

特集 社会基盤・産業基盤における材料の老朽化とその対策

日本では、化学プラントも含めて、社会基盤、産業基盤となる設備・機器が高経年化しており、これをスクラップアンドビルドすることはほとんど無くなり、バブル時代に建設、施工したものを延命しながら使用せざるを得ない状況にある。材料の劣化は、最悪の場合、事故やプロセスの停止に繋がり、経済的損失は膨大なものとなるので、安全性確保の面からも材料に関わる設備・機器の点検検査や補修、あるいは余寿命予測が重要となっている。これらの技術は化学プラントにおける維持管理技術に通じるものが多い。

そこで、本特集では、社会基盤・社会インフラと産業基盤・化学プラントの両者に焦点を当て、設備・機器の老朽化の現象、劣化や破損事例、検査をふくめた材料技術、余寿命予測、そして、これらに関連する法令や規格基準の現状を紹介する。

(編集担当：森 伸介)†

化学プラントの老朽化と設備維持技術

石丸 裕

1. 化学プラントの現状と将来

日本の重化学工業設備の多くは、国内市場の縮小やグローバル化した経済事情などの影響を受け、長期にわたり新たな建設や増設の投資がなされることなく経年化が進みつつある。エチレン製造装置を例にとると図1¹⁾に示すように、建設後既に40年を経過した設備が生産の約8割を担う状況となっている。今後とも高機能製品製造設備への投資は拡大しても、バルク型製品製造設備に対する投資環境の好転は望めず、むしろ原料や市場に近い海外での製造・販売への志向がより拡大するものと思われる。

これより今後日本の高経年化設備には、その能力、リスク、運用・維持コストなどのバランスによる合理的な耐用限界点の議論、また海外においても運用開始後30年に達する設備があり、経年化への対応が設備維持上の重要な課題になると考えられる。

2. 化学プラントの老朽化と装置材料の劣化、損傷

本稿では設備材料の材料学的な劣化メカニズムに基づく



Aging of Chemical Plants and Their Maintenance
Hiroshi ISHIMARU (正会員)
1970年 北海道大学工学部卒業
現在 大阪大学大学院工学研究科BE専攻
特任教授
連絡先：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘
2-1
E-mail ishmaru@mit.eng.osaka-u.ac.jp

2016年11月7日受理

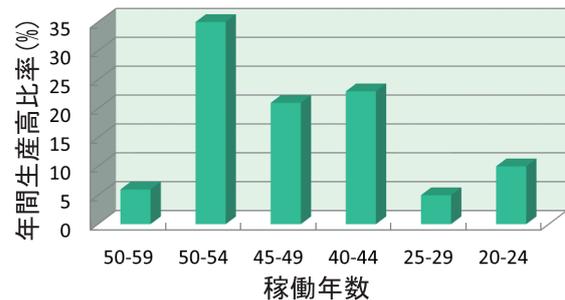


図1 日本のエチレンプラントの稼働年数とその生産高比率

“老朽化”に的を絞って考えていくことにするが、設備の寿命は表1に示すように多くの要因が連鎖的、複合的に関与して決定されていることに留意しておいて戴きたい。

化学設備材料は侵略的な腐食環境、高温、低温、高圧(熱応力や残留応力を含む)といった厳しい環境にさらされており、様々な機構による劣化が生じる。なお図2に示すように“劣化”は温度や繰り返し応力などの作用により結晶学的な被害が累積していくステージ(このステージでは熱処理などの手段によって回復が可能な場合もある)を、またマイクロボイドやき裂などの可視的で非可逆的な被害に進んだステージを“損傷”と定義するが、劣化・損傷メカニズムによっては区別が曖昧なこともある。しかし基本的には表2に示すように、体積的に生じる材質型劣化(損傷)、材料表面(層)型損傷、き裂型損傷の3種に分類が可能である。

材質型劣化の主要な要因は材料が使用される環境温度であるが、製作時の溶接や熱処理による熱履歴も直接あるいは潜在的に大きく影響する。図3²⁾は高温使用により典型

† Mori, S.

