

## 火力発電用高温高圧弁の経年劣化調査

山下 泰宏\*

### 1. はじめに

近年、火力発電は全電力供給量の約60%を供給している。また、電力需要の大幅な負荷変動に対しては、原子力発電所がベースロードとして運転されるため、火力発電所の頻繁な起動・停止（DSSまたはWSS）によってまかなわれている。

ところで、火力発電所の多くは、1955年（昭和30年）から1974年にかけて75MW以上の火力発電所が200ユニット以上建設されている。これらの経年火力発電所の約半数は、累積運転時間が10万時間を超えるようになっており、火力発電による電力の安定供給を目的とした長寿命化が重要視され、ボイラ、タービンおよびその他の重要機器に対する余寿命診断と耐力向上対策が行われるようになってきた。

弊社では、1984年から経年火力発電所の高温高圧弁に対する経年劣化調査を受注し、現在までに35ユニットの調査を行った実績を有している。本稿では、岡野バルブにおける火力発電用高温高圧弁の経年劣化調査への取り組み、特徴的な事例などについて紹介する。

### 2. 高温高圧弁の経年劣化調査の位置付け

1987年5月に通産省資源エネルギー庁より、「電気事業法第47条による定期検査の時期変更承認等の運用について（62資公第255号）」が通達され、運用要領別紙1にはボイラ設備定期点検の時期及び内容ならびにタービン設備定期点検の時期及び内容が示されている。

表1は別紙1の弁関係の抜粋で、ボイラ設備につい

表1 電気事業法第47条による定期検査の時期変更承認等の運用について  
ボイラ設備定期点検の時期及び内容（設置者が実施する点検）

重要機器	①標準期定期点検			②初回定期点検	③長期使用期定期点検	日常保守の対応	備考
	A点検	B点検	C点検				
(5)弁 (A)安全弁	a. 分解し、点検を行う。 b. 組立後、作動試験を行う。	a. 作動試験を行う。	a. 同左	a. 標準期A点検を行う。	標準期定期点検と同一とする。	・蒸気漏洩の確認 ・外観目視による確認	・作動試験は、油圧ジャッキにより行うことができる。
(B)主要弁 (弁体、弁座の摩耗が著しいもの)	a. 分解し、点検を行う。	a. 同左	a. 同左	a. 標準期A点検を行う。	標準期定期点検と同一とする。	・蒸気漏洩の確認 ・外観目視による確認	

タービン設備定期点検の時期及び内容（設置者が実施する点検）

重要機器	①標準期定期点検			②初回定期点検	③長期使用期定期点検	日常保守の対応	備考
	A点検	B点検	C点検				
(5)主要弁 ・主蒸気止め弁 ・蒸気加減弁 ・再熱蒸気止め弁 ・中間阻止弁	a. 各弁を分解し、ストレーナー、弁体、弁座等の点検を行う。 b. 必要に応じて、下記を行う。 ・PT検査 ・間隙測定 ・曲り測定	a. 主蒸気止め弁の点検を行う。 b. 必要に応じて、PT検査を行う。	a. 主蒸気止め弁の対策も未実施のものに限り点検を行う。 ・耐浸食型弁 ・ボイラー過熱器管、再熱器管に改良材（SUS347、ショットピーニング管） ・スケールブロー装置 ・運用面での配慮（変圧運用、DSS） b. 必要に応じて、PT検査を行う。	a. 標準期A点検を行う。	次を除いて標準期定期点検と同一とする。 a. 標準期A点検を行う。 b. 標準期B点検に下記を追加する。 ・各弁を分解し、ストレーナ、弁体、弁座等の点検を行う。 ・必要に応じて、下記を行う。 ・PT検査	・振動異音の確認 ・蒸気漏洩の確認 ・ボルトゆるみの確認 ・弁開度の確認 ・作動試験	a. 各弁の分解点検は、4～6年毎に行うことが望ましい。

\* 岡野バルブ製造㈱ 取締役 技術・開発統括部長

表2 定期点検区分と内容

定期点検区分	内 容
初回定期点検	初回定期点検は設備の調整段階と位置付け、標準的な定期点検に加え初期トラブル及び設備固有の問題点を把握するための詳細点検を行う。
標準定期点検	2年目以降10万時間（試運転開始以降の累積運転時間）または2,500回（試運転開始以降の累積起動回数）の間は、設備の定常段階と位置付け、標準的な定期点検を行う。
	A点検 次回の定期点検までの期間を2年とすることができるような精度の分解による目視点検及び非破壊検査ならびに補修レベルの精密定期点検
	B点検 次回の定期点検までの期間を1.5年とすることができるような精度の分解による目視点検及び補修レベルの簡易定期点検
C点検 次回の定期点検までの期間を1年とすることができるような精度の運転中における作動試験と短期間で点検を要する主要部の簡易点検及び補修レベルを組合せたミニ定期点検	
長期使用期定期点検	試運転開始以降の累積運転時間10万時間又は累積起動回数2,500回を超えた場合は設備の経年段階と位置付け、標準的な定期点検に加え経年劣化状況及び今後の運用を勘案した対応策等の把握のための詳細定期点検を行う。（経年劣化対策済機は、標準定期点検適用可）

ては安全弁および主要弁、タービン設備については主要弁となっている。この表のなかの定期点検については参考文献<sup>(1)</sup>の「事業用火力発電所の定期点検指針」で表2のように定義されており、「長期間使用期定期点検」は試運転開始以降の累積運転時間が10万時間または累積起動回数が2,500回を超える以降の定期点検となっている。

経年劣化調査および対策は長期間使用期定期点検に属し、この指針ではボイラ設備およびタービン設備の安全弁および主要弁についての定期点検要領がまとめられており、前者の中から弁関係の抜粋を表3に示す。この表の備考欄には「経年劣化及び参考事例」が示されており、弁の経年劣化調査にはこれらの内容を十分考慮しなければならない。

また、別紙3には余寿命診断実施に関する指針が示されており、余寿命診断の実施時期（初回）は、

- (1) 劣化要因が高温クリープのもの：  
累積運転時間10万時間程度経過後
- (2) 劣化要因が低サイクル疲労のもの：  
累積起動回数2,500回程度経過後

