

電動仕切弁シート部の信頼性向上に関する研究 (ステップ1)

Study on Improving the Reliability of Motor-Operated Gate Valve Seats (Step 1)

坂井 正彦 (Masahiko Sakai)* 光田 弘道 (Hiromichi Mitsuda)*

真鍋 吉久 (Yoshihisa Manabe)[†] 鈴木 昭雄 (Akio Suzuki)[†]

要約 弁は、原子力発電所において、多様な環境下で、流体の流量制御、減圧および閉鎖等の重要な機能を担っている。

これら多様な環境、機能に対応すべく、多種の型式の弁が採用され、その弁の設備数も数万台に及んでいるため、その信頼性の確保は、プラントの安全上、非常に重要である。

従って、本稿においては、弁の信頼性向上を目的に、第一段階として、プラントの安全性確保に重要な機能を担う電動仕切弁のシート部ステライト割れについて、その発生の可能性を評価した。

この評価は、実機の使用環境において、シート部に作用すると考えられる駆動部の弁体押し付け力(設定トルクおよびモータ惰走トルク)による応力、ステライト溶接時の残留応力および配管の内圧による応力等について行った。

また、シート部の応力低減のため、上記の評価から、弁体シート部の応力に大きく寄与しているモータ惰走率の低減、ウォームギヤや弁棒ネジ部の伝達系のバラツキの低減、ステライト溶接時の残留応力の低減および弁体の剛性向上等の改善策について検討した。

キーワード 電動仕切弁, 弁の信頼性向上, ステライト, ステライト割れ, ステライト溶接時の残留応力

Abstract Valves have numerous important functions, such as flow control, pressure reduction and blockage of fluids under various operating conditions in the nuclear power plants.

A wide range of valve types are used in order to accommodate these various conditions and functions. Since the number of valves installed can reach as much as several tens of thousands, the reliability of those valves is extremely important in terms of the plant safety.

First, we evaluated the possibility of stellite cracking in the seats of motor-operated gate valves, which have the important function of plant safety, for the purpose of improving valve reliability. This evaluation was made with respect to stress caused by the valve body pushing force of the driving portion considered to act on the valve seat (set torque and motor coasting torque), residual stress in stellite welding and internal pressure of the piping in an actual operating condition.

In addition, studies were also conducted to decrease stress in the valve seat based on the above results. The countermeasures included the decrease of motor coasting rate, which greatly contributes to stress on the valve seat, minimization of backlash in transmission components such as worm gears and valve stem screws, reduction of residual stress in stellite welding and the higher rigidity of the valve body.

Keywords Motor-operated gate valve, improvement of valve reliability, stellite, stellite cracking, residual stress during stellite welding

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
† 東亜バルブ株式会社

1. はじめに

弁は、長期間にわたる技術蓄積により、ほぼ完成された機器として考えられているが、原子力発電所においては、多様な流体を過酷な条件下で減圧、流量制御および閉鎖等のプラント安全上重要な機能を担っている。

本研究は、以上のように原子力発電所における厳しい要求機能に対応するため、近年進歩のめざましい設計、製作等広い分野の工学的技術を利用し、弁の一層の信頼性向上を図ることを目的に実施したものである。

