

〈技術レポート〉

エキスパンションジョイントの寿命評価方法の検討

中部電力(株)火力センター 品質管理グループ 課長 鍵谷 幸生
ニチアス(株)浜松研究所 シール材分野 柴田 秀史

コンバインドサイクル発電のガスタービンと後流設備とをつなぐダクトには、熱膨張・熱収縮を吸収するために非金属製伸縮継手（エキスパンションジョイント）が使用されているが、メンテナンスに関する知見は十分ではない。そこで、中部電力(株)とニチアス(株)は共同でラボ試験を行い、エキスパンションジョイントの構成部品の劣化特性を調べ、寿命を決める要因を明らかにすることで、計画的なメンテナンス・取り替えに有効となる知見を得ることができた。

1. はじめに

電気は、クリーンかつ信頼性の高いエネルギーとして我々の生活に欠くべからざるものとなっているが、我が国はエネルギー資源に恵まれていないため、経済性、エネルギーセキュリティ、環境保全等の観点から、電源の多様化・ベストミックスが図られている。中部電力(株)においても、電源構成は図1に示すように火力（LNG、石油、石炭）、水力、原子力のバランスのとれたものとなっている。

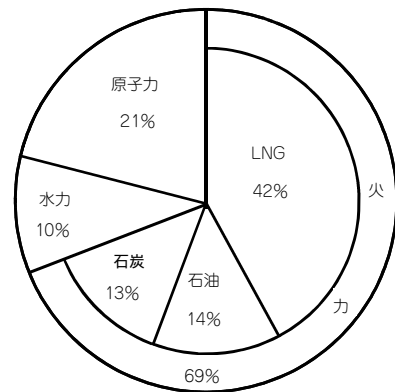


図1 中部電力の発電量の構成比

この中でLNGを燃料とする火力発電方式には、従来のボイラ・蒸気タービンを用いた発電方式に加えて、図2に示すようなガスタービンとボイラ・蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電方式（以後CC発電）がある。CC発電は、ガスタービンの排ガスをボイラに導きその排熱を有効利用することから発電効率が高く、経済性に優れており、また、CO₂やNO_xの排出が少なく、DSS（Daily Shutdown and Start up）が可能で需要変動に対する追従性が良い等、多くの利点を持つ発電方式である。CC発電に用いられるガスタービンは、効率の向上を追求するため燃焼温度の高温化が図られており、約1,300℃に高め

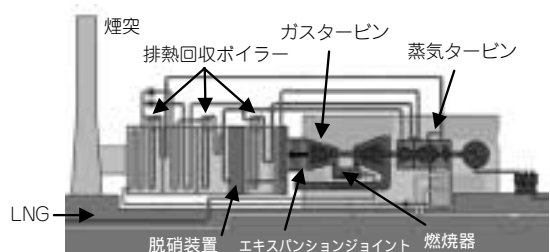


図2 コンバインドサイクル発電の構造構成例

ることで総合発電効率約49%を可能とする改良型コンバインドサイクル発電（ACC発電）が実用化されている。

また、既存のボイラ・蒸気タービンの出力増強策（リバウリング）として、ガスタービンを追設し、その排ガスをボイラに導くことで排熱を回収し、ガスタービンを単独設置した場合よりも高い発電効率を得られる排気再燃方式も導入されている（表1参照）。

これらACC発電に使用される1,300℃級ガスタービンの排ガスは、600℃以上の高温になるため、ガスタービンと後流設備とをつなぐダクトには、装置の起動停止に伴う大きな熱膨張・熱収縮を吸収するための非金属製伸縮継手（エキスパンションジョイント、以後EXP.J、写真1参照）が使用されている。しかしながら、これらは適用されてからの年数も浅く、メンテナンスに関する知見も十分でない。

今回、中部電力（株）とニチアス（株）は共同でラボ試験を行い、EXP.Jの構成部品の劣化特性を調べ、寿命を決める要因を明らかにすることで、今後の計画的なメンテナンスを行う上で有効な知見を得ることができたので、ここに報告する。

