
JMTR(材料試験炉)二次冷却系統の 冷却塔倒壊について — 第2報 —

令和元年12月20日

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所**

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

1. 件名／2. 事象の発生日時／3. 事象の発生場所

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. 事象の概要

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。



冷却塔倒壊前(H30.2.16撮影)



冷却塔倒壊後(R1.9.9撮影)

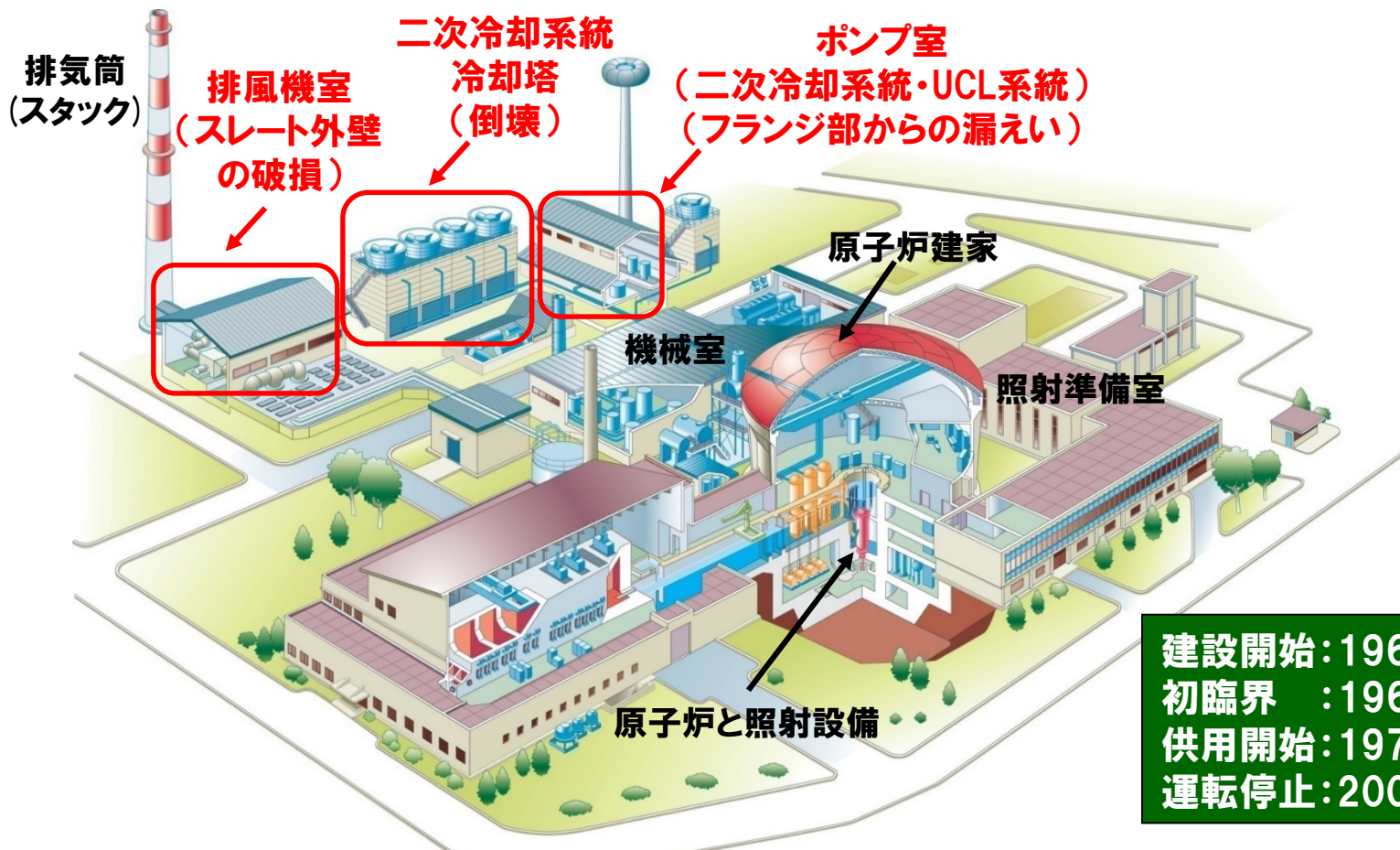
3. 事象発生場所

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) JMTR(材料試験炉)の概要 -

動力炉国産技術の確立と国産動力炉などの発展に寄与するため原子炉用材料及び燃料の各種照射試験、RIの生産などに利用されてきた軽水減速軽水冷却タンク型の材料試験炉であり、約38年間の運転実績を有する。平成18年8月の第165サイクルで運転停止以降、運転はしていない。

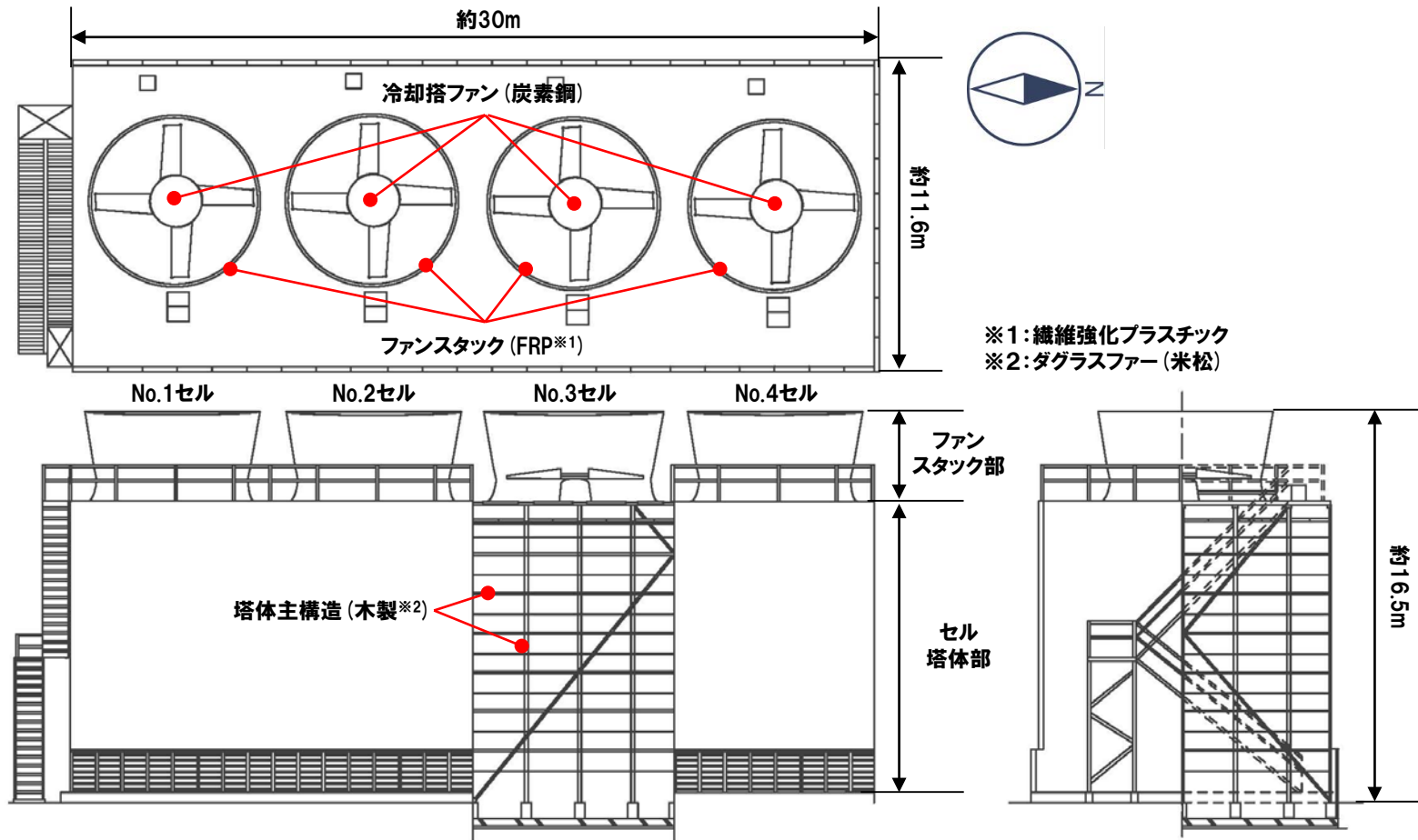


建設開始: 1965.4 (S40)
 初臨界: 1968.3 (S43)
 供用開始: 1970.9 (S45)
 運転停止: 2006.8 (H18)

