

タービンケーシングの経年破損について

Aging Damage of Turbine Casing

久保田 富則*
Tominori Kubota

内 容 梗 概

タービンの起動停止が非常に多くなるとタービンケーシングなど鋳鋼品の経年破損としてき裂事故が多くなる。いかにすればき裂事故を防止できるかを、日立製作所では数年前から研究し、最近これらき裂の本質的性状がわかってきて、き裂をなくすための完全な対策が期待できるようになった。

1. 緒 言

わが国においては、タービンの起動停止がさかんに行なわれるため、タービンケーシングなど鋳鋼品のき裂事故が相当多い。これは高温蒸気を使用するため、ときとして塑性変形を伴うような大きな熱ひずみの繰返しによるいわゆる熱疲労によって、このき裂の発生をみることがある。さらに長年月蒸気にさらされていると材料が劣化し、材質的变化によってき裂の発生および進行を早めていることも考えられる。

これらの研究は、近年国内外で各方面から注目されていながら実際の事故に直接役立つ対策はなされていないようである。これは、このような現象を実験で裏付けする研究が実際的に困難であり、かつ長年月を要するからである。

日立製作所では数年前よりこの研究に着手するとともに以前から研究していたものと総合検討し、最近これらき裂の本質的性状がはっきりわかり、き裂をなくすための完全な対策がたてられるようになった。

ここにこれらの研究の一端を紹介する。

2. 力学的考察

2.1 構造による熱応力

タービンケーシングは、タービンの使用条件の相違に伴う色々な形式によってその構造は異なるが一般的に構造が複雑で、かつ鋳造面からもむずかしい部品とされている。したがって構造による熱応力を軽減するには、この構造を肉厚均等でしかも対称の形にすることにより不同熱膨脹をなくし熱変形を僅少にし熱応力を軽減することが設計的にも望ましい。

ここで、熱応力を軽減するための二三の改善策について考えてみよう。

(A) 構造を簡単にして隅肉Rを大きくした例 (第1図参照)

図示(a)はケーシングカーチス部の隅肉Rが小さく、かつガイドリング部分が一体となっていたため、鋳造上困難な作業を伴う。(b)のように改造することによりR部の熱応力は軽減でき(後述)ガイドリングを別体組立式にすることにより鋳造および検査が容易にできる。

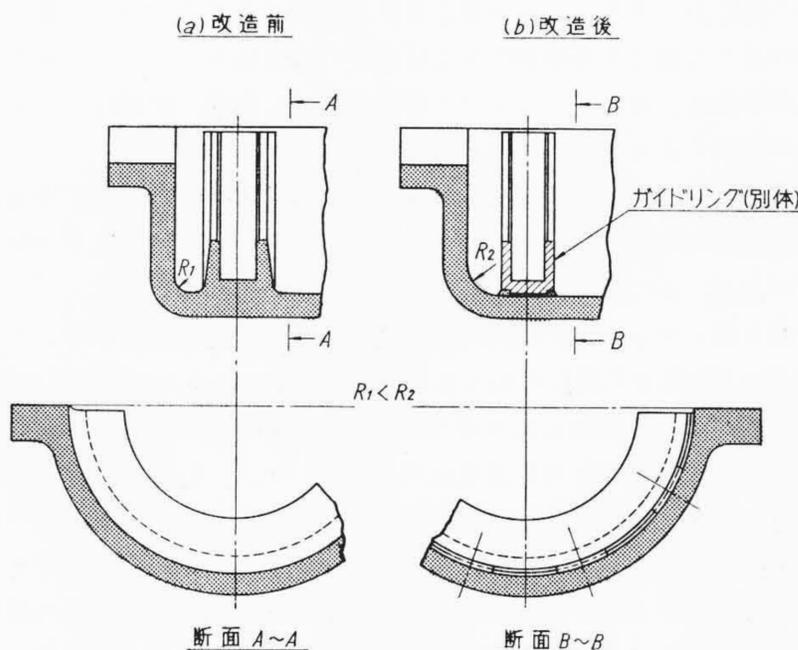
(B) 二重ケーシング構造にした一例 (第2図参照)

図示(a)は、抽汽点を設けるためケーシングの一部を突出させそのため内部の精密検査が困難なものを(b)図のように二重ケーシングにすれば、外部、内部ケーシングとも完全に精密検査ができかつケーシングの熱膨脹が自由に行なわれるので熱変形を少なく熱応力も軽減できる。

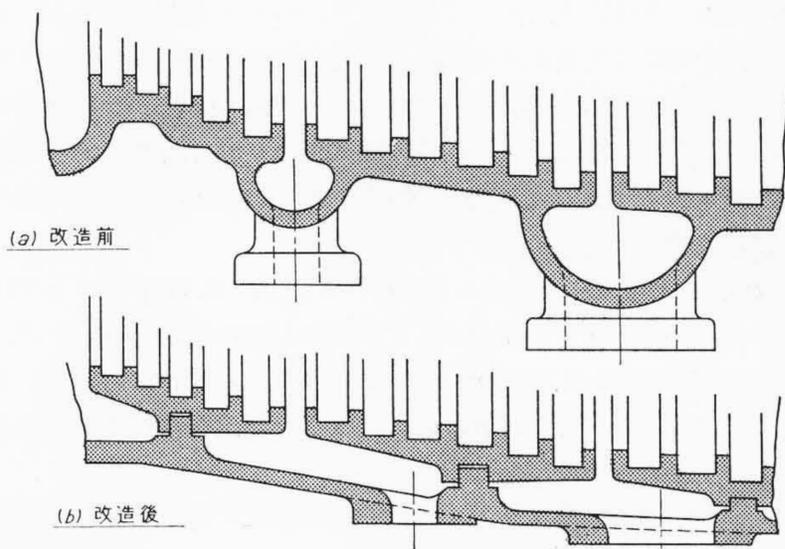
(C) セパレートノズルの構造にした一例 (第3図参照)

