

ガスエキスパンダロータ用耐硫化性Ni基合金の開発

八 鍬 浩* 高 橋 則 雄** 宮 坂 松 甫**
中 浜 修 平** 澤 田 茂*** 成 田 敏 夫***

Development of a Sulfidation-resistant Ni-based Superalloy for FCC Gas Expander Turbine Rotors

by Hiroshi YAKUWA, Norio TAKAHASHI, Matsuhito MIYASAKA, Shuhei NAKAHAMA, Shigeru SAWADA, & Toshio NARITA

A sulfidation-resistant, Ni-based superalloy was developed as a material for rotors of FCC (Fluid Catalytic Cracking) gas expander turbines. The superalloy consists of 3.0 mass% of Al and 1.5 mass% of Ti and a basic composition of AISI 685. Its sulfidation-corrosion resistance is two-fold better than that of AISI 685, while its high-temperature strength and hot workability are equal or higher than that of the same.

Keywords: Gas expander, Superalloy, Corrosion resistant, Sulfidation, Turbine, High-temperature material

1. 緒 言

流動床接触分解装置 (FCC) に組み込まれる動力回収タービンのロータには、高温強度と耐酸化性を兼ね備えたNi基超合金 AISI 685 が用いられている。しかし、AISI 685 は、約 800~900 K の H₂S あるいは SO₂ を含む環境で硫化腐食を生じ、材料特性が著しく低下することがある¹⁾。

著者らは、これまで 673~873 K での AISI 685 の硫化特性^{2, 3)} について報告した。また、前報^{4, 5)} において、AISI 685 合金の基本組成である Ni-20Cr-13.5Co-4Mo 合金の硫化挙動を調べ、合金中への Al 添加量を増やし、Ti 添加量を減らすことで硫化腐食が抑制されることを見出した。

一方、実用高温材料の場合、耐食性に加えて使用温度域における強度、延性、切り欠き破壊靱性、更に熱間加工性が要求される。AISI 685 は γ' 相とよばれる Ni₃(Al, Ti) の組成をもつ金属間化合物の析出により強度を出す

合金であるため、高温強度特性は γ' 析出量にほぼ支配される。すなわち、 γ' 量が不足すると十分な高温強度が得られず、逆に γ' 量が過剰になると延性と熱間加工性が低下する。したがって、AISI 685 と同程度 γ' 量を維持しながら耐硫化性を向上させるため、Al を増量した分 Ti を減量して γ' 量を AISI 685 と同程度にすれば、高温強度特性を AISI 685 と同等に維持しながら耐硫化性を向上させることができると考えられる。

そこで本報では、以上の推察を基に、ガスエキスパンダロータ材として開発した新耐硫化性Ni基合金 (RK 1000) について報告する。

2. 耐硫化性合金の化学組成

2-1 実験方法

2-1-1 合金の試作

前記の考えに基づいて試作した6種類の試作合金の化学組成を表1に示す。試作合金のTi添加量は1.5%あるいは2.0%とし、それぞれAl添加量を2.5~3.5%あるいは2.0~3.0%とした。これらの合金塊10 kgを、Ar雰囲気下の誘導加熱炉で溶製、铸造した後、200×20×20 mmの角柱状に鍛造した。鍛造合金は、溶体化 (1311 K×14.4 ks, 油冷)、安定化 (1116 K×14.4 ks, 空冷)、一次時効 (1033 K×57.6 ks, 空冷) 及び二次時効 (922 K×

* 株荏原総合研究所 材料研究室 工学博士
** 同 同
** 同 工学博士
*** 風水力事業本部 生産技術センター
*** 株荏原エリオット 生産設計部
*** 北海道大学大学院 工学研究科 工学博士

表1 試作合金の化学組成 (mass%) と γ' 量の計算値 (mol%)
Table 1 Chemical composition (mass%) and calculated γ' amount (mol%) of trial sulfidation resistant superalloys

	γ'	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	C	Zr	B	Fe	Si	S	P	Mn
AISI 685	26.8	bal.	19.74	13.39	4.23	3.00	1.50	0.049	0.06	0.005	0.94	0.06	0.001	0.002	0.01
2.0Ti-2.0Al	26.7	bal.	19.58	13.33	4.23	2.03	2.04	0.040	0.06	0.004	1.01	0.05	0.001	0.001	0.01
2.0Ti-2.5Al	30.2	bal.	19.60	13.41	4.25	2.02	2.49	0.042	0.06	0.005	1.00	0.04	0.001	0.001	0.01
2.0Ti-3.0Al	34.1	bal.	19.74	13.37	4.21	2.03	2.97	0.043	0.06	0.004	0.99	0.03	0.001	0.002	0.01
1.5Ti-2.5Al	28.1	bal.	19.70	13.54	4.25	1.53	2.51	0.041	0.06	0.005	1.01	0.05	0.001	0.002	0.01
1.5Ti-3.0Al	32.2	bal.	19.62	13.50	4.25	1.53	3.02	0.041	0.06	0.005	1.02	0.04	0.001	0.002	0.01
1.5Ti-3.5Al	36.0	bal.	19.60	13.57	4.15	1.53	3.50	0.041	0.06	0.004	1.00	0.04	0.001	0.001	0.01

