

JAERI-Tech  
97-036



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

1997年8月

渡辺憲夫・平野雅司

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)高野高速印刷

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部  
渡辺 憲夫・平野 雅司

(1997年7月4日受理)

国際原子力機関 (IAEA) では、原子力発電所における運転安全の向上を目的とし、ASSET(Analysis and Screening of Safety Events Team)による事例分析を行っている。ASSETによる基本的な活動は広範な事例のレビューと重要事例の分析であり、これは、根本原因分析方法 (ASSET手法) に従って行われる。ASSET手法は、各事例に対して、安全上重要な機器故障や運転員エラー等の不具合を同定し、その直接的な原因や、背後にある根本原因を明らかにして、改善策の検討を行うというものである。本研究では、科学技術庁等による公開報告書に基づき、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例における事象の直接原因、根本原因、並びに、改善策を系統的に整理することを目的とし、ASSET手法を適用して同事例の分析を行った。また、ASSET手法の有用性や問題点等について考察した。

分析の結果、「ナトリウム漏えい及び火災の拡大」事象に関して、7つの不具合 (温度計さや管の破損、原子炉手動トリップ操作の遅れ、漏えいの連続監視不徹底、漏えい規模の誤判断、不要な操作 (タービントリップ操作) の実行、緊急ドレン操作の遅れ、及び、空調設備停止操作の遅れ) を同定すると共に、それぞれの不具合について、直接原因、根本原因及び寄与因子を抽出し系統的に整理した。

これらの不具合の多くは、異常時運転手順書の不備に起因するものであり、さらに、同手順書作成の過程及び体制に関わる問題点や教育訓練プログラムの不備が根本原因や寄与因子として関与していることが明らかとなった。また、既に公開報告書において提示されている改善策を整理して今後検討すべき課題を明らかにし、これらについて新たに改善策を検討した。

また、本研究を通して、事象の直接原因や根本原因等を系統的に分析・整理し、それぞれに対して具体的な改善策を検討するにあたって、ASSET手法が有用性の高いものであることを確認すると共に、不具合間の因果律的關係に関する表現方法をはじめ幾つか改良すべき点があることを明らかにした。

IAEA-ASSET's Root Cause Analysis Method Applied to Sodium Leakage Incident at Monju

Norio WATANABE and Masashi HIRANO

Department of Reactor Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 4, 1997)

The International Atomic Energy Agency (IAEA) runs the Analysis and Screening of Safety Events Team (ASSET) services for enhancing operational safety at nuclear power plants. The typical mission of the ASSET services is to review a number of events and to analyze safety significant events using the root cause analysis method, so called the ASSET methodology. This method identifies occurrences such as component failures and operator errors, identifies their respective direct/root causes and determines corrective actions. The present study applied the ASSET methodology to the analysis of the sodium leakage incident at Monju, based on the published reports by mainly the Science and Technology Agency, aiming at systematic identification of direct/root causes and corrective actions, and discussed the effectiveness and problems of the ASSET methodology.

The results revealed the following seven occurrences and showed the direct/root causes and contributing factors for the individual occurrences: failure of thermometer well tube, delayed reactor manual trip, inadequate continuous monitoring of leakage, misjudgment of leak rate, non-required operator action (turbine trip), retarded emergency sodium drainage, and retarded securing of ventilation system.

Most of the occurrences stemmed from deficiencies in emergency operating procedures (EOPs), which were mainly caused by defects in the EOP preparation process and operator training programs. The corrective actions already proposed in the published reports were reviewed, identifying issues to be further studied. Possible corrective actions were discussed for these issues.

The present study also demonstrated the effectiveness of the ASSET methodology and pointed out some problems, for example, in delineating causal relations among occurrences, for applying it to the detail and systematic analysis of event direct/root causes and determination of concrete measures.

**Keywords :** Monju Incident, Root Cause Analysis, ASSET Methodology, Direct Causes,  
Corrective Actions, Contributing Factors, Occurrences

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. ASSETによる根本原因分析方法 (ASSET手法) の概要 .....	2
3. ASSET手法の「もんじゅ」事例への適用 .....	7
3.1 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例の概要 .....	7
3.2 ASSET手法の適用 .....	8
3.3 分析結果のまとめ .....	36
4. ASSET手法に関する考察 .....	39
4.1 ASSET手法の有用性 .....	39
4.2 ASSET手法適用における問題点と改良案 .....	39
5. おわりに .....	42
参考文献 .....	43

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outlines of ASSET Root Cause Analysis Method (ASSET Methodology) .....	2
3. Application of ASSET Methodology to Monju Incident .....	7
3.1 Event Description of Monju Incident .....	7
3.2 Application of ASSET Methodology .....	8
3.3 Summary of Analysis Results .....	36
4. Discussion on ASSET Methodology .....	39
4.1 Effectiveness of ASSET Methodology .....	39
4.2 Problems in ASSET Methodology and Proposed Improvements .....	39
5. Concluding Remarks .....	42
References .....	43

## 1. はじめに

事故・故障事例から得られる教訓・知見をプラントの運転管理にフィードバックさせることの重要性は幅広く認識されており、特に安全上重要と判断された事例に対しては、プラント設置者をはじめ規制当局等によって詳細な分析が行われている。一方、国際原子力機関 (IAEA) においても、原子力発電所における事故の発生防止を目的とし、ASSET (Analysis and Screening of Safety Events Team) による事例分析を通して教訓の導出並びに改善策の勧告等を行っている<sup>[1]</sup>。ASSETによる活動は、幾つかのタイプに分けられる (例えば、事例分析の方法や結果に関するセミナーの開催、事例分析の実施、分析結果のレビュー) が、いずれも、IAEA加盟国からの要請に応じて専門家チームを派遣して行われる<sup>[2]</sup>。この中で最も基本的な活動は、事例報告書等の文書情報やプラント設置者との質疑応答に基づく広範な事例のレビューと重要事例に対する根本原因分析 (Root Cause Analysis) であり、約10名の専門家によって行われる。事例分析の活動は約2週間という短期間で行うことが前提となっており、その効率化並びに標準化を図るために、分析のためのガイドライン (ASSET Guidelines)<sup>[3]</sup>が用意されている。このガイドラインには、根本原因分析方法 (ASSET Methodology: 以下、「ASSET手法」と呼ぶ) が示されており、それに沿って事例分析が行われるが、その対象は数件程度に限定される。分析の結果、各事例に対して、事象の直接的な原因や、その背後にある根本原因が明らかにされ、そして、最終的には、限られた財源の中で即座に実施できるものに着目してプラントの運転管理上有効となる改善策が提案・勧告される。これまでに、20数カ国がASSETを招聘しているが、我が国での招聘実績はない。

1995年12月8日、動力炉・核燃料開発事業団 (動燃) の高速増殖原型炉「もんじゅ」で二次系ナトリウムが漏洩し火災に至るという事象が発生した。この事例については、科学技術庁と原子力安全委員会がそれぞれ事故調査チームを発足して原因究明等を行い、その調査結果は、幾つかの報告書にまとめられ公開されている<sup>[4-7]</sup>。これらの報告書では、事象の原因はもとより、再発防止のための改善策に関する検討結果も示されている。現在は、「もんじゅ」の安全性を再確認することを目的として、「もんじゅ安全性総点検」(即ち、プラント設備、保安規定及び各種マニュアルについての点検と、当該事例の教訓を踏まえた改善策の検討) が進められている<sup>[6]</sup>。

本研究では、公開の報告書に基づき、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例における事象の直接原因、根本原因、並びに、改善策を系統的に整理することを目的とし、ASSET手法を適用して同事例の分析を行った。また、ASSET手法の有用性や問題点等について考察した。

## 2. ASSETによる根本原因分析方法（ASSET手法）の概要

一般に、安全上重要な事象は、設備・機器の故障や運転員の過誤といった不具合が連続的あるいは因果律的に重なることによって発生する。さらに、それぞれの不具合には、直接的な原因とその背後にある根本原因とがあり、類似事象の再発を防止する上では、これらの原因を明らかにし、適切かつ抜本的な対策を講じることが必要となる。

そこで、ASSETによる根本原因分析方法（ASSET手法）では、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（generic lessons learned）を導き出すこととしている<sup>[1,3]</sup>。

- 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ったのか？（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。

ASSET手法における具体的な分析手順は、以下に示すように7つのステップから構成される。

### (1) ステップ1：不具合の同定

分析対象事例において発生した個々の不具合を明らかにする。このステップでは、事例報告書等を基に、事象クロノロジー（例を図2.1に示す）を作成し一連の不具合、設備の動作及び運転員操作等を時系列的に整理する。これによって不具合の見落としを防ぐことができる。

### (2) ステップ2：不具合間の関係付け

事例報告書及びステップ1で作成した事象クロノロジーを基に、各不具合間の時間的及び因果律的な関係を明らかにする。このステップでは、図2.2に例示するようなロジックツリーを作成し不具合間の関係を表現すると共に、各不具合の性質（機器故障、人的過誤、手順エラーのいずれに属するか）を明確にする。

### (3) ステップ3：安全上重要な不具合の同定

一連の不具合の中から詳細な分析を行うべき対象を選定するが、その際、各不具合の安全上の重要性を十分に考慮することが必要となる。なお、このステップは、ASSET活動の時間的制約（ASSETによる分析が約2週間という短期間で行われること）を受けて設定されたものと考えられる。

### (4) ステップ4：直接原因の識別

ステップ3において選定された各々の不具合について、その直接原因（潜在的欠陥：



latent weakness) を明らかにする。また、直接原因の存在に寄与した因子として、品質管理あるいは予防保全における問題点等についても検討する。

(5) ステップ5：根本原因の識別

ステップ4において明らかにされた直接原因が何故取り除かれなかったを分析し、根本原因を明確にする。具体的には、設備のサーバランス試験、設備改善や手順改訂、及び、運転経験のフィードバック過程における問題点等を明らかにする。また、根本原因に対する寄与因子として、プラントの運営管理における欠陥についても検討する。

(6) ステップ6：改善策の検討

ステップ4及び5で明らかとなった直接原因、根本原因、及び、それらへの寄与因子各々に対して対応策を検討・立案すると共に、それが、プラントにおいて計画あるいは既に行われているか否かを調べる。対応策の検討においては、その実用性、実現性及び適用性に着目する必要がある。また、プラントにおける実施状況の調査では、実施あるいは計画されている対策が適切であるか、また、包括的であるかをチェックする。

(7) ステップ7：一般的な教訓の導出と勧告

上記の分析・検討結果に基づき、次の3つの観点から、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しプラントへの勧告としてまとめる。

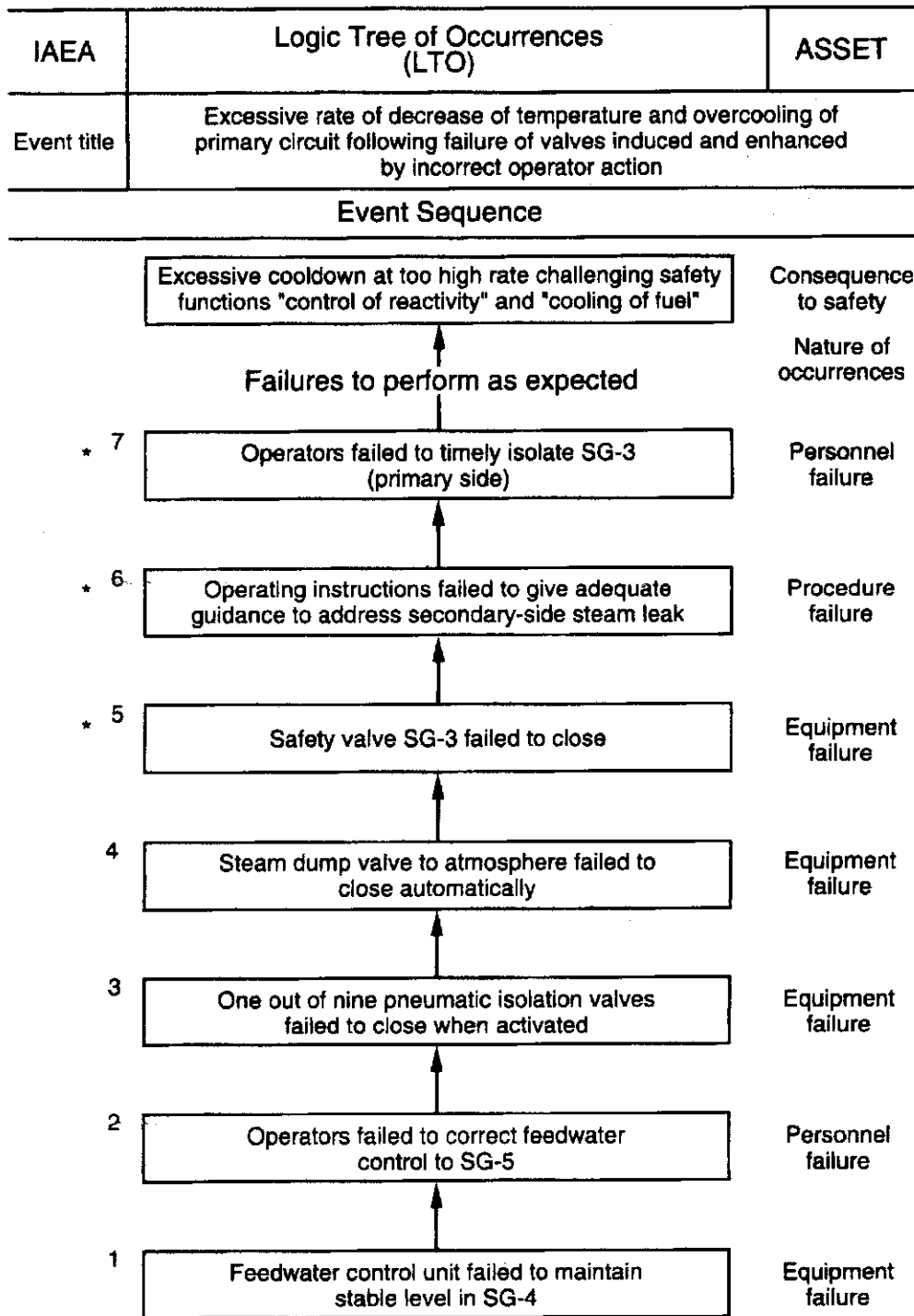
- ・ 安全設備に関するソフトウェアとハードウェアのバランスを最適化するための方法（運転員訓練プログラムや運転手順書の改訂、設備作動性能の向上に着目する）
- ・ 潜在的欠陥を取り除くための方法（品質管理、予防保全、サーバランス試験の強化に着目する）
- ・ 運転経験のフィードバックプロセス

なお、ステップ3～6における分析及び検討の結果は、図2.3に例示されるような所定の様式（原因分析フォーマット）にまとめられる。

**Sequence of Events on Dec. 13, 1992,  
Rovno 2**

Time	Event
18.39.29	Nominal power. Feedwater controller SG-4 observed to be defective. Incorrect engaging of bypass controller and inadvertent switching off SG-5 feedwater control to manual.
18.39.37	SG-5 level "too high," protection system activated turbine trip and SCRAM.
18.42.42	Opening of turbine bypass valves.
18.42.44	Automatic opening on SG-3 for one of the two steam dump valves to atmosphere. Steam pressure fluctuations and asymmetric flow.
18.42.56	Actuation of the safety system on $dp/dt > 0.09$ MPa/s.
18.43.00	All pneumatic isolation valves closed except one.
18.43.12	The previously de-energized bus bar is re-energized from DG-3.
18.43.37	Safety valve on SG-3 opened. Steam dump valve to atmosphere failed to close automatically.
18.44.00	Operators close steam dump valve on manual.
18.45.34	All electric-driven isolation valves closed.
18.47.02	ECCS/HPSI-3 stopped.
19.00	Safety valve on SG-3 observed to be not closed.
19.42.51	Isolation valves closed in the primary circuit loop of SG-3.

