかにして迅速かつ廉価に減少させるかが現場におけ
る研究の主題になってきた。最近における鋼の真空造塊法の急速な
普及はかかる必要性から生れたもので、大形鍛鋼品の脱ガスの問題
を造塊時に一きょに解決しようとするものである。

2. 白点発生に影響を及ぼす因子とその対策

白点の発生に影響すると思われる因子は非常に多いが、大別して
応力と冶金学的因子の二つに分けることができ、この二つの因子は
さらに次のように分類することができる。すなわち

(A) 応力: (1)冷却応力 (2)変態応力 (3)加工変形によ
っておこる応力

(B) 冶金学的因子: (1)偏析および非金属介在物 (2)ガス
このように白点の原因となる因子は数多く、かつこれらの因子は
その影響力に大小はあっても相互に関連して白点を誘発すると考え
られているもので、その防止のためには個々の因子を消失あるいは
減少させる必要がある。幸に白点は鋼種によってやや差はあるが、
鋼材を鍛造後常温に冷却する途中ほぼ 200°C以下⁽¹⁾で生ずるので、
上述の各因子を鋼材をこの温度に持ちきたす前に消失させれば、そ
の発生を防止することができる。このような観点から上述の各因子
について検討してみる。

まず加工変形による残留応力は鍛造後鋼材を直接室温まで冷却せ
ず、一度焼準、焼戻を行うことによって除くことができる。冷却応
力も危険な温度範囲まで鋼材を冷却する前に適当な温度で十分均熱
し、しかるのちきわめてゆっくり冷却することにより最小限にす
ることが可能である。変態応力はもし鋼材を臨界冷却速度以上でマル
テンサイト変態域まで冷却するとすれば、マルテンサイト変態域は
ちょうど白点発生の危険温度範囲と重なり合う場合が多いので発生
する応力を避けることは困難である。しかし一般に所定の機械的性
質をうるためには必ずしもマルテンサイトを生成させる必要はな

い。たとえばベイナイト変態を一定温度で完了させ、それに続く焼
戻によって残留オーステナイトを完全に分解させることにより、変
態応力は十分に取除かれる。このように各種の応力は熱的取扱いに
留意することにより比較的簡単に除去することができる。

偏析は主として合金元素の偏析係数と鋼塊の凝固速度によって左
右され、熔解、造塊作業でその基本条件が決まり、現行の作業方法
ではこれを完全になくすことは不可能である。鍛造作業では鍛錬効
果をできるだけ鋼材の内部にまで及ぼし、樹枝状品の破壊および成
分偏析の拡散を行わせて偏析の害を防ぐ。ただ偏析あるいは非金属
介在物は白点発生の一次因子ではなく、それによって局部的な変態
の遅延を起させたりまたは偏析の微小欠陥部に水素ガスを集中せし
めるという二次的な原因となって白点発生を助長すると考えられて
いるので、変態を十分に完了させかつ水素濃度を下げることにより
間接的にもその害を除くことができる。

鋼中の水素溶解度は温度上昇とともに急激に増加し、熔融状態
では常温における溶解度の10倍をこす値になる。したがって鋼塊が凝
固後鍛造、焼鈍などの作業をへて常温まで冷却される場合表面から
逸出放散した水素のほかになお多くの過飽和な水素を含んでおり、
これらの過飽和な水素は一方では鋼材内部の微小キャビティに集合
して大きな圧力を形成し、他方では鋼材の破断応力を低下させる
という二つの面で白点発生の原因となる。製鋼作業において出鋼時の
熔鋼中の水素量は大気中の水蒸気分圧によって左右され、大気溶解
法では一定の値以下に下げることが困難である。したがって 200°C
付近の危険温度範囲に鋼材を冷却する前に過飽和な水素を鋼材外部
に拡散逸出させるか、あるいは水素をなんらかの形で固定し無害に
しなければならない。一般に水素を化合物の形で固定する方法はあ
まり有効ではないように見え、もっぱら水素を外部に放出させる方
法がとられている。これがいわゆる脱水素処理 (Deflaking Trea-
tment) である。しかし大形鍛鋼品の場合、製品の直径が大きい
ため鋼材中心部の水素濃度を下げるためには非常に長時間を必要とし、
その期間が1箇月あまりに及ぶことが間々ある。白点発生原因とし
てあげたほかの因子が比較的短時間で取除かれるのに反して水素の
みがその除去に長時間を要することは、必然的に白点防止対策のな
かで脱水素処理を重視させる結果となった。

