

ガスタービンディスク用高強度10Cr1.5MoVNb 鋼の開発と製造

角屋 好邦*・馬越 龍太郎*²・岡村 義弘*³・中田 和広*³

Development and Production of 10Cr1.5MoVNb Steel for Gas Turbine Compressor Disk

Yoshikuni KADOYA, Ryotaro MAGOSHI, Yoshihiro OKAMOTO and Kazuhiro NAKATA

Synopsis : Recently, gas turbine inlet temperature has been raised in order to improve thermal efficiency of power plant. The turbine inlet temperature of 1500°C has already been attained in the newly developed gas turbine. In case of the combined cycle power plant, optimization of compressor pressure ratio corresponding to the increase of turbine inlet temperature is required to improve the thermal efficiency. Development of higher creep strength material for disk, therefore, is needed to actualize higher thermal efficiency gas turbine. Alloy design based on 12% Cr steels indicated that the high purity 10Cr1.5Mo0.75NiVNbN steel is suitable to the compressor disks required to the advanced type gas turbine. A trial disk has successfully been manufactured with this steel from 800 mm dia. electroslag remelting (ESR) ingot. Several evaluation tests revealed good material properties which meet the requirements of advanced type gas turbine compressor disk, especially in toughness and creep rupture strength.

Key words: gas turbine disk; forging; 12% Cr steel; toughness; creep; fatigue; electroslag remelting (ESR); high purity steel.

1. 緒言

近年、火力発電プラントはエネルギー資源のよりいっそうの有効利用を旨とし、発電効率の向上、省エネルギー技術の開発などが積極的に進められている¹⁾。そのなかでも蒸気タービンとガスタービンとを組合わせた複合発電（コンバインドサイクル）プラントが最近脚光を浴びており、その開発実用化も盛んである^{2,3)}。

コンバインドサイクルでは主機となるガスタービンの高温・高性能化により、プラント総合熱効率の大幅な改善が期待されるので、信頼性向上はもとよりガスタービンの大容量・高温化の開発と実証運転が現在積極的に進められている^{4,5)}。このようなガスタービンの高出力、高効率化に伴い、使用される耐熱部品に対する要求も厳しいものとなっている。このうちガスタービン用ディスク材に関しては大型化かつ高強度化のニーズが高まっている。

現在重量が数トン以上の大型ディスク鍛造品は溶解法、鍛造設備容量、機械加工性および合金元素の多量添加などの技術的・経済的制限から低合金鋼^{6,7)}が多く使用されている。上記のような要求に応えるためには、従来のディスク材よりも韌性と高温強度のバランスに優れ、しかも質量効果が少なく、かつ経済的な大型鍛造品用耐熱鋼の開発が望まれる。

著者らは従来の2.25CrMoV鋼ディスク材^{6,7)}よりもさら

に高強度・高韌性の大型鍛造品用の耐熱鋼を開発することを目的として、すでに蒸気タービンロータ材として開発されている10Cr鋼⁸⁾をベースに、新しいディスク用耐熱鋼の開発を試みた。また本開発鋼の実用規模ディスクを試作して、その材料特性を評価した。

2. 開発目標と成分設計

産業用ガスタービンのタービンロータはそれぞれ寸法の異なる数枚の大型ディスクで構成されており、それらは結合ボルトで一体化される組立ディスクタイプである。このディスクは、大きなものでは最終仕上げ形状として直径1800 mm、厚さ100~300 mm程度である。したがって、この種大型鍛造品の製造プロセス上においては鍛造効果および質量効果を考慮して、韌性と高温強度のバランスがとれた材料特性を確保することが高強度・高韌性大型ディスク材開発の鍵となる。

大型ディスク材の開発目標をTable 1に示す。クリープ破断特性については、すでに実用化されている2.25CrMoVNbNディスク材⁷⁾よりも20°C上昇可能なクリープ破断強度を確保することとした。

合金組成はすでに実用化されている蒸気タービンロータ材⁸⁾の10Cr鋼をベースとし、ディスク材としてCおよびNiなど合金元素の添加量の最適化を図り、高温強度および韌

平成13年9月12日受付 平成13年12月4日受理 (Received on Sep. 12, 2001; Accepted on Dec. 4, 2001)

* 三菱重工業(株)高砂研究所 (Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2-1-1 Shinhamma Arai-cho Takasago 676-8686)

* 2 三菱重工業(株)高砂製作所 (Takasago Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

* 3 日本鑄鍛鋼(株)技術開発部 (Technical Development Dept., Japan Casting & Forging Corp.)