図2.1 事象クロノロジーの例 (文献[1]より引用)



\*Occurrences which were chosen by the subgroup for detailed root cause analyses.

Logic tree of occurrences.

図2.2 ロジックツリーの例 (文献[1]より引用)

IAEA	Event Root Cause Analysis Form (ERCAF)				ASSET					
Event title	Excessive rate of decrease of temperature and overcooling of primary circuit following failure of valves induced and enhanced by incorrect operator action				December 13, 1992					
	<b>Occurrence: What failed to perform as expected?</b>				Corrective actions by plant					
Occurrence title	Operating instructions failed to give adequate guidance to address secondary steam leaks (*6)									
Nature of the failure	Procedure failure				Appropriate	Comprehensive		Implemented		
	<b>Direct cause: Why did it happen?</b>				Yes	No	Yes	No	Yes	No
Latent weakness of the element that failed to perform as expected	Inadequate instructions in post-scrum procedures to timely detect and to react to secondary-side steam leaks	I		Amend post-scrum instructions with regard to detection of and reaction to secondary steam leaks		X		X		X
Contributor to the existence of the latent weakness	*Deficiency of quality control prior to operation? *Deficiency of preventative maintenance? Deficiency in quality control in process of production of operating instructions	II		Implement quality control for technical contents in process of production of operating instructions		X		X		X
	<b>Root cause: Why was it not prevented?</b>				Yes	No	Yes	No	Yes	No
Deficiency to timely eliminate the latent weakness	*Inadequate detection, analysis, repair, remedy? Inadequate repair of post-scrum instructions based on operating experience feedback due to hesitance to issue essential instructions	III		Establish promulgation of provisional operating instructions		X		X		X
Contributor to the existence of the deficiency	Inadequate management policy for: • Surveillance • Operating experience feedback? Standard operating practice does not sufficiently emphasize using authority provisionally issue operating instructions	IV		Encourage and emphasize "top down" to exercise the existing authority to the fullest		X		X		X

Event root-cause analyses form (occurrence 6).

図2.3 原因分析フォーマットの例 (文献[1]より引用)

### 3. ASSET手法の「もんじゅ」事例への適用

1995年12月8日に動力炉・核燃料開発事業団（動燃、PNC：Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）の高速増殖原型炉「もんじゅ」で発生したナトリウム漏えい事例については、動燃をはじめ、その監督行政庁である科学技術庁（STA：Science and Technology Agency）、及び、原子力安全委員会（NSC：Nuclear Safety Commission）により原因究明等に関する調査が行われており、その結果が報告書にまとめられ公開されている。その代表的なものを以下に示す。

- ・原子力安全委員会の報告書<sup>[4]</sup>
  - 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅ2次系ナトリウム漏えい事故に関する調査審議の状況について（「NSC-中間報告」と呼ぶ）：1996/09/20発行
- ・科学技術庁の報告書<sup>[5-7]</sup>
  - 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の調査状況について<sup>[5]</sup>（「STA-調査状況報告」と呼ぶ）：1996/02/09発行
  - 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の報告について<sup>[6]</sup>（「STA-5月報告」と呼ぶ）：1996/05/23発行
  - 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明結果について<sup>[7]</sup>（「STA-原因究明報告」と呼ぶ）：1997/02/20発行
- ・動燃の報告書<sup>[8-11]</sup>
  - 高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて<sup>[8]</sup>（「PNC-第1報」と呼ぶ）：1995/12/19発行
  - 高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて（第2報）<sup>[9]</sup>（「PNC-第2報」と呼ぶ）：1995/12/25発行
  - 高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて（第3報）<sup>[10]</sup>（「PNC-第3報」と呼ぶ）：1996/3/26発行
  - 高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故について（回答）<sup>[11]</sup>（「PNC-回答」と呼ぶ）：1996/2/27発行

本研究では、上記の公開情報に基づき、ASSET手法を、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例に適用し、事象の直接原因や根本原因等を系統的に整理することを試みた。

#### 3.1 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例の概要

高速増殖原型炉もんじゅ（熱出力 714 MW、電気出力 280 MW）は、電気出力40%でのプラント・トリップ試験（緊急停止試験）を行うため、1995年12月6日22時頃に原子炉を起動し、12月8日16時30分頃発電機を併入して、熱出力約45%へ向けて出力上昇操作を行っていた。12月8日19時47分13秒、中央制御室において、Cループ2次主冷却系「中間

熱交換器出口ナトリウム温度高」の警報が発生した。この時の原子炉出力及び電気出力はそれぞれ約43%及び約40%であった。その6秒後に火災検知器からの警報が、また、1分12秒後に2次主冷却系ナトリウム漏えい警報が発生した。ナトリウム漏えいを確認するため、19時50分頃に、現場である配管室に運転員1名が、また、ナトリウム漏えい検出器の現場制御盤が設置されている部屋に運転員2名が出向くのと同時に、中央制御室で2次系のナトリウムの液位に顕著な変化がないことを確認した。この結果、当直長は、ナトリウム漏えいの規模は小さいと判断し、プラント第1課長の了解を得て、事故発生から12分19秒後（19時59分32秒）に原子炉の通常停止操作を開始した。しかし、その後、現場の確認は行われず、また、火災報知盤の確認も間欠的に数回しか行われなかった（即ち、漏えいの連続監視が行われなかった）。事故発生52分後（20時50分）頃から、火災検知器の発報が急増したため、再度配管室及び現場制御盤室の確認を行った。その結果を受けて、原子炉主任技術者、プラント第1課長及び当直長は、漏えい規模が拡大していると判断し、事故発生1時間22分後（21時10分）頃、原子炉手動トリップを決定した。しかし、原子炉トリップ操作は、21時18分頃のタービントリップ操作の後、21時20分頃に行われた。

原子炉トリップ後、ナトリウムの漏えいを抑制するために、運転員は、補助冷却設備によりナトリウム温度を低下させた後の22時46分頃から緊急ドレン操作を開始した。また、オーバーフロータンクからの汲み上げ停止操作は、緊急ドレン操作開始後に行われた。一方、換気空調設備は、23時13分頃に、Cループ2次主冷却系の「蒸発器液位低低」の信号により自動停止した。なお、緊急ドレンによるナトリウムの抜き取りは約1時間20分（12月9日0時15分頃）で完了した。このような経過を経て、原子炉は安全に停止し、ナトリウム漏えいも終息した。その後の調査により、ナトリウム漏えいは、2次主冷却系配管に取り付けられた温度計のさや管が破損したことによるものであることが判明した。

### 3.2 ASSET手法の適用

本節では、ASSET手法の「もんじゅ」事例への適用について記述する。2章で述べたように、ASSET手法における分析手順は7つのステップから構成されるが、「もんじゅ」事例への適用にあたっては、その一部を変更した。具体的には、ASSET活動とは異なり時間的な制約を受けないことから、ステップ3において、安全上重要な不具合の同定というタスクは省略し、その代わりに、同定した全ての不具合に対して詳細な分析を行うこととした。以下では、ASSET手法の各ステップに対応させて、分析の内容と結果について述べる。

#### (1) ステップ1：不具合の同定

このステップでは、前記の事例報告書を基に、事象クロノロジーを作成し一連の不具合、設備の動作及び運転員操作等を時系列的に整理した。その結果を図3.1に示す。同図に示すように、クロノロジー作成においては、事象の推移をより正確に理解できるよう、運転員による確認といった動作や判断も考慮した。これによって同定された不具合は以下の通り

である。

時刻	事象
19:47	中間熱交換器Cの二次側出口ナトリウム温度高アラーム、火災報知器（2カ所）
19:48	ナトリウム漏えいアラーム（2カ所）、火災報知器（12カ所）、
～19:57	煙の発生確認
19:58	小漏えいと判断
20:00	通常停止操作開始
～20:49	火災報知器（36カ所）
20:50	白煙の増加、ナトリウム漏えい信号の増加を確認
21:10	中漏えい手順に移行（漏えい規模の拡大と判断し原子炉手動トリップを決定）、 火災報知器（3カ所）、ナトリウム漏えいアラーム（2カ所）
21:15～	発電機解列、タービントリップ操作、火災報知器（2カ所）
21:20	原子炉手動トリップ、 火災報知器（11カ所）、ナトリウム漏えいアラーム（2カ所）
22:40	ナトリウムのドレン操作開始
22:55	ドレン弁開
23:13	換気空調設備停止、ナトリウム漏えいアラーム（1カ所）
00:15	ナトリウムのドレン完了、ナトリウム漏えいアラーム（2カ所）

図3.1 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例の事象クロノロジー

(各種設備の作動、機器の故障)

- a. 中間熱交換器二次側出口ナトリウム温度高アラームの鳴動：“ナトリウム漏えいの発生”という不具合を表す。
- b. 火災報知器の鳴動：“ナトリウム火災の発生”という不具合を表す。
- c. ナトリウム漏えいアラームの鳴動：“ナトリウム漏えいの継続”という不具合を表す。
- d. 換気空調設備の自動停止：これ自体は不具合ではないが、結果的に停止時期が遅れたため、不具合として“換気空調設備停止操作の遅れ”を考慮する必要がある。
- e. 温度計さや管の破損：“ナトリウム漏えい”の原因となった不具合を表す。

(運転員操作)

- f. 通常停止操作：操作自体は不具合ではないが、誤った判断に基づく操作であるため、“誤操作”の一種と見なす。
- g. 原子炉手動トリップ操作：操作自体は不具合ではないが、結果的に操作遅れとなったため、不具合として“原子炉手動トリップ操作の遅れ”を考慮する必要がある。
- h. 発電機解列及びタービントリップ操作：操作自体は不具合ではないが、実際には、

不要な操作であったため、“誤操作”の一種と見なす。

- i. ナトリウムのドレン操作（ドレン弁開）：操作自体は不具合ではないが、結果的に操作遅れとなったため、不具合として“緊急ドレン操作の遅れ”を考慮する必要がある。

この他に、運転員操作に関するものとして「ドレン完了」と「中漏えい手順への移行」があるが、前者は不具合ではなく事象の推移に何ら影響を与えるものではない。また、後者は、その時点での適切な判断に基づくものであり不具合ではないと言える。このため、これらについては、以後の分析から除外することができる。

(運転員による確認動作や判断)

- j. 煙の確認：“ナトリウム火災の発生”という不具合を表すものと見なす。
- k. 小漏えいと判断：結果的に、“漏えい規模に対する判断の誤り”であるため、不具合と見なすことができる。
- l. 白煙の増加及びナトリウム漏えい信号の増加の確認：“ナトリウムの漏えい及び火災の拡大”という不具合を表すものと判断できる。

## (2) ステップ2：不具合間の関係付け

このステップでは、事例報告書及びステップ1の事象クロノロジーに基づいてロジックツリーを作成し、各不具合間の時間的及び因果律的な関係を明らかにした。ロジックツリーの作成に先立ち、まず、上記のステップ1で同定した不具合とその性質を以下のように整理した。なお、ASSET手法では、不具合の性質として、“機器故障”、“人的過誤”及び“手順エラー”の3種類を取り上げているが、ここでは、ある不具合の結果として発生したものを“現象”なる性質として明示することとした。

- ①温度計さや管の破損（上記のeに対応）：機器故障
- ②ナトリウムの漏えい及び火災の発生（上記のa, b, jに対応）：現象
- ③ナトリウムの漏えい及び火災の拡大（上記のc, lに対応）：現象
- ④原子炉手動トリップ操作の遅れ（上記のgに対応）：手順エラー
- ⑤緊急ドレン操作の遅れ（上記のiに対応）：手順エラー
- ⑥換気空調設備停止操作の遅れ（上記のdに対応）：手順エラー
- ⑦不要な操作（タービントリップ操作）の実行（上記のhに対応）：人的過誤
- ⑧漏えい規模の誤判断とそれに伴う不適切な操作（上記のf, kに対応）：手順エラー、人的過誤

この他に、時系列的な不具合でないため図3.1の事象クロノロジーで表現できないが、事象の推移に大きな影響を及ぼしたと考えられることから、以下の不具合を追加することとした。

- ⑨漏えいの連続監視不徹底：手順エラー、人的過誤

次に、分析対象事例における最終的な影響（即ち、ロジックツリーの頂上事象）を、



「ナトリウムの漏えい及び火災の拡大」と定義してロジックツリーを作成した。図3.2に、そのロジックツリーを示す。例えば、同図では、「ナトリウムの漏えい及び火災の拡大」は、3つの不具合（「原子炉手動トリップ操作の遅れ」、「緊急ドレン操作の遅れ」及び「換気空調設備停止操作の遅れ」）が重なったことによるものであることが示される。さらに、「原子炉手動トリップ操作の遅れ」には、「漏えい規模の誤判断とそれに伴う不適切な操作（通常停止操作）」、「漏えいの連続監視不徹底」と「不要な操作（タービントリップ操作）の実行」が関与していることが分かる。このようにして、各不具合の間にはどのような時間的及び因果的な関係があるかを表現した。

