設備保全の有効性検討(Maintenance Effectiveness)
－設備運用実績の統計解析による保全周期適正化への挑戦－

Maintenance Effectiveness
Environmental Test Technology Unit

1. 背景

- 筑波宇宙センター総合環境試験棟（SITE）は、稼働開始（1989年）から30年近くが経過しており、全体として老朽化が進んでいる。一方で、設備の更新改修や保全に係る基盤的維持費には限りがあるため、設備保全のさらなる合理化を推進していくためには保全コストに対する設備の信頼性（不具合発生確率や不具合発生時の設備システム全体及び宇宙機本体に与える影響度の多寡）の関係を定量的に把握し、組織として要求するリスク・コストバランスを確保するための保全計画の改善活動（PDCAサイクル）が重要となる。
- 旧来、SITEを含む環境試験技術ユニット所管の宇宙機用地上試験設備では、定期点検・定期交換による時間計画保全を主として行い、試験時不具合の未然防止に努めてきた。一方で、石油プラントや水道・電力インフラ等他産業界の設備保全動向に目を向けると、定期的に検査・交換を行う時間計画保全（TBM）に加え、故障が発生した場合に設備全体に与える影響（リスク）を識別し影響が小さい機器は故障が発生してから対策を行う計画事後保全（PBM）、さらには近年のIoT技術の急速な進歩に伴い発展した状態監視保全（CBM）の3つの保全方式を合理的に選択するリスクベースメンテナンス（RBM）が保全方式の主流となりつつあり、宇宙機用地上試験設備保全においてもこのような技術動向を取り入れた保全計画のさらなる合理化が望まれている。

設備保全活動は設備の維持を行う「維持活動」と設備の改善を行う「改善活動」に大別されるが、ここでの「設備保全」とは「維持活動」のことを指す。

- 設備保全
  - 予防保全（不具合が起こる前にメンテナンス）
    - 時間計画保全
    - 状態監視保全
  - 事後保全（不具合が起きてからメンテナンス）
    - 計画事後保全
    - 緊急事後保全

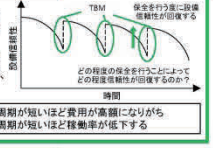
<旧来の設備保全>
これまでの宇宙機用地上試験設備の保全では時間基準保全を主として行い、突発的な不具合に対しては緊急事後保全によって対応してきた

➢ 種々の保全形態

[参考] 江 海洋,"回転機械設備の状態監視・診断法に関する研究－振動・AE 信号およびベイジアンネットワークによるアプローチ", 三重大学博士論文, 平成26年3月, p8, 図1-3

時間計画保全 (TBM: Time Based Maintenance)

- 時間基準保全や定周期保全ともいわれる、一定の間隔でメンテナンスを実施することにより信頼性を高めようとする考え方。宇宙機用地上試験設備に係る保全計画も、現在では主にTBMを基にして保全計画を立案している。保全周期はメーカ推奨年数や運用実績を基に設定することになり、安全のために短めに設定されがちであるが、徒に周期を短縮することも必ずとも得策であるとは限らない。



メリット	デメリット
・保全周期が短いほど高い信頼性を維持し続けられる ・保守計画の立案が容易	・保全周期が短いほど費用が高額になりがち ・保全周期が短いほど稼働率が低下する

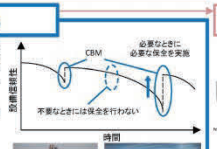
人間に例えると…

http://blog.livedoor.jp/kiwamu-kun/archives/51788.html

➢ 年に一度の健康診断、人間ドック等
→ 異常があれば治療

状態監視保全 (CBM: Condition Based Maintenance)

- 状態基準保全やヘルスモニタリングともいわれる、設備の状態を診断して必要なときに必要な保全を実施するという考え方。設備の状態に応じてメンテナンスを実施することで、設備の信頼性を確保しつつ時間計画保全よりも保全コストの適正化を図ることができる。但し、状態監視保全はプラント施設や電力・水道インフラ設備等の「24時間稼働型」の設備では導入実績が増えつつあるが、宇宙機用地上試験設備のような「24時間稼働する設備ではなく、稼働時に予期せぬ不具合が生じず確実に稼働すべき」設備については導入実績がなく、適切な診断技術に関する技術的なハードルが存在する。



メリット	・装置の状態に応じて適切な保守タイミングを判断できる ・保全周期の合理化による保全コストの適正化が期待できる
デメリット	・適切な診断技術の導入に技術的ハードルあり ・初期投資コストが高額になりがち

https://www.pinterest.com/pin/212134830766944 ; "Mahaffey" http://flickr.com/photos/gregsmith/4848245604/in/photostream/ ; http://flickr.com/photos/gregsmith/4848245604/sizes/o/

