

リスクベースメンテナンスのクレーン設備への適用

Application of Risk-Based Maintenance on Material Handling Systems

弥 富 政 享 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
高 橋 潤 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
小日向 寿 治 物流・鉄構事業本部運搬・物流システム事業部品質保証部
信 太 雅 人 物流・鉄構事業本部運搬・物流システム事業部バルクハンドリングシステム部 課長
富 士 彰 夫 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 部長 博士（工学）

リスクベースメンテナンス（RBM）は、検査・メンテナンス計画を最適化するための一つのツールである。欧米では経年劣化したボイラや石油化学プラントに適用されており、我が国でも適用が開始されている。当社では、すでに火力発電用ボイラやセメントプラントへ RBM を適用し事業展開している。しかしながら、クレーン設備に RBM を適用した例は我が国や欧米でもまだ報告されていない。本研究ではクレーン設備に対して RBM の適用を図った。その結果、RBM 手法の適用が可能であることが明らかとなった。

A risk-based maintenance (RBM) technique has been generated at IHI to optimize inspection and maintenance plans for fossil-fired power plants, which will be deregulated in Japan, and cement plants. This study investigated technical advances and problems resulting from the application of the RBM to materials handling systems. Risk is defined as the multiplication of the likelihood of failure by the consequences of failure of the components or system. This is based on engineering judgment with inspection data, operating condition, fatigue damage assessment, etc. The present study found that the RBM is a useful decision tool to optimize the inspection and maintenance plan and can be applied to the materials handling systems.

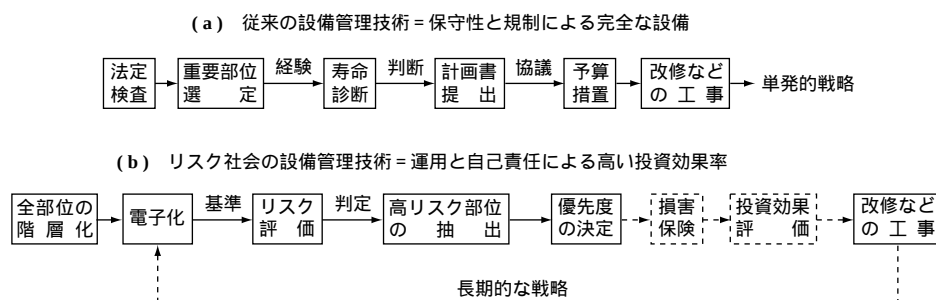
1. 緒 言

経営環境が先行き不透明な時代では投資効果への明確な戦略・意思決定が求められてくる。さらに、高度経済成長期を支えてきたプラントや機械設備類が更新時期⁽¹⁾を迎えているものの、このような経済状況のなか、更新が容易でないことは周知のとおりである。

従来、設備管理は十分な安全裕度と厳重な法定検査による「完全な設備または保守的⁽²⁾な設備管理技術」を基本的に比較的単発的な対応がされてきた。ところが、近年各産業分野での規制緩和が進むにつれ、経年プラントや機械設備の安全性を確保し、さらに低い保全コストと高い稼働率を維持できる新しい自己保全技術への期待が高まっている。第 1 図に示すように、自己責任を伴うリスク社会では、運用により高い投資効果率を上げるための長期的な戦略が必要になってくる。そのためにはリスク評価の概念と手順を明確に示す必要がある。

欧米、特にメジャー系の石油プラントでは規制緩和下の新しい保全システムとして、リスクを基準としたリスクベースインスペクション（RBI）、リスクベースメンテナンス（RBM）と呼ばれる検査の最適化手法を開発し、米国石油学会（API）基準⁽³⁾、米国機械学会（ASME）ガイドライン⁽⁴⁾を作成している。筆者らは、上記の基準に準拠した RBM を開発し⁽⁵⁾ 火力発電プラント^{(6),(7)}、セメント生成プラント⁽⁸⁾ などへの採用を始めている。筆者らが開発している RBM では、検査に加え構造機器の補修・取替えなどメンテナンス計画をも同時に策定することが可能である。

