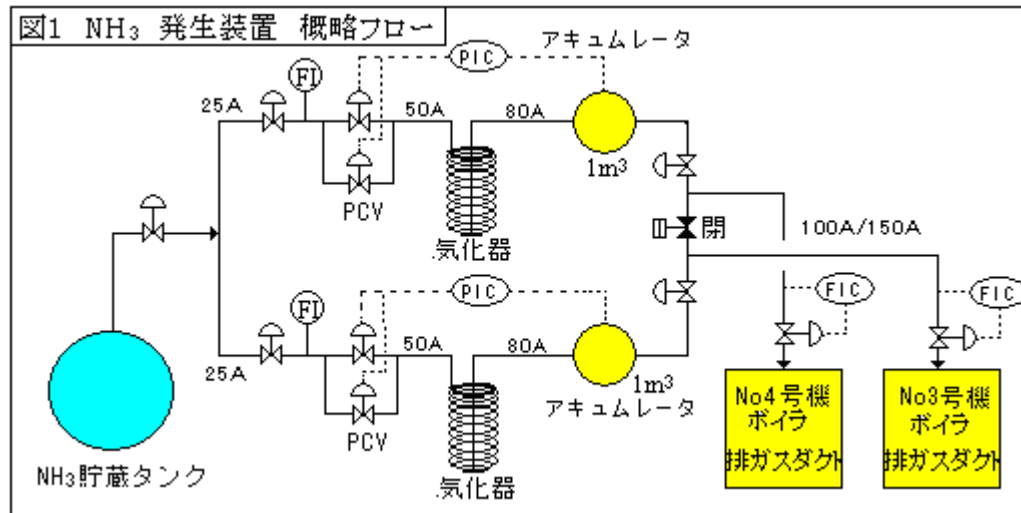


【整番】 CE-02-TC-001	【標題】 NH ₃ 発生装置の異常警報発生
分類：制御(動特性)/種別：トラブル事例	作成年月：H19.11/改訂：Ver0.0 (H19.11) 作成者：N.Miyamoto

全 10 枚

ボイラ排ガスダクトに注入するため液安を気化してアンモニアガスにして送り出す装置において、機器や配管あるいは制御系統に何の異常もなく、アキュムレータ圧力低のアラームがでることがわかった。そこで運転データを調べ幾つかの問題点を抽出し調節弁の動特性などを検討した。以下、その検討と対策の概要を紹介する。



1. トラブルの状況

(1) 装置の概略フローは図1のようである。貯蔵タンクからタンク元圧で送られた飽和液体アンモニアは気化器で気化されてアキュムレータ[ACとも略記]に保持され、ボイラ側の需要に応じて排ガスダクトに注入される。システム的には、ボイラ側の需要が増減してアキュムレータの圧力が増減すると、気化器上流に設けた圧力制御弁(PCV)の開度が調節されてアキュムレータへのフィード量がボイラ側の需要量に追従できるようになっている。この場合、アキュムレータの通常保持圧は $\sim 2.42\text{barA}$ で、 2.06barA でアラームが発生するようになっている。本ケースの圧力低アラームは数秒程度とごく短期的であって運転上、特に差し支えはなかったが、その原因をはっきりさせたいという運転側の要求があった。

(2) 本現象に関しては、以下のことが観察される。

- ・ 3号機に気化アンモニアをフィードする場合に起きている。4号機側にはみられない。
- ・ 3号機のアンモニア需要量の変動はかなり大きい(図1)。3号機のNOX変動量(=NH₃需要量)は4号機の約3倍の変動幅になっている。
- ・ ダクト側のNH₃注入量は需要(NOX量)にほぼ追従して変動している(図1)。発生装置側のNH₃量もNH₃注入量もほぼ追従して2～3分の遅れで変動している(図1 vs 図2)
- ・ 3号機フィード流量変動が相当大きい。アキュムレータに流入するNH₃量が最も下がった箇所でアラームがでている(図3)。

注目すべき特徴は、図3(3号機フィード時の発生装置側トレンドデータ)で観察される。即ち、

- ・ アキュムレータ(AC)の圧力が減少に向かっても圧力制御弁(以下PCV)はしばらく閉じてゆき、圧力が谷になる前に開方向に反転する。この間、流量はPCV開度に追従して減少する。

- ・ 然るに開方向に反転してPCVが開いていっても流量は低下して谷に至り、しばらく変化しない。
- ・ そしてPCVが十分開いた時点で急激に上昇し、いったん下がって更に急上昇し山に達する。

このパターンは多少の異同もあるが繰り返り起きている。その際の流量変化の谷の長さや山の高さは一定でなく、印象としては小さな山谷の途中に大きな山谷が現れ、その谷の継続時間が長くなった時に、圧力低のアラームがでるようだ。小さな山谷の周期は3分程度、大きな山谷の周期は7~10分程度。

なお、アンモニア需要量~発生装置流量のピークには2~3分位の遅れがある。これは発生装置からダクトまで距離があるうえにPCVとアキュムレータ間に1次遅れがあるためと思われる。

図1 3号機 運転データ(例)

