

JMTR(材料試験炉)二次冷却系統の 冷却塔倒壊に係る対応状況について

令和元年11月28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. 概要及び事象の状況**
- 2. 原因及び対策**
- 3. まとめ**

1. 概要及び事象の状況

1.1 概要

事象の概要

台風15号接近中の令和元年9月9日(月)7時40分頃、JMTR(材料試験炉)の二次冷却系統冷却塔(以下「冷却塔」という。)の倒壊を確認(倒壊は6時頃から7時40分頃までの間と推定)。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。

また、二次冷却系配管のフランジ部からの水の漏えい及び排風機室のスレート外壁の破損(2箇所)を確認。

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】

事象の原因

台風15号による強風の影響と考えられるが、詳細な原因については調査中。

安全装置の種類及び動作状況

なし

放射能の影響、被害者及び他に及ぼした影響

なし



冷却塔倒壊前(H30.2.16撮影)



冷却塔倒壊後(R1.9.9撮影)

1.2 主な時系列(1/2)

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。

1.2 主な時系列(2/2)

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。

1.3 法令報告事象としての判断

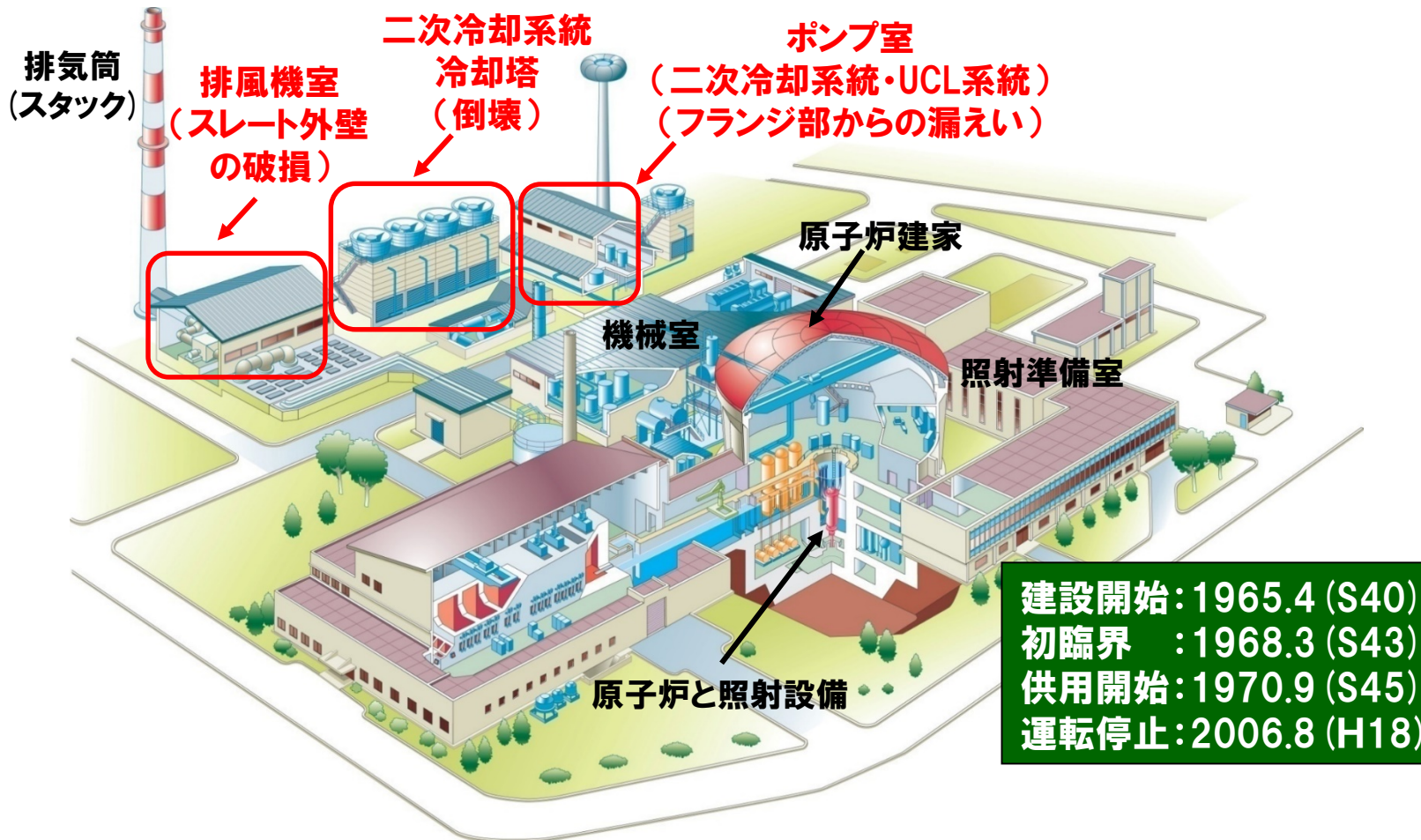
廃止措置準備中であるJMTRの原子炉及び二次冷却系統は、事象発生時、停止しており、今後も運転する予定はないため、当該事象による原子炉の安全への影響はない。

しかしながら、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から、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た。

1.4 JMTR(材料試験炉)の概要

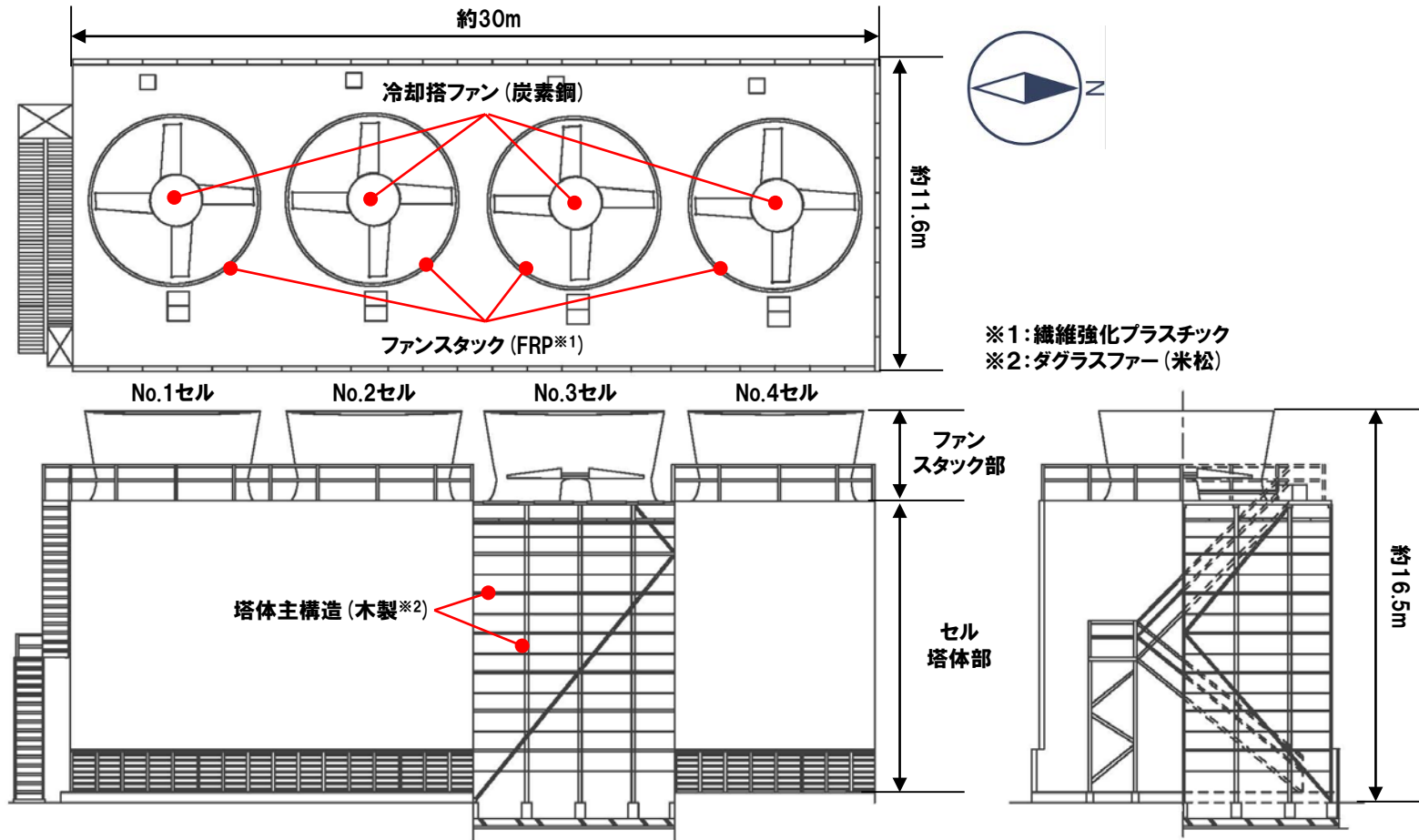
動力炉国産技術の確立と国産動力炉などの発展に寄与するため原子炉用材料及び燃料の各種照射試験、RIの生産などに利用されてきた軽水減速軽水冷却タンク型の材料試験炉であり、約38年間の運転実績を有する。

