

伊方原子力発電所環境安全管理委員会及び同原子力安全専門部会 委員コメント一覧

目次（項目）

1. 伊方発電所第3号機 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について.....	1
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.....	3
3. 伊方発電所第3号機 燃料集合体点検時の落下信号の発信について...	7
4. 伊方発電所における所内電源の一時的喪失について.....	10
5. 伊方発電所 連続発生したトラブルの総括評価について.....	12
6. 全般.....	17

1. 伊方発電所第3号機 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について

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント委員
1	運転に当たっては、四国電力の正規の職員が皆当たるようなシステムにしてもらいたい。	運転に当たっては、四国電力社員が対応している。また、安全上重要な作業や工程管理等も四電社員が携わっており、今後も中心となって対応していく。	R02 2/18	高橋
2	「問いかける姿勢」について、意識改革にどう取り組んでいくのか。	「問いかける姿勢」を定着させるため、毎年度実施している安全文化の教育テキストに今回の事象を追加し、繰り返し教育することで、このトラブルを忘れずに「問いかける姿勢」の重要性を認識させる。 R2年3月31日に新規制定した「原子力発電所 安全文化育成および維持活動要領」では、安全文化の育成・維持活動の目標として「健全な安全文化の特性」を定めており、これら10特性の一つに「問いかける姿勢」が含まれている。「健全な安全文化の特性」の定着を図るため、関係者が出席するスクリーニング会議で毎週唱和しているが、今後もこの取り組みを継続していく。 (6月4日 資料1-1 P5)	R02 3/24	池内
3	作業計画の立案等は重要な作業である。四国電力社員がすべての工程に携わるようにしてほしい。	重要な工程等には全て四国電力社員が携わっており、今後とも中心となり対応していく。 なお、今回の作業は、福島事故後、新規制基準が施行されて保安規定を変更したが、変更した内容の理解が不足していたものであり、保安規定改定時には、周知に加え内容に関する教育を技術系所員に対し実施するなどの改善を行う。 (6月4日 資料1-1 P4,5)	R02 3/24	高橋
4	再発防止策として実施する保安規定が改定された際の所員教育では、改定内容だけでなく、改定理由についても教育してほしい。	今回、保安規定を改定した場合は、従来の周知だけではなく、教育もするよう改めた。また、その教育に際しては改定に携わった者により改定の趣旨も含めた教育を実施することとしている。	R02 6/4	村松
5	何を問いかけるべきか分からなければ、問いかけるモチベーションが生じないが、「問いかける姿勢」の定着に向けた教育についてはどのように考えているのか。	「問いかける姿勢」の浸透については、安全文化の教育などを繰り返し実施していくこととしている。	R02 6/4	中村
6	理解が不足しているか分からない状況だと、結局、「問いかける姿勢」がいくら醸成されていても、問いかけるべき問題があるかどうか分からないので、それにより本事象を防ぐのは難しいのではないかと。	「問いかける姿勢」が欠けていたことだけでなく、保安規定の理解不足も原因であるため、今後は、双方向のコミュニケーションを図りながら、保安規定に係る教育を実施することとしている。	R02 6/4	森

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
7	分からないことも聞きやすい環境を作ることが大事であるが、どのように取り組むのか。	安全文化を醸成するのは、長期的・継続的な取り組みが必要であり、PDCAサイクルを繰り返し継続的に回しながらしっかりと取り組んで行く。	R02 6/4	森
8	教育も重要であるが、保安規定を遵守した作業であることが、書類上、物理的に確認できるシステムとしていくことが重要ではないか。	本事象については、保安規定の理解が不足していたこと、保安規定第 88 条への適合を確認できていなかったというシステム的な問題、及び「問いかける姿勢」が欠けていたことの 3 点が原因であったと考えており、確認するシステムに改善の余地があったことから、作業計画の妥当性を明確に確認できるチェックシートを作成し、社内関係者が確認又は承認する体制とした。	R02 6/4	宇根崎
9	システムの改善、教育の徹底及び意識(問いかける姿勢)の向上という改善策をバランスよく組み合わせさせて講じていってほしい。また、教育や意識の向上は保全活動全般の質を上げていくことにつながるの、長期的な取り組みになると思われるが、教育などの改善による効果の把握に取り組みながらより改善に努めていってほしい。	改善した保安規定第 88 条への適合を確認するシステムを確実に運用していくとともに、追加した教育および安全文化の醸成活動を継続的に実施していくこととしており、これらが必要に応じて改善しながらバランスよく取り組んでまいりたい。 また、不適合の発生状況等はCAPを用いて傾向を把握することとしており、教育などの改善策の効果の把握にも活用して、継続的な改善に努めてまいりたい。	R02 6/4	宇根崎
10	「問いかける姿勢」の定着への取り組みは、形式的になりすぎることなく、双方向のコミュニケーションを、組織の中でうまく運用されるよう努めてほしい。	「問いかける姿勢」の定着は一朝一夕に達成できるものではないが、今回策定した改善策を着実に進め継続的に取り組んでいく。 また、取り組みが形式的になりすぎないよう心掛けるとともに、教育や日々の業務において双方向のコミュニケーションを工夫しながら推進していくことで、互いに学び合える風土を育むよう努めてまいりたい。	R02 6/4	中村
11	双方向のコミュニケーションを図りながら教育に取り組むとの方針は是非お願いします。さらに、問答を通じて受講者、説明者双方の学び、気付きにつながるよう、様々な角度から議論できる社風を育てていってほしい。		R02 6/4	岸田

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

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
1	制御棒の引き上がり事案については、国内でも例がないとのことであるから、しっかりと原因究明をしてもらい、今後の安全運転につなげてもらいたい。また、調査結果等については、適宜、報告をお願いしたい	各事象については、しっかりと原因究明を行うとともに再発防止に努めている。 (原因と再発防止策をとりまとめた報告書を提出済み。)	R02 2/18	宇根崎
2	制御棒クラスタの切り離しの作業で、駆動軸着底の確認はどのように確認しているのか。	ベースプレートの高さを計測し、計画値の範囲内であることを確認している。 (6月4日 資料1-2 P32のステップ⑩)	R02 2/18	中村
3	制御棒クラスタ頭部に溜まっている堆積物は何か。なぜこのように溜まるか総合的に調査してほしい。	堆積物を分析した結果、マグネタイト(Fe_3O_4)であることを確認した。 堆積物は過去の定期検査でも確認されており、スパイダ頭部にスラッジが堆積する現象には、 ・駆動軸内表面で生成したマグネタイトが剥離、落下、堆積したもの ・1次冷却系統内で生成したマグネタイトが当該部に侵入、堆積したものの2つのケースがあると推定している。 (6月4日 資料1-2 P9~12)	R02 2/18	中村
4	結合部分だけでなく駆動軸取り外し工具についても念のため調べておくべき。	駆動軸取り外し工具についても調査を実施し問題がないことを確認した。 (6月4日 資料1-2 P35)	R02 2/18	中村
5	制御棒引き上がりは推定原因であるが詳細な調査はしているのか。	制御棒引き上がりについては、当該の駆動軸や制御棒クラスタのほか、工具や使用計測器等も含め詳細な原因調査を実施している。(6月4日 資料1-2 P3~16, 34~39) 推定原因は、原因調査から得られた物証に加え、事象発生時の駆動軸と制御棒クラスタの結合状態のケース検討や部分モデルによる引き上がり状態の実証試験を実施し、事象発生メカニズムを検討し、解析等によるメカニズムの妥当性確認を実施したうえで推定したものである。 (6月4日 資料1-2 P17~24)	R02 3/24	中村
6	制御棒の引き上がりに関して、これまで同様の事象はなかったのか。	国内外の類似事例を調査した結果、海外で制御棒の引き上がり事象が発生していたが、今回の事象と同様な事象はなかった。 (6月4日 資料1-2 P13)	R02 3/24	占部

