

JAERI-Tech
2004-051



JP0450522



HTTR水素製造システムの確率論的手法を用いた
可燃性ガス漏えい頻度評価
(受託研究)

2004年 6月

清水 明・西原 哲夫・森山 耕一*

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR 水素製造システムの確率論的手法を用いた

可燃性ガス漏えい頻度評価

(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

清水 明・西原 哲夫・森山 耕一*

(2004年4月22日受理)

日本原子力研究所の高温工学試験研究炉(HTTR)は核熱利用技術開発のためメタンの水蒸気改質による水素製造システムを接続することを計画している。本システムではこれまでの原子炉設備と異なり、原子炉に近接して大量の可燃性物質を取り扱うため、これらの存在を考慮した安全設計を行う必要がある。

本報告では、可燃性ガス漏えいの発生頻度について確率論的手法を用いて評価した結果を述べる。可燃性ガスを内包する機器、配管を系統別に区分し、安全設計で定めた緊急遮断弁の設置、可燃性ガス二重管化等の火災・爆発対策を勘案して、漏えいの発生頻度を計算した。火災・爆発の確率は漏えい確率と着火確率の積となるが、着火確率の評価は非常に困難であるために安全側に1として検討を進めた。このため、火災・爆発の防止に関する設計目標については漏えい発生頻度を $10^{-6}/\text{年}$ 以下に設定して、安全対策の妥当性を調べた。その結果、可燃性ガス配管の二重管化、計装配管の小口径化、漏えい検知器、漏えい遮断設備等が、火災・爆発の規模を小さくし、原子力プラントを災害から防護する上で有効であることを確認した。

本報告書は、文部科学省の受託研究「核熱利用システム技術開発」の中で実施されたものである。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

* 川崎重工業株式会社

Probabilistic Safety Assessment of Inflammable Gas Leakage
in the HTTR Hydrogen Production System
(Contract Research)

Akira SHIMIZU, Tetsuo NISHIHARA and Koichi MORIYAMA*

Department of Advanced Nuclear Heat Technology

Oarai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 22, 2004)

The High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) will be connected with a hydrogen production system by steam reforming of methane for development of nuclear heat utilization technology. Different from former nuclear facility, this facility will handle much inflammable gas near the nuclear reactor so that special safety consideration is necessary.

This report describes the Probabilistic Safety Assessment (PSA) of inflammable gas leakage in the HTTR hydrogen production system. Vessels and pipes, which contain flammable gas, were divided into several systems. Probability of gas leakage was calculated at all candidate places in consideration of the counter measures such as emergency shut off valves, double-covered pipes, nitrogen gas purge, and so on. Fire explosion occurs when both leakage and ignition occurs. As the probability of ignition is hard to evaluate, the analyses in this report assumed that "ignition probability is 1". Target value of flammable gas leakage probability was decided to be less than 10^{-6} /year, and effectiveness of countermeasures against fire explosion was evaluated.

As a result of assessment, the counter measures such as double-covered inflammable gas pipes, small diameter instrument pipes, leakage detector and emergency shut off valves, are confirmed to be very effective to minimize the scale of explosion and to prevent the damage on nuclear plant.

Keywords: HTTR, Hydrogen Production System, Steam Reforming, PSA, Safety Evaluation, Double Boundary Concept

Present study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

* Kawasaki Heavy Industries Co.,Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. HTTR 水素製造システムの概要	2
3. 火災・爆発に対する安全設計の考え方	5
4. 確率論的手法を用いた安全設計	8
4.1 評価手法	8
4.2 起因事象の選定	9
4.3 設計目標	10
4.4 可燃性物質漏えい頻度の評価結果	11
5. 問題点の検討	44
6. まとめ	46
謝辞	46
参考文献	48
付録 A 起因事象発生頻度の積算データ	49
付録 B 緩和機能のアンアベイラビリティ（不具合発生率）積算データ	58
付録 C 排風機と電源のアンアベイラビリティ（不具合発生率）	67

Contents

1.	Introduction	1
2.	Summary of HTTR Hydrogen Production System	2
3.	Basic Consideration for Fire Explosion Safety Design	5
4.	Safety Design using Probabilistic Safety Assessment	8
4.1	Method of Assessment	8
4.2	Identification of Initiating Events	9
4.3	Design Target Value of Accident Probability	10
4.4	Evaluation Results of Probability of Inflammable Gas Leakage	11
5.	Investigation of Problems	44
6.	Conclusion	46
Acknowledgements		46
References		48
Appendix A Probability of Primary Failure Occurrence		49
Appendix B Unavailability of Relief Measures		58
Appendix C Unavailability of Exhaust Fan and Electric Power Supply		67

1. はじめに

高温ガス炉は 950°C以上の高温のヘリウムガスを供給できることから、水素製造などの化学プラントの熱源として利用することができる革新的な原子炉である。日本原子力研究所では、高温ガス炉の基盤技術の確立、高温ガス炉の核熱を利用して水から水素を製造する熱化学法 IS プロセスの研究を進めている。そして、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(以下「HTTR」と呼ぶ)にメタンの水蒸気改質による水素製造施設を接続し、原子炉と水素製造設備の接続技術の開発を目指した水素製造実証試験を計画している。

HTTR に水素製造設備を接続するためには、原子炉と化学プラントを調和させた運転制御技術の開発が必要である。さらに、原子炉に近接して大量の可燃性物質を取り扱う水素製造設備を設置することにより、新たに火災・爆発に対して安全設計および安全評価を実施する必要がある。そこで、HTTR に水素製造設備を接続した HTTR 水素製造システムを対象として、システム系統設計や機器配置設計などと並行して火災・爆発対策を中心とした安全設計を実施してきた。

本報告では、安全設計の中で実施した火災・爆発対策の検討結果に基づき、それらの対策の有効性を確認する目的で実施した確率論的手法に基づく可燃性物質漏えい事故の発生頻度の評価結果を示す。なお、今回実施した確率論的評価では地震による影響は考慮していない。

2. HTTR 水素製造システムの概要⁽¹⁾

現在計画中の水蒸気改質法を使った HTTR 水素製造システムの概要は以下の通りである。

(1) 全体構成

HTTR 原子炉本体と水素製造施設とを結合した HTTR 水素製造システムの全体鳥瞰図を、図 2.1 に、水素製造施設の鳥瞰図を図 2.2 に示す。水素製造に直接関連する水蒸気改質器、蒸気発生器等の設備は原子炉建家の近傍に設置することを考えているが、原料である液化天然ガス (LNG) 貯蔵と供給のためのタンク等の設備は建家から充分離れた場所に設置する。

(2) 水素製造プラント

水素製造プラントは、図 2.3 のヒートマスバランスに示したように、中間熱交換器で 905°Cまで加熱された高温の 2 次ヘリウムガスを、880°Cで水蒸気改質器に供給し、原料となる天然ガスと水蒸気から、水蒸気改質反応により水素ガスを製造する。原料となる天然ガスの予熱には製品ガスの持つ余熱を利用する。2 次ヘリウムガス系、給水系、原料ガス供給系、後処理系、不活性ガス系のうち、可燃性ガスを内蔵するのは、図中で配管を太線あるいは三本線（二重管）で示した原料ガス供給系と後処理系であるので、本評価では特にそれらの系統と機器からの漏えいを検討する。

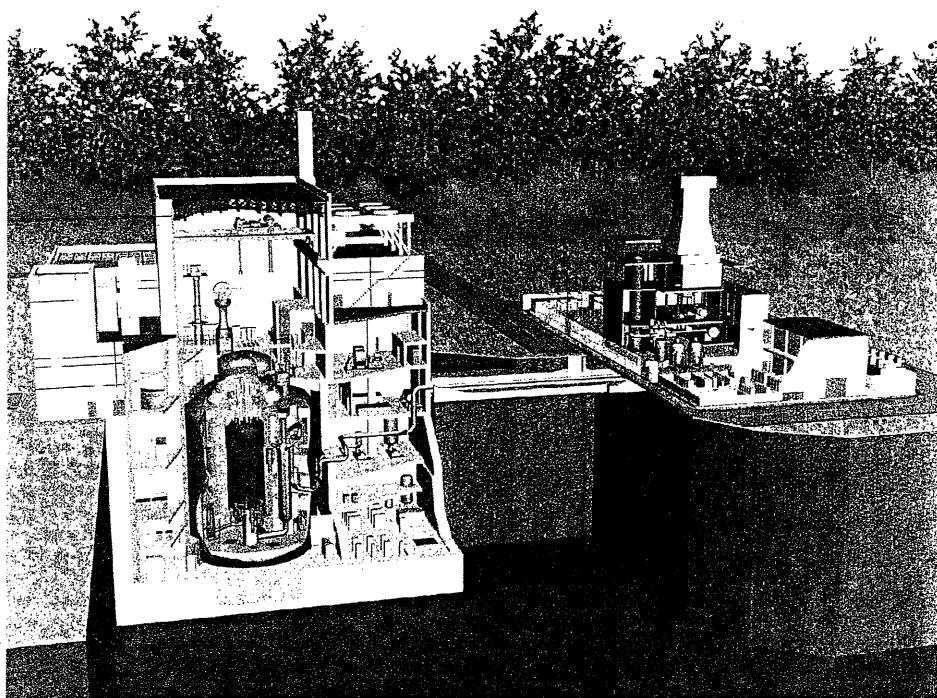


図 2.1 HTTR 水素製造システム 全体鳥瞰図

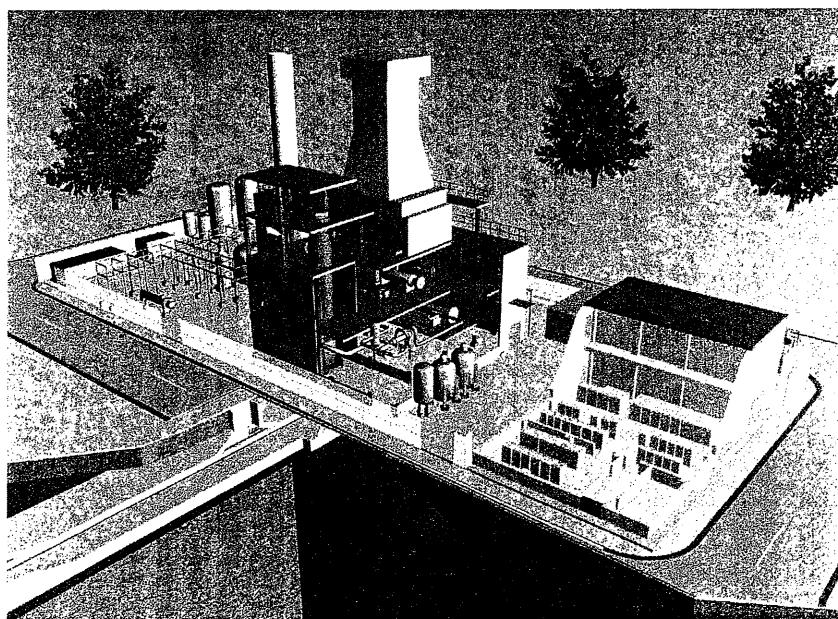


図 2.2 水素製造施設 鳥瞰図

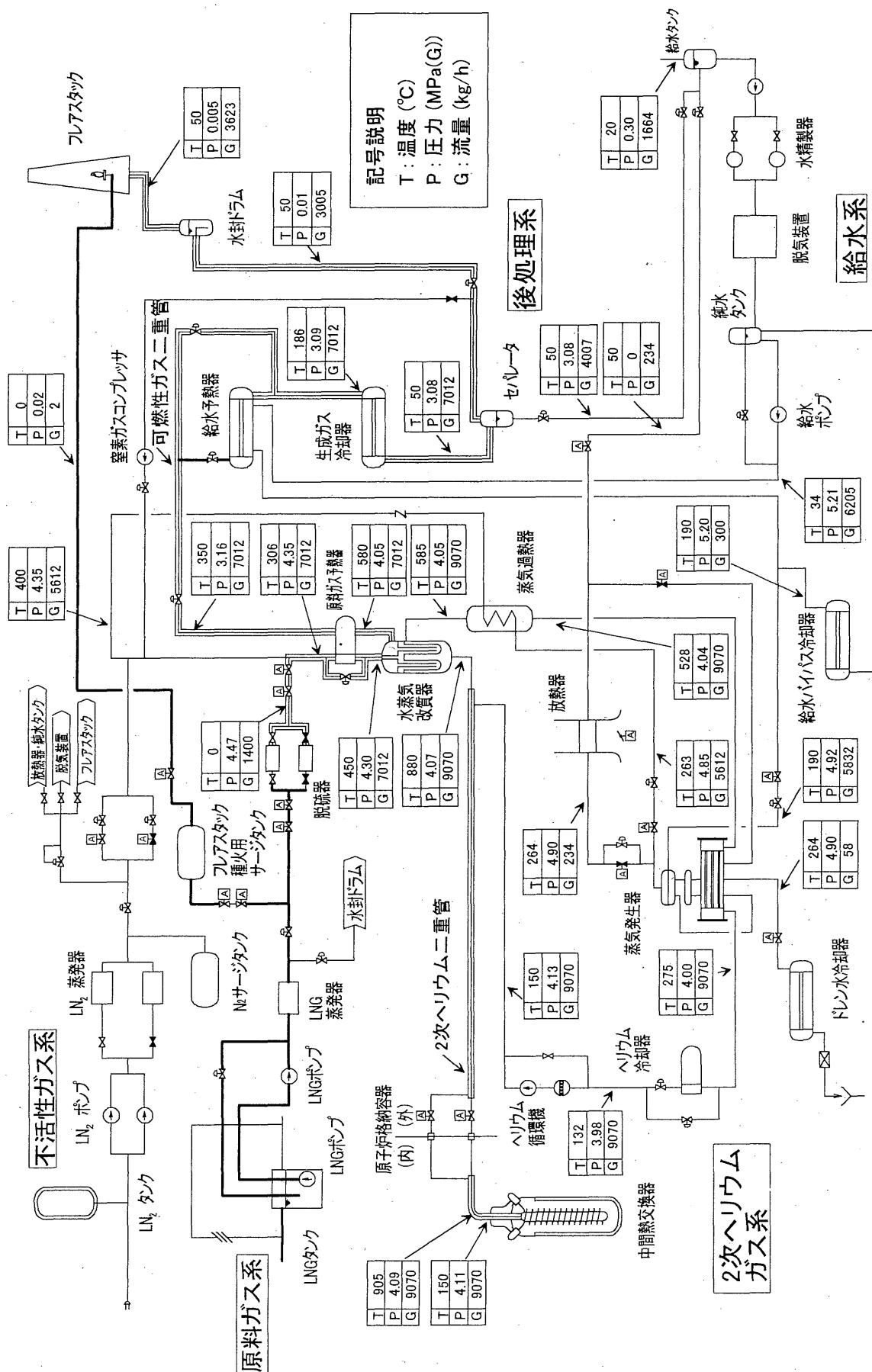


図 2.3 HTTR 水素製造システムのヒートマスマバランス

3. 火災・爆発に対する安全設計の考え方

従来の原子炉施設では、潜在的な爆発の発生を排除する為に施設周辺では大量の可燃性物質を取り扱わないことを設計方針としていた。しかし、HTTR 水素製造システムでは、原子炉で加熱した高温のヘリウムガスを水蒸気改質器に供給し水蒸気改質反応により水素を効率的に生産する為に、水蒸気改質器、原料ガス予熱器等の設備を原子炉近傍に設置する必要がある。そのため、原子炉の周辺で大量の可燃物を取り扱うこととなる。そこで、水素製造システムの基本設計方針を以下のように定めた。

- ① HTTR 水素製造システムで取り扱う原料としての天然ガスもしくは製品の水素ガスの漏えいを考慮した安全設計を行い、原子炉の安全機能を損なわないようにする。
- ② 深層防護（発生防止、拡大防止、影響軽減）の考えに基づいて安全対策を施す。

火災・爆発対策として、原子炉建家外部で発生する火災・爆発に対する事故の発生防止及び拡大防止については、一般プラントの対策を参考に対策を具体化することにした。さらに影響緩和策として原子炉の安全上重要な機器・構造物が有意な被害を受けないよう必要な離隔距離を取ることとした。

原子力施設あるいは化学プラントに適用される一般的な安全上のガイドラインは下記の 5 項目である。

- (1) 安全機能を有する系統、機器は実用上可能な限り不燃性または難燃性の材料を用いる。
- (2) 可燃性ガスを内蔵する機器、配管は充分な強度、耐食性、安全性を持たせる。
- (3) 早期の火災検知と消火のために、消火設備を設置する。
- (4) 安全機能を有する系統、機器の区画は、重要度に応じ隣接区画からの影響軽減策を講じる。
- (5) 想定される火災に対して、原子炉を停止できると共に残留熱を除去できる設計とする。

そして、HTTR 水素製造システムでは、下記の 4 項目を追加した。

- (6) 可燃性ガスを内包する配管を二重バウンダリ化する。
 - ・ 大口径の配管を二重バウンダリ化（二重管化）することで格納機能を強化し、内管が破損した場合でも、漏えい防止の障壁を増やす事で、大気への漏えいの確率を減らす。
- (7) 可燃性ガスの漏えい量を低減するため容器を小型分散化する。
 - ・ これにより万一の漏えいが起こった場合の最大漏えい量を抑制する。
- (8) 可燃性ガスの漏えいを検知する為の、漏えい検知設備と緊急遮断弁を拡充する。
 - ・ 系統、機器を区画化する為に緊急遮断弁を設置し、漏えいを検知した際はそれらを閉止し他区画からの可燃性ガスの流入を抑止する。二重管化した部分については、その第 2 の障壁となる外管内のアニュラ一部に圧力計とガス検知器を設置する。二重バウンダリ化していない部分については、漏えい想定場所近傍の大気中に、漏えい検知システムを設ける。さらに、漏えい検知した場合は格納された系内は窒素ガスによるバージを行い、機器、配管内部での爆発を防止する。

(9) 破断想定個所と原子炉との間に、充分な離隔距離をとる。

- ・漏えいした可燃性ガスに、万一着火し爆発が起こった場合でも、その爆風で原子力施設の安全機能が損なわれることが無い様に、原子炉と漏えい個所を充分に離した設計とする。

それらの安全対策を系統図中に示したのが図3.1である。これらの対策の有効性を以下のとおり確率論的安全評価で確認することとした。

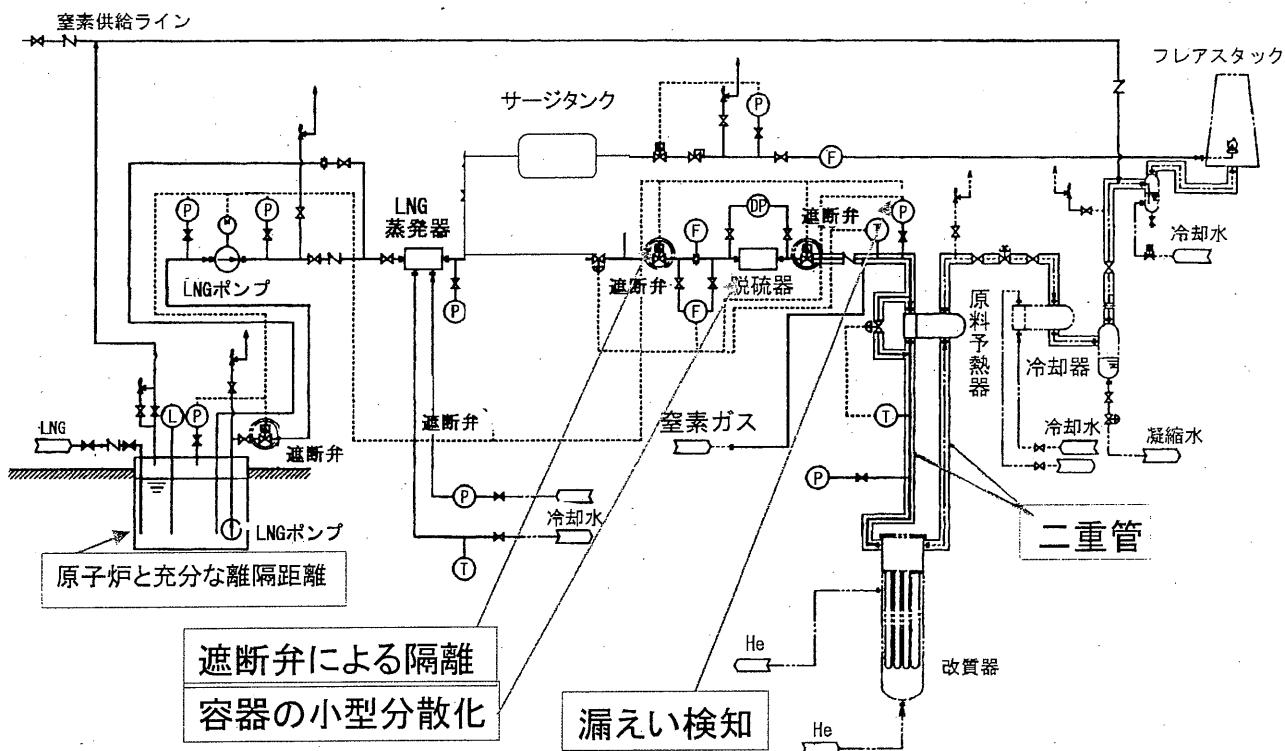


図3.1 火災爆発に対する安全対策（設計対応）

4. 確率論的手法を用いた安全設計

我が国における原子炉施設は、異常の発生防止、異常の拡大防止と事故への発展の防止、放射性物質の異常な放出の防止、といふいわゆる多重防護の思想に基づいて設計されており、通常運転時のみならず事故時も、放射線による危険から周辺公衆及び従事者の健康と安全を確保することを基本原則としている。確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment : PSA)とは、対象施設で起こりうる事故のシナリオを同定し、その発生頻度と影響を評価する体系的な手法であり、原子力発電所の安全性の評価に広く用いられている。PSAにおける事故の発生頻度の評価では、多くの場合、事故の発端となる事象（起因事象）を出発点として、故障の進展（各種の安全装置の成功あるいは失敗）の組合せを枝分かれ式に展開したイベントツリー（Event Tree: ET）と呼ばれる樹状図を作成し、起因事象の発生頻度とそれぞれの分岐点での成功あるいは失敗の確率を掛け合わせて最終的な事故の発生頻度を算出⁽²⁾している。そこで、PSAを用いて可燃性ガスの漏えい発生頻度を評価し、火災・爆発対策に関して、現状設計の妥当性の確認を行った。そして、安全目標を満足しないケースについては、可燃性ガス漏えい確率と漏えい量を推定し、今後の設計の方向性を定めた。

