

電動弁診断技術の高度化への取り組み

Development of Advanced Diagnostic Technologies for Motor-operated Valves

株式会社 東芝	粉 幸太郎	Kotaro HEGI	Member
株式会社 東芝	清水 俊一	Shunichi SHIMIZU	Member
株式会社 東芝	日隈 幸治	Koji HIGUMA	Member
株式会社 東芝	西野 浩二	Koji NISHINO	
株式会社 東芝	尾崎 健司	Kenji OSAKI	
株式会社 東芝	渡部 和美	Kazumi WATANABE	
CRANE NUCLEAR	濱野 文一	Frank HAMANO	

As use of condition-based maintenance is allowed in the new regulatory inspection system employed in Japan's nuclear power plants in 2009, development of advanced diagnostic technologies for motor-operated valves (MOVs) is now required. This report discusses advanced technologies in valve-setup verification, valve performance evaluation, monitoring of valve/actuator conditions by performance diagnostic system and moreover detection of stem crack by ultrasonic diagnostic system.

Keywords: Motor-operated Valve, Diagnostics, Condition-based Maintenance, Valve Performance

1. 緒言

原子力発電所では、新検査制度の定着に伴い、振動診断、潤滑油診断、赤外線サーモグラフィ等の設備診断技術が積極的に導入されている。定検期間の短縮と保全物量の適正化の観点から、状態監視保全の対象機器の拡大が求められており、海外の動向から電動弁に対する診断技術の適用が進むことが予想される。

電動弁診断技術は、多様な方式が各メーカーにより開発されており、欧州・米国等海外では、緊急時の作動保証が必要となる重要な弁に対して電動弁診断技術が積極的に導入され、定検中の分解点検を主体とした保全（時間計画保全）から、運転中の状態監視保全に移行している。国内の原子力発電所では、現状、電動弁の状態監視保全は実用的な運用には至っていないが、近年、保全物量の適正化等に向けて、高精度かつ現場作業が簡便で、非分解・非破壊で実施できる電動弁診断技術の開発及び実機適用が要望されている。

本報では、これらの要望に対応し、米国の規制や保全実績に基づき開発した性能診断技術と、国内の弁トラブル経験に基づき開発した弁棒の疲労・亀裂診断技術、及びこれらの診断技術の有効性について説明する。

2. 米国での電動弁の保全

米国では、過去、電動弁の保護スイッチ設定不良や過負荷等のトラブル事象が多発し、これらの事象に対応した修理が行われて来た。米国 NRC は、この状況

連絡先: 粉 幸太郎, 〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8, (株) 東芝 電力システム社, 電話: 045-770-2431, E-mail: kotaro.hegi@toshiba.co.jp

を踏まえ、定期的な性能確認のガイダンスとして安全系の電動弁に対する設計性能保証要求 (GL 89-10, 96-05) ¹⁾を発行した。これにより、米国電力会社は、運転中に弁棒のスラスト・トルク等の性能に係るデータの測定及び評価を要求されることとなり、各メーカーにより診断技術の実用化が図られた。その後の診断技術の高精度化に伴い、米国電力会社は、分解点検周期の最適化による信頼性向上と保全コスト低減を目的に、診断技術の積極的な導入を行って来た。そして現在、電動弁の保全では、分解点検は減少し、電動弁診断装置による性能診断が大半を占めている状況であり、その中でも本報で説明する性能診断技術は米国で主流となっている技術である。

3. 電動弁診断技術の有効性

3.1 経年劣化事象に対する診断の有効性

電動弁の経年劣化事象は、動作部及びその摺動部（電動駆動部のギア部・モータ部・トルクスイッチ・リミットスイッチ、弁棒、弁体、弁座、グランドパッキン部）で発生する摩耗等の劣化事象と、静止部（弁箱、弁蓋、ボルト・ナット等）で発生する腐食等の劣化事象に大別される。

前者の動作部及びその摺動部の劣化事象については、4.1 項で概要を説明する性能診断技術により、弁駆動時の弁棒スラストやモータ電流等の性能に係わるデータを測定し、劣化に起因する性能低下を評価することで検知が可能である。

