

平成27年度 経済産業省委託費

石油精製業保安対策事業

高圧ガスの危険性評価のための調査研究  
報告書

平成28年3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

## 目次

1. 調査研究の目的等	1
1.1 調査研究の目的	1
1.2 調査研究の概要	2
2. 支燃性ガスの安全な取扱措置の調査	3
2.1 支燃性ガス燃焼性データの取得	3
2.2 支燃性ガスの分類方法の検討	14
3. 重大事故の発生要因の抽出・分析	15
3.1 事故分析手法 PFA による事故原因分析	15
3.2 チェックポイント分析シートによるチェックポイント作成	23
4. 運転データからの事故予兆現象の抽出	30
4.1 インバリエント分析技術の概要	30
4.2 運転データのインバリエント分析	32
4.3 インバリエント分析詳細	35
4.4 追加インバリエント分析	44
4.5 運転データからの事故予兆現象の抽出のまとめ	47
5. 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の作成	50
5.1 現場保安チェックポイント集の分類, 整理	50
5.2 現場保安チェックポイント集検索システム構築	52
6. 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の評価	56
6.1 現場保安チェックポイント集の問題点, 改善点	56
6.2 改良版現場保安チェックポイント集	58
7. まとめ	59
7.1 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集のまとめ	59
7.2 現場保安チェックポイント集の活用に向けて	60
別添 1 事故進展フロー図および 3M3E 分析シート	
別添 2 チェックポイント分析シート	
別添 3 チェックポイント集(第 1 次案)	
別添 4 チェックポイント集(最終版)	

## 1. 調査研究の目的等

### 1.1 調査研究の目的

近年、石油精製業、石油化学工業や半導体製造業での技術の高度化により、これまでになく様々な種類の高圧ガスが用いられるようになってきている。高圧ガス設備の事故件数は増加傾向にあり、これらの事故の防止には、高圧ガスとして取り扱う化学物質の危険性の把握が不可欠である。最近、大きな爆発事故の原因にもなった支燃性ガスは、最も一般的な酸化剤である酸素と同様に漏えいや可燃性ガスとの混合のほか、配管や設備内の物質との反応に十分な注意を払うことが事故の防止には重要であるが、支燃性ガスの他の物質との反応する条件などを予測する手法は存在せず、これまでの事故などの経験に基づく管理がなされているのが現状である。

これら重大事故の発生防止のためには、使用する化学種や量によって、事故が起きた際の被害程度を適切に評価・予測し、事前に十分な安全対策を取ることが重要である。そのためこれまで支燃性ガス等の事故につながる条件およびメカニズムなどについて調査・検討を実施してきたところである。

一方、これまで重大事故が発生するたびに、事故当事者は、事故の詳細分析(経緯・事象・原因・対策など)の結果を事故報告書で公開してきた。また、各業界団体でも、これらの事故報告書を独自の方法でそしゃく・解釈・追加調査して、事故に対する教訓情報として会員企業に提供してきた。しかし、近年の調査によると、公開された事故報告書や事故教訓情報は、現場レベルとしては、「自分の担当している設備との相違点がある」、「事故事例をそしゃくするための時間的余裕がない」などの理由から活用が進んでいないという状況もある。

以上を踏まえ、支燃性ガスをはじめとする高圧ガスによる重大事故が発生する条件などを支燃性ガスの種類や反応物質や条件を変更することにより、さらに調査・検討を進める。また、当該調査・検討の結果(支燃性ガス種、反応物質、温度、圧力、濃度、場面など)およびこれまでの重大事故の情報を踏まえ、「重大事故が発生するまでの事象(現象、運転員の行動、運転員の操作など)を時系列に調査分析する」、「重大事故が発生するまでの運転データ(DCS データなど)を時刻歴で相関分析し、事故の予兆を抽出する」などの科学的手法を用いて現場に潜む高圧ガスの危険性を顕著化した上で、様々なプラントの作業現場で使用することができるチェックポイントとして抽出し、チェックポイント集にまとめる。そして、まとめたチェックポイント集は、現場作業員が安全に作業するためのリスクアセスメントの指標となることを目指す。

## 1.2 調査研究の概要

燃焼性の強さに則した支燃性ガスの安全な取扱措置の調査研究結果および過去の重大事故情報を科学的手法を用いて現場に潜む高圧ガスの危険性を顕著化させチェックポイント集を作成するために、以下の事項を行う。

なお、チェックポイント集は、現場作業員の始業前打合せおよび終業後打合せで活用されるものとする。

### (1)燃焼性の強さに則した支燃性ガスの安全な取扱措置の調査研究

これまでの石油精製業保安対策事業(高圧ガスの危険性評価のための調査研究)で得た燃焼性の強さに則した支燃性ガスの安全な取扱措置の調査研究結果を踏まえ、必要に応じて、支燃性ガスと金属材料の反応再現実験を実施し、金属種、樹脂種、その他可燃物の種類毎の組合せによる発火し易さ、発火温度等の予兆現象を抽出する。

### (2)重大事故の発生要因(原因)の抽出・分析

過去に発生した重大事故を 10 事例程度選定して、重大事故が発生するまでの事象を以下の手順で抽出・分析し、チェックポイントを抽出する。

- ① 事象を事故進展フロー図に記載し、事故分析手法 PFA などの分析手法を活用し、原因を抽出する。
- ② 人、設備、機器、管理などの視点で原因を分析し、教育、訓練、技術、工学などの視点で対策を検討する。
- ③ 上述①および②の作成過程を通じて得られた知見に基づき、現場で活用できるチェックポイントを抽出する。
- ④ チェックポイントに関連情報を付加する。
- ⑤ チェックポイントに検索機能を付加する。

### (3)事故発生前からの運転データの相関分析を行い、事故予兆現象を抽出

(2)の事故事例から 1 事例を選び、選んだ事故事例の事業所から、事故発生前後の運転データ(DCS データ)を入手し、運転データ間の相関分析などを行い、事故予兆現象を抽出する。

### (4)現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の作成

(1)から(3)を踏まえ、現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集として取りまとめを行う。チェックポイント集は、検索および編集機能を有する一般的なアプリケーションで作成し、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)の事故データベース(RISCAD)と同等の事故データベースに対して、チェックポイントを起因とした過去の類似事故が容易に参照できるリンク機能を有すること。

### (5)チェックポイント集の評価

作成したチェックポイント集を、事業所の現場経験者により現場レベルでの評価を 5 件程度受け、問題点、改善点等を抽出し、チェックポイント集に反映する。

## 2. 支燃性ガスの安全な取扱措置の調査

本項目では、支燃性ガスが可燃物と反応して発火する現象を、加熱型密閉容器を用いた発火試験により観測し、支燃性ガスと可燃物の種類ごとの組合せによる発火性を整理し、発火事故の要因となり得る現象を調査した。

これまでの石油精製業保安対策事業（高圧ガスの危険性評価のための調査研究）では、各種支燃性ガスの性状および事故事例の調査（平成 23 年度）、ガスの支燃性を評価するための、可燃性ガスとの混合気の評価モデルとした燃焼速度の調査研究（平成 23 および 24 年度）、および支燃性ガスと可燃物の発火性調査研究（平成 25 および 26 年度）を行ってきたが、本調査はこれまでの調査を補完するデータを取得するとともに、支燃性ガスによる発火の予兆現象を抽出し、後述のチェックポイント集作成に資するものである。

本調査研究では、まず、複数の事故事例が報告されている三フッ化窒素（ $\text{NF}_3$ ）について、これまでの調査で不足している発火性データを取得するための試験を行った。これまでの事故事例では、断熱圧縮あるいは流体摩擦等の何らかの要因により過熱した三フッ化窒素ガスが、配管やバルブ内のシール材と接触・反応して発火事故に至ったという報告がされている。平成 25 年度の調査研究では、シール材との発火性を調査するため、三フッ化窒素ガス雰囲気下における樹脂材料の発火試験が実施されている。しかし、三フッ化窒素は高温になるとともに熱分解が進行し、金属材料とも容易に反応し得る活性種を生成するため、金属材料との接触による発火性も事故要因として検討する必要がある。したがって本調査では、三フッ化窒素ガスが金属粉と反応して発火する現象を観測し、発火性に係るデータを取得した。また、支燃性ガスと可燃物の反応性に関するこれまでの試験結果を補完するため、三フッ化塩素（ $\text{ClF}_3$ ）と樹脂等のシール材との発火性の調査も行った。さらに、上述の試験では支燃性ガスとある一種の可燃物のみとの発火性を調査しているが、例えばシール材と金属が混在する環境下では燃焼に寄与する反応が変化する可能性がある。その影響を確認するため、金属粉とフッ素樹脂の混在試料について、高温での三フッ化窒素との接触に係る試験的な発火実験も行った。それらの試験方法および結果を次節に記す。

### 2.1 支燃性ガス燃焼性データの取得

#### 2.1.1 三フッ化窒素と金属粉の発火試験

まず、三フッ化窒素と金属粉の発火試験については、平成 26 年度「高圧ガスの危険性評価のための調査研究報告書」に記載されている装置・手法と同様に実施した。ここではその概要のみを記す。試験容器（図 2.1.1）としては、高温条件下においても耐食性を有するモネル 400 合金製の密閉式反応容器（内径 100 mm、高さ 200 mm、内容積 1.57 L）を用いた。容器内中央に設置された試料皿に金属粉試料（ $200 \pm 20$  mg または  $500 \pm 20$  mg）を配置し、不活性（窒素）ガス雰囲気化で試験温度（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ）まで昇温したのち、真空排気を行い、試験圧力（100 kPa）まで三フッ化窒素ガスを導入した。その際の温度と圧力の変化を、そ

れぞれ熱電対および歪み式圧力センサーを用いて記録した。熱電対としては、試料上方 1 cm の位置に設置した外径 1.6 mm のハステロイ X 製シース K 型熱電対を用いた。真空排気および支燃性ガス導入によって熱電対の指示温度が変動するため、発火の有無の判断は測定した温度履歴を、試料を設置しない場合のものと比較することで行った。金属粉試料としては、鉄、SUS304L、SUS316L、銅、真鍮（銅：亜鉛= 65 : 35）、およびアルミニウムを用いた。ほとんどの試験では粒径 150  $\mu\text{m}$ （ふるい目開き）のものを用いたが、鉄を用いた一部の試験では 53  $\mu\text{m}$ （ふるい目開き）の鉄粉についても測定を行った。発火温度は最小で 25 $^{\circ}\text{C}$ 刻みまで測定を行った。また、本試験では温度変化によって発火の有無を判断しているが、ほとんどの試料において、計測された発火温度未満の条件下においても、徐酸化による試料の変化が観測されている。

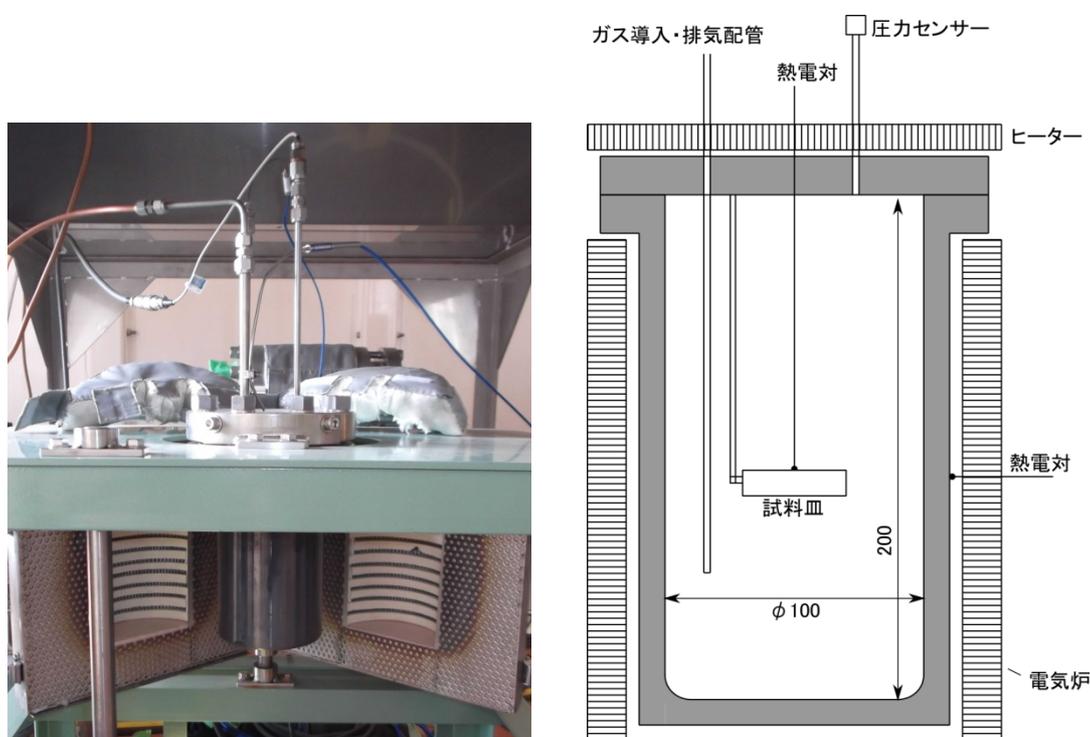


図 2.1.1 発火試験用反応容器の外観（左）および構造図（右）

以下結果を示す。まず、鉄粉の粒径 53  $\mu\text{m}$  および 150  $\mu\text{m}$  試料(200 $\pm$ 20 mg および 500 $\pm$ 20 mg) に対する結果を図 2.1.2-5 に示す。試料配置時の(?) 温度の時間履歴を黒線、試料無しの参照実験時の温度時間履歴を青線でそれぞれ示す（以下の図でも同様）。粒径 53  $\mu\text{m}$  試料については、200 mg では 200 $^{\circ}\text{C}$ 、500 mg では 175 $^{\circ}\text{C}$ において発火が観測された。一方で粒径 150  $\mu\text{m}$  試料では、いずれの重量においても発火温度は 450 $^{\circ}\text{C}$ であった。粒径に対する発火温度の傾向は、三フッ化塩素を用いた試験の結果（平成 26 年度報告書）と同様であったが、発火温度自体は、53  $\mu\text{m}$  試料については三フッ化窒素の方が低く、逆に 150 $\mu\text{m}$

試料については三フッ化窒素の方が高くなるという結果が得られている。つまり、三フッ化窒素雰囲気下においては粒径依存性がやや大きいと言える。また、発火後の到達温度については三フッ化塩素を用いた試験に比べいずれの条件でも低くなっており、燃焼速度の差が現れていると考えられる。

次に、二種類のステンレス鋼粉（SUS304L および SUS316L、いずれも 150  $\mu\text{m}$ ）試料（200 $\pm$ 20 mg および 500 $\pm$ 20 mg）を用いた場合の測定結果を図 2.1.6-9 に示す。SUS304L と SUS316L はほぼ同様の結果となった。いずれの場合も、200 mg では 400 $^{\circ}\text{C}$ 、500 mg では 375 $^{\circ}\text{C}$ において発火した。これらの発火温度は三フッ化塩素雰囲気下での発火温度（平成 26 年度報告書：375 $^{\circ}\text{C}$ ）とほぼ一致する。しかし、三フッ化塩素雰囲気下ではこれらの発火温度は鉄粉試料とほぼ同等であったのに対し、三フッ化窒素雰囲気下ではステンレス鋼粉は鉄粉よりむしろ発火しやすい傾向にあることが分かった。これは鉄粉やステンレス鋼粉に含まれる成分による効果であると考えられるが、その詳細なメカニズムは不明である。

アルミニウム粉、銅粉、および真鍮粉（いずれも 150  $\mu\text{m}$ 、500 $\pm$ 20 mg）を用いた試験結果を図 2.1.10-12 に示す。アルミニウム粉は 350 および 450 $^{\circ}\text{C}$ 、銅粉は 300、350、400、および 450 $^{\circ}\text{C}$ において試験を行ったが、発火は観測されなかった。一方で真鍮粉については 350 $^{\circ}\text{C}$ において発火が観測された。三フッ化塩素雰囲気下ではこれらの試料に対して 400 $^{\circ}\text{C}$ まで発火が観測されなかったことに比べると明確な傾向の違いがあることが分かる。前述の鉄粉やステンレス鋼粉の結果からは、三フッ化窒素は三フッ化塩素に比べて燃焼速度は低下していると考えられるが、真鍮粉についてはむしろ三フッ化窒素雰囲気下において発火しやすい傾向にあることが分かった。三フッ化窒素、三フッ化塩素いずれの場合も、金属をハロゲン化することで反応が進行すると考えられるが、その反応過程の違いが発火性に変化をもたらしていると言える。したがって、これらの発火現象を解明し、現象を予測するためには、化学反応過程を含む速度論的な解析が必要である。

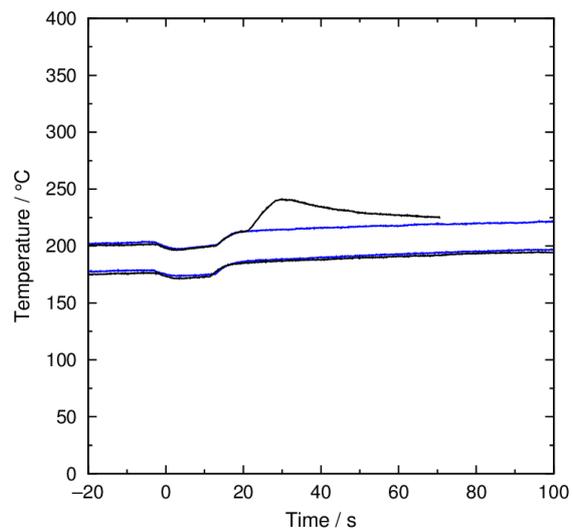


図 2.1.2 鉄粉 (53  $\mu\text{m}$ ) 試料 200 mg, 試験温度 175, 200°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線 : 参照実験における温度履歴)

