BLC形熱交換器の発災事故解析*

小林 英男^{*1}, 吉岡 照夫^{*2}, 竹花 立美^{*3}

Failure Analysis of BLC-Type Heat Exchanger

Hideo KOBAYASHI, Teruo YOSHIOKA and Tatsumi TAKEHANA

On October 16, 1992, a terrible explosion occurred at a VGO desulfurization unit at the Sodegaura petroleum refinement plant, Fuji Oil Co. Ten persons were killed and seven persons were seriously injured. The cause was delocking of a threaded lock ring which sustained a channel cover of a breech-lock-closure-type (BLC-type) heat exchanger. Failure analysis of the BLC-type heat exchanger was carried out. The cause and process of delocking of the lock ring were clarified.

Key Words: Failure Analysis, Explosion, Heat Exchanger, Gasket Retainer, Threaded Lock Ring, Hydrogen Gas Leakage, Ratcheting

1. 序 言

1992年10月16日(金)15時52分頃、千葉県袖ヶ浦市の富士石油(株)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。社会的な影響が大きいことから、同年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⁽¹⁾。以下では、爆発・火災事故の原因となったBLC形熱交換器の発災の原因と経過を解析した結果を示す。

2. 事故状況の概要

10月1日に触媒交換のために稼働を中止し、16日に稼働を本格的に再開した。15時30分頃から熱交換

器E-2801Aのホットボルディング(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のホットボルデ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。破損状況、災害状況の概要を以下に示す。

2・1 熱交換器構成部品の飛散 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)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。

2・2 飛散しなかった熱交換器構成部品の損傷 管側の内部部材の大半は飛散せず、発災に伴う損傷はなかった。U字形チューブを支えるクロスフロウバップルプレート同士を繋ぐシャフトは、発災後の脱圧で胴側の流体が急激に流動した結果、曲げ変形した。

2・3 反応塔の損傷 脱圧で触媒が吹き上げられ、反応塔の温度計と最上部のトレイが損傷した。

2・4 爆発・火災に伴う被害 爆発・火災によって発災熱交換器が焼損・変形し、日本鉱業(株)の潤滑油タンクと配管類に被害が生じた。また、爆風によって

* 原稿受付 平成5年6月21日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*2} 通商産業省環境局地局(〒100 東京都千代田区霞が関1-3-1)。^{*3} 高圧ガス保安協会機器検査事業部(〒105 東京都港区虎ノ門3-6-2)。

同製油所内 11 箇所の建屋(発災熱交換器からの距離 120~470 m)と日本鉱業(株) 7 箇所の建屋に窓ガラスの割れ、壁の破壊・変形等の被害が生じた。

3. 発災熱交換器の構造と履歴

3・1 構造 発災熱交換器 E-2801 B 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ブリーチロッククロージャ(BLC, breech lock closure)形で、製造メーカは千代田化工建設(株)である[1987年に製造部門は千代田プロテック(株)に移管]。構造を図1に示す。設計規格は ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 1 と TEMA“R”である。

3・2 内圧荷重の支持 図2を参照して、チャンネルカバー⑮に作用する内圧荷重は、ロックリング⑲を介してチャンネルバレル①のねじ部で支持される。

3・3 気密性の確保 熱交換器内部と外部の気密性は、ロックリングセットボルト⑳の締付け力でガスケット⑭によって確保される。また、管側と胴側は管板④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

⑰の締付け力がスペシャルパーティション⑦等を介して伝達され、ガスケット⑤によって確保される。

3・4 構造の特徴 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えいが生じるため、ホットボルティング作業が必要となる。フランジ形熱交換器の場合、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 形熱交換器の場合、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。

3・5 履歴 発災熱交換器は 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。

4. 水素ガスの漏えい発生の解析

事故状況から、事故は水素ガスの漏えい発生→ロックリング等の離脱・飛散→水素ガス的高速噴出→爆発・火災の経過をたどって発生したと判断される。10月16日15時47分頃、発災熱交換器上部の検知孔付近で白煙の発生が目撃されている。この白煙は検知孔の J 形管(内径 6 mm)の先端から管側の高温・高圧流体(減圧軽油等を含んだ水素、以下「水素ガス」という)が噴出し、J 形管の先端から 20 mm の距離にある保温材の外装カラー鉄板に衝突し、流体中の減圧軽油ミストが凝集したものと推定される。水素ガスの漏えい発生の原因としては、①ガスケット、ガスケットリテーナの材料等の不良、②ロックリングセットボルト、チャンネルカバーセットボルトの締付け力の不足、③