2. EXP.Jの構造と寿命

2.1 EXP.Jの構造

EXP.Jが取り付けられるダクトは、口径寸法が約4m以上であり、EXP.Jの構造は図3に示すようになっている。フランジ等金物部分を除くEXP.Jの基本構造は、内部流体をシールするための四弗化エチレン樹脂（PTFE）シートと補強用の耐熱クロスからなるベローズ部、及び内部の熱からベローズ部を保護する断熱ブランケットとそ

表1 中部電力のコンバインドサイクル発電設備

| 発電所 | 燃焼効率 [%] | 出力 [MW] | 運転開始時期 | 備考 |
|---------|----------|---------|----------|---------------|
| 四日市4号系列 | 42.5 | 560 | 昭和63年7月 | |
| 知多1号 | 41.0 | 529 | 平成8年8月 | リバウリング排気再燃方式 |
| 知多2号 | 41.0 | 529 | 平成7年8月 | " |
| 知多5号 | 39.8 | 854 | 平成7年6月 | " |
| 知多6号 | 39.8 | 854 | 平成6年9月 | " |
| 知多第二1号 | 40.7 | 854 | 平成7年2月 | リバウリング排気再燃方式 |
| 知多第二2号 | 40.9 | 854 | 平成8年7月 | " |
| 川越3号系列 | 48.5 | 1650 | 平成8年12月 | 改良型コンバインドサイクル |
| 川越4号系列 | 48.5 | 1650 | 平成9年11月 | " |
| 新名古屋7号 | 48.6 | 1458 | 平成10年12月 | 改良型コンバインドサイクル |



写真1 ニチアス製EXP.J T/#9999-NA NAベロー-Q

れを被覆する耐熱クロスからなる断熱部で構成されている。また、EXP.Jは取り付けられるダクトの位置によって使用条件が異なるため、その使用条件に応じた最適な材料構成・寸法で設計されている。

2.2 EXP.Jの寿命

工業製品の寿命は、JIS信頼性用語では「要求性能を満足できなくなり使用不能になったこと」と定義されている。これをEXP.Jに適用すると、要求性能は内部流体をシールした上でのダクト変位の吸収であるので、内部流体のシールができなくなった時、すなわちベローズの寿命がEXP.Jの寿命と定義できる。しかし、後に述べるように

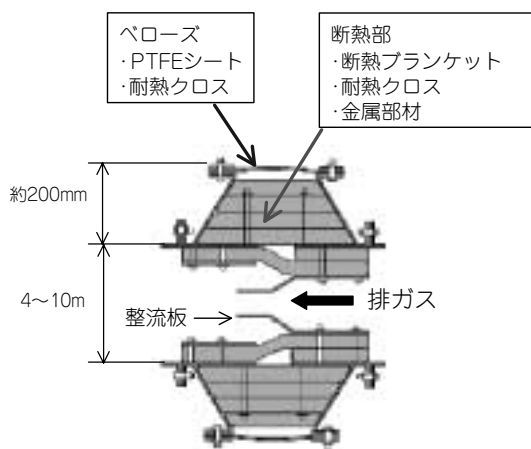


図3 エキスパンションジョイントの構造例

断熱部が劣化すれば、ベローズは温度上昇により急速に強度低下するため、断熱部の劣化もEXP.Jの寿命に大きく影響する。

2.3 研究の進め方

EXP.Jの寿命の推定は以下のステップで行った。

- ①EXP.Jの寿命には主に熱と屈曲の二つの劣化要因がある。各構成部品についてこれらを模擬した加熱試験、引張試験、耐折強さ試験を行った。
- ②特に屈曲については実際の屈曲状態が不明であったことから、実寸カットモデルを作成し、屈曲角度を求めると共に、EXP.Jの屈曲による劣化メカニズムを推定した。
- ③構成部品試験結果を基に、表2の各種手法により劣化特性を整理し、限界強度に至る時間・屈曲回数を推定した。なお構成部品の限界強度として、ベローズ部については内部流体圧力により発生する応力（計算値）を用い、断熱部については実機使用済み材の破損部と健全部の強度測定結果より推定した引張強さの値を用いた。

