

◇ ミニ特集：「バルブと配管に係わる技術的問題」 ◇

仕切弁の異常昇圧

笹原 敬史*

1. はじめに

仕切弁には異常昇圧という特殊な現象で、バルブが損傷したり、開弁機能が失われることがある。従来、火力発電関係では給水管系のバルブのように、満水状態のままでは常時は閉弁されているものや、蒸気管系でも、起動時水が弁箱胴部に流入し閉弁されている場合などで、異常昇圧現象がしばしば発生していたので、それぞれにその対策が講じられてきた。しかし、それでもなおバルブの取扱い不注意により開閉操作不能となり、調査の結果、弁箱胴部に異常昇圧が発生していることがよくある。

原子力発電でも、内圧こもりと称して熱による昇圧現象が見受けられ、それに対応した操作機力量の増加を配慮してきた。

アメリカでは、この現象をPressure Lockingと呼び、NRC^{注1)} レポートによると、原子力発電所において、1969年から1992年までの間、異常昇圧によるバルブの損傷事故が11件、また、1983年から1992年までの間に、異常昇圧の発生した不具合が15件あったと報告されている¹⁾。

そこで、本稿では異常昇圧の発生現象とその対策、および昇圧によってひずみを発生した弁箱の状態などについて述べる。

仕切弁の異常昇圧に対し、読者諸兄が些かでも関心を持っていただければ幸甚である。

2. 異常昇圧現象

密閉された容器内に水が充満している場合、僅かな温度上昇によって、水の体積膨張のため圧力が異常に高くなり、容器の弾性限界を超えてそれを変形させることがある。この現象は蒸気と水が混在して

いるときでも容易に発生する。このように何らかの条件で密閉された内部流体が温度上昇し、容器内で本来の圧力を上廻る圧力に上昇する現象が異常昇圧である。

物理的には、液体の熱膨張による圧力増加現象で、異常と言うのは適切でないかもしれないが、バルブにこの現象が発生した場合、その設計圧力以上に上昇するので異常昇圧と呼ばれている。

図1はドイツの文献²⁾に発表された論文の中の図であるが、容器内の水の占める%によって圧力上昇の割合が読み取れるようになっている。満水状態の場合、圧力上昇は容器内の水の膨張体積量で決定され、ごく僅かな温度上昇でその圧力は急激に上昇している。すなわち、水100%のときは、約50℃の温度上昇で圧力は200kgf/cm²に上昇し、約80℃では

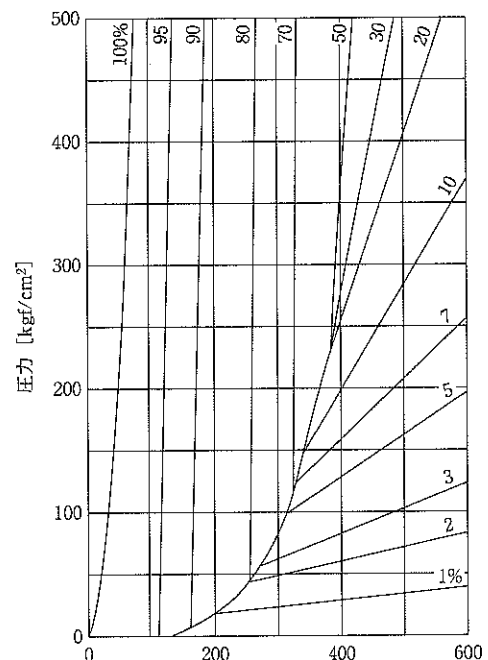


図1 密閉された水の温度と圧力上昇状態図

注1) Nuclear Regulatory Commission.

500kgf/cm²となっている。水量が約50%充填しているときは、約420℃に加熱されると、圧力は約500kgf/cm²以上になることを示している。容器内に気層がある場合、水の飽和温度に対応する圧力と気層の割合で発生する圧力が決ることになる。

またアメリカでの実測値のデータによると、温度変化に対する圧力上昇は0.4psi/°Fから43psi/°Fとなっている。ただし、最大値の43psi/°Fの温度計測は83°Fから131°Fの間で、弁箱の壁の外側で計測したものである。

本論文ではデータのばらつきなどを考慮して、設計値としては23psi/°Fをとることを推奨している³⁾。この値は2.93kgf/cm²になる。

3. 異常昇圧を誘起するバルブ形式

異常昇圧の発生するバルブは、弁箱胴部の出入口側にそれぞれの弁座があり、それに対応する弁体は、分離形か可とう性を有しており、2つの弁座にそれぞれ同時に密着し、気密を保つことのできる構造となっている。

