

伊方発電所の状況について

令和4年8月10日
四国電力株式会社

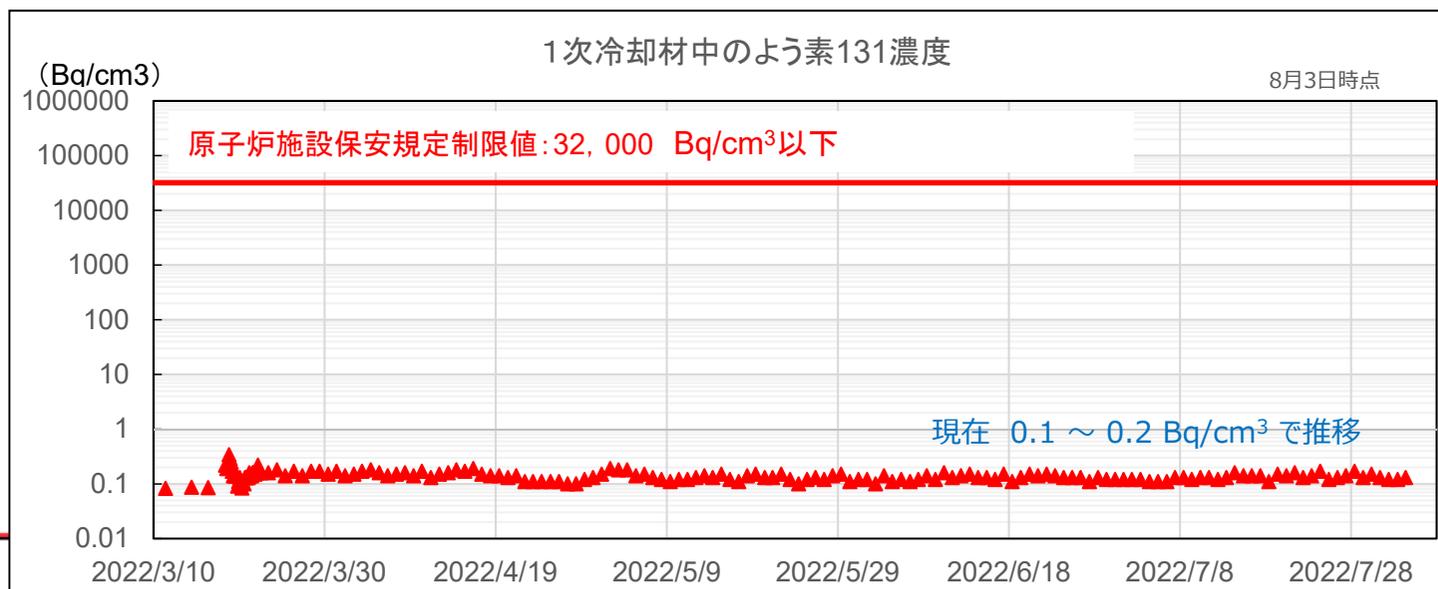
はじめに

- 伊方発電所3号機は、本年1月24日に第15回定期事業者検査（以下、「定期検査」）を終了し、通常運転を再開しました。
- 令和2年1月の第15回定期検査中に発生した「連続トラブル」および令和3年7月に判明した「過去の保安規定違反」については、再発防止策を徹底するとともに、愛媛県・伊方町からいただいたご要請に対する取り組みも継続的に進めています。
- 一方、使用済燃料を再処理工場に搬出するまでの間、一時的に貯蔵する施設として、伊方発電所敷地内に使用済燃料乾式貯蔵施設を設置する工事も順調に進捗しています。
- 本日は、これら伊方発電所3号機の状況についてご説明いたします。

1. 伊方発電所3号機の状況

- 伊方発電所3号機は、本年1月24日に第15回定期検査を終了し、通常運転を再開し、運転を継続しています。引き続き、安全・安定運転を継続してまいります。
- 次の定期検査は、令和5年2月3日から開始する予定としていましたが、国の審議会において、今年度の冬季の電力需給が厳しい見通しであり、供給力確保に向け発電所の補修点検時期の調整など追加の対策が必要との方針が示されたことから、当社は、四国を含む西日本エリアの電力の安定供給確保のため、運転期間を法定運転期間（13カ月）の範囲内で20日間繰り延べ、令和5年2月23日から定期検査を開始することとしました。（5月25日公表済み）
- また、本年3月18日に1次冷却材中のよう素131濃度の上昇（通常「約0.1Bq/cm³」の3倍程度「約0.3Bq/cm³」）を確認※²したことから、よう素濃度等の測定頻度を増加（通常週1回→現在1日1回）し、監視を強化しています。これまで、よう素濃度等の有意な上昇傾向は見られず、保安規定に定める運転上の制限値（32,000Bq/cm³）を十分下回っており、運転継続に安全上の問題はありません。また、放射線モニタの数値に有意な変動はなく、本事象による環境への影響はありません。なお、よう素濃度の上昇は、燃料からの漏えいの疑いが考えられるため次回の定期検査で燃料集合体全数（157体）の検査を実施し、漏えい燃料の特定等を行います。

※1 燃料の核分裂で発生する放射性物質、※2 本年3月18日公表済み



2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(1) 経緯

- 伊方発電所3号機の第15回定期検査において、令和2年1月に4件のトラブルが連続して発生したことから、当社は定期検査を中断して再発防止対策を策定し、愛媛県・伊方町にご報告するとともに、愛媛県知事・伊方町長からいただいたご要請に取り組むことを条件に定期検査を再開いたしました。
- 当社が策定した各トラブルの再発防止対策については完了しており、その後も継続的に、包括的な改善活動の推進などの取り組みを実施しております。
- 愛媛県知事・伊方町長からいただいたご要請に対しては、速やかに実施すべき項目への対応は完了しており、その後も継続的に、安全文化の醸成や技術力の維持・向上などの取り組みを実施しております。
- また、ご要請項目のうち、更なる安全性確保のための対応である、断路器の恒常的な対策についても、計画的に取り組みを進めているところです。
- 連続発生したトラブルに係るこれまでの主な経緯は以下のとおり。

令和元年12月26日 定期検査開始

令和2年1月6日～1月25日 連続トラブル発生（1月25日定期検査中断）

- 1月6日 中央制御室非常用循環系の過去の点検時期誤り
- 1月12日 原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒引き上がり
- 1月20日 燃料集合体落下信号の発信
- 1月25日 所内電源の一時的喪失（定期検査中断）

3月17日 各事象の原因と対策の報告書を愛媛県・伊方町へ提出

7月29日 環境安全管理委員会で対策内容を確認。

8月3日 愛媛県知事・伊方町長から定期検査再開にあたってのご要請をいただく。
(条件付きでの定期検査再開をご了解をいただく。)

8月5日 定期検査再開

令和3年9月2日 環境安全管理委員会で対策の実施状況を確認。

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(2) 連続発生したトラブルの概要等 (1/3)

	概要	原因	再発防止対策と対応状況
事象Ⅰ 中央制御室非常用循環系の点検に伴う運転上の制限の逸脱	<p>第14回定期検査（平成29年10月3日～平成30年11月28日）中の中央制御室非常用循環系点検作業について、保安規定に定める点検可能時期以外の期間で作業を実施していた。</p> <p>なお、当該作業以外の予防保全作業について、点検可能時期以外の期間で作業していなかったことを確認した。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 担当者は、保安規定記載事項の一部について誤った解釈をした状態であったこと、また、十分な確認を行わなかったことから、当該作業を実施してはいけない時期に計画した。 • 作業許可にあたり、各承認者が当該作業の実施可能時期かどうかを確実にチェックできる仕組みが構築できていなかった。 • 「問いかける姿勢」が欠けていたことから、組織としてのチェック機能も働かなかったものと推定した。 	<ul style="list-style-type: none"> • 作業計画の妥当性を確認するチェックシートを作成し、承認を受ける運用を開始した。 【社内規定へ反映し運用開始済】 • 保安規定が改定された場合には、周知に加えて改定内容に係る教育を実施する。 【社内規定へ反映済・継続実施】 • 保安規定の運用について追加教育を行う。 【教育実施】 • 定期的に実施している、原子力安全に対して組織や個人が持つべき習慣等に関する教育に、今回の事象を反映することで、「問いかける姿勢」が定着するよう繰り返し意識付けを行う。 【社内規定へ反映済・継続実施】
事象Ⅱ 原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタの引き上がり	<p>原子炉からの燃料取出の準備作業として、制御棒クラスタと駆動軸との切り離しを行った後、原子炉容器の上部炉心構造物を吊り上げていたところ、制御棒クラスタ1体が上部炉心構造物とともに引き上げられた。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 制御棒クラスタ頭部の堆積物が駆動軸取り外し軸の先端と接手との間に詰まったことから、駆動軸を制御棒クラスタへ着座させた後、駆動軸先端が制御棒クラスタに沈み込み、不完全な結合状態となり、制御棒クラスタ1体が上部炉心構造物とともに引き上げられたものと推定した。 • 切り離し操作後に意図せず再結合する事象は、これまで経験したことがない事象であったため、再結合となった状態を確認する手順がなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> • 駆動軸が確実に切り離されていることを確認するため、駆動軸取り外し軸の位置を確認する手順を追加することにより、再結合を防止する。 【作業要領書へ反映済】 • 駆動軸切り離し時に加え、駆動軸を制御棒クラスタへ着座させた後に再度重量確認や位置計測を行うことにより、再結合していないことを確実に確認する手順を追加する。 【作業要領書へ反映済】 • 制御棒クラスタ頭部のスラッジを可能な限り減らすため、定期検査毎に制御棒クラスタ頭部の状況を確認し、スラッジが堆積している場合は除去する。 【3-15定検実施済・継続実施】

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(2) 連続発生したトラブルの概要等 (2/3)

	概要	原因	再発防止対策と対応状況
<p>事象Ⅲ</p> <p>燃料集合体点検時の落下信号発信</p>	<p>燃料集合体を点検装置ラックに挿入する際に、当該ラックの枠に乗り上げたことにより使用済燃料ピットクレーンの吊り上げ荷重が減少し、燃料集合体の落下信号が発信した。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 点検装置ラックの開口部が小さく、難度が高い作業となっていた。また、水中照明により点検装置ラックに影ができ、開口部の視認性が低下していた。 燃料集合体の点検装置ラックへの挿入状況の確認は操作員のみで実施していた。 燃料集合体が点検装置ラックと接触すること等により荷重変動が生じた際の対応が明確でなかった。 この作業の困難さを操作員のみが認識し、作業員全員で共有できておらず、改善につながっていなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 点検装置ラックの開口部を拡大する。また、本点検作業時には、状況を確認するための水中テレビカメラ、作業中の視認性向上のための水中照明を追加で設置する。【点検再開時に実施済】 燃料集合体の点検装置ラックへの挿入状況について、操作員に加えて作業責任者がダブルチェックを行う。【作業要領書へ反映済】 燃料集合体を点検装置ラックに挿入する際の注意事項として、点検装置ラックへの接触等により荷重変動が生じた際には作業を中断し、追加措置の必要性等を確認することを作業要領書に追記する。【作業要領書へ反映済】 今後、作業の難度を考慮し、作業員への聞き取り等に基づき適切な作業手順・作業環境とすることが作業要領書に反映されるよう、社内規定を見直す。【社内規定・作業要領書へ反映済】
<p>事象Ⅳ</p> <p>所内電源の一時的喪失</p>	<p>1、2号機の屋内開閉所において、保護リレー試験時に断路器が故障し、1～3号機へ供給していた18万7千V送電線4回線からの受電が停止した。その後、1、2号機は6万6千Vの予備系統から受電し、3号機は非常用ディーゼル発電機から受電した後に、50万V送電線からの受電に切り替え復旧した。</p> <p>今回の保護リレー試験では、断路器が故障すると数秒間でも3基が同時に停電する系統構成となっていた。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 断路器の設備故障が直接的な原因であった。 断路器の開閉を行う内部部品の結合部分に、ごく稀に隙間が生じる構造となっていたため放電が発生し、放電に伴う発熱により結合部分が損耗し、隙間が拡大した。 その後、断路器開閉時に結合部の擦れが生じることで金属片が落下し、相间短絡（ショート）が発生し、保護装置が動作したものと推定した。 	<ul style="list-style-type: none"> 故障した当該断路器の部品を新品に交換する。【済】 その他断路器については、内部異常診断等により異常がないことを確認した。さらに、構造が異なる3号機の断路器についても、同診断により異常がないことを確認した。【確認実施済】 今後計画的に同一構造および使用状態が同じ断路器ユニット(13台)の内部開放点検を行う。【点検実施済】 恒常的な対策を検討する。【検討済。対策はP7参照】 当該断路器をかけた断路器(14台)について、内部異常診断による監視を強化する。【恒常対策まで継続実施】 今回の保護リレー試験の再開に際しては、一定の負荷を接続する必要があるが、1～3号機の同時停電を防止する観点から、3号機の所内負荷を接続しない系統構成（模擬負荷使用）とする。【試験再開時に実施済】

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(2) 連続発生したトラブルの概要等 (3/3)

	改善策	対応状況
総合評価	作業要領の充実	・3-15定検の全作業要領書の見直し【実施済】
	作業計画段階におけるレビューの強化 (新チームの設置)	・新チームを設置し、作業要領および作業実施時期のレビュープロセスを構築し、試行・検証を行い、令和2年9月から「プロセス管理課」を設置し、本格運用を開始 【実施済・継続実施】
	包括的な改善活動の推進 ・作業振り返り等による改善抽出 ・CAP※1のインプット充実等	<ul style="list-style-type: none"> ・作業後に振り返りを実施するよう標準発注仕様書を改正【実施済】 ・下記事項などを、EAM※2に登録し、CAPによる改善活動を実施【継続実施】 <p>作業計画段階のレビュー結果、作業要領書の気付き事項、メーカーからの各種情報 当社幹部との意見交換会での要望事項、他部門や外部機関によるレビュー結果</p> <p>※1 CAP : Corrective Action Program (是正処置プログラム) ※2 EAM : Enterprise Asset Management (統合型保守管理システム)</p>
	安全意識の共有 ・当社幹部等との意見交換の充実	・当社幹部等と所員の意見交換を実施【継続実施】
	技術力・現場力の維持向上 ・教育訓練機会の増加 ・ベテラン社員・作業員からの技術継承	<ul style="list-style-type: none"> ・関係会社・協力会社と協議し、教育・訓練計画を検討【完了】 ・ベテラン社員・作業員からの技術継承を継続【継続実施】
	従来進めてきた保安活動の一層の推進	・適切な組織・体制の維持、リスク情報活用の推進、保守管理プロセスの着実な運用、職場環境の改善活動、外部組織によるレビューなどの従来の活動を継続的に推進 【継続実施】