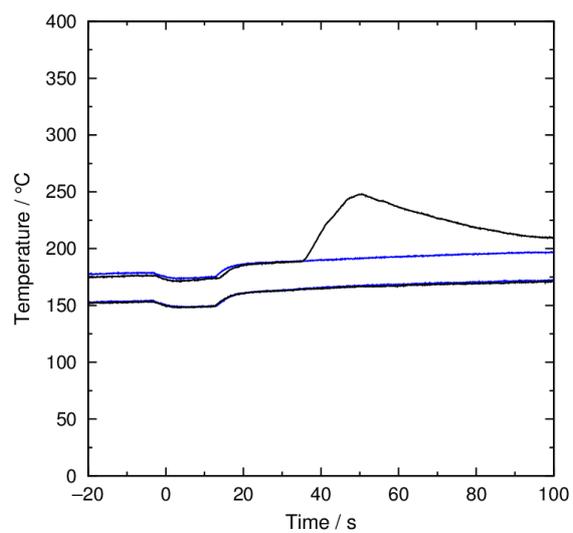


図 2.1.3 鉄粉 (53  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 150, 175°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線 : 参照実験における温度履歴)

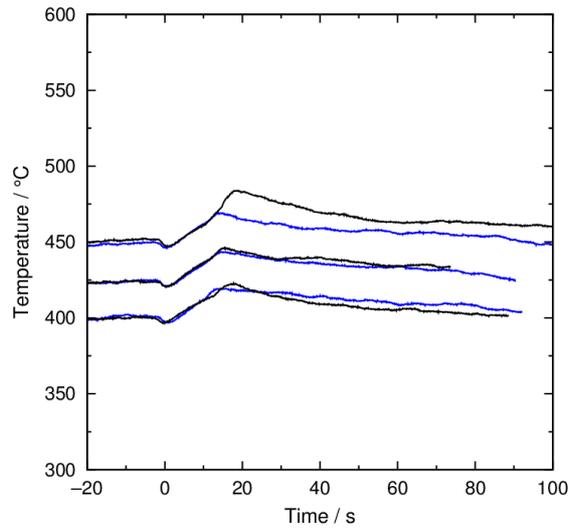


図 2.1.4 鉄粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 200 mg, 試験温度 400, 425, 450 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線 : 参照実験における温度履歴)

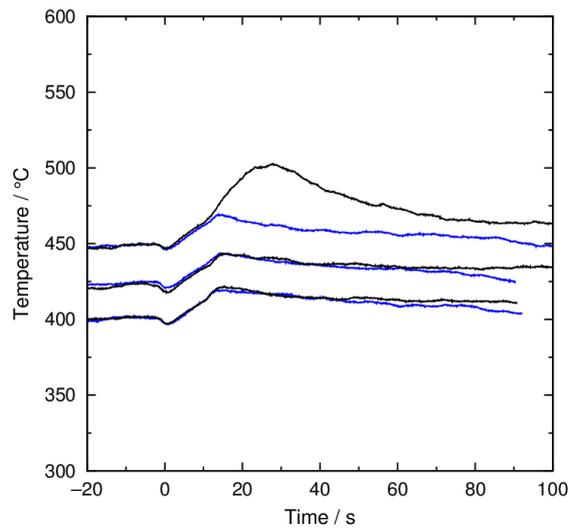


図 2.1.5 鉄粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 400, 425, 450 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線 : 参照実験における温度履歴)

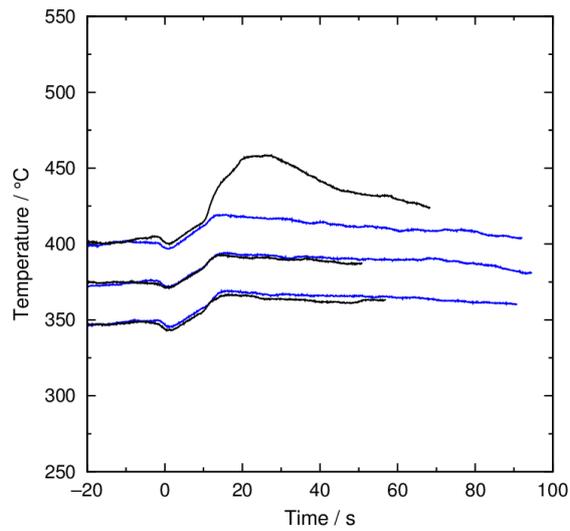


図 2.1.6 SUS304L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 200 mg, 試験温度 350, 375, 400 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

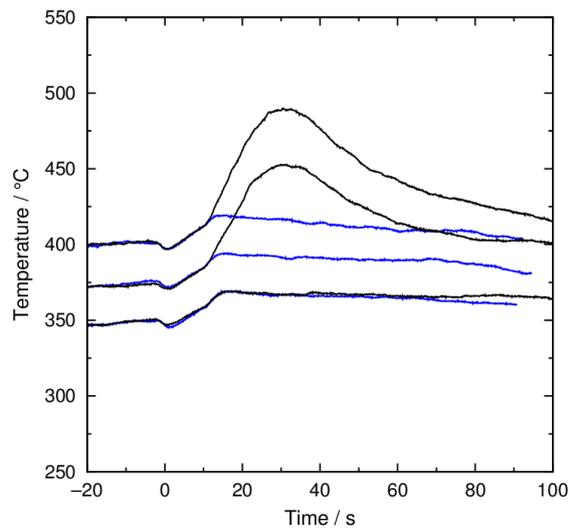


図 2.1.7 SUS304L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 350, 375, 400 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

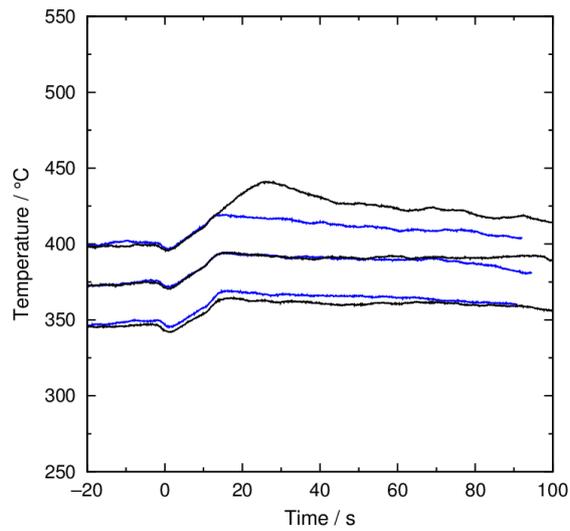


図 2.1.8 SUS316L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 200 mg, 試験温度 350, 375, 400 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

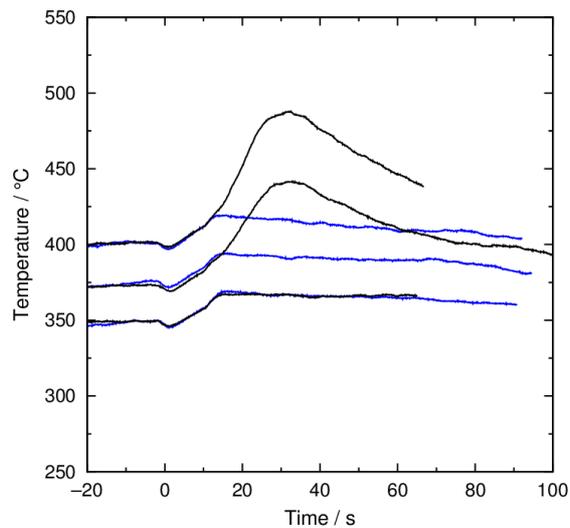


図 2.1.9 SUS316L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 350, 375, 400 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

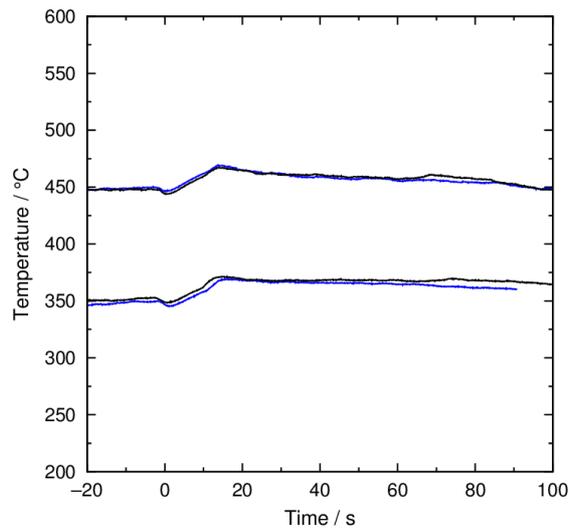


図 2.1.10 アルミニウム粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 350 および 400°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

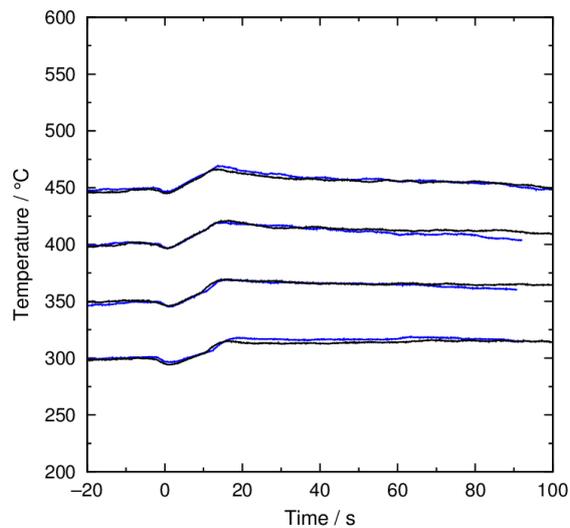


図 2.1.11 銅粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 試料 500 mg, 試験温度 300, 350, 400, および 450°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

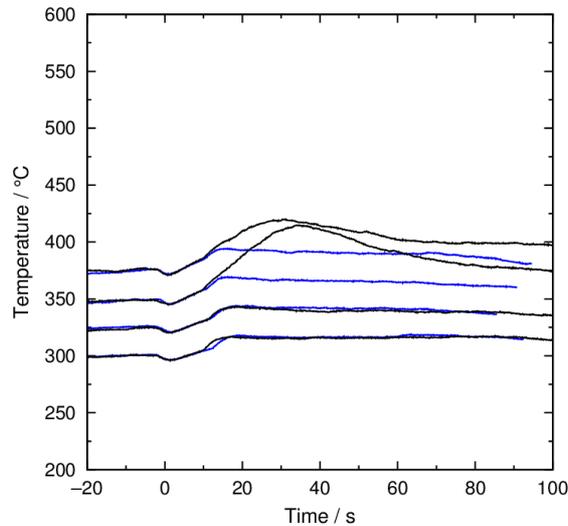


図 2.1.12 真鍮粉（150  $\mu\text{m}$ ）試料 500 mg，試験温度 300，350，および 375 $^{\circ}\text{C}$ において観測された温度の時間履歴（青線：参照実験における温度履歴）

### 2.1.2 樹脂材料と金属粉混在下での発火試験

三フッ化窒素雰囲気下における，樹脂材料と金属粉の混在試料に対する発火試験を行った。試験方法は前節と同様であり，樹脂材料としてはシール材として用いられるポリテトラフルオロエチレン（PTFE）およびポリクロロトリフルオロエチレン（PCTFE），金属粉試料としてはステンレス鋼粉（SUS316L，150  $\mu\text{m}$ ）を用いた。試料は試料皿にそれぞれ 500 $\pm$ 20 mg ずつ配置し，試験に供した。試験温度は 300 および 350 $^{\circ}\text{C}$ とした。結果を図 2.1.13 および 2.1.14 に示す。PTFE および PCTFE いずれの場合も，350 $^{\circ}\text{C}$ において明確な発火が観測された。この発火温度は SUS316L 粉のみの場合，あるいはフッ素樹脂のみの場合（平成 25 年度報告書：最高試験温度 450 $^{\circ}\text{C}$ でも発火せず）の発火温度に比べて低く，試料の混在により発火温度が低下していることを示している。また，発火後の到達温度も SUS316L 粉のみの場合（図 2.1.9）と比べて数百 $^{\circ}\text{C}$ 高く，フッ素樹脂が燃焼に寄与していることがわかる。配管部品等に使用されるシール材の発火性の評価には，配管部品等に用いられる金属材料との組み合わせを含めた調査が必要であるということを示唆しており，したがって，発火現象の要因抽出には様々な物質の組み合わせに対する調査研究が求められる。

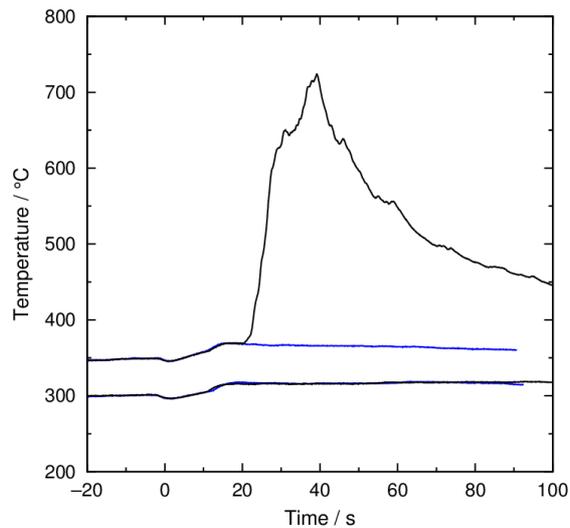


図 2.1.13 PTFE と SUS316L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 混在試料, 試験温度 300 および 350°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

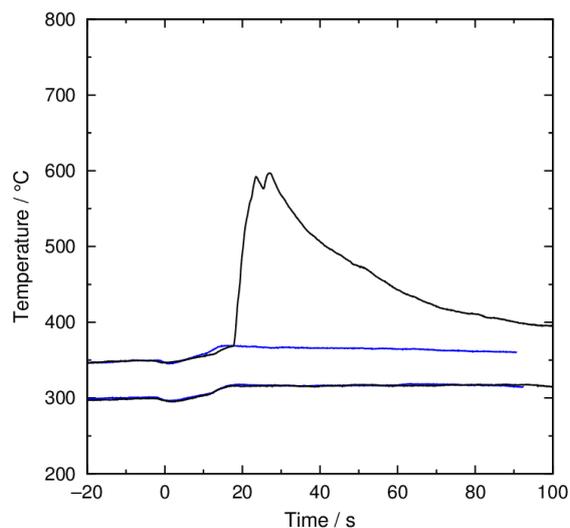


図 2.1.14 PCTFE と SUS316L 粉 (150  $\mu\text{m}$ ) 混在試料, 試験温度 300 および 350°Cにおいて観測された温度の時間履歴 (青線: 参照実験における温度履歴)

### 2.1.3 三フッ化塩素とシール材等との発火試験

支燃性ガスと可燃物の反応性に関するこれまでの試験結果を補完するため、三フッ化塩素と樹脂等のシール材との発火試験を行った。試験は平成 25 年度「高圧ガスの危険性評価のための調査研究報告書」と同様の方法で行った。すなわち、三フッ化塩素 100 kPa を室

温にて充填した密閉式反応容器内に固体シール材を配置し、一定速度で昇温させることにより、発火に至る温度を測定した。試料としては、PTFE、PCTFE、ポリエチレン（PE）、フッ素ゴム（FKM）、クロロプレンゴム（CR）を用いた。加熱の際の上限温度は450℃とした。

測定された温度の時間履歴を図 2.1.15 に示す。PE、FKM、および CR はそれぞれ 180、188、187℃において発火が観測された。PCTFE および PTFE は 450℃まで加熱したが発火は観測されなかった。平成 25 年度「高圧ガスの危険性評価のための調査研究報告書」のデータと合わせて、表 2.1.1 に結果をまとめる。PE、FKM、および CR は、三フッ化塩素雰囲気下では、三フッ化窒素と比べ、発火温度が著しく低下する結果が得られた。これは、三フッ化窒素は低温では比較的安定であり熱分解を開始する高温域にならないと反応を開始しないことに対し、三フッ化塩素は比較的低温の領域においても高い反応性を有することに由来する結果である。また、三フッ化塩素雰囲気下の試験では、発火が観測された場合の発火温度はほぼ同程度であった。

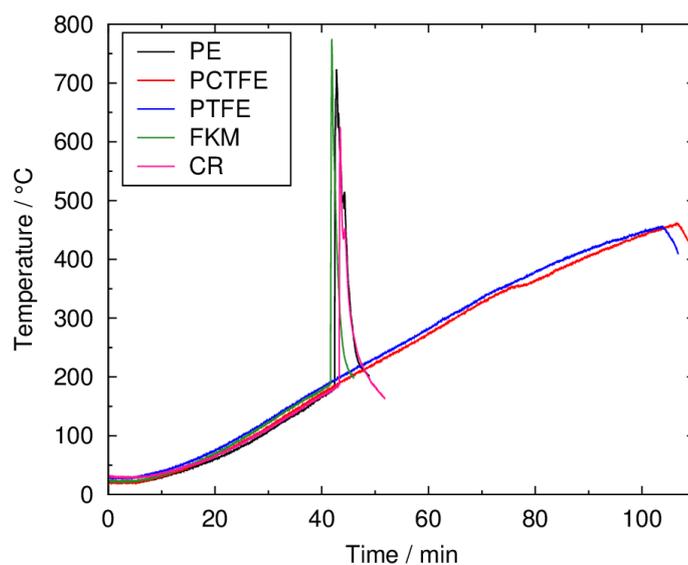


図 2.1.15 三フッ化塩素雰囲気下での発火試験における温度履歴

表 2.1.1 各可燃性ガス雰囲気中におけるシール材等の発火温度（℃）

	NF <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	ClF <sub>3</sub>
PTFE	>450	>450	>450
PCTFE	>450	392	>450
PE	422	215	180
FKM	395	411	188
CR	374	378	187