原子力発電所では、多様な環境下で多種の型式の弁が採用されているが、本論文では、第2節に述べる理由により、第一段階として、電動仕切弁を取り上げることにした。

2. 研究対象弁の選定

原子力発電所に使用されている弁の型式は、多種に及ぶが、本論文においては、次の理由により、電動仕切弁を選定する。

図1に電動仕切弁の外観写真を示す。

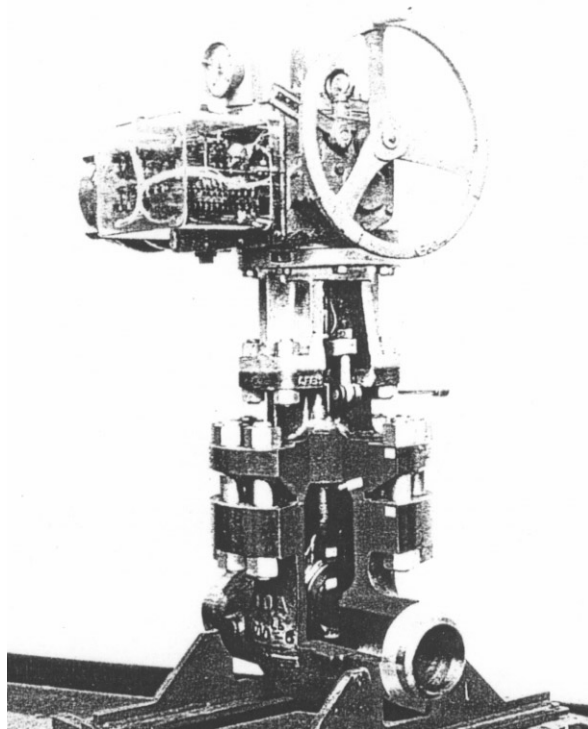


図1 電動仕切弁の外観写真

(1) プラントの安全上重要な弁であること。

電動仕切弁は、放射性物質を封じ込めるバウンダリーとしての機能を有し、放射性物質の系外リークを防止する役目を担っている。

具体的には、格納容器隔離弁および1次冷却材系統バウンダリー弁がこれに該当する。

(2) 高温、高圧の過酷な条件下で使用されている。

(3) 故障確率が相対的に大きいと考えられる。

なお、本研究においては、電動仕切弁の使用条件として、1次冷却材系統バウンダリー弁の高温高圧の使用条件(設計温度: 343℃, 設計圧力: 175kg/cm², 口径: 12B)を想定した。

3. 注目する故障モード

電動仕切弁を構成している部品について、考えられる故障モードから、次の条件に該当する「シート部ステライト割れ」に注目する。

(1) プラントの安全上重要な故障モード

放射性物質を封じ込めるバウンダリーとしての機能に着目し、放射性物質の系外リークを防止するシール機能に関連する故障モードに注目する。

(2) 潜在的な故障モード

顕在化した故障モードは、既に対策が実施されているため、ここでは潜在的な故障モードに注目する。

(3) 外観等の点検で発見の困難な故障モード

外観等の点検で発見の容易な故障モードは、日常点検等で早期に発見でき、大きなトラブルとなる前に対応が可能であるため、ここでは外観等の点検で発見の困難な故障モードに注目する。

