

令 01 原機（環材）013

令和 2 年 2 月 27 日

原子力規制委員会 殿

住 所 茨城県那珂郡東海村大字舟石川 765 番地 1
名 称 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
代表者の氏名 理事長 児玉 敏雄



JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について

標記の件について、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 62 条の 3 に基づき、令和元年 12 月 20 日付け令 01 原機（環材）009 で報告した JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について、冷却塔のがれき等の撤去作業が完了したことから、現場の安全管理等の進捗の記載及び記載の適正化を行い、別紙のとおり補正いたします。

別紙：原子力施設故障等報告書

以 上

原子力施設故障等報告書

令和2年2月27日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

件名	JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について
事象発生の日時	確認日時 令和元年9月9日（月） 7時40分頃 法令報告と判断した日時 令和元年9月9日（月） 13時30分
事象発生の場所	JMTR 二次冷却系統冷却塔（非管理区域）
事象発生の原子力施設名称	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究所（北地区） JMTR 施設
事象の状況	<p>JMTRの二次冷却系統冷却塔（以下「冷却塔」という。）は、原子炉運転中において一次冷却系統から熱交換器を介して受けた熱を大気に放散するための設備である。冷却塔は、No. 1～No. 4の4基のセルから構成され、昭和43年に建設された。現在の冷却塔は、平成10年から平成11年にかけて、当時主構造材の腐食、アンカーボルトの減肉・腐食が確認されたためセル塔体部、ファンスタック部及びアンカーボルトの更新を行った後、平成20年には耐用年数の長期化を図るためセル塔体部のトップデッキ及びファンスタック部材を木製からFRP製に更新したものである。事象発生時、二次冷却系統は停止しており、冷却塔のスレート外壁の補修を目的として、令和元年9月5日～令和元年9月13日の予定で補修作業を実施するため冷却塔の東側に仮設足場を設置していた。仮設足場は、台風に伴って防風ネットの取外し、固定強化のための斜材取付け等の対策を施していた。</p> <p>大洗研究所には気象観測塔及び気象観測露場があり、気象状況を常時観測している。令和元年9月9日（月）4時頃から台風15号による強い風が吹き始め、同日6時50分から7時10分までの間に、地上高10mにおいて最大瞬間風速30.9m/sの東風、地上高40mにおいて最大瞬間風速44.5m/sの東南東風が観測された。また、降水量は同日の降り始めから8時までで59mmであった。なお、気象観測塔及び気象観測露場は、冷却塔の東側約540mの位置にある。</p> <p>令和元年9月9日（月）7時40分頃、請負作業員3名が交替勤務の引継ぎ前の安全確認のためJMTR施設のパトロール中に、冷却塔の倒壊を確認した。なお、同日6時頃に行ったタンクヤードの現場確認時には冷却塔が倒壊していないことを目視で確認していたことから、冷却塔の倒壊時刻は、6時頃から7時40分頃までの間と推定される。冷却塔は、東側から西側に向けて倒壊し、冷却塔に接続している4本の二次冷却系配管は、冷却塔と共に倒れて、立ち上がり部で4本とも破損が生じていることが確認された。倒壊に伴う負傷者の発生はなかった。倒壊した冷却塔の周辺について、放射線管理第2課員による線量当量率測定を実施した結果、全てバックグラウンド値であり、線量当量率に異常は認められなかった。また、ポンプ室（二次冷却系統・UCL（Utility Cooling Loop）系統）地下部（Bトレンチ内、非管理区域）にある二次冷却系配管のフランジ部からの水の漏えいを確認した。その</p>

時点で漏えい量は 30～40L 程度で、漏えい率は約 150mL/分であった。漏えい水についてサンプリングを行い、放射線管理第 2 課員によるゲルマニウム半導体検出器を用いた測定を実施した結果、検出されたのは天然放射性核種のみであり、異常は認められなかった。なお、二次冷却系統にはろ過水を使用し、防食剤を添加して水質管理している。漏えいを停止させるため、二次冷却系配管の水抜きを行い、水位を下げた。漏えいが停止するまでのフランジ部からの漏えい量は 80～90L 程度であった。なお、事象発生時、ポンプ室（二次冷却系統・UCL 系統）に設置されている二次冷却系統の循環ポンプ 4 台及び補助ポンプ 2 台は全て停止していた。また、ポンプ室（二次冷却系統・UCL 系統）に設置されている UCL 系統の循環ポンプ 3 台のうち 1 台及び揚水ポンプ 3 台のうち 2 台による UCL 系統の運転を行っていた。事象発生後においてもこれらのポンプに異常はなく、冷却塔倒壊による UCL 系統の運転への影響はなかった。

一方、倒壊した冷却塔の部材の接触等により、隣接する排風機室のスレート外壁（2 箇所）の破損が生じていることを確認した。排風機室（第 2 種管理区域）の破損箇所について放射線管理第 2 課員による線量当量率測定及び表面密度測定を実施した。その結果、線量当量率は全てバックグラウンド値であること及び表面密度測定結果は検出下限値未満であり、異常は認められなかった。なお、排風機室は、JMTR の排気設備のうち、排風機、排気ダクト等の機器を収納している鋼管造スレート外壁、地上 1 階（一部地下 1 階）の建家であり、事象発生時、通常排気設備 4 台のうち 2 台、照射実験用排気設備 2 台のうち 1 台及び非常用排気設備 2 台のうち 1 台の排風機による排気設備の運転を行っていた。事象発生後においても排風機室内の排風機、排気ダクト等の機器に異常はなく、冷却塔倒壊による排気設備の運転への影響はなかった。

誤作動、電気事故等の防止のため、冷却塔入口弁、冷却塔ファン、循環ポンプ、補助ポンプ、循環ポンプ出口弁及び補助ポンプ出口弁の電源「断」を確認するとともに、二次冷却系統の隔離の観点から熱交バイパス弁の「閉」確認及び熱交入口弁・熱交出口弁の「閉」操作を実施した。また、安全確保のため、倒壊した冷却塔周辺に立入禁止措置を講じた。破損が確認された配管については、外部からの異物混入防止のため、耐水シート、土嚢等を用いて養生を行った。漏えいが確認された二次冷却系配管フランジ部について、漏えいを停止させるため二次冷却系統に設けられたドレン弁からの水抜きを行った。漏えい水及びドレン弁からの水抜きによる排水については、B トレンチ内の排水ピットを介して一般排水ラインにより pH 値が管理値内であることを監視しながら一般排水を行った。

排風機室のスレート外壁（2 箇所）の破損については、溶融亜鉛メッキ鋼板、シリコンコーキング及びアルミテープで応急措置を実施した。

事象発生時、二次冷却系統は停止しており、今後も運転することなく、廃止措置において解体・撤去を行う予定であった。そのため、本事象により二次冷却系統が故障したことに関し、原子炉の安全への影響はない。また、二次冷却系統以外の系統及び設備の機能への影響も生じていない。なお、倒壊した冷却塔による二次災害防止の観点から、3 時間に 1 回パトロールを実施し、周辺の状況を確認した。

JMTR は、平成 18 年 8 月の原子炉運転停止以降は、炉心に燃料は装荷され

	<p>ておらず、原子炉の運転を行っていない。平成 29 年 4 月の日本原子力研究開発機構の施設中長期計画において廃止することを決定したので、今後も運転を行う予定はなく、現在は廃止措置の準備を進めている（令和元年 9 月 18 日に原子力規制委員会に廃止措置計画認可申請済）。このため、二次冷却系統は事象発生時、停止しており、今後も炉心の冷却のために運転することなく、廃止措置において解体・撤去を行う予定であった。したがって、本事象発生により二次冷却系統が故障したが、原子炉の安全への影響はない状況である。</p> <p>しかしながら、事象発生時は廃止措置計画認可申請前であり、原子炉施設保安規定に二次冷却系統に係る施設定期自主検査を定め、実施していた（直近では、平成 30 年 9 月に実施し、施設定期自主検査の中で二次冷却系統の保守運転を行っている。）。したがって、二次冷却系統の故障により、原子炉を運転する場合に必要な炉心の冷却の機能が維持されない状況となったことから、試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則第 16 条の 14 第 3 号に定める原子炉施設の故障に該当するものとして、13 時 30 分、本事象を核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 62 条の 3 に基づく法令報告事象と判断し、原子力規制庁に報告した。</p> <p>なお、今回のような冷却塔の倒壊が JMTR の原子炉運転中に発生したとしても、運転要員による手動停止操作又は制御棒挿入の安全動作信号により原子炉は安全に停止し、一次冷却系統及び炉プールの保有冷却水により原子炉停止後の炉心が十分冷却できるため、原子炉の安全上問題はない。また、これらの対応は、原子炉施設保安規定に基づく運転手引に従い、実施する。</p>
<p>事象の原因</p>	<p>事象の原因究明に係る対応では、フォルトツリー図を作成し、構造計算書、保守記録等の記録調査、現場調査、倒壊した冷却塔から採取した木材の状態調査、発生応力の解析評価等により得られた情報に基づき、冷却塔の倒壊に至った原因の調査を行った。その結果、冷却塔の倒壊に至った経緯を以下のとおり推定した。</p> <p>(1) 冷却塔は、水平荷重（風荷重）である速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$（最大瞬間風速 63m/s 相当）に耐えられるように設計されていた。一方、冷却塔の主構造部材は木材であるが、冷却塔は一般的な木造建築とは異なり、「水平荷重（風荷重）を構造部材のうち筋かいのみが負担し、一構面の筋かいの機能が喪失した場合、隣接する構面の筋かいの荷重が増加するため破断が連鎖的に進みやすく、ねばりが小さい構造（以下「特殊な構造」という。）」であった。</p> <p>(2) 平成 18 年 8 月の JMTR の運転停止以降、長期間にわたり当該冷却塔を使用していないことにより乾湿を繰り返し、構造部材である木材の腐朽を促進する条件が整い、木材内部の腐朽が進行した。特に、冷却塔の東西方向の 17 構面（No. 1～No. 17）のうち、構面 No. 10、13 及び 15 の筋かい下端部（接合部）において、木材の残存断面積がほとんどない状況であった。</p> <p>(3) (1)に示す特殊な構造について十分把握できておらず、また、木材の腐朽に関するリスクや定期的な点検の必要性についてメーカーと十分共有できていなかったため、これらが設定した点検項目や方法、並びに部材等の更新計画に反映されていなかった。</p> <p>(4) (3)に示す状況により、筋かい等の構造部材に対しては、目視による点</p>

	<p>検を行い、破損等を確認した木材について補修、交換する対応を行っていた。目視による点検では木材内部の腐朽が把握できなかったため、(2)に示す木材内部の腐朽の進行により、特に、構面 No. 10、13 及び 15 の筋かい下端部（接合部）において、著しい耐力低下が生じた。</p> <p>(5) 水平荷重（風荷重）に対する耐力低下を把握していない状況において、台風 15 号による、水平荷重（風荷重）に対して最も影響を受ける真東の強風（最大瞬間風速 30.9m/s）により、残存耐力を上回る水平荷重（風荷重）が発生した。これにより複数の筋かいが破断し、(1)に示した特殊な構造のため隣接する構面にその現象が連鎖して冷却塔の倒壊に至った。</p> <p>この冷却塔の倒壊に至った経緯の推定に基づき、原因分析を行った結果、以下に示す 4 つの原因が重なって生じることにより冷却塔の倒壊に至ったと特定した。</p> <p>(1) 冷却塔の特殊な構造について十分把握していなかったこと。 冷却塔の特殊な構造について十分把握できていなかった。そのため、これに見合った保守・点検計画になっていなかった。</p> <p>(2) 実施していた点検では、木材内部の腐朽を把握できていなかったこと。 冷却塔については目視による点検を実施していたが、木材内部の腐朽を考慮しておらず、このような点検方法では、木材内部の腐朽が把握できなかった。</p> <p>(3) 使用環境が大きく変わったこと。 冷却塔を長期間使用しないことにより木材の腐朽の条件が整いやすくなり、使用環境が大きく変わった。また、その際に、保守・点検計画の見直しを行っていなかった。</p> <p>(4) 影響が最も大きくなる風向で水平荷重（風荷重）を受けたこと。 台風 15 号により、水平荷重（風荷重）に対して最も影響を受ける真東の強風を受けた。</p>
安全装置の種類 及び動作状況	なし
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	<p>二次冷却系統（冷却塔含む。）は、JMTR 原子炉施設の廃止措置の中で解体・撤去を行う予定であるため、冷却塔の建て替えは行わない。</p> <p>倒壊した冷却塔による二次災害を防止し、安全な状態にするため、冷却塔のがれき等を撤去することとした。撤去作業では、①散乱物の撤去、作業場所の整備、スレート材等の撤去、②ファンスタック、モータ、二次冷却系配管等の解体・撤去、③冷却塔セル塔体部の解体・撤去及び二次冷却系配管の閉止措置の作業を行うこととし、10月3日から作業を開始した。このうち、①の作業が11月1日に完了し、その後、②の作業が12月25日に、③の作業が令和2年1月27日にそれぞれ完了したことにより、冷却塔のがれき等の撤去作業は全て完了した。</p> <p>撤去物は、倒壊した冷却塔近傍の西側に整備した仮置き場所において、飛散防止ネットを取り付けて保管管理するとともに、随時、JMTR 敷地の西側に整備したのがれき等の保管場所に運搬し、材質毎に区分して保管管理した。</p>

	<p>撤去作業中に負傷等の発生が無いように安全管理を徹底するため、作業要領書を作成し、作業におけるホールドポイント、使用する保護具、役割分担を明示したベストの着用等を定め、作業の安全管理を行った。冷却塔の外壁に使用しているスレート材（解体等の際、吹付け石綿に比べ発じん性が比較的低い石綿含有建材）の撤去作業に当たっては、石綿が飛散するおそれがあるため、散水して湿潤状態を保つようにする、スレート材を原則非破砕で取り扱う等の飛散防止対策を講じ、石綿障害予防規則を遵守して作業中は防じんマスクを着用するとともに、冷却塔周辺の石綿の濃度測定を適宜行った。</p> <p>撤去作業期間中においても引き続き、令和2年1月27日まで関係者以外の立入禁止措置を講ずるとともに、3時間に1回パトロールを実施し、周辺の状態を確認した。冷却塔倒壊後の台風19号発生時には、保安要員を配置し、監視体制を強化した。さらに、冷却塔の撤去状況に応じた保安のための巡視及び点検に係る原子炉施設保安規定の変更認可申請を10月1日に行った（12月25日補正実施）。</p> <p>これらの措置の実施により、撤去作業中における安全確保が維持できた。冷却塔のがれき等の撤去作業が完了し、冷却塔の基礎部のみが残っているため、巡視点検を行い管理していく。さらに、JMTR 原子炉施設の廃止措置の中で、当該基礎部を解体・撤去するとともに、がれき等の保管場所で保管管理している撤去物について順次廃棄していく。</p>
再発防止対策	<p>[対策]</p> <p>倒壊した冷却塔は、建て替えを行わないことから、倒壊事象が再発することはない。したがって、冷却塔と同種である木造の原子力施設の設備の倒壊を防止するため、冷却塔の倒壊に至った原因に対する再発防止対策を検討した。その結果、以下に掲げる対策を講ずる。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 設備の特殊な構造についてメーカー情報等により把握し、その結果に応じて点検の見直し、補修、交換、補強等を行う。点検の見直しに当たっては、木材の腐朽が進行しやすい箇所を特定して重点的に点検が行えるように点検・保守計画を策定する。 (2) 木材内部の腐朽を把握するため、目視による点検に加え、木材内部の腐朽に着目して年1回打音点検等を計画的に行い、疑義が生じた部位には超音波測定器等を用いた腐朽具合の測定を行うとともに、点検結果に応じて補修、交換等を行うように点検・保守計画を定める。 (3) 設備を長期間使用しないことにより、設備の置かれた環境に、材料の劣化を促進させるような変化が生じる場合には、メーカーと情報共有して維持管理上のリスク評価を行った上で、評価結果に応じて点検項目及び頻度を追加・削除・変更する等の必要な措置を講ずる。 (4) 対策(1)～対策(3)において、必要な点検の見直し、補修、交換、補強等が完了するまでの間、設備に台風等の自然現象の影響が生じるおそれがある場合は、応急的に補強等を行う。 <p>[再発防止に向けた水平展開]</p> <p>再発防止に向けた水平展開として、JMTR 施設のうち、同種の冷却塔である UCL 系統冷却塔に対して、今回の原因調査及び原因分析に基づいて早急に健全性調査を開始した。調査結果に基づいて、点検の見直し、補修、交換、補強等の対応を行う。また、これらの対応が完了するまでの間、台風等の強</p>

風の対策として行っている 4 方向からのワイヤーロープによる固定は継続し、倒壊した場合の周辺への影響を軽減する。

また、原子力施設の倒壊事象の再発を防止するため、原子力機構の各拠点に対し、次のとおり水平展開を行う。屋外にあり、かつ、建築基準法に基づく一般的な木造建築とは異なる構造である木造の原子力施設の設備に対し、既存の点検方法により構造部材（柱、梁、筋かい等）の劣化（腐朽、腐食等）の状態（兆候含む。）が把握できるか否かを確認する。劣化の状態を把握できない箇所がある場合は、当該設備に対して、今回の原因分析に対する対策に基づき、必要な措置を講ずる。さらに、原子力機構内にある木造の建家・設備が倒壊して安全上重要な設備に影響を与えるおそれがある場合は、必要な措置を講ずる。

詳細は別添のとおり。

別添

JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について

令和2年2月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

目 次

1. 件名	1
2. 事象発生の日時	1
3. 事象発生の場所	1
4. 状況	1
5. 環境への影響	3
6. 今回の事象に対する対応措置	3
7. 事象発生場所の安全管理	4
8. 原因	5
8.1 原因調査	5
8.2 原因分析	10
9. 対策	10
10. 再発防止に向けた水平展開	11

図 表

図 1	大洗研究所施設配置図	12
図 2	JMTR 施設全体配置図	13
図 3	二次冷却系統冷却塔概略図	14
図 4	二次冷却系統概略図	15
図 5	風速及び風向の時間変化	16
図 6	二次冷却系統冷却塔の倒壊前と倒壊後の状況	19
図 7	破損した二次冷却系配管	23
図 8	線量当量率測定記録	25
図 9	二次冷却系配管フランジ部からの漏えい	26
図 10	二次冷却系統サンプリング水測定記録	28
図 11	排風機室の破損箇所及び措置対応	29
図 12	線量当量率測定記録	31
図 13	表面密度測定記録	32
図 14	モニタリングポストの指示値及び降水量	34
図 15	立入禁止措置の状況	35
図 16	二次冷却系配管の破損箇所の養生	37
図 17	二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況	42
図 18	二次冷却系統冷却塔の倒壊要因に係るフォルトツリー図	48
表 1	風向、風速、雨量の観測結果	49
表 2	時系列	52
表 3	二次冷却系統冷却塔の倒壊に係る基本事象の影響度評価	54

添 付 資 料

添付資料 1	材料試験炉（JMTR）の概要	55
添付資料 2	JMTR 原子炉施設施設定期自主検査記録 特定施設 二次冷却系統冷却塔 外観検査（抜粋）	56
添付資料 3	JMTR 特定施設 巡視点検表（原子炉停止中）（抜粋）	60
添付資料 4	二次冷却系統冷却塔の倒壊に係る基本事象ごとの 評価内容詳細	63
添付資料 5	木材の腐朽を考慮した解析検討による倒壊原因の推定	165
添付資料 6	同種の冷却塔への対応	176

1. 件名

JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について

2. 事象発生の日時

確認日時：令和元年9月9日（月）7時40分頃 JMTR 二次冷却系統冷却塔の倒壊

法令報告事象と判断した日時：令和元年9月9日（月）13時30分

・廃止措置準備中である JMTR の原子炉及び二次冷却系統は、事象発生時、停止しており、今後も運転する予定はないため、当該事象による原子炉の安全への影響はないものの、事象発生時点では JMTR は廃止措置計画認可申請前であり、原子炉施設保安規定に施設定期自主検査を定めている二次冷却系統の故障により、原子炉を運転する場合に必要な炉心の冷却の機能が維持されない状況となったこと。

3. 事象発生の場所

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究所（北地区）

JMTR（材料試験炉）二次冷却系統冷却塔【非管理区域】

4. 状況

(1) 事象発生時の状況

JMTR（添付資料1参照）の二次冷却系統冷却塔（以下「冷却塔」という。）は、原子炉運転中において一次冷却系統から熱交換器を介して受けた熱を大気に放散するための設備である（図1～図4参照）。冷却塔は、No.1～No.4の4基のセルから構成され、昭和43年（1968年）に建設された。現在の冷却塔は、平成10年（1998年）から平成11年（1999年）にかけて、当時主構造材の腐食、アンカーボルトの減肉・腐食が確認されたためセル塔体部、ファンスタック部及びアンカーボルトの更新を行った後、平成20年（2008年）には耐用年数の長期化を図るためセル塔体部のトップデッキ及びファンスタック部材を木製からFRP製に更新したものである。事象発生時、二次冷却系統は停止しており、冷却塔のスレート外壁の補修を目的として、令和元年（2019年）9月5日～令和元年（2019年）9月13日の予定で補修作業を実施するため冷却塔の東側に仮設足場を設置していた。仮設足場は、台風に備え防風ネットの取外し、固定強化のための斜材取付け等の対策を施していた。

大洗研究所には気象観測塔及び気象観測露場があり、気象状況を常時観測している。事象発生当時の地上高10m、40m、80mのそれぞれの位置における風向、風速（10分平均値）、最大瞬間風速を図5及び表1に示す。

令和元年（2019年）9月9日（月）4時頃から台風15号による強い風が吹き始め、同日6時50分から7時10分までの間に、地上高10mにおいて最大瞬間風速30.9m/sの東風、地上高40mにおいて最大瞬間風速44.5m/sの東南東風が観測された。また、降水量は同日の降り始めから8時までで59mmであった。

なお、気象観測塔及び気象観測露場は、冷却塔の東側約 540m の位置にある(図 1 参照)。

(2) 事象の状況

令和元年(2019年)9月9日(月)7時40分頃、請負作業員3名が交替勤務の引継ぎ前の安全確認のためJMTR施設のパトロール中に、冷却塔の倒壊を確認した(図6参照)。なお、同日6時頃に行ったタンクヤードの現場確認時には冷却塔が倒壊していないことを目視で確認していたことから、冷却塔の倒壊時刻は、6時頃から7時40分頃までの間と推定される。冷却塔は、東側から西側に向けて倒壊し、冷却塔に接続している4本の二次冷却系配管は、冷却塔と共に倒れて、立ち上がり部で4本とも破損が生じていることが確認された(図7参照)。倒壊に伴う負傷者の発生はなかった。倒壊した冷却塔の周辺について、放射線管理第2課員による線量当量率測定を実施した結果、全てバックグラウンド値であり、線量当量率に異常は認められなかった(図8参照)。また、ポンプ室(二次冷却系統・UCL(Utility Cooling Loop)系統)地下部(Bトレンチ内、非管理区域)にある二次冷却系配管のフランジ部からの水の漏えいを確認した(図9参照)。その時点で漏えい量は30~40L程度で、漏えい率は約150mL/分であった。漏えい水についてサンプリングを行い、放射線管理第2課員によるゲルマニウム半導体検出器を用いた測定を実施した結果、検出されたのは天然放射性核種のみであり、異常は認められなかった(図10参照)。なお、二次冷却系統にはろ過水を使用し、防食剤を添加して水質管理している。漏えいを停止させるため、「6. 今回の事象に対する対応措置」に示すとおり二次冷却系配管の水抜きを行い、水位を下げた。漏えいが停止するまでのフランジ部からの漏えい量は80~90L程度であった。なお、事象発生時、ポンプ室(二次冷却系統・UCL系統)に設置されている二次冷却系統の循環ポンプ4台及び補助ポンプ2台は全て停止していた。また、ポンプ室(二次冷却系統・UCL系統)に設置されているUCL系統の循環ポンプ3台のうち1台及び揚水ポンプ3台のうち2台によるUCL系統の運転を行っていた。事象発生後においてもこれらのポンプに異常はなく、冷却塔倒壊によるUCL系統の運転への影響はなかった。

一方、倒壊した冷却塔の部材の接触等により、隣接する排風機室のスレート外壁(2箇所)の破損が生じていることを確認した(図11参照)。排風機室(第2種管理区域)の破損箇所について放射線管理第2課員による線量当量率測定及び表面密度測定を実施した。その結果、線量当量率は全てバックグラウンド値であること及び表面密度測定結果は検出下限値未満であり、異常は認められなかった(図12及び図13参照)。なお、排風機室は、JMTRの排気設備のうち、排風機、排気ダクト等の機器を収納している鋼管造スレート外壁、地上1階(一部地下1階)の建家であり、事象発生時、通常排気設備4台のうち2台、照射実験用排気設備2台のうち1台及び非常用排気設備2台のうち1台の排風機による排気設備の運転を行っていた。事象発生後においても排風機室内の排風機、排気ダクト等の機器に異常はなく、冷却塔倒壊による排気設備の運転への影響はなかった。

時系列を表2に示す。

(3) 法令報告に係る通報の状況

JMTRは、平成18年(2006年)8月の原子炉運転停止以降は、炉心に燃料は装荷されておらず、原子炉の運転を行っていない。平成29年(2017年)4月の日本原子力研究開発機構の施設中長期計画において廃止することを決定したので、今後も運転を行う予定はな

く、現在は廃止措置の準備を進めている（令和元年（2019年）9月18日に原子力規制委員会に廃止措置計画認可申請済）。このため、二次冷却系統は事象発生時、停止しており、今後も炉心の冷却のために運転することなく、廃止措置において解体・撤去を行う予定であった。したがって、本事象発生により二次冷却系統が故障したが、原子炉の安全への影響はない状況である。

しかしながら、事象発生時は廃止措置計画認可申請前であり、原子炉施設保安規定に二次冷却系統に係る施設定期自主検査を定め、実施していた（直近では、平成30年（2018年）9月に実施し、施設定期自主検査の中で二次冷却系統の保守運転を行っている。）。したがって、二次冷却系統の故障により、原子炉を運転する場合に必要な炉心の冷却の機能が維持されない状況となったことから、試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則第16条の14第3号に定める原子炉施設の故障に該当するものとして、13時30分、本事象を核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第62条の3に基づく法令報告事象と判断し、原子力規制庁に報告した。

なお、今回のような冷却塔の倒壊がJMTRの原子炉運転中に発生したとしても、運転要員による手動停止操作又は制御棒挿入の安全動作信号により原子炉は安全に停止し、一次冷却系統及び炉プールの保有冷却水により原子炉停止後の炉心が十分冷却できるため、原子炉の安全上問題はない。また、これらの対応は、原子炉施設保安規定に基づく運転手引に従い、実施する。

5. 環境への影響

冷却塔倒壊確認（9月9日（月）7時40分頃）前後の時間帯の大洗研究所周辺監視区域境界付近のモニタリングポストの指示値は、降雨の影響で天然放射性核種に起因する空間線量率（ γ 線）の上昇がみられるものの平常の変動幅の範囲にあった。また、冷却塔近接及び風下のモニタリングポスト（P-2、P-3、P-16）の指示値は、他のモニタリングポストと同じ傾向にあった。したがって、施設に起因する空間線量率の上昇は認められず、環境への影響はなかった。図14にモニタリングポストの指示値のトレンドを示す。

なお、モニタリングポストによる空間線量率測定は現在も継続しており、異常のないことを確認している。

6. 今回の事象に対する対応措置

誤作動、電気事故等の防止のため、冷却塔入口弁、冷却塔ファン、循環ポンプ、補助ポンプ、循環ポンプ出口弁及び補助ポンプ出口弁の電源「断」を確認するとともに、二次冷却系統の隔離の観点から熱交バイパス弁の「閉」確認及び熱交入口弁・熱交出口弁の「閉」操作を実施した。また、安全確保のため、倒壊した冷却塔周辺に立入禁止措置を講じた（図15参照）。破損が確認された配管については、外部からの異物混入防止のため、耐水シート、土嚢等を用いて養生を行った（図16参照）。漏えいが確認された二次冷却系配管フランジ部について、漏えいを停止させるため二次冷却系統に設けられたドレン弁からの水抜きを行った。漏えい水及びドレン弁からの水抜きによる排水については、Bトレンチ内の排水ピットを介して一般排水ラインによりpH値が管理値内であることを監視しながら一般排水を行った。

排風機室のスレート外壁（2箇所）の破損については、熔融亜鉛メッキ鋼板、シリコン

コーキング及びアルミテープで応急措置を実施した（図 11 参照）。

事象発生時、二次冷却系統は停止しており、今後も運転することなく、廃止措置において解体・撤去を行う予定であった。そのため、本事象により二次冷却系統が故障したことに関し、原子炉の安全への影響はない。また、二次冷却系統以外の系統及び設備の機能への影響も生じていない。なお、倒壊した冷却塔による二次災害防止の観点から、3 時間に 1 回パトロールを実施し、周辺の状況を確認した。

7. 事象発生場所の安全管理

(1) 冷却塔のがれき等の撤去

倒壊した冷却塔による二次災害を防止し、安全な状態にするため、冷却塔のがれき等を撤去することとした。撤去作業では、①散乱物の撤去、作業場所の整備、スレート材等の撤去、②ファンスタック、モータ、二次冷却系配管等の解体・撤去、③冷却塔セル塔体部の解体・撤去及び二次冷却系配管の閉止措置の作業を行うこととし、10 月 3 日から作業を開始した。このうち、①の作業が 11 月 1 日に完了し（図 17 写真①～写真④ 参照）、その後、②の作業が 12 月 25 日に、③の作業が令和 2 年（2020 年）1 月 27 日にそれぞれ完了したことにより（図 17 写真⑤～写真⑦ 参照）、冷却塔のがれき等の撤去作業は全て完了した。

撤去物は、倒壊した冷却塔近傍の西側に整備した仮置き場所において、飛散防止ネットを取り付けて保管管理するとともに、随時、JMTR 敷地の西側に整備したのがれき等の保管場所に運搬し、材質毎に区分して保管管理した（図 17 写真⑧～写真⑩ 参照）。

撤去作業中に負傷等の発生が無いように安全管理を徹底するため、作業要領書を作成し、作業におけるホールドポイント、使用する保護具、役割分担を明示したベストの着用等を定め、作業の安全管理を行った。冷却塔の外壁に使用しているスレート材（解体等の際、吹付け石綿に比べ発じん性が比較的低い石綿含有建材）の撤去作業に当たっては、石綿が飛散するおそれがあるため、散水して湿潤状態を保つようにする、スレート材を原則非破碎で取り扱う等の飛散防止対策を講じ、石綿障害予防規則を遵守して作業中は防じんマスクを着用するとともに、冷却塔周辺の石綿の濃度測定を適宜行った。

撤去作業期間中においても引き続き、令和 2 年（2020 年）1 月 27 日まで関係者以外の立入禁止措置を講ずるとともに、3 時間に 1 回パトロールを実施し、周辺の状況を確認した。冷却塔倒壊後の台風 19 号発生時には、保安要員を配置し、監視体制を強化した。さらに、冷却塔の撤去状況に応じた保安のための巡視及び点検に係る原子炉施設保安規定の変更認可申請を 10 月 1 日に行った（12 月 25 日補正実施）。

これらの措置の実施により、撤去作業中における安全確保が維持できた。

(2) 今後の対応

冷却塔のがれき等の撤去作業が完了し、冷却塔の基礎部のみが残っているため、巡視点検を行い管理していく。さらに、JMTR 原子炉施設の廃止措置の中で、当該基礎部を解体・撤去するとともに、のがれき等の保管場所で保管管理している撤去物について順次廃棄していく。

8. 原因

8.1 原因調査

冷却塔の倒壊要因分析のため、フォルトツリー解析を行った。まず、原因を特定すべき事象（トップ事象）を「冷却塔の倒壊」として、その要因となる事象を基本事象にまで順次分解することにより、フォルトツリー図を構築した。次に、抽出された各々の基本事象の影響度評価を行い、「冷却塔の倒壊」に至った経緯を推定した。

(1) 冷却塔の倒壊要因分析のためのフォルトツリー図構築

構築したフォルトツリー図（図 18 参照）に示すとおり、トップ事象である「冷却塔の倒壊」は、「必要な強度の不足」、「性能を超える外力の発生」及び「設計で考慮していない外力の発生」の 3 つの事象のうちいずれか 1 つ又は 2 つ以上の影響の重畳により発生するとした。

「必要な強度の不足」は、「性能不足」又は「性能低下」により生じるものとした。前者の「性能不足」をもたらす事象としては、設計又は施工上の影響によるものと考え、基本事象として①構造設計の影響、②材料変更の影響及び③施工の問題の 3 つの要因を考えた。また、後者の「性能低下」をもたらす事象としては、冷却塔の木材、金属、コンクリート（基礎部）の変形等や不十分な保守管理によるものあるいは東北地方太平洋沖地震による影響と考え、基本事象として④木材の変形の影響、⑤木材の腐朽の影響、⑥保守運転の影響、⑦点検内容の問題、⑧更新・補修の影響、⑨金属の腐食、変形等の影響、⑩コンクリートの割れ・破損等の影響及び⑪地震力による破損等の影響の 8 つの要因を考えた。

「性能を超える外力の発生」をもたらす事象としては、冷却塔倒壊時における台風等の自然現象又は設備の運転に伴い生じる外力によるものと考え、基本事象として⑫風雨の影響、⑬飛来物の影響、⑭地震の発生の影響、⑮竜巻（突風）の発生の影響及び⑯設備運転による過応力の影響の 5 つの要因を考えた。

「設計で考慮していない外力の発生」については、冷却塔倒壊時に立ち上がり部で破損して冷却塔と共に倒れた 4 本の二次冷却系配管の破損の影響、冷却塔のスレート外壁の補修のために設置していた仮設足場の影響又は台風に伴う繰返し応力の影響によるものと考え、基本事象として⑰配管破損部の強度不足の影響、⑱配管破損部の腐食の影響、⑲足場の衝突の影響及び⑳繰返し応力の影響の 4 つの要因を考えた。

以上のとおり、トップ事象「冷却塔の倒壊」をもたらす要因として計 20 の基本事象を抽出した。

(2) 各基本事象の影響度評価結果

構築したフォルトツリー図を構成する 20 の基本事象それぞれについて、構造計算書、保守記録等の記録調査、現場調査、倒壊した冷却塔から採取した木材の状態調査、発生応力の解析評価等により得られた情報に基づき、各基本事象がトップ事象である「冷却塔の倒壊」に与える影響度（重要度）を評価した。これらの調査及び評価は、材料試験炉部、高速炉解析評価技術開発部、高速炉基盤技術開発部、放射線管理部、建設部などの他、メーカーからの協力も得ながら、組織的に実施した。

それぞれの評価の詳細（添付資料 4 参照）から、「冷却塔の倒壊」に与える影響度評価結果を一覧としてとりまとめた（表 3 参照）。これによると、「必要な強度の不足」、「性能を超える外力の発生」及び「設計で考慮していない外力の発生」におけるそれぞれの基本事

象のうち、「冷却塔の倒壊」に有意な影響を与え得る基本事象は、①構造設計の影響、⑤木材の腐朽の影響、⑦点検内容の問題及び⑫風雨の影響の4つであった。これら4つの基本事象による影響について以下に示す。

① 構造設計の影響

冷却塔の主構造部材は、木製の柱、横材及び筋かいで構成されている（木材は、防腐・防蟻処理されたものが使用されている。）。構造設計は、建築基準法に基づく一般的な木造建築のように柱に水平荷重（風荷重）を負担させる設計ではない。また、冷却塔全体が受ける水平荷重（風荷重）を全ての構面（東西方向17構面）で負担する剛床の構造ではなく、構面毎に風を受ける壁面の面積に応じて負担する構造である。このため構造部材のうち、筋かいが機能を喪失し、柱に力が集中すると柱中間部に設けている柱接合部（柱継手）が弱部となる特徴があることが分かった。また、一構面の筋かいの機能が喪失した場合、隣接する構面が負担する水平荷重（風荷重）が増加するため破断が連鎖的に進みやすく、ねばりが小さい構造（以下「特殊な構造」という。）であると考えられる。

次に、冷却塔の構造図に基づき冷却塔の解析モデルを作成し、設計時の水平荷重（風荷重）である速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$ （最大瞬間風速 63m/s 相当）を入力して構造計算を行った。その結果、構造部材のうち、水平荷重（風荷重）を負担する筋かいにおける検定比（発生軸力の解析値を評価基準値で除した値）は最大で 0.91 （下から2段目の筋かい）であり、筋かいの発生軸力は評価基準値に比べて小さいことを確認した。また、メーカーが作成した冷却塔の構造計算書上の検定比は最大 0.97 （同じく下から2段目の筋かい）であった。したがって、構造設計上問題がないことが確認できた（添付資料4 ①構造設計の影響 参照）。

⑤ 木材の腐朽の影響

冷却塔の構造部材のうち、筋かいに使用されている木材の劣化調査を行った。外観観察の結果から、東側の筋かいの下端部のうち6箇所では損傷又は接合部から木材が抜け出した状態であった。柱接合部（柱継手）については、接合金物の固定ボルト付近から柱が割裂していることが確認された。また、劣化調査の結果から、これらの箇所の筋かい下端部で木材の腐朽が進み、木材の健全な部分が少なくなっていることを確認した。特に、東西方向の17構面（No.1～No.17）のうち、No.10、13及び15の筋かい下端部（接合部）において、木材の残存断面積がほとんどない状態であった（添付資料4 ⑤木材の腐朽の影響 図⑤-5 参照）。その他の箇所でも筋かい下端部に木材の腐朽を確認した。

木材が腐朽する条件は、(a)栄養(木材)、(b)温度、(c)水分(湿度)、(d)空気が整うこととされている。(a)は冷却塔の木材そのものであり、冷却塔の使用中は常時流水に晒され腐朽菌が付着しにくく、(a)の栄養の吸収ができ難かった状態であったが、平成18年(2006年)8月のJMTRの運転停止以降、冷却塔は約1回/月の保守運転以外は長期停止状態になり、空気の入りが行われるようになったため(a)及び(d)の条件を満たした。また、東西方向の下部はルーバーとなっており、内側へ傾斜していて雨水が筋かい下端部へ入りやすい構造となっているとともに、筋かい下端部の接合部は接合金物の

固定ボルトで接合されているため、固定ボルトのボルト穴から雨水が入り込み、繊維方向に沿って木材内部への水分の浸み込みが生じ、その後乾燥するという乾湿が繰り返されたことで(c)の条件を満たした。(b)の条件は冬期の一部を除き、通年にわたって満たされている。以上のことから、冷却塔は、長期間使用しないことにより(a)～(d)の4条件が整いやすく、木材の腐朽が進みやすい状態であったことから、筋かい下端部(接合部)で劣化(腐朽)が進んだものと考えられる(添付資料4 ⑤木材の腐朽の影響参照)。

⑦ 点検内容の問題

倒壊した冷却塔を含む二次冷却系統は、文部科学省研究炉等安全規制検討会に平成15年度(2003年度)に妥当と判断された安全上の機能別重要度分類において、PS(異常の発生防止機能)のうち、クラス3(確立された設計、建設及び試験の技術並びに運転管理により、一般の産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持する必要のある構築物、系統及び機器)に分類している。これに基づき、冷却塔の点検は、目視による日常点検及び施設定期自主検査における外観検査(以下「目視による点検」という。)により、目視確認できる範囲内で実施し、破損等を確認した木材について補修、交換する対応を行ってきた。冷却塔の建設当時のメーカーによる取扱説明書においても、木材に関する定期点検として「半年1回の外観検査、年1回の清掃」が推奨されていたが一般的な定期点検表であり、点検結果に基づく処置としては「破損したものは取り換える」とされていた。⑤木材の腐朽の影響に示した劣化調査の結果から、筋かい下端部(接合部)の木材の腐朽が確認されたが、接合部の木材内部は、接合金物に覆われているため目視による点検では腐朽が確認できなかった。また、冷却塔倒壊後に筋かい下端部を目視により確認したところ、今回の倒壊による影響により損傷した接合部を除き、木材について目視で異常と判断することは困難であることを確認した。したがって、目視による点検では、筋かい下端部(接合部)の木材内部の腐朽状態を把握できなかった。

平成18年(2006年)8月のJMTRの運転停止以降、二次冷却系統の運転も停止し、冷却塔は約1回/月の保守運転以外は使用しなくなったが、平成23年度(2011年度)の原子炉再稼働を目指しており、平成18年度(2006年度)のメーカーによる冷却塔の健全性調査で破損のあった木材は交換し、健全性を確認したことや、メーカーとの木材の腐朽に対する考慮が共有されていなかったため、点検方法の見直しは行わなかった。新規制基準が平成25年(2013年)12月に制定され、これを踏まえた再稼働時期の検討を進めたが、この時点では再稼働を目指していたこと、東北地方太平洋沖地震後の点検及び補修を行ったことから、点検方法を見直す必要はないと考えた。結果的に、冷却塔は平成18年(2006年)8月から長期停止状態となり、冷却塔の置かれた環境が、木材の腐朽が進む条件が整いやすくなる環境に変わったが、当初から長期停止状態になることは予定していなかったため、冷却塔の点検方法を見直していなかった。

平成28年(2016年)12月にJMTR運転手引(特定施設)の巡視点検表を改正し、「気がり事象」の追加、「点検項目」を「確認事項」と変更し、確認内容の明確化を行い、より効果的な巡視点検を行うようになっていた。冷却塔本体については、「気がり事象」を「破損」とし、確認事項を「有害な損傷、変形、錆なし」として巡視点検を行うようにしていたが、点検方法の見直しは行わなかった。

その後、平成 29 年（2017 年）4 月に廃止措置に移行することが決定し、冷却塔を使用しないことが決まったが、廃止措置の準備段階であり、ここでも点検方法の見直しは行っていなかった。なお、長期停止状態であることについて、メーカーとの情報共有が不足していたことも、点検方法を見直さなかったことに影響したと考えられる。

一方、今回の調査で定期点検について改めてメーカーに確認したところ、メーカーが行う推奨点検の一般的な点検項目は、「木部各所の腐朽・劣化・破損」、「ボルト等金物の腐食・破損・外れ」、「エリミネータ、充填物の劣化・破損・脱落」、「駆動装置の点検」などであった。冷却塔については、これらメーカー推奨の一般的な点検項目に対する点検を不定期に行い、木材の腐食・腐朽した部位については交換・補修を行っていたものの、「木部各所の腐朽・劣化・破損」については、平成 18 年度（2006 年度）に行った冷却塔の健全性調査以降、打音点検のような目視以外の方法による点検は行っていなかった。本冷却塔は、設置環境や使用状況等によって腐朽の進行に大きな違いが生じることから、一律にこれらメーカーが行う一般的な点検（点検頻度や点検項目）を取扱いマニュアル等に定めることは困難な設備であり、メーカーとして、これまで点検の実施を強く推奨することはなかったとのことであった。実際に、平成 18 年（2006 年）8 月からの長期停止状態の間にもメーカーによる冷却塔ファンの回転数を調整する減速機の点検を行ったが、定期的な点検の推奨はされていなかった。結果として、これらの点検を行わないことの木材の腐朽に関するリスクや、点検の必要性に対し、メーカーと十分共有できていなかったと考えられる。

設置当初から構造計算書については提出図書に掲げておらずメーカーから提供されていなかった。また、平成 18 年度（2006 年度）のメーカーによる冷却塔の健全性調査において、冷却塔の特殊な構造を考慮した筋かい等の構造部材に対する点検方法の見直しなどについてメーカーからの提案はなかった。これらのことから、①構造設計の影響に示す冷却塔の特殊な構造について十分把握できていなかったため、これらの特徴が点検に反映されることもなかった（添付資料 4 ⑦点検内容の問題 参照）。

⑫ 風雨の影響

大洗研究所の気象状況を常時観測している気象観測塔及び気象観測露場のデータによると、令和元年（2019 年）9 月 9 日（月）4 時頃から台風 15 号による強い風が吹き始め、同日 6 時 50 分から 7 時 10 分までの間に、地上高 10m において最大瞬間風速 30.9m/s の東の風、地上高 40m において最大瞬間風速 44.5m/s の東南東の風を観測した。冷却塔は建設当時の建築基準法を参考にした水平荷重（風荷重）を用いて構造設計が行われており、台風 15 号の強風による水平荷重（風荷重）は、設計時の水平荷重（風荷重）（最大瞬間風速 63m/s 相当）には達していなかった。

過去 10 年間に最大瞬間風速 20m/s 以上を記録した日は 1 回/年以上あったが、冷却塔が倒壊することはなかった。特に、平成 29 年（2017 年）10 月の台風 21 号が通過した際は、今回の台風 15 号とほぼ同じ最大瞬間風速を記録するとともに、暴露された時間も長時間であったが、この時の風向は北東であった。このことから、倒壊には風向も重要な要素であったと考える。なお、これらをもとに風圧及び速度分布の解析を行った結果、JMTR 施設内の建家の配置の影響により局所的（冷却塔の No. 4 セルの東面）にはさらに大きな水平荷重（風荷重）が生じていた可能性がある（添付資料 4 ⑫風雨の影響

響 参照)。

(3) 冷却塔の倒壊に至った経緯の推定

木材の腐朽が確認されたことから、⑫風雨の影響で調査した台風 15 号による最大瞬間風速 30.9m/s の東の風が発生した場合において、木材の腐朽による構造部材（筋かい）の耐力低下を考慮した解析を実施した。その結果、筋かいが健全であれば、最大瞬間風速 30.9m/s の水平荷重（風荷重）である速度圧 $q=40\text{kgf/m}^2$ に耐えることを確認した。一方、木材の腐朽の程度を調査するために実施した筋かいの針貫入試験結果による残存断面積比に基づき、耐力低下を考慮した評価を行った結果、冷却塔が倒壊に至ることが推定できた。冷却塔は、①構造設計の影響で示した特殊な構造により、腐朽による劣化の程度が大きい部材を有する一構面が水平荷重（風荷重）を負担できなくなると、隣接する構面が水平荷重（風荷重）を負担して部材の軸力増加と部材の破断が隣接する構面に連鎖的に進むことから、冷却塔全体が損傷し、倒壊に至ったと推定される（添付資料 5 木材の腐朽を考慮した解析検討による倒壊原因の推定 参照）。

この検討結果に基づき、冷却塔の倒壊に至った経緯を以下のとおり推定した。

- ① 冷却塔は、水平荷重（風荷重）である速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$ （最大瞬間風速 63m/s 相当）に耐えられるように設計されていた。一方、冷却塔の主構造部材は木材であるが、冷却塔は特殊な構造であり、一般的な木造建築とは異なり、水平荷重（風荷重）を構造部材のうち筋かいのみが負担し、一構面の筋かいの機能が喪失した場合、隣接する構面の筋かいの荷重が増加するため破断が連鎖的に進みやすく、ねばりが小さい構造であった。
- ② 平成 18 年（2006 年）8 月の JMTR の運転停止以降、長期間にわたり当該冷却塔を使用していないことにより乾湿を繰り返し、構造部材である木材の腐朽を促進する条件が整い、木材内部の腐朽が進行した。特に、冷却塔の東西方向の 17 構面（No. 1～No. 17）のうち、構面 No. 10、13 及び 15 の筋かい下端部（接合部）において、木材の残存断面積がほとんどない状況であった。
- ③ ①に示す特殊な構造について十分把握できておらず、また、木材の腐朽に関するリスクや定期的な点検の必要性についてメーカーと十分共有できていなかったため、これらが設定した点検項目や方法、並びに部材等の更新計画に反映されていなかった。
- ④ ③に示す状況により、筋かい等の構造部材に対しては、目視による点検を行い、破損等を確認した木材について補修、交換する対応を行っていた。目視による点検では木材内部の腐朽が把握できなかつたため、②に示す木材内部の腐朽の進行により、特に、構面 No. 10、13 及び 15 の筋かい下端部（接合部）において、著しい耐力低下が生じた。
- ⑤ 水平荷重（風荷重）に対する耐力低下を把握していない状況において、台風 15 号による、水平荷重（風荷重）に対して最も影響を受ける真東の強風（最大瞬間風速 30.9m/s）により、残存耐力を上回る水平荷重（風荷重）が発生した。これにより複数の筋かいが破断し、①に示した特殊な構造のため隣接する構面にその現象が連鎖して冷却塔の倒壊に至った。

8.2 原因分析

「8.1 原因調査」に示した冷却塔の倒壊に至った経緯の推定に基づき、原因分析を行った結果、以下に示す4つの原因が重なって生じることにより冷却塔の倒壊に至ったと特定した。

(1) 冷却塔の特殊な構造について十分把握していなかったこと。

「8.1 原因調査」に示した冷却塔の特殊な構造について十分把握できていなかった。そのため、これに見合った保守・点検計画になっていなかった。

(2) 実施していた点検では、木材内部の腐朽を把握できていなかったこと。

冷却塔については目視による点検を実施していたが、木材内部の腐朽を考慮しておらず、このような点検方法では木材内部の腐朽が把握できなかった。

(3) 使用環境が大きく変わったこと。

冷却塔を長期間使用しないことにより木材の腐朽の条件が整いやすくなり、使用環境が大きく変わった。また、その際に保守・点検計画の見直しを行っていなかった。

(4) 影響が最も大きくなる風向で水平荷重（風荷重）を受けたこと。

台風15号により、水平荷重（風荷重）に対して最も影響を受ける真東の強風を受けた。

9. 対策

倒壊した冷却塔は、JMTR原子炉施設の廃止措置の中で解体・撤去を行う予定（廃止措置計画認可申請済）であり、建て替えは行わないことから、倒壊事象が再発することはない。したがって、冷却塔と同種である木造の原子力施設の設備の倒壊を防止するため、冷却塔の倒壊に至った原因に対する再発防止対策を検討した。その結果、以下に掲げる対策を講ずる。

(1) 設備の特殊な構造についてメーカ情報等により把握し、その結果に応じて点検の見直し、補修、交換、補強等を行う。点検の見直しに当たっては、木材の腐朽が進行しやすい箇所を特定して重点的に点検が行えるように点検・保守計画を策定する（原因(1)の対策）。

(2) 木材内部の腐朽を把握するため、目視による点検に加え、木材内部の腐朽に着目して年1回打音点検等を計画的に行い、疑義が生じた部位には超音波測定器等を用いた腐朽具合の測定を行うとともに、点検結果に応じて補修、交換等を行うように点検・保守計画を定める（原因(2)の対策）。

(3) 設備を長期間使用しないことにより、設備の置かれた環境に、材料の劣化を促進させるような変化が生じる場合には、メーカと情報共有して維持管理上のリスク評価を行った上で、評価結果に応じて点検項目及び頻度を追加・削除・変更する等の必要な措置を講ずる（原因(3)の対策）。

(4) 対策(1)～対策(3)において、必要な点検の見直し、補修、交換、補強等が完了するまでの間、設備に台風等の自然現象の影響が生じるおそれがある場合は、応急的に補強等を行う（原因(4)の対策）。

10. 再発防止に向けた水平展開

再発防止に向けた水平展開として、JMTR 施設のうち、同種の冷却塔である UCL 系統冷却塔に対して、今回の原因調査及び原因分析に基づいて早急に健全性調査を開始した。調査結果に基づいて、点検の見直し、補修、交換、補強等の対応を行う。また、これらの対応が完了するまでの間、台風等の強風の対策として行っている 4 方向からのワイヤーロープによる固定は継続し、倒壊した場合の周辺への影響を軽減する（添付資料 6 参照）。

また、原子力施設の倒壊事象の再発を防止するため、原子力機構の各拠点に対し、次のとおり水平展開を行う。屋外にあり、かつ、建築基準法に基づく一般的な木造建築とは異なる構造である木造の原子力施設の設備に対し、既存の点検方法により構造部材（柱、梁、筋かい等）の劣化（腐朽、腐食等）の状態（兆候含む。）が把握できるか否かを確認する。劣化の状態を把握できない箇所がある場合は、当該設備に対して、今回の原因分析に対する対策に基づき、必要な措置を講ずる。さらに、原子力機構内にある木造の建家・設備が倒壊して安全上重要な設備に影響を与えるおそれがある場合は、必要な措置を講ずる。

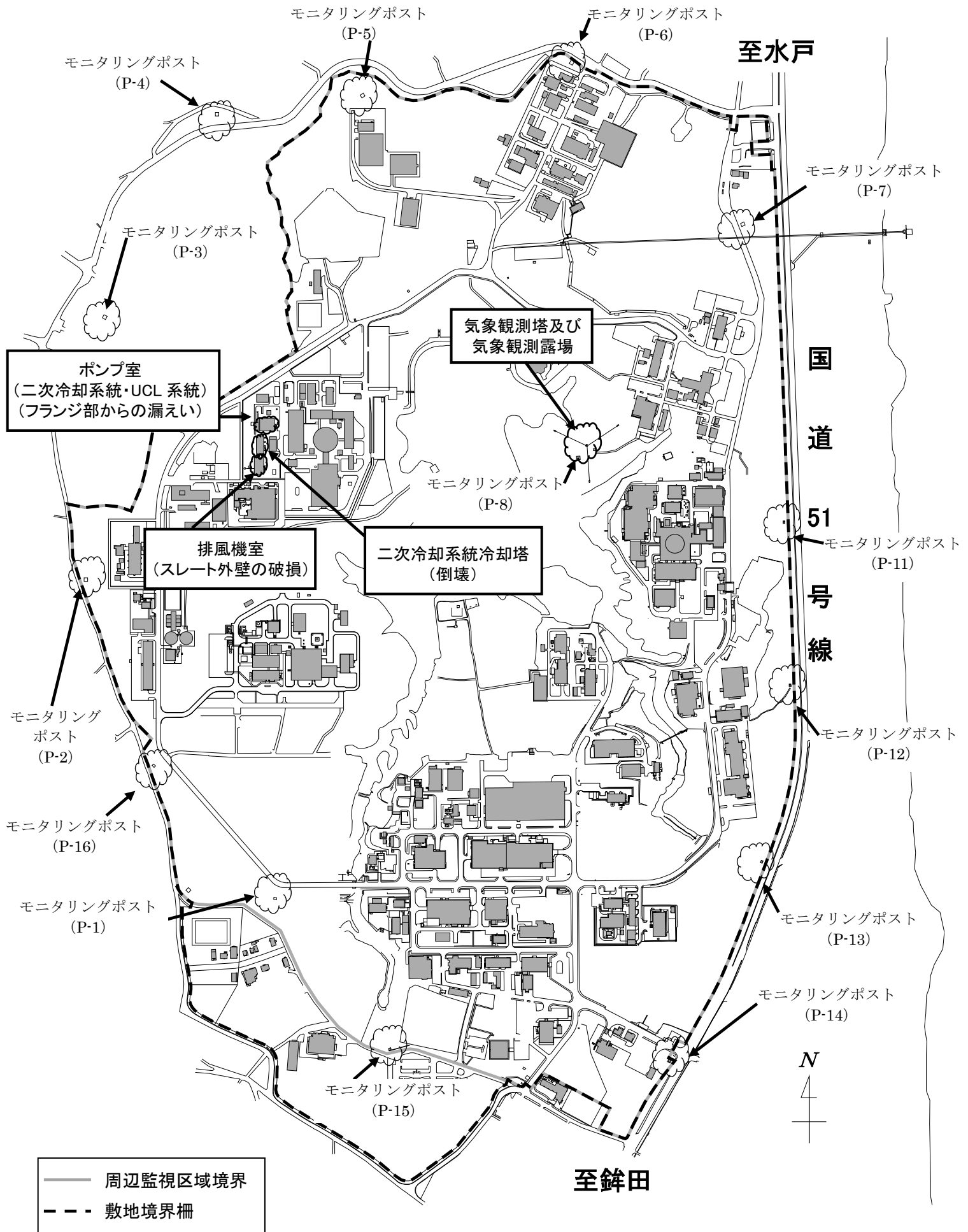


図 1 大洗研究所施設配置図

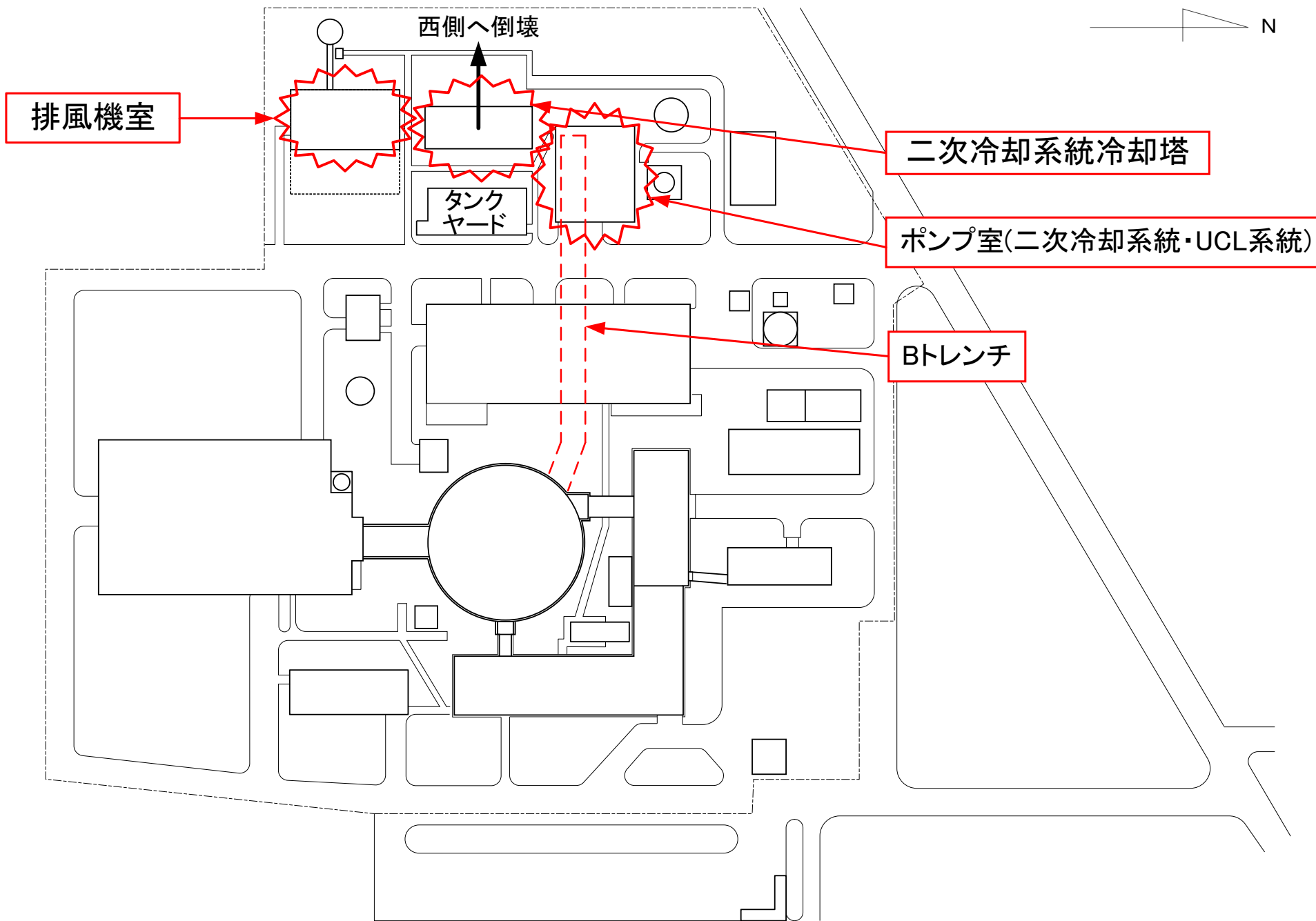
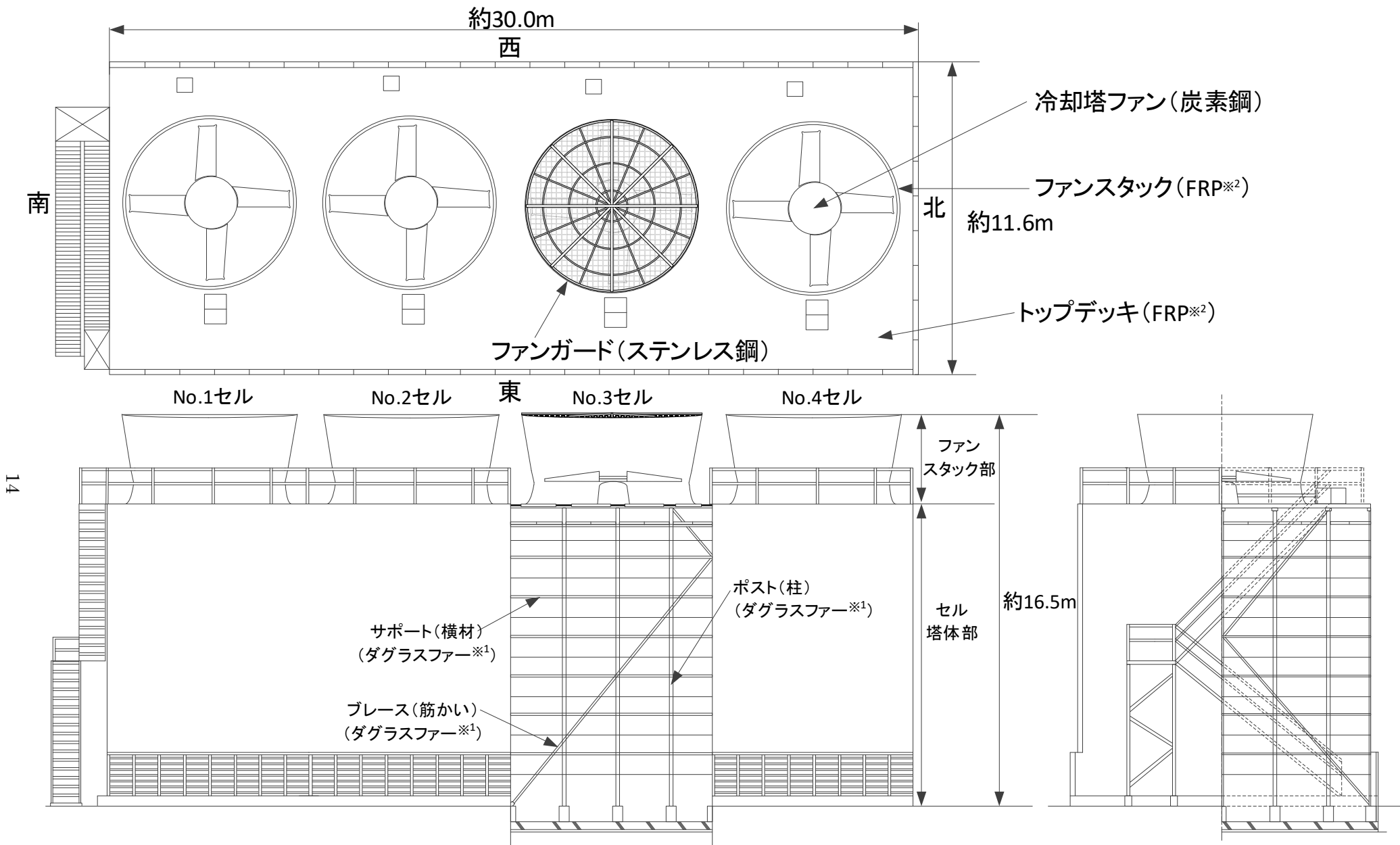


