



JAEA-Technology

2009-028

原子力研究施設等の事故・故障等に適用した 根本原因分析手法

Root Cause Analysis Method Applied to Accidents and Troubles
of Nuclear Research Facilities

佐藤 猛 渡辺 憲夫 吉田 一雄

Takeshi SATO, Norio WATANABE and Kazuo YOSHIDA

大洗研究開発センター
安全管理部

Health and Safety Department
Oarai Research and Development Center

May 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

原子力研究施設等の事故・故障等に適用した根本原因分析手法

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 安全管理部

佐藤 猛、渡辺 憲夫⁺、吉田 一雄⁺⁺

(2009年4月10日 受理)

事故・故障等から得られる教訓、知見などは、原子力施設の安全管理に活かすことの重要性は幅広く認識されており、事故・故障等の根本的な原因分析により、原子力施設の安全に関する教訓、知見などを導き出してきてている。日本原子力研究開発機構では、1990年頃から研究所で起こった一般施設を含む原子力研究施設等の事故・故障等を対象に根本原因分析を行ってきた。分析では多種多様な原子力施設を対象にしているため、誰でも活用できる分析法の確立を目指し、独自の分析方法を整備するとともに既存の分析法を活用してきた。本報告書では、これらの根本原因分析手法について紹介するとともに、JCO 臨界事故を対象にそれぞれの分析法を適用し、使用法を解説する。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

+ 安全研究センター

++ 安全研究センター原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Root Cause Analysis Method Applied to Accidents and Troubles of Nuclear Research Facilities

Takeshi SATO, Norio WATANABE⁺ and Kazuo YOSHIDA⁺⁺

Health and Safety Department, Oarai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 10, 2009)

The importance to make use of lessons learned and knowledge from accidents and troubles in safety management of nuclear research facilities is recognized widely. By the root cause analysis of accidents and troubles, lessons learned and knowledge have been arrived about safety management of facilities. The root cause analysis has been performed for accidents and troubles generated at nuclear research facilities in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) from about 1990.

Because the analysis is performed for various facilities, anyone have been used the analysis method of possible of utilize. On this account the analysis method has been developed and adopted an existing analysis method. This report introduces the analysis method that has been used for the root cause analysis of these accidents and troubles.

Furthermore, this report apply a generally well known JCO Criticality Accident to each analysis method as an example and explain on the direction for uses.

Keywords: Root Cause Analysis, Nuclear Research Facility, Analysis Method

+ Nuclear Safety Research Center

++ Nuclear Facility Safety Research Unit, Nuclear Safety Research Center

目 次

1. 緒言 -----	1
2. 原因分析手法 -----	1
2.1 認知行動過誤原因分析手法 -----	4
2.2 4M5E マトリックス分析手法 -----	8
3. JCO 臨界事故を事例としたそれぞれの分析手法の解説 -----	9
3.1 認知行動過誤原因分析手法を用いた分析 -----	9
3.2 4M5E マトリックス分析手法を用いた分析 -----	12
4. 結言 -----	12
謝辞 -----	13
参考・引用文献 -----	14
付録 1 認知行動過誤原因分析の分類項目の概要 -----	26
付録 2 4M5E マトリックス分析手法における 4M 要因分類表及び対策分類表 -----	28

Contents

1. Introduction -----	1
2. Cause analysis method -----	1
2.1 Cognitive error root cause analysis method -----	4
2.2 4M5E matrix analysis method -----	8
3. Explanation of each analysis method assumed JCO Criticality Accident an example -----	9
3.1 Analysis by Cognitive error root cause analysis method -----	9
3.2 Analysis by 4M5E matrix analysis method -----	12
4. Concluding Remarks -----	12
Acknowledgements -----	13
References -----	14

Appendix 1 Brief description of taxonomy of causes of error in cognitive behavior -----	26
Appendix 2 4M factors classification list and countermeasures classification list on 4M5E matrix analysis method -----	28

This is a blank page

1. 緒言

原子力施設の安全確保には、事故・故障などの運転経験から得られる教訓や知見を施設の設計、建設、運転管理（運転及び保守活動など）に適切に反映させることが不可欠であり、その重要性は幅広く認識されている。こうした教訓や知見は、事故・故障等のトラブルの原因やその背後にある要因を分析すること（即ち、根本原因の分析）により得られるものであり、施設を所有、運転、管理する者が自らそうした分析を実施し対策を検討することが必要である。実際、これまで、JCO 臨界事故のような事故による影響が生じたり安全上重要と判断された事故に対しては原子力安全委員会、日本原子力学会などで根本的な原因分析により、原子力施設の安全に関する教訓、知見などを導き出してきている。しかしながら、安全上の重要性がさほど高くないような事故・故障等については、必ずしもその根本原因まで遡って分析を行うわけではなく、従って、その対策も顕在化した事象の改善にとどまり、組織要因を中心とする根本的な原因を分析、改善する活動が十分には行われてこなかった。そのため、根本的な原因を残したままに組織要因を原因の一つとする事故、トラブルが絶えないとも言われている¹⁾。また、2007年2月には、「原子力発電所における安全のための品質保証規程(JEAC4111-2003)の適用指針—原子力発電所の運転段階—JEAG4121-2005」において、「8.5.2 是正処置」、「8.5.3 予防処置」に「根本原因分析に関わる内容の充実」が追加された²⁾。さらに、2007年8月には、根本原因分析に関する実用炉規則及び研究開発段階炉規則の改正が行われ、続いて2008年12月には、加工事業規則、廃棄物管理事業規則等の改正が行われた。

このような状況の中、これまで日本原子力研究開発機構では、1990年頃から旧日本原子力研究所内的一般施設を含む原子力研究施設等（以下、「研究施設」という）の事故・故障等を対象に研究所内に設置された「原子炉等安全審査会」の下に「事故・トラブル等要因分析専門部会」が設置され、事故・故障等の原因分析を行ってきた。分析の結果は、経営層が委員長とする原子炉等安全審査会において審議され、研究施設の運営の啓発に役立ってきたものと考えられる。実態上は、品質マネジメントシステムによる安全管理と同様な改善の効果があったものと考えられる。具体的には、研究施設で発生した事故・故障等を対象に、主に法令報告書等に基づき、法令報告書の記載内容が確定された時点の内容を事実として、根本原因の分析が行われてきた。根本原因の分析では、多種多様な施設を対象とし、さらに、様々な立場の職員が実施することを想定しているため、既存の分析手法に加え、各分析者個人の技量に応じて活用できる分析方法を整備し、それらを適宜組み合わせて使用してきた。本報告書では、これらの根本原因分析に用いられてきた分析手法について紹介する。さらに、原子力安全委員会、日本原子力学会などで根本原因分析が行われ、一般によく知られている JCO 臨界事故を例にそれぞれの分析法を適用し、使用法について具体的に解説する。

2. 原因分析手法

原子力施設の事故・故障等の原因には、設備・機器の破損、故障、誤動作、人間の誤操作などの内的要因による内部事象と地震、津波、台風などの外的要因による外部事象がある。

一般に、事故・故障等の原因分析では、顕在化した事象や現象から順次因果関係をたどっていくことにより、引き金となった直接的な要因（即ち、直接原因）やその背後にある要因（即ち、根本原因）、寄与因子が明らかになるが、これら原因がハードウェア問題だけに関わるのではなく、人的要因や組織要因が関係しているものが多い。例えば、2002年に米国の加圧水型原子力発電所(PWR)、Davis Besseで見つかった原子炉圧力容器上蓋損傷事象は、原子炉冷却水の漏えいにより上蓋の材料が腐食劣化し、大きなキャビティの形成に至ったというものであり、直接原因は一次冷却水応力腐食割れ(PWSCC)であるが、その背後には、検査が十分に行われていなかったという人的・組織的要因があった。このように、表面上はハードウェアの故障であっても、その原因を辿っていくと設計不良や保守の不備といった人的要因に行きつく場合が少なくない。従って、事故・故障等の分析を行うにあたっては、直接原因に留まらず、根本原因や寄与因子にも目を向けて細かく調べ、その結果を基に、適切かつ抜本的な対策を講じることが必要である。

事故・故障等の分析は、通常、当該施設の所有者（あるいは運転機関）が行ったり、あるいは、規制当局や関係機関の専門家による現地調査（関係者へのヒアリングなど）として行われるが、系統的な分析を行うには定型化された分析手法を用いることが不可欠である。こうした原因分析手法として、国際原子力機関(IAEA)では、原子力発電所における事故や故障を対象に、ASSET(Analysis and Screening of Safety Events Team)¹手法を開発しそれを用いた根本原因分析が行われてきた³⁾。この分析手法では、潜在的欠陥(latent weakness)は存在するものとして、それを顕在化させた要因、即ち、根本原因の分析に重点を置く。具体的には、まず、各事例について、次の3つの質問に答えることによって事例の分析を行い、さらに、その結果に基づき、当該プラントに対する改善策を検討し提案すると共に、他のプラントにも適用可能な一般性のある教訓や知見を導き出すこととしている。

- ① 如何なる不具合が発生したのか？(What happened ? or What failed to perform as expected ?)
- ② 何故その不具合は起こったのか？(Why did it happen ?)
- ③ 何故その不具合の発生を防止できなかつたのか？(Why was it not prevented ?)

