

米国の火力発電所蒸気タービンロータのバースト

【1974年6月19日、米国 テネシー州 ギャラティン】

新田明人((財)電力中央研究所 材料科学研究所)

小林英男(東京工業大学大学院 理工学研究科)

米国テネシー州中央部のギャラティン(Gallatin)にあるテネシー峡谷開発会社(TVA)ギャラティン(Gallatin)2号ユニットの中・低圧一体型のタービンロータが1957年5月の運転開始後106,000h経った1974年6月19日の冷機起動(ロータのメタル温度が室温まで下がった状態からの起動)中(回転数3,400rpm)に脆性破壊した。その結果、数十個の破片となり、その一部はボイラ建屋まで飛散した。当時、このロータに対しては中心孔の探傷検査が義務付けられていなかったため、中心孔付近に存在した大きな硫化マンガン(MnS)の偏析域に気付かずに運転が続けられ、そこからクリープ疲労*き裂が進展し、運転中の焼戻し脆化と相俟って脆性破壊に至った。事故を契機に、電力会社は所有する全てのロータの中心孔探傷検査を実施するとともに、EPRI(米国電力研究所)が蒸気タービンロータの継続運転/廃却(Run/Retire)を判定する専用コード(SAFER)を開発し、同コードがロータの運用管理に使用された。本事故は米国の内外に大きな衝撃とともに、非破壊検査の必要性などの多くの教訓も与えており、米国をはじめ日本など各国における蒸気タービンロータの技術進歩を促したものである。したがって、後世にも伝承していくべき重大事故の一つに挙げられる。(*クリープは金属材料に高温である一定の力が作用したときに徐々にひずみが蓄積していく損傷であり、力が繰り返し作用したときに起こる疲労損傷と重畳するクリープ疲労では、損傷の進行が速くなる。)

1. 機器

1954年に大気溶解インゴットから鍛造され、955 で焼ならし処理(微細で均一な金属組織にすることで機械的特性を改善させる熱処理)が施されたCr-Mo-V 鍛鋼(ASTM A470 Class8)製の中・低圧タービンロータで、1957年5月から出力225MWでベースロード運用(定格負荷での連続運転)されており、蒸気条件は13.8MPa、566 で回転数は3,600rpmであった。

2. 事象

TVA Gallatin 2号ユニットの中・低圧一体型のタービンロータが、1957年5月の運転開始後106,000h経った1974年6月19日に、補修による長期停止後の冷機起動(ロータのメタル温度が室温まで下がった状態からの起動)中(回転数3,400rpm)に脆性破壊した(図1)。その結果、数十個の破片となり、その一部はボイラ建屋まで飛散した。

(1) フォールトツリー解析の結果

破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー解析(図2)

1950年代の大気溶解インゴットから製造された当該タービンロータの中心孔付近にMnS偏析

域が内在していた。しかし、当該ロータの熱処理条件では当時、中心孔の超音波探傷を要求しないものであったことから、その存在に気付かずに10万時間を超える運転が続けられ、その間にクリープ疲労相互作用によるき裂が成長していった。また、その長期運用に伴う焼戻し脆化が生じていたため、補修による長期停止後の冷機起動中に脆性破壊に至った。

機器の設計と製作における不適切・不良に着目したフォールトツリー解析(図3)

当時の蒸気タービンロータ鋼(Cr-Mo-V鍛鋼)では、焼ならし温度が1100 の場合のみ中心孔の探傷検査が実施されていたが、当該ロータの焼ならし温度は955 であったため、中心孔の超音波探傷は行われなかった。そのため、インゴット製造時に生じた大きなMnS偏析域が中心孔付近に存在することに気付くことなく長期間の運用に供され、バースト事故に至った。

(2) イベントツリー解析の結果(図4)

