

© 1983 ISIJ

技術報告

# Cr-Mo-V 鋼のロータ材の品質におよぼす 各種製造法の影響

鈴木 章\*・岡村正義\*<sup>2</sup>・広瀬和夫\*・田中重明\*<sup>3</sup>

## Effects of Vacuum Carbon Deoxidation, Extra Low Sulfur Content, and ESR Process on the Quality of Cr-Mo-V Rotors

Akira SUZUKI, Masayoshi OKAMURA, Kazuo HIROSE, and Shigeaki TANAKA

### Synopsis:

In order to improve the quality of the central axial part of CrMoV steel rotors, the investigations were performed on the rotors made of conventional Si-killed steel, extra low sulfur Si-killed steel, vacuum carbon deoxidized (VCD) steel, and electroslag remelted (ESR) steel.

From the comparison of sulfur prints of the end cross sections of the rotors, an improvement in the segregation pattern was observed in the rotor made by applying VCD and the reduction of segregates was found in the rotor made of extra low sulfur steel.

The rotor manufactured from ESR ingot showed the best result; in addition to finding no spot in sulfur print, there was no indication in the magnetic particle test of the axial bore in the magnetizing condition of 700 amperes per inch of the bore diameter. Some indications were detected, however, in the condition of 300 amperes per inch on the rotor made of Si-killed steel.

These results have been discussed in the light of the current concepts on segregation.

## 1. 緒 言

発電用蒸気タービンの容量の増大にともない、タービンロータも大形化し、その使用条件も苛酷になつてきた。とくに高圧ロータおよび中圧ロータは高温で使用されるので、CrMoV 鋼が用いられるのが普通であるが、アメリカにおける最近のロータ破裂事故<sup>1)</sup>が CrMoV 鋼であつたこともあり、使用中のロータの材質の変化はもちろんのこと、製造時の検査との関連で、軸心部の品質の改善が問題になつている。

ロータの品質は鋼塊の良否によつて左右されるといつても過言ではない。偏析、収縮孔が少ないこと、耐火物等の外来系の介在物はもとより脱酸生成物が少ないこと、白点などの欠陥を防ぐために水素が少ないこと等の条件を満たす必要があり、塩基性電弧炉で溶解し真空鋳造を行うのが一般的である。

鍛造後ロータは多くの場合中心孔が開けられ、軸心部より試料をとり機械的性質等の確認が行われる。それは中心部が鋼塊の性状、鍛錬効果および熱処理効果のいず

れの面からも表面に較べて劣ると考えられているばかりでなく、使用時の応力が比較的高いことによる。そして中心孔内面からも超音波探傷検査、磁粉探傷検査が行われるが、最近とくに磁粉探傷試験の磁化電流は増大傾向にある。そこでこのようなロータの内部品質を向上するための方法としてA偏析の軽減をねらつて真空カーボン脱酸 (Vacuum Carbon Deoxidation, VCD) の適用および極低硫鋼の使用、さらにエレクトロスラグ溶解法 (ESR) の適用が提案され<sup>2)</sup>、また鋼塊の凝固時に押湯を ESR と同様の方法で積極的に保温すると同時に脱硫する ESHT (Electroslag Hot Topping)<sup>3)</sup> などの適用が提案検討されている。本報告では VCD 鋼、Si 脱酸極低硫鋼から製造したロータの内部品質を普通の Si 脱酸鋼から製造したものと比較すると共に ESR 鋼塊から製造したロータの品質についても検討した。

## 2. 試験方法と結果

調査対象の高圧ロータは塩基性電弧炉で溶製し、出鋼脱ガス、真空鋳造のいわゆる2重脱ガス法によつて製造

昭和56年4月本会講演大会にて発表 昭和57年5月27日受付 (Received May 27, 1982)

\* (株)神戸製鋼所鋳鍛鋼事業部 工博 (Steel Casting and Forging Division, Kobe Steel, Ltd.)

