

## 技術報告

UDC 669.14.018.44 : 669.15'26'292'294'786-194 :  
620.17 : 539.434 : 620.18 : 621.165-233

## 蒸気タービン用 12Cr ロータの機械的性質\*

河合 光雄\*\*・川口 寛二\*\*・吉田 宏\*\*\*

金沢 暎\*\*\*\*・三戸 暁\*\*\*\*\*

## Mechanical Properties of 12% Cr Steel Forging for Large Steam Turbine

Mitsuo KAWAI, Kanji KAWAGUCHI, Hiroshi YOSHIDA

Ei KANAZAWA, and Satoru MITO

## Synopsis:

In order to develop a new rotor forging, for compact designed larger steam turbine, which has higher mechanical properties than 1Cr-1Mo-0.25V rotor at elevated temperature, an investigation has been carried out on the mechanical properties and the uniformity of 12Cr-Mo-V-Ta-N model rotor and high and intermediate pressure rotor for 375 MW steam turbine.

12Cr-Mo-V-Ta-N rotor has better room temperature tensile strength and impact value than 1Cr-1Mo-0.25V rotor, in the part of shaft, body surface and body center. Creep rupture strength of 12Cr-Mo-V-Ta-N rotor, one of the most important properties, is also higher than 1Cr-1Mo-0.25V rotor and its uniformity is excellent.

It is expected that a newly developed 12Cr-Mo-V-Ta-N rotor with good mechanical properties and soundness can be applicable for larger steam turbine.

## 1. 緒 言

火力発電用蒸気タービンの性能向上には、使用蒸気の高温・高圧化や大容量化など各種の方法が考えられるが、蒸気タービンの大容量化は熱効率向上の寄与が大きく燃料の節約に貢献するため、逐年大容量化の傾向にある。

ところで、火力蒸気タービンの高圧あるいは中圧用ロータには従来 1Cr-1Mo-0.25V ロータが使用されているが、今後の蒸気タービンの大容量化を考えた場合、従来のロータでは特に中圧部で材料強度の余裕が少ないことから<sup>1)</sup>、経済的に不利な設計を余儀なくされる場合が多い。

この問題の解決策としては同じ温度条件下において強度の高い材料を使用したロータに蒸気環状面積の大きな羽根を植込み、高出力化する方法が考えられる。

そこで筆者らはこの考えをもとに今後の大容量蒸気タービンに使用する高圧あるいは中圧ロータ用材料として

12%Cr 基鋼を選定し基礎実験を行なった結果を前報<sup>2)</sup>に報告した。

本報告は前報で得られた知見をもとに、重量 2.5 t のモデルロータを試作し、鋼塊の健全性ならびに機械的性質とその均一性を調査検討したのち、この結果をもとに 375MW 蒸気タービン用高・中圧一体型ロータの製造を行ない、鋼塊の健全性および機械的性質とその均一性について調査検討したものである。

## 2. モデルロータ

## 2.1 試料および試験

## 2.1.1 試 料

実験に供した試料は 12%Cr-1%Mo-0.2%V 鋼に Ta と N を複合添加したもので、塩基性電気炉を使用して溶解後、真空鑄造を行ない重量 2.5 t の鋼塊を得たのち、胴部外径 710 mm  $\phi$  (鍛造比 3.1)、軸部外径 260 mm  $\phi$  (鍛造比 21.4) の形状に鍛造後粗削りを行ない、次いで

\* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 2 月 7 日受付 (Received Feb. 7, 1977)

\*\* 東京芝浦電気(株)総合研究所 金属セラミック研究所 (Metals and Ceramics Lab., Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd., 1 Toshiba-cho Komukai Saiwai-ku Kawasaki 210)

\*\*\* 東京芝浦電気(株)総合研究所 金属セラミック研究所 工博 (Metals and Ceramics Lab., Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.)

\*\*\*\* 東京芝浦電気(株)タービン工場 (Turbine Works, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.)

\*\*\*\*\* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University)

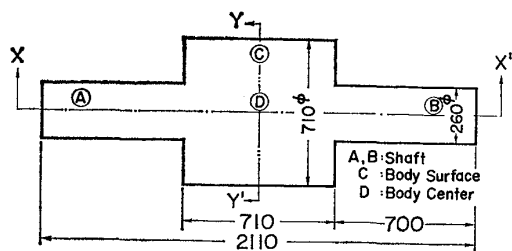


Fig. 1. Shape of model rotor and test position.

