第1部(7) 蒸気タービンの寿命評価とリスクベースメンテナンス

Life Assessment and Risk-based Maintenance for Steam Turbines

正 藤山 一成 (東芝)

Kazunari FUJIYAMA, Toshiba Corporation, Suehiro-cho 1-9, Tsurumi-ku, Yokohama

An integrated approach for risk-based maintenance was established to support optimum maintenance planning for steam turbine components. The plant life-cycle scenario is described through parts' life-cycle event trees for various damage phenomena and maintenance actions. The risk is estimated through probabilistic risk analysis calculating unreliability and expected expense for each event. Maintenance planning was determined through the net benefit obtained by operational income minus risk and maintenance cost. The unreliability is calculated as the function of operation time or cycles using field database. When the field data for detrimental phenomena was not obtained, probabilistic life assessment method could be utilized. The risk to detrimental state is predicted using life prediction rules with statistical distribution of experimental data. A personal computer (PC) based RBM system was developed consisting of the field database, event trees, statistical analyses, risk analyses and maintenance judgement.

Key Words: Risk-based Maintenance, Steam turbine, System, Probabilistic Risk Assessment, Life Assessment

1. はじめに

わが国の火力発電設備は、長期間使用されたプラントが多 くを占め、かつ運用形態の多様化が進んでいることから、余 寿命診断に基づく木目細かい保守管理が適用されている¹⁾. 一方、電力事業の自由化に伴い、経済的な保守管理計画を立 案することが必要になってきており、そのための有力な手法 としてリスクベースメンテナンス(RBM)導入の動きが活発 化している²⁾.

火力発電設備の中でも、蒸気タービンは高温・高圧・高速 回転条件で使用され、多くの部品が高い精度で緻密に組立て られているため、ある部品の故障が他の部分に波及する可能 性が強いと考えられる.そこで、蒸気タービンのリスク評価 において、確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)³⁾手法を応用し、システム安全工学の一手法であ るイベントツリー(事象の木)を用いて故障の波及シナリオ を表わすと共に、イベントツリーを構成する個々の事象に対 して故障の生起確率とその影響度と併せてリスクを定量的 に評価する方法が有効であると考えられる.

故障の生起確率の計算は、実際に故障事象が多く記録され ている場合はフィールドデータの統計解析によって求める ことができるが、大きな損害に至る事象は予防保全的に対策 が施さるため一般にデータは少ない.その場合には、事象の 確率論的予測を行ってリスクを求めることが必要となる.ク リープ、熱疲労、腐食疲労などの現象は余寿命評価手法が開 発されており、検査に基づく余寿命予測が行われている.そ こで、検査結果をもとに確率論的余寿命予測を行って故障確 率を予測しリスク評価を行う方法を導入する.

本稿では、まず蒸気タービン高温部品に対する余寿命評価 法と"ライフサイクルイベントツリー型"RBM 手法の概要に ついて述べる.この中で、蒸気タービンの部品展開とライフ サイクルにわたるイベントツリーを組合せ、総合的なメンテ ナンスシナリオを表現する.次に熱疲労き裂に関する確率論 的余寿命予測からリスクを評価する手法の例を示す.さらに PC ベースの RBM 実行支援システムを紹介する.

- 2. 蒸気タービンの余寿命評価法
- 1. 蒸気タービンの劣化・損傷事象⁴⁾
 図1に蒸気タービンの代表的な劣化・損傷事象の例を示す.

高温部の高・中圧タービンにおいては、蒸気流中の剥離スケ ールによるノズルや動翼のエロージョン、クリープによる変 形・割れ、熱疲労・低サイクル疲労による割れ、振動による 高サイクル疲労・摩耗、酸化および材料の軟化・脆化などの 劣化・損傷因子がある.低圧タービンでは、水滴によるノズ ルや動翼のエロージョン、振動による高サイクル疲労、腐食 疲労、応力腐食割れ(SCC)などの損傷因子がある.



Fig.1 Failure modes of steam turbine components.