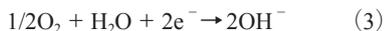
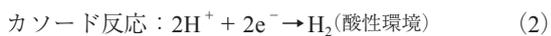
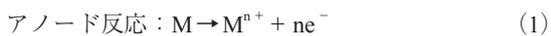
平成27、28年度化工誌編集委員(2号特集主査)
東京工業大学物質理工学院応用化学系

表1 化学プラントにおける様々な寿命様式

寿命の種類	基準にする特性, 指数など	具体的パラメーター
物理寿命	故障頻度, FFS(強度的供用可能性)	材料の損傷値, クリープ指数パラメーター, ハザード関数 MTBF(平均故障間隔), MTTF(平均故障時間)
時間寿命	設計基準値(設定寿命)	使用時間, 使用回数
安全寿命	リスク, 法規・規制への適合性	個人リスク, 集団リスク, ALARP, 耐震基準
機能寿命	性能値, 能力	生産量, 伝熱効率, 燃費, 吐出圧力
経済寿命	運転・補修費, 原材料コスト, 原単位	ICAF(リスク低減のためのコスト/便益比率)
設計寿命	設計基準値	設計肉厚, 構造
年次寿命	部品の供給停止, 後継補修技術者不在	使用時間, 使用回数
法規寿命	法律, 規格, 基準の改定	耐震性, 排出物, 環境規制
社会的寿命	騒音, 環境対策不備, 市街地立地	使用時間, 使用回数, 使用期限

的な材質劣化・損傷過程を示す例としてナフサ改質炉で使用されたHK40高炭素遠心铸造管の金属組織変化を示す。多量に析出した微細なCr炭化物はこの材料の高温強度を特徴付けているが、使用される時間の経過と共に、凝集・粗大化して強度も失われていく。析出物は高温強度維持に主要な役割を果たしているが、一方では延性の低下をもたらす。特に設備の起動、停止時に慎重な操作を要求するとともに再溶接を著しく困難にしている。焼き戻し脆化、クリープ脆化などの脆化事象も、高温使用過程で析出する析出物の形態や析出箇所、不純物元素の偏析などに起因している。ステンレス鋼では、高温使用あるいは溶接過程で結晶粒界に析出するCr炭化物は、生地中のCr濃度減少をきたし粒界腐食発生の原因となっている。このように金属組織変化は全ての表面型、き裂型いずれの損傷機構にも関与する熱活性化劣化プロセスである。

化学プロセスの発展は耐食材料の発展と共にあると言われているが、腐食損傷は化学プラントで最も頻発する事象で深刻でもある。腐食は式(1)に示す酸化反応と、式(2)(3)に示す還元反応の組み合わせで進行する。



(中性, アルカリ性環境)

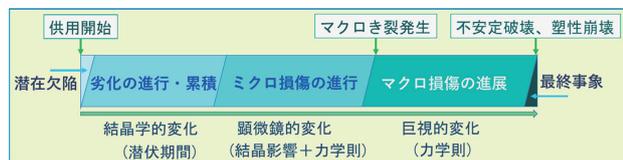


図2 材料の劣化・損傷のプロセス

表2 材料の劣化・損傷の形態

形態	主要要因	事象の例
表面(腐)損傷	化学反応、 機械的作用	腐食、酸化、磨耗 浸炭、窒化
き裂型損傷	応力、温度 化学的效果	疲労、応力腐食割れ、 水素脆化、クリープ
材質型損傷 (金属組織変化) (結晶微細構造変化)	温度、応力、 化学的效果 自己拡散 析出(粒界/粒内) 固溶	結晶粒界の 脆化、耐食性低下 硬化、脆化、軟化 クリープ抵抗低下、 韌性低下(低温脆性) 水素浸食

これより溶液のpHや溶存酸素が腐食反応の進行に大きな役割を果たしていることが分かるが、さらにこの反応の結果として生じる酸化物(不動態皮膜と呼ぶ)の金属表面での安定性が腐食の進行に大きく関わっている。実用金属材料の耐食性はこの不動態皮膜の存在によると言っても過言ではないが、この皮膜が局部的に破壊されるようなことがあれば孔食や応力腐食割れが発生し、設備には深刻な被害をもたらす。こうした局部腐食の発生は、材料、環境、応力の複雑な組み合わせに支配され、しかも長期間使用された後に発見されるケースや設備停止操作中に形成される過渡的な環境で発生するケースなどがあり、全面腐食に比べると対応は遙かに困難である。またカソード反応で生じる水素原子が金属中に侵入すると材料の脆性的な破壊をもたらす。

