

2¼Cr-1Mo 鋼の長時間恒温焼戻脆化量の 化学成分からの推定

高野正義*・勝亦正昭*²

Estimation of Long Term Isothermal Temper Embrittlement in 2¼Cr-1Mo Steel from Chemical Compositions

Masayoshi KOHNO and Masaaki KATSUMATA

Synopsis:

Step cooling and isothermal aging tests at 425, 450 and 475°C, for 54 000, 20 000 and 5 000 h, respectively, were performed on 2¼ Cr-1Mo steels with various amount (in mass pct.) of Si, Mn, Cu, Ni and impurities. The relationship between the step cooling and the isothermal temper embrittlement and chemical compositions was discussed.

The results are summarized as follows.

1) The shift in 50% fracture appearance transition temperature and 40ft-lb transition temperature by the step cooling treatment ($\Delta FATT_{SC}$, $\Delta 40TT_{SC}$) have good correlation to a embrittling factor $K_2 = (2Si + Mn + Cu + Ni) \cdot \bar{X}$, where $\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^2$. Therefore, the reduction of amount of Si, Mn, Cu, Ni and impurities is effective to reduce the susceptibility to temper embrittlement.

2) The equations, which can accurately estimate the shift in 50% fracture appearance transition temperature and 40ft-lb transition temperature by isothermal temper embrittling at $T^\circ\text{C}$ for t h ($\Delta FATT_{iT}$, $\Delta 40TT_{iT}$) from K_2 and \bar{X} , were derived.

3) Assuming that the life of petrochemical plants is 20 years at 425°C and the required toughness for forgings is $40TT \leq 10$ or 38°C, chemical compositions of a 300 mm thick 2¼ Cr-1Mo steel forging shall be controlled as follows.

$$40TT \leq 10^\circ\text{C} \cdots \bar{X} \leq 13.0, K_2 \leq 14.3$$

$$40TT \leq 38^\circ\text{C} \cdots \bar{X} \leq 17.5, K_2 \leq 19.3$$

Key words: 2¼ Cr-1Mo steel; temper embrittlement; step cooling; isothermal temper embrittlement; impurity element; alloying element; embrittling factor.

1. 緒 言

2¼Cr-1Mo 鋼鍛鋼品は高温で優れた機械的性質と耐水素侵食性を有しているため、石油精製プラントなどの高温圧力容器に広く使用されている。しかし、その操業温度が 400~450°C と焼戻脆化温度域にあるため、長時間使用による靱性の低下が問題となり、この種の鋼の焼戻脆化に関して多くの研究がなされ、各種の対策が取られるようになった^{1)~6)}。その対策は主として化学成分の制限であり、焼戻脆化の主要原因である不純物元素および促進元素の一つである Si 量を極力低減することによ

り、使用中の脆化を抑えることが可能となった。

ところで、これらの研究における脆化量の評価試験には、高温での比較的短時間の恒温脆化処理あるいはステップクーリング (Step Cooling, SC) 脆化処理⁷⁾が広く採用されている。しかしながら、これらの加速試験では焼戻脆化感受性の相対比較は出来ても定量的な評価は困難である。そこで、前報⁸⁾において、2¼Cr-1Mo および 3Cr-1Mo 鋼の 425~475°C における長時間恒温脆化量を SC 脆化量から精度よく推定する式を提案した。

本研究では、まず、2¼Cr-1Mo 鋼の SC 脆化量と化学成分の関係を明らかにし、SC 脆化量と良い相関を示

平成 3 年 11 月 27 日受付 平成 4 年 6 月 5 日受理 (Received on Nov. 27, 1991; Accepted on June 5, 1992)

* (株)神戸製鋼所高砂鍛鋼工場 (Steel Casting & Forging Plant, Takasago, Kobe Steel, Ltd., 2-3-1 Niihama Arai-cho Takasago 676)

*² (株)神戸製鋼所鉄鋼研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel Ltd.)

Table 1. Ranges of chemical compositions of steel forgings for step cooling embrittlement tests (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Sn	Sb	As	\bar{X}
0.10	0.01	0.26	0.002	0.006	0.01	0.01	2.01	0.96	0.001	0.001	0.0002	0.001	3.6
0.16	0.57	0.91	0.019	0.016	0.21	0.39	2.52	1.07	0.030	0.012	0.0160	0.017	27.2

Note: $\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^2$

す脆化係数 (Embrittling Factor) を求め、次いで、前述の推定式をこの脆化係数を用いて表示する事により、恒温脆化量を化学成分から推定する方法を検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 SC 脆化試験

供試材は Si, Mn, Cu, Ni と不純物元素量を変化させた実験室溶解材および大形鍛鋼品から採取した 2¼ Cr-1Mo 鋼である。その化学成分 (mass%) の範囲を Table 1 に示すが、焼戻脆化量に関する不純物元素の寄与率を示すパラメータ $\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^2$ も同表に示した。

熱処理としては、(オーステナイト化温度から 500°C までの平均冷却速度 (CR) が) 16~58°C/min (水焼入された肉厚 190~380 mm 材の ¼ 部の冷却速度に相当) の範囲でシミュレート焼入-焼戻した供試材、あるいは、水焼入-焼戻した肉厚 190~360 mm の鍛鋼品の ¼ 部から採取した供試材に溶接後熱処理 (PWHT) を施した。焼戻および PWHT 量は焼戻パラメータ $\{[TP] = (T + 273)(\log t + 20) \times 10^{-3}, T: ^\circ\text{C}, t: \text{h}\}$ で約 20.7 とし、PWHT 後は炉冷とした。なお、試験材はいずれもベーナイト組織を示した。