57.6 ks, 空冷) の熱処理を施してから組織観察, 硫化実験及び高温引張試験に供した。

2-1-2 耐硫化性の評価

前記の方法で製造した6種類の試作合金と AISI 685 を, 10 × 18 × 5 mmに切り出して硫化試験片とした。

硫化雰囲気は, N₂-3%H₂-0.75%SO₂混合ガスによって, 熱力学的平衡状態における酸素分圧を実機とほぼ等しい 10^{-18.5} Paに設定すると共に, 硫化を優先的に起こさせるため, 硫黄分圧を実機より約5桁高い10^{-0.5} Paに設定した。試験ガスは, あらかじめ所定の濃度の混合ガスを充填したボンベを用意し, マスフロー制御により一定流量で反応槽に供給した。硫化温度は873 K, 時間は345.6 ksとした,

2-1-3 高温引張強度の評価

鍛造した試作合金と AISI 685 から, 試験部の径が6 mm, 長さ80 mmの丸棒試験片を切り出し, 高温引張試験に供した。高温引張強度特性は, 811 Kの大気中における引張強さ, 0.2%耐力, 破断伸び及び破断絞りを測定し, AISI 685のそれらと比較した。また, 鍛造性を評価するため, 鍛造温度域(1173~1373 K)における引張強さ, 破断伸び及び破断絞りを大気中で測定し, AISI 685のそれらと比較した。

2-2 実験結果と考察

2-2-1 試作合金の硫化特性

図1に, 試作合金と AISI 685の硫化後の質量増を示す。Ti添加量が同程度の合金間では, Al添加量が増えるにつれて質量増が小さくなる傾向が見られた。また, Al添加量が約3%以上の合金では, 質量増が AISI 685の約半分かそれ以下であった。写真1に示すように, AISI 685の腐食生成物は, Ni, Co硫化物の外層スケール/Co, Cr硫化物の中間層/Cr硫化物の内層/Cr, Mo, Ti, Al硫化物及び酸化物からなる最内層スケールの四層構造をとる。これは試作合金についても同様であった。

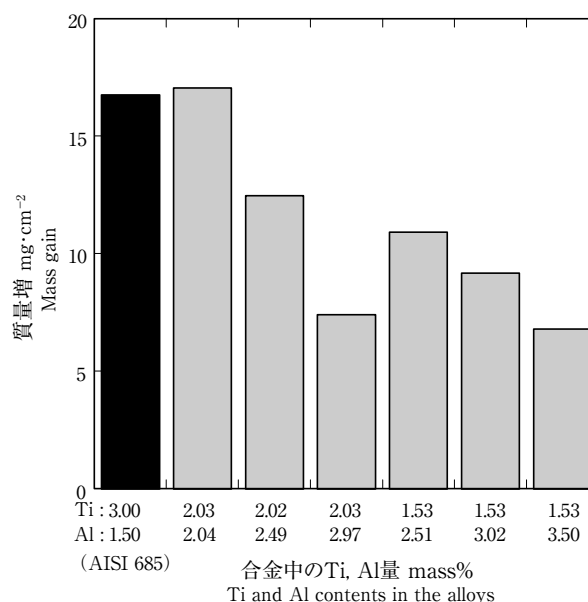


図1 Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al合金の硫化後の質量増 (N₂-3%H₂-0.75%SO₂中, 873 K, 345.6 ks)
Fig. 1 Effect of Ti and Al contents on the mass gain of wrought Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al alloys sulfidized in an N₂-3%H₂-0.75%SO₂ mixture, in which sulfur and oxygen partial pressures are 10^{-0.5} and 10^{-18.5} Pa respectively, at 873 K for 345.6 ks

AISI 685と試作合金の各腐食スケール層の厚さを図2に示す。これにより, Ti添加量が等しい合金間では, Al添加量の多いものほど各層ともに薄くなっている様子が分かる。2Ti-3Al, 1.5Ti-3.0Al及び1.5Ti-3.5Al合金では, 各層の厚さが AISI 685の約半分以下であった。このように, Al添加量を3.0%以上にすることで, 合金内部への侵食を半分近くにまで軽減できることが分かる。

図3に, AISI 685, 各試作合金に生成した最内層スケール中に含まれるS, O, Cr, Al, Ti及びMoの平均濃度を示す。各合金ともに, 最内層スケール中に含まれる

