

高温用 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の研究*

70623

宮野 樺太男**・足立 孝夫***

Study on 2 $\frac{1}{4}$ -Cr 1Mo Steel for Elevated Temperature Service

Katao MIYANO and Takao ADACHI

Synopsis:

2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel are generally used for the huge reactor vessels that operate at high pressure and elevated temperature, because of its good short and long time elevated tensile properties and its good resistance to hydrogen attack. Requirements for higher operating volume and pressure have accelerated a demand for reactor vessels of extra heavy gauge wall thickness and upgraded mechanical properties throughout the thickness.

To obtain informations needed for effective uses of 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steels, a fundamental and systematic study was carried out on the heavy gauge steels of 100-400 mm in thickness. In this study, the effect of cooling rates from austenitizing temperature on microstructures, the effect of cooling rates and tempering cycles on mechanical properties and elevated temperature tensile properties were investigated.

The results obtained are as follows:

(1) Uniform bainitic structure is obtained when the cooling rate is faster than 6°C/min, and the blockish ferrite increases with decrease rate, which deteriorates mechanical properties.

(2) The effect of various heat treatment cycles on room temperature tensile properties is shown as a function of LARSON-MILLER's tempering parameter, and 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steels in the ultimate tensile strength range from 56 kg/mm² to 90 kg/mm² can be manufactured by the suitable tempering cycles.

(3) To maintain excellent notch toughness, the cooling rate faster than 6°C/min is desirable and in the special case of manufacturing high tensile steels which are tempered at low temperature (UTS is over than 70 kg/mm²), 10-15°C/min or faster cooling rate is recommendable.

(4) By applying the results mentioned above, 365 mm thickness forged shell was cooled in agitating water and the excellent mechanical properties and satisfactory bainitic structure was obtained throughout the thickness.

(Received Feb. 25, 1970)

1. 緒 言

2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼 (ASTM A387-D) は高温での耐水素性、強度がすぐれているため高温高压下で稼動する石油精製用圧力容器の鋼材として多く用いられている。コストの面より圧力容器の規模は大きくなり胴体肉厚の増大傾向は著しく、現在では 250~300 mm, あるいはそれ以上の肉厚のものまで出現しようとしている。肉厚増大に伴って材料の内部まですぐれた機械的性質を確保することが重要な問題となる。

250 mm 肉厚ともなれば、製作上圧力容器が受ける熱処理、すなわち焼戻しと溶接後熱処理時間の総和は長いもので 100 もなり最終の機械的性質の確保が問題となる。したがって材料の機械的性質を確保するためには製作工程上できるだけ熱処理時間を短くする方向にもつていつたり、最初の焼戻し、および中間の溶接後熱処理温度に関しても十分な事前の考慮が必要である。また最終

の溶接後熱処理については母材の機械的性質の確保とともに溶接硬化部の軟化と機械的性質の向上の観点からも考慮されるべきである。

本鋼種は焼入性のよい材料であるが、オーステナイト化温度からの冷却速度は肉厚や冷却方法によつて異なり、極厚物になれば冷却速度は小さくなり機械的性質に大きく影響を与えるであろう。オーステナイト化温度からの冷却方法による焼入れ、焼ならし材とかいう区別は板厚を無視したものであり、鋼材の本質的な判定は冷却速度にもとづいてなされるべきである。機械的性質を確保するにあたっては材料の受ける総熱履歴 (オーステナイト化温度からの冷却速度、焼戻しおよび溶接後熱処理) を考慮に入れて判定しなければならない。

2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼についての報告は多数あるが¹⁾²⁾³⁾、冷

* 昭和 44 年 10 月本会講演大会にて発表
昭和 45 年 2 月 25 日受付

** (株) 日本製鋼所室蘭製作所研究所 工博

*** (株) 日本製鋼所室蘭製作所研究所

却速度に注目し、これと機械的性質の関係について組織的に研究した文献は見あたらない。したがって著者らは冷却速度に注目し、極厚 2½ Cr-1 Mo 鋼を製作するときに問題となることから、すなわちオーステナイト化温度からの冷却速度、焼戻しおよび溶接後熱処理条件と機械的性質の関係について調べ、あわせて顕微鏡組織について述べる。また、これらのデータにもとづいて 365 mm 鍛造シェルを浸水加速冷却し機械的性質を調べた。

2. 冷却速度と機械的性質

オーステナイト化温度からの冷却速度を任意に変える

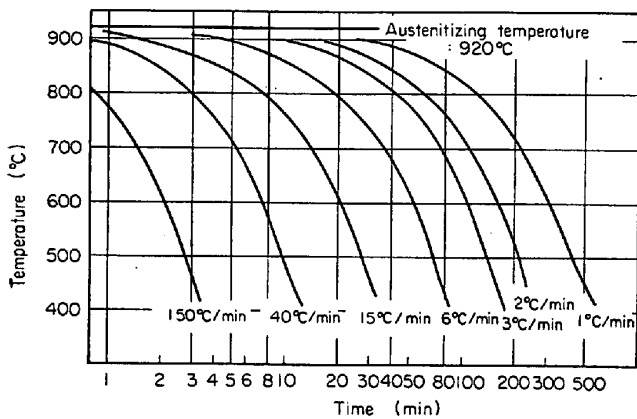


Fig. 1. Master cooling curves simulated by automatic controlled cooling device.

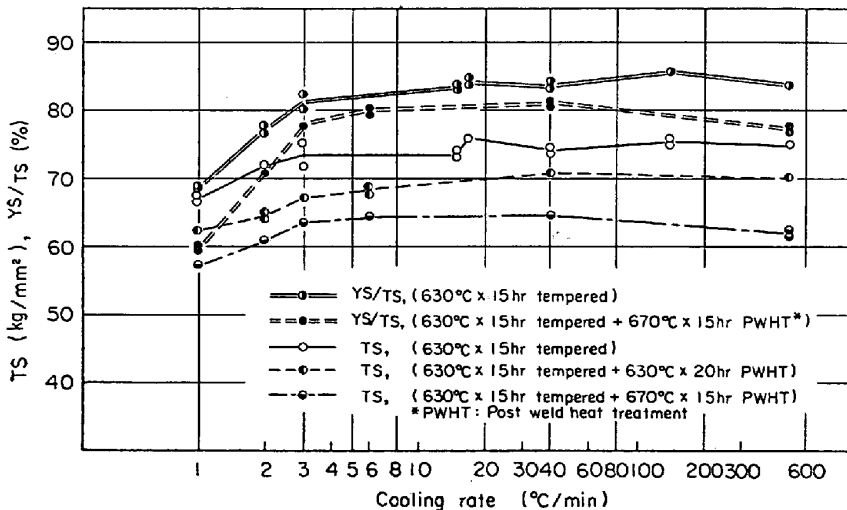


Fig. 2. Relationship between cooling rate, tensile strength and yield ratio of 2½ Cr-1 Mo steel.

