

北海道ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理施設の  
安全設計について

平成 18 年 9 月

日本環境安全事業株式会社

ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会

北海道事業部会

ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会  
北海道事業部会委員名簿

空閑 良壽 室蘭工業大学工学部応用化学科／教授

細見 正明 東京農工大学大学院共生科学技術研究院／教授

松藤 敏彦 北海道大学大学院工学研究科／教授

主 査 森田 昌敏 愛媛大学農学部生物資源学科／教授

## 目 次

1. 安全設計の概要	
1. 1 安全設計の考え方	1
1. 2 処理工程図	2
1. 3 安全設計の具体的な内容	3
1. 4 PCBの分解反応に関する安全設計	5
1. 5 PCBの漏洩対策	6
1. 6 ユーティリティ設備の安定供給対策	7
1. 7 自然災害に対する安全設計	9
1. 8 火災に対する安全設計	10
1. 9 敷地内レイアウト等に関する安全配慮	11
2. 安全解析の内容	
2. 1 安全性評価実施概要	12
2. 2 安全評価結果まとめ(PCB漏洩)	13
2. 3 安全評価結果まとめ(火災・爆発)	14
2. 4 安全評価結果まとめ(イベントツリーの例)	15
3. 安全解析結果の設計への反映事例	16

1. 1 安全設計の考え方

1. 1はじめに

北海道PCB廃棄物処理施設の安全設計に際しては、関連法令の遵守に加え、「ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会」報告書の提言内容を反映させることにより、リスクマネジメントの考え方に立ち施設全体の安全性を確保した設計としています。加えて、先行する各事業における改善措置等を踏まえ、下図に示すようにプロセス安全設計、操業監視システム、フェイルセーフ、セーフティネットという多重防護構造が十分に機能を発揮するように配慮し、通常運転時の異常発生及び不可抗力的な自然災害・緊急事態に対しても安全な停止ならびに安定した操業への復帰が可能であるとともに、施設外への影響を局限化する設備設計としています。更に、安全解析を通して施設の安全性と施設外へ与える影響を評価し、その結果を施設設計および施設運用に活かすことにより安全性の一層の向上を図っています。

1. 2 設備設計の基本思想

処理システムを構成する設備の特徴、重要度に応じて安全性向上のための措置を実施し、ハザードに対する多重防護を図ります。また、各先行事業における改善点を十分に反映した設計に配慮します。

1. 3 安全設計概要

- ・基本思想に基づき安全に配慮した設備設計を行っています。
- ・安全解析を通して、プロセスの潜在危険を洗い出し、問題点を抽出・定量化して、効果的な対策を設計にフィードバックしています。
- ・PCB廃棄物の搬入経路などレイアウト上の安全配慮、漏洩防止に対する設備対策、ユーティリティ設備の安定供給対策を織り込んでいます。
- ・自然災害等による緊急事態に対する安全設計は、安全な停止が行なえるように適切な対策を織り込んでいます。
- ・火災が発生した場合の対策として、粉末消火設備・消火栓などの防災設備を設置し被害の最小化と施設外への影響の局限化を図っています。
- ・施設の安全性評価として「施設内での火災・爆発」と「施設外へのPCB漏洩」のハザードを定量解析しその発生頻度を求め、十分に低いことを確認しています。

◇以下に、右図中の項目に対応した代表的な内容を示しています。

(4) セーフティネットの内容

- (4.1) 排気はそれぞれのプロセス内で処理した後、更に活性炭吸着塔を通して施設外へ排出。オンラインモニタリングにより排気中の微量PCB濃度を管理・監視。また、一般PCB取扱区域や天井裏の換気、排気を常時活性炭を通して排気するように設計
- (4.2) 建屋内に管理区域を設定し、管理区分レベル毎に負圧管理。更に、管理レベルに限らず施設全体の負圧バランスに配慮
- (4.3) PCB油の地下浸透防止、被害拡大防止のためオイルパン・ステンレス床・防油堤・不浸透性塗床を施工。

(3) フェイルセーフの内容

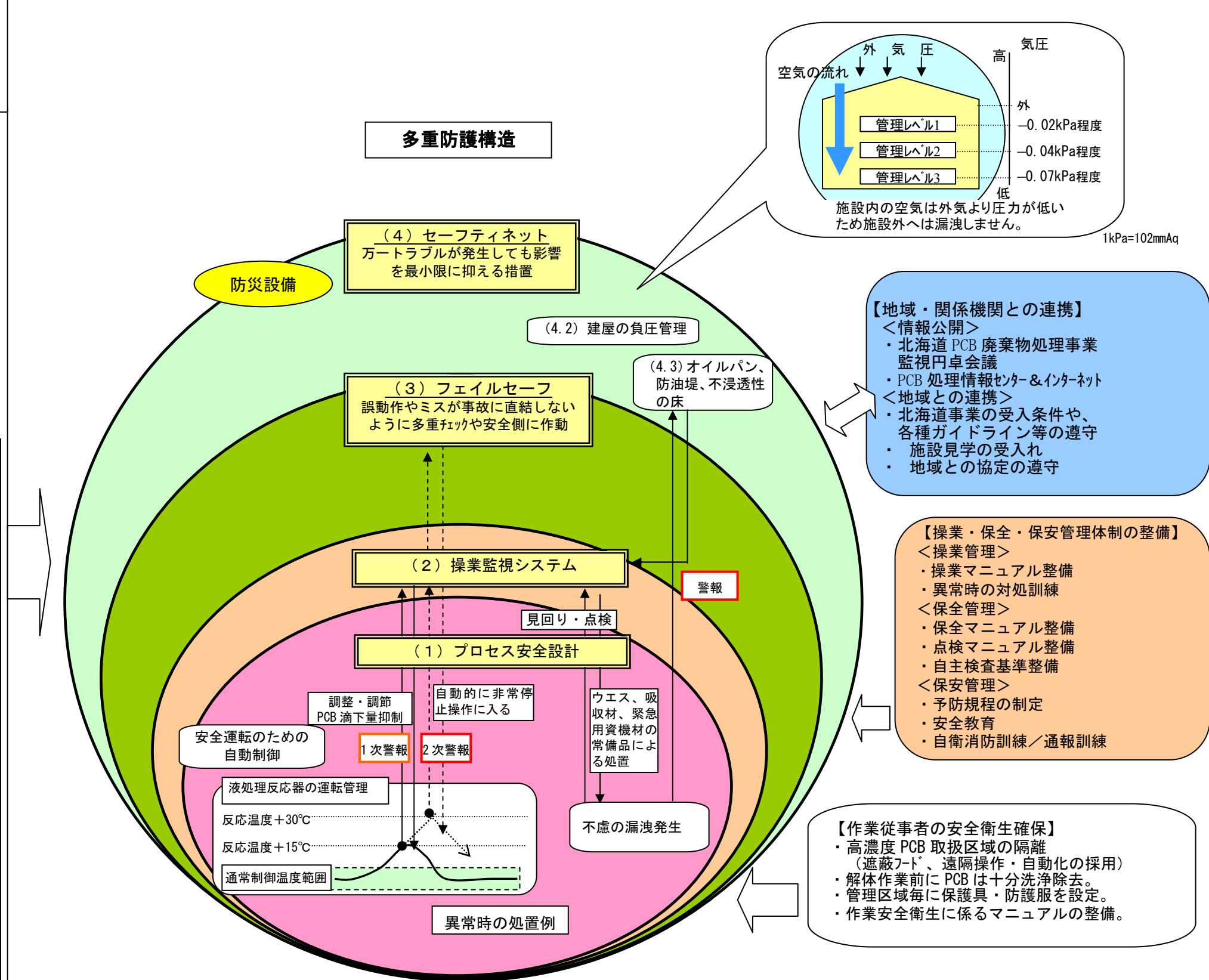
- (3.1) 温度・圧力・液面・濃度等の計器の中で安全上重要な計器は多重化。
- (3.2) 液移送の際、液レベル異常の場合には液面計の設定ポイントでポンプを停止させるシステムを織り込み。
- (3.3) 警報と連動して緊急自動停止ができる設計。
- (3.4) 停電等異常時の自動弁の開閉は安全側に作動するように設計。
- (3.5) オンラインモニタリング異常警報と連動して排気・換気の緊急自動切換ができる設計。

(2) 操業監視システムの内容

- (2.1) 中央制御室にて集中制御ができるように設計。
- (2.2) 運転状況の遠隔監視ができるようITV<sup>(注)</sup>を設置。
- (2.3) オンラインモニタリングや漏洩検知器による監視。

(1) プロセス安全設計の内容

- (1.1) 安全解析による安全設計内容
  - ① 安定した運転・操業を行うため、機械化および化学プロセスの制御として一般的な分散制御、自動制御を採用。
  - ② ユーティリティ設備の安定供給対策を設計に織り込み。
- (1.2) 安全解析以外で配慮された安全設計内容
  - ① 腐食等を考慮した適正な材料選定。
  - ② 流体特性を考慮した適正な継手の選定。
  - ③ 夾雑成分によるオンラインモニタリングの誤警報防止対策の採用



