

極低温用 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo 鋼の
強度と靱性石坂淳二*・三浦 立*²・島本 進*³・中嶋秀夫*⁴Strength and Toughness of 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo Steel for Cryogenic
Structural Application

Junji ISHIZAKA, Ritsu MIURA, Susumu SHIMAMOTO and Hideo NAKAJIMA

Synopsis :

It is well known that austenitic stainless steels are non-magnetic and have good toughness and high strength at low temperature. In this study, the effects of alloying elements such as molybdenum, manganese and nitrogen on the strength and toughness of austenitic steels and the mechanical properties of their large forgings were investigated at low temperature. The obtained results are summarized as follows.

(1) Molybdenum is effective for improving strength and toughness of austenitic steel at low temperature.

(2) A 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel was developed as a modification of SUS316LN for cryogenic structural material.

(3) At low temperature, the grain refinement is effective for increasing yield strength and the reduction of inclusions is effective for increasing toughness.

(4) An industrial scale forged plate of the newly developed steel was manufactured from a 6 t ESR ingot. The 140 mm thick plate showed very homogeneous mechanical properties through the thickness.

Key words : alloying element ; steel for low temperature ; grain size ; inclusion ; strength ; toughness.

1. 緒 言

高強度、高靱性を要求される代表的極低温材料に核融合炉 (FER : Fusion Experimental Reactor) のトロイダル磁場コイル構造材料がある。この超電導マグネットの発生磁界は 10~12 T と強大である。このため日本原子力研究所における検討結果¹⁾によれば FER の超電導磁石の支持構造材料は液体ヘリウム温度 (4 K) で耐力が 1 200 MPa 以上、破壊靱性値 (K_{IC}) が $200 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の性能が必要とされている。

米国の NBS. Boulder 研究所は長年にわたって各種構造材料の 4 K における強度および靱性に関するデータを収集してきた²⁾。その結果によれば、ほとんどの材料において降伏強さと破壊靱性の間に反比例関係が成立するが、そのなかでオーステナイト系ステンレス鋼がもっとも優れた強度-靱性バランスを示す。筆者らは SUS304 と SUS316 の 4 K における引張性質ならびにシャルピー衝撃性質に及ぼす炭素 (C) と窒素 (N) の

影響を調査し、SUS316 は SUS304 より高い耐力と衝撃靱性を示すことから、モリブデン (Mo) の低温における強化作用が大きいことおよび低温の強度に対する寄与は C より N の方が大きいことから SUS316LN が低温用鋼として有望であることを示した³⁾。これにより SUS316LN オーステナイト鋼を基に低温での強度と靱性に及ぼす Mo, Mn および強化元素の N 等の化学成分の影響を調査した。その結果、SUS316LN の低温での強度と靱性の改善を目的に高 Mo 添加を行い、これにともなう δ フェライトの析出防止のため低 Cr 化し、加えて低温強度の向上のため高 N 添加を行い、さらに N 固溶度を高めるため高 Mn とした 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo-N 鋼を開発した。一方、構造材料としての大型材を製造する場合、鋼塊の大型化および鍛造効果や固溶処理時の冷却速度の低下にともなう質量効果の把握と機械的性質の均一性に関する評価が重要である。そこで、本研究においては、低温での機械的性質などに及ぼす化学成分の影響に関する基礎的研究と開発材を用いて 6 t

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 平成元年 3 月 31 日受付 (Received Mar. 3, 1989)

* (株)日本製鋼所室蘭研究所 (Muroran Research Laboratory, The Japan Steel Works Ltd., 4 Chatsumachi Muroran 051)

*² (株)日本製鋼所中央研究所 (Research Center For Advanced Technologies, The Japan Steel Works Ltd.)

*³ 日本原子力研究所那珂研究所 工博 (Japan Atomic Energy Research Institute)

*⁴ 日本原子力研究所那珂研究所 (Japan Atomic Energy Research Institute)

ESR 鋼塊から大型鍛鋼板を製作し、その優れた性質を確認した。

以下にその結果を報告する。

2. オーステナイト鋼の低温強度に及ぼす Mo, Mn と N の影響

SUS304 と 316 鋼の 4 K における機械的性質を比較した結果、SUS316 の耐力と衝撃値は SUS304 より高い値を示した³⁾。このことは、Mo の添加は靱性を害することなくオーステナイト鋼を効果的に強化することを示唆している。そこで、高 Mo 添加による δ フェライト析出を防止するため Cr 含有量を減らした 12Cr-12Ni を基本成分として、その低温の機械的性質に及ぼす Mo と Mn および N の影響を調査した。

2.1 供試材および実験方法

全供試材の化学成分を Table 1 に示す。同表には次節に述べる厚肉鍛鋼板の調査に用いた 500 kg および 6 t ESR 鋼塊も比較のため併記した。供試材は真空誘導溶解炉 (VIM) で溶解し、50 kg 丸型鋼塊に造塊した。これを 1150°C で 3 h 加熱し、厚さ 50 mm × 幅 120 mm に予備鍛造し、再度 1150°C で 3 h 加熱し、厚さ 25 mm に熱間圧延した後、固溶化処理を施した。固溶化処理条件は 1040°C × 2 h 水冷とし一部 1070°C および 1100°C の固溶化処理の温度条件についても調べた。固溶化処理後、圧延方向に直角に引張試験片および 2 mmV シャルピー衝撃試験片を採取し、試験に供した。試験温度は室

