

美浜発電所1号機のB-充てんポンプマニホールドカバーボルトの損傷について (原因と対策)

このことについて、関西電力株式会社から下記のとおり連絡を受けた。

記

美浜発電所1号機(加圧水型軽水炉;定格電気出力34.0万kW)は、定格熱出力一定運転中のところ、平成17年3月19日10時40分頃に、巡回点検中の運転員が、原子炉補助建屋地下1階の充てんポンプ室で、B-充てんポンプ*¹のNo.1シリンダ吸込み側マニホールドカバー*²のボルト4本のうち3本が折れ、ナットとともに床面に落ちているのを発見した。

当時、A、B-充てんポンプが運転中であったが、同日11時33分に待機中のC-充てんポンプを起動し、11時38分にB-充てんポンプを停止した後、当該ポンプの出入口弁を閉止し、11時55分に隔離を完了した。

この事象による1次冷却水の漏れはない。また、補助建屋排気筒ガスモニタや運転パラメータ等に変化はなく、環境への放射能の影響はない。

[ボルト締付け状態の確認結果]

B-充てんポンプについて、当該マニホールドカバーのボルト4本を除く32本のボルトの締付け状態を確認したところ、あらたにNo.2シリンダ吸込み側マニホールドカバーのボルト1本が折れていることが認められるとともに、残りのボルト(31本)のうち28本のトルク値が目標トルク値*³より低く、折損が認められた吸込み側マニホールドカバーボルトのトルク値は40~120N・mの範囲にあることが確認された。

運転中のA、C-充てんポンプについて、順次ポンプを停止・隔離した上で、ボルト全数(72本)の締付け状態を確認した結果、ボルトの折れは認められなかったが、吐出側および吸込み側マニホールドカバーのボルトの一部に目標トルク値より低い箇所が認められたため、締め付けを行った。

*1: 1次冷却系統の水質、保有水量等を調整する系統(化学体積制御系統)で浄化した1次冷却水を、1次冷却系統へ送りこむポンプ。

*2: 充てんポンプのシリンダをつなぐマニホールド(集合管)のカバー、1つのシリンダの吸込み側と吐出側で、それぞれ4本の植込みボルトによりリキッドシリンダに取り付けられている。

*3: マニホールドカバーボルト24本(12本×2)は196N・m、リキッドシリンダカバーボルト12本は294N・m。

[平成17年3月22日 記者発表済]

1. B-充てんポンプのボルトに関する調査結果

(1) 外観観察等

- ・当該ポンプのボルト全数(36本)について外観観察を行った結果、折損ボルト

4本とN o. 1 シリンダ吸込み側マニホールドカバーの残存ボルト1本を除き、他のボルト31本に異常は認められなかった。

- ・折損ボルト4本の折損位置は、いずれもナットとマニホールドカバーとの締付け面付近であった。
- ・材料証明書によりボルト材料の成分や強度は規格値を満足していることを確認した。また、折損および残存ボルトについて寸法測定を実施し、適正に加工されていたと推定された。

(2) 浸透探傷検査

- ・ボルト全数について浸透探傷検査を実施した結果、N o. 1 シリンダ吸込み側マニホールドカバーボルト4本（うち折損ボルト3本）と、N o. 2 シリンダ吸込み側マニホールドカバーボルト3本（うち折損ボルト1本）のねじ部に有意な浸透指示模様が認められた。
- ・指示模様は、主にマニホールドカバーとナットの締付け面付近に認められた。一部のボルトは植込み部にも指示が認められたが、これは、ボルト折損により残存ボルトに2次的な力（曲げ応力）がかかったためと推定された。

(3) 破面観察

- ・折損ボルト及び残存ボルトについて破面観察を行った結果、き裂の起点はボルト外表面のねじの底部で、起点部は平坦で疲労損傷の特徴である組織依存型破面*が認められた。
- ・破面には腐食や酸化物などの付着が認められないことから、き裂は前回定期検査以降の運転期間中に発生・進展したものと推定された。