総合評価：4件のトラブルに対する個々の原因究明と再発防止対策の策定に加え、これらの背景の分析とそれを踏まえた改善策を取りまとめたもの

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(3) 愛媛県からのご要請への取り組み状況 (1/2)

赤字は、令和3年9月2日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会にて報告した以降の状況を反映した箇所。

要請事項	取り組み状況
<p>①更なる安全性向上に向けた詳細調査の実施 「伊方発電所第3号機 原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスト引き上がり」</p> <p>〔 マグネタイト発生メカニズム、挙動等について継続的に調査・研究し、その結果を学会や専門誌等で発表するとともに、発生量の低減に向けて取り組むこと。 〕</p>	<ul style="list-style-type: none"> マグネタイト発生メカニズム・挙動等についての調査・研究計画を策定、実施。 令和2年度はフェーズ1として、マグネタイト発生メカニズム等の調査を実施し、推定したメカニズムでのマグネタイト発生が確認できた。フェーズ1の調査・研究の成果は、日本保全学会第17回学術講演会(令和3年7月)で発表。 令和3年度はフェーズ2として、マグネタイト発生量低減策の研究を実施し、プラント起動時の水質環境下(200℃、弱酸性、酸化性雰囲気)でマグネタイト発生量が多くなる傾向を確認したため、次の定期検査においてマグネタイト発生量低減策を実施する予定。フェーズ2での調査・研究の成果は、日本保全学会第18回学術講演会(令和4年7月)で発表。 <p style="text-align: right;">「補足説明資料」参照</p>
<p>②恒常的な対策による安全性の確保 「伊方発電所における所内電源の一時的喪失」</p> <p>〔 再発防止策である部分放電診断と内部異物診断による状態監視の徹底と並行して、メーカーとも協議しながら、改造や新設備導入等による恒常的な対策による更なる安全性確保に取り組むこと。 〕</p>	<ul style="list-style-type: none"> 恒常的な対策が完了するまで、部分放電診断(常時計測)と内部異物診断による状態監視(1カ月に1回計測)を継続実施中。 恒常的な対策を検討し、一部断路器の撤去または改造を行うこととした。 現地工事は、3-15定期検査で一部実施し、次回3-16定期検査で本格的な工事を実施する予定。(令和5年に完了見込み。)
<p>③安全文化の醸成</p>	<ul style="list-style-type: none"> 日々の安全文化醸成活動を継続的に実施。(継続実施) 各自が自ら考える力を育成するため、安全文化の10の特性のうち自身の弱みを自ら抽出し、改善行動に繋げる取り組みを令和3年度から実施している。(継続実施) 原子力安全推進協会(JANSI)や外部講師などを活用し、海外の取り組みなどを含めた安全文化に関する教育を実施している。(継続実施) 当社幹部と発電所員等との間での双方向コミュニケーション形式での定期的な意見交換を継続する。 これらの取り組みについて、情報発信を実施する。(要請事項⑥への取り組み)
<p>④新チームの研鑽</p>	<ul style="list-style-type: none"> 作業要領書や作業計画の妥当性等を独立した立場からレビューする新チームは、試行・検証を実施し、令和2年9月に恒常的組織としてプロセス管理課を新設しレビュー活動の本格運用を開始した。 新チームの活動は日本保全学会第17回学術講演会(令和3年7月)で発表した。 プロセス管理課のレビュー活動は、リスクマネジメントの視点を取り入れるとともに、作業担当部門から独立した立場でレビューし、必要により改善事項を提案する運用としている。今後も運用しながら改善点抽出、改善策検討を継続して実施し、チームの技術力向上を図っていく。 なお、改善活動はCAPを活用して継続的に行っていく。 定期検査時のリスク管理の高度化を進めており、次回定期検査の工程策定作業から実施予定。

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(3) 愛媛県からのご要請への取り組み状況 (2/2)

赤字は、令和3年9月2日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会にて報告した以降の状況を反映した箇所。

要請事項	取り組み状況
<p>⑤技術力の維持・向上</p>	<ul style="list-style-type: none"> ベテラン社員のノウハウ等の技術継承のため、ベテラン社員の視点・知見を作業要領書に落とし込む作業を実施した。 定検作業はベテラン社員と若手社員を組み合わせ実施していく。(継続実施) 他電力やメーカなど海外を含めた外部組織からの情報収集を引き続き行う。(継続実施) 従来から実施しているシビアアクシデント対応等を含めた教育訓練を継続実施するとともに、稀頻度作業の原子力保安研修所での訓練計画を整備した。訓練は令和4年度下期(定期検査前)より実施。 従来通り、安全上重要な作業は当社社員が主体となって実施する。(継続実施)
<p>⑥県民の信頼回復</p>	<ul style="list-style-type: none"> 当社の取り組み状況を説明する動画を制作し、当社HP、地域のCATVなどで情報発信を行っており、引き続き情報発信に取り組む。(継続実施) <ul style="list-style-type: none"> 令和2年度 連続したトラブルの再発防止対策等 令和3年度 過去の保安規定違反に対する取り組み状況等 令和4年度 安全文化醸成活動、技術力の維持向上への取組み等を制作中 毎年実施している訪問対話活動において、伊方発電所に関するリーフレットを配布するとともに、ご意見・質問への対応を行っており、今後も活動を継続していく。(継続実施) <ul style="list-style-type: none"> 令和2年度、3年度はコロナウイルス感染拡大時期であったため、リーフレットを各家庭に配布し、はがき、電話、メール等で寄せられた意見・質問への対応を実施した。 <ul style="list-style-type: none"> 令和2年度 連続したトラブルの再発防止対策、使用済燃料乾式貯蔵施設の設置等 令和3年度 過去の保安規定違反に対する取り組み状況、連続したトラブルの再発防止対策、使用済燃料乾式貯蔵施設の設置等 令和4年度の活動方法は検討中。 日々の安全文化醸成活動を継続的に実施し、発電所員の安全意識向上に取り組む。(要請事項③で取り組む)
<p>⑦安全性の不断の追求について</p>	<ul style="list-style-type: none"> 継続的に最新知見等の収集を実施し、安全対策向上の検討に反映していく。 従来から実施している国内外の最新知見等の収集、評価、安全対策の検討を継続的に実施。 最新知見等の評価・安全対策検討の結果は安全性向上評価届出書※にまとめる。 <p>※原子力の有するリスクを認識し、新しい知見の把握に努め、必要な安全対策に積極的に取り組むことにより、伊方発電所の更なる安全性向上を図ることを目的に実施する評価で、定期事業者検査終了から6カ月以内に評価を実施し、原子力規制委員会へ届出することとなっている。また、安全性向上評価届出書は当社HPで公開している。(令和元年5月24日に初回の届出、令和4年7月22日に第2回の届出を実施)</p> <p>[https://www.yonden.co.jp/energy/atom/safety/safety_improvement/index.html]</p>

(参考) 令和2年の連続トラブルに係る愛媛県からのご要請事項

①更なる安全性向上に向けた詳細調査の実施について

「事象2 伊方発電所第3号機 原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり」については、他のプラントも含め過去に事例のない事象であることから、不完全結合の防止に留まることなく、PWR（加圧水型原子炉）の安全性向上という大局的かつ長期的な視点に立って、根本原因であるスラッジ（マグネタイト）発生メカニズム、挙動等について継続的に調査・研究し、その結果を学会や専門誌等で発表するとともに、発生量の低減に向けて取り組むこと。

②恒常的な対策による安全性の確保について

「事象4 伊方発電所における所内電源の一時的喪失」については、断路器の構造上、ごく稀に嵌合部に隙間が生じるために放電が発生したことが原因と推定されており、短絡の兆候が見られている同型断路器も確認されていることから、再発防止策である部分放電診断と内部異物診断による状態監視の徹底と並行して、メーカーとも協議しながら、改造や新設備導入等による恒常的な対策による更なる安全性確保に取り組むこと。

③安全文化の醸成について

安全文化の醸成は、一朝一夕に確立できるものではなく、継続的な取り組みが必要不可欠であるため、形式的な方法に陥ることなく、海外の取り組みも含め広く情報収集を行うとともに、双方向のコミュニケーションの重要性を意識して、効果的な取組方法を不断に見直すこと。

また、社員教育においては、教育する側も含めて参加者全員が様々な角度から議論できる体制を整備し、「問いかける姿勢」の定着のみならず、「問いかける能力」についても向上に向けて継続的に取り組むとともに、取組状況を積極的に発信すること。

④新チームの研鑽について

作業要領書や作業計画の妥当性等を独立した立場からレビューする新チームの設置は、非常に前向きで画期的な取組であるが、この新チームが十分機能し、トラブルの未然防止が図られるか否かは、今後の運用・活用方法次第であるため、新チームの活動自体にもCAP制度やリスク評価を活用するなど研鑽を重ね、伊方発電所の安全性向上を担う中核組織として育てること。

⑤技術力の維持・向上について

3号機一基体制となったことによる現場作業経験の減少やベテラン社員・作業員の定年退職等を踏まえ、これまで蓄積されたノウハウの維持が難しくなる懸念があるため、教育訓練の充実・強化に努めるだけでなく、他電力やメーカーなど海外を含めた外部組織からの情報収集を積極的に行うことにより、技術力の維持・向上に努めること。また、教育訓練については、これまでの内容に加え、外的事象やテロを含めたシビアアクシデントの防止や発生時の対応等の広範な知識の習得が強く求められているため、優先度も考慮しながら、合理的な訓練プログラムとしていくこと。

その上で安全上重要な作業については、四国電力社員が主体となって実施するとともに、社員一人ひとりが、電力事業者としての責任を持って取り組むこと。

⑥県民の信頼回復について

社長自らリーダーシップを強く発揮し、再発防止策及び上記追加要請事項の徹底による安全確保を図っていくとともに、その旨を県民に丁寧に説明すること。また、関係会社も含めた社員全員の安全意識の向上に不退職の覚悟で継続的に取り組み、県民の信頼回復に努めること。

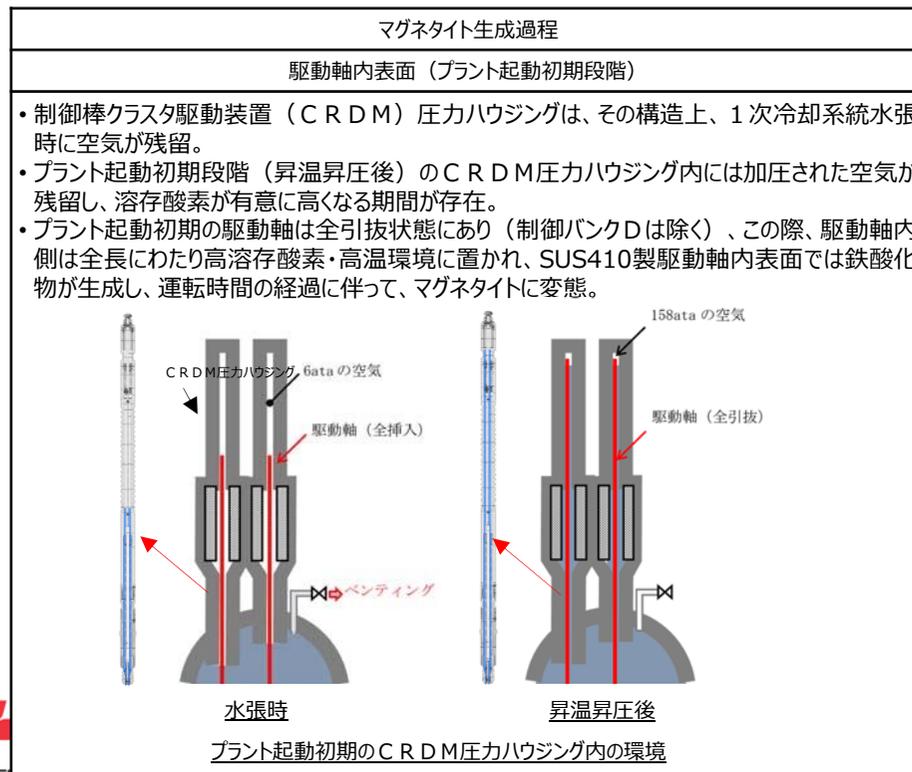
⑦安全性の不断の追求について

これまでも、国の求める安全基準は最低条件という認識で、その基準を上回るアディショナルな対策を要請してきたが、今回の連続トラブルを真摯に受け止め、また、この機会を捉え、再度、「安全対策に終わりはない」との強い信念の下、最新の知見等に基づく安全性を不断に追求し、自ら積極的に安全対策を講じること。

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(4) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (1/4)

- 伊方発電所3号機の原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり事象では、制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物が本事象に影響することを報告しました。
- この報告の中で、堆積物は、E P M Aによる元素組成分析およびX線回折による結晶構造分析の結果、ほぼマグネタイトであることを確認しました。また、マグネタイト生成過程については、プラント起動初期段階の高溶存酸素環境において駆動軸内表面で生成した鉄酸化物が、運転時間の経過に伴いマグネタイトに変態したものと推定しました。
- 上記の事実とそれに基づく推定メカニズムを実証するとともに、マグネタイト生成量の低減策等につなげるため、マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査を実施しました。
- 調査は、駆動軸の材料であるSUS410（実機と同様の熱処理条件、化学成分としたもの）を使用し、また、試験の妥当性を確認するために、比較対象として腐食試験データが豊富なSUS316（1次冷却材系統にも使用）も使用しました。