となっている。ただし、余寿命診断の対象は、「当該対象汽力設備の主要部位」となっており、この設備のなかには弁は該当しない。しかしながら、上述の安全弁および主要弁について経年劣化調査をした場合は、余寿命について評価・推定すべきと考えている。

表4 弁の主な劣化要因と調査方法

劣化対象部位	主な劣化要因	劣化の進行形態と事象	調査方法
①耐圧部 ・弁箱 ・弁体 ・弁座 ・ボルト	・高温クリープ (450℃以上)	炭化物の凝集→ボイド発生 →き裂→漏れ	・組織検査 ・硬さ検査
	・熱応力による低サイクル疲労 ・応力腐食 ・環境腐食	き裂の発生→成長→漏れ 錆の発生→肉厚、径の減少	・目視検査 ・PT検査 ・MT検査 ・寸法検査
②シート面 盛金部 ・弁体 ・弁座	・熱衝撃	き裂の発生→増加・成長→はく離	・目視検査 ・PT検査 ・UT検査
	・機械的衝撃	傷、曲り、き裂の発生 →漏れ	・目視検査 ・曲り検査
	・異物の噛み込み ・異物の吹付け	噛み込み傷の発生→漏れ 面荒れの発生→漏れ	・目視検査 ・PT検査
	・摺合せ磨減 ・流体浸食 ・流体腐食	盛金厚さの減少→漏れ エロージョンの発生→漏れ 腐食の発生→漏れ	・寸法検査 ・目視検査 ・寸法検査
③作動に係わる部品 ・弁軸 ・プッシュ類	・摺動摩擦 ・流体摺動摩擦	隙間の増大→振動・騒音 径の細り・拡大→振動	・目視検査 ・寸法検査
	・異物の噛み込み ・接触・隙間腐食	傷の発生→操作力の増大 腐食発生→漏れ	・目視検査
④外部漏洩防止部品 ・グランドパッキン ・ガスケット ・シールリング	・熱劣化 ・摺動摩擦 ・熱サイクル劣化	充填材の流出→漏れ シール面圧の低下→漏れ 熱減量→シール面圧の低下 →漏れ	（消耗品として定期的 に交換）
	⑤駆動機構 〔例〕 ・電動操作機	・機械的劣化 ・電氣的劣化	摩耗→振動・騒音 作動接点の摩耗→作動不良 絶縁抵抗の低下

### 3. 経年劣化調査内容

弁の場合は耐圧部の材料上の劣化に加えて、シート面盛金部、作動に係わる部品、外部漏洩防止部品および駆動機構に種々の劣化要因が加わることになる。

表4は弁の主な劣化要因、劣化の進行形態と事象および調査方法を劣化対象部位に対してまとめたものである。表5は岡野バルブにおける安全弁の経年劣化調査内容を例示したもので、図1は目視検査以外についてその部位と調査方法を図示したものである。

### 4. 経年劣化調査における特徴的な事例と評価方法

#### 4-1 組織検査

写真1～3は、岡野バルブ製500A主蒸気止め弁の弁箱材料2.5Cr-1Mo厚肉铸鋼品（ASTM A217 WC9）の経時変化を示す組織写真である。写真1はWC9の焼ならし後焼もどしをした厚肉铸鋼未使用品の標準組織で、フェライトのマトリックス（白地）の中にパーライト（黒い部分）が分布した組織である。

写真2はこの主蒸気止め弁が蒸気条件176kgf/cm<sup>2</sup>×569℃で運転され、累積運転126,770時間経過した組織（スンプ）で、写真2-1が弁箱外部（温度が低い所）、写真2-2が弁箱内部（温度が高い所）の組織である。これらの組織を写真1の標準組織と比較すると、弁箱

# バルブの損傷事例集

表3 ボイラ設備定期点検要領 (弁関係抜粋)