*：疲労破面に現れるもので、金属組織に似た破面

2. 疲労損傷に関する調査結果

- ・ボルトの疲労損傷の発生要因を調査した結果、ポンプ運転に伴う流体の圧力変動（0.2～16.9MPa）が考えられた。
- ・解析および試験によりその影響を確認した結果、ボルトの締付トルク値が50N・mを下回る場合には、ポンプ運転に伴う圧力変動によって、ボルトに疲労限*を超える変動応力が働く可能性のあることがわかった。

*：疲労損傷を起こす変動応力

3. ボルト締付けに関する調査結果

(1) 前回定期検査での作業状況

- ・当該マニホールドカバーは毎定期検査で分解（点検）組立てを行っている。
- ・作業要領書では、片締めが生じないように、目標トルク値や数回に分けて締め付けることが注意事項として記載されているが、実際の締付けトルク値を記録することの要求はなかった。
- ・作業員の聞き取り調査の結果、作業手順としては、手締め、メガネレンチ、トルクレンチの順で段階的にボルトを締め付けていることがわかった。

(3) 作業再現試験

- ・聞き取り調査をもとに、ボルトの締め付け作業を再現した結果、手締め後にメガネレンチで締め付けた場合、トルク値は140N・m以下でばらつくことがわかった。
- ・メガネレンチで締めつけた状態からトルクレンチを用いて、目標トルク値（196N・m）で締め付けた場合、一部のボルトでトルク値が100N・mまで低下することが認められた。
- ・トルクレンチで締め付けた後、再度、目標トルク値で締め付けた場合（再確認締め）には、すべてのボルトがほぼ目標トルク値で締め付けられることが確認された。

ボルト締め付け状態の確認結果や作業再現試験の結果から判断すると、吸込み側マニホールドカバーボルトについては、手締め後にメガネレンチで締め付けたのみであった可能性が高いと推定された。

4. 推定原因

- ・前回の定期検査において、当該ポンプの開放点検後の組立て時に、吸い込み側マニホールドカバーボルトについて、適正な締め付け力が確保されていなかった。
- ・このため、ポンプの運転に伴う圧力変動により、ボルトに疲労限を超える変動応力が加わり、き裂が発生・進展し、折損したものと推定された。

5. 対策

- ・今後は、ボルトの締め付け力が確実に確保されるよう、トルクレンチを用いて段階的に締め付け、最後に再確認締めを行うことや、締め付けの各段階においてトルク値を記録することを作業要領書に明記する。
- ・ボルト全数（36本）を新品に取り替えた上で、改訂された作業要領書に基づきボルトの締め付けを行い、当該ポンプを復旧する。

(経済産業省による I N E S の暫定評価尺度)

