

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.6 (1974) No.2

原子炉压力容器用 ASME SA533 Gr.B Cl.1 極厚鋼板について

On Heavy Gauge ASME SA 533 Gr.B Cl.1 Steel Plate for Nuclear Reactor Pressure Vessels

楠原 祐司(Yuji Kusuhara) 吉村 茂彦(Shigehiko Yoshimura) 荻野 泰司(Yasuji Ogino) 榎並 禎一(Teiichi Knami) 船越 督己(Tokushi Funakoshi) 林 忠男(Tadao Hayashi)

要旨：

溶解精錬工程に LD 転炉と ASEA-SKF 取鍋精錬炉 (LRF) の組合せを使用し、原子炉压力容器用 ASME SA533 Gr.B Cl.1 鋼板の試作を行なった。試作は適正な強度、高靱性および鋼板の内部健全性の確保ならびにこれらの再現性を確認するため、60～80t の鋼塊を用い 5 回行なった。結果はきわめて良好であり、LRF 精錬鋼の特色である非金属介在物の少ない内部健全性のすぐれた鋼板が製造できることが確認され、240mm 厚さの鋼板でも適正な強度と高靱性が得られた。さらに鋼板内の諸特性のバラツキ、大型脆性破壊試験、低サイクル疲労試験、加工性試験などを実施し、原子炉压力容器用鋼板としてきわめてすぐれた特性を有することを確認した。

Synopsis：

ASME SA 533 Gr.B Class 1 steel plates for nuclear reactor pressure vessels have been made for test purpose by means of combined use of LD converter and ASEA-SKF ladle refining furnace (LRF) in the melting and refining process. In order to secure proper strength, high fracture toughness and excellent internal soundness of the steel, as well as to confirm their reproducibility, tests were conducted five times, using a 60 to 80 t ingot for each heat. The results are found satisfactory, and steel plates obtained have a superior internal soundness with lesser non-metallic inclusions, well confirming what is usually known of LRF refined steels. The steel, even in 240 mm thickness, showed proper strength and high fracture toughness. These results and other tests conducted on uniformity of mechanical properties and fracture toughness across total dimensions of the plates, fracture toughness based on large specimens, low cycle fatigue, and workability, confirmed that the subject steel has such properties to permit good nuclear reactor pressure vessel fabrication.

本文は次のページから閲覧できます。

原子炉压力容器用 ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 極厚鋼板について

On Heavy Gauge ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 Steel Plate
for Nuclear Reactor Pressure Vessels

楠 原 祐 司*

Yuji Kusuhara

吉 村 茂 彦**

Shigehiko Yoshimura

荻 野 泰 司***

Yasuji Ogino

榎 並 禎 一****

Teiichi Enami

船 越 督 己*****

Tokushi Funakoshi

林 忠 男*****

Tadao Hayashi

Synopsis:

ASME SA 533 Gr. B Class 1 steel plates for nuclear reactor pressure vessels have been made for test purpose by means of combined use of LD converter and ASEA-SKF ladle refining furnace (LRF) in the melting and refining process.

In order to secure proper strength, high fracture toughness and excellent internal soundness of the steel, as well as to confirm their reproducibility, tests were conducted five times, using a 60 to 80 t ingot for each heat.

The results are found satisfactory, and steel plates obtained have a superior internal soundness with lesser non-metallic inclusions, well confirming what is usually known of LRF refined steels. The steel, even in 240 mm thickness, showed proper strength and high fracture toughness.

These results and other tests conducted on uniformity of mechanical properties and fracture toughness across total dimensions of the plates, fracture toughness based on large specimens, low cycle fatigue, and workability, confirmed that the subject steel has such properties to permit good nuclear reactor pressure vessel fabrication.

1. 緒 言

近年、原子力発電の開発がめざましく、わが国においても昭和60年度には6 000 万 kW の原子力発電設備が稼動するであろうと予測されており、

この分野で使用される鉄鋼材料の需要が増加している。

この要求にこたえるため、当社では、社内に原子炉材料に関するプロジェクトチームを発足させ、積極的に研究ならびに営業活動を推進し、原子炉格納容器材料などの供給を行ってきた。

* 水島製鉄所管理部厚板管理課
*** 水島製鉄所第一圧延部部長代理
***** 技術研究所厚板研究室室長・工博

** 水島製鉄所管理部検査課
**** 技術研究所水島研究室主任研究員
***** 技術本部技術開発部技術開発室部長

一方、化学工業、石油精製工業などの分野で、高温高压で使用される压力容器の使用が増加し、原子炉压力容器をも含めて、これらの容器に使用される压力容器用の極厚鋼板の需要が増加したことから、昭和46年4月より、当社水島製鉄所に一連の極厚鋼板製造設備¹⁾を移動させ、これらの要求にこたえている。

この設備の移動にともない、原子炉压力容器用材料の製造も可能になるため、原子炉材料に対する積極的進出策の一貫として、この設備の建設計画が決定された時点より、原子炉压力容器用 ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 鋼板の製品化の研究を続けてきた。

本報では、この研究の経緯ならびに最新の試作結果を報告する。なお、溶接継手性能試験結果の一例²⁾および一連の研究で得られた機械的性質におよぼす熱処理の影響³⁾は本誌別報に報告する。

2. 開発の経緯

2.1 目標の設定

一次系を内蔵する原子炉压力容器の破損はそのおよぼす影響が計り知れないので、これに使用される鋼材には高度の信頼性が要求されている。当社では当鋼種の製品化研究に先立ち、開発の目標を以下のように定めた。

(1) 鋼板の内部健全性の確保

原子炉压力容器用材料には極度に厳しい非破壊検査が要求されるうえに、当鋼種のように板厚が厚くさらに AI 投入量の比較的多い鋼板では要求される内部健全性を確保することが難しい。鋼板の内部健全性は圧延以後の工程でも影響を受けるが、製鋼工程の影響がきわめて大きい。極厚鋼板処理設備検討の段階では、極厚鋼の製造目的も含めて、鋼材の内部健全性確保に効果的な ASEA-SKF 方式による取鍋精錬炉⁴⁾ (Ladle Refining Furnace を略し当社では LRF とよぶ)を導入することが決定していたので、内部健全性の確保にあたっては、この設備の操業技術の習熟を主体にした。

(2) 適正な強度

ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 鋼板の規格で定めら

れている引張強さの範囲は $56.2 \sim 70.3 \text{ kg/mm}^2$ と比較的広いが、安定した引張特性が要求されるため、 $60 \sim 65 \text{ kg/mm}^2$ の範囲を目標にした。

(3) 高靱性の確保

原子炉压力容器は高温で使用される容器であるにもかかわらず、使用中に中性子照射損傷を受けるうえに、容器の瞬時破壊のおよぼす影響を考慮して、比較的厳しい低温靱性が要求されている。

一方、当鋼種は板厚が厚いため、焼入れ時の冷却速度が遅く、さらに、溶接後の応力除去焼なまし (以後 S R と呼ぶ) 時間が長くなるため、靱性の確保が難しい。

したがって、内部健全性の確保とならび、高靱性の確保を最大の重点項目とした。

(4) 鋼板の均質性の確保

原子炉压力容器では、板厚が厚く、溶接が容易でないうえに、最近、In-service inspection が強化されたことも加わり、溶接線を極力減らす方向にある。したがって、単重が40tを越える鋼板もまれではない。鋼板単重が増加すれば、使用鋼塊が大型化し、偏析などにもどづく鋼板内の機械的性質のバラツキも無視できなくなり、鋼板の均質性確保が必要である。

(5) 不純物元素の減少

原子炉压力容器材は使用中に中性子照射損傷を受けるので、照射感受性を増加する不純物元素の混入を嫌う。したがって、不純物元素の減少に留意する。

(6) 性能の安定化

常に安定した鋼板を製造できることは鋼板の製造者に利益をもたらすのみでなく、使用者に信頼して使用してもらうためにも重要である。このような点から、諸性能の再現性を重視する。

(7) 製造体制および品質保証体制の確立

試作過程において、品質の追及のみならず、経験を生かした製造体制および品質保証体制を確立する。

2.2 開発のステップ

目標の設定と同時に、Table 1 に示される段階の開発ステップを定め、研究を実施してきた。

小型鋼塊による研究は、主として、機械的性質

Table 1 Developing procedure of ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 plates
for nuclear reactor pressure vessels

Step	Kind of refining furnace	Ingot weight	Test purpose
Small size ingot test	High frequency furnace	30~50 kg	Confirmation of the effect of chemical compositions on mechanical properties and fracture toughness
Medium size ingot test	15 t electric arc furnace	20 t	Confirmation of relation between chemical compositions, and mechanical properties and fracture toughness in case of real thickness of plate
Large size ingot test	180 t LD converter-100 t LRF	60~80 t	Confirmation of various properties of real size plate manufactured with large size ingot

におよぼす化学成分の影響の調査を目的として実施され、その概略を把握するのに役だてた。さらに、中型鋼塊および大型鋼塊による試作段階にも必要に応じ小型鋼塊による実験を行ない、それぞれの試作段階での参考にした。

中型鋼塊による試作では実用板厚における機械的性質におよぼす化学成分の影響について確認を行なった。

ひきつづき実施された大型鋼塊による試作では、実用板厚、実用寸法の鋼板を **Fig. 1** に示す実際工程により製造し、強度と靱性の確認、鋼板内のこれらのバラツキの調査および内部健全性の確認を行なった。さらにこれらの再現性の確認および製造体制と品質保証体制の確立を図るため、5 チャージの試験を実施した。さらに最新の G 鋼（厚さ 240 mm）では、大型脆性破壊試験、低サイクル疲労試験、加工性試験、溶接継手性能試験を実施し、諸特性の確認も行なった。

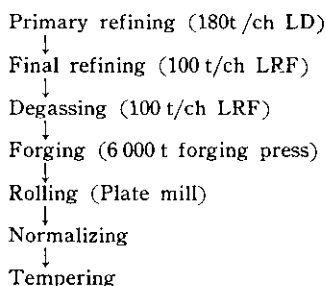


Fig. 1 Fabrication history

2.3 大型鋼塊による試作経過

中型鋼塊による試作結果も含めて、大型鋼塊による試作結果の概略を **Table 2** に示す。

各試作鋼とも綿密な非破壊検査が実施された。超音波探傷検査は ASME Sec. III で規定されている底面反射波の減衰を測定する方法⁵⁾と、**Table 3** に示す社内基準として採用している欠陥波を測定する方法で実施された。

結果は、大型鋼塊による第 1 回目の試作であった C 鋼に一部軽微な欠陥が検出されたほかはいずれも欠陥波は検出されず、さらに底面反射波の減衰も少なく良好であった。

また、鋼板の表面および端面について液体浸透探傷検査も実施した。いずれの鋼板とも欠陥指示は検出されず、結果は良好であった。

このように、非破壊検査結果はきわめて良好であり、溶解精錬工程への LRF 採用および分塊工程への鍛造プレスの採用により、すぐれた内部健全性を有する鋼板を製造できることが確認された。

大型鋼塊による試作以前に、十分な予備試験を実施したにもかかわらず、大型鋼塊による第 1 回目の試作鋼である C 鋼では靱性の確保の点で、かならずしも満足のいく結果は得られなかった。その後、当鋼種の靱性におよぼす化学成分および熱処理条件の影響が明らかにされ、E 鋼ではこの鋼種としては驚異的ともいえる高靱性を得ることが