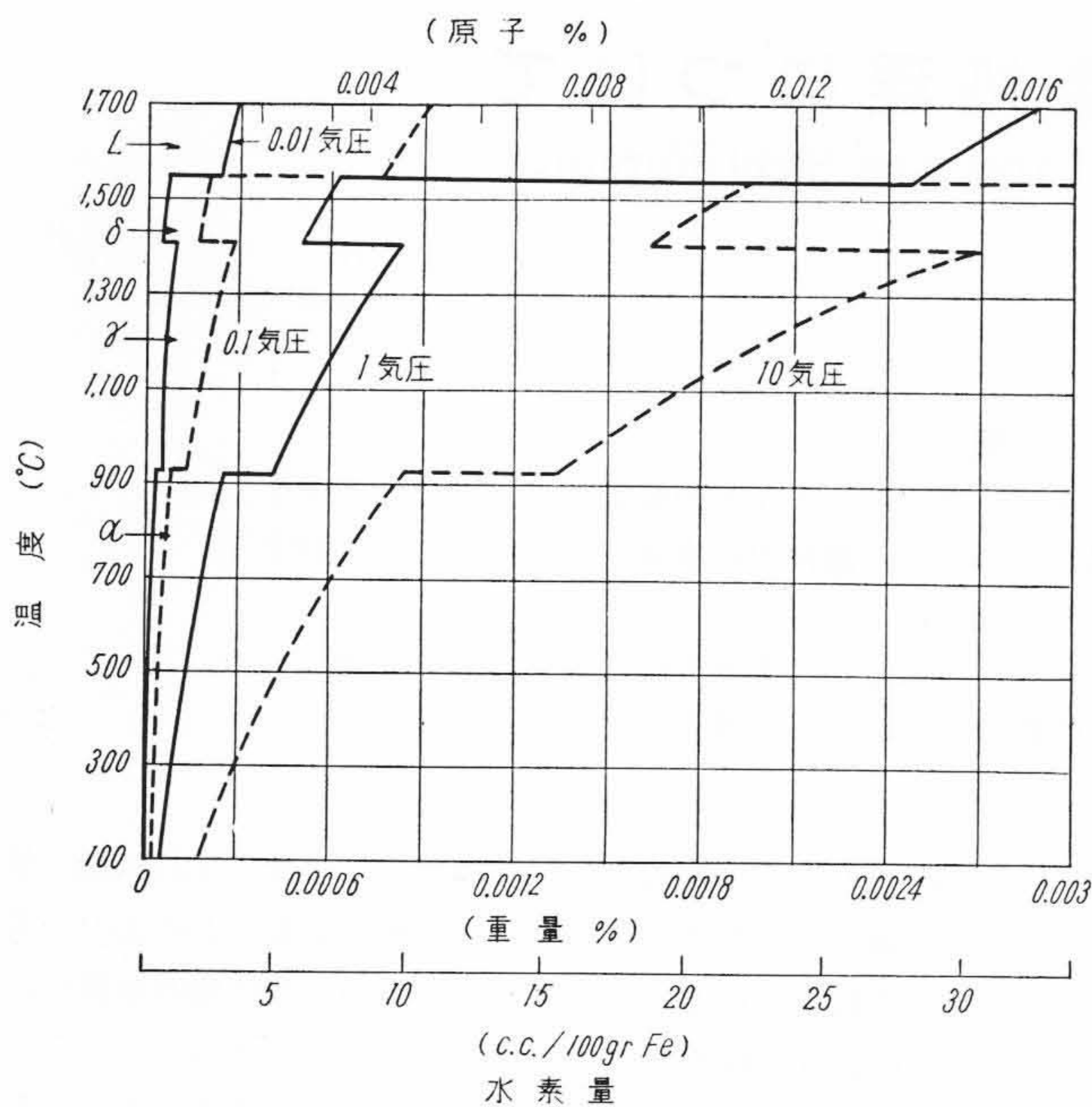
3. 鋼中の水素ガス

3.1 鋼中の水素溶解度

既述のように鋼中の水素溶解度は温度によって非常に大きく変化
する。Zapffe氏⁽²⁾は鉄中の水素溶解度が水素分圧の平方根に比例す
る⁽³⁾ものとして、1気圧での実験結果から異なった水素分圧のもと
における水素溶解度の温度による変化を第1図に示した。

Chipman氏⁽⁴⁾は水蒸気から吸収される熔鋼中の水素量は、水蒸気

* 日立製作所水戸工場



第 1 図 鉄中の水素溶解度と温度との関係 (Zapffe)

の分圧および熔鋼中の酸素の活量によって決定されるとし、反応式

$$H_2O(g) = 2[H] + [O] \quad (1)$$

の 1,600°C における平衡恒数 $K = 1.8 \times 10^{-6}$ を求め、これより水素量を (2) 式によって与えた。

$[H]\% = 1.35 \times 10^{-3} \sqrt{PH_2O/a_O} \quad (2)$

Carney 氏ら⁽⁵⁾はこの式を用いて水蒸気分圧および熔鋼中の酸素量の変化による吸収水素量を求めて第 2 図を得た。同図によれば熔鋼中の酸素量の少ない間は、熔鋼は純水素の 1 気圧のふんい気中におけるよりも湿った空気中でより多くの水素を吸収することを示す。

これに対して沢氏⁽⁶⁾は露出した熔鋼中の水素量 $[H]$ と空気中の水蒸気分圧 PH_2O の関係は (2) 式によって求めることはできず、熔鋼面上に存在すべき中間気相を拡散する H_2 および H_2O の量が当量であるという定常条件によって PH_2O と $[H]$ との関係を求むべきであるとし (3) 式を得た。

$[H]\% = 1.62 \times 10^{-3} \sqrt{PH_2O + 1.42[O]\%} \quad (3)$

(3) 式に従い、1,600°C において $[O] = 0.0047\%$ 、 $PH_2O = 0.008$ atm とした場合の水素量を求めると 1.5cc/100gr となり (2) 式によって得られる値 19cc/100gr より実際の値によりよく一致すると述べている。沢氏⁽⁷⁾はさらに塩基性電気炉操業における現場データより熔鋼中の水素量と大気中の水蒸気分圧との関係を求め第 3 図に示した。この値は日立製作所水戸工場の水素分析値が 4~7 ppm であるのと比較してほぼ一致している。

3.2 鋼中における水素の拡散

Sykes 氏ら⁽⁸⁾はフェライトおよびオーステナイト状態の鉄中における水素の拡散恒数 $D_H(\alpha)$ 、 $D_H(\gamma)$ と温度との関係式を式 (4)、(5) によって与えた。