\*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所鋳鍛鋼事業部技術部高砂開発室 工博 (Takasago Research and Development Section of Technical Department, Steel Casting and Forging Division, Kobe Steel, Ltd., 2-3-1 Niihama Arai-cho Takasago 676)

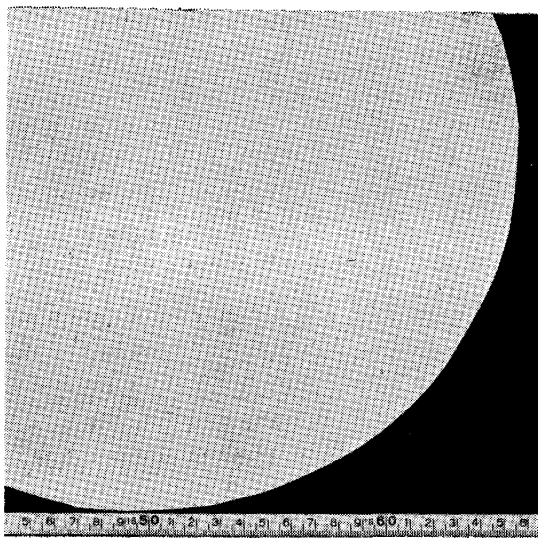
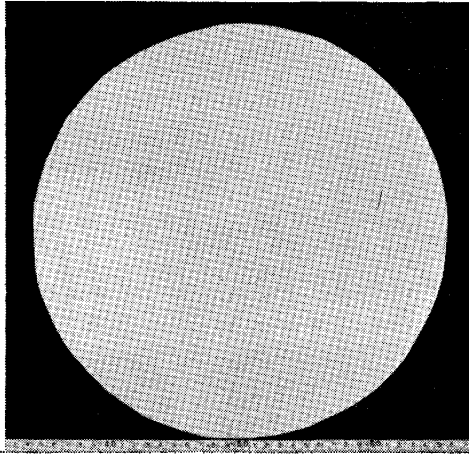
\*<sup>3</sup> (株)神戸製鋼所鋳鍛鋼事業部技術部高砂開発室 (Takasago Research and Development Section of Technical Department, Steel Casting and Forging Division, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. Chemical composition, dimension and weight of each rotor forging.

Rotor No.	Deoxidation	Chemical composition (Ladle analysis) (%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
A	Si deoxidation	0.27	0.25	0.74	0.005	0.005	0.51	1.02	1.19	0.24
B	Vacuum carbon deoxidation (VCD)	0.26	0.07	0.78	0.006	0.004	0.57	1.14	1.21	0.24
C	Si deoxidation (Low sulfur)	0.27	0.32	0.78	0.008	0.002	0.39	1.14	1.13	0.24
D	Si deoxidation	0.22	0.31	0.59	0.006	0.006	0.24	1.60	0.65	0.24
E	Si deoxidation (ESR)	0.27	0.33	0.64	0.011	0.001	0.27	1.60	0.68	0.24

Rotor No.	Dimension and weight of rotor	Rotor No.	Dimension and weight of rotor
A	Body dia.; Max. 1 250 mm Body length; 3 600 mm Total length; 6 000 mm 20 t	D and E	Body dia.; Max. 960 mm Body length; 1 800 mm Total length; 4 800 mm 9.2 t
B	Body dia.; Max. 1 200 mm Body length; 2 700 mm Total length; 5 500 mm 15 t		
C	Body dia.; Max. 1 120 mm Body length; 2 900 mm Total length; 6 100 mm 22 t		



Scale : mm

Photo. 1. Sulfur print of rotor A (Top end)  
(Si deoxidized)

した CrMoV 鋼で Si キルド鋼(A), 真空カーボン脱酸鋼(B)および出鋼脱ガス時あらかじめ鍋底に脱硫剤を入れて置き脱ガスと同時に脱硫した<sup>4)</sup> Si キルド極低硫鋼(C)で製造したものを選んだ。なお(B)ロータは地熱発電用の低圧ロータとして, 耐食性の点から CrMoV 鋼が選ばれたが, 靱性の改善を目的として真空カーボン脱酸を適用したものである<sup>6)</sup>。これらロータは Table 1 に示すようにほぼ同一サイズの鋼塊(重量; 60 t, 平均直径; 1 670 mm)から製造され, しかもほぼ同一胴径(1 200 mm)に製造されている。なお電弧炉精錬はダブルスラグ法で, 通常の Si キルド鋼を製造する場合, Si の最終調整は電弧炉出鋼から脱ガス過程で Si を添加して行つた。したがって真空カーボン脱酸鋼を製造する場合には Si を添加しないだけで製造法の基本は Si キルド鋼と変わらない。