ここで、①は分析対象事例において発生した機器故障や運転員過誤など一連の不具合を明らかにするための質問であり、また、②及び③は、それぞれ、各不具合の直接原因及び根本原因を明確にするためのものである。

なお、根本原因分析手法としては、このASSET手法の他に、事象原因分析(Event & Causal Factors Analysis : E&CFA)手法や管理監視リスクツリー分析(Management Oversight & Risk Tree : MORT)手法などがある。

しかし、こうした分析にはある程度の経験と知識が必要であり、専門家の領域に入ってくる。一方、事故・故障等を起こした現場では、危険予知(KY)活動、リスク評価などを実施しているものの根本原因まで辿りつかなかったり、分析手法そのものを使いこなせないこともある。また、根本原因分析では、分析者個人の技量に依存する傾向にあるが、その技量による分析結果

¹ 現在は、ASSETに代わってPROSPERという活動が行われている。

への影響を最小限に抑えることができるような手法を整備することが必要である。

そこで、著者らは、認知行動過誤原因分析手法を開発し、これまでに多くの事故・故障等の事例に適用し根本原因分析を行ってきた。また、事故・故障等の原因と再発防止のための対策を漏れなく抽出することができるよう 4M5E マトリックス型分析手法も併せて使用してきた。

これら二つの分析手法の特徴は、以下のとおりである。

- ① 認知行動過誤原因分析手法は、Rasmussen の認知行動モデルに基づく「原因分析」を基本に、事象に係わった人間の過誤に起因する場合、過誤の根本的な原因を分析するための手法であるため、人的要因を抽出することに向いている。
- ② 4M5E マトリックス型分析手法は、事故・故障等に対して、分析を行う際に要因及び対策を漏れなく抽出するための糸口を与えるものであるため、事象の分類や原因分析の対象の漏れを防ぐことに向いている。

これらの分析手法を用いて、1989 年度に発生した核燃料使用施設での発煙事象から現在に至るまで、多種多様な研究施設で発生した事故・故障等を対象に根本原因分析を行ってきた。近年(過去 5 年間)に発生した事故・故障等に対する根本原因の分析状況を Table 2.1 に示す。表中の分析対象事象の内容については、法令報告もしくは社会的影響のありうる事象としてプレス発表をしてあり、独立行政法人日本原子力研究開発機構のホームページ(<http://www.jaea.go.jp/>)⁴⁾に掲載されている。また、2003 年度は、発生した事象の原因が明らかに設備・機器の故障であったため設備・機器の修復等の実施により対応が済むものであったため、根本原因分析の対象事象としては取り扱わないとした。

Table 2.1 近年(過去 5 年間)に発生した事故・故障等に対する根本原因の分析状況

分析実施年度	分析対象事象	適用分析法
2007 年度	2007 年 6 月 26 日に発生した原子力科学研究所の非管理区域(モックアップ試験室建家周辺の引込溝及び共同溝)における核燃料物質による汚染事象を含む同様な汚染事象など、18 件の根本原因分析を実施。	認知行動過誤原因分析手法(簡易的な様式を使用)、4M5E マトリックス型
2006 年度	2006 年 2 月 13 日に発生した原子力科学研究所の高減容処理施設の減容処理棟における火災に関する根本原因分析を実施。	認知行動過誤原因分析手法
2005 年度	2005 年 4 月 11 日に発生した原子力科学研究所の JRR-3 の「S-1 駆動回路異常」信号発生に係るサーボアンプの故障に伴う手動停止など、3 件に関する根本原因分析を実施。	認知行動過誤原因分析手法(簡易的な様式を使用)
2004 年度	2005 年 2 月 19 日に発生した大洗研究開発センターの HTTR の「制御棒位置偏差大」スクラム信号による自動停止、2005 年 2 月 19 日に発生した同センターの JMTR の「照射設備異常」スクラム信号による自動停止など、3 件に関する根本原因分析を実施。	認知行動過誤原因分析手法

2.1 認知行動過誤原因分析手法⁵⁾

標記分析手法は、事故・故障等の事象の直接的な原因が、事象に係わった人間の過誤に起因する場合、過誤の根本的な原因を分析するための手法である。分析は、人間の認知行動（システムに発生した人間の対応を要する事態を検知し、その状態を把握して、移行すべきシステムの目標状態を設定し、それを達成するために必要なタスクを選択し、実行する一連の人間の対応）での過誤の発生メカニズムとそれに影響を及ぼす因子を系統立てて記述する Rasmussen の認知行動の梯子モデルを基にしている。このため、認知行動に影響を与えた組織に起因するような因子（例えば、教育・訓練不足）が抽出でき、さらに踏み込むと人の管理につながり、組織因子の解明にも有効である。Fig. 2.1 に認知行動過誤原因分析手法の手順を示す。

分析は、Rasmussen の認知行動モデルに基づく「原因分析」を基本とし、その前段階として原因分析に必要な情報を得るために「時系列分析」及び「状況分析」、それらを踏まえ、原因分析及び再発防止対策を検討する 4 段階の構成となっている。

Rasmussen の認知モデルの概要は、2.1.3 の原因分析に部分で概説する。

この分析手法は、日本原子力研究開発機構の多様な施設で発生する種々の事故・故障等の状況に適用可能な分析手法として開発され、Table 2.1 に示すようにこれまで数多くの事故・故障等の根本原因分析を適用してきた。

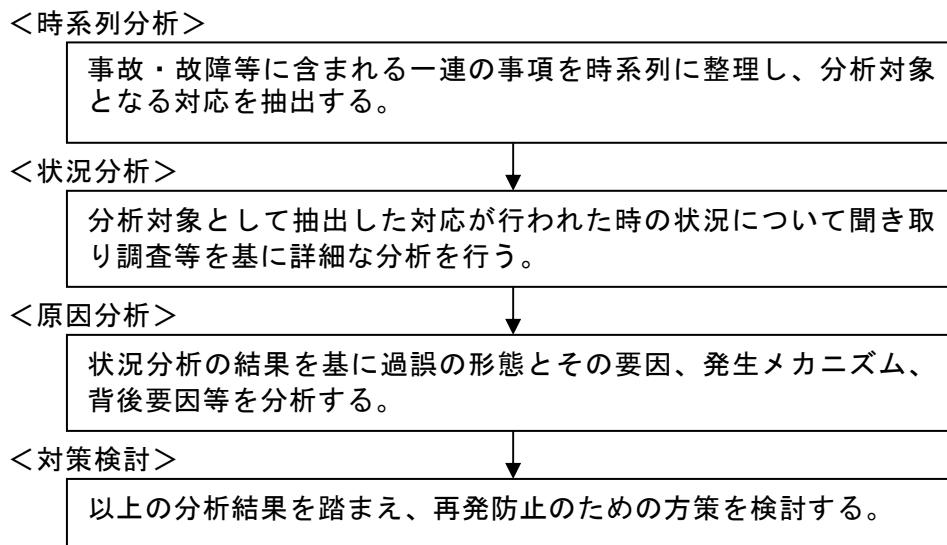


Fig. 2.1 認知行動過誤原因分析手法の概要

2.1.1 時系列分析

時系列分析は、事故・故障等の発生・拡大に係わったと考えられる事項を分析対象候補として抽出することを目的とする。分析対象の見落としを防ぎ、それらの時間的前後関係を明確にするため、事故報告書(法令に基づく報告書を含む)、データロガー、プロセス値のトレンド等(以下、「事故報告書等」という)のできるだけ客観的な事実を基に事故・故障等の発生前から施設の状況、それに対して取られた処置を時間を追って表形式にまとめる。その中から、対応が適切ではなかった点などを分析対象の候補として抽出する。ただし、事故・故障等に関係する当

事者は、思い込みなどの可能性があるため、できれば当事者以外の複数の人の確認が必要となる場合ある。

Table 2.2 に時系列分析表の一例を示す。この表は原子炉施設での事故・故障等の分析に用いた表である。整理項目は、「施設・機器の状態」、「機器の動作」、「運転員(保守員)の操作」に分けてあるが、分析の対象、分析の視点に合わせて適宜変更する必要がある。また、Table 2.2 の様式は、この分析ステップのワークシートであり、分析のまとめに際しては、この様式にこだわらず、要点を完結にまとめて表現することが望ましい。

事故・故障等の発生に係わって生じる事項の時間的流れは、大きく 3 つの期間に分けられる。それらは、

- (1) 事故・故障等の潜在的な要因の発生からそれが事故・故障等として顕在化するまで
- (2) 顕在化した事故・故障等によって生じたシステムの擾乱が収束するまで
- (3) 事故・故障等の原因調査及びシステムの修復

このうち、時系列分析では、通常(1)及び(2)を分析の対象とする。

(1)については、潜在的な要因を、どの時点にまで遡るかが重要となる。直接的な原因が設備・機器の破損、故障、誤動作であっても、保守・点検における人間の過誤に起因する可能性がある場合には、必要に応じて過去に遡って分析する必要がある。しかし、分析の第一次情報源である事故報告書等では、過去に遡及した情報は必ずしも充分ではないので、次のステップの状況分析の中で、必要に応じて追加的な時系列分析を行う必要がある。

(2)については、システムの変化に対する人間の応答に着目して整理する。特に、対応が必要なときに対応していないようなケースの見落としがないよう注意を要する。

(3)については、本原因分析手法を適用して行う事項に適さないため、本分析手法の対象外である。

2.1.2 状況分析(聞き取り調査)

状況分析では、時系列分析で抽出した事項について不明な点、それが発生したときの状況等で、事故報告書等には記載のない点、さらに事故・故障等発生前に遡り明らかにしておく必要があると考えられる事項を明確にするため、疑問点を質問事項として整理し、事故・故障等の関係者から直接聞き取り調査を行う。

聞き取り調査を行う者は、

- (1) 直接事故・故障等に携わっていない者
- (2) 同類の設備・機器等に詳しい者(同類の設備・機器等の運転、保守、操作を含む)
- (3) 法令・各種基準等に精通している者
- (4) 根本原因分析の経験を有する者または専門家

などが望ましい。しかし、(4)については、該当者の確保が困難な場合は、後で根本原因分析の経験を有する者または専門家に確認してもらうことが望ましい。

なお、聞き取り調査の対象者は、事故・故障等に関与した関係者であるが、組織要因を明確にするため施設管理者、課長、部長などを対象に行ってきた。

聞き取り調査で得られた情報を基に、事故・故障等での事象の流れにおける変節点を明確に

する。

変節点とは、その時点での人間の選択あるいは行為が、結果として事象の流れを悪化の方向に向かわせることになった、いわゆる「運命の分かれ目」である。状況分析の中で、この変節点にかかわり明らかにすべきことは、そこで採り得たほかの選択肢には、①何があったか、②なぜそのような選択をしたのか、である。②は、原因分析において、直接的な原因、認知行動に影響を及ぼした要因（背後要因）の候補となり得る情報を含むため、この点に留意して、質問事項を考え整理する必要がある。

質問事項の抽出に際しては、ある程度の分析シナリオを想定することは有効であるが、それが先入観となって、分析の方向を見誤らないよう留意すべきである。また、誘導尋問的質問、こちらの期待する回答が明白な質問の仕方は避ける。

聞き取り調査で明らかになった情報は、変節点ごとに Fig. 2.2 の書式で整理する。各変節点は時間を追ってならべる。それらの因果関係に応じて、分岐、合流させる。