➢ 石油プラントや発電設備等、24時間365日稼働し続けている設備の場合は、通常時と異常時の区分を検知しやすいため状態監視保全が効果を発揮する

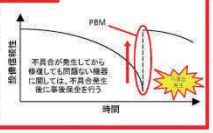
人間に例えると…

http://blog.livedoor.jp/kiwamu-kun/archives/51788.html ; http://blog.livedoor.jp/kiwamu-kun/archives/51788.html

➢ 日々の健康管理（日常生活での不調把握）
→ 異常・不調があれば検査

計画事後保全 (PBM: Planned Breakdown Maintenance)

- 不具合発生時、全体に与える影響が少ない機器に関しては不具合が発生してから修繕を行うという考え方。予防保全に対してコストを抑制できるが、想定していない不具合が発生し「緊急事後保全」が必要となった場合には多大な損失コストが発生する可能性がある。



メリット	・予防保全に対して保全コストが抑制できる
デメリット	・想定していない不具合が発生した場合、多大な損失コストが生じる可能性

人間に例えると…

http://blog.livedoor.jp/kiwamu-kun/archives/51788.html ; http://blog.livedoor.jp/kiwamu-kun/archives/51788.html

➢ 風邪をひいたので病院に行く
→大けがや大病による緊急搬送などは"緊急事後保全"に分類される

風邪程の軽い病の場合は本事には至らないため、健康維持の観点を優先して未然に防いだことも費用対効果が低い。そのため、風邪をひかないように努力しつつ、もしひいたとしてもその前に病気自体に対しておけ"計画事後保全"が効果的であると考えられる。

技術課題 → **機器の寿命をいかに正確に予測するか？**

- 設備保全の合理化を行うためには、機器・装置毎に不具合が発生した場合の全体への影響度合い（作業者の安全性、供試体への影響（スケジュール遅延含む）、設備への影響等）の多寡に応じて保全方式を識別し、運用実績や技術進歩に応じて保全内容・保全方式を改善していくことが望ましい。
- 上記の設備保全の合理化を行う上で、「装置・機器の寿命をいかに正確に予測するか」という点が技術的課題点となる。特に、宇宙機用地上試験設備のように「24時間稼働設備ではなく、他に類似設備も少なく、一般には流通していないような特注機器を使用している設備」については、これまでの運転状況や直前の点検結果等から次回試験時の不具合発生確率を推定する必要がある。

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312000000 ; http://www.pbookshop.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eaf9d0ed0ffc0bf7b6bb86f0bc4/9/7/9781118000000.jpg

ダムの開閉機構や防災用燃料備蓄、非常用電源装置などの「24時間稼働」ではないが稼動時には予期せぬ不具合が生じず確実に稼働すべき設備」にとって、機器の寿命を正確に予測し「どの程度の頻度でどのような保全を行うことが最適な保全の在り方か」を探ることは現在でも研究段階の課題である。

2. 設備保全の合理化に向けた機器寿命予測手法の検討

- 機器の寿命を予測する手法としては、代表的なものとして以下の手法が挙げられる。

状態監視保全

- 機器・装置の運転データや別途取り付けたセンサデータから異変を検知する。宇宙機用地上試験設備のような常時稼働ではない設備に適用できるか不透明。

http://www.pumpworld.com/articles/pump-industry-blog/2014/03/31/ge-to-buy-lufkin-for-1.aspx

可動部・摺動部をもつ機械機器で多くの実績有

ワイブル分析

- アイテムの寿命予測にしばしば用いられるワイブル分布を用いて、経過日数（ここでは設備稼働日数）に対する不具合発生確率を過去の不具合実績から算出する手法。最尤推定法を用いて母数パラメータ推定を行い機器寿命を予測する。

※ 対象にストレスを与えた際の時間経過に対する不具合発生確率はワイブル分布に従うことが広く知られている。
三浦利夫 "ワイブル分布の本質", 日本信頼性学会, Vol.2, No.4, p34-41, 1991

確率密度関数

$$f(t|m,\eta) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m}\right\}$$

対数尤度関数

$$ln\,L(m,\eta|t) = ln\left[\prod_i \frac{m}{\eta}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1} exp\left\{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m}\right\}\right]$$

デマンド故障確率/ベイズ推定

- 故障件数が少ないデータにおいても、日常点検結果や前回の運転記録等を事前確率分布として扱うことにより寿命予測に必要なデータを補完できる。実績は少なく研究段階。

http://www.pbookshop.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eaf9d0ed0ffc0bf7b6bb86f0bc4/9/7/9781118000000.jpg