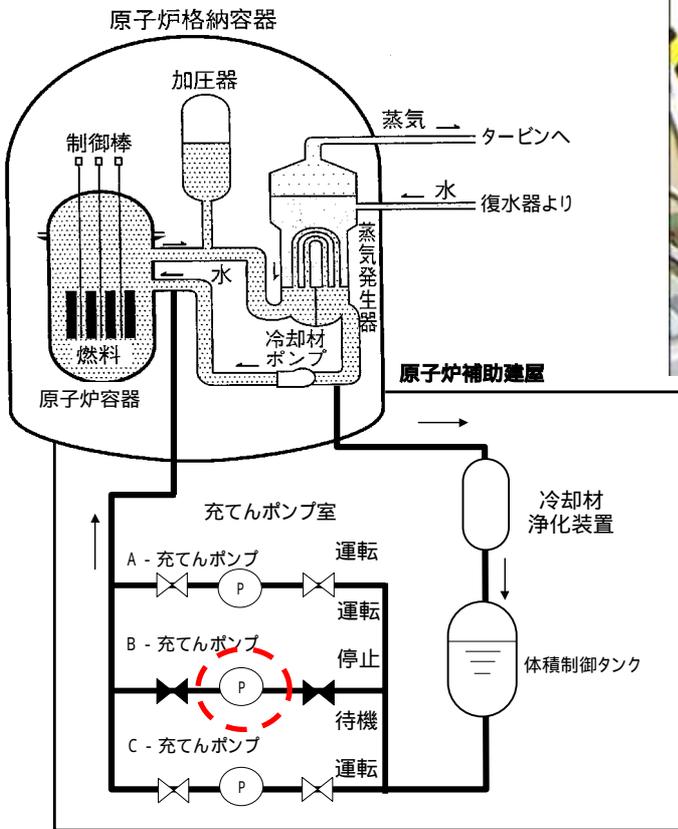
基準1	基準2	基準3	評価レベル
—	—	0—	0—

問い合わせ先(担当：伊藤)
内線2352・直通0776(20)0314

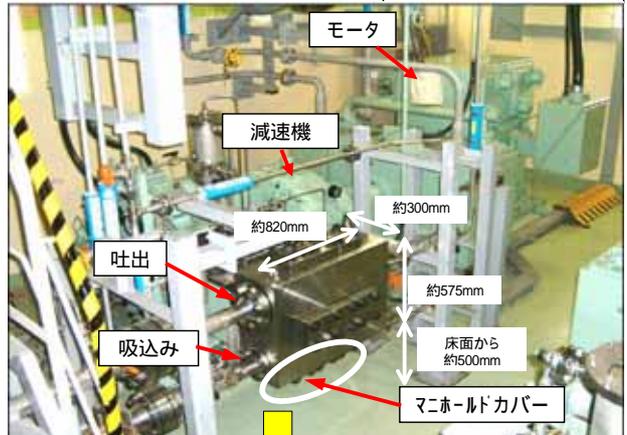
美浜発電所1号機

B - 充てんポンプマニホールドカバーボルトの折損の原因と対策について

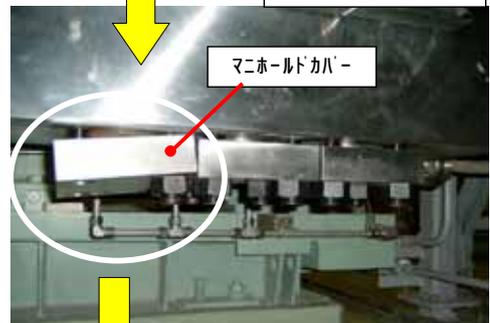
系統概略図



充てんポンプ外観



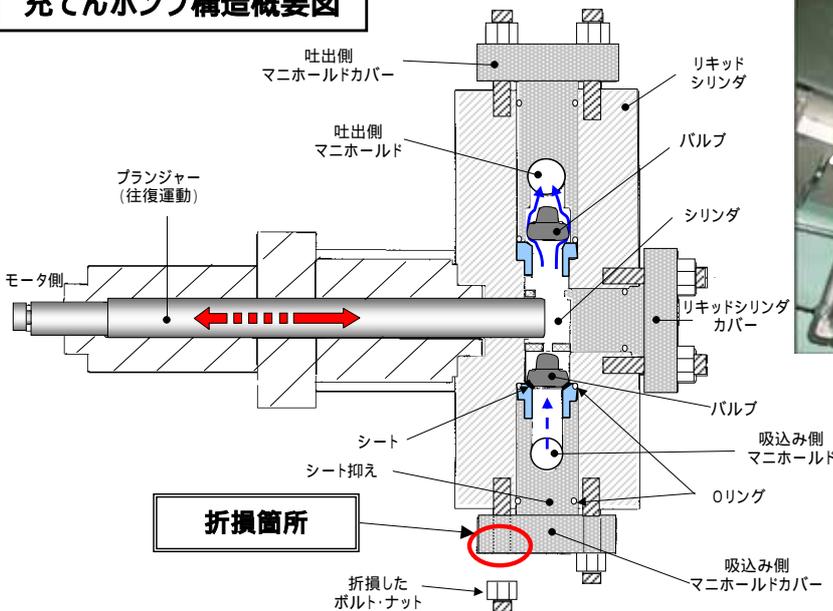
シリンダ側面



シリンダ下部



充てんポンプ構造概要図



折損したボルト、ナット



【充てんポンプ仕様】
 型式 : 往復型
 定格容量 : 9.5 m³/h
 入口圧力 : 0.2 MPa
 吐出圧力 : 16.9 MPa
 温度 : 40
 材料 : ステンレス鋼

