

高信頼性を経済的に実現する保全計画法

Planning Method of Maintenance Schedule to Ensure High Reliability at Minimum Cost

玉木 悠二 Yuji TAMAKI Member

It seems to take a long time before to reach completion of lifetime estimation methods of equipment. To overcome these difficulties from the lack of lifetime estimation knowledge, many efforts, such as on stream inspections, etc. are made to fill the gap. Under such situation, this study proposes a most effective solution, which utilizes all operation results and efforts available, putting into an organically arranged system to realize better performance and reliability to the plant at minimum cost. And this solution is advantageous for computerization of maintenance schedule planning, for simplified indexes prepared in the solution are to be effectively utilized as the data necessary for the systems.

Keywords: Lifetime of equipment, Strategic Solution for Optimization Maintenance, Classification of Equipment Property, Computerization of Planning System of Maintenance Schedule, Organically Arranged System

1. 緒言

化学・石油化学分野では、安全の確保にとって重要な設備寿命の予測が非常に難しいという問題がある。

ここで設備の寿命というのは、定期整備の後、設備が安全安定に機能を発揮し続け得る期間のことである。

安全については多くの規制が出されているが、それらは所轄官庁毎に分断して制定されているため、規制領域の間に過不足が生ずると共に、プラント全体を有機的に捉える思考を阻み、結果として安全確保のために配備された各種の補完対策は評価の対象から外され、専ら設備のハード的な健全性のみを重視した保全運営を助長してきたように思われる。

またその一方では、経時的な劣化傾向が十分に定量把握されないまま、確率論的に設備の安全を論じようとする主張もなされてきた。

この様な状況の中で生産現場はこれ迄、寿命予測技術の不足を安全側に十分な余裕を残して定期点検、整備を実施することで補ってきたが、現今の事業環境は最早そのような無駄を許さなくなり、その事情は化学・石油化学分野に限らず原子力分野においても同様の状況になっている。

設備の故障とは、それを設置した利用目的に反して発

生する社会にとっての不都合のことである。

そしてこの故障を確実に予防しようとする時には、どうしても設備の寿命を知ることが必要になってくるが、その寿命は相当数の実績データを積み重ねても、設計や製作の出来栄え、整備や運転操作面などに含まれる影響因子が明確にされていない現状では、なかなか汎用化されたデータとして纏めることが出来ないでいる。

ポンプを例にとっても — この様な単純な設備においてさえも — 故障はポンプを構成する色々な部位(要素単位)に色々な形で現れ、それらの事象1つ1つには寿命というものがあって、それらの寿命の全てが集積されて初めて保全の管理単位であるポンプ(要素設備)の故障が評価されることになるが、現実には使用流体の種類や圧力、温度、設備の構造、整備レベル・・・など、仮定した影響因子に従って条件を整合させると、故障物理などの知恵で不足を補強してもなお予測ができる程のデータは中々集積が難しい。

配管の破孔ですら、一箇所が破孔してもその直近部には何の予兆も認められないという事例は多々あるし、同じ海水でもその腐食性は東京湾と瀬戸内海では明らかに異なっている。

換言すれば設備の寿命予測は、要求精度で予測するために必要な影響因子が予め特定されていれば、データの蓄積も可能であろうが、それが出来ていないところにこの予測技術の開発を困難にしている原因があると言ってよい。

連絡先：玉木悠二 〒284-0044 四街道市和良比 282-76

電話：043-432-5284、e-mail：tamy@ceres.dti.ne.jp

このような状況の中で生産現場に高い信頼性を経済的に実現するためには、機器、配管、計器などプラントを構成する全ての設備について、「機能低下（喪失を含む）」と「設備損傷（破壊を含む）」の2つの視点から故障が発生した時の被害を評価し、その大きさに応じて整備の内容や間隔を体系的に決定する「最適化保全」の考え方の適用が極めて有効になる。

以下にその考え方を紹介する。

なお「機能低下」と「設備損傷」とは、不都合を次のような認識により2つに分類したものである。

機能低下：設備が課せられた役割を果たさないために発生する不都合 例例えば性能不良、不調、誤作動、不作動など

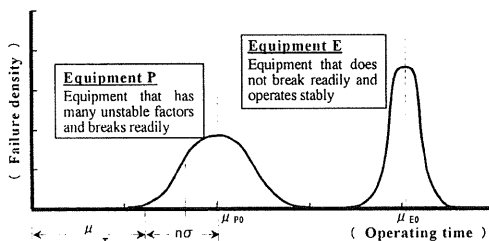
設備損傷：設備が劣化、損耗することによって発生する不都合 例例えば破孔、破裂、設備損傷による危険物等の漏出、設備的・人的損害の発生など

