

# 令和 2 年 1 月に伊方発電所で 連続発生したトラブルについて

令和 3 年 8 月 5 日  
四国電力株式会社

## はじめに

- 伊方発電所3号機は、令和元年12月26日から運転を停止し、第15回定期事業者検査（以下、「定期検査」）を実施しておりますが、令和2年1月にトラブルが連続して発生し、地域の皆さまをはじめ多くの方々に多大なご心配をおかけしました。  
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・伊方町長から頂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。  
また、愛媛県知事・伊方町長から頂いたご要請に対しては、ご要請項目のうち、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。  
これらの対応状況については、本年3月の環境管理委員会において報告させていただきました。
- ご要請項目のうち、更なる安全性確保のための対応（マグネタイト発生メカニズム等の研究、断路器の恒常的な対策）についても、現在、取り組みを進めているところであり、本日は、主にこの対応状況についてご説明いたします。

== これまでの経緯 ==

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）

令和2年3月17日 各事象の原因と対策の報告書を愛媛県へ提出

令和2年7月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会で対策内容が適切であるとご判断。

令和2年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頂く。  
(条件付きでの定期検査再開をご了解を頂く。)

令和2年8月5日 定期検査再開

# 目次

---

## 1. 原因と対策の報告書の対応状況

- (1) 個別事象の改善策実施状況
- (2) 総合評価の改善策実施状況

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

- (1) 取り組み状況
- (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査
- (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策
- (4) 新チームの活動

[補足説明資料 1] 連続して発生したトラブルの概要等

[補足説明資料 2] マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査

[補足説明資料 3] 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策

[補足説明資料 4] 新チームの活動

# 1. 原因と対策の報告書の対応状況

## (1) 個別事象の改善策実施状況

令和3年3月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会から状況が変化した箇所を赤字で示す。

改善策	令和元年度	令和2年度					令和3年度	備考
	3月以前	4月～6月	7月～9月	10月～12月	1月～3月	4月～6月		
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		▼3/1 新規教育資料の施行 ▼4/1 安全文化醸成 社内規定施行 ▼4/21,23,27 保安規定88条の教育						[完了] (継続実施)
		教育は継続実施						
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ーの引き上がり		▼4/3 作業要領書の改正 ▼3/16 スラッジの除去完了(次サイクル分) ▼4/1 スラッジ除去をEAM作業タスクに追加(将来対応)						[完了]
事象Ⅲ 燃料集合体点検時の落下信号発信		▼3/16 作業要領書の改正			▼11/5 設備対応 (点検装置ラックの改良) ▼11/11 設備対応 (カメラ・照明の追加設置) ▼11/11 中断していた燃料集合体の点検作業を実施			[完了]
事象Ⅳ 所内電源の一時的喪失		▼3/12 500kV,187kV断路器の状態確認完了 ▼4/28 当該断路器の部品取替完了		▼10/7 模擬負荷を用いた保護リレー試験実施				[再発防止策完了]
		断路器 (13台) の内部開放点検						
		部分放電診断・内部異物診断						
		恒常的な対策の検討						
								恒常的対策は14～19ページ参照

# 1. 原因と対策の報告書の対応状況

## (2) 総合評価の改善策実施状況 (1 / 2)

令和3年3月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会から状況が変化した箇所を赤字で示す。

改善策	令和元年度	令和2年度				令和3年度	備考
	3月以前	4月～6月	7月～8月	9月～12月	1月～3月	4月～6月	
(1)作業要領の充実		▼2/13 3-15定検の全作業要領書の見直し完了					[完了]
(2)作業計画段階におけるレビューの強化 (新チームの設置) a.作業要領のレビュー b.作業実施時期のレビュー		▼4/1 新規作業要領書への反映のための社内規定施行 ▼4/1 新チーム設置 レビュープロセスの構築		▼9/25プロセス管理課設置			[完了] (継続実施) 今後も改善点の抽出、改善策の検討を継続して実施する
(3)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		▼3/31 標準発注仕様書の改正 (作業後に振り返りを実施する旨の追記) ▼4/1 CAP本格運用開始	CAPによる改善活動を継続				[完了] (継続実施)
		下記事項について整理し、EAM※2に登録する ・作業計画段階のレビュー結果 ・作業要領書の気付き事項 ・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 ・メカからの各種情報					

