エロージョン・コロージョンのテクニカルモジュール

酒井潤一* 伊藤 慶* 木原重光**

* 早稲田大学 基幹理工学部

** 株式会社ベストマテリア

Technical Module of Erosion-corrosion

Jun'ichi Sakai*, Kei Ito* and Shigemitsu Kihara**

* Waseda University

** Best Materia Co., Ltd.

RBM (Risk Based Maintenance) is a promising method of maintenance for aged plants. The Risk is defined as the product of likelihood and consequence of failure. The likelihood of failure is evaluated by prediction of residual life or sensitivity of failure and degradation. Technical module is a tool to evaluate the likelihood of failure. In this paper development of technical module for erosion-corrosion which is one of the most likely mechanism of failure in aged plants is introduced.

Key words : Risk Based Maintenance (RBM), technical module, erosion-corrosion, residual life, likelihood of failure

1. はじめに

昨今、大きな産業事故の発生など、我が国の産業設備の安全に関する信頼が揺らいでいる。図 1¹⁾ に示す高圧ガス保安法にかかわる過去 40 年間の年別事故件数推移は、近年事故件数が増加傾向にあることを示している。すでに成熟社会となりつつある我が国は、膨大な社会・産業資産としての構造物を有しており、これらの構造物を大切に維持、活用することが重要な時代になっていると考えられる。

最近の事故の原因として、構造物の老朽化、保全関係技術者の減少、技術伝承の不備、時代遅れの規制などの問題が指摘されている。一方で、国際競争の激化の中で、すべての製造業においてコストダウンは必須である。また、社会インフラにおいても老朽化した構造物において安全を損なうことなく、低コストで維持することが求められている。産業のみならず社会インフラを含めた構造物維持のための合理的保全の重要性を認識しなければならぬといえる。産業インフラの主構成材料である金属材料では、長い歴史の中で事故の原因となる破損機構はほとんど解明されてきたが、残念ながら近年の事故は過去に経験した事象の繰返しである。過去の研究成果を広く誰でもが容易に使える手段にしていくことが必要である。2004 年 8 月に作業員 5 人が死亡した美浜原子力発電所の高温蒸気噴出事故²⁾の原因として、一般にも知られるようになったエロージョン・コロージョンも古くから経験している損傷機構であり、何らかの方法で予知できなかったかと悔やまれる。

一方、近年の規制緩和によって、各種プラントにおける定期検査が法定から自主検査に移行しつつあり、効率

的な自主基準が必要となってきた。2005 年 4 月から高圧ガス製造設備の保安検査方法に関する制度が改正され、従来の省令（技術基準）による保安検査から、事業者が主体的に実施する定期自主検査に重点が移る^{3), 4)}。検査の技術基準は省令から民間規格（例えば 2007 年度に制定が見込まれる高圧ガス保安協会規格など）によることになり、時間計画型（Time Based）から状態基準型（Condition Based）検査が主体となると考えられる。懸念される損傷の度合の評価を基準にして、各部位に対するメンテナンスの重要度、緊急度、優先順位を決めてメンテナンスを行う方法が、これらのニーズに合致するものである。

そのような中で、欧米から始まったリスク（破損の起こり易さ×破損による被害の大きさ）を基準にした維持管理手法である RBI/RBM（リスクベースインスペクション/メンテナンス）が今後のメンテナンス手法の主流となると考えられている⁵⁾。RBI/RBM 手法は、リスクの大きさを指標に保全の優先順位を付けることで、無駄な検査を省略し、リスクの大きいところに優先的に投資がなされるという合理的な手法である。RBI/RBM において最も重要なことはリスク評価の信頼性であり、すべてのメ

図 1 高圧ガス保安法関係事故件数の推移

* 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 (3-4-1, Ookubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan)