## 2.2 支燃性ガスの分類方法の検討

支燃性に基づくガスの分類のためには、ガスの支燃性の強さを評価する必要がある。今年度分も含め、これまでの石油精製業保安対策事業（高圧ガスの危険性評価のための調査研究）で実施されてきた調査研究では、可燃性ガスとの混合気を評価モデルとした燃焼速度の測定とそのモデル化、および支燃性ガスと可燃物の発火性の測定が報告されている。

ガスの支燃性は、そのガス自体が備えている性質として捉えることができるが、これまでの調査研究で明らかとなっている通り、ガス自身の物性値と、可燃性ガスあるいは可燃物との接触・混合時の燃焼性との間には、必ずしも明確な相関関係が成り立たない。さらに、それらの燃焼速度や発火温度は、燃焼熱との相関も明確でないことが明らかとなっている。したがって、支燃性に基づく分類においては、支燃性ガス自身の物性値ではなく、可燃性ガスや可燃物との接触・混合した際の燃焼性を基本とした評価が必要である。

支燃性の指標となる燃焼性の評価において、多種の可燃性ガスや可燃物を想定することは現実的ではなく、ある種の可燃性ガスまたは可燃物を評価指標として選定する必要がある。支燃性ガスと可燃性ガスとの混合気を評価モデルとする場合は、平成24年度報告書で議論されている通り、気相での燃焼特性である燃焼速度や可燃濃度範囲、あるいは酸素当量係数が評価指標となり得る。ISO10156では、支燃性ガス混合物に含まれる支燃性ガスの酸素当量係数を用いた評価がされている。しかしこの評価方法では、強い支燃性を有するガスを高濃度に含むガスの危険性の程度を直接評価することはできず、また指標としても燃焼速度との相関も低いため、燃焼による被害程度との関連も明確ではない。したがって支燃性ガスの危険性は、それぞれの燃焼特性を独立に計測・評価した上で、複合的に評価する必要がある。酸素当量係数はある種の限界濃度、すなわち燃焼の起こりやすさを示す値であり、一方で燃焼速度は爆発威力、すなわち燃焼時の被害に関わる値であるため、少なくともこれらの値を二つの軸として同時に評価することが望ましい。

しかしながら、固体可燃物を対象とした場合では、不均一場での発火・燃焼現象の根本的な理解が求められるため、現状では現象の予測は困難であり、その燃焼性の評価は難しい。さらに前節で顕在化したように、異種可燃物の混合によっても発火性、燃焼性は著しく変化し得る。したがって発火現象に系統的な傾向はなく、支燃性ガスによる発火事故予兆現象の抽出のためには、個別のガス・可燃物の組み合わせに対して発火試験の実験データを蓄積することが必要である。さらに、これらの発火現象を科学的に予知するためには、不均一過程を含む現象の予測モデルを構築するための学術的知見が求められる。

以上まとめると、気相での燃焼をモデルとした支燃性の評価は、前述の通り燃焼特性を複合的に評価することで可能となり得るが、気相以外での可燃物が対象となる事故要因の抽出のためには、系に存在する物質に対する個別の試験によって、支燃性ガスと可燃物のそれぞれの組み合わせに対する危険性を評価する必要がある。

### 3. 重大事故の発生要因の抽出・分析

本章では、「重大事故が発生するまでの事象(現象, 運転員の行動, 運転員の操作など)を時系列に調査分析する」ことを目的として, 過去の重大な事故事例から運転中の事故事例 4 件を選んで分析を行った。また, 2011 年から 2014 年の間に国内で発生した重大事故 4 件, 支燃性ガスが関連する事故 1 件も対象とした。さらに, 第 4 章において「運転データからの事故の予兆の抽出」のモデルケースとした運転中のトラブル事例 1 件を加え, 計 10 件の事例について分析を行った。

事故事例の分析は, 産総研が公開している「リレーショナル化学災害データベース (RISCAD)」<sup>1)</sup>において, 事故の分析を行うために開発された「事故分析手法 PFA<sup>®</sup>」<sup>2)</sup>を用いて実施した。さらに, 事故分析手法 PFA によって抽出された原因を「チェックポイント分析シート」により分析, 検討を行い, 10 件の事例から抽出されたチェックポイントをチェックポイント集としてまとめた。

以下に詳細を述べる。

#### 3.1 事故分析手法 PFA による事故原因分析

##### 3.1.1 事故事例の選択

分析対象とする事故事例 10 件の選択にあたっては, 運転現場で活用可能なチェックポイントの抽出を行うことを念頭に置き, 現場での作業が原因となった事故事例を抽出することを心がけた。ただし, 2011 年から 2014 年に起きた 4 件の重大事故の分析は必須のものと考えた。また, 第 4 章で対象とした「運転データからの事故の予兆の抽出」のモデルケースとした運転中のトラブル事例 1 件も必須とした。第 2 章で対象とした支燃性ガスに関する事故事例は, 過去に数例の事故情報が入手可能であったが, その中から作業中の事故で, かつ, 詳細な事故調査結果が報告されている 2009 年の山口県の事故事例を選択した。残りの事故事例については, 国内外の過去の重大事故を調査し, バルブの誤操作, バルブの不十分な操作, 車両の誤操作, 運転中の火気工事作業といった現場での作業が原因となった事故事例 4 件を抽出した。

抽出した事故事例を表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 分析対象事例一覧

No.	発災年月日	事故名称	発災地名	死者数 (名)	負傷者数 (名)	RISCAD 事故ID
1	1973/10/8	ポリプロピレン製造工場で爆発	千葉県	4	19	7134
2	1992/5/30	水素還元プロセス中に爆発	神奈川県	0	0	50
3	2005/10/6	オレフィン製品製造工場で爆発	米国・テキサス州	0	16	7029
4	2009/11/4	三フッ化窒素製造プラントで爆発	山口県	0	5	7519
5	2010/11/9	ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの爆発	米国・ニューヨーク州	1	1	8651
6	2011/11/13	塩化ビニルモノマ製造施設で爆発	山口県	1	0	7980
7	2012/4/22	レゾルシンプラントが爆発	山口県	0	0	8137
8	2012/9/29	アクリル酸製造施設で爆発	兵庫県	1	36	8317
9	2014/1/9	水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発	三重県	5	13	8440
10	-	運転データを分析した事例	千葉県	0	0	-

### 3.1.2 事故分析手法 PFA の概要<sup>3)</sup>

事件事例の分析は産総研で開発された事故分析手法 PFA を用いて行った。事故分析手法 PFA は、利用者に複雑な事故の内容を一目で理解できるようにすることを目的として、RISCAD の中でいくつかの事例にリンクさせてきた「事故進展フロー図」を作成するための手法として発展してきた。

事故進展フロー図は、RISCAD 運用グループの誰かが事件事例の事故調査報告書などから、事故に関連する事象を時系列で抽出し、原因を考えて、事故進展フロー図の原案を作成し、それを RISCAD 運用グループ全員で確認し、議論して仕上げる、という手順で行っていたが、その過程で、グループで議論することによって、お互いのバックグラウンドを補完しあって、知識や経験を共有できることがわかってきた。これは、まさに現在、企業現場で問題となっている熟練者の知識や経験の伝承や組織の安全意識の低下に対して有効な対策となる。

そこで、この知識と経験の共有を化学プラントの現場で実践できないかと考え、「事故進展フロー図を作成するための手法」を事故分析手法 PFA としてまとめた。事故分析手法 PFA は、単に事故進展フロー図を作成して、事故を分析する手法にとどまらず、事故分析を通じて、組織の安全文化を伝承し、安全意識を向上するための手法と考えている。

#### (1)事故進展フロー図の構成

以前は事件事例を理解するためには、数 10 ページに及ぶ難解な事故調査報告書を各自が読解するしかなかった。しかし、それでは、現場で十分に活用することは困難である。そこで、難解な事故調査報告書を読まなくても、一目で事故が理解できるように整理したものを事件事例にリンクさせることにした。これが事故進展フロー図である。

事故進展フロー図は、「事故概要」、「背景」、「事故進展フロー」、「恒久的対応策」、および「教訓」から構成される。事故進展フロー図の様式を図 3.1.1 に示す。

事故概要		事故番号	発生日時(曜日)	所在地
背景				
区分	原因事象	事故進展フロー		備考
経過	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象1(事故発生前)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象2(事故発生前)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">推定原因1</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象3(事故発生前)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">4</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象4(事故発生前)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">推定原因2* 推定原因3**</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">5</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象5(最終事象) 火災, 漏えいなど</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">事象1の備考</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">推定原因1の備考</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">事象3の備考</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">*推定原因2の備考 **推定原因3の備考</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">事象5(最終事象)の備考</div>		
対応操作	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象6(事故発生後)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象7(事故発生後)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">日時 時間</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">事象8(事故発生後)</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">事象6の備考</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">事象7の備考</div>		
恒久的 対応策	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">恒久的対応策1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">恒久的対応策2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">恒久的対応策3</div> </div>			
教訓	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">教訓フレーズ1: 説明文</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">教訓フレーズ2: 説明文</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">教訓フレーズ3: 説明文</div>			

図 3.1.1 事故進展フロー図の様式

「事故概要」欄には、発生日時、場所、および、概要文を記述する。RISCAD では一定のルールを定めて、この事故概要を作成している。「どこ(〇〇工場)で、何が(爆発、火災、漏えい、中毒)起きた。」を最初に記載し、被害の拡大状況や消防活動などを続ける。最終的な被害は、物的被害、人的被害に分けて、それぞれこの順序で記載する。次に事故原因を記載し、最後に、事故後の対応や行政による処分などを記載する。

次に、「背景」欄には事故事例の背景となった事柄や補足的な情報を記述する。事故が起きた設備の設立年代や設立の経緯、事故当時の社会情勢や事業所の状態、化学プロセスの事故であれば、関連化学物質の危険性やプロセスフローなど、必ずしも事故に直接関係のない事柄でも構わないが、事故を理解する上で役立ちそうな情報があれば、記載する。

「事故進展フロー」は、事故進展フロー図の主要部分であり、事故分析手法 PFA を実施する土台となる。「事故進展フロー」部分は縦3列から構成される。中央列には、事象を時系列に並べ、各事象において問題の有無を検討し、問題のある事象については、左列にその原因を抽出する。火災、爆発、漏えいなどの最終事象に至るまでを「経過」として記載し、被害拡大や消防活動など事故後の事象は、「対応操作」として記載する。右列は、備考欄である。備考には、各事象の補足情報を記載するほか、抽出した原因に対して、その原因を抽出するに至った理由や経緯の説明を記載する。

「恒久的対応策」には、「事故進展フロー」内で抽出された各原因に対する対応策を検討し、記載する。さらに、恒久的対応策を普遍化したものを教訓として、「教訓」欄に記載する。RISCAD では、教訓の表現方法として、簡潔で興味を持たれそうなフレーズをまず記載し、その説明文を一般的な意味とその教訓が分析した事例にあてはまる部分が理解できるように記載する。

事故進展フロー図は、時間の流れを基に分析を実施するものであるため、初心者でも比較的容易に事故進展フロー図を作成することが可能である。事故進展フロー図を作成するにあたっては、詳細な事故情報があることが望ましいが、少ない情報であっても相応に原因を抽出し、対応策を検討することができる。また、事故進展フロー図は、分析者以外の第三者が閲覧した場合に、難解な事故報告書を読むよりも事故の進展や原因がより容易に理解できるという利点がある。さらに、事故の進展を時系列に従って確認することにより、事故を擬似的に体験できる効果が期待できる。

## (2)事故分析手法 PFA の手順

事故分析手法 PFA は、以下の手順に従って分析を実施する。

- (a)事象の時系列整理
- (b)原因の抽出
- (c)恒久的対応策の検討
- (d)教訓の作成
- (e)概要文のまとめ

#### (f)グループによる議論

手順の詳細を以下に解説する。

#### (a)事象の時系列整理

事象事例の分析に先立って、分析対象となる事象事例に関する事故調査報告書などの情報を精読して、内容を十分に理解する必要がある。ただし、一般に事故調査報告書などは難解であるため、事象を時系列で整理しながらまとめると理解しやすい。

事故分析手法 PFA では、作業者および組織の行動、状況や設備、装置、化学物質および手順書の状態など全てを事象として時系列で並べる。

#### (b)原因の抽出

時系列で整理した事象には、どこかに事故に至った原因が隠れているはずである。そこで、各事象に問題がないかを逐次検討する。問題がありそうな事象については、原因の抽出を行う。主な原因は、すでに事故調査報告書などに記載されているが、残念ながら事故調査報告書には、必ずしも全ての原因が記載されているとは限らない。そこで、分析者の知識や経験に基づいて、できるだけ多くの原因を推定して抽出することが望ましい。ここが、事故調査と事象事例分析の相違点と言える。事象事例分析では、真の原因を追及するよりも、事象事例からより多くのことを学ぶことが重要である。

#### (c)恒久的対応策の検討

恒久的対応策は、抽出した原因ごとに検討し、原因の数だけ恒久的対応策を挙げられることが理想的である。

#### (d)教訓の作成

教訓は恒久的対応策を普遍化して作成する。ただし、事象事例をより印象づけるために、教訓は1つの事象事例に対して、2-4件程度に絞り込むのが望ましい。したがって、教訓を考える前に、まず、この事象事例でポイントとなる、事象事例を見る人に最も伝えたいことは何か、を考える必要がある。こうした検討を行うことにより、事象事例をより印象的に記憶することができ、また、事故防止のために、まずどこに注意すべきか、どういう対策を優先すべきかを判断する能力が身につけられる。

#### (e)概要文のまとめ

最後に分析結果をまとめて概要文を作成する。概要文の記載方法は、3.2項で紹介した。

#### (f)グループによる議論

事故分析手法 PFA による事故進展フロー図の作成は、前節までの手順で一応は完成する。

しかし、その事故進展フロー図には、情報源である事故調査報告書の内容と分析者個人の知識しか含まれていない。事故事例を知識化し、より有効に活用するために、数名のグループで議論し、事故進展フロー図を完成させる。ある分析者が作成した事故進展フロー図の原案に対して、分析者を含めた4-5名程度の異なるキャリアを持つ人たちからなるグループで事故事例について議論し、最終的に事故進展フロー図を完成させる。

### (3)事故分析手法 PFA の効用

本調査研究とは直接は関係しないが、事故進展フロー図を囲んでのグループによる議論には、次のような効果が考えられることを紹介する。

- (a)グループ内で事故の情報を知識として共有できる。
- (b)事故の進展の見落としを補完し、違った視点で原因を抽出できる。
- (c)原因の抽出や恒久的対応策について、他の参加者の知識や経験を共有できる。
- (d)皆で原因を見つけ出そうという意識、組織全体の安全意識が向上される。

例えば、化学プラント現場での短時間のミーティングの中で活用するなどの方法がある。

できあがった事故進展フロー図は、事業所全体や企業全体など、さらに広い範囲に水平展開して、事故事例情報の共有と安全教育に役立てることができる。

本調査研究においては、作成されたチェックポイントから各事故事例とその事故進展フロー図を参照できるようにするが、事故進展フロー図を囲んで事故やその原因について議論する時間があれば、上述のような活用方法が考えられる。

### 3.1.3 事故事例の分析

表 3.1.3 に示した各事故事例の概要を以下に示す。また、それらの事故調査報告書を分析し、作成した事故進展フロー図を別添 1 に示した。

#### (1)ポリプロピレン製造工場での爆発 1973年10月8日 千葉県

ポリプロピレン製造工場でのポリプロピレン装置の冷却器洗浄後に爆発が起きた。工場に停電が起こり、反応器の遠隔操作弁を開こうとした際に、誤って工事のため大気開放になっていた反応器の弁を開いた。ここから大量のプロピレン、ヘキサンなどが流出し、大爆発になった。

#### (2)水素還元プロセス中に爆発 1992年5月30日 神奈川県

パラフェネチジン製造プラントのパラニトロフェネチン(PNP)の水素還元プロセスで爆発が起きた。PNP 受槽と水素還元塔の間の配管で漏えいがあり、バルブが完全に閉止していなかったため溶媒のトルエン蒸気を含む水素が PNP 受槽側に逆流した結果、水素が保温材内に漏えいし、静電気によって着火した可能性がある。

(3)オレフィン製品製造工場での爆発 2005年10月6日 米国・テキサス州

オレフィン製品の製造工場にて連続した爆発が起きた。フォークリフトのトレーラーがプロピレン配管のバルブに引っかかり、配管を破断したために液体プロピレンが漏洩し、気化したガスから火災が発生し、連続した爆発を引き起こした。

(4)三フッ化窒素製造プラントでの爆発 2009年11月4日 山口県

化学製品製造会社にある鉄骨造の工場でガスボンベに三フッ化窒素を充填する作業中に火災、爆発が起きた。三フッ化窒素をガスボンベに注入していた際に、容器間の圧力差により三フッ化窒素が移動した際の流体摩擦が原因でガス管の接続部分から出火し、その後爆発に至った可能性がある。

(5)ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの爆発

2010年11月9日 米国・ニューヨーク州

米国のポリフッ化ビニルなどを製造する化学工場でポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの修理作業中に貯蔵タンクの爆発が起きた。計画点検後の再起動時に3基ある貯蔵タンクのうちの1基の修理作業を平行して実施しており、配管の縁切りが欠落していたところに、圧縮機の故障やシール部の亀裂により、他の2基の貯蔵タンクから可燃性のフッ化ビニルが当該貯蔵タンクに入り込み、着火、爆発した可能性がある。

(6)塩化ビニルモノマ製造施設での爆発 2011年11月13日 山口県

塩化ビニルモノマ製造施設にある塩酸塔還流槽付近で漏えい、爆発、火災が起きた。反応工程の緊急放出弁が故障が発端で最終的にプラント全工程が停止した。その際、塩酸塔還流槽などに溜まった混合液の反応による発熱に運転者が気づけなかったため、反応が急激に進行し、塩酸塔還流槽が破裂し、爆発、火災に至った。