後者の静止部の劣化事象については、性能診断技術での検知は困難であり、目視点検や分解点検での対応

が必要となる。特に、使用流体が海水等の腐食性流体の場合は、劣化の進行が速いため目視点検や分解点検が重要となる。しかし、腐食性流体でない場合は、劣化の進行には非常に長期間を要するため、長い周期での点検で対応すればよく、前者の動作部及びその摺動部の診断を行えば、主要な経年劣化事象を検知することが可能である。

以上のように、性能診断技術により、動作部及びその摺動部で発生する主要な経年劣化事象を検知することが可能であり、分解点検の可否判断に有効に活用できる。

3.2 国内トラブル事象に対する診断の有効性

国内原子力発電所で発生している電動弁故障の内、約 60%が保守不良等に起因する初期故障となっている²⁾。電動弁の組立・調整は、作業性の低い現場で、ギア装置、及びリミットスイッチ・トルクスイッチの精密な組立・調整が行われるため、作業ミスに起因する初期故障が発生しやすい。性能診断技術は、スイッチ接点間の電流・電圧等の測定により、駆動部の組立状態やスイッチの設定状態の診断を可能とし、これらの故障を未然に防ぐことができる。

また、国内原子力発電所では、弁棒の折損事象が発生している³⁾。これらの事象は、弁棒の製造不良等の要因に、運転中の弁棒の振動の発生が重なり、弁棒に疲労亀裂が発生・進展し、折損に至る故障である。4.2 項及び 4.3 項で概要を説明する弁棒の疲労・亀裂診断技術は、弁棒の初期亀裂、及び弁棒の疲労の要因となる振動の発生の検知を可能とし、これらの故障を未然に防ぐことができる。

以上のように、性能診断技術及び弁棒疲労・亀裂診断技術により、国内原子力発電所で多く発生している故障を未然に防ぐことが可能であり、トラブルの低減に有効に活用できる。

4. 電動弁診断技術の概要

4.1 性能診断技術

性能診断技術は、弁の駆動時の、弁棒のスラスト・トルク、モータの電流・電圧、リミットスイッチ・トルクスイッチの接点間電流・電圧の測定により、電動弁の駆動性能の診断を可能とし、米国 NRC の設計性能保証要求⁴⁾及び国内の運転保守指針⁴⁾に対応するものである。

Fig.1 及び Table1 に示す部位にセンサを仮設で外付けし、電動弁を開閉動作させた際の上記データを測定する。測定データは、Fig.2 に示すように、①電動弁のモータ起動後の駆動装置のギアによる負荷伝達状態、②弁棒に力が伝達された後の弁棒の挙動、③保護スイッチによる弁動作停止等、電動弁の動作に応じて変化する。診断ソフトでは、測定データに対して、電動弁の各動作イベントをマーキングし、各イベント時のデータ値を記録・演算することにより、Table2 に示

す評価レポートを作成する。

診断は、①電動弁の新設または分解点検・組立直後のベースライン試験による基準データの測定（直接診断）、②その後の定期試験によるベースライン試験データとの比較及び傾向監視（間接診断）、③定期試験でデータに異常が確認された場合は再度直接診断、という流れで行う。

ベースライン試験では、直接測定により、弁棒のスラスト・トルク、モータの電流・電圧、リミットスイッチ・トルクスイッチの接点間電流・電圧を測定し、Table2 に示す評価レポートによる直接診断を行う。この際、弁棒のスラストまたはトルクと、モータ電流・電圧により演算したモータトルクとの間の相関関係の導出、及び設計データを基にした判定基準の設定を行う。

その後の定期試験では、モータコントロールセンター（MCC）でモータ電流・電圧、及びスイッチの接点間電流・電圧を測定する。これらの測定値からモータトルクを演算し、ベースライン試験で求めた相関関係を基に弁棒のスラストまたはトルクを推定する。この推定値と、あらかじめ設定した判定基準との比較により、良否判定（間接診断）を行う。ここで、異常と判定された場合は、再度直接診断を行い、異常の原因究明を行う。