平成29年4月1日に日本原子力研究開発機構が公表した「施設中長期計画」において、JMTRは廃止施設として決定し、令和元年9月18日、原子力規制委員会に廃止措置計画認可申請済み。

4. 状 況 ー (2) 二次冷却系統冷却塔の概要 ー

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。



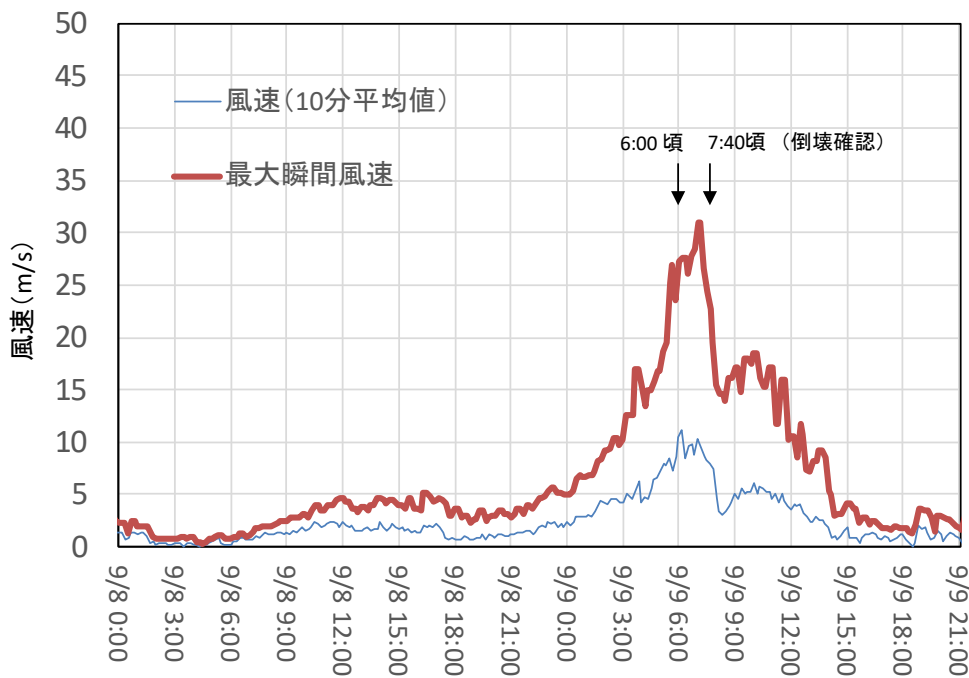
二次冷却系統冷却塔の概略図

- 昭和43年建設。現在の冷却塔は、平成10～11年度にかけて、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後、平成20年度には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。
- 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(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実施)。

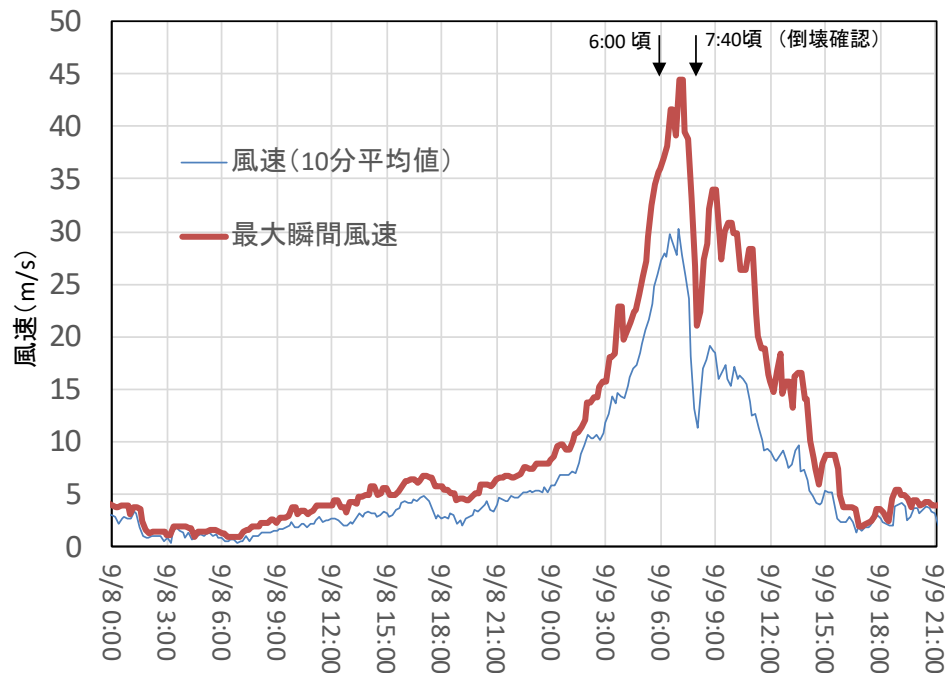
4. 状 況 — (3) 事象発生時の気象状況 —

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の東風、地上高40mにおいて最大瞬間風速44.5m/sの東南東風を観測(下図参照)。降水量は同日の降り始めから8時までで59mm。

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。



風速の時間変化(地上高10m)



風速の時間変化(地上高40m)

4. 状 況 — (4) 破損の状況 —

冷却塔は、東側から西側に向けて倒壊。冷却塔に接続している4本の二次冷却系配管は、立ち上がり部で破損。

○ 事象の状況



冷却塔倒壊後 東側



冷却塔倒壊後 西側



カメラ撮影方向

二次冷却系配管



冷却塔倒壊後 北側



冷却塔倒壊後 南側



破損した状況(拡大)

二次冷却系配管立ち上がり部の破損

- ・ 倒壊した冷却塔周辺の線量当量率は、全てバックグラウンド値であり異常なし。倒壊に伴う負傷者なし。
- ・ 本事象により二次冷却系統が故障したことに関する原子炉の安全への影響なし。また、二次冷却系統以外の系統及び設備の機能への影響なし。

4. 状 況 — (5) 二次冷却系配管のフランジ部からの水の漏えい —

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。

○ 事象の状況

- 漏えい確認時点で漏えい量は30～40L程度(漏えい率は約150mL/分)。
- 漏えい水のサンプリング測定の結果、異常なし。
- 事象発生時、当該ポンプ室に設置されている二次冷却系統及びUCL系統のポンプ等の機器に異常はなく、冷却塔倒壊によるUCL系統の運転への影響なし。

○ 対応措置

- 二次冷却系統に設けられたドレン弁からの水抜きにより水位を低下させ、漏えいを停止。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、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実施。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。



二次冷却系配管 止水前



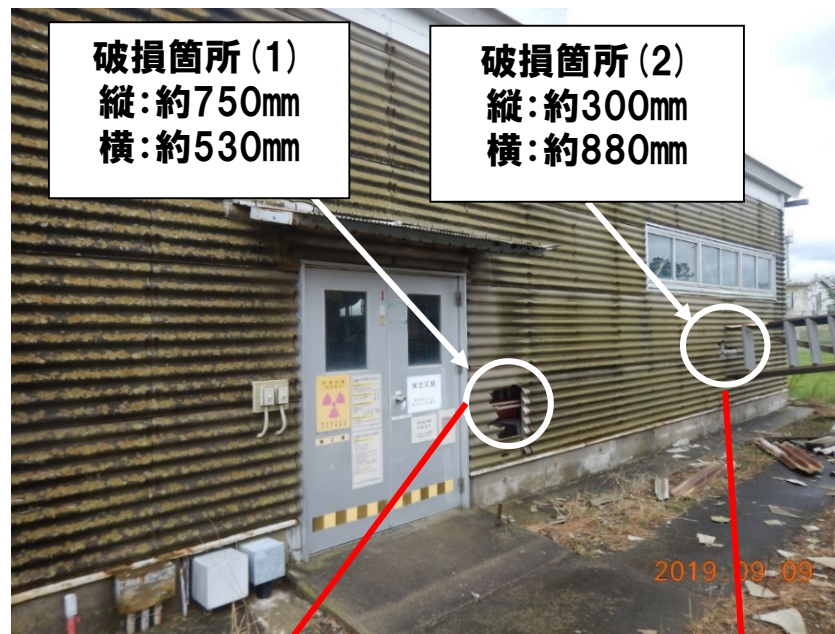
二次冷却系配管 止水後

4. 状 況 - (6) 排風機室のスレート外壁の破損の状況 -

冷却塔に隣接する排風機室*のスレート外壁に、倒壊した冷却塔の部材の接触等による破損(2箇所)を確認。

○ 事象の状況

- 破損箇所について、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は検出下限値未満であることから、異常なし。
- 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なし。