Table 1. Chemical composition of specimen (%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al
0.13	0.24	0.59	0.014	0.009	0.38	2.39	0.22	0.98	0.005

ことができる可変冷却炉を用い、あらかじめ設定した Fig. 1 に示す冷却曲線に合わせて小型試験片を冷却し、種々の焼戻し、溶接後熱処理をほどこし冷却速度と機械的性質の関係を調べた。オーステナイト化温度は 920 °C、保持時間は 4 hr、冷却速度範囲は 1~500°C/min であった。なお可変冷却炉の冷却能力を越える冷却速度のものは適当な厚さの 3T×3T (T=肉厚) 以上の試験板を水焼入れすることによりほぼ目標とする冷却速度を得た。試験に用いた 2½ Cr-1 Mo 鋼の化学組成を Table 1 に示す。

冷却速度と引張強さ、降伏比の関係を Fig. 2 に示す。6°C/min 以上の冷却速度ではほぼ一定の引張強さ、降伏比を示すが、これ以下の冷却速度では強度が低下する。焼戻しあるいは溶接後熱処理温度が同じでも保持時間が長くなると強度が低下する。

冷却速度と衝撃値の最低レベルの関係を Fig. 3 に示す。冷却速度が 10~15°C/min 以上ではほぼ一定の衝撃値であるが、これ以下の冷却速度では順次衝撃値は低下する。溶接後熱処理を含み焼戻し効果が進むと衝撃値のレベルは全体として上昇し、しかもこの傾向は試験温度範囲内で最後まで認められる。

2½ Cr-1 Mo 鋼の機械的性質を調べる場合、オーステナイト化温度から冷却した後の溶接後熱処理を含めたすべての焼戻し熱処理を下式によつて示される焼戻しパラ

メータで整理することが多い。焼戻しパラメータと引張

$$\text{焼戻しパラメータ} = T \times$$

$$(\log t + 20) \times 10^{-3}$$

T: 焼戻し、溶接後熱処理温度 (°K)

t: 焼戻し、溶接後熱処理時間 (hr)

強さ、冷却速度の関係を Fig. 4 に示す。図の中に含まれている 100~200 mm 肉厚の浸水加速冷却焼戻し材は端面より T 以上入った表面より ¼T の位置から採取した試験片の引張強さをプロットしたものである。後述するがこれらの冷却速度はおおよそ 25~100°C/min である。冷却速

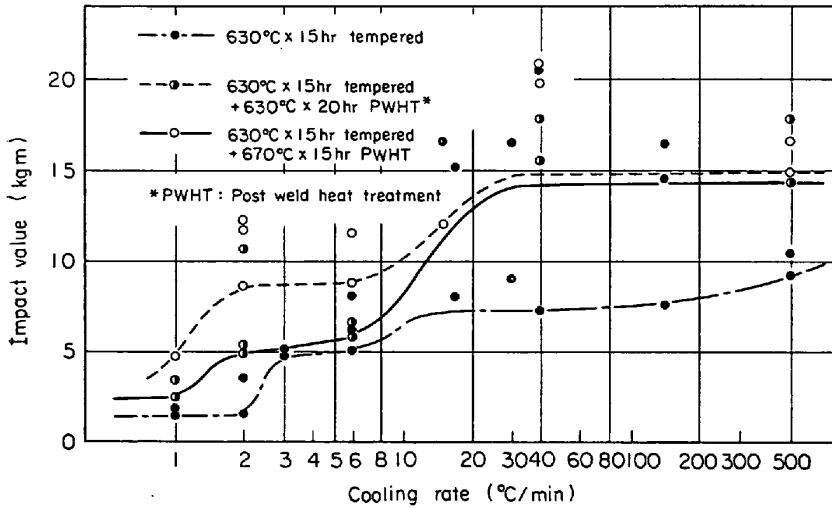


Fig. 3. Relationship between cooling rate and V-notch Charpy impact value of 2½Cr-1 Mo steel at 0°C.

度が 40°C/min 以上の実験室的規模の試験材と 100~200 mm 肉厚の実用規模試験材の強度はほぼ同等レベルにあることがわかる。しかし冷却速度の著しく小さいものは引張強さが低い。焼戻しパラメータが小さいときは両者の強度差が大きいが、焼戻しパラメータが大きくなるにつれて強度差が小さくなりパラメータが 20・6 前後になると実質 6°C/min のものは冷却速度の大きいものとほとんど強度レベルが同じになる。

冷却速度が 6°C/min 以上の試験材と実製品の衝撃値と焼戻しパラメータの関係を Fig. 5 に示す。焼戻しパ

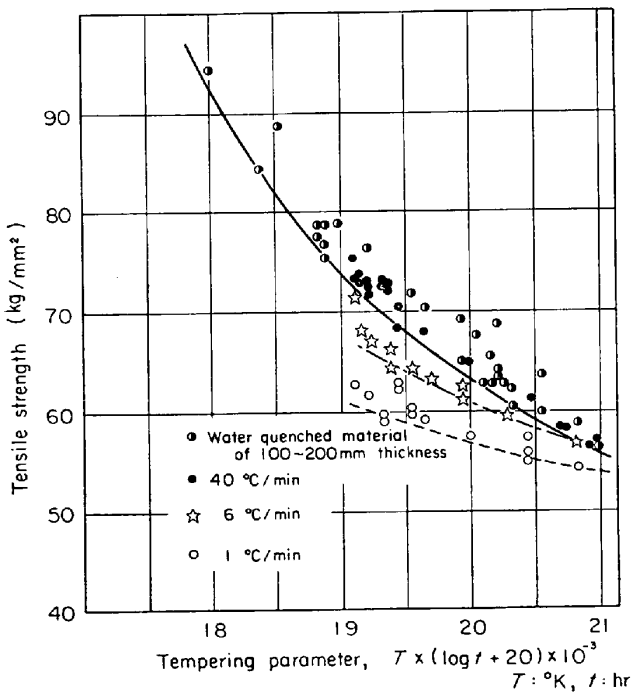


Fig. 4. Relationship between tensile strength and tempering parameter of 2½Cr-1 Mo steel.

