

設備の重要度と信頼性解析を判断基準とした 機械設備の維持管理

平 子 啓 二

(独)水資源機構では、治水施設や利水施設などの社会資本の効率的な維持管理を実現するために、これまで画一的に実施してきた予防保全を見直し、設備の特性に応じた保全方法を採用することとした。

保全方法の採用に当たっては、設備の社会的重要度分類と高い信頼性を要求される原子力産業や航空機産業などで用いられている FMEA（故障モード影響解析）と RCM 解析（信頼性重視保全計画解析）の信頼性工学をゲート設備やポンプ設備などの機械設備に適用し、設備の信頼性を現状の水準に確保した上で、事後保全の採用、点検周期の延長、点検項目の削減などにより保全作業の合理化とコストの縮減を図った。

この報文は、機械設備の維持管理を合理化するために実施した検討内容および解析手法などについて報告するものである。

キーワード：社会資本の効率的維持管理、設備の社会的重要度、信頼性工学、最適保全方法

1. はじめに

(独)水資源機構の事業は、農業用水、工業用水、水道用水を供給する利水事業から、洪水調節、既得用水の確保、水環境の保全などの治水事業まで多方面にわたり、国民生活や経済活動に無くてはならないライフラインとなっている。

(独)水資源機構が保有するゲート設備やポンプ設備などの機械設備は、これら事業の主たる機能である取水、制水、揚水、排水などを担うものであり、これら設備が機能を失った場合、その目的の重要性から地域社会に与える影響は非常に大きなものとなる。

機械設備は、構成している機器、部品が運転に伴い回転・摺動するため摩耗や経年劣化により故障や機能低下を生じる宿命にあり、設備機能を正常に維持するためには、日常点検、定期点検、点検結果に基づく修理、故障を未然に防止するための部品交換や機器更新、機能等が低下した設備の更新など多岐にわたる維持管理が必要である。

(独)水資源機構は、平成6年に機械設備の点検・整備基準、機器の標準更新年数および判定基準値などを定めた「機械設備管理指針(案)」を制定し、設備の維持管理を行ってきたが、設備数の増加に伴い年間に要する維持管理費が増大してきたため、将来に向けた社会資本の効率的な維持管理を実現することが組織の命題となった。

このため保全方法の決定に設備の社会的重要度分類と原子力産業や航空機産業などで一般化している信頼性工学を導入し、設備の信頼性を現状水準に確保した上で保全方法の最適化と保全コストの適正化を図り、機械設備の維持管理を合理的かつ論理的とした。

2. 検討上の課題と対応策

これまでの機械設備の維持管理は、「設備の故障は一切許されない」とする観点から、故障を発生させない予防保全を基本に実施されていた。

また、ダム設備と水路設備のように設置目的や稼働形態の異なる設備を画一的に維持管理していたことから、適用していた保全方法が合理的でない面もあった。

これらの現状を踏まえ、検討課題および対応策として次の項目を抽出した。

〈検討課題〉

- ①設備の設置目的（治水目的、利水目的など）により、社会的重要度が異なり、自ずと保全方法（項目、周期など）も異なるべきではないか。
- ②設備機能に大きな影響を与えない機器・部品は、事後保全（故障発生後に機能修復）にできるのではないか。
- ③設備の運転形態（常用系、待機系）により保全方法（項目、周期など）を変えるべきではないか。

表一 1 機械設備の社会的重要度分類基準

分類基準	内	容
レベル I 社会的影響度大	公衆の人命・財産もしくは社会経済的に重大な影響を及ぼす恐れがある場合。	洪水・高潮などの危険が発生した場合に、災害の発生を防止し、被害を軽減することは(独)水資源機構施設の責務である。これら治水目的に設置された機械設備が正常に機能しない場合、重大な災害を引き起こし、直接的に公衆の人命や財産が危険にさらされ、かつ社会経済的にも重大な影響を及ぼすことが想定される。よって、これら設備をレベル I (社会的影響度大) に分類した。
レベル II 社会的影響度中	利水事業者の活動を介して、社会経済的に影響を及ぼす恐れがある場合。	農業用水、工業用水、水道用水、発電用水などの供給と河川流水の機能を正常に維持することは(独)水資源機構施設の責務である。これら利水目的・環境保全目的で設置された機械設備が正常に機能しない場合、利水事業者の活動などを介して地域社会の活動に影響を及ぼす恐れが想定される。よって、これら設備をレベル II (社会的影響度中) に分類した。
レベル III 社会的影響度小	社会へ影響を及ぼす恐れがない(小さい)場合。	当該設備の故障影響が機構内部での被害に留まり、国民生活や資産に直接の影響を与えない(もしくは影響が非常に小さい)場合は、レベル III (社会的影響度小) に分類した。

