

極厚鋼板のプログラム試験法

Programmed Test Method for Heavy Plate

原 弘 範*

Hironori Hara

吉 村 茂 彦**

Shigehiko Yoshimura

Synopsis :

ASME Rules prescribe that a programmed test method may be applied to certify the mechanical properties of heavy plates.

In this article, the programmed test method is applied for 2¼%Cr-1%Mo steel and Mn-Ni-Mo steel heavy plates, and these results are compared with those obtained by the conventional "3T test method".

By the results of the experiments, it is concluded that the test method can be applied to the actual productions in place of the conventional "3T test method".

1. はじめに

近年各種プラントに使用される圧力容器などの大型化に伴ない、極厚鋼板の製造が要求されてきた。特に、原子炉圧力容器用鋼板として用いられる Mn-Ni-Mo 鋼 (ASTM A 533 B) の場合、原子炉の発電容量の増大に伴ない、その要求される肉厚は増加している¹⁾。また、原油の直接脱硫リアクターとしては、従来は鍛鋼リング材が用いられていたが、最近、経済性などの諸観点より、鋼板による溶接構造が用いられるようになった。この直接脱硫リアクター用鋼板として用いられるものに、2¼%Cr-1%Mo 鋼 (ASTM A387 D) があり、この鋼板の肉厚としても、200mm 前後の厚みが要求されている。

これら圧力容器などに使用される鋼板は、脆性破壊との関連において、良好な靱性が要求されるため、鋼板の熱間加工後、焼入れおよび焼もどしの熱処理が行なわれることが多い。したがって、容

器自体の機械的性質を確認するためには、鋼板が加工後受けるのと同等の熱履歴を与えたのち、試験を行なう必要がある。その方法として、従来は、いわゆる 3T 法が用いられている。この 3T 法とは、試験片の冷却速度が容器自体の冷却速度に一致するよう、すなわち試材寸法による影響をうけないようにするため、 T (板厚)×3 T (板幅)×3 T (長さ)以上の寸法の試材に所要の熱履歴を与えたのち、鋼板内部より試験片を採取し、この試験値で容器本体の機械的性質を確認するという方法である。

ところが、ASME Sec. III "Nuclear Vessel" 1968, Edition N-313. 2, 3 に 3T 法以外に新しい試験方法が規定されている。それはオーステナイト化温度から、焼ならし、あるいは焼入れを受けるフェライト系鋼材では、実物を代表する機械的性質は、本体と同等、あるいはそれよりも速くない冷却速度で得られた材質で代表しても良い。しかも、この場合、試験片のどの場所においても、冷却速度は、製品本体の冷却速度に対し、

* 水島製鉄所管理部検査課掛長

** 水島製鉄所管理部検査課

±25°F (14°C), ±20sec の範囲に収まっていなければならないという規定である。このような観点から、冷却速度可変式電気炉(以後シミュレーターと呼ぶ)を用いて鋼材に熱履歴を与える方法^{2),3)}(以後プログラム法と呼ぶ)が用いられるようになってきた。この方法によれば鋼板製造工程の短縮、3T法にくらべ試材が少量ですむなどの利点のほか、冷却速度が自由にコントロールできるため、本体の熱処理条件の設定にも寄与できるという利点がある。

本報告は、当社水島製鉄所に設置された、シミュレーター装置の概要、ならびにプログラム法を極厚 Mn-Ni-Mo 鋼板 (ASTM A533 B), 2¼%Cr-1%Mo 鋼板 (ASTM A387 D) に適用し、従来の 3T法との相関について調べた結果について述べる。

2. シミュレーター装置の概要

シミュレーター装置は、本体と総合制御盤から構成されている。以下に、装置の各部分の概要、および性能について述べる。

2.1 本 体

本体の外観を **Photo. 1** に示す。本体は、炉体、加熱装置(ヒーター用変圧器)、冷却装置(冷却空気送風機、可変速度電動機、導風管および流量計、排気口開閉装置、冷却水注水装置、風量制限用手動ダンパーが組み込まれている)などより構成される。

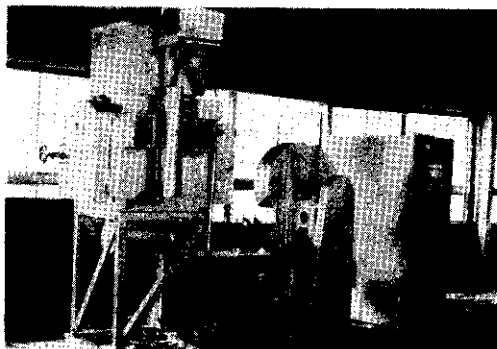


Photo. 1 Appearance of program controlled heating and cooling apparatus

加熱装置は、エスビット線ヒーターの抵抗加熱によって、加熱時の昇温、および冷却時に設定温度よりも下がった場合の加熱を行なう。冷却装置としては、常温空気の高速噴射による風冷、ならびに噴水による水冷の2方式により、所定の冷却速度を試験材に与えるようになっている。また、冷却時に、風量制限用手動ダンパーの開閉によっても、補助的に冷却速度が制御できるようになっている。

