

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

ターボポンプ開発現場における「ヒューマンエラー」について (その1 LE-5/LE-7 ターボポンプ編)

渡邊 光男

2012年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

ターボポンプ開発現場における「ヒューマンエラー」について*

(その1 LE-5/LE-7 ターボポンプ編)

渡邊 光男*¹

Avoidable “Human Error” in Field of Research and Development of Turbopumps* (1st Report: LE-5/LE-7 Turbopumps)

Mitsuo WATANABE*¹

概 要

人は誰しも「邪念」、「欲望」そして「無知」と「うっかり」により、「ヒューマンエラー」を引き起こす危険因子を内に孕んでいる。これまで約 35 年に渡り LE-5^{1),2)} / LE-7^{3),4)} ターボポンプの開発に携わり、その中で自身が見聞きした「判断ミス」について事例を挙げて検証する。ここに示す「ヒューマンエラー」は遠い他人事ではなく、誰でもいつでも当事者になりえるものであり、決断を迫られたときにミスに導かないよう他山の石としていただければ幸いである。

Key words: Rocket engine, LE-5/LE-7 Turbopumps, Human error

1. はじめに

回顧録に載るような成功例からは学ぶものはなし。学ぶべきはそこに至る過程にこそ存在する。「失敗は宝の山」である。

したがって、本来失敗した事例から学習すべきであるが、失敗例が粉飾されずに正しくは記録に残ることはほとんど無いのである。その結果、成功例だけが金字塔のごとく記録される。そのため後世代の人たちは、その記録に目を通すだけで輝かしい業績者（企業、個人）の一員となったような錯覚を起こす。そして「実績がある、問題はない」との根拠のない自信に満ちた発言をする。

また、人間は人間らしさの象徴である。「邪念」、「欲望」そして「無知」と「うっかり」を誰しも持ち合わせている。さらにこの四つの“人間らしさ”は、世に言われる「認識不足」、「安易な考え」、「思いこみ」という「ヒューマンエラー」の要因となるのである。

ここで述べている「ヒューマンエラー」というカテゴリーは、本来日本の風土には馴染まない言葉である。なぜならば、古来日本での物作りは“職人”の仕事であり、不良品は世に出回ることなど無かったからである。

一方、明治以降に日本の近代化を進める過程において、欧米の機械化による大量生産方式が導入され、「素人職人の大量育成」が始まったことが、後の世の「ヒューマンエ

* 平成 24 年 1 月 31 日受付 (Received 31 January 2012)

* 1 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送プログラム・SE 室 (Space Transportation Program Systems Engineering Office, Space Transportation Mission Directorate)

ラー」の温床となったものと考えられる。

しかしながら、人間である以上「ミス」は必ず冒す。絶対冒す。「ミス」は人間であることの証明でもあり、生涯「ミス」を冒さず人生を全うする人間は皆無であろう。

したがって、一度目の「ミス」は許される。二度目は、プロを自認する者であれば許されない。しかも我々の許される「ミス」は、事故に繋がることのない最小限の「自己完結型のミス」でなければならない。すなわちミスを最小限とするためには、常々「**プロとしての自覚を持って仕事をする**」ということである。

世間では「失敗を糧に……」とか「先人を教訓に……」とよく言われているが、そのためには失敗例（事故につながる判断ミス）は正しく引き継いで行かなければならない。

したがって、これまでほとんど目に触れることがなかった、LE-5 から LE-7 エンジンターボポンプの開発現場における、“人間らしさ”が起す「**個々のヒューマンエラー**」と、組織を優先させてミスに導く「**組織としてのヒューマンエラー**」について、直接または間接的に携わった事例について記録として残すことにする。

2. LE-5 ターボポンプ編

LE-5 エンジンとは、我が国で初めて独自に開発した液体酸素／液体水素を推進剤とする、推力 10 トン級の世界最高水準のポンプ式のエンジンである。

しかし、開発がスタートした 1970 年代中ごろの国外ではもちろん、国内でも「日本の技術レベルでは無理だろう」との評価が大勢を占めていた。当時の旧航空宇宙技術研究所（以後旧 NAL）では、既に液体酸素／液体水素ポンプの研究・試作を IHI と共に進めてはいたが、エンジン開発となるとほぼゼロからのスタートであった。

このため、LE-5 用ターボポンプは旧 NAL、旧宇宙開発事業団（以後旧 NASDA）、IHI との 3 組織の共同開発となった。したがって、個々の未熟から発生する「**個々のヒュー**

マンエラー」と、会社の立場を優先した結果発生する「**組織としてのヒューマンエラー**」が混在して発生することになった。

2.1 耐熱ボルトの材質が異なっていた

1978 年の LE-5 エンジンの開発が始まった初期の出来事。当時の NAL では、10 トンクラスのターボポンプは全て筆者らが組立、試験、分解、検査（詳細な検査は IHI）を行っていた。OTP（T/P-80：当時は LE-7 がまだ無かったので OTP と呼んでいた、本稿では LE-5/OTP と記述する）は旧 NAL、FTP は旧 NASDA が主担当となり開発を進めていた。OTP／FTP とも製作は IHI である。

NAL での OTP 試験後にクリーンルームでタービン側カバーを外したところ、タービン静翼を止めていたボルトが破断しロックワイヤー（INCONEL600）にぶら下がっていた。もちろんそこに使用されているボルトは燃焼ガスが通るために、図面上では A-286（耐熱鋼：約 700℃ まで強度を保つ）／12 ポイントの耐熱性を考慮したボルトであった。（図 1 参照）

しかし、破断したボルトを見ると若干延びており、また破断面は A-286 ほど荒くはない。何かおかしいとの疑念が湧いたので、OTP 担当者に調査をお願いした。

その返答は「**図面上はおかしくない、指示書も間違っていない、最初に組立納入したときも支給されたボルトを組んでいる**」との返答で会社に責任は無いとのニュアンス。責任の話をしているのではないのだが、納得できないのでさらに調達した資材系の調査も依頼した。「**資材係も A-286 で発注している、書類が残っている**」との返答。

おかしい、おかしくないとの押し問答が数日続いた後、「材質が間違っていました、そのボルトは約 400℃ までしか強度保証がありません」との電話があった。つまり、何時切れてもおかしくないボルトであった。納入業者の間違いであった。

では何処に問題があったのか？

前記のように発注までは間違っただけではなかった。にもか

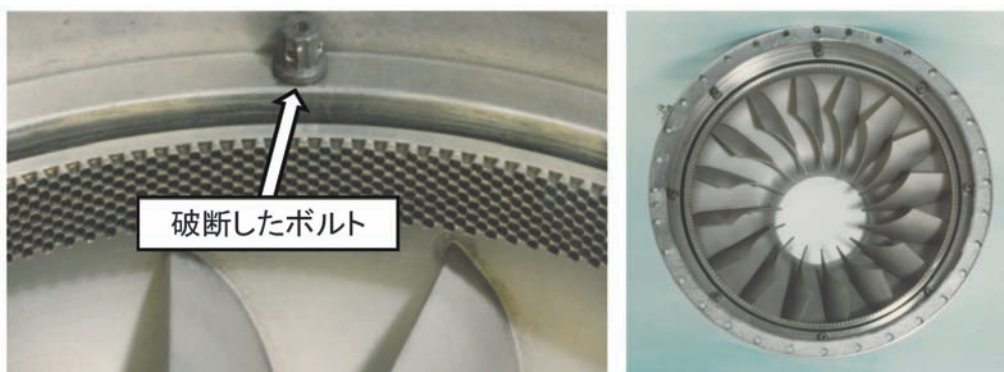


図 1 LE-5/OTP の破断した箇所のボルト（1978 年：写真は正規品の A-286 耐熱ボルト）

かわらず「組み立てられたボルトが違っていた」、つまり納入品の受け入れ検査時に、「思いこみで目くら判を押した」ことが原因であった。

この時に予備品のボルト（リストにも A-286 と記載）に交換しただけですませていたら、近い将来に重大な事故を引き起こした可能性が考えられる事例であった。

一つミスで事故に至る確率はほぼゼロである。二つ以上のミスが重なると、事故を引き起こす可能性は限りなく大きくなる。これは誰もが一度は経験していることと思う。

ここで事故に至らなかったのは、一つミスがあっても二つ目のミスを冒さなかったことにある。何かしらの兆候を見逃さなかったことで、事故につながる複数のミスとはならなかった。運が良かっただけであるが、運も味方にするかまたは見放されるかは当事者次第である。