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を行った。



1.5 二次冷却系統冷却塔の概要

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。



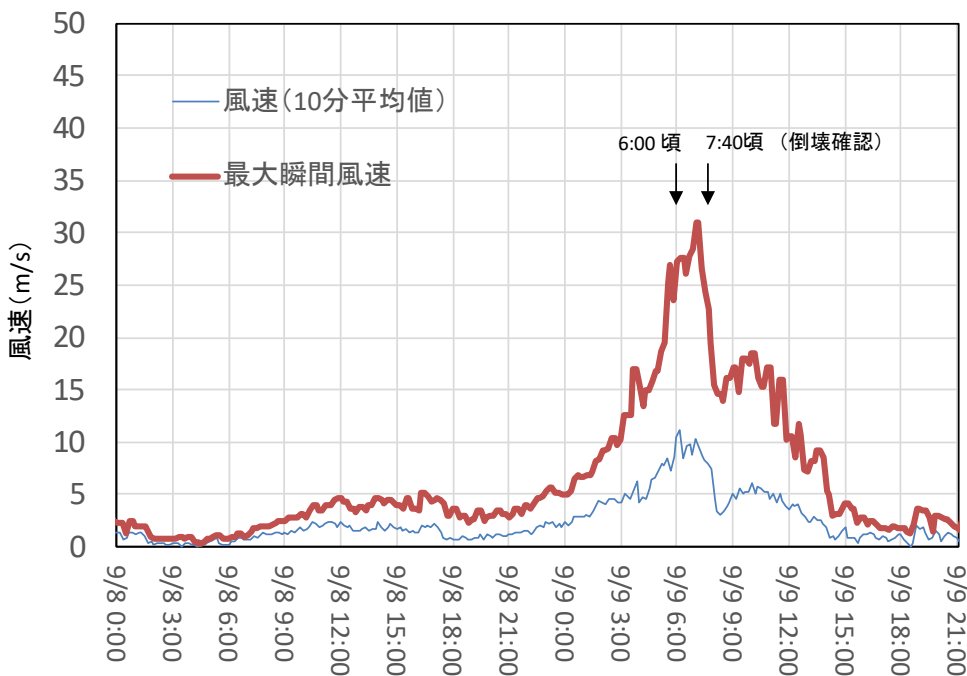
二次冷却系統冷却塔の概略図

- 昭和43年建設。現在の冷却塔は、平成10～平成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)。

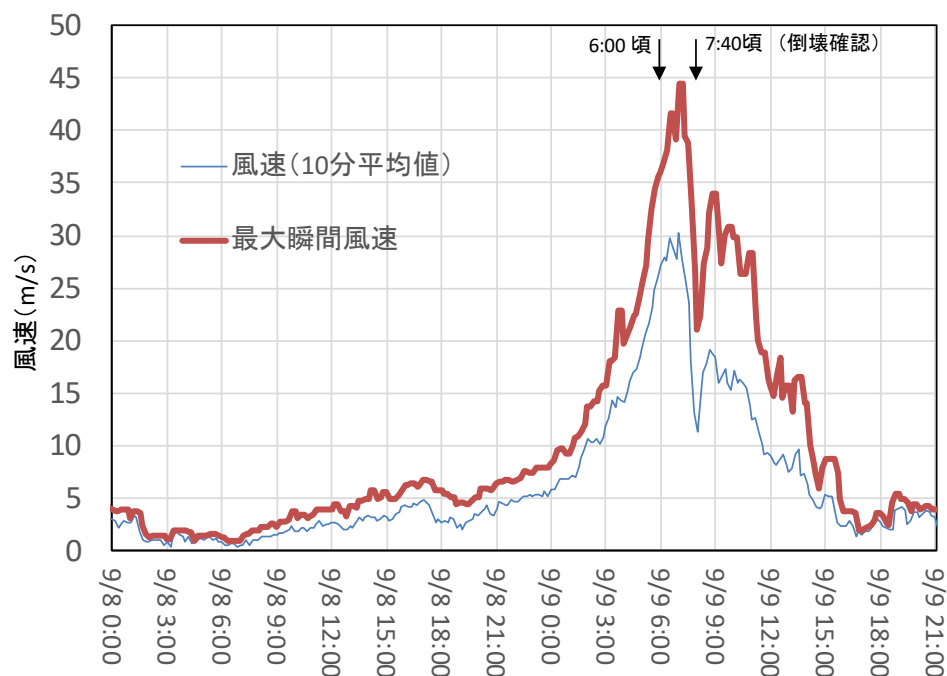
1.6 事象発生時の気象状況

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)

1.7 冷却塔の倒壊及び二次冷却系配管の破損の状況(1/2)