1050°C × 15 h → 油焼入れ → 575°C × 15 h → 炉冷 → 640°C × 30 h → 炉冷の調質<sup>2)</sup>を施したものである. Fig. 1 にモデルロータの形状と試験片採取位置を示す.

### 2.1.2 試験

試験は超音波探傷, 磁粉探傷を行なったのち, 各部を切断してサルファプリント, 疵見試験, 化学分析による偏析調査, 組織観察, 引張試験, 疲労試験およびクリープ破断試験を行なった.

なお, 超音波探傷試験には FD-4 型探傷器を, 疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機を, またクリープ破断試験は前報と同様に単式クリープ試験機を使用した.

## 2.2 結果および考察

### 2.2.1 モデルロータの健全性

超音波探傷および磁粉探傷は調質前粗削りおよび調質

Table 1. Chemical composition of model rotor. (%)

|            | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | V    | Ta   | N     | Fe   |
|------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Position A | 0.21 | 0.35 | 0.63 | 0.013 | 0.007 | 0.39 | 11.29 | 0.97 | 0.21 | 0.09 | 0.035 | Bal. |
| B          | 0.23 | 0.34 | 0.65 | 0.014 | 0.006 | 0.39 | 10.90 | 0.84 | 0.22 | 0.10 | 0.041 | Bal. |
| C          | 0.19 | 0.37 | 0.71 | 0.014 | 0.011 | 0.35 | 11.02 | 0.87 | 0.21 | 0.11 | 0.042 | Bal. |
| D          | 0.21 | 0.32 | 0.66 | 0.014 | 0.007 | 0.43 | 11.09 | 0.84 | 0.19 | 0.08 | 0.039 | Bal. |

後に行なった. 超音波探傷の結果は 5MHz V<sub>44</sub> 100% および 60% の条件とも欠陥は検出されず, また磁粉探傷の結果も同様に欠陥は検出されなかった.

サルファプリントおよび目視による疵見は調質後 Fig. 1 に示した X-X' 断面および Y-Y' 断面について実施した.

サルファプリントの結果は濃厚な偏析はほとんど認められず, また疵見結果は巣やき裂などの欠陥は全くなく健全なロータであつた.

Table 1 にモデルロータ各部より採取した試料の化学分析結果を, また Photo. 1 に光学顕微鏡組織を示す.

表より明らかなように試料採取位置による化学成分の変動は小さく, また写真より明らかなように各部とも均一な焼戻しマルテンサイト組織で, 結晶粒の大きさもほぼ同程度であり良好な鋼塊であることがわかる.