Table 2 Summarization of test results

Kind of steel	Ingot weight (t)	Chemical composition								Thickness (mm)	Tensile test			2 mm V-notch Charpy impact test			Heat treatment condition		
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al		Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	E _{1/2} (kg-m)	T _{1/2} (°C)	T _{1/2} (°C)	Quenching (°C) × (h)	Tempering (°C) × (h)	SR (°C) × (h)
A	20	0.19	0.20	1.20	0.009	0.007	0.67	0.56	0.014	75	49.4	62.2	28	17.9	30	-66	875 × 6	660 × 12	620 × 45
										173	45.6	59.5	29	6.8	6	-25	875 × 6	660 × 12	620 × 45
B	20	0.20	0.18	1.30	0.011	0.006	0.69	0.52	0.018	173	48.5	62.7	29	6.1	0	-17	875 × 6	660 × 12	620 × 45
										300	49.3	63.8	27	4.6	11	-17	875 × 6	640 × 12	600 × 45
C	80	0.20	0.26	1.23	0.011	0.010	0.66	0.51	0.024	140	49.4	62.8	27	6.6	8	-25	900 × 4.5	670 × 4.5	620 × 45
D	80	0.19	0.30	1.35	0.013	0.007	0.69	0.54	0.032	170	48.8	62.1	30	8.2	7	-34	870 × 5	665 × 5	620 × 45
E	80	0.18	0.25	1.25	0.011	0.006	0.68	0.49	0.018	143	49.5	60.2	30	18.3	-30	-55	900 × 4.5	665 × 4.5	620 × 45
F	80	0.18	0.24	1.40	0.009	0.006	0.66	0.53	0.027	140	50.6	64.6	28	8.9	-4	-30	900 × 4.5	665 × 4.5	620 × 45
										170	53.6	65.1	29	11.9	-11	-34	900 × 5	665 × 5	620 × 45
G	60	0.18	0.26	1.37	0.011	0.006	0.67	0.54	0.019	240	49.3	63.9	28	17.3	-20	-46	890 × 7.2	645 × 5	620 × 26

Sampling site : Quarter of thickness

Tensile specimen : JIS Z 2201 No. 10

Charpy specimen : JIS Z 2202 No. 4

Table 3 Conditions of ultrasonic examination for G steel

Detector	SM-50
Scanning	100% of one major surface
Couplant	Water
Surface condition	As ground
Probe	2.25Q 30N
Sensitivity	STB-III V _{15-2.8} =100%
Frequency	2.25 MHz

できた。しかしE鋼は引張強さが、当初目標とした下限 60kg/mm² いっぱいであり、やや強度が低すぎたので、F鋼の試作にあたっては、適正強度と靱性の確保を目的とした。結果は Table 2 に示されているように良好であり、E鋼で意図した強度と靱性のコントロール技術を再確認した。この技術をもとに、最新の試作鋼である G鋼では 240mm という厚さであるにもかかわらず、後述するように、高い靱性と適正な強度を確保するこ

とができた。

強度および靱性の追及と並行して、各試作鋼とも鋼板内の多くの位置から試験片を採取し、鋼板内のバラツキを調査した。後述するG鋼の結果で代表されるように比較的バラツキは少なく、十分要求値を満足する範囲内にあることが確認された。

5回の試作で、細部にわたる製造体制が確立され、また、G鋼の試作にあたっては、すでに制定されていた原子炉材の品質保証体制を適応させ、その訓練をかねるとともに体制確立の一助とした。

3. 試作結果の詳細

試作結果の代表として、以下に最新のG鋼の結果を報告する。

3.1 鋼板の製造概要

G鋼の製造工程はF鋼までと同様に、Fig. 1 に示したとおりである。また、製造工程の諸元を Table 4 に示す。

Table 4 Slab and plate size of G steel

Ingot weight	60 t
Slab size	340×3 400×4 600
Slab weight	42 t
Plate size	240×3 300×6 000
Plate weight	37 t

3・2 非破壊検査

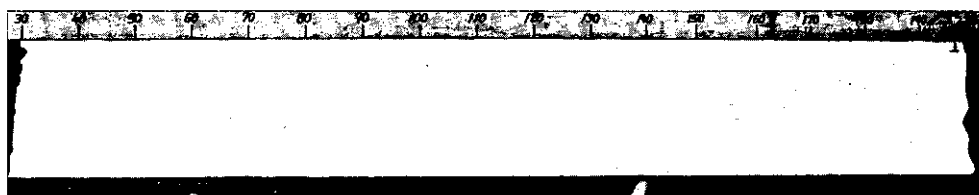
焼ならし・焼もどしが実施された鋼板の表面および裏面を、水島製鉄所極厚処理工場に設置され

ている表面研削用グラインダーで研削した後、鋼板の全面にわたり超音波探傷を実施した。欠陥は検出されず、結果は良好であった。

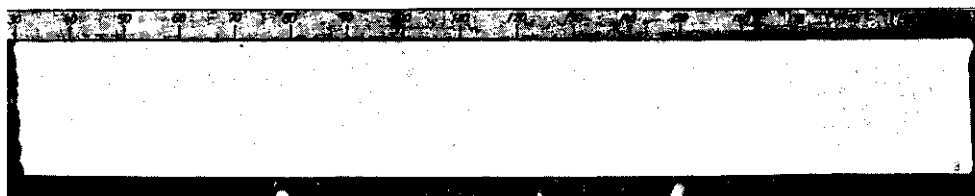
さらに、鋼板の表面および端面について液体浸透探傷検査を実施した。また、端面については磁粉探傷検査も行なった。欠陥指示は見られず、結果は良好であった。鋼板のトップおよびボトム端面の液体浸透探傷検査結果を **Photo. 1** に示す。

3・3 鋼板の内部性状

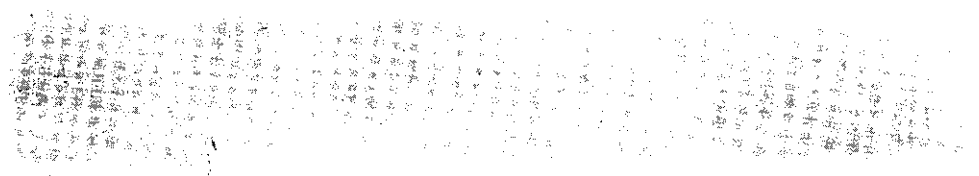
鋼板の内部健全性をさらに詳しく確認するた



Top edge



Bottom edge

Photo. 1 Liquid penetrant examination results at top and bottom edges of G steel

Center

Top edge

Side



Center

Bottom edge

Side

Photo. 2 Sulphur print at top and bottom edges of G steel

め、内部性状試験としてサルファープリント、マクロエッチ、清浄度、均質試験および側曲げ試験を行なった。

(1) サルファープリント

鋼板のトップおよびボトム端部の半幅について試験を行なった。結果は **Photo. 2** に示すように、有害な S 偏析は見られず良好であった。

(2) マクロエッチ

サルファープリントを採取した位置と同位置のマクロエッチ試験結果を **Photo. 3** に示す。異常な偏析は見られず、結果は良好であった。

(3) 清浄度

JIS G 0555 による清浄度の測定を行なった。結果は **Table 5** に示すように、Al 投入量が比較的多いにもかかわらず良好であり、通常溶解鋼の

半数程度の非金属介在物量であることが確認された。

LRF で精錬された他の鋼種についても、同様の結果が得られており、非金属介在物量の少ない点、LRF 精錬鋼の大きな特色であるといえる。あとに示す酸素分析結果と合せて考察すると、酸化物系介在物が極度に少ないことが明らかである。

前章で示したきわめてすぐれた非破壊検査結果も含めて、鋼板内部の健全性に良好な清浄度が大きく寄与していると考えられる。

(4) 均質試験

鋼板トップ側より圧延方向と直角に全厚の均質試験片を採取し試験を行なった。結果は **Photo. 4** に示すように、有害な欠陥は認められず良好であった。

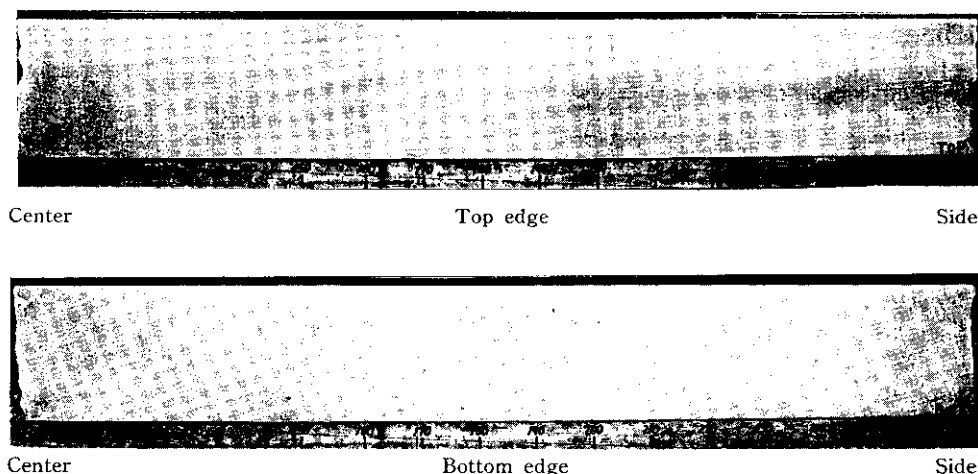


Photo. 3 Macrostructures at top and bottom edges of G steel

Table 5 Cleanliness of G steel

Sampling site		dA _{60×400}	dB _{60×400}	dC _{60×400}	dA + dB + dC
Corresponding location in ingot	Through-thickness location				
Mid area of top	Quarter	0.021	0.008	0.017	0.046
	Center	0.021	0.000	0.029	0.050
Corner area of top	Center	0.004	0.000	0.029	0.033
Mid area of bottom	Quarter	0.021	0.029	0.021	0.071
	Center	0.013	0.017	0.042	0.072
Corner area of bottom	Center	0.008	0.000	0.033	0.041

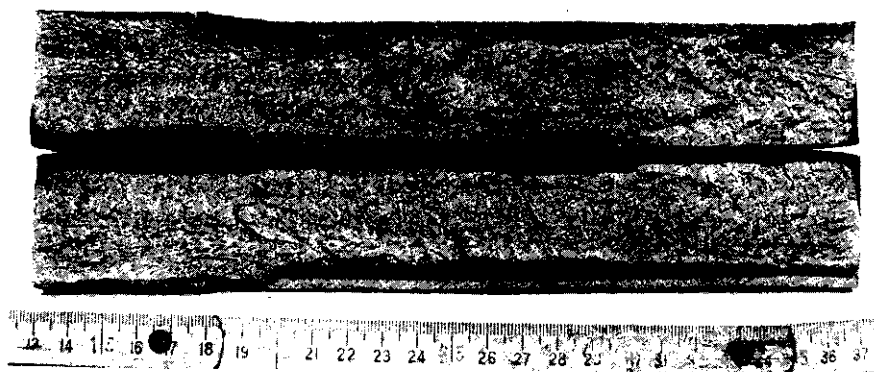


Photo. 4 Homogeneity test result at top area of G steel

(5) 側曲げ試験

鋼板トップ部の中央部より幅は全厚で、厚さ 10 mm、長さ 300 mm、の試験片を採取し、曲げ半径 20 mm、曲げ角度 180° の側曲げ試験を実施した。結果を Photo. 5 示す。割れなどの有害な欠陥は発生せず、結果は良好であった。

3.4 化学成分

(1) レードルおよびチェック分析

目標成分およびレードル分析値を Table 6 に、チェック分析結果を Table 7 に示す。C の偏析がやや認められるが、60 t 鋼塊から製造された 37 t の鋼板であることを考慮すれば偏析は少ないといえる。

(2) 不純物元素

不純物元素の分析結果を Table 8 に示す。結果はきわめて低い値を示しており、製鋼主原料に溶銑を使用する LD-LRF 精錬工程の特色が確認された。特に中性子照射脆化に対して有害である

