

原子力発第05171号
平成17年11月 9日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 常盤 百樹

伊方発電所第2号機 中性子検出器の指示不良他
3件に係る報告書の提出について

平成17年9月に発生しました伊方発電所第2号機 中性子検出器の指示不良他2件、および、平成17年5月30日に発生しました伊方発電所 雑固体焼却設備の不具合につきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第2号機
第5高圧給水加熱器の不具合について

平成17年11月
四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所第2号機 第5高圧給水加熱器の不具合について

2. 事象発生の日時

平成17年9月12日 11時15分(確認)

3. 事象発生の設備

第5高圧給水加熱器2B

4. 事象発生時の運転状況

第18回定期検査中(平成17年9月5日より)

5. 事象発生の状況

伊方発電所第2号機(定格電気出力566MW)は、第18回定期検査中のところ、第5高圧給水加熱器Bの点検において、水室仕切ふたに取り付けている点検口の仕切ふたを固定している32本のボルトのうち、5本のボルトと座金が脱落していることが確認された。

その後、水室内に脱落した5本のボルトと座金を回収したが、回収した5個の座金のうち、2個の座金の一部が欠損していることが確認された。引き続き当該給水加熱器水室及び伝熱管内部を調査した結果、器内より座金の欠損部分と考えられる2個の破片を発見・回収した。

なお、本事象による周辺環境への放射能の影響はなかった。

(添付資料 - 1 ~ 4)

6. 時系列

9月12日

9時頃

第5高圧給水加熱器B 点検開始

11:15

5本のボルトと座金が脱落していることを確認

(水室内に脱落していた5本のボルトと座金を回収)

9月13日

第5高圧給水加熱器B内の詳細調査を開始

伝熱管内部に欠損した座金の一部(1個)を発見・回収

9月17日

伝熱管内部から回収したスラッジの中から座金の一部(1個)を発見・回収

7. 調査結果

(1) 現地調査

仕切ふたボルト締付け状態及びそれを構成するボルト、座金、仕切ふた、並びに水室内部、管板面の外観・寸法調査を実施した。

a. 外観調査

(a) B号機(当該機)

仕切ふたボルト締付け状態

ボルト・座金が脱落していた5箇所以外の27箇所について、ボルトの締付け状態を確認した結果、18箇所において若干のがたつき(ボルトの頭が手で動かせる状態)が認められたが、座金による回り止めは効いており、座金の施工状態に特段の不良は認められなかった。(添付資料-3)
ボルト

回収したボルト5本の外観を目視により調査した結果、4本の頭部側面ないし底面に擦れ跡が認められた。また、2本については、ねじ部に擦れてできたと思われる溝状の傷が認められた。しかし、ボルトの脱落に至るような破断あるいはねじ部の著しい損傷は認められなかった。

回収したボルト以外の27本についても調査した結果、3本の頭部側面ないし底面に擦れ跡が認められた。(添付資料-4)

また、頭部底面(座金との当たり面)には、製造時のかえりが若干多くみられた。

座金

回収した座金5枚(別途回収した破片2個を含む)について外観を目視により調査した結果、表面(ボルト側)、裏面(仕切ふた側)、舌部ボルト側接触面、舌部仕切ふた側接触面ないし内径周りに擦れ跡が認められた。また、仕切ふた側舌の基部は両肩がいずれもかえりを伴って著しく摩耗減肉しており、2個の破片もこの位置で分離していた。

回収した座金以外の27枚についても調査した結果、擦れ跡の認められたボルト位置にあった座金3枚にボルトに対応する擦れ跡が認められた。(添付資料-4)

仕切ふた

仕切ふたを取り外し、目視により点検した結果、ボルトが脱落していた5箇所及び擦れ跡の認められた座金位置3箇所の座金当たり面(仕切ふた表面ないし側面)に擦れ跡が認められた。

水室内部

出入口水室内部について目視により点検した結果、回収したボルト・座金以外の異常は認められなかった。

仕切ふた取付部(仕切ふた側の座)について、目視により点検した結果、異常は認められなかった。また、新品のボルトを用いて雌ねじとのかみ合

いを確認した結果、雌ねじ側にも損傷は認められなかった。

管板面

入口水室管板面の肉盛り溶接部を目視により点検したところ、6箇所で見られる減肉を確認した。当該箇所の浸透探傷検査を実施した結果、減肉以外の傷等の異常は認められなかった。（添付資料 - 5）

なお、ボルトがはまり込んだ状態で発見された伝熱管5箇所についても目視調査及び浸透探傷検査を実施したが、いずれも異常は認められなかった。

擦れ跡・減肉箇所の照合

回収したボルト及び座金並びにボルトの脱落していた仕切ふた各部の擦れ跡を照合した結果、各接触面位置に相互に該当する擦れ跡があり、これらの擦れ跡は相互の接触、摩耗によるものと判明した。

また、管板面肉盛り溶接部の減肉箇所の状況と座金減肉箇所（仕切ふた側舌の基部）の状況もほぼ一致した。（添付資料 - 5）

（b）A号機

比較のためボルト脱落の認められなかったA号機についてもB号機と同様の調査を実施した。

仕切ふたボルト締付状態

ボルトの締付状態を確認した結果、B号機と同様に13箇所において若干のがたつきが認められたが、座金による回り止めは効いており、座金の施工状態に特段の不良は認められなかった。

ボルト・座金・仕切ふた

取り外したボルト、座金、仕切ふたについて目視により調査した結果、1本のボルト頭部側面及び底面、その位置の座金・仕切ふたに擦れ跡が認められた。

b. 寸法計測

取り外したボルト、座金について寸法計測を実施した。

（a）B号機（当該機）

ボルト

ボルトおねじ外径は、脱落していたボルトも含め、11.6～11.7mmであり、JIS公差（製造時）の下限11.701mmをわずかに下回っていた。

座金

脱落せずに残っていた座金の内径は、12.6～12.7mmであり、メーカーが採用している旧JIS規格12.5mm（製造公差の規定なし）よりもわずかに大きかった。脱落していた座金の内径は、擦れにより正確な測定は困難であったが、12.7～13mm程度であった。

(b) A号機

A号機についても計測したが、各部ともB号機と同様であった。

以上の調査結果から、ボルトの脱落は、ボルトの破断、ねじ部の損傷によるものではなく、回り止めのために舌付座金を使用していたにも関わらず、何らかの要因でボルトが緩み、回転して脱落したものと判明した。

ボルトが回転して脱落に至るには、

ボルトと座金、座金と仕切ふたとの間の摩擦力喪失

曲げ起こした座金舌部による回り止め機能喪失

が考えられる。

このうち、については、締付けているボルトの軸力が喪失すると失われてしまう。したがって、規定したボルト締付けトルクが適切であったかどうか、また規定トルクでボルトの締付けが行われていたかどうか、初期の締付けトルクが喪失する可能性はなかったか、調査検討する必要がある。

また、については、ボルトが回転しないような寸法であったかどうか、適切に舌部の曲げ起こしができていたかどうか、回り止め機能が喪失する可能性はなかったか、調査検討する必要がある。

2号機第5高圧給水加熱器2基は、前回定期検査（平成16年4月～8月）において全体取替えを行っており、不具合を発見した今回の定期検査が初めての開放点検となることから、取替時の設計、施工、その後の運転状態について、前記の観点から調査検討した。