大気溶解によるCr-Mo-V鍛鋼インゴットに生じたMnS偏析が中心孔付近に内在することが、中心孔探傷の要求されない955 という焼ならし温度で熱処理されていたため、検知されないまま長期運用に供された。その結果、内在したMnS偏析域からクリープ疲労によるき裂が発生・成長し、長期運用に伴う焼戻し脆化と相俟って、冷機起動中に脆性破壊するに至った。

3. 経過

本タービンロータは1954年に大気溶解された955 焼ならしCr-Mo-V鍛鋼製で1957年5月から出力225MWでベースロード運用(定格負荷での連続運転)されており、蒸気条件は13.8MPa、566 で回転数は3,600rpmであった。

1950年代の大気溶解による本タービンロータの中心孔付近に硫化マンガン偏析(MnS)域が内在していた。当時の蒸気タービンロータ鋼(Cr-Mo-V鍛鋼)では、焼ならし温度が1100 の場合のみ中心孔の探傷検査が実施されていたが、当該ロータの焼ならし温度は955 であったため、中心孔の超音波探傷は行われなかった。そのため、MnSの偏析域の存在に気付かずに10万時間を超える運転が続けられた(図5)。図6に示すように、その間にクリープ疲労相互作用によるき裂が成長していった。また、材質的には長期運用に伴う焼戻し脆化が生じていたため、補修による長期停止後の冷機起動(ロータのメタル温度が室温まで下がった状態からの起動)中に脆性破壊に至った。その結果、数十個の破片となり、その一部はボイラ建屋まで飛散した。

4. 原因

事故を経験した焼ならし温度1100 のロータに対しては、中心孔探傷検査を要求していたが、事故対策として焼ならし温度を955 に変更したロータには中心孔探傷検査を要求しなかった。全てのロータに中心孔探傷検査を要求していれば、大きなMnS偏析域の存在は検知され、バースト事故は生じなかった。

5. 対処

(1) 本事故を契機に全ロータに中心孔探傷検査が要求されるようになった。特に、1950年代に製造された大気溶解によるCr-Mo-V鋼のインゴットの中心部には硫化マンガン等の偏析が生じやすいため、その確認と除去を目的に中心孔が設けられている。しかし、本事故におけるように完全

な除去は困難であるため、ロータの中心孔探傷検査は不可欠である。

(2) インゴット中心部に偏析し易い硫化マンガン等を除去するため中心孔を設けた中空ロータでは、遠心力による周方向応力は中心孔表面で最大となる。一方、中実ロータでは、中心で周方向応力が最大となるが、その値は中空ロータよりも小さい(例えば、中空ロータで内径が非常に小さい場合と比べると、下記のように最大の周方向応力は 1/2 となる)。したがって、最大応力が小さくなる中実ロータの方がクリープ損傷等に対しては有利になる。大気溶解の時代から次第に製鋼技術が進歩し、真空溶解法等が開発・導入されたことにより、最近では不純物が少なく高品質化が進み、中実ロータが採用できるようになった。なお、ロータのような回転円筒に作用する最大応力は以下ようになる。

(a) 中空回転円筒

円周応力 σ_{θ} は内周で最大値を示し、次式のように表される。

$$\left(\sigma_{\theta}\right)_{\max} = \left(\sigma_{\theta}\right)_{r_a} = \frac{\omega^2}{g} \frac{3-2\nu}{4(1-\nu)} r_b^2 \left\{ 1 + \frac{1-2\nu}{3-2\nu} \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、 r_a は内半径、 r_b は外半径、 ν は比重量、 ω は角速度(一定)、 g は重力の加速度、 σ_{θ} はポアソン比である。(1)式で内半径が小さくなり、 r_a が0に近づけば

$$\left(\sigma_{\theta}\right)_{\max} = \frac{\omega^2}{g} \frac{3-2\nu}{4(1-\nu)} r_b^2 \quad (2)$$