書類に記載されている、手順書に書いてあるから間違いは無いとの「思いこみは厳に慎むべきである」。湧いた疑問は中途半端に終わらせないことである。

したがって、「思いこみ」により社内の各部署で複数の見落としを重ねた、「組織としてのヒューマンエラー」の事例である。

2.2 OTP シール溝の加工ミス

1978 年に納入された LE-5/OTP を試験設備に取り付け、入口インターフェース管を装着するために、ナフレックスシールを挿入しようとしたところ、シール溝に入らない。はじめは違う径のシールを送ってきたものと考え、問い合わせを行った。

「シールの部品番号、シリアル No. に間違いはない」との返答であったが、シールは入らない。

ではケーシングか？

図面寸法はシール径に合わせており間違っていない。だが明らかに出来上がり寸法が異なっている。きついかのレベルではなく直径で 3 mm ほどシール溝の外径が小さい。何故？

検査成績書には合格の印がある。OTP は試験設備から取り外し製作メーカーへ逆戻り。

ここでの問題は 2.1 の項と同様に、「図面が間違っていないのだから、間違っ

て製作するはずがない」との思いこみ。（図 2 参照）
実際に寸法を測るという検査行程を省略して、「思いこみ」で合格印を押したのである。結果的には OTP を持ち帰り分解し、追加工、再組立と会社も多大な経費が発生することになった。

これなども「思いこみ」により見落としをした、「組織としてのヒューマンエラー」の一例である。

2.3 G・G オリフィスの挿入ミスによる事故

純国産の LE-5 液酸／液水エンジンの開発がスタートし、これまで NAL と NASDA で別々に単体試験を行ってきた OTP (T/P-80)／FTP (T/P-9F) を組合せた総合試験が、1980 年に現角田センター東地区の FETS（旧 NASDA 供給系総合試験設備）で始まった。（図 3-1 参照）

当時の NASDA はまだ経験が浅く、そこにプロ意識の強い IHI 試験隊と、ポンプの研究・試作では一歩先んじてはいても、開発経験のない NAL の三者が共同で開発試験を進めていた。

現場では当然のごとくギクシャクしてスムーズに進ま

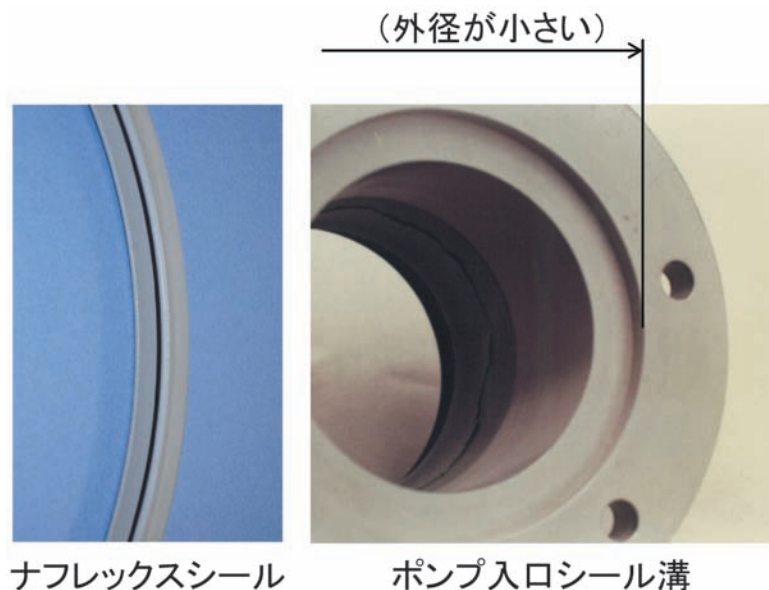


図 2 LE-5/OTP 入口シール溝（1978 年：写真は FY52 のケーシング A）

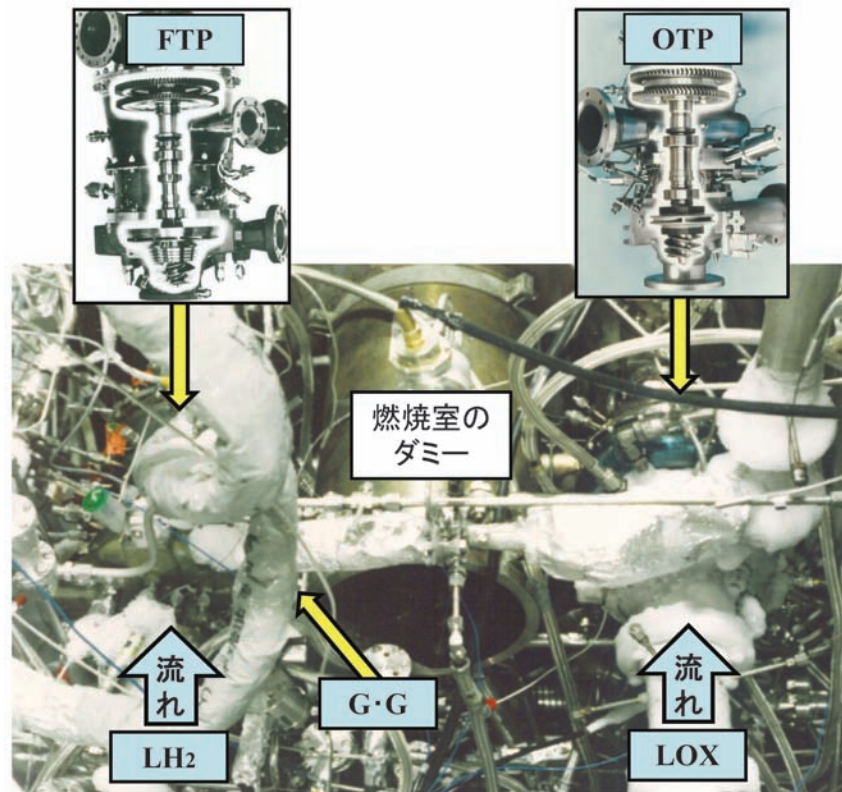


図 3-1 日本で最初の LE-5 エンジン用 OTP/FTP 総合組合せ試験 (1980 年：現角田センター)

なくなります。ついには、「ここからここまでは IHI の責任範囲、この範囲は NAL の範囲、設備に関するところは NASDA の範疇で余計な口出しはしない」となり、「ヒューマンエラー」の温床ができあがった。

初期型の LE-5 エン진은 G・G サイクルで、ポンプ駆動はガス発生器 (図 3-2 参照) で燃焼ガスを作り、FTP のタービンを回しその後 OTP のタービンを駆動する。

この G・G に流入する LOX と GH₂ の流量をコントロールするオリフィスを逆に挿入したために、G・G 燃焼器内は高温となり溶けた内壁の一部が FTP タービンに流入し損傷を与えたのである。開発スケジュールはもちろん、現場作業者の自尊心に対するインパクトも大きかった。

「ここでは 4 つのミスが重なっている」

1. LOX と GH₂ のオリフィス外径が同じで、逆に挿入できる。
2. 作業者が指示書を見落とした。
3. 現場でチェックする検査員がいなかった。
4. 初めての液酸／液水エンジンの開発にもかかわらず、従事者に対し技術 (基本) 的な教育が成されていない。