(2) 施工状況の調査

前回定期検査時に実施した取替工事における締付け作業の状況について、記録の確認及び聞き取りにより調査を行った。

a. 締付手順

2号機第5高圧給水加熱器2基は、本體現地据付後、付帯工事を実施したため、当該仕切ふたは、2基とも現地にて最終閉鎖を行った。

締付手順は、同様の締付構造を持つマンホールふたと同様、次のとおりであり、問題はなかった。

- ・ 2人で水室内に入り、ガスケット、仕切ふたをセットした。
- ・ 仕切ふたを支えるため4箇所に焼き付き防止剤を塗布したボルト・座金を挿入した。
- ・ その後、同様に全数の座金・ボルトを挿入し、手締めした。
- ・ トルクレンチを使用し、規定トルク（15 Nm）の半分のトルクで対角に順次締付けた。
- ・ 規定トルクで対角に順次締付けた。このとき、座金の共回りを予想し、回転方向と反対側に若干ずらした状態でセットした。

- ・ プラスチックハンマを使用し、ふた側の舌を折り曲げ加工した。
- ・ ボルト側の舌は、マイナスドライバを使用して約45度まで立て起こしてから、プラスチックハンマで同様に折り曲げ加工した。

b. 締付状態の確認

水室外にいた作業責任者は、トルクレンチの設定トルクの確認を行うとともに、締付作業状況を監視していた。

また、座金折り曲げ加工後、目視にて取付状況の確認を行い、問題のないことを確認した。

以上の調査結果から、据付時のボルトの締付トルク、座金の取付け手順とその確認には問題がなかったと考えられる。

(3) 設計検討内容についての調査

取り替えた給水加熱器は、基本的な構造は従来のもので変わりはないが、これまでの保守経験を反映し、伝熱管材質を始めとする各部の設計変更を行うとともに、供給メーカーの変更に伴い、細部の設計は異なったものとなっている。

そこで、当該部の設計検討内容に問題がなかったか、特に仕切ふた形状、ボルト本数・寸法、ガスケット材質等の細部について、設計時の検討内容、経緯について調査した。

メーカーは、それまでの火力発電設備向け給水加熱器の設計経験に加え、当社からの要求仕様（耐エロージョン性の向上、ガスケットの非石綿化、メンテナンス性の向上）を考慮し、次のとおり設計した。

まず、狭隘な水室内でのメンテナンス性（ハンドリング）を考慮しつつ、設計経験に基づき仕切ふた形状、大きさ、締付け方法を選定した。

ボルトの回り止め構造として、経験のある両舌付座金を採用することとし、形状・寸法は、メーカーで標準的に使用している旧JES規格品であれば問題ないと考えた。

ガスケット材質を選定するにあたっては、設計仕様をガスケットメーカーに提示し、従来の石綿製品の代替品を提案するよう求めた。ガスケットメーカーは、温度等の使用条件に見合う代替品としてステンレス鋼薄板の両面に黒鉛シール材を張り合わせたタイプのガスケットを提案した。

メーカーは、提案を受けたガスケットは設計仕様を満足していると判断、これを採用することとし、ボルトの締付けトルク等の詳細検討を進めた。しかし、当初予定していたボルト（本数・寸法）では、ガスケットメーカーの推奨する締付け面圧が確保できないことから、再度、ガスケットメーカーに問い合わせを行ったところ、出入口水室差圧が小さい（設計0.08MPa）こと、差圧が加わる方向がガスケットを締付ける方向に作用することから、高差圧のシール性能は必要ないので通常の約1割の面圧（3MPa）で流体のシールができる旨の回答を得た。

この回答に基づきさらに詳細検討を行い、各部詳細寸法、ボルト締付トルクを

決定した。

(4) 運転履歴の調査

前述のとおり、2号機第5高圧給水加熱器は、前回定期検査時に取替えを行っているため、前回定期検査以降（平成16年7月）今回の定期検査開始（平成17年9月）までの約1年間の運転履歴について調査した。

今回の事象に関連する運転パラメータとして、当該部を流れる主給水の流量、同温度、圧力の変動が考えられるが、すべて通常の範囲内であった。なお、平成16年12月～平成17年1月に電気設備点検のため発電を停止しており、この間は流量が通常の1/10未満まで低下していたことを確認した。

(5) ボルト軸力喪失要因の調査

ボルトの軸力が喪失する要因として、初期の締付けトルク（規定トルク）とガスケット特性（圧縮・復元特性）と相まって、

- ・初期締付けトルクの変動
- ・ガスケットとボルトの熱膨張差
- ・運転時荷重

が考えられることから、(1)～(4)の調査結果に基づき、これらの影響について解析、モックアップ試験により評価検討した。

a. ガスケット特性の調査

前述のとおり、設計上規定した締付トルクによりガスケットに加わる面圧は、通常、同種のガスケットを使用する場合の1割程度であったことから、まず、この領域に着目した特性試験を実施し、ガスケット特性（圧縮・復元特性）を詳細に確認した。
(添付資料 - 6)

b. ボルト頭部底面のかえりによる影響の評価

外観調査においてボルト頭部底面（座金との当たり面）にかえりが見られたことから、モックアップ試験を行い、このかえりがボルト締付けトルクに及ぼす影響を評価した。

かえりのあるボルトを用いた場合、ガスケットの圧縮率は、かえりのないボルトに比べて約70%に減少した。これは、締付けトルクの一部がかえりの変形に吸収されてしまい、ガスケットの圧縮に寄与していないことが原因と考えられる。したがって、この場合、失われた分の締付けトルク（約30%）は、締付け当初から軸力として作用していなかった可能性がある。

(添付資料 - 7)

c. 座金曲げ加工による影響の評価

施工状況の調査において確認した作業ステップのうち、ボルト締付けトルク

への影響が考えられる座金の曲げ加工について、モックアップ試験を行い、影響を評価した。

試験の結果、座金の曲げ加工を行った際に締付トルクの一部が失われ、軸力が失われる可能性があり、この影響度合いは、締付けトルクの小さい場合に大きいことが明らかとなった。(添付資料 - 8)

d . ガasketとボルトの熱膨張差の影響評価

ボルトの材料であるステンレス鋼は、ガasketの材料である膨張黒鉛に比べて線膨張係数が大きく、温度上昇に伴い、ボルトの伸びにより軸力が低下する可能性があることから、この影響を評価した。

評価の結果、常温で締付け後、約220の運転温度に昇温した場合、ボルトはガasketよりも約0.01mm(ガasketのひずみに換算して約0.4%)余分に伸びるため、ガasket特性(添付資料 - 6)に沿ってこれに相当する軸力が低下することが明らかとなった。

e . 運転時に作用する荷重の影響評価

設計検討内容の調査の結果、運転時に仕切ふたに作用する出入口水室間の差圧(設計約0.08MPa)は、ガasketのシール性の観点からのみ考慮されていた。この差圧は、ガasketのみを圧縮する方向に作用するため、ボルトの軸力は低下する可能性があることから、この影響を評価した。

評価の結果、運転時に仕切ふたに作用する差圧および動圧を考慮すると、ガasket面には面圧換算で最大約0.36MPaの荷重が作用することが明らかとなった。ボルトに比べればガasketは非常に柔らかいため、荷重はボルト軸力を減殺してしまい、軸力が低下することとなる。

以上の評価検討結果から、本給水加熱器で採用した締付け構造・ガasket・締付けトルクの組み合わせにおいては、出入口水室のシール性に問題はないものの、ボルトの締付けトルクが小さかった場合には、ボルトのかえりの存在、座金曲げ加工に伴う外力、運転に伴う温度変化・差圧などが重畳した場合にボルトの軸力が喪失してしまう可能性があることが判明した。

