

ガスケットの適切な施工について

1. はじめに

プラントの安全操作を行うにあたり、高圧力容器の適切な維持管理は必要不可欠である。取り扱う流体は可燃性、引火性、爆発性、毒性などの性質を持つ場合もあるため、漏えいが災害や事故に繋がる恐れがある。そのため、プラント従事者は、プラント内にある多数のフランジ締結部が適切な締結がなされているか、日々管理を行っている。

しかしながら、フランジ締結起因の災害事故件数は減少していないのが現状である。国内における高圧ガス事故の原因別推移をTable1 及びFigure1に示す。これらの統計が示すとおり、設備の維持管理不良による災害事故の総件数は減少傾向ではなく、更にはその構成要因の約30%を「フランジ締結起因」が占めている。そのため適切なフランジ締結はプラントの安全操作を行う上で重要な課題の一つである。

フランジ締結における技術と知識の底上げのため、ASME PCC-1¹⁾に代表されるガスケットの施工に関する規格の整備や、シールトレーニングセンターのようなガスケットの締結作業の教育プログラムが目玉されている。

本報では、フランジ締結が起因となったトラブル事例なども踏まえ、ガスケット施工における注意点を整理し紹介する。

Table1 設備の維持管理の不良による災害件数

西暦	腐食管理 不足	フランジ 締結起因	検査管理 不良	点検不良	容器管理 不良	計
2020年	104	72	22	37	14	249
2019年	155	84	13	35	10	297
2018年	124	99	19	35	13	290
2017年	113	97	29	30	8	277
2016年	109	109	20	42	10	290
2015年	93	60	31	17	21	222
2014年	78	55	19	11	16	179
2013年	80	56	28	16	20	200
2012年	65	59	65	8	11	208
2011年	67	66	66	8	20	227

出典：経済産業省「高圧ガス関係事故集計」

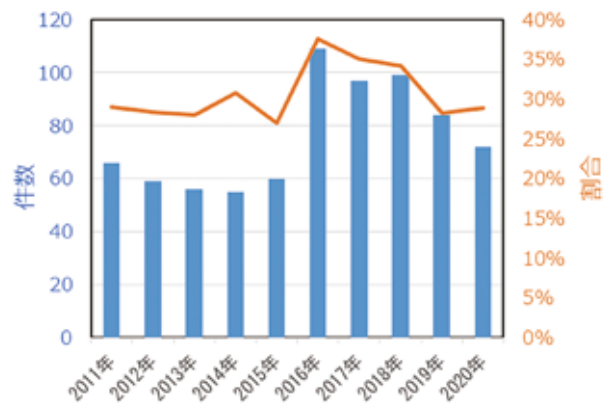


Figure1 フランジ締結起因災害の件数・割合

2. ガスケット施工によるトラブル事例

実際に発生したガスケット施工に関するトラブル事例から要因を分析すると締付け不足、過剰締付け、片締めが主要因に挙げられる。

締付け不足とは、ガスケット全体に適切な面圧が負荷されていない状態のことである。ガスケットが全面座の場合やフランジ・ボルト強度が不足する際に生じやすい。また、応力緩和などで更にガスケット面圧が低下することで、漏えいの発生、及び内圧に抵抗出来ずガスケットが流体に押し出されて破損が生じること(吹き飛び)もある。吹き飛びが生じたガスケット外観をFigure2に示す。

締付け不足とは反対に、過剰に締付けるとガスケットが圧縮破壊(圧壊)する場合がある。特にふっ素樹脂ジャケットガスケットで発生することが多い。Figure3のように多数の周状の亀裂が生じ破壊されることで、漏えいに至る。

片締めとは、偏った締付けによってガスケット面圧が不均一になる状態を指す。ガスケットに部分的な締付け不足や過剰締付けが生じることで、部分的な漏れや破断、変形が起こる。片締めの事例をFigure4に示す。一部の締付け力が低いため、フランジとガスケットの摩擦が低下し、内圧によって外に押出され、漏えいに至った事例である。

いずれのトラブルも締付け作業における不備に起因しており、締付け管理がいかに重要であるかが分かる。そこで、適切な締付け作業を行うため、基礎的な締付け手順、及び締付け管理方法を紹介する。