注) ITV: Industrial Television の略称。  
工業用に用いられる監視カメラのこと。



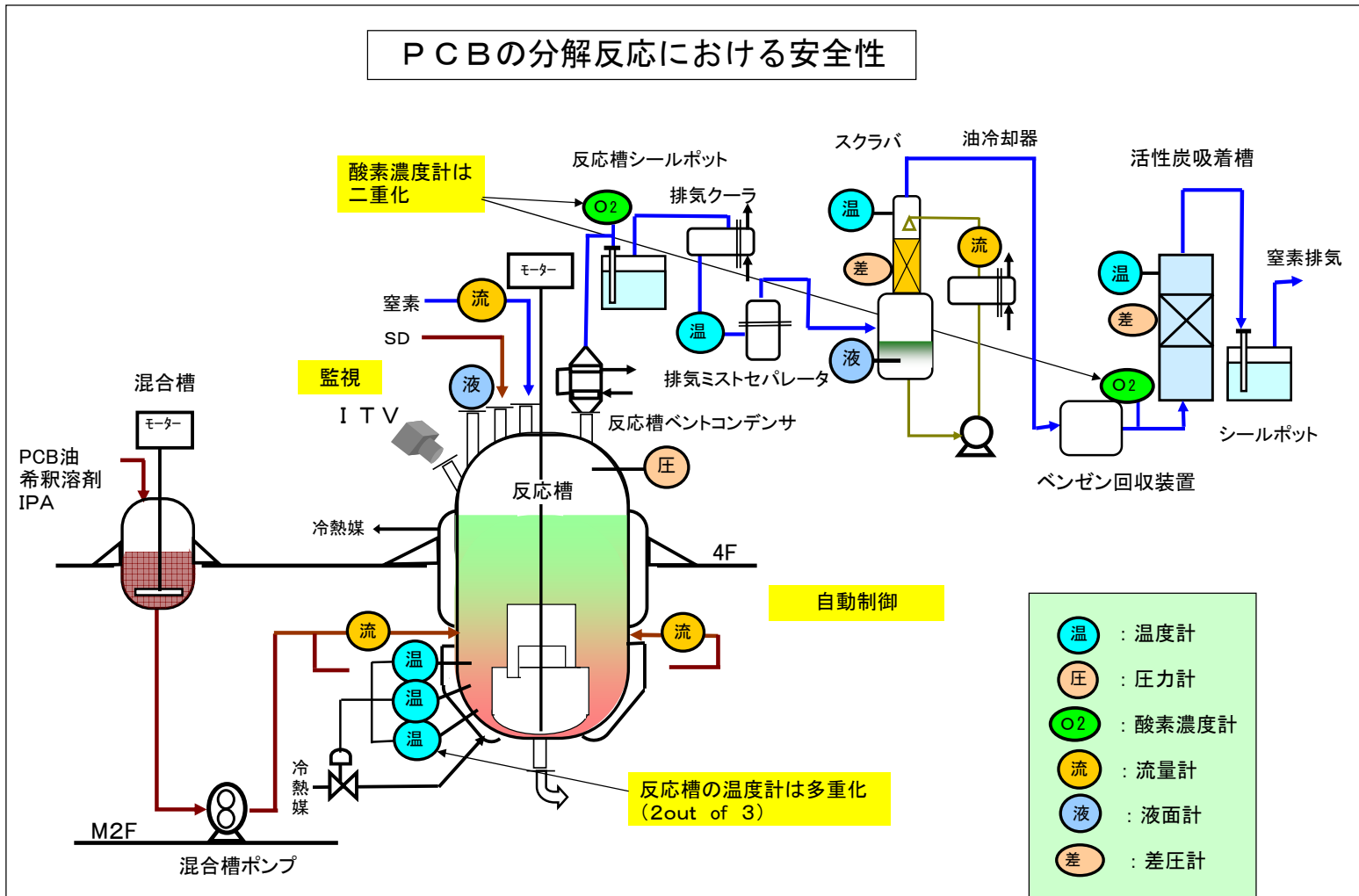
### 1. 3 安全設計の具体的な内容

目的と項目	前処理			液処理
	解体・洗浄（攪拌／超音波）	蒸留	真空加熱分離	
運転状態安定化のための自動制御 (1.1) (2.1)	①手作業のヒューマンエラー防止のため、解体作業は極力機械化・自動化。 ②攪拌洗浄操作は、プログラム制御による自動運転を基本。 ③超音波洗浄操作は、第1洗浄槽から減圧乾燥槽まで自動での洗浄を基本。 ④中央制御室での集中制御管理。	①蒸留塔の塔頂圧力制御および塔底加熱量等の制御は自動制御。 ②中央制御室での集中制御管理。	①真空加熱分離装置は処理対象物を受入れ、前準備完了後“自動処理”スタートにより処理完了まで自動運転。 ②中央制御室での集中制御管理。	①液処理は基本的にバッチの自動運転。 ②反応時の加温・冷却用熱媒循環系統の温度制御は2 out of 3 システムによる自動制御。 ③中央制御室での集中制御管理。
適正な材料選定 (1.2)	①洗浄装置類にはステンスを使用。	①蒸留設備の塔槽類にはステンスを使用。 ②塩酸による腐食が懸念される、蒸留塔真空ポンプ下流および一部受槽についてはSUS316とする。 ③蒸留塔塔底ラインに設置する圧力計等はフランジ接続タイプを採用する。	①真空加熱炉本体など高温に曝される機器には、耐熱性、耐食性を考慮しステンスを使用。 ②酢酸・蟻酸による腐食が懸念される部位についてはSUS316とする。	①反応槽には、UNS N10276 <sup>(注1)</sup> +SM400B <sup>(注2)</sup> クラッドを採用。 ②後処理の抽出槽には、SUS329J4L <sup>(注3)</sup> +SM400Bクラッドを採用。 ③その他、PCBに接する機器にはステンスを使用。 (注1)UNS N10276 :ASTM規格の Hastelloy C276 <sup>(注4)</sup> 同等材のこと (注2)SM400B :JIS G 3106 に規定の溶接構造圧延鋼材のこと (注3)SUS329J4L :オーステナイトとフェライトの2相の組織からなるステンス鋼のこと (注4) Hastelloy C276: Ni 基耐塩酸および耐熱超合金のこと
安定運転継続のための監視強化と警報発信 (2.2) (3.1)	①作業状況確認のため解体エリアにはITVを設置。 ②洗浄装置の制御システムの安定化のため主要部分の計器は二重化。 ③受槽、貯槽の液面警報は1次警報、2次警報の設定が可能な計器を採用。 ④攪拌洗浄装置には異常振動検知器を設置。	①蒸留設備の制御システム安定化のため主要部分は二重化。 ②蒸留塔の定常・安定運転に必要な温度・圧力・流量等の計器類については、中央制御室への指示警報および制御機能付きを採用。	①オイルスクラバ界面状況確認のためITVを設置。 ②制御システムの安定化のため真空加熱炉周りの温度計、圧力計等主要部分は二重化。 ③真空加熱分離装置の温度計、圧力計は1次警報、2次警報の設定が可能な計器を採用。	①反応槽、抽出槽の内部状況監視のためITVを設置。 ②制御システムの安定化のため、主要部分は二重化。 ③PCBの受槽類、液処理反応に関わる計量槽の液面計は二重化。 ④反応槽の温度制御は2 out of 3 を採用、また、反応排気の酸素濃度計は二重化。 ⑤貯槽の液面計は1次警報、2次警報の設定が可能な計器を採用。
手順ミス防止のためのインターロックシステムの構築 (3.2)	手順のミス防止するための多重防護機能の一例として以下のものを示す。 ・正常範囲を逸脱した場合は、DCS内に予め整備されたインターロックシステムが作動し、安全に設備停止。 ・槽類には液面計による警報設定のほかに、リミットスイッチを設けてポンプ停止等のインターロックを組み込み、溢流を防止。			
安全に停止させるためのシステム (3.3) (3.4)	<地震時> ①攪拌洗浄、超音波洗浄、蒸留設備、真空加熱分離は、2 out of 3 システムによる地震感知装置により一定震度以上で停止。 ②クレーン等の搬送機器類は、安全を確保するため、状況を確認した後に作業従事者の判断で停止。 ③解体・分別に関わる装置は、安全を確保するため、状況を確認した後に作業従事者の判断で停止。 ④排気処理系統は地震の際も自動停止させない。			<地震時> ①液処理設備の各機器は、2 out of 3 システムによる地震感知装置により一定震度以上で停止。 ②停止時各バルブの開閉は安全側に作動。 ③排気処理系統は地震の際も自動停止させない。

目的と項目	前処理			液処理
	解体・洗浄（攪拌／超音波）	蒸留	真空加熱分離	
安全に停止させるためのシステム（続き） （3.3） （3.4）	<p>&lt;停電時&gt;</p> <p>①制御・計装機器類には、無停電電源装置により電源供給される。</p> <p>②停電と同時に非常用発電機が起動し、約40秒後には電源確立し、所定の機器に電源供給される。</p> <p>③非常用発電装置からの供給が停止した場合は全ての機器を停止。なお、各バルブの開閉は安全側に作動。</p> <p>④停電時において、避難・誘導が確実に行なわれるように、誘導灯・非常用照明灯を設置。</p>			
気体状PCB漏洩防止のための排気処理設備 （3.5） （4.1）	<p>①前処理の排気は</p> <p>第1系統：遮蔽フード排気（運転時立入あり）</p> <p>第2系統：遮蔽フード排気（運転時立入なし）</p> <p>第3-1系統：PCB含有プロセス排気</p> <p>の系統に分けて処理したのち、最後にセーフティネットの活性炭吸着槽を通して排気する。</p> <p>②なお、前処理を行う部屋の換気排気も活性炭を通して排気する。</p>			<p>①液処理系の排気はその成分に応じて、</p> <p>第3-1系統：PCB含有プロセス排気</p> <p>第3-2系統：PCB+水素+ベンゼン排気</p> <p>第3-3系統：PCB+ベンゼン排気</p> <p>の系統に分けて処理したのち、最後にセーフティネットの活性炭吸着槽を通して排気する。</p> <p>②なお、液処理を行う部屋の換気排気も活性炭を通して排気する。</p>
	<p>①オンラインモニタリングの異常警報と連動しての排気・換気ライン緊急自動切換、または自動停止を採用。</p> <p>セーフティネット活性炭入口側のオンラインモニタリング測定値が異常を示した場合、セーフティネット活性炭出口側から、PCB濃度が正常な系統のセーフティネット活性炭入口側へ流れるよう、自動的にダクトを切り替え、PCB濃度異常となった排気、換気が施設外へ出て行くことを防ぐとともに、各室、各エリアの負圧バランスが保持されるように制御する。</p> <p>切替後の系統のセーフティネット活性炭入口側のオンラインモニタリング測定値がさらに異常を示した場合は、自動的に排気、換気を停止する。</p>			
気体状PCB漏洩防止のための管理区域設定による気密性確保 （4.2）	<p>レベル3：超音波洗浄エリア</p> <p>レベル3：トランスコンデンサ解体エリア</p> <p>：攪拌洗浄エリア</p> <p>管理区域レベル毎に負圧管理を実施。</p>	<p>レベル1：蒸留エリア</p> <p>管理区域レベル毎に負圧管理を実施。</p>	<p>レベル2：真空加熱分離エリア</p> <p>管理区域レベル毎に負圧管理を実施。</p>	<p>レベル1：液処理エリア</p> <p>管理区域レベル毎に負圧管理を実施。</p>
液状PCB漏洩防止のための多重のバリアー （4.3）  ・オイルパン、SUS床 ・防油堤 ・不浸透性塗床	<p>①PCBを取り扱う機器の下部に一次バリアーとしてのオイルパン又はSUS床、防油堤、二次バリアーとして防液堤を設置。</p> <p>②床面には耐薬品性、耐久性のあるエポキシ樹脂による不浸透性塗床を施工し、地下浸透を防止。</p>			<p>①PCBを取り扱う機器の下部に一次バリアーとしてのオイルパン又はSUS床、防油堤、二次バリアーとして防液堤を設置。</p> <p>②床面には耐薬品性、耐久性のあるエポキシ樹脂による不浸透性塗床を施工し、地下浸透を防止。</p> <p>③SD剤受入場所には、コンテナ車の周囲に側溝を設置</p>



# 1.4 PCBの分解反応に関する安全設計



## 安全対策の内容

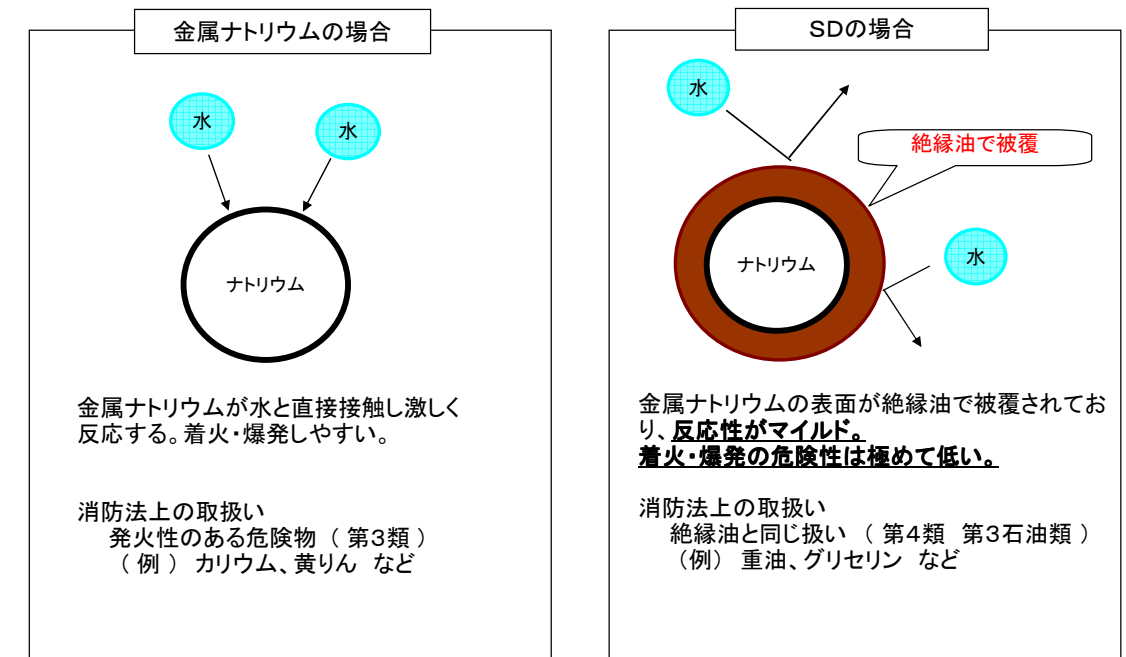
- ① 反応薬剤 (SD) の安全性
  - ・ 分解に必要な特性は維持しつつ、絶縁油で被覆し安全性を大幅に向上。
- ② 反応操作上の安全配慮
  - ・ マイルドな分解反応条件。(温度: 115~120℃、圧力: 常圧)
  - ・ 反応薬剤を予め張り込んだ反応槽に、PCBを含む混合液(希釈溶剤に廃PCBおよびIPAを混合した液)を少量ずつギヤーポンプにて加えることにより、急激な反応による発熱を防止。
  - ・ また、混合槽および装入ポンプは反応槽レベル以下に設置しており、機器が故障した際にPCBが反応槽に一気に流入することはない。
- ③ 安全運転のための自動制御ならびに監視計器
  - ・ 重要な監視計器は二重化(反応温度制御は2out of 3)するとともに、分解反応は自動制御で行なう。
  - ・ 反応槽内が通常制御温度範囲を逸脱した場合は1次警報(反応温度+15℃)と共にPCBを含む混合液の装入量を低減させ温度上昇を回避。
  - ・ 更に、反応温度+30℃になれば、2次警報と共に混合槽ポンプ停止、自動停止に至る。
  - ・ 攪拌機が停止した場合は、警報発信と共に混合槽ポンプ停止、で自動停止に至る。
  - ・ 反応槽の内部状況監視のためI TVを設置。