となる。

(b) 中実回転円筒

円周応力 σ_{θ} および半径応力 σ_r はともに中心で最大となり、次式のように表される。

$$\left(\sigma_{\theta}\right)_{\max} = \left(\sigma_r\right)_{\max} = \frac{\omega^2}{g} \frac{3-2\nu}{8(1-\nu)} r_b^2 \quad (3)$$

今、外半径 r_b が等しい同材質の中空円筒と中実円筒が同じ角速度 ω で回転している場合を考える。中空円筒の内半径 r_a が非常に小さいとき最大円周応力は(2)式で与えられ、一方中実回転円筒の最大円周応力は(3)式で与えられる。したがって、両者を比較することにより、中実回転円筒の最大円周応力は中空回転円筒の 1/2 となることがわかる。

6. 対策

事故直後の対策として、電力各社において以下を実施した。

- (1) ロータの取替(中心孔検査の結果に基づきロータを取り替える水平展開の実施)
- (2) 中心孔探傷検査の義務付け

事故後数年にわたる米国電力研究所(EPRI)での研究開発を経た後の対策として、

- (1) ロータ寿命解析コードの開発(EPRI)とそれによる寿命(Run/Retire)管理(電力会社)

本事故の直接的な関与はないが、それ以降の技術進歩の結果に基づく対策として、メーカーが以下を実施している。

- (1)真空溶解法の開発・導入
- (2)中実ロータの開発・導入

7. 知識化

確固たる技術的根拠なくして非破壊検査を免除すべきではない。
(技術的に曖昧なところがあれば、非破壊検査すべき)

8. 背景

1950年代に大気溶解で製造されたCr-Mo-V鍛鋼ロータには、硫化マンガンなどの非金属介在物が偏析し易いが、当時中心孔の非破壊検査は義務付けられていなかった。中心孔を設けることで硫化マンガン偏析等の欠陥が除去できるとの思い込みがあったのかも知れない。また、1968年には1100℃焼ならしCr-Mo-V鍛鋼製のロータに対し中心孔の超音波探傷が勧告されたが、本事例では955℃と検査対象外の熱処理温度であったため、非破壊検査は行われなかった。もし検査が行われていたならば、破壊の起点となった中心孔付近の硫化マンガン偏析域は検出可能な大きさであったため、当然見つけられたはずである。非破壊検査を怠ると、思いがけない事故を招く(痛い目に会う)という好例である。これ以外にも、非破壊検査の必要性和重要性を痛感させられる事故事例は数多くある。

9. 後日談

この事故は当時米国の内外においてセンセーショナルに伝えられ、米国は勿論、わが国でも全ての蒸気タービンロータの中心孔検査が行なわれた。米国内では、この事故を契機にEPRI(米国電力研究所)が、中心孔の超音波探傷による指示欠陥を自動的に取り込み、有限要素法と確率論的破壊力学を用いて指示欠陥からのクリープ疲労き裂の進展を評価し、蒸気タービンロータの継続使用か取替えかを判定する専用コードSAFER(Stress And Fracture Evaluation of Rotors)を開発した。また、多くの廃却ロータを用いて、超音波探傷の精度評価、き裂進展や経年的な焼戻し脆性等のデータベース開発も行なわれた。その後、同コードは米国内外で広く採用され、特に米国では、探傷で欠陥が見つけられても、SAFERで継続使用可と判定され、そのまま運用されたロータも数多くある。

10. よもやま話

蒸気タービンロータは大型の高速回転体であるため、本事故で見られたように、その破壊は破片がミサイルのように飛散し大きな被害をもたらす危険性がある。表1はこれまでに経験した代表的な蒸気タービンロータのバースト事故をまとめたものであり、死傷者の出た事故もある。因みに、わが国における同様なバースト事故として、1970年に起こった三菱重工の長崎造船所における事故⁽³⁾が挙げられる。

わが国では、従前より予防保全を基本にプラントの維持管理が為されており、特に高速回転体である蒸気タービンロータの場合、き裂等の欠陥が見つかり、直ちに取除かれてきた。たとえば、図7(文献(4)中の図3を修正)は高圧タービンロータのヒートグループ全周にわたり熱疲労き裂が入