$D_H(\alpha) = 7.6 \times 10^{-4} \times e^{-1,150/T} \quad (4)$

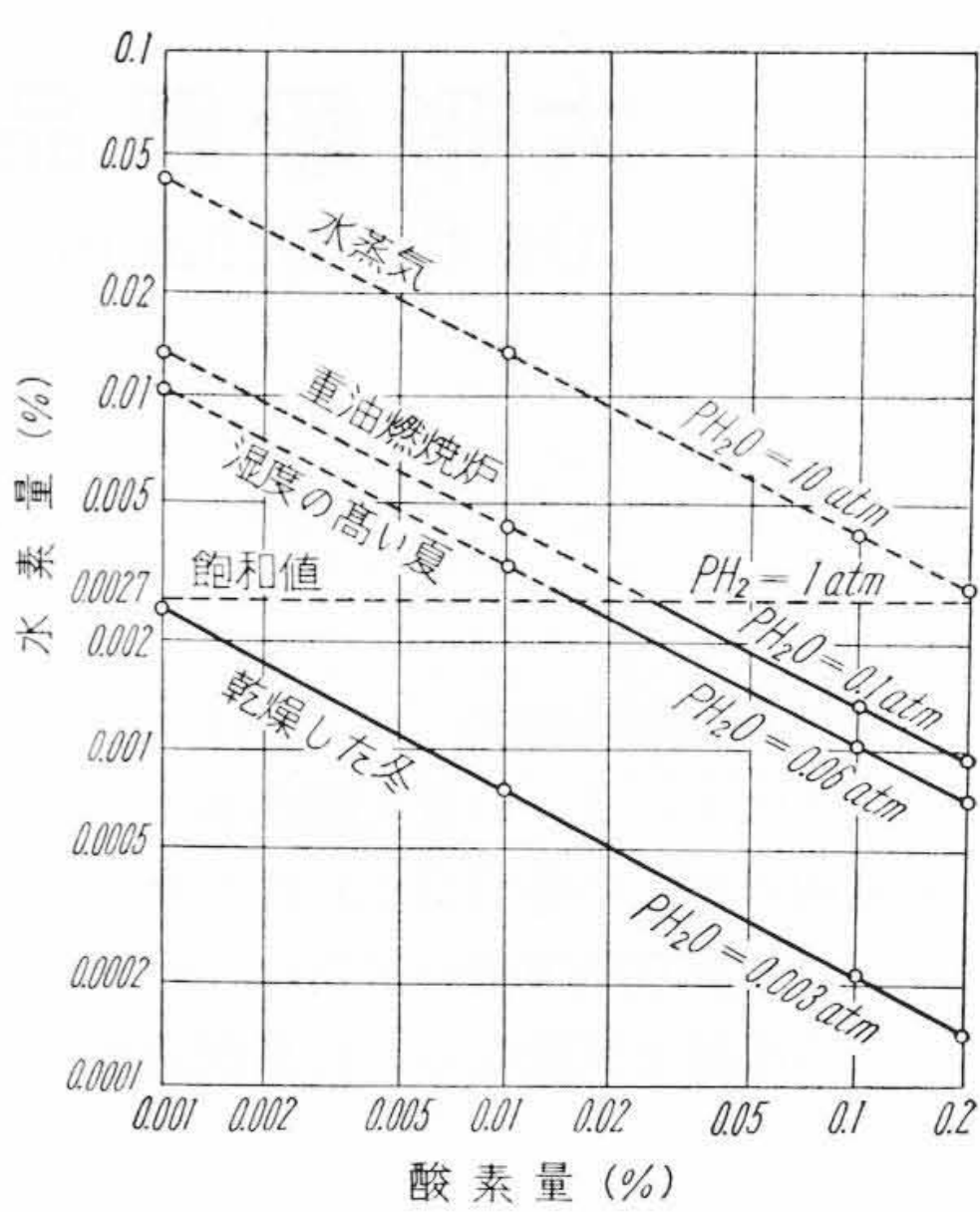
$D_H(\gamma) = 1.5 \times 10^{-2} \times e^{-6,000/T} \quad (5)$

これに対して Geller および Sun 氏⁽⁹⁾は同じく溶解度および透過度より計算して Sykes 氏らとやや異なった式を導き出した。

$D_H(\alpha) = 2.2 \times 10^{-3} \times e^{-2,900/RT} \quad (6)$

$D_H(\gamma) = 1.1 \times 10^{-2} \times e^{-9,950/RT} \quad (7)$

Hobson 氏⁽¹⁰⁾は (4)、(5) 式ならびに 200 °C 以下における彼自身の実験値によって第 1 表を得た。



第 2 図 各種ふんい気中における熔鋼中の水素量と酸素量との関係 (Carney, Chipman, Grant)