排風機室 補修前

○ 対応措置

- 破損箇所について、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。

*: 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(放射線障害予防規程に基づく第2種管理区域)。



補修後(1)



補修後(2)

4. 状 況 ー (7) 主な時系列(1/2)ー

令和元年9月9日(月)

- 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した。
- 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。

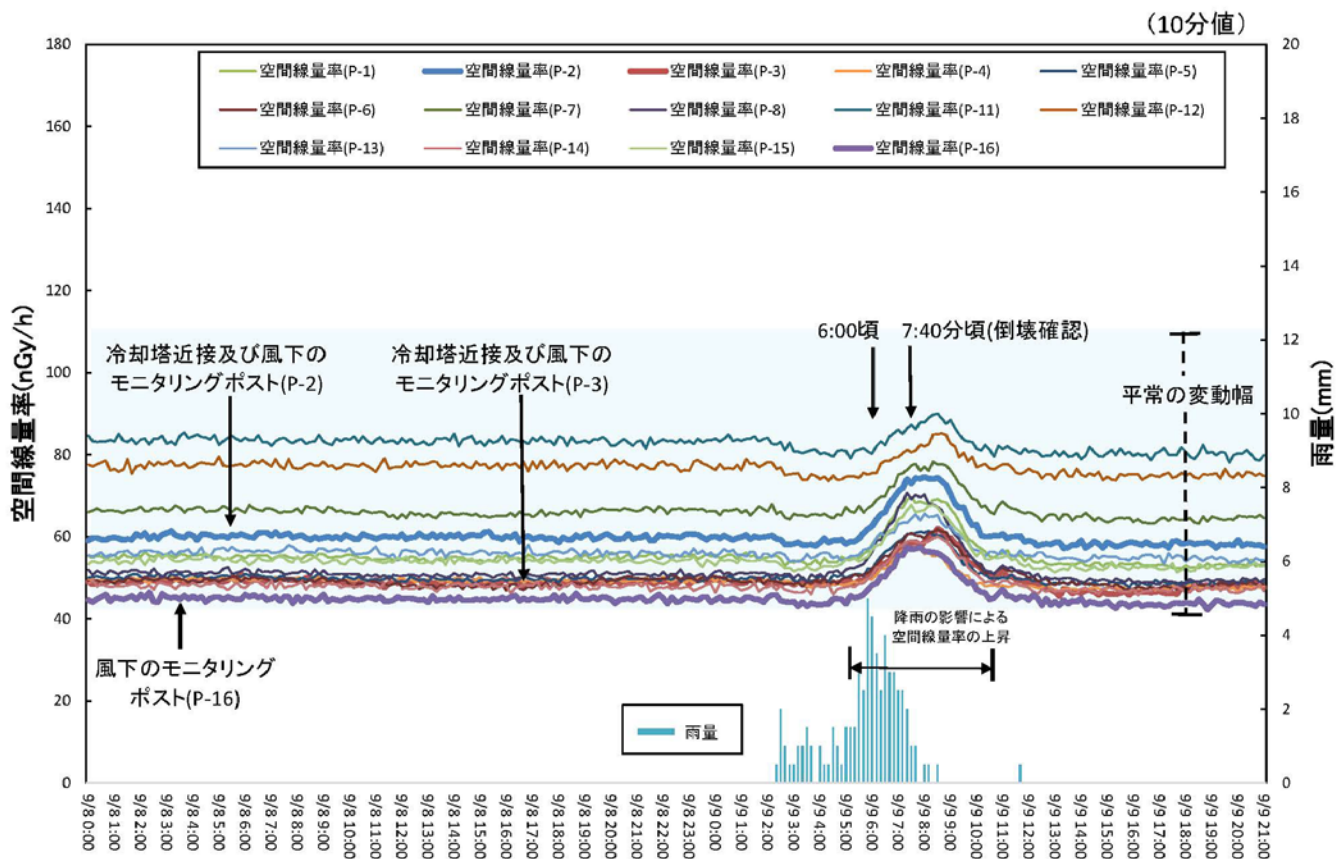
4. 状 況 ー (7) 主な時系列(2/2)ー

令和元年9月9日(月)

- 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
- 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課員に依頼した。
- 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水の漏えいを停止させるため、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。

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。

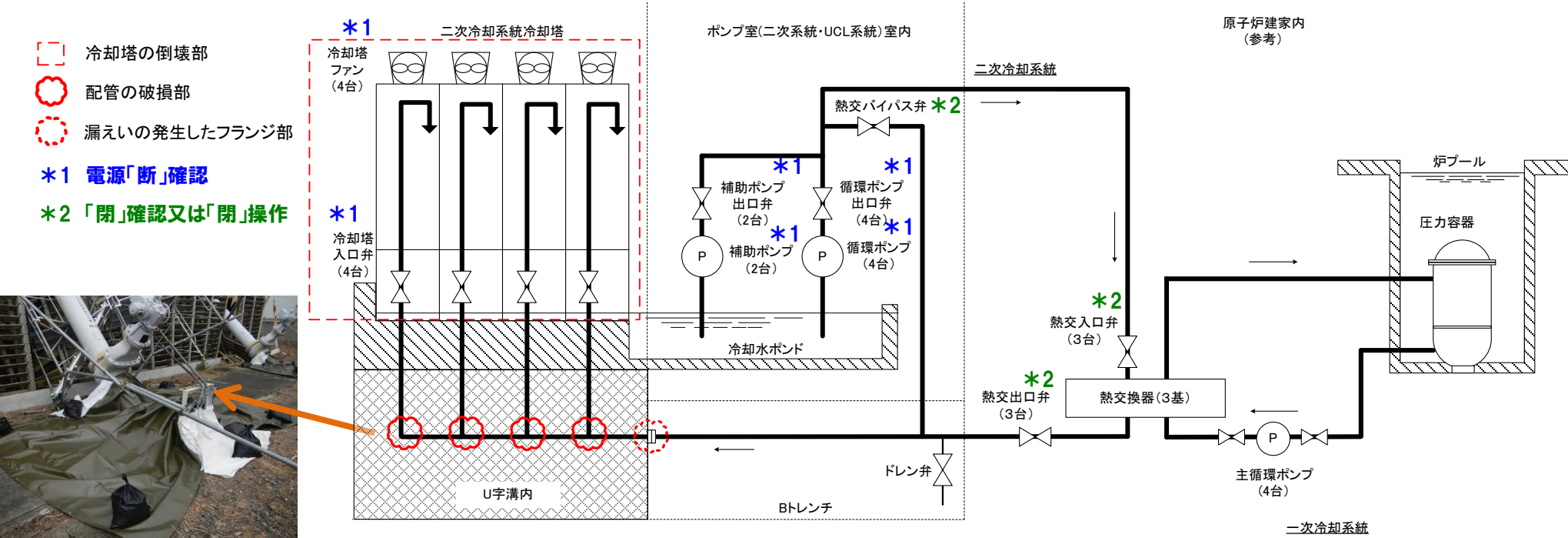


- 冷却塔近接及び風下のモニタリングポスト(P-2、P-3、P-16)の指示値は、他のモニタリングポストと同じ傾向であり、施設に起因する空間線量率の上昇は認められず、環境への影響はなし。
- モニタリングポストによる空間線量率測定は現在も継続しており、異常のないことを確認。

6. 今回の事象に対する対応措置

○ 対応措置

- 誤作動、電気事故等の防止のため、ポンプ、弁等の電源「断」を確認。
- 二次冷却系統隔離の観点から、弁の「閉」確認又は「閉」操作を実施。
- 外部からの異物混入防止のため、二次冷却系配管破損部の養生を実施。
- 安全確保のため、倒壊した冷却塔周辺に立入禁止措置を実施。
- 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。



