

## 腐食・疲労等のモニタリング技術・診断技術等に関する調査

## 1. 危険物施設以外の設備で適用されているモニタリング技術、診断技術

## 1) 原子力施設、高圧ガス施設、電力施設、都市ガス施設、土木関連施設、化学プラント施設、その他全般的施設で利用されている技術

原子力施設、高圧ガス施設、電力施設、都市ガス施設、土木関連施設、化学プラント施設、その他全般的施設で利用されている技術を、文献調査した結果を別表 1 に示す。

- ・原子力施設においては、施設の疲労、亀裂、摩耗、腐食などを連続監視することの重要性から、複雑形状設備、高温設備、放射線設備という特殊性に適合した各種モニタリング技術が利用されている。
- ・高圧ガス施設及び化学プラント施設で利用されている診断技術は、危険物施設における診断技術と同様である。
- ・電力施設の中でボイラ関連設備において利用されている診断技術は、危険物施設の加熱炉で適用している技術と同様であるが、構造物の外面腐食を金属の腐食電流の直接計測によってモニタリングする技術は、他の産業にも適用できる共通的技术と考えられるが、文献調査の範囲では、他の産業では使われていない。
- ・都市ガス施設においては、長距離埋設管の腐食診断技術が利用されている。ここで利用されている技術は、危険物埋設配管でも利用されている。
- ・土木関連施設の中で、橋梁に関しては、センサを取り付けて長期モニタリングを行う技術、遠隔監視する技術が使用されている。

別表 1 の技術の中で危険物施設のモニタリング、診断に適用可能性がある技術を下表に示す。(既に適用されている技術を含む)

診断技術名	略号	概要	適用例
アコースティック・エミッション	AET	材料が変形や亀裂発生したときに生ずる弾性波（アコースティックエミッション）から、腐食、亀裂、漏洩などを検出する。	タンク底板、配管、容器、変圧器、回転機械
磁気飽和低周波渦流探傷 (SLOFEC)	ET	測定対象物を予め直流磁化することにより渦電流試験で精度よく板厚を測定する。	

診断技術名	略号	概要	適用例
パルス渦流探傷	ET	試験体に渦電流を発生させて、欠陥部における渦電流の乱れをインピーダンス変化として検出	
ガイド波	UT	長距離電波性の超音波を用いて計測位置から数十メートルの検査が可能	橋梁添架配管 橋脚貫通配管 配管サポート部 埋設配管
フェーズドアレイ超音波探傷	UT	多数の振動子(圧電素子)個々の振動子が超音波を送受信するタイミングを独立に制御し、合成された超音波波面を形成することにより超音波ビームの制御を行う。狭隘部への適用や、火力発電所ボイラ大径管に発生するクリープ損傷箇所の特定に有効	配管溶接部内部 火力発電所のボイラ大径管 狭隘部の腐食 構造物の内部
高精度減肉連続監視システム	UT	1200℃に耐える探触子で高温配管、高温構造物の減肉を測定する	原子力で利用
赤外線サーモグラフィ		対象物から出ている赤外線放射エネルギーを非接触で測定し、表面温度の差(ホットスポット)から劣化部位を検出	配管の減肉、孔食の有無 構造物全般
リアルタイム RT	RT	放射線を配管に照射し、内部の状態を背面に置いたフラットパネルで撮影し、画像の濃淡で内部のキズや形状を検査する	原子力で利用 保温配管
カラーシンチレーター	RT	X線内部透視装置により保温材の上から減肉を検査	原子力で利用 保温配管

診断技術名	略号	概要	適用例
中性子水分計+X線ハイブリッド腐食診断システム		保温材の水分を測定し、湿潤場所をX線で減肉を測定する。測定装置をロボットに搭載して検査	保温配管
電気化学ノイズモニタリング法	ENA	電極表面での微小な酸化還元反応を、精密な電圧と電流測定により腐食現象とノイズ形態の対応付けを行うことにより、ミクロンオーダーの測定ができる	原子力で利用 構造物全般

