

タービン補器制御に使用する空気作動式調節弁の問題点

Problem of Pneumatic Control Valve for the Steam Turbine Auxiliaries

青羽 雅夫* 常松 普*
Masao Aoba Hiroshi Tsunematsu

内 容 梗 概

自動制御系における検出部、調節部としての各種計器、調節計の進歩はめざましいものがあるが、それらの機能が発揮されるためには、操作部である制御弁が完全でなければならない。すなわち、それぞれのプロセスに適応した制御特性と構造、材料を有していなければならない。

本稿は火力プラントの復水および給水加熱装置など補機の制御に使用される弁についてそれらの問題点を述べたもので、特に最も重要な問題であるバルブボデー、シートなどの浸食を防ぐための注意を詳しく述べ、かつ制御弁の受入試験の一端にもふれた。

1. 緒 言

調節弁はよく“パイプ中の技術的邪魔物”と呼ばれる。言葉のように幾多の技術的研究が残されている。特に負荷変化の激しい発電所に使用する調節弁はその特性を吟味する必要がある。

本稿においては、調節弁の構造、口径の決定法などの一般的問題はすべて省略し、一番問題になると考えられる、内弁の形状選定、ボデーおよびトリム材料選定、音響対策、受入検査の問題点にしばらく以下順をおって説明する。

2. 内弁形式の選定について

内弁の分類は各メーカーによりさまざまであるが、下記のように流量特性により大分類し、さらにこれを形状により分類するのが便利である。その流量特性カーブは第1図に示すとおりである。

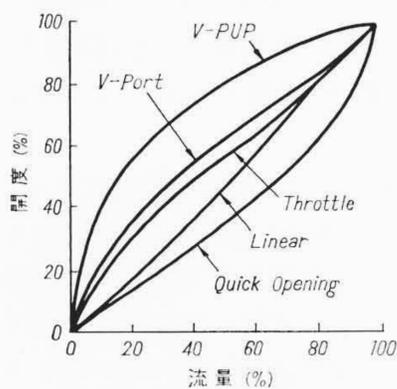
- (1) Equal Percentage ...V-PUP, Micro-Form, Micro-Flute
- (2) Modified Parabolic...Throttle, V-Port
- (3) Linear.....Throttle
- (4) Quick Opening

以上4つの形式の特色は下記のとおりである。

- (1) Equal Percentage 特性
 - (a) 負荷はあまり変化しないが(10:1くらい)高いRangeabilityを必要とするとき
 - (b) 調節弁を取り付けたシステムの摩擦損失が弁による圧力降下に近づくとき。
 - (c) 調節弁の前後の差圧を予想することはできないが、大きく変わる可能性のあるとき

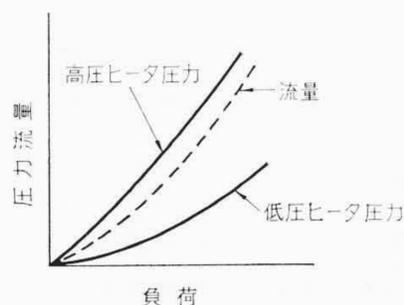
- (2) Modified Parabolic 特性

低リフトにおいて弁の行程の変化が広範な場合(低流量のときに流量変化するためには比較的大きく動くので、低流量域ではよい結果を与える)

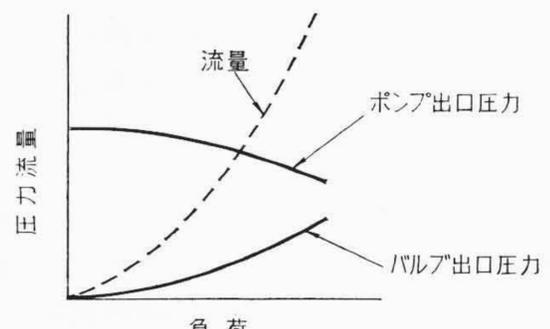


第1図 各内弁の特性カーブ

* 日立製作所日立工場



第2図 給水加熱器の特性



第3図 ポンプ吐出側に弁のある系の制御特性

(3) Linear 特性

- (a) 大部分の圧力降下が調節弁で起こる場合
- (b) Rangeability が少なくてもよい場合
- (c) プロセスの遅れが短い場合
- (d) システムが調節弁の10%内のP. B(比例帯)で制御されるとき
- (e) プロセスの主変化がlinearか、または負荷の変化であることが明白なとき