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
7	スラッジは水質管理を行うことで減少させているはず。そういった取組みとか、技術的な観点からの評価はないのか。	<p>今回制御棒クラスタの頭部に確認されたスラッジ（マグネタイト）は鉄の酸化物であるが、従来から、1次冷却材の鉄濃度は低く管理しており、系外から補給される水の鉄濃度も低く管理することによりできるだけ発生を抑制している。</p> <p>また、1次冷却材の浄化流量を可能な限り多くとることにより、生成されたマグネタイトを可能な限り除去している。</p> <p>（6月4日 資料1-2 P41）</p> <p>一方で、マグネタイトは1次冷却系統設備に使用されている材料に含まれる鉄などが元となっていることから、発生しないようにすることは困難である。</p> <p>（6月4日 資料1-2 P12）</p> <p>このため、今回の再発防止対策により、スラッジがスパイダ頭部に堆積したとしても、制御棒クラスタの引き上がりが生じないように手順を見直すこととしている。</p> <p>（6月4日 資料1-2 P26）</p>	R02 3/24	渡邊
8	マグネタイトの薄片が磁化した駆動軸接手に付着するというメカニズムがあるのであれば、この点について気を付ける必要があるのではないのか。	<p>駆動軸と制御棒クラスタの切り離し作業にあたっては、インジケータロッドが完全に下降していることを確認するとともに、重量確認とベースプレート高さの位置計測を行うこととしており、磁化した接手にマグネタイトが付着しても支障はない。</p>	R02 6/4	中村
9	今回の調査結果により、剥離している薄片のサイズが大きいことが分かったが、これが磁化して駆動軸内部の位置決めナットと接手の間に付着すると大きな影響を及ぼす可能性があるのではないのか。	<p>これまでの運転においても特に駆動軸の動作に異常が認められたことはなく、また、今後の対策については、確実に接続又は切り離しができていることを確認できる手順を追加したことから、問題ない。</p>	R02 6/4	中村
10	駆動軸が高溶存酸素及び高温環境におかれることで、マグネタイト生成するということであれば、ほかの材質を使うことについて検討してはどうか。また、プラント運転中においては、駆動軸内部で1次冷却材の自然循環が発生するとのことだが、これは本当か。	<p>駆動軸本体の材料は、制御棒位置の検出機能の観点から磁性材の使用する必要があり、限定されるものである。また、運転中の駆動軸近傍の下端と上端では温度差があることから自然循環がある程度ある。</p>	R02 6/4	中村

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
11	<p>本事象はマグネタイトが非常に悪い影響を及ぼしていないか。</p>	<p>○マグネタイトの設備への影響について 駆動軸本体の材料は、制御棒位置の検出機能の観点より磁性材を使用する必要があり SUS410 を使用している。また、接手部は耐摩耗性の観点より硬度の高い SUS403 を使用している。</p>	R02 6/4	渡邊
12	<p>駆動軸を取り出して外観確認をして、外面については腐食が見られておらず、環境が同じ内面も腐食がないという認識であれば、今回観察された大きな薄片等はどこから発生したのか。 スパイダ頭部にスラッジが堆積するメカニズムについて、環境要因や材料条件等を、再度、総合的に整理して考える必要があるのではないか。</p>	<p>駆動軸と制御棒クラスタの結合・切り離し作業の際に、スパイダ頭部内に堆積しているマグネタイトが駆動軸の接手部に付着していたとしても、重量確認と位置確認により確実に結合・切り離しがされていることを確認するため、同様事象の再発防止は可能である。</p> <p>また、強磁性であるマグネタイトが悪影響を及ぼす可能性がある設備としては、磁性材料を使用している設備が考えられるが、磁性材料を使用している設備は限定的であり、その設備の構造や機能を踏まえると、マグネタイトがプラントの安全に悪影響を及ぼす可能性は低い。</p> <p>また、マグネタイトが生成したとしても、1次冷却系統設備の主要材料はステンレス鋼であり、水質管理された環境下においては不働態皮膜が形成されるため、健全性に影響を与えるような腐食が生じることはない。</p> <p>今回スパイダ頭部内に確認されたマグネタイトが、すべて駆動軸内表面から溶出した鉄により生成したと仮定した場合であっても、駆動軸の健全性に影響を与えるものではない。</p> <p>○マグネタイト生成・堆積過程について 1次冷却系統の水質および温度環境下においては、鉄の酸化物は安定的にマグネタイト (Fe₃O₄) として存在することが知られており、堆積物の分析結果がマグネタイトであったこととも整合する。</p> <p>スパイダ頭部にマグネタイトが堆積する現象としては、駆動軸内表面（プラント起動初期段階、プラント運転中）や1次冷却系統内で生成されたマグネタイトが堆積したケースが考えられる。また、今回確認された薄膜状のマグネタイトは、構造上、駆動軸内表面で生成したものである。</p> <p>これらのマグネタイト生成メカニズムは、実機の設備構成を踏まえたものであり、1次冷却系統の水質および温度環境下においては一般的な化学反応式等で示されるものであることから、硬度の高いメカニズムである。</p> <p>(別添1「マグネタイトの生成と設備への影響」参照)</p>	R02 6/4	中村

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
13	今後、推定メカニズムの明確化について、事象が発生した電力会社として主体的に責任を持って取り組んでほしい。	本事象のメカニズムについては、作業手順、制御棒クラスタ頭部へのマグネタイトの堆積、駆動軸等の観察等の事実から、不完全結合に至る様々なケースを検討し、実証試験や解析等も行い、不完全結合に至ったメカニズムを特定している。	R02 6/4	渡邊
14	本事象の原因究明は、伊方発電所だけでなく世界中のPWRに関係する内容であることから、ぜひ根本原因を究明してほしい。	また、今回の再発防止対策により、制御棒クラスタの引き上がり事象は確実に防止することができる。	R02 6/4	中村
15	再発防止策は、推定原因のとおりにかどうかに関わらず、追加手順により再発防止ができることから十分である。 ただ、本事象の発生メカニズムの解明については、世界中のPWRの安全性向上に非常に大きな役割を果たし得ることから、今後、四国電力として科学的にこれを解明して、それを発信してくという姿勢が重要である。	一方で、堆積物（マグネタイト）の生成・堆積については、定期検査ごとに堆積物を除去することとしているが、今後、以下の取り組みも継続していく。 ・ 定期検査時に制御棒クラスタのスパイダ頭部に堆積しているマグネタイトを除去する際には、水中カメラにて堆積状況を観察・記録していき、情報を蓄積し、傾向監視するなど保全に役立てていく。 ・ 他プラントの状況について、情報収集・情報交換を行う。	R02 6/4	宇根崎
16	推定原因ではあるが、いろいろな証拠物を基に、できる範囲で原因を検証しているとは思いう。世界中の発電所に活かす意味で、メカニズムの推定は非常に重要であり、原因の追究を進めていただければと思う。	さらに長期的な堆積物の低減に向けて、実験などで効果的な低減の方法を研究するなど知見の拡充を図り、更なる安全性の向上に努めていく。 また、現状、伊方発電所で堆積物（マグネタイト）の発生量が急増している傾向はないが、定期検査ごとの堆積物の発生量調査により、有意な増加傾向が見られた場合は、速やかに前回定期検査のプラント起動時以降の運転状況を確認し、増加要因を分析したうえで対応を検討する。 (別添2「制御棒クラスタ引き上がり発生メカニズムの整理結果」参照)	R02 6/4	望月

3. 伊方発電所第3号機 燃料集合体点検時の落下信号の発信について

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
1	この点検は過去の伊方3号機の燃料リークの経験から実施している点検であるが、これを保守管理でやるのは無理があるのではないのか。過去に策定した、対策では、当該燃料を原因が分かるまでは使用しないのではなかったのか。	当時の対策としては、漏えいした燃料は使用しないこととし、漏えいした燃料と同一時期に製造された同設計のA型55燃料(2体)は念のため使用を見合わせることにした。なお、当該燃料(2体)については既に除却済みである。 また、漏えい対策を行った新設計の燃料を平成23年に採用済みである。 また、原子力安全・保安院の指示に基づき、漏えいが発生した燃料と同設計のA型55燃料を使用する場合には、当該燃料の漏えい原因に係る知見を踏まえ、燃料集合体の最下部支持格子について、燃料棒の支持部(支持板、ばね板)と燃料棒の間に隙間等がないことを確認することとしている。 (6月4日 資料1-3 P12,13)	R02 2/18	渡邊
2	照射済燃料に関しては、脆くなっていることもあり得る。重量物である燃料集合体がラック上に少し乗ってしまったことで、燃料集合体に変な荷重が加わり、たわみや見えない傷がないのかなども総合的に検査してほしい。	当該燃料集合体は照射済みであるが、照射済燃料に対する荷重評価結果を未照射条件で健全性が確認された荷重と比較することは、より厳しい取扱いとなる。 また、当該燃料集合体を対象に、点検装置ラックへの乗り上げ前後の燃料集合体の曲がり量を確認したが、点検装置ラックへの乗り上げ前後で、当該燃料集合体の曲がり量に有意な変化はなかった。 (6月4日 資料1-3 P7)	R02 2/18	中村
3	ファイバースコープでの確認は、燃焼度の高い燃料集合体の下部の各4面について行うのか。また、今定検で5体確認することであるが、その5体に決めた理由は何か。	ファイバースコープによる点検対象の燃料は、燃料被覆管の摩耗の進展に影響を及ぼす可能性のある「燃焼度」、「装荷回数」及び「装荷位置」を考慮して選定している。具体的には、再使用予定燃料のうち2サイクル以上装荷された燃料から、装荷回数が同じ、かつ、炉内の装荷位置が対称であった燃料を1グループとし、それぞれのグループから最も燃焼が進んだ燃料を点検対象として選定している。点検作業は燃料集合体の最下部支持格子の4面すべてにファイバースコープを挿入し、燃料棒の支持部(支持板、ばね板)と燃料棒の間に隙間等がないことを確認する作業である。 今回の点検では、再使用を予定しているA型55燃料64体のうち、2サイクル以上装荷された62体を確認対象としており、このうち、前サイクル(第15サイクル)で装荷していた燃料集合体30体(5グループ)を対象に、各グループから最も燃料の進んだ5体を選定している。 (6月4日 資料1-3 P2,13)	R02 2/18	渡邊