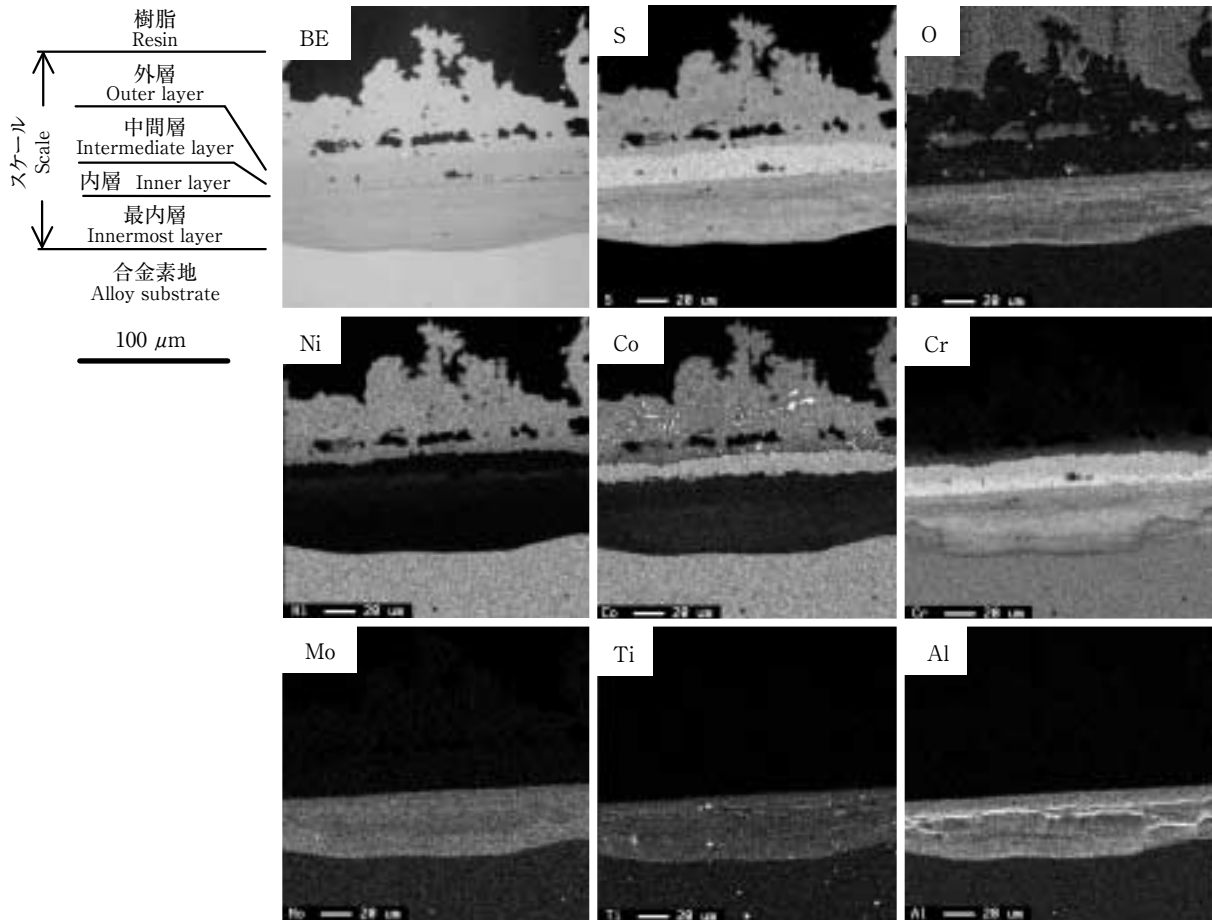


写真1 硫化後のAISI 685断面の反射電子像と特性X線像 (N_2 -3% H_2 -0.75% SO_2 中, 873 K, 345.6 ks)

Photo 1 Back-scattered electron images and the characteristic X-ray images of the cross-section of AISI 685 sulfidized at 873 K for 345.6 ks under an N_2 -3% H_2 -0.75% SO_2 mixture, in which sulfur and oxygen partial pressures are $10^{-0.5}$ and $10^{-18.5}$ Pa respectively

Cr, Mo量に大きな変化は見られなかった。Ti量は、AISI 685では約6.5 at% (原子パーセント)と大きい、試作合金はいずれも4 at%以下であり、また、Al/Ti原子%比が大きくなるにつれて徐々に小さくなる傾向が見られた。一方、Al量は、Al/Ti原子%比が増加するにつれて著しく大きくなり、AISI 685は約6 at% (原子パーセント)であるのに対して、1.5Ti-3.5Al合金では12.5 at% (原子パーセント)にまで濃縮されていた。また、ばらつきはあるが、Al添加量の多い合金は、最内層中の酸素の平均濃度が大きくなる傾向が見られた。以上の結果から、Al添加量が大きな合金は、内層スケール中にAl硫化物あるいは酸化物を多く含むことによって、硫黄の合金内部への拡散を抑制したため、合金内部への侵食が抑制されたものと考えられる。