(7)レゾルシンプラントでの爆発 2012年4月22日 山口県

化学工場で蒸気発生プラントの不具合によるレゾルシン製造プラントの緊急停止作業中に爆発、火災が起きた。運転者が、誤判断からインターロックを解除した際に液循環のために導入されていた窒素が自動で停止し、冷却用コイルが酸化反応器上部には設置されていなかったために酸化反応器上部で中間体のジヒドロキシパーオキシドの分解、発熱が起こり、爆発に至った可能性がある。

(8)アクリル酸製造施設での爆発 2012年9月29日 兵庫県

アクリル酸製造施設で保全工事後の再稼働中にアクリル酸中間タンクが破裂し、火災が起きた。アクリル酸の精製塔塔底液60立方mをタンクに溜めた際に、25立方m以上で実施することになっていた天板リサイクルが実施されなかったため、タンク上部で温度上昇

とともにアクリル酸の二量化反応が進行し、反応暴走に至った。

(9)水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発 2014年1月9日 三重県

超高純度の多結晶シリコン製造工場で水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発、火災が起きた。水素精製設備から熱交換機能が低下した水冷熱交換器を取り外して、内部洗浄作業のため熱交換器の上部チャンネルカバーを開放した直後に爆発が起きた。

(10)運転データを分析した事例 千葉県

ナフサ分解で得られる汎用石油化学原料から石油化学製品を量産するプロセスにおいて、濃縮工程の予熱器などの性能低下のトラブルが起きた。原料の空気酸化による有機過酸化物生成の反応工程で使用される弱アルカリ塩水溶液の助剤が、下流の濃縮工程の予熱器などに付着したことが原因で、プロセスを停止し、洗浄などによる助剤除去作業が必要となった。

## 3.2 チェックポイント分析シートによるチェックポイント作成

### 3.2.1 現場保安チェックポイント集検討会

現場で活用可能な保安に係るチェックポイントは、事故事例の分析によって抽出された大事故につながる「原因」を気づかせ、危険が顕在化することを未然に防止するためのもの、と考えられる。チェックポイントの作成にあたっては、事故事例から抽出された原因からエキスパートが想起するものをリストアップしていく、という方法が考えられるが、今後広く現場で使えるようにするためには、一定の手法として構築する必要がある。そこで、公益社団法人化学工学会(化学工学会) 安全部会 事故・ヒヤリハット事例活用ワーキンググループ(HHTWG)で考案された「3M3E 分析」<sup>4)</sup>によって、原因を要因に分類し、その分類結果をチェックポイント作成の出発点とすることとした。

チェックポイント作成にあたっては、化学プラント現場での経験と知識が必須である。そこで、化学プラントでの現場経験を有する方に集まっていたいただき、「現場保安チェックポイント集検討会」(検討会)を組織して、チェックポイントの作成の協力を依頼した。

検討会の人選にあたっては、化学工学会 安全部会に協力を要請し、その紹介で化学工学会 産学官連携センターのシニアの化学工学技術者の活動組織である SCE・Net (Senior Chemical Engineers Network)<sup>5)</sup>のメンバに協力を要請し、最終的に表 3.2.1 に示す方々に検討を依頼した。

表 3.2.1 現場保安チェックポイント集検討会検討員

	氏 名	所 属
1	竹内 亮 主査	事故分析・コミュニケーション研究所 所長
2	井内 謙輔	化学工学会安全部会
3	牛山 啓	化学工学会 SCE-Net 幹事
4	熊澤 信光	熊澤技術士事務所 所長
5	小谷 卓也	化学工学会 SCE-Net, AIChE 上級会員(名誉会員)
6	齋藤 興司	化学工学会 SCE-Net 幹事
7	澁谷 徹	化学工学会 SCE-Net 監査
8	中村 喜久男	化学工学会 SCE-Net
9	長安 敏夫	化学工学会 SCE-Net 幹事
10	松井 悦郎	カレントス(株) 社長
11	三平 忠宏	化学工学会 SCE-Net 幹事
12	山岡 龍介	化学工学会 SCE-Net
13	渡辺 紘一	化学工学会 SCE-Net
14	中島 農夫男	産総研 客員研究員
15	若倉 正英	産総研 客員研究員

### 3.2.2 3M3E 分析

3M3E 分析とは、事件事例の分析から抽出された原因に対して、さらにその要因を 3M(Man : 人, Machine : 設備/機器, Media/Management : 管理)の視点から分析し、それぞれに対して 3E(Education : 教育/訓練, Engineering : 技術/工学, Etc. : その他)の視点から対応策を検討する手法である。一般的には、4M4E 分析や 4M5E 分析などが行われるケースが多いが、HHTWG では、分析を簡略化するために 3M3E 分析とした。

各事件事例の事故進展フロー図を基本として、抽出されたそれぞれの原因に対して 3M3E 分析を行い(厳密には対応策までは考えていないので、3M 分析である)、「人」、「設備/機器」、「管理」の視点で要因を抽出した。最終的にチェックポイントは現場で活用することを目的としたため、管理よりも特に「人」と「設備/機器」についての要因の抽出を重要視した。

ある事象の原因に対して、3M3E 分析を行った例を図 3.2.1 に示す。

ここで問題となる事象と取り上げたのは、「冷却器の目詰まり」である。これに対し、「危険意識欠如」と「設備設計不備」が原因として抽出された。「危険意識欠如」という原因に対して、目詰まり対策が日常的に行われていたという実態を背景に、本来、非定常作業であり、危険性に十分配慮して行わなければならない作業に対する危険感覚が欠如していた、ということ「人」の要因として分析している。これの対応策は矢印の後に書かれた「危険感覚向上の教育」となる。「設備設計不備」という原因に対しては、そもそもの目詰まり対策を設備的に行わず、毎回の作業で対応していたことを「設備/機器」の要因として分析しており、「設備改善」が対応策となる。「管理」要因として、目詰まりの原因究明をせず、放置したこともあるが、本調査研究では「管理」要因は検討の対象としてない。

事象:冷却器の目詰まり		
原因1:危険意識欠如	原因2:設備設計不備	
Man	Machine	Media/Management
目詰まり対策という非定常作業に対する危険感覚欠如 →危険感覚向上の教育	補助冷却器目詰まり対策不良 →重合物が付着しないように設備改善	頻発する不具合の原因を究明しなかった →原因究明と設備や運転条件の改善の指示

図 3.2.1 3M3E 分析の例

3M3E 分析の結果は、事故進展フロー図の原因欄の右側に追記し、別添 1 に示した。

なお、3M3E 分析は、チェックポイントの分析と合わせて「現場保安チェックポイント集検討会」の検討員が行った。

### 3.2.3 チェックポイント分析シート

検討会の進め方は、まず、分析対象とした各事故事例 1 件につき、1-2 名の担当検討員を決め、産総研が準備した事故進展フロー図を元に、検討会の開催前に 3M3E 分析からチェックポイントの作成までを準備しておく。

その際、3M3E 分析によって、抽出された「人」、「設備/機器」、「管理」の視点からの要因のうち、主に「人」と「設備/機器」に関する要因を書き出して、それぞれの要因に対する「気づき」、すなわち、チェックポイントを作成することとした。「人」の要因には、その人が実施する作業も含まれると考え、「作業/人」として整理した。また、本調査研究で構築する「チェックポイント集検索システム」での検索に用いるために、各チェックポイントについて、「キーワード」も作成することとした。

そこで、3M3E 分析結果からチェックポイント、キーワードの作成を行うために、一連の「要因」→「チェックポイント」→「キーワード」を記入するための「チェックポイント分析シート」を作成し、検討員は検討会開催前にこのシートを作成することとした。

チェックポイント分析シートの作成例を図 3.2.2 に示す。

事例に基づくチェックポイント					
原因(3M3Eより抽出)		注意すべき事項		キーワード	
設備/設計	作業/人	設備/設計	作業/人	設備/設計	作業/人
・補助冷却器目詰まり対策不良	・目詰まり対策という非正常作業に対する危険感覚欠如	・目詰まりしやすい箇所を把握しているか？ ・目詰まりの要因(化学物質、危険性)を把握しているか？ ・根本的な対策(バイパス運転、二系列化)はとれないか？ ・メンテ方法を考慮した設計になっているか？	・目詰まりを回避/減少させる操作方法はあるか？ ・目詰まりが定期的に発生する場合、その対策は作業手順書に含まれているか？ ・非正常作業の危険箇所は確認したか？ ・非正常の工事を実施する前に、危険分析を実施して対策を施したか？	・補助冷却器 ・目詰まり ・目詰まり防止 ・目詰まり要因	・目詰まり清掃 ・非正常作業/工事 ・危険分析

### 3.2.4 チェックポイント作成

検討会は、事故事例 1 件につき 1 回開催し、1 回に 2-3 時間をかけ、担当検討員が事前に作成したチェックポイントの 1 件 1 件について、参加した検討員全員の経験と知識を活かして検討した。各事故事例での議論のポイントは後述するが、基本的には、設計者を含む現場の作業者に事故防止のための「気づき」を与えることを念頭に置き、管理側の責任で実施すべきことや、設計者を含む現場作業員では対応が困難なことは除外した。

検討会の実施状況と議論のポイントは以下の通りである。

各事故事例のチェックポイント作成結果を記載したチェックポイント分析シートを別添 2 に示した。

第1回 2015年10月20日(火)10:00-13:00, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(1)ポリプロピレン製造工場で爆発 (担当：竹内主査)

議論のポイント

- ・ 事故に関連した化学物質名は重要な情報であるが、現場で活用する際に利用者が一見して自分たちには関係のないチェックポイントだと思わないように、チェックポイントには、具体的な物質名を記載せず、「重合物」などの危険要因が把握できるような名称を用いる。
- ・ 事故に関連した設備/機器に関しても同様に「目詰まりしやすい箇所」のように要因と関連付けできるような名称とする。

第2回 2015年11月4日(水)13:00-16:00, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(6)塩化ビニルモノマ製造施設で爆発 (担当：井内検討員)

議論のポイント

- ・ リスク評価によって副反応生成物による危険性を予測し、設備/機器で対応するのは設計側のチェックポイントであるが、運転側でも顕在化した危険性を気づかせるためのチェックポイントが必要である。
- ・ 緊急時のアラームの洪水の中で運転側が確認すべきことを明らかにした。

第3回 2015年11月18日(水)10:00-12:30, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(3)オレフィン製品製造工場で爆発 (担当：竹内主査)

議論のポイント

- ・ チェックポイントを適用範囲で、広い、中間、狭い、に分類してみた。今後の採否は各担当者に任せる。
- ・ 車両の入構手続きや車両衝突防護の考え方が現場によって異なる。

第4回 2015年12月7日(月)13:00-15:30, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(7)レゾルシンプラントが爆発 (担当：熊澤検討員)

議論のポイント

- ・ インターロックの作動、あるいは、インターロックの解除によって、プロセス状態がどのように変わるのか、設計側の想定と運転側への周知が重要である。
- ・ インターロック解除の条件と手続きを明確にしておく必要がある。

第5回 2015年12月14日(月)10:00-12:30, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(5)ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの爆発

(担当：澁谷検討員, 山岡検討員)

議論のポイント

- ・ 火気並行工事の考え方が現場によってかなり異なり、また、高圧ガスの講習会では、火

気使用許可を受ければ良いことになっているため、実際には全面的に運転中の火気並行工事を禁止することは困難である。

・本調査研究で作成するチェックポイントは法的効力を持つものではないので、まずは、注意喚起の意味で工事中の火気並行工事を禁止するチェックポイントを作成し、現場に火気並行工事回避を検討するための気づきを与え、現場の適切な管理者の承認を得た上で、火気並行工事を実施する際のチェックポイントも作成した。

第6回 2015年12月22日(火)12:30-15:00, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(2)水素還元プロセス中に爆発 (担当：齋藤検討員, 渡辺検討員)

議論のポイント

・配管材料の選定は設計側のチェックポイントであるが、漏洩などの異常時に運転側で配管材料を疑うチェックポイントも作成した。

・チェックポイント集の検索に用いるチェックポイントの分類について検討し、設計、工事(事前, 当日), 保全(事前, 当日), 運転(事前, 当日, 緊急時)とし、機器、作業、現象について2階層のキーワードを作成し、絞り込み検索を可能とすることとした。

第7回 2016年1月8日(金)13:00-15:30, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(8)アクリル酸製造施設で爆発 (担当：中村検討員)

議論のポイント

・事故の発端となった天板リサイクルの不実施について、設計側、運転側それぞれのチェックポイントを作成した。

・公設消防への情報提供は管理側の問題であるが、そのような緊急時に運転側でやるべきことのチェックポイントを作成した。

第8回 2016年1月12日(火)13:00-16:00, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例：(9)水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発 (担当：三平検討員, 松井検討員)

議論のポイント

・事例(9)は管理側の責任が大部分であり、現場に対するチェックポイントの作成は困難であったが、繰り返し起きていた発火の原因究明を管理側に要望する、繰り返し発火が起きていたような危険な作業をする際の人員の制限などをチェックポイントとして作成した。

・チェックポイントの分類方法について、工事と保全の考え方が現場によって大きく異なることが明らかになったが、現地評価の結果を受けて検討することとした。

第9回 2016年1月19日(火)12:30-15:30, 産総研東京本部 第2会議室

検討事例：(4)三フッ化窒素製造プラントで爆発 (担当：牛山検討員)

議論のポイント

- ・事故調査報告書の記載が不十分で、ガスの充填方法や着火原因について疑問が多いが、それ以上の情報がないため、事故調査報告書の記載を元に分析を行った。
- ・関連情報として、産総研で実施している支燃性ガスとシール材との燃焼性評価実験の結果を示した。この表は同事故事例の事故進展フロー図に添付した。

表 3.2.2 各支燃性ガス雰囲気中におけるシール材等の発火温度(°C)

	NF <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	ClF <sub>3</sub>
PTFE	>450	>450	>450
PCTFE	>450	392	>450
PE	422	215	180
FKM	395	411	188
CR	374	378	187

PTFE : ポリテトラフルオロエチレン  
PCTFE : ポリクロロトリフルオロエチレン  
PE : ポリエチレン  
FKM : フッ素ゴム  
CR : クロロプレンゴム

第 10 回 2016 年 1 月 25 日(月)13:00-15:00, 公益社団法人 化学工学会 大会議室

検討事例 : (10)運転データを分析した事例 (担当 : 中島客員研究員, 小谷検討員)

議論のポイント

- ・運転トラブルの改善の事例であるが、チェックポイントの作成を試みた。
- ・運転日数による管理は運転負荷によってトラブル発生までの日数が異なるため、運転データからの予兆現象の抽出が活用できる可能性が示された。
- ・チェックポイント集検索システムについては、物質特有のチェックポイントも検索できるように検討する。

#### 引用文献

- 1) 「リレーショナル化学災害データベース」(Relational Information System for Chemical Accidents Database, RISCAD), <http://riscad.db.aist.go.jp>
- 2) 「事故分析手法 PFA」, 商標登録, 第 5580785 号(2013)
- 3) 和田有司, 「産業保安と事故事例データベースの活用 -リレーショナル化学災害データベースと事故分析手法 PFA-」, シンセシオロジー, Vol.6(4), pp.219-227(2013)
- 4) 和田有司, 阿部祥子, 杉本まき子, 松倉邦夫, 中島農夫男, 若倉正英, 「化学プラントの事故事例の活用に向けて-事故情報の収集と活用-」, 第 44 回化学工学会秋季大会(2012)
- 5) 「公益社団法人化学工学会 産学官連携センター SCE・Net (Senior Chemical Engineers Network)」, <http://www.sce-net.jp>

#### 4. 運転データからの事故予兆現象の抽出

高圧ガスの事故の発生防止のために、インバリエント分析技術を用いて、事故が発生するまでの運転データを時系列で調査分析し、予兆を抽出することができるかどうかを検証した。

##### 4.1 インバリエント分析技術の概要

インバリエント分析技術は、システムのセンサデータを自動抽出し、従来の分析方式では見つけづらかった故障の予兆、「いつもと違う状態」を発見する機械学習技術である。

時系列の数値データを分析対象とし、正常な期間の数値データから、センサデータ間の関係性を「モデル」として学習し、リアルタイムに得られる数値データを監視することで、異常兆候を早期に発見することができる。モデルは、センサデータ間の関係性を数学的に記述したものであり、インバリエント分析技術のソフトウェアが自動的に生成する。

インバリエント分析技術を用いた分析手法を「インバリエント分析」とする。インバリエント分析を行うプロセスとして、以下の2項が挙げられる。

##### (1)関係性(インバリエント)の抽出

各センサデータ(図 4.1.1 の” m” )間の関係式を導出し、関係が安定しているものをモデルとして作成し、学習する。

##### (2)数値データの監視

生成したモデルを用いて故障予兆検知を行う。収集されたセンサデータ間の関係性が、モデルに学習された関係性と変化しているかどうかを分析する。機器の劣化などでシステムが「いつもと違う」挙動をはじめた(関係式からの予測値から乖離があった:「関係性の崩れ」があった)場合、その小さな変化の時点で異常と認識し、故障を検知する。