3. 構成部品の劣化試験

現在EXP.Jに用いられている構成部品の劣化傾向を探るため、加熱による外観、重量、引張強さ、耐折強さの変化を測定した。試験条件を表3に、試験結果を表4に示す。

外観観察では、断熱ブランケットはまったく変化がなく、耐熱クロスの一部と断熱部の金属部材

表2 寿命推定方法

| 方法 | 内容 |
|---------|--|
| 特性値低下法 | 短時間の試験データで長時間域を推定し、特性値の限界値から寿命時間を予測。 |
| アレニウスの式 | 各温度で予測した寿命時間から他の温度での寿命時間を予測。 |
| アイリングの式 | アレニウスの式を温度以外のストレス（応力、屈曲回数等）に適用して寿命を予測。 |
| バスキンの式 | 繰り返し応力の応力振幅と破断繰り返し数より、他の応力振幅での寿命回数を予測。 |

表3 構成部品の劣化試験条件

| 項目 | 条件 | 内容 |
|--------|------|--|
| 加熱処理 | 試験温度 | 150 , 200 , 250 (ベローズ部) 610 , 650 , 700 (断熱部) |
| | 試験時間 | 5 ~ 100時間 |
| 引張試験 | 試験装置 | 島津製作所製オートグラフAG-50kNG |
| | 引張速度 | 200mm/min (耐熱クロス, 金属部材) 20mm/min (断熱ブランケット) |
| 耐折強さ試験 | 試験装置 | 安田精機製作所製 MIT耐折度試験機 307-BRP |
| | 折曲速度 | 175回/分 |
| | 折曲角度 | 90°, 180°, 270° |
| | 荷重 | 9.8N (金属部材の一部は0.49N) |

に加熱による変色が見られたが、その他の変化は特になかった。

重量変化については、断熱部の耐熱クロスに加熱による2~3%程度の重量減少が認められたが、その他はほとんど変化が見られなかった。

表4 構成部品の劣化試験結果

| 使用箇所 | 構成部品 | 材料仕様 | ニチアスの品番 | 外観 | 重量変化 | 引張強さ | 耐折強さ |
|-------|----------|----------------------|--|--|------|------|-------------|
| ベローズ部 | 耐熱クロス | PTFE融着ガラスクロス | T/#8400-H + T/#9001 | | | | |
| | | ガラスクロス | T/#8400-H T/#8400-H(SUS) | | | | |
| 断熱部 | 断熱ブランケット | セラミックファイバー ブランケット | T/#5120 #100 T/#5220Z#100 T/#5220Z#130 | | | | - - - |
| | | 耐熱クロス | シリカクロス | T/#8250#1000M T/#8250#1000 T/#8250#700 | | | |
| | | 金属部材 | インコネルデミスター SUS316デミスター SUS316金網 | | | | |

評価は、 : 変化なし, : 多少変化あり, : 劣化傾向あり, - : 未試験

引張試験では、ベローズ部の耐熱クロスに加熱時間が長くなると引張強さが低下する傾向が見られ、断熱部の断熱ブランケットや耐熱クロスの一部には加熱初期に引張強さの低下が見られたがその後は安定していた。また、金属部材は加熱による変化はほとんど見られなかった。

耐折強さ試験では、断熱部やベローズ部の耐熱クロスの破断回数が加熱温度や折曲角度によって影響を受ける傾向が見られた。

以上の結果を総合的に判断すると、断熱部の断熱ブランケットや金属部材は加熱による特性の変化が少なく、現在使用している構成材料の信頼性が高いことが確認された。耐熱クロスは、加熱や折曲角度によって引張強さや耐折強さがかなり影響を受けることが判明した。