つまり、「水素よりも酸素が多く流れれば燃焼温度はどうなるか」などを理解していれば、たとえ指示書に間違いがある場合でも現場サイドで気がつくはずである。

これが事故の概要と原因になります。

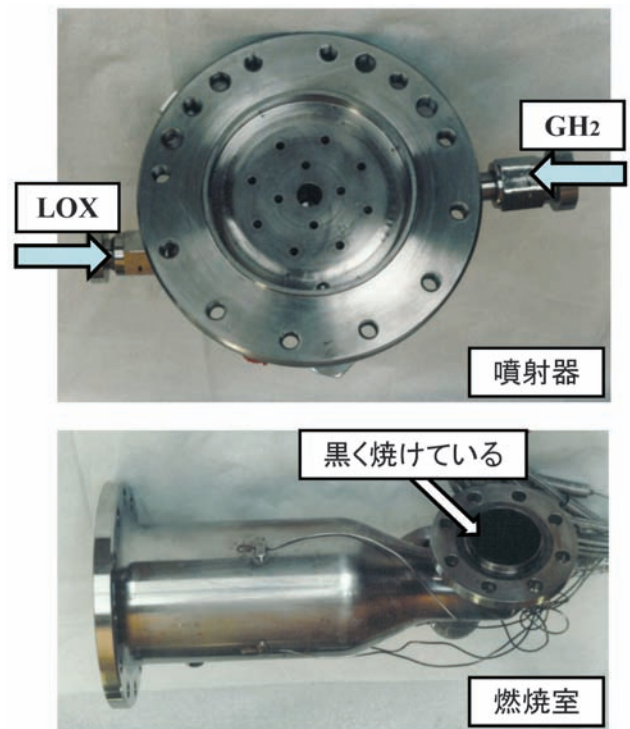


図 3-2 LE-5 用ガス発生器
(1980 年：写真は試験後分解した状態)

ここでは原因 1 が全て。但し、2, 3, 4 がしっかりしていれば防げた事故と考えられる。

外径を同じにすれば、オリフィス径を変えるときにどち

らにも使えるとの設計者の合理的な判断。

しかし、「現場作業では、あらゆるミスが起きうとの認識が欠落している」。机上の空論が事故を誘発した一例である。

対策として、

- ①水素系と酸素系でオリフィス外径を変えて逆に挿入できなくした。
- ②供試体取り付け時は、複数の検査員が立ち会うことになった。

この事例は、無知による「個々のヒューマンエラー」と「組織としてのヒューマンエラー」が複数重なることで発生した事故であった。

2.4 LE-5/OTP 組立温度によるトラブル

2.3 項で述べたように、組合せ総合試験（1980 年）において各組織の責任範囲を線引きされたため、NAL が持ち込んだ OTP の組立・分解・検査は全て旧 NAL の筆者らが行った。FTP は IHI 瑞穂工場で行った。

OTP の組立は、現角田センター東地区の支援棟（洗浄室）に設置されているクリーンブースを使用した。OTP の組立条件は清浄度と温度管理の 2 点。清浄度はブース（クラス 1,000）の中なので問題はなし。空調の温度設定も 20℃ にセット。

ところが OTP 組立最終段階になり、主羽根車（アルミ

合金）を固定するナットが、軸にマークされた規定の位置まで廻らないのである。（図 4 参照）

締め付けトルクの値は間違っていない。では軸の冷やし方が足りなかったのか。考えられることは全てやり直したが、マークの位置まで規定トルクでは締め込むことができなかった。

では、何処に原因があったのか？

当時の支援棟の控え室には、試験支援のためコスモテックが常駐していた。この支援棟の空調は洗浄室、検査室と他の控え室が一台の空調機で賄われていた。本来、温度管理が必要な場所（洗浄室、検査室）と一般控え室の空調は分離されるべきであった。

このため、控え室は寒すぎるために我々の知らないところで設定温度を 5℃ 上げていたのが原因であった。

OTP の主羽根車はアルミ合金製であるために、温度上昇分の寸法誤差が顕著に表れた例である。何故、マーク位置にこだわるのか。「規定トルクで締めたのだから良いではないか？」と疑問を持たれる方もいるかもしれません。

しかし、組立は常温、運転は -183℃ の極低温。つまり極低温におけるアルミの縮みを考慮して、トルク値や締め付け位置は決定されている。したがって、マーク位置を合わせ込まないと、極低温の試験時に緩みが生じる危険性を残すことになる。

この「無知」にも等しい「ヒューマンエラー」は、いつ

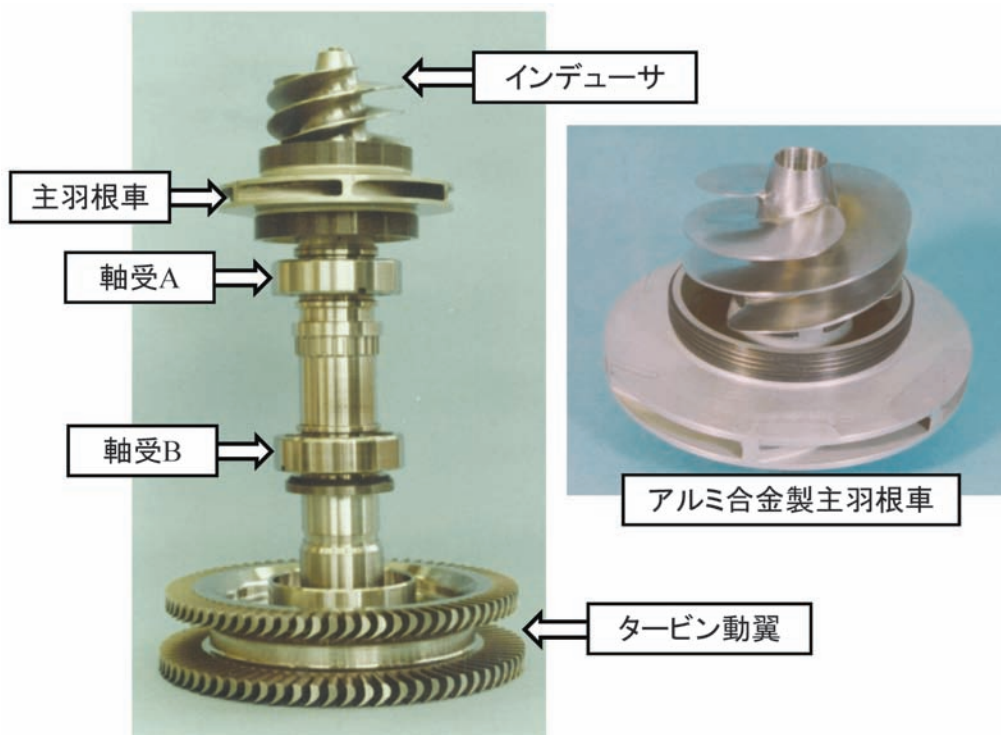


図 4 LE-5/OTP 軸系組立とアルミ合金製主羽根車（1980 年）

でも何処でも誰でも起こしえる可能性のある事例である。

2.5 LE-5B 軸受温度上昇のトラブル

2000年3月のLE-5Bエンジン試験において、LTP(LE-5B/LOXポンプの名称)軸受B温度が上昇した。インデューサライナとして組み込まれていたカーボン入りテフロン(CABON IN TEFLON)が、キャビテーションエロージョンによりダメージを受け、そのコンタミが軸受冷却流路に組み込まれているボールフィルタを詰まらせたことが原因であった。(図5参照)

1970年代後半に、LE-5液酸ターボポンプのインデューサライナの材料を何にするかが問題となっていた。最大の選定条件は「インデューサが振れ廻って接触しても、熱を出さないこと」であり、安全を最優先とした選択であった。

最初は実績のあるPTFE(テフロン)を使用した。しかし、擦り痕は良好であるが、欠点は強度的に弱いことと熱収縮率が大きく低温における精度(形状、チップ隙間)の確保が難しいことである。

次はKEL-Fを使用。強度もあり熱収縮も小さい。しかし、擦り痕はささくれ立ちガサガサでインデューサのチップ近傍は摩擦熱により変色する。(図6参照)

三番目としてカーボン入りテフロンを試した。縮みも比較的小さく、加工精度も確保できる。擦り痕も滑らかで良好。但し欠点はキャビテーションエロージョンに弱いことであった。テフロンにカーボン等が添加されているために若干脆くなっているようである。(図7参照)

ここでの基本は、「安全は全てに優先する」のためにあえて欠点に目を瞑り(エンジン作動時間、領収試験時間等を考慮して)、カーボン入りテフロンを選定した。

LE-5が実機の開発試験に移行した後は、OTP/FTP共に旧NASDAが中心となり開発を進めた(LE-5A/LE-5B含め)ために、旧NALのなかではインデューサライナの材質に