4. 1 評価手法

(1) 評価の手順

PSAは原子炉施設にとって、ある望ましくない事象（起因事象）が発生した場合に、その施設における事象の進展を整理して、その発生確率を推定しリスクを評価するものである。まず事故の発生に至る安全装置の故障進展の組み合わせ（事故シーケンス）を同定し、イベントツリーと呼ばれる図4.1に示すような樹状図を作成する。起因事象が起きたとき、その拡大防止や影響緩和のために備えている安全設備が機能しなかつたときに事故に進展するため、不具合発生の起因事象の確率と、緩和機能を持った安全装置の不具合発生確率（アンアベイラビリティ）を各分岐点で与え、その積を計算することにより、中間あるいは末端に現れる種々の事象の発生確率が計算される。

(2) 検討条件

検討の対象とする系統・設備は、図4.2 原料ガス供給系配管系統図と、図4.3 後処理系配管系統図の配管と機器とする。

本系統・設備は、原子力設備では無いが、充分高い品質保障を実施することを前提として、使用する機器故障率データは、原則として下記の原子力安全研究協会（以下「原安協」と呼ぶ）の原子力発電所信頼性データ調査専門委員会において整備された「評価済PSA用機器故障率データベース⁽³⁾」を用いた。

また、その他の故障率データベースとして、下記等を必要に応じ参照することとする。

• WASH-1400⁽⁴⁾

- NUREG/CR-4550⁽⁵⁾
- IEEE Std 500-1984⁽⁶⁾

なお、今後は水素製造システムが化学プラントであることを考慮し、より適切なもの例ええば、AIChE で発行している化学プラント用のデータベース等を使って今回の評価の見直しを行うべきと考えている。

4. 2 起因事象の選定

HTTR 水素製造システムにおける可燃性ガス漏えいによる火災・爆発発生の可能性は、漏えい発生場所に応じて期待される緩和機能、及び事象推移を考慮して評価するのが合理的である。そこで、可燃性ガスの漏えい発生場所として、系統図から可燃性ガスを貯蔵または輸送する容器、配管等を網羅し、そこからメタンガス、水素ガスといった可燃性ガスが漏えいする事象を 8 項目の起因事象として整理した。起因事象を発生場所の観点から体系的に分類しこれらの 8 項目起因事象に至るまでの論理を、マスターロジックダイアグラムとして、図 4.4 に示す。尚、今回はこの起因事象の選定では、可燃性ガスの放出の原因として機器と配管のバウンダリ破損を考えたが、弁の誤開放は考慮しなかった。弁の誤開放を考慮しなかったのは、現設計において安全弁以外で可燃性ガスを大気放出するラインを考えていなかった為である。今後の設計の進歩により、弁の誤作動による可燃性ガスの漏えいが考えられる場合には、静的機器の破損と動的機器の誤作動を考慮する必要がある。

起因事象の発生場所を系統図上に示したのが、図 4.5 である。

(1) 水蒸気改質器触媒管破損 + 建家内 2 次ヘリウム配管破損 (起因事象①)

通常であれば、水素製造施設にあり可燃性ガスを内蔵する水蒸気改質器と原子炉を接続する配管には 2 次ヘリウムが流れしており、可燃性ガスが原子炉建家内に漏えいするとは考えられない。しかし、水蒸気改質器触媒管破損と建家内 2 次ヘリウム配管破損が連続して発生した場合は、水蒸気改質器の可燃性ガスが 2 次ヘリウム配管を経由して、原子炉建家内へ漏えいする恐れがある。これを起因事象①とする。

(2) 可燃性ガス二重管の内管の破損 (起因事象②)

HTTR 水素製造システムにおいては、図 4.6 のように可燃性ガスの漏えい防止を目的として、原料ガス配管あるいは後処理配管を二重管として、外管には窒素を封入する方式を探っている。万一、内管で漏えいが発生しても、外管が第 2 の障壁となりアニュラ一部の圧力変化の検知あるいはガス検知により、内管の漏えいが検知され、原料ガスの遮断とアニュラ一部の掃気が行われる。

この可燃性ガス二重管の内管漏えいを起因事象②として選定する。

(3) 二重バウンダリ化していない部分の破損 (起因事象③)

原料ガス供給系と後処理系の配管、弁、容器のうち、雰囲気への可燃性ガス漏えいを防止するための二重バウンダリ化をしていない計装用小口径配管、弁、容器部分での漏えい事象を起因事象③として選定する。

(4) フレアスタック種火の燃焼維持失敗 (起因事象④)

何らかの原因で、フレアスタックで種火とフレアスタックの火が消え、生成ガスが未燃焼

で放出される事象を起因事象④とする。緩和機能を持った装置としては種火の消失を検知し、窒素ガスを供給し希釈放出する様な安全設備が設置されている。

(5) フレアスタック用種火燃料供給管破損 (起因事象⑤)

フレアスタックへの種火燃料供給ラインでの破損により、原子炉建家近傍に種火用の可燃性ガスが漏えいする恐れのある事象を起因事象⑤とする。ガス漏えい検知器の信号により原料ガス系の各遮断弁の閉止措置がとられるなお、種火用ガスの漏えいによりフレアスタックの燃焼維持に失敗し、未燃焼ガスが滯留することについては上記の(4)に含まれるものと考える。

(6) LNG タンク破損 (起因事象⑥)

LNG タンクの破損により、LNG タンクフード内へ可燃性ガスが漏えいする恐れのある事象を起因事象⑥とする。LNG タンクフードは常に排風機により、可燃性ガスが漏えいしても、希釈放出がなされるが、タンク破損の直後に、続けて排風機停止が発生した場合は火災発生の恐れがある。

(7) LNG 貯蔵エリア内の原料ガスバウンダリ破損 (起因事象⑦)

原子炉建家から比較的距離のある LNG 貯蔵エリア内での、原料ガス供給系の容器あるいは伝熱管の破損で、可燃性ガスが漏えいする恐れのある事象を起因事象⑦とする。容器の破損としては、原料ガス供給系を緊急遮断弁で区分される各領域に区分しその領域にある代表的な容器として、LNG 蒸発器 (⑦-1)、活性炭脱硫器 (⑦-2)、フレアスタック種火用サージタンク (⑦-3) を選定した。容器が破損し、大気中に可燃性ガスが漏えいした場合は漏えいを検知して、すぐに漏えいのあった容器の上流と下流の配管に設置された緊急遮断弁を閉め、容器を系から隔離することで、漏えい量を抑えるようにしている。また、熱交換器の内部破損として、LNG 蒸発器の伝熱管破損 (⑦-4) を考える。伝熱管破損の場合、LNG 蒸発器の熱源が大気の場合は漏えい個所が LNG 貯蔵エリアであり原子炉からの離隔距離が充分であるが、水素製造システムの現設計は熱源として冷却水を併用している為、冷却水配管を通じて、可燃性ガスが原子炉近傍まで運ばれることも考えられるので、検討対象とする。

(8) LNG ベントライン破損 (起因事象⑧)

原子炉建家近傍も通る LNG ベントラインの破損で、可燃性ガスが漏えいする恐れのある事象を起因事象⑧とする。

4. 3 設計目標

IAEA の諮問機関である国際原子力安全諮問グループでは、原子力プラントの安全目標として、新設炉の炉心損傷の発生確率は 10^{-5} /年以下とする定量的な目標を示しているが⁽⁷⁾、原子炉と化学プラントの複合プラントに対する、火災・爆発の発生頻度の安全目標値は無い。「石油コンビナートの防災アセスメント策定指針 (=旧指針 平成6年3月消防庁特殊災害室)」では、発生確率が 10^{-6} /年以下では、災害の影響評価を不要としている⁽⁸⁾。そこで、それを参考に本プラントの火災・爆発発生頻度の安全目標を 1.0×10^{-6} /年以下とした。

火災は漏えい個所の近傍に着火源がある場合に発生する。しかし、今回の評価において①着火源の存在の仮定、②可燃性混合気形成に寄与する地形、機器配置等の形状的効果、③気象条

件、などを考慮するのは、データ不足であり、また論理が複雑となりすぎるため適切ではないと考える。そこで、火災・爆発の発生頻度の代わりに、可燃性ガスの漏えいの頻度を評価対象とすることとした。

4. 4 可燃性物質漏えい頻度の評価結果

可燃性物質漏えいの発生頻度はイベントツリーを展開し、安全機能の有無（作動、不作動）を考慮して求められる。そこで、インタロック線図およびシステム系統図の情報に基づき、起因事象の発生に対して、可燃性ガス漏えいを緩和する方向に期待される事象緩和機能あるいはそれを遂行する設備、またそれらの設備用の電源、圧縮空気等のサポート系の作動成功あるいは失敗を組合せ、イベントツリーを作成した。

イベントツリーで考慮した緩和機能を整理した結果を表 4.1 に示す。各起因事象に対する可燃性物質の漏えい発生頻度の評価に当たっては、この表をベースに、分岐確率を記載した緩和機能をヘッディングにおき、イベントツリーを展開した。また確率を示す有効数字については、発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティを示す表とイベントツリー中では、計算中で桁落ちが発生しないように 3 桁で表示しているが、計算の根拠とした原安協の信頼度のデータは有効数字 2 桁であり、さらに計算の中途では安全側に数値を切り上げてきりの良い数値に丸める処置も行っているので、最終的に積算して各起因事象毎の最終的な可燃性ガス漏えい率をまとめて評価する際は有効数字 2 桁に戻し本文中に記載する。

(1) 水蒸気改質器触媒管破損 + 建家内 2 次ヘリウム配管破損 (起因事象①)

1) イベントツリー

水蒸気改質器触媒管破損が先に起こり引き続き建家内 2 次ヘリウム配管破損が発生する場合のイベントツリーを図 4.7 に、建家内 2 次ヘリウム配管破損が先に起こり引き続き水蒸気改質器触媒管破損が発生する場合のイベントツリーを図 4.8 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティ（機能不全がおこる頻度）の設定根拠は、表 4.2 および表 4.3 に示す。

2) 評価

イベントツリーによる算定では、発生の順序にかかわらず、水蒸気改質器触媒管破損と 2 次ヘリウム配管破損が続けて 15 分以内に起こった場合に、可燃性ガスが原子炉建屋内に漏えいする。その他に、漏えい検知やパージ作業を実施した場合でも 2 次ヘリウムガス配管に漏えいした可燃性ガスはそのまま配管内に残留し、2 次ヘリウム純化設備による可燃性ガスの除去作業に時間がかかることを考慮し、1 週間以内に 2 番目の障壁の破損がある場合の頻度も合計して、可燃性ガス漏えい事象の確率とした。水蒸気改質器触媒管破損が先行する起因事象(①-1)の漏えい確率 4.4×10^{-10} /年と 2 次ヘリウム配管破損が先行する起因事象(①-2)の漏えい確率 1.5×10^{-10} /年をあわせて、原子炉建家への可燃性物質の侵入事象の発生頻度は 5.9×10^{-10} /年であり、目標値 1.0×10^{-6} /年以下を満足する。

(2) 可燃性ガス二重管の内管破損（起因事象②）

1) イベントツリー

イベントツリーを図 4.9 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティの設定根拠は、表 4.4 に示す。

2) 評価

起因事象である可燃性ガス二重管の内管の破損の頻度は付録の表 A-1 のように原安協の示す配管漏えい故障率（5m を 1 セクションとし 1 時間あたりの故障率を示す）にセクション数と一年間の時間数を掛けて積算し、 $5.00 \times 10^{-4}/\text{年}$ とした。また外管の破損の頻度は、内管の破損の漏えい検知あるいはページに失敗していることを運転員が気づかない場合を仮定し、外管が一般機器であることから 24 時間以内に破損する確率とし、内管の破損と外管の破損の事象の従属性を考慮して安全率を 100 として $1.40 \times 10^{-4}/\text{demand}$ とした。

本事象については、可燃性ガス二重管のうち圧力バウンダリとなっている内管が破損した場合でも外管の格納機能により原子炉建家近傍へ可燃性物質を漏えいさせないことが安全設計の基本方針である。可燃性ガス二重管の内管の破損に続いて外管が破損し、原子炉建家近傍への可燃性物質の放出事象の発生頻度はこれらの頻度を掛け合わせて算出することで $7.0 \times 10^{-8}/\text{年}$ となる。この数値は目標値 $1.0 \times 10^{-6}/\text{年}$ 以下を満足する。

以上二重管部分が破損した場合については、外部への漏えいの頻度は非常に少なく問題の無いことはわかった。ただし、二重管部分は独立して存在するのではなく、次項で述べる二重バウンダリ化していない部分（配管、弁、容器）と結合している為、それらの弁あるいは容器が破損した場合は、その破損個所から、二重管内管の可燃性ガスも外部に漏えいする事を考慮しておかなくてはならない。二重バウンダリ化していない部分の破損で漏えいした場合の影響については次項以降で検討する。

(3) 二重バウンダリ化していない部分（配管、弁、容器）の破損（起因事象③）

1) イベントツリー

イベントツリーを図 4.10 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティの設定根拠は、表 4.5 に示す。

2) 評価

配管の破損頻度は付録の表 A-2 に示すように、原安協の示す配管漏えい故障率にセクション数と時間を掛けて積算した。弁の漏えい率には付録の表 A-3 に示すように、原安協の示す弁形式別の故障率 (/hr) に時間を掛けて積算した。容器の漏えい率については付録の表 A-4 に示すように、原安協の示す熱交換器あるいはタンクの外部リークの確率 (/hr) に時間を掛けて積算した。最終的には配管、弁および容器という 3箇所の外部漏えいの確率を合計して二重バウンダリ化していない部分からの漏えい頻度とした。図 4.10 に示すように、二重バウンダリ化していない部分で漏えいが発生する頻度は $2.0 \times 10^{-3}/\text{年}$ であり、雰囲気への漏えい発生頻度 $1.0 \times 10^{-6}/\text{年}$ 以下という目標は起因事象発生の段階で、既に満足できない。

雰囲気への漏えい発生頻度 1.0×10^{-6} /年以下という目標を満足できなかった事象に関しては、可燃性物質の大気中への漏えい量を推定し、原子炉建家側への影響が軽微であることを確認する必要がある。

なお、雰囲気への漏えい後、早期に漏えいの検知を行ない、遮断とページを行って漏えい量を限定することは可能である。

(4) フレアスタック種火の燃焼維持失敗（起因事象④）

1) イベントツリー

イベントツリーを図 4.11 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティの設定根拠は、表 4.6 に示す。

2) 評価

本事象は、原子炉建家近傍への可燃性物質の放出の恐れがあるが、フレアスタックへの窒素ガス注入により未燃ガスを希釈放出し、火災・爆発の発生を防止する設計対応をとっている。

イベントツリーによる算定では、希釈放出失敗の発生頻度は 2.4×10^{-7} /年であり、目標の 1.0×10^{-6} /年以下であり、目標を満足する。

(5) フレアスタック種火用燃料供給管破損（起因事象⑤）

1) イベントツリー

イベントツリーを図 4.12 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティ（故障率）の設定根拠は、表 4.7 に示す。

2) 評価

燃料供給ラインはフレアスタックへ種火用燃料を輸送するラインであり、原子炉建家近傍へ至るので、可燃性物質の放出を防止するという観点では、 5.0×10^{-4} /年の頻度で漏えいが発生し、 1.0×10^{-6} /年以下の目標を満足しない。本事象については、次章で漏えい量を考慮して原子炉施設への影響を評価する。

(6) LNG タンク破損（起因事象⑥）

1) イベントツリー

イベントツリーを図 4.13 に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティの設定根拠を、表 4.8 に示す。

2) 評価

LNG タンクフード内での漏えい事象の頻度は 2.0×10^{-4} /年だが、あらかじめ安全装置としてフードと排風機が設置され常時稼動しているので、それらの機器が機能喪失して希釈放出を失敗する頻度で評価する。希釈放出を失敗する頻度は、 4.2×10^{-9} /年の頻度であり、 1.0×10^{-6} /年以下の目標を満足する。

(7) LNG 貯蔵供給エリア内の原料ガスバウンダリの破損（起因事象⑦）

1) イベントツリー

LNG 貯蔵供給エリアにある主要機器の原料ガスバウンダリ破損に関しては、遮断弁で切り分けられる領域ごとに展開した。LNG蒸発器領域破損（起因事象⑦-1）、活性炭脱硫器領域破損（起因事象⑦-2）、フレアスタック種火用サージタンク領域破損（起因事象⑦-3）について、それぞれ図4.14、図4.15、図4.16に示す。イベントツリーの考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティ（機能不全の確率）の設定根拠は、表4.9に示す。

LNG 貯蔵供給エリア機器の内部にあるバウンダリの破損についてはLNG蒸発器伝熱管破損（起因事象⑦-4）を選定しそのイベントツリーを図4.17に示す。その考え方および起因事象発生頻度／緩和機能のアンアベイラビリティの設定根拠は、表4.10に示す。

2) 容器破損による漏えい量の評価（起因事象⑦-1、⑦-2、⑦-3）

本事象の評価においては、概略の漏えい量と発生頻度の関係が見通せるようにイベントツリーを詳細に展開した。例えば、図4.14においてはLNG蒸発器の容器（周辺の配管と弁を含める）が破損した場合に破損の頻度自体は $2.0 \times 10^{-3}/\text{年}$ であるが、漏えいを検知し、LNG蒸発器の上流と下流の個々の緊急遮断弁の閉止動作の成功、失敗の組合せで、外部流出する可燃性ガスの容積が異なる。内蔵する天然ガスが漏えいするタンクについては●印で表示した。事象番号⑦-1-2では、LNG蒸発器外部破損により可燃性ガスの漏えいが始まるが、漏えい検知に成功したため安全装置が作動し、LNGポンプA出口、LNGポンプB戻りライン、活性炭脱硫器入口、フレアスタック燃料供給ラインの各弁については閉止に成功し、フレアスタック種火用サージタンク入口の緊急遮断弁の閉止には失敗する確率は、 $2.22 \times 10^{-8}/\text{年}$ という計算結果となった。その場合の可燃性ガスの外部漏えい量は漏えいを起こしたLNG蒸発器に内蔵する天然ガス量81kgと、連結する配管に設置した緊急遮断弁の閉止に失敗したフレアスタック種火用サージタンクの内容量145kgの合計226kgで、これが容器の内外の差圧で短期に外部流出する。同様にそれぞれの最終的な事象毎に図4.14の右表は内蔵の可燃性ガスが流出する容器を●印で表示している。また各タンクの可燃性ガス内容量は図中央の表にタンク名称毎に示す。

LNGポンプA出口の遮断弁の閉止失敗あるいはLNGポンプB戻りライン弁閉止失敗により、LNGタンク内で自然蒸発した可燃性物質がLNG蒸発器破損部から漏えいするケースを事象番号⑦-1-7に示している。LNGタンクは液化した状態で保存されているため、それがタンクの保温材を通しての入熱による自然蒸発によりいったん気化してから漏えい個所を通じて大気に放出されるので、LNGタンク内蔵の液化天然ガスは短期漏えいは起こさず少量の長期漏えいの可能性があるという意味でLNGタンクについては△印で表示した。事象番号⑦-1-13は、LNGポンプA出口の遮断弁閉止失敗とポンプAトリップ失敗が重なった場合で、LNGが定格使用量（約400g/s）程度LNG蒸発器において蒸発し、長期放出が継続するという意味で

LNG タンクについては○印で表示した。もちろんポンプのトリップに失敗しても、運転員が異常に気づきポンプを停止あるいはLNG ポンプ A 出口弁を手動閉止した時点で LNG タンク関連のガス放出は終了する。

LNG 貯蔵供給エリアに設置する原料ガス供給系の機器および配管においては、原子炉本体との離隔距離を充分とることを前提として、ある程度の可燃性物質の放出を許容するという安全設計の基本方針を定めている。その為、図 4.14 のイベントツリーの右表で●印をつけた容器の内容量を合計したものが各最終事象の短期の漏えい放出量となるので、漏えい量に対する累積発生頻度分布 (CFD : Cumulative Frequency Distribution) を作成した。LNG 蒸発器領域破損、活性炭脱硫器領域破損、およびフレアスタック種火用サージタンク領域破損のシーケンスを合成した累積発生頻度分布を図 4.18 に示す。145 kg の放出量を超える事象は安全目標 1.0×10^{-6} /年以下となることがわかる。

3) LNG蒸発器伝熱管破損の評価（起因事象⑦-4）

LNG 蒸発器伝熱管破損の事象では、加圧された LNG もしくは加圧された原料ガスが冷却水ラインへ侵入し、過圧による冷却水バウンダリの破損から、あるいは冷却水ラインを流れた後にクーリングタワーから原子炉建家近傍への放出が考えられる。放出の発生頻度は 3.0×10^{-3} /年と推定され、目標値である漏えい確率 1.0×10^{-6} /年をオーバーした。これについては、設計の変更が必要である。そこで具体的な設計改訂案について次章に記載する。

（8）LNGベントライン破損の評価（起因事象⑧）

LNG ベントラインの配管は LNG 貯蔵供給エリアから水素製造エリアのフレアスタックまで配置される。現設計ではなんら対応する緩和機能がないのでイベントツリーに展開せず、漏えい確率のみ算定した。

フレアスタックへ BOG (Boiler Off Gas) を排出する LNG ベントラインの漏えい発生頻度は、現設計の呼び径 (100 A) および長さ (300 m) に基づき、配管破損のセクション当たり故障率を 1.80×10^{-10} /h、セクション数を 5 m 当たり 1 セクションと仮定すると 1.0×10^{-4} /年と推定される。従って安全目標を満たしていない。しかし漏えい量は少量であるので、具体的な漏えい量と原子炉に及ぼす影響については次章に記載する。