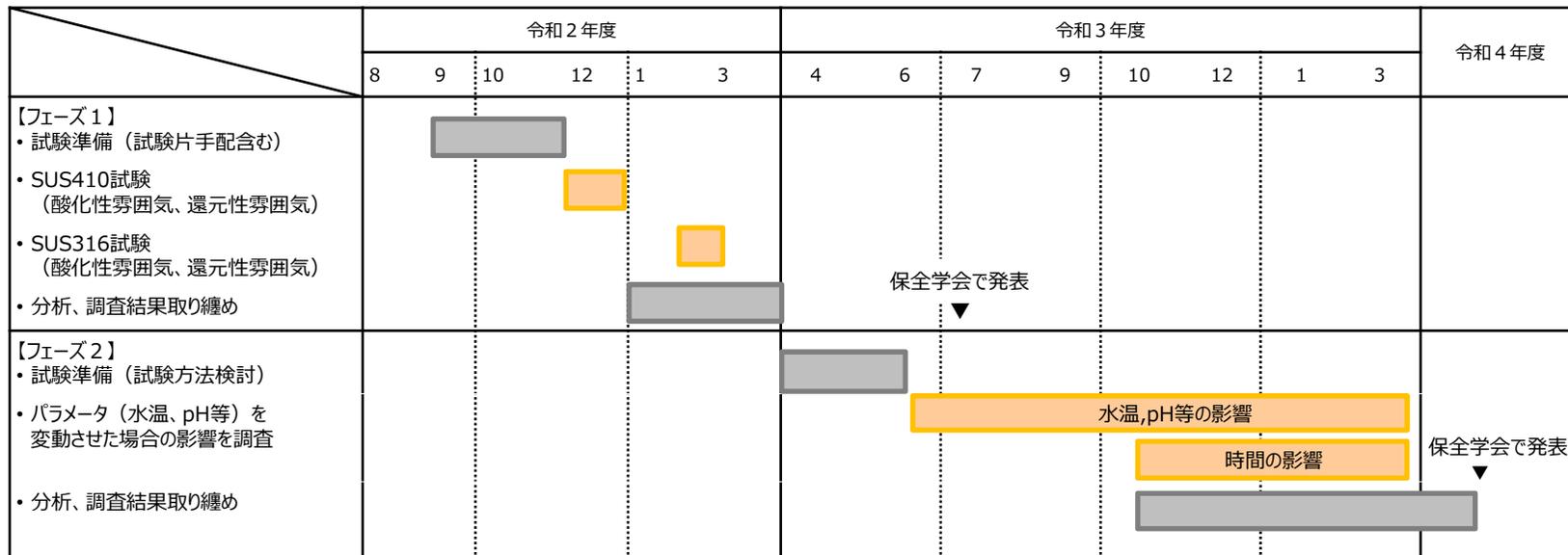
- 1次冷却材系統で確認される金属クラッドは、主な成分は鉄、ニッケルであり、クロムも10%程度含まれている。
（確認された堆積物はほぼマグネタイト）
- 駆動軸の材料には、オーステナイト系ステンレス鋼に比べれば耐食性は劣るが、硬さと強度に優れたマルテンサイト系ステンレス鋼（SUS410）が使用されている。
- プラント起動初期、駆動軸内は高溶存酸素・高温環境の期間があると考えられる。

2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(4) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (2/4)

【調査の概要】

- 3号機の原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり事象で確認されたマグネタイトについて、
 - ・PWR 1次冷却系環境下におけるSUS410の腐食挙動とマグネタイト生成メカニズムの確認
 - ・マグネタイト生成量の有効な低減策の検討
 を目的に調査を実施。
- 調査は四国総合研究所で実施することとし、フェーズ1, 2の2段階で実施。
- 令和2年度に、フェーズ1として、本事象のマグネタイト生成過程（プラント起動初期に駆動軸内表面で生成）を試験で確認し、スパイダ頭部内の堆積物は駆動軸に由来するものであることを確認。この結果は、日本保全学会第17回学術講演会（令和3年7月6日～8日）で発表。（令和3年8月5日原子力安全専門部会で報告）
- 令和3年度は、フェーズ2として、フェーズ1の調査結果を踏まえたうえで、SUS410の腐食に与える水質パラメータを変化させた場合の腐食速度等に関する試験を実施し、結果は日本保全学会第18回学術講演会（令和4年7月13日～15日）で発表。



2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(4) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (3/4)

【フェーズ2 調査の概要】

- 既存の研究データが少ないSUS410を中心に、プラント運転期間において想定される環境条件も考慮し、以下のパラメータを変動させた試験を実施。

影響因子	概要
①水温	プラント起動時（水質調整前後）の1次冷却水環境において、SUS410の腐食量に与える水温の影響を把握するため、実機駆動軸内で想定される水温下(150～300℃)で腐食試験を実施。
②pH	SUS410の腐食量に与えるpHの影響を把握するため、プラント起動時（弱酸性）～プラント運転末期（弱アルカリ性）で想定される水質（ほう素濃度とリチウム濃度）での腐食試験を実施。 ※ pHは、ほう素濃度とリチウム濃度の組み合わせによって決まる
③溶存酸素	腐食量、腐食速度、同水温・pHの水質条件下における酸化性および還元性雰囲気下の腐食速度の比較から、SUS410の腐食速度に与える溶存酸素濃度の影響について検討。
④浸漬時間	プラント起動時から運転時に想定される水質環境を模擬した条件での腐食試験を繰り返し実施し、腐食量に与える浸漬時間の影響を評価（～3,000時間程度）

- 上記調査結果を基に、実機プラント運用状況を踏まえて、有効な腐食量低減策を検討。

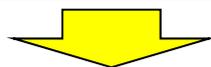
2. 連続発生したトラブルの再発防止対策の実施状況

(4) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (4/4)

【フェーズ2 調査の結果】

- SUS410の腐食量に与える水質（水温、pH等）の影響を把握するための腐食試験の結果は以下のとおり。

影響因子	結果
①水温	プラント起動時を想定した水質環境下におけるSUS410の腐食速度は、実機の駆動軸で想定される温度範囲のうち、中央付近と想定される水温200℃で極大を示した。
②pH	プラント起動時の水質（ほう素濃度とリチウム濃度）においては、水温200℃と想定される駆動軸中央部付近は中性点以下（弱酸性）となり、運転中のように中性点以上（弱アルカリ性）の環境下と比較して腐食速度が速いことを確認した。
③溶存酸素	同水温・pH _T の水質環境下においては、プラント起動時のような溶存酸素濃度が高いと想定される酸化性雰囲気下で腐食速度が高くなる傾向が認められた。
④浸漬時間	腐食速度は、3サイクル経過時点で起動時が2.37mg/dm ² /日（約0.2μm/サイクル）、運転時が0.05mg/dm ² /日（約0.3μm/サイクル）となり、起動時および運転時を踏まえた浸食度は約0.5μm/サイクルと、駆動軸本体の板厚に対して十分小さい。 また、腐食生成物量は、起動時を想定した水質環境下で多い。



- プラント起動時および運転時に生成した酸化皮膜により、駆動軸内表面の腐食速度は大幅に低下しており、今回の試験で得られた浸食度で腐食が継続したとしても、駆動軸本体の板厚に対して十分小さく、駆動軸機能に影響を及ぼすものではないと推察される。
- 駆動軸内表面への腐食は、プラント起動時の水質環境下（200℃、弱酸性、酸化性雰囲気）で生じやすいと推察される。

⇒起動時を対象とした腐食量低減策（運用可能な範囲でのpH上昇）の検討が有効。

⇒次の定期検査後のプラント起動時にマグネタイト発生量低減策を実施する予定。

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況

(1) 経緯

- 令和3年7月（3号機第15回定期検査中）に伊方発電所で過去に当社元社員（現在は退職）が、宿直勤務中に発電所を抜け出し、その間、一時的に伊方発電所原子炉施設保安規定（以下、「保安規定」）に定める必要な要員数※1を満たしていない時間帯があったことが判明しました。本事案は、是正処置プログラムの一環として発電所構内に設けている申告用BOXに匿名による申告を確認したことから、社内のコンプライアンス推進委員会※2により調査を実施したところ、判明したものです。

※1:保安規定に定める必要な要員数

新規規制基準施行後に策定した保安規定（平成28年4月実施）では重大事故等が発生した場合に対応を行う要員数（22名以上）を定め、夜間・休日は発電所構内に必要な要員を宿直させている。

※2:コンプライアンス推進委員会

法令遵守および企業倫理の徹底を図るため、平成14年12月に設置。社長を委員長、総務担当役員を主査とし、経営企画部長や広報部長など部門横断的な立場から判断のできる間接部門の長などで構成。今回の調査は中立的第三者である社外弁護士の助言・指導の下で実施。

- 当社は再発防止対策を策定し、愛媛県・伊方町にご報告するとともに、愛媛県知事・伊方町長からいただいたご要請に取り組むことを条件に3号機の運転を再開いたしました。
- 当社が策定した再発防止対策は完了しており、愛媛県知事・伊方町長からいただいたご要請に対しても、しっかりと受け止め、伊方発電所の更なる安全性向上に取り組むとともに、地域の皆様からの信頼回復に努めているところです。
- これまでの主な経緯は以下のとおり。

令和3年7月2日 通報連絡（第1報）実施

元社員Aが過去に宿直勤務中に発電所を抜け出し、その間、一時的に保安規定に定める必要な要員数を満たしていない時間帯があったことを確認

7月13日 通報連絡（第2報）実施

元社員A以外は外出実績の有無に係る調査で無断で発電所を抜け出した事案がなかったことを確認

9月8日 原子力規制委員会にて本事案は保安規定違反と評価（深刻度IV「通知あり」、再発防止策を継続確認）

9月10日 愛媛県および伊方町へ原因と対策の報告書を提出

10月25日 環境安全管理委員会で報告書の内容と対策の実施状況を確認

11月19日 愛媛県知事・伊方町長(11月10日)から3号機の運転再開にあたってのご要請をいただく。

(条件付きでの3号機の運転再開をご了解をいただく。)

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況

(2) 事案の概要等

- 伊方発電所において、発電所関係者からの匿名による申告（令和2年6月24日確認）があり、その内容は「元社員A（現在は退職）が宿直勤務中に発電所を抜け出し業務を放棄していたが、保安規定不適合事案としては是正および公表されないのはなぜか」とするものであった。

〔元社員Aは、社内の担当部門（原子力部門以外）の調査で、約3年間に亘って会社経費で携行缶に給油したガソリンを私有車に給油していたことが判明したことから、令和2年5月に社内処分（懲戒休職6か月）を受けており、同年11月に復職した後、令和3年1月31日に自己都合により退職している。〕

- 本申告を受けて、**コンプライアンス推進委員会において調査を実施した結果、元社員Aが宿直当番の日に社有車を使用して5回**（うち4回は運転日誌に偽名を使用）**発電所外に出ていたことが確認**され、5回の外出時間帯は、伊方発電所の**保安規定**（緊急時対応要員として22名が宿直当番に従事）**を一時的に満たしていない状態であったことが判明**した。

＜元社員Aの宿直当番中の外出に伴う緊急時対応要員の欠員が生じた時間等＞

	日時	宿直時間	外出時間
①	2017年3月20日（月・祝）	8:30～翌8:30	9:00～11:00
②	2018年1月20日（土）	8:30～翌8:30	9:00～10:00
③	2018年8月5日（日）	8:30～翌8:30	9:00～9:30
④	2018年9月22日（土）	8:30～翌8:30	9:00～10:00
⑤	2019年2月9日（土）	8:30～翌8:30	9:00～11:00

- また、発電所の出入管理記録、社有車の運転日誌、アンケート等の調査の結果、**元社員A以外には、当番中に不正に発電所外へ出た者は確認されなかった。**
- 調査の結果、本事案の原因は
 - (1) 原子力安全に対する意識やコンプライアンスを徹底するという意識を欠いていた
 - (2) 当番者の管理に十分ではない点があった
 - (3) 当番者の交代に係るルールが一部不明確であったなどが推定されたため、それぞれ再発防止策を策定し、必要な対応を完了しています。

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況 (3) 推定原因と再発防止策 (1/3)

(1)コンプライアンスを徹底させるための措置

赤字は、令和3年10月25日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会にて報告した以降の状況を反映した箇所。

推定原因	再発防止策
<p>・本事案の発生に至った原因として、元社員 A が原子力安全に対する意識やコンプライアンスを徹底するという意識を欠いていたことがあげられる。</p> <p>・発電所員へのアンケートにおいて、元社員 A が宿直勤務中に発電所外へ出ているとの噂を聞いたことがある者が存在していたが、<u>噂の事実確認に向けて上長へ報告する等の能動的な対応が取られていなかった。</u></p>	<p>a. 経営層による訓話、督励【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伊方発電所従業員の原子力安全に対する意識のより一層の向上とコンプライアンスの徹底を図る。 ・令和3年度は41回、今年度は7月末時点で11回実施。
	<p>b. 保安規定等の遵守、企業倫理の徹底についての特別教育【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伊方発電所で勤務する当社所員全員および当社より業務を委託している関係会社従業員全員に対し、緊急時対応要員としての当番業務は重大事故等に備えた重要な責務であることを再認識させるとともに、保安規定・法令の遵守、企業倫理の徹底についての教育を実施。
	<p>c. コンプライアンス教育【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・業務を遂行する上で、コンプライアンスの判断に疑義があれば、上長等に相談することなど、発電所員全員に対して教育を実施。特別管理者に対しては、コンプライアンスに対する考え方・心構えなどに関する教育を実施。
	<p>d. 職場内での議論の実施【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電所各課単位で実施する職場研究会等の場において、本事案を題材として議論し、同様な事案の再発防止等について理解を深める。 ・また、職場研究会の他、課内でのミーティングの場等も活用し、身近な問題、疑問についても自由に議論し、より良い職場へと改善を図る活動を推進する。 ・令和3年度の職場研究会は、本事案を題材として議論し、「日頃からのコミュニケーションや管理者によるリーダーシップの重要性を再認識した。」などの意見があった。 ・その他、食事面や宿直室へのWiFiの設置など宿直環境改善の要望があったことから、順次対応を進め、宿直室へのWiFi設置を行うなどの対応を実施。 ・令和4年度は、職場研究会の実施に向けてテーマの選定を行っているところ。

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況 (3) 推定原因と再発防止策 (2/3)

(2)保安規定不適合事案を未然に防止する管理面の強化

赤文字は、令和3年10月25日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会にて報告した以降の状況を反映した箇所。

