

【整番】FE-06-TC-007	【標題】圧力変動によるラプチャーディスクの破損トラブル
分類：流れ(非定常流れ)／種別：トラブル事例	作成年月：H20.6／改訂：Ver0.1 (H20.6) 作成者：N.Miyamoto

H20.6.18 誤記訂正ほか

全6枚

1. あらまし

φ900 低圧蒸気ラインに設けたφ700 ラプチャーディスク(以下 RD)が、破裂圧力以下の低い圧力で破損した。原因としてまず RD の製品欠陥が疑われ破裂試験を行ったが特に異常はなかった。そこで φ900 ラインに圧力センサを付け圧力履歴を計測したところ、系の運転操作を変えるときに、異常な圧力降下が起こることがわかった。以下、このトラブル内容とその推定原因を紹介する。

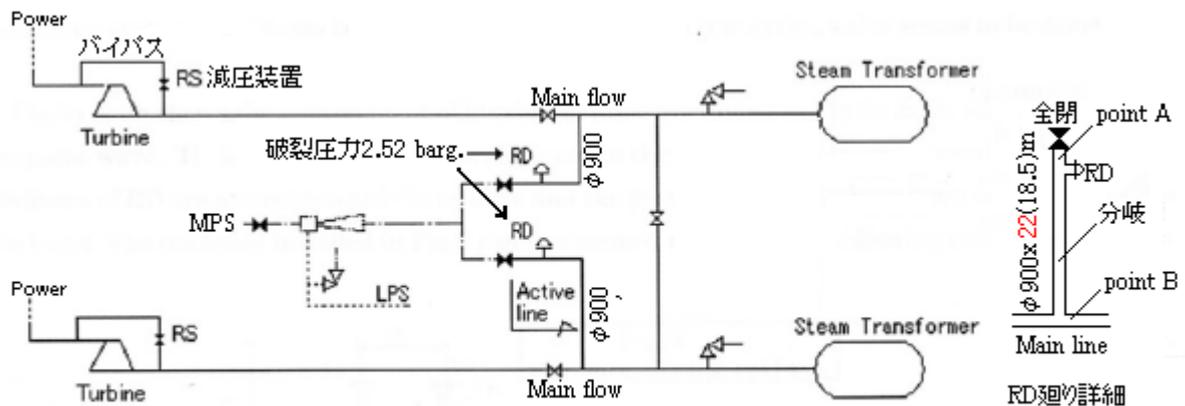


図1 ラプチャーディスク関連の流れ

2. トラブルの状況

- RD 関連のフローを図 1 に示す。低圧蒸気はエジェクタから Steam Transformer に流れるように設計されており当該 RD はエジェクタ 2 次側圧力の上昇をセーブするため設置されている。然るに事故当時は図のようにエジェクタ側のラインは RD 手前で遮断され、RD はタービン—Steam Transformer 間の圧力逃がし装置になっていた。この場合、当該 RD は図 1 右に示すように Main line からの先止り分岐ラインのほぼ末端に位置する形になる(この措置は過渡的なもの)。
- 当該 RD の破損は 3 回起きている。1 回目の詳細はわからないが、2 回目は、ライン指示圧力 1.93 barg であって、セット圧力 2.7barg の Main line の安全弁は作動しておらず、破裂圧力 2.75 barg の既存 RD も破損していない。3 回目はライン指示圧力 1.7barg であった。なお 1 回目と 3 回目は通常の運転状態で発生し、第 2 回目は Change-over 操作(Power 側のタービンバイパス切換え操作)中に発生している。
- ライン圧力は当該 RD の破裂圧力 2.52 barg に達していないのでまず、RD の製品欠陥が疑われ、持ち帰りの工場テストを実施したが、正常に破裂することがわかった。これは圧力計指示に現れない瞬間的な圧力上昇が当該ラインで起きていることを暗示する。そこで、ラインにひずみゲージ内臓の圧力センサをつけて、運転中の圧力変動を継続的に計測することにした。計測ポイントは下記 2 ポイント。
ポイント A：分岐先端部の RD 寄り、ポイント B：分岐元の主管側
- 通常運転中ラインには 0.15at 幅位の圧力変動があるものの、概ね安定した圧力で運転されている。しかし Change-over 操作中に瞬間的に大きな圧力の急降下/急上昇(以下圧力ダイビング)が起きる。この

