

発電用原子炉施設故障等報告書

平成27年 6月 5日

東京電力株式会社

| | |
|----------------|--|
| 件名 | 福島第一原子力発電所 G4南エリアA5-A6タンク連結弁の不具合について |
| 事象発生の日時 | 平成26年9月17日17時40分 (福島第一規則第18条第3号に該当すると判断した日時) |
| 事象発生の場所 | 福島第一原子力発電所 |
| 事象発生の発電用原子炉施設名 | 汚染水処理設備等 貯留設備 (タンク等) 中低濃度タンク 各設備附属配管等 連結弁 (完成品) |
| 事象の状況 | <p>1. 事象発生時の状況</p> <p>平成26年9月4日12時04分、福島第一原子力発電所構内 (以下、「発電所構内」という。) のG4南エリアにおいて、モバイル型ストロンチウム除去装置の運転準備として、A4タンクとA5タンク間の連結弁を「開」にし、A4タンクに貯留していた淡水化装置で濃縮した汚染水 (以下、「RO濃縮水」という。) をA5タンクへ移送していた当社社員が、A5タンクとA6タンク間に設置されている連結弁 (V-202-G4-A-9) (以下、「当該弁」という。) の弁箱から、1秒に1滴程度で水が滴下していることを確認した。</p> <p>このため、A4タンクからA5タンクへの移送を停止するとともに、保温材を取り外して当該弁の状況を確認したところ、弁箱に10cm程度のひび割れらしきものがあること、その周辺およびフランジ部から水が滲んでいることを確認したことから漏えいと判断し、漏えい箇所をビニール袋により養生した。</p> <p>A5タンクの水位を確認したところ、タンク底部より約1,320mm (水位計表示10.7%) であり、当該弁のひび割れらしき箇所の高さ (タンク底部より約500mm) より上の水位であった。</p> <p>A5タンクの水位を下げるため、同日14時43分から仮設ポンプを使用してA5タンクからA4タンクへの移送を行うとともに、当該弁のひび割れらしき箇所およびフランジ部に接着剤を塗布し、同日18時03分に当該弁からの漏えいが停止したことを確認した。</p> <p>当該弁から滴下した水は、G4南エリア周辺に設置された堰 (以下、「当該堰」という。) 内に留まっており、堰外への流出は確認されなかった。なお、当該堰内にはすでに雨水が3cm程度 (9月4日10時現在) 溜まっていたことから、漏えいした範囲は確認できなかった。</p> <p>このため、A4タンクからA5タンクへのRO濃縮水移送を開始した直後の9月4日11時00分頃 (A5タンク水位が当該弁のひび割れらしきものの高さまで到達したと考えられる時刻が明確にわからないため、この時刻を始点に保守的に評価) から漏えい箇所のビニール袋による養生が完了した同日12時15分頃までの時間、および滴下した量 (1秒に1滴程度) から、漏えい量を約1リットルと推定した。</p> <p>当該弁から漏えいした水を採取して放射能分析を行った結果、Cs-134 が約 $2.5 \times 10^3 \text{Bq/L}$、Cs-137 が約 $7.3 \times 10^3 \text{Bq/L}$、Sb-125 が約 $1.7 \times 10^4 \text{Bq/L}$、全ベータが約 $9.8 \times 10^7 \text{Bq/L}$ であった。</p> <p>また、漏えいした水の放射能量は、全ガンマで約 $2.7 \times 10^4 \text{Bq}$、全ベータで約 $9.8 \times 10^7 \text{Bq}$ と評価した。</p> <p>その後、9月13日に当該弁を取り外して新品の同型弁へ取替を行い、9月17日に取り外した当該弁内部の目視確認を行ったところ、ひび割れは弁箱表面から内面まで貫通していることを確認した。</p> |

事象の状況

本事象については、当該弁のひび割れが弁箱内面まで貫通していることから、福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画（以下、「実施計画」という。）で定める汚染水処理設備等に要求される機能（汚染水処理設備等は漏えいを防止できること）を有していないと判断し、同日17時40分、福島第一規則第18条第3号「発電用原子炉設置者が、発電用原子炉施設のうち実施計画に定められたものの点検を行った場合において、発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき。」に該当すると判断した。

2. 応急対策

当該弁からの漏えいを停止させるため、9月4日14時43分から仮設ポンプを使用して、A5タンクからA4タンクへ移送を行い、A5タンクの水位を低下させる操作を開始した。

また、9月4日17時50分に一旦移送を停止して、移送ポンプを大容量のものに取り替えた後、9月5日14時16分から移送を再開した。

その後、9月5日17時00分頃、A5タンク水位が当該弁の位置より低い水位となったことを確認し、同日18時10分に移送を停止した。

また、仮設ポンプでの移送と並行して、当該弁のひび割れらしき箇所およびフランジ部に接着剤を塗布し、9月4日18時03分に漏えいが停止したことを確認した。

当該堰内に溜まった水については、9月4日から9月6日にかけて、吸引車を使用して断続的に回収するとともに、当該堰内床面の洗浄を行った。

3. 環境への影響

漏えいした水は当該堰内に留まっており、堰外への流出は確認されなかったこと、当該堰内に溜まっていた水は回収し、堰内床面の洗浄を行ったことから、放射能による環境への影響はないものと判断した。

4. 当該弁の履歴および同型弁の漏えい有無確認結果

当該弁にひび割れらしきものが確認されたことから、当該弁の履歴および同型弁の漏えい有無の確認を行った。

(1) 当該弁の設置状況および使用履歴調査

- a. 平成25年8月上旬に当該弁（新品）を設置した。
- b. 平成25年11月12日にA5タンクの水張り試験（ろ過水を使用）、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を行い、当該弁に漏えい等の異常がないことを確認した。水張り試験時、当該弁は「開」の状態であった。
- c. 当該弁を含む連結配管部の水張り試験完了後、A6タンク周りの水張り試験のためA5タンクの水張り試験に使用したろ過水を、A6タンクに移送した。なお、ろ過水の移送は、当該弁およびA6タンク側の連結弁を「開」にして、水頭圧によりA6タンクへ送り、その後は、当該弁を「閉」にして仮設ポンプで移送した。
- d. A6タンク周りについても、ろ過水を使用した水張り試験を行い、その後、A6タンク、およびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行った。水抜きはA6タンク側の連結弁を「開」状態で実施した。その際も、当該弁は「閉」の状態であった。
- e. A5タンクからA6タンクへろ過水の移送が完了した以降、本事象が発生するまでの間、当該弁の操作を行った記録はなかった。
- f. 平成25年12月下旬（平成25年12月24日から同年12月27日の間）に、当該弁および連結配管に保温材を取り付けた。
- g. 平成26年1月7日、A5タンクについて、RO濃縮水を受け入れ可能な状態とした。ただし、RO濃縮水は受け入れず、空の状態としていた。

| | |
|--------------|--|
| <p>事象の状況</p> | <p>(2) 汚染水タンク周りで使用している同型弁の調査結果 汚染水タンク周りで使用している同型弁について、本事象と同様なひび割れが発生していないか調査を行った結果は、以下の通りであった。</p> <p>a. 汚染水タンクの堰外に設置されているRO濃縮水ラインの同型弁（19台）について、平成26年9月26日から9月30日にかけて、保温材を取り外して外観点検を実施し、異常はなかった。</p> <p>b. 同型弁を採用している汚染水タンク堰内連結弁（以下、「汚染水タンク堰内同型弁」という。）（941台）について、平成26年9月26日から同年11月13日にかけて、保温材を取り外して外観点検を実施し、異常はなかった。</p> |
| <p>事象の原因</p> | <p>5. 原因調査結果 5-1. 当該弁の仕様・構造および破損の状況 当該弁の仕様・構造および破損の状況について調査を行った。</p> <p>(1) 当該弁の仕様および構造調査 a. 当該弁は、日本工業規格（JIS B 2031）ねずみ鋳鉄弁（呼び圧力10Kのフランジ形外ねじ仕切り弁）であり、一般的な設備においても広く使用される製品（汎用品）であった。</p> <p>b. 当該弁の最高許容圧力（120℃以下の脈動水の場合）は、0.98MPa、また、当該弁の弁箱水圧試験圧力は、2.06MPaであった。</p> <p>c. 当該弁が接続される配管の内径は、200mmであった。</p> <p>d. 当該弁の構造は、弁箱内に「密封室」と呼ばれる空間が存在し、弁箱内に流体が内包された状態で、弁を「開」から「閉」にすると、その空間に流体が滞留する構造となっていた。</p> <p>(2) 当該弁の外観確認結果 平成26年9月4日に撮影した写真から、当該弁の外観確認を行ったところ、ひび割れらしきものは、当該のひび割れらしきものだけでなく、弁蓋フランジ部のボルト穴2箇所についても、ひび模様が確認された。 それ以外には、据え付け時についたと推定される小さな傷は確認されたものの、当該弁の破損に至るような大きな傷や打痕等は認められなかった。</p> <p>(3) 当該弁の分解点検結果 平成26年9月17日、当該弁の弁箱を切り出して調査（表面観察）したところ、当該のひび割れらしきものは、弁箱表面から内面まで貫通していることを確認した。内面まで貫通したき裂（以下、「貫通き裂」という。）は、弁蓋フランジ部から、弁箱の方向に長さ約10cmにわたっていた。 また、貫通き裂発生に至るような腐食は認められなかった。</p> <p>(4) 破面観察結果 平成26年9月25日、貫通き裂部を分割してマクロ破面観察を行ったところ、以下のことが確認された。 しかしながら、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかった。 なお、鋳鋼品の場合、破損のメカニズムによらず、同様な破面様相を呈することが知られており、電子顕微鏡等を用いた詳細観察を実施しても、新たな知見を得られる可能性は低いと判断した。</p> <p>a. き裂は弁箱の板厚を貫通しており、き裂の長さは最深部で弁蓋フランジ面より約12cmであった。</p> <p>b. 引け巣等の顕著な鋳造欠陥は確認されなかった。</p> |

事 象 の 原 因

- c. 破面の大部分は腐食生成物で覆われていた。一部の破面は、著しい腐食により破損のメカニズムを示唆するような破面様相の観察が困難となっていた。
- d. 破面は巨視的には平坦であり、分岐等は確認されなかった。
- e. 破面には、破壊の起点や進行方向等を示唆する筋模様や段差等は確認されなかった。
- f. 破面上で一部腐食が生じていなかった部位については、破面観察のために強制的に破断させた部分（以下、「強制破断部」という。）と同様な破面様相が確認された。
- g. 腐食の程度が他と比較して顕著でない部分について、酸洗後、破面観察したところ、強制破断部と破面様相が類似していた。

(5) 貫通き裂部以外のひび割れ部調査結果

「5-1. (4) 破面観察結果」において、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかったことから、更なる調査として、平成26年10月2日、当該の貫通き裂部箇所以外のひび模様（弁蓋フランジ部のボルト穴2箇所）について調査を行ったところ、ボルト穴外側部のみにひび割れが確認された。そのひび割れは、弁箱の内面側にはなかった。

しかしながら、本調査においても、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかった。

5-2. 貫通き裂発生の要因分析

これまでの調査結果をもとに、要因分析表により貫通き裂が発生した要因について調査した。

(1) 弁選定ミス

当該弁の最高許容圧力は0.98MPa、弁箱水圧試験圧力は2.06MPaであるのに対して、A5タンクを満水にした場合の水頭圧は約0.1MPaであることから、当該弁を選定するにあたり、弁仕様は適切であった。

(2) 弁製造・組立時の欠陥

a. 弁蓋フランジの過度な締め付け

弁蓋フランジの締め付け方法については、弁メーカーの製造工場において空気インパクトレンチで規定のトルクで締め付けており、フランジ面に対して過大な外力は加わっていない。

なお、弁箱の貫通き裂は、弁蓋フランジ部から弁箱の方向（縦方向）に入っていることから、貫通き裂を引き起こした力は、弁箱を横に引き裂く方向に加わっていることが分かる。また、フランジの締め付け方向に過大な力が加わったのであれば、横方向にひびが入ると考えられることから、フランジの過度な締め付けの可能性はないと考えられる。

b. 弁製造過程における欠陥

(a) 当該弁は、日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験・検査^{*1}を経て出荷された製品であった。

(b) 日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験・検査は、製造ロット毎に抜き取り形式で行われており、抜き取り対象となった弁については、その試験および検査に合格していた。なお、当該弁がその試験および検査対象であったかは分からなかった。

(c) 弁メーカーに製造欠陥が発生する割合について問い合わせを行ったところ、当該弁のような鋳鉄製の弁において、貫通き裂が発生するような製造欠陥の情報はない。

事象の原因

(d) 当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にひび割れらしき痕はないことから、弁製造過程における欠陥の可能性は考えられない。

※1 材料試験、外観検査、寸法検査、作動試験、圧力試験を行っている。

c. 巣の存在（鑄造欠陥）

破面観察結果から、引け巣等の顕著な鑄造欠陥は確認されなかった。

(3) 現地据え付け時における破損

a. 当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にひび割れらしき痕はないこと、また、当該弁周りに漏水がなかったことが確認されたため、現地据え付け時において貫通き裂が発生していた可能性は考えられない。

b. 当該弁の弁蓋フランジ部ボルト穴の外側に確認された2箇所のひび割れについては、当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）からは確認できなかった。

(4) 腐食

a. 腐食減肉

当該弁の貫通き裂破面は、貫通き裂発生後に生じたと考えられる腐食生成物で覆われていたものの、貫通き裂発生の原因となるような腐食減肉は認められなかった。

(5) 過大応力

a. 弁据え付け時の偏芯応力

A5タンクとA6タンク間の連結配管は、可とう管（フレキシブルチューブ）を使用しており、当該弁に過大な偏芯応力は加わらない。

b. 運転・操作ミスによる過加圧

当該弁は、平成25年8月上旬に設置され、同年11月12日にA5タンクの水張り試験、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を実施しているが、当該弁に加わった圧力は、タンクの水頭圧（水張り試験時におけるタンク平均水位は約10m）のみであり、運転・操作ミスによって当該弁の最高許容圧力（0.98MPa）を超えるような圧力が加わることは考えられない。

c. 凍結による体積膨張

(a) 破面観察結果からは、破損のメカニズムの特定に繋がる情報は得られなかった。しかしながら、鑄造欠陥が見られないことや、割れの位置、方向、弁の運用状況等を考慮すると、当該弁設置後に弁箱内部に過度な圧力が作用したことに起因する割れである可能性が高いと推定された。また、内圧の作用源としては、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定された。

(b) 弁メーカーに過去の類似事象について問い合わせを行ったところ、弁箱内の密封室に溜まった流体が凍結により体積膨張し、その影響によって弁箱内部に過大な応力が加わったことで、ひび割れが発生した事象が確認された。

(c) 弁メーカーにおいて、当該弁と同型の弁を使用し、密封室内に空気が残らないように水を満たした後、弁を全閉として、雰囲気温度を -10°C とした環境に放置して再現試験を行ったところ、再現試験開始から約6時間20分後に、弁箱表面温度が約 -5°C に到達した時点で、本事象において確認された貫通き裂の模様と酷似した割れが確認された。

事象の原因

d. 外的衝撃による破損

(a) 当該弁の外観確認を行ったところ、据え付け時についてと推定される小さな傷は確認されたものの、き裂発生に至るような打痕等は認められなかった。

6. 凍結による弁破損の可能性について

原因調査結果から、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定されたこと、また、弁メーカーから類似事象に関する情報および再現試験の結果から、凍結により本事象と同様な貫通き裂が発生した経緯が確認されたことから、当該弁が置かれた状況において、どのように弁箱内の密封室に水が流入し、密封された状態で滞留したのか、また、弁体および連結配管に保温材が取り付けられていたにもかかわらず、当該弁のみ凍結が発生したのか、運用面を考慮して弁破損の可能性を検討した。

(1) 弁箱内密封室への水の流入と滞留について

当該弁は「4. (1) 当該弁の設置状況および使用履歴調査」で記載の通り、A5、A6タンクの水張り試験を実施した以降、当該弁を「閉」とし、連結配管内を水抜きした状態となっていた。このような手順で水張り、水抜きを実施すると、ほぼ満水であったA5タンクの水頭圧がかかった状態で、A5タンクからA6タンクに水を移送した際に発生する水の流れにより、弁箱内密封室にろ過水が流入し満水となり、弁を「閉」にした後、水が密封された状態で残留する可能性があることが分かった。

(2) 同型弁の保管・運用状態について

a. 同型弁の保管・運用状態を確認したところ、当該弁以外に、弁箱内密封室が満水になった状態で、連結配管の水抜きが行われている弁はなかった。

なお、平成25年8月19日に福島第一原子力発電所汚染水貯留設備RO濃縮水貯槽からの漏えい事象（以下、「H4北エリアタンクからの漏えい事象」という。）が発生している。

