

重油間接脱硫装置の熱交換器ふた板の離脱による爆発・火災

【1992年10月16日、千葉県 袖ヶ浦市】

小林英男(東京工業大学大学院 理工学研究科)

富士石油株式会社 袖ヶ浦製油所において重油間接脱硫装置の爆発・火災事故が発生し、死者10名、負傷者7名を出した。BLC型熱交換器のふた板(チャンネルカバー)の押え(ロックリング)の離脱によってチャンネルカバー、ロックリング等が飛散・衝突し、また水素ガス的高速噴出によって爆発・火災が発生した。

1. 機器

重油間接脱硫装置(No.2 VGO アイソマックス装置)のBLC(Breach - Lock - Closure)型熱交換器

2. 事象

10月1日に触媒交換のために稼動を中止し、16日に稼動を本格的に再開した。15時30分頃から熱交換器E-2801Aのホットボルティング(増締め)作業を開始し、15時42分頃に作業を終了した。その後、熱交換器E-2801Bのホットボルティング作業に移行した。15時47分頃、熱交換器E-2801B上部の検知孔付近で白煙が発生し、作業中断、待機指示が出された。15時52分頃、熱交換器E-2801B付近において爆発・火災が発生した。人的災害に加えて、物的被害は直接被害額約24億円に及んだ。

特に、熱交換器構成部品のうち、チャンネルカバー、ロックリング等が発災に伴い隣接する日本鉱業株式会社に飛散し(飛散距離約130m)、潤滑油タンクと配管類を破損した。

3. 経過

熱交換器E-2801Bは米国シェブロンリサーチ社のライセンスによって製造されたBLC型で、製造メーカーは千代田化工建設株式会社である(1987年に製造部門は千代田プロテック株式会社に移管)。

BLC型熱交換器の構造を図1に、気密性の確保の詳細を図2に示す。熱交換器のふた板(チャンネルカバー)に作用する内圧荷重は、押え(ロックリング)を介して胴(チャンネルバレル)のねじ部で支持される。熱交換器内部と外部の気密性は、ロックリング締付けボルトの締付け力でガスケットによって確保される。また、管側と胴側は管板によって仕切られており、管側(高圧側)と胴側(低圧側)の気密性は、チャンネルカバーセットボルトの締付け力がスペシャルパーティション等を介して伝達され、ガスケットによって確保される。

一般に、高温・高圧の熱交換器では、運転開始時の昇温・昇圧に伴い内部流体の漏洩が生じるため、ホットボルティング作業が必要となる。フランジ型熱交換器の場合、ボルトは大径で、フランジ

周辺に障害物があり、作業は困難となる。しかし、BLC 型熱交換器の場合、ボルトは小径、すべて前面に配置されているので、作業性に優れている。

熱交換器 E-2801B は、1975 年 2 月に製造され、1991 年 6 月までに計 5 回の開放検査・整備が行われている。最近 2 回(1988 年 6 月と 1991 年 6 月)は千代田プロテック(株)の工場(川崎)にもち込まれ、開放検査・整備が行われた。

事故の社会的影響が大きいことから、1992 年 10 月 19 日に通商産業省立地公害局長の私的諮問機関として「千葉県富士石油袖ヶ浦製油所事故調査委員会」(委員長 大島榮次 東京工業大学名誉教授、委員 6 名)が設置され、事故原因の究明、再発防止策の検討等を行い、8 回の委員会の審議を経て、1993 年 3 月 23 日に事故調査委員会報告書を完成、提出した。

4. 原因

原因を解析した結果を、以下に示す。

- (1) チャンネルカバーの裏側に設置され、気密性を確保する目的のガスケットリテナ(円盤状、SUS321)は、ラチェティングによって経年的に直径減少するが、適切な交換が行われず、また不適切なグラインダー補修と相まって、降温時にガスケット溝を超えた乗上げ、かみ込みが生じ、昇温時にガスケットとの接触不良、すきまの拡大によって水素ガスの漏洩発生に至った。
- (2) インターナルフランジセットボルトは先端のつぶれで管側の内部部品の熱膨張変形を吸収する役割をもっているが、適切な交換が行われず、チャンネルカバーセットボルト荷重が増大し、ロックリングが曲げ変形し、ロックリングの経年的な直径減少をもたらした。
- (3) 発災時に、断熱材取り外しの温度差による熱変形と漏洩水素ガスによる内圧変形が、チャンネルバレルの直径増大をもたらした。
- (4) ロックリングの直径減少とチャンネルバレルの直径増大の複合効果で、ねじ山のかみ合い高さが著しく減少し、チャンネルバレル正面側ねじ山先端の塑性崩壊を引き金として、ロックリングが離脱した。
- (5) ロックリングの離脱によってロックリング(900 kg)とチャンネルカバー(2000 kg)が飛散・衝突し、また水素ガスの高速噴出によって爆発・火災が発生した。