これらの供試材は PWHT ままおよび文献 6) の Fig. 1 に示す SC 処理後、2 mmV ノッチシャルピ衝撃試験を行い、それぞれ、50% 破面遷移温度 (FATT) および 40ft-lb エネルギー遷移温度 (40 TT) を求めた。脆化量は PWHT 後の遷移温度 (FATT_P, 40 TT_P) からの上昇量 ($\Delta FATT_{SC}$, $\Delta 40 TT_{SC}$) で評価した。

2.2 恒温脆化試験

恒温焼戻脆化試験のデータは前報⁸⁾の試験結果のうち 2¼Cr-1Mo 鋼に関するものを用いた。その化学成分を Table 2 に示す。

熱処理としては、20~58°C/min (水焼入された肉厚 190~340 mm 材の ¼ 部の冷却速度に相当) の範囲の CR でシミュレート焼入-焼戻した供試材、あるいは、水焼入-焼戻した肉厚 265~320 mm の鍛鋼品の ¼ 部より採取した供試材に PWHT を施した。焼戻および PWHT 量は [TP] で約 20.7 とし、PWHT 後は炉冷とした。

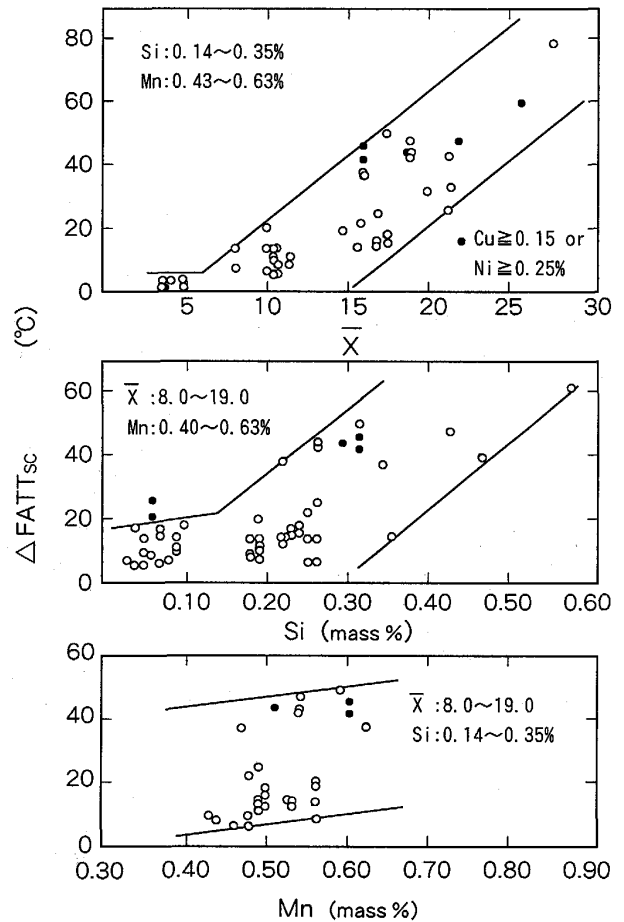


Fig. 1. Relationship between $\Delta FATT_{SC}$ and chemical compositions.

恒温焼戻脆化試験は、425, 450 および 475°C で、それぞれ、54 000, 20 000 あるいは 5 000 h まで実施した。これらの供試材は恒温脆化処理の各時間保持後、2 mmV ノッチシャルピ衝撃試験を行い、それぞれ、FATT および 40 TT を求めた。各温度 (T) での脆化量は SC 試験の場合と同様、FATT_P, 40 TT_P からの上昇量 ($\Delta FATT_{iT}$, $\Delta 40 TT_{iT}$) で評価した。なお、大形鍛鋼品の恒温脆化処理については 475°C のみ実施した。実験方法の詳細については前報⁸⁾を参照していただきたい。

SC および恒温処理による脆化量 $\Delta FATT$ と $\Delta 40 TT$ はほぼ同じ値を示したので、以後、脆化量は $\Delta FATT$ で代表させた。

Table 2. Chemical compositions of steels used for isothermal temper embrittlement tests (mass%).

