

# 原子力発電所の取替可能な機器の 長期的な健全性について

2023年10月

東北大学 特任教授（客員）  
青木孝行

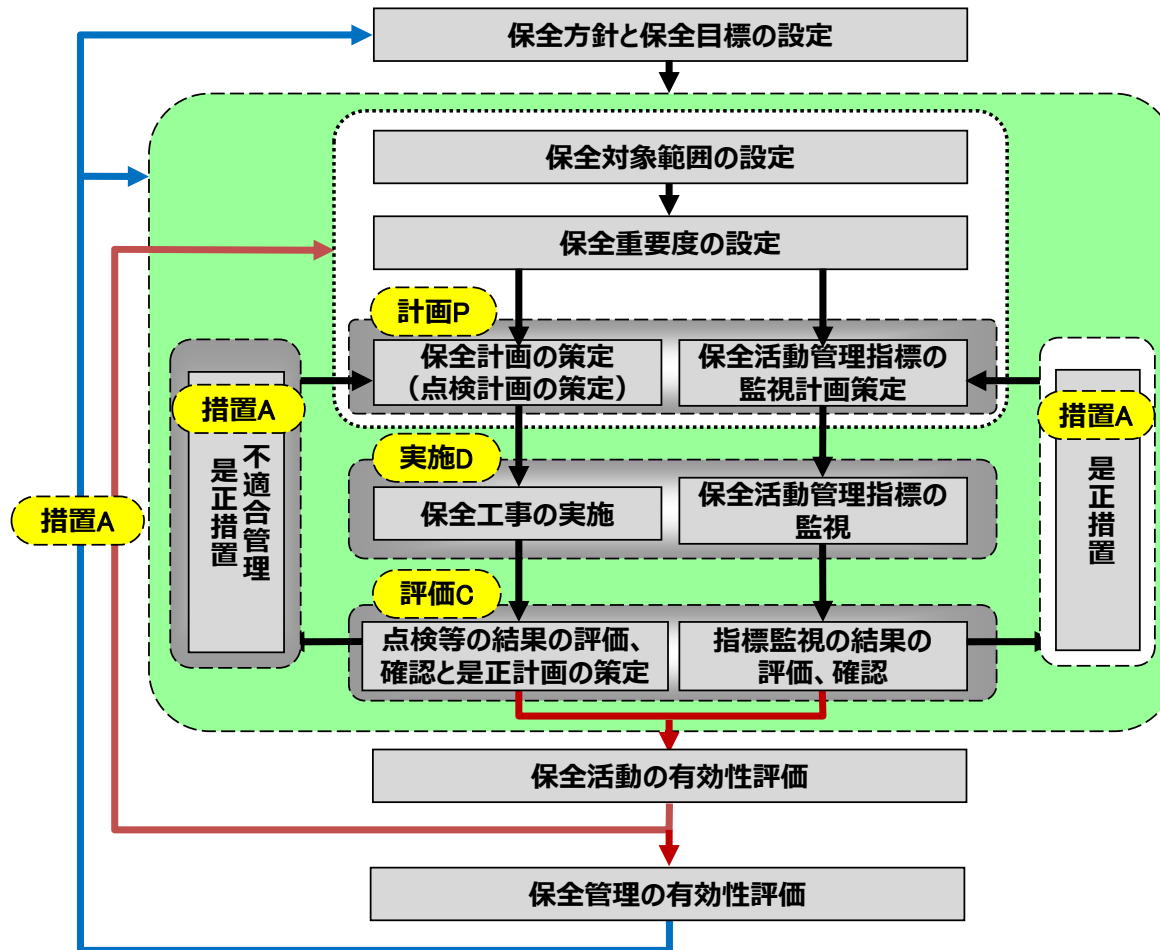
# 目次

1. 原子力発電所における保全の概要
2. 状態基準保全について
3. 取替可能な機器に対する保全は60年以上の長期運転に十分か？
  - (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全は長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？
  - (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？
  - (3) 取替可能な機器に対する設計経年化(設計古さ)対策は十分か？
4. まとめ

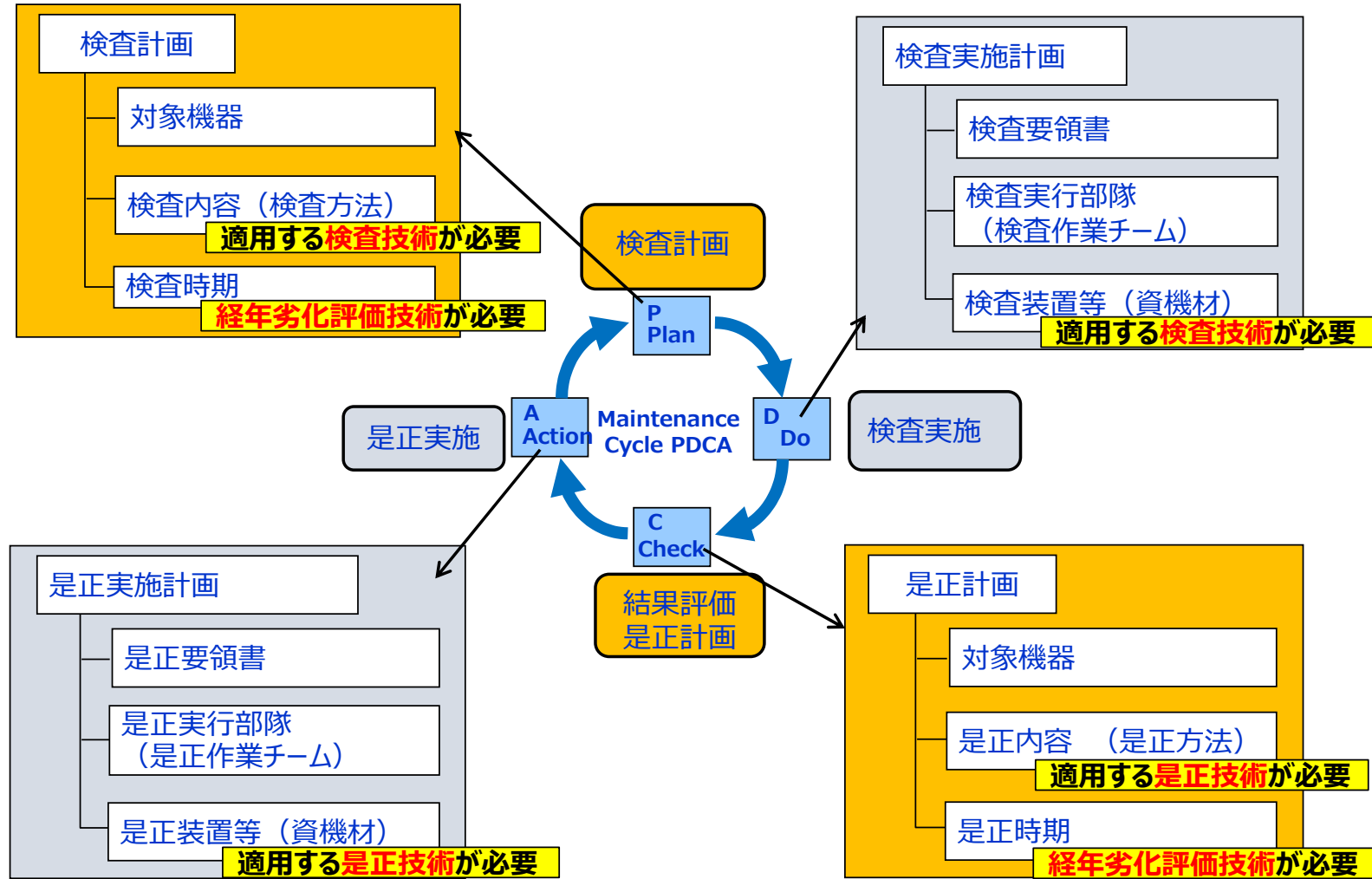
# 目次

1. 原子力発電所における保全の概要
2. 状態基準保全について
3. 取替可能な機器に対する保全は60年以上の長期運転に十分か？
  - (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全は長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？
  - (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？
  - (3) 取替可能な機器に対する設計経年化(設計古さ)対策は十分か？
4. まとめ

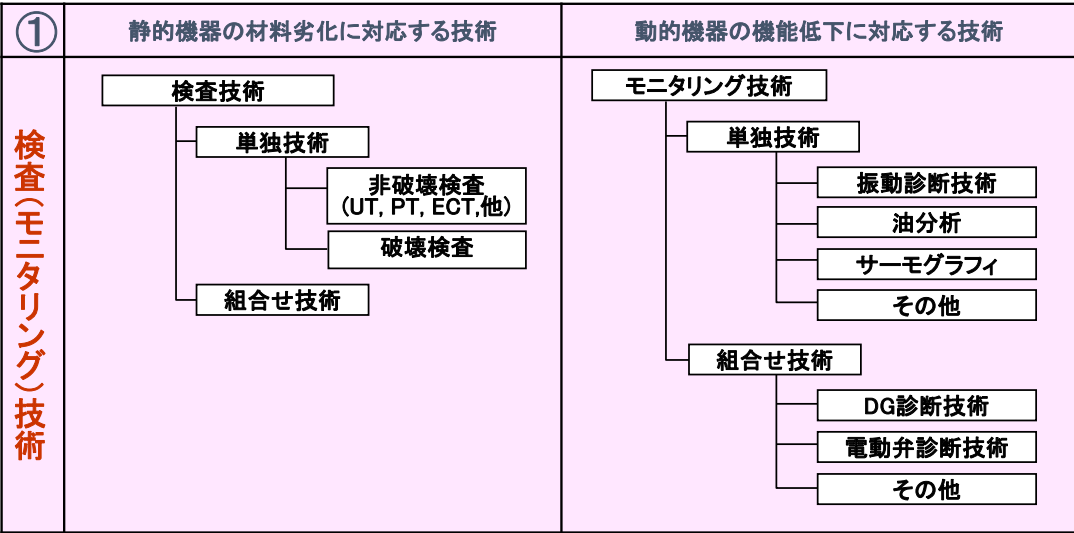
# 原子力発電所の保守管理規程 (日本電気協会 電気技術規程JEAC4209)



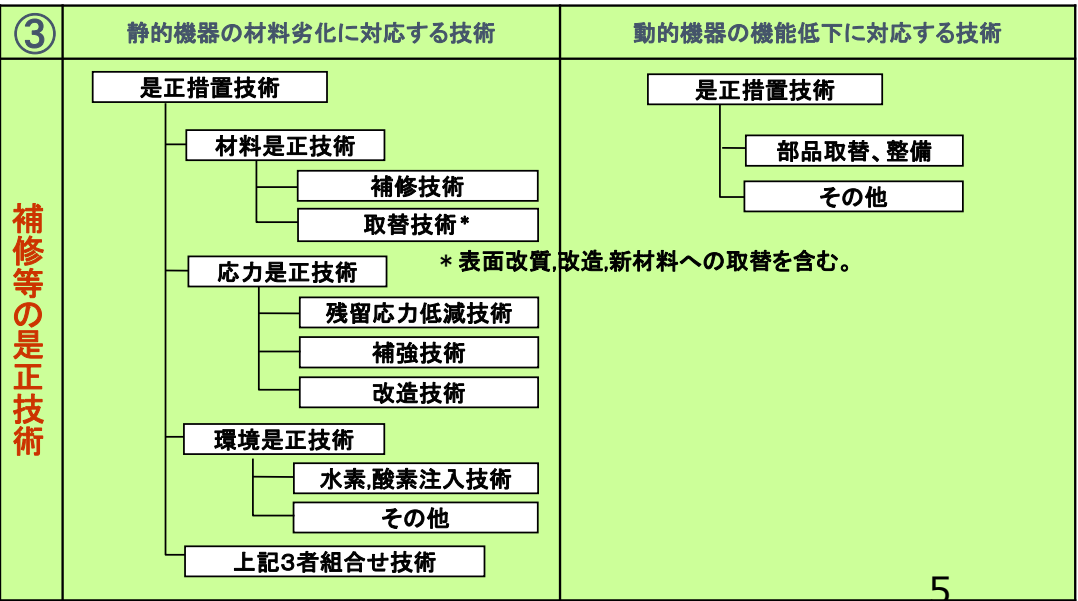
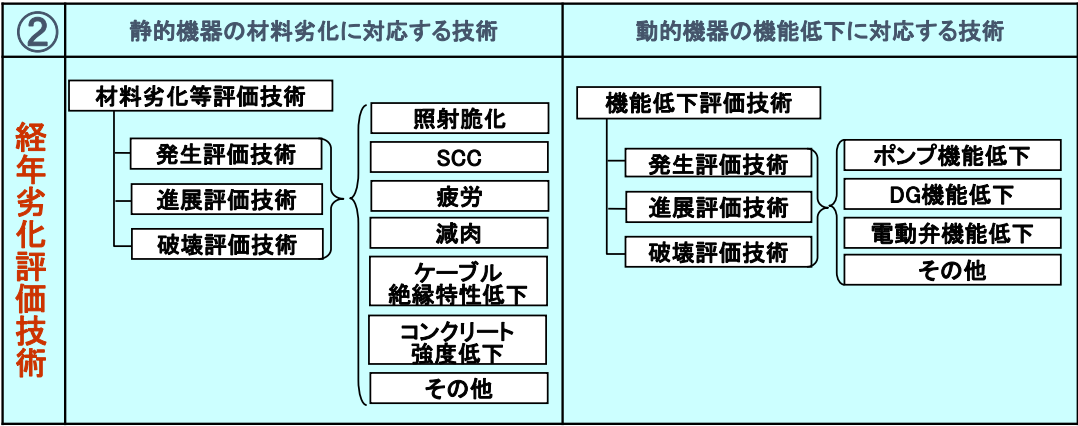
# 保全サイクルPDCA