図2 J M T R 施設全体配置図



※1 ダグラスファー:米松

※2 FRP:繊維強化プラスチック

図3 二次冷却系統冷却塔概略図

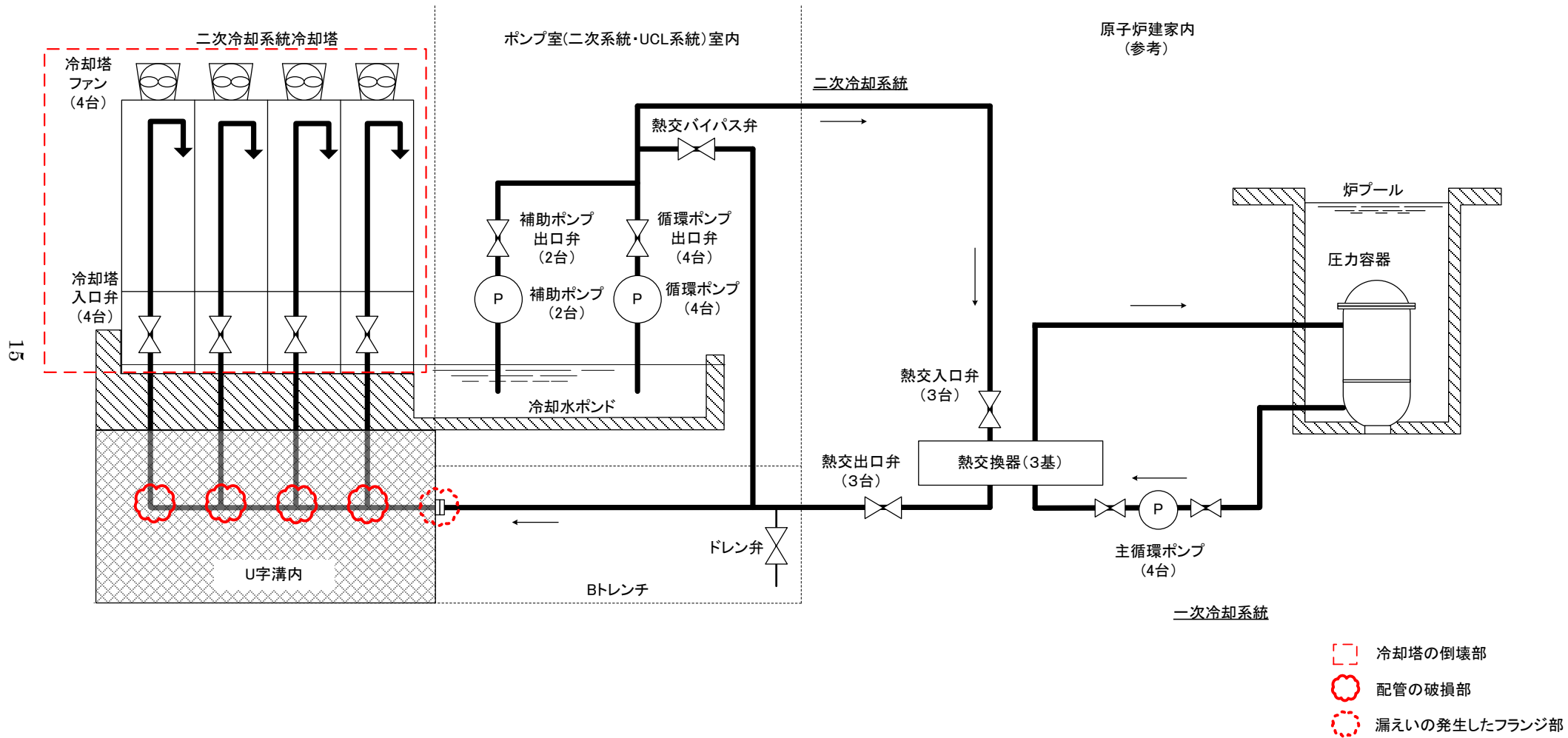


図4 二次冷却系統概略図

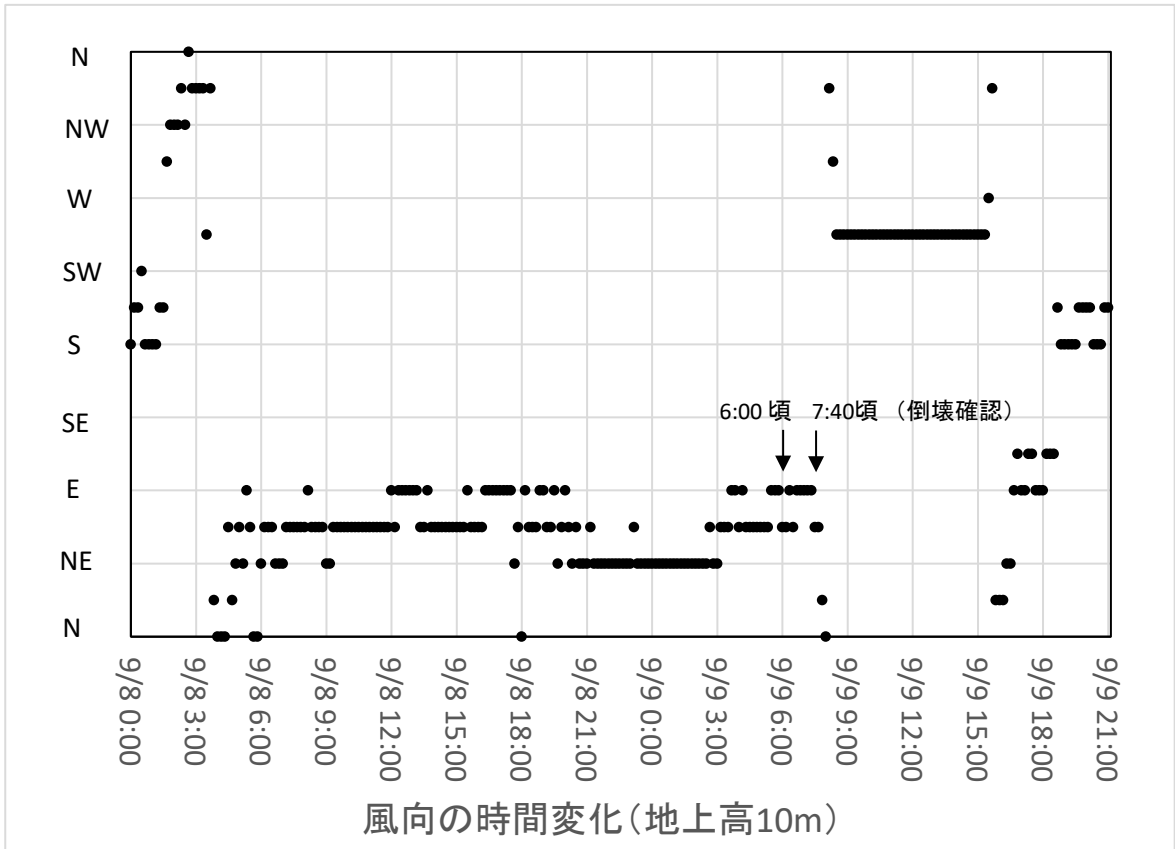
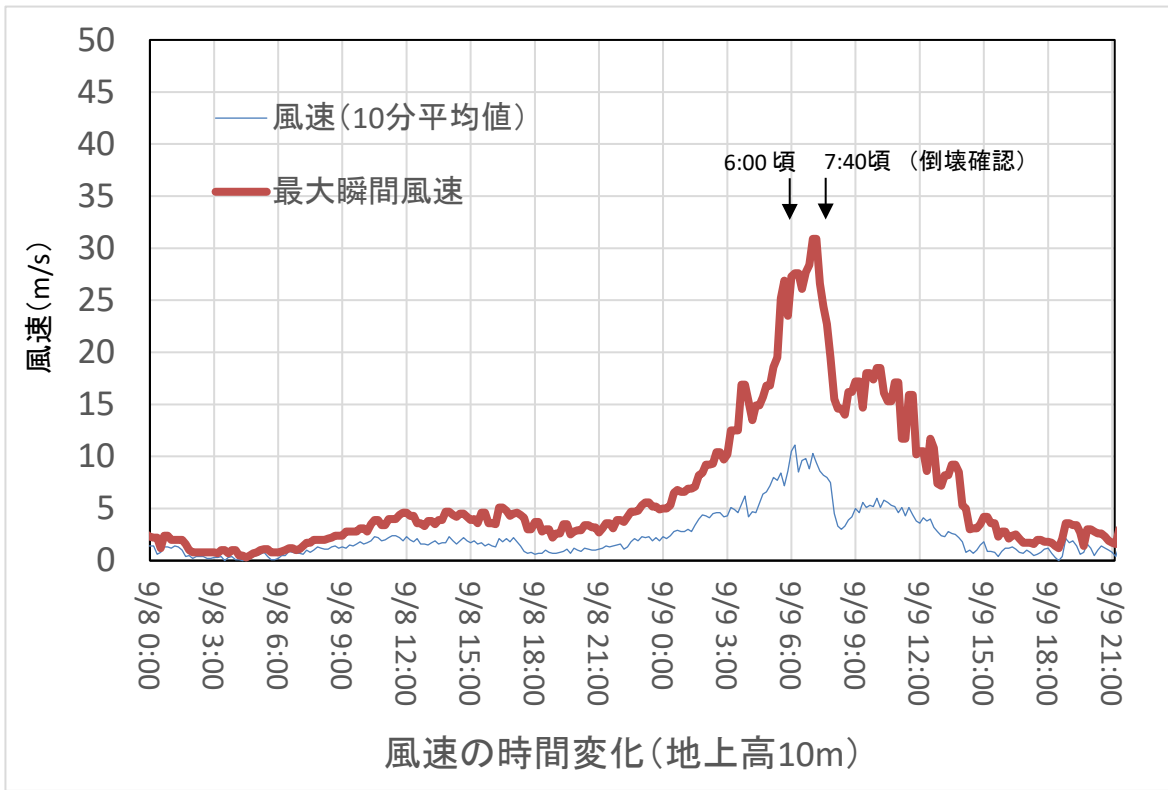


図5 風速及び風向の時間変化 (1/3)

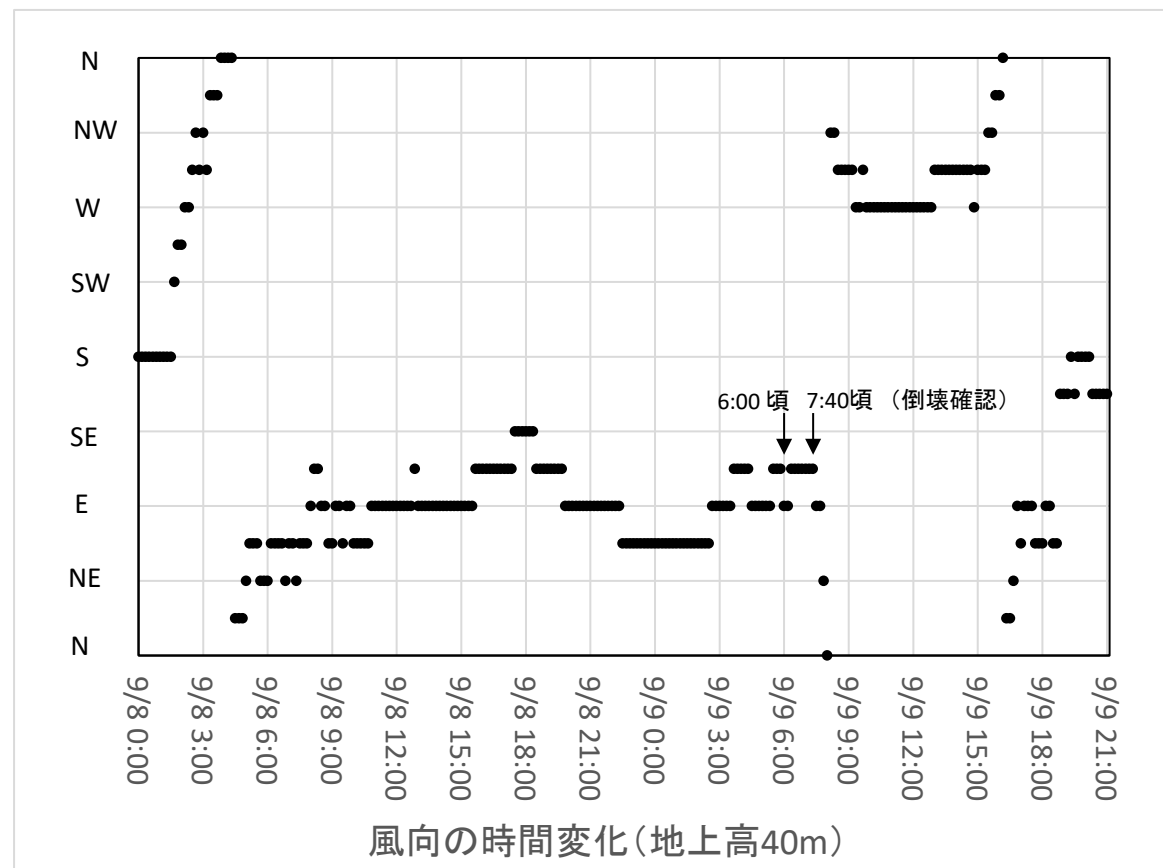
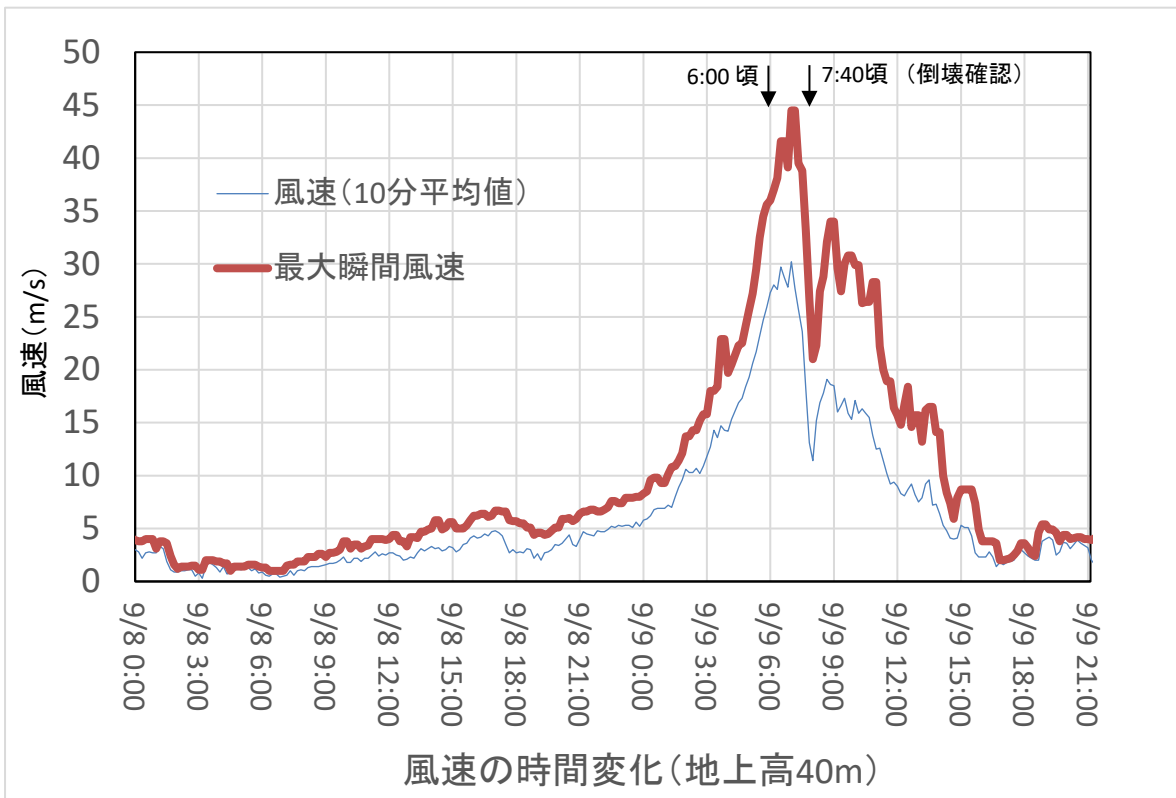


図5 風速及び風向の時間変化 (2/3)

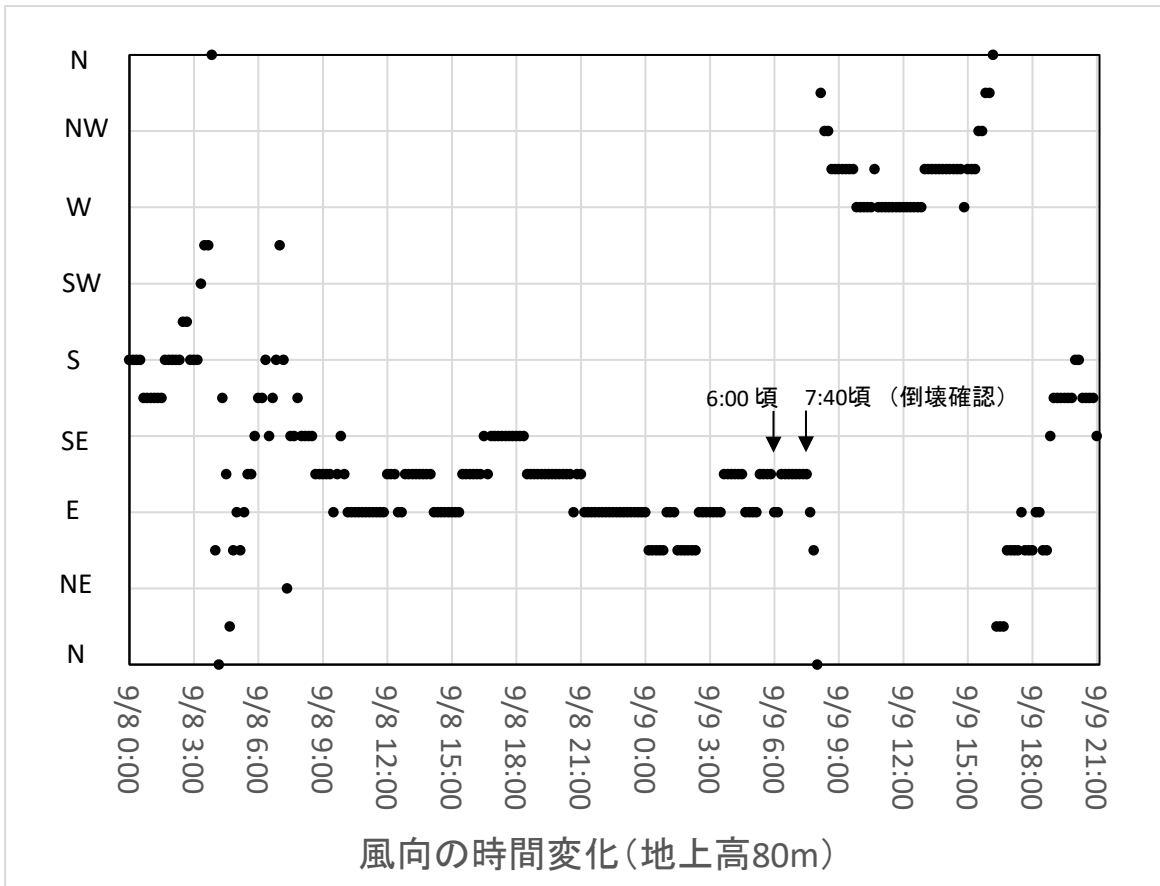
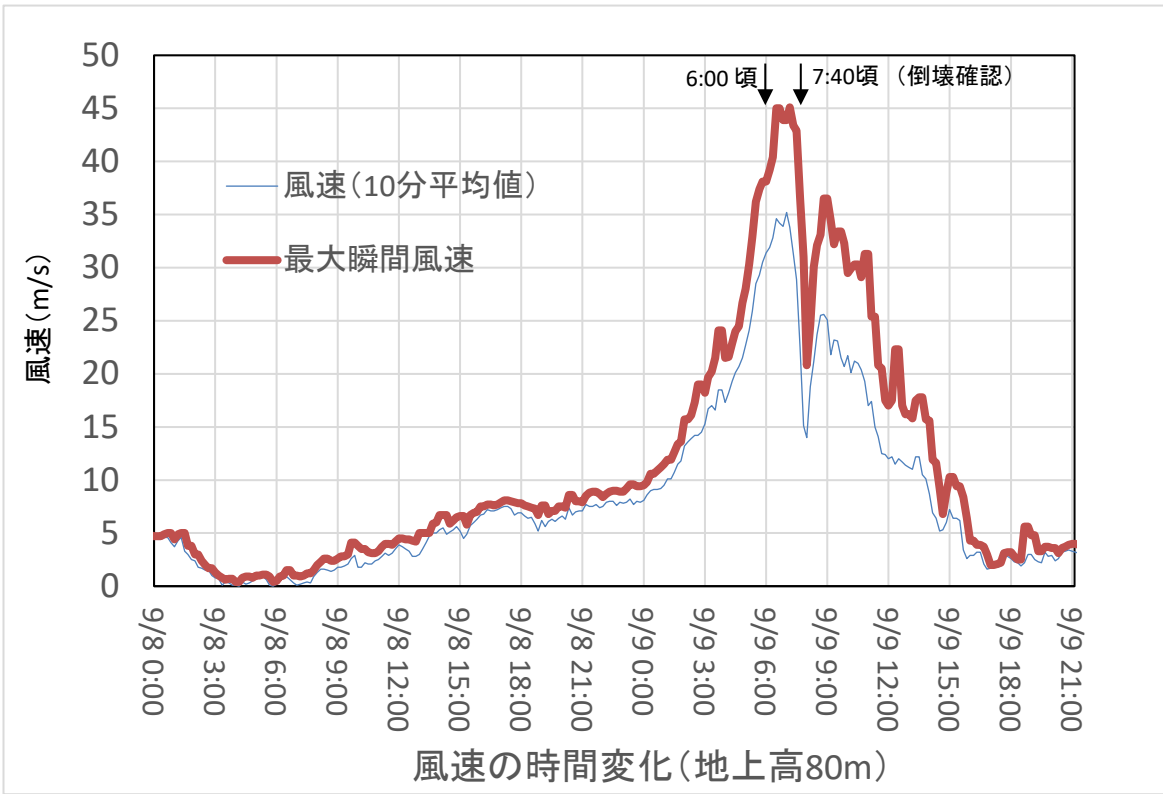


図5 風速及び風向の時間変化 (3/3)

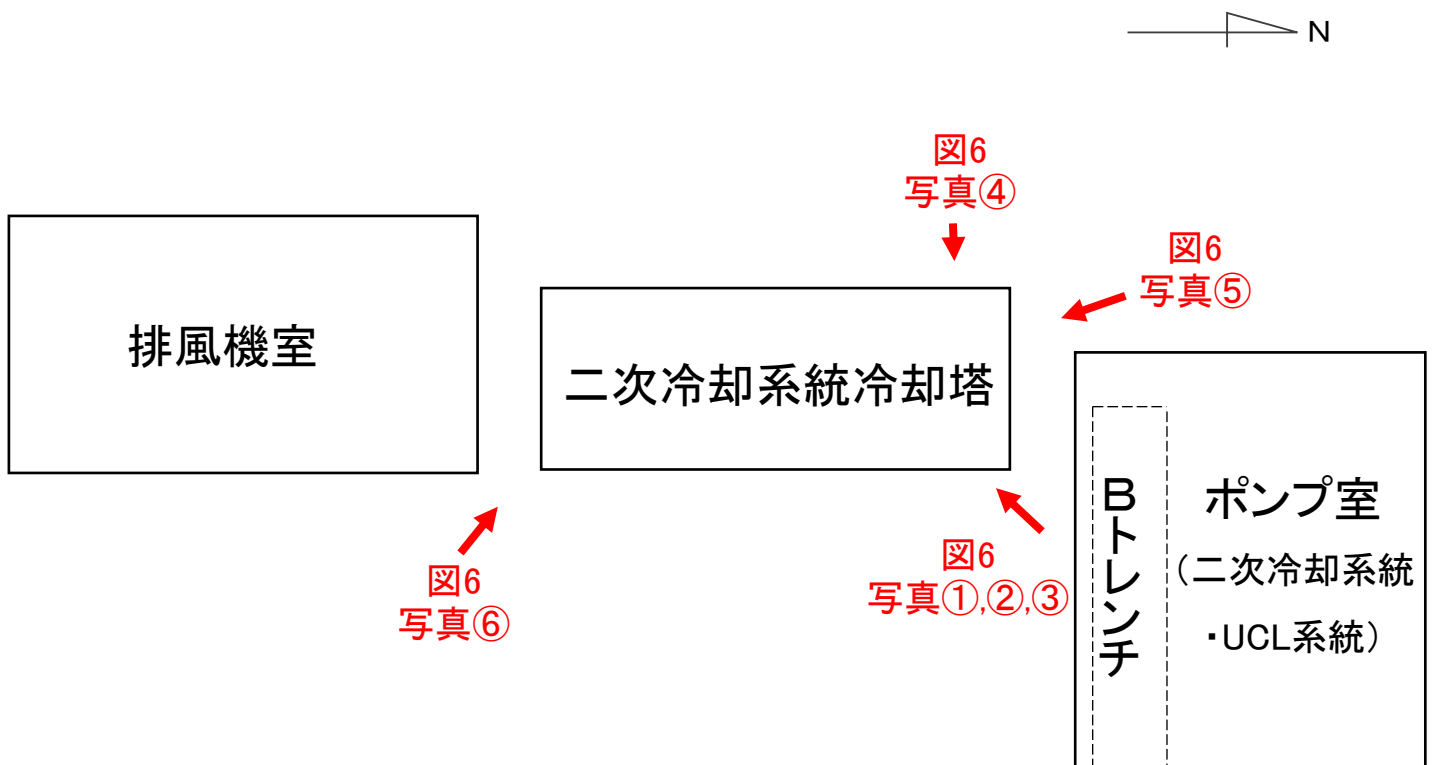


図6 二次冷却系統冷却塔の倒壊前と倒壊後の状況 (1/4)



写真① 倒壊前（平成30年2月16日撮影）



写真② 倒壊後（令和元年9月9日撮影）

図6 二次冷却系統冷却塔の倒壊前と倒壊後の状況（2/4）



写真③ 倒壊後 東側（令和元年9月9日撮影）



写真④ 倒壊後 西側（令和元年9月12日撮影）

図6 二次冷却系統冷却塔の倒壊前と倒壊後の状況（3/4）



写真⑤ 倒壊後 北側（令和元年9月12日撮影）



写真⑥ 倒壊後 南側（令和元年9月12日撮影）

図6 二次冷却系統冷却塔の倒壊前と倒壊後の状況（4/4）

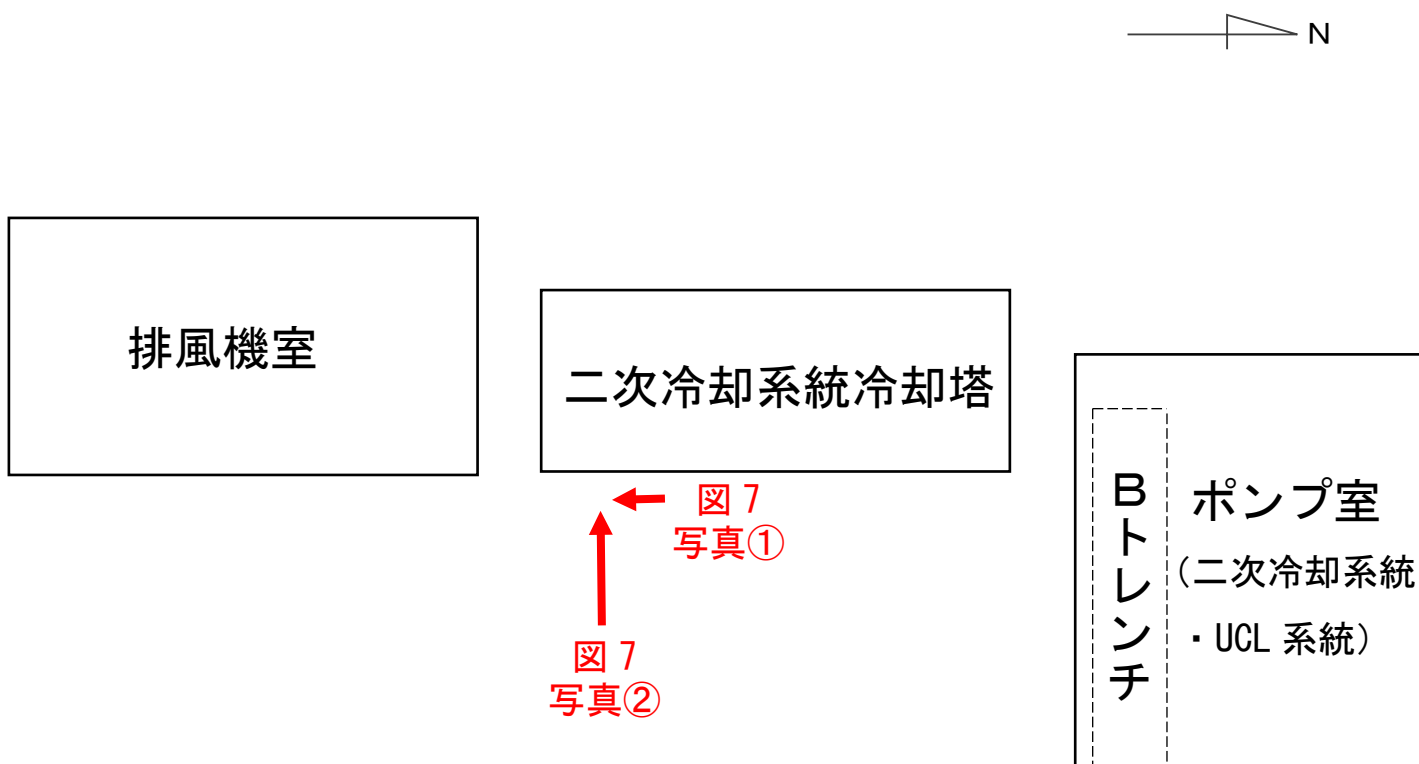
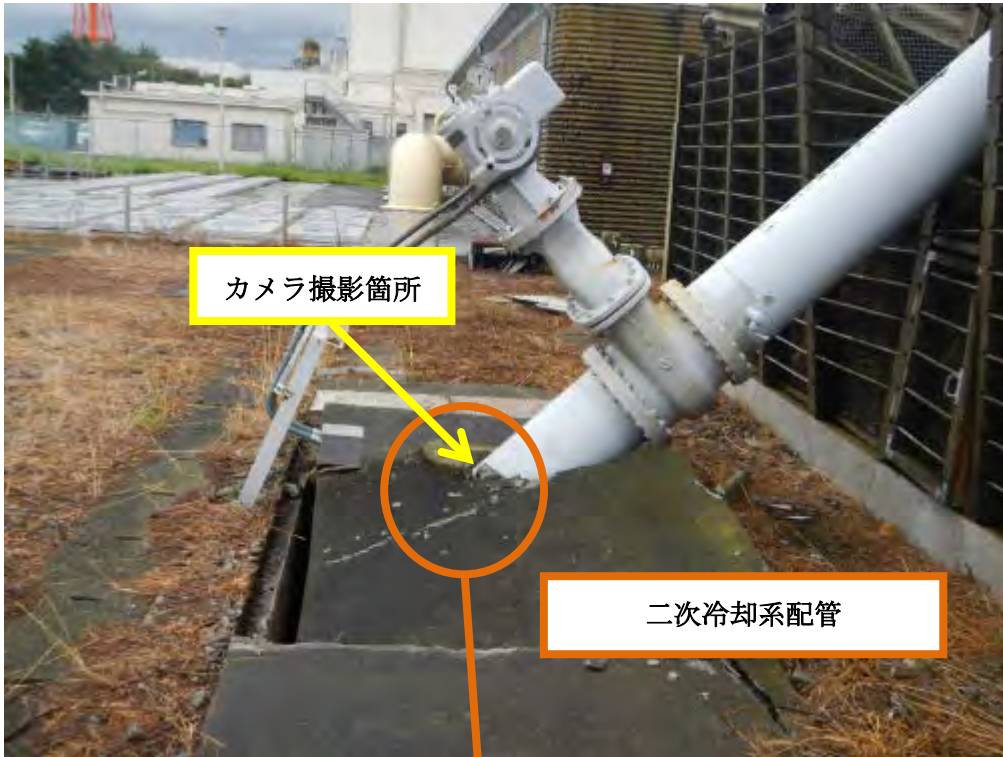


図7 破損した二次冷却系配管 (1/2)



写真①（令和元年9月9日撮影）

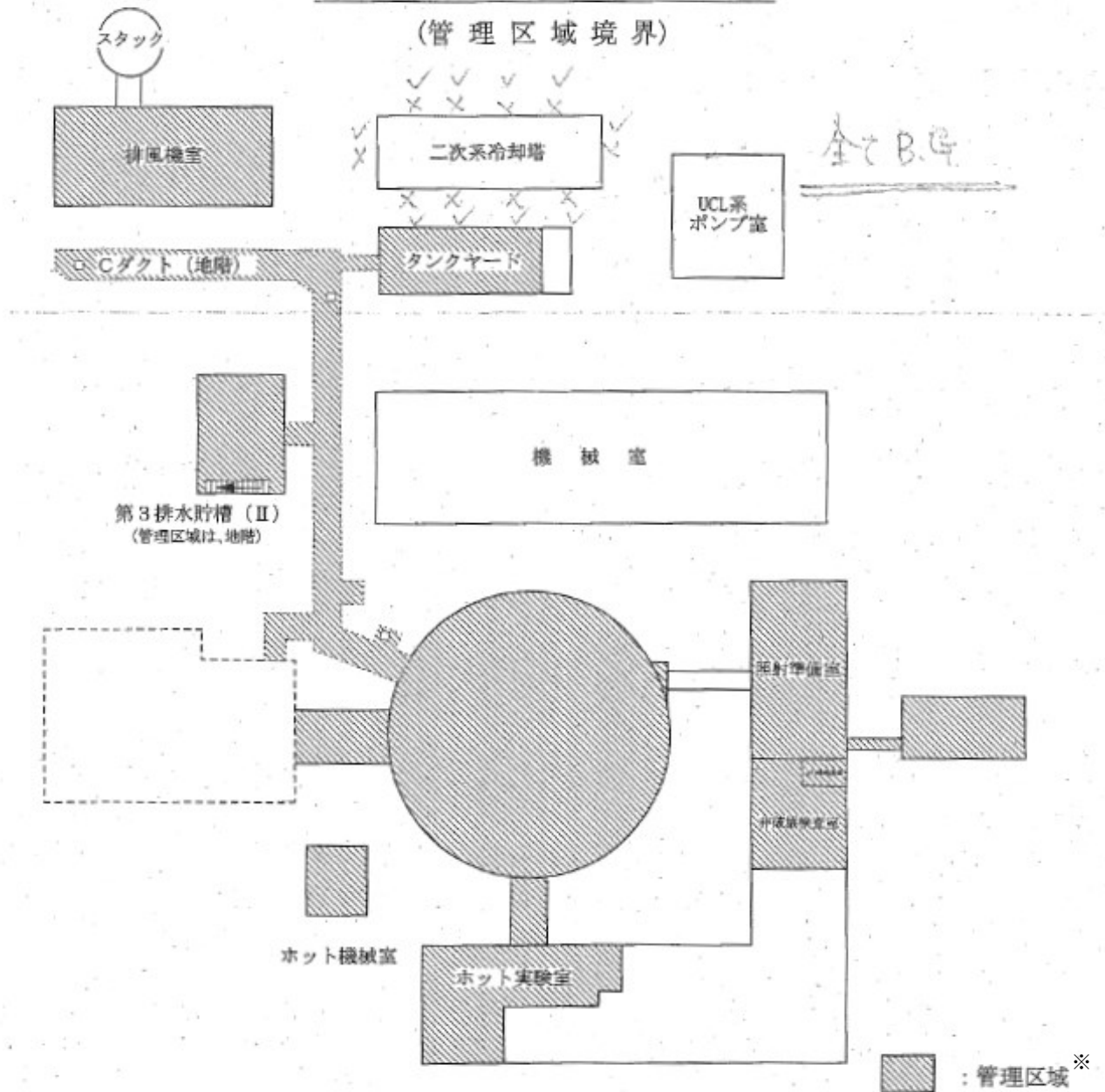


写真②（令和元年9月9日撮影）

図7 破損した二次冷却系配管（2/2）

線量当量率測定記録

(管理区域境界)



建屋名	JMTR	原子炉	<input type="checkbox"/> 運転中 (MW)
測定日時	R1年9月9日10:10~	運転状況	<input checked="" type="checkbox"/> 停止中
測定者	■■■■■	単位	μSv/h
測定線種	γ	備考	×印:測定点 レ印はB.Gを示す
測定器	GM-142		
B.G	0.2		
測定方法	サーベイ法 (床上1m)		

※：原子炉施設保安規定、核燃料物質使用施設等保安規定、放射線障害予防規程に基づく全ての管理区域を示す。
 なお、排風機室は、放射線障害予防規程に基づく第2種管理区域である。

個人情報保護の観点から■■の箇所は非開示とする。

図8 線量当量率測定記録

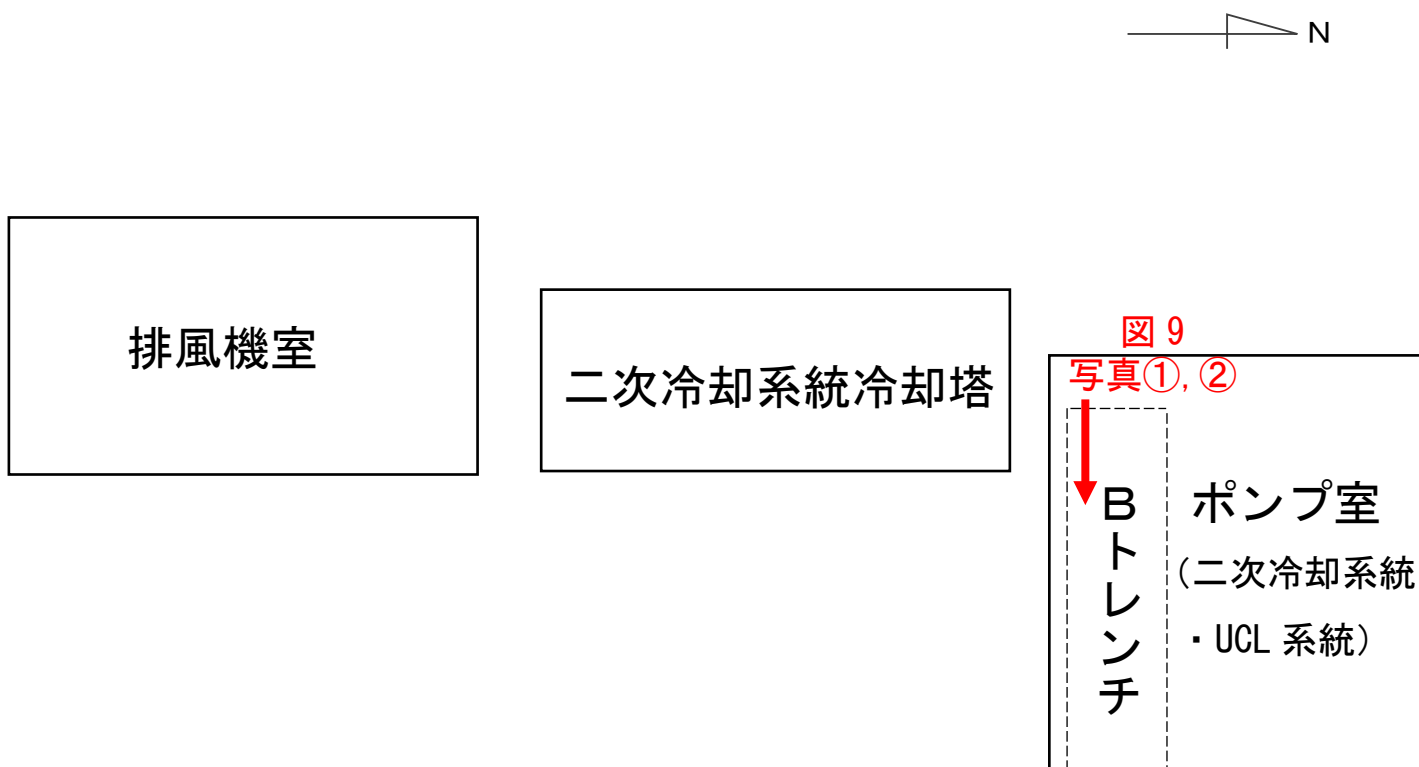
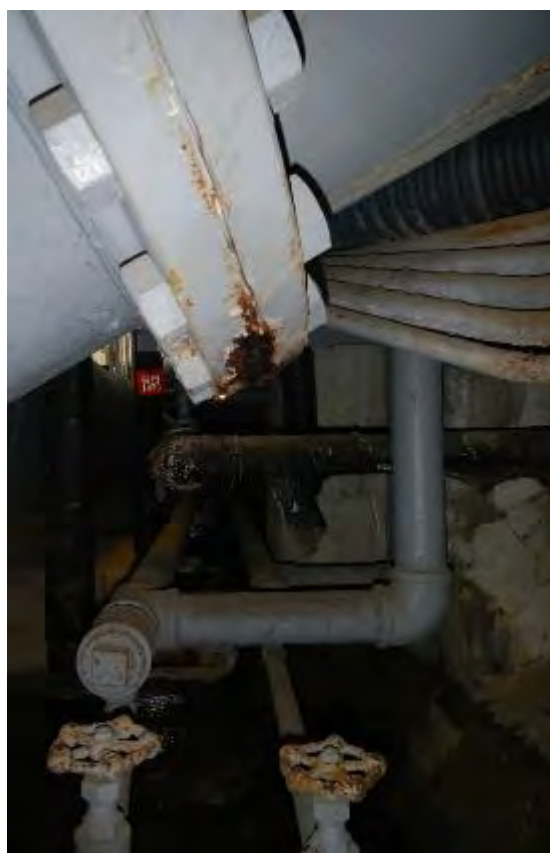


図 9 二次冷却系配管フランジ部からの漏えい (1/2)



写真① 二次冷却系配管 止水前
(令和元年9月9日撮影)



写真② 二次冷却系配管 止水後
(令和元年9月9日撮影)

図9 二次冷却系配管フランジ部からの漏えい (2/2)

2019-216-01-01

9/9 二次冷却システムサンプリグ水 3000秒

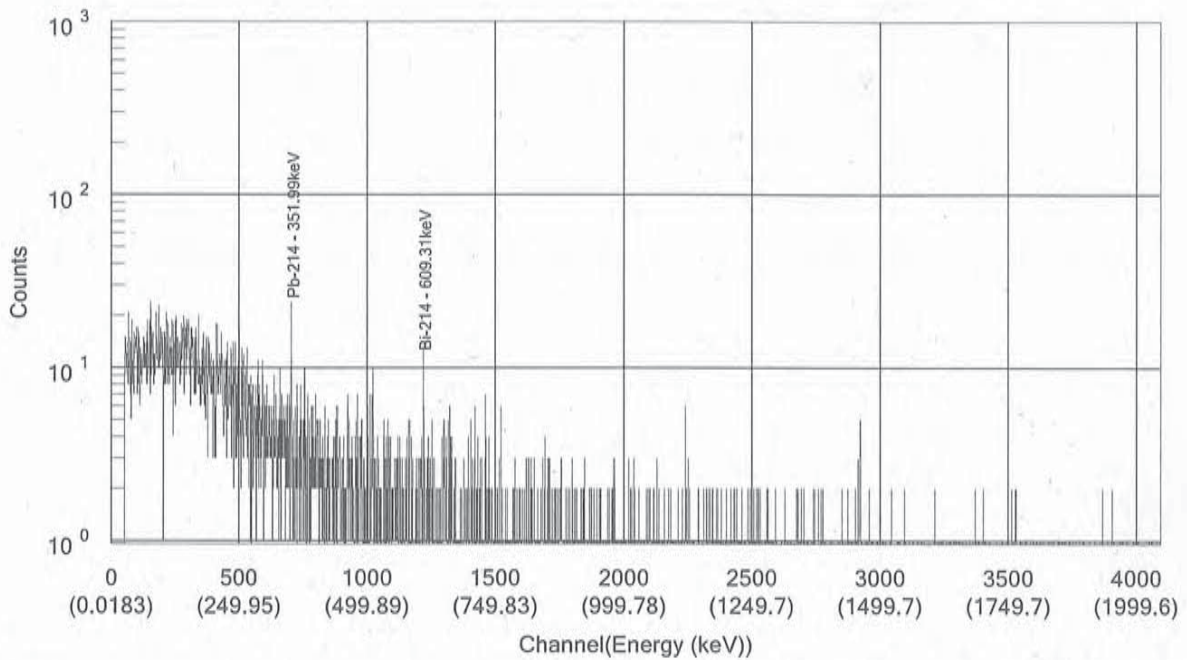
Acquired : 2019/09/09 11:30:15 Real Time : 3000.7 sec Live Time : 3000.0 sec

試料名 : 二次冷却システムサンプリグ水
採取場所 : 二次冷却系
検出器 : Ge-1
測定者 :
試料形状 : POLI100
供試料量 : 1.00000E+02 cm3
試料高さ : -

採取者 : 原子炉課
採取開始日時 : 2019年 09月 09日 11時 07分 00秒
採取終了日時 : 2019年 09月 09日 11時 07分 00秒
試料密度 : -

エネルギー校正 : ENE2019.04.23 HE-40-01-03
効率校正 : EFF2019.05.29 POLI100-01-05
ビークカウント補正(1) : BG200000 2019.5.31-01-01

校正日 : 2019年 05月 29日
校正日 : 2019年 05月 29日
測定日 : 2019年 05月 31日 分析日 : 2019年 06月 04日



個人情報保護の観点から■の箇所は非開示とする。

図10 二次冷却システムサンプリグ水測定記録

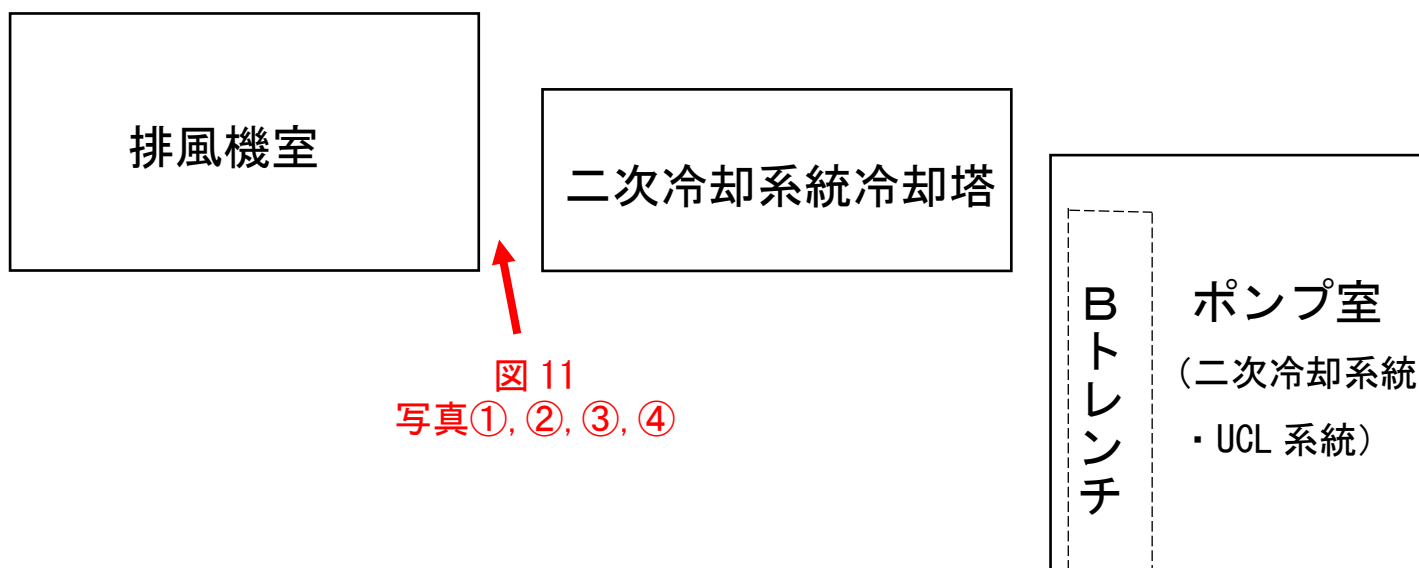
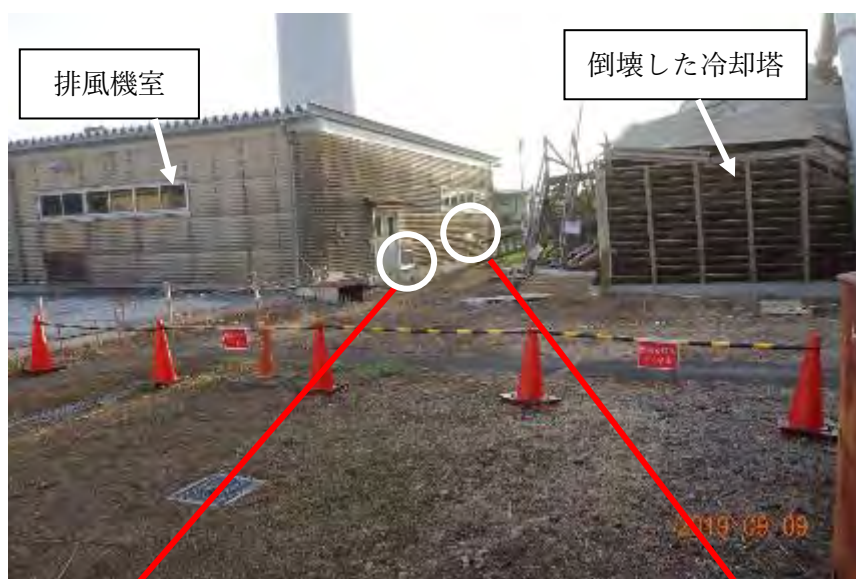


図 11 排風機室の破損箇所及び措置対応 (1/2)



写真① 補修前（令和元年 9 月 9 日撮影）



写真② 補修後（令和元年 9 月 9 日撮影）

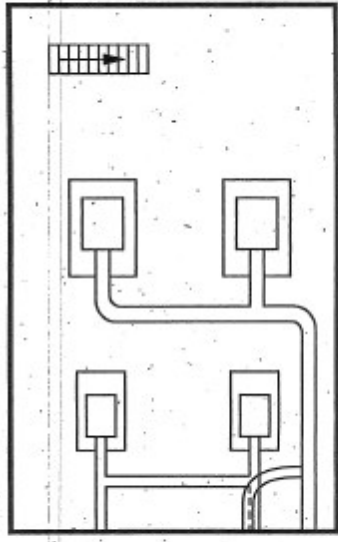


写真③ 補修後(1)（令和元年 9 月 9 日撮影）

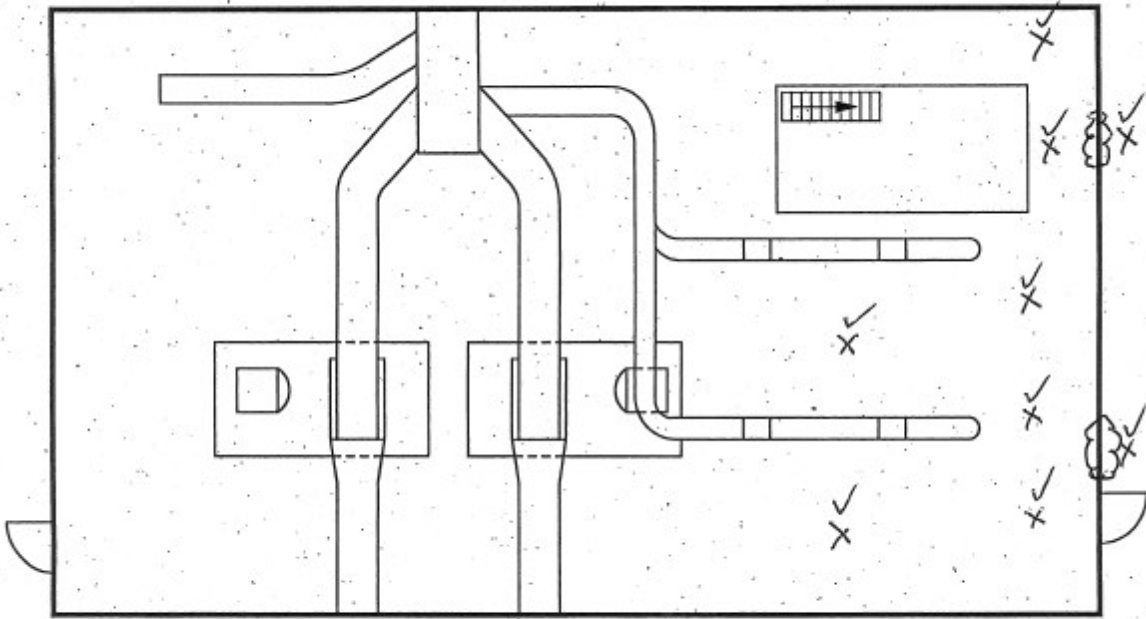


写真④ 補修後(2)（令和元年 9 月 9 日撮影）

図 11 排風機室の破損箇所及び措置対応（2/2）



B1F



1F

■ : 管理区域※

JMTR排風機室

⊙ : 壁破損部

課長	チムリゲン
[Redacted]	

線量当量率測定記録

線量当量率測定記録	
建家名	排風機室
測定日時	令和元年9月9日9:38~
測定者	[Redacted]
測定線種	γ線
測定器	GM管式(GM-504)
B.G	0.2 μSv/h
測定方法	サーベイ法 (床上約1m)
単位	μSv/h
原子炉	<input type="checkbox"/> 運転中 (MW) <input checked="" type="checkbox"/> 停止中
備考	X印: 測定点 レ印はB.Gを示す