ところで 12%Cr 基鋼の蒸気タービンロータへの適用に

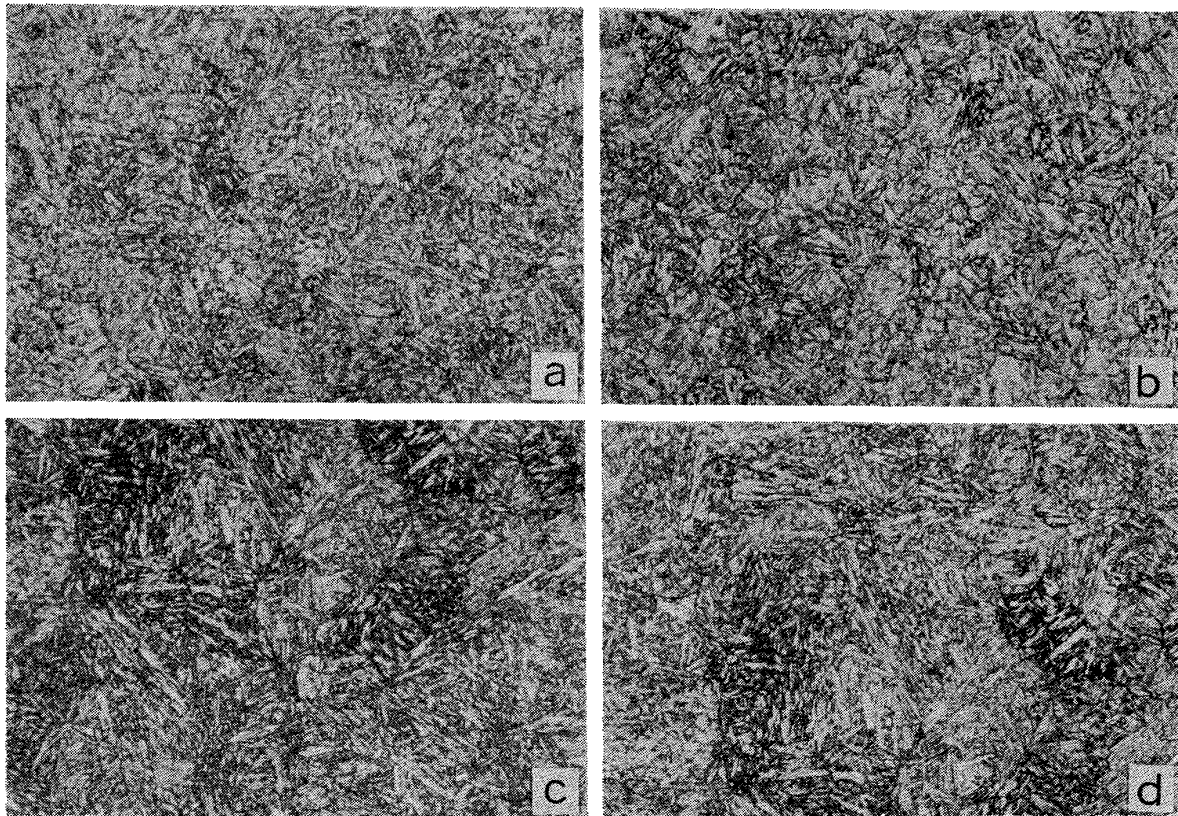


Photo. 1. Microstructure of model rotor. (×200)

a) location A, b) location B, c) location C, d) location D

関する研究は D. L. NEWHOUSE<sup>3)</sup> や阪部<sup>4)</sup>らが行なっており、鋼塊の健全性については阪部らが重量 9 t の 12 Cr-1Mo-0.2V 鋼製ロータで検討している。その結果 12 %Cr 基鋼はロータ材料として十分その使用が可能であるとしているが、本実験供試モデルロータも阪部らの結果と同様に欠陥は全く認められないことから、健全性については十分蒸気タービン用ロータとして使用が可能であると言える。

### 2.2.2 モデルロータの機械的性質

モデルロータ各部より採取した試験片の機械的性質を Table 2 および Fig. 2 ~ Fig. 4 に示す。

Table 2 は引張試験および衝撃試験結果で、室温の引張強さおよび耐力は軸部が最も高い値であり、次いで胴表層部、胴中心部の順となっている。

伸び、絞りについてみると、胴中心部は試験片採取方向の差がほとんど認められないが、胴表層部および軸部は試験片採取方向による差が若干認められ、軸方向に採取した試料の方が半径方向に採取した試料よりもすぐれている。

衝撃値および 50% FATT は軸部が最も良い値を示し、次いで胴表層部、胴中心部の順になっている。なおこの衝撃試験結果も前述した伸び、絞りと同様に試験片採取方向により若干の差が認められる。

この引張試験結果や衝撃試験結果で認められる試験片採取位置および方向による機械的性質の差は、鍛造比および鍛伸による繊維組織によるものと考えられる。

Fig. 2 はモデルロータ各部の半径方向に採取した試料の高温引張試験結果で、蒸気タービンの高圧あるいは中圧用ロータとして重要な 500°C 以上での機械的性質はほとんど差が認められず、良好な均一性がうかがえる。なお、軸方向に採取した試料も同様な結果であった。

Fig. 3 に回転疲労試験結果を示す。図より明らかなように疲労強さは軸部が最も高い値を示し、次いで胴表層部、胴中心部の順となっている。この結果は前述した引張試験および衝撃試験結果と同様に鍛造比の差によるものと考えられる。

Fig. 4 はモデルロータ各部より半径方向に採取した試料のクリープ破断試験結果で、図より明かなように軸部、胴表層部および胴中心部とも高温引張試験結果と同様にクリープ破断強さの差はほとんどなく、高温での機械的性質の均一性が良好であることがうかがえる。なお軸方向に採取した試料もほとんど同じ結果であった。