(4) Quick Opening 特性

- (a) 簡単な On-Off 制御のできる場合
- (b) 最大の弁容量に急速に達せねばならぬ場合
- (c) 感度がそれほどよくなくてもよい場合

以上の特性により大分類し、もし Equal Percentage に決定したら次に V-PUP にするか、Micro にするかは口径および詳細 Cv 値変化を検討して決める。また Linear がよいとなったら、Throttle にするか V-Port にするかを決定せねばならぬが、高圧、高温で高速流体のもの(あるいは粘度の高いもの)は Throttle と決定し、他は V-Port を選んだほうが経済的であろう。Modified にするかどうかを決めるには、さらにプロセスの特性を深く調査する必要がある。

フラッシングエロージョンなどを発生する心配のある部分に使用する弁、さらに異状音を発生するおそれのある場合は別章に述べる項目を再検討することを忘れてはならない。

具体的選定例⁽¹⁾を次に記す。

(イ) 給水加熱器の水位制御(一般の場合)

流量と圧力降下が負荷変化に比例し、Rangeability も大体 10:1 以下であるので、安定性があり自己制御性をもつので Linear 特性でよい。第2図はこれらの特性を示すカーブである(しかし高負荷で弁ストローク速度がちょうどよい場合は、低負荷では急激なレベル変化を起こす心配のものもあるので、よくヒートバランスを検討し、このような場合は低負荷で感度を落とした修正特性の採用も考慮すべきである)。

(ロ) ポンプの後ろに調節弁のある系の制御

低圧給水加熱器ドレンポンプ後ろの弁、復水器水位制御などはこの系であるが、この系では第 3 図の特性曲線のように、流量が減少するにつれて圧力降下が増大し、Rangeability は前記に比し相当高い方向に進むので Equal Percentage の特性をもつものが一般にはよい。

そのほかタービン補機の制御系には蒸気系統の減圧が多くあるが、この系統は、流量の変化範囲、圧力・温度の条件変化があるので、一概に形式を決めるのはむずかしい。その系ごとに Rangeability を計算するとおのずから結論はでるが、一般には Equal Percentage 特性に落ち着くようである。脱気器低水位制御(補給水制御)で一系統に大小 2 個の調節弁を付ける場合は、一般に常用(小弁)は Equal Percentage, 危急用(大弁)は Quick Opening または Linear とする。他の系統も以上の考え方で一つ一つ吟味したが発表は差し控えたい。

3. ボデーおよびトリム材料について

制御弁のように絞り制御を行なうものでは、バルブシートを通過する流速が高くなり、バルブ・シートあるいはボデーに浸食を生じやすい。ことに高温水が弁内で圧力降下する場合にはフラッシュして水と蒸気の混合流となり、はなはだ過酷な条件となる。第 4 図にボデーおよび弁体において最も浸食をうけやすい部位を示す。浸食事故を防ぐにはバルブトリムおよびボデーを耐食性の大きい材料にすることはもちろん、後述するようにボデーの内部形状なども適当に定めねばならない。弁浸食の形態はポンプとか水車の材料に生ずる現象とほぼ同一視することができるから、おもな浸食現象を拾うと次のものである。

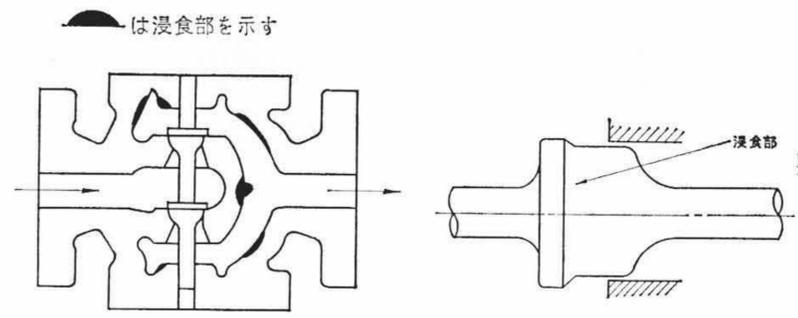
- (a) コロージョン
- (b) インピンジメントアタック
- (c) エロージョンコロージョン
- (d) キャビテーション
- (e) ガルバニックコロージョン (電池作用腐食)