これにより、故障の状況を管理者が正確に把握し、システムに大きな影響を与える前に対処することが期待できる。

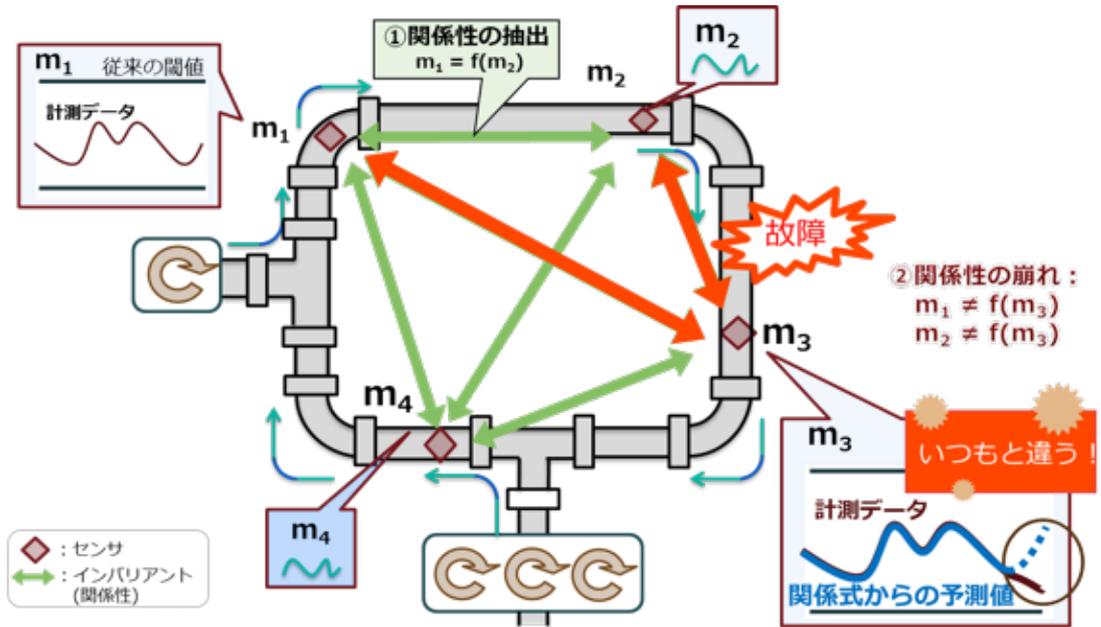


図 4.1.1 異常検知の具体例

## 4.2 運転データのインバリエント分析

### 4.2.1 対象事象概要

運転データのインバリエント分析の対象事例として、化学プラントの濃縮塔熱交換器の詰まり現象を対象とした。当該濃縮塔熱交換器はコアレッサーにて分離できなかったナトリウム塩がチューブ表面に付着する事により熱交換効率が悪くなるため、定期的にプラントを停止し、洗浄を実施していたが、一時期その頻度が増加した。

本事象は長期連続運転の阻害要因であり、また、プラント停止、スタート時の非定常作業に伴う事故発生リスクの増大を招くものであった。

この熱交換器詰まりの事例に関して、インバリエント分析技術を用いて事象が発生するまでの運転データを分析し、事象の予兆を抽出することができるか検証した。また、従来は熱交換器の圧力の上昇速度を監視することにより、熱交換器の詰まり状況を判断していたが、インバリエント分析技術によってプロセスデータ全体から詰まり状況を事前に把握し、コアレッサーの不調もしくは水洗のタイミングをよりの確に判断する情報を得ることを目的とした。

対象としたプロセスのプロセスフロー図を図 4.2.1 に示す。

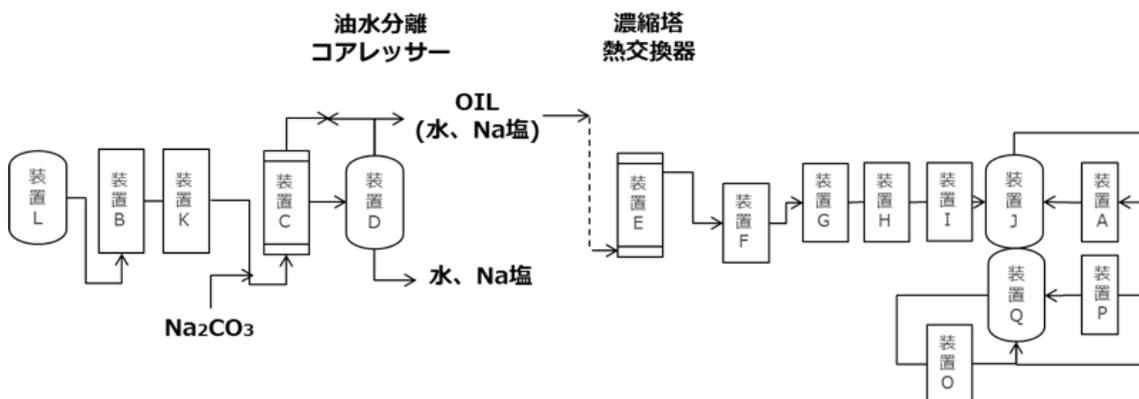


図 4.2.1 プロセスフロー図

### 4.2.2 実施計画

熱交換器の詰まりが少ない期間を「いつもの状態」と定義し、その期間のデータを用いてインバリエントモデルを作成する。詰まり状況の進行がある期間をいつもと違う状態として検出する検定を行う。検出することにより、熱交換器の詰まりの予兆を抽出することが可能と考えられるため、それを検定することとした。

また、従来の洗浄のための停止(Cleaning Shutdown : CSD)および定期修理のタイミングにおけるセンサデータ間の関係性の崩れを分析し、関係性の崩れ状態から洗浄タイミングの判断が可能か検証する。

### 4.2.3 分析対象データ

#### (1)受領データ

化学プラントのプロセスデータに関して、以下のデータを対象としてインバリアント分析を実施した。

インバリアント分析にて必要とされるデータ期間は1年が目安であることに対し、4年間のデータを提供いただけたため、使用データ期間は十分である。また、センサデータ数は、対象となる装置において現状取得している全てのセンサデータを受領し、データの取得間隔も現状設定している最小の単位である1時間のデータを受領した。

表 4.2.1 分析に使用したプロセスデータ概要

使用データ期間	2006/11/01 ~ 2010/10/31(4年間)
センサデータ数	85
取得間隔	1時間
総データ件数	2,980,440件

#### (2)データ詳細

本プラントは定期修理やCSDを行うために、期間中に運転を停止している。分析に使用した期間における運転停止期間を示す。

表 4.2.2 プラント停止期間

No	停止期間
1	2006/10/28 00:00~2006/12/02 00:00
2	2007/06/03 00:00~2007/06/07 00:00
3	2008/02/18 00:00~2008/02/22 00:00
4	2008/10/20 00:00~2009/02/03 00:00
5	2010/02/23 00:00~2010/02/25 00:00
6	2010/03/01 00:00~2010/03/13 00:00
7	2010/10/12 00:00~2010/11/30 00:00

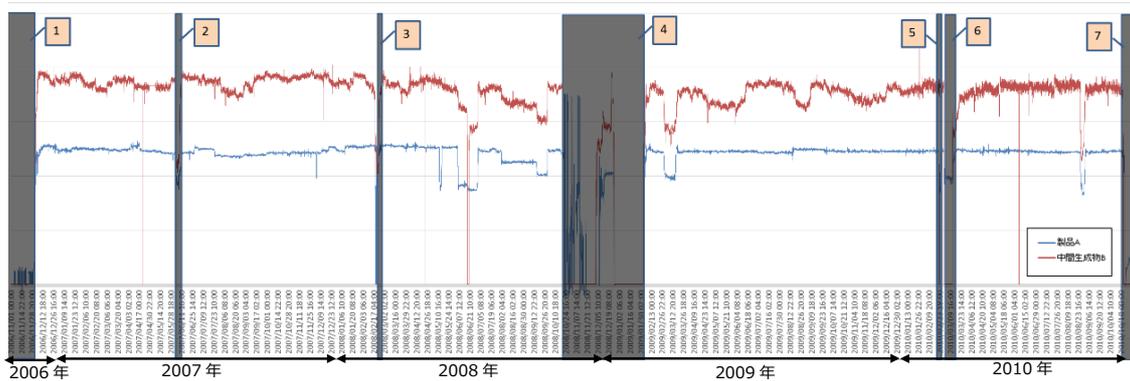


図 4.2.2 プラント停止期間と製品 A(青線), 中間生成物 B(赤線)の生産量

2008 年 10 月末(図 4.2.2 の 4)から実施している定期修理では, コアレサラーの改修を行っており, 2009 年 2 月の運転開始以降, 熱交換器詰まりの発生は抑制されている。

#### 4.2.4 不適切なデータの補間について(インバリエント分析の前処理)

インバリエント分析技術では数値のみを扱うため, 数値以外のデータを除外する必要がある。

分散制御システム (Distributed Control System : DCS)のデータを確認したところ, 数値以外に 6 種類の文字列が見つかった。文字列が記録されている値については, 異常値として前後の値と区別するため, すべて 0 で補間することとした。数値以外のデータの種類を以下に示す。

表 4.2.3 数値以外の DCS データ

No	非数値データ	発生率(%)
1	No Data	14.88
2	Shutdown	0.32
3	Bad Input	0.03
4	?175	0.01
5	P_REMOTE_ERROR	0.007
6	P_BAD_DIGSTATE	0.004

また, センサ名が重複しているセンサデータが 12 種類見つかったが, 重複したものはセンサデータに差分が無かったことから, 一方を削除することとした。

### 4.3 インバリエント分析詳細

#### 4.3.1 学習期間

熱交換器の詰まり状況を検出するため、学習期間は詰まりの少ない期間として、コアレッサ改修以降の2009年2月以降のデータから選定し、急激な変動があった個所については学習期間から除外した。

インバリエントモデルの学習に使用した期間を以下に示す。

表 4.3.1 インバリエントモデルの学習期間

No	学習期間
期間 1	2009/02/10 00:00 ~ 2010/02/17 00:00
期間 2	2010/04/07 00:00 ~ 2010/05/30 00:00
期間 3	2010/06/15 00:00 ~ 2010/08/19 00:00
期間 4	2010/09/10 00:00 ~ 2010/10/05 00:00

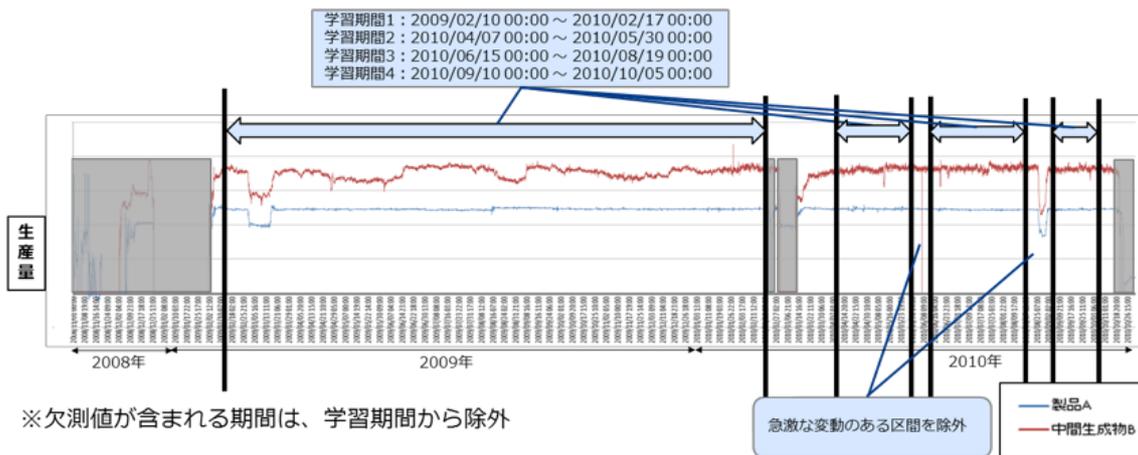


図 4.3.1 製品 A, 中間生成物 B の生産量と学習期間との関係

### 4.3.2 モデル図

前項の学習期間で作成したモデルの論理関係図を以下に示す。

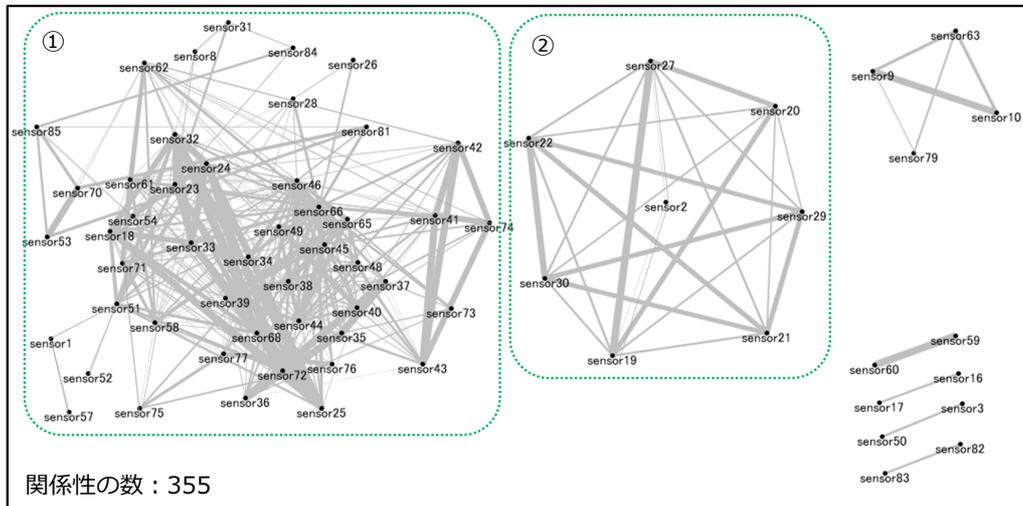


図 4.3.2 モデル論理関係図

モデル論理関係図では、各点がセンサを表し、関係性を持つセンサが線で結ばれ、線の太さは関係性の強さを示す。線が太いほど関係性が強く、線が細いほど関係性が弱い。センサを表す点の位置については、他のセンサと被らないように自動で描画が行われる。センサデータは大きく①と②の2つの集まりに分かれた。①の集まりは複数の生産工程にまたがるセンサデータで構成されており、②の集まりは1つの生産工程に関するセンサデータを中心に構成されている。

### 4.3.3 異常検知結果

熱交換器の詰まりが発生しているコアレッサー改修前の2006年11月から2008年10月について、作成したインバリエントモデルを用いて検定を行った。検定した結果の異常度グラフと製品A、中間生成物Bの生産量の関係を以下に示す。

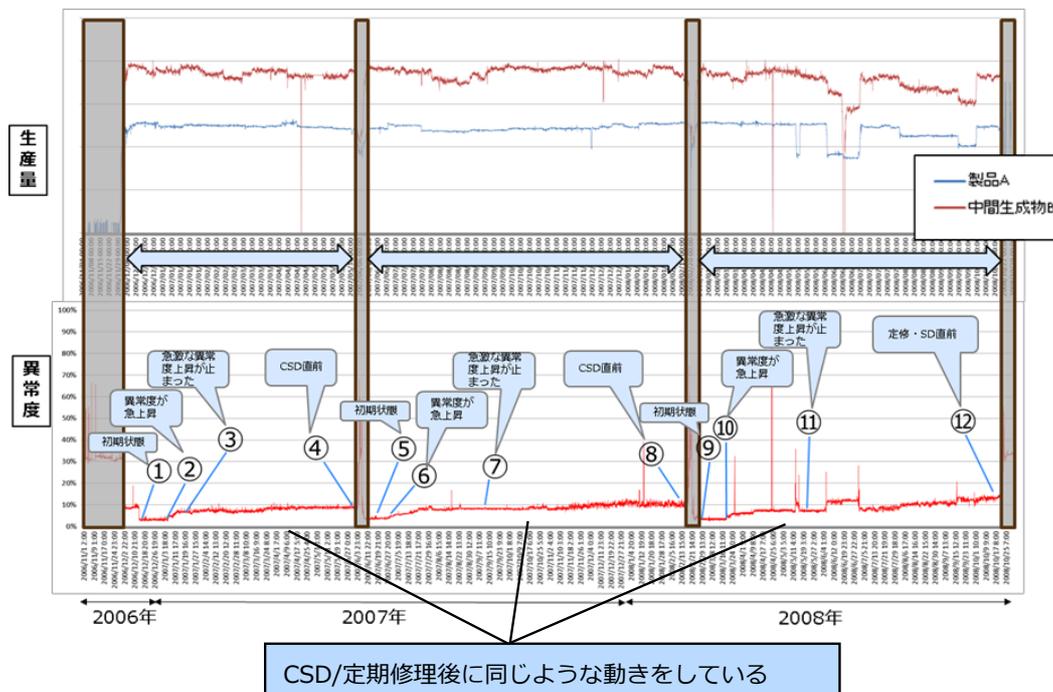


図 4.3.3 インバリエント分析による検定結果

#### (1)異常検知結果概要

該当期間においてCSD/定期修理が3回行われており、それぞれのCSD/定期修理の1ヶ月後(次回CSD/定期修理の5~7ヶ月前)から異常度の増加が見られた。これはインバリエントモデルを作成した状態とは異なる状態に徐々に変化している、つまり熱交換器内に詰りが発生し、熱交換器の効率が低下していることを表している。各CSD/定期修理間のポイント①~⑫について異常度の増加要因を分析したところ、装置Aの圧力および温度に関する関係性の崩れがCSD/定期修理から時間が経過するにつれて増加する傾向と、sensor68(装置RのLEVEL(MV))に関する関係性の定常的な崩れを検出した。装置Aの圧力および温度に関連するセンサデータを以下に示す。

表 4.3.2 装置 A に関連するセンサデータ

項目	センサデータ名
装置 A の圧力に関するセンサデータ	sensor40(MV)、sensor41(PV)、sensor42(SV)
装置 A の温度に関するセンサデータ	sensor43(MV)、sensor44(PV)、sensor45(SV)

注 SV: 設定値 (Set Variable)、PV: 測定値 (Process Variable) 、MV: 操作量 (出力) (Manipulative Variable)

それぞれのポイントにおいて関係性が崩れていたセンサの一覧を示す。自動で抽出されるものであり、関係性の崩れが大きい順(significance の降順)に並べている。