〈対応策〉

- ①設備の社会的重要度分類基準の設定。
- ②設備の維持管理に関する合理的解析手法の選定(解析手法の選定・評価)。
- ③設備の社会的重要度分類に応じた保全方法の決定。

表一 2 設備区分と適用保全方法

設備区分	分類基準	適用保全方法
I	故障時の社会的影響度 大	予防保全
II	故障時の社会的影響度 中	予防保全
III	故障時の社会的影響度 小	事後保全

3. 設備の社会的重要度分類

機械設備の社会的重要度分類の検討に当たり、次の思想を分類の指標とした。

当該設備が何らかの故障によりその目的・機能を達成できない状況を想定し、そのことに起因する国民生活や資産などの被害規模

指標に沿って、設備の設置目的・機能および設備規模から、社会的重要度分類するための具体的分類基準を表一 1 のとおり整理した。

分類基準は、定性的なものとし、設備分類の大枠のみを規定するものとした。

また、代替設備の有無、設備の冗長性、設置場所の条件や設備の持つ特殊性などにより、重要度レベルを調整できる柔軟な分類基準とした。

4. 社会的重要度分類と適用保全方法

設備の社会的重要度分類により、論理的に類似の社会的重要度別グループに区別することが可能となり、保全作業の合理化を検討する際の区分とすることができた。

分類における社会的重要度区分 I が故障時における社会的影響が大きい設備、つまり維持管理を重点的に実施すべき設備とし、区分毎に適用する保全方法は、表一 2 とした。

設備区分 II に求められる信頼度は、当該設備故障時の社会に与える影響度が設備区分 I より小さいので、信頼度も小さくできると考え、点検周期を延長して信頼度の調整を図った。設備区分 II の信頼度は、暫定的に設備区分 I の 90 % 信頼度とし、点検周期を設備区分 I の 2 倍として今後の保全作業のなかで周期の検証を行うこととした。設備区分 III の設備については、設備区分 II よりさらに地域社会への影響が少ないことから、要求信頼度を引き下げ事後保全とした。

5. 合理的解析手法の選定

機械設備は、「目的に応じた機能や性能(品質)」を持ち、「使用に当たっては故障が少なく安定して使用できる(信頼性)」ことが求められる。

信頼性が品質と並ぶ製品の性能であると認識されたのは、第二次世界大戦以降アメリカ国防省が信頼性評価技術の検討を始めたことが契期となっている。

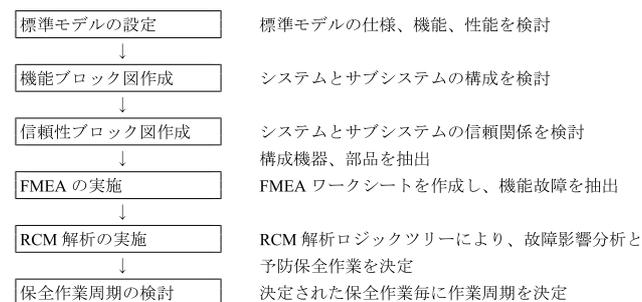
その後原子力産業、航空機産業など各分野で信頼性技術が導入され各種解析手法が開発、改良され現在に至っている。

信頼性工学でシステムの故障率を求める手法としては、一般的に FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) と FTA (Fault Tree Analysis) が広く知られている。

FMEA がシステムにおける全ての機器、部品の故障を解析できるのに対して、FTA は頂上事象と無関係な機器、部品については解析されないため、通常は明確な問題点が設定できる場合には FTA が用いられ、問題点がどこに潜んでいるか判断できないときは FMEA が用いられる。