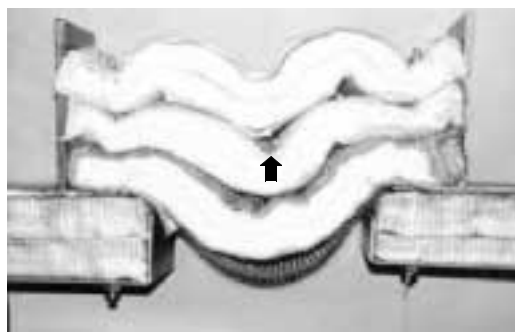
4. EXP. Jの劣化メカニズムの推定

EXP. Jの寿命を予測するに当たり、その劣化メカニズムを推定した。

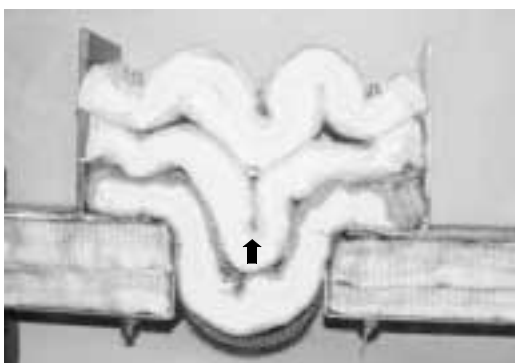
まず、EXP. Jはダクトの熱膨張・熱収縮による伸縮変位を吸収するために使用されるが、このときにEXP. Jの断熱部がどのような挙動を示すのかを確認するために、実機と同形状で軸方向に切断した断面のカットモデルをつくり、試験機にセットして、実際の伸縮変位を再現し、断面の状態を観察した。初期据付時および最大圧縮時のカットモデルの断面を写真2に示す。写真2b)から、最大圧縮時には断熱材がかなり鋭角に屈曲していることが分かる。

以上の断面観察結果と構成部品の劣化試験における検討内容を参考にしてEXP. Jの劣化メカニズムを推定すると、図4に示すようになる。

①ダクトの熱膨張を吸収するために断熱材が圧縮



a) 初期据付時



b) 最大圧縮時

写真2 EXP. Jのカットモデル

され、断熱部の耐熱クロスの一部が鋭角に屈曲する。

- ②DSS運転に伴うダクトの熱膨張・熱収縮により屈曲が繰り返され、耐熱クロスが切断される。
- ③耐熱クロスの切断部から断熱ブランケットが高速の流体によって吸い出される。
- ④断熱ブランケットの消失部分からヒートパスが発生し、ベローズ部の耐熱クロスの温度が上昇する。

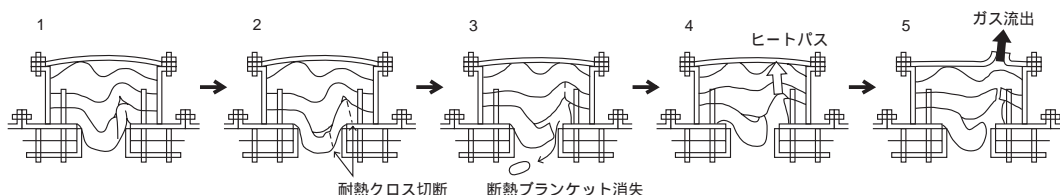


図4 EXP. Jの劣化メカニズムの推定

⑤ペローズ部の耐熱クロスの強度が加熱により低下し、内部流体の圧力を保持する限界強度以下になった時に耐熱クロスが破断して排ガスが漏れる。

以上の劣化メカニズムの推定から、EXP. Jの寿命を推定するためには、ペローズ部の耐熱クロスの引張強さと断熱部の耐熱クロスの耐折強さが重要であることがわかる。

5. EXP. Jの寿命の推定

5.1 寿命の推定方法

工業製品の寿命を実験データから推定する方法には表2のように種々の手法が知られており、今回の研究でもこれらの手法の適用を試みた。以下にEXP. Jの寿命を支配すると考えられるペローズ部の耐熱クロス及び断熱材部の耐熱クロスの寿命推定に使用した「特性値低下法」と「バスキンの式」について説明する。

(1) 特性値低下法

特性値低下法は、特性値の時間に対する低下が一般に認められている場合や実験式が求められる場合に使用され、ベンチ試験等の短時間の試験データで長時間域での特性値の低下を予測し、劣化限界である寿命を予測する方法である。