3-1 ウエッジ仕切弁

ウエッジ仕切弁は弁体がくさび状で図2に示すが、この仕切弁で異常昇圧が発生するのは、図3(a)のフレキシブルジスクおよび(b)のダブルジスクである。フレキシブルジスクは高温高压弁に広く用いられ、弁体の中央部に切り込みがあり可とう体となっている。ダブルジスクは化学工業用によく使用され

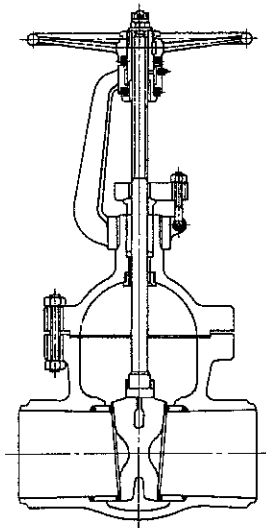
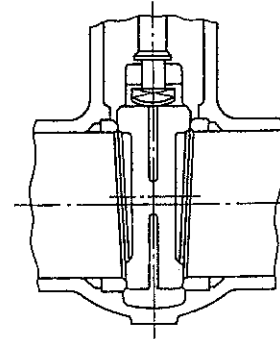
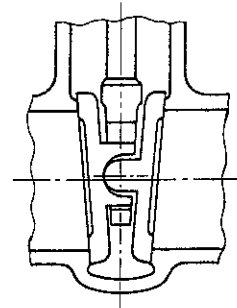


図2 ウエッジ仕切弁



(a) フレキシブルジスク



(b) ダブルジスク

図3 弁体の形式

ており、2個の弁体が分離して装備され、弁座の変形になじむ構造になっている。別名セパレートジスクまたはスプリットジスクともいう。

3-2 パラレルスライド弁

図4に示すパラレルスライド弁は、弁座が平行形で弁体は2個に分離しており、中央部にばねが装着

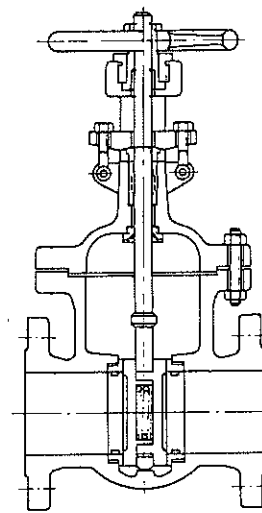


図4 パラレルスライド弁

されているので、内圧がないとき、弁体は両側の弁座上を滑りながら開閉する。全閉時、入口側より内圧が負荷されると、入口側弁体はばねを圧縮して出口側に押され弁座から離れるので、流体は弁箱胴部に満たされ、出口側弁体は圧力によって弁座に圧着し、気密を保つことになる。この状態を図5に示す⁴⁾。すなわち、流体は入口側管路部と弁箱胴部に充満することになる。

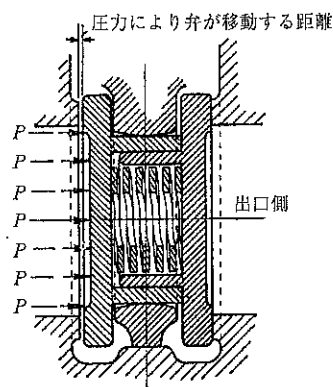


図5 弁座部負荷状況

4. 異常昇圧の発生条件

異常昇圧現象は、次に述べるような種々の使用状態や環境条件で発生する。

- ① 給水管系などのように、常時水が充満している場合
- ② 発電プラント起動時、水漲りをしたため、バルブ内に水が充満している場合
- ③ プラント水圧試験時の水が、封じ込められたまま閉弁している場合

など、上記3つの条件で、閉弁されたまま外部から加熱されたとき

- ④ 蒸気管系で閉弁によって通気を中断すると、弁箱胴部に密閉された蒸気が冷却され、復水することによって胴部圧力が低下する。この状態で再通気を始めると、通気初期の管路内の発生ドレンがバルブに流入し、弁箱胴部に充満し密閉される。ドレンが充満したまま外部から加熱されると、異常昇圧が発生する。

5. バルブにおける異常昇圧現象

5-1 ウエッジ仕切弁

この形式の仕切弁で低圧領域で使用されるもの

は、通常、弁全閉時、くさびを効かせ弁体を食い込ませて、弁座の両面で気密を保っている。しかし、この場合は殆んど常温で使用され、かつ、弁体は図6に示すようなソリッドディスクなので異常昇圧のおそれは殆んどない。