設備材料の経年劣化に対応するには、こうした個々の損傷機構の理解が必要であるが、この二つの例で述べたように、材料は強度を向上させると脆化が生じる、耐食性を得ることにより局部腐食が発生するといった相反する気難しい性質を持っている。経年化により生じる損傷は、こうした矛盾点の片方を見逃したことにより発生することが少なくない。装置材料選択に当たっては材料のカタログデータのみならず、供用により平行して生じる全ての材質変化を幅広い視点で検討しておくことが肝要である。

3. 装置材料の劣化・損傷の発生と診断

プラント材料に生じる損傷も電子機器と同じようにその要因により Systematic Failure : SF と、Random Hardware Failure : RHF に分けられる³⁾。SFは製作や保全の品質ある

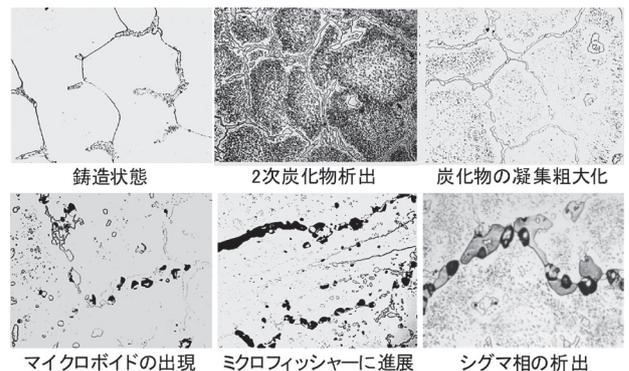


図3 HK40遠心铸造管の使用過程におけるマイクロ組織の変化

いはミスに起因して発生し、管理により原因をつぶすことで対応される。RHFは経年劣化や損傷メカニズムに基づいて発生し、その進行に伴うリスクに応じて対応策が検討される。保全是機器の製作段階の品質管理業務から関与すべきで、SFを有する、いわゆる「生まれの悪い」機器は供用過程でも問題を生じることが多い。また経年設備で問題になっている断熱材下の外面腐食はSFに分類される損傷であって、適切な保全で管理すべき事象と考えられる。RHFについては次章で触れる損傷許容基準による保全が求められており、現状の設計基準保全では合理的な対応は困難である。

化学設備の供用中検査(ISI)は、運転過程で生じる材料の変化、たとえば初期欠陥の進展、RHFの発生と進展などの評価が目的で、製作時の規則に基づく「有害欠陥検査」とは異なる。特に材料の質的变化や微小欠陥の同定、損傷サイズの定量評価などが求められ、供用開始前検査(PSI)で取得された精度の高い初期データとの比較でそれらが判断されることも多い。表3に供用過程検査で用いられる診断方法の例を、また表4には損傷評価に用いられる非破壊的な検査方法の例を示すが、実装置で損傷発生が懸念される部位は検査のための接近性が困難な場合が多く、そのための特殊なセンサや検査方法も多く開発されている。熱交換器を例にとると製作時には検査されることのない伝熱管端部シール溶接部の欠陥や溶け込み、伝熱管の全面肉厚測定、バップルプレート部のき裂発生なども重要な検査項目となっている。

4. プラント経年化と保全基準について

日本では供用中の設備においても設計規格が要求する要件を満たすことが求められている。従って、供用中検査において設計で必要とされる肉厚を満たさない箇所が見つかる、あるいは欠陥や損傷が見つければ、その原因、性状を問わず削除や肉盛り溶接補修、部分更新などの対策が必要となっている。