ところで、供試材であるモデルロータは 12%Cr-1%Mo-0.2%V 鋼に Ta と N を複合添加し Ta(C<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>) を微細に分散析出させてクリープ破断強さを向上したも

Table 2. Mechanical properties of model rotor.

| Test position and direction | Tensile test                     |                            |         |          | Impact test                       |               |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------|----------|-----------------------------------|---------------|
|                             | 0.02% Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | El. (%) | R.A. (%) | 2V Charpy (kg-m/cm <sup>2</sup> ) | 50% FATT (°C) |
| A Radial                    | 74.1                             | 100.3                      | 16.5    | 38.5     | 2.3                               | 53            |
| A Longitudinal              | 73.7                             | 99.1                       | 18.0    | 51.0     | 3.2                               | 40            |
| C Radial                    | 73.2                             | 94.8                       | 17.0    | 43.0     | 2.1                               | 63            |
| C Longitudinal              | 73.5                             | 98.4                       | 19.0    | 53.0     | 2.3                               | 61            |
| D Radial                    | 72.4                             | 95.9                       | 15.5    | 39.0     | 1.8                               | 71            |
| D Longitudinal              | 72.6                             | 97.5                       | 15.5    | 39.5     | 1.9                               | 67            |

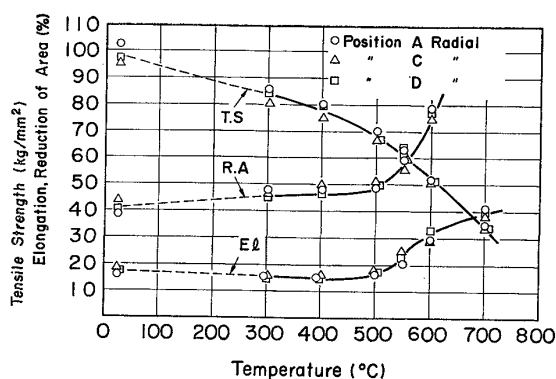


Fig. 2. Tensile properties of 12Cr-Mo-V-Ta-N model rotor at elevated temperature.

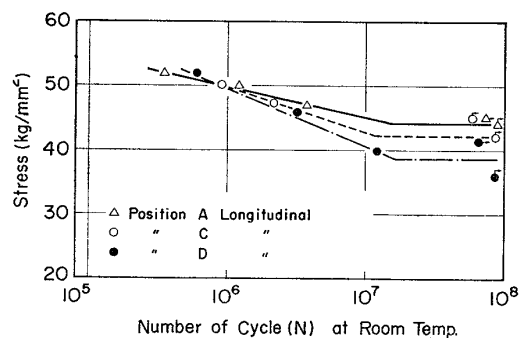


Fig. 3. Fatigue strength of model rotor.

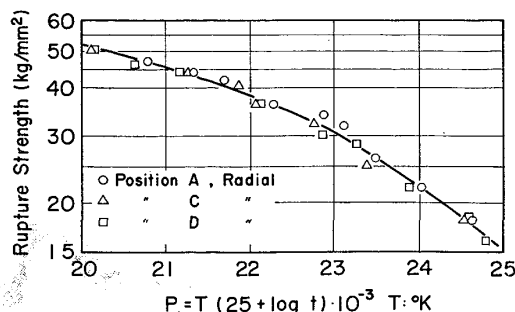


Fig. 4. Creep rupture strength of model rotor.

ので、そのクリープ破断強さは  $\sigma_{Rup. at 550^{\circ}C, 1000h} = 25 + 30Ta\% + 225N\%$  の近似式で表わされる<sup>2)</sup>。そこでこの近似式を用いてモデルロータ各部の実測値と計算値の比較を行なった。Fig. 5 にその結果を示す。図より明ら

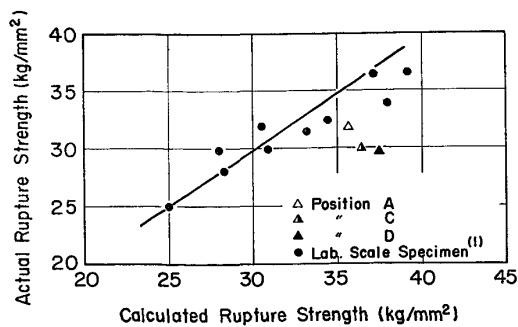


Fig. 5. Relation between actual and empirically calculated creep rupture strength of model rotor, at 550°C, 1000h.