** 〒190-0001 東京都立川市若葉町 2-2-1 (2-2-1, Wakaba-cho, Tachikawa-city, Tokyo, 169-0001 Japan)

メンテナンス手法と同様に損傷の起こり易さを破損確率、余寿命あるいは発生感受性などとして算定することである。

本報告では、RBI/RBMにおける破損の起こり易さ算定のツールであるテクニカルモジュールをエロージョン・コロージョンを対象に開発した成果を中心に述べる。このテクニカルモジュールは、(財)エンジニアリング振興協会「産業・社会資本構造物の長寿命化に向けた高度メンテナンスシステムの開発」プロジェクトの開発成果⁶⁾である。

2. リスクベースインスペクション/メンテナンス (RBI/RBM)

2.1 RBI/RBM の概要

RBI/RBM は、リスクを基準にメンテナンス（検査、補修、改造、更新など）を行う手法で、リスクの高いところに手厚いメンテナンスを実施して、リスクを低減し、全体のリスクレベルが許容範囲以下になるようにメンテナンスが計画される。

RBI/RBM においてリスクは「故障、破損の起こり易さ」と「起きた場合の被害の大きさ」の積として表現される。米国石油学会 (API)^{7), 8)}、米国機械学会 (ASME)^{9), 10)} が RBI についてのガイドラインを示しているが、その中でリスクの半定量的表現方法として、図 2 に示すような縦軸に「故障、損傷の起こり易さ」、横軸に「起きた場合の被害の大きさ」とったマトリックス表示を推奨している（縦軸、横軸の区分け数の決まりはない。図 2 では 4×4 とした）。各部位の懸念される損傷に対するリスクは縦軸「故障、破損の起こりやすさ」と横軸「起きた場合の被害の大きさ」を査定して図 2 にプロットされる。査定の結果、リスクが許容範囲（リスクレベルごとの対処方法は経営的判断を含めてあらかじめ設定される）を越えている機器、部位に対して、リスクが許容範囲に入るようにするための検査、補修、改造、更新計画が RBM によるメンテナンス計画となる。結果として、プラント全体のリスクが一定値以下となって、安全で効率的な運転を可能にすることになる。リスクの低減は縦軸を下げる（損傷を起きにくくする）か横軸を左に寄せる（被害を小さくする）ことによって達成できるので、マトリックス表示することでリスク低減策が検討しやすくなる。また、現状で許容範囲にある部位に実施されている検査をなくしてもリスクレベルが変わらずに許容範囲にあるなら、その検査は省略が可能なることを意味する。

図2 リスクマトリックスと対応例

結果的に検査項目を減らすことを可能にし、RBM はメンテナンスコストの削減も可能にするといえる。

2.2 国内外動向

規制緩和、自由化が進んでいる欧米では、古くから自主基準でメンテナンスを行っており、石油メジャーでは、膨大なプラントを効率的にメンテナンスするために、以前から RBI/RBM 手法を実践している。米国石油学会 (API) が石油精製プラント向けのリスクベース検査 (RBI) のガイドライン^{7), 8)}、米国機械学会 (ASME) も各種プラント用の RBI ガイドライン^{9), 10)} を作成し、最近では ASME/API の統合によるガイドラインの開発が進められている。米国では、膨大な点検、検査が必要である原子力発電所における検査の効率化のために、リスクの考え方を取り入れた検査方法が検討されている。米国原子力規制委員会 (NRC) がリスクインフォーム規制の適用を積極的に進めており、電力業界、電力研究所 (EPRI)^{11), 12)}、ASME¹³⁾ も前向きで、原子力発電所のメンテナンスに対して、RBI の適用は確実に進むものと思われる¹⁴⁾。

欧州では、RIMAP (Risk Based Inspection and Maintenance Procedure for European Industries) プロジェクトを推進し、欧州全体で同一基準で RBI/RBM を実施するために必要な手法の開発を行っている。また、欧米では、多くのコンサルティング会社が、RBI/RBM のソフトウェア販売やコンサルティングを提供している。