※1 CAP : Corrective Action Program (是正処置プログラム) , ※2 EAM : 統合型保守管理システム



# 1. 原因と対策の報告書の対応状況

## (2) 総合評価の改善策実施状況 (2 / 2)

令和3年3月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会から状況が変化した箇所を赤字で示す。

改善策	令和元年度	令和2年度				令和3年度	備考
	3月以前	4月～6月	7月～8月	9月～12月	1月～3月	4月～6月	
(4)安全意識の共有 ・当社幹部等との意見 交換充実		意見交換を継続実施 (令和2年度は26回実施)					[完了] (継続実施)
(5)技術力・現場力の 維持向上 a.教育訓練機会の増加 b.ベテラン社員・作業 員からの技術継承		教育・訓練計画の検討 (関係会社・協力会社と協議して検討)					[完了] (継続実施)
		▼2/13 3-15定検作業要領書見直しにあわせ ベテラン社員・作業員のノウハウ反映					
		ベテラン社員・作業員からの技術継承を継続					
(6)従来進めてきた保安活 動の一層の推進		従来の活動を継続的に推進					[完了] (継続実施)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切な組織・体制の維持</li> <li>・リスク情報活用の推進</li> <li>・保守管理プロセスの着実な運用</li> <li>・職場環境の改善活動</li> <li>・外部組織によるレビュー</li> </ul>					

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (1) 取り組み状況 (1 / 2)

令和3年3月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会から状況が変化した箇所を赤字で示す。

要請事項	取り組み状況
<p><b>①更なる安全性向上に向けた詳細調査の実施</b> 「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」</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"> <li>マグネタイト発生メカニズム・挙動等についての調査・研究計画を策定し、令和2年から2年程度かけて調査・研究する計画としている。</li> <li>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。</li> <li>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ている。</li> <li>フェーズ1での調査・研究の成果は、日本保全学会第17回学術講演会(7/6～8)で発表した。引き続き、学会や専門誌等での発表を目指す。</li> </ul> <p style="text-align: right;"><b>9～13ページ参照</b></p>
<p><b>②恒常的な対策による安全性の確保</b> 「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"> <li>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。</li> <li>恒常的な対策の対応方針の検討完了。</li> <li>現地工事は、現在実施中の3-15定期検査で一部実施し、次回3-16定検で本格的な工事を実施する予定。（令和5年に完了見込み。）</li> </ul> <p style="text-align: right;"><b>14～19ページ参照</b></p>
<p><b>③安全文化の醸成</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>日々の安全文化醸成活動を継続的に実施。（継続実施）</li> <li>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。</li> <li>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）</li> <li>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。</li> <li>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）</li> </ul>
<p><b>④新チームの研鑽</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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については、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。</li> <li>新チームの活動は日本保全学会第17回学術講演会(7/6～8)で発表した。</li> <li>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。</li> </ul> <p>なお、改善活動はC A Pを活用して継続的にやっていく。</p> <p style="text-align: right;"><b>20～24ページ参照</b></p>

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (1) 取り組み状況 (2 / 2)

令和3年3月29日 伊方原子力発電所環境安全管理委員会から状況が変化した箇所を赤字で示す。

要請事項	取り組み状況
<u>⑤技術力の維持・向上</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>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<b>実施した</b>。</li><li>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)</li><li>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引き続き行う。(継続実施)</li><li>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<b>した</b>。訓練は<b>令和4年度より実施する</b>。</li><li>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)</li></ul>
<u>⑥県民の信頼回復</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>再発防止策等の当社取り組み状況を説明する動画等を制作し、情報発信を行った。(令和2年8月～10月)</li><li>毎年実施している訪問対話活動において、昨年度は、令和2年10月～令和3年1月に使用済燃料乾式貯蔵施設の概要や連続して発生したトラブルなどの伊方発電所の状況に関するリーフレットを配布し、意見・質問への対応を実施した。(継続実施)</li><li>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への取り組み)</li></ul>
<u>⑦安全性の不断の追求について</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>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。</li><li>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。</li><li>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。</li></ul> <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。(令和元年5月24日に初回の届出を実施)</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ト引き上げ」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。

