

鉄—窒素系の研究

(内耗による鉄—窒素系の析出及び復元について)

山口 秀 夫, 市 村 稔

The Reversion of Nitride Precipitates in the Fe-N System by an Internal Friction Method

Hideo YAMAGUCHI and Minoru ICHIMURA

Abstract:— The precipitation of nitrides in quenched α -Fe-N alloys was studied by an internal friction method.

Specimens (an iron rod) used in this study were high pure iron (Johnson Matthey). The rod is of radius 5 mm and length 150 mm. It was reduced into 0.76 mm diameter by cold-drawing. The main impurities of this specimens were carbon (ca. 0.03 weight %), nitrogen (0.01%) and oxygen (0.01%). Specimens were completely decarburized and denitrided by wet hydrogen treatment, and then arbitrarily contents of nitrogen were charged.

From the precipitation curves, the solubilities of nitrogen in α -iron at two different states, and the heat of solution were obtained as follows.

$$\log N (\text{Fe}_4\text{N}) = -1480/T + 0.60$$

$$\Delta H = 6760 \text{ cal/g mol (250}^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C)}$$

$$\log N (\text{Fe}_{16}\text{N}_2) = -1565/T + 1.22$$

$$\Delta H = 7150 \text{ cal/g mol (150}^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C)}$$

From the values of the temperature of the maximum internal friction at certain frequency, the activation energy of nitrogen atom in α -iron was determined, and the diffusion constant was calculated.

$$Q = 19000 \text{ cal/mol} \quad D_0 = 1.89 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

For the investigation of reversion, the metastable nitride formed at 150°C completely redissolved after up-quenching to 260°C. The overshooting effect of the internal friction is presumed to depend on both of the size and the number of nitride precipitates formed during pre-ageing, and the reason of this effect might be represented by the evaporation of small particles and by partial dissolution of large particles.

I 緒 言

α 鉄-窒素系に於ける窒化物の析出に関しては、これまで種々の方法で広く研究されてきた。^{(1),(2),(3)} 窒化物には二種類あり一つは高温で形成される安定析出物 Fe_4N であり、もう一つは低温で形成される準安定析出物 Fe_{16}N_2 である。焼入時効にともなって変化する現象に、電気抵抗、磁性、格子定数、密度等があり、これらの変化から析出量を正確に知る事は可能であるが、この外に固溶原子の応力に基づく格子間拡散による内耗極大値、 Q^{-1} が固溶原子の量に比例するという現象を利用する事もできる。

本実験に於ては、 α 鉄-窒素系の焼入時効に於ける窒化物の析出過程を主として内耗により追求した。その為に試料を湿水素処理により脱炭脱窒し、歪一焼鈍法により結晶粒を調整した後、適当に窒化した。

Q^{-1} と時間の対数、 $\log t$ との関係から α 鉄中の窒素の固溶限、及び溶解熱を求めた。又同時に電顕観察により析出物の形、種類、方位なども合せて追求した。

更に復元実験を行い、 α 鉄に対する窒化物の溶解及び析出過程を主として内耗により追求した。

II 試 料 作 製

試料はジョンソンマッセイ社製の $5\text{ mm}\phi \times 150\text{ mm}$ の高純度鉄を、 $0.76\text{ mm}\phi$ に冷間線引したものをを用いた。その化学成分を表 1 に示す。

表 1 化 学 組 成

成分元素	C	O	N	Si	Mn	Cu	Ag
含有量 p.p.m.	300	100	100	3	2	1	1
	28※		166※				

※ 本実験の分析値

脱炭脱窒の結果は内耗値からは炭素、窒素ともにその残存が認められなかった。表 2 の試料グループ A と D はこのあと 500°C で窒化後均一化処理を、 580°C で 18 時間行った。試料グループ A をアルゴンガス中で 950°C で 5 分加熱後水焼入したものの平均結晶粒径は $50\sim 100\ \mu$ の範囲であった。

試料グループ B は脱炭脱窒後、 $0.76\text{ mm}\phi$ から $0.70\text{ mm}\phi$ に冷間線引後、 950°C で 10 分加熱後炉冷して、 880°C で 6 時間アルゴンガス中で焼鈍し炉冷した。窒化は $400\sim 500^\circ\text{C}$ で、又均一化処理は、 580°C で 18 時間行った。このグループの平均結晶粒径は $350\sim 1500\ \mu$ であった。

試料グループ C は、脱炭脱窒後、室温で 2 回/インチの振り加工を与え、 890°C で 2 時間アルゴンガス中で再結晶焼鈍を行い、平均結晶粒径を $700\sim 2500\ \mu$ にした。窒化、均一化処理は A、B グループと同様である。

又、溶体化処理は 580°C で 10 分アルゴンガス中で行い水焼入した。

表 2 に試料一覧を示す。

表 2 試 料

グループ	番 号	窒 素 量 ppm	註 1 $Q_0^{-1} \times 10^4$	註 2 K	結 晶 粒 径 μ	実 験
A	A 1	190	156	1.22	120~140	
	A 2	243	180	1.35	70~100	
	A 3	349	271	1.29	70~100	
	A 4	552	340	1.62	50~100	
	A 5	665	380	1.75	—	
	A 6	634	365	1.74	50~100	焼入時効 (内耗) 150° C
	A 7	520	360	1.45	50~100	250° C 350° C
B	B 1	341	309	1.10	350~1500	
	B 2	430	330	1.30	320~1500	
	B 3	331	267	1.24	350~1500	
	B 4	575				電 顕
C	C 1		320		700~2500	復元 (内耗)
	C 2		310		700~2500	//
	C 3		300		700~2500	//
	C 4		290		700~2500	//
	C 5		260		700~2500	等時加熱曲線
	C 6		299		700~2500	光 顕
D	D 1	750				焼入時効 (電気抵抗)
	D 2	556				//
	D 3	280				//