った事例であるが、き裂部の除去(スキンカット)とヒートグループの曲率拡大(応力集中低減)加工が予防保全策として行われた。また、この事例から熱疲労によるき裂発生までの寿命評価の重要性が指摘できる。すなわち、蒸気タービンロータでは起動停止等の過渡運転時の温度変化を制限し熱疲労による寿命消費量(累積値 100%がき裂発生寿命)を管理しているが、この事例では寿命消費量の累積値 23%で同図のき裂が発見され、熱疲労寿命評価の高精度化の必要性が痛感されることとなった⁽⁵⁾。因みに、1980 年代半ばにわが国にもSAFERが導入されたが、オリジナルなき裂進展の解析機能は使用されず、改めてき裂発生までの寿命を評価する損傷解析機能を追加する改良が加えられた。このように、米国の事後保全に対し、わが国では予防保全が採用されており、それぞれに一長一短があるが、国によって保全に対する考え方も異なっている。

表1 過去の代表的な蒸気タービンロータのバースト事故

事故発生年	国名	ユニット名	種別	原因
1950	オランダ	Nijmijen	低圧ロータ	脆性破壊(詳細不明)
1951	ドイツ	(シーメンス社)	低圧ロータ	脆性破壊(詳細不明)
1954	アメリカ	Ridgeland#4	低圧ロータ	脆性破壊(欠陥起点)
1970	日本	(三菱重工)	低圧ロータ	脆性破壊(欠陥起点)
1972	日本	海南#3	低圧ロータ	装置取付け不良 + 共振
1974	アメリカ	Gallatin#2	中圧ロータ	クリープ疲労 + 脆化

11. 主シナリオ

1. 誤判断
2. 狭い視野
3. 規格不良
4. 計画・設計
5. 計画不良
6. 無検査
7. 蒸気タービンロータ
8. 大気溶解 CrMoV 鍛鋼
9. 中心孔
10. MnS 偏析の見落とし
11. 使用
12. 運転・使用
13. 機械の運転・操縦
14. 破損
15. 破壊・損傷
16. クリープ疲労
17. き裂・割れ
18. ロータバースト(飛散)

<参考文献>

- (1) L.D.Kramer and D.Randolph, "Analysis of TVA Gallatin No.2 Rotor Burst : Part -Metallurgical Considerations," Proc. 1976 ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction, pp.1-24(1976).
- (2) D.A.Weisz, "Analysis of TVA Gallatin No.2 Rotor Burst : Part -Mechanical Analsis," Proc. 1976 ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction, pp.25-40(1976).
- (3) 畑村洋太郎編著、「続々・実際の設計 失敗に学ぶ」、日刊工業新聞社、pp.342-349(1996)
- (4) 帆足純, 寺山俊郎, 火力原子力発電, 第 24 巻, 第 10 号, pp.1128-1144 (1973 年 10 月)
- (5) 桑原和夫, 新田明人, 電力中央研究所研究報告, 74049 (1974 年 11 月)