この時点で、次のステップの分析で整理する材料が出揃う。

変節点の分析を漏れなく実施するためには 4M5E マトリックス分析手法を使用することもよい。詳細は、2.2 で概説する。

2.1.3 原因分析⁶⁾

ここでは Rasmussen の分析手法(デンマーク Risø 国立研究所の J.Rasmussen が中心となり、開発した人的過誤の分析手法である)を用いて人的要因分析を行う。ここではヒューマンエラー発生の因果関係を 6 つの要素に分けて分析する。すなわち、エラーの発生したタスク、エラーの形態(機能不全の外的モード)、エラーを引き起こした意思決定過程、エラーの原因と発生のメカニズム及びそれに影響を及ぼす背後要因(パフォーマンスに対する影響因子及び状況因子)について分析する。付録 1 の分析のガイダンスを参照すると分析を比較的容易に行うことができる。

分析対象は、前節の状況分析で抽出された変節点での人間の対応である。分析は、以下の観点から該当するものを見つけ出す作業である(付録 1 の分類項目を参照)。

以下に各要素の概要を説明する。

(1) エラーの形態

タスク実行時に、直接目に見える形で現れた人間のエラー形態の分類である。分析では、状況分析で抽出した変節点での選択すべき対応に着目する。Rasmussen の分類では、「エラー」と呼ばずに「機能不全」と表現しているのは、「エラー」という言葉に罪のニュアンスが含まれているため、あえて「エラー」という言葉の使用を避けている。ここでは、理解を容易にするために「エラー」を用いる。このカテゴリーには、一連の手順の中にある行為を省略したり、タイミングを誤ったりするエラーあるいは、間違った行為を行うエラーが含まれる。

(2) エラーを引き起こした意思決定過程

Rasmussen は、人間の認知過程をいくつかの段階に分けて記述するモデルを提唱している。このモデルは、Rasmussen の「梯子モデル」と呼ばれる。人間は、外界(原子炉運転員の場合はプラント)に変化が生じた場合、それに対応する必要性を検知し、次の行動の方向を決めるた

めに、周囲の重要なデータを観察し、現状を同定する。さらに、起こりうる結果を定められた目標との関連で評価し、これに基づきシステムが移行すべき目標状態を選択し、そのために遂行すべきタスクを決定する。次にどのように実行するかの手順をきめて、実行に移す。ただし、いつもこのような順序で変化に対応するわけではなく、その人のこれまでの経験、持っている知識、その場の状況などによって途中が省略される場合がある。このような変化の検知から手順の実行に至る一連の知的プロセスのどの段階に関連してエラーに至ったかをこの要素では分類する。ここでの分析では、人間が対応を決定あるいは選択するのに際して、これまでの経験が生かせる状況であったか？、決定するに際して必要な情報を得ていたか？を把握することが分析のポイントとなる。

(3) エラー発生の心的メカニズム

過去の訓練や経験に基づいて行動を起こす際の選択エラーや、システム側から与えられた情報の処理過程のエラー、記憶を呼び戻す際のエラー、知識に基づいた推論過程でのエラー、環境に不慣れなために正確に行動できなかったエラーなど意志決定の各段階におけるエラーのメカニズムに関する分類である。

(4) エラーの原因

システムからの人間に対する外乱及び他の人間からの外乱など外的要因、過度の作業、病気などによる作業能力の低下及び作業者自身の内的要因などで、時間的にエラーの発生以前に位置付けられ、一時的に発生したヒューマンエラーの原因になったものをここに分類する。ここでの分析および次の背後要因の分析では、状況分析での②「なぜそのような選択をしたか」の項目として抽出した事項の多くが、これらの分類項目に該当する。

(5) 影響を及ぼす背後要因(パフォーマンスに対する影響因子及び状況因子)

この要素に分類される因子もエラーの「原因」ではあるが、前述の「エラーの原因」に比べて永続的なものが、この要素として分類される。例としては、ヒューマンエラーが発生したときの作業特性、作業環境、作業負荷、作業の持つ動機付けなど作業者の心理的、肉体的条件などが挙げられる。

以上の各要素に関して、それに該当する分類項目を見つけ出し、3.1.3 原因分析のように整理する。付録1を参照して整理した場合、分類項目の表現自体が日常にない用語で構成されているため分かりづらい。そこで、不要な項目を削除し、状況分析で抽出した要因が該当する項目だけを残し、さらに、その内容を該当事象に即した具体的な表現で分かりやすく記述する。

2.1.4 再発防止対策の検討

このステップでは、原因分析の結果を基に再発防止のための対策を検討する。原則的には、原因分析で抽出された「エラーの外的原因」、「パフォーマンスに対する影響因子」、「状況因子」を排除する方策が対策となり得る。

2.1.5 分析を行うための簡易的な情報整理様式

認知行動過誤原因分析を行うには、長時間を要するため、短期間に一度のたくさんの事象を

分析するため、簡易的な情報整理様式を作成した。この様式は認知行動過誤原因分析の考え方を基に発生事象の原因を直接原因と間接原因に分けて記載し、それぞれの背後要因を記載する。また、背後要因の誘因因子・要因を記載する。さらには、背後要因の誘因因子・要因を排除する方策・方法を記載し、防止対策とする。Table 2.3 に簡易的な情報整理様式（背後要因等調査票）を示す。

2.2 4M5E マトリックス分析手法

4M5E マトリックス分析手法は、要因分析手法として広く用いられてきた 4M-4E マトリックス分析手法(4つの要因分析(Man、Machine、Media、Management)を行い、4つの対策(Education、Engineering、Enforcement、Examples)を行なうとするもの)に「Environment」(環境)を付け加えたものである。一般的に広く用いられてきた同様な分析手法は、この他に、Edwards が基本モデルを提案し、KLM オランダ航空の Hawkins が改良した要因分析方法 SHEL モデル、電力業界で使われている SHEL モデルに Management を追加した M-SHEL モデル、Hiyari-Hatto-Guideline for IDEas of Error reduction、1999 の H2-GUIDE などがある。

4M5E マトリックス分析手法の取扱いは、財団法人原子力安全技術センターのホームページ (<http://www.n-iinet.ne.jp/4m5e.htm>)に掲載されている。この中で 4M5E マトリックス分析手法分析事例として、日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所の第 1 廃棄物処理棟地下灰取出室のグローブ破損⁷⁾などを取り上げて解説している。

4M5E マトリックス分析手法⁸⁾は、発生した事象について 4M 「Man」(人)、「Machine」(設備、機器)、「Media」(環境)、「Management」(管理)の視点から要因を抽出し、これらの要因に対して、5E 「Education」(教育・訓練)、「Engineering」(技術・工学)、「Enforcement」(強化・徹底)、「Example」(模範・事例)、「Environment」(環境)の視点から対策を検討する原因対策対応式(マトリックス式)の分析手法である。

この手法は、下記に留意しながら、次の手順により分析を行う。

- ①分析を行う際に要因及び対策を漏れなく抽出するための糸口を与えるものである。
抽出された結果が「表の中の何処に分類されるか」ではなく「事象に関連するあらゆる要因と対策を洗い出すこと」に重点を置くことが適当である。
- ②要因分類表(4M) 及び対策分類表(5E)は事業所の特徴に応じて適宜改善することで、その事業所にとってより有効なマニュアルとすることができます。

(1) *4M 分析(要因分析)

- ①トラブル事象に関するできるだけ詳細な情報を入手し、その事象概要を 4M5E マトリックス(Table 2.4)に記述する。
- ②トラブル事象の要因を次の 4M の視点から分析し、4M 要因分類表(付録-2)に従って分類する。

*4M Man(作業者の心身的な要因、作業能力的な要因)

Machine(設備・機器・器具固有の要因)

Media(作業者に影響を与えた物理的、人的な環境の要因)

Management(組織における管理状態に起因する要因)

③4M5E マトリックス(付録 2)に、対応する区分の**整理番号を付したうえ、箇条書きで簡潔に要因を書き出す。

④トラブル事象から見落とした要因がないかチェックする。

(2) *5E 分析(対策立案)

①4M 分析において抽出・分類した要因に対して 5E 対策分類表(付録-2)に従って、対策を導き出す。要因 1 つにつき、少なくとも 1 つの対策を当てはめる。

*5E Education(業務遂行のために必要な能力、意識を向上させるための方策)

Engineering(安全性を向上させるための設備、方法の技術的な方策)

Enforcement(業務を確実に実施するための強化・徹底に関する方策)

Example(具体的な事例を示す方策)

Environment(物理的な作業環境を改善する方策)

②4M5E マトリックスに、対応する区分の**整理番号を付して箇条書きでそれぞれ対策を書き出す。

**整理番号：要因、対策の傾向分析等のための整理番号

以上、4M5E マトリックス分析手法は単純に要因と対策が分かりやすい形でまとめられるが、背後要因などの根本的な原因にたどり着きにくいところがある。このため、さらに踏み込んだ分析を認知行動過誤原因分析手法などが使用できる。また、直接 4M5E マトリックス分析手法で分析するのではなく、分析のまえに「2.1 認知行動過誤原因分析手法」で述べてきた時系列分析、状況分析で事象を整理しておくことが必要である。

3. JCO 臨界事故を事例としたそれぞれの分析手法の解説

これまで述べてきた種々の分析法は、研究所で起こった一般施設を含む原子力研究施設等の事故・故障等を対象に適用してきた。また、分析を行う際は、主に法令報告書等を基に確定された事実を資料として、根本的な原因分析を行ってきた(Table 2.1 参照)。

ここでは、原子力安全委員会、日本原子力学会など^{9),10),11)}で根本的な原因分析が行われて、事故の内容が一般の人にもよく知られている。JCO 臨界事故をそれぞれの分析法の適用例として、これまでの経験を活かした使用法を解説する。

なお、ここでは、文献 9)に聞き取り調査やなぜなぜ分析などの結果が記載されているため、それぞれの分析法への適用は、その結果を引用している。したがって、実際に聞き取り調査を行ったわけではない。

3.1 認知行動過誤原因分析手法を用いた分析

3.1.1 JCO 臨界事故の概要と時系列分析

(1) 事故の概要

1999 年 9 月 30 日午前 10 時 35 分頃、株式会社ジェー・シー・オー (JCO) において沈殿槽

内の硝酸ウラニル溶液が臨界に達し、警報装置が吹鳴した。この臨界は、最初に瞬間に大量の核分裂反応が発生し、その後、約 20 時間にわたって、緩やかな核分裂状態が継続したものであった。10月1日午前2時30分頃から、沈殿槽外周のジャケットを流れる冷却水の抜き取り作業が開始され、午前6時15分頃、臨界状態は停止した。その後、ホウ酸水を注入し、午前8時50分には臨界の終息が最終的に確認された。