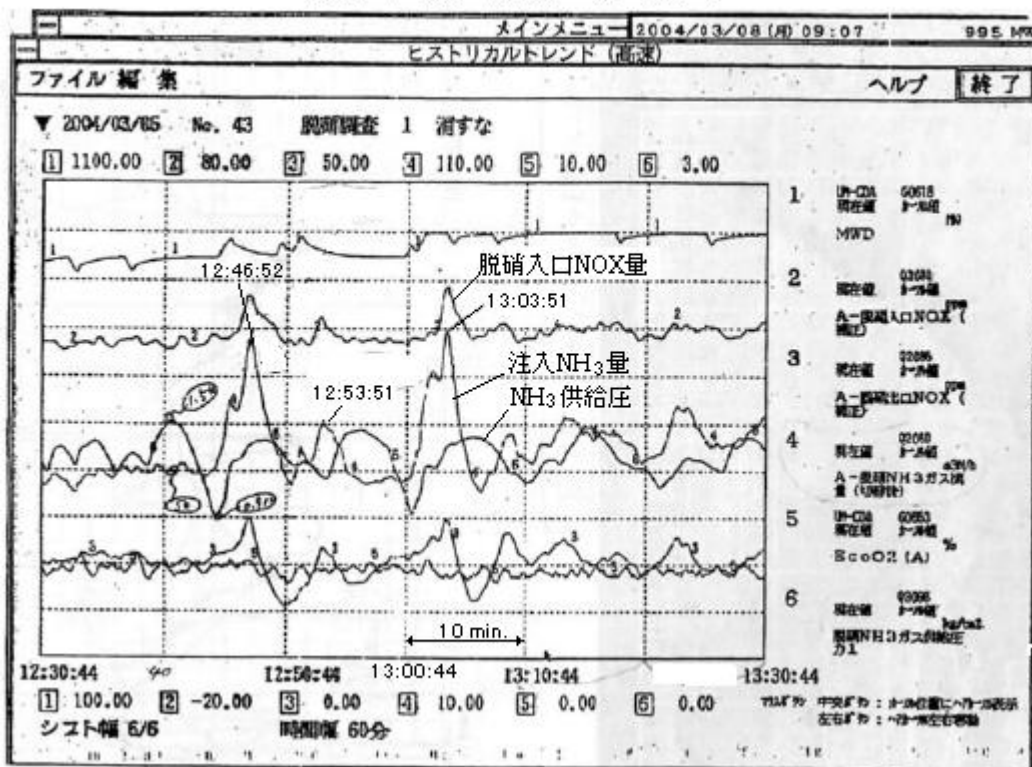
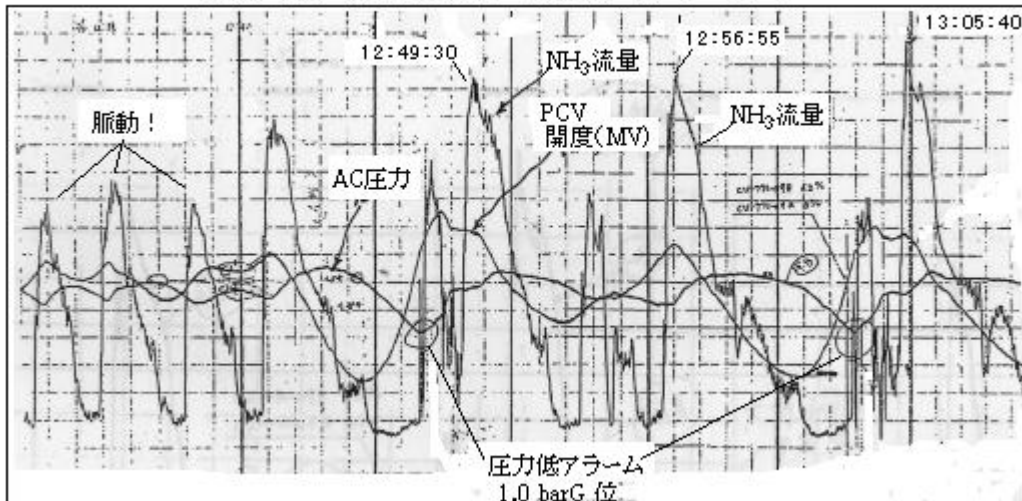