故障実績以外のデータも加味した寿命予測が可能

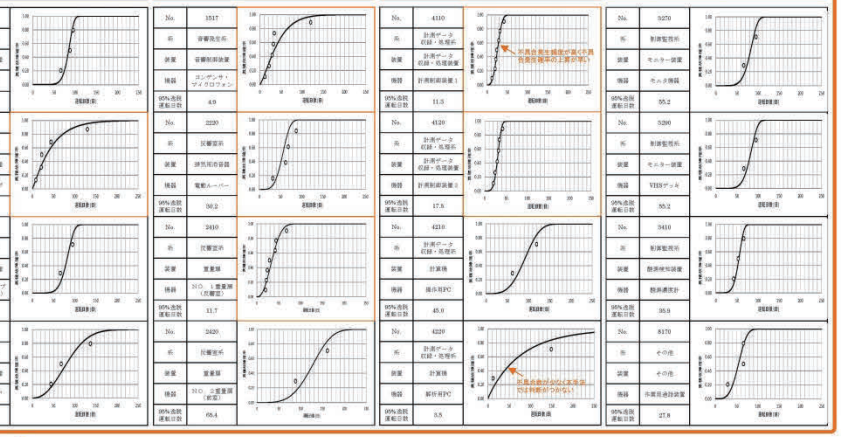
一般社団法人 原子力安全推進協会, "故障件数の不確定さを考慮した国内一般機器故障率の推定", http://www.nuca.jp/files/reliability/REPORT201401.pdf, 2014年1月

3. ワイブル分析を用いた機器寿命予測の1600m3音響試験設備への試行例

- 機器寿命予測手法の内、ワイブル分析を宇宙機用地上試験設備の一つである1600m3音響試験設備に試行適用した例を以下に示す。過去10年分の設備稼動実績と、分類した装置・機器単位での試験中不具合実績（不具合発生件数）を調査し、最尤推定法を用いてワイブルフィッティングを行った。
- 試行の結果、パワーアンプや電動ルーバ、重量扉制御系や計測制御装置等の機器は、保全周期が短いにも関わらず不具合が頻発しており、保全内容について改善が必要であることが分かった。また、本手法が適用できる機器については、保全周期の延長が期待できる機器は存在しなかった。

1600m³音響試験設備

音響発生系																							
No.	1460	No.	1470	No.	1502	No.	1504	No.	1517	No.	2220	No.	2410	No.	2420	No.	4110	No.	4210	No.	4220	No.	3270
形	音響発生系	形	音響発生系	形	音響発生系	形	音響発生系	形	音響制御装置	形	反響室系	形	反響室系	形	反響室系	形	計測データ収録・処理系	形	計測データ収録・処理系	形	計測データ収録・処理系	形	制御監視系
装置	音響発生装置	装置	音響発生装置	装置	音響制御装置	装置	音響制御装置	装置	コンデンサ・マイクロフォン	装置	排気用吹出口	装置	重量扉	装置	重量扉	装置	計測データ収録・処理装置	装置	計測データ収録・処理装置	装置	計測データ収録・処理装置	装置	モニター装置
機器	音響変換器（EPT-200）	機器	パワーアンプ	機器	クリップパラメ（DC-200A-5）	機器	コンストラムジョーズ	機器	SO₂ 2重扉（反響室）	機器	電動ルーバー	機器	SO₂ 1重扉（反響室）	機器	SO₂ 2重扉（反響室）	機器	計測制御装置 1	機器	計測制御装置 2	機器	計測制御装置 3	機器	モニター機器
95%信頼運転日数	68.1	95%信頼運転日数	3.2	95%信頼運転日数	88.2	95%信頼運転日数	25.8	95%信頼運転日数	4.9	95%信頼運転日数	50.2	95%信頼運転日数	11.7	95%信頼運転日数	65.4	95%信頼運転日数	11.5	95%信頼運転日数	17.5	95%信頼運転日数	45.0	95%信頼運転日数	55.2



4. まとめ

- まとめを以下に記す。
  - 設備保全の技術は日々進歩しており、宇宙機用地上試験設備でも保全計画のさらなる合理化を図るべく、保全の有効性を定量的に評価し効率的に改善を図っていく手法の整備が望まれている。
  - 音響試験設備にワイブル分析を用いた不具合発生確率の概算手法を適用することにより、保全周期の見直しが期待できる機器が確認された。
  - 宇宙機用地上試験設備は石油プラントや電力インフラ設備のように24時間稼働し続けるようなものではなく、試験がないときには稼働を停止している状態であるため、「次回試験時に不具合なく確実に稼働するか」をこれまでの運転状況や直前の点検結果等から推定する必要がある。
  - 今後、状態監視保全の導入可能性を検討しつつ、保全コスト、故障モード、故障発生時のリスク等から時間基準保全・状態監視保全・計画事後保全を定量的に評価・識別する手法を検討し、設備保全のさらなる合理化に努めていく。

This document is provided by JAXA.