ラメータが大きくなるにつれて衝撃値の最低レベルは上昇している。フェライト系の鋼種に見られる応力除去焼鈍脆化（溶接後熱処理の繰り返し加熱による脆化）⁽⁵⁾は認められないようである。

Fig. 6, 7, 8 に引張強さと降伏点、伸び、絞り、絞りの関係を示す。引張強さが高いと当然降伏点も高いが降伏比も高く、逆に伸び、絞りは小さい。

2½Cr-1 Mo 鋼の機械的性質はオーステナイト化温度からの冷却速度焼戻し溶接後熱処理によつてほぼ決まる。適当な焼戻し熱処理をする

ことにより 56~90 kg/mm² の引張強さになるように任意に調整でき、それに応じて降伏点、伸び、絞りが推定できる。安定した機械的性質を得るためにはオーステナイト化温度からの冷却速度を 10~15°C/min 以上になければならないが、高温で焼戻しする ASTM A387-D を製作する場合には十分な焼戻しが行なわれるので一般衝撃値規格を考慮に入れて最低 6°C/min 以上の冷却速度であれば十分であろう。

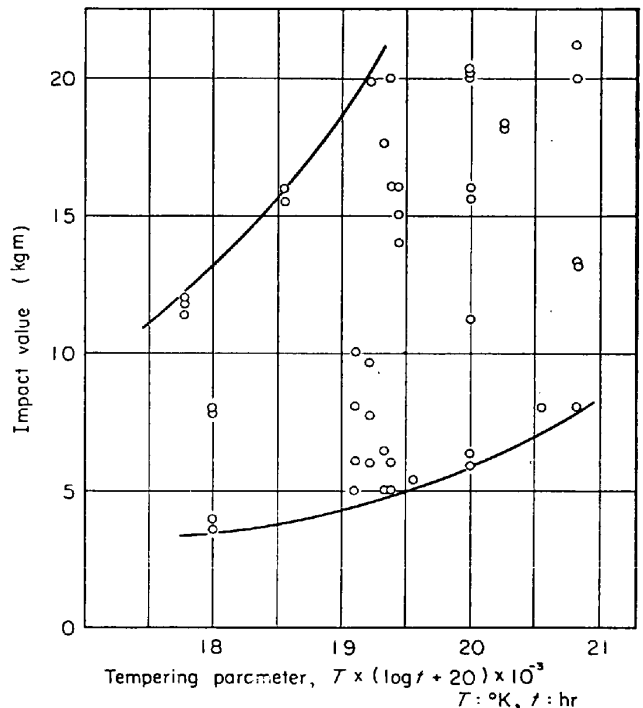


Fig. 5. Relationship between tempering parameter and V-notch Charpy impact value at 15.5 °C.

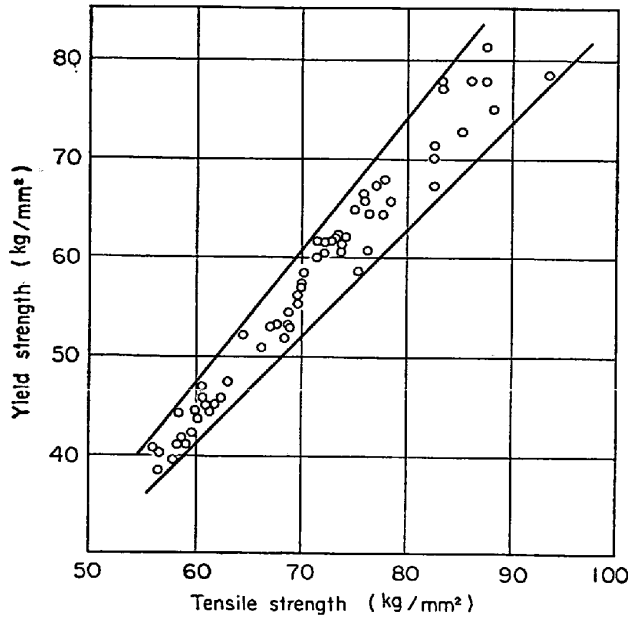


Fig. 6. Relationship between tensile strength and yield strength of $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel.

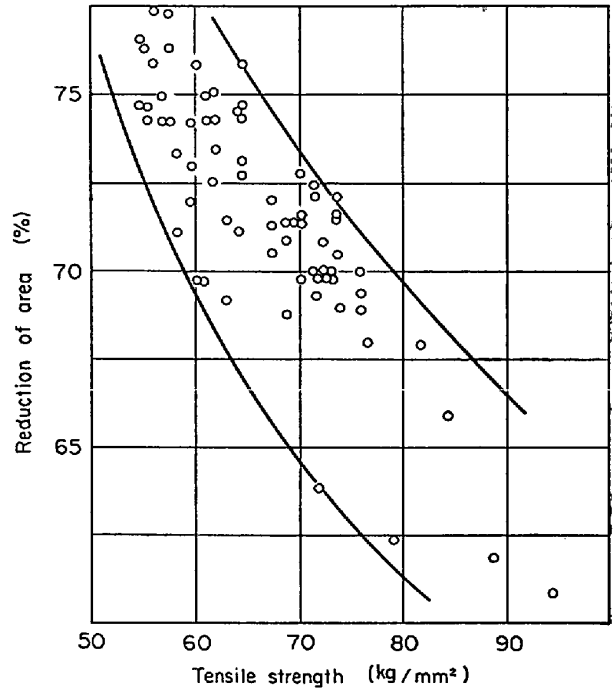


Fig. 8. Relationship between tensile strength and reduction of area of $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel.