2.2 総合制御盤

総合制御盤には、前記本体を手動、または自動制御するための装置を収納してある。すなわち、これには、自動温度記録調節計、プログラム設定器、ヒーター供給電力調整器 (SCR)、可変速度電動機制御装置、ヒーター電源などの機器より構成されている。**Fig. 1** に制御システムのブロック・ダイアグラムを示す。

加熱時には、自動温度調節計で、ヒーター供給電力を P I D 制御することにより、所定の昇温速度を得ることができるようになっている。冷却時には、プログラム・シートに描かれた、プログラム・パターン(冷却曲線のマスターカーブ)に従って、シーケンス・コントロール回路を通じ、変速モーター、ダンパーコントロールモーター、排気モーター、注水用電磁弁などが自動的に作動し、高圧ブローア・吐出風量、および噴水量をプログラム制御し、所要の冷却速度を試験材に与えることができるようになっている。

2.3 性 能

この装置は、前述の ASME Sec. III の規定に合致させるため、常用温度に保持した場合、設定温度に対し ±10°C 以内、冷却設定曲線によるプログラム冷却の場合、設定冷却曲線に対するズレは、±14°C, ±20sec 以内に収まるように設計されている。

この装置を使用した場合の設定冷却曲線と、試材各部の冷却曲線との対比の一例を **Fig. 2** に示す。この図より明らかなように、温度制御点および試材各点の冷却曲線と、設定冷却曲線(マスターカーブ)とのズレは、いずれの点においても、

