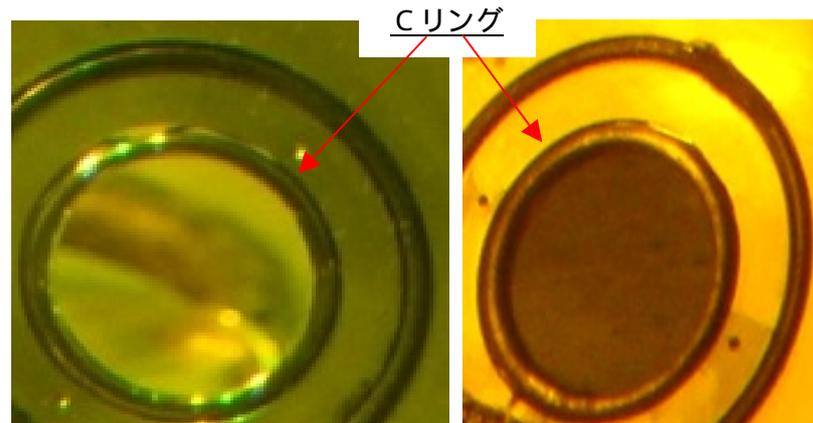


閉止フランジ部から液が漏れたことに対する調査及び評価

1. 閉止フランジの取り付け状況

閉止フランジは金属ガスケットとともに設置され、閉止フランジに取り付けられたボルトを、インパクトレンチを使用し締め付けることにより取り付けられる。インパクトレンチの締め付けによりCリングが潰れることでシール性が確保される。



当該フランジとともに設置されていた金属ガスケット(丸み残りCリングは潰れていない)

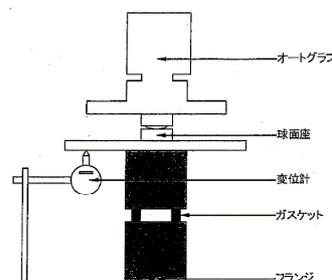
Cリングが潰れた金属ガスケット(以前使用していたもの)

今回当該フランジ(南側)に設置されていた金属ガスケットを観察した結果、Cリングは丸み残り、潰れていないことが分かった。また、北側の金属ガスケットについても同様に潰れていないことが分かった。このため、Cリングの機能が十分発揮されていなかった可能性があると考え、Cリングの状態を調査することとした。

2. Cリングの状態と締め付けトルクの関係

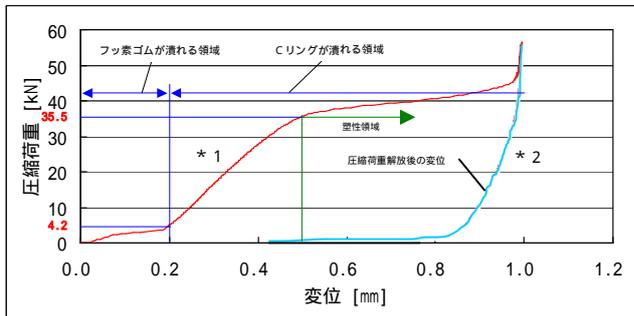
試験方法

フランジとフランジの間に金属ガスケット(Cリング、フッ素ゴム含む)を挟んだ状態で上面から荷重を掛けて荷重と変位の関係を調査した。試験概要図を以下に示す。

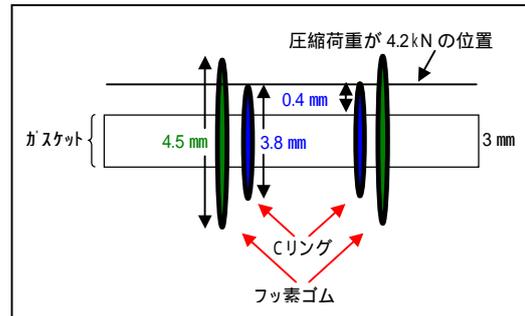


試験概要図

試験結果



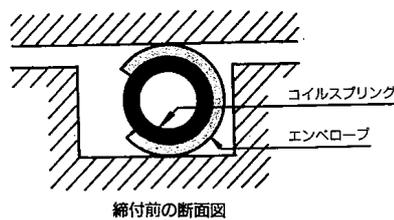
* 1 : 荷重を除々に加え、連続的に変位を測定した結果
 * 2 : 荷重を除々に開放し、連続的に変位を測定した結果



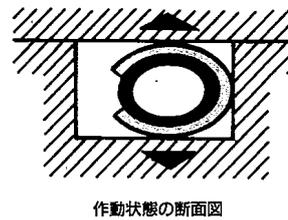
フランジ面とCリング、フッ素ゴムの位置関係

上図（左図）の試験データは、フランジとフランジの間に金属ガスケットを挟んだ状態で上面から荷重を掛けて荷重と変位の関係をプロットしたものである。

初期状態から荷重を掛けた結果、変位 0.2mm までがフッ素ゴムのみが潰れる領域（Cリングに接触していない領域）であり、変位 0.2mm 以降はフッ素ゴム及びCリングが潰れる領域である。また、Cリングは初期時には真円で圧縮時の反力が大きい、歪むに従い楕円形に徐々に変形し始め、塑性変形が起こる。この塑性ポイントが 0.5mm 程度である。（下図参照）