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、原子炉は安全に停止し、原子炉停止後の炉心も十分冷却できるため、原子炉の安全上問題はない。

7. 事象発生場所の安全管理(1/3)

○ 撤去作業

- 散乱物の撤去、作業場所の整備、スレート材等の撤去が**11月1日に完了**



撤去前状況(南側)(令和元年10月7日撮影)



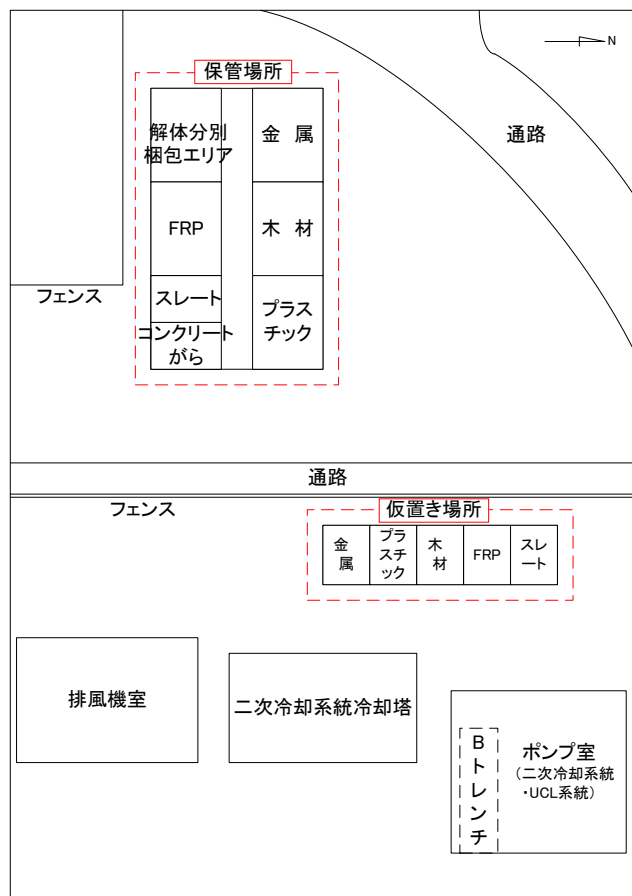
撤去中状況(南側)(令和元年10月24日撮影)

- 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作業要領書に定め、作業の安全管理を行っている。
- 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、散水、非破碎での取扱い、防塵マスクの着用、石綿濃度測定等の措置を講じている。
- 冷却塔倒壊後の台風19号発生時には、保安要員を配置し、監視体制を強化して対応した。

7. 事象発生場所の安全管理(2/3)

○がれき等の保管状況

- 撤去物は、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。
- 随時、仮置き場所から、随時、保管場所に運搬し、材質毎に区分して保管管理



がれき等の仮置き状況(令和元年10月30日撮影)



がれき等の保管場所の状況(令和元年11月14日撮影)

7. 事象発生場所の安全管理(3/3)

○ 撤去作業の進捗状況

- ファンスタック、モータ、二次冷却系配管等の重量物の解体・撤去を12月末を目途に完了させ、主要な二次災害の防止対策を完了させる。
- 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令和2年1月末を目途に完了させ、撤去作業を全て完了させる。
- 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申請を10月1日に実施。



撤去前状況(西側)(令和元年9月12日撮影)



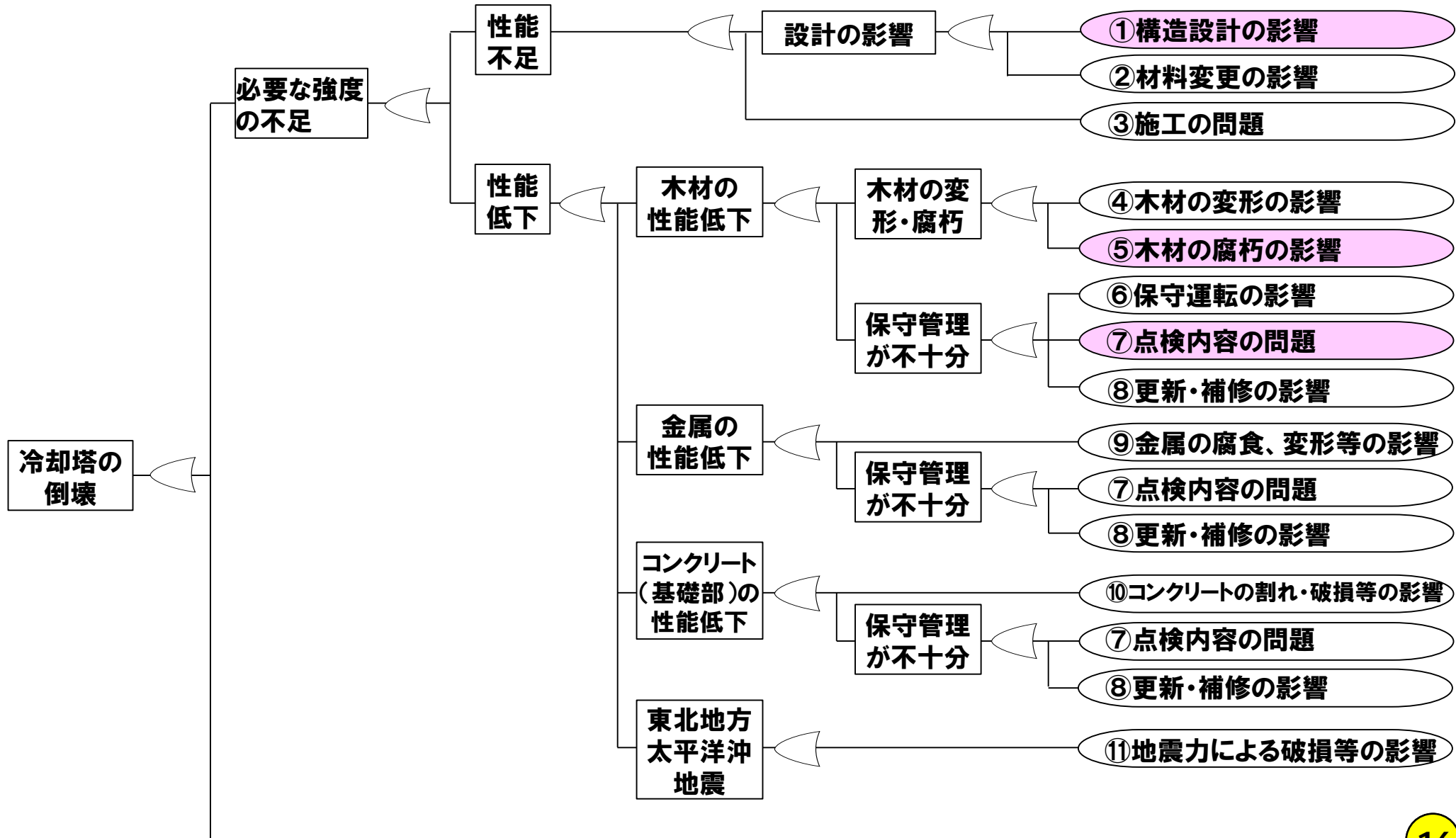
撤去中状況(西側)(令和元年12月11日撮影)