日本機械学会〔Na03-06〕材料力学部門2003年春のシンポジウム講演論文集('03.3.28~29 東京)

図2に,蒸気タービンに一般的に考えられる基本的な損傷 事象のイベントツリーを示す、イベントツリーは、発端とな る故障事象から始めて、その影響が次々と他の部品にも波及 していく過程を表わし、タービンが運転できなくなる状態に まで展開する.高・中圧タービンでは、蒸気通路部における 高温酸化スケールの生成により, 弁棒などの摺動部に固着が 生じて制御不能になったり,スケールが脱落して蒸気流によ って運ばれ、ノズルや動翼のスケールエロージョンが生じる. さらに、エロージョンにより通路面積の変化が生じ、性能低 下や制御不能事態が生じ,振動増大などを引き起こして,き 裂発生・進展を経て破損に至る.一方,遠心力,内圧応力や 熱伸び差による変形から,回転体の振動増大や接触による摩 耗,熱疲労・クリープ損傷の蓄積によるき裂発生とその後の き裂進展により破損が生じる.低圧タービンでは、腐食環境 における腐食疲労・SCC が生じ破損に至る.また,水滴エロ ージョンの進行によっても破損が生じる.



Fig.2 Basic event trees for steam turbine components.

2. 2. 蒸気タービンの余寿命評価法 5)

図3に、蒸気タービンの解析と非破壊計測を組合せた決定 論的余寿命評価法の例を示す. 部材の温度・応力解析に基づ く方法では、まず、タービン機器の運用条件(定常運転状態 または起動停止時の過渡状態における蒸気温度, 圧力, 回転 数,負荷など)に対する構造解析から評価部位の温度,応力, ひずみを求める.次に、クリープや疲労などの損傷の蓄積を 材料の寿命特性と運転履歴(運転時間、起動停止回数)とか ら時間比および繰返し数比として計算する.このとき、使用 するクリープや疲労の材料特性は非破壊的に計測した材料 劣化状態(硬さ)を反映して修正したものとする. 部材のき 裂発生までの余寿命は,累積したクリープと疲労の損傷値の 組合せが、 クリープ・疲労限界損傷値に到達するまでの期間 とする. き裂発生後の進展予測には破壊力学による計算を行 い、非破壊的に計測した材料の劣化状態(脆化)を反映して 限界き裂寸法に達するまでの期間を予測する.また,非破壊 的にクリープボイド,硬さ、き裂分布などを測定し、損傷評 価を行う非破壊的損傷評価法も用いられる.

決定論的余寿命評価には、材料の下限特性が用いられることが多いが、その設定には信頼区間の99%下限などがよく用いられる.

本手法を確率論に拡張するためには、材料の統計分布特性 と、運転パターンの統計分布特性が必要である.国内の蒸気 タービンにおいては、運転履歴は詳細に把握されており、振 動応力を除いては、ほとんど不確定性は無いと考えられるた め必ずしも統計分布を用いる必要はない.ただし、運転状態 に不確定要因のある場合は統計的分析が必要である.



Fig.3 Life assessment method by analysis and DNE.

解析に基づく損傷評価に用いる材料の寿命特性としてク リープ,高温低サイクル疲労(熱疲労)などに関する特性が あるが,バラツキの統計処理を行うため規格化を行う.図4 に示すように,応力σ(MPa)とビッカース硬さ HV との比 σ/HV を縦軸にとってラーソン・ミラーパラメータ (*P=T*(20+logt,),*T*:温度(K),t;クリープ破断時間(h))で整理す ると,新材・人工劣化材・実機使用劣化材をまとめたデータ 群が得られる.その最適近似線は次式で与えられる.

$$P = a_0 + a_1 \left(\log \frac{\sigma}{HV} \right) + a_2 \left(\log \frac{\sigma}{HV} \right)^2 + a_3 \left(\log \frac{\sigma}{HV} \right)^3 \quad (1)$$
ただし、 a_0, a_1, a_2, a_3 定数

図5に,式(1)の最適近似線から求めた実破断時間/推定 値の分布を示す.この場合、2母数ワイブル分布近似より対 数正規分布の近似度がやや良好であった.この分布から実機 の温度・応力に対するクリープ寿命の最適近似値を用いて寿 命の累積確率分布が求められる.





-37-

図6に CrMoV 鋳鋼の高温低サイクル疲労特性を示す.室 温から600℃まで、塑性ひずみ範囲Δε,と破損繰返し数 N(繰 返し定常状態のピーク応力から25%応力低下時の繰返し数) の関係として次の近似式が得られる.

$$\Delta \varepsilon_{p} = C_{p} N_{f}^{\alpha_{p}}$$
(2)
ただし, $C_{p} \alpha_{p}$:定数.