本事象発生当時、フランジ型タンクと溶接型タンクの建設を並行して進めており、フランジ型タンクにはRO濃縮水を、溶接型タンクには多核種除去設備で処理した水を貯蔵する運用としていた。

H4北エリアタンクからの漏えい事象の発生を受け、放射能濃度の高いRO濃縮水は、漏えいリスクの低い溶接型タンクに可能な限り貯蔵し、多核種除去設備で処理した水をフランジ型タンクに貯蔵する運用に変更した。当該弁を設置していたG4南エリアの各タンク（フランジ型タンク）は、この運用変更の前後で順次受け入れ可能な状態となっており、隣接のA4タンクまではRO濃縮水を貯蔵していたが、A5、A6タンクはこの運用変更後に受け入れ可能な状態となったため、使用せずにいた。

このため、当該弁は、他の同型弁とは異なる保管・運用状態となっていた。

現在のタンク運用については、基本的に全てのタンクを順次使用しているため、A5、A6タンクのように数ヶ月間も空の状態にしておくことはない。

b. 同型弁が設置されている汚染水タンクエリアについて調査したところ、発電所構内の複数のエリアに設置されていることが確認された。また、その汚染水タンクの設置が開始された時期（同型弁が設置された時期）を調査したところ、平成23年3月以降であることが確認された。このことから、同型弁は、設置以降に最大で3回冬を越していることが分かった。なお、当該弁以外に、本事象のような貫通き裂が発生した弁はなかった。

事象の原因

(3) 当該弁水張り以降の外気温について

a. 当該弁の水張り以降、当該弁に保温材を取り付けるまでの期間（11月12日から12月27日）で凍結した可能性を検討するため、この期間の発電所構内における外気温^{※2}を調査した結果、氷点下となった日はあったものの、1時間（平均）毎の観測記録から氷点下が継続していたのは、12月26日の3時間（2時頃から4時頃）のみであった。その時の外気温は -0.6°C から -0.8°C であったことから、保温材を取り付ける前に当該弁の密封室に残留したろ過水が凍結した可能性は低いと推定した。

※2 観測地点：免震重要棟西側

b. 当該弁に保温材を取り付けた以降の発電所構内における外気温を調査（期間：平成25年12月28日から平成26年3月31日）したところ、1日の最低気温^{※3}が氷点下となった日が、61日あることを確認した。この61日のうち、 -5°C 以下を観測した日は、4日あることを確認した。このうち、2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、1時間（平均）毎の外気温がほぼ -5°C 以下を推移しており、さらに、2月5日23時頃と2月6日1時頃にかけては、 -6.6°C （調査期間における最低気温）を観測していた。このことから、弁箱内の密封室の残留水が、外気温と同様の温度となれば、発電所構内の環境で凍結する可能性があることが分かった。

※3 毎分単位で観測される1日の最低温度

(4) 保温材を取り付けていたにもかかわらず凍結した可能性について

保温材を取り付けていたにもかかわらず、当該弁のみ凍結した可能性がある状況から、他の同型弁との相違点を検討したところ、当該弁は、水張り試験後、当該弁に接続している連結配管の水抜きが行われていた。また、当該弁は、A5タンクの直近に取り付けられており、外気に開放されているような状態となっていたことから、密封室の残留水が、弁箱内部から冷却された可能性があることが分かった。

以上のことから、当該弁は、特殊な運用条件のために密封室にろ過水が満水となった状態で残留し、その水が、水抜きされた配管を通じて弁箱内部から冷却されたことにより凍結し、当該弁が破損した可能性が高いと推定した。

7. 貫通き裂の発生メカニズム

これまでの原因調査結果から、貫通き裂は以下のメカニズムで発生したものと推定した。

- (1) 当該弁の構造は、弁箱内に「密封室」と呼ばれる空間が存在し、弁箱内に流体が内包された状態で弁体を「開」から「閉」にすると、密封室に流体が残留する構造となっていた。
- (2) 当該弁を含む連結配管部の水張り試験後、A5タンクに貯留したろ過水をA6タンクに移送するため、当該弁およびA6タンク側の連結弁を「開」にした際、ほぼ満水であったA5タンクの水頭圧がかかった状態で発生する水の流れにより、当該弁の密封室にろ過水が流入し満水となった。その後、当該弁を「閉」にしたことにより、密封室に水が密封された状態で残留した。
- (3) A6タンク周りの水張り試験後、A6タンク、およびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行ったことから、当該弁の密封室は、A5タンク内の外気と弁箱内部で接触する状態となった。

| | |
|----------------------|---|
| <p>事象の原因</p> | <p>(4) 平成25年12月下旬以降は、当該弁および連結配管に保温材を取り付けていたが、平成26年3月下旬にかけて、発電所構内における外気温が氷点下となった日が61日あり、特に2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、外気温がほぼ-5℃以下を推移していた。</p> <p>(5) 凍結防止対策として、当該弁および連結配管には保温材を取り付けていたものの、当該弁が接続されている連結配管は水抜きが行われており、当該弁内部（A5タンク側）は、A5タンク内に開放されていたため、当該弁内部から密封室が冷却され、密封室に残留したろ過水が凍結した。</p> <p>(6) 凍結した水が体積膨張し、その影響によって弁箱内部の密封室に過大な応力が加わったことにより、弁箱に貫通き裂が発生した。また、弁箱の弁蓋フランジ部が外側に膨張したため、ボルト穴2箇所、穴の外側にひび割れが発生した。</p> <p>8. 推定原因 これまでの調査結果から、本事象が発生した原因は、以下の通りであると推定した。</p> <p>(1) A6タンク周りの水張り試験後、連結配管内の水抜きをした際に、当該弁の密封室にろ過水が満水となった状態で残留した。また、当該弁に接続している連結配管の水抜きが行われ、弁がA5タンクの直近に取り付けられていたことから、外気に開放されているような状態となっていた。</p> <p>(2) 上記の状態、外気温が低温（特に2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、外気温がほぼ-5℃以下を推移）となった時間が継続したことにより、保温材が取り付けられていたにもかかわらず、当該弁内部から密封室が冷却され、密封室内に残留したろ過水が凍結し、体積膨張により貫通き裂が発生したものと推定した。</p> |
| <p>保護装置の種類及び動作状況</p> | <p>なし</p> |
| <p>放射能の影響</p> | <p>漏えいした水は当該堰内に留まっており、堰外への流出は確認されなかったこと、当該堰内に溜まっていた水は回収し、堰内床面の洗浄を行ったことから、放射能による環境への影響はないものと判断した。</p> |
| <p>被害者</p> | <p>なし</p> |
| <p>他に及ぼした障害</p> | <p>なし</p> |
| <p>復旧の日時</p> | <p>未定</p> |
| <p>再発防止対策</p> | <p>9. 対策</p> <p>(1) 貫通き裂が発生した当該弁の交換 貫通き裂が発生した当該弁について、平成26年9月13日に新品の同型弁への交換を行った。</p> <p>(2) 密封室に残留する水の凍結防止処置 汚染水タンクおよび連結配管の水張り試験を行った後、連結配管の水抜きを行う場合は、弁を「開」状態にして密封室の水抜きを行うことを、試験・施工要領書に追記することを周知した。（平成27年4月17日 関係部門に周知^{※4}）</p> <p>※4 周知が必要な部門を再整理し、平成27年5月15日に追加で周知を行った。</p> |

再発防止対策

また、弁の構造上、密封室が存在するその他の弁についても対策されるよう、廃止措置基本マニュアルおよび保守管理基本マニュアルの下位文書である「凍結防止対策運用ガイド」（以下、「ガイド」という。）に、本事象の概要を反映した。今後はガイドにより、毎年、水（ろ過水・汚染水等）を保有する設備、および過去に保有していた設備を対象に、凍結防止対策実施フローに従って対策が必要な設備を選定し、残水除去操作を実施することとした。（平成27年4月1日 ガイド改訂完了）

福島第一原子力発電所
G4南エリアA5-A6タンク連結弁の不具合について

平成27年 4月 提出
平成27年 6月 補正

東京電力株式会社

はじめに

平成26年9月4日、福島第一原子力発電所構内のG4南エリアにおいて、A5タンクとA6タンク間に設置されている連結弁（V-202-G4-A-9）の弁箱から、1秒に1滴程度で水が滴下していることを確認した。

このため、保温材を取り外して当該連結弁の状況を確認したところ、弁箱に10cm程度のひび割れらしきものがあること、その周辺およびフランジ部から水が滲んでいることを確認したことから、漏えい拡大防止のための応急対策を行い、当該連結弁からの漏えいが停止したことを確認した。

その後、9月13日に当該連結弁を取り外して新品の同型弁へ取替を行い、9月17日に取り外した当該連結弁内部の目視確認を行ったところ、ひび割れは弁箱表面から内面まで貫通していることを確認したことから、本事象については、福島第一規則第18条の規定に基づく事故報告に該当すると判断した。

これらの内容等については、運総発官26第391号（平成26年9月26日付け）にて原子力規制委員会へ報告を行っている。

その後、当該連結弁の不具合に関する調査等を行い、原因が分析できたこと、それらに対する対策の立案ができたことから、これらの内容等について運総発官27第57号（平成27年4月28日付け）にて原子力規制委員会に報告を行っている。

今回の報告書は、平成27年4月28日の報告後に実施した原子力規制庁への報告内容の説明を踏まえて、対策等について修正を行い、補正として報告するものである。

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. 件 名 | 1 |
| 2. 事象発生の日時 | 1 |
| 3. 事象発生の発電用原子炉施設 | 1 |
| 4. 事象発生時の状況 | 1 |
| 5. 応急対策 | 2 |
| 6. 環境への影響 | 2 |
| 7. 当該弁の履歴および同型弁の漏えい有無確認結果 | 2 |
| 8. 原因調査結果 | 3 |
| 8-1. 当該弁の仕様・構造および破損の状況 | 3 |
| 8-2. 貫通き裂発生の要因分析 | 5 |
| 9. 凍結による弁破損の可能性について | 7 |
| 10. 貫通き裂の発生メカニズム | 8 |
| 11. 推定原因 | 9 |
| 12. 対策 | 9 |
| 13. 添付資料 | 10 |

1. 件名

福島第一原子力発電所
G4南エリアA5-A6タンク連結弁の不具合について

2. 事象発生の日時

平成26年9月17日17時40分
(福島第一規則第18条第3号に該当すると判断した日時)

3. 事象発生の発電用原子炉施設

汚染水処理設備等 貯留設備 (タンク等) 中低濃度タンク 各設備附属配管等
連結弁 (完成品)

4. 事象発生時の状況

平成26年9月4日12時04分、福島第一原子力発電所構内 (以下、「発電所構内」という。) のG4南エリアにおいて、モバイル型ストロンチウム除去装置の運転準備として、A4タンクとA5タンク間の連結弁を「開」にし、A4タンクに貯留していた淡水化装置で濃縮した汚染水 (以下、「RO濃縮水」という。) をA5タンクへ移送していた当社社員が、A5タンクとA6タンク間に設置されている連結弁 (V-202-G4-A-9) (以下、「当該弁」という。) の弁箱から、1秒に1滴程度で水が滴下していることを確認した。

このため、A4タンクからA5タンクへの移送を停止するとともに、保温材を取り外して当該弁の状況を確認したところ、弁箱に10cm程度のひび割れらしきものがあること、その周辺およびフランジ部から水が滲んでいることを確認したことから漏えいと判断し、漏えい箇所をビニール袋により養生した。

A5タンクの水位を確認したところ、タンク底部より約1,320mm (水位計表示10.7%) であり、当該弁のひび割れらしき箇所の高さ (タンク底部より約500mm) より上の水位であった。

A5タンクの水位を下げるため、同日14時43分から仮設ポンプを使用してA5タンクからA4タンクへの移送を行うとともに、当該弁のひび割れらしき箇所およびフランジ部に接着剤を塗布し、同日18時03分に当該弁からの漏えいが停止したことを確認した。

当該弁から滴下した水は、G4南エリア周辺に設置された堰 (以下、「当該堰」という。) 内に留まっており、堰外への流出は確認されなかった。なお、当該堰内にはすでに雨水が3cm程度 (9月4日10時現在) 溜まっていたことから、漏えいした範囲は確認できなかった。

このため、A4タンクからA5タンクへのRO濃縮水移送を開始した直後の9月4日11時00分頃 (A5タンク水位が当該弁のひび割れらしきもの高さまで到達したと考えられる時刻が明確にわからないため、この時刻を始点に保守的に評価) から漏えい箇所のビニール袋による養生が完了した同日12時15分頃までの時間、および滴下した量 (1秒に1滴程度) から、漏えい量を約1リットルと推定した。

当該弁から漏えいした水を採取して放射能分析を行った結果、Cs-134 が約 2.5×10^3 Bq/L、Cs-137 が約 7.3×10^3 Bq/L、Sb-125 が約 1.7×10^4 Bq/L、全ベータが約 9.8×10^7 Bq/L であった。

また、漏えいした水の放射エネルギーは、全ガンマで約 $2.7 \times 10^4 \text{Bq}$ 、全ベータで約 $9.8 \times 10^7 \text{Bq}$ と評価した。

その後、9月13日に当該弁を取り外して新品の同型弁へ取替を行い、9月17日に取り外した当該弁内部の目視確認を行ったところ、ひび割れは弁箱表面から内面まで貫通していることを確認した。

本事象については、当該弁のひび割れが弁箱内面まで貫通していることから、福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画（以下、「実施計画」という。）で定める汚染水処理設備等に要求される機能（汚染水処理設備等は漏えいを防止できること）を有していないと判断し、同日17時40分、福島第一規則第18条第3号「発電用原子炉設置者が、発電用原子炉施設のうち実施計画に定められたものの点検を行った場合において、発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき。」に該当すると判断した。

（添付資料－1、2、3、4）

5. 応急対策

当該弁からの漏えいを停止させるため、9月4日14時43分から仮設ポンプを使用して、A5タンクからA4タンクへ移送を行い、A5タンクの水位を低下させる操作を開始した。

また、9月4日17時50分に一旦移送を停止して、移送ポンプを大容量のものに取り替えた後、9月5日14時16分から移送を再開した。

その後、9月5日17時00分頃、A5タンク水位が当該弁の位置より低い水位となったことを確認し、同日18時10分に移送を停止した。

また、仮設ポンプでの移送と並行して、当該弁のひび割れらしき箇所およびフランジ部に接着剤を塗布し、9月4日18時03分に漏えいが停止したことを確認した。

当該堰内に溜まった水については、9月4日から9月6日にかけて、吸引車を使用して断続的に回収するとともに、当該堰内床面の洗浄を行った。

（添付資料－5）

6. 環境への影響

漏えいした水は当該堰内に留まっており、堰外への流出は確認されなかったこと、当該堰内に溜まっていた水は回収し、堰内床面の洗浄を行ったことから、放射能による環境への影響はないものと判断した。

7. 当該弁の履歴および同型弁の漏えい有無確認結果

当該弁にひび割れらしきものが確認されたことから、当該弁の履歴および同型弁の漏えい有無の確認を行った。

（1）当該弁の設置状況および使用履歴調査

- a. 平成25年8月上旬に当該弁（新品）を設置した。
- b. 平成25年11月12日にA5タンクの水張り試験（ろ過水を使用）、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を行い、当該弁に漏えい等

- の異常がないことを確認した。水張り試験時、当該弁は「開」の状態であった。
- c. 当該弁を含む連結配管部の水張り試験完了後、A6タンク周りの水張り試験のためA5タンクの水張り試験に使用したろ過水を、A6タンクに移送した。なお、ろ過水の移送は、当該弁およびA6タンク側の連結弁を「開」にして、水頭圧によりA6タンクへ送り、その後は、当該弁を「閉」にして仮設ポンプで移送した。
 - d. A6タンク周りについても、ろ過水を使用した水張り試験を行い、その後、A6タンク、およびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行った。水抜きはA6タンク側の連結弁を「開」状態で実施した。その際も、当該弁は「閉」の状態であった。
 - e. A5タンクからA6タンクへろ過水の移送が完了した以降、本事象が発生するまでの間、当該弁の操作を行った記録はなかった。
 - f. 平成25年12月下旬（平成25年12月24日から同年12月27日の間）に、当該弁および連結配管に保温材を取り付けた。
 - g. 平成26年1月7日、A5タンクについて、RO濃縮水を受け入れ可能な状態とした。ただし、RO濃縮水は受け入れず、空の状態としていた。

(添付資料-6)