コンテナクレーンやアンローダなど大型運搬機械においてもほかの社会インフラ⁽¹⁾と同様に 20 年以上稼働した経



第 1 図 リスク社会の運用に基づく設備管理
Fig. 1 Management of facilities based on investment in the risk society

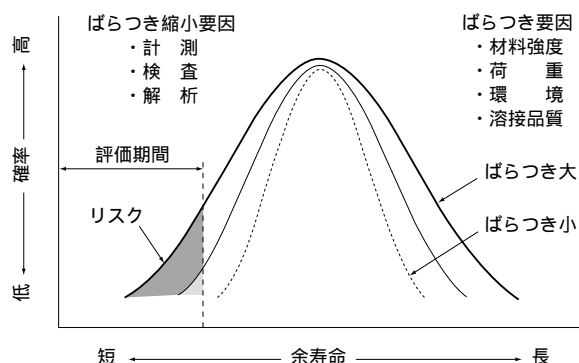
年設備が増加しており RBM が有効な手段として期待されている⁽⁹⁾。そこで本稿では、荷役運搬機械に対して RBM を応用した余寿命診断システムの考え方とその実用的な手法を述べる。

2. 寿命の考え方

RBM は、経年設備の寿命延伸を図るための意思決定ツールの一つである。もちろん新規の設計にも運用計画を立てるうえで有効な手法である。しかし、一般的に「寿命・余寿命」の定義は明確にされていないのが実情である。各種の計算や研究などによって寿命評価手法の開発がされているものの、それには多くのばらつきや不確定要素が含まれている。十分な安全裕度を意味する「保守性」⁽²⁾と保全に向けられる比較的潤沢な資金に守られた従来の運用では、それらの不確定性を無視することも可能であった。第1表は、鋼構造物（主として橋梁）を対象にした寿命の定義⁽¹⁰⁾の例である。これによると「寿命」とは、工学的な評価のみならずユーザ・経営者の判断をも含んだ種々の要因によって決まることが分かる。したがって第2図に示すように、種々の要因を検討し寿命（余寿命）推定における不確定領域（リスクの一種）をいかに小さくするかがリスク評価の目的になる。

第1表 寿命の定義⁽¹⁰⁾
Table 1 Life definition for steel structures

	分類	定義
寿命	物理的寿命	使用開始後の損傷・摩耗・疲労・腐食・被災などによって、鋼構造物の性能が低下し使用に耐えられなくなり、あるいは外力に抵抗しきれない限界となること。
	機能的寿命	建設後の社会環境の変化によって鋼構造物に要求される機能も変化し、期待される機能を満足しなくなることによって使用停止が決定されること。
	経済的寿命	鋼構造物の性能を低下させないあるいは低下した性能を向上させるために必要な費用と取替えに必要な費用を勘案し、引続き使用するよりも取替えを行うほうが経済的であること。



第2図 余寿命評価におけるリスクの考え方
Fig. 2 Concept of risk for residual life assessment

設計基準における考え方も変化している。欧米ではすでに压力容器の設計安全率を低減し競争力を向上させる方策を採っているが、国内でもそれに呼応して压力容器の設計許容応力の見直し⁽¹¹⁾や、現状に合わせたクレーン構造部分の疲労設計基準の見直し⁽¹²⁾、⁽¹³⁾が検討されている。これらは、保守的な安全裕度から脱却し、より現実に合わせた設計や運用を行おうとする動きでもあり、設備構成機器の構造強度や余寿命推定の信頼性を高める効果をもたらす。

3. リスクの定義

ルイス⁽²⁾によると、リスクとは不確実性を包括した意思決定パラメータであり、単に「危険」を意味するものではない。原因と結果の関係がはっきりしないと将来の結果を確実に知ることができないが、ある結果を信じて意思決定することを「リスク許容行為」という。

機械設備の経済効果を上げるには設定寿命を超えても使用できることが理想であり、寿命のばらつき、すなわち不確実性の要因を抽出し、プラント全体の各機器が一定のリスク以下になるように検査、補修、更新計画を策定し最適コストでのリスク回避を実現すればよい。したがって、リスク管理とは、期待した結果を導きだすことができる対策を最大限実施し、出てくる結果が不明確な行為を最小限にすること⁽²⁾であるといえる。