また,非破壊的損傷評価に用いる特性の例として,図7に 途中止め試験による最大き裂長さ*a_{max}と繰返し数比NINf</sub>の関 係を示す.この関係は次式で表される.*

$$a_{\max} = A \exp\left(B\frac{N}{N_f}\right) \tag{3}$$

ただし, A,B:定数.

低サイクル疲労における式(3)の関係は,試験片寸法に比べて大きな領域に均一なひずみ範囲が繰返され,かつ構造として応力開放が顕著でない範囲で,相似的にそのまま外挿して使用可能であることがシミユレーションや実機との比較などで示唆されている.⁷

式(2),式(3)から,実験寿命 N_{fex} (または繰返し数比(N/N_{fex})と推定値 N_{fex} (または(N/N_{fex})の比の分布形を求めると,対数正規または2日数ワイブル分布で近似できる.図8に2日数ワイブル紙にプロットした例を示すが, N_{fex}/N_{fex} と($N/N_{fex}/(N/N_{fex})$ の分布特性はほぼ一致する.これはNが途中止め実験における確定値のためである.そこで,実機のき裂損傷評価においても N_f の分布特性を用いることにする.



Fig.6 Low cycle fatigue property of CrMoV casting.



Fig.7 Maximum crack length vs. cycle ratio for CrMoV casting LCF specimen.



Fig.8 2-parameter Weibull distribution of life ratio for maximum crack length and for LCF life.

3. **蒸気タービンのリスクベースメンテナンス手法** 蒸気タービンの故障事象を検査履歴・補修履歴・運用履

歴・診断履歴などのフィールドデータに基づいて分析し、リ スク管理の基本的な流れである「リスク特定ーリスク分析ー リスク評価ーリスク対策」[®]に沿ったRBMを行う.

図9に蒸気タービンにおけるRBM実施プロセスを示す. 以下,この各ステップに沿って手順を説明する.



Fig.9 Risk-based maintenance flow for steam turbines.

3.1. 部品展開とイベントツリー作成⁹⁾

蒸気タービンの部品展開に対応した具体的なイベントツ リーを展開する.図10に、高圧タービンにおける、部品展 開とイベントツリーの組合せ例を示す.ノズルに生じた損傷 は、動翼やロータに影響を及ぼし、ロータの損傷は、ノズル、 動翼、軸受に影響を与える.これらの損傷は放置すれば部品 の破損を引き起こし、運転不能状態に至る.



Fig.10 .Parts-Event tree diagram for steam turbines.

3. 2. 故障確率の解析⁹⁾

故障確率の解析を行うに当って、まずイベントツリーを構成する各事象について、実際の保守管理記録からフィールド 故障データを抽出・分類し、同一機種の同一事象を運転時間 *t*および起動停止回数 N に対して時系列的に並べる. 故障し ていないユニットは、未故障データとしてデータ総数に加え る.

故障確率は,ある時刻 tまでに故障している機器の割合, すなわち不信頼度 F(t)で表わす.不信頼度 F(t)と信頼度 R(t)(t において正常な機器の割合)の関係は,次式で表わされる. (事象が繰返し数 Nに依存する場合 tを Nに置換える)

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{4}$$

不信頼度 F(t)を求める方法として,累積ハザード関数法を 用いる¹⁰⁾.累積ハザード関数 H(t)は,故障率λ(t)の累積関数 であるから,信頼度および不信頼度と次の関係式が得られる.

$$H(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t)$$
⁽⁵⁾

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\{-H(t)\}$$
(6)

実際の離散データから H(t)を求めるには、次式のように、時刻 t_k において故障した1台をその時点までの生き残り台数 n+1-i(n:機器総数, t:累積故障機器数)で割ったものをすべての故障について累計する.これを <math>H(t)の推定値 $\hat{H}(t_k)$ とする.

$$\hat{H}(t_k) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n+1-i}$$
(7)

ここで、不信頼度がワイブル型の寿命分布(ŋ,m は定数)

$$F(t)=1-\exp\{-(t/\eta)^m\}$$
 (8)

(9)

に従うならば、H(t)は次式によって近似されることになる.

$$H(t) = (t/\eta)^m$$

1

式(7)で求めた $\hat{H}(t_k)$ と運転時間 tの関係が式(9)により近似 できるか否かを両対数グラフによって検討し,近似度が良好 であれば不信頼度関数として採用する.近似度が良好でない 場合は,異なった現象が混在している場合があることから, イベントツリーの再分析を行ってデータの分割などの処置 を行う.