図2 NH 発生装置 ローカルトレンドデータ



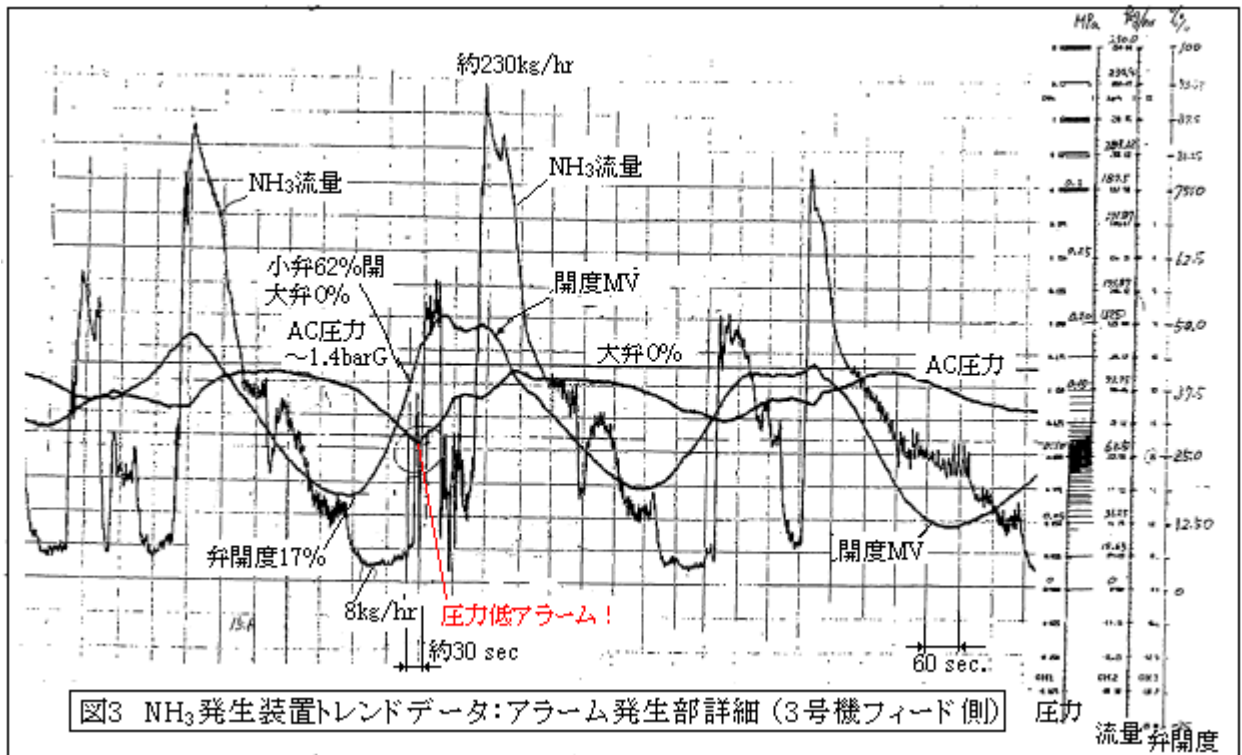


図3 NH₃発生装置トレンドデータ:アラーム発生部詳細(3号機フィード側)

2. 原因とメカニズム

圧力低アラームは過度な流量変動に誘起されていると思われる。原因として次のものが挙げられる。

- 3号機ダクト側のアンモニア需要の変動
- PCV 出口から気化器の間にある気液2相流域の挙動
- 脈動流の介在
- PCV の制御特性

まず、(a)について。アキュムレータの圧力変化は、周知のように次式で与えられる。

$$dp/dt = (\kappa RT/V)(m_i - m_o) \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、 dp/dt = 圧力時間変化率、 κ 、 R 、 T = 比熱比、気体定数および気体温度
 m_i 、 m_o = 入口および出口質量流量、 V = アキュムレータ容積

PCV の操作は、 (dp/dt) を最小に抑え圧力設定値(～1.4 barg)に保持するように行われる。 $m_i \cong m_o$ の時、下流のアンモニア需要に即応した出力が得られる。従って PCV 追従性が良ければアキュムレータ出入口流量の乖離は小さい。図 3 の流量変化(= m_i) を平均値で扱い、アキュムレータ圧力変化(dp/dt) をベースにして、(1)式からアンモニア需要(m_o) を試算すると図 4 のようになる。 m_i と m_o には多少のずれがあるが、似たような大きさや形になる。これは図 1 に対する図 2 の傾向からも了解できる。4号機フィード側でアラームがでていないのは、流量変化量とその勾配が小さく m_o と m_i の乖離が広がらなかったためと思われる。

次に(b)について。前述のようにアラーム発信は流量の谷が長く継続する時に起きているようである。継続時間が短ければアラームはでないのではないかと注目されるのは、弁が開き方向に転じても流量がしばらく下がり続けることである。この現象は PCV 出口以降の気液2相区間の挙動と関係があるように思われる。例えば、

- ・気液 2 相流でよく起きる流量逸走（サージング）
- ・気相の成長に伴う管路の閉塞（ベーパーロック）

サージングについて。通常の配管区間では流量が減ると圧力降下量も減るが、気液 2 相流配管区間で下降管部分に加熱があると、逆に圧損が増えることがある。この場合、流量が逸走して過小過大流量になる。本ケースでは気化器に下降チューブに加熱ゾーンがあり、圧損計算では低流量域でサージングモードの傾向がみられ、初め過小流量にその後過大流量に逸走する可能性がある(図 5a 参照)。しかしデータの長い流量の谷をサージングのみで説明することには多少無理があるようだ。

ベーパーロックについて。PCV2 次側では絞りにともない飽和液体アンモニアのフラッシュが増加する。PCV の 2 次側配管は図 5b のように逆 U 字になっているがこの水平部分に気体スラグが滞留すると図 5c のように管路が閉塞し⁽¹⁾、更に弁開によって 2 次圧が上昇して閉塞が解消し急激に流量が増加するが考えられる。この過程は図 3 のトレンドと符合する。しかし流れが閉塞した状態でも、PCV は開き続けるので 2 次圧上昇によって停留分は押し出され、閉塞はごく短期的なものになるような気がする。ベーパーロックとサージングが並存して原因になっているのかも知れない。