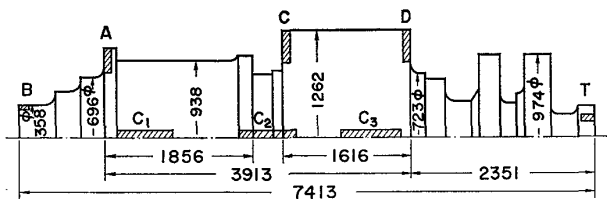


Fig. 6. Shape of high and intermediate pressure rotor for 375MW steam turbine and test position.

かなように、供試材であるモデルロータのクリープ破断強さは各部とも計算値より若干低い値であり、胴部においてその傾向が大きい。

この理由としては供試材であるモデルロータのC+N含有量が若干多い<sup>2)5)</sup> ことおよび胴部の鍛造比が少ないことによると考えられる。

### 3. 375MW 蒸気タービン用ロータ

#### 3.1 試料および実験

##### 3.1.1 試料

実験に供した試料は 375 MW 蒸気タービン用の実機高・中圧一体型ロータで、塩基性電気炉を使用して溶解後、真空鋳造を行ない 90 t の鋼塊を得た。次いで鍛造調質前粗削りを行なったのち 1050°C × 22 h → 油焼入れ → 570°C × 49 h → 炉冷 → 640°C × 60 h → 炉冷の調質を施したものである。Fig. 6 に供試ロータの形状と試験片採取位置を示す。

##### 3.1.2 試験

試験は超音波探傷試験、疵見試験を行なったのち、各部より採取した試験片を用いて、化学分析による偏析調査、組織観察、引張試験、衝撃試験およびクリープ破断試験を行なった。なお、超音波探傷試験には SM-10B 探傷器を、中心孔疵見試験にはオフナ型 55 ミリボアスコープを使用した。

Table 3. Chemical composition of High and Intermediate Pressure rotor for 375MW steam turbine (%).

|                | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   |
|----------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Position T     | 0.18 | 0.27 | 0.63 | 0.016 | 0.018 | 0.30 | 10.3 | 0.94 |
| A              | 0.18 | 0.27 | 0.62 | 0.016 | 0.017 | 0.30 | 10.3 | 0.94 |
| C <sub>1</sub> | 0.17 | 0.26 | 0.61 | 0.016 | 0.018 | 0.30 | 10.3 | 0.92 |
| C <sub>2</sub> | 0.17 | 0.27 | 0.61 | 0.016 | 0.017 | 0.30 | 10.3 | 0.93 |

|                | V    | Ta    | N      | Co   | Al    | Ti  | Sn    | Fe   |
|----------------|------|-------|--------|------|-------|-----|-------|------|
| Position T     | 0.25 | 0.095 | 0.0417 | 0.02 | 0.003 | Tr. | 0.017 | Bal. |
| A              | 0.25 | 0.089 | 0.0412 | 0.02 | 0.003 | Tr. | 0.016 | Bal. |
| C <sub>1</sub> | 0.24 | 0.080 | 0.0400 | 0.02 | 0.003 | Tr. | 0.008 | Bal. |
| C <sub>2</sub> | 0.25 | 0.095 | 0.0407 | 0.02 | 0.003 | Tr. | 0.010 | Bal. |

#### 3.2 結果および考察

##### 3.2.1 375MW 実機蒸気タービンロータの健全性

超音波探傷試験は調質前後および中心孔明け後に、2.25MHz, B=75 mm および高感度で行なつたが、欠陥エコーは全く認められず、また疵見試験の結果も同様にロータ全表面および中心孔ともに巣やき裂は全くなく健全なロータであることが確認された。

Table 3 にロータ各部より採取した試料の化学分析結果を、Photo. 2 に光学顕微鏡組織を示す。

表より明らかなように試料採取位置による化学成分の変動は少なく、また写真より明らかなように鍛造比が少ないためか胴中心部の結晶粒が若干粗い傾向が認められるが、各部とも均一な焼戻しマルテンサイト組織でありフェライトの混存もないことから、前述した超音波探傷試験や疵見試験の結果とともに健全なロータであることがわかる。