近年、国内でも学協会が RBI/RBM 手法の確立のための活動を行っている。日本高圧力技術協会 (HPI) では RBM 研究委員会（委員長：酒井信介東京大学教授）が日本高圧力技術協会基準 (HPIS) として RBI ガイドライン¹⁵⁾ および RBI ハンドブック¹⁶⁾ を発刊する予定である。(財)エンジニアリング振興協会では、(財)機械システム振興協会からの委託研究として、「機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフェーズビリティスタディ」¹⁷⁾ を 2003 年から 2 年間実施した。また、同協会は 2004 年から国家プロジェクトとして「産業・社会資本構造物の長寿命化に向けた高度メンテナンスシステムの開発」を 3 年間実施し、RBI/RBM に必要なツールの開発を行った⁶⁾。(独)日本学術振興会では 2004 年度から「化学プラントのリスクベース保全技術」に関する先導的研究開発委員会が調査活動を行い、2007 年度から産学協力研究委員会「リスクベース設備管理第 180 委員会」（委員長：酒井潤一早稲田大学教授）を設置し活動している。

また、火力発電用ボイラ¹⁸⁾⁻²⁰⁾、LNG タンク²¹⁾、クレーン²²⁾、セメントプラント²³⁾、蒸気タービン²⁴⁾、への RBM の適用が報告されている。RBM 実施に参考になる書籍^{25), 26)} も出版されている。

2.3 リスク評価

当然のことながら、RBI/RBM で重要なことはリスクの算定である。リスクは「破損の起こり易さ」と「破損が生じた結果として生ずる被害の大きさ」の積である。従って、リスクは、「破損の起こり易さ」と「破損が生じた結果として生ずる被害の大きさ」、それぞれの算定によって求められる。ここでは「破損の起こり易さ」の

算定方法について述べる。

一般的に「破損の起こり易さ」は、破損確率、余寿命および発生感受性として表現できる。リスクの評価には定性的、半定量的および定量的評価がある。定量的評価は、破損確率と被害の金額の積として表現されるが、破損確率のデータが乏しく信頼性に問題があり、評価コストも掛かるため、定性的、半定量的評価の後に、大きな投資となる設備の評価などに限定して適用される。一方、余寿命および発生感受性は、多くの損傷機構研究の成果を利用することで、比較的容易に評価できる。余寿命および発生感受性評価結果を、図2の縦軸のようにレベル分けして「破損の起こり易さ」の評価とする方法が、半定量的評価方法として広く使われている。

3. テクニカルモジュール

具体的に「破損の起こり易さ」の評価を行うには、対象となる機器（部位）において懸念される損傷機構を特定して、その損傷機構に対する損傷確率、余寿命または発生感受性評価を行うことになる。損傷機構を特定するためのツールとして、損傷劣化機構スクリーニングプログラム⁶⁾が利用できる。

余寿命および発生感受性評価のためのツールとして、API PUBLICATION 581 (Risk-Based Inspection Base Resource Document)⁸⁾では、テクニカルモジュールを用意している。テクニカルモジュールとは、使用材料、環境などの条件についての質問に順次答えると、その損傷機構に対する余寿命または発生感受性が求められる手順を示したものである。

例として、図3にAPI581における18Cr-8Ni系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れの感受性を評価するテクニカルモジュールのフロー図を示す。塩化物イオン濃度、温度、pHによって割れ感受性の程度を評価できるものとなっている。

API581 Appendixには、表1に示す損傷機構についてのテクニカルモジュールが掲載されている。

4. エロージョン・コロージョン事例から見る影響因子

テクニカルモジュールの作成には、損傷メカニズムを理解し、損傷の程度を決める要因を明確にすることが不可欠である。

一般に、エロージョン・コロージョンは流体の衝突により金属表面（皮膜）が除去され、母材の溶解が著しく加速される現象として理解されている。流体による機械的な皮膜除去はないが、流速により腐食が促進される現象は流動加速腐食（FAC）と呼び、エロージョン・コロージョンと区別される場合があるが、ここでは広義の流体中加速腐食をエロージョン・コロージョンとして扱う。エロージョン・コロージョンの機構を解説した文献^{27) - 29)}によれば、材質（硬さ）、流速、流体の状態（単相、混相）、乱流度合、流体の腐食性、金属温度がエロージョン・コロージョンの損傷程度を決める主因子と考えられる。

