

第 4 章 プロセス安全性評価 (第 4 段階)

危険度ランク I のブロックに対しては、HAZOP、FMEA、FTA のいずれか、あるいはこれらと同等以上の手法でプロセス安全性評価を実施し、安全対策を確認する。ここでいう、同等以上の手法とは、HAZOP や FMEA と同等の系統性および網羅性を備えた解析手法であるものである。例題では、図 3.4.1 の P&ID で示したアセチレン水添装置について、HAZOP および FMEA を行う。また、アセチレン水添装置における異常反応による事故が発生する事象について、FTA を行った例を示す。

危険度ランク II のブロックの安全性評価は、What-if あるいはこれと同等以上の手法で実施する。例題では、ランクは II ではないが、アセチレン水添装置に対して What-if を適用した事例を紹介する。

危険度ランク III のブロックの安全性評価では、第 2 段階の定性的評価で基本的な安全対策がなされていることを確認し、プロセス特性を考慮した簡便な方法で安全対策を再確認する。

例題 1 アセチレン水添装置の HAZOP ワークシート

例題 2 アセチレン水添装置の FMEA ワークシート

例題 3 アセチレン水添装置の FTA (図 3.4.2)

例題 4 アセチレン水添装置の What-if ワークシート

例題 5 危険度ランク III の安全性評価ワークシート

注記 (出典) :

図 3.4.1 のアセチレン水添装置の P&ID は、岡山県保安・防災研究会、水島地区保安・防災協議会で研究され、「保安・防災モデルに関する調査報告書 - II」として発表された中から転載させていただいたものである。

1.1 HAZOP

ここでは、アセチレン水添装置のブロックが危険度ランク I であると仮定して、HAZOP を用いてプロセス安全性評価を行う。

1.1.1 プロセス概要の確認

解析に先立って、P&ID に沿って次のようなプロセスの概要を確認する。

【プロセスの概要】

ナフサ分解炉ガスを蒸留分離した後の C 2 留分中に含まれる 0.5~1.0% 程度のアセチレンを水添反応によりエチレン製品中で 10ppm 以下におさえるためのプロセスがこのアセチレン水添反応プロセスである。