(2) 汚染水タンク周りで使用している同型弁の調査結果

汚染水タンク周りで使用している同型弁について、本事象と同様なひび割れが発生していないか調査を行った結果は、以下の通りであった。

- a. 汚染水タンクの堰外に設置されているRO濃縮水ラインの同型弁（19台）について、平成26年9月26日から9月30日にかけて、保温材を取り外して外観点検を実施し、異常はなかった。
- b. 同型弁を採用している汚染水タンク堰内連結弁（以下、「汚染水タンク堰内同型弁」という。）（941台）について、平成26年9月26日から同年11月13日にかけて、保温材を取り外して外観点検を実施し、異常はなかった。

8. 原因調査結果

8-1. 当該弁の仕様・構造および破損の状況

当該弁の仕様・構造および破損の状況について調査を行った。

(1) 当該弁の仕様および構造調査

- a. 当該弁は、日本工業規格（JIS B 2031）ねずみ鋳鉄弁（呼び圧力10Kのフランジ形外ねじ仕切り弁）であり、一般的な設備においても広く使用される製品（汎用品）であった。
- b. 当該弁の最高許容圧力（120℃以下の脈動水の場合）は、0.98MPa、また、当該弁の弁箱水圧試験圧力は、2.06MPaであった。
- c. 当該弁が接続される配管の内径は、200mmであった。
- d. 当該弁の構造は、弁箱内に「密封室」と呼ばれる空間が存在し、弁箱内に流体が内包された状態で、弁を「開」から「閉」にすると、その空間に流体が滞留する構造となっていた。

(添付資料-7)

(2) 当該弁の外観確認結果

平成26年9月4日に撮影した写真から、当該弁の外観確認を行ったところ、ひび割れらしきものは、当該のひび割れらしきものだけでなく、弁蓋フランジ部のボルト穴2箇所についても、ひび模様が確認された。

それ以外には、据え付け時についたと推定される小さな傷は確認されたものの、当該弁の破損に至るような大きな傷や打痕等は認められなかった。

(添付資料-8)

(3) 当該弁の分解点検結果

平成26年9月17日、当該弁の弁箱を切り出して調査(表面観察)したところ、当該のひび割れらしきものは、弁箱表面から内面まで貫通していることを確認した。内面まで貫通したき裂(以下、「貫通き裂」という。)は、弁蓋フランジ部から、弁箱の方向に長さ約10cmにわたっていた。

また、貫通き裂発生に至るような腐食は認められなかった。

(添付資料-9)

(4) 破面観察結果

平成26年9月25日、貫通き裂部を分割してマクロ破面観察を行ったところ、以下のことが確認された。

しかしながら、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかった。

なお、鋳鋼品の場合、破損のメカニズムによらず、同様な破面様相を呈することが知られており、電子顕微鏡等を用いた詳細観察を実施しても、新たな知見を得られる可能性は低いと判断した。

- a. き裂は弁箱の板厚を貫通しており、き裂の長さは最深部で弁蓋フランジ面より約12cmであった。
- b. 引け巣等の顕著な鋳造欠陥は確認されなかった。
- c. 破面の大部分は腐食生成物で覆われていた。一部の破面は、著しい腐食により破損のメカニズムを示唆するような破面様相の観察が困難となっていた。
- d. 破面は巨視的には平坦であり、分岐等は確認されなかった。
- e. 破面には、破壊の起点や進行方向等を示唆する筋模様や段差等は確認されなかった。
- f. 破面上で一部腐食が生じていなかった部位については、破面観察のために強制的に破断させた部分(以下、「強制破断部」という。)と同様な破面様相が確認された。
- g. 腐食の程度が他と比較して顕著でない部分について、酸洗後、破面観察したところ、強制破断部と破面様相が類似していた。

(添付資料-10)

(5) 貫通き裂部以外のひび割れ部調査結果

「8-1. (4) 破面観察結果」において、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかったことから、更なる調査として、平成26年10月2日、当該の貫通き裂部箇所以外のひび模様(弁蓋フランジ部のボルト穴2箇所)について調査を

行ったところ、ボルト穴外側部のみにひび割れが確認された。そのひび割れは、弁箱の内面側にはなかった。

しかしながら、本調査においても、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかった。

(添付資料－9)

8-2. 貫通き裂発生の要因分析

これまでの調査結果をもとに、要因分析表により貫通き裂が発生した要因について調査した。

(1) 弁選定ミス

当該弁の最高許容圧力は0.98MPa、弁箱水圧試験圧力は2.06MPaであるのに対して、A5タンクを満水にした場合の水頭圧は約0.1MPaであることから、当該弁を選定するにあたり、弁仕様は適切であった。

(添付資料－7、11)

(2) 弁製造・組立時の欠陥

a. 弁蓋フランジの過度な締め付け

弁蓋フランジの締め付け方法については、弁メーカーの製造工場において空気インパクトレンチで規定のトルクで締め付けており、フランジ面に対して過大な外力は加わっていない。

なお、弁箱の貫通き裂は、弁蓋フランジ部から弁箱の方向（縦方向）に入っていることから、貫通き裂を引き起こした力は、弁箱を横に引き裂く方向に加わっていることが分かる。また、フランジの締め付け方向に過大な力が加わったのであれば、横方向にひびが入ると考えられることから、フランジの過度な締め付けの可能性はないと考えられる。

b. 弁製造過程における欠陥

(a) 当該弁は、日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験・検査^{※1}を経て出荷された製品であった。

(b) 日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験・検査は、製造ロット毎に抜き取り形式で行われており、抜き取り対象となった弁については、その試験および検査に合格していた。なお、当該弁がその試験および検査対象であったかは分からなかった。

(c) 弁メーカーに製造欠陥が発生する割合について問い合わせを行ったところ、当該弁のような鋳鉄製の弁において、貫通き裂が発生するような製造欠陥の情報はなかった。

(d) 当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にひび割れらしき痕はないことから、弁製造過程における欠陥の可能性は考えられない。

※1 材料試験、外観検査、寸法検査、作動試験、圧力試験を行っている。

c. 巣の存在（鋳造欠陥）

破面観察結果から、引け巣等の顕著な鋳造欠陥は確認されなかった。

(添付資料－9、10、11、11－1)

(3) 現地据え付け時における破損

- a. 当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にひび割れらしき痕はないこと、また、当該弁周りに漏水がなかったことが確認されたため、現地据え付け時において貫通き裂が発生していた可能性は考えられない。
- b. 当該弁の弁蓋フランジ部ボルト穴の外側に確認された2箇所のひび割れについては、当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）からは確認できなかった。

(添付資料－11－1)

(4) 腐食

a. 腐食減肉

当該弁の貫通き裂破面は、貫通き裂発生後に生じたと考えられる腐食生成物で覆われていたものの、貫通き裂発生の原因となるような腐食減肉は認められなかった。

(添付資料－8、9、10)

(5) 過大応力

a. 弁据え付け時の偏芯応力

A5タンクとA6タンク間の連結配管は、可とう管（フレキシブルチューブ）を使用しており、当該弁に過大な偏芯応力は加わらない。

b. 運転・操作ミスによる過加圧

当該弁は、平成25年8月上旬に設置され、同年11月12日にA5タンクの水張り試験、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を実施しているが、当該弁に加わった圧力は、タンクの水頭圧（水張り試験時におけるタンク平均水位は約10m）のみであり、運転・操作ミスによって当該弁の最高許容圧力（0.98MPa）を超えるような圧力が加わることは考えられない。

c. 凍結による体積膨張

- (a) 破面観察結果からは、破損のメカニズムの特定に繋がる情報は得られなかった。しかしながら、鑄造欠陥が見られないことや、割れの位置、方向、弁の運用状況等を考慮すると、当該弁設置後に弁箱内部に過度な圧力が作用したことに起因する割れである可能性が高いと推定された。また、内圧の作用源としては、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定された。
- (b) 弁メーカーに過去の類似事象について問い合わせを行ったところ、弁箱内の密封室に溜まった流体が凍結により体積膨張し、その影響によって弁箱内部に過大な応力が加わったことで、ひび割れが発生した事象が確認された。
- (c) 弁メーカーにおいて、当該弁と同型の弁を使用し、密封室内に空気が残らないように水を満たした後、弁を全閉として、雰囲気温度を -10°C とした環境に放置して再現試験を行ったところ、再現試験開始から約6時間20分後に、弁箱表面温度が約 -5°C に到達した時点で、本事象において確認された

貫通き裂の模様と酷似した割れが確認された。

d. 外的衝撃による破損

- (a) 当該弁の外観確認を行ったところ、据え付け時についたと推定される小さな傷は確認されたものの、き裂発生に至るような打痕等は認められなかった。
(添付資料-6、7、8、10、11、11-2)

9. 凍結による弁破損の可能性について

原因調査結果から、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定されたこと、また、弁メーカーから類似事象に関する情報および再現試験の結果から、凍結により本事象と同様な貫通き裂が発生した経緯が確認されたことから、当該弁が置かれた状況において、どのように弁箱内の密封室に水が流入し、密封された状態で滞留したのか、また、弁体および連結配管に保温材が取り付けられていたにもかかわらず、当該弁のみ凍結が発生したのか、運用面を考慮して弁破損の可能性を検討した。

(1) 弁箱内密封室への水の流入と滞留について

当該弁は「7. (1) 当該弁の設置状況および使用履歴調査」で記載の通り、A5、A6タンクの水張り試験を実施した以降、当該弁を「閉」とし、連結配管内を水抜きした状態となっていた。このような手順で水張り、水抜きを実施すると、ほぼ満水であったA5タンクの水頭圧がかかった状態で、A5タンクからA6タンクに水を移送した際に発生する水の流れにより、弁箱内密封室にろ過水が流入し満水となり、弁を「閉」にした後、水が密封された状態で残留する可能性があることが分かった。

(2) 同型弁の保管・運用状態について

- a. 同型弁の保管・運用状態を確認したところ、当該弁以外に、弁箱内密封室が満水になった状態で、連結配管の水抜きが行われている弁はなかった。

なお、平成25年8月19日に福島第一原子力発電所汚染水貯留設備RO濃縮水貯槽からの漏えい事象（以下、「H4北エリアタンクからの漏えい事象」という。）が発生している。

本事象発生当時、フランジ型タンクと溶接型タンクの建設を並行して進めており、フランジ型タンクにはRO濃縮水を、溶接型タンクには多核種除去設備で処理した水を貯蔵する運用としていた。

H4北エリアタンクからの漏えい事象の発生を受け、放射能濃度の高いRO濃縮水は、漏えいリスクの低い溶接型タンクに可能な限り貯蔵し、多核種除去設備で処理した水をフランジ型タンクに貯蔵する運用に変更した。当該弁を設置していたG4南エリアの各タンク（フランジ型タンク）は、この運用変更の前後で順次受け入れ可能な状態となっており、隣接のA4タンクまではRO濃縮水を貯蔵していたが、A5、A6タンクはこの運用変更後に受け入れ可能な状態となったため、使用せずにした。

このため、当該弁は、他の同型弁とは異なる保管・運用状態となっていた。

現在のタンク運用については、基本的に全てのタンクを順次使用しているため、A5、A6タンクのように数ヶ月間も空の状態にしておくことはない。

- b. 同型弁が設置されている汚染水タンクエリアについて調査したところ、発電所構内の複数のエリアに設置されていることが確認された。また、その汚染水タンクの設置が開始された時期（同型弁が設置された時期）を調査したところ、平成23年3月以降であることが確認された。このことから、同型弁は、設置以降に最大で3回冬を越していることが分かった。なお、当該弁以外に、本事象のような貫通き裂が発生した弁はなかった。

(3) 当該弁水張り以降の外気温について

- a. 当該弁の水張り以降、当該弁に保温材を取り付けるまでの期間（11月12日から12月27日）で凍結した可能性を検討するため、この期間の発電所構内における外気温^{※2}を調査した結果、氷点下となった日はあったものの、1時間（平均）毎の観測記録から氷点下が継続していたのは、12月26日の3時間（2時頃から4時頃）のみであった。その時の外気温は -0.6°C から -0.8°C であったことから、保温材を取り付ける前に当該弁の密封室に残留したろ過水が凍結した可能性は低いと推定した。

※2 観測地点：免震重要棟西側

- b. 当該弁に保温材を取り付けた以降の発電所構内における外気温を調査（期間：平成25年12月28日から平成26年3月31日）したところ、1日の最低気温^{※3}が氷点下となった日が、61日あることを確認した。この61日のうち、 -5°C 以下を観測した日は、4日あることを確認した。このうち、2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、1時間（平均）毎の外気温がほぼ -5°C 以下を推移しており、さらに、2月5日23時頃と2月6日1時頃にかけては、 -6.6°C （調査期間における最低気温）を観測していた。このことから、弁箱内の密封室の残留水が、外気温と同様の温度となれば、発電所構内の環境で凍結する可能性があることが分かった。

※3 毎分単位で観測される1日の最低温度

（添付資料－11－3）

(4) 保温材を取り付けていたにもかかわらず凍結した可能性について

保温材を取り付けていたにもかかわらず、当該弁のみ凍結した可能性がある状況から、他の同型弁との相違点を検討したところ、当該弁は、水張り試験後、当該弁に接続している連結配管の水抜きが行われていた。また、当該弁は、A5タンクの直近に取り付けられており、外気に開放されているような状態となっていたことから、密封室の残留水が、弁箱内部から冷却された可能性があることが分かった。

以上のことから、当該弁は、特殊な運用条件のために密封室にろ過水が満水となった状態で残留し、その水が、水抜きされた配管を通じて弁箱内部から冷却されたことにより凍結し、当該弁が破損した可能性が高いと推定した。

10. 貫通き裂の発生メカニズム

これまでの原因調査結果から、貫通き裂は以下のメカニズムで発生したものと推定した。

- (1) 当該弁の構造は、弁箱内に「密封室」と呼ばれる空間が存在し、弁箱内に流体が内包された状態で弁体を「開」から「閉」にすると、密封室に流体が残留する構造となっていた。
- (2) 当該弁を含む連結配管部の水張り試験後、A5タンクに貯留したろ過水をA6タンクに移送するため、当該弁およびA6タンク側の連結弁を「開」にした際、ほぼ満水であったA5タンクの水頭圧がかかった状態で発生する水の流れにより、当該弁の密封室にろ過水が流入し満水となった。その後、当該弁を「閉」にしたことにより、密封室に水が密封された状態で残留した。
- (3) A6タンク周りの水張り試験後、A6タンク、およびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行ったことから、当該弁の密封室は、A5タンク内の外気と弁箱内部で接触する状態となった。
- (4) 平成25年12月下旬以降は、当該弁および連結配管に保温材を取り付けていたが、平成26年3月下旬にかけて、発電所構内における外気温が氷点下となった日が61日あり、特に2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、外気温がほぼ -5°C 以下を推移していた。
- (5) 凍結防止対策として、当該弁および連結配管には保温材を取り付けていたものの、当該弁が接続されている連結配管は水抜きが行われており、当該弁内部(A5タンク側)は、A5タンク内に開放されていたため、当該弁内部から密封室が冷却され、密封室に残留したろ過水が凍結した。
- (6) 凍結した水が体積膨張し、その影響によって弁箱内部の密封室に過大な応力が加わったことにより、弁箱に貫通き裂が発生した。また、弁箱の弁蓋フランジ部が外側に膨張したため、ボルト穴2箇所、穴の外側にひび割れが発生した。
(添付資料-12)

1.1. 推定原因

これまでの調査結果から、本事象が発生した原因は、以下の通りであると推定した。

- (1) A6タンク周りの水張り試験後、連結配管内の水抜きをした際に、当該弁の密封室にろ過水が満水となった状態で残留した。また、当該弁に接続している連結配管の水抜きが行われ、弁がA5タンクの直近に取り付けられていたことから、外気に開放されているような状態となっていた。
- (2) 上記の状態、外気温が低温（特に2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、外気温がほぼ -5°C 以下を推移）となった時間が継続したことにより、保温材が取り付けられていたにもかかわらず、当該弁内部から密封室が冷却され、密封室内に残留したろ過水が凍結し、体積膨張により貫通き裂が発生したものと推定した。

1.2. 対策

- (1) 貫通き裂が発生した当該弁の交換

貫通き裂が発生した当該弁について、平成26年9月13日に新品の同型弁への交換を行った。

(2) 密封室に残留する水の凍結防止処置

汚染水タンクおよび連結配管の水張り試験を行った後、連結配管の水抜きを行う場合は、弁を「開」状態にして密封室の水抜きを行うことを、試験・施工要領書に追記することを周知した。(平成27年4月17日 関係部門に周知^{※4})