図示(a)は一体形ノズル、(b)はセパレートノズルを示す。

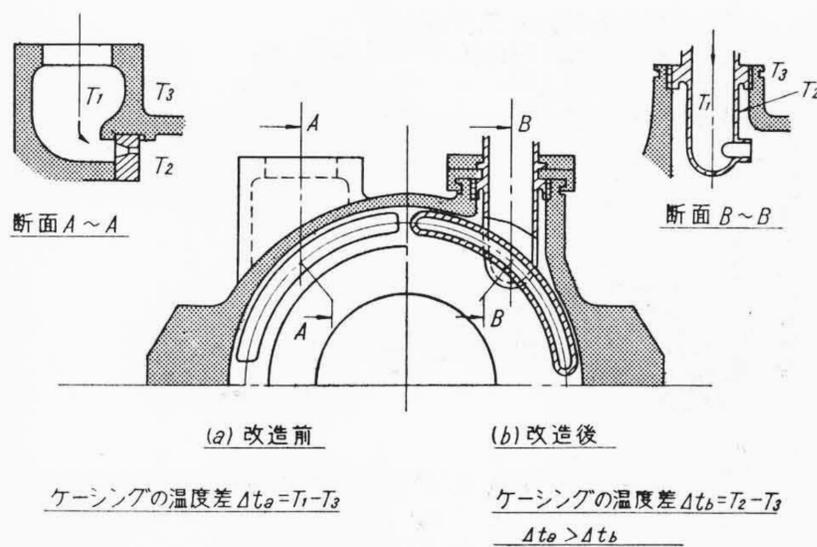
* 日立製作所日立工場



第1図 構造を簡単にして隅肉Rを大きくした一例



第2図 二重ケーシング構造にした一例



第3図 セパレートノズルの構造にした一例

(b)においてはノズルボックスの熱膨脹が自由に行なわれ、かつノズルボックス、およびケーシングの温度差をいずれも少なくすることができるので熱応力を軽減できる。すでに稼動している大形タービンにはすでにこの構造を採用している。

ここで上記(A)でのべた隅肉Rを大きくすることによってどれだけ熱応力が軽減できるかについて計算をおこなってみると隅肉R50mmを230mmに大きくすることによる応力集中率を約25%程度減少させることができる。

2.2 起動停止と熱応力

タービンの起動停止の回数が増えるとタービンケーシングに繰返し熱応力が作用しき裂事故誘発の原因となる。たとえば加熱時には壁内面に働く圧縮応力が降伏点を越えて塑性変形を生じ冷却時過大の引張応力が働き、これが繰返されてき裂に発展する場合が多い。このような場合き裂の発生および発展の過程はケーシングの材質、壁内の温度分布、ケーシングの形状、繰返し回数、使用時間など多くの要因によって左右される。

熱応力によってき裂事故を起しやすい部分は一般にタービン入口の高温厚肉非対称部、およびコーナ部でこれらはいずれもケーシングの急速、かつ不均一な温度変化によるところが多い。

第4図にケーシング壁内外の温度差変化の実験結果を示す。これはNo.2加減弁室通気の場合とNo.1,2加減弁室通気の場合とを、壁内面の温度上昇率を変化させて壁内外の温度差を比較した実験値であるが、これにより同じ温度上昇率でもNo.1,2加減弁室通気の場合のほうが温度差は約25%少なくなる。このことは、タービン起動時全周通気の運転方法を採用すれば、ケーシングの熱応力をそれだけ軽減できるわけである。さらに全周通気にすれば壁内面の温度上昇率を従来の280°C/hから500~600°C/hにすることも可能となる。

全周通気の具体的方法として主塞止弁バイパス運転法がある。すなわち起動時には主塞止弁全閉、加減弁全開の状態、バイパス弁によって起動し、定格回転数になったら同期し約20%まで負荷をかける。この間速度と負荷とは電動油圧式パイロット弁によって調整される。20%負荷に達するとNo.1加減弁のみほぼ全開で、他の加減弁は全閉し、また主塞止弁は全開する。

負荷を下げる場合は、上述と逆の操作となりやはり20%以下ではバイパス弁制御となる。従来No.1加減弁だけで起動したときは、No.1加減弁を通る蒸気の絞りによって温度が低下したが、20%までバイパス弁で負荷をかければ、このような現象を防ぐことができる。

このことは逆に負荷を下げて最低負荷運転を実施したときにも、加減弁での絞り温度変化がなくなるだけでなく、蒸気速度および熱

伝達率が低下するから、緩慢かつ均一に温度変化をケーシングに与える結果となる。さらに注目すべきことは最低負荷のような部分負荷の運転でも蒸気速度を極端に少なくさせることができるのでノズル翼などの浸食を減少させることになる。

3. 材料的考察

3.1 き裂の発生機構

ごく一般的に鑄造き裂の発生機構としては結晶偏析説がある。これは鑄物が凝固し、収縮をはじめてある程度の内力が発生し、局部的に応力集中が生じて熱間き裂が発生するときは結晶粒界はまだ一部熔融状態にあり、この粒界にき裂が入る。すなわち結晶粒界偏析のため実際の鑄鋼においては、1,300°Cまたはそれ以下に融点の低下した部分が存在しき裂が発生する場合である。

次に問題になるのはクラスト層である(第5図参照)。

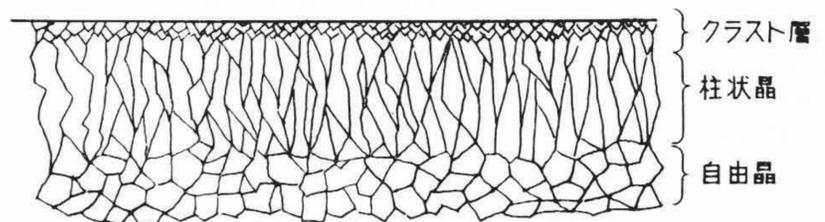
熔鋼が鑄型内に流入すると、その表面は鑄型に熱を奪われて急速に凝固し、いわゆるクラスト層を生成する。