RBM においてリスクは以下のように定義する⁽³⁾、⁽⁴⁾。

リスク (Risk) = 破損の起こりやすさ (Likelihood of failure) × 被害の大きさ (Consequence of failure)

破損の起こりやすさとは、構造機器の破壊確率である。しかし、前述のように物理的寿命の概念のあいまいさや寿命予測のばらつきなどがあり、確定的・定量的な確率として表す段階に至っていない。したがって現状では構造機器の経年劣化、損傷・検査など破壊確率に関連する要因を網羅し半定量的に評価する方法が主流である。被害の大きさは、破損が生じた場合のさまざまな経済性・安全性被害について評価する。

4. RBM の評価手順

4.1 概要

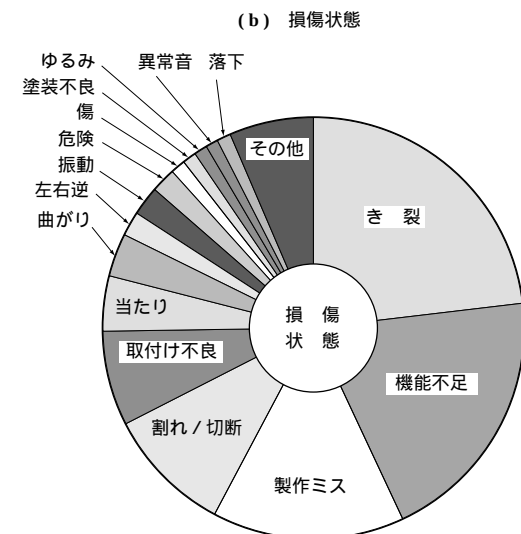
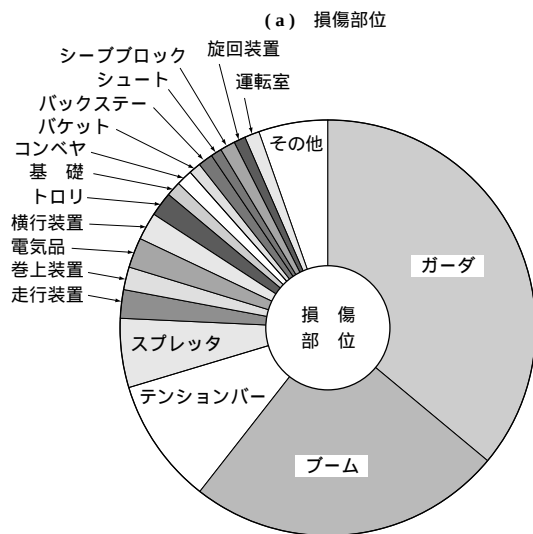
クレーン設備のメンテナンスでは、第2表に示すように、設備全体の健全性・安全性・機能性・経済性の観点から維持向上が図られている。RBM は主として設備全体の構造健全性を評価する目的で実施する。また、経年劣化と余寿命診

第 2 表 クレーン設備のメンテナンスの内容
Table 2 Maintenance methods for materials handling systems

分 類	内 容
構造健全性評価	劣化・損傷調査, 寿命・余寿命診断, RBM
動力・機械部品の健全性	劣化・損耗の検出・評価
電気・制御系の健全性	機能点検, 防水処理
知能化	効率化, 制振制御, モニタリング
仕様変更	容量 / 速度変更, 油圧系の交換, 動力 / 制御更新
リフレッシュ工事	洗浄, 塗装, 機械部品オーバーホール, 電装品換装