破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー図を図 3 に示す。機器の補修・取替えにおける不適切・不良に着目したフォールトツリー図を図 4 と図 5 に示す。熱交換器ふた板の離脱のイベントツリー図を図 6 に示す。

5. 対処

通商産業省が、同型熱交換器を保有する事業者、富士石油(株)を含むコンビナート事業者、同型熱交換器を製造している設備メーカー、および千代田プロテック(株)を含む製造メーカーに対して、対策を指導した。また、高圧ガス保安協会が各地において事故調査報告会を開催した。

6. 対策

- 適切な保守管理と補修
- 部品の交換基準の確立

- 保守管理における設備オーナーと設備メーカーとの間の役割分担の明確化

7. 知識化

耐圧部品の設計においては、塑性変形を許容しない弾性設計が基本となっている。しかし、部品によっては機能上、塑性変形を許容する設計を行う場合がある。このような部品は、疲労解析とラケット解析によって寿命を保証するか、または定期的に交換することが要求される。本事例のガスケットリテナとインターナルフランジセットボルトは、これに該当する。

定期的な交換に際しては、部品の交換基準を確立し、これに基づき適切な保守管理を行う必要がある。特に、部品の交換時期の判断と確認について、設備オーナーと設備メーカーとの役割分担が明確化されていない場合が多い。設備オーナーの作業上の都合と開放検査・整備を行う技術者の独善的な判断が、事故の原因となる場合が多い。

8. 後日談

鉄鋼メーカーで、防衛機器も手がけている株式会社日本製鋼所が、火薬を使わずに砲弾やミサイルを高速で飛ばす発射装置の研究を進めている。すでにアルミニウムと水だけで、黒色火薬を上回る爆発力を得るという「OIC 砲」については実験に成功、数年後には実用化できるという。また、大きな電流を流すことで強力な磁場を発生させ、その力で従来の火薬の 3 倍以上の発射速度を得るという「電磁砲」についても、21 世紀の実用化を目指して研究を進めている。

OIC 砲は、水の中に置いたアルミニウム製フィラメントに大きな電流を流して、アルミニウムと水を高温で反応させ、発生した高圧水素ガスの膨張圧力で、砲弾などを撃ち出す仕組みである。火薬を爆発させても秒速 2 km 程度の発射速度しか得られなかったのに対して、OIC 砲は秒速 3 km 以上の高速が得られるという。

日本製鋼所が新型の発射装置の研究を始めたのは、「火薬よりも高速の発射速度を得ることで、砲弾などをより遠く、より正確に飛ばす」ためだった。しかし、冷戦の終結で、大口の需要先と期待していた防衛部門は、予算の抑制が続きそうだ。同社は、取り扱いが安全なうえ、火薬よりも強力なエネルギーが得られる利点を強調して、民生用ロケットのエンジンなど軍事用以外の用途に力を入れる方針だ。

BLC 型熱交換器の事故は、チャンネルバレルが砲身で、チャンネルカバーとロックリングが砲弾で、高圧水素ガスの膨張圧力で砲身から砲弾を撃ち出したとみなせる。以下に砲弾の飛翔距離の解析結果を示す(図 7 参照)。

- 大気放出エネルギー

$$E = 37.1 \times 10^6 \text{ J}$$

- 飛翔体(砲弾)の初期速度

$$v = \sqrt{2E/M} = 158 \text{ m / sec}$$

- 自由落下時間

$$t = \sqrt{2h/g} = 0.579 \text{ sec}$$

○ 飛翔距離

$$L = vt = 120 \text{ m}$$

飛翔距離の解析結果は、リバウンドした実際の飛翔距離(130 m)とほぼ一致する。

9. よもやま話

○ ガasketリテナ

ビンのふたは通常、ビンの口部の外側にねじを切り、ふた(口金)の内側にねじを切って、ねじ止めする。BLC 型熱交換器の場合はこれと逆で、胴(チャンネルバルル)の口部の内側にねじを切り、ふた板(チャンネルカバー)の押え(ロックリング)の外側にねじを切って、ねじ止めしている。薬品を入れるビンのふたの裏側には、ウェーファ(wafer)という薄くて丸い透明紙が敷いてある。ウェーファの役目は、ふたの気密性を確保することである。BLC 型熱交換器のガasketリテナは、ステンレス鋼の薄い円盤で、ふた板の裏側に設置されている。ガasketリテナの役目も、気密性の確保である。ビンの場合と異なり、ねじ部の外側ではなく、内側に位置するが、役目は同じである。