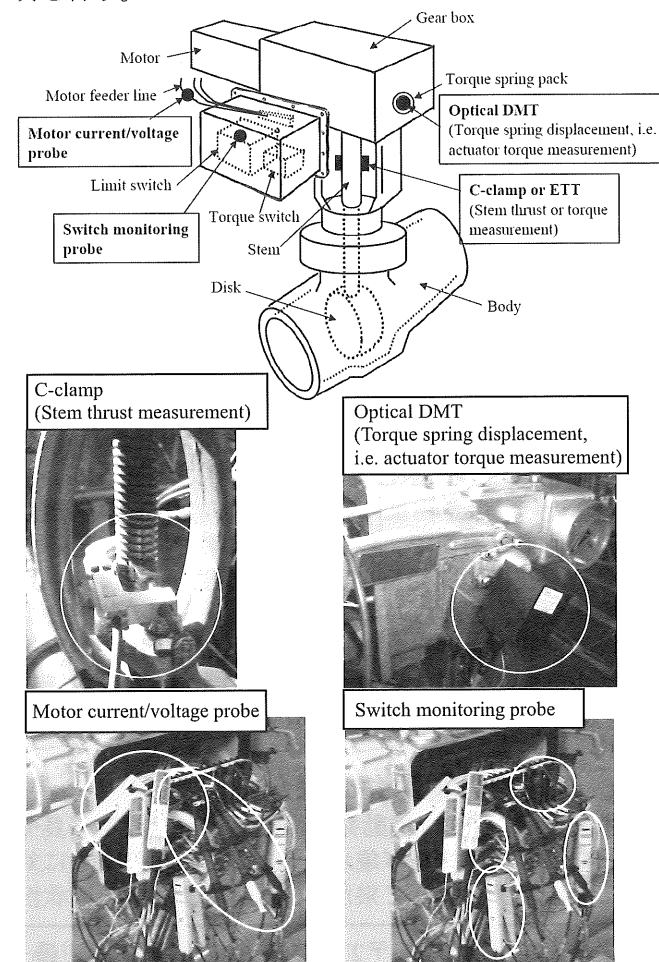


Fig.1 Sensors and measurement points

Table1 A list of sensors and measurement data

Sensors	Measurement data	Measurement points	Evaluation data	Baseline test (*1)	Periodic test (*1)
C-Clamp or ETT (strain gage)	Stem thrust or torque	Stem	•Valve/Actuator load condition	○	△
Optical DMT (displacement transducer)	Torque spring displacement	Outside of torque spring pack	•Valve/Actuator load condition •Torque switch operating condition	△	△
Motor current/voltage probe	Motor current/voltage (by measurement at valve or MCC)	Motor feeder line	•Motor load condition •Motor operating condition	○	○(*2)
Switch monitoring probe	Current through or voltage across control switches (by measurement at valve or MCC)	Contacts of limit/torque switches	•Limit/Torque switch operating condition	○	○(*2)

(Note) (*1) ○: Indispensable measurement, △: Arbitrary measurement
(*2) Measurement at MCC