(6) 座金による回り止め機能の評価

ボルトの軸力が喪失すると、座金に作用していた摩擦力は失われるが、折り曲げた座金の舌部によってボルトの回転が防止される構造である。

そこで、取り外した座金の内径とボルト首下部の外径との関係からボルトが回転する可能性を幾何学的に検討した。

評価の結果、座金の折り曲げ加工が理想的な状態では、ボルト中心と座金中心が完全に偏心した状態で据え付けた場合でも回転するおそれはないが、ボルトと座金が擦れ合い、摩耗によりボルト外径と座金内径のギャップが0.25mm以

上拡大した場合、あるいは、座金折り曲げ加工時に同程度にスプリングバックがあった場合には、回転する可能性があることが明らかとなった。

(添付資料 - 9)

8 . ボルトおよび座金が脱落したメカニズム

以上の調査結果から、ボルト及び座金が脱落に至り、座金の一部が破損して回収されたメカニズムは、概ね以下のとおりと推定される。(添付資料 - 10)

当該締付け部の設計において、出入口水室間のシール性に着目し、ガスケットの非石綿化、メンテナンス性の向上を念頭に締付け部の設計を行った。ボルト締付けトルクは、ガスケット面圧のみから規定したため、ボルト軸力は小さな値となった。このとき、据付段階、運転段階でボルトの軸力が失われる可能性については検討していなかった。

ボルトおよび座金は、規格品として一般品を購入、使用したため、ボルトには、若干多めのかえりが残ったままであった。また、ボルトおよび座金の寸法は、それぞれに問題のあるものではなかったが、組み合わせた場合にねじ部と座金の隙間は広がり勝手であった。

仕切ふたボルト締付け作業は、標準的な手順で適正に行われた。しかし、ボルトにかえりが残っていたために、締付けトルクの一部がかえりに吸収されてしまい、計画した軸力にはなっていなかった。また、座金舌折り曲げ作業において軸力の一部が緩和した可能性もあった。さらに、座金の折り曲げ加工時のスプリングバック効果により、ボルト頭部と座金舌部の間で生じるある程度のギャップは避けられなかった。

プラント運転開始に伴い、出入口水室間の差圧、給水による動圧、温度上昇が締付け部に作用し、さらに軸力の低下をもたらした。これらは、仕切ふた本体の設計には考慮されていたが、ボルトの軸力を緩和させる可能性については考慮されていなかった。以上の要因が重畳し、一部のボルトの軸力が喪失した。

ボルトの軸力が喪失した結果、座金に作用していた摩擦力が喪失したため、座金がずれたり、さらにはボルト・仕切ふたとの間で擦れ合い、摩耗した。当初より、ボルトねじ部の外径が小さめで座金内径は大きめであったこと、あるいは、ボルト頭部と座金舌部とのギャップの存在が、座金の回り止め機能喪失に至る余裕を少なくさせていた。

座金の回り止め機能が喪失した結果、運転中に作用する微小な振動により、斜め上向きに取り付けられていたボルトが緩み、座金とともに脱落した。脱落したボルトと座金は、水流により伝熱管に吸い込まれ、管板部にひっかかった状態となった。

その後、板状の座金は水流により管板部に引っかかった状態で振れ回り、管板肉盛溶接部とともに摩耗した。伝熱管内径まで摩耗した2枚の座金は、その位置で一部が破断し、破断部は伝熱管に吸い込まれた。なお、1枚は、平成16年12月から平成17年1月に実施した電気設備点検のための発電停止において水勢が弱まった際に、一旦管板面から水室内に落下し、その後に別の伝熱管に再度吸い込まれた。

B号機と同じ条件であったA号機についても、1本のボルトでの段階に至る兆候が認められていた。

9. 1号機第5高圧給水加熱器についての評価

1号機第5高圧給水加熱器2基についても、2号機の後、平成16年9月～平成17年2月に実施した定期検査時に同一メーカーのものと取替えを行っている。

調査の結果、設計については、2号機のものと同じであった。

しかし、当該仕切ふたの締付け作業については、2号機は現地据付後であったのに対し、1号機はメーカー工場製作段階で実施していた。

工場における締付け作業状況の聞き取りを行ったところ、ボルト径が小さいため、締付けトルクの管理を経験的な判断に委ねており、トルクレンチでは行っていなかった。実際の締付けトルクがどの程度になっていたか、作業に当たった作業員により再現試験を実施したところ、約28～30Nmであった。したがって、2号機よりは強く締付けられており、相対的には軸力は失われ難いと考えられる。

なお、2号機と同様の事象が発生し、座金の破片が異物として蒸気発生器に到達した場合を仮定し、保守的な条件で評価を行ったところ、蒸気発生器伝熱管の健全性には問題ないことを確認した。(添付資料-11)

10. 推定原因

第5高圧給水加熱器出入口水室仕切ふた締付けボルトが脱落した原因は、

- ・ 設計段階において、出入口水室間のシール性のみからボルト締付けトルクを規定したため、ボルトのかえりの存在、座金曲げ加工に伴う外力、運転に伴う温度変化・差圧など、設計段階で考慮していなかったボルト軸力低下要因に対する余裕がなく、これらが重畳した結果、軸力が喪失してしまった
- ・ 実際に使用したボルト・座金の組み合わせでは寸法的に座金の回り止め機能喪失に至るまでの余裕が少なかったため、わずかなギャップの拡大により、軸力を喪失したボルトが運転中の微小振動により回転、弛緩した