図 1 BLC 形熱交換器の構造

図 2 BLC 形熱交換器の気密性の確保

ガスケット部の接触不良が考えられる。詳細な調査・検討の結果、①と②の可能性は否定された。なお、ガスケットは1箇所で破断していたが、飛散後の衝突等の外力による結果と推定される。以下、③について検討・解析する。昇温・降温の繰返しに伴うガスケットリティナの直径減少に着目すれば、ガスケット部の接触不良によって水素ガスが以下に示す経過で漏えいすることが想定される。

4.1 昇温・降温の繰返しに伴うガスケットリティナの直径減少 図3を参照して、ガスケットリティナ(円盤状, SUS 321)はバックアップリング(円輪状, SCM 435)で周囲を拘束されており、昇温時のガスケットリティナの熱膨張変形はバックアップリングで拘束され、圧縮応力で降伏し、塑性変形が生じる。例えば、温度上昇を20°Cから240°C(定常運転温度200°Cに脱窒素率を上げるための温度上昇を考慮)とした場合、ガスケットリティナ(外径)の径方向自由熱膨張変位は $u_1=2.57$ mm, バックアップリング(内径)の径方向自由熱膨張変位は $u_2=1.96$ mmであり、ガスケットリティナには拘束の圧縮変位 $\Delta u=u_1-u_2=0.61$ mmが昇温・降温ごとに繰返される。

ガスケットリティナの圧縮ひずみは $\varepsilon=8.85 \times 10^{-4}$ となる。降伏ひずみは $\varepsilon_r=6.79 \times 10^{-4}$ である(200°C, 比例限度力 $\sigma_r=121$ MPa, 縦弾性係数 $E=178$ GPa)。 $\varepsilon < 2\varepsilon_r$ なのでシェイクダウンし、昇温・降温の繰返しに伴いラチェッティングによる圧縮ひずみは累

積しないことになる。しかし、実際には、ガスケットリティナはロックリングセットボルト(バックアップリング)とチャンネルカバーセットボルト(コンプレッションリング)の締付け力で拘束されており、この拘束は材料の熱膨張変形によって昇温時に強まり、降温時に緩むが、完全にはなくなる。したがって、ガスケットリティナは降温時に熱収縮変形するが、拘束されて引張応力が生じる。開放時に、引張応力は消滅し、代わりに圧縮残留ひずみが生じる。開放を伴う昇温・降温の繰返しによって、ラチェッティングによる圧縮ひずみが累積する。

開放検査記録によれば、ガスケットリティナの直径は設計値1379.0 mmに対して、経年的に減少し、1991年の開放検査時には1.8 mmの減少となっており、上記のラチェッティングが生じていたことを裏付けている。なお、ガスケットリティナの直径減少に寄与する別の要因として、昇温時のチャンネルカバーセットボルトのホットボルティング作業によって、ガスケットリティナのコンプレッションリング接触部分が軸方向変形することが挙げられる。

以上の要因を総合的に考慮して、ガスケットリティナのみを解析対象として、板厚が変化する軸対称薄肉シェル要素でモデル化し、熱弾塑性・大変形解析を実施した。昇温・降温を1サイクルとし、その間に内圧荷重、コンプレッションリングの強制変位、熱荷重の負荷・除荷の9ステップを考えた。1978年の運転開始から1991年の開放検査に至る5サイクルのガスケットリティナの径方向収缩量 δ_r と軸方向変形量 δ_z を解析した結果を図4に示す。 δ_r は開放検査記録と定性的に一致する結果が得られた。また、解析結果から、ガスケットリティナは径方向へ降温時に最も収縮し、昇温時のチャンネルカバーセットボルトのホットボルティング作業直前に最も膨張することがわかる。