AET : Acoustic Emission Testing

ET : Eddy Current Testing

UT : Ultrasonic Testing

RT : Radiographic Testing

ENA : Electrochemical Noise Analysis

## 2) 社会インフラの老朽化対策技術調査

- ・国の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の中で、「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の開発技術チームにおいて研究開発が進められている。
- ・研究開発テーマとして 60 テーマが登録されている。（参考資料 1 参照）  
技術分類、研究担当機関、テーマ件数を下記に示す。

技術分類	研究担当機関	テーマ件数
点検・モニタリング・診断技術	科学技術振興機構（JST）	8
	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	10
	国土交通省	16
構造材料・劣化機構・補修・補強技術	科学技術振興機構（JST）	3
	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	1
情報・通信技術	科学技術振興機構（JST）	2
	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	3
ロボット技術	科学技術振興機構（JST）	3
	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	7
	国土交通省	3
アセットマネジメント技術	科学技術振興機構（JST）	4
合計		60

- ・上記 60 テーマの中から、危険物施設の維持管理・更新・マネジメント技術にも適用可能と考えられる 10 テーマについて、その概要を別表 2 に示す。
- ・別表 2 に示した 10 テーマを分類すると下表のようになる。（番号は国のテーマ番号）

技術分類	研究担当機関
点検・モニタリング・診断技術	科学技術振興機構（JST）
	1. 異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発
	2. レーザー超音波可視化探傷技術を利用した鋼橋の劣化診断技術の開発
	3. インフラ劣化評価と保全計画のための高感度磁気非破壊検査
	8. インフラモニタリングのための振動可視化レーダーの開発
	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
	1 2. ラジコンボートを用いた港湾構造物の点検・診断システムの研究開発
	国土交通省
2 2. 橋梁点検ロボットカメラ等機器を用いたモニタリングシステム	

技術分類	研究担当機関
	<p>ムの創生</p> <p>2 3. 画像解析技術を用いた遠方からの床板ひび割れ定量化システムの構築</p> <p>3 4. IT 等を活用した社会資本の維持管理（点検・診断） 「目視困難な水中部にある鋼構造物の腐食や損傷等を非破壊で検出可能な技術」を公募し、応募技術を現場で活用・評価して、技術の改善を促進する。」</p>
構造材料・劣化 機構・補修・補 強技術	科学技術振興機構（JST）
	3 6. 構造物の状態を高度可視化するハイブリット応力発光材料の研究開発
	3 7. 鋼構造物の腐食による劣化損傷の新溶射材による補修技術の研究開発

別表 2 の技術の中で危険物施設のモニタリング、診断にも適用可能性がある技術を下表に示す。

研究テーマ	診断技術
1. 異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発	<p>①可搬型高出力X線源を用いた透過可視化技術</p> <p>②部分CT技術</p>
2. レーザー超音波可視化探傷技術を利用した鋼橋の劣化診断技術の開発	<p>①高速レーザー走査して超音波の電波映像を計測する技術</p> <p>②遠隔計測を可能とするレーザー工学系機器</p> <p>③コンパクト軽量のレーザー超音波可視化検査装置</p> <p>④計測映像の乱れを解析して、亀裂の位置とサイズを検出する画像解析法</p>
3. インフラ劣化評価と保全計画のための高感度磁気非破壊検査	<p>①磁気抵抗素子(MR)を用いたポータブル検査装置を開発し、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・極低周波渦電流検査法（ELECT）</li> <li>・不飽和交流磁束漏えい法（USAC）</li> </ul> <p>を確立</p> <p>②酸化物高温超伝導体を用いた超電導量子干渉素子（SQUID）磁気センサーを用いて、舗装の上から高速道路や橋梁の鋼床板溶接部の亀裂を検出する技術を確立中</p>
8. インフラモニタリングのための振	①マイクロ波レーダー信号を対象物から反射し