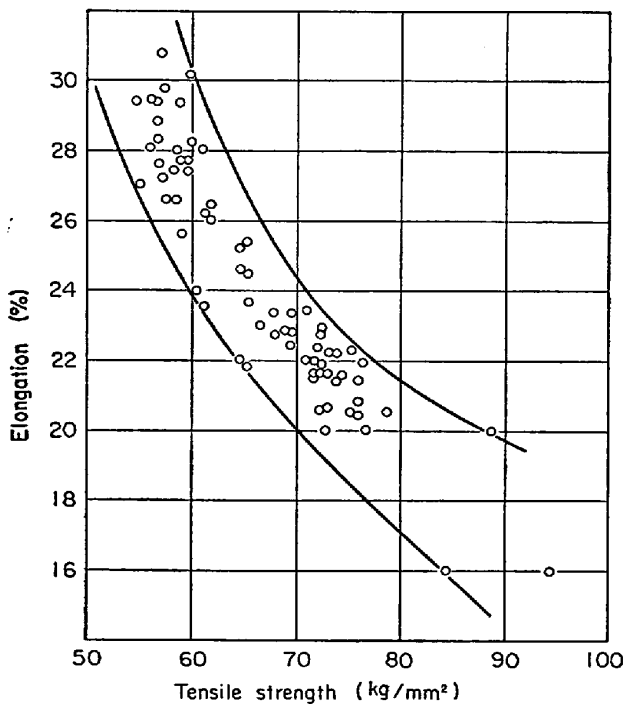


Fig. 7. Relationship between tensile strength and elongation of $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel.

3. 焼戻し特性

Table 2 に示す成分の $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼について冷却速度と焼戻し特性、靱性回復特性を調べた。

Fig. 9, 10 に焼戻し温度と硬さの関係を示す。焼戻し温度が 400°C までは硬さはそれほど変化せず、冷却速度が $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上で Hv 340, $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で Hv 310 前後である。冷却速度の大きいものは、焼戻し温度が 500°C 近傍で硬化が認められるが、 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ のものには認められない。ほぼ 550°C から軟化が始まるが、冷却速度によつて軟化挙動が異なる。冷却速度が $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$ のものは比較的低温域での軟化が激しいが、高温域では冷却速度の小さいものより硬さが高い。 $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ のものは全温度領域にわたつて軟化抵抗が大きい。 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ のものは冷却速度の大きいものと比較して硬さが低く、焼戻し時間が長くなるとさらにこの傾向が明りようになり強度の低下が十分に予想される。

Fig. 11 に焼戻し温度と衝撃値の関係を示す。軟化温度と靱性回復温度とはほぼ一致し 600°C ぐらいから靱性を持つようになるが、低温域で焼戻しする場合には冷却速度の影響が大きい。すなわち冷却速度が $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Table 2. Chemical composition of specimen (%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al
0.11	0.25	0.55	0.009	0.007	0.24	2.40	0.21	0.93	0.006

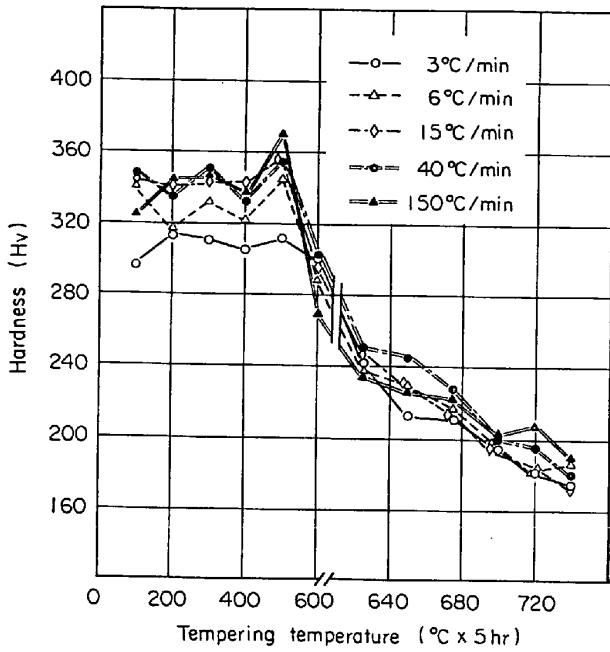


Fig. 9. Relationship between tempering temperature and hardness of 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel.

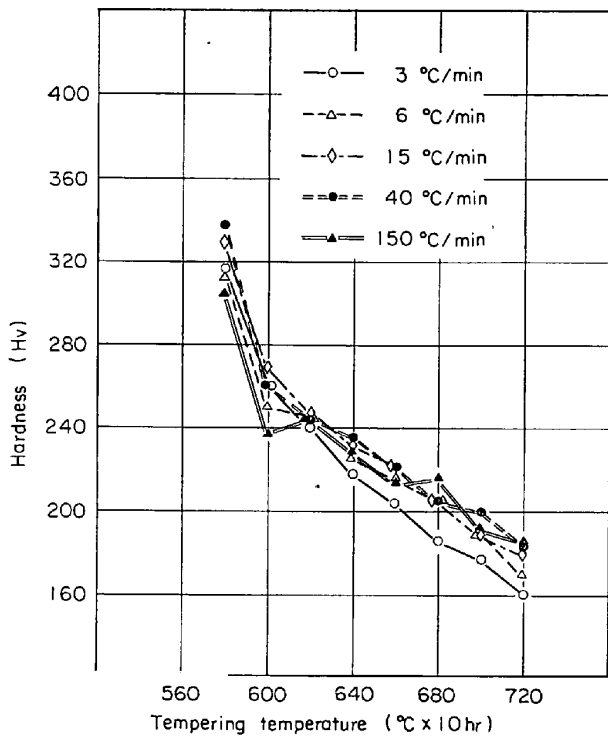


Fig. 10. Relationship between tempering temperature and hardness of 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel.

