

クリープの高圧ガス事故の注意事項

高圧ガス保安協会

1. 目的

石油精製、石油化学では、加熱炉管、改質管(リフォーマーチューブ)、分解管(クラッキングコイル)など、高温、高圧の過酷な環境で使用される設備がある。こうした過酷な環境では、クリープを考慮した適切な設計、寿命評価、余寿命評価などが求められる。

事故事例データベース¹⁾で抽出したクリープの高圧ガス事故の件数は7件[※]であり、その数は決して多いとは言えない。しかしながら、令和元年度にとりまとめた高圧ガス事故概要報告では、13件のうち2件がクリープの高圧ガス事故であった。うち1件は、クリープの高圧ガス事故という報告はなかったが、高圧ガス事故概要報告を作成するために詳細に調査した結果、クリープの高圧ガス事故と確認された。したがって、実際にはクリープの高圧ガス事故の件数は、事故事例データベースに登録された7件よりも多いことが推定される。

また、事故調査解析委員会は、令和元年度の高圧ガス事故概要報告作成結果を受け、石油連盟、石油化学工業協会に対し、対策等の検討をお願いした。

そこで、本調査では、クリープの高圧ガス事故について、過去の事故事例の調査に加え、関係者に対するヒヤリング調査等も行い、主に石油精製、石油化学等の関係者が今後の対策を図るために参考となる注意事項をとりまとめる。

※ 事故事例データベースから、キーワード「クリープ」で抽出した事故10件のうち、ガスケット、パッキンなどのシール部材のクリープ現象という報告3件を除いた件数。

2. クリープの基礎知識

1) クリープの種類

材料に応力を作用する場合、材料が変形し、応力に対応するひずみが直ちに発生する。通常は材料に作用する応力を一定の値に保持すれば、変形は進行せず、ひずみはその値にとどまっていると考えてよい。ところが、特定の温度以上になると、時間の経過とともにひずみが増大する。一定温度で一定の応力を作用する場合に、時間とともにひずみが増大する現象をクリープという。にクリープの種類を、下記に示す。

①クリープ変形

高温(絶対温度で表示した融点の約50%を超える温度)において、一定応力のもとでひずみが時間的に増大し続け、断面積が減少する現象を、クリープ変形という。塑性変形のメカニズムがすべり(転位の移動)であるのに対して、クリープ変形のメカニズムは原子空孔の拡散による結晶粒の変形と、これを補完する粒界すべりである。温度をパラメータとするクリープひずみと時間の関係を、クリープ曲線という。クリープ曲線は、遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープの三つの領域に区分される。遷移クリープは、1次クリープともいい、クリープの初期の変形速度が大きい領域である。定常クリープは、2次クリープともいい、変形速度がほぼ一定な領域であり、クリープ寿命のほとんどをこの領域が占める。加速クリープは、3次クリープともいい、クリープの最終段階で、急速に変形し、最終破断に至る。定常クリープでは、高い応力では転位上昇によるクリープが、低い応力では原子空孔の拡散による拡散クリープが支配的となる。クリープ曲線のモ

デル化としては、遷移クリープと定常クリープを一つの式で表現できる **Blackburn** 式、定常クリープを簡単な式でモデル化した **Norton** 式がある。**Blackburn** 式はステンレス鋼、**Norton** 式は広範囲の金属材料に適用されている。

②クリープ破壊

クリープ変形の結果として、破壊に至る現象をクリープ破壊という。破壊のプロセスは、結晶粒界への原子空孔の拡散、微小空洞(キャビティ:拡散成長型空洞)の生成、成長、合体と最終破断である。クリープ破壊は、粒界破壊となる。応力が高い場合には、粒界または粒内に生成した微小空洞(ボイド:非拡散成長型空洞)が時間依存型の粒内変形によって成長、合体し、粒内破壊になることもある。温度をパラメータとする応力と破断寿命(破断時間)の関係を、クリープ破断曲線という。クリープ破断曲線は、温度と破断寿命を組み合わせたラーソン・ミラー パラメータを用いて表示できる。