○ ラチェット、ラチェッティング

テニスのネットを張る場合に使う歯車が、ラチェットであり、一方向にしか変形が進行しない現象をラチェット変形という。棒に引張力を加えた状態で、熱応力の繰返しによって引張塑性変形させると、棒は引張力の方向に引張塑性ひずみが累積していく。圧縮力を加えた場合には、圧縮力の方向に圧縮塑性ひずみが累積していく。これを熱ラチェットという。円盤状のガasketリテナは、周囲の拘束によって圧縮力を受けており、熱応力の繰返しによって圧縮塑性ひずみが累積し、直径が減少する。

10. 主シナリオ

1. 誤判断

2. 状況に対する誤判断

3. 組織運営不良

4. 管理不良

5. 使用

6. 保守・修理

7. 部品交換

8. 交換基準不備

9. ガasketリテナ

10. 不良現象

11. 機械現象

12. かみ込み

13. 水素漏洩

14. 使用

15. 保守・修理

16. 交換基準不備

17. インターナルフランジセットボルト

18. 破損

19. 変形

20. 塑性変形

21. ロックリング

22. 不良現象

23. 機械現象

24. ねじ山のかみ合い高さ減少

25. ロックリング離脱

26. チャンネルカバー飛翔

27. 二次災害

28. 損壊

29. 爆発・火災

〈参考文献〉

- (1) 富士石油(株)袖ヶ浦製油所事故調査報告書、高圧ガス保安協会、平成5年5月
- (2) 小林英男、吉岡照夫、竹花立美、BLC 形熱交換器の発災事故解析、日本機械学会論文集(A編)、60-570(1994)、527-534
- (3) 小林英男、吉岡照夫、竹花立美、発災 BLC 型熱交換器チャンネルカバーの飛翔解析、日本機械学会講演論文集、平成5年度材料力学講演会、No.930-73(1993)、65-66