断を取り扱う RBM では、過去の損傷事例の把握が最も重要な評価要因になる。第 3 図は、大型クレーンやアンローダの過去に発生した 95 件の損傷について、部位（ - (a) ）と状態（ - (b) ）の分類を示したものである。さまざまな部位で損傷が生じていることが分かる。このような経験に基づいて RBM 評価を行うことによってリスク評価の精度が向上する。したがって、品質保証関連部署の記録や熟練者の記憶を可能な限りデータベース化することが必要である。RBM は従来経験的に分かっている問題を基準化し、クレーン設備の運転状況を基に設計者、保全の熟練者、客先（ユーザ）などの関係者が合意できる結論を得るための手順を与えるものである。その手順は以下のように表すことができる。

- (1) 高リスク部位を特定するため機械設備内の機器を階層化して分類する。
- (2) 評価期間（点検時期または延伸期間）を設定する。
- (3) 一定のルールに基づき各機器の運転状況に応じたリスクを定義する。
- (4) 各機器のリスクを体系的に処理する。
- (5) 査定したリスクの大きさに基づいて機器のメンテ



第 3 図 クレーン・アンローダにおける損傷部位と損傷状態（全 95 件）
Fig. 3 Damaged components and behavior in several materials handling systems (Total components : 95)

ナンスの優先順位をつける。

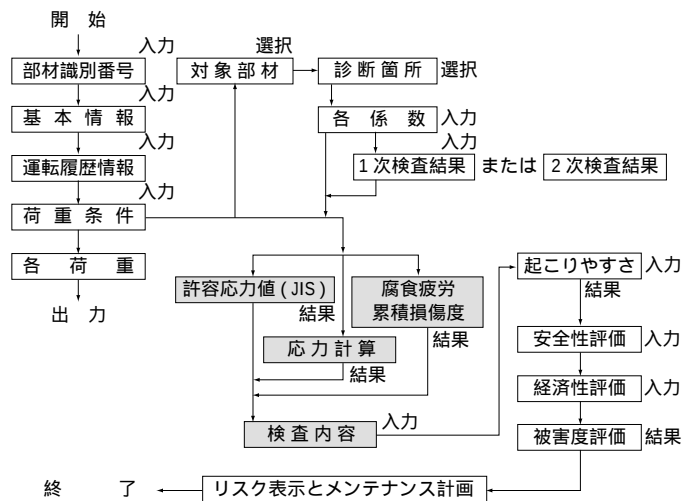
- (6) 最適な検査計画を立案する。

4.2 RBM の評価手順

第 4 図に RBM システムのフローを、第 3 表に RBM で扱うシステム項目を示す。

4.2.1 部材選定と情報収集

経年運転に伴い劣化や損傷が生ずる可能性があるすべての部位を網羅するため、クレーン構造を階層的に細分化し診断箇所を選定する。本システムではコンテナクレーン、橋型クレーン、連続アンローダ、引込クレーン、スタッククレーン、リクレーマなどを対象とし、部材を選別した。各部材をさらに階層化し、運転中に特定の損傷が発生する可能性がある診断部位を導きだす。この各診断部位に対して RBM でリスク診断を行う。



第 4 図 RBM システムのフロー
Fig. 4 Procedure of RBM for materials handling systems

第 3 表 クレーン設備 RBM システム項目

Table 3 Inventory treated in RBM for materials handling equipment

No.	システム項目
1	機 種
2	設 置 状 況
3	クレーン分類
4	部 材
5	部 材 箇 所
6	部 材 箇 所 情 報
7	材 料
8	板 厚
9	JSSC 等級区分
10	塗 装 劣 化 度
11	起こりやすさの要因
12	起 こ り や す さ
13	安 全 性 評 価
14	経 済 性 評 価
15	総 合 評 価

第 4 表に橋型クレーンの例を示す。診断対象機の情報として、能力、機能、積載荷重、納入年月などの基本情報、使用年月、荷重履歴などの運転履歴情報を入力する。続いて対象部材を選定し、さらに診断部位を選定すると、診断部位ごとのリスク評価ファイルが作成される。診断部位が決定すれば、構成材料、板厚、設計条件、溶接形状、検査記録、検査の効果、簡易寿命診断結果、さらには過去の補修記録など評価に必要なデータを収集入力しデータベース化する。詳細情報として、評価期間、運転履歴、稼働率、部材の破損によって設備ユニットが停止した場合の生産損失コスト、補修コストさらに周辺機器の回復コスト、人災補