ためと推定される。

11. 対策

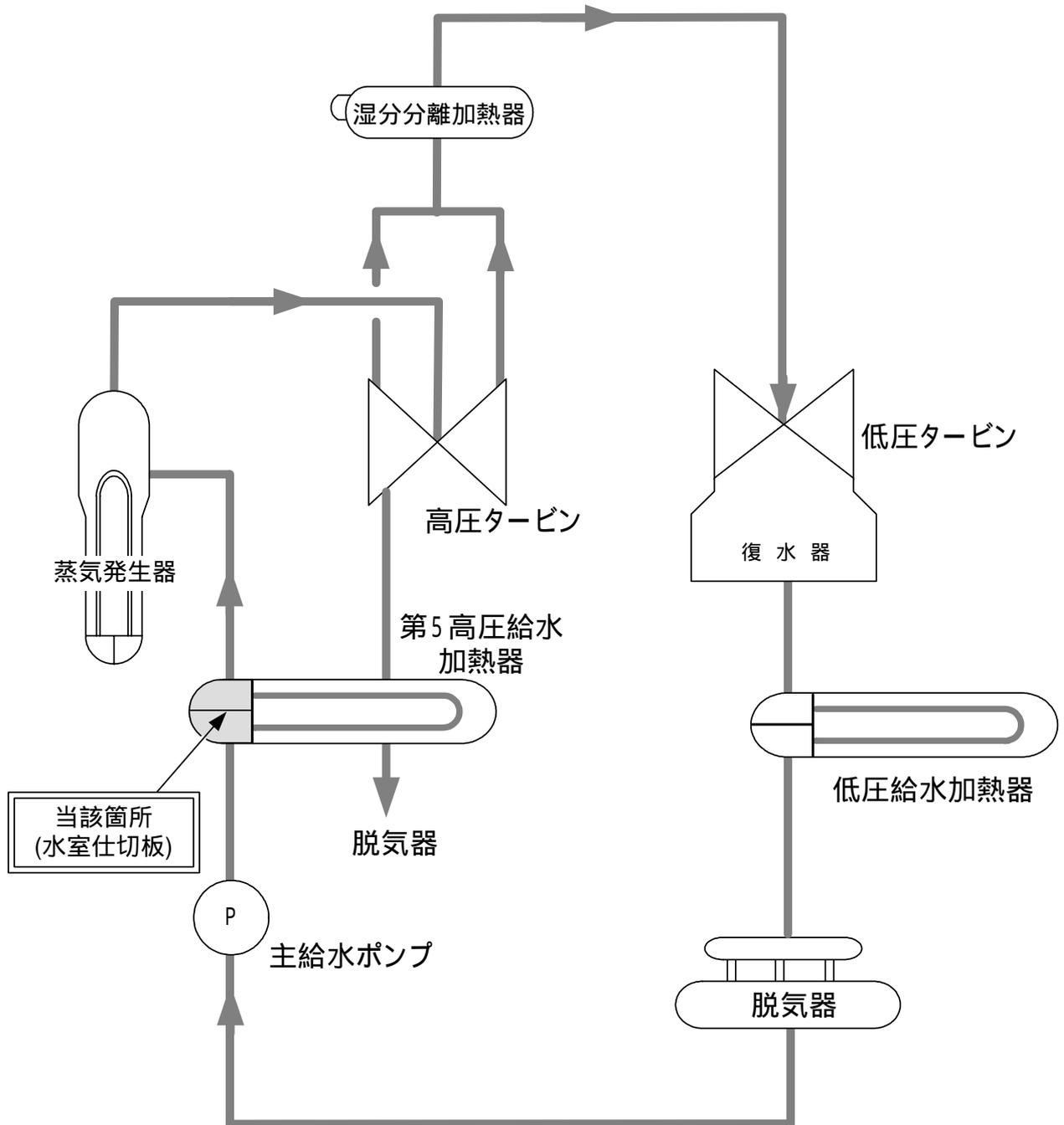
- (1) 水室仕切ふた締付け部の設計を次のとおり変更し、ボルト、座金および仕切ふたを新品に取り替えるとともに仕切ふた取付座の改造を行い、復旧する。
- ・ ボルトの軸力が喪失することのないよう、ボルトのサイズアップ（M12 M16）および材質の変更（SUS304 SNB7）を行い、初期締付けトルクを75Nmに向上する。
 - ・ 締付けトルクがガスケットの圧縮に有効に作用するよう、かえりのないボルトを使用する。
- A号機についても、今回の定期検査期間中に同じ対策を実施する。
- (2) 脱落したボルト及び座金については、摩耗部分を除き全て回収した。ボルトおよび座金が接触していたと考えられる管板肉盛溶接部11箇所について、液体浸透探傷検査により異常のないことを確認した。また、B号機伝熱管全数について渦流探傷検査を実施し、健全性を確認した。
- (3) 同一の構造である1号機第5高圧給水加熱器2基については、次回定期検査において、2号機と同じ対策を実施する。なお、万一、運転中に2号機と同様の事象が発生し、座金の破片が異物として蒸気発生器に到達したとしても、蒸気発生器伝熱管損傷による漏えいに至る可能性はない。
- (4) その他、1～3号機で水室内部にボルト締め仕切ふたがある第1～第3低圧給水加熱器、第4低圧給水加熱器（3号機のみ）、第6高圧給水加熱器（3号機のみ）、湿分分離加熱器について、設計上、同様の問題がないことを確認した。

以上

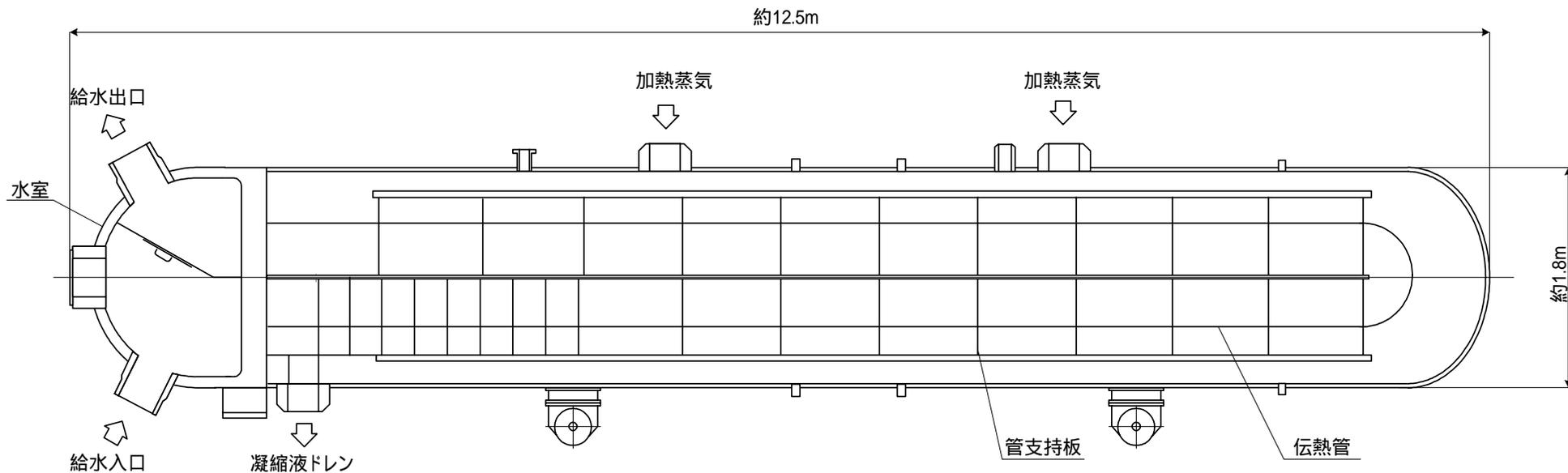
添 付 資 料

- 添付資料 - 1 伊方 2 号機第 5 高圧給水加熱器廻り概略系統図
- 添付資料 - 2 第 5 高圧給水加熱器概略構造図
- 添付資料 - 3 第 5 高圧給水加熱器 2 B 仕切ふた取付状況
- 添付資料 - 4 回収したボルトおよび座金
- 添付資料 - 5 擦れ跡・減肉箇所の照合
- 添付資料 - 6 ガasket特性の調査
- 添付資料 - 7 ボルト頭部底面のかえりによる影響の評価
- 添付資料 - 8 座金曲げ加工による影響の評価
- 添付資料 - 9 座金による回り止め機能の評価
- 添付資料 - 1 0 ボルトおよび座金が脱落したメカニズム
- 添付資料 - 1 1 異物による蒸気発生器伝熱管への影響