(1) ボイラー				
機器名	周期及び分解程度	点検内容	作業要領	備考
d. 安全弁 (汽水側、過熱器、再熱器、圧力逃し装置、起動用パイパス弁)	1. A点検時には分解点検し、組立後作動試験を行う。 2. B点検時には作動試験を行う。 3. C点検時には上記2に同じ。 4. 初回定期点検時にはA点検を行う。 5. 長期使用期定期点検時には、下記1に同じ。 (1) A点検時には上記1に同じ。 (2) B点検時には上記2に同じ。 (3) C点検時には上記3に同じ。	1. 分解時 (1)異物の混入、弁体及び弁座の損傷 (2)弁箱、弁取付管座の溶接部の亀裂 (3)弁軸のわん曲、先端の焼付き、摩耗、間隙 (4)摺動部、調整リングの焼付き及び摩耗、間隙 (5)パネ及び調整ネジ、ボルトの異常 2. 清掃手入れ後 (1)異物の混入、弁体及び弁座の損傷、溶着金属の亀裂の有無 (2)弁箱の欠陥、溶接部の亀裂 (3)弁軸のわん曲、先端の焼付き、摩耗、間隙 (4)摺動部、調整リングの摩耗、間隙 (5)パネ及び調整ネジ、ボルトの異常 (6)サイレンサーの腐食損傷の状況 3. 組立中及び完了後 (1)内部に異物、遺留物のないことを確認する。 (2)リフト、間隙を確認する。 (3)ボイラーの起動時、各弁の吹出し圧力、吹止り圧力、吹下り圧力等の作動試験を行い、規定の圧力で正確に作動することを確認する。	1. 分解 (1)分解して各部の点検をする。分解の際は、調整リング等の位置に合マークを付けておく。 (2)セット寸法を記録する。 2. 清掃手入れ (1)弁箱等はウエス及び洗剤で拭き、圧縮空気で清掃する。 (2)弁体、弁座は必要に応じて液体浸透探傷試験及び摺合せ手入れを行う。 (3)摺合せ後、弁体、弁座等の余裕代を確認する。 (4)弁座、弁箱のドレン抜き穴、調整リング等は入念に清掃する。 (5)排気管の雨水抜き穴等の清掃を行う。 3. 組立、復旧 (1)分解時のセット寸法及び分解時の調整リング等の位置に合わせて組立てる。 (2)弁箱の先端とディスクの間及び下部のパネ受けと吹出し圧力調整ネジの間に潤滑油を塗る。 (3)シート面に傷をつけないように特に注意する。	1. 運用事項及び注意事項 (1)初回定期点検以降のB点検及びC点検の場合は、定期点検の停止前に作動試験を行い、作動不良の場合は分解して点検する。 (2)シート面の傾き及び各部品の偏心の有無については、特に入念に観察点検する。 (3)弁箱、パネは、必要に応じ磁粉探傷、液体浸透探傷試験等で検査することが望ましい。 (4)安全弁を分解した場合は、作動試験を行う。作動試験は、油圧ジャッキにより行うことができる。 2. 経年劣化及び参考事例 (1)安全弁の作動不良原因は、シート面の傾きまたは減耗、組立寸法の異常、摺動部や調整リングの間の異常、シート気密面の損傷の場合の他、排気側配管不良によることがある。 (2)漏れの発生では熱衝撃による弁、弁座シート面の溶着状の亀裂の発生、吹出し時のスケール異物の吹付けによる気密面の損傷による例が多い。 (3)経年劣化により作動不良となった場合は、部品の交換修理または弁の取替えを要する。 (4)弁箱、弁体及び弁座は、熱応力による低サイクル疲労により亀裂が発生する場合がある。
e. 主要弁 (弁体、弁座の摩耗が著しいもの)	1. A点検時には分解点検を行う。 2. B点検時には上記1に同じ。 3. C点検時には上記1に同じ。 4. 初回定期点検時にはA点検を行う。 5. 長期使用期定期点検時には下記を行う。 (1)A点検時には上記1に同じ。 (2)B点検時には上記2に同じ。 (3)C点検時には上記3に同じ。	1. 分解時 (1)弁体及び弁箱内の付着物、たい積物の状況 (2)パッキン、シールリングの損傷 (3)ボルト、ナット類の異常 (4)駆動機構の軸、ギヤの潤滑の良否及びギヤボックスの汚損 (5)潤滑油の劣化 (6)アスパーヒーターの点検 a. ノズル、ミキシングチャンバーの亀裂、腐食、浸食、破損の有無及び溶接部の異常 b. ライナー、支え板の損傷 c. 復水交換型のものについては、エレメント内外面の亀裂、腐食、浸食の有無 2. 清掃手入れ後 (1)配管内部、溶接部の異常 (2)弁箱の亀裂、浸食時の損傷 (3)弁体、弁座の損傷及び当り面の状況 (4)弁軸の亀裂、わん曲、摩耗、腐食の状況 (5)ガイド部の接触 (6)パッキン、シールリング類、フランジ面の損傷 (7)ボルト、ナット類の異常 (8)駆動機構の軸、ギヤ、軸受の当り、摩耗の状況 (9)空気圧操作機構との接続部の異常の有無 3. 組立中及び完了後 (1)内部の異物、遺留物の有無を確認 (2)組立状態の異常有無の確認 (3)手動操作等の開閉テスト、ストロークと固さ状況 (4)電動駆動弁の開閉テスト リミットスイッチ、トルクスイッチの動作確認 開閉時間の測定 (記録) (5)空気圧作動弁の開閉テスト 操作圧と弁リフト (記録) (6)水圧テスト時に漏洩その他の異常有無を確認	1. 分解 (1)分解して各部を点検する。必要に応じて合マークを付ける。 (2)弁体、弁座、ボルト等を傷つけないよう注意する。 (3)弁の分解時に配管内に異物がはいるないように適当な閉止板または栓を行う。 2. 清掃手入れ (1)弁箱等はウエス及び洗剤で拭き、圧縮空気、真空掃除機で清掃する。 (2)弁体、弁座は必要に応じて、摺合せ手入れを行い、当りどりをして機能の良否を確認する。 (3)駆動機構の軸、軸受及びギヤ、ギヤボックスは洗剤で洗浄し、耐油スポンジ等で清掃する。 (4)パッキン、シールリングの当りどりを手入れを行う。 (5)ボルト、ナットを手入れする。 (6)アスパーヒータープレノズルの点検手入れ、補修調整を行う。 3. 組立、復旧 (1)異物のかみ込みに注意し、入念に組立てる。 (2)弁内部の通り止めロックを確認する。 (3)高温ボルトは、規定の伸びを与えるように締付ける。 (4)グランドパッキンは、新品と取替える。 (5)電動、空気作動等操作部の組立て、機能の確認を行う。 (6)開閉テストを行う。	1. 運用事項及び注意事項 (1)停止前に全系統の弁類を外観点検するとともに、その機能の良否を確認し、漏洩その他の異常の有無を点検して分解点検対象弁を決める。 (2)主蒸気止め弁その他本体主要弁類については、弁体、弁座の摩耗の著しいと思われるものは定検毎に分解点検を行う。 弁箱外面の点検及び駆動機構の分解は、4～6年に1回を目途に必要な都度行う。 なお、分解点検手入れは、下記の着眼点による。 a. 弁の漏れにより停止に至るもの。 b. 運転中機器を修理するときに閉止する必要のある弁。 c. 弁の漏れにより重大事故を起こす可能性のあるもの。 d. 使用頻度が多く、弁体、弁軸、グランドパッキン等の損傷のおそれがあるもの。 e. 過去の実績から漏れの頻度の多い弁。 f. 過去に亀裂などの異常故障があり、その状態の再発が懸念される弁。 (3)主管系の大口径弁は、2～4年に1回または付属する機器の点検時に行う。 その他本体付着弁で定期点検前に漏れその他各部を点検し、異常のない弁については4～6年に1回の周期で計画的に分解点検することが望ましい。 (4)アスパーヒータープレノズル及びスプレー水チャンパー等は、4～8年に1回程度必要に応じて分解点検する。分解点検する場合は、予備品や溶接検査申請の必要の有無を予め検討する必要がある。 (5)亀裂の点検には、内面は液体浸透探傷試験、外面は磁粉探傷試験を用いて行い、必要に応じ放射線透過試験を併用する。 (6)弁の外側は、必要時または保温補修時に点検する。 2. 経年劣化及び参考事例 (1)弁体、弁座シート部のエロージョンによる漏洩の事例が多く、また溶着金属の熱衝撃による亀裂発生例もある。 (2)弁箱、弁体及び弁座は、熱応力による低サイクル疲労により亀裂が発生する。 (3)応力集中や振動による弁軸の折損、肉厚不均衡における亀裂の発生、弁箱の表面亀裂、弁軸の摩耗、損傷や弁体破損の事例もある。