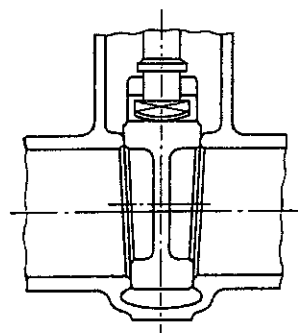


図6 ウエッジ仕切弁のソリッドディスク

一方、高温高圧領域では、くさびを効かせなくて、弁体を若干浮き上がらせた状態を全閉位置とし、下流側の弁座のみで気密を保持する配慮がなされている。すなわち、高温用では弁体を両面くさびで全閉すると、弁棒などの熱膨張でさらにくさびが押し込まれることになり、開操作が困難になるので、図7のように全閉時弁体の片面(入口側)は弁座との間に必ず隙間ができる位置を全閉とし、上流側の圧力で弁体を下流側に押し付けて気密を保つのである⁵⁾。

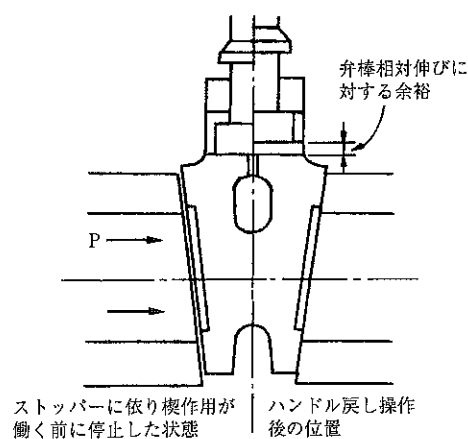


図7 ウエッジ仕切弁の全閉時弁体位置

ところが、フレキシブルディスクやダブルディスクにおいて、弁体の全閉位置が適切でない場合(全閉時

くさび作用が効いている場合)、起動時、弁箱胴部に残存する水やドレンが加熱されて異常昇圧現象が発生する。

5-2 パラレルスライド弁

高温水用で閉弁後内圧を零にすると、弁体は両弁座にばねで圧着され、弁箱胴部には水が充満したまま残り、プラントが再起動するとき、入口側より入熱し残存水は膨張し圧力が上昇する。この圧力が入口側圧力より高くなり、弁座荷重が増加して開操作不能となる。

蒸気用では全閉し入口側圧力を零にすると、胴部に残存した蒸気は温度低下と共に復水しドレンとなり、この部分に貯まることになる。この状態で再起動すると、管路内のドレンもバルブに流入し、入口側蒸気温度でドレンが再蒸発し圧力が上昇する。この圧力が入口側圧力より高くなると、胴部圧力の放出ができず内圧がこもったままとなる。

6. 異常昇圧発生状況の具体例

わが国においては、パラレルスライド弁は殆んど使用されていないので省略し、ウエッジ仕切弁における異常昇圧発生具体例を次に述べる。

- ① 火力および原子力発電プラントの給水系は多重性をもっており、特に給水ポンプ出口弁や給水ヒータの出入口弁では、一つの系統のバルブが全閉状態で休止し他の系統が運転されているため、他系統からの加熱によって、休止系統のバルブに異常昇圧の発生する可能性が非常に高い。
- ② 給水ヒータ回りのバルブで、運転休止のため全閉したとき、弁箱胴部には水が充満している。弁体の全閉位置が不適切でくさびが効いていると、出入口側の圧力が零になっても、胴部には圧力のある水が残留したまま、時間経過と共に一旦冷却されるが、再起動すると残留水は加熱され、膨張し異常昇圧現象となる。
- ③ 現地において、配管や圧力容器の修理後、その部分の出入口弁を閉止して水圧試験が実施される。出入口弁がウエッジ仕切弁の場合、全閉時くさびを効かせず差圧だけで止めようとするとき、水圧試験用のポンプ容量が小さいと、圧力は急激に上昇せず弁体は低压側に密着せず漏れる場合がある。そこで、くさびが効くように

調節して水圧試験を実施することがある。試験後、弁体を元の位置に戻せばよいのであるが、くさびを効かした位置のまま運転に入ると、出入口管路内の水は排出されていても、試験時くさびが効いていたことで、弁箱胴部に水が充満した状態のまま温度が上昇し、短時間で異常昇圧が発生する。従って、水圧試験後は弁箱胴部の水も確実に排出する必要がある。

- ④ 弁製造者によっては、図8のように弁棒上部にストッパーを設け、これによって弁体はくさびが効かないように制限しているのがあるが、前述のように水圧試験圧力が上昇しないため、このストッパーを緩めてくさびが効くように弁体押し込むことがある。この場合、試験後は必ずストッパーを元の位置まで締め込んで、弁体を浮かせる必要があるのだが、これを忘れることがあり、それによって異常昇圧を発生させることが多い。