締付前の断面図



作動状態の断面図

漏えいが確認された閉止フランジとともに設置されていたCリングに掛かっていたトルクは確認出来ないが、通常のインパクトレンチ性能（約 70N・m）であればCリングが潰れる力が掛かるものの、実際のCリングが潰れていなかったという状況から通常のインパクトレンチ性能が出ていない可能性があると考え、インパクトレンチの性能を調査することとした。

また、上図（左図）より、Cリングが潰れない最大圧縮荷重とCリングが潰れて塑性変形が起こるポイント（塑性ポイント）での圧縮荷重に対するボルト（1本のボルト）の締め付けトルクを以下に示す。

考え方：圧縮荷重をボルト本数で除することによりボルト1本当たりの軸力が算出され、これをボルトの径及びトルク係数（ボルト自体とボルトを受ける側の摩擦係数により決まる値）を乗じることにより締め付けトルクが算出される。

圧縮荷重 4.2 kN の場合 (Cリングが潰れない最大圧縮荷重)

$$T = K \times (F/n) \times d = 0.199 \times (4.2 \times 10^3/3) \times 16/1000 = \underline{4.5N \cdot m}$$

圧縮荷重 35.5 kN の場合 (塑性ポイントでの圧縮荷重)

$$T = K \times (F/n) \times d = 0.199 \times (35.5 \times 10^3/3) \times 16/1000 = \underline{37.7N \cdot m}$$

ねじの呼び径 d=16 mm

ねじ本数 n = 3 本

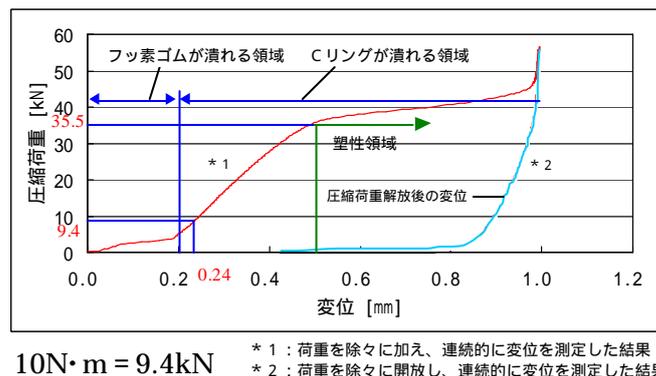
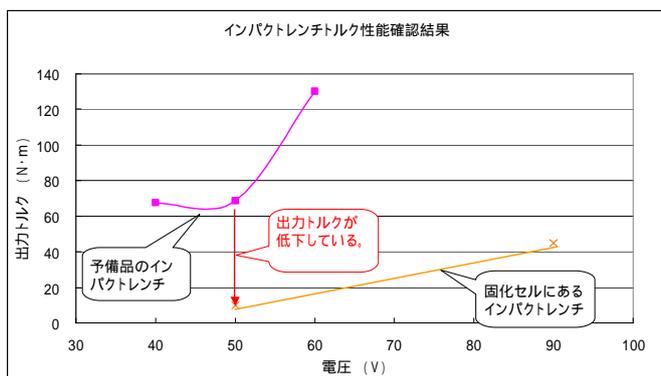
トルク係数 K=0.199 (JIS B 1083 参考表 1 における摩擦係数 0.15 の際のトルク係数)

インパクトレンチによる締め付けトルク T(N・m)

3 . インパクトレンチの締め付けトルク調査

今回漏えいが発生した閉止フランジの締め付け作業に使用したインパクトレンチの締め付けトルクは、固化セル内でインパクトレンチの姿勢を垂直にし、治具等を用いて確認した。

その結果、通常 70N・m 程度のインパクトレンチの締め付けトルクが 10N・m 程度に低下していることが確認された (2 回測定し、11N・m と 9N・m であった)。



当該インパクトレンチのこれまでの使用実績等を調査したところ、それ以前に使用していたインパクトレンチが故障したため、急遽セル内に入れたものであり、事前にインパクトレンチの締め付けトルクを確認せず、機器仕様からトルク管理方法に必要な電圧と締め付け時間の関係を確認してセル内に入れて使用していたことが確認された。

さらに、締め付けトルクが低下した原因として、モータの性能低下が考えられることから、インパクトレンチのモータ部における抵抗値測定 (通常 3 程度) を行ったところ、抵抗値が増大していることを確認した (抵抗値は、400M を超えていた)。抵抗値が増大する原因としては、当該インパクトレンチを本年 1 月の高レベル廃液の漏えい後における閉止フランジの取付け・取り外しに使用していたため、モータ内部のコイル部に硝酸 (漏えいした高レベル廃

液の硝酸)の影響で腐食等による異常が発生した可能性がある。なお、外観についても確認し、特に異常はなかった。

当該インパクトレンチ



(当該インパクトレンチの使用実績)

- 2003年8月 購入(2008年5月まで管理区域外で保管)
- 2008年6月～2008年12月 管理区域外にて訓練で使用
- 2008年12月 固化セル内搬入
- 2008年12月 結合装置取外し、ガラス溶融炉付属品取外し
- 2009年1月～2月 高レベル廃液供給配管閉止フランジ着脱
- 2009年2月～11月 セル内機器点検等に使用
- 2009年11月 締め付けトルク低下を確認し予備品と交換