表 4.1 緩和機能の整理

起因事象	事象緩和機能	緩和機能を期待される設備 (安全装置)
水蒸気改質器触媒管破損 + 建家内2次ヘリウム配管破損	① 漏えい検知	2次ヘリウム中不純物濃度計 原料ガス／2次ヘリウム差圧計
	② 供給系遮断(改質器トリップ信号による)	活性炭脱硫器出口遮断弁(閉)
	③ 系内ページ(改質器トリップ信号による)	窒素ガス供給ライン遮断弁(開) 窒素ガス供給流量制御設備
② 可燃性ガス二重管の内管破損	① 二重管内格納	外管
	② 漏えい検知	二重管部圧力計 二重管部ガス検知計、圧力計
	③ 供給系遮断(改質器トリップ信号による)	活性炭脱硫器出口遮断弁(閉)
	④ 系内ページ(改質器トリップ信号による)	窒素ガス供給ライン遮断弁(開) 窒素ガス供給流量制御システム
③ 二重バウンダリ化していない部分の破損	① 漏えい検知	ガス漏えい検出器(濃度計二重化)
	② 供給系遮断(改質器トリップ信号による)	活性炭脱硫器出口遮断弁(閉)
	③ 系内ページ(改質器トリップ信号による)	窒素ガス供給ライン遮断弁(開)
④ フレアスタック種火の燃焼維持失敗	① 火の消失の検知	火炎検知器(センサを二重化し、高信頼性を確保)
	② フレアスタック希釈放出	フレアスタック窒素ガス供給弁(開)
	③ 供給系遮断(改質器トリップ信号による)	活性炭脱硫器出口遮断弁(閉) (二重化有り、電源喪失の際も遮断)
	④ 系内ページ(改質器トリップ信号による)	窒素ガス供給ライン遮断弁(開) 窒素ガス供給流量制御システム
⑤ フレアスタック種火用燃料供給管破損	① 漏えい検知	ガス漏えい検知器 (種火用天然ガス供給ライン圧力)
	② 原料ガス供給系隔離	原料ガス供給系の各遮断弁(閉)
⑥ LNG タンク破損	① 希釈放出	排風機運転継続
⑦ LNG 貯蔵エリア内の原料ガス供給系バウンダリ破損 ⑦-1 LNG 蒸発器容器破損	① 漏えい検知	流量偏差検知器 ガス漏えい検知器
	② 原料ガス供給系隔離	原料ガス供給系の各遮断弁(閉)
	③ 供給系遮断(改質器トリップ信号による)	活性炭脱硫器出口遮断弁(閉) LNG ポンプ電源装置(トリップ)
⑦-2 活性炭脱硫器容器破損 ⑦-3 フレアスタック種火用 サージタンク容器破損 ⑦-4 LNG 蒸発器伝熱管破損		
⑧ LNG ベントライン破損	なし	なし

表 4.2 水蒸気改質器触媒管破損+建家内 2 次ヘリウム配管破損

		発生頻度／アン アベイラビリティ ^{*4}	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象： ①-1 水蒸気改質器触媒管破損		$3.00 \times 10^{-3} /y^{*2}$	水蒸気改質器触媒管の破損を想定	熱交換器一基当たりの伝熱管破損の故障率 $9.2 \times 10^{-9} [1/h]$, EF=30 (原安協データ) より、EF 上限値を採用して、 $9.2 \times 10^{-9} [1/h] \times 30 \times 8760 [h/y] = 2.4 \times 10^{-3} [1/y]$ を丸めて設定
緩和機能 サポート系 フロントライン系	電源	$1.00 \times 10^{-7} /d^{*3}$	事象発生後の緩和機能に要する時間をバージ時間の15分に余裕を見て1時間と仮定し、ミッションタイム ^{*5} を設定	ミッションタイム中の商用電源、非常用 DG、無停電電源の喪失を考慮 →(参照:添付 C)
	圧縮空気	NA*	系内バージ機能のみに必要なで、フロントライン系の系内バージのアンアベイラビリティに含める。	NA
	2次ヘリウム配管		起因事象の水蒸気改質器触媒管破損に重ね、独立事象としての2次ヘリウム配管破損を考慮。 建家内2次ヘリウム配管の可燃性ガスに対する障壁としてのミッションタイムは、事象発生後の事故処理(ヘリウム中の可燃性ガスを純化系で除去)の期間が長引くと考えて、1週間と仮定。 2次ヘリウム配管が破損した場合には、可燃性ガスの侵入は避けられないが、バージが完了するまでの15分以内と以降とで侵入程度が異なると考えられるので、2次ヘリウム配管破損シーケンスを分岐することとした。	2次ヘリウム配管破断発生頻度は $1.8 \times 10^{-10} [1/h]$, EF=30(原安協データ)より 配管長約 60m(12 セクション)と EF 上限値を採用して $1.8 \times 10^{-10} [1/h] \times 60m/5m \times 8760 [h/y] \times 30 = 5.7 \times 10^{-4} [1/y]$ を丸めて $1.0 \times 10^{-3} [1/y]$ と設定、 これをベースに 15 分であれば $1/8760 \times 1/4$ 倍 これをベースに 1 週間であれば $1/365 \times 7$ 倍
		$2.85 \times 10^{-8} /d$	事象発生後、15分以内に独立事象として破損する確率とする。	
		$1.91 \times 10^{-5} /d$	事象発生後、15分以降、1週間までに独立事象として破損する確率とする。	
	漏えい検知	$5.00 \times 10^{-3} /d$	2次ヘリウム中不純物濃度による漏えい検知のアンアベイラビリティとする。	2次ヘリウム中不純物濃度による漏えい検知には、一般的な計器構成を仮定し、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-1)
	水蒸気改質器トリップ信号	$1.00 \times 10^{-4} /d$	水蒸気改質器トリップ信号(活性炭脱硫器出口遮断弁閉、及び系内バージを始動)の発信に対する非信頼度とする。	一般的な半導体ロジック回路を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-2)
	原料ガス供給系遮断	$1.11 \times 10^{-5} /d$	閉信号を受け取った活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)が二つとも閉失敗する非信頼度とする。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用($\beta=0.1$ と仮定)	空気作動弁の閉失敗故障率 $Q_t=1.1 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)を使用 システム故障頻度 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Q_t\}^2 + (\beta \cdot Q_t) = \{0.9 \cdot Q_t\}^2 + (0.1 \cdot Q_t) = 1.101 \times 10^{-5} /d$ を丸める
	系内バージ	$5.11 \times 10^{-4} /d$	窒素ガス供給ライン遮断弁開失敗、窒素ガス供給系流量制御、及びサポート系として圧縮空気系(窒素ガス流量制御での使用を想定)の非信頼度(和事象)とする。 ミッションタイムは、バージ時間の15分に余裕を見て1時間と設定する。	窒素ガス供給ライン遮断弁 ディマンドに対する空気作動弁の開失敗として評価 窒素ガス供給系流量制御(通常時待機系) 一般的流量制御系を仮定して、1年間待機の待機中故障の平均アンアベイラビリティを計算 ミッションタイム中の故障は、待機中故障と比べて小さいので無視 圧縮空気系(常時運転) 圧縮機のミッションタイム中の継続運転失敗として評価 →(参照:添付 B、表 B-3)
	原料ガス供給系遮断+系内バージ	$1.00 \times 10^{-3} /d$	上記の 2 項目を合計した $5.22 \times 10^{-4} /d$ を丸めた。	

注：*: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

*2: 発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率を示す。 *3: /d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数を示す。

*4: アンアベイラビリティとは不具合発生率。 *5: ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間という。

表 4.3 建家内 2 次ヘリウム配管破損+水蒸気改質器触媒管破損

		発生頻度／ アンアベイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象: ①-2 建家内2次ヘリウム配管破損		1.00×10 ⁻³ /y	建家内2次ヘリウム配管の破損を想定	2次ヘリウム配管破断発生頻度は、表 4.2 を参照のこと 1.0×10 ⁻³ /y を設定
緩和機能 サポート系 フロントライン系	電源	1.00×10 ⁻⁷ /d	事象発生後の緩和機能に要する時間をページ時間の15分に余裕を見て1時間と仮定し、ミッションタイムを設定	ミッションタイム中の商用電源、非常用 DG、無停電電源の喪失を考慮 →(参照:添付 C)
	圧縮空気	NA	系内ページ機能のみに必要なので、フロントライン系の系内ページのアンアベイラビリティに含めず。	NA
	水蒸気改質器触媒管		起因事象の2次ヘリウム配管破損に重ね、独立事象としての改質器触媒管破損を考慮。 水蒸気改質器触媒管の可燃性ガスに対する障壁としてのミッションタイムは、事象発生後の事故処理の期間を考慮して、1週間と仮定。 水蒸気改質器触媒管が破損する場合には、ページが完了するまでの15分以内の場合が問題となるので、改質器触媒管破損シーケンスを分岐することとした。	熱交換器一基当たりの伝熱管破損の故障率 9.2×10 ⁻⁹ [1/h], EF=30 (原安協データ) より、EF 上限値を採用して、 9.2×10 ⁻⁹ [1/h] × 30 × 8760 [h/y] = 2.4×10 ⁻³ [1/y] これを丸めて 3.0×10 ⁻³ /y と設定 これをベースに 15 分であれば 1/8760 × 1/4 倍 これをベースに 1 週間であれば 1/365 × 7 倍
		8.56×10 ⁻⁸ /d	事象発生後、15分以内に独立事象として破損する確率とする。	
		5.74×10 ⁻⁵ /d	事象発生後、15分以降、1週間までに独立事象として破損する確率とする。	
	漏えい検知	1.00×10 ⁻⁵ /d	2次ヘリウム配管破損を検知する信号として、2次ヘリウム流量(低)を用い、そのアンアベイラビリティを評価する。	2次ヘリウム流量による検知には、一般的な計器構成を仮定し、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティの $Qt=4.284 \times 10^{-5} /d$ をベースに 2 out of 3 ロジックとして計算→(参照:添付 B、表 B-1) システム故障頻度 $P(s)=3\{(1-\beta) \cdot Qt\}^2 + (\beta \cdot Qt)$ $=3\{0.9 \cdot Qt\}^2 + (0.1 \cdot Qt) = 4.288 \times 10^{-6} /d$ を丸める
	水蒸気改質器トリップ信号	1.00×10 ⁻⁴ /d	水蒸気改質器トリップ信号(活性炭脱硫器出口遮断弁閉、及び系内ページを始動)の発信に対する非信頼度とする。	一般的な半導体ロジック回路を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-2)
	原料ガス供給系遮断	1.11×10 ⁻⁵ /d	閉信号を受け取った活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)が二つとも閉失敗する非信頼度とする。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 ($\beta=0.1$ と仮定)	空気作動弁の閉失敗故障率 $Qt=1.1 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)を使用 システム故障頻度 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Qt\}^2 + (\beta \cdot Qt)$ $=\{0.9 \cdot Qt\}^2 + (0.1 \cdot Qt) = 1.101 \times 10^{-5} /d$ を丸める
	系内ページ	5.11×10 ⁻⁴ /d	窒素ガス供給ライン遮断弁開失敗、窒素ガス供給系流量制御、及びサポート系として圧縮空気系(窒素ガス流量制御での使用を想定)の非信頼度(和事象)とする。 ミッションタイムは、ページ時間の15分に余裕を見て1時間と設定する。	窒素ガス供給ライン遮断弁 ディマンドに対する空気作動弁の開失敗として評価 窒素ガス供給系流量制御(通常時待機系) 一般的流量制御系を仮定して、1年間待機の待機中故障の平均アンアベイラビリティを計算 ミッションタイム中の故障は、待機中故障と比べて小さいので無視 圧縮空気系(常時運転) 圧縮機のミッションタイム中の継続運転失敗として評価 →(参照:添付 B、表 B-3)
	原料ガス供給系遮断+系内ページ	1.00×10 ⁻³ /d	上記の 2 項目を合計した 5.22×10 ⁻⁴ /d を丸めた。	

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率をしめす。 /d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間をいう。

表 4.4 可燃性ガス二重管の内管破損

		発生頻度／ アンペイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象:② 可燃性ガス二重管の内管破損		5.00×10 ⁻⁴ /y	活性炭脱硫器出口遮断弁以降、漏えい防止のための二重管で囲われている部分の可燃性ガスバウンダリの破損を想定	
緩和機能 サポート系	電源	1.00×10 ⁻⁷ /d	事象発生後の緩和機能に要する時間をページ時間の15分に余裕を見て1時間と仮定し、ミッションタイムを設定	ミッションタイム中の商用電源、非常用 DG、無停電電源の喪失を考慮 →(参照:添付 C)
	圧縮空気	NA	系内ページ機能のみに必要なので、フロントライン系の系内ページのアンペイラビリティに含ませる	NA
フロントライン系	二重管の外管破損	1.40×10 ⁻⁴ /d	<工学的判断による設定ベース> ベースは二重管内の可燃性ガスバウンダリの故障率と同じとし、事象の依存性を考慮して 100 倍(2 倍)大きくする。 ミッションタイムは事象発生後万一系内ページが自動で行われない場合でも、運転員が手動の弁操作で原料ガス遮断や、ページ作業が行われると考えそれらの事故処理の間、24時間の格納性を確保できれば良いと仮定する。	1.4×10 ⁻⁴ =5.0×10 ⁻⁴ / 8760 (バウンダリ故障率) ×100 (設定ファクタ) ×24 (ミッションタイム)
	漏えい検知	2.00×10 ⁻⁷ /d	二重管部圧力検知と二重管部ガス漏えい検知とともに機能しない非信頼度とする。	二重管部圧力検知、二重管部ガス漏えい検知とも、一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンペイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-4)
	水蒸気改質器トリップ信号	1.00×10 ⁻⁴ /d	水蒸気改質器トリップ信号(活性炭脱硫器出口遮断弁閉、及び系内ページを始動)の発信に対する非信頼度とする。	一般的な半導体ロジック回路を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンペイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-2)
	原料ガス供給系遮断	1.11×10 ⁻⁵ /d	閉信号を受け取った活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)が二つとも閉失敗する非信頼度とする。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β フルクタ法を適用 ($\beta=0.1$ と仮定)	空気作動弁の閉失敗故障率 $Q_f=1.1 \times 10^{-4} / d$ (原安協データ)を使用 システム故障頻度 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Q_f\}^2 + (\beta \cdot Q_f)$ $=\{0.9 \cdot Q_f\}^2 + (0.1 \cdot Q_f) = 1.101 \times 10^{-5} / d$ を丸める
	系内ページ	5.11×10 ⁻⁴ /d	窒素ガス供給ライン遮断弁開失敗、窒素ガス供給系流量制御、及びサポート系として圧縮空気系(窒素ガス流量制御での使用を想定)の非信頼度(和事象)とする。 ミッションタイムは、ページ時間の15分に余裕を見て1時間と設定する。	窒素ガス供給ライン遮断弁 ディマンドに対する空気作動弁の開失敗として評価 窒素ガス供給系流量制御(通常時待機系) 一般的な流量制御系を仮定して、1年間待機の待機中故障の平均アンペイラビリティを計算 ミッションタイム中の故障は、待機中故障と比べて小さいので無視 圧縮空気系(常時運転) 圧縮機のミッションタイム中の継続運転失敗として評価 →(参照:添付 B、表 B-3)
	原料ガス供給系遮断+系内ページ	1.00×10 ⁻³ /d	上記の 2 項目を合計した $5.22 \times 10^{-4} / d$ を丸めた。	

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率をしめす。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンペイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間という。

表 4.5 二重バウンダリ化していない部分（配管、弁、容器）の破損

		発生頻度／ アンアベイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象：③ 可燃性ガスを内蔵し、二重バウンダリ化していない部分の破損		$2.00 \times 10^{-3} /y$	活性炭脱硫器出口遮断弁以降の可燃性ガスバウンダリのうち、二重バウンダリ化していない部分の破損を想定	配管系統図、配管リスト、弁リスト、機器リストを参考にして積算→(参照:添付 A、表 A-2～表 A-4) $0.77 \times 10^4 /y + 3.84 \times 10^4 /y + 7.08 \times 10^4 /y = 1.17 \times 10^3 /y$ <p>を丸めて $2.00 \times 10^{-3} /y$ とする。</p>
緩和機能	サポート系	電源	$1.00 \times 10^{-7} /d$	事象発生後の緩和機能に要する時間をページ時間の15分に余裕を見て1時間と仮定し、ミッションタイムを設定 ミッションタイム中の商用電源、非常用 DG、無停電電源の喪失を考慮 →(参照:添付 C)
		圧縮空気	NA	系内ページ機能のみに必要なもので、フロントライン系の系内ページのアンアベイラビリティに含ませる NA
	フロントライン系	漏えい検知	$5.00 \times 10^{-4} /d$	現状設計では、漏えい検知システムの詳細は未定だが、今回の評価では、必要なポイント毎に <u>二重化されたガス漏えい検知器があるものと仮定し</u> 、ガス漏えい検知がともに機能しない非信頼度とする。 ガス漏えい検知には一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 →(参照:添付 B、表 B-5)
		水蒸気改質器トリップ信号	$1.00 \times 10^{-4} /d$	水蒸気改質器トリップ信号(活性炭脱硫器出口遮断弁開、及び系内ページを始動)の発信に対する非信頼度とする。 一般的な半導体ロジック回路を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-2)
		原料ガス供給系遮断	$1.11 \times 10^{-3} /d$	閉信号を受け取った活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)が二つとも閉失敗する非信頼度とする。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用($\beta=0.1$ と仮定) 空気作動弁の閉失敗故障率 $Qt=1.1 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)を使用 システム故障頻度 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Qt\}^2 + (\beta \cdot Qt) = \{0.9 \cdot Qt\}^2 + (0.1 \cdot Qt) = 1.101 \times 10^{-5} /d$ を丸める
		系内ページ	$5.11 \times 10^{-4} /d$	窒素ガス供給ライン遮断弁開失敗、窒素ガス供給系流量制御、及びサポート系として圧縮空気系(窒素ガス流量制御での使用を想定)の非信頼度(和事象)とする。 ミッションタイムは、ページ時間の15分に余裕を見て1時間と設定する。 窒素ガス供給ライン遮断弁 ディマンドに対する空気作動弁の開失敗として評価 窒素ガス供給系流量制御(通常時待機系) 一般的流量制御系を仮定して、1年間待機の待機中故障の平均アンアベイラビリティを計算 ミッションタイム中の故障は、待機中故障と比べて小さいので無視 圧縮空気系(常時運転) 圧縮機のミッションタイム中の継続運転失敗として評価 →(参照:添付 B、表 B-3)
		原料ガス供給系遮断+系内ページ	$1.00 \times 10^{-3} /d$	上記の2項目を合計した $5.22 \times 10^{-4} /d$ を丸めた。

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率をしめす。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間をいう。

本事象に関しては、数値を切り上げて丸める操作は行わず、算出値をそのまま使用した。

表 4.6 フレアスタック種火の燃焼維持失敗

		発生頻度／ アンアベイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象:④ フレアスタック種火の燃焼維持失敗		$1.00 \times 10^{-2} /y$	<工学的判断による設定ベース> 何らかの予期し得ない要因により種火とフレアスタックの火が消え、生成ガスが未燃焼のまま放出される事態を想定 発生頻度は不明であるが、比較的低頻度の“運転時の異常な過渡変化”相当と考え、工学的判断として設定	NA
緩和機能 サポート系 フロントライン系	電源	$1.00 \times 10^{-7} /d$	事象発生後の緩和機能に要する時間をページ時間の15分に余裕を見て1時間と仮定し、ミッションタイムを設定	ミッションタイム中の商用電源、非常用 DG、無停電電源の喪失を考慮 →(参照:添付 C)
	圧縮空気	NA	系内ページ機能のみに必要なので、フロントライン系の系内ページのアンアベイラビリティに含める。	NA
	種火の消失の検知を失敗	$5.00 \times 10^{-6} /d$	二重化された火炎検知器が、種火の燃焼維持失敗の検知に際しともに機能しない非信頼度とする。	火炎検知には一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 →(参照:添付 B、表 B-6)
	フレアスタック希釈放出	$1.80 \times 10^{-3} /d$	フレアスタック窒素ガス供給弁の開失敗の非信頼度とする。	空気作動弁の開失敗故障率 $1.8 \times 10^{-3} /d$ (原安協データ) を使用
	改質器トリップ信号	$1.00 \times 10^{-4} /d$	改質器トリップ信号(活性炭脱硫器出口遮断弁閉、及び系内ページを始動)の発信に対する非信頼度とする。	一般的な半導体ロジック回路を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算→(参照:添付 B、表 B-2)
	原料ガス供給系遮断	$1.11 \times 10^{-3} /d$	閉信号を受け取った活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)が二つとも閉失敗する非信頼度とする。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 ($\beta=0.1$ と仮定)	空気作動弁の閉失敗故障率 $Qt=1.1 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)を使用 システム故障頻度 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Qt\}^2 + (\beta \cdot Qt) = \{0.9 \cdot Qt\}^2 + (0.1 \cdot Qt) = 1.101 \times 10^{-5} /d$ を丸める
	系内ページ	$5.11 \times 10^{-4} /d$	窒素ガス供給ライン遮断弁開失敗、窒素ガス供給系流量制御、及びサポート系として圧縮空気系(窒素ガス流量制御での使用を想定)の非信頼度(和事象)とする。 ミッションタイムは、ページ時間の15分に余裕を見て1時間と設定する。	窒素ガス供給ライン遮断弁 ディマンドに対する空気作動弁の開失敗として評価 窒素ガス供給系流量制御(通常時待機系) 一般的流量制御系を仮定して、1年間待機の待機中故障の平均アンアベイラビリティを計算 ミッションタイム中の故障は、待機中故障と比べて小さいので無視 圧縮空気系(常時運転) 圧縮機のミッションタイム中の継続運転失敗として評価 →(参照:添付 B、表 B-3)
	原料ガス供給系遮断+ 系内ページ	$1.00 \times 10^{-3} /d$	上記の2項目を合計した $5.22 \times 10^{-4} /d$ を丸めた。	