第 1 表 各温度における α および γ Fe 中の水素の拡散恒数

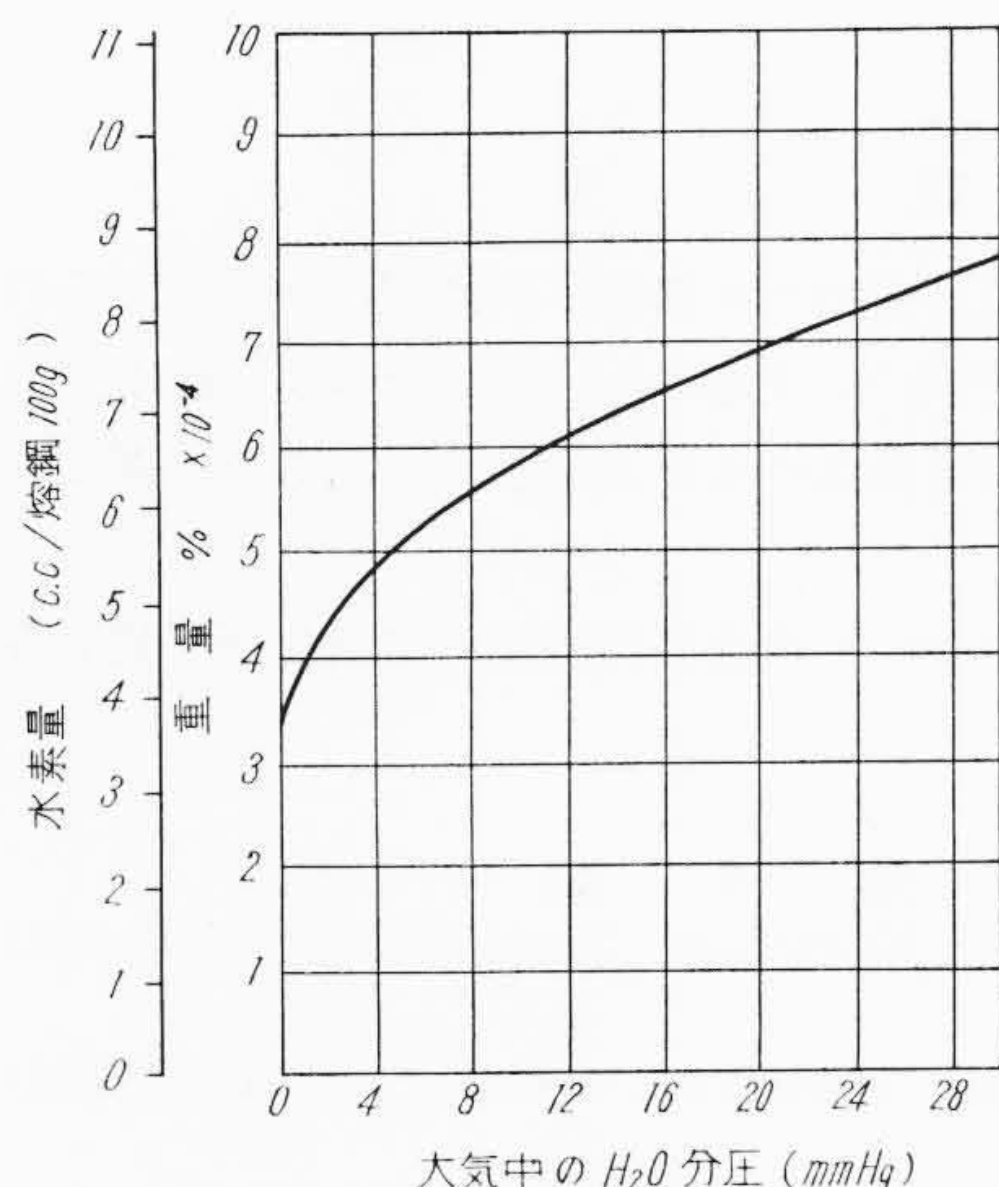
温 度 (°C)	拡 散 恒 数 (cm ² /s)	
	α -Fe	γ -Fe
1,500	3.9×10^{-4}	5.0×10^{-4}
1,400	3.8×10^{-4}	4.1×10^{-4}
1,300	3.6×10^{-4}	3.3×10^{-4}
1,200	3.4×10^{-4}	2.5×10^{-4}
1,100	3.2×10^{-4}	1.9×10^{-4}
1,000	3.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}
900	2.8×10^{-4}	8.7×10^{-5}
800	2.6×10^{-4}	5.7×10^{-5}
700	2.3×10^{-4}	3.1×10^{-5}
600	2.0×10^{-4}	1.5×10^{-5}
500	1.7×10^{-4}	6.4×10^{-6}
400	1.3×10^{-4}	2.0×10^{-6}
300	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-7}
200	6.7×10^{-5}	4.7×10^{-8}
100	1.3×10^{-5}	1.5×10^{-9}
50	1.3×10^{-6}	—
20	3.2×10^{-7}	1.9×10^{-11}
-78	5.8×10^{-9}	—

鋼中における水素の拡散恒数は温度上昇とともに大きくなるが、より以上にオーステナイト、フェライトの相による相違が大きく、たとえば 800°C におけるフェライトおよびオーステナイト中における水素の拡散恒数の比は Geller 氏らの式によればほぼ 5.4 であり、Sykes 氏らの式によってもなお 4.7 となる。