それぞれの現象について今さら説明するまでもないと思うがこのうち、エロージョンとは流速のある液体または気体によって金属が摩耗される現象で、流体中に存在する液体、気体の粒子がエロージョンを著しく促進する。フラッシュを伴う水による浸食がそれである。

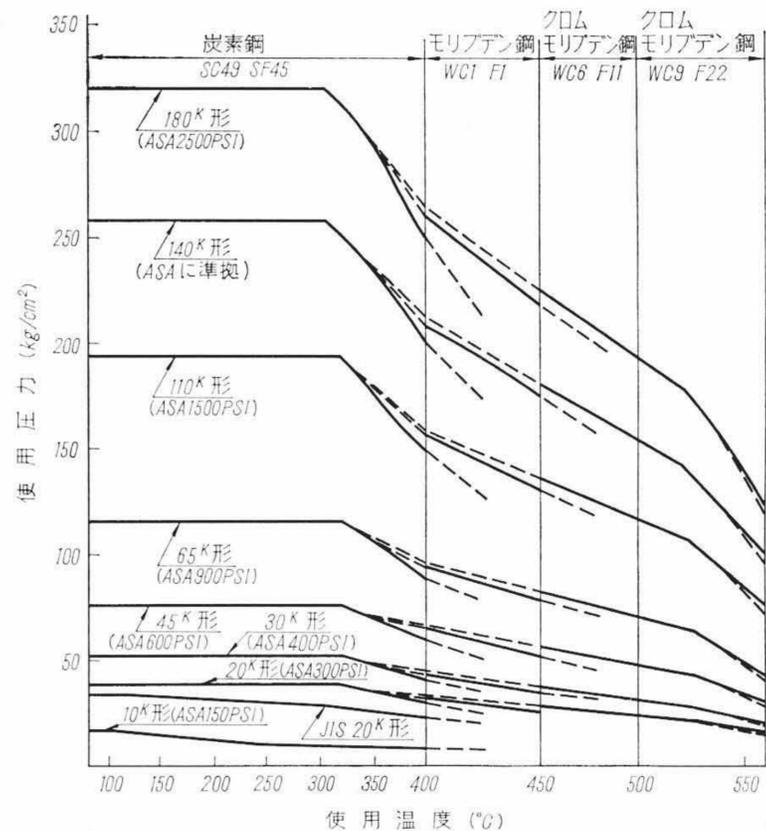
流速が非常に高くなって、静圧がその水温における水の蒸気圧近くまで低下すると、含有する空気がまず微細なあわとなって逸出し、これに水蒸気が増発してきてキャビテーションを生じ、これが崩壊するとき生ずる水の衝撃圧ないしその繰返し応力によってエロージョンが異常に進行する現象をキャビテーション損傷とよび、キャビテーション損傷の大小に最も影響するのは空気含有量で空気の含有量が減少するとキャビテーションは発生しがたくなり、したがって損傷は減少する。

弁における浸食は上述の浸食現象の重合されたものと考えられるが、火力プラントにおいては淡水とか海水系統に使用される弁では主としてコロージョン、ガルバニックコロージョンに注意し、比較的溶存酸素が少なく、圧力降下によりフラッシュするような給水加熱器ドレンそのほかの復水系統および蒸気系統の弁ではエロージョン、キャビテーション損傷に注意すべきであるといえよう。しかし筆者らの経験では弁の浸食事故はほとんどエロージョンであるゆえ、以下その防止について述べる。

火力プラント用として一般に使用される弁ボデー材料は青銅、鋳鉄、鋳鋼、鍛鋼、モリブデン鋼、クロムモリブデン鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼で、経済的、強度的な面から各温度に対し好適な材料を選定すべきである。弁ボデーを ASA 16.5 Steel Pipe Flanges and Flanged Fittings に準じて設計製作する場合の使用