また ESR 鋼塊から製造したロータの品質を評価するために, 直径; 1 500 mm の ESR 鋼塊(E)および Si キルド鋼塊(D)から胴径 960 mm の同一形状のロータを製造し比較した。Table 1 からわかるように(D), (E)鋼塊は(A), (B), (C)鋼塊と鋼種が異なっている。

各ロータのサルファプリントをロータ端面(鋼塊頂部側)で採取した。結果を Photo. 1~5 に示す。Photo. 1 と Photo. 2 の比較から真空カーボン脱酸の適用により S の偏析状況はやや改善され, 極低硫鋼(Photo. 3)では A 偏析が認められなかつた。また ESR を適用した(E)のサルファプリント(Photo. 4)は非常に優れている。

つぎにロータ軸心部の品質を調べるために, (D), (E)のロータの中心孔内面の磁粉探傷試験を行い比較した。

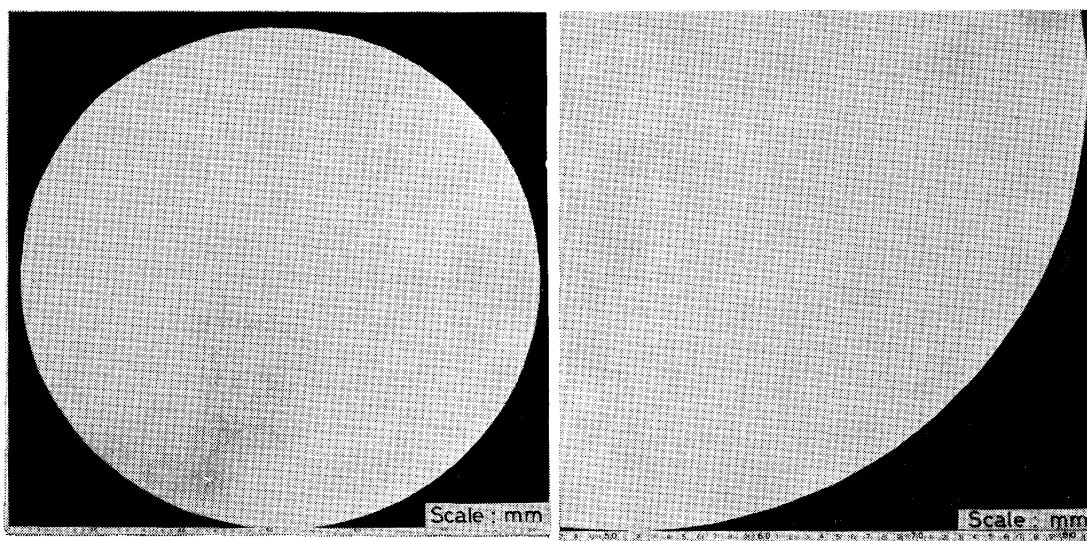
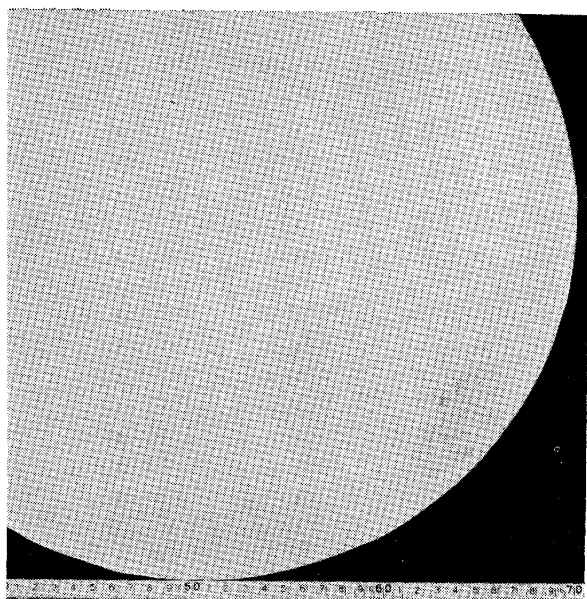
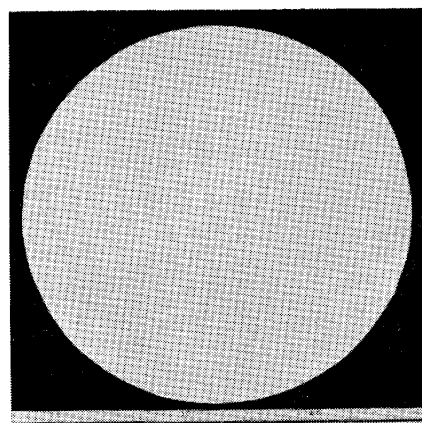
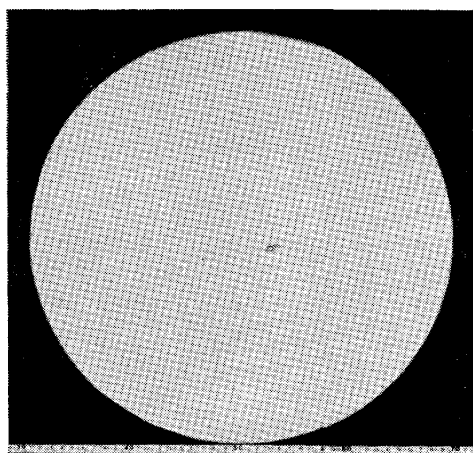