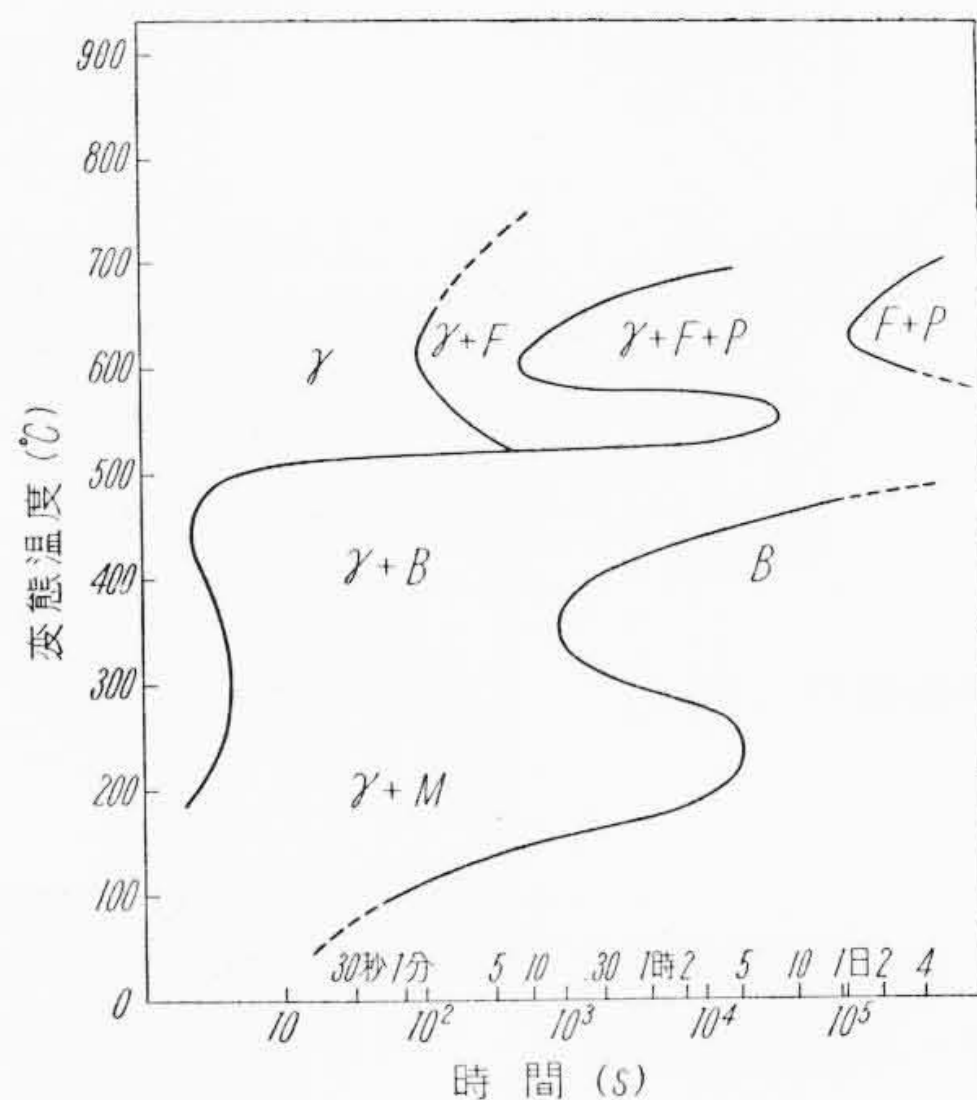
鋼の脱水素処理を考えるには拡散のほか透過を考えねばならない。拡散ではただ金属内での濃度勾配のみが問題になるが、透過には表面反応とその温度における溶解度が大きく影響する。たとえば薄い鉄板を水素が透過する場合には、水素が供給される側では水素はまず鉄の表面に分子として吸着し、触媒反応によって原子に分解してはじめて鉄中に吸収される。水素が逸脱する表面ではちょうどこの逆の反応が進まねばならない。このため透過度はふんい気中の水素の分圧と温度によって変化するが、温度が一定の場合には水素分圧の平方根に直線的に変化する⁽¹¹⁾。すなわち水素分圧と溶解度との関係が、そのまま水素分圧と透過度との関係に成立する。

4. 脱 水 素 処 理

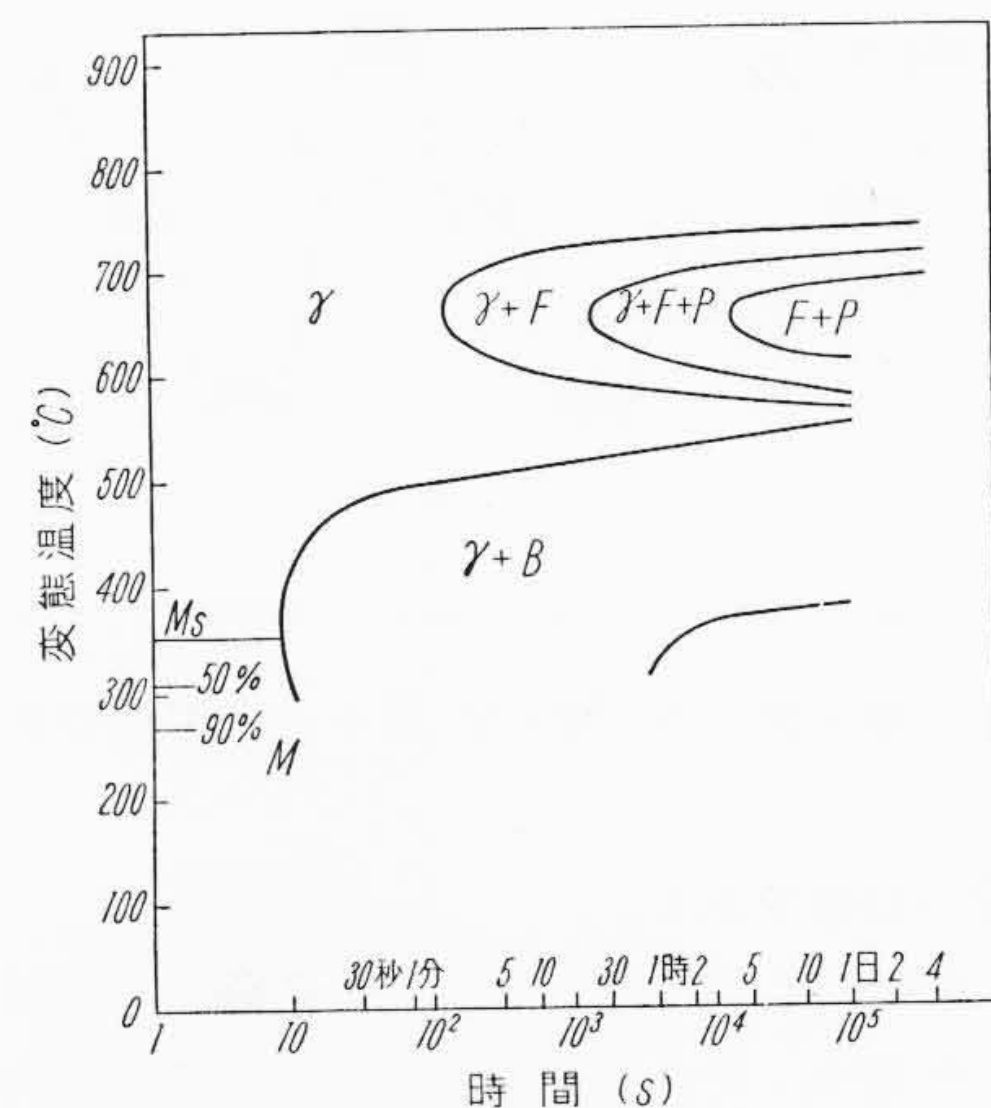
脱水素処理は既述のとおり鋳込当時 4~7 ppm あった鋼塊中の水素量を、その量以下では白点が生じなくなる臨界水素量まで低下させる処理であり、臨界水素量は製品の大きさ、形状、冷却速度などの条件によって変化するが現場的には各種のデータより推して