図2に電動仕切弁の構造を示す。

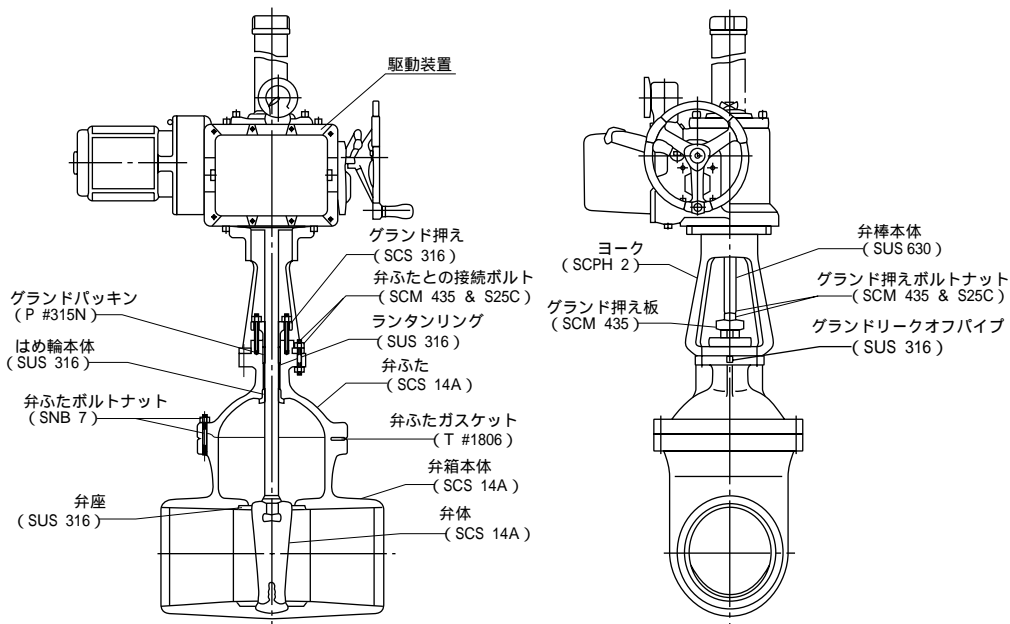


図2 電動仕切弁構造図

4. シート部ステライト割れ発生の可能性

図3にシート部のステライト部を示す。

シート部ステライト割れに対する設計上の評価は、弁体形状が複雑であることから、駆動部の設定トルクによる弁体押し付け力と配管の内圧により発

生する軸方向（圧縮）応力のみを考慮し、この応力が、ステライトの圧縮強度以下であることを確認している。

しかし、実機環境においては、設計上評価している応力以外に、駆動部のモータ惰走トルクによる弁体押し付け力、ステライト溶接時の残留応力、弁体母材とステライトの熱膨張差による応力等が考えら

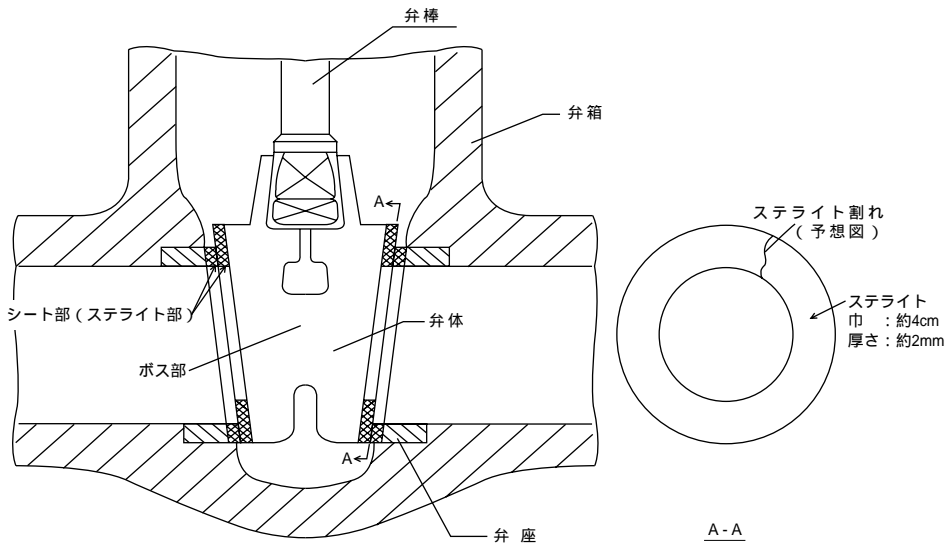


図3 既設弁体構造

れ、更に応力の方向についても軸方向以外に半径方向、円周方向にも作用すると考えられる。

このため、実機環境において、弁シート部に作用する各々の応力について、構造解析等により定量的に評価する。

シート部に作用する主な応力は、次の5成分から成る。

(1) 駆動部押し付け力による応力

既設駆動装置の構造を図4に示す。

モータの回転力は、ヘリカルギヤを経て、第2段の減速部であるウォームを回転させる。

ウォームギヤの内部には、電動弁の弁棒ネジ部のネジにはめ込まれた、ジャッキナットが固定され、ウォームギヤの回転は、弁棒の上下運動、即ち、電動弁の開閉動作に変えられる。

電動弁の開閉操作力が増加すれば、この増加量に比例して、ウォームは、トルクスプリングを押して、軸方向へ移動する。

この移動が、あらかじめ定められた操作力に相当するトルク（弁が、シール機能を果たすために必要なトルク）まで、トルクスプリングを縮めた時に、トルクスイッチの接点を開いてモータの電源を断にする。⁽¹⁾