のものは 580°C 焼戻しで十分高い靱性が得られるが、冷却速度の小さいものは靱性が低い。焼戻し時間が長くなると靱性が向上する。高温焼戻しの場合には、この冷却速度範囲で靱性におよぼす冷却速度の影響はほとんど認められなかつた。

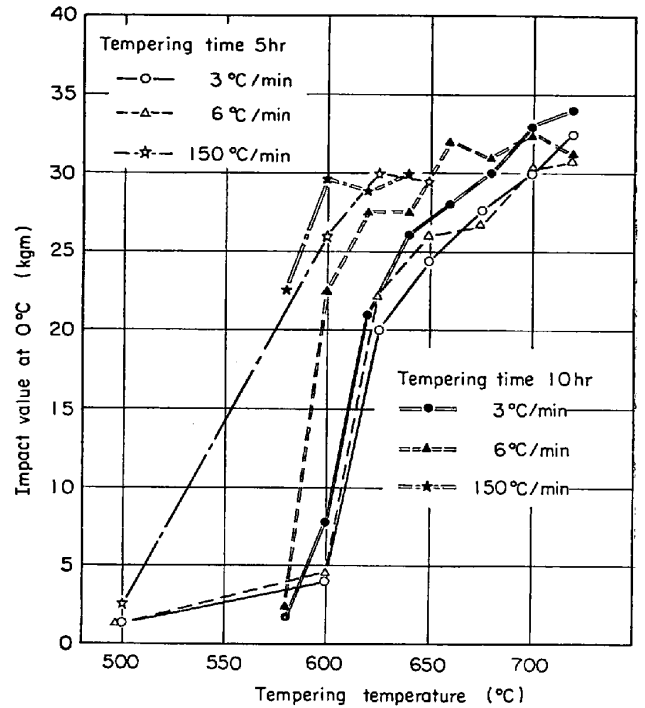


Fig. 11. Relationship between tempering temperature and impact value at 0°C of 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel.

4. 冷却速度と顕微鏡組織

鋼はオーステナイト化温度からの冷却速度により焼戻し特性、機械的性質が変化し、顕微鏡組織も異なる。2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の連続冷却変態曲線はいくつか報告されている⁶⁾。これらによれば初析フェライトのまったく析出しない最低冷却速度（上部臨界冷却速度）はほぼ 200°C/min 以上で実際の厚物製品では水焼入れとしても得ることのできない冷却速度である。したがって実製品の顕微鏡組織は初析フェライトを必ず含んだベイナイト、マルテンサイトの混在したものである。冷却速度の著しく小さいものはパーライト変態が起こる。

Photo. 1 にオーステナイト化温度からの冷却速度に対応した顕微鏡組織を示す。（化学組成は Table 1 に示すものである。）冷却速度が 1°C/min のとき、ブロック状の大きな初析フェライトがほとんどで少量のパーライト、ベイナイトを含む組織であるが、冷却速度が大きくなるにつれて初析フェライトの形状が小さく、量も少なくなり、パーライトが認められなくなる。それにかわつてベイナイトが多くなり、さらに冷却速度が大きくなるとマルテンサイトも含まれてくる。ブロック状の初析フェライトは 6°C/min の冷却速度で小さいのが認められるが、15°C/min になるとほとんどなくなり均一なベイナイトの組織となる。前述した冷却速度と機械的性質の関係を考慮するとブロック状の初析フェライトの形状

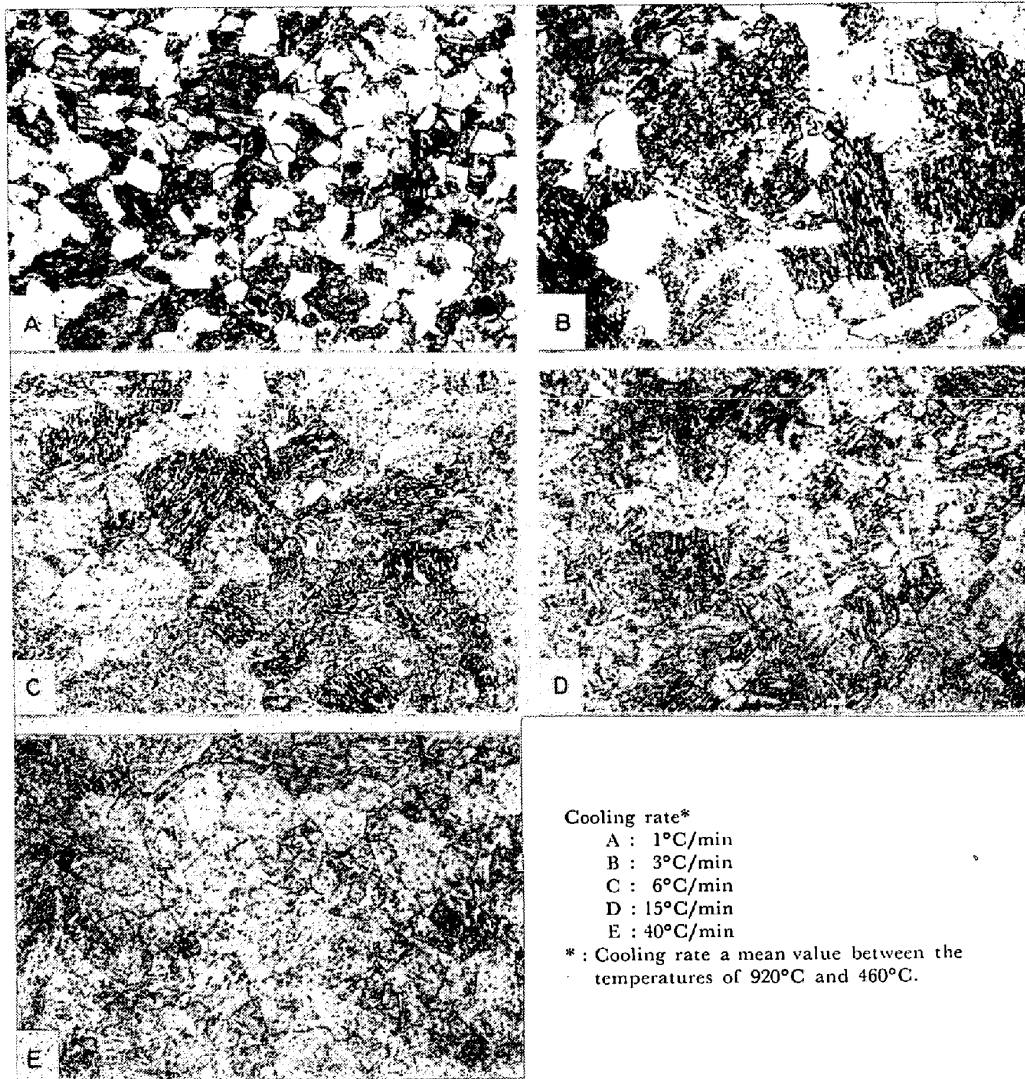


Photo. 1. Microstructure versus cooling rate of $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel.
($920^{\circ}\text{C} \times 4$ hr austenitized and $630^{\circ}\text{C} \times 15$ hr tempered).
 $\times 100(\frac{3}{4})$

Cooling rate*

A : $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$

B : $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

C : $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$

D : $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$

E : $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$

* : Cooling rate a mean value between the temperatures of 920°C and 460°C .