③クリープ疲労

高温低サイクル疲労において、ひずみサイクルの保持時間中にクリープが生じ、応力がリラクゼーションする。したがって、疲労の損傷とクリープの損傷を独立に評価し、それを線形加算する。しかし、単純な線形加算は成立せず、加速効果がある。これをクリープ疲労相互干渉効果という。具体的には、疲労の寿命比(回数/寿命)とクリープの寿命比(時間/寿命)の和を、1 以下の 0.3~ 0.6 に制限する。

④クリープ脆化

クリープ損傷により延性が低下する。これをクリープ脆化という。一定応力のクリープ試験の絞りまたは絞りから得られる真破断ひずみを、クリープ破断延性という。クリープ破断延性は、引張試験の破断延性よりも低下する。

⑤応力リラクゼーション

一定応力のもとでひずみが時間的に増大する現象が、クリープである。逆に、一定ひずみのもとで応力が時間的に減少する。これを応力リラクゼーション(応力緩和)という。クリープと応力リラクゼーションは、材料にとって表裏の特性である。

2) 寿命予測

実構造物に対する寿命予測は数十万時間までが要求されている。実際の使用条件(温度、荷重)に基づきクリープ試験を行うと、破壊までに長時間を要するため、高温、短時間でクリープ試験を行い、結果を外挿するラーソン・ミラーパラメーター法(以下「**LMP** 法」という。)が、クリープ寿命予測で多く用いられている。**LMP** 法の外挿は、最長破断データから 3 倍の外挿が目安となる。十分なデータに基づく場合でも 10 倍が限界である。**LMP** 法では、同一の材料において、温度、応力、破断時間の異なる試験データを整理し、最適曲線または下限曲線を設定し、任意の温度、圧力におけるクリープ破断寿命を予測することができる。なお、同じ規格材でも寿命で 10 倍程度の差があるため、製造条件および化学成分に依存する微視的組織にも注意が必要である。

応力が変動する場合のクリープの累積損傷則は、応力ごとのクリープ損傷の和が累積で 1 となったときに破壊すると定義している。累積損傷則には、使用時間の破断時間に対する比で損傷を定義する時間消費則と、クリープひずみの破断延性に対する比で損傷を定義する延性消費則がある。

クリープの余寿命予測の実験方法としては、実構造物から試験片を採取し、クリープ試験により余寿命を予測する方法がある。結果を得るまでに時間を要するが、高い評価精度が期待できる。非破壊評試験方法を適用すれば、実構造物から試験片を採取する必要がなく、比較的短時

間で消費した損傷の結果が得られる。非破壊試験方法の対象には、硬さ、結晶粒変形、組織、炭化物組成、析出物粒間距離、電気抵抗、超音波、A パラメータ、ボイド面積率、ボイド個数密度などがある。解析により予測する方法としては、実構造物全体の損傷分布を対象とし、使用条件に対応した余寿命予測が可能である。しかし、モデル化、材料データの選定を含めた解析条件の設定に十分な配慮が必要となる。

3) 技術基準

設計温度がクリープ領域に達する材料の許容引張応力の値は、高圧ガス保安法特定設備検査規則第 14 条第 5 項で、以下のように規定されている。実際には、応力が許容引張応力以下であれば、10 万時間を超えてもクリープ損傷が問題となることはない。しかし、クリープ損傷の進行度を検査において確認し、検査結果に基く寿命消費率から、余寿命を予測し、設備検査、交換計画に反映することも行われている。

特定設備検査規則

第二章 特定設備検査

第二節 設計

第三款 加工

(材料の許容引張応力) 第十四条

5 設計温度がクリープ領域に達する材料の許容引張応力の値は、次の各号に定める値のうち最も小さい値以下としなければならない。

- 一 設計温度において千時間当たり〇・〇一パーセントのクリープ歪みを生じる応力の平均値(同じ種類の材料から作られた複数のクリープ試験片のクリープ試験により得られた応力の平均の値であつて、クリープ試験について十分な知見を有する者が定めたものをいう。)
- 二 設計温度において十万時間でクリープ破断を生じる応力の平均値(同じ種類の材料から作られた複数のクリープ試験片のクリープ試験により得られた応力の平均の値であつて、クリープ試験について十分な知見を有する者が定めたものをいう。)の一・五分の一
- 三 設計温度において十万時間でクリープ破断を生じる応力の最小値(同じ種類の材料から作られた複数のクリープ試験片のクリープ試験により得られた応力のうち最も小さい値であつて、クリープ試験について十分な知見を有する者が定めたものをいう。)の一・二五分の一