外部でもパナート組織が拡散し、粒状化が起こっており(黒い点々の所)、弁箱内部ではこの現象が一層顕著に現れている。

写真3は写真2より更に28,170時間を経過した累積運転時間が154,940時間における組織で、写真3-1が弁箱外部、写真3-2が弁箱内部の組織である。こ

表5 安全弁の経年劣化調査内容

項目	調査事項	調査箇所	調査方法	記録
1. 外観調査 (分解前)	(1) 破損部品の確認	・キャップ、フォーレバー、鉄板等の装着部品	・目視検査	寸法記録
	(2) 排気管干渉の有無	・排気管とサイレンサー部	・寸法検査	
	(3) ドレン管の状態	・ドレン管による安全弁の拘束状態	・目視検査	
	(4) その他	・発錆状態	・目視検査	
2. 胴部材の調査	A. 弁箱	・弁箱(高温部、低温部)	・顕微鏡組織試験	組織写真
			・硬さ試験	測定記録
			・目視検査	写真撮影
			・PT試験	写真撮影
	(2) 外観検査	・内部可視範囲 ・外表面	・目視検査	写真撮影
			・寸法検査	測定記録
			・PT試験	写真撮影
			・寸法検査	測定記録
	(3) 表面検査	・弁箱と弁座の接合部	・目視検査	写真撮影
			・寸法検査	測定記録
			・PT試験	写真撮影
			・寸法検査	測定記録
(4) 寸法検査	・ガイド嵌合部	・目視検査	写真撮影	
		・寸法検査	測定記録	
		・PT試験	写真撮影	
		・寸法検査	測定記録	
B. 弁座	(1) 外観検査	・流路内面	・PT試験	写真撮影 (ファイバースコープ撮影)
			・目視検査	写真撮影
			・目視検査	写真撮影
			・PT試験	写真撮影
	(2) 表面検査	・シート面	・目視検査	写真撮影
			・寸法検査	測定記録
			・寸法検査	測定記録
			・寸法検査	測定記録
(3) 寸法検査	・シート面の傾き ・座金の質量 ・弁座部(シート面内外径、のぞ部の径)	・目視検査	写真撮影	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	
C. 弁体	(1) 外観検査	・シート面 ・ディスクセンター	・目視検査	写真撮影
			・目視検査	写真撮影
			・PT試験	写真撮影
			・PT試験	写真撮影
(2) 表面検査	・シート面	・目視検査	写真撮影	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	
(3) 寸法検査	・弁体部(シート面内外径、その他) ・サーマルディスクの間隔	・目視検査	写真撮影	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	
		・寸法検査	測定記録	

項目	調査事項	調査箇所	調査方法	記録	
3. 作動内性に係る部品の調査	D. 弁 軸	(1) 外観検査	・先端部	・目視検査 写真撮影	
			・摺動部	・目視検査 写真撮影	
			・クロスピン取付部	・目視検査 写真撮影	
		(2) 表面検査	・先端部	・PT試験	写真撮影
				・真直度	測定記録
				・摺動部の径	寸法検査
	E. ガイド	(1) 外観検査	・弁箱との嵌合部	・目視検査 写真撮影	
			・ディスクガイド部	・目視検査 写真撮影	
	(2) 寸法検査	・弁箱との嵌合部	・寸法検査	測定記録	
			・ディスクガイド部	・寸法検査	
	F. ガイドキャップ	(1) 外観検査	・背圧逃がし口部	・目視検査 写真撮影	
G. ネッキッブッシュ	(1) 外観検査	・内径部	・目視検査 写真撮影		
		・内径部	・寸法検査 測定記録		
H. スプリング	(1) 外観検査	・外表面	・目視検査 写真撮影		
		・自由高さ	・硬さ試験 測定記録		
(2) 寸法検査	・自由高さ	・寸法検査	測定記録		
I. スプリングシート	(1) 外観検査	・スプリングとの当り面	・目視検査 写真撮影		
		・ステップカラーとの当り面	・目視検査 写真撮影		
J. アジャスティングスクリュー	(1) 外観検査	・内径部	・目視検査 写真撮影		
		・内径部	・寸法検査 測定記録		
K. その他の部品 (アッパーリング、ローアリング、ステップカラー)	(1) 外観検査	・全体	・目視検査 写真撮影		

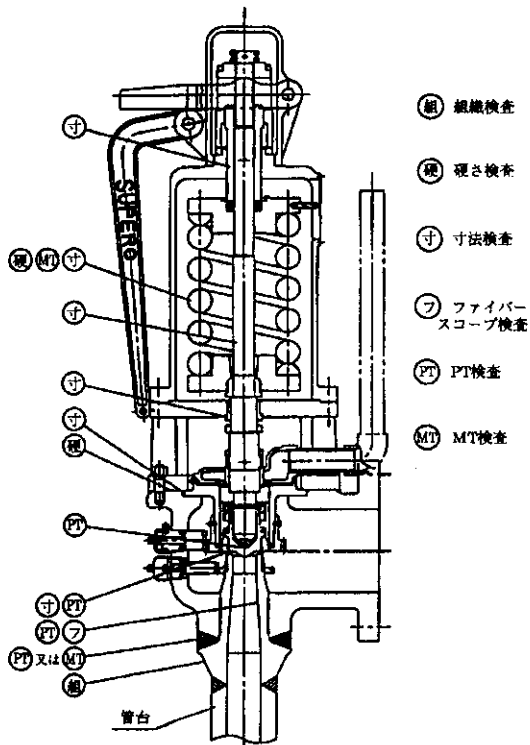


図1 安全弁の経年劣化調査方法

これらの組織を写真2の組織と比較すると、弁箱外部ではパーライト組織の粒状化が一段と進み、結晶の粒界に炭化物が析出している。弁箱内部では結晶粒内の炭化物がフェライト中に固溶されて、結晶の粒界が線として見えるようになっている。