上記構造から、駆動部により次の応力が、

弁シート部に負荷される。

a. 設定トルクによる応力

設定トルクとは、弁がシール機能を果たすために必要な締め付けトルク値である。

弁シート部にかかる応力として、この設定トルクに相当する弁体押し付け力により発生する応力がある。

b. モータ惰走トルクによる応力

トルクスイッチは、モータ駆動力によって、設定トルク値に達すれば、モータ電源を断する。

しかし、モータ停止時のトルクは、モータの慣性回転力により、設定トルクより大きなトルク（以下、モータ惰走トルクと記載）となる。

弁シート部にかかる応力として、このモータ惰走トルクに相当する弁体押し付け力により発生する応力がある。

図5に、弁の開から閉に至る時に弁体に作用するトルクの時間変化を示す。⁽²⁾

(2) ステライト溶接時の残留応力

本応力は、弁体の母材であるステンレス鋳鋼品（SCS14A）にステライト（コバルト＋クロム他）を盛金する際、溶着金属内に残留する応力である。

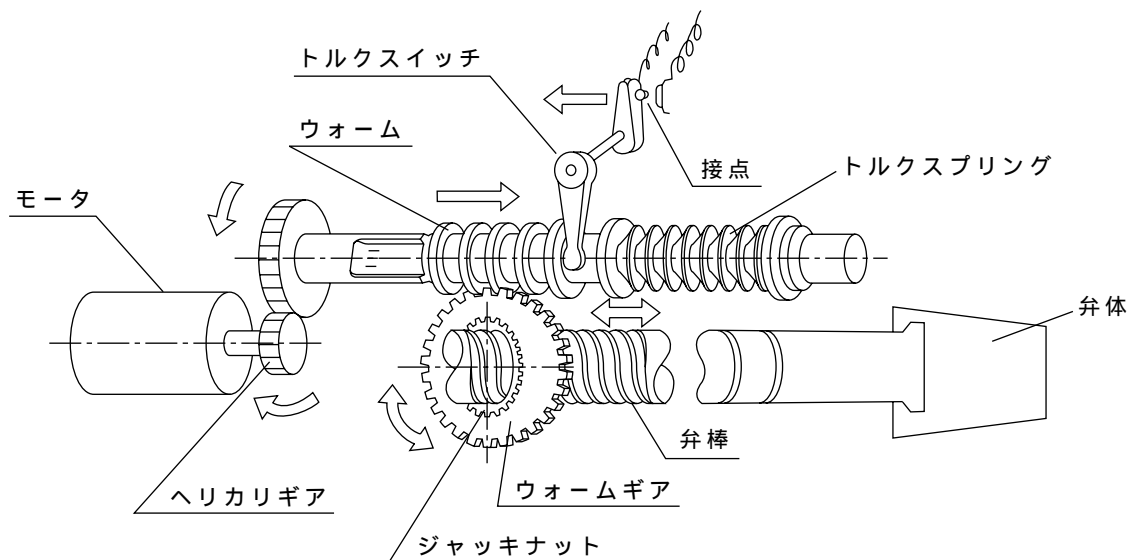


図4 駆動部の制御構造

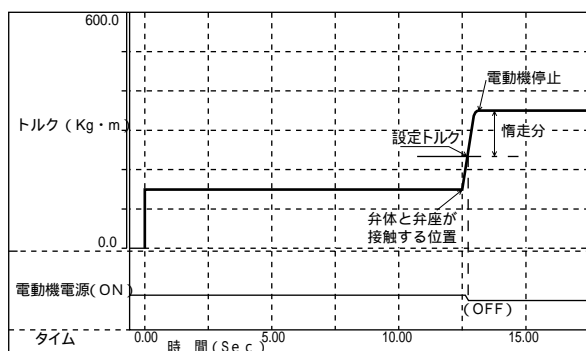


図5 電動仕切弁閉鎖時のトルク状況

(3) 配管反力等による応力

弁体と弁座の角度は、シール機能を持たせるため、同一角度で設計されている。

しかし、実機環境においては、弁に接続している配管に熱、内部流体力等により、曲げモーメントがかかることや、定期検査等の保守時に実施する弁体と弁座のシート面の手入れ等により、弁体と弁座の角度に相違ができる。