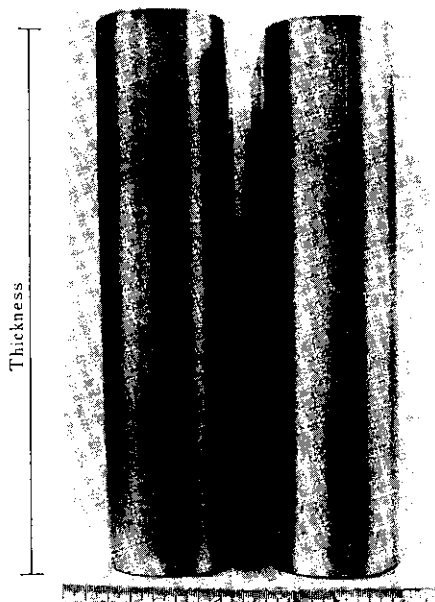


Photo. 5 Side bend test results at top area of G steel

Table 6 Chemical compositions of G steel

(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
Specification	0.25 max.	0.15 ~0.30	1.15 ~1.50	0.035 max.	0.040 max.	0.40 ~0.70	—	0.45 ~0.60	—
Aiming	0.18	0.25	1.35	0.012 max.	0.010 max.	0.65	0.10	0.55	0.02 ~0.025
Ladle	0.18	0.26	1.37	0.011	0.006	0.67	0.11	0.54	0.019

Table 7 Check analysis of G steel

(%)

Sampling site	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
Corner area of top	0.20	0.27	1.32	0.012	0.006	0.70	0.11	0.55	0.019
Mid area of top	0.17	0.27	1.30	0.010	0.005	0.69	0.10	0.54	0.021
Corner area of bottom	0.17	0.27	1.29	0.010	0.006	0.68	0.10	0.54	0.021
Mid area of bottom	0.18	0.26	1.32	0.010	0.006	0.69	0.10	0.55	0.021

(Through-thickness location : Quarter)

Table 8 Analysis of trace elements on G steel

(%)

Sampling site	Cu	Sn	Sb	As	V	Ti	Nb	Co	B	N	O
Mid area of top	0.01	0.002	<0.002	0.003	0.006	0.007	<0.002	0.022	<0.0002	0.0091	0.0014

(Through-thickness location : Quarter)

といわれている Cu の含有量が低く、原子炉压力容器用鋼板として適していることが確認された。また、酸素分析値がきわめて低く、酸化物系介在物が少ないことを示している。

3.5 熱 処 理

3.5.1 熱処理条件

通常工程では、鋼板は前記の焼ならし、焼もどし工程で出荷され、材料製造者での材質保証は、容器製造者で鋼板が受ける熱履歴を試験片に与えてなされている。これらの熱履歴は鋼板の熱間曲げ加工のための加熱、鋼板への材質付与のための焼入れ、焼もどしおよび溶接後の SR である。ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 鋼に規格で定められている焼入れ、焼もどしの条件、ならびに原子炉压力容器の設計製作に使用されている ASME Sec. III で規定されている SR 条件を示すと Table 9 の

Table 9 Heat treatment condition specified in ASME Boiler and Pressure Vessel Code

Kind of heat treatment	Holding time h/in	Holding temperature °C (°F)
Quenching	—	843~982 (1 550~1 800)
Tempering	0.5	Min. 593 (Min. 1 100)
SR	1.0	Min. 593 (Min. 1 100)

とおりである。実際の熱処理条件はこれらに準拠して、容器製造者と鋼板製造者が協議して定めている。

大型鋼塊での試作において採用した熱処理条件の概略を Table 2 に、G 鋼の詳細を Fig. 2 に示す。

熱処理条件の機械的性質、とりわけ低温靱性におよぼす影響については、F 鋼までの試作で十分に調査がなされている。焼入れ加熱条件として

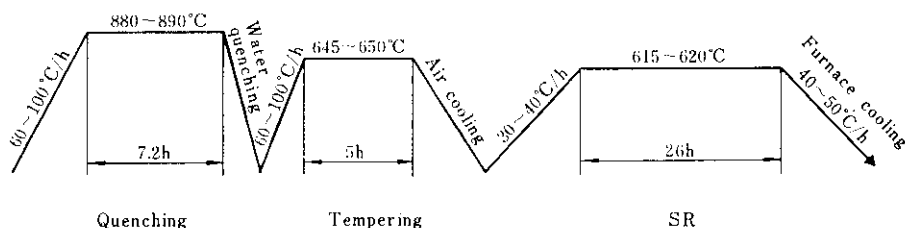


Fig. 2 Heat treatment conditions for G steel

は、オーステナイト結晶粒度があまり粗大化しない程度の加熱により高靱性が得られることが明らかにになり、焼もどしおよびSR条件についてはFig. 3に示すように両者を総合した焼もどしパラメーター ($T(20 + \log t)$, ただし T : 絶対温度で表示した保持温度, t : 保持時間) のある範囲内で高靱性を示すことが明らかにされている³⁾。

一方、熱処理条件はTable 9に示したような鋼板の規格と容器の設計製作基準、ならびに容器の寸法形状などにもとづく作業手順などにより制限を受ける。

G鋼による試作にあたっては、これまでの試作により当鋼種の靱性と強度のコントロール技術を確認していたとはいえ、厚さ240mmという超極厚鋼板を対象としていたので、靱性の確保を懸念し、許される範囲内で焼入れ加熱温度および焼もどし温度を従来の試作鋼板にくらべ高靱性が得られる方向に修正した。

また、F鋼までの試作により、焼入れ前の熱履歴は最終熱処理後の機械的性質にほとんど影響しないことが明らかにされたので、G鋼の試作にあたっては熱間加工相当の焼ならしは省略した。

3.5.2 熱処理方法

(1) 3T法⁶⁾

母板の焼ならし、焼もどしの終了した鋼板は非破壊検査を実施した後、適当な大きさに切断され

焼入れ、焼もどし、SRの熱処理が実施された。

E鋼以後の試作では、当社水島製鉄所極厚処理工場に設置されているテストクーボン熱処理炉で実施した。

各試作鋼板とも代表的な熱処理板には熱電対が取り付けられ、熱履歴が測定された。G鋼の焼入れ時の冷却曲線をFig. 4に示す。800°Cから400°Cまでの冷却速度を当社で得られたデータの集積にもとづく板厚と、冷却速度の関係の曲線と同時に示すとFig. 5のとおりである。

熱処理板の端部から板厚に相当する位置までは鋼板端部からの冷却に影響されるので、試験片は端部から板厚部を切りすてた部分から採取された。

なお、水島製鉄所のテストクーボン熱処理炉の最大処理可能寸法は1000mm幅×1500mm長である。

(2) プログラム法

熱処理板の端部から板厚分を切りすてて試験片を採取する3T法は鋼板の歩留りを低下させるので、これにかわり、ASME Sec. IIIならびに通産省の技術基準では、試験片の冷却曲線を、製品を代表するそれにシミュレートする装置を使用した試験片の熱処理法⁷⁾ (以下プログラム法と呼ぶ) が容認されており、わが国においても本試験法に対する新装置開発と合理性の確認⁸⁾により、広く採用されている。

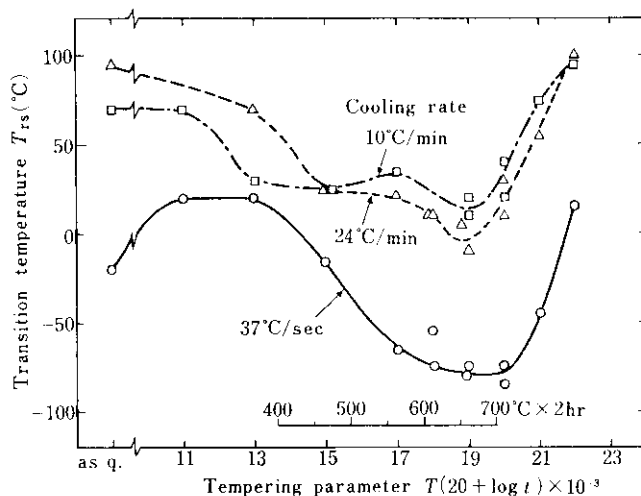


Fig. 3 Effect of tempering conditions on 2 mm V-notch Charpy impact property

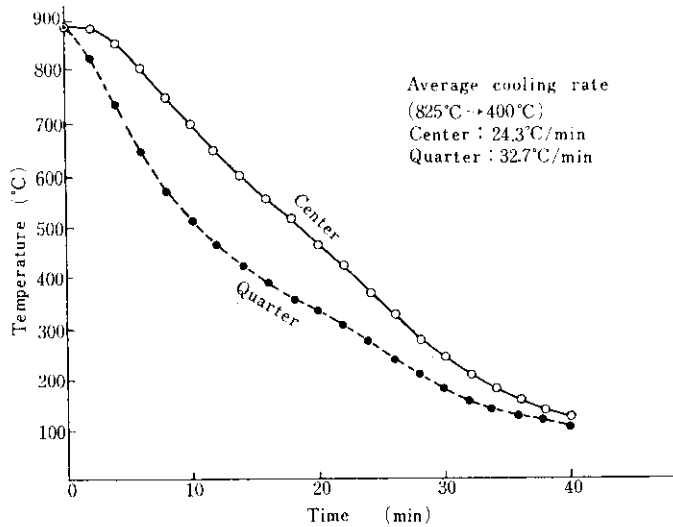


Fig. 4 An example of cooling curve during quenching for G steel

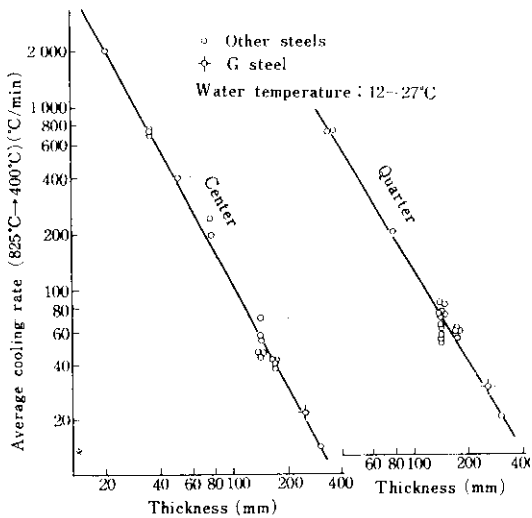


Fig. 5 Relation between plate thickness and average cooling rate during quenching

当社でもこの装置を水島製鉄所に設置しており、プログラム法による材質保証用試験片の熱処理が認められる場合には採用している⁹⁾。ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 鋼板の材質保証に当方法を使用した場合の結果を確認するため、一部の試験にこの熱処理法を採用した。この装置で熱処理可能な熱処理板の大きさは 21mm 厚×220mm 幅

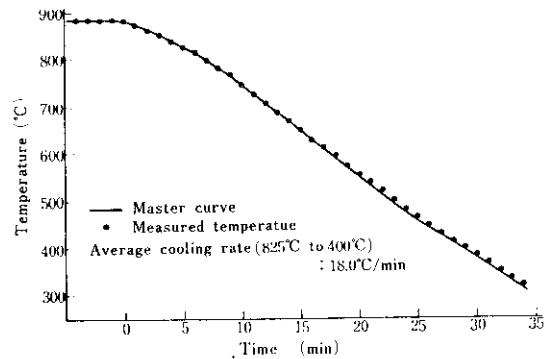


Fig. 6 Master curve used for simulated quenching and specimen temperatures measured during simulated quenching