この臨界による総核分裂数は、沈殿槽内の残留溶液の分析結果から、 2.5×10^{18} 個と評価されている。

JCO 東海事業所の転換試験棟は、1980 年 11 月に核燃料物質の使用許可を取得し、その後、1984 年に濃縮度 20% 未満のウランの液体製品も製造可能な加工施設に変更許可されたものである。この事故は「常陽」の燃料用として、1999 年度に濃縮度 18.8%、ウラン濃度 380gU/リットル以下の硝酸ウラニル溶液を転換試験棟において製造することを目的とした作業において起こった。作業は 3 人で実施され、29 日から硝酸ウラニル溶液の製造を開始している。本来であればウラン粉末を溶解塔で硝酸を加えて溶解すべきところを、ステンレス容器 (10 リットル) でウラン粉末を溶解した後、作業手順書をも無視して、ステンレス容器 (5 リットル) 及び漏斗を用いて、1 バッチ (作業単位 : 2.4kgU) 以下で制限して管理すべき沈殿槽に 7 バッチ (約 16.6kgU) の硝酸ウラニル溶液を注入し、臨界事故に至った。

(2) 時系列分析

時系列分析では、硝酸ウラニル溶液(UHN)製造開始(1986年)以来の事柄もあるが、ここでは事故を起こした操業の経過についてのみを記載した。

【事故の発生前】

1999 年 9 月 6 日、計画グループ主任により作成された各工程ごとの作業手順書であるプロセスパラメータシート(PPS)の審査という形で、作業に関する打ち合わせが主任、職場長、スペシャルクルー副長の 3 名によって持たれた。硝酸ウラニル溶液(UNH)製造の場合の PPS は溶解、溶媒抽出、沈殿、仮焼、製品溶解の各工程に対して用意されているが、混合均一工程に対しては作成されていない。

9 月 28 日、副長、作業員 C、D で製品 UNH 混合の均一化のための準備作業として、純硝酸ウラニル溶液貯塔への上部仮設配管を取り付けたが、手順書では下部仮設配管を取り付けたことになっていることを知らずに、このやり方では下部配管系統でデッドスペースができるここと、UNH 取り出し口が低すぎることで、作業性が悪いと副長は考えて、3 名で話していたところ、貯塔に替えて沈殿槽を混合均一化に使用してはどうかというアイディアが D から提案された。

同日、10：35 臨界事故発生、沈殿槽へのウラン投入量 16.588kgU

【事故の発生後】

同日、10：35 JCO 加工施設の転換試験棟で警報が吹鳴。

翌日 10 月 1 日、2：30 頃、沈殿槽の冷却水抜取り作業を開始、4：00 頃、施設境界の中性子線量率の低下を確認、6：30 頃中性子線量率は検出限界以下に低下したことを確認し臨界状態は終息した。この結果、最終的に臨界事故が終息するまでに約 20 時間が経過し、この事故による総核分裂数は、 2.5×10^{18} であり、被ばく者は周辺住民を含む 666 名となった。

(3) 分析結果

JCO 臨界事故の時系列分析表を Table 3.1 に示す。分析表では、人間の選択あるいは行為が、結果として事象の流れを悪化の方向に向かわせることになった変節点を貯塔に替えて沈殿槽を混合均一化に使用してはどうかというアイディアが D から提案された時点を選択して、次の状況分析を行うことにした。

なお、ここでは、変節点をこの 1 点を例として抽出したが、JCO 臨界事故のように多くの変節点が存在する。その場合は、一つ一つ分析を行うとよい。もちろん時系列分析においてもさらに細かい点まで把握しておく必要がある。

3.1.2 状況分析

硝酸ウラニル溶液の沈殿槽を用いた混合均一化に着目した状況分析を Fig. 3.1 に示す。

ここでは、選択しなかった対応としてこれまでとおり貯塔を使用して混合均一化を行うことが考えられる。なお、そもそも、貯塔を用いた混合均一化行程が、手順書に基づいて未許可の仮配管を設置することを必要とするような複雑なものとなったのは、この工程がクロスブレンディング法による過度な作業負荷等の問題を解決するためにアドホック(その場対応)的に導入されたものであったことによっている。また、クロスブレンディング法の導入自体も、アドホック的であった。

貯塔を使用して混合均一化を行うという背後要因には、

- ① スペシャルクルー：転換試験棟内に、溶液の混合を最も効率的に達成できる攪拌機を備えていて混合機能に最適なことが明白でデッドスペースも生じていない沈殿槽が存在して、前日(9月 27 日)まで精製工程に使用していた。
- ② スペシャルクルー副長：品質管理上は、沈殿槽の使用前に念入りな洗浄を実施すれば問題ないと考えた。
- ③ 計画グループ主任：品質管理上は、不純物が混入する恐れがないこと、ADU が残っている可能性がないことを副長に確認して問題ないと判断した。

3.1.3 原因分析

硝酸ウラニル溶液の沈殿槽を用いた混合均一化に着目した原因分析を Fig. 3.2 に示す。

原因分析としては、「機能不全の外的モード」で「行為の省略」が該当し、当り前ではあるが、「硝酸ウラニル溶液を形状管理していない沈殿槽に 7 バッチ連続して投入したこと。」となる。背後要因としては、「パフォーマンスに対する影響因子」で「心的負荷と資源」が該当し、「手順書をぜったい読まなければならないという動機に欠けた。」こととなる。また、間接原因としては、「状況因子」で「作業時間特性」が該当し「スペシャルクルーは、硝酸ウラニル溶液製造操業他に定常業務として排水処理、スクラップの細粉化などの現場作業及び 30B シリンダー 5 年定期検査関連作業などで忙しくて余裕がない。」などが考えられる。

のことから防止対策は、

- ① 法令、手順書の遵守などを適正に遂行するため、モラルの向上を図る意識教育を実施する。
- ② 臨界安全に関する教育を行うとともに、人間工学的な配慮による設備・機器上の要因を改

善する。
などが挙げられる。

3.1.4 簡易的な情報整理様式（背後要因等）を用いた情報の整理

簡易的な情報整理様式（背後要因等）を用いた情報の整理状況を Table 3.2 に示す。簡易的な情報整理を行ったとしても認知行動過誤原因分析手法と同じような結果を示すが、論理展開が直観的になってしまう傾向がある。このため、着目する変節点が若干複雑になると違った方向に進む可能性がある。ただし、短期間に一度のたくさんの事象を分析することが可能である。

3.2 4M5E マトリックス分析手法を用いた分析

4M5E マトリックス分析手法を用いた分析結果を Table 3.3 に示す。分析の結果は認知行動過誤原因分析手法と同じような結果を示すが、マトリックス分析だけに着目点からの論理展開が直観的になってしまう傾向がある。ただし、認知行動過誤原因分析手法が時系列分析による変節点からの分析に対し、いきなり 4 つの要因分析（Man、Machine、Media、Management）に入ってくるため、Management の【組織要因・風土】が該当するような「第 34 回生産計画会議(9 月 29 日 13:00~14:30)には、製造部長、職場長、安全管理グループ長、計画グループリーダー、主任、技術部工務グループリーダー等が出席して 10 月の生産計画を議論しており、転換試験棟の操業の予定納期などが報告されている。ざくばらんに計画の「ずれ」をも情報交換する場となっていたら、硝酸ウラニル溶液混合均一化における沈殿槽使用への手順変更ことを、主任以外のメンバーが知って、その危険性に気づいて、実行が防止できた可能性が高い。」など別の変節点が対象となったりする。このため、漏れなくマトリックス的に要因分析し、一機に全体の要因を見渡すためには便利である。例えば、これまで事故・故障等における要因分類として、人的要因が含まれるか否かなどの判断に役立ってきた。

なお、認知行動過誤原因分析手法では、変節点を 1 点、例として抽出したが、JC0 臨界事故のように多くの変節点が存在する。その場合は、一つ一つ分析を行うとよい。

4. 結言

これまで研究所内で起こった研究施設の事故・故障等の根本原因分析に用いられてきた二つの分析手法である認知行動過誤原因分析手法及び 4M5E マトリックス分析手法の特徴及び使用法について述べてきた。また、日本原子力学会 JC0 事故調査委員会の調査報告などを使用して、JC0 臨界事故を対象にそれぞれの分析法を適用し、使用法を解説した。

これらの分析法は、1989 年度に発生した核燃料使用施設での発煙事象から現在に至るまで研究所内で起こった多種多様な研究施設の事故・故障等を対象に適用され、さらに、様々な立場の職員が実施してきた。これらの経験から様々な立場の職員を対象にこれらの分析法を解説しながら根本原因分析を実施してきた結果、これまでに根本原因分析の経験を有する者や専門家などでなくともこれらの分析法を用いてある程度の根本原因分析ができるものと考えられる。

今後は、今後も発生する多種多様な研究施設の事故・故障等を対象にそれぞれの分析法を適用して得られた根本原因及び教訓が品質保証活動におけるより良い是正処置及び予防処置に結びつき、実行的な改善につながることを期待する。

なお、Table2.1 にも示した 2007 年 6 月に発生した日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所の非管理区域における核燃料物質による汚染事象では、これまでの経験を活かし、規制当局等への法令報告書に「未報告という不適切な対応に特化した根本原因分析」を記載した。このことは、これまで説明した使用方法とは若干異なるが法令報告書に根本原因分析の結果を記載した例である。記載した内容を Fig. 4.1 に示す。

謝 辞

これまで数多くの一般施設を含む原子力研究施設等の事故・故障等を対象に根本原因分析を行ってきた際に、分析結果のとりまとめにご尽力戴いた石島清見安全研究センター長に深く感謝するとともに実際に事故・故障等の根本原因分析に携わった施設の運転管理等を行っている職員等にその労に対し深く感謝いたします。