4.2 ガスケットリティナのガスケット溝を越えた乗上げ、かみ込み ガスケットリティナの直径の設

図3 ガスケットリティナの径方向変形と軸方向変形

図4 ガスケットリティナの径方向収缩量 δ_r と軸方向変形量 δ_z の解析結果

計値は 1379.0 mm であり、ガスケットリティナの当たり面の幅(両面で 32 mm)を差引くと 1347.0 mm となる。一方、ガスケット溝の内径は 1345.0 mm であり、ガスケットリティナは直径が 2 mm 減少すると、ガスケット溝に収まらなくなる。発災熱交換器のガスケットリティナの当たり面とチャンネルバレルのガスケット溝を調査した結果、以下の痕跡が認められた。

①グラインド補修の痕跡 1991 年の開放検査時に、ガスケット当たり面の内側角部(以下「ガスケットリティナ角部」という)に周長の 3/4 にわたり最大幅 1.5 mm、高さ 1.5 mm の損傷(つぶれ)が発見されたために、ガスケットリティナの当たり面の厚さ(内側)を全周にわたって 2 mm 程度削り取り、ガスケットリティナ角部とガスケット溝の内側突起角部(以下「ガスケット溝角部」という)にグラインド補修を行った。

②乗上げ、かみ込みの痕跡 ガスケット溝角部に正面から見て上側右 1/4 周にグラインド補修面に沿って斜めに乗り上げた痕跡と上側左 1/4 周にかみ込んだ痕跡、ガスケットリティナ角部にもこれに対応する損

傷が確認された。

したがって、グラインド補修とガスケットリティナの直径減少の結果、ガスケットリティナ角部はガスケット溝角部への乗上げが容易な状態にあった。10 月 1 日に発災熱交換器の降温・降圧を行った際に、ガスケットリティナは径方向に熱収縮変形し、ガスケットリティナ角部はガスケット溝角部に乗り上げ、一部がかみ込んだと推定される。

なお、1989 年の開放検査時に、発災熱交換器と同形で、同一系の熱交換器 E-2801 C、E-2801 D(より低温の使用条件)のガスケットリティナは交換され、1991 年の開放検査時に、熱交換器 E-2801 A(より高温の使用条件)のガスケットリティナは機器更新で不要になった E-2801 C のガスケットリティナ(3 年間使用)を転用・交換されたものの、発災熱交換器のガスケットリティナはこれまで交換されていなかった。

4.3 水素ガスの漏えい発生 発災熱交換器の昇温・昇圧の開始とともに、ガスケットリティナは熱膨張変形する。水素ガスの漏えい発生メカニズムを図 5 に示す。かみ込み部分の軸方向変位は大きく、ロックリングセットボルトの締付け力が強く作用して、かみ込みはますます助長される。この部分での気密性は、金属同士の直接接触で保たれる。一方、かみ込み部分の周辺の乗上げ部分は、昇温に伴い径方向に熱膨張変形し、すきまが生じて水素ガスの漏えい発生に至る。すなわち、発災熱交換器の昇温・昇圧の開始とともに、既設のガス漏えい検知器では検知できない程度のごく微量の水素ガスの漏えいが始まり、温度・圧力の上昇に伴いすきまが拡大し、10 月 16 日 15 時 47 分頃に上部検知孔から目視で確認される程度の規模の漏えいとなり、その後の水素ガスの漏えい量は時間とともに急激に増大し、大規模な漏えい量に至って発災したものと推定される。

5. ロックリング等の離脱の解析

ロックリング等の離脱の原因としては、①熱交換器内部の異常内圧上昇(熱交換器内部の爆発、反応器内部の暴走反応)、②熱交換器外部の爆発・燃焼、火災(漏えい水素ガスの爆発・燃焼・断熱材の火災)、③チャンネルバレルの直径増大(温度差による熱変形、漏えい水素ガスによる熱変形、漏えい水素ガスによる内圧変形)、④ロックリングの取付け方法不良(ねじ山のかみあい不正常、ねじ山の着座、かみあいねじ山数の減少)、⑤ロックリングの直径減少[曲げモーメントによる周方向変形(繰返し変形)]が考えられる。詳細な調査・検討の結果、①、②、④の可能性は否定された。