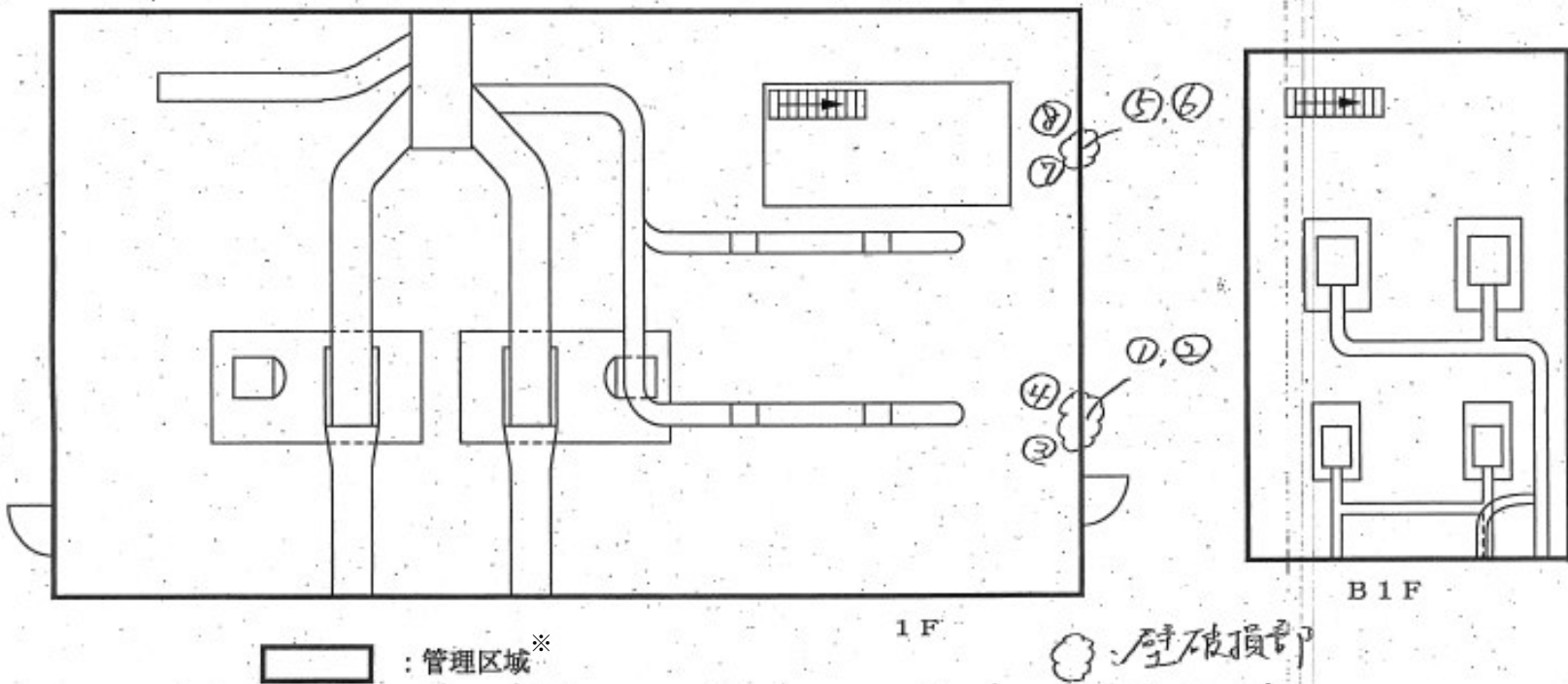
2019/9/9

※: 放射線障害予防規程に基づき管理区域を示す。
個人情報保護の観点から■の箇所は非開示とする。

図 12 線量当量率測定記録

別紙

表面密度測定点 (R1. 9. 9)



B1F

1F

JMTR排風機室

☁ 壁破損部
 ①, ②, ⑤, ⑥ 壁
 ③, ④, ⑦, ⑧, ⑨ 床

管理区域*

※：放射線障害予防規程に基づく管理区域を示す。

図 13 表面密度測定記録 (2/2)

別紙

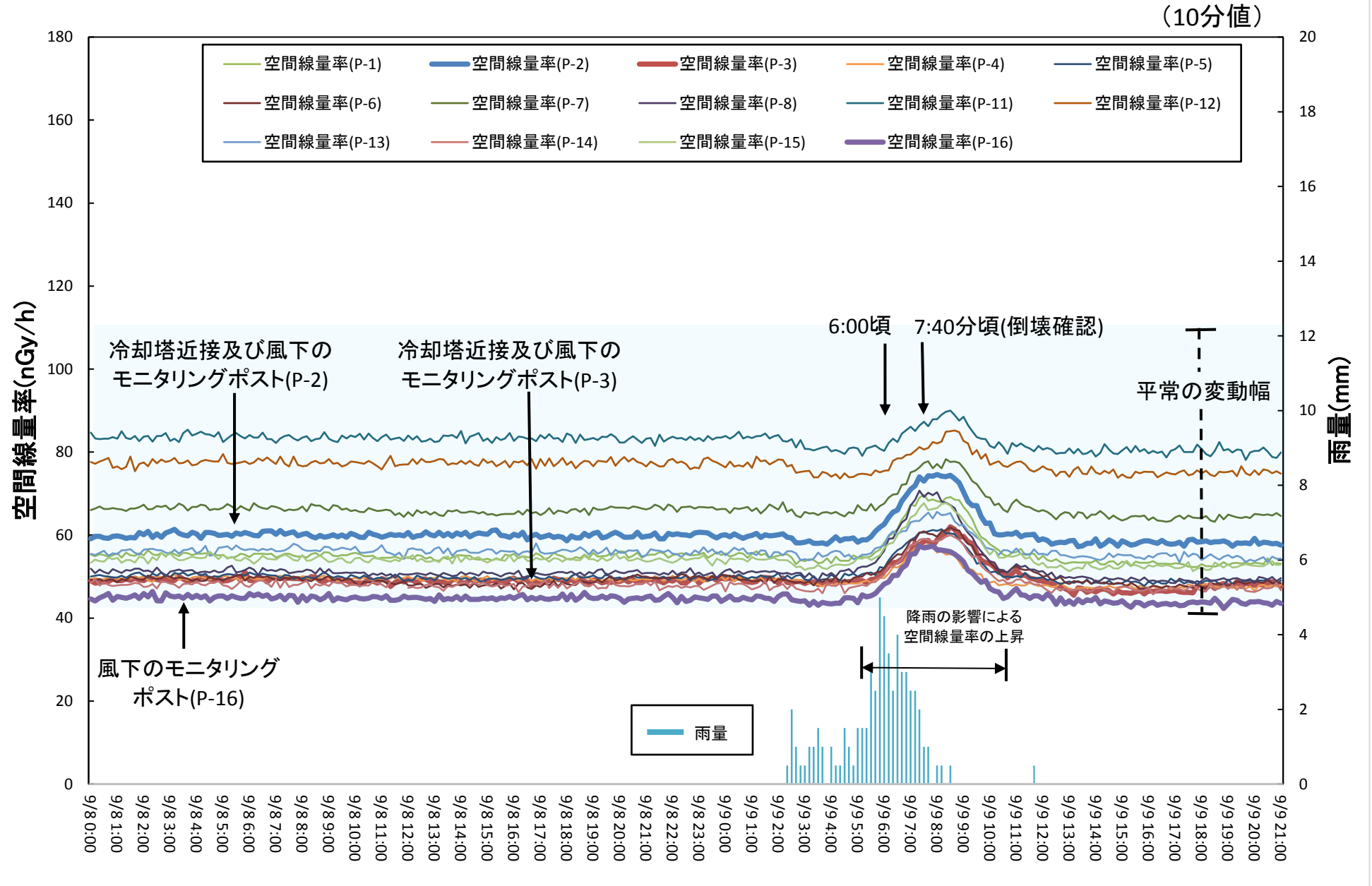


図14 モニタリングポストの指示値及び降水量



図 15
写真②



排風機室

二次冷却系統冷却塔

図 15
写真①



B
ト
レ
ン
チ

ポンプ室
(二次冷却系統
・ UCL 系統)

図 15 立入禁止措置の状況 (1/2)



写真① 冷却塔 東側（令和元年9月9日撮影）



写真② 冷却塔 西側（令和元年9月9日撮影）

図 15 立入禁止措置の状況（2/2）

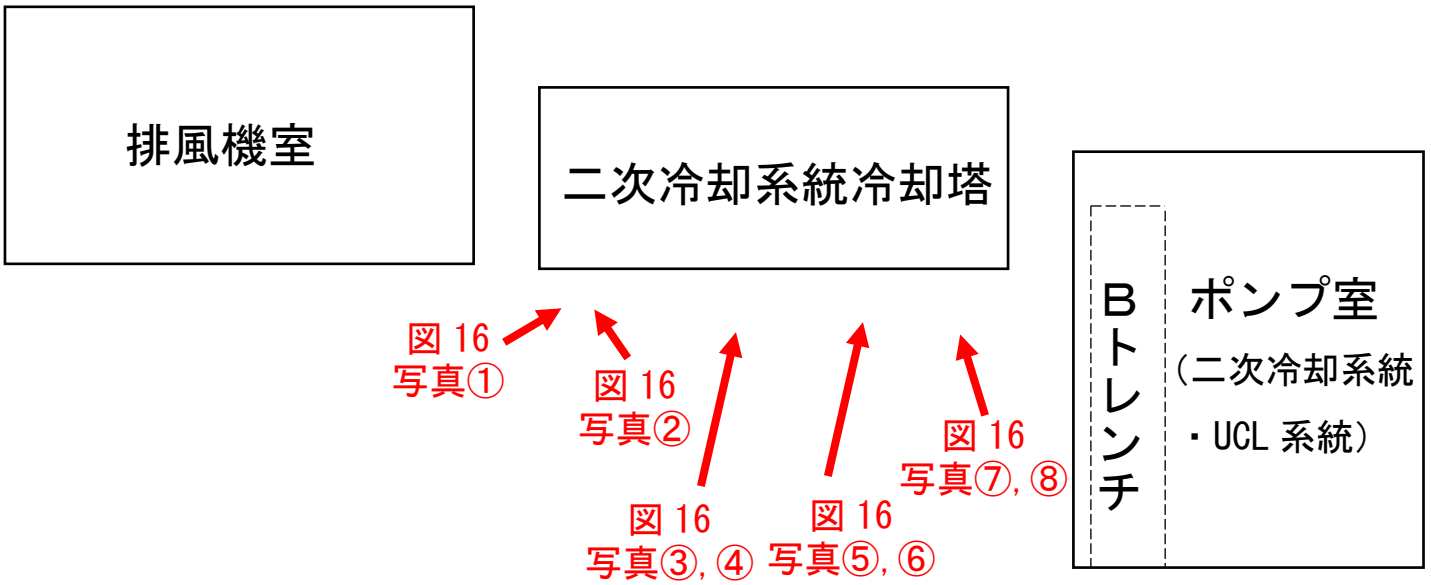
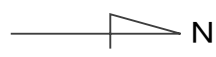


図 16 二次冷却系配管の破損箇所の養生 (1/5)



写真① 二次冷却系配管 (No.1 セル側) 養生前 (令和元年9月11日撮影)



写真② 二次冷却系配管 (No.1 セル側) 養生後 (令和元年9月11日撮影)

図 16 二次冷却系配管の破損箇所の養生 (2/5)



写真③ 二次冷却系配管 (No.2 セル側) 養生前 (令和元年9月11日撮影)



写真④ 二次冷却系配管 (No.2 セル側) 養生後 (令和元年9月11日撮影)

図 16 二次冷却系配管の破損箇所の養生 (3/5)



写真⑤ 二次冷却系配管 (No.3 セル側) 養生前 (令和元年9月11日撮影)



写真⑥ 二次冷却系配管 (No.3 セル側) 養生後 (令和元年9月11日撮影)

図 16 二次冷却系配管の破損箇所の養生 (4/5)



写真⑦ 二次冷却系配管 (No.4 セル側) 養生前 (令和元年 9 月 11 日撮影)



写真⑧ 二次冷却系配管 (No.4 セル側) 養生後 (令和元年 9 月 11 日撮影)

図 16 二次冷却系配管の破損箇所の養生 (5/5)

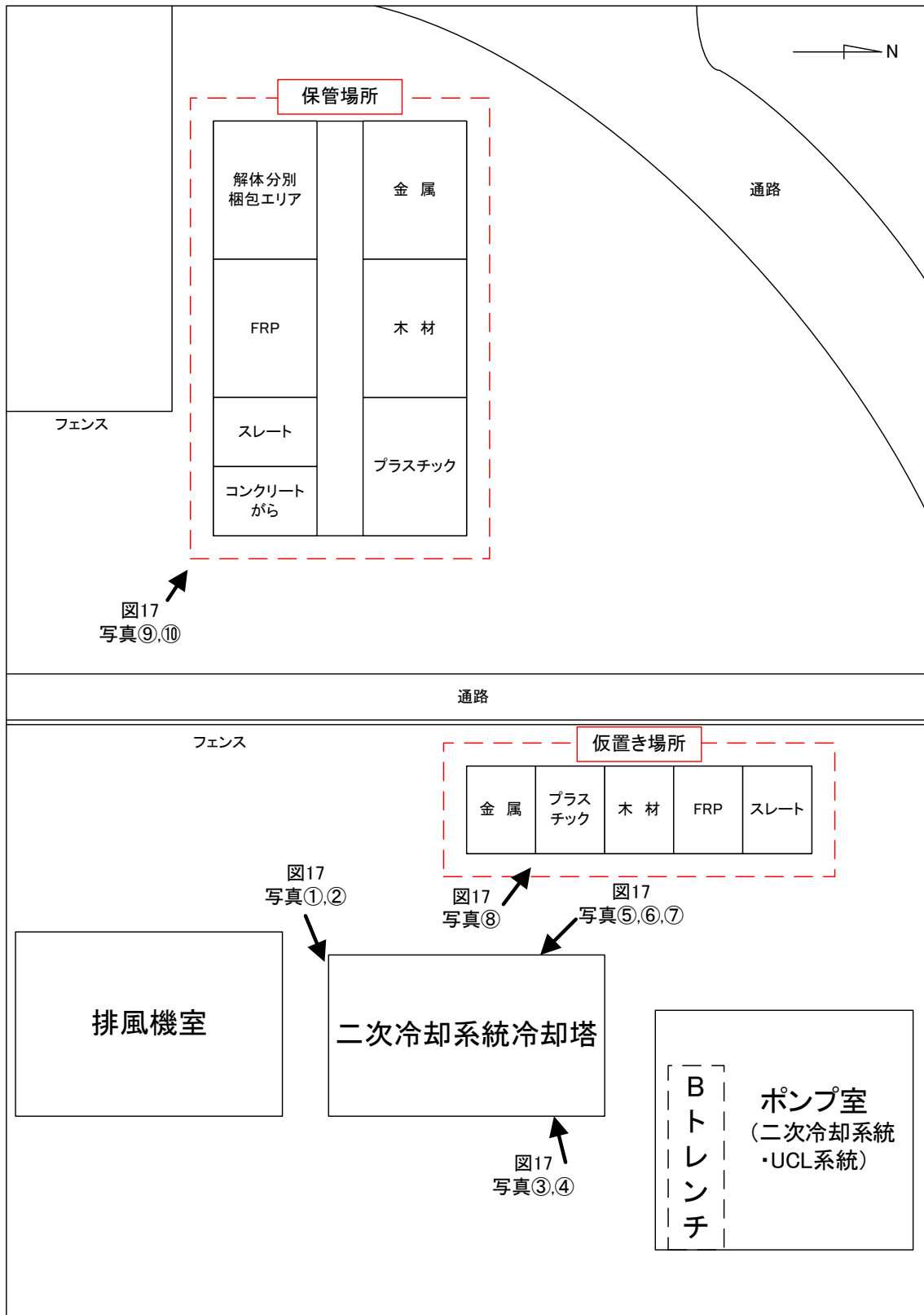


図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況 (1/6)



写真① 撤去前状況(南側) (令和元年10月7日撮影)



写真② 撤去中状況(南側) (令和元年10月24日撮影)

図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況 (2/6)



写真③ 撤去前状況(東側) (令和元年10月3日撮影)



写真④ 撤去中状況(東側) (令和元年10月24日撮影)

図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況 (3/6)



写真⑤ 撤去前状況(西側) (令和元年9月12日撮影)



写真⑥ 撤去中状況(西側) (令和元年12月11日撮影)

図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況 (4/6)



写真⑦ 撤去後状況(西側) (令和2年1月31日撮影)



写真⑧ がれき等の仮置き状況 (令和元年10月30日撮影)

図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況 (5/6)



写真⑨ がれき等の保管場所の状況（令和元年12月11日撮影）



写真⑩ がれき等の保管場所の状況（令和2年2月3日撮影）

図 17 二次冷却系統冷却塔のがれき等の撤去状況（6/6）

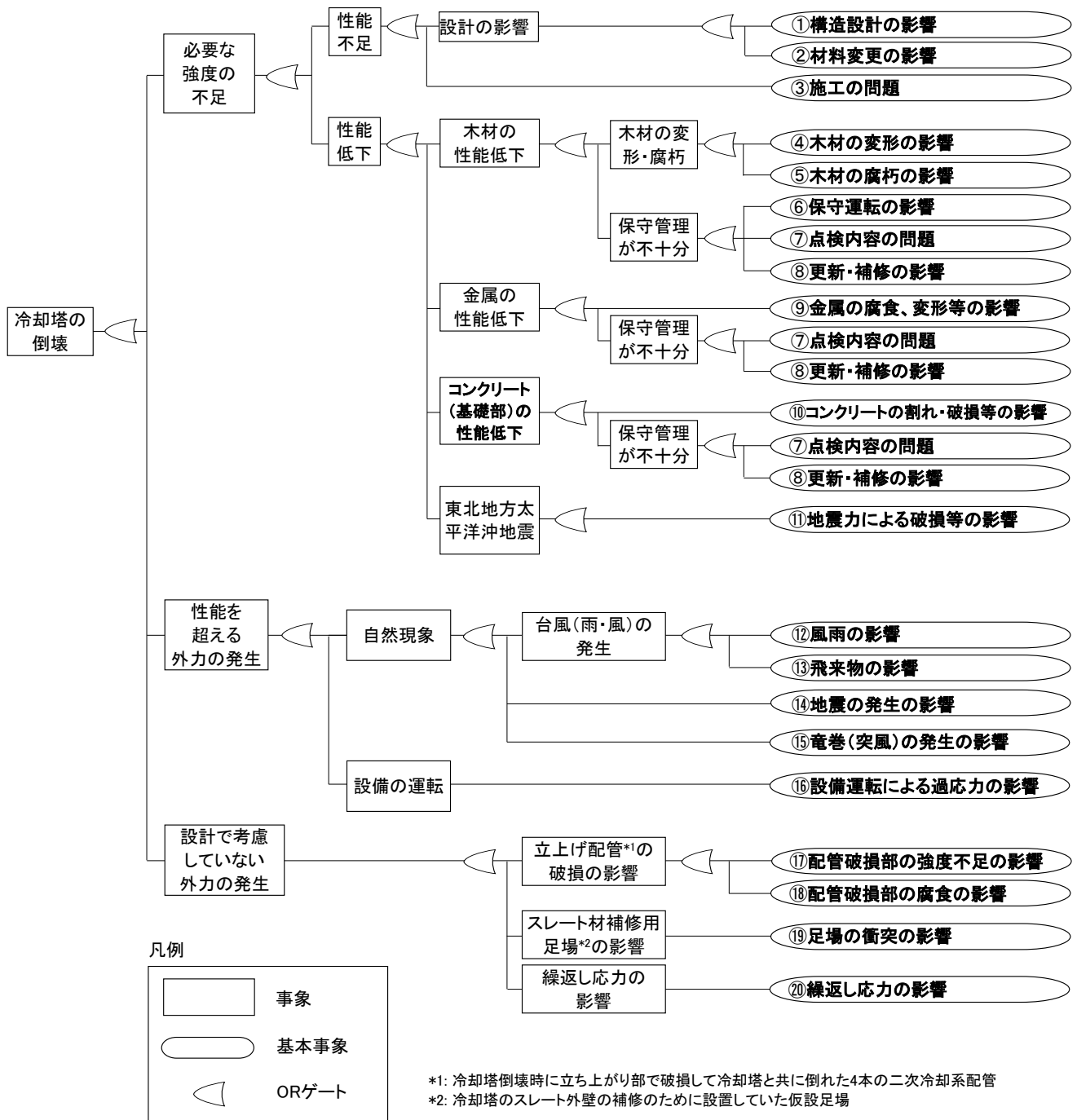


図 18 二次冷却系統冷却塔の倒壊要因に係るフォルトツリー図

表1 風向、風速、雨量の観測結果 (1/3)

	地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]		地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]
	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速			風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	
		[m/s]			[m/s]			[m/s]					[m/s]			[m/s]			[m/s]		
2019/9/8 0:00	S	1.4	2.3	S	3	3.9	S	4.5	4.7	0	2019/9/8 8:10	E	1.1	2	ESE	1.3	2.3	SE	1.6	2.3	0
2019/9/8 0:10	SSW	1.4	2.2	S	2.8	3.8	S	4.4	4.7	0	2019/9/8 8:20	ENE	1.1	2.1	ESE	1.4	2.3	SE	1.6	2.6	0
2019/9/8 0:20	SSW	0.6	2.2	S	2.2	3.8	S	4.4	4.7	0	2019/9/8 8:30	ENE	1.3	2.2	E	1.4	2.3	SE	1.5	2.6	0
2019/9/8 0:30	SW	0.8	1.2	S	2.7	4	S	4.6	4.9	0	2019/9/8 8:40	ENE	1.4	2.4	E	1.4	2.6	ESE	1.4	2.4	0
2019/9/8 0:40	S	1.3	2.4	S	2.8	4	SSE	4.6	5	0	2019/9/8 8:50	ENE	1.2	2.4	ENE	1.5	2.6	ESE	1.5	2.4	0
2019/9/8 0:50	S	1.3	2.4	S	2.7	4	SSE	4.1	5	0	2019/9/8 9:00	NE	1.3	2.4	ENE	1.6	2.3	ESE	1.8	2.6	0
2019/9/8 1:00	S	1.2	2	S	2.7	3.1	SSE	3.7	4.4	0	2019/9/8 9:10	NE	1.2	2.8	E	1.7	2.7	ESE	1.8	2.8	0
2019/9/8 1:10	S	1.4	2	S	3.3	3.8	SSE	4.3	4.9	0	2019/9/8 9:20	ENE	1.5	2.8	E	1.7	2.7	ESE	1.9	2.8	0
2019/9/8 1:20	SSW	1.3	2	S	3.1	3.8	SSE	4.6	5	0	2019/9/8 9:30	ENE	1.4	2.8	ENE	1.8	2.8	E	2.1	3	0
2019/9/8 1:30	SSW	1	2	S	1.9	3.6	SSE	3.3	5	0	2019/9/8 9:40	ENE	1.6	2.8	E	2	3	ESE	2.6	4.1	0
2019/9/8 1:40	WNW	0.4	1.6	SW	1.1	2.4	S	3	3.8	0	2019/9/8 9:50	ENE	1.8	3.1	E	2.3	3.8	SE	2.9	4.1	0
2019/9/8 1:50	NW	0.5	1	WSW	0.9	1.6	S	2.5	3.8	0	2019/9/8 10:00	ENE	1.6	3.1	ENE	1.8	3.8	ESE	1.8	3.8	0
2019/9/8 2:00	NW	0.2	0.8	WSW	0.9	1.2	S	2.4	3	0	2019/9/8 10:10	ENE	1.7	2.8	ENE	1.8	3.1	E	1.8	3.5	0
2019/9/8 2:10	NW	0.4	0.8	W	1	1.4	S	1.8	3	0	2019/9/8 10:20	ENE	1.9	3.5	ENE	2.2	3.5	E	2.2	3.5	0
2019/9/8 2:20	NNW	0.4	0.8	W	1	1.4	S	1.7	2.4	0	2019/9/8 10:30	ENE	2.3	3.9	ENE	2.2	3.5	E	2.1	3.2	0
2019/9/8 2:30	NW	0.4	0.8	WNW	1.1	1.4	SSW	1.5	2	0	2019/9/8 10:40	ENE	2.2	3.9	ENE	1.9	3.1	E	2.1	3.1	0
2019/9/8 2:40	N	0.2	0.8	NW	1.1	1.5	SSW	1.5	1.7	0	2019/9/8 10:50	ENE	1.9	3.4	E	2.2	3.3	E	2.4	3.1	0
2019/9/8 2:50	NNW	0.2	0.8	WNW	0.5	1.5	S	1	1.7	0	2019/9/8 11:00	ENE	2	3.4	E	2.2	3.4	E	2.5	3.3	0
2019/9/8 3:00	NNW	0.3	0.8	NW	0.8	1.1	S	0.8	1.3	0	2019/9/8 11:10	ENE	2.2	4	E	2.5	4	E	2.8	3.7	0
2019/9/8 3:10	NNW	0.3	0.7	WNW	0.3	1.1	S	0.7	1	0	2019/9/8 11:20	ENE	2.4	4	E	2.8	4	E	3.1	4	0
2019/9/8 3:20	NNW	0.4	1	NNW	1.4	2	SW	0.1	0.8	0	2019/9/8 11:30	ENE	2.4	4	E	2.4	4	E	2.9	4	0
2019/9/8 3:30	WSW	0	1	NNW	1.8	2	WSW	0.4	0.6	0	2019/9/8 11:40	ENE	2.2	4.4	E	2.6	4	E	3.1	3.9	0
2019/9/8 3:40	NNW	0.3	0.7	NNW	1.6	2	WSW	0.3	0.7	0	2019/9/8 11:50	ENE	1.9	4.6	E	2.5	3.9	E	3.5	4.2	0
2019/9/8 3:50	NNE	0.4	1	N	1.3	1.9	N	0.1	0.7	0	2019/9/8 12:00	E	2.3	4.6	E	2.7	4	ESE	3.9	4.5	0
2019/9/8 4:00	N	0.1	1	N	0.9	1.9	ENE	0.1	0.4	0	2019/9/8 12:10	ENE	2	4.3	E	2.7	4.4	ESE	3.7	4.5	0
2019/9/8 4:10	N	0.1	0.5	N	1.4	1.7	N	0	0.4	0	2019/9/8 12:20	E	1.8	4.3	E	2.5	4.4	ESE	3.5	4.4	0
2019/9/8 4:20	N	0	0.5	N	0.7	1.7	SSE	0.4	0.8	0	2019/9/8 12:30	E	2.1	3.6	E	2.4	3.8	E	3.3	4.4	0
2019/9/8 4:30	ENE	0.1	0.3	NNE	0.8	1	ESE	0.2	0.9	0	2019/9/8 12:40	E	1.6	3.6	E	2	3.8	E	2.8	4.3	0
2019/9/8 4:40	NNE	0.2	0.5	NNE	1.1	1.4	NNE	0.3	0.9	0	2019/9/8 12:50	E	1.6	3.3	ESE	2.1	3.3	ESE	2.8	4.2	0
2019/9/8 4:50	NE	0.4	0.7	NNE	1.2	1.4	ENE	0.5	0.8	0	2019/9/8 13:00	E	1.5	3.8	E	2.3	4.2	ESE	3	5	0
2019/9/8 5:00	ENE	0.5	0.8	NE	1.1	1.4	E	0.8	1	0	2019/9/8 13:10	E	1.7	3.8	E	2.2	4.2	ESE	3.5	5	0
2019/9/8 5:10	NE	0.6	1	ENE	1.2	1.4	ENE	0.8	1	0	2019/9/8 13:20	ENE	1.9	3.5	E	2.7	4.1	ESE	4.1	5	0
2019/9/8 5:20	E	0.8	1.1	ENE	1.3	1.6	E	0.9	1.1	0	2019/9/8 13:30	ENE	1.6	3.9	E	3.1	4.7	ESE	4.7	5	0
2019/9/8 5:30	ENE	0.4	1.1	ENE	1	1.6	ESE	0.6	1.1	0	2019/9/8 13:40	E	1.7	3.9	E	2.9	4.7	ESE	5	5.9	0
2019/9/8 5:40	N	0.1	0.8	NE	1.2	1.6	ESE	0.1	0.9	0	2019/9/8 13:50	ENE	1.7	4.7	E	3.1	4.9	ESE	5	6	0
2019/9/8 5:50	N	0.1	0.8	NE	0.8	1.4	SE	0	0.4	0	2019/9/8 14:00	ENE	2.3	4.7	E	3.3	5	ESE	5.3	6.7	0
2019/9/8 6:00	NE	0.2	0.8	NE	0.9	1.3	SSE	0.2	0.5	0	2019/9/8 14:10	ENE	1.9	4.4	E	3.1	5.8	E	5.5	6.7	0
2019/9/8 6:10	ENE	0.5	0.9	ENE	0.6	1.3	SSE	0.6	0.9	0	2019/9/8 14:20	ENE	1.6	4.2	E	3.2	5.8	E	4.9	6.7	0
2019/9/8 6:20	ENE	0.5	1	ENE	0.5	1	S	0.7	1	0	2019/9/8 14:30	ENE	1.9	4.5	E	2.9	4.9	E	5.1	5.9	0
2019/9/8 6:30	ENE	0.9	1.2	ENE	0.7	1	SE	0.9	1.5	0	2019/9/8 14:40	ENE	2.2	4.5	E	3	5.1	E	5.3	6.2	0
2019/9/8 6:40	NE	0.8	1.2	ENE	0.7	1	SSE	0.6	1.5	0	2019/9/8 14:50	ENE	1.9	4.2	E	3.3	5.6	E	5.6	6.5	0
2019/9/8 6:50	NE	0.7	1	NE	0.4	1	S	0.3	1	0	2019/9/8 15:00	ENE	1.7	3.9	E	3.2	5.6	E	5.2	6.6	0
2019/9/8 7:00	NE	0.7	1.1	ENE	0.5	1	WSW	0.1	1	0	2019/9/8 15:10	ENE	1.9	4	E	2.8	5	E	4.5	6.6	0
2019/9/8 7:10	ENE	0.6	1.4	ENE	0.6	1.5	S	0.2	0.9	0	2019/9/8 15:20	ENE	1.6	3.6	E	3	5	E	4.9	5.8	0
2019/9/8 7:20	ENE	1	1.7	NE	1	1.6	NE	0.3	1	0	2019/9/8 15:30	E	1.7	4.6	E	3.5	5	ESE	5.7	6.7	0
2019/9/8 7:30	ENE	0.8	1.7	ENE	0.6	1.6	SE	0.4	1.2	0	2019/9/8 15:40	ENE	1.4	4.6	ESE	3.6	5.3	ESE	6	6.9	0
2019/9/8 7:40	ENE	1	2	ENE	1	1.9	SE	0.3	1.2	0	2019/9/8 15:50	ENE	1.6	3.6	ESE	4.1	5.8	ESE	6.3	7	0
2019/9/8 7:50	ENE	1.3	2	ENE	1.1	1.9	SSE	0.9	1.5	0	2019/9/8 16:00	ENE	1.4	3.6	ESE	4.3	6.2	ESE	6.7	7.5	0
2019/9/8 8:00	ENE	1.2	2	E	1	1.9	SE	1.3	2	0	2019/9/8 16:10	ENE	1.3	3.5	ESE	4.1	6.2	ESE	6.8	7.5	0

表1 風向、風速、雨量の観測結果 (2/3)

	地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]		地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]
	風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]	風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]	風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]			風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]	風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]	風向	風速 (10分 平均) [m/s]	最大瞬間 風速 [m/s]	
2019/9/8 16:20	E	2.1	5.1	ESE	4.2	6.4	ESE	7.2	7.7	0	2019/9/9 0:30	NE	2.8	6.5	ENE	6.8	9.8	ENE	9.1	10.6	0
2019/9/8 16:30	E	1.8	5.1	ESE	4.5	6.4	SE	7.1	7.7	0	2019/9/9 0:40	NE	2.9	6.8	ENE	6.9	9.8	ENE	9.1	10.9	0
2019/9/8 16:40	E	2.1	4.8	ESE	4.3	6.1	ESE	7.1	7.6	0	2019/9/9 0:50	NE	2.8	6.6	ENE	6.9	9.3	ENE	9.2	11.2	0
2019/9/8 16:50	E	1.8	4.3	ESE	4.7	6.2	SE	7.2	7.7	0	2019/9/9 1:00	NE	2.8	6.6	ENE	6.9	9.3	E	9.5	11.5	0
2019/9/8 17:00	E	2.2	4.5	ESE	4.8	6.7	SE	7.4	7.9	0	2019/9/9 1:10	NE	3	6.9	ENE	7.2	10.1	E	10.1	11.9	0
2019/9/8 17:10	E	1.8	4.6	ESE	4.6	6.7	SE	7.5	8.1	0	2019/9/9 1:20	NE	2.8	6.9	ENE	7	10.8	E	10.1	11.9	0
2019/9/8 17:20	E	1.4	4.4	ESE	4.3	6.6	SE	7.5	8.1	0	2019/9/9 1:30	NE	3.4	7.1	ENE	8	10.9	ENE	10.7	12.6	0
2019/9/8 17:30	E	0.9	4.1	SE	3.5	6.6	SE	7.3	8	0	2019/9/9 1:40	NE	4	8.2	ENE	8.9	11.4	ENE	11.5	13.4	0
2019/9/8 17:40	NE	0.7	3	SE	2.7	5.8	SE	6.7	7.9	0	2019/9/9 1:50	NE	4.4	8.4	ENE	9.6	12.1	ENE	11.8	13.6	0
2019/9/8 17:50	ENE	0.8	3	SE	3	5.7	SE	6.9	7.8	0	2019/9/9 2:00	NE	4.3	9.2	ENE	10.6	13.7	ENE	13.2	15.7	0
2019/9/8 18:00	N	0.6	3.7	SE	2.7	5.7	SE	6.9	7.8	0	2019/9/9 2:10	NE	4.1	9.2	ENE	10.3	13.7	ENE	13.6	15.7	0
2019/9/8 18:10	E	0.7	3.7	SE	2.8	5.5	SE	6.6	7.6	0	2019/9/9 2:20	NE	4.5	9.3	ENE	10.3	14.3	ENE	13.9	16.1	0.5
2019/9/8 18:20	ENE	0.7	2.8	SE	2.7	5.5	SE	6.4	7.5	0	2019/9/9 2:30	NE	4.6	10.4	ENE	10.7	14.3	E	14.2	17.3	2
2019/9/8 18:30	ENE	1	3	ESE	3.1	5.1	ESE	6.5	7.4	0	2019/9/9 2:40	ENE	4.6	10.4	E	10.2	15.2	E	14.2	19	1
2019/9/8 18:40	ENE	0.8	3	ESE	3	5.1	ESE	5.9	7.3	0	2019/9/9 2:50	NE	4.2	9.7	E	10.9	15.8	E	14.5	19	0.5
2019/9/8 18:50	E	0.7	2.2	ESE	2.2	4.4	ESE	5.2	6.7	0	2019/9/9 3:00	NE	4.3	10.2	E	11.8	15.8	E	15.3	18.2	0.5
2019/9/8 19:00	E	0.7	2.6	ESE	2.6	4.6	ESE	6.2	7.6	0	2019/9/9 3:10	ENE	5.1	12.5	E	12.7	18	E	16.7	19.7	1
2019/9/8 19:10	ENE	0.8	2.6	ESE	2	4.6	ESE	5.6	7.6	0	2019/9/9 3:20	ENE	4.9	12.5	E	14.3	18	E	17	20.2	1
2019/9/8 19:20	ENE	0.9	3.5	ESE	2.7	4.4	ESE	6.1	6.8	0	2019/9/9 3:30	ENE	4.6	12.5	E	13.6	18.4	E	16.6	21.5	1.5
2019/9/8 19:30	E	1.1	3.5	ESE	2.8	4.5	ESE	6.3	7.1	0	2019/9/9 3:40	E	5.4	16.9	ESE	14.7	22.9	ESE	18.5	24.1	1
2019/9/8 19:40	NE	0.7	2.5	ESE	3	4.8	ESE	6.1	7.1	0	2019/9/9 3:50	E	6.2	16.9	ESE	14.3	22.9	ESE	18.5	24.1	0
2019/9/8 19:50	ENE	1.2	2.8	E	3.5	5.1	ESE	6.4	7.5	0	2019/9/9 4:00	ENE	4.2	15.3	ESE	14.2	19.7	ESE	17.3	21.5	1
2019/9/8 20:00	E	1	2.9	E	3.4	5.1	ESE	6.6	7.5	0	2019/9/9 4:10	E	4.7	13.5	ESE	15.3	20.5	ESE	18.2	21.6	0.5
2019/9/8 20:10	ENE	0.9	2.9	E	3.6	5.9	ESE	6.3	7.4	0	2019/9/9 4:20	ENE	4.6	14.9	ESE	16.1	21.4	ESE	19.3	22.9	0.5
2019/9/8 20:20	NE	1.2	3.4	E	4	5.9	ESE	7.4	8.6	0	2019/9/9 4:30	ENE	5.5	14.9	E	16.9	22.3	ESE	20.1	24	1.5
2019/9/8 20:30	ENE	1.1	3.4	E	4.4	6	ESE	6.7	8.6	0	2019/9/9 4:40	ENE	6.4	15.7	E	17.3	22.5	E	20.7	24.5	1
2019/9/8 20:40	NE	1	3.2	E	3.5	5.7	E	7	8	0	2019/9/9 4:50	ENE	6.6	16.8	E	18.4	24.1	E	21.5	26.7	0.5
2019/9/8 20:50	NE	1	3.2	E	3.3	5.9	ESE	7.1	8	0	2019/9/9 5:00	ENE	7.2	16.8	E	19.3	25.7	E	22.7	28	1.5
2019/9/8 21:00	NE	1.1	2.7	E	4	6.4	ESE	7.1	7.9	0	2019/9/9 5:10	ENE	8	18.6	E	20.6	27.2	E	24.1	30.3	1.5
2019/9/8 21:10	ENE	1.2	3.1	E	4.7	6.6	E	7.7	8.5	0	2019/9/9 5:20	ENE	7.7	19.5	E	21.7	29.5	ESE	25.9	32.9	1.5
2019/9/8 21:20	NE	1.4	3.6	E	4.5	6.6	E	7.5	8.8	0	2019/9/9 5:30	E	8.4	25.2	ESE	23.2	32.5	ESE	28.5	36.2	3
2019/9/8 21:30	NE	1.3	3.6	E	4.4	6.8	E	7.5	8.9	0	2019/9/9 5:40	E	7.2	26.9	ESE	24.7	34.5	ESE	29.3	37.4	2.5
2019/9/8 21:40	NE	1.4	3.1	E	4.3	6.8	E	7.7	8.9	0	2019/9/9 5:50	E	8.6	23.5	ESE	25.9	35.6	ESE	30.5	38.1	5
2019/9/8 21:50	NE	1.5	3.9	E	4.8	6.6	E	7.4	8.7	0	2019/9/9 6:00	ENE	10.5	27.3	E	27.3	36	E	31.4	38.1	4.5
2019/9/8 22:00	NE	1.6	3.9	E	4.7	6.6	E	7.5	8.4	0	2019/9/9 6:10	ENE	11.1	27.6	E	28	37	E	31.9	39.2	3.5
2019/9/8 22:10	NE	1.1	3.7	E	4.7	6.8	E	7.9	8.7	0	2019/9/9 6:20	E	8.5	27.6	ESE	27.6	38.1	ESE	32.8	40.4	2.5
2019/9/8 22:20	NE	1.3	4.2	E	4.9	7	E	8	8.9	0	2019/9/9 6:30	ENE	9.6	26.1	ESE	29.7	41.6	ESE	34.6	45	4
2019/9/8 22:30	NE	1.8	4.7	ENE	5.2	7.6	E	8	9	0	2019/9/9 6:40	E	9.8	27.7	ESE	28.7	41.6	ESE	34.2	45	3
2019/9/8 22:40	NE	2.1	4.7	ENE	5.1	7.6	E	7.6	9	0	2019/9/9 6:50	E	8.8	28.4	ESE	27.8	39.1	ESE	33.9	43.9	3
2019/9/8 22:50	NE	1.9	4.8	ENE	5.3	7.4	E	7.9	8.9	0	2019/9/9 7:00	E	10.3	30.9	ESE	30.2	44.5	ESE	35.2	43.9	2.5
2019/9/8 23:00	NE	2.3	5.3	ENE	5.2	7.4	E	7.8	8.9	0	2019/9/9 7:10	E	9.4	30.9	ESE	27.7	44.5	ESE	33.8	45.1	2.5
2019/9/8 23:10	ENE	2.2	5.6	ENE	5.3	7.9	E	7.9	9.2	0	2019/9/9 7:20	E	8.6	26.6	ESE	25.7	39.5	ESE	31.3	43.4	2
2019/9/8 23:20	NE	2.3	5.6	ENE	5.3	7.9	E	8.2	9.6	0	2019/9/9 7:30	ENE	8.2	24.4	E	23.6	38.8	ESE	28.9	42.9	1
2019/9/8 23:30	NE	1.9	5.2	ENE	5.1	7.9	E	7.7	9.6	0	2019/9/9 7:40	ENE	8	22.7	E	18.2	33.2	E	22.5	36.6	1
2019/9/8 23:40	NE	2.2	5.2	ENE	5.6	8	E	8	9.4	0	2019/9/9 7:50	NNE	7.5	19.5	NE	13.1	26.7	ENE	15.1	31	0
2019/9/8 23:50	NE	1.9	4.9	ENE	5.2	8	E	7.9	9.4	0	2019/9/9 8:00	N	4.5	15.5	N	11.4	21	N	14	20.8	0.5
2019/9/9 0:00	NE	2.3	5	ENE	5.8	8.3	E	8.1	9.5	0	2019/9/9 8:10	NNW	3.3	14.6	NW	15.2	22.3	NNW	18.8	24.6	0.5
2019/9/9 0:10	NE	2.1	5	ENE	5.9	8.5	ENE	8.6	9.8	0	2019/9/9 8:20	WNV	3	14.6	NW	16.9	27.4	NW	21.2	30.1	0
2019/9/9 0:20	NE	2.4	5.3	ENE	6.2	9.6	ENE	9	10.6	0	2019/9/9 8:30	WSW	3.3	14	WNW	17.8	28.8	NW	23.7	32.1	0.5

表1 風向、風速、雨量の観測結果 (3/3)

	地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]		地上高10m			地上高40m			地上高80m			雨量 [mm]
	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速			風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	風向	風速 (10分 平均)	最大瞬間 風速	
		[m/s]			[m/s]			[m/s]					[m/s]			[m/s]			[m/s]		
2019/9/9 8:40	WSW	3.9	16.2	WNW	19.1	32.1	WNW	25.5	33.1	0	2019/9/9 15:00	WSW	1.8	4.2	WNW	5.3	8.7	WNW	7.2	10.3	0
2019/9/9 8:50	WSW	4.2	16.2	WNW	18.6	34	WNW	25.6	36.5	0	2019/9/9 15:10	WSW	0.9	4.2	WNW	5.1	8.7	WNW	6.4	10.3	0
2019/9/9 9:00	WSW	5	17.2	WNW	18.5	34	WNW	25.1	36.5	0	2019/9/9 15:20	WSW	0.9	3.6	WNW	5.1	8.7	WNW	6.4	9.4	0
2019/9/9 9:10	WSW	4.6	17.2	WNW	16	29.6	WNW	21.8	34.4	0	2019/9/9 15:30	W	0.8	3.6	NW	4.3	8.7	NW	6.2	9.4	0
2019/9/9 9:20	WSW	5.6	14.7	W	16.6	27.4	WNW	23.2	32.2	0	2019/9/9 15:40	NNW	0.4	2.3	NW	2.7	7.4	NW	3.4	8.4	0
2019/9/9 9:30	WSW	5.1	18	W	17.3	30	WNW	23.1	33.4	0	2019/9/9 15:50	NNE	0.9	2.8	NNW	2.3	4.9	NNW	2.6	6.4	0
2019/9/9 9:40	WSW	5.3	18	WNW	15.9	30.8	WNW	21.5	33.4	0	2019/9/9 16:00	NNE	1.2	2.8	NNW	2.3	3.8	NNW	2.9	4.3	0
2019/9/9 9:50	WSW	5.2	17.4	W	15.3	30.8	W	20.7	32.3	0	2019/9/9 16:10	NNE	1.2	2.1	N	2.3	3.8	N	2.9	4.3	0
2019/9/9 10:00	WSW	6	18.5	W	17.1	29.9	W	21.7	29.5	0	2019/9/9 16:20	NE	1.3	2.4	NNE	2.8	3.8	NNE	3.2	3.9	0
2019/9/9 10:10	WSW	5.1	18.5	W	15.9	29.9	W	20.1	29.9	0	2019/9/9 16:30	NE	1.1	2.5	NNE	2.3	3.8	NNE	3.2	3.9	0
2019/9/9 10:20	WSW	5.8	16.1	W	16.3	26.3	W	21.2	30.3	0	2019/9/9 16:40	E	0.8	2.1	NE	1.4	3.6	NNE	2.1	3.7	0
2019/9/9 10:30	WSW	5.6	15.3	W	15.9	26.4	W	21	30.3	0	2019/9/9 16:50	ESE	0.7	1.7	E	1.8	2	ENE	1.6	3	0
2019/9/9 10:40	WSW	5.3	15.3	W	15.5	26.4	WNW	20.4	29.1	0	2019/9/9 17:00	E	1	1.7	ENE	1.6	2	ENE	1.7	2	0
2019/9/9 10:50	WSW	5.2	17.1	W	13.8	28.3	W	19.3	31.3	0	2019/9/9 17:10	E	0.8	1.7	E	1.8	2.1	ENE	1.8	2	0
2019/9/9 11:00	WSW	4.6	17.1	W	12.5	28.3	W	17	31.3	0	2019/9/9 17:20	ESE	0.5	1.6	E	1.9	2.2	ENE	1.8	2.1	0
2019/9/9 11:10	WSW	5.1	11.7	W	12.6	22.2	W	17.4	25.4	0	2019/9/9 17:30	ESE	0.6	2	E	2	2.5	E	1.9	2.2	0
2019/9/9 11:20	WSW	4.3	11.7	W	11.4	20	W	15	25.4	0	2019/9/9 17:40	E	0.8	2	ENE	2.5	2.9	ENE	2.8	3.1	0
2019/9/9 11:30	WSW	5.1	15.9	W	10.2	18.9	W	14.1	20.8	0	2019/9/9 17:50	E	1.1	1.8	ENE	3	3.6	ENE	2.8	3.2	0
2019/9/9 11:40	WSW	4.4	15.9	W	9.2	18.9	W	12.5	20.5	0.5	2019/9/9 18:00	E	1.2	1.8	ENE	2.7	3.6	ENE	2.6	3.2	0
2019/9/9 11:50	WSW	3.8	10.2	W	9.4	16.4	W	12.4	17.5	0	2019/9/9 18:10	ESE	0.7	1.7	E	2.4	3.2	E	2.3	2.8	0
2019/9/9 12:00	WSW	3.6	10.5	W	9	15.7	W	12	17	0	2019/9/9 18:20	ESE	0.3	1.4	E	2.2	2.6	E	2.2	2.5	0
2019/9/9 12:10	WSW	4.1	10.5	W	8.3	14.8	W	12.2	17.5	0	2019/9/9 18:30	ESE	0	1.2	ENE	2	2.4	ENE	1.9	2.5	0
2019/9/9 12:20	WSW	3.8	8.6	W	8.1	16.7	W	11.5	22.3	0	2019/9/9 18:40	SSW	0.4	2.1	ENE	2	4.6	ENE	2.2	5.6	0
2019/9/9 12:30	WSW	4	11.7	W	8.7	18.4	W	12	22.3	0	2019/9/9 18:50	S	2.1	3.6	SSE	3.8	5.4	SE	3	5.6	0
2019/9/9 12:40	WSW	3.2	10.8	W	9.2	14.6	W	11.7	17	0	2019/9/9 19:00	S	1.7	3.6	SSE	4	5.4	SSE	3	4.8	0
2019/9/9 12:50	WSW	2.8	7.4	W	8.2	15.7	W	11.4	16.2	0	2019/9/9 19:10	S	1.9	3.4	SSE	4.2	4.9	SSE	2.5	4.8	0
2019/9/9 13:00	WSW	2.4	7.2	WNW	7.5	15.7	WNW	11.2	16.2	0	2019/9/9 19:20	S	1.4	3.4	S	3.9	4.9	SSE	2.3	3.3	0
2019/9/9 13:10	WSW	2.3	8.2	WNW	7.9	13.2	WNW	11	15.8	0	2019/9/9 19:30	S	0.6	2.7	SSE	2.5	4.6	SSE	2.2	3.3	0
2019/9/9 13:20	WSW	2.8	8.2	WNW	9.2	16.2	WNW	12.2	17.5	0	2019/9/9 19:40	SSW	0.8	1.4	S	2.8	3.8	SSE	3.2	3.7	0
2019/9/9 13:30	WSW	2.6	9.2	WNW	9.6	16.5	WNW	12.2	17.8	0	2019/9/9 19:50	SSW	1.6	3	S	3.7	4.4	SSE	2.8	3.7	0
2019/9/9 13:40	WSW	2.5	9.2	WNW	7.2	16.5	WNW	10.5	17.8	0	2019/9/9 20:00	SSW	1.2	3	S	3.6	4.4	S	2.9	3.6	0
2019/9/9 13:50	WSW	2.2	8.5	WNW	7.3	14.1	WNW	10.1	15.7	0	2019/9/9 20:10	SSW	0.5	2.8	S	3.1	4	S	2.4	3.6	0
2019/9/9 14:00	WSW	1.8	5.3	WNW	6.4	14.1	WNW	8.7	15.6	0	2019/9/9 20:20	S	1	2.6	SSE	3.5	4.1	SSE	2.6	3.1	0
2019/9/9 14:10	WSW	0.8	5	WNW	5.3	10	WNW	6.9	11.9	0	2019/9/9 20:30	S	1.4	2.6	SSE	3.9	4.2	SSE	3.2	3.6	0
2019/9/9 14:20	WSW	1	3	WNW	4.8	8.4	WNW	6.4	11.6	0	2019/9/9 20:40	S	1.2	2.3	SSE	3.6	4.2	SSE	3.3	3.7	0
2019/9/9 14:30	WSW	0.7	3.1	WNW	4.1	7.4	WNW	5.2	9.2	0	2019/9/9 20:50	SSW	1	1.9	SSE	3.4	4	SSE	3.4	3.9	0
2019/9/9 14:40	WSW	1	3.1	WNW	4	5.9	WNW	5.3	6.8	0	2019/9/9 21:00	SSW	0.8	1.7	SSE	3.2	4	SE	3.3	4	0
2019/9/9 14:50	WSW	1.5	3.5	W	4.1	7.9	W	6	8.8	0											

注)各観測結果は、それぞれ左欄の時刻より前10分間の平均風向、平均風速、最大瞬間風速及び積算雨量を示す。

表 2 時系列

日付	時間	内容
令和元年 9月9日	6:00 頃	請負作業員 2 名が、タンクヤードの現場確認時には冷却塔が倒壊していないことを確認。
	7:40 頃	請負作業員 3 名が、冷却塔の倒壊及び配管の破損並びに隣接する排風機室のスレート外壁 (2 箇所) の破損を確認したため、原子炉課長へ連絡。原子炉課長現場確認。
	8:20	原子炉課長から次長へ連絡。次長現場確認。
	8:30	部内に一斉放送にて冷却塔の倒壊及び現場への立入禁止を周知 (1 回目)。 請負作業員と原子炉課員が、誤作動、電気事故等の防止のため、二次冷却塔入口弁、冷却塔ファン、循環ポンプ、補助ポンプ、循環ポンプ出口弁、補助ポンプ出口弁の電源「断」確認。
	8:38	次長から部長へ連絡。
	8:40	部長現場確認。
	8:44	部長から環境技術開発センター長へ連絡。
	8:45	部長から所長へ連絡。
	8:47	部長から保安管理部長へ連絡。
	8:52	所内緊急電話 9901 に連絡。
	9:05	部内に一斉放送にて冷却塔の倒壊及び現場への立入禁止を再周知 (2 回目)。
	9:15	大洗研究所に現地対策本部を設置。材料試験炉部に現場指揮所を設置。
	9:19	FAX (第 1 報) 発信。→9:37 原子力規制庁事故対処室 FAX (第 1 報) 着信確認。
	9:38	放射線管理第 2 課員が、排風機室内の線量当量率及び汚染確認のため、線量当量率測定及び表面密度測定を開始。→10:38 排風機室内の測定結果の報告 (異常なし)。
	10:00	原子炉課員と請負作業員が、二次冷却系統内の隔離のため、熱交バイパス弁「閉」確認及び熱交入口弁 (3 台) 並びに熱交出口弁 (3 台)「閉」操作の作業開始。
	10:10	放射線管理第 2 課員が、冷却塔倒壊付近の線量当量率確認のため、線量当量率の測定を開始。→10:38 冷却塔倒壊付近の測定結果の報告 (異常なし)。
	10:13	原子炉課員と請負作業員が、熱交入口弁 (3 台) 及び熱交出口弁 (3 台) の全閉確認。
	10:30	原子力規制庁保安検査官が現場確認。
10:44	FAX (第 2 報) 発信。→11:12 原子力規制庁事故対処室 FAX (第 2 報) 着信確認。	

日付	時間	内容
	10 : 49	原子炉課員が二次冷却系統の確認中に、配管フランジ部からの水の漏えいを確認（30～40L程度、約150mL/分）。
	11 : 06	原子炉課員により、1箇所目（出入口側破損箇所）の排風機室破損箇所の補修作業が完了。
	11 : 07	原子炉課員が配管フランジ部からの漏えい水をサンプリングし、汚染確認のため、測定を放射線管理第2課員に依頼。
	11 : 30	放射線管理第2課員が配管フランジ部からの漏えい水の汚染確認のため、ゲルマニウム半導体検出器を用いた測定を開始。 →13 : 01 漏えい水の測定結果の報告（異常なし）。
	11 : 36	原子炉課員により、2箇所目の排風機室破損箇所の補修作業が完了。
	13 : 30	本事象は法令報告事象と判断。
	14 : 35	FAX（第3報：最終報）発信。→15 : 06 原子力規制庁事故対処室（第3報：最終報）着信確認。
	14 : 37	原子炉課員が、配管フランジ部からの漏えい水を停止させるため、二次冷却系配管の水抜き作業を開始。
	15 : 25	原子炉課員が、安全確保のため、冷却塔の立入禁止用ローピングの作業開始。
	15 : 50	原子炉課員による安全確保のための、冷却塔の立入禁止用ローピングの作業終了。
	17 : 14	原子炉課員による、二次冷却系配管の水抜き作業終了。
	18 : 15	現地対策本部、現場指揮所 解散。

表3 二次冷却系統冷却塔の倒壊に係る基本事象の影響度評価

基本事象	影響度 *1	調査項目	調査内容	調査結果
① 構造設計の影響	○	構造設計評価の確認	・設計方針の確認 ・設計荷重を考慮した際の部材の構造計算(柱、横材、筋かい) ・構造の特徴	類似冷却塔の構造計算書を参考に構造計算を行い、当時の設計で200kgf/m ² の水平荷重(風荷重)で倒壊しないことを確認。また、特殊な構造であり、建築基準法に基づく一般的な木造建築とは異なり、一構面の筋かいの機能が喪失した場合、隣接する構面が負担する水平荷重(風荷重)が増加するため破断が連鎖的に進みやすく、ねばりが小さい構造であることを確認。
② 材料変更の影響	×	更新時の材料変更	・ファンスタック交換時の確認	平成20年度の更新工事では、トップデッキ、ファンスタック等の材質の変更を行ったが、二次冷却系統冷却塔上部の重量は更新前とほぼ同じ重量であり、影響はないことを確認。
③ 施工の問題	×	検査記録の確認	・建設時の承認図 ・更新工事時の施工記録の確認 ・更新工事時の検査記録の確認 ・構造計算書及び技術仕様書の確認	昭和63年度の改修時の検査記録並びに平成10年度及び平成11年度の更新時の施工及び検査記録を調査し、更新工事時の施工上の問題はなかったことを確認。昭和43年度の建設当初から接合金物が承認図と異なって施工されていることを確認したが、当時の設計である200kgf/m ² の水平荷重(風荷重)で倒壊しないことを確認。
④ 木材の変形の影響	×	木材の損傷状態の確認	・木材の損傷状態の確認(外観検査)	二次冷却系統冷却塔倒壊後の木材の損傷状態の確認を行い、木材の変形はなかったが、一部の木材について劣化と推定される部位を確認。
⑤ 木材の腐朽の影響	○	木材(柱、横材、筋かい)の残存強度評価	・木材の劣化診断(外観確認、針貫入試験、含水率測定) ・劣化診断結果の評価	二次冷却系統冷却塔の木材の腐朽状態を針貫入試験により測定し、接合金物近傍の木材の腐朽進行を確認。この結果から残存断面積比を評価し、木材の強度の低下を推定。
⑥ 保守運転の影響	×	保守運転履歴の確認	・保守運転履歴及び頻度の規定の確認	木材に対しては、湿潤・乾燥のサイクル数が少ないほうが、膨張・収縮による割れの可能性が減ると考えられるが、行っていた保守運転の運転時間(約40分)及び頻度(1回/月から1回/年)から、保守運転の影響よりも降雨の影響の方が大きいため、保守運転の実施による木材への影響は少ないと評価。
⑦ 点検内容の問題	○	点検内容の確認	・点検項目に対する実施状況の確認(①日常点検、②施設定期自主検査) ・メーカーが行う点検の調査 ・腐朽に係る知見の点検への反映の調査	長期運転停止状態において、打音点検のような目視以外の方法による点検を行わないことの木材の腐朽に関するリスクや点検の必要性に対し、メーカーと十分共有できていなかったことを確認。設置当初から構造計算書を提出図書に掲げておらずメーカーから提供されていなかったため、冷却塔の特殊な構造について十分把握できず、点検に反映されなかったことを確認。
⑧ 更新・補修の影響	×	更新履歴の確認	・更新履歴、保守記録(履歴)の確認 ・耐用年数	更新履歴、保守記録を確認し、適宜更新・保守は実施。
⑨ 金属の腐食、変形等の影響	×	金属部品の健全性確認	・接合金物の外観検査・寸法検査	接合金物の外観検査及び寸法測定を行い、著しい腐食がないこと、寸法は施工時の寸法公差範囲内であり、減肉がないことを確認。また、変形した接合金物を調査し、変形が倒壊時の負荷による原因であることを特定。
⑩ コンクリートの割れ・破損等の影響	×	コンクリート(基礎部)の健全性確認	・コンクリート(基礎部)の外観検査	コンクリート(基礎部)の外観検査を行い、割れ、破損等はないことを確認。コンクリートの破損等による倒壊でないことを検証。
⑪ 地震力による破損等の影響	×	地震後の点検内容の確認	・東北地方太平洋沖地震の影響に関する健全性調査及びその後の補修内容の調査	地震後の点検結果に従い、損傷部を補修していることを確認。
⑫ 風雨の影響	○	風速、風向、風圧、雨量の確認	・事象発生当日の風速、風向、雨量の確認 ・過去の当該箇所における風速、風向の確認 ・周囲の構造物による風速の増大	設計時の水平荷重(風荷重)に達していないことを確認。倒壊事象発生時の気象データと過去10年間のデータを比較し、風速だけでなく風向も倒壊に影響することを確認。気象データを参考にJMR施設敷地内をモデル化し、二次冷却系統冷却塔への風圧・風向を推定。これらの評価に基づき、倒壊事象を推定。
⑬ 飛来物の影響	×	飛来物の衝突、閉塞による影響	・気象庁の気象データ確認 ・現場の状況確認(がれき等の散乱状態)	気象庁の気象データをもとに、茨城地区の強風発生状況を確認するとともに、現場調査結果を踏まえ、二次冷却系統冷却塔周辺部への飛来物の衝突及び閉塞がないことを確認。
⑭ 地震の発生の影響	×	地震力の有無	・気象庁の気象データ確認 ・点検記録の確認	気象庁の気象データをもとに、平成24年3月以降に発生した大洗町・銚田市の地震発生状況を確認し、二次冷却系統冷却塔への影響がないことを確認。また、平成25年9月に銚田市で震度5弱を観測したが、地震後の点検で異常がないことを確認。
⑮ 竜巻(突風)の発生の影響	×	竜巻(突風)発生の有無	・気象庁の気象データ確認 ・現場の状況確認(がれき等の散乱状態)	気象庁の気象データをもとに、茨城地区の竜巻発生状況を確認するとともに、二次冷却系統冷却塔周辺部への飛来物の衝突及び閉塞発生の有無の現場調査結果を踏まえ、竜巻が発生していないことを確認。
⑯ 設備運転による過応力の影響	×	当日の運転履歴	・運転状況の確認	倒壊事象発生当日の二次冷却系統冷却塔の運転状況を確認し、運転していないため過応力が発生していないことを確認。
⑰ 配管破損部の強度不足の影響	×	設計の確認	・構造解析 ・破断面の外観検査	二次冷却系配管の構造解析を行い、二次冷却系統冷却塔上部の重量による応力が配管の溶接部近傍(熱影響部)に集中し、破断したことを確認。なお、溶接施工方法は、完全溶け込み開先溶接のうちT継手であり、十分な強度を有していたと推定。
⑱ 配管破損部の腐食の影響	×	溶接部の確認	・破断面の外観検査	溶接部及び倒壊直後の破断面の外観写真により、著しく腐食していないことを確認。
⑲ 足場の衝突の影響	×	足場倒壊による影響	・外壁補修工事の記録確認 ・足場倒壊状態の確認	外壁補修工事の記録から、東側(配管側)へ倒壊防止を施していたことと、メッシュシートを取り付けていないことから、足場単体での倒壊は想定しにくく、足場の倒壊は二次冷却系配管が倒れた影響によるものと推定。
⑳ 繰返し応力の影響	×	応力発生の確認	・文献等による調査 ・現場確認	建築物の構造計算は、静的設計により実施されていることを確認。繰返し風荷重の評価については、建築物の外装材に対して実施されているが、台風の通過に伴う繰返し風荷重による影響は静的計算より小さいことから影響がないことを確認。