図3 API581の塩化物応力腐食割れ感受性を求めるテクニカルモジュールのフロー

表1 API581に示されている損傷機構とテクニカルモジュール

損傷機構	テクニカルモジュール
全面減肉	塩酸腐食
	ナフテン酸腐食
	高温水素/硫化水素腐食
	硫酸腐食
	フッ酸腐食
	サワー水腐食
	アミン腐食
	高温酸化
応力腐食割れ	苛性割れ
	アミン割れ
	硫化物応力割れ
	水素誘起割れ（硫化水素中応力水素誘起割れ）
	炭酸割れ
	ポリチオン酸割れ
	塩化物応力腐食割れ
	フッ酸中水素誘起割れ（HCS=HF） 水素誘起割れ（フッ酸中応力水素誘起割れ） （SOHIC=HF）
高温水素腐食	
機械的疲労	配管の機械的疲労
クリープ	加熱炉管
脆性破壊	低温低靱性破壊
	焼き戻し脆化
	475 脆化
	σ相脆化
外面損傷	炭素鋼-外面腐食
	炭素鋼および低合金鋼の保温材下腐食
	オーステナイト系ステンレス鋼の外面応力腐食割れ
	オーステナイト系ステンレス鋼の保温材下外面応力腐食割れ

表2 JST 失敗事例検索サイトのエロージョン・コロージョン事故事例と分析

損傷機器・箇所	事故概要	流体 状態	流速 (m/s)	乱流度 (場所)	腐 食 性	温度 (℃)	腐食速度 (mm/y)
原発復水管	2004年8月運転中の原子力発電所のタービン建屋(3階建て)内で、配管が破裂して高温の蒸気が噴出し、2階で定期点検の準備作業をしていた作業員11人のうち、4人が死亡し、2人が重体、5人が重軽傷を負った。後日、重体の1人も死亡した。運転中の原発の事故としては過去最悪の規模である。二次系配管なので、放射能汚染はなかった。配管破裂の原因は、エロージョン/コロージョンによる局部減肉である。	単相	0.48	オリフィス下流部	高温水	142	0.36
火力発電タービン配管	2004年8月火力発電で、タービン建屋内の配管が破裂し、蒸気が漏洩する事故が起き、運転を停止した。人身事故無し	単相	不明	バルブ(弁)下流	高温水	不明	0.93
エタノールプラント高圧エチレン配管	1997年5月エタノール製造装置を定常運転中、エチレンを主とするリサイクルガスの高圧配管のT字部でエロージョン・コロージョンが起きて減肉し、内圧に耐えられなくなってエチレンガスが漏れ、爆発、火災となった。水分を含んだ気液混相流が高速に流れていたため、著しく腐食が進んだ。	気液	14.5	T字部	エチレン	不明	不明
メチルアミン製造装置原料系配管	1993年4月メチルアミン製造装置の定常運転中、原料供給工程の熱回収用予熱器と蒸発器との間にあるU字配管の直管部に穴があき、原料ガスが噴出した。流体はアンモニア、メチルアミン、メタノールの混合物および微量の蟻酸化合物で気液混合相(容積比で気体0.91、液体0.09)であり、原料供給工程の熱回収用予熱器と蒸発器との間にあるU字型配管の最底部において、腐食性物質である蟻酸化合物が濃縮され、また原料予熱器の出口温度が高かったために液の蒸発率が上昇し、気体量が増加したため、管内流速が高まりエロージョン・コロージョンが発生し管の破損を引き起こした。	気液	12.5	直線部	蟻酸	高温	不明
原発給水系配管エルボ	1986年12月、米国バージニア州サリー原子力発電所2号機(加圧水型軽水炉で1973年5月に営業運転開始、事故まで76,600時間運転)の二次冷却系配管でギロチン破断事故が発生した。この破断事故は、給水ポンプ入口側の18インチ(457mm)の90°エルボ部で生じた。破断した配管の材質は、板厚0.5インチ(12.7mm)の炭素鋼(ASTM A234)である。破断の原因は、エロージョン・コロージョンにより配管の肉厚が薄くなる減肉現象が発生していたためである。配管破断事故により破断部近傍で工事を行っていた4名が死亡し、2名が負傷した。	気液	不明	エルボ	ヒドラジン添加	290 ~ 330	0.94
石油精製プラントトランスファーライン炭素鋼還流配管	当装置はサワー原油を対象に設計製作されたが、途中から低全酸価のスイート原油(ナイジェリア、アンゴラなどの西アフリカ産)に切り替えられ、腐食損傷が発生した。加熱炉出口での330~345℃の高い運転温度の影響が大きく、気化により高流速の二相流となりナフテン酸腐食した。	気液	15	エルボ	ナフテン酸	230	不明
ナフサ搬送ポンプインペラ	スラリーを含有する高温ナフサを搬送する中型ポンプの炭素鋼製インペラが2ヶ月間でインペラ羽根がなくなるほど激しく減肉した。減肉速度は18mm/年に相当する。	固液	不明	ポンプインペラ	ナフサ	160	18
	ポンプの炭素鋼製軸も同様に激しく減肉した。しかし、スラリーが強く接触しないポンプ構造なので、その減肉速度は2mm/年以下である。	単相	不明	ポンプ軸	ナフサ	160	2
熱交換器出口配管の水注入口下流の曲管	ナフサ水添脱硫装置を運転中、コンバインド熱交換器出口配管の水注入口下流のエルボが突然破損し、開口穴から気液混相流のプロセス流体が噴出し火災となった。	気液	不明	曲がり部	硫化水素	高温	不明
ポンプ出口配管	ポンプ吐出し側直下に存在する配管で、液流れ(旋回流)および含有固形物によるエロージョンによって、円周方向にナイフで削ったような規則的減肉が発生した。	固液	不明	旋回流	不明	不明	17
熱炭酸カリ溶液によるCO ₂ 吸収液再生塔	アンモニアプラントにおいて、運転開始2ヶ月後にCO ₂ 吸収液再生塔中段部・液分散板取付け部(塔下部へのディストリビューター)付近の塔壁にクラック状開口が発生し、プロセス液(K ₂ CO ₃ 、KHCO ₃ 、DEA、V2O ₅ : 0.8 kg/cm ² G、123℃)が漏出した。塔外面からクラックにラバーを詰込み、金属バンドで締付けて漏れを止め、運転を継続しようと試みたが成功せず、漏出開始後13日目にプラントを停止した。	単相	不明	想定外の乱流	アンモニア	123	不明