さてこのクラスト層は注湯とほとんど同時に生成するために、この部品の温度は初めから1,400°C前後である。鑄造品が収縮を開始し、き裂発生時にはクラスト層はさらに温度が低下し、比較的十分な展延性をもっているものと思われる。したがってき裂の出現はクラスト層では行なわれず、その下のコーナゴースト部の液相面で行なわれる。

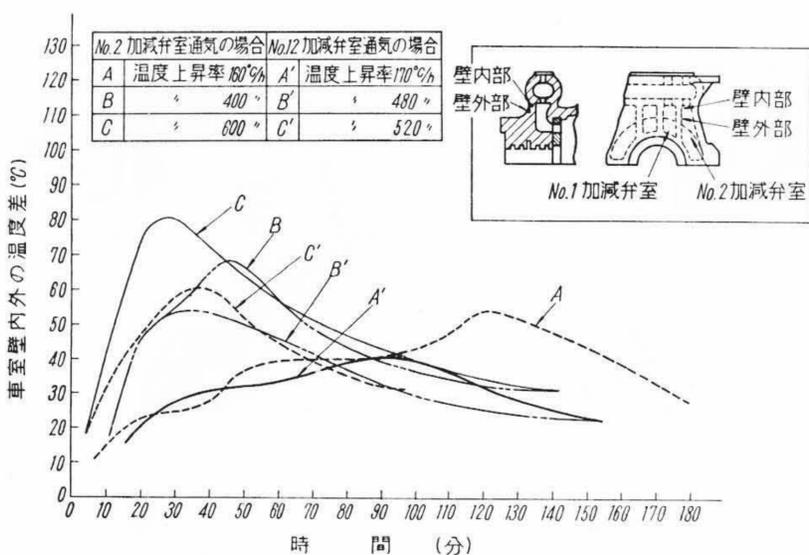
一般に鑄造当時のき裂は鑄物の表皮下にかくされている場合が多い。熱処理によって鑄物表面が酸化し、クラスト層が除去されればき裂が発見され、またさらに表皮をはつりとれば新たに柱状晶間にき裂が発見されることはありうるからである。

一般に鋼の変態点以上で発生したき裂は粒間き裂であり、鑄造時の焼割れまたは腐食作用によって起きたき裂はこの類に属する。一方鋼の変態点以下で発生したき裂は貫粒き裂が多い。冷間でも短時間で発生するき裂、冷却をする時の応力によるき裂、常温の疲労によるき裂はすべて貫粒き裂に属する。貫粒き裂は肉眼でみた場合一見直線的に見えるがよく見ると細かい曲折が見えるものである。

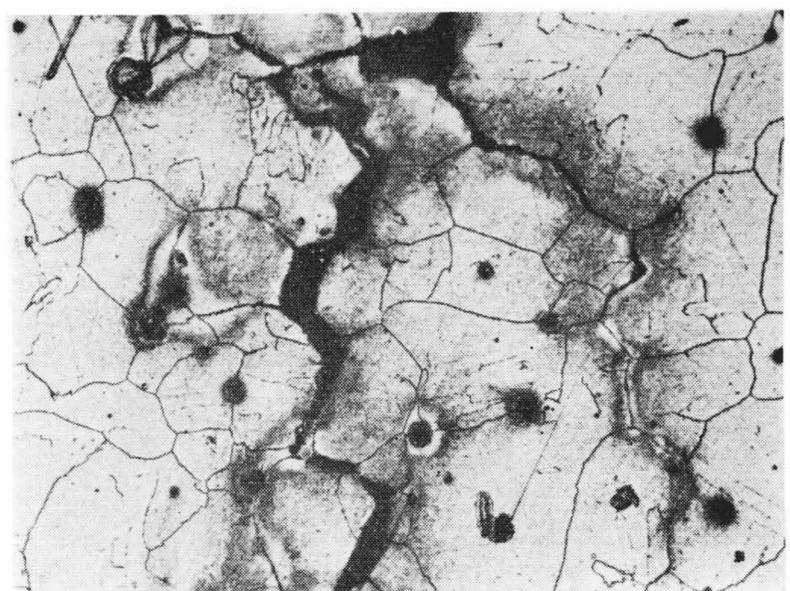
これらのき裂は、その原因によりそれぞれ発生機構も異なる。ときには両型のき裂が混合して生ずる場合もある。