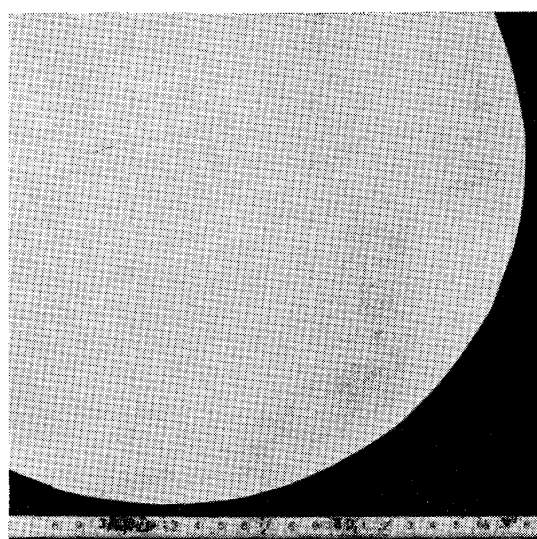
Photo. 2-a. Sulfur print of rotor B (Top end) (VCD).

Photo. 2-b. Enlargement of Photo. 2-a.



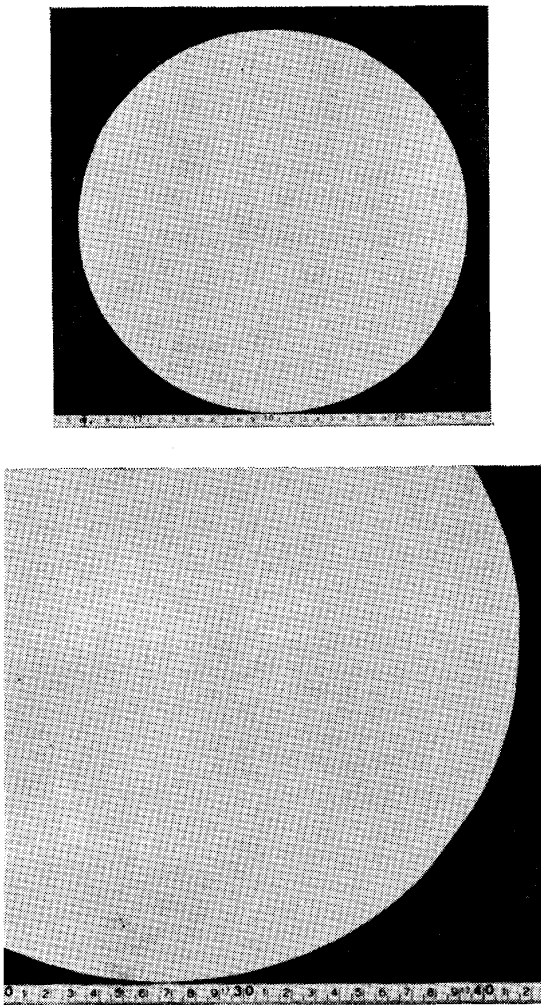
Scale : mm

Photo. 3. Sulfur print of rotor C (Top end) (Si deoxidized low sulfur).



Scale : mm

Photo. 4. Sulfur print of rotor D (Top end) (Si deoxidized).