Figure2 締付け不足によるガスケット吹飛び事例



Figure3 過剰締付けによる圧壊事例



Figure4 片締め(一部締付け不足)による変形事例

3. 規格の締付け手順

一般的に管フランジは多数本ボルトにて締結されるが、締付け作業は通常一本ずつ行う。一旦締付けを終えたボルトの軸力は、他のボルトを締付けることによって変動し、ボルト軸力が低下する場合が多い。この現象を弾性相互作用と呼ぶ。弾性相互作用によるボルト軸力変動を補償し、ボルト締付け荷重を目標値に収束させるためには、複数回繰り返しの

締付けが必要となる。

このような複数回の締付け手順を示した規格として、ASME PCC-1¹⁾及びJIS B 2251²⁾を紹介する。ASME PCC-1、JIS B 2251ともボルトを対角(星形)に締付けた後、周回締めを行う。対角締めは、締付けトルクを段階的に増加させることで、ガスケットの片締め防止に効果的である。周回締めは隣り合うボルトで生じる弾性相互作用による締付け荷重の不均一を軽減させる効果がある。

ASME PCC-1¹⁾とJIS B 2251²⁾の比較をTable2に示す。JIS B 2251は、先に制定されたASME PCC-1を、より効率的にかつ正確に締付けられるようにした規格である。段階的に対角締付けを行う工程は、ASMEでは全ボルトが対象であったが、JISでは4本ないし8本の対象ボルトのみとしている。ボルト本数が多い場合により効率的である。目標トルクでの周回締付けについてもASMEではナットが回転しなくなるまでであるが、回数に上限を定めている。更に、ボルト本数12本以上の場合に目標トルクを110%とすることも、ボルト軸力を目標値に早期に収束するための工夫である。なお、JIS B 2251の適用範囲は、ジョイントシートガスケットとラジアル巻形ガスケットとされている。ただし、当社の実験結果から、No.GF300に代表される高機能シートガスケットやふっ素樹脂シートガスケットにも適用可能であることが分かっている。

Table2 JIS B 2251とASME PCC-1の締付け手順

JIS B 2251		ASME PCC-1	
段階	手順	段階	手順
仮締付け	4本ないし8本の対象ボルトのみ段階的に対角締め	仮締付け	全ボルト スナグトルク(20%以下)
本締付け	全ボルト周回締め100% ボルト本数12本以上は 目標トルク110% 周回数:4~6周	Round 1~3	全ボルト段階的に 対角締め
		Round 4	全ボルト周回締め100% (ナットが回らなくなるまで)
増締め	4時間以上経過後 本締付けと同様の締付け 周回数:1~2周	Round 5	4時間以上経過後 Round 4と同様の締付け

スナグトルク:ねじ座面を密着させるのに必要なトルク

4. 締付け管理方法

ガスケットの定量的な締付け管理方法として、トルク法、回転角法、トルクこう配法、超音波軸力計、及びボルトテンシオンナーによる軸力管理などがある。いずれの方法も一長一短があり、作業性、施工精度などのバランスを総合的に判断し選択する必要がある。Table3に各管理方法の比較を示す。

JIS B 1083 ねじの締付け通則³⁾ではトルク法、回転角法、トルクこう配法が提案されている。トルク法は、トルクレンチな

どを用い、締付けトルクのみを管理する。簡便で一般的な管理方法として広く用いられている。ただし、締付けトルクの約90%はねじ面や座面の摩擦で消費されるため、各部材の摩擦特性によりばらつきが生じやすい。

回転角法は、締付けによるねじの回転角を管理する方法である。ねじの弾性域の締付けにおいては、ねじの剛性が高い場合にばらつきが大きくなる。逆に塑性域の締付けでは回転角誤差の影響を受けにくい、ねじに塑性変形が生じるため再利用出来ないなどの課題がある。

トルクこう配法は、締付け回転角と締付けトルクのこう配を締付け指標とし、ねじの降伏荷重が目標値となる。初期の締付けのばらつきを小さくし、かつ、ねじの弾性域を最大限に利用する場合に用いる。塑性域の回転角法と同様、ねじの降伏点や耐力を超えないよう注意が必要となる。