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で $/y$ は1年あたりの故障率をしめす。 $/d$ は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間という。

表 4.7 フレアスタック種火用燃料供給管破損

			発生頻度／ アンアベイラビリティ	設定根拠	
				考え方	詳細
緩和機能 起因事象: ⑤ フレアスタック 種火用燃料供給管破損	電源 圧縮空気	NA NA	5.00×10 ⁻⁴ /y		サージタンク出口遮断弁以降の燃料供給ライン配管の破損を想定
					配管系統図及び配管リストを参考に、配管セクションを仮定して積算→(参照:添付 A、表 A-5)
	漏えい検知 原料ガス供給系隔離	NA	電源系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして電源断で開となる電磁弁で作動するものと仮定し、電源系の健全性には期待しなくても良いこととした。 漏えい検知機能には電源が必要であるが、事象発生後に漏えい検知を期待する短期間だけであるので、そのアンアベイラビリティは無視できるものとした。		NA
			圧縮空気系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして air less close を仮定し、圧縮空気供給機能の健全性には期待しなくても良いこととした。		NA
			5.00×10 ⁻⁴ /d		必要なポイント毎に二重化されたガス漏えい検知器があるものと仮定し、ガス漏えい検知がともに機能しない非信頼度とする。
		上流側の遮断ポイントとして、サージタンク出口遮断弁、サージタンク入口遮断弁までの閉失敗の非信頼度を考慮	ガス漏えい検知には一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算 二重化における共通要因故障の考慮には、β ファクタ法を適用 →(参照:添付 B、表 B-5)		
			1.10×10 ⁻⁴ /d		空気作動弁の閉失敗故障率 $Qt=1.1 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)を使用 二重化における共通要因故障の考慮には、β ファクタ法を適用 ($\beta = 0.1$ 仮定)
		1.11×10 ⁻⁵ /d	サージタンク入口遮断弁(二重化)の閉失敗確率 $P(s)=\{(1-\beta) \cdot Qt\}^2 + (\beta \cdot Qt) = \{0.9 \cdot Qt\}^2 + (0.1 \cdot Qt) = 1.101 \times 10^{-5} /d$ を丸める		

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率を示します。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数を示します。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間という。

表 4.8 LNG タンク破損

		発生頻度／ アンアベイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象:⑥ LNG タンク破損		$2.00 \times 10^{-4} /y$	LNG タンクの破損を想定	タンクの破損故障率= $2.2 \times 10^{-8} /h$ (原安協) より年当たりの発生頻度= $2.2 \times 10^{-8} [1/h] \times 8760 [h/y] = 1.93 \times 10^{-4} [1/y]$ を丸めて $2.0 \times 10^{-4} [1/y]$
緩和機能	サポート系	電源	$1.10 \times 10^{-5} /d$	排風機の駆動源としての電源喪失の非信頼度とする。排風機は常時運転であるので、電源の非信頼度は事象発生後のミッションタイム中故障を考える。 ミッションタイムは、事象発生後の液体状態の天然ガスを内蔵する容器の修理であるので、内部流体の抜き出し等に時間がかかると考え、復旧処理に要する時間に余裕を見て1週間(168 h)と仮定
		圧縮空気	NA	圧縮空気系には依存しないと仮定 NA
	フロントライン系	排風機	$1.00 \times 10^{-5} /d$	二重化された排風機($100\% \times 2$)が1基常時運転、1基待機の運用において、ミッションタイム中にともに機能喪失となる非信頼度とする。 ミッションタイム中の排風機の非信頼度を待機冗長系として計算。 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 →(参照:添付 C)

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率をしめす。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間をいう。

表 4.9 原料ガス供給系バウンダリ外部破損 (⑦-1、⑦-2、⑦-3)

		発生頻度／ アンペイラビリティ	設定根拠	
			考え方	詳細
起因事象	⑦-1 LNG 蒸発器容器破損	$2.00 \times 10^{-3} /y$	上流側はLNGポンプ出口遮断弁及びLNGポンプB 戻りライン遮断弁、下流側は活性炭脱硫器入口遮断弁及びサージタンク入口遮断弁で仕切られるLNG蒸発器を含む領域でのバウンダリ破損を想定	配管系統図、配管リスト、弁リスト、機器リストに基づき、対象領域内の漏えい頻度を配管、弁、容器についての積算値を丸める。 →(参照:添付 A、表 A-6～表 A-8)
	⑦-2 活性炭脱硫器容器破損	$6.00 \times 10^{-4} /y$	活性炭脱硫器入口遮断弁と活性炭脱硫器出口遮断弁の間の活性炭脱硫器を含む領域でのバウンダリ破損を想定	
	⑦-3 フレアスタック種火用 サージタンク容器破損	$6.00 \times 10^{-4} /y$	サージタンク入口遮断弁からフレアスタック燃料供給遮断弁の間のサージタンクを含む領域でのバウンダリ破損を想定	
緩和機能	サポート系 電源	NA	電源系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして電源断で開となる電磁弁で作動するものと仮定し、電源系の健全性には期待しなくても良いこととした。 漏えい検知機能には電源が必要であるが、事象発生後に漏えい検知を期待する短期間だけであるので、そのアンペイラビリティは無視できるものとした。	NA
	圧縮空気	NA	圧縮空気系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして air less close を仮定し、圧縮空気供給機能の健全性には期待しなくても良いこととした。	NA
フロントライイン系	漏えい検知	$1.00 \times 10^{-8} /d$	現状設計では、漏えい検知システムの詳細は未定だが、今回の評価では、二重化された流量偏差によるガス漏えい検知、及び必要なポイント毎に二重化されたガス漏えい検出器があるものと仮定し、ガス漏えい検知がともに機能しない非信頼度とする。	流量偏差によるガス漏えい検知、及びガス漏えい検出器によるガス漏えい検知には、ともに一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンペイラビリティを計算 二重化における共通要因故障の考慮には、 β ファクタ法を適用 ($\beta = 0.1$ 使用) →(参照:添付 B、表 B-7、表 B-8) $1.47 \times 10^{-5} \times 4.56 \times 10^{-4} = 6.70 \times 10^{-9} /d$ を丸める。
	原料ガス供給系隔離		破損想定位置に近い遮断弁から順番に、各遮断弁の閉失敗の非信頼度を考慮	
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	LNGポンプA 出口遮断弁の閉失敗	
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	LNGポンプB 戻りライン遮断弁の閉失敗	
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	活性炭脱硫器入口遮断弁(二重化)の閉失敗	
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)の閉失敗	
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	フレアスタック種火用サージタンク入口遮断弁(二重化)の閉失敗	
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	フレアスタック種火用サージタンク出口燃料供給ライン遮断弁の閉失敗	

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率を示す。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数を示す。

アンペイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間をいう。

表 4.10 原料ガス供給系バウンダリ内部破損 (⑦-4)

起因事象	発生頻度／アンアベイラビリティ	設定根拠	
		考え方	詳細
⑦- 4 LNG 蒸発器伝熱管破損	$3.00 \times 10^{-3} /y$	LNG蒸発器の伝熱管の破損を想定。伝熱管破損後は高圧の可燃性ガスが伝熱管破損個所を通じて冷却水配管に入り、その配管が原子炉近傍で破断して雰囲気中に可燃性ガスを放出を予想した。	熱交換器一基当たりの伝熱管破損の故障率 $9.2 \times 10^{-9} [1/h]$, EF=30 (原安協データ) より、EF 上限値を採用して、 $9.2 \times 10^{-9} [1/h] \times 30 \times 8760 [h/y] = 2.4 \times 10^{-3} [1/y]$ を丸めて設定
緩和機能	サポート系 電源	NA	電源系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして電源断で開となる電磁弁で作動するものと仮定し、電源系の健全性には期待しなくても良いこととした。
	圧縮空気	NA	圧縮空気系には依存しないと考える。 遮断弁の閉動作は、フェイルセイフとして air less close を仮定し、圧縮空気供給機能の健全性には期待しなくとも良いこととした。
プロントライン系	漏えい検知	$2.00 \times 10^{-5} /d$	二重化された流量偏差によるガス漏えい検知があるものと仮定し、ガス漏えい検知が機能しない非信頼度とする。(ただし、この方式では多量のガス漏えいに対処はできるが、少量の流出の検出は不可能である) この事象では、雰囲気中へガスが出るのは原子炉建家近傍となる恐れがあるので、有効な緩和機能としてのガス漏えい検出器には期待できないと考える。
	原料ガス供給系隔離	破損想定位置に近い遮断弁から順番に、各遮断弁の閉失敗の非信頼度を考慮	流量偏差によるガス漏えい検知には、一般的な機器構成を仮定して、保守的に1年間待機の場合の待機中故障を考慮した平均アンアベイラビリティを計算 二重化における共通要因故障の考慮には、 β フラクタ法を適用 ($\beta = 0.1$ 使用) →(参照:添付 B、表 B-7)
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	LNGポンプ A 出口遮断弁の閉失敗
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	LNGポンプ B 戻りライン遮断弁の閉失敗
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	活性炭脱硫器入口遮断弁(二重化)の閉失敗
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	活性炭脱硫器出口遮断弁(二重化)の閉失敗
		$1.11 \times 10^{-5} /d$	フレアスタック種火用サージタンク入口遮断弁(二重化)の閉失敗
		$1.10 \times 10^{-4} /d$	フレアスタック種火用サージタンク出口燃料供給ライン遮断弁の閉失敗

注: NA は Not Applicable で無視できるほど小さいことを示す。

発生頻度で /y は 1 年あたりの故障率をしめす。/d は demand を示しており、機能を発揮すべき需要の回数をしめす。

アンアベイラビリティとは不具合発生率、ミッションタイムはその機能が健全性を保つ必要時間という。

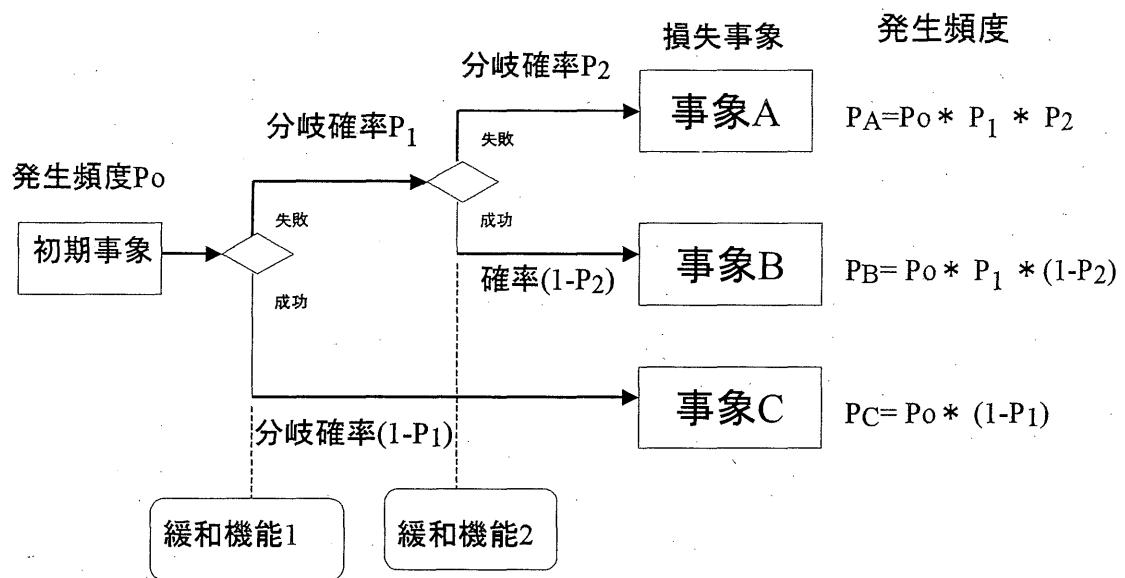
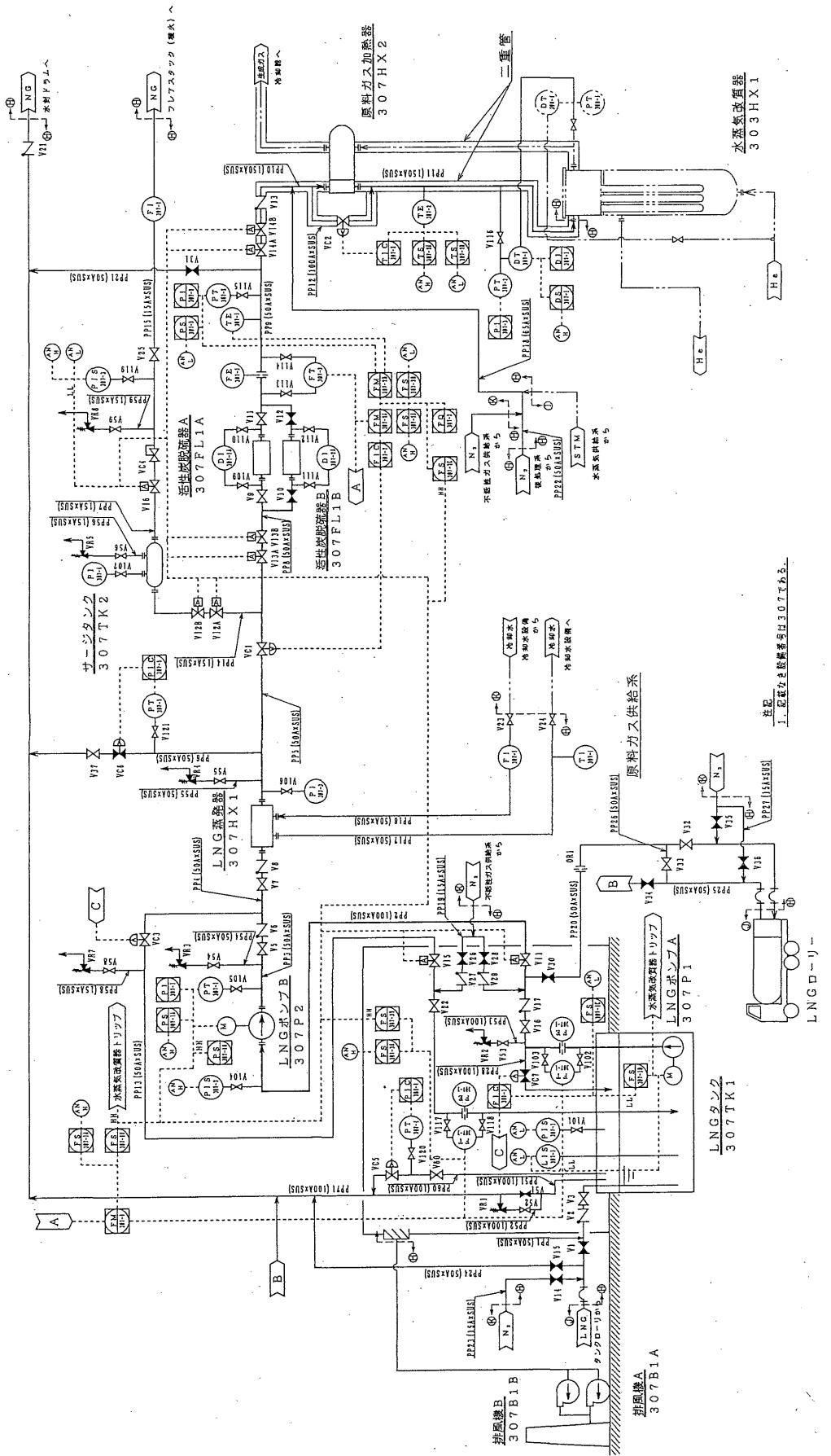
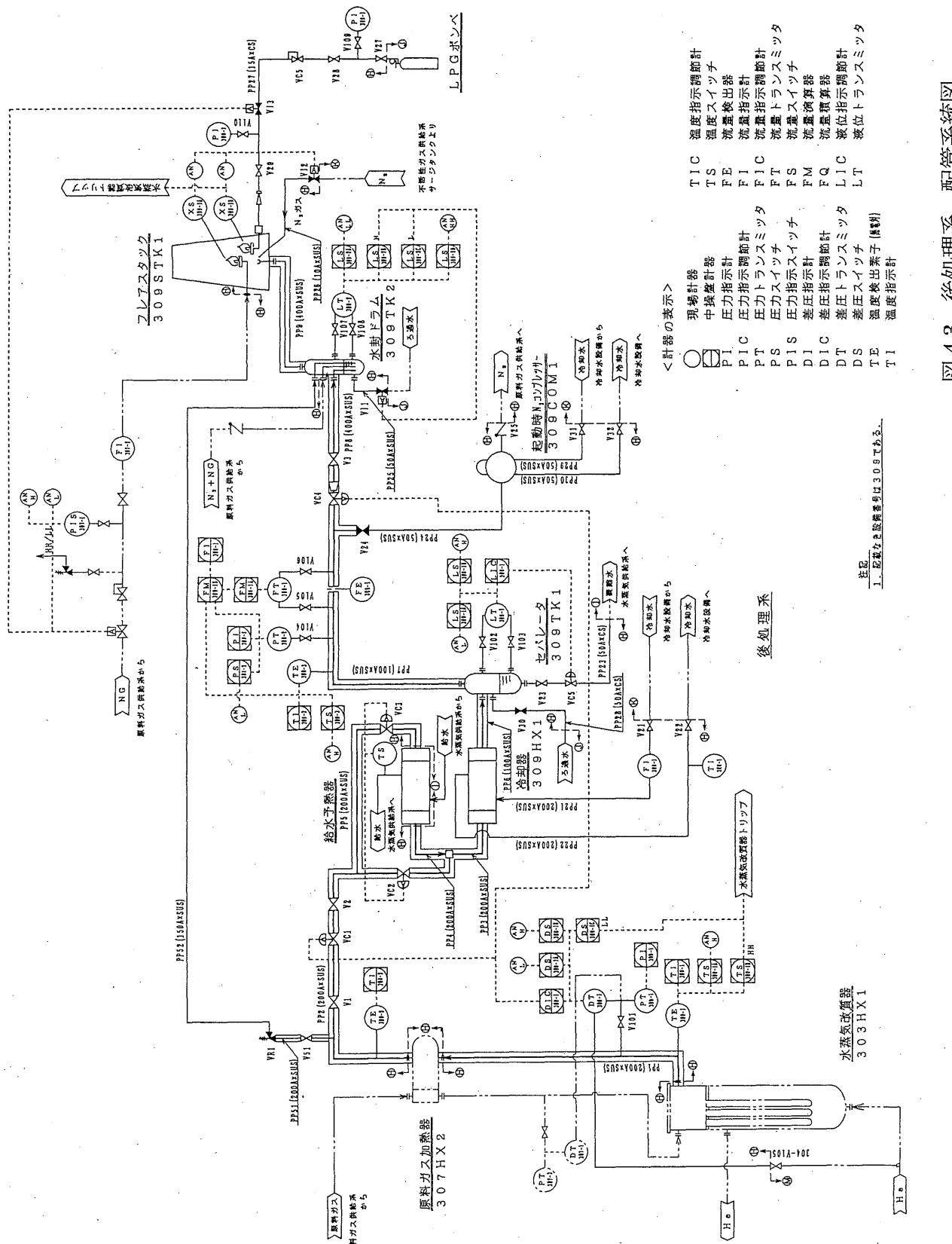


図 4.1 イベントツリーを使った確率論的安全評価 (PSA)