註 1) Q_0^{-1} ; 溶体化処理直後の内耗極大値註 2) K ; $wt\%N = K Q^{-1}$

III 実 験 方 法

脱炭脱窒は水素ガスを純水素精製装置により精製し, 50°C の水蒸気バスを通した湿水素 ($H_2 + H_2O$) ガスにより行った。水素ガス流量は約 500 cc/min で行った。

窒化は NH_3 ガスを分解炉により分解した, 所望の ($N_2 + H_2 + NH_3$) 混合ガスにより行った。ガス流量30及び 100 cc/min に於て NH_3 ガスの分解率は, 98及び65%だった。ガス流量は流量計及び差圧計により調整した。

均一化処理は, 試料を真空ガラスカプセルに封入し, 580°C で18時間焼鈍して窒素分布を均一にした。均一化処理の一例を図1に示す。

窒素分析は, JIS G-1228 にもとずき, 炭素分析は, 燃焼中和滴定法を改良したもので行った。

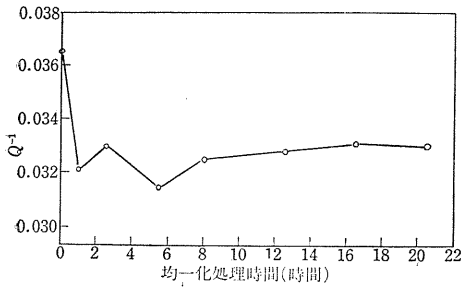


図1 均一化処理の効果
 真空ガラスカプセル中、580°C で加熱
 後空冷溶体化処理は Ar ガス中 580°C
 で10分加熱後水焼入約 1 cps で内耗測定

内耗は 試料に約 1 cps 程度の振り振動
 を与え、振巾の自由減衰からその値を
 求めたがその最大値(ピーク値)は、約
 22°C で観察された。内耗測定装置を図
 2 に示す。

ここで、内耗ピーク値(Q⁻¹)は、振り
 振動法に於て、次の式から求められる。

$$Q^{-1} = \ln(A_0/A_n) / n\pi$$

ただし A₀; 最初の振巾
 A_n; n 番目の振巾
 n; 振動の回数

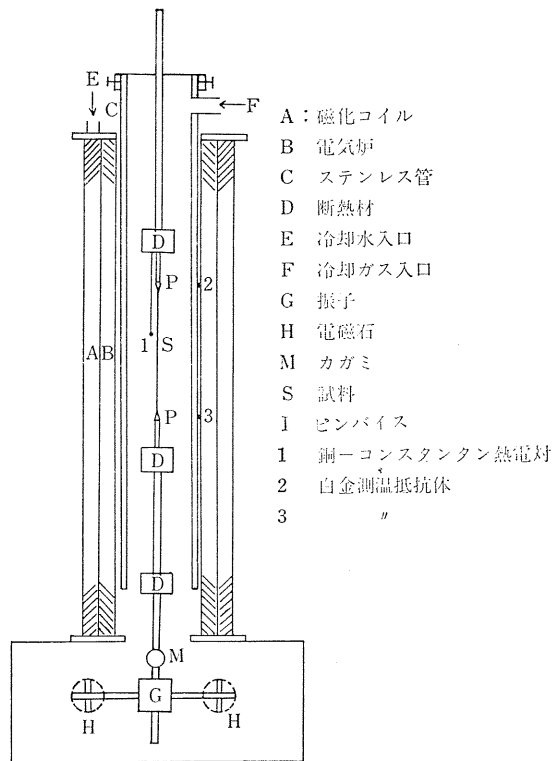


図2 内耗測定装置

電気抵抗は、0.76mmφ×750mmの試料を、0°C のトランスフォーマー オイル中でダ
 ブブリッジ法により測定した。なお標準抵抗は、0.1Ω のものを 20°C で使用した。
 電顕観察はレプリカ法によった。

IV 実験と結果

1) 定数 K の決定 これまで多くの研究者によって、窒素量 (wt % N) と内耗ピーク

値 (Q^{-1}) の定量的関係が得られ, それは次の式で表わされる。

$$\text{wt\%N} = K Q^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

彼らの結果によると K の値は結晶粒径及び, 固溶窒素量に依存する。これらの関係は図 3 及び図 4 に示される。ただし, 図 3 の窒素量は, 化学分析により求められたものである。

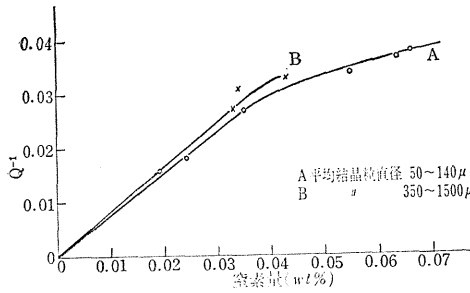


図 3 最大内耗値と窒素量の関係 (1cps)

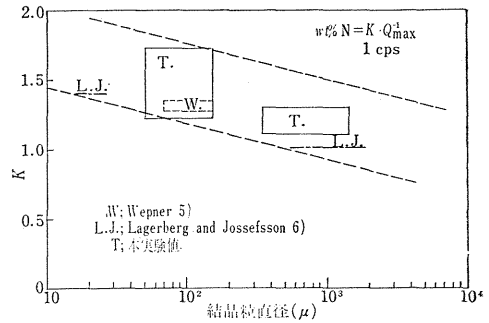


図 4 定数 K と結晶粒度の関係

2) α 鉄中の窒素の拡散 内耗測定に於て振動数を一定とすると, 内耗ピークの起る温度が決まり, 1 cps では窒素のそれは 22°C である。一般に拡散に関し

$$\overline{X^2} = 2Dt \dots\dots\dots (2)$$

ここに $\overline{X^2}$; one dimension の mean square penetration

D ; diffusion coeff.