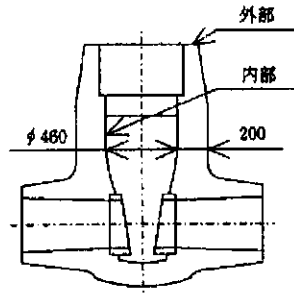
このように弁箱組織は、高温中での長期間の使用によって大きく変化しているが、この鋼種が高クリーブ延性材料であるため、低クリーブ延性材料に見られるようなポイドは発生せず、顕微鏡組織検査から材料の余寿命を推定することは困難である。

4-2 累積運転時間に対する余寿命評価

高温高圧弁に使用される1Cr-0.5Mo鋼または2.5Cr-1Mo鋼が高温クリーブ域で長時間使用されると、金属組織上からはパーライトがフェライトと炭化物に分かれ、結晶粒界に炭化物が凝縮してくる。しかしながら、前述したようにこの鋼種が高クリーブ延性材料であるため、顕微鏡組織検査から材料の余寿命を推定することは難しい。したがって、弁箱材料の余寿命の推定は、同一鋼種・同一熱処理材のマスターラプチャーカーブをもとに使用時の発生応力から推定している。

図2の①は2.5Cr-1Mo鋼品 (ASTM A217 WC9、

# バルブの損傷事例集



口径：500A  
弁箱材料：ASTM A217 WC9（焼ならし後焼もどし）  
設計圧力×温度：194kgf/cm<sup>2</sup>×574℃

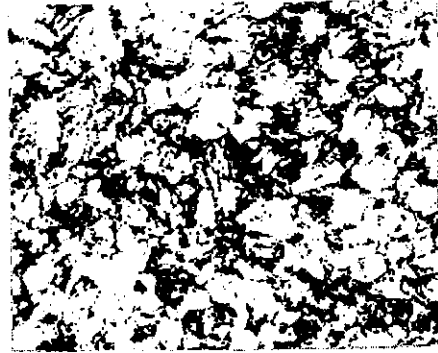


写真1 WC9の標準組織 100μm  
(焼ならし後焼もどし)

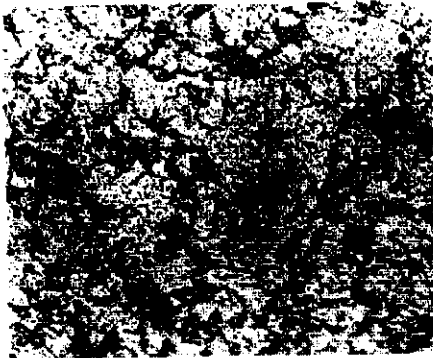


写真2-1 外部 100μm



写真3-1 外部 50μm

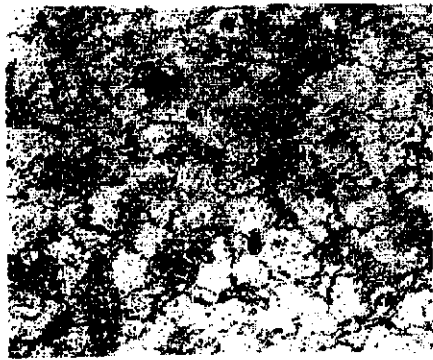


写真2-2 内部 100μm

弁箱材料：ASTM A217 WC9（焼ならし後焼もどし）  
使用圧力×温度：176kgf/cm<sup>2</sup>×569℃  
累積運転時間：128,770Hr  
起動・停止回数：——

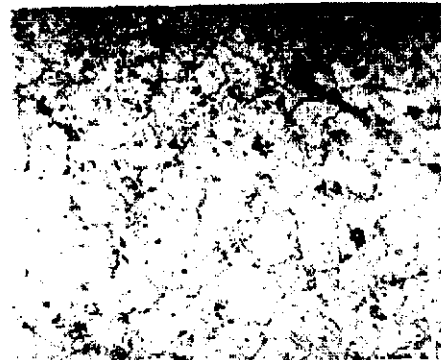


写真3-2 内部 50μm

弁箱材料：ASTM A217 WC9（焼ならし後焼もどし）  
使用圧力×温度：176kgf/cm<sup>2</sup>×569℃  
累積運転時間：154,840Hr  
起動・停止回数：124回

JIS SCPH32相当)の岡野バルブにおけるクリープ破断試験データ(平均値)にもとづいたマスターカーブである。図2の②は、ASME SA217 WC9の許容応力がクリープ域については“100,000時間でクリープ破断が生じる応力の平均値の0.6倍”がベースになっているとして、クリープ破断応力の平均値を逆算したも

のである。

ここで、①と②の曲線が近似していることおよび①の曲線の方が下側にあることから、岡野バルブではこのマスターカーブを0.6倍した③の曲線をWC9（JIS SCPH32）の寿命曲線として余寿命評価を行っている。

さて、前述の500A主蒸気止め弁の弁箱胴部の運転

- ①：岡野バルブのクリープ破断試験（平均値）にもとづいたマスターカーブ
- ②：ASME SA217 WC9の許容応力から逆算した100,000時間で破断が生じる応力の平均値
- ③：①の応力を0.6倍した値で岡野バルブの“WC9の寿命曲線”