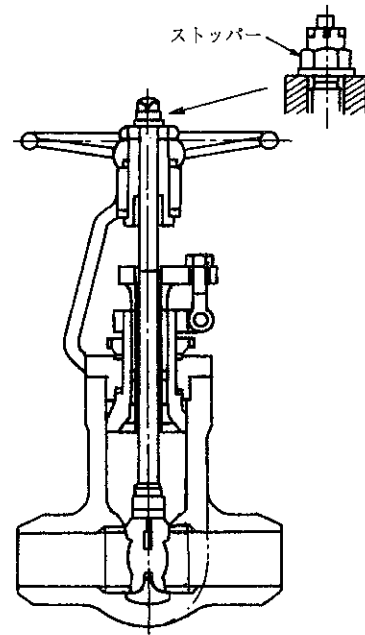


図8 ウエッジ仕切弁のストッパー

- ⑤ 現地でバルブを分解点検時、上記ストッパーの位置や弁体全閉位置を分解前に確認記録せず、組立後適切な位置に復旧してなく、弁体がくさびの効くように設定されていると、異常昇圧発生の原因となる。
- ⑥ 原子力発電プラントでは、隔離弁として電動

ウエッジ仕切弁が多く使用されている。これらが全閉をトルクシーティングされたとき、異常昇圧という程ではないが内圧こもり現象が発生する。

7. 異常昇圧による影響

異常昇圧は最終的には、弁箱を破壊するという最悪の状態に至る現象であるが、この状態に至った例はなく、その前に次のような現象が発見され、重大事故にならないで対策が講じられている。

7-1 開操作不能

7-1-1 異常昇圧によるもの

図9のように弁箱胴部に異常昇圧が発生すると、弁体は出入口両弁座に圧着され、通常運転時の操作力では開操作不能である。前述のような各々の状況で、他に原因がなく開不能の場合は、弁箱胴部に異常昇圧が発生していると推定せざるを得ない。この場合、無理に開操作をすると弁棒と弁体との接続部が損壊し、弁体は残ったままで弁棒のみ上昇してくる。この現象は内部流体は流れず、開操作が極端に軽くなったことで推察できる。

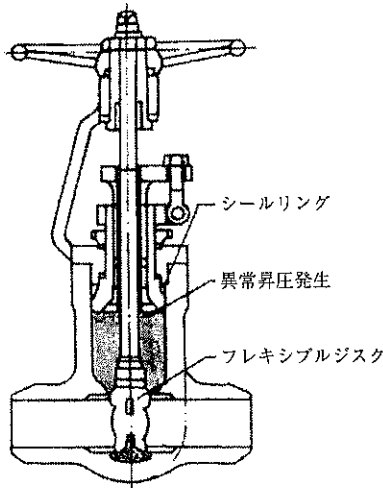


図9 異常昇圧発生状態

7-1-2 熱拘束によるもの

ウエッジ仕切弁が熱影響による開不能の不具合には、異常昇圧と共にThermal Bindingといわれる熱拘束がある。アメリカの文献では、この2つを同じレベルで論じているものが多く、異常昇圧と同時に発生しているので、ここで若干触れることにする。

熱拘束の可能性としては、

- 弁棒膨張又はヨークの収縮
- 弁体の膨張又は弁箱の収縮

によって発生する。

すなわち、前者は弁棒の膨張による突込みで、くさび作用を強固なものとし、後者は弁体が弁座間に挟まれ、より気密性を高めることになる。その結果として、開不能の不具合が発生するのである。