温および液体窒素中に浸漬し 77 K で、一部は液体ヘリウム浸漬し 4 K とした。引張試験片は 4 K では平行部直径 7 mm、標点間距離 35 mm の丸棒試験片を、その他の温度では直径 10 mm、標点間距離 50 mm の伸び検出器取付用つば付丸棒試験片を用いた。引張速度は 0.2% 耐力を超えるまでは公称ひずみ速度 0.4%/min それ以降は 6.0%/min とした。さらに一部鋼種について、T-L 方向に 1 TCT 試験片を採取し、室温、173 K および 77 K において除荷コンプライアンス法により J_{IC} 試

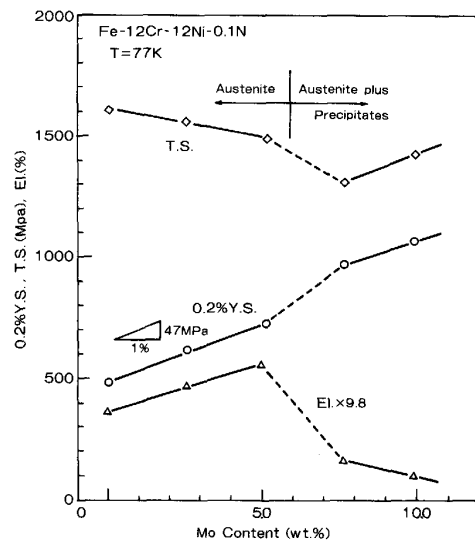


Fig. 1. Effect of molybdenum content on the tensile properties of Fe-12Cr-12Ni-0.1N steel at 77 K.

Table 1. Chemical composition of the test materials.

Materials	No.	Chemical Composition (wt.%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
50Kg VIM'ed	1	0.024	0.60	1.20	0.019	0.006	11.84	11.79	0.01	0.106
	2	0.022	0.65	1.24	0.020	0.007	11.72	11.88	2.55	0.105
	3	0.023	0.65	1.21	0.021	0.008	11.84	11.96	5.15	0.107
	4	0.030	0.65	1.20	0.021	0.010	11.72	12.05	7.65	0.113
	5	0.021	0.61	1.20	0.021	0.010	11.84	11.96	9.90	0.109
	6	0.032	0.63	10.35	0.022	0.012	11.98	12.22	7.65	0.171
	7	0.025	0.54	5.20	0.021	0.007	12.01	12.25	4.82	0.134
	8	0.023	0.54	10.07	0.021	0.008	11.82	11.80	4.72	0.178
	9	0.024	0.55	15.04	0.021	0.009	11.80	12.09	4.81	0.205
	10	0.021	0.52	20.17	0.021	0.007	11.85	12.01	4.83	0.189
	11	0.019	0.58	9.98	0.016	0.007	11.74	12.03	5.14	0.091
	12	0.025	0.58	9.96	0.015	0.009	11.64	12.12	5.09	0.149
	13	0.029	0.56	9.87	0.015	0.009	11.49	11.97	5.02	0.180
	14	0.031	0.59	9.84	0.014	0.008	11.50	12.05	5.14	0.192
	15	0.017	0.53	10.46	0.020	0.006	12.47	12.38	5.16	0.208
	16	0.024	0.60	10.61	0.018	0.005	12.70	12.41	5.10	0.209
500Kg ESR'ed		0.047	0.74	9.26	0.015	0.002	11.93	11.95	5.03	0.204
6 ton ESR'ed		0.046	0.44	9.74	0.020	0.002	11.92	12.21	4.89	0.203

験を実施し、破壊靱性を調べた。

2.2 結果および考察

2.2.1 Mo の影響

12Cr-12Ni-0.1N を基本成分として Mo を 0 から 10% 範囲で変化させ、低温の機械的性質に及ぼす Mo の影響を調べた。Fig. 1 に 77 K の引張性質に及ぼす Mo 含有量の影響を示す。0.2% 耐力は Mo 量 5% まで直線的に上昇するが、5% と 7.5% の間で不連続的に上昇し、その後再び直線的に上昇する。Mo 含有量 0~5% 範囲における Mo 1% 当たりの 0.2% 耐力の増加量は 47 MPa である。この耐力の増加は Mo による置換型固溶強化と考えられる。一方引張強さは Mo 量 7.5% 付近まで低下する。引張強さの低下の原因は Mo 量の増加によりオーステナイトが安定化しひずみ誘起マルテンサイト

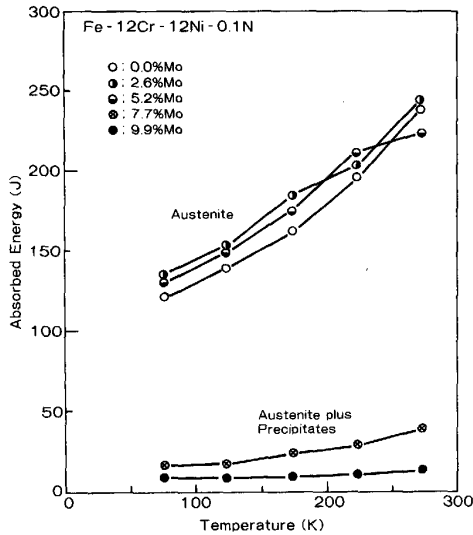


Fig. 2. Change of absorbed energy by test temperature for Fe-12Cr-12Ni-0.1N steel with various molybdenum content.