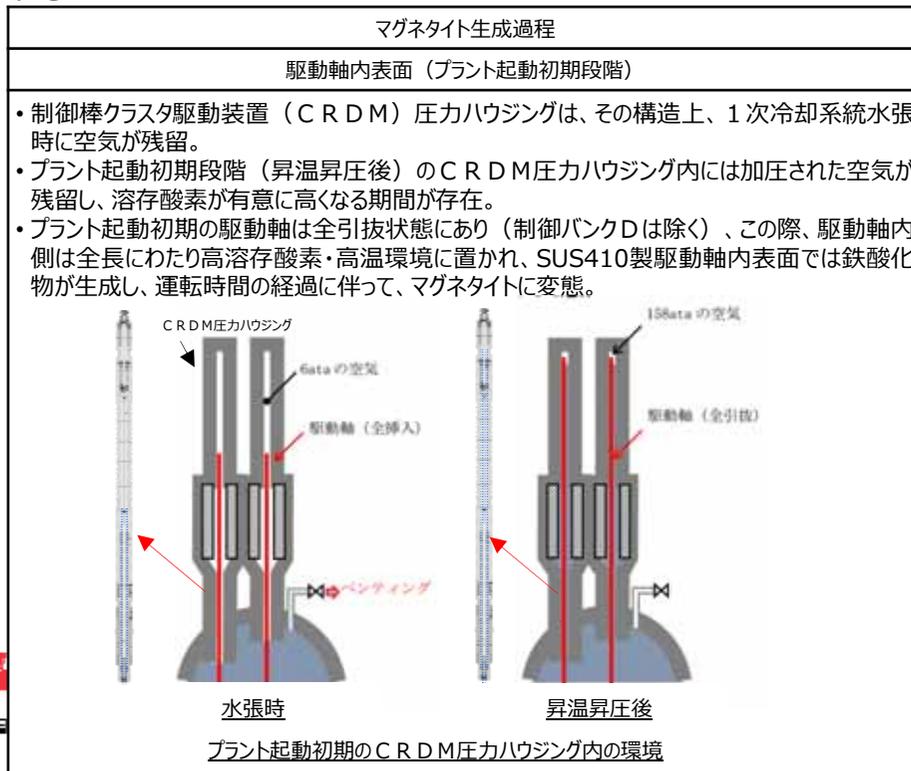
### ⑦安全性の不断の追求について

これまで、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. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (1 / 5)

- 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、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、調査を実施する。
- 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）を使用する。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）も使用する。



- 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. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (2 / 5)

#### 【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、SUS410等における腐食生成物の生成状況、腐食速度等に関する調査を実施する。
- 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段階で実施する計画としている。
- 令和2年度は、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）を試験で確認した。結果は、日本保全学会第17回学術講演会（7月6日～8日）で発表した。
- 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の腐食速度の定量的な調査等を実施している。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (3 / 5)