*1 ○:影響あり、 ×:影響なし

材料試験炉(JMTR)の概要

材料試験炉 (Japan Materials Testing Reactor : JMTR)は、発電用原子炉などで使用する燃料や材料を中性子で照射し、それらの耐久性や適正を実際に試験する、いわば「原子炉をつくるための原子炉」として建設され、昭和 43 年 3 月に初めて臨界に達し、昭和 45 年 1 月に定格出力50MW に到達しました。その後、改修工事を行うため、平成 18 年 8 月 1 日に運転を一時停止するまでの約38 年間、安全かつ安定に運転を継続してきました。

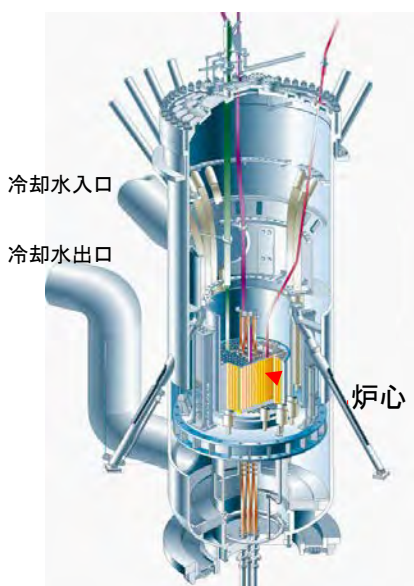
JMTR は、短時間で照射試験を行うことができるように、発電用原子炉よりも多くの中性子を発生する設計となっています。この中性子を利用して、軽水炉、新型転換炉、高速増殖炉、高温ガス炉などの動力炉の開発のための各種燃料、材料照射試験を行い、多くの成果を挙げてきました。また、核融合炉開発のための材料開発試験、ラジオアイソトープの製造、新材料開発や基礎工学研究、放射化分析など、幅広い利用も行われてきました。

材料試験炉(JMTR)の仕様

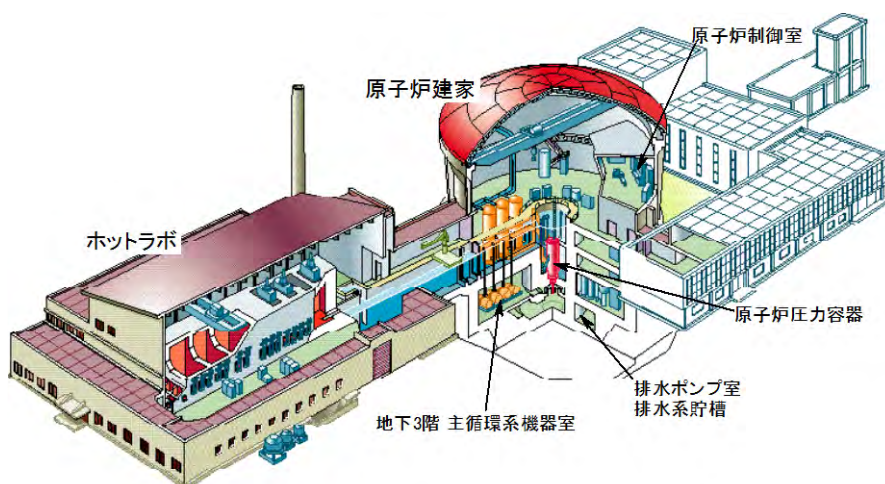
- ★初臨界……………昭和 43 年 3 月 30 日
- ★定格出力到達……………昭和 45 年 1 月 12 日
- 原子炉熱出力……………50MW(5 万キロワット)
- 冷却材/反射材……………軽水/金属ベリリウム
- 原子炉入口/出口冷却材温度…最高 49℃/56℃
- 一次冷却材流量/圧力……6,000m³/h / 1.5MPa
- 炉心構成燃料体数……………29 体(707燃料体含む)
- 炉心有効高さ/直径……………75cm/156cm
- 高速中性子束……………最大 4 × 10¹⁸ / (m²・s)
- 熱中性子束……………最大 4 × 10¹⁸ / (m²・s)
- 出力密度……………425MW/m³
- 燃料……………ウラン・シリコン・アルミニウム分散型合金(U₃Si₂-Al)
- ウラン 235 濃縮度……………約 20wt%
- 燃料体形式……………板状
- 原子炉圧力容器……………ステンレス鋼(SUS304L)
- 主な照射設備……………キャプセル照射設備(約 60 箇所)、シュラウド照射設備(1 箇所)、水力照射設備(1 箇所)



照射キャプセル等外観



原子炉圧力容器鳥瞰図



JMTR 鳥瞰図

原子炉施設保安規定第5編第36条第1項第4号関係別表第21

JMTR 原子炉施設 施設定期自主検査記録

特定施設 二次冷却系統 冷却塔

外觀検査 (抜粋)

材料試験炉部 原子炉課

施設定期自主検査記録

検査対象	冷却塔	検査年月日	平成30年8月6日				
検査項目	外観検査	原子力機構 検査責任者	■				
検査場所	二次冷却系統冷却塔	原子力機構 検査実施者	■				
<p>1. 記録</p> <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th>検査対象</th> <th>結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>冷却塔</td> <td>良</td> </tr> </tbody> </table> <p>詳細については、添付2「外観検査記録」参照のこと。</p> <p>2. 判定基準 冷却塔ファン、電動機及び冷却塔全体に、有害な傷、損傷のないこと。</p> <p>3. 判定 合格</p>				検査対象	結果	冷却塔	良
検査対象	結果						
冷却塔	良						
備考							

添付 1

検査前条件・検査手順確認シート

確認日：平成 30 年 8 月 6 日

検査実施者： XXXXXXXXXX

1. 検査対象
冷却塔

2. 検査前条件確認

No.	確認内容	確認
1	冷却塔の外観検査が行える状態にあること。	✓

3. 検査手順確認

No.	確認内容	確認
1	検査前条件を満足していることを確認する。	✓
2	No.1 冷却塔ファン及び電動機について、有害な傷、損傷のないことを目視により確認する。	✓
3	No.2 冷却塔ファン及び電動機について、有害な傷、損傷のないことを目視により確認する。	✓
4	No.3 冷却塔ファン及び電動機について、有害な傷、損傷のないことを目視により確認する。	✓
5	No.4 冷却塔ファン及び電動機について、有害な傷、損傷のないことを目視により確認する。	✓
6	冷却塔全体について、有害な傷、損傷のないことを目視により確認する。	✓

個人情報保護の観点から■の箇所は非開示とする。

添付 2

外観検査記録

検査実施日：平成 30 年 8 月 6 日

検査実施者： XXXXXXXXXX

冷却塔

確認箇所	有害な傷、損傷の有無	結果
No. 1 冷却塔ファン及び電動機	無	良
No. 2 冷却塔ファン及び電動機	無	良
No. 3 冷却塔ファン及び電動機	無	良
No. 4 冷却塔ファン及び電動機	無	良
冷却塔全体	無	良

個人情報保護の観点から ■ の箇所は非開示とする。

様式変更日：2019年4月23日

JMTR 特定施設 巡視点検表 (原子炉停止中)(抜粋)

2019年9月8日(日)

点検者 XXXXXXXXXX

点検開始時刻 13:15

点検終了時刻 14:30

課長	担当	総括責任者	担当班長

記入についての注意

「巡視点検の結果、異常(異状)があった場合は、確認欄に*印を付け、記事欄に状態を記入する。異常(異状)がない場合については、確認欄にレ印を記入する。気づき事項のあった場合は、記事欄に状態を記入する。

なお、異常(異状)とは、目視(聴覚、視覚及び臭覚含む。)で判断できるものをいう。

1. プロセス制御計算機(HIS画面)：機械制御室

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認
1	第3排水系貯槽(I) ^{注1}	漏えい・溢水	水位<4900mm 3780 mm	✓
2	第3排水系貯槽(II) 廃樹脂貯槽 ^{注1}	漏えい・溢水	水位<900mm 35 mm	✓
3	第3排水系貯槽(II) 排水貯槽 ^{注1}	漏えい・溢水	水位<3600mm 2746 mm	✓
4	ホット機械室DPタンクNo.1	漏えい	水位<1.10m 0.42 m	✓
5	ホット機械室DPタンクNo.2	漏えい	水位<1.10m 0.98 m	✓

注1 月の初めに、前月の1か月のトレンドグラフを作成し、点検表に添付する。

2. 純水系統

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認
1	照明設備(天井灯)	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
2	亜硫酸ソーダ注入装置(タンク)	漏えい	漏水なし	✓
		破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓
3	純水製造設備電源盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
			電源「ON」確認	✓
	純水製造装置排水処理盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
			電源「ON」確認	✓
	純水補給系統現場制御盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
			電源「ON」確認	✓
SGX2型制御盤 ：2台	機器異常、 プロセス異常	警報表示なし	✓	
		機器異常なし	✓	
SGX2型制御盤 ：2台	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
		電源「ON」確認	✓	

個人情報保護の観点から■の箇所は非開示とする。

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認
14	サンプリング装置	漏えい	漏水なし	✓
		破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓
15	全般（建家壁等）	破損	有害な損傷なし	✓

9. 二次冷却系統

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認	
1	照明設備（天井灯）	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
2	ポンプ室内配管等	漏えい	漏えいなし	✓	
		破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
3	制御盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
		破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
	MCC盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
		破損	有害な損傷、錆なし	✓	
	補助ポンプ電源盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
		破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
4	スペースヒータ	漏電・発煙・火災	NFB「ON」確認	✓	
			異音、異臭、発煙なし	✓	
5	循環ポンプ、 補助ポンプ	ポンプ	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓
		モータ	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
			破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓
潤滑油	漏えい	規定量確認	✓		
6	冷却塔本体	本体	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓
		減速機（潤滑油）	漏えい	規定量確認	※3
7	全般（建家壁等）	破損	有害な損傷なし	✓	

10. UCL系統

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認		
1	照明設備	天井灯	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
2	屋外照明灯分電盤		漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
3	循環ポンプ、 揚水ポンプ	ポンプ	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
		モータ	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓	
			破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
		潤滑油	漏えい	規定量確認	✓	
4	薬注装置、制御盤	滅菌装置	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
			漏えい	漏えいなし	✓	
		防食装置	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
			漏えい	漏えいなし	✓	
		pH調節装置	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓	
			漏えい	漏えいなし	✓	
		5	冷却系統制御盤（MCC盤）	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
		6	揚水ポンプ電源盤（高圧電源盤）	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
7	スペースヒータ	漏電・発煙・火災	NFB「ON」確認	✓		
			異音、異臭、発煙なし	✓		
8	配管	破損	有害な損傷、変形、錆なし	✓		
		漏えい	漏水なし	✓		
9	ポンド	漏えい	水位確認	✓		

18. JMT R副警報盤

No.	点検対象	気がかり事象	確認事項	確認
1	警報盤	漏電・発煙・火災	異音、異臭、発煙なし	✓
	一次冷却系統 ^{注5}	漏えい	警報発報なし	✓
	制御設備 ^{注5}	漏えい	警報発報なし	✓
	排水系統 ^{注5}	漏えい	警報発報なし	✓

注5 当該項目の点検は、休日等を実施する。

記事

※1Cトイン4切

※2停止中

※3 外壁補修工事のため点検出来ず

二次冷却系統冷却塔の倒壊に係る基本事象ごとの評価内容詳細

①	構造設計の影響	64
②	材料変更の影響	71
③	施工の問題	72
④	木材の変形の影響	80
⑤	木材の腐朽の影響	94
⑥	保守運転の影響	101
⑦	点検内容の問題	106
⑧	更新・補修の影響	111
⑨	金属の腐食、変形等の影響	120
⑩	コンクリートの割れ・破損等の影響	129
⑪	地震力による破損等の影響	131
⑫	風雨の影響	135
⑬	飛来物の影響	144
⑭	地震の発生の影響	146
⑮	竜巻（突風）の発生の影響	149
⑯	設備運転による過応力の影響	151
⑰	配管破損部の強度不足の影響	152
⑱	配管破損部の腐食の影響	159
⑲	足場の衝突の影響	161
⑳	繰返し応力の影響	163

①構造設計の影響

1. 確認・調査事項

二次冷却系統冷却塔（以下「冷却塔」という。）の主構造部材は、木製の柱、横材及び筋かいで構成されている。建設時は当時の建築基準法を参考にした水平荷重（風荷重）を用いて構造設計が行われている。ここでは改めて構造計算を行い、当時の構造設計の妥当性を確認する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔の倒壊後、設計当時の構造計算書の提出をメーカーに依頼したが、構造計算書の存在は確認できたが、保管は確認できなかった。このため、メーカーから提出された当時の類似の冷却塔の構造計算書及びヒアリングに基づいて、構造計算のためのモデルを構築するとともに、設計当時の各種入力パラメータの確認を行った。これらに基づいて、構造モデルを用いて、設計時の水平荷重（風荷重（最大瞬間風速 63m/s 相当））と自重を考慮して構造計算を行い、部材に発生する軸力と耐力を比較して、構造設計の妥当性を確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 冷却塔の構造

冷却塔は、昭和 41 年 1 月の「JMTR 設計及び工事の方法（その 3）原子炉冷却系統施設（4）」（以下「設工認書」という。）により設計・施工されたもので、平成 10 年度から平成 11 年度には、構造部材（木材）に腐朽が見られたため、当時の設工認書及び施工要領書に基づいて改修が実施された。設工認書及び施工要領書に記載されている基本仕様及び塔体部材等の仕様を表①-1 に示す。

冷却塔の概要図を図①-1 に、構造概要を図①-2 に示す。冷却塔は、柱、横材及び筋かいから構成された構面を東西方向に 17 構面、南北方向に 7 構面配置しており、柱で鉛直荷重を負担し、筋かいのみで水平荷重（風荷重）を負担する構造となっている。また、冷却塔内部は吹き抜けとなっており、冷却塔全体が受ける水平荷重（風荷重）を全ての構面（東西方向の場合 17 構面）で負担する剛床の構造ではなく、各構面毎に風を受ける壁面の面積に応じて水平荷重（風荷重）を負担する構造である。

外壁の下部には外気を取り入れる木製ルーバーを東西面に配置している。冷却塔上部に FRP 製ファンスタック（平成 20 年に木製から FRP 製に更新）を 4 基設け冷却用外気をファンにより上空へ放出している。

3.2 設計条件の確認

(1) 水平荷重（風荷重）条件

冷却塔の設計時の水平荷重（風荷重）は、昭和 25 年に制定された建築基準法に

基づき、速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$ （最大瞬間風速 63m/s 相当）としている。なお、現行の建築基準法に基づく水平荷重（風荷重）は、速度圧 $q=118\text{kgf/m}^2$ （最大瞬間風速 53.4m/s 相当）となる。

(2)設計の考え方

冷却塔の設計時の考え方について、評価開始時は設計当時の構造計算書が確認できなかったため、類似構造計算書及びメーカーからのヒアリングにより確認し、最終的には、評価後に発見された構造計算書により、以下の考え方であることを確認した。

- ① 水平荷重（風荷重）は設計時には速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$ とし、高さによらず一様に設定している。
- ② 柱で鉛直荷重を負担し、筋かいで水平荷重（風荷重）を負担する構造とする。
- ③ 構造部材は軸力（引張及び圧縮）のみを伝達するトラス部材として設計する。
- ④ 軸力算定は 2 次元トラス構造の各部材に発生する軸力を手計算により算出する。
- ⑤ 部材に発生する軸力について、短期許容圧縮・引張力以内となることを確認する。
- ⑥ 接合部については、ライセンス先のメーカー標準により定めており、部材に発生する軸力が伝達できる設計（部材と同等）である。そのため、設計検討として部材に発生する軸力の確認を実施する。
- ⑦ 柱については、部材中間部に継手を設置しているが、当該部位は水平荷重（風荷重）に抵抗できる接合部として設計されていない（軸力伝達のみを想定）。

3.3 結果

冷却塔の構造を確認した結果、主構造部材は木材であり、添付資料 4「③施工の問題」に示すとおり、防腐・防蟻処理されたものが使用されていることを確認した。構造設計は、建築基準法に基づく一般的な木造建築のように柱に水平荷重（風荷重）を負担させる設計ではないため、筋かいが機能を喪失し、柱に力が集中すると柱中間部に設けている継手が弱部となる特徴があることが分かった。また、剛床の構造ではなく、各構面毎に風を受ける壁面の面積に応じて水平荷重（風荷重）を負担する構造であることから、一構面の筋かいが機能を喪失した場合、隣接する構面が受ける水平荷重（風荷重）が増えるため破断が連鎖的に進む、ねばりが小さい構造と考えられる。

3.1 及び 3.2 で確認した構造及び条件に基づき、柱、横材、筋かいについて部材端部をピン接合としてモデル化し、軸力のみが伝達できる解析モデル（図①-3）を作成し、設計時の水平荷重（風荷重）を入力して構造計算を実施した（図①-4）。

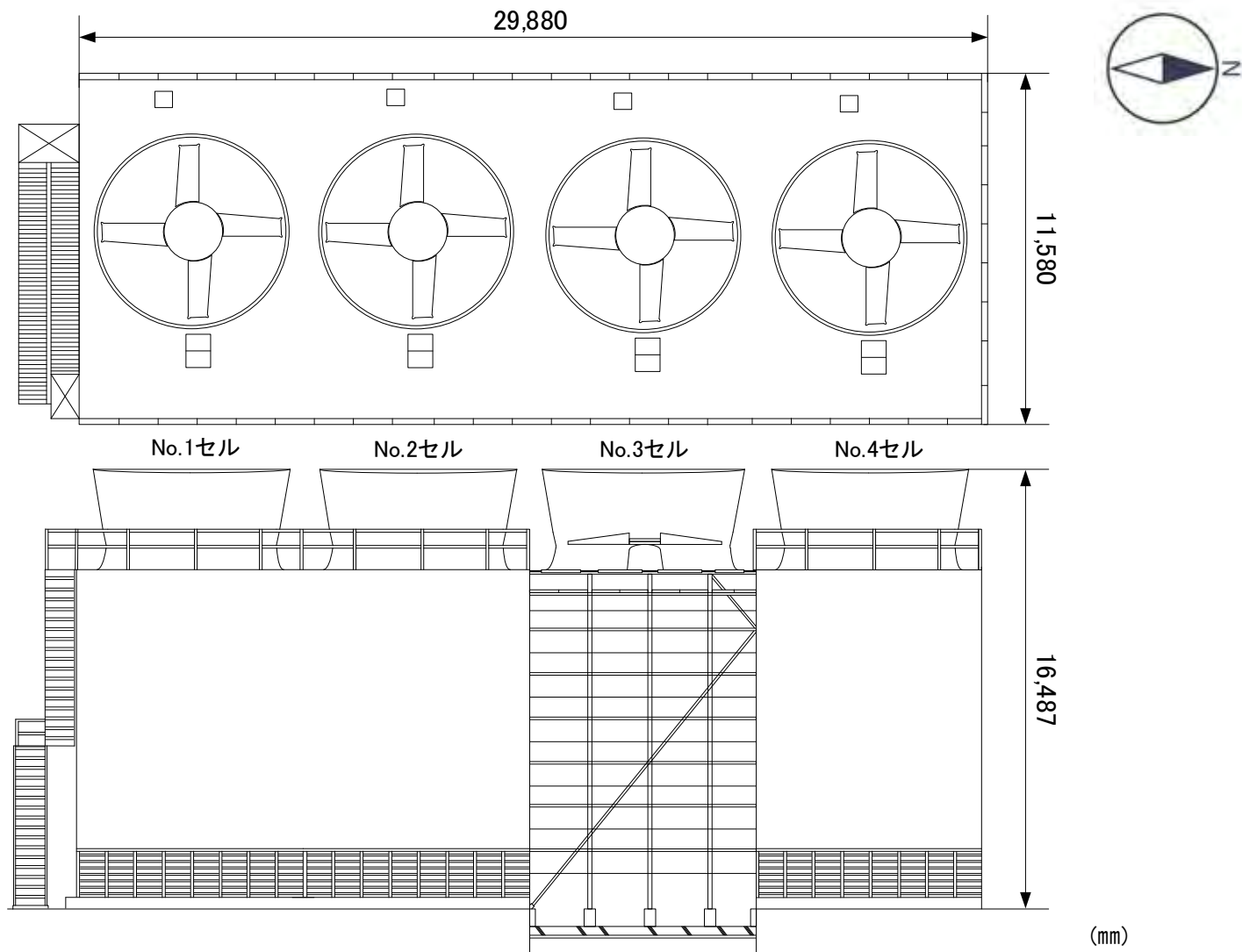
部材の検討結果は、表①-2 に示すとおり、最も厳しい検定比（発生軸力を評価基準値で除した値）が生じる筋かい部分において 0.91 であり、筋かいの発生軸力が評価基準値を下回っていることを確認した。

なお、本評価後に発見された構造計算書を確認したところ、3.2 (2) で示した設計の考え方と同様に構造計算が行われていた。検定比は最大で0.97になっており、本評価(0.91)と同位置でほぼ同じ値であった。

4. 評価結果

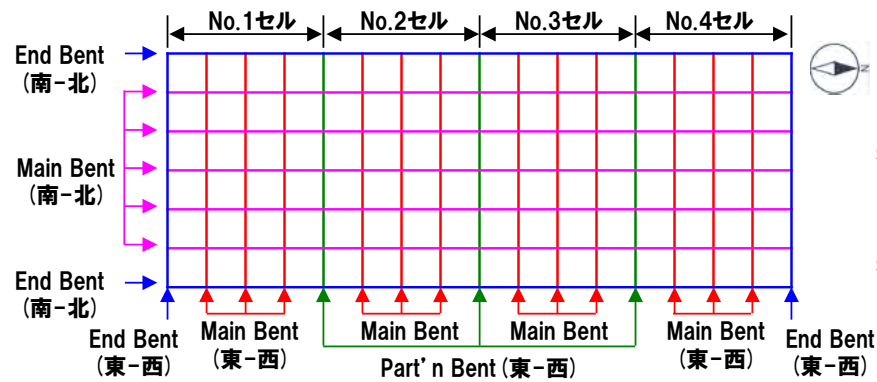
冷却塔について構造図に基づき解析モデルを作成し、設計時の水平荷重(風荷重)を加えて改めて構造計算を行った結果、検定比は最大で0.91であり、筋かいに発生する軸力は評価基準値を下回り、構造設計上問題ないことが確認できた。なお、構造計算書上の検定比も最大で0.97であり、本評価と同位置でほぼ同じ値であった。

また、冷却塔は、主構造部材が木材であり、「水平荷重(風荷重)を柱が負担せず筋かいのみで負担し、かつ、一構面の筋かいの機能が喪失した場合、隣接する構面が負担する水平荷重(風荷重)が増加するため破断が連鎖的に進みやすく、ねばりが小さい構造」という特殊な構造であることを確認した。



図①-1 二次冷却系統冷却塔の概要図（上図：平面図、下図：断面図）

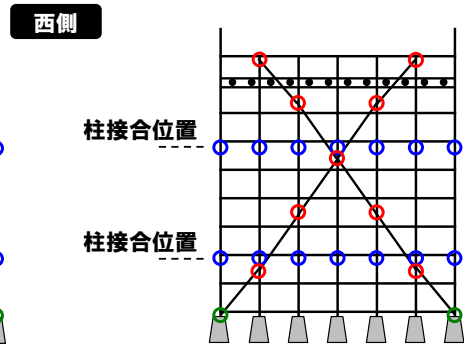
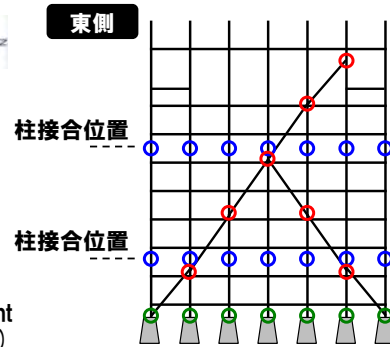
キープラン (平面)



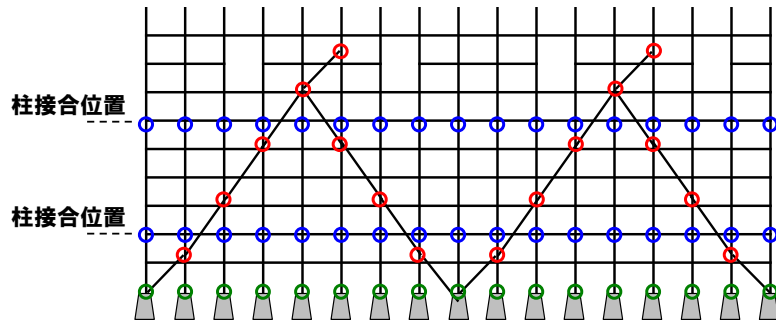
End Bent (東-西)

Part'n Bent (東-西)

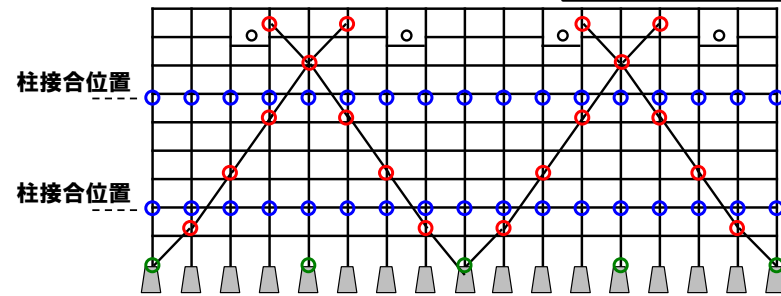
Main Bent (東-西)



End Bent (南-北)



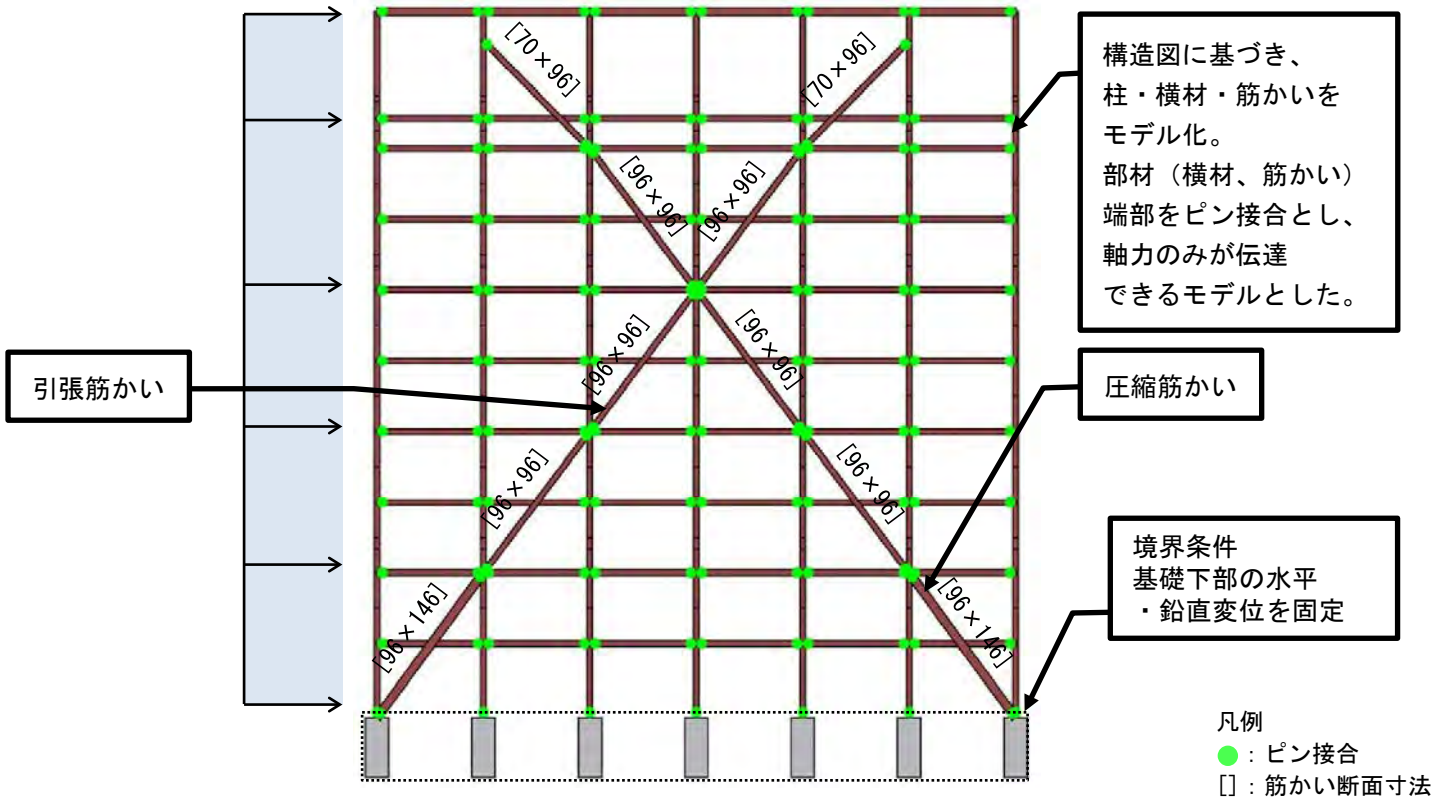
Main Bent (南-北)



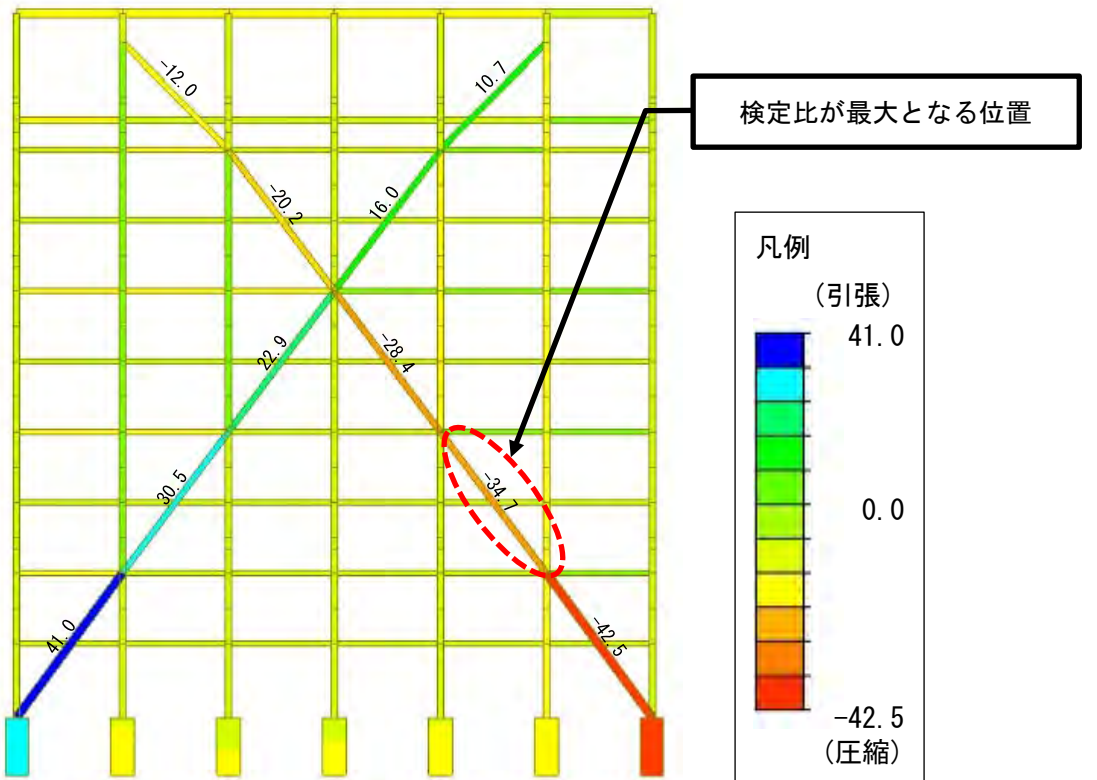
- : 筋かい接合金物
- : 柱接合金物
- : 基礎部接合金物

図①-2 二次冷却系統冷却塔の構造概要

設計時の水平荷重（風荷重）
 速度圧 $q=200\text{kgf/m}^2$
 （高さによらず一様に設定）



図①-3 解析モデル



図①-4 設計時の水平荷重（風荷重）による解析結果 [軸力図 : kN]

表①-1 二次冷却系統冷却塔の基本仕様

① 基本仕様	
項目	仕様
搭型式	4F60B-184V-2436BP
外形寸法	搭高 16,487mm、塔幅 11,580mm 搭長 29,880mm
冷却水量	3,900m ³ /h
温度条件	入口温度 43.25℃ 出口温度 31.0℃ 湿球温度 26.5℃
送風機	直径 5,490mm (18Ft.) 4枚羽根、192RPM、鋼板+亜鉛メタリコン製
減速機	型式 FG-60、減速比 1/5.09
電動機	55kW、6P、3,000V、50Hz、B種絶縁
中間軸及びカップリング	FS-18A、減速機側 RC-501、電動機側 RC-505、鋼製+塗装

② 搭体部材	
項目	仕様
トップデッキ	FRP製 (H10、11年度は木製、H20年度にFRPに更新)
ポスト(柱)	木製(ダグラスファー)、クロス(東西)方向:7ヶ所、ロンジ(北南)方向:17ヶ所 3分割(トップ、インナー、ボトム)
ブレース(筋かい)	木製(ダグラスファー)、クロス(東西)方向:17面、ロンジ(北南)方向:7面
ルーバー	木製(ダグラスファー)、ポスト、ルーバーブレード13段
外壁	大波スレート(セメントアスベストボード)

表①-2 部材に発生する軸力及び評価基準値

部材		位置	①発生軸力 (kN)	②評価基準値 ^{※1} (kN)	検定比 (①/②)
筋かい	圧縮	下から5段目	12.0	19.4	0.62
		〃 4段目	20.2	38.3	0.53
		〃 3段目	28.4	38.3	0.75
		〃 2段目	<u>34.7</u>	<u>38.3</u>	<u>0.91</u> ^{※2}
		最下段	42.5	56.3	0.76
	引張	下から5段目	10.7	46.9	0.23
		〃 4段目	16.0	64.3	0.25
		〃 3段目	22.9	64.3	0.36
		〃 2段目	30.5	64.3	0.48
		最下段	41.0	64.3	0.64

※1 短期許容圧縮・引張力（木質構造設計規準により算定。圧縮は座屈耐力[オイラー式]を考慮）

※2 下線部は、検定比が最大となる位置を示す

②材料変更の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔は、平成 20 年にトップデッキ及びファンスタックを木製から FRP 製に更新している。また、その他の冷却塔上部部品（機械構造及び機械台）についても設置以降補修及び更新を実施している。これらの更新時の材料変更が冷却塔の倒壊事象に影響を与えているか評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

近年、木材に代わる構造材として FRP 製に変更する部分補修が行われており、特に人が歩行する部分のデッキや送風機の周り、フローア関係など重要な部分については推奨されている。このため、材料変更による影響としては、冷却塔上部部品の補修及び更新により生じた重量変化が、冷却塔倒壊事象に影響を与えたか評価する。

3. 確認・調査結果

冷却塔上部部品（ファンスタック、トップデッキ、ファン、ファンガード、機械構造及び機械台）について、冷却塔建設時（昭和 43 年度）と更新後の重量を比較した。比較結果を表②-1 に示す。表②-1 に示すように建設時と更新後では、ほぼ同等の重量であることを確認した。

4. 評価結果

冷却塔建設時と更新後の重量を比較し、冷却塔上部部品の交換における重量はほぼ同じであることから、冷却塔倒壊に影響しないと考えられる。

表②-1 冷却塔の建設時と更新後の重量比較表

部位	建設時 (t)	更新後 (t)
ファンスタック	10.55	11.20
トップデッキ	6.66	7.14
ファン	2.44	2.44
ファンガード	1.92	1.92
機械構造 (モータ+中間軸+減速機)	6.40	4.66
機械台	1.84	2.47
合計	29.81	29.83

③施工の問題

1. 確認・調査事項

冷却塔の改修や更新時の施工が倒壊に影響したかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔は、その強度に係る主構造材について、外観等による木材の破損等が確認される毎に改修や更新工事を実施してきた。昭和 41 年度の承認図を基に、昭和 63 年度に行われた改修工事と平成 10～11 年度にかけて行われた更新工事について、検査記録及び施工記録を確認し、これらの改修、更新工事等における施工の影響について調査する。

3. 確認・調査結果

(1) 昭和 63 年度の改修記録

昭和 63 年度の改修工事の施工記録を確認し、本工事が昭和 41 年度の承認図を基に実施されていることを確認した。交換する木材は、「木材の加圧式防腐処理方法 (JIS A 9002)」に規定する処理方法により防腐・防蟻処理されていた。また、ボルト類(アンカーボルト含む)は全数 SUS304 に交換されていた。一方、接合部に使用されている接合金物は、すべて再利用されていた。更新後の性能検査については、各セルを運転し、搭振動の計測により運転に問題となる箇所がないことが確認されていた。

(2) 平成 10～11 年度の更新記録

平成 10～11 年度の更新工事の検査記録を確認し、本工事が昭和 41 年度の承認図を基に実施されていることを確認した。主構造に対しては、木材検査が行われおり、検査は当時の日本農林規格「針葉樹製剤の欠点の測定方法」に従い実施されていた。また、交換する木材は、「木材の加圧式防腐処理方法 (JIS A 9002)」に規定する処理方法により防腐・防蟻処理されたものが使用されており、結果は全ての検査項目に対して判定基準を満たしていた。検査内容が記載された木材検査基準書を表③-1 に示す。

施工記録を確認した結果、接合部に使用されている接合金物は、使用不可能になったものは一部更新されたが、ほとんど再利用されていた。また、現地据付工事においては、主構造、接合金物及びボルト類を含む冷却塔の各部において表③-2 のとおり検査が行われており、冷却塔セル塔体部に対しては外観、作動点検及び垂直度計測が行われ、結果は全て合格であった。

(3) 接合金物の施工について

昭和 41 年度の承認図を確認していく中で、基礎部筋かいの接合金物の仕様が承認図に示されているものと異なっていることが分かった。承認図上の接合金物の取付け仕様を図③-1 に示す。すなわち、承認図上は 3 本ボルト用接合金物を使用しなければならない接合部に対して、2 本ボルト用接合金物を使用していた。接合金物の取付け状況を図③-2 に示す。本施工については、図③-2 に示す写真から、接合金物の交換は実施されておらず、建設時の昭和 43 年度から取違えていることが分かった。

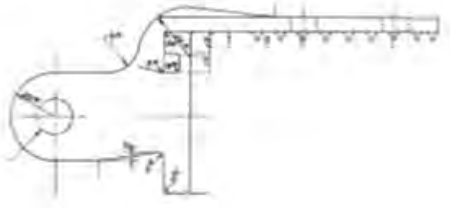
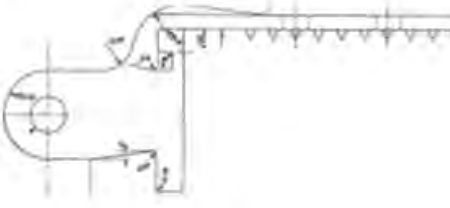
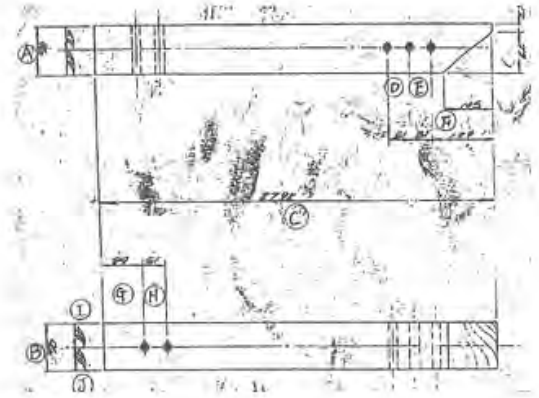
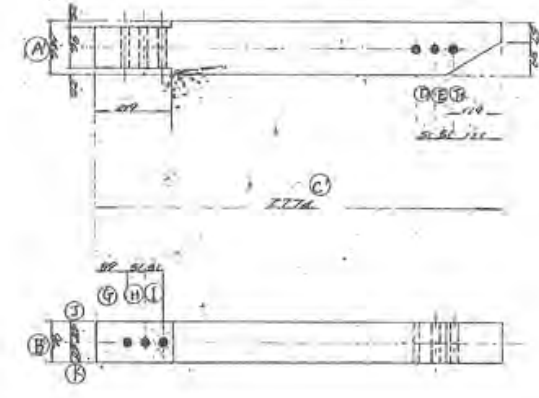
構造計算書及び承認図から、呼び断面寸法(4in×4in(96mm×96mm))の部材を使用し、ボルト本数 2 本で接合する筋かいの種類は、1 構面当り 3 種類あった。一方、ボルト数 3 本で接合する筋かいの種類は、1 構面当り呼び断面寸法(4in×4in(96mm×96mm))の部材で 3 種類、呼び断面寸法(4in×6in(96mm×146mm))の部材で 2 種類であった。

接合強度は使用する材料よりも大きいことから、構造計算書により 2 本ボルト用及び 3 本ボルト用接合金物の接合部の強度を推定すると、それぞれ 4221kgf 及び 5946kgf 以上であることを確認した。また、メーカーが管理している技術データから、類似接合金物を用いた接合部の強度が、構造計算書で推定した接合部の強度より大きいことを確認した。





4. 評価結果

昭和 63 年度の改修工事及び平成 10～11 年度の更新工事においては、冷却塔に使用されている主構造に対する検査及び現地据付工事において行われた検査は、ともに判定基準を満たすものであった。また、改修工事及び更新工事でのメーカー所見においても特に問題となる箇所はないとされた。

一方、接合金物の取違いによる接合部強度については、メーカーの構造計算書及び接合部の技術データを用いて設計時に行った構造計算値との比較を行った。その結果、2 本ボルト用接合金物を用いた基礎部筋かいの検定比は 0.96 であり、風荷重 200kgf/m²では許容範囲内であることを確認したことから、倒壊に影響したものでないと推定できる。




	2本ボルト用接合金物	3本ボルト用接合金物
接合金物	接合部① 	接合部② 
使用箇所	96×96 mm 筋かい 	96×146 mm 筋かい 

図③-1 接合金物の取付け仕様

	昭和63年の改修前	平成10～11年の更新後 (冷却塔倒壊時)
接合部 ①	 <p>96×96mm 筋かい</p> <p>3本ボルト用 接合金物</p>	 <p>96×96mm 筋かい</p> <p>3本ボルト用 接合金物</p>
接合部 ②	 <p>2本ボルト用 接合金物</p> <p>96×146mm 筋かい</p>	 <p>96×146mm 筋かい</p> <p>2本ボルト用 接合金物</p>

図③-2 接合金物の取付け状況

表③-1 木材検査基準書

[含水率30%以下における判定基準]		[A:極めて軽微であること(見本写真により判定)]	
		[B:軽微であること(見本写真により判定)]	
製材の材種	測定方法 「詳細は“添付針葉樹製材の欠点の測定方法“(日本農林規格抜粋)を参照」		
主な部品名	節		
部品断面寸法 (mm)	<ol style="list-style-type: none"> 径比 (1) 径比は、節の径のその存する材面の幅に対する百分率による。 (2) 節の径は、その存する材面における長さの方向のりょう線に平行なその節の2接線間の距離(その節が1又は2のりょう線によって切られている場合には、そのりょう線と接線との距離又はその幅)とする。 (3) ひき割類及びひき角類において連続して隣接2材面又は、3材面に存するものについては、節の横断面のみを径比の対象とする。 (4) 径が短径の2.5倍以上ある節の径は、その実測した径の1/2とみなす。 2. 集中径比は、15cmの長さの材面に存する節に係わる径比の合計とする。 材面の欠け、きず、穴、入り皮、やにつぼ 1. 径比及び径については、節に準じる。 2. 材面における欠け又はきずであって、材の長さの方向のりょう線上に存するものは丸身とみなす。 		
節(材面の欠け、きず、穴を含む)	径比 (%)		
入り皮、やにつぼ			
丸身 (%)	<ol style="list-style-type: none"> 板類についての百分率は、丸身の厚さ又は幅のその存する部分の最大の材の厚さ又は幅の割合による。 ひき割類及びひき角類についての百分率は、その存する部分の最小横断面における辺の欠を補った方形の4辺の合計に対する辺の欠の合計の割合による。但し、1角における百分率は、その方形の辺の合計に対する1角における辺の欠の最大のものの割合による。 正角については、その両端から材の長さ0.2mの部分を除いて測定する。 極めて小さいもので、切削加工等によって消滅する程度のもは、対象としない。 		
曲り (%) (長手方向に対し)	<p>百分率は、材の長さ方向に沿う内曲面の最大矢高の弦の長さ方向に対する割合による</p>  <p>曲り (%) = $(CD/AB) \times 100$</p> <p>最大矢高</p> <p>材長 L</p>		
そり又はねじれ	<p>トブデッキ幅そり W (幅)</p>  <p>幅そり (%) = $(h/W) \times 100$</p>		
木口割れ (%)	<ol style="list-style-type: none"> 百分率は、木口割れの長さの、材の長さに対する割合による。 同一端に2個以上あるときは最長のものの長さを、両端にあるときは各端における 最長のものの長さの合計を各々の長さとする。 材面における割れは、その長さの1/3(他の材面に貫通したものにあっては、その長さ)とみなす。 極めて軽微なものは、対象としない。 		
目まわり (%)	<ol style="list-style-type: none"> 百分率は、その弧の長さのその存する木口の辺の欠を補った方形の4辺の合計に対する割合による。 同一端に2個以上あるときは最長のもの の弧の長さを両端にあるときは各端における最長のものの、弧の長さの合計をそれぞれの長さとする。 		
貫通割れ (%)	<p>“木口割れ”と同様とする</p> <p>可  不可</p>		
繊維方向の傾斜 (mm)	材の長さの方向の1mの長さの間における繊維走向の傾斜の高さによる		
平均年輪 (mm)	<p>木口面上の平均年輪幅は、年輪にほぼ垂直方向の同一直線上において、年輪幅の完全なもののすべての平均値による。</p> <ol style="list-style-type: none"> 荷口とは検査時におけるそれぞれの部材の積み重ねられた1つの山を言い、ボルトとプレスそれぞれ別の荷口として扱う。 		
干し割れ	但、木口面におよんだ干し割れは木口割れとし、木口割れの基準を適用する。		
芯持ち、腐れ			
あて、虫あな			
端落ち			
寸法			
その他の欠点			

表③-2 現地据付工事チェックリスト (1/3)

据付検査箇所		部材の更新/ 再使用区分	検査内容
1	基礎関係	[更新] アンカーボルト SS400	アンカーボルトはダブルナットになっているか。
			ボルトは完全に締付けられているか。
2	主構造 ポスト ブレース サポート	[更新] 木製部材	木材の割れ・破損は、ないか。
			ボルト類の緩みは、ないか。
			ボルト類の取付間違いは、ないか。
			ジョイント金具の”ツメ”の食い込みは完全か。
			柱列の通芯は狂っていないか。
			柱の垂直度は規定値以内か。
3	ルーバー	既設品再使用 ルーバー金網	部材の割れ・破損は、ないか。
		[更新] 木製部品	ボルト類の緩みは、ないか。
			ボルト類の取付間違いは、ないか。
4	充填物	既設品再使用	部材の割れ・破損は、ないか。
		[更新] ポリグリッド (P.P) 20枚追加	部品取付位置・方向は、良いか。
			シール材etc. 取付忘れは、ないか。
5	エリミネーター	既設品再使用 エリミネーターブロック	部材の割れ・破損は、ないか。
		[更新] シール材	ポスト取付ボルトの緩みは、ないか。
			部品の取付方向は、良いか。
			シール材etc. 取付忘れは、ないか。
6	外壁	[更新] 大波スレート コーナ-ロール スレート釘	部材の割れ・破損は、ないか。
			釘の打忘れは、ないか。
			重ね部のシールは、良いか。

表③-2 現地据付工事チェックリスト (2/3)

据付検査箇所		部材の更新/ 再使用区分	検査内容
7	機械台	既設品再使用	ボルト類の取付間違いは、ないか。
			ボルト類の緩みは、ないか。
			水平度は、規定値以内か。
8	減速機	既設品再使用 [更新] 給油管 パイプクランプ	ボルト類の取付間違いは、ないか。
			ボルト類の緩みは、ないか。
			油配管のシールは、良いか。
9	中間軸 カップリング	既設品再使用	ボルト類の緩みは、ないか。
			軸芯は、規定値以内か。
			ファンスタックとの接触は、ないか。
10	電動機	既設品再使用	ボルト類の取付間違いは、ないか。
			ボルト類の緩みは、ないか。
11	ファン	既設品再使用	部材の割れ・破損は、ないか。
			ボルト類の緩みは、ないか。
			ファン角度のバラツキは、ないか。
12	トップデッキ	[更新] 木製部材	木材の割れ・破損は、ないか。
			釘サイズの間違いは、ないか。
			接合部に隙間が生じていないか。

表③-2 現地据付工事チェックリスト (3/3)

据付検査箇所	部材の更新/ 再使用区分	検査内容
13	ファンスタック ファンガード [更新] 木製部材 シャフト材-(SUS304) [既設品再使用] ファンガード SUS304	部材の割れ・破損は、ないか。
		ボルト類の緩みは、ないか。
		ボルト類の取付間違いは、ないか。
		バトン間に隙間が生じていないか。
		ファン・中間軸との接触は、ないか。
14	散水装置 既設品再使用 [更新] Uボルト SUS304	ノズル・パッキン類の取付忘れは、ないか。
		ボルト類の取付間違いは、ないか。
		フランジボルト類の緩みは、ないか。
15	試運転段取	減速機潤滑油は、規定通り封入されているか。
		ファン取付けボルトの緩みは、ないか。
		中間軸軸芯の狂いは、ないか。
		ファンスタック、ファン、中間軸の接触は、ないか
16	試運転	通水による外壁からの水漏れは、ないか。
		通水によるルーバーからの水漏れは、ないか。
		設計動力にて運転されているか。
		電動機、減速機の温度上昇は正常か。
		異常振動・異音の発生は、ないか。

④木材の変形の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の主構造部材である木材の異常な変形の有無について調査し、冷却塔の倒壊への影響を評価する。調査は、散乱した木材の外観検査及びサンプリング試料を用いた外観検査により行う。なお、改修工事や更新工事前の木材については、各工事の検査成績書により調査（③施工の問題）する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔の倒壊後、散乱した確認可能な木材について、異常な変形の有無を調査するとともに、破損部の確認や破損した木材の状態を調べる。また、冷却塔の北面を中心としてサンプリング試料を取り出し、外観検査により、木材の異常な変形の有無を確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 倒壊時の現場確認による木材の状態

冷却塔倒壊直後に、木材の変形・破損について現場にて目視による外観確認を行った。冷却塔の柱は南北方向に17本、東西方向に7本あり、柱の場所を南北は北側から1から17の数字で、東西は東側からAからGのアルファベットで示す。柱の番地を図④-1の平面図に示す。冷却塔の柱には2か所の接合部があるので、下部を㉑、上部を㉒とした（図④-1の断面図参照）。

倒壊直後に確認が可能であった最東面（1Aから17Aの柱の面）及び最北面（1Aから1Gの柱の面）についての調査結果を図④-2及び図④-3に示す。これらの写真より、最東面については接合部㉑の部分での木材の破損が確認できた。最東面の接合部㉑より下にある柱については、ほとんど変形はないことを確認した。次に、最北面では、6か所の接合部が確認できた。最北面においても、接合部での破損が確認されたが、接合部間の木材が変形している部分については確認できなかった。

破損している木材について南面からサンプルを取り出し、木材の状態について目視にて確認を行った。結果を図④-4～図④-8に示す。図④-4及び図④-5より南面A通り柱及び外側階段の柱材を確認した結果、木材表面部（外皮）は大きな欠陥及び曲がりがないことが分かったが、破損部から内面を観察した結果、両方の柱とも、手で触ると容易に崩れる状態であること、崩れた木材片は軽いことなど、劣化が激しく、腐朽していると考えられる状態であった。参考として、図④-7～図④-8に南側階段の損傷状態を示す。本部分は、冷却塔の柱や筋かいと使用環境は異なっており、降雨以外では常時乾燥状態であったと考えられる部分である。図④-6から損傷している南側の柱の一部と外側階段斜め材（方づえ）とともに、劣化状態は類似しており、破損部において手で触ると容易に崩れる部分があることが観察できた。

以上の確認の結果から、冷却塔本体の柱及び筋かいについて、柱及び筋かいの表

面部の変形や破損は見当たらないものの、木材内部の劣化は、場所によってはかなり進行していたと推測でき、「⑤木材の腐朽の影響」で検討することとした。

3.2 サンプルング試料による木材の劣化状態確認

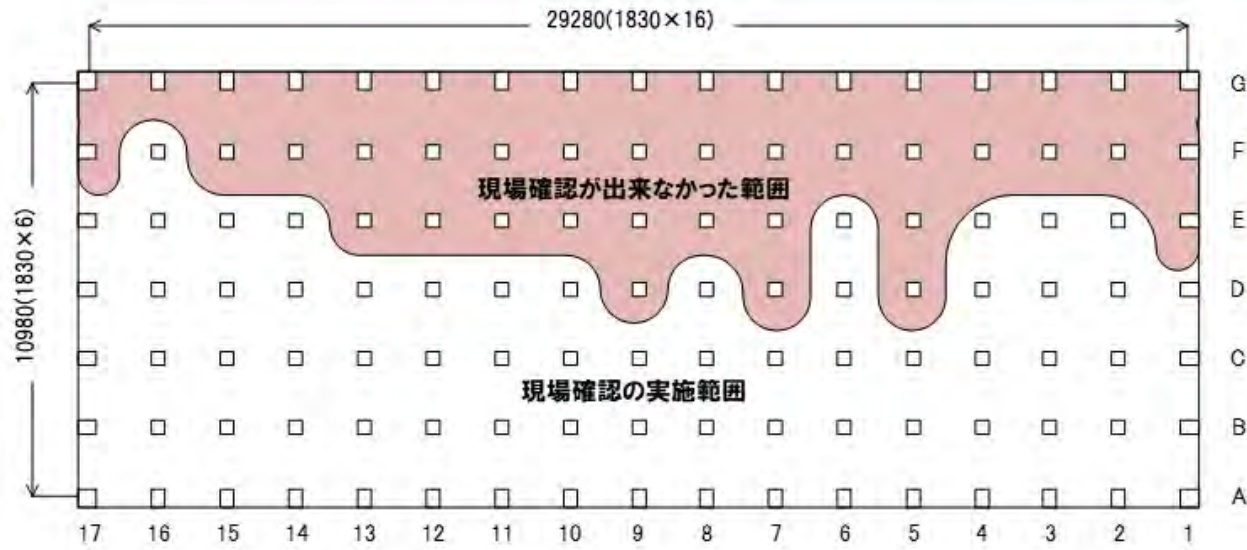
本事象においては、主構造部材である木材が台風 15 号の強風による荷重に耐えきれずに破損し、倒壊に至った可能性が考えられるため、荷重を受ける主構造部の接合部近傍木材を採取した。採取位置は採取可能な北面及び南面とした(図④-9 参照)。

外観検査の結果を図④-10 に示す。一部のサンプルについて、内部の劣化は見られたものの異常な曲がり、凹凸、穿孔等の変形を伴う木材は確認できなかった。

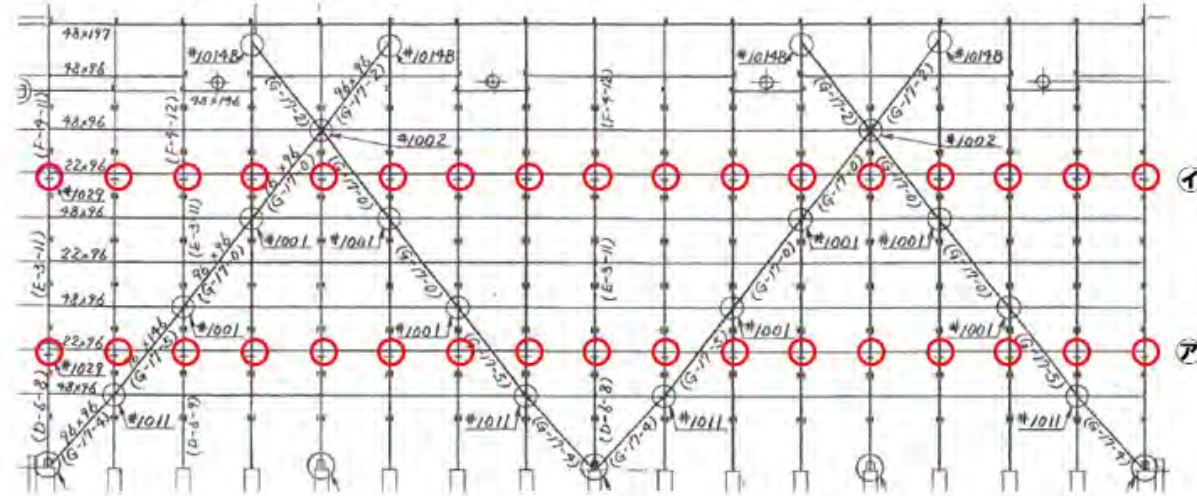
4. 評価結果

倒壊時の現場確認による木材の状態確認の結果及びサンプルング試料による木材の変形・破損状態を確認した結果、倒壊した木材及び倒壊せず残存する木材ともに異常な変形・破損は確認できなかったことから、冷却塔倒壊事象に影響を与えていないと考えられる。