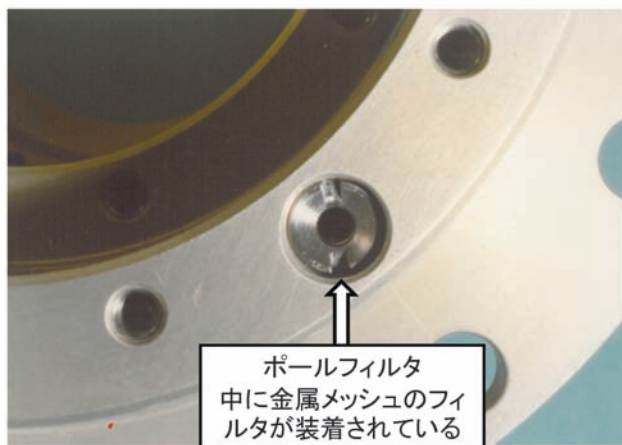


図5 LE-5/OTP ボールフィルタ
(1978年:写真のLE-5/OTPでは同円周上に2ヶ所)

ついて話題に上ることも顧みられることもなかった。

1982年に推力10トン級の高圧液酸ポンプ^{5),6)}(P-130: $N=47,500\text{ rpm}$, $\Delta H=25\text{ MPa}$, $Q_d=16\text{ l/s}$)を試作し、その

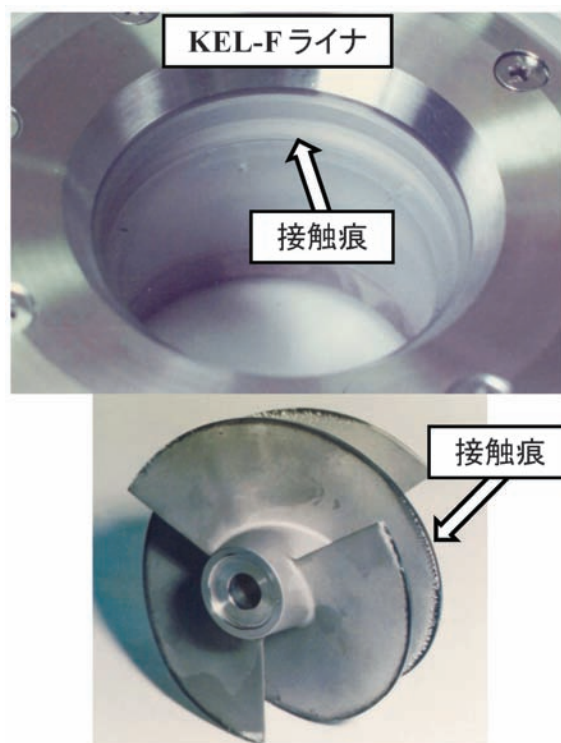


図6 KEL-F ライナとインデューサの接触痕
(インデューサの接触部はKEL-Fの焼き付きが見られる)

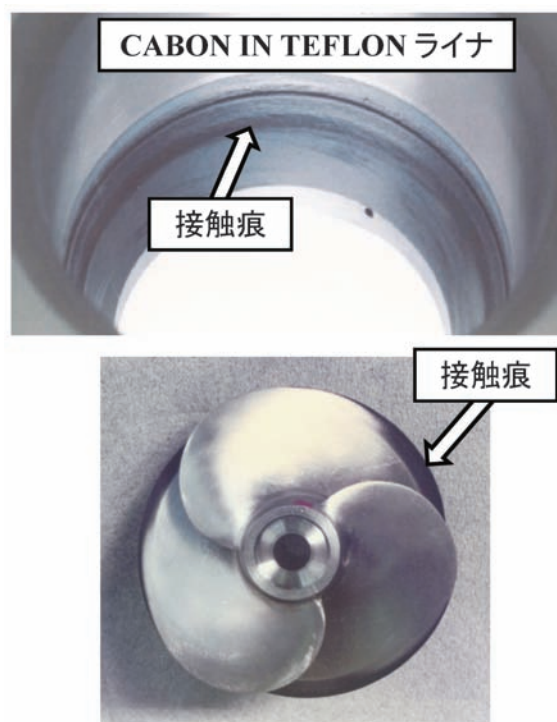


図7 CABON IN TEFLON ライナとインデューサの接触痕
(インデューサの接触痕は滑らか)

試験をNAL／NASDA 共同研究で行っている。インデューサはA-286、主羽根車及びケーシングはINCONEL718 というLE-7ターボポンプの原型となったポンプである。このときのインデューサライナはケーシングに銀メッキを施したものである。

この経験からLE-7ターボポンプ（OT-103以降）のインデューサライナ（田代試験場で爆発事故を起こした初期型の開発基礎試験用（OT-001）はKEL-F）にメタルライナが採用された。その後20有余年の実績を積んでおり、これらのことからLE-5Bではメタルライナが採用されていたものと筆者らは思いこんでいた。

しかし、20年余りの年月を経てトラブルは発生した。ポンプもその間に初期型のLE-5から改良型のLE-5A、そして現フライトモデルのLE-5Bとなっていた。試験に供したLE-5Bのターボポンプは、累積試験時間が5,000秒を超えており、インデューサライナはキャビテーションエロージョンによる壊蝕がかなり進んでいたものと推察される。

LE-5に選定した当時には、同一ライナで累積運転時間が5,000秒を超えるなどとは考えられていなかった。

その後、2000年後半～2001年にかけて角田センターの高圧液酸ターボポンプ試験設備において長秒時の実証試験⁷⁾を行い、現在はLE-7/LE-7Aと同様にメタル（銀メッキ）のライナとなっている。

完璧などというものはこの世には存在しない。問題は、「何故この材料を選定したか、何故この設計に至ったか」の過程が引き継がれていなかったことである。

「設計変更するには、実証試験（認定試験）などを行わないとできない」、さらに「変更理由が見あたらないとできない」とのこと。

開発はゼロからのスタートであり、材料の変更や設計変更は、開発過程において当たり前のこと。

したがって材料、設計が固まるまで（途中の設計変更も）の経過は正しく引き継がれるべきだと考える。現在のシステムでは、各種審査会の膨大な資料が残されている。しかし、新しいエンジンの開発には10年近い歳月が掛かり、その間にはメーカーの担当者もJAXAの担当者も変わる。

また、改良されエンジン型式が変更されても基本設計は変わらない（LE-5～LE-5B、LE-7～LE-7A）場合が多い。「これまで問題が起きていないものを・・・」のなかで、果たして基本設計まで遡り検証する人はいるのだろうか。甚だ疑問である。

この事例は、「組織としてのヒューマンエラー」に属するものと考ええる。

3. LE-7 ターボポンプ編

1983年にLE-Xの名称で推力100トン級のOTPの設計を開始した。1985年には、旧NAL角田支所（現角田西地区）に高圧液酸ターボポンプ試験設備の建設を開始し、1986年3月からOTPの試験を開始した。同年OTPのスタートから半年ほど遅れて、旧NASDA角田開発センター（現角田東地区）にFTPの試験設備が完成しプリバーナ（PB：ガス発生器）の単体試験を開始した。

LE-7ターボポンプの開発は、LE-5のスタート時と同様にOTPは旧NALが主担当となり、FTPは旧NASDAが主に担当することとなった。

NALでは最初に各構成部品の性能確認用に、開発基礎型ターボポンプ⁸⁾（OT-001、002）2台を製作した。後に回転系は若干の改良が加えられたが、基本設計は実機に引き継がれている。ケーシングは単体地上試験用のため軽量化はされず（組立重量約550kg）、INCONELの無垢材を機械加工し溶接で接合している。

その後、エンジン試験に供するための原型ターボポンプ（OT-101、102、103）および支援研究用ターボポンプ（OT-104）の合計6台を製作した。

OTPのシリアルNo. 200番台以降はNASDAが実機試験用に製作したターボポンプである。

開発基礎型ターボポンプのインデューサライナは、LE-5よりかなり大口径となるために、最初は強度の優れていたKEL-F製（図8参照）であった。ライナを装着するケーシングAは、軽量化が施されていないためかなりの厚みがあり、KEL-F製ライナも十分な厚みを持った設計であった。

この初号機（OT-001、002）のターボポンプは、ライナを含め構造上の大きなトラブルもなく試験は進められた。

唯一大きなトラブル（事故）は、1987年にMHI田代試験場で起きたLE-7エンジン（OT-001を組込んだ）の爆発事故である。我が国の宇宙開発史上（エンジン開発試験のなかでは）最大級の酸素爆発事故ではあるが、あまり知られてはいない。当時、世界最高水準の大型高圧液酸／液水エンジンの開発の難しさが、再認識された事故であった。