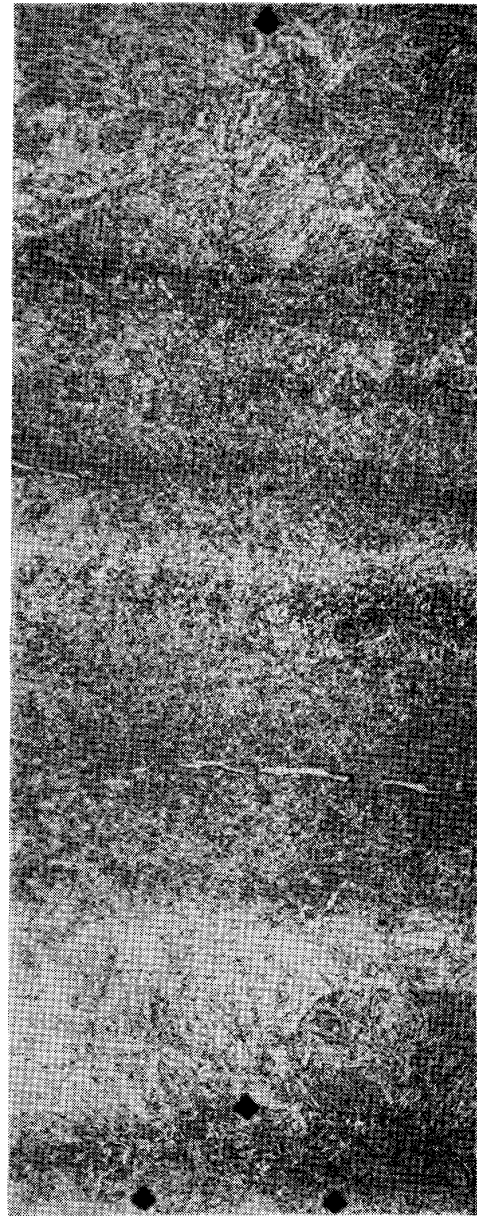
Scale : mm

Photo. 5. Sulfur print of rotor E (Top end) (ESR).

磁粉探傷試験は電流貫通法すなわち、中心孔内面を磁化させる方式で、磁化条件は通常中心孔直径 1 inch あたりの電流値で表示されるのが普通である。ここでは 100, 200, 300, 500, 700 A/inch の各条件で行い比較した。付着した磁粉の長さはボアスコープ (Bore Scope) で測定した。ロータ (D) と (E) の磁粉探傷試験の結果、ロータ (D) は磁化電流 300 A/inch でインディケーションを認めたが ESR ロータ (E) では 700 A/inch の磁化電流でもインディケーションは認められなかった。なおロータ (A), (B), (C) は 100 A/inch の条件でしか試験を行っていないが、すべてインディケーションは認められなかった。

### 3. 考 察

#### 3.1 真空カーボン脱酸鋼, Si 脱酸極低硫鋼と A 偏析 真空カーボン脱酸鋼より製造したロータ (B) の A 偏析



(×100×7/10)

Photo. 6. Nital etching of the segregated zone.

は軽微であつたが、同様のことはこれまでいくつか報告されている<sup>6)~11)</sup>。R. TARMAN<sup>6)</sup> は NiCrMoV 鋼を対象に脱酸法を変えた 52 t 鋼塊からロータを製造し、A 偏析について比較している。その結果、偏析線の数ならびに半径方向の分布範囲とも含 Al, Si 鋼 (Si : ~0.30%, Al : ~0.025%) が最も数は多く、範囲は広い。そして含 Si 鋼 (Si : ~0.30%, Al : ≤0.01%), 含 Al 鋼 (Si : ≤0.10%, 目標 : 0.08%~0.10%, Al : ~0.025%), 真空カーボン脱酸鋼 (Si : ≤0.10%, 目標 : 0.08~0.10%, Al ≤0.010%) の順に改善できると報告している。また拜田ら<sup>11)</sup>も Si 含有量の異なる Al 脱酸鋼 (Al : ~0.050%) で A 偏析の調査を行い、R. TARMAN と同様に A 偏析線密度は固液共存相内の残溶鋼に働く平均浮力を

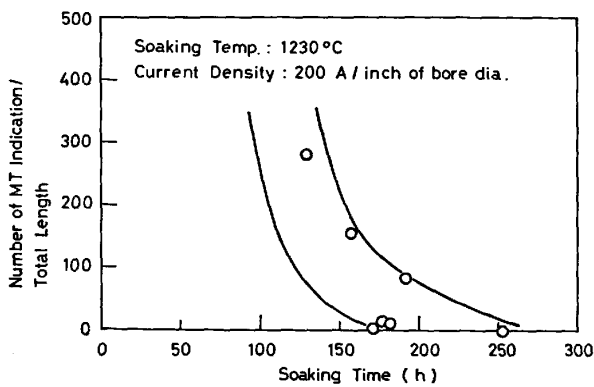


Fig. 1. Relation between soaking time and number of MT indication.