Group	Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Sn	Sb	As	\bar{X}
1	A	0.15	0.04	0.52	0.010	0.011	0.03	0.16	2.39	1.04	0.001	0.004	0.0039	0.005	14.1
	B	0.11	0.22	0.45	0.013	0.012	0.05	0.10	2.35	1.04	0.003	0.005	0.011	0.005	21.0
	C	0.14	0.31	0.59	0.009	0.009	0.02	0.17	2.45	1.02	0.023	0.004	0.012	0.005	17.1
	D	0.12	0.08	0.68	0.009	0.014	0.02	0.18	2.37	1.01	0.004	0.005	0.0080	0.006	15.6
	E	0.16	0.01	0.53	0.019	0.013	0.01	0.18	2.01	1.06	0.001	0.002	0.0085	0.005	21.1
	F	0.12	0.30	0.57	0.019	0.007	0.02	0.17	2.46	0.98	0.004	0.004	0.012	0.006	27.2
	G	0.14	0.57	0.49	0.009	0.012	0.02	0.16	2.43	1.06	0.006	0.007	0.012	0.010	18.8
2	P	0.14	0.22	0.53	0.008	0.007	0.03	0.17	2.35	1.04	0.014	0.003	0.0020	0.002	10.4
	Q	0.12	0.17	0.55	0.002	0.010	0.01	0.16	2.45	1.03	0.026	0.003	0.0031	0.003	5.0
	R	0.13	0.06	0.91	0.007	0.008	0.01	0.16	2.52	1.06	0.009	0.002	0.0012	0.003	8.7
3	P1	0.13	0.27	0.49	0.003	0.015	0.01	0.01	2.22	0.97	0.019	0.001	0.0002	0.001	3.6
	P2	0.13	0.26	0.48	0.010	0.015	0.01	0.01	2.24	0.98	0.020	0.001	0.0002	0.001	10.6
	P3	0.14	0.26	0.49	0.016	0.016	0.01	0.01	2.26	1.00	0.020	0.001	0.0002	0.001	16.6
	P4	0.13	0.26	0.48	0.004	0.016	0.01	0.01	2.23	0.99	0.019	0.016	0.0002	0.001	10.6
	P5	0.12	0.25	0.47	0.002	0.008	0.01	0.01	2.30	0.96	0.010	0.001	0.0002	0.017	4.2
	P6	0.12	0.25	0.46	0.002	0.009	0.01	0.01	2.30	0.97	0.014	0.001	0.0160	0.001	10.5
	P7	0.13	0.24	0.46	0.003	0.008	0.11	0.01	2.26	0.97	0.015	0.001	0.0003	0.001	3.7
	P8	0.13	0.24	0.47	0.003	0.009	0.20	0.01	2.42	0.99	0.019	0.001	0.0002	0.001	3.6
	P9	0.14	0.25	0.49	0.008	0.016	0.01	0.01	2.20	0.99	0.022	0.008	0.0070	0.007	15.4
	P10	0.15	0.25	0.48	0.008	0.007	0.08	0.01	2.27	0.98	0.020	0.008	0.0080	0.004	15.6
	P11	0.11	0.26	0.50	0.013	0.014	0.20	0.01	2.19	1.00	0.016	0.008	0.0082	0.012	21.5
	P12	0.10	0.06	0.48	0.012	0.012	0.20	0.01	2.38	0.98	0.016	0.010	0.0109	0.010	22.5
4	a	0.12	0.23	0.44	0.010	0.012	0.06	0.08	2.27	0.98	0.002	0.006	0.0070	0.006	16.5
	b	0.15	0.05	0.53	0.009	0.012	0.03	0.17	2.41	1.06	0.002	0.004	0.0041	0.005	13.2
	c	0.14	0.18	0.44	0.006	0.006	0.02	0.06	2.41	1.06	0.002	0.002	0.0017	0.004	8.1

Note; $\bar{X}=(10P+5Sb+4Sn+As)\times 10^2$

3. 実験結果および考察

3.1 SC 脆化試験

Fig. 1 に $\Delta FATT_{SC}$ と化学成分の関係を示す。 $\Delta FATT_{SC}$ は \bar{X} の低下に伴って減少し、 \bar{X} が 6.0 以下になると脆化は認められなくなる。また、 $\Delta FATT_{SC}$ は Si の低下に伴って減少するが、Si 量が 0.10% 以下での低下率はそれ以上の場合に比べて小さい。同様に、Mn 量の低下により $\Delta FATT_{SC}$ は減少するが、Si に比べ Mn の効果は小さいことがわかる。これらの結果から、著者の一人は、既に、2¼Cr-1Mo 鋼の焼戻脆化に対する脆化係数として $K_1=(2Si+Mn)\cdot\bar{X}$ を提唱している⁶⁾。また、同図には、Ni を 0.25% あるいは Cu を 0.15% 以上含んだ供試材のデータを●印で示している。この種のデータはいずれもばらつき範囲の上限近傍にあり、データは少ないが、これらの元素の増加により脆化が促進されることがわかる。

$\Delta FATT_{SC}$ におよぼす化学成分の影響を明らかにするために、 $\Delta FATT_{SC}$ と各種脆化係数について重回帰分析を行った結果を Table 3 に、また、最も相関係数の高かった $\Delta FATT_{SC}$ と K_2 の関係を Fig. 2 に示す。ただし、焼戻脆化の認められなかった \bar{X} が 6.0 以下のデータはこの解析から除いた。この結果より、脆化係数として広く使用されている J-factor³⁾より K_1 の方が $\Delta FATT_{SC}$ との相関が良く、また、Ni, Cu を考慮した K_2 のほうが、さらに良い相関を示していることがわかる。なお、 $\Delta FATT_{SC}$ に及ぼす CR, 試験片採取方向、

Table 3. Regression equations between temper embrittlement by step cooling treatment and various embrittling factors.

Regression equations (n=68)	r (%)	σ (°C)
$\Delta FATT_{sc}=2.37 \bar{X}-12.4$	67.6	12.3
$\Delta FATT_{sc}=0.320J_1-10.3$	81.2	9.7
$\Delta FATT_{sc}=2.16 K_1-6.9$	88.8	7.7
$\Delta FATT_{sc}=2.04 K_2-10.7$	91.4	6.7
$\Delta 40TT_{sc}=2.26 \bar{X}-12.5$	66.3	12.1
$\Delta 40TT_{sc}=0.305J_1-10.5$	79.8	9.8
$\Delta 40TT_{sc}=2.07 K_1-7.4$	87.7	7.8
$\Delta 40TT_{sc}=1.95 K_2-10.9$	90.0	7.1

Note: 1) $\bar{X}=(10P+5Sb+4Sn+As)\times 10^2$
 2) $J=(Si+Mn)\cdot(P+Sn)\times 10^4$
 3) $K_1=(2Si+Mn)\cdot\bar{X}$
 4) $K_2=(2Si+Mn+Cu+Ni)\cdot\bar{X}$
 5) r: Correlation coefficient
 6) σ : Standard deviation

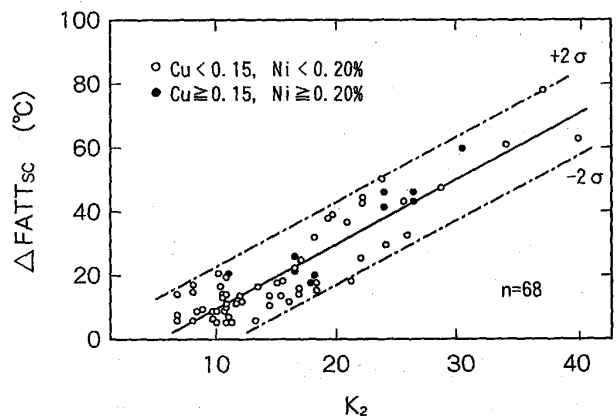


Fig. 2. Relationship between $\Delta FATT_{SC}$ and K_2 .