3.1 設計変更によるトラブル例

この後の実機を模擬（軽量化しほぼ実機と同形状）した原型ターボポンプOT-101が、1987年に納入され試験が始まった。この原型ターボポンプの試験後、入口側を外したところインデューサライナが破損していた。開発基礎型OTPでは全く問題なかったはず？

OTPの設計担当者も「全く同じ設計です。原因がわかりません」とのこと。

みんなで頭を悩ませていたところ、2週間ほど立って

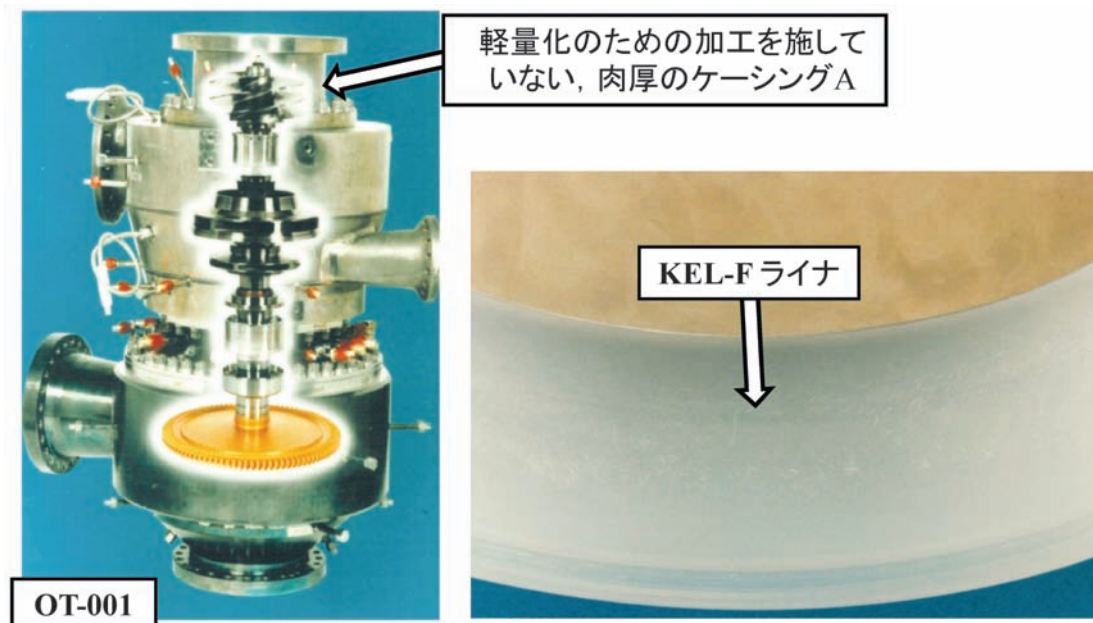


図8 LE-7 開発基礎型 OTP と KEL-F ライナ
(1986 年：写真の OT-001 は、後に田代のエンジン試験で爆発した供試体)

から「ケーシング A の肉厚を軽量化のため薄く」との NASDA からの要求で薄くしました。そのために図 8 に示すライナも薄くなってしまいました」とのこと。

NASDA が発注している実機型ターボポンプの設計を確立するために、原型ターボポンプを製作するとの目的もあったが、設計変更したパーツは報告すべきであった。了解を得ず独断で設計変更した結果が、ライナの破損となって現れたものである。

「結果には必ず何らかの過程が介在する」。結果には必ず原因があるという見本のようなミスで、「この程度厚みを減らしても問題はないだろう」との安易な考えは、「無知のミス」にも通じる愚かな判断であった。

この結果、ケーシングを薄肉軽量化した原型ターボポンプのライナは、KEL-F 製では強度不足であるとの結論から、実証試験を繰り返し金属ライナに銀メッキ（現在はケーシング A に直接銀メッキ）を施すライナに変更された。

このミスは、「安易な考え」が起こした「個々のヒューマンエラー」と、「組織としてのヒューマンエラー」の両方が介在した事例であると考えられる。

3.2 検査の見落としによるトラブル

LE-7 原型 OTP/ OT-102 が、1988 年が納入され、試験のために高圧ターボ設備に取り付けられた。GO₂/GHe ドレン細配管取り付けのために、軸受け C、D 下流ドレンポートキャップを開けると金属（？）と疑われるコンタミが見つかった。ルーペで確認したところ金属質のものであることが明らかとなった。（図 9 参照）ターボポンプの輸送中

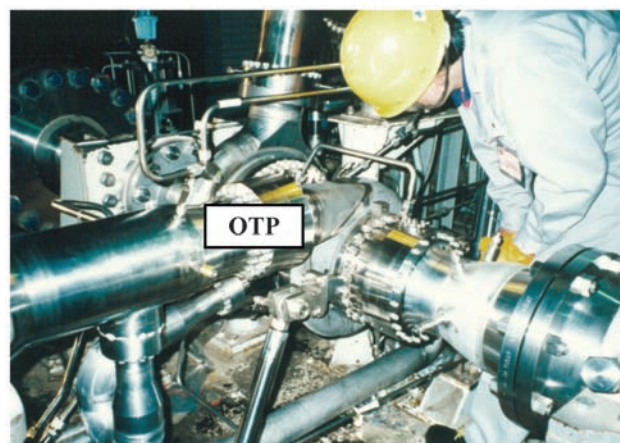


図9 LE-7/OTP の内部から金属切り子を発見
(1988 年：写真はポートを確認している様子)

の振動により、内部から出てきたものと考えられた。

「液酸ターボポンプ内部から金属キリコ」

清浄度云々の話どころではない。もっと初歩的なレベルであり、爆弾を腹の中に抱えているようなものである。

ファイバースコープでポートの中を覗いたところ、ドレンポートの内部で直角に曲がっている横穴に金属切り子がぎっしりと詰まっていた。

ケーシング内の穴加工は、それぞれの位置から直角に穴を開けて貫通させている。加工後はガスで穴内部のゴミを吹き飛ばし、更にフロンを流していたとのこと。

しかし、「金属粉ではなく切削切り子が詰まっていた場合は、窒素ガスパージやフロンを流したとしても切り子の隙間を通過する」。しかも、実際に中を覗き確認するという最も単純な検査行程が抜けていた。

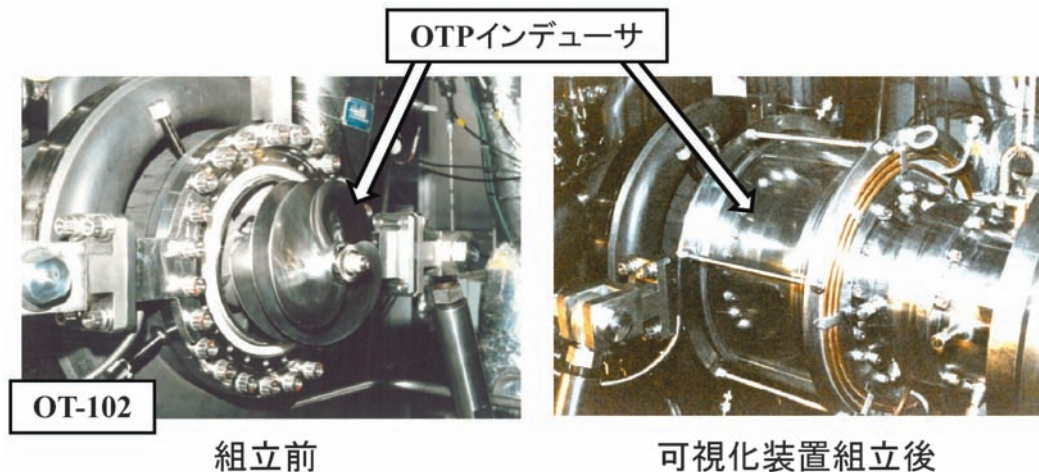


図10 LE-7/OTP インデューサの可視化装置（1990年：写真は組立前と組立後の様子）

ターボポンプは取り外され工場に逆戻り。全分解し、全ての内部貫通している穴を検査・洗浄。したがって、会社側も多大な経費が発生することとなり、さらに開発試験スケジュールにもインパクトを与える結果となった。