研究テーマ	診断技術
動可視化レーダーの開発	<p>た信号をデータ処理して構造体を画像化し、各部の振動を解析して健全性をモニタリングする</p> <p>②数百メートル離れた地点から微弱なマイクロ波を照射することで測定できる</p>
1 2. ラジコンボートを用いた港湾構造物の点検・診断システムの研究開発	<p>①小型のラジコンボートに動揺抑制装置付撮影カメラで栈橋上部工下面部を撮影</p> <p>②画像解析より劣化診断するシステムを開発</p> <p>③実証試験で有効性を確認</p>
2 2. 橋梁点検ロボットカメラ等機器を用いたモニタリングシステムの創生	<p>コンクリート橋の支承部や桁端部等、人が容易に近づけない部位の、損傷状況の経年変化データを取得する定期監視型モニタリングシステム</p> <p>①ロボットカメラ、雲台付き点検カメラ、レーザーキャナーの画像をフルハイビジョンで表示</p> <p>②機器相互は位置情報連動の補完機能で、前回撮影と同条件で撮影</p> <p>③時系列変化を可視化</p>
2 3. 画像解析技術を用いた遠方からの床板ひび割れ定量化システムの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無人飛行機あるいはポールに搭載したデジタルカメラで撮影した画像からひび割れ図を作成</li> <li>・ひび割れが遊離石灰で覆われても、内側のひび割れを定量的に算定する</li> <li>・タブレットを使って測定現場で診断できる</li> </ul>
3 4. IT 等を活用した社会資本の維持管理（点検・診断）	<p>新技術情報提供システム（NETIS）での公募に応募した技術開発を国交省が推進、支援する</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・公募テーマ「目視困難な水中部にある鋼構造物の腐食や損傷等を非破壊で検出可能な技術」</li> </ul>
3 6. 構造物の状態を高度可視化するハイブリット応力発光材料の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造物の劣化（ひずみ、ひび割れ）を検出・可視化する高感度応力発光材料を開発</li> <li>・塗装の上から応力発光法（ML 法）で構造物の溶接部等の微小亀裂、劣化を検出可能</li> </ul>
3 7. 鋼構造物の腐食による劣化損傷の新溶射材による補修技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・防食耐久性に優れた金属溶射合金（Al-Mg-Ca）を開発</li> <li>・狭隘部の金属溶射に適したプラズマアーク溶射技術を確立</li> </ul>

### 3) モニタリング技術に関する海外事例

国土交通省「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会」でモニタリング技術の海外事例が報告されている。

	開催日	資料番号	資料名	事例件数
第3回委員会	平成26年3月20日	資料2-3	「モニタリング技術に関する海外事例について」	16
第5回委員会	平成27年3月6日	資料4	「海外事例に関する調査」	31

海外事例の名称一覧は参考資料2に示す。

2つの海外事例は橋梁の腐食モニタリングの事例が多いが、危険物施設のモニタリングにも適用可能と考えられる技術を使用した事例を抽出し、別表3、別表4に示す。それぞれ7テーマである。

この中で特に危険物施設と関連が深い技術は下記4事例である。

測定場所	事例名	実施国
埋設管	光ファイバを使った温度モニタリングによるパイプラインの漏出検出	ドイツ
水道管路	水道インフラ災害を予防および緩和するための次世代 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) *1	アメリカ
橋梁	電子疲労センサ (EFS <sup>TM</sup> ) *2 を利用した疲労亀裂のモニタリング	オーストラリア
港湾	RTD Incotest*3 による非接触型の鋼部材の肉厚計測	オランダ

\*1 SCADA 水道、排水、下水処理、石油やガスのパイプライン、送電網、大規模通信システムなどのインフラのデータを収集し、監視制御するシステム

\*2 EFS Electrochemical Fatigue Sensor 鋼構造物の微細な疲労亀裂の進展をモニタリングするためのセンサ

\*3 RTD Incotest パルス渦流技術 (PEC) を応用した先端スクリーニング技術で、保温・被覆材、コーティングされた炭素鋼対象物の肉厚現象を高速で検査できる。  
耐火被覆、コンクリート、海洋性生物、鏽、泥等が表面に存在しても問題なく検査が可能。