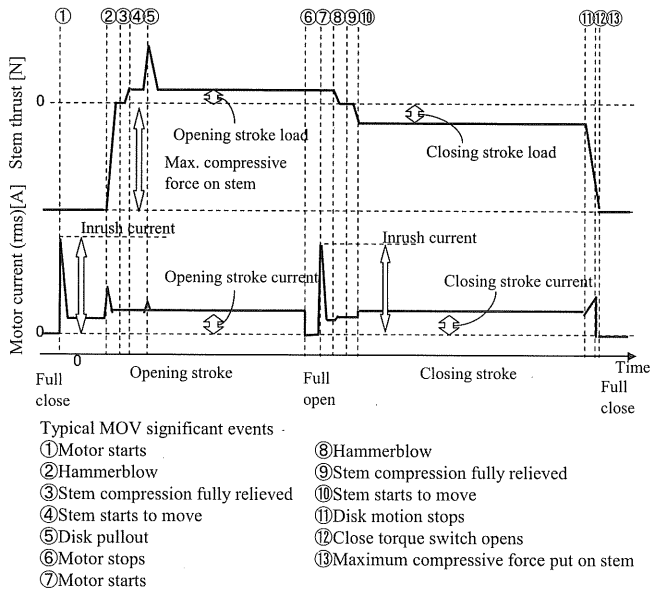


Fig.2 Typical MOV significant events on signature traces (example)

Table2 Analysis report (example)

Test Description Close Test Case Test Date 1995/10/31 16:26:36			
Close Thrust Data:		Open Thrust Data	
Value at C3	N	Value at O4	N
Value at C20 (Avg Run Thrust)	N	Value at O22 (Avg Run Thrust)	N
Value at C19 (Max Run Thrust)	N	Value at O21 (Max Run Thrust)	N
Thrust at CST	N	Thrust at Disc Pullout	N
Maximum Thrust	N	Offset between C3 and O4	N
Closing Thrust Margin	N		
Inertial Thrust	N		
Close Stem Torque Data		Open Stem Torque Data	
Avg Running Torque	Nm	Avg Open Running Torque	Nm
Torque at C14	Nm	Max Torque at Disc Pullout	Nm
Maximum Torque	Nm		
Close Power Data		Open Power Data	
Peak Close Inrush Power	watt	Peak Open Inrush Power	watts
Avg. Running Power Close	watt	Avg running Power Open	watt
Power at C14	watt	Power at Disc Pullout	watt
Max Closing Power	watt		
Close Motor Current Data		Open Motor Current Data	
Name Plate Running Current	Amps	Max Open Inrush Current	Amps
Max Close Inrush Current	Amps	Avg Open Running Current	Amps
Avg Close Running Current	Amps	Max Current at Disc Pullout	Amps
Current at CST	Amps	----	
Current at Motor Cutoff	Amps	Open Contactor Dropout Tim	Secs
Close Contactor Dropout Tim	Secs		

4.2 弁棒疲労診断技術

国内原子力発電所で、弁体及び弁棒の流力振動により、Fig.3 に示す弁棒の一部で応力が集中し、疲労亀裂が発生・進展し、折損に至る事象が発生している^[3]。このため、弁棒の疲労の要因となる振動の発生の検知を目的に、弁棒疲労診断技術を開発した。系統運転中に弁棒の振動を直接測定する。弁箱内は流れがあること、及び弁の開閉動作により弁棒が上下することから、センサを直接設置することは困難である。そこで、弁箱の外側から弁棒の振動を直接測定するため、Fig.3 に示す超音波振動計^[5]を用いる。

弁棒の振動応答解析による振動振幅と応力の関係を予め算出しておき、測定した振動値から発生している応力を推定する。振動解析モデルは、Fig.4 に示すように、弁棒をはり要素とし、駆動部との取合点と、グランドパッキン（ばね要素）で支持したモデルである。弁棒は1次の振動モードで振動すると予想されるため、1次モードでの変形量と応力評価点の応力の関係を予め算出しておき、測定した弁棒の振動値（変形量）から発生する応力を評価する。応力評価点は、亀裂が発生した場所または応力が集中すると予想される場所とする。測定された弁棒の振動から振動周波数を求め、運転時間から、振動の繰返し回数を算出し、弁棒の疲労評価を行う。疲労評価の結果は分解点検の有無を判断するデータとして使用される。

Fig.5 に試験弁での弁棒の振動と応力を測定した結果を示す。流量を増加させ 1.1m³/min 付近から急激に応力が増加しており、弁棒に曲げ応力が発生する状態、すなわち振動が発生していると考えられる。振動についても 1.2m³/min 付近から急激に増加しており、曲げ応力と同等な結果を示しており、振動測定により応力の発生を検知できることが確認できた。