図 5 水素ガスの漏えい発生メカニズム

5・1 チャンネルバレルの直径増大(③) ③はロックリングとチャンネルバレルのねじ山のかみあい高さの減少をもたらし、ロックリングの離脱の原因となる。図面上でロックリング側雄ねじの山径の最小値は $\phi 1424.7$ mm, チャンネルバレル側雌ねじの山径の最大値は $\phi 1419.3$ mm であり、ねじ山のかみあい高さは $\Delta h = 2.70$ mm となる。

発災熱交換器の昇温・昇圧時には、ホットボルトティン作業のために正面側フランジ部の断熱材を取り外していた。したがって、ロックリングとチャンネルバレルの間に温度差が生じ、この温度差によってチャンネルバレルが相対的に熱膨張変形し、直径が増大する。発災熱交換器の通常運転条件(内圧, ボルト荷重)と保温条件を入力として(胴側温度 250°C , 管側温度 200°C , 外気温度 20°C), 断熱材が有る場合となしの場合に有限要素法で定常熱伝導変形解析を行った結果、ねじ山のかみあい高さは断熱材が有る場合の 2.04 mm からなしの場合に 1.70 mm に減少した。この現象は発災熱交換器と同形の熱交換器の昇温・昇圧時には通常に起こるもので、設計上も考慮されているが、後述する⑤との複合効果の原因となる。

同様に、漏えいした高温の水素ガスによるチャンネルバレルの熱膨張変形の可能性が考えられる。管側の高温・高圧流体は水素ガス 5 wt.% と減圧軽油 95 wt.% であり、このうち水素ガスは熱容量が小さく影響を無視できるが、減圧軽油の熱量の影響は無視できない。高温・高圧流体(約 200°C)がロックリングとチャンネルバレルのねじ部に漏えいした場合、ロックリングとチャンネルバレルに熱量を供給し、肉厚の薄いチャンネルバレルが早期に熱膨張変形し、ねじ山のかみあい高さが減少する。しかし、水素ガスの漏えいが目視で確認されるようになってから発災まで約 5 分を要していることから、この影響はさほど大きなものではなかったと推定される。

図 6 ロックリングの直径減少の計測結果と解析結果の比較

前述したように、水素ガスの漏えい量は時間とともに急激に増大し、発災直前には大規模な漏えい量に至ったものと推定される。その結果、上部と下部の 2 個の検知孔(内径 6 mm)からだけでは脱圧し切れず、チャンネルバレル内の各部材とねじ部のすきまに水素ガスが侵入し、圧力が管側の内圧 731 MPa 近くまで上昇し、チャンネルバレルが膨張変形し、直径が増大することが考えられる。この直径増大によってロックリングとチャンネルバレルのねじ山のかみあい高さは大幅に減少する。内圧を 731 MPa として、有限要素法で内圧変形解析を行った結果、ねじ山のかみあい高さは奥側で設計値 2.70 mm から 1.95 mm に減少した。さらに、上述した温度差による熱変形と漏えい水素ガスによる内圧変形を同時に解析した結果、ねじ山のかみあい高さは奥側で 1.29 mm に減少した。

5・2 ロックリングの取付け方法不良(④) ④の可能性は否定された。ただし、1979 年の開放検査時に、すでにガスケットリティナの軸方向変形量が約 8.6 mm であったことが確認されている。開放後のロックリング組立時に、この軸方向変形量に相当するねじ 2 山分のかみあい数が奥側で不足する。しかし、ねじ部の強度計算は実際のねじ 23 山に対して 20 山で行われ、設定荷重 17.7 MN に対して十分な強度が保証されている。しかし、かみあいねじ山数の減少は後述する⑤との複合効果の原因となるので、総合解析結果では、これを考慮する。

以上の検討・解析から、③がロックリングの離脱に及ぼす影響が明らかになった。しかし、③のみによって、ロックリングが離脱することはない。以下では、ロックリングの離脱の原因として、⑤について検討・解析する。

6. ロックリングの直径減少の解析

発災熱交換器の飛散したロックリングの寸法計測結果を図 6 に示す。製作許容誤差を考慮しても(図面寸法, Max. 1216.4 , Min. 1216.0 mm), 奥側の直径が約 2 mm 減少していることがわかる。発災熱交換器に隣接する同形熱交換器 E-2801 A (より高温の使用条件)でも同様の変形が認められることから、飛散・衝突による変形ではなく、発災以前に生じた変形と考えられる。なお、他の同形熱交換器 E-2801 C, E-2801 D (より低温の使用条件)では、同様の変形は認められなかった。この直径減少によってロックリングとチャンネルバレルの奥側のねじ山のかみあい高さは減少し、ロックリングの離脱の原因になったと推定される。