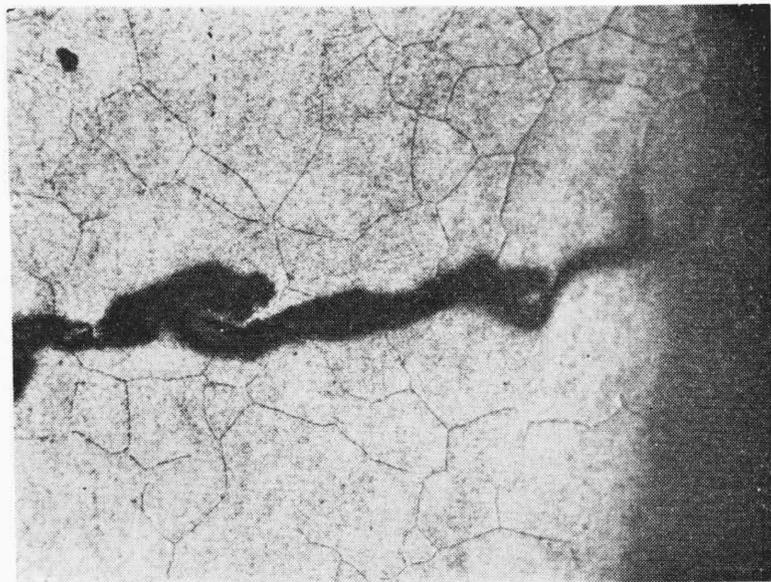
第5図 クラスト層の生成



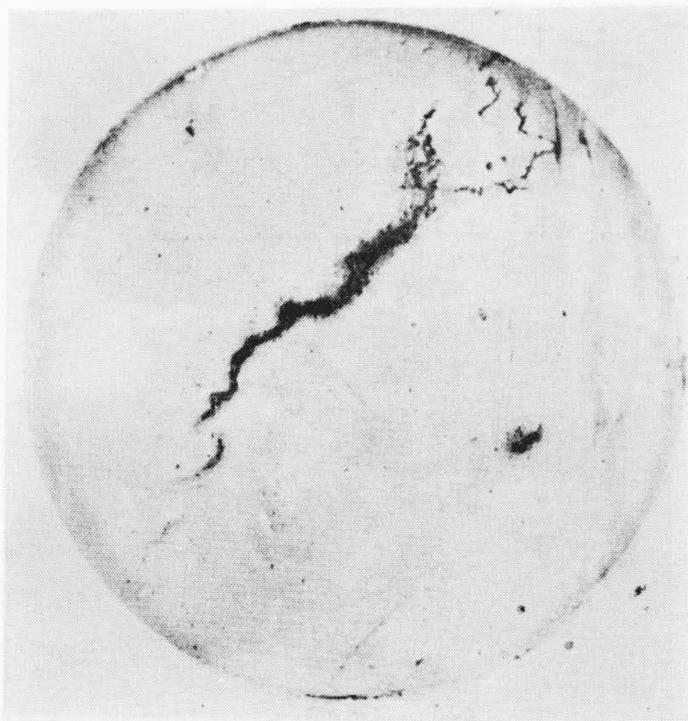
第4図 ケーシング壁内外の温度差変化



第6図 粒間き裂の一例



第7図 貫粒き裂の一例



第8図 き裂の進展

第6図は粒間き裂，第7図は貫粒き裂の顕微鏡写真を示す。

3.2 き裂の進展

粒間き裂での進展は，まず鋳造時のき裂が，内部的または表面的にある場合，表皮またはこれに隣接する部分に生ずる応力と，これが熱応力の繰返しによりき裂が成長発展することにより，随時表面に現われてその開口度を増し，やがて肉眼で発見できる程度まで発展する。

顕微鏡的にき裂の幅を見るとき，鋳造当時のき裂か，運転中に発生したき裂かを区別することは仲々困難であるが，従来の経験によれば開口度での差は一般的に0.05 mm以下のものは運転中に発生したものが多し。またき裂の形状も運転中に発生したものは比較的せん鋭な形をしている。

第8図にき裂の進展の一例を示す。中央部の大きい部分が最初に発生した粒間き裂，両側の細かいものがその後発展したき裂と推定される。

3.3 材料のぜい弱化

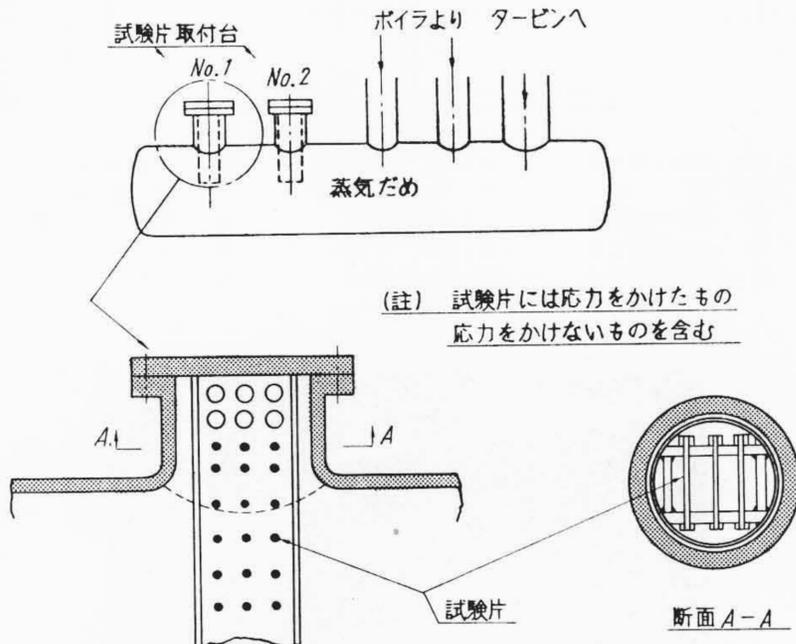
鋼に蒸気を接触して使用するとき蒸気そのものおよび熱影響によって材料がぜい弱化する。

そのおもなものは

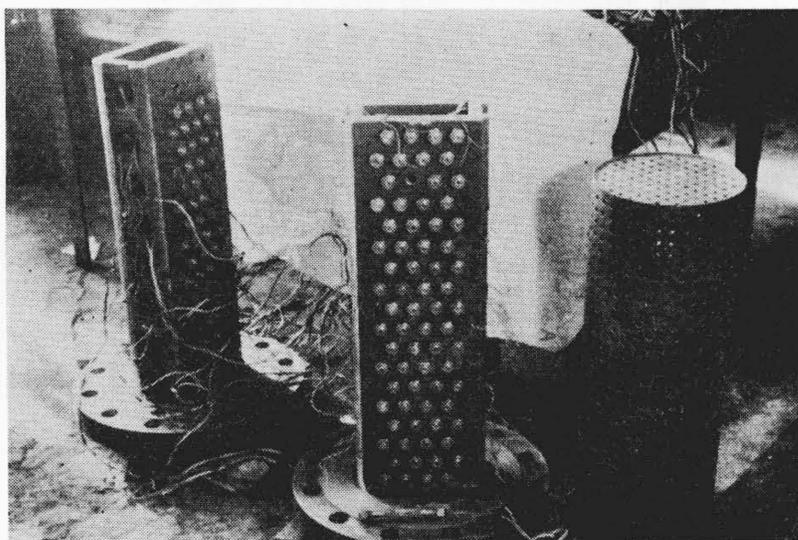
- (A) 高温使用中における鋼中の炭化物，Cr化合物などの析出に起因するぜい化。
- (B) 高温使用中における含有炭素の黒鉛化による強度の低下。
- (C) 鋼と高温高圧水蒸気との反応，すなわち高温の水蒸気が鋼