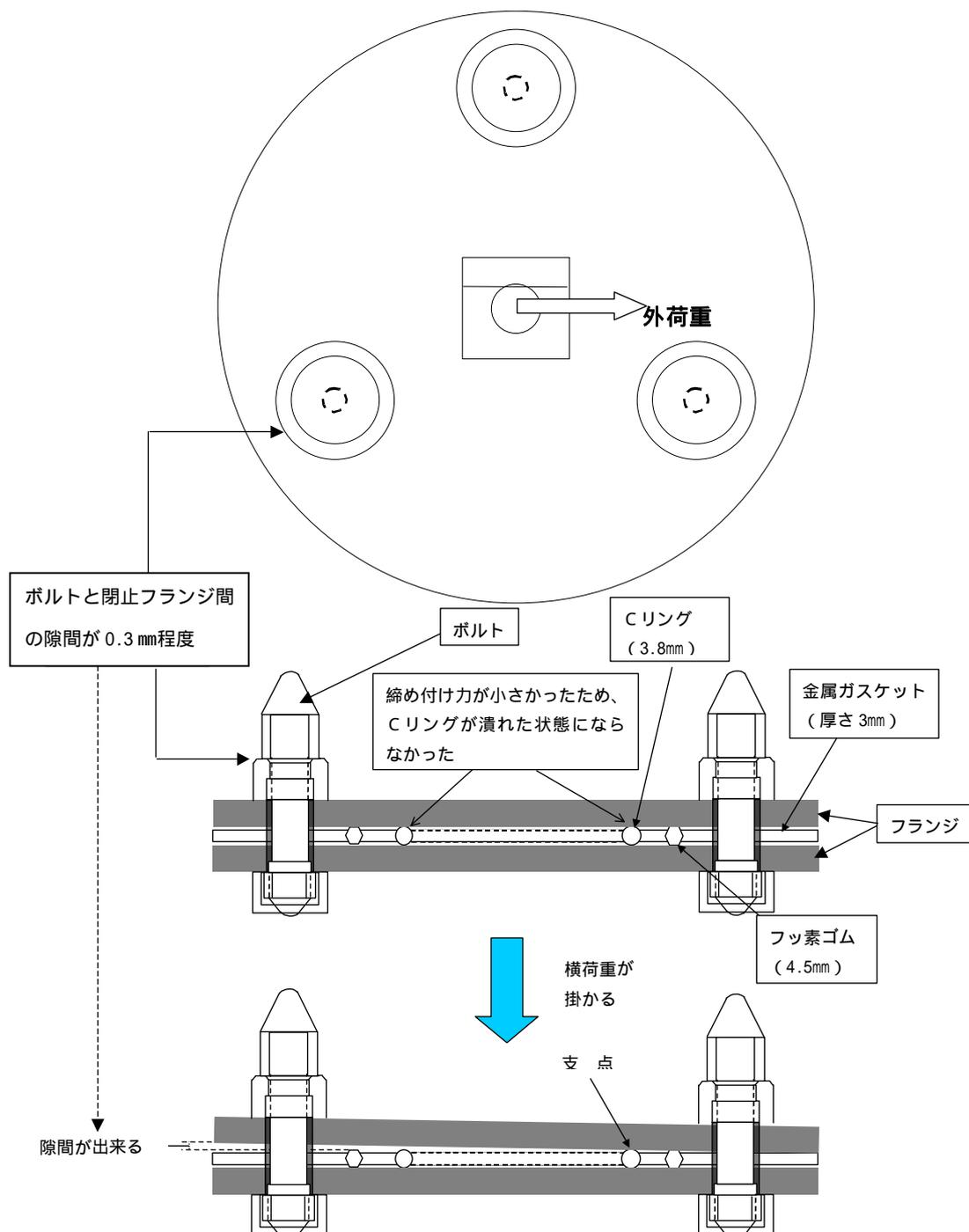
Cリングの状態調査結果及びインパクトレンチの締め付けトルク調査結果を踏まえ、インパクトレンチの締め付けトルクが低下した状態で締め付けた閉止フランジに外荷重が掛かった際に漏えいが発生するか等について、モックアップ試験等で確認することとした。

4. モックアップ試験等

4.1 外力発生によるフランジとガスケット間での隙間発生に対する評価

Cリングが潰れていない状態において一方向から荷重が掛かった場合にフランジ部とガスケットの間に隙間が出る可能性について金属ガスケットの構造等から評価を行った。

その結果、Cリングが潰れていない状態で、一方向から荷重が掛かったことにより荷重が掛かった側の金属ガスケットとフランジ部に隙間が出ることを確認した。



: ボルトと閉止フランジ間に隙間が 0.3 mm程度あれば、構造上横荷重が掛かった場合に金属ガスケットと閉止フランジ間に隙間ができることを確認した。また、漏えい後に南側閉止フランジのボルトの締め付け状態を確認した結果、ボルトに若干の緩みを確認した。

4.2 モックアップ試験

Cリングの外観観察によりCリングが潰れていなかったこと、金属ガスケットの構造等の評価によりCリングが潰れていない状態で隙間が出来ることが確認できたことから、モックアップ試験で隙間の確認及び隙間が開く状態で実際に液体が漏れるか否かを確認した。また、Cリングが潰れていなかったことから締め付けトルクが $10\text{N}\cdot\text{m}$ に低下していたインパクトレンチの締め付けトルクがさらに低下するかについて確認した。