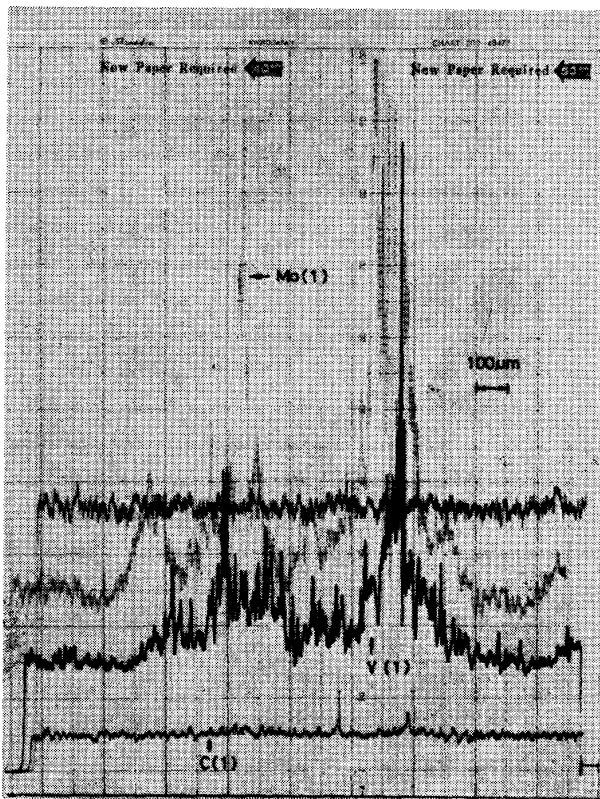


Fig. 2. Line analysis in the segregated zone.

表す関数  $\phi$  の値が増すにつれて増加するとし、J. Co-MON ら<sup>12)</sup>が示したCの偏析比を表す式の成分項に類似した式を示している。

一方、極低硫化とマクロ偏析の関係について竹内<sup>13)</sup>らは次のように報告している。すなわち、CrMoV 鋼のロータにおいてS含有量の減少につれてサルファプリントはしだいに改善されるが、とくに 20 ppm 以下のS含有量でサルファプリント上に偏析線が認められなくなる。また 10 ppm の試料にはマクロ腐食で偏析線は認められなかったと述べている。

このようなA偏析に対する真空カーボン脱酸や極低硫化の効果は Si 含有量の低下や極低硫化に伴う固液共存

相内の液相の密度が減少するといった最近の研究で定性的に説明できると考えられる。

### 3.2 鋼塊中心付近の偏析と磁粉探傷インディケーション

高圧ロータで問題となる磁粉探傷インディケーション(以下 MT インディケーションと略す。)は中心孔表面であるから鋼塊のA偏析の領域よりも内部に相当すると考えられ、“A”偏析に対する同様の考え方が鋼塊中心部の偏析に対しても適用できるかどうかは問題である。これまで著者らが同種のロータの中心孔内面で認めた 0.3 mm 以上の MT インディケーション付近のマイクロ組織を Photo. 6 に示すが、インディケーションはミクロ的な偏析部に対応し、硫化物が多く認められた。そこで同時期に製造した同種の Si キルド鋼のロータの磁化条件 200 A/inch における MT インディケーションの数と鍛錬工程中の総加熱時間との関係をとつてみた (Fig. 1)。なおこれらロータのS含有量は 0.005% 前後であつた。図からわかるようにインディケーションの数は加熱時間に依存し、インディケーションは拡散によって軽減できることを示している。そこでこれらのロータの中心孔トレパン材の偏析帯で Cr, Mo, V のマイクロ偏析を調べた。MT インディケーションが顕著に認められた試料と全く認められなかつた試料についてナイトルで腐食した結果を Fig. 2, Fig. 3 にそれぞれ示す。このようにインディケーションが顕著に認められる場合には偏析は非常にシャープであり、各成分が十分に拡散されていないと考えられる。これをミクロ観察すると硫化物の近くに炭化物等が認められるのに対し、インディケーションが認められない場合の硫化物にはこのようなものは認められなかつた。Fig. 4 に EPMA で測定した Cr のマイクロ偏析比 ( $Cr_{max}/Cr_{min}$ ) と鍛造加熱時間の関係を示すが、時間とともに拡散し均質化されることがわかる。これらの結果から磁化電流 200 A/inch の条件下で MT インディケーションが認められなくなるマイクロ偏析比は Cr, Mo, V についてそれぞれ 1.5, 2.0, 2.1 程度であると思われる。W. WIEMAN ら<sup>14)</sup>はレドルの S 含有量が 10 ppm 以下の CrMoV 鋼高圧ロータの鋼塊頂部側でマイクロ偏析比を調査し、Cr について 1.6, Mo について 2.6, V について 2.1 程度の値を報告している。