(c)について。前項でも触れたが、発生装置の流量には 3 分周期の脈動 が常在しているように思える。この脈動の原因はわからない。この脈動は図 3 に似ており、何らかの関連によって図 3 の大きな山谷の引き金になっているのかもしれない。

更に(d)について。なお、操作部と計測部の間に、不安定で遅れのある気液 2 相区間と容積部分(アキュムレータ)があるので、本来、制御しにくい個所と思われる。制御特性には安定性と追従性があるが、本ケースの流量変動は長周期なので不安定化傾向は少なく、急激な流量変動に対する追従性に問題がある。運転スタート時点の Cv 値や PID の設定は緩やかな流量変動に対応したもので、3 号機の急激な流量変動に対応するものではない。従って、現状の設定を変更して応答を改善する必要があると思われる。

[添付 A のように現状の PID 設定について簡易的な応答計算を試みた。トレンドデータに一致するわけではないが流量変動などに似たような傾向が見られるので、この簡易応答計算を用いて改善策の検討を行った。]

種々検討してみたが、遂に原因は特定できなかった。(a)~(d)のいずれも原因になり得る。

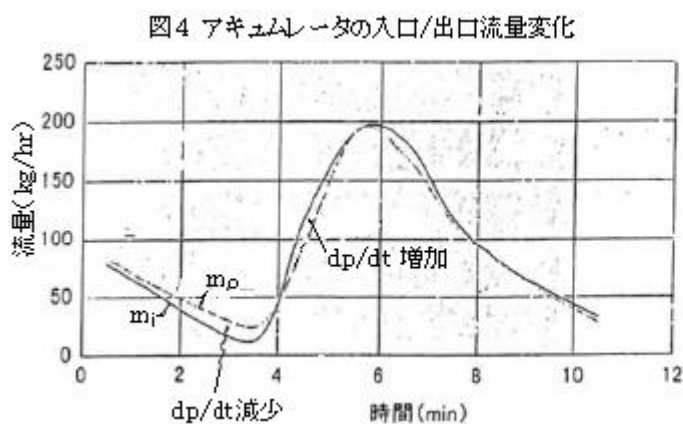
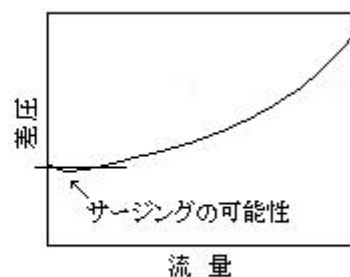


図5a 2相流区間の流量-差圧関係(傾向)



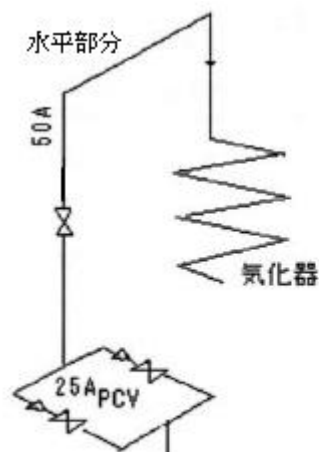
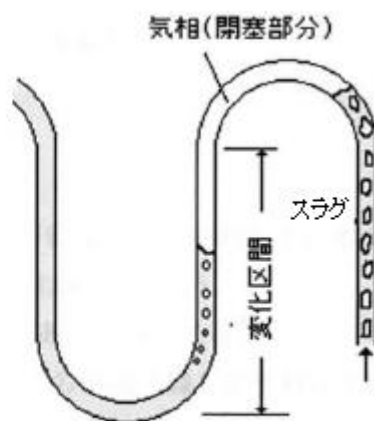


図5b PCV～気化器の間の配管形状

図5c テイビカルな閉塞フロー
(JSME気液2相流技術ハンドブックより)

3. 是正措置

(1) 抜本的には、アンモニア需要の変動を4号機並みの緩慢な変化に変えることがベストであるが、恐らく現実には不可と思える。アンモニア発生装置側で考えられる改善策としては次のようなものがある。

- ① アキュムレータの容量アップ
- ② PCVの位置変更
- ③ PCVの C_v 値変更
- ④ PCDのPID動作変更
- ⑤ その他

① について。AC圧力時間変化率(dp/dt)を減少すれば圧力の降下は緩和されるので(1)式の分母の容積 V の増加すなわちアキュムレータを増設することが考えられる。容量を変えて、簡易的に応答計算(添付A参照)した結果を図6aに示す。確かに容量が増えると圧力低下量は減るが、期待した程ではない。

② について。前述のようにベーパーロックを原因とすることには無理がある。しかし、管内2相流の流況に依存して水平曲り部分などの局部抵抗が効いてロックに至ったことも、考えられなくはない。そこで、例えばPCVを気化器入口の立ち下がり部分に移して管内の流況を変えることも考えられる。PCV1次側(逆U字水平部分)は液流れになり、水平部分閉塞の懸念は解消される。