Table 1. Target of a new disk alloy steel.

Item	Rim	Bore
0.2% yield strength at 500°C (MPa)	>510	>510
Charpy V impact		
a) Absorbed energy at 20-25°C (J)	>41	>41
b) FATT (°C)	≤25	≤40
Creep rupture strength	20°C up more than conventional 2.25CrMoVN Steel (480°C-10 ⁵ h, ≥350MPa)	20°C up more than conventional 2.25CrMoVN Steel (480°C-10 ⁵ h, ≥350MPa)

性の改善をねらった。とくに、Niに関しては、これまでの一連の研究⁹⁾で得られている10Cr鋼の靱性および高温強度に及ぼすNiの影響に関する知見を反映させた。すなわち、Niの増量添加は高温強度の低下を招くものの、一方で靱性の向上に効果があることから、ガスタービンディスクの材料特性のなかでも大型ディスク中心部の靱性確保を重視して、従来の0.6%Niから増量させて0.75%Niとした。

3. 実用規模ディスク材の試作および評価

3.1 製造方法

本開発鋼，10.3Cr1.5Mo0.75NiVNbN鋼を用いてφ1950mm×240tmm，調質重量が約6tの実用規模ディスク材を試作した。

溶解量は約40tでの炉外精錬をかけて下注ぎによりESR用電極を作製した。その後ESRを行い，9tの鋼塊を溶製した。この鋼塊を据え込み，粗鍛造，仕上鍛造を行い，さらに調質形状加工を行い，調質重量が約6tで最大径がφ1950mmの大型ディスク材を製作した。

焼入条件は，1080°Cで14h保持後油焼入れとし，耐力が780MPaとなるように，焼戻しを675°Cで26h保持後炉冷とした。Fig. 1および2にこのディスクの鍛造状況および焼入実施状況の写真をそれぞれ示す。また，試作ディスクの焼入れ時における冷却速度の実測結果をFig. 3に示す。1080°C~400°C間の平均冷却速度は，それぞれ表層部：22.6°C/minおよび中心部：9.0°C/minであった。

3.2 試験方法

製造したディスクの品質および材料特性に関しては代表箇所における化学成分分析および光学顕微鏡組織観察を，機械的特性として引張試験，衝撃試験，破壊靱性試験，低サイクル疲労試験およびクリープ破断試験を行った。尚，機械的特性の調査を行う前にディスクの磁粉探傷検査および超音波探傷検査を実施した結果，欠陥は認められず健全なディスクであることが確認された。

引張試験には直径6mm，標点間距離30mmの丸棒試験片を用いた。衝撃試験にはJIS4号のシャルピーVノッチ試験片を用いた。破壊靱性試験には1T-CT試験片（厚さ：25mm）を用いて J_{IC} 試験を行い，得られた J_{IC} から K_{IC} へ換算して評

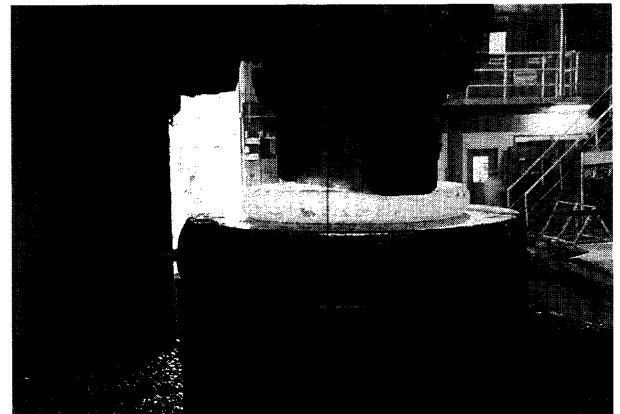


Fig. 1. View of forging of the trial disk.