4) 設計

クリープ領域で使用する高圧ガス設備には、内圧によるクリープが公式による設計で考慮されている。一方、内外面の温度差による熱応力が大きい場合には、熱応力クリープが破壊モードになるため、公式による設計が適用できず、解析による設計の適用となる。特に、クリープ領域での運転時にき裂状欠陥の存在が想定される場合には、クリープき裂進展解析が必要となる。設計条件を超える運転異常、過度の減肉、溶接部(母材、溶接金属、熱影響部)における極端なミスマッチ、設計時に考慮されていない応力集中の発生などがある場合にも、クリープき裂進展解析が必要となる。

3. 事故の抽出

事故事例データベースから、以下のキーワードで抽出したところ、178 件(1. で挙げた 7 件の
 高圧ガス事故を含む。)の高圧ガス事故が該当した。

キーワード：改質炉、加熱炉、反応管、輻射部、輻射熱、対流部、浸炭、侵炭、デコーキング、
 リフォーマー、コンベクション、ラジエーション、接触改質、接触分解、熱分解、水
 素化分解、蒸気改質、異常燃焼

その内容を精査した結果、12 件の高圧ガス事故は、クリープの可能性があると判断した(1. で
 挙げた 7 件の高圧ガス事故を含む。)。クリープの可能性のある高圧ガス事故の概要を、表 1 に
 示す。なお、1. に記載のとおり、本調査では、ガスケット、パッキンなどのシール部材のクリープ
 現象は対象にしていない。

表 1 クリープの可能性のある高圧ガス事故の概要

No.	事故 コード	事故の名称 (事象、常用温 度、材質)	事故概要	判断理由および クリープの種類
1	1995- 016	天然ガス処理 装置の加熱炉 からの火災 (漏洩→火 災、 不明、 不明)	天然ガス処理装置の運転中、再生ガスヒーターの緊急停 止装置が突然作動し、同時に再生ガスヒーター煙突より 炎があがった。再生ガスヒーターの加熱コイルにパイロ ットバーナーの火災が直接接触し、コイルの表面温度が上 昇し、クリープ変形による膨れに伴い肉厚が減少し、内 部圧力に耐えることができなくなり亀裂が生じ、ガスが 漏えいし、火災に至ったもの。	事故概要にクリ ープ 加熱炉管の温度 上昇(バーナー 火災)によるクリ ープ変形
2	1995- 053	触媒移送管の 溶接部亀裂に よる漏えい・ 火災 (漏洩→火 災、 不明、 不明)	流動接触分解装置は落雷による停電のため緊急停止し ていた。運転を再開したところ、反応塔下部保温材の隙 間から白煙が上がったので、公設消防に連絡し、自衛消 防隊が消火器で消し止めた。当該溶接部にクリープ脆化 による割れが生じ、これが貫通して内容物が吹き出した もの。	事故概要にクリ ープ 溶接部の材料不 良(溶接材料選 定)によるクリ ープ脆化
3	1996- 011	重油直接脱硫 装置の加熱炉 管溶融 (漏洩→火 災、 不明、 不明)	重油直接脱硫装置の運転中、反応塔供給加熱炉の加熱炉 管が破損し、発災した。加熱炉管は入口側で 2 パスに分 かれ、出口側で合流する構造となっている。加熱炉の中 心にバーナーの焚口が 10 個設置されており、事故当時 10 個のうち 6 個を点火していた。加熱炉管の入口側が 軸方向に開口し、また U ベンド近傍が 4 ヶ所溶融して いる。長期的にバーナーを入口側に偏らせた焚き方をし ていたことにより局部的にコーキングが生成・成長し、 管壁温度が上昇し、材料強度が低下して短時間クリープ により破損したもの。	事故概要にクリ ープ 加熱炉管の温度 上昇(コーキン グ)によるクリ ープ変形