##### 3.2.2 375MW 実機蒸気タービンロータの機械的性質

ロータ各部より採取した試験片の機械的性質を Table 4 および Fig. 7 に示す。

Table 4. Mechanical properties of High and Intermediate Pressure rotor for 375MW steam turbine.

| Test position<br>and direction | Tensile test                        |                               |            |             | Impact test                          |                 |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|--------------------------------------|-----------------|
|                                | 0.02% Y.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) | R.A.<br>(%) | 2V Charpy<br>(kg-m/cm <sup>2</sup> ) | 50% FATT<br>(%) |
| T Longitudinal                 | 72.2                                | 96.5                          | 21.0       | 56.4        | 3.4                                  | 58              |
| B Longitudinal                 | 73.8                                | 95.8                          | 20.0       | 54.2        | 3.0                                  | 56              |
| A Radial                       | 73.1                                | 94.3                          | 17.5       | 44.2        | 2.2                                  | 64              |
| C Radial                       | 72.3                                | 95.3                          | 16.7       | 43.1        | 2.4                                  | 59              |
| D Radial                       | 72.0                                | 95.2                          | 16.2       | 40.5        | 2.2                                  | 69              |
| C <sub>1</sub> Longitudinal    | 71.5                                | 93.4                          | 18.2       | 50.5        | 2.9                                  | 61              |
| C <sub>2</sub> Longitudinal    | 69.4                                | 92.2                          | 19.0       | 53.3        | —                                    | —               |
| C <sub>3</sub> Longitudinal    | —                                   | —                             | —          | —           | 2.4                                  | 61              |