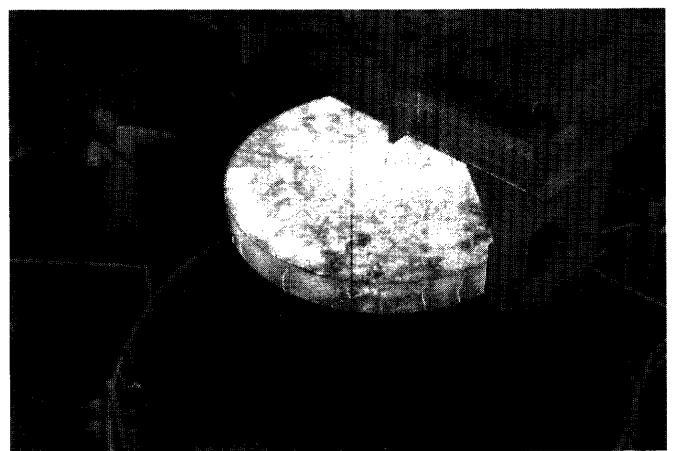


Fig. 2. View of quenching of the trial disk.

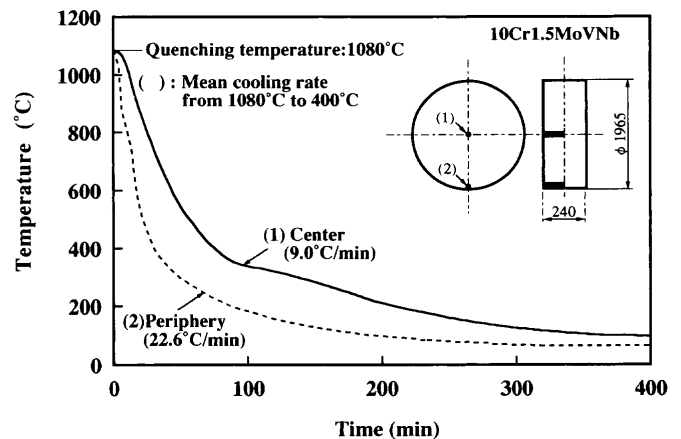


Fig. 3. Measured cooling rate during quenching of the trial disk.

価した。低サイクル疲労試験は直径8mm，標点間距離20mmの丸棒試験片を用いて両振りの引張-圧縮試験を行った。クリープ破断試験には直径6mm，標点距離30mmの平滑試験片および直径6.4mmの切欠試験片を用いた。また，上記の機械的特性試験から得られた結果は従来の2.25CrMoVNbディスクの材料特性^{6,7)}と比較しながら評価した。

Table 2. Chemical composition at various portion in the trial disk.

																	(mass %)
portion	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Sn	As	Sb	Nb	N	
Ladle	0.13	0.08	0.57	0.004	0.001	0.03	0.74	10.37	1.49	0.18	0.002	0.003	0.004	0.0012	0.048	0.046	
Product	TD1	0.12	0.08	0.56	0.003	0.002	0.03	0.72	10.26	1.46	0.17	0.003	0.003	0.004	0.0011	0.047	0.046
	TD2	0.12	0.09	0.56	0.003	0.001	0.03	0.72	10.31	1.46	0.18	0.003	0.003	0.004	0.0012	0.047	0.045
	TD3	0.12	0.08	0.56	0.003	0.001	0.03	0.72	10.32	1.46	0.18	0.002	0.003	0.004	0.0011	0.047	0.045
	C1	0.14	0.08	0.57	0.004	0.001	0.03	0.74	10.41	1.50	0.18	0.003	0.003	0.004	0.0012	0.048	0.047
	C2	0.13	0.08	0.56	0.004	0.001	0.03	0.74	10.38	1.49	0.18	0.003	0.003	0.003	0.0012	0.048	0.047
	C3	0.13	0.05	0.57	0.004	0.001	0.03	0.73	10.33	1.47	0.18	0.003	0.003	0.003	0.0013	0.047	0.046
Requirement	0.10~	max.	max.	max.	max.	max.	max.	10.00~	1.30~	0.12~	max.	max.	max.	max.	0.030~	0.030~	
	0.16	0.10	1.00	0.015	0.015	0.15	1.00	11.00	1.60	0.22	0.010	0.015	0.020	0.0015	0.080	0.070	