例えば、実験式が分かっている短時間の試験データによりそのパラメータを求めれば、図5のように長時間域の予測が可能となり、寿命となる特

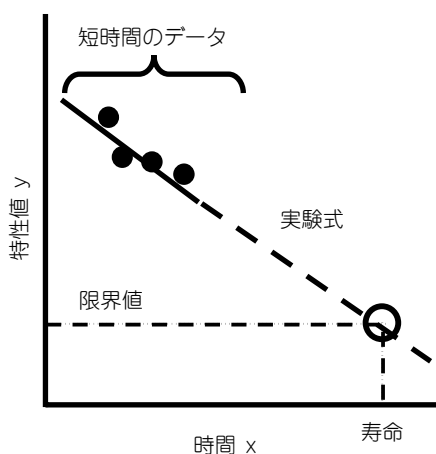


図5 特性値低下法

性値が決まれば寿命時間を予測することができる。

(2) バスキンの式

バスキンの式はサイクル試験のような繰り返し応力がかかる場合に用いられるもので、応力振幅と破断までの繰り返し数（疲労回数）との間に下記の関係が成立する。

$$\sigma_a \cdot N_f^m = C$$

但し、 σ_a ：応力振幅、 N_f ：破断繰り返し数（破断回数）、 m 、 C ：定数である。

この式の両辺の対数をとると、

$$\log \sigma_a = -m \log N_f + \log C$$

となつて、応力振幅と破断繰り返し数の両対数のプロットが $-m$ の勾配を持つ直線になることを示している。このとき、試験した各応力振幅での破断繰り返し数をもとに、試験した応力振幅以外の条件での破断繰り返し数（寿命回数）を予測することができる。

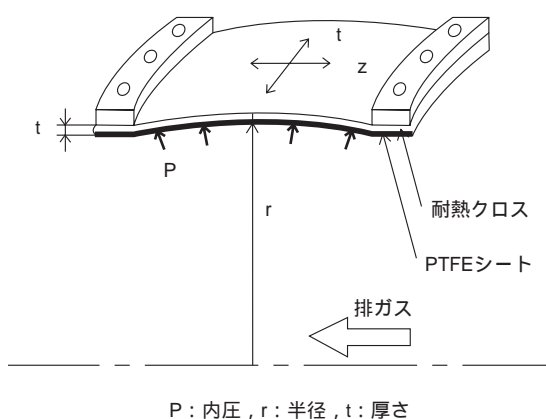
5.2 ペローズ部の耐熱クロスの寿命

ペローズ部の耐熱クロスに必要な最小の引張強さ（限界値）を求めるために、ペローズ部を図6のように内圧のかかる薄肉円筒形状でモデル化した。半径 r 、厚さ t の耐熱クロスに内圧 p が負荷されたとき、円周方向応力 σ_t 、軸方向応力 σ_z は以下ようになる。

$$\sigma_t = p \cdot r / t, \quad \sigma_z = \sigma_t / 2$$

但し、 p ：内圧、 r ：半径、 t ：厚さである。

この式にEXP. Jの設計条件から p 、 r 、 t を求め



P：内圧，r：半径，t：厚さ

図6 ペローズ部の耐熱クロスに発生する応力

て計算すると、ベローズ部の耐熱クロスに負荷される最大応力 σ_t が求まり、この値を寿命を予測するときの限界値 σ_c とする。

次にベローズ部の耐熱クロスの加熱による引張強さの変化の一例として、PTFE融着ガラスクロス(T/#8400-H + T/#9001)の測定値を図7に示す。図より明らかなように、150℃、200℃においては耐熱クロスに強度低下の傾向は見られないが、250℃では耐熱クロスの引張強さが加熱時間の対数に比例して低下する傾向が認められた。

そこで、250℃での試験結果に特性値低下法を適用して、実際の発電所の使用条件から求めた耐熱クロスの限界値 σ_c をもとに、耐熱クロスの寿命を以下のようにして求めた。

- ①各温度における加熱時間 t と引張強さ σ の低下を表す対数式のパラメータを求める。

$$\sigma = A + B \ln t$$

σ ：引張強さ， t ：加熱時間， A ， B ：定数

- ②限界の引張強さ σ_c から特性値低下法により寿命時間 t_f を求める。

$$t_f = \exp\{(\sigma_c - A)/B\}$$

t_f ：寿命時間， σ_c ：限界の引張強さ

この式に A ， B ， σ_c の値を代入すると、ベローズ部の耐熱クロスの温度が250℃での寿命時間は約600日という値が得られた。250℃でも2年弱は使用可能ということになるので、EXP.Jを早急に交換する必要はないが、250℃を劣化の起点と考えると、250℃からさらに温度が上昇する傾向にある場合にはより短時間での交換が必要である。