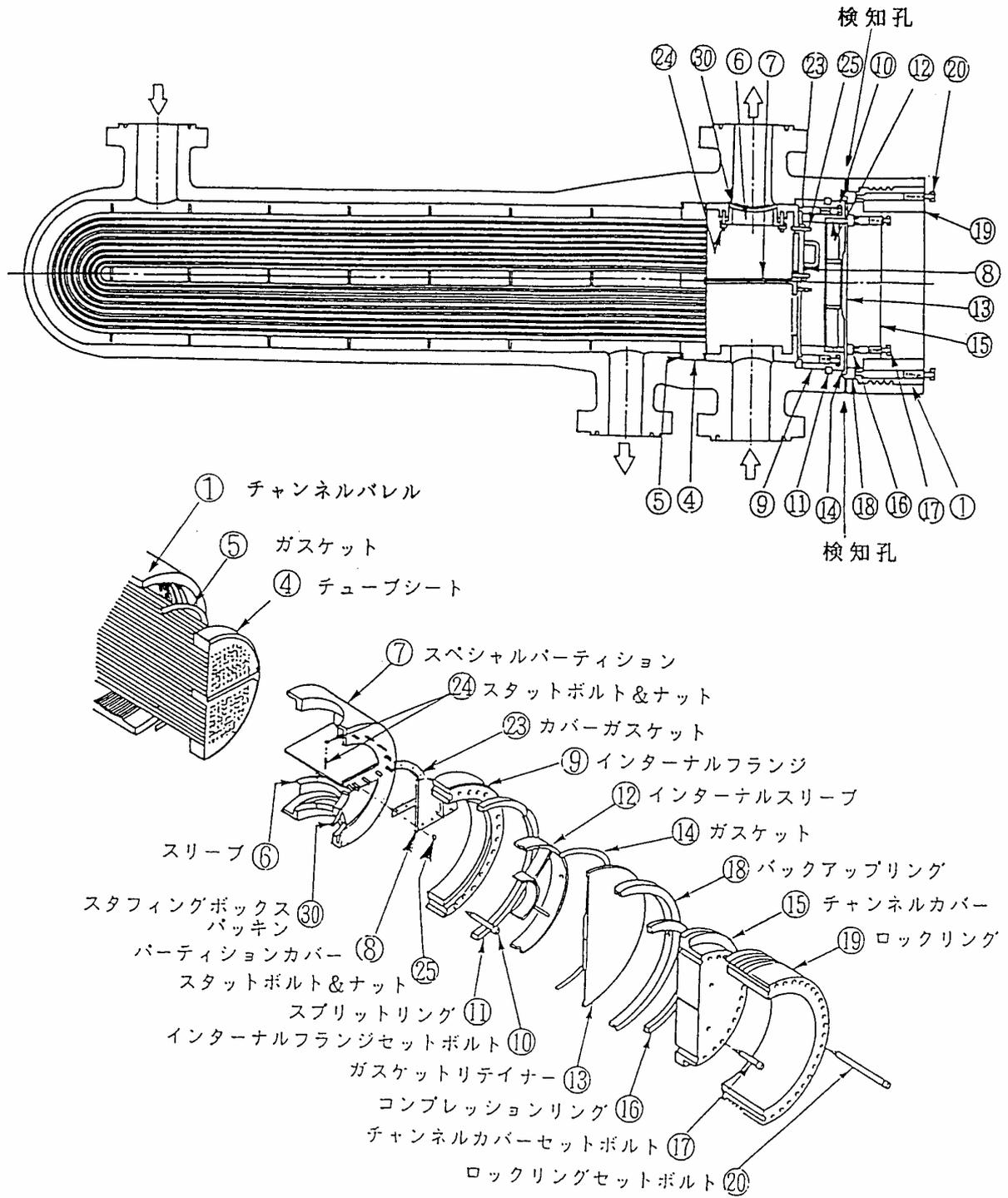


図1 BLC型熱交換器の構造

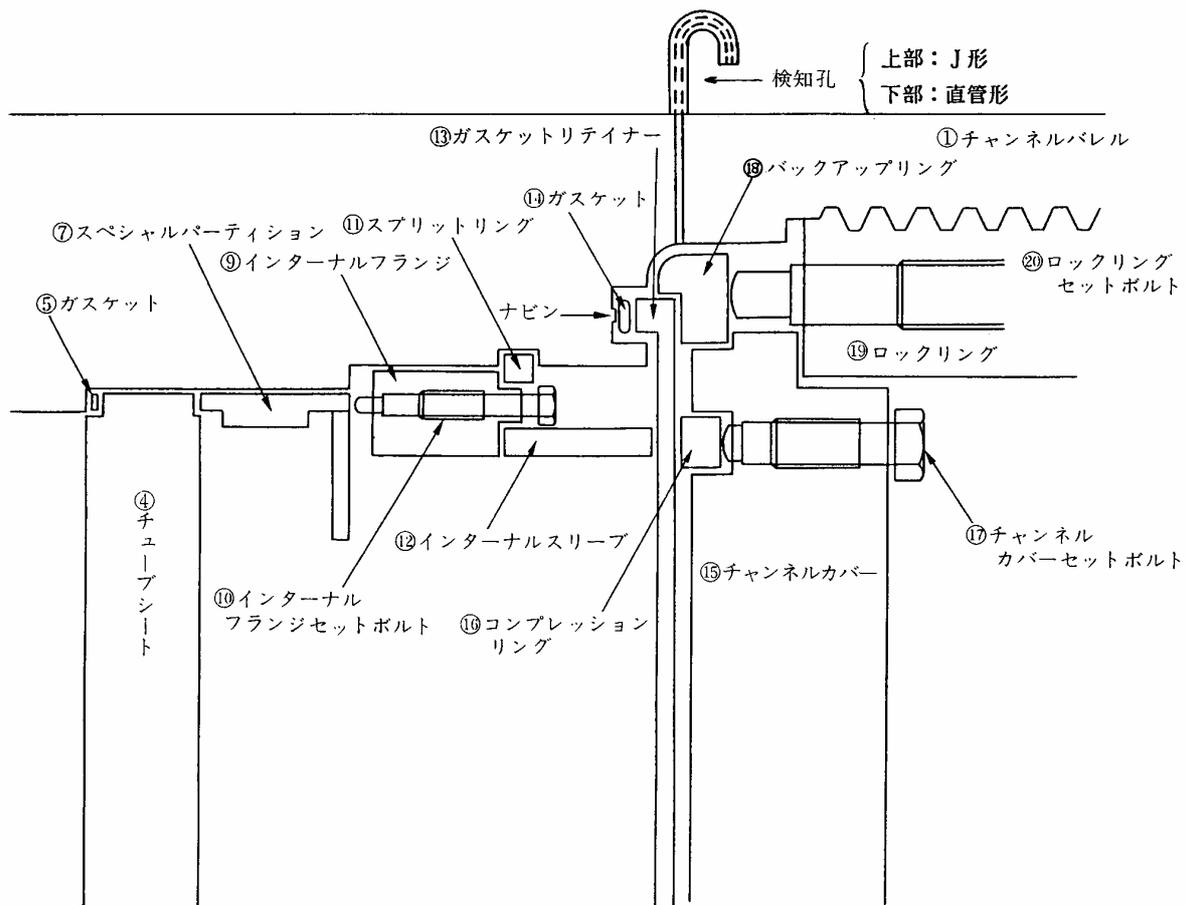