# 保全 3 技術の構造体系



検査(モニタリング)技術



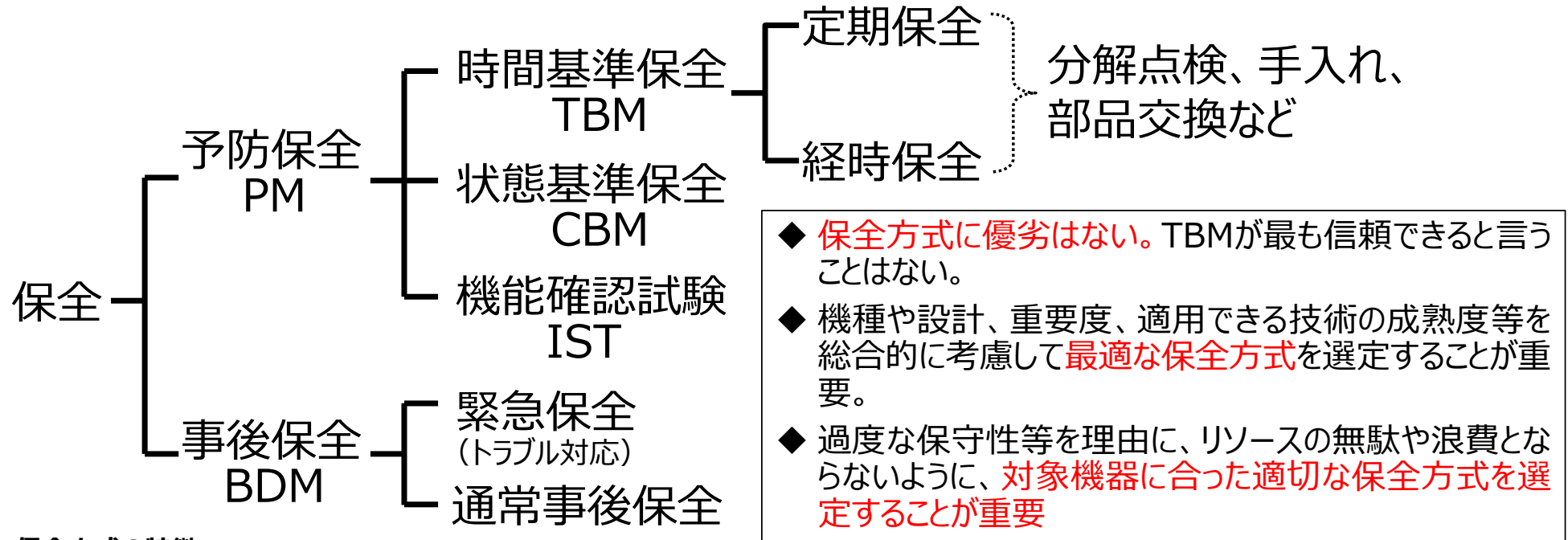
補修等の是正技術

\* 表面改質, 改造, 新材料への取替を含む。

プラントの安全性、経済性を確保・向上させるために、**保全 3 技術**を体系的に整備する努力がなされてきた。

精度や効果等の技術的性能だけでなく、時間的制約などのプラントがその時に置かれている状況に対応できる**保全 3 技術**を整備する努力がなされてきた。

# 保全方式の体系と種類



## 保全方式の特徴

- TBM : **分解検査**。全ての劣化部位の状態が確認できる。複雑多岐にわたる分解・点検・復旧工程の中で**人為ミス**が導入されやすい。厳しい各種管理が必要。過度に実施すると、**いじり壊し**が発生する。**多くの手間、工期、費用**が掛かる。
- CBM : **非分解検査 (診断)**。一部の異常/劣化徴候を検知できる。実証された状態監視技術が多くなっている。**少ない手間、時間、費用**で実施できる。
- IST : **非分解検査 (機能確認)**。対象機器の機能状態を確認できる。**少ない手間、時間、費用**で実施できる。
- BDM : 通常、**安全に係わらない機器**に適用。故障発生後に対応した方が**経済的**である機器に適用。

- PM: Preventive Maintenance  
 TBM: Time Based Maintenance  
 CBM: Condition Based Maintenance  
 IST: In-service Testing  
 BDM: Break-down Maintenance (Run to failure)

# 異常兆候とその検知技術（ポンプの例）

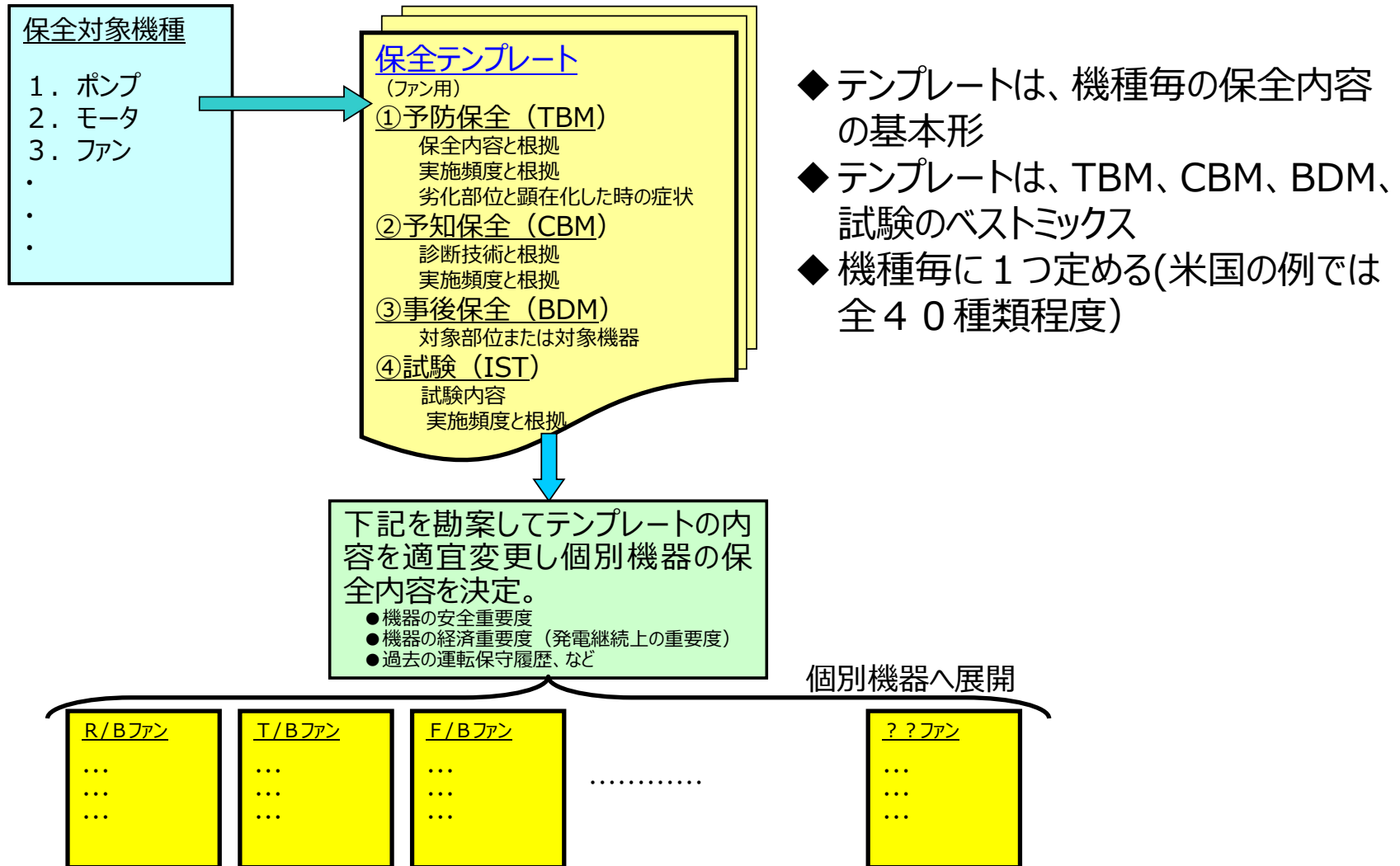
ポンプの各種機能		部品	異常/劣化の種類	顕在化する症状 (異常/劣化兆候)	異常/劣化兆候を 検知できる既存技術
QH性能	I入力-伝達	主軸	アンバランス 芯ずれ ----- き裂/破断	振動の異常	振動診断技術
		軸継手	アンバランス 芯ずれ	振動の異常	振動診断技術
	I入力-変換	羽根車(インペラ)	アンバランス、ケーシング接触 機械的ゆるみ ----- 腐食/浸食	振動の異常 QH低下	振動診断技術 機能試験
		ケーシングリング	浸食による減肉	QH低下	機能試験
	軸支持	軸受	内輪/外輪/回転体の疵 潤滑不良	振動の異常 油の劣化/異物	振動診断技術 油分析
		軸受箱	ボルト締付ゆるみ	振動の異常	振動診断技術
圧力障壁	耐圧	ケーシング	内面の腐食/浸食	減肉/損傷	分解点検時の目視検査
		ケーシングボルト	腐食	漏えい(フランジ部) 減肉/破損	分解点検時の目視検査 又はUT検査
	シール	ガスケット・パッキン	へたり	漏えい(フランジ部)	なし（定期取替）
		メカニカルシール グラウトシール	劣化、へたり	漏えい率増加	漏えい率計測技術又は 目視検査
機器支持	支持	支持脚/台板	腐食	減肉 振動の異常	目視検査
		基礎ボルト	腐食	減肉 振動の異常	目視検査

現状の状態監視技術によって検知できる異常/劣化兆候と検知できない異常/劣化兆候がある

異常/劣化兆候を検知できる状態監視技術がない場合は、分解点検で状態を確認する



# 保全テンプレートの概念



# 保全テンプレートの例

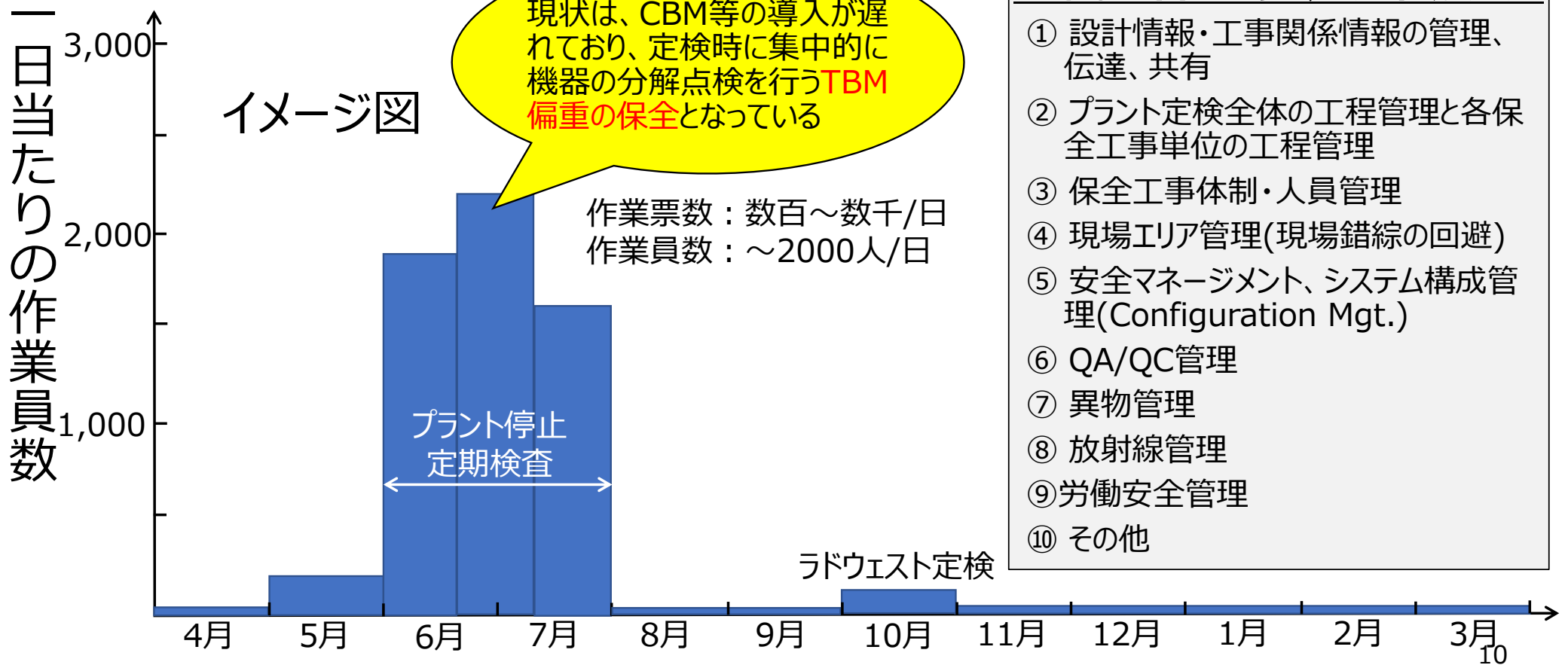
保全テンプレートは  
TBM, CBM, BDM,  
ISTのベストミックス