これらの現象が、温度変化によって弁棒引上げ力をどの程度増加させるかを示したものが、図10と図11である⁶⁾。

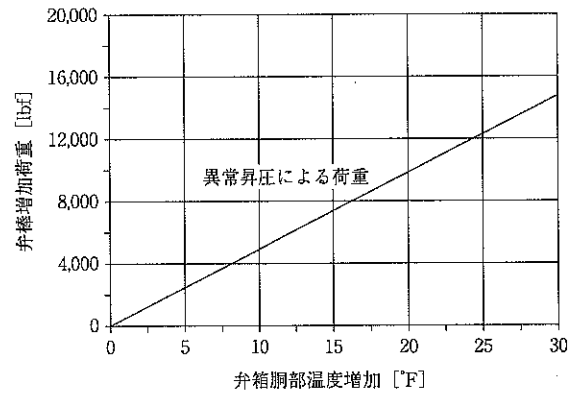


図10 異常昇圧による弁棒増加荷重

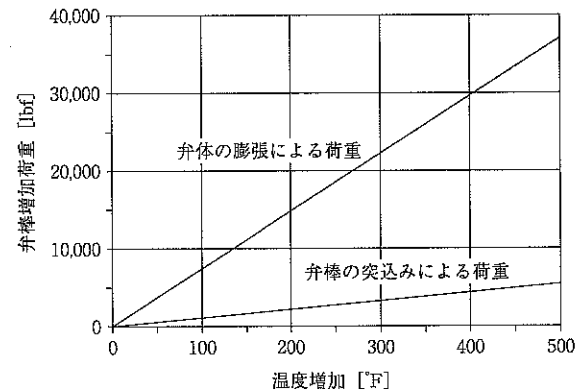


図11 熱拘束による弁棒増加荷重

対象弁は次のとおり

- 弁口径 : 4"フレキシブルジスク仕切弁
- 圧力級 : #600
- 弁座内径 : 3.06in (77.7mm)
- くさび角度 : 5度
- 常用圧力 : 800psi (55.3MPa)

常用温度 : 520°F (271°C)

図10は異常昇圧による弁棒引上げ力の増加を示し、25°F (約13.8°C) の温度上昇で、12,000lbf (5,436kgf) の増加となっている。図11は熱拘束による増加を示しているが、200°F (約111°C) の温度上昇で、弁体膨張による増加荷重は15,000lbf、(約6,803kg)、弁棒の突込みによる増加荷重は2,500lbf (約1,134kgf) で、合計17,500lbf(約7,937kgf)の増加を示している。

これによって、同じ温度上昇であれば異常昇圧による弁棒荷重の増加の方が、かなり大きいことが分る。

7-2 ガasket部よりの漏洩

図2のようなボルトドボンネット構造においては、異常昇圧による弁箱またはふたの変形が、フランジ部に影響し、ガasket部より漏れることがある。内部流体が漏れることによって、異常昇圧は解放されるので開操作は可能となる。常用運転時この部分より液体が漏れてなくても、ガasket部に漏洩した跡が残っていることで、異常昇圧が発生していたことが推定される。

7-3 グランドパッキン部よりの漏洩

ガasket部と同様にグランドパッキン部よりの漏洩が発生し、それによって異常昇圧は解放されるが、その漏洩が継続すると、パッキンが減耗したり、弁棒またはボックス内面に漏れ溝ができて、漏洩を止めることができなくなる。

7-4 プレッシャーシール形弁

図9に示すようなプレッシャーシール構造は、内圧による自緊性(セルフシール)なので、圧力が高くなればなる程シールリング部の気密性は向上し、圧力の解放ができない。グランドパッキン部より漏洩が発生することはあるが、この構造は高圧弁に多いので、パッキンの締め付け力が大きく、パッキン部よりの漏洩はあまり期待できない。そこで、異常昇圧が発生すると弁箱が変形することになる。弁箱が変形することによって、シールリング部や弁座部から圧力が解放される。

弁箱内径が数%大きくひずんだ例もあり、またふたが内圧で上昇し、ふた引上げボルト用ナットが緩んでいたこともある。異常昇圧により開操作不能で、かつ弁箱まで変形する例は、このプレッシャーシール形弁がほとんどである。

8. 現地における異常昇圧対策

- ① 現地で異常昇圧が発生し開操作不能になると、プラント運転上非常に厄介なことになる。この対策として最も安全な方法は、通水または通気を止めて、バルブ全体を冷却することである。長時間を要する自然冷却が許されない場合は、冷風やドライアイスなどで強制冷却するとよい。それでもなお開操作困難な場合は、弁箱に衝撃を与えると開くことがある。

この冷却による方法は、前述の熱拘束の対策でもある。

- ② 前記の状態でも開かない場合は、バルブが冷却された状態で、グランドパッキンの締め付け力を緩める。この作業は危険を伴うので、非常に注意深く慎重にグランドボルト用ナットを少しずつ緩める。ナットがボルトに充分かみ合っている状態を確認して、ボックス外側に軽く衝撃を与えると、内圧が放出されることがある。しかし、この作業はあまり薦められないので、已むを得ない場合のみ細心の注意をもって実施されたい。

9. 異常昇圧防止対策

異常昇圧防止対策としては、バルブが閉弁状態にあるときでも、弁箱胴部が気密室にならないようにすればよいのであるから、種々の方法が考えられる。その方法は使用者側と充分打合せの上決定されなければならない。そして、適当な方法を単独または組合せて採用する必要がある。