※4 周知が必要な部門を再整理し、平成27年5月15日に追加で周知を行った。

また、弁の構造上、密封室が存在するその他の弁についても対策されるよう、廃止措置基本マニュアルおよび保守管理基本マニュアルの下位文書である「凍結防止対策運用ガイド」(以下、「ガイド」という。)に、本事象の概要を反映した。今後はガイドにより、毎年、水(ろ過水・汚染水等)を保有する設備、および過去に保有していた設備を対象に、凍結防止対策実施フローに従って対策が必要な設備を選定し、残水除去操作を実施することとした。(平成27年4月1日 ガイド改訂完了)

(添付資料-13)

1.3. 添付資料

| | |
|-----------|---------------------------|
| 添付資料-1 | 事象発生時の時系列 |
| 添付資料-2 | 漏えい発生場所(当該弁配置図) |
| 添付資料-3 | 漏えい発生時の状況 |
| 添付資料-4 | 漏えい量の算出 |
| 添付資料-5 | 応急対策の状況 |
| 添付資料-6 | 当該弁の設置状況および使用履歴調査結果 |
| 添付資料-7 | 当該弁の設計図・仕様 |
| 添付資料-8 | 外観確認結果 |
| 添付資料-9 | 分解点検結果 |
| 添付資料-10 | 破面観察結果 |
| 添付資料-11 | 当該弁の貫通き裂に関する要因分析表 |
| 添付資料-11-1 | 現地据え付け時の状態 |
| 添付資料-11-2 | 再現試験結果 |
| 添付資料-11-3 | 発電所構内の外気温調査結果 |
| 添付資料-12 | 当該弁貫通き裂発生メカニズム |
| 添付資料-13 | 対策の実施状況(密封室に残留する水の凍結防止処置) |

事象発生時の時系列

平成26年9月4日

- 10:56 モバイル型ストロンチウム除去装置の運転準備として、A4タンクからA5タンクへRO濃縮水の移送を開始
- 12:04 A5タンクとA6タンク間の連結弁の弁箱から、1秒に1滴程度で水が滴下していることを当社社員が確認
- 12:15頃 漏えい箇所のビニール袋による養生が完了
- 14:43 仮設ポンプにより、A5タンクからA4タンクへのRO濃縮水移送を開始
- 17:50 仮設ポンプによる、A5タンクからA4タンクへのRO濃縮水移送を一旦停止
- 18:03 ひび割れらしき箇所およびフランジ部に接着剤を塗布し、漏えいが停止したことを確認

平成26年9月4日～平成26年9月6日

当該堰内に溜まった水について、吸引車を使用し断続的に回収を行うとともに、堰内床面の洗浄を実施

平成26年9月5日

- 14:16 仮設ポンプを大容量のものに取り替えた後、A5タンクからA4タンクへのRO濃縮水移送を再開
- 17:00 A5タンク水位が当該弁の位置より低い水位となったことを確認
- 18:10 仮設ポンプによる、A5タンクからA4タンクへのRO濃縮水移送を停止

平成26年 9月13日

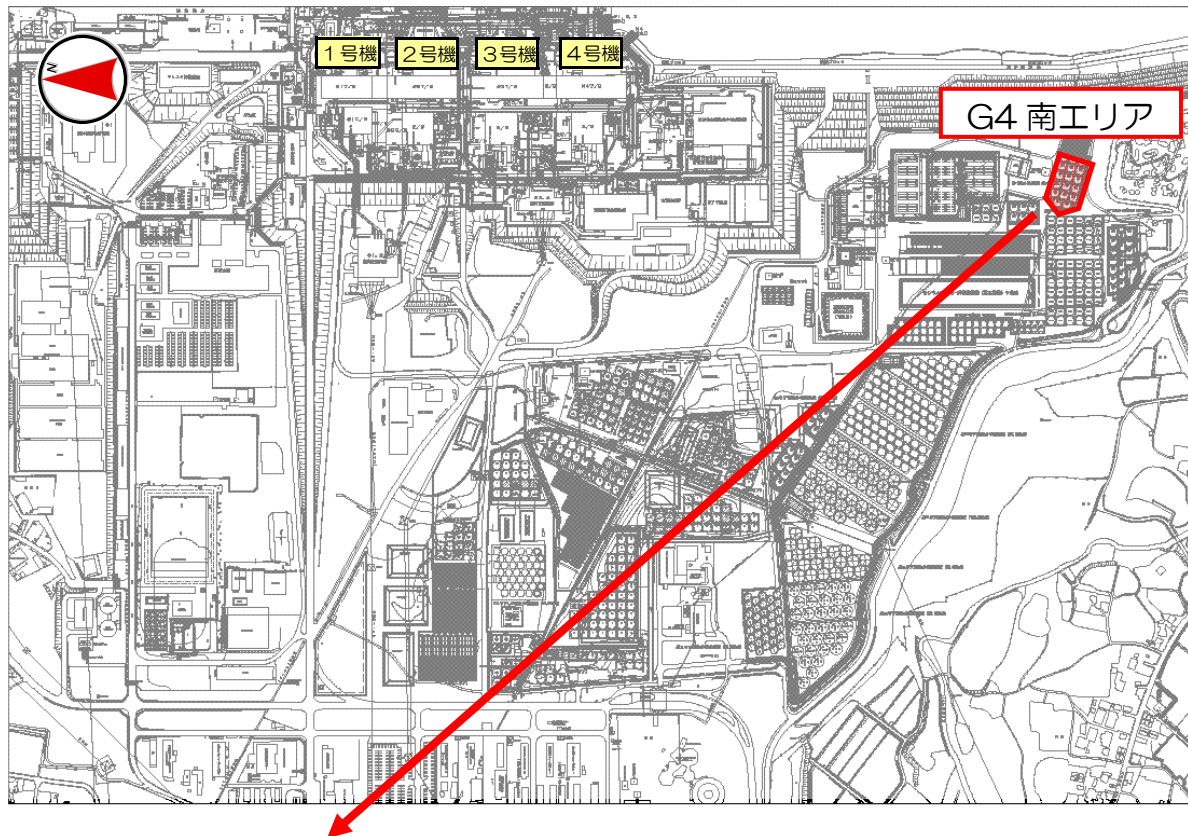
当該弁を取り外し、新品の同型弁に取替え

平成26年 9月17日

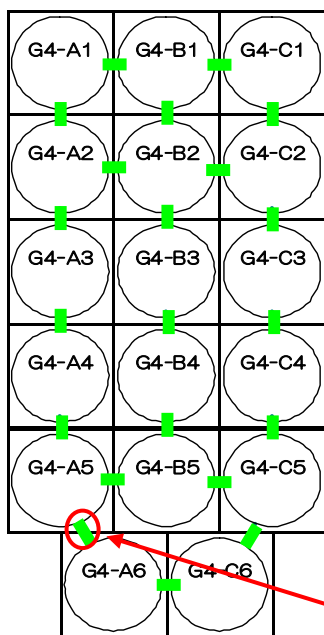
- 13:30 取り外した当該弁内部の目視確認を開始
- 17:40 東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則第18条第3号「発電用原子炉設置者が、発電用原子炉施設のうち実施計画に定められたものの点検を行った場合において、発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき。」に該当すると判断

漏えい発生場所（当該弁配置図）

タンクエリア周辺図

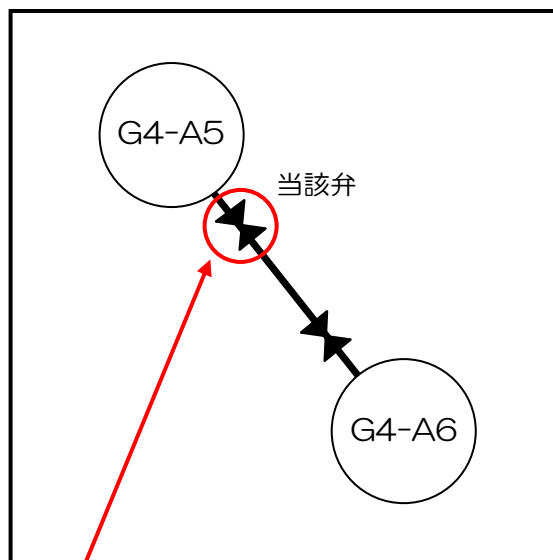


G4 南エリア 詳細図



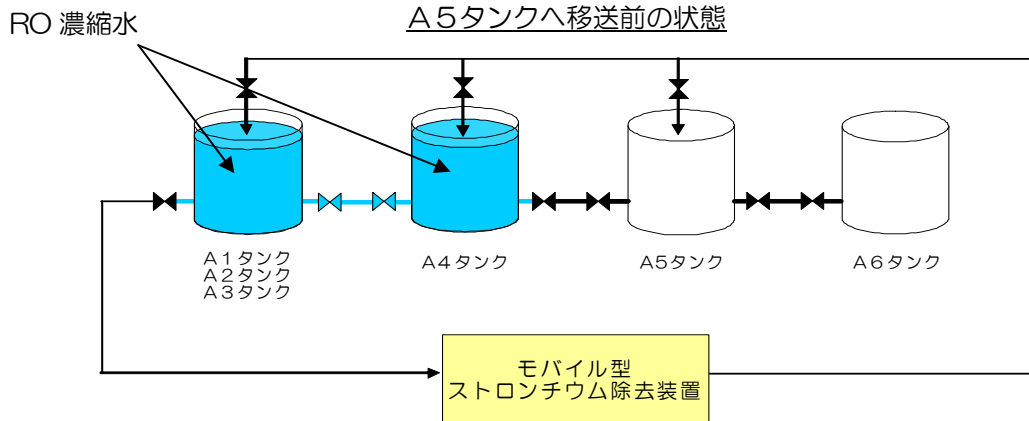
■ 連結配管

当該弁配置図

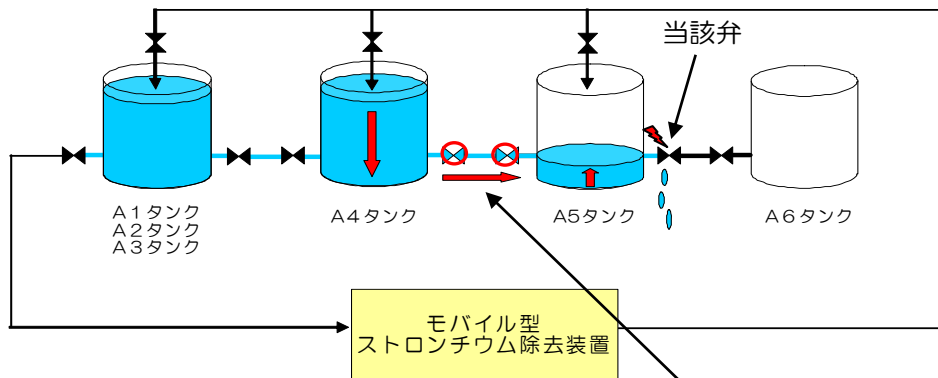


漏えい発生箇所

漏えい発生時の状況



当該弁より漏えいが発生した時の状態



A4タンクとA5タンク間の連結弁を「開」にしたところ、当該弁より1秒に1滴程度の漏えいが発生

漏えい発見時の写真



拡大写真



漏えい量の算出

(1) 漏えい時間

A4タンクからA5タンクへRO濃縮水移送を開始した直後の平成26年9月4日11時00分頃*から、漏えい箇所のビニール袋による養生が完了した同日12時15分頃までの約75分間と評価した。

*当該弁のひび割れ箇所の高さは、タンク底部より約500mmであり、移送開始した直後に漏えいが発生したとは考えられないが、A5タンク水位が当該弁のひび割れらしきもの高さまで到達したと考えられる時刻が明確に分からないため、平成26年9月4日11時00分頃に漏えいが発生したものと推定

(RO濃縮水の移送開始後、タンク底部から漏えい発生箇所まで水位が上昇する時間を保守的に評価)

(2) 漏えい速度

1秒に1滴程度＝1分あたり約15ccと推定

(3) 漏えい量

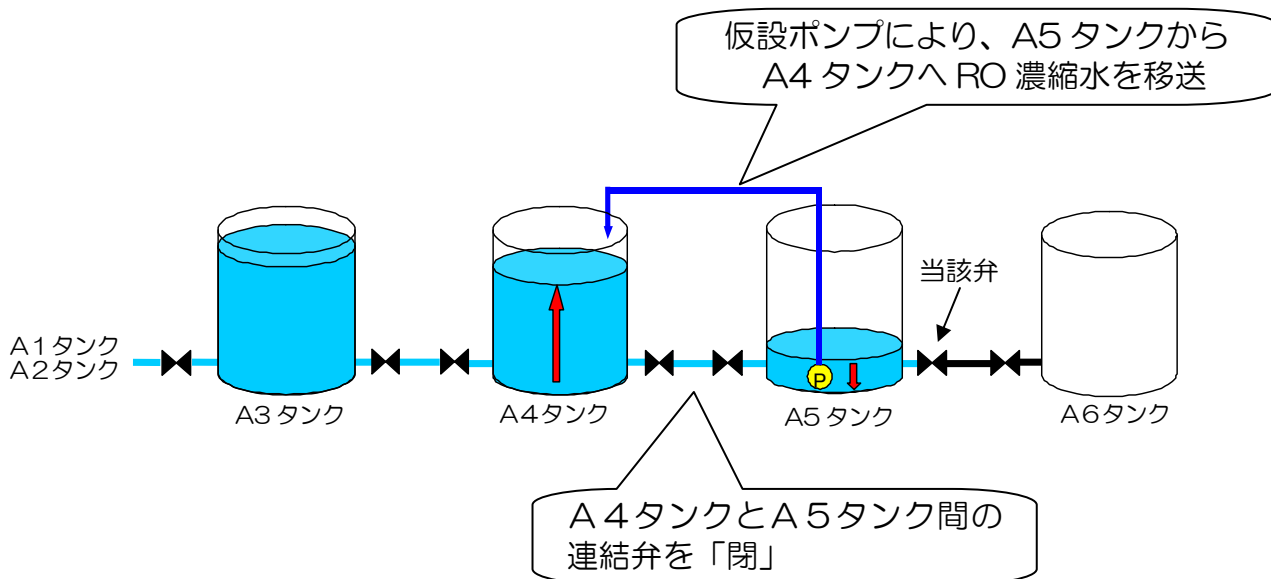
漏えい時間（約75分間）と漏えい速度（1分あたり約15cc）から、漏えい量を約1リットルと推定した。

$$75分 \times 15cc = 1125cc \\ \approx 約1リットル$$

応急対策の状況

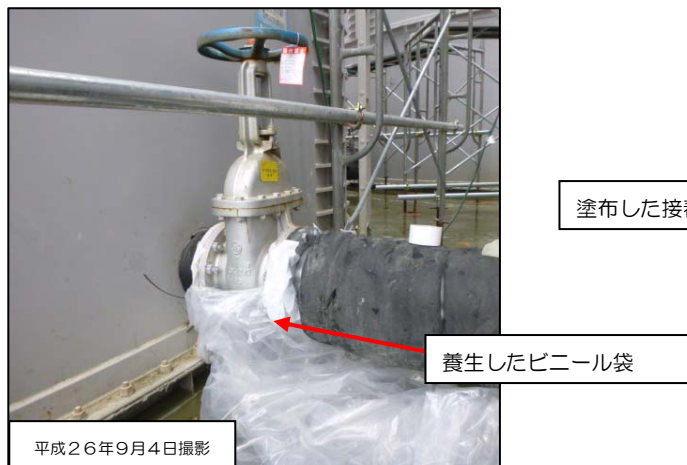
- (1) 仮設ポンプによるRO濃縮水の移送
 (平成26年9月4日～平成26年9月5日実施)

仮設ポンプによる移送状況図



- (2) 当該弁への接着剤塗布
 (平成26年9月4日実施)