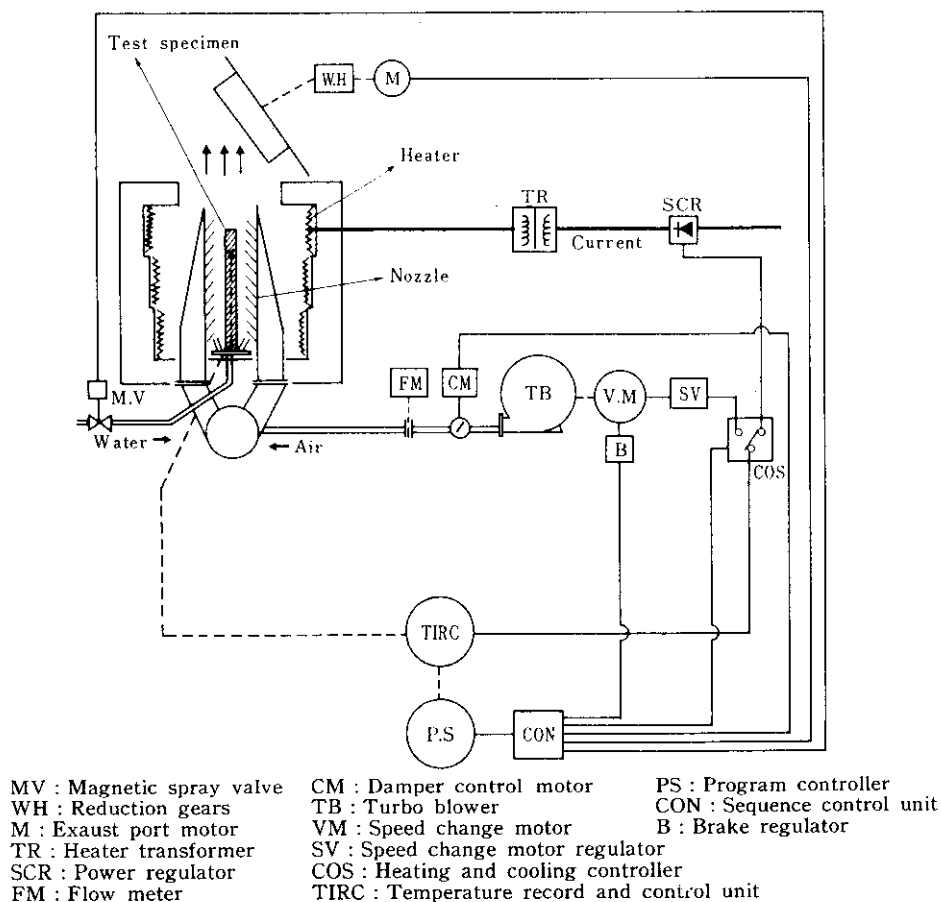


Fig. 1 Block diagram of apparatus

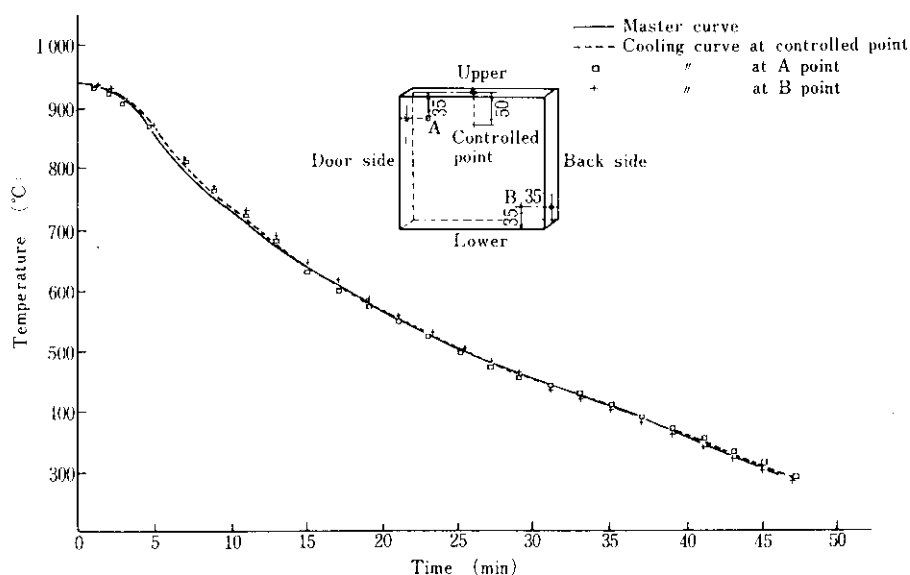


Fig. 2 Cooling curves at several points of test specimen

ASME Sec. III の規定内にある。

この装置で処理できる試材の最大寸法は、厚さ 21mm×幅 220mm×長さ 250mm である。この試材より、試験片を採取する場合の採取可能寸法は、厚さ 21mm×幅 150mm×長さ 185mm である。ちなみに、各試験片ごとの 1 枚の試材より採取できる本数を示すと次のようになる。

- (1) 引張試験片 (例: 21×21×180) 6ヶ
- (2) 衝撃試験片 (例: 12×12×60) 16~20ヶ
- (3) 落重試験片 (例: 17×55×150) 3ヶ

3. 極厚鋼板の焼入れ冷却曲線

3.1 3T 法による焼入れ冷却曲線の例

プログラム法で焼入れを行なう場合には、板厚に応じた焼入れ冷却曲線をあらかじめ知っておく必要がある。

当所においても、種々の板厚の鋼板について、従来の 3T 法による焼入れ冷却曲線を測定した。この場合の測定は、 $T \times 3T \times 3T$ 以上の試材を、幅 1.8m、長さ 1.6m、深さ 3.07m の焼入れ槽（水

量 8.85m³）に水焼入れすることにより行なった。焼入れ冷却曲線は、鋼板の板厚 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ の位置に、CA 熱電対を取り付け、温度記録計により測定した。なお、焼入れ方法としては、水をポンプで注入（供給水量 2m³/min）しながら、さらにプロペラで攪拌されている水槽に焼入れする方法（以後攪拌水槽焼入れ法と呼ぶ）と、水の注入も、プロペラでの攪拌も行なわない静止水槽に焼入れする方法（以後静止水槽焼入れと呼ぶ）の 2 通りとした。

Fig. 3 は、攪拌水槽焼入れ法の場合の、板厚の $\frac{1}{4}$ での代表的板厚の冷却曲線の一例を示したものである。

また Fig. 4 は、両焼入れ法の場合について、板厚の $\frac{1}{4}$ と $\frac{1}{2}$ での 825°C から 400°C までの平均冷却速度と板厚の関係を示したものである。図からも明らかなように、両焼入れ法での焼入れ平均冷却速度に差異が認められる。この攪拌水槽焼入れ法と静止水槽焼入れ法での焼入れ冷却速度は、当所におけるテスト・クーボン法で制御可能な冷却速度の最大と最小を示すものである。

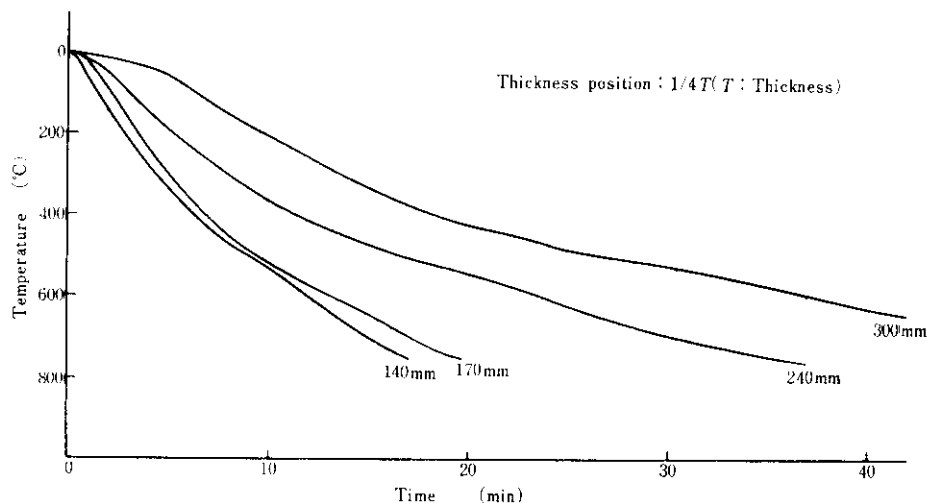


Fig. 3 Representative accelerated cooling curves at $\frac{1}{4}T$ (3T Test coupon)