ボルトの軸力管理は、座面との摩擦の影響がないため高精度な締付け管理が可能であり、超音波軸力計やボルトテンショナーなどの工具を用いて、ボルトの軸力を管理する。

超音波軸力計は、ねじの長さを測定し締付け前後のねじの長さの差から軸力を求める方法であり、軸力とボルトの伸びが比例関係にある弾性域でのみ適用出来る。精度が高く、測定自体も容易であるが、事前にボルト両端面を平滑にしておく必要がある。

ボルトテンショナーは、あらかじめ目標とする軸力まで油圧でボルトを引張り、ナットを締付けた後に油圧を開放することで所定の軸力を与える方法である。ボルトテンショナーを装着する分だけ、余分のねじ長さスペースが必要となる。超音波軸力計、ボルトテンショナーとも高精度ではあるが、時間と費用がかかるため、高圧配管や大口径フランジなどの重要箇所には用いられることが多い。

なお、定量的ではない締付けとして、小口径フランジではハンドスパナ、大口径フランジでは打撃レンチが用いられる場合がある。しかしながら、ばらつきが大きく、締付け力をコントロール出来ず、均一な締付けには熟練を要する。シールメーカーとしてはTable3に示した定量的な締付け管理方法を推奨する。

Table3 定量的な締付け管理方法

締付け管理方法	締付け指標	締付けの領域
トルク法	締付けトルク	弾性域
回転角法	締付け回転角	弾性域 塑性域
トルクこう配法	締付け回転角に対する 締付けトルクのこう配	弾性限界
超音波軸力計	ボルトの伸び	弾性域
ボルトテンショナー	ボルト軸力	弾性域

5. 締付け手順によるボルト軸力への影響

ASME PCC-1とJIS B 2251の締付け手順においてボルト軸力、フランジ面間を評価した結果を紹介する⁴⁾。試験方法をTable4, 5に、ボルト軸力の測定結果をFigure5、フランジ面間の測定結果をFigure6に示す。ガスケットは、膨張黒鉛をファイラ材としたうず巻形ガスケット(No.6596V)及びジョイントシートガスケット(No.6500)、寸法はJPI Class300 24inchである。

Figure5より、No.6596VにおいてはJIS B 2251の方がASME PCC-1より、ボルト軸力のばらつきは少なく平均値も高い結果となった。これは、JIS B 2251において「うず巻形ガスケットでは、仮締付け完了後に50%の締付けトルクで円周締めを行う」ことが規定されていること、目標トルクを110%としていることなどが挙げられる。うず巻形ガスケットはガスケット幅が狭く、圧縮量も大きい片締めが生じやすい傾向にある。なお、ASME PCC-1では円周締めは、ナットが回転しなくなるまでとなっており、Table5に示すように、JIS B 2251の周回数の方が多くなる場合もある。

次にFigure6のフランジ面間距離より、ボルト軸力の結果と同じように、No.6596VにおいてはJIS B 2251の締付け手順が最も面間距離が小さかった。また、フランジ面間距離のばらつきについては、ASME PCC-1の締付け手順でもボルト軸力のばらつきほどは大きくない結果となった。

Table4 試験条件

ガスケット	うず巻形ガスケット No.6596V	ジョイントシートガスケット No.6500
寸法	JPI Class300 24inch t4.5	JPI Class300 24inch t3.0
フランジ座の直径	φ692.2	φ692.2
ボルト	M39、24本	M39、24本
目標 ガスケット面圧	40MPa	40MPa

Table5 締付け手順

	JIS B 2251	ASME PCC-1
目標値までの 締付け段階	4段階	3段階
締付け手順	仮締付け時：対角締付け 本締付け時：円周締付け	対角締付け 円周締付け
対象ボルト	仮締付け時：4本 本締付け時：全てのボルト	全てのボルト
締付け完了までの 総段階数	11段階	8段階
備考	目標トルクの 110%で締付け	円周締付け時はナットが 回らなくなるまで締付け