Al 添加による細粒化などの影響は少なかった。

以上の結果, 2¼Cr-1Mo 鋼の焼戻脆化感受性を下げるためには, 不純物元素と同時に Si, Mn, Cu, Ni 量を下げる必要がすることが明らかになった。しかし, Mn は焼入性を確保する上で重要な元素であり, Cu, Ni の含有量は元来少ないので, 効果の大きい Si の低減が有効である。

また, Cu, Ni 量の少ない場合には K_1 も $\Delta FATT_{SC}$ と良い相関を示すが, 恒温脆化試験に Cu を 0.20% 含む供試材を使用しているため, 本研究では脆化係数として K_2 を使用した。

3.2 恒温脆化試験

425°C-20 000 h の恒温脆化量 ($\Delta FATT_{i425-20}$) 及び 450°C-20 000 h の恒温脆化量 ($\Delta FATT_{i450-20}$) と化学成分の関係を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。 $\Delta FATT_{i425-20}$ は \bar{X} の低下に伴って減少し, \bar{X} が 6.0 以下になると脆化は認められなくなる。 $\Delta FATT_{i425-20}$ は Si の低下に伴って減少するが, \bar{X} の大きい方が脆化量, 単位 Si 量に対する減少率ともに大きい。また, 低 Si 材のため脆化量は小さいが, Mn 量の減少に伴って $\Delta FATT_{i450-20}$ は減少する。 $\Delta FATT_{i450-20}$ の場合にも, $\Delta FATT_{i425-20}$ の場合と同様なことが \bar{X} , Si および Cu について言える。ただし, \bar{X} が 4.2 以下の場合には, Cu が 0.20% まで増加しても脆化は認められない。

以上のように, 恒温脆化量と化学成分の関係は SC 脆化の場合と同様の傾向を示している。そこで, 各温度, 各保持時間における $\Delta FATT_{iT}$ と K_2 の関係を Fig. 5 に示す。いずれの脆化処理温度においても, 保持時間が同じであれば, $\Delta FATT_{iT}$ は K_2 に比例しているといえる。また, 425°C の 35 000 h と 54 000 h, 450°C の 10 000 h と 20 000 h, 475°C の 3 000 h と 5 000 h における脆化量の差は小さく, 脆化は飽和する傾向にあり, 飽和脆化量 ($\Delta FATT_{iT\infty}$) も K_2 に比例するものと推察される。 K_2 が同一の場合, $\Delta FATT_{iT\infty}$ は脆化処理温度が低いほど大きい, 3 000 h 程度の短時間の脆化処理では高温ほど $\Delta FATT_{iT}$ は大きく, 脆化速度は低温ほど遅いことがわかる。

以上の結果, $\Delta FATT_{iT}$ と K_2 の関係は前報⁸⁾に示した $\Delta FATT_{iT}$ と $\Delta FATT_{SC}$ の関係に類似しており, 前報と同様な方法で K_2 から $\Delta FATT_{iT}$ の推定が可能と思われる。

3.3 化学成分からの恒温脆化量の推定

前報⁸⁾において, $T^\circ\text{C}$, t h の恒温脆化処理による $\Delta FATT_{iT}$ は $\Delta FATT_{SC}$ および等価 P 量 $P_{eq} = (10P + 5Sb + 4Sn + As)/10(\text{mass}\%)$ で定義される不純物量

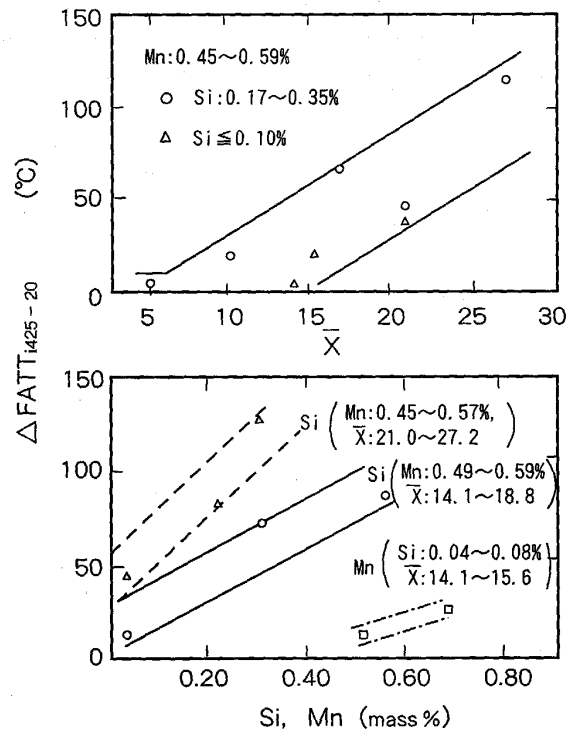


Fig. 3. Relationship between $\Delta FATT_{i425-20}$ and chemical compositions.