第 4 表 橋型クレーンにおける部位のパターン化

Table 4 Patterns provided for various parts of a gantry crane

No.	機 種	部 材	診断部位
1	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）／テンションバー連結部	連結部
2	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）／ガーダ連結部	連結部
3	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）	フランジとウェブの溶接部
4	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）	横行レール下部
5	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）	仕切板周辺部
6	橋型アンローダ	カンチレバー（海側）	フランジとウェブの溶接部
7	橋型アンローダ	ガーダ	横行レール下部
8	橋型アンローダ	ガーダ	仕切板周辺部
9	橋型アンローダ	カンチレバー（陸側）	フランジとウェブの溶接部
10	橋型アンローダ	カンチレバー（陸側）	横行レール下部
11	橋型アンローダ	カンチレバー（陸側）	仕切板周辺部
12	橋型アンローダ	ガーダ／バックステーの連結部	連結部
13	橋型アンローダ	カンチレバー（陸側）／ガーダ連結部	連結部
14	橋型アンローダ	カンチレバー（陸側）／ガーダ連結部	連結部
15	橋型アンローダ	頂部鉄鋼（海側）／バックステー連結部	連結部
16	橋型アンローダ	頂部鉄鋼（海側）／バックステー連結部	連結部
17	橋型アンローダ	頂部鉄鋼（陸側）／バックステー連結部	連結部
18	橋型アンローダ	頂部鉄鋼（陸側）／バックステー連結部	連結部

償コストなど経済性評価のための指標も必要となる。

4.2.2 疲労損傷評価

クレーン設備の場合、最も重要な損傷因子は疲労損傷である。疲労損傷評価は、設計パターンによる簡易評価、応力計測や応力解析による詳細評価を JIS B 8821 や JSSC 疲労設計指針⁽¹⁴⁾を用いて行う。しかし、この評価はあくまでリスク評価を実施する際の参照データである。したがって、設置状況や塗装劣化度を考慮し腐食疲労データ⁽¹⁵⁾を参考にして疲労寿命曲線の修正を行う。さらに疲労設計曲線のばらつきなども考慮する。検査記録（板厚、腐食減肉状態など）は、リスク評価に非常に重要な要素となるため、いくつかの検査方法について入力する。

4.2.3 リスク評価

階層化した部位に生じる可能性がある損傷メカニズムについて、破損の起こりやすさと被害の大きさをそれぞれ評価していく。リスクの査定は現状では完全な定量的評価は困難であるため、設計、保全、検査、運転、研究にかかわる専門家が集まり「半定量的」に評価する。本システムでは、第 5 表に示すそれぞれの関連項目について「半定量的」な評価手法を用い、それらの解答から総合点を数値的に評価してそのリスクをリスクマトリックス図の該当位置へプロットする⁽¹⁶⁾。

(1) 破損の起こりやすさの査定

破損の起こりやすさは、第 5 表に示すように、各診断位置における現在の損傷状態、過去に起きた損傷、検査の効果、今後の損傷の可能性などから総合的に評価する。各要因について 3 ～ 5 段階のレベル付けをし、レベルごとに -37 ～ +19 点の範囲で重み付けをする。その評点の合計で、破損の起こりやすさを高、中、低、微の 4 段階にランク付けする。ランク付けの方法は、試行錯誤と過去の経験を考慮して決めたものである。

破損の起こりやすさの要因のうち、最もリスクの低減効果があるのは検査である。現実には何が起きているのか詳細に把握すればするほどリスクが下がることは容易に理解できる。したがって、1 次検査時に目視検査を行う場合と 2 次検査でさらに詳細な検査（例えば肉厚計測）を行う場合ではリスクランクは異なってくる。また、適用する検査手法の効果（検出確率）⁽⁵⁾に