機器：〇〇ポンプ    運転条件：常時/間歇/待機    環境：過酷/非苛酷    重要度：高/低

我が国では伝統的にTBM（分解点検）に偏重

保全タスク	内容	頻度	技術的根拠
TBM	ポンプのアンカップリング、清掃、検査、グリス及びカップリング 外部全体の目視検査 劣化および状態監視で劣化傾向のあったものは是正	2 定検	内容は、メーカー推奨を踏まえた産業界の標準テンプレートに基づき決定。自社経験で一部修正。 頻度は、自社および産業界の経験、およびこのポンプの使用率に基づき決定。
	故障モード 機能低下 漏えい 出力低下	故障原因 部品故障 ハウジング/ボディ/チューブのクラック、ガスケット/Oリングの故障、潤滑油系/給油系漏れ、メカニカルシール故障、パッキン劣化、部品故障 内部摩擦、部品故障	
CBM	既定の標準測定点の振動データの収集と分析	1 回/ 3 月	振動データの収集と傾向調査は、結線の緩み、軸合わせ不良、潤滑油不足、過剰磨耗等による機器/部品故障の検知が可能。軸受け、シール、軸合わせ状態の潜在的劣化を検知する方法として産業界が推奨。
	故障モード 機能低下 出力低下 運転不能	故障原因 部品故障 内部摩擦、部品故障 軸受け固着、駆動装置故障、インペラー固着、ステム/シャフト損傷	
BDM			
試験 (IST)	ポンプの運転範囲にわたる全重要運転パラメーター傾向監視のための定期的なポンプ性能試験。	2 定検	産業界の経験が重要ポンプの運転状況と性能監視に効果的な活動であると証明。周期的性能試験で機器性能劣化を特定できる様々な性能パラメーターの傾向調査が可能。潜在的な故障の推定が可能。
	故障モード 機能低下 漏えい 出力低下 運転不能	故障原因 部品故障 ハウジング/ボディ/チューブのクラック、ガスケット/Oリングの故障、潤滑油系/給油系漏れ、メカニカルシール故障、パッキン劣化、部品故障 内部摩擦、部品故障 軸受け固着、駆動装置故障、インペラー固着、ステム/シャフト損傷	

# 我国の原子力発電所における保全の実態



## TBMは複雑な作業が伴い、各種の厳しい管理と多くの人材が必要

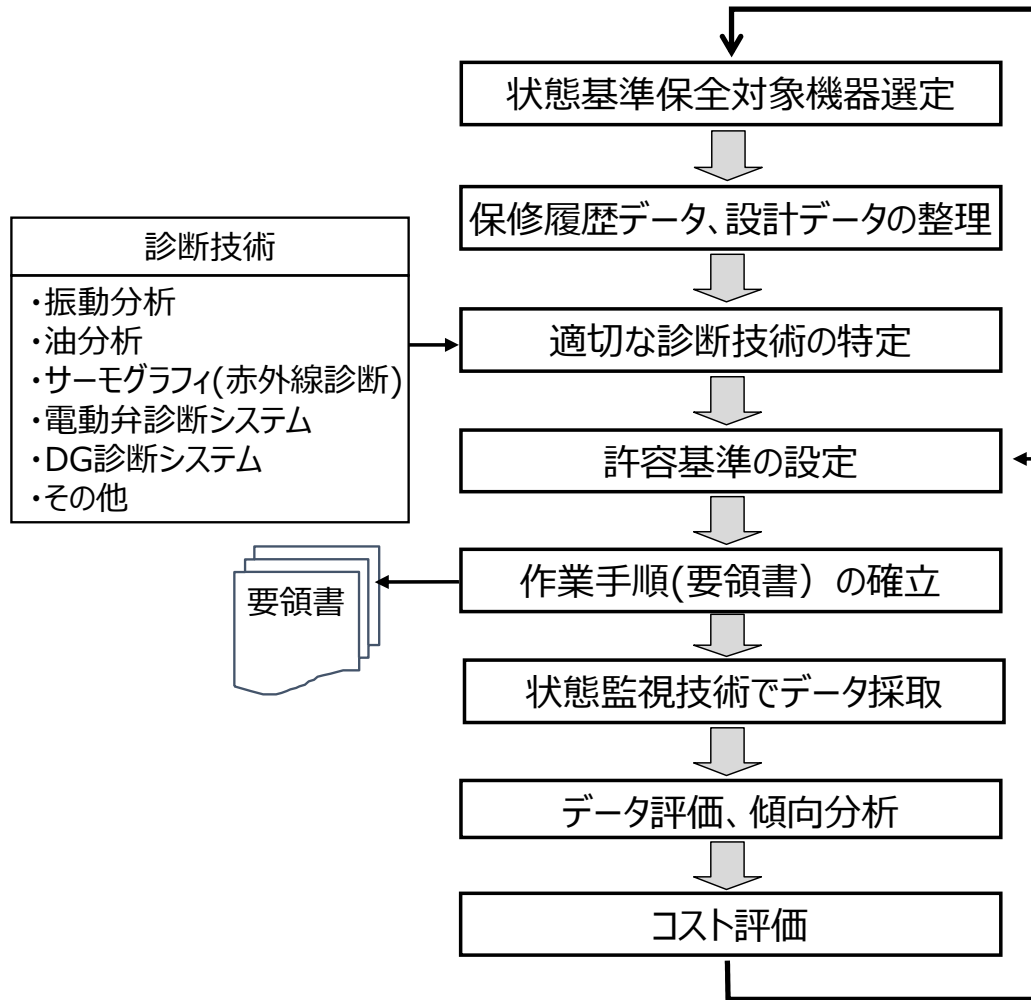
- ① 設計情報・工事関係情報の管理、伝達、共有
- ② プラント定検全体の工程管理と各保全工事単位の工程管理
- ③ 保全工事体制・人員管理
- ④ 現場エリア管理(現場錯綜の回避)
- ⑤ 安全マネージメント、システム構成管理(Configuration Mgt.)
- ⑥ QA/QC管理
- ⑦ 異物管理
- ⑧ 放射線管理
- ⑨ 労働安全管理
- ⑩ その他

# 目次

1. 原子力発電所における保全の概要
2. 状態基準保全について
3. 取替可能な機器に対する保全は60年以上の長期運転に十分か？
  - (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全は長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？
  - (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？
  - (3) 取替可能な機器に対する設計経年化(設計古さ)対策は十分か？
4. まとめ

# 状態基準保全の導入プロセス

- 科学的、工学的、技術的根拠のあることが前提
- それも自分自身で経験、体感が必要

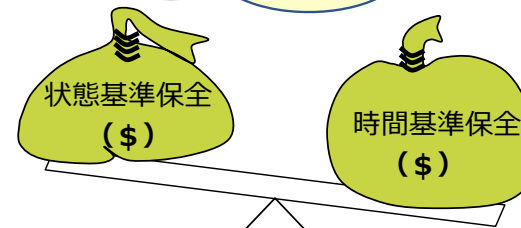


事業者の幹部責任者がCBMを正しく認識し、**自信**を持つとともに、実行を決断・推進をしないと、CBMの導入・拡大はできない。

それには、まず電力の担当者が自信を持つこと。「外注」「お任せ」では自信は持てない。

ISO, ANSI等に基づき  
暫定基準作成

リソースの無駄遣いとならないようにコスト意識を持つことが必要かつ重要



# 多くの状態監視技術はすでに実機に適用されている

## 多くの状態監視技術が存在

- 振動分析（回転機など）
- 油分析（回転機軸受など）
- サーモグラフィ（電機品など）
- 超音波(音響)診断（弁リーク、軸受状態、放電、等）
- 衝撃パルス試験（ころがり軸受）
- ECT（熱交換器細管）
- ボアスコープ検査（原動機内部）
- On-line 腐食モニタリング
- 絶縁診断
- 溶存ガス分析（変圧器絶縁オイル）
- 電動弁診断
- 逆止弁診断
- 空気作動弁診断
- ディーゼル機関診断
- その他

- 状態監視技術が成熟
- 米国原子力発電所でも適用経験が豊富（30年にも及ぶ実績）
- 他産業でも豊富な実績

特に下記が広範に適用されている

- 振動分析
- 油分析
- サーモグラフィ

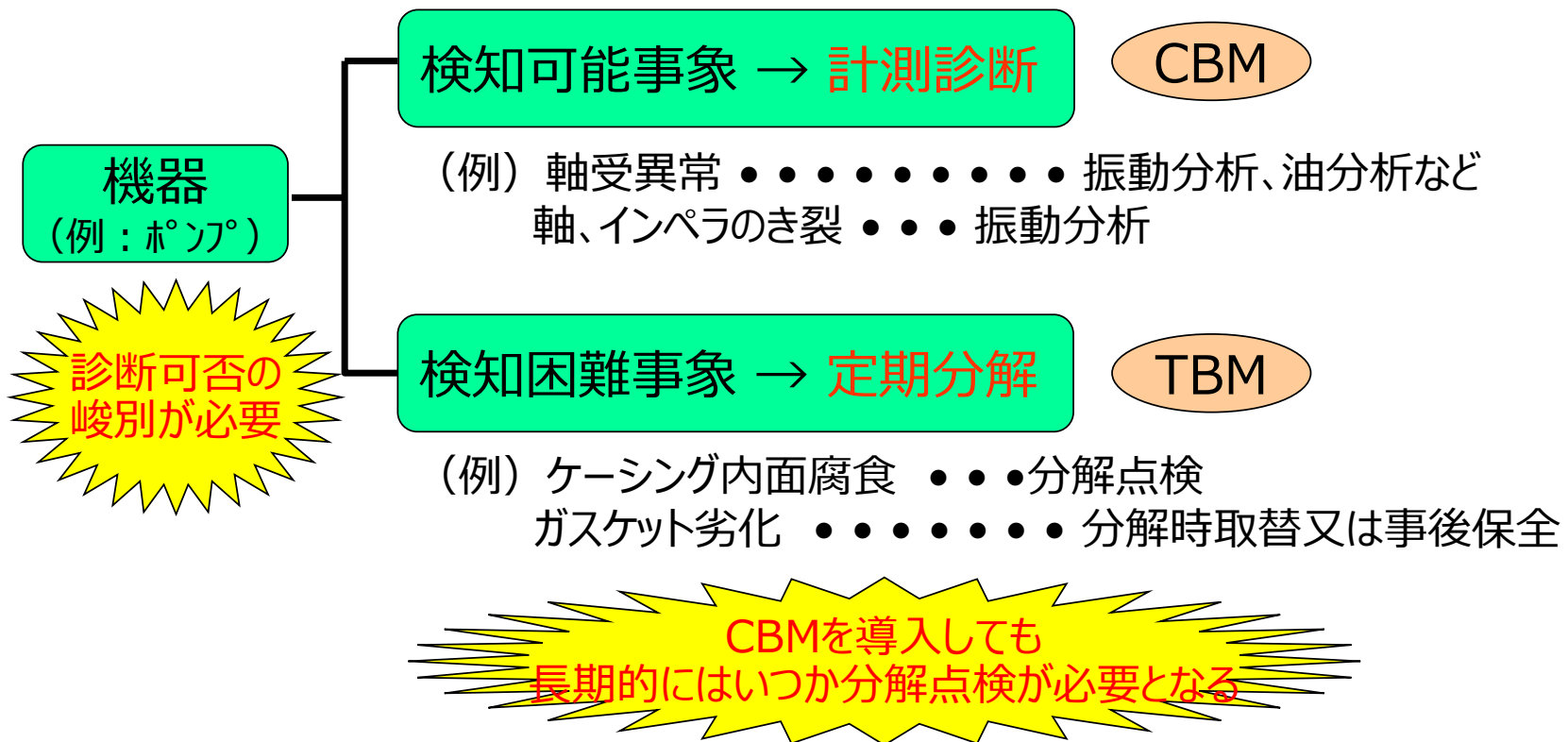
- ◆ 国内の原子力発電所では、CBM実施範囲は限定的であり、適用されている技術は「振動分析」「油分析」「サーモグラフィ」が中心である
- ◆ 海外の原子力発電所や国内外の一般産業プラントでは
  - CBM/状態監視技術が広範に適用され、多くの実績が蓄積されている
  - オンライン設備診断システムやポータブル設備診断システムなどによる効率的なデータ収録・分析も行われている（一般産業プラントではAIによるデータ分析も始められている）

# 実機で使用されている状態監視技術（例）

No	機種区分	主要劣化モード	適用可能状態監視技術
1	ポンプ, ファン	軸受劣化 機能低下	● 振動, 油分析 ● 機能確認試験、分解点検後の試運転
2	熱交換器	伝熱管劣化 機能低下 腐食	● ECT ● 熱効率計算（出入口温度計測） ● 肉厚測定
3	モータ	軸受劣化 絶縁低下	● 振動, 油分析 ● 絶縁診断技術（高圧モータのみ）
4	容器	SCC 腐食	● U T ● 肉厚測定
5	配管	SCC 腐食	● U T ● 肉厚測定
6	弁	機能低下(アクチュエータ) 腐食 シートパス	● 電動弁, 逆止弁, AO弁の診断装置 ● 肉厚測定 ● 超音波診断
7	炉内構造物	SCC	● VT、UT
8	ケーブル	絶縁低下	● 絶縁測定/UT
9	電気設備	絶縁低下	● サーマグラフィ
10	タービン設備	軸受劣化 腐食	● 振動, 油分析 ● 肉厚測定
11	コンクリート	機能低下	● 強度確認(シュミットハンマーテスト等)
12	計測制御設備	機能低下/絶縁低下	● サーマグラフィ
13	空調設備(冷凍機)	機能低下	—
15	電源設備(MCC,トランス等)	機能低下/絶縁低下	● サーマグラフィ
16	非常用ディーゼル	機能低下	● DG診断装置
17	圧縮機	機能低下	—