図 2 気密性の確保の詳細

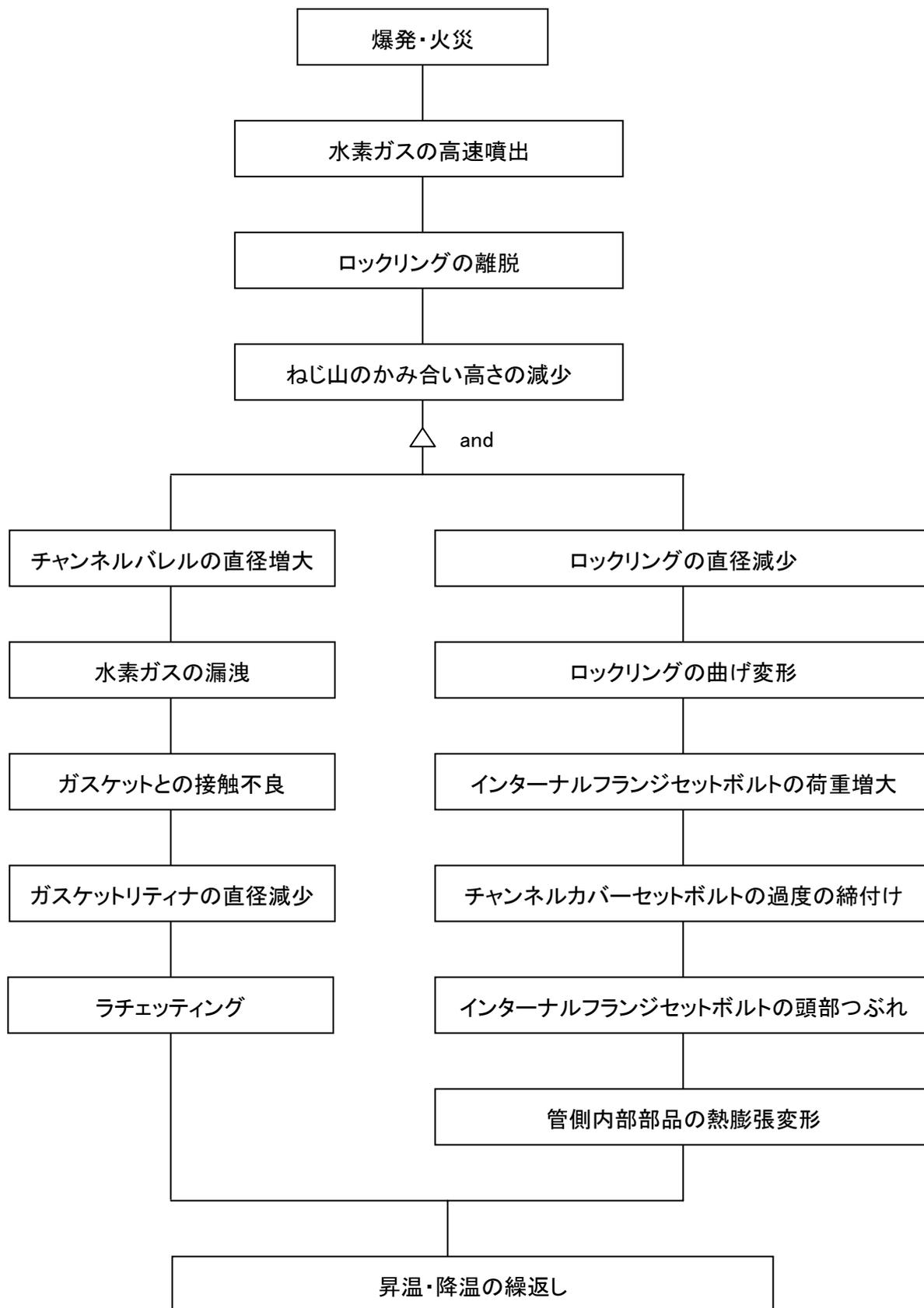


図 3 破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー図

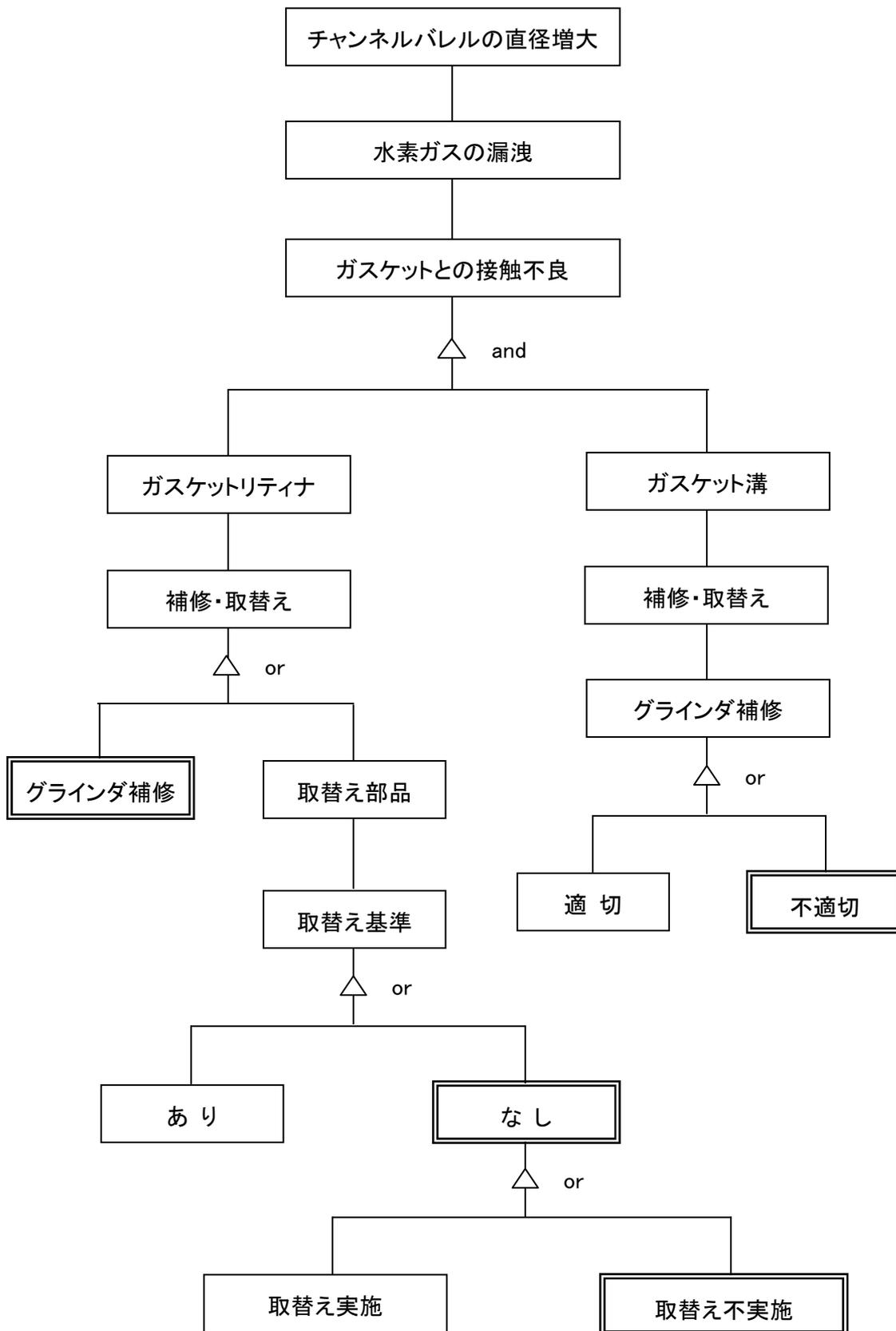


図 4 機器の補修・取替えにおける不適切・不良に着目したフォールトツリー図(1)