(1) 外荷重によるフランジと金属ガスケット間の隙間確認

Cリングが潰れない最大締め付けトルクが $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ であることを受け、それ以下の締め付けトルクとして $1\text{N}\cdot\text{m}$ から $5\text{N}\cdot\text{m}$ までの締め付けトルクの状態を外荷重を掛けることによりフランジと金属ガスケット間に隙間が生じるか確認した。試験方法及び試験結果を以下に示す。

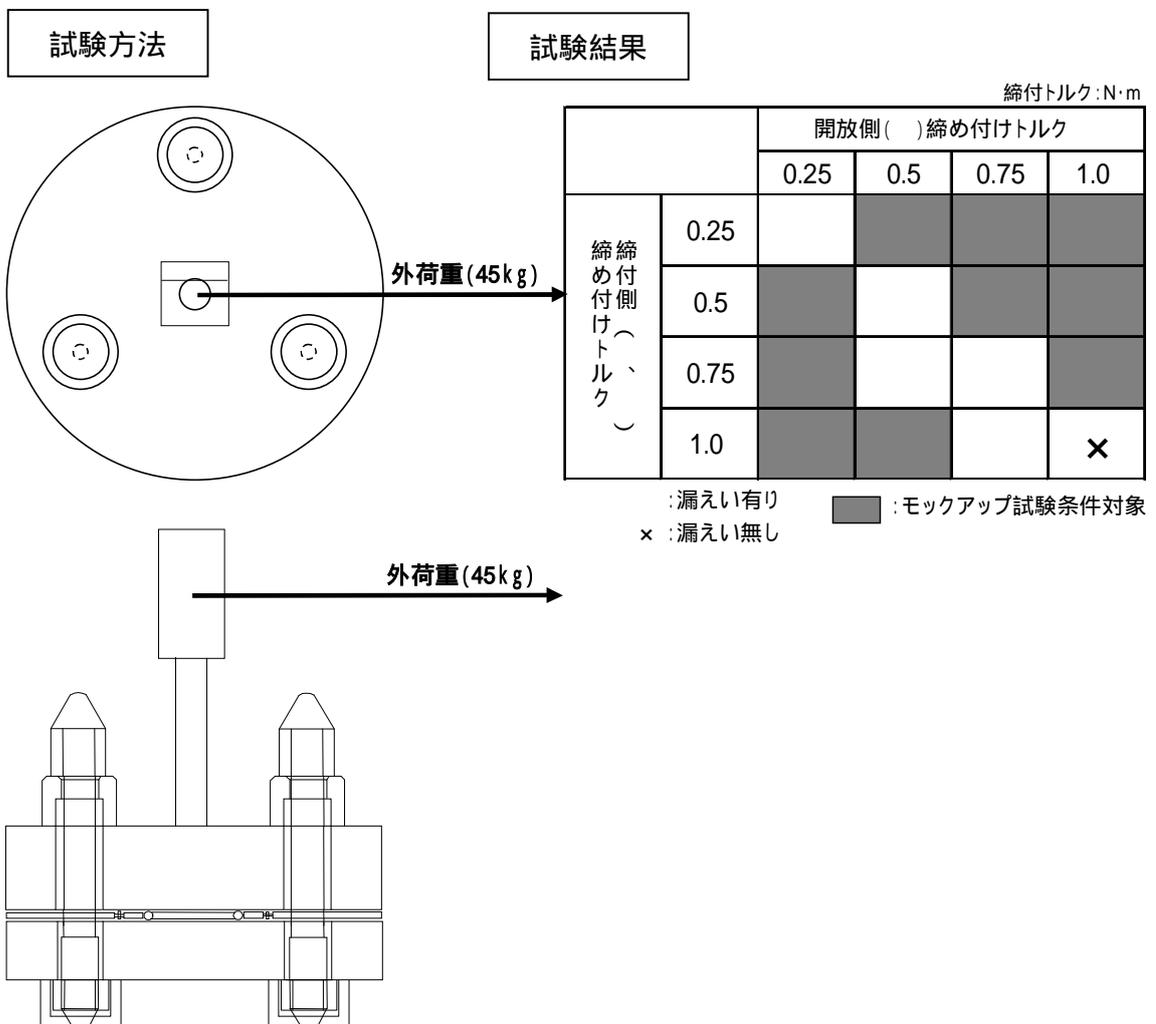
試験方法		試験結果	
	ボルト締め付けトルク (N・m)	外荷重 (Kg)	閉止フランジ観察結果
	1.0	45.0	 (開きあり: 0.58mm)
	2.0	45.0	 (開きあり: 0.20mm)
	3.0	45.0	 (開きあり: 0.18mm)
	4.0	45.0	 (開きあり: 0.16mm)
5.0	45.0	 (開きあり: 0.16mm)	

モックアップ試験の結果、1～4 N・m の試験条件において金属ガスケットとフランジ間に隙間の変化があることを確認した。

(2) 外荷重による漏えいの有無の確認

(1) の試験結果にてフランジ隙間が確認されたボルト締め付けトルクについて、1 N・m の締め付けトルクから順に漏れが生じるか試験を行なった。結果、1 N・m では漏れが生じなかったため、1 N・m 以下の締め付けトルクにて漏れが生じる条件の詳細調査を行なった。様々な締め付けトルクで取り付けた閉止フランジに対し外荷重を発生させ配管内部の液体が漏えいするか否かの確認を行った。