9-1 圧力バランス穴

9-1-1 弁体の片側弁板にバランス穴を設ける。

図12に示すように、通常、入口側の弁板に穴明けするのであるが、そのバルブの閉弁時の流体の閉止方向を留意しなければならない。給水ポンプ出口弁、給水ヒータ出口弁などは、それらのバルブの開弁時の流れ方向と、閉弁時の閉止方向とが逆になるので、このようなバルブは通常出口側弁板に穴明けする。

穴を設けた側の弁座の閉止機能はなくなるので、両側の閉止機能を要求されるようなところには適用できない。運転中は片側だけ閉止すればよいが、水圧試験時には逆方向から圧力がかかることがある場合などは不適當である。

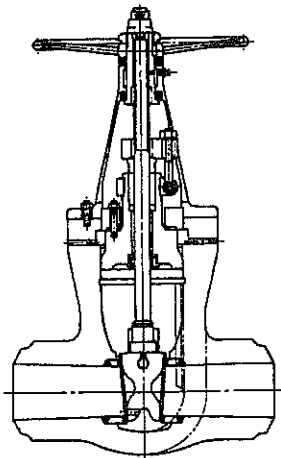


図12 弁体バランス穴

9-1-2 弁座に穴明けする。

図13⁷⁾ は入口側弁座に穴明けした例であるが、これも弁体と同じく閉止方向を留意しなければならない。

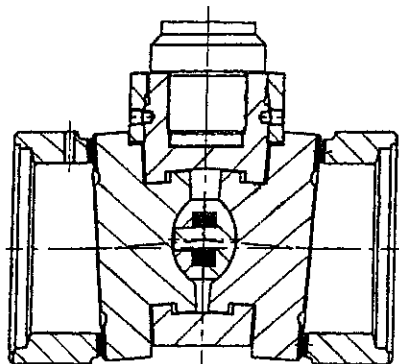


図13 弁座バランス穴

弁体穴明けの場合は、設置後、若し方向性に不都合が生じたとき、弁体の出入口を逆に入れ換えることによって解決できるが、弁座の場合はそれが不可能なので、穴明け位置は慎重に決定しなければならない。

9-1-3 弁箱の弁座棚部に穴明けする。

図14⁸⁾ に例を示すが、閉止方向性については前述のとおりである。

9-2 弁箱胴内部のドレンを必要に応じて抜く
蒸気用弁では、弁箱胴部にドレン抜弁を設け適時これを開く。特に主弁を開操作するときは、必ずドレン抜弁を開いた後に行うことをマニュアル化しておく。

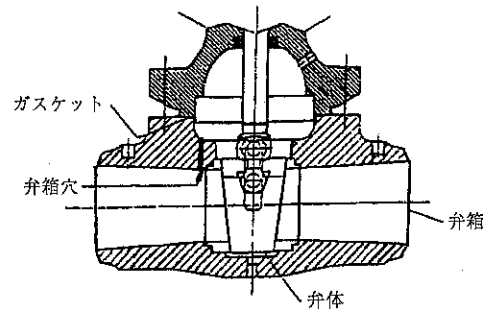


図14 弁箱棚部のバランス穴

9-3 均圧管を設け途中で止め弁を設置する

弁箱胴部と入口側または出口側の間に均圧管を設け、その途中で常時開（オープンロック）の止め弁（バランス弁）を設置し、必要に応じて開閉できるようにする。

図15にこの方法を示すが、バランス穴を設けた場合の片側のみしか気密性が得られないという欠点がなく、バランス弁側の弁座気密を必要とするときは、バランス弁を閉弁して対応できる。ただし、コスト高になること、および用済後バランス弁を必ず開弁しておかないと、異常昇圧が発生する欠点がある。

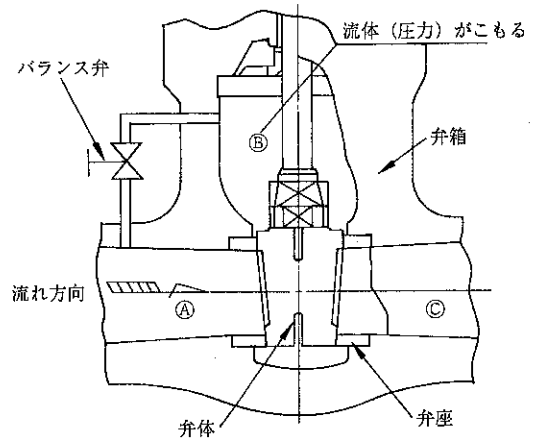


図15 バランス弁

9-4 弁体のストッパーを設ける

ウェッジ仕切弁ではくさび効果を与えず、片側弁座面（高圧側）に隙間ができるように、図8のごとく弁棒上部にストッパーを設け、弁体の全閉位置を確実に設定する。

9-5 全閉後ハンドルを若干逆回転させる

図7のように、ストッパーで弁座面の片側に隙間を与えると共に、弁棒を若干引上げるように、全閉後ハンドルを半回転（電動弁では数回転）戻すことを習慣づけて必ず実行する。この操作は前述の弁棒および弁体の熱膨張による熱拘束を防止することにもなる。