# 注意を要すること(1)

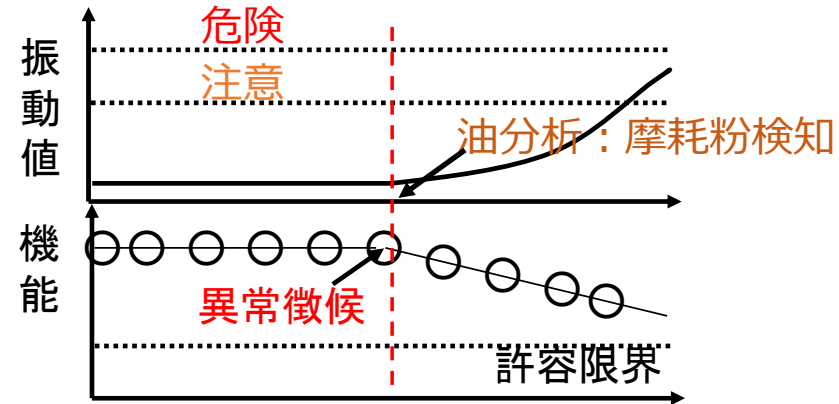
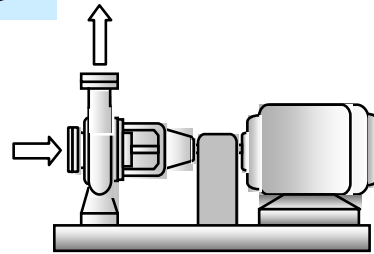
状態監視技術で検知できる事象とできない事象の峻別





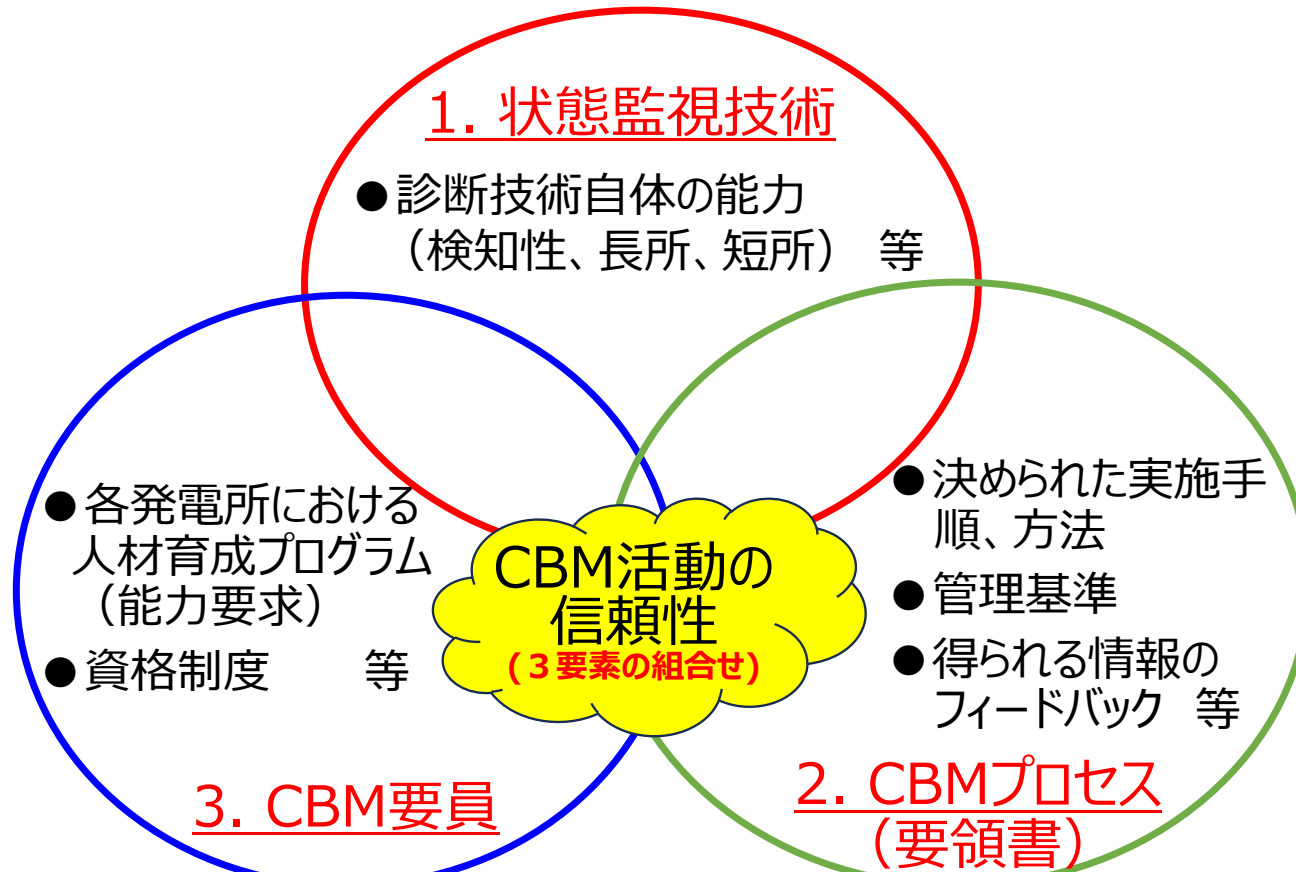
# 検知可能な事象と困難な事象

例) ポンプ



	定量項目	評価・分析項目	検知できない事象
振動診断	変位, 速度, 加速度 周波数	回転体の構造異常 (アンバランス, ミスアライメント) 軸受異常, 回転体の摩耗 等	・ケーシングの内面腐食 ・メカシール異常
油分析	粘度, 水分, 全酸価 清浄度(NAS等級) 等	油の性状, 汚染度 摩耗粉分析(フェログラフィー) 等	・ガスケットの劣化 等
赤外線診断	表面温度	発熱部位の確認, 温度分布 軸受温度測定 変圧器の入出力端子の絶縁 碍子の温度測定	サーモグラフィだけで構造 体内部の事象を断定す ることは不可能

# 注意を要すること(2)



この3要素でCBM活動の信頼性、パフォーマンスが決まる

# 振動管理基準について

## 絶対値管理

- ①判定基準は保守的に設定されている。
- ②機器個別の癖は考慮されない。
- ③データ蓄積後は相対値管理に移行。

現在の状態



判定基準表から判定する。

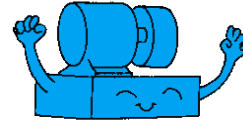
(例) ISO速度管理表

振動速度のrms値 mm/s	クラス I	クラス II	クラス III	クラス IV
0.28				
0.45	A			
0.71	B	A		
1.12	C	B	A	
1.80	D	C	B	A
2.8		D	C	B
4.5			D	C
7.1				D
11.2				
18				
28				
45				

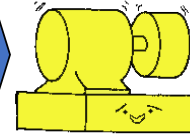
## 相対値管理

- ①判定基準の決定にはデータ蓄積が必要。
- ②機器個別の癖も考慮した確実な管理が可能。
- ③通常値を見極め後、判定基準値を決定する。

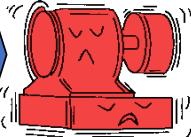
修理完了直後



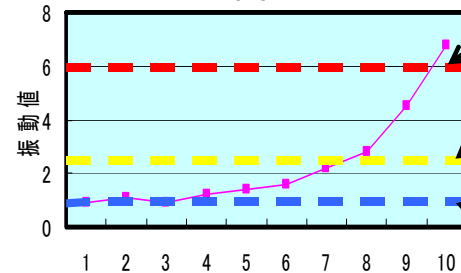
2年後



3年後



傾向管理グラフ



判定基準 (例)

6倍≦危険

2.5倍≦注意

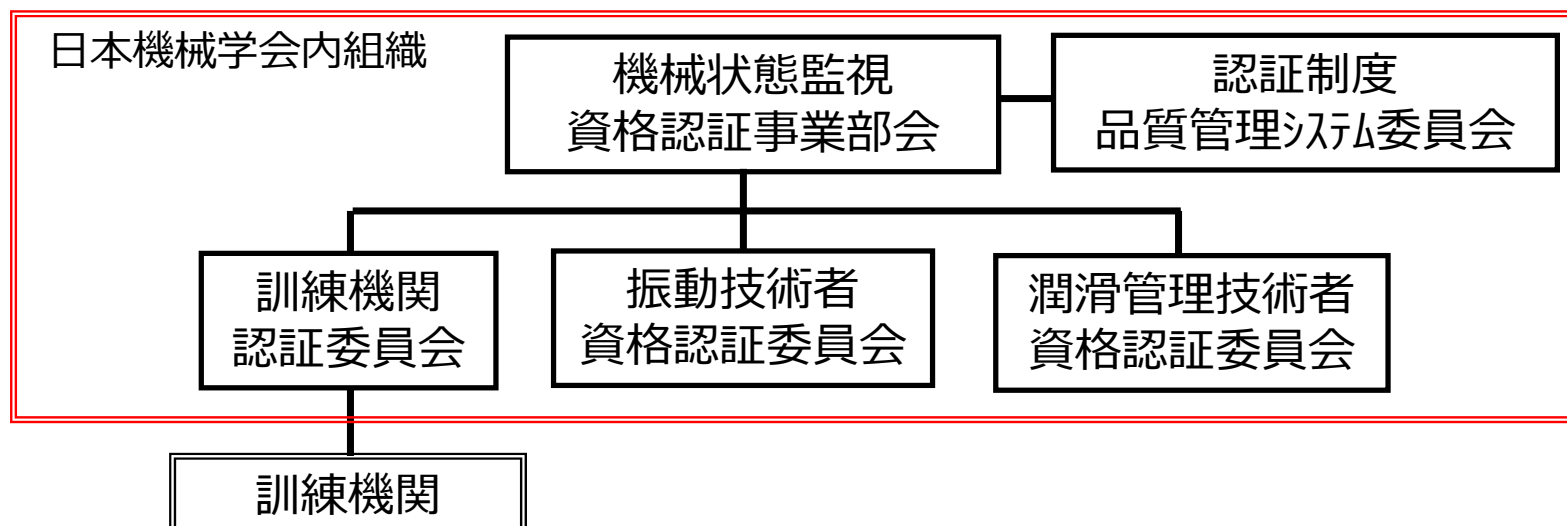
通常値

# 資格認証制度 (ISO18436)

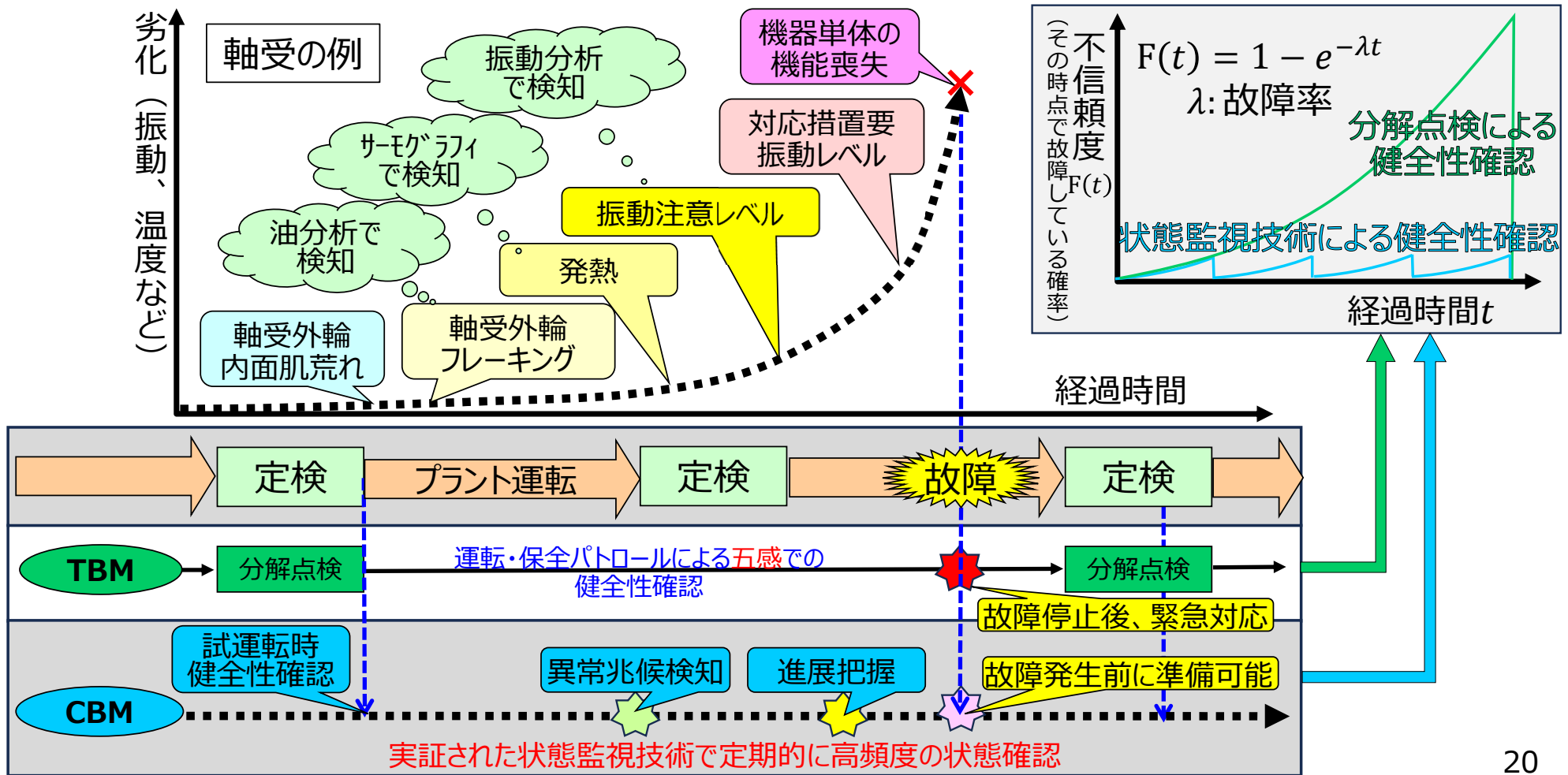
米国には  
Vibration Specialist, Certified  
Infrared Thermographerなどの  
資格あり