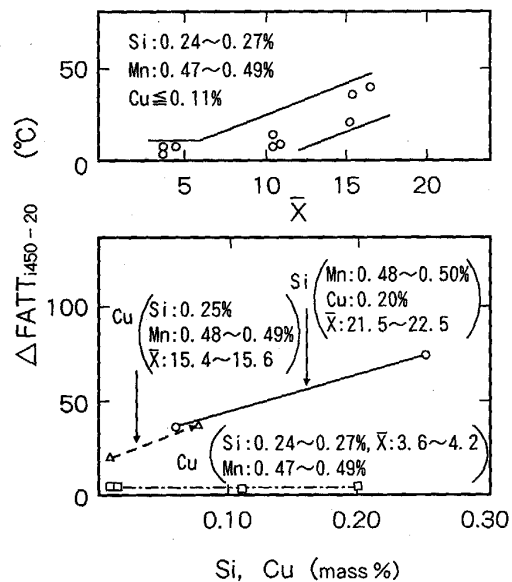


Fig. 4. Relationship between $\Delta FATT_{i450-20}$ and chemical compositions.

から次式により, 精度よく推定できることを明らかにした。

$$\Delta FATT_{iT} = (a + bT) \Delta FATT_{SC} \{1 - \exp^2 \operatorname{erfc}(x)\} \dots \dots \dots (1)$$

$$x = 2\sqrt{Di}/ad \dots \dots \dots (2)$$

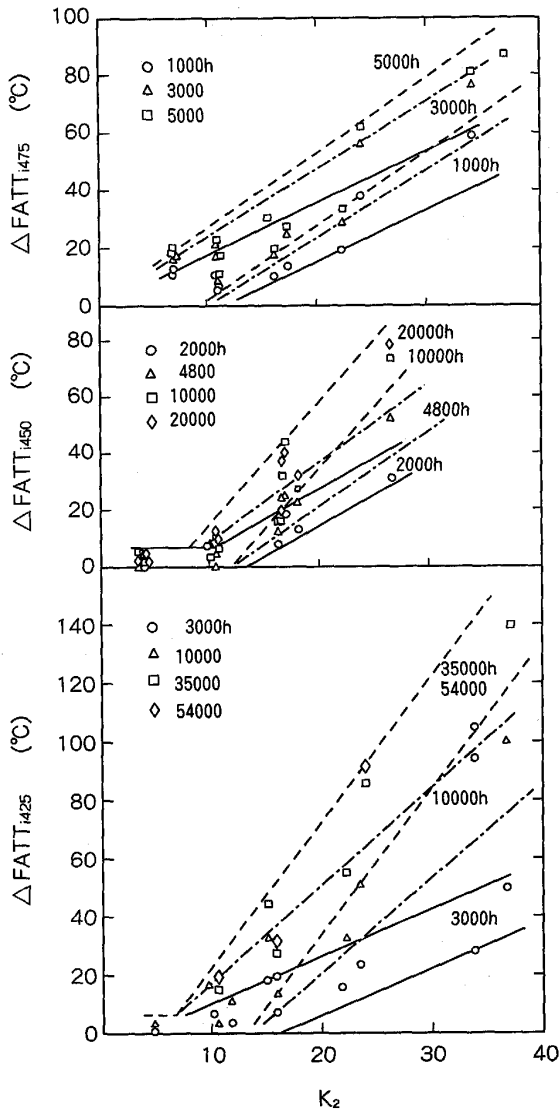


Fig. 5. Relationship between $\Delta FATT_{iT}$ and K_2 .

$$D = 1750 \exp \left\{ -33200 / (T + 273) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$a = \frac{1/3 \exp \left\{ Q/R(T + 273) \right\}}{1 + P_{eq} \exp \left\{ Q/R(T + 273) \right\}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし,

- D: 不純物 P_{eq} の見掛け上の拡散係数
- α : $t = \infty$ の場合の P_{eq} の粒界偏析量と P_{eq} の母相中の濃度の比
- P_{eq} : P の原子量で表した P_{eq} の母相中での濃度
- d: 粒界の厚さ
- Q: P_{eq} が母相に固溶した時と粒界に偏析した時のエネルギー差
- R: ガス定数
- $erfc(x) = 1 - erf(x)$
- a, b: 定数

また, 2¼Cr-1Mo 鋼の場合, P_{eq} は次式のように表示できる.

$$P_{eq} = 1.79 \bar{X} \times 10^{-5} \dots\dots\dots (5)$$

Table 3 より $\Delta FATT_{SC}$ は次のように示される.

$$\Delta FATT_{SC} = A + BK_2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし, A, B: 定数

したがって, (1)式は次のように表される.

$$\Delta FATT_{iT} = (a + bT)(A + BK_2) \{1 - \exp x^2 erfc(x)\} \dots\dots\dots (7)$$

$d = 8.5 \times 10^{-8}$ cm と仮定し, $Q = 43930$ J/mol⁹⁾, $R = 8.284$ J/molK とすれば, (2)式より x が計算できるので, 恒温脆化試験で得られたデータを用い, (7)式について重回帰分析を行い, 定数 a, b, A, B を決定し次式を得た.

$$\Delta FATT_{iT} = (-345 + 0.696T + 33.6K_2 - 0.0647K_2T) \times \{1 - \exp x^2 erfc(x)\} \dots\dots\dots (8)$$

($r = 94.2\%$, $\sigma = 9.7^\circ\text{C}$, $n = 100$)

$$\Delta 40TT_{iT} = (-243 + 0.479T + 28.8K_2 - 0.0544K_2T) \{1 - \exp x^2 erfc(x)\} \dots\dots\dots (9)$$