伊方2号機第5 高压给水加热器廻り概略系統図

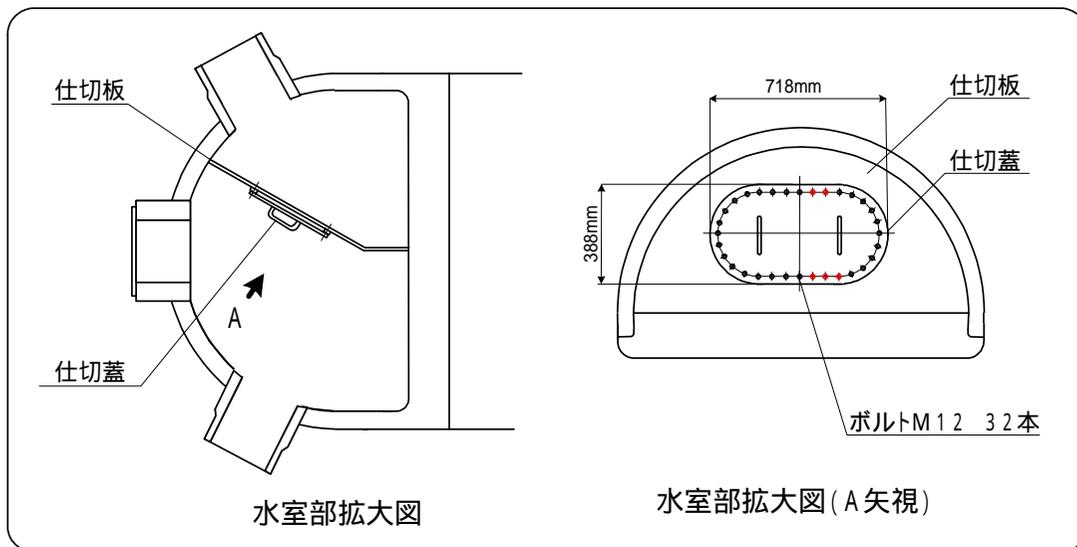


第5 高圧給水加熱器概略構造図

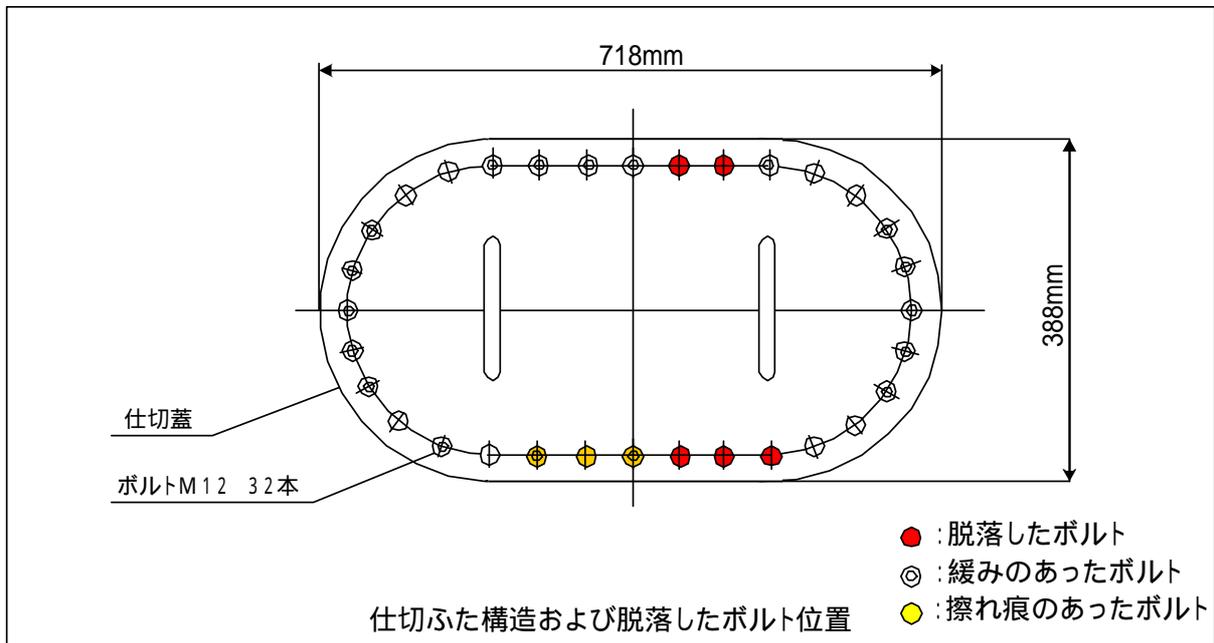


第5 高圧給水加熱器仕様

型式	横置Uチューブ式	
伝熱管	材料	ステンレス鋼
	寸法	外径15.8×厚さ1.2mm
	本数	1,676本



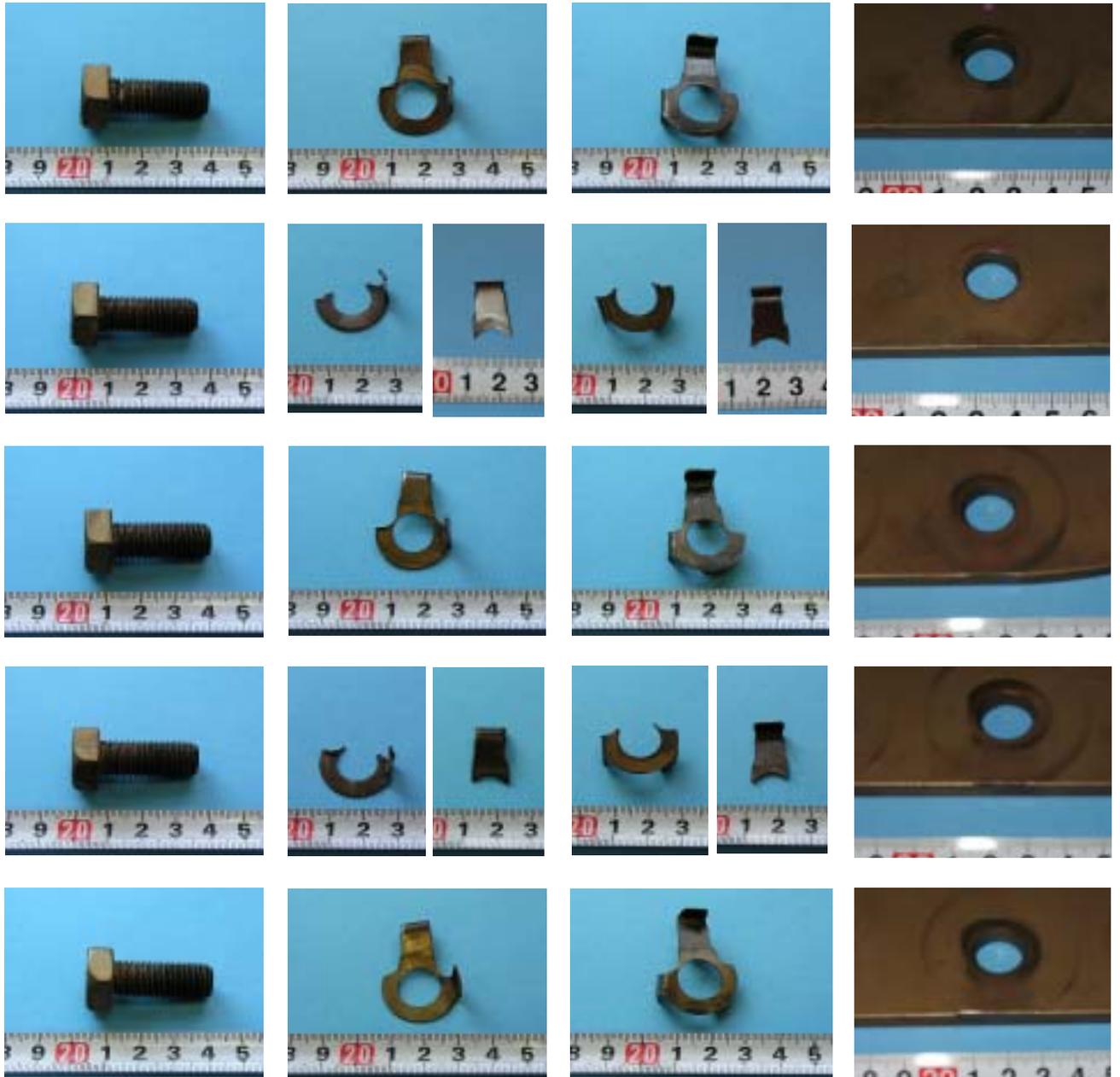
第5 高压给水加热器2 B 仕切ふた取付状況



ボルト脱落
(計5本)