ときの圧力変動の計測結果を図 2、図 3 に示す。図 3 はそのうち最も大きい圧力変動をピックアップした

ものである。ポイント A の圧力降下(以下圧力ダイビング)は約 1.6bar で、ポイント B の約 0.3bar よりもかなり大きくなっている。

3. 原因とメカニズム (推定)

(1) 図 3a,b をパターン化すると下図のようになる。図の中のパラメータの値は付表の通り。

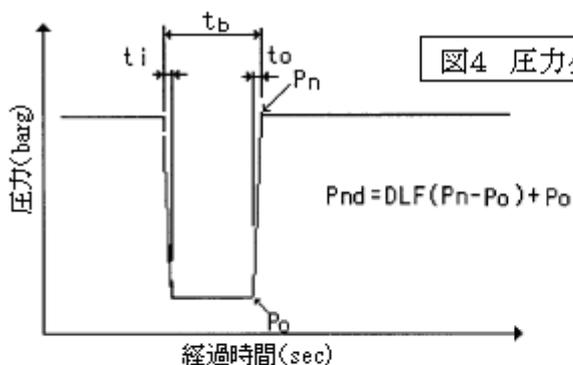


図4 圧力ダイビングパターンとその規模

ポイント	ダイビング時間 tb	降下/回復時間 ti or to	回復後の圧力 Pn	回復前の圧力 Po
A	1.38 sec.	0.002 ~ 0.006 sec.	1.62 barg	0.14 barg (*)
B	1.42 sec.	0.0005 ~ 0.002 sec.	1.62 barg	1.32 barg

(*) このポイントAでの回復前圧力は図3aの①における値である。ダイビング時の底値は0 barg以下と思われる。

ポイント A の圧力回復速度は 250~750bar/sec.と極めて早く、波動の形態は 1sec.以上の比較的長い底辺をもつ逆台形のパルス波である。このような場合、構造物には実態の流体圧力(Pn)を越える見掛け圧力(衝撃圧力)が作用すると思われる。この見掛け圧力(Pnd)は次式で見積もることができる。

見掛け圧力 $P_{nd} = DLF(dP/dt)t_o + P_o$ ここで、DLF=動荷重係数

本ケースでは、(dP/dt)は線形なので、

$P_{nd} = DLF(P_n - P_o) + P_o$ -----(a)

DLF はよく知られた係数で、下図のように与えられる。

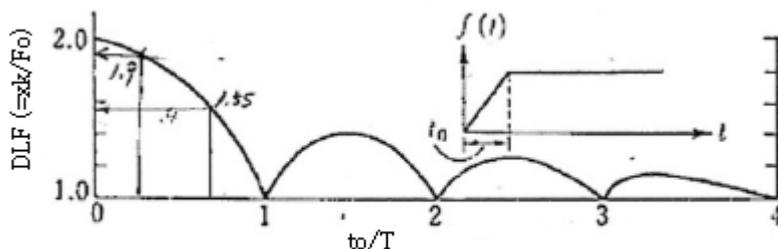


図5 線形スタート・ステップ入力の場合の衝撃スペクトル

Point A では、横軸の値は $(t_o/T) = (\text{回復時間}) / (\text{RD の固有周期}) = (0.002 \sim 0.006) / 0.0088 = 0.23 \sim 0.68$