## 反応薬剤の安全性と漏洩対策

PCB分解のための反応薬剤として、ナトリウム分散体(SD)を用いることにより、分解に必要なナトリウムの特性を維持しつつ、取扱い上の安全性を大幅に向上。

SD: ナトリウムを溶媒中に一旦溶解させ、10μm以下の超微粒子にして分散体としたもの。  
Sodium Dispersion の略

### 1. SDの化学的安定性



金属ナトリウムが水と直接接触し激しく反応する。着火・爆発しやすい。  
消防法上の取扱い  
発火性のある危険物(第3類)  
(例) カリウム、黄りん など

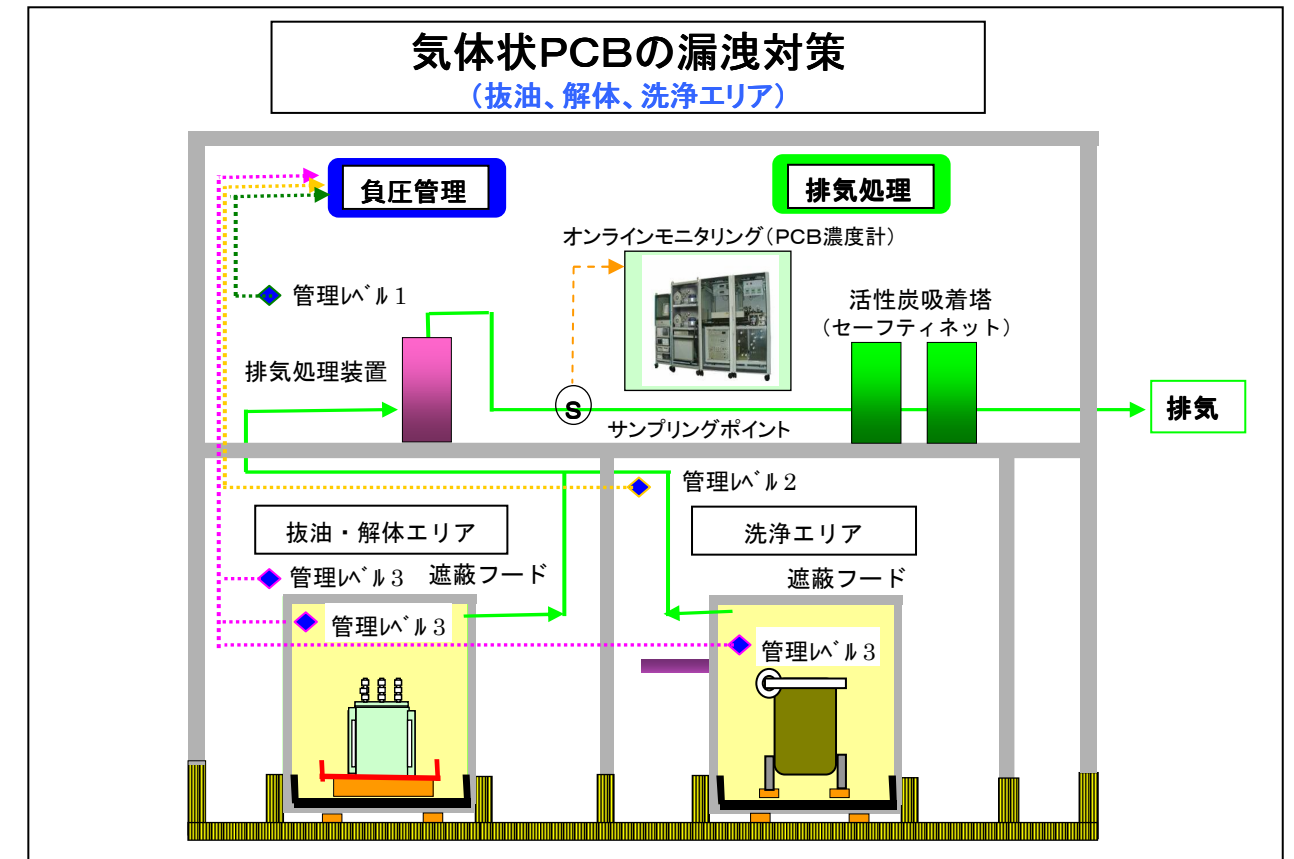
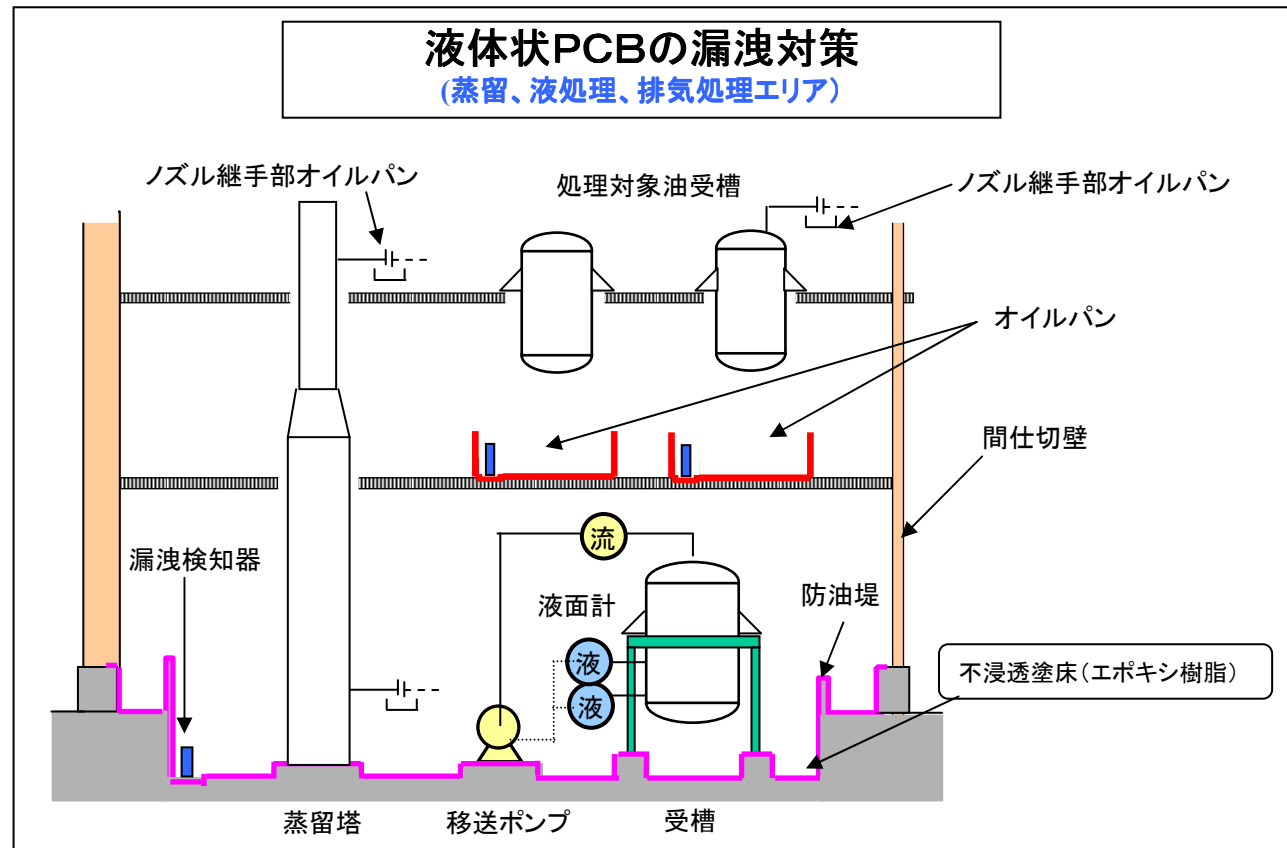
金属ナトリウムの表面が絶縁油で被覆されており、**反応性がマイルド。**  
**着火・爆発の危険性は極めて低い。**  
消防法上の取扱い  
絶縁油と同じ扱い(第4類 第3石油類)  
(例) 重油、グリセリン など

### 2. 漏洩対策

- ① SDの運搬については専用のローリを使用し、受入は建屋内のSD搬入室で行なう。
- ② 万一施設内でSDが漏洩しても、防油堤により外部漏洩を防止。
- ③ 万一発火した場合のSD室の消火は、粉末消火設備に加えSD専用の消火器を設置
- ④ 受入作業時に液たれが生じた場合は、ウエス等でふき取りペール缶に入れ、密封した上で安全に処理。



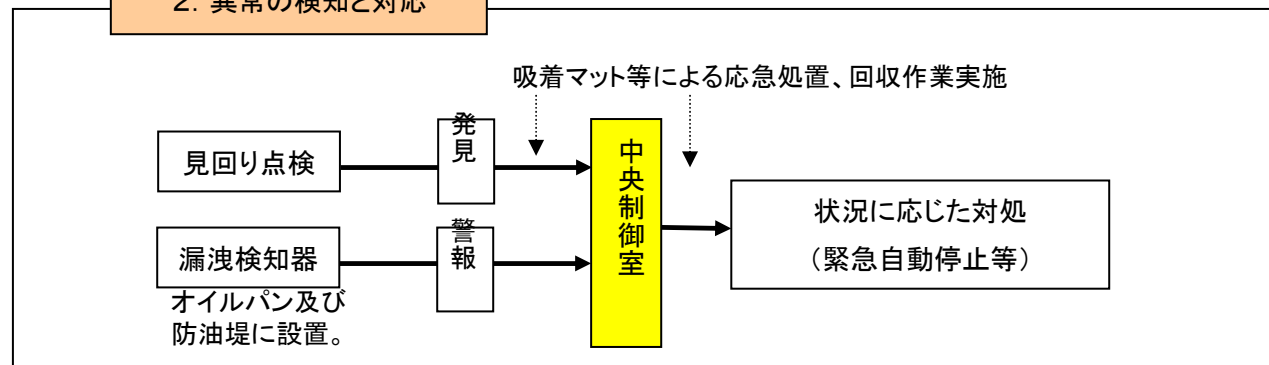
# 1.5 PCBの漏洩対策(施設外の環境中への漏洩防止対策)



## 1. 漏洩防止対策

- 液体状PCBの漏洩防止対策として、以下のような計装制御システムとしている。
  - 移送ラインには、必要に応じて重量計測や積算流量計等を設置し移送量を制御。
  - 液面計とポンプの連動により、液位「高」で送液弁閉止、「高高」で移送ポンプを自動停止。
  - 主要な貯油槽の液面計を二重化。
- 配管に取付けるバルブは漏洩防止タイプ(ベローズ弁等)を採用している。

## 2. 異常の検知と対応



## 3. 漏洩時の拡大防止対策(セーフティネット)

- 不慮の漏洩発生時でも下記対策により、外部漏洩を防止。
- 鋼板溶接構造の処理対象油受槽用オイルパン等(該当機器容量の100%を確保)または防油堤の設置。
  - 間仕切壁下部が防油堤として機能。
  - 床面の不浸透塗床により地下浸透を防止。

## 1. 排気処理方法

- PCB取り扱い作業は、作業内容によって遮蔽フードやグローブボックス又は局所排気装置を設置。
- 発生源毎に処理系統を分割。

スクラバー等の排気処理装置によりPCBを除去

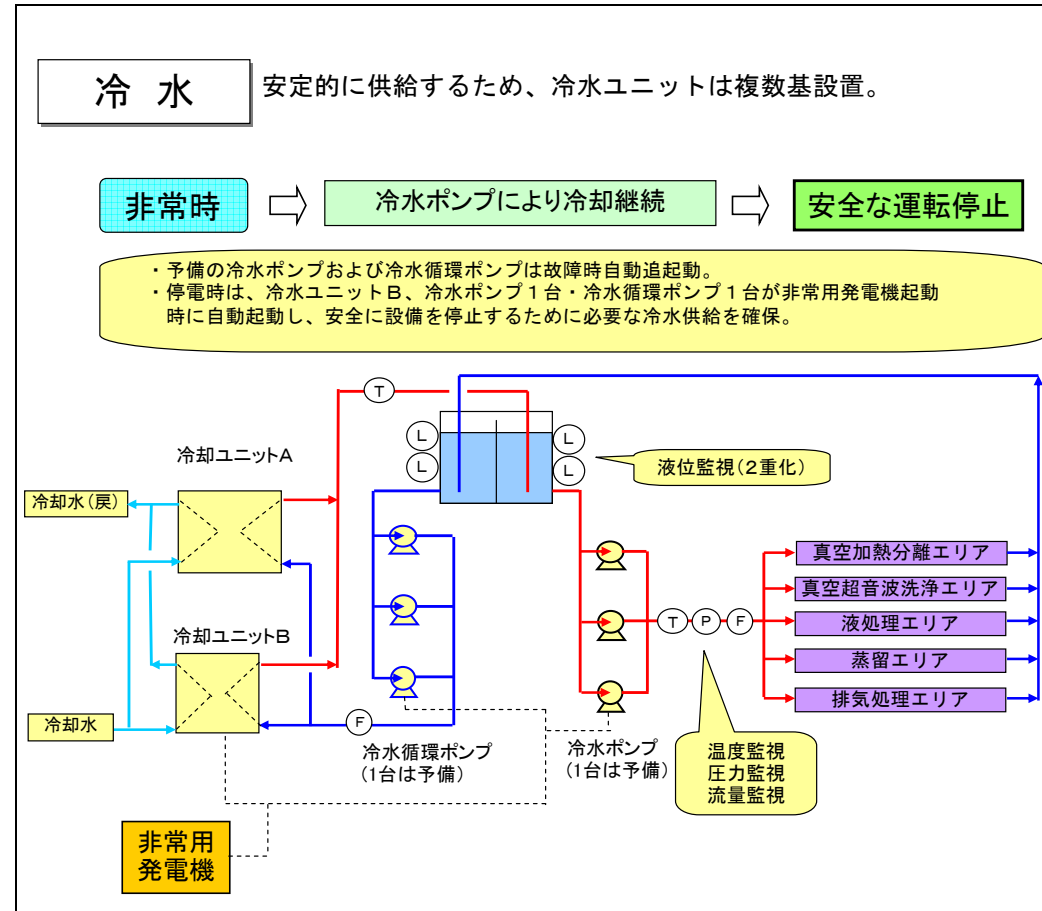
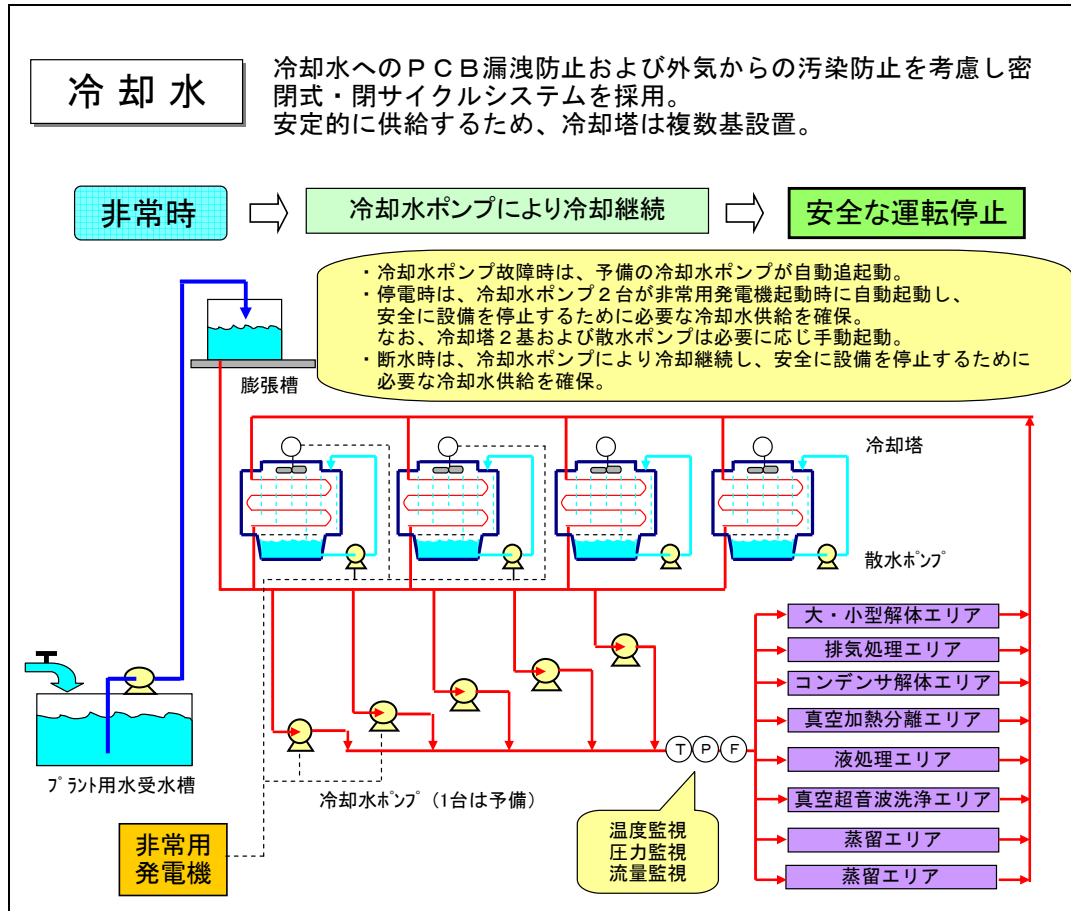
## 2. 排気処理機能の監視