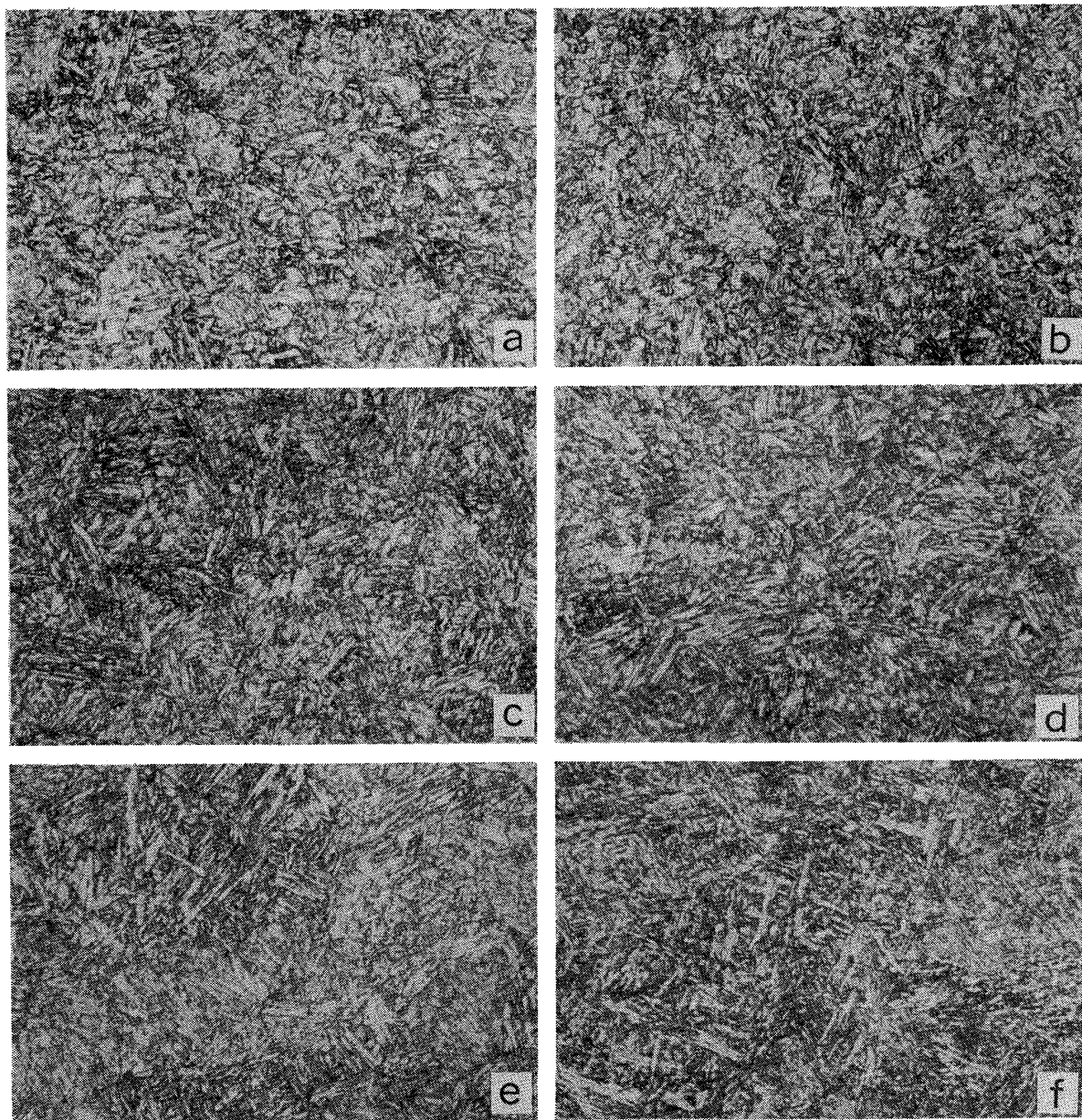


Photo. 2. Microstructure of 375MW H.I.P. rotor for steam turbine. ( $\times 200$ )

a) position B, b) position T, c) position A  
d) position D, e) position C<sub>1</sub>, f) position C<sub>3</sub>

Table 4 は引張試験および衝撃試験結果で、引張強さ耐力とも前述したモデルロータと同様に鍛造比の大きい軸部が最も高い値を示し、胴中心部が低い傾向を示すがその差は小さく、また伸び、絞りおよび衝撃値も同様な傾向である。

ここで従来より火力蒸気タービンの高圧あるいは中圧用ロータとして使用されている 1Cr-1Mo-0.25V ロータと本実験供試材である 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータの機械的性質を比較してみると、引張強さおよび耐力とも、軸部、胴表層部で 10% 以上、胴中心部で 7% 以上、本実験供試材の 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータの方がすぐれ

ている。

また、ロータ中心部の 50% FATT も従来の 1Cr-1Mo-0.25V ロータの 120~130°C に対し、本実験供試ロータは 61°C と低い値で、靱性もすぐれている。

Fig. 7 はロータ各部より採取した試料のクリープ破断試験結果で、図より明らかなように平滑試験材および切欠き試験材とも高温長時間側で急激な強度の低下は見られず、また切欠き試験材の方が高温長時間側まで平滑試験材より高い値を示すとともに、各試験片採取位置によるクリープ破断強さの差もほとんど認められず、高温クリープ破断強さおよびその均一性にすぐれたロータであ

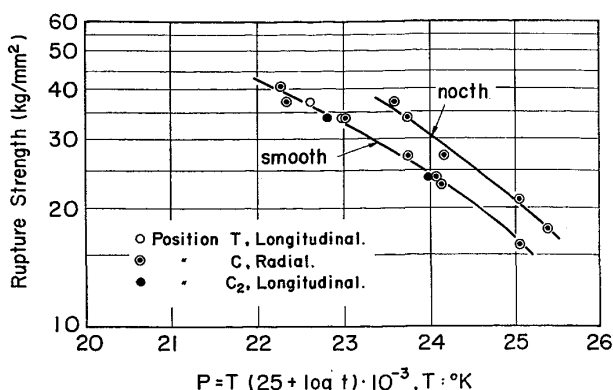


Fig. 7. Creep rupture strength of High and Intermediate Pressure rotor for 375MW steam turbine.

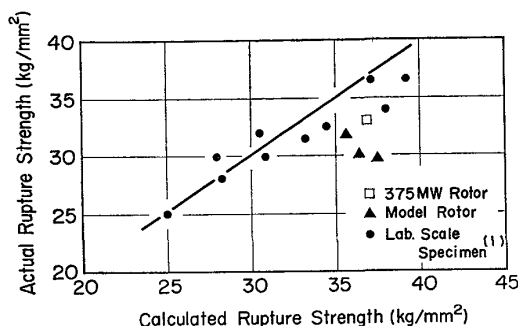


Fig. 8. Relation between actual and empirically calculated creep rupture strength of High and Intermediate Pressure rotor for 375 MW steam turbine. at 550°C, 1,000h.