表 4.3.3 ①～⑫の各ポイントにおいて関係性が崩れたセンサー一覧

① 2006/12/14 16:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor68	sensor39	0.3157	1.2193
2	sensor68	sensor45	0.3622	1.2027
3	sensor68	sensor44	0.3583	1.1839
4	sensor68	sensor65	0.3261	1.1730
5	sensor68	sensor58	0.3490	1.1721
6	sensor68	sensor23	0.5062	1.1672
7	sensor68	sensor71	0.4013	1.1661
8	sensor68	sensor33	0.7194	1.1600
9	sensor68	sensor25	0.7194	1.1600
10	sensor68	sensor32	0.7295	1.1390
11	sensor68	sensor18	0.6984	1.1264

② 2007/1/10 17:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor68	sensor32	0.7295	1.2717
2	sensor68	sensor39	0.3157	1.2562
3	sensor68	sensor45	0.3622	1.2558
4	sensor73	sensor36	0.4003	1.2410
5	sensor68	sensor44	0.3583	1.2407
6	sensor73	sensor37	0.4003	1.2406
7	sensor68	sensor65	0.3261	1.2347
8	sensor73	sensor35	0.4004	1.2332
9	sensor41	sensor45	0.4933	1.2300
10	sensor43	sensor44	0.4935	1.1986
11	sensor68	sensor71	0.4013	1.1852
12	sensor68	sensor33	0.7194	1.1652
13	sensor68	sensor25	0.7194	1.1652
14	sensor68	sensor23	0.5062	1.1487
15	sensor68	sensor58	0.3490	1.1266
16	sensor43	sensor45	0.4916	1.1256
17	sensor61	sensor58	0.5534	1.1004
18	sensor74	sensor45	0.4476	1.1001

③ 2007/1/20 15:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor73	sensor37	0.4003	1.7116
2	sensor73	sensor36	0.4003	1.7076
3	sensor73	sensor35	0.4004	1.6958
4	sensor41	sensor45	0.4933	1.5593
5	sensor43	sensor35	0.3005	1.5169
6	sensor43	sensor37	0.3004	1.5139
7	sensor43	sensor36	0.3005	1.5111
8	sensor43	sensor44	0.4935	1.5104
9	sensor41	sensor37	0.3010	1.4433
10	sensor41	sensor36	0.3011	1.4417
11	sensor41	sensor35	0.3011	1.4285
12	sensor43	sensor45	0.4916	1.4280
13	sensor61	sensor58	0.5534	1.3685
14	sensor41	sensor44	0.4957	1.3542
15	sensor74	sensor45	0.4476	1.3474
16	sensor74	sensor44	0.4495	1.2943
17	sensor68	sensor39	0.3157	1.2619
18	sensor68	sensor45	0.3622	1.2405
19	sensor68	sensor65	0.3261	1.2241
20	sensor68	sensor44	0.3583	1.2236
21	sensor68	sensor24	0.7252	1.1631
22	sensor68	sensor32	0.7295	1.1610
23	sensor68	sensor71	0.4013	1.1466
24	sensor68	sensor33	0.7194	1.1379
25	sensor68	sensor25	0.7194	1.1379
26	sensor68	sensor23	0.5062	1.1087

④ 2007/5/19 19:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor61	sensor58	0.5534	3.9051
2	sensor41	sensor45	0.4933	3.7931
3	sensor43	sensor44	0.4935	3.6998
4	sensor43	sensor45	0.4916	3.4699
5	sensor41	sensor44	0.4957	3.3184
6	sensor74	sensor45	0.4476	2.8619
7	sensor74	sensor44	0.4495	2.7748
8	sensor43	sensor65	0.3140	2.6832
9	sensor41	sensor65	0.3150	2.6761
10	sensor42	sensor65	0.3107	1.9124
11	sensor73	sensor37	0.4003	1.9069
12	sensor73	sensor35	0.4004	1.9063
13	sensor73	sensor36	0.4003	1.9051
14	sensor42	sensor44	0.4880	1.8135
15	sensor42	sensor45	0.4857	1.7572
16	sensor68	sensor65	0.3261	1.6363
17	sensor68	sensor39	0.3157	1.6301
18	sensor68	sensor45	0.3622	1.4852
19	sensor68	sensor44	0.3583	1.4780
20	sensor72	sensor24	0.7586	1.4571
21	sensor40	sensor49	0.7900	1.3700
22	sensor72	sensor25	0.7662	1.3288
23	sensor72	sensor33	0.7662	1.3287
24	sensor30	sensor22	0.8721	1.3012
25	sensor32	sensor45	0.3107	1.2663
26	sensor33	sensor45	0.3133	1.2607
27	sensor25	sensor45	0.3134	1.2607
28	sensor24	sensor45	0.3122	1.2569
29	sensor72	sensor39	0.3753	1.2066
30	sensor18	sensor45	0.3193	1.1671
31	sensor29	sensor20	0.4226	1.1576
32	sensor21	sensor20	0.4275	1.1561
33	sensor68	sensor33	0.7194	1.1283
34	sensor68	sensor25	0.7194	1.1283
35	sensor68	sensor23	0.5062	1.1182
36	sensor68	sensor32	0.7295	1.1085

fitness : 関係性の強さ 5.1 用語参照

significance : 予測値からの乖離 5.1 用語参照

網掛け : 装置 A の圧力、温度関連センサ

⑤ 2007/6/10 13:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor68	sensor39	0.3157	1.5649
2	sensor68	sensor65	0.3261	1.4866
3	sensor68	sensor45	0.3622	1.4865
4	sensor68	sensor44	0.3583	1.4673
5	sensor68	sensor32	0.7295	1.4271
6	sensor68	sensor58	0.3490	1.4233
7	sensor68	sensor71	0.4013	1.4129
8	sensor68	sensor23	0.5062	1.4127
9	sensor68	sensor33	0.7194	1.3779
10	sensor68	sensor25	0.7194	1.3779
11	sensor68	sensor18	0.6984	1.1406

⑦ 2007/9/20 15:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor61	sensor58	0.5534	3.5360
2	sensor43	sensor44	0.4935	3.3537
3	sensor41	sensor45	0.4933	3.1993
4	sensor41	sensor44	0.4957	3.0099
5	sensor43	sensor45	0.4916	2.9248
6	sensor74	sensor44	0.4495	2.4602
7	sensor43	sensor65	0.3140	2.4423
8	sensor41	sensor65	0.3150	2.4398
9	sensor74	sensor45	0.4476	2.3109
10	sensor40	sensor49	0.7900	1.9973
11	sensor73	sensor37	0.4003	1.8869
12	sensor73	sensor36	0.4003	1.8851
13	sensor73	sensor35	0.4004	1.8765
14	sensor42	sensor65	0.3107	1.7401
15	sensor68	sensor65	0.3261	1.6965
16	sensor42	sensor44	0.4880	1.6432
17	sensor68	sensor39	0.3157	1.5866
18	sensor68	sensor44	0.3583	1.5312
19	sensor42	sensor45	0.4857	1.4800
20	sensor68	sensor45	0.3622	1.4601
21	sensor68	sensor32	0.7295	1.4247
22	sensor30	sensor22	0.8721	1.3922
23	sensor68	sensor23	0.5062	1.3618
24	sensor68	sensor18	0.6984	1.3574
25	sensor68	sensor33	0.7194	1.3570
26	sensor68	sensor25	0.7194	1.3570
27	sensor68	sensor24	0.7252	1.2602
28	sensor68	sensor71	0.4013	1.1325

⑥ 2007/7/12 12:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor41	sensor45	0.4933	1.8557
2	sensor43	sensor44	0.4935	1.7768
3	sensor43	sensor45	0.4916	1.6966
4	sensor61	sensor58	0.5534	1.6880
5	sensor41	sensor44	0.4957	1.5956
6	sensor68	sensor39	0.3157	1.5797
7	sensor68	sensor65	0.3261	1.4742
8	sensor74	sensor45	0.4476	1.4706
9	sensor68	sensor45	0.3622	1.4505
10	sensor68	sensor18	0.6984	1.4504
11	sensor68	sensor44	0.3583	1.4244
12	sensor74	sensor44	0.4495	1.3981
13	sensor68	sensor23	0.5062	1.3632
14	sensor68	sensor71	0.4013	1.3374
15	sensor68	sensor33	0.7194	1.3303
16	sensor68	sensor25	0.7194	1.3303
17	sensor68	sensor32	0.7295	1.3189
18	sensor68	sensor24	0.7252	1.2212
19	sensor43	sensor65	0.3140	1.1794
20	sensor41	sensor65	0.3150	1.1722
21	sensor68	sensor58	0.3490	1.1683

⑧ 2008/2/3 14:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor43	sensor44	0.4935	4.1578
2	sensor41	sensor44	0.4957	3.7296
3	sensor41	sensor45	0.4933	3.2180
4	sensor74	sensor44	0.4495	3.1468
5	sensor43	sensor65	0.3140	3.0784
6	sensor41	sensor65	0.3150	3.0625
7	sensor43	sensor45	0.4916	2.9448
8	sensor61	sensor58	0.5534	2.7688
9	sensor74	sensor45	0.4476	2.2687
10	sensor42	sensor65	0.3107	2.1949
11	sensor42	sensor44	0.4880	2.0387
12	sensor73	sensor37	0.4003	1.9529
13	sensor73	sensor36	0.4003	1.9511
14	sensor73	sensor35	0.4004	1.9488
15	sensor68	sensor65	0.3261	1.8475
16	sensor65	sensor39	0.8095	1.8014
17	sensor65	sensor45	0.6987	1.7099
18	sensor68	sensor44	0.3583	1.6523
19	sensor42	sensor45	0.4857	1.4902
20	sensor27	sensor19	0.9750	1.4238
21	sensor68	sensor39	0.3157	1.4114
22	sensor20	sensor22	0.4478	1.3910
23	sensor20	sensor30	0.4407	1.3651
24	sensor72	sensor23	0.6171	1.3244
25	sensor68	sensor45	0.3622	1.3075
26	sensor18	sensor71	0.3712	1.2771
27	sensor38	sensor45	0.6024	1.2763
28	sensor25	sensor23	0.6893	1.2276
29	sensor33	sensor23	0.6894	1.2276
30	sensor46	sensor39	0.6532	1.2237
31	sensor68	sensor32	0.7295	1.2061
32	sensor68	sensor33	0.7194	1.1948
33	sensor68	sensor25	0.7194	1.1948
34	sensor44	sensor45	0.9014	1.1815
35	sensor23	sensor18	0.6461	1.1610
36	sensor24	sensor23	0.6858	1.1423
37	sensor68	sensor23	0.5062	1.1203
38	sensor68	sensor24	0.7252	1.1106
39	sensor68	sensor18	0.6984	1.1071

㉑ 2008/2/23 05:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor68	sensor58	0.3490	1.4641
2	sensor68	sensor71	0.4013	1.3856
3	sensor68	sensor32	0.7295	1.3038
4	sensor68	sensor39	0.3157	1.2912
5	sensor83	sensor82	0.4873	1.2891
6	sensor68	sensor23	0.5062	1.2840
7	sensor68	sensor33	0.7194	1.2696
8	sensor68	sensor25	0.7194	1.2696
9	sensor68	sensor45	0.3622	1.2425
10	sensor68	sensor65	0.3261	1.2371
11	sensor68	sensor44	0.3583	1.2276
12	sensor68	sensor24	0.7252	1.1983

㉒ 2008/5/24 12:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor41	sensor45	0.4933	3.3142
2	sensor43	sensor44	0.4935	3.2305
3	sensor43	sensor45	0.4916	3.0288
4	sensor41	sensor44	0.4957	2.9042
5	sensor74	sensor45	0.4476	2.4637
6	sensor74	sensor44	0.4495	2.3930
7	sensor43	sensor65	0.3140	2.2173
8	sensor41	sensor65	0.3150	2.2078
9	sensor73	sensor37	0.4003	1.7213
10	sensor73	sensor36	0.4003	1.7204
11	sensor73	sensor35	0.4004	1.7156
12	sensor68	sensor39	0.3157	1.6594
13	sensor40	sensor49	0.7900	1.6026
14	sensor42	sensor44	0.4880	1.5859
15	sensor42	sensor65	0.3107	1.5832
16	sensor68	sensor65	0.3261	1.5750
17	sensor42	sensor45	0.4857	1.5354
18	sensor68	sensor45	0.3622	1.4921
19	sensor68	sensor44	0.3583	1.4835
20	sensor68	sensor32	0.7295	1.3827
21	sensor68	sensor24	0.7252	1.3033
22	sensor72	sensor39	0.3753	1.2642
23	sensor68	sensor23	0.5062	1.2380
24	sensor68	sensor33	0.7194	1.2103
25	sensor68	sensor25	0.7194	1.2103
26	sensor68	sensor18	0.6984	1.1716

㉓ 2008/3/22 18:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor68	sensor39	0.3157	1.3706
2	sensor68	sensor45	0.3622	1.3319
3	sensor68	sensor65	0.3261	1.3223
4	sensor68	sensor32	0.7295	1.3178
5	sensor68	sensor44	0.3583	1.3126
6	sensor41	sensor45	0.4933	1.2801
7	sensor68	sensor58	0.3490	1.2655
8	sensor43	sensor44	0.4935	1.2438
9	sensor68	sensor23	0.5062	1.2420
10	sensor73	sensor37	0.4003	1.2330
11	sensor73	sensor36	0.4003	1.2291
12	sensor73	sensor35	0.4004	1.2240
13	sensor68	sensor33	0.7194	1.2200
14	sensor68	sensor25	0.7194	1.2200
15	sensor68	sensor71	0.4013	1.1961
16	sensor43	sensor45	0.4916	1.1764
17	sensor41	sensor44	0.4957	1.1105

㉔ 2008/10/8 6:00:00

	計測項目(入力)	計測項目(出力)	fitness	significance
1	sensor20	sensor22	0.4478	8.5281
2	sensor20	sensor30	0.4407	8.4969
3	sensor41	sensor45	0.4933	4.3422
4	sensor43	sensor45	0.4916	3.9690
5	sensor43	sensor44	0.4935	3.9594
6	sensor41	sensor44	0.4957	3.5566
7	sensor74	sensor45	0.4476	3.3245
8	sensor74	sensor44	0.4495	2.9714
9	sensor43	sensor65	0.3140	2.8132
10	sensor41	sensor65	0.3150	2.8050
11	sensor61	sensor58	0.5534	2.5791
12	sensor20	sensor27	0.7520	2.5267
13	sensor20	sensor19	0.7497	2.3709
14	sensor27	sensor22	0.4899	2.1538
15	sensor21	sensor22	0.7542	2.1441
16	sensor19	sensor22	0.4919	2.1399
17	sensor21	sensor30	0.7253	2.0617
18	sensor42	sensor45	0.4857	2.0101
19	sensor42	sensor65	0.3107	2.0031
20	sensor27	sensor30	0.4760	1.9996
21	sensor19	sensor30	0.4775	1.9851
22	sensor42	sensor44	0.4880	1.9407
23	sensor72	sensor39	0.3753	1.8131
24	sensor68	sensor39	0.3157	1.7401
25	sensor73	sensor36	0.4003	1.7374
26	sensor73	sensor37	0.4003	1.7358
27	sensor73	sensor35	0.4004	1.7318
28	sensor68	sensor65	0.3261	1.7158
29	sensor18	sensor45	0.3193	1.6822
30	sensor33	sensor45	0.3133	1.6761
31	sensor25	sensor45	0.3134	1.6761
32	sensor68	sensor45	0.3622	1.6700
33	sensor24	sensor45	0.3122	1.6618
34	sensor32	sensor45	0.3107	1.6440
35	sensor68	sensor44	0.3583	1.5688
36	sensor25	sensor23	0.6893	1.3499
37	sensor33	sensor23	0.6894	1.3499
38	sensor24	sensor23	0.6858	1.2622
39	sensor32	sensor71	0.3622	1.2621
40	sensor68	sensor32	0.7295	1.2550
41	sensor40	sensor49	0.7900	1.2421
42	sensor32	sensor23	0.6759	1.2285
43	sensor68	sensor24	0.7252	1.2207
44	sensor68	sensor33	0.7194	1.2051
45	sensor68	sensor25	0.7194	1.2051
46	sensor18	sensor71	0.3712	1.2041
47	sensor24	sensor71	0.3644	1.2016
48	sensor26	sensor28	0.3575	1.1862
49	sensor68	sensor18	0.6984	1.1646
50	sensor68	sensor23	0.5062	1.1277

装置 A の圧力および温度に関する関係性の崩れが異常度の増加に大きく関与しており、異常度の増加は熱交換器の詰まりの進行を捉えたものと考えられる。また、これらの関係性の崩れは CSD/定期修理の 1 ヶ月後付近から増加しており、熱交換器の詰まりは CSD/定期修理の 1 ヶ月後付近から進行していると考えられる。

それぞれのポイントにおいて崩れていた装置 A に関する関係性の個数を以下に示す。

表 4.3.4 各ポイントにおける装置 A に関する関係性の崩れ数

確認ポイント	装置 A 関連の 関係性の崩れ数
定期修理	
①	2
②	6
③	14
④	19
CSD	
⑤	2
⑥	10
⑦	14
⑧	16
CSD	
⑨	2
⑩	6
⑪	14
⑫	19
定期修理	

CSD/定期修理直前は装置 A に関する関係性の崩れが毎回 16～19 個となっており、この値を指標とすることで洗浄のタイミングを判断できる可能性がある。

#### (2)sensor68 の関係性の崩れに関する考察

sensor68(装置 R の LEVEL(MV))についてインバリアントモデルの学習に使用した期間と検定期間におけるセンサ値の変動を確認したところ、学習期間では 40 付近の値を取っていることに対し、検定期間では 60 付近の値を取っていることがわかった。sensor68 のセンサ値の差異は運用変更があったと推測され、sensor68 に関する関係性の崩れは熱交換器詰まりに無関係であると判断した。sensor68 の検定期間とモデル学習期間のグラフを以下に示す。