No.	事故コード	事故の名称 (事象、常用温度、材質)	事故概要	判断理由およびクリープの種類
4	2000-007	加熱炉管のクリープ破断による天然ガス噴出 (破裂、不明、不明)	天然ガス再生装置の運転を行っていたところ、加熱炉から噴出音がすると共に、黒煙状の天然ガスが噴出した。計器室にいた運転係員は直ちに緊急停止ボタンを押し装置を停止させた。事故時、加熱炉の圧力検知装置がガス漏れによる炉内の圧力上昇を検知し作動し、燃料の供給がストップしたので火災には至らなかった。調査の結果、加熱炉の内部に設置された加熱管の一部が開口し、ガスが噴出したもの。また管の外表面に亀裂と並行な熱疲労に類似した割れが認められ、割れ内部に酸化スケールが観察されることから、管素材の微小欠陥又は加工時の傷が存在し、間欠運転による熱疲労により割れが発生し破断したものとみられている。 【注記】1995-016 と同一の事業所で発生した事故	事故の名称にクリープ 加熱炉管の応力上昇(疲労き裂)によるクリープ疲労
5	2008-625	アンモニア製造施設ナフサ改質ガス漏えい (漏洩、770℃、SB410)	10月22日午前中、作業員がアンモニア製造設備の異音に気付き、ガスの漏えいを覚知したため、直ちにプラントを停止した。また、プラント内部の可燃性、毒性ガスは大気中に安全にブローし、保安用窒素でパージした。この漏えい事故に伴う火災・爆発の発生及び人的被害は無かった。調査の結果、ナフサ1次改質炉出口配管(材質:SB410、Φ577.6mm)の外面に、周方向のき裂(長さ:約130mm)が確認された。配管破損の原因は、当該配管外部に保温材が施工されていたため、配管外部温度が上昇し、配管材料の耐熱温度(約450℃)を超えて使用した事によるクリープ破断と考えられる。この配管は、平成20年7月の定修前までは、破損部に保温材は施工されていなかったが、定修時、一旦剥離した配管外部の保温材を再度被覆させる際、現場作業員の判断により、施工仕様書の保温材施工範囲外の箇所に保温材を被覆してしまった。そのため、それまでは配管外部表面温度は約180℃となっていたところ、保温材施工により当該配管外部表面温度は600℃を超える温度となり、クリープ破断が発生したものと推定される。今後、配管表面に温度計を設置することによる常時監視、年1回実施しているサーモグラフィによる定期検査については年2回とする等、監視・点検を強化することとした。また、保全方針、判定基準、保全周期を改善し、計画書に明記する等、保全計画書の見直し、工事仕様変更管理の見直し及び工事完了状態の確認を徹底することとした。さらに、プラント製作時の設計思想等、作業員に対する教育を検討することとした。	事故概要にクリープ 溶接部の温度上昇(保温材)によるクリープ脆化

No.	事故コード	事故の名称 (事象、常用温度、材質)	事故概要	判断理由およびクリープの種類
6	2014-372	接触改質装置の改質反応器ボトム配管からのナフサ、LP ガス漏えい火災 (漏洩→火災、 488℃、 1・1/4Cr-1/2Mo鋼)	事故当時、常圧蒸留装置の接触改質装置は通常運転中であつた。1 時 30 分頃に現場目視確認中、接触改質装置のリアクターR202 ボトムラインより出火しているのを発見した。消火器による一時的な消火を行うとともに公設消防への連絡、自衛消防隊が窒素/スチーム吹きかけを行った。なお、5 分前に運転員が巡回している際には火災は確認されておらず、巡回後に組成ガス内の発火点を超える温度でガスが漏えいし、自然発火したものと思われる。リアクターの降圧および窒素冷却を行い、リサイクルコンプレッサーの運転を停止し、公設消防と現場の鎮火を確認し、ガス検知器でガスなしを確認した。漏えい量は 115.1L である。3/4B 配管の開口部より内部流体が本管と枝管のすき間に漏えいし、ダブリングの溶接開口部(溶接欠陥または運転中の熱応力により、部分的に開口したと推定)から漏えいしたものである。現在の設計基準に基づくと、当該部の構造は継手による接続が必要である。一方、当該部は 22B 本管と 3/4B 枝管が継手なしの隅肉溶接で接続されており、その止端部にて開口が確認された。継手なしの隅肉溶接の止端部は継手ありに比べて相対的に応力集中度が高いことと、製作時の溶接後の低温割れが相まって貫通に至った可能性が想定されるものの、現時点では原因特定まで至っていない。そのため、不具合部のサンプル採取、組織観察などを行い、原因調査を引き続き実施する。今後は、漏えいの発生したダブリングおよび枝管を撤去し、開口部にねじ込みプラグを行い、シール溶接を行う。	噴出・漏えいの分類にクリープ溶接部の応力上昇(拘束→熱応力)によるクリープ脆化