この相違を吸収するため、弁体は、フレキシブルな構造となっており、弁座角に追従して変形する。

本応力は、弁体と弁座の角度の相違によって、弁体に変形するために発生する応力である。

(4) 内圧による応力

本応力は、弁体が内部流体を遮断することにより生ずる弁前後間の差圧によって、発生する応力である。

(5) 熱膨張差による応力

本応力は、内部流体の温度によって、弁体の母材であるステンレス鋳鋼品とステライトの熱膨張差により発生する応力である。

上記の各々の応力の値を構造解析、実験等により求め、更に実機使用環境等によるバラツキを考慮した結果は次のとおりである。

a. 設定トルクによる応力

本応力は、設定トルクが、駆動部のギヤ、弁棒ネジ部を介して、弁体に作用する荷重により発生するため、駆動部のギヤ、弁棒ネジ部の潤滑の程度、形状等による伝達効

率の変化によりばらつく。

本応力の評価は、構造解析によって行った。

本応力の最小値は、弁設計時に採用している伝達効率をベースに弁体に作用する荷重を算出し、その値を荷重条件として、構造解析により算出した。

また、最大値は、伝達効率の変化として、メーカーの経験に基づき、1.6倍を考慮した。

なお、伝達効率については、弁の使用環境条件で変化が予想されるため、より実機弁に合致した応力評価をするためには、今後、実機使用環境条件毎の層別的な評価を実施する必要がある。

b. モータ惰走トルクによる応力

本応力は、モータの仕様、駆動系の仕様および摺動抵抗等いろいろな要因により発生するモータ惰走トルクの変化に伴ってばらつく。

本応力の最小値は、モータ惰走がない状態で、零とした。

モータ惰走トルク値の最大は、惰走トルクデータのある実機弁の値を統計処理し、設定トルク値と同等のトルクまで上昇するものと仮定した。

従って、本応力の最大値は、上記設定トルクの最大値と同等である。

なお、モータ惰走トルクの最大値については、弁の使用環境条件で変化が予想されるため、より実機弁に合致した応力評価をするためには、今後、実機使用環境条件毎の層別的な評価を実施する必要がある。

c. ステライト溶接時の残留応力

本応力は、母材と溶接金属の材料特性の相違、手動溶接による溶接条件の相違、弁体の母材の形状の違いによる溶接時の拳動の相違等によりばらつく。

本応力は、解析による算出が、困難であるため、実機弁体と同等の弁体モデルを製作し、歪みゲージ法により残留応力を求め、そのバラツキを統計処理して、最小値、最大値を求めた。

d. 配管反力等による応力

本応力は、配管反力等の値によってばらつく。

本応力の最小値は、配管反力等がない状態で零とした。

本応力の最大値は、実機弁に作用する配管反力が不明であることから、弁の設計に当たって、技術基準に規定されている反力による弁体と弁座の角度の相違の他に、定検時等の保守時に実施する弁体と弁座のシール面の摺り合わせ等による弁体と弁座の角度の相違を加味して、技術基準に規定されている2倍の反力を仮定して算出した。⁽³⁾

e. 内圧による応力

本応力は、弁の設計圧力をベースに、構造解析により算出した。

f. 熱膨張差による応力

本応力は、弁の設計温度、弁体の母材とステライトの熱膨張係数、ヤング率をベースに算出した。

評価の結果、ステライト強度を越える可能性があるのは円周方向応力であり、軸方向、半径方向の応力は、ステライト強度未満であった。

図6に上記の各成分応力の円周方向の値をまとめて示す。

上記 a. ~ f. の円周方向応力の最大値の合計は、ステライト強度⁽⁴⁾の約1.5倍となり、ステライト割れは、顕在化する可能性が大きい潜在的な故障モードと考えられる。

また、これらの応力のうち、大きなウエイトを占めているのは、駆動部の弁体押し付け力（設定トルク、及びモータ惰走トルク）による応力およびステライト溶接時の残留応力である。

5. 改善策

構造解析等による評価結果から、潜在的な故障モードであるステライト割れの発生を防止するには、シート部に作用する応力のうち、大きなウエイトを占めている駆動部の弁体押し付け力（設定トルクおよびモータ惰走）による応力およびステライト溶接時の残留応力を低減するのが有効である。