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
4	<p>改善策がいくつかあるが、燃料の移動操作についても技術的な改善がなく極めて原始的であると思った。技術的な改善もぜひ取り組んでいただきたい。</p>	<p>通常の使用済燃料ラックでの燃料取扱作業は、3号機の運転開始以降十分な実績があり、これまで燃料集合体を使用済燃料ラックに乗り上げる事象は発生していないが、本点検作業は、使用済燃料ピットの限られたエリアに設置した点検装置を用いて行う難度の高い作業であり、点検体数（今回は5体）や、残りの点検回数（過去に漏えいが発生したタイプの燃料の使用が終了するまであと3～4回程度）などを考えると、通常の燃料取扱作業と比べて限定的な作業である。</p> <p>本事象に対して、技術的に高度化する対策としては、使用済燃料ピットクレーンの位置決めを自動化することなどが考えられるが、仮にクレーンをラックの直上に自動で位置決めしたとしても、燃料集合体のラックへの挿入箇所はクレーンより約1.1m下方であるため、燃料集合体をそのままラックに挿入した場合、クレーンに吊り下げられた工具や燃料集合体の僅かな揺れや振動等により、接触したり乗り上げたりする可能性があることから、目視で挿入状況を確認する必要があると考える。また、燃料集合体下部がラック位置と僅かにずれている場合は、手動によるセンタリングの修正等が必要となる。</p> <p>このため、燃料集合体のラック乗り上げ防止の観点からは、点検装置ラック開口寸法を拡大する等により、十分に再発防止が可能であり、最も有効な対策であると考えている。</p>	R02 3/24	占部
5	<p>使用済燃料プールにある燃料集合体の落下信号が発信された場合には、その場にいる作業員はどういった対応を取ることになっているのか。</p>	<p>燃料集合体の落下信号が発信した場合は、落下した燃料から発生するおそれがある放射性ガスをチャコールフィルターにて吸着するため、使用済燃料ピットの空調系がアニュラスの排気系統に切り替わる。今回は実際には燃料集合体が落下したわけではないが、実際に燃料集合体が落下し、放射性ガスの発生を目視した場合は、作業員は被ばく防止の観点から退避することになる。</p>	R02 6/4	中村

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
6	<p>ラック乗り上げ時に燃料被覆管に発生した応力は約 3 MPa としているが、1,000kg を超える物が乗り上げた時の応力にしては、小さい気がするが、どうか。</p>	<p>今回の事象では、燃料集合体の荷重がある程度クレーンに残った状態で、鉛直にラックに乗り上げたことから、264 本の燃料被覆管に概ね均等に荷重がかかったと考えており、その条件で評価すると約 3 MPa となる。ラック乗り上げ時にある程度の不均等な荷重が作用した可能性も否定できないが、均等な荷重を想定した場合の発生応力（約 3 MPa）は未照射時材料の耐力約 600MPa に対しては十分に小さいことからある程度の不均等な荷重が作用したとしても燃料被覆管の健全性に問題はない。</p>	R02 6/4	渡邊
7	<p>原子力安全委員会が定めた「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」においては、水素化物再配向による機械的特性劣化防止の条件として、PWR の場合では 100MPa という値が示されているが、今回の評価にあたり、発生応力を未照射時の耐力（約 600MPa）と比較するのは適切ではないのではないかと。仮に、この 100MPa と比較した場合、保管中の燃料被覆管応力にラック乗り上げ時に発生したと想定する応力を加えた約 63MPa では、あまり余裕がない。ラック乗り上げ時に発生した応力について、燃料棒 264 本に均一に力が加わったとして評価しているが、本当に均一に力が加わっているのか。例えば有限要素法を使用して、精密に評価してはどうか。</p>	<p>ラック乗り上げ時にある程度の不均等な荷重が作用したことは否定できないが、仮にラック乗り上げ時にある極端に不均等な荷重が作用すると想定（264 本の燃料棒のうち最外周 2 面の 33 本の燃料棒ですべての発生荷重を分担すると仮定）した場合でも、燃料被覆管に発生する応力は約 20MPa であり、この応力が使用済燃料ピットで保管中の燃料被覆管に作用したとしても、燃料被覆管応力（未照射時で約 600MPa）に対して十分小さい。</p> <p>有限要素法による評価については、精緻なモデルの構築方法や条件設定の妥当性など曖昧さのほうが大きいとされており、また上記のとおり、ラック乗り上げ時の荷重による発生応力も十分小さいことから、工学的判断により現状の評価手法は適切と判断する。</p> <p>（別添 3「ラックに乗り上げた際に燃料被覆管に生じた荷重の均等性」参照）</p> <p>なお、ご指摘の 100MPa の値は、周方向応力が生じた状態の燃料被覆管が高温から冷却される際に水素化物再配向が生じることにより、燃料被覆管の機械的特性が低下しない条件としてのしきい値であり、耐力等の機械的強度の制限値とは意味合いが異なるものと認識している。今回ラックに乗り上げた燃料は炉心から取り出した直後の燃料で、燃焼度も 35,000Mwd/t 程度であり、今回の評価にあたり発生した応力を未照射時材料の耐力と比較することに問題はないと判断する。</p>	R02 6/4	渡邊

4. 伊方発電所における所内電源の一時的喪失について

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
1	<p>断路器の故障は推定原因であるが詳細な調査はしているのか。</p>	<p>所内電源一時的喪失事象については、要因分析図を作成し、当該断路器について分解や分析等を行い、詳細な原因調査を実施している。(6月4日 資料1-4 P9～P15)</p> <p>推定原因については、実証試験(非接触状態の確認、放電試験)等によって、メカニズムの妥当性を確認したうえで推定したものである。(6月4日 資料1-4 P16～P18)</p> <p>また、計画的に開放点検を実施している中で、内部に粉が確認された南幹2号線乙母線断路器についても、同様の詳細な原因調査を行い、同様のメカニズムによって発生したものと推定している。 (6月4日 資料1-4 P27～P29, 参考-9)</p>	R02 3/24	中村
2	<p>原因は推定であるが小さなトラブルが続くときは大きな事故の前触れとなり得る。電源喪失の問題、断路器の回転部分の緩み等はめったにないことであり、どれくらいの確率で起こるのか。技術的な背景をもっと説明してほしい。</p>	<p>当該断路器は、ガス絶縁開閉装置であり、一般的に気中断路器とは異なり、導電部、絶縁部、接触部等は、すべてガスを封入したユニット内に密閉され、外部雰囲気の影響を遮断しているために長期間劣化せず、耐環境性に優れていることから信頼性の高い装置となっている。今回の事象は、嵌合部(セレージョン構造)の僅かな隙間が起因となって発生したものである。なお、今回と同様のメカニズムによる故障については、当該断路器メーカーにおいても過去に例はなかった。 (6月4日 資料1-4 P10)</p> <p>なお、過去の研究における一つの指標として、GIS(ガス絶縁開閉器)の事故確率としては、0.202×10^{-3} 件/(台・年)という数値がある。</p>	R02 3/24	占部
3	<p>断路器の故障が原因というが、このような不具合がないことを確認するのが試験だと思う。故障があっても、一時的にしろ電源喪失しないような試験を考えていただきたい。細かな点検に人が対応するのは100%は無理である。点検の開発や体制作りが大事。 特に断路器の故障で電源がなくなったのは改善していただきたい。</p>	<p>電源は重要であることから、多重化・多様化している。</p> <p>今回の事象も、すべての電源がなくなったものではなく、3号機においては外部電源として500kV送電線2回線、亀浦変電所からの配電線、また、非常用ディーゼル発電機や空冷式非常用発電装置など多種多様な電源が待機状態であったとともに、設計どおりに約10秒で非常用ディーゼル発電機から受電されている。</p> <p>しかし、一時的とは言え1, 2, 3号機すべての外部電源が喪失したことに鑑み、今後、試験を再開する際は1, 2, 3号機が同時に停電しないよう模擬負荷装置を使用することとしている。 (6月4日 資料1-4 P3, 4, 24, 26)</p>	R02 3/24	藤川