③ について。単純にPCVの制御が外乱に対し遅れないように、開度- C_v 曲線の傾きを大きくとることが考えられる。PCVのリニア特性を変えて簡易応答計算した結果を図6bに示す。 C_v 値のMaxを35%以上程度にすると効果がでてくる。更にイコール%も含めてスタディする必要がある。ただ、試行を要するので、幾つかの C_v 曲線(内弁)を用意する必要があると思われる。

④ について。比例係数/積分時間/微分時間を変えて簡易応答計算した結果を、図6c,d,eに示す。比例係数(ゲイン K_p)及び微分時間(T_d)が大きくなると効果がでてくる。積分時間(T_i)は、5sec辺で効果がでてくる。微分時間については現状設定されていないが、これを設定すると図6fのようにAC圧力/MV値ともバタツキがなくなる。AC出口流量変化の周波数が低いためと思われる。

$K_p=1.553$ (現状の5割増し)、 $T_i=5$ secとした時は、

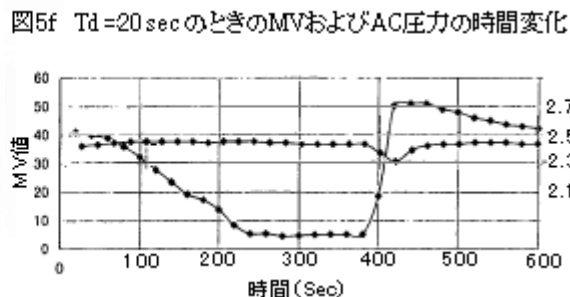
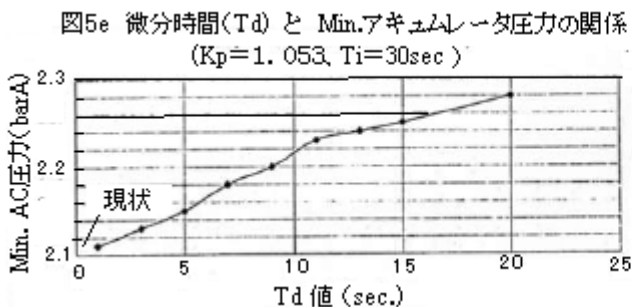
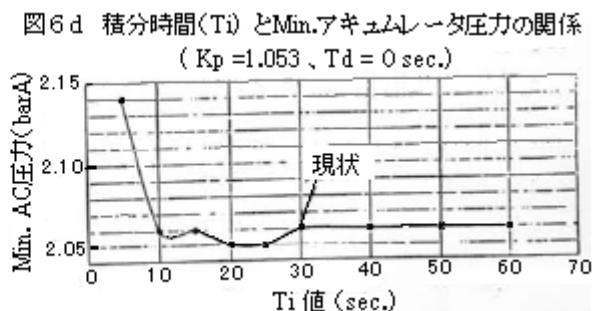
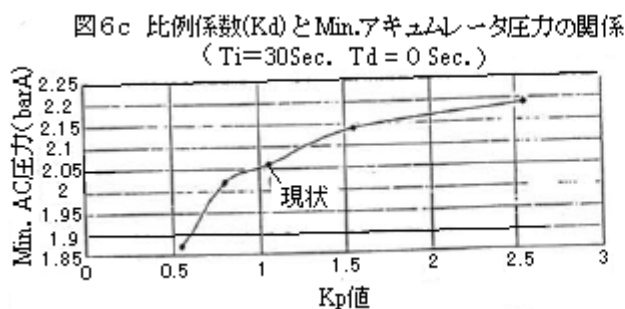
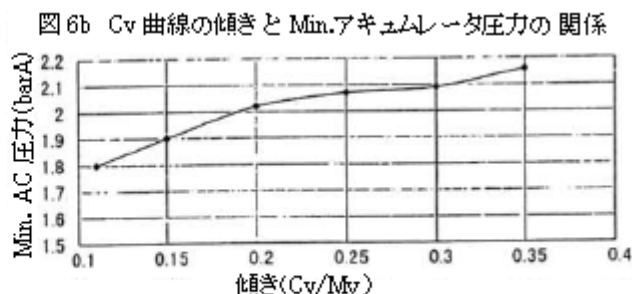
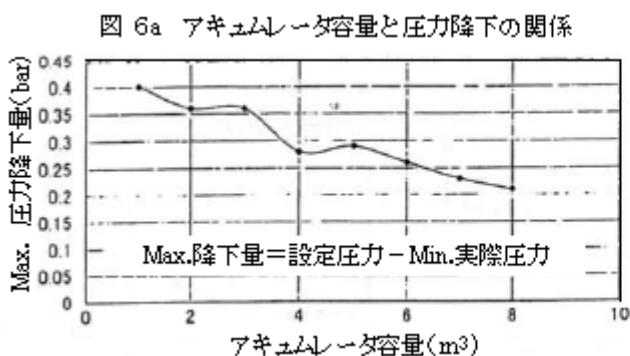
AC圧力 min. 2.23bar (現状の $K_p=1.053/T_i=30$ secでは、min. 2.06bar)