#### 4) 危険物施設に適用されているモニタリング技術・診断技術等

国内の検査会社、事業会社、技術系専門誌等に対して、先進技術の動向等についてヒアリングを実施し、危険物施設に適用されている各種技術の概要等を以下に示す。

##### ア モニタリング技術・診断技術

対象場所	技術名	技術の概要	
配管	インナースルー	斜角の超音波探触子 2 つ(ツインセンサー)を軸方向に走査して減肉部を特定し、その場所は周方向に垂直探傷して肉厚測定する。	超音波
	ラックスルー	配管と梁の接触部の腐食をツインセンサーで診断し、腐食深さを推定する。	超音波
	NIPS (Nippi Image Processing system)	レーザーフィルムデジタイザーによる画像処理で保温材を外さずに配管の内面・外面腐食を測定する。	ガンマ線
	CUI-View II (Corrosion Under Insulation-View II)	エネルギー弁別型の CdTe 素子ラインセンサを用いて配管の減肉を定量的に測定する。	エックス線、 ガンマ線
	フェイズドアレイ 超音波探傷	複数の振動子を有した探触子を用いて複数の屈折角で一度にスキャンすることで溶接部のクラック、キズの深さ、ボルトの腐食等を測定する。	超音波 (原子力技術の応用)
	電位差法	防油堤貫通配管の外面腐食を測定する。貫通部前後の電位差と健全部の電位差との変化率から腐食程度を診断する。	直流パルス電流
タンク底板	FSM 法 (指紋照合法 Field Signature Method) EPD 法 (電位差法 Electro Potential Drop)	タンクの犬走り部または側板下部に格子状にセンシングピンとカレントピンを取り付け、電流を2方向から流してそれぞれの電位差を測定し、電位差変化率から底板の肉厚分布を得る。	直流パルス電流  運転中タンク外部から検査
	タンク底板連続板厚測定装置	多数の超音波厚さ計を組み込んだ測定器で 30~40cm 幅でタンク底板の厚さを測定する。2~5mm ピッチで肉厚測定が可能	超音波 タンク開放時に検査
その他	ATOM (Automatic Tube	熱交換器チューブの外面腐食を超音波で測定する。	超音波

対象場所	技術名	技術の概要	
	Outside Mapping system)		

イ 長寿命化技術

分類	技術・商品名	技術の概要	適用例
機器の部分更新 (腐食部分の再生)	C-Phoenix 工法	部分減肉した円筒状胴板を周方向に数分割して取り除き、耐食性の新胴板に交換する。 実績 7件 千代田工商	大型塔、石油精製装置、圧力容器のスカート部、圧力容器外面腐食補修、加熱炉対流部加熱管更新
劣化配管の更生修理	フェニックス工法	配管内面にシールホースを接着して再使用可能にする。  実績 東邦ガス他	中圧、低圧配管。 埋設ガス導管 口径：100～400mm 最長：200m エルボ：4か所まで
防食テープによる被覆	酸化重合型屋外防食テープ (屋外設備用)	特殊配合乾性油（植物油系）を主成分とするコンパウンドをプラスチック系不織布に含浸させたもの。空気中の酸素と酸化重合物が表面に皮膜を形成し、優れた防食性と耐候性を発揮する。柔軟性に富んでいるため、貼ってなでつけるだけで、どんな形状の箇所にもぴったり密着が可能となる。“貼る重防食塗料”と言える。	栈橋配管 架台基礎部 タンク裾回り（雨水侵入防止） 屋外配管 水管橋 橋梁添配管
	ペトロラタム系防食テープ (埋設設備用) (海中、水中設備用)	石油の潤滑油留分を溶剤脱蠟して得られる軟質の非結晶性または微結晶性のワックスに、潤滑油の重質留分を練り合わせた半固体状混合物であるペトロラタムを主成分としたコンパウンドを不織布に染み込ませたテープ。柔軟性に富み、どんな形状のものにもピッタリ密着する。	
純亜鉛の犠牲防食機能と被覆による防食	ZAP テープ	<ul style="list-style-type: none"> <li>導電性の亜鉛粒子を粘着剤に分散し、その粘着剤を亜鉛箔に塗布したもの。</li> <li>粘着剤層を鋼材に貼ることで、亜鉛被覆による鋼材の防食</li> </ul>	配管溶接部 タンク脚部 ガードレール地際部