この後、加工後には必ず内部の確認を行うことが検査手順書に書き加えられた。

“「見る」という最も単純で、初歩的なこと”が手順書から抜け落ちていた事例である。

このミスは「組織としてのヒューマンエラー」であり、もし金属片が発見されていなければ、最悪の場合は爆発事故を引き起こした可能性も考えられた一例である。運の強さもまた開発の現場では、必要な要素の一つである。

3.3 無知が起こしたトラブル

LE-7の開発初期にOTPに発生した回転非同期（ $1.1\omega \sim 1.3\omega$ ）の軸振動が問題となり⁹⁾、原型OTPに可視化装置を組み付けて、インデューサに発生するキャビテーションを「直接見る」試みが、1990年に進められていた。（図10参照）

基本的な設計は、これまで旧NAL時代に筆者らが推力10トン（LE-5）クラスのポンプの入口流れを、液体窒素を用いて可視化した実績があり、これを参考に設計を進めることをメーカー担当者に推奨した。

可視化装置の設計は、会社の新人が担当となった。研修をかねているのか、NALなら何とかしてくれるだろうとの甘えなのか、いつも決まって新人である。

LE-5とLE-7ではインデューサの径が約2倍となっているにも関わらず、設計したポリカーボネート（液体窒素を直接可視化する内筒）は明らかに脆弱であった。

こちらの心配をよそに、「根拠のない自信に満ちあふれ」聞く耳を持たないとの態度であった。いざ試験場で可視化

装置の組立が始まると、入口長さ方向の寸法が合わない。長すぎて組付かないのである。全体組み立て図では寸法が合っている。何故？

「この新人は、実際の装置を設計したのは初めてであった」。つまり、ナフレックスシールが落ちないようにとの配慮で内部に5ミリのつばが計3ヶ所付いていた。図面上では組立ができていても実際には15ミリ長くないと入らないのである。

急遽、地元の町工場で削り落として何とか組み付けることができた。

いくつかのトラブルを乗り越え、試験本番になり予冷を開始した。低温ガスによる予冷を約1時間行い、液体窒素をわずかに流し始めた頃に「パキッ」という音と共に真空ポンプが勢いよく回り始めた。内筒のポリカーボネートに亀裂が入ったのである。最も危惧していたことが現実となった。

「大学で経験があるから大丈夫」と頑張られると、低温もやっていたのかな？とも思い、頭から否定することはしなかった。これは間違いであった。

壊れてしまったので「本当に低温をやっていたのか」と聞くと、「やっていたのは水でした」とのこと。「水で大丈夫なので液体窒素でも大丈夫だと思っていました」。この一言。

周りの状況、相手の言い分を聞いてしまうとなかなか反対しづらくなるものですが、「納得しなければ先に進めてはいけない」との強い意志が必要であることを思い知らされた出来事であった。

この事例は、「無知」による「個々のヒューマンエラー」に属するものであるが、設計者に謙虚さがあれば防げたミスとも考えられる。

後に回転非同期軸振動は、インデューサに発生するキャビテーション不安定現象の一種である、旋回キャビテーションによるものであることを突き止めた^{10), 11)}。

一方、旋回キャビテーションはFTPにおいても発生していたが、液体酸素と液体水素の密度差を考えると、FTPでは問題となる事象ではないとの結論であった。

しかし、1999年のH-IIロケット8号機の事故では、FTPのインデューサに発生する旋回キャビテーションが誘発した、インデューサ翼の疲労破壊^{12), 13)}が原因であるとの結論が下された。

3.4 机上による「思いこみ」が起こした事故

1986年9月に発生したプリバーナ燃焼試験の水素爆発事故の原因となったボルトは、A-286/12P 緩み止め用穴付きボルトである。(図11参照)

現地の試験隊が誤発注したボルトは長さが足りず、穴の部分が入る短いものであった。間違いに気がつきはしたが、大量購入したために再度買い直すことを会社に報告できず、現地の設計担当者に報告した。担当者は費用、スケジュール等を考え、貫通部断面の残りの面積から強度を割り出し、使用可能の判断を下した。

しかし、応力は細いところ、薄いところまたは角などに集中するのは常識中の常識。

また設計担当者は、各ボルトの締め付けトルクを現場の作業員へ指示するのも仕事。しかし、「**全ては机上の値であり、現場での実作業を全く知らなかった**」のである。

一方、プリバーナインターフェース配管(ターボポンプインターフェース全般でも)は小径でしかもボルトは密に

配置されています。図面上では完璧に合うはずのボルト穴は、実際には加工誤差やフランジの溶接などにより僅かなズレが生じていたために、現場ではよくA-286ボルトの焼き付きを起こしていた。

これを防止するため、「**現場ではボルトにテフロン系の潤滑剤を塗布して使用していた**」。つまり、限りなく摩擦係数はゼロに近い状況下で締込みを行っていたことになる。

潤滑剤を塗布した場合、トルクは半分程度に抑えるというのが一般的なやり方。それを指定された規定トルクで締込みを繰り返していたということは、実際には規定トルクの2倍以上の力を常にかけていたことになり、ボルトは塑性領域付近で使用されていたと推定される。

試験中に数本のボルトが破断し、フランジの口が開き噴出した水素ガスに引火して爆発した。事故後に見たボルトは、長さは不揃いでしかも新品のものより全て延びていた。

「ここでは次の4つのミスが重なっている」

1. ボルトを誤発注した。
2. 正規のボルトを使用せず、諸事情から使うための理屈を導き出した。
3. 現場では規定トルクの意味を理解せず、作業優先で潤滑剤を使用していた。
4. 設計担当者は現場の作業状況を全く把握していなかった。

これが事故の概要と原因である。

ここでは1のミスだけでは事故とはならないが、2の判断ミスにより3、4に繋がりが、起こるべくして起こった事故であると考えられる。

この例は、角田センター(現東地区)のLE-7/FTP開発における最初の爆発事故である。

この事例は、「無知」と「邪念」による「組織としてのヒューマンエラー」に属するものと考えられる。

3.5 組織としての判断ミスが起こした事故

3.4項の事故から約3ヶ月後の1986年12月にこの事故は発生した。

LE-7エンジンでは、ターボポンプ(OTP/FTP)のタービンマニホールディングはエンジン側についている。NALでのOTPの地上試験(高圧液酸ターボポンプ試験場)用には、MHIがタービンマニホールディングを試験用治具として製作し納入していた。

一方、FTPタービンマニホールディングは、IHIがエンジン搭載用として製作したが、後に不必要であることが判明した。

ここで事故の原因となったFTPタービンケーシングは、勘違いから製作した物であり、本来は廃棄すべきもので

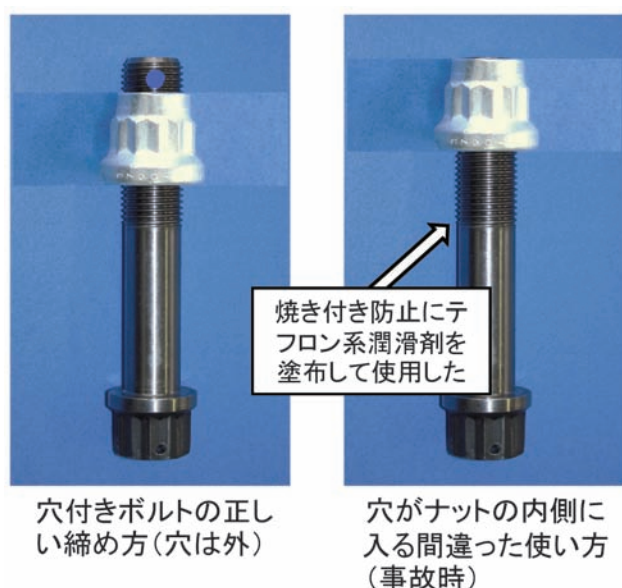


図11 プリバーナインターフェースの破断したボルト(1986年:写真は穴付きボルトの使い方を再現したもの)

あった。

しかし、タービンケーシングを使用せずに廃棄すれば、会社の多大な損失となる。このため、「何とかしなくては」との発想が生まれたものと推察される。

そこで、エンジン搭載用に薄肉・軽量化したケーシングの強度計算をして、「**100回は安全に地上試験に使用できる**」との解を導き出し、地上試験用治具として使用することとなった。（図12参照）