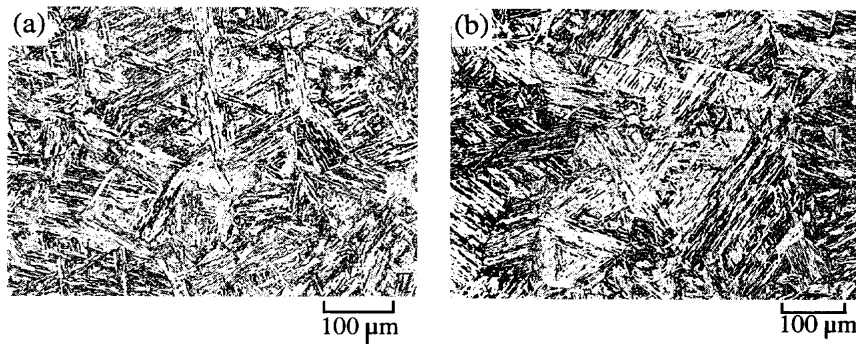
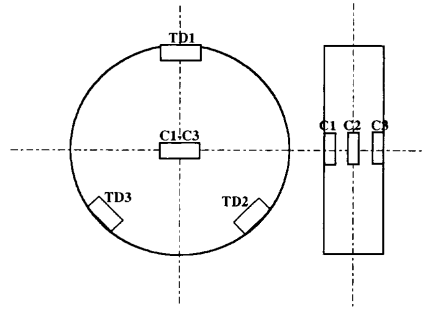


Fig. 4. Microstructure and grain size of the trial disk: (a) rim (G.S. No.: 2.1); (b) bore (G.S. No.: 1.5).

3.3 試作ディスクの材料特性

(1) 化学組成

Table 2にディスク各位置の分析結果を示す。目標どおりの分析値が得られており、また、大型鋼塊にもかかわらず、各位置による成分の変動はほとんど認められていない。とくに材料の冶金の性質と機械的性質に影響するC, Cr, Mo, V, NbおよびNのような重要元素は各位置において、ほぼ同じ値となっている。これはESR法の効果であり、本ディスク製造の狙いであるESRの効果が十分に発揮されている。

(2) 金属組織観察

ディスク各位置の光学顕微鏡組織をFig. 4に示す。組織は焼戻しマルテンサイト組織である。また旧オーステナイト結晶粒径はJIS No. で1.5~2.1であり、この種のディスクとしては通常の結晶粒であるといえる^(6,7)。Fig. 5にディスクの表層部から採取した試験片によるCCT線図の測定結果を示す。従来のロータ材のCCT線図⁽⁸⁾とほぼ同じである。Fig. 3において実体の冷却速度は9.0~22.6°C/minであり、

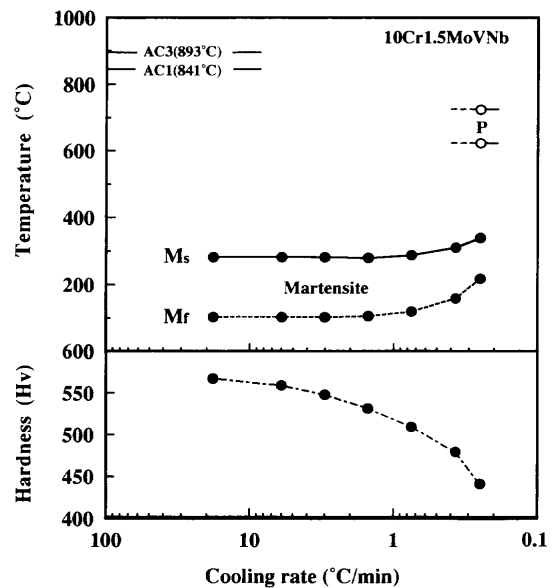


Fig. 5. Continuous cooling transformation curve of the trial disk.

Table 3. Mechanical properties of trial disk.