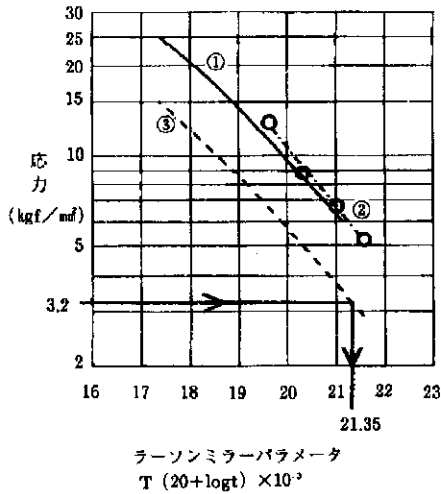


図2 WC9の設計寿命線図（焼ならし後焼もどし鋼製品）

圧力における円周応力は、内圧を受ける円筒の弾性応力の式（機械工学便覧 材料力学）より、

$$\sigma_{\theta} = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \cdot \frac{P}{100} \quad \dots(1)$$

$$= 3.2 \text{ kgf/cm}^2$$

ここに、

$$K^2 = (D/d)^2 = 3.5$$

$$D = 860 \text{ mm}$$

$$d = 460 \text{ mm}$$

$$P = 176 \text{ kgf/cm}^2$$

運転状態における応力3.2kgf/cm<sup>2</sup>に対するラーソンミラーパラメータを図2より求め、寿命時間を計算すると、

$$T (20 + \log t) \times 10^3 = 21.35 \quad \dots(2)$$

$$t = 227,140 \text{ hr}$$

ここに、

$$T = 569 + 273 = 842^{\circ}\text{K}$$

この止め弁の累積運転時間が154,940hrであり、

$$\text{余寿命時間} = 227,140 - 154,940 = 72,200 \text{ hr}$$

と推定される。

#### 4-3 起動・停止回数に対する寿命評価

主蒸気止め弁のような厚肉鋼製弁には、起動・停止の過渡状態における熱疲労（低サイクル疲労）が加わ

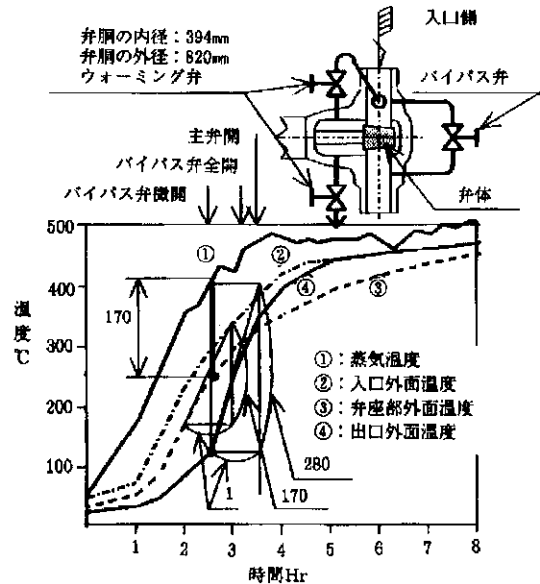


図3 400A主蒸気止め弁の発電所における昇温データ

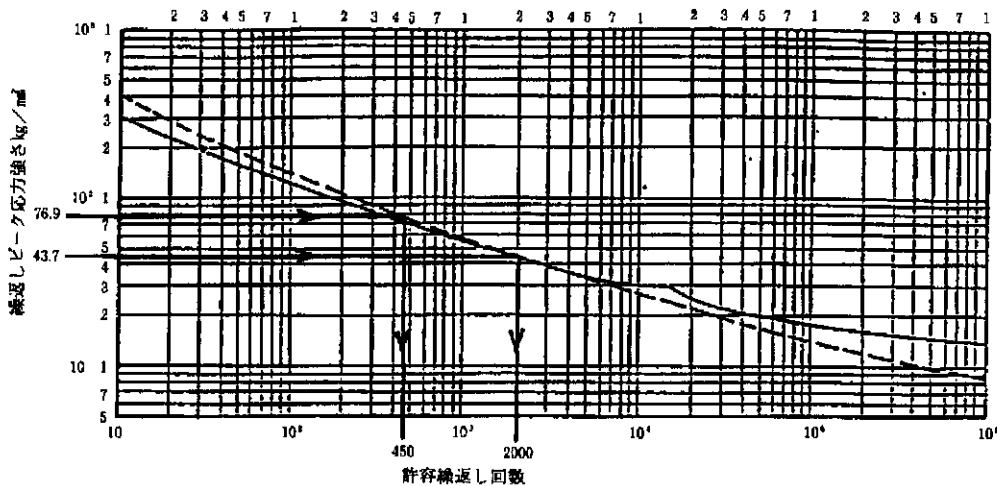
ることになる。この熱疲労は熱応力（熱ひずみ）の大きさと繰返し回数によって起こり、き裂の発生・成長という形態をとる。したがって、起動・停止回数に対する余寿命は、その過渡状態における熱応力を計算し、その値に対応する許容繰返し回数を設計疲れ線図から求めて評価することになる。

図3は400A主蒸気止め弁の実際の運転における昇温テストデータで、弁箱の外表面に熱電対を取付けて計測したものである。昇温開始から途中まで主弁およびバイパス弁は全閉しているが、弁箱は入口蒸気を図示した口径25Aウォーミング弁を通して暖気した。

この図より、②入口外面の温度変化率は①蒸気温度変化率とほぼ同一で、③弁座部外面の温度変化も少し遅れて同様な温度変化率を示している。温度変化率は250℃以下で比較的大きく、250℃を超えるとやや小さくなっている。したがって、入口から胴部をとおして最大の熱応力が発生する条件は250℃以下としてよく、弁箱の温度変化率を蒸気温度変化率と同一にしておけば、熱応力は十分安全側に評価したことになる。ただし、このデータのように出口外面温度が130℃と低い状態でバイパス弁を開いた場合、その直後の④出口外面の温度変化率は蒸気温度変化率より大きくなっているため、このような場合は熱応力が高くなる。

熱応力は、温度上昇のとき（起動時）内周が圧縮、外周が引張りとなり、温度降下のときは（停止時）その逆となる。応力の絶対値は、常に内周が最大で、つ

別図第1 設計疲れ線図(炭素鋼、低合金鋼及び高張力鋼)



(備考)