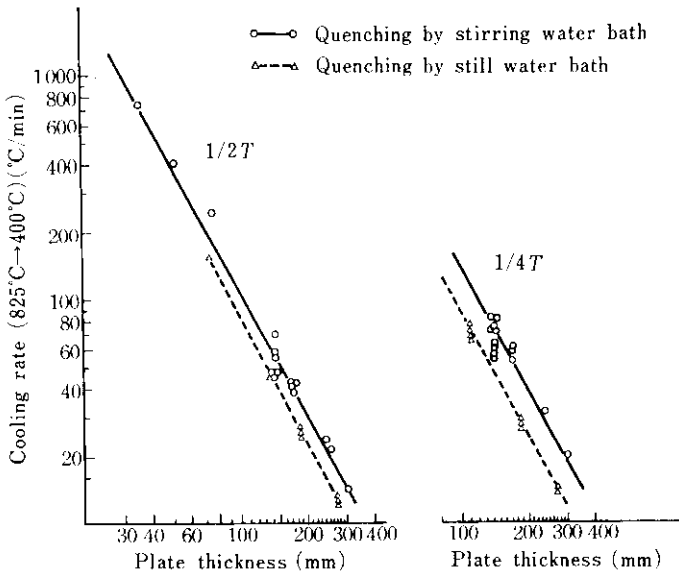


Fig. 4 Cooling rate of test coupon in quenching

線の比較例を示す。この図によればプログラム法で行なった場合の焼入れ冷却曲線のマスター・カーブ（3T法により得られた冷却曲線）とのズレは、前述の ASME Sec. III の規定（温度偏差 $\pm 14^{\circ}\text{C}$ ，時間偏差 $\pm 20\text{sec}$ ）内にあり、そのズレは非常に小さい範囲に収まっている。これは、マスター・カーブとして、3T法で実際に測定した冷却曲線を使用したため、 500°C 近傍での鋼の変態潜熱による冷却曲線のふくらみもカバーすることができたからである。一般に、温度、時間軸とも、マスター・カーブとのズレが最も生じやすいのは、この変態潜熱のところであり、マスター・カーブの設定に際し

ては、この点に特に注意する必要がある。

3.2 3T法とプログラム法による冷却曲線の比較例

Fig. 5 に 3T法とプログラム法による冷却曲

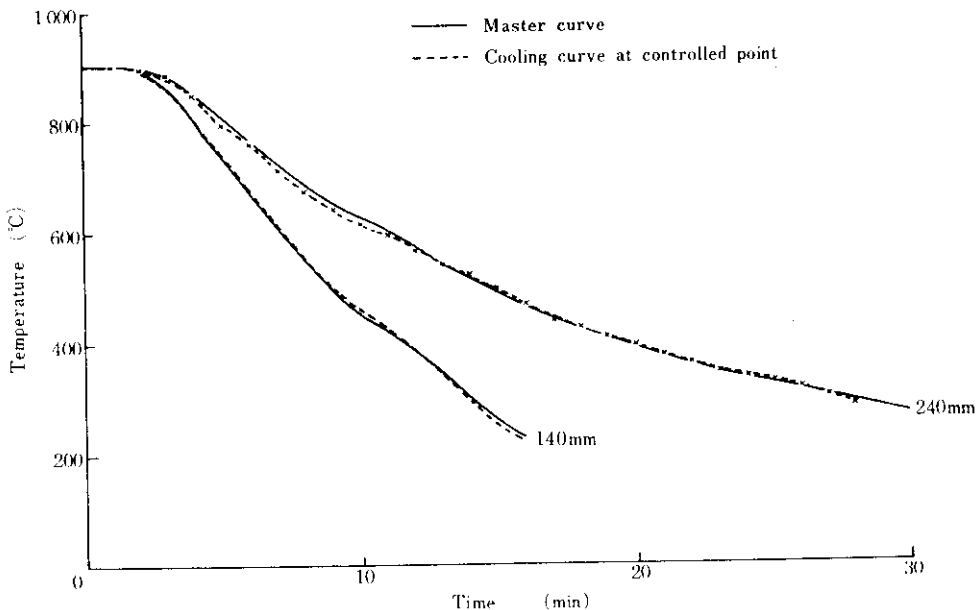


Fig. 5 Comparison between master curves and cooling curves at controlled point

4. プログラム法の適用結果

プログラム法で焼入れを行なったものと、3T法で焼入れを行なった場合との機械的性質を比較するため、2¼%Cr-1%Mo鋼(板厚110~268mm)およびMn-Ni-Mo鋼(板厚140~240mm)を用い、熱処理後、引張および衝撃試験を行なった。Fig. 6は、鋼板が試験までにうける熱処理のフロー・チャートである。なお、プログラム法では、焼入れは、シミュレーターを用いたが、焼もどしおよび応力除去焼鈍には、小型電気炉を用いた。

なお、供試材の化学成分および熱処理条件の一例を Table 1, 2 に示す。

4.1 2¼%Cr-1%Mo 鋼 (ASTM A387 D)

厚さ 21mm×幅 220mm×長さ 250mmの小型試験片を、鋼板の板厚¼および½の位置より採取し、3T法ならびにプログラム法で焼入れ焼もどしたものの、あるいはさらに応力除去焼鈍(SR)を行なったものについて機械試験を行なった。なお、プログラム法焼入れで用いたマスター・カーブは、3T法で焼入れを行なった際、測定した冷却曲線を用いた。