Portion	Tensile test (R.T.)				Tensile test (500°C)				V-notch Charpy	
	0.2%Y.S.	T.S	El.	R.A.	0.2%Y.S.	T.S	El.	R.A.	FATT	Absorbed energy
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(°C)	(R.T.)(J)
TD1	792	907	20.6	63.0	559	634	19.7	74.2	-	-
TD2	796	912	20.3	63.0	548	638	20.2	74.6	-	-
TD3	794	907	20.4	63.5	554	629	19.2	73.0	17	94
C2	783	913	20.2	65.0	564	634	18.3	72.5	22	97

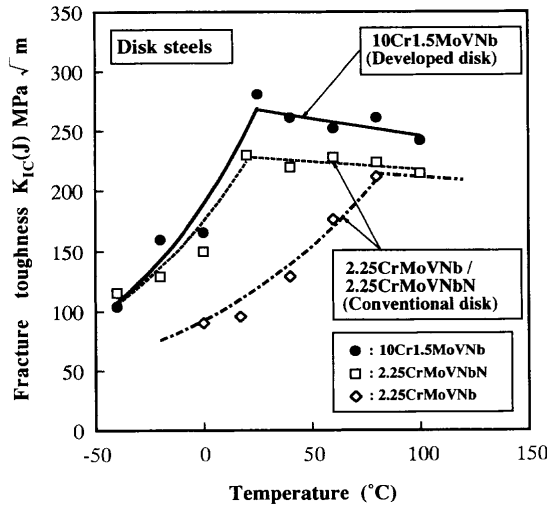


Fig. 6. Fracture toughness transition curve of the trail disk and conventional disk steels.

ディスク各部の冷却速度の広い範囲にわたって均一なマルテンサイト組織が得られることがわかる。

(3) 引張および衝撃性質

Table 3にディスク各位置の機械的性質を示す。室温の0.2%耐力，引張強さはそれぞれ783~796 MPa, 907~913 MPa, 500°Cの0.2%耐力，引張強さはそれぞれ548~564 MPa, 629~638 MPaであり，表層部と中心部の強度差は非常に少ない。一方，50%FATTは表層部が17°C，中心部が22°Cと位置による差もほとんど認められない。

(4) 破壊靱性

ディスクの中心部の破壊靱性値(K_{1C})を従来の2.25CrMoV鋼^{6,7)}と比較してFig. 6に示す。この図からわかるように，開発ディスクの中心部の室温における K_{1C} 値は約260 MPa·m^{1/2}であり，従来の2.25CrMoV鋼⁶⁾のそれよりも2倍以上高い。また，比較的靱性の良好なスーパークリーン仕様の従来の2.25CrMoVNbN鋼⁷⁾のそれよりも1.2倍高くなっている。さらに，開発ディスクの中心部の上部棚領域は室温においても認められており，優れた破壊靱性をもっていることがわかる。

(5) 低サイクル疲労特性

ディスクの表層部における低サイクル疲労試験結果をFig. 7に示す。また，Fig. 7には従来の2.25CrMoVNb鋼⁶⁾および2.25CrMoVNbN鋼⁷⁾のデータを比較のため併せて示した。開発ディスクの試験温度は450°Cであるが，従来の

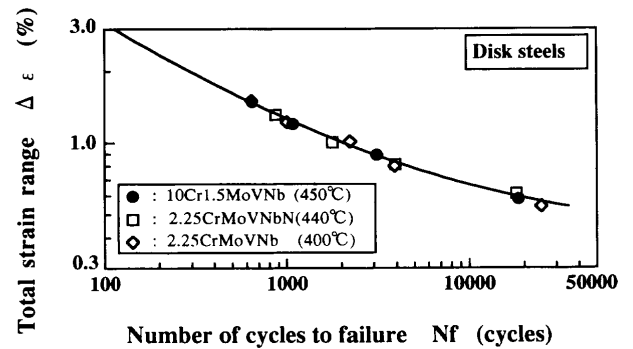


Fig. 7. Low cycle fatigue strength of the trial disk and conventional disk steels.

