

佐賀導水路の巨勢川ポンプ場（東澁系） ガスタービンエンジンにおける燃焼器亀裂 について

施設管理係長 高野 誠司¹・管理課長 山下 繁昭¹

¹九州地方整備局 佐賀河川事務所 管理課（〒849-0918 佐賀県佐賀市兵庫南二丁目1番34号）

2019年5月に実施した排水機場の点検におけるボアスコープ調査において、ガスタービンエンジン内の燃焼器ライナーに亀裂を確認した。2004年の運用から15年目で発生した不具合であるが、全国でも排水機場に当該タイプのガスタービンを採用しているのは巨勢川ポンプ場（東澁系）だけであるため、その発生メカニズムを含めて紹介し、ガスタービンを維持管理するうえでの一考察を述べるものである。

Key Words: 機械設備、排水機場、ガスタービンエンジン、不具合

1. はじめに

排水機場は、台風や大雨による内水の増加により浸水被害を軽減するため強制的に堤外へ排水するための施設であり、主にポンプ、原動機、減速機、配管等から構成される。中でも原動機の日本における変遷は、1945年頃より電動機で駆動するポンプが主流となるが、台風による度重なる停電に対応するため、徐々にディーゼルエンジンに変わっていった。1965年頃から製作加工技術の進歩により大型化が可能になり数多くの排水機場が設置され、現在の構造はこの頃に確立されている。

1989年頃になると、機場全体としての信頼性・経済性がより求められるようになり、機場の節水化・無水化が進められた。その中で原動機においても空冷化及びコンパクト化が叫ばれるようになり、ついにガスタービンエンジンが登場することとなった。これにより大規模な排水機場においては従来タイプに比べて約35%のコスト削減が可能となった。

現在では、更に機器の長寿命化やより効率的な維持管理が出来るよう状態監視技術や故障診断を取り入れ、延命化の取り組みが進められているが、ガスタービンエンジンの排水機場への適用については歴史が浅く、まだまだ合理的な維持管理手法や故障診断には検討の余地が残されている。そのような状況から今回発生したガスタービンエンジンの燃焼器不具合について紹介したい。

2. 巨勢川ポンプ場（東澁系）

当該排水機場の主なスペックについて以下のとおり。

- (1) 総排水量 26m³/s
- (2) 台数 2台
- (3) 全揚程 16m
- (4) 口径 2,400mm
- (5) 原動機 単純開放サイクル二軸式横型
ガスタービンエンジン
(ロールスロイス社)
- (6) 出力 2,795kw
- (7) 運転時間 累計1,352時間/2台



写真-1 巨勢川ポンプ場（東澁系）外観

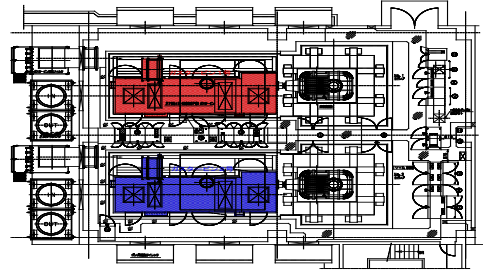
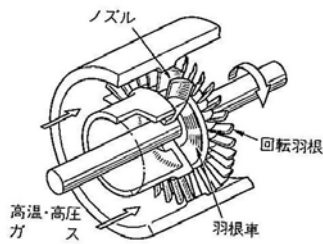


図-1 機場平面図 (赤…1号 青…2号)

3. ガスタービンエンジン

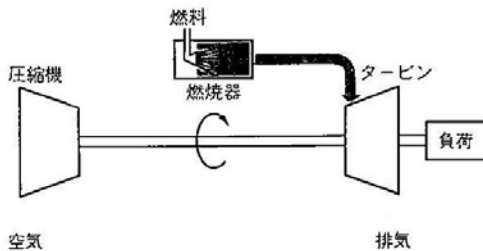
ガスタービンは、高温・高圧の気体をノズルに噴出させ、羽根にあてて回転力を得る原動機である。（図－2 参照）



図－2 ノズルと羽根の関係（ガスタービンイメージ図）

(1) ガスタービンの主な機器構成

外部から取り入れられた空気は、圧縮機で圧縮され、燃焼器に送られる。燃焼器内では、燃料噴射弁から噴射された燃料と圧縮空気とが混合して定圧燃焼が行われる。この燃焼ガスがタービン内で膨張することによりタービンの回転羽根を回し、動力を発生させる。仕事の終わった燃焼ガスはそのまま排気して大気中へ排出されるが、当該機場もこのタイプである。（図－3 参照）



図－3 単純開放サイクルガスタービンの構成

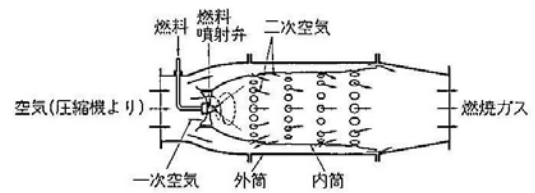
ガスタービンは主に圧縮機、燃焼器、タービンの3つの構成要素から成り立っており、ピストン機関に比べて燃焼が連続して行われるため、大出力が得やすく、往復運動が無いので構造がシンプルで軽量小型にすることが可能である。