ISO18436

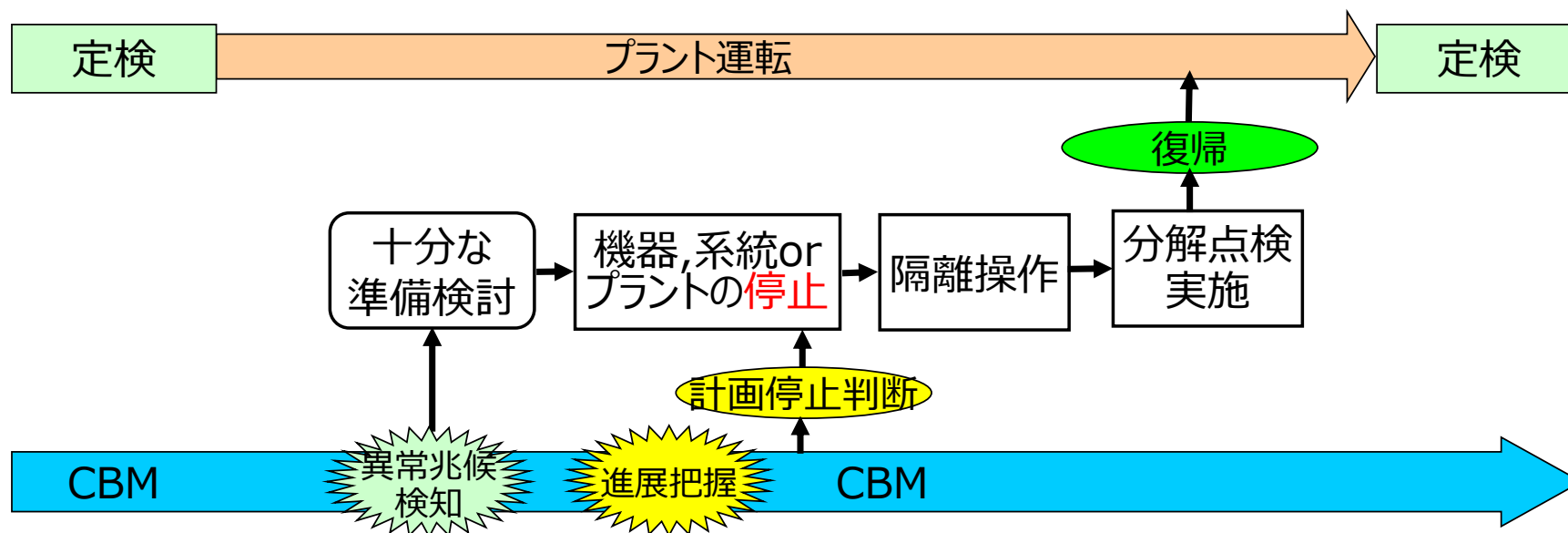
Condition monitoring and diagnostics of machines -  
Requirements for training and certification for personnel  
機械の状態監視と診断・技術者の訓練および認証に関する要求事項



# CBMが突然の計画外停止の低減あるいは リスク低減ができる理由



# CBMと言っても、 分解点検を実施しないわけではない



- 異常兆候が検知されれば、進展状況を見て故障する前に停止し予防保全（分解点検/整備）
- 状態監視技術で検知できない劣化部位/モードは、必要時期を予測し、その時期に当該機器を停止して分解点検/整備

# 目次

1. 原子力発電所における保全の概要
2. 状態基準保全について
3. 取替可能な機器に対する保全は60年以上の長期運転に十分か？
  - (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全は長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？
  - (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？
  - (3) 取替可能な機器に対する設計経年化(設計古さ)対策は十分か？
4. まとめ

# (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全是長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？

- ◆ プラント全体の安全性と経済性が確保できるか否かでプラント寿命が決まる
  - 安全性の確保（規制基準等の規制要求、設計経年化、他）
  - 経済性の確保（発電継続性/計画外停止の最小化）
- ◆ 保全是PDCAの繰り返しで保全目的<sup>(注)</sup>を達成する仕組みであり、特定の運転期間を想定していない、したがって基本的に取替可能な機器の長期運転は可能
  - 保全計画の立案方法（TBM, CBM, BDM, ISTのベストミックス）
  - TBM、CBM、BDM、ISTの内容は運転年数に関係しない
  - CBMの適用範囲/限界（活用可能な状態監視技術）
  - 適切なCBMは安全性を向上させる（高頻度の健全性確認、<sup>(注) 安全性と経済性(運転継続性)の確保</sup>事故時の活用も可)
- ◆ 多くの状態監視技術は実証済みであり、活用が期待される
  - CBMの適用可否は、設備・機器に発生・進展する経年劣化を検知できる状態監視技術が有るか否かで決まる
  - CBMは、保全高度化や保全の成否に影響する、重要な位置を占めている
- ◆ 新設計が採用されても多くの機器の基本構造は変わらないので、既存の状態監視技術は適用可能（例外の計装品等は従来からCBM適用が難しい）



# 我国の状態監視保全/状態監視技術は 海外と比べてどうか？

- ◆ 状態監視技術そのものは基本的に同じ、遜色ない
  - 診断能力（パフォーマンス）は、使用資機材(技術)、CBM要員/資格、CBM要領書の3者の組合せで決まる
- ◆ 我国の原子力発電所でのCBM経験は欧米と比較して圧倒的に少ないので、熟練度、現場スキルが異なる
  - 米国原子力は30年の経験、我国では化学プラントなどで経験豊富、原子力発電所では経験が十分でない
- ◆ 経験の差が出るのは、CBM適用範囲、データ分析と健全性評価・判断、コスト意識  
⇒初めての領域に踏み込む場合、技術的根拠のある自信と勇気が必要
- ◆ CBM、CM技術は事故時の対応技術としても有効（事故で停止した設備・機器の再起動に向けた健全性確認と判断）

# 取替可能な機器と状態監視技術

	機種	安全に関わる主な設備・機器	状態監視技術（装置）
1	ポンプ	ターボポンプ、往復ポンプ	回転機診断（振動、油）
2	熱交換器	直管式熱交換器、U字管式熱交換器	非破壊検査
3	ポンプモータ	低圧ポンプモータ	回転機診断（振動、油）
4	容器	タンク、ライニング槽、フィルター等	非破壊検査
5	配管	ステンレス鋼配管、炭素鋼配管、低合金鋼配管	非破壊検査
6	弁	仕切弁、玉形弁、逆止弁、バタフライ弁、安全弁、ボール弁 電動弁用駆動部、空気作動弁用駆動部	電動弁診断装置、逆止弁 診断装置
7	炉内構造物	シュラウド等	非破壊検査
8	ケーブル	低圧ケーブル、同軸ケーブル ケーブル接続部	絶縁試験、硬度試験 サーモグラフィ
9	タービン設備	高圧タービン、低圧タービン	ファイバースコープ
10	コンクリート構造物		コア抜き強度試験等
11	計測制御設備	計測装置、補助継電器盤、操作制御盤	
12	空調設備	ファン、空調機、冷凍機、フィルタユニット、ダクト、ダンパ及び弁	回転機診断（振動、油）
13	機械設備	ディーゼル機関、圧縮空気系設備、クレーン、補助ボイラ等	DG診断装置
14	電源設備	パワーセンタ、バスダクト、MCC、ディーゼル発電設備、MGセッ ト、直流電源設備、変圧器、分電盤等	絶縁診断、サーモグラフィ、 IST

## (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？

### ◆ 共通要因故障をもたらす可能性のある「**外的/内的事象**」

- 外的事象（地震、津波/洪水、火災、飛来物等の人為事象、・・・）
- 内的事象（内部溢水、内部火災、ヒューマンエラー、・・・）

### ◆ 共通要因故障を防止・抑制する「**設計**」

共通要因故障：CCF (Common Cause Failure)

- 安全設計基準：深層防護、多重性/多様性、独立性、単一故障基準、など
- 新規制基準に基づくSA設備、特重施設の追設で安全性向上

### ◆ 共通要因故障は、「設計」で防止・抑制されるようになっている

- ただし、完璧と慢心せず、潜在するCCFリスク源を追求し続けることが重要  
⇒ 新知見が得られた場合はその都度、対応を検討する**仕組み**が必要
- システム・機器の機能・性能を維持する適切な「**保全**」の計画・実施が重要（**設計の前提**）  
⇒ 単なる機器の健全性を維持する保全でなく、CCFリスク（原子力安全）を考慮した保全

ATENA等による**検討の仕組み**が産業界に構築されている  
(デジタル化CCFで実績あり)

### ◆ その一方で、共通要因故障につながる保全不備（ヒューマンエラー等）には注意

- 特に安全重要度の高いSSC、複数の系統・機器に跨るサポートシステムなどにおける保全

原子力安全やリスク・ハザードに関する基本的知識と感度（感性）を持つ人材の育成が重要

# 共通要因故障と保全の役割

- ◆ 安全機能を常に発揮できるようにSSCを維持すること（設計の前提）
  - 保全3技術を適切に活用すれば、十分に対応可能
    - ✓ 通常、経年劣化や異常は徐々に発生・進展するので、その間に保全3技術で対応できる
    - ✓ CBM/状態監視技術による高頻度の状態確認は損傷や故障の事前検知に効果的
  - その一方で、共通要因故障の原因となり得る保全不備（ヒューマンエラー等）には注意が必要
    - ✓ 想定事象：保全不備＋内的・外的事象（地震、津波、溢水、火災など）
    - ✓ 保全対象：特に複数の系統・機器に跨るサポートシステム（電源系、冷却系、他）など
- ◆ 機器に発生する経年劣化や異常の特性（発生、進展）を把握すること
  - 経年劣化や異常の発生・進展を精度よく予測したり、PRA等の適切な安全評価を可能としたりするための知見やデータ等を収集・蓄積する
  - 特に、事前検知が難しい経年劣化事象、機能喪失直前までがんばる機器には注意（脆性破壊、流れ加速型腐食FAC、絶縁破壊、特性変化等）

# (3) 取替可能な機器に対する設計経年化 (設計古さ) 対策は十分か？

## ◆ 物理的な劣化 (PLM評価/長期停止中の経年劣化評価と保全計画)

- 保全に対する短期、中期、長期の視点 (通常保全、長期停止保全、PLM)

## ◆ 非物理的な劣化 (最新知見の反映、製造中止品への対応)

### • 最新知見の反映

- ✓ ATENAガイドラインによる体系的取り組み：安全上の弱点を抽出する**仕組み**が重要  
設計情報比較やPRA 等から**着眼点**を抽出

- ✓ **机上では分からない弱点 (現場レイアウト等) ⇒現場walkdown、現場技術者の育成、等が必要**

### • 事業撤退、製造中止への対応

- ✓ サプライチェーンの確保 (保全作業サービス、技術サポート、予備品、他)
- ✓ 対応策：国内外関係組織との情報共有、予備品等情報の共有、中長期的な発注見通しの策定、事業支援、・・・

### • **組織・構成員の劣化への対応**

- ✓ 原子力安全やリスク・ハザード等に対する基本的知識や感度/感性を持つ**人材の育成**
- ✓ 特に安全性への影響の大きい**保全分野**の人材育成 (事業者だけでなく、協力会社も)

過去「定期安全レビュー」として  
下記を実施していた  
① 運転経験の反映  
② 最新基準適合性評価  
③ 確率論的安全評価PSA

# 欧米での設計経年化(設計古さ)への取り組み

## ① 米国

- ◆ NRCは下記を要求、特別な設計経年化対策は要求していない
  - Current Regulatory Basisを満足すること (+バックフィット)
  - PRA等によるリスク評価で高いリスクがないこと
- ◆ 産業界の保全標準化が進んでいる (NEI-AP913、EPRI-PM Basis等)
- ◆ 陳腐化対策/サプライチェーン対策など、産業界でよく検討されている

## ② 欧州

- ◆ 規制当局は10年毎に長期的な安全性を検討評価する「定期安全レビュー」の実施を要求、特別な設計経年化対策は要求していない
- ◆ 陳腐化対策/サプライチェーン対策など、産業界でよく検討されている