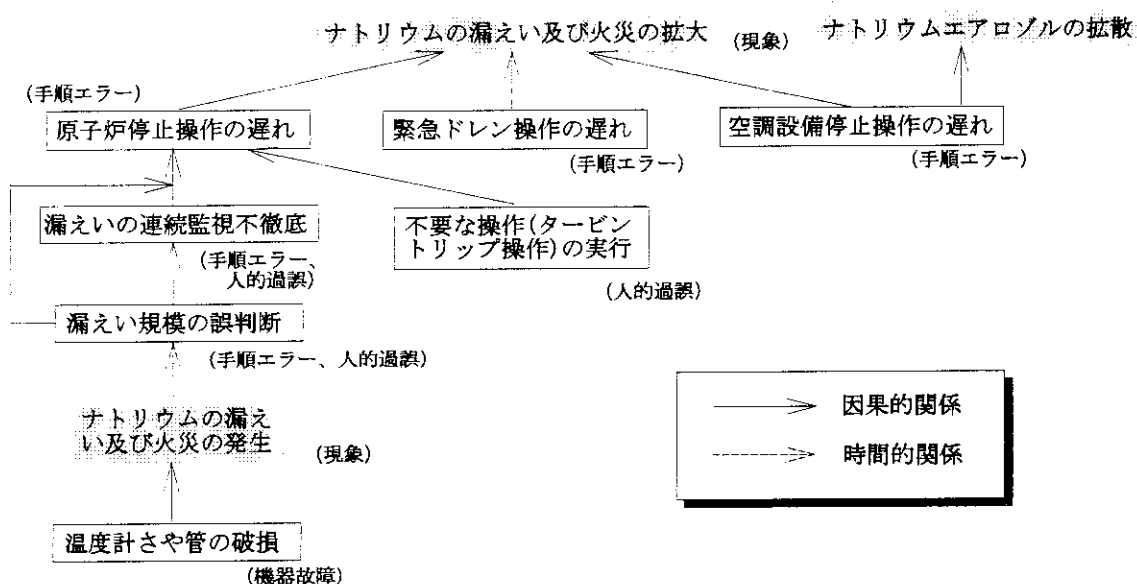


図3.2 ロジックツリーによる事象シーケンス表現

(3) ステップ3：各不具合に関する詳細分析

ASSET手法のステップ3では、直接原因や根本原因などの分析対象として安全上重要な不具合を選定することとなっているが、ここでは、以下に示すように、ASSET手法とは異なるアプローチを取ることとした。

- ・ ASSET活動のような時間的制約がないため、分析対象とすべき不具合を選定する必要はない。従って、不具合選定のタスクは省略し、原則として全ての不具合を対象に、その発生について詳細な分析を行う。
- ・ ASSET手法では、図2.3に示したような定型化された様式に記入することで、各不具合の直接原因や根本原因等を識別することとなっているが、この様式には不具合間の従属関係を示す項目がなく、特に、原因間の関係が分かりにくいものとなっている。従って、さらに詳細なロジックツリーを別途作成することにより、こうした従属関係を明示する。

・詳細ロジックツリーの作成にあたっては、以後のステップでの参考となるよう、不具合の直接原因、根本原因及び寄与因子を区別して表現し、その具体的内容も明記する。

上記のステップ2では、分析対象事例に対して9個の不具合が同定されたが、このうち、“ナトリウムの漏えい及び火災の拡大”及び“ナトリウムの漏えい及び火災の発生”は、他の不具合の結果として生じたものであるため、これら2つの不具合に対するロジックツリーの詳細化は必要ない。従って、ステップ3では、残りの7つの不具合について詳細ロジックツリーを作成した。但し、“原子炉手動停止操作の遅れ”とそれに関与する3つの不具合（“漏えい規模の誤判断”、“漏えい連続監視不徹底”及び“不要な操作（タービントリップ操作）の実行”）は、1つの詳細ロジックツリーにまとめて表現した。従って、詳細ロジックツリーは4種類であり、それらを図3.3(a)～(d)に示す。

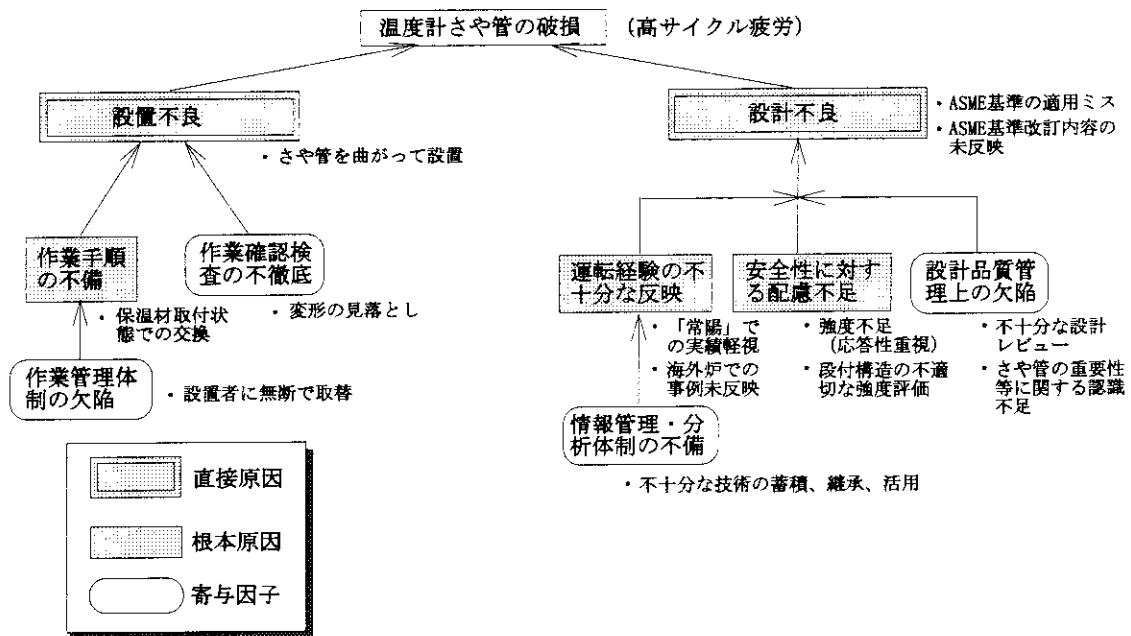


図3.3(a) 温度計さや管破損に対する詳細ロジックツリー

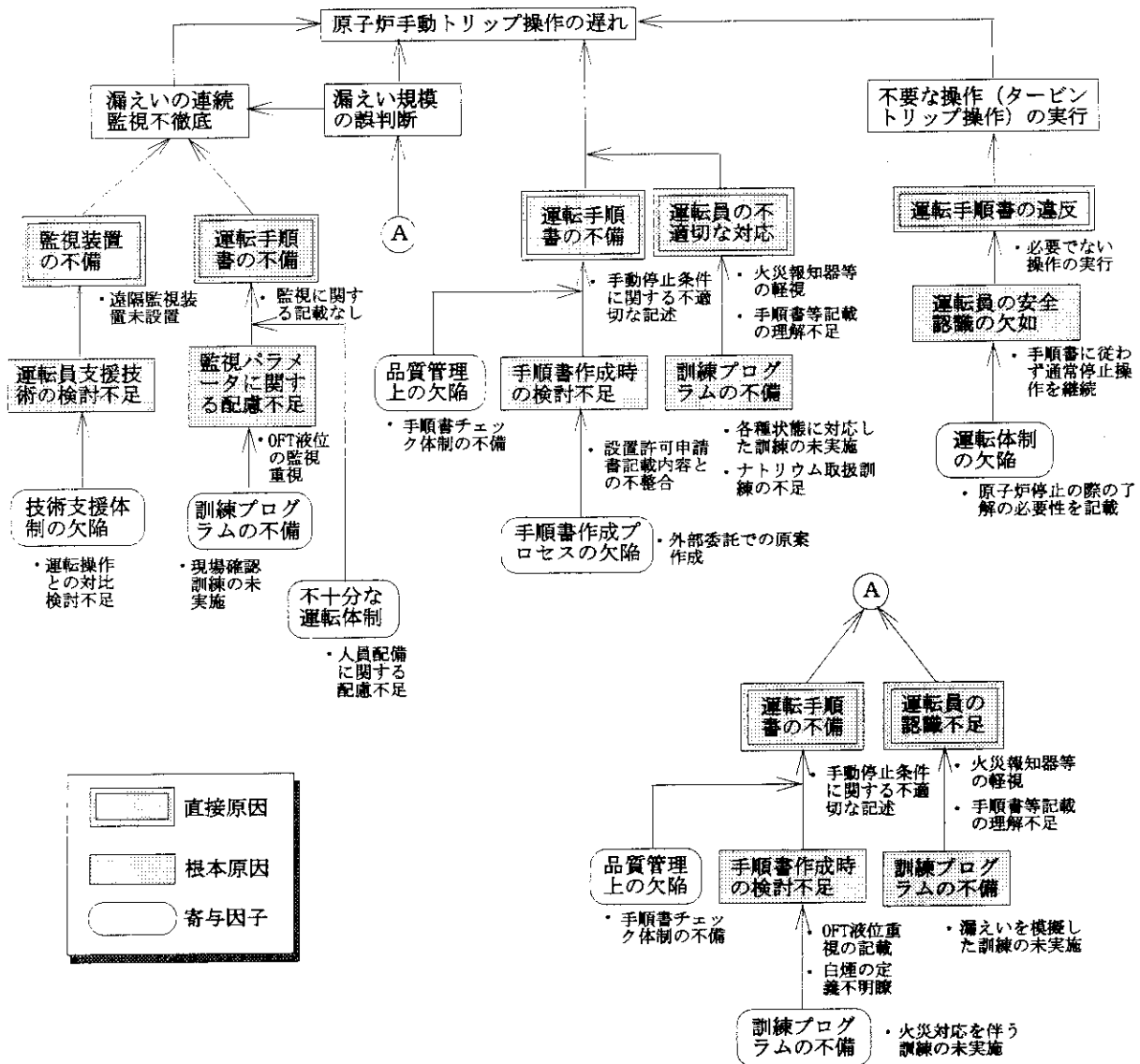


図3.3(b) 原子炉手動トリップ操作遅れに対する詳細ロジックツリー

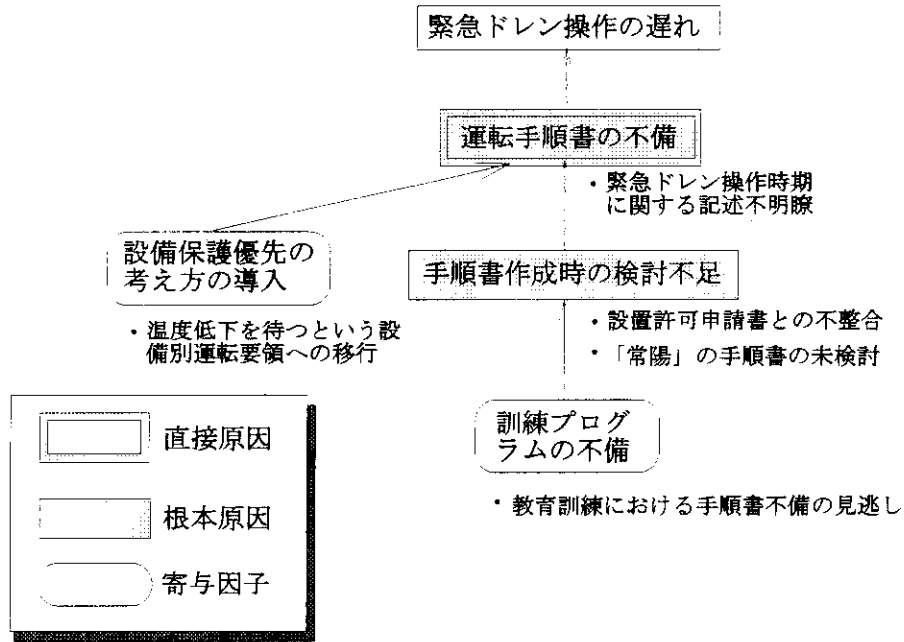


図3.3(c) 緊急ドレン操作遅れに対する詳細ロジックツリー

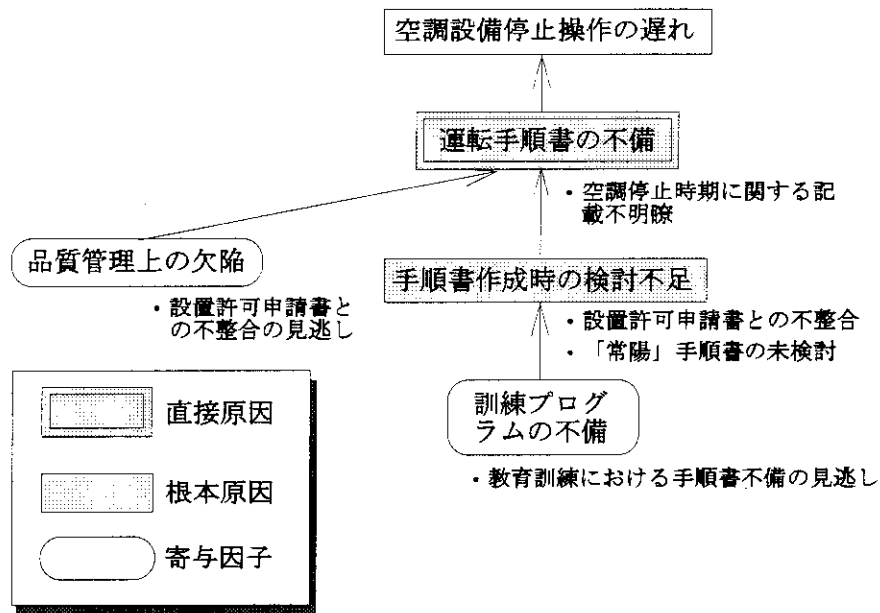


図3.3(d) 空調設備停止操作遅れに対する詳細ロジックツリー

(4) ステップ4：直接原因の識別

ステップ4では、ステップ3で作成した詳細ロジックツリーを基に、ASSET手法の様式に従って、各不具合の直接原因（潜在的欠陥：latent weakness）とその存在に寄与した因子（品質管理あるいは予防保全における問題点）を整理した。但し、前述したように、この様式には、不具合間の従属関係を示す項目がないため、ここでは、各不具合に対して、