および量と機械的性質の間には密接な関係のあることがわかる。したがってすぐれた機械的性質を得るためには初析フェライトの少ない均一なベイナイト的な組織にしなければならない。

5. 肉厚と冷却速度

オーステナイト化温度からの冷却速度は肉厚あるは冷却方法によつて変化する³⁹⁾。実際の製品を作る場合、肉厚、冷却方法に応じた冷却速度の関係を把握しておく必要がある。

Fig. 12 は実際の $3T \times 3T$ 以上の試験板について、また実製品について端面より T 以上入った表面から $\frac{1}{4}T$ の位置の冷却曲線を測定し、冷却速度と肉厚の関係をまとめたものである。冷却速度 $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上を得るには、空冷の場合肉厚 100 mm が限度でそれ以上の肉厚のも

のは加速冷却を必要とする。

6. 高温強度

$2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼は高温で用いられることが多いから高温強度の確保も重要な問題である。短時間の高温引張強さはほぼ常温の引張強さに比例することが経験的に知られている。しかし組織的にブロック状のフェライトが多い場合や焼戻し過程が進むと常温引張強さに対する高温引張強さの割合がやや低下するようである。Fig. 13 に ASTM A387-D 強度クラスの極厚物について整理した常温強度と高温強度の関係を示す。必要とする高温強度に応じた常温強度がわかるわけである。

7. 365 mm 肉厚の鍛造シェル材の機械的性質

約 140 t 鋼塊を用い鍛造した 365 mm 肉厚の単位シ

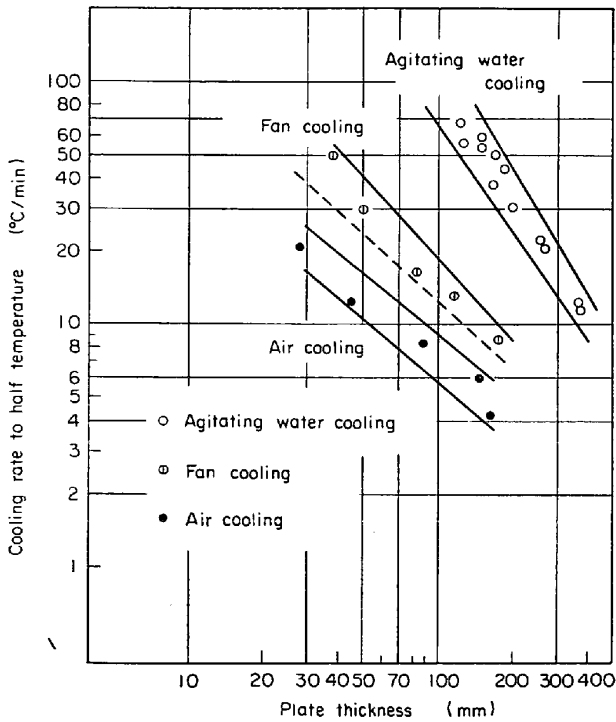


Fig. 12. Cooling rate at $\frac{1}{4}T$ location versus plate thickness of low alloy steel.

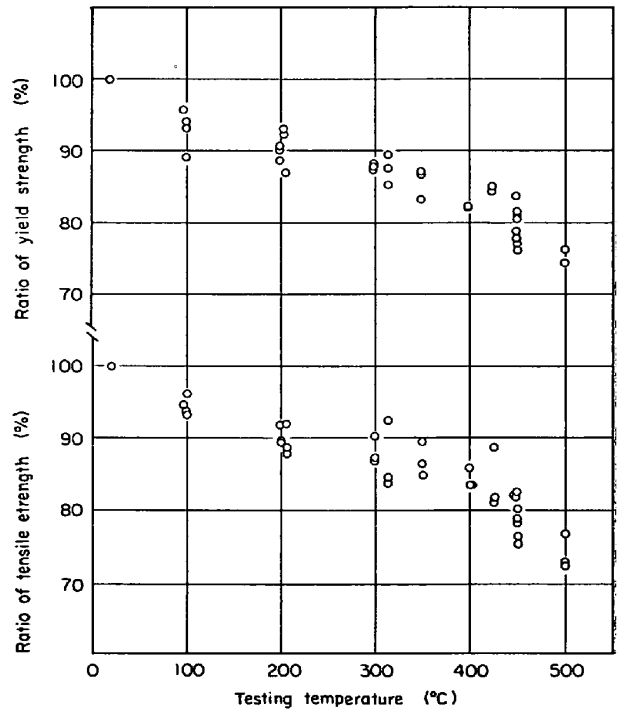


Fig. 13. Ratio of tensile and yield strength at elevated temperature to those at room temperature of $2\frac{1}{2}$ Cr-1 Mo steel.