結果は、「**4回目の試験でタービンケーシングが破裂し、水素爆発を引き起こした**」。

タービンが壊れ瞬時に軸がロックしたために、インデューサを固定しているタイボルトが破断し、インデューサは入口上流側に回転しながら飛んでいった。

この事故では、「**組織としての判断ミス**」と共に「**設備**」にも問題があったと考えている。

旧NALのOTP試験設備と旧NASDAのFTP試験設備では、供試体周りの設備に対する設計思想が大きく異なっていた。それはFTP設備では、供試体にかかる応力を緩和するための機構が全く考えられていなかった。

OTPでは試験設備を設計する際に、供試体メーカーから「ポンプ側に応力をかけないように」との厳しい要求があった。そのためメインポンプ入口／出口ライン、スプリットポンプ出口側には応力緩和のための伸縮管が設けられていた（図13参照）。

一方、FTPの設備では伸縮管は全く無く、各設備配管が供試体を引っ張り合うというポンプにはかなり過酷な設備となっていた。（供試体メーカーは同一）

ケーシングの強度／寿命計算にはこの条件（設備配管の引っ張り合いの影響）を反映させることは甚だ困難であったと考えられる。また、大量の燃焼ガス流入によるケーシ

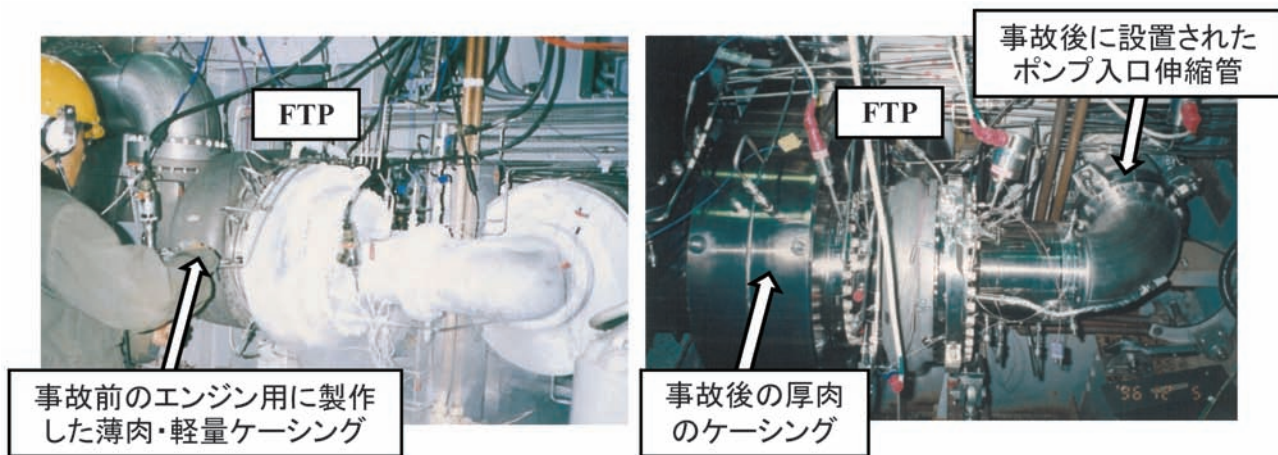


図12 事故前と事故後のLE-7/FTPタービンケーシング（1986年：写真左は事故当日の試験，写真右は事故後の試験）

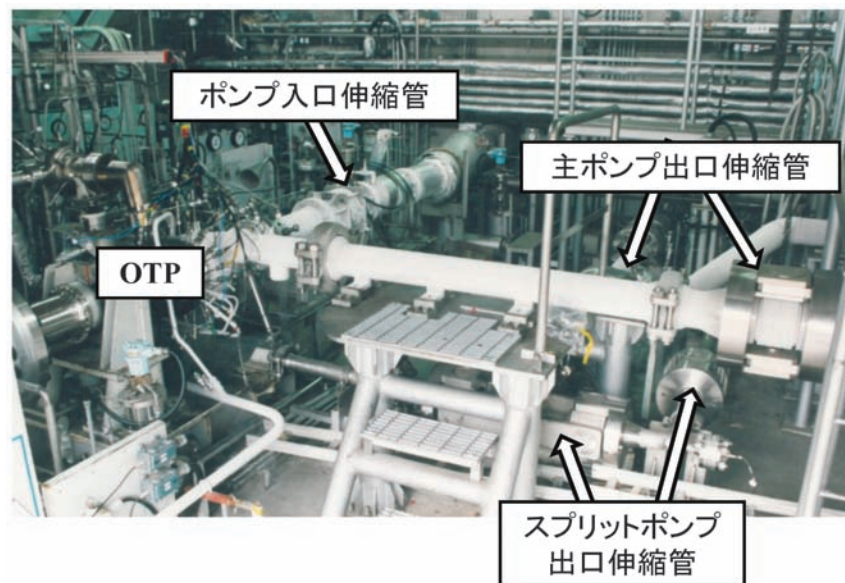


図13 伸縮管が設置されているLE-7/OTP試験設備
（写真は現角田センターの高圧液酸ターボポンプ試験設備）

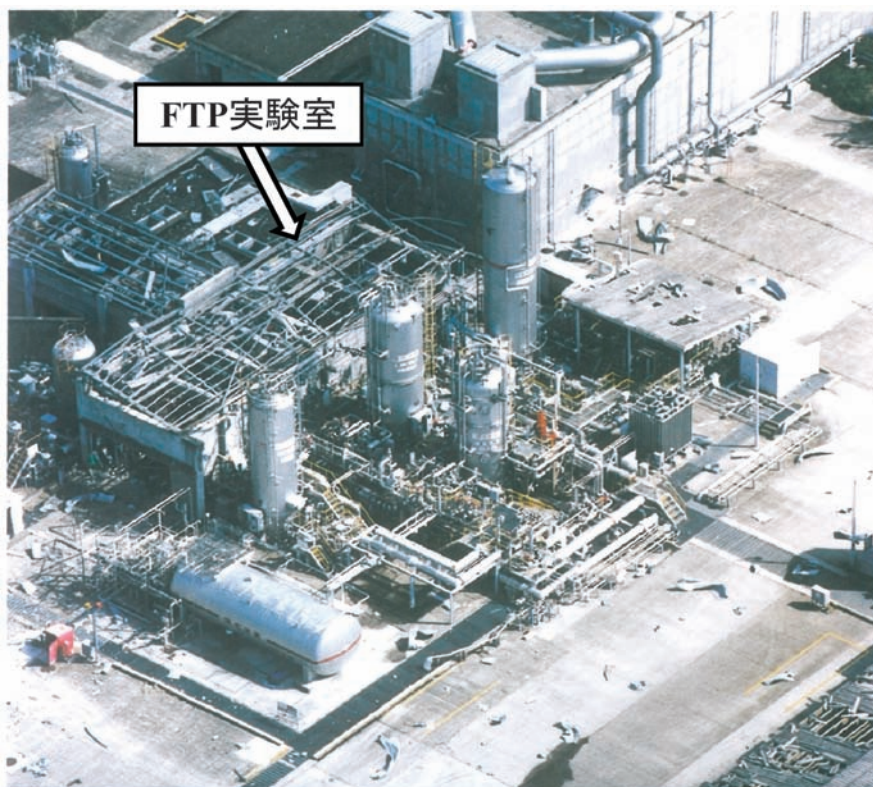


図14 水素爆発したLE-7/FTP試験場（1991年：現角田センター供給系試験設備）

ングの振動および熱歪み等の影響も、あまり深く考えられてはいなかったものと推察されます。

さらにポンプ側配管の試験（液水温度）時の熱収縮による曲げや捻れの応力が、タービンケーシングに与える影響なども考慮したのだろうか、いささか疑問である。もっと深く考えるべきであった。タービンケーシングの圧力と温度によるサイクル計算ではなかったのか。

事故後、OTP用タービンケーシングの強度問題が浮上したが、当初から地上試験用に設計されており、FTPタービンケーシングの約3倍の肉厚（パワーは1/4）となっていた。

現在FTP試験設備に設置されている伸縮管は事故後に設置されたものである。

「ここでは3つのミスが重なっています」

1. 誤ってタービンケーシングを製作した。
2. 試験治具として使うための机上の理屈を導き出した。（強度計算には、不確定要素が多すぎた）
3. エンジン搭載用として設計・製作したものを、社内事情を優先し目的以外（地上試験用治具）に使用した。（廃棄の判断をすべきであった）