仕切ふた取付状況

回収したボルトおよび座金

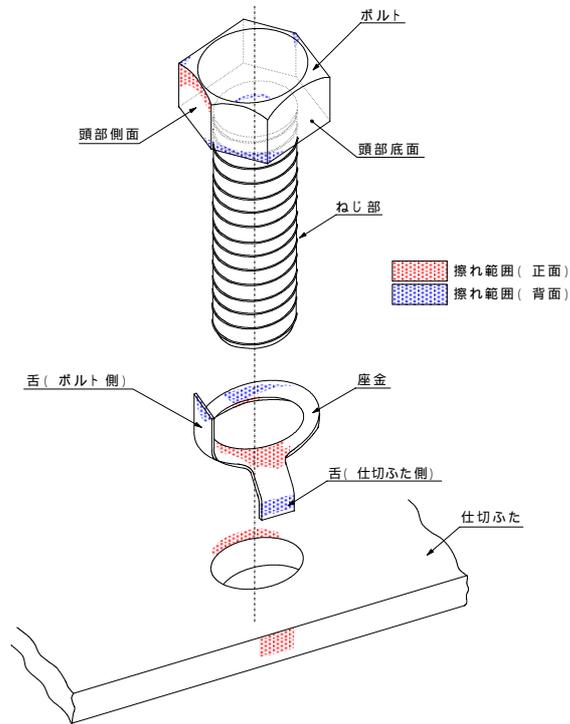


回収したボルト

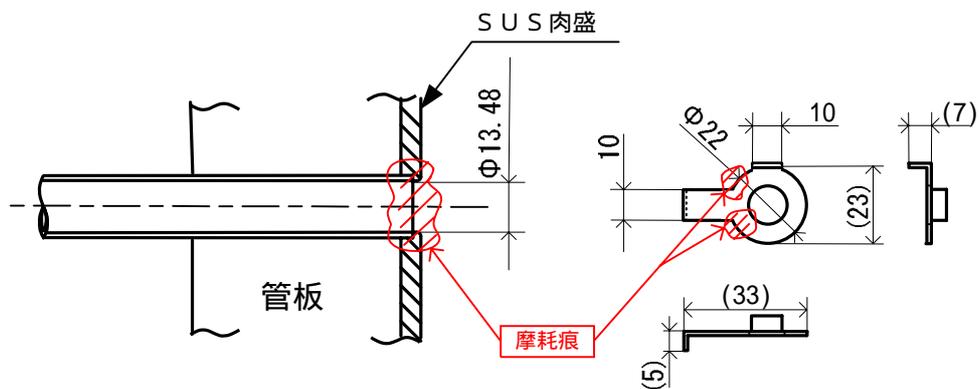
回収した座金

仕切ふた(ボルト脱落位置)