今回の解析は、全ての機器、部品を対象とした FMEA を採用した。FMEA は、システムの弱点箇所や故障率を検討できるが、この結果を以て適切な保全計画を立てることは難しい。FMEA などを用いて最適コストの保全方法を検討する手法は、アメリカの航空会社で開発された RCM 解析 (Reliability Centered Maintenance 解析) が最も広く用いられている。この RCM 解析は、対象となるシステムの機器や部品が有する機能と、各機器などの故障が及ぼす影響を信頼性データ (FMEA など) に基づき明確にし、機能面、安全面、経済面などにおける重要な故障について、それに対処するために適用可能で効果的と考えられる保全作業を体系的に選定できる解析手法である。RCM 解析を適用することにより、次の成果が得られる。

- ①効果の少ない予防保全を削減し、事後保全とできる。
- ②設備稼働状態を考慮しながら、時間計画保全から状態監視保全に移行できる。
- ③必要な時間計画保全を選定し、その保全頻度を最適化できる。



図—1 FMEA をベースにした RCM 解析フロー

- ④保全作業の最適化により保全コストを削減できる。
- FMEA と RCM 解析による具体的解析フローを図—1 に示す。

6. FMEA の実施

標準モデルに従いサブシステムの構成要素である機器、部品毎に故障モードを抽出し、抽出した各故障モードについて致命度 I ~ IV の 4 段階に分類し、その故障が上位のサブシステム、システムに与える影響を解析した。

システムの機能に重大な影響を及ぼす機器、部品 (致命度 I・II) については、システムの信頼性を確保するため、故障を発生させない予防保全を施し、逆にシステムの機能に大きな影響を与えない機器、部品 (致命度 III・IV) については、できる限り事後保全として機器、部品の寿命を使い切ることにより保全コストの削減を図ることとした。FMEA の致命度評価と RCM 解析への展開を表—3 に、FMEA の解析結果を表—4 に示す。

表—3 FMEA の致命度分類と RCM 解析への展開

致命度	故障評価	保全方法
I	致命的 (機能停止)	予防保全を基本とし、RCM 解析に展開。(当該故障が発生した場合、システムが機能停止もしくは機能低下に陥ることから、設備の信頼性を確保するため予防保全を実施し、故障発生を未然に防ぐ。)
II	重大 (機能低下)	
III	軽微 (機能維持可能)	事後保全を基本とする。(当該故障が発生した場合においても、システムの機能維持が可能のため、コスト効果を考え、異常が発生した時点で補修等を実施する事後保全とする。)
IV	微小 (機能に支障なし)	

表—4 FMEA ワークシート (抜粋)

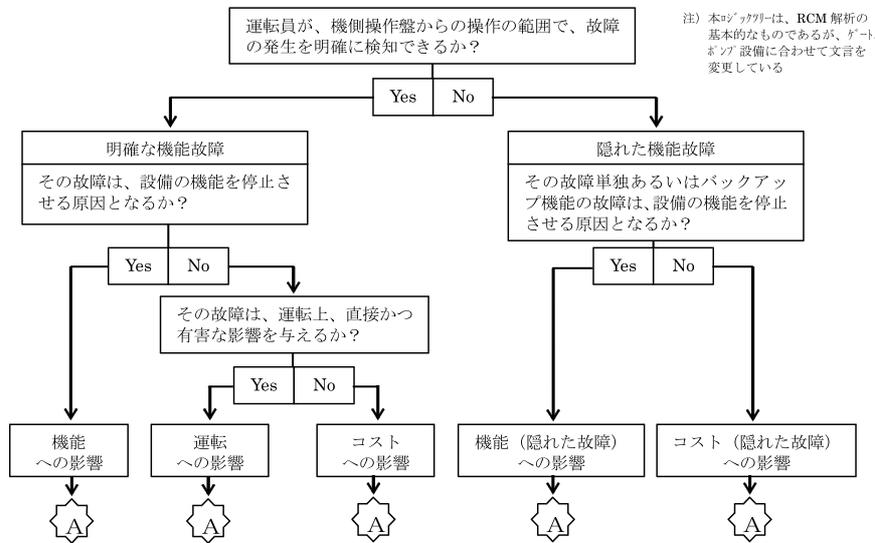
設備名：非常用洪水吐きゲート

サブシステム名：ワイヤロープウィンチ式開閉装置

設備形式：ラジアルゲート (ワイヤロープウィンチ巻上式)