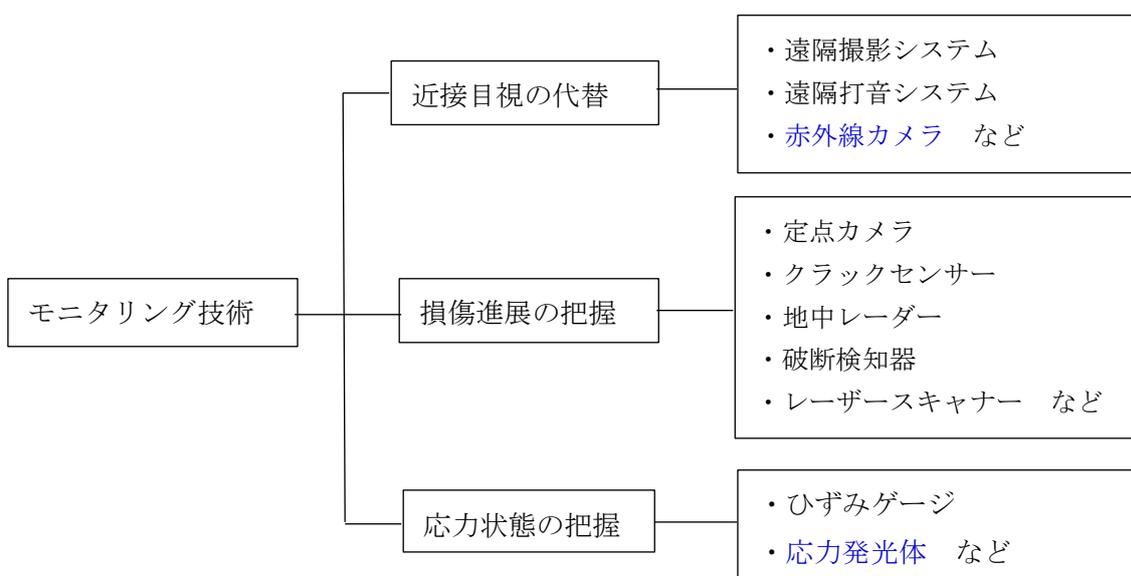
分類	技術・商品名	技術の概要	適用例
		性と亜鉛による犠牲防食性の二つの機能を発揮する。	
	ZAP ペースト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接着剤に亜鉛粒子を分散させたペースト</li> <li>・防食上は皮膜の厚さが厚いほど有効であり、ZAP ペーストは厚いことが評価されている。約 300 <math>\mu\text{m}</math> の厚膜の形成が可能</li> </ul>	送電線接合部 H鋼接合部 地下フランジとエルボ
	ZAP シート	<ul style="list-style-type: none"> <li>・配管と梁の間にシートを挿入し、配管の梁接触部近傍をテープで巻く。</li> <li>・タンクの底板と側板の溶接部の下部に敷設。</li> </ul>	配管と梁の接触面  タンク底板裏面
重防食塗料	超厚膜型ポリウレタン樹脂塗料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶剤を含有しない 100%ソリッドのポリウレタン樹脂塗料</li> <li>・耐海水性、耐衝撃性、耐摩耗性に優れる。</li> <li>・膜厚 2500 ミクロンが可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シーバース</li> <li>・海洋構造物</li> <li>・鋼管杭、鋼矢板</li> <li>・橋梁、橋脚</li> <li>・備蓄タンクの側板の塗装</li> <li>・船舶</li> </ul>
保温材	はっ水性保温材	雨水等が保温外装板から侵入しても吸湿せず、配管外面を湿潤状態にしない。	保温配管 保温タンク
	小口径エルボ用保温材	小口径配管の現場保温施工は密着が難しいのでエルボに合わせて製作した保温材を使用。	
保温工法	コーキング材	シリコン系コーキング材が劣化しにくい。	
	2重被覆	保温材をアルミ系シートで覆い、その上を亜鉛鋼板または SUS 鋼板で覆う。	
	密着型プレハブ断熱パネル工法	保温材と外装材を一体化させたプレハブ式の断熱パネル。裏面に粘着シートを有し、タンク側板等の施工対象物に密着させることができる。	タンク保温施工 大型塔を C-Phoenix 工法で更新する際の保温工事にも適用 隙間がないので雨水が侵入しない
樹脂被覆鋼管	ポリエチレン被覆鋼管	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼管外面を押出法でポリエチレン被覆する</li> <li>・20 インチ管の場合、一般配管の被覆は 2mm であるが、高圧ガ</li> </ul>	埋設配管用