推定原因	再発防止策
<p>・宿直当番者の所在の確認面 宿直の開始（入直）時に点呼を行い要員が揃っていることを確認しているが、その後は宿直勤務中を含め宿直の交代（退直）時まで、点呼等で確認の実施を定めておらず、実施していなかった。</p>	<p>a. スマートフォンによる宿直当番者の所在確認 【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・宿直当番者全員（22名）にGPS機能付きのスマートフォンを携帯させ、適宜、連絡責任者等が宿直当番者の所在を確認する。また、総合事務所より所定の距離以上に離れた場合はアラームを鳴らす設定とした。 <p>b. 宿直当番者の点呼の追加 【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・入直時、退直時の点呼に加え、スマートフォンを利用して抜き打ちで整員状況を確認（点呼）する。これにより、スマートフォンの携帯忘れも防止する。
<p>・発電所退出者の管理面 入構は厳しく管理する一方で、出構は、特別な管理はしておらず、当番者が不正に発電所外へ出ていないことの確認はしていなかった。</p>	<p>c. 発電所退出者管理の強化 【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・出入管理システムの入出構者データで宿直当番者、平日当番者が勤務時間中に発電所外へ出ていないかどうかを確認する。 ・当番中に発電所外へ出る行為に対して抑止力となるよう、上記の対応について所内に周知。
<p>・社有車の管理面 社有車の鍵は、急な使用すること等を考慮し、比較的容易に持ち出せる状態の部署があったこと、使用者本人の確認、車両運転日誌の記載等について、管理が十分にはできていなかった。</p>	<p>d. 社有車の管理の強化 【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・社有車の鍵は施錠可能な収納ボックス等に入れて保管管理する。 ・社有車の運行管理者は、社有車の使用目的、行先を確認するとともに、所外へ出る場合は、同乗者を含めて平日当番中および宿直勤務中でないことを確認のうえ使用を許可する。 ・社有車返却後は、その都度、運行管理者が車両運転日誌を確認し、記載内容が適正であるかを確認する。 ・上記の対策を関係会社でも実施。

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況

(3) 推定原因と再発防止策 (3/3)

(3) 重大事故等対応をより一層確実に実施するため、当番者の交代に係るルールを明確化

赤字は、令和3年10月25日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会にて報告した以降の状況を反映した箇所。

推定原因	再発防止策
<ul style="list-style-type: none"> 計画的な当番者の交代は、予定表へ反映を実施しているが、<u>宿直勤務中に交代や、平日当番者が短時間交代する場合の手順は社内規程で明確にしておらず、交代実績が確実に記録、関係者が確認できる運用になっていなかった。</u> 万が一の重大事故等対応時に<u>要員を補充する手順について、社内規程が不明確</u> 	<p>a. 当番者の交代替理等の強化【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> 宿直勤務中の交代する場合や、平日当番者が短時間交代する場合においても、交代を記録する運用とし、当日の当番者（22名）を電子掲示板に掲載し必要時に関係者が確認できるようにした。 平日当番体制をより厳格に運用する観点から、<u>当社所員の平日当番者は、平日の通常勤務中に発電所外へ出る必要のある業務を実施しない者が主に担当する運用とした。</u> 万が一の重大事故等対応時に要員を補充する手順を社内規程に明確化し、関係者に周知。
	<p>b. 腕章による平日当番者の意識付け【継続実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> 平日当番者全員（22名）に通常勤務中に<u>当番者であることを示す腕章を付けさせ意識付けをするとともに、第三者によるチェック機能も働くようにする。</u>また、当番中に発電所外へ出る必要が生じた場合は、<u>代行者への引継ぎ時に腕章を渡す運用とした。</u>

(4) その他

伊方発電所員の懲戒事案については、事案の内容を担当部署から原子力部門に連絡し、原子力部門において、原子力安全上の問題がないか確認する。

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況

(4) 愛媛県からのご要請への取り組み状況

要請事項	取り組み状況
<p>1 原子力事業者としての責任について</p> <p>福島第一原子力発電所事故の教訓を決して忘れることなく、安全最優先の取組を行うとともに、二度と要員の無断外出のような事案を発生させないよう、経営トップから協力会社社員一人一人に至るまで、原子力事業者としての責任や使命を自覚するよう改めて徹底すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 当社幹部と発電所員等との意見交換や、幹部からの訓話・督励等の機会をとらえ、原子力事業者としての責任や使命を自覚するよう伝えている。(継続実施) • 保安規定の遵守や企業倫理の徹底、コンプライアンス教育を年1回実施。(継続実施) • 職場単位で身近な問題、疑問について、自由に議論し、より良い職場へと改善を図る活動(職場研究会など)を年1回実施。(継続実施) • 福島第一原子力発電所事故を風化させない取り組みとして、今年度は外部講師を招き、福島第一原子力発電所事故の教訓を題材とした講演を実施する予定。
<p>2 安全性の向上と県民の信頼回復について</p> <p>再発防止策の確実な実施はもとより、これまで以上に安全性向上に努め、技術力の維持・向上や安全文化の醸成に取り組むこと。</p> <p>また、再発防止策や安全文化の醸成活動の実施状況について、県民に対してより一層丁寧に説明し、県民の信頼の回復に努めること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 連続発生したトラブルの反映でも実施している「③安全文化の醸成活動」、「⑤技術力の維持・向上」、「⑥県民への信頼回復」の取り組みにて実施。(継続実施)
<p>3 「えひめ方式」の徹底について</p> <p>かねてより要請している「えひめ方式」の通報連絡体制の徹底について、「えひめ方式」が信頼関係の根幹であることを再認識し、遺漏なく実施すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 伊方発電所の運営には、地域の皆様のご理解のうえに成り立っていることを再認識のうえ、地元との信頼関係の礎である「えひめ方式」による情報公開の徹底に努めている。(継続実施)

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況

(5) 再発防止策に対する評価等 (1/2)

(1) 再発防止策の評価

- 再発防止策である当番者の待機状態の管理強化や発電所の入退出者の管理強化、当番者の交代管理強化、腕章着用等については、これまで着実に運用できており、本事案と同様の問題は発生していないことから、再発防止策が機能していると評価する。

(2) 安全文化醸成活動に関する評価

- 安全文化醸成活動を評価するため、原子力部門の組織（伊方発電所、本店、原子力保安研修所、原子力本部）を対象に、意識調査（アンケート）などを実施した。
- 意識調査結果の評価にあたっては、組織をより良くするために必要な要素（安全文化の10特性）に基づき、各要素毎の傾向を確認し、評価を行った。
- 令和3年度の伊方発電所の評価結果は、
 - いずれの要素も5段階評定（1～5点）で、平均約4点と高い水準を維持できていた。
 - また、原子力発電所を運営する他社と比べても、同等以上の得点であった。
 - 「リーダーの責任」や「問いかける姿勢」については、日常的に強く意識している傾向がみられた。一方で、「継続的な学習」のうち、自ら積極的に学習し、改善していく意識に関しては、改善する余地がみられた。
- この結果も踏まえて、継続的な改善に取り組む。

安全文化の10特性
PA（個人の責任）
QA（問いかける姿勢）
CO（安全に対するコミュニケーション）
LA（リーダーの責任）
DM（意思決定）
WE（尊重しあう職場環境）
CL（継続的な学習）
PI（問題の把握と解決）
RC（問題を提起できる環境）
WP（作業プロセス）

3. 過去の保安規定違反の再発防止対策の実施状況 (5) 再発防止策に対する評価等 (2/2)

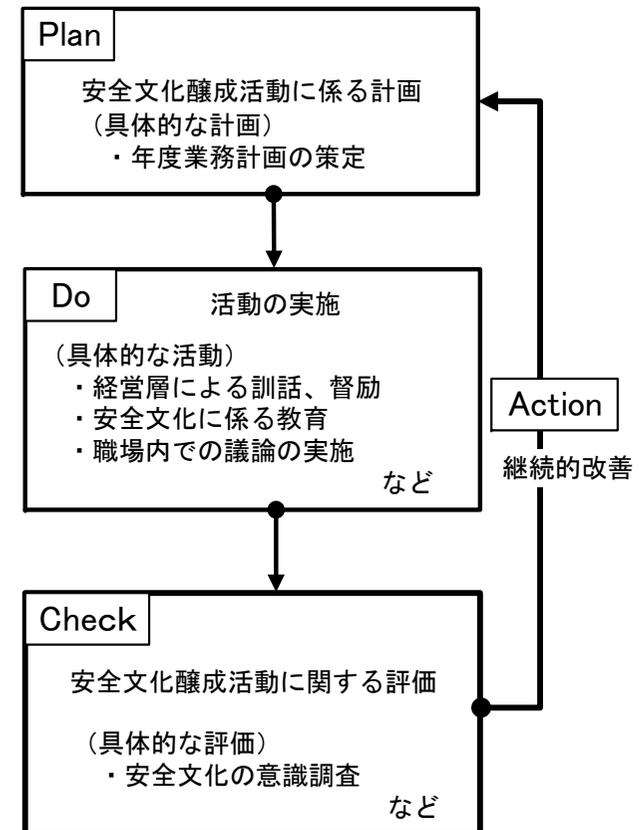
(3)安全文化醸成活動に係る計画

- 今年度は、再発防止策として実施している
 - ・経営層による訓話、督励
 - ・安全文化に係る教育
 - ・職場内での議論の実施 など

に加え、福島事故を風化させない取り組みとして、社外から講師を招き、「福島第一原子力発電所事故の教訓」を題材とした講演を実施する予定である。

- また、他の電力各社の安全文化醸成に関する良好事例などを調査し、より効果的な取り組み方法を検討していく。
- 引き続き、安全文化醸成活動を通じて、伊方発電所の安全文化の継続的な改善に取り組む。

安全文化醸成活動について

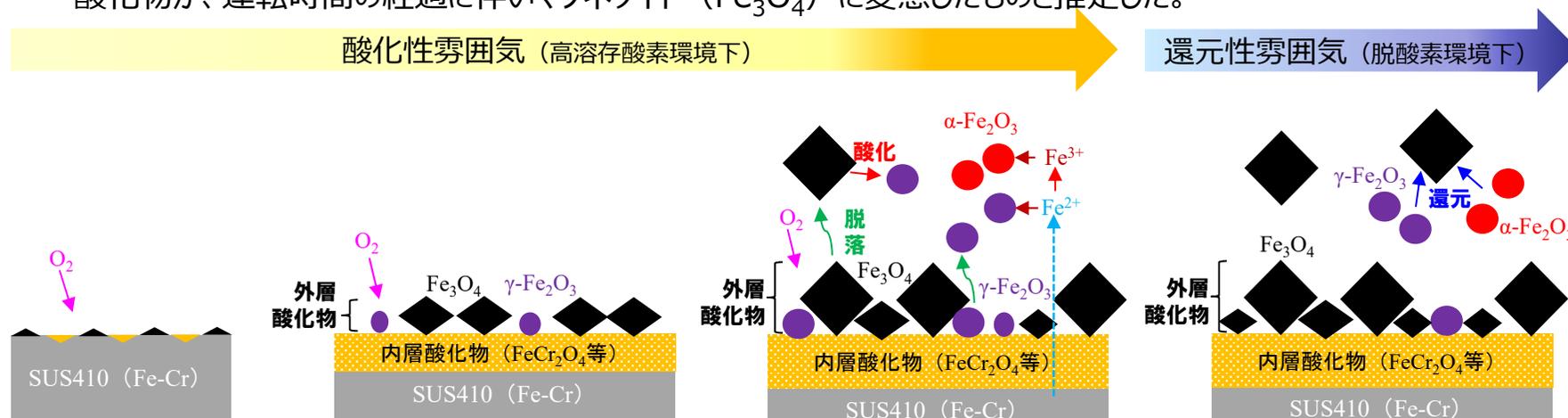


[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査（1/14）

1. フェーズ1 結果概要 / フェーズ2 調査の目的

- 伊方発電所3号機の原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり事象では、制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物が本事象に影響することを報告した。
- この堆積物は、電子線マイクロアナライザ（EPMA）による元素組成分析およびX線回折分析装置による結晶構造分析の結果、ほぼマグネタイト（ Fe_3O_4 ）であることを確認した。
- マグネタイト生成過程については、プラント起動初期段階の高溶存酸素環境において駆動軸内表面で生成した鉄酸化物が、運転時間の経過に伴いマグネタイト（ Fe_3O_4 ）に変態したものと推定した。



プラント起動時における制御棒駆動軸表面での腐食生成物の生成過程（推定）

- プラント運転期間において想定される制御棒駆動軸の環境条件を考慮し、SUS410の腐食に与える水質パラメータ（水温、pH、浸漬時間等）の影響について調査を行った。
- 上記調査結果をもとに、実機プラントの運用状況を踏まえて、有効な腐食量低減策を検討した。

[補足説明資料]

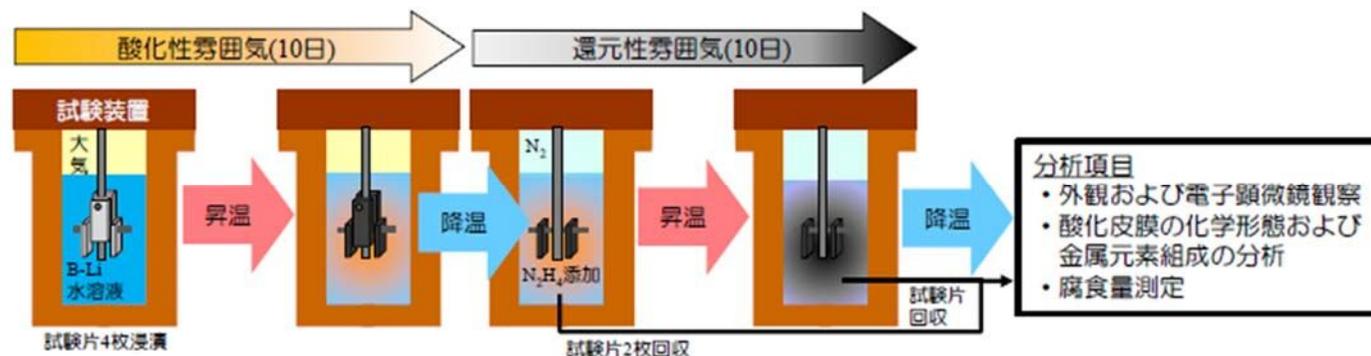
マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (2/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (1)水温の影響

- ▶ プラント起動時（水質調整前後）の1次冷却水環境において、SUS410の腐食量に与える水温の影響を把握するため、実機駆動軸内で想定される水温下(150～300℃)での腐食試験を実施。

プラント起動時の1次冷却材水環境を模擬した試験条件（水温影響）

試験雰囲気		酸化性雰囲気	還元性雰囲気
試験条件	気相	大気ガス	窒素ガス
	液相	ほう酸(4,500ppm as B)／水酸化リチウム(1.0ppm as Li)	
	水温	150℃、200℃、250℃、300℃の4通り	
	圧力	0.5～8.6MPa（飽和水蒸気圧）	
試験日数		10日	10日
試験片材質		SUS410（実機駆動軸と同様の熱処理条件、化学成分のものを使用）	