冗長性 (予備設備)：なし

部品名	機能	故障モード	故障原因	故障の影響		致命度 (故障等級)
				サブシステム	設備 (システム)	
電動機	ゲート開閉用動力	過熱	過負荷, 固着, 保護装置故障	機能低下	機能低下	II (予備機有り)
電動機	ゲート開閉用動力	振動, 異音	偏芯, ベアリング経時劣化機能低下	機能低下	機能低下	II (予備機有り)
電動機	ゲート開閉用動力	絶縁抵抗不良	湿気, 経時劣化	機能低下	機能低下	II (予備機有り)
電磁ブレーキ	電動機の制動	固着	腐食, 間隙調整不良, ライニング磨耗	機能停止	機能低下	II (予備機有り)



図一 故障モード影響評価 RCM ロジックツリー

7. RCM 解析の実施

FMEA により故障等級が上位（致命度 I・II）と判断された機器、部品の故障モードにつき、図一 2 の故障モード影響評価 RCM ロジックツリーを用いて、各々の故障発生におけるシステムへの影響を、影響別に分類した。このロジックツリーにより機器、部品の故障モードを FMEA における影響評価よりさらに踏み込んだ具体的な影響別に分類し、その結果を基にそれぞれの影響内容に応じた保全計画を策定した。

図一 2 により分類したそれぞれの影響内容と採用すべき保全方法の基本ルールは、表一 5 のとおりとした。

そして次に、図一 3 の保全方法選定 RCM ロジックツリーに従い最適な保全方法を選定していった。

保全方法選定 RCM ロジックツリー上、日常保全是基本的に全ての機器、部品に適用されるものであり、他の保全作業は上から順に保全コストが経済的に有利な並びとなっているため、ツリーに従って上から順に保全作業を検討し、最初に適切と判断された保全作業が最も経済的な保全方法となる。

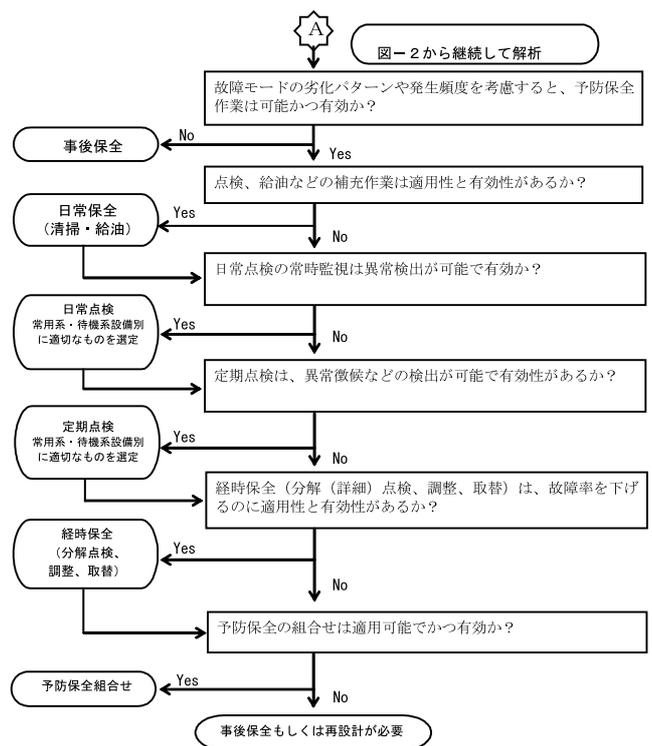
保全方法選定 RCM ロジックツリーを適用する際の留意点と保全周期の設定について次に示す。

(1) 機器、部品の劣化モードと発生頻度

機器、部品の劣化状態は、それぞれ独自の劣化・故障特性を有していることから、劣化モードを腐食・経時劣化タイプ、脆化タイプ、突発タイプの 3 タイプに分類した。そして、劣化モードに適応した保全方法を設定するため、劣化モードと適用保全方法を表一 6 のとおり整理した。

表一 5 保全方法採用の基本ルール

RCM 影響評価結果	保全方法採用の基本ルール
1. 機能への影響 機能への影響 （隠れた故障） コストへの影響 （隠れた故障）	致命的故障もしくは高リスク故障であることを考慮し、定期保全（清掃・給油）以下、いくつかの保全方法を組合せた保全方法を採用する。
2. 運転への影響 コストへ影響	経済性を考慮し、定期保全（清掃・給油）の他、モニタリング保全（日常点検）、オンコンディション保全（定期点検）、経時保全（分解点検、調整、取替）の順に検討し、いずれか有効な保全方法を採用する。