この反応プロセスは発熱反応であるため、安全上運転には十分な注意が必要である。

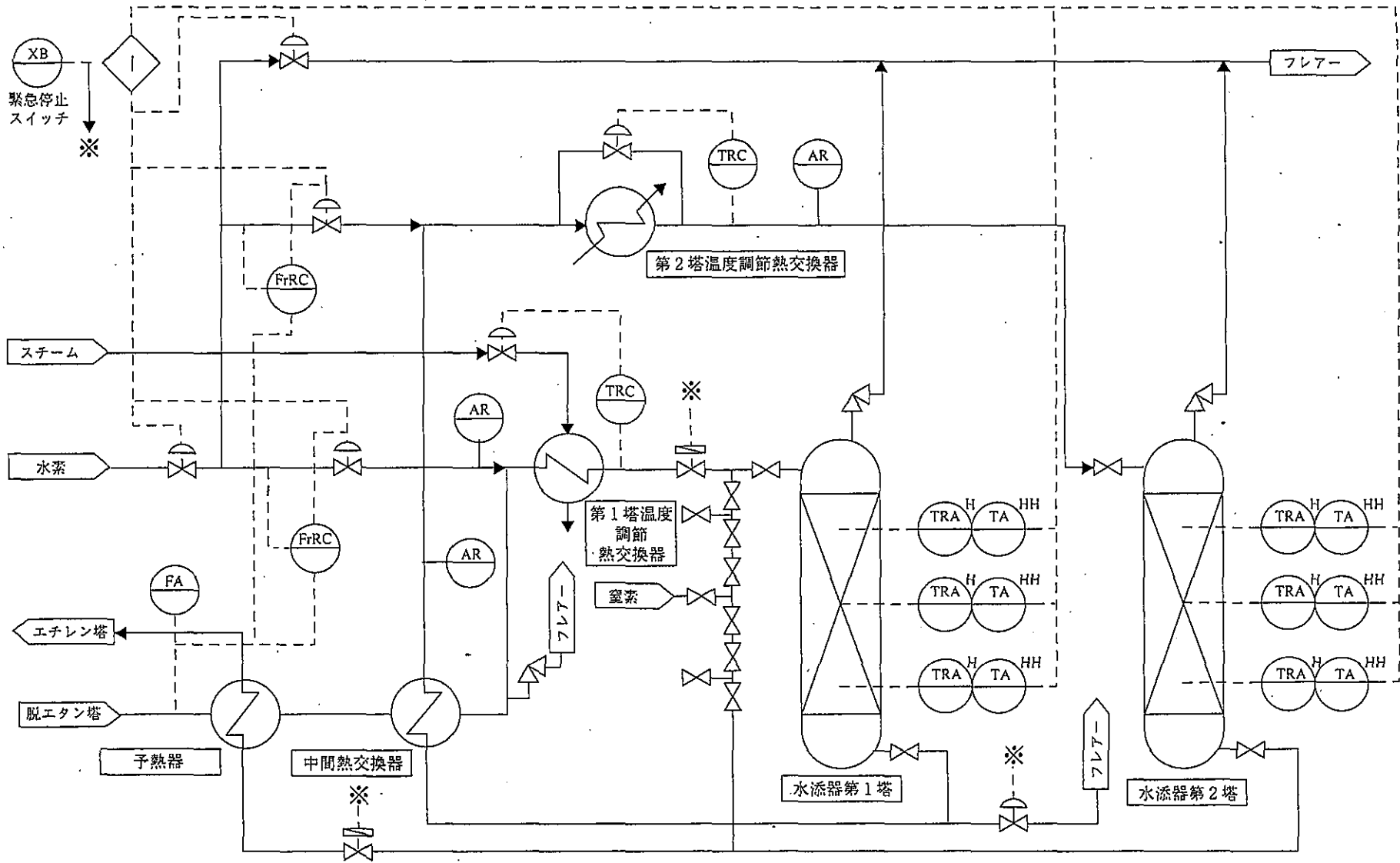


図3.4.1 アセチレン水添装置フローシート (P&IDとして使用)

第3編 アセスメントの進め方の具体例

石油化学工場の基幹プラントの主要製品であるエチレンのスペックの中で最も重要なアセチレン濃度は、水添反応プロセスの運転により決まるため、これはエチレンプラントの中心となるプロセスであり、その面からも安定運転が強く望まれることになる。このプロセスのフローシートを図3.4.1に示す。

このプロセスは固定床の反応器3基（2基のシリーズ運転+1基の予備）と温度調節用の熱交換器類からなる。反応器の運転条件は、温度50~150℃、圧力2.45MPaGである。反応率の向上を図るため、水素は2段階に分けてフィードされる。

発熱反応に対する安全装置としては、反応器触媒層温度上昇により水素導入を緊急シャ断するインターロック機構と、計器室からワンタッチ反応器の出入り口緊急シャ断と緊急脱圧ができるシステムを持っている。また、温度測定装置については、信頼性向上のため、反応器触媒層の各層の温度計をダブルエレメント化している。

1.1.2 HAZOPの実施

例題1のアセチレン水添装置のHAZOPワークシートに沿って、次に解説する。

(イ) ステップ1：解析対象範囲の設定

危険度ランクIのブロック、すなわちアセチレン水添工程をHAZOPの対象とする。

(ロ) ステップ2：スタディ・ノードの分割

P&IDに示されている主要な機器、プロセスラインをプロセス条件ならびにシステムの機能を考慮して解析対象区分に分割する。

例題では、主要な塔槽類すなわち水添器に着目して、水添器第1・2塔ならびに水添器に連結する複数のラインおよび熱交換器をまとめて1つのスタディ・ノードとし、ノード番号を1とした。