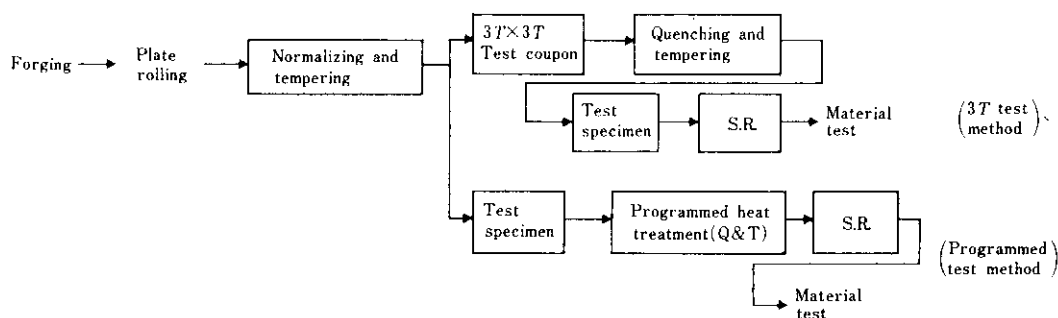


Fig. 6 Flow chart of heat treatment for test specimens

Table 1 Chemical composition of tested steels (wt %)

Kind of steel	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
2¼%Cr-1%Mo (A387 D)	152	0.15	0.26	0.52	0.011	0.005	2.46	0.99	—
	185	0.15	0.37	0.55	0.010	0.005	2.45	1.00	—
Mn-Ni-Mo (A533 B)	140	0.18	0.24	1.40	0.009	0.006	0.13	0.53	0.66
	240	0.18	0.26	1.37	0.011	0.006	0.11	0.54	0.67

Table 2 Condition of heat treatment

Kind of steel	Thickness (mm)	Quenching	Tempering	S. R.
2¼%Cr-1%Mo (A387 D)	152	920°C×4.5hr W.Q.	650°C×4.5hr A. C.	695°C×20hr F. C.
	185	940°C×7.3hr W.Q.	645°C×7.3hr A. C.	700°C×19hr F. C.
Mn-Ni-Mo (A533 B)	140	900°C×4.2hr W.Q.	665°C×4.2hr A. C.	620°C×45hr F. C.
	240	890°C×7.2hr W.Q.	645°C×5hr A. C.	620°C×26hr F. C.

Fig. 7 は、両熱処理法の引張試験での、各特性について、Fig. 8 は衝撃特性 (+20°C における吸収エネルギー) についての結果を比較したものである。また、Fig. 9 には衝撃遷移曲線の比較の一例を示した。

これらの結果によると、両熱処理法による引張特性および衝撃特性には良い一致がみられた。こ

の試験結果の範囲では、引張強さ、降伏強さの両熱処理法による差は最大 3kg/mm^2 程度である。20°C での吸収エネルギーについては、両者の値は良く一致しており、また衝撃遷移曲線においても差はほとんどみられない。また、両熱処理法での顕微鏡組織の比較の一例を Photo. 2 に示すが、両者はほとんど同じような組織を示している。