ここで RD の固有周期 T は RD 躯体の固有値解析結果による。

$(t_o/T) = 0.23 \sim 0.68$ の場合、図 5 より、 $DLF = 1.55 \sim 1.90$ であるから

$$P_{nd} = (1.55 \sim 1.90) \times (1.62 - 0.14) + 0.14 = 2.43 \sim 2.95 \text{ barg at Point A}$$

Point B では同様に、DLF=1.9~1.99 であるから

$$P_{nd} = (1.99 \sim 1.90) \times (1.62 - 1.32) + 1.32 = 1.89 \sim 1.92 \text{ barg at Point B}$$

Point A のすぐそばに RD はあるが、圧力が 2.43~2.95 barg であるので、RD の破裂圧力 2.52barg を上回り RD が破裂する可能性がある。

圧力ダイビング中の RD シェルの挙動は下図のようであったと思われる。通常の運転状態では状態 A。ダイビング当初は圧力が下がって状態 B まで収縮し、その後圧力が回復して状態 A に帰るが、加速がついてオーバーランし状態 C に至って遂に破裂したものである。

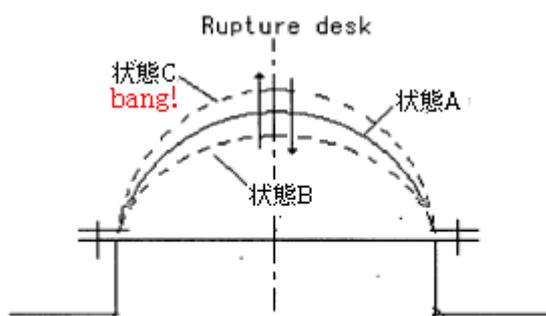


図6 圧力ダイビング中のRDシェルの変形(予想)

(2) Point A の圧力ダイビングは Point B よりも大きい。回復プロセスの変動幅の比(R)をみると

$$R = (P_n - P_o)_R / (P_n - P_o)_S = (1.62 - 0.14) / (1.62 - 1.32) = \text{約 } 5(\text{倍})$$

ここでサフィックス R、S はそれぞれ受信端、発信端の意

になる。Point B の変化が圧力波として伝播して Point A の圧力変化をもたらすと考えれば、これは波動問題として扱える。当該ケースのような先止り分岐管の場合、Streeter のテキストによれば、以下の式が成立する⁽¹⁾。

$$(H_R / H_S) = 1 / \cos(\omega L / a) \quad \text{----- (b)}$$

ここで H_R =受信端(Point A)の圧力振幅、 H_S =発信端(Point B)の圧力振幅、

i =虚数= $\sqrt{-1}$ 、 L =先止り分岐管の長さ(m)、 a =流体音速(m/s)、

ω =発信端の角振動数(rad./s)= $\omega_o + 2n\pi$ 、 ω_o =基本角振動数、 n =次数 1,2,3,...

(H_R / H_S) は前述の圧力幅比 R にほぼ等しい。基本角振動数 ω_o は $0 < \omega_o L / a < 2\pi$ で決まる。

$\omega = 2\pi f$ 、 $\omega_o = 2\pi f_o$ (f, f_o は振動数)の関係から上式は結局、次のようになる。

$$f = (a/L) \{ [1/(2\pi)] \cos^{-1}(1/R) + n \} \quad \text{----- (c)}$$

$a=500\text{m/s}$ 、 $L=\text{約 } 20\text{m}$ 、 $R=5$ であるから、

$$f = 5.45, 30.45, 55.45, 80.45, 105.45, \dots \text{ Hz}$$

$$T = 0.183, 0.033, 0.018, 0.012, 0.0095, 0.0076, 0.0064, \dots \text{ sec.}$$

圧力回復プロセスは、ポンプの立ち上がりのようなもので、 $T=2t_o$ と見なせる。故に増幅比 $R=5$ を誘発する圧力回復時間は図 7 (次頁) のようになる。

図 7 のハッチ部分は計測によって推定される時間域(0.002~0.006)を示している。このハッチ部分に 8 ポイントもの次数が含まれているので、確率的に 5 倍増幅になる可能性は極めて高いといえる。