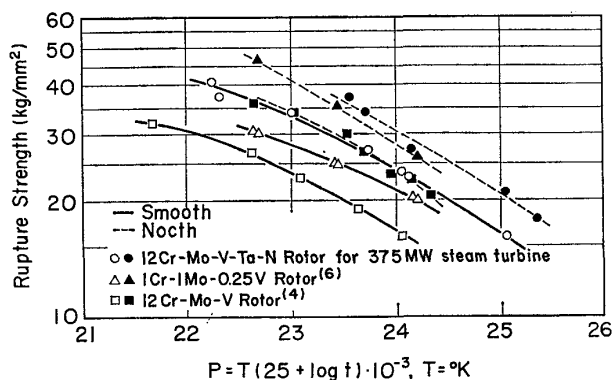


Fig. 9. Creep rupture strength on rotor body surface of 12Cr-Mo-V-Ta-N rotor, 1Cr-1Mo-0.25V rotor and 12Cr-Mo-V rotor.

と言える。

ここで、本実験供試材である 375MW 蒸気タービン用の 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータのクリープ破断強さについて、前述したモデルロータと同様に  $\sigma_{Rup. at 550^\circ C, 1000h} \approx 25 + 30Ta\% + 225N\%$  の近似式で比較検討してみると Fig. 8 に示すようにクリープ破断強さは実験室規模の少量溶解試験材の強さとほぼ同程度であり、化学成分のバ

ランスや鍛造、熱処理などが良好であつたことがうかがえる。

ところで、蒸気タービンの高圧あるいは中圧用ロータとして最も重要な動翼埋込部であるロータ胴表層部のクリープ破断強さについて、本実験供試材の 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータと 1Cr-1Mo-0.25V ロータ<sup>6)</sup>および 12Cr-Mo-V ロータ<sup>4)</sup>を比較検討した。この結果を Fig. 9 に示す。

図より明らかなように、本実験供試材の 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータのクリープ破断強さは 1Cr-1Mo-0.25V ロータに比べ平滑試験材で 15~20% 以上、切欠き試験材で 10~15% 以上高い値であり、また Ta および N を含まない 12Cr-Mo-V ロータに比べはるかにすぐれたクリープ破断強さを有していることが確認された。

#### 4. 結 言

大容量蒸気タービンの高圧および中圧用ロータの開発を目的に 12Cr-Mo-V-Ta-N 鋼製の重量 2.5 t のモデルロータを試作しその鋼塊の健全性と機械的性質について調査検討を行なうとともに、その結果をもとに 375MW 実機高・中圧一体型ロータの製造を行ない、鋼塊の健全性と機械的性質について調査検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

1) 超音波探傷試験、疵見試験、化学分析による偏析調査などの結果、材料欠陥は全く認められず健全なロータであることが判明した。

2) 引張強さや衝撃値などの室温の機械的性質は、鍛造比の多少により軸部、胴表層部、胴中心部の順に若干低くなる傾向が認められるが、その差は小さい。

3) 高温引張強さおよびクリープ破断強さは軸部、胴表層部、胴中心部ともほとんどその差は認められず、高温機械的性質のすぐれたロータであることが確認された。

4) 従来、火力蒸気タービンの高圧あるいは中圧用ロータとして使用されている 1Cr-1Mo-0.25V ロータに比べ、本実験供試材の 12Cr-Mo-V-Ta-N ロータは室温および高温の機械的性質がすぐれ、またその均一性も良く、鋼塊の健全性も良好なことから、今後の大容量蒸気タービン用ロータとして十分その使用が可能と考えられる。

#### 文 献

- 1) 中川洋三: 金属材料, 13(1973) 5, p. 90
- 2) 河合光雄, 川口寛二, 吉田 宏, 金沢 暎, 三戸 暁: 鉄と鋼, 61(1975) 2, p. 229
- 3) D. L. NEWHOUSE, C. J. BOYLE, and R. M.

CURRAN: ASTM 68th Annual Meeting (1965)

4) 阪部喜代三, 徳田 昭, 本間亮介: 学振 123 委員会研究報告, 8 (1967) 3, p. 423

5) 藤田利夫, 芥川 武, 学振 123 委員会研究報告,

1 (1960) 1, p. 7

6) 中野 平, 山本俊二, 後藤督高, 鈴木定雄: 鉄と鋼, 49 (1963) 6, p.908