図11に,式(7)によって求めた H(t)の推定値と運転時間 t の関係を示す.データに対して式(9)による近似が成立ってい ることが分かる.図12は,図11の近似を式(8)から不信頼 度関数によって表示したものである.





3. 3. リスク評価⁹⁾

リスクは「故障確率×影響度」で定義されるが、ここでは、 時間の経過とともに変化するリスクを表現するために、不信 頼度関数×損害額をリスク(リスクコスト)とする.

損害額の算定には、計画外停止による収入源や、対策のための段取り費用と復旧費用などの項目を対象に応じてリストアップし、各費目を算定していく.

図13に、イベントツリーとリスク評価の例をノズルエロ ージョンの場合について模式的に示す.各イベントは波及す る順序に従って展開され、それぞれ不信頼度関数と損害額が 割付けられる.不信頼度と損害額の程度は楕円形の大小で定 性的に示してある.この両者を掛け合せ、イベントツリー内 のすべての事象について足し合わせることにより、リスクコ ストを運転時間(または起動回数)の関数として得ることが できる.なお、ここでイベントツリーを構成する各事象は、 復旧費用が算定しやすいように図10の項目をまとめてあ る.



Fig.13 Schematic of event tree and risk analysis.

3. 4. リスクベースメンテナンス方法⁹

前節では、リスク対策を行わない前提でのリスク評価法に ついて述べたが、保守管理計画の策定においては、種々のリ スク対策案を検討した上で最適な方法を選択することにな る.リスク対策案を考える場合には、まず、プラントの全使 用期間を想定し、その間の各部品のライフサイクルを考えて、 イベントツリーに対策を折込んだツリーを作成する.

図14に、ノズルエロージョンの場合について、リスク対 策案を考慮するためのライフサイクルにわたるイベントツ リーの作成例を示す.ここでは、リスク対策を施さず、未対

策部品を予定期間使いきった上でエロージョン対策品に交換する案1に対して、案2として、定期的な補修を2回実施した後対策品に交換する場合と、案3として、第1回目の補修時期に対策品に交換する場合を比較した.その結果、案3は初期にやや多い目の総コストが生じるが、その後の補修は不要となるため、案1の交換時点での高いリスクに対し、案3の方が有利となる.一方、案2は補修を繰返すことにより途中の総費用面では有利であるが、繰返し補修後対策品に交換する時点で、累積補修費と交換費の和が案3に比べ高くなっている.



Fig. 14 Risk-based maintenance scenario analysis.

図15に、対策を実施する保全間隔の最適な設定方法を横 軸に保全間隔,縦軸にコストをとって示す.対策コストは保 全間隔が長くなるほど低くなるが、この図では、年平均コス トとして表わしてある.運転による収入が時間に比例するも のとすると、対策コストとリスクコストの和との差が利得と なり、利得最大となる間隔でのインターバルが推奨される. 別法として総コスト最小の時期あるいは対策コストがリス クを下回る限界の時期に設定することも可能である.この例 ではいずれの場合も大差ないインターバルに設定される.



Fig.15 Risk-based optimization of maintenance interval.

4. 確率論的余寿命評価に基づくリスク評価

予防保全的なメンテナンスでは、き裂などが限界を超える 前に補修を施すため、限界を超えた時のリスクを予測するこ とが困難な場合がある.また、検査時に計測されるき裂寸法 は、ユニットや検査時期の違いにより一定ではない.そこで、 余寿命評価手法を用いて所定のき裂寸法に至る事象のリス クを予測することを考える.

いま,余寿命評価のための検査を行い,低サイクル疲労き 裂が観察されてその寸法が計測されたとする.決定論的には, 評価対象部位のき裂群の内の最大き裂長さ*a_{max}*を計測すれば, 疲労損傷として繰返し数比 *N/N_f*が式(3)のマスターカーブに より定まる.この N に起動停止回数を代入すると該当のき裂 を生じさせたき裂の基準寿命 *N_f*が定まる.この *N_f*にはバラ ツキがあるため,その確率分布を図8に示した2日数ワイブ ル分布で表わす.限界き裂寸法 *a_{cr}*に至る回数 *N_{cr}*は,式(3) から定まり,その分布が *N_f*の分布に等しいとする.

