

目 次

第 1 章 メンテナンスストラテジー	1
第 1 節 メンテナンス方式とその選定	2
1. メンテナンス方式の分類	2
1.1 保全予防	2
1.2 予防保全	2
1.3 事後保全	3
1.4 改良保全	3
2. メンテナンス方式選定の考え方	4
2.1 LCCM にもとづく選定	4
2.2 劣化パターンにもとづく選定	5
2.3 メンテナンス方式選定の総合的な考え方	6
第 2 節 信頼性基準保全（RCM）の基礎	6
1. RCM とは	6
2. RCM の解析手順	7
3. RCM による保全方式の選定	9
第 3 節 状態基準保全（CBM）の基礎	9
1. 予知保全（Predictive Maintenance）の考え方	10
2. プロアクティブ保全(原因除去型保全)の考え方	11
第 2 章 トライボロジーの基礎：潤滑理論／基礎事項	17
第 1 節 潤滑剤の機能	18
1. 腐食防止作用	18
2. 清浄作用	18
3. さび止め作用	18
4. 密封作用	19
5. 動力伝達作用	19
6. 電気絶縁作用	19
第 2 節 潤滑体系	20
1. 流体潤滑	21

2. 弾性流体潤滑 (ElastoHydrodynamic Lubrication)	23
3. 境界潤滑	24
3.1 物理吸着膜	24
3.2 化学吸着膜	25
4. 混合潤滑	26
第3節 基油	27
1. 基油の特徴	27
1.1 グループⅠ基油	27
1.2 グループⅡ, Ⅲ基油	28
1.3 グループⅣ基油	29
1.4 グループⅤ基油	29
第4節 添加剤	31
1. 添加剤の効果	31
2. 添加剤の機能	31
3. 各種添加剤の機能	32
3.1 腐食防止剤	32
3.2 抗乳化剤	33
3.3 流動点降下剤	33
3.4 耐摩耗 (AW: Anti-wear) 添加剤	33
3.5 極圧 (EP) 添加剤	34
4. 代表的な添加剤の化学構造と機能	34
4.1 酸化防止剤	34
4.2 粘度指数 (VI) 向上剤	36
4.3 金属型清浄剤, 無灰型分散剤	37
第3章 潤滑剤の選定	42
第4章 給油・給脂法	43
第5章 潤滑剤の保管と管理	44
第6章 油中コンタミナントの計測と管理	45
第1節 粒子状の異物混入	46
1. 潤滑油への粒子状の異物混入	46

1.1 残留異物	46
1.2 発生異物	46
1.3 侵入異物	46
2. 機械に及ぼす影響	47
2.1 劣化故障	47
2.2 突発故障及び間欠故障	51
3. 潤滑剤に及ぼす影響	51
4. 粒子状異物の計測方法と単位	52
4.1 質量汚染濃度測定法	52
4.2 粒子計数法	53
4.3 清浄度コード	59
5. コンタミネーション粒子の管理技術	61
5.1 清浄度の目標値	61
5.2 ろ過装置の選定及び設計	63
5.3 オフラインフィルター及び浄油機	64
5.4 フラッシングフィルター	65
5.5 フィルターのメンテナンス	65
第2節 水分コンタミナント	66
1. 潤滑油と水分の共存状態	66
1.1 潤滑油と遊離水の共存状態	66
1.2 潤滑油への水分の溶解と温度	68
2. 水分混入による設備機械のトラブル	69
2.1 油中の水分と軸受の寿命	69
2.2 油中の水分とギヤのトラブル	71
2.3 油中の水分と油圧装置のトラブル	72
3. 水分混入による潤滑剤の劣化	72
3.1 潤滑油基油の水分による酸化劣化の促進	73
3.2 グリースの水分による劣化	73
3.3 潤滑油添加剤の水分による劣化	74
4. 潤滑油中の水分測定法	75
4.1 蒸留法による水分測定	75
4.2 カールフィッシャー法	75
4.3 水素化カルシウム法	76
4.4 クラックルテスト	77