9-6 圧力逃し弁を設ける

図16⁸⁾は弁箱胴部に圧力逃し弁を設けたものである。逃し弁の吹出し圧力を適切に設定することによって、異常昇圧時のみ作動するように考慮する。

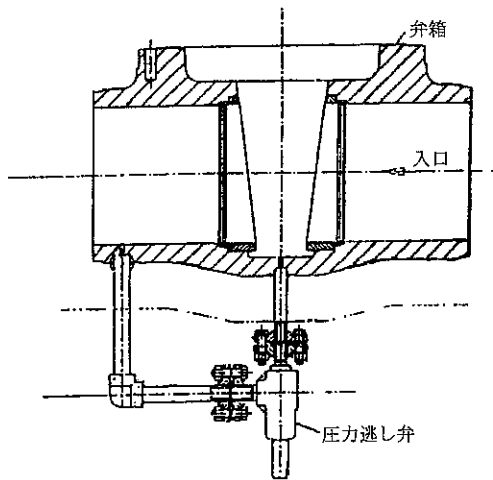
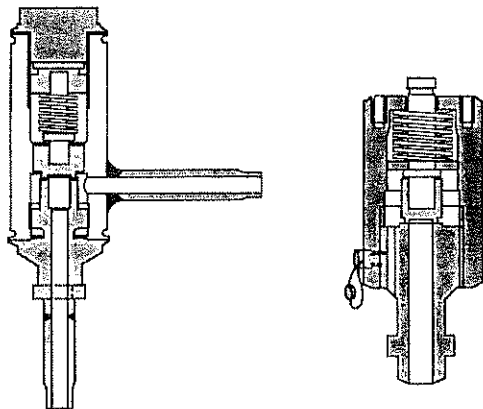


図16 圧力逃し弁の設置

図17⁹⁾は圧力逃し弁の構造を示すが、(a)の原子力発電プラント用は、吹出し流体を回収すべく出口側は弁箱に接続されている。



(a) 原子力発電プラント用逃し弁 (b) 汎用逃し弁

図17 圧力逃し弁の構造

10. 異常昇圧発生弁の処置

明らかに異常昇圧が発生したと分かるバルブは、できるだけ早い時期に分解して、内部を調査する必要があります。

10-1 分解点検

(1) 弁箱内部の点検

最大内径部の寸法を計測し、永久ひずみが生じていないか点検する。またき裂の有無などについても調査する。

(2) ガasket部（シールリング部も含む）およびグランドパッキン部の漏洩跡の有無を調査し、もし痕跡があれば、補修するか部品を取替えねばならない。

(3) 何が原因で異常昇圧が発生したかも調査し、再組立の場合はその再発防止対策を実施する必要があります。

10-2 ひずみが生じた弁箱の考察

永久ひずみが発生した弁箱の継続使用が可能か否かを確認するため、ひずみを与えた材料の短時間引張試験、および1,000時間のクリープラプチャー試験の結果、次のようなことが分かったと報告されている。

供試材は、0.2、1.0、5.0%のそれぞれのひずみを与えたものとし、0%材との比較を行ったものである。

① 図18は横軸が残留ひずみの%であるが、JIS SCPH21材の500℃における引張試験の結果は、ひずみを与えることによって、降伏点、抗張力

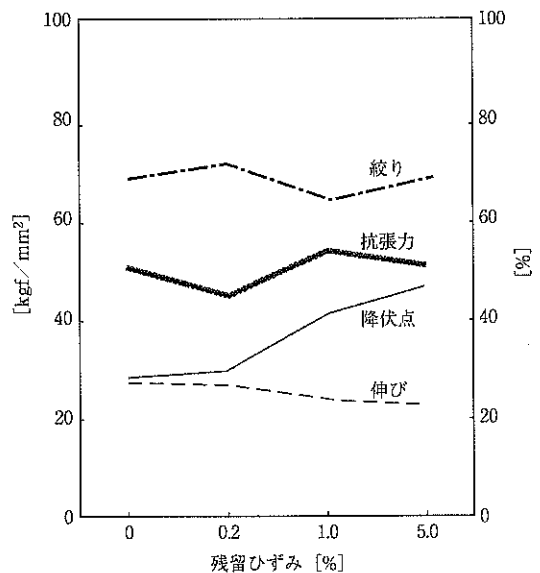


図18 SCPH21材の500℃における引張試験

など強度に関するものは増加し、伸び、絞りなどの靱性に関する値は減少する傾向にある。残留ひずみの影響は降伏点に顕著にあらわれ、1.0%のひずみで約12kgf/mm²、5%で約20kgf/mm²程度増加している。伸びは5%ひずみで約5%減少しているが、一応材料規格は満足している。