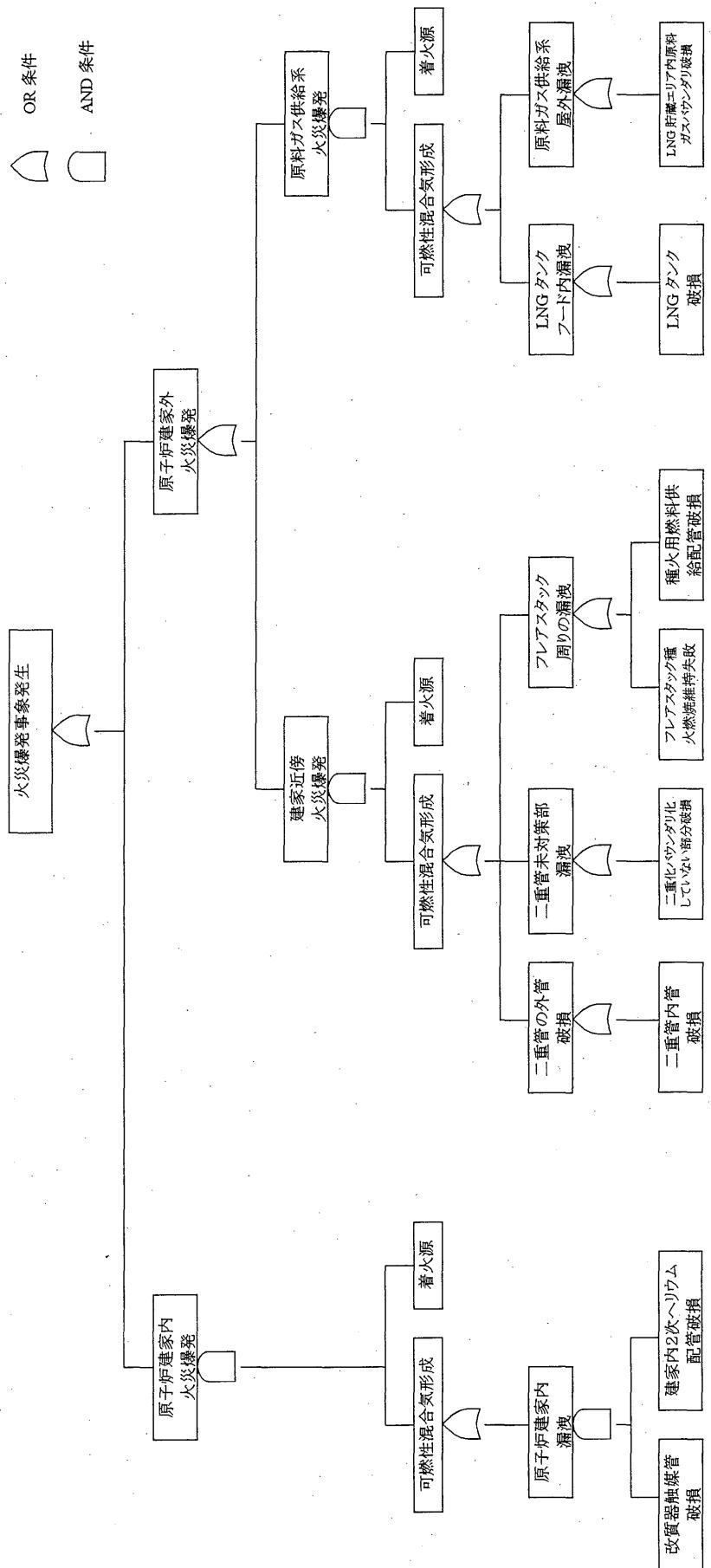


図 4.4 火災爆発事象マストロジックダイアグラム

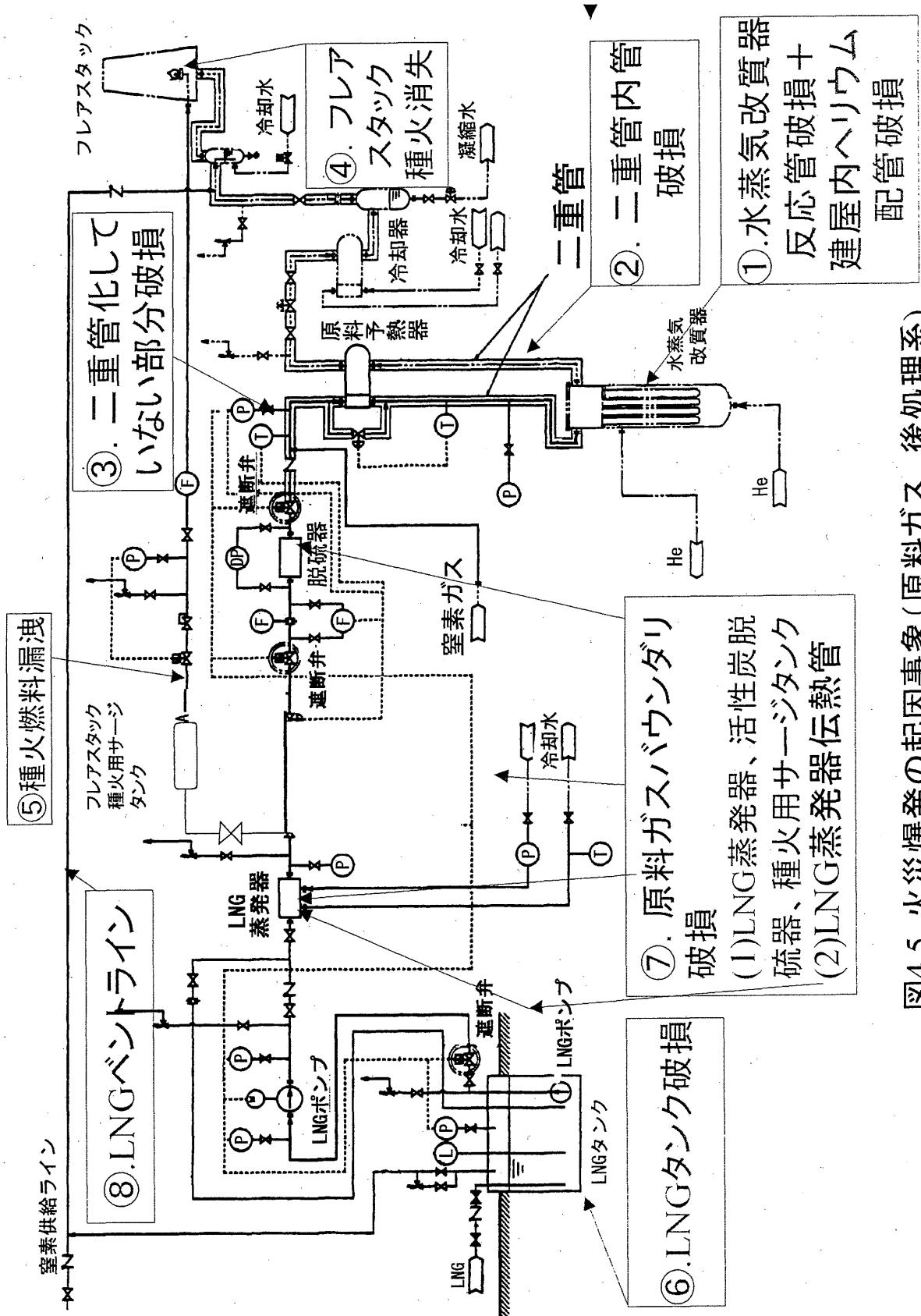


図4.5 火災爆発の起因事象(原料ガス、後処理系)

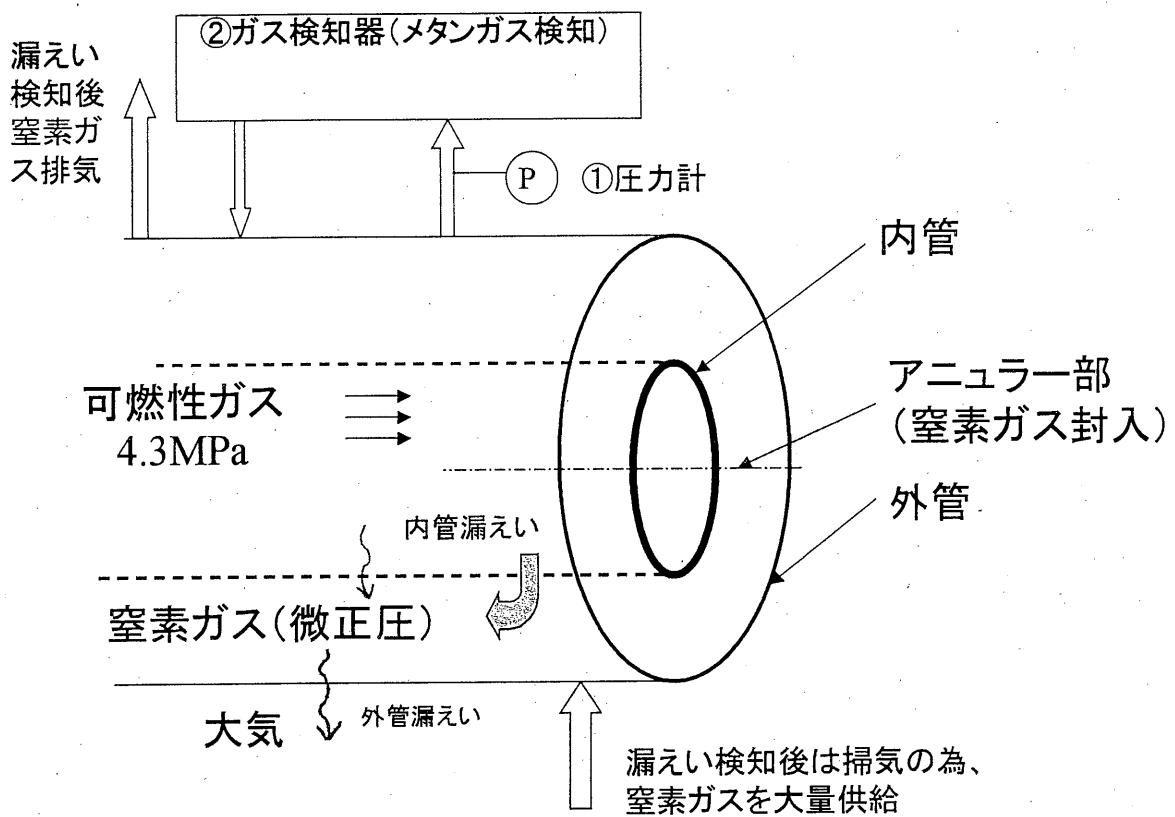


図 4.6 可燃性ガス二重管の構造と漏えい検知方法（閉ループ案）

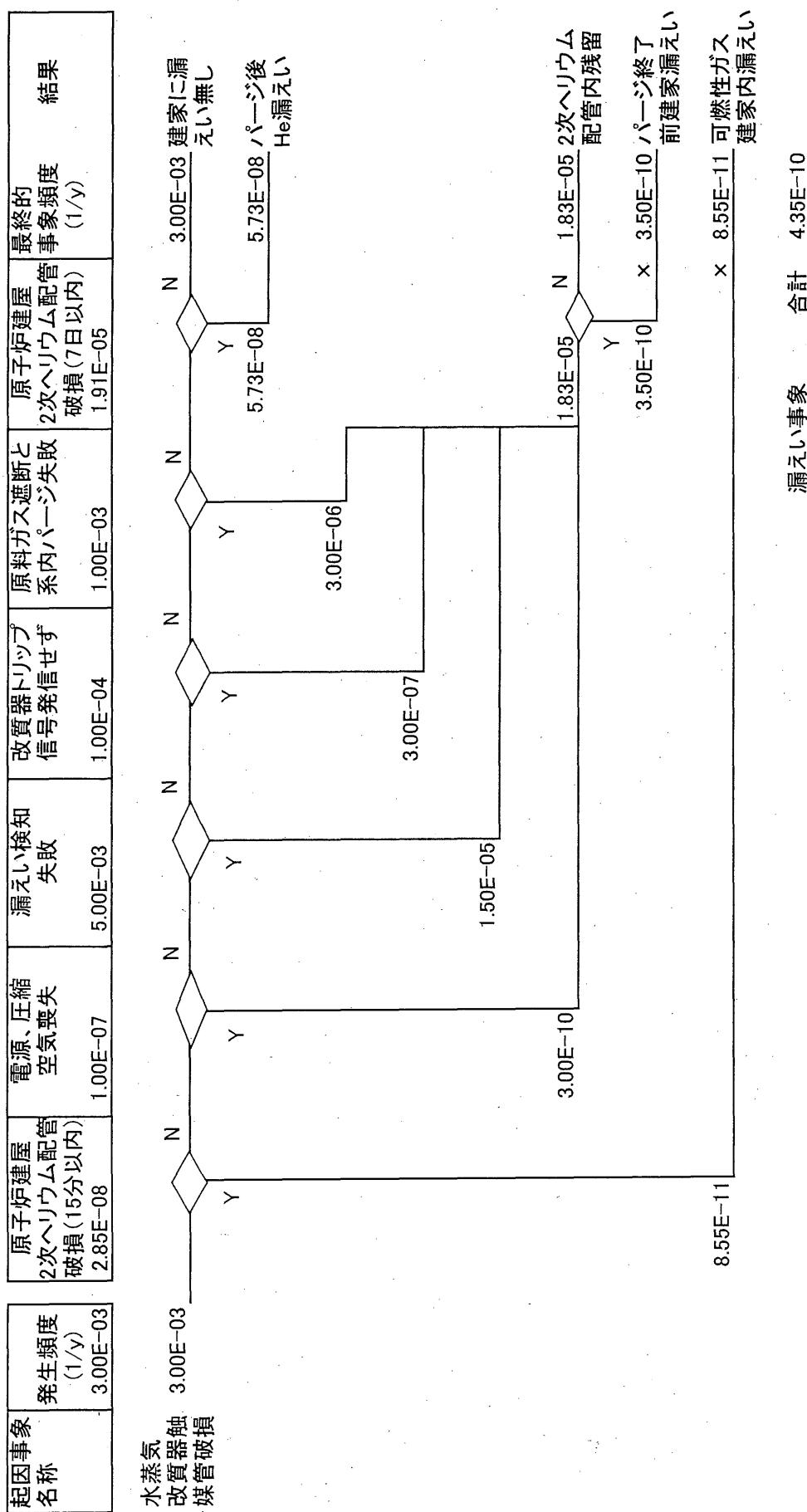


図 4.7 水蒸気改質器触媒管の破損に引き続き2次ヘリウム配管破損(起因事象①-1)

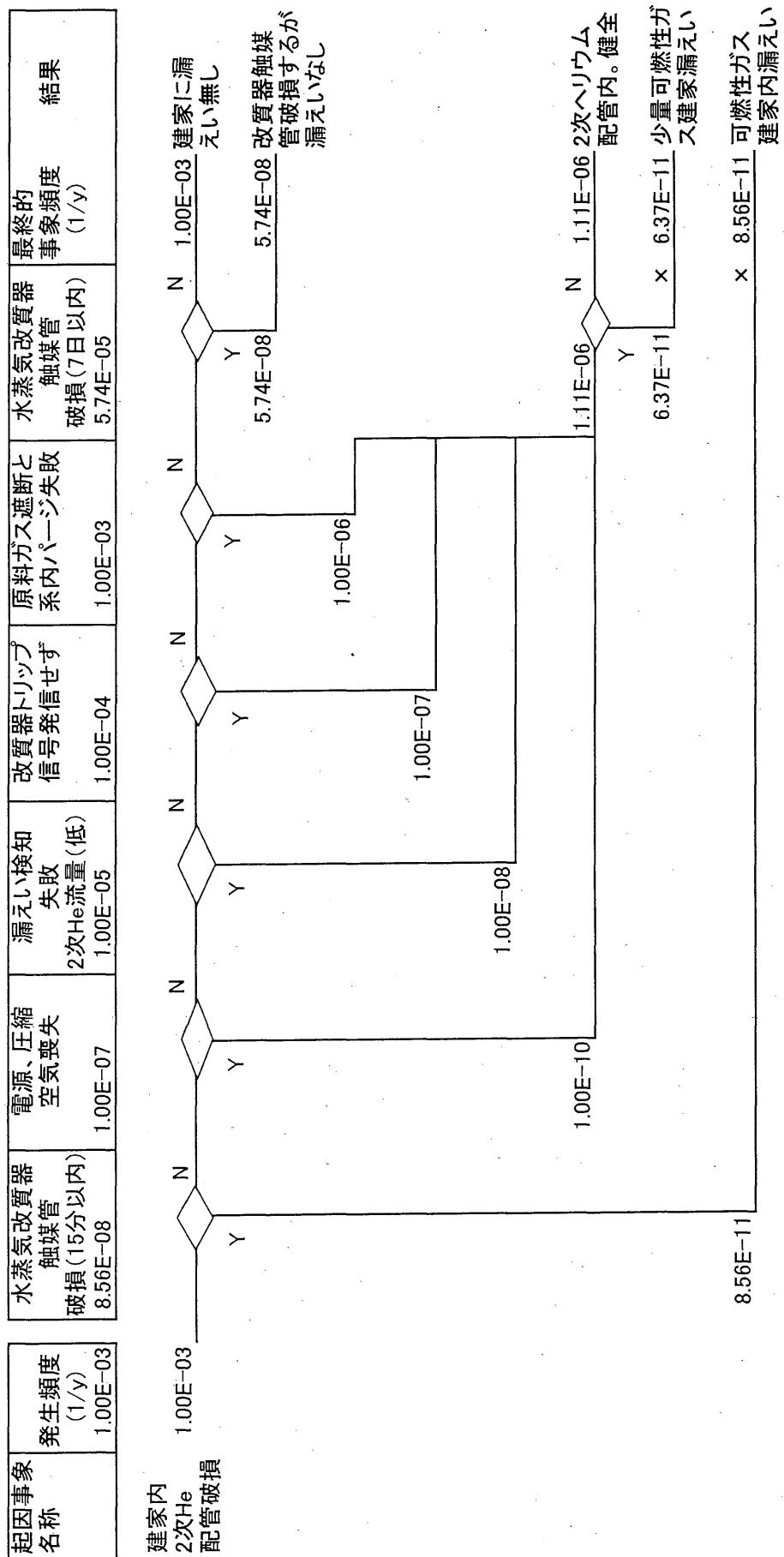


図4.8 原子炉建家内2次ヘリウム配管破損に引き続き水蒸気改質器触媒管の破損(起因事象①-2)

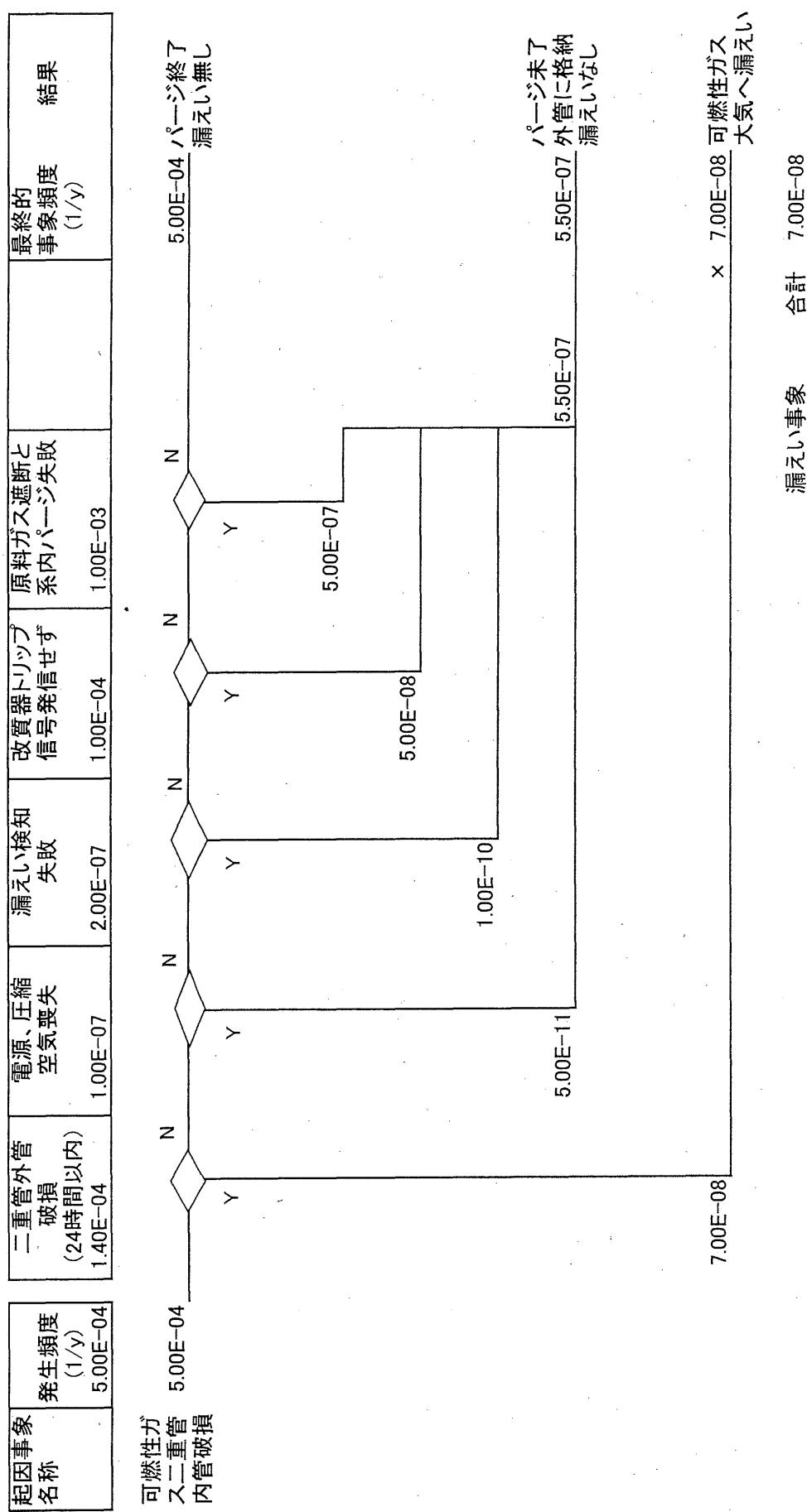


図4.9 可燃性ガス二重管の内管の破損(起因事象②)

起因事象 名称	二重化していない部分の破損 発生頻度(1/y)	電源、圧縮 空気喪失	漏えい検知 失敗	改質器トリップ 信号発信せず	原料ガス遮断と 系内バージ失敗	最終的 事象頻度 (1/y)	結果
	2.00E-03	1.00E-07	5.00E-04	1.00E-04	1.00E-03		

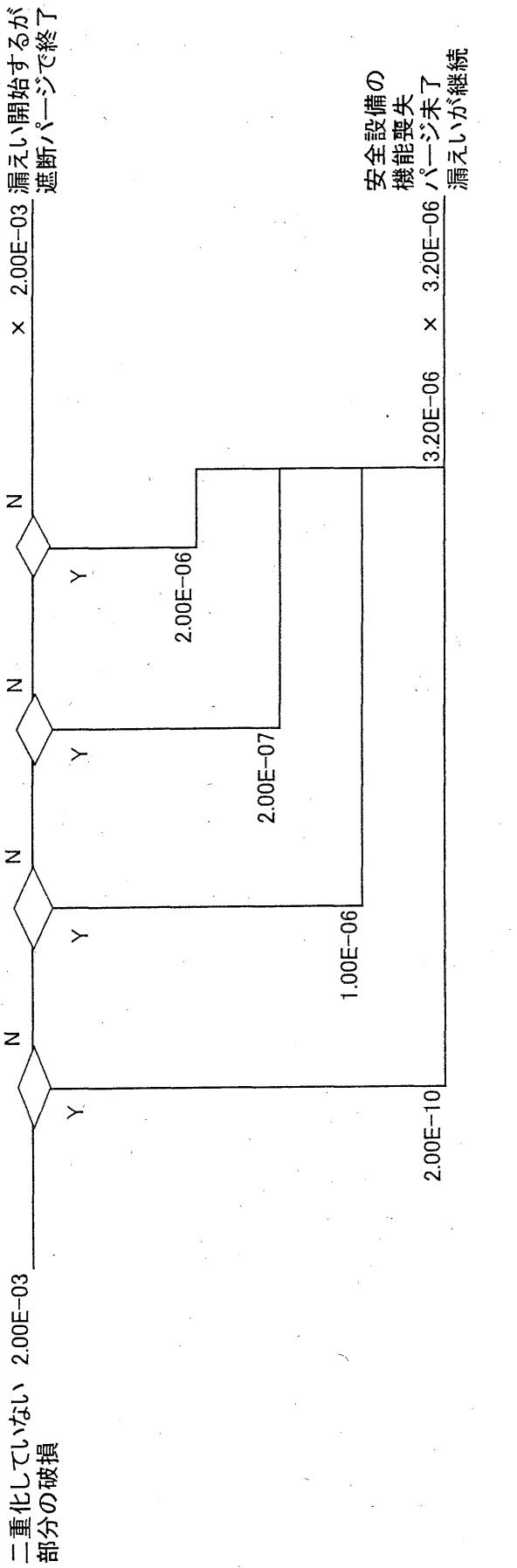


図4.10 可燃性ガスを内蔵し二重バウンダリ化していない部分(配管、弁、容器)の破損(起因事象③)