2. 寿命予測に関する現状

(1) 基礎認識

Fig-1 は設備が故障に至る迄の運転時間の様子を、パラツキが正規分布を示すものと仮定して、横軸に整備を終えた設備が再び故障を起こす迄の総運転時間を、縦軸に故障発生密度を置いて概念的に示したものである。

Fig.1 Schematic frequency distribution of failure



μ : Regular inspection cycle of equipment when used for important usage
 T_0 : Regular inspection cycle of equipment when used for unimportant usage

設備の故障が構成部位のどこかに不都合が発生して起こるとすれば、同じ原因による同じ不都合は例えばこの様な概念で整理されるであろうと想像したものである。

勿論、化学工業等で用いられている多数の部品で構成された諸種の設備が、多様な条件下で全てこの様に整理できると確認されたものでも、まして具体値として μ や σ が取得された例もない。

また Fig-2 はバスタブ曲線と呼ばれるものであるが、この図が示す様に工業化された生産設備は初期故障、即ち

初歩的な設計不良や取扱いの不慣れ等による故障発生段階を過ぎると偶発故障の段階に入り、故障率がある種の許容レベル内に落ち着くと想定されている。

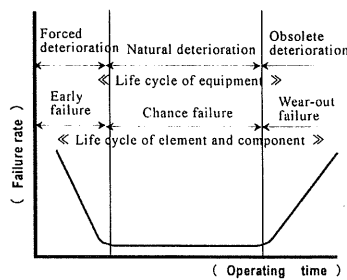


Fig-2 Equipment Failure curve (Bathtub curve)

そしてこの想定は経験的にも妥当性が認められていて、実用に供される設備はこの偶発故障領域での運用を前提に、通常は摩耗故障領域に対してどれ程の時間的余裕を残すかは別にして、故障率の低い偶発故障領域から摩耗故障領域を臨みながら定期的に整備を行い運用に供されている。

ただ厳密にはこの偶発故障領域も通念として認識されているもので、全ての場合に対して即断的に適用できるものではなく、またこの段階の故障は予め原因や発生部位が特定できない、ランダムに発生する故障であることから、この領域の運営では常時的な監視が不可欠の条件になってくる。

(2) 寿命予知対応の限界

設備には夫々与えられた役割があり、その役割が大きければ大きい程故障に備えて、その機能を補完する方策が2重、3重に対策されるのが普通である。

「機能低下」は、このようなプラントを構成する設備が負っている役割の大きさを評価する指標であり、原子力発電プラントなどでは各設備相互の協調関係が FT や ET 解析などとして評価され、役割の大きさの確認が行なわれている。

そしてその役割の大きさは、その設備が機能を喪失した時に発生する被害の大きさとして定量化され、その評価にはその設備の設置環境や壊れ方によって発生する火災や爆発、有害物質の流出など、「設備損傷」による被害も加味される。

問題はその時の設備寿命の評価である。

それは例えば確率論的リスク評価の表現で云うと、ある設備について新設時の故障発生確率が分かったとして、

その故障発生確率が例えば 100 年後にはどのようになっているか、同じか、違うとすればどの様な値になっているのか、許容値を超えるとすれば何年経った時点で超えるのかと云った問題である。

Fig-3 は Fig-1 の故障発生密度を時間の経過に伴う故障発生率の変化として示した故障発生分布図であるが、言い換えれば

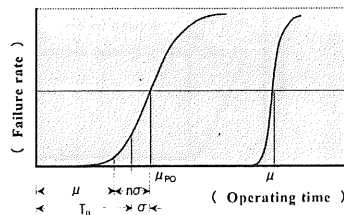


Fig-3 Failure distribution chart

この問題は、この図で見た場合にその設備の運用状態が今どの位置にあるかを見定める問題である。

しかし、現段階では Fig-3 のような故障発生分布図は、それ自体が全く同じ設備や部品を同一条件で多用するような特殊な場合を除き、次のような事情から作成は事実上殆ど不可能な状態にあると云ってよい。

- 設備寿命を決定付ける影響因子が明確にされていない現状では、仮定した多数の影響因子と共に寿命実績を大量に集積することが困難なこと
- 故障自体が破滅に繋がり兼ねない装置産業では、高い信頼性を持つ設備寿命の統計値が得られる程に故障実績のデータ蓄積ができないこと