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

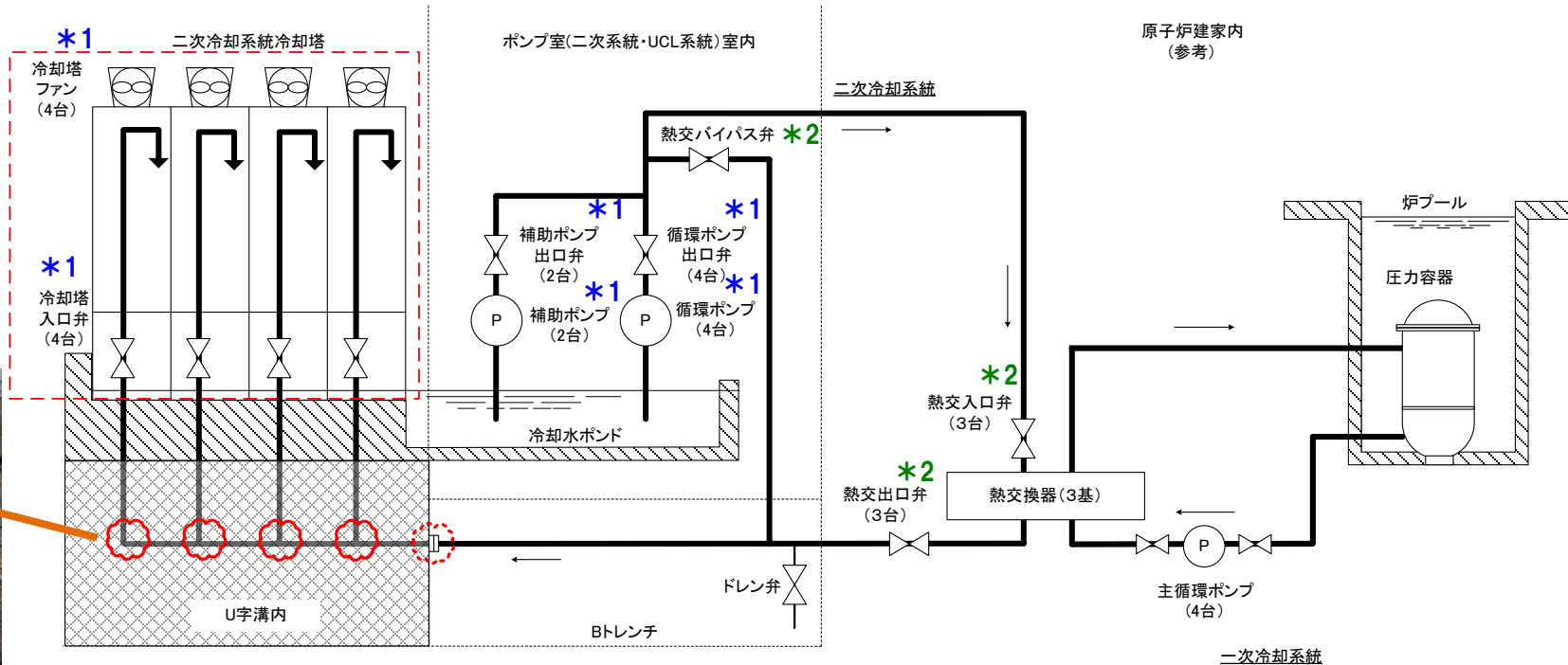
- ・ 倒壊した冷却塔周辺の線量当量率は、全てバックグラウンド値であり異常なし。倒壊に伴う負傷者なし。
- ・ 本事象により二次冷却系統が故障したことに関する原子炉の安全への影響なし。また、二次冷却系統以外の系統及び設備の機能への影響なし。

1.8 冷却塔の倒壊及び二次冷却系配管の破損の状況(2/2)

○ 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。

- ☐ 冷却塔の倒壊部
- ⊗ 配管の破損部
- ⊙ 漏えいの発生したフランジ部
- *1 電源「断」確認
- *2 「閉」確認又は「閉」操作



二次冷却系配管の養生

二次冷却系統概略図

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、周辺の状態を確認している。

1.9 二次冷却系配管のフランジ部からの水の漏えいの状況

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

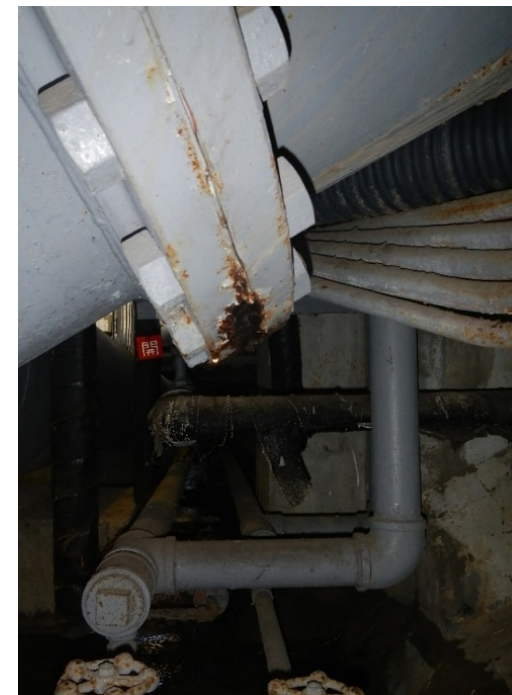
- 漏えい確認時点で漏えい量は30～40L程度(漏えい率は約150mL/分)。
- 漏えい水のサンプリング測定の結果、異常なし。
- 事象発生時、当該ポンプ室に設置されている二次冷却系統及びUCL系統のポンプ等の機器に異常はなく、冷却塔倒壊によるUCL系統の運転への影響なし。