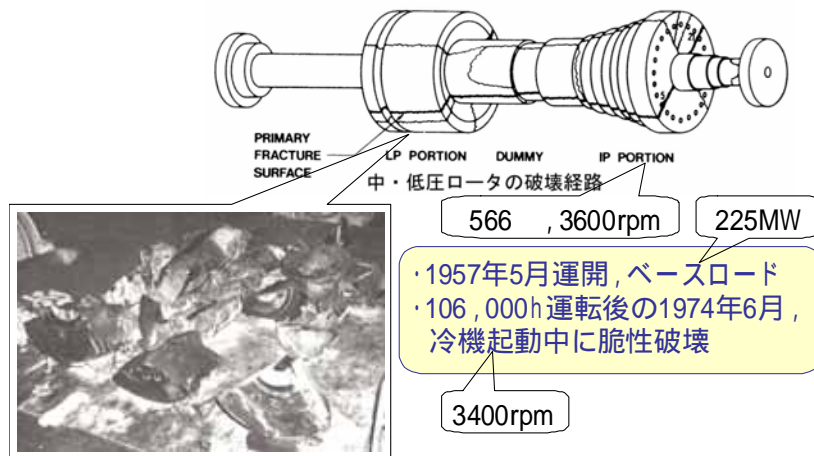


図1 TVA Gallatin 2号中・低圧ロータのバースト事故の概要

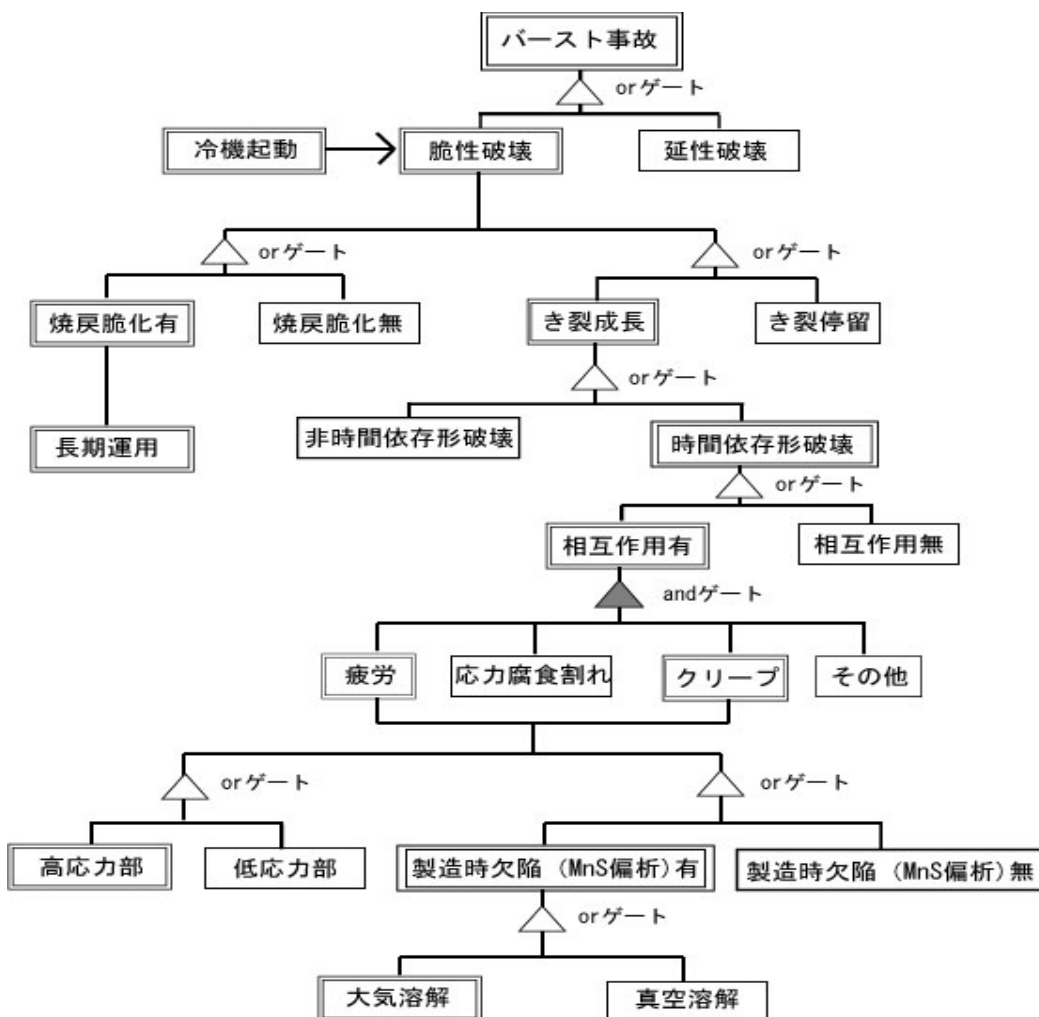


図2 破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー図