(a) 制御弁ボデーの浸食部位 (b) 制御弁弁体の浸食部位
第 4 図 制御弁の浸食部位



第 5 図 弁の許容圧力、温度

限界は第 5 図のようになる。特にエロージョン、コロージョンについて考えなくてもよい場合は、これらの図でボデー材質を定めてよい。

キャビテーションによる壊食は前述のようにキャビテーターが消滅に近迫するときの衝撃圧ないしその繰返し応力による衝撃疲れ破壊と考えられているから、材料の機械的性質としては引張り強さが重要であり、鋼では多くの場合引張り強さとかたさとはほぼ比例するので、一般にかたさが高いほど耐キャビテーション性がよくなると考えてよい。

エロージョンを警戒せねばならぬ条件下では耐食性の強い材料を用いることはもちろんであるが、あまり高い流速で使われぬよう弁のサイジングにも注意を払わねばならない。

弁入口出口部の流速を制限することはエロージョン防止のみでなく、振動および騒音を生ぜしめないためにも必要であって、経験とか実験によって制限値を設けている弁メーカーもある。

第 1 表は水を流体とする弁についてアメリカの代表的な制御弁メーカーである A 社、B 社および Power 誌⁽²⁾に掲載された制限値と、国内弁メーカー C 社の納入実績から調べた結果を示したものである。第 2 表は蒸気の場合を示す。

アメリカの某メーカーでは弁口径によって流速の制限を行なっていて、水に対しては口径 $\frac{1}{2}B \sim 1B$ では弁入口流速を 7.6 m/s まで許すが、口径が大きくなるにしたがって制限値を低くし、10B 以上の弁では 3.6 m/s に制限している。蒸気に対しても口径 $\frac{1}{2} \sim 1B$ では入口流速を 127 m/s までとっているが、10B 以上の弁では 61 m/s と制限値を低くしている。このような制限の目的は弁とそれを支持する管の自然振動数と流体による弁に生ずる振動数の共振を避けよう

第1表 各社弁出入口水速制限値

(単位: m/s)

流体	弁形状およびボデー材質		アメリカ A社		アメリカ B社	POWER 誌 記載値		国内 N社
			弁出口において		弁入口において	弁出入口において		弁入口において
			連続使用する場合	間歇使用する場合		93℃以下の場合	93℃をこえる場合	
水 (フラッシュの場合)	玉形弁	FC25	—	—	—	—	—	7.5
		ASTM A-216-53T WCB またはSC49	6	9	3	4.6	3.7	13
		ASTM A-217-55 WC6	—	—	8	—	—	15
		ASTM A-217-55 WC9	—	—	—	—	—	17
		ASTM A-217-55 C5	9	12	11	(6以上) 上限について記述なし	(6以上) 上限について記述なし	19
	アングル弁(ベンチュリシート付)	23	28	—	—	—	—	
二相流フラッシング	玉形弁	FC25	×	×	×	93℃をこえ、フラッシュ2%まで	93℃をこえ、かつフラッシュ2%をこえる場合	7.5
		ASTM A-216-53T WCB またはSC49	4.6	7.6	×	×	×	13
		ASTM A-217-55 WC6	—	—	×	×	×	15
		ASTM A-217-55 WC9	—	—	×	×	×	17
		ASTM A-217-55 C5	6	9	C5を使用することになっているが流速規定なし	4.6	2.4	19
	アングル弁(ベンチュリシート付)	23	28	—	—	—	—	

注: — は規定されていないことを示す。× は使用を禁じられていることを示す。

第2表 アメリカA社における弁出口蒸気流速制限値

(単位: m/s)

流体	弁形状およびボデー材質		標準	最高
過熱蒸気	玉形弁	ASTM A-216-53T WCB	90	230
		ASTM A-217-55 C5	120	230
湿り蒸気	玉形弁	ASTM A-216-53T WCB	60	90
		ASTM A-217-55 C5	90	120
	アングル弁(ベンチュリシート付)		150	230

とするものであると思われるが、エロージョンによるボデーの寿命の点から見れば、同じ設計圧力のものでは弁口径の小さいものほど、ボデーの肉厚さは薄くなるから、同じ流速では口径の小さいものほど流動抵抗の増大も加わって寿命が短くなる。このように考えると口径の小さいものに高い流速を許すのは好ましくないように思う。