t ; diffusion の起る時間

mean-square radial penetration を $\overline{R^2}$ とすると $\overline{R^2}/3 = 2Dt$

d を diffusing atom の nearestneighbor distance とし, これに対する時間を τ とすれば,

$$d^2/3 = 2D\tau$$

即ち $D = d^2/6\tau \dots\dots\dots (3)$

即ち, τ は mean-jump time である。我々の場合 $d = a/2$ であるから (ただし, a は鉄の格子定数)

$$D = a^2/24\tau \dots\dots\dots (4)$$

となる。 τ と τ_r (relaxations time) との間には bcc 格子であるから, 次の関係がある。

$$\tau = 3\tau_r/2 \dots\dots\dots (5)$$

又, 一方振り振動の内耗実験に於ては Q^{-1} が最大の時には, ω を角速度とすると,

$$\tau_r \omega = 1 \dots\dots\dots (6)$$

(4), (5) 及び (6) 式から

$$D = a^2\omega/36 = a^2 2\pi f/36 \dots\dots\dots (7)$$

ただし, f は振りの cps である。

a, π の値を (7) 式に代入して両辺の対数をとると

$$\log D = -15.8438 + \log f \dots\dots\dots (8)$$

種々の振り振動数に於ける, 内耗ピーク温度の結果を表 3 に示す。

一般に拡散係数 D は次の式で表わされる。

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

ただし D_0 ; 拡散恒数

Q ; 拡散の為の活性化エネルギー

R ; ガス定数

両辺の対数をとると

$$\log D = \log D_0 - Q/4.575T \dots\dots\dots (9)$$

図5に表3と(8)式及び(9)式によって、拡散係数の対数 $\log D$ と、ピーク温度の逆数 $1/T$ の関係を示す。この直線の傾きから α 鉄中の窒素の拡散の為の活性化エネルギー、 $Q=19,000\text{cal/mol}$ 及び拡散恒数、 $D_0=1.89 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{sec}$ の値を得た。

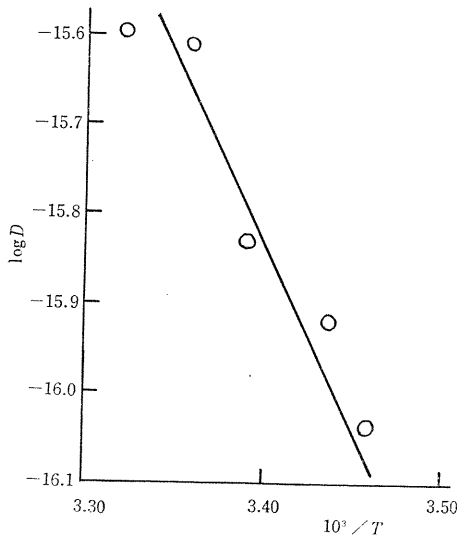


表3 振動数とピーク温度

振動数 cps	ピーク温度 °C
0.639	16.0
0.84	18.3
1.03	22.0
1.71	25.2
1.77	28.0

図5 拡散係数の対数 $\log D$ とピーク温度の逆数 $1/T$ との関係

3) α 鉄中の窒素の固溶体からの析出 焼入時効に伴う内耗ピーク値の減少を図6に示す。150°C 時効は、パラフィンバスにより 250°C 及び 350°C 時効はソルトバスで行った。表4に種々の温度に於ける時効から求められた平衡内耗値を示した。

図6 時効曲線 →

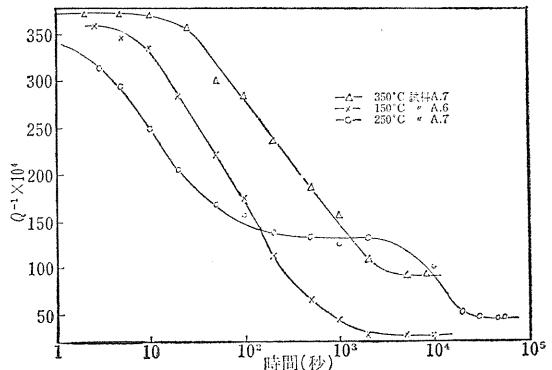
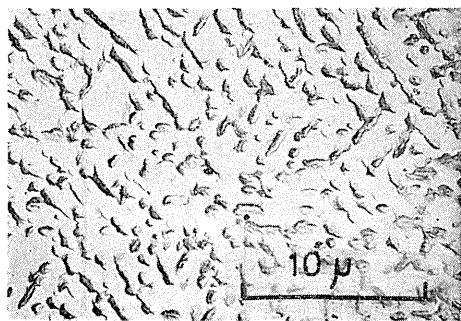


表 4 固 溶 限

析出相	時効温度 °C	試料番号	平衡内耗値	固溶量 (ppm)
安定相 Fe_4N	450	A 5	$Q^{-1} \times 10^4$ 270	350
		A 7	268	347
	400	A 5	200	257
		A 7	187	240
	350	A 5	140	180
		A 7	110	142
	300	A 5	80	103
	250	A 7	40	57
準安定相 Fe_{16}N_2	250	A 7	130	167
	150	A 6	25	33