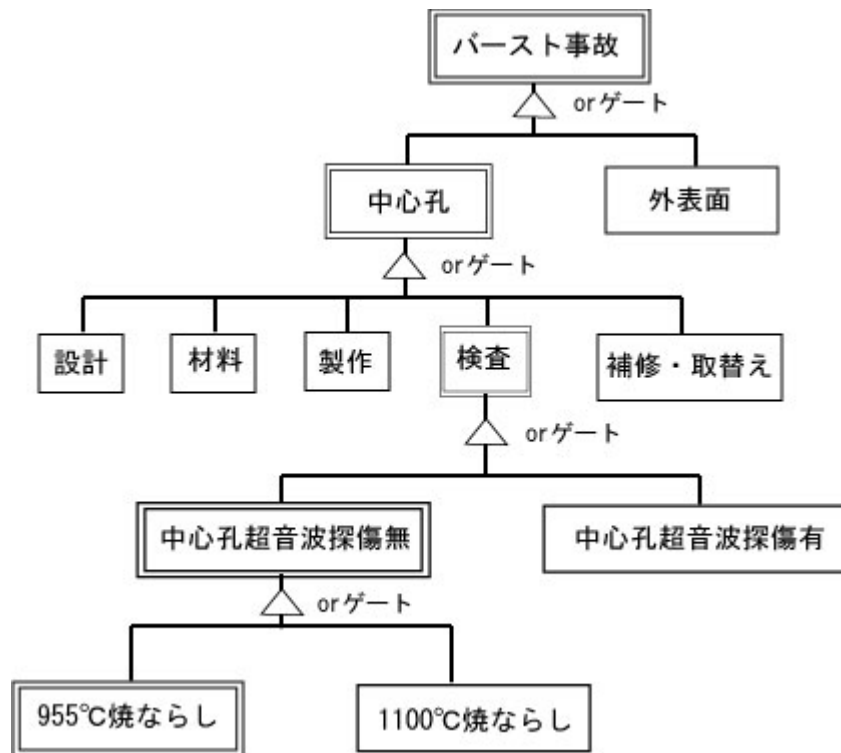


図3 機器の設計と製作における不適切・不良に着目したフォールトツリー図

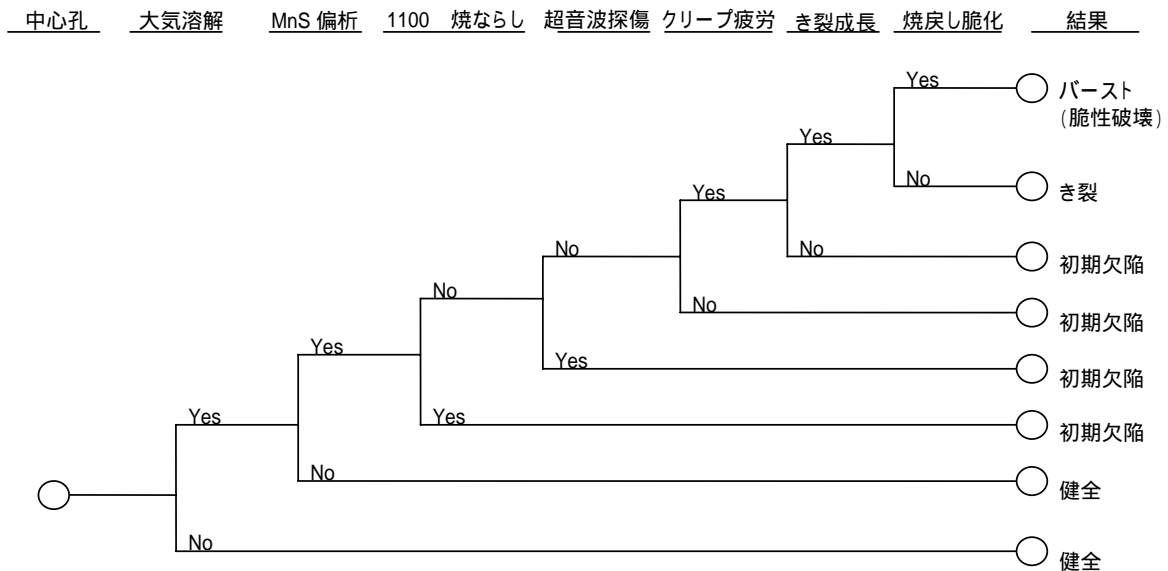


図4 超音波探傷不実施による製造欠陥の見落としならびにそこを起点とするクリープ疲労き裂の成長と焼戻し脆化の重畳による蒸気タービンロータのバースト事故のイベントツリー図