ノードの分割は、このようにある設備範囲としているが、解析においては見落としを防ぐために、ラインまたは機器ごとに追っていくやり方になる。その際、P&ID上の、解析しようとしている対象の部分にマーカーで色を塗って、HAZOPに参加している全員が一目で理解できるようにするとよい。そして、その対象部分についての解析を終了した時点で、別の色のマーカーで着色する。これにより別の色に変わるので、次の対象部分の解析に移った時に混乱しないで済む。このようにして、全ての部分の解析が終了したとき、P&ID上は全て塗りつぶされていることになる。

(ハ) ステップ3：解析対象ノードの選定とずれの想定

分割されたスタディ・ノードの一つを解析対象のノードとし、ずれを想定する。

例題では、次のように進めた。

- 1) まず、プロセスパラメータの中から「流れ」について解析することとした。
- 2) 解析上、原料ラインをP&IDのうえでの脱エタン塔から水添器第1塔入口までと定義した。
- 3) 解析対象の原料ラインおよび熱交換器（予熱器、中間熱交換器、第1塔温度調節熱

交換器)を黄色のマーカーで塗った。

- 4) ここで、ガイドワード「無し」を、パラメータ「流量」と組み合わせて、ずれ「流れ無し」が、この対象部分に起こり得るかどうかを議論した。

(ニ) ステップ4：ずれの原因の洗い出し

HAZOP チームの中から、ずれ「流れ無し」の発生原因として、次の候補が示された。

- ・水添器第1塔入口にあるしゃ断弁の誤動作による閉止
- ・水添器第1塔入口にある手動弁の誤操作（開け忘れ）による閉止
- ・脱エタン塔停止

(ホ) ステップ5：システムへの影響検討

ステップ4で想定されたそれぞれの原因によるずれが発生した場合に、システムに起こり得る影響を一つずつ検討する。

「水添器第1塔入口にあるしゃ断弁の誤動作による閉止」の場合、ずれの原因となるしゃ断弁の上流側への影響と下流側への影響を分けて検討した。まず、上流側への影響は、脱エタン塔に対して出口閉塞が起こったことであるから、直接的な現象として「脱エタン塔での圧力上昇」が、ここで記載すべき（上流側への）影響である。一方、下流側の水添器第1塔に対しては、原料ガスおよび水素ガスの流入を止められるため、直接的な現象として「反応が停止」する。

このように、影響の検討を行う際には、講じられている安全対策をこのステップでは考慮せずに、ずれの原因によってシステムにどのような影響が生じるかのみに着目する。

また、影響の記述はできるだけ丁寧に、時系列の変化が考えられる場合にはその連鎖現象を含めて行うことが望ましい。この影響を丁寧に記述することで、次のステップで確認する対策の妥当性を明確にできる。

(ヘ) ステップ6：現状の対策の評価と追加対策の検討

次に、ずれの発生防止対策あるいはシステムへの影響軽減対策が設計面から講じられているか、あるいは運転面から配慮がなされているかを確認する。

まず、上流の「脱エタン塔圧力上昇」に対しては、上流側のP&ID（図3.4.1には示されていない）を参照して、脱エタン塔の頭頂配管に圧力検出設備が設置されていることを確認する。また、脱エタン塔出口弁閉止に対しては、適切な吹き出し容量を持った安全弁が設置されていることを確認する。

次に、下流の「水添器および下流の運転停止」は、安全に係ることではないが、安定運転への阻害であるため、対策について検討する。しゃ断弁が閉止すると、直ちに流量がなくなるので原料ガス流量計は、その現象を表示して、流量Lのアラームを出す。また、しゃ断弁の開閉状態は計器室に表示される。これらの対策は、それらがあることでしゃ断弁の閉止を防ぐものではなく、水添器の運転停止を防ぐものでもないが、運転停止の原因を特定し、再スタートを容易に行うために意味のあるものである。

第3編 アセスメントの進め方の具体例

この例の場合には、現状の対策が十分であると考えられるので、新たな対策は必要ないと判断された。

対策を確認・検討する際には、次のように原因系への対策であるか、結果系への対策であるかを意識して行うと効果が高い。

- 1) 原因系への対策
 - ・ ずれの発生を抑制あるいは予防するもの
 - ・ ずれの発生を発見できるもの
 - ・ ずれの原因を特定できるもの（可能であれば）
- 2) 結果系への対策
 - ・ 影響の発生を発見できるもの
 - ・ 影響の拡大を防止できるもの

