



入門講座

リスクベース工学入門-3

リスクベースメンテナンス Risk-Based Maintenance

富士彰夫
Akio Fuji

(株) IHI テクノソリューションズ
シニアエンジニア

1 はじめに

石油精製、石油化学、貯槽、発電、船舶、海洋構造物、パイプライン、鉄鋼などのプラントや設備あるいは各種の機械構造物においてリスク（破損発生確率と影響度または被害の大きさの組み合わせ）を基準にした新しい保全技術の導入が盛んになっている。従来法定検査の下で時間計画型の検査や保全を行ってきたが、事業者による自主検査への制度移行¹⁾や設備の老朽化による事故の増加、経済効率の低下などの変化に対応することが求められている。図1は、一般的な工業設備や製品の計画からリサイクルまでのライフサイクル管理を表したものである。各過程で様々な不確実性が存在するため、そのリスクを評価する方法が提案されている。その中で最も長い時間取り扱われるのが運転から保全の繰り返し期間であり、この繰り返しをライフサイクルメンテナンス (LCM)²⁾ (図5参照) と称して、できるだけ長い間設備の信頼性と経済性を維持する工夫がされる。リスクベースメンテ

ナンス (Risk Based Maintenance、以後、RBM) あるいはリスクベースインスペクション (Risk Based Inspection、以後、RBI)³⁾ は、今までの経験や知識を生かしつつ相対的なリスクの大きさを指標にして検査やメンテナンスの最適化のための意思決定をするひとつのツールである。ここでは、RBM (またはRBI) の効果、最近の動向、基本的な手法および今後の方向性について述べる。

2 RBMの効果

RBMを実施することにより、以下のような効果が単独または相乗効果として得られる。

2.1 定期検査間隔の延長

欧米では、RBMを適用して具体的に定期検査の延長を関係官庁や主管機関に認定してもらう例が多い⁴⁾。ただし、新設設備ではなく比較的長い運転経験があり、数回の検査を実施している場合に限られる。RBMの結果はもちろんだが、どのような評価システムやソフトウェアを使用しているかも重要なポイントになる。安定して運転されている機器や機械類は、開放点検などを行うとむしろ故障が増加することがあり、この効果への期待は大きい。

2.2 稼働率の向上

損傷状態や余寿命の把握、検査・メンテナンスの最適化を行うことにより、予想できない原因による計画外停止が減少する⁵⁾。前項の定期検査間隔の延長も結果として稼働率向上に貢献する。RBMでは構成する機器や部材の状態を階層的に把握するため、設備全体の信頼性（健全性および安全性）が向上する。

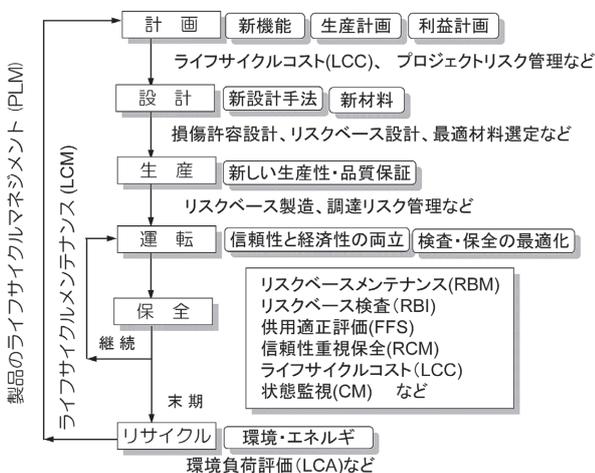


図1 工業製品のライフサイクルマネジメントにおけるリスク評価の役割

クの3段階で構成されている。この内、考え方および評価手法について2005年以降欧州標準手法として手直しされ、2008年欧州各国の標準化機関の集合組織であるCEN(欧州標準化委員会)から、CWA(CEN Workshop Agreement)15740「タイトルは上記と同」¹⁸⁾として正式に認められた。今後は、EN(Europäische Norm)規格への文書化の作業に入る。もしEN規格になるとISO規格化の可能性もあり国際的な影響力が出てくる。静的機器(配管・圧力容器など)の損傷および破損を取り扱うRBMに加え、RIMAPでは回転機など動的機器も対象にして、機能・性能基準対応のRCM(Reliability Centered Maintenance、信頼性中心保全)およびMTBF(Mean Time Before Failure、平均故障時間)、さらにFFS(Fitness For Service、供用適性評価)、HAZOP(Hazard and Operability Study 化学プラントのプロセス流れ図に従う問題特定)、安全システム、電気計装などとの関連も考慮に入れできるだけ幅広い産業分野で適用できるよう考慮している¹⁹⁾。しかし、欧州各国の法規・基準や政府の考え方が異なるため標準化に対する今後の調整が必要になる。実際に欧州各国(例えば、オランダ(圧力容器RBI規格)²⁰⁾、セルビア、イタリア、フランス、ドイツ、イギリス、ポルトガルほか)⁴⁾では、自国基準、APIガイドライン、市販のソフトウェアなど様々な形態でRBMの導入を行っている。