No.	事故コード	事故の名称 (事象、常用温度、材質)	事故概要	判断理由およびクリープの種類
7	2018-428	水素製造装置からの水素ガス等漏えい (漏洩、900℃、KHR35CT)	8/15 1:40 頃、計器室において改質炉の炉内温度計の指示不良を確認したため、従業員が現地調査を実施したところ、改質炉(2階)反応間の出口配管付近(1階上部)からガス漏えいを視認した。その後、緊急停止・脱圧・窒素置換作業を開始し、119番通報等を実施。8/15～8/20に冷却作業、配管保温材解体および漏えい試験を実施し、8/21に反応間(C-1)下部に20cm前後の縦ワレがあることを確認した。漏えい箇所の非破壊検査等を実施した結果、き裂が生じた原因としては、反応管に充てんされている触媒の一部が経年劣化により活性低下し、吸熱反応が進まなかったことから、当該箇所周辺の反応管が局所的な高温状態になり、クリープ損傷に進展したものと推察された。き裂が生じた原因としては、反応管に充てんされている触媒の一部が経年劣化により活性低下し、吸熱反応が進まなかったことから、当該箇所周辺の反応管が局所的な高温状態になり、クリープ損傷に進展したものと推察される。	事故概要にクリープ 加熱炉管の温度上昇(検査不良)によるクリープ変形

No.	事故コード	事故の名称 (事象、常用温度、材質)	事故概要	判断理由およびクリープの種類
8	2003-047	脱硫装置加熱炉からの漏えい・火災 (漏洩→火災、800℃、SUS347HTB)	製油所の減圧軽油脱硫装置の通常運転中に、オペレータがパトロール中に加熱炉で通常と異なる燃焼状態を確認したので、脱硫装置の緊急停止作業を開始した。その後、加熱炉ののぞき窓から火炎が炉外へ出ているのを発見したので、自衛消防組織発令と共に公設消防に連絡した。連絡後、加熱炉出口配管が接続している熱交換器のボルト部から漏えいが起こり、シェル側の油が漏れて自然発火した。この火災は水による消火で5分後に鎮火した。加熱炉管側の火災は配管の一部が破裂して、水素、軽油等が流出し火災となったものである。事故後、加熱炉管を調査したところ、長手方向に穴があいており、発災部位付近のコーキングが多く、コークス層が認められた。開口の原因は高温およびコークスによる浸炭と考えられる。	データベースでは腐食による漏えい・火災 高圧ガス等事故調査報告書の添付資料において「クリープ破壊を示す金属組織」、「加熱炉の開口は、浸炭に伴い母材のクロム含有量が低下し、腐食により母材減少、高温短時間クリープが発生した。内面にコークスが堆積し、母材の浸炭およびクリープ損傷が促進された。」との記載あり。 加熱炉管の応力上昇(デコーキング→浸炭)によるクリープ変形
9	2004-113	脱硫装置加熱炉からの火災 (漏洩→火災、405℃、SUS321)	重油脱硫装置は通常運転中であったが、午前5時2分頃計器室パネルの警報が一斉に鳴り、ランプが点灯した。班長が現場確認のため計器室を出たところ、原料予熱加熱炉で火柱が見えたので、装置の緊急停止を行った。その後、加熱炉の消火及び周辺機器の冷却のための散水開始が開始された。2日後の4月23日午前10時に鎮火を確認した。加熱炉内部の加熱管から何らかの原因で漏えいして着火したものと推定される。	データベースでは原因不明による漏えい・火災 高圧ガス事故概要報告の調査において判明した。 加熱炉管の温度上層(コーキング)によるクリープ変形