ESR を適用したロータの優れた結果は短時間で均質化ができる細かな凝固サブ組織にもとづくものと思われる。R. JAUCH ら<sup>15)</sup>は低圧タービンロータや発電機に使われる 3.5%NiCrMoV 鋼について直径 2300 mm の ESR 鋼塊と直径約 1800 mm の普通鋼塊の表面から中

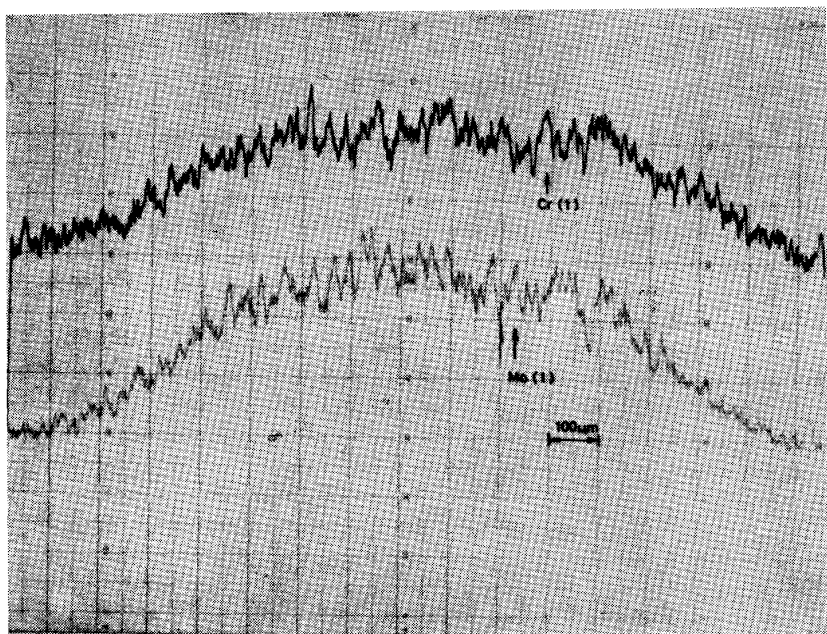


Fig. 3. Line analysis in the segregated zone.

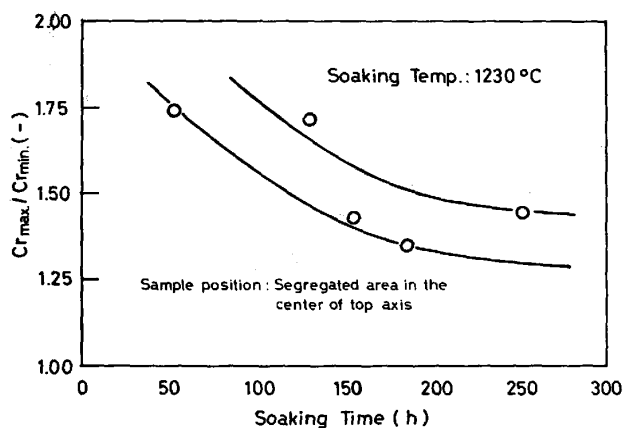


Fig. 4. Relation between soaking time and micro-segregation ratio of chromium.