250°C 時効に於ける電顕写真を, 写真 1 に示す。

写真 1 250°C 時効による組織変化, 電顕レプリカ法 倍率は (a) に同じ



(a) 250°C × 200秒



(c) 250°C × 5400秒



(b) 250°C × 1000秒



(d) 250°C × 10000秒



(c) 250°C × 56000秒

4) 復元 窒化物の安定相及び準安定相の存在温度範囲を考慮して、前時効温度 (T_1) と復元温度 (T_2) とを選び、 $T_1 \rightarrow T_2$ を、準安定相 \rightarrow 準安定相範囲 ($M \rightarrow M$)、準安定相 \rightarrow 安定相範囲 ($M \rightarrow S$)、安定相 \rightarrow 安定相範囲 ($S \rightarrow S$) とに分けた。溶体化処理直後の、内耗ピーク値 Q_0^{-1} と、 T_1 時効の平衡内耗ピーク値 $Q_{T_1}^{-1}$ との差を1として規格化した内耗量と復元時間の関係を、図7 ($M \rightarrow M$)、図8 ($M \rightarrow S$)、図9 ($S \rightarrow S$) に示す。図10に *overshooting* 量と復元温度の関係、図11に復元比と復元温度の関係、図12に等時加熱曲線、図13に復元—時効—復元曲線を示す。

写真2に、図13に基く光学顕微鏡写真を示す。

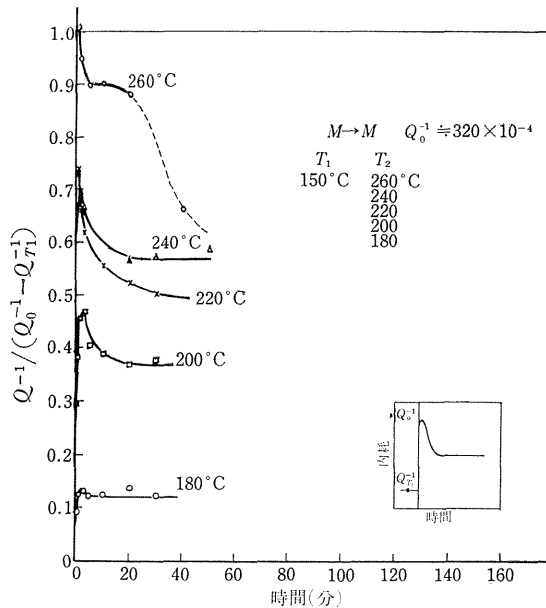


図7 復元曲線 ($M \rightarrow M$)

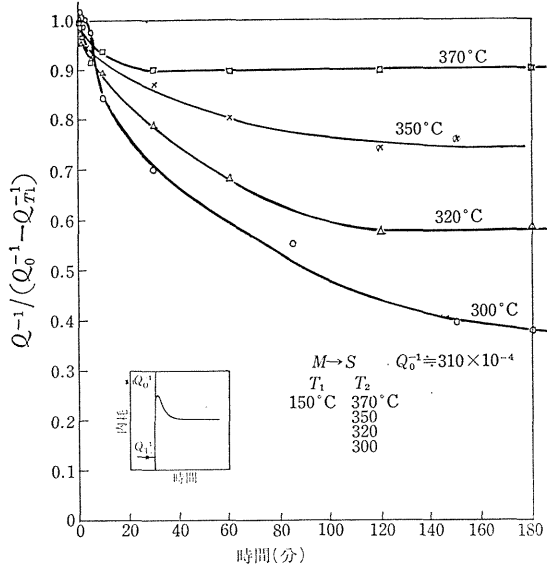


図 8 復元曲線 ($M \rightarrow S$)

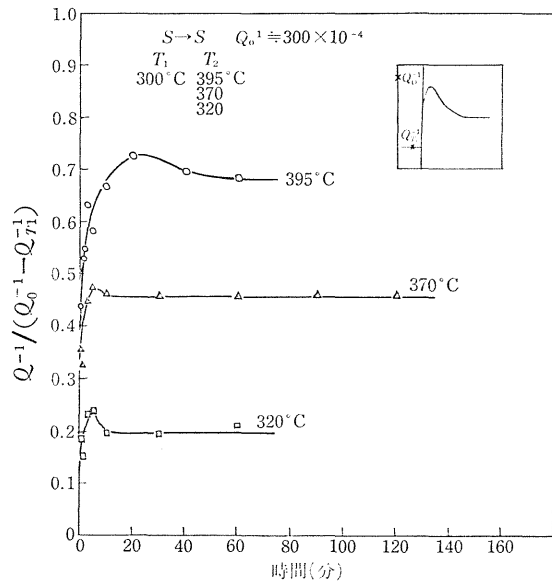


図 9 復元曲線 ($S \rightarrow S$)