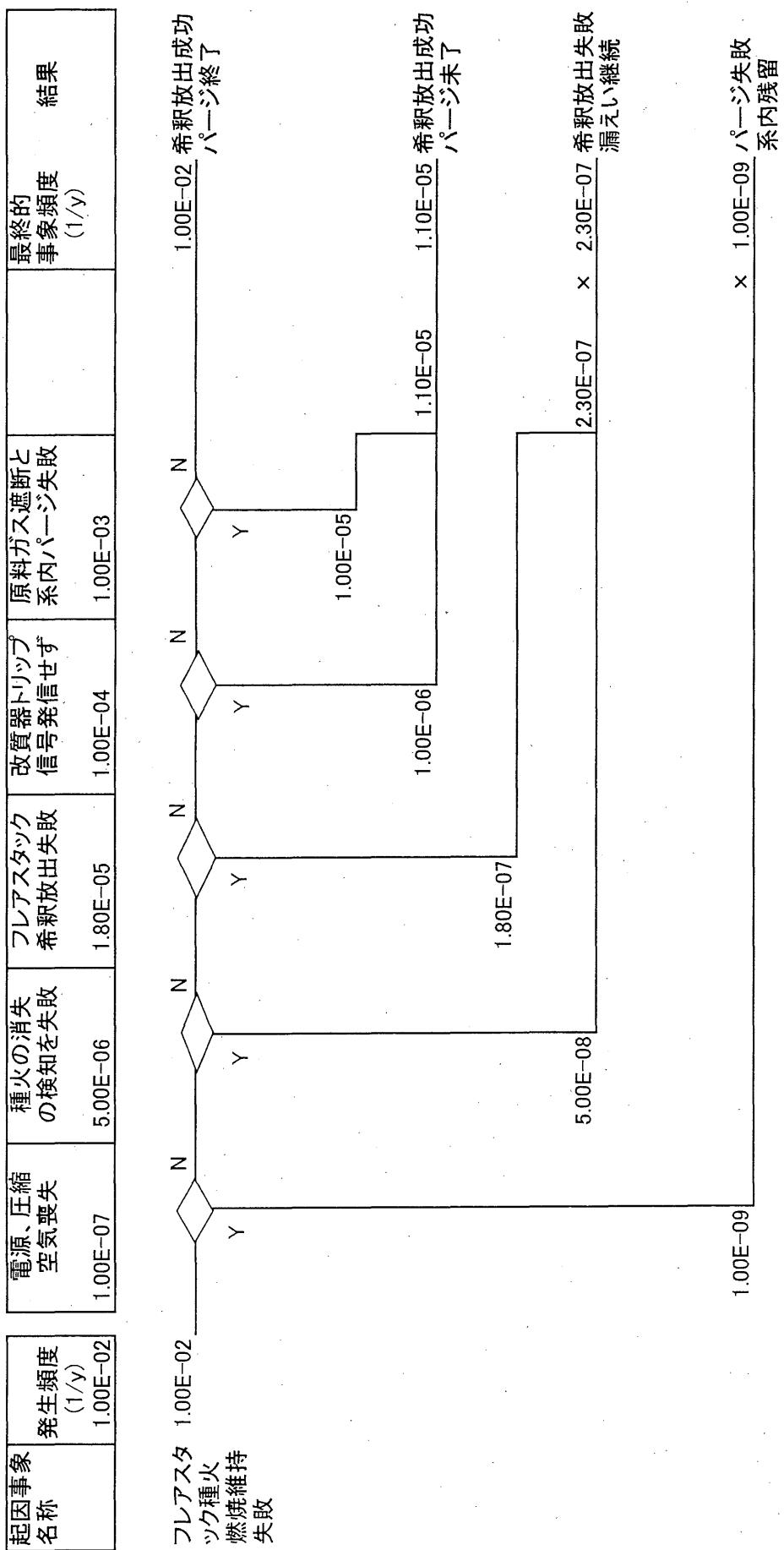


図4.11 フレアスタック種火の燃焼維持失敗（起因事象④）

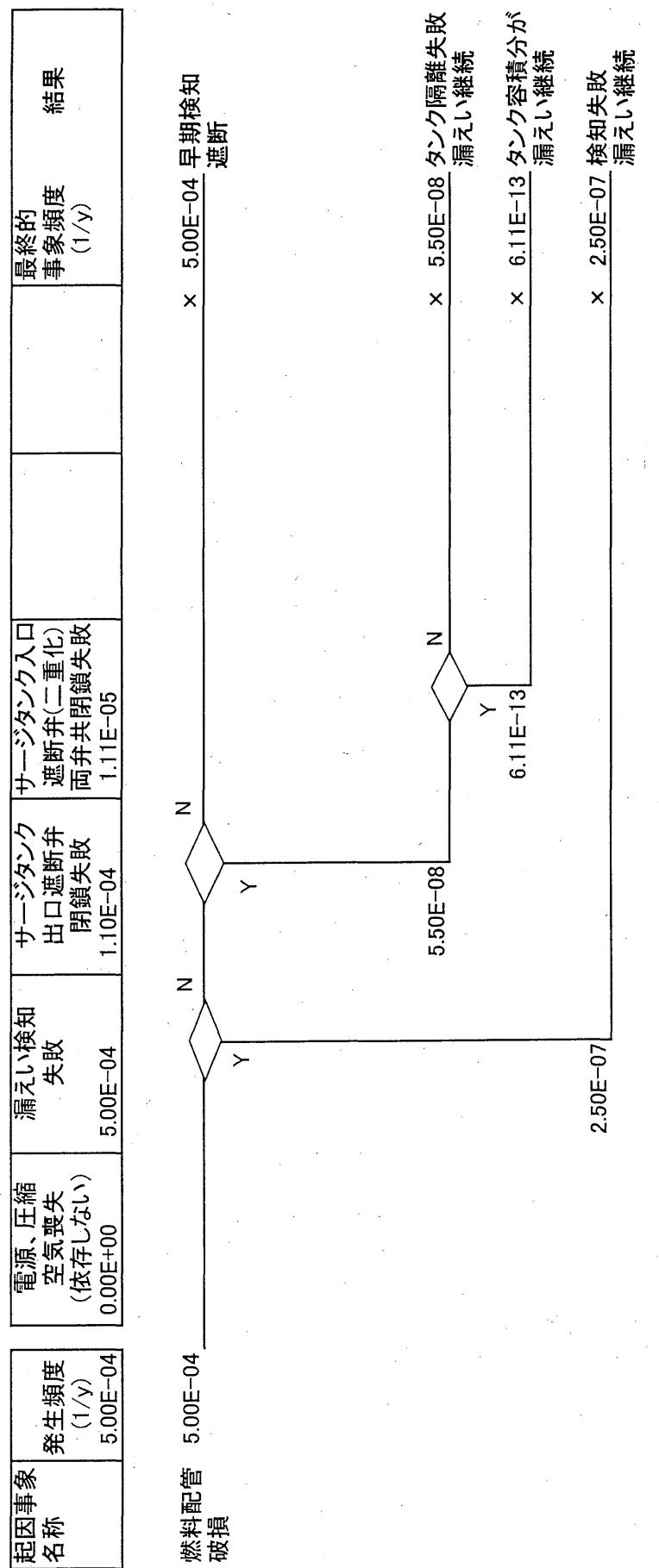


図4.12 フレアスタック種火用燃料供給管破損(起因事象⑤)

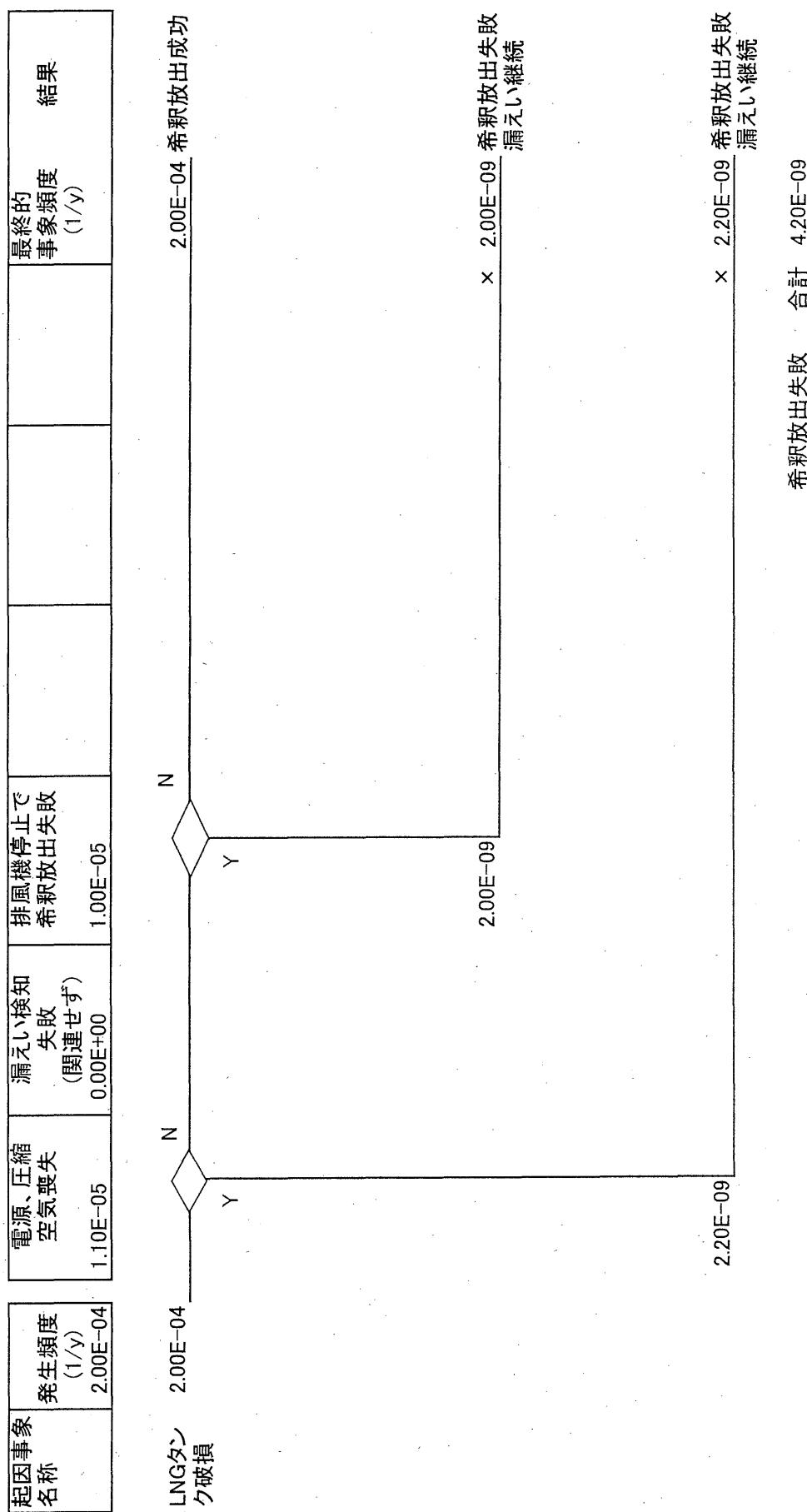
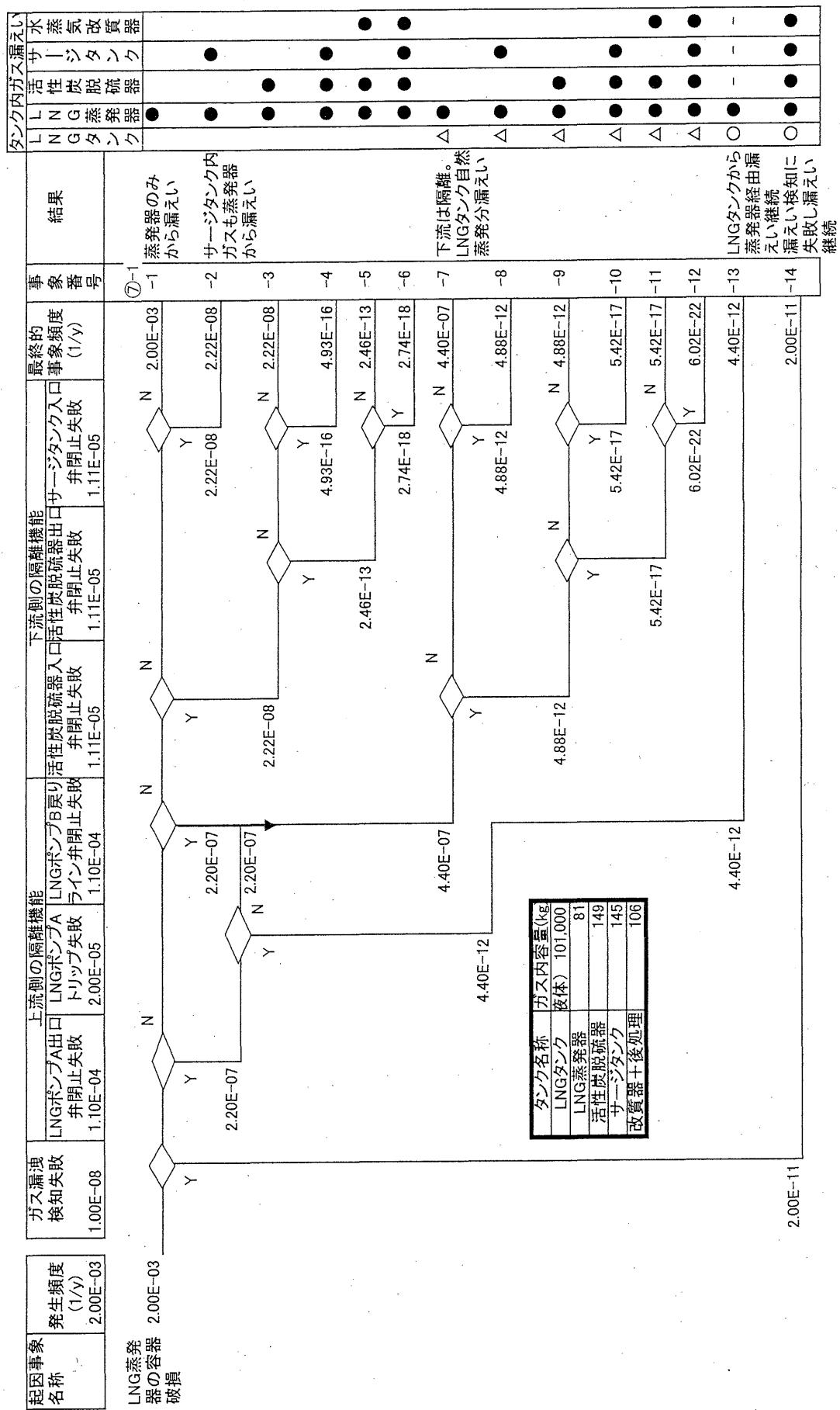
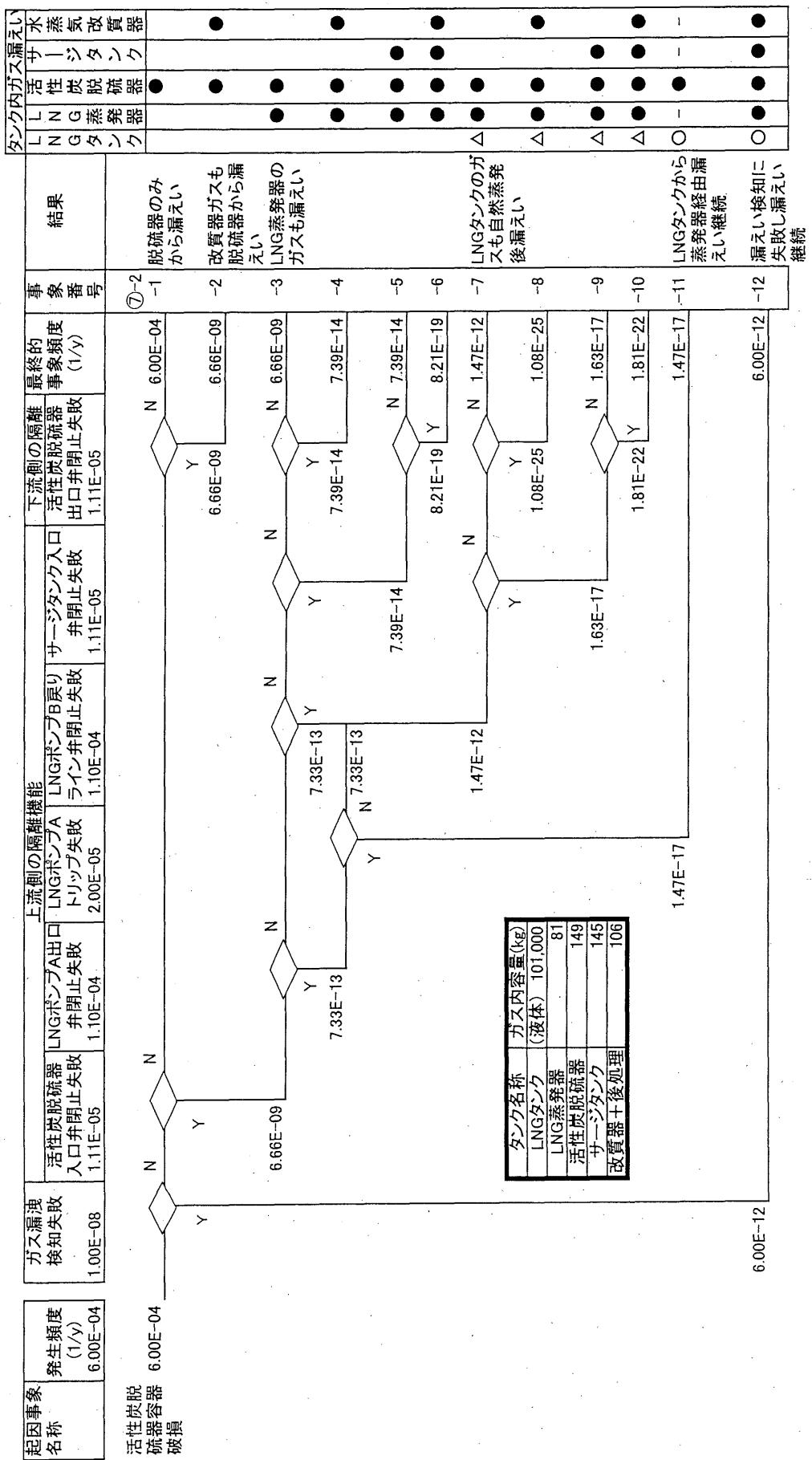


図4.13 LNGタンクフード内漏えい(起因事象⑥)