テクニカルモジュールの作成に当たっては、エロージョン・コロージョンによる実際の事故事例から損傷因子を抽出し、減肉量との因果関係をもとめ、因子の係数化をすれば、実用的な予測が可能になると考えた。

JST 失敗知識データベース²⁾ から「エロージョン」「コロージョン」「炭素鋼」をキーワードとして検索し、10件の事例を得た。表2にそれらの損傷状況、腐食速度と損傷因子を整理して示す。

流体状態については検索結果 10 件のうち単相流による損傷事例は 2 件であり、混相流によるものは 8 件（内、気液が 5 件）であった。また、腐食速度が記載されているもので比較をすると、固液はすべて 15 mm/y 以上であり、単相流もしくは気液混相流のものは 1 mm/y 程度のものが多い。ナフサ搬送ポンプインペラの固形スラリーによるエロージョン・コロージョンの事故事例においては、スラリーが直接接触するインペラでは腐食速度が 18 mm/y であるのに対し、スラリーが直接接触しない軸材では 2 mm/y であった。以上より、固液混相流では腐食速度が一桁程度上昇することが分かる。

流速については流速が記載されていない、または流速が記載されていても腐食速度が記載されておらず、定量的因果関係は明確ではないが、事故事例には 10 m/s 以上の高い流速のケースが多く、流速の影響が大きいことが読み取れる。

乱流度合いについて、配管系のエロージョン・コロージョンについては直線部での事例は事故 8 件中 1 件のみであり、他はすべてエルボ部など乱流になりやすい領域で起こっている。