第1表 試験計画表

No	材質	試験時間					
		5	10	15	20	25	30
1	炭素鋼鋳鋼(球状化)						30,000 時間試験
2	1/2 Mo (s)						30,000 時間試験
3	炭素鋼 (焼鈍)		10,000 時間試験				
4	1/2 Mo (s)				20,000 時間試験		
5	1Cr1/2Mo (s)						30,000 時間試験
6	1Cr3/4Mo1/4V (s)						30,000 時間試験



第9図 試験装置



第10図 試験片取付台

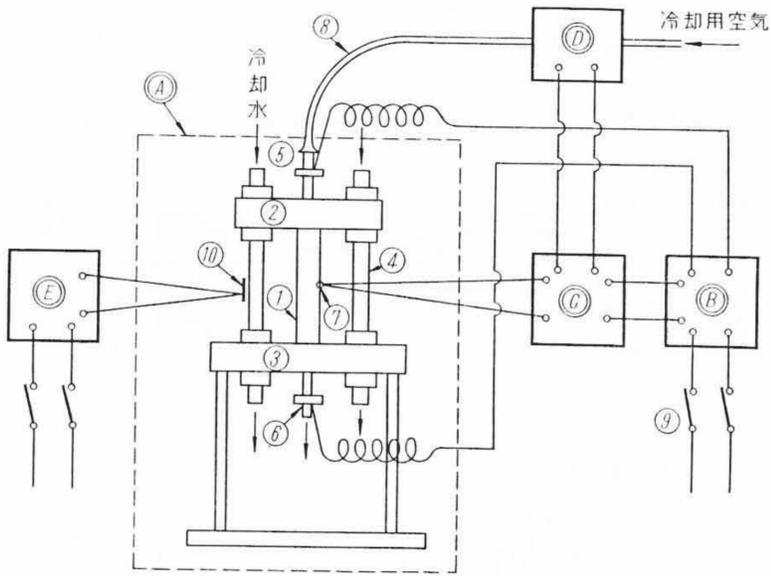
を浸食し，脱炭および反応生成ガス圧力によるマイクロクラックの発生によるぜい弱化で，これは一般に水素ぜい性ともいわれCA. Zapffe などにより強調されている。

黒鉛化は，ときに黒鉛化を促進する元素(たとえば Ni, Si のようなもの)が高い高炭素材料に内力が与えられた場合に低い温度でも発生するといわれているが，このような特殊な場合を除けば大体500°C以上において長時間使用中に発生し，これには Al 含有量が影響をもつといわれている。

上記のうち(A)(B)については実験室で試験できるが(C)については長年月を要するので実際の発電所に試験片を取付け目下長時間試験中である。

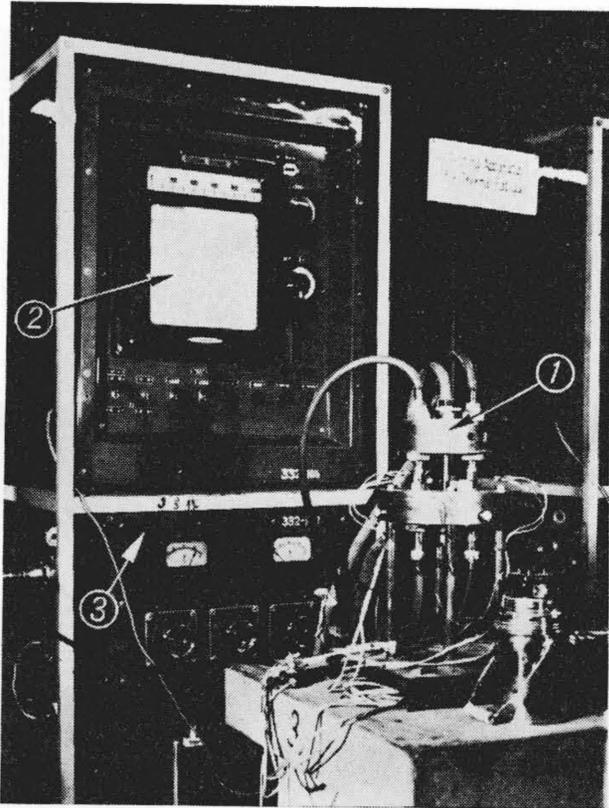
3.3.1 ぜい化試験

東京電力株式会社日立火力発電所 12,500 kW タービン蒸気だめの一部に試験片を取り付けさせていただき，昭和30年12月より405°C 22 kg/cm²gの蒸気による30,000 h 試験を続行中である。約10,000 h 加熱後の結果によると，



- Ⓐ: 試験片取付部
- Ⓑ: 電源
- Ⓒ: 温度調節装置
- Ⓓ: 冷却用空気弁
- Ⓔ: ひずみ記録計
- ①: 試験片
- ②: 取付金具
- ③: 取付金具
- ④: 支柱
- ⑤: 上部端子
- ⑥: 下部端子
- ⑦: 熱電対
- ⑧: 冷却用ゴム管
- ⑨: スイッチ
- ⑩: ひずみゲージ

第 11 図 試験装置説明図



第 12 図 熱疲労試験装置

- (a) 水素ぜい性の傾向はみられない。
- (b) 炭素鋼 1/2 Mo および 1Cr 1/2 Mo 材は長時間加熱により引張り強さは増しぜい化の傾向がみられる。
- (c) 1Cr 3/4 Mo 1/4 V 材は衝撃値が増す傾向がみられる。
- (d) 応力の付加はぜい化を助長している。