② 図19、図20は、前記と同じ材料の500℃におけるクリープラプチャー試験について、1,000時間までの伸びと絞りのそれぞれの結果を図示したものである。×印の線は0.2、1.0、5.0%のそれぞれのひずみ材の結果を示したものである。

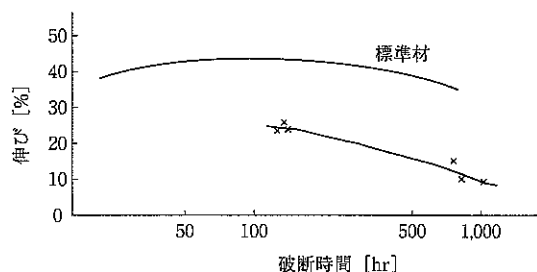


図19 1,000時間までの伸びの低下状況

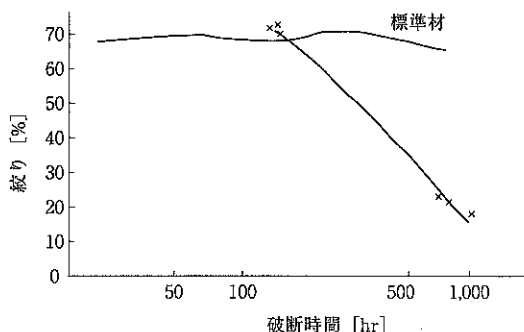


図20 1,000時間までの絞りの低下状況

高温引張試験の結果と同じ傾向で、ひずみ材の低下が極めて大きく、破断時間が1,000時間以上になれば、破断伸びが10%以下に低下するものと考えられる。一般に金属材料を高温で使用するときは、最低10%の全伸びが必要とされて

いるので、異常昇圧によって永久ひずみを起こした弁箱材の再使用は、靱性の低下が著しく材質的に問題がある。

③ 以上の結果から、異常昇圧によって永久ひずみを発生した弁箱は、急激に破壊に至ることはないかもしれないが、長時間の使用には危険を伴うので、早い時期に取替えることを推奨する。

11. おわりに

仕切弁の異常昇圧に関しては、ASME/ANSI B16.34.2.3.3 Fluid Thermal Expansion、ASME/ANSI B31.1.107.1(c)およびJEAC3706-2001.4.2.6.異常昇圧対策、などの中で注意が喚起され、「購入者は、バルブ内部の圧力が、許容圧力を超えないように、据付けまたは操作上の手段を考慮するか、あるいは設計、据付けまたは操作上での対策をとる必要がある。」とされている。

しかし、依然としてバルブの取扱い不適切による異常昇圧が各所で発生し、しかも弁箱がひずんだまま使用している場合もある。

本拙分が異常昇圧発生防止および発生後の処置などについて、ご参考になることを期待するものである。

<参考文献>

- 1) Paul H. Rothe 他4名：Modeling Pressure Lock of Valves：ASME Paper 96-WA/HT-25, P2, 1996
- 2) A Hartmann：MITTEILUGEN DER VGB：August, 1959
- 3) L. Ike Ezekoye, W. E. Moore：Thermally Induced Pressure Locking of Gate Valves：Survey of valve Bonnet Pressurization Rates：ASME PVP-Vol, 333, p.255, 1996
- 4) 笹原敬史：バルブの設計, P.69, パワー社, 2003
- 5) 笹原敬史：高温高压弁の保守点検と経年変化；雑誌メンテナンス, Vol.169, P.59, 1994
- 6) Tahsin Dogan：A Screening Method For Pressure Locking and Thermal Binding of Gate Valves：ASME NE-Vol14 P.75 1994
- 7) H. Konrad, R. Klimpke, H. Zilling：Panzerungen, insbesondere für Armaturen；VGB Kraftwerk-technik 74 Heft 11, P.929, 1994
- 8) L. I. Ezekoye：Pressure Locking and Thermal Binding of Gate Valves from A Valve Manufacturer's Perspective：ASME PVP-Vol 282, P.90, 1994
- 9) C. R. Jones, Tenera L. P.：Steam Valve Problems caused by Internal Condensation：Power Engineering No.10, P.27, 1987