ト量が少なくなるためと考えられる³⁾。伸びは Mo 量 5% まで上昇するが、5% を超えると急激に低下する。Fig. 2 に 273~77 K における衝撃値に及ぼす Mo 含有量の影響を示す。Mo 量 5% まで非常に高い衝撃値を示すが、5% を超えると衝撃値が急激に低下する。Photo. 1 に低い靱性を示した 7.7%Mo および 9.9%Mo 添加材のミクロ組織を示す。Mo 量 5.2% 以下ではオーステナイト単相で析出物は見られないのに対して Mo 量が 7.7% 以上で析出物が多くなることおよび伸びおよび衝撃値が低下することから、析出物と伸びおよび衝撃値の間には密接な関係があるものと考えられる。これらの析出物は 9.9%Mo 添加材から抽出した残渣の X 線回折の結果、Fig. 3 に示すように Laves 相⁴⁾、R 相⁶⁾ならびに Chi 相⁴⁾⁵⁾ の 3 種類の金属間化合物であることが判明した。

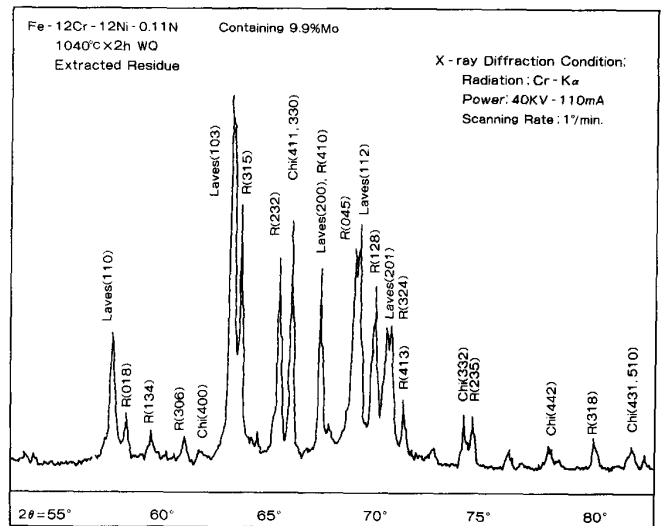
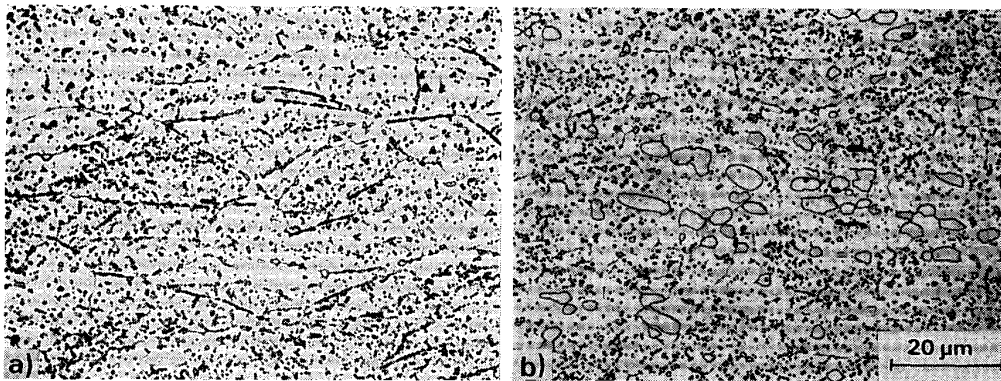


Fig. 3. X-ray diffraction analysis on the extracted residue from the steel containing 9.9%Mo.



a) 7.65%Mo

b) 9.90%Mo

Photo. 1. Microstructures of Fe-12Cr-12Ni-0.1N steels containing a) 7.65% and b) 9.90%Mo (1040°C × 2 h W. Q.).

以上の結果、Mo 添加材は低温における伸びや衝撃値を犠牲にすることなく耐力を高めることができ、その最適添加量は 5% 前後であることを明らかにした。

2.2.2 Mn の影響

12Cr-12Ni-5Mo-0.15N を基本成分として Mn の低温機械的性質に及ぼす影響を調べた。Fig. 4 に 77 K の引張性質と Mn 含有量の関係を示す。0.2% 耐力と引張強さは Mn 量の増加とともに上昇する。これらの強化は Mn 添加の効果と、Mn 添加にともなう溶解度の増加による、N の増加で強化したと考えられる。なお、1%

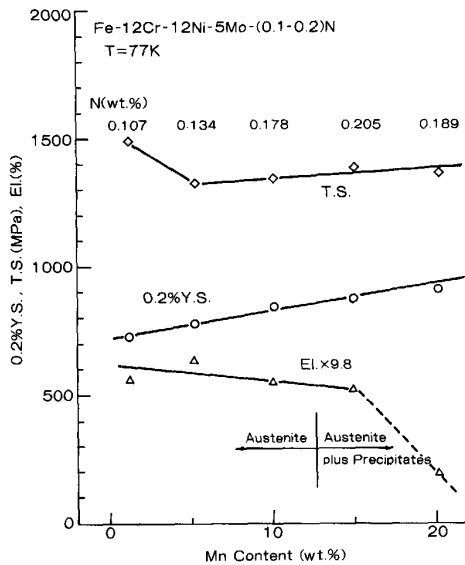


Fig. 4. Effect of manganese content on the tensile properties of Fe-12Cr-12Ni-5Mo-(0.1-0.2)N steel at 77 K.