擦れ跡・減肉箇所の照合

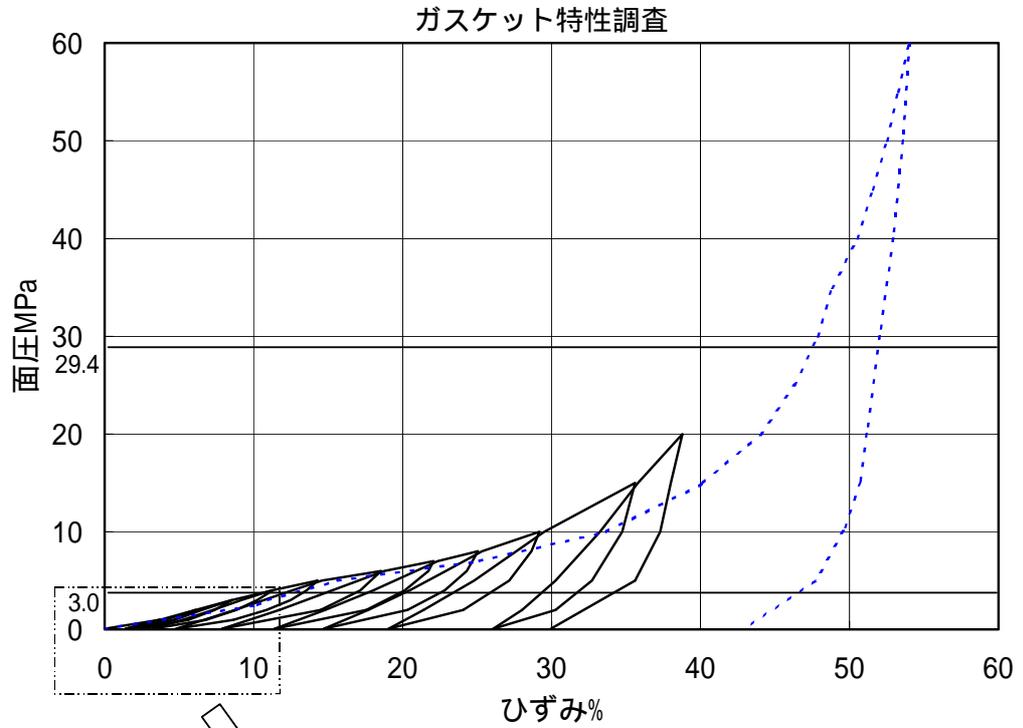


仕切ふた・ボルト・座金の擦れ跡

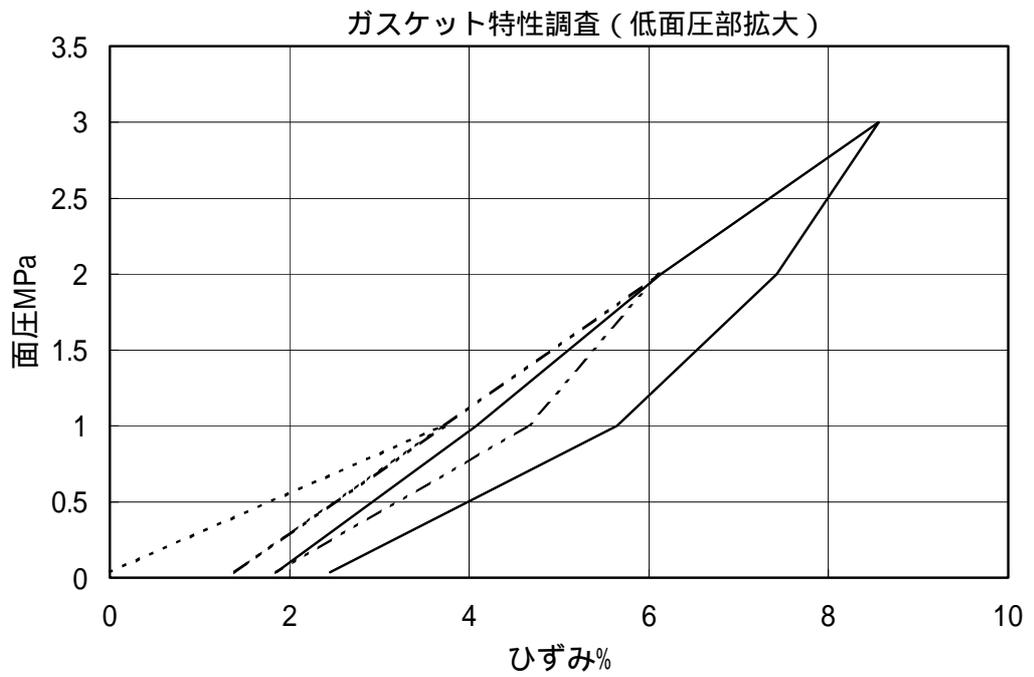


管板面肉盛溶接部の減肉箇所と回収した座金

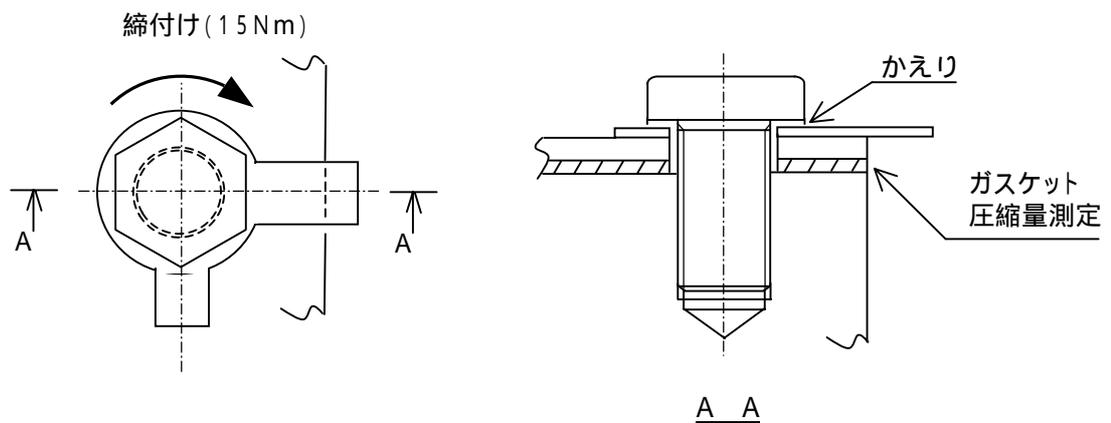
ガスケット特性の調査



拡大



ボルト頭部底面のかえりによる影響の評価

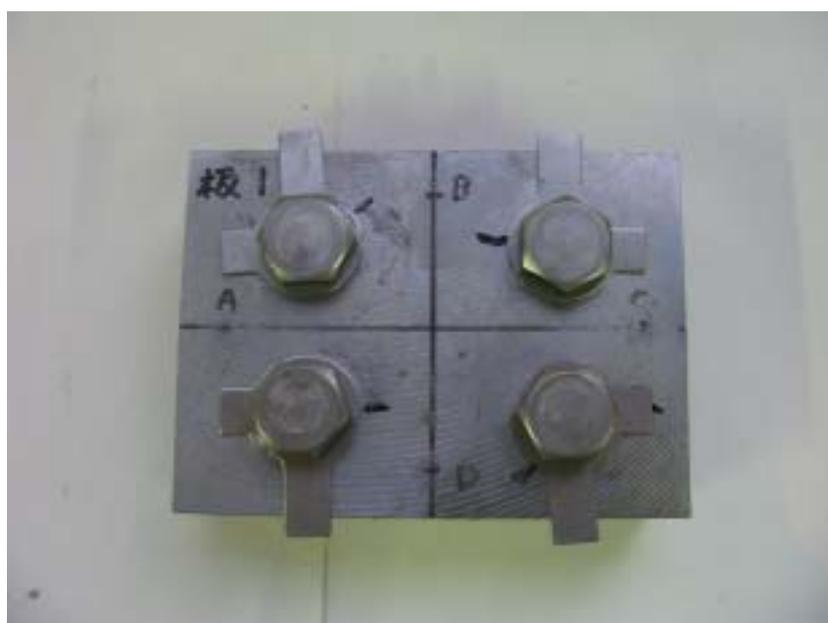


試験手順

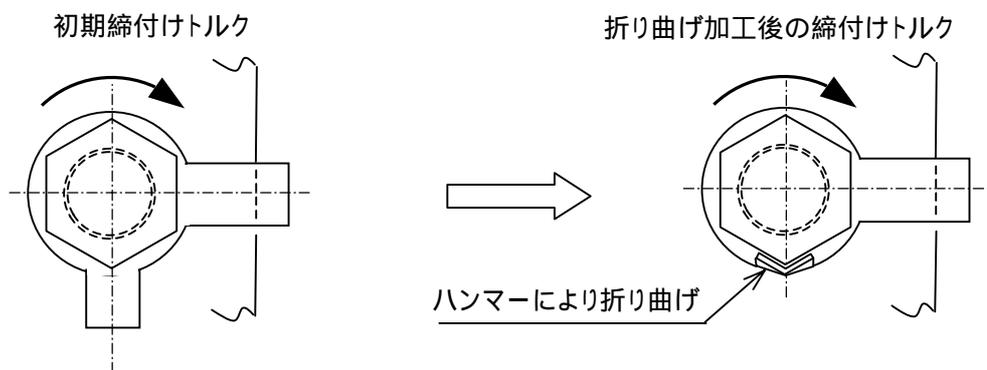
15 Nm 初期トルク締付け
 ガスケット圧縮量の測定

試験結果

	かえり有り	かえり無し
ガスケット圧縮量	0.20 mm	0.29 mm
ガスケットのひずみ	6.43 %	9.21 %



座金曲げ加工による影響の評価



試験手順

初期締付けトルク 15 Nm、25 Nmにより締め付け

ハンマーにより座金の舌を折り曲げ加工

座金の舌起こし(トルク測定のため)

ダイヤル式トルクレンチでボルトが締め始めるトルク値を測定

試験結果

初期締付けトルク (Nm)	座金加工後のトルク (Nm)
15	10
25	20

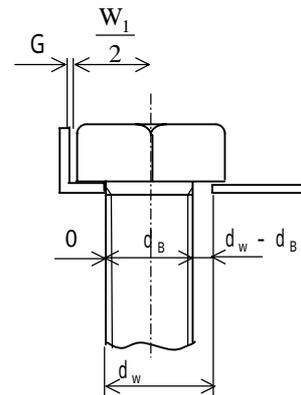


試験に用いたモックアップ

座金による回り止め機能の評価

< 取付初期状態 >

ボルト及び舌付座金関連寸法(実測値)

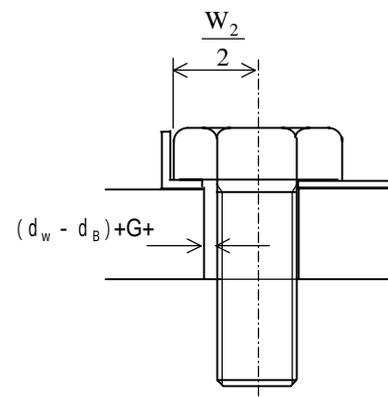
六角ボルト頭の対辺寸法 $W_1 = 18.9 \text{ mm}$ 六角ボルト頭の対角寸法 $W_2 = 21.6 \text{ mm}$ 座金とボルト頭の初期スキマ
(スプリングバック)(最小値) $G = 0.1 \text{ mm}$ 六角ボルトのねじ部外径 $d_B = 11.6 \text{ mm}$ 舌付座金穴径 $d_W = 12.7 \text{ mm}$ 

取付初期状態

< ボルトが回り始める状態 >

(ボルトが廻る条件)

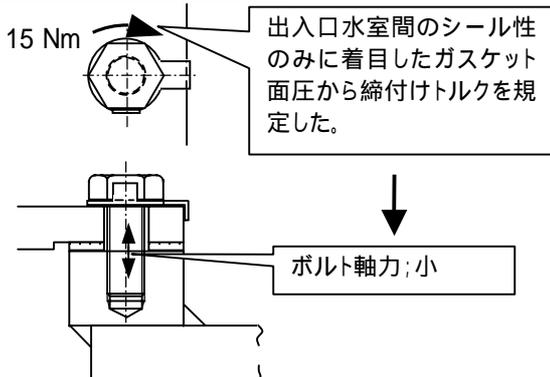
$$\frac{W_2 - W_1}{2} (d_W - d_B) + G + 0.15$$