4.5 赤外分光法	77
4.6 静電容量式オンライン水分計	77
4.7 潤滑油の水分の管理と管理限界	78
5. 抗乳化性の計測	78
6. 水分の除去方法	79
6.1 沈降分離	79
6.2 遠心分離	80
6.3 真空加熱分離	80
6.4 フィルタ吸着法	80
第3節 グリコール冷却液コンタミナント	80
1. グリコール冷却液混入によるエンジンのトラブル	80
2. グリコール冷却液コンタミナントの潤滑油への影響	81
3. エンジン潤滑油中のグリコール冷却液測定法	82
3.1 シッフ試薬法(ASTM D2982)による測定	82
3.2 ガスクロマトグラフ法(ASTM D4291)による測定	83
3.3 ナトリウム/カリウム元素分析法	83
4. 潤滑油中のグリコール冷却液の管理限界	84
第4節 すず(ディーゼルスーツ)コンタミナント	84
1. ディーゼルスーツコンタミナント混入によるエンジン摩耗への影響	84
2. ディーゼルスーツコンタミナントの潤滑油への影響	85
3. エンジン潤滑油中のディーゼルスーツコンタミナントの測定法	87
3.1 ペンタン・トルエン不溶解分(ASTM D893 Procedure B)法	87
3.2 熱重量分析法(Thermogravimetric Analysis (TGA) ASTM D5967 Annexes 5)	88
3.3 ペンタン不溶分-メンブレンフィルター法(ASTM D 4055)	88
3.4 残留炭素分測定法	88
3.5 吸光光度法(CEC L-82-97 分光光度計法)	89
第5節 燃料希釈	89
1. 燃料混入によるエンジンのトラブル	89
2. 燃料コンタミナントのエンジン潤滑油への影響	90
3. エンジン潤滑油中の燃料希釈測定法.....	91
3.1 粘度による燃料希釈測定	91
3.2 引火点による燃料希釈測定	91
3.3 ガスクロマトグラフ法(JPI-5S-23, ASTM D3524)による測定	91

3.4 蒸留法 (ASTM D322-97, IP23/2000)による測定	92
4. エンジン潤滑油の燃料希釈の管理限界	92
第6節 空気のコンタミネーション管理技術	93
1. 油・空気共存状態	93
1.1 「泡」と「気泡」	93
1.2 気泡はどこから	94
1.3 潤滑油の粘度, 温度と泡	94
1.4 潤滑油の放気性	95
2. 泡及び気泡が機械に及ぼす影響	96
2.1 油温上昇	96
2.2 キャビテーション	96
2.3 圧縮性増加	97
2.4 冷却効率低下	98
3. 泡及び気泡が潤滑剤に及ぼす影響	98
3.1 酸化劣化	98
3.2 熱的損傷	99
3.3 気泡の除去による劣化抑制効果	99
4. 泡および気泡の計測法	99
4.1 泡立ち度および泡安定度	99
4.2 放気性	99
4.3 気泡径と気泡上昇速度	100
4.4 気泡含有率	101
5. 気泡管理技術	103
5.1 油中気泡の放気性改善技術	103
5.2 気泡除去技術	103
5.3 気泡除去システム	105
5.4 油タンク	106
第7章 オイルサンプリング	115
第1節 オイルサンプリングの目的	116
第2節 設備特有のサンプリング	117
1. 循環給油式の装置	117
1.1 循環給油装置の設備構成	117
1.2 循環給油式の装置でのサンプリングポイント	119

1.3 潤滑状態監視のためのサンプリング	120
1.4 オフラインフィルター浄油システムの機能状態把握のためのサンプリング	125
1.5 オイルタンクの水分、粒子汚染の状況把握のためのサンプリング	125
2. リザーバタンクの無い循環給油式の装置でのサンプリングポイント（ウエットサ ンプ）	125
3. リザーバタンクの有る循環給油式の装置でのサンプリングポイント（ドライサ ンプ）	126
4. 油浴給油などの反復式給油法でのサンプリングポイント	126
5. グリースのサンプリングポイント	128
5.1 その他のサンプリングポイント（Y型ストレーナー）	132
第3節 サンプリング方法	133
1. 非加圧システムにおけるサンプリング	133
1.1 非加圧システム	133
2. 加圧システム - 低圧	134
3. 加圧システム - 高圧	134
第4節 外乱の防止管理	135
1. 容器の清浄度管理	135
1.1 S/N比を用いた容器の清浄度管理	136
1.2 容器の清浄化管理	136
1.3 サンプリング時の容器の清浄管理	137
2. フラッシング	138
2.1 サンプリング操作の留意点とサンプリング口付近のフラッシング	138
2.2 油圧・潤滑系のタンクのフラッシング	139
3. サンプリングに適した機械の状態	140
3.1 サンプリング時の機械の運転状態	140
3.2 サンプリング時の目視による状態判定	141
3.3 オイル交換によるデータ補正	141
第5節 サンプリングプロセスの管理	143
1. オイルサンプリングの頻度	143
1.1 日常のイルサンプリングの頻度	143
1.2 異常兆候時のオイルサンプリングの頻度	145
2. サンプリングの手順	146
2.1 サンプリングの準備	146

第 8 章 潤滑剤の健全性（性状）の監視	156
第 1 節 潤滑油の酸化劣化	157
1. 酸化劣化反応の概略	157
2. 潤滑油基油の酸化劣化メカニズム ^{1, 2)}	158
3. 各種潤滑油の劣化形態	160
3.1 タービン油の劣化 ³⁾	160
3.2 油圧作動油の劣化 ³⁾	160
3.3 エンジン油の劣化 ^{4, 5)}	162
4. まとめ	163
第 2 節 潤滑油の熱劣化	163
1. 熱分解	164
2. 熱酸化劣化	165
3. まとめ	166
第 3 節 添加剤の消耗	166
1. 酸化劣化	167
1.1 酸化防止剤	167
2. せん断	168
3. 加水分解	169
3.1 リン酸エステル	169
3.2 ZDTP	170
3.3 その他の添加剤	170
4. 吸着	170
5. 沈降	171
6. 蒸発	171
7. まとめ	172
第 4 節 油種誤認，混合油による試験	172
1. 物理的性状試験による診断	172
1.1 基油の組成分析	172
1.2 基油の分子量分析	174
2. 使用されている添加剤からの診断	176
2.1 IR 分析	176
2.2 クロマトグラフ分析	177