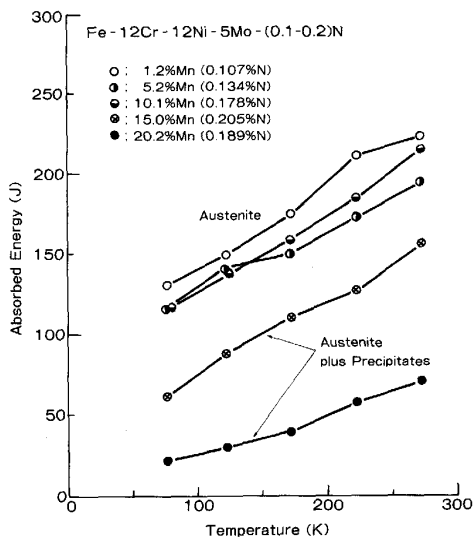


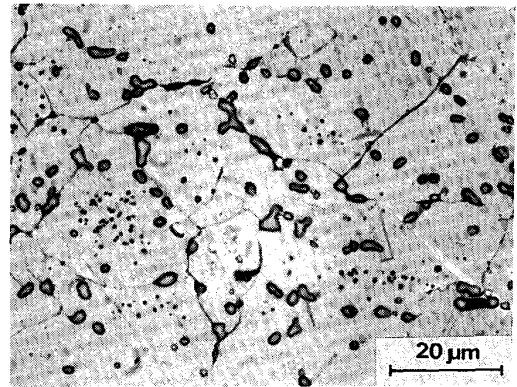
Fig. 5. Change of absorbed energy by test temperature for Fe-12Cr-12Ni-5Mo-(0.1-0.2)N steel with various manganese content.

Mn では高い引張強さを示すが、これはひずみ誘起マルテンサイト変態によるものと考えられる。また、伸びは Mn 量 15% までは緩やかに低下するが、Mn 量が 15% を超えると急激に低下する。Fig. 5 に 273~77 K における衝撃値に及ぼす Mn 含有量の影響を示す。Mn 量 10% までは衝撃値に及ぼす影響は小さいが、15% まで増すと衝撃値が急激に低下する。Photo. 2 に衝撃値の低い 15%Mn 添加材のマイクロ組織を示す。Mn 量 10% 以下では完全オーステナイト組織であり、析出物は見られないが 15%Mn 添加材には明瞭な析出物が認められ、これらの析出物が靱性の低下の原因となっていると考えられる。これらの析出物は抽出残渣の X 線回折によると、Chi 相⁴⁾⁵⁾ と Laves 相⁴⁾ の 2 種類の金属間化合物である。

以上のように 12Cr-12Ni-5Mo 鋼において、10% までの Mn 添加は靱性にほとんど影響をおよぼさず、強化元素である N の溶解度を高め高 N 添加による高強度化するので高強度、高靱性を有する材料の開発に有効である。

2.2.3 N の影響

12Cr-12Ni-10Mn-5Mo を基本成分として低温の機械的性質に及ぼす N 含有量および固溶化処理温度の影響を調べた。Fig. 6 に固溶化温度が 1040, 1100°C の際の 4 K における引張性質と N 量の関係を示した。0.2% 耐力と引張強さはともに N 量の増加とともに上昇する。これによると、4 K での耐力の要求値 (1200 MPa) を満たすには N 量は 0.2% 以上が必要である。また、各引張試験温度における N 量 0.1% 当たりの 0.2% 耐力の上昇を Fig. 7 に示す。N による強化の度合いが、低温ほど大きいことが SUS316 と同様に¹⁾ 本鋼でも確認された。したがって、前項で述べたように Mn などの添加により、母材の N 固溶度を増加し、高 N を添加す



15.0%Mn

Photo. 2. Microstructures of Fe-12Cr-12Ni-5Mo-0.19N steels containing 15.0%Mn (1040°C × 2h W.Q.).

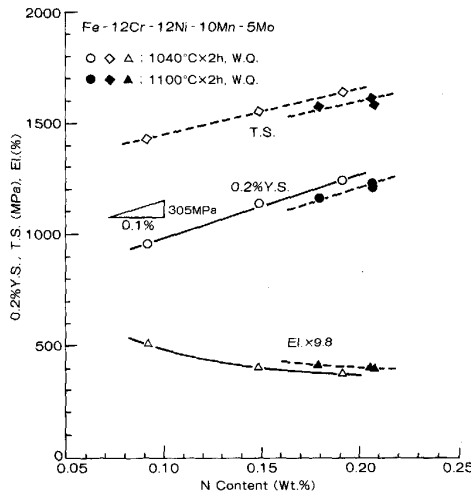


Fig. 6. Effects of nitrogen and solution annealing temperature on the tensile properties of Fe-12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel at 4 K.