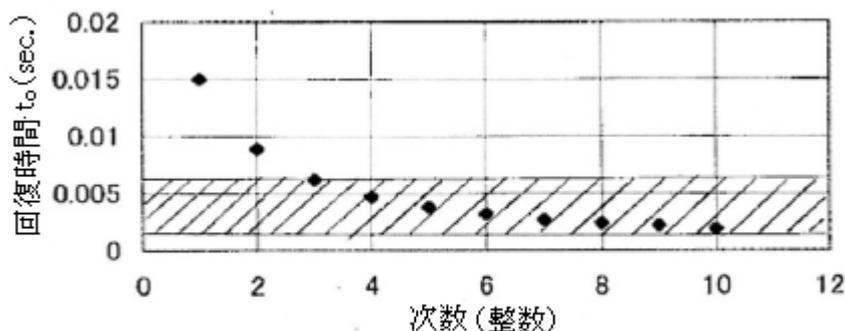


図7 R=5の増幅を生じる回復時間(t_0)

先止まり分岐管ではしばしば大きな圧力増幅が起きて振動源になることはよく知られている。この Point A の 5 倍増幅も、先止まり管の特性に由るものと考えていい。

- (3) 圧力計測中、RD は取り除かれて盲蓋されているので、果たして観察された最大の圧力ダイビングで RD が破損するかどうかはわかっていない。しかし以上の検討からみて、Change-over 時の圧力ダイビング現象によって RD が破損する確率は相当に高い。第 2 回目の破損はまさに Change-over 時に起きているので、圧力ダイビングが原因とみて差し支えないだろう。

一方、第 1 回/第 3 回目の破損は通常運転中起きている。通常運転時の圧力計測では異常な圧力変動は現れなかったが、この系には、何か別の圧力ダイビング現象あるいは圧力ダイビングに匹敵するような圧力変動の可能性が隠されているようだ(そうでなければ RD の破裂を説明することはできない)。