3.1.3 国内

国内ではHPI(日本高圧力技術協会)が非原子力分野のRBMガイド²¹⁾およびRBMハンドブック²²⁾を2009年に発行予定である。化学工学会装置材料委員会では破損発生確率評価に必要な検査有効度をまとめた「設備保全のための検査有効度ハンドブック」²³⁾を発行している。さらに、日本学術振興会リスクベース設備管理第180委員会²⁴⁾ではアカデミックなアプローチによる損傷係数の検討、Class NK(日本海事協会)では船用主機関のリスクベース検査基準²⁵⁾、日本鉄鋼協会では鉄鋼設備の標準的なRBM手法²⁶⁾の検討が進められている。なお、日本国内の橋梁など社会資本関連設備では“リスク”を使わずアセットマネジメント²⁷⁾手法による維持管理を指向している。

3.1.4 その他(豪州、韓国、中国、東南アジア、サウジアラビアなど)

他の地域でもRBM(RBI)の導入が盛んである。豪州では、パイプライン規格であるAS2885「Pipeline-Gas & Liquid Petroleum」(1997)²⁸⁾にRBIの考え方を導入している。韓国の歴史は比較的浅いが、石油化学²⁹⁾、電力業界³⁰⁾において既に標準的なRBM手法を導入している。中国では、近年急速にRBM(RBI)の導入が進みパイプラインを含

む145の石油化学プラントで国家的な共同研究が実施された³¹⁾。さらに橋梁や高層ビルなどの建築・土木分野へリスク評価が適用されつつある。マレーシアでは火力発電所の定期検査期間延長のための標準評価法としてRBMが導入された³²⁾。その他、サウジアラビアなどでも石油およびガス製造設備、輸送設備にRBIが適用されている³³⁾。

3.1.5 その他(既存のソフトウェア)

RBMを実施する際各種のガイドラインを参考にして独自でシステムを構築することもできるが、多くの情報やデータおよび複雑な評価を取り扱うため既存のソフトウェアを有効に利用する方法がある。同時に、専門家の指導やコンサルタントを活用する。代表的な既存(市販)のソフトウェアは、APIRBI Software (version 8.03.01)³⁴⁾、RoIM(独TÜF-SUD)³⁵⁾、RISKWISE(英国TWI)³⁶⁾、RBMS(英国ESRT)³⁷⁾、AXSYS Integrity(米国Bentley)³⁸⁾、ORBIT(DNV)³⁹⁾、RBI(Bureau Veritas)などがあり様々な産業分野へ適用が可能である。

3.2 国内の機種別適用事例

RBMの海外での適用事例は多いが、ここでは国内における機種別代表事例を示す。

火力発電設備では、1999年、初めて火力発電用ボイラへRBM⁴⁰⁾が適用され、その後新保全システム⁴¹⁾、FREEDOM⁴²⁾などのシステムの導入、蒸気タービン^{43,44)}への適用がされている。発電所全体の保全システムをRCM(信頼性中心保全)とし一部にRBMを適用する方法⁴⁵⁾も示されている。火力発電設備では設備全体を構成する機器や部材の長期間使用に伴う劣化・損傷評価から得られる相対的リスクの大きさに従い検査やメンテナンスの優先度を決定する⁴⁰⁾。

貯蔵設備では、長期間使用されている備蓄石油タンク⁴⁶⁾およびLNG(液化天然ガス)地上2重殻タンク⁴⁷⁾などにRBIあるいはRBMが適用されている。各タンクを構成する構造部材の健全性評価からそのタンクの検査・保全計画を決めることが可能だが、一方で貯蔵・備蓄基地に設置されている複数のタンク間の保全計画を比較することも可能である。また、ガスパイプラインについては劣化・損傷に起因する影響度が大きい国際的な検討がされているが国内でもRBMの適用⁴⁸⁾や日本ガス協会においてリスク評価法が検討されている。