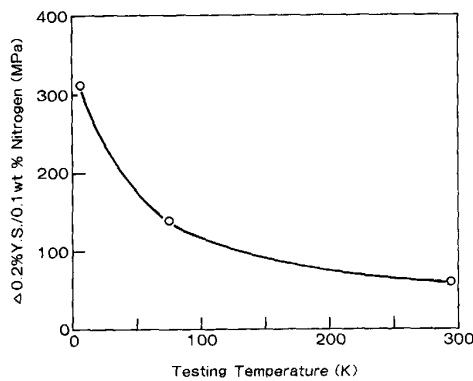


Fig. 7. Effect of tensile testing temperature on the increase of 0.2% offset yield strength per 0.1 wt% nitrogen content.

ることが高強度化に有効である。靱性に及ぼす N 量および固溶化温度の影響を Fig. 8 に示す。1040°C および 1100°C で固溶化処理を行い、4 K で衝撃試験を行った結果、高 N 量でかつ、固溶化温度が高いほど高い衝撃吸収エネルギーが得られた。固溶化温度が高いほど耐力や引張強さが低下し、伸びおよび衝撃靱性が増加するのは十分な固溶が得られたためと考えられる。また、N 量が 0.25% 程度までなら、N 量の増加にともなって強度が高くなるので、母地の変形に対する抵抗が増す結果、衝撃吸収エネルギーが高くなるものと考えられる。

以上の結果、4 K での耐力 1200 MPa 以上で、高靱性を有する極低温で使用される構造材料として 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo-0.2%N 鋼が有望であることを明らかにした。

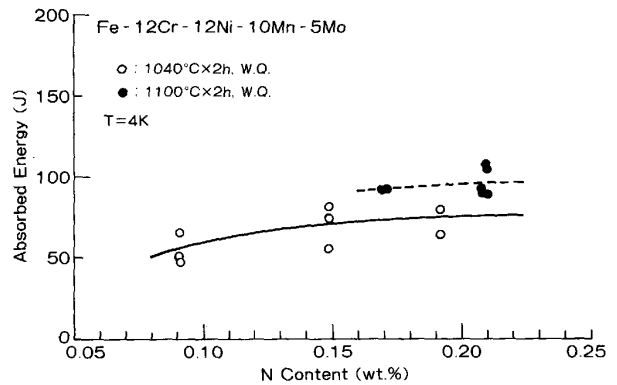


Fig. 8. Effects of nitrogen and solution annealing temperature on absorbed energy of Fe-12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel at 4 K.

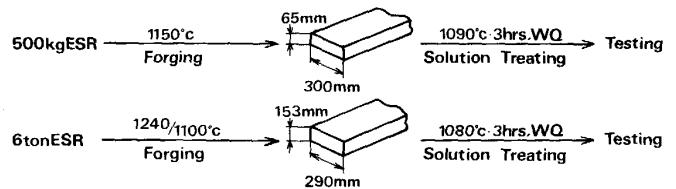


Fig. 9. Manufacturing procedures.

3. 大型鍛鋼品の製造と低温における機械的性質

実験室的規模での開発研究に基づき、12Cr-12Ni-10Mn-5Mo 鋼の 500 kg および 6 t ESR 鋼塊を用いた工業的規模での鍛鋼品を製造し、強度および靱性に関して検証した。

3.1 大型鍛鋼品の製造

高周波誘導炉により大気中で溶製した電極を用いて直径 260 mm の 500 kg ESR 鋼塊を溶製した。一方、直径 800 mm の 6 t ESR 鋼塊用の電極には塩基性電気炉にて溶解、精練した溶鋼を VOD (真空酸素脱炭) 処理したものを用いた。500 kg 鋼塊を 1150°C に加熱し、厚さ 65 mm × 幅 300 mm の板に鍛造した。鍛造後、1090°C × 3 h 水冷の固溶化処理を施し調査に供した。6 t 鋼塊は最高 1240°C 加熱後に予備鍛造し、次に 1100°C に加熱し、厚さ 153 mm × 幅 290 mm の板に仕上鍛造した。鍛造後、板厚 140 mm に機械加工して、1080°C × 3 h 水冷の固溶化処理を施し調査に供した。供試材の化学成分を Table 1 に、製造工程を Fig. 9 にそれぞれ比較して示した。