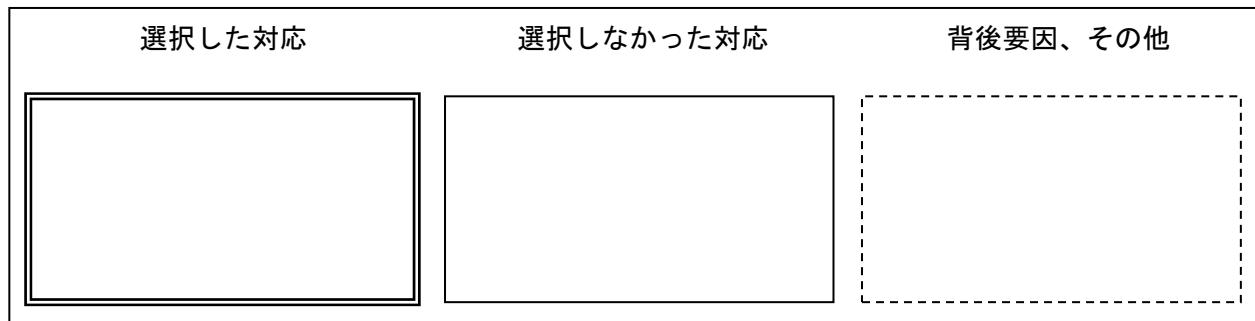
参考・引用文献

- 1) 原子力安全・保安院、独立行政法人原子力安全基盤機構：“事業者の根本原因分析実施内容を規制当局が評価するガイドライン”、2007年8月。
- 2) 日本電気学会：“原子力発電所における安全のための品質保証規程(JEAC4111-2003)の適用指針－原子力発電所の運転段階－JEAG4121-2005[2007年追補版2]”、2008年2月。
- 3) 渡辺憲夫、平野雅司：“IAEA-ASSETにおける根本原因分析手法の「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例への適用”、JAERI-Tech 97-036(1997)。
- 4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構のホームページ：<http://www.jaea.go.jp/>(accessed 2009-01-15)の発表・お知らせ、プレス発表、事故・トラブル関連を引用。
- 5) 日本原子力研究所：1994年2月、私信。
- 6) J.ラスマッセン著、海保博之、他訳：“インターフェースの認知工学”、啓学出版、1990年。
- 7) グローブ破損調査グループ、バックエンド技術部：“第1廃棄物処理棟地下灰取出室グローブ破損調査報告書”、JAERI-Review 2002-017 (2002)。
- 8) 財団法人原子力安全技術センターのホームページ：<http://www.n-iinet.ne.jp/4m5e.htm> (accessed 2009-01-15)の4M5Eを引用。
- 9) 原子力安全委員会：“ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告”、1999年12月。
- 10) 日本原子力学会JCO事故調査委員会：“JCO臨界事故 その全貌の解明－事実・要因・対応－”、東海大学出版、2005年2月。
- 11) 茨城県：“核燃料加工工場施設臨界事故の記録”、2000年9月。

Table 2.2 時系列分析表の様式

日時/ 時刻	施設・機器の状況	機器の動作	運転員(保守員)の操作	補足説明	因果 関係	分析 の必 要性

<タスク名 1>



<タスク名 2>

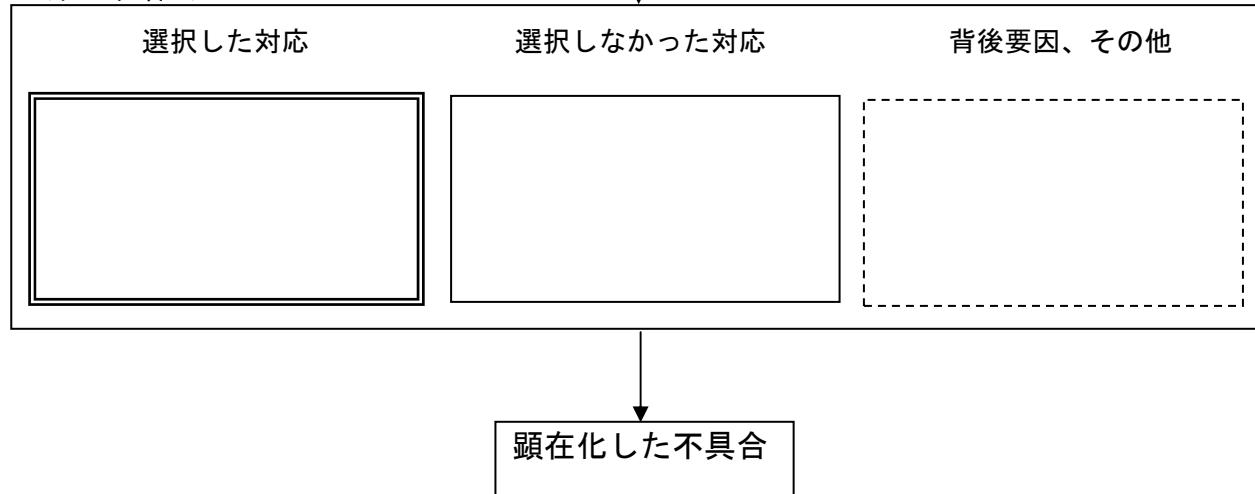


Fig. 2.2 状況分析の様式

Table 2.3 簡易的な情報整理様式（背後要因等調査票）

1	施設名	
2	発生年月日	
3	発生事象の件名	
4	発生事象の概要	
5	発生事象の原因	(1)直接原因 (2)間接原因 (3)背後要因
6	背後要因の誘引因子・要因	
7	上記 6.の因子・要因を排除するための方策・方法 (現状との比較)	
備 考		

Table 2.4 4M5E マトリックス分析の様式
事故・故障等の名称
4M5E マトリックス

事象概要	要因 →業務遂行のためには必要な能力、意識を向上させるための方策	Man 人 →作業者の心身的な要因、作業能力的な要因	Machine 設備・機器 →設備・機器・器具固有の要因	Media 環境 →作業者に影響を与えた物理的、人的な環境の要因	Management 管理 →組織における管理状態に起因する要因
Education 教育・訓練 →業務遂行のために必要な能力、意識を向上させるための方策					
Engineering 技術・工学 →安全性を向上させるための設備、方法の技術的な方策					
Enforcement 強化・徹底 →業務を確実に実施するための強化、徹底に関する方策					
Example 模範・事例 →具体的な事例を示す方策					
Environment 環境 →物理的な作業環境を改善する方策					

Table 3.1 JCO 臨界事故の時系列分析表

日時/時刻	施設・機器の状況	機器の動作	運転員(保守員)の操作	補足説明	分析の必要性 因果関係
1999年 9月6日				計画グループ主任により作成された各工程ごとの作業手順書であるプロセスパラメータシート(PPS)の審査という形で、作業に関する打ち合わせが主任、職場長、スペシャリスト副長の3名によって持たれた。硝酸ウラニル溶液(UNH)製造の場合のPPSは溶解、溶媒抽出、沈殿、仮焼、製品溶解の各工程に対して用意されているが、混合均一化工程に対しては作成されていない。	
9月28日	副長、作業員C、Dで製品UNH混合の均一化のための準備作業として、純硝酸ウラニル溶液貯槽への上部仮設配管を取り付けたが、手順書では下部仮設配管を取り付けたが、このやり方では下部配管系統でデッドスペースができるこことで、UNH取り出し口が低すぎることで、作業性が悪いと副長は考へて、3名で話していたところ、貯槽に替えて沈殿槽を混合均一化に使用してはどうかといふアイディアがDから提案された。				有

9月 29 日	13:00 過ぎから副長・作業員C、Dで製品溶解と溶液を沈殿槽にいれる作業を開始し、4バッチの溶解と沈殿槽への注入で29日は終了した。	12:15頃、副長は食堂の前で計画グループ主任と一緒に、UHNの均一化に貯槽を使うと時間がかりサンプルを出すのに間に合わない、沈殿槽をきれいにしてあるのでこれを使うことではなく純物が入るなどして品質に問題が出ることはないので沈殿槽を使用してもよいか訊ね、同主任は、不純物以外に沈殿槽を使うことで品質上問題はないかを検討するため回答を保留。このときは同主任は臨界管理上の懸念は全く持っていない。	13:00頃、同主任は副長に電話、「不純物が混入する恐れはないか、ADUが残っている可能性はないか、沈殿槽を使わないと間に合わないんですね」を尋ね確認。この確認後「沈殿槽を使ってもいいです」と了承の返事をした。電話をしている間に「沈殿槽では硝酸ウラニル溶液を沈殿させると臨界の危険がある」ということを思い出し、「沈殿させないようにアンモニアのバルブは開けないで下さい」と注意。	副長は計画グループ主任からの電話を受けた、Cに「溶液ならOK」と伝え、Dに「アンモニアのバルブを固定するよう」と指示した。
9月 30 日 10:00 過ぎ		7バッチ目の2回目のビーカーから沈殿槽注入(最後の注入)は、滌過作業を完了したCが漏斗を支えていた。副長はDにいわれて、ウラン量から液量を計算して、沈殿槽に入っているウラン濃度の計算を、沈殿・反焼室扉の近くの机で、始めようとしていた。	5バッチ目の滌過を始めたところ、計画グループのEから電話でサンプル提出の確認、13時までに出すことをEに返事。	
9月 30 日 10:35		臨界事故発生、沈殿槽へのウラン投入量 16. 588kgU		