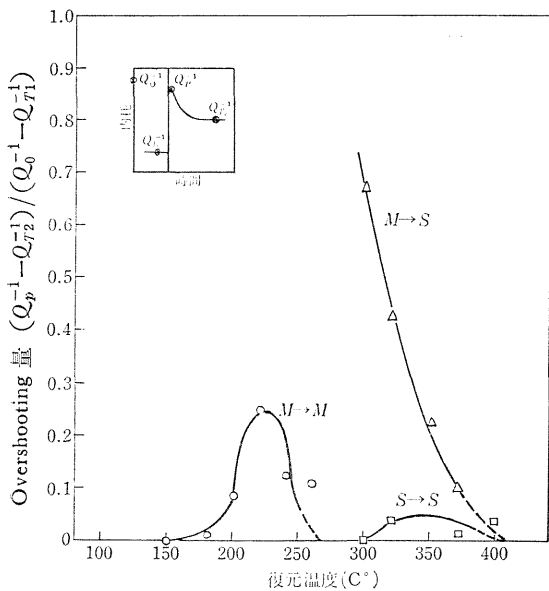


図10 Overshooting 量—復元温度曲線

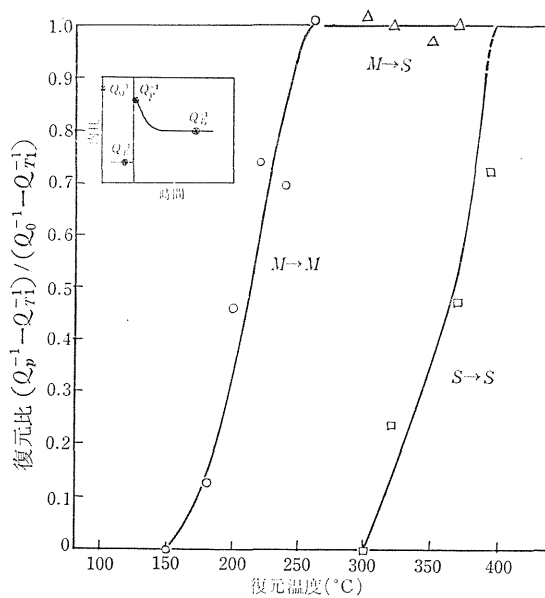


図11 復元比—復元温度曲線

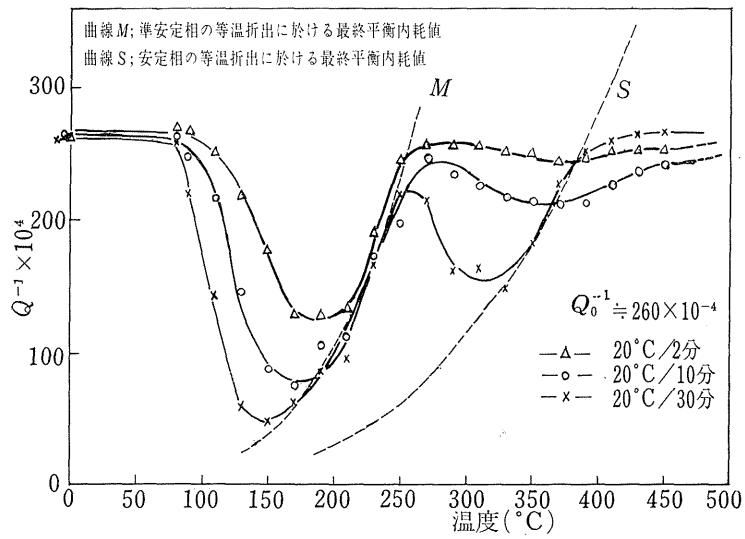


図12 等時加熱曲線

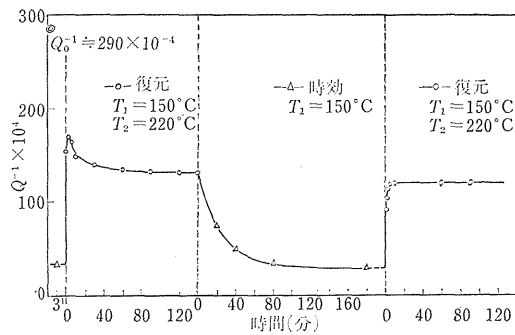
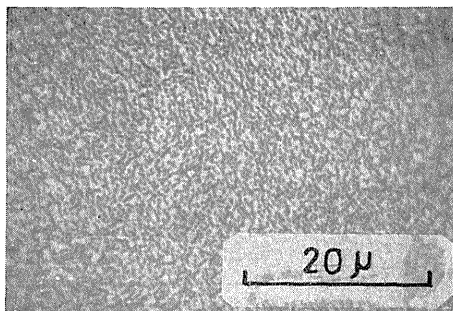
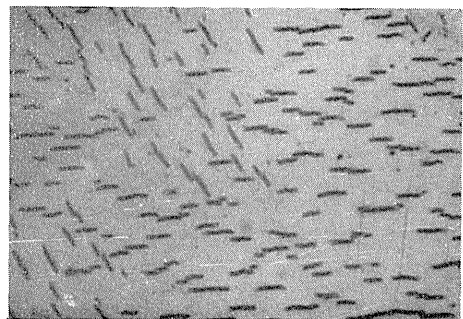


図13 復元—時効—復元曲線

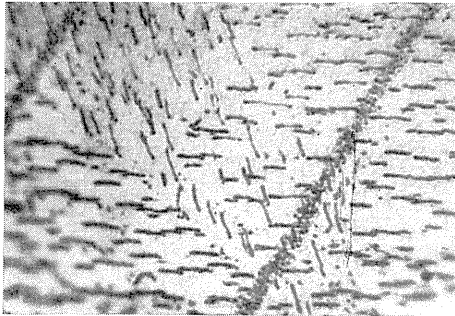
写真 2 復元—時効—復元曲線に於ける組織変化, 光学顕微鏡法
倍率は (a) に同じ



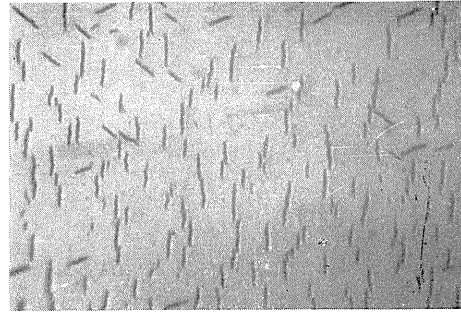
(a) 150°C × 3.5時間



(b) 220°C × 3.5時間



(c) 150°C × 3時間



(d) 220°C × 1.5時間

V 考 察

(I) 式の定数 K については、今迄種々の値^{(5),(6),(7),(8)}が報告されているが、本実験では結晶粒径が $50\sim 140\mu$ の場合は $1.22\sim 1.75$ 、結晶粒径が $350\sim 1500\mu$ の場合は約 1.30 である。
 (図4参照) これらの結果は *Wepner*⁽⁵⁾ 及び *Lagerberg*⁽⁶⁾ らの結果と矛盾しない事を確認した。(図4参照)