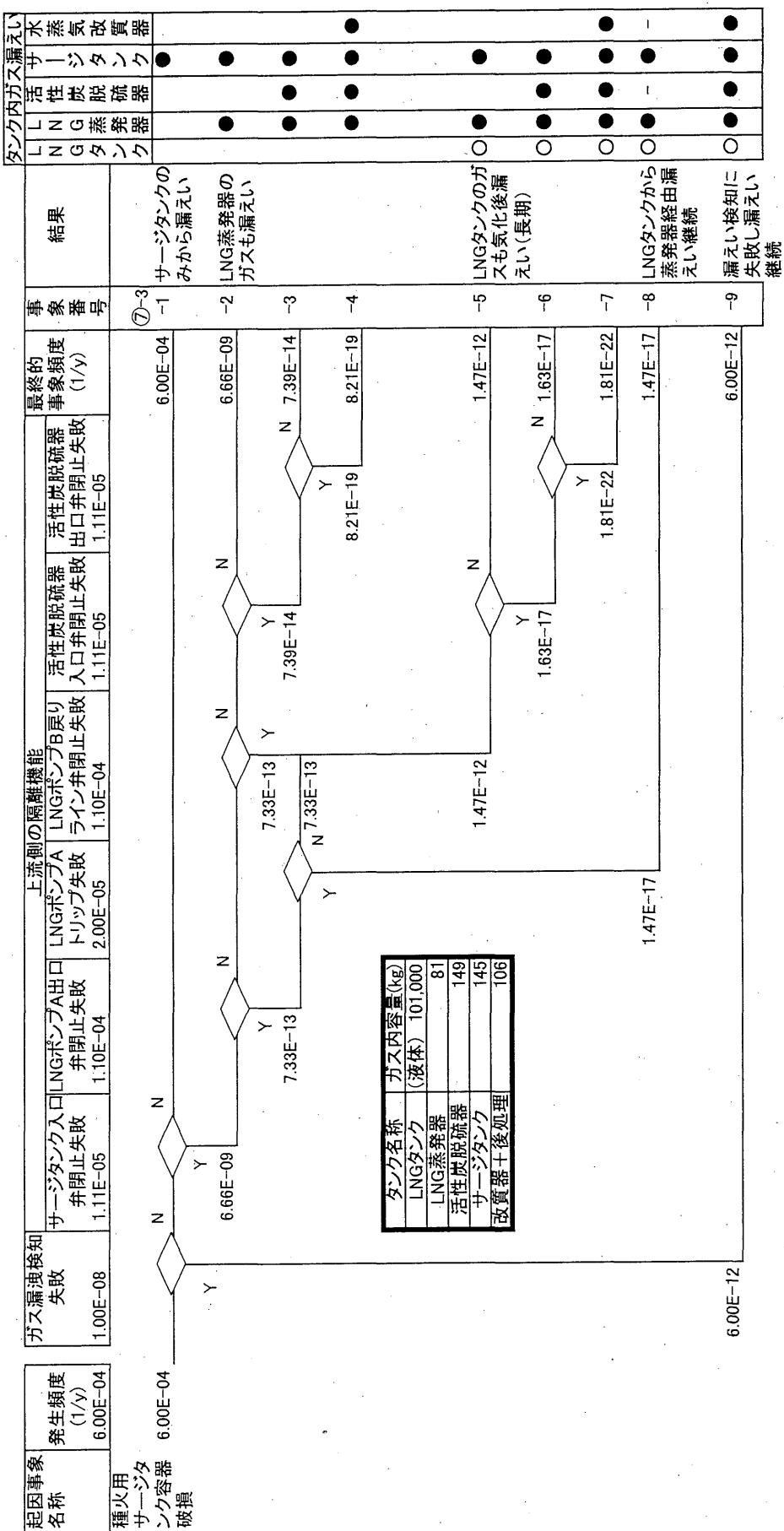
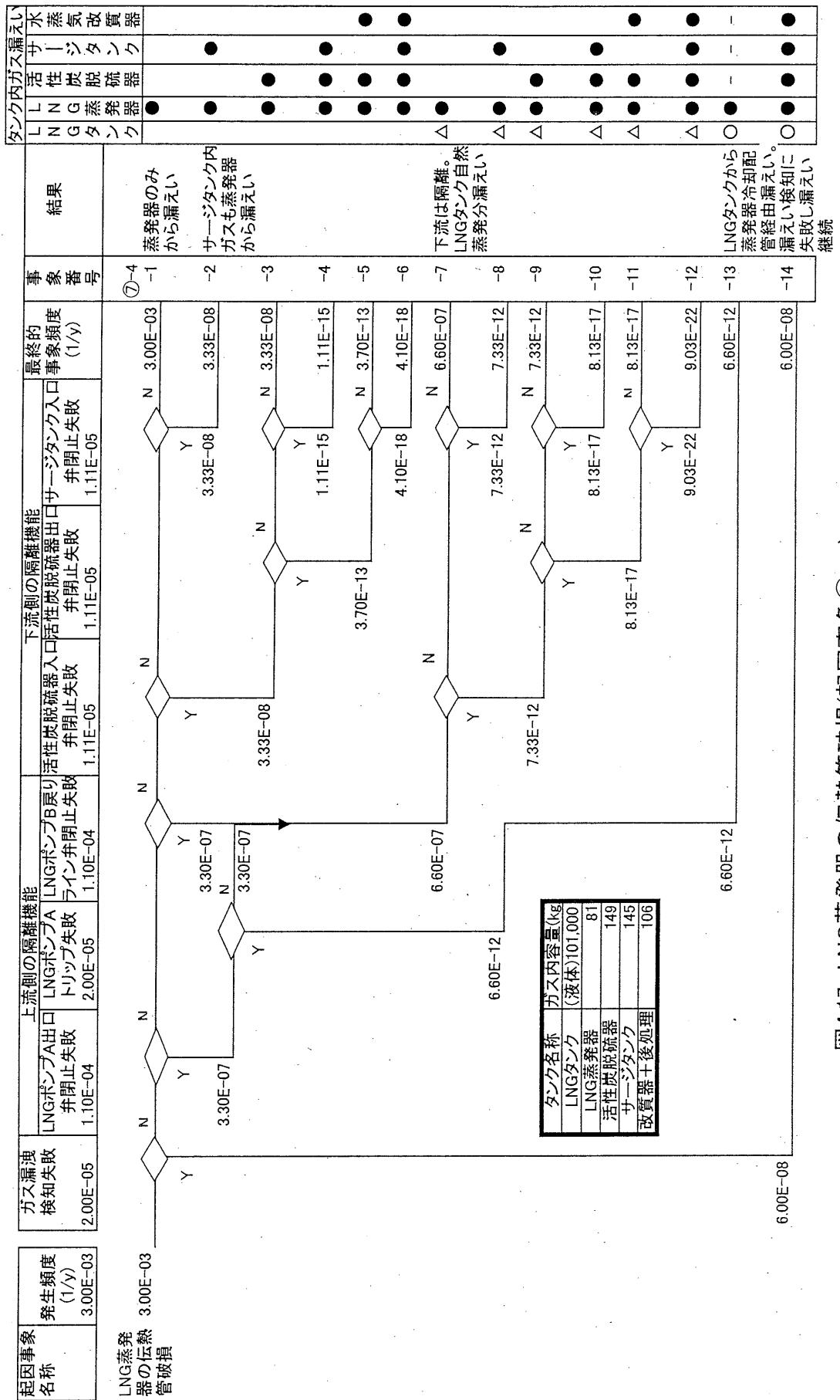


図4.16 フレアスタック種火用サージタンクの容器破損(起因事象⑦-3)



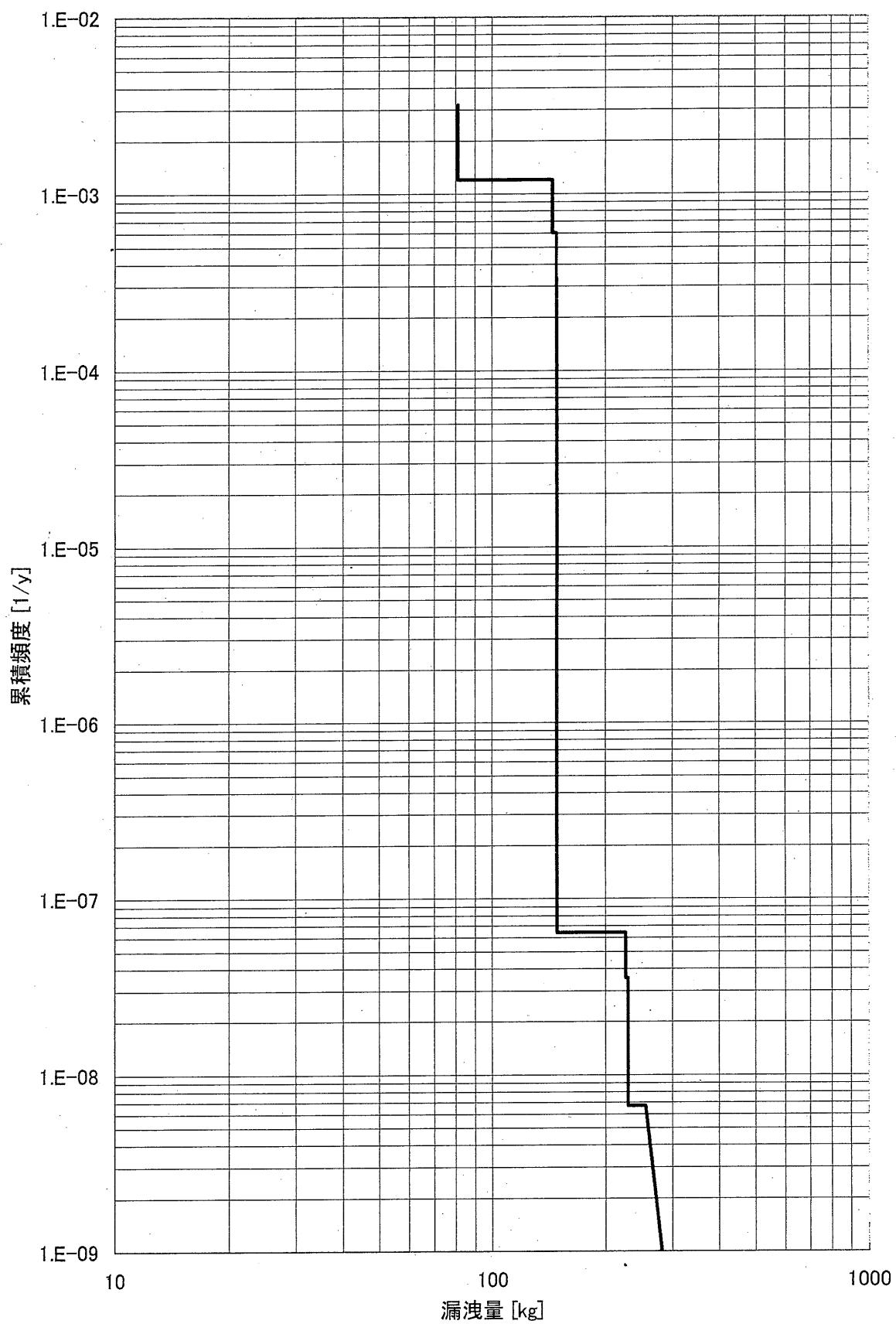


図4.18 漏洩量についての累積発生頻度
(LNG貯蔵供給エリア内容器破損)

5. 問題点の検討

本評価では、可燃性ガスが漏えいした時の着火の確率を 1.0 として、火災・爆発の発生確率を評価することで、安全側の評価を行った。その結果、安全目標を越える事象が発生した。そこで、漏えい発生確率が安全目標を超えた事象について今後の設計対応をまとめた。

(1) 二重化していない配管、弁、容器の破損（起因事象③）

原子炉建家近傍において、二重化ができていない部分におけるバウンダリ破損頻度を積算すると 2.0×10^{-3} /年である。その内訳は、配管 7.71×10^{-5} /年、弁 3.84×10^{-4} /年、容器 7.08×10^{-4} /年である。これらの要素の何れもが目標値の 1.0×10^{-6} /年以下を越えている。

漏えい量を皆無にするようなハード的な対応すなわち、対象となる弁、容器等の漏えい源のすべてを囲うのはコストと熱効率の面から現実的とは言えない。従って、ある程度の漏えいを許容した上で、それによる火災・爆発が原子炉に与える影響を小さくすることが現実的と考える。

可燃性ガスを内蔵する配管、弁あるいは容器の破損に関しては、早期に漏えい検出と漏えい遮断するように安全設備を追加拡充することで火災・爆発の規模を抑制する必要がある。さらに、今回概算で算出した漏えい量を設計の進展に合せて改定し、影響評価を実施し、原子炉建屋に対する影響が軽微であることを確認する。

漏えいを許容する対策として、以下の設計対応を考慮する事とした。

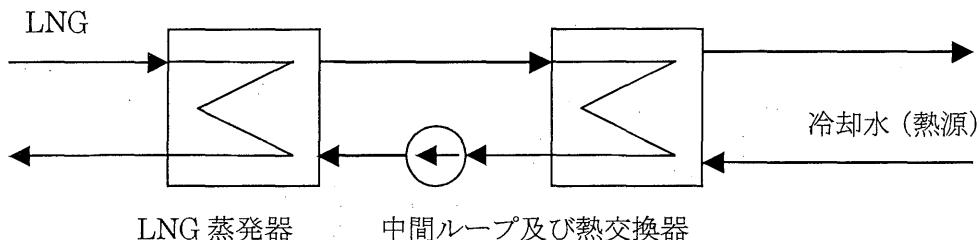
- ・ 弁、容器については、大破損を排除できる構造を検討する。
- ・ 漏えい検出と漏えい遮断する安全設備の詳細化を図る。

(2) フレアスタック種火用燃料供給管破損（起因事象⑤）

通常時の燃料供給量は、約 6×10^{-4} kg/s (2 kg/h) である。これを連続放出としても早期に充分希釈され火災・爆発の影響は充分小さいと考える。すなわち、原子炉建家近傍の漏えいを想定しても、安全上問題が無い。

(3) LNG 蒸発器伝熱管破損（起因事象⑦-4）

LNG 蒸発器の熱源は冷却水設備の配管から供給される。冷却水はクーリングタワーから冷却水ポンプを経由し、分岐後ヘリウムガス冷却器、ドレン水冷却器等の各使用先にて機器を冷却あるいは LNG 蒸発器においては LNG を加熱後、合流してクーリングタワーに戻る。系統の圧力はほぼ大気圧程度である。LNG 蒸発器伝熱管破損の事象では、加圧された LNG もしくは加圧された原料ガスが冷却水ラインへ侵入し、過圧による冷却水バウンダリの破損、あるいは冷却水ラインを移行しクーリングタワーから原子炉建家近傍への放出が考えられる。これを防止するためには、下記の通り、冷却水ラインに、LNG 蒸発器専用の中間ループを設け、伝熱管破損時に可燃性ガスが、全ループを回らないようすることが有効である。



LNG 蒸発器伝熱管破損の発生頻度は、本評価では 3.0×10^{-3} /年と推定されるので、原子炉建家近傍への可燃性ガス移行及び漏えいを防止する観点からは、非信頼度が 10^{-4} /d 以下の障壁があれば良い。従って一般的な障壁の信頼度で、充分成立性は見込めると考える。この考え方に基づき設計変更を行う。

(4) LNG ベントライン破損 (起因事象⑧)

ボイルオフガスの流量は、約 1.8×10^{-3} kg/s (設計値 max : 6.25 kg/h) である。これを連続放出としても早期に充分希釈され火災・爆発の影響は充分小さいと考える。すなわち、原子炉建家近傍の漏えいを想定しても、安全上問題が無い。

(5) 機器故障率のデータベース

今回の PSA には、原安協のデータを使用したが、当該施設が今後新たに設計する施設であること、及び化学プラントであることを考慮すると、原安協のデータベースでも、十分に保守的と言えぬ可能性がある。よって今後の課題として、AIChE で化学プラント用のデータ集を出しているので、それが本施設に適用可能か検討する価値があると思われる。

6. まとめ

HTTR 水素製造システムの安全上重要な課題の一つは、可燃性ガス漏えいによる火災・爆発対策である。そこで、可燃性ガスの漏えい頻度について PSA を行った。可燃性ガス漏えいの発生場所として、系統図から可燃性ガスを貯蔵または輸送する容器、配管等を網羅し、8 項目の起因事象として選定した。起因事象毎（漏えい個所毎）に、火災・爆発緩和機能（遮断弁、可燃性ガス二重管、LNG タンクの排風機の設置等）を勘案して、PSA の手法により漏えいの発生頻度を計算するとともにその頻度を安全目標の $1.0 \times 10^{-6}/\text{年}$ 以下にするための方策を検討した。

評価結果と改善対策をまとめて表 6.1 に示す。安全目標を満足できなかった起因事象に対する対策を以下に示す。

- (1) 「起因事象⑤の種火用燃料供給配管破損」および「起因事象⑧の LNG ベントライン破損」漏えい量が $10\text{kg}/\text{h}$ 以下であり、火災・爆発の際の原子炉への影響は十分小さく、問題は無い。
- (2) 「起因事象⑦-4 の LNG 蒸発器の伝熱管破損」
中間ループを設けることで、冷却水に直接可燃性ガスが流入することを排除できることがわかったので、設計を改訂する。
- (3) 「起因事象③の二重バウンダリ化していない部分の漏えい」
二重バウンダリ化していない部分の漏えい可燃性ガスを内包する配管、弁および容器で二重化されていない部分の破損については早期に漏えい検出と漏えい遮断するように安全設備を追加拡充することが有効である。この案については、別途漏えい量を算出し、火災・爆発の影響評価を実施し、原子炉建屋に対する影響が軽微であることを確認する予定である。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、ご指導を受け賜りました大洗研究所核熱利用研究部小川益郎部長、同部高温機器開発グループ稻垣嘉之リーダに感謝の意を表します。また、本報告書の査読をいただきと共に、懇切丁寧なご指導を受け賜りました東海研究所原子炉安全工学部の村松健次長に謝意を表します。

表 6.1 評価結果の概要

起因事象	雰囲気への漏えい確率	判定 良:○ 不可:×	評価結果の概要
①水蒸気改質器触媒管破損+建家内2次ヘリウム配管破損	4.4E-08/y (建屋内へ)	○	どちらの事象が先に起こっても、建屋内に可燃性ガスの漏洩する確率は判定基準を満足する。
②可燃性ガス二重管内管の漏えい	7.0E-08/y	○	外管の格納機能が有効に働く。
③二重バウンダリ化していない部分(配管、弁、容器)の漏洩	2.0E-03/y	×	初期事象の漏えい確率で目標値を超えた。今後、漏えい検知システムを追加拡充し、火災爆発影響評価をする。
	125kg		
④フレアスタック種火の燃焼維持失敗	2.4E-07/y	○	希釈放出に失敗する確率は小さく判定基準を満足する。
⑤種火用燃料供給管破損	5.0E-04/y	×	漏洩発生頻度は、基準を満足しないが、漏洩率が2kg/hと小さく、早期に充分希釈され問題無し。
	漏洩量 2kg/h		
⑥LNGタンク破損	4.2E-09/y	○	LNGタンクフード内の漏洩の際、排風機の機能喪失による希釈放出失敗の確立は判定基準を満足
⑦-1,2,3 LNG蒸発器、活性炭脱硫器、サージタンクの容器破損	1.0E-06/y	○	145kg以上の漏洩確率は1.0E-6以下となる。今後、この漏えい量、あるいはLNG漏えい量を仮定し、風による可燃性ガス雲の移動も考えた原子炉建家に対する火災爆発影響評価を実施する。
	漏洩量 145kg		
⑦-4 LNG蒸発器の伝熱管破損	3.0E-03/y	×	従来設計では問題があつたが、蒸発器の加熱媒体を独立させる等の設計対策済み。問題無し
⑧LNGベントライン破損	1.0E-04/y	×	漏洩発生頻度は、基準を満足しないが、漏洩率が6.25kg/hと小さく、早期に充分希釈され問題無し。
	漏洩量 6.25kg/h		

参考文献

- (1) 西原、清水、谷平、内田、"HTTR に接続する水素製造システムの系統設計"、JAERI-Tech 2002-101
(2002 年)
- (2) 原子力安全委員会 平成 2 年版 原子力安全年報 第 2 編原子力における安全の考え方
第 3 節確率論的手法による安全評価研究
- (3) P S A 用故障率データに関する調査、平成 9 年 3 月、原子力安全研究協会；原子力発電所信頼性データ調査専門委員会
- (4) Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants. U. S. Nuclear Regulatory Commission Rep. WASH-1400, NUREG 75/014 (October 1975)
- (5) NUREG/CR-4550, Volume 1, Revision 1, SAND86-2084, Analysis of Core Damage Frequency : Internal Events Methodology
- (6) IEEE Std 500-1984, IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations
- (7) 原子力安全委員会 平成 10 年版 原子力安全白書 第 2 章第 1 節 原子力安全を巡る諸課題への対応
- (8) 消防庁特殊災害室「石油コンビナートの防災アセスメント策定指針(通知)」平成 6 年 3 月

付録 A 起因事象発生頻度の積算データ

表 A-1 可燃性ガス二重管内管の漏えい頻度

表 A-2 二重化していない配管の漏えい頻度

表 A-3 二重化していない弁の漏えい頻度

表 A-4 二重化していない容器の漏えい頻度

表 A-5 フレアスタック種火用燃料供給管の漏えい頻度

表 A-6 LNG蒸発器領域の漏えい頻度

表 A-7 活性炭脱硫器領域の漏えい頻度

表 A-8 フレアスタック種火用サージタンク領域の漏えい頻度

表 A-1 可燃性ガス二重管の内管の漏えい頻度

基礎データ	機器／故障モード		故障率 [1/h] 配管3インチ未満(リード) [1/h]	エラーフラグタ 出典 (原安協) 配管3インチ以上(リード) [1/h]
	配管3インチ未満(リード) [1/h]	30 (原安協)		
	4.00E-10 1.80E-10	30 30 (原安協)		

配管番号	配管名称	呼び径 [A]	呼び厚 [sch]	配管長 [m]	セクション数固定	備考	単位故障率 [1/h]	頻度 [1/y]
307PP9	活性炭脱臭器～蒸気会流点	50	80	600	120	5 m/section仮定(弁×2)	4.00E-10	4.20E-04
307PP10	原料ガス加熱器:原料ガス入口～原料ガス出口～改質器:原料ガス入り	150	80	30	6	5 m/section仮定(T×1)	1.80E-10	9.46E-06
307PP11	原料ガス加熱器/原料ガス出口～原料ガス入り	150	80	30	6	5 m/section仮定(T×1)	1.80E-10	9.46E-06
307PP12	原料ガス加熱器:生成ガス加熱器:生成ガス入口～原料ガス加熱器:生成ガス入り/分歧点	100	80	5	2	弁×1	1.80E-10	3.15E-06
309PP1	改質器:生成ガス出口～原料ガス加熱器:生成ガス入り/分歧点	200	80	30	6	5 m/section仮定 弁×3、T×1	1.80E-10	9.46E-06
309PP2	原料ガス加熱器:生成ガス入口～給水予熱器:生成ガス入り/分歧点	200	80	10	5	弁×1、T×1	1.80E-10	7.98E-06
309PP3	給水予熱器:冷却器:生成ガス入り	200	80	20	3	直管のみと仮定 弁×1	1.80E-10	4.73E-06
309PP4	給水予熱器:生成ガス出口～給水予熱器:生成ガス入り/合流点	200	80	4	1	直管のみと仮定 弁×1	1.80E-10	1.58E-06
309PP5	給水予熱器:生成ガス出口～給水予熱器:生成ガス入り/合流点	200	80	5	2	直管のみと仮定 弁×1	1.80E-10	3.15E-06
309PP6	冷却器:生成ガス出口～セバーラータ:生成ガス入り	100	80	10	1	直管のみと仮定 弁×1	1.80E-10	1.58E-06
309PP7	セバーラータ:生成ガス出口～セバーラータ:生成ガス入り	100	80	30	6	5 m/section仮定(オリフィス×1、T×1)	1.80E-10	9.46E-06
309PP8	水封ドラム入口～水封ドラム入り	400	40	30	6	5 m/section仮定(オリフィス×1、弁×1)	1.80E-10	9.46E-06
309PP9	水封ドラム入口～フレアスタック	400	40	5	1	直管のみと仮定 弁×1	1.80E-10	1.58E-06
309PP11	原料ガス加熱器安全弁放出ライン	200	80	2	2		1.80E-10	3.15E-06
合計							4.95E-04	
(これまで)							5.00E-04	

原安協が配管の径によりリークの頻度(単位故障率/h)示しております。5mを1セクションとして配管長から算出したセクション数と、1年=8760hrを掛け

て配管毎の頻度を出す。水素製造エリアの二重管全部を合計する。

表 A-2 二重化していない配管の漏えい頻度

基準データ 配管(3インチ未満)リード	機器／故障モード	故障率	エラーファクタ	出典
	配管(3インチ未満)リード	4.00E-10	30	(原安協)