($r = 94.4\%$, $\sigma = 10.2^\circ\text{C}$, $n = 71$)

$\Delta FATT_{iT}$ の推定値と実測値の関係を Fig. 6 に示す. 重相関係数 (r) は 94.2%, 標準偏差 (σ) は 9.7°C と良い相関関係が得られているが, 前報の $\Delta FATT_{SC}$ からの推定法に比べると相関係数はやや低い. また, Fig. 7~9 に(8)式から求めた各温度における $\Delta FATT_{iT}$ と保持時間の関係を実測値と対比させて示す. 425°C の C および F 鋼を除いてよく一致している. Fig. 6 の 2σ の範囲からはずれているのはこの C, F 鋼のデータで

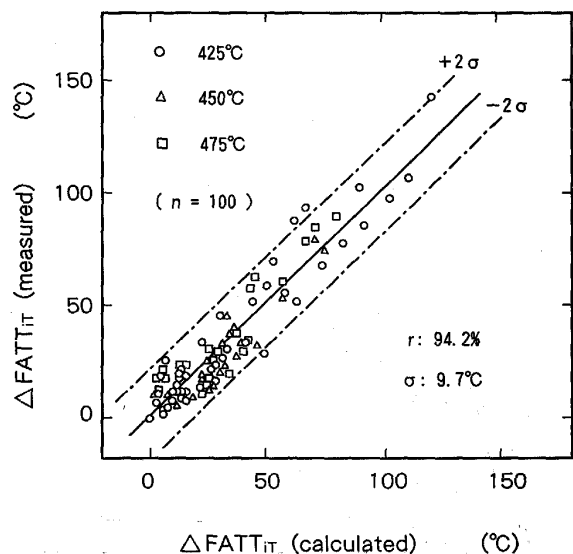


Fig. 6. Relationship between measured and calculated $\Delta FATT_{iT}$.

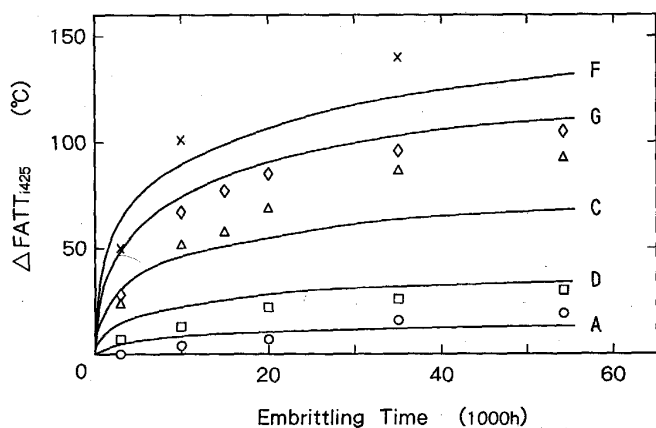


Fig. 7. Comparison of calculated and measured $\Delta FATT_{i425}$.

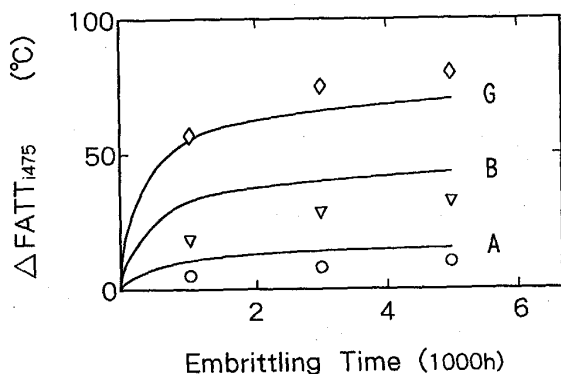


Fig. 9. Comparison of calculated and measured $\Delta FATT_{i475}$.

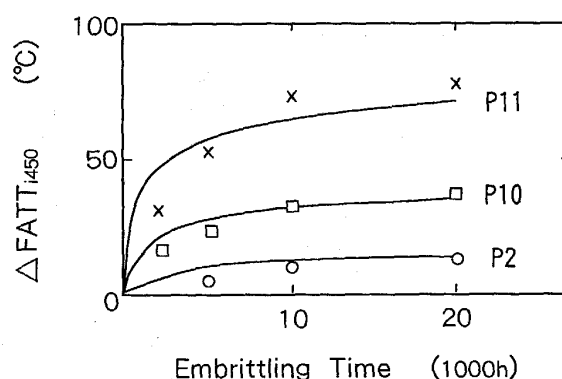


Fig. 8. Comparison of calculated and measured $\Delta FATT_{i450}$.

ある。また、Fig. 2において、これらの鋼は K_2 からの $\Delta FATT_{SC}$ の推定値がバラツキ範囲の上限にあったものである。

各温度での代表的供試材について、(8)式から推定した90%飽和脆化量に達するまでの脆化量と保持時間の関係をFig. 10に示す。90%飽和脆化量に達するまでの保持時間は425°Cで $3.8 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^5$ h, 450°Cで $6.7 \times 10^4 \sim 9.7 \times 10^4$ h, 475°Cで $1.0 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4$ hである。この時間は低温側では実験時間よりも1桁程度長時間となっており、精度向上のためにはさらに長時間の恒温脆化試験が必要であろう。

Fig. 11に(8)式より計算した $\Delta FATT_{iT\infty}$ と K_2 の関係を示すが、 K_2 が大きい程脆化温度が低い $\Delta FATT_{iT\infty}$ は大きくなる。また、 $\Delta FATT_{iT\infty}$ に対する K_2 の効果