現状において、撤去作業中における安全確保が維持できている。

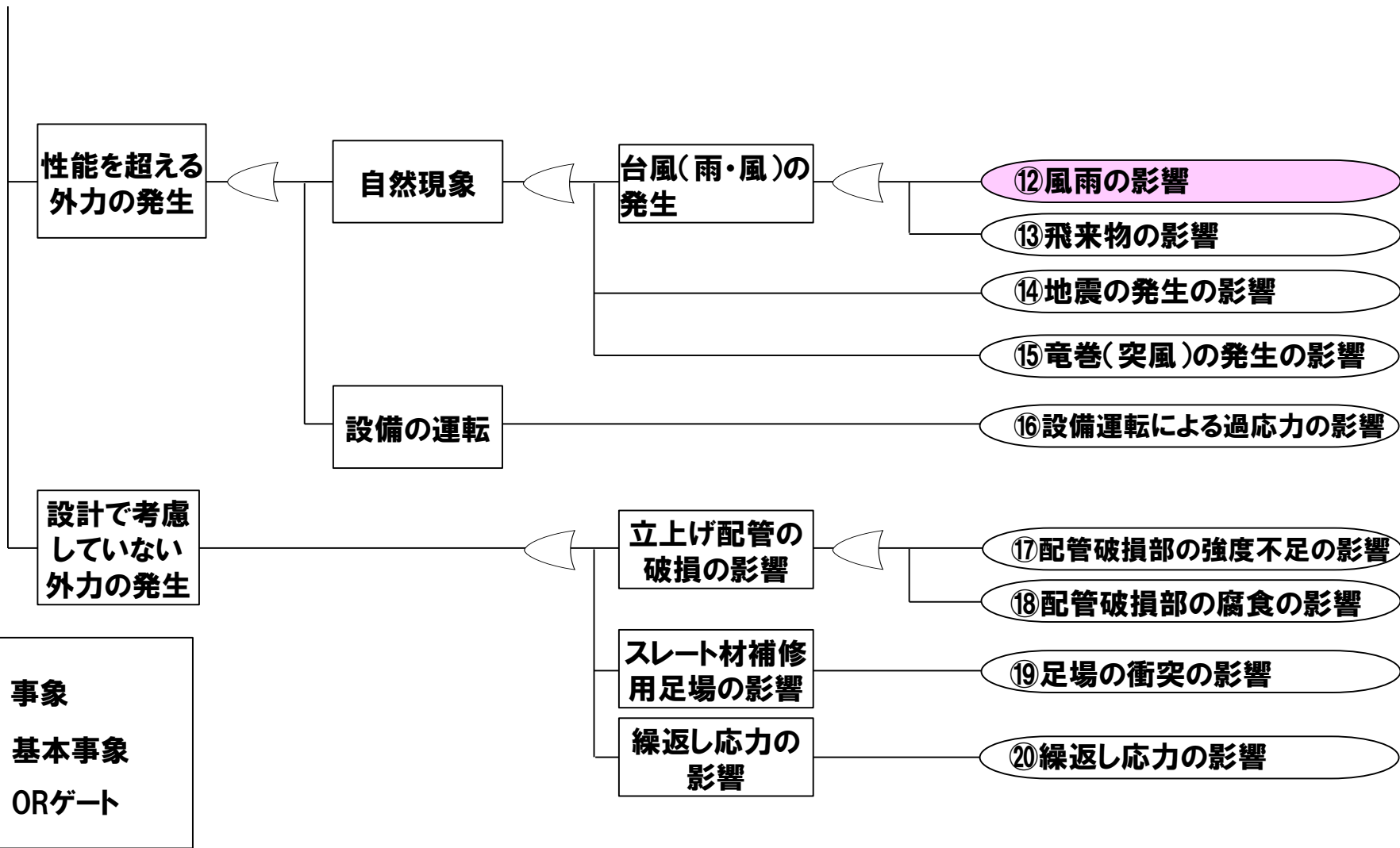
○ 今後の対応

- 撤去作業完了後は、冷却塔の基礎部のみが残るため、巡視点検により管理。
- 今後、廃止措置の中で当該基礎部を解体・撤去し、撤去物を順次廃棄していく。

8. 原因 – (1) 倒壊要因に係るフォルトツリー図(1/2)–



8. 原因 – (1) 倒壊要因に係るフォルトツリー図(2/2)–



凡例



冷却塔の倒壊への影響度を評価するため、フォルトツリー図にある基本事象について調査。

※: 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。

8. 原因 – (2) 基本事象に対する調査内容(1/4) –

フォルトツリー図の基本事象について、冷却塔の倒壊への影響度を評価。

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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 木材の劣化診断(外観確認、針貫入試験、含水率測定、非破壊検査) 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。

8. 原因 – (2) 基本事象に対する調査内容(2/4) –

基本事象		影響度*1	調査項目	調査内容	調査結果
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。

8. 原因 – (2) 基本事象に対する調査内容(3/4) –

基本事象		影響度*1	調査項目	調査内容	調査結果
⑪	地震力による破損等の影響	×	地震後の点検内容の確認	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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JMTR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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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・鉾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月に鉾田市で震度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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。

8. 原因 – (2) 基本事象に対する調査内容(4/4) –

基本事象	影響度*1	調査項目	調査内容	調査結果
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。

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。



「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つと推定。

8. 原因 – (3) ①構造設計の影響(1/3)–

(1) 冷却塔の基本仕様

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

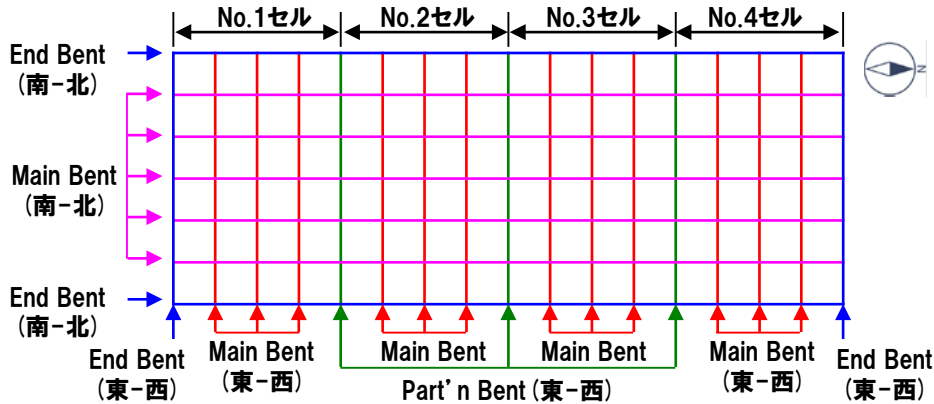
(2) 冷却塔の搭体部材

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(南北)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(南北)方向:7面
ルーバー	木製 (ダグラスファー)、 ポスト、 ルーバースレード13段
外壁	大波スレート(セメントアスベストボード)

8. 原因 - (3) ①構造設計の影響(2/3)-

二次冷却系統冷却塔の構造概要

キープラン(平面)

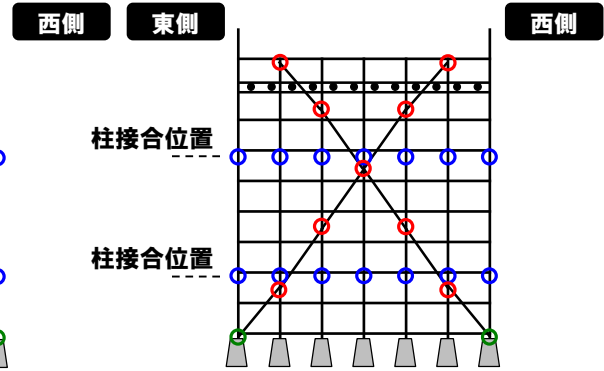
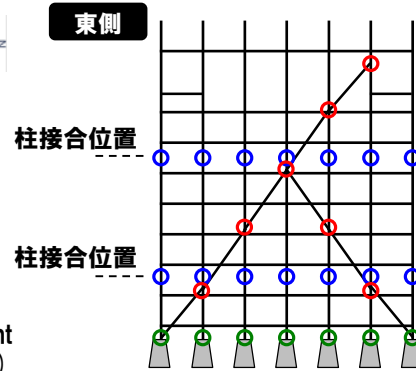


- : 筋かい接合金物
- : 柱接合金物
- : 基礎部接合金物

End Bent (東-西)

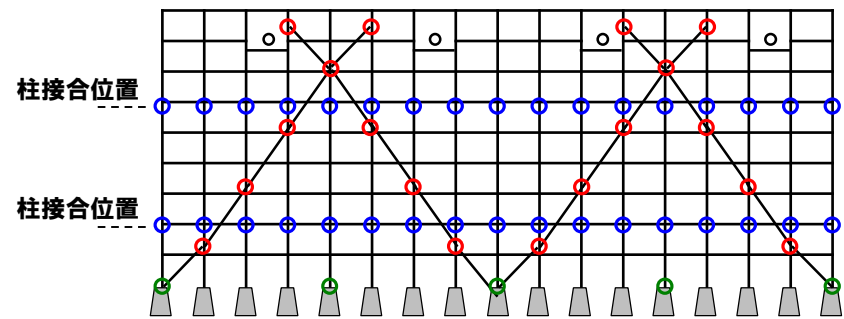
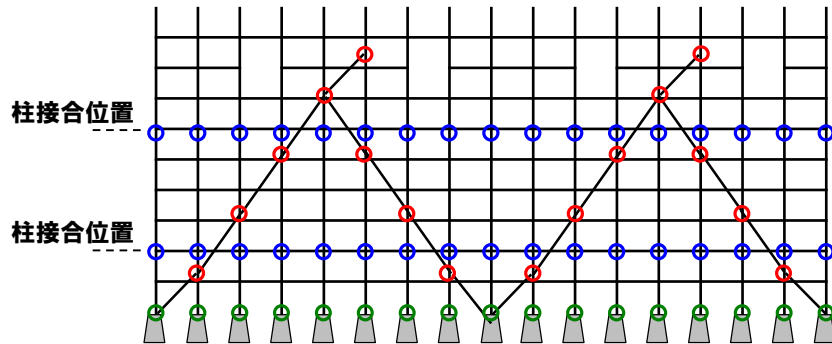
Part'n Bent (東-西)