×250mm 長である。

G 鋼で採用した焼入れ時の冷却曲線と熱処理板の測温結果の一例を Fig. 6 に示す。

3・6 組 織

3・6・1 顕微鏡組織

3 T 法およびプログラム法で熱処理した G 鋼の顕微鏡組織を Photo. 6 に示す。

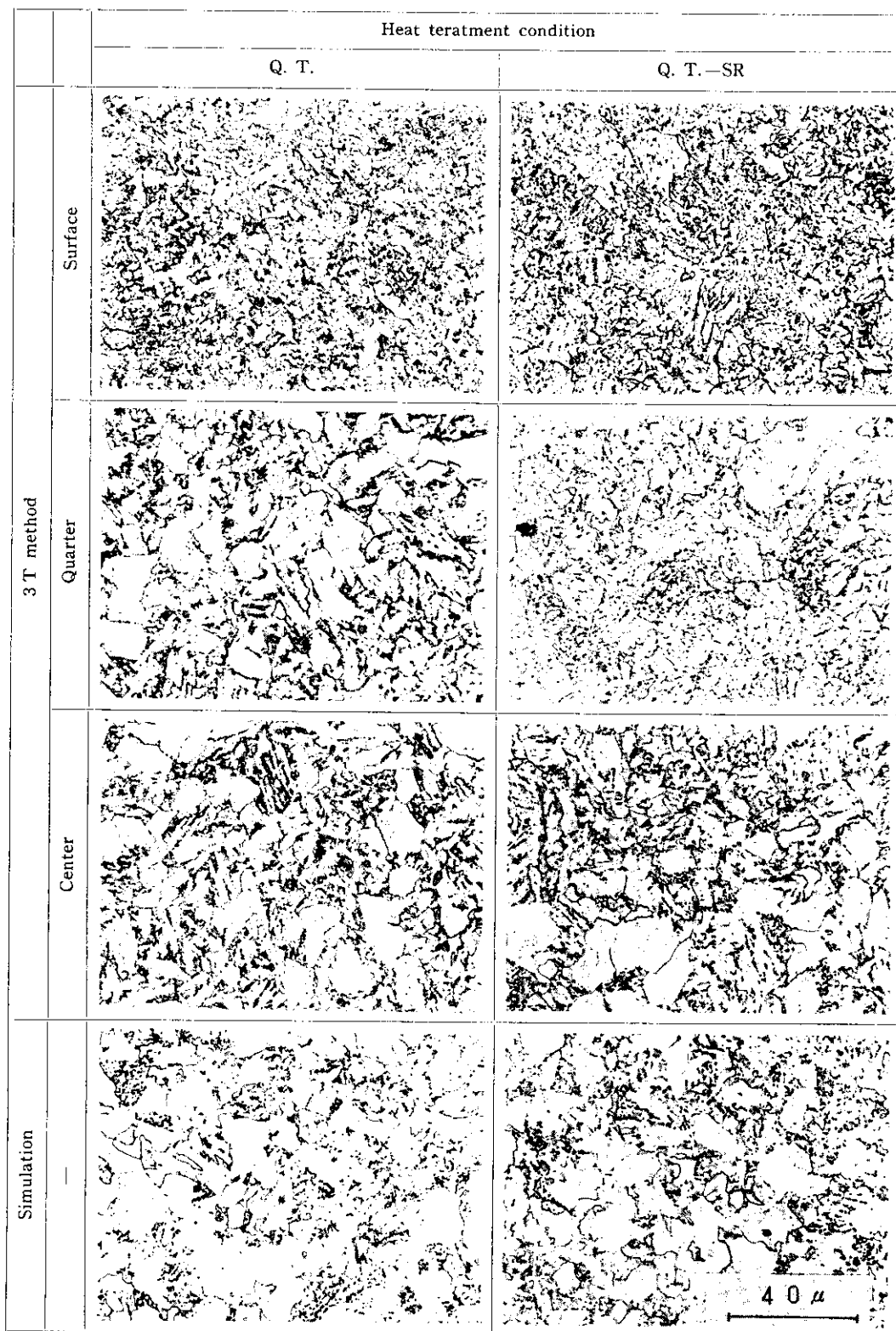


Photo. 6 Microstructures of G steel

3 T法による熱処理板では、焼入れ時の冷却速度の大きい鋼板表面部ではベイナイト組織であり、板厚の $\frac{1}{2}$ 部および $\frac{1}{2}$ 部ではベイナイトにフェライトが混在する組織が得られている。顕微鏡組織におよぼすSRの影響は Photo. 6 からは明確でない。

プログラム法による熱処理で得られた組織は、3 T法による板厚の $\frac{1}{2}$ 部のそれに類似した組織が得られている。プログラム法による焼入れ時の冷

却速度が3 T法の $\frac{1}{2}$ 部のそれに近いことからこの結果は妥当なものと考えられる。

3・6・2 オーステナイト結晶粒度

ASTM E 112 の浸炭法 (1700°F×8 h で浸炭) で測定したG鋼のオーステナイト結晶粒度を Photo. 7 に示す。オーステナイト結晶粒度番号はトップ部およびボトム部とも No. 8 であった。に

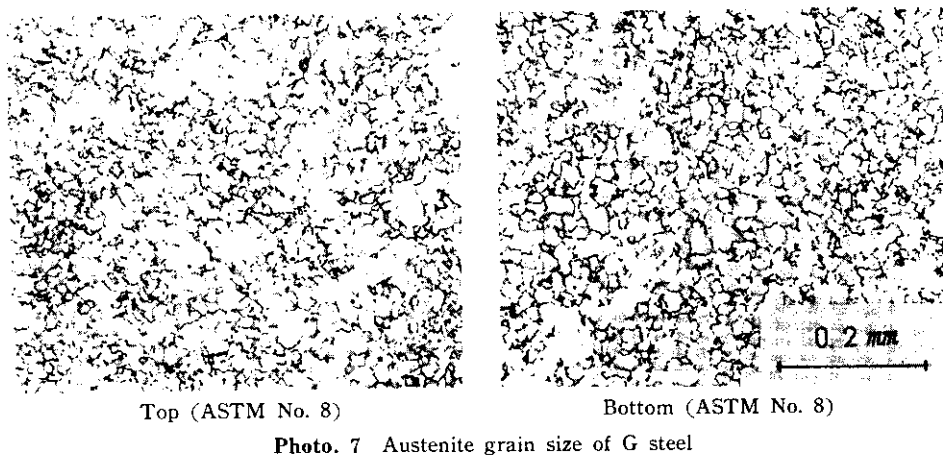


Photo. 7 Austenite grain size of G steel

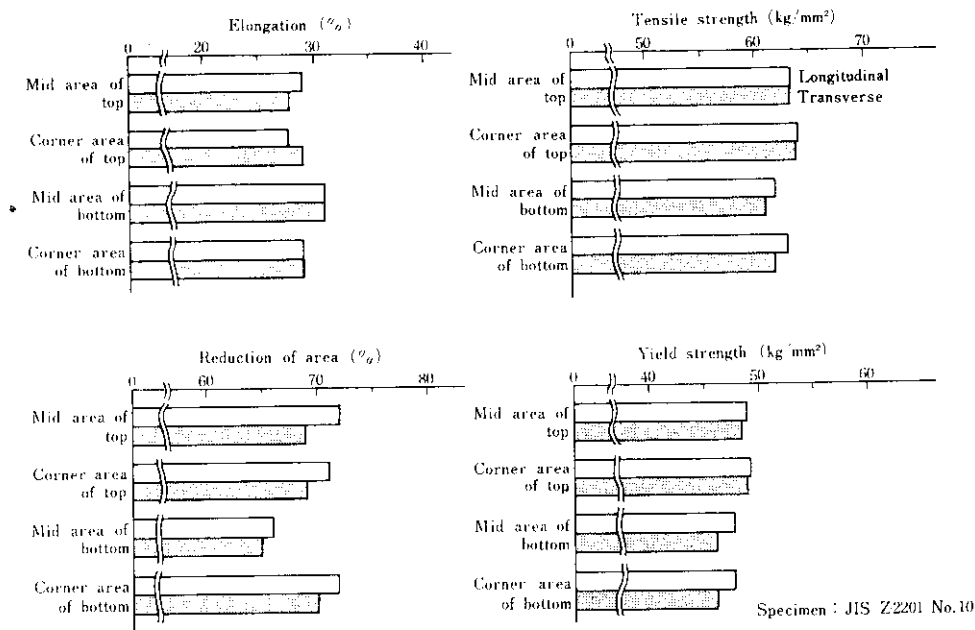


Fig. 7 Effect of sampling sites on tensile properties (G steel)

3.7 引張特性

3.7.1 常温の引張特性

(1) 偏析の影響

3 T法で熱処理した試験板の板厚内 $\frac{1}{4}$ 部の試験結果を **Fig. 7** に示す。ボトムの中央部でやや低い強度を示したが、目標の $60 \sim 65 \text{ kg/mm}^2$ 内にす

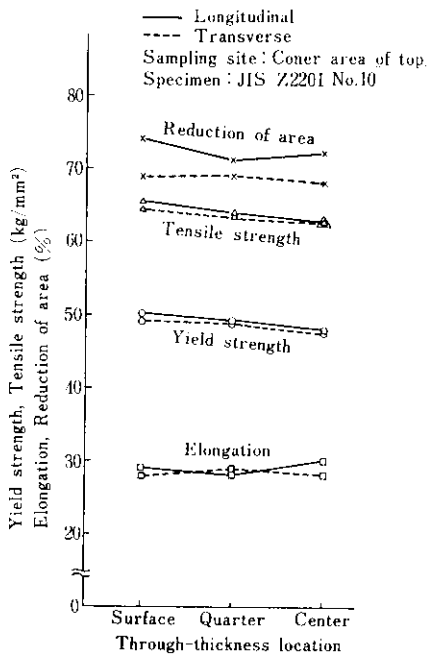


Fig. 8 Effect of through-thickness location on tensile properties (G steel)

べてはっており、60 t 銅塊から製造された37 t の鋼板であることを考慮すればバラツキはきわめて少ないことが確認された。

他の引張特性も十分規格値を満足している。

(2) 板厚内位置の差

前項と同様の熱処理をした試験板の鋼板トップ側端部の板厚内表面、 $\frac{1}{4}$ および $\frac{1}{2}$ 部の試験結果を **Fig. 8** に示す。Photo. 6 に示した組織からも明らかなように、焼入れ時の冷却速度の大きい表面部で高い強度を示している。板厚の $\frac{1}{4}$ 部と $\frac{1}{2}$ 部での差は少なかった。

(3) 異方性

試験片の中央部が板厚の中心にくるように、板厚方向に採取した試験片の試験結果を、同位置の鋼板圧延方向および圧延方向と直角方向 (**Fig. 9** 参照) の結果と比較して示すと **Fig. 10** のとおりであり、きわめて異方性の少ない鋼板であることが確認された。