日立製作所中央研究所で行なったポンプ材料のキャビテーション試験の結果からみると、弁においても出入口の水速は10 m/s以下におさえるのが安全であって、アメリカA社の制限値が適当な域にあり、かつ使用ひん度も考慮している点において合理的と思われる。

トリム材料としてはステライト #11, 33, コルモノイ #6, ステンレス 440C などが現在使用されているが、急速に発展する火力発電

第3表 アメリカB社における制御弁の許容圧力、温度

弁形状	トリム材料	最高許容差圧 (psi)		最高許容温度 (°F)
		水	蒸気	
スロットルプラグ形 (第6図) および V-PUP形 (第7図)	316ステンレス鋼	100	150△	600
	316ステンレス鋼 シート面ステライト盛	300	400	600
	316ステンレス鋼 シートおよびガイド面ステライト盛	300	400	1,100
	316ステンレス鋼 ガイド面ステライト盛	100	150△	1,100
Vポート形 (第8図)	弁体シート…青銅 ステム…ステンレス鋼	50	使用せず	500
	316ステンレス鋼	120□	120□	600
ケージ形シートとコーン形弁体組み合わせ (第9図)	弁体…440C ステンレス鋼 ステム…304 ステンレス鋼 ケーシング…440C ステンレス鋼	500	使用せず	第5図* 参照
アングルボデーベンチュリシート (第10図)	弁体…304 ステンレス鋼ステライト盛 ステム…304 ステンレス鋼 シート…440C ステンレス鋼	3,000		

△: 飽和蒸気の場合はシート面にステライト盛を行なう。

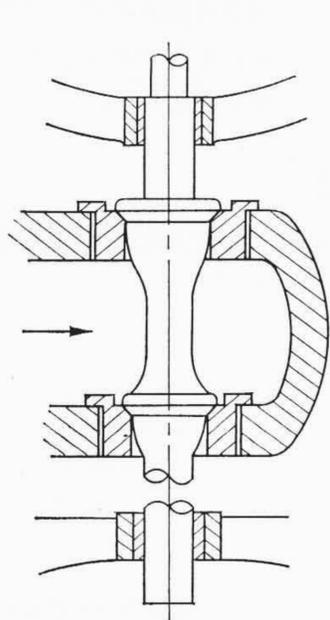
□: 飽和蒸気または圧力差が 100 psi をこえる場合はシート面にステライト盛を行なう。

◎: 小流量の給水制御に使用する。

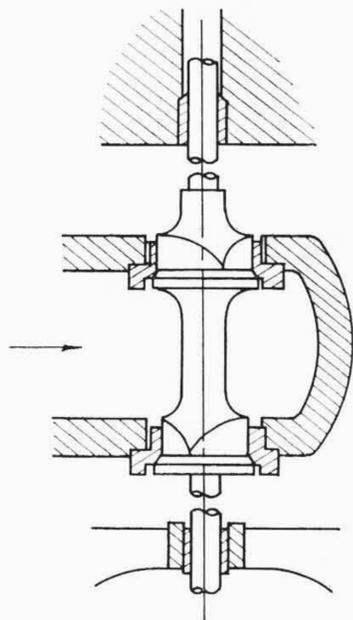
*: ボデー材料の許容限界まで許す。

界では蒸気の高圧化とともに制御弁もますます過酷な使用条件に耐え得るものが要求されるようになり、特にトリム材料の問題はいまだ十分といい得る材料が見当たらないのが現状であろう。したがってタングステンカーバイト系などの焼結合金を研究していくとともに、弁体、ボデーの形状を適当に選定することが重要である。

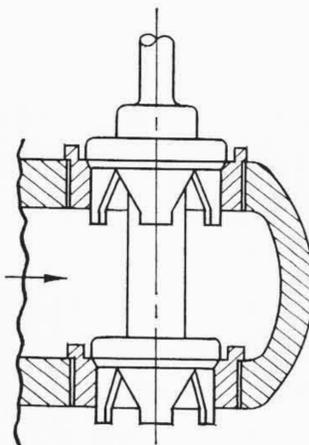
アメリカB社での使用標準のうちから代表的なものを第3表に、弁の形式を第6~10図に示す。