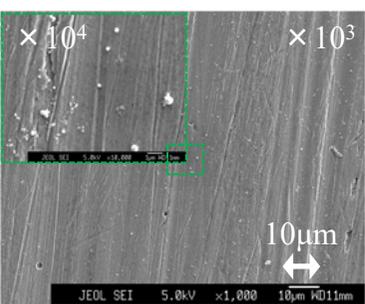
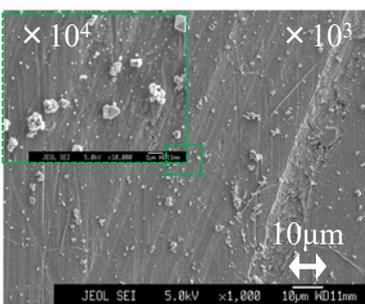
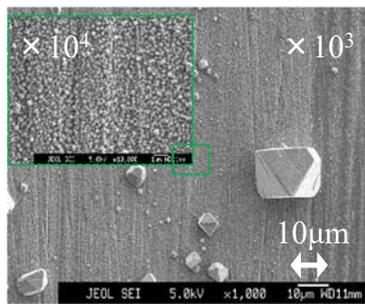
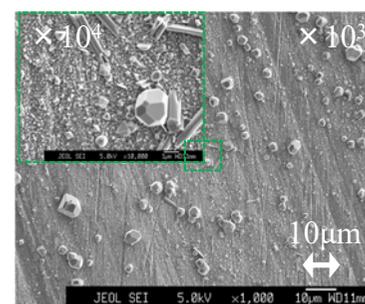
高温腐食試験の概要

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (3/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (1)水温の影響

- 走査型電子顕微鏡(SEM)観察
試験温度の上昇 (~250℃) に伴い、粒子径/密度の増大や粒径1μm以上の八面体を含む多面体粒子の出現を確認。
- ICP発光分光分析装置(以下「ICP-AES」という。)による酸化皮膜の金属元素組成分析
試験温度の上昇 (~250℃) に伴い、酸化皮膜に占めるFeの割合が増加。
- X線回折装置による酸化皮膜の結晶構造分析
200℃、250℃および300℃における主成分はマグネタイト (Fe₃O₄)。また、元素組成から副成分としてクロマイト (FeCr₂O₄) の存在も示唆。

		150℃	200℃	250℃	300℃
SEM像 * 10 ⁴ 倍は 10 ³ 倍の緑 枠内を観察					
	酸化皮膜中の金属元素組成 (mol%)	Cr(61.1) > Fe(38.9) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(72.4) > Cr(27.0) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(82.1) > Cr(17.1) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(82.0) > Cr(17.7) > Ni, Mo(< 1.0)
結晶性化合物	主	有意なピーク検出できず	Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄
	副		FeCr ₂ O ₄ (推定)	FeCr ₂ O ₄ (推定)	FeCr ₂ O ₄ (推定)

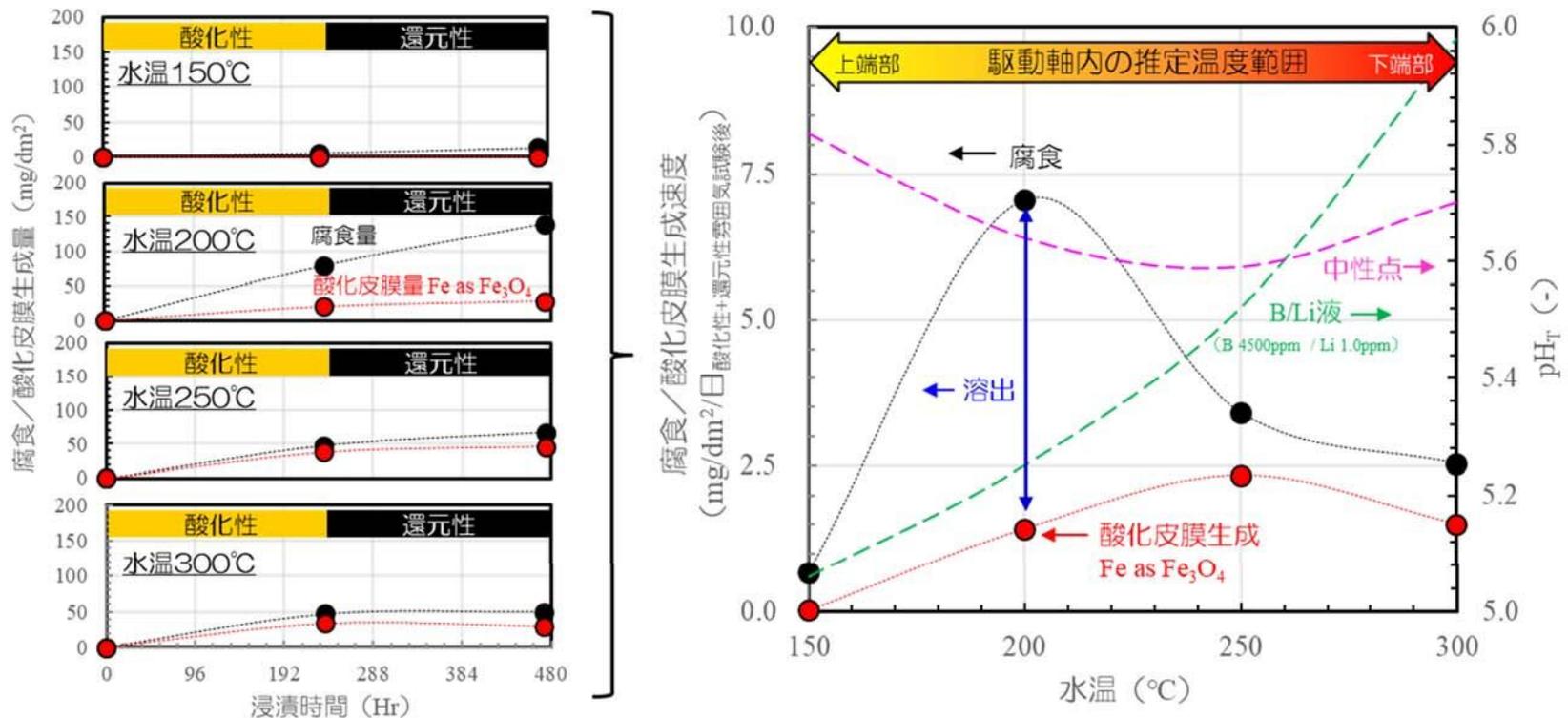
[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (4/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (1)水温の影響

- 腐食量(超音波処理、5%HCl/0.5%インヒター溶液を用いた化学洗浄)、腐食速度
プラント起動時を想定した水質環境下におけるSUS410の腐食速度は、実機駆動軸で想定される温度範囲のうち、中央部付近と想定される水温 200℃ で極大を示した。

一方、酸化皮膜生成速度は水温250℃で極大を示した。



水温と腐食／酸化皮膜生成速度との関係

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (5/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (2)pHの影響

- SUS410の腐食量に与えるpHの影響を把握するため、プラント起動時～プラント運転末期で想定されるB/Li濃度での腐食試験を実施。

プラント起動時～運転中の1次冷却水環境を模擬した試験条件 (pH影響)

試験条件	気相	大気 (酸化性雰囲気) → 窒素ガス (還元性雰囲気)			
	液相	pH _T 5.3 (B 4,500 ppm/Li 1.0 ppm)【起動時】	pH _T 5.6 (B 4,500 ppm/Li 2.5 ppm)	pH _T 6.3 (B 1,400 ppm/Li 2.5 ppm)【運転時初期想定】	pH _T 7.1 (B 100 ppm/Li 1.3 ppm)【運転時末期想定】
	水温	「(1)水温の影響」で最大の腐食量を示した200℃			
	圧力	1.6MPa (飽和水蒸気圧)			
試験日数	酸化性雰囲気10日→還元性雰囲気10日				

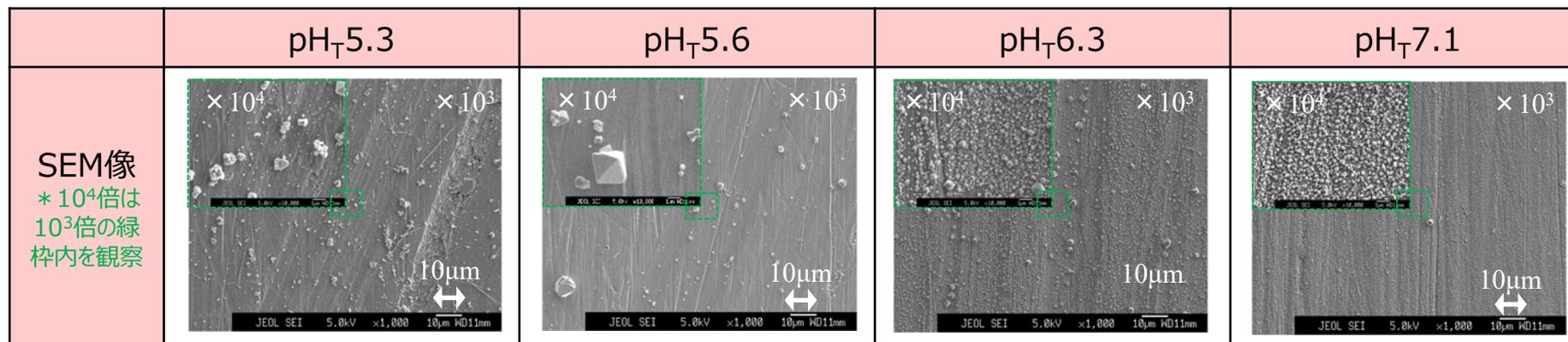
[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (6/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (2)pHの影響

- 走査型電子顕微鏡(SEM)観察

pHの上昇に伴い、粒子密度が増大するとともに、粒径1 μ m以上の八面体を含む多面体粒子が出現。



- ICP-AESによる酸化皮膜の金属元素組成分析 / X線回折装置による酸化皮膜の結晶構造分析

pH_Tに係らず酸化皮膜に含まれる金属元素の主成分はFeおよびCrであり、結晶構造部分析の結果、主成分としてマグネタイト (Fe₃O₄) が検出。また、副成分としてクロマイト (FeCr₂O₄) の存在も示唆。

	pH _T 5.3	pH _T 5.6	pH _T 6.3	pH _T 7.1
酸化皮膜中の 金属元素組成 (mol%)	Fe(72.4) > Cr(27.0) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(70.1) > Cr(29.2) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(87.1) > Cr(12.5) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(84.1) > Cr(15.8) > Ni, Mo(< 1.0)
結晶性化合物	主成分 : Fe ₃ O ₄ 、副成分 : FeCr ₂ O ₄ (推定)			

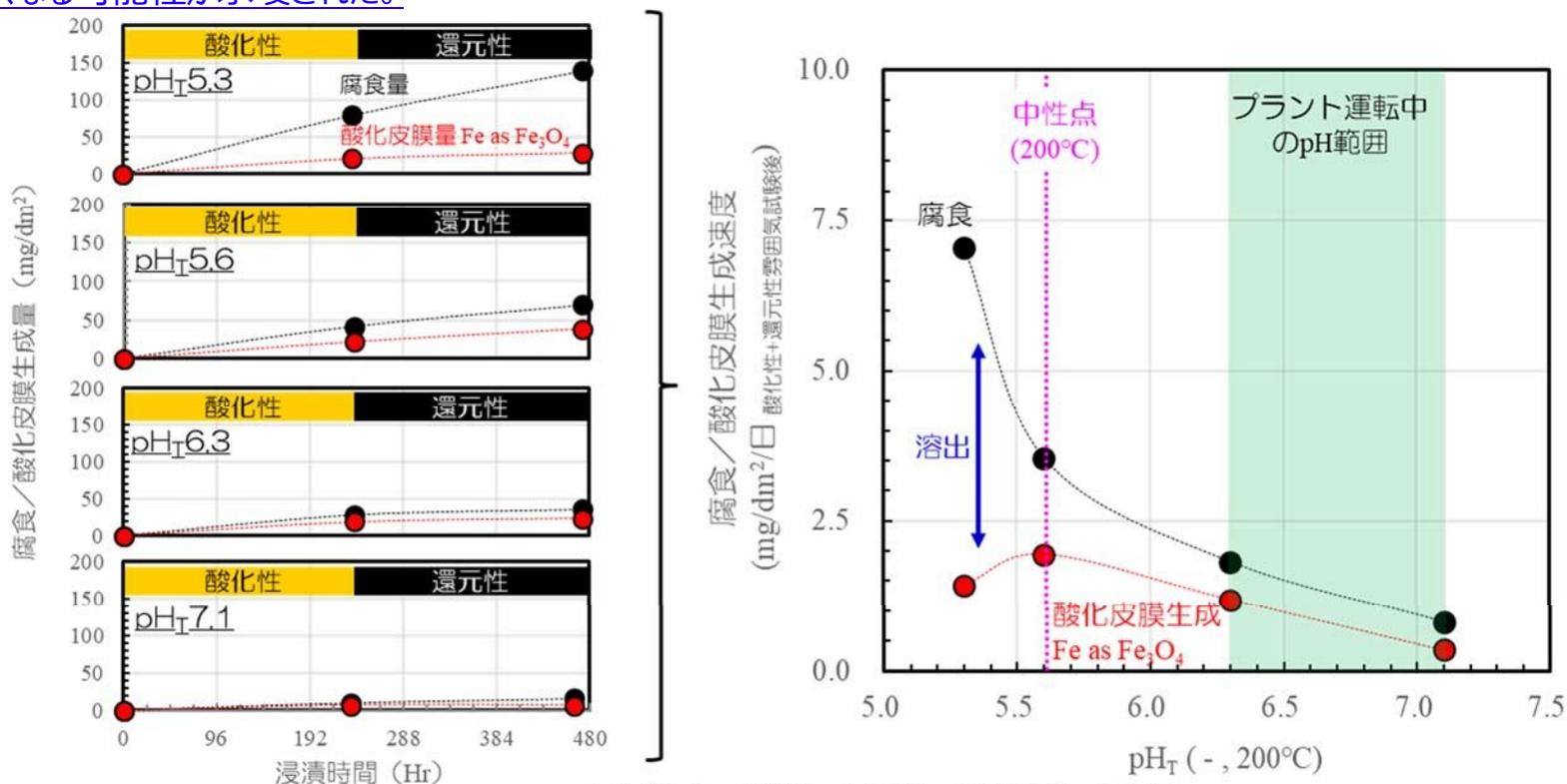
[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (7/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (2)pHの影響