○ 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



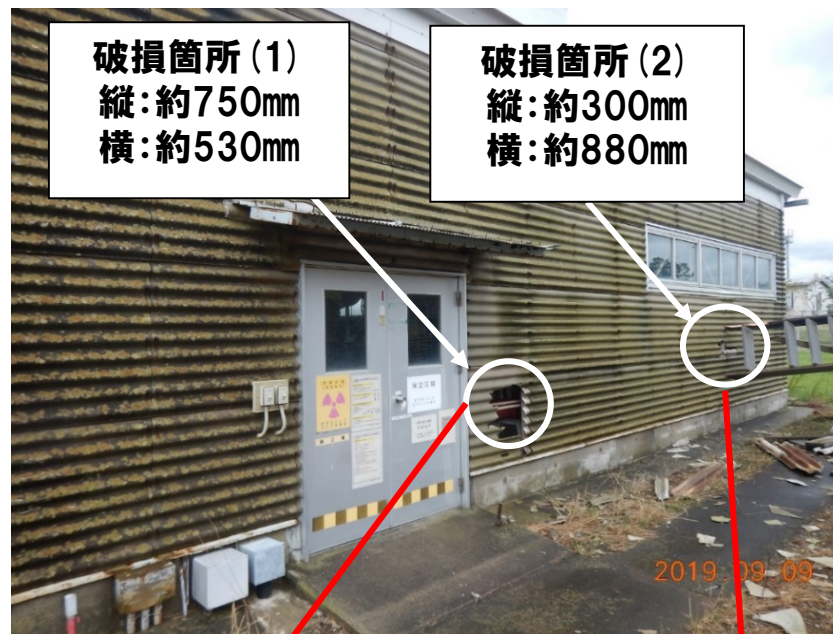
二次冷却系配管 止水後

1.10 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)。



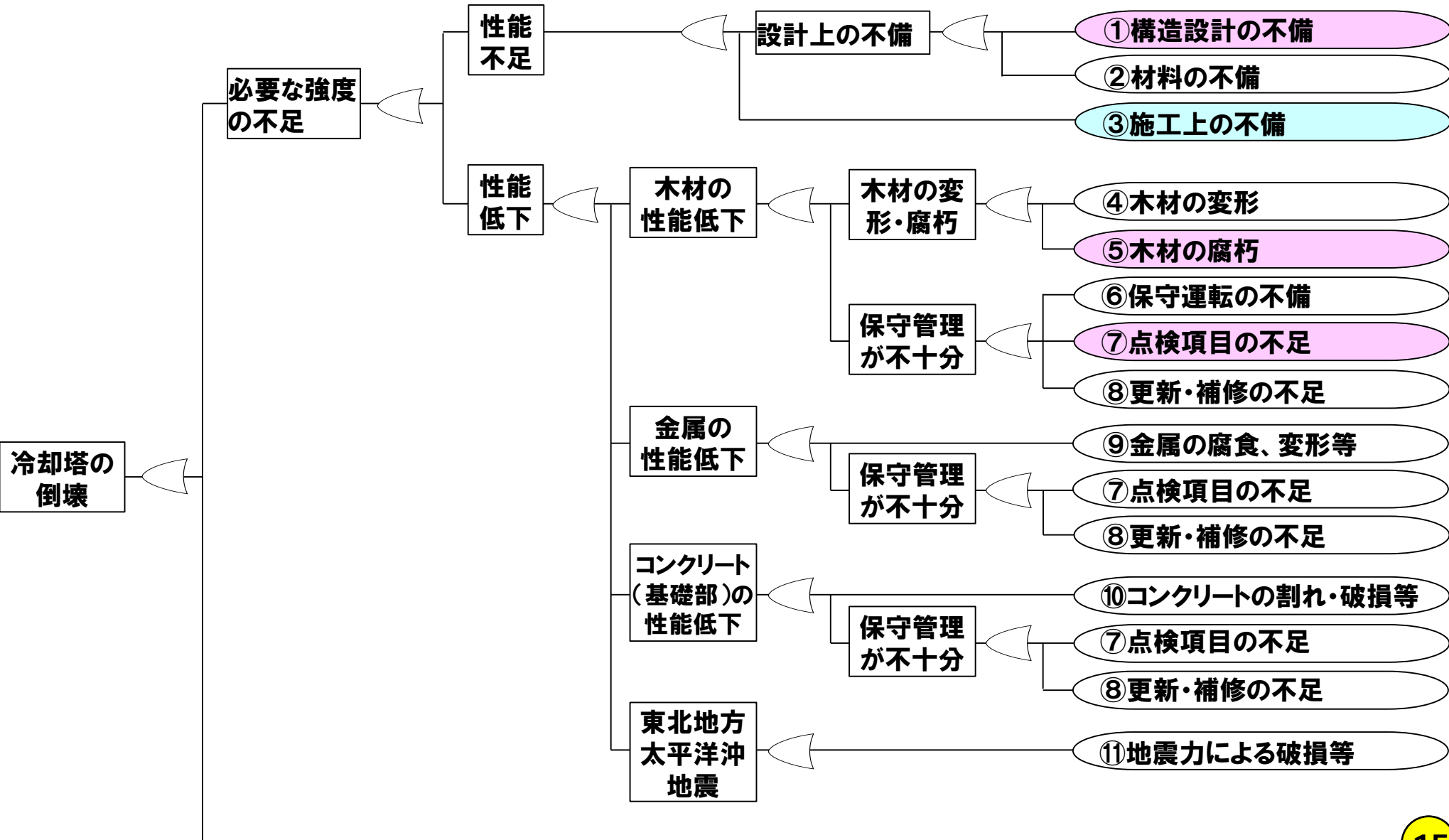
補修後(1)



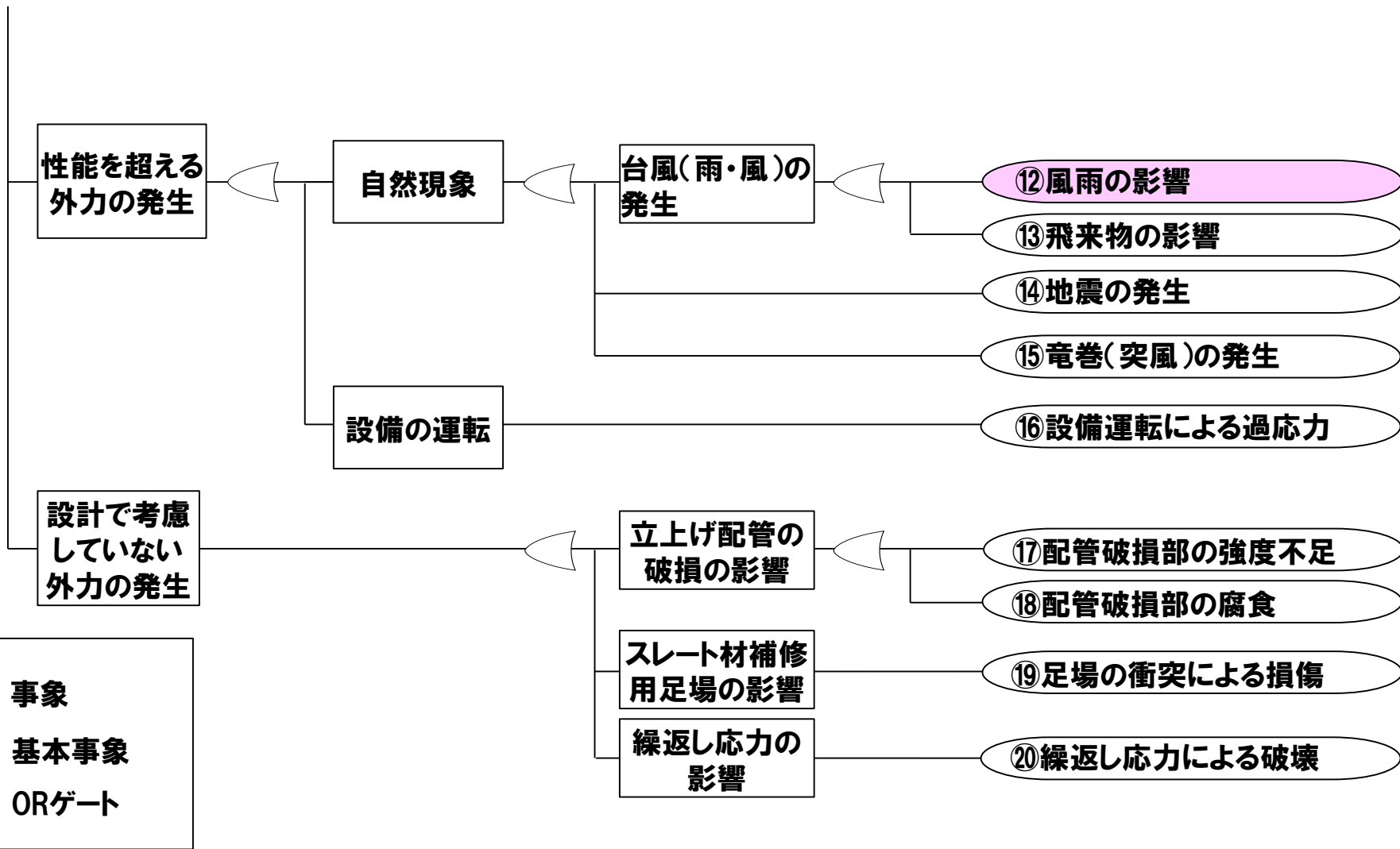
補修後(2)