α 鉄中の窒素原子の拡散に関しては、拡散係数の対数 $\log D$ とピーク温度の逆数 $1/T$ との関係が図5の様になったが *J. D. Fast*⁽⁸⁾ や *C. A. Wert*⁽²⁾ による $\log D$ と $1/T$ の関係を本実験の値と合せてプロットすると図14の様になり、非常に良い一致を示した。

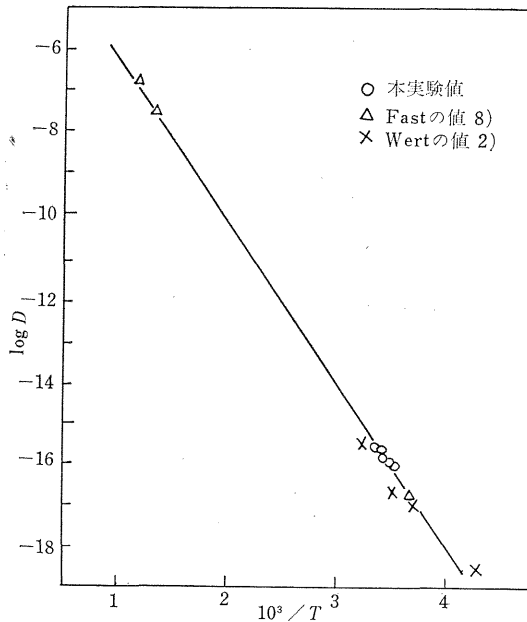


図14 拡散係数の対数 $\log D$ とピーク温度の逆数 $1/T$ との関係

α 鉄中の窒素の固溶体からの窒化物の析出に伴って内耗値は減少し、平衡値に近づくが (図6参照) この平衡値は、その時効温度に於ける固溶限に相当する。表4に、種々の時

効温度に於ける, 平衡内耗値を示したがこれを基にして, 図15に α 鉄に於ける Fe_4N 及び Fe_{16}N_2 と平衡する窒素の固溶限を示した。

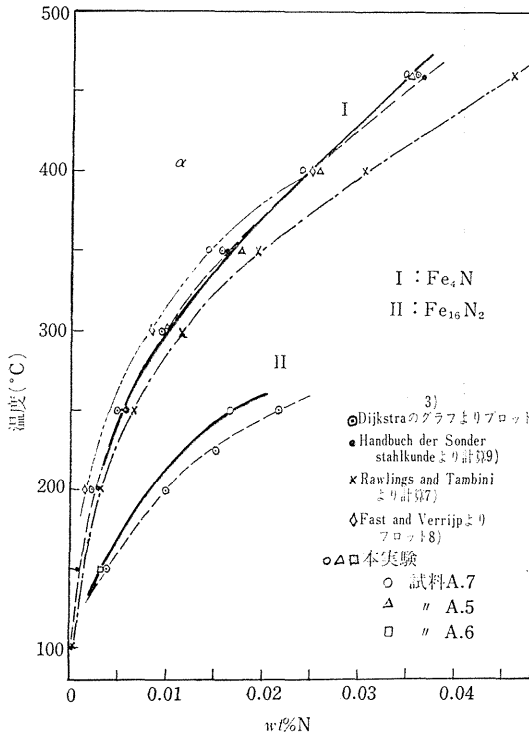


図15 Fe_4N 及び Fe_{16}N_2 と平衡する α -鉄中の窒素の溶解度

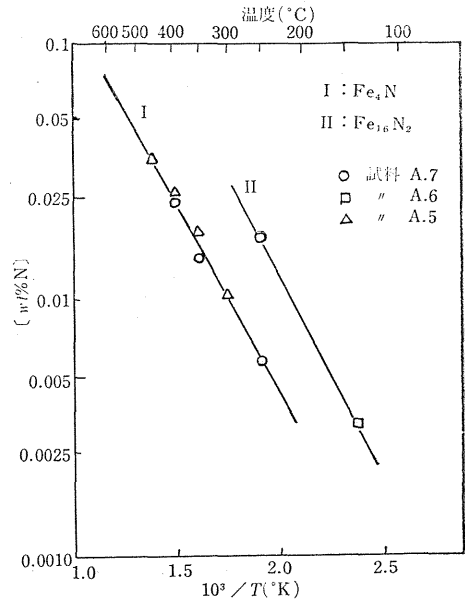


図16 Fe_4N 及び Fe_{16}N_2 と平衡する α -鉄中の窒素の溶解度

完全な固溶体の場合には, 固溶限 $[N]_{sol}$ は $\left(\frac{\partial \ln [N]_{sol}}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta H}{RT}$

又は $\ln [N]_{sol} = -\Delta H/R T + \text{const}$ $\log [N]_{sol} = -\Delta H/4.575T + C \dots (10)$

ここに ΔH は析出相 1 グラムモル当りの溶解熱である。(10) 式に基いて, 図16に, $\log[\text{wt}\% \text{N}]$ と $1/T$ の関係を示す。

Fe_4N に対する固溶限は

$$\log N(\text{Fe}_4\text{N}) = -1480/T + 0.60 \dots (11)$$

又 $\Delta H = 6760 \text{ cal/g mol}$ ($250 \sim 450^\circ \text{C}$)