3.2 大型材の低温での機械的性質

厚さ 140 mm の板の肉厚各部での顕微鏡組織を Photo. 3 に示す。組織はオーステナイト単相で粒界の

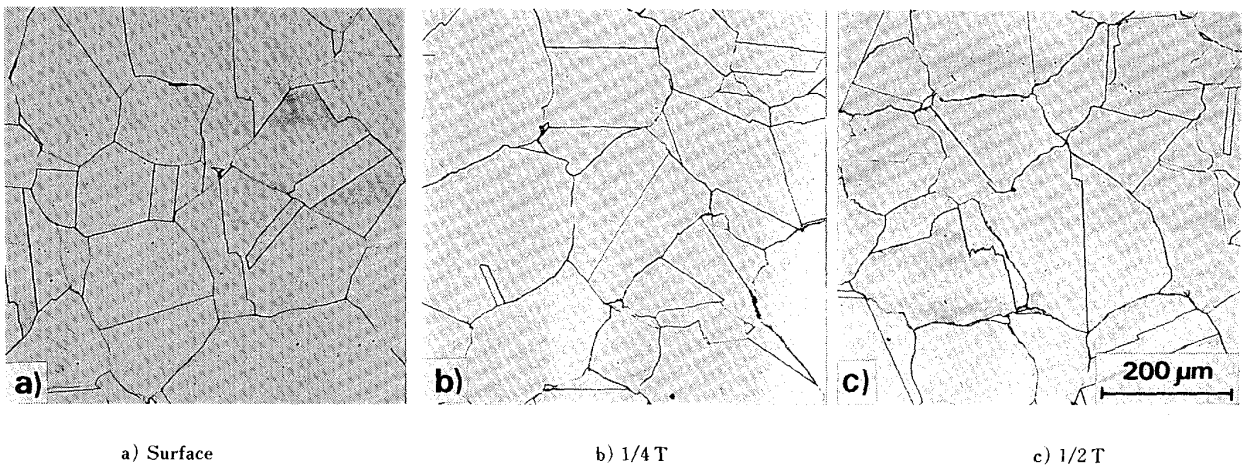


Photo. 3. Microstructures at various locations of 6 t ESR'ed forged plate.

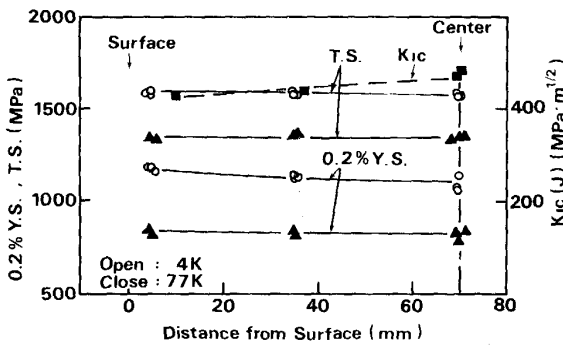


Fig. 10. Mechanical properties of the specimens taken from various locations of 140 mm thickness plate.

析出物も認められず健全な組織である。結晶粒度は表層で ASTM No. 1.3 および中心部で ASTM No. 1.4 であった。一方、オーステナイト鋼においても大型材となると固溶化処理時の冷却速度に起因する質量効果が認められる場合がある⁹⁾。そこで、本材料でも肉厚方向の機械的性質の分布を調査した。板のL方向の表層、1/4 t および 1/2 t の位置から採取した試験片を用いて引張試験、衝撃試験および破壊靱性 (J_{IC}) 試験を 77 K および 4 K にて実施した。肉厚各部の引張試験結果と破壊靱性値 K_{IC} を Fig. 10 に示す。4 K と 77 K における引張性質と K_{IC} 値は肉厚方向に均一であり、本材料は質量効果をほとんど示さないものと判断できた。

3.3 低温強度に及ぼす結晶粒度の影響

大型オーステナイト鍛鋼品の製造では鍛造効果の不足などの理由で結晶粒の微細化の難しさが生じ¹⁰⁾、比較的結晶粒度の粗い材料となる可能性がある。そこで、極低温での機械的性質に及ぼす結晶粒度の影響を正しく把握する必要があり調査を行った。供試材は、鍛造材を 1080°C で固溶化処理して結晶粒度を ASTM No. 2.5 に

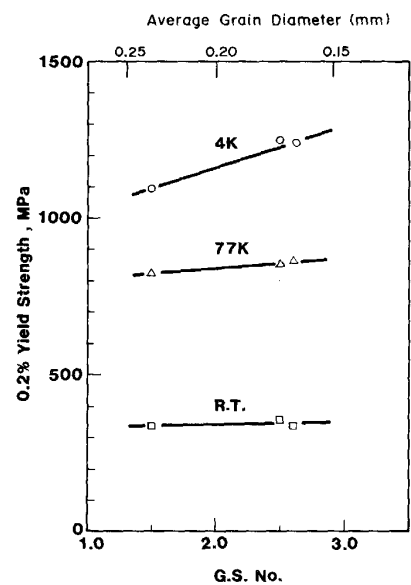
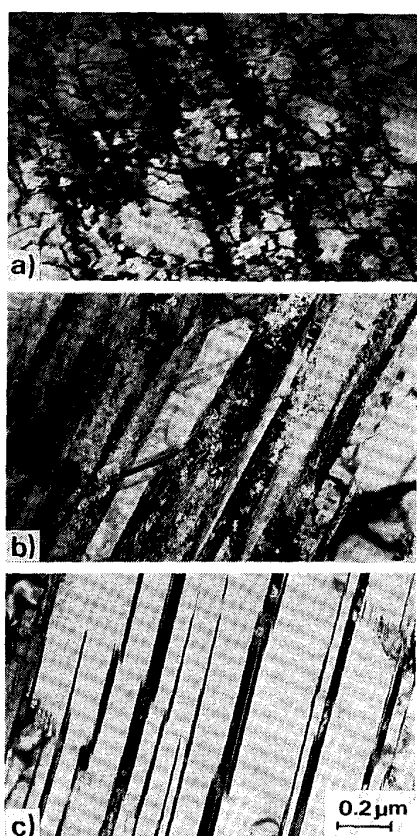


Fig. 11. Effect of grain size on yield strength of 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel.