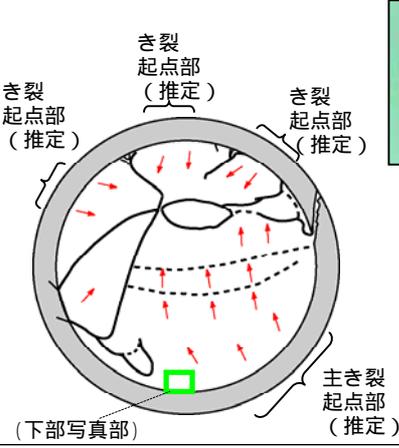
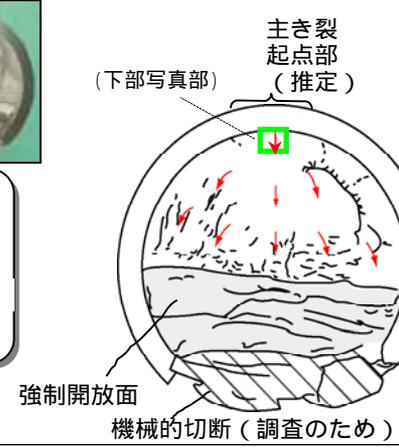
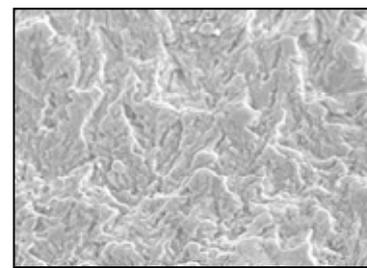
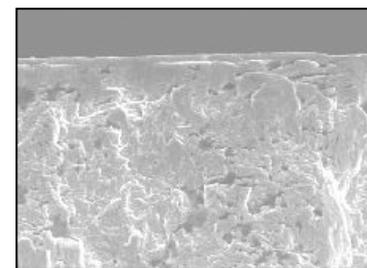
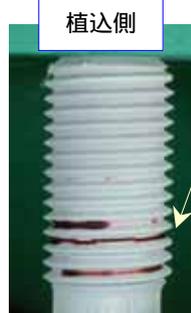
【マニホールドカバー仕様】
 材質: ステンレス鋼
 寸法: 177mm × 167mm (厚さ50mm)
 【ボルト仕様】
 材質: 高温用合金鋼
 寸法: 外径30mm × 長さ137mm
 【ナット仕様】
 材質: 炭素鋼 (S45C)
 寸法: 内径30mm

ポンプの動作説明

プランジャーの往復運動により、吸込み側から吸込んだ1次冷却水をプランジャーが押し出すことにより、圧力を上げ、1次冷却材系統に注入する。

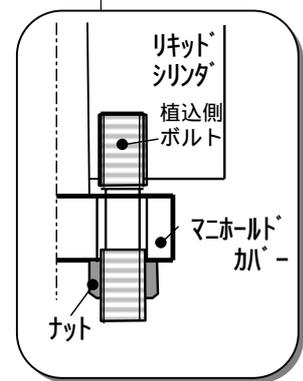
外観観察、浸透探傷検査等の結果

No.1シリンダ	No.2シリンダ	No.3シリンダ
 折損 PT指示あり  PT指示あり	 PT指示あり  折損 PT指示あり	 PT指示なし  PT指示なし
 折損 PT指示あり  折損 PT指示あり	 PT指示なし  PT指示あり	 PT指示なし  PT指示なし

	折損していたボルト (No.1シリンダ) の例	残存 (No.1シリンダ) していたボルト
破面	 き裂起点部 (推定) き裂起点部 (推定) き裂起点部 (推定) 主き裂起点部 (推定) (下部写真部)	 主き裂起点部 (推定) (下部写真部) 強制開放面 機械的切断 (調査のため)
電子顕微鏡観察		
浸透探傷検査	 植込側  ナット側	 植込側  ナット側 主き裂 (強制開放)

— 異なるき裂起点から発生した破面の合体部
 - - - 同一破面上の段差
 ビーチマーク
 ← き裂進展方向 (推定)