(ト) ステップ7：解析結果の記録

以上の解析結果を整理し、HAZOP ワークシートに記録する。

記録は、一つのずれに対する一つの原因についての影響・現状の対策・追加対策あるいは検討事項を検討した段階で、一つのハザードシナリオ（原因と影響のセット）として、都度行った方がよい。上記（ニ）～（ヘ）の解説では、いくつかのハザードシナリオについて記述しているが、これは解説のためのものであり、解析は一つのハザードシナリオ単位を進めて、記録していくと混乱を避けることができる。

例題では、原料ガスの「流れ」について、「無し」「量的減少」「量的増加」「逆転」というガイドワードを適用して解析を進めたが、記録は全てのラインについて、ガイドワード単位でまとめて行っている。この記録のまとめ方には、決まりがあるわけではなく、記録の落ちがないようなやり方を工夫して、記録後の読みやすさを考慮して行えばよい。

このように、全てのスタディ・ノードに対し同様の作業を繰り返して、解析を終了する。

〈その他 HAZOP ワークシートに対する注記〉

影響および対策について検討する際には、その影響の現われ方の速さが重要な要素となる場合がある。ずれが発生してから、システムに影響が出るまでにあまり時間がなければ、作業員による対応を期待することは不適當であろう。ゆっくりとした変化であれば、適切な警報により、作業員の対応で問題ない場合もあり得る。対策の妥当性で判断に迷った時には、影響の速さに注意してみると評価しやすくなることがある。

HAZOP ワークシート

ノード番号 1

ノード アセチレン水添装置 (水添器第1・2塔本体、入口ライン、製品ライン、水素ライン、フレアライン、スチームライン、冷却水ラインを含む)

パラメーター 流れ

ずれ	ずれの原因	システムへの影響	現状の対策	追加対策あるいは検討事項
流れ無し (原料ガス)	水添器入口しゃ断弁誤動作による閉止	水添器および下流での運転停止	しゃ断弁開閉表示 (計器室) 原料ガス流量計	
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計安全弁	
	水添器入口手動弁誤操作による閉止	水添器および下流での運転停止	原料ガス流量計	手動弁には弁の開閉表示礼をつける
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計安全弁	
脱エタン塔停止	水添器および下流での運転停止	原料ガス流量計		
流れ無し (製品ガス)	水添器出口しゃ断弁誤動作による閉止	水添器および下流での運転停止、水添器圧力上昇	しゃ断弁開閉表示 (計器室) 原料ガス流量計 安全弁 (水添器)	
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計安全弁	
	水添器出口手動弁誤操作による閉止	水添器および下流での運転停止、水添器圧力上昇	原料ガス流量計 安全弁 (水添器)	手動弁には弁の開閉表示礼をつける
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計安全弁	
流れ無し (水素ガス)	水素ガス流量制御誤動作による閉止	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計	

第4章 プロセス安全性評価 (第4段階)

	水添器温度 HH インターロック誤作動	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計 水添器温度計 (複数)	水添器温度 HH インターロックを 2-0-0-3*方式とすることを考える
流量減(原料ガス)	第1塔温度調節熱交換器チューブの閉塞	水添器および下流での運転停止	定期点検 原料ガス流量計	
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計	
流量減(製品ガス)	中間熱交換器チューブの閉塞	水添器および下流での運転停止、水添器圧力上昇	定期点検 原料ガス流量計 安全弁 (水添器)	
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計	
	予熱器チューブの閉塞	水添器および下流での運転停止、水添器圧力上昇	定期点検 原料ガス流量計 安全弁 (水添器)	
		脱エタン塔圧力上昇	脱エタン塔オーバーヘッド圧力計	
流量減(水素ガス)	原料ガス流量計誤動作 (過少表示) により制御システムが、水素ガス供給弁の開度を絞るように要求する	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計 水添器温度計 (複数)	
	水素ガス流量計誤指示 (過大表示) により制御システムが、水素流量制御弁の開度を絞るように要求する	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計 水添器温度計 (複数)	