第3図 大気中の水蒸気分圧と熔鋼中の水素量との関係 (沢)



第4図 Ni-Mo-V 鋼の恒温変態図 (厚母, 根本, 清水)



第5図 Ni-Cr-Mo 鋼の恒温変態図 (Rose, Peter, Strassburg)

2 ppm 前後と考えられる。

水素を迅速に除去するためにはなるべく、(1)径あるいは肉厚を小さくする、(2)水素の拡散恒数を大きくし、(3)水素の溶解度を小さくするような状態にしてやる必要がある。径あるいは肉厚は一般に鍛造仕上り状態でもっとも小であるので処理は仕上鍛造後に行ったほうが効果的である。水素の拡散恒数は前掲第1表のように高温にはなるほど大きいのでなるべく高温のほうがよいが、逆に鋼中の水素溶解度は第1図のように低温になるほど小さく低温のほうが好都合である。またオーステナイト状態はフェライト状態に比較して溶解度は大きく、かつ同一温度での拡散恒数は数分の1の値を示すので水素除去のためには適当な状態であるとはいえない。このような条件を考え合わせると水素除去のために最適な温度はA₁変態点の直下、現場的には650～700℃付近であると考えられる。ただこの場合オーステナイトが完全に分解していることが必要な前提条件である。

オーステナイトを完全に分解させるためにもっとも迅速な方法は焼入によって100%マルテンサイトを作り、これを適当な温度で焼戻す方法であるが、脱水素処理を必要とするほどの鋼材であればこのような方法の採用は当然白点を誘発すると考えられるので採用することは不可能である。白点発生危険温度範囲である200℃付近以下に冷却せず、かつ大きな変態応力を生ずるマルテンサイト変態を起させずにオーステナイトを分解させるには拡散変態を行わせる。ロータ材あるいはピニオン材のように複炭化物生成元素を含んだ鋼材は拡散変態としてパーライト変態およびベイナイト変態の二つをもっているが、分解をよりすみやかに行わせるためには、パーライト変態が短時間に完了する場合にはパーライト変態により、パーライト変態よりベイナイト変態がより短時間内に完了する場合にはベイナイト変態により分解を完了させるべきである。第4図はNi-Mo-V鋼の恒温変態図であるが、かかる鋼種ではベイナイト変態を用いるべきであり、第5図のNi-Cr-Mo鋼の例のごときはパーライト変態により分解を行わせる。

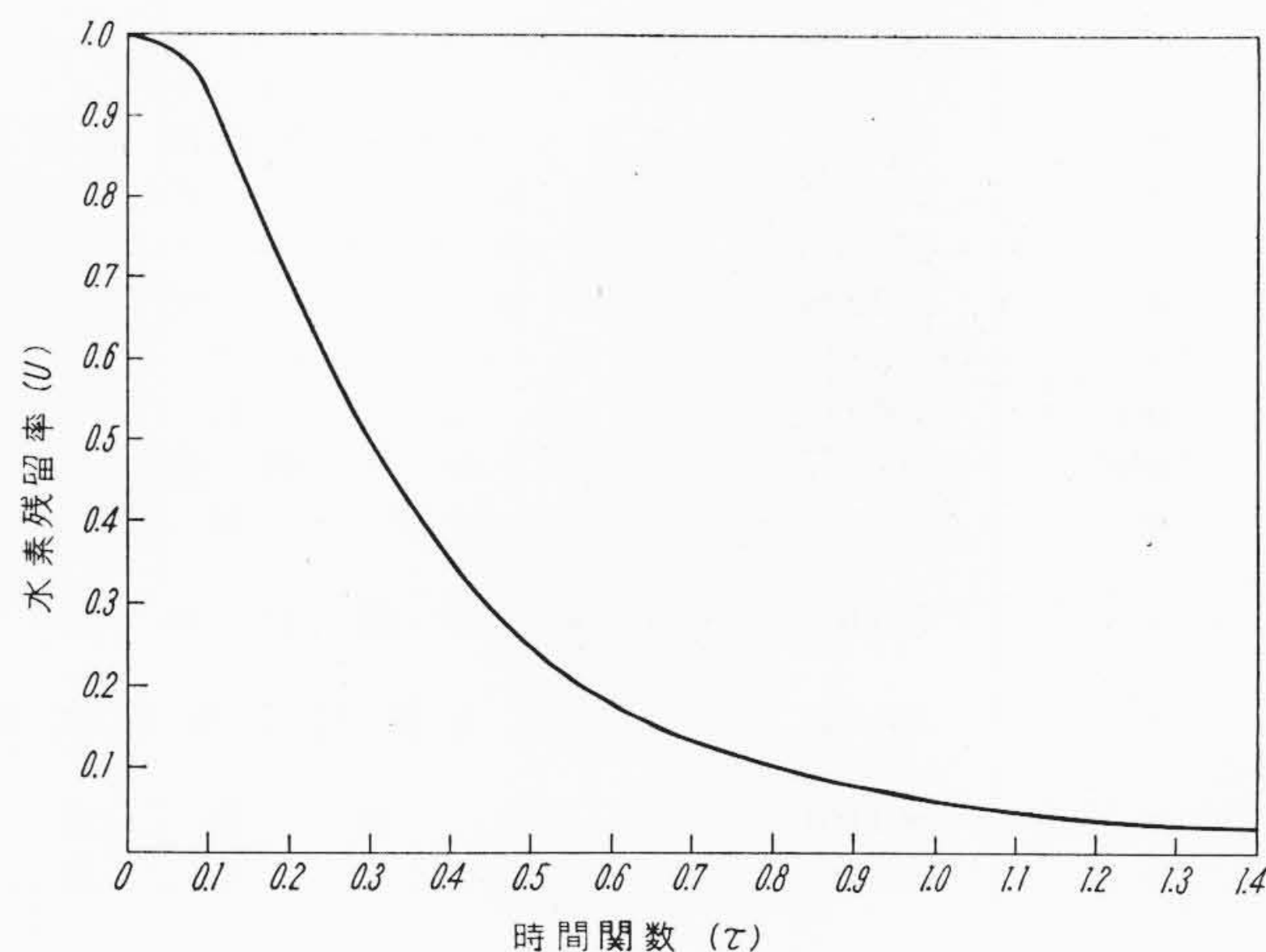
このようにオーステナイトを完全に分解させたのちA₁点直下に保てば水素は表面より漸次放出し、同時に中心部より表面への拡散も行われ中心部の水素濃度も時間とともに減少していく。