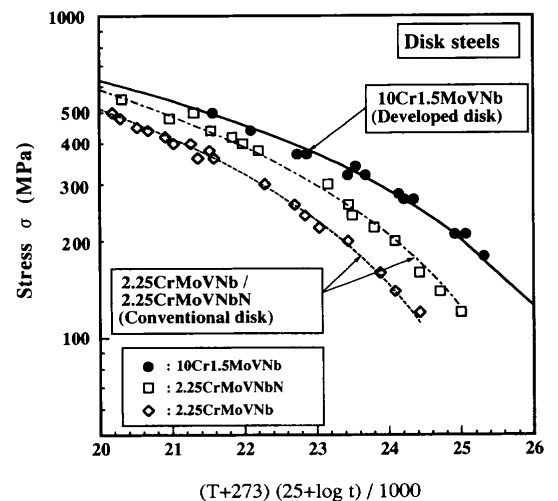


Fig. 8. Creep rupture strength of the trial disk and conventional disk steels.

ディスク材のデータも含めて400~450°Cの試験温度の範囲においては低サイクル疲労強度に大差なく，開発ディスクの低サイクル疲労強度は従来ディスクのそれらと同等であることが認められる。

(6) クリープ破断特性

ディスクの表層部におけるクリープ破断強度をLarson-Millerパラメータで整理してFig. 8に示す。また，この図に従来ディスクの2.25CrMoVNb鋼⁶⁾および2.25CrMoVNbN鋼⁷⁾のデータも併記した。この図からわかるように，開発ディスクの表層部のクリープ破断強度は従来ディスクの2.25CrMoVNb鋼⁶⁾および2.25CrMoVNbN鋼⁷⁾いずれのディスク材よりも優れており，例えば平滑材の480°C-10⁵hの

クリープ破断強度は従来ディスク材のなかで高強度である2.25CrMoVNbN鋼⁷⁾のそれに比べて応力で約1.3倍高く、温度で20°C向上している。

4. 結言

高強度・高靱性の大型鍛造品用の耐熱鋼を開発することを目的として10Cr鋼をベースにして、本開発鋼により実用規模ディスクを試作してその特性を調べた。得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 10.3Cr1.5Mo0.75NiVNbN鋼の化学組成により製造法としては炉外精錬とESR法の採用を図り、最大径がφ1950mm、調質重量が約6tの実用規模ディスク材を試作し、表層部および中心部のそれぞれの位置における冶金的調査および機械的性質の調査を行った。その結果、大型鋼塊にもかかわらずディスクの各位置における化学成分の変動は認められず、非常に均一であり、表層部および中心部の機械的性質も大きな差は認められず、材質的にも均一であった。

(2) 試作した開発ディスクの靱性は良好であり、その破壊靱性値 K_{IC} は、従来の2.25CrMoVNbN鋼ディスク材の1.2倍を示す。また、クリープ破断強度については480°C-10⁵のクリープ破断強さで比較すると、従来の2.25CrMoVNbN鋼ディスク材のそれに比べて応力で約1.3倍高く、温度で20°C向上している。

文 献

- 1) K.Kougami and H.Ishida: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1043.
- 2) T.Hirata: *J. Gas Turbine Soc. Jpn.*, **13** (1985), 2.
- 3) T.Saito and K.Kanou: *J. Gas Turbine Soc. Jpn.*, **18** (1990), 30.
- 4) T.Umemura, Y.Tsukuda, E.Akita, K.Akagi and Y.Iwasaki: *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, **34** (1997), 226.
- 5) S.Aoki, K.Uematsu, K.Tanaka, T.Ooya and K.Hirokawa: *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, **37** (2000), 6.
- 6) I.Tsuji and Y.Kadoya: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 707.
- 7) Y.Kadoya, K.Takahashi, H.Kawai, I.Tsuji, T.Azuma and Y.Tanaka: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 564.
- 8) Y.Kadoya, T.Kitai, A.Matsuo, I.Tsuji, M.Kishimoto, T.Tsuyama and Y.Okamura: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 910.
- 9) Y.Kadoya, R.Magoshi, H.Kawai, K.Morinaka, M.Mikami and K.Soeda: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 564.