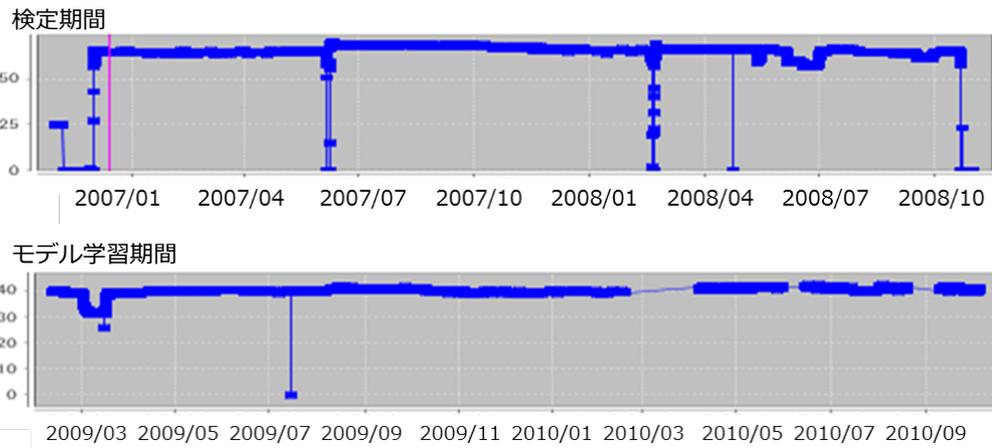


図 4.3.4 検定期間とモデル学習期間における sensor68 のセンサ値の相違

装置 A に関する関係性の崩れが熱交換器の詰まり状態を表している可能性があり，該当する関係性の崩れを監視することにより状態の把握，および，洗浄タイミングを判断することが可能と考えられる。

#### 4.4 追加インバリエント分析

##### 4.4.1 学習期間

2008年10月末に実施したコアLESSA改修の有効性を検証することを目的とし、追加分析を実施した。

追加分析では、コアLESSA改修後の期間について検定を行う為、4.3.1の学習期間の一部を対象とするインバリエントモデルを作成し、2006年11月から2010年10月までを検証期間とした検定を行った。

表 4.4.1 追加分析の学習期間

No	学習期間
期間 1	2009/02/10 00:00 ~ 2010/02/17 00:00

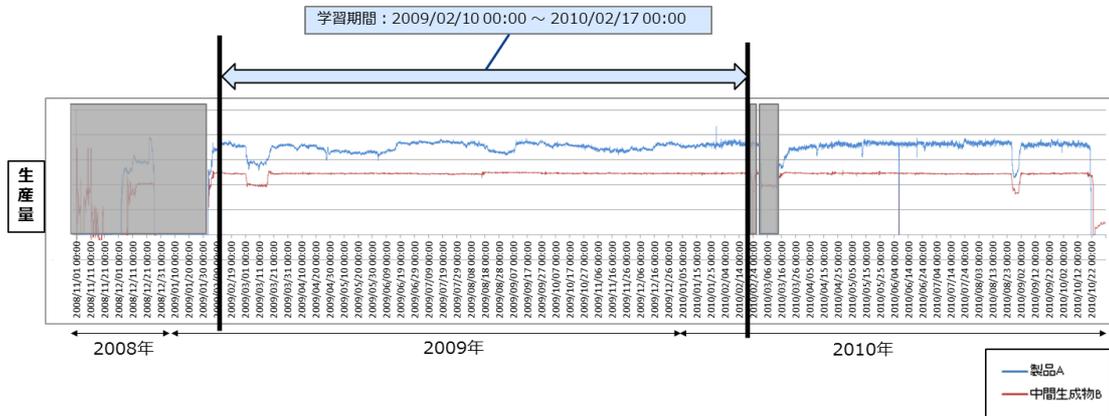


図 4.4.1 追加分析における製品 A(青線)、中間生成物 B(赤線)の生産量と学習期間との関係

#### 4.4.2 モデル図

学習期間が少なくなり、弱い関係性まで抽出されたことで、関係性の数が4.3.2と比較し増えている。関係性の数が増えているため4.3.2のモデル論理関係図とは異なる表示のされ方となった。

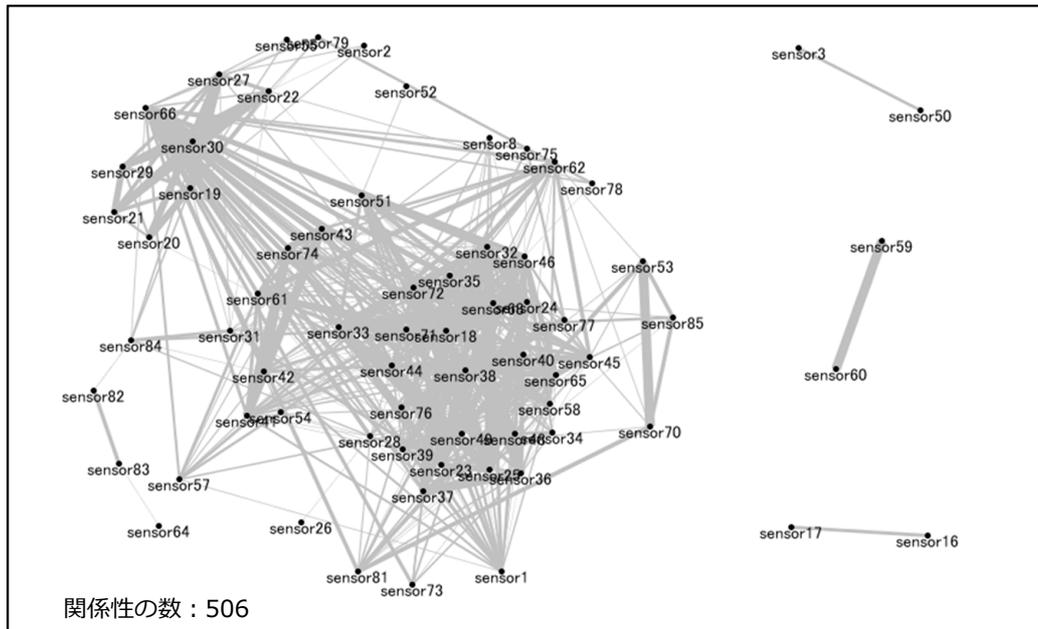


図 4.4.2 追加分析 モデル論理関係図

#### 4.4.3 異常検知結果

受領データ期間全てに対して検定を行った。検定した結果の異常度グラフと製品A, 中間生成物Bの生産量の関係を以下に示す。

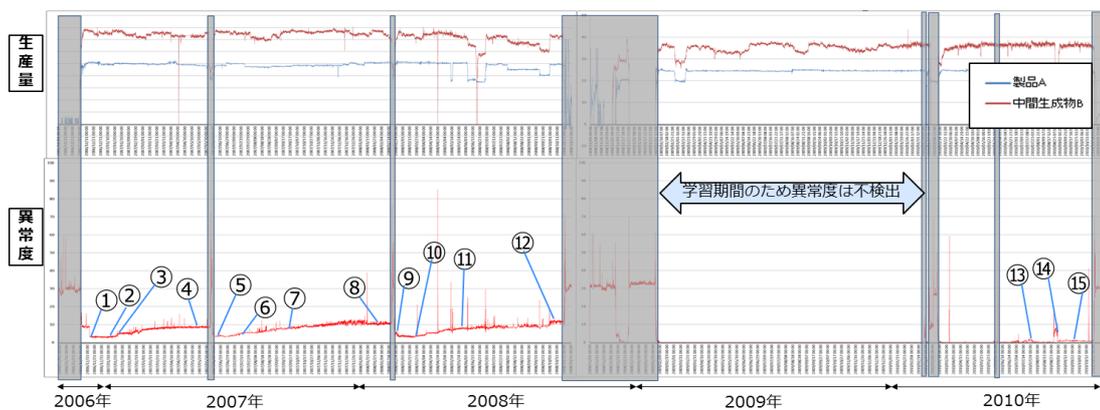


図 4.4.3 追加分析のインバリエント分析による検定結果

上記①から⑫は図 4.3.3 と同時刻である。CSD/定期修理後に装置 A の sensor40, sensor41,

sensor42 関連を中心に異常度が上昇していく傾向がある。これは、4.3.3 で示した結果と同様である。また、各ポイントにおける関係性の崩れ数も 4.3.3 で示した結果とほぼ同じである。

学習期間後の 2010 年 3 月以降は、連続した異常度の増加は見られない。⑬から⑮に関して、sensor65(装置 J BTM OUT)を中心とした一時的な異常度の上昇は見られるが、2006 年から 2008 年のように、定期修理およびシャットダウンまで続くような連続的な上昇は見られない。このことから、2008 年 10 月末に実施したコアレッサー改修は熱交換器の詰まりに対して効果があったということがインバリアント分析技術から確認できた。このことから、インバリアント分析技術をセンサ値から装置改修等の効果測定に応用できる可能性を示せた。

## 4.5 運転データからの事故予兆現象の抽出のまとめ

### 4.5.1 インバリエント分析のまとめ

熱交換器における詰まりの予兆が抽出できるかどうかを確認することを目的として、コアレッサー改修後の詰まりが少ない期間を学習したインバリエントモデルを用い、詰まりの発生が確認されている期間の検定を行った。

検定の結果、CSD/定期修理後の1ヶ月後(次回CSD/定期修理の5~7ヶ月前)付近で装置Aに関する関係性の崩れが検出され始め、時間の経過に伴い関係性の崩れが増加していることがわかった。これは熱交換器詰まり事象の予兆を捉えたものと考えられる。また、関係性の崩れの増加傾向は詰まりの状況を表していると考えられることから、関係性の崩れ状況を監視することで濃縮塔熱交換器詰まりの発生、進行を把握できる可能性がある。

今回の研究の結果、現在の運用で実施している圧力の監視に加え、圧力と温度に関するセンサとの関係性の崩れ、すなわち、プロセス全体のセンサデータ間の関係性の崩れから不具合の予兆を抽出できることを示すことができた。

以上のことから、「予兆を抽出することができるかどうかを検証する」という目的については、達成できたといえる。

さらに、インバリエントモデルの作成方法を工夫することで装置改修等の効果測定に活用できる可能性が広がった。

### 4.5.2 インバリエント分析の今後の可能性

本研究に関して、データの提供を受けた事業所からの見解は以下の通りであった。

- ・機械学習の手法により、現状実施している運転監視と、ほぼ同じレベルの監視が可能という結果が得られ、この手法の可能性に期待を持った。
- ・今回の解析を通して明らかになった問題点の解決を含めて、実用化に向けてのさらなる技術改良に期待する。

本研究で、インバリエント分析技術はプロセスデータ全体から運転状態を捉えられることを示せた。インバリエントモデルの精度を向上させていくことで故障予兆、発見のみならず、プロセス間・センサ間の関係性を可視化することで化学プラントにおける暗黙知を形式知化する技能継承支援といった運用面での適用も可能である。

また、運転現場への導入に際しては、原因分析・要因特定といったプロセス面に対する適用も求められる。プロセス面に対するインバリエント分析技術の適用方法については現在研究が進んでおり、実用化も近い。

インバリエント分析技術を用い、運用面・プロセス面でプラントの運転を高度化させていくことが事故の発生防止につながると考える。

## 参考資料

### <用語集>

文中で使用した用語について、解説する。

- (1)インバリアント：不変性，平常時のシステムに成り立つ 2 点間のデータの不変関係。関係性。
- (2)フィットネス値(fitness)：インバリアント分析におけるセンサ間の関係性の強さ。値が高いほど，強い関係性を持つ。
- (3)モデル：インバリアントの集合で表現されたデータ間に成り立つルール。
- (4)モデル図：時系列データからセンサ間の関係性を自動抽出した図。2 つの測定点間の不変の関係式を導出。2 点の関係をインバリアントと呼ぶ。フィットネス値が高い程，線が太い。
- (5)significance：2 つの測定点間の関係式から導出した予測値からの乖離。値が大きい程，予測値からの乖離が大きく，異常度が高いことを示す。
- (6)CSD：プラントにて行われる，洗浄のための停止(Cleaning Shutdown)
- (7)MV：操作量(出力)(Manipulative Variable)
- (8)PV：測定値(Process Variable)
- (9)SV：設定値(Set Variable)

<センサー一覧>

センサ名	装置詳細
sensor1	装置B 入口 酸化生成物 流量 (PV)
sensor2	装置B 出口 温度 (PV)
sensor3	装置C 温度 (PV)
sensor4	装置C 圧力 (PV)
sensor5	装置C インターフェース (MV)
sensor6	装置C インターフェース (PV)
sensor7	装置C インターフェース (SV)
sensor8	装置D インターフェース (MV)
sensor9	装置D インターフェース (PV)
sensor10	装置D インターフェース (SV)
sensor11	装置D 上面 圧力 (MV)
sensor12	装置D 上面 圧力 (PV)
sensor13	装置D 上面 圧力 (SV)
sensor14	装置E LEVEL (PV)
sensor15	装置E インターフェース (MV)
sensor16	装置E インターフェース (PV)
sensor17	装置E インターフェース (SV)
sensor18	装置F 出口 圧力 (PV)
sensor19	装置G 圧力 (PV)
sensor20	装置G 出口 温度 (MV)
sensor21	装置G 出口 温度 (PV)
sensor22	装置G 出口 温度 (SV)
sensor23	装置G 供給 流量 (MV)
sensor24	装置G 供給 流量 (PV)
sensor25	装置G 供給 流量 (SV)
sensor26	装置H 0.7S 流量 (PV)
sensor27	装置H 圧力 (PV)
sensor28	装置H 出口 温度 (MV)
sensor29	装置H 出口 温度 (PV)
sensor30	装置H 出口 温度 (SV)
sensor31	装置H 供給 流量 (MV)
sensor32	装置H 供給 流量 (PV)
sensor33	装置H 供給 流量 (SV)
sensor34	装置I 圧力 (MV)
sensor35	装置I 圧力 (PV)
sensor36	装置I 圧力 (SV)
sensor37	装置I 温度 (MV)
sensor38	装置I 温度 (PV)
sensor39	装置I 温度 (SV)
sensor40	装置A 圧力 (MV)
sensor41	装置A 圧力 (PV)
sensor42	装置A 圧力 (SV)
sensor43	装置A 温度 (MV)
sensor44	装置A 温度 (PV)
sensor45	装置A 温度 (SV)

センサ名	装置詳細
sensor46	装置J 上面 温度 (PV)
sensor47	装置J 下面 圧力 (PV)
sensor48	装置I 3S 流量 (PV)
sensor49	装置A 3S 流量 (PV)
sensor50	装置K 出口 温度 (PV)
sensor51	装置L LEVEL (MV)
sensor52	装置L (PV)
sensor53	装置L (SV)
sensor54	装置M RAW CU 流量 (PV)
sensor55	装置N 圧力 (PV)
sensor56	装置N LEVEL (PV)
sensor57	装置O 圧力 (MV)
sensor58	装置O 圧力 (PV)
sensor59	装置O 圧力 (SV)
sensor60	装置O 温度 (MV)
sensor61	装置O 温度 (PV)
sensor62	装置O 温度 (SV)
sensor63	装置O 圧力差 (PV)
sensor64	装置P 圧力差 (PV)
sensor65	装置J 下面 出口 温度 (PV)
sensor66	装置Q 上面 温度 (PV)
sensor67	装置Q 下面 圧力 (PV)
sensor68	装置R LEVEL (MV)
sensor69	装置R LEVEL (PV)
sensor70	装置R LEVEL (SV)
sensor71	装置Q 下面 出口 温度 (PV)
sensor72	装置R 出口 流量 (PV)
sensor73	装置I 入口 温度 (PV)
sensor74	装置A 入口 温度 (PV)
sensor75	装置S PW 供給 温度 (MV)
sensor76	装置S PW 供給 温度 (PV)
sensor77	装置S PW 供給 温度 (SV)
sensor78	装置T SC 供給 流量 (PV)
sensor79	装置T LEVEL (MV)
sensor80	装置T LEVEL (PV)
sensor81	装置T LEVEL (SV)
sensor82	装置U 0.7S 流量 (PV)
sensor83	装置U 出口 温度 (MV)
sensor84	装置U 出口 温度 (PV)
sensor85	装置U 出口 温度 (SV)

## 5. 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の作成

第3章で作成した各事故事例のチェックポイントを全て統合して、チェックポイント集を作成した。その際、本調査研究で構築する「チェックポイント集検索システム」での検索、すなわち、チェックポイント集の利用者とチェックポイントの活用場面を想定したチェックポイントの分類、整理が必要である。この分類、整理方法についても、現場の経験者の集まりである「現場保安チェックポイント集検討会」において検討した。

### 5.1 現場保安チェックポイント集の分類、整理

チェックポイントの作成の際に「設備/機器」、「作業/人」という分類はしているが、これを利用者と活用場面の視点で分類すると、「設備/機器」は主に設計者、「作業/人」は運転作業員、工事作業員、保全作業員に大きく分けられる。もちろんそれは概してみれば、と言うことであり、運転作業員などが知っておくべき設計上のチェックポイントも存在する。また、「工事」と「保全」の区別については、検討会でも大きく意見が分かれたが、本調査研究で作成するチェックポイント集においては、「工事」はプラント敷地内での設備/機器工事に伴う業務、「保全」はメンテナンス業務のうち、工事を伴わない検査などの業務とした。

また、検討会の議論のポイントにも記載したが、「運転」、「工事」、「保全」に関しては、当日の作業前のミーティングで確認することを想定した「当日チェックポイント」、作業の区切りごとの開始時に行われるミーティングを想定した「事前チェックポイント」に分類し、さらに「運転」に関しては、異常事態が発生した際の緊急時に確認すべき「緊急時チェックポイント」の分類も作成した。ただし、「緊急時チェックポイント」は緊急時にチェックポイント集を検索して確認するというものではなく、緊急時に確認すべきことを安全教育の場などに事前に確認しておくことを想定している。

以上の検討を踏まえ、利用者と活用場面に関しては、重複して分類することを可とした。すなわち、あるチェックポイントは、運転の緊急時のチェックポイント、設計時のチェックポイント、工事の事前チェックポイントなどに同時に分類されることがある。