組織依存型破面



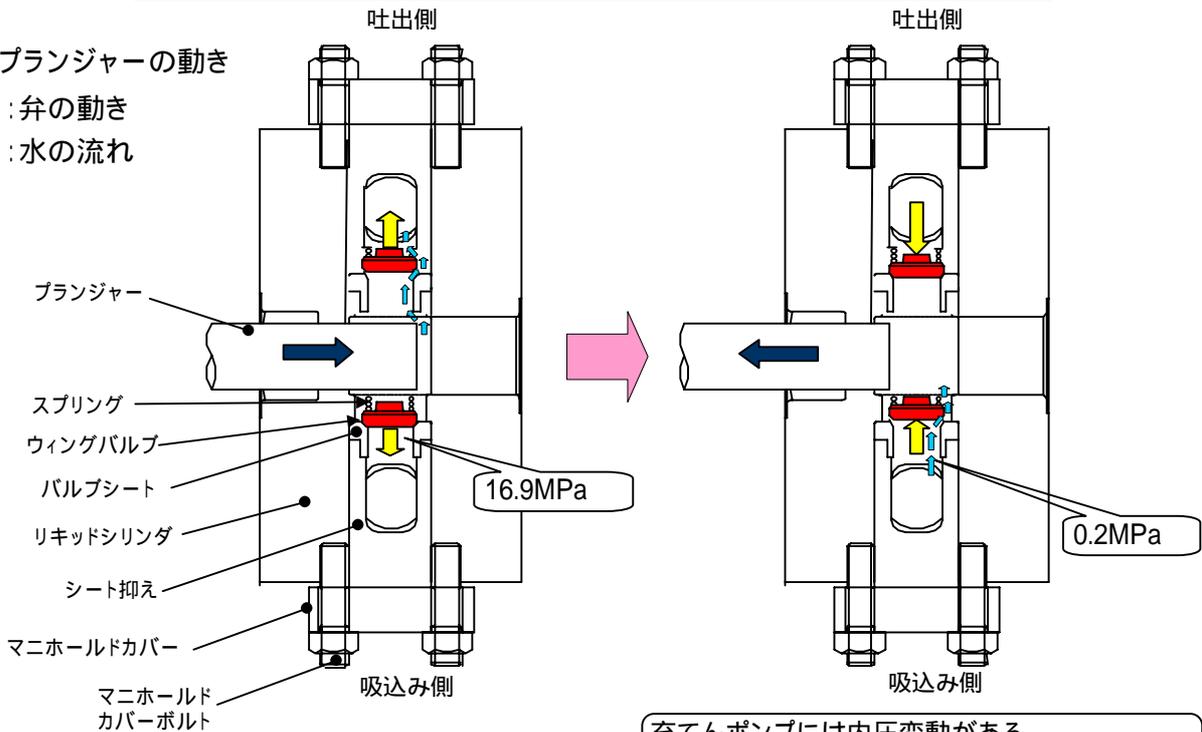
【考察】

(1)破面は平坦で、疲労破面の様相を呈している。
 (2)破面には段差が認められ、この段差は主に異なる起点から発生した複数のき裂が合体して生じたものである。
 (3)主な起点部は4ヶ所と推定され、いずれもねじ山の谷部である。

(1)主な起点部はねじ山の谷部であり、半月状にき裂進展していた。
 (2)主起点近傍は比較的平坦であるが、中央部では凹凸の大きな破面であり、変動応力が大きかったことを示唆している。
 (3)強制破面が認められるが、この破面はボルト取外し時及び破面観察時に生じたと考えられる。
 (4)残存ボルト植込側の浸透指示は、3本のボルトが折損したことにより、当該部に2次的な力(曲げ応力)がかかったものと考えられる。