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
4	<p>同一構造の断路器において、既にいくつか放電したものを確認したとのことだが、この構造をもった断路器については、同様の故障が一般的に生じ得るとい認識なのか。</p>	<p>メーカー等の使用実態からは、短絡まで起こった事例はなかったと聞いているが、同一構造の断路器においては、嵌合部で隙間が生じて、今回のような放電が起こり得るとい前提に立って、部分放電の検知に関して常時計測することで対応したい。</p> <p>なお、メーカーと協議しながら、恒常的な対策についても検討していく。</p>	R02 6/4	中村
5	<p>調査結果の運転履歴の確認事項において、「メーカー動作確認回数である10,000回を十分に下回り（約350回）」とあるが、メーカーが実施している動作確認とはどのような試験なのか。</p>	<p>メーカーでは、断路器の機械的強度を確かめるため、JEC（電気規格調査会標準規格）に基づき、電圧をかけない状態で開閉動作を10,000回行う耐久試験を実施し、開閉に伴う機械的な損耗がないことを確認している。</p> <p>今回は、約350回程度しか開閉動作をしていない断路器で発生した事象であり、開閉に伴う機械的損耗ではなく、嵌合部の隙間で生じた放電が原因で短絡したものと推定している。</p>	R02 6/4	中村

5. 伊方発電所 連続発生したトラブルの総括評価について

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
1	<p>保全や保守の管理の状況が今どうなっているか、それが最近低下したことはないか、そして、今後に向けてどう改善していくかというか、定量的なものをどうやっていくか、というようなことを説明していただきたい。</p>	<p>今回のトラブルの連続発生を機に、伊方発電所の保守管理プロセスを調査したところ、①点検計画の策定、②保全の実施、③保全の有効性評価、④保守管理の有効性評価といったプロセスが定められたとおりに実施されており、各トラブルの発生原因が保守管理プロセスに起因するものではないことも確認できたことから、同プロセスは有効に機能していると確認できた。</p> <p>今後も、保守管理プロセスを適切に運用することにより、保守管理の継続的な改善を図っていく。</p> <p>(6月4日 資料 1-5 P30)</p>	R02 2/18	村松
2	<p>トラブルを未然に防ぐための努力、保守管理における不適合の未然防止の活動としては、通常は何がなされていて、疎かになったということはないかということ、実際に起こったトラブルの中で確認をしたい。</p> <p>併せて、それに関連する教訓、今後の改善というものがあれば教えていただきたい。</p>	<p>伊方発電所では、「①点検計画の策定→②保全の実施→③保全の有効性評価→④保守管理の有効性評価→①」といったPDCAサイクルを回すことにより、保守管理を実施している。</p> <p>今回の4事象については、下記のとおり、いずれも発生原因は保守管理プロセスに起因するものではないことを確認している。</p> <p>○事象Ⅰ（運転上の制限の逸脱）・事象Ⅱ（制御棒引き上がり）・事象Ⅲ（落下信号発信）は、設備故障が発生した事象ではなく、保守管理プロセスに起因するものではない。</p> <p>○事象Ⅳ（所内電源一時的喪失）は、過去に経験のない故障によるものであり、保守管理プロセス自体に不備があった訳ではない。</p> <p>なお、事象Ⅳについては、過去に経験のない故障によるものであり、本事象を想定した保全項目は設定していなかったが、これまで運用してきた保守管理プロセスに沿った是正処置を検討し、当該機器の監視強化等を行うこととした。</p> <p>(6月4日 資料 1-5 P30)</p>	R02 2/18	村松

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
3	<p>原子力安全を考えると、安全文化の醸成は大事。日本のような文化で外国ではできることが定着できるのか。具体的な施策はあるのか。</p>	<p>従来から伊方発電所では、安全文化醸成活動の目標として、WANO文書を参考に「健全な安全文化の特性」を定めており、その特性の一つに「継続的な学習」も含まれている。</p> <p>また、R2年3月31日に新規制定した「原子力発電所 安全文化育成および維持活動要領」において、目標、計画、実施、評価の手順を定めている。</p> <p>この活動の有効性については、年度業務計画の実施状況評価、意識調査（アンケート）およびCAP（改善措置活動）による傾向監視の評価や、JANSIやWANOによる外部評価を総合的に評価し、評価結果を次年度の活動へ反映して継続的に改善を進めていくこととしており、これらの取り組みは、海外の考え方も合致している。</p> <p>（6月4日 資料1-5 P32,33）</p>	R02 3/24	森
4	<p>安全文化の醸成については日本と外国とではやり方が全然違う。日本は管理をするという発想だが、外国は無条件でスタッフを尊重したうえで、スタッフが十分に勉強していなければ、勉強を促すということを繰り返して、全体のレベルを上げていくやり方。これは「OECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）※」で実施している。日本と外国とでは風土が異なるので、日本は日本の文化として、どうやっていくかというのを経験を積み重ねながらやって行ってほしい。</p> <p>※ 安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策・技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題点の検討、各国法の調査及び経済的側面の研究等を行っているOECDの専門機関。</p>	<p>一方、OECD/NEAにおいては、「国の文化は安全文化を醸成し強化するために考慮すべき要素の1つ」との考え方が示されている。当社としては、今後とも、海外の良いところを取入れつつ、日本のやり方で安全文化醸成を進めていくのが良いと考えており、新規制定した上記要領に基づく活動に加え、双方向のコミュニケーション形式による幹部と発電所員等の意見交換を継続して実施していくことで、安全文化醸成を進めていく。</p> <p>（6月4日 資料1-5 P20～23、35）</p>	R02 3/24	中村

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
5	<p>事象が重なったことについて、トラブルの未然防止のためのチェックがどうなっているのか等の要望を原子力安全専門部会でしており、今回の報告書を読んで、前向きに答えていただいていると感じた。</p> <p>新しいチームでチェックすることについては、前向きであり評価できる。作業要領書の充実とレビューの新チームの設置は、特に画期的であり、今までは規制側の対応だけであったが、これに対して、この機会により良くするという発想で一步踏み出した。今後、このチームがどれくらいの実効性を持ってやれるかが重要。また、どう運営していくかにかかっている。部会でもその予定について、伺ってきたい。</p>	<p>作業計画段階において、作業要領書や作業実施時期の妥当性に対するレビューを実施するとともに、継続的な改善を行うため、新チーム(プロセス管理チーム)を本年4月1日に設置し、活動を開始している。</p> <p>今後、本チームにおいてレビュー機能の有効性を検証し、組織に係る保安規定の変更認可を得て恒常的な組織を設置することとしている。</p> <p>(6月4日 資料1-5 P34, 40)</p>	R02 3/24	村松
6	<p>作業要領書の充実などがあるが、作業員が個人で勉強するのか、グループで勉強するのか手順の確認のやりかたも踏まえて、新チームでレビューしていくのが良いのではないかと。</p>	<p>作業関係者は、事前に、グループで作業要領書の内容を確認して、作業当日も再度確認を実施している。</p> <p>本年4月1日に設置した新チームは、工事施工会社から提出、作業担当課が確認した作業要領書について、リスクの低減や品質保証の観点からレビューを実施し、必要に応じ作業担当課と協議したうえで作業要領書の見直しが実施される。この流れを継続することにより、作業担当課と新チームの間で十分なコミュニケーションが図られ、関係者の「問いかける姿勢」に対する理解が更に深まっていくものと考えている。</p> <p>また、今後とも、見直し後の作業要領書を用いて作業関係者による読み合わせを行うことで、より確実な作業を実施していく。</p> <p>(6月4日 資料1-5 P40)</p>	R02 3/24	中村
7	<p>もう少し密に点検を行っていれば、連続して4つのトラブルは起きなかったと思われる。停止時に点検を一斉に行うとトラブル等が重なる確率が高くなると思われるため、発電所の運転中でも可能な点検については、こまめに実施してほしい。</p>	<p>伊方発電所では、信頼性保全分析により故障時のプラントへの影響度合い・故障発生の可能性等を踏まえて保全重要度を決定するなどし、設備ごとに保全方式や点検計画を定めて、保守管理を実施している。(6月4日 資料1-5 P29)</p> <p>設備によっては、停止時にしか点検できないものもあれば、必ずしもそうではないものもある。停止時にしか点検できない設備についても、運転中に状態監視を行うなど、トラブルを未然に防ぐための取り組みを行っている。</p>	R02 6/4	高橋