Hobson氏⁽¹⁰⁾はRussell氏⁽¹²⁾による熱伝導の計算を水素の拡散放出に応用し、ロータシャフト材についての実験より表面係数を求めて、水素の減少率と処理時間、鋼材の半径および拡散恒数との関係を導き出した。第6図はその結果を示す。ここにUは円筒の中心部における処理後の水素量の初期水素量に対する比であり、kは材

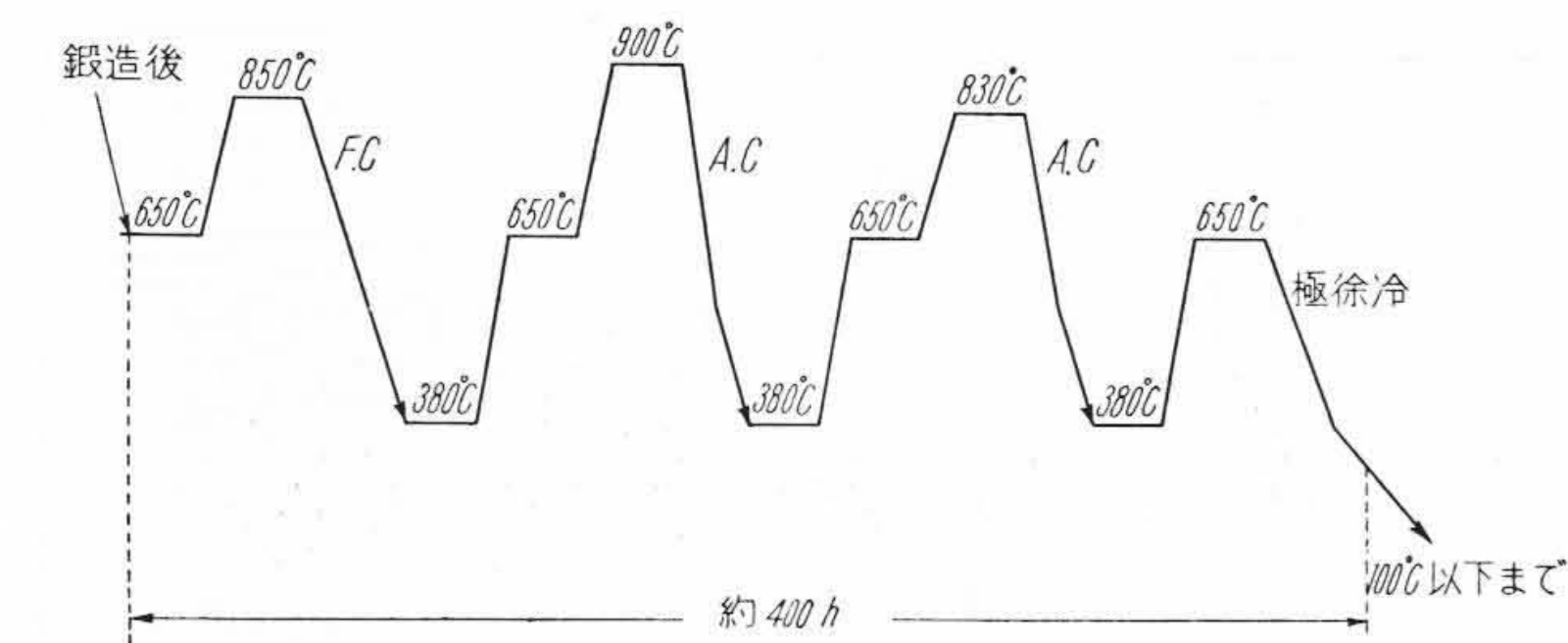
料の拡散恒数 (cm²/s)、tは処理時間 (s)、rは半径 (cm) であり、 τ は $\tau = kt/r^2$ の関係にある。この図によれば直径1mのロータシャフト素材の中心部における水素量を半減するためには650℃で約1,000時間焼鈍する必要があることを示す。

実際の作業においては処理温度を650℃付近に一定に保たないで、途中オーステナイト領域に加熱しそれをさらに冷却する処理をそう入している。この利点は変態が原子の拡散を伴い同時に水素原子の移動も促進するからである。加熱によりフェライトがオーステナイトに変態する場合には変態は外層より漸次中心に及ぶが、これはオーステナイト部分とフェライト部分の境界層が表面より中心に移動することであり、この境界線ではオーステナイトの水素溶解度がフェライトのそれの約2倍近く大きいので水素原子はフェライト部分からオーステナイト部分に、つまり内側から表面に向かって移動し全体として中心部の水素濃度を低下させることができる。オーステナイトからの冷却はできうるならば空冷してベイナイト変態を行わせるのがよい。空冷により組織の均一化、微細化を図れるからであるが、また空冷して焼戻を行ったソルバイト組織はあらいパーライト組織よりも水素の拡散を容易にする⁽¹³⁾からである。