分類	技術・商品名	技術の概要	適用例
		ス配管は5mmとしている。	
	密着ポリエチレン鋼管	・鋼管外面をポリエチレンとポリエチレンコポリマーの2層で被覆する	埋設配管用

### 5) 危険物施設に活用が考えられる技術

設備の定期修理インターバルが延長される方向にあること、定期修理でも配管は全数検査ができないこと、タンクの開放周期が長いことなどを考えると、長期使用危険物施設の運転中に劣化の有無をスクリーニングする技術の充実と活用が望まれる。

国の維持管理研究委員会報告書の道路分科会では橋梁におけるモニタリング技術を次のように分類している。



#### ●赤外線サーモグラフィの活用

上表の中の赤外線カメラによる状態検査は、産業界のさまざまな分野で活用されているが、危険物施設の劣化スクリーニングではまだ利用が広がっていない。

「海外保全管理技術の国内への適用に関する調査」によると、米国では、塔槽の保温材下外面腐食の検査にサーモグラフィ技術が普及しているが、国内で適用するためには検査精度が課題であること、しかし、スクリーニングに用いることは有効と報告されている。

ハンディな機器であり、地上から遠隔測定できるので、機器、配管など対象を定めて定期的に測定し、温度変化を観察することが望まれる。

赤外線サーモグラフィを設備診断に活用している工場は複数あると思われるが、危険物

施設への適用事例、診断ノウハウを産業界で共有し、活用事例を蓄積・公開することによって、長期使用危険物施設の診断への利用が広まることが期待される。

#### ●応力発光体による疲労亀裂の検出

上表の応力発光体は材料の疲労亀裂などの損傷を検出・可視化する材料として注目されている。国の「戦略的イノベーション創造プログラム」でも、科学技術振興機構が「構造物の状態を高度可視化するハイブリッド応力発光材料の研究開発」を進めており、高速道路の鋼材の防食塗装の割れ（塗膜割れ）発生個所を対象に応力発光試験を実施し、防錆塗料の上から鋼製部材における疲労亀裂の有無判定方法を確立している。

疲労亀裂や応力集中の検査技術は、危険物施設にも適用可能と考えられる。

危険物施設で適用可能と考えられる場所（配管・機器等の溶接部、応力が集中しやすい箇所など）を選定し、実プラントでの実証試験を実施して、測定場所に適した発光材料、測定方法等を確立すれば、簡易な疲労亀裂スクリーニング方法をすることができる。

なお、産業技術総合研究所（九州）では「応力発光技術コンソーシアム」を設置し、共同実証試験をとおした最適化の事例を積み重ね、社会への実装を広げる場を設けている。