接着剤塗布前の写真



接着剤塗布後の写真



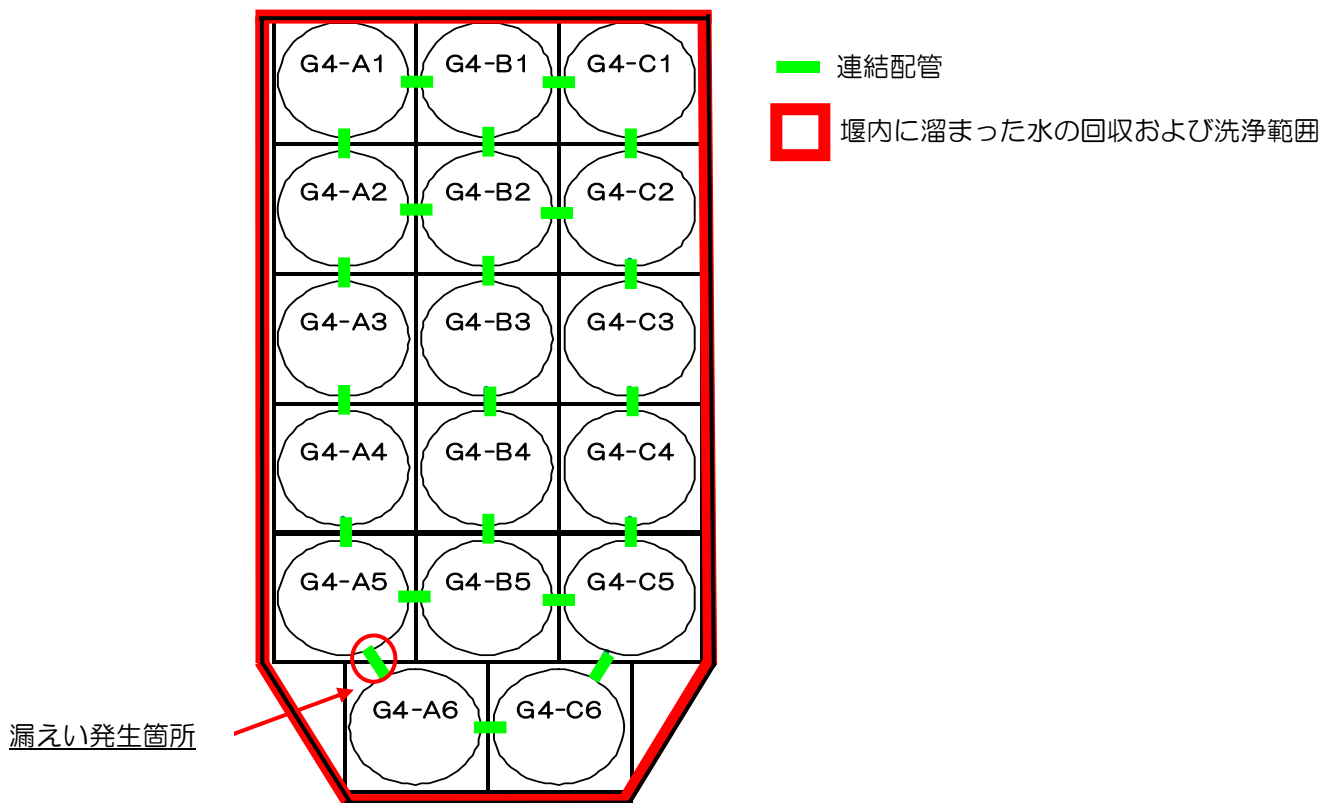
(当該弁下部のビニール袋は応急対策で養生したものの)

(ひび割れ箇所およびフランジ部に接着剤を塗布)

(3) 堰内水の回収及び洗浄

(平成26年9月4日～平成26年9月6日実施)

G4南エリア当該堰図



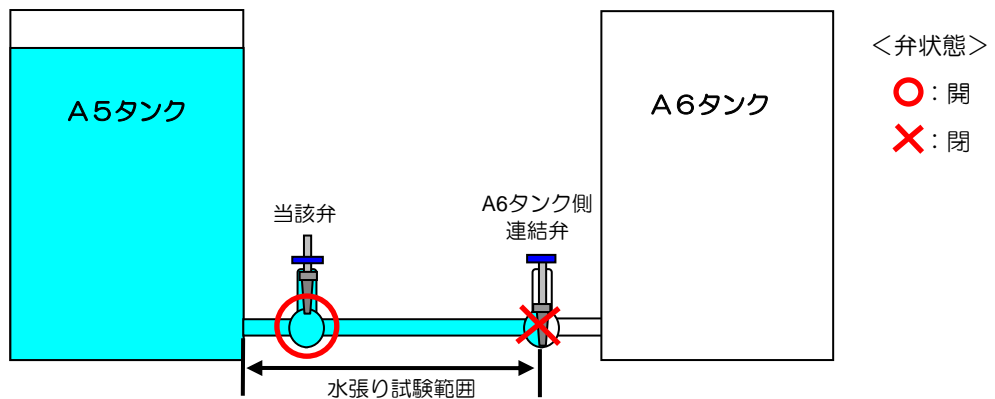
当該弁の設置状況および使用履歴調査結果

当該弁にひび割れらしきものが確認されたことから、当該弁の設置状況および使用履歴について調査を行った。

- (1) 平成25年8月上旬に当該弁（新品）を設置した。
- (2) 平成25年11月12日にA5タンクの水張り試験（ろ過水を使用）、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を行い、当該弁に漏えい等の異常がないことを確認した。

なお、水張り試験時、当該弁は「開」の状態であった。（図－1 参照）

図－1. 当該弁を含む連結配管部水張り試験時の状態（11月13日）



- (3) 当該弁を含む連結配管部の水張り試験完了後、A6タンク周りの水張り試験のためA5タンクの水張り試験に使用したろ過水を、以下の手順にてA6タンクに移送した。

- ① A6タンク側連結弁を「開」（タンク水頭圧による移送開始）（図－2 参照）
- ② タンク水頭圧による移送終了後、当該弁を「閉」（図－3 参照）
- ③ 仮設ポンプにより移送実施（図－3 参照）

図－2. A5タンク水頭圧による移送状態

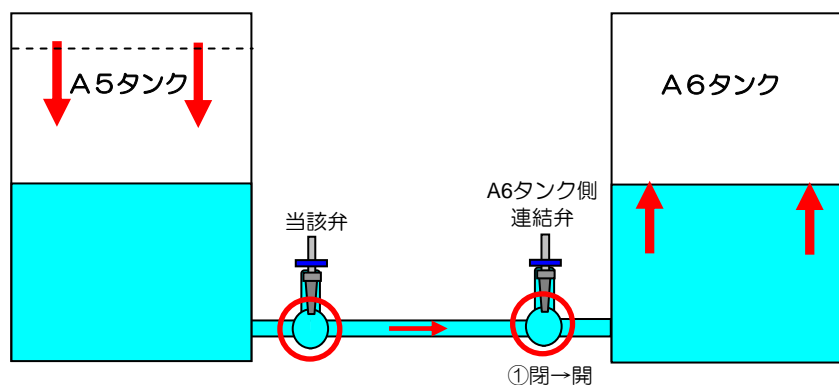
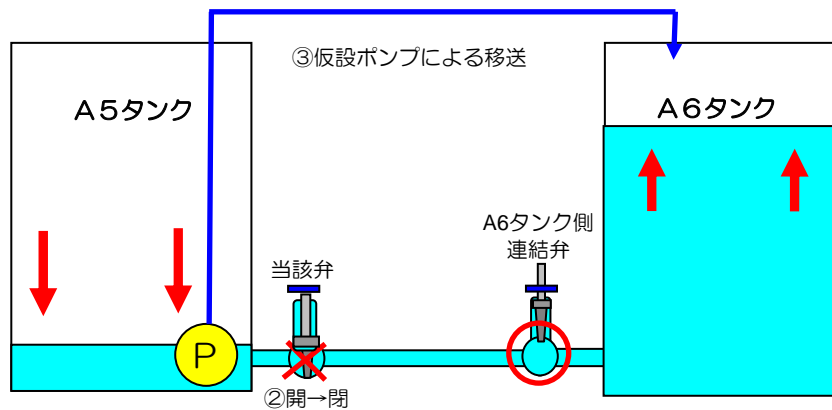


図-3. 当該弁「閉」および仮設ポンプによる移送状態



(4) A6タンク周りについても、ろ過水を使用した水張り試験を行い、その後、A6タンクおよびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行った。水抜きはA6タンク側の連結弁を「開」状態を実施した。その際も、当該弁は「閉」の状態であった。(図-4参照)

A6タンクの仮設ポンプによる水抜き終了後、A6タンク側連結弁を「閉」とした。(図-5参照)

図-4. A6タンクおよび連結配管部水抜き時の状態

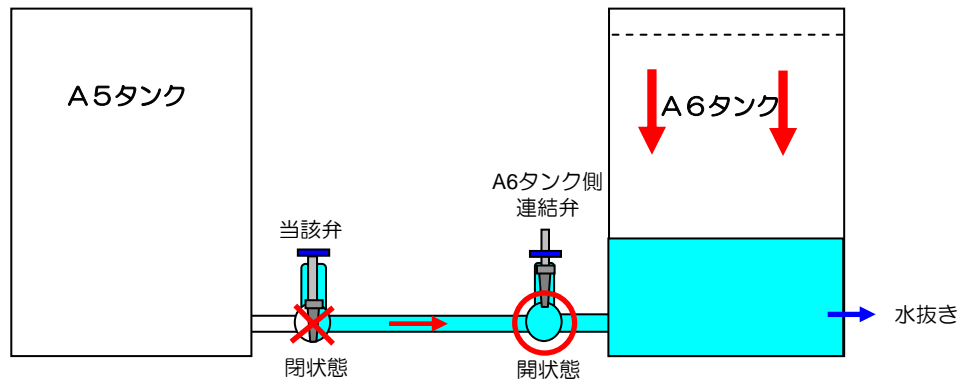
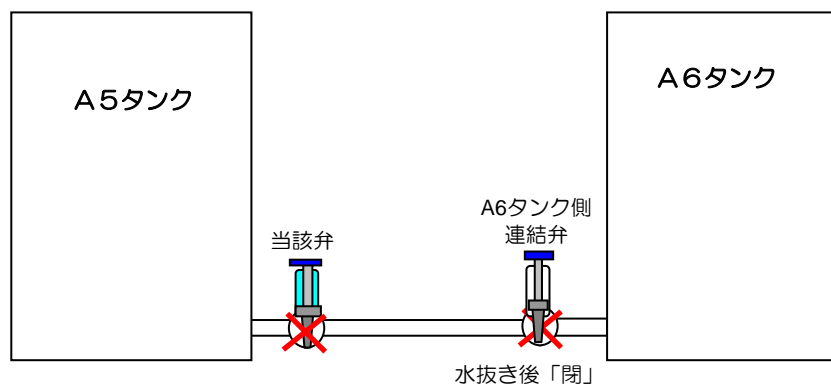
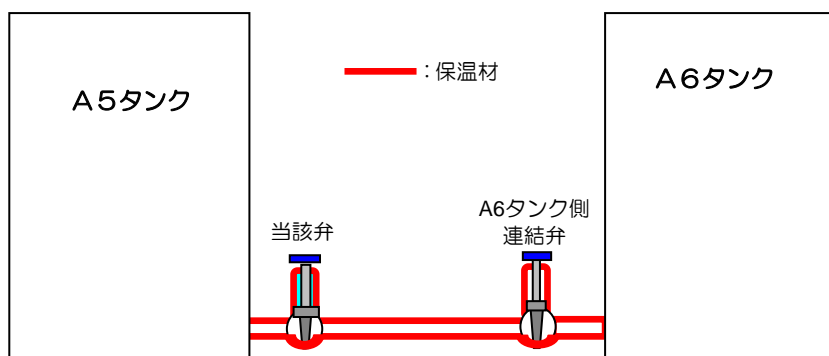


図-5. A6タンク水抜き後の状態



- (5) A5タンクからA6タンクへろ過水の移送が完了した以降、本事象が発生するまでの間、当該弁の操作を行った記録はなかった。
- (6) 平成25年12月下旬（平成25年12月24日から同年12月27日の間）に、当該弁および連結配管に保温材を取り付けた。（図－6参照）

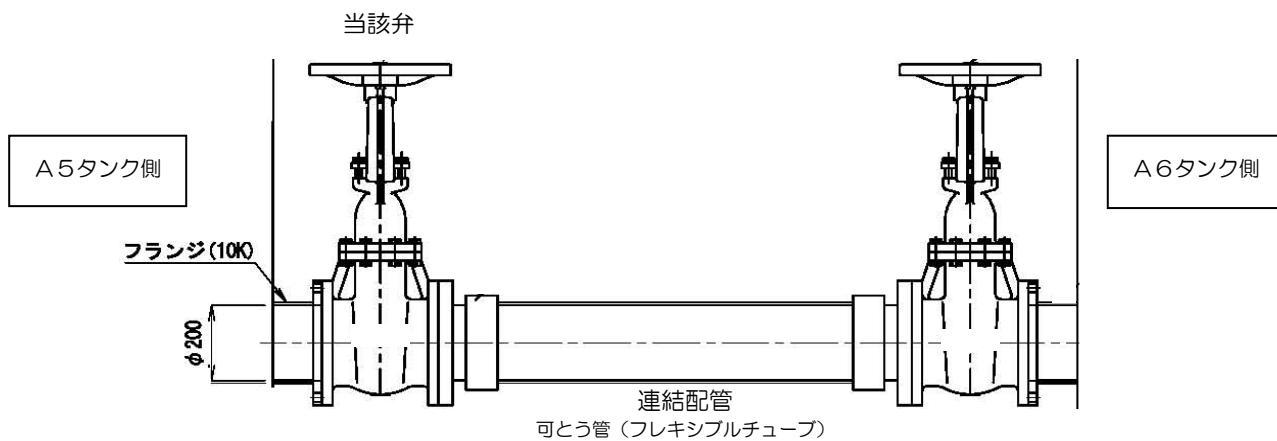
図－6. 当該弁および連結配管保温材取り付け範囲



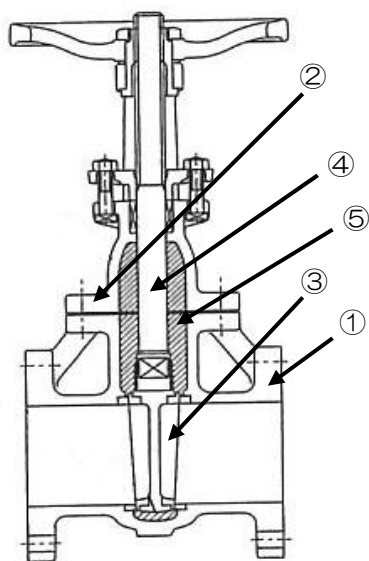
- (7) 平成26年1月7日、A5タンクについて、RO濃縮水を受け入れ可能な状態とした。ただし、RO濃縮水は受け入れず、空の状態としていた。

当該弁の設計図・仕様

(1) 外形図



(2) 弁構造図

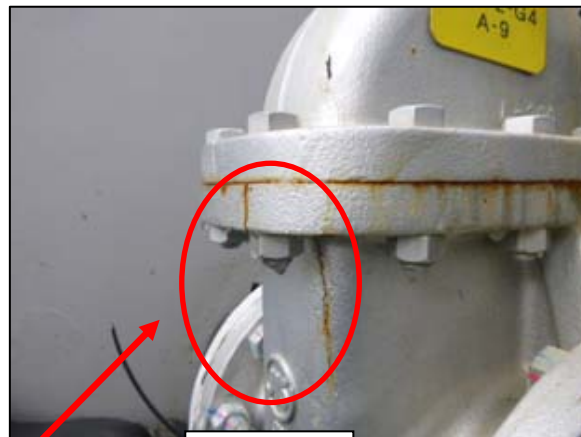


| | |
|---|-------------------|
| ① | 弁箱 |
| ② | 弁蓋 |
| ③ | 弁体 |
| ④ | 弁棒 |
| ⑤ | ボデーキャピティ (密封室) |

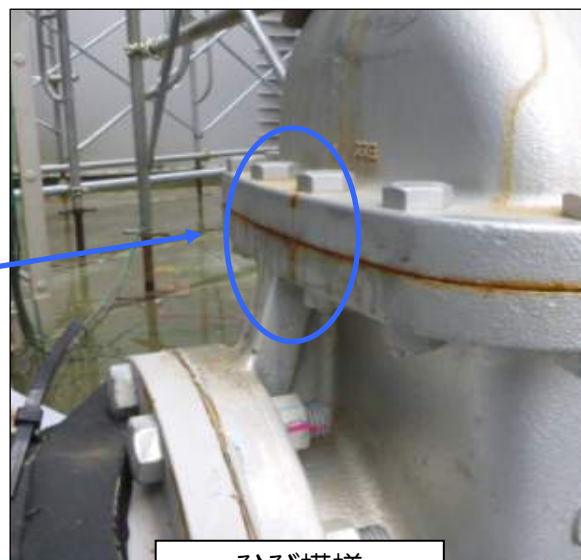
(3) 弁仕様

| 当該弁の仕様 | |
|----------|---------------------|
| 製品規格 | JIS B 2031 ねずみ鋳鉄弁 |
| 製品種類 | JIS10K フランジ形外ねじ式仕切弁 |
| 最高許容圧力 | 0.98MPa |
| 弁箱水圧試験圧力 | 2.06MPa |
| 弁呼び径 | 200mm |