Main Bent (東-西)



End Bent (南-北)

Main Bent (南-北)



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(特殊な構造)。

8. 原因 - (3) ①構造設計の影響(3/3)-

建設当時の設計の考え方

※:冷却塔は設備機器であり、建築基準法は適用されない。

- 当時の建築基準法を参考にして、風圧による冷却塔に発生する軸力を算出。
(速度圧:200kgf/m²(最大瞬間風速63m/s相当))。
- 地震力を水平0.4G、鉛直0.2Gとし、冷却塔に発生する軸力を算出。
- 風圧と耐震による冷却塔への影響を比較し、構造計算を実施。

評価条件

構造図に基づき、柱・横材・筋かいをモデル化。

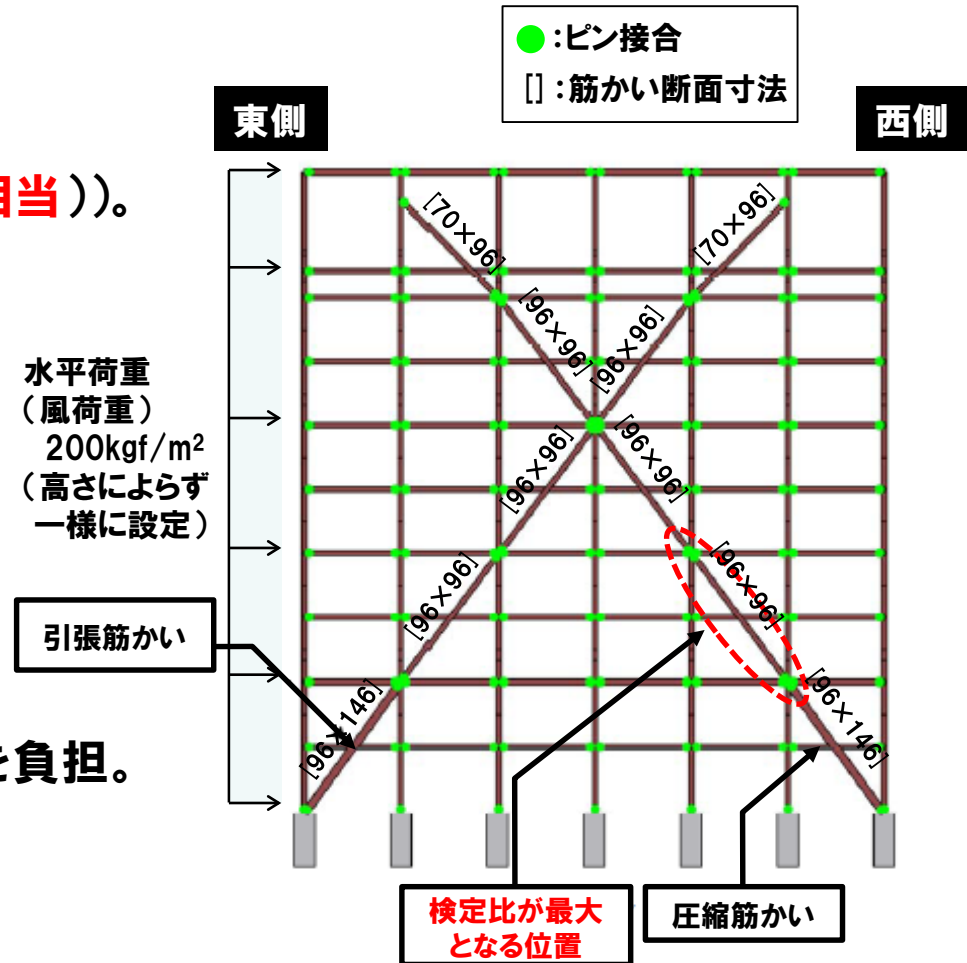
- 水平荷重(風荷重)と自重を考慮
(設計時:速度圧200kgf/m²)
- 柱で鉛直荷重、筋かいで水平荷重(風荷重)を負担。
- 部材端部をピン接合とし、軸力のみを伝達。

評価結果

- 最も厳しい検定比*1が生じる下から2段目の筋かい(圧縮)において、発生軸力(34.7kN)及び評価基準値(短期許容圧縮力 38.3kN*2)から、検定比は0.91であった。

*1:発生軸力を評価基準値で除した値

*2: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



冷却塔東西断面のモデル化(例)

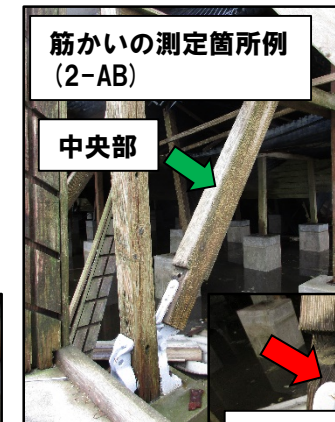
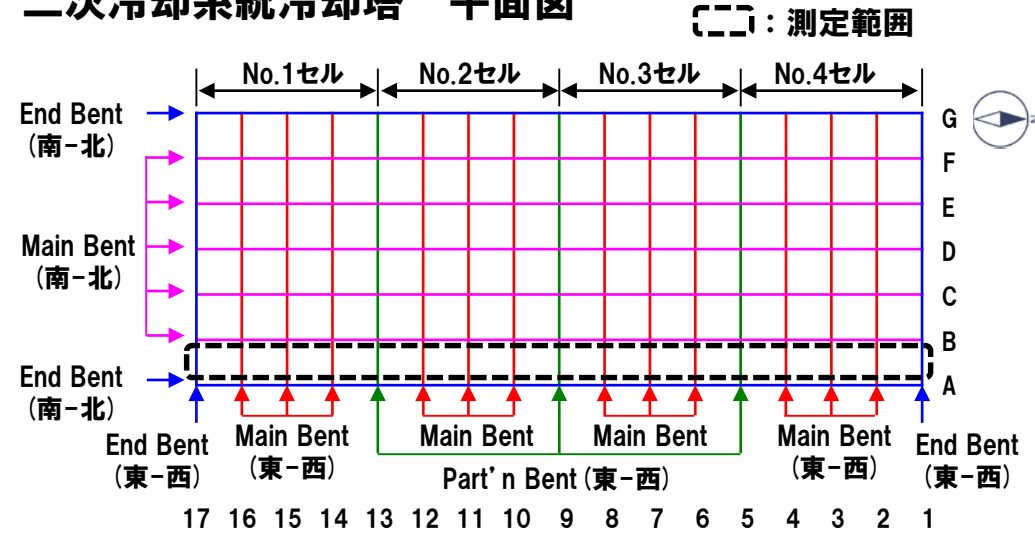
8. 原因 - (4) ⑤木材の腐朽の影響(1/2)-

二次冷却系統冷却塔の運転経緯

- 平成11年10月～平成18年8月
:JMTR稼働中(第130サイクル～第165サイクル)
⇒ JMTR運転中は二次冷却系統は連続運転
- ★平成19年4月:再稼働に向けた改修工事
- 平成18年8月～平成22年8月
:JMTR改修工事中
⇒ 原則1回/月で保守運転を実施
- 平成22年9月～平成23年2月
:JMTR改修工事中
⇒ 再稼働に向けた試運転(1回/月)
- ★平成23年3月:東日本大震災
- 平成23年5月～平成29年3月
:再稼働計画あり
⇒ 原則1回/月で保守運転
- ★平成29年4月:JMTR廃止施設に決定
- 平成29年4月～平成29年8月
⇒ 原則1回/月で保守運転
- 平成29年8月以降
⇒ 年1回の施設定期自主検査のみ運転。