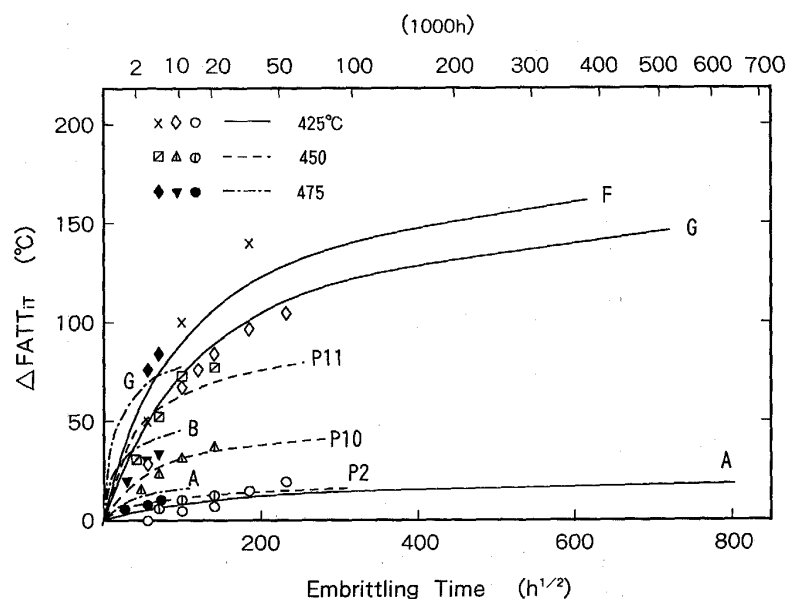


Fig. 10. Relationship between $\Delta FATT_{iT}$ and embrittling time until 90% of $FATT_{iT\infty}$.

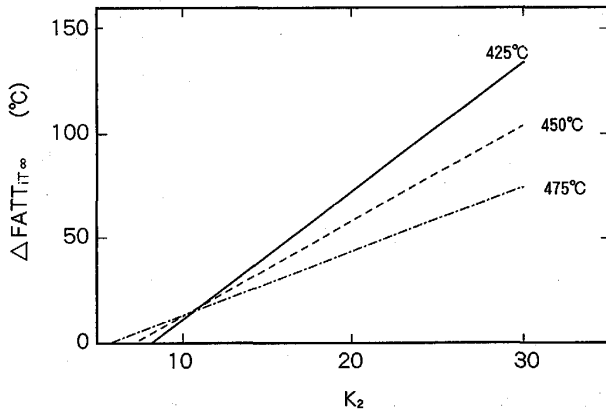


Fig. 11. Relationship between calculated $\Delta FATT_{iT\infty}$ and K_2 .

は低温程大きいので、 K_2 が 10.5 まで減少すると $\Delta FATT_{iT\infty}$ は同一となり、それ以下では逆転し高温の方が大きくなる。しかし、 K_2 が小さい時は \bar{X} も小さく、飽和までの時間が、特に低温で、長くなり、 $\Delta FATT_{iT\infty}$ の精度が低くなる点を考慮する必要がある。

3.4 焼戻脆化軽減のための化学成分の制限の検討

恒温脆化量と化学成分の関係が明らかとなったので、装置の寿命を 20 年とした場合の使用後に必要な靱性を得るための化学成分の制限について検討した。

この種の鋼の焼戻脆化の判定基準としては

$$40TT_P + \alpha \Delta 40TT_{SC} \leq 10 \text{ または } 38^\circ\text{C} \dots\dots(10)$$

が用いられているが、前報⁸⁾で左辺を 20 年間使用後の靱性と考えると、(10)式の α は 2.5 が適切であることを示した。ここでは、425~475°C で 20 年間使用後の 40TT (40TT_{iT-20Y}) が 10 または 38°C 以下となるための化学成分の制限について検討した。

Table 1 に示した試験材の PWHT 後の靱性と化学成

分の関係について、重回帰分析を行った結果、次式が得られた。

$$FATT_P = 262C + 62.8Si - 37.6Cr + 1.24\bar{X} - 8.75Al - 9.32D - 22.5\log(60CR) + 66.5 \dots(11)$$

($r = 93.5\%$, $\sigma = 9.4^\circ\text{C}$, $n = 74$)

$$40TT_P = 283C + 56.8Si - 44.4Cr + 1.12\bar{X} - 8.13Al - 9.34D - 17.6\log(60CR) + 49.2 \dots(12)$$

($r = 81.0\%$, $\sigma = 9.6^\circ\text{C}$, $n = 74$)

ただし、Al = 1 (Al ≥ 0.009%), Al = 0 (Al < 0.009%)

D = 1 (鍛錬方向), D = 0 (直角方向)

したがって、PWHT 後の靱性は C, Si, \bar{X} が低く Cr の高いほど、CR の速いほど良好であり、また、Al 添加細粒鋼および鍛錬方向から採取した材料の方が良好であることが明らかである。なお、Mn, Cu, Ni は成分の変動範囲が小さかったため、その有意な影響が認められなかったものと思われる。

鍛鋼品の PWHT 時間は厚肉になるほど長時間となるよう規定されているため、厚肉 2¼Cr-1Mo 鍛鋼品の引張強さ、特に、高温引張強さが要求値を満足しにくくなる。したがって、強度に寄与する化学成分はできるだけ高めとしたいが、焼戻脆化の観点からは逆の傾向にあるため、これらの点を考慮し、Table 4 に示す基本成分を定めた。この成分を使用し、焼入時肉厚 300 mm の鍛鋼品の 40TT_P および脆化量 $\Delta 40TT_{iT-20Y}$ を各種の \bar{X} , K_2 について、(12)および(9)式より計算し、この和として 40TT_{iT-20Y} を求めた。そして、これを 10 または 38°C 以下とするための \bar{X} および K_2 を Level 1, Level 2 として Table 4 に示す。この場合安全側の値を得るために、40TT_P の推定には C, Si, \bar{X} の最大値と Cr の最小値を、また、 $\Delta 40TT_{iT-20Y}$ の推定には Si, Mn, Cu, Ni, \bar{X} の最大値を使用し、試験片採取方向は靱性の低い直角方向とした。また、40TT_P,

Table 4. Estimation of isothermal temper embrittlement in 2¼Cr-1Mo steel forgings from chemical compositions.