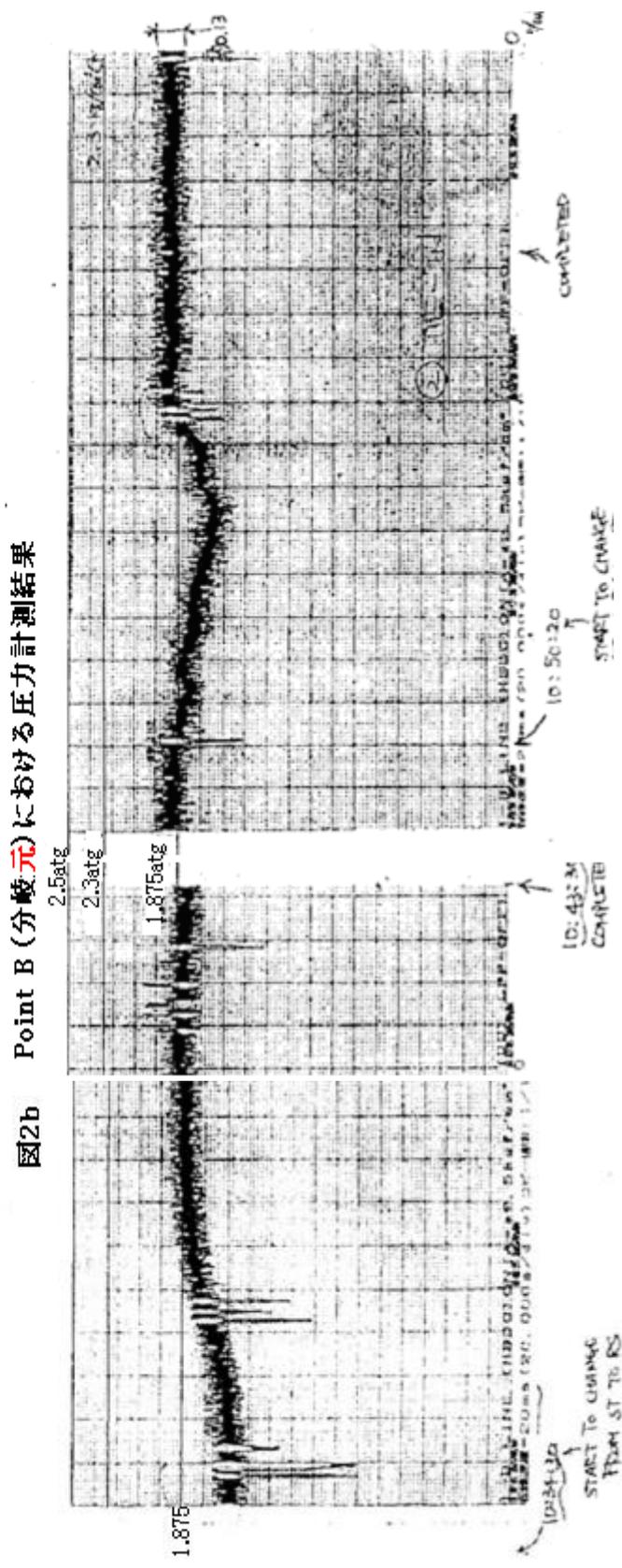
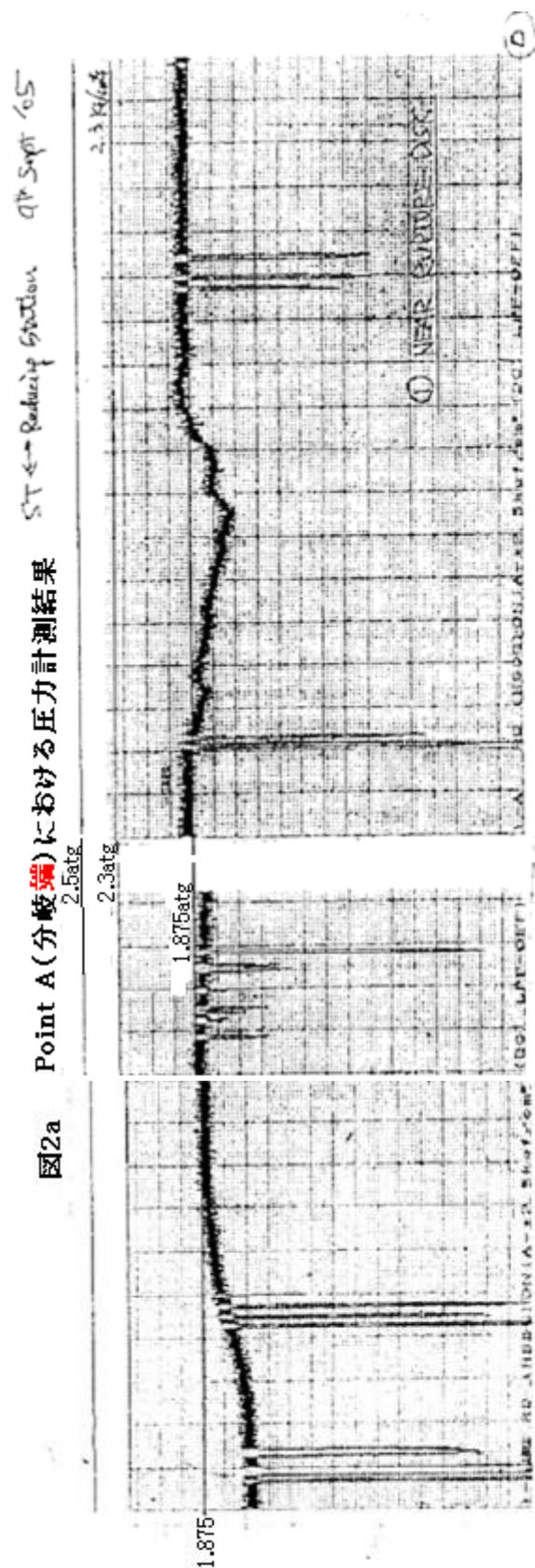
- (4) 図 2 に示すような圧力の急降下現象がなんで起きるのかは定かでない。ただ Change-over では蒸気はタービンを経由せずに蒸気変換弁(?)で減圧され乾き度を調整するため水が注入される。この減圧/注入の過程で急激な蒸気の凝縮が起きて圧力の急降下が起きるのではないかと思われる。