図一 3 保全方法選定 RCM ロジックツリー

表一六 機器・部品の劣化モードと適用保全方法

劣化モード	定義	適用保全方法
A 腐食・経時劣化タイプ	劣化の進行が、時間・使用頻度に比例する場合。	予防保全により、劣化の兆候および進行状況を把握することができる。よって予防保全を適用。
B 脆化タイプ	潜伏期間中は、徐々に劣化が進み、ある時点を過ぎると急激に進行する場合。	予防保全により、劣化の兆候を把握することができる。よって予防保全を適用。
C 突発タイプ	故障が突発的に発生する場合。	故障が突発的に発生することから、事前に不具合の兆候を発見・把握することができない。よって事後保全にて補修、交換を実施。

表一七 設備の稼働形態と適用保全方法

稼働形態	定義	適用保全方法
常用系設備	日常的に、その駆動部（電動機・内燃機関）が稼働している機械設備。	常用系設備は、日常的に運転していることより、定期保全（清掃・給油）とモニタリング保全（運転時点検）を基本とし、できる限りモニタリング保全で対処し、管理運転は極力減らす方向とした。 各種計測（板厚、絶縁抵抗値、ワイヤローブ径など）や、運転時の点検でカバーできない没水部分の保全などをオンコンディション保全（定期点検）による実施とした。
待機系設備	日常の大半は待機状態で、その駆動部が稼働しておらず、必要に応じて稼働する機械設備。	待機系設備は、待機状態にあることより、定期保全（清掃・給油）とモニタリング保全（巡視点検）が日常保全の中心となり、オンコンディション保全（定期点検）により定期的に管理運転を実施し、駆動・制御設備および没水部を保全することとした。 運転時のモニタリング保全（運転時点検）は、その運転頻度が低いことから現実的とは言えないので、RCM解析に反映させないこととした。

突発タイプに分類される故障モードの場合、当該故障の発生頻度も考慮しながら予防保全の要否を検討することとした。ゲート構造部材の損傷、変形など事故により引き起こされる故障モードについては、非常に発生頻度が低いため予防保全の適用は適切でないと判断したが、突発タイプでも重要な機器、部品でかつ故障発生頻度が高いものについては経時保全（定期的な分解整備等）による予防保全を採用した。

(2) 設備の稼働形態

設備の稼働形態の違いによる適用保全方法は、表一七のとおり整理した。

常用系設備においては、日常点検で設備の不具合の大半を発見できることから、従来の定期点検から日常点検への移行が可能となり、定期点検項目の大幅削減に繋がった。

(3) 保全周期

RCM ロジックツリーにより保全方法を選定した後、各保全作業の最適周期を設定した。日常点検は、通常業務時に常に実施するので、点検周期は設けない。また、日常保全（清掃、給油など）は、設備構成、運転状況などにより、各設備毎に異なるので各種条件を勘案のうえ設備毎に保全周期を設定した。

定期点検については、次の考えに基づいて点検周期を設定している。

各機器における定期点検周期は、機器毎の故障率と数量による関数から定量的に配分した。サブシステムがK種類の機器から構成されていて、サブシステムの平均保全周期Mが判明している場合、機器iに配分される保全周期 M_i を次式で求めた。

$$M_i = \frac{M \cdot \sum_{i=1}^K (n_i \cdot \lambda_i)}{K \cdot n_i \cdot \lambda_i}$$

n：機器の数量　λ：機器の故障率

この式は、各機器の故障率にその機器の数量で重みを付け、その「数量×故障率」の総和に占める各機器の「数量×故障率」の割合から平均保全周期Mを各機器の保全周期 M_i として配分する式である。つまり機器数量と故障率から保全周期を機器毎に割り振っている。

ここまで述べてきたRCM解析手法を用いた解析結果を、表一八に示す。

8. 標準点検項目表

設備の社会的重要度分類、FMEAおよびRCM解析を経て、予防保全適用となった機器、部品の標準点

表一8 RCM 解析ワークシート (抜粋)

設備名：非常用洪水吐きゲート

設備形式：ラジアルゲート (ワイヤロープウインチ式)