2. 原因及び対策

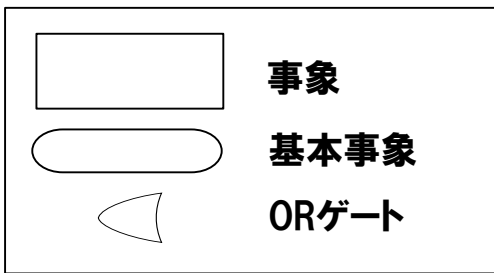
2.1 冷却塔の倒壊要因に係るフォルトツリー図(1/2)



2.1 冷却塔の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。

2.2 冷却塔の倒壊に係る基本事象に対する調査内容(1/3)

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		調査項目	調査内容
①	構造設計の不備	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応力評価(柱、横材、筋かい)
②	材料の不備	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
③	施工上の不備	検査記録の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・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
④	木材の変形	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)
⑤	木材の腐朽	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
⑥	保守運転の不備	保守運転履歴の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・保守運転履歴及び頻度の規定の確認
⑦	点検項目の不足	点検項目(内容)の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・点検項目に対する実施状況を確認 ①日常点検、②施設定期自主検査の確認 ・メーカーによる点検についての調査 ・更新時に得た腐朽に係る知見の点検等への反映の調査

2.2 冷却塔の倒壊に係る基本事象に対する調査内容(2/3)

基本事象		調査内容	備考
⑧	更新・補修の不足	更新履歴の確認	<ul style="list-style-type: none"> 更新履歴、保守記録(履歴)の確認 耐用年数
⑨	金属の腐食、変形等	金属部品の健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> 接続金物の外観検査・寸法検査
⑩	コンクリートの割れ・破損等	コンクリート(基礎部)の健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート(基礎部)の外観検査
⑪	地震力による破損等	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
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
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)
⑭	地震の発生	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
⑮	竜巻(突風)の発生	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)
⑯	設備運転による過応力	当日の運転履歴	<ul style="list-style-type: none"> 運転状況の確認

2.2 冷却塔の倒壊に係る基本事象に対する調査内容(3/3)

基本事象		調査内容	備考
⑰	配管破損部の強度不足	設計の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・構造解析 ・破断面の外観検査
⑱	配管破損部の腐食	溶接部の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・破断面の外観検査
⑲	足場の衝突による損傷	足場倒壊による影響	<ul style="list-style-type: none"> ・外壁補修工事の記録確認 ・足場倒壊状態の確認
⑳	繰返し応力による破壊	応力発生の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・文献等による調査 ・現場確認

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構造設計の不備、⑤木材の腐朽、⑦点検項目の不足及び⑫風雨の影響の4つと推定。
(③施工上の不備については調査中)

2.3 構造設計の不備① –二次冷却系統の設計仕様–

(1) 基本仕様

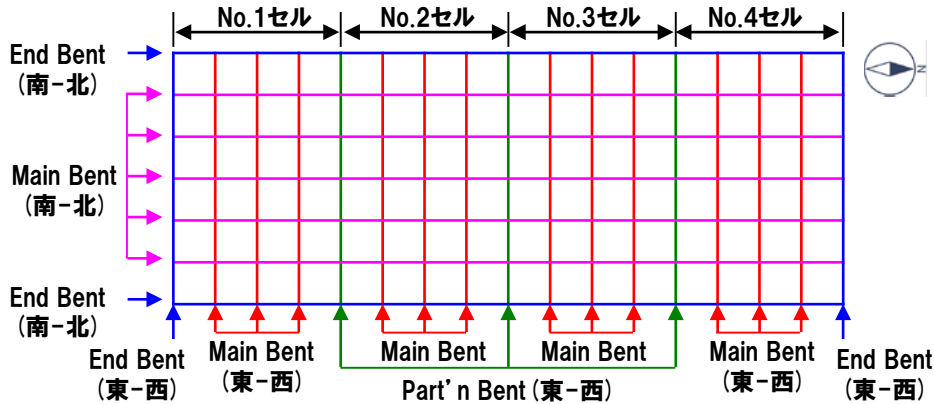
項目	仕様
搭型式	4F60B-184V-2436BP
外形寸法	搭高 16,487mm、塔幅 11,580mm 搭長 29,880mm
冷却水量	3,900m ³ /h
温度条件	入口温度 43.25℃ 出口温度 31.0℃ 湿球温度 26.5℃
送風機	直径 5,490mm (18Ft.) 4枚羽根、192RPM、鋼板+亜鉛メタリコン製
減速機	型式 FG-60、減速比 1/5.09
電動機	55kW、6P、3,000V、50Hz、B種絶縁
中間軸及びカップリング	FS-18A、減速機側 RC-501、電動機側 RC-505、鋼製+塗装

(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)

2.3 構造設計の不備② - 二次冷却系統冷却塔の構造概要 -

キープラン (平面)

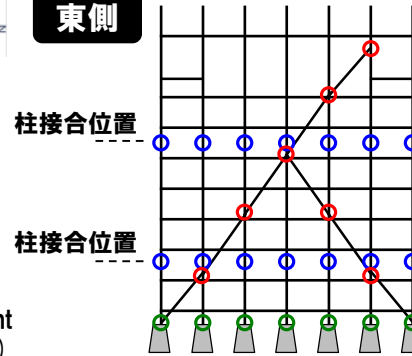


End Bent (東-西)
Part'n Bent (東-西)

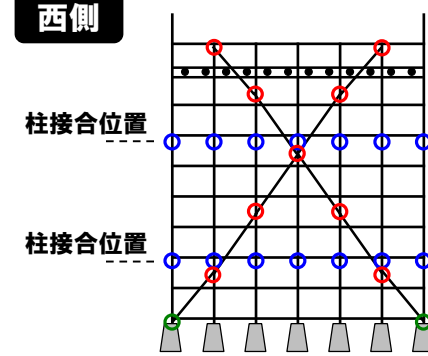
Main Bent (東-西)



東側

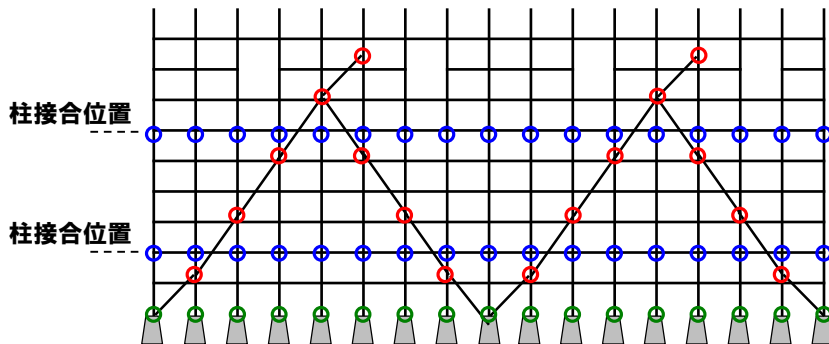


西側

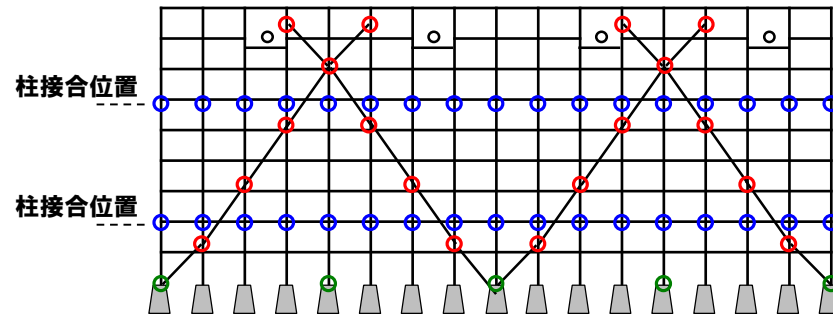


- : 部材接合金物
- : 柱継手金物
- : 基礎部継手金物

End Bent (南-北)