<硝酸ウラニル溶液の沈殿槽を用いた混合均一化>

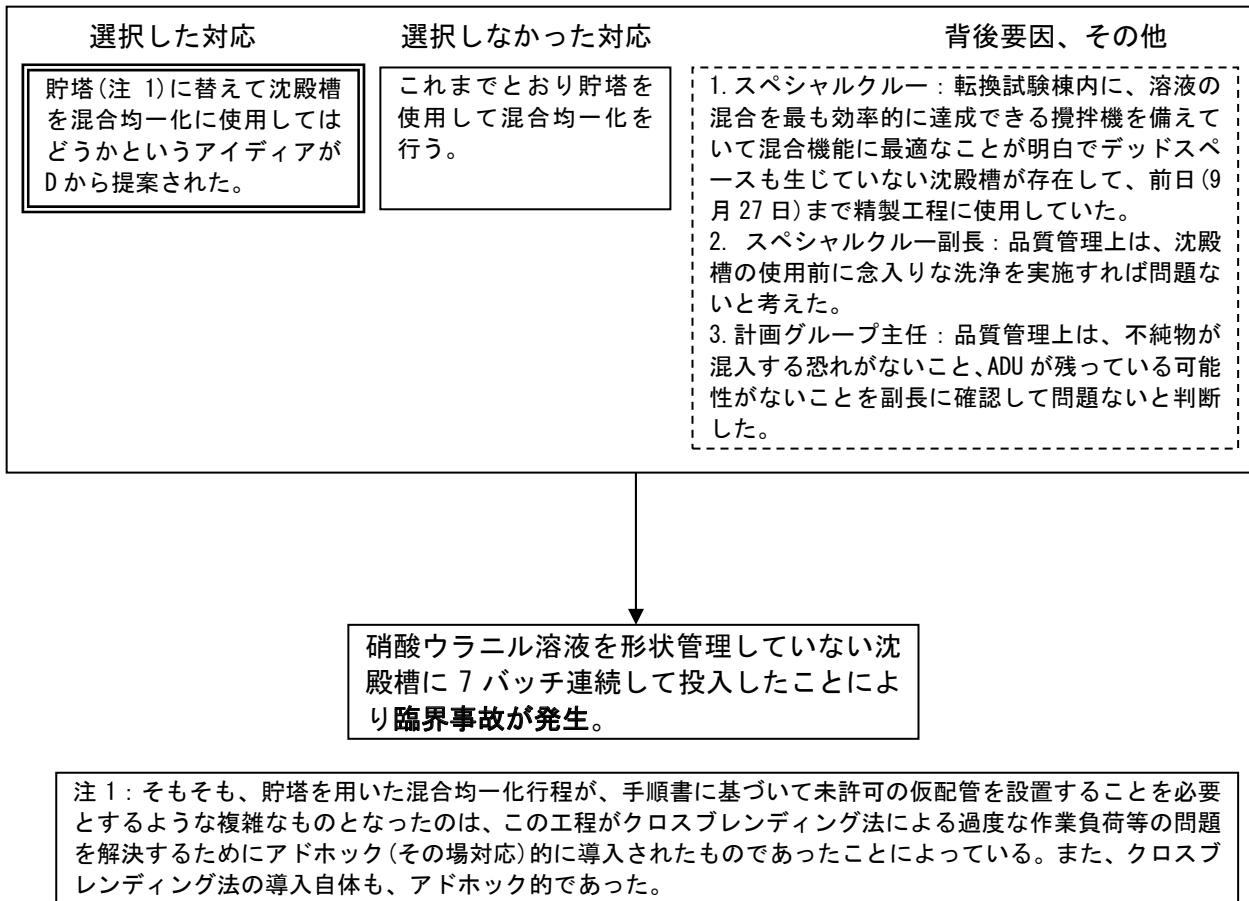


Fig. 3.1 <硝酸ウラニル溶液の沈殿槽を用いた混合均一化>に着目した状況分析

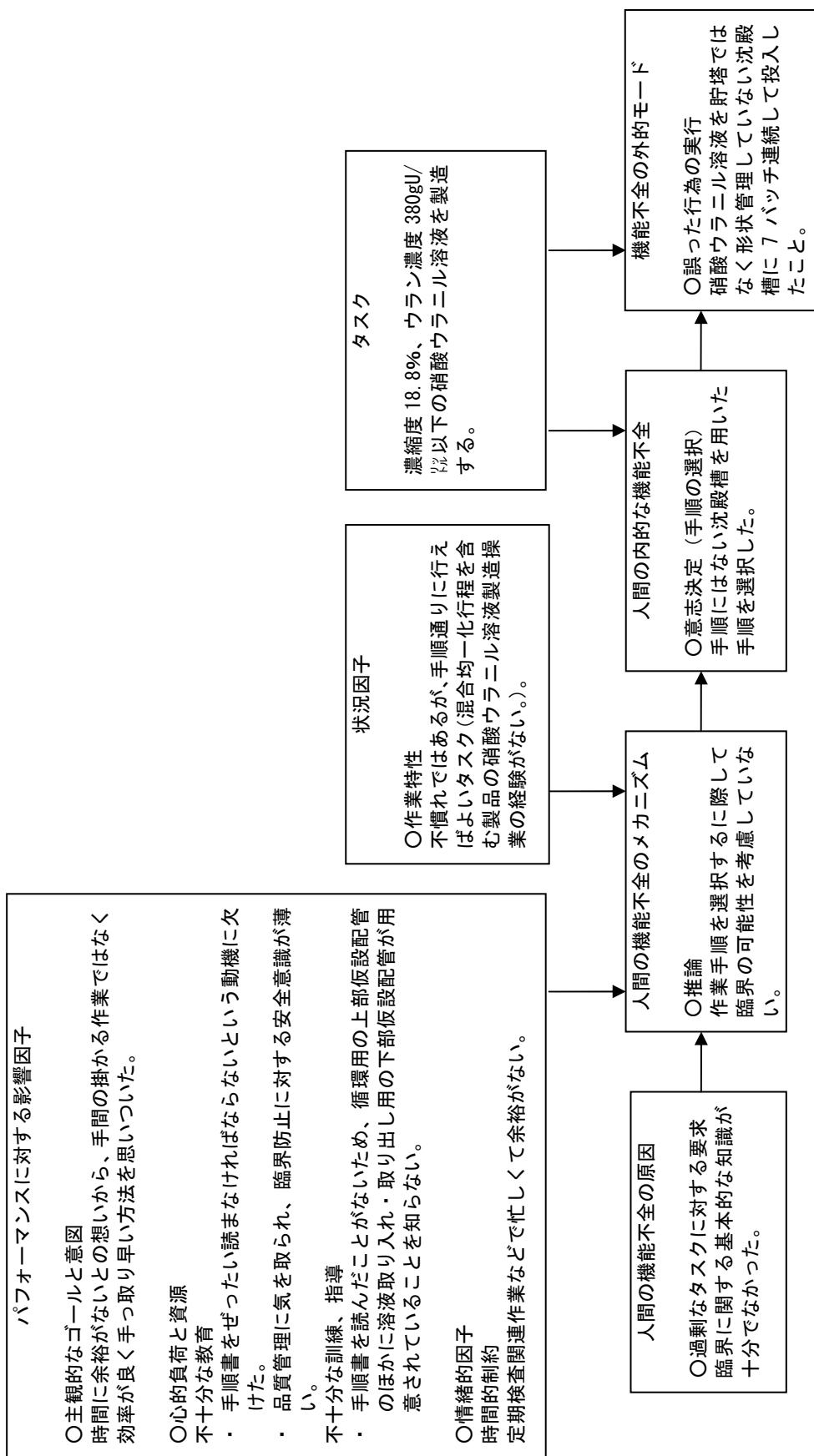


Fig. 3.2 <硝酸ウラニル溶液の沈殿槽を用いた混合均一化>に着目した原因分析

Table 3.2 簡易的な情報整理様式（背後要因等調査票）を用いた JCO 臨界事故の整理

1	施設名	株式会社ジー・シー・オー (JCO) 転換試験棟
2	発生年月日	1999年9月30日午前10時35分頃
3	発生事象の件名	臨界事故
4	発生事象の概要	この事故は「常陽」の燃料用として、1999年度に濃縮度18.8%、ウラン濃度380gU/リッタ以下硝酸ウラニル溶液を転換試験棟において製造することを目的とした作業において起った。作業は3人で実施され、29日から硝酸ウラニル溶液の製造を開始している。本来であればウラン粉末を溶解塔で硝酸を加えて溶解すべきところを、ステンレス容器(10リットル)でウラン粉末を溶解した後、作業手順書をも無視して、ステンレス容器(5リットル)及び漏斗を用いて、1バッチ(作業単位:2.4kgU)以下で制限して管理すべき沈殿槽に7バッチ(約16.6kgU)の硝酸ウラニル溶液を注入し、臨界事故に至った。
5	発生事象の原因	(1)直接原因 硝酸ウラニル溶液を形状管理していない沈殿槽に7バッチ連続して投入したこと。 (2)間接原因 スペシャルクルーは、硝酸ウラニル溶液製造操業他に定常業務として排水処理、スクラップの細粉化などの現場作業及び30Bシリンドラー5年定期検査関連作業などで忙しくて余裕がない。 (3)背後要因 ①副長、作業員C、Dで製品UNH混合の均一化のための準備作業として、純硝酸ウラニル溶液貯塔への上部仮設配管を取り付けたが、手順書では下部仮設配管を取り付けたことになっていることを知らずに、このやり方では下部配管系統でデッドスペースができるこや、UNH取り出し口が低すぎることで、作業性が悪いと副長は考えて、3名で話していたところ、貯塔に替えて沈殿槽を混合均一化に使用してはどうかというアイディアがDから提案された。 ②スペシャルクルー副長も品質管理上は、沈殿槽の使用前に念入りな洗浄を実施すれば問題ないと考えた。 ③計画グループ主任も品質管理上は、不純物が混入する恐れがないこと、ADUが残っている可能性がないことを副長に確認して問題ないと判断した
6	背後要因の誘引因子・要因	系統的な臨界安全教育、とりわけ転換試験棟の臨界安全管理方策の特異性に留意した教育がなされていなかったこと。
7	上記6.の因子・要因を排除するための方策・方法(現状との比較)	臨界安全教育の実施。
備考		注1:そもそも、貯塔を用いた混合均一化行程が、手順書に基づいて未許可の仮配管を設置することを必要とするような複雑なものとなつたのは、この工程がクロスブレンディング法による過度な作業負荷等の問題を解決するためにアドホック(その場対応)的に導入されたものであったことによつている。また、クロスブレンディング法の導入自体も、アドホック的であった。

Table 3.3 4M5E マトリックス分析手法を用いた JCO 臨界事故の分析

事故・故障等の名称 JCO 臨界事故		4M5E マトリックス分析手法を用いた JCO 臨界事故			
事象概要	この事故は「常陽」の燃料用として、1999 年度に濃縮度 18.8%、ウラン濃度 380gU/トス以下での硝酸ウラニル溶液を転換試験棟において製造することを目的とした作業において起こった。作業は 3 人で実施され、9 月 29 日から硝酸ウラニル溶液の製造を開始している。本来であればウラン粉末を溶解塔で硝酸を加えて溶解すべきところを、ステンレス容器 (10 %) でウラン粉末を溶解した後、作業手順書をも無視して、ステンレス容器 (5 %) 及び漏斗を用いて、1 バッチ (作業単位 : 2.4kgU) 以下で制限して管理すべき沈殿槽に 7 バッチ (約 16.6kgU) の硝酸ウラニル溶液を注入し、臨界事故に至った。				