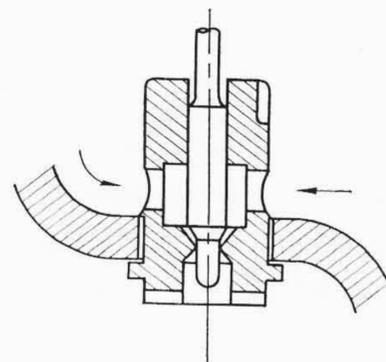
第6図 スロットルプラグ形弁



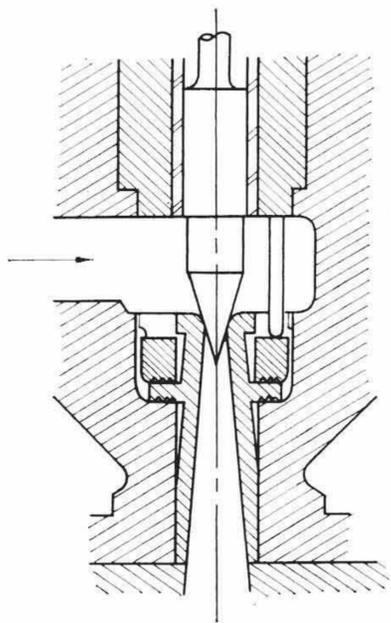
第7図 V-PUP形弁



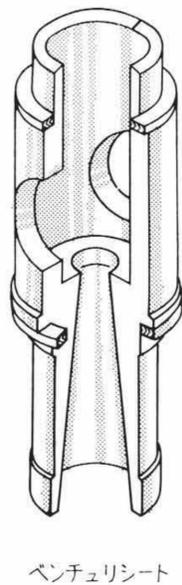
第8図 Vポート形弁



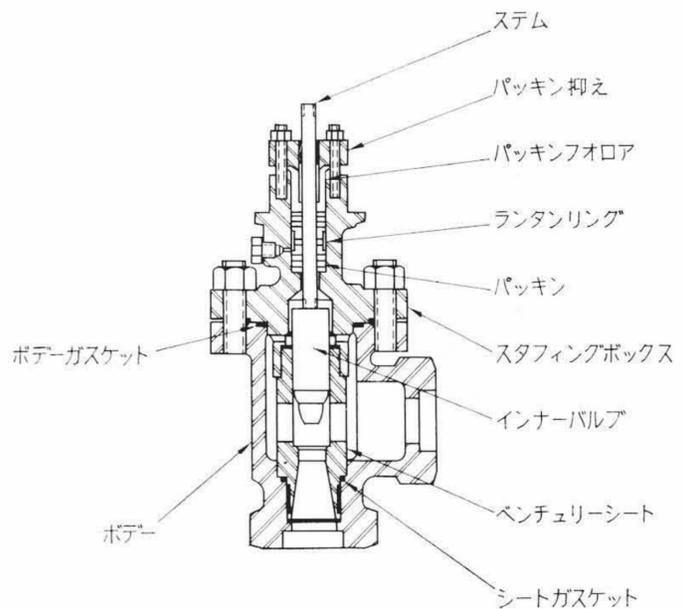
第9図 ケージ形シートとコーン形弁体組み合わせ



第 10 図 ベンチュリシート付アングル弁



ベンチュリシート



第 11 図 アメリカ A 社における高差圧用制御弁の構造

弁座にステライト肉盛りしたものでは、その硬度が平均していることが部分的な摩耗を防ぐ上から、たいせつであるのは論をまたないが、先ごろ東亜バルブ株式会社が外国製の弁について調査した結果、ステライトの溶着が一樣に行なわれていないものが見いだされており⁽³⁾、国内弁メーカーも反省すべきことと思う。ステライト溶着が一般化して鋳鋼弁メーカーはどこでもこれを実施しているが、すべてのメーカーが完全な溶着技術を体得しているかどうか不安と考えるからである。このような面からアメリカ A 社では摩耗が激しいと考えられる場所には 17-4PH ステンレス鋼から削り出し、熱処理した第 11 図のようなトリムを採用している。この構造ではステライトの肉盛りは行なわれないので硬度のアンバランスなどの心配はなく、摩耗した場合に容易に弁座を交換できる利点をもっている。