## ③ 我国

- ◆ 新規制基準の見直し、バックフィット、安全性向上評価制度、長期施設管理計画認可制度
- ◆ 規制当局は課題意識を持っている (設計古さの発見方法)
- ◆ ATENAが体系的な設計経年化評価ガイドラインを検討・策定

# 目次

1. 原子力発電所における保全の概要
2. 状態基準保全について
3. 取替可能な機器に対する保全は60年以上の長期運転に十分か？
  - (1) 取替可能な機器に対する状態基準保全は長期運転に効果的か？状態監視技術は十分か？
  - (2) 取替可能な機器の共通要因故障対策は長期運転に十分か？
  - (3) 取替可能な機器に対する設計経年化(設計古さ)対策は十分か？
4. まとめ

# まとめ

- ◆ 長期運転を想定し、下記の観点から保全上重要な問題があるか検討した。
  - 状態基準保全/状態監視技術
  - 共通要因故障
  - 設計経年化（設計古さ）対策
- ◆ その結果、上記観点から検討されている諸対策を着実に進めていけば、大きな問題が発生する可能性は低いと考える。
- ◆ しかし、それらを進めるにあたり、その前提となる人材の育成が必要不可欠であり、極めて重要であると考ええる。
- ◆ その人材とは、原子力安全を解し、リスク・ハザードに対する感度（感性）を持つ人材のこと。そのような人材を保全を含む各技術分野にできるだけ多く育成することが望まれる。（原子力安全の一般化、常識化）
- ◆ 特に保全分野は現場に精通している人材が多く、発電所運営への影響力の大きいので、それが実現すると、効果は大きいと考える。



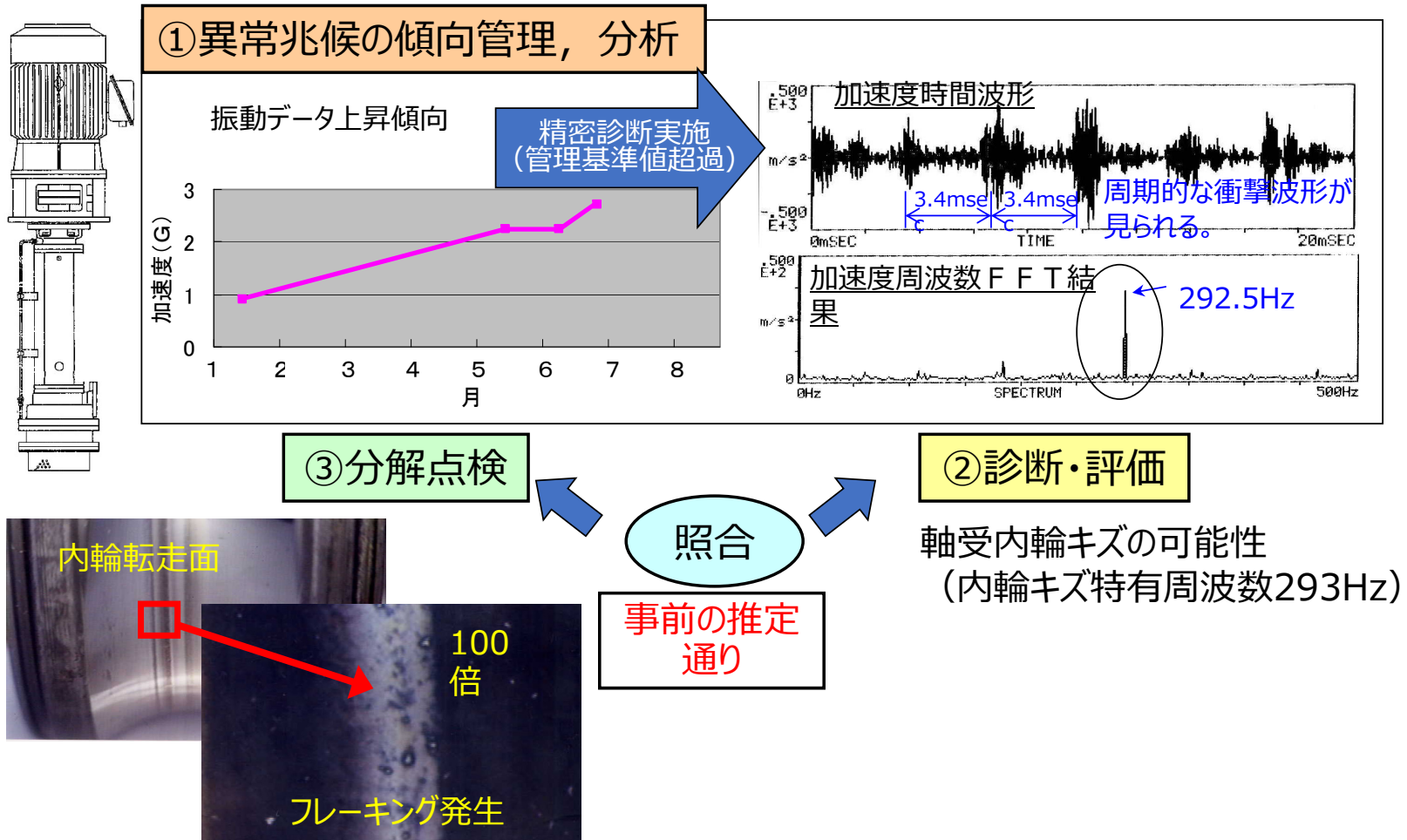
ご清聴ありがとうございました。

## 参考資料

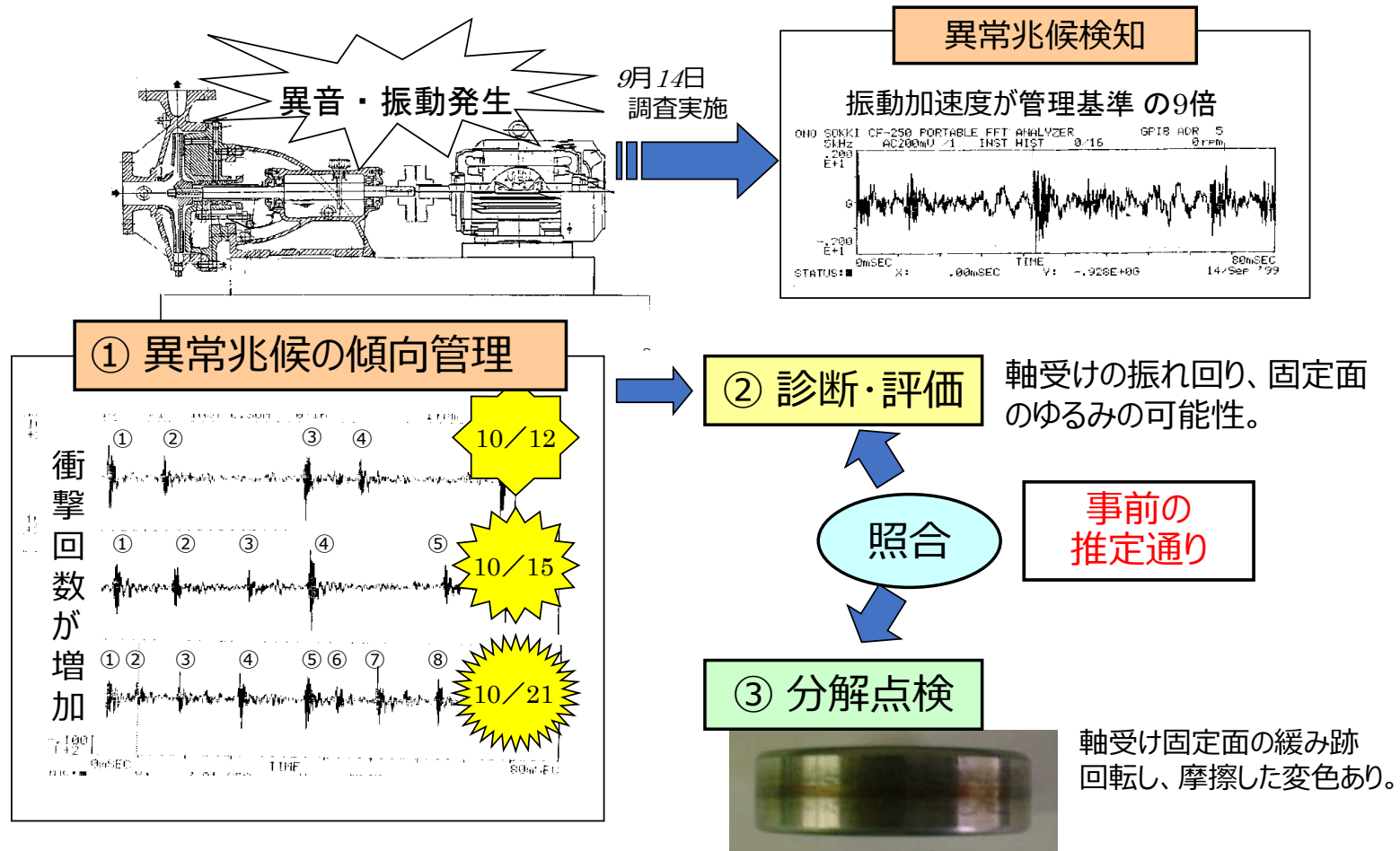
1. 状態監視技術で異常原因の特定に成功した実機での事例
2. 状態監視技術の適用により事前検知できた可能性のある実機トラブル事例
3. 我国特有の保全のやり方に伴うリスクについて  
(CBMは“分解点検”偏重のリスクを低減する)

# 状態監視技術で異常原因の特定に成功した 実機での事例

# 異常検知事例(1)

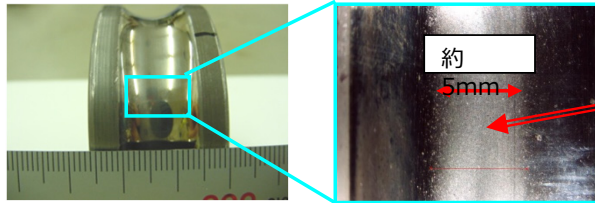
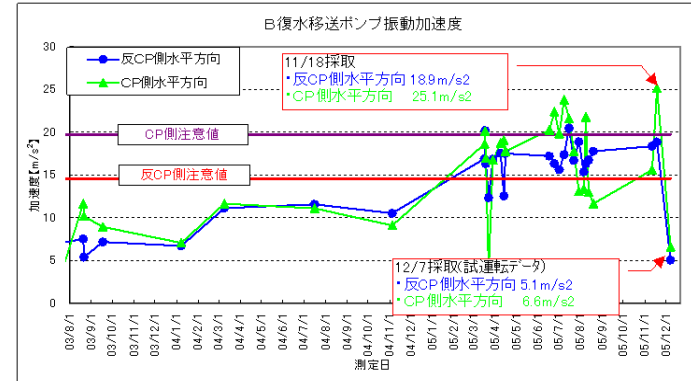
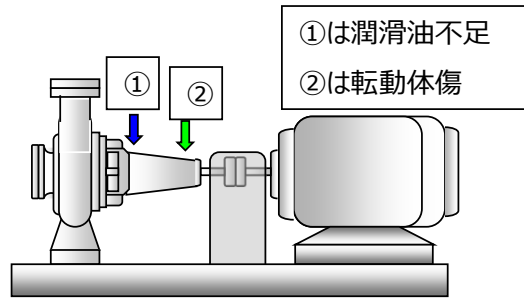


# 異常検知事例(2)



# 異常検知事例(3)

ポンプ軸受異常 (軸受転動体傷)



内輪、外輪の転送面に熱による変色、及び軌道面の面荒れが生じている

写真2-1 内輪転走面

写真2-2 内輪転走面(拡大35倍)

転動体に摺動傷を確認

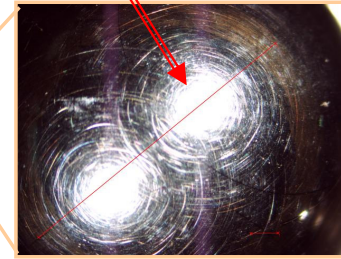
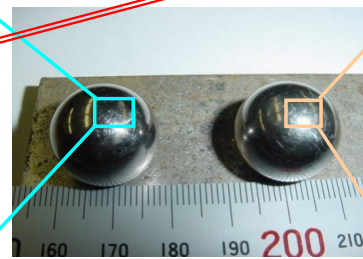
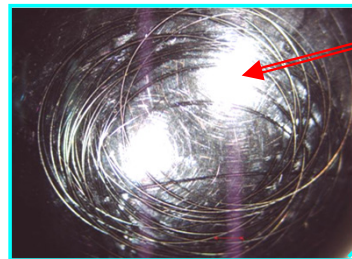