- 1 点線は、材料の最小引張強さが56.2kg/mm<sup>2</sup>以下のもに使用する。
- 2 実線は、材料の最小引張強さが80.9kg/mm<sup>2</sup>以上91.3kg/mm<sup>2</sup>未満のものに使用する。
- 3 材料の最小引張強さが56.2kg/mm<sup>2</sup>を超え80.9kg/mm<sup>2</sup>未満のものにあつては、比例法によつて計算する。
- 4 この図における繰返しピーク応力強さは、疲れ解析による繰返しピーク応力強さに  $2.11 \times 10^4$  を乗じて得た値とする。  
材料の使用温度における縦弾性係数
- 5 温度が375度を超える場合は、この図を使用できない。

図4 設計疲れ線図

ぎに外周が大きくなる。

この熱応力は、簡単な形状の場合(参考文献3参照)、

$$\sigma_{\theta} = \nu \phi \beta S^2 \quad \dots(3)$$

ここに、

$\sigma_{\theta}$  : 円周応力 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\nu$  : 壁面の温度変化率 (°C/min)

$\phi$  : 材料係数 (kg・min/°C・mm<sup>4</sup>)

低合金炭素鋼の場合、

300°Cのとき  $8.1 \times 10^{-4}$

425°Cのとき  $9.3 \times 10^{-4}$

570°Cのとき  $11.2 \times 10^{-4}$

$\beta$  : 形状係数

円筒形の場合、外径/内径の比が

1.7のとき0.425

2.0のとき0.473

S : 肉厚 (mm)

図3においてバイパス弁を微開した時点の③弁座部外面の最大温度変化率は、170°C/hr (2.83°C/min)である。前述の500A主蒸気止め弁がこの変化率で変化したと仮定した場合の熱応力は、

$$\sigma_{\theta} = -38.9 \text{ kgf/mm}^2$$

ここに、

$$\phi = 7.6 \times 10^{-4}$$

$$\beta = 0.452$$

また、250°Cにおける①蒸気温度を弁内面温度とし、③弁座部外面温度との差による熱応力を厚肉円筒の内外面温度差による熱応力の式(機械工学便覧 材料力学)より計算すると、

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} (T_2 - T_1) \beta_1 \quad \dots(4)$$

$$= -41 \text{ kgf/mm}^2$$

ここに、

$\alpha$  : 熱膨張係数 =  $14.2 \times 10^{-6}$  mm/mm°C

E : 縦弾性係数 =  $1.98 \times 10^4$  kgf/mm<sup>2</sup>

$\nu$  : ポアソン比 = 0.3

$T_2 - T_1$  : 外面と内面の温度差 = -170°C

$\beta_1$  : 円筒の熱応力の係数 = 1.2

上記の計算で熱応力の高い方の  $\sigma_{\theta} = -41 \text{ kgf/mm}^2$  に対する許容繰返し回数を図4の設計疲れ線図(原子力設備の技術基準の別図第1)より求める。この場合、応力補正を次式によつて行う。

$$\sigma_{\theta}' = \frac{2.11 \times 10^4}{250^\circ\text{Cにおける縦弾性係数}} \times -41$$

$$= -43.7 \text{ kgf/mm}^2$$

この応力に対する許容繰返し回数は、

$$N=2,000 \text{ 回}$$

これに対して実際の起動・停止における蒸気温度の変化率は、 $60^\circ\text{C/hr}$  ( $1^\circ\text{C/min}$ ) 程度であることから、起動・停止回数が弁の寿命に影響することはないといえる。

しかしながら、バイパス弁を微開した直後から出口外面温度が急激に立ち上がることから、この弁の繰返しピーク応力の評価としてはバイパス弁の微開直後の温度変化率を採用すべきである。バイパス弁の微開直後の温度変化率は、 $280^\circ\text{C/hr}$  ( $4.67^\circ\text{C/min}$ ) であり、そのときの外面と内面の最大温度差は $280^\circ\text{C}$ である。

そこで、(3)式の $\sigma \theta$ を求めると、

$$\sigma \theta = -66.7 \text{ kgf/mm}^2$$

ここに、

$$\phi = 7.9 \times 10^{-4}$$

つぎに4)式の $\sigma \theta$ を求めると、

$$\sigma \theta = -65.9 \text{ kgf/mm}^2$$

ここに、

$$\alpha = 15.0 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$$

$$E = 1.83 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

$$T_2 - T_1 = -280^\circ\text{C}$$

上記の計算で熱応力の高い方の $\sigma \theta = -66.7 \text{ kgf/mm}^2$ に対する許容繰返し回数を図4より求めるため、応力補正を行うと、

$$\begin{aligned} \sigma \theta' &= \frac{2.11 \times 10^4}{1.83 \times 10^4} \times -66.7 \\ &= -76.9 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned}$$

この応力に対する許容繰返し回数は、

$$N=450 \text{ 回}$$

となり、上述したような過酷な熱サイクルがかかるような高温蒸気用厚肉大口径弁の起動・停止の許容回数、450回程度と考えられる。

なお、図4の設計疲れ線図は $375^\circ\text{C}$ 以下で使用することになっているが、この検討における温度が $400^\circ\text{C}$ と近似していることから、許容繰返し回数はこの疲れ線図によった。

#### 4-4 溶接部の亀裂

高温高压大口径弁の溶接部としては弁体および弁座のシート面へのステライト肉盛り溶接部、弁箱と弁座の溶接部ならびに弁箱に接続されるバイパス管またはドレン管との溶接部がある。これらの溶接部のなかで

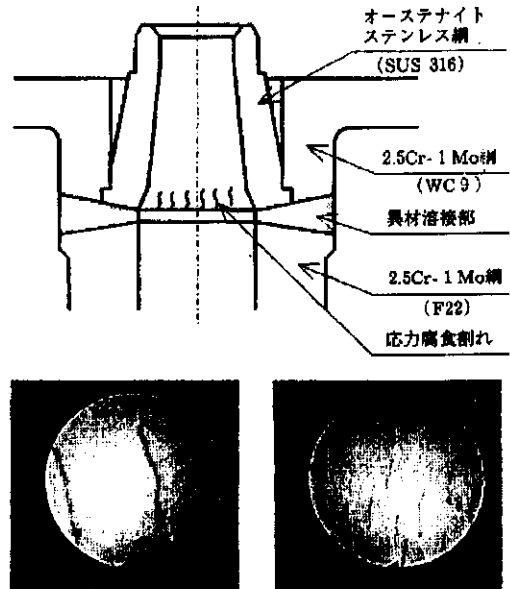


図5 異材溶接部のき裂

き裂が最も多い弁体または弁座のステライト肉盛り溶接部は、その原因が溶接施工上の不備または熱衝撃による場合が多く、き裂は初回定期点検時に発見される場合が多く、経年劣化調査のテーマからは除外する。