その発生による結果として生じた不具合と発生の要因となった不具合を示す項目を追加した。表3.1(a)～(g)に、7つの不具合各々について分析・整理した直接原因及び及びその寄与因子、並びに、不具合間の従属関係をまとめる。以下では、各不具合に対する直接原因について述べる。

① まず、“温度計さや管の破損”の直接原因としては、表3.1(a)に示すように、次の2つの問題点を取り上げた。

- ・ 設計不良：温度計さや管の設計評価において、テーパ構造に対するASME基準(Performance Test Code)を段付構造に適用するというミスを犯したことが明らかとなっている[4,6,7]。また、別のASME基準(Boiler & Pressure Vessel Code)が改定されていることを認識していなかったことも重要視すべき問題点とされている[4,6,7]。
- ・ 設置不良：動燃及び行政庁の検査後に熱電対を交換した際、配管断熱材を取り付けたままの状態で行ったため、温度計さや管の中で熱電対シースが曲がって取り付けられ、そのまま放置された可能性が高いとされている[7]。このシースの変形が、当該温度計だけが破損した原因と考えられている[7]。

なお、設計不良については、設計レビューが不十分であった等、設計に関する品質保証管理上の問題が指摘されている[4,6]ことから、寄与因子として、「設置者及びメーカーによる設計の品質管理上の欠陥」を取り上げ、また、設置不良については、据付時にシースの曲がりが見落とされていた可能性が高いと判断されている[7]ことから「メーカーによる作業確認検査の不徹底」を寄与因子とした。

② 第2の不具合である“原子炉手動トリップの遅れ”については、次の2つの直接原因を同定した(表3.1(b)参照)。

- ・ 異常時運転手順書の不備：異常時運転手順書の記載内容に不整合があった(手順書の「フローチャート」では火災報知器の発報確認により原子炉を手動トリップすることと記載されているが、「概要」と「細目」には記載されていない)こと、また、手動トリップの条件に関する記載が不適切であった(手順書の「概要」において、手動トリップの条件となるプロセス変化量の1つとしてオーバーフロータンク(OFT)液位を取り上げているが、火災報知器に関する記載はない)ことが、この不具合の要因とされている[4,5]。
- ・ 運転員の不適切な対応：異常時運転手順書の一部及び設置許可申請書において、火災報知器や漏えい検出器の発報により原子炉を手動停止する旨の記載があり、これを運転員が十分理解していれば早期に原子炉を手動停止することができたであろうと判断されている[4-6]。

また、手順書は動燃内の審議検討を経て承認されたにも拘わらず上述のような不整合等が放置された原因の1つに、手順書チェック過程の問題点が指摘されている[6]。従って、寄与因子として「手順書作成過程における品質管理上の欠陥」を取り上げた。

表3.1(a) “温度計さや管の破損”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	機器故障
当該不具合による結果	ナトリウムの漏えい
発生要因となった不具合	該当なし
直接原因	具体的内容
温度計さや管の設計不良 (設計エラー)	・テーパー構造に対するASME基準の段付構造への適用(4, 6, 7) ・ASME基準の改訂内容の未反映(4, 6, 7)
寄与因子	具体的内容
設置者及びメーカーによる設計 の品質管理上の欠陥	・さや管の役割や重要性に関する認識欠如(4) ・不十分な設計レビュー(4)
直接原因	具体的内容
温度計さや管の設置不良 (据付時エラー)	・さや管据付時に熱電対シースの変形(7)
寄与因子	具体的内容
メーカーによる作業確認検査の 不徹底	・据付時における変形の見落とし(7)

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

表3.1(b) “原子炉手動トリップ操作の遅れ”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
当該不具合による結果	ナトリウムの漏えい及び火災の拡大
発生要因となった不具合	漏えいの現場確認・連続監視の不徹底、漏えい規模の誤判断、不要な操作の実行(タービントリップ操作)
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の不備	・手動トリップ条件に関する不適切な記述(4, 5) ・手順書記載内容の不整合(4, 5)
寄与因子	具体的内容
手順書作成過程における品質 管理上の欠陥	・設置者による手順書の審議検討における設置許可申請書記載内容(漏えい検知器及び火災報知器の信号による原子炉手動停止)との不整合の見逃し(5)
直接原因	具体的内容
運転員の不適切な対応	・漏えい検知器、火災報知器の軽視(4) ・手順書及び設置許可申請書の記載内容に対する不十分な理解(5, 6)
寄与因子	具体的内容
該当なし	

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

③ 第3の不具合である”漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”については、表3.1(c)に示すように、次の2つの直接原因を同定した。

- ・異常時運転手順書の不備：異常時運転手順書において、火災報知器の連続監視及び白煙発生状況の現場確認に関する記載がなかったことが指摘されている[4]。
- ・監視装置・警報表示の不適切な設計・設置：火災報知盤の音響停止スイッチをリセットしない限り追加発報時に鳴動しない設計となっていたこと、及び、中央制御室において漏えいの推移を監視できるような装置が配備されていなかったことが問題視されている[4,5]。

また、運転体制に関し、現有設備に対して技術的に支援する要員の配備が十分でなかったことも指摘されている[4,5]ことから、「不十分な運転体制」を寄与因子として取り上げた。

表3.1(c) “漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
当該不具合による結果	原子炉手動トリップ操作の遅れ
発生要因となった不具合	漏えい規模の誤判断
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の不備	・火災報知器と白煙発生状況に関する監視の記載なし <sup>(4)</sup>
寄与因子	具体的内容
該当なし	
直接原因	具体的内容
監視装置、警報表示の不適切な設計/設置	・火災報知盤の再鳴動機能の不備 <sup>(5,6)</sup> ・中央制御室における漏えい計測値表示設備の未設置 <sup>(5,6)</sup>
寄与因子	具体的内容
不十分な運転体制	・現有設備に則した運転員構成や配備に関する配慮不足 <sup>(4)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

④ 第4の不具合である”漏えい規模の誤判断”については、「異常時運転手順書の不備」と「漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足」を直接原因とした(表3.1(d)参照)。

- ・異常時運転手順書の不備：異常時運転手順書において、OFTナトリウム液位の変化が漏えい規模の主要判断要素である旨の不適切な記載があったことや、上記②に示したような記載内容の不整合があったことが誤判断の要因とされている[4,5]。
- ・漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足：運転員が、OFTの液位に変動がないことから”小漏えい”と判断したことや、火災報知器や漏えい検出器の発報を軽視し

たことから<sup>[4,5]</sup>、漏えい規模の判断要素に関して運転員の認識が欠如していたものと考えられる。

また、”原子炉手動トリップ操作の遅れ”と同様、手順書チェック過程の問題点が指摘されていることから、寄与因子として「手順書作成過程における品質管理上の欠陥」を取り上げた。

表3.1(d) “漏えい規模の誤判断”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー、人的過誤
当該不具合による結果	漏えいの現場確認・連続監視の不徹底、原子炉手動トリップ操作の遅れ
発生要因となった不具合	該当なし
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の不備	・漏えい規模の判断基準に関する手順書記載の不整合 <sup>(4,5)</sup>
寄与因子	具体的内容
手順書作成過程における品質管理上の欠陥	・手順書の原案検討から承認までの過程におけるチェックミス <sup>(6)</sup>
直接原因	具体的内容
漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足	・オーバーフロータンク及び蒸発器の液位変動のみ監視 <sup>(4-6)</sup> ・火災報知器や漏えい検出器の発報軽視
寄与因子	具体的内容
該当なし	

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

- ⑤ 第5の不具合である”不要な操作（タービントリップ操作）の実行”は、原子炉手動トリップ操作を実施する上で必要な操作でなく、手順書にも記載されていない<sup>[4,5]</sup>ことから、運転員による「異常時運転手順書の違反」を直接原因とした（表3.1(e)参照）。
- ⑥ 第6及び第7の不具合である”緊急ドレン操作の遅れ”と”換気空調設備停止操作の遅れ”については、いずれも、異常時運転手順書において、その必要性や操作時期に関する記述が不明瞭であったこと（ドレン操作については、手順書の「細目」に記載がなく、また、空調設備の停止については、ドレン操作後に行うと読めるような記載となっている）が指摘されている<sup>[4-6]</sup>。従って、表3.1(f)及び(g)に示すように、これらの不具合の直接原因として、「異常時運転手順書の不備」を同定した。また、前者の不具合に対する寄与因子として、異常時運転手順書に設備別運転要領書（ナトリウム温度低下後のドレン操作を行う旨記載している）への移行を明示していることから、「手順書作成過程における設備保護優先の考え方の導入」を取り上げた。一方、後者の不具合に対しては、設置許可申請書における記載（火災報知器の信号により空調ダクトを全閉する）



と異常時運転手順書の記載内容に不整合が認められた<sup>[4,5]</sup>ため、「手順書作成過程における品質管理上の欠陥」を寄与因子とした。

表3.1(e) “不要な操作(タービントリップ操作)の実行”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	人的過誤
当該不具合による結果	原子炉手動トリップ操作の遅れ
発生要因となった不具合	該当なし
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の違反	・原子炉手動トリップに必要なでない操作の先行 <sup>(4,5)</sup>
寄与因子	具体的内容
該当なし	

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

表3.1(f) “緊急ドレン操作の遅れ”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
当該不具合による結果	ナトリウムの漏えい及び火災の拡大
発生要因となった不具合	該当なし
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の不備	・緊急ドレンの必要性及び操作時期に関する記載不明瞭 <sup>(5,6)</sup>
寄与因子	具体的内容
手順書作成過程における「設備保護」優先の考え方の導入	・「熱衝撃緩和のためナトリウム温度低下を待つ」という設備別運転要領書への移行を手順書に記載 <sup>(4,5)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

表3.1(g) “換気空調設備停止操作の遅れ”の直接原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
当該不具合による結果	ナトリウムの漏えい及び火災の拡大
発生要因となった不具合	該当なし
直接原因	具体的内容
異常時運転手順書の不備	・空調停止の必要性及び操作時期に関する記載不明瞭 <sup>(5,6)</sup>
寄与因子	具体的内容
手順書作成過程における品質管理上の欠陥	・設置者による手順書の審議検討における設置許可申請書(火災報知器の信号で空調ダクト全閉)との不整合の見逃し <sup>(4-6)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

## (5) ステップ5：根本原因の識別

ASSET手法に従い、このステップでは、上記のステップ4において明らかとなった直接原因が何故取り除かれなかったを、設備のサーベランス試験、設備改善や手順改訂、及び、運転経験のフィードバック過程における問題点という観点から分析し、各不具合の根本原因を明らかにした。また、根本原因に寄与する因子として、プラントの運営管理上の欠陥についても検討した。その結果を、表3.2(a)～(g)にまとめる。以下では、各不具合の根本原因について述べる。

- ① “温度計さや管の破損”の2つの直接原因については、表3.2(a)に示すように、「設計不良」に対して2つの根本原因と1つの寄与因子を、また、「設置不良」に対して根本原因と寄与因子を1つずつ同定した。

表3.2(a) “温度計さや管の破損”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	機器故障
直接原因	温度計さや管の設計不良
根本原因	具体的内容
安全性に関する配慮の欠如	・ 応答性重視による強度不足 <sup>(4,6,7)</sup> ・ 段付構造の不適切な強度評価 <sup>(4,6,7)</sup>
寄与因子	具体的内容
該当なし	
根本原因	具体的内容
運転経験データの不十分な反映	・ 常陽での使用実績の軽視 <sup>(4)</sup> ・ 海外炉における破損事例の未反映 <sup>(4)</sup>
寄与因子	具体的内容
情報管理・分析体制の不備	・ 不十分な技術の蓄積、継承、活用 <sup>(4)</sup>
直接原因	温度計さや管の設置不良
根本原因	具体的内容
メーカーによる作業手順の不備	・ 配管保温材を取り付けた状態でのさや管交換 <sup>(7)</sup>
寄与因子	具体的内容
メーカーにおける作業管理体制の欠陥	・ 設置者に無断で交換 <sup>(4,7)</sup> ・ 交換作業の未報告 <sup>(4)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

- ・ 設計不良：温度計さや管の設計において動燃がメーカーに示した仕様は温度計の応答時間だけであったこと<sup>[4]</sup>等から、応答性を重視したために安全性に対する配慮が欠けていたものと判断できる。また、動燃の「常陽」で十分に使用実績のある形状のものは異なった設計であったこと<sup>[4]</sup>や、フランスのスーパーフェニックスにおける事例の

教訓を十分に活用していなかったこと<sup>[4]</sup>から、運転経験データの反映が不十分であったものと考えられる。従って、根本原因として、「安全性に対する配慮の欠如」と「運転経験データの不十分な反映」を摘出した。また、これまでの技術の蓄積や経験を十分に活用するための体制が十分に整備されていなかったものとの指摘もあり<sup>[4]</sup>、これが後者の根本原因に寄与したと推測できる。従って、寄与因子として、「情報管理・分析体制の不備」を摘出した。

・設置不良：破損したさや管については、配管断熱材を取り付けたままの状態にシース付熱電対の交換を行ったこと<sup>[7]</sup>、また、交換作業を動燃に無断で行ったこと<sup>[4,7]</sup>が明らかになっており、これらの事実に基づき、「メーカーによる作業手順の不備」を根本原因に、「メーカーにおける作業管理体制の欠陥」をその寄与因子とした。

② 次に、“原子炉手動トリップの遅れ”に対する2つの直接原因、「異常時運転手順書の不備」と「運転員の不適切な対応」については、それぞれ、根本原因を1つずつ、また、前者に対して1つの寄与因子を同定した（表3.2(b)参照）。