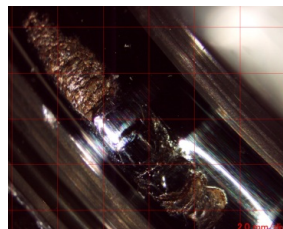
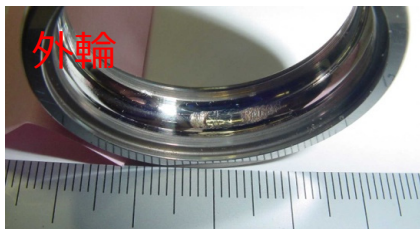
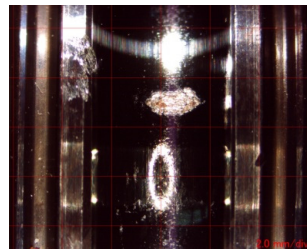
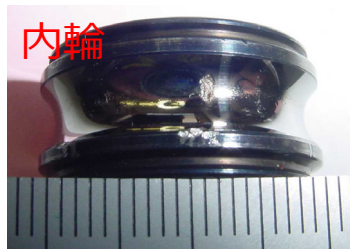
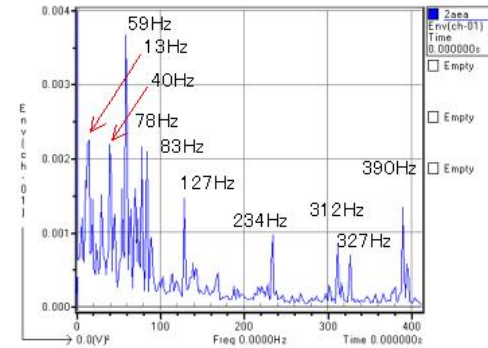
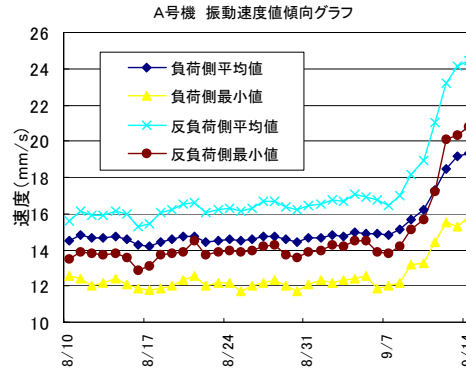
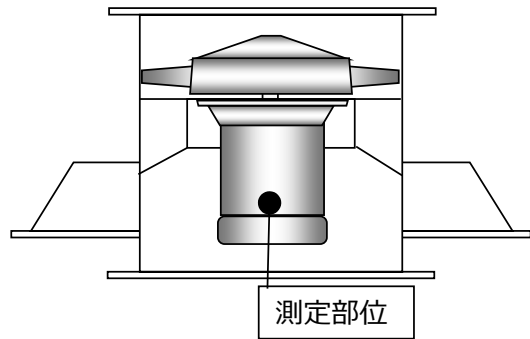
写真2-9 転動体拡大 (35倍)

写真2-7 転動体

写真2-10 転動体拡大 (35倍)

# 異常検知事例(4)

## 軸流ファン電動機軸受異常 (フレーキング)



内輪及び外輪にフレーキングが確認された。

# 状態監視技術の適用により 事前検知できた可能性のある実機トラブル事例



# 調査検討方法

- 情報源：

  - 原子力施設情報公開ライブラリー「ニューシア」

- 検討対象範囲：

  - 過去10年間（1998年～2007年）

- 検討方法：

  - \* 既に実用化されている状態監視技術を念頭に、それらを適用した場合、原理的に事前検知できた可能性があると考えられる過去のトラブルを抽出する。
  - \* 本検討は、過去トラブルの実機状態監視データがないので、定量的な検知可否の評価ではない。
  - \* 本検討では、実際に状態監視技術を適用できる現場環境であるか確認していない。（当該機器周辺のスペース、放射線量率、雰囲気温度など）

# 調査検討結果

- 事前検知できた可能性のあるトラブル件数：14件
- 上記内訳  
(トラブル発生機器の種類と件数)
  - \* ポンプ：3件
  - \* モータ：5件
  - \* 電動弁：5件
  - \* 逆止弁：1件

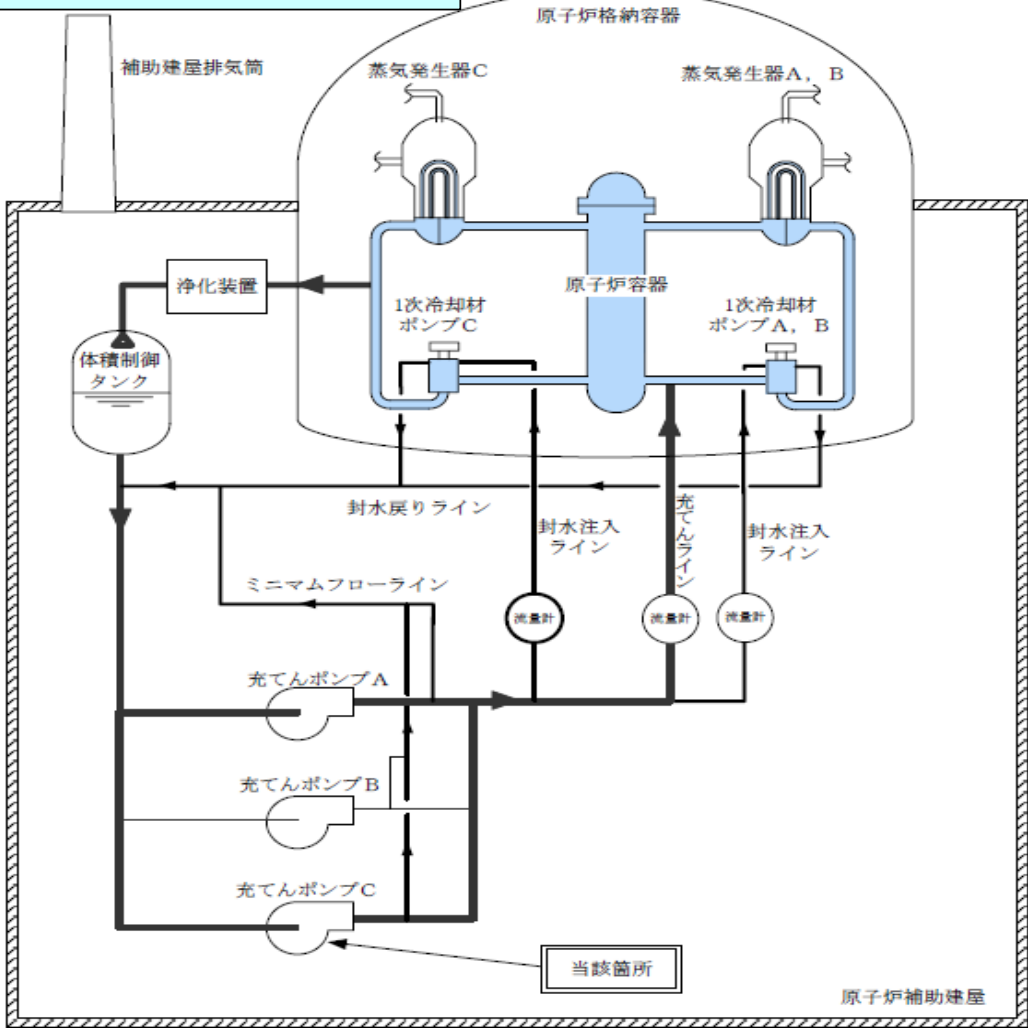
# 事前検知し計画的対処が可能と判断するのに 必要な条件

- ◆ 機器の特定部位から発せられる異常兆候の信号は、固有の特徴を有していること
- ◆ その信号をキャッチできる技術があること
- ◆ その技術で信号をキャッチできる（センサーをセットできる）部位が当該機器にあり、測定員あるいは恒設設備により信号測定が可能であること
- ◆ 取り込む信号は、一定以上のS/N比を備えていること（信号とノイズを識別できること）
- ◆ 異常兆候は、経時的に徐々に進行する現象であること（突発的でなく、異常兆候検出からその評価、判断、保全措置の実施までの時間的余裕があること）

## 実機事例 7 (1/6)

- 発生日：2004年3月15日
- ユニット名：伊方3号
- 事象発生機器：化学体積制御系充てんポンプ
- 事象発生時の状況：  
定期検査中、当該弁を全開から全閉へ操作したところ、動作途中で停止。
- 事象の原因：
  - \* 第7段スプリットリング溝部の工場製作加工時に、加工用バイトの刃先形状が連続加工により変化し、溝部コーナのR止まりの曲率半径が小さい状態（応力集中係数が大きい状態）で製作され、羽根車焼嵌に伴うスプリットリングと主軸の接触により、当該溝部に応力が発生。
  - \* 加えて、定期検査時に体積制御タンクを大気開放にした状態で充てんポンプを運転したため、ミナムローラインのオリフィス部で気泡が発生し、この気泡の流れ込みで生じた振動により当該溝部に応力が発生。

# 実機事例 7 (2/6)

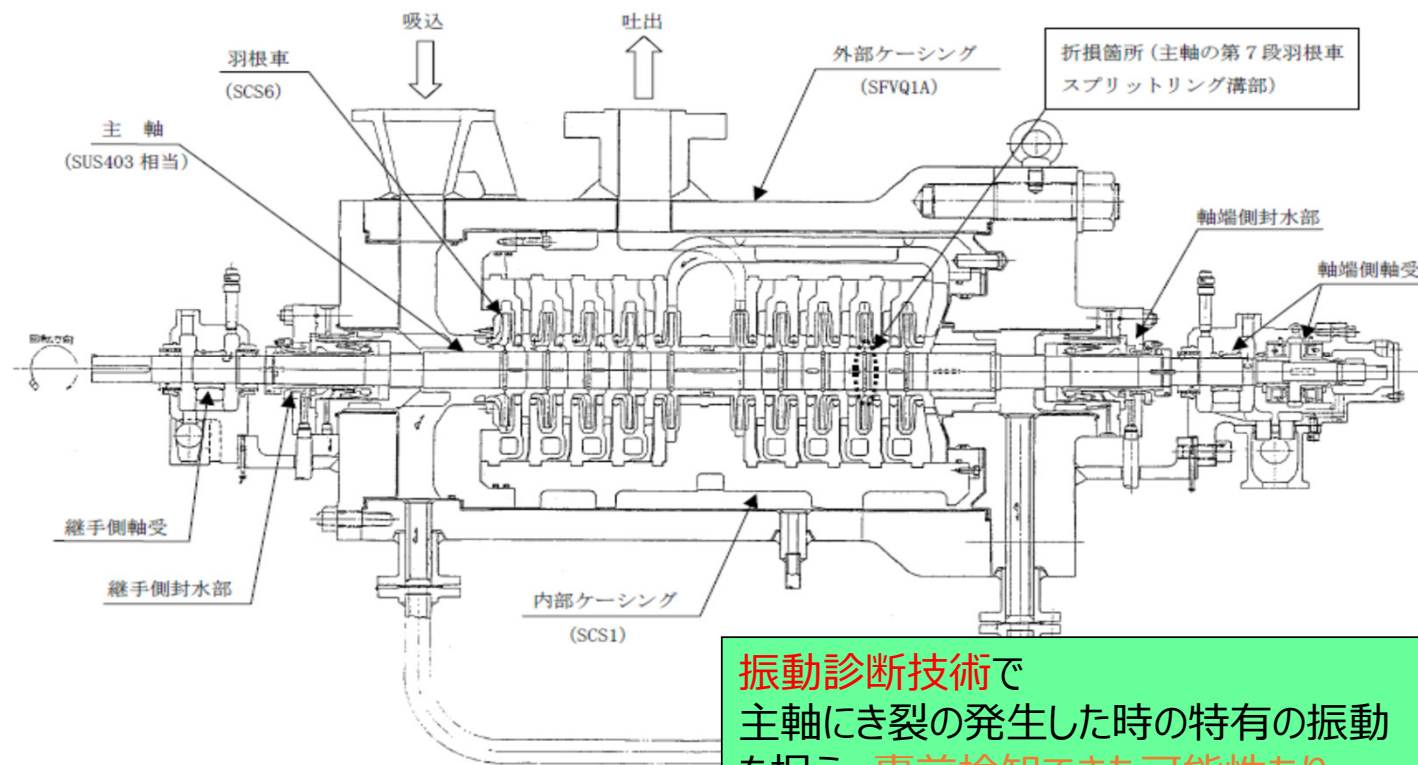


情報源：原子力施設情報公開ライブラリー「ニューシア」

## 実機事例 7 (3/6)

金属疲労によるシャフトの折損

伊方3号機 充てんポンプ構造図



振動診断技術で  
主軸にき裂の発生した時の特有の振動 (次々頁No.9)  
を捉え、事前検知できた可能性あり

## 実機事例 7 (4/6)

# 異常兆候とその検知技術 (ポンプの例)

ポンプの各種機能		部品	異常/劣化の種類	顕在化する症状 (異常兆候)	異常兆候を検知できる既存技術
QH性能	I入力-伝達	主軸	アンバランス 芯ずれ	振動の異常	振動診断技術
			き裂/破断		
	I入力-変換	軸継手	アンバランス 芯ずれ	振動の異常	振動診断技術
		ケーシングリング	浸食による減肉	QH低下	機能試験
		軸支持	軸受	内輪/外輪/回転体の疵 潤滑不良	振動の異常 油の劣化/異物
軸受箱	ボルト締付ゆるみ		振動の異常	振動診断技術	
圧力障壁	耐圧	ケーシング	内面の腐食/浸食	減肉/損傷	分解点検時の目視検査
		ケーシングボルト	腐食	漏えい(フランジ部) 減肉/破損	分解点検時の目検査又はUT検査
	シール	ガスケット・パッキン	へたり	漏えい(フランジ部)	なし(定期取替)
		メカシール グランドシール	劣化、へたり	漏えい率増加	漏えい率計測技術又は目視検査
機器支持	支持	支持脚/台板	腐食	減肉 振動の異常	目視検査
		基礎ボルト	腐食	減肉 振動の異常	目視検査