図16に、実機ケーシングの4回にわたるき裂の計測結果 に対する N_{er}の分布を示す.計測の都度,はつり除去を行っ ているため、形状が変わり加わるひずみ条件も変わることか ら、分布も異なっている.

図17に、横軸に累積起動停止回数をとり、a, に至る事 象の不信頼度関数を示す.ここで、はつり除去対策は不信頼 度が急激に増加する前の時期に行われたことを示す.ただし、 き裂に対するはつり対策は、クリープ強度に基づく残存肉厚 の判定によって制限される.



Fig. 16 Casing crack failure probability analysis.



-40-

5. リスクベースメンテナンスシステム^{9),10)}

リスク評価に基づく保守管理計画の策定には、種々の部品 と故障シナリオに対する計算が必要であり、効率的な処理シ ステムの開発が不可欠である.大規模な確率論的シミュレー ションを実施する場合を除き、リレーショナルデータベース (RDB)を用いて、RBM システムを構築することができる.

図18に、蒸気タービンのRBMシステムの概要構成を示 し、図19に画面例を示す.部品展開部では、対象とする部 品区分が表示され、評価しようとする部品の選択入力が行わ れる.次に、部品ごとに対応するイベントツリーと事象項目 が選択される.イベントツリーの各項目ごとに、目視検査、 寸法計測、欠陥検査データと運転履歴のデータが選択された プラントについてデータベースから呼び出され不信頼度関 数が計算される.この不信頼度関数と故障による予想損失額 と予防保全対策金額の入力値を組合せて、リスク評価および 最適保守管理インターバルが示される.



Fig. 18 Outline of steam turbine RBM system.



Fig.19 Risk-based maintenance system for steam turbines.

以上, 蒸気タービンのリスクをコスト関数として定量化し, プラントを部品展開と対策シナリオを含めたライフサイク ルイベントツリーの組合せに適用することにより, 運用上の 経済的評価を行う RBM 手法が適用できることを示した.本 手法をベースにデータベース, 確率論的シミュレーション, リモート監視・IT などの技術をプラントに応じてカスタマイ ズし, 図20に示すような総合的なリスクマネジメントシス テムを構築することにより, 点検・保守管理・寿命管理・リ スクコントロール設計・フレキシブル運用支援に活用するこ とができる.



Fig.20 The concept of risk management system and basic technologies.

6. おわりに

蒸気タービンについて、フィールドデータ信頼性解析と確 率論的余寿命評価に基づき、確率論的リスク評価を行って経 済的な保守管理計画を立案する RBM 手法とシステムについ て紹介した.本システムをプラント毎にカスタマイズして適 用することにより、プラント機器の信頼性と経済性の向上に 寄与することが期待される.

参考文献

- (1)藤井和哉,村尾周仁,富田彰,斎藤潔: 火力原子力発電,49, 263-279 (1998).
- (2)小林英男: 材料科学, 37, 171-177 (2000).
- (3) 酒井信介: 日本金属学会誌, 66, No.12, 1170-1176 (2002).
- (4)藤山一成,藤原敏洋,児玉寬嗣,齊藤和宏,吉瀬仁志,岡崎光芳: 材料, **52**, No.1, 28-33 (2003).
- (5)村田肇,浅田稔,竹下豊男,丹敏美,川本和夫,綾野真也,篠崎幸 雄,森田益夫,大野芳一:火力原子力発電,40, No.10, 1178-1182 (1989).
- (6)藤山一成,齊藤和宏,藤原敏洋,児玉寛嗣,吉瀬仁志,岡崎光芳, 高木健太郎:日本金属学会誌, 66, No.12, 1199-1205 (2002).
- (7)K.Fujiyama, K.Takaki, Y.Nakatani, Y.Yoshioka and Y.Itoh: Materials Science Research International, 8, No.3, 134-139 (2002).
- (8)三菱総合研究所, "リスクマネジメントガイド", 20(2000), 日本規格協会.
- (9)藤山一成:火力原子力発電技術協会関東支部 "現場に密着した最新の運転・予防保全技術に関する講習会"資料, 24-34 (2003).
- (10)塩見弘,関 哲朗, JUSE-RAS1 オフィシャルが、イト、ブ、ック, (1998)日 科技連出版社.
- (11)物質・材料研究機構, クリープ データシート, No.9B (1990).