#### 【フェーズ1 調査の概要】

		①酸化性雰囲気試験	②酸化性雰囲気→還元性雰囲気試験
試験概要		1次冷却システム水張後の駆動軸ハウジング内の環境を想定した試験条件にて、SUS410とSUS316の腐食生成物生成状況を確認する。	①酸化性雰囲気試験と同じ条件で試験を実施したのち、1次冷却システム水質調整後を想定した試験条件にて、SUS410とSUS316の腐食生成物生成状況を確認する。
試験条件	気層部	大気ガス (酸素濃度：21% 窒素濃度：79%)	大気ガス (酸素濃度：21% 窒素濃度：79%) ↓ 窒素ガス (窒素濃度：100%)
	液相部	ほう素－水酸化リチウム水溶液 (ほう素濃度：4,500ppm リチウム濃度：1.0ppm)	ほう素－水酸化リチウム水溶液 (ほう素濃度：4,500ppm リチウム濃度：1.0ppm) 還元性雰囲気試験ではヒドラジンを添加
試験材料		SUS410 (実機駆動軸同等材)、SUS316	
試験装置		チタン製オートクレーブ装置を使用	
試験手順		<ol style="list-style-type: none"> <li>装置容器内に試験片を入れ、試験片が浸る程度まで試験液(B-Li水溶液)を加えて蓋を閉止する。(気相部は大気)</li> <li>電熱ヒーターによって容器外部から加温し、試験液温度を目標温度(200℃)まで昇温する。(昇温により内部の圧力が200℃での飽和蒸気圧(1.55MPa)まで昇圧し、保持していることを確認する。)</li> <li>昇温・昇圧状態で2,5,10日 (SUS316は10日のみ) 保持した後、自然冷却・降圧して装置を開放。</li> <li>試験片および試験液を回収し、試験片表面と試験液中の腐食生成物を分析。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>「①酸化性雰囲気試験」(10日)と同じ試験を実施する。</li> <li>装置内試験液の溶存酸素濃度を測定し、当量のヒドラジンを添加して蓋を閉止する。</li> <li>ガス導入管より窒素を通気し、気層部を窒素に置換したのち装置を密閉。</li> <li>電熱ヒーターによって容器外部から加温し、試験液温度を目標温度(200℃)まで昇温する。(昇温により内部の圧力が200℃での飽和蒸気圧(1.55MPa)まで昇圧し、保持していることを確認する。)</li> <li>昇温・昇圧状態で10日保持した後、自然冷却・降圧して装置を開放。</li> <li>試験片および試験液を回収し、試験片表面と試験液中の腐食生成物を分析。</li> </ol>
分析項目		<ol style="list-style-type: none"> <li>外観観察</li> <li>試験片スケール表面分析 (取出の都度) <ul style="list-style-type: none"> <li>元素組成分析 (EPMA)</li> <li>結晶構造分析 (X線回折)</li> </ul> </li> <li>試験液懸濁物分析 (最終取出時のみ) <ul style="list-style-type: none"> <li>元素組成分析 (EPMA)</li> <li>結晶構造分析 (X線回折)</li> </ul> </li> </ol>	

- ・プラント起動初期の駆動軸内の状態を模擬し、上記条件での腐食試験を実施する。
- ・プラント起動初期の駆動軸内側は、全長にわたり高溶存酸素、高温環境 (①酸化性雰囲気試験の状態) におかれるが、時間の経過に伴って溶存酸素は除去される (②還元性雰囲気試験の状態)。

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (4 / 5)

#### 【フェーズ1 調査の結果】

- ▶ プラント起動初期段階を模擬した水質環境下では、試験雰囲気に関わらず駆動軸材料であるSUS410表面で生成される腐食生成物（酸化皮膜）の主成分はマグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）であった。
- ▶ また、SUS410における試験液中の懸濁物の主成分は酸化性雰囲気ではヘマタイト（ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ）であったが、還元性雰囲気への移行にともないマグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）への変態が認められた。
- ▶ 比較対象として用いたSUS316についても、同環境下で生成される腐食生成物（酸化皮膜及び懸濁物）の主成分はマグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）であった。
- ▶ なお、今回の調査では回収される懸濁物の量に材料間で大きな差があり、今回の試験条件においてはSUS410の方がSUS316に比べ腐食が進行する環境であったと言える。
- ▶ 詳細な「観察結果」、「元素組成、結晶構造分析」等は[補足説明資料2]参照

#### <SUS410>

		主成分	副成分
酸化性雰囲気	酸化皮膜	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ (推定)
	懸濁物	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$
酸化性→ 還元性雰囲気	酸化皮膜	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ (推定)
	懸濁物	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

#### <SUS316>

		主成分	副成分
酸化性雰囲気	酸化皮膜	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	有意なピークを検出できず
	懸濁物	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ (推定)
酸化性→ 還元性雰囲気	酸化皮膜	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ (推定)
	懸濁物	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\alpha, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ (推定)

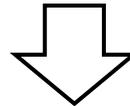


## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (2) マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (5 / 5)