試験方法及び試験結果を以下に示す。





初期状態



外荷重無し状態で漏えい無し



外荷重を掛けて漏えい有り

モックアップ試験の結果、3つのボルトを $1\text{N}\cdot\text{m}$ 以上の締め付けトルクで締め付けた閉止フランジに外荷重を掛けても内部の液体が漏えいすることは無く、内部の液体が漏えいする条件としては締め付けトルクが $0.75\text{N}\cdot\text{m}$ 程度の場合であった。

補助ホイストチェーンが接触したことにより閉止フランジから漏えいが発生したことを踏まえると、固化セル内で使用していた $10\text{N}\cdot\text{m}$ 程度の締め付けトルクのインパクトレンチで締め付けを行っていたものの、実際の締め付けトルクが $1\text{N}\cdot\text{m}$ 以下になっていたことが考えられる。

この可能性について、遠隔による締め付け状態を模擬したモックアップ試験により確認することとした。

(3) 構造及び姿勢による締め付けトルクのばらつき確認

遠隔操作による閉止フランジの締め付け状態を模擬したモックアップ試験を行い、インパクトレンチの目標トルクを模擬し、実際の締め付けトルクとの関係について確認を行った(インパクトレンチは、締め付ける際の目標トルクを印加する電圧によって決定される)。試験方法及び試験結果を以下に示す。

試験方法



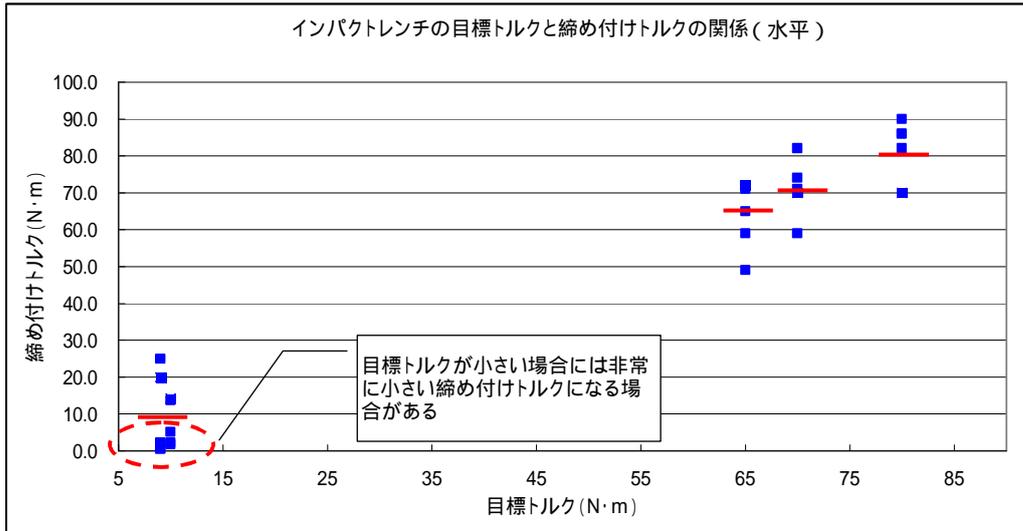
インパクトレンチ締め付け(垂直方向:
締め付けトルク確認を模擬)



インパクトレンチ締め付け
(水平方向:実機での遠隔操作による閉止フランジの
取付を模擬)

試験結果

目標トルク(N・m)	電圧(V) 1	締め付けトルク(N・m) 2				
9	38	0.6	25.0	20.0	2.3	0.6
10	41	13.8	2.3	14.2	5.2	1.8
65	50	59	49	72	71	65
70	52	59	74	70	82	71
80	53	86	90	70	86	82



- 1 垂直方向にて目標トルクになるように電圧調整
- 2 設定電圧にて水平状態で計測

垂直方向で目標トルクを 10N・m、9N・m に調整したインパクトレンチで水平方向での締め付け（遠隔操作での締め付けと同様な方法）を行った場合、1N・m 程度の締め付けトルクになる場合があった。

- ・締め付けトルク 10N・m：最小値 1.8N・m
- ・締め付けトルク 9N・m：最小値 0.6N・m

通常の締め付けトルク（70N・m）前後の値に調整したインパクトレンチで締め付けを行った場合は、締め付けトルクのばらつきを考慮しても十分な締め付けトルクが確保されていることが確認された。

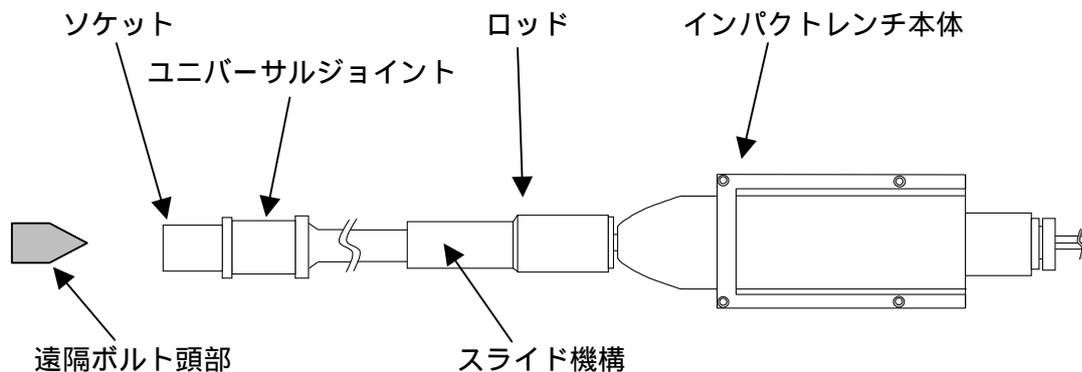
上記結果から、水平方向におけるインパクトレンチの締め付けトルクが低下したことによりボルトの締め付け力が 1N・m 程度になったボルトが存在した可能性があったものとする。