になり、計算上ではかなり改善される。AC 圧力/MV 値のバタツキは現状と殆ど変わらない。更に $K_p=1.553$ 、 $T_i=5\text{sec}$ 、 $T_d=20\text{sec}$ の時は、AC 圧力 min. が 2.32bar まで上がる。バタツキはない。

以上は添付 A に示す簡易応答計算に依っている。この計算は追従性をみる上では有効であるが、安定性の判別には向いておらず、過剰ゲインによる不安定については懸念が残る(添付 B 参照)。しかし、PID 設定を変更してアラーム発生を抑えることは決して不可能ではないと思われる。

⑤について。例えば、AC 圧力低の設定レベル引き下げや AC 設定圧力の引き上げなどがある。AC 圧力を 2.42barA から 2.52barA に変更すると、簡易計算の上では、AC 圧力 min. は 2.06bar から 2.16bar にアップする。

①はコストがかかる割に効果が小さい。②は多少賭け的な選択肢になる。③④⑤は比較的容易で費用もあまりかからない。まず、④の効果をみてから他の対策に進むのがよいと思われる。



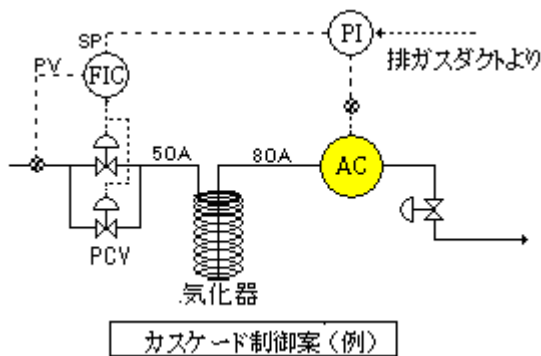
(2) 協議の結果、上記の提案が受け入れられ PCV の PID 確認テストが実施された。テストはボイラードクトの NOX 変動を期待して行われたが、あいにくと NH₃ 流量は安定状態にあったので、ダクト側に負荷変動を与え、PID 設定を変えて追従性/安定性を調べた。その結果、

ゲイン $K_p=1.54$ 、積分時間 $T_i=20\text{sec}$ 、微分時間 $T_d=10\text{sec}$ 。

辺で最も良好な応答が得られたので、以後これを設定値として発生装置の運転を行うことになったが、これが実際の急激な負荷変動に追従できるかは？が残った。ただ、1年間経過してもクレームは発生せず一応、改善案⑤で OK だったと思われる。なお、運転側の都合(?)で、上記の設定は少し変更されているようである。

追記) PCV の追従性/応答性の改善策として、下記のようなカスケード制御方式への変更も考えられる。

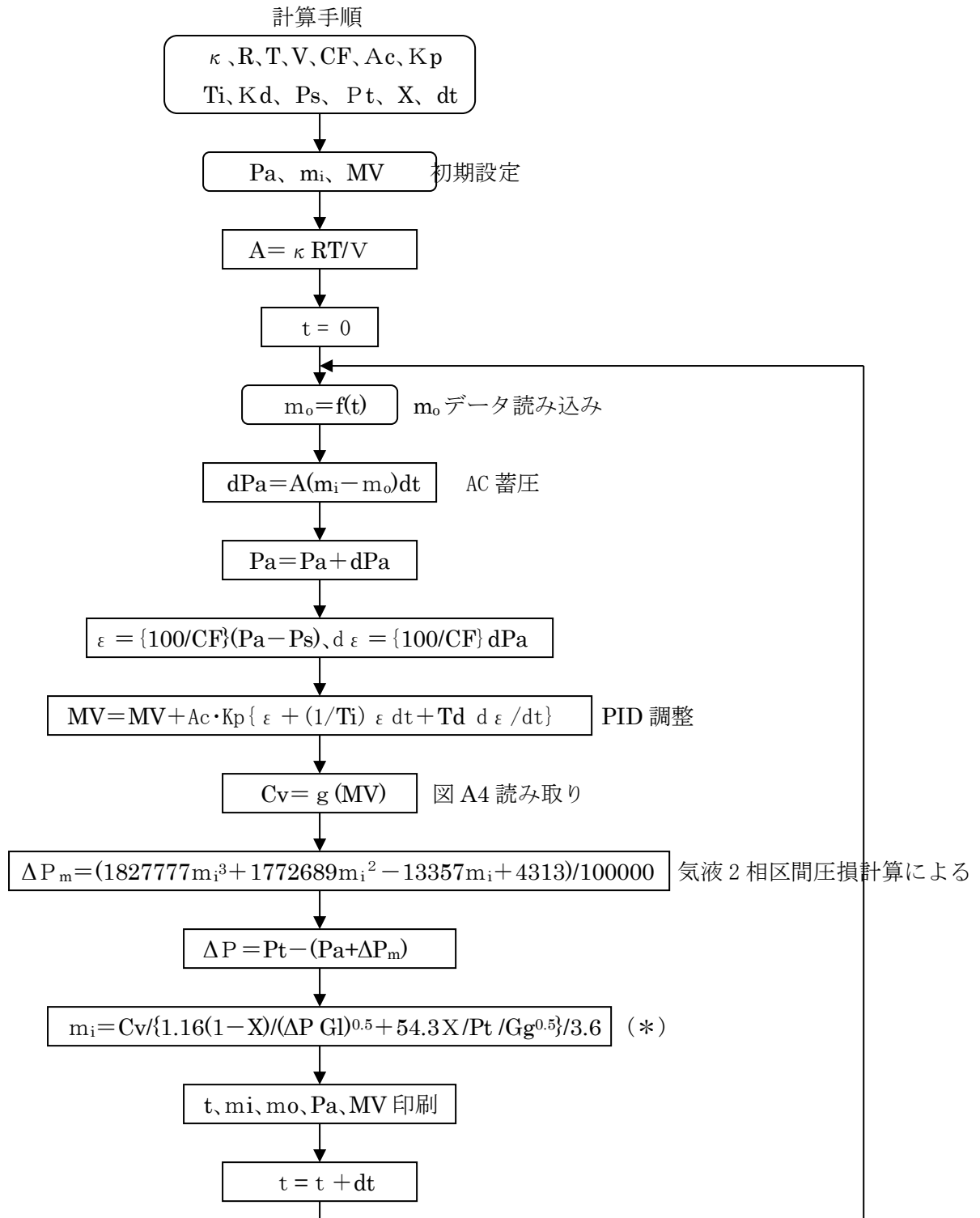
これについても、簡易応答計算で種々検討したが、余り効果を期待できないようであった。