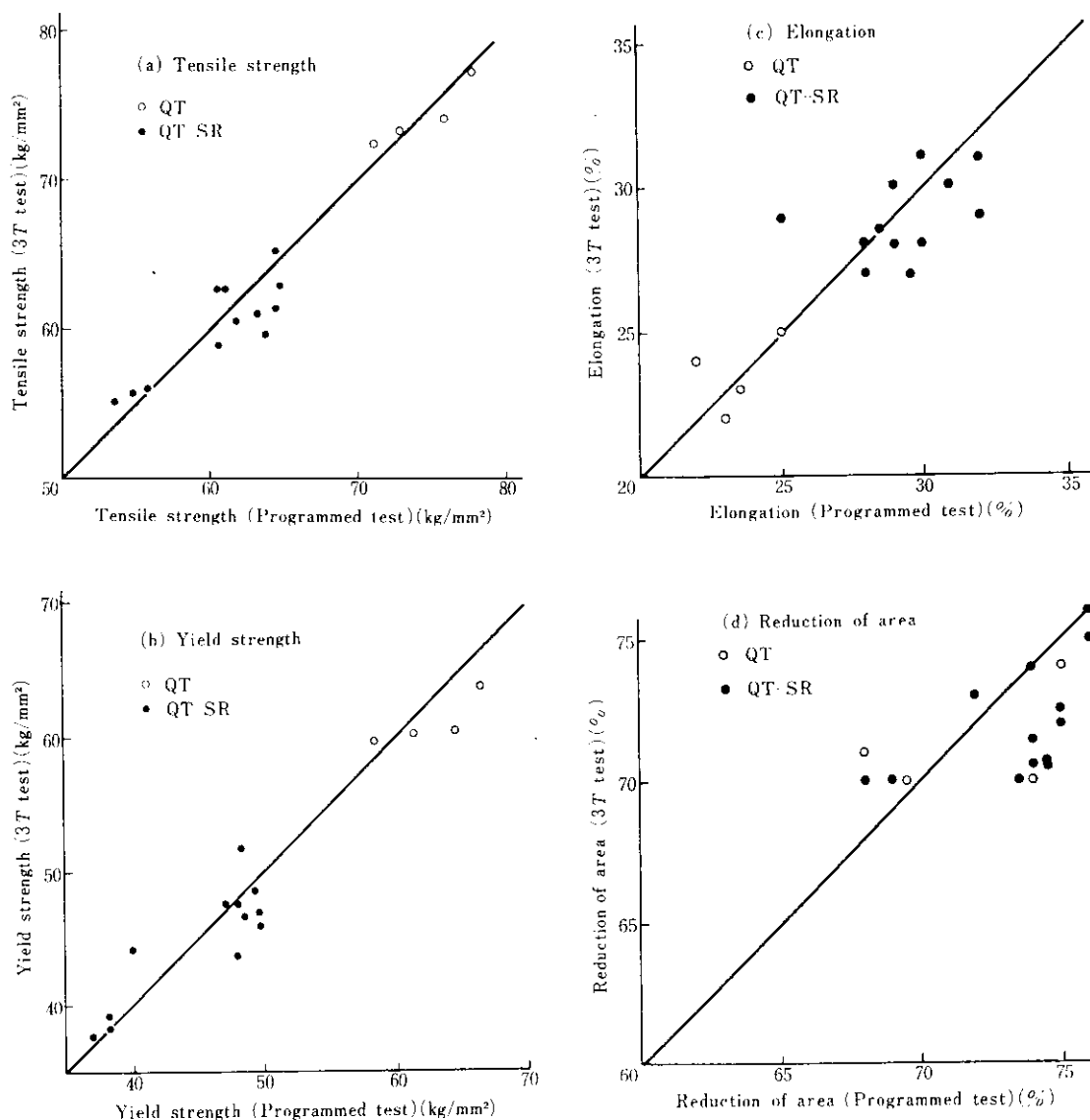
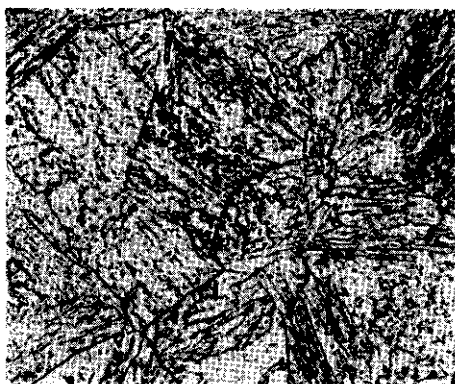
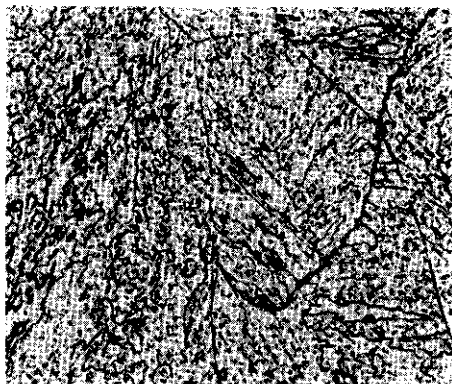


Fig. 7 Comparison of tensile properties between programmed and 3T test (2 1/4%Cr-1%Mo steel)



Programmed test specimen



3T test coupon (×500)

Photo. 2 Comparison of microstructures (as QT-SR) between programmed and 3T test (2 1/4%Cr-1%Mo steel)

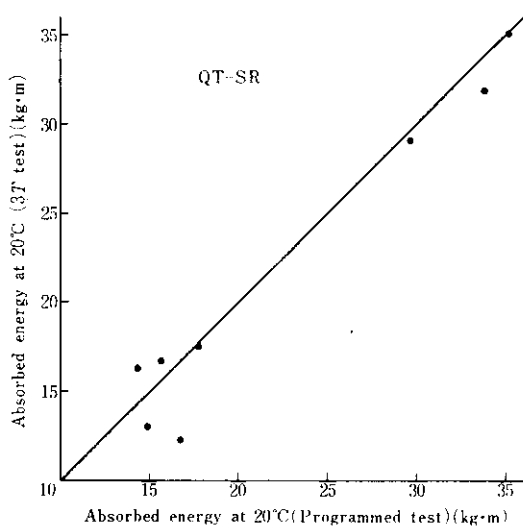


Fig. 8 Comparison of absorbed energy at 20°C between programmed and 3T test (2 1/4%Cr-1%Mo steel)

4.2 Mn-Ni-Mo 鋼 (ASTM A533 B)

Mn-Ni-Mo 鋼についても、2 1/4%Cr-1%Mo 鋼と同様に熱処理を与えたのち、引張および衝撃特性について、3T 法とプログラム法との比較を行った。**Fig. 10** は引張特性、**Fig. 11, 12** は衝撃特性について比較したものである。この場合も、両熱処理法により得られた機械的性質の間には良好な一致がみられた。このデータの範囲では、引張強さ、降伏強さの差は最大 2kg/mm² 程度であった。また、衝撃特性では、-12.2°C の吸収エ