表3.2(b) “原子炉手動トリップ操作の遅れ”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
直接原因	異常時運転手順書の不備
根本原因	具体的内容
異常時運転手順書作成時の検討不足	・設置許可申請書内容との不整合 <sup>(4,5)</sup> ・常陽における手順書内容の未反映 <sup>(4)</sup>
寄与因子	具体的内容
手順書作成プロセス上の欠陥	・手順書原案を外部委託で作成、設置者が検討 <sup>(4)</sup>
直接原因	運転員の不適切な対応
根本原因	具体的内容
訓練プログラムの不備	・各種状態に対応した訓練の未実施 <sup>(5)</sup> ・ナトリウム取扱に関する訓練の不足 <sup>(4,6)</sup>
寄与因子	具体的内容
該当なし	

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

・異常時運転手順書の不備：設置許可申請書において、火災報知器や漏えい検出器の警報により手動で原子炉を停止する旨記載されており、異常時運転手順書の記載内容との不整合が認められている<sup>[4,5]</sup>。また、手順書作成時に「常陽」の運転マニュアルとの比較対応を行わなかったことも明らかとなっている<sup>[4]</sup>。これらのことから、手順書不備の根本原因を「異常時運転手順書作成時の検討不足」とした。さらに、手順書の原案は外部委託により作成され動燃が検討したとされており<sup>[4]</sup>、こうした体制が手順

書の不備に寄与しているものと推測できる。従って、上記根本原因の寄与因子として、「手順書作成プロセス上の欠陥」を抽出した。

・運転員の不適切な対応：運転員の教育訓練は、現場での白煙の認知や火災対応を伴わないものであり[5,6]、火災報知器や漏えい検出器の発報により原子炉の手動停止に関する訓練も行われていなかったものと考えられる。また、ナトリウム消火実験や反応実験に関する研修が義務づけられておらず、ナトリウム取扱に関する教育訓練が不十分であったことが問題視されている[4,6]。こうした「訓練プログラムの不備」が、運転員の不適切な対応に繋がったと判断できるため、根本原因として取り上げた。

③ 表3.2(c)に示すように、「漏えいの現場確認・連続監視の不徹底」の直接原因である「異常時運転手順書の不備」と「監視装置・警報表示の不適切な設計・設置」については、それぞれ、根本原因と寄与因子を1つずつ同定した。

表3.2(c) “漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
直接原因	異常時運転手順書の不備
根本原因	具体的内容
監視パラメータに対する配慮の欠如	・精度の低いオーバーフロータンク液位の監視を重視(4,5)
寄与因子	具体的内容
訓練プログラムの不備	・現場確認や火災対応を伴う訓練の未実施(4)
直接原因	監視装置、警報表示の不適切な設計/設置
根本原因	具体的内容
異常時の運転員支援技術における検討不足	・火災報知盤の不適切な設置場所(5,6) ・中央制御室における漏えい検出器指示表示なし(4-6)
寄与因子	具体的内容
運転及び技術支援体制の欠陥	・手順書と実際の運転操作との対比検討不十分(4)

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

・異常時運転手順書の不備：異常時運転手順書において、火災報知器や漏えい検出器を軽視し、精度の低いOFT液位の監視を重視している点[4,5]に着目し、「監視パラメータに対する配慮の欠如」を根本原因とし、現場確認や火災対応を伴った訓練が行われていなかったことが監視パラメータの不備を見落とした要因の1つと考え、「訓練プログラムの不備」を寄与因子とした。

・監視装置・警報表示の不適切な設計・設置：火災報知盤が中央制御盤から離れており警報発生箇所の表示を確認し難いという設置上の問題点が指摘されている[5,6]。また、漏えい検出器の指示値が中央制御室において確認できないものとなっていたこと[4-6]

等から、異常時に運転員を支援するための技術対応が不十分であったと考えられる。従って、こうした「異常時の運転員支援技術における検討不足」を根本原因として同定した。また、その関連事項として、中央制御室における実際の運転操作を対比しながら手順書の内容を検討することの必要性が指摘されている<sup>[4]</sup>ことから、運転員支援技術を検討するための体制が十分でなかったものと判断し、「運転及び技術支援体制の欠陥」を寄与因子として抽出した。

④ ”漏えい規模の誤判断”に対する直接原因、「異常時運転手順書の不備」と「漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足」については、表3.2(d)に示すように、根本原因を各々1つずつ同定し、また、前者については1つの寄与因子を抽出した。

- ・異常時運転手順書の不備：手順書において、精度の低いOFT液位の変化を重視した記載になっていたこと<sup>[4,5]</sup>、及び、白煙の定義が明確に示されていなかったこと<sup>[4]</sup>から、「異常時運転手順書作成時における検討不足」を根本原因として抽出した。また、教育訓練プログラムに、現場確認や火災対応を伴う訓練が含まれていなかったことから、「訓練プログラムの不備」を寄与因子とした。
- ・漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足：教育訓練では、漏えい現場の情報を指導員が与える方式が採用されており、漏えいを模擬した訓練が実施されていなかったこと<sup>[5,6]</sup>から、「訓練プログラムの不備」を根本原因として同定した。

表3.2(d) ”漏えい規模の誤判断”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー、人的過誤
直接原因	異常時運転手順書の不備
根本原因	具体的内容
異常時運転手順書作成時の検討不足	・精度の低いオーバーフロータンク液位等のプロセス量を重視 <sup>(4,5)</sup> ・白煙の定義不明瞭 <sup>(4,5)</sup>
寄与因子	具体的内容
訓練プログラムの不備	・現場確認や火災対応を伴う訓練の未実施 <sup>(4)</sup>
直接原因	漏えい規模判断要素に関する運転員の認識欠如
根本原因	具体的内容
訓練プログラムの不備	・漏えいを模擬した訓練の未実施 <sup>(4-6)</sup>
寄与因子	具体的内容
該当なし	

[出典：(1)STA-調査状況報告、(2)STA-5月報告、(3)STA-原因究明報告、(4)NSC-中間報告]

⑤ 表3.2(e)に示すように、”不要な操作（タービントリップ操作）の実行”の直接原因である「異常時運転手順書の違反」については、同手順書に記載されていないにも拘わら

ず通常停止における操作手順を先行させたこと<sup>[4,6]</sup>から、根本原因として「運転員の安全認識の欠如」を取り上げた。また、手順書は、保安規定の記載内容（当直長は直ちに拡大防止に必要な応急措置を講じる旨の記載）に反して、原子炉を停止する際にプラント第1課長の了解を得る旨記載しており指揮命令系統をあいまいにするものであったと指摘されている<sup>[4,5]</sup>ことから、「運転体制の欠陥」を寄与因子として同定した。

- ⑥ “緊急ドレン操作の遅れ”と“換気空調設備停止操作の遅れ”は、いずれも、その直接原因が「異常時運転手順書の不備」であり、表3.2(f)及び(g)に示すように、設置許可申請書等の記載内容（火災報知器の信号で空調ダクトを全閉するとともに、・・・漏えいが確認された場合には手動にてOFTからの汲み上げを停止する）との不整合が認められ<sup>[4]</sup>、また、「常陽」の運転マニュアルにおける記載（空調停止後に原子炉をトリップし、引き続きナトリウムのドレンを行うという合理的な対応となっている）を参照していなかった<sup>[4]</sup>という共通点がある。これらの問題点に着目して、「異常時運転手順書作成時における検討不足」を根本原因とした。また、教育訓練が同手順書に従って実施されていたにも拘わらずこうした問題点が見逃された<sup>[4]</sup>ことから、「訓練プログラムの不備」を寄与因子として同定した。なお、“空調設備停止操作の遅れ”は、ナトリウムエアロゾルの拡散の要因の1つでもある（図3.2参照）。

表3.2(e) “不要な操作(タービントリップ操作)の実行”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	人的過誤
直接原因	異常時運転手順書の違反
根本原因	具体的内容
運転員の安全認識の欠如	・手順書に従わず通常停止における操作手順の遂行 <sup>(4,5)</sup>
寄与因子	具体的内容
運転体制の欠陥	・「原子炉停止に関する上司了解の必要性」の手順書記載 <sup>(4,5)</sup>

[出典：(1)STA-調査状況報告、(2)STA-5月報告、(3)STA-原因究明報告、(4)NSC-中間報告]

表3.2(f) “緊急ドレン操作の遅れ”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
直接原因	異常時運転手順書の不備
根本原因	具体的内容
異常時運転手順書作成時の検討不足	・設置許可申請書内容との不整合 <sup>(4)</sup> ・常陽における手順書内容の未反映 <sup>(4)</sup>
寄与因子	具体的内容
訓練プログラムの不備	・教育訓練における手順書不備の見逃し <sup>(4)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

表3.2(g) “換気空調設備停止操作の遅れ”の根本原因と寄与因子

当該不具合の性質	手順エラー
直接原因	異常時運転手順書の不備
根本原因	具体的内容
異常時運転手順書作成時の検討不足	・設置許可申請書内容との不整合 <sup>(4)</sup> ・常陽における手順書内容の未反映 <sup>(4)</sup>
寄与因子	具体的内容
訓練プログラムの不備	・教育訓練における手順書不備の見逃し <sup>(4)</sup>

[出典：(4)NSC-中間報告、(5)STA-調査状況報告、(6)STA-5月報告、(7)STA-原因究明報告]

#### (6) ステップ6：改善策の検討

ASSET法では、上記のステップ4及び5で明らかとなった直接原因、根本原因、及びそれらへの寄与因子各々に対して改善策を検討・立案し、それが、プラントにおいて計画あるいは既に実施されているか否かを調べることとなっている。また、ASSET手法では、原則として、設備の設計変更等の多大な費用や時間を必要とする改善策は除くこととし、即時性のある対策に限定している。しかし、本研究では、こうした限定はせずに改善策の検討を行うこととした。

「もんじゅ」事例については、既に、動燃や、科学技術庁(STA)及び原子力安全委員会(NSC)が、幾つかの具体的な改善策を検討・提案しており、ここでは、まず、それらを、直接原因、根本原因及び寄与因子それぞれに対応させて整理した。これによって、今後検討すべき課題(現時点で具体的な改善策が提案されていない直接原因、根本原因及び寄与因子)が明らかになるため、次に、これらについて、新たな改善策の検討を行った。このステップでの分析結果を表3.3(a)～(g)にまとめる。これらの表では、本研究において新たに検討した改善策をイタリック体書式で示し、既に提案されている改善策と区別した。

① まず、“温度計さや管の破損”という不具合に関しては、2つの直接原因、3つの根本原因及び4つの寄与因子を同定したが、このうちの4項目については、以下に示すように、既に提案されている改善策と対応させることができる。

- ・ 設計不良(直接原因)：STAは、同一設計の温度計さや管については全て取り替えなければならないとし、その際、温度計の健全性の確保について審査及び検査を行うとしている<sup>[6]</sup>。これには、さや管の設計変更及び交換というハードウェア対応が必要となる。
- ・ 運転経験データの不十分な反映(根本原因)：NSCは、技術と経験を継承し新技術を習熟するためのシステムを構築することの必要性を指摘している<sup>[4]</sup>。これには、動燃(及びメーカー)において技術支援を行うための体制を整備する必要がある。
- ・ 設計の品質管理上の欠陥(寄与因子)：NSCは、動燃における品質保証の管理機能の改善が必要であると指摘している<sup>[4]</sup>。また、STAは、動燃における品質管理体制の整

備に加えて、メーカーに対しても品質保証活動を充実するよう動燃に指導させることとしている<sup>[6]</sup>。これについては、動燃及びメーカーにおける品質管理に関する意識の高揚、組織対応並びに人材の育成・配備が必要となる。

- ・ 情報管理・分析体制の欠陥（寄与因子）：NSCは、新しい情報を入手・反映するための機能の充実・強化の必要性を指摘している<sup>[4]</sup>。また、STAは、事故情報の収集とその反映を行うための体制を整備しなければならないとしている<sup>[6]</sup>。これには、動燃及びメーカーにおける組織対応並びに人材の育成・配備が必要となる。

表3.3(a) “温度計さや管の破損”の直接／根本原因、寄与因子に対する改善策

直接／根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
温度計さや管設計不良	同一設計の温度計さや管の設計変更・取替	STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
温度計さや管設置不良	設置具台の確認検査、設置方法の強化	
<b>根本原因</b>		
メーカーによる作業手順の不備	作業状況の把握や作業実施手順の遵守徹底 (社内教育の充実・強化)	
運転経験データの不十分な反映	技術と経験の継承、最新情報の入手、分析及び検討の徹底	NSC-中間報告 <sup>(4)</sup>
安全性に関する配慮の欠如	設計・施工時における安全性最優先の考え方の徹底	
<b>寄与因子</b>		
設置者及びメーカーによる設計品質管理上の欠陥（品質管理体制上の問題）	設置者における品質保証の管理機能の改善 <sup>(4,6)</sup> メーカーに対する品質保証活動の充実を指導 <sup>(6)</sup>	NSC-中間報告 <sup>(4)</sup> STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
情報管理・分析体制の不備	最新情報を収集・反映する機能の充実・強化	NSC-中間報告 <sup>(4)</sup> STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
メーカーによる作業確認検査の不徹底	作業後の確認検査の強化、確認検査の重要性の周知徹底	
メーカーによる作業管理体制の欠陥	作業計画の立案、実施方法や手順、確認検査方法の整備などを行う管理体制の強化	

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

残りの5項目については、現在提案されている改善策に対応するものがないと考えられる。そこで、以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。

- ・ 設置不良（直接原因）：温度計の熱電対交換の際には配管断熱材を外して行うことを義務づけるなど、設置方法や設置手順を強化する。具体的な方法や手順に関しては、



設置者とメーカーとの間で十分検討する必要がある。

- ・ 安全性に対する配慮の欠如（根本原因）：設計、製作、施工などの各段階において、安全性を最優先とする基本的な考え方を関係者に周知徹底させる。これは、メーカーを含む関係者各位に対する安全性の十分な教育を必要とする。
- ・ メーカーによる作業手順の不備（根本原因）：作業状況の把握（作業の難しさ等）や作業実施手順の内容の理解や遵守を作業員に周知徹底させる。これは、メーカーの自主的努力を必要とする。
- ・ メーカーによる作業確認検査の不徹底（寄与因子）：作業後の機器の設置状況等について、設置者職員を含む複数の人によって行うなど作業の確認検査を強化する。また、確認や検査を行うことの重要性を作業員に周知徹底させる。これは、設置者によるメーカー指導とメーカーの自主的努力を必要とする。
- ・ メーカーによる作業管理体制の欠陥（寄与因子）：作業の実施計画の立案、実施方法や手順の整備、検査や確認方法の整備など、一連の作業を管理するための体制を充実・強化する。これには、設置者によるメーカー指導、及び、メーカーにおける組織対応並びに人材の育成・配備が必要となる。