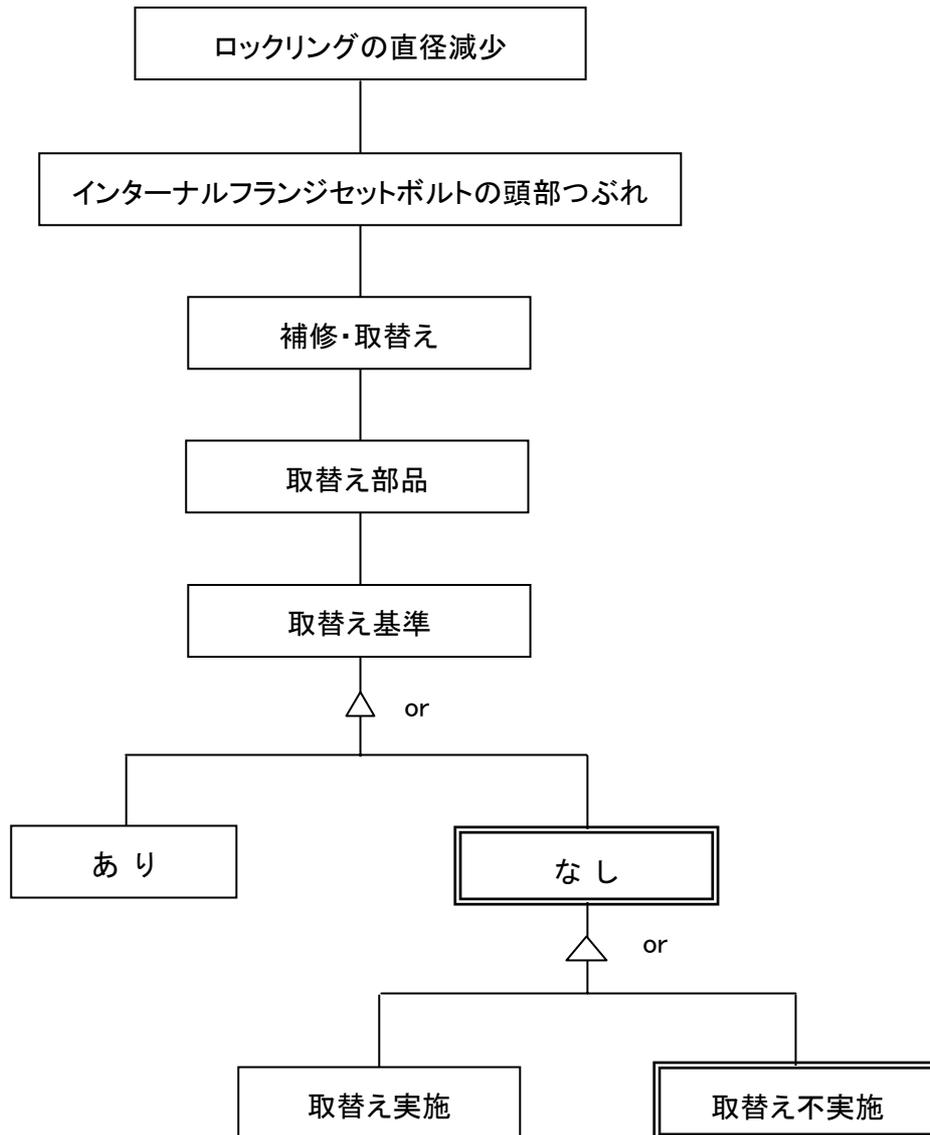


図 5 機器の補修・取替えにおける不適切・不良に着目したフォールトツリー図(2)