流体の腐食性については、多様な環境で事故が起きているが、何らかの腐食性を有した環境で事故が発生していることは明白である。

温度については 150℃ 付近で起こっている事例が多く、温度が明記されている事例は 123, 142, 160, 230℃ であり、常温より高温側での事故事例が多い。

5. エロージョン・コロージョンの テクニカルモジュール作成

エンジニアリング振興協会の「産業・社会資本構造物の長寿命化に向けた高度メンテナンスシステムの開発」プロジェクト⁶⁾の研究の一環として開発したエロージョン・コロージョンの起こり易さを評価するテクニカルモジュールを以下に紹介する。

5.1 作成手順

エロージョン・コロージョンは主に乱流域で発生し、混相流によるものが著しい減肉を呈すること、腐食速度は一般に流速、流体の種類と温度に依存することから、流体状態、流速、形状（乱流度合）、流体の腐食性、温度の 5 つをエロージョン・コロージョンの影響因子として挙げた。これら影響因子に係数付けし、係数を累積した値でエロージョン・コロージョンの起こり易さを表現するものとした。係数付けおよび累積方法は、専門家による委員会を設置し、4. で述べた事例における因果関係をもとに専門家の知識、経験から、影響因子の影響度合いを検討し決定した。

流体状態は、単相を基準（係数 1）とし、気体-液体の混相について係数 3、固体が混ざった場合、エロージョンの効果が著しくなり減肉が急加速すると判断し、液体-固体の混相では係数を 20 とした。

流速は、通常 10 m/s 未満で設計されていることが多く、係数を 1 とし、10 m/s 以上では急激な加速があると判断し、係数を 5 とした。

乱流の度合は、構造物（配管など）の形状によって決

まると判断した。通常流れの直線部（直管など）ではエロージョン・コロージョンの発生は見られないことから、流れの直線部を係数 1 とし、内径の変化する曲がり部、オリフィスなど流れが乱れる部位について係数 10 とした。

流体の腐食性については、特に腐食性が問題とならない物質で腐食抑制対策をしていない場合を係数 1、防食対策をしている場合を係数 0.5、また特に腐食性が高い場合に係数を 4 とした。

材料温度については、基本的に腐食、エロージョンとも温度が高い側で進行が早いと判断し、100℃ 未満を係数 1 とし、高温側で係数を高く設定した。

5.2 利用手順

このテクニカルモジュールの適応範囲は、次のとおりとする。

対象材料：炭素鋼

温度：300℃ 未満（ドライ環境は除く）

環境：pH は 4～10 の範囲（pH 4 未満では酸による単純腐食となり、pH 10 以上では腐食が抑制されるので除外する）

以下の順に使用条件を入力し、係数を求め、累積係数と使用期間によって余寿命および破損の起こりやすさレベルを決定する。

5.2.1 因子と係数

① 流体状態

表 3 流体状態と係数 C_1

流体状態		係数 C_1
単相		1
混相	気体-液体	3
	液体-固体	20

② 流体速度

表 4 流体速度と係数 C_2

流体速度	係数 C_2
10m/s 未満	1
10m/s 以上	5

③ 乱流度合（形状）

表 5 乱流度合（形状）と係数 C_3

乱流度合（形状）	係数 C_3
配管の直線部など	1
配管曲がり部（エルボなど）、バルブの下流部、オリフィス後流、管径の減少部、旋回流部など	10

④ 流体の腐食性

表 6 流体の腐食性と係数 C_4

流体の腐食性	係数 C_4
腐食抑制対策あり（インヒビターなど）	0.5
腐食抑制対策なし	1
特に腐食性が高い	4

⑤ 材料の温度

表7 材料の温度と係数 C_5

材料の温度	係数 C_5
100℃未満	1
100℃以上, 200℃未満	2
200℃以上, 300℃未満	2.5

5.2.2 累積係数と減肉速度目安

上記各係数の積(式1)を累積係数として、表8に累積係数と減肉速度の目安を示す。

$$\text{累積係数} = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \quad (1)$$

表8 累積係数と減肉速度目安(破損感受性レベル)