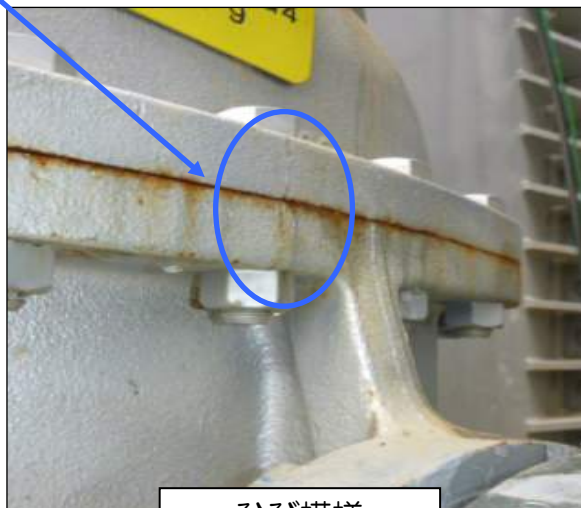
外観確認結果



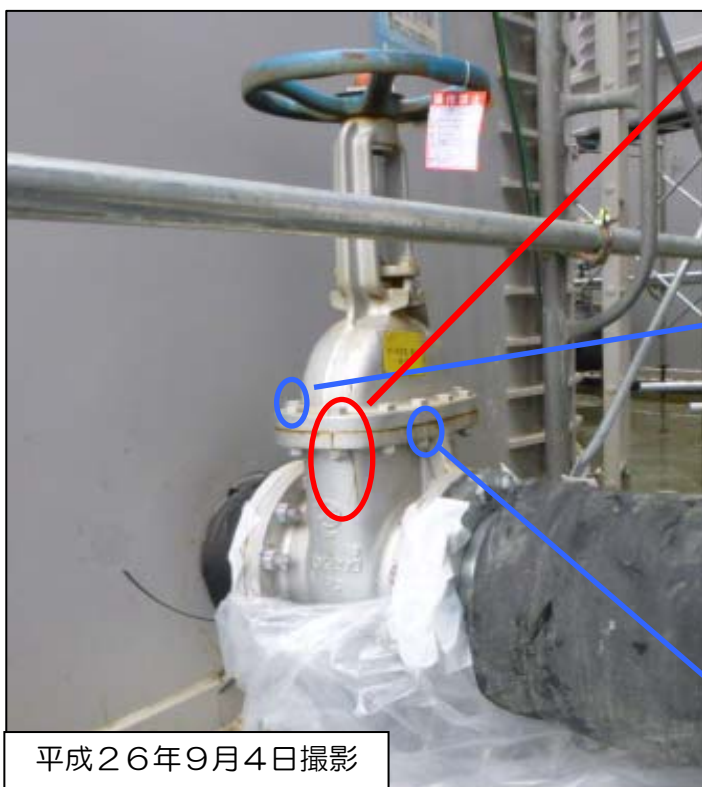
ひび割れ



ひび模様
(A5 タンク側)



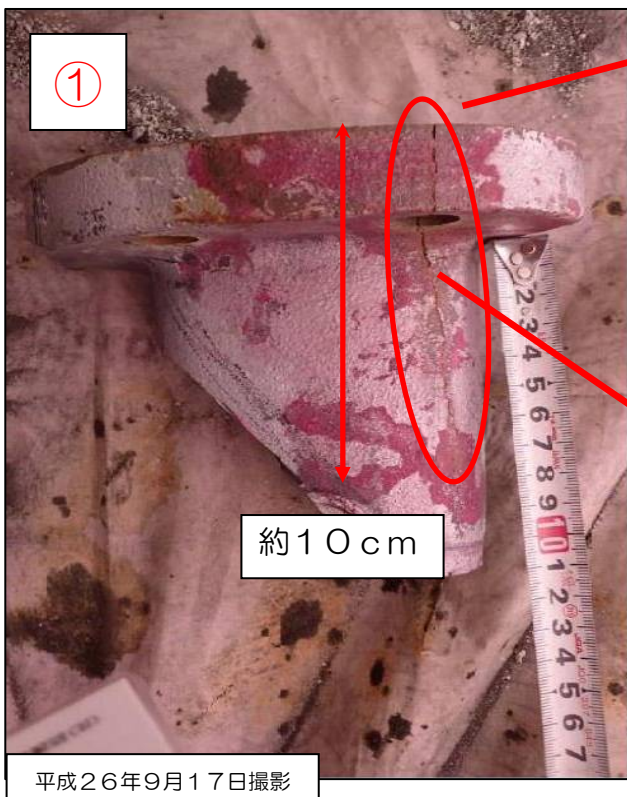
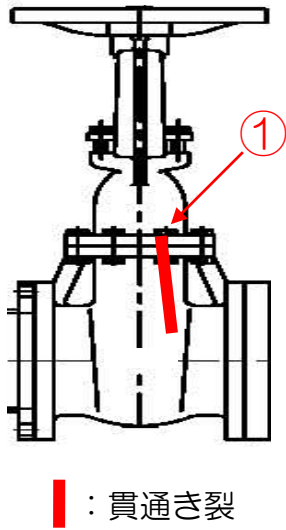
ひび模様
(A6 タンク側)



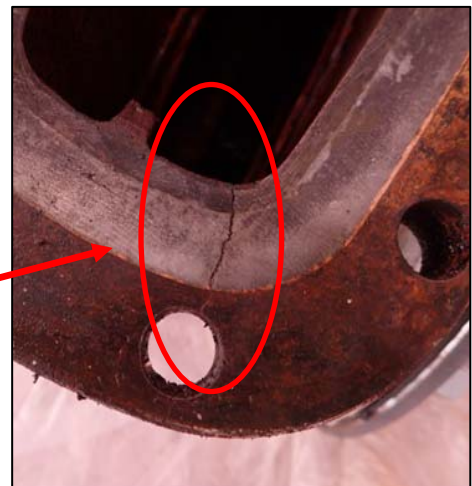
平成26年9月4日撮影

分解点検結果

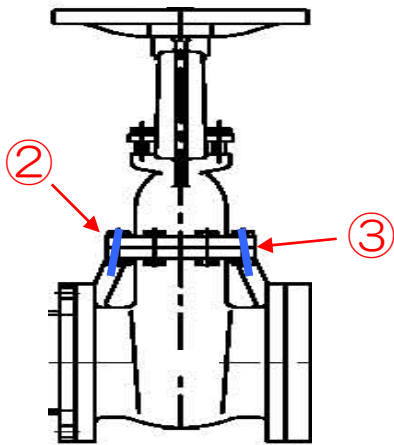
(1) 貫通き裂の状況 (平成26年9月17日分解点検実施)



当該弁箱正面



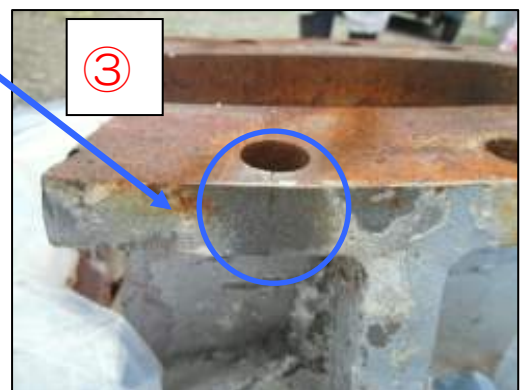
(2) ひび割れの状況 (平成26年10月2日分解点検実施)



■ : ひび割れ



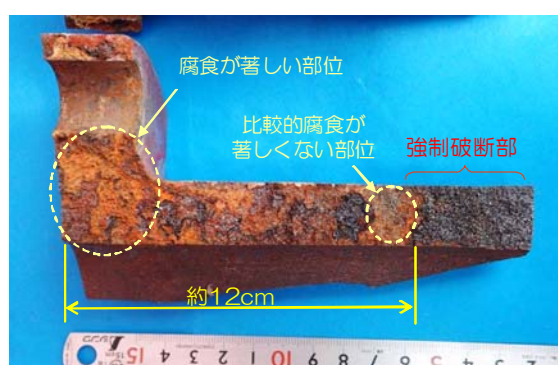
当該弁箱上部



破面観察結果

(1) 破面の概観（平成26年9月25日）

- ・き裂は弁箱の板厚を貫通しており、き裂の長さは最深部で弁箱フランジ面より約12cmであった。
- ・引け巣等の顕著な鑄造欠陥は確認されなかった。
- ・破面の大部分は腐食生成物に覆われていた。
- ・一部の破面は著しい腐食により、破損のメカニズムを示唆するような破面様相の観察が困難となっていた。
- ・破面は巨視的には平坦であり、分岐等は確認されなかった。
- ・破面には、破壊の起点や進行方向等を示唆する筋模様や段差等は確認されなかった。



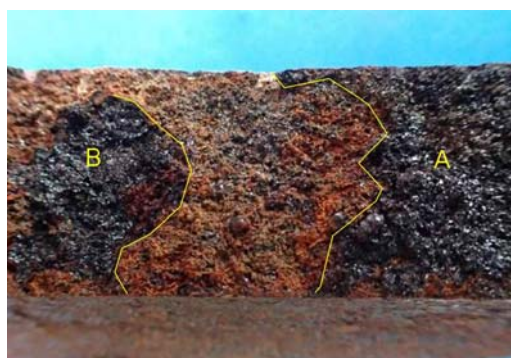
(破面開放直後)



(酸洗後)

(2) マクロ破面観察（平成26年9月25日）

- ・破面上で一部腐食が生じていなかった部位（B）については、強制破断部（A）と同様な破面様相が確認された。
- ・腐食の程度が他と比較して顕著でない部分（C）についても酸洗後、破面観察したところ、強制破断部（A）と破面様相が類似していた。



(破面開放直後)



(酸洗後)

(3) 考察

破面の概観およびマクロ破面観察を実施したが、破損原因の特定に繋がる情報は得られなかった。なお、鑄鋼品の場合、破壊のメカニズムによらず同様な破面様相を呈することが知られており、電子顕微鏡等を用いた詳細観察を実施しても、新たな知見を得られる可能性は低いと判断した。

当該弁の貫通き裂に関する要因分析表

| 事象 | 要因 | 確認方法 | 確認結果 | 判定 | 添付番号 | |
|----------|---------------|------------------|---|---|----------------------|---|
| 当該弁の貫通き裂 | 弁選定ミス | ①弁仕様の確認 | ①当該弁の最高許容圧力はA5タンクを満水にした場合の水頭圧を上回っており、当該弁を選定するにあたり、弁仕様は適切であった。 ・弁最高許容圧力：0.98MPa（JIS10K） ・弁箱水圧試験圧力：2.06MPa ・満水時のタンク水頭圧：約0.1MPa | × | 添付資料-7 当該弁の設計図・弁仕様 | |
| | 弁製造・組立時の欠陥 | 弁蓋フランジの過度な締め付け | ①締め付けトルクの確認 | ①弁蓋フランジの締め付け方法については、弁メーカーの製造工場において、空気インパクトレンチで規定のトルクで締め付けており、フランジ面に対して過大な外力は加わっていない。なお、弁箱の貫通き裂は、弁蓋フランジ部から弁箱の方向（縦方向）に入っていることから、貫通き裂を引き起こした力は、弁箱を横に引き裂く方向に加わっていることがわかる。また、フランジの締め付け方向に過大な力が加わったのであれば、横方向にひびが入ると考えられることから、フランジの過度な締め付けの可能性はないと考えられる。 | × | 添付資料-9 分解点検結果 |
| | | 弁製造過程における欠陥 | ①弁試験記録の確認 ②製造欠陥に関して弁メーカーへ聞き取り調査 | ①当該弁は、日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験および検査 ^{※1} を経て出荷された製品であった。日本工業規格（JIS B 2031）に基づく試験および検査は、製造ロット毎に抜き取り形式で行われており、抜き取り対象となった弁については、その試験および検査に合格していた。なお、当該弁がその試験および検査対象であったかは分からなかった。また、当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にはひび割れらしき痕はないことから、弁製造過程における欠陥の可能性は考えられない。 ②弁メーカーに製造欠陥が発生する割合について問い合わせを行ったところ、当該弁のような鑄鉄製の弁において、貫通き裂が発生するような製造欠陥の情報はなかった。 ^{※1} 材料試験、外観検査、寸法検査、作動試験、圧力試験を行っている。 | × | 添付資料-11-1 現地据え付け時の状態 |
| | | 巣の存在（鑄造欠陥） | ①破面観察 | ①破面観察結果から、引け巣等の顕著な鑄造欠陥は確認されなかった。 | × | 添付資料-10 破面観察結果 |
| | 現地据え付け時における破損 | ①工事施工記録（試験記録）の確認 | ①当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）から、当該弁に貫通き裂が発生していた箇所にはひび割れらしき痕はないこと、また当該弁周りに漏水がなかったことが確認されたため、現地据え付け時において貫通き裂が発生していた可能性は考えられない。なお、当該弁の弁蓋フランジ部ボルト穴の外側に確認された2箇所のひび割れについては、当該弁を含む連結配管水張り試験時の写真（平成25年11月13日撮影）からは確認できなかった。 | × | 添付資料-11-1 現地据え付け時の状態 | |
| | 腐食 | 腐食減肉 | ①外観確認、分解点検、破面観察 | ①当該弁の貫通き裂破面は、貫通き裂発生後に生じたと考えられる腐食生成物で覆われていたものの、貫通き裂発生の原因となるような腐食減肉は認められなかった。 | × | 添付資料-8 外観確認結果 添付資料-9 分解点検結果 添付資料-10 破面観察結果 |
| | 過大応力 | 弁据え付け時の偏芯応力 | ①当該弁、連結配管の設置状態の確認 | ①A5タンクとA6タンク間の連結配管は、可とう管（フレキシブルチューブ）を使用しており、当該弁に過大な偏芯応力は加わらない。 | × | 添付資料-7 当該弁の設計図・仕様 |
| | | 運転・操作ミスによる過加圧 | ①当該弁使用履歴の確認 | ①当該弁は平成25年8月上旬に設置され、同年11月12日にA5タンクの水張り試験、同年11月13日に当該弁を含む連結配管部の水張り試験を実施しているが、当該弁に加わった圧力はタンクの水頭圧（水張り試験時のタンク平均水位は約10m）のみであり、運転・操作ミスによって当該弁の最高許容圧力（0.98MPa）を超えるような圧力が加わることは考えられない。 | × | 添付資料-6 当該弁の設置状況および使用履歴調査結果 添付資料-11-1 現地据え付け時の状態 |
| | | 凍結による体積膨張 | ①破面観察 ②弁メーカーに過去の類似事象の有無について確認 ③当該弁水張り以降の発電所構内外気温の確認 ④弁保温材の有効性確認 | ①破面観察結果からは、破損のメカニズムの特定に繋がる情報は得られなかった。しかしながら、鑄造欠陥が見られないことや、割れの位置、方向、弁の運用状況等を考慮すると、当該弁設置後に弁箱内部に過度な圧力が作用したことに起因する割れである可能性が高いと推定された。 また、内圧の作用源としては、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定された。 ②弁メーカーに過去の類似事象について問い合わせを行ったところ、弁箱内の密封室に溜まった流体が凍結により体積膨張し、その影響によって弁箱内部に過大な応力が加わったことで、ひび割れが発生した事象が確認された。さらに、弁メーカーにおいて、当該弁と同型の弁を使用し、密封室内に空気が残らないように水を満たした後、弁を全閉として、雰囲気温度を-10℃とした環境に放置して再現試験を行ったところ、再現試験開始から約6時間20分後に、弁箱表面温度が約-5℃に到達した時点で、本事象において確認された貫通き裂の模様と酷似した割れが確認された。 ③当該弁の水張り以降、当該弁に保温材を取り付けるまでの期間（11月12日から12月27日）で凍結した可能性を検討するため、この期間の発電所構内における外気温 ^{※2} を調査した結果、氷点下となった日はあったものの、1時間（平均）毎の観測記録から氷点下が継続していたのは、12月26日の3時間（2時頃から4時頃）のみであった。その時の外気温は-0.6℃から-0.8℃であったことから、保温材を取り付ける前に当該弁の密封室に残留したろ過水が凍結した可能性は低いと推定した。 さらに、当該弁に保温材を取り付けた以降の発電所構内における外気温を調査（期間：平成25年12月28日から平成26年3月31日）したところ、1日の最低気温 ^{※3} が氷点下となった日が、61日あることを確認した。この61日のうち、-5℃以下を観測した日は、4日あることを確認した。このうち、2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、1時間（平均）毎の外気温がほぼ-5℃以下を推移しており、さらに、2月5日23時頃と2月6日1時頃にかけては、-6.6℃（調査期間における最低気温）を観測していた。このことから、弁箱内の密封室の残留水が、外気温と同様の温度となれば、発電所構内の環境で凍結する可能性があることが分かった。 ④保温材は平成25年12月24日から同年12月27日の間で取り付けた。保温材を取り付けていたにもかかわらず、当該弁のみ凍結した可能性がある状況から、他の同型弁との相違点を検討したところ、当該弁は、水張り試験後、当該弁に接続している連結配管の水抜きが行われていた。また、当該弁は、A5タンクの直近に取り付けられており、外気に開放されているような状態となっていたことから、密封室の残留水が、弁箱内部から冷却された可能性があることが分かった。 ^{※2} 観測地点：免農重要棟西側 ^{※3} 毎分単位で観測される1日の最低温度 | △ | 添付資料-10 破面観察結果 添付資料-11-2 再現試験結果 添付資料-11-3 発電所構内の外気温調査結果 |
| | | 外的衝撃による破損 | ①外観確認 | ①当該弁の外観確認を行ったところ、据え付け時についてと推定される小さな傷は確認されたものの、き裂発生に至るような打痕等は認められなかった。 | × | 添付資料-8 外観確認結果 |