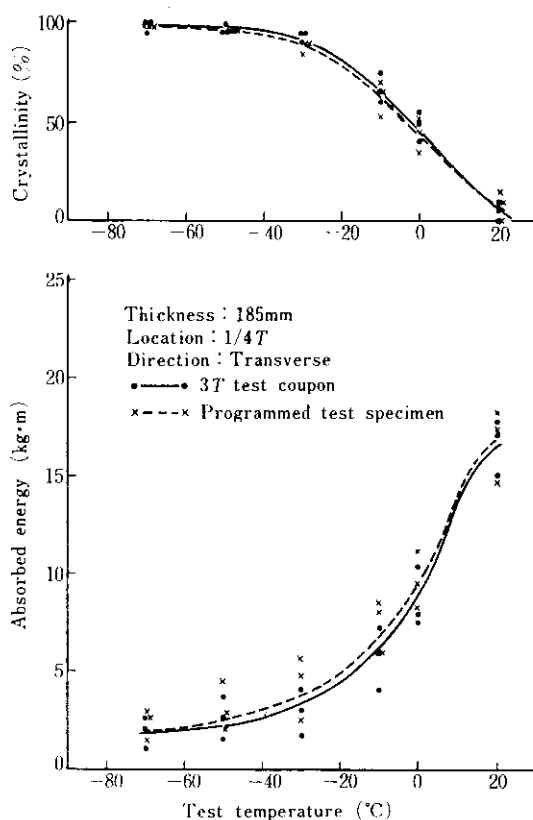


Fig. 9 Comparison of Charpy transition curves between programmed and 3T test (2 1/4%Cr-1%Mo steel)

ネルギ、脆性破面率遷移温度とも、良好な一致がみられた。

Photo. 3 は 両熱処理法の組織の比較の一例を示したものであるが、ほぼ同じような組織である。

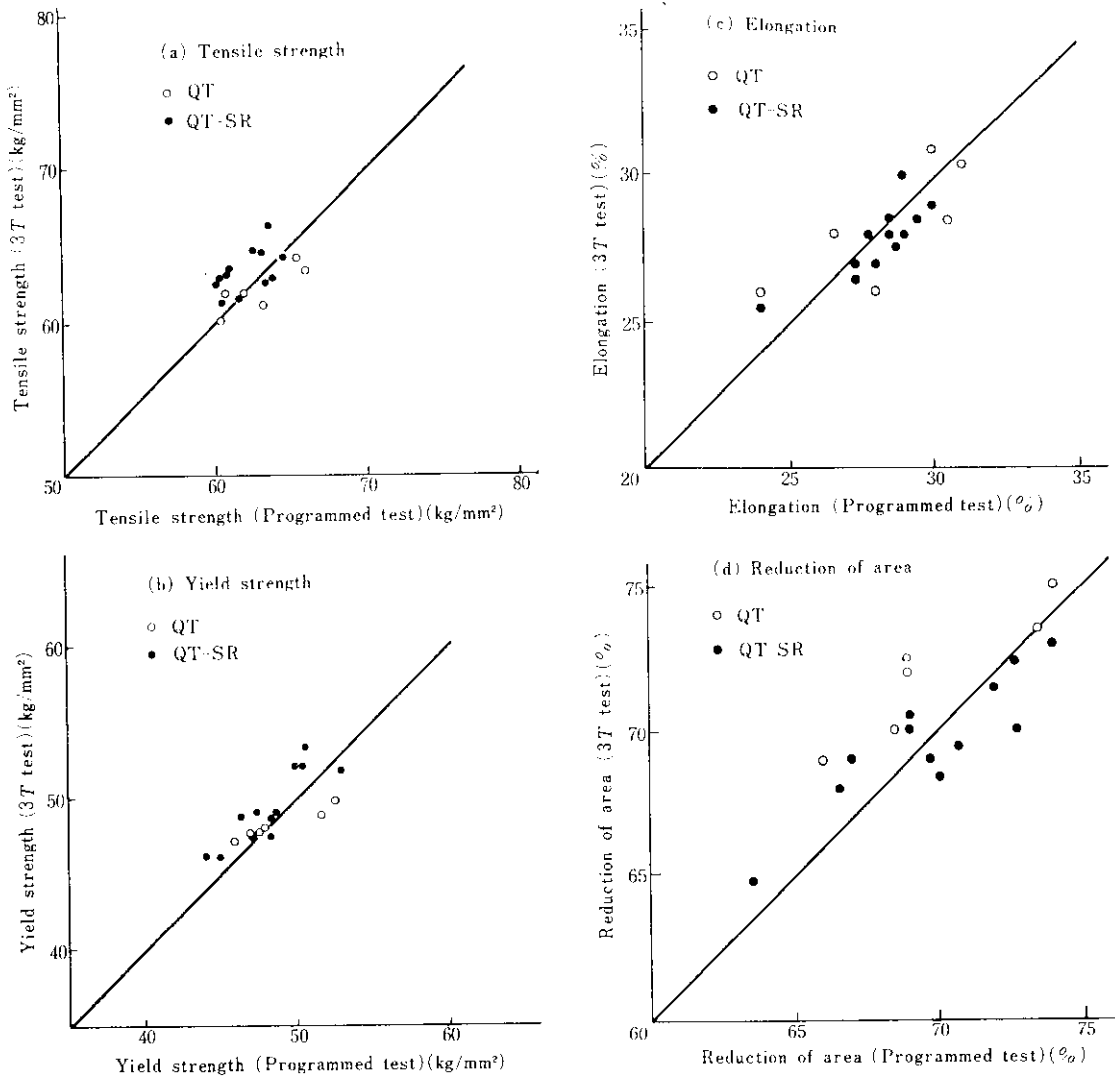
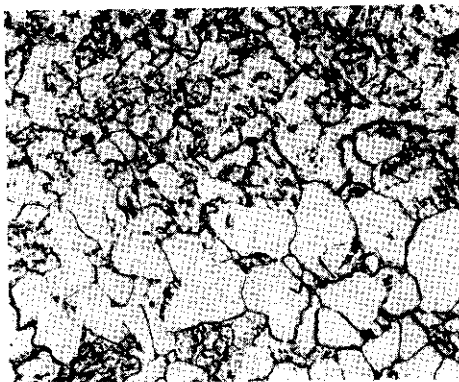
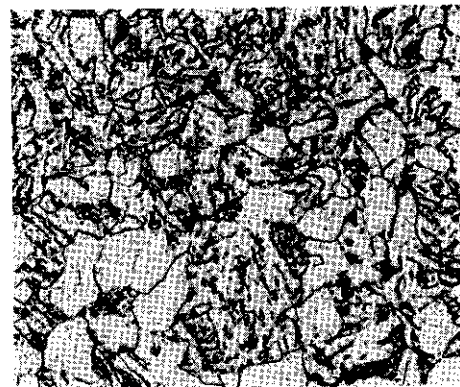