② 次に、“原子炉手動トリップ操作の遅れ”に関しては、直接原因、根本原因及び寄与因子を各々2項目ずつ同定したが、このうち、直接原因2項目と根本原因1項目については、以下に示すように、既に動燃において改善策が検討・提案されている。

- ・ 異常時運転手順書の不備（直接原因）：動燃は、ナトリウムの漏えいが確認された時点で原子炉を直ちに手動トリップすることを基本とする手順書の改訂を行うとしている[4,6,11]。なお、この際、漏えいの確認方法（火災報知器や漏えい検出器の鳴動による確認等）を手順書に明記する必要があると考えられる。
- ・ 運転員の不適切な対応（直接原因）：動燃は、改訂した手順書に則した教育訓練を実施することとし、訓練プログラムの改善を行うとしている[10,11]。教育訓練においては、漏えいの発生から事象の終息に至る過程で要求される一連の操作を模擬できることが不可欠であると考えられる。
- ・ 訓練プログラムの不備（根本原因）：動燃は、現実に発生し得る種々の状況に対応した訓練を行うとし、訓練プログラムの拡充を図ることとしている[10,11]。

しかし、原子炉手動トリップに関する異常時運転手順書の不整合が見逃された根本原因及び寄与因子については、現時点で提案されている改善策の中に該当するものがないと考えられる。以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。

- ・ 異常時運転手順書作成時の検討不足（根本原因）：異常時運転手順書の作成（改訂）時に、設置許可申請書や保安規定等の記載内容を十分に検討し不整合のないことを確認すると共に、「常陽」（可能であれば、仏スーパーフェニックス）における運転マニュアルとの比較検討を行って不適切あるいは不明瞭な記載のないことを確認するためのプロセスを確立すべきと考えられる。手順書における記載は、原子炉手動トリッ

ブ等の主要な操作について、その必要性を運転員が理解できるよう配慮する必要がある。また、手順書作成には、設計、安全解析、運転等各分野の従事者が携わって、様々な観点から検討することが不可欠と考えられる。

- ・手順書作成過程における品質管理上の欠陥（寄与因子）：動燃における異常時運転手順書のチェックは、管理職（副所長、次長、課長）と原子炉主任技術者等から構成される委員会で審議検討され所長の承認を得るという体制で行われたとされており<sup>[6]</sup>、当直長等実際に運転に携わる職員が手順書チェックに関わっていなかったものと推測できる。運転現場での操作性等を考慮すると、手順書のチェック体制には運転員（少なくとも当直長）を加えるべきと考えられる。また、運転員がチェックに携わることで、各操作の重要性や必要性に関する理解が深まるものと期待される。
- ・手順書作成プロセス上の欠陥（寄与因子）：異常時運転手順書の原案は外部に委託して作成されており<sup>[4]</sup>、こうした体制が設置許可申請書との不整合や不適切な記述を生んだことに寄与しているものと推測できる。従って、手順書の原案作成は、「ふげん」や「常陽」における経験者を含めて動燃内部の技術者が行うよう体制を改善すべきと考えられる。これは、手順書改訂の場合も同様である。

表3.3(b) “原子炉手動トリップ操作の遅れ”の直接/根本原因、寄与因子に対する改善策

直接/根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の不備(記載内容の不整合等)	漏えい確認時点での原子炉手動トリップを基本とした手順に変更	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
運転員の不適切な対応	改訂手順書に則った教育訓練の実施(訓練プログラムの改善)	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
<b>根本原因</b>		
異常時運転手順書作成時の検討不足	設置許可申請書等の記載内容との比較検討を通して手順書内容を確認するためのプロセスの確立	
訓練プログラムの不備	訓練プログラムの内容拡充(現実に発生し得る種々の状況に対応した訓練の実施等)	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
<b>寄与因子</b>		
手順書作成過程における品質管理上の欠陥	手順書のチェック体制の強化(運転現場の参画、現場での操作性重視)	
手順書作成プロセス上の欠陥	手順書作成を設置者自身で行うための人員及び体制の整備・強化(経験者を含めた体制作り)	

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策(案)

③ 第3の不具合、“漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”に関しては、直接原因と根本原因として各々2項目、寄与因子として3項目を同定した。このうちの5項目については、対応する改善策が既に提案されている。以下に、その具体的内容を示す。

- ・ 異常時運転手順書の不備（直接原因）：動燃は、漏えいの現場確認方法を手順書に明記すること、また、漏えい監視設備や警報設備の改善に伴う手順書の変更（各種設備の対応操作の明確化等）を行うこととしている<sup>[11]</sup>。同様に、STAも遠隔監視装置の設置に伴う中央制御室における連続監視等の手順を整備しなければならないとしている<sup>[6]</sup>。なお、手順書を改訂にあたっては、運転員が具体的に要求される対応操作等を明記すること、及び、運転現場の意見を採り上げてマンーマシンインターフェースの観点から配慮することが必要と考えられる。
- ・ 監視装置・警報表示の不適切な設計・設置（直接原因）：動燃は、遠隔監視装置を設け漏えい検出信号の指示記録を中央制御室において確認できるよう設備改善を行うと共に、火災報知器に再鳴動機能を付加することとしている<sup>[10,11]</sup>。さらに、漏えいを総合的に監視するシステムについて検討を行うこととしている<sup>[10,11]</sup>。なお、STAは、火災報知器の再鳴動機能付加にあたっては、他の運転操作に支障をきたさないよう音色等について検討する必要があると指摘している<sup>[6]</sup>。これらの設備改善においては、運転現場におけるマンーマシンインターフェースの評価を十分に行うことが必要であると考えられる。
- ・ 監視パラメータに対する配慮の欠如（根本原因）：上述したように、動燃は、遠隔監視装置の設置や総合的な漏えい監視システムの検討を行うこととしており<sup>[10,11]</sup>、これにより、監視パラメータの充実が図れるものと考えられる。
- ・ 不十分な運転体制（寄与因子）：動燃は、設備改善に伴い、各種試験を通して実際に体験することにより、適正な運転体制（人員配備）等の検討を行うこととしている<sup>[11]</sup>。
- ・ 訓練プログラムの不備（寄与因子）：動燃は、シミュレータによる教育訓練において現実的な状況を想定したものとし、また、漏えいの現場確認方法に関する教育訓練を充実させることとしている<sup>[11]</sup>。また、STAは、ナトリウムの反応に関する知識と経験を得るために映像等を活用する等教育訓練を充実させること、並びに、ナトリウムの反応実験等の教育研修を義務づけるなどナトリウムの取扱に関する体験訓練を強化することが必要であると指摘している<sup>[6]</sup>。

他の2項目、支援技術に関する2項目（根本原因と寄与因子）に関しては、現時点で提案されている改善策に該当するものが示されていないため、以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。

- ・ 異常時の運転員支援技術における検討不足（根本原因）：異常時に中央制御室において運転員が現場の状況を正確に把握することは事故対応の基本であり、従って、対応操作を行うにあたって運転員が如何なる情報を必要とするかを十分検討しなければならないと考えられる。前述したように、動燃は、総合的な漏えい監視システムを検討

することとしている<sup>[10,11]</sup>が、その際には、様々な状況において要求される運転員の対応操作と対比させつつ必要情報を検討することが不可欠であろう。

- ・運転及び技術支援体制の欠陥（寄与因子）：異常時運転手順書の作成（改訂）や教育訓練の内容の整備等を、中央制御室や現場における実際の対応操作と対比させて行うことは、手順書や訓練の内容の妥当性を確認する上で有効であると考えられる。従って、こうした体制を確立することが必要であろう。また、運転現場における手順書や訓練内容の検討は、運転員並びに技術支援要員等の人員配備が適正であるか否かを検討するのにも役立つと考えられる。なお、NSCは、手順書作成・改正の担当者は中央制御室に常駐して実際の運転操作と対比しながら手順書内容を検討し必要な改善・改訂を行うべき時期であった、と指摘している<sup>[4]</sup>。

表3.3(c) “漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”の  
直接/根本原因、寄与因子に対する改善策

直接/根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の不備（記載内容の不足）	現場確認の方法の手順書明記 設備改善に伴う手順書内容の拡充（漏えい監視の明確化）	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
監視装置、警報表示の不適切な設計/設置	設備改善（遠隔監視装置の設置、火災報知器の再鳴動機能の付加、漏えい検出器指示記録の中央制御室表示）	PNC-回答 <sup>(11)</sup> STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
<b>根本原因</b>		
監視パラメータに対する配慮の欠如	漏えいを総合的に監視するシステムの検討	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
異常時の運転員支援技術における不十分な検討	事故時に中央制御室の運転員が必要とする情報の検討と設備改善への反映	
<b>寄与因子</b>		
訓練プログラムの不備	シミュレータ訓練の充実（映像等を活用した教育訓練の充実） ナトリウム取扱に関する体験訓練の強化	PNC-回答 <sup>(11)</sup> STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
不十分な運転体制	適正な人員配備等の検討	PNC-回答 <sup>(11)</sup>
運転及び技術支援体制の欠陥	運転手順書や訓練プログラムの内容整備を 運転現場における実際の対応操作と対比検討する体制の整備	

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

- ④ 第4の不具合、“漏えい規模の誤判断”に関して同定した6項目（直接原因、根本原因、寄与因子として各々2項目）のうち3項目については、以下に示すように、それぞれ

れに対応する改善策が既に提案されている。

- ・ 異常時運転手順書の不備（直接原因）：動燃は、手順書記載内容の詳細化を行って漏えいの判断基準を明確にすることとしている<sup>[11]</sup>。また、前述したように、漏えいの規模に拘わらずナトリウムの漏えいが確認された時点で原子炉を直ちに手動トリップすることを基本とする手順書の改訂を行うとしている<sup>[11]</sup>。
- ・ 訓練プログラムの不備（根本原因、寄与因子）：動燃は、漏えいを模擬した訓練をはじめ、現実発生し得る種々の状況に対応した訓練を行うとし、訓練プログラムの拡充を図ることとしている<sup>[11]</sup>。

表3.3(d) “漏えい規模の誤判断”の直接／根本原因、寄与因子に対する改善策

直接／根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の不備（不明瞭な記載内容）	手順書の記載内容の詳細化、漏えいの判断基準の明確化	PNC-回答(11)
漏えい規模判断要素に関する運転員の認識欠如	各種計測機器の精度に関する教育の強化、白煙の定義等に関する理解の徹底	
<b>根本原因</b>		
異常時運転手順書作成時の検討不足	漏えい規模判断のための計測パラメータ及び定量的判断基準の検討	
訓練プログラムの不備	訓練プログラム内容の拡充（漏えいを模擬した訓練の実施、現実発生し得る状況に対応した訓練の実施）	PNC-回答(11)
<b>寄与因子</b>		
手順書作成過程における品質管理上の欠陥	手順書のチェック体制の強化（運転現場の参画、現場での操作性を重視）	
訓練プログラムの不備	訓練プログラム内容の拡充（漏えいを模擬した訓練の実施、現実発生し得る状況に対応した訓練の実施）	PNC-回答(11)

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

上記以外の3項目については、現時点で提案されている改善策の中に適用可能なものがないと考えられる。従って、以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。但し、上述のように、「漏えいの規模に拘わらず漏えいを確認した時点で原子炉をトリップする」ことになれば、これらの項目に関する改善は重要でなくなる可能性もある。

- ・ 漏えい規模判断要素に関する運転員の認識不足（直接原因）：運転員が漏えい規模に対する主要判断要素としたOFT液位等のプロセス量については、その計測機器の精度等に関して十分な教育を行うことが必要である。また、火災報知器や漏えい検出器の

精度と漏えい規模との関係、白煙発生の定義等についても理解を深めるための教育や訓練が重要である。

- ・ 異常時運転手順書作成時の検討不足（根本原因）：異常時運転手順書では、漏えい規模を判断するための計測パラメータを洗い出し、各々に対する定量値を示すなど具体的な判断材料を提供する必要がある。また、白煙発生のように定量化の不可能あるいは困難なものは、補助的な判断材料とすべきである。動燃が提案した総合的な漏えい監視システムの検討<sup>[10,11]</sup>において、漏えい規模の判断に利用可能な計測パラメータが示されるものと考えられ、これを基に手順書の整備を行うべきである。

- ・ 手順書作成過程における品質管理上の欠陥（寄与因子）：前記②と同様である。

⑤ 第5の不具合、“不要な操作（タービントリップ操作）”に関しては、直接原因、根本原因、及び、寄与因子が各1項目ずつ同定されており、これら各項目について対応する改善策が既に提案されている。以下に、その具体的内容を示す。

- ・ 異常時運転手順書の違反（直接原因）：動燃は、漏えいが確認された時点で原子炉を手動でトリップすることを基本とし、直ちに操作を実施するよう手順書の改善を行うとしている<sup>[11]</sup>。しかし、手順書を遵守させるためには、様々な状況における手動トリップの必要性を十分配慮して記載する必要がある。

- ・ 運転員の安全認識の欠如（根本原因）：動燃は、上記の手順書改善に加えて、意識の徹底を行うこととしている<sup>[11]</sup>。これには、教育訓練や研修等により「安全性を優先する」という組織全体としての取り組みが不可欠であると考えられる。

表3.3(e) “不要な操作(タービントリップ操作)の実行”の  
直接/根本原因、寄与因子に対する改善策

直接/根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の違反	漏えい確認時点で原子炉をトリップすることを基本とし直ちに操作を実施するよう手順書を改善	PNC-回答(11)
<b>根本原因</b>		
運転員の安全認識の欠如	運転員による意識の徹底	PNC-回答(11)
<b>寄与因子</b>		
運転体制の欠陥	当直長が必要措置を採れるよう手順書を改善	PNC-回答(11)

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

- ・ 運転体制の欠陥（寄与因子）：動燃は、「原子炉の手動停止の際にはプラント第1課長に報告し了承を得る」という手順書記載に対して、当直長が直ちに必要な措置を講ずることができるようにしている<sup>[11]</sup>。これを徹底するためには、如何なる状況

においても当直長が自らの判断で対応できるような権限を持たせるよう組織全体としての教育（雰囲気作り）を行う必要があると考えられる。

- ⑥ 第6の不具合、「緊急ドレン操作の遅れ」に関しては、直接原因と根本原因として各々1項目を、また、寄与因子として2項目を同定したが、このうち直接原因と根本原因については、以下に示すように、対応する改善策が提案されている。

- ・異常時運転手順書の不備（直接原因）：STAは、下記に示すようなドレン方法に関する検討の結果を踏まえて手順書を整備する必要があるとしている<sup>[6]</sup>。ただし、この際、ドレン操作を開始する時期や条件を明確に記載することが不可欠であると考えられる。また、「常陽」の運転マニュアルとの比較検討を行ってナトリウム漏えい量の抑制の観点から有効かつ合理的な対応操作を検討することも必要である。
- ・異常時運転手順書作成時の検討不足（根本原因）：動燃は、緊急時においてナトリウムの温度低下を待たずにドレンすることの重要性と必要性を認識しており、様々な漏えい状況に応じたドレン方法について具体的な改善策を検討することとしている<sup>[11]</sup>。STAは、ナトリウムの温度低下を待たないドレン方法について手順を整備すべきであったとし、ドレン設備の改善等を含めて具体的な方策の検討が必要であると指摘している<sup>[6]</sup>。

表3.3(f) “緊急ドレン操作の遅れ”の直接/根本原因、寄与因子に対する改善策

直接/根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の不備（曖昧な記載内容）	緊急ドレンの方法の検討結果を踏まえた手順の整備	STA-5月報告 <sup>(6)</sup>
<b>根本原因</b>		
異常時運転手順書作成時の検討不足	漏えい状況に応じた緊急ドレン方法の検討	STA-5月報告 <sup>(6)</sup> PNC-回答 <sup>(11)</sup>
<b>寄与因子</b>		
手順書作成過程における「設備保護」優先の考え方の導入	安全性を最優先する考え方に基づく手順書の検討を行う体制の確立	
訓練プログラムの不備	緊急ドレン操作の必要性、時期、条件等に関する教育訓練の充実	

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

残りの2項目については、現時点で提案されている改善策の中に適用可能なものがないと考えられる。従って、以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。

- ・手順書作成過程における設備保護優先の考え方の導入（寄与因子）：緊急時に使用する手順書においては設備別運転要領に従うという方針（特に、設備保護を優先する考え方を）を排除し、安全を最優先する意識の下に、手順書の記載内容を検討することが

必要であると考えられる。

- ・ 訓練プログラムの不備（寄与因子）：緊急ドレン操作の有効性や必要性等に関する教育を充実させること、また、種々の状況における同操作の時期や条件を明確にした訓練を実施することが必要であると考えられる。また、ドレンが遅れた場合の影響等についても十分な教育を行うことが重要であろう。

⑦ 第7の不具合、“換気空調設備停止操作の遅れ”に関しては、直接原因と根本原因として各々1項目を、また、寄与因子として2項目を同定したが、このうち直接原因と根本原因については対応する改善策が既に提案されている。以下に、その具体的内容を示す。

- ・ 異常時運転手順書の不備（直接原因）：STAは、換気空調設備の停止操作時期について、運転員に誤解を与えないよう手順書の記載内容を改定する必要があると指摘している[6]。なお、この際、停止の条件を明確にすることが必要と考えられる。
- ・ 異常時運転手順書作成時の検討不足（根本原因）：動燃は、漏えいの状況に応じて可能な限り早期に換気空調設備を停止するための具体的方策を検討することとしている[11]。STAは、停止手順の検討にあたって、空調設備の停止による室温上昇とその機器への影響、並びに、その後の現場への立ち入り等を十分配慮する必要があると指摘している[6]。

表3.3(g) “換気空調設備停止操作の遅れ”の直接／根本原因、寄与因子に対する改善策

直接／根本原因、寄与因子	改善策	出典
<b>直接原因</b>		
異常時運転手順書の不備（曖昧な記載内容）	空調設備停止操作手順（操作時期）の明確化	STA-5月報告 <sup>(6)</sup> PNC-回答 <sup>(11)</sup>
<b>根本原因</b>		
異常時運転手順書作成時の検討不足	状況に応じた空調設備の早期停止操作手順の検討（停止による室温上昇とその影響を検討することが必要 <sup>(6)</sup> ）	STA-5月報告 <sup>(6)</sup> PNC-回答 <sup>(11)</sup>
<b>寄与因子</b>		
手順書作成過程における品質管理上の欠陥	設置許可申請書等の記載内容との比較検討を通して手順書内容を確認するするためのプロセスの確立	
訓練プログラムの不備	空調停止操作の必要性、時期、条件等に関する教育訓練の充実	

注) イタリック体は、本研究において検討した改善策（案）

他の2項目については、現時点で提案されている改善策の中に該当するものがないと考えられる。従って、以下では、これらの各項目について検討した改善策を示す。



- ・ 手順書作成過程における品質管理上の欠陥（寄与因子）：手順書の作成・改訂に際しては、設置許可申請書や「常陽」の運転マニュアルにおける記載との対比や手順書内記載の整合性検討等を行うというプロセスを確立し、手順書の品質管理を強化する必要があると考えられる。特に、設備の改善や手順の変更等を伴う場合には、原子炉手動トリップや緊急ドレン操作など他の操作手順との関連（例えば、時間的な順序）を配慮することが重要である。
- ・ 訓練プログラムの不備（寄与因子）：動燃におけるシミュレータ訓練では、現場模擬盤で簡易的に空調設備の停止操作を行ってきたとされているが<sup>[5]</sup>、この訓練における停止操作の主旨が不鮮明であったと推測できる。従って、空調設備停止の重要性や必要性並びに操作時期や条件を明確にし運転員に周知徹底させることを目指した訓練プログラムとすることが必要と考えられる。また、併せて、空調設備停止後の現場の状況等についても教育することが要求される。

#### (7) ステップ7：一般的な教訓の導出と勧告

このステップでは、上記の分析・検討結果に基づき、①安全設備に関するソフトウェアとハードウェアのバランスを最適化するための方法（訓練プログラムや手順書の改訂、設備作動性能の向上）、②潜在的欠陥を取り除くための方法（品質管理、予防保全、サーバランス試験の強化）及び③運転経験のフィードバックプロセス、の観点から、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まとめた。その結果を以下に述べる。

##### ① 安全設備に関するソフトウェアとハードウェアのバランスを最適化するための方法

- i) 運転手順書の改訂：「もんじゅ」事例では、異常時運転手順書の問題として、設置許可申請書との不整合、曖昧あるいは不適切な記載、及び、「常陽」の運転マニュアルとの比較検討の不足などが指摘されている<sup>[4-6]</sup>。こうした問題は、手順書の原案を外部に委託して作成しそれを動燃内部で審議検討するという作成プロセスやチェック体制に不備があったこと等によるものと考えられる。従って、プラント管理者は、手順書作成あるいは改訂に際して、設置許可申請書や保安規定などの記載内容を十分検討し、さらに、当直長をはじめとする運転操作員を加えた体制による内容のチェックを行うというプロセスを確立させるべきである。
- ii) 訓練プログラムの内容整備：異常時運転手順書に沿って運転員の教育訓練が行われていたにも拘わらず、手順書の不整合等が見逃される結果となった。この原因の1つは、各訓練において現場での確認動作が模擬されていないことが明らかとなっており<sup>[4-6]</sup>、実際のプラント状況を把握するための訓練としては不十分な内容であったものと推測できる。また、ナトリウムの取扱に関する教育研修が全ての運転員に義務づけられておらず、漏えい時のナトリウムの反応等に関する知識と経験が不十分であったと指摘されている<sup>[4-6]</sup>。従って、プラント管理者は、運転員の教育研修や訓練の内容を検討する際、

可能な限り現実的な状況を模擬すること、並びに、各々の対応操作に関してその必要性や重要性が理解できるようにすること等を十分配慮すべきであり、また、こうした要件が満足されていることを確認するための体制を確立させる必要がある。

- iii) 設備作動性能の向上：「もんじゅ」事例では、漏えい監視装置等設備上の不備が問題視された<sup>[4-6]</sup>が、これは、火災報知器や漏えい検出器の役割に関する認識が欠如していたこと、OFT液位の精度に関する理解が不十分であったこと、設計段階において運転現場での操作性を十分配慮していなかったこと等に起因するものと推測できる。各設備や機器については、それぞれの機能や性能を十分把握することがプラントを運転するための基本であると考えられる。しかし、大規模かつ複雑な設備構成を有するプラントに対して、各種設備の機能を運転員が熟知することは不可能あるいは極めて困難である。従って、プラント管理者は、運転員だけでなく適切な技術的支援を行うための人員を配備したり、連絡網を整備するといった運転体制を確立すべきである。

## ② 潜在的欠陥を取り除くための方法

- i) 品質管理の強化：「もんじゅ」事例の起因事象である温度計さや管破損は、設計/設置上のミスにより起こったものと考えられている<sup>[4-7]</sup>。こうしたミスが潜在したのは、設計仕様から施工まで過程における検討及び検査（チェックやレビュー）が十分でなかったことによる<sup>[4-6]</sup>。一方では、応答性を重視したことにより、「常陽」とは異なる設計を採用し健全性を確保するための配慮に欠けたという問題点も指摘されている<sup>[4]</sup>。従って、プラント管理者は勿論のこと、メーカーにおいても設計から施工に至る工程において十分な品質管理を行うための体制を整備したり、過去の実績などの経験や技術を伝承するための組織作りを行うべきである。
- ii) 予防保全及びサーベランス試験の強化：温度計熱電対シースの設置不良による変形、異常時運転手順書における記載内容の不整合などが見逃されたという事態に鑑み、プラント管理者は、予防保全やサーベランス試験を含む検査の実施方法や体制を強化すべきである。

## ③ 運転経験のフィードバックプロセス

- i) 運転経験のフィードバックプロセスの拡充：「常陽」における使用実績やフランスのスーパーフェニックス炉におけるトラブル事例を十分に反映していなかったことが明らかとなっている<sup>[4]</sup>。こうした運転経験データの反映は、国際的に重要視されていることから、事例の分析や評価を行うための人材を育成すると共に、そのフィードバックを適切に行うための体制を整備・強化すべきである。

## 3.3 分析結果のまとめ

本節では、ASSET手法を用いて「もんじゅ」事例の分析を行った結果について、その要点をまとめる。具体的には、“ナトリウム漏えい及び火災の拡大”事象に対して同定した

7つの不具合と、各不具合の直接原因、根本原因及び寄与因子、及び、改善策を簡潔に述べる。

- (1) 温度計さや管の破損：ナトリウム漏えいの原因であり、設計不良並びに設置不良に起因した不具合である。設計不良については、根本原因として、温度計さや管の設計段階において安全性に対する配慮に欠けていたことや、運転経験データの反映が十分でなかったことを取り上げ、また、寄与因子として、情報管理・分析体制と、体制を含めた設計の品質管理の不備を摘出した。改善策としては、温度計さや管の設計変更・取替や設計の品質保証管理機能の改善などが既にNSCやSTAから提示されている。設置不良については、根本原因として、メーカーによる交換作業手順の不備を、また、寄与因子として、メーカーによる作業管理体制の欠陥等を摘出した。これらに対する改善策として、作業の実施方法・手順等の整備や、作業計画の立案等を行うための管理体制の強化などを進めるべきであると考えられる。
- (2) 原子炉手動トリップ操作の遅れ：この不具合は、ナトリウム漏えいの継続及び火災の拡大の原因であり、異常時運転手順書の記載内容が不適切であったことと、運転員による対応が不適切であったことに起因する。根本原因としては、手順書作成時にその内容が十分検討されなかったこと、及び、現実には発生し得る状況に対応した教育訓練が行われていなかったことが挙げられる。また、寄与因子としては、手順書の作成プロセスにおける欠陥を指摘した。これらの因子に対する改善策として、動燃は、手順書の改訂や訓練プログラムの内容拡充を行うとしているが、この他に、手順書の作成プロセスやチェック体制の整備・強化等が必要であると考えられる。
- (3) 漏えいの現場確認・連続監視の不徹底：この不具合は、上記(2)の発生要因の1つであり、異常時運転手順書の記載に不備があったことと、監視装置や警報表示設備に設計・設置上の不備があり運転員に適切な情報を提供できなかったことによる。根本原因は、漏えいの際に監視すべきパラメータに関して十分な検討がなされていなかったことと、運転員を支援するための技術的な対応に問題があったことである。また、寄与因子としては、教育訓練プログラムの不備等を摘出した。改善策として、動燃は、手順書の改訂、漏えい監視設備の改善、教育訓練の充実等を行うこととしているが、この他に、運転員を支援するための設備や体制を整備することも必要と考えられる。
- (4) 漏えい規模の誤判断：この不具合は、上記(2)及び(3)の発生要因の1つであり、異常時運転手順書の記載内容が不適切であったことと、漏えい規模の判断に対する運転員の認識が不足していたことに起因する。根本原因は、手順書の内容に関する検討が不十分であったことと、漏えいを模擬するなど実際の状況に則した訓練が行われていなかったことである。教育訓練プログラムの問題は手順書の記載不備の寄与因子でもある。これらに対して、動燃は、漏えいの判断基準の明確化など手順書の記載を詳細化したり、訓練プログラムの内容を拡充することとしているが、この他に、手順書のチェック体制や計測機器の精度に関する教育を強化することも必要と考えられる。