サブシステム名：ワイヤロープウインチ式開閉装置

冗長性 (予備設備)：なし

部品・機器名	故障モード	故障原因	劣化モード	致命度故障等級	現状周期	算出周期 (現状周期を1とする)	影響度分析結果	予防保全作業 (YES/NO)	予防保全作業の内容			
									① 定期保全	② モニタリング保全	③ オンコンディション検査	
電動機	過熱	過負荷, 固着保護装置故障	B	II	1ヶ月	1.0	運転への影響 (予備機有り)	Y	清掃	運転時触診・作動確認 電流・電圧値確認	-	
〃	振動, 異音	偏芯, ベアリング経時劣化	B	II	1ヶ月	1.0	運転への影響 (予備機有り)	Y	清掃	運転時目視・触診 作動確認	-	
〃	絶縁抵抗不良	湿気経時劣化	A	II	1年	0.9	運転への影響 (予備機有り)	Y	清掃	-	絶縁抵抗測定	1年
電磁ブレーキ	固着	腐食調整不良 ライニング磨耗	A	II	1ヶ月	1.9	運転への影響 (予備機有り)	Y	清掃	運転時作動確認	-	

表一9 標準点検項目表 (抜粋)

施設名	設備名	サブシステム名	稼働形態	待機系	点検実施年月日
		(1) ラジアルゲート	稼働区分	1	点検実施者
装置区分			点検実施状況		
点検			定期点検		備考
点検内容	点検方法	実施項目	結果	実施項目	
扉体全般	外観の異常 開閉動作の異常	目視により開閉に支障のある障害物がないか確認する。 目視もしくは通常運転により、振動、異常音、片回り等が発生し無 常を確認する。	○		
主桁	たわみ・板厚減少	目視によりたわみや板厚減少につながる著しい腐食の無いことを確認す る。	○	2年毎	
脚柱	たわみ・少	目視によりたわみや板厚減少につながる著しい腐食の無いことを確認す る。超音波板厚計により残存板厚を測定する。	○	2年毎	
スキンプレート	継手部の漏水	目視により溶接線からの漏水が無いことを確認する。	○		
	板厚の減少	目視によりたわみや板厚減少につながる著しい腐食の無いことを確認す る。 目視によりたわみや板厚減少につながる著しい腐食の無いことを確認す る。超音波板厚計により残存板厚を測定する。	○	2年毎	
接合ボルト・ナット	弛み・脱落	目視、触診によりボルトナットの弛みもしくは脱落が無いことを確認す る。	○		
		ハンマリングによりボルトナットの弛みを確認する。目視によりボルト ナットの脱落が無いことを確認する。必要に応じて増締めする。		2年毎	
補助ローラ		目視によりローラの回転に異常が無いことを確認する。		1ヶ月	
扉体シーブ	固着	目視によりシーブの回転に異常が無いことを確認する。			
水密ゴム	漏水を伴う損傷 変形	水位が高い場合は目視により異常な漏水の無いことを確認する。水位が 低い場合は扉体上流側から目視により水密ゴムのまくれ込み等が無いこ とを確認する。ゲートを閉閉操作可能な場合は目視により水密ゴムに 損傷、変形、磨耗が無いことを確認する。	○		

稼働形態は、常用・待機別、設備区分は社会的な重要度別に点検チェックシートを作成

装置区分は、信頼性解析により、設備の機能に影響を及ぼす重要機器・部品に限定(差別化)

点検内容は、信頼性解析により、設備の機能に影響を及ぼす故障モードに限定(差別化)