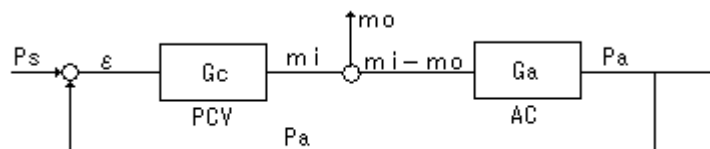
引用文献

- (1) 気液 2 相流技術ハンドブック 6.3.3 フローパターン遷移に起因する不安定流動

添付 A: 簡易応答計算によるシミュレーション



(*) IPC 計装ハンドブック 14.4 加算法によるフラッシュ流体の C_v 計算式適用



ブロック線図

記号説明： κ = 断熱比 (1.313)、 R = 気体定数 (49.78m/K)、 T = AC 温度 (293K)、 V = AC 容積 (m³)
 CF = 制御範囲 (6 bar)、 MV = PCV 開度 (%)、 ϵ = 制御誤差 (%)
 Kp = 比例係数、 Ti = 積分時間 (sec)、 Td = 微分時間 (sec)、 Ac = 弁動作 (-1)
 Pa = AC 圧力 (bar)、 dPa = AC 圧力増分 (bar) Ps = AC 圧力設定値 (約 2.42barA)、
 Pt = PCV 1 次側圧力 (約 7.33barA)、 ΔP = PCV 圧損 (bar)、 ΔP_m = 気液 2 相区間圧力損失 (bar)
 m_i = AC 入口流量 (kg/s)、 m_o = AC 出口流量 (kg/s)、 X = クオリティ (~0.1)、 Cv = 弁 Cv 値
 dt = 単位時間 (sec)、 t = 時間 (sec)、 G_l = 液比重 (約 0.655)、 G_g = 気体比重 (約 1.8)

H16.3.8 のトレンドデータをベースにして、下記条件のもとに応答計算を試みる。

$Kp=1.053$ (95%)、 $Ti=30$ sec、 $Td=0$ (オリジナルの設定通り)

$m_o=94$ kg/h (0 sec)、 70 kg/h (90 sec)、 45 kg/h (150 sec)、 16 kg/h (210 sec)、 8 kg/h (270 sec)
 8 kg/h (380 sec)、 125 kg/h (390 sec)、 156 kg/h (420 sec)、 180 kg/h (450 sec)、 156 kg/h (500sec)
 125 kg/h (550 sec)、 94 kg/h (630 sec) < $m_o \propto m_i$ を仮定とし設定。中間は直線内挿 >
 m_i = 初期 0.026kg/s (94kg/h)、 Pa = 初期 2.42barA、 MV = 初期 37.5%、 $dt=2$ sec