締め付け力が 1N・m 程度になったのは、モータの回転力が弱いため、インパクトレンチの押し付けバネの力により、ねじを回転する力が伝わりにくくなることによるものとする。

したがって、インパクトレンチの構造及び姿勢による締め付けトルクへの影響については以下のとおりと考えられる。

・インパクトレンチの構造

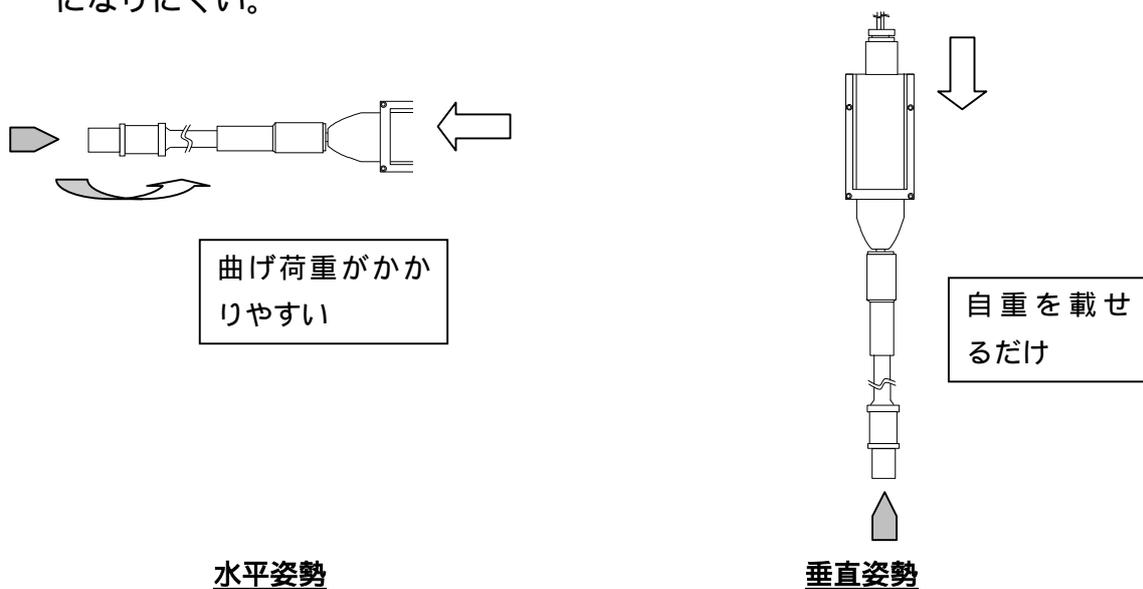
遠隔操作型インパクトレンチはパワーマニピュレータにより操作し、遠隔操作性を向上させるために、ソケットにはユニバーサルジョイントを設け、遠隔ボルト頭部はガイドしやすく山形にしている。また、ロッドには押し込んだ際に軸方向にスライドする機構を組み込んでいる。このように遠隔操作型インパクトレンチでは一般的なインパクトレンチに比べて、複雑な機構としていることからトルクの逃げが生じやすい。



・インパクトレンチの姿勢による影響

水平姿勢での操作に関しては、ソケットなどの荷重がインパクトレンチの回転部分にかかり易く、抵抗となる可能性が高い(特にエクステンション付きソケットの場合に差が出る)。

それに比べて垂直姿勢では軸に対して横荷重がかかり難いことから、抵抗になりにくい。



5 . 漏えいに至ったメカニズム

モックアップ試験等の結果から、補助ホイストチェーンが把持部に接触した際に配管内部の液体が漏えいに至ったメカニズムについて以下のように評価した。

硝酸等の影響で締め付けトルクが低下したインパクトレンチを、遠隔操作により水平方向の姿勢で使用したことにより締め付けトルクがさらに小さくなった。(インパクトレンチ調査及びモックアップ試験による締め付けトルクのばらつき確認より)

インパクトレンチの締め付けトルクが低下した状態でボルトを締め付けたため、ボルト締め付けトルクが $0.75N \cdot m$ (モックアップ試験による外荷重における漏えいの有無確認)程度になった。(締め付けトルクのばらつき確認: $9N \cdot m$ に調整したインパクトレンチのばらつき調査結果より)

小さいトルクで締め付けられたため、金属ガスケットのCリングが潰れた状態にならなかった。(シール性が低い:ガスケット調査より)

補助ホイストチェーンが閉止フランジ把持部に接触し、閉止フランジ把持部に力が掛かり、Cリングを支点として力が掛けられた側の金属ガスケットと閉止フランジとの間に隙間が生じた。(外荷重発生によるフランジとガスケット間での隙間より)

隙間部分から配管内の液体が漏えいした。(外荷重による漏えいの有無確認より)