	フレア放出ライン水素ガス流量制御弁誤動作(全開)	水添器への水素ガス流入量が減少し、製品エチレンがオフスペックとなる	水素ガス流量計 製品エチレン分析計 水添器温度計(複数)	
流量増(原料ガス)	本ノードでは原因無し			(備考:エチレン塔入口流量制御弁不調によりこのノードでの流量増が起こる)
流量増(水素ガス)	原料ガス流量計誤指示(過大表示)により制御システムが、より多くの水素を供給することを要求	水添器異常温度上昇(暴走反応の危険性)	水添器温度計(複数)TAHH*水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	水素ガス流量制御弁開度表示(計器室)の必要性を検討する
	水素ガス流量計誤指示(過少表示)により制御システムが、水素流量制御弁の開度をさらに大きくするように要求する	水添器異常温度上昇(暴走反応の危険性)	水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック。	上記参照
逆流(原料ガス)	本ノードでは原因無し			
その他の流れ (意図しない流れ) (製品ガス)	フレア行き脱圧弁誤動作	製品ロス	定期点検	脱圧弁開度表示(計器室)の必要性を検討する
その他の流れ (漏えい) (製品ガス)	水添器安全弁あるいは脱圧弁からの漏れ	製品ロス	定期点検	予備安全弁設置の必要性を検討する

* ロジックループに設けられる検出器や制御端等の数をNとし、ロジックの動作に必要な信号の数をMとすると、ロジックの構成はM out of Nと表わされる。このM out of Nのロジック構成を、MooNあるいはM-o-o-Nと表わす。検出器を冗長化させて信頼性を上げようとする場合に、インターロックの動作の仕組みを表す場合に用いられる。

例えば、2-o-o-3の場合には、3個の検出器を設置して、その中の2個の検出器から信号を受け取った場合に、インターロック動作を行わせる。

1-o-o-2: いずれかの信号で作動するため、確実に停止させる場合(安全運転上)有利である。逆に誤報あるいは信号故障でも作動するため、安定運転に対しては不利となる。

2-o-o-2: 双方の信号が生きた時にのみ作動するため、誤報あるいは信号故障に対して強く、安定運転上は有利となる。逆に安全運転に対しては、不利(鈍感)になる。

2-o-o-3: 上記二つの利点を合わせ持ち、安全運転上および安定運転上優れている。

* TAHH: Temperature Alarm High High

温度計の警報の設定値について、品質を維持する運転範囲の上限を温度高(TAH)として警報を発報し、さらに温度が上昇して安全運転範囲の上限に該当する値を温度高高(TAHH)とする。

TAHHは、その温度に達した場合に、インターロックを作動させたり、運転員による緊急対応を取らせることになる。その設定値の決定においては、発報から作動までの時間遅れ、および作動してから処置を完了し安全運転範囲を超えないようにエネルギーの供給を停止するまでの時間遅れを考慮する必要がある。

ノード番号 1

ノード アセチレン水添装置 (水添器第1・2塔本体、入口ライン、製品ライン、水素ライン、フレアーライン、スチームライン、冷却水ラインを含む)

パラメーター 圧力

ずれ	ずれの原因	システムへの影響	現状の対策	追加対策あるいは検討事項
圧力低	フレアー行き脱圧弁誤動作(その他の流れ)	製品ロス		(その他の流れ)を参照
圧力高	流れ無しおよび流量減による圧力上昇以外には圧力上昇を引き起こす要因はない			

ノード番号 1

ノード アセチレン水添装置 (水添器第1・2塔本体、入口ライン、製品ライン、水素ライン、フレアーライン、スチームライン、冷却水ラインを含む)