- 見回り点検により、排気処理設備の正常な稼働を確認。
- 公定法による排気分析を定期的実施し、排気処理機能を確認。
- オンラインモニタリングにより中央制御室にて常時監視。

## 3. セーフティネット

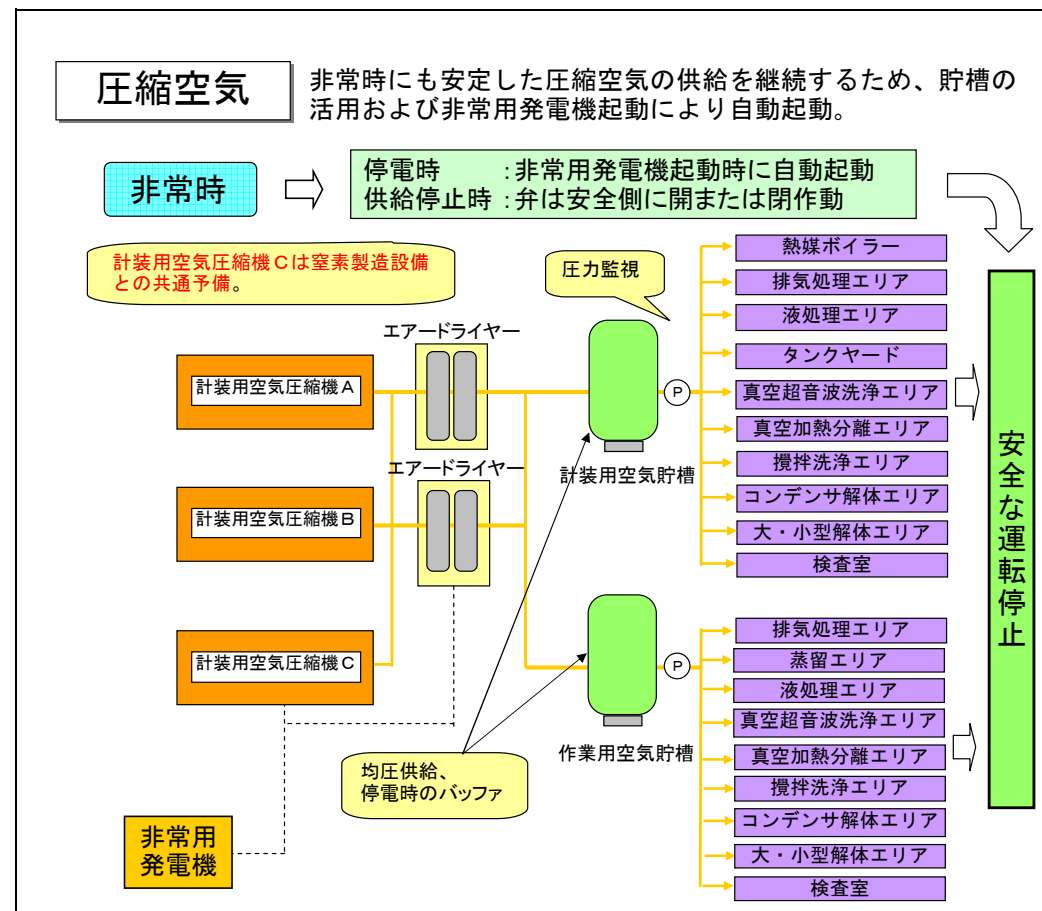
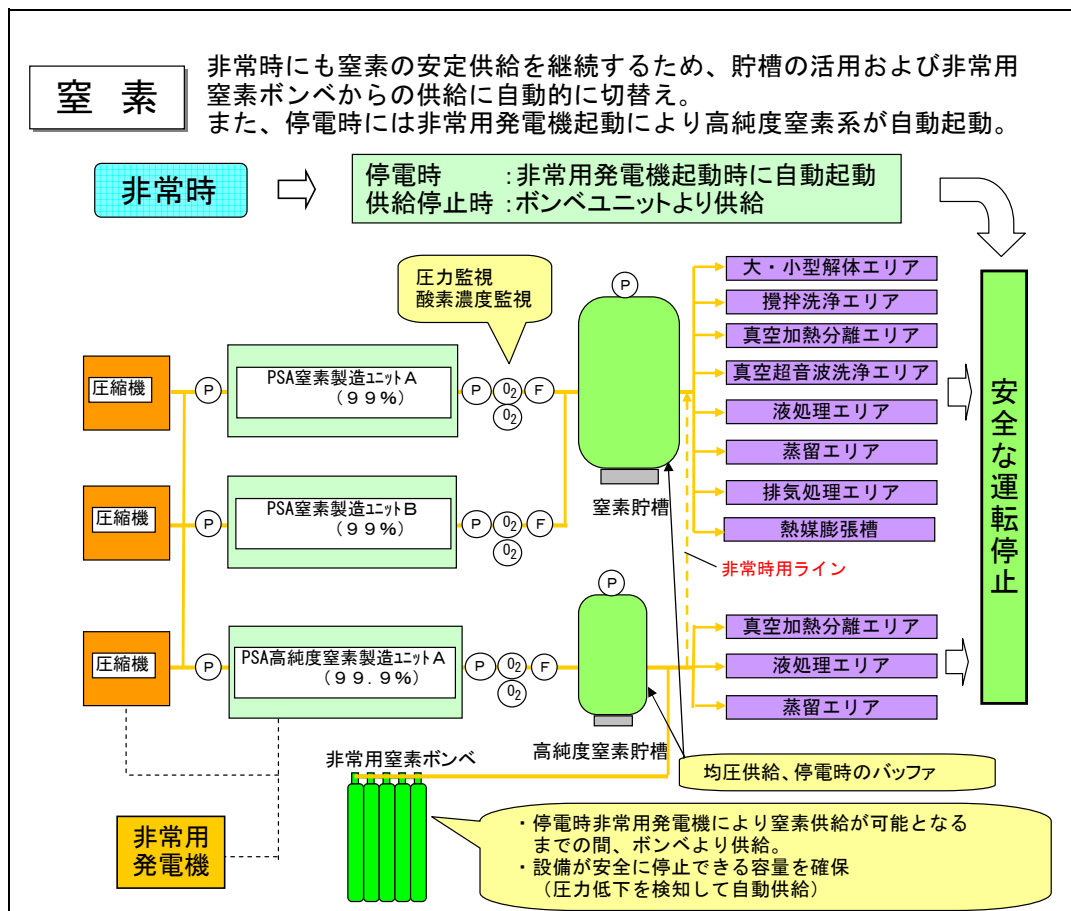
- 活性炭吸着塔  
排気処理(PCB除去)後、更に活性炭吸着塔を通して施設外へ排出。
- 负压管理  
各室は管理レベルに応じた负压管理を確実に実施しており、施設内の空気が未処理のまま外部に漏れることは無い。

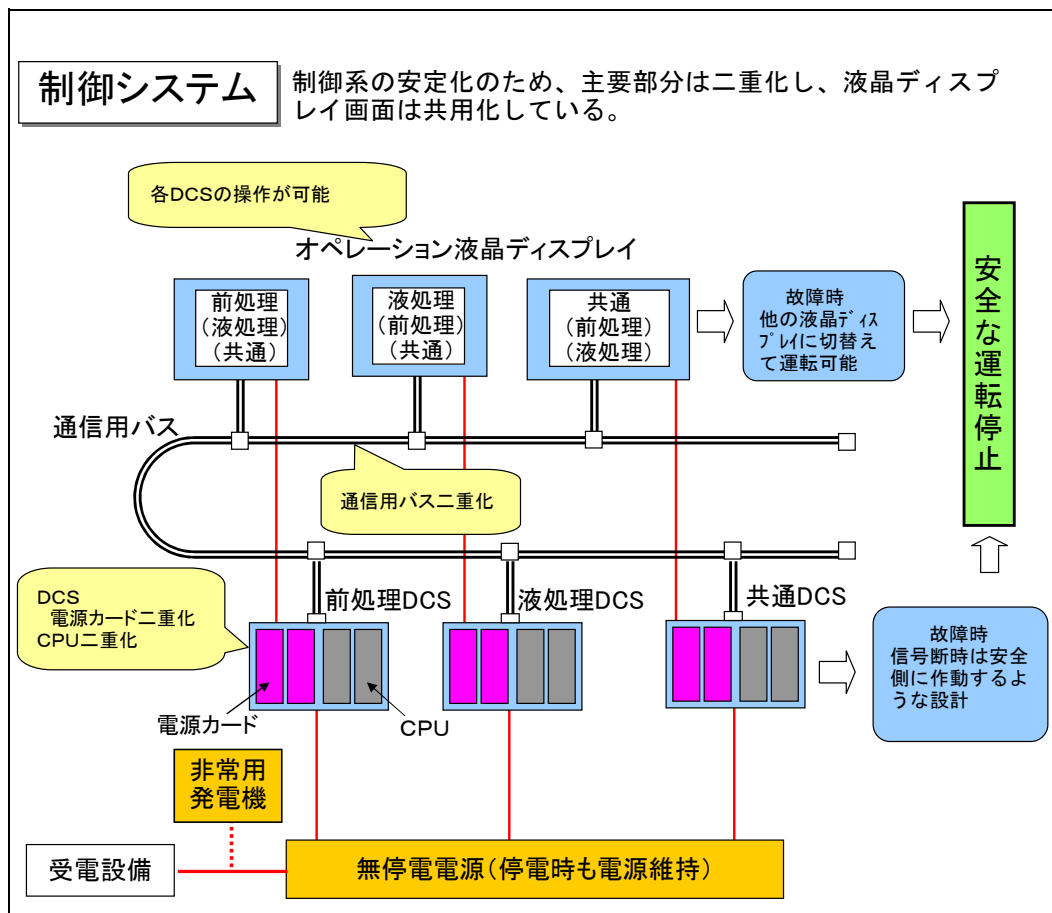
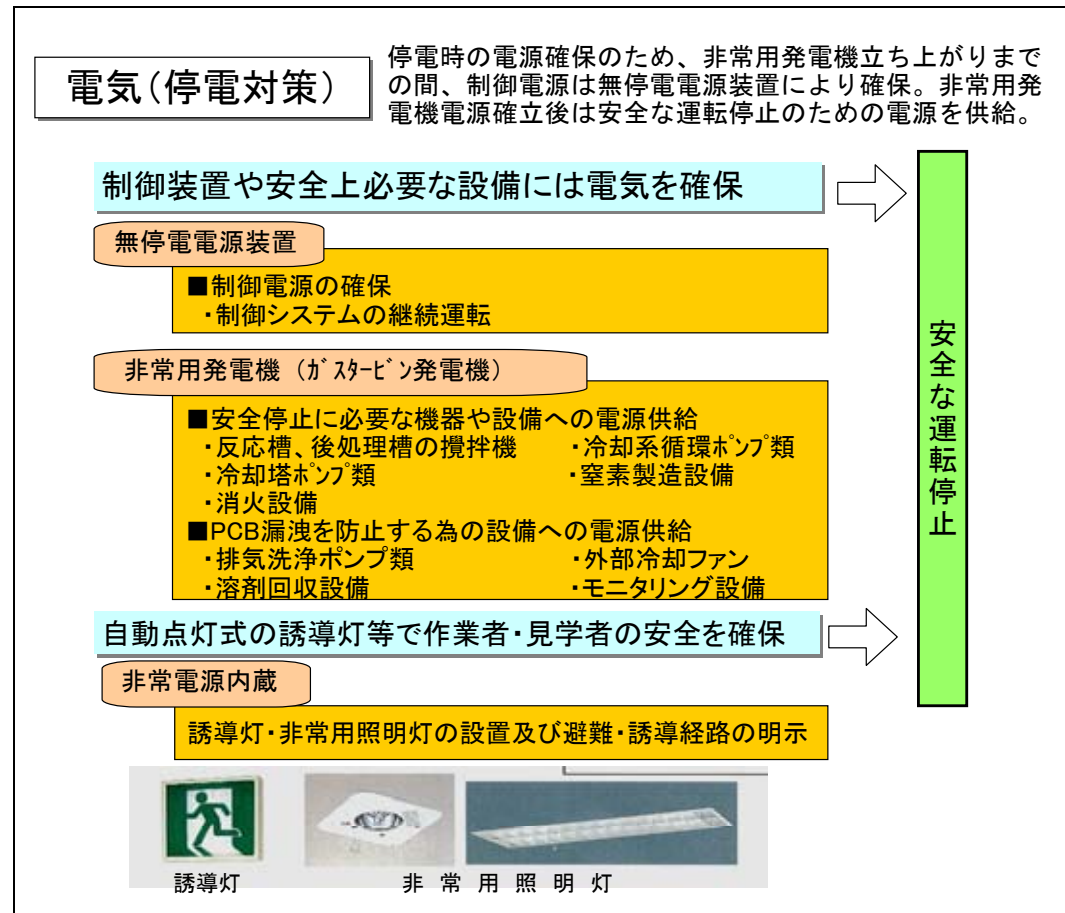
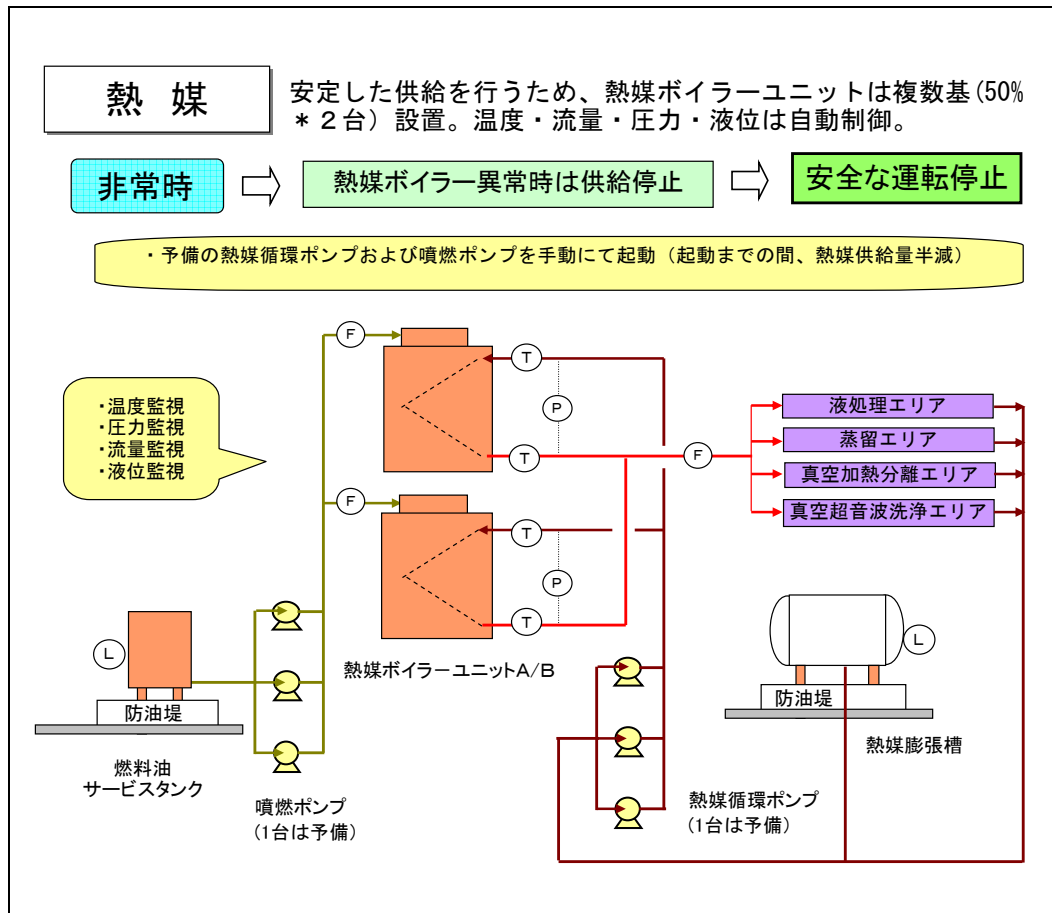
# 1.6 ユーティリティ設備の安定供給対策