キーワードによる分類に関しては、利用者がどういう条件でチェックポイントを絞り込みたいかを考慮して、「機器」、「作業」、「現象」で分類することとした。あまり細かく分類すると検索でヒットするチェックポイントの数が少なくなることが懸念され、また、真にその現場に該当するチェックポイントだけでなく、できるだけ関連するチェックポイントにも目を通して貰い、新たな「気づき」を与えたいため、各分類について第2階層までのキーワードとした。

以上のチェックポイント集の分類の考え方を表5.1.1に整理した。

この分類方法に従って、各事故事例のチェックポイントを全て統合したチェックポイント集の分類を行った。作業は異なる業種の経験を有する検討会の2名の検討員に依頼した。両名の分類の間には、組織形態の相違による作業員個人の業務の範囲やミーティングの持ち方に差があることが考えられる。

実際のチェックポイント集の分類作業は、作成されたチェックポイントが元となった事故事例や原因と切り離されても理解できるように表現を修正する作業、利用者と活用場面による分類、チェックポイント分析シートを参考にしたキーワードによる分類と第2階層キーワードの作成を行った。2名の検討員によって分類されたチェックポイント集はそれぞれ別添3に示した。現地評価での意見を受けて修正することを踏まえ、この時点では両者の分類結果の統合は行わなかった。

表 5.1.1 チェックポイント集の分類の考え方

利用者による分類

対象者	活用場面
運転作業員	事前チェックポイント
	当日チェックポイント
	緊急時チェックポイント
設計者	設計時チェックポイント
工事作業員	事前チェックポイント
	当日チェックポイント
保全作業員	事前チェックポイント
	当日チェックポイント

キーワード分類

【機器】	【作業】	【現象】
静機器	設計	事故
動機器	運転	機器異常
弁・配管	工事	反応異常
計装	保全	運転異常
電気	全体	工事異常
ユーティリティ		保全異常
その他		緊急対応

## 5.2 現場保安チェックポイント集検索システム構築

チェックポイント集を現場で活用しやすくするために「現場保安チェックポイント集検索システム」を構築した。現場での活用は、最終的には各事業所に相応しい方法で行って貰えれば良いが、本調査研究では、以下の想定でシステムを構築した。

- (1)管理者がチェックポイント集から現場や当日の作業に合わせて作業者に「気づき」を与えたいチェックポイントをあらかじめ選択する。(チェックポイントリストの作成)
- (2)チェックポイントリストをタブレット端末に保存し、作業者に渡して、現場や作業前のミーティングで閲覧する。
- (3)作業者はチェックポイントを確認したら、タブレット端末上で確認のチェックを入れる。
- (4)作業者自身あるいは管理者が、チェックポイントの確認状況をタブレット端末上で確認する。

(1)のチェックポイントリストの作成は、管理者のデスクトップPC上での作業を想定し、Windows マシン上で作動するアプリケーション(Win アプリ)を作成した。その際に利便性の上で重要なのは、検索システムの使い勝手である。検索システムは以下の構想の元に構築した。

- ・「利用者と活用場面」に関しては、「or 検索」とした。
- ・「キーワード分類」に関しては、「機器」、「作業」、「現象」の各分類では「and 検索」で絞り込みを可能とし、各分類間は「or 検索」とした。
- ・「利用者と活用場面」と「キーワード分類」は「and 検索」とした。

また、Win アプリのこの他の機能として、

- ・チェックポイント集の読み込み機能
- ・チェックポイントリストの保存管理、書き出し機能

がある。

チェックポイント集に関しては、将来の改訂と各事業所での自由なカスタマイズを想定して、一定様式の Microsoft Excel で作成されたファイルを読み込むものとした。その上で、例えば、チェックポイントの通し番号で 5,000 番まではシステム側で提供するもので、システムのバージョンアップに従って変更される可能性のあるチェックポイントとし、5000 番以降は各事業所でカスタマイズして作成したチェックポイントとして、システム側のチェックポイント集の改訂によって影響を受けずに継続して使用できるようにした。

Win アプリの画面イメージを図 5.2.1 に示す。

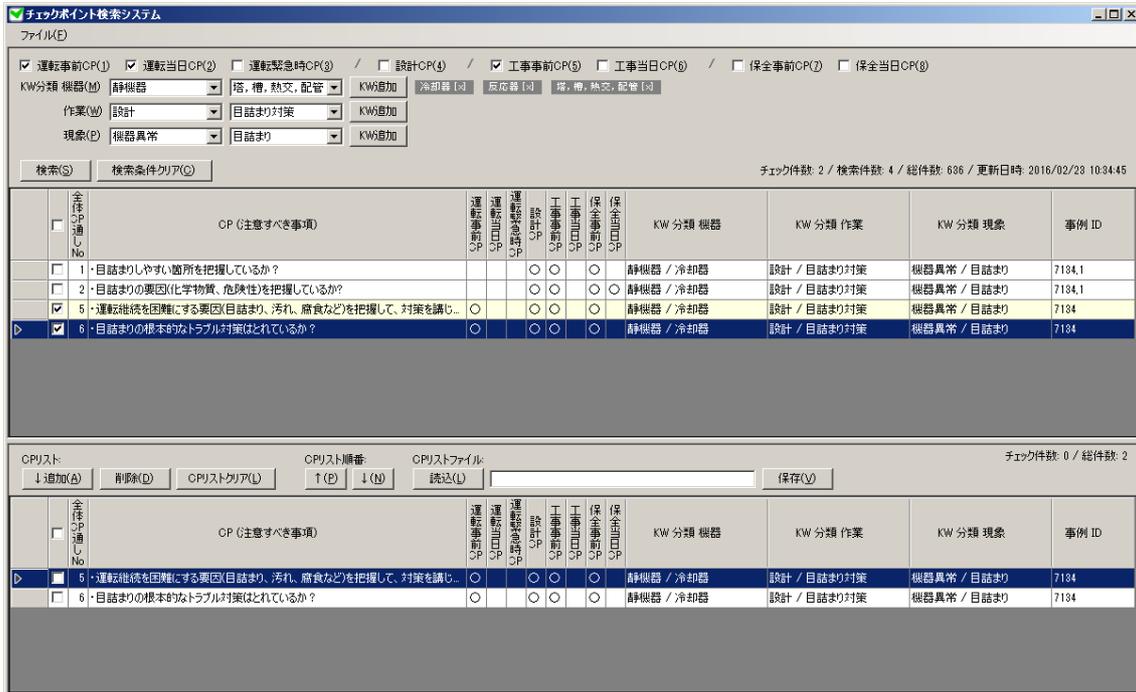


図 5.2.1 現場保安チェックポイント集管理アプリケーションの画面イメージ

(2)-(4)のタブレット端末のアプリケーションは、将来的にはネットワーク経由でクラウドサーバを利用するなどして、管理者が Win アプリで保存したチェックポイントリストを自動的に読み込み、チェックした結果を管理者に返すようなシステムを想定しているが、現状では、化学プラントの作業現場でのネットワーク環境などを考慮して、Win アプリで書き出したデータをタブレット端末に手動で読み込むシステムとした。

(2)のチェックポイントリストの一覧画面のイメージを図 5.2.2 に、各チェックポイントの確認画面のイメージを図 5.2.3 に、(4)のチェック結果の確認画面のイメージを図 5.2.4 にそれぞれ示す。

各チェックポイントの確認は、単に「はい」、「いいえ」ではなく、「いいえ」の代わりに本来あってはいけないが何かの理由で実施できていないため後で確認する場合の「未実施」、何かの問題がある場合の「上司に報告」、火気工事のように他の部署と事前に合意しておくべき場合の「事前に実施合意」、何かの理由で実施できない場合の「実施不可能」、現場に十分に浸透したか、全く関係がないことが明白な場合の「次回から不要」という選択肢を作成した。当然のことながら、「はい」以外の項目については、対応について管理者が確認することが求められる。この選択肢については、今後、現場で活用される中で見直しが必要であると考えている。



図 5.2.2 チェックポイントリストの一覧画面のイメージ

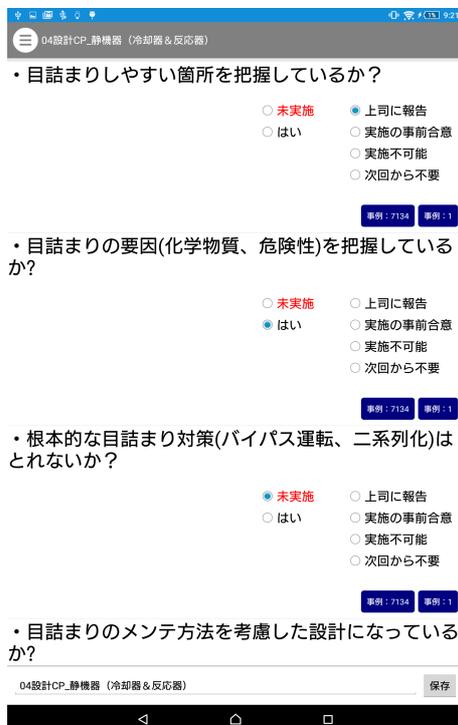


図 5.2.3 チェックポイントの確認画面のイメージ

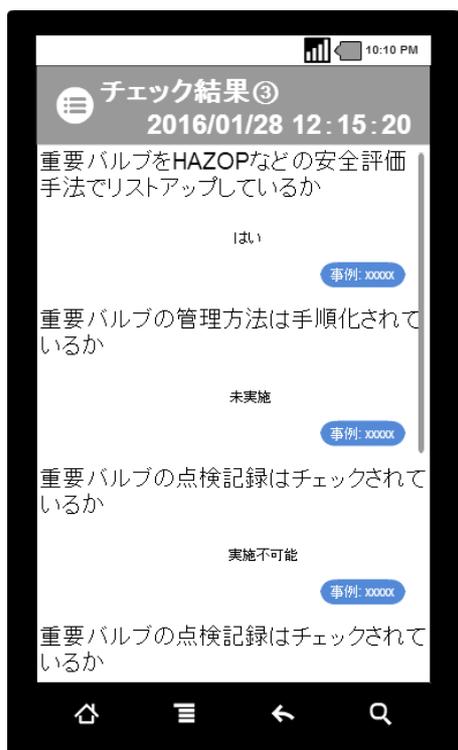


図 5.2.4 チェック結果の確認画面のイメージ

## 6. 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の評価

作成したチェックポイント集およびチェックポイント集検索システムを実際に現場保安のために活用可能なものとするために、国内の化学プラントの事業所で現地評価を依頼した。

### 6.1 現場保安チェックポイント集の問題点，改善点

現地評価を依頼したのは下記の3地区，6事業所の計8名の方々である。評価された方々の役職は，各事業所の環境・安全関連部署の部長，室長，研究室長や製造課長などである。

表 6.1.1 現地評価依頼先リスト

現地評価日	地区	評価者
2016年2月5日	川崎地区	1事業所2名
2016年2月8日	千葉地区	4事業所5名
2016年2月9日	水島地区	1事業所1名

現地評価では，まず，本調査研究の概要を説明し，チェックポイント集を提示し(事前を送付)，チェックポイント集検索システムの構想を説明した。これに対して，チェックポイント集の活用の可能性，各チェックポイントの内容，分類方法，チェックポイントシステムの使い勝手などについて評価を受けた。また，添付の評価項目について評価後に記入して貰い，回収した。

各地区での現地評価の概要を以下に示す。

#### (1)川崎地区

- ・評価できる点
  - ・不具合による停止や工事などの非定常作業のタイミングで活用できそう。
  - ・こういう事故を防ぎたいという観点で，事故事例へのリンクは必要だ。
- ・要望，改善が必要な点
  - ・現場でチェックポイントや分類を自由にカスタマイズできるようにして欲しい。
  - ・チェックポイントがどういうリスクにつながるかを理解できるようにして欲しい。

#### (2)千葉地区

- ・評価できる点
  - ・チェックポイントが網羅的にリストアップされている点は良い。
  - ・上司から安全情報が通知されたかを問うチェックポイントは有効だ。
  - ・作業手順書，緊急時の手順書を作成する際に抜けがないかチェックするのに役立つ。
  - ・現場作業者にチェックポイント集を見せて，抜けがないかを自分で考えるといった安

全教育に活用できそう。

- ・視点が多様なので危険予知訓練にも使える。
- ・安全教育の平準化に活用できる。
- ・失敗したらどうなるか、を考えさせる点が良い。
- ・要望、改善が必要な点
  - ・検索方法や結果の表示方法を工夫して、より使いやすいシステムにして欲しい。
  - ・検索の入口を設計段階、作業計画段階などの場面や単位作業にしてはどうか。
  - ・キーワード検索ではなく、より一般的な言葉での「あいまい検索」にはできないか。
  - ・事例が増えてきたら物質名での検索も可能にして欲しい。
  - ・チェックポイントが事故事例だけでなく、チェックポイントの背景にリンクしていると良い。
  - ・「現場保安」と謳っているが、設計のチェックポイントもあり対象が分かり難い。
  - ・当日チェックポイントのイメージが湧かない。安全教育訓練の確認なら理解できる。
  - ・突発的な事象が起きた時にチェックポイントは見ないだろう。
  - ・与えるだけではなく、作業者に考えさせる工夫が欲しい。

### (3)水島地区

- ・評価できる点
  - ・非常作業の前の危険予知訓練に活用できる。
  - ・実際の事故事例から作成されたチェックポイントである点は貴重な。
- ・要望、改善が必要な点
  - ・事前のリスクアセスメントのチェックポイントと始業前ミーティング時の確認のチェックポイントは分けた方が良い。
  - ・緊急時や作業前の忙しい時に活用するのは難しい。
  - ・チェックポイントの表現は作業者に気づきを与え、行動を変えるようなものが良い。
  - ・作業の KnowWhy や原理原則を含むような文言にしなければ、従来のチェックリストと変わらない。最終的には10個程度に集約できないか。
  - ・その一方で文言は簡潔で理解容易でなければならぬので、詳細情報はリンクを張って参照させるなどの工夫が必要。
  - ・この作業の前にはこの事故を思い出せ、といったようなかみ砕いた表現が良い。
  - ・複数のチェックポイントの複合によって事故が起きていることが伝わるのが望ましい。
  - ・クライシスマネジメントの観点からのチェックポイントも必要だ。

## 6.2 改良版現場保安チェックポイント集

現地評価の結果を受け、チェックポイント集を以下の観点で見直して、チェックポイント集の最終版とした。

- ・チェックポイントの表現の見直し
- ・運転作業者に対する緊急時チェックポイントの分類を主とする分類の見直し

見直し後のチェックポイント集の最終版を別添 4 に示す。最終的に作成したチェックポイントの数は 791 件となった。

現場保安チェックポイント集検索システムについての現場評価における意見に関しては、並行してシステム開発を行っていたため、絞り込み検索の実現など、可能な限りシステムに反映させたが、今後さらに改良が必要と考えている。

## 7. まとめ

### 7.1 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集のまとめ

本調査研究の目的である「重大事故が発生するまでの事象(現象, 運転員の行動, 運転員の操作など)を時系列に調査分析する」に関しては, 産総研が運営する「リレーショナル化学災害データベース(RISCAD)」から9件の事故事例を選び, これに次の運転データ解析に用いた事例1件を加えた計10件の事例について, 産総研で開発した「事故分析手法 PFA」を用いて事故進展フロー図を作成するという科学的手法によって事故原因を抽出した。これを, 化学プラントの現場経験を有するシニアを中心とする「現場保安チェックポイント集検討会」の検討員が, 化学工学会安全部会で提案した「3M3E 分析」を用いて「人」, 「設備/機器」の要因を分析したのちに, それぞれの要因に対して, 現場経験に基づく「チェックポイント」を作成した。支燃性ガスに関する事故事例については, 事故進展フロー図とともに支燃性ガスとフッ素系シール材との燃焼性に関するデータを付記し, 材料選定の際の「気づき」を与えた。

また, 「重大事故が発生するまでの運転データ(DCS データなど)を時刻歴で相関分析し, 事故の予兆を抽出する」に関しては, インバリアント分析手法を用いて, 化学プラントの実運転データを分析し, 事故につながる可能性があるトラブル現象の予兆の抽出を行い, 事故進展フロー図で指摘された日数管理の問題点の課題を解決できる可能性が示された。

作成されたチェックポイントは10事例分を集めて, 「現場保安チェックポイント集」としてまとめ, 「対象者と活用場面」, および, 「機器」, 「作業」, 「現象」のキーワードで分類した。

さらに, 「現場保安チェックポイント集」を実際に現場で活用しやすくするための「現場保安チェックポイント集検索システム」を構築した。このシステムは, WindowsPC上で管理者が現場に伝えたいチェックポイントを選択し, チェックポイントリストとして保存し, それをタブレット端末に転送して, 現場で作業者が閲覧, チェックができるようにし, さらに, チェック結果を保存し, 現場作業や管理者が後から確認できるようにした。

## 7.2 現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集の活用に向けて

本調査研究の目的である「現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集」とそれを現場で活用するための「現場保安チェックポイント集検索システム」は、一応完成したが、対象とした事故事例は10件と少なく、国内の重大事故を中心にしたため対象業種も限られている。今後、国内に限らず石油精製業を中心に海外の事故事例も対象として事故事例の件数を増やし、より役に立つチェックポイント集として拡大していく必要がある。チェックポイント集システムに関しては、チェックポイントの作成と並行して開発を進めたため、現行版は非常に限られた機能となっているが、現地評価で希望があった「カスタマイズ機能」や「作業者に考えさせる工夫」を取り入れた機能拡張が必要である。

今後、情報開示の手続きを経て、「現場で活用可能な保安に係るチェックポイント集」ならびに「現場保安チェックポイント集検索システム」はインターネット上で公開する予定である。ぜひ、多くの方に使っていただいて、ご意見をいただきたいと思う。