原因	Man 人 →作業者の心身的な要因、作業能力的な要因	Machine 設備・機器 →設備・機器・器具固有の要因	Media 環境 →作業者に影響を与えた物理的、人的な環境の要因	Management 管理 →組織における管理状態に起因する要因	【組織要因・風土】
【技量】 副長、C 作業員、D 作業員ともに混合均一化行程を含む製品の硝酸ウラニル溶液製造操業の経験がないこと、手順書を読んだことがないため、循環用の上部仮設配管のほかに溶解取り入れ・取り出し用の下部仮設配管が用意されていることを知らない。	【設計・機能】 副長、作業員 C、D で製品 UNH 混合の均一化のための準備作業として、純硝酸ウラニル溶液貯槽への上部仮設配管を取り付けたが、手順書では下部仮設配管を取り付けたことにになっていることを知らずに、このやり方では下部配管系統でデッドスペースができることがあることや、UNH 取り出しが口が低すぎることで、作業性が悪いと副長は考えて、3 名で話していたところ、貯槽に替えて沈殿槽を混合均一化に使用してはどうかというアイディアが D から提案された。 ・7 バッチ目もビーカーから沈殿槽注入(最後の注入)。	【職場状況】 ほのかの業務が忙しくて余裕がないかったこと、読んだだけでは実際の作業を実施できる内容になつていなことと、手順書が順守すべきもとしてみなされていなかつた。	第 34 回生産計画会議(9 月 29 日 13:00~14:30)には、製造部長、職場長、安全管理グループ長、計画グループリーダー、主任、技術部工務グループリーダー等が出席して 10 月の生産計画を議論しており、転換試験棟の操業の予定納期などが報告されている。ざくばらんに計画の「ずれ」をも情報交換する場となついたら、硝酸ウラニル溶液混合均一化における沈殿槽使用への手順変更などを、主任以外のメンバーが知って、その危険性に気づいて、実行が防止できた可能性が高い。		

<p>Education 教育・訓練 →業務遂行のために必要な能力、 意識を向上させるための方策</p>	<p>【意識教育】 法令、手順書の遵守などを適正に遂行するため、モラルの向上を図る意識教育を実施する。</p>	<p>【意識教育】 法令、手順書の遵守などを適正に遂行するため、モラルの向上を図る意識教育を実施する。</p>	<p>【意識教育】 法令、手順書の遵守などを適正に遂行するため、モラルの向上を図る意識教育を実施する。</p>
<p>Engineering 技術・工学 →安全性を向上させるための設備、方法の技術的な方策</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・フェールセーフ、フェールホールフの考え方を取り入れた改善を行う。 ・臨界安全に関する教育を行うとともに、人間工学的な配慮による設備・機器上の要因を改善する。 	<p>【設備機器の改善】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フェールセーフ、フェールホールフの考え方を取り入れた改善を行う。 ・臨界安全に関する教育を行うとともに、人間工学的な配慮による設備・機器上の要因を改善する。 	<p>【設備機器の改善】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フェールセーフ、フェールホールフの考え方を取り入れた改善を行う。 ・臨界安全に関する教育を行うとともに、人間工学的な配慮による設備・機器上の要因を改善する。
<p>Enforcement 強化・徹底 →業務を確実に実施するための強化、徹底に関する方策</p>	<p>【危険予知活動】 危険予知活動を徹底する。</p>	<p>【危険予知活動】 危険予知活動を徹底する。</p>	<p>【危険予知活動】 危険予知活動を徹底する。</p>
<p>Example 模範・事例 →具体的な事例を示す方策</p>	<p>【水平展開】 ・職制による情報の周知。 ・情報を共有する仕組みを再構築する。</p>	<p>【水平展開】 ・職制による情報の周知。 ・情報を共有する仕組みを再構築する。</p>	<p>【水平展開】 ・職制による情報の周知。 ・情報を共有する仕組みを再構築する。</p>
<p>Environment 環境 →物理的な作業環境を改善する方策</p>	<p>【作業環境の改善】 作業に必要なスペースの拡充を行う。</p>	<p>【作業環境の改善】 作業に必要なスペースの拡充を行う。</p>	<p>【作業環境の改善】 作業に必要なスペースの拡充を行う。</p>



Fig. 4.1

付 錄 1 認知行動過誤原因分析の分類項目の概要

1. エラーの形態

- (1) 規定のタスクの不実行(タスクの省略、動作の省略、不適切あるいは不正確なパフォーマンス、不適切なタイミング、動作の順序の誤り)
- (2) 誤った行為の実行(操作すべき機器・装置は正しかったが間違った操作、間違った機器・装置に対して動作が実行された、間違ったタイミング)
- (3) 無関係の行為の実行(余計な動作、すなわち、対象以外のシステムに対する動作)
- (4) 隠れ道(複数の事象や過失もしくは通常の人間の行為が、偶然のタイミングが一致することで顕在化し、結果として人間の機能不全と見なされる場合)

2. エラーを引き起こした意思決定過程

- (1) 検出(運転員が対応する必要があるにも係わらず応答しない)
- (2) システム状態の同定(運転員は対応する必要が、システムの状態を誤って解釈する)
- (3) 意志決定(運転員は適切に同定されたシステム状態に対応するが間違ったゴールを目標—例えば、安全性よりも運転の継続を選ぶ—、不適切なシステム目標状態を選択—例えば、シャットダウンの代わりに出力を80%へ低下させる—、不適切なタスクの選択)
- (4) 行為(実行された行動のシーケンスが不適切、または選んだタスクに対して正確に一致していない、手順の中に含まれる操作に係わる身体的活動が正しくない、書面もしくは口頭による伝言が不正確に伝わる)

3. エラーの発生の心的メカニズム

- (1) 識別(ステレオタイプの固着—作業の一部が慣れた者であるため考慮することを忘れる—、慣れ親しんだ近道(早合点)、ステレオタイプの乗っ取り—正しい意図にしたがってタスクまたは行為が実行されようとするが、実行時の「うっかり」により、異なった行為またはタスクに係わるステレオタイプ化された動作系列(訓練により身に付いた定型的な一連の動作)に陥る—例えば、適切な手順Aを実行中に操作Xを行う。操作Xは、慣れているが関係ない手順Bに含まれていたため、操作Xの続く手順Bを行ってしまう—、慣れ親しんだパターンの見落とし)
- (2) 入力情報の処理(現在の情報レベルに対して感覚や注意が不十分であったため、手がかりに気付かなかった場合、文章や計器の読み違い、口頭によるメッセージの誤解等、情報の間違った理解に基づいて行動した場合、外界から得られる情報には対応していない運転員の勝手な想起/推定等により提供される情報に基づいて不適切な対応を行った場合)
- (3) 想起(孤立項目の忘却/運転員が孤立した行為や役目(孤立項目)の実行を忘れた場合、即ち。実行されるべき項目が、役目のつながりの中で何の関連もないか、または知的・運動的なシーケンスに直接影響を及ぼさない行為や役目の実行を忘れた場合、選択の誤り/間違った選択肢の選択、種類の選択は正しかったがその中のメンバーを取り違える、いくつかある候補のうち間違ったものを選択した場合—例えば、上/下、+/-、左/右、A/B、開/閉、施錠/解錠等の間違い、その他の記憶想起の間違いによる誤り)

- (4) 推論(副次的効果や前提条件が十分に考慮されていない一人間は知識ベースの行動、ゴール制御型の行動によって特徴付けられるあまり慣れ親しんでいない状況下にあって、推論を間違って行った場合)
- (5) 身体的協応(運動の変動性/手動操作の正確さ不足、不適切な力加減、不適切なタイミングなど、期待された技能からのずれもここに含む、空間的方向付けの誤り/正しい意図及びマーク・タグの正確な想起にもかかわらず、場所・位置に関する直接の感覚(更新されずに残っている印象、古い習慣等)に従ったため間違った場所または対象にして、タスク/行為を実行した場合)

4. エラーの原因

- (1) 外部事象(警報、信号、ノイズなどのシステムあるいは環境からの外乱(注意をそらす事柄)、上司の命令、伝言、質問、電話など、他のタスクによる妨害などの並行的な作業)
- (2) 過剰なタスクに対する要求(時間(早さ)、力、体格などの物理的要求、状況に関する不十分な、あるいは間違った情報、特定の状況に関する不十分なあるいは間違った知識・指示)
- (3) 運転員の無力化(病気、ケガなど)
- (4) 外的原因なし(力加減、タイミングのずれなどの人間の本質的な変動性、故意、サボタージュ)

5. パフォーマンスに対する影響因子

- (1) 主観的なゴールと意図(過度の作業実行に対する要求(うまくやろううと意気込むこと)、早さ、正確さ、遅れまいとする努力など、作業の内容が不適切に多い、タスクが二次的なものと考えている、矛盾するゴール)
- (2) 心理的負荷と資源(人間工学的に不適切な作業場所、重複した作業、不十分な教育、不十分な訓練、指導)
- (3) 情緒的因素(原子炉を止めると会社は大損害を被るなどの社会的因素、不十分な負荷、退屈、時間的制約、失敗への恐怖)

6. 状況因子

- (1) 作業特性(スケジュールの通りに行えばよい熟練したタスク、必要に応じ、即座に実行すべき熟練した作業、スケジュールの通りに行えばよいが不慣れな作業、必要に応じ、即座に実行すべき不慣れな作業)
- (2) 物理的環境(ノイズ、不快な温度、湿度、圧力、臭いなど、放射線)
- (3) 作業時間特性(昼夜勤務、夜間勤務、直勤務の始まり、直勤務の中ごろ、直勤務の終わり)

付録 2 4M5E マトリックス分析手法における 4M 要因分類表（参考・引用文献 8）財團法人原子力安全技術センターのホームページより引用）
4M5E マトリックス分析手法における 4M 要因分類表