このような脱水素処理中に変態を行わせる操作は鋼材の材質、大きさによって異なるが、1回から数回繰返される。このうち最終回の処理は特に大切であり、第2節で述べたように残留応力を極小にし変態を完了させることが必要である。オーステナイトが完全に分解せず、局所的に残留オーステナイトを残しやすい鋼種には二重焼



第6図 ロータシャフト素材の水素放出曲線 (Hobson)



第 7 図 Ni-Mo-V 鋼ロータ素材の脱水素処理曲線の一例

戻が有効である。

最後のしめくくりとしての危険温度範囲を通過して常温まで冷却する作業は、それ自体費用がかからず時間的にもわずかの差であるにもかかわらず、その影響はかなり大きいと思われるので入念に行う必要がある。この目的のために除冷用ピットをもつことは非常に効果がある。

日立製作所水戸工場の脱水素処理の一例を Ni-Mo-V 鋼について示せば第 7 図のとおりであり、かかる処理により白点完全防止に成功している。

5. 真空造塊法と脱水素処理

真空造塊法によって得られる鋼塊の水素含有量は真空造塊法そのものに差があるので一律ではないと思うが、一般には脱水素処理を行う必要のない程度の水素量に下げることが目的であろう。

日立製作所水戸焼工場の真空造塊装置によって得られる鋼塊の水素量は 1～2 ppm であり⁽¹⁴⁾ 臨界水素量以下であると考えられるので、これらの鋼塊を使用した場合には特に脱水素処理は行わず、組織の微細化と応力の除去のために焼準、焼戻を行っている程度である。かかる方法によっても真空造塊法採用後まだ一度も白点の発生をみ

ていない。

6. 結 言

以上従来行ってきた白点防止のための脱水素処理について、その実際と簡単な理論的裏付けについて述べた。真空造塊法の採用によりかかる処理が不必要となり過去のものとなりつつあるのは喜ばしい限りである。

終りに種々ご指導をいただいた日立製作所水戸工場製鋼部関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) E. Houdremont, H. Korschan: Stahl u. Eisen 55(1935) 297～304
- (2) C. A. Zapffe: Metals Handbook, Amer. Soc. Met. (1948) 1208～1209
- (3) A. Sieverts: Z. phys. Chem. 77(1911) 591～613
- (4) J. Chipman: Basic Open Hearth Steelmaking AIME 1951 685～686
- (5) D. J. Carney, J. Chipman, N. J. Grant: Elec. Furnace Steel Proc. AIME 6(1948) 34
- (6) 沢繁樹: 鉄と鋼 41(1955) 1166～1172
- (7) 沢繁樹: 鉄と鋼 41(1955) 416～424
- (8) C. Sykes, H. H. Burton, C. C. Gagg: J. ISI 156(1947) 155～180
- (9) W. Geller, Tak-Ho. Sun: Archiv für das Eisenhüttenw. 21(1950) 423～430
- (10) J. D. Hobson: J. ISI April (1959) 342～352
- (11) G. Borelius, S. Lindblom: Ann. Phys. 82 (1927) 201～226
- (12) T. F. Russell: Ist Report of the Alloy Steels Research Committee: ISI Spec. Rep. No. 14(1936) 149～187
- (13) P. Bardenhener, G. Thanheiser: Mitt. K-Wieh. -Inst. Eisenforschung 10(1928) 323～342
- (14) 竹入信, 藤本裕, 門瀬益雄, 渡辺準平: 真空鑄造法の研究, 日立評論 別冊 No. 33, 23～31 (1959)



特 許 と 新 案

最近登録された日立製作所の特許および実用新案 (その 3)

(第70頁より続く)

種 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
実 用 新 案	501174	逆転防止装置を有する深井戸ポンプ用モータ	亀 有 工 場	田 中 栄 吉 山 堀 内 正 堀 小 川 儀 夫 野 山 江 章 俊 村 村 茂	34. 10. 15
"	501195	コ ロ 軸 受 の 給 油 装 置	亀 有 工 場	田 中 小 川 儀 夫 堀 内 江 章 俊	"
"	501202	深 井 戸 ポンプの軸しゅう動装置	亀 有 工 場	山 堀 内 江 章 俊	"
"	501203	スキップカーの連続自動積込装置	亀 有 工 場	野 村 茂	"
"	501204	旋回体のケープル給電装置	亀 有 工 場	石 山 実	"
"	501205	旋回体のケープル給電装置	亀 有 工 場	石 山 実	"
"	501206	旋回体のケープル給電装置	亀 有 工 場	石 山 実	"
"	501210	可動コンベヤ付クレーン	亀 有 工 場	平 栗 保 平	"
"	501212	ね じ れ 歯 車	亀 有 工 場	保 延 誠	"
"	501177	送りネジ間隙除去装置	川 崎 工 場	長 田 道 夫	"
"	501178	送りネジの間隙切換装置	川 崎 工 場	阿 長 武 田 芳 道 長 武 田 芳 道	"
"	501152	自動平衡計の指示装置	多 賀 工 場	小 鷲 沢 重 樹 鷲 見 哲 雄	"
"	501157	積算電力計用位相補償用短絡環	多 賀 工 場	木 内 勝 造 米 岡 正 四 郎	"
"	501161	真 空 度 測 定 装 置	多 賀 工 場	小 池 武	"
"	501162	洗 濯 槽 支 持 装 置	多 賀 工 場	篠 岡 子 三 郎 益 子 五 郎	"
実 用 新 案	501163	電 気 洗 濯 機	多 賀 工 場	林 益 子 三 郎	34. 10. 15