5.3 断熱部の耐熱クロスの寿命

断熱部の耐熱クロスの寿命については、耐折強さ試験の結果をもとに、バスキンの式を適用して、折曲角度と耐折回数との関係を検討した。

断熱部の耐熱クロスの耐折強さ試験結果の一例としてシリカクロス(T/#8250 #1000Mシルテックスクロス1000M)の700℃加熱後の試験体の耐折回数と耐折角度の関係を図8に示す。図より明らかなように、耐折回数の対数と折曲角度の対数の間には、バスキンの式に示されるように直線関係が成立した。耐熱クロスの寿命は以下のようにして求めた。

- ①各試験温度 T における耐折回数 N と折曲角度 α

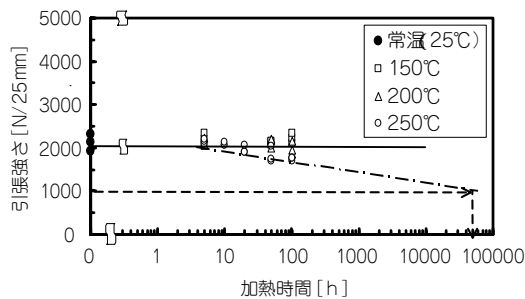


図7 PTFE融着ガラスクロスの引張強さ

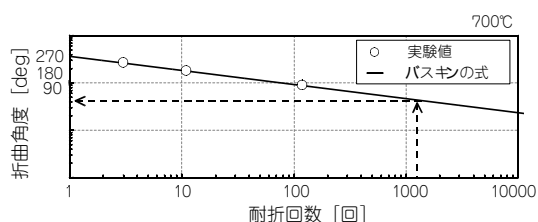


図8 断熱部の耐熱クロスの耐折回数と折曲角度の関係

から重回帰分析を用いて下記の耐折回数の低下を示すバスキンの式のパラメータを求める。

$$\log N = A + B \log \alpha + C \log T$$

但し、 N ：耐折回数， α ：折曲角度， T ：温度， A ， B ， C ：定数である。

(加熱時間が耐折回数に及ぼす影響は比較的小さいので、加熱時間の項は含まない)

- ②EXP.Jのカットモデルより得られた最大折曲角度 α_c と耐熱クロスが使用される位置での推定温度 T から次式により寿命回数 N_f を求める。

$$N_f = 10(A + B \log \alpha_c + C \log T)$$

写真2のカットモデルにおいて矢印の部分の屈曲が最も厳しく、初期据付時と最大屈曲時での耐熱クロスの屈曲差すなわち最大折曲角度は90°になっている。このとき、温度700℃における寿命回数は約100回であり、比較的短時間で耐熱クロスの破断が生じる可能性がある。

実際に使用中のEXP.Jの断熱部の耐熱クロスの折曲角度は測定できず、実機と耐折強さ試験では加わる荷重も異なるため、寿命の推定を行うには実機の破損状況との比較検討が必要であるが、折曲角度が2倍になると耐折回数が約1/10になる

ことから、耐熱クロスの破断は折曲角度に大きく影響されることがわかった。これより、カットモデルによる断面観察等を参考にして折曲角度が小さくなるように断熱構造を設計すれば、耐熱クロスの破断寿命を延長することができるものと思われる。

6. おわりに

本報では、現在中部電力(株)の主力の発電設備である ACC 発電で使用される EXP.J の寿命評価方法の検討結果について報告した。

本研究では、EXP.J の製造メーカーであるニチアス(株)と共同で、各構成部品の各種の特性についての数多くの実験を行い、構成部品の劣化傾向を把握することができた。

また得られた劣化傾向をもとにいくつかの手法を用いて寿命の推定を試みた。実際には使用条件が個々の EXP.J で異なり、またその挙動が複雑

であるため個別の寿命を正確に推定することは難しいが、本研究によって EXP.J の寿命をある程度の精度で予測できるようになった。

数多くの実験データに基づく本研究で得られた知見は、今後の EXP.J の計画的なメンテナンスに有効に役立つものと考えている。

筆者紹介



鍵谷 幸生

中部電力(株)火力センター
品質管理グループ
課長



柴田 秀史

浜松研究所 シール材分野