No.	事故コード	事故の名称 (事象、常用温度、材質)	事故概要	判断理由およびクリープの種類
10	2004-255	改質反応炉の亀裂による火災 (漏洩→火災、925℃、KHR35CT)	改質反応炉下部において、保温材強化作業中の作業員が、改質反応炉下部配管の保温材隙間から炎が出ているのを確認し、直ちに計器室に連絡して連絡を受けた直長自ら消火器により消火した。当該配管では改質炉反応管下部の浸炭を防ぐために、ガス温度を非浸炭領域となる865℃以上となるように管理していた。しかし他の部分では3層にしていた保温材が、発災部分では1層と薄くなっており、さらに保温層と配管の間に隙間が発生していた。そのため外気が流入して予想以上の放熱が起り、金属管内の表面温度が部分的に低下して浸炭領域になったため亀裂が生じ、亀裂部位より高温の混合ガス(水素、炭酸ガス、メタン)が漏えいして自然発火したとみられる。	データベースでは腐食による漏えい・火災 浸炭による減肉が確認されている。減肉により応力が上昇し、クリープ損傷が発生したと判断した。 加熱炉管の応力上昇(コーキング→浸炭)によるクリープ変形
11	2010-166	接触改質装置の反応塔の配管接続部からの漏えい (漏洩→火災、540℃、STPA23)	事業所内で、13時24分頃、運転員が工事準備のため接触改質装置の第4反応塔(P-V4)へ行った際に、付近で火災(炎の高さ約50cm)を発見した。直ちに同装置を緊急停止し、市消防本部及び関係官庁への通報を実施した。脱圧操作、窒素による可燃性ガスの排除等を実施したことにより炎は見えなくなり、13時38分に消火を確認した。(市消防本部による鎮火確認は14時11分)原因は、運転停止時(常温)から運転時の温度上昇に伴う第4反応塔の上方への熱膨張により、硫化用配管の接続部に過大な応力が作用し、過去からの装置起動、停止の繰返しによる疲労破壊(高温での低サイクル疲労)を生じたためと推定される。	データベースでは疲労による漏えい・火災 溶接欠陥がなく、発停による高温低サイクル疲労となっているため、クリープ損傷の可能性ありと判断した。 HAZの応力上昇(拘束→熱応力)によるクリープ疲労
12	2018-191	接触改質装置(HF)反応塔出口の電動弁溶接線からの水素ガス及び改質油の漏えい火災 (漏洩→火災、538℃、ASTM A387Gr.C)	製造係が巡回点検中に、反応塔下流配管の保温内部より小火を覚知した。公設消防へ通報後、用役装置を除く全装置の緊急運転停止操作を行った。冷却・拡散のため発災箇所へスチームを吹き付けたところ、火はすぐに収まり、窒素を投入して鎮火を確認した。事故後の調査で反応塔出口レギュレーサー配管とバルブを接続する溶接線端部にクラックが発生していることが分かった。着火の原因は、クラック部から高温の内部ガス(水素および改質油)が保温内部に漏出し、空気と接触したことで自然発火したと推定される。クラックの原因については、当該反応塔は定期的に運転、再生を繰り返しており、その際に当該部が温度変化を繰り返す為、熱応力が繰り返し加わり、熱疲労割れが起こったためと推測される。	データベースでは疲労による漏えい・火災 高圧ガス事故概要報告の調査において判明した。 溶接部の応力上昇(サポート不良→曲げ応力)によるクリープ脆化