- 腐食量(超音波処理、5%HCl/0.5%インヒター溶液を用いた化学洗浄)、腐食速度
pH_Tの上昇に伴い、腐食量および腐食速度の低下を確認。一方、酸化皮膜生成速度は、pH_T 5.6で極大を示した。

プラント起動から出力運転開始までの期間については、駆動軸内中央部付近の1次冷却水は中性点以下(弱酸性)になると想定され、運転中のようにpH_Tが中性点以上で管理された環境と比較して腐食速度が速くなる可能性が示唆された。



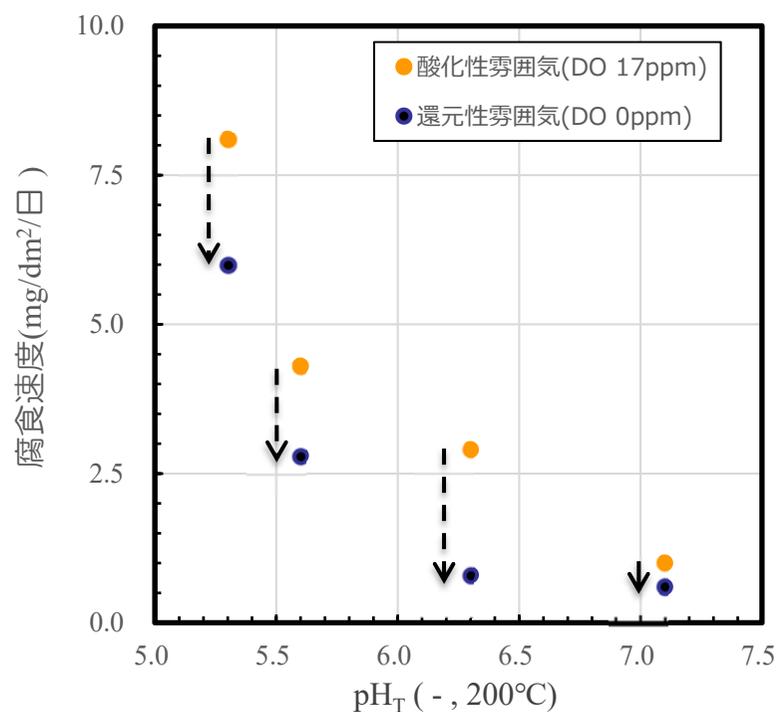
pHと腐食/酸化皮膜生成速度との関係

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (8/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (3)溶存酸素の影響

- 腐食量(超音波処理、5%HCl/0.5%インヒビター溶液を用いた化学洗浄)、腐食速度
同水温・ pH_T の水質条件下における酸化性(飽和溶存酸素【DO】濃度 17ppm: 計算値)および還元性(DO濃度 0ppmと想定)雰囲気下の腐食速度の比較から、SUS410の腐食速度に与えるDO濃度の影響について検討。
→ pH_T (水温200°C) に係らず還元性雰囲気下におけるSUS410の腐食速度は、酸化性雰囲気下と比較して約30~70%低減。



溶存酸素(DO)と腐食速度との関係

[補足説明資料]

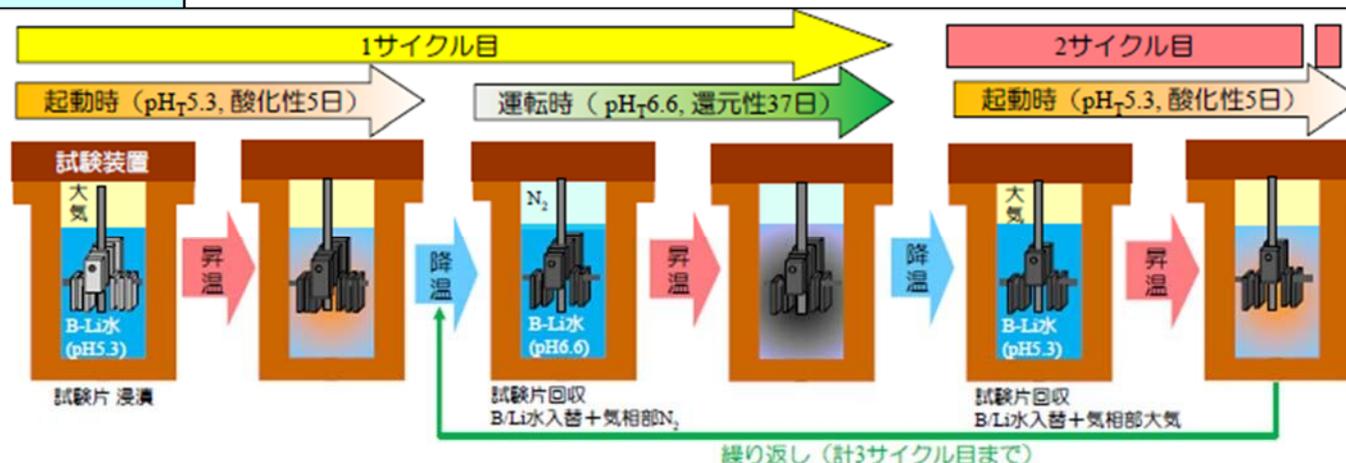
マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (9/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (4)浸漬時間の影響

- ▶ プラント起動時から運転時に想定される水質環境を模擬した条件での腐食試験を繰り返し実施し、腐食量に与える浸漬時間の影響を評価 (5+37日/サイクル×3サイクル=計126日:約3,000時間)。

プラント起動時～運転中の1次冷却水環境を模擬した試験条件 (浸漬時間影響)

試験雰囲気	プラント起動時 (酸化性雰囲気)	プラント運転時 (還元性雰囲気)
試験条件	気相	大気ガス
	液相	pH _T 5.3 (B 4,500 ppm/Li 1.0 ppm)
	水温	「(1)水温の影響」で最大の腐食量を示した200℃
	圧力	1.6MPa (飽和水蒸気圧)
試験日数	5日/サイクル	37日/サイクル
試験片材質	SUS410 (実機駆動軸と同様の熱処理条件、化学成分のものを使用)	



浸漬試験の概要

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査（10/14）

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (4)浸漬時間の影響

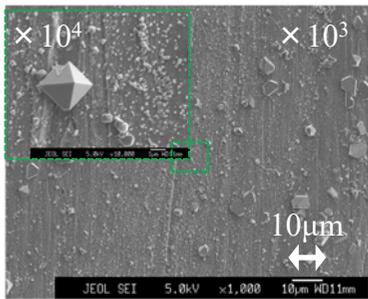
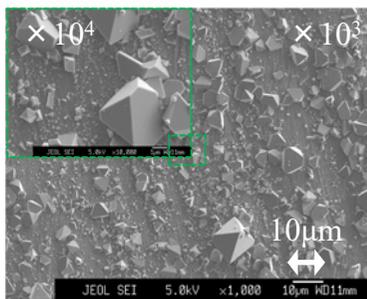
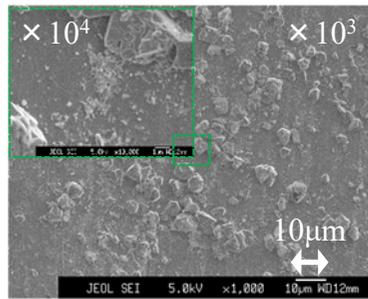
➤ 走査型電子顕微鏡(SEM)観察

浸漬時間の経過に伴い、八面体を含む多面体粒子の出現および粒子径の増大を確認。ただし、2サイクルから3サイクル目にかけての変化は軽微であった。

➤ ICP-AESによる酸化皮膜の金属元素組成分析／X線回折装置による酸化皮膜の結晶構造分析

浸漬時間の経過に伴い、酸化皮膜量の増加を確認したが、2サイクル目運転時以降の酸化皮膜量の増加は軽微であり、安定した酸化皮膜が形成されたものと考えられる。

また、結晶構造分析の結果、1サイクル目の運転時を想定した水環境下での試験以降では、主成分としてマグネタイト (Fe_3O_4) が検出され、副成分としてクロマイト (FeCr_2O_4) の存在も示唆。

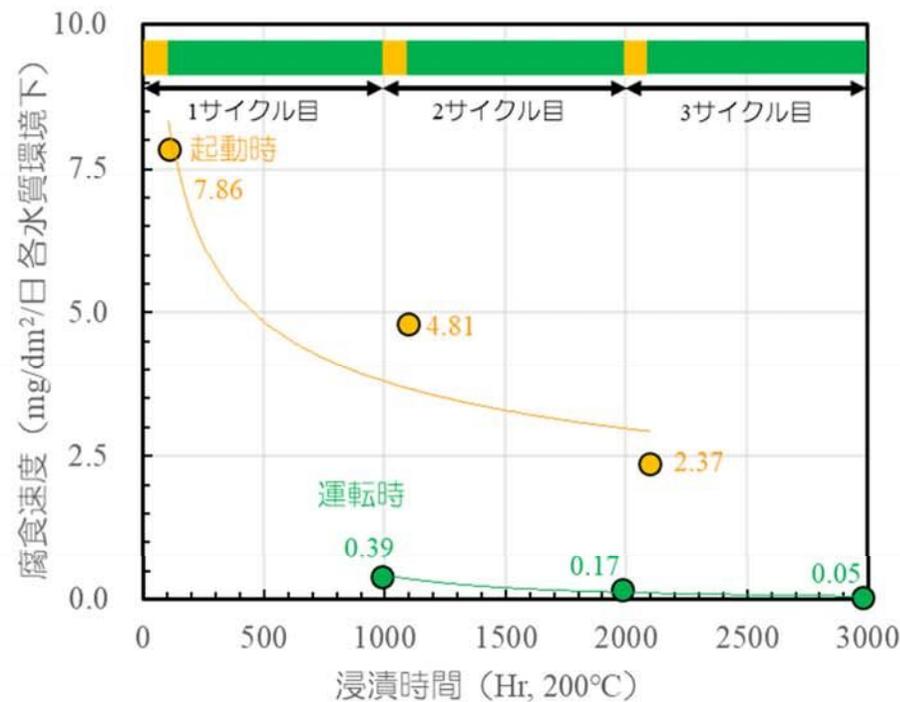
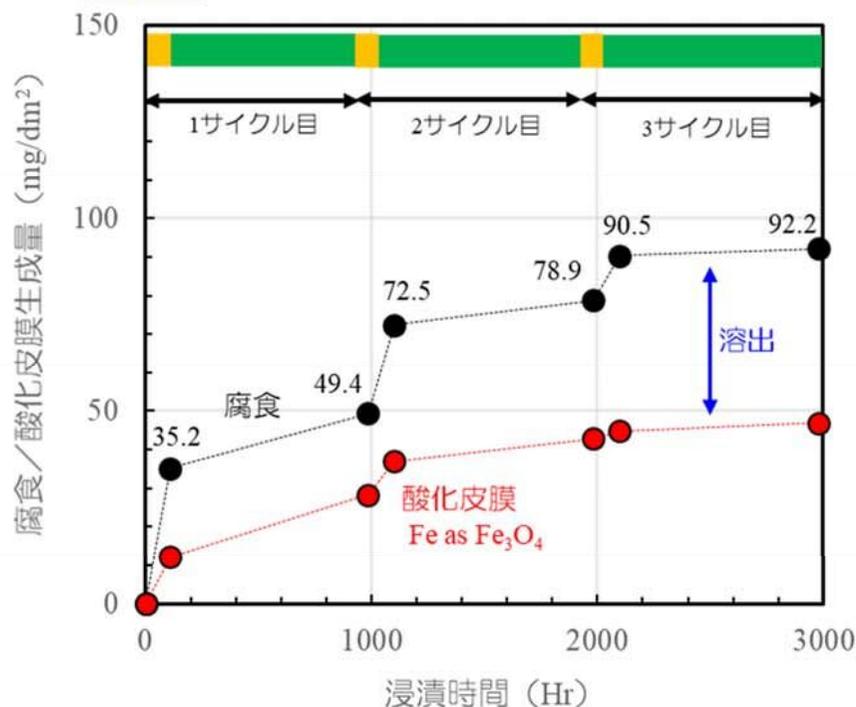
	1サイクル終了時	2サイクル終了時	3サイクル終了時
SEM像 * 10^4 倍は 10^3 倍の緑枠内を観察			
酸化皮膜中の金属元素組成 (mol%)	Fe(76.7) > Cr(23.3) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(75.2) > Cr(24.4) > Ni, Mo(< 1.0)	Fe(72.3) > Cr(26.9) > Ni, Mo(< 1.0)
結晶性化合物	主成分： Fe_3O_4 、副成分： FeCr_2O_4 (推定)		

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (11/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (4)浸漬時間の影響

- 腐食量(超音波処理、5%HCl/0.5%インヒビター溶液を用いた化学洗浄)、腐食速度
浸漬時間の経過に伴い、腐食量の増加を確認。浸漬時間当たりの腐食量は、サイクルによらず、起動時を想定した水質環境下で大きかった。
酸化皮膜量は浸漬時間の経過に伴い増加したが、2サイクル目運転時以降の酸化皮膜量の増加は軽微。
また、腐食速度は3サイクル経過時点で起動時が2.37mg/dm²/日 (約0.2μm/サイクル)、運転時が0.05mg/dm²/日 (約0.3μm/サイクル) となり、起動時および運転時を踏まえた浸食度は約0.5μm/サイクルであった。