2-2-2 試作合金の高温引張特性

811 Kの大気中における試作合金、AISI 685の引張強

さ、0.2%耐力、破断伸び及び破断絞りを図4に示す。Ti含有量が同程度の合金間では、 γ' 量が大きいものほど引張強さと0.2%耐力は大きく、伸び及び絞りは小さくなる傾向を示した。また、 γ' 量が同程度の合金間では、Ti含有量が多いものほど引張強さと0.2%耐力は大きく、逆に伸びと絞りは小さくなった。伸びと絞りに関しては、すべての試作合金がAISI 685と同等以上の値を示したが、引張強さ、0.2%耐力に関しては、2%Ti添加合金では2.5%以上のAl添加量 (計算上の γ' =30.2%)、1.5%Ti添加合金では3%以上のAl添加量 (計算上の γ' =32.2%)が必要であることが分かった。 Ni_3Al のAlサイトに原子サイズの大きなTiが固溶すると、歪みが大きくなり、強度が大きくなる⁶⁾。本実験では、試作合金のTi添加量をAISI 685よりも少なく設定したため、AISI 685と同等の引張強度を得るために、より多くの γ' 量が必要となったものと考えられる。

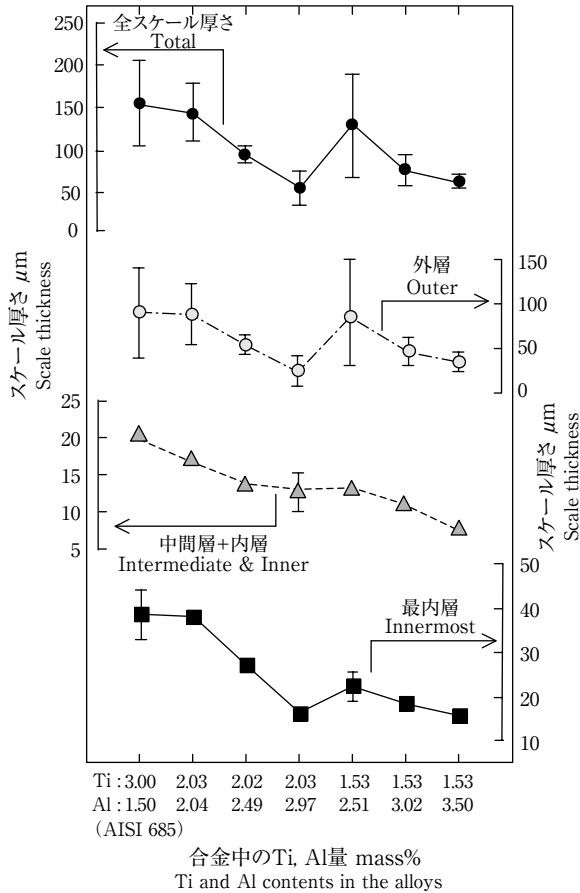


図2 試作合金に生成した各硫化物スケール層の厚さ (N₂-3%H₂-0.75%SO₂中, 873 K, 345.6 ks)
Fig. 2 Thickness of each corrosion scale layer on the wrought Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al alloys exposed in an N₂-3%H₂-0.75%SO₂ mixture, in which sulfur and oxygen partial pressures are 10^{-0.5} and 10^{-18.5} Pa respectively, at 873 K for 345.6 ks

図5に、1173～1373 Kの大気中における各試作合金、AISI 685の引張特性を示す。1323 K以上では、すべての特性においてAISI 685と試作合金の間に大きな差異は見られなかった。一方、1273 K以下ではすべての特性においてAISI 685と試作合金の間に差異が見られた。すなわち、引張強さに関しては、試作合金の中で計算上のγ'量が最も小さい2.0Ti-2.0Al合金がAISI 685よりも100 MPa程度小さくなり、γ'量がAISI 685よりも約7%多い1.5Ti-3.5Al合金は約100 MPa、約9%多い2Ti-3Al合金は100～200 MPa程度大きくなった。他の合金はAISI 685と同程度であった。一方、伸びと絞りに関しては、γ'量の大きな合金ほど小さくなり、γ'量がAISI 685よりも約7%以上多い2.0Ti-3.0Al、1.5Ti-3.5Al合金では、AISI 685よりも小さくなる傾向を示した。

以上の結果から、耐硫化性、使用環境における高温強

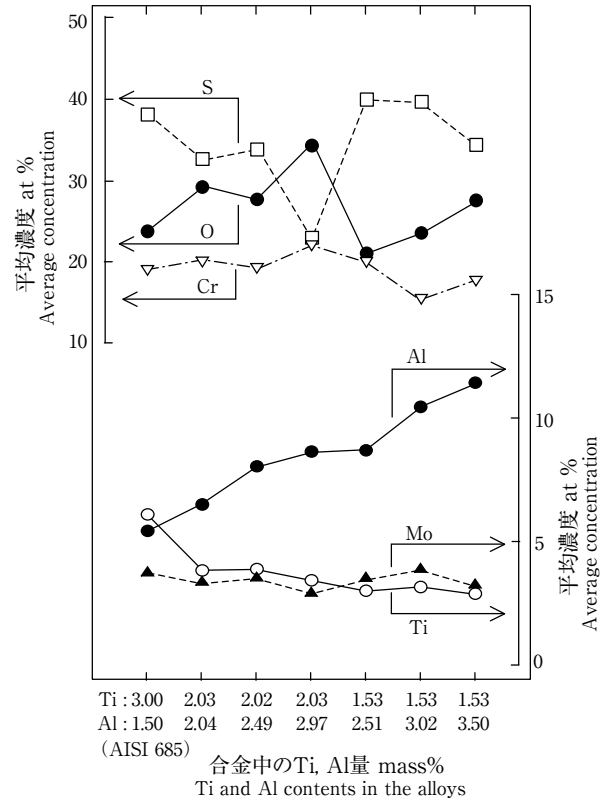


図3 試作合金に生成した最内層スケール中のS, O, Cr, Mo, Al及びTiの平均濃度 (N₂-3%H₂-0.75%SO₂中, 873 K, 345.6 ks)