#### 【フェーズ1 調査結果のまとめ】

- 一般的にステンレス材料の腐食表面は、比較的粗な外層酸化物と緻密な内層酸化物からなる二層構造であることが知られている。外層酸化物の主な元素は鉄であり、一部イオン状または粒子状の腐食生成物として水中に放出される。一方、クロムについては、内層酸化物内に留まりやすい傾向がある。
- 今回の調査において、試験液中から分離された懸濁物や、外層酸化物と考えられる試験片表面の主成分は鉄であることが確認され、腐食生成物の生成過程の推定メカニズムと整合している。
- これらの鉄は、還元性雰囲気中でマグネタイトに変態しており、制御棒クラスタのスパイダ頭部内から回収された堆積物の形態とも合致した。
- この懸濁物の元素組成についても、1次冷却システムで確認される金属クラッドと比較すればニッケル、クロム成分が少ないことも、制御棒クラスタのスパイダ頭部内から回収された堆積物と合致している。



**以上より、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。**

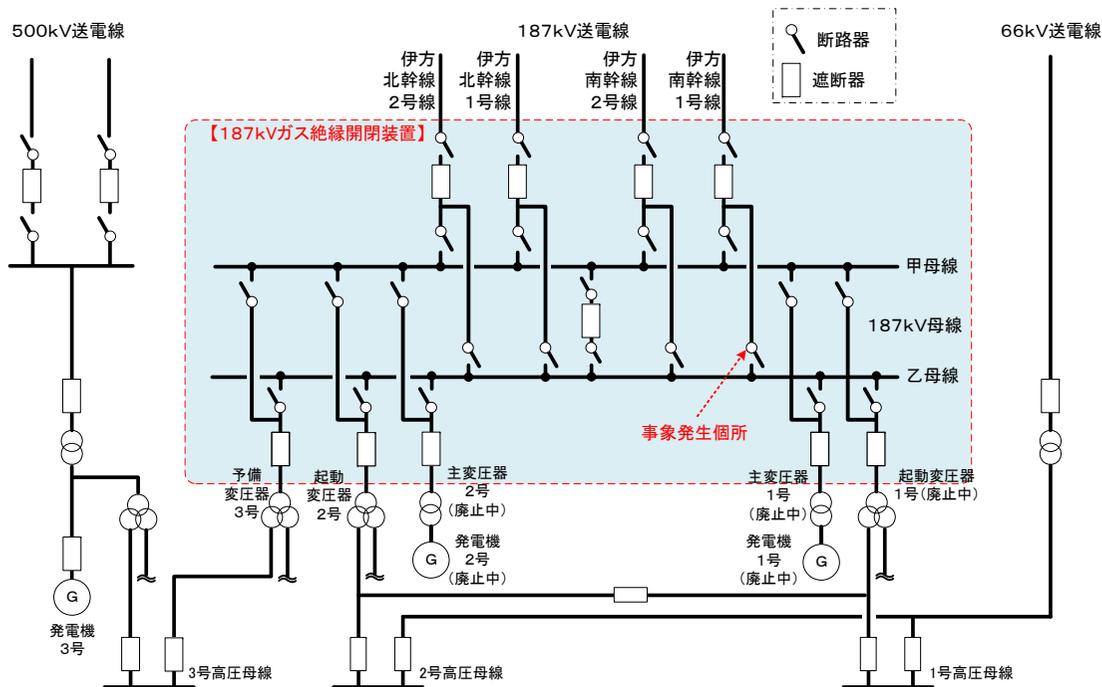
#### 【フェーズ2 調査の計画内容】

- 腐食生成物の生成過程を踏まえ、腐食に影響すると思われるパラメータ（温度、pH、酸素濃度、時間）を検討する。
- 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する。
  - (1) 温度による影響 150℃ ~ 250℃程度
  - (2) pHによる影響 pH 5.8 ~ pH 7.3 (285℃) 程度
  - (3) 溶存酸素濃度の影響 還元性 ~ 酸化性
  - (4) 浸漬時間 ~4000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する。