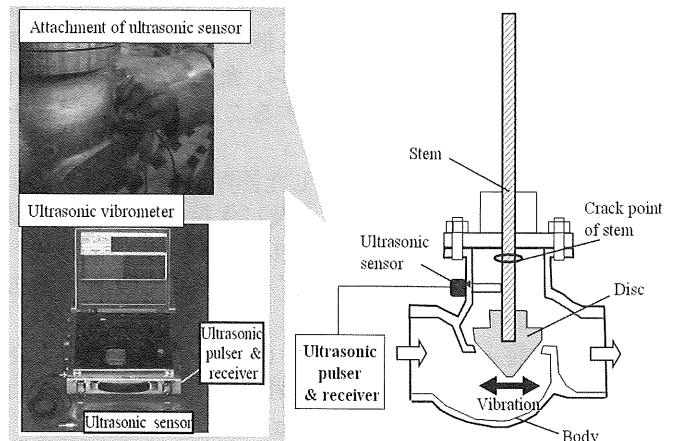


Fig.3 Ultrasonic vibrometer and measurement point

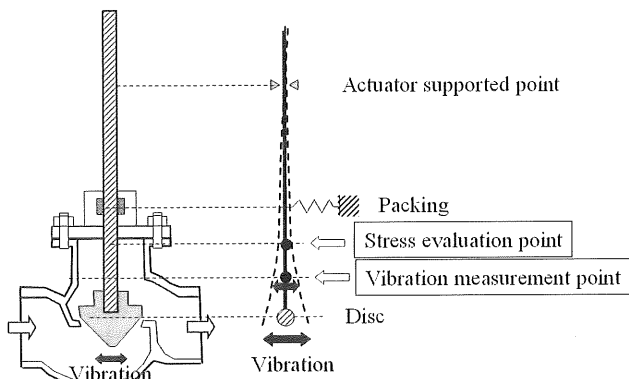


Fig.4 Vibration response analysis model

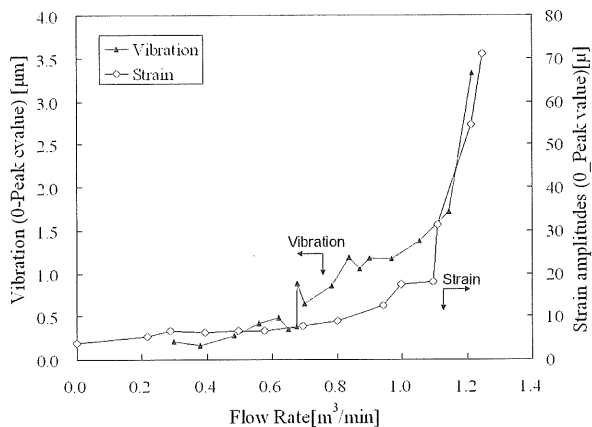


Fig.5 Stem vibration and strain data

4.3 弁棒亀裂診断技術

弁棒の初期亀裂の検知を目的に、弁棒亀裂診断技術を開発した。Fig.6 に示すように弁棒頭頂部に超音波センサを設置し、垂直探傷によって非分解で亀裂を検知する。亀裂が存在する場合、亀裂箇所からのエコーが得られるため、この亀裂エコーから診断を行う。垂直探傷では弁棒底部や弁体からの形状エコーも検出されるが、弁棒サイズから形状エコーの発生位置(=時間)が得られることから、亀裂発生が予想される領域に時間ゲートを設定することで亀裂エコーと形状エコーとを分離する。

上記探傷法に基づき開発した診断装置を Fig.7 に示す。亀裂診断装置は、センサ及び保持具、超音波送受信器、ノート PC から構成される。センサの電動弁への取り付けは保持具内のマグネットにて吸着する方式としており着脱可能である。