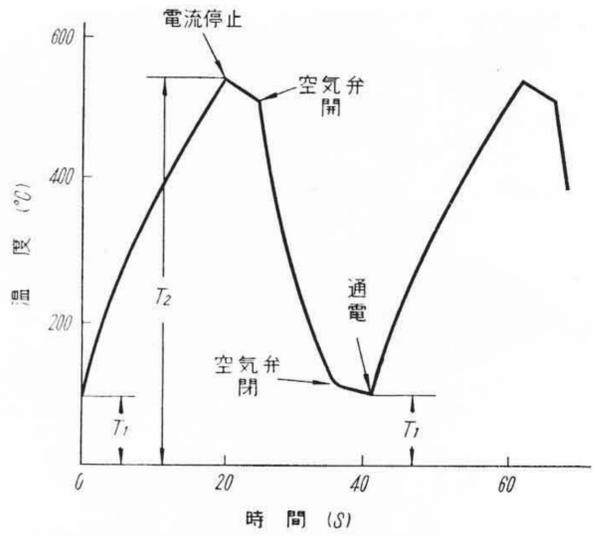
今後さらに脱炭の影響、腐食の影響、球状化処理と焼鈍との熱処理の影響などを究明するつもりである。

第 1 表に試験計画表、第 9 図に試験装置、第 10 図に試験取付台を示す。

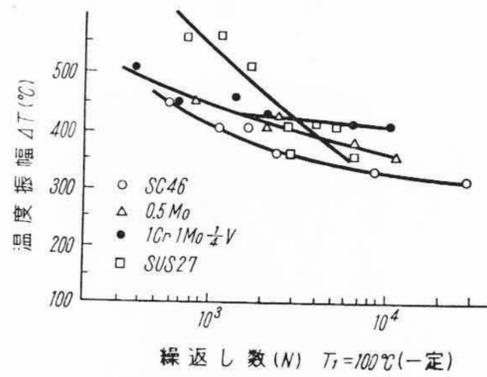
4. 熱疲労強度

タービンの運転上ひん繁なる起動停止を行なうことによって冷機を高温蒸気で起動する際の急熱、または暖機を低温蒸気で起動する際の急冷によって生ずる熱応力の繰返しによる疲労、いわゆる熱疲労によってケーシングにき裂または変形を起させることがある。

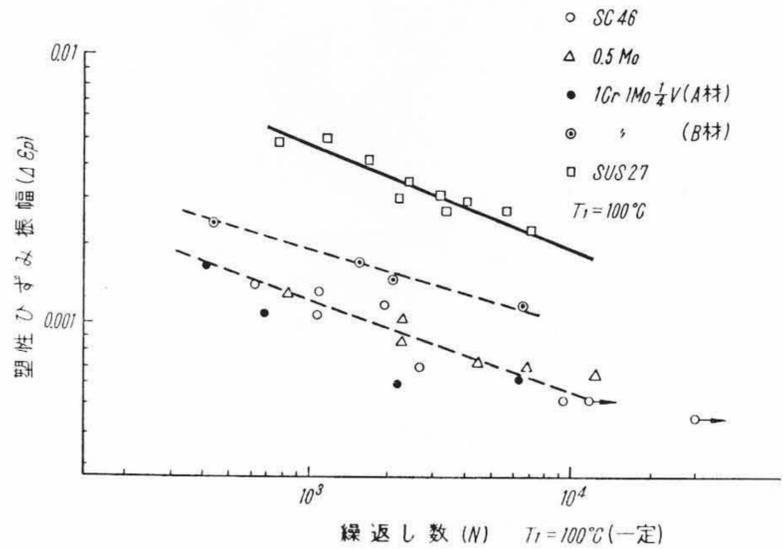
ここでケーシング材として使用されている材料に加熱冷却の温度サイクルを与え、その間の応力振幅とき裂発生までのサイクル数を実験で求め、実際の運転に見合った条件での熱疲労強度を求めた。



第 13 図 試験片中央の温度変化



第 14 図 温度振幅と破断繰返し数



第 15 図 塑性ひずみ振幅と繰返し数

第 11 図に試験装置説明図を、第 12 図に熱疲労試験装置の外観を示す。

まず、温度変化を 1 サイクルの所要時間との関係で示したものが第 13 図である。すなわち下限温度 T_1 から所定の温度 T_2 になると制御装置が働いて電流が止り、冷却空気弁が開いて温度が下る。このとき支柱にはったひずみゲージにより試験片にかかる応力を記録する。

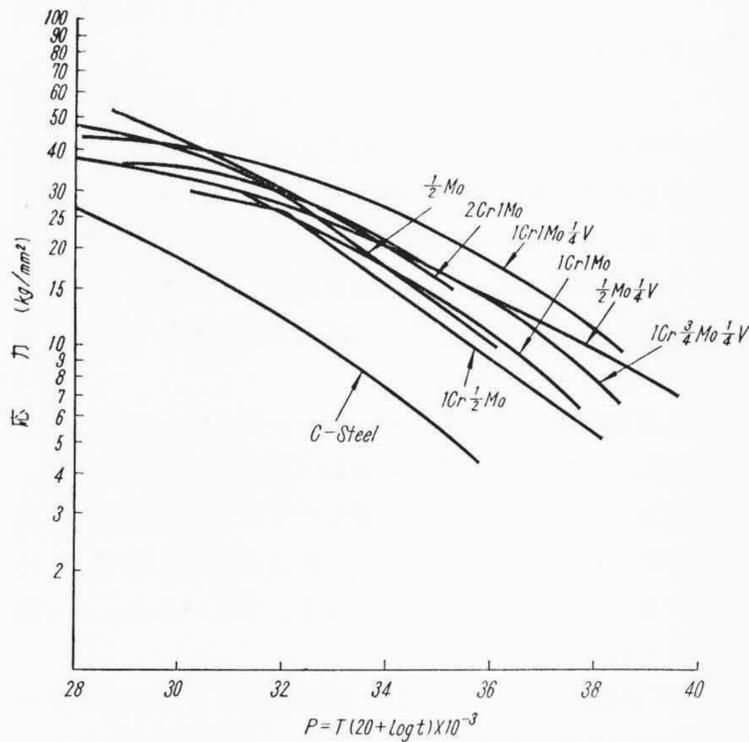
次に温度振幅 ΔT とき裂発生までの繰返し数 N との関係をも $T_1 = 100^\circ\text{C}$ (一定) として求めたものを第 14 図に示す。これによりたとえば SC46 1/2 Mo および 1Cr 1 Mo 1/4 V 鋳鋼の温度振幅 $\Delta T = 400^\circ\text{C}$ における繰返し数 N の比率をとると 1.0, 2.2 および 7.5 となり、1Cr 1 Mo 1/4 V 鋳鋼は非常に熱疲労強度の高いことがわかる。