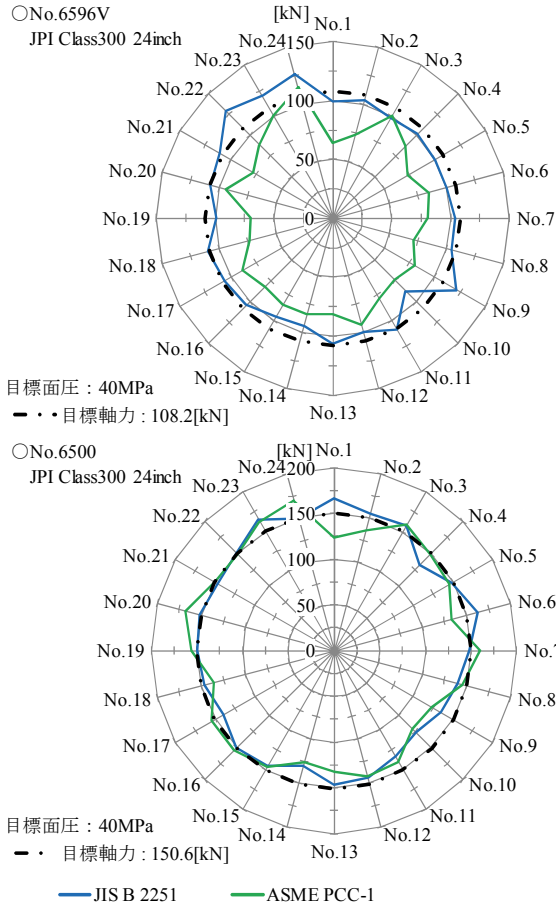


Figure5 ボルト軸力の分布

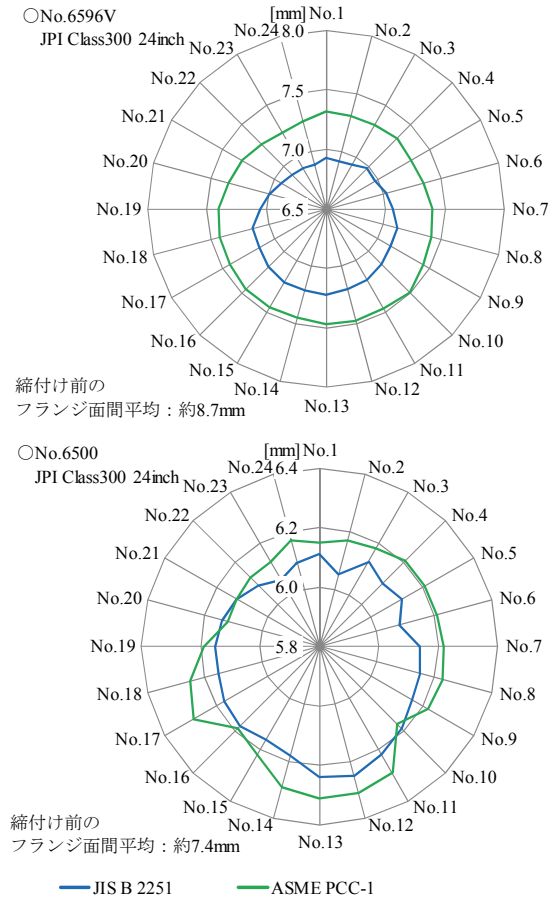


Figure6 フランジ面間距離

6. おわりに

国内プラントは設備の高経年化が進んでおり、2025年までにほとんどの設備稼働年数が40年超過となる。そのため、「事故発生リスク増大」「稼働率低下による収益性ダウン」が想定される。本報では、ガスケットのトラブル事例と基礎的な締付け手順、及び締付け管理方法を紹介した。当社はシールメーカーとして今後もシールエンジニアリングサービスを提供し、漏えいによる災害や事故の撲滅に貢献する。

7. 参考文献

- 1) ASME PCC-1, Guidelines for pressure boundary bolted flange joint assembly (2010)
- 2) Japanese Industrial Standards. JIS B 2251“フランジ継手締付け方法”, (2008)
- 3) JIS B 1083, ねじの締付け通則 (2008)
- 4) 藤原隆寛, “密封特性に対する締付け手順の影響”, Valqua Technology News Vol. 37 (2019)



中出 賢志郎
H&S営業本部



高橋 聡美
研究開発本部
商品開発部