パラメーター 温度

ずれ	ずれの原因	システムへの影響	現状の対策	追加対策あるいは検討事項
温度低 (第1塔入口ガス)	第1塔温度調節熱交換器温度調節系不調 (スチーム調節弁全閉)	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計 水添器温度計 (複数)	スチーム調節弁の開度表示(計器室)の必要性を検討する
	第1塔温度調節熱交換器汚れによる伝熱(加熱)不良	製品エチレンがオフスペックとなる	定期点検 製品エチレン分析計 水添器温度計 (複数)	
	予熱器汚れによる伝熱不良	原料ガス温度が低下し、第1塔温度調節熱交換器のスチーム要求量が上がる。スチーム供給が不十分な場合、製品エチレンがオフスペックとなる	定期点検 製品エチレン分析計	
		エチレン塔への流入ガス温度が上がったままとなる	定期点検	エチレン塔への影響をチェックする

	中間熱交換器汚れによる伝熱不良	原料ガス温度が低下し、第1塔温度調節熱交換器の蒸気要求量が上がる。蒸気供給が不十分な場合、製品エチレンがオフスペックとなる	定期点検 製品エチレン分析計	
		第2塔温度調節熱交換器への流入ガス温度が高温となり、バイパス流量が減る。第2塔温度調節熱交換器の冷却能力が足りない場合、第2塔で異常温度上昇(暴走反応)の危険性がある。	定期点検 水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	
温度低 (第2塔入口ガス)	第2塔温度調節熱交換器温度調節系不調(バイパス調節弁全開)	製品エチレンがオフスペックとなる	製品エチレン分析計 水添器温度計(複数)	バイパス調節弁の開度表示(計器室)の必要性を検討する
温度高 (第1塔入口ガス)	第1塔温度調節熱交換器温度調節系不調(蒸気調節弁全開)	異常温度上昇(暴走反応の危険性)	水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	
温度高 (第2塔入口ガス)	第2塔温度調節熱交換器温度調節系不調(バイパス調節弁全開)	異常温度上昇(暴走反応の危険性)	水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	
	第2塔温度調節熱交換器汚れによる伝熱(冷却)不良	異常温度上昇(暴走反応の危険性)	定期点検 水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	
	第2塔温度調節熱交換器チューブの閉塞	冷却不足で第2塔入口ガス温度が高温となり、水添器第2塔で異常温度上昇(暴走反応)の危険性がある。	定期点検 水添器温度計(複数)TAHH 水添器温度HHによる緊急停止・脱圧インターロック	

ノード番号 1

ノード アセチレン水添装置 (水添器第1・2塔本体、入口ライン、製品ライン、水素ライン、フレアーライン、スチームライン、冷却水ラインを含む)

パラメーター 成分

ずれ	ずれの原因	システムへの影響	現状の対策	追加対策あるいは検討事項
組成変化 (原料ガス)	原料ガス中のアセチレン分増加	製品エチレンオフスペック	脱エタン塔出口原料ガス分析計	
不純物混入 (水素ガス中不純物)	水素ガス精製装置不調	製品エチレンオフスペック	水素ガス分析計	
不純物混入 (第1塔温度調節熱交換器)	第1塔温度調節熱交換器チューブ漏れ	原料ガスがスチーム系に流入し、スチーム系異常圧力上昇の可能性はある。		スチーム系への、安全弁の設置を確認する
		コンデンセート中に可燃性ガスが流入し、フラッシュドラム等で大気中に拡散する可能性がある。	定期点検	コンデンセートが大気開放されるところ(例えばフラッシュドラムのベント出口近辺)に、ガス検知器を設置する
不純物混入 (第2塔温度調節熱交換器)	第2塔温度調節熱交換器チューブ漏れ	原料ガスが冷却水系に流入し、冷却水系異常圧力上昇の可能性はある。		冷却水系への安全弁の設置を確認する
		冷却水中に可燃性ガスが流入し、冷水塔で大気中に拡散する可能性がある。	定期点検	冷水塔戻り配管のベント出口近辺にガス検知器を設置する
不純物混入 (予熱器)	予熱器チューブ漏れ	原料ガスが製品エチレン中に漏れこみ製品オフスペックとなる可能性がある	定期点検 第2塔出口製品エチレン分析計	
不純物混入 (中間熱交換器)	中間熱交換器チューブ漏れ	原料ガスが水添器第2塔入口ガス中に漏れこみ製品オフスペックとなる可能性がある	定期点検 第2塔入口製品エチレン分析計	