平面図
基礎部の番地



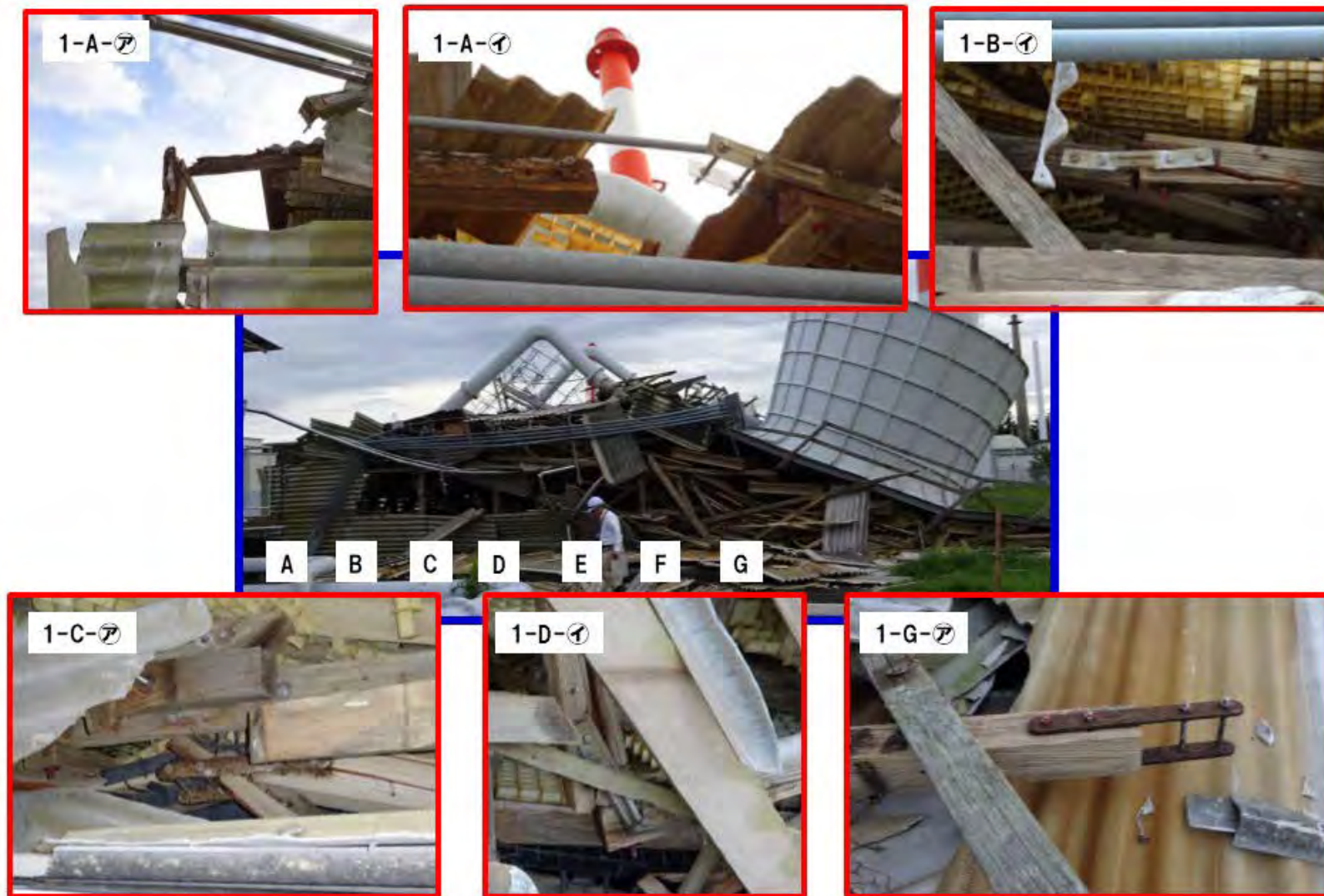
断面図



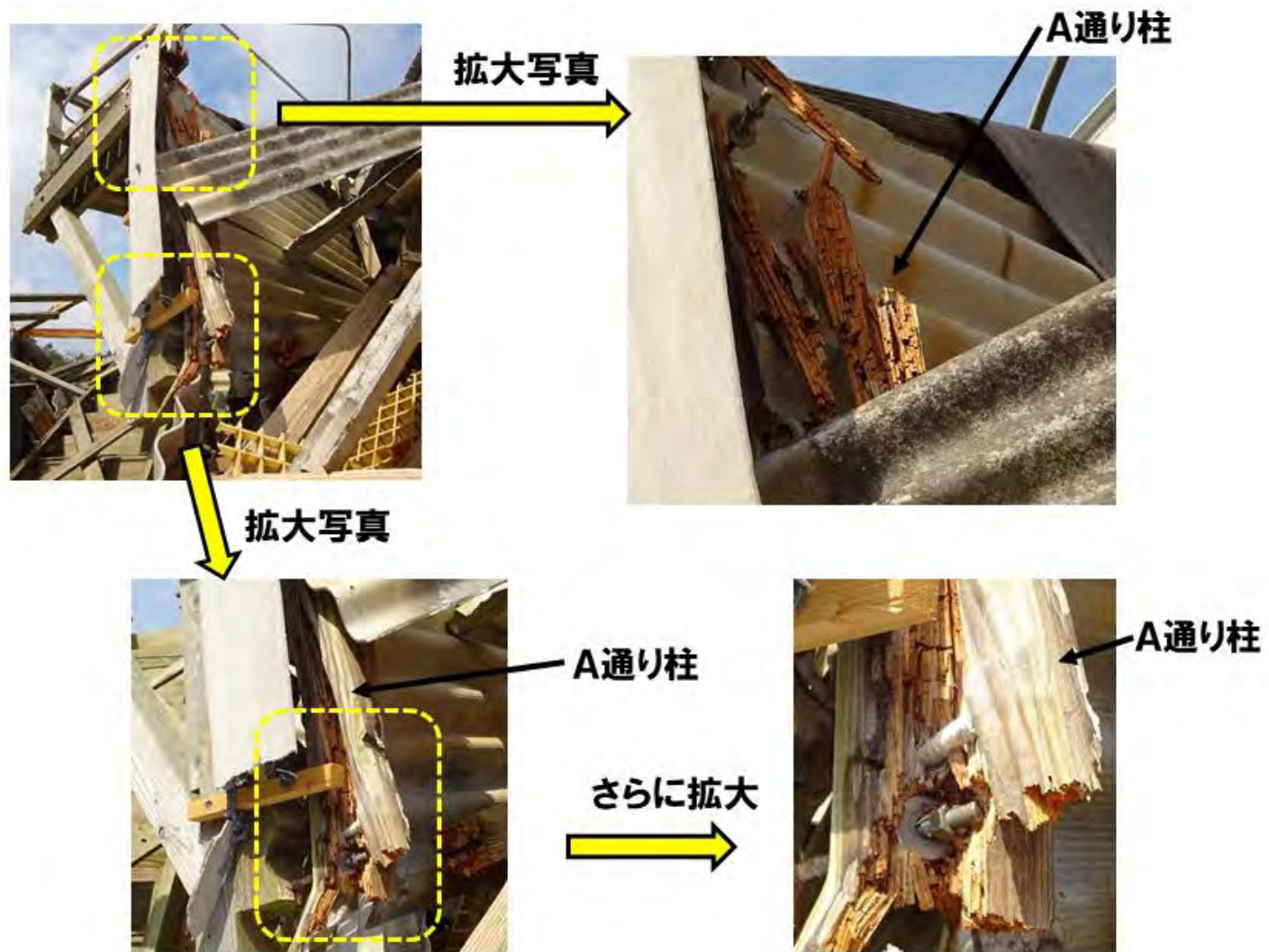
図④-1 冷却塔の倒壊直後における現場確認箇所



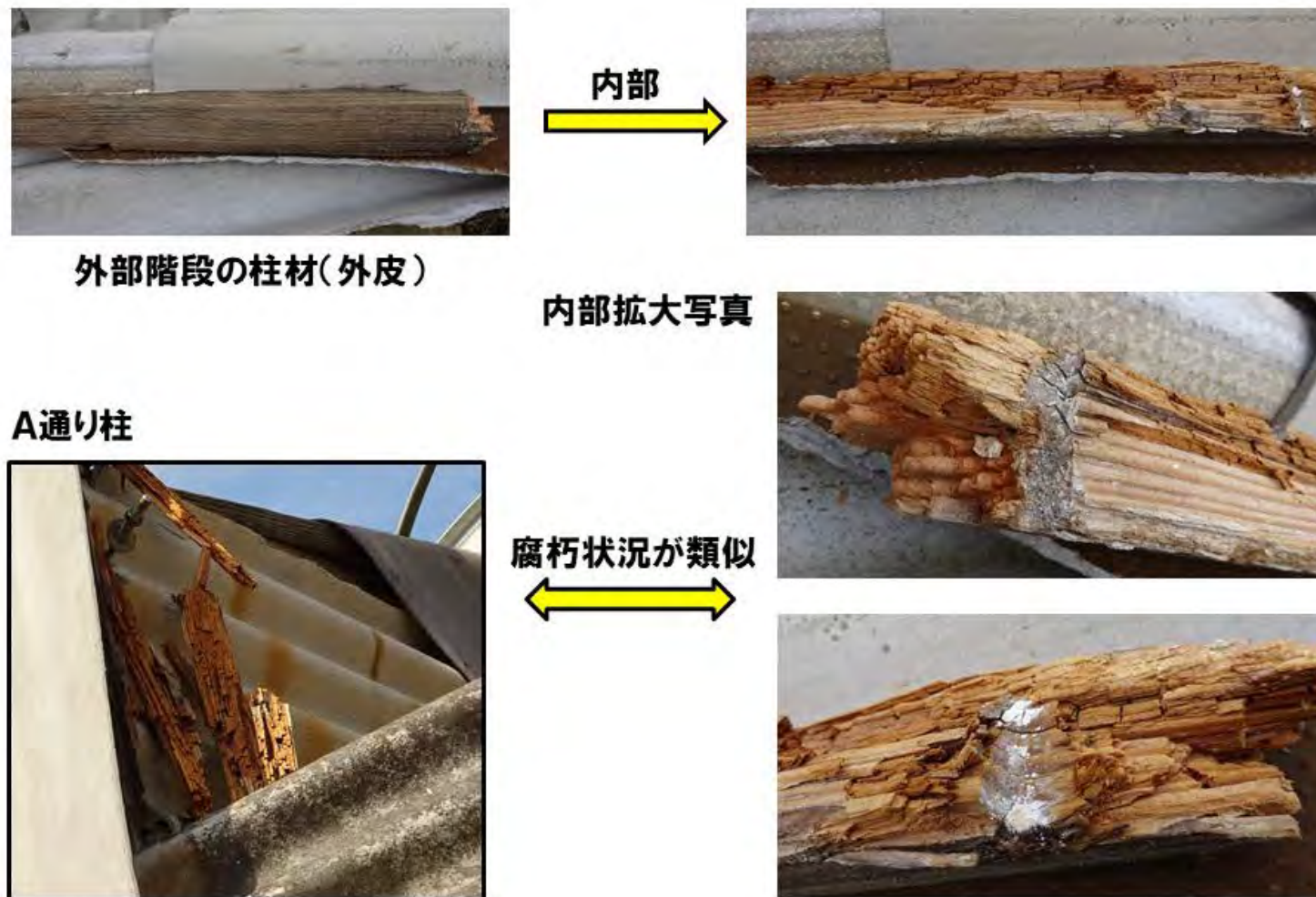
図④-2 冷却塔の東面における柱接合部の調査



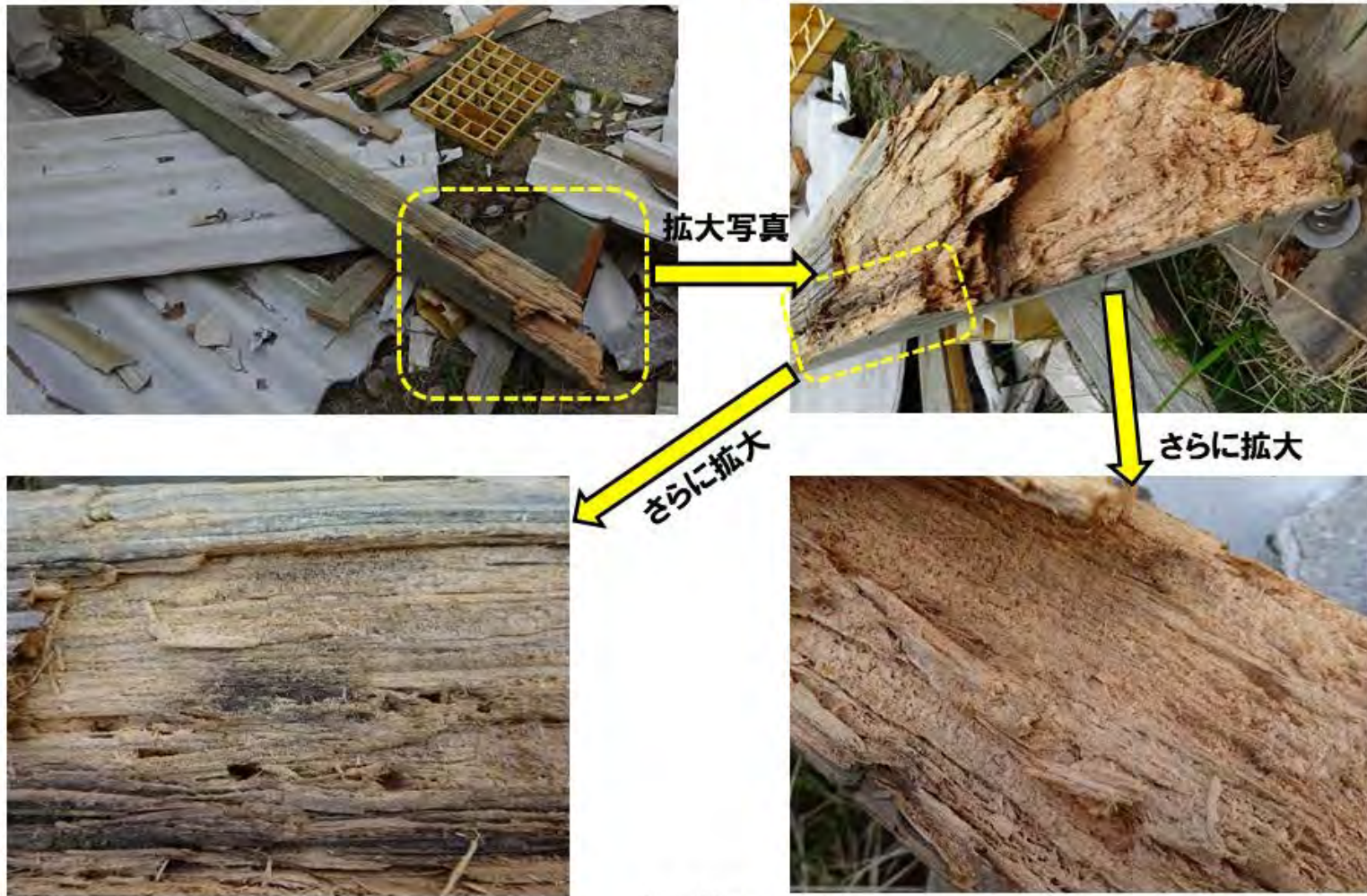
図④-3 冷却塔の北面における柱接合部の調査



図④-4 南面 A 通り柱の木材の状態

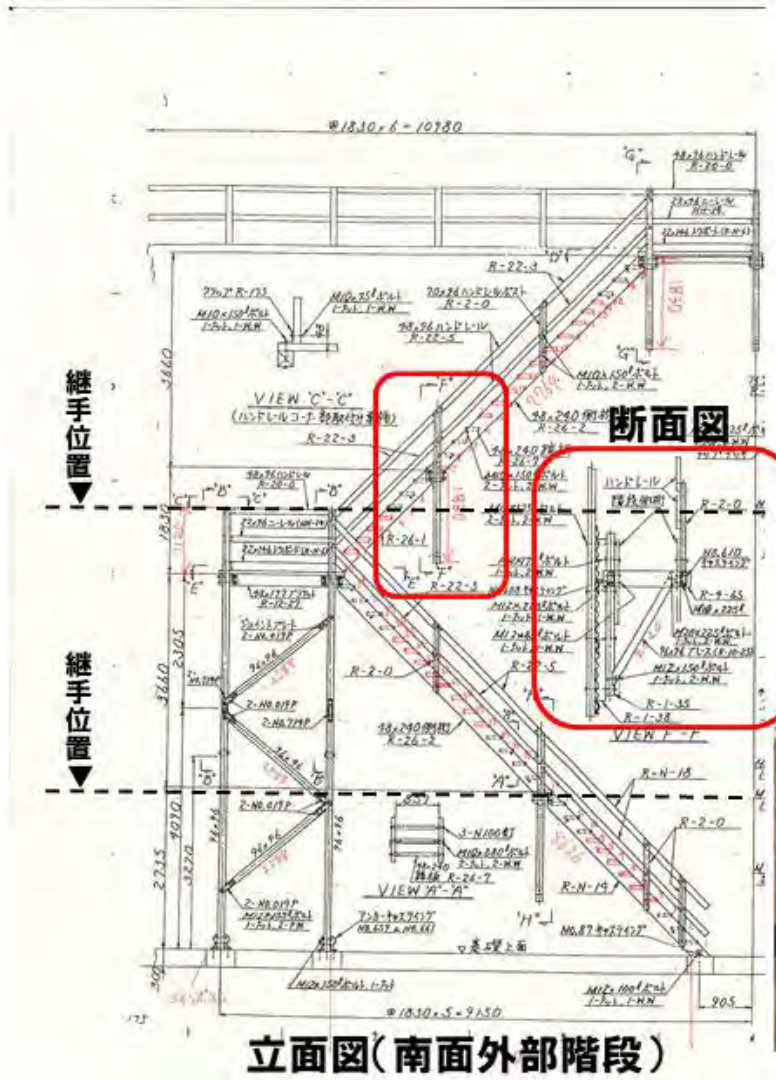


図④-5 南面の柱の木材の状態



腐朽状況は、階段斜め材(方づえ)と類似

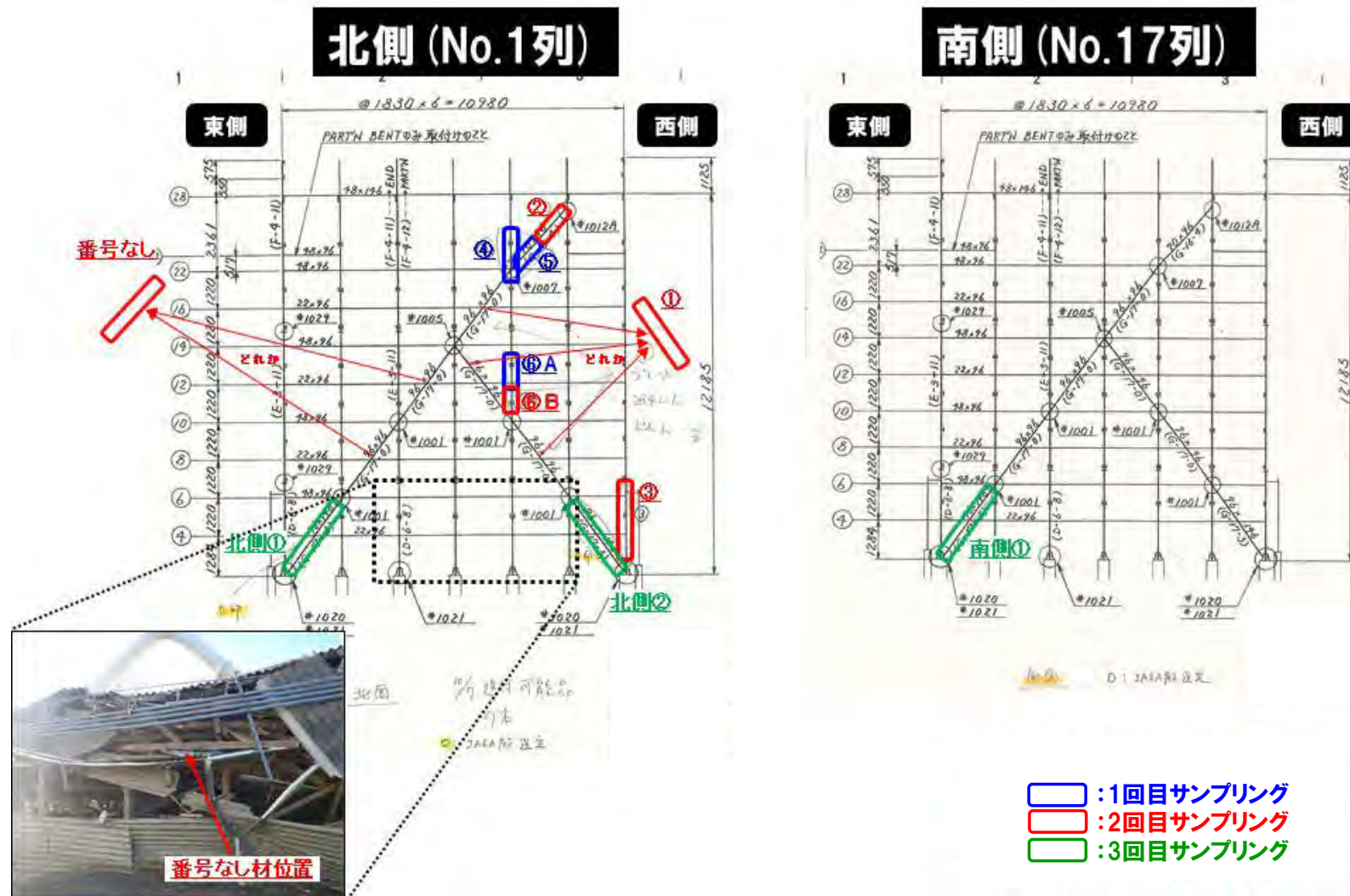
図④-6 南面の柱の木材の状態



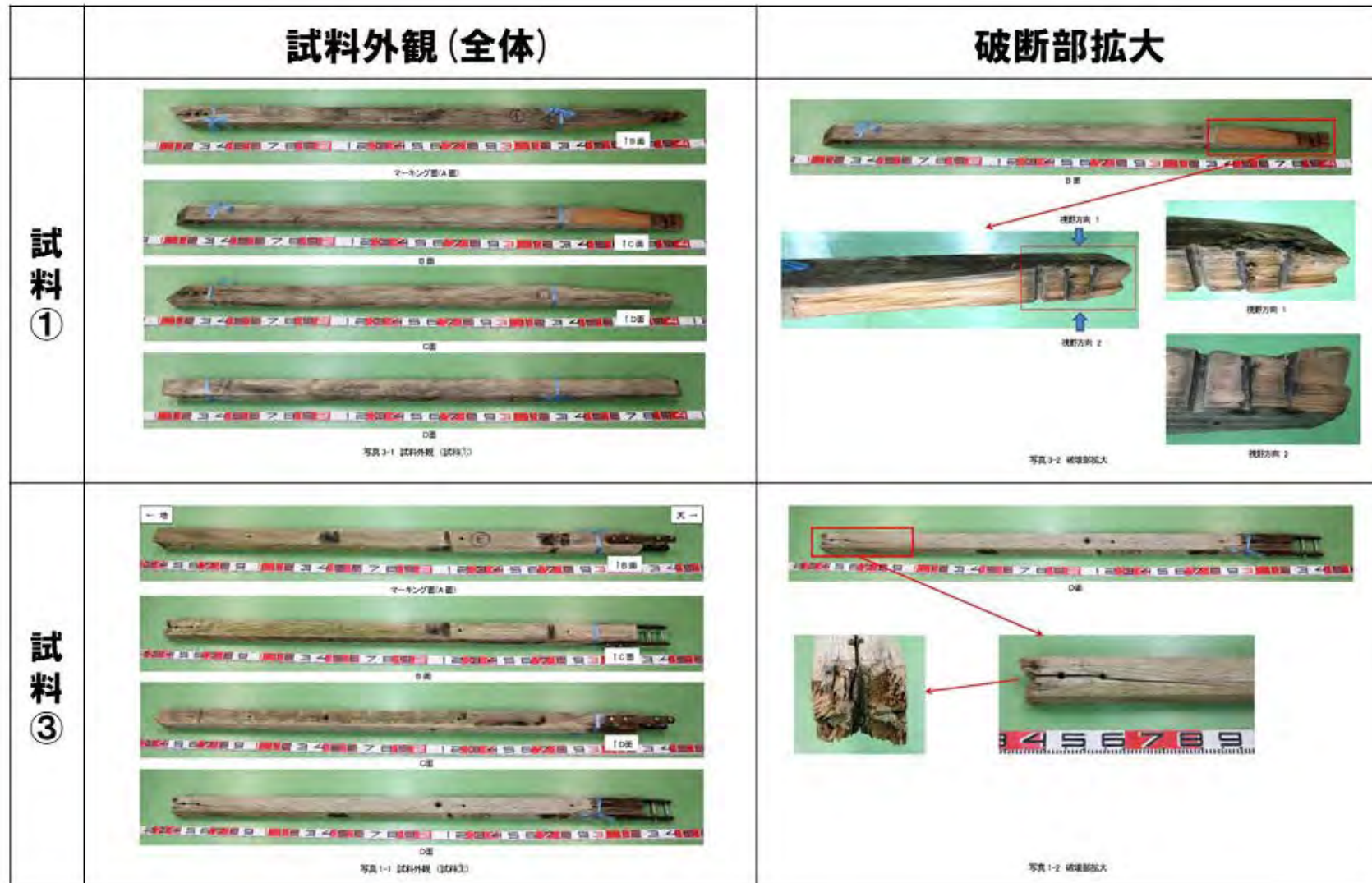
図④-7 冷却塔の南面における柱接合部等の詳細調査箇所



図④-8 南面の階段斜め材の木材の状況

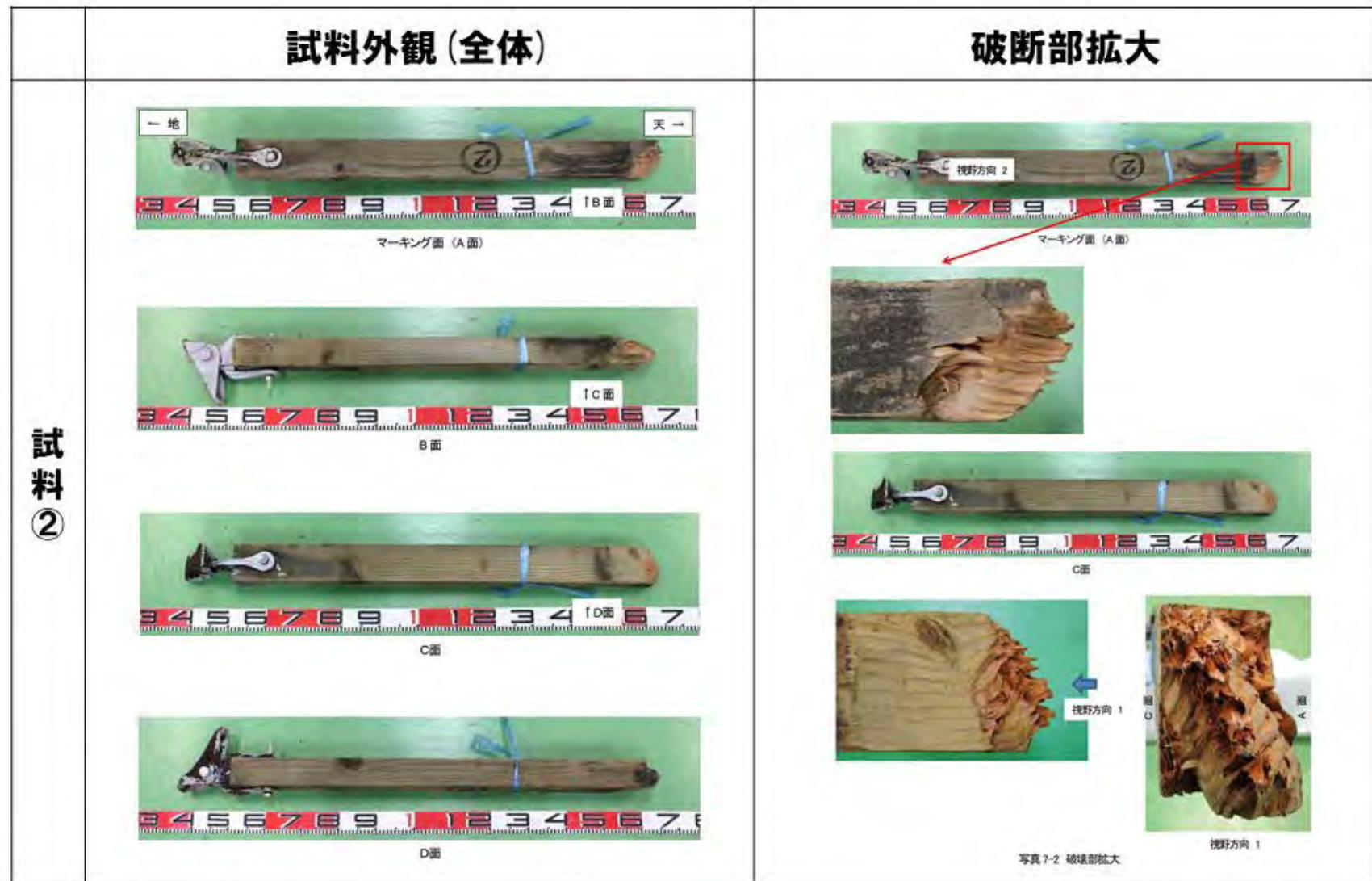


図④-9 サンプリング試料の採取箇所



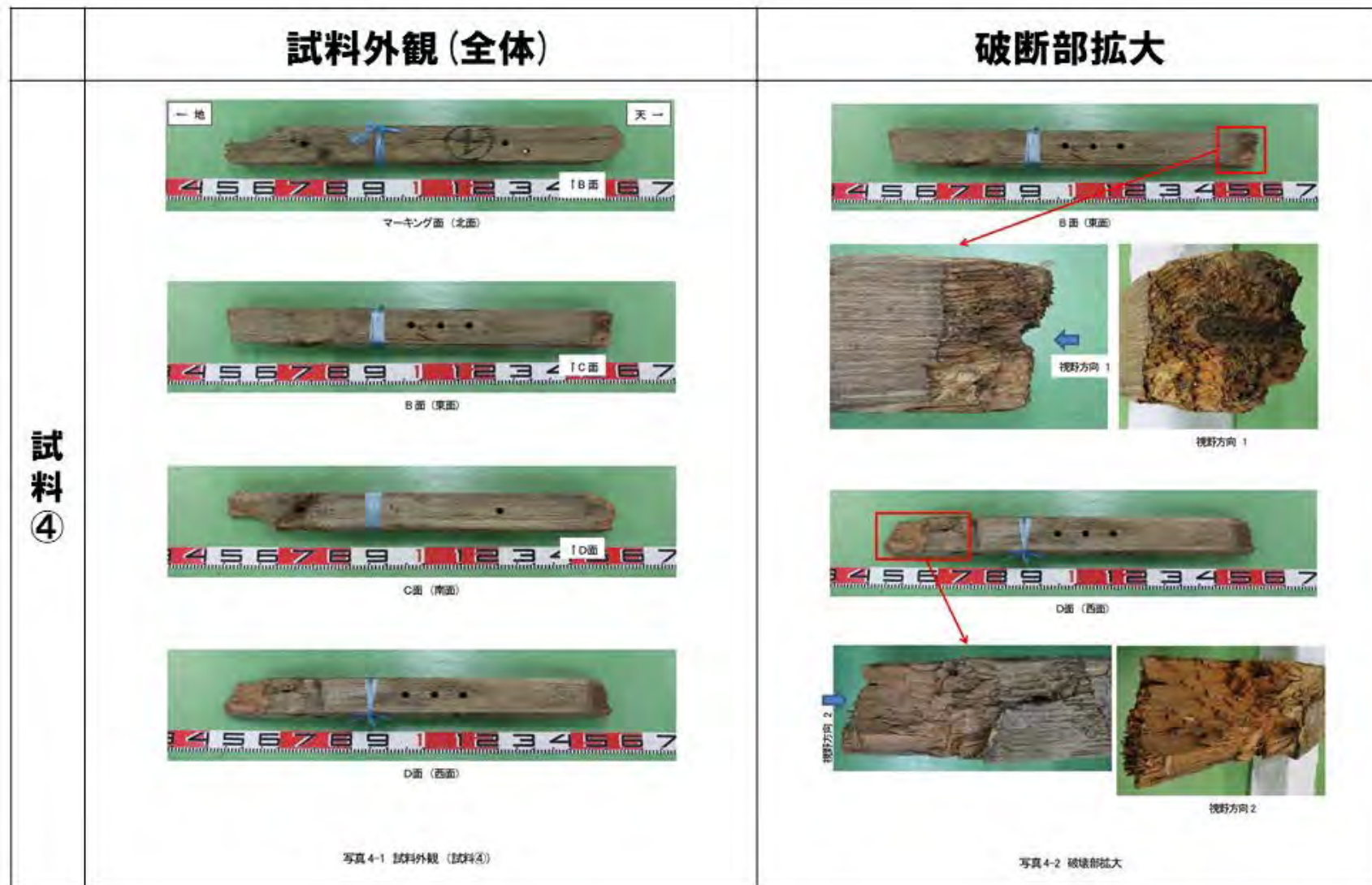
図④-10 サンプルリング試料の外観検査 (1/3)

試料②



図④-10 サンプルリング試料の外観検査 (2/3)

試料④



図④-10 サンプル試料の外観検査 (3/3)

⑤木材の腐朽の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊の原因究明のため、当該冷却塔の主構造部材である木材の劣化状態を外観確認(損傷状態、劣化状態)、針貫入試験等により調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔は、柱、横材及び筋かいから構成された構面を東西方向に 17 構面、南北方向に 7 構面配置しており、柱で鉛直荷重を負担し、筋かいのみで水平荷重(風荷重)を負担する構造となっている。また、メーカー仕様を基に設計・施工されており、建築基準法に基づいた木造構造物とは接合部の構成が異なる。そのため、接合部の違いによる脆弱性に着目し、筋かいに使用されている木材について外観確認(損傷状態、劣化状態)、針貫入試験等の結果を評価する。

3. 確認・調査結果

3.1 木材の劣化調査結果

冷却塔の下部は、東西方向の壁に冷却の空気を取り入れる木製ルーバーが設けられ、通風が確保されている。平成 18 年 8 月の運転停止以降、約 1 回/月の頻度での保守運転以外は連続運転を行っていなかった。

このような状況から、JMTR 運転停止後約 13 年間は、冷却塔内部は比較的乾燥している状態、また冷却塔の下部は雨水が侵入しやすく木材が湿潤/乾燥を繰り返す状態であったと考えられる。一方、筋かい下端部の接合部は接合金物の固定ボルトで接合されているため、固定ボルトのボルト穴が開けられていた(図⑤-1)。

外観検査より、東側の筋かいの下端部のうち 5 箇所が抜け出し及び 1 箇所に損傷が確認された。

冷却塔の東面筋かいの下端部(接合部近傍)と中央部における針貫入試験の測定箇所を図⑤-2 に示す。針貫入試験は針の直径約 2mm の治具にて行った。針貫入試験の結果を表⑤-1 に示す。測定は 3 回行い、平均値を求めた。また、得られた針貫入試験結果を図⑤-3 にグラフとしてまとめた。この結果、下端部には針貫入深さが 30mm 以上の箇所が 5 か所、最大で 58mm の針貫入深さの箇所も観測された。中央部では、針貫入深さは約 10mm 前後とほぼ一定であった。このことから、下端部が中央部よりも劣化が進行していたことを確認するとともに、腐朽が進行していたものと考えられる。筋かい下端部(接合部)の木材における固定ボルト穴の周囲の劣化状態を図⑤-4 に示す。

3.2 木材の劣化調査結果と非破壊検査結果

新材の断面積に対する針貫入試験結果等から木材の腐朽していない部分の断面積の比(残存断面積比)の評価を行った結果を図⑤-5、木材の腐朽に伴う部材耐力低

下の考え方を図⑤-6に示す。冷却塔は、中央部に比べ、下端部が全体的に劣化している傾向が確認できた。筋かい 10-AB、13-AB の下端部の残存断面積比はゼロであり、筋かい 15-AB の下端部の残存断面積比は 0.04 と小さかった。なお、新材に対し実施した針貫入試験と穿孔抵抗測定において、表層から 5mm 程度は、同様に抵抗が無い結果であることから、木材表層から 5mm 分を控除して残存断面積比を算出している。

4. 評価結果

倒壊した冷却塔は、東方向からの風に抵抗する筋かいのうち 5 箇所が抜け出し及び 1 ヶ所に劣化による脆弱部が確認された。要因としては、東西方向の下部はルーバーとなっており、内側へ傾斜していて降雨が筋かい端部へ入りやすい構造となっていることが考えられる。また、筋かい下端部の接合部は接合金物の固定ボルトで接合されているため、繊維方向に沿って、木材内部への水分の浸み込みが生じ、ボルト周辺の劣化(腐朽)が進んだものと考えられる。

木材が腐朽する条件は、①栄養(木材)、②温度、③水分(湿度)、④空気が整うこと^{〔⑤-1〕}とされている。腐朽するメカニズムとして、運転時は、流水のため、木材に腐朽菌が付着しにくかったが、運転停止後は、流水が無いため、木材に腐朽菌が付着し、栄養を吸収することが可能となった(要因①)。気温は冬季の一部を除き適温であった(要因②)。木材は運転停止後、降雨の影響を受けて乾湿を繰り返している状況であった(要因③)。また、運転時は、流水のため、空気の入りができなかったが、運転停止後は、空気の入りが可能となった(要因④)。以上のことから木材が腐朽する 4 条件が整っていたと考えられる。

5. 参考文献

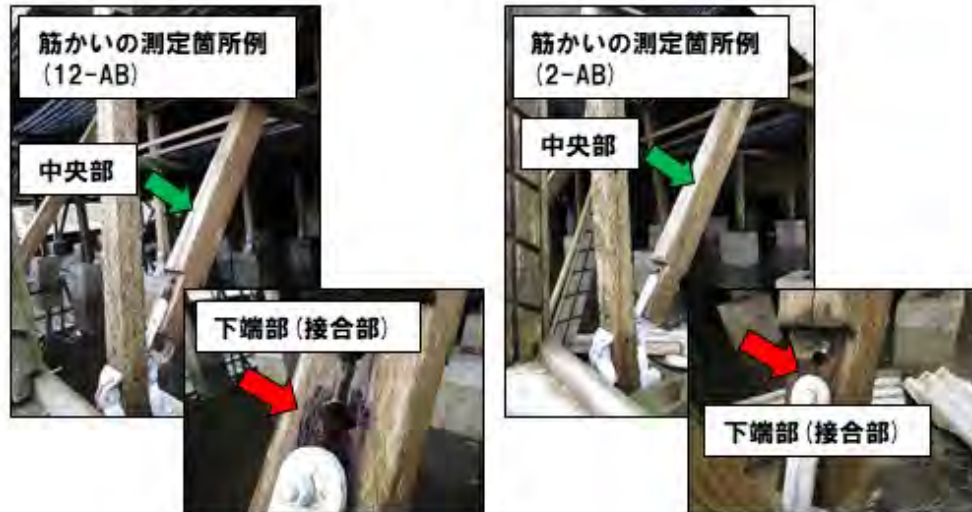
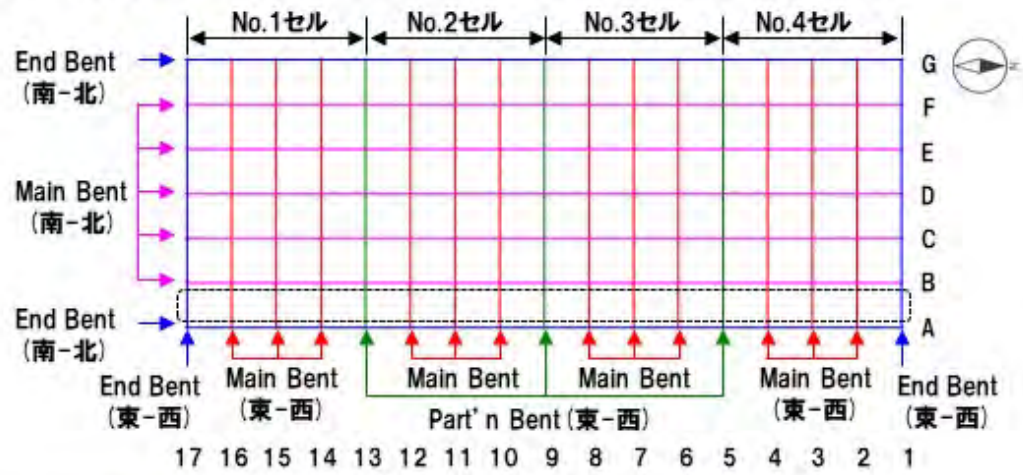
- 〔⑤-1〕 国土交通省 国土技術政策総合研究所、「木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究」, 国総研資料 第975号, 2017年.



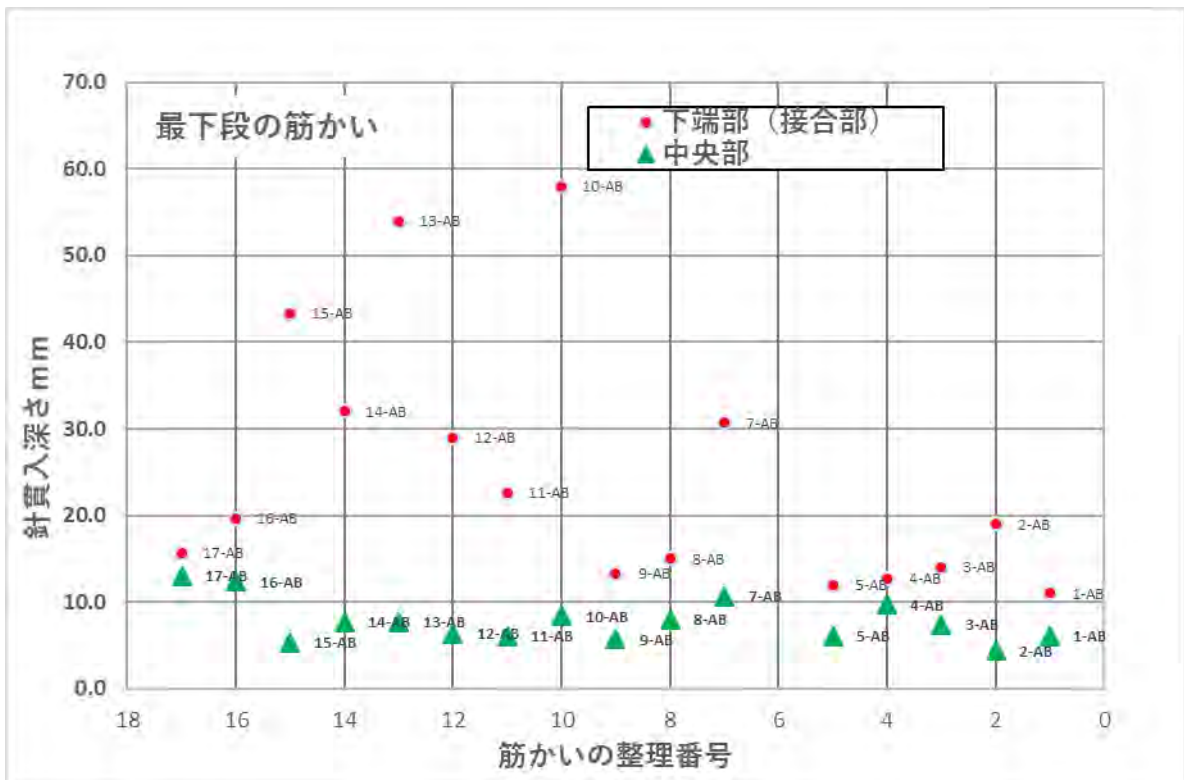
図⑤-1 筋かい下端部の接合部近傍部の写真

二次冷却系統冷却塔 平面図

○ : 測定範囲



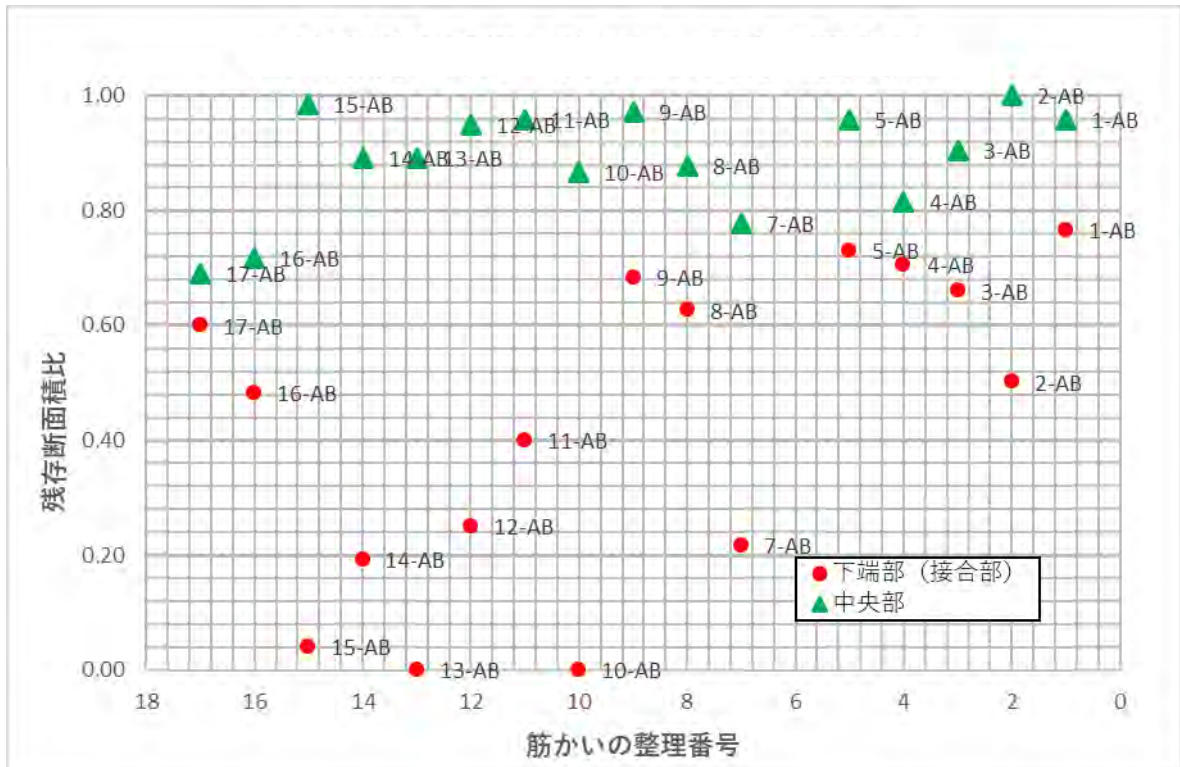
図⑤-2 冷却塔・筋かいの測定箇所(針貫入試験)



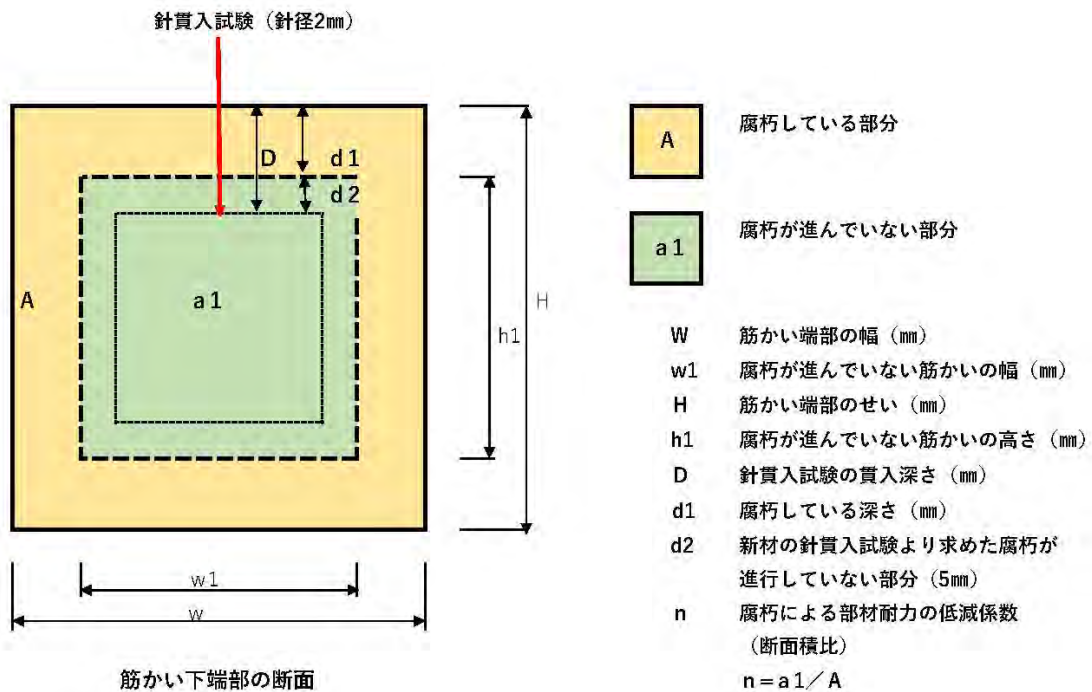
図⑤-3 冷却塔・筋かいの針貫入試験結果



図⑤-4 固定ボルト穴の周囲の劣化状態



図⑤-5 冷却塔残存断面積比



図⑤-6 木材の腐朽に伴う部材耐力低下の考え方

表⑤-1 冷却塔の針貫入試験結果

No	部 材 名 称	部 材 の 位 置		部 材 符 号	現 場 調 査					備 考	
					① 損 傷 の 状 態	② 劣 化 の 状 態	③ 針 貫 入 の 平 均 値 (mm)	1 回 目 (mm)	2 回 目 (mm)		3 回 目 (mm)
1	筋かい	1-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	6.0	6.0	5.0	7.0	サンプリング試料
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	11.0	12.0	11.0	10.0	
2	筋かい	2-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	4.3	5.0	5.0	3.0	上端に割裂あり
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	19.0	19.0	20.0	18.0	
3	筋かい	3-AB	中央	G-17-3	○※1	×(腐朽あり)	7.3	7.0	10.0	5.0	上端のボルト2本抜け出しあり
	EW		下端	G-17-3	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	14.0	14.0	11.0	17.0	
4	筋かい	4-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	9.7	9.0	10.0	10.0	
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	12.7	12.0	11.0	15.0	
5	筋かい	5-AB	中央	G-17-3	○※1	×(腐朽あり)	6.0	6.0	7.0	5.0	上端のボルト2本緩みあり
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	12.0	18.0	11.0	7.0	
6	筋かい	6-AB	中央	G-17-3							危険を伴うため未計測
	EW		下端	G-17-3							
7	筋かい	7-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	10.7	10.0	12.0	10.0	筋かいとの交点で柱折損
	EW		下端	G-17-3	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	30.7	29.0	41.0	22.0	
8	筋かい	8-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	8.0	8.0	8.0	8.0	上端に腐朽あり、割裂あり
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	15.0	15.0	14.0	16.0	
9	筋かい	9-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	5.7	7.0	6.0	4.0	筋かいとの交点で柱折損
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	13.3	14.0	14.0	12.0	
10	筋かい	10-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	8.3	9.0	9.0	7.0	上端に割裂あり
	EW		下端	G-17-3	×(損傷あり)	×(腐朽あり)	58.0	80.0	80.0	14.0	
11	筋かい	11-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	6.0	4.0	8.0	6.0	上端に腐朽あり
	EW		下端	G-17-3	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	22.7	33.0	26.0	9.0	
12	筋かい	12-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	6.3	7.0	6.0	6.0	
	EW		下端	G-17-3	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	29.0	51.0	19.0	17.0	
13	筋かい	13-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	7.7	8.0	8.0	7.0	上端に腐朽あり、割裂あり
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	54.0	48.0	34.0	80.0	
14	筋かい	14-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	7.7	7.0	8.0	8.0	
	EW		下端	G-17-3	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	32.0	48.0	15.0	33.0	
15	筋かい	15-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	5.3	5.0	5.0	6.0	上端に割裂あり
	EW		下端	G-17-3	○※1	×(空洞化)	43.3	80.0*	38.0	12.0	
16	筋かい	16-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	12.3	14.0	11.0	12.0	上端に割裂あり
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	19.7	23.0	19.0	17.0	
17	筋かい	17-AB	中央	G-17-3	○※1	○※2	13.0	16.0	15.0	8.0	サンプリング試料
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	15.7	13.0	17.0	17.0	
18	筋かい	A-17~16	中央	G-17-4	○※1	○※2	8.3	9.0	9.0	7.0	柱接合部との離れあり
	NS		下端	G-17-4	○※1	○※2	15.3	17.0	11.0	18.0	
19	筋かい	A-9~10	中央	G-17-4	○※1	○※2	9.3	10.0	10.0	8.0	
	NS		下端	G-17-4	○※1	○※2	30.3	36.0	15.0	40.0	
20	筋かい	A-9~8	中央	G-17-4	○※1	○※2	7.7	6.0	7.0	10.0	
	NS		下端	G-17-4	○※1	○※2	13.0	11.0	13.0	15.0	
21	筋かい	A-1~2	中央	G-17-4	○※1	○※2	8.3	7.0	10.0	8.0	
	NS		下端	G-17-4	×(抜出あり)	×(腐朽あり)	80.0	80.0	80.0	80.0	
22	筋かい	1-F~G	中央	G-17-3	○※1	○※2	11.0	10.0	12.0	11.0	サンプリング試料
	EW		下端	G-17-3	○※1	○※2	15.0	19.0	15.0	11.0	
共通：											
注 記	(1)損傷の状態 (○※)：目視点検において木材強度に影響する明らかな損傷が認められない状態を示す。										
	(2)劣化の状態 (○※)：目視点検において木材強度に影響する明らかな劣化が認められない状態を示す。										
(3)針貫入試験：針の直径約2mmの治具により貫入深さを計測（貫入寸法はJIS1級鋼製巻尺にて計測）											

⑥保守運転の影響

1. 確認・調査事項

二次冷却系統の保守運転履歴（原子炉運転時の運転を含む）を確認し、保守運転の影響から木材の性能低下に繋がることがなかったか調査し評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔は、平成 10 年度から平成 11 年度にかけて更新を行っていることから、平成 10 年度以降の二次冷却系統運転等（平成 18 年 9 月以降は保守運転等）の履歴について、当時の記録（二次冷却系統「起動」確認書及び二次冷却系統「保守運転」確認書）により確認する。また、二次冷却系統の保守運転の頻度について、規定類に定めがないかの確認を行う。

3. 確認・調査結果

3.1 二次冷却系統運転等履歴

平成 10 年 10 月から平成 18 年 8 月までは、原子炉の運転（第 125 サイクル～第 165 サイクル）を行っており、原子炉運転中は二次冷却系統は連続運転を行っていた。

平成 18 年 9 月から平成 23 年 2 月までは JMTR 改修工事期間であったことから、原則 1 回/月で二次冷却系統の保守運転（試運転を含む。）を実施していた。ただし、保守運転の時間は 1 回 40 分程度であった（以下同じ。）。

平成 23 年 5 月から平成 29 年 3 月までは、当時 JMTR の再稼働を目指しており、原則 1 回/月で保守運転を実施していた。

平成 29 年 4 月に JMTR は原子力機構が策定した「施設中長期計画」^[⑥-1]により廃止施設に決定し、平成 29 年 4 月から平成 29 年 8 月までは原則 1 回/月の保守運転を行っていたが、平成 29 年 8 月に実施した二次冷却系統を運転して行う施設定期自主検査以降、1 回/年の二次冷却系統を運転して行う施設定期自主検査を実施する場合のみの運転としていた。調査した履歴を図⑥-1 に示す。

3.2 保守運転の規定の確認

JMTR 運転手引（特定施設）の第 1 章通則に平成 28 年 8 月に「保守運転」の項目を追加し、それに基づき二次冷却系統の保守運転を実施してきた。しかし、上述のとおり、平成 29 年 8 月以降は 1 回/年の二次冷却系統を運転して行う施設定期自主検査を実施する場合のみの運転としていた。

4. 評価結果

二次冷却系統の保守運転は主に循環ポンプ、ファン駆動部等動的機器の保守のため行っていたため、原子炉の運転を行うことがないと決定した平成 29 年度以降は原子炉の冷却を行うための連続運転を行うことが正式になくなったため、1 回/年の施設定期自主検

査時に機能を確認することとしていた。

一方、木材に対しては、湿潤・乾燥のサイクル数が少ないほうが、膨張、収縮による割れの可能性が減ると考えられるが、行っていた保守運転の運転時間（約 40 分）及び頻度（1 回/月から 1 回/年）から、保守運転の影響よりも降雨による影響の方が大きいため、保守運転の実施による木材への影響は少ないと評価した。

5. 参考文献

[⑥-1]：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「施設中長期計画」、平成 29 年 4 月 1 日（策定）

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成10年度	運転	123cy	124cy						125cy		126cy		127cy
	保守運転												
	検査・補修等								冷却塔の更新 (No.1セル)				
平成11年度	運転		128cy	129cy						130cy	131cy		132cy
	保守運転												
	検査・補修等								冷却塔の更新 (No.2~4セル) 減速機分解点検				
平成12年度	運転	133cy	134cy					135cy	136cy		137cy		138cy
	保守運転												
	検査・補修等												
平成13年度	運転	139cy	140cy					141cy	142cy		143cy		144cy
	保守運転												
	検査・補修等												

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成14年度	運転	144cy	145cy		146cy					147cy			
	保守運転												
	検査・補修等												
平成15年度	運転			148cy				149cy	150cy		151cy		152cy
	保守運転												
	検査・補修等												
平成16年度	運転	152cy	153cy	154cy					155cy	156cy		157cy	158cy
	保守運転												
	検査・補修等										中間軸更新		
平成17年度	運転	158cy	159cy	160cy							161cy		162cy
	保守運転												
	検査・補修等		電動機点検整備										

図⑥-1 二次冷却系統運転等履歴 (1/3)

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成18年度	運転	163cy		164cy		165cy							
	保守運転	-					-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等												健全性調査
平成19年度	運転												
	保守運転	-	-						-	-	-	-	-
	検査・補修等												
平成20年度	運転												試運転
	保守運転	-	-	-	-	-						-	-
	検査・補修等						冷却塔の補修		電動機等の更新				
平成21年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-						-	-
	検査・補修等												

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成22年度	運転						試運転	試運転	試運転	試運転	試運転		
	保守運転				-	-							-
	検査・補修等												
平成23年度	運転												
	保守運転		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等												健全性調査
平成24年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等						ひび割れ等補修工事						
平成25年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等												

- 保守運転(試運転を含む。)

図⑥-1 二次冷却系統運転等履歴 (2/3)

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成26年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等												
平成27年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等				健全性調査								
平成28年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	検査・補修等									減速機点検整備		減速機点検整備	
平成29年度	運転												
	保守運転	-	-	-	-	-							
	検査・補修等												

年度	状況	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平成30年度	運転												
	保守運転						-						
	検査・補修等												
令和元年度	運転												
	保守運転												
	検査・補修等												

- 保守運転(試運転を含む。)

図⑥-1 二次冷却系統運転等履歴 (3/3)

⑦点検内容の問題

1. 確認・調査事項

メーカー推奨の日常点検項目（内容）を確認し、冷却塔の倒壊に与えた影響を評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

メーカー推奨の日常点検項目（内容）に対する実施状況を確認する。

① 日常点検

② 施設定期自主検査の確認

さらにメーカーが行う推奨点検についての調査を行う。

また、腐朽に係る知見の点検への反映の調査についても行う。

3. 確認・調査結果

3.1 日常点検について

今回の調査で定期点検について改めてメーカーに確認したところ、メーカー推奨の一般的な日常点検項目は、「減速機のオイル量、汚れ」、「運転中の異常な振動」、「運転中の散水状態」、「ボルト等の緩み」、「木部各所の破損」、「金物等の腐食」である。それらメーカー推奨の一般的な日常点検項目に対し、冷却塔に対して行っていた点検内容についてまとめたものを表⑦-1に示す。