Fig. 3 Average concentrations of S, O, Cr, Mo, Al and Ti in the innermost scale of the Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al alloys exposed in an N₂-3%H₂-0.75%SO₂ mixture, in which sulfur and oxygen partial pressures are 10^{-0.5} and 10^{-18.5} Pa respectively, at 873 K for 345.6 ks

度、熱間加工性を考慮して、1.5 mass%Ti-3.0 mass%Al合金が、ガスエキスパンダタービンのロータ材として最適であると判断した。

3. 耐硫化性新合金による模擬ディスクの製作

前節において、AISI 685合金の基本組成として、Ti, Al添加量をそれぞれ1.5 mass%, 3.0 mass%とした合金(本開発合金)が、ガスエキスパンダロータ材として最適であることを示した。そこで、この耐硫化性新合金製のロータ模擬ディスクの製作を試みた。

3-1 実験方法

3-1-1 直径500 mmのディスクの鍛造

ガスエキスパンダタービンのロータディスクは、直径850～1400 mmであり、自由鍛造で製造される場合と型鍛造で製造される場合とがある。鍛造機の容量の都合上、国内で鍛造できる最大のディスク径は1000 mmで

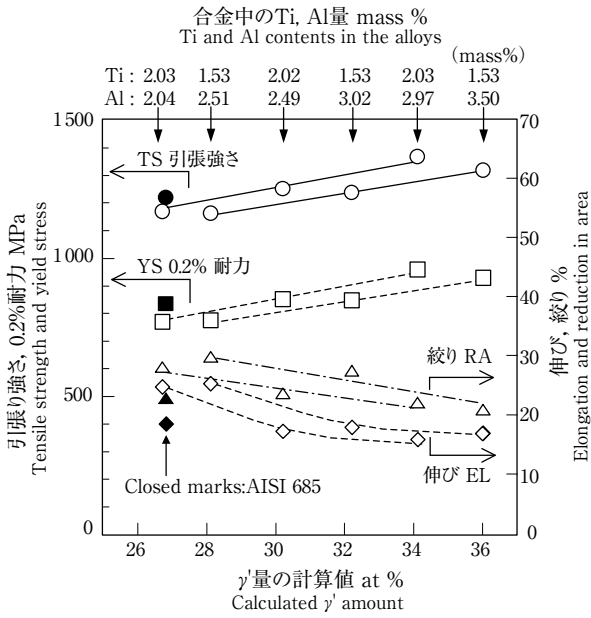


図4 811 Kの大気中における試作合金の引張特性

Fig. 4 Effect of Ti and Al contents on the tensile properties of wrought Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al alloys at 811 K in air
TS: Tensile Strength, YS: Yield Stress at 0.2% offset, RA: Reduction in Area, EL: Elongation

ある。ここでは、まず、国内の鍛造メーカーで鍛造される場合に用いられる自由鍛造法によって、径が実機の約1/2に当たる直径500×80 mmのロータ模擬ディスクを製作した。鍛造品の健全性は、外観検査、超音波探傷試験及び浸透探傷試験によって評価した。

3-1-2 クリーブ強度の評価

鍛造した500 mmの模擬ディスクのリムから径方向に棒状試験片を切り出し、100～1000 hクリーブ破断試験⁷⁾、ストレスリラクゼーション試験を実施した。ストレスリラクゼーション試験は、閉ループにおいて、塑性域における全歪みを一定に保ち、その際の応力弛緩速度からクリーブ速度を推定する方法である⁸⁾。閉ループにおいては、全歪み(ε_t)は、弾性歪み(ε_e)と非弾性歪み(ε_i)の和となり一定となる(式1)。したがって、非弾性歪速度(ε̇_i)は式(2)のように書ける。

$$\epsilon_e + \epsilon_i = \epsilon_t = \text{constant} \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{\epsilon}_i = -\dot{\epsilon}_e = -\frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Eは弾性係数、σは応力を表す。非弾性歪みは、クリーブ歪みとほぼ等しいと考えられるため、非弾性歪速度、すなわちクリーブ速度は、式(2)から弾性係数と応力の時間変化から求められる。ここでは、923、