凡例

(P) : 圧力計  
(T) : 温度計  
(F) : 流量計  
(O<sub>2</sub>) : 酸素濃度計  
(L) : 液面計





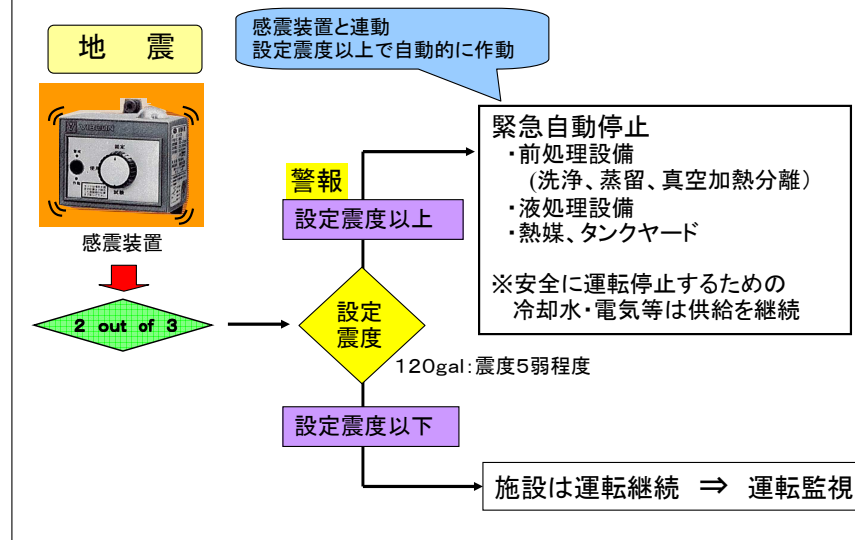
凡例

(P)	: 圧力計
(T)	: 温度計
(F)	: 流量計
(O <sub>2</sub> )	: 酸素濃度計
(L)	: 液面計

DCS : 分散型制御システム

# 1.7 自然災害に対する安全設計

## 地震対策



### 1. 耐震設計

基礎：液状化現象を考慮した基礎構造設計（岩盤支持）を採用。横揺れに対する水平力支持を杭に持たせるため、杭を太くし鉄筋を増量。

建屋構造：層せん断力係数は法定値（建築基準法施行令）を遵守。

### 2. 地震発生時の対応

- ① 設定震度以上の場合には感震装置により警報発生 ⇒ 緊急自動停止
- ② 設定震度以下でも震度の大小に関わらず、直ちに現場確認・安全確保実施。

地震防災規程等の整備：操作基準・点検基準、連絡・通報体制、対策組織体制

地震を想定した訓練の実施：緊急停止訓練、避難・誘導訓練

地域・関係組織との連携：公的機関・地域への連絡体制の構築と合同訓練の実施

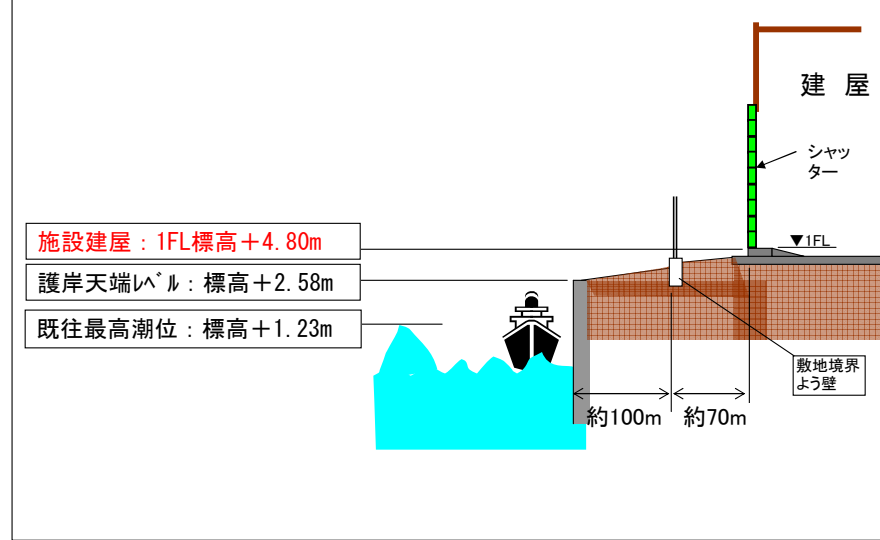
### 3. 参考データ 室蘭市山手町の地震発生実績

観測地点室蘭市山手町の1926年以降の震度別地震発生実績は下表の通り。小地震はあるものの、震度5を超える大きさの地震は1926年以降「ゼロ」。

震度	発生回数
1	367
2	102
3	31
4	6
5以上	0

出典：気象庁震度データベース

## 施設の浸水対策



### 1. 施設設計

施設の地盤面（敷地標準GL）は、標高+4.35mに設定。（過去の最高潮位より更に+3.12m高い位置）

室蘭開発建設部室蘭港湾建設事務所検潮所  
高極潮位（H. H. W. L.）+1.23m（昭和45年9月18日）

基準水面、観測基準面との関係は、

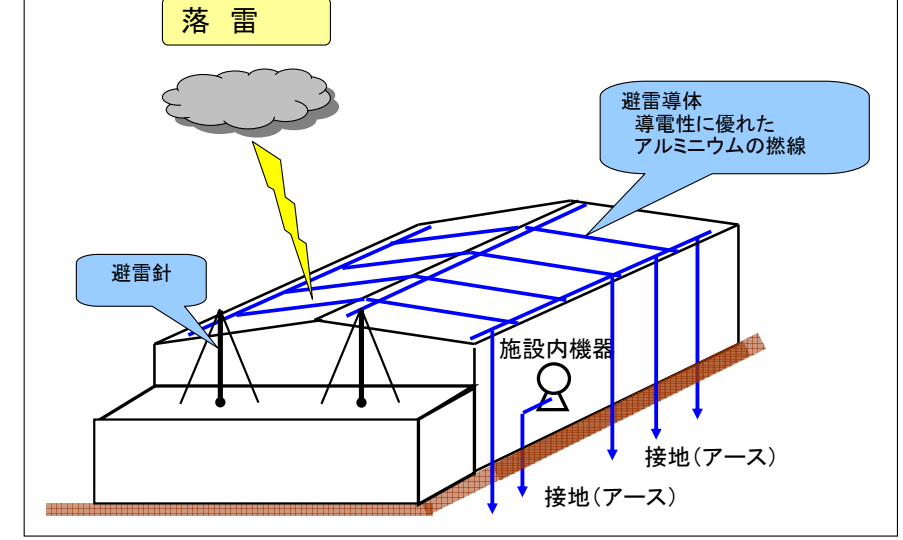


### 2. 暴風雨時等の対応

台風・津波・暴風雨の情報入手。（室蘭地方気象台）

状況に応じて入りロシャッターを閉めることにより雨水の浸入を防止

## 落雷対策



### 1. 施設設計

- ① 建屋：避雷導体及び避雷針を設置。
- ② 施設内機器：接地（アース）工事を実施。
- ③ 定期的（年1回程度）に接地抵抗を確認し、接地不良の発生を防止。（接地抵抗値はJIS A 4201に準拠）