鋼板の異方性は非金属介在物の量、分布および形態と密接な関係があるといわれている。**Table 5**

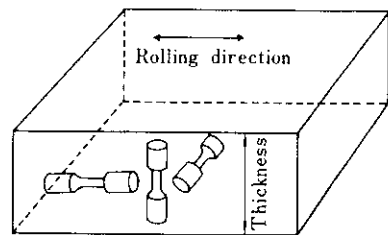


Fig. 9 Sampling method of specimens for anisotropy test

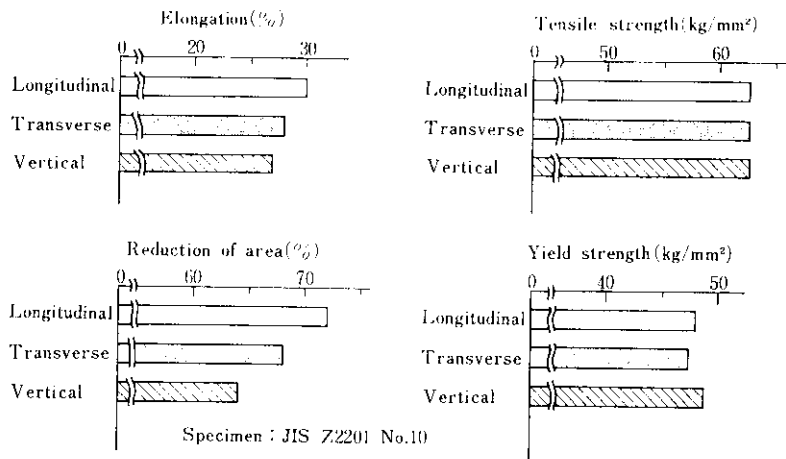
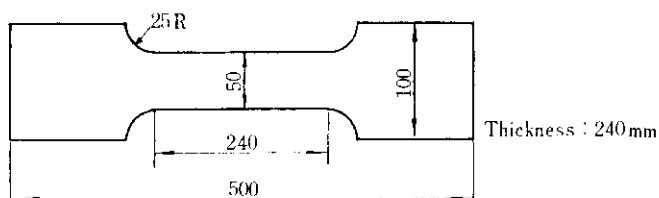


Fig. 10 Anisotropy of tensile properties (G steel)

Table 10 Tensile properties of specimens heat-treated by simulation method (G steel)

Sampling site	Specimen orientation	Yield strength (0.2% offset) (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Top	Longitudinal	49.4	62.8	28	75
	Transverse	47.1	62.4	27	74
Bottom	Longitudinal	45.6	60.7	30	74
	Transverse	45.7	60.7	30	72

(Specimen : JIS Z 2201 No. 10)

**Fig. 11** Specimen for full thickness tensile test

示したように LD-LRF 工程で溶製された当鋼種は非金属介在物が少ないことが確認されており、この結果と密接な関連があるものと考えられる。

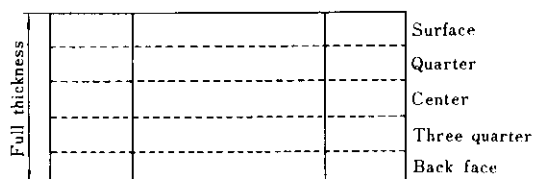
(4) プログラム法の確認

鋼板のトップおよびボトム側の鋼板端部の板厚内1/4部からプログラム法用熱処理板を採取し、**Fig. 2** に示した熱処理条件および **Fig. 6** に示した焼入れ時の冷却曲線を用い熱処理を行ない試験を実施した。結果は **Table 10** のとおりであり、**Fig. 8** に示した焼入れ時の冷却速度に近似している板厚内1/2部の結果に近いことが確認された。

3.7.2 全厚引張試験

3 T法で熱処理されたボトム側の試験板より、**Fig. 11** に示す全厚の引張試験片を採取し、試験を実施した。

結果は **Table 11** に示されるように、前節で示した JIS 10号試験片による結果にくらべ高い強度を示した。この差は試験片形状の差と考えられたのでこれを確認するため、残りの全厚引張試験片を **Fig. 12** に示すように板厚方向を5等分し、引張試験を行なった。結果は **Table 12** に示されるとおりであり、形状の近似している JIS 10号の試験結果に近づいている。

**Fig. 12** Dividing method of full thickness tensile specimen**Table 11** Results of full thickness tensile tests (G steel)

Sampling site	Specimen orientation	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)		
				Surface	Quarter	Center
Top	Longitudinal	53.8	70.1	33	35	35
	Transverse	54.6	69.1	31	34	34
Bottom	Longitudinal	51.4	69.5	35	36	37
	Transverse	52.0	68.2	29	33	33

Table 12 Test results of specimens made by dividing a full thickness tensile specimen (G steel)

Through-thickness location	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (GL=200mm) (%)
Surface	52.0	65.2	28
Quarter	49.9	63.9	27
Center	49.3	63.8	26
Three quarters	49.9	63.8	26
Back face	52.2	65.6	28

3・7・3 高温引張特性

短時間高温強度特性を求めるため、高温引張試験を実施した。鋼板のボトム部からプログラム法用熱処理板を採取し、同法を用い熱処理を行ない、試験片を採取した。試験片形状は10mmφ、GL=50mmとし、試験はJIS G 0567に準拠して行なわれた。

試験結果はFig. 13のとおりであり、すべての温度で、SA533 Gr.B Cl.1鋼板のSupplementary Requirementに示される値を満足した。

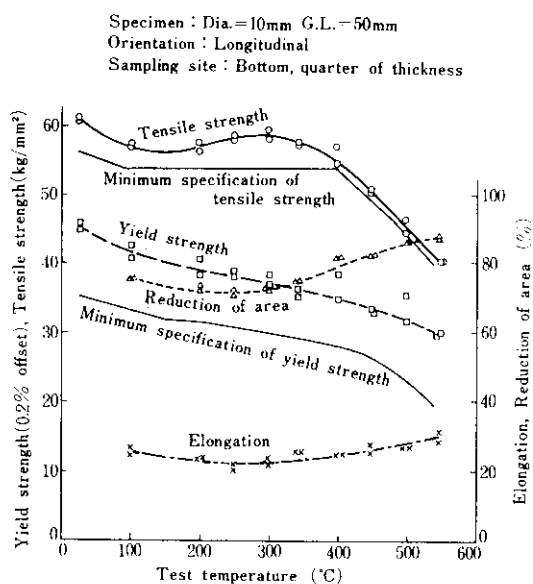


Fig. 13 Results of high temperature tensile tests (G steel)

3・7・4 低温引張特性

3 T法で熱処理した試験板の試験結果をFig. 14に示す。-196°Cにおいて試験をした一本の試験片以外はリュース変形を示したので、降伏強さは降伏点を採用した。

降伏点 σ_y の温度依存性は(1)式のようにあらわされる。

$$\sigma_y = 35.6 \exp\left(-\frac{95.8}{T}\right) \quad \text{.....(1)}$$

ただし、 T :絶対温度(°K)

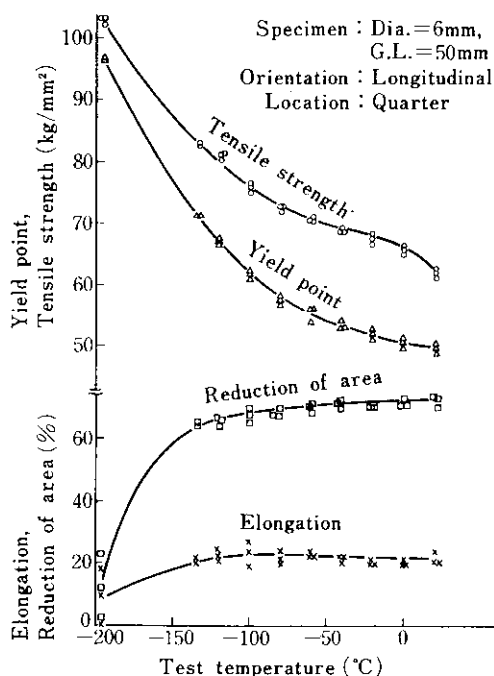


Fig. 14 Results of low temperature tensile tests (G steel)

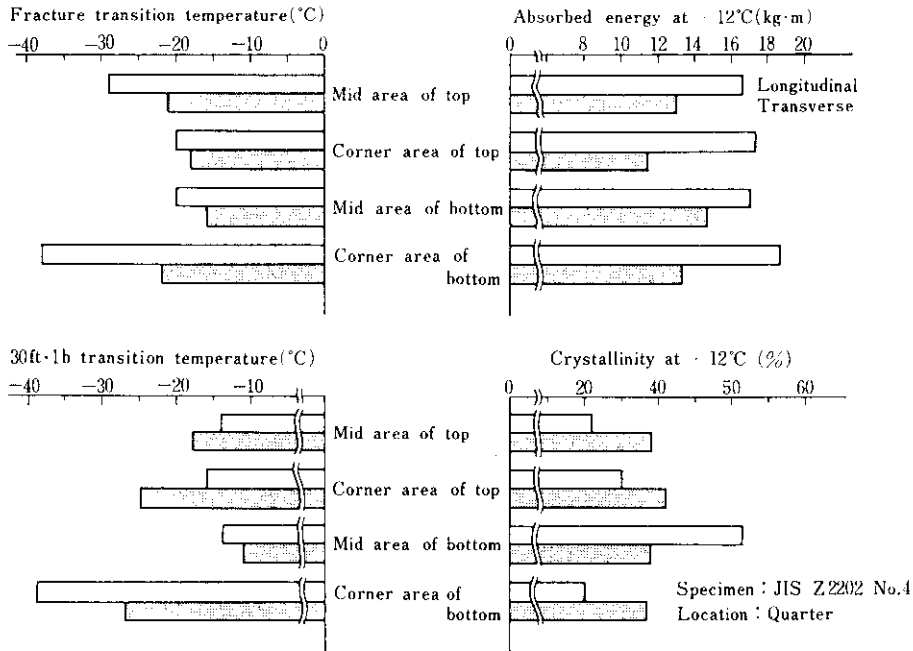


Fig. 15 Effect of sampling site on 2 mm V-notch Charpy impact properties (G steel)

3.8 低温靱性

3.8.1 2mm V ノッチシャルピー 衝撃特性

引張特性と同様に、当鋼種の重要な特性であるため、特性値の把握のみでなく、偏析および板厚内の焼入れ時の冷却速度の影響、さらに、異方性の調査およびプログラム法の確認を行なった。

(1) 偏析の影響

3 T法で熱処理した熱処理板の板厚内 $\frac{1}{4}$ 部の試験結果を Fig. 15 に示す。結果は良好であった。たとえば、 -12°C における吸収エネルギーは $4.2\text{kg}\cdot\text{m}$ を十分に満足しており、また、位置によるバラツキも比較的少なかった。

(2) 板厚内の差

前項と同様な熱処理をしたボトム側端部の板厚内表面、 $\frac{1}{2}$ および $\frac{1}{4}$ 部の試験結果を Fig. 16 に示す。

焼入れ時の冷却速度の大きい鋼板表面で、高い靱性を示し、 $\frac{1}{4}$ 部、 $\frac{1}{2}$ 部と低下する。し

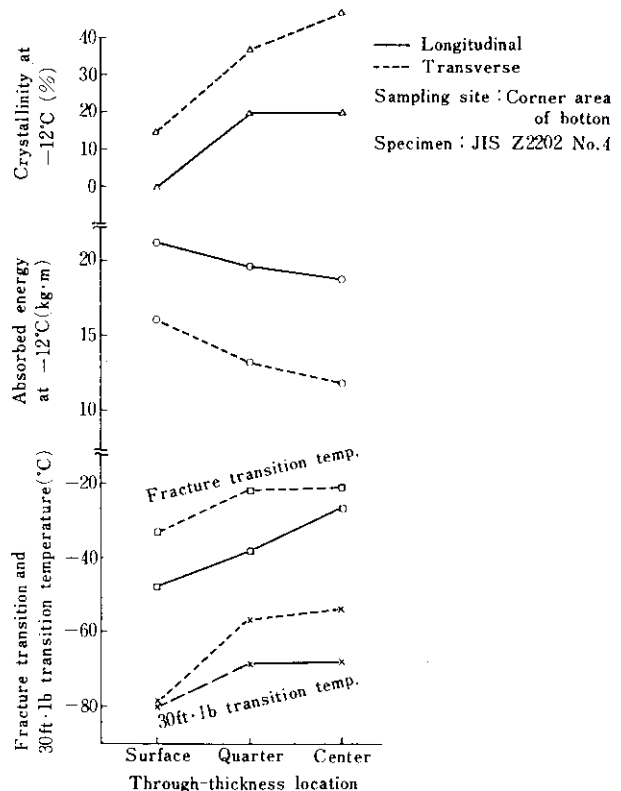


Fig. 16 Effect of through-thickness location on 2 mm V-notch Charpy impact test results (G steel)