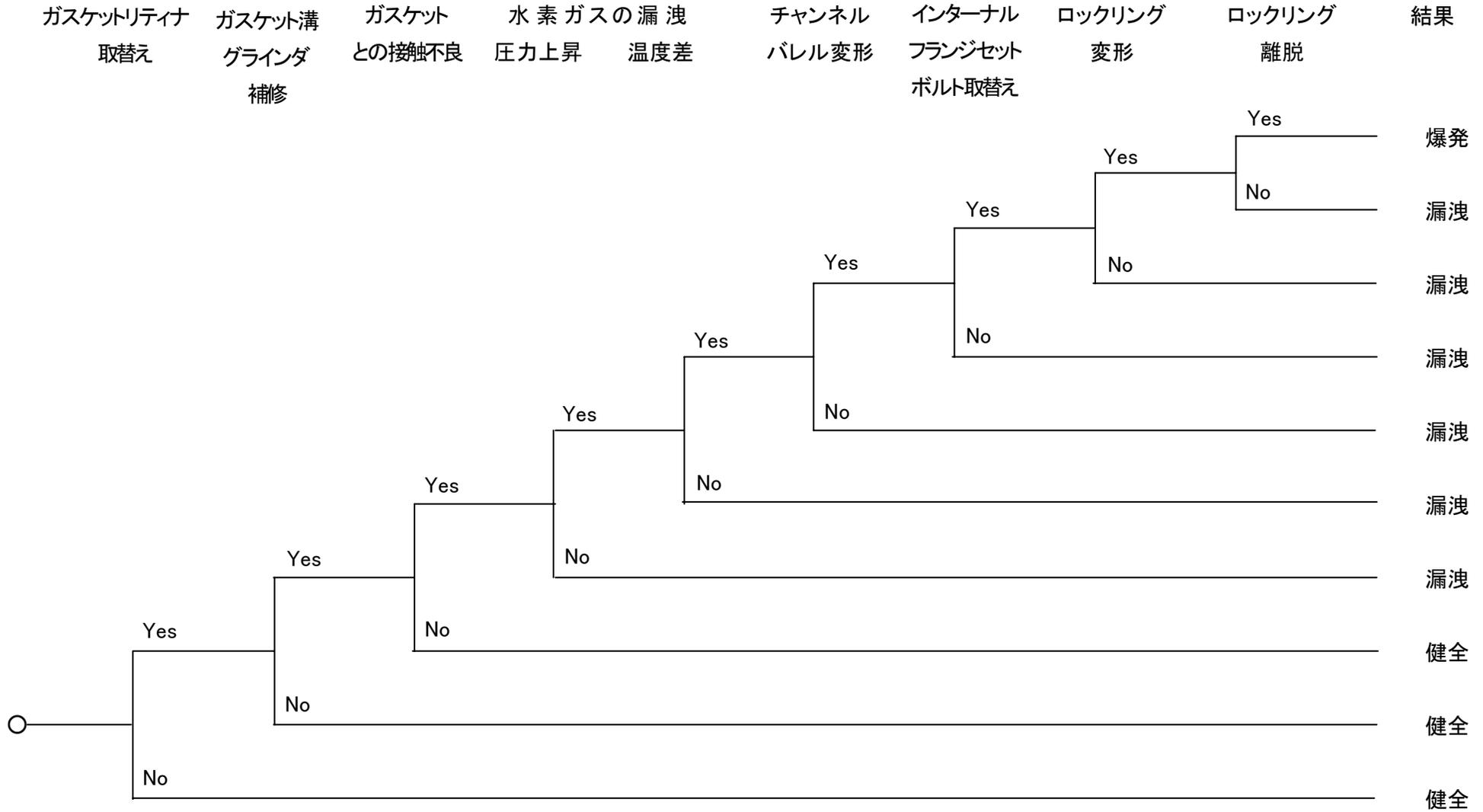


図 6 熱交換器ふた板の離脱のイベントツリー図

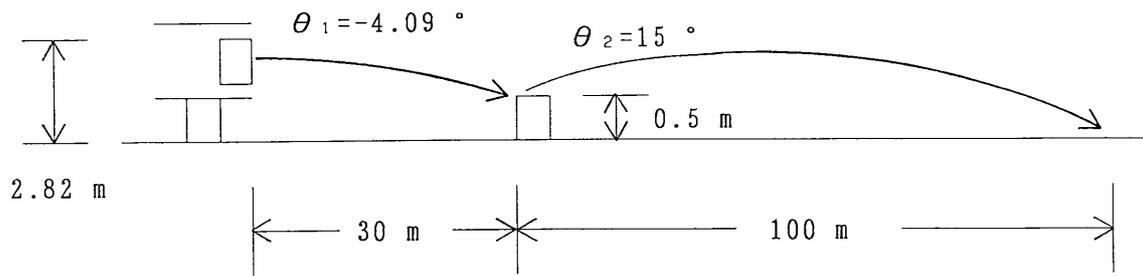


図 7 チャンネルカバーの飛翔距離