### 2. 落雷時の対応

落雷 → 直ちに設備点検を実施、異常の有無確認。



# 1.8 火災に対する安全設計

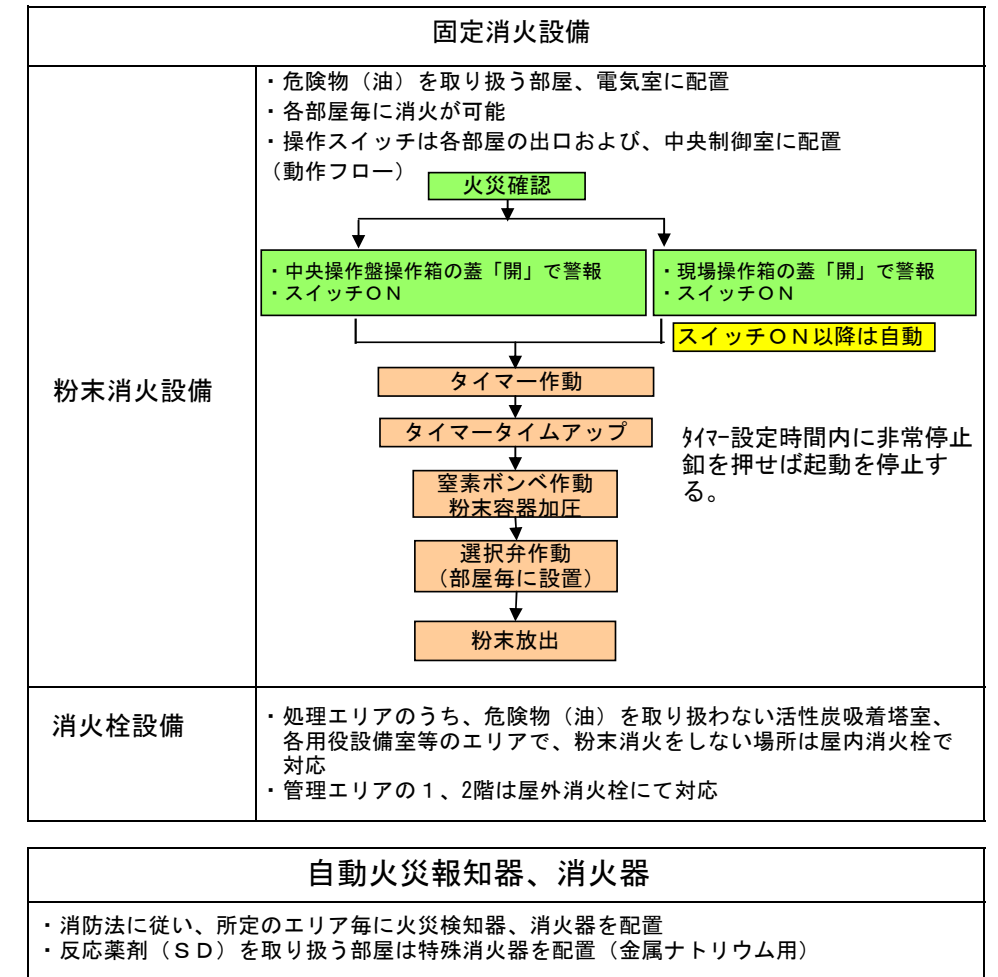
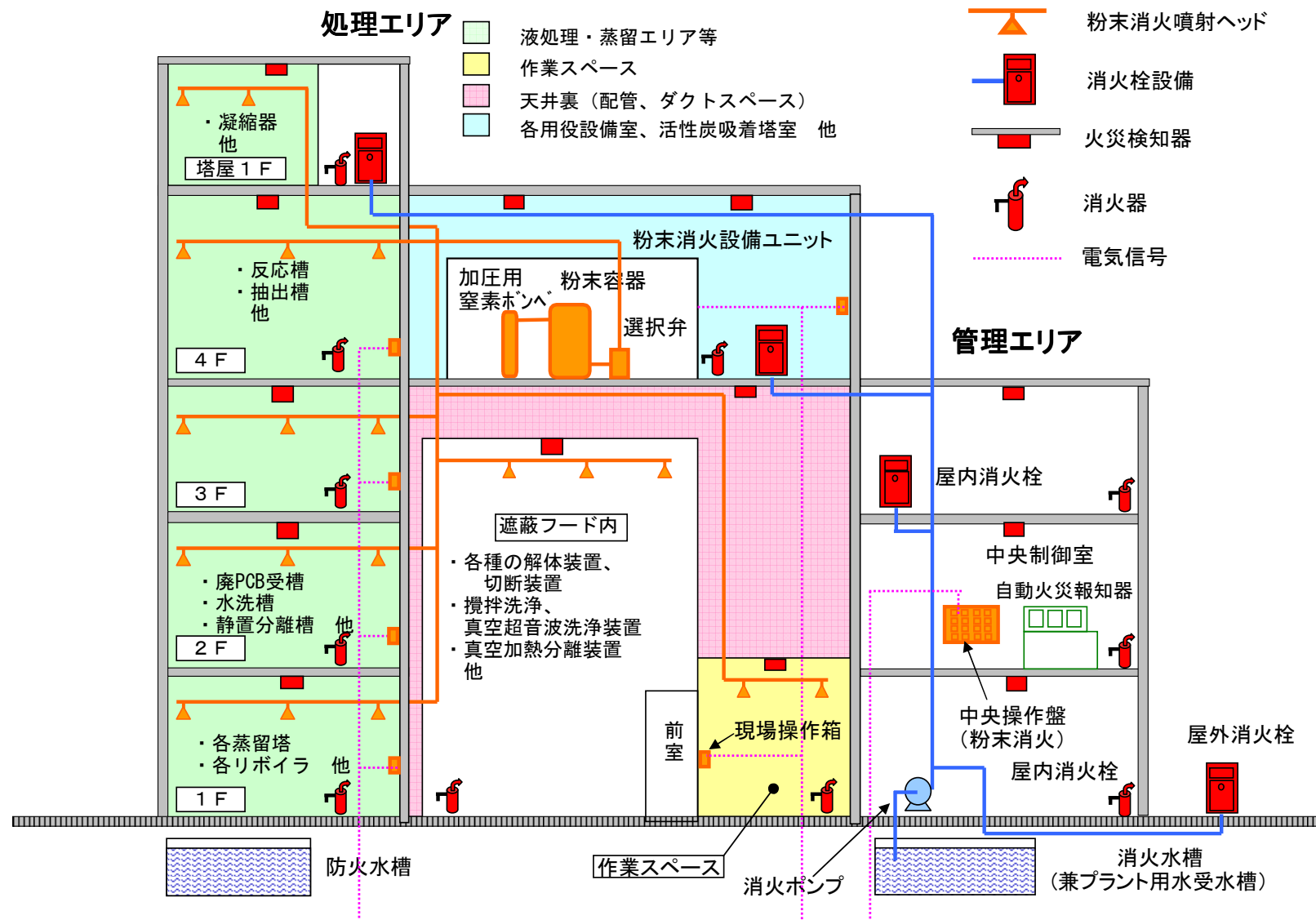
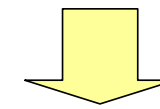
## 設備上の火災予防対策

施設を火災から守るため、以下のような設備対策を講じています。  
 なお、建屋の消防法上の取り扱いは、「危険物一般取扱所」であり、取扱対象危険物は第4類第3石油類および第4石油類です。

1. 建築物の構造 : 鉄骨準耐火構造。
2. 壁の仕様 : 石膏ボード、ALC板など不燃材料を使用。
3. 防火区画 : 施設内に防火区画を設定し防火壁で区切っている。
4. 電気設備 : 液処理エリア、SD室、真空加熱分離エリア、真空超音波洗浄エリア、蒸留エリアの電気機器は防爆仕様を採用。
5. 避雷設備 : 建屋には避雷導体、及び避雷針を設置。  
施設内機器には接地施工。
6. 警報設備 : 自動火災報知設備を設置。
7. 消火設備 : 粉末消火設備、消火栓設備を設置(各階の消火栓設備は、通路や階段室に設置)

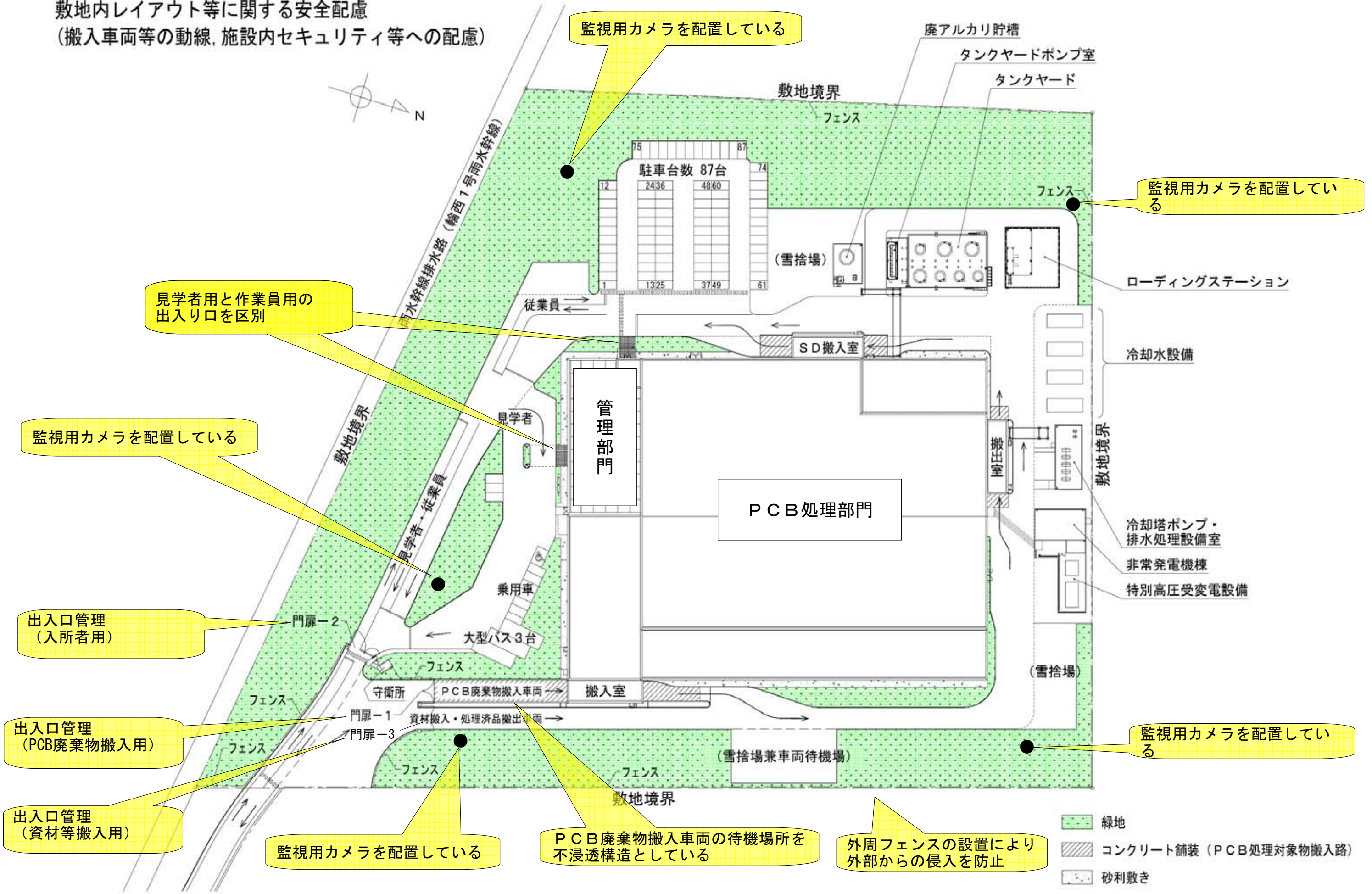
## 消火方法

1. PCB油を含む危険物の取扱部屋及び電気室 ⇒ **粉末消火**
2. 上記以外の部屋及び屋外 ⇒ **消火栓**



1.9

敷地内レイアウト等に関する安全配慮  
(搬入車両等の動線, 施設内セキュリティ等への配慮)





### 2.1 安全性評価実施概要

#### (1) 安全性評価手順

安全性の評価は、以下の手順で実施している。

##### ① 定性的リスク評価

プロセス設備について HAZOP を用いて不具合シナリオを抽出し、必要に応じて追加の安全対策を立案し、設計に反映した。用役設備については FMEA を実施して、設備の信頼性を評価した。また、受入・抜油・解体等の機械設備については、What-if を実施し、必要に応じて安全対策を立案し、設計に反映した。

##### ② 確率論的安全評価

HAZOP の結果、定量的な評価が必要とされた不具合シナリオについて、イベントツリー解析を実施することでリスクの発生頻度を算定し、必要に応じて追加の対策を立案し、設計に反映した。この結果、リスクの発生頻度の目標を達成していることを確認した。

本施設の確率論的安全評価は、設計基準事故として、2種類を対象に実施した。選定理由とあわせて以下に示す。

##### ・「PCB 漏洩」

本施設は、PCB を安全に処理する事を目的とした施設である。液体状あるいは気体状 PCB が建屋外へ漏洩した場合には、環境に対する影響が懸念されるため、本事象を定量評価の対象として選定する。

##### ・「火災・爆発」

本施設では、PCB を洗浄する目的で、可燃性の洗浄剤を使用している。また、PCB の無害化プロセスで水素が発生する。そのため、「火災・爆発」を定量評価の対象として選定する。

#### 用語説明

##### ◇ HAZOP (HAZard and OPerability study)

化学プラントを構成する一本のラインまたは機器に着目し、流量、温度といったプロセスパラメータの正常状態からのずれを想定し、そのずれの原因の洗い出しと、ずれが発生した時のプロセスへの影響や適切な安全対策がとられているかを検討する手法。

##### ◇ FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

システムを構成する機器に着目し、その機器に考えられる故障モードを取り上げ、その故障がシステムに及ぼす影響を解析する手法。

##### ◇ What-if

「もし…ならば」という質問を繰り返すことにより、設備面、運転面での潜在危険を洗い出し、それに対する安全対策を講じることによりシステムの安全化を図る手法。

##### ◇ イベントツリー解析 (Event Tree Analysis)

起因事象(引き金となる事象)が発生した時、対応の成功・失敗を考慮して事象の進展過程をツリー状に表現し、各々の成功・失敗の確率を使って事故に至る発生頻度を解析する手法。

#### (2) 定性的リスク評価

施設内の各設備について、定性的リスク評価を実施した結果、HAZOP シート約 830 枚、FMEA シート約 20 枚、What-if シート約 40 枚を作成した。

HAZOP では、不具合シナリオを抽出すると共に、「現状の安全対策」の有効性を確認し、必要に応じてより高い安全性を確保するための「追加の安全対策」を立案し、設計に反映した。