運搬機械など溶接構造物の例として、橋型アンローダ⁴⁹⁾では鉄鉱石や石炭の荷役に伴う構造部材の疲労損傷や腐食を対象にしたRBM評価が実施されている。

船舶では、船舶主機関への適用^{25,50)}をはじめLNG船の荷役機器(配管、弁など)を含むRBM⁵¹⁾が実施されている。ABS、DNV、Lloyd's Register、Class NKなど船舶検査認

間基準保全)に従いMTBF(故障までの平均時間)からリスクを評価する場合がある。ここでは、静的機器(配管、压力容器など)を対象にする。

4.4. リスク評価

リスクは次式で計算される。

$$\text{リスク} = \text{破損発生確率 (PoF, Probability of Failure)} \text{ (または破損の起こりやすさ (LoF, Likelihood of Failure))} \times \text{影響度 (または被害の大きさ (CoF, Consequence of Failure))}$$

リスクの計算には、定性的(ランキングなど)、半定量的(例えば余寿命評価と損傷係数の組み合わせ)、定量的(破損発生確率データを使用)の3種類がある。定性的であっても専門家により正しい評価に近づくこともあり、定量的でも母集団によって破損発生確率が異なる場合があり、どれが正しいとは言えない。リスクは、不確実を表すものであり、できるだけ周辺情報を活用してその不確実性を減らす努力が必要である。

4.4.1 破損発生確率(破損の起こりやすさ)

破損発生確率(PoF)は以下のように表すことができる⁹⁾。

$$\text{PoF} = \text{一般破損頻度 (GFF, Generic Failure Frequency)} \times \text{設備特有係数} \times \text{設備管理係数}$$

一般破損頻度は、API RP581⁹⁾、OREDA⁶⁰⁾、NERC-DB¹⁴⁾などから得ることができるが必ずしも対象にしている設備や機器に適合するデータがあるとは限らない。設備特有係数は、損傷係数(Damage Factor)あるいは損傷速度と検査有効度で構成する。API RP581⁹⁾やHPIハンドブック²²⁾には、減肉、応力腐食割れ、CUI(保温材下腐食)その他の損傷メカニズムに対する損傷係数が用意されている。検査有効度は、検査の信頼度によるリスクの低減効果をランク付けしたもので検査手法や検査範囲に依存する。詳細はAPI RP581⁹⁾や化学工学会化学装置材料委員会検査有効度ハンドブック²³⁾を用いることができる。設備管理係数は、設備の管理状態(運転、検査、補修記録やモニタリングなど)に伴うリスクの増減を評価するのに用いる。破損発生確率データが十分得られていない場合に事前確率を仮定しベイズ定理を用いて検査実施毎に改善する手法^{61,62)}が提案されており一部実用化している²⁵⁾。定性的および半定量的な評価では、余寿命評価、検査有効度などを組み合わせたランキングを行ってリスクを決定する³⁾。破損発生確率(PoF)のランキングの一例¹⁸⁾を

示したのが、表1である。必ずしも5段階である必要はないが、5~1のランクでおおよそ表のような定義をする。このランクはリスクマトリックスの縦軸として用いる。

4.4.2 影響度(被害の大きさ)

被害の大きさ(CoF)は、対象機器の破損が生じた時の健康、安全、環境、経済性について評価する。石油精製や石油化学分野では内容物の性質や使用条件により被害の大きさを評価する種々の手法が提案^{9,18)}されており、計算ツールも用意されている。被害の大きさは、対象設備毎に異なるため独自の評価をする必要がある。CoFのランキングの一例を表2¹⁸⁾に示すが、社会的な影響、イメージなども評価項目になり得る。表2はリスクマトリックスの横軸に相当する。

4.5 リスク受容の評価

定量的なリスク計算以外のほとんどのリスク評価では、図4に示すリスクマトリックス¹⁸⁾を利用する。このマトリックスに評価したリスクをプロットし、リスクカテゴリを決定する。リスクカテゴリの区切りや定義は様々であるが、リスク低減対策のための指標として用いる。ちなみに表3³⁾は筆者らが用いているリスクカテゴリと対策案である。

4.6 対策策定と意思決定

表3に示したように、筆者らは4つのリスクカテゴリを定義して実用化している。4つのカテゴリは、リスクが大きい順

表1 破損発生確率(PoFまたはLoF)ランク一例¹⁸⁾

項目 ランク	破損の 定義	MTBF	PoF
4	多分発生する	1-5年	0.1-0.01
3	可能性有り	5-10年	0.01-0.001
2	ほとんど発生しない	10-50年	0.001-0.0001
1	全く発生しない	100年以上	<0.0001