かし1/4部および1/2部での差は少なかった。シャルピー遷移曲線を Fig. 17 に示す。

(3) 異方性

試験片のノッチ部が、板厚内の1/4部にくるように板厚方向に試験片を採取し、試験を実施した。試験結果を同位置の鋼板圧延方向および圧延方向

に直角の方向の結果とともに Fig. 18 および Fig. 19 に示す。

引張試験結果と同様に板厚方向でも要求値を満足する結果が得られ、きわめて異方性の少ない鋼板であることが確認された。

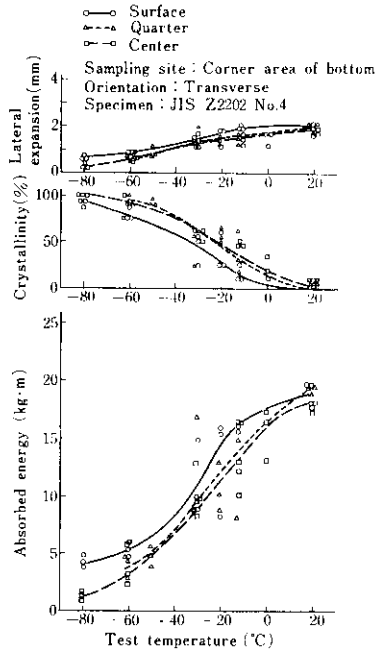


Fig. 17 Effect of through-thickness location on 2 mm V-notch Charpy impact test results (G steel)

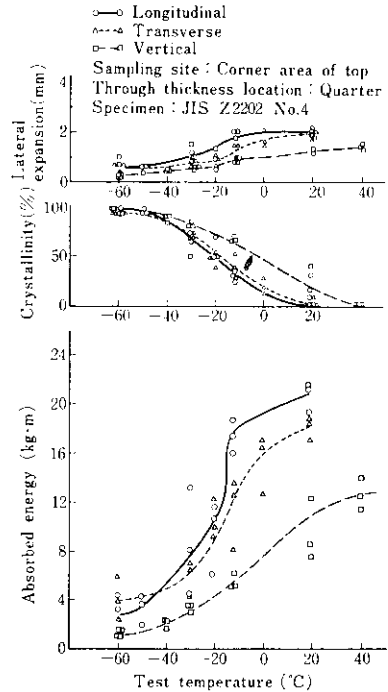


Fig. 19 Anisotropy of 2 mm V-notch Charpy impact properties (G steel)

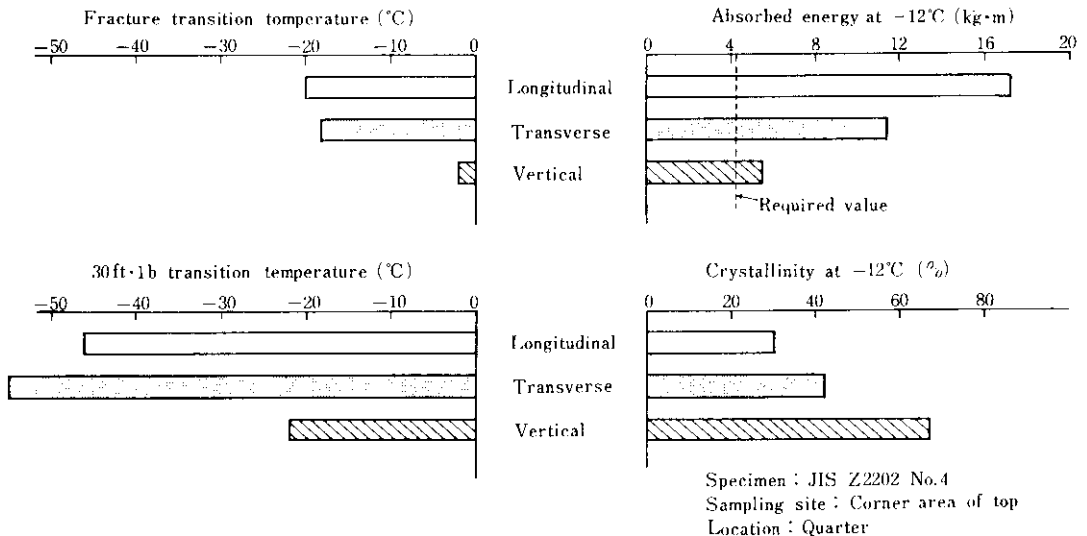


Fig. 18 Anisotropy of 2 mm V-notch Charpy impact properties (G steel)

(4) プログラム法の確認

鋼板のトップおよびボトム側の端部の板厚内 $\frac{1}{4}$ 部からプログラム法用熱処理板を採取し、Fig. 2 および Fig. 6 に示した条件で熱処理し、試験を実施した。

試験結果を Table 13 および Fig. 20 に示す。結果は良好であり、引張試験結果と同様に 3 T 法の焼入れ時の冷却速度 ($24.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$) が近似して

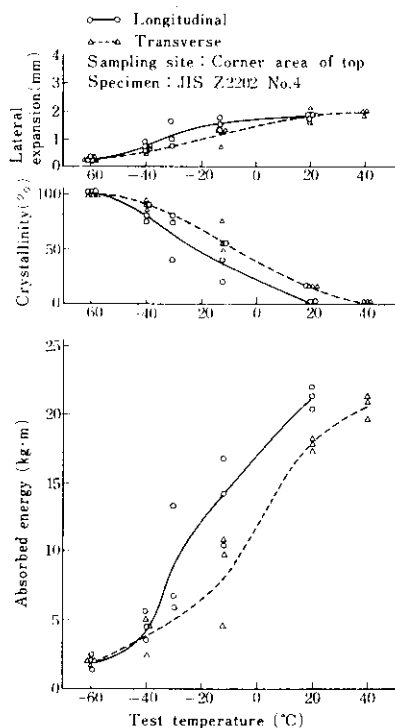


Fig. 20 2 mm V-notch Charpy impact test results on specimen heat-treated by simulation method (G steel)

いる Fig. 18 および Fig. 19 に示した板厚内 $\frac{1}{2}$ 部の結果に近似していることが確認された。

3・8・2 プレスノッチシャルピー衝撃試験

大型脆性破壊試験結果とその結果がよく相関するといわれるプレスノッチシャルピー衝撃試験を実施した。試験結果は Fig. 21 のとおりであり、破面遷移温度 rT_c は -5°C であった。

3・8・3 NRL 落重試験

3 T 法で熱処理された鋼板ミドル部の熱処理板について、NRL 落重試験を行なった。また鋼板トップ部についてプログラム法で熱処理した熱処

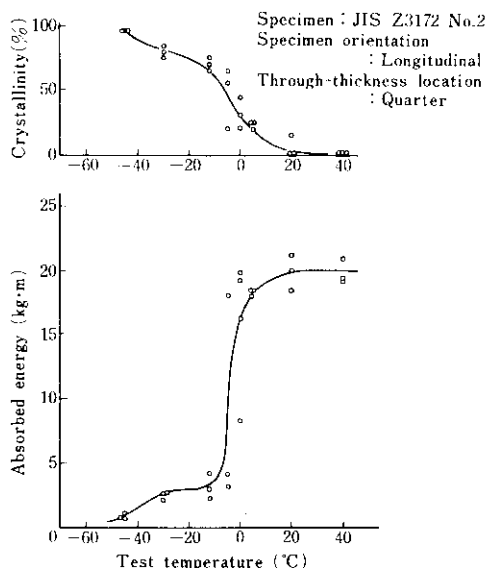


Fig. 21 Results of press notch Charpy impact test (G steel)

Table 13 2 mm V-notch Charpy impact properties on specimens heat-treated by simulation method (G steel)

Sampling site	Specimen orientation	Absorbed energy at -12°C ($\text{kg}\cdot\text{m}$)	Crystallinity at -12°C (%)	Fracture transition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	30 ft·lb transition temperature ($^{\circ}\text{C}$)
Corner area of top	Longitudinal	13.7	35	-20	-40
	Transverse	8.2	60	-7	-37
Corner area of bottom	Longitudinal	20.1	7	-29	-56
	Transverse	10.6	52	-14	-50

(Specimen : JIS Z 2202 No. 4)

理板についても試験を実施した。

結果は、Table 14 に示されるように 3 T 法およびプログラム法ともに良好であった。

ASME Sec. III NB 2300 においては、脆性破壊防止の観点から、耐圧試験または使用温度を決定するための Reference Temperature RT_{NDT} を求めることを規定している。この規定によれば落重試験より求めた T_{NDT} より 60°F (33°C) 高い温度以下の温度における 2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験結果が吸収エネルギー $50\text{ ft}\cdot\text{lb}$ ($6.9\text{ kg}\cdot\text{m}$) 以上、横膨出率 35 mil (0.9 mm) 以上である時 $T_{NDT}=RT_{NDT}$ であると定義している。

Table 14 に示した各位置および熱処理方法に対応する T_{NDT} 値より 33°C 高い温度における 2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験結果は、代表例として示した Fig. 17, 19, および 20 より明らかなように、吸収エネルギー $6.9\text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上、横膨出率 0.9 mm 以上を十分に満足するので、ここで求められている T_{NDT} は RT_{NDT} であると決定される。

3.8.4 Deep Notch 試験

脆性破壊発生特性を調べるため、Deep Notch 試験を実施した。3 T 法で熱処理した鋼板ミドル部の熱処理板から試験片の中心が板厚の $\frac{1}{4}$ 部と一致するように Fig. 22 に示す 75 mm 厚さの試験片を採取し、試験を行なった。

試験結果を Fig. 23 に示す。この結果と(2)および(3)式から塑性表面エネルギー S_i を求めると Fig. 24 のとおりであり、クラック長さを 10 mm および 100 mm とした時の無限板にお

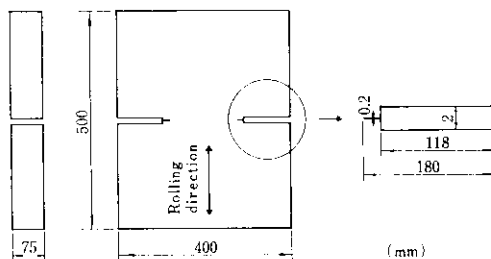


Fig. 22 Specimens for deep notch tests

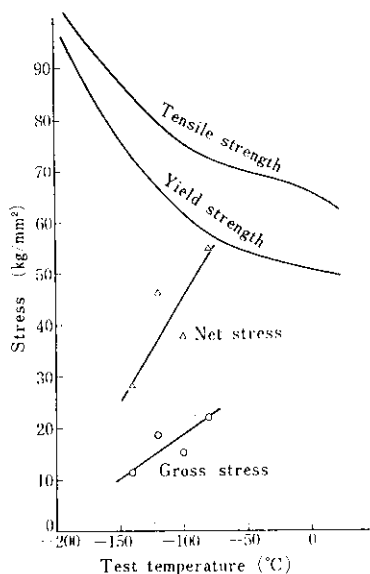


Fig. 23 Results of deep notch tests (G steel)

る脆性破壊発生応力と温度との関係は Fig. 25 のように求まる。

Table 14 Results of NRL drop weight tests (G steel)