エルを浸水加速冷却し、さらに焼戻しし、機械的性質を調べた結果について述べる。

Fig. 14 はオーステナイト化温度から浸水加速冷却したときの $\frac{1}{4}T$ での実測冷却曲線である。880~400°C の平均冷却速度は約 11°C/min で、前述の基礎データから満足できる冷却速度である。Table 3 に表面、 $\frac{1}{4}T$ 、 $\frac{1}{2}T$ の位置における化学組成、Table 4 に種々の熱処理を与えた後の機械的性質を示す。試験片はすべて端面より肉厚以上離れた位置より採取して、表面とあるのは表面より 20 mm 入ったところから採取している。

top, bottom, 肉厚方向ともに成分的な相違はほとんどなく、機械的性質もほぼ均一である。焼戻しまま、675°C×30 hr、690°C×30 hr 溶接後熱処理の焼戻しパラメータは 19・8、20・5、20・8 であり、Fig. 2 に示し

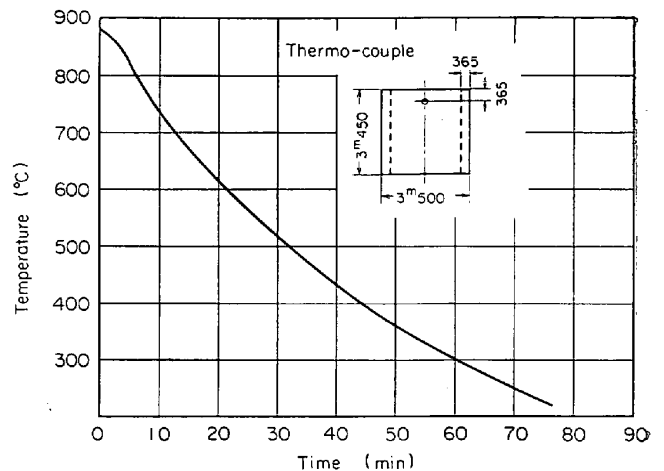


Fig. 14. Cooling curve of 365 mm thickness forged shell water-quenched at $\frac{1}{4}T$ location.

Table 3. Chemical composition of 365 mm thickness forged shell at some locations (%).

Location		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	As	Sn
Top	S*	0.15	0.26	0.55	0.013	0.014	0.16	2.45	0.16	1.06	0.002	0.013	0.009
	$\frac{1}{4}T$	0.15	0.26	0.58	0.013	0.014	0.16	2.40	0.16	1.06	0.002	0.012	0.009
	$\frac{1}{2}T$	0.15	0.26	0.56	0.013	0.014	0.15	2.45	0.15	1.07	0.002	0.013	0.009
Bottom	S*	0.14	0.24	0.53	0.011	0.014	0.15	2.36	0.15	1.02	0.003	0.012	0.009
	$\frac{1}{4}T$	0.15	0.24	0.55	0.011	0.014	0.16	2.39	0.16	1.04	0.002	0.012	0.008
	$\frac{1}{2}T$	0.15	0.24	0.55	0.012	0.014	0.16	2.39	0.16	1.03	0.002	0.011	0.009

*: 20mm from surface

Table 4. Tensile and impact properties of 365 mm thickness forged shell water-cooled and tempered, and post weld heat treated of 2½Cr-1 Mo steel.

Heat treatment		Location	Tensile and impact properties at RT					Tensile properties (457°C)				
WC and tempering	PWHT*		YS (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	EL (%)	RA (%)	vE 15.5°C (kgm)	YS (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	EL (%)	RA (%)	
900°C × 19 hr WC and 660°C × 16 hr tempered	As tempered	Top	S**	54.4	69.9	26.3	75.0	20.9-21.2	45.8	53.0	20.6	72.1
			¼T	55.4	70.8	26.2	73.0	21.2-23.0	45.8	53.1	21.7	73.8
			½T	55.0	70.3	24.5	74.2	22.6-23.7	45.0	55.9	21.4	70.9
		Bottom	S**	55.6	71.7	25.2	74.6	21.8-22.3	46.9	55.1	21.4	70.4
			¼T	57.7	71.2	26.4	73.4	22.2-23.1	46.6	55.0	20.5	73.0
			½T	58.0	71.2	25.7	73.8	22.4-24.1	45.8	55.4	20.5	69.6
	690°C × 30 hr	Top	S**	45.2	61.5	28.7	73.9	22.4-23.1	35.3	45.6	23.0	73.8
			¼T	45.8	61.1	28.5	73.9	21.6-22.7	35.5	46.7	23.0	71.3
			½T	45.8	61.5	29.1	74.3	22.0-23.0	36.6	46.1	21.5	70.4
		Bottom	S**	45.2	61.1	30.5	75.9	22.7-22.8	35.5	45.8	24.0	75.4
			¼T	45.4	60.8	31.0	74.3	20.8-22.3	37.1	46.2	24.0	73.8
			½T	46.1	60.4	29.7	73.5	24.9-29.7	36.4	47.1	21.3	69.6
675°C × 30 hr	Top	S**	48.3	63.0	27.5	74.3	21.6-22.7	37.7	47.6	21.7	73.8	
		¼T	49.2	63.5	28.9	76.6	20.1-22.3	39.5	48.7	22.2	72.1	
		½T	49.4	63.5	27.5	72.7	21.3-23.3	39.8	48.3	21.4	73.8	
	Bottom	S**	51.4	65.0	26.6	73.5	21.3-22.0	39.0	48.9	23.0	75.4	
		¼T	50.6	64.4	27.7	73.5	20.0-20.9	40.3	49.1	21.5	69.6	
		½T	48.7	63.5	27.0	74.3	23.9	40.4	49.6	22.0	70.6	

PWHT* : Post weld heat treatment, S** : 20mm from surface

た焼戻しパラメータと引張強さの関係とよく一致する。

Photo. 2 に各位置における顕微鏡組織を示す。表面、¼T、½T の顕微鏡組織はほとんど同じで均一なベイナイト的な組織を示し、Photo. 1 の冷却速度と顕微鏡組織の関係とよく一致する。

8. 結 言

2½Cr-1 Mo 鋼の冷却速度、焼戻しおよび溶接後熱処理と機械的性質の関係について調べた。結果を要約するとつぎのようになる。

1. オーステナイト化温度からの冷却速度により機械的性質は変化するが、10~15°C/min 以上でほぼ均一機械的性質となる。

2. 機械的性質と顕微鏡組織の間には密接な関係があり、ブロック状の大きな初析フェライトがなくなると機械的性質が安定する。

3. オーステナイト化温度からの冷却速度が6°C/min より小さいと引張性質の劣化が認められ、それ以上の冷却速度のものと比較して引張強さ、降伏強さの低下が顕著である。