6 . 推定原因

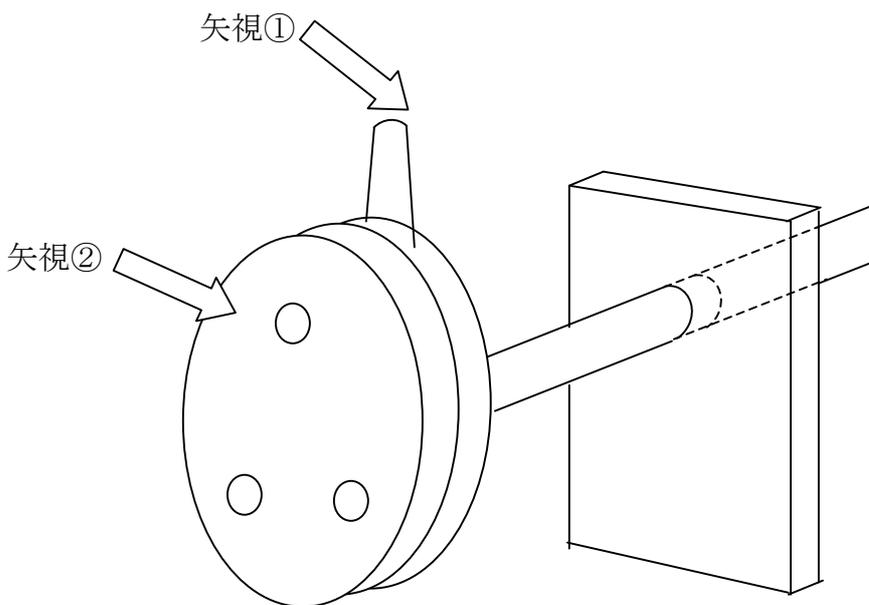
補助ホイストチェーンが閉止フランジ把持部に接触した際に配管内部の液体が漏えいに至ったメカニズム等を踏まえ、インパクトレンチの締め付けトルクが低下し、閉止フランジボルトの締め付け力が不足していたことが、閉止フランジ部から漏えいが発生した原因と推定する。

以 上

配管の健全性確認（写真）



南側配管の健全性確認（矢視①）

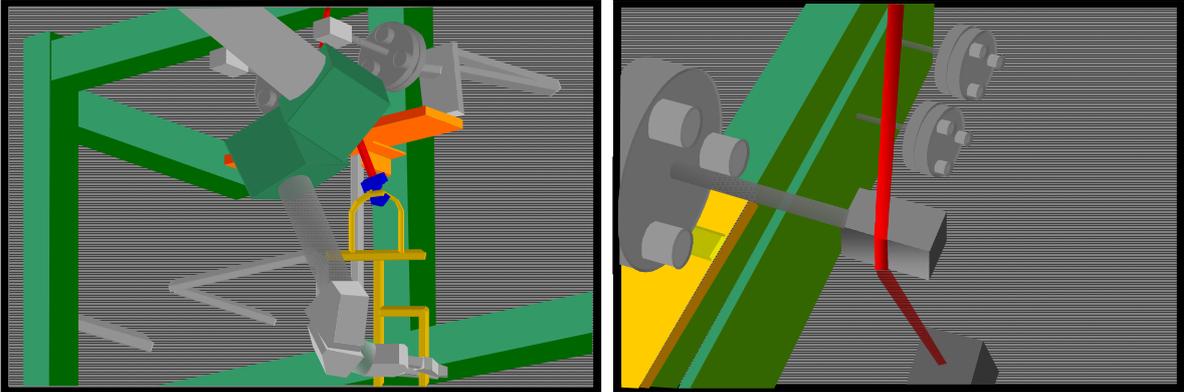


南側配管の健全性確認（矢視②）

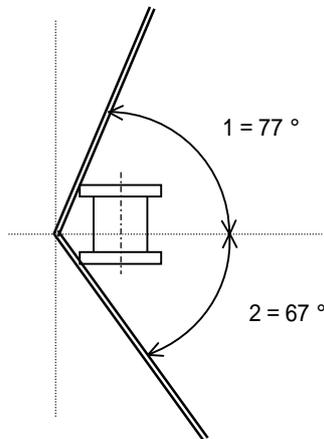
配管の健全性評価について

1. チェーン傾き角度の想定

チェーンの傾きが最大の状態



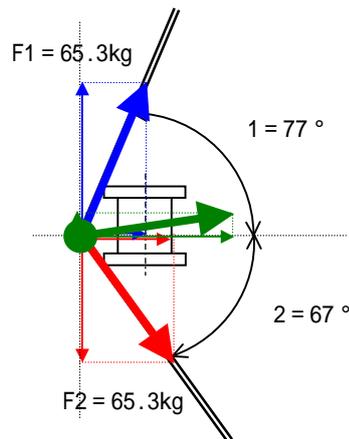
上図より、閉止フランジ把持部廻りにおいては、以下の角度の状態となっているものと推定される。



2 . 閉止フランジ把持部に働く荷重

荷の荷重が 63.2kg、ホイストフック重量が 1.326kg、ホイストチェーン重量が 0.7kg(= 0.35kg/m × 2m)であることから、補助ホイストチェーンに働く引張力 F1 及び F2 は 65.3kg で一定である。

閉止フランジ把持部にかかる荷重 W は、F1(青)及び F2(赤)の鉛直・水平それぞれの方向での合力を合成したもの(緑)である。



(ア) F1 の分力

$$1 = 77^\circ$$

$$F1H (\text{水平}) = F1 \times \cos 1 = 65.3 \times \cos 77^\circ = 14.68 \text{ kg}$$

$$F1V (\text{垂直}) = F1 \times \sin 1 = 65.3 \times \sin 77^\circ = 63.62 \text{ kg}$$