関連弁番号	細管名称	セクション数	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]
307V116	水蒸気改質器入口圧力計	2	4.00E-10	7.01E-06
309V101	水蒸気改質器出口圧力計	2	4.00E-10	7.01E-06
309V30	セノペレータ給水ライン	1	4.00E-10	3.50E-06
309V102, 309V103	セノペレータ液位計	4	4.00E-10	1.40E-05
309V23, 309VC5	セノペレータ凝縮水排出ライン	2	4.00E-10	7.01E-06
309V104	セノペレータ出口圧力計	2	4.00E-10	7.01E-06
309V105, 309V106	生成ガスライン流量計	4	4.00E-10	1.40E-05
309V11	水封ドラム給水ライン	1	4.00E-10	3.50E-06
309V107, 309V108	水封ドラム液位計	4	4.00E-10	1.40E-05
合計				7.71E-05

水素製造エリアでは大部分は二重管方式。一部計装配管が一重管。全部細管で故障率/hにセクション数と8760h/yを乗じて1年あたりの漏洩頻度を算出する。

表 A-3 二重化していない弁の漏えい頻度

基準データ	機器／故障モード	故障率 [1/h]	エラーフレクタ [1/h]	出典 (原安協) (原安協) (原安協)
空気作動弁外部リーケ		2.90E-09 9.70E-10 8.00E-09 [1/h]	30 30 30	
手動弁外部リーケ				
安全弁外部リーケ				
弁番号	弁名称	呼び径 [A]	駆動方式	故障率 [1/h]
307VC2	原料ガス加熱器バイパスライン温度調節弁	100	AD	2.90E-09
307V116	水蒸気改質器入口圧力計元弁	15	H	9.70E-10
309V101	水蒸気改質器出口圧力計元弁	15	H	9.70E-10
309V51	原料ガス加熱器出口安全弁元弁	200	H	9.70E-10
309VR1	原料ガス加熱器出口安全弁	200	SD	8.00E-09
309V1	原料ガス加熱器出口弁	200	H	9.70E-10
309VC1	生成ガスライン差圧調節弁(通常運転用)	200	AD	2.90E-09
309V2	冷却器入口弁	200	H	9.70E-10
309VC2	給水予熱器バイパス弁	200	AD	2.90E-09
309VC3	給水予熱器温度調節弁	200	AD	2.90E-09
309V30	セパレータ液位計気相側元弁	50	H	9.70E-10
309V102	セパレータ液位計液相側元弁	15	H	9.70E-10
309V103	セパレータ凝縮水止弁	15	H	9.70E-10
309V23	セパレータ凝縮水液位調節弁	50	H	9.70E-10
309VC5	セパレータ出口圧力計元弁	50	AD	2.90E-09
309V104	生成ガスライン流量計上流側元弁	15	H	9.70E-10
309V105	生成ガスライン流量計下流側元弁	15	H	9.70E-10
309V106	N2コンプレッサ入口弁	50	H	9.70E-10
309V24	生成ガスライン差圧調節弁(起動停止用)	100	AD	2.90E-09
309VC4	水封ドラム入口弁	400	H	9.70E-10
309V3	水封ドラム給水弁	50	A	2.90E-09
309V11	水封ドラム液位計上位側元弁	15	H	9.70E-10
309V107	水封ドラム液位計下位側元弁	15	H	9.70E-10
				合計 3.84E-04

原安協の資料で、バルブ形式別の故障率/hが示されており、8760h/yを掛けて漏洩頻度を算出。

水素製造エリアでも、弁は二重管内には收められないでの、全弁がこの範囲に入る。

表 A-4 二重化していない容器の漏えい頻度

基準データ	機器／故障モード 熱交換器外部リーフ タンク破損	故障率 [1/h] 9.20E-09 2.20E-08	エラーファクタ 30 (原安協) 30 (原安協)	出典
-------	--------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----

機器番号	機器名称	備考	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]
307HX2	原料ガス加熱器		9.20E-09	8.06E-05
303HX1	水蒸気改質器		9.20E-09	8.06E-05
	給水予熱器		9.20E-09	8.06E-05
309HX1	冷却器	ガス：胴側 ガス：管側	9.20E-09	8.06E-05
309TK1	セパレータ		2.20E-08	1.93E-04
309TK2	水封ドラム		2.20E-08	1.93E-04
合計				7.08E-04

水素製造エリア内容器の故障率/hに 8760h/y を掛け漏洩頻度

表 A-5 フレアスタック種火用燃料供給管の漏えい頻度

基礎データ	機器／故障モード		故障率 [1/h]	エラー割合	出典
	配管3インチ未満(リーケ)	[1/h]			
	配管3インチ以上(リーケ)	[1/h]	4.00E-10 1.80E-10	30 30	(原安協) (原安協)

配管番号	配管名称	呼び径 [A]	呼び厚 [sch]	配管長 [m]	セクション数仮定	備考	単位故障率 [1/h]	故障率 [1/y]
307PP7	サージタンク出口遮断弁～フレアスタック燃料供給ライン減圧弁	15	80	1	1	配管長は仮定	4.00E-10	3.50E-06
307PP15	フレアスタック燃料供給ライン減圧弁～フレアス	15	20	600	120	5 m/section仮定	4.00E-10	4.20E-04
307PP59	タック天然ガス入口 フレアスタック燃料供給配管安全弁放出ライン	15	20	2	2	弁×1	4.00E-10	7.01E-06
合計 (丸めて)							4.31E-04	5.00E-04

表A-6 LNG蒸発器領域の漏えい頻度

表 A-7 活性炭脱硫器領域の漏えい頻度

基礎データ		機器／故障モード	故障率 [1/h]	エラーフレクタ	出典			
配管3インチ未満(リード) [1/h]		4.00E-10	30	(原安協)				
配管3インチ以上(リード) [1/h]		1.90E-10	30 (原安協)					
主配管	配管番号	配管名称	呼び径 [A]	呼び厚 [sch]	配管長 [m] セグション数仮定			
307PP8	フレアスタック燃料供給ライン分岐点～活性炭脱硫器	50	80	10	5 T×1、弁×2(活性炭脱硫器入口遮断弁以降の部分を考慮)			
307PP9	活性炭脱硫器～蒸気会派点	50	80	600	7 T×2、弁×2、オリフィス×1(活性炭脱硫器出口遮断弁までの部			
307PP21	(サークルタンク出口窒素ガスノージライン)	50	80	5	1.5 m section仮定			
					4.56E-05			
					小計+ 4.56E-05			
細管	配管番号	配管名称	呼び径 [A]	呼び厚 [sch]	配管長 [m] セグション数仮定	備考	故障率 [1/h]	破損頻度 [1/y]
D1307-1用	差圧換出用針装配管	10	10	4	4	配管番号は仮、呼び径は仮定	4.00E-10	1.40E-05
D1307-2用	差圧換出用針装配管	10	10	4	4		4.00E-10	1.40E-05
F1307-1用	差圧換出用針装配管	10	10	2	2		4.00E-10	1.40E-05
P1307-2用	圧力換出用針装配管						4.00E-10	1.40E-05
							4.91E-05	1.75E-05
							小計+ 4.91E-05	5.56E-05
弁	手動弁	故障モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]				
307V9	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V10	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V11	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V12	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V31	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
			4.25E-05					
			小計+ 4.25E-05	5.95E-05				
計器用止弁	故障モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]					
307V109	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V110	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V111	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V112	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V113	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V114	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
307V115	外部リード	9.70E-10	8.50E-06					
			5.95E-05					
			小計+ 5.95E-05	5.95E-05				
容器	機器番号	故障モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]				
307FL1A	活性炭脱硫器	2.20E-08	1.93E-04					
307FL1B	活性炭脱硫器	2.20E-08	1.93E-04					
			3.85E-04					
			小計+ 3.85E-04	5.82E-04				
				全合計 (丸めて) 6.00E-04				

表 A-8 フレアスタック種別用サーバンク領域の漏えい頻度

基礎データ	機器／故障モード	故障率 [1/h]	エラーフラグ	出典
	配管3インチ未満(1/ー) [1/h]	4.00E-10		(原安協)
	配管3インチ以上(1/ー) [1/h]	1.80E-10		(原安協)
				30 (原安協)
主配管	配管名称	呼び径 [A]	呼び重 [sch]	配管長 [m]
30TP14 30TP7 30TP56	フレアスタック燃料供給ライン分岐点～サーバンク入口 サーバンク燃料供給出口～フレアスタック燃料供給ライン サーバンク安全弁放出ライン	15 15 50	80 80 80	3 2 2
				セクション数仮定
				1 サーバンク入口遮断弁以降の部分を考慮 2 フレアスタック燃料供給供給遮断弁までの部分を考慮
				2弁×1
				小計 1.40E-05
細管	配管番号 配管名称	呼び径 [A]	呼び重 [sch]	配管長 [m]
P1307-1用	圧力検出用計装配管	10		
				セクション数仮定
				1 配管番号は仮、呼び径は仮定
				2 配管番号は仮
弁動弁	配管番号	呼び径 [A]	呼び重 [sch]	配管長 [m]
30TV56				
				セクション数仮定
				1 外部リード
				2 外部リード
計器用止弁	配管モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]	
30TV107	外部リード	9.70E-10	8.50E-09	
	外部リード	9.70E-10	8.50E-09	
				小計 8.50E-06
安全弁	配管モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]	
30TVR5	開閉	8.00E-09	7.01E-05	
	外部リード	8.00E-09	7.01E-05	
	内部リード	1.60E-08	1.40E-04	
				小計 2.80E-04
容器	配管モード	故障率 [1/h]	頻度 [1/y]	
30TTK2	破裂	2.20E-03	1.93E-04	
				小計 1.93E-04
全合計	(丸めて)	5.11E-04	6.00E-04	

付録 B 緩和機能のアンアベイラビリティ（不具合発生率）積算データ

- 表 B-1 水蒸気改質器触媒管破損+建室内2次ヘリウム配管破損に
係わる漏えい検知のアンアベイラビリティ
- 表 B-2 水蒸気改質器トリップ信号のアンアベイラビリティ
- 表 B-3 系内ページのアンアベイラビリティ
- 表 B-4 可燃性ガス二重管内漏えい検知のアンアベイラビリティ
- 表 B-5 二重化していない部分からのガス漏えい検知の
アンアベイラビリティ
- 表 B-6 フレアスタック種火の燃焼維持失敗検知の
アンアベイラビリティ
- 表 B-7 流量偏差による漏えい検知のアンアベイラビリティ
- 表 B-8 ガス漏えい検出器のアンアベイラビリティ

表B-1 改質器触媒管破損十建室内2次ヘリウム配管破損に係わる漏えい検知のアンペイラビリティ

プロセス／2次ヘリウム差圧(低)					
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間 [h]
差圧発信器	不動作	2.00E-09 1/h	30 EF	原安協(圧力ransミッタ)	4380 8.76E-06
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30 EF	原安協(演算器)	4380 1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30 EF	原安協	4380 4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30 EF	原安協	4380 7.88E-07
2次ヘリウム循環機を止める判断に使用するだけなので、漏えい検知評価には期待しないこと					小計 2.97E-05

2次ヘリウム中不純物濃度					
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間 [h]
センサ	不動作	1.00E-06 1/h	10 EF	WASH(計器一般)	4380 4.38E-03
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30 EF	原安協(演算器)	4380 1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30 EF	原安協	4380 4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30 EF	原安協	4380 7.88E-07
					小計 4.40E-03 (丸めて) 5.00E-03

2次ヘリウム流量(低)					
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間 [h]
オリフィス	常時監視でされているので、待機中故障としての開塞等は考えない				
流量ransミッタ	不動作	2.60E-09 1/h	30 EF	原安協	4380 1.14E-05
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30 EF	原安協(演算器)	4380 1.53E-05
開平演算器	不動作	3.50E-09 1/h	30 EF	原安協(演算器)	4380 1.53E-05
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30 EF	原安協	4380 7.88E-07
					小計 4.284E-05 ($\beta=0.1$) 4.288E-06 (丸めて) 1.00E-05
$Q_{t^*} = P(s) = \beta \cdot Q_t + 3 \cdot ((1 - \beta)Q_t)^2 =$					2 out of 3

表 B-2 水蒸気改質器トリップ信号のアンアベイラビリティ

改質器トリップ信号		機器		故障モード	故障率	エラーフルタ	出典	平均待機時間 [h]	アンアベイラビリティ
カーデ(半導体ロジック回路)	不動作	6.50E-09	1/h	30	原安協	4380	4380	2.85E-05	
出力リレー	不動作	1.80E-10	1/h	30	原安協	4380	4380	7.88E-07	
							合計	2.93E-05	
						(丸めて)		1.00E-04	

半導体ロジック回路、あるいは出力リレーどちらかが故障したら、トリップ信号は出ないので、アンアベイラビリティは和とした。

表 B-3 系内ページのアンケイラビリティ

要素ガス供給系流量制御		機器		故障モード	故障率	エラーファクタ	出典	平均待機時間	アンケイラビリティ
オリフィス 流量トランスマッタ	閉塞力	2.80E-09	1/h	30	原安協	4380	1.23E-05		
ディストリビュータ	高出力	1.00E-08	1/h	15	原安協	4380	4.38E-05		
開平演算器	高出力	1.40E-08	1/h	10	原安協(演算器)	4380	6.13E-05		
調節計	高出力	1.40E-08	1/h	10	原安協(演算器)	4380	6.13E-05		
空気作動弁	不動作	2.70E-09	1/h	30	原安協	4380	1.18E-05		
	作動失敗	6.90E-08	1/h	10	原安協	4380	3.02E-04		
					小計		4.93E-04		

要素ガス供給ライン遮断弁		機器		故障モード	故障率	エラーファクタ	出典	平均待機時間	アンケイラビリティ
空気作動弁	開失敗			1.80E-05	1/d	20	原安協	NA	1.80E-05

圧縮空気系		機器		故障モード	故障率	エラーファクタ	出典	ミッションタイム	アンケイラビリティ
圧縮機	絶縁運転失敗			6.30E-07	1/h	7	原安協(電動ポンプ)	1	6.30E-07
								全合計	5.11E-04
								(丸めて)	1.00E-03

イベントツリー作成時は原料ガス遮断失敗の確率 1.11×10^{-6} も含めて丸めて、 1.0×10^{-3} とした。

表B-4 二重管の内管漏えい検知のアンペイラビリティ

二重管部圧力検知		平均待機時間 [h]				アンペイラビリティ
機器	故障モード	故障率	エラーフーカタ	出典		
圧力トランシミッタ	不動作	2.00E-09 1/h	30	原安協	4380	8.76E-06
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30	原安協(演算器)	4380	1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30	原安協	4380	4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30	原安協	4380	7.88E-07
				小計		2.97E-05

二重管部ガス漏えい検知		平均待機時間 [h]				アンペイラビリティ
機器	故障モード	故障率	エラーフーカタ	出典		
センサ	不動作	1.00E-06 1/h	10	WASH(計器一般)	4380	4.38E-03
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30	原安協(演算器)	4380	1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30	原安協	4380	4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30	原安協	4380	7.88E-07
				小計		4.40E-03

全合計(積事象) (丸めて)	1.31E-07
	2.00E-07

表B-5 二重バウンダリ化していない部分からのガス漏えい検知のアンペイラビリティ

二重管部外のガス漏えい検知					
機器	故障モード	故障率	エラーフレクタ	出典	平均待機時間 [h]
センサ	不動作	1.00E-06 1/h	10	WASH(計器一般) 原安協(演算器)	4380 4.38E-03
ディストリビュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30		4380 1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30		4380 4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30		4380 7.88E-07
		Qt=		小計	4.40E-03
		P(s)=[(1-β) · Qt]^2 + β · Qt		二重化 (β=0.1) (丸めて)	4.56E-04 5.00E-04

漏洩検知はガス濃度計で、二重化されているものとする。

表B-6 フレアスタッフ種火の燃焼維持失敗検知のアンバライビリティ

火災検知器 機器	故障モード	故障率	エラーフーカタ	出典	平均待機時間 [h]	アンペライラビリティ
センサ ディストリビュータ	常時監視できているので、デイマンドに対する不動作は無視できる					
	不動作	3.50E-09 1/h	30	原安協(演算器)	4380	1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30	原安協	4380	4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30	原安協	4380	7.88E-07

表 B-7 流量偏差による漏えい検知のアンペイラビリティ

流量偏差検知(二重化)

JAERI-Tech 2004-051

①LNGポンプA出口流量						
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間	アンペイラビリティ
オリフィス 流量トランスマッタ ディスクリビュータ 開平演算器	常時監視できているので、待機中故障としての閉塞等は考えない、 原安協 原安協(演算器) 原安協(演算器)	2.60E-09 1/h 3.50E-09 1/h 3.50E-09 1/h	30 EF 30 EF 30 EF	4380 4380 4380	1.14E-05 1.53E-05 1.53E-05	
				小計		4.20E-05

②活性炭脱硫器出口流量						
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間	アンペイラビリティ
オリフィス 流量トランスマッタ ディスクリビュータ 開平演算器	常時監視できているので、待機中故障としての閉塞等は考えない、 原安協 原安協(演算器) 原安協(演算器)	2.60E-09 1/h 3.50E-09 1/h 3.50E-09 1/h	30 EF 30 EF 30 EF	4380 4380 4380	1.14E-05 1.53E-05 1.53E-05	
				小計		4.20E-05

③LNGポンプB気リライン流量						
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間	アンペイラビリティ
オリフィス 流量トランスマッタ ディスクリビュータ 開平演算器	常時監視できているので、待機中故障としての閉塞等は考えない、 原安協 原安協(演算器) 原安協(演算器)	2.60E-09 1/h 3.50E-09 1/h 3.50E-09 1/h	30 EF 30 EF 30 EF	4380 4380 4380	1.14E-05 1.53E-05 1.53E-05	
				小計		4.20E-05

④偏差信号						
機器	故障モード	故障率	エラーフックタ	出典	平均待機時間	アンペイラビリティ
演算器 警報設定器 出力リレー	不動作 不動作 不動作	3.50E-09 1/h 1.10E-09 1/h 1.80E-10 1/h	30 EF 30 EF 30 EF	4380 4380 4380	1.53E-05 4.82E-06 7.88E-07	
				小計		2.09E-05

二重化(β) 一系統合計 0.1 1.47E-04
1.47E-05

表B-8 ガス漏えい検出器のアンペイラビリティ

ガス漏えい検知機器	故障モード	故障率	I-Fアクト	出典	平均待機時間 [h]	アンペイラビリティ
センサ	不動作	1.00E-06 1/h	10 EF	WASH(計器一般)	4.380	4.38E-03
ディスクリピュータ	不動作	3.50E-09 1/h	30 EF	原安協(演算器)	4.380	1.53E-05
警報設定器	不動作	1.10E-09 1/h	30 EF	原安協	4.380	4.82E-06
出力リレー	不動作	1.80E-10 1/h	30 EF	原安協	4.380	7.88E-07
	Qt=			小計	4.40E-03	

$$P(s) = [(1 - \beta) \cdot Qt]^2 + \beta \cdot Qt =$$

二重化 ($\beta = 0.1$)

4.56E-04

付録 C 排風機と電源のアンアベイラビリティ（不具合発生率）

付録 C

1. 排風機のアンアベイラビリティ

1.1 排風機の運用方法

現設計では、LNGタンクフード内の排風機は各100%容量の二台が設置される。排風機の運用方法は、インタロック線図によると、一台（A機）が常時連続運転、他の一台（B機）は待機状態でA機トリップ時に自動起動する計画である。

1.2 アンアベイラビリティ算出

排風機のアンアベイラビリティは、一台常時連続運転、一台待機の典型的な待機冗長系として算出した。

具体的な算出には基礎データとして、下記を用いた。

排風機連続運転失敗故障率 $\lambda : 2.4 \times 10^{-7} / h$ (原安協データ、ファン／プロワを採用)

排風機起動失敗確率 $Q : 2.8 \times 10^{-5} / d$ (原安協データ、ファン／プロワを採用)

ミッショントイム : 168 h と設定

共通要因故障ファクタ : $\beta = 0.1$

アンアベイラビリティの計算値は、

$$U \approx 1 - \{1 + (1 - \beta)(1 - Q)\lambda T\} \cdot e^{-\lambda T} = 4.04 \times 10^{-6}$$

となり、本検討ではこれを丸めて、 1.0×10^{-5} とした。

2. 電源系のアンアベイラビリティ

2.1 電源系のアンアベイラビリティ

2.1.1 ミッショントイム

ページ期間15分の設計値に余裕を見て、1時間と設定する。

2.1.2 アンアベイラビリティ

(1) アンアベイラビリティ算出

基礎データとしては、下記を用いる。

付録 C

商用電源喪失頻度 : $1.1 /y$

(HTTR で採用している外部電源喪失頻度の値と同じとした。)

非常用 D G 起動失敗故障率 : $5.2 \times 10^{-4} /d$ (原安協データ)

無停電電源機能喪失故障率 : $3.9 \times 10^{-8} /h$

(原安協データ、蓄電池機能喪失の故障率より)

最大待機時間は 1 年 (8760 時間) を仮定し、平均待機時間として $8760/2$ 時間を設定

以上の条件で評価した電源系のアンアベイラビリティは、 8.71×10^{-8} となり、本検討ではこれを丸めて、 1.0×10^{-7} とした。

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
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
上率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、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	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバー	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
6.89476×10^{-3}	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J (計量法)}$
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.184 J (熱化学)
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1855 J (15 °C)
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	= 4.1868 J (国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	仕事率 1 PS (仏馬力)
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 75 kgf·m/s
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
1	2.70270×10^{-11}	1
3.7×10^{10}	1	

照射線量	C/kg	R
1	100	3876
0.01	1	1

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

HTR水素製造システムの確率論的手法を用いた可燃性ガス漏えい頻度評価(受託研究)

R100
古紙配合率100%
白度70%再生紙を使用しています