心にかけて Cr と Mo のマイクロ偏析比を調べ、ESR 鋼塊が優れていると報告している。すなわち、デンドライトの 2 次アームの間隔に関連する平均冷却速度について比較すると、平均直径が 1580 mm の普通鋼塊の中心付近の平均冷却速度は約  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{min}^{16)}$ 、一方直径が 1500 mm の ESR 鋼塊の場合は  $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}^{17)}$  である。このことからみても ESR 鋼塊の 2 次アームの間隔は小さく拡散距離が小さいので加熱により均質化しやすいと言えるであろう。本試験における ESR を適用したロータ (E) の鋼塊頂部側の軸心部の Cr, Mo, V のマイクロ偏析比はそれぞれ 1.3, 1.9, 1.5 であった。

Y. HIROSE ら<sup>3)</sup>は ESHT 技術を CrMoV 鋼に適用し、高圧タービンロータを製造した。この鋼塊重量は 63.4 t、レールドル S 含有量は 0.002% である。このロータは 500 A/inch の条件で MT インディケーションを

認めず、また偏析線は普通鋼塊に比較して細いと述べている。A. MITCHELL<sup>18)</sup>は ESR 鋼塊と ESHT 鋼塊を比較して、ESR の場合には凝固過程を通じて大きい温度勾配が維持できるので、どんな鋼塊サイズにおいても ESHT あるいは普通鋼塊より優れた凝固組織を有するものと思われるが、計算上この優位性は 1800 mm 以上の直径では普通鋼塊に接近しそうであると述べている。この ESHT の有効性に関する評価は今後比較検討されることと思われる。

#### 4. 結 言

通常の Si 脱酸鋼、Si 脱酸極低硫鋼、真空カーボン脱酸鋼、そして ESR を適用した鋼塊から CrMoV 鋼のタービンロータを製造し、この内部性状を比較検討するとともに中心孔の MT インディケーションについて検討した。

(1) 真空カーボン脱酸鋼の適用や極低硫化は A 偏析を軽減するのに有効である。

(2) 普通鋼塊から製造するタービンロータの MT インディケーションを減らすには鍛錬工程の加熱によって偏析を均質化することが重要である。

(3) ESR を適用した軸材は偏析はもとより磁粉探傷試験においても卓越した結果を示した。これは普通鋼塊に較べてサブ組織が細かいことが一つの原因であろう。

#### 文 献

- 1) L. D. KRAMER and D. D. RANDOLPH: 1976

- ASME-MPC Symposium on Creep Fatigue Interaction, Winter Annual Meeting (1976), p. 1
- 2) J. E. STEINER, V. P. SWAMINATHAN, and R. I. JAFFEE: 9th International Forging Conference (1981)
  - 3) Y. HIROSE, K. MORINAKA, S. WATANABE, T. SAEKI, and S. MATSUFUJI: 9th International Forging Conference (1981)
  - 4) 岡村正義, 永田弘之, 三浦正淑, 新実高保, 鈴木章: 鉄と鋼, 63(1977), p. 2028
  - 5) 生田正浩, 菊地英雄, 鈴木章, 宮崎松生: 鉄と鋼, 63(1977), S 271
  - 6) 南幹男, 新実高保, 三浦正淑, 永田弘之: 鉄と鋼, 56(1970), S 423
  - 7) 高橋忠義, 工藤昌行: 鉄と鋼, 62(1976), S 455
  - 8) R. TARMANN: Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 126 Jahrgang Heft 11(1978), p. 390
  - 9) 成田貴一, 堀江修, 岩田至弘, 戸田晴彦: 鉄と鋼, 65(1979), S 650
  - 10) 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, 65(1979), p. 1581
  - 11) 拜田治, 岡野忍, 江見俊彦, 河西悟郎: 鉄と鋼, 67(1981), p. 954
  - 12) J. COMON, J. DELORME, and P. BESTIEN: 6th International Forgemasters Meeting (1972)
  - 13) 竹内淳, 小杉允: 鑄鋼と鍛鋼, 昭和55年7月, No. 330, p. 15
  - 14) W. WIEMANN and C. BERGER: EPRI Workshop-Rotor Forgings for Turbines and Generators-, Sept. 14/17, 1980, Polo Alto, Cal., U. S. A
  - 15) R. JAUCH, A. CHOUDHURY, H. LÖWENKAMP, and F. REGNITTER: Stahl Eisen, 95(1975), p. 408
  - 16) 岩田至弘, 戸田晴彦, 新実高保, 三浦正淑, 永田弘之: 鉄と鋼, 62(1976), A 37
  - 17) 三浦正淑, 新実高保, 松本重喜, 鈴木章: 鉄と鋼, 62(1976), p. 1698
  - 18) A. MITCHELL: Proceedings of the third international iron and steel congress (1978), p. 695