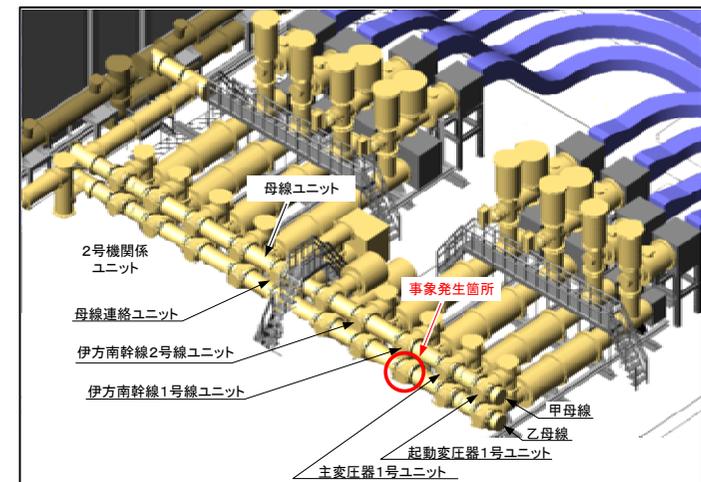
## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策 (1 / 6)

- 伊方発電所1、2号機の187kVガス絶縁開閉装置（以下「187kV GIS」という。）において、1個の断路器で短絡が発生し送電線からの受電が停止した。これによって、伊方発電所の所内電源が一時的に喪失した。
- 断路器で短絡が発生した原因は、断路器内部の可動接触子と絶縁操作軸埋金の嵌合部（以下、「嵌合部」）が非接触状態（断路器が開放状態）で電圧が課電されることによって、嵌合部に放電が発生し、最終的に短絡に至ったものと推定した。



伊方発電所 所内電源系統 概要図



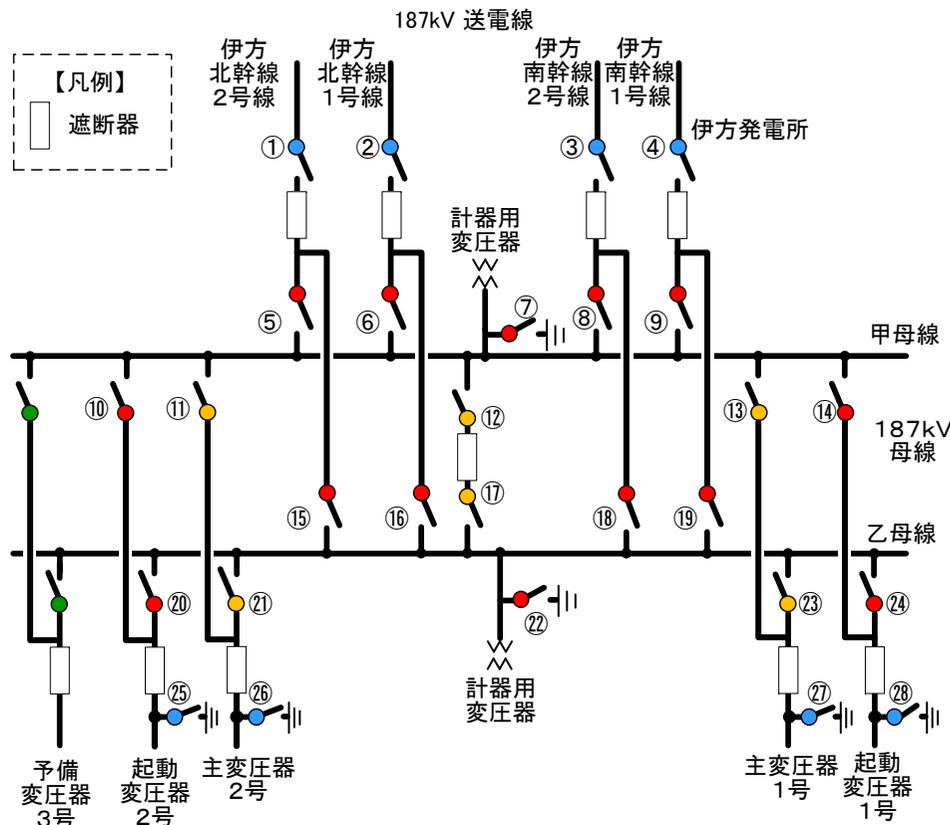
伊方発電所 187kV GIS全体概要図

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策 (2 / 6)