6・1 ロックリングの外力と変形 中空円筒形状

のロックリングには、奥側端面上の内周近傍で内圧荷重とインターナルフランジセットボルト荷重が分布力として作用し、外周上のねじ部が支点としてこの反力を受ける。また、これとは別に、ロックリングセットボルト荷重が作用している。これらはすべて軸圧縮力であり、変形は軸方向に生じ、直径減少をもたらすことはない。しかし、上記の分布力と反力は曲げモーメントを誘起し、奥側で圧縮、正面側で引張りの周方向応力が生じる。この周方向応力が降伏応力を超えるほど十分に高ければ、ロックリングは奥側で圧縮塑性変形し、直径減少に至る可能性がある。管側の内圧は発災直前の計測記録結果から 731 MPa であることが確認されており、ロックリングが塑性変形を起こす過大な外力は、インターナルフランジセットボルト荷重以外にあり得ない。

6・2 インターナルフランジセットボルト荷重

インターナルフランジセットボルトの役割は図 2 に示した。管側(高压側)と胴側(低压側)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コンプレッションリング→ガスケットリティナ→インターナルスリーブ→インターナルフランジ→インターナルフランジセットボルト→スペシャルパーティションと伝達され、ガスケットによって確保される。管側の内部部材(インターナルスリーブ、インターナルフランジ、インターナルフランジセットボルト、スペシャルパーティション)は SUS 321 で、本体胴(低合金鋼)よりも線膨張係数が大きく、昇温時に熱膨張変形し、ガスケットを締付けると同時に、ガスケットリティナ→コンプレッションリング→チャンネルカバーセットボルト→チャンネルカバー→ロックリングと力を伝達する。この熱膨張変形とその拘束によって生じる圧縮力の定量的解析は、かなり難しい問題である。

そこで、インターナルフランジセットボルトは昇温時に生じる内部部材の過大な熱膨張変形と拘束力を、ボルト先端のつぶれ(圧縮塑性変形)によって吸収する役割をもっている。ボルト 1 本当たりの荷重の最大値(圧縮塑性変形荷重)は 54.9 kN と設定されていた(ボルト総荷重は $54.9 \text{ kN} \times 44 \text{ 本} = 2.41 \text{ MN}$)。しかし、昇温・降温の繰返しで、ボルト先端のつぶれが増大すれば、ガスケットの気密性を確保するために、降温後の昇温時にボルト先端のつぶれを補うチャンネルカバーセットボルトの締付け(ホットボルティング作業)がつけに必要となる。その結果、オーステナイト系ステンレス鋼に特有な著しいひずみ硬化と繰返し硬化によって、塑性変形応力は上昇し続け、過大なボルト荷重になる。同時に、チャンネルカバーセットボルトの締

付けによって、ガスケットリティナのコンプレッションリング接触部分が軸方向変形する。前述したように、この軸方向変形(へこみ)はガスケットリティナの直径減少に寄与する要因の一つである。すなわち、インターナルフランジセットボルトの先端のつぶれを補うチャンネルカバーセットボルトの過度の締付けが、ガスケットリティナの直径減少のみならずロックリングの直径減少をもたらすことになる。

開放検査記録によれば、1979 年の開放検査時に発災熱交換器のインターナルフランジセットボルト 44 本中の 30 本の先端につぶれ(最大で 6 mm)、軸に曲りを発見したが、2 本は再使用可能と判断し、交換しなかった。その後の開放検査時にも、ボルト先端のつぶれ量にかかわらず全数の交換は行わず、全数の 20% を定期的に交換していた。なお、発災後に 44 本の全長を測定した結果、基準寸法からの収縮量(先端つぶれ量)が 5 mm 以上のボルトが 31 本を占めていた。すなわち、ボルトの定量的な交換基準は定められておらず、ボルトを適切に交換しなかったために、ボルト荷重は設定値に対して大幅に増加していたと推定される。