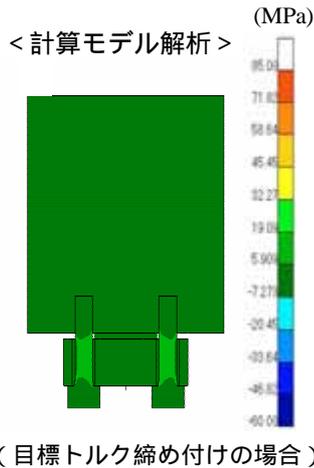
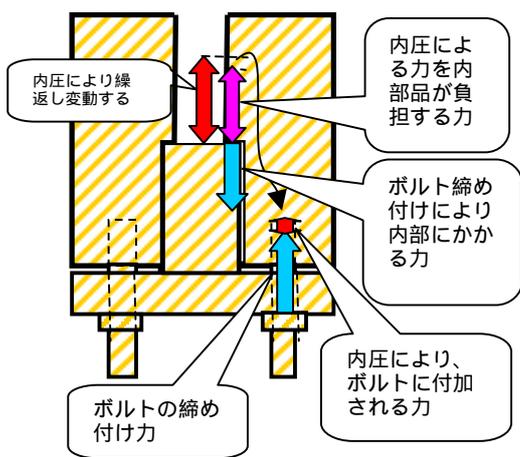
疲労損傷にかかる調査

- ➡ : プランジャーの動き
- ↑ : 弁の動き
- ↑ : 水の流れ

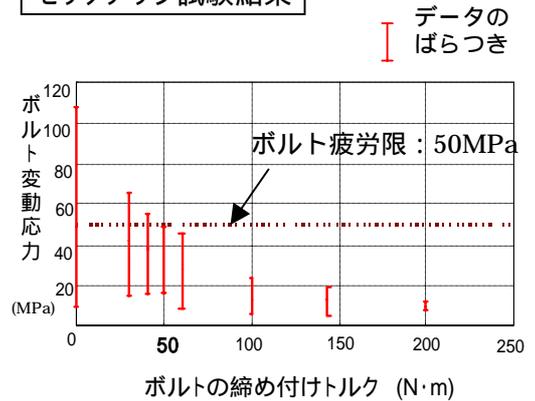


充てんポンプには内圧変動がある。
最大16.9MPa、最小0.2MPa(通常85回転 / 分)

ボルトを目標トルクで締め付けた場合

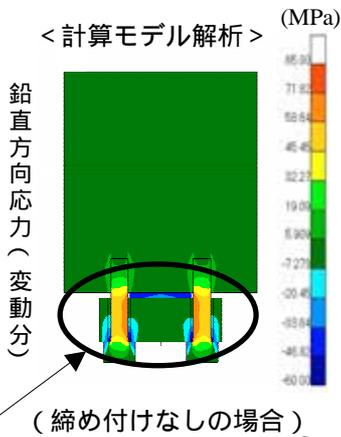
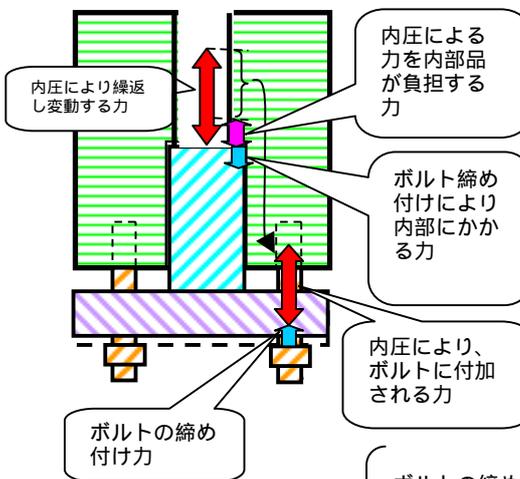


モックアップ試験結果



ボルトの締め付けトルク値が50N·mを下回る場合には、ポンプ運転に伴う圧力変動によって、ボルトに疲労限(50MPa)を超える変動応力が働く可能性があることがわかった。

ボルトの締め付けが不十分な場合



ボルトの締め付けが不十分な場合、内圧による荷重が発生すると内部品を介してボルトに荷重が伝わるため、ボルトに大きな応力が発生する。

内圧による変動する力によりボルトに疲労が蓄積

ボルトが疲労で折損

原因と対策

作業手順(作業員聞き取り)