# 実機事例 7 (5/6)

## 異常原因とその特性 (振動の例)

No.	現象	原因	振動の特徴	
			振幅・振動数・位相の変化	振動波形
1	不つりあい振動	<ul style="list-style-type: none"> <li>アライメントの変化</li> <li>ローターの熱曲がり</li> <li>ローターの経年的曲がり</li> </ul>		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>回転部材の欠損</li> <li>カップリングのずれ</li> </ul>		
9	クラックによる振動	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸の一部にクラックが発生した場合</li> </ul>		
10	軸受給油不足振動	<ul style="list-style-type: none"> <li>すべり軸受への給油量不足 (不安定振動)</li> </ul>		

図 5-49 高速回転機械の異常と振動特性の関係  
(日立製作所／大森，佐藤氏の論文より引用)



## 実機事例 7 (6/6)

# ポンプの故障事例の分析評価

- き裂の発生した主軸には特有の振動が現れる
- 上記振動を捉えられる振動測定技術は存在する
- 振動センサーを設定できる部位がケーシング外面や軸受箱外面にある
- 事前検知には、SN比の良い信号が必要
- ポンプ主軸の疲労による折損は、突発的に発生する現象ではなく、繰返し応力によって徐々にき裂が発生・進展する

⇒事前検知できた可能性がある。

我国特有の保全のやり方に伴うリスクについて  
(CBMは“分解点検”偏重のリスクを低減する)

# 定期検査中の現場の混雑と情報錯綜

## 分解点検(TBM)主体の保全の問題点

### プラント定検マスター工程表

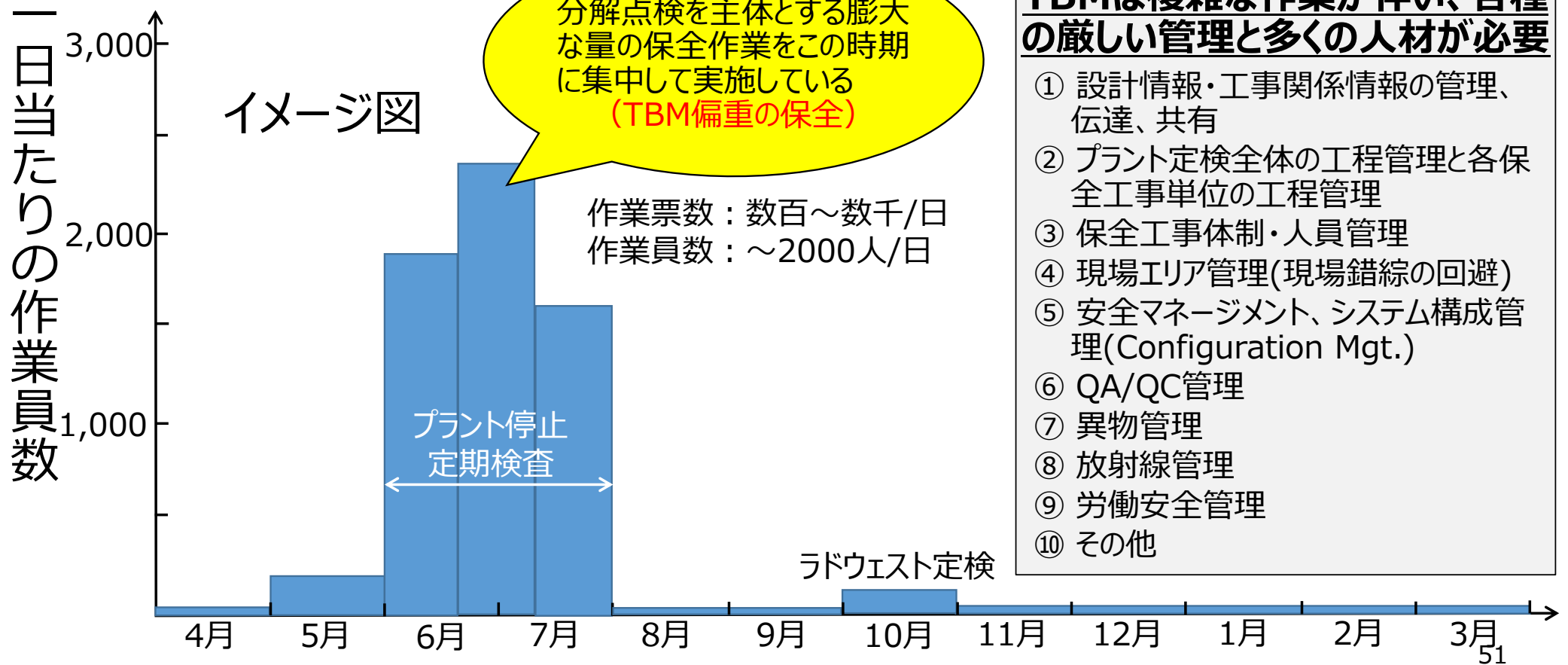
系統	週	1	2	3	4	5	6	7
主要規制		保安規定、雨内ルール等からの規制事項						
原子炉	工程	原子炉停止 PCV,RPV 開放	燃料取出	CRD 交換等	燃料装荷、CRD 試験、炉内点検等	PCV,RPV 復旧、RPV 耐圧試験、等	機能試験、系統構成、等	▽原子炉起動
	工数	[Bar chart showing workload distribution across weeks]						
原子炉系	隔離	隔離、水抜き	各機器の保全工事(請負工事)					
	作業	隔離	各機器の保全工事(請負工事)				系統復旧	
	制御	隔離	各機器の保全工事(請負工事)					
	隔離	隔離、水抜き	各機器の保全工事(請負工事)					
	作業	隔離	各機器の保全工事(請負工事)				系統復旧	
	制御	隔離	各機器の保全工事(請負工事)					
電機系	隔離	隔離	隔離	全停工事 復旧		系統復旧		
	隔離	隔離	隔離	全停工事 復旧		系統復旧		
タービン系	隔離	隔離、水抜き	各機器の保全工事					
	作業	隔離	各機器の保全工事				系統復旧	
	制御	隔離	各機器の保全工事					

数多くの現場作業、多種多様な現場作業が同時並行で実施される

現場混雑、情報錯綜の中で実施する保全作業には多種多様なリスク源が潜在し、相対的にリスクが高い



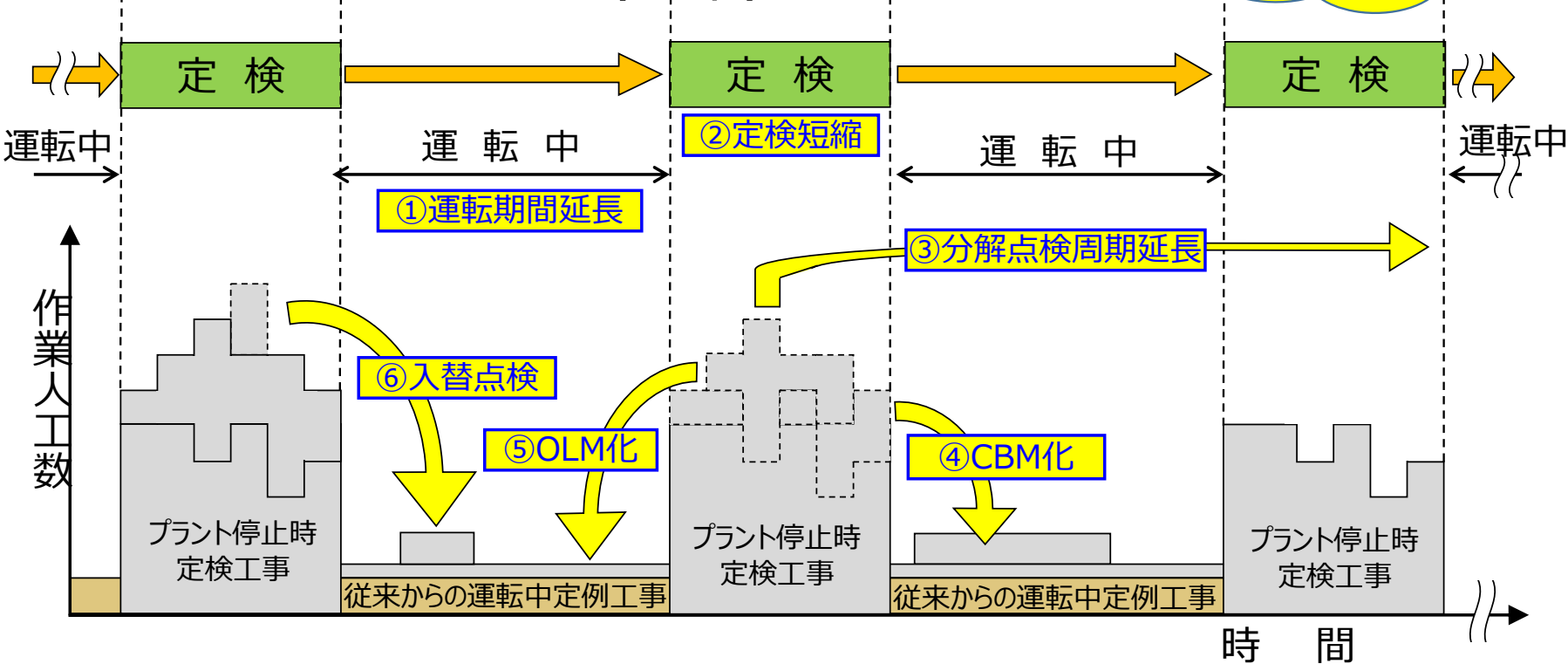
# 定検時に集中して多くの保全作業を実施するやり方はオペレーショナル・リスクが高い



# 年間保全作業量の平準化による全体リスクの低減

## 保全適正化によるリスク低減の具体策 (6策)

CBM等の活用で  
リスク低減が可能



# プラント停止中と運転中のリスク比較

## 定期検査中（プラント停止中）

### ① PRAリスク

- 標準から外れたシステム構成、深層防護の劣化
- 停止期間中、随時変更されるシステム構成
- 機器故障、運転操作による人的過誤（稼働/待機機器少）

### ② オペレーショナル・リスク

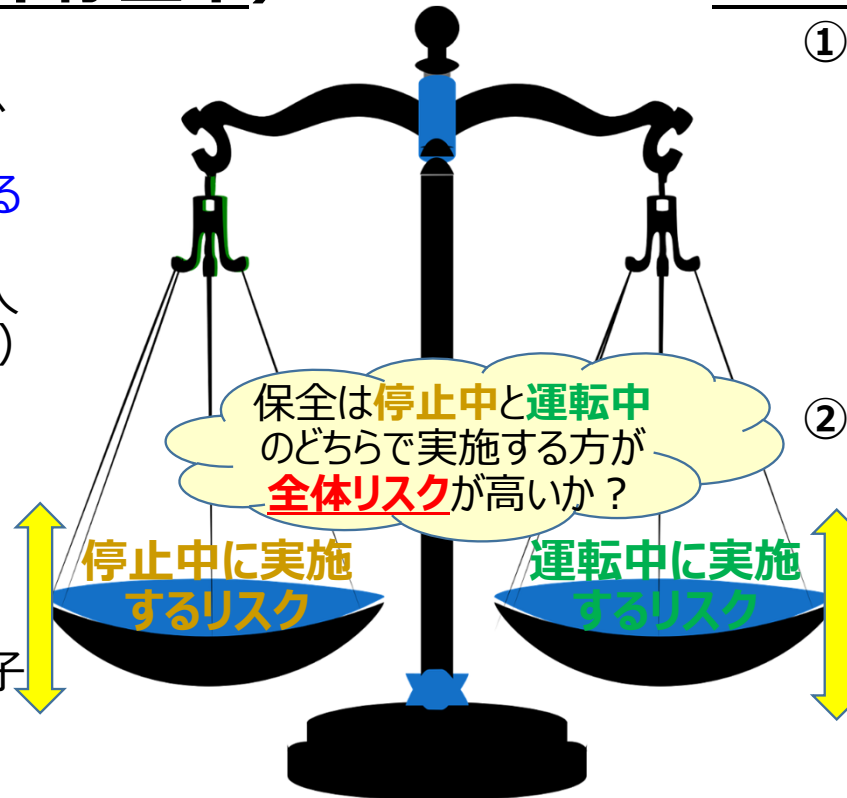
- PRAリスク以外のリスク

原子力リスク  
環境汚染リスク  
被ばくリスク  
反応度添加リスク  
労働安全リスク

- 保全品質に影響を与える因子

保全対象  
保全実行部隊(作業員)能力  
作業要領書  
使用資機材  
現場作業条件・環境

定検中は  
条件が厳しい。



## OLM中（プラント運転中）

### ① PRAリスク

- 標準的なシステム構成と深層防護
- ただし、OLM機器の隔離により、一部特殊なシステム構成
- 機器故障、運転操作による人的過誤（稼働/待機機器多）

### ② オペレーショナル・リスク

- PRAリスク以外のリスク

原子力リスク  
環境汚染リスク  
被ばくリスク  
反応度添加リスク  
労働安全リスク

- 保全品質に影響を与える因子

保全対象  
保全実行部隊(作業員)能力  
作業要領書  
使用資機材  
現場作業条件・環境

危機管理、バックアップ等が重要。