第 5 節 潤滑油の性状監視と診断	178
1. 潤滑油の代表的な性状と監視診断技術としての試験法	178
1.1 粘度指数 (VI: Viscosity Index) [JIS K 2283 単位: なし]	180
1.2 きょう雑物 (Contaminants) [JIS B 9931 単位: mg/100mL]	182
1.3 水分 (Water Content) [JIS K2275 単位: 容量%または質量%]	183
1.4 流動点 [JIS K2269 単位: °C]	185
1.5 銅板腐食 [JIS K2513 単位: なし]	186
1.6 引火点 Flash Point [JIS K2265 単位: °C]	186
1.7 泡立ち試験方法 [JIS K2518, K2241]	188
1.8 耐荷重能試験方法 [JIS K2519 単位: MPa (耐荷重能), mm (摩耗こ ん径)]	189
1.9 酸化安定度試験	190
1.10 赤外分光分析 (IR:Infrared Spectroscopy)	192
第 9 章 摩耗粉分析と状態監視	196
第 1 節 一般的な機械の摩耗メカニズム	197
1. アブレシブ摩耗 (abrasive wear)	198
1.1 二元アブレシブ摩耗と摩耗量の算出モデル	200
1.2 三元アブレシブ摩耗	201
2. 疲労摩耗	203
2.1 二元疲労摩耗	204
2.2 三元疲労摩耗	209
3. 凝着摩耗	210
3.1 凝着摩耗のモデル (Archard の理論)	210
3.2 摩耗粉の生成機構	211
3.3 凝着摩耗の特徴	213
4. 腐食摩耗	214
5. キャビテーション摩耗ーガスまたは蒸気のキャビテーション	216
第 2 節 摩耗粉分析の技術	218
1. フェログラフィー摩耗粉分析	218
1.1 フェログラムの準備	218
2. フィルタグラムによる摩耗粉分析	222
2.1 フィルタグラムの準備	222
2.2 フィルタグラムを用いた鉄鋼設備の摩耗管理	223

2.3	フィルタグラムの分析方法	224
2.4	フィルタグラムの分析事例	224
3.	フェログラム観察における光源の影響	227
4.	フェログラフィー分析における磁気の影響	227
5.	フェログラム観察における熱処理	228
5.1	予備テスト	228
5.2	フェログラムの加熱方法	228
5.3	観察結果	228
5.4	熱処理により材質判定	231
6.	摩耗粒子の形態 ³⁹⁾	231
6.1	正常摩耗粒子 (Normal Rubbing Wear Particles)	231
6.2	切削摩耗粒子 (Cutting Wear Particles)	232
6.3	球状摩耗粒子 (Spherical Particles)	232
6.4	平板状摩耗粒子 (Fatigue-Plate Particles)	232
6.5	薄片摩耗粒子 (Fatigue-Laminar Layer Particles)	233
6.6	シビア摩耗粒子 (Severe Sliding Wear Particles)	233
6.7	黒色酸化粒子 (Dark Metallo Oxide, Black Oxide Particles)	233
6.8	非鉄金属 (Non-Ferrous Particles)	233
6.9	繊維 (Fiber)	234
6.10	赤錆 (Red oxide)	234
6.11	腐食摩耗粒子 (Corrosive Wear Particles)	234
6.12	結晶質 (無機物, 有機物) (Crystal-Inorganic & Organic)	234
6.13	非晶質 (無機物, 有機物) (Amorphous-Inorganic & Organic)	234
6.14	フリクションポリマー (Friction Polymer)	234
6.15	固体潤滑剤, その他 (Solid Lubricant, Others)	235
第3節	摩耗粉濃度の分析	235
1.	ICP発光分光分析	235
2.	アーク放電発光分光分析	237
3.	摩耗粉濃度の測定方法	239
3.1	前処理方法	239
3.2	分析のための準備	239
3.3	摩耗粉濃度測定事例	240
4.	現場での摩耗状態監視	242
4.1	状態監視のための油の分析	242

4.2 油の外観からの判断	242
4.3 鉄粉濃度計	243
4.4 鉄粉濃度計活用事例	246
4.5 鉄粉濃度計による潤滑診断の効果	251
5. オンライン鉄粉濃度センサーの適用事例	251
5.1 動作原理	251
5.2 風車ナセル内増速機への実装と計測データ	252