Main Bent (南-北)



2.3 構造設計の不備③ ー設計条件と評価ー

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負荷する応力を算出。
(速度圧:200kgf/m²)。
- 地震力を水平0.4G、鉛直0.2Gとし、冷却塔に負荷する応力を算出。
- 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。

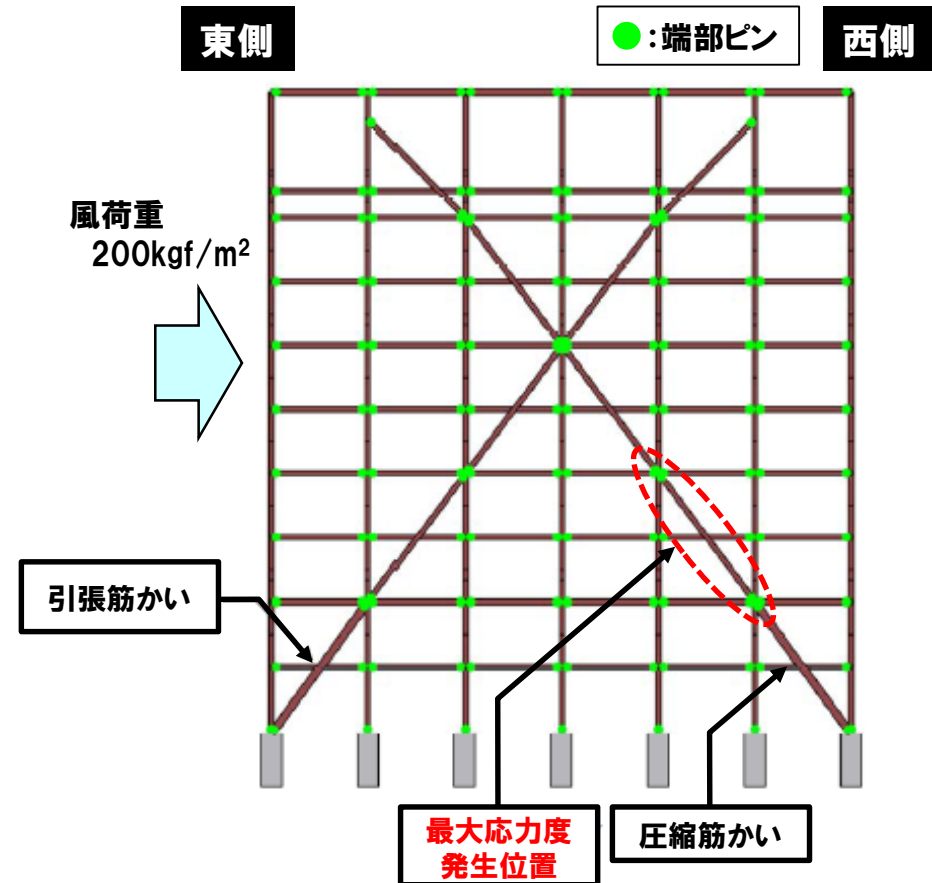
評価条件

構造図に基づき、柱・横材・筋かいをモデル化。

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

評価結果

- 下から2段目の筋かい (圧縮) に最大応力度が負荷。評価基準値に対する発生応力度の比は、約0.9であった。



冷却塔東西断面のモデル化 (例)

2.4 木材の腐朽① - 運転経緯と針貫入試験の測定 -

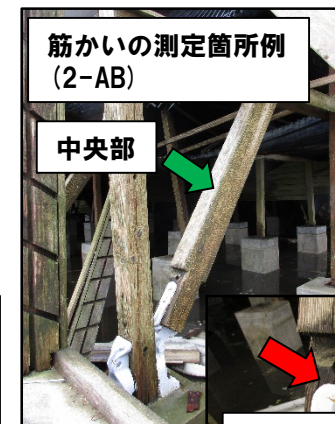
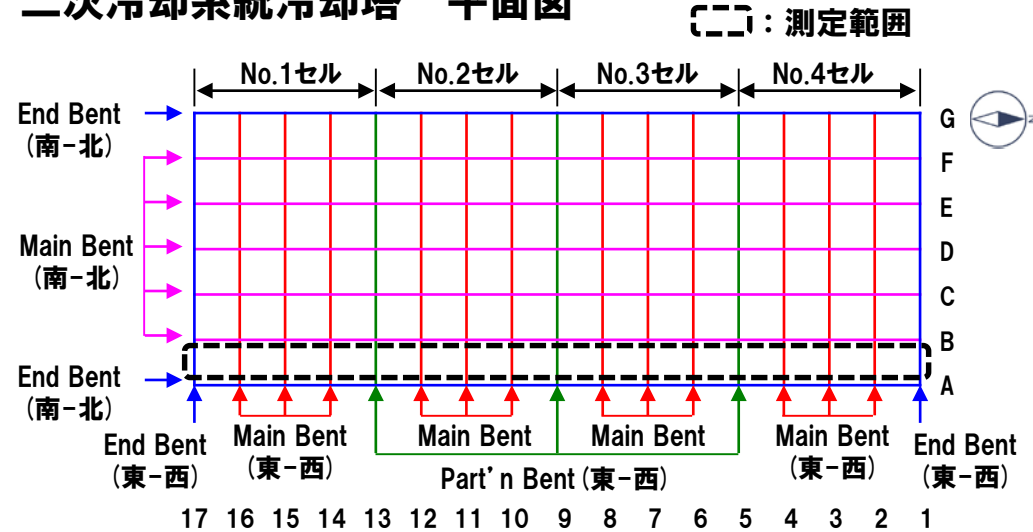
二次冷却系統冷却塔の運転経緯

※:平成10~11年に更新後

- 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運転中は二次冷却設備は連続運転
 - ★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