写真－2 ガスタービン写真

(2) 燃焼器

後述する燃焼器不具合について、まず機能を説明しておく。燃焼器は圧縮空気の流れの中に燃料を噴射して連続的に燃焼させる装置である。筒型になっており、内筒と外筒とよぶ二重の円筒からなり、燃料は内筒の中に噴射される。燃焼に必要な空気は内筒頭部から取り入れられるが、残りの空気は内筒を外周から冷やしながらしだいに内筒に流入し、燃焼ガスと混合して所定の温度まで燃焼ガスの温度を下げる。今回のガスタービンエンジンにおいては、燃焼器が6個あり、燃料はA重油を用いている。（図－4 参照）



図－4 燃焼器の構造

4. 点検手法

次に点検手法について説明する。

(1) 点検時期及び回数

排水機場の点検は、河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)に準じ実施することとなるが、マニュアルについては設置状況等を考慮して決定するものとあり、当該機場においては以下のとおり実施している。（表－1 参照）

点検整備の種別	実施時期(月)												回数/年度	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
年点検	○													1
月点検 (管理運転点検・目視点検)					○				○					2
臨時点検	○												随時	

表－1 点検時期及び回数

(2) 点検項目及び手法

点検項目は、揚排水機場設備点検・整備指針(案)同解説において設備毎に決められており、各現場毎に加筆修正を行い実施している。点検方法は、交換・清掃・分解・目視・調整・測定・増し締め・指触・動作確認・聴覚にて実施となる。

参考にガスタービン点検におけるチェックシートを以下に示す。（表－2 参照）

点検・整備チェックシート 主原動機(ガスタービン機類) (1/4) <待機系設備>

点検項目		点検内容		点検結果		点検者	
項目	内容	結果	備考	氏名	印	氏名	印
主原動機(ガスタービン)①							
ガスタービン機	点検項目	点検内容	点検結果	点検者	点検者	点検者	点検者
燃焼器	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検
	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検	燃焼器の点検

表-2 ガスタービンチェックシート表 (抜粋)

本稿で紹介する不具合(燃焼器の亀裂)は表-2内に赤枠で示している「燃焼器」の目視項目にて確認されたものである。(ボアスコープによる確認)なお、燃焼器の亀裂については揚排水機場設備点検・整備指針(案)同解説には定められておらず、機器毎のメーカーの定める値となっている。本機の許容値は1インチ(25.4mm)である。

5. 点検結果(燃焼器亀裂)

(1) 燃焼器の許容値を超えた亀裂が発生した位置

2019年5月に確認した許容値を越えた亀裂発生箇所は以下のとおり。(図-5参照)

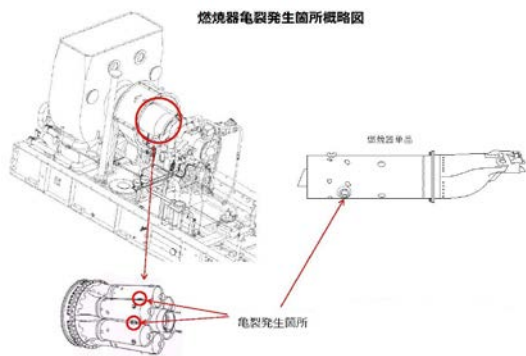


図-5 亀裂発生箇所概略図

(2) ボアスコープ画像

ボアスコープにて発見した6筒あるうちの2筒(#2と#3)の亀裂発生状況。写真だけでは非常にわかりにくいため、赤線で亀裂を表現している。(写真-3参照)

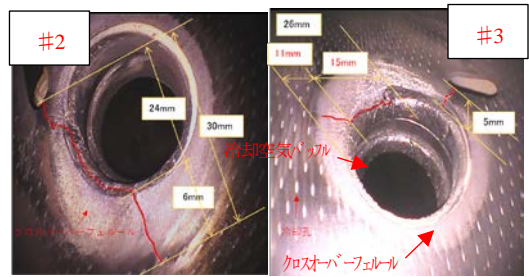


写真-3 亀裂(クラック)の発生した燃焼器

写真で黒く大きな穴が空いているところが冷却空気バブルと呼ばれるところで、穴の周囲に擦れているような色に見えるところが溶接部である。クロスオーバーフェルルというが、その周囲に小さな線のようなものが無数に見えるが、これは燃焼器に発生する温度分布による熱応力を緩和するための冷却孔である。

亀裂については、調査したところ2009年5月に既に発生しており、その時点においては、#2の燃焼器で24mm、#3の燃焼器で15mmの許容値内の亀裂。その後10年間で#2が6mm延伸して30mm、#3が11mm延伸して26mmまで亀裂が進行していたということが判明した。

(4) 学識経験者による現地視察

亀裂の発生メカニズムについて専門的知見による確認が必要となったため九州地方整備局の Tecdoctor である北九州市立大学機械システム工学科の井上教授と建設業者及び原動機メーカー4者による現地視察を行った。