メーカー推奨の日常点検については、冷却塔の塔内上部（散水ノズル周辺まで）及び下部（基礎及びルーバー部）など目視確認できる範囲内において巡視点検等において行われており、充填剤等がある塔内中部（散水ノズルから下、ルーバーから上の部分）については目視確認できる範囲に限定されていたことが確認された。

3.2 施設定期自主検査について

JMTRの施設定期自主検査において、冷却塔の検査項目は外観検査であった。冷却塔の外観検査において、目視確認できる範囲内において行われていたことが確認された。

施設定期自主検査等の検査項目の設定経緯については、以下のとおりであった。

(1) 文部科学省研究炉等安全規制検討会での検討に資するため、「試験研究炉定期安全レビュー」を実施した。その結果を受け、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」を参考に重要度分類を行い、これにより、施設定期検査、施設定期自主検査等の検査項目の整理を行った。

(2) JMTRの重要度分類は、文部科学省研究炉等安全規制検討会での検討の結果、妥当と判断され、その結果を受けて原子炉施設保安規定のJMTRに係る施設定期自主検査等の改定（平成15年9月）を行った。なお、倒壊した冷却塔を含む二次冷却系統は、安全上の機能別重要度分類において、PS（異常の発生防止機能）のうち、クラス3（確立された設計、建設及び試験の技術並びに運転管理により、一般の産業施

設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持する必要がある構築物、系統及び機器)に分類している。

(3) 試験炉規則の改定(平成16年2月)に合わせ、重要度分類を行い、原子炉運転委員会(当時の日本原子力研究所の安全審査機関)の審査を受け、保安規定における施設定期自主検査の検査項目の改定(平成16年3月)を行った。

3.3 メーカーが行う推奨点検

冷却塔の建設当時のメーカーによる取扱説明書においては、木材に関する定期点検として「半年1回の外観検査、年1回の清掃」が推奨されていたが一般的な定期点検表であり、処置としては「破損したものを取り換える」ものであった。一方、今回の調査で定期点検について改めてメーカーに確認したところ、メーカーが行う推奨点検の一般的な点検項目は、「木部各所の腐朽・劣化・破損」、「ボルト等金物の腐食・破損・外れ」、「エリミネータ、充填物の劣化・破損・脱落」、「駆動装置の点検」などである。それらメーカー推奨の一般的な点検項目に対し、⑧更新・補修の影響のとおり不定期に行い、目視確認できる範囲内で実施し、破損等を確認した木材について補修、交換する対応を行ってはいったものの、「木部各所の腐朽・劣化・破損」については、平成18年度に行った健全性調査以降、打音点検や触手点検などのような目視以外の方法による点検は行っていないことが確認された。

3.4 腐朽に係る知見の点検への反映

JMTRは平成18年8月まで原子炉の運転を行った後、平成23年度の原子炉の再稼働を目指し、平成18年度のメーカーによる冷却塔の健全性調査で破損のあった木材は交換し、健全性を確認していたことやメーカーとの木材の腐朽に対する考慮が共有されていなかったため、点検方法の見直しは行わなかった。また、その健全性調査の際、冷却塔の特殊な構造を考慮して筋かい等の構造部材に対する点検方法の見直しなどについてメーカーからの提案はなかった。

平成19年度から平成22年度の4年間で原子炉施設の一部更新及び照射設備の整備を行い、平成23年度の原子炉の再稼働を目指していたが、平成23年3月に東北地方太平洋沖地震が発生し、再稼働の計画が遅れ、さらに新規制基準が平成25年12月に制定され、これを踏まえた再稼働時期の検討を進めたが、この時点では再稼働を目指していたこと、東北地方太平洋沖地震後の点検及び補修を行ったことから、点検方法を見直す必要はないと考えた。

平成28年12月にJMTR運転手引(特定施設)の巡視点検表を改正し、「気がかり事象」の追加、「点検項目」を「確認事項」と変更し、確認内容の明確化を行い、より効果的な巡視点検を行うようになっていた。冷却塔本体については、「気がかり事象」を「破損」とし、確認事項を「有害な損傷、変形、錆なし」として巡視点検を行うようにしていたが、点検方法の見直しは行わなかった。

結果的に、冷却塔は平成18年8月から長期停止状態となり、冷却塔の置かれた環境が、木材の腐朽が進む条件が整いやすくなる環境に変わったが、当初から停止状態が長期にな

ることは予定していなかったため、メーカーとの情報共有も不足しており、これらのことから冷却塔の点検方法を見直していなかった。その後、平成 29 年 4 月に廃止措置に移行することが決定^{〔⑦-1〕}し、冷却塔を使用しないことが決まったが、廃止措置の準備段階であり、ここでも点検方法の見直しは行っていなかった。

4. 評価結果

冷却塔の日常点検は目視による点検であり、施設定期自主検査についても外観検査を行っていた。また、平成 28 年 12 月からは確認内容の明確化を図り、より効果的な巡視点検を行えるようにしていた。しかし、これらの点検や後述（⑧更新・補修の影響）する補修等についても目視で確認できる範囲内において行われており、塔内中部（散水ノズルから下、ルーバーから上の部分）の「ボルト等の緩み」、「木部各所の破損」、「金物等の腐食」については充填材等があることから、目視で確認できる範囲内において行われていた。この塔内中部の木材、金属部等の詳細点検を行うためには、スレート外壁や充填材の取り外し、塔内外に仮設足場を設置するなど大掛かりな作業となる。メーカーによると他の冷却塔においても、点検費用や点検期間などの理由から塔内上部及び下部の点検結果より状態を推定している場合もあるとのことだったため、塔内中部の点検が目視で確認できる範囲内であったことは、冷却塔の倒壊に影響を与えなかったと判断した。

一方、⑤木材の腐朽の影響に示す劣化調査の結果から、筋かい下端部（接合部）の木材の腐朽が確認されたが、接合部の木材内部は、接合金物に覆われているため目視による点検では腐朽が確認できなかった。また、冷却塔倒壊後に筋かい下端部を目視により確認したところ、今回の倒壊による影響により損傷した接合部を除き、木材について目視で異常と判断することは困難であることを確認した（図⑦-1 参照）。したがって、目視による点検では、筋かい下端部（接合部）の木材内部の腐朽状態を把握できなかった。なお、今回の調査で定期点検について改めてメーカーに確認したところ、これらメーカーが行う一般的な点検については、設備の設置環境や使用状況によって腐朽の進行に大きな違いが生じることから、一律にこれらメーカーが行う一般的な点検（点検頻度や点検項目）を取扱いマニュアル等に定めることは困難な設備であり、メーカーとして、これまで点検の実施を強く推奨することはなかったとのことであった。実際に、平成 18 年 8 月からの長期停止状態の間にもメーカーによる冷却塔ファンの回転数を調整する減速機の点検を行ったが、定期的な点検の推奨はされていなかった。結果として、長期運転停止状態において、目視以外の方法による点検を行わないことの木材の腐朽に関するリスクや点検の必要性に対し、メーカーと十分共有できていなかったと考えられる。また、設置当初から構造計算書を提出図書に掲げておらずメーカーから提供されていなかったため、①構造設計の影響に示す冷却塔の特殊な構造について十分把握できていなかった。そのため、点検に反映されることもなかった。

5. 参考文献

〔⑦-1〕：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構「施設中長期計画」、平成 29 年 4 月 1 日（策定）



冷却塔倒壊後の
筋かい 10-AB

外観目視では筋か
い下端部(○部)に
異常を確認するこ
とは困難。



冷却塔倒壊後の
筋かい 13-AB

外観目視では筋か
い下端部(○部)に
異常を確認するこ
とは困難。



冷却塔倒壊後の
筋かい 15-AB

外観目視では筋か
い下端部(○部)に
異常を確認するこ
とは困難。

図⑦-1 倒壊後の筋かい下端部の状況
(腐朽が進んでいる 10-AB, 13-AB, 15-AB を抜粋)

表⑦-1 冷却塔の点検項目について

一般的な日常点検項目(メーカー推奨)	冷却塔
減速機のオイル量、汚れ	<ul style="list-style-type: none"> ・H23.6～H29.8 まで保守運転(月例)時にオイル量の確認を実施。 ・H29.1.4 から JMTR 特定施設 巡視点検表(原子炉停止中)が改訂され、オイル量の確認を毎日実施している。
運転中の異常な振動	<ul style="list-style-type: none"> ・自主点検において、振動、温度、電流値(現場盤)を確認。
運転中の散水状態	<ul style="list-style-type: none"> ・外観目視確認。
ボルト等の緩み	<ul style="list-style-type: none"> ・H10(No.1)、H11(No.2～No.4)に冷却塔を更新。 ・H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査(アンカーボルト除外)。 ・H23 冷却塔の詳細調査。 ・H27 屋外に設置された設備機器等の基礎ボルト調査。 ・H26～H30 施設定期自主検査(外観検査)。
木部各所の破損	<ul style="list-style-type: none"> ・H10(No.1)、H11(No.2～No.4)に冷却塔を更新。 ・H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査。 ・H23 冷却塔の詳細調査。 ・H26～H30 施設定期自主検査(外観検査)。
金物等の腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・H10(No.1)、H11(No.2～No.4)に冷却塔を更新。 ・H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査。 ・H23 冷却塔の詳細調査。 ・H26～H30 施設定期自主検査(外観検査)。

⑧更新・補修の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の更新・補修の履歴を確認し、冷却塔倒壊への影響を評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

倒壊した冷却塔（平成 10～11 年度に更新）について、平成 10 年以降の更新・補修の履歴を確認する。また、耐用年数についても確認する。

3. 確認・調査結果

冷却塔の更新履歴の確認結果を表⑧-1 及び図⑧-1 に示す。

平成 10～11 年度の冷却塔更新以降、駆動部の点検等を随時行い、平成 18 年度に健全性の調査を行っている。当時、平成 23 年の原子炉再稼働を目指し、平成 19～22 年度の 4 年間をかけて原子炉施設の更新を行っており、この期間に更新対象以外の設備機器の健全性調査を行っており、冷却塔についても調査を行っていた。この時の調査は、破損・変形・付着物・鉄性腐食・経年劣化の有無を確認するため目視点検、木材の内部割れ・腐蝕、ボルト類のゆるみを確認するための点検ハンマーによる打音点検、強度劣化の有無を確認するための触手点検を行っている。点検の結果、トップデッキやファンスタックに木材の干割れなどを認め、その調査結果を受け、平成 20 年にトップデッキ、ファンスタックを FRP 製に交換した。さらに塔体部下部の筋かい 1 本に木材の腐朽を確認し、平成 24 年 9 月の工事で更新している。

平成 23 年 3 月に発生した平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の確認のため、平成 24 年 3 月に健全性調査を目視により行い、基礎モルタルのひび割れ等のほか、基礎アンカーボルトの腐食、接合部ボルトの緩み、木材の劣化などがわかり、平成 24 年 9 月にそれらについて交換・補修作業を行っている。

さらに平成 27 年にはホットラボ施設において発生したアンカーボルトの減肉を受け、健全性調査を行い、基礎アンカーボルトに腐食は認めたものの直ちに対応が必要な状態ではないことを確認した。

平成 28 年には、減速機の点検を行っており、その際エリミネータ等の補修を推奨されているが、塔体部全体に対し更新の推奨まではされていない。

なお、耐用年数についてメーカーに確認したが、使用の状況や環境によって異なることがわかった。

4. 評価結果

更新・補修の履歴を確認し、冷却塔は更新・補修など保守は不定期ではあるが適宜実施されていると評価した。

耐用年数については、使用の状況や環境によって異なるが、直近のメーカーが行った点検である平成 28 年 12 月において、エリミネータ等の補修を推奨されているが、塔体部全体に対し更新の推奨まではされていない。その後、平成 29 年 4 月に JMTR は廃止施設と決定

し、廃止措置計画認可後、冷却塔は第一段階で解体撤去することになり、冷却塔の更新については計画されていなかった。

調査の目的

JMTR再稼働後の二次冷却システムの長期使用を確実なものにするため(H10年及び11年の構造材更新工事施工後、約8年経過)。

調査の場所

二次冷却系統冷却塔

- (1)塔外装 :ファンスタック、トップデッキ、外壁、ルーバー
- (2)塔内上部 :デッキジョイント・ジョイントサポート類、ポスト・ブレース、エリミネータ
- (3)塔内中部 :散水装置、散水ノズル、エリミネータサポート・散水管サポート、最上段木製グリッド
- (4)塔内下部 :ポスト・ブレース・サポート

調査の項目(目視確認が可能な範囲)

- (1)目視 :破損・変形・付着物・鉄性腐食・経年劣化の有無
- (2)槌打音:木材内部割れ、ホルト類のゆるみの有無、必要に応じ、キリにより部材を突き刺し、内部不朽程度の確認
- (3)触手 :強度劣化の有無

調査の結果

- (1)トップデッキ、デッキジョイント(根太)、階段踊場ステップ等、塔上部の日射による影響を受けやすい木部の干割れ有
- (2)ファンスタック、トップデッキ、デッキジョイント類の干割れ問題を解消できる、FRP製への材質変更をメーカーより推奨。

⇒上記(1)及び(2)については、平成20年10月に交換。



(1) 健全性調査(その1) -H18年度実施-

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (1/6)

(1) トップデッキ、デッキジョイント(根太)、階段踊場ステップ等、塔上部の日射による影響を受けやすい木部の干割れ有に対する交換

トップデッキ、デッキジョイント(根太)、サポート、ファンスタック部を解体し、FRP製のものと交換を行った。階段踊場ステップについては、木製のステップに交換した。



デッキ取外し



デッキFRP交換



ファンスタックFRP交換



階段踊り場補修

(2) 平成 20 年 10 月の交換作業

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (2/6)

調査の目的

東北地方太平洋沖地震後のJMTRに関連する建家等の健全性を確認するため。

調査の場所

二次冷却系統冷却塔

(1)木造構造物：基礎、床組、軸組(柱・梁等)外壁等の部材及び接合金物、ボルト

調査の項目(目視確認が可能な範囲)

(1)目視：基礎部コンクリートのひび割れ等の有無、アンカーボルトの伸び、破断等の有無、部材及び接合金物(ボルト、接合金物等)の著しい損傷の有無

調査の結果

- (1)基礎アンカーボルト、ナット、ワッシャの腐食有
- (2)接合金物ボルトの緩み有
- (3)木材の劣化有
- (4)基礎被覆モルタルのひび割れ、浮き、剥離有
- (5)床面(モルタル)ひび割れ、浮き有

⇒上記(1)～(5)については、平成24年9月に交換・補修。



(3) 健全性調査(その2) -H23 年度実施-

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (3/6)

(1)基礎アンカーボルト、ナット、ワッシャの腐食に対する補修

アンカーボルト、ナット、ワッシャの腐食部については、ケレン清掃後、塗装を行った。

(2)接合部ボルトの緩みに対する補修

接合部ボルトの緩みについては増し締めを行った。変形やズレのある接合部の金具については交換した。

(3)木材の劣化に対する交換

劣化している木材については交換した。

(4)基礎被覆モルタルのひび割れ、浮き、剥離に対する補修

基礎被覆モルタルのひび割れ、浮き、剥離部に対しては、ハツリによりひび割れ、浮き、剥離部を取り除き、その後、ERボンド※1を塗布し、モルタルで補修を行った。

(5)床面(モルタル)ひび割れ、浮き

ひび割れに対しては、低圧注入工法を用いてエポキシ樹脂を注入した。

浮きに対しては、浮き部をハツリにより撤去後、ERボンドを塗布し、モルタルで補修を行った。

※1 ERボンドは、あらゆる面に接着する水希釈型変性エポキシ樹脂接着剤のこと。

(4) 平成24年9月の交換・補修作業 その1

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (4/6)



(5) 平成 24 年 9 月の交換・補修作業 その 2

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (5/6)

調査の目的

ホットラボ施設において発生したアンカーボルトの一部減肉を受け、JMTRにおいて同種の事象の発生がないか調査するため。

調査の場所

二次冷却系統冷却塔
(1)基礎アンカーボルト

調査の項目(目視確認が可能な範囲)

- (1)目視 : 腐食、減肉及び塗装の剥がれ等の有無
- (2)打診 : 緩みの有無

調査の結果

- (1)基礎アンカーボルトの腐食
- (2)基礎アンカーボルトの緩み無

⇒上記(1)の腐食については、直ちに対応が必要な腐食でないと判断したため補修は行っていない。



(6) 健全性調査(その3) -H27 年度実施-

図⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の実施状況 (6/6)

表⑧-1 冷却塔の点検・補修・交換及び健全性調査の履歴

No.	時 期	内 容	備 考
1	平成 10 年 9 月	交換（柱 No.1、フレス No.1、サポート No.1、ウインドバップル No.1、トップデッキ No.1、ファンスタック No.1、ルーバー No.1、外壁 No.1、アンカーボルト No.1、充填物 No.1）	全面交換を実施
2	平成 11 年 9 月	交換（柱 No.2～4、フレス No.2～4、サポート No.2～4、ウインドバップルNo.2～4、セルパテーション、トップデッキ No.2～4、ファンスタックNo.2～4、ルーバー No.2～4、外壁 No.2～4、アンカーボルト No.2～4、充填物 No.2～4、電動機用高圧ケーブル等）	
3	平成 11 年 10 月	点検（減速機）	
4	平成 17 年 1 月	交換（中間軸）	
5	平成 17 年 4 月	点検（電動機）、交換（軸受け）	
※ 平成 18 年 8 月 第 165 サイクル終了後、運転停止			
㉠	平成 19 年 3 月	健全性調査（その 1）	
6	平成 20 年 10 月	交換（トップデッキ、ジョイント、サポート、ファンスタック：木製⇒FRP、主柱、階段）	
7	平成 20 年 11 月	点検（減速機、電動機）	
㉡	平成 24 年 3 月	健全性評価（その 2）	
8	平成 24 年 9 月	交換（鉄骨工事、木工事）、補修（塗装工事、ひび割れ補修工事）	
㉢	平成 28 年 2 月	健全性評価（その 3）	
9	平成 28 年 12 月	点検（減速機）	
※ 平成 29 年 4 月 施設中長期計画により JMTR は廃止施設と決定			

⑨金属の腐食、変形等の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔を構成する木製の構造部材は、金属製の接合金物により部材及び基礎材が接続されている。腐食による接合金物の耐力の低下が冷却塔の倒壊に影響したかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

目視による外観観察及び測定器による寸法測定により、接合金物の腐食、変形等の状況を可能な範囲で調査する。このため、平成18年8月の原子炉運転停止以降、冷却塔の健全性評価を平成18年度、平成23年度及び平成27年度に実施していることから、これらの記録を確認し、外観が確認可能な接合金物の観察、抽出可能な接合金物の外観観察及び寸法測定により、評価する。

3. 確認・調査結果

3.1 接合金物の形状及び材質

接合金物は使用される接続部の構造によりその形状が異なる。確認した接合金物の形状及び材質を表⑨-1に示す。各接合金物の使用箇所は、以下のとおりである。

No. 1 : 柱 (ポスト) - 柱 (ポスト)

No. 2 : 柱 (ポスト) - 柱 (ポスト)

No. 3 : 柱 (ポスト) - 東西方向筋かい (ブレース)

No. 4 : 柱 (ポスト) - 南北方向筋かい (ブレース)

No. 5 : 柱 (ポスト) - 基礎材

3.2 接合金物の腐食、変形等の状況

外観確認の可能な接合金物の外観観察を行った結果、接合金物の表面は、平成27年度の外観写真と比べて大きな変化はなく、腐食は進んでいないものと考えられる。

次に、抽出した接合金物について、腐食、変形等の状況を図⑨-1に示す。

外観観察の結果、No. 1、No. 3～No. 5の接合金物はFCD-40（鋳鉄）で製作されていることから、塗装のはがれているところに一部腐食が観測されたが、著しい減肉は確認されなかった。No. 2の接合金物はSUS304（ステンレス鋼）で製作されており、腐食は観測されなかった。

また、各接合金物の寸法測定を行った結果、測定値は設計寸法と公差内で一致していた。

一方、図⑨-2に各接合金物の変形等の状態を示す。鋳鉄製の接合金物は僅かな曲がりがあり、ステンレス製の接合金物には一部負荷による大きな曲がりがあり一部観察された。冷却塔の主構造物が木材であり、接合金物の強度が木材の強度よりも大きいこ

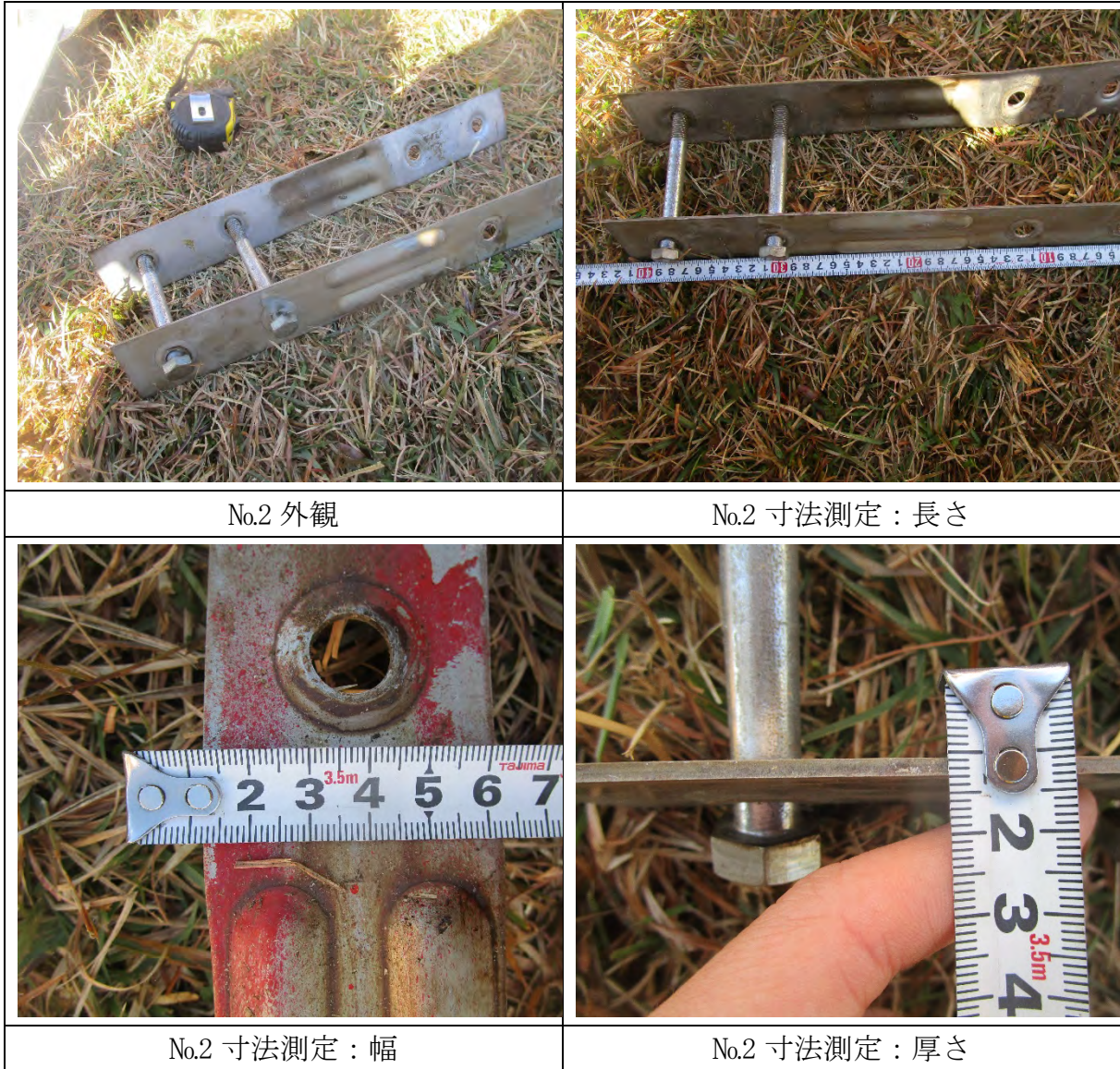
とから、これら接合金物の曲がり、は、冷却塔の倒壊時に二次的に負荷された応力（風荷重以外の応力）による曲がりと考えられる。

4. 評価結果

接合金物の調査の結果、接合金物の一部に曲がり、が観察されたものもあったが、冷却塔の主構造部材が木材であり、接合金物の強度が木材の強度よりも大きいことから、冷却塔の倒壊時に二次的に負荷された応力による曲がりと考えられ、金属の腐食、変形等による冷却塔の倒壊への影響はなかったと考えられる。特に、基礎材との接合金物に施されている塗装には大きな剥離もなかった。このことから、倒壊の影響により確認できない接合金物についても、木材の腐朽の影響が大きく、金属の腐食の程度は少ないと考えられる。



図⑨-1 接合金物の腐食、変形等の状況 (No. 1)



図⑨-1 接合金物の腐食、変形等の状況 (No. 2)



No.3 外観



No.3 外観



No.3 寸法測定：幅



No.3 寸法測定：厚さ

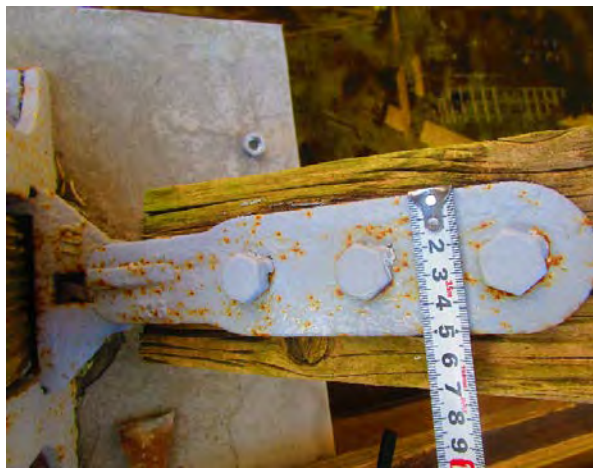
図⑨-1 接合金物の腐食、変形等の状況 (No. 3)



No.4 外観



No.4 外観



No.4 寸法測定：幅



No.4 寸法測定：厚さ

図⑨-1 接合金物の腐食、変形等の状況 (No. 4)



No.5 外観



No.5 外観



No.5 寸法測定：幅



No.5 寸法測定：高さ

図⑨-1 接合金物の腐食、変形等の状況 (No. 5)



変形等の例 (No. 2)



変形等の例 (No. 2)



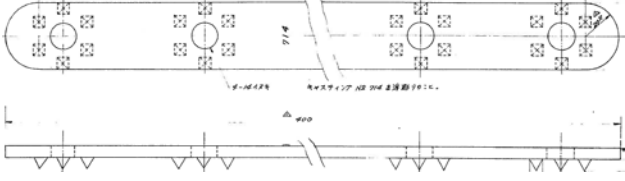
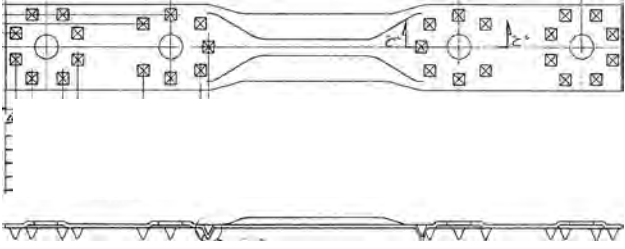
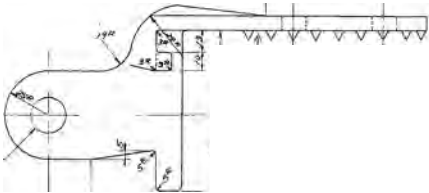
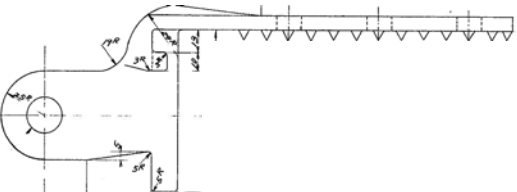
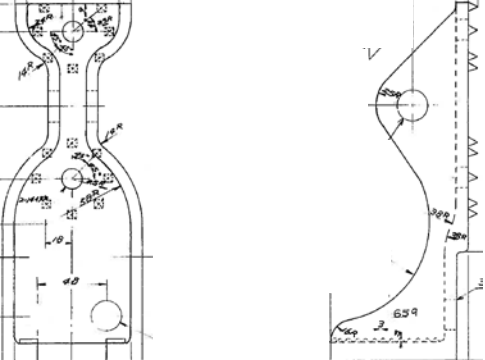
変形等の例 (No. 2)



変形等の例 (No. 4)

図⑨-2 接合金物の変形等の状態

表⑨-1 二次冷却系統冷却塔に使用されている接合金物の形状及び材質

No.	形状	材質
1		FCD-40 (鑄鉄)
2		SUS304 (ステンレス)
3		FCD-40 (鑄鉄)
4		FCD-40 (鑄鉄)
5		FCD-40 (鑄鉄)

⑩コンクリートの割れ・破損等の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊に、割れ・破損等によるコンクリートの性能低下が影響しているかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

東北地方太平洋沖地震後に行われた冷却塔の補修工事の結果、その後の施設定期自主検査及び巡視点検の結果からコンクリートの割れ・破損等の有無を確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 冷却塔の補修工事

東北地方太平洋沖地震後に行われた冷却塔の補修工事は、事前に行われた冷却塔の健全性確認により確認されたコンクリートのひび割れに対して行った。健全性確認の結果、143箇所（幅1mm未満：112箇所、幅1～2mm：31箇所）のひび割れが確認されているが、全ての箇所について原状復帰のために補修工事を実施しており、補修工事後においてひび割れはない状態であった。なお、健全性確認において確認されたひび割れについては機能上問題はないとの評価結果であった。

コンクリートのひび割れについては、それぞれ表⑩-1に示す工法で補修を行った。

3.2 施設定期自主検査及び点検

冷却塔のコンクリートについては施設定期自主検査において外観検査を行っている。冷却塔の補修工事後は、原子炉施設保安規定に従い施設定期検査を受ける時期ごとに施設定期自主検査を行っており、平成30年度の施設定期自主検査（平成30年8月6日）までは、有害な傷、損傷のないことが確認されている。

また、JMTR運転手引（特定施設）に従い毎日行われる巡視点検においても冷却塔の外観確認を行っている。巡視点検は倒壊事象発生前は前日にも行われており、有害な損傷、変形、錆のないことを確認している。

4. 評価結果

東北地方太平洋沖地震後の健全性確認により確認されたひび割れについては全ての箇所について補修工事が実施されていること、その後の検査及び点検において異常のないことが確認されており、点検以降、冷却塔の倒壊発生までの期間で有害な割れ・破損等が発生することは想定できないことから、コンクリートの割れ・破損等による冷却塔の倒壊への影響はなかったと考えられる。

表⑩-1 コンクリートのひび割れの補修工法

ひび割れ幅	工 法
0.2mm 未満	シーリング工法とし、可とう性エポキシシーリング材補修
0.2mm～1.0mm 未満	樹脂注入工法とし、自動式エポキシ樹脂低圧注入工法
1.0mm 以上	ダイレクトシーリング工法とし、弾性エポキシグラウト注入

⑪地震力による破損等の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊事象に、東北地方太平洋沖地震による損傷が影響しているかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

東北地方太平洋沖地震後に行われた冷却塔の健全性確認の結果及びこの結果から必要となった補修の結果を確認する。

3. 確認・調査結果

東北地方太平洋沖地震後に行われた冷却塔の健全性確認においては、設備点検として、冷却塔のセル塔体部及び基礎部の目視点検及び基礎ボルトの打診点検を実施した。点検の結果、冷却塔の筋かいに2箇所の損傷を確認したが機能上問題がないと評価された。基礎部については、143箇所（幅1mm未満：112箇所、幅1～2mm：31箇所）のひび割れが確認されたが、機能上問題はないと評価された。特に、基礎ボルトの打診点検では異常は発見されなかった。

健全性確認において確認された損傷及びひび割れについては機能上問題はないとの評価結果であったが、全ての箇所について原状復帰のために補修を実施した。損傷があった筋かいについては、木材も交換された。基礎部のひび割れについては、それぞれ表⑪-1に示す工法で補修を行った。補修に関する写真を図⑪-1～図⑪-4に示す。

4. 評価結果

東北地方太平洋沖地震後の健全性確認により地震による損傷が機能上問題ないと評価された。また、本健全性確認結果に基づいて、原状復帰のために補修も完了していることから、冷却塔の倒壊事象に、東北地方太平洋沖地震による影響はないと評価した。



図①-1 冷却塔の筋かい補修前の写真



図①-2 冷却塔の筋かい補修後の写真



図⑩-3 基礎部ひび割れ補修前の写真



図⑩-4 低圧注入工法による補修時の写真

表⑪-1 コンクリートのひび割れの補修工法

ひび割れ幅	工 法
0.2mm 未満	シーリング工法とし、可とう性エポキシシーリング材補修
0.2mm～1.0mm 未満	樹脂注入工法とし、自動式エポキシ樹脂低圧注入工法
1.0mm 以上	ダイレクトシーリング工法とし、弾性エポキシグラウト注入

⑫風雨の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊事象に対し、風雨による影響について評価する。今回の台風 15 号の風雨により倒壊事象が発生したが、これまでの過去 10 年間の強風についても調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

台風 15 号による風雨について、大洗研究所の気象観測データの整理を行うとともに、過去 10 年間の各年の最大瞬間風速のデータを整理し、風雨の影響について調査する。また、台風 15 号の風速発生時の冷却塔に負荷する風荷重の影響を評価する。

3. 確認・調査結果

3.1 大洗研究所内の気象観測位置

本文に示すとおり、大洗研究所内には気象観測塔及び気象観測露場があり、これらは冷却塔の東側約 540m の位置にある。本地点の標高は、36.57m である。倒壊した冷却塔の標高は 35.35m であり、ほぼ同じ標高である。JMTR 施設内には、原子炉建家、ホットラボ、居室実験室、機械室等の建家が密集している。

3.2 台風 15 号の風雨データ

大洗研究所の気象状況を常時観測している気象観測塔及び気象観測露場のデータによると、9 月 9 日（月）4 時頃から強い風が吹き始め、同日 6 時 50 分から 7 時 10 分までの間に、地上高 10m において最大瞬間風速 30.9m/s の東の風、地上高 40m において最大瞬間風速 44.5m/s の東南東の風を観測した。降水量は同日の降り始めから 8 時までで 59mm であり、降雨による影響は少ない。このような状況から、倒壊の発生原因の一つとして、風による影響が考えられる。

3.3 過去 10 年間の気象データ

3.2 の調査結果より、倒壊の影響は降水量ではなく風の影響である可能性が高いことから、過去 10 年間における各年の最大瞬間風速に係るデータを表⑫-1 及び表⑫-2 に示す。本表には、各年度における最大瞬間風速の最大値を記載するとともに、最大瞬間風速の最大値を記録した同時間帯の風速（10 分平均）及び風向も合わせて記載している。

この結果、平成 29 年 10 月 22 日から 23 日の風速は今回倒壊した風速とほぼ同じであった。平成 29 年 10 月 22 日から 23 日には台風 21 号が茨城県を通過していた。平成 29 年の台風 21 号と今回の台風の進路^[⑫-1]を図⑫-1 に示す。茨城県での台風の進路はほぼ同じであり、大洗研究所内で観測した気象データから、最大瞬間

風速 20m/s(10m 高及び 40m 高)以上で暴露された時間は令和元年の台風 15 号ではそれぞれ 190 分及び 430 分に対し、台風 21 号(平成 29 年)ではそれぞれ 410 分及び 640 分と長時間続いていた。最大瞬間風速(10m 高及び 40m 高)は、台風 15 号ではそれぞれ 30.9m/s 及び 44.5m/s、台風 21 号(平成 29 年)ではそれぞれ 31.2m/s 及び 43.4m/s であった。この時の風向(10m 高及び 40m 高)は、台風 15 号でそれぞれ東の風及び東南東の風、台風 21 号(平成 29 年)ではそれぞれ北東の風であった。

以上より、今回の台風で倒壊に至った原因としては、最大瞬間風速とともに風向が要因であったと考えられる。

3.4 Fluent による風解析

解析コード Fluent^{〔⑫-2〕}は、有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の流体解析に広く利用されているコードである。解析体系は、JMTR 敷地内の建家の配置を考慮して、縦 210m、横 122m、高さ 50m の範囲とした。Fluent(Ver. 17.2)による解析モデルの範囲を図⑫-2 に示す。考慮した建家は、風上から、原子炉建家(その上流の居室実験室を含む)、機械室、タンクヤード、ポンプ室、排風機室、そして評価対象である冷却塔である。境界条件及び解析条件について、それぞれ表⑫-3 及び表⑫-4 に示す。

Fluent による水平方向の解析結果(圧力及び速度分布)を図⑫-3 に示す。図⑫-3 より、高さ 5m の地点では、冷却塔への風速は上流にある機械室の影響により弱くなっていると見受けられるが、冷却塔とポンプ室の間の狭い領域で風が集中して流れが速くなる傾向にある。また、高さ 10m の地点では、機械室の影響はなく、冷却塔の前面にあるスレート壁への風速はほぼ一様にあたっているが、5m の高さと同様に冷却塔とポンプ室の間で風が集中し流れが速い傾向にあり、ポンプ室側の冷却塔の東側スレート壁の部分で圧力が高くなっている。さらに、高さ 15m の地点のファンスタックにおいても、風速はほぼ一様であるが、ポンプ室の影響を受けポンプ室側の No.4 セルフアンスタックに負荷される圧力は、他のファンスタックよりも多少大きい傾向にある。

次に、Fluent による鉛直方向の解析結果(圧力及び速度分布)を図⑫-4 に示す。本検討は、前述の水平方向の解析結果により、冷却塔の排風機室側にある No.1 セルとポンプ室側にある No.4 セルに着目した結果を示している。この結果、No.1 セル及び No.4 セルとも、鉛直方向の圧力はほぼ均一に負荷されているが、No.4 セルのほうが No.1 セルよりも風による大きな圧力が負荷された結果となった。

以上の解析結果より、冷却塔の No.4 セル側がポンプ室の影響により、大きな風荷重が負荷されたものと考えられる。

4. 評価結果

大洗研究所内の気象観測塔及び気象観測露場の気象データをもとに、風雨による

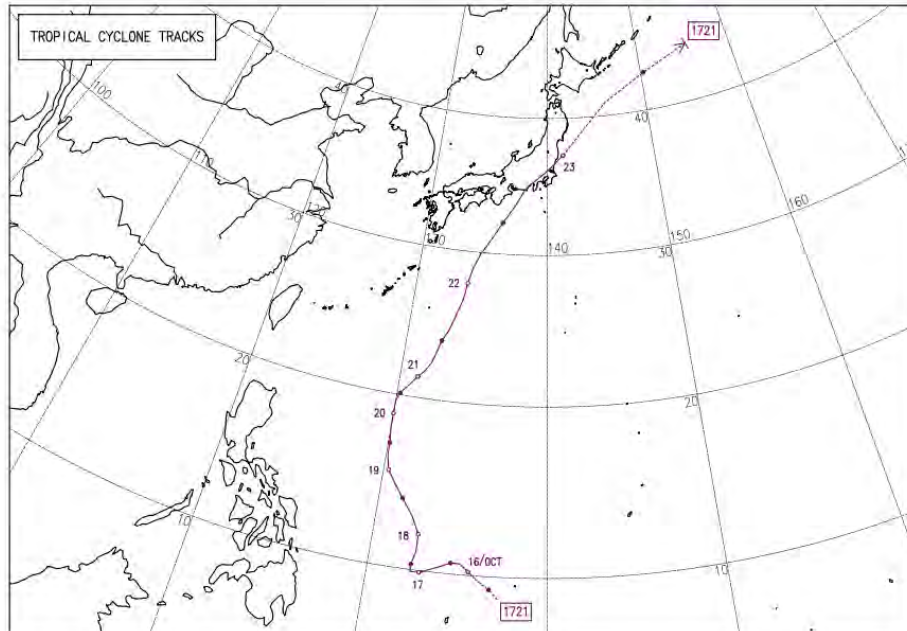
影響を評価した。なお、当該観測地点は JMTR 施設から東側に約 540m の地点であるが、ほぼ同じ標高である。気象データから、降雨による影響は小さいことから、風による影響について調べた。大洗研究所の気象状況を常時観測している気象観測塔及び気象観測露場のデータによると、9 月 9 日 (月) 4 時頃から強い風が吹き始め、同日 6 時 50 分から 7 時 10 分までの間に、地上高 10m において最大瞬間風速 30.9m/s の東の風、地上高 40m において最大瞬間風速 44.5m/s の東南東の風を観測した。冷却塔は建設当時の建築基準法を参考にした風荷重を用いて構造設計が行われており、台風 15 号の強風による風荷重は、設計時の風荷重 (最大瞬間風速 63m/s 相当) には達していないものの、倒壊の発生原因の一つとして、風による影響が考えられる。

過去 10 年間に最大瞬間風速 20m/s 以上を記録した月日は 1 回/年以上あったが、冷却塔が倒壊することはなかった。特に、平成 29 年 10 月の台風 21 号が通過した際は、今回の台風 15 号とほぼ同じ最大瞬間風速を記録するとともに、暴露された時間も長時間であった。風向 (10m 高及び 40m 高) については、台風 15 号でそれぞれ東の風及び東南東の風、台風 21 号 (平成 29 年) ではそれぞれ北東の風であった。このことから、倒壊には風向も重要な要因であったと考える。

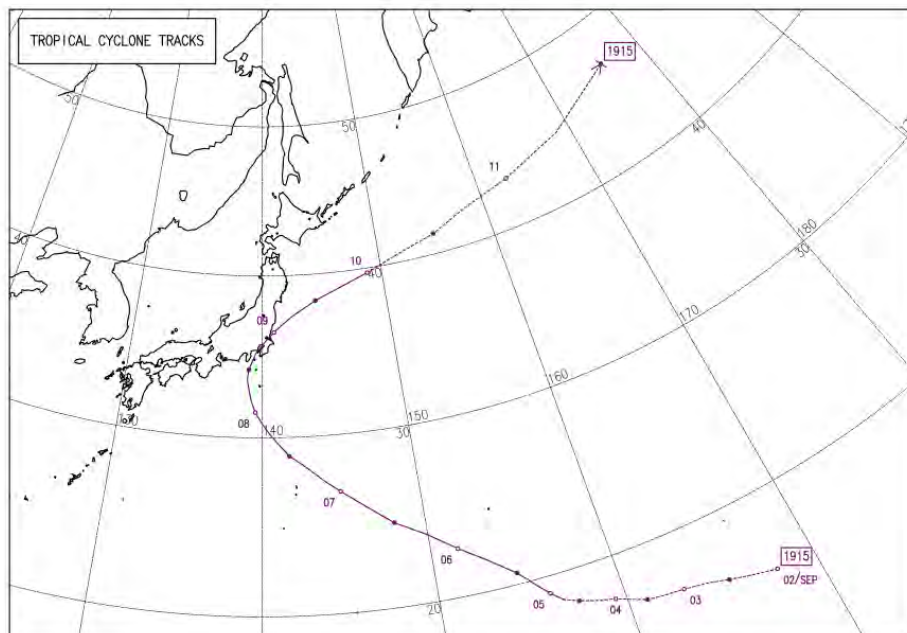
これらをもとに、Fluent を用いた風圧及び速度分布の解析を行った。この結果、冷却塔のポンプ室側の No. 4 セルの東面に風荷重が大きいことが分かった。これは JMTR 施設内の建家の配置による影響と考えられる。

5. 参考文献

- [⑫-1] 気象庁 HP (ホーム>各種データ・資料>過去の台風資料>台風経路図)
https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/index.html
- [⑫-2] ANSYS Fluent ソフトウェア
<https://www.ansys.com/ja-jp/products/fluids/ansys-fluent>



(a) 2017年10月 台風21号

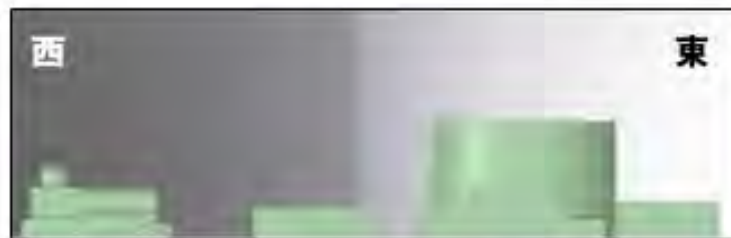


(b) 2019年9月 台風15号

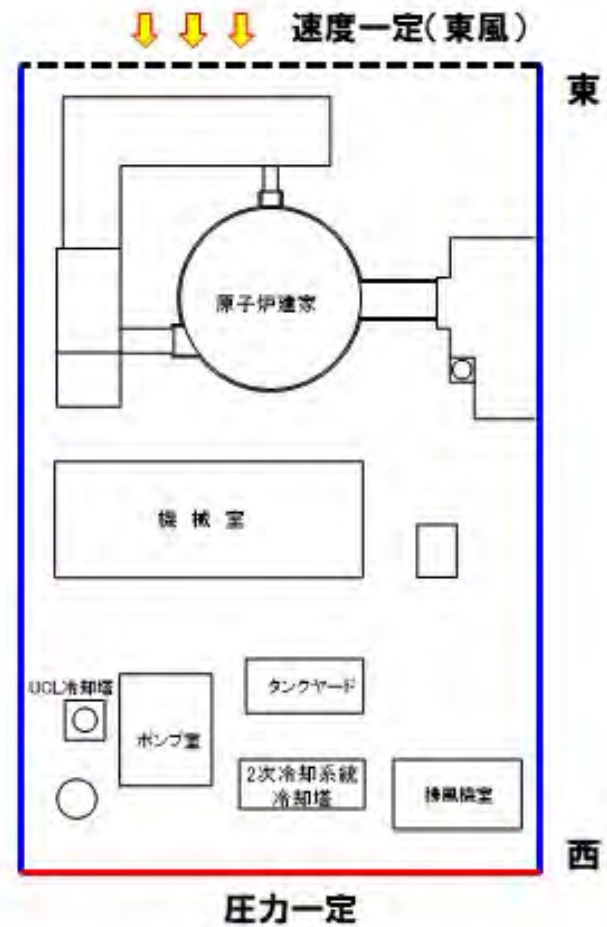
図⑫-1 平成29年10月(台風21号)と令和元年9月(台風15号)の台風の進路 [⑫-1]



(a) 解析モデルの全体概要

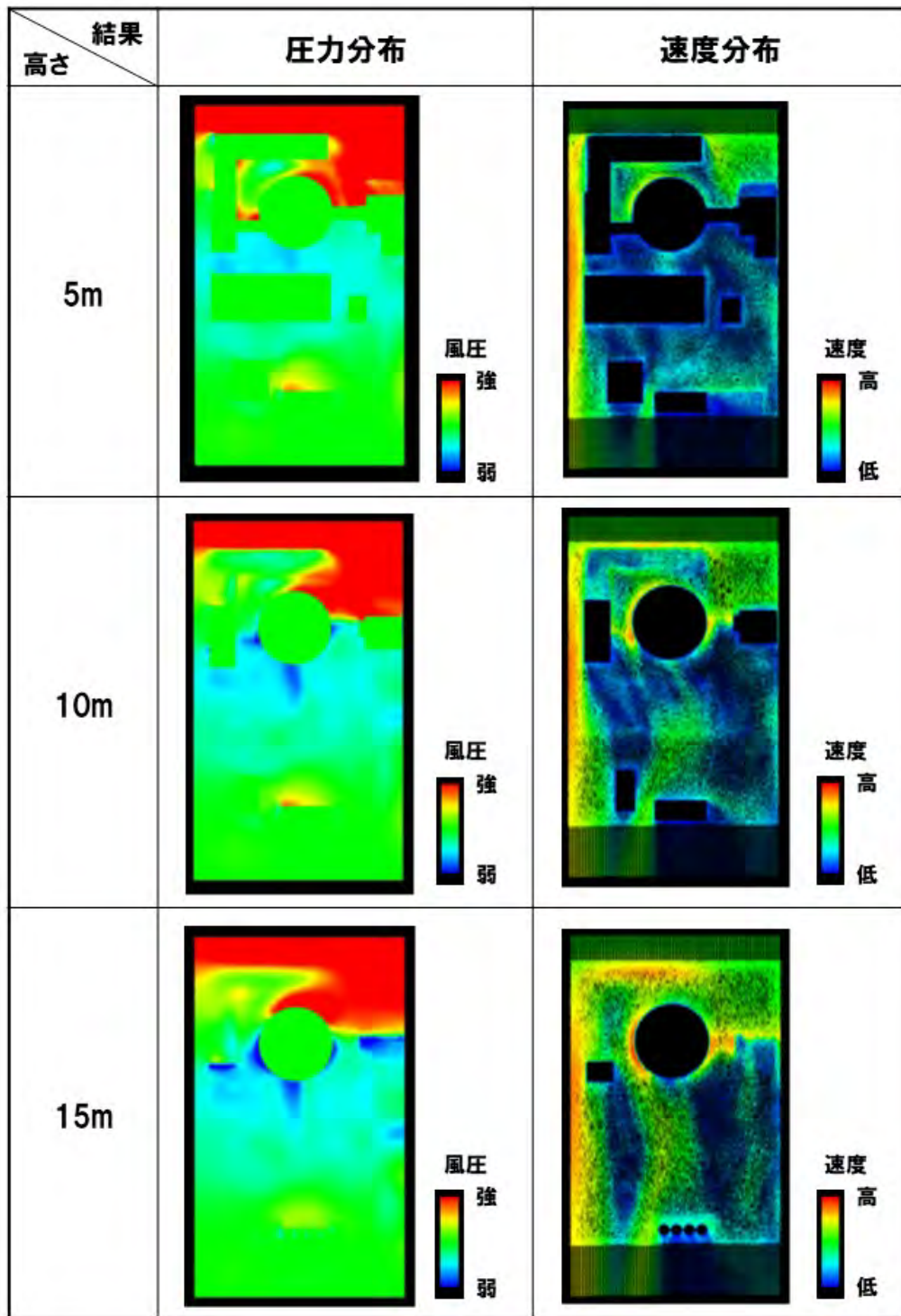


(b) 解析モデルの鉛直断面

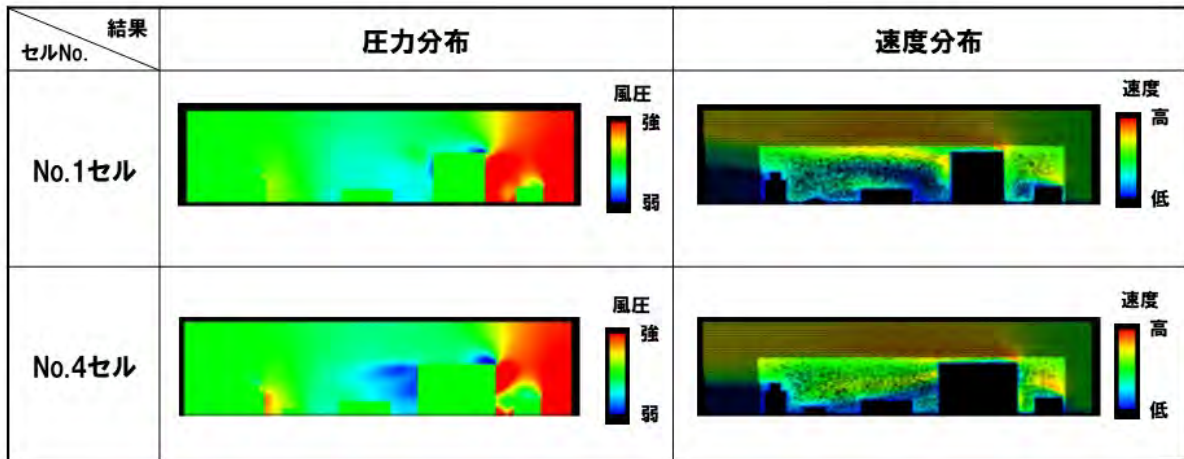


(c) 解析モデルの水平断面

図⑫-2 Fluent による解析モデルの範囲



図⑫-3 Fluent による水平方向の解析結果(圧力及び速度分布)



図⑫-4 Fluent による鉛直方向の解析結果(圧力分布及び速度分布)

表⑫-1 過去 10 年間の最大瞬間風速データ -10m 高風向風速-

	最大値観測時刻	最大瞬間風速 (m/s)	風速(10分平均) (m/s)	風向
2009年度	2009年10月8日10時20分	26.5	8	SSW
	2009年10月8日10時30分		8.5	SSW
2010年度	2010年4月2日8時00分	26.3	11.4	SW
	2010年4月2日8時10分		11.1	SW
2011年度	2011年9月21日18時50分	31.2	11.1	S
	2011年9月21日19時00分		10.8	S
2012年度	2012年6月20日1時50分	29.3	12.4	SW
	2012年6月20日2時00分		11.9	SW
2013年度	2013年10月16日6時40分	32.9	16.9	NE
	2013年10月16日6時50分		14.4	NE
2014年度	2015年1月15日18時40分	21.1	6.7	NNE
2015年度	2016年1月18日13時20分	25.4	12.4	NE
	2016年1月18日13時30分		6.9	NE
2016年度	2016年8月22日17時10分	28.6	10.1	SSW
	2016年8月22日17時20分		10.6	SSW
2017年度	2017年10月22日24時00分	31.2	11.4	NE
	2017年10月23日0時10分		10.1	NE
2018年度	2018年10月1日3時40分	28.8	11.5	SSW
	2018年10月1日3時50分		11.6	SSW
2019年度 (4月1日から8月31日)	2019年7月7日13時30分	21.3	8.4	NNE
	2019年7月7日13時40分		8.4	NNE
2019年度 (9月9日)	2019年9月9日7時00分	30.9	10.3	E
	2019年9月9日7時10分		9.4	

表②-2 過去10年間の最大瞬間風速データ -40m 高風向風速-

	最大値観測時刻	最大瞬間風速 (m/s)	風速(10分平均) (m/s)	風向
2009年度	2009年10月8日11時10分	30.3	13.5	SSW
	2009年10月8日11時20分		12.9	
2010年度	2010年4月2日9時10分	30.4	15.6	SSW
2011年度	2011年9月21日18時50分	35.8	21.4	S
	2011年9月21日19時00分		21	
2012年度	2012年4月3日18時40分	36.6	16.8	S
	2012年4月3日18時50分		18.5	
2013年度	2013年10月16日6時10分	38.2	24.1	NNE
	2013年10月16日6時20分		22.8	
	2013年10月16日6時40分		23.8	
	2013年10月16日6時50分		20.2	
2014年度	2014年7月27日14時40分	30.4	15.7	NW
	2014年7月27日14時50分		9	NNW
2015年度	2016年1月18日12時50分	29.9	21.2	NE
	2016年1月18日13時00分		19.3	
2016年度	2016年8月22日15時10分	35.9	17.2	SE
	2016年8月22日15時20分		11.4	
2017年度	2017年10月22日24時00分	43.4	18.1	NE
	2017年10月23日00時10分		17.3	
2018年度	2018年10月1日1時20分	37.5	22.1	SSE
	2018年10月1日1時30分		19.7	S
2019年度 (4月1日から8月31日)	2019年7月7日13時30分	22.9	13.1	NNE
	2019年7月7日13時40分		12.3	
2019年度 (9月9日)	2019年9月9日7時00分	44.5	30.2	ESE
	2019年9月9日7時10分		27.7	

表⑫-3 解析モデルの境界条件

作動流体	空気(非圧縮流体)
構造物	固体領域(連成無し)
熱輸送	考慮せず
入口境界	速度一定(30m/s)
出口境界	圧力一定(0Pa)
構造材・地面	標準壁関数
その他境界	Free slip

表⑫-4 Fluent コードによる解析条件

解析コード	Fluent (Ver. 17.2)
計算アルゴリズム	SIMPLE
離散化(運動量保存則の対流項)	1次風上
Time step	-(定常解析)
乱流モデル	標準k-ε 2方程式モデル

⑬ 飛来物の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊に、飛来物の衝突、閉塞による影響があったかを調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

台風 15 号の強風の影響による飛来物の衝突及び閉塞発生の有無を冷却塔周辺部のがれきの調査をすることにより評価する。

3. 確認・調査結果

台風 15 号の強風による飛来物等の確認や冷却塔の閉塞状況の確認を行った。冷却塔で使用されている材料以外のものはなく、飛来物の衝突及び閉塞が発生していないことを確認した。また、がれきの撤去作業を実施しているが、がれきの散乱状態から、後述する竜巻（突風）の発生が無いこと（表⑬-1^[⑬-1]参照。）及び台風通過後の作業エリア周辺状況からも飛来物の衝突及び閉塞が発生していないことを確認した。

4. 評価結果

冷却塔周辺部のがれき等の調査結果から、飛来物の衝突及び閉塞は発生していないことが確認できた。以上のことから、冷却塔の倒壊に影響はなかったと評価した。

5. 参考文献

[⑬-1] 気象庁 HP（ホーム＞各種データ・資料＞竜巻等の突風データベース＞最近発生した事例一覧（速報））

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/new/list_new.html

表⑬-1 最近発生した事例一覧（速報）2019.11.5 更新
 -気象庁 HP より一部抜粋（編集）-

現象区別	発生日時	発生場所	日本版改良藤田スケール		被害幅	被害長さ	主な被害状況				総観場	備考
			風速	階級			m	km	死者	負傷者		
					全壊	半壊						
竜巻	2019/10/12 08:08 頃	千葉県 市原市	約 55m/s	JEF2	調査中	調査中	1	9	12	23	台風	住家一部損壊 54 棟
不明	2019/10/04 08 時頃	東京都 大島町	不明	不明	50	0.1	0	0	0	0	寒冷前線	
ダウンバーストまたは ガストフロント	2019/10/01 18:30 頃	滋賀県 近江八幡市、 蒲生郡竜王町	約 35m/s	JEF0	調査中	調査中	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	
竜巻	2019/09/25 09:30 頃	新潟県(海上)	不明	不明	不明	不明	0	0	0	0	気圧の谷、 その他(前線)	
竜巻または漏斗雲	2019/09/25 09:00 頃	新潟県(海上)	不明	不明	不明	不明	0	0	0	0	気圧の谷、 その他(前線)	
不明	2019/09/22 19:00 頃	高知県 安芸市	約 35m/s	JEF0	70	1.7	0	0	0	0	台風	
竜巻	2019/09/22 08:30 頃	宮崎県 延岡市	約 50m/s	JEF1	調査中	調査中	0	18	0	1	台風	住家一部損壊 508 棟
竜巻または漏斗雲	2019/09/12 08:30 頃	北海道 留萌地方(海上)	不明	不明	不明	不明	0	0	0	0	気圧の谷、 寒気の移流	
竜巻または漏斗雲	2019/09/12 07:15 頃	北海道 宗谷地方(海上)	不明	不明	不明	不明	0	0	0	0	気圧の谷、 寒気の移流	
ダウンバーストまたは ガストフロント	2019/09/10 19:35 頃	群馬県 邑楽郡邑楽町、 館林市	約 35m/s	JEF0	700	0.9	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	住家一部損壊 8 棟
ダウンバーストまたは ガストフロント	2019/09/10 19:30 頃	埼玉県 深谷市、 群馬県 伊勢崎市	約 30m/s	JEF0	960	2.4	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	
ダウンバーストまたは ガストフロント	2019/09/10 19 時頃	栃木県 佐野市	約 40m/s	JEF1	640	1.5	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	住家一部損壊 27 棟
不明	2019/09/10 16:20 頃	山梨県 笛吹市	約 35m/s	JEF0	100	0.9	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	
不明	2019/09/04 16:30 から 17:30	長野県 長野市	不明	不明	不明	0.02	0	0	0	0	暖気の移流、 雷雨(熱雷を除く)	