MTBF:故障までの平均時間

表2 影響度(被害の大きさ)(CoF)ランクの一例¹⁸⁾

評価項目	(CoF軸の例)				
	A	B	C	D	E
健康(Health)	影響なし	要注意	一時的健康被害(治療可能)	長期慢性疾患	生命に関わる深刻な健康被害
安全(Safety)	作業に支障なし	簡単な援助	数日作業に支障	長期療養	死亡事故
環境(Environment)	影響なし	ほとんど無し	わずかな影響	現地	広範囲・長期
経済性(Business)	<1万 €	1万-10万 €	10万-100万 €	100万-1千万 €	>1千万 €
セキュリティ	無し	現地の一部	現地全般	周辺広域	社会的脅威
イメージ低下	無し	ほとんど無し	悪い評判	業界的	政治的
社会的混乱	無し	ほとんど無し	わずかな影響	小さい領域	大きい

に許容不可、要計画変更、条件付許容、許容可能である。本リスクカテゴリーの特徴は中間的なリスク“要計画変更”であり、英語ではUndesirableを意味する。これに該当する機器に対し、次期検査までに(あるいは次期検査時に)運転条件変更やモニタリングなどのリスク低減対策を行う。その対策の妥当性は再リスク評価によって確認できる。従って、この段階で策定する検査計画・メンテナンス計画が将来の設備保全の基本的計画になる。

4.7 対策実施と報告

リスク評価を含む対策実施の結果および検査結果などを報告書にまとめるとともにデータベース化する。この繰り返しでLCM(ライフサイクルメンテナンス)の基本となる。筆者らが提案しているLCMの概念²⁾を図5に示す。RBMによ

て得られた高リスク部位の対策の短期コスト効果あるいは長期的なLCC(ライフサイクルコスト)を評価し、妥当であれば検査・メンテナンス計画を実施する。得られた余寿命評価や事例データは、将来の検査時に実施するRBMの基本データとなる。このようなシステムにより例えば一括長期メンテナンスビジネス⁶³⁾が可能になる。

4.8 全体レビュー

LCMの積み重ねやLCC²⁾評価を含む最適検査・メンテナンスの実績が設備全体のマネジメントの改善や経営効率改善に繋がる。従って、全体をレビューする仕組みが必要である。

5 今後の方向性

RBMの基本的な枠組みはほとんど完成したとってよいが実用上設備やプラント全体の保全・維持管理について、検討すべき課題があり今後とも改善が必要である。RBMは、配管や圧力容器など静的な機器を対象にしてきたが実用上動的機器(回転機器)の検査・メンテナンスも考慮したRCM(信頼性中心保全)との関係を明確にする必要がある。前述したようにRIMAP¹⁸⁾ではその関係を考慮しており他の基準でも取り入れる必要がある。き裂や減肉に対する破壊力学評価は別途FFS(供用適正評価)を用いて行っているが実際にはRBMとFFSは同じ場面で使用することが多いため連携を図る動き⁶⁴⁾が出ている。損傷モードやメカニズムの定義を国際的に統一するためPVRC(米国圧力容器研究会議)、EPERC(欧州圧力容器研究会議)、JPVRC(日本圧力容器研究会議)が協力する方針⁶⁴⁾が出されている。さらにプラントの保全・維持管理の現場では、構造機器や回転機器だけではなく安全装置や非常装置を含めた電気計装システムがリスク評価と大いに関係する。従って国際電気規格IEC61508で定義される機能安全レベル(SILレベル)もRBMと同時に評価すべきである⁵²⁾。リスク評価の基盤となる損傷データベースの構築⁶⁵⁾も重要な課題である。従来損傷や不具合の経験をデータベース化する動きはあったが、定量的な破壊発生確率データを得るには損傷データだけではなく正常稼働時間を含むデータベースの再構築が必要となる。

6 さいごに

RBM(またはRBI)は、リスク評価を用いて検査やメンテナンス計画の最適化を行うためのひとつのツールである。欧米やアジアを初めとして国際的に急速に普及しつつあり、さらに欧米は標準化や規格化により主導的な立場を得ようとし