ともかく制御弁においては、弁本体よりトリム材料のほうが目下のところ研究眼目であって、われわれ汽機製造者および制御弁製造者は協力してエロージョン問題の解決にいつそう努力せねばならないと考えている。

4. 音響対策について

制御弁が使用中に異常な音響を発生することがある。水、蒸気、ガスおよび水と蒸気の混合流などその流体の種類によってその防止の方法も異なってくると思うが、ここでは水系における音響防止の一例を紹介する。

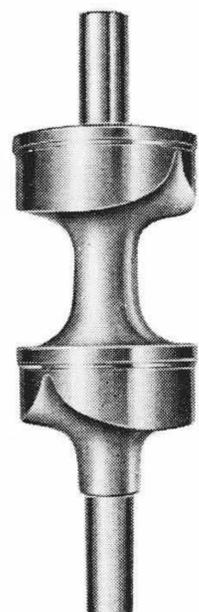
弁内で生ずる音の原因としては ㊸ キャビテーション ㊹ ボデー内で生ずる水の渦による弁体の振動と固有振動数との共鳴現象が考えられる。もしキャビテーションによる場合は前節で述べたように、空気含有量が大きく影響するから、これらの原因を除くとか弁内のフラッシュを減ずるように制御弁のおかれているシステムを検討する必要がある。

しかしここでは第 12 図に示すスロットルプラグ形弁体で発生する音響についての考察と対策を簡単に述べることにする。

弁内に生ずる渦では、弁体と弁座にはさまれた通路の直後に生ずる渦が弁体に最も強烈な振動を与えるであろう。弁体表面の曲率変化が多いと境界層のはがれにより渦が生ずる。ボデー内部の形状は複雑であるから流れの向き、流速の分布も複雑でカルマン渦のような整然とした渦列は形成されないのが一般であろうが、スロットルプラグ形のような円断面を有し、プロフィール曲率の変化が多い弁体ではこの可能性が考えられ、それによる振動数が弁の固有振動数と一致したとき大きな音響を発生するものと考えられる。よって、このようなスロットルプラグ形弁体で生ずる音響に対しては第 13 図のような V-PUP 形弁体か V ポート形弁体に交換してみるのが効



第 12 図 スロットルプラグ形弁体



第 13 図 V-PUP 形弁体

果のあることである。

このような音響防止には以上述べたように、弁体の選定に留意するか、渦による振動数を弁の固有振動数に近づけないようにすることが最良である。

弁に大きな差圧をかけぬようにすることは、たとえ渦を生じたとしても、それによる起振力、振動数を低くおさえる上に有効であるには違いないが、弁差圧は給水加熱器の水位制御弁のように加熱器間の圧力差により必然的に定まってしまう場合もあるし、ポンプ吐出側に制御弁があって負荷の変化に伴って流量が広範囲に変化するような場合には、負荷が減少するほどポンプ吐出圧とシステムヘッドの差が開いて弁差圧は大きくなり、しかも流量は減ずるので弁開度は小さくなりスロットルプラグ形弁体では振動を受けやすいから前述の弁体プロフィールの選定を行なうのが安全である。

5. 受入検査の要点

制御弁の性能を向上させ、長い寿命を持たせるためには各制御弁メーカーの受入検査基準を検討する必要があると思う。

検査試験項目としては一般に

- (1) 外観形状、寸法、組立検査
- (2) 非破壊検査
- (3) 作動および漏えい試験
- (4) 流量特性試験
- (5) 完成検査

などがあげられるが、制御弁の生命である(3)、(4)項についてふれたい。まず C_v 値の試験であるが、現在国内メーカーでは 1 psi で行

なう場合がほとんどであるが、この数値で試験したものが実際のプラントに取り付け、設計値が保証できるかどうかはなはだ疑問である。筆者らはFCI規格⁽⁴⁾にあるように5~10 psi (0.3~0.7kg/cm²g)は必要ではないかと考えている。この圧力に維持し弁指示計の各リフトにおける流量をフローメータにより3回測定し、実測値は指定の流量値より多くなければならないが、指定の流量曲線に対し+10%、-0%内に押えるべきである。