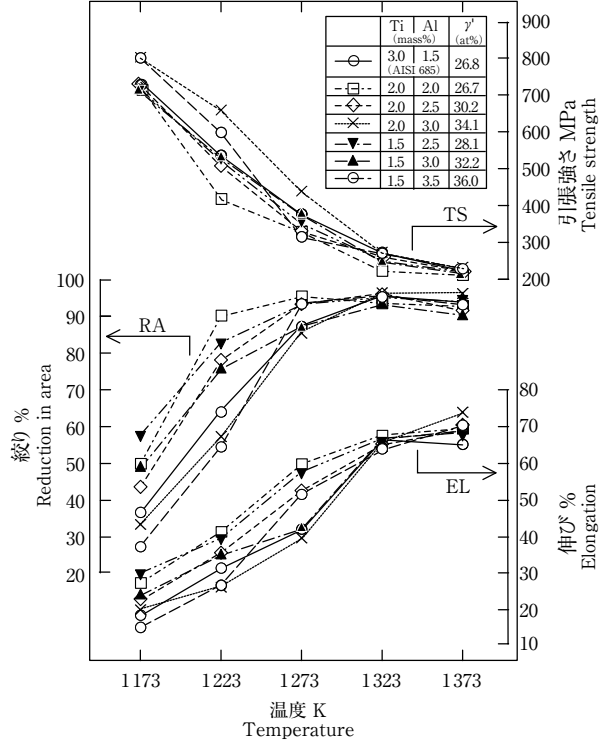


図5 1173～1373 Kにおける試作合金の引張特性

Fig. 5 Effect of Ti and Al contents on the tensile properties of wrought Ni-20Cr-13.5Co-4Mo-Ti-Al alloys at between 1173 and 1373 K
TS: Tensile Strength, RA: Reduction in area, EL: Elongation

973及び1023 Kの大気中において、全歪みを0.4, 1.3%とした。

3-1-3 切欠き破壊靱性の評価

切欠き破壊靱性は、コンスタントディスプレイスメント試験によって評価した。コンスタントディスプレイスメント試験は、試験片応力集中部にき裂が導入された場合、そのき裂の成長しやすさを、変位に対する応答荷重から判断する方法である⁹⁾。切欠き付きの丸棒試験片を一定変位速度で引っ張り、その際の応答荷重を変位に対して測定する。試験片にき裂が導入されるまでは、変位が大きくなるにつれて荷重も大きくなるが、試験片にき裂が導入されると、応答荷重は極大値を示し、その後き裂の進展と共に低下する。したがって、極大値を示した後、より少ない変位で荷重が急激に低下する材料は、き裂が進展しやすい材料であると判断できる。

以上を踏まえ、同じ条件下で本開発合金とAISI 685のコンスタントディスプレイスメント試験を実施し、本開発合金の切欠き破壊靱性を相対的に評価した。試験雰囲気は大気とし、試験温度は873, 923 K、定変位速度

表2 本開発合金製模擬ディスクの化学組成
Table 2 Chemical composition of the ϕ 500 mm disk of the developed alloy (mass%)

Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	C	Zr	B	Fe	Si	S	P	Mn
bal.	19.58	13.54	4.34	1.35	3.02	0.030	0.05	0.005	0.54	0.02	0.0005	0.002	0.01

表3 本開発合金製模擬ディスクの高温引張特性
Table 3 High temperature tensile properties of the rotor of AISI 685 and disk made of the developed alloy

	引張特性 Tensile properties (810 K)				クリープ破断 Creep rupture (518 MPa/1005 K)		結晶粒度 ASTM grain size
	YS/0.2% (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	Time (h)	EL (%)	
仕様値 Specification of the rotor of AISI 685	725	1070	15	18	23	10	4 or finer
本開発合金 ϕ 500 mm disk of the developed alloy	780	1147	26.4	32.0	47.9	23.6	4.5

を 7.5×10^{-5} mm/s とした。

3-2 実験結果及び考察

3-2-1 直径500 mm 模擬ディスクの鍛造

せん断破壊や座屈などの問題なく健全に鍛造することができた。また、超音波探傷試験、浸透探傷試験の結果、鍛造傷は検出されず、欠陥がないことが確認された。

表2に、本模擬ディスクの化学組成を示す。また、表3に、高温引張特性を示す。表3には、ガスエキスパンダロータ用 AISI 685 の仕様値も併せて示す。これにより、本開発合金製ディスクがガスエキスパンダロータディスクとして十分な引張特性をもつことが分かる。

3-2-2 クリープ強度

図6に、クリープ破断試験結果のラルソン・ミラープロット¹⁰⁾を示す。比較のため、文献¹¹⁾より引用した AISI 685 のプロットも併せて示す。図6から、クリープ破断試験から得た本開発合金のクリープ破断強度は、AISI 685 と同程度であることが分かる。

図7に、ストレスリラクゼーション試験から得た本開発合金、AISI 685 のクリープ速度から見積もった、1% クリープ時間のラルソン・ミラープロットを示す。これらのラルソン・ミラー主クリープ曲線から、本開発合金の1% クリープ強度は、低温・高応力側では AISI 685 と同程度であり、高温・低応力側においては、AISI 685 よりもクリープ強度が大きくなると推定される。