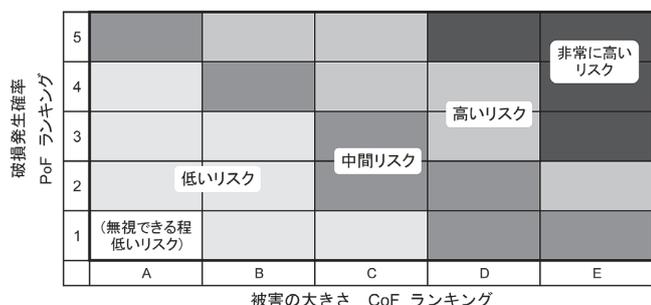


図4 リスクマトリックスとリスクカテゴリーの一例¹⁸⁾

表3 リスクカテゴリーと対策の一例³⁾

リスクカテゴリー	リスクレベル	対 策	
1	許容不可	高い	直ちにカテゴリ3または4へリスク低減
2	要計画変更	やや高い	次期検査までにリスク低減(運転条件や検査手法の変更、モニタリングなどの採用)
3	条件付許容	中間	現状の検査を継続して実施する
4	許容可能	低い	リスクを大幅に上げない範囲で法定検査以外は検査の省略も可能

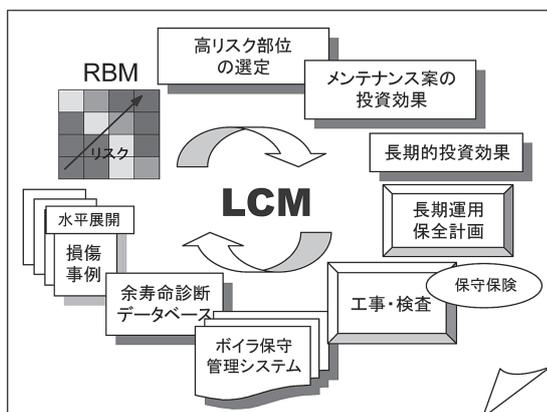


図5 ライフサイクルメンテナンス(LCM)の考え方²⁾

ている。国内でも自己責任による保全や維持管理の手法として注目されているが、未だ“リスク”に馴染めない風土や、コスト効果が顕在化しないなど適用のための阻害要因がある。国際競争に打ち勝つためにも早急な標準化や普及のための施策が必要である。