Fig. 10 Comparison of tensile properties between programmed and 3T test (Mn-Ni-Mo steel)



Programmed test specimen



3T test coupon (×500)

Photo. 3 Comparison of microstructures (as QT-SR) between programmed and 3T test (Mn-Ni-Mo steel)

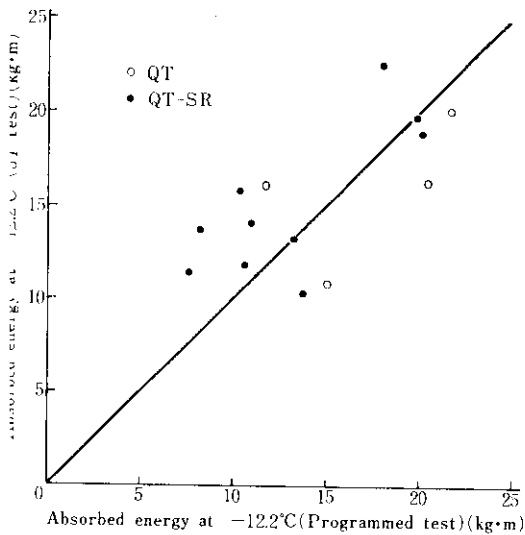


Fig. 11 Comparison of absorbed energy at -12.2°C between programmed and 3T test (Mn-Ni-Mo steel)

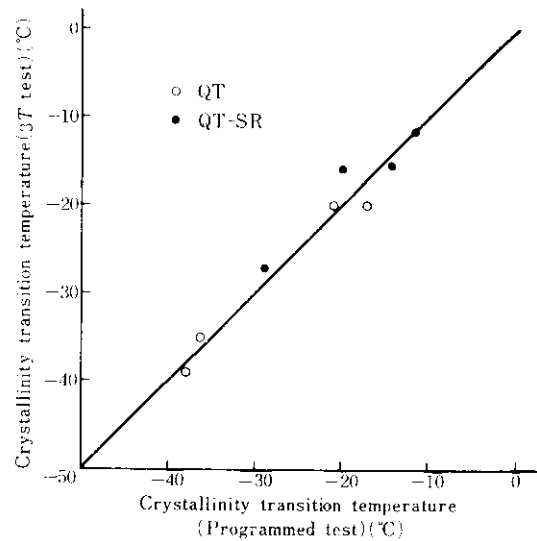


Fig. 12 Comparison of crystallinity transition temperature between programmed and 3T test (Mn-Ni-Mo steel)

まとめ

以上述べたように、従来の3T法と、プログラム法による、引張特性および衝撃特性について比較した結果、 $2\frac{1}{4}\%\text{Cr}-1\%\text{Mo}$ 鋼、Mn-Ni-Mo鋼いずれの場合にも両特性とも、かなり良好な一歩を示した。また顕微鏡組織の比較においても、特に差異は認められなかった。

したがって極厚圧力容器用鋼板が各種の熱履歴

を受けたあとの機械的性質は、製品本体が受ける同等の熱履歴を、小型試験片にシミュレートさせることにより、把握できることが確認された。

なお、このプログラム法で試験を行なうためには、製品本体での多数の冷却曲線を知り、板厚ごとの焼入れ冷却曲線を設定しておく必要がある。これらの冷却曲線を用い、小型試験片で製品本体の機械的性質をあらかじめ知り、それらのデータを基に、すぐれた品質の鋼板を製造することが可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 野村ら：日本製鋼所技報，(1973)33, 31
- 2) 足立ら：日本製鋼所技報，(1971)29, 67
- 3) 薄田ら：三菱重工技報，7 (1970)2, 10