3-2-3 切欠き破壊靱性

図8に、コンスタントディスプレイメント試験から得た本開発合金と AISI 685 の変位-応力曲線を示す。

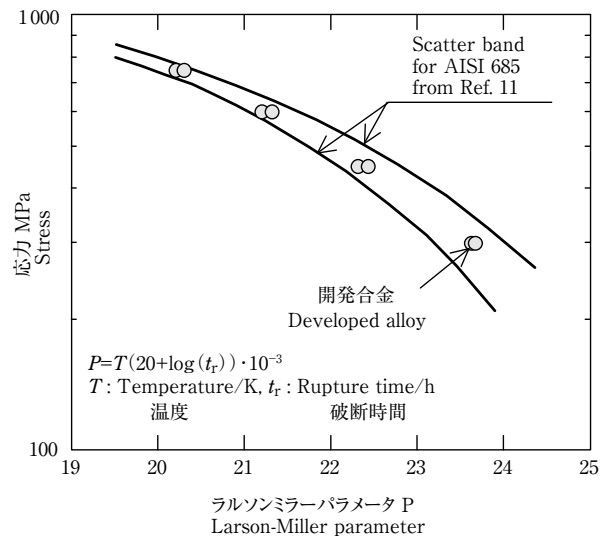


図6 本開発合金と AISI 685^[11] のラルソンミラー主クリープ曲線
Fig. 6 Larson-Miller master curves of the creep rupture for the developed alloy and AISI 685^[11]

873, 923 K のいずれにおいても、応答応力の極大値、極大値を示した後の応力低下こう配が、本開発合金と AISI 685 との間で大きな差異が見られない。したがって、大気中における本開発合金の切欠き破壊靱性は、AISI 685 と同程度であると判断できる。

以上の結果から、本開発合金は、AISI 685 と比較して、運転温度域において同等のクリープ強度と切欠き破壊靱性をもつと判断できる。したがって、ガスエキスパンダタービンロータに本開発合金を用いることによ

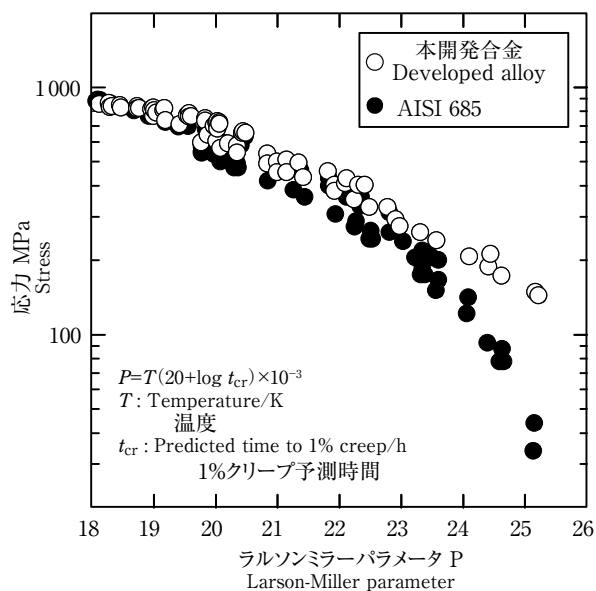


図7 ストレスリラクセーション試験から得た本開発合金とAISI 685の1%クリープ時間予測曲線

Fig. 7 Larson-Miller master curves of the predicted time to 1% creep by the stress relaxation testing for the developed alloy and AISI 685

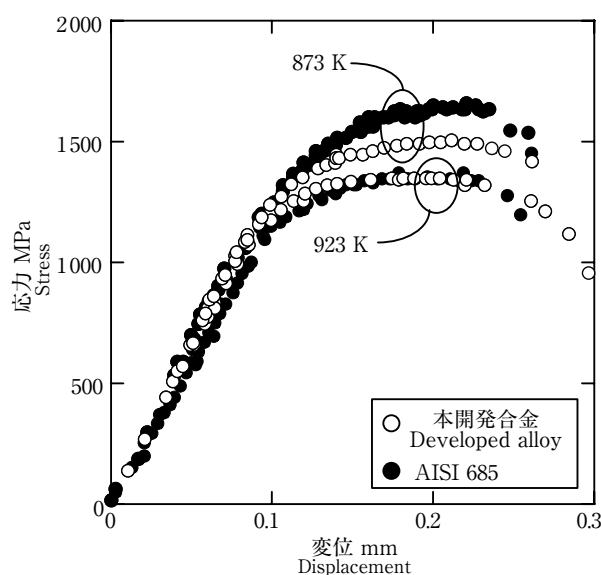


図8 コンスタントディスプレイースメントレート試験による変位-応力曲線

Fig. 8 Stress vs. displacement plots for the developed alloy and AISI 685 at 873 and 923 K



写真2 本開発合金製ガスエキスパンダディスク (φ1400 mm)
Photo 2 Appearance of the φ1400 mm gas expander turbine disk made of the developed alloy



写真3 本開発合金製ガスエキスパンダ動翼
Photo 3 Appearance of the gas expander rotating blade made of the developed alloy