したものの、1150°C 加熱した後に 1080°C 固溶化処理して結晶粒度を ASTM No. 1.5 に調整したもの、および室温で 5% のひずみを与えた後、1080°C 固溶化処理して結晶粒度を ASTM No. 2.6 に調整した 3 種類の試験片を用いた。室温、77 K および 4 K における引張試験の結果を Fig. 11 に示す。結晶粒が細粒になるほど高耐力となり、その関係は低温になるほど顕著である。一般に Petch の関係式⁷⁾で知られているように、耐力は結晶粒径の平方根に反比例するが極低温ではこの関係がより顕著に現れるものと考えられる。Photo. 4 に各試験温度で 5% の引張変形を与えた薄膜試験片で TEM 観察した結果を示す。室温、77 K および 4 K で変形した材料の転位の分布が異なっている。低温ほど耐力の増加に及ぼす結晶粒度の影響が大きい理由は粒界付近の転位の



a) Test temperature : RT b) Test temperature : 77 K
c) Test temperature : 4 K

Photo. 4. TEM photomicrographs on 12Cr-12Ni steel deformed at various temperature.

分布の違いなどが考えられるが詳細な検討がさらに必要である。

3.4 低温の機械的性質に及ぼす材料の溶解法の影響

大型材製造では種々の材料の溶解法を選択する可能性がある。そこで材料の溶解法の違いによる機械的性質の差を調査するため、Table 1 に示す VIM 材 (No. 15) と 500 kg と 6 t ESR 材の機械的性質の比較検討した。室温、77 K および 4 K における引張試験結果を Fig. 12 に示す。各材料の耐力と引張強さは、室温から 4 K までほぼ同じだが、6 t ESR 材の 4 K での耐力は低い値を示す。これは 6 t ESR 材の結晶粒度が ASTM No. 1.4 であるのに対し VIM 材と 500 kg ESR 材の結晶粒度がそれぞれ ASTM No. 2.8 と 2.5 であることから 6 t ESR 材の 4 K での低耐力は結晶粒度の影響によると考えられる。一方、破壊靱性試験結果を Fig. 13 に示す。6 t および 500 kg ESR 材の 4 K における K_{IC} は平均 $274 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり VIM 材の $230 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と比較して高い値を示している。また 77 K の試験結果でも ESR 材の K_{IC} は VIM 材のそれより高い。Photo. 5 に破壊靱性試験片の破面の SEM 観察結果を示す。破面形態はい

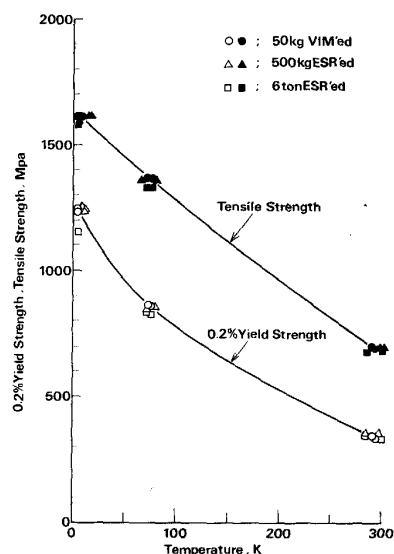


Fig. 12. Comparison of temperature dependence of 0.2% yield and tensile strengths among various processed 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel.

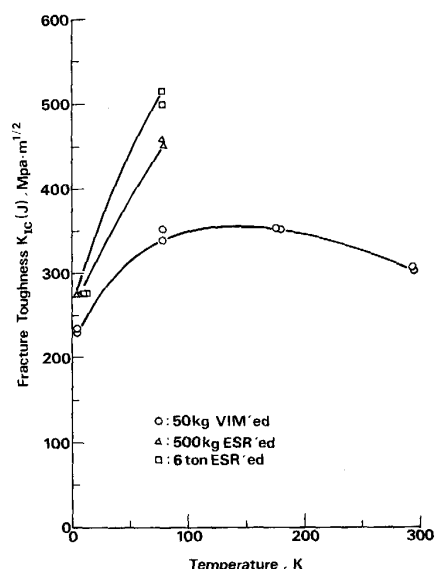


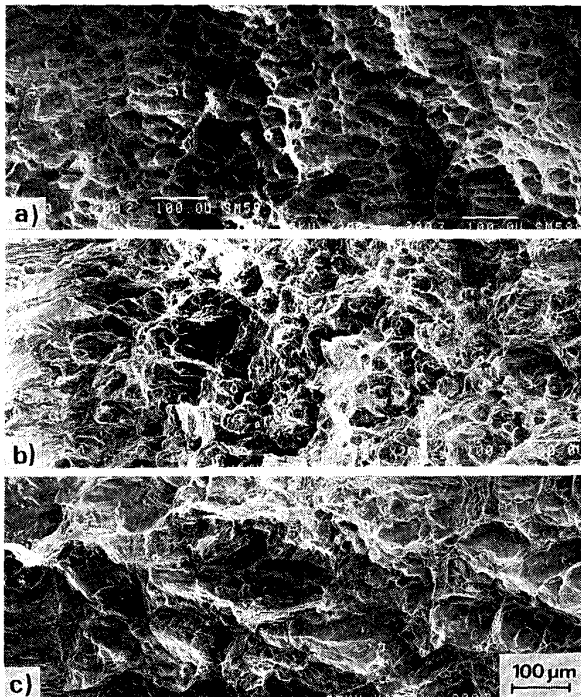
Fig. 13. Temperature dependence of fracture toughness $K_{IC}(J)$ of the ESR'ed 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo steel compared with that of VIM'ed heat.