性能検証として、模擬亀裂(スリット)を付与した弁棒を電動弁に組み込み、弁閉状態で非分解診断を行った。弁棒には 606mm、940mm の 2 サイズを用いた。結果、いずれも亀裂深さが弁棒直径の 10%以上(亀裂長さは弁棒直径の 30%) から亀裂エコーが検出できることを確認した。Fig.8 に 940mm サイズの観測信号を示す。また、弁閉状態の流量 1.3m³/min 下で同様の測定を行ったが、弁閉状態と同等の信号が得られ、停止中に加えて系統運転中でも診断が可能であることを確認した。

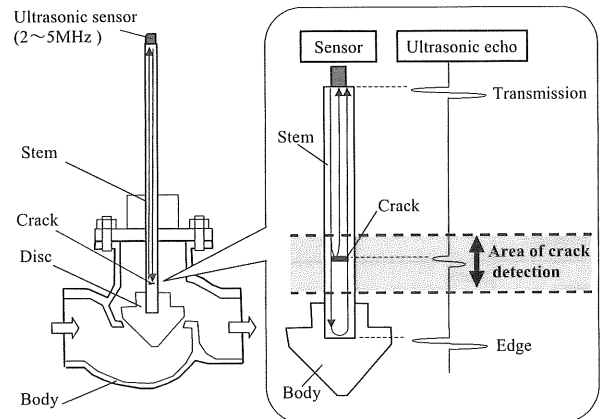


Fig.6 Measurement area

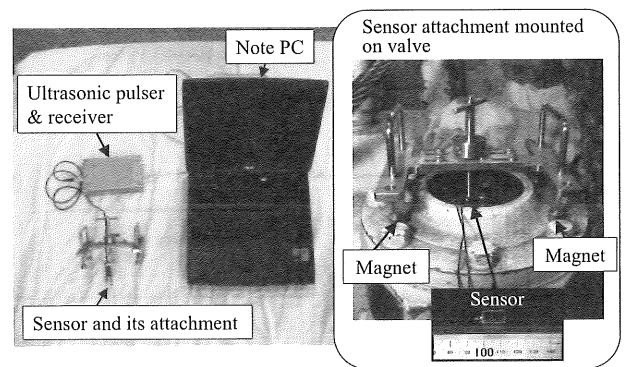


Fig.7 Diagnostic system

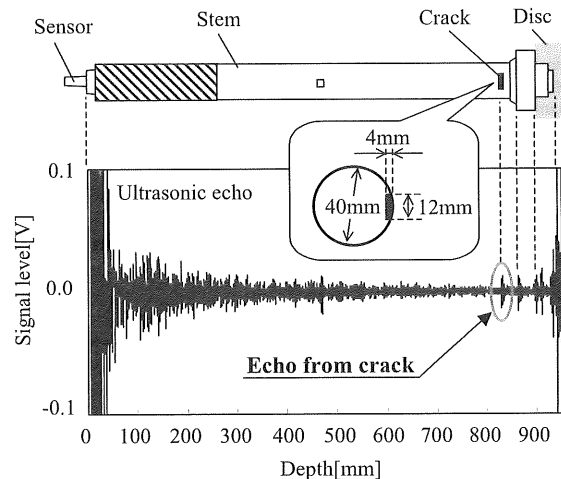


Fig.8 Measurement result of stem

5. 結言

以上のように、米国の規制や保全実績に基づき開発した、電動弁の主要な経年劣化事象及び組立・調整状態を簡便に診断可能とする性能診断技術と、国内の弁トラブル経験に基づき開発した、弁棒の疲労・亀裂診断技術により、電動弁の総合的な設備診断技術を確立した。

本技術を実機に対して適用し、状態監視保全を運用していけば、原子力発電所に多数ある電動弁の信頼性向上と保全コスト低減に大きな効果が期待できる。

参考文献

- [1] NRC, Generic Letter 89-10 及び 96-05
- [2] 原子力安全基盤機構, 運転管理年報 (1966 年～2005 年)
- [3] 日本原子力技術協会ホームページ, 原子力施設情報公開ライブラリー「ニューシア」
- [4] 日本電気協会, 軽水型原子力発電所の運転保守指針 JEAG4803-1999
- [5] 荒川他, D&D2002,203(2002)