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
8	<p>6月4日 資料1-6のNo.10の回答「事象Ⅰ～Ⅲは設備の故障ではないので保守管理プロセスに起因するものではない」について解釈を確認したい。</p> <p>保全に関する活動は、ハードウェアの信頼性を確保する活動（保守管理プロセス）と作業管理の信頼性を確保する活動（トラブルが発生しないように作業計画すること）があり、保守管理プロセスに劣化はなかったと認識しているが、作業管理の信頼性を確保する行動にも劣化はなかったとの認識で良いか。</p>	<p>6月4日 資料1-5での整理としては、保守管理プロセスは委員のご理解どおりハードウェアの信頼性を確保する活動であり、一方、作業管理の信頼性を確保する活動については、保守管理プロセスとは別と整理し、その妥当性を定期検査プロセスの調査で確認している。</p> <p>調査の結果、保守管理プロセスは適切に運用されており、事象Ⅰ～Ⅲともハードウェアの故障ではなく、事象Ⅳは過去に経験のない故障であったことから、共通原因として保守管理プロセスの劣化があったわけではない。</p> <p>一方、定期検査プロセスについては、適切に実施されてきており同プロセスに劣化があったわけではないが、事象Ⅰ、Ⅲ、Ⅳの発生を踏まえて、新チームを設置し、独立した立場から、作業担当部門が策定した作業計画の妥当性を確認するとともに、継続的な改善を図るなどの改善策を実施することとした。</p>	R02 6/4	村松
9	<p>定量的リスク評価には、事前のリスク評価、起こった事象の重要度評価及び定量的なトレンド分析という3つの重要な役割があるが、それぞれどのような取組みを進めているのか。</p>	<p>事前のリスク評価については、従来からの取組みとして、定期検査を行う際には、作業計画段階において、停止時リスクの定量的評価を確認して周知するとともに、自主的な安全性向上のほか、規制庁において新たに定められた安全性向上評価届出制度の中で確率論的リスク評価等を実施しており、教育・訓練等への反映を進めている。</p> <p>さらに、本年4月に設置した新チームでは、作業実施時期の妥当性について、安全上重要な機器の作業が原子力安全リスク上問題のない時期に計画されていることを確認するといったレビューを行うこととしている。</p> <p>事象の重要度評価については、新検査制度に基づく原子力規制検査においても評価されることになっているが、事業者としてもこうした評価を実施したいと考えており、そのために確率論的リスク評価モデルの高度化等に取り組んでいる。</p> <p>定量的なトレンド分析については、規制で用いられる安全実績指標の他にも自主的に採取しているデータがあり、ハード、ソフトの観点から分析できるようにしている。</p>	R02 6/4	村松

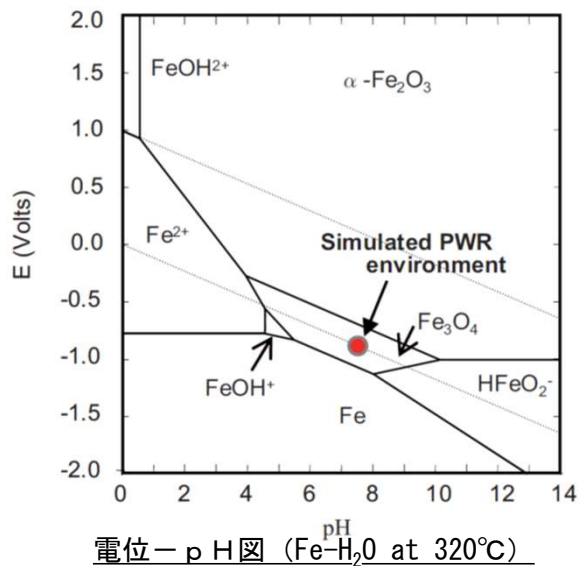
番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
10	再発防止策として新設する、作業計画等を独立した立場からレビューする新チームにおいては、リスク評価の活用は、非常に相性がよく、その業務に役立つと思うので、研鑽を重ね、また会社としても配慮してほしい。	新チームでは、原子力安全リスクに係るレビューも実施することとしており、安全上重要な機器の作業が原子力安全リスク上問題のない時期に計画されていることを確認することとしている。 (6月4日 資料1-5 P40) 新チームは、本年4月1日に活動を開始したばかりであるが、レビュー業務について試行を重ねつつ、チームとしての技量を上げていく。	R02 6/4	村松
11	新チームが行う作業要領書などのレビュー活動と、例えばCAPなどの新検査制度における取り組みは、両者の状況を見ながら、協力した形で進めるのが合理的と感じるがどうか。	新チームの活動は、トラブルを少なくするという観点では、新検査制度における取り組みと関係している。四国電力としては、リスク情報の活用とCAP制度の活用等パフォーマンススペースの取り組みによって、新検査制度を円滑に導入していきたい。	R02 6/4	中村
12	日本の文化に即した方法として、双方向のコミュニケーションにより、安全文化の醸成を図っていくこととしているが、安全管理とは峻別したかたちで進めることができると理解しているか。	安全文化は、いろいろな活動のベースとなるものと考えている。その中で、社長と原子力本部長が発電所員や関係会社等と行ったひざ詰めでの意見交換等の双方向コミュニケーションについては、相手が本音を言ってくれるであろう取り組みであるため、安全管理とは異なり、自発的な活動を推進できるものと考えている。	R02 6/4	中村
13	安全文化については、日本と海外とでは考え方や捉え方にかなり違うところはあるが、ぜひ、海外における取り組みも参考にしながら、トラブルの未然防止に努めてほしい。	4年に一度実施されているWANOのピアレビューでは、海外の発電所に勤務するピア(仲間)からレビューを受けている。また、JANSIからは定期的に海外の良好事例についての紹介を受けている。これらの取り組みを有効活用することにより、トラブルの未然防止に努めていく。	R02 6/4	中村
14	ひざを突き合わせて話し合うことは日本的でいいとは思いますが、それが「言いやすいこと」を担保していることには必ずしもならない。現状の取り組みに修正を求めるものではないが、社員が自律的に問題点を見出し、議論できる素地を作ることが大事だと思われるため、その点、今後、より考えていただきたい。	社員が自律的に問題点を見出すためにも、「問いかける姿勢」醸成の取り組みを実施している。 また、「言いやすい」環境を醸成するためにも、引き続き関係者間で緊密なコミュニケーションを実施することや、他社ベンチマークにより良好事例を積極的に取り入れるといった職場環境の改善活動を継続していく。 (6月4日 資料1-5 P36)	R02 6/4	森

6. 全般

番号	委員コメント	四国電力回答	日付	コメント 委員
1	委員も、発電所の細かな設備がすべてわかるものではない。例えば、電源の構成とか、燃料の移動など動画等があれば理解が進むと思う。	各トラブルの6月4日 資料 1-1～1-4 に現場の状況が分かる写真を追加した。	R02 3/24	中村

1. 1次冷却系統の水質管理とマグネタイトの生成

- 1次冷却系統の水質管理に関しては、電気伝導率、pH、塩素イオン、溶存酸素等を適切に管理しており、これまで管理値を逸脱したことはなく、設備の健全性を確保する観点から、pHは6.8~7.3で管理しており、水素添加を行うことにより溶存酸素を低くしている。
- このような環境下における鉄の酸化物は、安定的にマグネタイト (Fe_3O_4) として存在することが知られており、堆積物の分析結果がマグネタイトであったこととも整合する。
- また、1次冷却系統設備の主要材料はステンレス鋼であり、水質管理された環境下においては、不働態皮膜が形成されているため、設備の健全性に影響を与えるような腐食は生じない。



	腐食速度(600F, 316°C)				
	[mg/dm ² · month]				
	溶液中の pH (572 F, 300°C)				
	5.4	5.6	5.9	6.9	7.2
・ 溶液					
B as H ₃ BO ₃	1500	純水		1500	
アルカリ (Li, K), M[ppm]				10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
アンモニア [ppm]					
Inconel 600	27	12(概算)	9	5	4
304 SS	5	2	2	2	2