第 5 表 リスクランキングの要因例
Table 5 Risk ranking factors

破損の起こりやすさ の評価要因例	被害の大きさの評価要因	
・現状の損傷状態 ・次期検査までの寿命 ・供用中検査の効果 ・防食状態 ・建設基準 ・稼働状態 ・その他	1. 安全性被害	安全性（人身災害）
	2. 経済性被害	・診断位置の修理費 ・周辺被害の修理費 ・機器停止による操業損失費 ・その他

についても議論する必要がある。

(2) 被害の大きさの査定

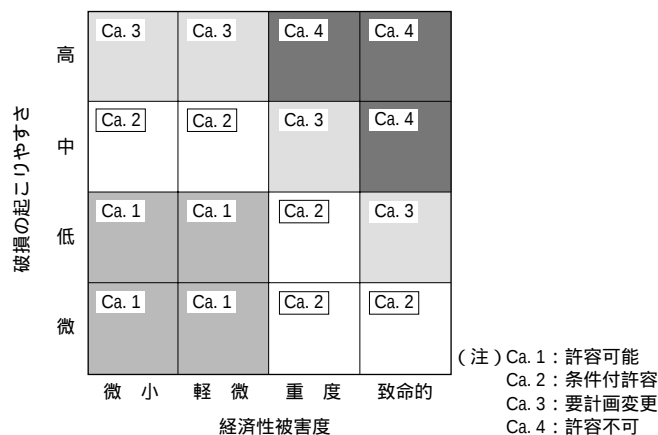
被害の大きさは、安全性および経済性の両面についてそれぞれ独立して評価する。石油化学プラントなどでは火災・爆発さらに毒性被害など 2 次的な被害の大きさを考慮する必要があるが⁽³⁾、クレーン設備ではこのような 2 次的災害は考慮する必要はなく、第 5 表に示す安全性と経済性（金額）の被害を評価する。

安全性評価においては運転員や周辺作業者の作業場所や破損した場合の損傷の進行度合い、対象部位の設置場所なども考慮する。

経済性に関する被害は対象部位の修復に要する費用、周辺部材の補修費用、機械設備の停止によって生ずる生産損失、人身災害に関連する賠償額なども含める。これは当然機械設備の規模や重要度などによっても異なる。なお、被害の大きさは安全側の結果を導くよう最悪のシナリオを想定しておくことが必要であり、最終的なリスクランキングにおける被害の大きさは安全性および経済性被害のどちらか厳しい方を用いる。

以上の各診断部位の評価結果を第 5 図に示すリスクマトリックスにプロットする。これが RBM の一つの結論である。ランク付けを何段階にするかは標準的な考え方があるわけではない。実用上、4 または 5 段階が妥当であるといわれている。第 5 図に示したリスクマトリックスでリスクカテゴリを設定する。カテゴリは「許容可能」、「条件付許容」、「要計画変更」、「許容不可」に分類され、第 6 表に示す対策が要求される。このカテゴリは機械設備の特有の事情や経験によって変えることも可能である。この結果に従い補修や取替えに関するメンテナンスの優先度や検査計画を策定する。リスクが非常に高く有効な対策がない場合は、クレーン設備本体の更新という結果がでる場合もある。

現状の情報を基にリスク評価を行って上記の結論を得るが、本システムの特長は検査基準（検査間隔や検査方法）や将来



第 5 図 リスクマトリックスとカテゴリ
Fig. 5 Risk matrix and categories

第 6 表 リスクカテゴリと対策
Table 6 Risk categories and measures

カテゴリ	判 定	対 策
Ca. 1	許容可能	法定点検以外は対象期間において検査・管理は不要
Ca. 2	条件付許容	適切な検査やメンテナンスが行われていれば使用可能
Ca. 3	要計画変更	次期点検までにリスクランクを下げる ・検査手順の改良 ・運転管理方法の改善 ・オンラインモニタリング ・被害の低減対策
Ca. 4	許容不可	直ちにリスクランクを Ca. 2 以下に下げる

の運転条件などを変更しリスクの再査定を行って、リスクの低減やコストの削減などの効果を評価できることである。当然 1 次評価における高リスク部位では対策を策定した後、再評価を行ってリスクの低減を確認することが可能である。