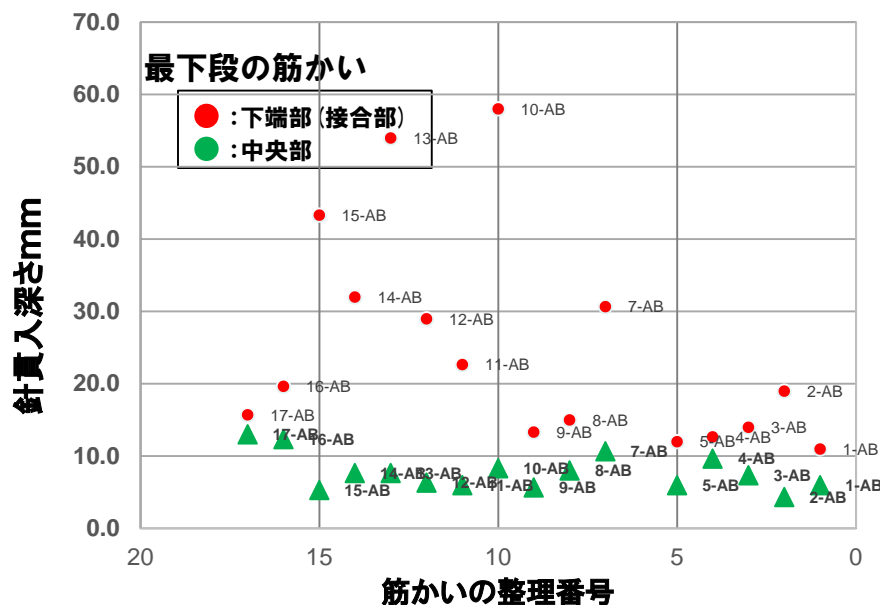
二次冷却系統冷却塔 平面図



2.4 木材の腐朽② - 木材の腐朽評価 -

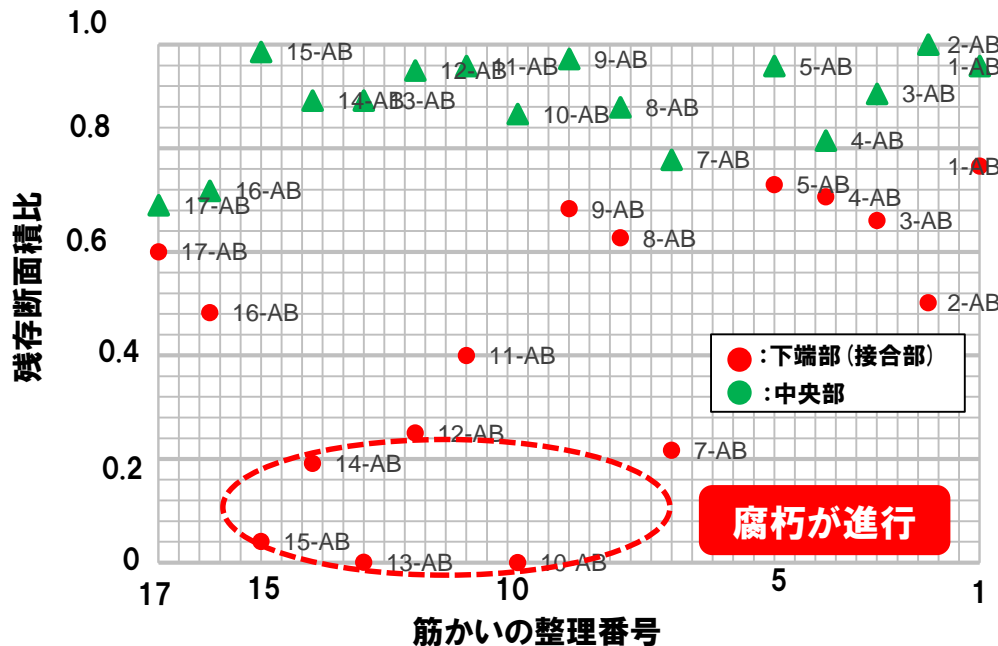
木材の耐力低下に関する指標を針貫入試験結果から残存断面積比として評価

針貫入試験結果



中央部はほぼ10mmと一定。下端部は30mm以上の部分が5か所確認。

残存断面積比 (新材=1.0)



特に10~15構面の下端部(接合部)で残存断面積比が小さく、木材の腐朽が進行。

木材腐朽により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)

2.5 点検項目の不足 —メーカー推奨の点検項目に対する実施状況—



メーカーが推奨する設置者側が行う点検項目について、実施状況を以下に示す。

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網羅していた。
- 点検は目視可能な範囲(塔上部及び塔下部)に限定されていた。
- 東日本大震災以降、長期停止中の木材内部の腐朽状態を把握するための点検項目の改善はしていなかった。

2.6 風雨の影響① - 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30分		10.3	E
2019年度 (9月9日)	2019年9月9日7時30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。

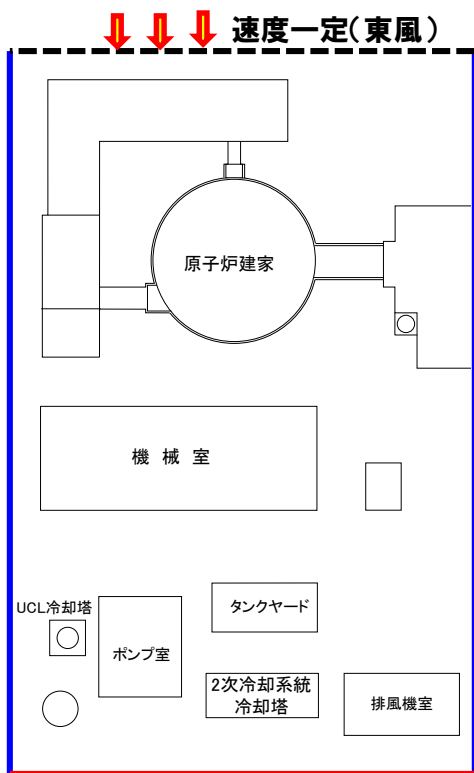
2.6 風雨の影響② - 風解析結果 -

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

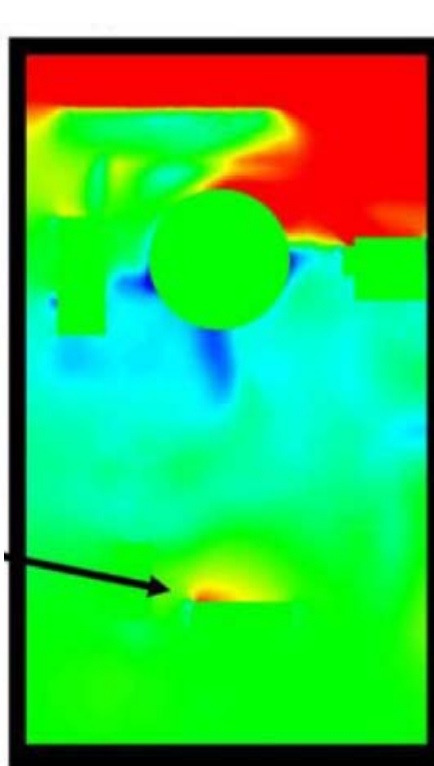
モデル化範囲:縦210m、横:122m、高さ50m
 風速 :30m/s

○ 解析結果(地上高10m)