図7に改良駆動装置の概念構造、図8に改良弁体の概念構造を示す。

(1) モータ惰走率の低減

モータの惰走率は、モータの回転速度に応じて大きくなるため、モータ停止時の回転速度を遅くし、惰走率を減少させる構造とする。

具体的には、弁棒変位センサーにより、弁の開閉位置を検知し、所定の位置で、インバータ制御により、モータの回転速度を制御

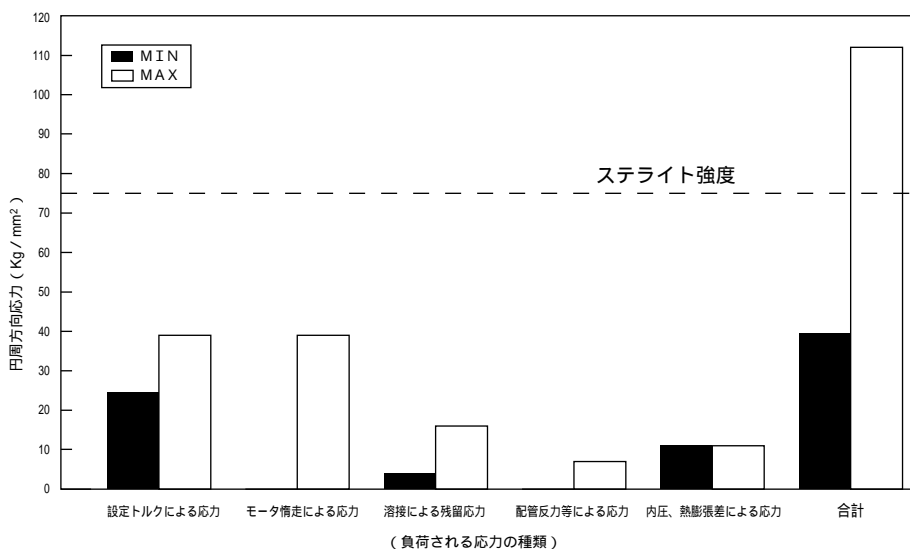


図6 弁シート部に負荷される応力

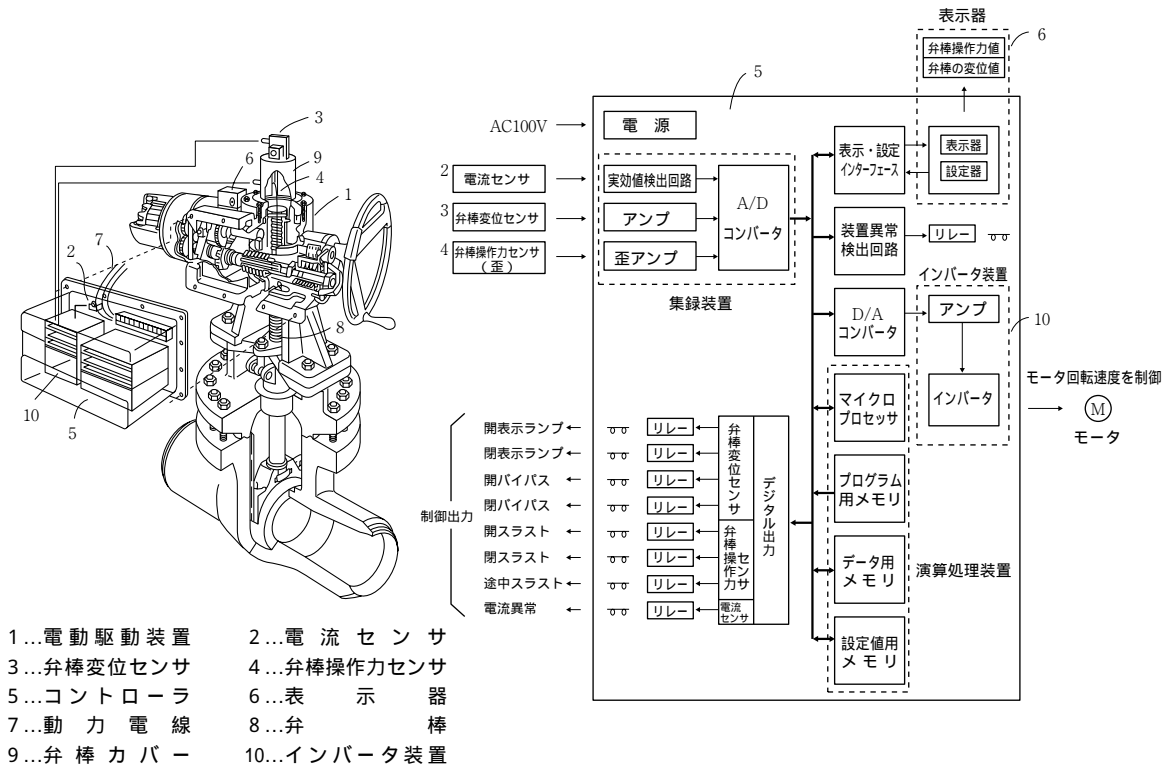


図7 駆動部の締付け低減の概念構造

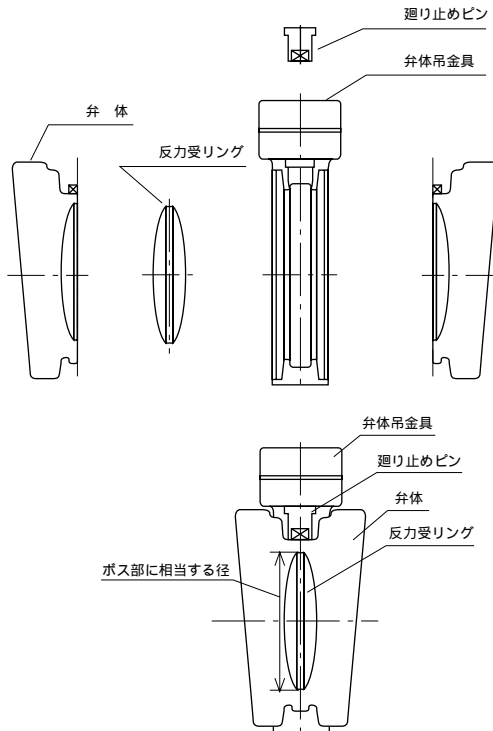


図8 改善弁体の概念構造

(全開,全閉付近:回転速度を遅くする.中間開度:回転速度を速くする.)し,モータ惰走率を小さくする.

(2) 伝達系のバラツキの低減

弁の操作力は,ウォームギヤ等の回転トルクで制御しているため,ウォームギヤ等の伝達系の潤滑の程度や形状等でばらつく.

このため,弁の操作力を直接検知する構造とする.

具体的には,弁の操作力を検知するセンサーとして,弁棒内に歪みゲージを埋め込み,弁棒に発生する応力を検出する.

(3) 弁体の剛性の向上

弁体は鋳鋼性の一体ものであり,弁体と弁座のシール性の確保のため,弁体の中央部にスリットをいれ,フレキシブルな構造としている.

この弁体の剛性を向上するためには,シール性を損なわないように既設弁体のボス部に相当する径を大きくする必要がある.