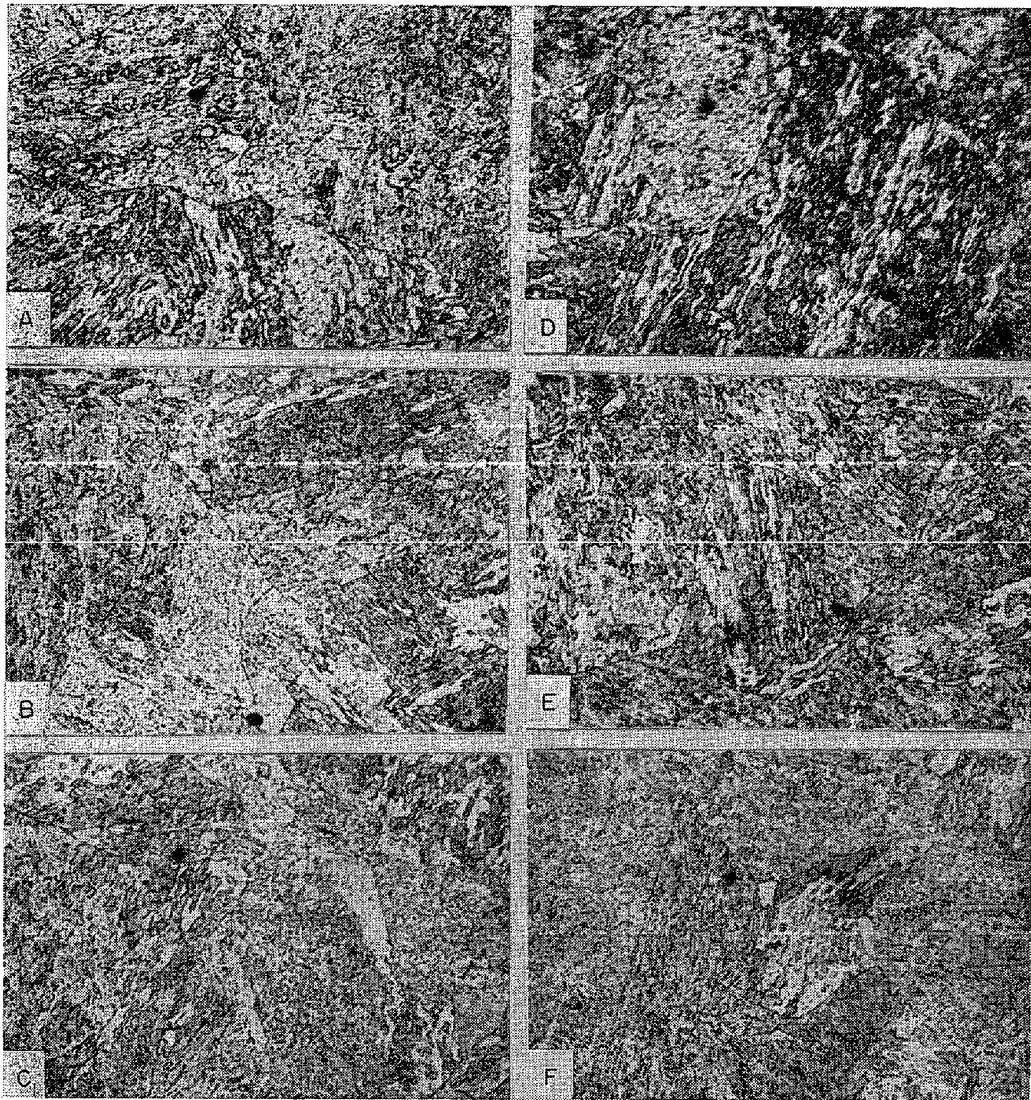
4. オーステナイト化温度からの冷却速度が 10~15°C/min より小さいと低温焼戻しの場合は靱性が低い。

5. 焼戻しパラメータと引張強さの関係を明らかにした。適当な焼戻し、溶接後熱処理を行なうことにより 56~90 kg/mm² の引張強さになるように任意に調整できる。

6. 365 mm 肉厚の鍛造シェルを浸水加速冷却し機械的性質を調べた。top, bottom, 肉厚方向ともに成分的な相違はほとんど認められず、均一な機械的性質が得られた。

文 献

- 1) E. L. FOGLEMAN and R. H. STERNE: Hydrocarbon Processing, 44 (1965) 12, p. 123
- 2) R. M. BROWN, R. A. REGE, and C. E. SPAEDER: 21st Annual Petroleum-Mechanical Engineering Conference, ASME (1966) "Symposium on Heat-Treated Steels for Elevated Temperature Service", p. 27
- 3) R. H. STERNE and E. L. FOGLEMAN: "High and Low Temperature Behavior of 2½ and Cr-1% Mo Pressure Vessel Steel." Luken Steel Company, (1966)
- 4) 宮野: 昭和 43 年秋季溶接学会全国大会発表
- 5) 宮野, 島崎: 昭和 43 年秋季溶接学会全国大会発表
- 6) 耳野, 梅沢: 日本鋼管技報, 26 (1963) May, p. 36



A: Top, surface B: Top, $1/4 T$ C: Top, $1/2 T$ D: Bottom, Surface E: Bottom, $1/4 T$ F: Bottom, $1/2 T$
 Photo. 2. Microstructure of 365 mm thickness forged shell watercooled and tempered.
 ($900^{\circ}\text{C} \times 19 \text{ hr}$ austenitized and $600^{\circ}\text{C} \times 16 \text{ hr}$ tempered) $\times 400(3/4)$

- 7) 邦武: 住友金属技報, 12 (1960), p. 482
- 8) R. E. LORENTZ: Welding J., 41 (1962) 10, p. 433-S
- 9) R. D. STOUT, et al.: Welding J., 40 (1961) 9 p. 400-S

討 論

【質問】 石播技研 氏家信久

冷却速度 $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ でどのくらいの厚さまで処理でき

るか?

【回答】

$\frac{1}{4}T$ での冷却速度と考えると肉厚 500 mm まで $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上の冷却速度を得ることが可能である。肉厚 500 mm の鋼板を製作することは困難であるから実質的には鍛造シェル方式の圧力容器となる。機削などによる減厚を考慮に入れると実際の容器肉厚は 350~400 mm が限界であろう。