⑭地震の発生の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊に、地震の発生による影響があったかを調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

東北地方太平洋沖地震後に実施した JMTR 関連建家等の詳細調査（冷却塔：平成 24 年 3 月 12 日から 23 日で実施）以降から事象発生までの茨城県大洗町及び鉾田市における地震発生の有無を気象庁 HP で確認する。

3. 確認・調査結果

『気象庁 HP：ホーム＞各種データ・資料＞震度データベース検索』^[⑭-1]により平成 24 年 3 月 24 日から令和元年 9 月 9 日までの間に発生した大洗研究所周辺の地震を表⑭-1 に示す。この結果、大洗研究所付近での最大震度は、平成 25 年 9 月 20 日に鉾田市で発生した震度 5 弱であった。本地震発生直後の「地震後点検」では、異常がないことを確認している。また、平成 27 年度にホットラボ施設で発生したアンカーボルトの一部減肉を受け、冷却塔についても基礎アンカーボルトの調査を行い、アンカーボルトの腐食、減肉及び緩みがなかったことも確認している。

4. 評価結果

平成 24 年 3 月 24 日から令和元年 9 月 9 日までの約 7 年半の間、茨城県大洗町及び鉾田市での最大震度は震度 5 弱であったが、「地震後点検」及び「基礎アンカーボルトの調査」において冷却塔に異常がなかったことを確認していることから、地震による影響はなかったと評価した。

5. 参考文献

[⑭-1] 気象庁 HP：ホーム＞各種データ・資料＞震度データベース検索

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>

表⑭-1 震源リスト
 -気象庁 HP より一部抜粋 (編集) -

(1) 大洗町

地震の発生日	震央地名	緯度	経度	深さ	M	検索対象 最大震度
令和1年6月17日	茨城県北部	36° 30.9' N	140° 35.0' E	77km	M5.1	3
平成30年7月17日	茨城県沖	36° 25.8' N	140° 41.5' E	52km	M4.8	3
平成30年3月30日	茨城県沖	36° 26.5' N	140° 37.2' E	56km	M5.1	3
平成29年8月2日	茨城県北部	36° 48.2' N	140° 32.1' E	9km	M5.5	3
平成28年12月28日	茨城県北部	36° 43.2' N	140° 34.4' E	11km	M6.3	3
平成28年11月22日	福島県沖	37° 21.2' N	141° 36.2' E	25km	M7.4	3
平成28年7月27日	茨城県北部	36° 27.0' N	140° 36.8' E	57km	M5.4	3
平成28年5月16日	茨城県南部	36° 02.0' N	139° 53.2' E	42km	M5.5	3
平成27年11月22日	茨城県沖	36° 25.7' N	140° 41.2' E	52km	M4.8	3
平成27年8月6日	茨城県沖	36° 26.3' N	140° 37.1' E	55km	M5.2	3
平成27年5月25日	埼玉県北部	36° 03.2' N	139° 38.3' E	56km	M5.5	3
平成25年9月20日	福島県浜通り	37° 03.0' N	140° 41.7' E	17km	M5.9	3
平成24年12月7日	三陸沖	38° 01.1' N	143° 52.0' E	49km	M7.3	3

(2) 銚田市

地震の発生日	震央地名	緯度	経度	深さ	M	検索対象 最大震度
令和1年8月4日	福島県沖	37° 42.4' N	141° 37.9' E	45km	M6.4	3
令和1年7月28日	三重県南東沖	33° 09.6' N	137° 23.8' E	393km	M6.6	3
令和1年6月17日	茨城県北部	36° 30.9' N	140° 35.0' E	77km	M5.1	3
平成31年1月18日	茨城県南部	35° 55.2' N	140° 25.9' E	54km	M5.3	3
平成30年9月5日	茨城県沖	36° 28.5' N	141° 20.2' E	60km	M5.5	3
平成30年7月17日	茨城県沖	36° 25.8' N	140° 41.5' E	52km	M4.8	4
平成30年3月30日	茨城県沖	36° 26.5' N	140° 37.2' E	56km	M5.1	4
平成29年11月3日	茨城県北部	36° 48.9' N	140° 31.8' E	8km	M4.8	3
平成29年10月6日	福島県沖	37° 05.2' N	141° 09.3' E	53km	M5.9	3
平成29年8月2日	茨城県北部	36° 48.2' N	140° 32.1' E	9km	M5.5	4
平成29年2月28日	福島県沖	37° 30.8' N	141° 22.0' E	52km	M5.7	3
平成29年2月19日	千葉県北東部	35° 43.8' N	140° 39.8' E	52km	M5.4	3
平成29年1月18日	茨城県沖	36° 25.7' N	140° 38.5' E	53km	M4.2	3
平成29年1月5日	福島県沖	36° 51.7' N	140° 58.7' E	56km	M5.3	3
平成28年12月28日	茨城県北部	36° 43.2' N	140° 34.4' E	11km	M6.3	3
平成28年11月24日	福島県沖	37° 10.4' N	141° 20.7' E	24km	M6.2	3
平成28年11月22日	福島県沖	37° 21.2' N	141° 36.2' E	25km	M7.4	4
平成28年11月21日	千葉県東方沖	35° 52.6' N	140° 57.6' E	17km	M5.0	3
平成28年10月20日	千葉県北東部	35° 51.7' N	140° 31.4' E	37km	M5.3	4
平成28年9月9日	茨城県沖	36° 23.2' N	141° 01.8' E	47km	M5.4	3
平成28年9月7日	茨城県南部	36° 10.0' N	140° 02.1' E	50km	M4.9	3

平成 28 年 8 月 19 日	茨城県沖	36° 33.6' N	141° 07.9' E	48km	M5.4	3
平成 28 年 7 月 27 日	茨城県北部	36° 27.0' N	140° 36.8' E	57km	M5.4	4
平成 28 年 7 月 20 日	茨城県南部	36° 01.2' N	139° 56.9' E	42km	M5.0	3
平成 28 年 6 月 18 日	茨城県沖	36° 23.0' N	140° 45.6' E	25km	M4.2	3
平成 28 年 6 月 12 日	茨城県南部	35° 59.8' N	139° 55.9' E	40km	M4.8	4
平成 28 年 5 月 16 日	茨城県南部	36° 02.0' N	139° 53.2' E	42km	M5.5	4
平成 28 年 2 月 7 日	茨城県南部	36° 03.1' N	139° 54.2' E	43km	M4.6	3
平成 28 年 1 月 24 日	千葉県東方沖	35° 52.7' N	140° 53.9' E	17km	M4.6	3
平成 27 年 11 月 22 日	茨城県沖	36° 25.7' N	140° 41.2' E	52km	M4.8	4
平成 27 年 10 月 21 日	福島県沖	37° 18.8' N	141° 11.5' E	37km	M5.3	3
平成 27 年 8 月 28 日	茨城県沖	36° 21.2' N	140° 56.0' E	46km	M4.8	3
平成 27 年 8 月 6 日	茨城県沖	36° 26.3' N	140° 37.1' E	55km	M5.2	4
平成 27 年 5 月 30 日	小笠原諸島西方沖	27° 51.6' N	140° 40.9' E	682km	M8.1	3
平成 27 年 5 月 25 日	埼玉県北部	36° 03.2' N	139° 38.3' E	56km	M5.5	4
平成 27 年 1 月 30 日	茨城県南部	35° 58.7' N	140° 12.4' E	40km	M4.8	3
平成 27 年 1 月 26 日	千葉県北東部	35° 52.6' N	140° 28.9' E	37km	M5.0	4
平成 26 年 9 月 16 日	茨城県南部	36° 05.6' N	139° 51.8' E	47km	M5.6	3
平成 26 年 7 月 12 日	福島県沖	37° 03.0' N	142° 19.2' E	33km	M7.0	3
平成 26 年 5 月 5 日	伊豆大島近海	34° 57.1' N	139° 28.8' E	156km	M6.0	3
平成 25 年 12 月 31 日	茨城県北部	36° 41.4' N	140° 37.7' E	7km	M5.4	3
平成 25 年 12 月 14 日	千葉県東方沖	35° 38.5' N	140° 43.8' E	49km	M5.5	3
平成 25 年 11 月 10 日	茨城県南部	36° 00.1' N	140° 05.0' E	64km	M5.5	3
平成 25 年 10 月 26 日	福島県沖	37° 11.7' N	144° 34.1' E	56km	M7.1	3
平成 25 年 10 月 20 日	茨城県沖	36° 25.6' N	140° 38.8' E	53km	M4.3	3
平成 25 年 10 月 12 日	茨城県沖	36° 25.9' N	140° 41.8' E	52km	M4.8	3
平成 25 年 9 月 20 日	福島県浜通り	37° 03.0' N	140° 41.7' E	17km	M5.9	5 弱
平成 25 年 4 月 29 日	千葉県東方沖	35° 48.5' N	141° 07.5' E	34km	M5.6	3
平成 25 年 4 月 4 日	千葉県東方沖	35° 46.0' N	140° 55.0' E	12km	M5.1	3
平成 25 年 3 月 26 日	千葉県東方沖	35° 51.9' N	140° 55.5' E	17km	M4.6	3
平成 25 年 3 月 26 日	千葉県東方沖	35° 51.9' N	140° 55.4' E	15km	M4.6	3
平成 25 年 1 月 28 日	茨城県北部	36° 34.2' N	140° 33.6' E	74km	M4.8	3
平成 24 年 12 月 7 日	三陸沖	38° 01.1' N	143° 52.0' E	49km	M7.3	4
平成 24 年 11 月 9 日	福島県沖	36° 52.6' N	141° 22.7' E	33km	M5.5	3
平成 24 年 10 月 24 日	茨城県沖	36° 32.0' N	140° 50.8' E	51km	M4.5	3
平成 24 年 10 月 12 日	千葉県北東部	35° 50.9' N	140° 32.9' E	37km	M5.1	3
平成 24 年 10 月 2 日	茨城県沖	36° 05.5' N	140° 58.9' E	39km	M4.2	3
平成 24 年 9 月 14 日	千葉県北東部	35° 51.6' N	140° 32.4' E	37km	M5.1	3
平成 24 年 8 月 26 日	福島県沖	36° 58.0' N	141° 04.9' E	90km	M5.2	3
平成 24 年 6 月 1 日	千葉県北西部	36° 01.6' N	139° 52.5' E	44km	M5.1	3
平成 24 年 5 月 18 日	茨城県南部	36° 08.1' N	139° 50.4' E	51km	M4.8	3
平成 24 年 4 月 29 日	千葉県北東部	35° 42.9' N	140° 36.0' E	48km	M5.8	3
平成 24 年 4 月 25 日	千葉県北東部	35° 43.3' N	140° 40.7' E	43km	M5.5	3
平成 24 年 4 月 13 日	福島県沖	36° 56.8' N	141° 25.3' E	32km	M6.0	3
平成 24 年 4 月 12 日	茨城県沖	36° 49.7' N	141° 20.5' E	29km	M5.6	3
平成 24 年 4 月 1 日	福島県沖	37° 04.6' N	141° 07.9' E	53km	M5.9	3

⑮竜巻（突風）の発生の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊に、竜巻（突風）の影響があったかを調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔倒壊時における茨城県大洗町における竜巻（突風）発生の有無を気象庁 HP で確認する。

3. 確認・調査結果

『気象庁 HP：ホーム＞各種データ・資料＞竜巻等の突風データベース＞最近発生した事例一覧（速報）』^{⑮-1}を確認したが、令和元年9月9日に茨城県大洗地区での竜巻の発生はなかった（表⑮-1 参照。）。また、冷却塔の倒壊後のがれきの散乱状態や周辺部建家及び構造物の影響を調査した結果、大洗研究所内周辺において竜巻（突風）の発生がなかったことを確認した。

4. 評価結果

冷却塔倒壊時には、竜巻（突風）が発生しておらず、竜巻（突風）による影響はなかったと評価した。

5. 参考文献

[⑮-1] 気象庁 HP（ホーム＞各種データ・資料＞竜巻等の突風データベース＞最近発生した事例一覧（速報））

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/new/list_new.html

表⑮-1 最近発生した事例一覧（速報）2019.11.5 更新
 -気象庁 HP より一部抜粋（編集）-

現象区別	発生日時	発生場所	日本版改良藤田スケール		被害幅 m	被害長さ km	主な被害状況				総観場	備考
			風速	階級			死者	負傷者	住家			
					全壊	半壊						
ダウンバーストまたはガストフロント	2019/09/10 19:35 頃	群馬県 邑楽郡邑楽町、館林市	約 35m/s	JEF0	700	0.9	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	住家一部損壊 8 棟
ダウンバーストまたはガストフロント	2019/09/10 19:30 頃	埼玉県 深谷市、群馬県 伊勢崎市	約 30m/s	JEF0	960	2.4	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	
ダウンバーストまたはガストフロント	2019/09/10 19 時頃	栃木県 佐野市	約 40m/s	JEF1	640	1.5	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	住家一部損壊 27 棟
不明	2019/09/10 16:20 頃	山梨県 笛吹市	約 35m/s	JEF0	100	0.9	0	0	0	0	雷雨(熱雷)	
不明	2019/09/04 16:30 から 17:30	長野県 長野市	不明	不明	不明	0.02	0	0	0	0	暖気の移流、雷雨(熱雷を除く)	

⑩設備運転による過応力の影響

1. 確認・調査事項

二次冷却系統の運転による過応力が生じて、冷却塔の倒壊に影響したかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

冷却塔倒壊発生時の二次冷却系統の運転状態を調査して、運転による過応力が発生しているかを調査する。

3. 確認・調査結果

冷却塔倒壊時の二次冷却系統の運転状態を確認したところ、二次冷却系統は停止していたため、二次冷却系統の運転による過応力が発生していなかった。

4. 評価結果

冷却塔倒壊時に二次冷却系統は停止しており、二次冷却系統の運転により過応力は発生しておらず、二次冷却系統の運転による過応力が、冷却塔の倒壊への影響はないと評価した。

⑰ 配管破損部の強度不足の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔に設置している4本の二次冷却系配管(以下「立上げ配管」という。)の強度が不足しており、台風15号の強風により、先に立上げ配管が倒れ、冷却塔の倒壊に影響したかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

当時の冷却塔に係る設工認書、配管の溶接設計を確認し、冷却塔に設置している4本の立上げ配管の破断部の外観観察を行う。次に、有限要素法により、冷却塔の設計基準値である風荷重 200kgf/m^2 の曲げモーメントが負荷された際の応力集中の箇所及び想定される荷重を評価する。

3. 確認・調査結果

3.1 関連図書及び溶接設計の調査

冷却塔に係る設工認書の確認を行った。設工認書から、立上げ配管の仕様は表⑰-1のとおり、接続については溶接もしくはフランジによるものとされており、立上げ配管の試験検査は、水圧試験及び性能試験であった。一方、立上げ配管の溶接部検査については、要求されていなかった。

3.2 立上げ配管の外観写真

図⑰-1に立上げ配管破断部の写真を示す。台風15号により破断した立上げ配管の外観写真から、4本の立上げ配管の破断箇所は溶接部の近傍である熱影響部と考えられ、それぞれほぼ同じ位置であった。

3.3 有限要素法による立上げ配管の応力解析

立上げ配管の応力解析を有限要素法を用いて行った。図⑰-2に立上げ配管部の配置概要図及び計算モデルを示す。冷却塔に配置されている立上げ配管は、冷却塔入口ヘッダーに450Aの配管を溶接した構造となっている。立上げ配管の応力計算にあたっては、図⑰-2(b)に示すとおり、冷却塔にある木材が立上げ配管を保持していない状態で、冷却塔が倒壊しない状態では冷却塔上部の重量は全て冷却塔の柱(119本)で支えられていると仮定して、保守的に評価した。有限要素法による立上げ配管の応力計算結果を図⑰-3に示す。図⑰-3(a)より、立上げ配管の自重及び当時の設計基準である風荷重 200kgf/m^2 を考慮した冷却塔入口ヘッダーと立上げ配管との溶接部に負荷される応力は、最大で 50MPa (50N/mm^2)であった。

立上げ配管(No.3)内面部の詳細写真を図⑰-4に示す。溶接は、完全溶け込み開先溶接のうちT継手(以下「T継手」という。)であった。研究炉技術基準を参考に当該溶接部の継手効率を近似する「突合せ両側溶接」の継手効率で考慮した場合、

溶接検査を行い基準に適合すれば、母材強度に対して 1.00 となっている（その他の場合は、継手効率は 0.70）^{〔⑰-1〕}。

以上より、当該溶接部の強度は、使用されている立上げ配管の材料である SS400 相当の設計引張強度 (S_u 値： 400N/mm^2) に対して、継手効率を 0.70 を考慮したとしても、溶接部の強度は 280MPa (280N/mm^2) であることから、立上げ配管の自重及び風荷重を考慮した荷重による破損はなかったと考えられる。

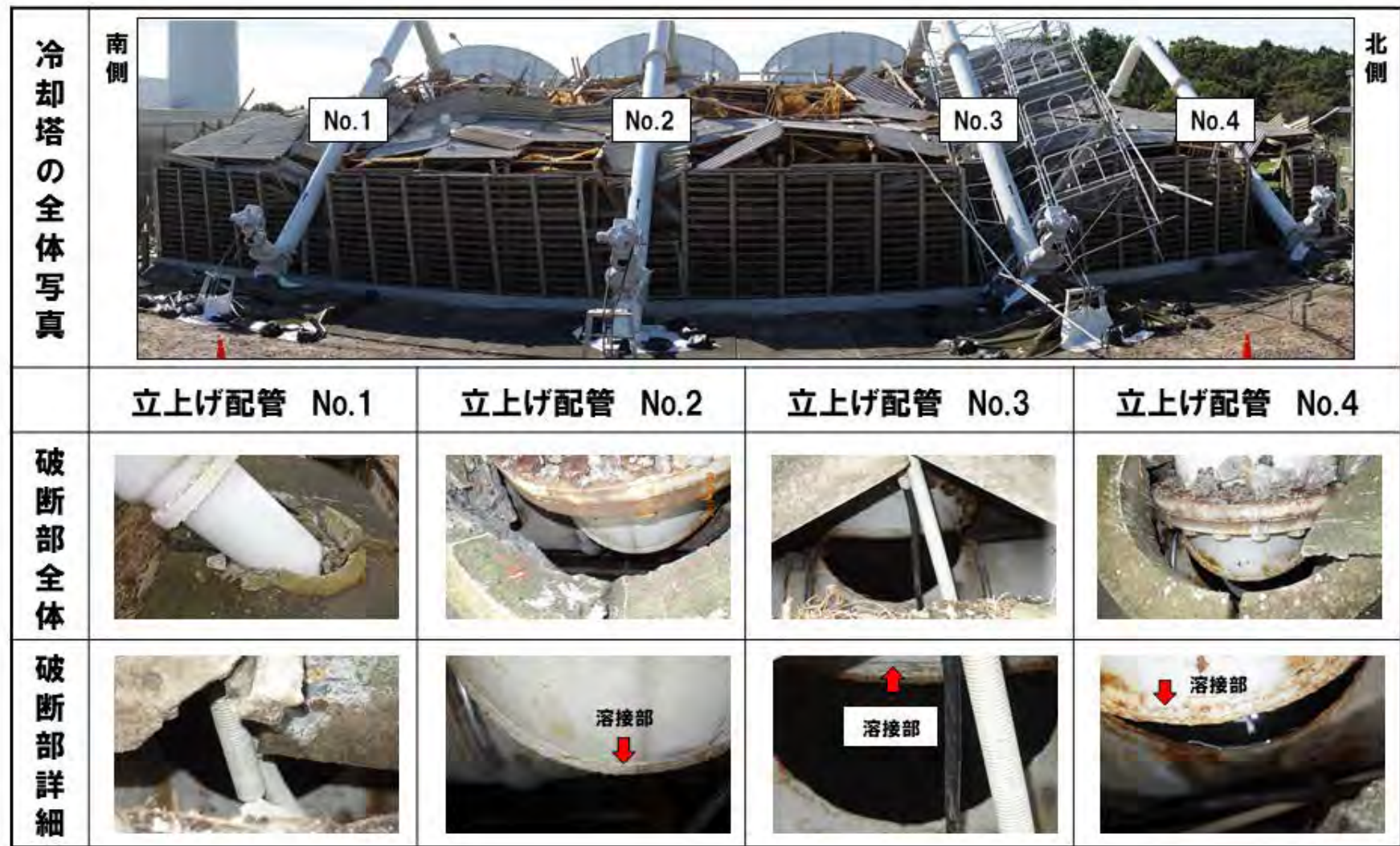
図⑰-3(b)より、冷却塔上部の重量が立上げ配管に負荷された場合を評価した。計算条件は、冷却塔上部の重量を 29.8t とし、その重量が立上げ配管 4 本に平均的に負荷されたものと仮定するとともに、ファンスタックに係る風荷重も考慮した。その結果、溶接部に負荷される圧力は、 525MPa (525N/mm^2) 以上であり、母材強度を超える結果となった。立上げ配管の溶接部近傍の詳細写真を図⑰-5 に示す。この結果、破損部は溶接部近傍の熱影響部から破損し、冷却塔入口ヘッダーの配管まで破損していた。これは、当該部に大きな応力(曲げ)が負荷されたものと示唆される。

4. 評価結果

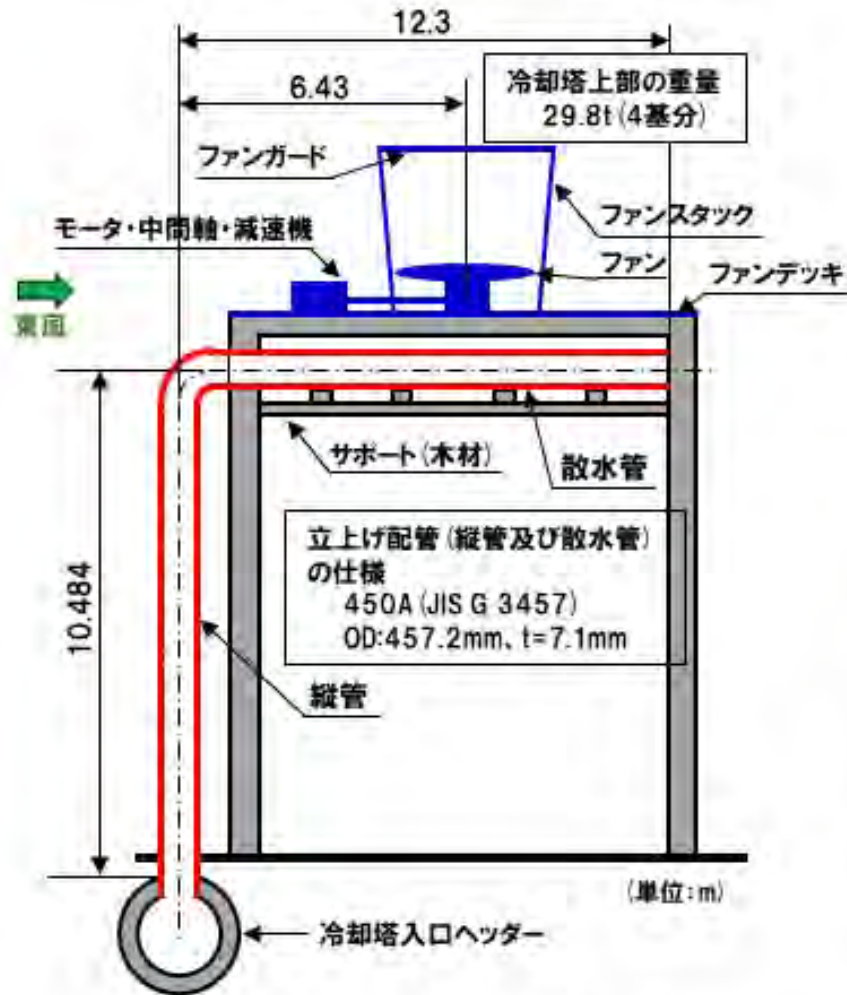
冷却塔の倒壊については、冷却塔上部の重量が立上げ配管に負荷され、それにより立上げ配管溶接部の近傍が破断したと考えられ、先に立上げ配管が倒れることによる冷却塔倒壊に影響を及ぼしたものではないと評価した。なお、立上げ配管は、T継手であり、溶接部の強度は十分満足していたものと考えられる。

5. 参考文献

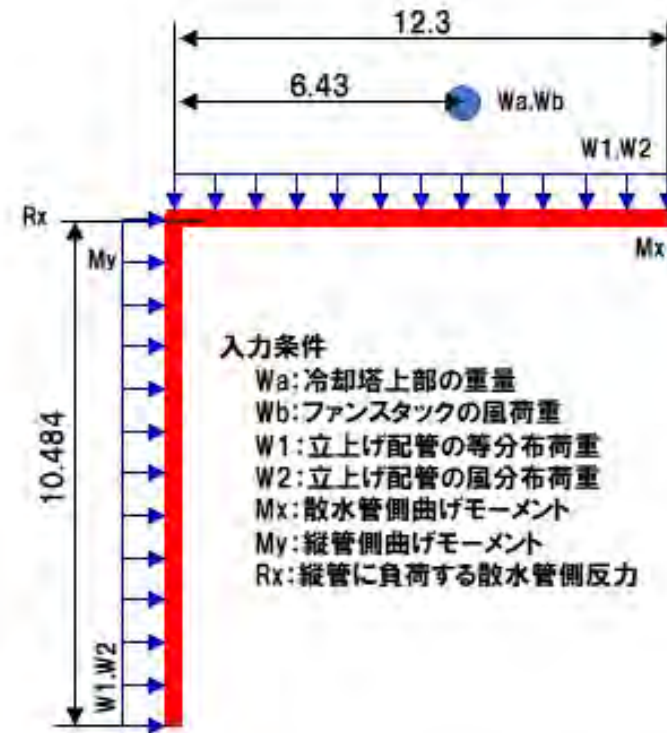
- 〔⑰-1〕 文部科学省 科学技術・学術政策局、「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」、平成 15 年 5 月 30 日(15 科原安 第 13 号)。



図⑰-1 二次冷却系配管(立上げ配管)破断部の写真

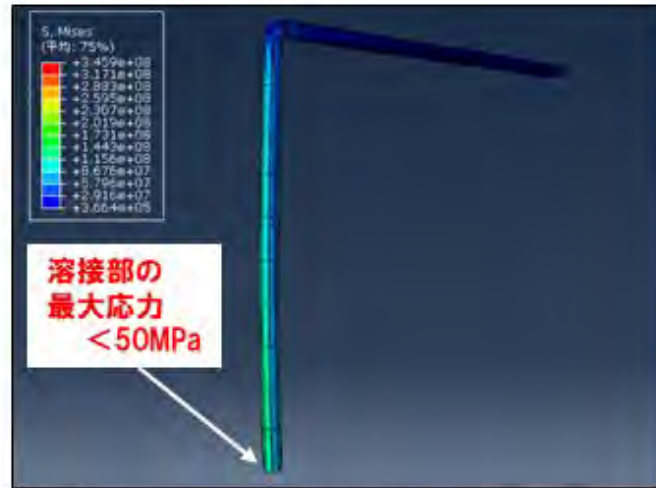


(a) 立上げ配管の配置概要図

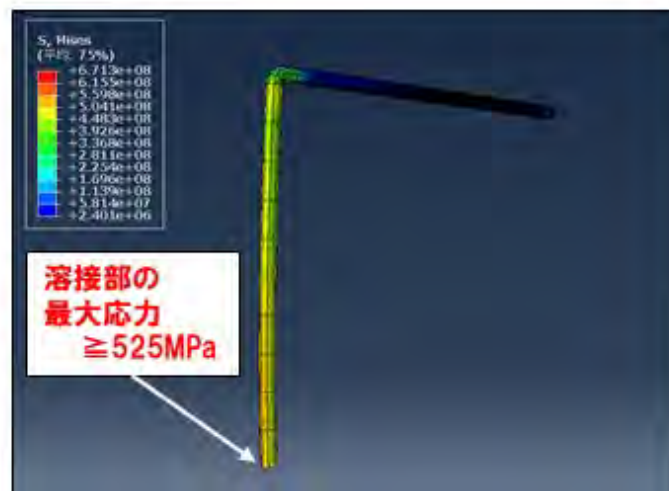


(b) 立上げ配管の構造解析モデル

図①7-2 有限要素法による二次冷却系配管(立上げ配管)溶接部の計算モデル



(a) 立上げ配管自重と風荷重を考慮した最大応力

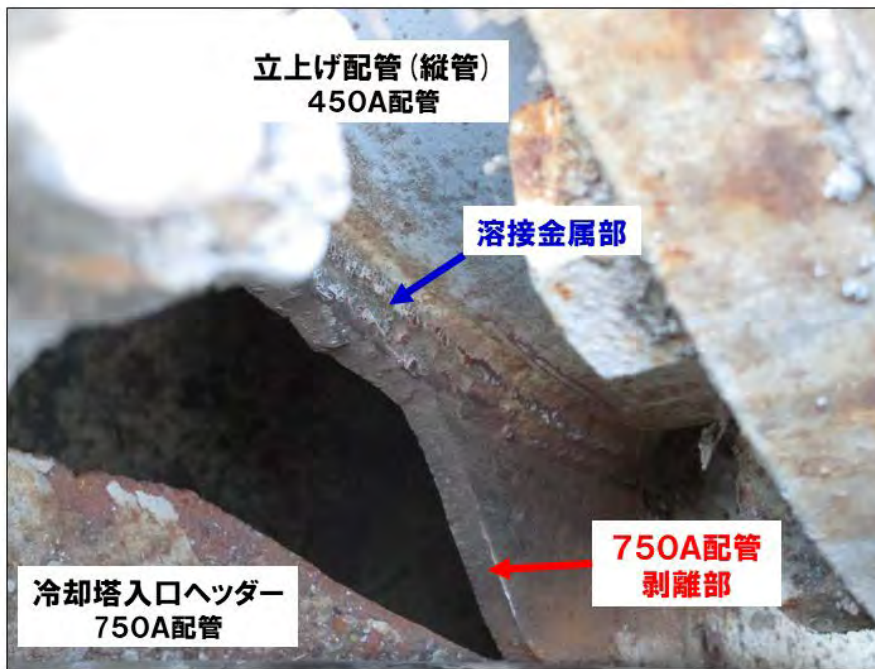


(b) 冷却塔上部重量を考慮した最大応力

図⑰-3 有限要素法による二次冷却系配管(立上げ配管)溶接部の最大応力計算結果



図⑰-4 立上げ配管 (No. 3) 内面部の詳細写真



図⑰-5 立上げ配管 (No. 4) の溶接部近傍の詳細写真

表⑰-1 立上げ配管に係る機器仕様 (設工認書より)

項目	要求仕様
(1) 材質	SS41、STPG38
(2) 呼び径	添付図面 No. 1 二次冷却系統流路系統図
(3) 接続	主熱交換器への接続はフランジにより、その他の接続箇所は溶接又はフランジによる。
(4) 設計圧力	5kg/cm ² g
(5) 設計温度	60℃

⑱ 配管破損部の腐食の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔に設置している 4 本の立上げ配管の溶接部が腐食し、台風 15 号の強風により、先に立上げ配管が倒れ、冷却塔の倒壊に影響したかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

立上げ配管の破損部及び溶接部が破損していない部分の外観観察を行い、溶接部の健全性を評価する。

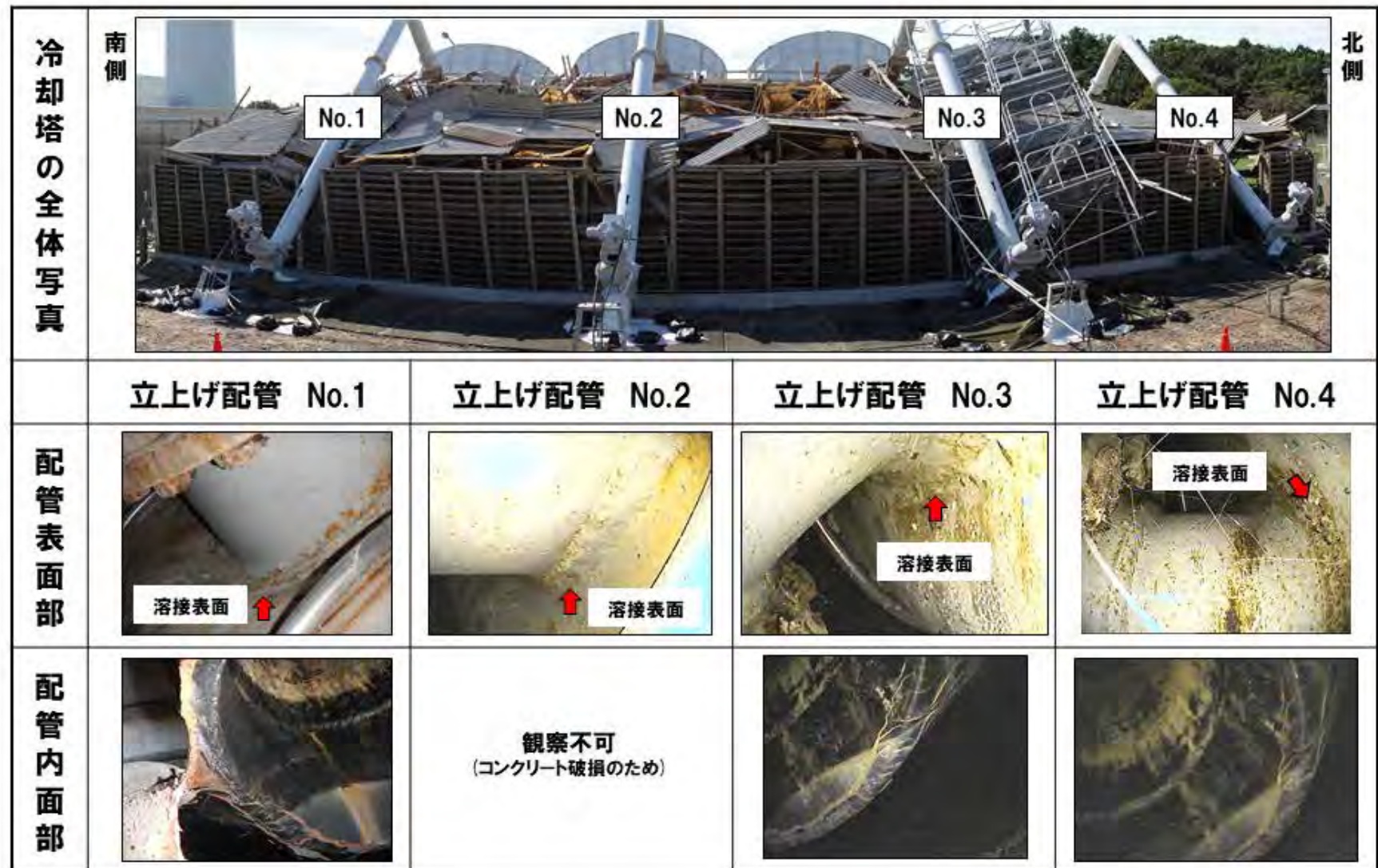
3. 確認・調査結果

立上げ配管の破損部の外観観察から、冷却塔の倒壊直後における立上げ配管の破損部表面は金属光沢で錆はなかったことから、腐食はなかったものと考えられる(図⑱-1 参照)。

立上げ配管の破損していない溶接部の写真を図⑱-1 に示す。なお、本部分は、圧縮応力が負荷されたところであり、溶接部は破断していなかった。この結果、4 本の立上げ配管の溶接部には、表面の塗装がはがれた原因で一部錆が観察されたところはあったが、表面及び内面とも欠陥や腐食はなかったと考えられる。

4. 評価結果

立上げ配管の破損部及び破損していない箇所の外観観察の結果から、立上げ配管溶接部は腐食はなかったと考えられることから、冷却塔の倒壊への影響はないと評価した。



図⑱-1 二次冷却系配管(立上げ配管)溶接部の外観写真

⑱ 足場の衝突の影響

1. 確認・調査事項

外壁補修工事の際に設置した足場の衝突が冷却塔の倒壊に影響しているかを評価する。

2. 確認・調査の方法及び内容

外壁補修工事中の記録により、足場の組立て状況を確認する。また、足場の倒壊状況について、目視により確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 外壁補修工事中の足場の組立て状況

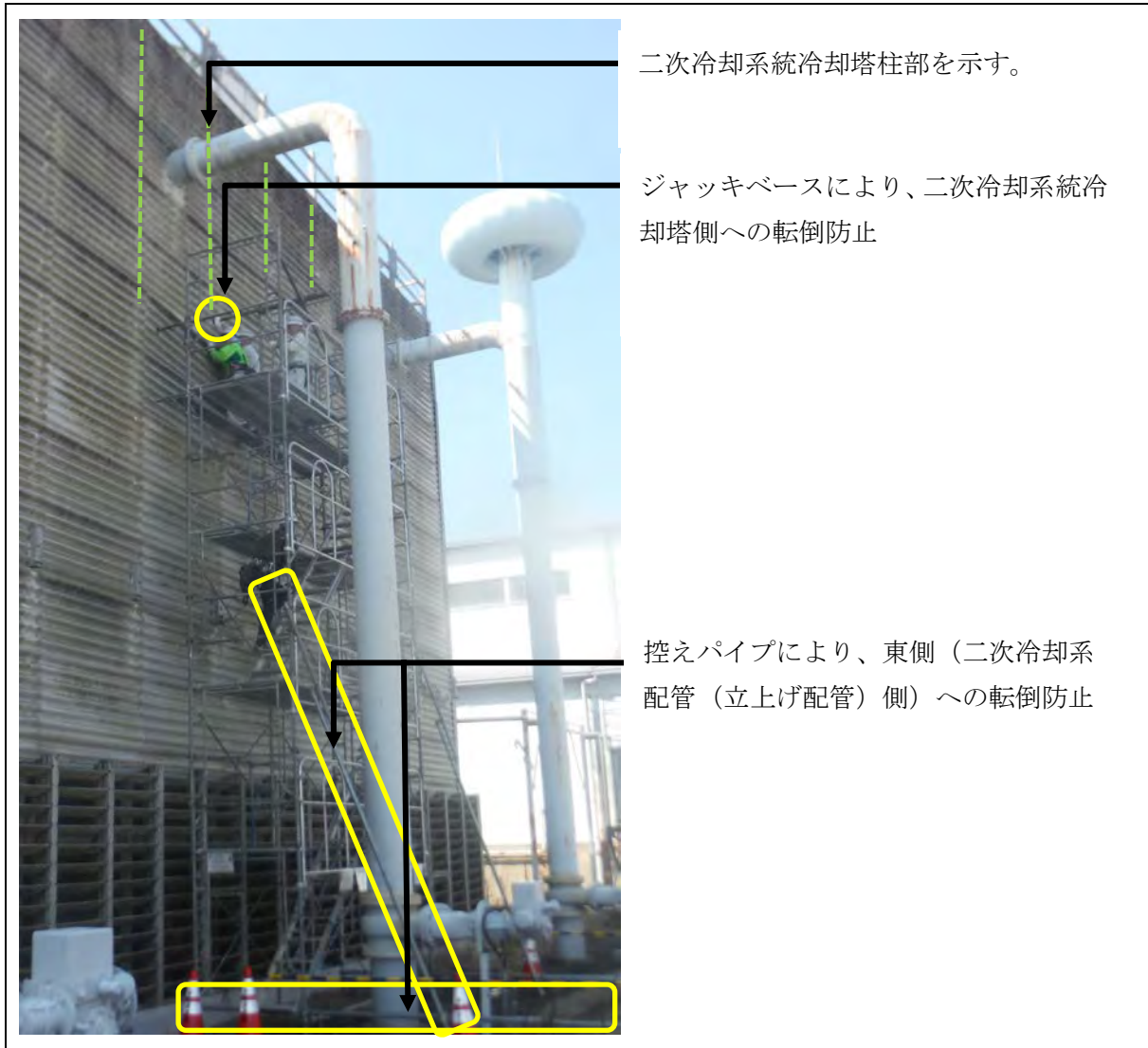
図⑱-1 に示すとおり、足場の最上部にはジャッキベースによる、冷却塔側への倒壊防止措置を施していた。また、東側（立上げ配管側）についても控えパイプによる倒壊防止措置を施していた。

3.2 足場の倒壊状況

図⑱-2 に示すとおり、建枠のジョイント及び布枠の外れ止め部分については健全であったが、左1スパンの建枠、布枠、アルミ階段枠、上さん及び先行手すり枠が立上げ配管により押しつぶされている状況であった。また、足場が倒壊する際に控えパイプの座屈及びクランプの切断が確認された。なお、足場の外側へメッシュシートを取り付けていなかった。

4. 評価結果

足場の倒壊について、冷却塔側及び、東側（立上げ配管側）へ倒壊防止を施していたことと、メッシュシートを取り付けていないことから、足場単体での倒壊は想定しにくく、立上げ配管が倒れた影響によるものと推定される。このことから、足場の衝突は冷却塔の倒壊に影響を与えていないと評価した。



図⑱-1 外壁補修工事中の足場の組立て状況



図⑱-2 足場の倒壊状況

⑳ 繰返し応力の影響

1. 確認・調査事項

冷却塔の倒壊に、台風 15 号による繰返し応力(風荷重)による損傷が影響しているかを文献により調査する。

2. 確認・調査の方法及び内容

台風等の強風時においては、数時間にわたって風圧が変動し、繰返し荷重を受けるため、繰返しの荷重が冷却塔の倒壊への影響について文献を調査し、それに基づいた現場確認を行う。

3. 確認・調査結果

建築物の耐風設計においては、建築基準法や建築物荷重指針に規定された風圧力に基づく設計風荷重による静的設計法が用いられている。一方、木材の耐久性については、静的な木材強度に対する載荷時の応力レベルと破壊に至るまでの時間との関係が調べられている^{〔⑳-1〕}。

木材の耐久性に係る評価として、建物等に負荷される継続時間による木材の許容応力度を求めるが、応力レベルが約 18%以下では荷重継続時間はほぼ ∞ となり、永久に壊れないとされている^{〔⑳-1〕}。また、疲労試験により、木材の疲労限度が約 20%であるとの報告がある^{〔⑳-2〕}。冷却塔の設計・施工時の速度圧 200kgf/m²に対し、台風 15 号の最大瞬間風速約 31m/s の速度圧 40kgf/m²であることから、健全な木材であれば繰返し応力に対して影響はないと推定される。

また、文献^{〔⑳-3〕}では、建築物外装壁の評価であるが、台風が通過するモデルを構築し、風圧変動の発生頻度特性を求め、疲労損傷度を評価しており、繰返し応力による外装壁の疲労損傷度は小さく、設計風速に達する台風が通過しても破損しない結果が示されている。これにより、冷却塔の倒壊直後のスレート材の散乱状態を確認した結果、冷却塔周辺部へのスレート材の散乱はごく狭い範囲であり、影響はなかったものと考えられる。

4. 評価結果

台風 15 号による繰返し応力(風荷重)については、健全な木材であれば影響はなく、木材の破損は発生しないと推定されるが、実際は木材の腐朽があり、耐力の低下により筋かいが強度部材として機能していない影響が大きいと考えられる。

5. 参考文献

〔⑳-1〕 佐々木康寿、「木材の力学的耐久性」、Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.66 (2017)786-792.

〔⑳-2〕 Y. Sasaki, M. Yamasaki, T. Sugimoto, " Fatigue Damage in Wood Under

Pulsating Multiaxial-Combined Loading” , Wood and Fiber Science,
37(2005)232-241.

- [⑳-3] 高森浩治、谷口徹郎、谷池義人、「台風通過に伴う建築物壁面に作用する変動風圧特性と壁外装材の疲労損傷評価」、第22回風工学シンポジウム論文集(2012) .

木材の腐朽を考慮した解析検討による倒壊原因の推定

1. 目的

二次冷却系統冷却塔（以下「冷却塔」という。）の倒壊について、原因調査から冷却塔の特殊な構造及び木材の腐朽が主な要因として考えられる。ここでは、木材の腐朽による耐力低下を考慮した解析を実施し、倒壊まで至った過程を推定する。

2. 冷却塔の構造上の特徴

(1) 冷却塔は設備として設計されており、建築基準法に基づく一般的な木造建築のように柱に水平荷重（風荷重）を負担させる設計ではない。そのため、柱中間部に継手を設けているが、筋かいが機能を喪失し、柱に力が集中すると継手が弱部となると考えられるため、構面内の筋かい及び柱の評価を行う。

(2) 冷却塔は、柱、横材及び筋かいで構成した構面を東西方向に 17 構面配置している。風を受ける壁面は、柱に連結されており、風荷重は構面内の筋かいに負担させる設計である。各構面の風荷重は連結されている壁面の面積に応じて設定する。

一部の部材及び構面が木材の腐朽により耐力がなくなり、機能が喪失した場合、隣接する構面が受ける風荷重が増えると考えられるため、その影響を検討する。

3. 構造部材の劣化、損傷等

添付資料 4 「⑤木材の腐朽の影響」における調査結果の概要を以下に示す。

外観観察の結果より、東側の筋かい下端部 3-AB、7-AB、10-AB、11-AB、12-AB、14-AB の計 6 ヶ所は損傷または接合部から木材が抜け出した状態であった。また、柱接合部（柱継手）については、接合金物の固定ボルト付近から柱が割裂していることが確認されている（添付資料 4 表⑤-1）。

劣化調査の結果より、10-AB～15-AB の筋かい下端部の木材の腐朽が進み、木材の健全な部分が少なくなっていることを確認した。また、その他の箇所についても筋かい下端部に木材の腐朽を確認した（添付資料 4 図⑤-5）。

耐力低下を考慮した解析にあたっては、木材の腐朽が進んでいる 10-AB を例に残存断面積比を用いた検討を行う。なお、残存断面積比は、引張筋かいについては、「下端部（接合部）」の値を採用する。圧縮筋かいについては、耐力が部材長全体の座屈耐力であることから「下端部（接合部）」と「中央部」の平均値を採用した。

4. 台風 15 号時の解析評価

(1) 風荷重

本検討では、台風 15 号時に大洗敷地内で観測された地上高 10m の最大瞬間風速 30.9m/s 及び最新の建築基準法に基づき、速度圧を $q = 40\text{kgf/m}^2$ とし、風力係数により風上（高さ方向の分布を考慮）・風下の圧力を考慮して風荷重を算定した。

(2) 評価方法

構造図に基づき、柱、横材及び筋かいについて部材端部をピン接合としてモデル化し、軸力のみが伝達できる解析モデル（図 1）を作成し、台風 15 号時の風荷重（速度圧 $q = 40\text{kgf/m}^2$ ）と自重を考慮して軸力算定を実施した。

解析による軸力算定結果と図 2 に示す針貫入試験結果による残存断面積比（耐力低下に相当）に基づき、倒壊に至った原因を検討する。検討ステップを以下に示す。

ステップ 1：設計時のモデルによる評価

引張及び圧縮筋かいが機能する場合の軸力を算出し、終局耐力（評価基準値）と比較を行う。

ステップ 2：耐力低下を考慮した評価

針貫入試験結果による残存断面積比に基づき耐力低下を考慮し、部材の損傷状況を確認する。

ステップ 3：引張筋かいを取り除いたモデルによる評価

上記ステップ 2 の解析結果より、引張筋かい接合部について耐力が見込めず先行して破断すると考えられることから圧縮筋かいのみで風荷重を負担させた場合の損傷状況を確認する。

ステップ 4：一部圧縮筋かいを取り除いたモデルによる評価

上記ステップ 3 の解析結果より、引張及び圧縮筋かいが機能しない場合の力及び変形状態を確認する。

ステップ 5：一構面が破断した場合の隣接する構面への影響検討

「冷却塔の構造上の特徴 2. (2)」に示すとおり、木材の腐朽による耐力低下の程度が大きい部材を有する構面が風荷重を負担できなくなり、隣接する構面の荷重負担が増大した場合、冷却塔全体が倒壊しないか検討する。

(3) 評価結果

ステップ 1：設計時のモデルによる評価

引張及び圧縮筋かいともに発生軸力は評価基準値を下回り（検定比は 0.2 程度）、健全である（表 1、図 3）。

ステップ 2：耐力低下を考慮した評価

ステップ 1 の検定比は、圧縮引張ともに 0.2 程度であるが、木材の

腐朽による残存断面積比（図 2）を耐力低下と考えると、一部の構面（例えば、No. 10 構面）では下端部の耐力がないため、先行して引張筋かいが破断する（表 2）。

実際の外観観察の結果より、引張筋かいの端部で接合金物から木材が抜け出して破断していることも確認されていることから、次ステップでは引張筋かいが機能しないと仮定して解析を実施する。

ステップ 3：引張筋かいを取り除いたモデルによる評価

引張筋かいが機能を喪失した場合、圧縮筋かいの軸力が大きくなる傾向を確認できた。よって、圧縮筋かいはステップ 2 における木材の腐朽による耐力低下に加え、軸力増加により損傷しやすくなると考えられる（表 3、図 4）。

ステップ 4：一部圧縮筋かいを取り除いたモデルによる評価

引張及び圧縮筋かいともに破断すると、風荷重を柱が負担することとなり、力・変形も増大し（図 5）、柱継手が損傷する（表 4）。その後、柱継手部が塑性ヒンジ（部材が弾性範囲を超え、回転に対して抵抗できない状態）となり、機能を喪失したと考えられる（図 6、図 7）。

ステップ 5：一構面が破断した場合の隣接する構面への影響検討

「冷却塔の構造上の特徴 2. (2)」に示すとおり、劣化の程度が大きい部材を有する No. 10～15 構面（特に No. 10、13、15 構面）が風荷重を負担できなくなると、隣接する構面が風荷重を負担することとなり、部材の軸力増加と部材の破断が隣接する構面に連鎖的に進み、冷却塔全体が損傷して倒壊に至ったと考えられる（図 8、表 5）。

なお、添付資料 4「⑫風雨の影響」を踏まえると、局所的にはさらに大きな風荷重が生じていた可能性があり、倒壊に影響していたと考えられる。

5. 評価結果

台風 15 号時の風荷重による解析を実施した結果、構造部材が健全な状態であれば耐えることができたが、風荷重を負担する筋かいが劣化により耐力が低下し、倒壊に至ったと考えられる。

本検討より、木材の腐朽が進んでいる筋かいの一方（引張筋かい）が破断すると他方の筋かい（圧縮筋かい）に力が集中し、両方の筋かいが破断に至ることが確認できた。その後、柱に力が集中し、構造上弱部となる柱継手が損傷したと考えられる。

また、劣化の程度が大きい部材を有する一構面が風荷重を負担できなくなると、隣接する構面が風荷重を負担して部材の軸力増加と部材の破断が隣接する構面に連鎖的に進むことから、冷却塔全体が損傷し、倒壊に至ったと推定される。

台風 15 号時の風荷重
速度圧 $q=40\text{kgf/m}^2$

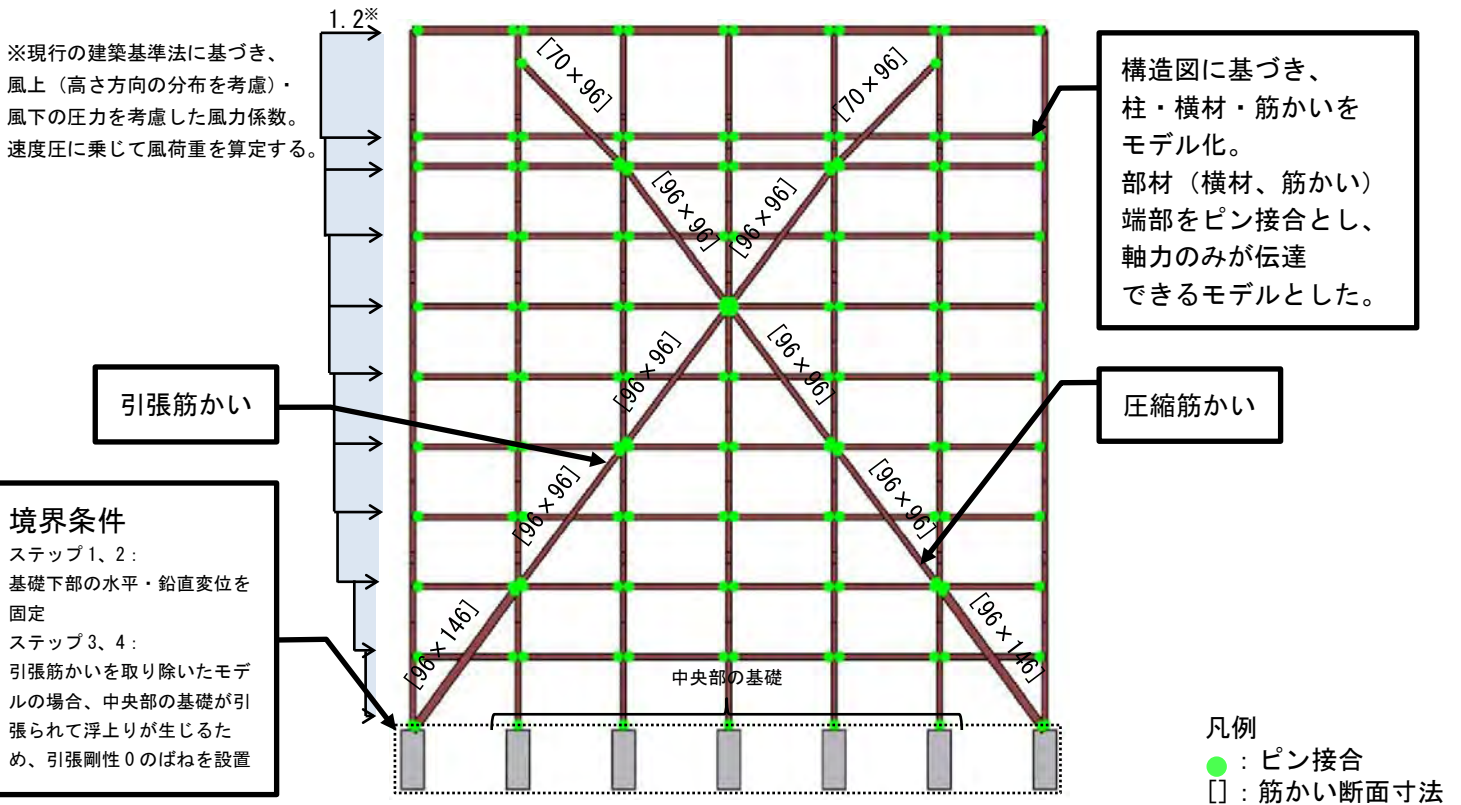


図 1 解析モデル

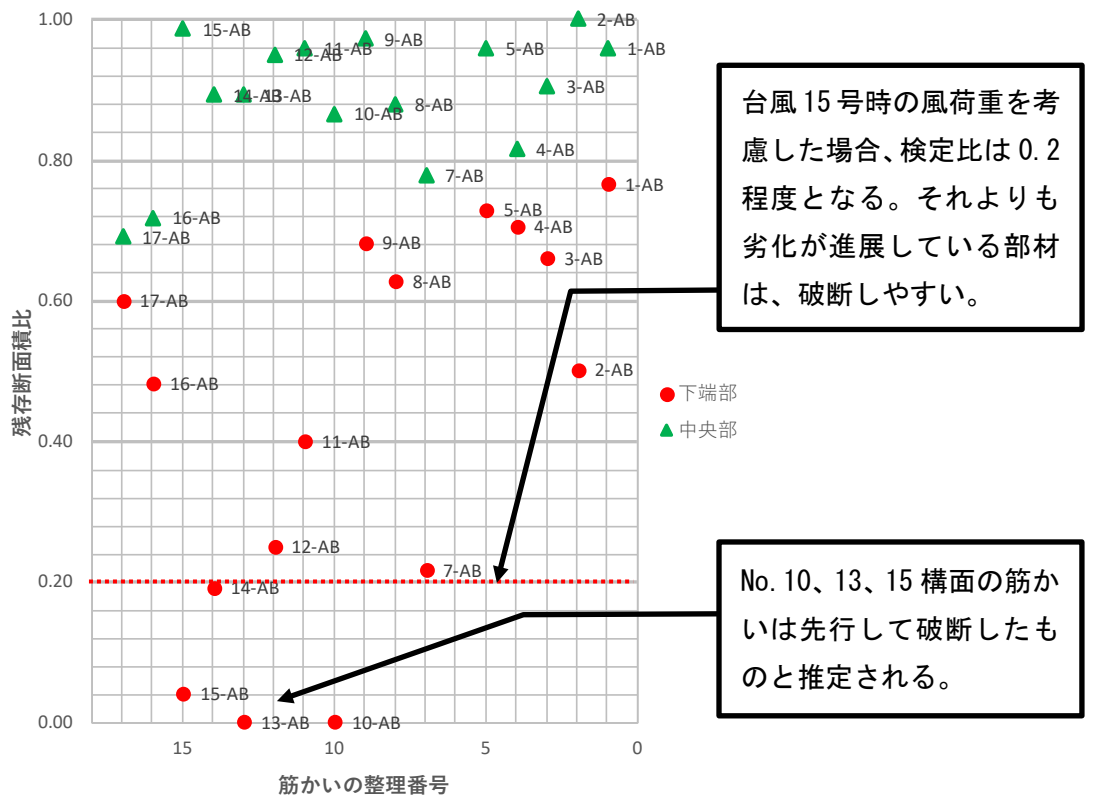


図 2 針貫入試験結果（残存断面積比）

表1 部材の検討結果（台風15号時の風荷重、ステップ1）

部材	位置	①発生軸力 (kN)	②評価基準値* (kN)	検定比 (①/②)
筋かい (圧縮)	下から2段目	9.1	38.3	0.24
筋かい (引張)	下から1段目	6.2	96.5	0.07
筋かい (引張) 接合部	下から1段目	6.2	33.7	0.19

※ 終局耐力（木質構造設計規準により算定。圧縮は座屈耐力[オイラー式]を考慮）

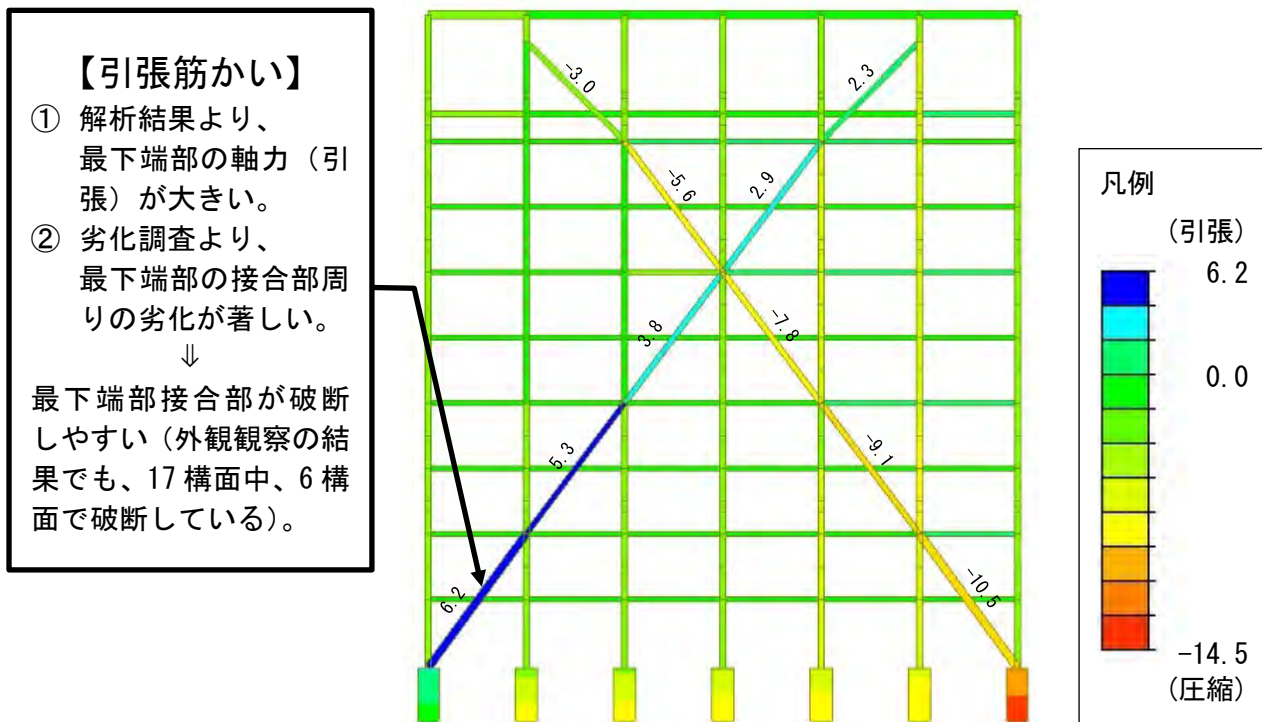


図3 台風15号時の風荷重による解析結果〔軸力図 :kN〕
（ステップ1：設計時のモデルによる評価）

表2 部材の検討結果（台風15号時の風荷重、ステップ2）

部材	位置	①発生軸力 (kN)	②評価基準値 ^{※1} (kN)	検定比 (①/②)
筋かい (圧縮)	下から2段目	9.1	7.2	1.27
筋かい (引張)	下から1段目	6.2	0	※2
筋かい (引張) 接合部	下から1段目	6.2	0	※2