累積係数	減肉速度目安
5未満	0.05mm/年
5以上, 200未満	0.25mm/年
200以上, 400未満	1.0mm/年
400以上	3.0mm/年

5.2.3 余寿命評価

エロージョン・コローシヨンの余寿命評価を行う場合は、式(2)および(3)により計算する。

$$\text{全寿命(年)} = \text{余肉(mm)} / \text{減肉速度(mm/年)} \quad (2)$$

ここで、余肉：実肉厚(mm)－必要最小肉厚(mm)，減肉速度(mm/年)：表8の減肉速度目安。

$$\text{余寿命(年)} = \text{全寿命(年)} - \text{使用期間(年)} \quad (3)$$

注) 式(2)の実肉厚は通常建設時の肉厚計測値を使用するが、運転中に対象部位の肉厚を正確に計測している場合、その値を用い、式(3)の使用期間は、検査実施後の期間を使用する。

以上のテクニカルモジュールのフローを図4に示す。

5.2.4 リスク評価への適用

半定量的リスク評価における「破損の起こりやすさ」のレベルは、5.2.3で求めた余寿命から表9によって求めることができる(このレベル分けは目安であり、使用者の判断で変更できる)。

図4 エロージョン・コローシヨンのテクニカルモジュールのフロー

表9 余寿命と破損の起こりやすさレベル

余寿命	破損の起こり易さレベル
15年以上	1
8年以上, 15年未満	2
2年以上, 8年未満	3
2年未満	4

6. お わ り に

本報告では、(財)エンジニアリング振興協会「産業・社会資本構造物の長寿命化に向けた高度メンテナンスシステムの開発」プロジェクトの開発成果の一つであるエロージョン・コロージョンの起こり易さ算定のツールであるテクニカルモジュールを紹介した。テクニカルモジュールはRBI/RBMにおける破損の起こり易さ算定の手段であるとともに、通常の寿命評価などに有効に活用できる。蓄積された損傷データ、専門家および経験者の知識と経験を含有したもので、技術伝承の道具ともいえる。しかし、あくまでも損傷の程度を相対的に比較する目安として使用すべきもので、減肉速度などの定量的値には期待を持つべきではないと考える。

また、本テクニカルモジュールを用いて表2に示されている事例を当てはめて見ると、実際の減肉量が予測値を上回るものがあり、係数付けについて再検討が必要なることを示唆している。現状では、事例件数および影響因子と腐食速度の因果関係についての情報量が不足している。本テクニカルモジュールの係数の組み合わせは108通りあり、正確に検証するには多量の情報量が必要となる。実際のプラントでの損傷評価に適用して改良を加えることで、信頼性を向上させることができるので、メンテナンス関係者による適用、検証、改善を期待している。

また、他の損傷機構についても同様のテクニカルモジュールの開発が進むことが望まれる。

参 考 文 献

- 1) (社)日本高圧力技術協会材料分野情報収集委員会, 失敗知識データベース(材料分野)報告書, 平成18年2月 p I-14.
- 2) JST 失敗知識データベース, 科学技術分野の事故や失敗の知識と教訓, URL: <http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>.
- 3) 小林英男, 「高圧ガス製造設備の保安検査方法の制度改正」, HPI セミナー第6回压力容器関連規格の国内外動向, (社)日本高圧力技術協会, 平成17年1月27日.
- 4) 神門正雄, 「高圧ガス保安協会における規格策定プロセスの抜本的見直しについて」, HPI セミナー第6回压力容器関連規格の国内外動向, (社)日本高圧力技術協会, 平成17年1月27日.