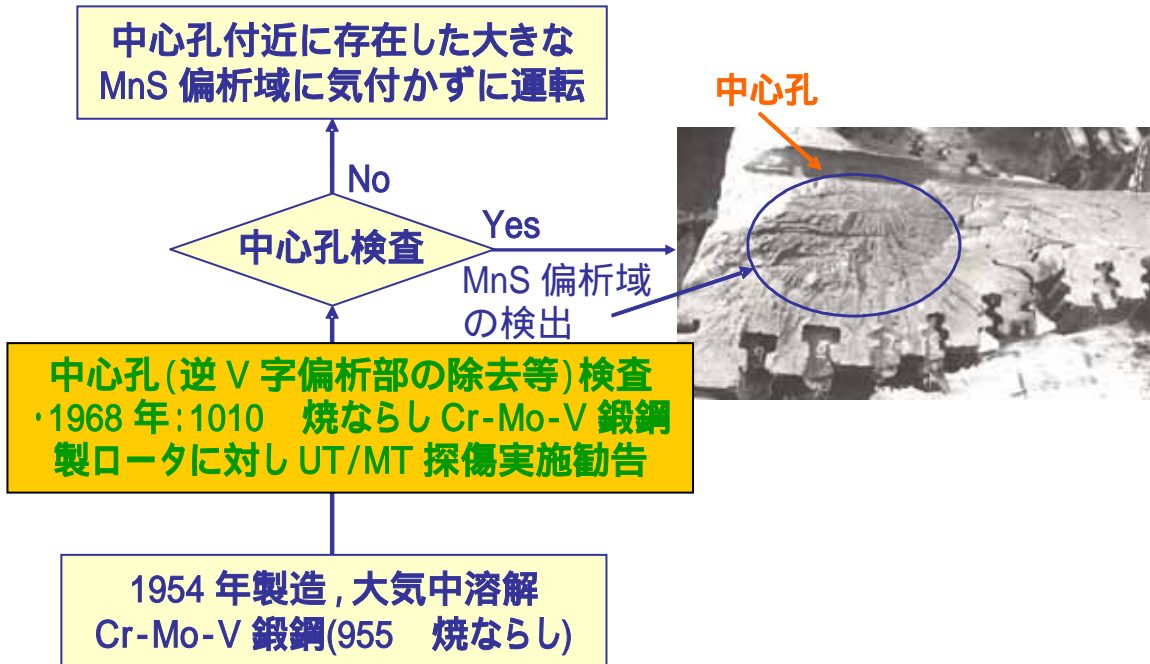


図5 中心孔付近に内在していた硫化マンガン偏析域

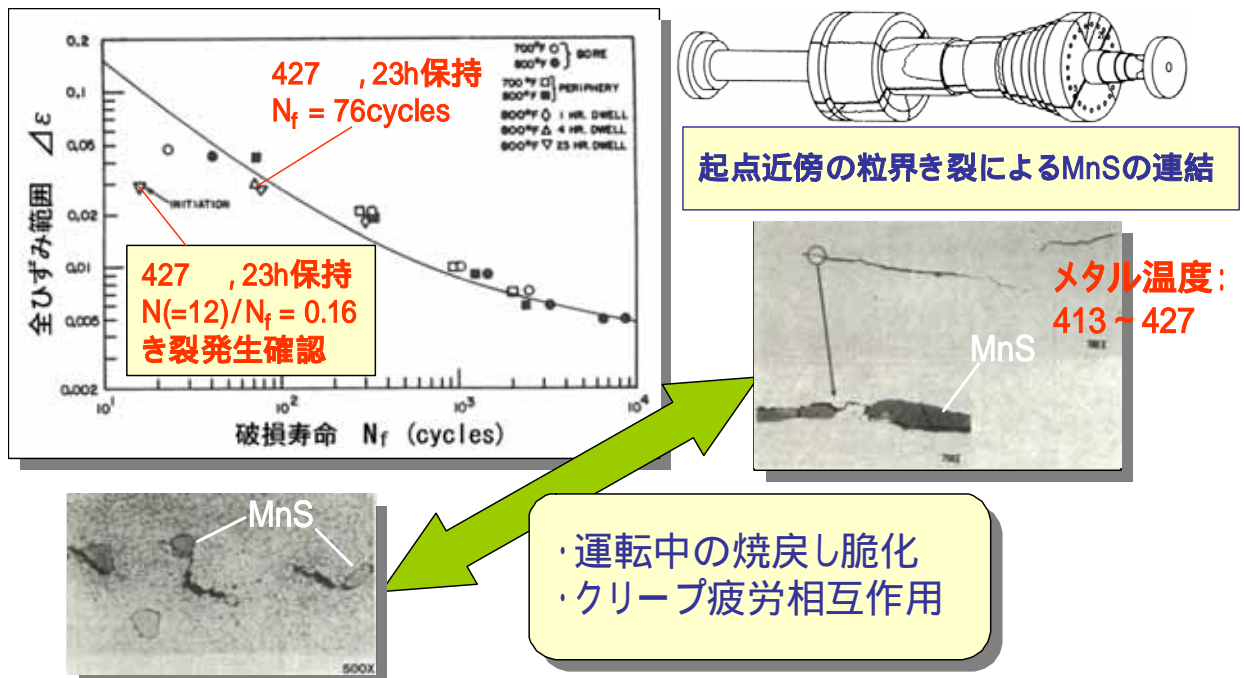