しかし供用が開始された設備では、暴露される環境条件は明確になり、発生した損傷の機構や性状、規模、発生場所なども確認され、弾塑性解析の進歩と相伴って精度の高い供用適合性評価(FFS)⁴⁾が可能になる。さらに使用された材料の現場での補修や更新作業には新たな材質の弱点を発生させる懸念も大きい。こうした背景から欧米では設備の供用過程で生じる劣化、損傷の存在を前提とした保全基準が制定され、図4に示すように設計基準とは明確に区別されて用いられるようになってきた。さらには機器が内在する危険物、毒性物質の漏洩を危害事象としたリスクに基づく保全基準も提案され、RHFにより損傷が生じた経年設備の保全が合理的に実施できるようになってきた。また、大型回転機やポンプなどの動機器に対しては、部品単位での故障頻度や故障時の影響の大きさに基づいて保全方式を最適化する信頼性基準保全が取り入れられている。図5⁵⁻⁸⁾にはそうした保全方法の例を示す。

日本でも最近になってFFSの考え方が、制限付きではあるが高圧ガス設備の保全に取り入れられるようになってきたが⁹⁾、元々、欠陥や減肉による設計肉厚未達状態を許容しない設計条件をそのまま保全基準と考えているので、内容物の漏洩を限界条件と考えるリスク基準の保全思想とは矛盾が生じることになる。

欧州ではCEN(欧州標準化委員会)にTC319 Maintenance Serviceの委員会を設け、用語の定義や資産管理のあり方を含めた基本的な保全のEN標準規格作成をおこなっており、アメリカにおいても機械学会や石油協会などにおいて保全規格作成が精力的におこなわれている。日本の化学工業では経年設備の維持、補修技術や管理技術において劣るわけではないが、こうした規格化、標準化という面では遙かに遅れていると言わざるを得ない。

5. 補修技術と教育

経年設備を維持していく過程では生産能力向上や規制変更への対応要求などもあり、部分的な補修や更新は必ず必

表3 供用過程で用いられる損傷の評価試験方法

評価対象の例		試験法の例	
		破壊試験	非破壊試験(現場試験)
機械的性質	強度、靱性、延性	強度試験、スモールパンチテスト 組成分布(SEM)	硬さ、組織、組成(Positive Material Identification法)、 音弾性特性(超音波)、磁気特性、X線回折
減肉		断面観察(局部腐食)	超音波、渦電流、漏洩磁束
き裂		断面観察(顕微鏡)	染色探傷、磁粉探傷、電位差法、超音波、 渦電流、放射線
微小分布欠陥	マイクロポイド	断面観察(顕微鏡)	超音波、渦電流、漏洩磁束
金属組織	形態、析出物、相	組織検査、X線回折、電子線回折、 表面分析	組織検査(レプリカ法)、硬さ、 エッチング試験(マクロ)
化学組成		分析(化学、蛍光X線、SEM、他)	Positive Material Identification法、簡易化学分析
物理的特性	導電率、透磁率 音速、熱伝導度	専用の測定装置	渦電流、磁気測定、超音波、打音
電気化学特性	電位、電流	ポテンシオスタット、 無抵抗電流計など	ポテンシオスタット、無抵抗電流計など
耐食性	腐食度、侵食度 再不動態化電位など	各種ラボ腐食試験	腐食評価クーポン、コロゾメーター ポテンシオスタット

表4 材料の劣化・損傷の非破壊評価法の例

損傷形態	損傷部位	物理化学的方法	具体的な評価手法の例
微小欠陥 (ボイド)	表面損傷	超音波	表面波, SH波, 円筒波, 表面反射波
		レーザー照射	表面反射波スキャン(レーザー顕微鏡/超音波)
		渦電流	高周波表面検査
		電位差	交流電位差
	内部損傷	磁性	漏洩磁束
		超音波	反射ノイズエコー法, 減衰(透過波・反射エコー高さ), 反射波・透過波(周波数分布変化), 音速
金属組織的变化 内部応力	表面/内部	渦電流	導電率, インピーダンス変化
		電位差	直/交流電位差, 電気抵抗
		超音波	音弾性・音速, 透過波減衰・周波数変化・反射エコー高さ
		磁性	バルクハウゼンノイズ, 磁気異方性, 透磁率
		X線	回折角, 半価幅
		電気化学的評価	浸漬電位, 孔食電位, 再不動電位
		機器分析	析出物抽出
き裂	サイズ定量化	微小硬度計	超音波硬度計
		超音波	斜角法(焦点, フェーズドアレイ), 端部エコー法, TOFD
		渦電流	周波数可変法, 位相角
		電位差	直/交流電位差, 電気抵抗
		放射線	側傾法, 濃度法
		磁性	漏洩磁束