5. リスク評価結果および考察

経年クレーン設備に対するリスク評価結果の一例を示す。対象とした設備の内容は以下のとおりである。

機 種	橋型アンローダ
荷 種 類	鉄鉱石、石灰
運転開始年	1971 年（稼働年数 28 年）
運 搬 回 数	2.8×10^5 回
設 置 場 所	海に隣接して設置
評価データ	実働応力計測データ、腐食、減肉推定値、累積疲労損傷

第 6 図はそれらの入力状況である。第 7 図は、当該機種の対象部材選定画面である。対象部材を選択すること（今回、ガータもしくはカンチレバー）で、第 8 図に示す部位選定画面が表示され（第 7 図の対象部材としてガータを選択した場合）、対象診断部位を選定する。この選定部位に対

第 6 図 対象設備情報画面の一例

Fig. 6 Information input format of materials handling systems

第 7 図 橋型アンローダの部材情報画面

Fig. 7 Component image for a gantry crane

第 8 図 ガーダの診断箇所情報画面

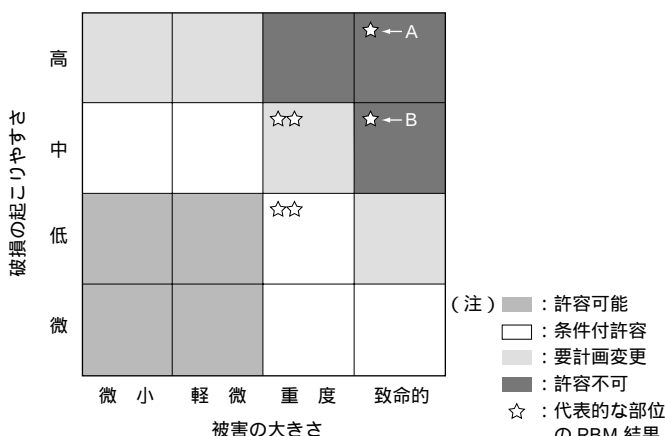
Fig. 8 Image screen of checked parts for a girder

して実働応力計測データ、腐食減肉データ、累積疲労損傷計算結果などの基礎データに基づき、専門家によって破損の起こりやすさと安全性・経済性被害度を評価した。その一例を第 9 図に示す。

今回対象とした橋型アンローダの RBM 評価結果を第 10 図に示す。評価は第 4 表に示す 18 部位の中から重要と考えられるカンチレバー（海側）およびガーダに対して行い、2 箇所（図中の A および B）の部位において総合評価は「許容不可」の結果を得た。カンチレバーフランジとウ

第 9 図 リスク評価結果画面の一例

Fig. 9 Risk assessment results (screen image)



第 10 図 リスク評価結果

Fig. 10 RBM assessment results

ェブの溶接部（第 10 図に示す A）は腐食に伴う減肉と疲労き裂が検出された。さらに計測した実働応力を基に計算した余寿命はほとんどないと判断され、総合評価は高リスク領域の「許容不可」となった。この部位に対して検査方法の変更や運転方法の変更を行ってもリスクの低減は不可能であり、「大規模な補修」または「新設」が必要であるという結果となった。ガーダフランジとウェブの溶接部（第 10 図に示す B）においても同様に腐食減肉が見つかったため、計測した実働応力と腐食減肉速度を考慮して累積疲労損傷則に基づいた余寿命計算を行い、リスク評価を行った。この結果、この部位に対しても総合評価は高リスク領域の「許容不可」となった。なお、第 10 図におけるほかの 4 点はカンチレバーおよびガーダの横行きレール下部、仕切板周辺部を評価した例であり、要計画変更（次期点検までの対策）および条件付許容（現状の検査体制で継続使用）と、比較的风险は低い評価となった。

実際には、対象とした橋型アンローダは従来の検討方法に基づいて新設することが決まっている。これは、RBM が従来の経験的方法と同じような結果を得ることができ、同

時に RBM の利点であるさまざまなリスク管理が可能になることを示している。

6. 結 言

本研究では、RBM のクレーン設備への適用を試みた。RBM によって従来熟練者が経験的に検討した対策と同じような結果が得られることが分かり、RBM をクレーン設備に適用できることが明らかになった。