そしてこのことは、設備の安全確保の対策はここ当面、設備寿命の正確な予測は期待出来ないと云うことを前提に対応しなければならないことを意味している。

(3) 信頼性確保の工夫

このような事情の中で、これ迄安全・安価・安心を確保するために、保全領域では様々な工夫が凝らされてきた。

Fig-4 に各方面、各時点で採られてきた各種の努力を、また Table-1 にはそれらの努力の流れを概念的に示す。

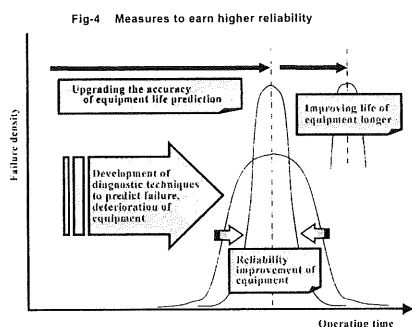


Fig-4 Measures to earn higher reliability

Target	Measure	Management based on failure physics	Management based on empirical compromise of human and natural science	
Efforts to reduce damage in preparation for an emergency (monitoring of changes in the circumstances = patrol, etc)		Monitoring of an unexpected failure due to the poor quality of maintenance or improper operation	Supplement of the lack of reliability arising from the utilization of trend management	Monitoring of an unexpected failure due to empirical sensuous management
Efforts to ensure the soundness of equipment	Efforts to certify the soundness of equipment at a low cost	Establishment of performance restoration procedures to ensure the life estimated by failure physics	Short-term life monitoring and prediction of causes of a failure by failure physics	Total coordination of equipment -related work by establishment of systematic equipment operating standards
	Efforts to ensure the soundness of equipment	Establishment of life estimation techniques by failure physics	Efforts to acquire know how to eliminate failure factors by data analysis	Introduction of a gradient allocation of management resources based on a concept of risk management
Efforts to estimate equipment life	Efforts to ensure reliability in life estimation	Efforts to understand and evaluate conditions of the soundness of equipment	Efforts to make reliability evaluation easy by introducing systematic equip manage procedures	Excessive maintenance (ensure the soundness of equipment by an increase in maintenance costs)
			Factorization of equipment into elemental parts, subdivision of attributes and data accumulation	Effort to enhance reliability based on the evaluation of the actual performance of operation and the results of corrective maintenance
			Efforts to understand conditions sensuously based on experiences	Breakdown maintenance (a kind of gradient allocation concept)
				Leave things to chance

そしてその様な信頼性確保の対策では、例えば「安全・安価」に対しては

- 設備寿命の予測精度の向上（予測技術の向上）
- 設備性能の安定化（整備技術の向上）
- 設備の長寿命化（設備仕様の改良）
- 余命診断技術の向上（信頼性の確認）

等の対応が挙げられ、更に「安心」については未だ殆ど緒についていない段階ではあるが、

- 設備管理業務の透明化（設備の運用実態などの情報を、専門家ではない市民や関係者が容易に理解できる形で定量的に表現する方法の開発）

等の方法が取り上げられている。

ただ再度ここで認識しておくべきは、これらの努力は“設備の寿命が正確に予測出来ない”ことへの補完として実施されていること、確率論的なアプローチで言えばプラントを構成する個々の設備に対して、同一仕様・条件で多数の運用実績があるような特殊な例を除き、“実用に耐える程の精度で故障発生の度数分布が描けない”ことに端を発する対応であるとうことである。

3. 安全・安価・安心を実現する設備保全

(1) 安全の確保

「設備の持つ信頼性」の度合いは「設備の毀れ易さ」と補数の関係にあるが、その値は定期整備で初期値に還元された後、故障発生率が低位で落ち着く偶発故障の段階を経て一定の目標故障予防信頼率が確保出来なくなる限界で次の定期整備が行われ、再び初期値に還元されると生産現場は考えている。

そして生産現場はこの様な想定のもとに、次回の定期

整備に至る作業期間中の故障発生率を所期の低位安定レベルに保つべく、プラントを構成する各設備の整備計画を立案し実行している。

このことは言い換えれば設備の運用とは、設備に完全無欠の性能保証を求めるのではなく、完全無欠ではない設備から如何にして有用な機能だけを引き出し、有害な事象の発生を抑えるかという活動であると云うことができる。

そしてこのような認識を保全業務に当て嵌めて考えると、設備の運用は「設備を壊れなくする」「設備寿命を予知する」と云う発想だけではなく、“壊れても有害な事態を発生させない”ということにも着眼して対応すべきことを示唆している。