ずれも微小ボイドの集まりの粒内延性破壊であり、靱性が高いことを裏付けている。VIM 材は特にボイドの分布が細かく延性破壊起点部が多いことが予測される。Table 2 に各材料の JIS G 0555 による清浄度測定結果を示す。ESR 材では硫化物系介在物が VIM 材に比べて少なくなっているのがわかる。これは S 含有量が VIM 材では 0.006% であるのに対して、500 kg 及び 6 t の ESR 材では約 1/3 になっているためである。ESR 材の非金属介在物面積率は VIM 材の 1/3~1/4 となっ

Table 2. Cleanliness of the materials measured by point counting method and oxygen content.

Steel	Melting process	Ingot weight	Cleanliness (%)			Oxygen content (ppm)
			Sulfide	Oxide	Total	
12Cr-12Ni-10Mn-5Mo	VIM	50 kg	0.033	0.029	0.062	61
	ESR	500 kg	0.008	0.015	0.023	13
	ESR	6 t	0.023	0.012	0.035	6

Fatigue
Pre-Crack



a) VIM 50 kg heat b) ESR'ed 500 kg heat
c) ESR'ed 6t heat

Photo. 5. SEM fractographs on the 4K fracture toughness specimens made from variously processed ingots.

ている。また、6 t、500 kg ESR 材と VIM 材の酸素含有量はそれぞれ 6、13 および 61 ppm で、ESR による著しい酸化物除去効果も現れている。以上の結果、12Cr-12Ni-10Mn-5Mo 鋼のほぼ同一化学成分の VIM 材と ESR 材とを比較すると、強度はほぼ同じであるが、破壊靱性値は ESR 法によって著しく改善され、清浄度の向上が靱性向上に工業的にきわめて有効な手段であることを明らかにした。さらに本材質と 316 LN の低温の機械的性質を比較した場合、316 LN の耐力および破壊靱性値は 4 K でそれぞれたかだか 1000 MPa、250 MPa \sqrt{m} であるので²⁾³⁾、4 K での高い強度と靱性が 12Cr-12Ni-10Mn-5Mo 鋼の特徴であり大型材でもこれが確認された。

4. 結 言

オーステナイト鋼の低温における優れた強度と靱性に注目し、さらに窒素、Mn および Mo の合金元素の添加による低温における強度と靱性の改善について検討を加えた。これに基づき開発した材料で大型材を製造し大型材における各種性質を調査した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) 低温でのオーステナイト鋼の強化および靱性改善には Mo 添加が効果的である。

(2) その結果、12Cr-12Ni-10Mn-5Mo 鋼が SUS 316LN 改良鋼として開発され、6 t ESR 鋼塊による大型鍛造材の開発に成功した。

(3) 低温における機械的性質に及ぼす結晶粒度および清浄度の影響を調査した結果、極低温で結晶粒細粒化が強度改善に、また ESR プロセス等の採用による清浄度向上が靱性改善に大きな効果があることを明らかにした。

最後に、本研究遂行にあたり、各種実験の実施に多大なご協力を賜った(株)日本製鋼所室蘭研究所の藤田信康殿と曾川恒彦殿に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) K. YOSHIDA, H. NAKAJIMA, K. KOIZUMI, M. SHIMADA, Y. SANADA, Y. TAKAHASHI, E. TADA, H. TSUJI and S. SIMAMOTO: Austenitic Steels at Low Temperatures, ed. by R. P. REED and T. HORIUCHI (1983), p. 29 [Plinum Press]
- 2) LNG Materials and Fluids, ed. by Cryogenic Division Institute for Basic Standards National Bureau of Standards Boulder (1977) [Doguras Mann]
- 3) 三浦 立, 大西敬三, 中嶋秀夫, 島本 進: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 715
- 4) B. WEISS and R. STICKLER: Metall. Trans. A, **3** (1972), p. 851
- 5) J. M. LEITNAKER: Weld. J., **61** (1982) 1, p. 9S
- 6) A. K. SINHA, R. A. BUCKLEY and W. HUME-ROTHERY: J. Iron Steel Inst., **205** (1967) 2, p. 191
- 7) N. J. PETCH: J. Iron Steel Inst., **174** (1953) 1, p. 25
- 8) 大西敬三, 三浦 立, 塚田尚史, 関村和義, 森谷博明, 富士明良: 日本製鋼所技報, (1981) 40, p. 12
- 9) 大西敬三, 塚田尚史, 鈴木公明, 手代木邦夫, 加賀 寿, 楠橋幹雄, 佐藤育雄: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 671
- 10) 大西敬三, 塚田尚史, 鈴木公明, 三浦 立, 楠橋幹雄, 佐藤育雄: 火力原子力, **36** (1984), p. 849