- 5) 富士彰夫ほか; リスクベースメンテナンス (RBM), 配管技術, **46** [1] 71 (2004).
- 6) 平成18年度戦略的技術開発(構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発)報告書, (財)エンジニアリング振興協会 (2007).
- 7) American Petroleum Institute, "Risk-Based Inspection", API Recommended Practice 580, (2002.5).
- 8) American Petroleum Institute, "Risk-Based Inspection Base Resource Document", API Publication 581, (2000.5).
- 9) The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Risk-Based Inspection-Development of Guidelines", vol.1 General Document, CRTD-Vol.20-1, (1991).
- 10) ASME, "Risk-Based Inspection-Development of Guidelines", vol.3 Fossil Fuel-Fired Electric Power Generating Station Application, CRTD-Vol.20-3, (1994).
- 11) EPRI, "Risk-Informed In-service Inspection Evaluation Procedure", EPRI TR-106706, (June 1996).
- 12) ASME, "Risk Informed Requirements for Class 1, 2 & 3 Piping, Method B", N-578, (Sep.1997).
- 13) ASME, "Risk Informed Requirements for Class 1, 2 & 3 Piping, Method A", N-577, (Sep.1997).
- 14) 「高稼働率技術開発 定期点検・定期検査の高度化に関する検討 (フェーズ II) (OPI)」, 発電技検レビュー, No.24, p.103 (1998).
- 15) 柴崎敏和, HPI の RBM 専門研究委員会により提案予定の RBM ガイドの紹介, HPI セミナー第5回「リスクベースメンテナンスの基礎と応用」平成18年度, 日本高圧力技術協会, p.35.
- 16) 石丸 裕, HPI の RBM 専門研究委員会により提案予定の RBM ハンドブックの紹介, HPI セミナー第5回「リスクベースメンテナンスの基礎と応用」平成18年度, 日本高圧力技術協会, p.55.
- 17) 「機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフィージビリティスタディ」報告書, (財)機械システム振興協会, 委託先 (財)エンジニアリング振興協会, 平成17年3月.
- 18) S. Kihara, A. Fuji, T. Okatsuka, I. Kajigaya, M. Yatomi, H. Eguchi and C. Fukuoka, *Therm. Power*, **52** [4] 27 (2001).
- 19) A. Fuji, et al., *J. Jpn. Inst. Met.*, **66** [12] 1192 (2002).
- 20) S. Kihara, et al., *J. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **106** [1019] 873 (2003).
- 21) H. Anzai et al., Advanced Risk Assessment of LNG Storage Tanks Based on Risk-Based Maintenance Planning, Int. Conf. of LNG (LNG-14), Doha, (2004.).
- 22) 富士彰夫, リスクベースメンテナンスのクレーン設備への適用, 日本機械学会講習会 No.01-89, p.63-70 (2002).
- 23) J. Takahashi, T. Node, N. Hatta, M. Torigoe, H. Eguchi, A. Fuji, S. Kihara, and M. Shipley, Application of Risk-Based Maintenance with Life and Financial Assessment on Cement Plants, ACSIM2002, Systems Integrity and Maintenance, Cairns, p.323 (2002).
- 24) K. Fujiyama, et al., *J. Jpn. Inst. Met.*, **66** [12] 1199 (2002).
- 25) 木原重光, 富士彰夫, 「RBI/RBM 入門」, 日本プラントメンテナンス協会 (2002).
- 26) M. G. Stewart and R. E. Melchers (酒井信介監訳), 「技術分野におけるリスクアセスメント」, 森北出版 (株) (2003).
- 27) H. H. Uhlig, "Uhlig's Corrosion Handbook".
- 28) Welding Research Council, "Damage mechanism affecting fixed equipment in pulp and paper industry", WRC489, (2004).
- 29) Corrosion Handbook (Jpn.) (1998).

(2007年6月25日受理)

要 旨

リスクを基準とするメンテナンス (RBI/RBM) において破損の起こり易さを求める手法として、損傷機構別のテクニカルモジュールが使われている。テクニカルモジュールは、対象となる部位の使用条件を入力すると破損確率、発生感受性、余寿命などが算出できる手順を示したものである。本解説では、エロージョン・コロージョンに対するテクニカルモジュールの作成方法、使用手順および問題点を述べる。

キーワード エロージョン・コロージョン, リスクベースメンテナンス, RBM, テクニカルモジュール, 減肉速度, 余寿命