現地据え付け時の状態

当該弁水張り試験時の写真



当該弁拡大写真



再現試験結果

当該弁の貫通き裂が発生した要因として、弁箱内残留水の凍結による体積膨張の可能性が高いと推定されたことから、弁メーカーにおいて再現試験を実施した。

1. 試験方法

- (1) 当該弁と同型の弁（以下、「試験対象弁」という。）を使用し、弁箱内密封室に空気が残らないように水を満たした後、弁を「閉」にする。
- (2) 恒温恒湿室の雰囲気温度を -10°C とし、その状態を保持する。
- (3) 試験対象弁に凍結による割れが発生するか確認する。

2. 試験結果

- (1) 試験開始後、約6時間20分後に試験対象弁の表面温度が約 -5°C に到達し時点で、試験対象弁に割れが確認された。

(図-1 参照)

- (2) その割れは、弁箱および弁蓋フランジ締め付けボルト周辺の計6箇所（弁箱4箇所、弁蓋2箇所）に確認された。そのうち、弁箱に発生した2箇所の割れは今回確認された当該弁の貫通き裂模様と酷似していた。

(図-2 参照)

図-1. 再現試験温度記録

(供試品を試験対象弁と読み替える)

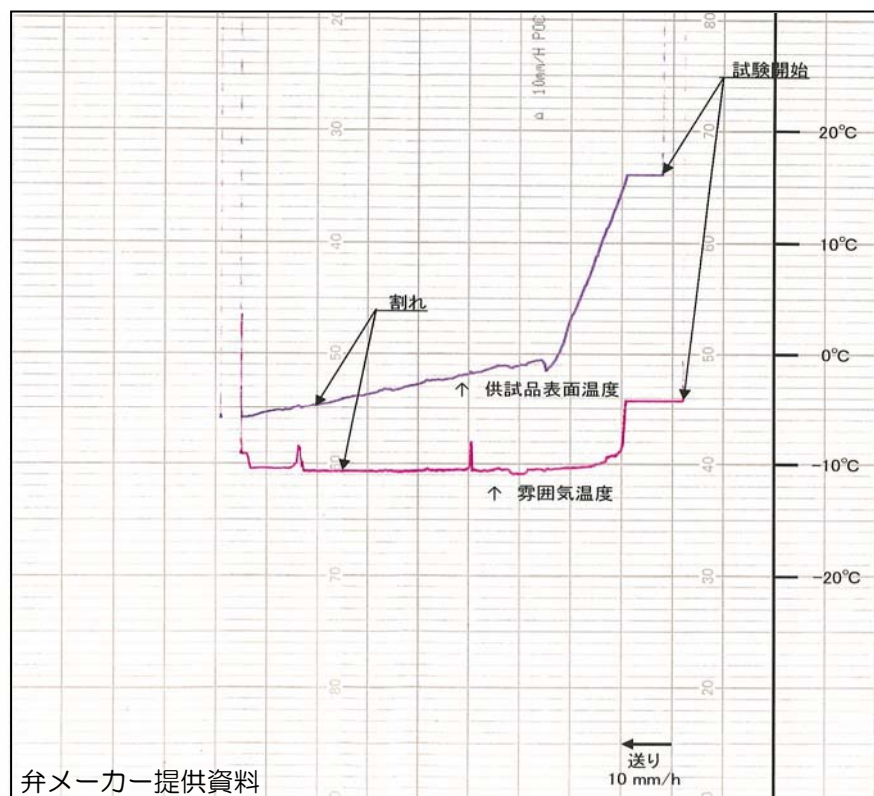
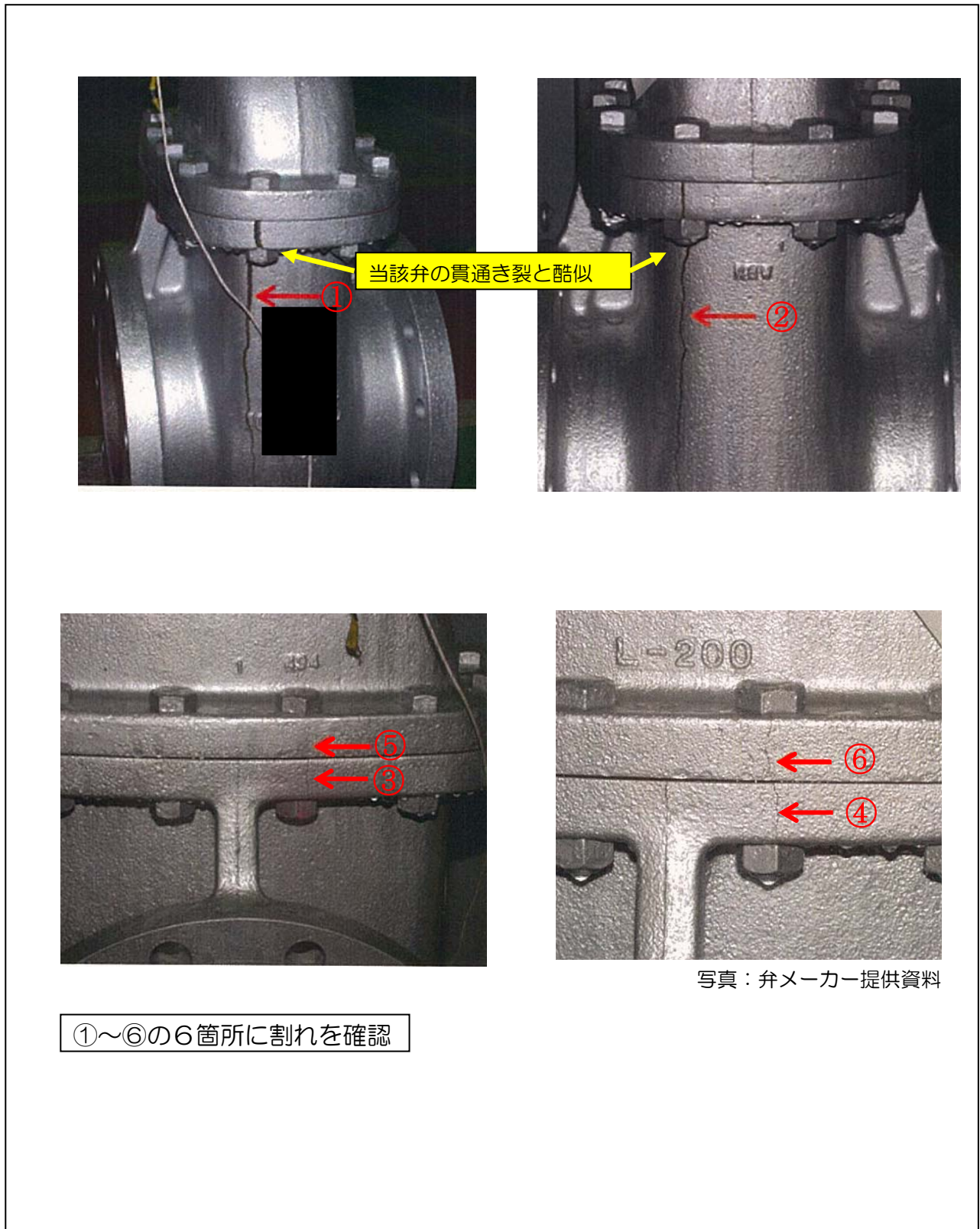


図-2. 試験対象弁割れ写真



発電所構内の外気温調査結果

1. 調査内容

当該弁の貫通き裂が発生した原因が、凍結による体積膨張の可能性が高いと推定したことから、以下の期間について発電所構内の外気温^{※1}を調査した。

(1) 当該弁の水張り以降、当該弁に保温材を取り付けるまでの期間

(期間：平成25年11月12日～同年12月27日)

(2) 当該弁に保温材を取り付けた以降、年度末までの期間

(期間：平成25年12月28日～平成26年3月31日)

※1 免震重要棟西側に設置した気象観測装置で観測した温度

2. 調査結果

(1) 当該弁の水張り以降、当該弁に保温材を取り付けるまでの期間の外気温について

- ・この期間において、氷点下を観測した日は9日あった。
- ・氷点下を観測した9日のうち、1日の最低気温^{※2}が最も低かった日は12月25日の -1.9°C であったが、1時間（平均）毎の観測記録からは氷点下を継続しなかった。
- ・1時間（平均）毎の観測記録から氷点下を継続した日は、12月26日の3時間（2時頃～4時頃）のみであった。その時の外気温は -0.6°C から -0.8°C であった。

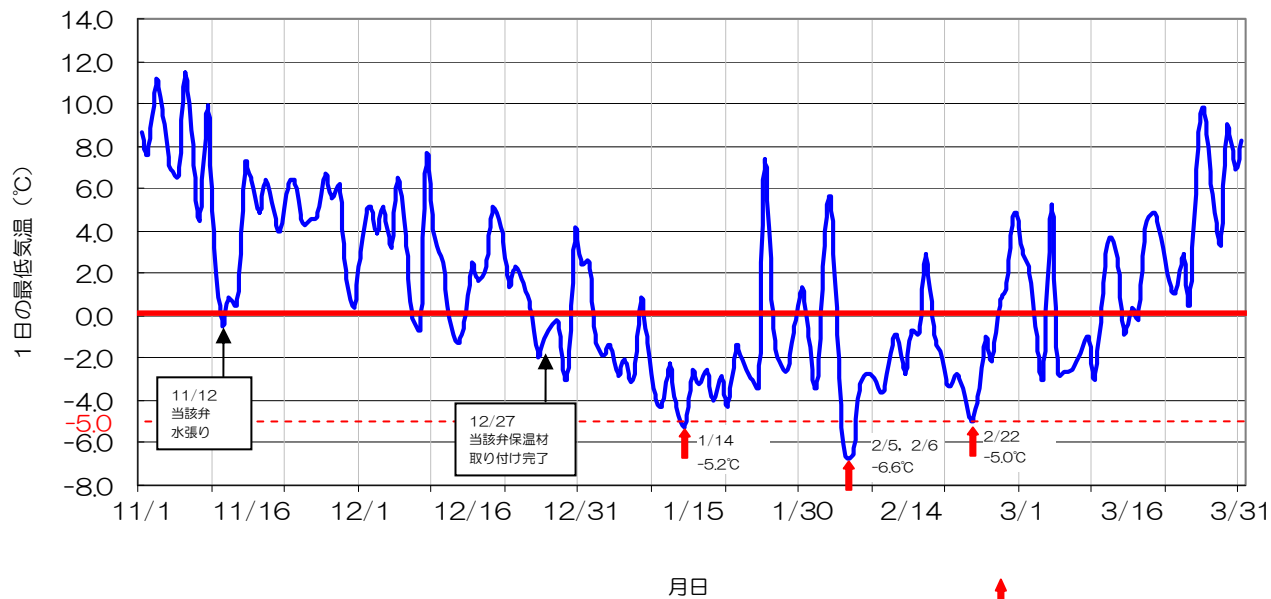
※2 毎分単位で観測される最低温度

(2) 当該弁に保温材を取り付けた以降、年度末までの期間の外気温について

- ・この期間（94日間）において、1日の最低気温が氷点下を観測した日は、61日あった。
- ・1日の最低気温が氷点下となった61日のうち、 -5°C 以下を観測した日は、4日^{※3}あった。2月5日23時頃と2月6日1時頃には、この期間の最低温度である -6.6°C を観測していた。（図－1参照）
- ・このうち、特に2月5日の22時頃から2月6日の5時頃にかけては、1時間（平均）毎の観測記録から外気温がほぼ -5°C 以下を推移していた。（図－2参照）
- ・1日の最低気温が -5°C 以下を観測した日の1月14日と2月22日は、1時間（平均）毎の観測記録から -5°C 以下を1時間以上継続しなかった。

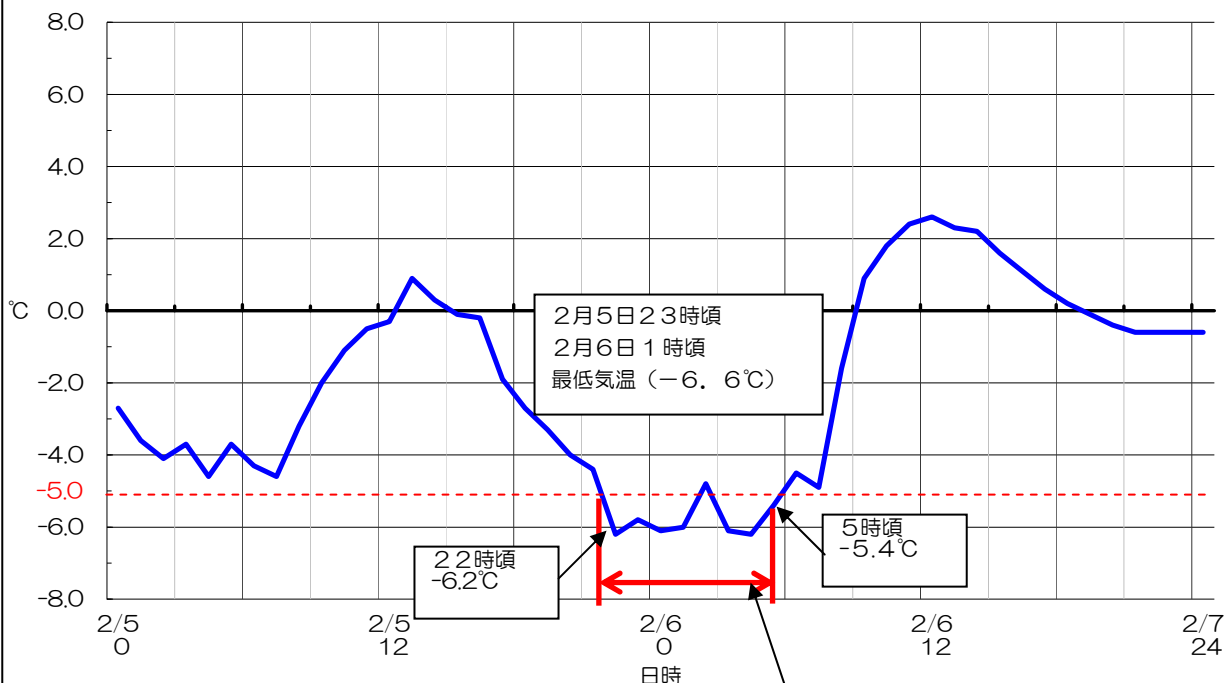
※3 1月14日（ -5.2°C ）、2月5日（ -6.6°C ）、2月6日（ -6.6°C ）、2月22日（ -5.0°C ）

図-1 福島第一原子力発電所 平成25年11月～平成26年3月 最低気温



最低気温のデータは、発電所構内（免震棟西側）に設置した
気象観測装置で観測した1日の最低気温

図-2 2月5日、2月6日にかけての1時間（平均）毎の外気温



3. 評価

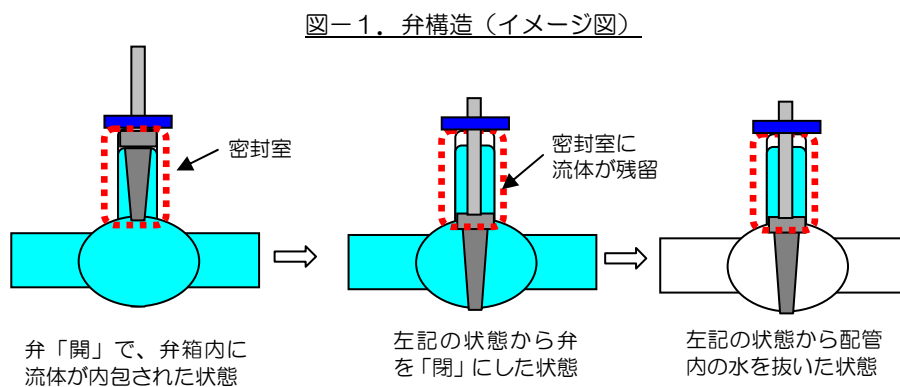
調査結果から、当該弁の保温材を取り付けるまでの期間については、氷点下となった日はあったものの、氷点下を継続した時間およびその時の外気温を考慮すると、保温材取り付け前に、当該弁の密封室に残留したろ過水が凍結した可能性は低いと推定される。