RBM の最大の利点は、設備全体のリスクを把握することによって評価漏れをなくし、思わぬ損傷を防止できることである。さらに、熟練技術者の経験や過去の事例の伝承、余寿命評価基準による安全性向上、複数の設備間におけるメンテナンスの重要度の公平な比較、検査・補修理由の透明性向上、不要検査項目や検査不要部位の明確化、複数の評価期間を設定した長期的な運用計画の策定、など検査・メンテナンス計画の意思決定に対しさまざまな効果がある。

一方、RBM に関する課題は、設備の全部位を対象にした評価を行うため初期コストが高いことである。したがって、長期的な運用や部材や部位のパターン化により他機種へのデータ転用を行ってコストを低減する。RBM では、現在半定量的な方法を用いているため、専門家・熟練者の知識、経験が重要な役割を果たす。したがって、知識・経験を判定基準として定量化することも要求される。RBM を実施する担当者の判断能力も問われるが、実機への適用経験が解決してくれる。RBM は、将来減少する熟練者に代わる一つの意味決定手法として、国際競争力やコスト競争力を高める強力なツールである。

参 考 文 献

- (1) 小林英男：クレーン 第 38 巻 第 2 号 2000 年 p.2
- (2) H.W.ルイス (宮永一郎訳)：科学技術のリスク 昭和堂 1997年
- (3) American Petroleum Institute：Risk-Based Inspection Base Resource API Publication 581 (2000.5)
- (4) ASME：Risk-Based Inspection-Development of Guidelines Vol.3 Fossil Fuel-Fired Electric Power Generating Station Application CRTD-

Vol.20-3 (1994)

- (5) 富士彰夫,木原重光：火力発電プラントにおけるリスクベース・メンテナンス (RBM) の採用 メインテナンス No.231 冬季号 2002 年 pp.29 - 35
- (6) 木原重光,富士彰夫：設備管理の新技术 RBI-RBM を知ろう プラントエンジニア 第 32 巻 2000 年 10 月 pp.9 - 24
- (7) 富士彰夫,弥富政享,江口春樹,福岡千枝,岡塚敬明,木原重光,D. Worswick, B. Brown：設備保全 - 火力発電ボイラにおけるリスクベースメンテナンス (RBM) 法の適用 圧力技術 第 39 巻 第 1 号 2001 年 1 月 pp.60 - 67
- (8) 高橋 潤,野出 毅,八田暢哉,富士彰夫：セメントプラントへのリスクベースメンテナンス (RBM) 手法の適用 石川島播磨技報 第 42 巻第 6 号 2002 年 11 月 pp.319 - 323
- (9) 富士彰夫：リスクベースメンテナンス (RBM) による新しい設備管理技術 クレーン 第 39 巻 第 6 号 2001 年 pp.2 - 7
- (10) 日本鋼構造協会：鋼構造物の寿命に関する調査 1991年 8 月 p.29
- (11) 木原重光,大友 暁：压力容器規格における安全率引き下げの検討 日本機械学会材料力学部門 M&M2000 講演論文集 2000 年 10 月 pp.599 - 600
- (12) 橋内良雄：クレーン構造部分の疲労設計基準の見直し 日本機械学会材料力学部門 M&M2000 講演論文集 2000 年 10 月 pp.619 - 620
- (13) 日本規格協会：JIS B 8211 (案)クレーン鋼構造部分の計算基準 2001 年
- (14) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針 同解説 技法堂出版 1993 年
- (15) Y. Kumakura, M.Takanashi, A. Fuji, M. Kitagawa, M. Ojima and Y. Kobayashi：Fatigue Strength of Coated Steel Plate in Seawater Proceeding of the 9th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Brest (1999) p.108
- (16) 弥富政享,高橋 潤,富士彰夫,小日向寿治,信太雅人：運搬機械のリスク評価による余寿命診断システムの開発 日本機械学会第 9 回交通・物流部門大会講演論文集 No.00-50 2000 年 12 月 p.281