さらに、塑性ひずみ振幅と破断繰返し数との関係を第 15 図に示す。これによると 1Cr 1 Mo 1/4 V 鋳鋼 (A 材) は塑性ひずみが小さい点で熱疲労強度上がりわめて有利である。

なお塑性ひずみ振幅 $\Delta \epsilon_p$ と破断繰返し数 N との間には $N^a \Delta \epsilon_p = k$ の関係があることが認められた。ここで a, k は材料および試験条件によってきまる常数である。

時間	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C
100	28.62	30.60	32.58	34.56	36.54	38.52
1,000	29.92	31.99	34.06	36.13	38.20	40.27
10,000	31.22	33.38	35.54	37.70	39.86	42.02
100,000	32.52	34.77	37.02	39.27	41.52	43.77

パラメータ $P = T(20 + \log t) \times 10^{-3}$ T : Rankin温度
 t : 時間 (h)



第16図 各種鋳鋼のクリープ破断特性

5. 材料および熱処理

タービンケーシング材の使用基準はタービン入口蒸気温度が310°C以下は炭素鋼、316~440°Cは1/2 Mo、441~510°Cは1Cr 1 Mo、511~538°Cは1Cr 3/4 Mo 1/4 V または1Cr 1 Mo 1/4 V、539~566°Cは1Cr 1 Mo 1/4 V 鋳鋼であり、567°C以上はオーステナイト系の材料を用いる。

以前のケーシング材料は炭素鋼であったが蒸気温度が高くなるにしたがい次第に低合金鋼が用いられるようになった。

Moの添加は高温における抗張力、降伏点を高くし炭化物の粒界析出を防ぎ粒界を強くする点で有効であり、Mo鋼は広く一般に使用されてきた。さらに高温強度を上げるものとしてCrを添加したいわゆるCrMo鋼が用いられてきた。

Crは焼入性をよくして高温におけるクリープ強度を高めるとともに、高温における黒鉛化を防止するために用いられてきた。またVは高温強度をさらに強める上に有効である。511~538°C用の材料に1Cr 3/4 Mo 1/4 V または1Cr 1 Mo 1/4 V を用いているのはこれらの理由によるものである。

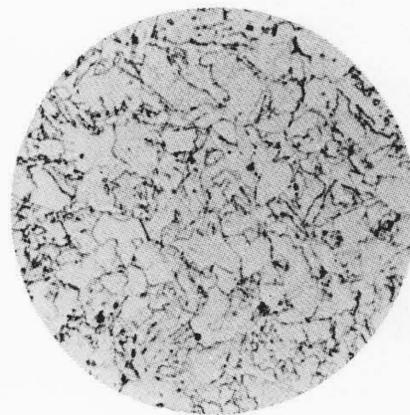
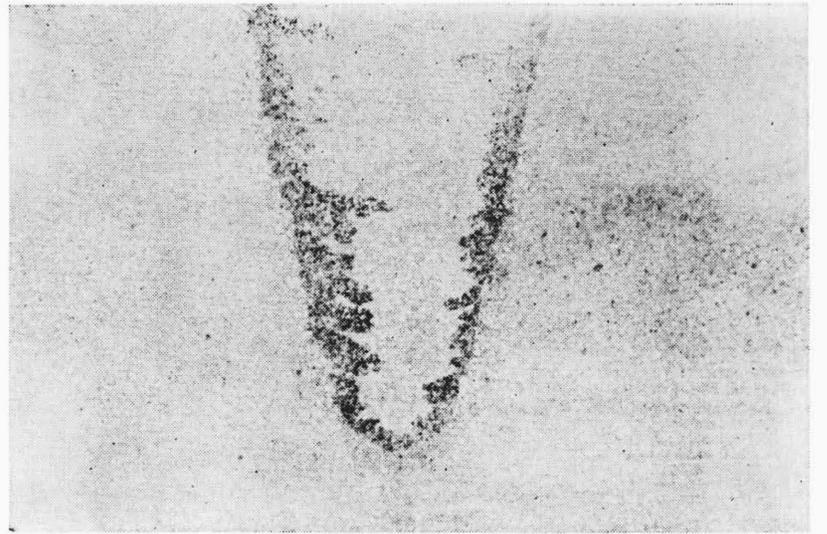
またAlは脱酸剤としてごく少量用いられている。高温で良好な機械的性質を得るためNormalize temperが行なわれる。Normalize temperにより低温における靱性を失うことなく高温におけるクリープ破断強度の高いものをうる事ができる。

ケーシング材として最適の材料をきめるため高温引張り、衝撃、クリープ破断強度などについて詳細に試験した。

第16図はこれらケーシング材として用いられている材料のクリープ破断特性を示す。

6. 許容応力

タービンケーシングなどの設計上の許容応力をいくらにするかは、以前からの問題であるが、日立製作所では数年前から各種鋳鋼



(a) 母材 (×100)

(b) 熔着鋼 (×100)

第17図 新熔接棒による熔着部マクロ組織

品のクリープ破断強度を詳細に求め、これにA. S. M. E Boiler Construction Codeの許容応力の考え方を適用して、あらゆる材料について適正な許容応力をきめている。すなわちA. S. M. E Boiler Construction Codeの許容応力の考え方は次の五つの項の最低値をとることになっている。