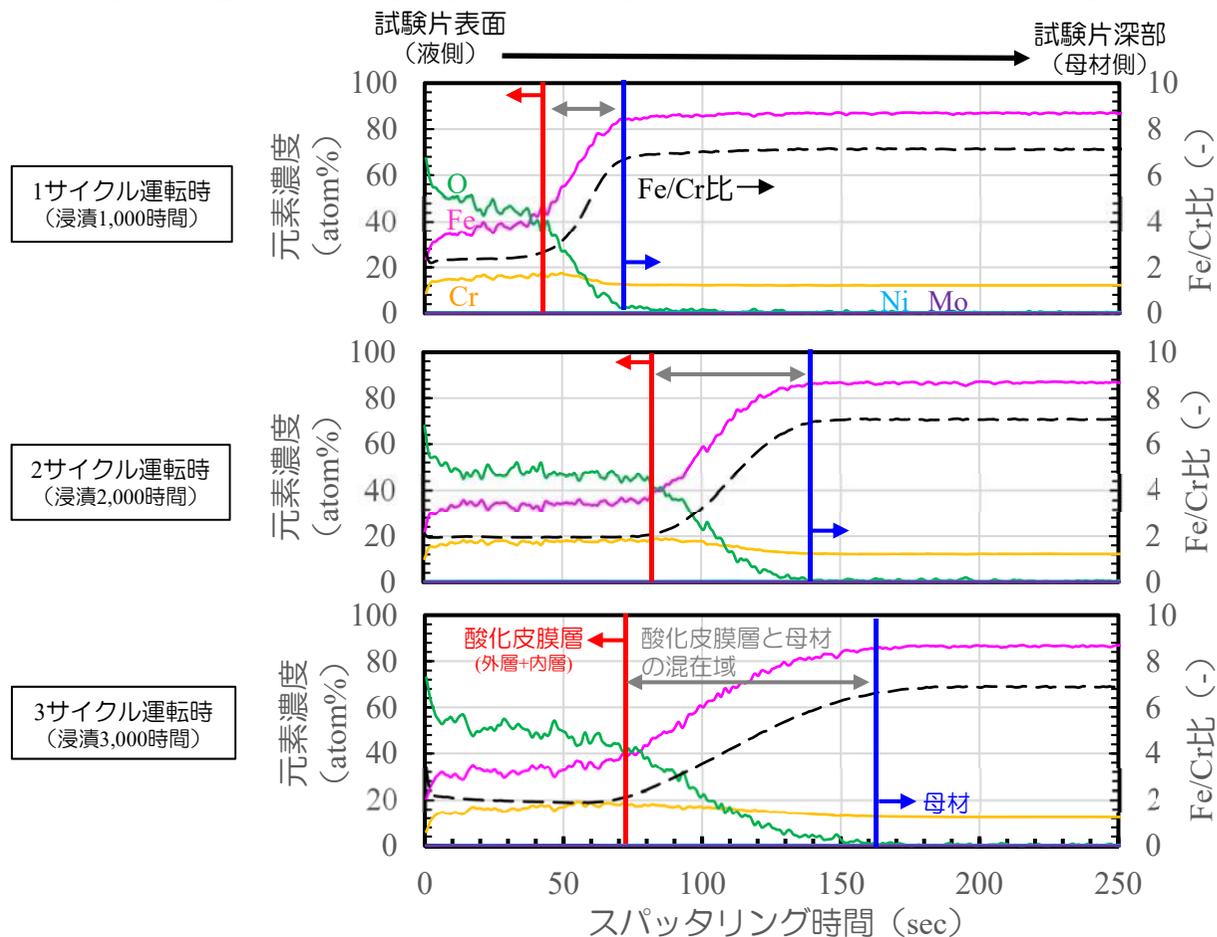
[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (12/14)

2. 高温水環境下におけるSUS410腐食速度試験 (4)浸漬時間の影響

➤ GD-OESによる酸化皮膜の性状 (深さ方向の元素分布等)

SUS410試験片に形成された酸化皮膜の主成分はO, Fe, Crであり、Fe/Cr比から、酸化皮膜領域、酸化皮膜と母材の混在と推察される領域および母材の3領域が確認された。また、2サイクル目運転時までは浸漬時間の経過にともない酸化皮膜層は厚くなる傾向が認められた (SEM観察結果、腐食量測定結果と同様)。



SUS410試験片表面の深さ方向元素分布の測定結果 (GD-OESによりφ4mm範囲を分析)

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査（13/14）

3. まとめ

- SUS410の腐食量に与える水質（水温、pH、時間等）の影響を把握するための腐食試験を行った結果、以下のとおりであった。

影響因子	結果
①水温	本試験装置を用いた場合、プラント起動時を想定した水質環境下におけるSUS410の腐食速度は、実機駆動軸で想定される温度範囲のうち、中央付近と想定される水温200℃で極大を示した。（スライド3/14）
②pH	プラント起動時のB/Li濃度においては、水温200℃と想定される駆動軸中央部付近は中性点以下（弱酸性）となり、運転中のように中性点以上（弱アルカリ性）の環境下と比較して腐食速度が速いことを確認した。（スライド6/14）
③溶存酸素	同水温・pH _T の水質環境下においては、プラント起動時のような溶存酸素濃度が高いと想定される酸化性雰囲気下で腐食速度が高くなる傾向が認められた。（スライド7/14）
④浸漬時間	腐食速度は、3サイクル経過時点で起動時が2.37mg/dm ² /日（約0.2μm/サイクル）、運転時が0.05mg/dm ² /日（約0.3μm/サイクル）となり、起動時および運転時を踏まえた浸食度は約0.5μm/サイクルと、駆動軸本体の板厚に対して十分小さい。 また、腐食生成物量は、起動時を想定した水質環境下で多い。（スライド10/14）



- プラント起動時および運転時に生成した酸化皮膜により、駆動軸内表面の腐食速度は大幅に低下しており、今回の試験で得られた浸食度で腐食が継続したとしても、駆動軸本体の板厚に対して十分小さく、駆動軸機能に影響を及ぼすものではないと推察される。
- 駆動軸内表面への腐食は、プラント起動時の水質環境下で生じやすいと推察される。

⇒起動時を対象とした腐食量低減策（運用可能な範囲でのpH上昇）の検討が有効。

[補足説明資料]

マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (14/14)

[参考]保全学会での発表

PWR 1次冷却水環境下における SUS410 の腐食速度等に関する検討
Investigation on corrosion characteristics of SUS410 in PWR primary coolant system environment.

四国電力株式会社
四国電力株式会社
四国電力株式会社
四国電力株式会社
四国電力株式会社
株式会社 四国総合研究所

Inadvertent withdrawal of a control rod cluster was observed during lifting of the upper core structure on the 15th outage of Ikata Unit3. The source of magnetite sludge, which is one of the causes of this event, was presumed to be the drive shaft, but there is little knowledge about the corrosion characteristics of the drive shaft material SUS410 in the PWR primary water. Therefore, we investigated the corrosion characteristics of SUS410 in simulated PWR primary water circumstance at the plant start-up stage and operation. As a result, SUS410 corrosion tends to occur primarily under the circumstance of plant start-up water chemistry, and it is effective to consider measures to reduce the amount of corrosion.

Keyword: Ikata Unit3, primary coolant system, drive shaft, SUS410, corrosion, magnetite,

1. はじめに

伊方発電所3号機第15回定期検査(令和元年12月26日解列)の燃料取出し作業において発生した制御棒クラスタの吊り上がり事象では、当該制御棒クラスタのスパイダ頭部内にマグネタイト(Fe₃O₄)の堆積が確認され、これが本事象に影響したものと考えられた。

このFe₃O₄は、1次冷却水が高溶存酸素環境となるプラント起動初期段階に、SUS410製の駆動軸内表面で生成した腐食生成物である鉄酸化物が、起動工程の進行に伴いFe₃O₄に変態して脱落・堆積したものと推定された。このことから、伊方発電所3号機における起動初期の1次冷却水環境を模擬してSUS410等の腐食試験を行った結果、SUS410製の制御棒駆動軸内表面でFe₃O₄が生成することを確認した^[1]。

本報では、制御棒駆動軸内でのプラント起動/運転中に想定される環境条件を考慮し、水質パラメータ(温度、pH、溶存酸素濃度等)がSUS410の腐食速度等に与える影響について報告する。

2. 調査計画

プラント起動初期の制御棒駆動軸は、全長にわたり高温・高溶存酸素の水質環境下であり、運転時を含め、駆動軸上下端では温度差が生じる。また、起動工程の進行に伴い溶存酸素は除去され、還元性雰囲気となる。また、ほう素濃度希釈操作によりpHは上昇する。

連絡先: [REDACTED]
〒760-8573 高松市丸の内2番5号
四国電力株式会社 原子力部 安全グループ
E-mail: [REDACTED]

そこで、プラント起動初期の1次冷却水環境におけるSUS410の腐食量に与える水温の影響を把握するため、実機駆動軸内で想定される水温下において腐食試験を実施するとともに、極大の腐食量を示した水温において、B/Li濃度の調整による各pH条件下での腐食試験を実施した。

表1 試験概要(水温およびpH影響試験)

試験雰囲気	酸化性雰囲気	還元性雰囲気
	大気ガス	窒素ガス
試験条件	液相	水質: ほう酸(4,500ppm as B) / 水酸化リチウム(1.0ppm as Li) 圧力: 0.5~8.6MPa(飽和水蒸気圧)
	pH影響試験	温度: 水温試験で最大の腐食量となる温度 水質: ①水温試験と同条件、②pH=中性点 ③プラント運転中のpH範囲2点 圧力: 1.6MPa(飽和水蒸気圧)
試験日数	10日	10日
試験片材質	SUS410(実機駆動軸同等材)	
試験装置	チタン製オートクレープ装置を使用	
分析項目	1. 外観観察	
	2. 試験片表面分析(電子顕微鏡像観察【SEM】元素組成【EDS, ICP】結晶構造【X線回折】)	
	3. 腐食量・速度(化学洗浄-重量測定)	

また、プラント起動初期および運転時に想定される水質環境を模擬した条件で腐食試験を繰り返す(42日【酸化性雰囲気5日+還元性雰囲気37日】/サイクル×3サイクル=計126日: 約3,000時間)、腐食量に与える浸漬時間の影響を評価した。

なお、pHは、水温およびB/Li濃度から計算ツール(ChemWorks Ver.4.3, EPRI)を用いて算出した。

3. 調査結果

3.1 水温影響

SEM観察の結果、試験温度が高いほど酸化皮膜の外層を形成する粒子の径が増大し、粒径1μm以上の八面体を含む多面体粒子が出現するとともに、不定形な微粒子の密度も増加していた。

また、腐食速度は、実機駆動軸で想定される温度範囲のうち、中央部付近と想定される水温200°Cで極大を示した。一方、酸化皮膜の主成分はFe₃O₄と推定され、その生成速度は水温の上昇に伴い増加した。

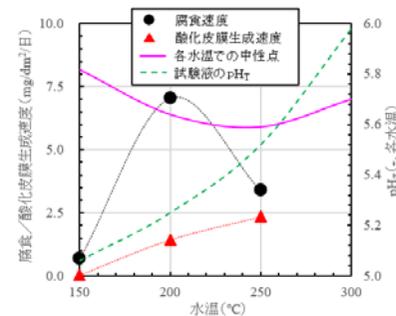


図1 SUS410試験片における水温と腐食速度の関係

3.2 pH影響

SEM観察の結果、pHの上昇に伴い粒子密度が増加するとともに、粒径1μm以上の八面体を含む多面体粒子の出現が認められた。また、SUS410の腐食速度はpH5.3で最大を示し、pHの上昇に伴い腐食速度および酸化皮膜(主成分: Fe₃O₄)生成速度は低下した。

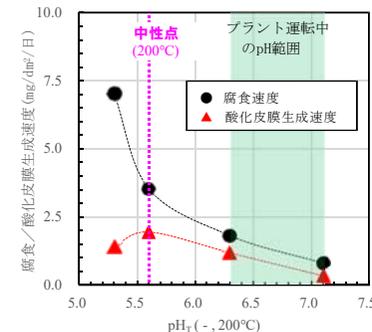


図2 SUS410試験片におけるpHと腐食速度の関係

3.3 溶存酸素(DO)濃度影響

3.1および3.2における酸化性/還元性雰囲気下の腐食速度の比較から、SUS410の腐食速度に与えるDO濃度の影響を検討した結果、pHによらず、還元性雰囲気下におけるSUS410の腐食速度は、酸化性雰囲気と比較して約30~70%低減された。

3.4 浸漬時間の影響

SEM観察の結果、1サイクルから2サイクル目にかけては、浸漬時間の経過に伴い八面体を含む多面体粒子の出現および粒子径の増大が認められた。一方、2サイクル目以降の変化は軽微であった。

また、腐食速度は、3サイクル経過時点で起動時から2.37mg/dm²/日、運転時が0.05mg/dm²/日と、SUS410については起動初期の水質環境下での腐食が支配的である可能性が示唆された。なお、実機プラント起動(約5日)および運転(約390日)時間を踏まえ腐食速度から算出した浸食量は、約0.5μm/サイクルと軽微であることから、実機プラントの総運転時間を考慮しても、駆動軸内表面で生じた腐食は、その機能性に影響を及ぼすものではないと評価できる。

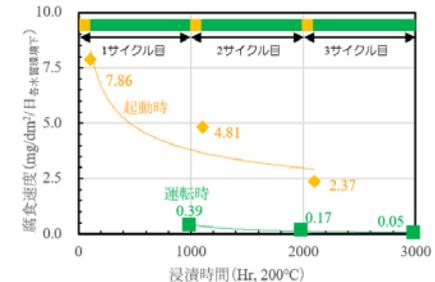


図3 SUS410試験片における浸漬時間と腐食速度の関係

4. まとめ

制御棒駆動軸内でのプラント起動/運転中に想定される環境条件を考慮した各種試験を実施することにより、SUS410の腐食速度の挙動を明らかにした。

SUS410の腐食速度は、運転中よりもプラント起動初期の水質環境下(200°C、弱酸性、酸化性雰囲気)で大きく、特に起動時を対象とした腐食低減策の検討が腐食生成物の生成抑制に有効と考えられる。