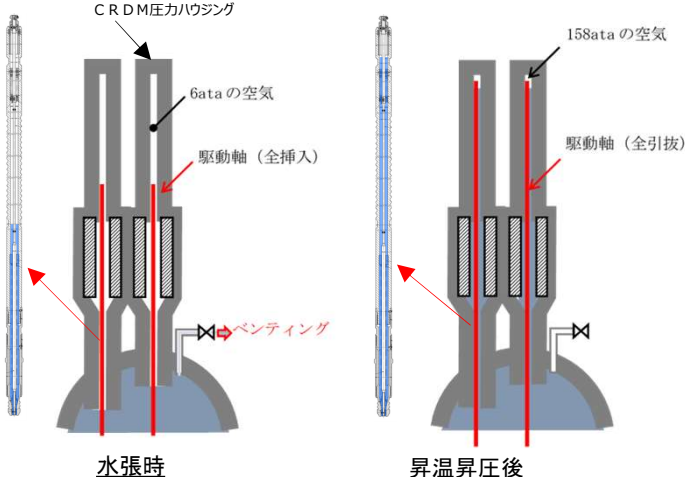
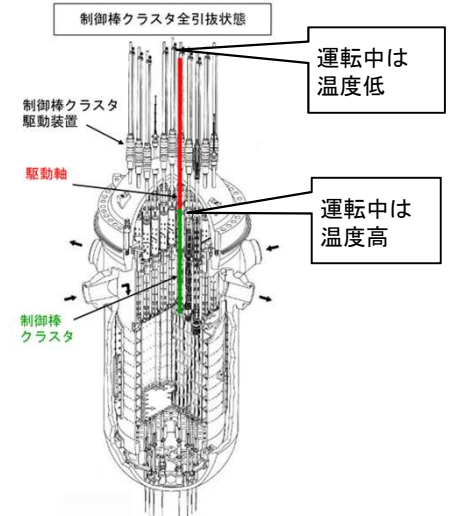
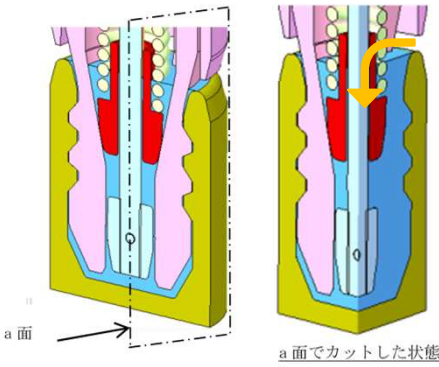
SUS304の腐食速度は約0.3μm/year

注) 10 mg/dm² · month = 0.000 055 inches / year

H₃BO₃ アルカリ溶液中の材料の腐食速度

2. マグネタイトの堆積過程

- スパイダ頭部にマグネタイトが堆積する現象としては、駆動軸内表面で生成したものが剥離し堆積するケースと1次冷却系統内で生成したものが当該部に侵入し堆積するケースがある。

① 駆動軸内表面で生成		② 1次冷却系統内で生成
①-1 プラント起動初期段階	①-2 プラント運転中	
<ul style="list-style-type: none"> 制御棒クラスタ駆動装置（CRDM）圧カハウジングは、その構造上、1次冷却系統水張時に空気が残留。 プラント起動初期段階（昇温昇圧後）のCRDM圧カハウジング内には加圧された空気が残留し、溶存酸素が有意に高くなる期間が存在。 プラント起動初期の駆動軸は全引抜状態にあり（制御バンクDは除く）、この際、駆動軸内側は全長にわたり高溶存酸素・高温環境に置かれ、SUS410製駆動軸内表面では鉄酸化物が生成し、運転時間の経過に伴って、マグネタイトに変態。  <p>水張時 昇温昇圧後 プラント起動初期のCRDM圧カハウジング内の環境</p>	<ul style="list-style-type: none"> プラント運転中、駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間を経て鉄イオンを含む1次冷却材が駆動軸内部に浸入。 運転中の駆動軸近傍の下端と上端では温度差があると推定され、駆動軸内部では温度差（密度差）を駆動源とする1次冷却材の自然循環流が発生。 駆動軸内部を循環する過程の温度変化に伴って溶解度が変化し、析出した鉄イオンが駆動軸内表面でマグネタイトを形成。  <p>運転中の駆動軸・制御棒クラスタ位置と駆動軸内部の自然循環流</p>	<ul style="list-style-type: none"> 駆動軸外部で生成したマグネタイトが、駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間を経てスパイダ頭部と駆動軸接手の隙間部に侵入し堆積。 駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間は数mm程度と狭いことから、今回、スパイダ頭部内で確認された堆積物は、ケース①で生成したマグネタイトが堆積したもののほうが比較的多いと推定。  <p>駆動軸外部で生成したマグネタイトが侵入 スパイダ頭部内への侵入経路</p>

- 堆積物には薄膜状のマグネタイトが確認されている。以下のことから、堆積物は、マグネタイトが駆動軸内表面で生成・成長し、剥離・落下してスパイダ頭部に堆積したものが多い。

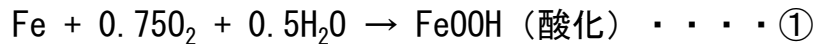
- 上表①のマグネタイト生成は、類似の環境である駆動軸外表面でも生じるが、外表面は、プラント起動時や運転中に駆動軸を操作（制御棒を動作）させることにより、マグネタイトを含むクラッドの排出を促進させていることから、内表面に比べてマグネタイトが成長する可能性は低い。
- 上表②に示すとおり、駆動軸と制御棒クラスタのスパイダ頭部との隙間は数mm程度と狭いことから、1次冷却系統や駆動軸の外表面から、比較的大きく成長したマグネタイトがこの隙間から侵入しスパイダ頭部に堆積する可能性は低い。

3. マグネタイトの生成メカニズム(1/3)

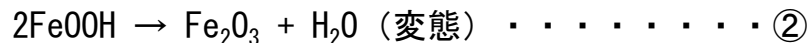
➤ マグネタイトの生成メカニズムは以下のとおりである。

①-1 駆動軸内表面で生成 (プラント起動初期段階)

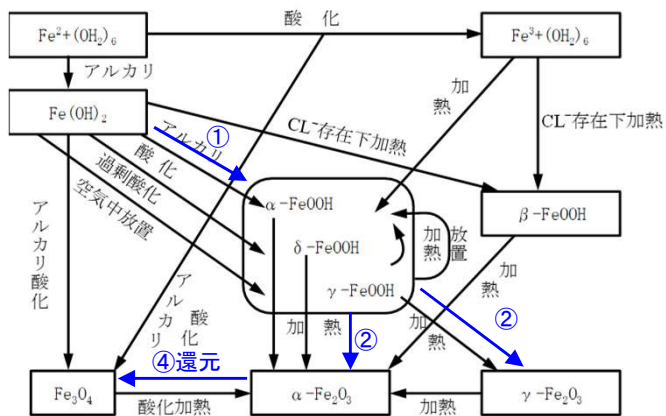
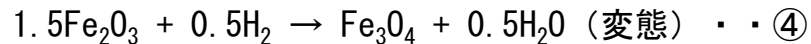
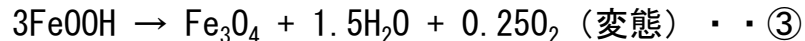
- ✓ 高溶存酸素と中～高温が組み合わされた環境において、駆動軸内表面で鉄酸化物が生成する。



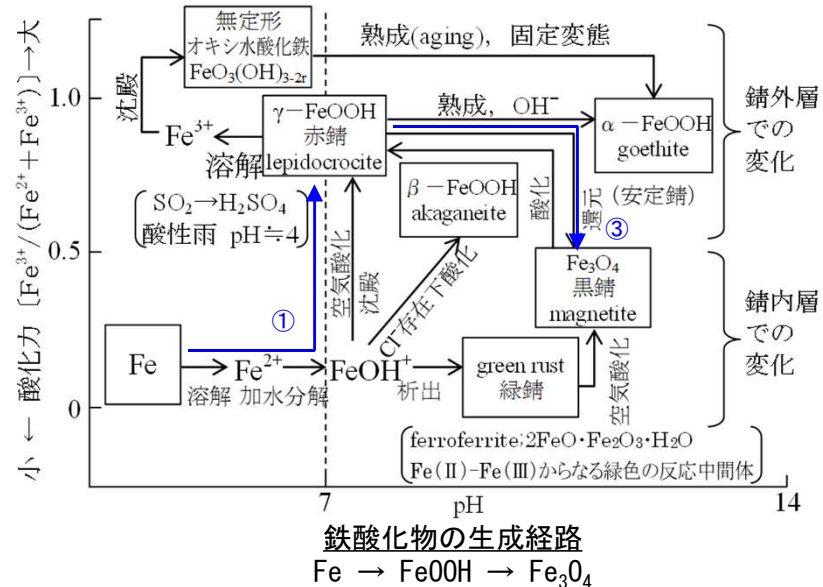
また、高温ではヘマタイト(Fe₂O₃)に変態する。



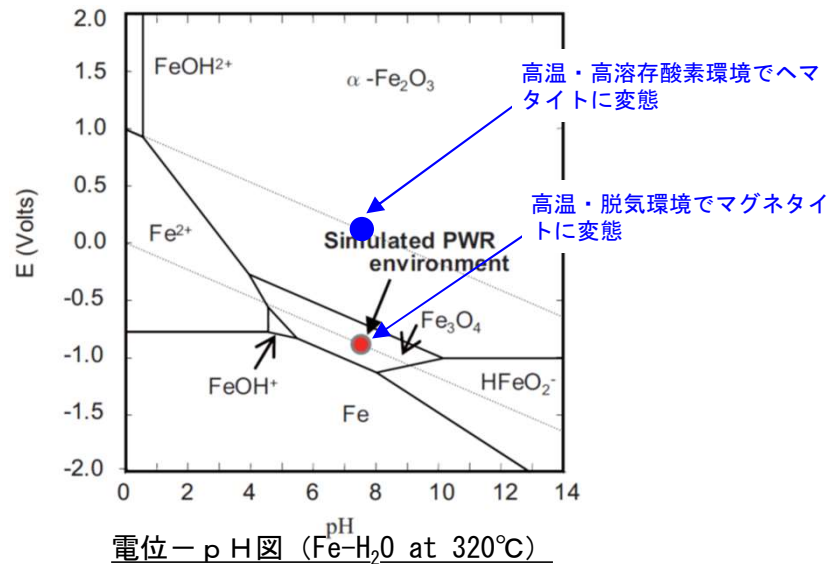
- ✓ 運転時間の経過に伴って、生成した鉄酸化物は高温脱気環境でマグネタイト(Fe₃O₄)に変態する。