Fe_{16}N_2 に対する固溶限は

$$\log N(\text{Fe}_{16}\text{N}_2) = -1565/T + 1.22 \dots (12)$$

又 $\Delta H = 7150 \text{ cal/g mol}$ ($150 \sim 250^\circ \text{C}$) となった。

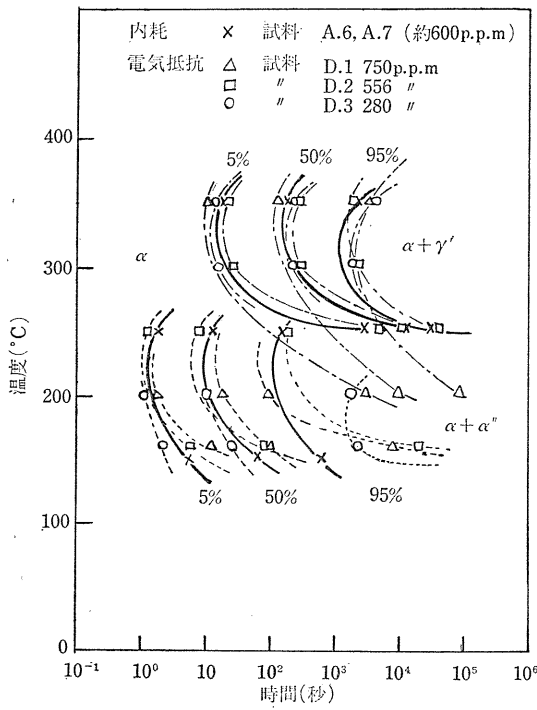
なお Fe_4N に対する固溶限は, Rowlings⁽⁷⁾ によると

$$\log V(\text{Fe}_4\text{N}) = -1649/T + 0.942 \dots (13)$$

又 $\Delta H = 7540 \text{ cal/g mol}$ ($300 \sim 550^\circ \text{C}$)

Hand buch der sonderstahl kunde⁽⁹⁾ によると

$$\log V(\text{Fe}_4\text{N}) = -1550/T + 0.70 \dots (14)$$



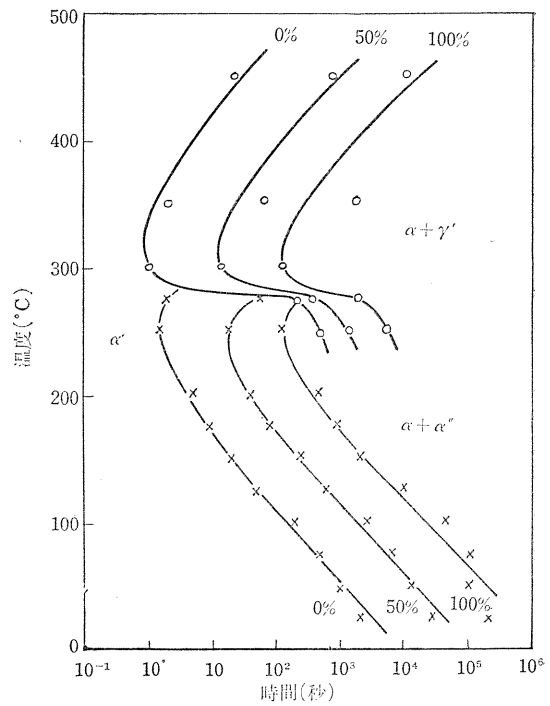
又 $\Delta H = 7100 \text{ cal/g mol}$

$Fast$ ら⁽⁸⁾ によると

$$\log N(\text{Fe}_4\text{N}) = -1814/T + 1.090 \quad (15)$$

← 図17 等温析出曲線

図13 等温析出曲線⁽³⁾ →



又 $\Delta H=8300\text{cal/g mol}$ ($380\sim 580^\circ\text{C}$) であり大体同様の値である。又本実験の結果は $250\sim 450^\circ\text{C}$ (Fe_4N) に於て *Dijkstra*⁽³⁾ の結果と非常に良い一致を示した。又、図6の時効過程を析出割合として考え、電気抵抗による焼入時効の変化と合せて、図17に、等温析出曲線を示した。

図18に *Dijkstra*⁽³⁾ の析出曲線から同様にして求めた等温析出曲線を示す。この場合の窒素量は 430ppm である。

写真1は 250°C 時効に於ける組織変化で、(a) と (b) は準安定相析出による内耗値変化に対応し、(d) と (e) は安定相析出による内耗値変化に対応する。(c) は安定相析出の直前と考えられ準安定相の析出物が大きく成長している。(d) は安定相の析出物の間に準安定相の析出物が残っている状態である。(図6参照)(c) 及び (e) から、ステレオ法によって Fe_4N 及び Fe_{16}N_2 の *habit plane* が、それぞれ $(100)_a$, $(210)_a$ である事を確認した。

次に復元に関し、図7 ($M\rightarrow M$) の復元曲線によると、 $T_1=150^\circ\text{C}$, $T_2=260^\circ\text{C}$ で完全に復元したが $T_2=180\sim 240^\circ\text{C}$ の範囲では、不完全であった。この試料の準安定相の飽和固溶温度は図12の曲線 *M* 及び等時加熱曲線より約 270°C と推定されるが、一方、この温度は準安定相の安定存在温度範囲のほぼ限界である。

図8 ($M\rightarrow S$) の場合、 $T_1=150^\circ\text{C}$, $T_2=300\sim 370^\circ\text{C}$ の範囲では、何れも完全に復元したが、これは準安定相の存在が不安定である温度範囲に、*up-quench* された為である。この試料の安定相の飽和固溶温度は、図12の曲線 *S* より約 410°C と推定される。

図9 ($S\rightarrow S$) の場合、 $T_1=300^\circ\text{C}$, $T_2=320\sim 395^\circ\text{C}$ の範囲では、復元は不完全であった。完全復元には、約 400°C が必要と思われる。又、この試料の安定相の飽和固溶温度は、図12の曲線 *S* より約 405°C と推定される。