インターナルフランジセットボルト荷重の推定結果を以下に示す。①は前述した設定値である(総荷重 2.41 MN)。②は同一仕様の新品のボルトの圧縮試験結果で、温度 200°C で 5 mm の変形に 196 kN の力が必要であることが確認された(総荷重 8.62 MN)。③は発災熱交換器に使用されていたボルトから試験片を採取し、圧縮試験を行った結果で、温度 200°C で降伏応力は 416 MPa に上昇していることが確認された(総荷重 11.5 MN)。実際のボルト総荷重は 8.62 MN 以上、11.5 MN 以下と考えられる。

6・3 ロックリングの直径減少の解析 インターナルフランジセットボルト総荷重として上記の三つの値、2.41、8.62、11.5 MN を用いて、有限要素法で弾性解析と弾塑性解析を行った。ロックリング奥側の周方向圧縮応力は、総荷重 2.41 MN の場合に材料の 200°C での降伏応力 240 MPa を超えないが、総荷重 8.62 MN の場合には超えて塑性変形し、総荷重 11.5 MN の場合には塑性変形が大規模に拡大して、直径が減少することが確認された。解析結果と計測結果の比較の一例を図 6 に示す。実際には、昇温・降温に伴いボルト荷重は負荷・除荷が繰返される。この繰返し荷重によってロックリングの塑性変形はさらに増大する。すなわち、過大なボルト荷重の繰返しで、ロックリングの直径減少の原因と推定される。

7. ロックリングの離脱の総合解析

以上の検討・解析の結果、発災以前のロックリングの直径減少と発災時のチャンネルバレルの直径増大（温度差による熱変形と漏えい水素ガスによる内圧変形）によって、ロックリングとチャンネルバレルのねじ山のかみあい高さが減少したことが、ロックリングの離脱の主要原因と考えられる。

7・1 ねじ山のかみあい高さの解析 この三つの主要原因による影響を有限要素法で総合解析した。総合解析は前述した個別の解析をも含んでいる。ねじ山のかみあい高さの解析結果をまとめて表1に示す。表1において、かみあいねじ山数が20山の場合、チャンネルバレル側は奥側から3列めまでかみあいがなく、奥側1列めは実際の4列めを意味している。

通常運転条件では、ロックリングとチャンネルバレルのねじ山のかみあい高さは設計値2.70 mmに対して2.04 mmが確保されており(解析番号①)、ガスケットリティナの軸方向変形(へこみ)によってかみあいねじ山数が23山から20山まで減少しても、その影響はほとんどない(解析番号②)。これにロックリングの直径減少を考慮すれば、1.01 mmに大きく減少するけれども(解析番号③)、ロックリングが離脱することはない。

一方、ホットボルティング作業のために正面側フランジ部の断熱材を取り外した場合、温度差による熱変形でねじ山のかみあい高さは2.04 mmから1.70 mmに減少する(解析番号④)。さらに、漏えい水素ガスによる内圧変形を考慮すれば、ねじ山のかみあい高さは1.29 mmとなるが(解析番号⑥)、ロックリングの直径減少がなければ離脱することはない。

解析番号⑧では、以上のすべての要因を考慮している(かみあいねじ山数20山、ロックリングの直径減少、温度差による熱変形、漏えい水素ガスによる内圧変形)。この解析では、ロックリングの直径減少の測定結果から、ねじ山のかみあい高さの初期値を奥側で1.57 mm、正面側で2.08 mmと仮定した(解析番号③の場合も同様)。ねじ山のかみあい高さは通常運転条件の2.04 mmから0.07 mmへと大幅に減少し、奥側でほとんどかみあいのない状態となる。

7・2 ロックリング離脱のメカニズム 有限要素法による総合解析で得られたねじ山のかみあい高さの減少の結果から、ロックリングの離脱のメカニズムは以下のとおりと考えられる。

①ねじ山のかみあい高さの減少によって、チャンネルバレル側は奥側から12列め(ロックリング側の9列め)までのねじ山は荷重をほとんど負担せず、荷重は正面側のねじ数山に集中する。表1の解析番号⑧の場