点検実施状況は、設備の稼働状態を考慮しながら、日常点検と定期点検に振り分け

傾向把握が可能なデータは、定量的データを採用し、傾向管理を実施

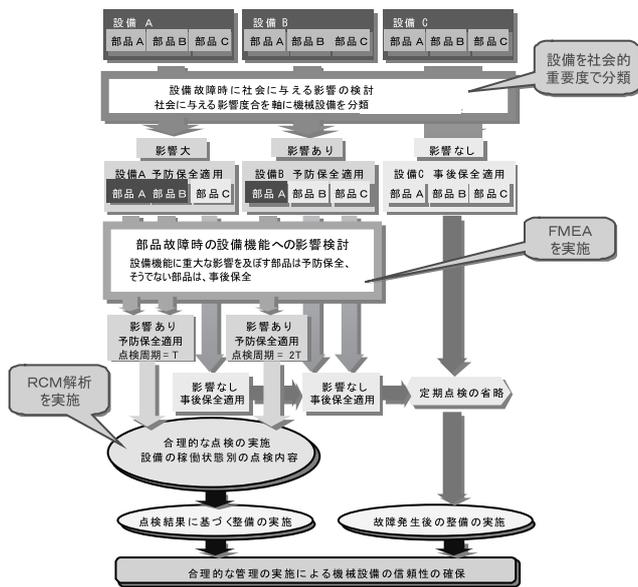
点検方法は、具体的に記述

現状の実機故障率を考慮し見直された点検周期

検項目表を表—9に示す。この標準点検項目表を基に定期点検を実施している。

9. おわりに

画一的な予防保全を基本としてきた機械設備の維持管理を、原点に立ち返り「機械設備の維持管理は如何にあるべきか」と設問し、それぞれの保全方法に論理的根拠付けを行って、今回の検討を取りまとめた。今回の検討の解析フローを図—4に示す。



図—4 機械設備保全方法解析フロー

今回の検討によって得られた成果は、次と判断している。

① 保全作業の合理化

設備状況に応じた保全作業が効率的に実施できるため、業務遂行が合理的となった。

② コスト縮減

事後保全の導入、運転時点検の採用および点検間隔の延長などにより保全コストを縮減できた。

③ 技術力向上

状態監視保全となり担当職員の技術的判断を要することから、結果として技術力が養成された。

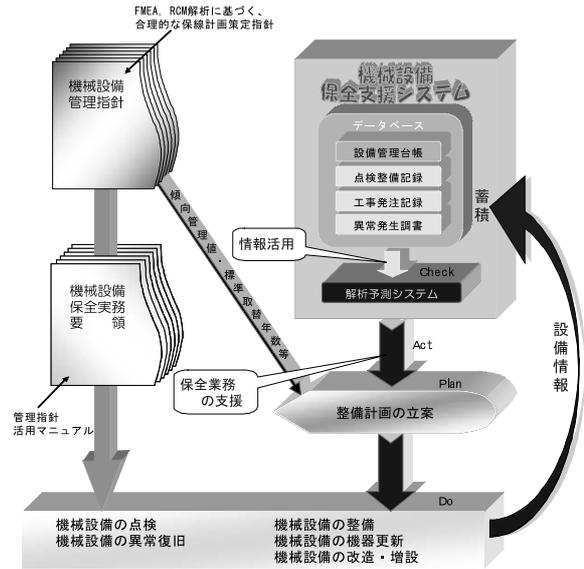
④ 保全データの活用による合理化

保全データの解析により同種設備の寿命予測、故障傾向の予知などが可能となり、保全作業が合理的となった。

その他に長期的な整備計画の精度向上やユーザー説明の質向上などにも効果があったと考えている。

(独)水資源機構においては、今回の解析と併行して

保全作業のデータ集積と解析を目的とした「機械設備保全支援システム」を構築した。さらに、保全作業の実運用に関する手引き書「機械設備保全実務要領」を作成して保全作業の効率化に取り組んでいる(図—5)。



図—5 保全作業実施フロー

また、今回の検討で解析が十分でなかった機器、部品などの更新、取替年数などについても保全データを基にしてワイブル解析を用いて検討中である。この検討内容についても機会があれば報告したいと考えている。

日本が人口減少に転じた今、社会資本の適切な維持管理体制の構築は社会の急務と考える。社会資本の効率的な維持管理に拙文が少しでも役立てば幸甚である。 JICMA

【参考文献】

- 1) 小野寺勝重：保全性設計技術，日科技連，1999
- 2) 小野寺勝重：実践 FMEA 手法，日科技連，1999
- 3) 塩見 弘：信頼性工学入門，丸善，1998
- 4) 伊藤邦夫：RCM（信頼性重視保全）による保全作業の最適化，PETROTECH Vol.23 No.8（社）石油学会，2000
- 5) 電力中央研究所報告：原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出，2001
- 6) 土木研究所資料：機械設備の信頼性評価に関する調査研究，1990
- 7) 土木研究所資料：機械設備の信頼性評価に関する調査研究（第二報），2001

【筆者紹介】

平子 啓二（ひらこ けいじ）
独立行政法人水資源機構
ダム事業部
機械課長