図10の *overshooting* 量と復元温度の関係は、($M\rightarrow M$) の場合 150°C と約 270°C で0であり、その中間で最大になった。($S\rightarrow S$) の場合にも、 300°C 及び約 410°C の中間に最大があると思われる。($M\rightarrow S$) の場合には、 T_2 の上昇と共に減少し、約 410°C で0になるものと思われる。

図11の復元比は ($M\rightarrow M$) の場合、 T_2 の上昇と共に増加し、 $T_2=260^\circ\text{C}$ で1になった。($S\rightarrow S$) の場合も T_2 の上昇と共に増加し、約 410°C で1になるものと思われる。($M\rightarrow S$) の場合には常に1であった。

図12の等時加熱曲線は加熱速度が $20^\circ\text{C}/2\text{分}$, $20^\circ\text{C}/10\text{分}$, $20^\circ\text{C}/30\text{分}$ の、三条件で行ったが、その変化は大体四段階に分かれる。第一段は、約 80°C からの、内耗値の急激な減少で、これは準安定相の析出に基く。第二段は、これに続く約 260°C までの内耗値の急激な増加で、これは準安定相の固溶限に添っての再固溶に基く。第三段は更に約 260°C からの内耗値のゆるやかな減少でこれは安定相の析出に基く。第四段はそれに続く内耗値のゆるやかな増加で、これは安定相の固溶限に添っての再固溶に基く。ここで $20^\circ\text{C}/2\text{分}$ の場合、安定相の析出量が少いにもかかわらず、それが再固溶する為の加熱時間が短いので、内耗値はゆるやかに増加する。之に反し $20^\circ\text{C}/30\text{分}$ の場合には、安定相の析出量が多いにもかかわらず、それが再固溶する為の加熱時間が、充分であるので、内耗値は安定相の固溶限に添って速やかに上昇するものと考えられる。図中2本の破線 (*M* 及び *S*) は本試料の等温析出曲線の最終内耗値の温度変化であり *M* が準安定相、*S* が安定相に基く

ものである。

本実験に於て、全ての復元曲線に *overshooting* の現象が認められるが、この原因はより高温 (T_2) に *up-quench* された時不安定になる微小析出物の消滅及び析出物の部分的溶解により T_2 の平衡固溶量よりも余計に固溶される為と考えられる。この考え方は、図13の復元—時効—復元曲線、及びそれに基く写真2によっても支持される。

図13によると最初の *up-quench* では *overshooting* が起るが、それに続く2回目の T_1 時効で平衡状態まで析出が起ったあとの、2回目の *up-quench* では *overshooting* が見られない。これは、2回目の T_1 時効に於て、新しく低温で析出したもののみが再固溶される為である。Fe—C系に於て、D. Keefe⁽¹¹⁾らも同様の結果を得ている。

写真2は、復元—時効—復元曲線(図13)に基く組織変化で(a)は T_1 時後(150°C)の状態、準安定相の微細な析出物が数多く存在する。(b)はこれを220°Cに *up-quench* して3.5時間加熱したもので(a)に比べて析出物の数は非常に減少し、且つ大きく凝集している。(c)はこれを T_1 時効(150°C)して平衡状態にしたもので(b)に比べて析出物は多く、又微細のものも混在している。(d)は、これを再び220°Cに *up-quench* し、同温度で1.5時間加熱したもので、微細な析出物は再び固溶され、析出状態は、(b)とよく似ている。

VI 結 論

- 1) 内耗最大値と化学分析値より結晶粒径と定数 K の関係を得た。
- 2) 内耗により、 α 鉄中の窒素の拡散の為の活性化エネルギー Q 及び拡散恒数 D_0 の値を得た。
- 3) 時効析出曲線より Fe_{16}N_2 及び Fe_4N と平衡する α 鉄中の窒素の固溶限を決定し、各々の溶解熱を求めた。
- 4) 電顕写真から、ステレオ法によって、 Fe_{16}N_2 及び Fe_4N の *habit-plane* がそれぞれ $(100)_\alpha$, $(210)_\alpha$ である事を確かめた。
- 5) Fe—N系の復元に於て ($\text{M} \rightarrow \text{M}$) に関しては飽和固溶温度以下で完全復元した。 $(\text{S} \rightarrow \text{S})$ に於ても同様である。 $(\text{M} \rightarrow \text{S})$ に於ては全ての場合に完全復元した。又、復元—時効—復元曲線、及び顕微鏡観察によって *overshooting* の原因が微小析出物の消滅及び析出物の部分的溶解によるものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) C. A. Wert Acta Met. V. 2 (1954) 361
- 2) C. A. Wert J. Appl. Physics V. 20 (1949) 943
- 3) L. J. Dijkstra J. Metals, Trans (1949) 252
- 4) A. S. Keh, H. A. Wriedt Trans. AIME V. 224 (1962) 560
- 5) W. Wepner Arch. Eisenhüttenw. V. 27 (1956) 449
- 6) G. Lagerberg, A. Josefsson Acta Met. V. 3 (1955) 236
- 7) R. Rawling, D. Tambini J. Iron Steel Inst. V. 189 (1956) 302
- 8) J. D. Fast, M. B. Verrijp J. Iron Steel Inst. V. 180 (1955) 337
- 9) E. Hundermont "Handbuch der Sonder Stahl Kunde" (1956) 189
- 10) T. Oi, K. Sato Trans. Japan Inst. Met. V. 7 (1966) 129
- 11) D. Keefe, C. Wert Trans. AIME V. 215 (1959) 114