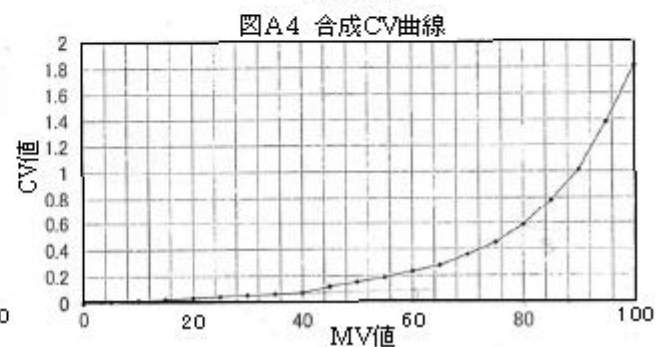
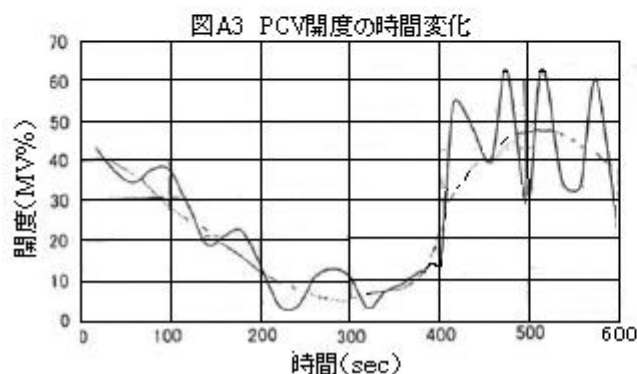
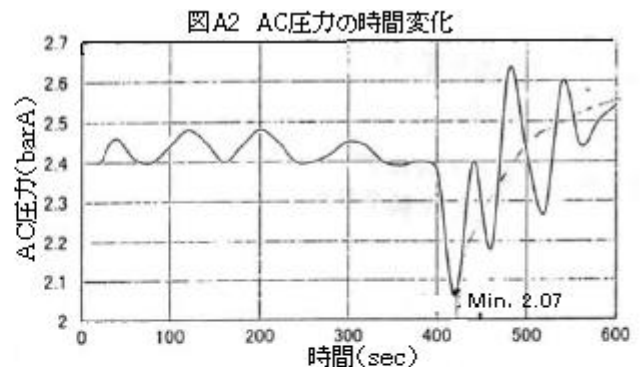
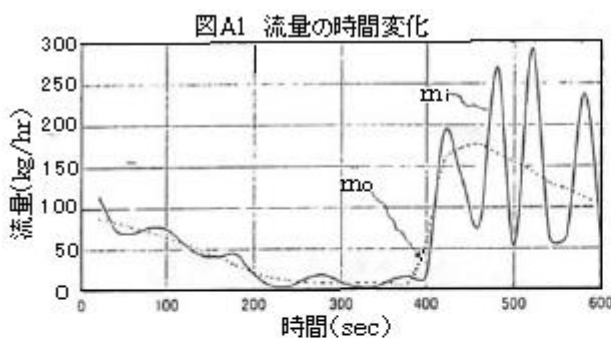
AC 出口流量 m_o を与えて各応答値を求める。 計算結果を図 A1、A2、A3 に示す。

図 A1 は流量 (m_i 、 m_o) 変化を示す。AC 入口流量 m_i は出口流量に追従しているが、変動する。特に 400sec 以降が著しい。トレンドデータに似ている。

図 A2 は、AC 圧力 Pa の変化を示す。420sec 程度に最少値があるがこれはトレンドより 40sec 位遅れるがオーダー的には近い。それ以降は乱れる。トレンドデータでは Pa の変化はマイルドであるがこれは計器の事情に由るのではないかと思われる。

図 A3 は MV 値変化を示す。傾向は似ているが、min. 値はかなり低く 400sec 以降は大きく乱れる。

MV のズレはあるが、大筋ではトレンドデータの傾向と似ているのでシミュレーションに使えると思う。



添付 B. PID 制御に関する要点

	比例動作 (P動作)	積分動作 (I動作)
式 ゲイン 位相遅れ	$y = K \varepsilon$ $G_c = 20 \log K$ $\phi_c = 0$	$y = (1/T_i) \int \varepsilon dt$ $G_c = 1/(T \omega)$ $\phi_c = 90^\circ$
性質	ゲイン大 → ゲイン余有減 → 不安定 ゲイン小 → ゲイン余有増加 → 安定(追従性低) ----- 比例要素 ≒ 1 次遅れ要素の時定数極小のもの ----- 追従性を良くしたいのなら位相遅れのない比例動作でゲインを大きくするのがよい。	通常、ゲイン余有/位相余有が減少し不安定になる。 ----- 積分動作の重要な役割はオフセット(残留偏差)を消すこと。 (オフセットの量は負荷変化の大きさに比例し比例ゲインに反比例する)。 ----- 積分時間が短い程、動作は強くなる。しかし動作が大きいと振動が収まらず不安定に
	微分動作 (D動作)	
式 ゲイン 位相遅れ	$y = T_d(d\varepsilon/dt)$ $G_c = +20 \text{ dB/dec}$ $\phi_c = 180^\circ$	
性質	入力に変化の傾向がみられるとその変化の大きさに応じて出力を出す動作 ----- 微分時間が長いほど先回り動作が強くなる。 ----- この動作を用いると低い周波数で系はより安定となる。	

ゲイン余有/位相余有が適度である時

- 余有小 → 制御系は不安定傾向 → 系の乱れで設定値廻りに振動
- 余有大 → 安定するが追従性がなくなる → 外乱の影響を消すのに時間がかかる。

フィードバック系において一巡の位相遅れが 180 度になる周波数においてゲインが 1 未満の場合、系は安定である。
フィードバック系において一巡のゲインが 1 になる周波数において位相遅れが 180 度以下であれば、系は安定である。