What-if では、機械設備がもつ潜在不具合シナリオについて、ハザード、安全、機能の各視点により分析を進め、現状の対策の是非と追加対策の要否を判定した。

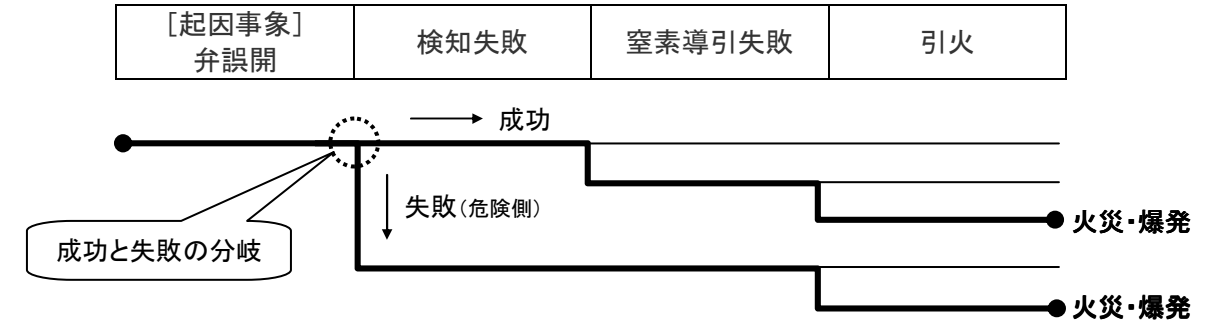
#### (3) 確率論的安全評価

(2)の結果より、先に識別した2種類の不具合シナリオについて、確率論的安全評価を実施した。各不具合シナリオについてイベントツリー解析を行うことにより、リスクの発生頻度を求めた。

##### ① イベントツリー作成

不具合シナリオに基づき、引き金となる事象と、その進展を抑制する緩和策や安全装置を識別し、イベントツリーを作成。

<イベントツリーの例: 弁誤開故障を引き金とする可燃性雰囲気への空気の流れによる火災・爆発>



##### ② リスクの発生頻度の定量化

イベントツリーの起因事象については、引き金となる機器故障の1年あたりの発生頻度を算定し、また、分岐確率については、事象進展を抑制する緩和策や安全装置の失敗確率を算定。起因事象の発生頻度と分岐確率をイベントツリーに代入することで、リスクの発生頻度を定量化。

#### (4) 安全性評価まとめ

本施設はフェイルセーフやセーフティネットに代表される基本的な安全設計に加え、諸種の安全対策や運用上のリスク軽減策を講ずることにより、定量的な安全評価の結果においても、十分な安全性を有しており、その結果、施設外へ比較的厳しい影響を及ぼしうる事象の発生頻度は、それぞれ以下の様に十分低いと評価された。

「PCB 漏洩」	$5.9 \times 10^{-7}$ 回/年
「火災・爆発」	$2.7 \times 10^{-7}$ 回/年

なお、英国安全衛生庁 (Health and Safety Executive) が発行している「Reducing risks, protecting people HSE's decision-making process」(2001)では、個人死亡リスクが  $1 \times 10^{-6}$  死亡/年・人 以下であれば「広く受容される領域」とされている。



## 2.2 安全評価結果まとめ(「PCB 漏洩」)

ハザード 種別	事故シナリオのタイプ	部位 [設備名]		起因事象発生頻度の 低減策 <sup>(注1)</sup>	事象進展の 回避・緩和策 <sup>(注1)</sup>	対策適用前の 発生頻度(回/年) <sup>(注2)</sup>	対策適用後の 発生頻度(回/年)
PCB 漏洩	移送停止失敗によるオーバーフロー  【代表シナリオ】 レベルセンサや遮断弁の故障で、PCB の移送が停止できず、液体状 PCB がベントラインを経由して建屋外へ漏洩する可能性がある。	1	小型トランス抜油装置	—	液位高(圧力高)のインターロック追加 $\langle 9.2 \times 10^{-6} \rangle$	$6.4 \times 10^{-5}$	$6.0 \times 10^{-10}$
		2	大型(車載)トランス抜油装置	—	液位高(圧力高)のインターロック追加 $\langle 3.4 \times 10^{-5} \rangle$	$2.6 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-9}$
		3	気液分離槽	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 3.4 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$ 、遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 1.4 \times 10^{-6} \rangle \rightarrow \langle 3.2 \times 10^{-10} \rangle$	—	$2.6 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-10}$
		4	攪拌洗浄槽用再利用液供給槽	—	液位高(圧力高)のインターロック追加 $\langle 3.1 \times 10^{-3} \rangle$	$1.0 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-10}$
		5	スクラバ油抽出槽	—	液位高(圧力高)のインターロック追加 $\langle 3.1 \times 10^{-3} \rangle$	$5.5 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-8}$
		6	回収スクラバ油受槽	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 3.9 \times 10^{-7} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$ 、遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 1.2 \times 10^{-4} \rangle \rightarrow \langle 8.8 \times 10^{-8} \rangle$	—	$4.0 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-12}$
		7	第一再生溶剤槽	—	—	$3.9 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
		8	排気処理工程 オイルスクラバ(第 3-1、3-2、3-3)	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 7.2 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$ 、遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 2.9 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 2.1 \times 10^{-4} \rangle$	—	$4.2 \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-9}$
		9	分離液溶剤抽出槽	遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 6.8 \times 10^{-2} \rangle \rightarrow \langle 1.1 \times 10^{-5} \rangle$	—	$2.9 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-9}$
		10	分離液受槽	タイマーを設置し抽出の所定時間を超えた場合には抽出停止信号 $\langle 6.4 \times 10^{-3} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$	—	$5.6 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-12}$
		11	混合槽薬剤計量槽	—	—	$4.0 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-8}$
		12	反応槽	供給弁を多重化 $\langle 5.6 \times 10^{-3} \rangle \rightarrow \langle 2.1 \times 10^{-8} \rangle$	液位検知によるベントラインの確保 $\langle 8.6 \times 10^{-2} \rangle$	$5.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-9}$
	PCB を含む流体が建屋内への流出し、 建屋外へ漏洩  【代表シナリオ】 洗浄槽へ洗浄溶剤の過剰供給により、PCB を含んだ内容液が蓋から建屋内に漏洩し、場合によっては建屋外へ漏洩する可能性がある。	13	大型(車載)トランス抜油装置	—	液位高(圧力高)のインターロック追加 $\langle 3.4 \times 10^{-5} \rangle$	$2.6 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-11}$
		14	解体前洗浄槽	遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 2.0 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 6.2 \times 10^{-9} \rangle$	防油堤の設置	$2.0 \times 10^{-5}$	$8.7 \times 10^{-10}$
		15	特殊品解体装置	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 8.2 \times 10^{-3} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$	防油堤の設置	$8.3 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-8}$
		16	超音波洗浄槽(第1~3洗浄槽)	供給ポンプ停止ロジックを追加 $\langle 4.0 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 1.7 \times 10^{-5} \rangle$	防油堤の設置、レベルスイッチを追設 $\langle 7.4 \times 10^{-4} \rangle$	$4.1 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-8}$
		17	攪拌洗浄槽	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 4.6 \times 10^{-3} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$ 、供給ポンプ停止ロジックを追加 $\langle 2.5 \rangle \rightarrow \langle 1.1 \times 10^{-4} \rangle$	防油堤の設置	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-8}$
		18	真空加熱炉	—	防油堤の設置	$6.5 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-8}$
	気体状 PCB 捕集能力低下  【代表シナリオ】 排気処理設備のオイルスクラバポンプ故障により、スクラバによる気体状 PCB の捕集能力が低下し、建屋外へ漏洩する可能性がある。	19	排気処理工程 オイルスクラバ(第1、第2)	タイマーを設置し移送の所定時間を超えた場合には供給停止信号 $\langle 3.6 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 0.0 \rangle$ 、遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性確認 $\langle 1.4 \times 10^{-1} \rangle \rightarrow \langle 1.0 \times 10^{-4} \rangle$	防油堤の設置、レベルスイッチを追設 $\langle 7.4 \times 10^{-4} \rangle$	$3.6 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-13}$
		20	排気処理工程 第2 オイルスクラバ	—	オンライン PCB モニタ 活性炭吸着槽 <sup>(注3)</sup>	$2.9 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-9}$
		21	排気処理工程 第3-1 オイルスクラバ	—	オンライン PCB モニタ 活性炭吸着槽 <sup>(注3)</sup>	$2.9 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-9}$
		22	排気処理工程 第3-2 オイルスクラバ	—	オンライン PCB モニタ 活性炭吸着槽 <sup>(注3)</sup>	$2.9 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-9}$
	23	排気処理工程 第3-3 オイルスクラバ	—	オンライン PCB モニタ 活性炭吸着槽 <sup>(注3)</sup>	$2.9 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-9}$	
合 計						$6.8 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-7}$

(注1): 網掛けは今回の解析結果に基づき改善した対策である。<>は網掛けの対策によるリスクの発生頻度の低減効果である。

対策による起因事象の発生頻度の低減は、<対策適用前の発生頻度> $\rightarrow$ <対策適用後の発生頻度>の形で表す。

但し、起因事象については、センサの故障とアクチュエータ(弁等)の故障の2つのタイプを考慮している。

(注2): 対策適用前の発生頻度は、網掛けした対策を講じない場合の発生頻度を表す。

(注3): 活性炭吸着に関しては、十分に安全側の失敗確率(1/100)を仮定している。

(注4): フローの変更に伴い、不具合シナリオそのものが消滅しています。

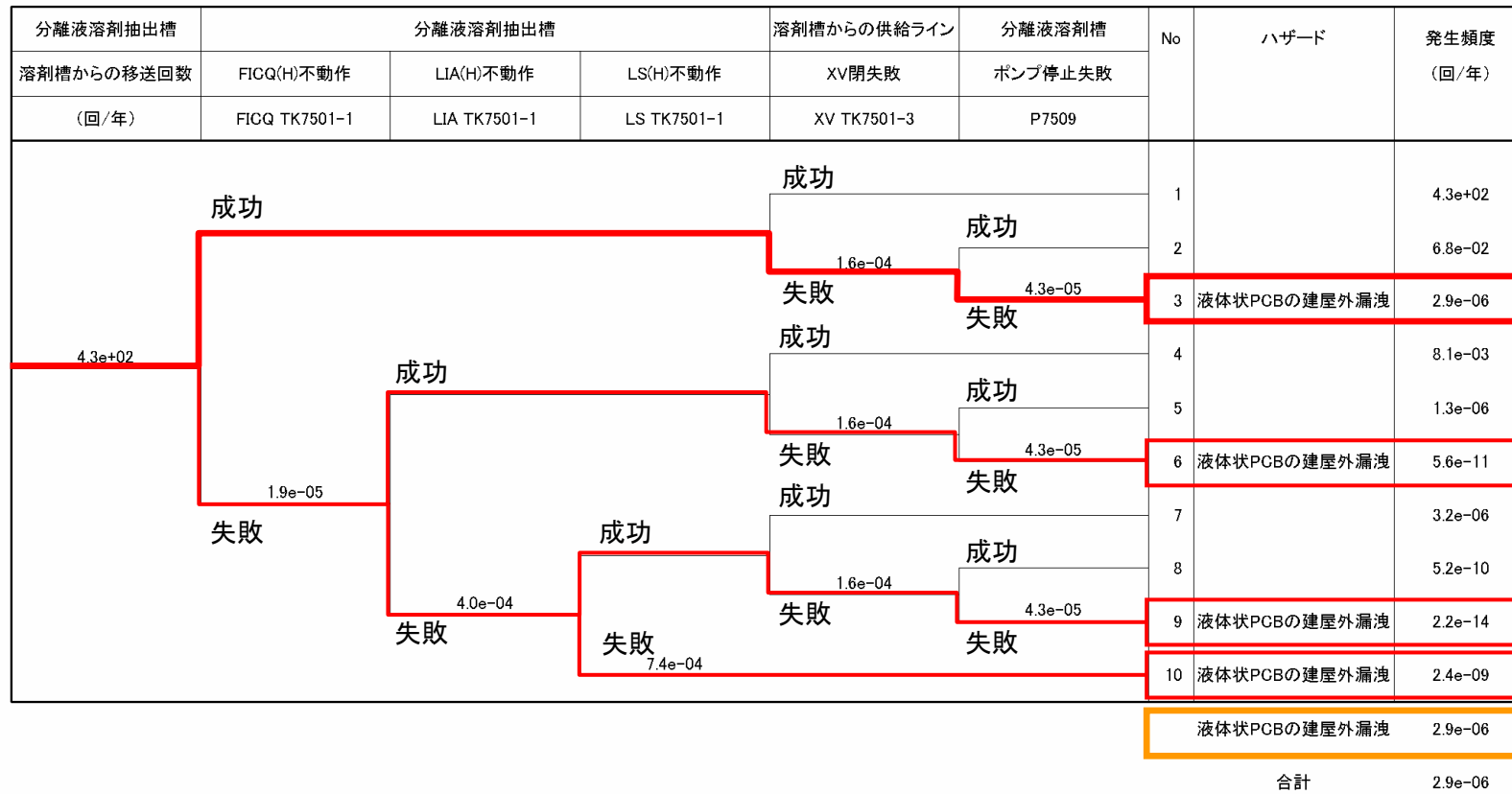
## 2.3 安全評価結果まとめ(「火災・爆発」)