- ・二人一組で作業
- ・一人がカバーをささえ、もう一人がナットをねじ込む
- ・メガネレンチで締め付ける
- ・トルクレンチで目標トルクまで締め込む

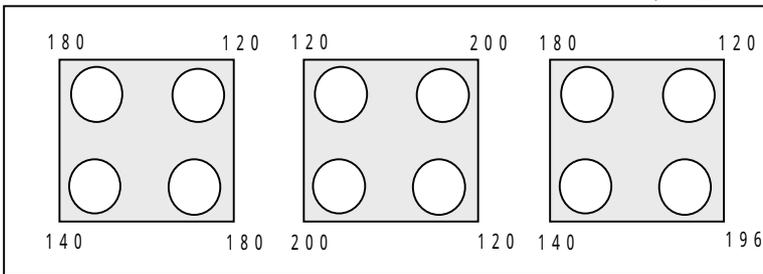
作業再現試験

～ナット(4本)の締め付け工具と締め付けトルク値～

- ・メガネレンチのみの場合: 140N・m以下
- ・メガネレンチ+トルクレンチ(再確認締めなし)の場合: 100N・mまで下がるものがある
- ・メガネレンチ+トルクレンチ+再確認締めの場合: 196N・m以上

緩みトルクから推定した締め付け方法

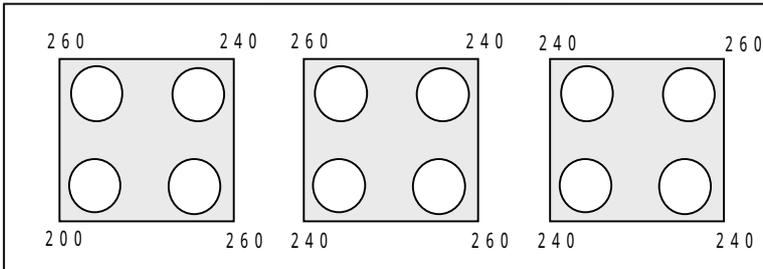
吐出側マニホールドカバー(目標トルク値: 196N・m) (単位: N・m)



< 推定締め付け方法 >

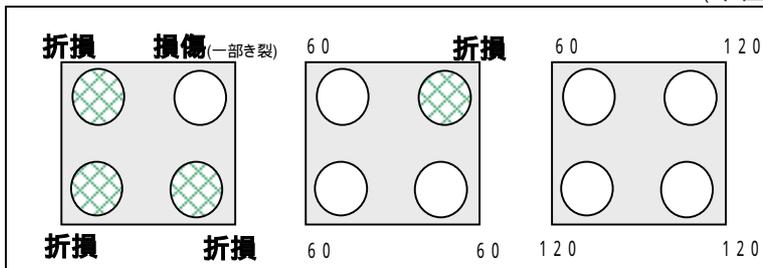
- ・トルクレンチ使用
- ・再確認締めなし

リキッドシリンダカバー(目標トルク値: 294N・m) (単位: N・m)



- ・トルクレンチ使用
- ・再確認締めなし

吸込み側マニホールドカバー(目標トルク値: 196N・m) (単位: N・m)



- ・メガネレンチのみ使用
(トルクレンチ使用せず)

・マニホールドカバーとナットの端面が干渉しているためトルク値は測定不可(280N・mで動かず)。
数字は40N・mから20N・mごと、および規定トルク値で緩めた場合のボルトの緩んだトルク値を示す。例えば、「120N・m」は100～120N・mの間に、「190N・m」は180～196N・mの間に緩みトルクがあることを示す。

現状の作業要領書

- ・片締めのないよう、目標トルク値で締め付けるよう記載。
- ・各ボルト毎に、トルク値を記録する様式ではなかった。

対策

- ・今後は、ボルトの締め付け力が確実に確保されるよう、トルクレンチを用いて段階的に締め付け、最後に再確認締めを行うことや、締め付けの各段階においてトルク値を記録することを作業要領書に明記する。
- ・ボルト全数(36本)を新品に取り替えた上で、改訂された作業要領書に基づきボルトの締め付けを行い、当該ポンプを復旧する。