勿論、原子力発電所の炉心溶融のような飛び切り有害な事態の発生に対しては、“事実上絶対に”起こさないための対策が何重にも設計段階で施されているが、当然のことながらそのように対策された設備であっても、経時劣化に対しては同様の認識が必要になってくる。

(2) 有害な事態を発生させない保全

“壊れても有害な事態を発生させない”ことを主旨とした保全は、故障したら重大な被害が発生する設備には点検整備をより短い間隔、より精緻な内容で行い、逆に被害の発生が少ない設備に対しては点検整備の周期をより長くする等の措置を採ることにより行われる。

これは設備が現在バスタブ曲線のどの位置で運用されているかが特定できない状況の中で、確保すべき安全は確実に確保しつつ、可能な設備には保全費の削減を狙って整備内容の簡易化や改造を試み、得られた知見は積極的に他に展開していくことを主旨としたものである。

そしてこの設備保全の方法では、対象設備に関する最も信頼できる情報は、その設備がそれまで運用されてきた対応の帰結である現時点の設備の実態であるとして、その状況を起点として安全と安価の両立を目指す対応が体系的に展開される。

そのためこの保全法を導入する場合には、まず現状の信頼性のレベルが満足か否かに拘らず、その信頼性が再現できる情報を集約整理するところから始められる。

そしてその上で故障すれば大きな被害が発生する重要な設備には点検整備の頻度、内容、状況監視等を強化した“手厚い対応”が、逆に被害の少ない設備にはより簡略

化した対応が計画的に適用されることになる。

またこの種の保全法を採用する際に、特に重要なことは網羅的にこれを行なうこと、気が付いたことを気が付いた範囲で実施するのではなく、プラントを構成する全ての設備を同じ尺度で体系的に評価して遺漏無く対応策を決めることである。

(3) 最適化保全

前項に示す保全方式を採用する場合には、次のような運営基準の制定が必要になる。

- ・ 設備が「機能低下」や「設備損傷」を起こした時に発生する影響度を定量的に評価する評価基準
- ・ 設備の「壊れ易さ」を定量的に評価する評価基準
- ・ 設備が故障した時の影響を許容限度内に抑えるための「管理の手厚さ」を決める設備管理基準
- ・ 設備が保有する現在の信頼性を確実に再現するための「設備管理処方」の制定基準

① 「設備損傷」の影響度に関する定量評価

「プロセス特性」と呼ぶ指標により評価されるもので、その設備が設置された「場」(使用条件)の厳しさを、例えば取扱物質や取扱条件の過酷さが含む危険性で評価

② 「機能低下」の影響度に関する定量評価

「機能特性」と呼ぶ指標により評価されるもので、設備が持つ機能の大きさを設備が機能を喪失した時に発生する波及被害の大きさを評価

③ 「壊れ易さ」の定量評価

「設備特性」と呼ぶ指標で評価されるもので、設備が確保している信頼性の大きさを、設備が故障するまでの安定運転時間の長さで評価

④ 「管理の手厚さ」を決める設備管理規定

保全対応を「設備の壊れ易さ」と設備が故障した時の影響大きさの両面から評価し、その大きさに応じて手厚さのレベルを決定する規定

⑤ 「設備管理処方」の整備

現有の設備信頼性を再現するために必要な、定期整備や偶発故障を抑止の為の日々の手入れ、監視、OSI等に関する処方を網羅して規定

この様な設備保全の手順を体系的に整理して実施する

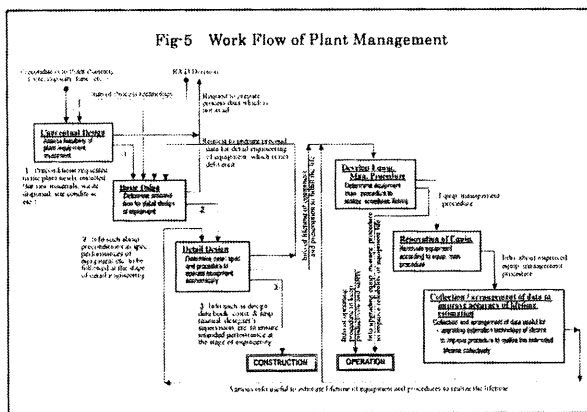
のが、以下に概要を述べる「最適化保全」であり、この様な体系的な保全運営法を導入することによって、生産現場では次の様なメリットも同時に享受することが可能になる。