ハザード 種別	事故シナリオのタイプ	部位 [設備名]		起因事象発生頻度の 低減策 <sup>(注1)</sup>	事象進展の 回避・緩和策 <sup>(注1)</sup>	対策適用前の 発生頻度(回/年) <sup>(注2)</sup>		対策適用後の 発生頻度(回/年)	
火災・ 爆発	可燃性雰囲気への空気流入(水素を除く) 【代表シナリオ】 弁誤開故障により槽内へ空気が流入すると溶剤との混合気が形成され、これに引火すると火災に至る可能性がある。	24	減圧乾燥槽 (ベーパーライン弁誤開)	—	接地、圧力高による N2 の緊急導引 $<1.4 \times 10^{-5}>$	$3.4 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-12}$	$1.4 \times 10^{-7}$
		25	減圧乾燥槽 (排気ライン自動弁誤開)	—	接地、圧力高による N2 の緊急導引 $<1.4 \times 10^{-5}>$	$2.6 \times 10^{-6}$		$3.8 \times 10^{-11}$	
		26	真空加熱炉 (オイル冷却ポンプ故障)	—	接地	$1.1 \times 10^{-7}$		$1.1 \times 10^{-7}$	
		27	真空加熱炉 (油回転ポンプ故障)	—	接地、圧力増加による真空ラインの遮断 $<7.0 \times 10^{-7}>$	$2.4 \times 10^{-8}$		$2.4 \times 10^{-8}$	
		28	廃 PCB 受槽	—	接地	$1.1 \times 10^{-9}$		$1.1 \times 10^{-9}$	
		29	溶剤回収塔(処理済油分析待槽)	冷却水流量調節弁の最小開度制限 $<1.6 \times 10^{-1}> \rightarrow <2.1 \times 10^{-4}>$	—	$3.1 \times 10^{-8}$		$2.2 \times 10^{-11}$	
	可燃性物質の大気への流出 【代表シナリオ】 炉圧制御失敗により、溶剤のベーパーを含む内部ガスが炉外にリークし、これが発火する可能性がある。	30	乾燥用溶剤加熱器	—	熱媒ライン遮断弁の健全性をバッチ毎に確認 $<3.0 \times 10^{-4}>$	$6.1 \times 10^{-7}$	$9.7 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-7}$
		31	超音波洗浄用再利用液供給槽 (超音波洗浄槽)	—	—	$8.9 \times 10^{-12}$		$8.9 \times 10^{-12}$	
		32	真空加熱炉	—	圧力スイッチを追加 $<4.8 \times 10^{-6}>$	$9.5 \times 10^{-4}$		$5.0 \times 10^{-9}$	
		33	第一(第二)再生溶剤クーラー	冷却水流量調節弁の最小開度制限 $<3.2 \times 10^{-1}> \rightarrow <4.4 \times 10^{-4}>$	—	$2.2 \times 10^{-5}$		$1.5 \times 10^{-8}$	
		34	IPA 受槽	積算流量計の健全性をバッチ毎に確認 $<3.0> \rightarrow <8.0 \times 10^{-3}>$	レベルスイッチを多重化 $<7.4 \times 10^{-4}>$	$9.1 \times 10^{-7}$		$2.9 \times 10^{-9}$	
	水素雰囲気への空気流入 【代表シナリオ】 槽内への N2 供給失敗により、払出し時に排気ラインから外気を吸い込み、爆鳴気を形成し、火災に至る可能性がある。	35	用役設備 ボイラ	—	安全弁追設置 $<2.1 \times 10^{-4}>$	$2.8 \times 10^{-7}$	$8.3 \times 10^{-8}$		
		36	反応槽	—	接地、シールポット、圧力低による N2 の緊急導引 $<4.3 \times 10^{-2}>$ 、圧力低による払出し停止 $<1.1 \times 10^{-1}>$	$4.8 \times 10^{-3}$	$7.0 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-8}$
37	抽出槽	—	接地、シールポット、圧力低による N2 の緊急導引 $<4.3 \times 10^{-2}>$ 、圧力低による払出し停止 $<1.1 \times 10^{-1}>$	$2.2 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-9}$				
(注1): 網掛けは今回の解析結果に基づき改善した対策である。<>は網掛けの対策によるリスクの発生頻度の低減効果である。 対策による起因事象の発生頻度の低減は、<対策適用前の発生頻度> $\rightarrow$ <対策適用後の発生頻度>の形で表す。 (注2): 対策適用前の発生頻度は、網掛けした対策を講じない場合の発生頻度を表す。						合計	$8.0 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-7}$	

## 2.4 安全評価結果まとめ(イベントツリーの例)

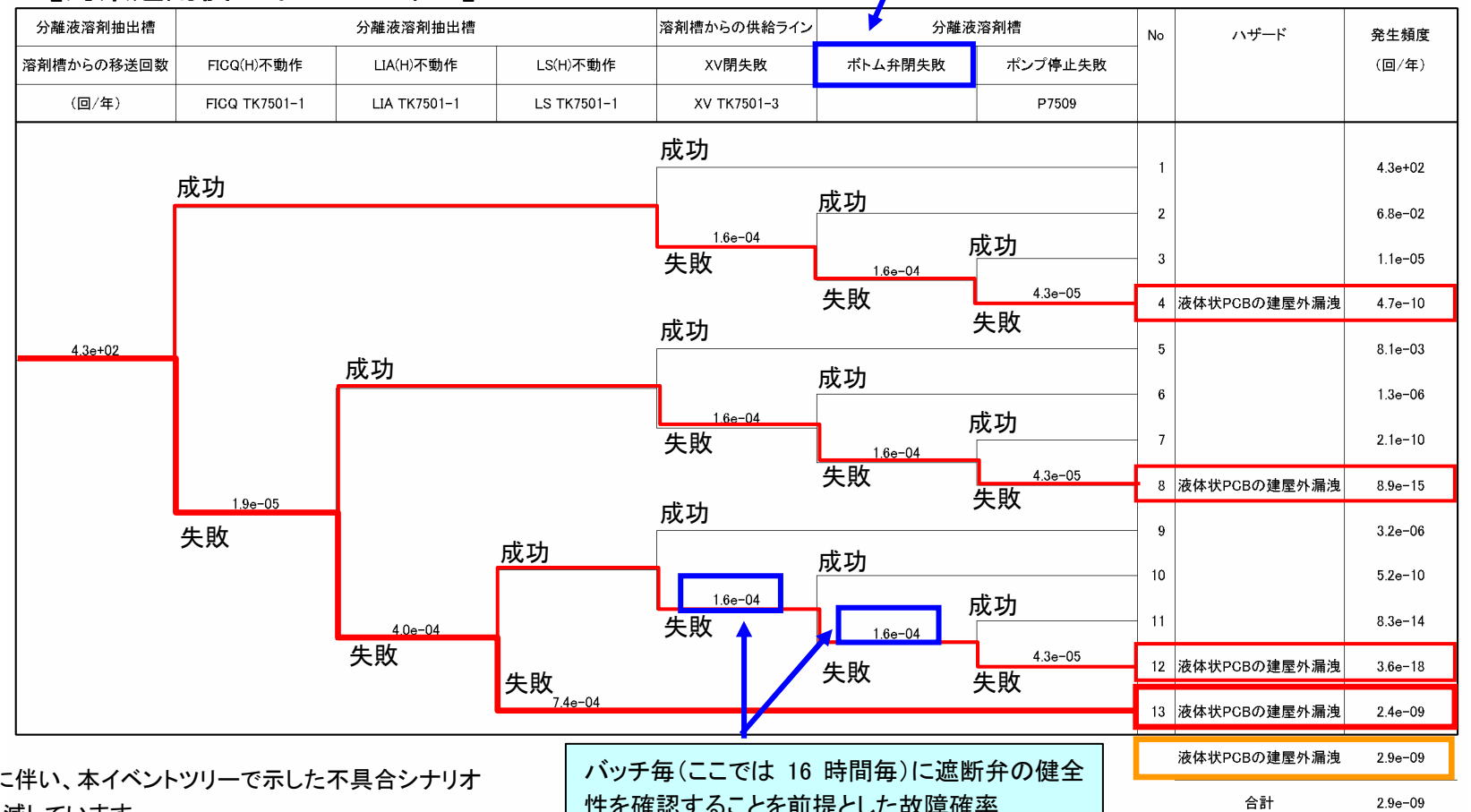
(注) PCB 漏洩「No.9」(分離液溶剤抽出槽 [液処理])のイベントツリー

### 【対策適用前のイベントツリー】



既存の遮断弁と別のタイプ(共通原因故障を考慮しなくてもよい)遮断弁を追加

### 【対策適用後のイベントツリー】



安全対策の強化

遮断弁を追加し、バッチ毎に健全性を確認する

(注) フローの変更に伴い、本イベントツリーで示した不具合シナリオそのものが消滅しています。

バッチ毎(ここでは 16 時間毎)に遮断弁の健全性を確認することを前提とした故障確率

### 3. 安全解析結果の設計への反映事例

危険事象	設備名	不具合シナリオ	リスク軽減策
PCB漏洩	前処理	洗浄槽の減圧操作を行う際に、ドレンポットの隔離に失敗すると、ドレンポットが減圧され負圧破損し、PCBを含んだ洗浄溶剤が建屋内へ流出する可能性がある。	・ドレンポットを真空仕様として、負圧破損によるPCBの漏洩を防止した。
		真空加熱オイルスクラバの不具合により、真空加熱炉で分離されたPCBが捕集できないと、建屋外へ漏洩する可能性がある。	・スクラバ排気ラインを第3-1オイルスクラバの上流側に接続し、第3-1排気処理設備でPCBを捕集できる構成とした。
	前処理および液処理	レベルセンサや遮断弁の故障で、PCBの移送が停止できないと、液体状PCBがベントラインを経由して建屋外へ漏洩する可能性がある。	・レベルスイッチの追設により異常監視の信頼性を向上させた。 ・圧力センサにより液位異常を検知し、移送を停止させるインターロックを追加した。 ・タイマーを設置し、移送の所定時間を超えた場合には遮断弁を閉止するインターロックを追加した。 ・遮断弁の追設やポンプ停止のインターロックを追加し、より確実な移送停止を図った。
	液処理	レベルセンサや供給ライン弁の故障により、反応槽シールポットへのスクラバ油の供給が停止できないと、PCBを含む処理油が反応槽経由でオーバーフローし、ベントラインを経由して建屋外へ漏洩する可能性がある。	・反応操作時のスクラバ油補給を禁止とした。 ・スクラバ油供給ラインの自動弁を直列2重化することで、信頼性向上を図った。 ・移送ラインにオリフィスを挿入し、流速を抑制することで、安全確保のための余裕時間を得た。
		オイルスクラバから廃PCB受槽へのスクラバ油の抽出量過少により、新しいスクラバ油の補充が行われず、スクラバ油に含まれるPCB濃度が上昇し、オイルスクラバによるPCB捕集効率が低下し、気体状PCBが建屋外へ漏洩する可能性がある。	・スクラバ油の交換を確実に図るため、オイルスクラバのレベルをトレンド監視することとした。
		分離水を過剰に抜き出すと、PCBを含む分離水が分離水受槽をオーバーフローし、ベントラインを経由して建屋外へ漏洩する可能性がある。	・分離水の抽出時間を設定し、所定時間を超えた場合には、抽出弁閉止および抽出ポンプを停止させることにより、分離水の過剰抽出を抑制した。
火災・爆発	前処理	処理ドラムの保温用のヒーターが直接加熱方式であるため、ドラム油に引火点の低い液体が混入していた場合、引火の可能性がある。	・ヒーターの形式を間接加熱方式(外面ヒーター)に変更することで、引火点以上に加熱されることを防止した。
		洗浄槽の温度センサ故障により、洗浄溶剤が引火点を超え、ワーク搬出の際、空気と混合すると、可燃性混合気が形成され、火災に至る可能性がある。	・ワーク搬出に際しては、クーラーで常に一定時間冷却することで洗浄溶剤を引火点以下に引き下げ、火災の発生を防止した。
		熱媒システムの不具合で乾燥用溶剤加熱器が過熱破損すると、流出した溶剤が発火する可能性がある。	・熱媒循環ラインの遮断弁をバッチ毎に開閉確認することで、不具合時の熱媒停止の信頼性を向上させた。
		真空加熱炉で加熱分離操作後の復圧時に窒素を過剰に供給すると、炉内の雰囲気気が炉外へ流出し、発火する可能性がある。	・真空加熱炉に圧力スイッチを追設し、圧力高で窒素供給ライン弁を閉止、かつ、真空加熱オイルスクラバの入口弁を開放することで、炉内の圧力上昇をより確実に抑制した。
		副反応槽から水素を含んだ排気が第3-1排気系統へ流出すると、爆鳴気を形成し、火災に至る可能性がある。	・副反応槽からの排気を水素の流入を許容する第3-2排気系統へ変更することで、火災の発生を防止した。
	液処理	水和水槽から抽出槽へのライン弁の誤開等により、抽出槽からナトリウムを含んだ処理済液が水和水槽へ逆流すると、水和水槽において、ナトリウムと水が反応し、火災に至る可能性がある。	・水和水槽を抽出槽と同程度の高さに、1バッチ分の水和水を受入れる槽を設置し、抽出槽からの逆流防止を図った。
		反応槽からの処理済油抽出時に窒素の供給に失敗すると、反応槽の圧力が低下し、排気処理設備経由で空気を引込むことで、反応槽内の水素と爆鳴気を形成し、火災に至る可能性がある。	・反応槽の圧力低による反応槽ポンプ停止、および、槽内の窒素置換により、爆鳴気形成を抑制した。

ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会事務局  
〒105-0014

東京都港区芝1丁目7番17号 住友不動産芝ビル3号館  
日本環境安全事業株式会社 事業部 安全・技術開発課

TEL:03-5765-1930 FAX:03-5765-1940

<http://www.jesconet.co.jp>