Heat treatment	Sampling site	Through-thickness location	Test temperature (°C)						NDT temperature (°C)
			−12	−30	−35	−40	−45	−50	
3 T method	Middle	Surface							−45
		Quarter							−45
		Center							−35
Simulation	Top	—							< −12

Specimen : ASTM E 208 type P-3

Specimen orientation : Transverse

Figures in circles show crack length in mm

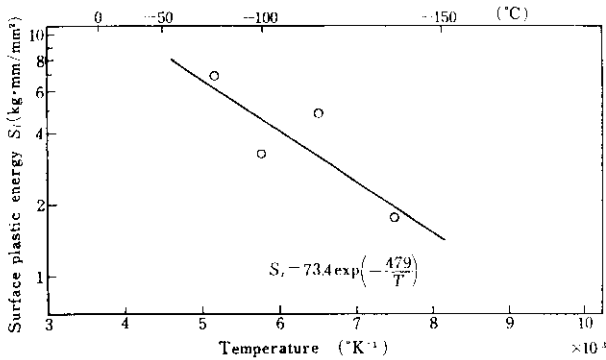


Fig. 24 Relation between surface plastic energy and temperatures (G steel)

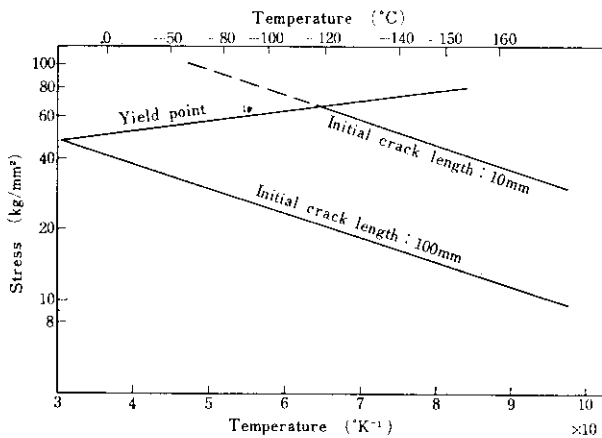


Fig. 25 Relation between crack initiation stress and temperatures for varying initial crack length (G steel)

$$S_i = \frac{\pi(f\sigma_G)^2 c}{2E} \quad (2)$$

$$f = \left\{ \frac{2b}{\pi c} \left(\tan \frac{\pi c}{2b} + 0.1 \sin \frac{\pi c}{b} \right) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

ここで c : クラックの深さ = 120 mm

b : 試験片半幅 = 200 mm

E : ヤング率 = 21 000 kg/mm²

σ_G : グロス応力

さらに(4)式より応力拡大係数 K 値を求めると

Table 15 のとおりである。

$$K = \sigma_G \sqrt{\pi c} f \quad (4)$$

3.8.5 WOL 試験

3 T法で熱処理された熱処理板より, Fig. 26 に示される試験片を鋼板圧延方向に採取し, 試験

Table 15 K values of G steel on deep notch test

Test temperature (°C)	K value (kg·mm ^{-1/2})
-80	535
-100	367
-120	450
-140	271

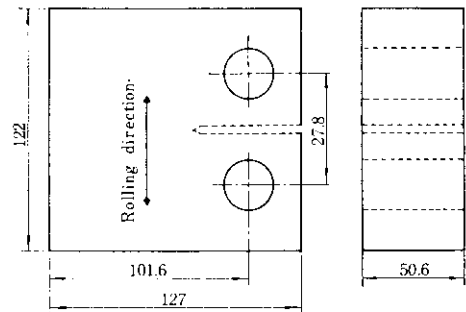


Fig. 26 WOL test specimen (mm)

を行なった。結果を Fig. 27 に示す。

ASME Sec. III では Appendix G で, 線型弾性破壊力学理論にもとずき, 仮想欠陥を対象に最大荷重を計算することが規定されており, WOL 試験で得られた K_{IC} 値はこれらの検討に用いられる。

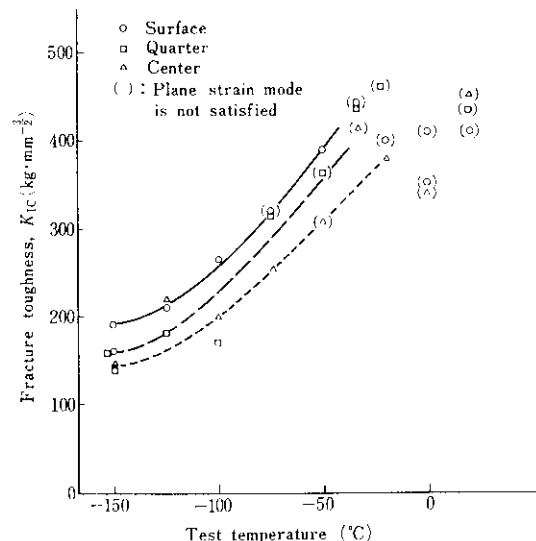


Fig. 27 Results of WOL tests (G steel)

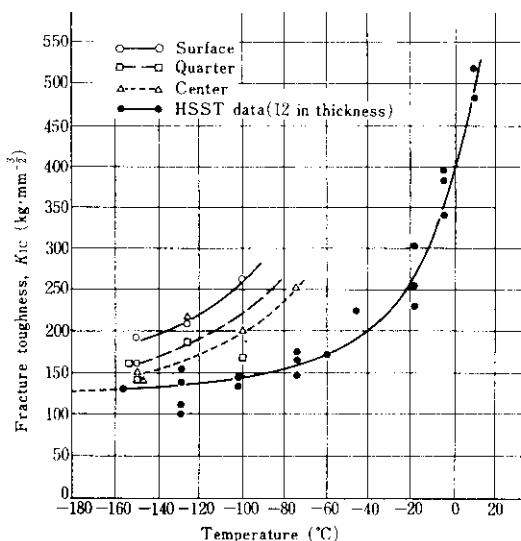


Fig. 28 Comparison on fracture toughness with the data obtained under HSST program

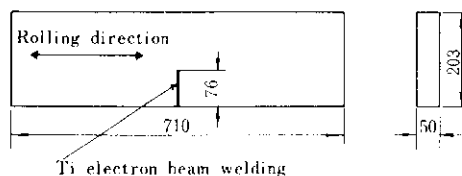


Fig. 29 DT test specimen (mm)

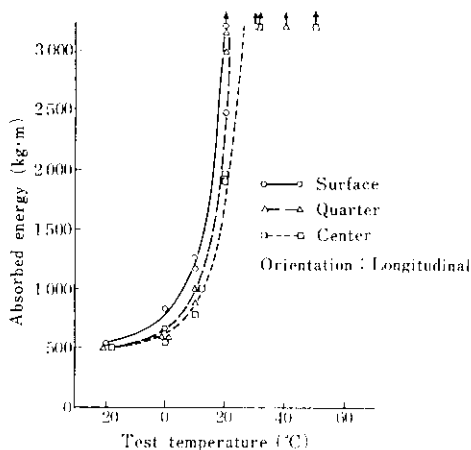
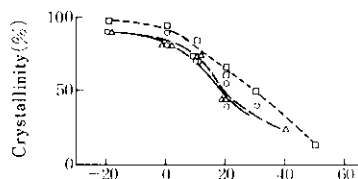


Fig. 30 Results of DT tests (G steel)

G鋼の K_{1c} の温度依存性を HSST プログラム (USAEC において1967年から推進されている原子炉圧力容器の超厚鋼技術に関する研究で, Heavy section steel technology programの略) で得られた値¹⁰⁾と比較して, Fig. 28 に示す。

(6) DT試験

3 T法で熱処理した熱処理板より Fig. 29 に示されるDT試験片を採取し, 試験を行なった。結果を Fig. 30 に示す。さらに, HSST プログラムで得られた数種のDT試験片の結果¹⁰⁾と比較し, Fig. 31 に示す。

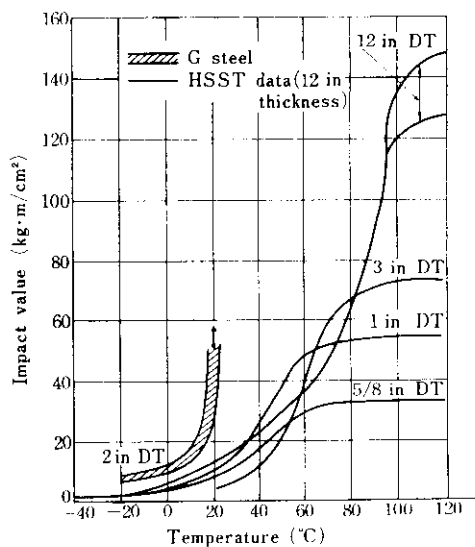


Fig. 31 Comparison on DT test results with the data under HSST program

3・9 低サイクル疲労特性

ASME Sec. III では原子炉圧力容器の不連続部などが塑性領域となる場合には疲労解析を要求し, 設計疲労曲線を与えている。

3 T法で熱処理した試験板について, 室温および高温の低サイクル試験を実施した。試験結果を Fig. 32 に示す。室温および高温とも板厚内の1/4部と1/2部で差はあまり見られなかった。また, Fig. 32 に同時に示した ASME Sec. III の設計疲労曲線¹⁰⁾にくらべ, 十分満足する結果が得られている。

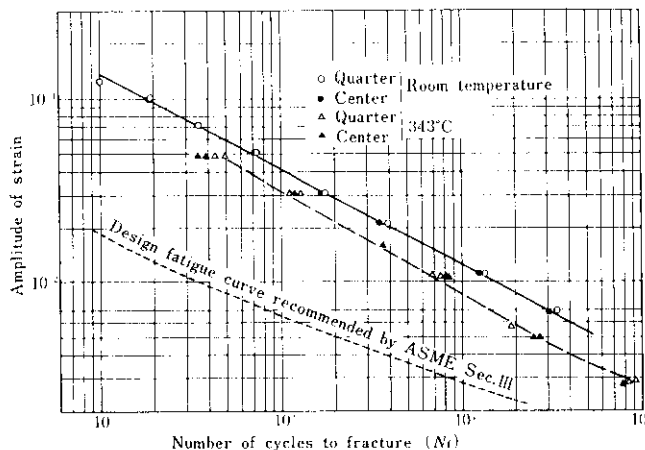


Fig. 32 Results of low cycle fatigue test at room temperature and 345°C (G steel)

3・10 加工性

鋼板の容器への加工の影響および加工の難易を調査するため、歪時効試験、熱処理試験および溶接性試験を実施した。

3・10・1 歪時効試験

鋼板の冷間加工の機械的性質におよぼす影響を調査するため歪時効試験を行なった。

3 T法で焼入れ、焼もどしで熱処理した試験板の板厚内1/4部から Fig. 33に示す予歪を与えるための試験片を圧延方向と直角方向に採取し、

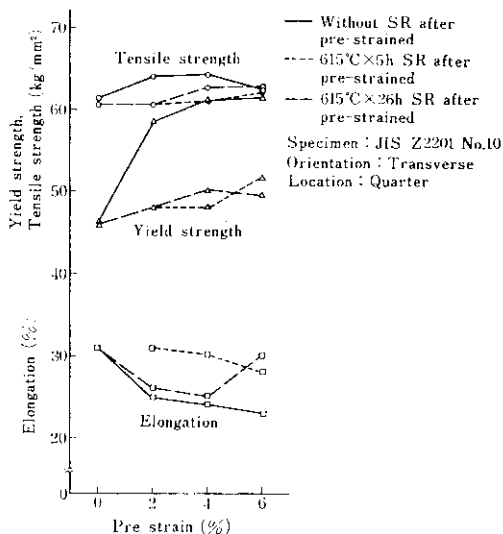


Fig. 34 Effect of pre-strain on tensile properties (G steel)