鉄酸化物の生成経路
FeOOH → Fe₂O₃ → Fe₃O₄



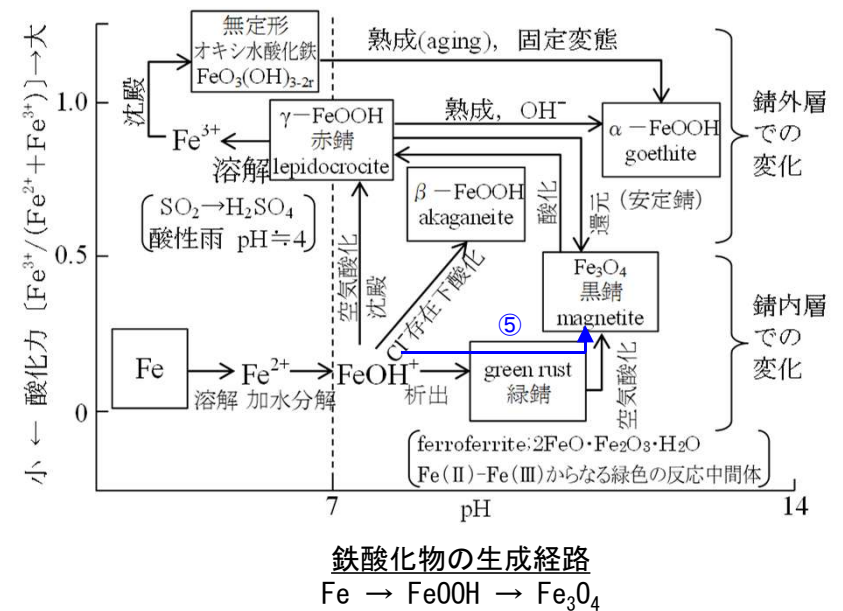
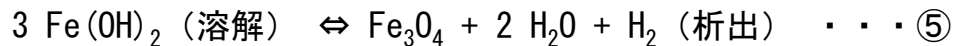
鉄酸化物の生成経路
Fe → FeOOH → Fe₃O₄



3. マグネタイトの生成メカニズム(2/3)

①-2 駆動軸内表面で生成 (プラント運転中)

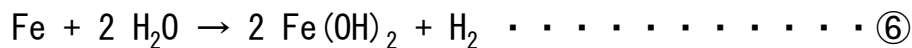
- 1次冷却系統内には1次冷却系統設備から溶出した鉄イオンや系統内への補給水に含まれる鉄イオンが存在している。
- 運転中の駆動軸下端部は、原子炉容器頂部の温度と同程度の温度(温度高)となるが、上端部は、CRDM冷却ファンによる冷却の影響を受ける(温度低)。このため、駆動軸内部ではこの温度差(密度差)を駆動源とする自然循環流が発生する。
- 一般的に、1次冷却系統中の鉄イオンの溶解度は温度の関数であることから、駆動軸内部を循環する過程の温度変化に伴って溶解度が変化する。
- これにより、溶解していた鉄イオンが駆動軸内表面で析出し、駆動軸内表面でマグネタイトを形成する。



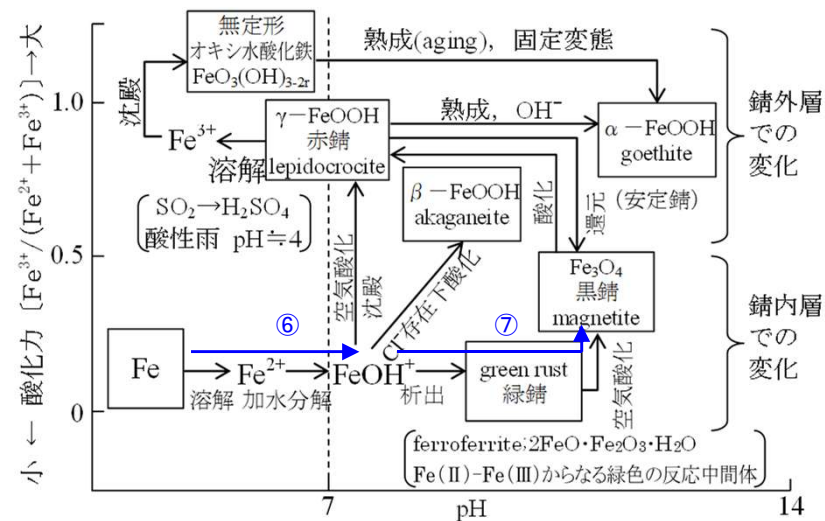
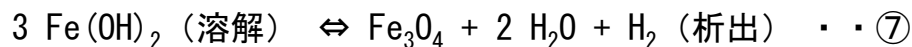
3. マグネタイトの生成メカニズム(3/3)

② 1次冷却系統内で生成

- プラント運転中の高温脱気環境においてステンレス鋼等から鉄イオンが溶出する。



- その後、高温脱気環境において次の反応でマグネタイトが生成する。



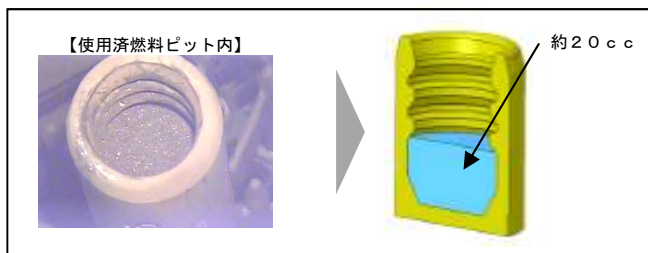
鉄酸化物の生成経路
 $\text{Fe} \rightarrow \text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$

4. 駆動軸の健全性

- 制御棒クラスタのスパイダ頭部内に確認されたマグネタイトが、すべて駆動軸内表面から溶出した鉄により生成したと仮定した場合であっても、駆動軸の健全性に影響を与えるものではない。

マグネタイト生成量の推定

- 制御棒クラスタのスパイダ頭部内に確認された堆積物の外観確認（水中カメラ）の結果、堆積物は20cc程度の量と推定。



- 堆積物量20ccに相当するマグネタイト生成量は約40gと推定。

マグネタイト生成量

$$\begin{aligned}
 &= \text{堆積物量} \times \text{かさ密度} \\
 &= 20\text{cc} \times 2 \\
 &= 40\text{g}
 \end{aligned}$$

マグネタイトの真密度は $5.2\text{g}/\text{cm}^3$ であるが堆積物充填率を1/2以下と仮定し、かさ密度を $2\text{g}/\text{cm}^3$ と設定

駆動軸の健全性

- マグネタイト40gに相当するマルテンサイト系ステンレス鋼のFe酸化量は約29gと推定。

$$\text{Fe酸化量} = 40 \div 1.38$$

1.38はマグネタイトの酸化物換算係数（酸化物質量とFe当量の金属質量比）

- 駆動軸のマルテンサイト系ステンレス鋼部品の合計重量：数十kg
- 以上より、駆動軸の合計重量に対する酸化減量率は0.1%未満と微量であり駆動軸の健全性への影響はない。

- マルテンサイト系ステンレス鋼部品の主体である駆動軸本体内部表面でのみ酸化が生じたと仮定すると、その酸化量は数 μm 程度。
- 駆動軸本体の板厚最小値は数mmオーダーであり、酸化量の数 μm は板厚に対し十分小さいことから、駆動軸機能に影響を及ぼすものではない。