4. 是正措置

Point B の圧力ダイビングは小さく見掛け圧力は 1.89~1.92barg で 2barg 程度に収まっている。一方 Point A の 5 倍増幅は、ラインが先止まり分岐管になったために起きている。従って現状の先止まりさえ解除されれば Point A の増幅も解消されて Point B 並みに小さく収まることが期待される。そこで、特に RD を安全弁に替えるなどの是正措置は行われなかった。但し、エジェクタに繋がって全系統が正常なライン構成になるまで RD を取り外し、代わりに盲蓋をして運転された。

追記) その後、エジェクタに繋がりほぼ正常なライン構成で運転されたが、今度はエジェクタ駆動圧力の影響によるものと思われる RD 破裂が起きた。結局、このラインには RD のように感度の高い薄肉デバイスは不向きであったようだ。噴出してもまたセット状態に戻る安全弁と交換された。

引用文献：(1)Streeter and Wylie 「Hydraulic Transient」 (McGrow-Hill)



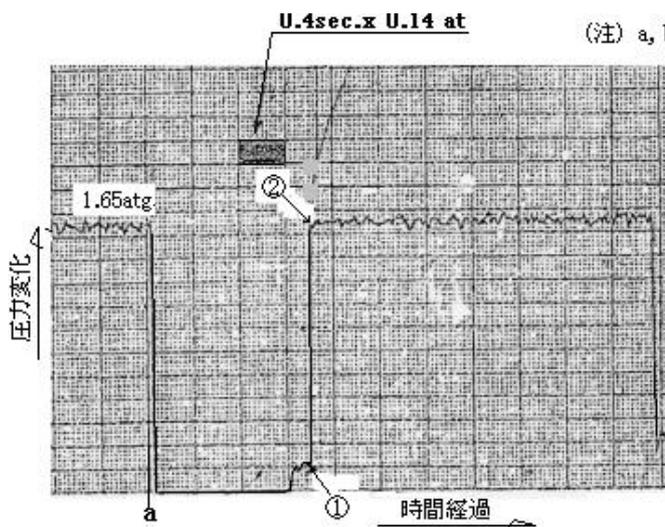


図3a Point A (分岐元) の圧力ダイビング状況

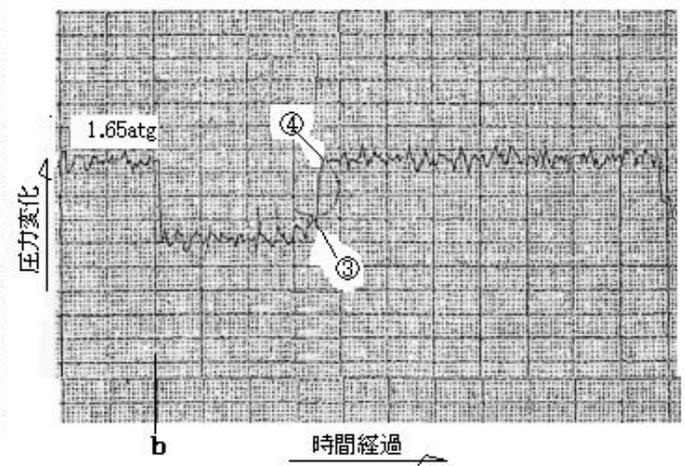


図3b Point B (分岐端) の圧力ダイビング状況