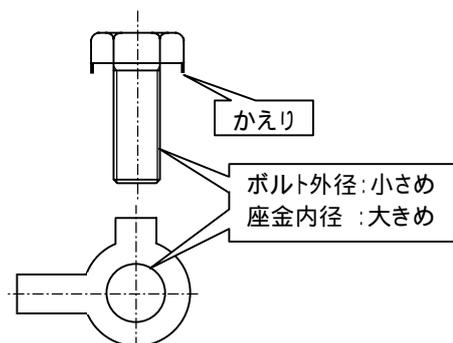
ボルトが回り始める状態

ボルトおよび座金が脱落したメカニズム

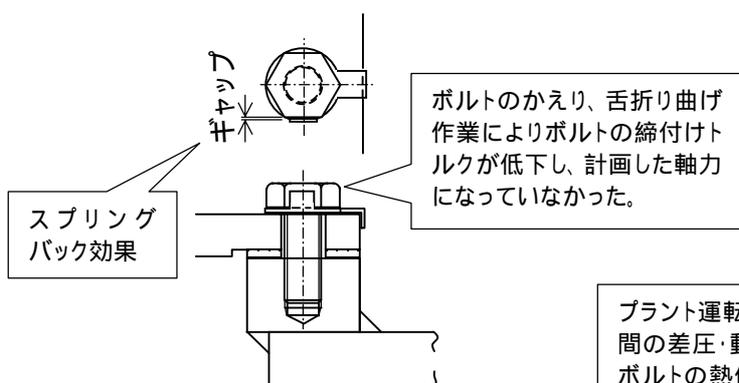
仕切ふた締付け部の設計



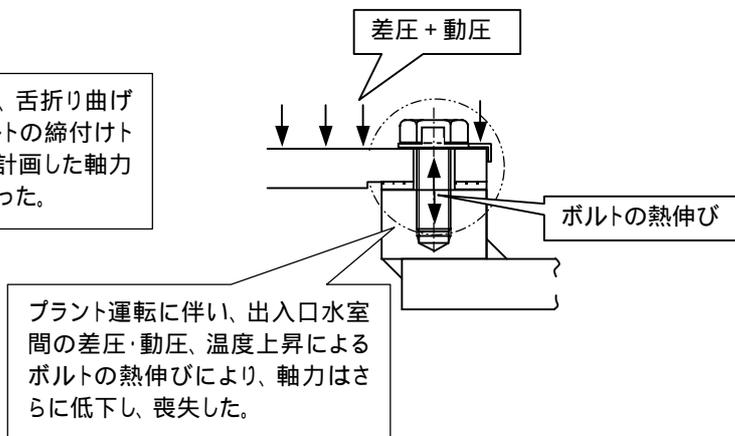
使用したボルトおよび座金



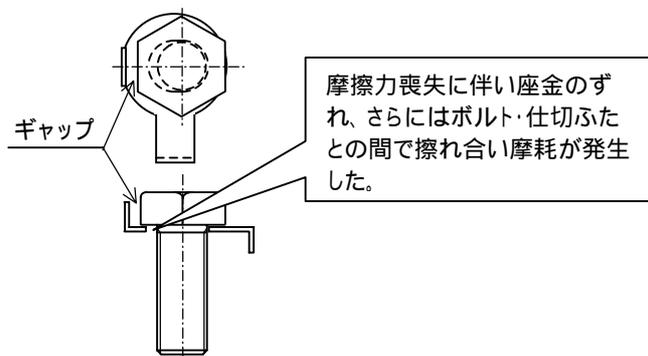
仕切ふたボルト締付け作業



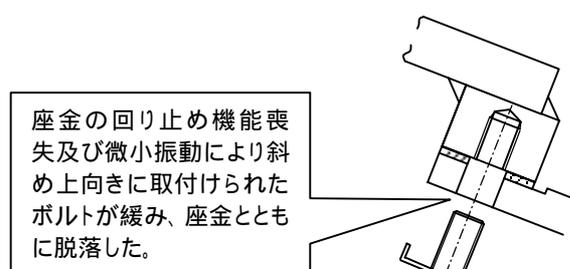
プラント運転開始に伴う軸力の減少



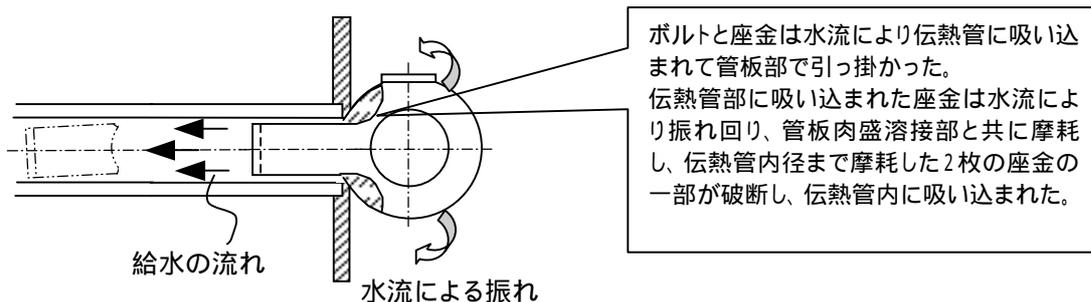
座金に作用していた摩擦力喪失に伴い座金のずれ発生



座金回り止め機能喪失によるボルト落下



脱落した座金が水流により伝熱管入口に引っ掛かり座金が摩耗



異物による蒸気発生器伝熱管への影響

伊方1号機において運転中に2号機と同様の事象が発生し、座金の破片が異物となっても、現実的には2号機と同じように第5高圧給水加熱器内に留まる可能性が高いと考えられるが、万一、蒸気発生器に流入し管板部の伝熱管群部に至った場合^(注)においても、異物は小さく軽いことなどから、以下に示すように、伝熱管の健全性に問題はない。

(注) 2号機と同じような大きさ・重量の板状の異物が流入した場合、給水の流れにより管板部の中央領域付近まで流れ着く可能性がある。管板中央領域では板状の異物が上昇流に対して最大受圧面積となる状態またはそれに近い状態を維持する場合には伝熱管群部を上方向に移動すると考えられるが、現実には乱れのある流れの中で板状の異物がそのような状態を維持するのは不可能であることから、上方向に移動し続けることはない。

乱れのある流れの中で小さく軽い異物が同じ場所で繰り返し同じ動きをすることは考えられず、伝熱管の同一個所に異物が繰り返し衝突することはありえないため、伝熱管の健全性に影響はない。

繰り返しのない衝突として、仮に異物が伝熱管群部において最大流速4 m / sで伝熱管に衝突した場合でも、その衝撃力は微小であり伝熱管の健全性に影響はない。

なお、念のため、異物が運転期間を通して管板上の1箇所に留まり、そこで2本の伝熱管の同じ箇所に繰り返し衝突し伝熱管が摩耗減肉するという厳しい条件での評価も行ったが、この場合でも、以下のとおり、減肉量は伝熱管が破断する限界減肉量に対して十分小さく、蒸気発生器伝熱管の健全性が問題とならないことを確認した。

摩耗期間	摩耗減肉量 (1)	限界減肉量 (2)
13 ヶ月間	減肉率約 23% (深さ 0.30 mm)	減肉率 78% (深さ 0.99 mm)
26 ヶ月間	減肉率約 37% (深さ 0.47 mm)	

1: 異物の板厚である 0.8 mm の減肉幅での摩耗減肉深さ。

2: 減肉幅 10 mm と想定した場合において伝熱管が破断する減肉深さ。