5. マグネタイトの設備への影響

- 駆動軸本体の材料は、制御棒位置の検出機能の観点より磁性材を使用する必要がありSUS410を使用している。また、接手部は耐摩耗性の観点より硬度の高いSUS403を使用している。
- 駆動軸と制御棒クラスタの結合・切り離し作業の際に、スパイダ頭部内に堆積しているマグネタイトが駆動軸に付着していたとしても、重量確認と位置確認により確実に結合・切り離しがされていることを確認するため問題ない。
- また、強磁性であるマグネタイトが悪影響を及ぼす可能性がある設備としては、磁性材料を使用している設備が考えられるが、1次冷却系統設備の磁性材料の使用箇所は下表のとおりであり、マグネタイトがプラントの安全に悪影響を及ぼす可能性は低い。

設備名	磁性材料の有無 (接液部)	磁性材料の 部品名	磁性材料の 材質名称	設備への影響
原子炉容器	無	—	—	—
制御棒クラスタ 駆動装置	有	ラッチメカの各部品	SUS410	<ul style="list-style-type: none"> ・ マグネタイトが原因で制御棒クラスタ駆動装置の動作不良が発生する可能性はあるものの、マグネタイトもクラッドの一種であり、これまでに経験したクラッドによる動作不良の防止策として、 <ul style="list-style-type: none"> ・ 1次冷却系統の浄化流量を最大としクラッド低減に努める ・ プラント起動時や運転中に制御棒を動作させクラッド排出を促進する対策を実施しており、動作不良が発生する可能性は低い。
		駆動軸	SUS403, SUS410	
制御棒クラスタ	有	スプリングリテーナ	SUS630	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造上マグネタイトが付着しても設備の機能に影響はない。
炉内構造物	無	—	—	—
燃料集合体	無	—	—	—
蒸気発生器（1次側）	無	—	—	—
加圧器	無	—	—	—
1次冷却材ポンプ	無	—	—	—
配管	無	—	—	—
弁	有	弁棒	SUS630	<ul style="list-style-type: none"> ・ 制御棒クラスタ駆動装置廻りで生成されたマグネタイトのうち、弁まで到達するものはごく微量と考えられ、その大きさも微小と考えられることから、設備に悪影響を及ぼす可能性は低い。 ・ これまでにマグネタイトによる弁の動作不良は報告されておらず、弁分解点検でもマグネタイトが弁棒に付着している様子は確認されていない。

6. まとめ

- 1次冷却系統の水質および温度環境下においては、鉄の酸化物は安定的にマグネタイト (Fe_3O_4) として存在することが知られており、堆積物の分析結果がマグネタイトであったこととも整合する。
- スパイダ頭部にマグネタイトが堆積する現象としては、駆動軸内表面（プラント起動初期段階、プラント運転中）や1次冷却系統内で生成されたマグネタイトが堆積したケースが考えられる。また、今回確認された薄膜状のマグネタイトは、構造上、駆動軸内表面で生成したものである。
- これらのマグネタイト生成メカニズムは、実機の設備構成を踏まえたものであり、1次冷却系統の水質および温度環境下においては一般的な化学反応式等で示されるものであることから、確度の高いメカニズムである。
- 仮に、制御棒クラスタのスパイダ頭部内に確認されたマグネタイトが、すべて駆動軸内表面から溶出した鉄により生成したと仮定した場合であっても、駆動軸の健全性に影響を与えるものではない。
- また、強磁性であるマグネタイトが悪影響を及ぼす可能性がある設備としては、磁性材料を使用している設備が考えられるが、磁性材料を使用している設備は限定的であり、その設備の構造や機能を踏まえると、マグネタイトがプラントの安全に悪影響を及ぼす可能性は低い。

制御棒クラスタ引き上がり発生メカニズムの整理結果(1/2)

- 本事象のメカニズムについては、作業手順、制御棒クラスタ頭部へのマグネタイトの堆積、駆動軸等の観察等の事実から、不完全結合に至る様々なケースを検討し、実証試験や解析等も行ってメカニズムを特定している。
- 今回の再発防止対策により、制御棒クラスタの引き上がり事象は確実に防止することができる。
- クラッドの一種であるマグネタイトは鉄の酸化物であり、全く発生しないようにすることは難しいがクラッドは被ばくの原因ともなっていることから、最新の知見である学会標準に示される被ばく低減のための改良水化学技術をすべて適用するなど、極力発生量を低減させる取り組みを行っている。今後も新たな知見等があれば積極的に採用するなど、発生低減に向けた取り組みを継続していく。
- 堆積物（マグネタイト）の生成・堆積については、定期検査毎に堆積物を除去することとしているが今後、以下の取り組みも継続していく。
 - ・ 定期検査時に制御棒クラスタ頭部に堆積しているマグネタイトを除去する際には、水中カメラにて堆積状況観察・記録して情報を蓄積し、傾向監視するなど保全に役立てていく。
 - ・ 他プラントの状況について、情報収集・情報交換を行う。
- さらに長期的な堆積物の低減に向けて、実験などで効果的な低減の方法を研究するなど知見の拡充を図り、更なる安全性の向上に努めていく。

制御棒クラスタ引き上がり発生メカニズムの整理結果(2/2)

事象発生メカニズム	メカニズム推定の根拠	再発防止対策	今後の取り組み
マグネタイト生成	<ul style="list-style-type: none"> 文献により、実機設備構造および運転環境においてマグネタイトが生成（存在）することを確認 	<p>— (水質管理徹底の継続)</p>	<p>まずは、以下の取り組みを継続していく。</p> <ul style="list-style-type: none"> 定期検査毎のスラッジ堆積状況の確認（傾向観察） 他プラントの情報収集、情報交換による知見の蓄積
マグネタイト堆積	<ul style="list-style-type: none"> 水中カメラにより、スパイダ頭部に堆積物を確認 分析の結果、堆積物はマグネタイトであることを確認 	<ul style="list-style-type: none"> 定期検査毎にスパイダ頭部内の状況を確認し、堆積物が確認された場合は除去する 	<p>さらに、長期的な堆積物の低減に向けて、実験などで効果的な低減の方法を研究するなど、マグネタイト生成・堆積に係る知見拡充に取り組んでいく。</p>
取り外し軸スタック	<ul style="list-style-type: none"> 取り外し軸が確実に下降したことを確認する手順はなかった 構造上、スパイダ頭部1山目で不完全結合状態に至るには、取り外し軸が途中でスタックする必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> 駆動軸着座前に取り外し軸のスタック有無を確認する手順を追加することにより、スタック要因に拘わらず、スタックを起因とした事象発生を防止 	<p>左記の対策を確実に実施することにより、制御棒クラスタと駆動軸の不完全結合を確実に防止する。</p>
不完全結合	<ul style="list-style-type: none"> 駆動軸接手部の通常の着座状態とは異なる位置に局所的な接触痕を確認 解析により、着座状態から取り外し軸のスタックが解除された場合に不完全結合状態（スパイダ頭部1山目）となることを確認 	<ul style="list-style-type: none"> 駆動軸着座後の再度の重量確認および位置計測をする手順を追加することにより、事象発生防止をより確実なものとする 従来実施していた、上部炉心構造物吊り上げ時の水中カメラでの監視を継続 	
制御棒クラスタ引き上がり	<ul style="list-style-type: none"> 不完全結合状態となるケースを検討し、調査結果等と整合するケースを特定したうえで、実証試験を実施し、スパイダ頭部1山目での引き上がりを確認 		

ラックに乗り上げた際に燃料被覆管に生じた荷重の均等性

- ラックに乗り上げた燃料集合体は、クレーンにて鉛直に吊り下ろしている最中にラックに乗り上げたものであること、燃料集合体落下信号発信時でもクレーンの荷重は約167kg残存していたことから、事象前後を通じて燃料集合体は鉛直に直立した状態を維持しており、燃料集合体への横方向の曲げ荷重等は発生していないと考えられる。また、当該燃料集合体は、下部ノズルの脚部3箇所でラックに乗り上げたことから、下部ノズルがラックへ乗り上げ時に発生した荷重は、全ての燃料棒に対して概ね均等に作用したものと考えている。
- ここで、ラックに乗り上げた際に燃料集合体にある程度の不均等な荷重が作用した可能性は否定できないが、均等な荷重が作用すると想定した場合、燃料被覆管に発生する応力は約3MPaとなり、耐力（未照射時で約600MPa）と比較して十分小さいことから、ある程度の不均等な荷重が作用したとしても、燃料被覆管の健全性に問題はない。
- 仮に、燃料集合体に対して右図のように極端に不均等な荷重※が作用すると想定した場合、燃料被覆管に発生する応力は約20MPaとなり、この応力と使用済燃料ピットで保管中の燃料被覆管応力（約60MPa）が同時に作用したとしても、燃料被覆管の耐力に対して十分小さい。

※ラックに乗り上げた燃料集合体の最外周2面の燃料棒（33本）のみで、ラック乗り上げ時に発生したすべての荷重を分担（当該燃料棒では均等に分担）したと仮定。