て、従来と同等の機械的特性を維持しながら腐食寿命を延伸することができるものとする。

4. 本開発合金製ガスエキスパンダタービンロータの製作

以上の模擬ディスク製作を基に、FCCガスエキスパンダとして最大級である、直径1400 mmの実機ガスエキスパンダディスクと動翼の製造を試みた。

その結果、ディスク、動翼のいずれも、直径500 mmの模擬ディスクと同様に、せん断破壊や座屈などの問題はなく鍛造され、また超音波探傷・浸透探傷試験の結果、鍛造欠陥も認められなかった。

写真2, 3に、鍛造した開発合金製実機ディスク、動

翼の外観写真をそれぞれ示す。また、このディスクのリム、動翼のプラットフォーム部から切り出した試験片を用いた高温引張試験結果、クリープ破断試験結果を表4に示す。これにより、本開発合金製ディスク、動翼は、すべての特性において、FCCガスエキスパンダタービンディスクとして十分な値を示していることが確認された。

5. 結 言

(1) ガスエキスパンダロータ材の耐硫化性を向上させるため、従来材であるAISI 685よりAlを増量し、Tiを減量した合金を6種類試作した。これらを、873 Kでの硫化腐食試験、811 Kでの引張試験及び1173 - 1373 K

表4 本開発合金製ガスエキスパンダディスク、動翼の高温引張特性
Table 4 High temperature mechanical properties of the ϕ 1400 mm gas expander turbine disk and rotating blade made of the developed alloy

	引張特性 Tensile properties (810 K)				クリープ破断 Creep rupture (518 MPa/1005 K)	
	YS/0.2% (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	Time (h)	EL (%)
仕様値 Specification of the rotor of AISI 685	725	1070	15	18	23	10
本開発合金製ディスク ϕ 1400 mm disk of the developed alloy	792	1178	20.5	18.8	101.0	36.9
本開発合金製動翼 Rotating blade of the developed alloy	788	1081	26.3	23.4	68.9	43.6

での熱間加工性試験に供した結果、1.5 mass%Ti-3.0 mass%Al合金が耐硫化性、高温強度、及び熱間加工性のすべてにおいて総合的に最も優れていると判断され、ガスエキスパンダロータ材用耐硫化腐食性Ni基超合金とした。本開発合金は、AISI 685と同程度の強度特性及び熱間加工性を有しながら、耐高温硫化腐食性が約2倍近く優れている。

(2) 本開発合金で、直径500 mmの実機エキスパンダ模擬ディスクを鍛造した。このディスクから切り出した試験片から、クリープ破断試験、ストレスリラクセーション試験、及びコンスタントディスプレイースメント試験を行ったところ、AISI 685と同等以上のクリープ特性、切欠き破壊靱性をもつことが分かった。

(3) 本開発合金で、直径1400 mmの実機ガスエキスパンダディスクの製造に成功した。また、このエキスパンダディスクのリムから切り出した試験片は、ガスエキスパンダディスクとして十分な常温引張強度、高温引張強度、及びクリープラプチャー強度を示した。

なお、ストレスリラクセーション試験とコンスタントディスプレイースメント試験の実施、データに対するディスクカッション及び本合金製実機エキスパンダディスクの製造についてはElliott Turbomachinery Inc.社（現Elliott Ebara）のPhillip Dowson氏に協力を頂いた。

謝 辞

本合金開発を進めるにあたって合金の試作及び強度特性評価に全面的にご協力して頂いた、日立金属(株)大野丈博博士をはじめ日立金属(株)安来工場の皆様に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) P. Dowson, D.M. Rishel & N.S. Bornstein : Proc. 24th Turbo-machinery Symp., p11 (1995).
- 2) 八鍬, 宮坂, 成田 : Zairyo-to-Kankyo (材料と環境), 48 (5), 299 (1999).
- 3) 八鍬, 高橋, 中浜, 河崎, 成田 : エバラ時報, No.188, p3 (2000).
- 4) 八鍬, 宮坂, 方, 成田 : Zairyo-to-Kankyo (材料と環境), 49 (7), 420 (2000).
- 5) 八鍬, 高橋, 中浜, 方, 成田 : エバラ時報, No.194, p3 (2002).
- 6) P.H. Thornton, R.G. Davies and T.L. Johnston : Met. Trans., 1, 207 (1970).
- 7) 日本規格協会 : “JIS Z 2272, 金属材料の引張クリープ破断試験方法”, (1993).
- 8) D.A. Woodford : Proc. of 6th International Conference on Creep and Fatigue, p61 (1996).
- 9) J.J. Pepe and D.C. Gonyea : Proc. of Intl. Conf. on Fossil Power Plant Rehabilitation, (ASM International), p39 (1989).
- 10) F.R. Larson and J. Miller : Trans. ASME, 74, 765 (1952).
- 11) The ASTM-ASME-MPC Joint Committee on Effect of Temperature on the Properties of Metals, ASTM Data Series DS7-S1 (1968).