Man	Machine	Media	Management
1. 身体的要因 記載例：作業者の身体的な要因。体格、作業姿勢等の要因で、作業を行った。 ・無理な姿勢で、作業を行った。 ・作業位置に無理があるため、作業を行った。 ・作業機能が不十分だった（右手を怪我していった等） ・行動の自由がない 2. 心理生理的要因 記載例：作業者の心理的、生理的な要因。作業者の思い込み、推測などの主観的な要因と、過度な緊張、焦り等の心理的ストレスの他、病気、睡眠不足等の生理的なストレスなどが含まれる。 ・疲労で作業に集中できなかった。 ・睡眠不足で作業に集中できなかった。 ・他の作業に気をとられ××作業が疎かになつた。 ・××を忘れた、間違えた。 ・無意識に××をしてしまった。 ・先入観（思い込み）に囚われていた。	1. 機器 記載例：機器の故障、動作不良等の要因。 ・機器が故障していった。 ・センサーが誤作動した。 2. 設計 記載例：設計工芸上の配慮の欠如などトラブルによる要因。 ・機器の設計に不備があるため、作業機器の保護機能（加熱防止等）が不十分であった。 ・設計機器の保護機能が不十分だった。 ・部品工芸学的配慮が不十分だった（安全通路が狭い等）。 ・作業ベースが不十分だった。 ・表示灯（故障、緊急停止等）が目立たなかった。 ・情報が聞こえなかった。 3. 技量 記載例：作業者の技量の不足。作業に必要な技量を有しない者のによる行為。 ・作業に慣れで、作業に慣れていた。 ・十分な技能が無かった。 4. 知識 記載例：作業者の知識の不足、誤った理解等の要因。 ・作業に対する知識が不足していた、誤っていた。 ・作業内容をよく理解していないかった、誤っていた。 5. 不正 記載例：作業者自ら意図又は指示をうけ不正を認識した。うえで行う行為等の要因。 ・故意による不正作業を行つた。 ・同僚の不正作業を隠蔽、黙認した。	1. 作業環境 記載例：作業者に影響を与えた物理的、人的な環境の要因。 ・記載例：作業場所等の要因。予算、経営方針、責任体制等、コスト削減により安全管理への配慮が不十分（設備の更新が遅くなってしまった） ・風雨の中での作業であった。 ・天災（台風、落雷等） ・照明が不適切だった（温度が高かった） ・騒音が大きかった（高溫加熱処理等） 2. コミュニケーション 記載例：作業者への情報伝達の不足に基づく要因。 ・必要な情報や伝達の仕組みが現状が足りない。 ・機能としているが現状が不足している。 ・マニフェルが現状が不足していた。 ・事前打ち合わせが不十分だった。 ・作業中に車線が不十分だった。 ・交替要因への引継ぎが不十分だった。 ・トランブル情報が共有されなかった。 3. 作業条件 記載例：作業の特性、配分、時刻など労働条件に関する要因。 ・勤務体制が不十分（人員不足）のため無理をした。 ・勤務条件が不適当（継続的に残業している等） ・勤務時間に対する不備。 4. 現場状況 記載例：人間関係、職場の慣習、組織風土等に関する要因。 ・上司や同僚との人間関係に問題があった。 ・部署間の連携が不十分であった。 ・上司や同僚間のコミュニケーションが不十分であった。	組織における管理状態に起因する要因 1. 組織 ・記載例：規則、規定、基準に開する要因。作業に必要な規則、基準、手順が不適切などを含む。 ・組織の指針、方針が無い、規定が無い。 ・マニュアル、規定の内容が不十分、不適切であった（重要な項目が無く、適切に更新されていない等） 2. 計画 記載例：不適切な作業計画に開する要因。作業期間、人員配置、作業方法などを含む。 ・工程計画（作業が不十分（内容の不備、管理者によるレビューの不備等） 3. 教育訓練 記載例：知識訓練体制の不備。 ・教育訓練計画の不備。 ・教育訓練体制の不備。 4. 不正 記載例：管理者が開与する不正行為。管理者による不正行為の指示、黙認、隠蔽などを黙認していた。 ・裏マニフェルによる不正行為を隠蔽、黙認した。 ・不正な作業を指示した。 5. 不正 記載例：作業者が手順が機能しない、ダブルチェック。 ・確認対策が実施されない、 ・確認対策が機能しない、 ・確認対策が実施されない、 ・計画変更が周知されない、 ・作業の変更が反映されない、 ・組織の要因。 ・ルール違反・スケジュール優先。 ・業務遂行・スケジュール優先。 ・不都合な情報が報告されない、 ・過去の経験が反映されない、 ・セクショナリズム。

4M5E マトリックス分析手法における対策分類表

Education 業務遂行のために必要な能力、意識を向上させるための方策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 知識教育 業務を遂行するために必要となる知識の向上を図るための方策。 (対策例) ・講習会を開催する ・説明会を開催する ・教育用教材を作成する ・作業マニュアルを作成する 2. 意識教育 法令、マニュアルの遵守、不適合事項の報告等業務を遂行するためのモラルの向上を図るための方策 (対策例) ・ミーティングを行う ・講習会を開催する ・説明会を開催する ・教育用教材を作成する 3. 実技 業務の遂行に必要な技量の向上を図るための方策 (対策例) ・実地訓練を行う ・OJTを行う
Engineering 安全性を向上させるための設備、方法の技術的な方策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設備機器の改善 事故・トラブルの要因となった設備機器上の要因を改善するための方策。 (対策例) ・人間工学的な配慮による設備機器の改善を行う ・フェールセーフ、フループルーフの考え方を取り入れた改善を行う ・設計の改善を行う ・設備機器の修理、改修を行う ・安全機能の多重化を図る訓練 ・制御装置等のコンピュータープログラムの改造を行う 2. 工程の改善 事故・トラブルの要因となった取扱い方法等、ソフト面の改善を図るための方策。 (対策例) ・製造方法の改善を行う ・取扱方法の改善を行う ・検査方法の改善を行う 3. 基準の見直し 機器の安全装置、警報の発報レベル等に関する各種設定値を改善する。 (対策例) ・判定基準の見直しを行う ・機器の設定値（各種パラメータ）の見直しを行う
Enforcement 業務を確実に実施するための強化・徹底に関する方策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 規定化 業務内容を定型化し業務の簡素化、手順の明確化のための方策。 (対策例) ・規定の制定、変更を行う ・作業を手順化しマニュアルの制定、変更を行う ・責任の所在を明確にする 2. 評価・指導 業務内容を適正化するとともに、トラブルの要因となりやすい作業に対する認識の向上を図るための方針。 3. 危険予知活動 業務における危険個所の抽出及び未然防止を講ずるための方策 (対策例) ・危険予知活動を徹底する ・TBM、体調確認を実施する
Example 具体的な事例を示す方策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 模範事例 業務における危険個所を認識すると共にトラブルの未然防止のための認識の向上を図るための方策。 (対策例) ・模範を示す ・安全対策等に関する発表会を行う ・参考となる事故 ・トラブル事例を示す 2. 水平展開 共通性のあるトラブル等の情報を共有するための方策 (対策例) ・データベースによる情報の共有 ・職制による情報の周知
Environment 物理的な作業環境を改善する方法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 作業環境の改善 業務に対する注意力の向上を図るための方策 (対策例) ・照明、騒音、温度、湿度等、適した作業環境に改善する ・作業に必要なスペースの拡充を行う

This is a blank page

国際単位系 (SI)

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比體積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
質量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度 ^(b)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
輝屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	$\text{sr}^{(c)}$	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	m^2/m^2
力	ニュートン	N	s^{-1}
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	$\text{m}^2/\text{kg s}^3$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$\text{m}^2/\text{kg s}^{-3}$
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs A^{-1}
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	センチリュー	H	$\text{kg s}^2 \text{A}^{-1}$
光束密度	ルーメン	lm	$\text{cd sr}^{(c)}$
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量, 比エネルギー, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq	s^{-1}
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
			$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもやはヨーロピアンではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際にには、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は表示されない。
 (c) 調光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度範囲を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) については CIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	バスカル秒	Pa s	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$\text{m}^2/\text{kg s}^2$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s^{-3}
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{K}^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$\text{m}^2/\text{s}^2 \text{K}^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	m^2/s^2
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$\text{m kg s}^{-3} \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^2$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m kg s}^3 \text{A}^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m^{-3}sA
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m^{-2}sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m^{-2}sA
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$\text{m}^3/\text{kg s}^2 \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{A}^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1}sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2/s^3
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4/\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	$\text{m}^2/\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} = \text{kg s}^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{mol}$

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{-21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$
リットル	L	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^3 \text{cm}^3=10^{-3} \text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3 \text{kg}$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.602\ 176\ 53(14)\times 10^{-19} \text{J}$
ダルトン	Da	$1\text{Da}=1.660\ 538\ 86(28)\times 10^{-27} \text{kg}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1\text{Da}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times 10^{11} \text{m}$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\text{bar}=0.1\text{MPa}=100\text{kPa}=10^5 \text{Pa}$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1\text{mmHg}=133.322 \text{Pa}$
オングストローム	Å	$1\text{\AA}=0.1\text{nm}=100\text{pm}=10^{-10} \text{m}$
海里	M	$1\text{M}=1852\text{m}$
バーン	b	$1\text{b}=100\text{fm}^2=(10^{-12}\text{cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	$1\text{kn}=(1852/3600)\text{m/s}$
ネーベル	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\text{erg}=10^{-7} \text{J}$
ダイナ	dyn	$1\text{dyn}=10^{-5} \text{N}$
ボアズ	P	$1\text{P}=1\text{dyn s cm}^{-2}=0.1\text{Pa s}$
ストークス	St	$1\text{St}=1\text{cm}^2 \text{s}^{-1}=10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
スチール	sb	$1\text{sb}=1\text{cd cm}^{-2}=10^4 \text{cd m}^{-2}$
フォト	ph	$1\text{ph}=1\text{cd sr cm}^{-2} 10^4 \text{lx}$
ガル	Gal	$1\text{Gal}=1\text{cm s}^{-2}=10^{-2} \text{ms}^{-2}$
マックスウェル	Mx	$1\text{Mx}=1\text{G cm}^2=10^{-8} \text{Wb}$
ガウス	G	$1\text{G}=1\text{Mx cm}^{-2}=10^{-9} \text{T}$
エルステッド	Oe	$1\text{Oe} \triangleq (10^3/4\pi)\text{A m}^{-1}$

(c) CGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10} \text{Bq}$
レントゲン	R	$1\text{R}=2.58\times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラド	rad	$1\text{rad}=1\text{cGy}=10^{-2} \text{Gy}$
レム	rem	$1\text{rem}=1\text{cSv}=10^{-2} \text{Sv}$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\text{nT}=10^{-9} \text{T}$
フェルミ	fm	$1\text{フェルミ}=1\text{fm}=10^{-15} \text{m}$
メートル系カラット	Torr	$1\text{Torr}=200\text{mg}=2\times 10^{-4} \text{kg}$
トール	Torr	$1\text{Torr}=(101.325/760)\text{Pa}$
標準大気圧	atm	$1\text{atm}=101.325 \text{Pa}$
カリ	cal	$1\text{cal}=4.1858 \text{J} (\text{15}^\circ\text{C} \text{カロリー})$
ミクロ	μ	$1\mu=1\text{μm}=10^{-6} \text{m}$