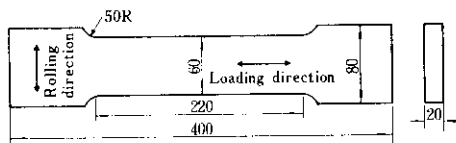


Fig. 33 Pre-strained specimen for strain-aging test

2%, 4% および 6% の予歪を与え、250°C×1h の時効処理を行なった。時効後 SR による回復状況を調査するため、一部、615°C×5h および 615°C×26h の SR を実施し、引張試験および 2mm V ノッチシャルピー衝撃試験を行なった。

引張試験結果は Fig. 34 に示されるとおりであり、時効のままの状態では、予歪により降伏点の大幅な増加および伸びの減少が見られた。しかし、時効後の SR により回復が見られた。

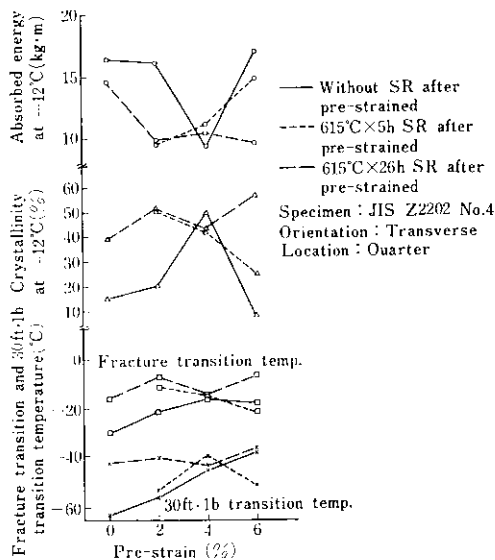


Fig. 35 Effect of pre-strain on 2 mm V-notch Charpy impact properties (G steel)

シャルピー衝撃試験結果を Fig. 35 に示す。予歪量の増加により若干遷移温度の上昇が認められ、また、SR により回復するよりは、むしろ劣化する傾向が見られた。

3・10・2 熱処理試験

機械的性質におよぼす SR の影響を調査するた

め、SR条件を種々に変えて試験を行なった。

3 T法で焼入れ、焼もどしを実施した鋼板ミドル部の熱処理板を Table 16 に示す条件でSRした後、板厚の1/4部から圧延方向と直角方向に引張試験片および 2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験片を採取し試験を行なった。

引張試験結果および 2 mm V ノッチシャルピー

Table 16 SR conditions on heat treatment test

SR temperature (°C)	Holding time (h)	Tempering parameter
595	10	18.22×10^3
620	10	18.74×10^3
620	20	19.00×10^3
620	30	19.17×10^3
640	10	19.16×10^3
640	30	19.59×10^3

Tempering parameter = $T(20 + \log t)$

T : Temperature (°K)

t : Time (h)

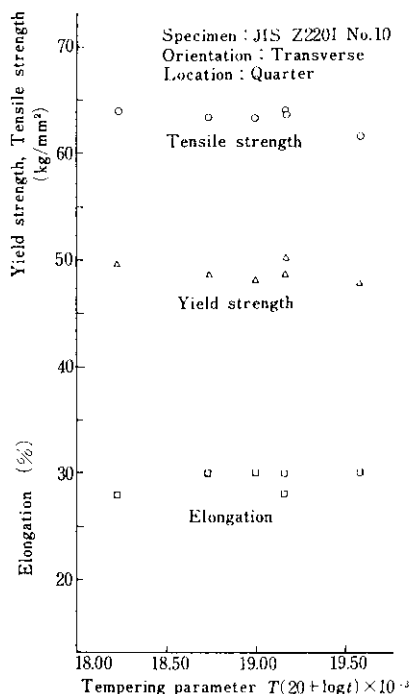


Fig. 36 Relation between tensile properties and SR conditions (G steel)

試験結果を Fig. 36 および Fig. 37 に示す。

両試験結果とも SR 条件の変化に対し比較的鈍感な結果が得られた。

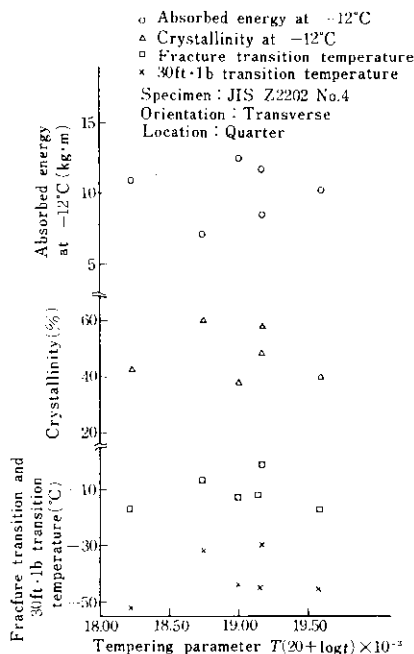


Fig. 37 Relation between 2 mm V-notch Charpy impact properties and SR conditions (G steel)

3・10・3 溶接性試験

鋼板の溶接性を調査するため、溶接最高硬さ試験および Y 型拘束ワレ試験を行なった。

(1) 溶接最高硬さ試験

3 T法で焼入れ、焼もどしをした熱処理板から 20 mm 厚さの試験板を採取し、予熱温度をかえて試験を行なった。また一部の予熱温度では原厚 (240 mm) のまま試験を行なった。結果を Fig. 38 に示す。

(2) Y 型拘束ワレ試験

3 T法で焼入れ、焼もどしをした熱処理板から厚さ 50 mm の試験片を採取し、試験を行なった。試験結果を Fig. 39 に示す。ルート割れ阻止温度および断面割れ阻止温度として 200°C、表面割れ阻止温度として 100°C が得られた。

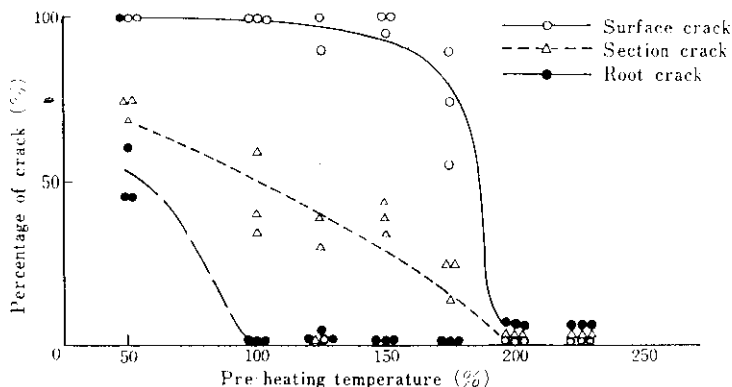


Fig. 39 Relation between percentage of cracks and pre-heating temperatures on y-groove cracking test (G steel)

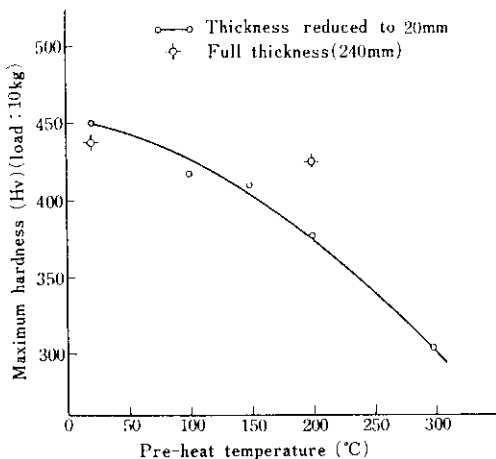


Fig. 38 Relation between maximum hardness and pre-heat temperature on welding maximum hardness tests (G steel)

4. 総 括

原子炉圧力容器用 ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 鋼板をとりあげ、製品化のための研究を続けてきた。高度の信頼性を要求される原子炉圧力容器に使用される鋼板であることを考慮し、試作は万全を期するため、実験室規模の小型鋼塊から始められ、中型鋼塊、大型鋼塊による試作と進めてきた。大型鋼塊による実用厚板、寸法の試作では鋼板の内部健全性の十分な確認と、機械的性質の再現性およびコントロール技術を確認するため、5回の試作が実施された。大型鋼塊による試作結果の概略は下記のとおりである。

(1) 精錬工程に LRF を採用したため、非金属介在物がきわめて少なく、効果的な脱ガス効果も加わり、内部健全性のすぐれた鋼板が製造された。5回の試作のうち、超音波探傷検査結果では、第1回目の試作でわずかに欠陥が見られたが、2回目以降ではまったく欠陥は検出されなかった。

(2) 製鋼主原料に溶銑を使用しているため、不純物元素が少ない鋼板が製造できることが確認された。

(3) 60~80 t の鋼塊から試作したにもかかわらず、偏析は比較的少なかった。これにともない鋼板内の機械的性質のバラツキも少なく、鋼板規格範囲内はもとより、目標範囲内にも十分収まることが確認された。

(4) 大型鋼塊のみならず、多数の小塊鋼塊による予備実験を重ねたため、適正な強度と、すぐれた靱性をそなえた鋼板を製造する技術が確立され、240 mm という超極厚鋼の試作においても高い靱性が得られた。240 mm 厚の鋼板では低温靱性の調査で、小型試験に加えて、各種の大型脆性破壊試験を実施し、低温靱性の確認を行なった。

(5) 機械的性質の異方性がきわめて少なかった。特に板厚方向の特性がすぐれていた。異方性は非金属介在物の量、分布および形態と密接な関係があるといわれており、この結果は LRF 精錬による非金属介在物の除去効果と考えられる。

(6) 冷間加工の機械的性質におよぼす影響は、比較的少なかった。

(7) S Rの機械的性質におよぼす影響も比較的少なく、高温長時間のS R後でも機械的性質の劣化は少なかった。

(8) 低サイクル疲労試験結果も良好であった。

これらの結果と、別報に示される溶接継手性能試験結果から、溶解精錬工程に LD-LRF の組合せを採用し製造された ASME SA533 Gr.B Cl.1 鋼板は、原子炉圧力容器用鋼板としてきわめてすぐれていることが確認された。

さらに、5回の大型鋼塊による試作で、細部にわたる製造工程ならびに品質保証体制の確立を計ることができ、高品質で、安定した性能を有する原子炉圧力容器用鋼板を製造できる体制が確立さ

れたと考えている。

なお、本鋼の中性子照射試験を現在実施中である。当工程で製造された鋼板は不純物元素、特に照射脆化に有害であるといわれている Cu の含有量が低いことから、きわめて低い照射敏感性を示すものと期待される。

おわりに、140mm~170mmの鋼板の試作にあたっては、石川島播磨重工業技術研究所の方々、さらに、240mm の鋼板の試作にあたっては三菱重工(株)神戸研究所ならびに神戸造船所の方々に多大の御指導をたまわるとともに、試験の一部を分担していただきました。ここに記し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 江本、宮田ほか：川崎製鉄技報，6 (1974) 2, 153
- 2) 広、西山、坪井、岡部、森：川崎製鉄技報，6 (1974) 2, 70
- 3) 榎並、佐藤、田中、船越：川崎製鉄技報，6 (1974) 2, 15
- 4) 西岡、江本：川崎製鉄技報，4 (1972) 1, 12
- 5) NB-2542, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III
- 6) NB-2222.3 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III
- 7) NB-2212.2 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III
- 8) 薄田、安藤：三菱重工技報，7 (1970) 2, 10
- 9) 原、吉村：川崎製鉄技報，6 (1974) 2, 166
- 10) F. J. Witt : ORNL-TM-3030
- 11) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III Appendix I