作動試験の方法は、検出装置との組合せ試験を行なうのを原則とする。試験設備の関係でダイヤフラム弁単独で試験する場合は、検出出力と同一圧力を加えて試験しなければならない。この場合ダイヤフラム室に空気圧を徐々に加えリフトの関係応答動作状況について試験する。

リフト試験としては指定リフトに対する目盛試験を行ない、目盛値に対する誤差が第4表以内であるかどうかを検査すべきである。

ヒステリシス試験は、空気圧を徐々に弁全開（または全閉）圧力まで上げ、この間0.2kg/cm²とびの各点のリフトを読みとり、次に空気圧を下げ弁を閉じ（または開く）ていく過程で0.2kg/cm²とびの各リフトを読んでその偏差を測定する。その許容値は各社ほとんど同一で、第5表の数値を採用している。

リアリティ試験も、弁全閉、全開範囲内で弁リフトより離れた点を測定する。その許容値は第5表のとおりである。ポジション付調節弁のヒステリシス、リアリティ試験はポジションをバイパスした場合についても実施しそれぞれ合格することが必要である。

漏えい試験はすべて弁の入口側より指定条件中の最大差圧を加圧しなければならない。液体の場合は直接漏えい量を計測できるが、蒸気の場合は漏えい蒸気を凝縮してその量を測定する。許容値は第6表程度が適当と考える。

(3)、(4)項以外で問題となるのは放射線検査であるが、われわれは突合せ溶接弁の鋳鋼開先部は全数行なうのを原則としている。

第4表 制御弁リフト許容値

(単位: mm)

リフト	20まで	20をこえ45まで	45をこえ75まで
リフト許容差	+2 0	+3 0	+4 0

第5表 ヒステリシス、リアリティ許容値

種別	ヒステリシス(%)	リアリティ(%)
ポジションなし	3	±4
ポジション付	1.0	±1.0
ポジションバイパス	3.5	±4

第6表 漏えい量許容値

弁区分	漏えい許容量(最大流量の)(%)
単座弁	0.01
複座弁	0.5

6. 結 言

以上タービン補機に使用する制御弁の問題点四つについて述べたが、さらに検討すべきことは数が多く“技術的邪魔物”が邪魔物でなくなるよう努力したい。次の機会には弁継手と付属品、Rangeability, アングル弁などについて述べたいと考えている。本稿が火力プラント制御関係者に対しいくぶんでも参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 佃俊雄, 内田義久: 火力発電所の自動制御 (昭36 オーム社)
- (2) Power p. 92 (Jan. 1960)
- (3) 大坪: 火力発電 14, 54 (昭38-1)
- (4) Fluid Controls Institute, Inc. (FCI 58-2)



特 許 の 紹 介



特許第402521号 (特公昭37-8700号)

繁 田 道 男

放 射 線 遮 蔽 窓

ホットラボラトリーのように放射線源を取り扱う実験室等においては、放射線遮蔽室内に収納された線源を室外より放射線遮蔽壁の一部に設けられた放射線遮蔽窓を通して透視しながら内部の線源をマニプレータ等を介して取り扱い得るようにしている。この窓は通常第1図に示すように高密度ガラスを放射線遮蔽壁にはめこんで構成されるが、放射線照射によるガラスの着色のため、次第にその透視能力が損われ、ついには内部の観察が不可能となるに至る。

この発明は上記欠点を除去し得るもので、第2図に示すように、放射線遮蔽壁の一部に窓孔をあけ、その内部に高密度材料よりなるブロックを室外より室内を直接見通せないように互い違いに配置するとともに、これらのブロックにより形成されるジグザグ通路に純水を注入しかつこの通路の各隅端に観察用の反射鏡を取り付けてある放射線遮蔽窓である。

このように構成した本発明遮蔽窓においては、室内の線源よりの直接の放射線はブロックにより遮蔽され、また散乱放射線は純水によって吸収遮蔽されるため、室外に洩れることがない。そして、室外より反射鏡をのぞくことにより室内を観察することができる。なおこの反射鏡は放射線照射による着色変化等を生じないため、観察上の支障をきたすおそれがない。(松 島)