- ・ 所轄官庁毎にバラバラに規制されてきた安全確保の対応を、プラントを1つの有機体として捉えた上で、特性に応じて無駄のない、しかも評価や対策に継目の無い確実で合理的な計画として立案、実行できる体制に強化することができること
- ・ 設備運用の有りのままが専門家ではない一般の人達にも容易に理解できる形で提供可能となり、一般市民のみならず企業の経営者にも「安心」を醸成する素地を提供することが可能になること

4. システム化

プラントを構成する各設備の健康状態は、経時劣化や操業、整備実績等によってダイナミックに変遷するので、「最適化保全」を遺漏無く展開するためには、その運用状態や対応実績を体系的に整理蓄積し、必要に応じてレビューし改定し活用する運営基盤としてシステム化を進めることが重要な要件になってくる。

保全に係る各業務は、例えば Fig-5 の様に相互に関連を持って運営されるために、各業務との間で情報のやり



取りや蓄積、検索、修正、経緯の保存などの作業が発生し、これらの業務を確実かつ効果的に遂行するためには、システム化が不可欠になるからである。

そしてそのシステム化では例えば Table-2 の様な諸種のデータが必要になるが、その中で単純な体系に整理された「最適化保全」の指標は、必要なシステムの構造計画や構築を容易にする上で極めて有用な資料となる。

Table-2 Data requested for the system formulation

	Items to be prepared	Key points to the works
Preparation of Basic data	for management of maintenance	
	P&ID	Compile existing materials to database
	Spec.list of equipment	
	Spec.list of piping	
	List of control loop	
	Elec. install'n system D	
	Past record of maint/insp.	
	Data of past failure	
	for maintenance planning	
	「Process Property」	Set Eval. Classifi'n see ①
「Function Property」	'' see ②	
「Equipment Property」	'' see ③	
「Maint. manage. density」	'' see ④	
「Equip. man. procedure」	'' see ⑤	
Assistance for management of maintenance		
Maint. Schedule Planning	Have links to effective computing systems	
Eval./compile data from field		

①「プロセス特性」の評価基準

設備が置かれた「場」が持つ危険性を Table-3 に示す評価項目の例により A-D の4段階で評価

Table-3 Method of Establishing Evaluation Classification of Process Property

Evaluation Item	Detailed item	Method of evaluation classification	Remarks	
Fire/explosion danger	Material danger	1 Explosive 2 Ignitable 3 Oxidizable 4 Flammable 5 Flammable(gas)	Classify the danger of substances handled into 4 grades based on "Safety Assessment" with reference to "Grading of Importance" and the classification of hazardous materials in the fire Service Law.	Reference books: "Comments on Safety Assessment" the Safety Division of the Industrial Safety and Health Dept. of the Ministry of Labor.
		1 Pressure 2 Temperature 3 Operation 4 Volume of vessel	Based on "Safety Assessment" and "Grading of Importance", classify into 4 grades the danger of operating conditions, including a danger that they deviate from the normal conditions and come into the dangerous area.	
Physical hazards	1 Vapor 2 Solid or liquid	Classify into 4 grades the danger that is evaluated with TLV-TWA by ACGIH of vapor substances and solid or liquid, i.e. the danger of the toxic substances prescribed by various laws and regulations, such as the High-Pressure Gas Control Law, the Ordinance on Prevention of Organic Solvent Poisoning, Poisonous Material Control Law, and the Ordinance on Prevention of Hazards due to Specified Chemical Substances. Also use part of the methods by NFPA of evaluating chemical substances.	TLV-TWA-Threshold Limited Value Time Weighted Average Concentration.	
Environment-mental disturbance	1 Waste water 2 Emission 3 Noise, vibration odor, smoke, etc. 4 Health	Classify environmental danger into 4 grades, from a level that a failure exerts an influence on the outside of the plant, to a low level that the influence of a failure can be dealt with in the facilities.	Evaluation methods by NFPA: The methods by the "National Fire Protection Association" of evaluating the danger of chemical substances to fire fighters	
Production disturbance	1 Continuation of operation 2 Product quality 3 Resources 4 Energy	Classify the degree of the influence of a failure into 4 grades, from a level that the influence immediately leads to all shut down or a large loss, to a level that a failure exerts an influence on the volume of production, quality, loss, etc.		