そこで判明した事は以下のとおり。

- 1) 亀裂の要因は、起動停止の繰り返しによる熱応力による低サイクル疲労の可能性がある。
- 2) 同型の燃焼器に単純交換してもすぐに同じ現象が生じる可能性がある。燃焼器の構造の進化や排水機場の運用方法の見直し等の技術的な改善が不可欠である。
- 3) 設計改善や工夫については海外製品であることからどこまで協力が得られるかはわからない。熱応力解析などによる原因究明と対策効果の検証が望ましいが、危険域での運転を避けるなどの明確な改善効果が確認出来れば良い。

6. 結果を踏まえた検証で判明したこと

(1) 燃焼器について

- 1) 燃焼器(ライナー)の形態について、製造図

を入手出来ないため詳細な製造方法を知ることが出来ない。

- 2) 今回不具合を確認した1号機の燃焼器と2号機の燃焼器を確認したところ、冷却空気バッフル部の内側の溶接構造が違っている。
- 3) 1号及び2号機ともに同じ時期に新品が組み込まれているが、形態の異なる燃焼器ライナーが存在することから、製造ベンダーが異なっていたことが推測される。
- 4) 2号機の燃焼器は2018年の整備時に交換を実施しているが、そのときの燃焼器ライナーは設計変更されている。(これまでの従来品にはクロスオーバーフェール付近には冷却孔が設けられていなかったが、現2号機の燃焼器ライナーにはクロスオーバーフェール付近まで冷却孔が追加されていた。設計変更の理由は明らかにこの部分の熱応力を緩和するために設けられたものと推測できる。(写真-4と写真-5参照)

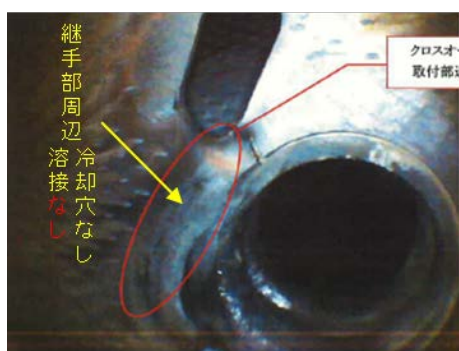


写真-4 従来品

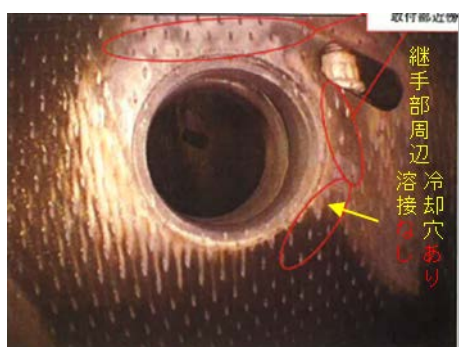


写真-5 設計変更品(現行2号機)

(2) 運用方法について

運用開始から15年経過しているが、その間最も厳しい条件下で稼働したのは、日本の工場において製品検証のために実施した現地搬入前の性能試験である。定格をやや超えた領域(110%程度)で運転・停止を繰り返し行っており、このときがガスタービンエンジンにとって最も過酷な環境であったと言える。

すなわち、今後の運用においては設置当初より条件が厳しくなることは考えにくく、わずかではあるが改善の方向だと思われる。

また、今回ガスタービンエンジンのライセンス契約を行っている Siemens 社や日本における取扱事業者の IHI 航空宇宙防衛事業領域の燃焼器設計担当者にも排水機場運用において寿命等を延命できるような運用パターンは存在するか確認したが、とくに改良できる点は見つからなかった。(2018年に整備した2号機において安定した運用が出来ているため問題ないと判断)

(3) 亀裂再発の予測

前述しているとおり、製造図を入手することが出来ないため解析は不可能であり、定量的に亀裂発生を判断することは出来ない。

しかし、熱応力対策としてクロスオーバーフェール直近まで冷却孔を設け改良しており、燃焼器について過度な負荷がかかることは今後の機場実運用においてはほぼ発生しないと言えることから、亀裂発生までの時間はより延長されるものと判断する。

7. おわりに

以上排水機場など陸上部でかつ待機系のガスタービンエンジンについては、開発された航空機分野のそれと比較するとまだまだ歴史が浅く、発生する不具合やタイミングについても解明出来ないところが多く存在していると想定される。また、整備に対するユーザー側の体制も満足ではない。それらを踏まえた上で今後発生するであろう不具合等に対し知見を増やし、更なる維持管理の向上に努めていきたいと思う。

なお、当該亀裂を有する1号ガスタービンエンジンについては、実稼働が可能な状態であるため改良品交換に向けて現在準備中である。

参考文献

- 1) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：河川ポンプ施設総覧 2020.
- 2) 渡部一郎, 笠原英司, 岡野修一ほか：原動機, 実教出版株式会社 1987.
- 3) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：揚排水機場設備点検・整備指針(案)同解説 2010.
- 4) 国土交通省総合政策局建設施工企画課河川局治水課：河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案) 2008.
- 5) 株式会社荏原製作所社会システム技術部：ガスタービン燃焼器ライナーの亀裂に関する見解書 2019.