4. クリープの高圧ガス事故の統計と解析

クリープに起因する高圧ガス事故 12 件のクリープの種類の内訳は、クリープ変形 6 件、クリープ脆化 4 件、クリープ疲労 2 件であった。クリープ変形(6 件)は全て加熱炉管で発生し、うち 5 件が漏えい後に火災に至っている。クリープ脆化(4 件)は、触媒移送管、反応器などの出口配管の溶接部で発生し、うち 3 件が漏えい後に火災に至っている。クリープ疲労(2 件)は、加熱炉の反応管と反応塔の入り口配管の溶接部で発生し、うち 1 件が漏えい後に火災に至っている。

クリープは、材料、温度、応力の組み合わせで発生するため、クリープの原因を、材料不良、温度上昇、応力上昇に分けて整理した。材料不良は 1 件あり、溶接金属に延性が不足していたため、クリープ脆化による割れが発生した。温度上昇は 5 件あり、温度上昇の原因は、コーキング、バーナー火炎が直に当たったこと、施工範囲外に保温材を巻いたこと、運転による温度環境を踏まえた適切な検査管理が実施されなかったことである。応力上昇は 6 件あり、応力上昇の原因は、コーキングに起因する浸炭、腐食による減肉、配管拘束に伴う熱応力の発生、配管支持不良による曲げ応力の発生であった。

事件事例データベースを検索し、「クリープ」のキーワードがない 5 件についてもクリープの事故として解析を行った(表 1 No.8~12)。5 件はデータベースでは、腐食(2 件)、疲労(2 件)、原因不明(1 件)により漏えい、火災が発生したと記載されている。また、5 件のうち 2 件については、事故が発災してから約 1 年後に実施した高圧ガス事故概要報告の調査において、クリープに起因する事故であることが判明した。クリープの事故は、疲労、腐食と誤解され、見過されていること、火災事故として詳細な調査が行われていないことに加え、クリープ事象が正しく理解されていないため、クリープに起因する事故が発生しているにもかかわらず有効な対策が取られていないことが懸念される。

5. 注意事項

クリープによる高圧ガス事故について、注意事項を次に示す。

- クリープは高温で使用されている加熱炉管で多く発生している。加熱炉管は、炉内の位置によって温度履歴が異なるため、個別の温度履歴を踏まえた検査管理が重要である。
- コーキングが発生する場所では、炭素析出部分の温度が上昇するため、定期的に炭素を除去するとともに、余寿命予測に温度上昇を考慮する必要がある。また、オーステナイト系ステンレス鋼では炭素が析出した部分は浸炭によりクロムの欠乏が起りやすく、割れ、腐食減肉に加え、炭素量増加に伴い母材のクリープ特性が低下するため、クリープが助長されることに注意が必要である。
- 施工範囲を間違え保温材を被覆したことにより温度上昇し、クリープ変形する。一方、保温材の量が足りずに温度低下し、コーキングが発生して、クリープ変形した事例もある。保温材を使用する場合には、適切な温度範囲となるように施工上の注意が必要である。
- 金属材料を高温環境(融点(絶対温度)の 50%超)で使用する場合には、クリープを想定した適切な設計と保守管理を行うため、内圧以外の曲げ応力、熱応力、振動にも配慮する必要がある。また、高温酸化によりクリープが助長されることに注意が必要である。
- 一般的な金属材料のクリープデータは公開されているが、特殊な金属材料のクリープデータは公開されていない。加熱炉管などの機器メーカーでは、自社で取り扱う金属材料のクリープデータは蓄積している。ユーザは、定期的にクリープデータの更新の有無を機器メーカーに確認するとともに、必要に応じて検査計画の見直しを行うことが重要である。
- クリープは高温の高圧ガスが設備で発生するため、漏えい後に火災に至る割合が極め

て高い(9/12)。高圧ガス設備のクリープ対策には、漏えいの未然防止に加え、漏えい後の速やかな高圧ガス供給の停止措置が有効となる。

参考文献

- 1) 令和元年度高圧ガス事故事例データベース
- 2) 三浦直樹、“クリープ変形・破壊とその評価”、HPI オンライン技術セミナー材料の損傷・破壊の解析と予測の技術、日本高圧力技術協会、(2020)