※1 終局耐力（木質構造設計規準により算定。圧縮は座屈耐力[オイラー式]を考慮）

耐力算定にあたっては、針貫入試験結果（残存断面積比）による耐力低減を考慮

※2 耐力0のため算定できない

表3 部材の検討結果（台風15号時の風荷重、ステップ3）

部材	位置	①発生軸力 (kN)	②評価基準値 [※] (kN)	検定比 (①/②)
筋かい (圧縮)	下から2段目	14.3	7.2	2.00

※ 終局耐力（木質構造設計規準により算定。圧縮は座屈耐力[オイラー式]を考慮）

耐力算定にあたっては、針貫入試験結果（残存断面積比）による耐力低減を考慮

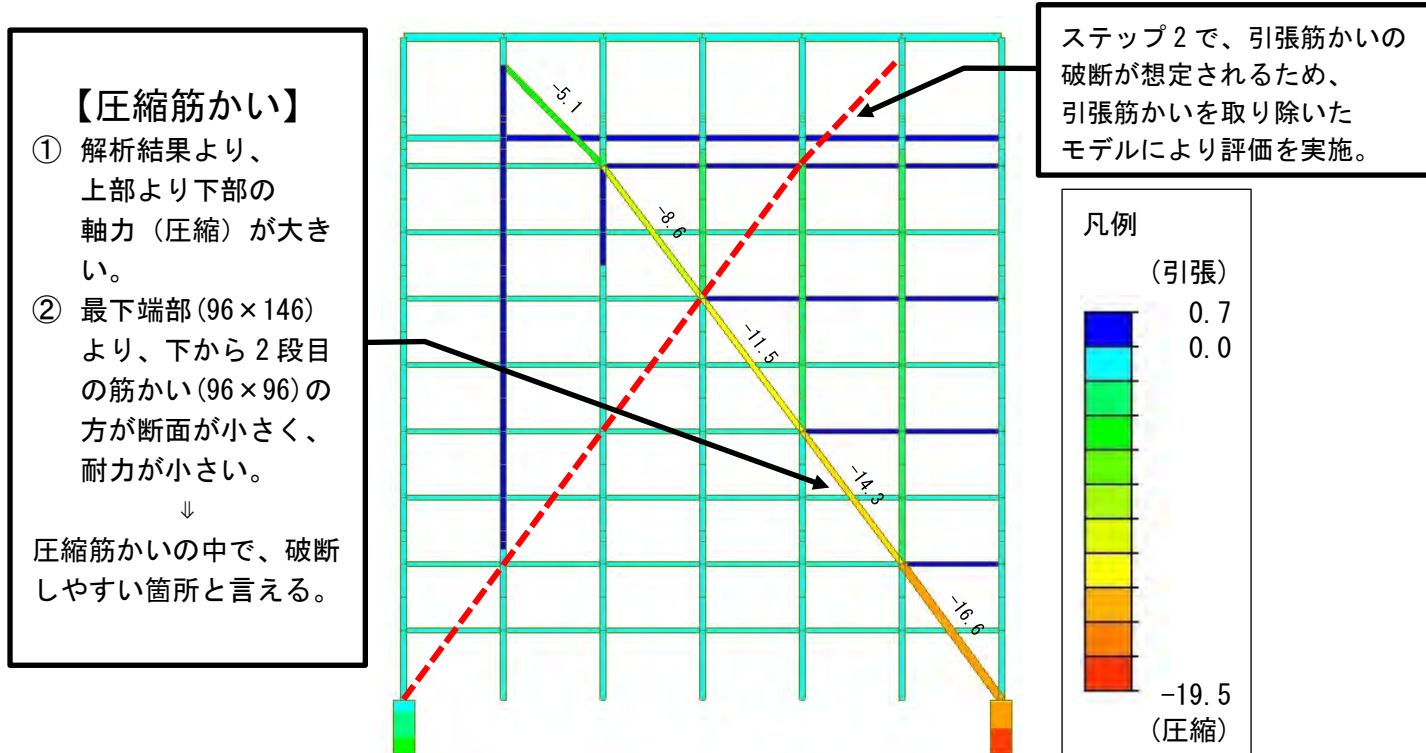


図4 台風15号時の風荷重による解析結果 [軸力図 :kN]
 (ステップ3: 引張筋かいを取り除いたモデルによる評価)

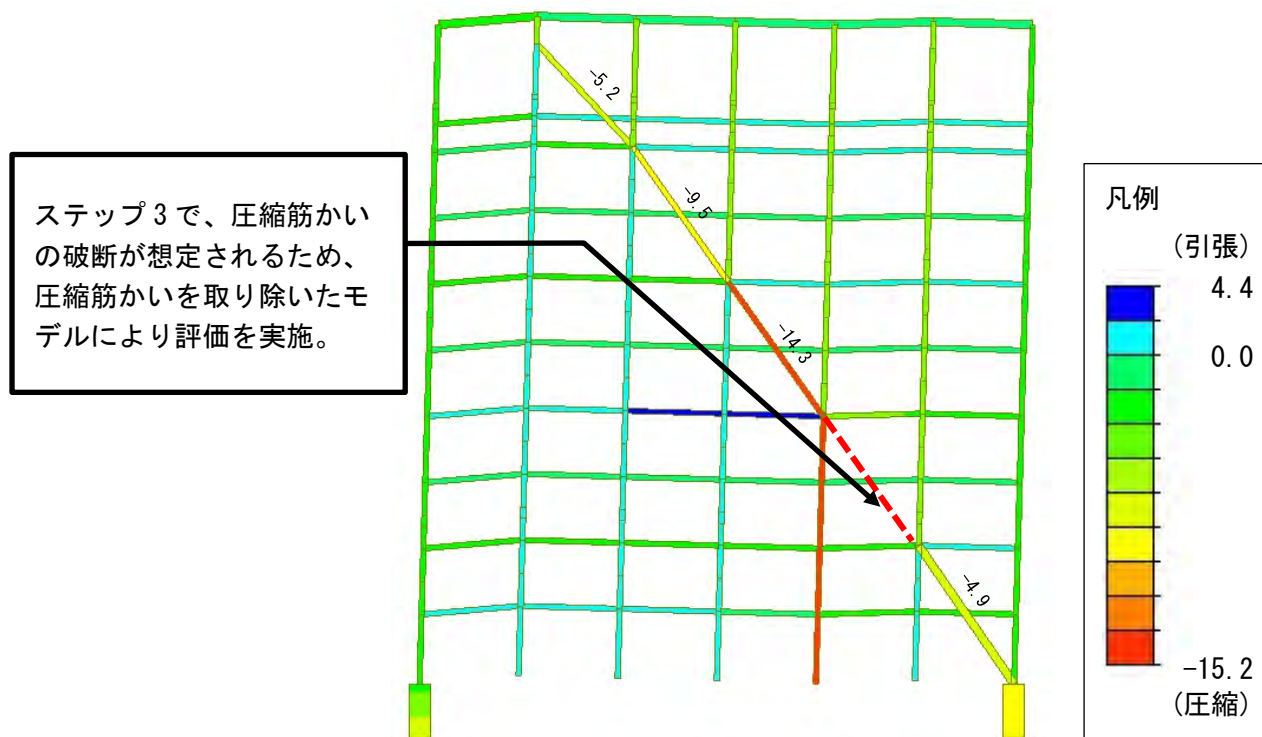


図5 台風15号時の風荷重による解析結果 [軸力図 :kN]
 (ステップ4: 一部圧縮筋かいを取り除いたモデルによる評価)

表4 柱継手の検討結果（台風15号時の風荷重、ステップ4）

部材	位置	①発生軸力 (kN)	②評価基準値* (kN)	検定比 (①/②)
柱継手	下図参照	39.4	14.5	2.73

※ 終局耐力（木質構造設計規準により算定。）

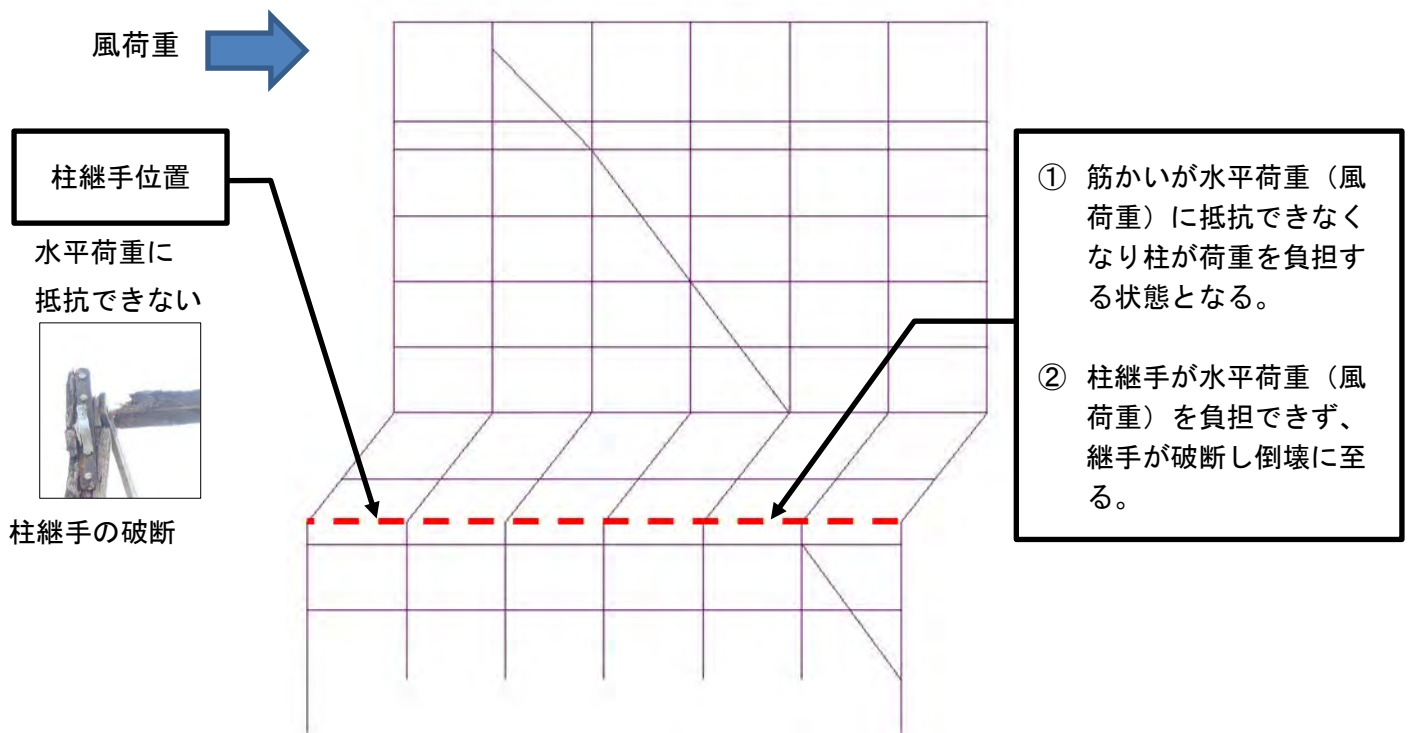
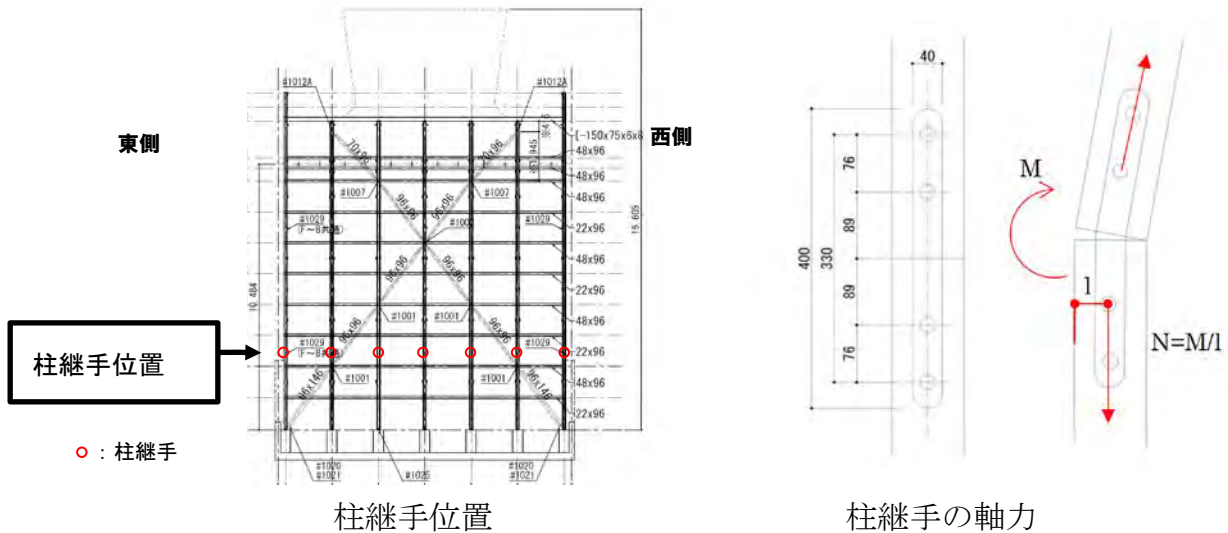


図6 柱継手が塑性ヒンジとなった時の変形イメージ
(ステップ4：一部圧縮筋かいを取り除いたモデルによる評価)

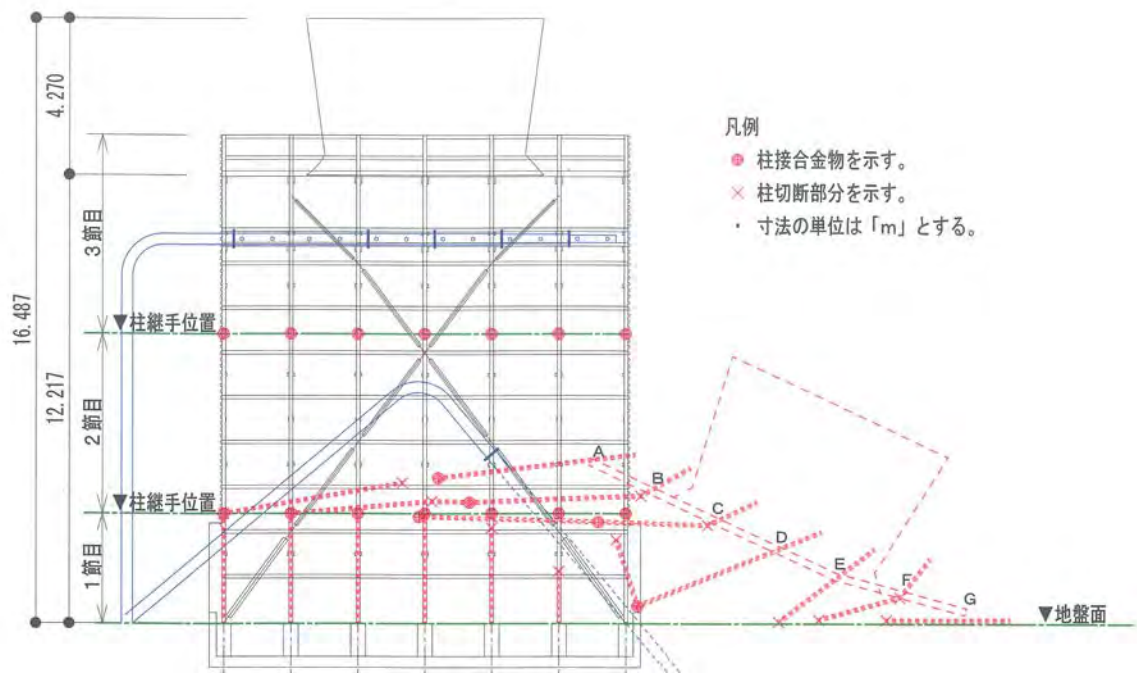
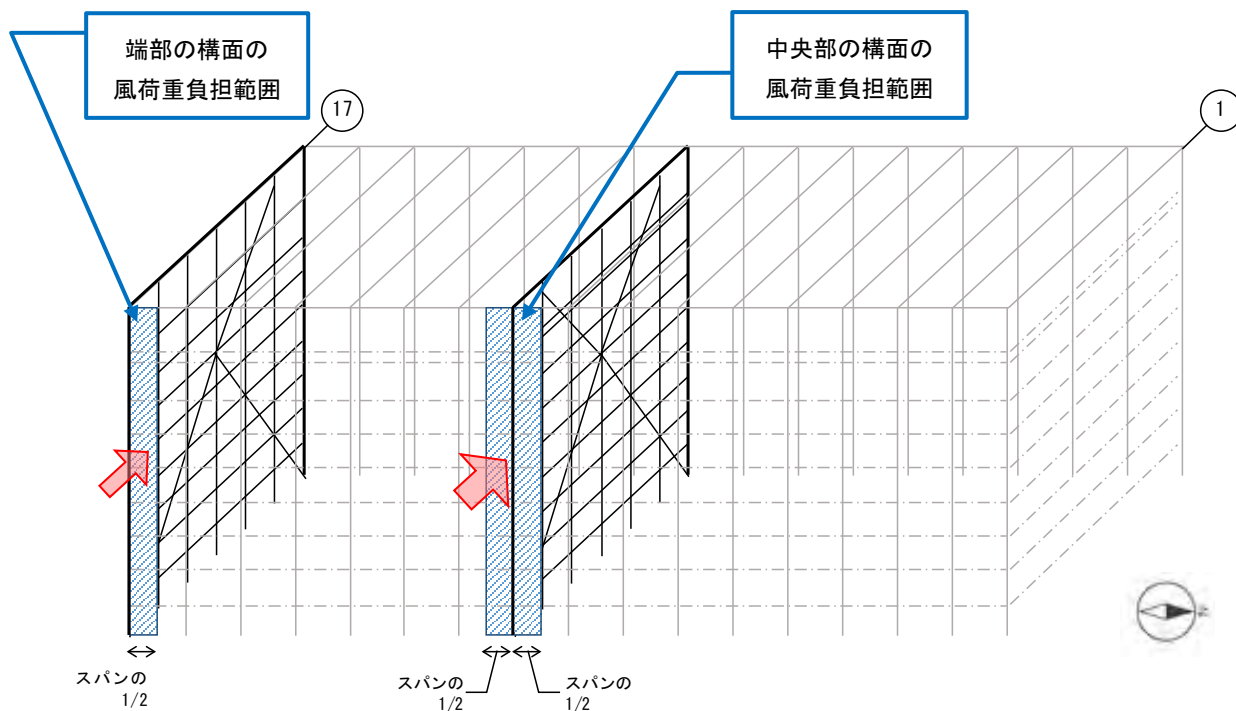
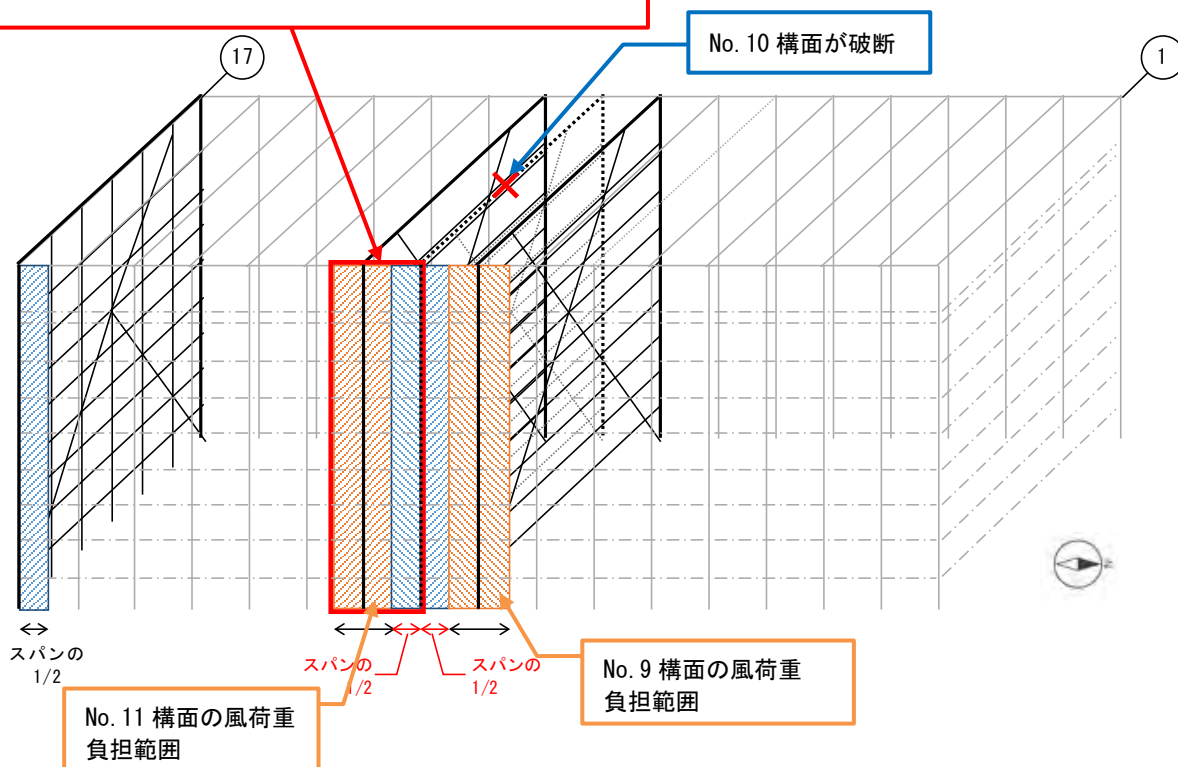


図7 倒壊後の破損状態



(1) 設計時 (全部材が健全な状態)

設計時の風荷重を踏襲し、柱に連結されている壁面の面積に応じて風荷重を考慮する。
隣の No. 11 構面が No. 10 構面で負担していた荷重の 1/2 を負担




(2) 一構面が破断して隣接する構面が風荷重を負担する時 (参考解析)

図 8 解析モデルと負担する風荷重の概要

表5 一構面が破断した場合の隣接する構面への影響検討（検定比一覧表 [引張]）

筋かいの整理番号	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
ステップ1（腐朽なし）	0.095	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.095
ステップ2（腐朽あり）	0.16	0.39	4.68	0.99	※	0.76	0.48	※	0.28	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ3（腐朽あり）	0.16	0.39	×	0.99	×	0.76	0.48	×	0.28	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ4（腐朽あり）	0.16	0.39	×	0.99	×	0.76	0.48	×	0.28	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-1（腐朽あり）	0.16	0.59	×	1.99	×	1.14	0.71	×	0.42	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-2（腐朽あり）	0.16	1.18	×	×	×	×	1.67	×	0.42	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-3（腐朽あり）	1.27	×	×	×	×	×	×	×	1.25	0.30	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-4（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2.88	0.88	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-5（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	9.22	0.26	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-6（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2.99	0.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-7（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3.26	0.27	0.29	0.38	0.12
ステップ5-8（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3.63	0.29	0.38	0.12
ステップ5-9（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4.17	0.38	0.12
ステップ5-10（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5.87	0.12
ステップ5-11（腐朽あり）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3.97



隣接する構面で負担していた荷重の1/2を負担

※：耐力0のため算定できない
 凡例：赤色 破断した構面を示す。

検討ケース

- ステップ1：設計時のモデルによる評価
- ステップ2：耐力低下を考慮した評価
- ステップ3：引張筋かいを取り除いたモデルによる評価
- ステップ4：一部圧縮筋かいを取り除いたモデルによる評価
- ステップ5：一構面が破断した場合の隣接する構面への影響検討

破断した構面が負担していた風荷重を隣接する構面が負担
 （木材の腐朽は No.10～15 構面において進んでおり、特に残存断面積比が0に近い No.10、13、15 構面が先行して破断したと推定）

同種の冷却塔への対応

1. UCL 系統冷却塔の概要

JMTR には、二次冷却系統冷却塔と同種の冷却塔として、二次冷却系統冷却塔と同時期に設置された木造の冷却塔である UCL (Utility Cooling Loop) 系統冷却塔がある。

UCL 系統は、図 1 に示すとおり、循環ポンプ、揚水ポンプ、高架水槽、冷却塔等の機器から構成され、原子炉付属の次の各設備から熱を冷却水にとり、この熱を冷却塔を用いて大気に放散するために運転されている。

- (1) ループの終段冷却系
- (2) 炉外試験設備
- (3) ディーゼル発電機
- (4) 空気圧縮機
- (5) 制御棒駆動装置

各設備を冷却し加熱された水は全て UCL 系ポンドに戻される。UCL 系ポンドと UCL 系統冷却塔との間に水を循環させて必要な除熱を行い、冷却された水は UCL 系ポンドから所定の圧力で各設備へ供給する。このように本系統は冷却塔循環回路と各設備への冷却水補給回路が分離され、圧力調整装置として高架水槽を有している。

二次冷却系統冷却塔とは異なり、UCL 系統冷却塔は 1 基のセルのみで構成されている。一方、二次冷却系統冷却塔及び UCL 系統冷却塔は、JMTR の建設当初の昭和 43 年度に建設され、ほぼ同時期に補修・交換が行われている。現在の UCL 系統冷却塔は、平成 11 年度に、当時主構造材の腐食、アンカーボルトの減肉・腐食が確認されたためセル塔体部、ファンスタック部及びアンカーボルトの更新を行った後、平成 30 年度にはセル塔体部のトップデッキ及びファンスタック部材を木製から FRP 製に更新されている。

UCL 系統冷却塔の概略図を図 2 に示す。また、主な仕様は以下のとおりである。UCL 系統冷却塔は、東西方向で約 10m、南北方向で約 8m となっている。一方、UCL 系統冷却塔は、南側に高さ約 10m のポンプ室建家が配置されている以外は、東側、西側及び北側には高い建家はない。なお、当時の「JMTR 設計及び工事の方法 (その 3) 原子炉冷却系統施設 (4)」には、二次冷却系統と同様に建築基準法に基づいた風荷重 (200kgf/m²) で評価することが記載されている。ただし、UCL 系統冷却塔は、安全上の機能別重要度分類において対象外とされており、仮に UCL 系統冷却塔が倒壊した場合でも原子力施設の安全上問題はない。

- | | |
|--------|---------------------|
| (1) 構成 | 冷却塔ファン : 1 基 |
| | ファンスタック (FRP) : 1 基 |

	セル塔体部主構造（ダグラスファー）
(2) 主要寸法	縦：約 9.8m、横：約 7.9m、高さ：約 11.3m
(3) 機能	交換熱量 : 10 MW 冷却水流量：860 m ³ /h
(4) 使用状況	冷水ポンド水温が 32℃－28℃の間で冷却塔ファン及び循環ポンプが自動起動・停止する。
(5) 位置づけ	法規制区分：原子炉施設（地震荷重：水平 0.4G、垂直 0.2G、風荷重：200kgf/m ² ）

今回の二次冷却系統冷却塔の倒壊事象を受け、UCL 系統冷却塔の健全性調査を実施した。

2. 二次冷却系統の冷却塔倒壊に係る原因分析に基づく調査内容

UCL 系統冷却塔について、本文「8.2 原因分析」に示すとおり、以下の4つの原因について調査を行う。

(1) 冷却塔の特殊な構造について十分把握していなかったこと。

UCL 系統冷却塔は、メーカーと情報を共有し、二次冷却系統冷却塔と同じ設計思想で設計・設置されているものである。当時の構造計算書はメーカーで保管・管理されていないことから、構造計算を行い、その結果に基づき、点検を見直し、点検・保守計画を策定する。

(2) 実施していた点検では、木材内部の腐朽を把握できていなかったこと。

UCL 系統冷却塔の点検は、二次冷却系統冷却塔と同様に巡視及び点検並びに施設定期自主検査において、目視による点検を実施している。現状の UCL 系統冷却塔の健全性調査を行い、木材内部の腐朽状態等の調査を行う。健全性調査の結果をメーカーと共有し、UCL 系統冷却塔の補修、交換、補強等の計画を策定する。

(3) 使用環境が大きく変わったこと。

UCL 系統冷却塔は、平成 11 年に更新された後、約 20 年間経過していること、維持管理経験から約 30 年で更新を行っていること、JMTR 原子炉施設の廃止措置に伴い、廃止する設備に応じて必要な冷却容量は減少していくこと等を考慮して、使用環境の整理を行い、安全確保と合理的な維持管理を踏まえた検討を行う。

(4) 影響が最も大きくなる風向で水平荷重（風荷重）を受けたこと。

二次冷却系統冷却塔で調査した気象観測データ（添付資料 4 「⑫風雨の影響」）に基づき、風向の影響について調査する。また、実際に令和元年 10 月 12 日に関東・東北地方を直撃した台風 19 号では、UCL 系統冷却塔のデッキ部に風速計を設置し、その風速・風向を測定する。その結果を踏まえて、「3.1 UCL 系統冷却塔の構造評価」に示した UCL 系統冷却塔の構造計算においては、東西方向及び南北方向の風による風荷重の影響評価を行う。

3. 調査の進捗状況及び結果

3.1 UCL 系統冷却塔の構造評価

UCL 系統冷却塔の構造計算を開始するに当たり、二次冷却系統冷却塔と同様に、冷却塔の構造、寸法、重量等の基本パラメータを整理した。その結果を表 1 に示す。本情報に基づき、計算モデルを構築し、構造評価を行った。なお、施工図及び現場調査により、接合金物の取付け状態等も確認した。

3.2 UCL 系統冷却塔の木材健全性調査

(1) 針貫入試験結果

針貫入試験は、UCL 系統冷却塔の主構造部材のうち、二次冷却系統で実施した方法と同様に基礎部筋かいの下端部(接合部)及び中央部で行った。針貫入試験で使用した針直径は約 2mm の治具を用い、その深さを測定し、残存断面積比も算出した。針貫入試験の測定箇所を図 3 に、基礎部筋かいの針貫入試験の結果を表 2 に示す。得られた測定結果により、測定箇所と針貫入深さとの関係、測定箇所と残存断面積比の関係をそれぞれ図 4 及び図 5 に示す。この結果、基礎部筋かいの下端部及び中央部とも針貫入深さが 6mm～16mm の範囲であること、残存断面積比もほとんどの箇所で 7 割以上が維持でき、ほぼ一定であることが確認できた。これにより、二次冷却系統冷却塔の結果と比較して、常時運転状態である UCL 系統冷却塔については劣化の進行度は小さいことを確認した。

(2) 第三者機関による診断

第三者機関による木材の健全性確認を行った。本健全性確認では、1 次診断として視診、打診及び触診、2 次診断として高周波式含水率計、超音波測定器(ウッドポールテスタ)及び穿孔抵抗測定器(レジストグラフ)による計測機器を用いて行った。測定箇所は、主構造部材である筋かい、柱、横材等の一部(基礎部及び天井部)とした。

UCL 系統冷却塔の基礎部筋かい及び柱の診断の結果を図 6 に示す。この結果、常時運転状態であることから、一部の箇所を除き腐朽菌が定着するには至らず、明確に腐朽が進行している状態であることは確認できなかった。一方、UCL 系統冷却塔の上部は、雨水の影響により木材が劣化している部分が確認された。このことは、UCL 系統冷却塔下部と上部でも環境が大きく異なっていることから、点検項目については見直しが必要である。なお、劣化した木材については、早急に補修計画の策定を行う。

2 次診断では、1 次診断の結果に基づいて、測定箇所を選定し、上記の計測機器を用いて測定を行った。

まず、高周波式含水率は、生物劣化そのものを示す指標とはならないが、劣化の危険性(特に腐朽)を把握するために行った。この結果、運転状態である UCL 系統冷却塔内の木材の設置箇所により、水分の分布状態が異なることが分かった。また、超音波測定器による測定では、木材の個体差や環境起因による差異範囲内であり、内部欠陥等における劣化の評価は困難であった。これは、調査日が雨天

であったことから、測定箇所が含水率の高い状態であったことが考えられる。さらに、穿孔抵抗測定器による測定では、筋かいの有効断面積が 20%程度低減していることが示唆された。これは、針貫入試験で評価した残存断面積比とほぼ一致していた。針貫入試験で評価した残存断面積比では、接合部と中央部でほぼ同じであった。

3.3 UCL 系統冷却塔の使用環境調査

UCL 系統冷却塔は、平成 18 年 8 月の JMTR 運転停止以降、常時運転状態であり、UCL 系統冷却塔の使用環境に大きな変化はない。廃止措置認可後、廃止措置第 1 段階では工程上、直ちに使用環境が変わることがない。このため、現状の UCL 系統冷却塔の維持管理において、点検の見直し、補修、交換、補強等の計画を策定する。

今後、UCL 系統冷却塔は、平成 11 年の更新後、約 20 年間経過していること、JMTR 原子炉施設の廃止措置に伴い、廃止する設備に応じて必要な冷却容量は減少すること等を考慮し、適切な時期に、UCL 系統冷却塔を小型の設備に置き換える変更計画を策定する。

3.4 気象データの調査

二次冷却系統冷却塔で調査した気象観測データ(添付資料 4 「⑫風雨の影響」)に基づき、風向の影響について調査した。過去 10 年間における各年の最大瞬間風速に係るデータ(表⑫-1 及び表⑫-2)から、各年度における最大瞬間風速 20m/s 以上は 1 回/年あったが、UCL 系統冷却塔については倒壊はしていない。

一方、UCL 系統冷却塔の南側にはポンプ室建家があり、JMTR 敷地内の配置を考慮すると、北方向の風が他施設への影響が最も大きくなる風向となる。気象データの調査の結果、北東もしくは北北東の風は、10 年間で 4 回あり、今回の二次冷却系統冷却塔の真東の風より発生回数が多いことから、調査・評価を行う。

4. 今後の対応

UCL 系統冷却塔について、二次冷却系統冷却塔の原因分析に基づいて、令和 2 年 3 月までに健全性調査及び点検の見直しを終了し、次年度からは補修、交換、補強等を行い、当面の間、設備を維持管理する。なお、これらの対応が完了するまでの間、台風等の強風の対策として行っている 4 方向からのワイヤーロープによる固定は継続し、倒壊した場合の周辺への影響を軽減する(図 7 参照)。

一方、UCL 系統は廃止措置の進捗状況に応じて必要な冷却能力は大幅に減少することも考慮して、UCL 系統冷却塔を小型の設備に置き換える変更計画の策定に着手する。

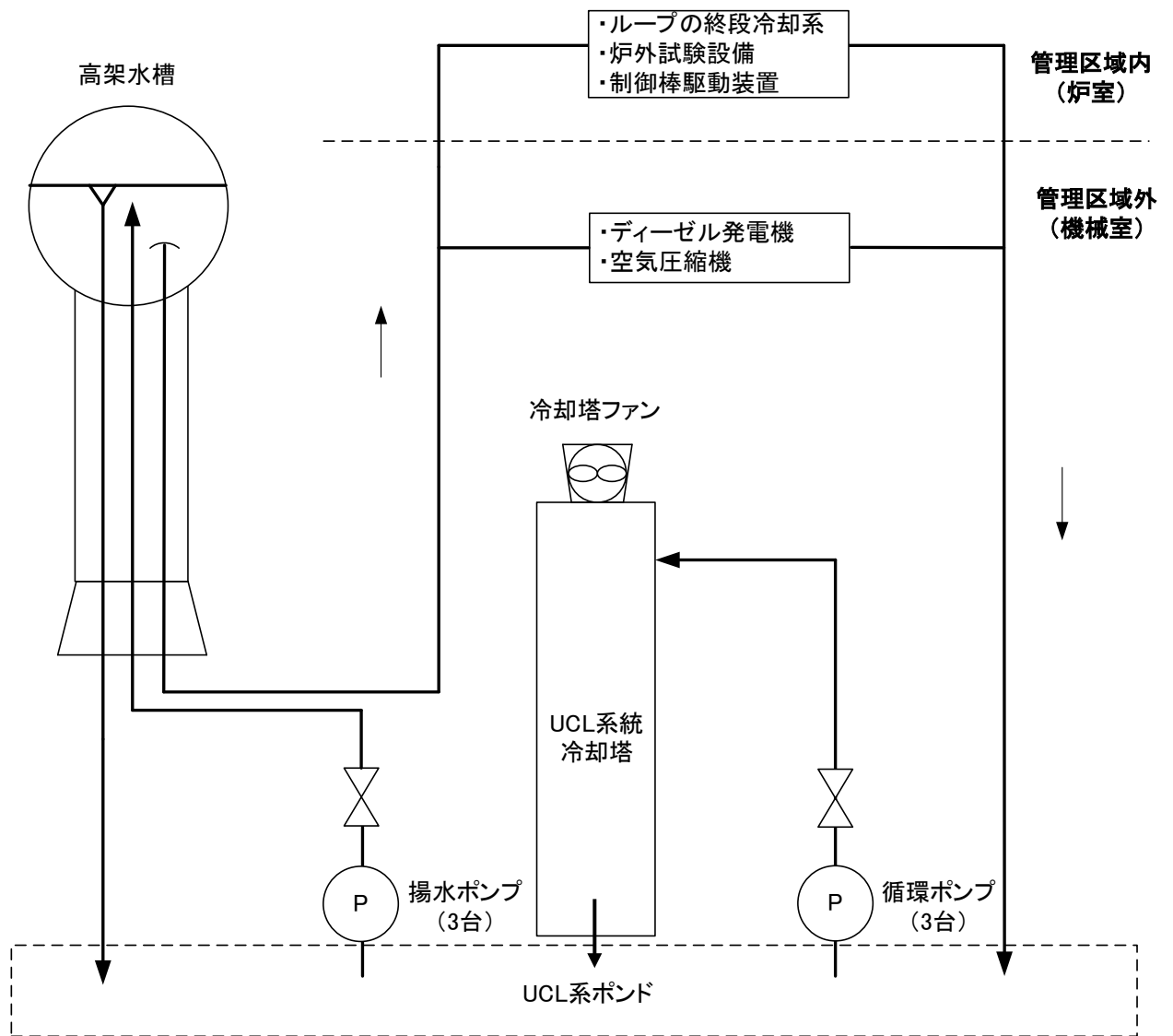


図1 UCL 系統の概略図

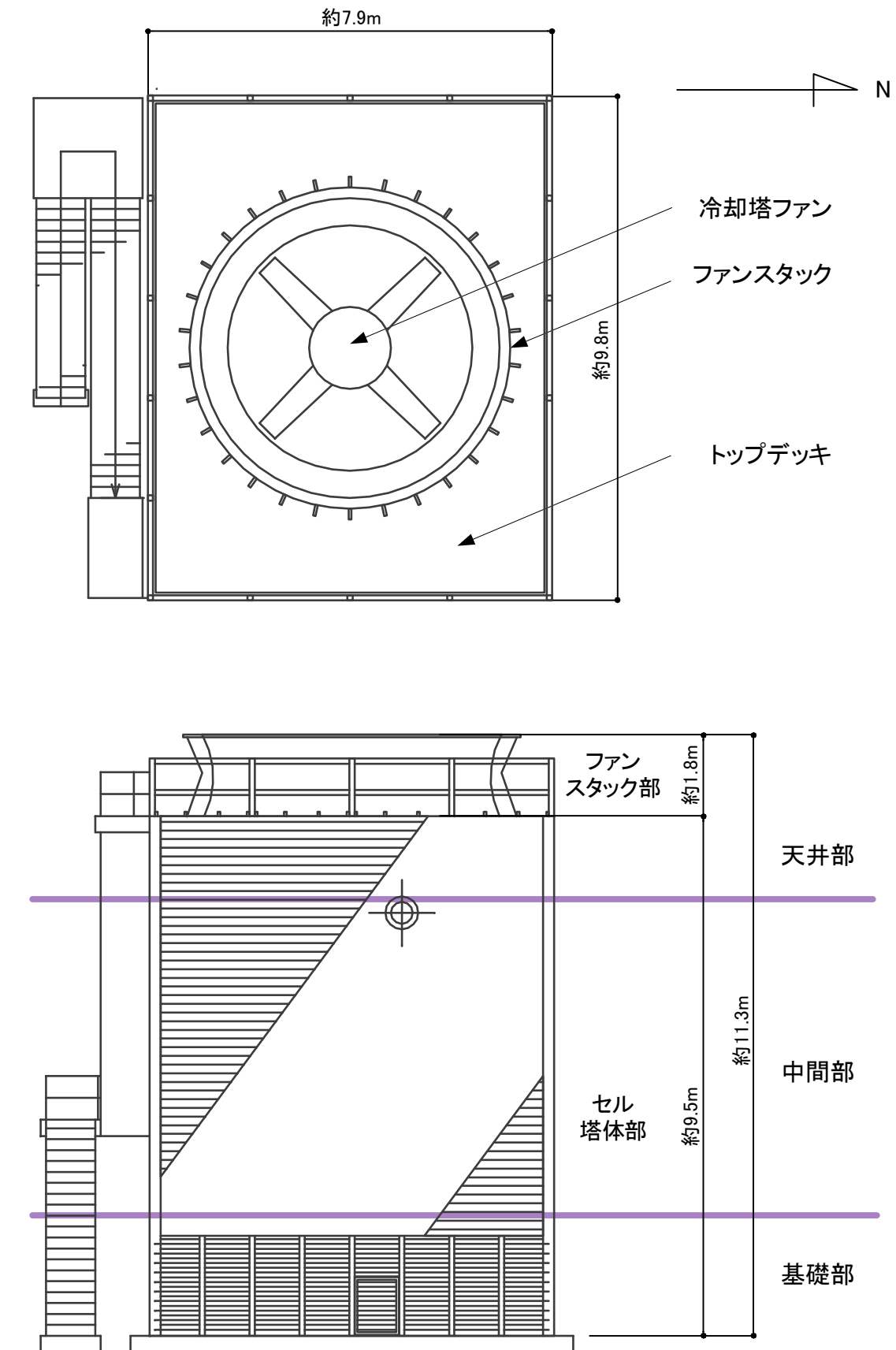
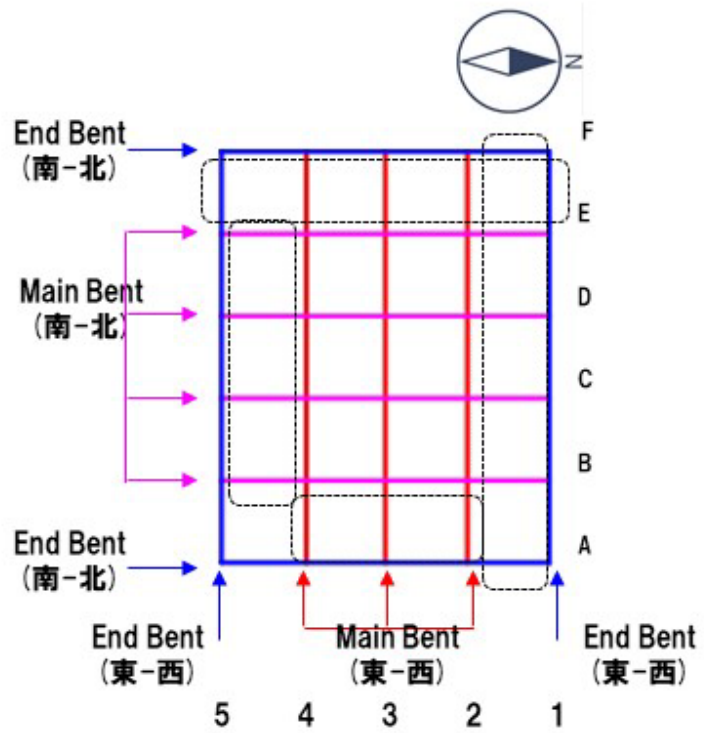
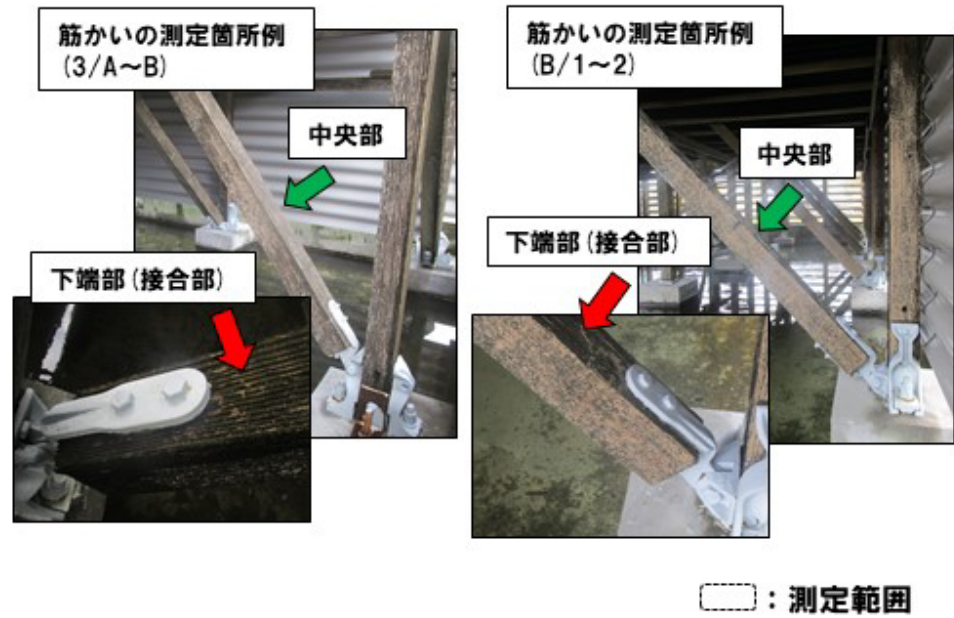


図2 UCL 系統冷却塔の概略図



(a) UCL系統冷却塔 平面図



(b) 針貫入試験の測定箇所

図3 UCL 系統冷却塔・筋かいの測定箇所(針貫入試験)

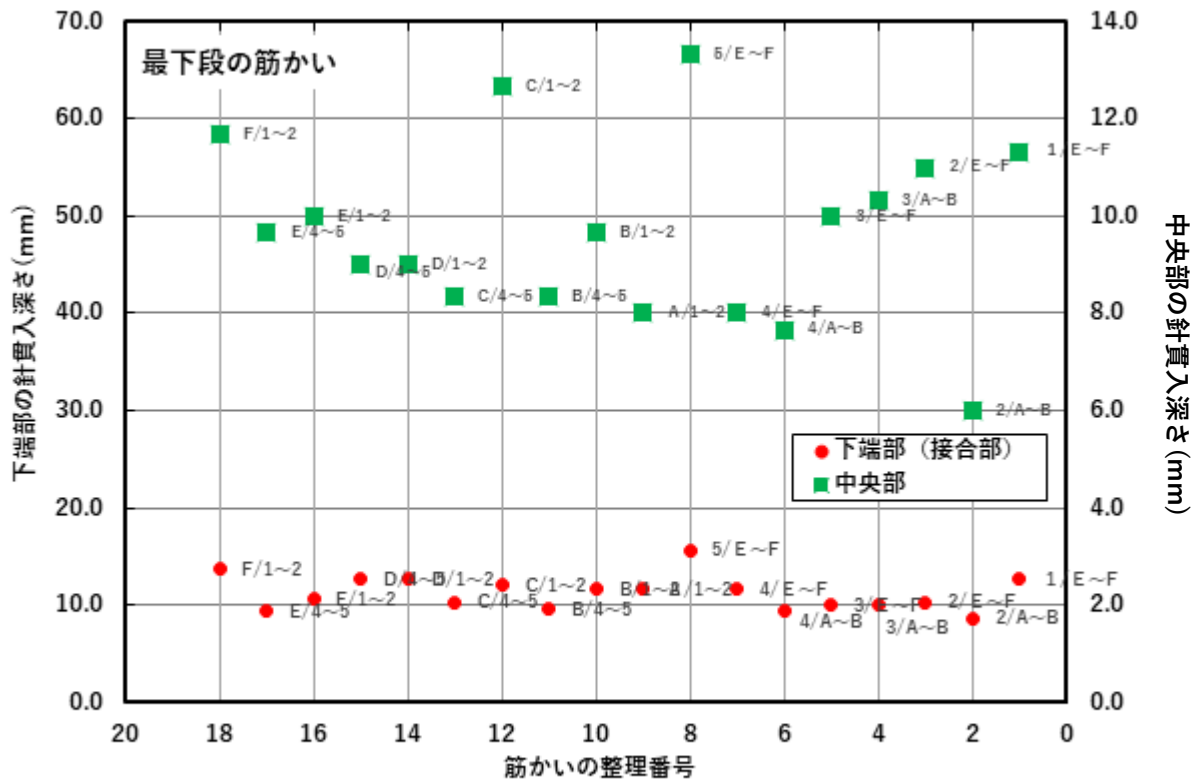


図4 UCL 系統冷却塔の筋かい部の針貫入試験結果

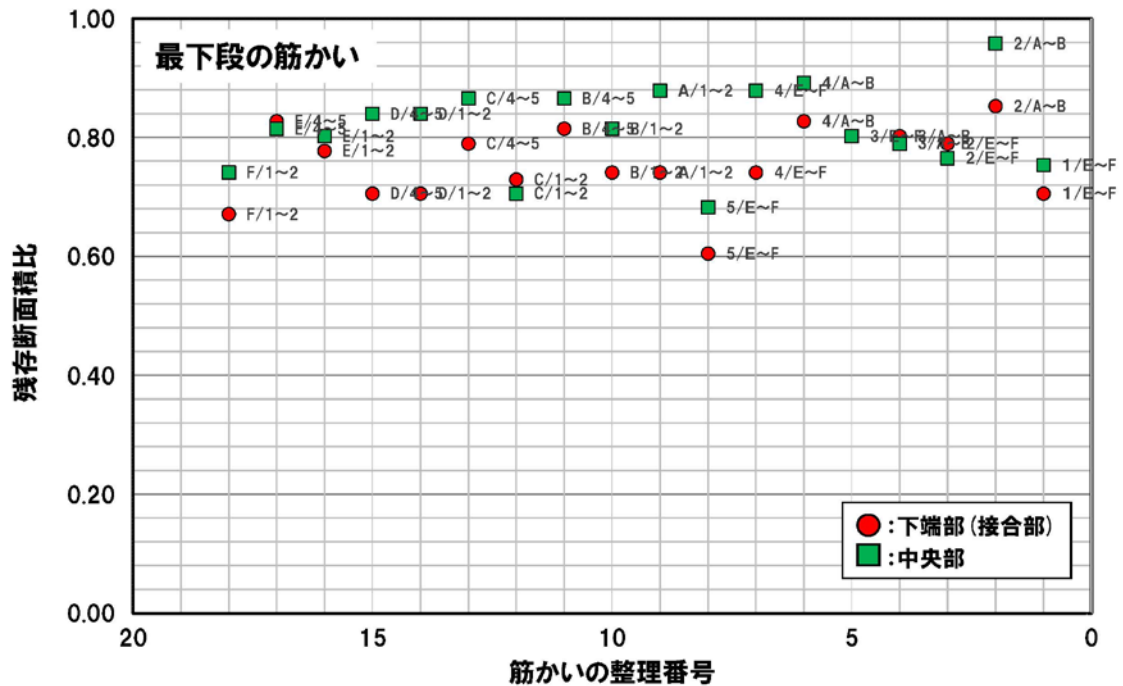
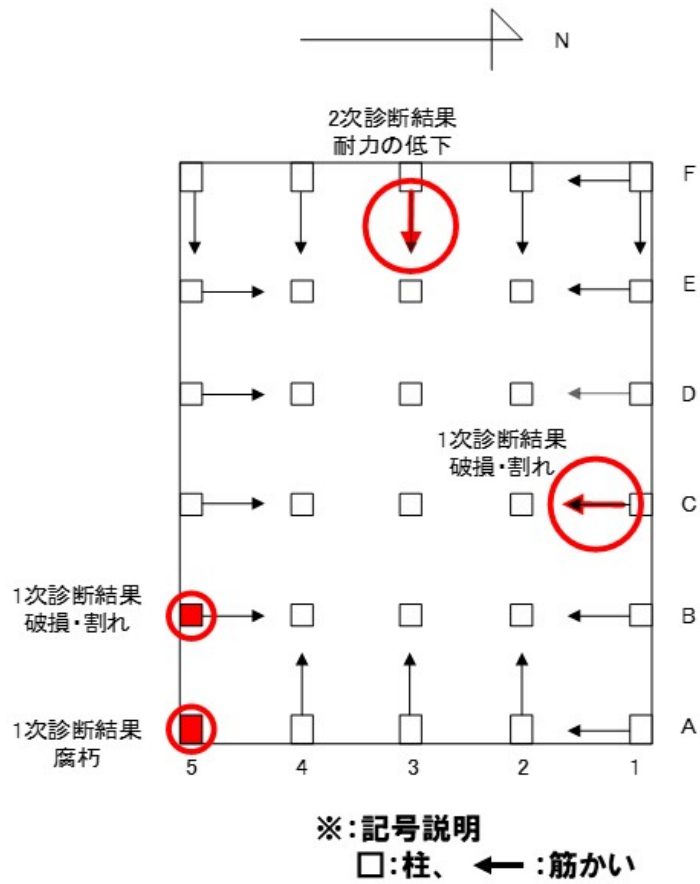


図5 UCL 系統冷却塔の筋かい部の残存断面積比



柱	筋かい
診断箇所: B-5 	診断箇所: C-1 
診断箇所: A-5 	診断箇所: F-3 

図6 UCL 系統冷却塔：基礎部の劣化箇所



図7 UCL 系統冷却塔：ワイヤーロープによる固定（令和元年 11 月 25 日撮影）

表1 UCL 系統冷却塔の主な仕様

項目	主な仕様
構造	木造軸組み
規模 (外形寸法)	塔高 11,607mm×塔幅 9,750mm×塔長 7,920mm（ファンスタック含む）
材料 (主構造材)	木製（ダグラスファー）、ファンスタック・トップデッキ（FRP 製）、 外壁（FRP 製波板）
重量 (内訳)	冷却塔総重量： 18,948kg ファンガード：478kg、ファンスタック：782kg、ファン：536kg、 減速機（オイル含む）：811kg、中間軸：77kg、電動機：600kg、 機械台：660kg、塔内散水管：1,600kg、外壁：1,200kg、 その他：12,204kg

表2 UCL 系統冷却塔の針貫入試験結果

No	部 材 名 称	部 材 の 位 置		部 材 符 号	現場調査						備 考
					① 損 傷 の 状 態	② 劣 化 の 状 態	③ 針 貫 入 の 平 均 値 (mm)	1 回 目 (mm)	2 回 目 (mm)	3 回 目 (mm)	
1	筋かい	1/E~F	中央		○※1	○※2	11.3	11.0	12.0	11.0	
	EW		下端		○※1	○※2	12.7	15.0	12.0	11.0	
2	筋かい	2/A~B	中央		○※1	○※2	6.0	7.0	5.0	6.0	
	EW		下端		○※1	○※2	8.7	9.0	9.0	8.0	
3	筋かい	2/E~F	中央		○※1	○※2	11.0	9.0	14.0	10.0	
	EW		下端		○※1	○※2	10.3	11.0	10.0	10.0	
4	筋かい	3/A~B	中央		○※1	○※2	10.3	9.0	10.0	12.0	
	EW		下端		○※1	○※2	10.0	9.0	11.0	10.0	
5	筋かい	3/E~F	中央		○※1	○※2	10.0	8.0	12.0	10.0	
	EW		下端		○※1	○※2	10.0	10.0	10.0	10.0	
6	筋かい	4/A~B	中央		○※1	○※2	7.7	7.0	8.0	8.0	
	EW		下端		○※1	○※2	9.3	9.0	10.0	9.0	
7	筋かい	4/E~F	中央		○※1	○※2	8.0	8.0	8.0	8.0	
	EW		下端		○※1	○※2	11.7	11.0	13.0	11.0	
8	筋かい	5/E~F	中央		○※1	○※2	13.3	13.0	14.0	13.0	
	EW		下端		○※1	○※2	15.7	15.0	17.0	15.0	
9	筋かい	A/1~2	中央		○※1	○※2	8.0	8.0	8.0	8.0	
	NS		下端		○※1	○※2	11.7	11.0	13.0	11.0	
10	筋かい	B/1~2	中央		○※1	○※2	9.7	10.0	10.0	9.0	
	NS		下端		○※1	○※2	11.7	14.0	13.0	8.0	
11	筋かい	B/4~5	中央		○※1	○※2	8.3	8.0	9.0	8.0	
	NS		下端		○※1	○※2	9.7	9.0	11.0	9.0	
12	筋かい	C/1~2	中央		○※1	○※2	12.7	13.0	16.0	9.0	
	NS		下端		○※1	○※2	12.0	15.0	12.0	9.0	
13	筋かい	C/4~5	中央		○※1	○※2	8.3	9.0	8.0	8.0	
	NS		下端		○※1	○※2	10.3	10.0	12.0	9.0	
14	筋かい	D/1~2	中央		○※1	○※2	9.0	9.0	9.0	9.0	
	NS		下端		○※1	○※2	12.7	13.0	12.0	13.0	
15	筋かい	D/4~5	中央		○※1	○※2	9.0	9.0	9.0	9.0	
	NS		下端		○※1	○※2	12.7	13.0	12.0	13.0	
16	筋かい	E/1~2	中央		○※1	○※2	10.0	10.0	10.0	10.0	
	NS		下端		○※1	○※2	10.7	12.0	10.0	10.0	
17	筋かい	E/4~5	中央		○※1	○※2	9.7	8.0	11.0	10.0	
	NS		下端		○※1	○※2	9.3	9.0	10.0	9.0	
18	筋かい	F/1~2	中央		○※1	○※2	11.7	11.0	13.0	11.0	
	NS		下端		○※1	○※2	13.7	13.0	15.0	13.0	
注 記	(1) 損傷の状態 (○※) : 目視点検において木材強度に影響する明らかな損傷が認められない状態を示す。 (2) 劣化の状態 (○※) : 目視点検において木材強度に影響する明らかな劣化が認められない状態を示す。 (3) 針貫入試験 : 針の直径約2mmの治具により貫入深さを計測 (貫入寸法はJIS1級鋼製巻尺にて計測)										