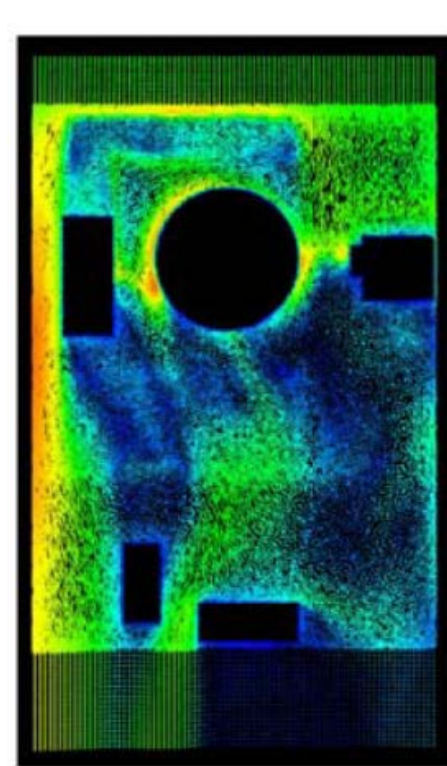
圧力一定

圧力分布



風圧の
高い部分

速度分布



速度
高
低

評価の概要

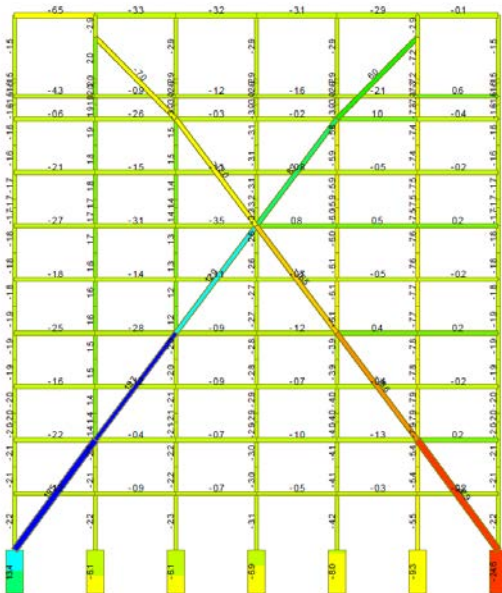
- ① 原子炉建家後部に剥離流が発生、②冷却塔への風圧・速度は東壁北側にピークが発生

2.7 台風15号時の状況を模擬した構造評価

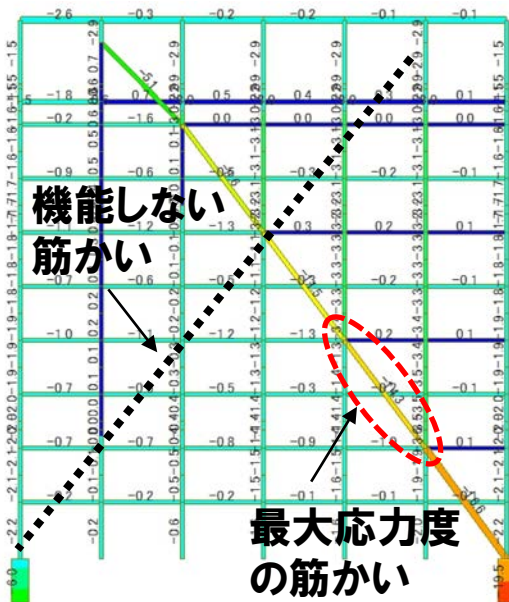
FT図の「①構造設計の不備」及び「⑤木材の腐朽」を考慮して、台風15号の強風を模擬した構造計算を行い、倒壊の原因を推定。

台風15号を想定した解析ケース

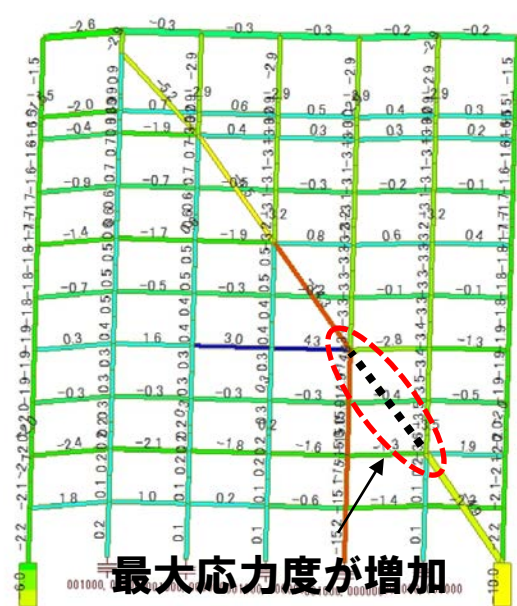
- (1) 健全な木材の時 (強風に耐える) (2) 腐朽により機能しない場合 (3) 筋かいの破損により荷重の増加



最大瞬間風速30.9m/s
 \Rightarrow (発生応力) / (評価基準値) = **0.24**



木材の腐朽状態を考慮する。
 \Rightarrow 機能しない筋かいがある。



荷重の増加
 \Rightarrow 荷重の増加が伝搬、冷却塔倒壊

- 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、筋かいへの荷重増加が伝搬し倒壊と推定している。

2.8 原因の特定

- ✓ 風荷重 $200\text{kgf}/\text{m}^2$ に耐える設計であることを確認(施工上の不備は現在調査中)。
- ✓ 最大瞬間風速 $30.9\text{m}/\text{s}$ 時の評価を行い、筋かいの評価基準値に対する発生応力度の比は 0.24 であり、設計条件では台風15号の強風に十分耐えうることを確認。
- ✓ 針貫入試験結果から、風荷重を担保する筋かいの耐力が腐朽により低下し、強度部材として機能しないものがあることを確認。
- ✓ 筋かいが強度部材として機能を喪失した場合のモデル計算を実施。木材の腐朽により、強度が低下した筋かいが破損することにより、隣接する筋かいへの荷重増加が伝播し、倒壊に至ったと推定。
- ✓ 過去にも最大瞬間風速 $30.9\text{m}/\text{s}$ (10m 高)と同程度の強風があったが倒壊に至っていないことから、風向き(東風)も倒壊の原因の一つであると推定。



冷却塔の構造部材である筋かいの下端部(接合部)で木材の腐朽が進行し、木材の耐力が低下していたため、台風15号の強風の影響により筋かいが損傷して機能喪失し、隣接する筋かいの損傷が進み、冷却塔の倒壊に至ったと推定。

平成18年8月以降の冷却塔の長期停止中に進行した木材の腐朽の原因や、木材内部の腐朽状態を把握できなかった要因について分析し、点検方法の見直し等、同種の設備に対する再発防止対策や水平展開について検討を進めている。

3. まとめ

3.1 まとめ及び今後の対応

- **令和元年9月9日(月)の事象発生後、冷却塔のがれき等の撤去及び冷却塔倒壊に至る原因の究明に取り組んでいる。**
- **倒壊した冷却塔のがれき等については、二次災害を防止する観点で安全な状態にするため、撤去作業を進めている。なお、冷却塔のがれき等の撤去後は、冷却塔の基礎部分のみ残る予定である。**
- **冷却塔の倒壊要因分析のため、フォルトツリー解析を行い、基本事象の影響度評価を行っている。現在、事実関係に基づいた冷却塔の構造評価、木材のサンプル試験を含めた現地調査、気象条件、保守点検記録等の調査を実施中である。**
- **今後、原因を特定し、必要な対策を立て、これらを法令報告第2報としてとりまとめて報告する予定である。**