参考文献

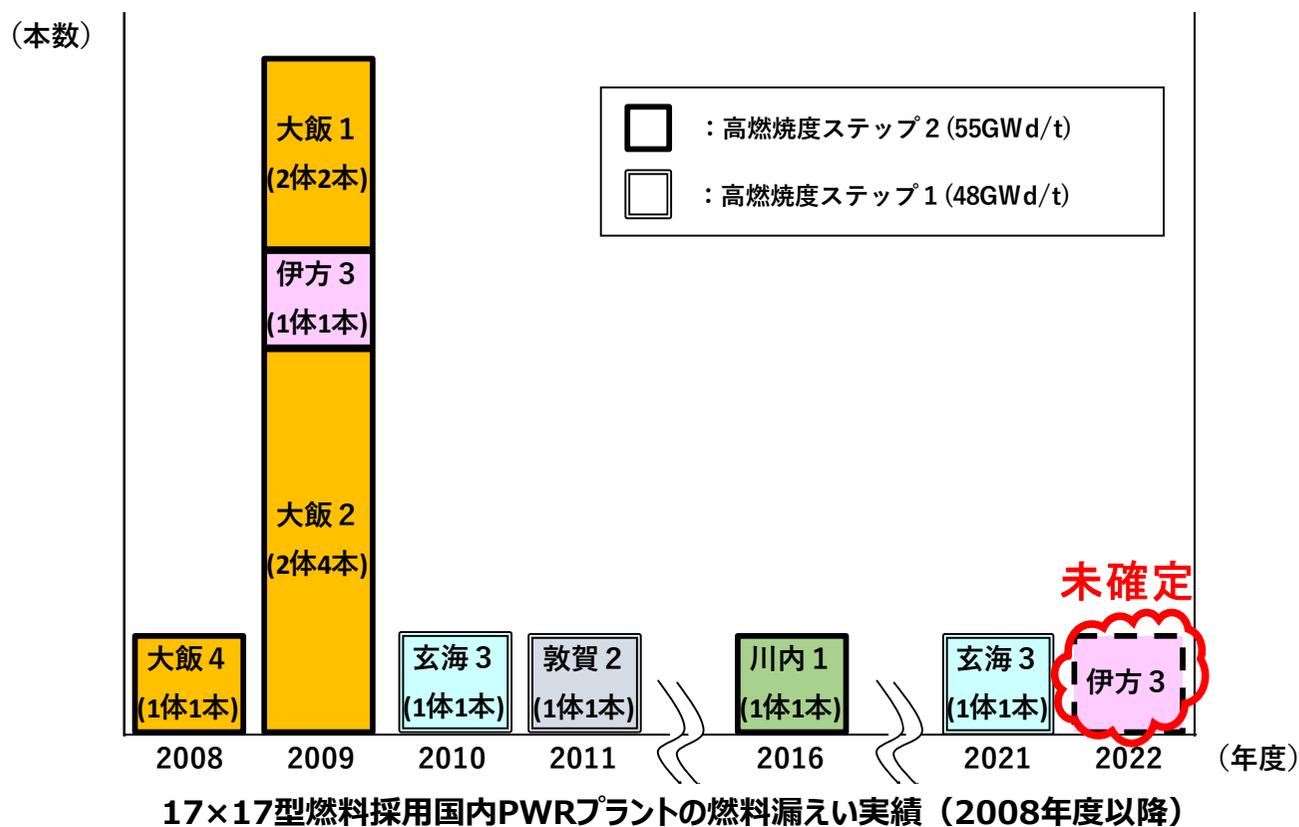
- [1] [REDACTED]
“PWR1次冷却水環境下でのマグネタイト生成メカニズム等に関する検討”、日本保全学会 第17回学術講演会要旨集、2021、pp.179-180

[参考資料]

伊方3号機第12サイクル燃料漏えいの原因究明、対策等について（1/4）

【近年の国内PWRにおける燃料漏えいについて】

- ◆ 2008年度以降、17×17型燃料を採用している国内PWRにおいて、下図の燃料漏えいが発生。
- ◆ 伊方3号機では、2009年度に従来A型燃料1体（燃料棒1本）の漏えいが発生。今回は未確定であるが、これを含めても、他の発電所と比較して漏えいの発生確率が特段高いものではない。
- ◆ 従来A型燃料については、国内PWRへの導入以降、続けて漏えいが発生したことから、様々な解析や試験により原因を特定。当社では、2011年度にZDP1燃料を採用し、順次燃料の取替を進めている。また、従来A型燃料の使用にあたっては、炉心設計において配置を工夫するとともに、使用前にファイバースコープを用いた最下部支持格子内の確認を実施し、漏えいの発生抑制に努めている。



[参考資料]

伊方3号機第12サイクル燃料漏えいの原因究明、対策等について（2/4）

【第12サイクルでの燃料漏えいについて】

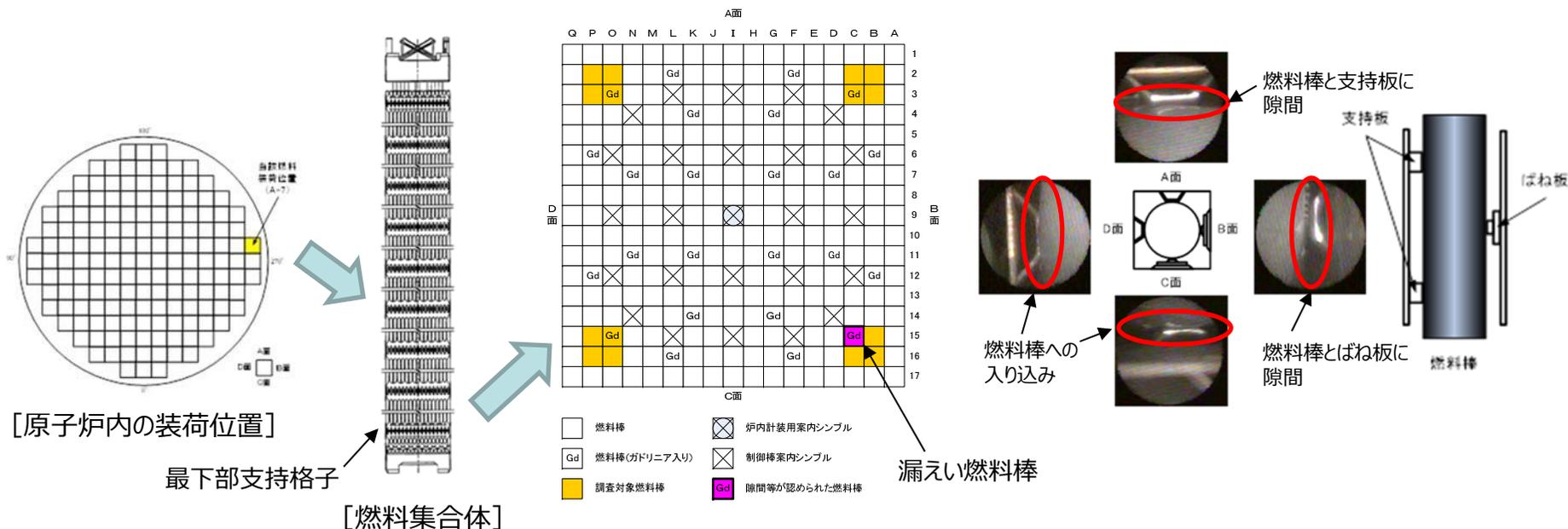
- ◆ 2009年11月19日、伊方3号機第12サイクルにおいて燃料漏えいが発生。第12回定検（2010年1月7日～）で漏えい燃料1体（A型高燃焼度燃料ステップ2（以下、「従来A型燃料」という））を特定し、技術専門部会へ状況を報告。その後、ファイバースコープ等を用いて漏えい原因を調査した結果を取り纏め、2010年2月5日に愛媛県へ原対報告。（最下部支持格子内に隙間等を確認：下図）

(原因)

最下部支持格子内における燃料棒と支持板またはばね板の接触面で、当該燃料固有の何らかの要因により燃料棒の微小な振動による燃料被覆管の摩耗が進展し、燃料棒に微小孔（ピンホール）が生じた事象であると推定。

(対策)

- ✓ 漏えい燃料は再使用しない。また、念のため同一時期に製造された燃料の使用を見合わせる。
- ✓ 関電大飯で漏えいした同型燃料の照射後試験に参画し、結果を踏まえ必要な対策を講じる等により燃料の信頼性向上を図る。



[参考資料]

伊方3号機第12サイクル燃料漏えいの原因究明、対策等について（3 / 4）

【従来A型燃料の漏えい対策に係る経緯】

- ◆ 2010年2月5日、旧原子力安全・保安院（以下、「NISA」という）から、伊方3号機での漏えい以前にも関電大飯2,4号機でも従来A型燃料の同様の漏えいが発生していたことを踏まえ、PWR電力各社へ「従来A型燃料を使用する場合、最下部支持格子内に隙間等がないことを確認すること」との指示文書発出（愛媛県へ報告済）。PWR電力大で確認方法を検討した結果、燃焼度、炉心対称性等を考慮した抜取対象をファイバースコープで点検する旨NISAへ説明し、了承されたことから、以後の定検時に点検を実施。
- ◆ 2010年4月28日、関電大飯1号機の原対報告にて、関電大飯（4ループプラント）での一連の従来A型燃料の漏えいについて、以下の原因、対策が報告されたため、NISAから、これらの知見を踏まえて、3ループプラント（伊方3号機含む）での漏えい対策要否を評価し、対策等を報告するよう指示文書発出（愛媛県へ報告済）。
- ◆ 2010年6月11日、NISA指示文書に対し、以下を要旨とする評価結果等を回答。愛媛県へも報告。
 - （評価） 3ループプラントで従来A型燃料を使用する際は、4ループプラントと比較して燃料漏えいが発生する可能性は低いと考えられる。
 - （対策）
 - ✓ 炉心運用上の考慮事項として、燃焼の進んだ10%Gd燃料は、炉心最外周（Lコーナ）に装荷しない。
 - ✓ 関電大飯の照射後試験結果等の知見を踏まえて対策する。
- ◆ 2010年6月～11月、国の原子力安全小委員会燃料WGが開催され、4ループプラント、3ループプラントの対策の有効性、燃料の改良について審議。この中でNISAが「従来A型燃料を運用制限のもとに継続使用するとした事業者判断は妥当。フレット磨耗による1次冷却材への放射性物質の漏えいはいはごくわずかであることから安全上の問題はない。」と取り纏め。
- ◆ 2017年3月23日、九電川内1号機（3ループプラント）で従来A型燃料の漏えいが発生。九電は追加で以下の対策を実施。
 - （対策） 漏えい燃料と同じ製造時期の燃料は、漏えい燃料集合体の漏えい発生時の燃焼度実績を超えていることから、再使用する場合は、念のため炉心中央部（炉心中心位置及びその周囲8箇所）に構造の異なる燃料集合体と隣接して装荷しない。

[参考資料]

伊方3号機第12サイクル燃料漏えいの原因究明、対策等について（4/4）

【従来A型燃料の漏えいに対する当社の対策】

- ◆ 漏えい原因（メカニズム）の究明、照射後試験で得られた知見等を踏まえて改良されたA型高燃焼度燃料ステップ2（信頼性向上燃料（ZDP1燃料））を採用し、順次燃料の取替を進めている。（第15サイクルから装荷。第16サイクルでは40体を使用中。）

【信頼性向上燃料（ZDP1燃料）の概要】（右図参照）

①下部ノズルの変更

均質多孔型の流路孔を適用した下部ノズルとすることで、炉心入口部の圧損が増加し、炉心内で隣接する圧損の高い燃料からの1次冷却材の流入量が減少するとともに、下部ノズルの下方で生じた流速分布が下部ノズルで整流され、集合体内での横流れが減少する。

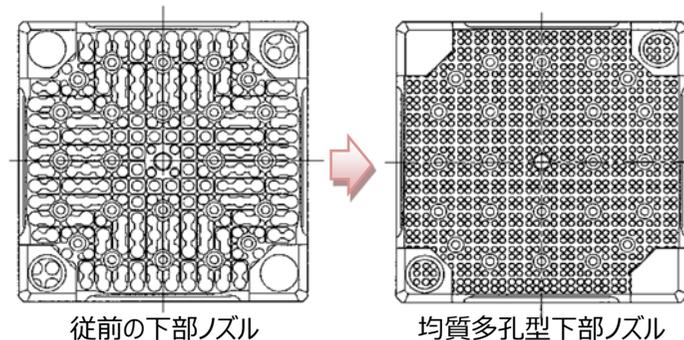
②最下部支持格子位置の変更

最下部支持格子位置を下げ、炉心内で隣接する燃料の最下部支持格子位置に近づけることで、隣接燃料と支持格子の高さがずれることにより生じる横流れが減少する。また、最下部支持格子から下に突出した燃料棒長さを短くすることで、燃料棒下端に働く流体力が低減する。

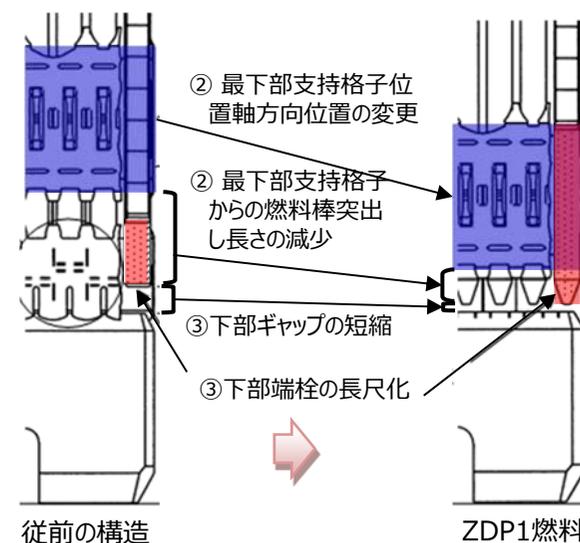
③下部端栓の長尺化及び下部ギャップの短縮

燃料棒下部端栓を長尺化することにより、最下部支持格子がペレット有効部ではなく下部端栓を保持することになるため、照射による最下部支持格子ばね力の緩和が小さくなる。また、下部端栓下端と下部ノズル上面との距離（下部ギャップ）を短くすることで、燃料棒が下方にずれたとしても、最下部支持格子の保持部がペレット有効部となることはなく、万フレッシング摩耗が発生したとしても被覆管が貫通することはない。

- ◆ 継続して使用している従来A型燃料（第16サイクルでは40体を使用中）については、漏えいリスクを低減するため、炉心設計上、
 - ・ 燃焼の進んだ10%Gd燃料は、炉心最外周（Lコーナ）に装荷しないとの制限を課すとともに、自主的に、漏えいメカニズムに影響のある、
 - ・ 炉心中心位置に装荷しない
 - ・ 構造の異なる燃料（B型高燃焼度燃料ステップ2等）との多面隣接を避ける
 - ・ 九電川内1号機の対策の水平展開等を実施。また、NISA指示文書に基づくファイバースコープ点検を継続して実施。
- ◆ これらの対策を実施することにより、伊方3号機第13サイクル（2010.3.4～2011.4.29）から第15サイクル（2018.10.30～2019.12.26）において、従来A型燃料の漏えいは発生していない。



①下部ノズルの変更



②最下部支持格子軸方向位置の変更

③下部端栓の長尺化及び下部ギャップの短縮