表 1 ねじ山のかみあい高さの解析結果

Analysis number	Operating condition	Number of thread	Decrease in dia. of lock ring	Increase in dia. of channel barell		Contact height of thread (mm) Upper : Inner side Lower : Outer side
				Thermal deformation	Pressure deformation	
①	Normal	2 3	—	—	—	2. 0 4 2. 2 7
②		2 0	—	—	—	2. 1 1 2. 2 6
③		2 0	○	—	—	1. 0 1 1. 5 8
④	Disaster (Increasing of temp. & pressure, hot bolting)	2 3	—	○	—	1. 7 0 2. 1 4
⑤		2 0	—	○	—	1. 7 7 2. 1 2
⑥		2 3	—	○	○	1. 2 9 1. 7 9
⑦		2 0	—	○	○	1. 3 5 1. 7 8
⑧		2 0	○	○	○	0. 0 7 0. 9 0

合、チャンネルパレル正面側1列めのねじ山先端角部が線接触となり、最初に塑性崩壊し、つぶれることが確認された。チャンネルパレル正面側1列めのねじ山先端が塑性崩壊すると、角部の線接触は面接触となり、対応するロックリング側(正面側から4列め)のねじ山先端の応力が上昇して、塑性崩壊する。

②上記①のねじ山先端の塑性崩壊によって、ねじの傾斜角(すべり角)が増大し、軸方向荷重の径方向分力が生じ、ロックリングの直径減少、チャンネルパレルの直径増大をもたらし、ねじ山のかみあい高さがさらに減少した。

③ねじ山の塑性崩壊とかみあい高さの減少によって剛性が低下し、ねじ部全体の荷重が再配分する。その結果、荷重をほとんど負担していなかった奥側のねじ山も荷重を負担することになるが、荷重を負担すると曲げモーメントを誘起し、ロックリング奥側では圧縮の周方向応力が発生して直径減少をもたらす(発災以前の直径減少を助長する)。また、この場合にも軸方向荷重の径方向分力が生じ、ロックリングの直径減少、チャンネルパレルの直径増大に寄与する。したがって、ねじ山のかみあい高さが減少し、奥側でかみあい高さがなくなるねじ山数が増大した。

④荷重の再配分の結果、チャンネルパレル正面側2列めと対応するロックリング側(正面側から5列め)のねじ山先端が塑性崩壊した。

⑤以下、上記の②から④が瞬時のうちに繰返され、ねじ山先端の塑性崩壊が正面側から奥側へ向けて伝ばすると同時に、かみあい高さがなくなるねじ山が奥側から正面側へ向けて伝ばし、ねじ部全体がねじ山先端の塑性崩壊か、またはかみあい高さがなくなるかのいずれかの状態となってロックリングが離脱した。

なお、発災後にレプリカを採取して調査した結果、ロックリング側とチャンネルパレル側両方のねじ山先端に塑性変形の形跡が認められた。これはロックリングが離脱する際、ロックリング側ねじ山先端がチャンネルパレル側ねじ山先端をこすりながら抜け出した結果と推定される。一方、チャンネルパレル奥側2列めまでとロックリング正面側2列めまでは、塑性変形の形跡がなく、かみあい状態になかったことを裏付けている。いずれにせよ、ねじ山の根元がせん断崩壊した形跡がまったく認められないことは、上述したねじ山の

かみあい高さの減少によるロックリングの離脱のメカニズムを立証するものである。

8. 結 言

BLC 形熱交換器の発災の原因と経過を解析した。結果を要約すれば以下のとおりであり、これらを解析し、定量的に立証することができた。

水素ガスの漏えい発生

(1) ガスケットリティナはラチェッ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補修と相まって、降温時にガスケット溝を越えた乗上げ、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えい発生に至った。

ロックリングの離脱

(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を過度に締付けることになり、インターナルフランジセットボルト荷重が増大し、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えい水素ガスによる内圧変形が、チャンネルパ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パレルの直径増大の複合効果で、ねじ山のかみあい高さが著しく減少し、チャンネルパ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。

爆発・火災等

(5) ロックリングの離脱によって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。

調査・検討・解析に際して、事故調査委員会、通商産業省環境立地局保安課、高圧ガス保安協会、富士石油(株)、千代田化工建設(株)、千代田プロテック(株)の関係各位に多大のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 千葉県富士石油袖ヶ浦製油所事故調査委員会報告書、(1993-3)。