Chemical Compositions	Aimed % Range %	Level 1			Level 2		
		C : 0.14, C ≤ 0.15,	Si : 0.07, Si ≤ 0.10,	Mn : 0.55, Mn ≤ 0.60,	Cu ≤ 0.05, Cu ≤ 0.10,	Ni : 0.15, Ni ≤ 0.20,	Cr : 2.35, Cr ≥ 2.25
\bar{X}		13.0			17.5		
K_2		14.3			19.3		
40TT _P (T)	°C	-52.3 ± 19.2			-47.2 ± 19.2		
Embrittling Temp.	°C	425	450	475	425	450	475
$\Delta 40TT_{iT-20Y}$	°C	33.0 ± 20.4	30.8 ± 20.4	26.8 ± 20.4	56.5 ± 20.4	55.9 ± 20.4	41.6 ± 20.4
40TT _{iT-20Y}	°C	-19.3 ± 28.0	-21.5 ± 28.0	-25.5 ± 28.0	9.2 ± 28.0	1.5 ± 28.0	-5.6 ± 28.0
Max. 40TT _{iT-20Y}	°C	8.7	6.5	2.5	37.2	36.6	22.3

Note:.....1) Level 1 : 40TT_{iT-20Y} ≤ 10°C 2) Level 2 : 40TT_{iT-20Y} ≤ 38°C 3) Error limits refer to ±2σ

$\Delta 40TT_{iT-20Y}$, $40TT_{iT-20Y}$ について, それぞれ, 2σ の範囲を示し, $40TT_{iT-20Y}$ の 2σ の上限値と比較した. なお $40TT_{iT-20Y}$ の σ は $40TT_P$, $\Delta 40TT_{iT-20Y}$ の σ の平方和の平方根として求めた. 使用温度は 425, 450 および 475°C としたが, 最も脆化の大きい 425°C に基準を置いて \bar{X} を定めた. この結果, $40TT_{iT-20Y}$ を 10°C 以下とするためには $\bar{X} \leq 13.0$, $K_2 \leq 14.3$, 38°C 以下とするためには $\bar{X} \leq 17.5$, $K_2 \leq 19.3$ に規制する必要があることがわかった. すなわち, それぞれの基準に対して不純物量は, 例えば $P \leq 0.010\%$, $Sn \leq 0.004\%$, $Sb \leq 0.002\%$, $As \leq 0.004\%$ および $P \leq 0.012\%$, $Sn \leq 0.006\%$, $Sb \leq 0.005\%$, $As \leq 0.006\%$ に制限する必要があるが, これは現在の技術で十分可能な範囲である.

このように不純物元素を含む化学成分が明らかになれば, ある温度である期間使用した後の $FATT$, $40TT$ を計算することができ, その環境で使用できるかどうかの検討が可能である.

4. 結 言

各種化学成分を有する 2¼Cr-1Mo 鋼について, SC 脆化試験および 425°C で 54 000 h, 450°C で 20 000 h, 475°C で 5 000 h までの恒温脆化試験を行い, これらの焼戻脆化量を化学成分から推定する方法を検討した結果, 次の結論を得た.

1) SC 脆化量は脆化係数 $K_2 = (2Si + Mn + Cu +$

$Ni) \cdot \bar{X}$ と良い相関が認められる. したがって, 焼戻脆化感受性を下げるためには, 不純物元素を極力下げるとともに, 強度の許す範囲で Si, Mn, Cu, Ni 量を下げることが有効である.

2) 425~475°C の各温度, 保持時間における恒温焼戻脆化量 $\Delta FATT_{iT}$, $\Delta 40TT_{iT}$ は K_2 および \bar{X} より (8), (9)式を用いて精度良く推定できる.

3) 装置の寿命を 20 年間と想定し, 使用後の要求靱性値を $40TT_{iT-20Y} \leq 10$ または 38°C とすれば, 最も脆化の厳しい 425°C の場合, 肉厚 300 mm の 2¼Cr-1Mo 鋼鍛鋼品に要求される化学成分は次の通りである.

$$40TT_{iT-20Y} \leq 10^\circ\text{C} \cdots \bar{X} \leq 13.0, K_2 \leq 14.3$$

$$40TT_{iT-20Y} \leq 38^\circ\text{C} \cdots \bar{X} \leq 17.5, K_2 \leq 19.3$$

文 献

- 1) R. Bruscatto: Weld. J., **49** (1970), p. 148S
- 2) R. A. Swift and J. A. Gulya: Weld. J., **52** (1973), p. 57S
- 3) 宮野樺太男, 足立孝夫: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 153
- 4) T. Wada: Climax Molybdenum Company Progress Report, No. 32-74-03(1975)
- 5) 高松利夫, 乙黒靖男, 塩塚和秀, 橋本勝邦: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 178
- 6) M. Kohno, M. Makioka, S. Kinoshita and A. Suzuki: ASTM STP, **755** (1982), p. 208
- 7) G. C. Gould: ASTM STP, **407** (1968), p. 90
- 8) 高野正義, 勝亦正昭: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 296
- 9) M. P. Seah: Acta Metall., **25** (1977), p. 345