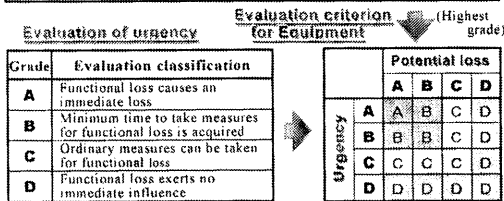
②「機能特性」の評価基準

「設備が機能を停止した時の波及被害の大きさ」を、被害の発生が阻止できなかった時の波及被害の大きさ「損失性(Potential Loss)」と、被害波及の阻止に要する必要時間の充足度「切迫性(Urgency)」の評価を Table-4 の方法で総合し、次の4段階で評価

- A: 異常の拡大防止や抑制、災害防止の為の最後の歯止めとなる機能(拡大阻止)
- B: 運転維持に必要な機能の内、重大な危険や損害の発生を押し止している機能(事故予防)
- C: 生産活動の維持に必要な機能の内、Bに該当する以外の機能(状態維持)
- D: A~C以外の補助、補完、予備的な機能(補完)

Table-4 Mechanism for Evaluating Equipment Function

Evaluation of potential loss		
Eval. items	Detailed item	Method of evaluation classification
Breakage danger	-----	Evaluate whether the functional loss of elemental equipment may lead to breakage of related equipment, with a two-grade classification: Grade A(Breakage) and Grade B(No breakage)
Environmental disturbance	1. Waste water 2. Emission 3. Noise, odor, etc. 4. Health	Evaluate the Detailed items 1 to 3 by applying the evaluation criteria for the environmental danger of the Process property Evaluate the Detailed item 4 by classifying it into 4 grades, from a level that exerts an influence on outside of works to a level that exerts no influence on these.
Production disturbance	1. Continuation of operation 2. Product quality 3. Resources 4. Energy	Evaluate these items by applying the evaluation criteria for the production disturbance of the Process property.



③ 「設備特性」の評価基準

通常、定期点検整備の周期の長短を現時点での設備寿命（初期値）と見做して、Table-5 の様に A-D の 4 段階で評価
 なお定期整備の周期を設備寿命と見做すのは、寿命予測技術が未熟な現状では、その判断が生産現場のポテンシャルの総力であり、更には現場の先進性や後進性に左右されず、どの現場でも容易に入手可能な値であることによる

Table-5 Example of Evaluation Criterion for "Equipment property"

Grade	A	B	C	D
Evaluation measure	Fragile	Inspection cycle (year)		
		One	2	3 or more

④ 「保安全管理密度」

横軸に「プロセス特性」と「設備特性」の総合評価である「使用上の重要度」、縦軸に「設備特性」を置いた Fig-6 に例示するマトリクス上で、保全担当役員が自ら安全性と経済性を両立させる費用配分方針として 4 段階で規定

Fig-6 Matrix for establishing maintenance management density

		Importance in Use			
		A	B	C	D
Equipment Property	A	2A	A	B	B
	B	A	B	C	C
	C	B	C	C	D
	D	B	C	D	D

「使用上の重要度 (Importance in Use)」 = 「プロセス特性」と「設備特性」に含まれる評価の中の最高評点

⑤ 「設備管理処方」のデータベース

設備管理に関する全ての業務を、例えば次の 4 つのカテゴリに分けて整理

- ・ 作動中の設備の偶発異常を早期に発見し対策に繋ぐため運転部門が実施する設備管理
- ・ 保全部門が専門知識、技能を用いて偶発故障の発生を予知予防する設備管理
- ・ 定期点検整備の補完として実施する中間整備、日常整備、故障診断等の設備管理
- ・ 設備の経時劣化を初期状態に還元し、次回の定期点検時期迄、所定の性能を維持することを主旨として実施する設備管理

「最適化保全」のシステム化に際して配慮すべき事項としては、例えば次の様な点が挙げられる。

- － 設備データや運用実績データを目的に応じて抽出し再加工できること
- － 日々発生する各種の実績データが簡便に整理、蓄積できること
- － 最初から多くを望まず現場の進展に合わせて逐次的にシステムの充実化が図れること
- － 既存システムとリンクが容易にとれる構造を持つこと

参考文献

[1] 玉木悠二 “設備保全の最適化とその手法”、オートメーション、Vol. 46, No. 11 (2001. 11)
 [2] 玉木悠二 “設備運用のトータル最適化(10 回連載)”、オートメーション、日刊工業出版プロダクション、Vol. 47, No. 5~Vol. 48, No. 2 (2002. 5~2003. 2)
 [3] 玉木悠二 “ビルメンテナンスの最適化を考える(3 回連載)”、設備と管理、オーム社、第 38 巻第 9 号~第 11 号 (2004. 9~11)