木材の腐朽状況 ⇒ 針貫入試験により確認

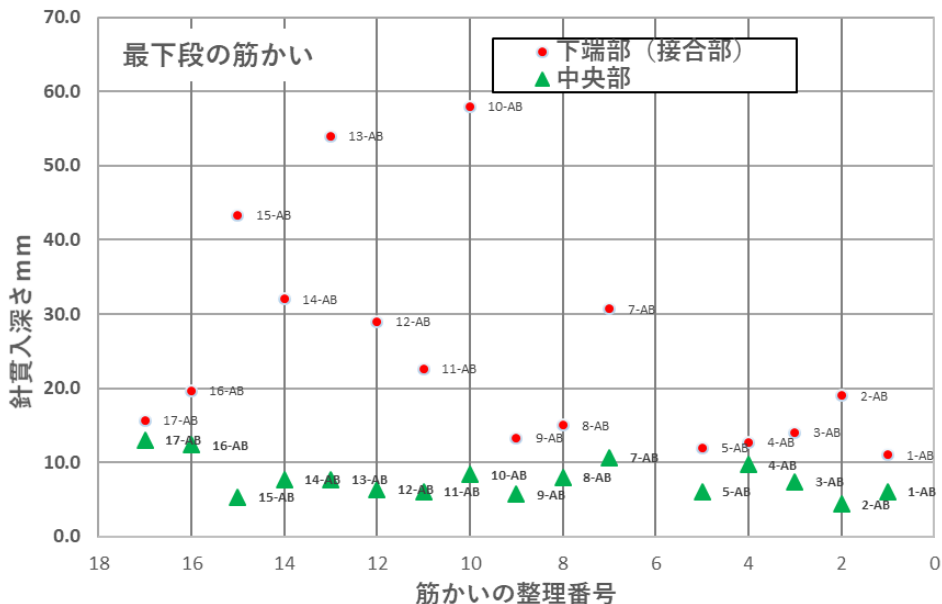
二次冷却系統冷却塔 平面図



8. 原因 - (4) ⑤木材の腐朽の影響(2/2)-

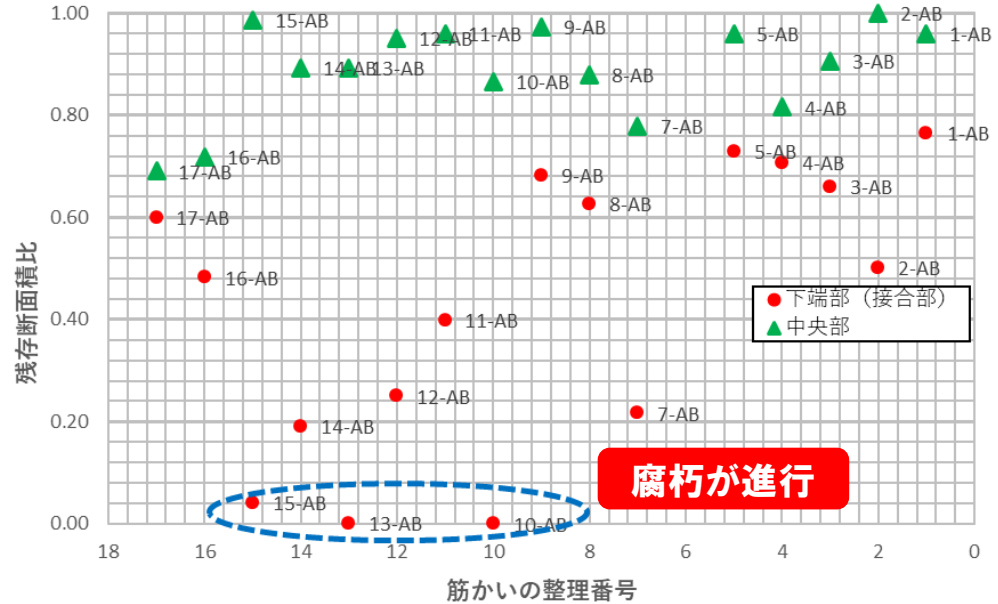
木材の耐力低下に関する指標を針貫入試験結果から残存断面積比として評価

針貫入試験結果



中央部はほぼ10mmと一定。下端部は30mm以上の部分を5か所確認。

残存断面積比 (新材=1.0)



木材の腐朽により構面No.10、13及び15の筋かい下端部の残存断面積がほとんどない状況。

木材腐朽により水平荷重(風荷重)を負担する強度部材として機能しない筋かいが存在していたことが要因と考えられる(構造解析により推定する)

8. 原因 - (5) ⑦点検内容の問題一

○ メーカー推奨の点検項目に対する実施状況

点検項目	二次冷却系統冷却塔
減速機のオイル量、汚れ	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
運転中の異常な振動	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	外観目視確認
ボルト等の緩み	H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査 H23 二次冷却系統冷却塔の詳細調査 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	H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査 H23 二次冷却系統冷却塔の詳細調査 H26～H30 施設定期自主検査(外観検査)
金物等の腐食	H18 二次冷却系冷却塔の健全性調査 H23 二次冷却系統冷却塔の詳細調査 H26～H30 施設定期自主検査(外観検査)

- メーカーが推奨する設置者側が行う点検項目は実施していた。
- 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. 原因 - (6) ⑫風雨の影響(1/2)-

10m高風向風速

大洗研究所内にある気象観測露場



【観測項目】

- ・10m高風向風速
- ・雨量

評価の概要

① 2019年9月9日は強風時に風向きが東であった。

	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
	2016年1月18日13時20分		12.4	NE
2015年度	2016年1月18日13時30分	25.4	6.9	NE
	2016年8月22日17時10分		10.1	SSW
2016年度	2016年8月22日17時20分	28.6	10.6	SSW
	2017年10月22日24時00分		11.4	NE
2017年度	2017年10月23日0時10分	31.2	10.1	NE
	2018年10月1日3時40分		11.5	SSW
2018年度	2018年10月1日3時50分	28.8	11.6	SSW
	2019年7月7日13時30分		8.4	NNE
2019年度 (4月1日から8月31日)	2019年7月7日13時40分	21.3	8.4	NNE
	2019年9月9日7時00分		10.3	E
2019年度 (9月9日)	2019年9月9日7時10分	30.9	9.4	

※ 各年度における最大瞬間風速の最大値(太字)。各年度における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)も合わせて記載。

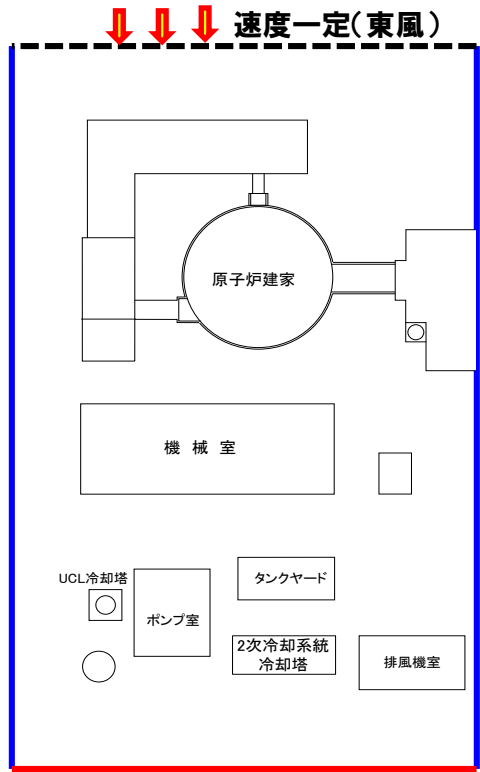
8. 原因 - (6) ⑫風雨の影響(2/2)-

原子炉建家を含む風上側を広範囲にモデル化⇒Fluentコードを用いたRANS解析(標準k-ε、定常)