経年劣化調査で発見された溶接部のき裂の事例を図5に示す。この欠陥は図示したような構造の異材溶接部に発生しており、溶接外周面にはPT検査で欠陥がなかったが、上部からファイバースコープを入れて検査した結果発見されたものである。

このき裂は溶接部に隣接したSUS 316のオーステナイトステンレス鋼側に発生していることから、溶接による熱影響部が鋭敏化され、14年間にわたる使用中の熱応力との重量により、応力腐食割れにつながったものと(鋭敏化された部分では結晶粒界にCr炭化物が析出するため、その周辺でCr濃度が低下し、耐食性が低下する)推定している。

溶接部にはき裂が発生しやすく、特に異材溶接部については、注意してき裂の調査をする必要がある。

## 5. 経年劣化調査の一般的な注意点

### 5-1 組織検査の最適位置

組織検査については、調査弁の未使用組織が分からない場合(調査弁が輸入弁のとき)を含み、調査弁において温度が最も高かった部位と最も低かった部位の2カ所を検査し、比較評価する必要がある。また、組織検査位置が錆肌の場合は、少なくとも1mm研削して



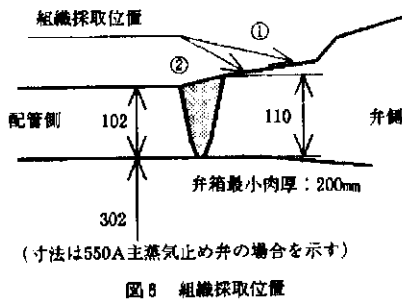


図6 組織採取位置

組織検査を行う必要がある。

調査弁で温度が最も高かった部位としては弁箱内面であるが、組織検査のための研磨作業が困難な場合がある。流体温度に十分到達した部位としては、弁と配管との溶接部が最も適切と考えている。すなわち、弁の溶接開先部（非破壊検査を実施）は図6に示すように配管肉厚に向かってなだらかな勾配となっているため、弁箱肉厚に比べて薄く、運転による熱履歴を十分に受けているので、溶接による熱影響部と熱影響部を外れた二つの位置について組織検査を行うのがもっとも適切と考えている。

### 5-2 寿命線の信頼度の向上

累積運転時間に対する余寿命評価については、図2の③寿命曲線の信頼度を上げる必要がある。その方法としては、図7に示すように長時間（10万時間以上）使用弁から試験片を採取し、クリーブ破断試験を行って②テストデータによる回帰線を求め、それに対してある余裕のもとに③99%信頼度下限を設定することになる。

なお、テストデータによる回帰線の精度を上げるためには、試験条件（試験温度）を増やした方がよく、破断後のテストピースについても組織検査を行い、余寿命診断調査において検査した組織と対比できる基本データとすべきと考えている。

### 5-3 累積起動回数に対する寿命評価

累積起動回数に対する寿命については、4-3項で述べたように通常の起動・停止による温度変化に対しては影響ないものと考えている。しかしながら、主蒸気止め弁のような蒸気用厚肉大口径については、起動・停止時に大きな温度変化率が生じる場合があり、適切な評価方法を採用するとともに代表弁による温度変化の測定が必要な場合がある。

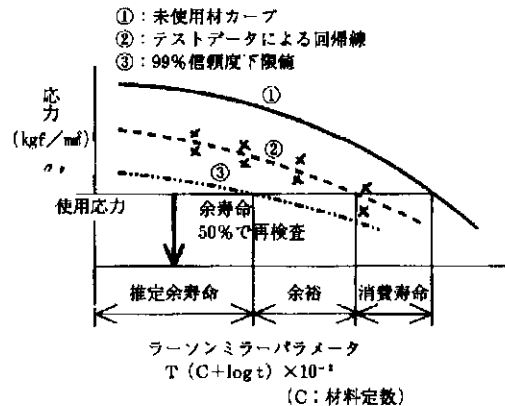


図7 使用材のテストデータによる余寿命線の確立

なお、経年劣化調査弁については、弁箱内面のコーナー部についてPT検査を行い、き裂の発生の有無を確認の方が実際的と考えている。

## 6. むすび

火力発電所のボイラ設備およびタービン設備のなかで重要機器に分類される安全弁および主要弁に対する経年劣化調査は、経年火力発電所の有効利用・長寿命化を目的として、今後ますます増加するものと考えられる。

また、それらの弁に対する余寿命診断については、電気事業法第47条および第53条に準じて（弁は余寿命診断の対象になっていないが、過酷な熱履歴を受けるため）行われるようになるものと考えられる。したがって、バルブメーカーとしては、経年劣化調査の高精度化に加えて評価技術の確立が必要である。

本稿では、岡野バルブにおける経年劣化調査への取り組みと余寿命診断に対する考え方について説明した。関係各位のご参考にできれば幸甚である。

#### 〈参考文献〉

- (1) 火原協会 技術指針：「事業用火力発電所の定期点検指針」 TNS-G1001 (1987)
- (2) 火原協会 講座18：「火力設備の余寿命診断と耐力向上対策」 (1993)
- (3) 新田明人：「経年火力発電設備の余寿命評価技術の現状と動向 診断と耐力向上対策」 圧力技術 VOL.26 No.6 (1988)
- (4) 山成 清：「火力発電所の高圧高温弁の問題」 火力発電 (1968, 4)
- (5) 馬本秀雄：「発電用ボイラの余寿命診断技術」 配管技術 (1990, 3)