具体的には,弁体を入口側と出口側で2分割し,この弁体間には,ボス部に相当するレンズ型の反力受けリングを挿入し,剛性を向上すると同時に弁座面の変化に対応可能なようフレキシブルな構造とする.

(4) 適切な溶接方法の検討

弁シート部は,高温,高圧等の過酷な環境状態でのシール性確保の要求機能から,ステ

ライトを溶接盛り金する構造であるため,残留応力の発生は避けがたいが,極力小さくする必要がある.

このため,ステライト溶接時の挙動をシミュレーションするプログラムを開発し,溶接条件を種々変えて極力,残留応力の小さい適切な溶接条件を検討する.

6. 今後の研究課題

本稿においては,電動仕切弁のステライト割れの発生の可能性およびその改善策について検討した.

今後は,実機適用に向けて,効率的な改善策を検討するため,実機弁の使用環境条件で変化が予想されるモータ惰走率のバラツキと伝達系のバラツキについての使用環境条件ごとの層別的な評価,改良機の詳細設計および検証試験等を検討する.

参考文献

- (1) 日本ギヤ(株),バルブコントロール T Y P E S M B カタログ, No.L-002K, 1-2
- (2) 東亜バルブ(株),電動弁自動診断システムカタログNo.D-25, 1-2
- (3) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 1993 第81条
- (4) 三菱マテリアル(株),耐熱合金データ集 カタログNo.273, 2