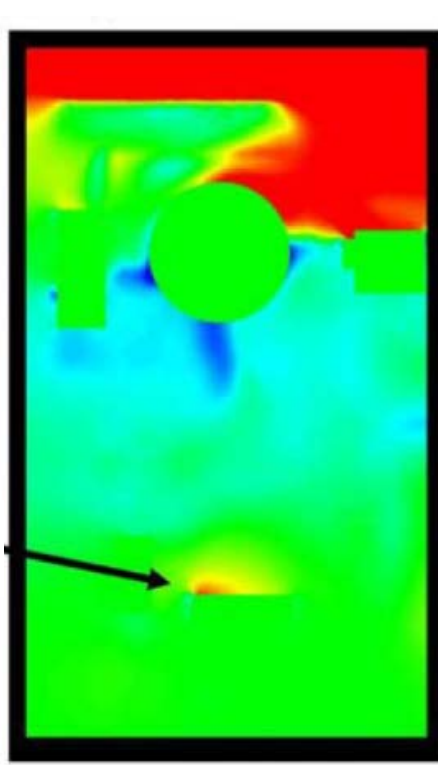
○ モデル化範囲と条件

モデル化範囲:縦210m、横:122m、高さ50m
 風速 :30m/s

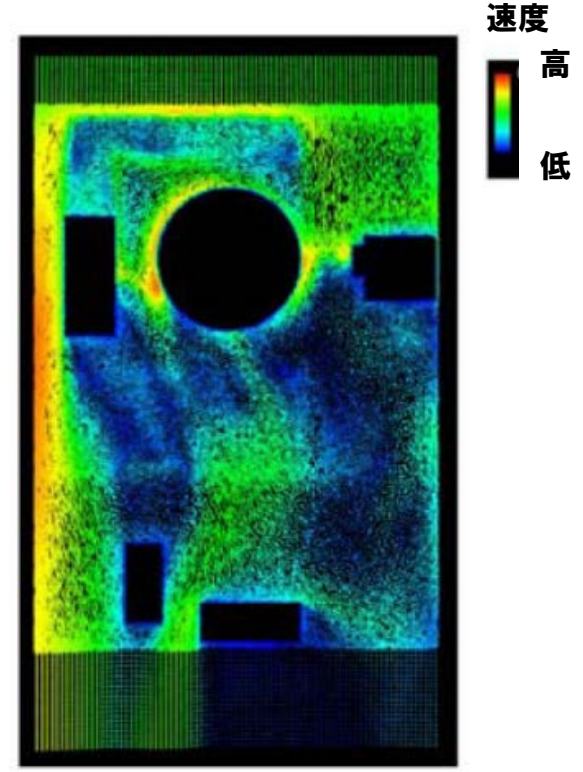
○ 解析結果(地上高10m)



圧力分布



速度分布



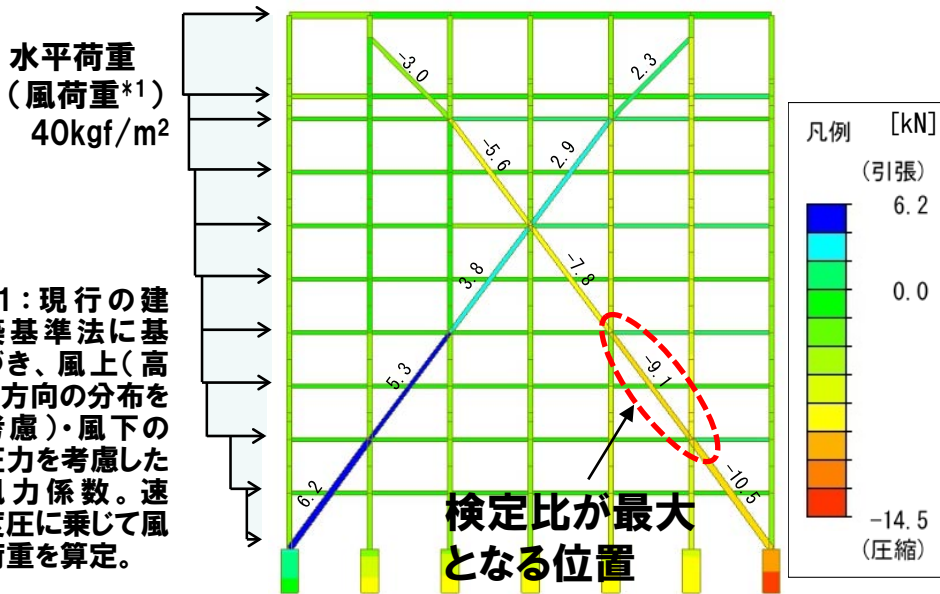
評価の概要

- ① 原子炉建家後部に剥離流が発生、② 冷却塔への風圧・速度は東壁北側にピークが発生

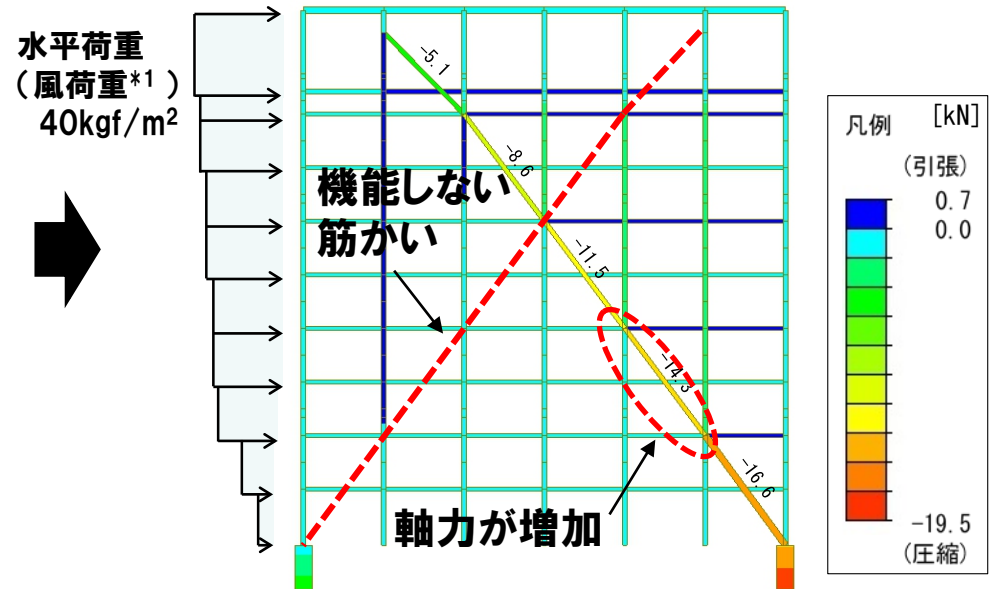
8. 原因 - (7) 原因の推定(1/2)-

FT図の「①構造設計の影響」及び「⑤木材の腐朽の影響」を考慮して、台風15号の強風を模擬した構造計算を行い、倒壊の原因を推定(腐朽が進んだ構面No.10の例)。

(1) 健全な木材の時 (強風に耐える)



(2) 木材の腐朽により機能しない場合



最大瞬間風速30.9m/s (圧縮)
 $\Rightarrow \frac{\text{発生軸力 } 9.1\text{kN}}{\text{評価基準値 (終局耐力 } 38.3\text{kN}^*2)} = \mathbf{0.24}$

機能しない筋かいがある。⇒ 荷重の増加 (圧縮)
 $\Rightarrow \frac{\text{発生軸力 } 14.3\text{kN}}{\text{評価基準値 (終局耐力 } 7.2\text{kN}^*2.*3)} = \mathbf{2.00}$

*2: 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

*3: 耐力算定にあたっては、針貫入試験結果による耐力低減を考慮

- ① 水平荷重を負担する筋かいが、腐朽により強度部材として機能しなかった。
- ② 機能しない筋かいにより、残った筋かいへ荷重が伝搬し、倒壊したと推定している。

8. 原因 – (7) 原因の推定(2/2) –

○ 「冷却塔の倒壊」に至った経緯の特定

- 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、**冷却塔は特殊な構造であった。**
- 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、**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。**
- 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、冷却塔の東西方向の17構面のうち、構面No.10、13及び15の筋かい下端部(接合部)において、腐朽により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. 原因 – (9) 原因分析 –

○ 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。

(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。

(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以下に掲げる再発防止対策を講ずる。

- (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。
(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。
(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

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。

*:原子炉付属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のUCL (Utility Cooling Loop) 系統の冷却塔であり、二次冷却系統冷却塔と同様に木造である。

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、以下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。また、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。