これが事故の概要と原因となります。

この例も1のミスでは事故は起きない。2の判断ミスにより、3の決定的なミスを誘発している。

角田センター（現東地区）のLE-7/FTP開発における2度目（同年2度目）の爆発事故である。

この事例もまた、「無知」と「邪念」による「組織としてのヒューマンエラー」に属するものと考えられる。

3.6 スケジュール優先の判断による事故

1991年にタービン出口排気ダクト（曲り管：A-286）の溶接線が割れ、大量の水素が吹き出し爆発した。周辺の民家に被害を与えた初めての爆発事故であった。（図14参照）

事故当時、新たなダクトを製作していたが納期に遅れが生じていた。しかし、「試験スケジュールを優先する」決定が下された。FTPの試験は新規製作ダクトを使用することになったが、ベンチュリー流量計の校正試験は従来のダクトを使用した。校正試験と云えども本試験と同等であった。

排気ダクトは溶接線に沿って割れ、噴き出した大量の水素が空中着火し近隣の住居に被害を与えた。事故後に排気出口ダクトの破断面を見ると、溶接線（内部）に水素脆性によるクラックが生じ、これまでに幾度となく研磨削除していた痕跡が認められた。更に研磨後の溶接線上の肉厚は不均一であり、最小肉厚部は7ミリ、正規の肉厚21ミリの1/3程度となっていた。（図15参照）

しかし、7ミリあれば計算上問題はなく、さらに耐圧／気密検査の結果から、使用の判断にミスは無かったとの結論であった（事故後）。

計算上の7ミリは全週に渡り平滑な状態であって初めて

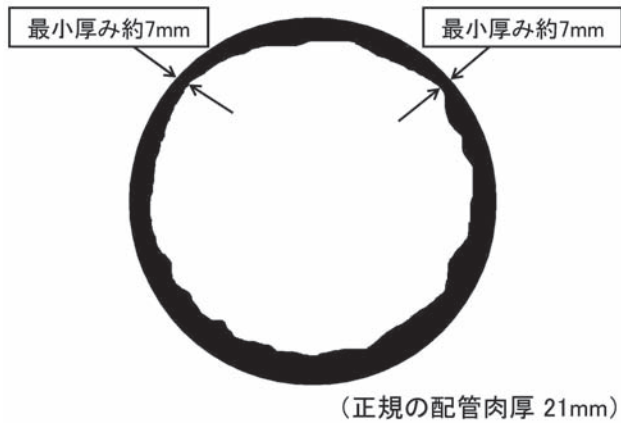


図15 溶接線破断面の概念図
(1991年：タービン出口排気ダクト)

成り立つ値であり、3.4項で述べたように現実には一番弱いところへ応力が集中することは周知の事実である。

さらに水素ガスの流れによる振動、ダクト形状も直管ではなく曲り管であったことなどを考えると、最低限溶接による肉盛り補修を行うか、またはスケジュールの変更（新規ダクトの納入を待つ）を行うべきであった。

「ここでは3つのミスが重なっています」

1. 新規製作ダクトの納入を待たずスケジュールを優先した。
2. 本試験ではないのだから、あと2～3回なら問題ないだろうとの安易な判断。「静的な耐圧・気密検査」の結果を過信した。
3. 部分的に肉厚が正規の1/3程度となっていたことから、溶接補修(または廃棄)の判断を速に行うべきであった。

これが事故の概要と原因となります。

ここでは、1で大きな間違いを冒しているために、2、3での判断が甘くなっている。

この事故を教訓として、OTP試験設備の排気系の溶接部検査が行われたが、A-286系の溶接部には水素脆性によるクラック等の異常は全く見られなかった。

角田センター（現東地区）のLE-7/FTP開発における3度目の爆発事故であるが、試験再開は約半年後であった。スケジュール優先の判断は、半年遅れを招く結果となった。

この事例は、「スケジュール最優先」という「邪念」により、判断を狂わせ事故に至らしめた「組織としてのヒューマンエラー」に属するもの考える。

これまでの経験では、事故は一つのミスだけでは絶対起きることはない。「二つ以上のミスが重なったとき、ほぼ

100パーセント近く事故は起きる」ということである。

「認識不足」のための判断ミスはもちろん、ミスを誘発する「邪念」は最も慎まなければならない。

4. ま と め

ここに記載した事故例は、筆者が何らかの形で関わってきたターボポンプに限定して述べている。したがって、IHI/MHI等メーカーの自社試験場における事故等にはふれていない。

LE-5の開発がスタートして、LE-7/LE-7Aに至る30有余年の間には、「ヒューマンエラー」による事故または事故には至らなかった軽度のミスは、ここに記載した何倍、何十倍も隠れているものと考えられる。

「失敗は宝の山」との格言があるが、この埋もれた宝を掘り出すためには、失敗例を正確に残す必要があるとの考えからまとめたものである。

「認識不足」、「安易な考え」、「思いこみ」がヒューマンエラーの要因となるが、「邪念」、「欲望」そして「無知」と「うっかり」は人間の持ち合わせた本能である。

集団になると、誰が見てもおかしいと思う判断を下すのが人間であるならば、「ヒューマンエラー」を減らすためには、「個々がプロの自覚」を持って仕事にあたることである。「想定外」とのいい訳は、専門家として最も恥ずべき言葉である。

特に設計関係者は、机上の計算が100パーセントであるとの勘違いに陥りやすい。供試体／装置・設備を理解し、現場では何が行われているかを「自分の目で確認する」ことが、「組織としてのヒューマンエラー」を未然に防ぐ第一歩であるとする。

しかしながら、仕事は細分化され視野が益々狭くなってきているのが現状である。人間の持つ愚かさを理解し、反面教師としていただければ幸いである。

参考文献

- 1) Kamijo, K., Sogame, E., Okayasu, A., "Development of Liquid Oxygen and Hydrogen Turbopumps for the LE-5 Rocket Engine" AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 19, No. 3, (1982), pp. 226-231.
- 2) 上條謙二郎, 志村 隆, 橋本亮平, 山田 仁, 野坂正隆, 鈴木峰男, 渡邊光男, 渡辺義明, 長谷川敏, 菊池正孝, 十亀英司, "液酸・液水ロケットエンジンターボポンプシステムの研究" 航空宇宙技術研究所報告, TR-696, (1982.1)
- 3) 上條謙二郎, 吉田 誠, "LE-7液酸ポンプインデューサの試作研究" 本機械学会論文集(B編), 57巻544号,

- (1991.12)
- 4) Kamijo, K., Yoshida, M., Tsujimoto, Y., “Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer” AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, (1992)
 - 5) 上條謙二郎, 渡邊光男, 青木 宏, “ロケット用高圧液酸・液水ポンプの研究” 日本航空宇宙学会誌, 第 357 号別刷, (1983.10)
 - 6) 渡邊光男, 長谷川敏, 上條謙二郎, 青木 宏, “小型高圧液酸ポンプの研究試作” 航空宇宙技術研究所報告, TR-959, (1988.2)
 - 7) NAL/NASDA 共同研究, “LE-5B エンジン液酸ターボポンプインデューサライナ技術試験結果報告書” 宇宙開発事業団, KBB-010, (2001)
 - 8) 山田 仁, 渡辺義明, 吉田 誠, 長谷川敏, 上條謙二郎, “LE-7 用液酸ポンプの試作研究” 航空宇宙技術研究所報告, TR-1020, (1989.4)
 - 9) 上條謙二郎, “高速ポンプインデューサの旋回キャビテーション” ターボ機械, 第 20 巻第 4 号, (1991), pp. 33–39.
 - 10) Kamijo, K., Yoshida, M., “Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer” AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 6, (1993), 819–826.
 - 11) 渡邊光男, 長谷川敏, 渡辺義明, 橋本知之, 吉田 誠, 山田 仁, “LE-7 液酸ターボポンプインデューサの回転非同期軸振動の抑制” 航空宇宙技術研究所報告, TR-1359, (1998.7)
 - 12) 今野 彰, 坂爪則夫, “LE-7 エンジンターボポンプと 8 号機の失敗の原因” ターボ機械, 第 29 巻第 3 号, (2001), pp. 139–144.
 - 13) 今野 彰, “H-II ロケット失敗の原因とその教訓” 圧力技術, 第 41 巻第 6 号, (2003), pp. 335–344.