- (1) 規格の引張り強さの最低値の1/4
- (2) 各温度における引張り強さの1/4
- (3) 各温度における降伏点の62.5%
- (4) 各温度における1,000時間に0.01%のクリープ速度を与える応力
- (5) 各温度における100,000時間の破断強度の平均値の60%または最低値の80%

これは、クリープ強度が問題にならない比較的低い温度範囲(400°C以下)では(1),(2)が許容応力を支配し、温度が高くなると(4),(5)が支配的となることを示す。ただし、鋼種によってどの項が最低となるかは多少異なることもある。

7. 熔接

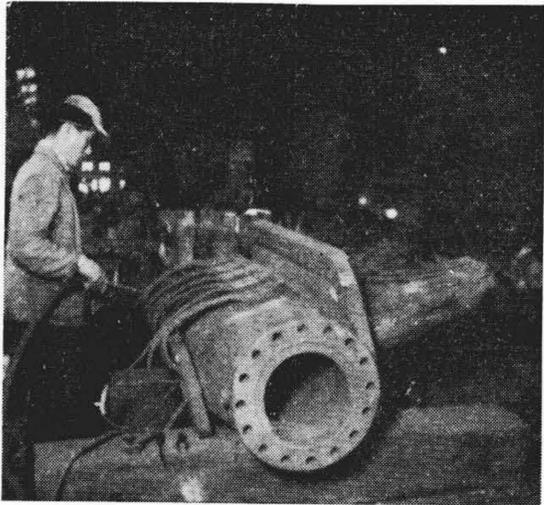
タービンケーシングは、大形のものになると30 ton位のものもあり、構造が複雑なので鋳造も、鋳造後の検査もこれを容易にするためしばしば熔接構造が用いられる。CrMoV鋼は焼入性がよいため、熔接による熱影響部の硬化性に著しく大きく、欠陥のない熔接を行なうためには適切な熔接棒によって作業することはもちろん適切な予熱および後熱処理が必要である。

熔接性を究明するためには、これら諸鋼材について恒温変態図を求め、熔接性を明らかにするとともに、さらに連続冷却変態図を求め熔接熱サイクル再現装置を用い、熔接熱影響部の金相学的変化を究明することが肝要である。

従来CrMo鋳鋼を共金熔接したものは熔接鋼の強度がケーシング材の強度よりも小さく、そのため母材よりも熔着鋼のほうが比較的



第 18 図 磁気探傷ブロード法の一例



第 19 図 磁気探傷コイル法の一例

探傷検査，内部の相当深いところにあるものは放射線検査，超音波探傷検査が用いられている。

第 18 図は磁気探傷ブロード法，第 19 図は同じくコイル法の一例を示す。

9. 結 言

タービンケーシングの経年破損について日立製作所では数年前から研究した結果次の結論に達した。

(1) ケーシングの構造を肉厚均等かつ対称とし，応力集中率を下げるよう隅肉Rを大きくすれば，熱応力はかなり軽減できる。

(2) 起動停止のひん繁な運転をすれば，それだけタービンの寿命を短かくすることになるので極力避けることが望ましいが，全周通気による主塞止弁バイパス運転法を採用することにより，ケーシング壁内外の温度差を少なくし熱応力を軽減することができる。

(3) 長年月蒸気にさらされているとケーシング材がぜい化するのので，材料の選定，熱処理の合理化をさらに検討する必要がある。

(4) 塑性変形を伴うような大きな塑性ひずみと破断繰返し回数即ち寿命との間には一定の関係があり，低合金鋼時にCrMoV 鋳鋼は一般炭素鋼に比べ降伏点が高く，塑性ひずみが小さい点で熱疲労強度上非常に有利である。

(5) CrMoV 鋳鋼のケーシングで，熔接構造のものにはクリープ破断強度の高い新熔接棒を開発したので，これを使用することにより強度的に一層安全である。

(6) 鋳造時の内部欠陥は，最近の精密検査で完全に除去できるようになったので以前発生したようなき裂事故は完全になくなった。

(7) 以上のような設計，製作，検査の全面にわたり実際的な研究に基づき検討実施し，かなりの成果をあげているので今後は上述のような運転法を実施するならばケーシングのき裂事故をなくし，タービンの寿命を長くすることができると確信する。

最後に本研究を行なうにあたり種々ご指導いただいた東京電力株式会社寺田重役，九大石橋教授，日立金属株式会社田村重役，長島鋳造部長，日立製作所日立研究所小野部長，根本，佐々木両主任研究員，大内田主任研究員，楠本主任，日立工場綿森部長，桑野課長，そのほかの各位に厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 石橋：機学誌，60，15（昭32-1）
- (2) 桑野：機学誌，講演前刷集，122（昭35-10）
- (3) 楠本：日立評論，43，262（昭36-2）
- (4) 長島：鋳鋼資料，109（昭28-12）
- (5) ASTM-ASME. Joint Committee ASTM-STP 151（1953-Oct）

早く切断されていたので熔着鋼の強度をさらに増加させることについて，日立製作所では独自の試作熔接棒を開発し，熔接鋼の強度，作業性の難易を実験し，かつき裂性試験には実物大のものを作って詳細に試験し，実用熔接棒として十分使用可能なることを確認し現在全面的に使用している。

第 17 図に今回日立製作所で開発した新熔接棒による熔接部のマクロ組織を示す。

8. 検 査

タービンケーシングのき裂事故を防止する一つの方策は，精密検査の確立である。鋳造当時の微少欠陥が，き裂の進展を早めついに重大な事故を起すことを考え，あらゆる点から完全な検査が必要である。

鋳造時の欠陥には，通常表面欠陥と内部欠陥とがある。

表面欠陥には酸洗い検査，ダイチェック検査が用いられている。内部欠陥のうち，表皮下のきわめて浅いところにあるものは，磁気