(イ) F2 の分力

$$2 = 67^\circ$$

$$F2H (\text{水平}) = F2 \times \cos 2 = 65.3 \times \cos 67^\circ = 25.51 \text{ kg}$$

$$F2V (\text{垂直}) = F2 \times \sin 2 = 65.3 \times \sin 67^\circ = 60.10 \text{ kg}$$

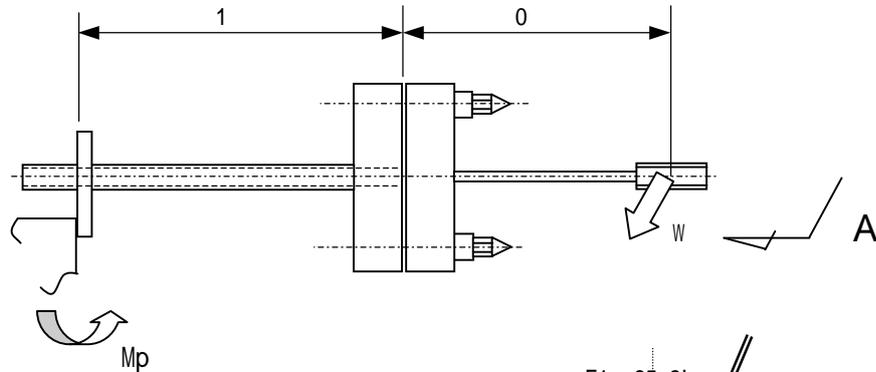
(ウ) 合成荷重 W

$$WH (\text{水平}) = F1H + F2H = 14.68 + 25.51 = 40.2 \text{ kg}$$

$$WV (\text{垂直}) = F1V - F2V = 63.62 - 60.10 = 3.6 \text{ kg}$$

$$W = \sqrt{WH^2 + WV^2} = \sqrt{40.2^2 + 3.6^2} = \underline{40.4 \text{ kg}}$$

3 . 配管の応力評価



配管のサポート点にかかるモーメント : M_p

$$M_p = W \times (0 + 1)$$

$W = 40.4(\text{kg})$ より

$$M_p = 40.4 \times (0 + 1) = 1.63 \times 10^4 \text{ (kg-mm)}$$

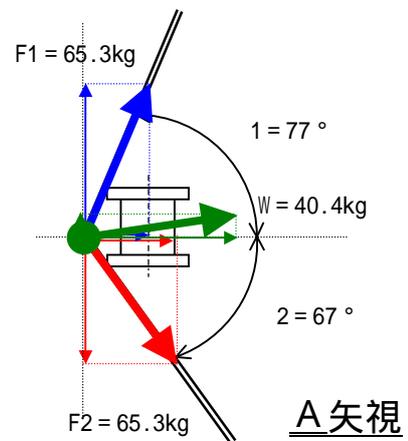
配管の断面係数 : Z_p

$$Z_p = (\quad / (32 \times d_o)) \times (d_o^4 - d_i^4)$$

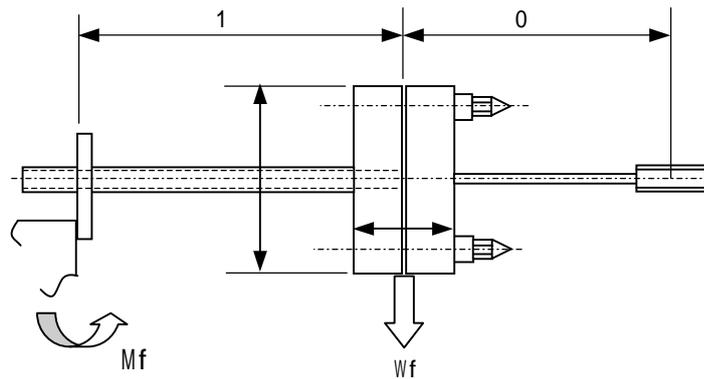
$$= 1.73 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

配管サポート点における曲げ応力 : ρ

$$\rho = M_p \div Z_p = (1.63 \times 10^4) \div (1.73 \times 10^3) = 9.42 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$



A矢視



フランジ重量により、配管のサポート点にかかるモーメント：Mf

$$\begin{aligned} M_f &= W_f \times 1 \\ &= 2.013 \times 10^3 \text{ (kg-mm)} \end{aligned}$$

配管の断面係数：Zp

$$\begin{aligned} Z_p &= \left(\frac{\pi}{32 \times d_o} \right) \times (d_o^4 - d_i^4) \\ &= 1.73 \times 10^3 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

配管サポート点における曲げ応力： f

$$f = M_f \div Z_p = (2.013 \times 10^3) \div (1.73 \times 10^3) = 1.16 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

把持部に負荷された荷重によるモーメントと同じ方向であったと仮定して（実際は異なる）、それぞれのモーメント Mp 及び Mf の合成により発生する配管サポート点における曲げモーメント b は

$$b = p + f = 9.42 + 1.16 = 10.58 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

配管の許容応力： p_allow (18.0 kg/mm²) より

$$\underline{b = 10.6 \text{ (kg/mm}^2\text{)} < 18.0 \text{ (kg/mm}^2\text{)} = p_allow}$$

よって、配管での発生応力は、許容値内であり、問題は無い。

以 上