参考文献

- 1) 小林英男：HPI 技術セミナー第6回「圧力容器関連規格の国内外動向」, (2005)
- 2) 富士彰夫：検査技術, 10, (2005) 4, 13.
- 3) 木原重光, 富士彰夫：リスク評価によるメンテナンス, RBI/RBM 入門, 日本プラントメンテナンス協会, (2002)
- 4) API-RBI European Workshop, Milan, (2008)
- 5) L.G.Smith : ASME, PVP, (1993) 251, 27.
- 6) R.Kauer, 泉：化学装置, (2007) 7, 2.
- 7) 関西電力：http://www.kepco.co.jp/pressre/2002/0128-1_1j.html.
- 8) HSE : ALARP Suite of Guidance, http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarp.htm.
- 9) API RP581 2nd Edition, (2008)
- 10) API 579-1/ASME FFS-1 (2007)
- 11) P.A.Henry : API RBI European Workshop, Milan, (2008)
- 12) API RP580 2nd Edition Draft 8 (2007)
- 13) ASME : CRTD 20-1 (1991)
- 14) ASME : CRTD 20-3 (1994)
- 15) R.Chambers : EPRI 1004382 (2002)
- 16) ABS : Guide for Surveys Using RBI for the Offshore Industry, (2003)
- 17) 例えば DNV : http://research.dnv.com/rimap/.
- 18) CEN : CWA 15740 (2008)
- 19) A.Jovanovic : API RBI European Workshop, Milan, (2008)
- 20) The Netherlands rules for pressure vessels “RBI”, T0260 (2002)
- 21) 柴崎敏和：圧力技術, 44 (2006) 6, 357.
- 22) 政友弘明：圧力技術, 44 (2006) 6, 362.
- 23) 化学工学会化学装置材料委員会保全分科会：設備保全のための検査有効度ハンドブック (2006)
- 24) J.Sakai : Proc.of 4th Int.Workshop on Risk-Based Engineering (RBE), Tokyo, (2008), 273.
- 25) 椎原裕美, 黒澤忠彦, 西口優美, 酒井信介, 濱野雅巳, 松本弘, 田上邦雄, 富士彰夫, 弥富政享, 志村義治：平成 20 年日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2008)
- 26) 日本鉄鋼協会：http://www.isij.or.jp/Bukai/Gakujutsu/Kenkyu/seisan.htm#seisan3.
- 27) 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦, 技報堂出版, (2005)
- 28) Australian Standard : 2885 Pipeline-Gas & Liquid Petroleum, (1997)
- 29) Sang-Min Lee, Yoon-Suk Chang, Jae-Boong Choi, and Young-Jin Kim : J.of Pressure Vessel Tech, 128 (2006) 3, 445.
- 30) Bum-Shin Kim : Proc.of 4th Int.Workshop on Risk-Based Engineering, Tokyo, (2008), 49.
- 31) Shan-Tung Tu : Proc.of 4th Int.Workshop on Risk-Based Engineering, Tokyo, (2008), 88.
- 32) T.K.C.George, D.Worswick and, R.J.Browne : POWERGEN ASIA, Malaysia, (2001)
- 33) Tim McGhee : API RBI European Workshop, Milan, (2008)
- 34) The Equity Engineering Group Inc. : http://www.equityeng.com/api-rbi-software.php.
- 35) TÜF-SUD : http://www.tuv-sud.jp/plant/tuv-roim.html.
- 36) TWI : http://www.twisoftware.com/riskwise.
- 37) ESR Technology : http://www.esrtechnology.com/page_view.asp?InfoID=322.
- 38) Bentley : http://www.bentley.com/en-GB/Products/Bentley+AXSYS+Integrity/.
- 39) DNV : http://www.dnv.com/services/software/products/safeti/safetirbi/orbit.asp.
- 40) 富士彰夫：圧力技術, 45 (2007) 3, 154.
- 41) 関西電力HP：(2002), http://www.kepco.co.jp/pressre/2002/0128-1_1j.html
- 42) H.Matsumoto, N.Komai and K.Kimura : Conf.on Decision Making for Risk Management, Houston, (2005)
- 43) 藤山一成, 秋國康成, 齊藤和宏, 岡崎光芳, 児玉寛嗣, 藤原敏洋：火力原子力発電, 54 (2003) 5, 21.
- 44) 桜井茂雄：圧力技術, 45 (2007) 5, 46.
- 45) 高崎照夫, 二宮史尚, 森田昌夫, 黒岩智樹：火力原子力発電, 55 (2004) 9, 936.
- 46) 柴崎敏和, 高木伸夫, 松本精二, 角田浩, 西晴樹：圧力技術, 46 (2008) 2, 85.
- 47) 富士彰夫, 高橋潤, 戸田勝哉：Jitsu-Ten (実務&展望), 231 (2006), 47.
- 48) 吉川正樹：配管技術, (2006), 14.
- 49) 富士彰夫, 弥富政享, 馬場秀成：Jitsu・Ten (実務&展望), 230 (2006), 53.

- 50) 石村恵以子, 高木正英, 桐谷伸夫, 永井建夫, 春海一佳: 第78回マリンエンジニアリング学術講演会, (2008), 113.
- 51) H.Shiihara: 3rd PAAMES and AMEC2008, Chiba, (2008)
- 52) 石丸裕: 第60回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, (2008) 31.
- 53) 三笠哲郎, 大野敦史, 小森一夫: Plant Engineer, (2008), 8, 2.
- 54) K.TODA and A.FUJI: 3rd Int.Workshop on Risk-based Engineering, Seoul, (2007)
- 55) 畑明仁, 堀倫裕, 亀村勝美: 大成建設技術センター報, 40 (2007) 09-1
- 56) 松田貞則: こうえいフォーラム, 14 (2006) 1.
- 57) 堀川浩之, 吉川正樹, 橋本光行: JFE 技報, 11 (2006) 56.
- 58) H.Kihara: CORROSION SCIENCE, 49 (2007), 112.
- 59) 日本建築学会編: 事例に学ぶ 建築リスク入門, 技報堂出版, (2007)
- 60) OREDA: Offshore Reliability Data 4th Edition, SINITFF, (2002)
- 61) 酒井信介: 圧力技術, 42 (2004) 5, 284.
- 62) 酒井信介: 圧力技術, 43 (2005) 1, 22.
- 63) 安藤美彦, 柏木智光, 岡塚敬明, 齋藤規子, 富士彰夫: 石川島播磨技報, 43 (2003) 6, 220.
- 64) D.A.Osage: API RBI European Workshop, Milan, (2008)
- 65) 酒井信介: 保全学, 5 (2006) 1, 24.

(2008年12月4日受付)