- (5) 不要な操作（タービントリップ操作）の実行：この不具合は、上記(2)の発生要因の1つであり、原子炉トリップ操作手順には必要でない（手順書に記載されていない）行為を行ったという、いわば、手順書違反によるものである。この根本原因は、運転員の安全性に対する認識が不足していたことであり、また、寄与因子として、原子炉停止の際に上層部の了解を必要とする運転体制上の問題を取り上げた。これらに対する改善策として、動燃は、手順書の改訂、運転員による意識の徹底を図ることとしている。
- (6) 緊急ドレン操作の遅れ：この不具合は、ナトリウム漏えいの継続の原因の1つであり、異常時運転手順書における記載が不適切であったことに起因する。根本原因としては、手順書作成時にその内容が十分検討されていなかったことを、また、その寄与因子としては、教育訓練において手順書の不備が見逃されたことから訓練プログラムの不備を取り上げた。改善策として、動燃は、緊急ドレンの方法を検討し手順書を整備することとしているが、この他に、緊急ドレンの必要性やその時期及び条件等に関して教育訓練を充実させることも必要であると考えられる。
- (7) 空調設備停止操作の遅れ：この不具合は、ナトリウム火災の拡大の原因の1つであり、また、ナトリウムエアロゾルが拡散した要因でもある。直接原因は、上記(6)と同様、手順書の記載が不適切であったことであり、根本原因及び寄与因子も上記(6)と同様である。改善策として、動燃は、状況に応じた空調設備の早期停止手順を検討し、その結果を踏まえて手順書を改訂する方針としているが、空調停止操作の必要性や時期・条件等に関する教育訓練を充実させることも必要であると考えられる。

## 4. ASSET手法に関する考察

IAEAのASSET手法を「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例に適用し、その有用性を確認すると共に、1つの事例に対する系統的かつ詳細な分析にASSET手法を適用する際の問題点を抽出した。本章では、これらの点について考察する。

### 4.1 ASSET手法の有用性

2章に述べたように、ASSET手法は、約2週間という短期間で行う必要があることから、数件の事例の各々において安全上重要と考えられる不具合（機器故障や運転員エラー等）だけを対象として、原因分析を行い改善策を提案・勧告するために開発・利用されている方法であり、事例の全体について詳細な分析を行うことを意図していない。しかし、重要な不具合については、その直接原因、根本原因並びに寄与因子を同定することとなっており、部分的には詳細な分析を行うことを基本としている。

本研究では、ある特定の不具合に絞らず、1つの事例全体にASSET手法の基本的考え方を適用し、系統的な原因分析を試みた。その結果、次節に述べるような問題点があるものの、当該事例において発生した不具合を同定し、直接原因と根本原因及びその寄与因子を識別・整理する方法として有用であることが確認できた。特に、

- ・ロジックツリーを作成することにより、対象事例において発生した不具合を同定する際に見落としを防ぐことできる、
- ・各不具合に対して、個別に、その直接原因、根本原因及び寄与因子を洗い出すため、それぞれについて具体的な改善策の検討を効率的に行うことができる

などの利点がある。

### 4.2 ASSET手法適用における問題点と改良案

一般に、安全上重要な事象は、単一の不具合によるものでなく、複数の不具合が重なって起こったことによるものである。こうした事象では、不具合の幾つかに因果的な関係があり、例えば、ある不具合が原因となって別の不具合を引き起こしたり（これを、「連鎖的因果関係」と呼ぶ）、ある1つの原因により複数の不具合が発生すること（これを、「共通原因的因果関係」と呼ぶ）がある。また、不具合は、必ずしも単一の原因（直接原因あるいは根本原因）によるものではなく、複数の原因が関わっている場合がある。このような不具合間の因果的な関係や、不具合と直接あるいは根本原因との間の関係を系統的に分析・整理するという観点から、ASSET手法における問題点を見出し、その改良案を検討した。その結果を以下に示す。

## (1) ロジックツリーに関する問題点と改良項目

## i) 不具合間関係の表現

ASSET手法では、不具合間の関係を、ロジックツリーで表現することとしているが、このロジックツリーは、不具合の発生順序に着目して作成される。従って、不具合間の時間的關係と連鎖的因果關係は表現されるものの、その關係が単に時間的なものなのか、あるいは、因果的なものなのかの區別がなされていない。この2種類の關係を明確に表現するために、図3.2に示したように、ロジックツリーにおける表記方法を改良することが望ましい（同図では、実線矢印が連鎖的因果關係、破線矢印が時間的關係を示している）。

## ii) 共通原因的因果關係の表現

複数の不具合の発生に1つの原因が関わっている場合には、その共通原因が何であるかを同定し、それを取り除くための対策を検討することが不可欠である。しかし、ASSET手法におけるロジックツリーでは、不具合だけを対象としているため、不具合間の共通原因的因果關係を表現することは不可能である（あるいは、極めて困難である）。これは、ASSET手法が全ての不具合を対象としたものでなく特定の不具合に着目して分析を行うこと意図しているため、仕方のないことであろう。従って、共通原因を見落とすことなく同定し、不具合間の關係を明らかにするためには、ロジックツリーを詳細化することにより、各不具合の直接原因や根本原因まで遡って展開することが有効であると考えられる。例えば、本研究では、図3.3(b)に示したように、詳細ロジックツリーを作成したことで、“原子炉手動トリップ操作の遅れ”、“漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”、及び、“漏えい規模の誤判断”という3つの不具合が全て、1つの直接原因、“（手動トリップ操作に関する）異常時運転手順書の記載不備”によるものであることを明確に表現することが可能となった。

## iii) 不具合—直接／根本原因間關係の表現

ASSET手法では、不具合とその直接／根本原因の關係を、原因分析フォーマットにおいて表現することとなっているが、後述するように、1つの不具合について複数の直接／根本原因が存在する場合の対応づけが困難であるという問題点がある。こうした問題点は、詳細ロジックツリーを作成し不具合と直接／根本原因及び寄与因子との間の關係を視覚的に表現することによって解決できると考えられる。例えば、図3.3(a)に示したように、詳細ロジックツリーを作成したことで、“温度計さや管の破損”には、2つの直接原因、“設計不良”と“設置不良”が関わっており、それぞれに対する寄与因子や根本原因を明確に対応付けることが可能となった。

## (2) 原因分析フォーマットに関する問題点と改良項目

## i) 不具合間關係の表現

ASSET手法では、不具合間の關係はロジックツリーで表現することとしており、原因分析フォーマットには、こうした關係を記入するフィールドが用意されていない。そのため、

原因分析フォーマットからは、他の不具合との関係が把握できず、各不具合はそれぞれ独立に発生したという印象を受けやすい。しかし、不具合によっては、別の不具合の原因となったり、あるいは、結果として生じた場合もあり、このような連鎖的因果関係を原因分析フォーマットに明記することは、不具合の発生過程を理解する上での助けになるものと考えられる。例えば、表3.1(c)に示したように、各不具合ごとにその結果として発生した不具合及び発生要因となった不具合を記入するフィールドを設ける等、原因分析フォーマットを改良することにより、“漏えい現場確認・連続監視の不徹底”が“漏えい規模の誤判断”（「発生要因となった不具合」）に起因し、“原子炉手動トリップ操作の遅れ”（「当該不具合による結果」）をもたらしたことを容易に理解できる。

#### ii) 不具合—直接/根本原因間関係の表現

図2.3から分かるように、ASSET手法における原因分析フォーマットは、1つの不具合に対して、その直接原因と根本原因を記入するためのフィールドが1つずつしか用意されておらず、仮に、複数の直接原因とそれに伴う複数の根本原因をそれぞれ該当するフィールドに記入すると、直接原因と根本原因間の対応が不明確になる恐れがある。従って、1つの不具合には複数の直接原因があり、さらに、それぞれについて複数の根本原因があるという前提にたつて原因分析フォーマットを改良する必要があると考えられる。例えば、表3.2(c)に示したように、“漏えいの現場確認・連続監視の不徹底”という不具合には、“異常時運転手順書の記載不備”と“監視装置・警報表示の不適切な設計・設置”が直接原因として関わっており、さらに、それぞれの直接原因に対する根本原因や寄与因子として如何なる問題が関与しているかを容易に理解することができる。

#### iii) 直接/根本原因及び寄与因子に関する具体的内容の表現

ASSET手法では、不具合はその内容が分かるように事例情報に沿って具体的に表現されるものの、直接原因、根本原因及び寄与因子については、例えば、“～に関する手順書記載内容の不備 (Inadequate instructions in procedures to …)” というように、概念的な表現であり具体性に欠ける傾向があるため、実際に顕在化した欠陥や不備に関する具体的内容を適切に表しているとは言い難い。この点については、表3.1及び3.2に示したように、原因分析フォーマットに、対応する事実を明記するためのフィールドを追加することが望ましいと考えられる。このように事実との対応を示すことは、直接原因や根本原因として明らかとなった問題点について具体的な改善策を検討する際の助けになるものと考えられる。

### (3) その他の問題点

ASSET手法では、直接原因、根本原因及び寄与因子として如何なる項目を取り上げるべきかに関する定義が概念的であるがゆえ、実際に分析を行うにあたっては分析者の主観的判断に依存せざるを得ない。しかし、この種の問題は、様々なタイプを具体的に例示することで解決されると考えられ、ASSET手法のガイドラインを充実させる必要がある。

## 5. おわりに

本報告書では、IAEAのASSET活動において用いられている根本原因分析手法（ASSET手法）の概要について述べると共に、それを「もんじゅ」ナトリウム漏えい事例に適用した結果を示した。ASSET手法は、短期間で数件の事例を対象とし、安全上重要な機器故障や運転員エラー等の不具合を同定し、その直接原因、根本原因及び寄与因子を分析・整理して改善策の提案・勧告を行うための方法である。

公開情報を基に、ASSET手法を用いて「もんじゅ」事例の分析を行った結果、“ナトリウム漏えい及び火災の拡大”事象に関して、以下に示す7つの不具合を同定し、それぞれの不具合について、直接原因、根本原因及び寄与因子を抽出し系統的に整理した。

- (1) 温度計さや管の破損
- (2) 原子炉手動トリップ操作の遅れ
- (3) 漏えいの現場確認・連続監視の不徹底
- (4) 漏えい規模の誤判断
- (5) 不要な操作（タービントリップ操作）の実行
- (6) 緊急ドレン操作の遅れ
- (7) 空調設備停止操作の遅れ

このうち、(2)、(3)、(4)、(6)及び(7)の不具合は、異常時運転手順書の記載が不適切であったことに起因しており、その背後にある根本原因としては、手順書作成時においてその内容が十分吟味・検討されていなかったことを抽出した。また、この寄与因子として、手順書の作成プロセスやチェック体制が十分機能していなかったことを取り上げた。さらに、教育訓練プログラムが現実の状況に則した内容となっていなかったことが根本原因あるいは寄与因子として関わっていることを明らかにした。一方、(1)及び(5)の不具合は、それぞれ、温度計さや管の設計不良及び運転員の手順違反によるものであるが、その背後にある根本原因は、設計段階において温度計の応答性を重視したこと、及び、原子炉手動トリップ操作時に通常停止操作の手順を先行させたことであり、いずれも、安全性に対する認識や配慮に欠けていたという共通の問題があることを明らかにした。また、これらの不具合に関する寄与因子として、設計品質管理の体制、情報の分析体制、運転の体制といった組織上の問題点を抽出した。

さらに、本報告書では、各不具合の直接原因、根本原因及び寄与因子について改善策を整理・検討した。具体的には、運転手順書や訓練プログラムの改訂・整備、漏えい監視装置の改良・整備など、既に動燃やSTAが提示している改善策を、直接原因、根本原因及び寄与因子に対応づけて整理した。しかし、手順書の作成過程や体制など幾つかの問題点に関しては具体的な方針が示されていないものもあり、これらについては、新たに改善策を検討した。

また、本研究を通して、事象の直接原因や根本原因等を系統的に分析・整理し、それぞ



れに対して具体的な改善策を検討するにあたって、ASSET手法が有用性の高いものであることを確認すると共に、不具合間の因果律的關係に関する表現方法をはじめ幾つか改良すべき点があることを明らかにした。

なお、本報告書では、各々の直接原因、根本原因及び寄与因子について、対応方針が既に提示されているものと未提示のものとを区別して改善策を整理しており、現在進められている「もんじゅ安全性総点検」において具体的な改善策を検討する際に役立つことを期待する。

## 参考文献

- [1] F. Reisch, "The IAEA-ASSET Approach to Avoiding Accidents is to Recognize the Precursors to Prevent Incidents", Nuclear Safety Vol. 35, No. 1, pp.25-35, 1994.
- [2] IAEA, "Information Leaflet : The ASSET Services", 1994.
- [3] IAEA, "ASSET guidelines", IAEA-TECDOC-632, 1991.
- [4] 原子力安全委員会、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅ2次系ナトリウム漏えい事故に関する調査審議の状況について"、1996.
- [5] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の調査状況について"、1996.
- [6] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の報告について"、1996.
- [7] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明結果について"、1997.
- [8] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて"、1995.
- [9] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて(第2報)"、1995.
- [10] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて(第3報)"、1996.
- [11] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故について(回答)"、1996.

れに対して具体的な改善策を検討するにあたって、ASSET手法が有用性の高いものであることを確認すると共に、不具合間の因果律的關係に関する表現方法をはじめ幾つか改良すべき点があることを明らかにした。

なお、本報告書では、各々の直接原因、根本原因及び寄与因子について、対応方針が既に提示されているものと未提示のものとを区別して改善策を整理しており、現在進められている「もんじゅ安全性総点検」において具体的な改善策を検討する際に役立つことを期待する。

## 参考文献

- [1] F. Reisch, "The IAEA-ASSET Approach to Avoiding Accidents is to Recognize the Precursors to Prevent Incidents", Nuclear Safety Vol. 35, No. 1, pp.25-35, 1994.
- [2] IAEA, "Information Leaflet : The ASSET Services", 1994.
- [3] IAEA, "ASSET guidelines", IAEA-TECDOC-632, 1991.
- [4] 原子力安全委員会、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅ2次系ナトリウム漏えい事故に関する調査審議の状況について"、1996.
- [5] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の調査状況について"、1996.
- [6] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の報告について"、1996.
- [7] 科学技術庁、"動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明結果について"、1997.
- [8] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて"、1995.
- [9] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて(第2報)"、1995.
- [10] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉もんじゅ40%出力試験中における2次系ナトリウム漏えいについて(第3報)"、1996.
- [11] 動力炉・核燃料開発事業団、"高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故について(回答)"、1996.