また、当該弁に保温材を取り付けた後の期間については、外気温がほぼ -5°C 以下を継続して観測した日があったことから、当該弁の密封室に残留したろ過水が、外気温と同様の温度になれば、発電所構内の環境で凍結に至る可能性があるとして評価した。

当該弁貫通き裂発生メカニズム

これまでの原因調査結果から、貫通き裂は以下のメカニズムで発生したものと推定した。

1. 当該弁の構造は、弁箱内に「密封室」と呼ばれる空間が存在し、弁箱内に流体が内包された状態で弁体を「開」から「閉」にすると、密封室に流体が残留する構造となっていた。（図－1 参照）



2. 当該弁を含む連結配管部の水張り試験後、A5タンクに貯留したろ過水をA6タンクに移送するため、当該弁およびA6タンク側の連結弁を「開」にした際、ほぼ満水であったA5タンクの水頭圧がかかった状態で発生する水の流れにより、当該弁の密封室にろ過水が流入し満水となった。その後、当該弁を「閉」にしたことにより、密封室に水が密封された状態で残留した。（図－2、3 参照）

図－2. A5タンク水頭圧による移送状態

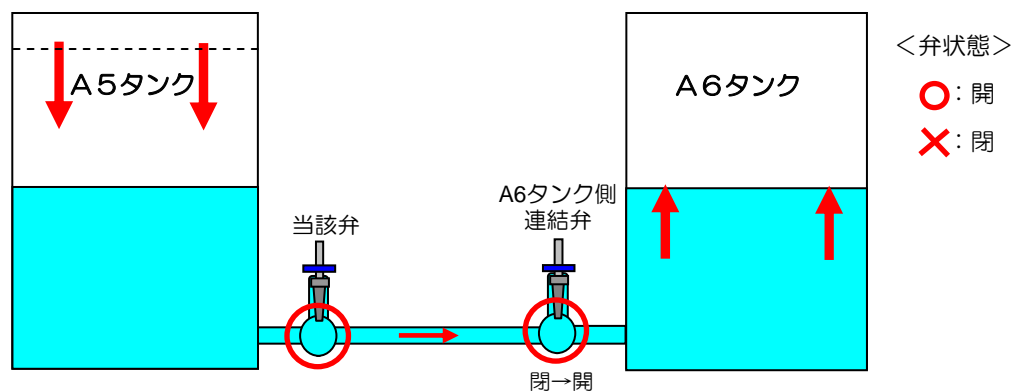
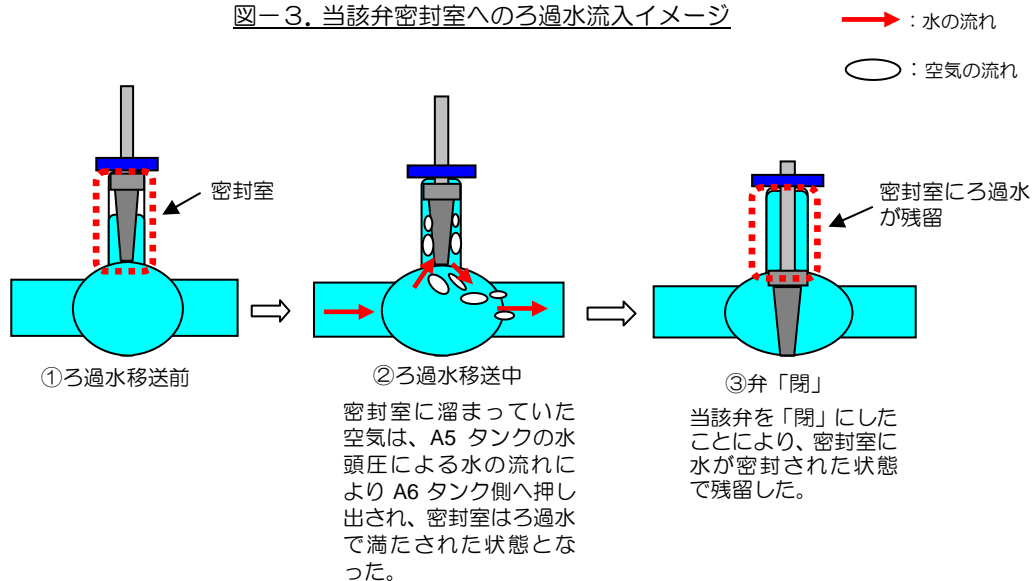


図-3. 当該弁密封室へのろ過水流入イメージ



3. A6タンク周りの水張り試験後、A6タンクおよびA5タンクとA6タンク間の連結配管の水抜きを行ったことから、当該弁の密封室は、A5タンク内の外気と弁箱内部で接触する状態となった。(図-4、5参照)

図-4. A6タンク水抜き後の状態

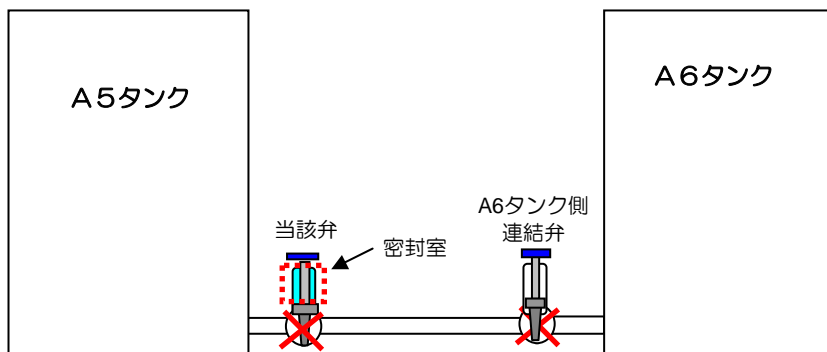
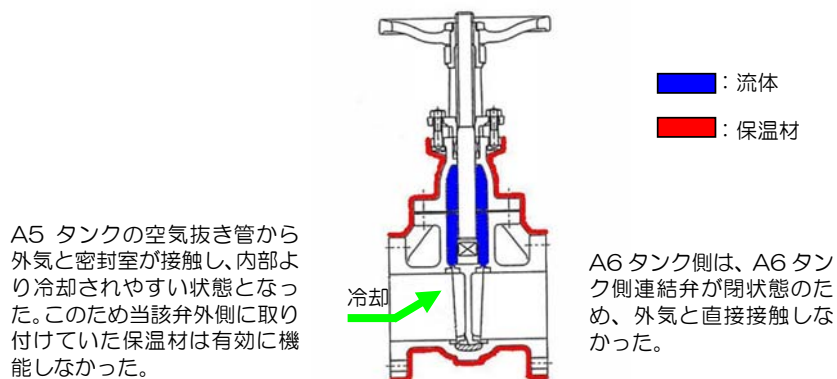
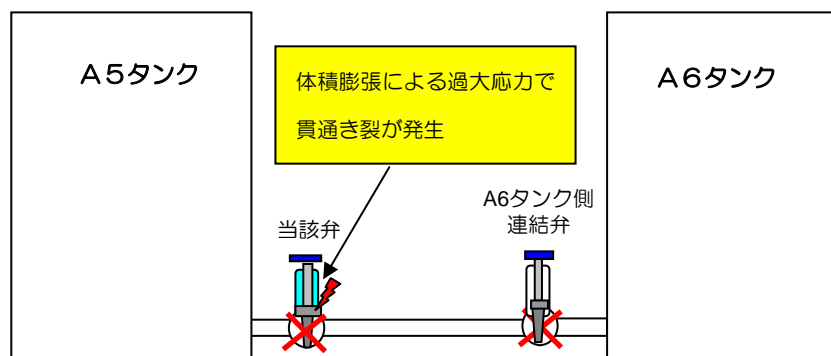


図-5. 連結配管水抜き後の密封室の状態 (イメージ図)



4. 平成25年12月下旬以降は、当該弁および連結配管に保温材を取り付けていたが、平成26年3月下旬にかけて、発電所構内における外気温が氷点下となった日が61日あり、特に2月5日22時頃から2月6日5時頃にかけては、外気温がほぼ -5°C 以下を推移していた。
5. 凍結防止対策として、当該弁および連結配管には保温材を取り付けていたものの、当該弁が接続されている連結配管は水抜きが行われており、当該弁内部（A5タンク側）は、A5タンク内に開放されていたため、当該弁内部から密封室が冷却され、密封室に残留したろ過水が凍結した。
6. 凍結した水が体積膨張し、その影響によって弁箱内部の密封室に過大な応力が加わったことにより弁箱に貫通き裂が発生した。また、弁箱の弁蓋フランジ部が外側に膨張したため、ボルト穴2箇所、穴の外側にひび割れが発生した。（図－6参照）

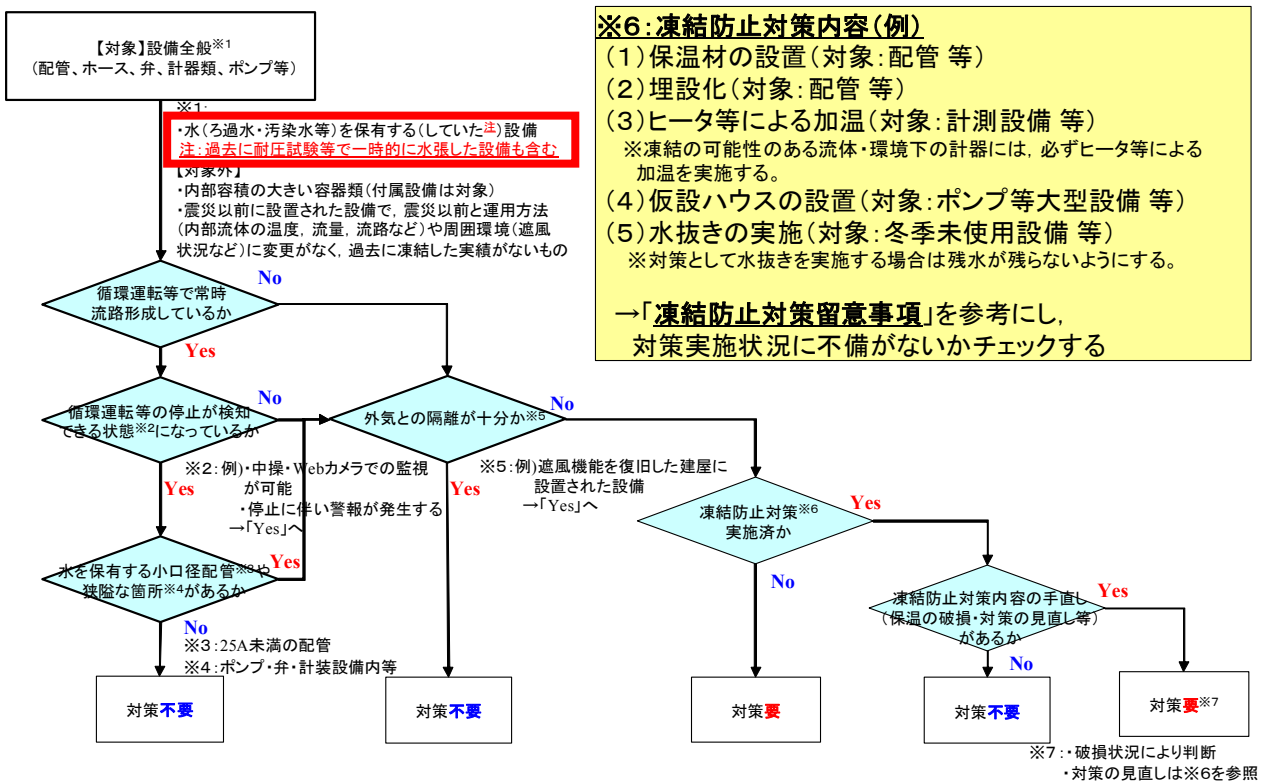
図－6. 貫通き裂発生時の状態



対策の実施状況（密封室に残留する水の凍結防止処置）

当該弁貫通き裂事象に鑑み、弁の構造上、密封室が存在するその他の弁についても対策されるよう、廃止措置基本マニュアルおよび保守管理基本マニュアルの下位文書である「凍結防止対策運用ガイド」（以下、「ガイド」という。）に、本事象の概要を反映した。今後はガイドにより、毎年、水（ろ過水・汚染水等）を保有する設備、および過去に保有していた設備を対象に、凍結防止対策実施フローに従って対策が必要な設備を選定し、残水除去操作を実施することとした。（平成27年4月1日ガイド改訂完了）

図－1. 凍結防止対策実施フロー



：本事象の対策として、ガイドに反映した箇所
(朱書き部分を追記)

図-2. 凍結防止対策留意事項

| No. | 留意事項 | 方法 | 経験・知見 | 対応箇所 |
|-----|---|--------------------------|---|---|
| ① | 凍結防止を考慮した作業手順が定められているか確認する | 対象設備に係わる工事の作業手順書の確認 | 【経験】配管関係の作業実施のため保温材を取外したが、作業終了後復旧し忘れたため凍結した。 【経験】SFP循環冷却二次系にて、必要以上の台数のエアフィンクーラを運転したため凍結した。 | 設備所管箇所実施 |
| ② | 凍結の可能性のある流体・環境下の計器には、保温材取付のみではなく、必ずヒータ等による加温を実施する | 保温材の敷設とヒータの設置、または設置場所の暖房 | 【経験】計器本体及び計装配管に保温材と雨風避けカバーを設置していたが、ヒータを設置していなかったため計器内の滞留水が凍結・膨張し破損した。 | 設備所管箇所実施 |
| ③ | 上水道配管にも対策を実施する | 保温材の敷設ヒータの設置 | 【経験】浄水場浄化装置の配管が凍結し、1F構内各所が断水した(プラント設備ではないが、作業者への影響が大きかった)。 | 設備所管箇所実施 |
| ④ | 系統の水抜きを実施する場合、系統内の弁・ポンプ内に流体が残留する可能性がある構造が確認する 流体が残留する可能性がある場合は予め対象をピックアップし、系統の水抜き後に除去操作を実施する | 弁・ポンプ内部水抜き | 【経験】系統の水抜きを実施したが、弁のヘッド・密封室部、及びポンプケーシング部に流体が残留することに気づかず、残留した流体が凍結・膨張し設備が破損した。 【知見】系統の水抜き後は弁及びポンプ内部に流体が残留することを想定し、残水除去操作(設備の分解・弁の開閉・ポンプ本体からの水抜き)を実施する。 | 設備所管箇所実施 設備運転箇所補佐 ○水抜きを設備運転箇所へ依頼する場合は、設備所管箇所は留意事項を考慮した適切な実施方法を伝える |
| ⑤ | 他の作業の影響により凍結防止対策が解除されていないか確認する | 対象設備に係わる干渉工事の確認 | 【経験】通常ルールとして「開」運用となっていた弁が、他工事の影響で「閉」運用に変更され、水が滞留してしまい凍結・膨張し破損した。 【知見】凍結防止対策実施設備であることを自Gr内で確実に情報共有する。また、他Grに対しても念のため凍結防止対策設備であることを周知する。 | 設備所管箇所実施 作業実施箇所補佐 ○作業実施箇所は他Gr所管設備に対し作業を実施する場合は設備所管箇所へ連絡する |
| ⑥ | 「新設設備」及び「以前と運用方法が変わった設備」への対策状況を確認する | パトロール時に状況確認 | 【知見】設置後初めて冬季を迎える設備について対策を実施しているか確認する。 【知見】以前と運用方法が変わった設備については現状の対策で適切か確認する。 | 設備所管箇所実施 |
| ⑦ | 対策箇所を抽出する際はP&ID等正式な図面を用いて実施する | P&IDを用いて対策箇所を確認する | 【経験】凍結防止対策抽出に使用していた図が主要なラインのみを記載した概要図だったため、対策漏れが発生し凍結した。 | 設備所管箇所実施 |
| ⑧ | 凍結防止対策として循環運転している設備は万一停止した場合の体制を確立しておく | 設備所管・運転箇所の連絡・復旧体制の確認 | 【経験】凍結防止対策として循環運転をしていたが、不具合により停止し、配管内の滞留水が凍結・膨張し破損した。 【知見】不具合により循環運転が停止しても早急に対応ができるよう連絡・復旧体制を確認する。 | 設備所管箇所実施 設備運転箇所補佐 ○設備所管箇所は循環運転にて凍結防止対策を実施している場合は、循環運転停止時の連絡体制などを設備運転箇所へ周知しておく |

④: 本事象の対策として、ガイドに反映した箇所
(朱書き部分を追記)