図6 硫化マンガンからのクリープ疲労相互作用によるき裂の成長

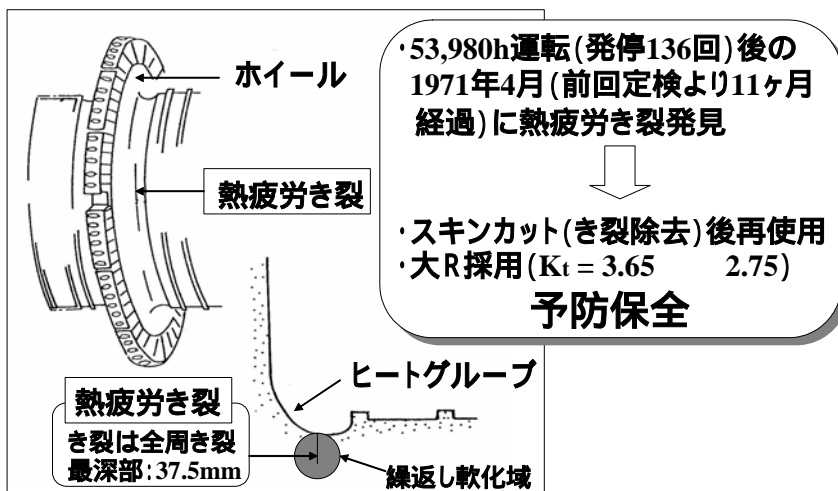


図7 高圧タービンロータのヒートグループに発生した熱疲労き裂