要になる。そこでは材料そのものに脆化などの変質がある、薄板や拘束の大きい構造が多い、予熱・後熱が困難、かつ溶接姿勢が悪いなど溶接条件が劣悪な場合が多い。溶接設計や溶接材料に特別な配慮が必要であるが、悪条件下の溶接に対応できる高い技量を有する溶接工の育成や維持も保全の重要な役割の一つである。

6. おわりに

化学プラントは永遠の命を持つわけではなく、経年使用により必ず劣化・損傷は進む。しかしそれは管理可能なプロセスであり、英国の環境安全局が主張するように「設備が何年使われたかではなく、どのように運転され、検査され保全されてきたか」が議論されるべきで、古いから不安全ということではない。一方では設備の設計建設、運用開始段階で多くの困難を経験した人々が会社を去り、設備の状態が安定したところで運転や保全を引き継いだ人々の、意識のマンネリ化や経験の欠如による設備異常や損傷の兆候への感受性の希薄化の懸念がないとは言えない。また海外に建設されたプラントでは日本とは異なる速度やメカニズムで経年損傷が進むことも考えられる。

世界の全ての化学プラントは確かに経年化していくが、それに伴い経験は豊富になり蓄積される知恵と知識は高度化する。それらを、進歩する信頼性評価技術により活用することで、設備材料が発信するあらゆる情報を評価し、合理的な対応をとることが可能になるものと思われる。「老朽化」ではなく「安全と信頼性が実証された」プラントとしてより長く活用できることを望む次第である。

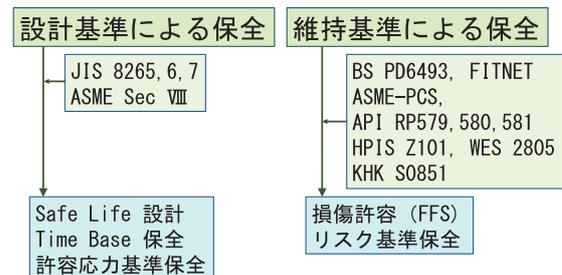


図4 二つの保全基準と関連規格の例

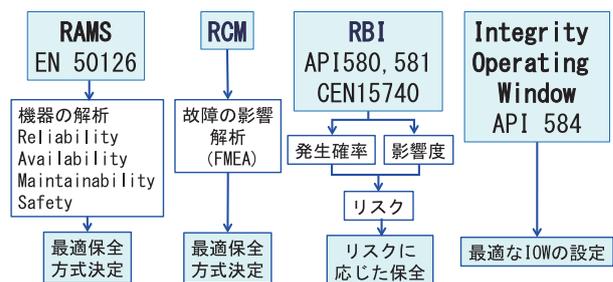


図5 最適な保全方式の決定基準例
RCM: Reliability Centered Maintenance
RBI: Risk Based Inspection

引用文献

- 1) 経済産業省: 資料 石油化学産業について (2013)
- 2) 石丸: 圧力技術, 21(3), 147-155 (1982)
- 3) JS C0508, 電気, 電子, プログラムブル電子安全系の機能安全(1999)
- 4) API 579, Fitness for Service Evaluation (2007)
- 5) EN 50126, Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability And Safety (1999)
- 6) Moubraj, J.: Reliability-centred Maintenance, Butterworth (1988)
- 7) API 581, Risk Based Inspection Technology, 3rd-ed (2016)
- 8) API 584, Integrity Operating windows (2014)
- 9) KHK/PAJ/JPCA S 0851, 高圧ガス設備の供用適正評価に基づく耐圧性能および強度に関わる次回検査時期設定基準 (2014)