#### 【恒常的な対策の対象断路器】

- 短絡が発生した断路器と同様の構造の断路器（当該断路器および接地開閉器を含む。） 28台のうち放電が発生するおそれがある断路器14台（下図中「●」）については、現在、監視強化を実施しているが恒常的な対策を実施することとした。
- なお、以下の14台については、放電が発生するおそれがないことから対策対象外とした。
  - ・開放状態で嵌合部に電圧が課電されないもの
  - ・配置上、嵌合部が常時接触するもの



断路器	恒常的な対策の対象/対象外	台数
	対象	14台 (5 6 7 8 9 10 14 15 16 18 19 20 22 24)
	対象外 〔開放状態で電圧が課電されないため対策不要の断路器/接地開閉器〕	6台 (11 21 12 17 13 23)
	対象外 〔配置上、嵌合部が常時接触するため対策不要の断路器/接地開閉器〕	8台 (1 2 3 4 25 26 27 28)

なお、「●」は構造が異なるため対応不要の断路器

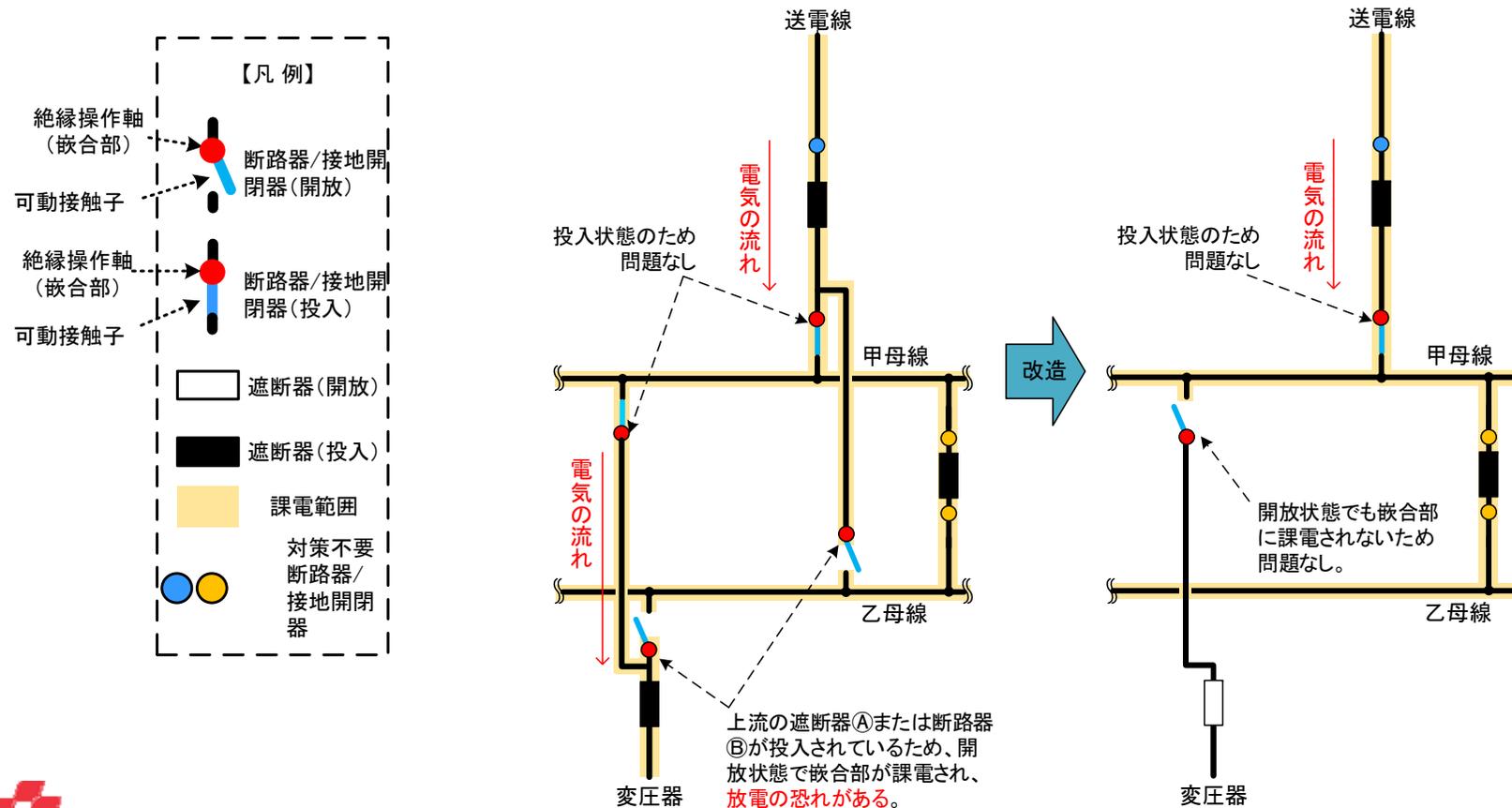


## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策 (3 / 6)

#### 【恒常的な対策の考え方】

- 187kV母線に接続される遮断器は、1、2号機の運転を前提に柔軟な運用・保守が可能となるように甲母線・乙母線のどちらにでも接続できるよう2系統の断路器を設置しているため、片母線の断路器を投入した際、一方の断路器は開放状態で嵌合部が課電され放電の恐れがある状態となる。
- 1、2号機が廃止となったことを踏まえ、運用上必要がなくなった断路器を撤去して、片母線での接続とすることで、断路器が開放状態で嵌合部に電圧が課電されないようにする。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策 (4 / 6)

#### 【恒常的な対策】

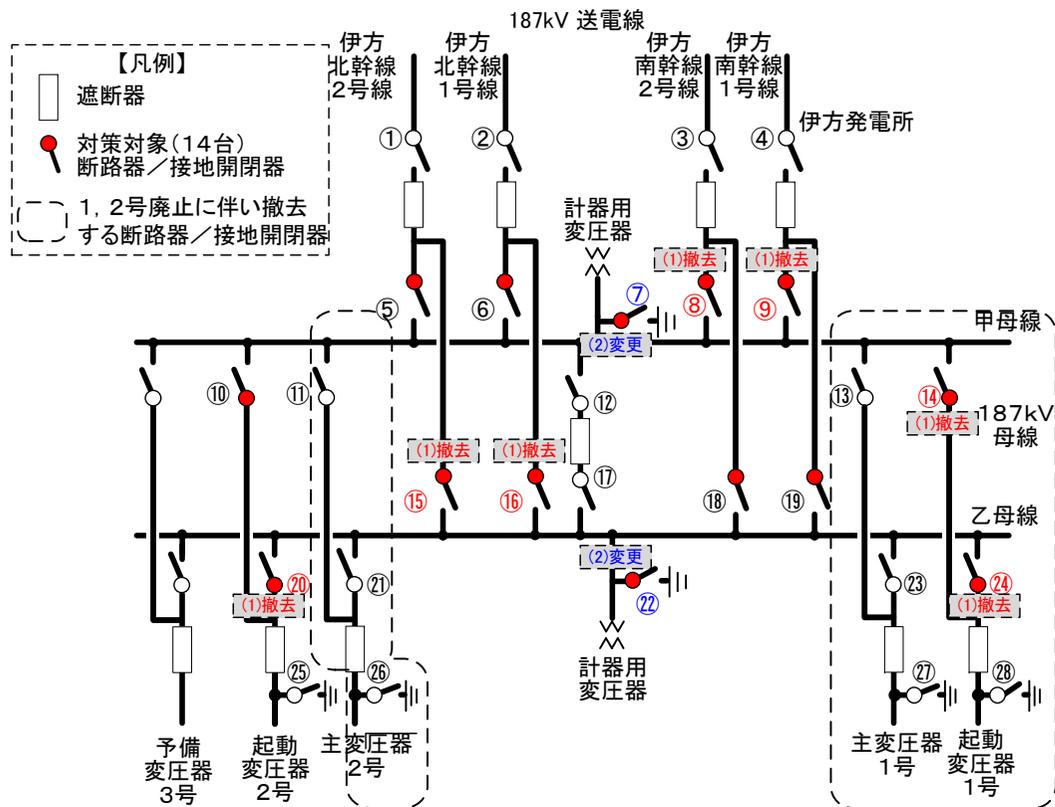
#### (1) 断路器の撤去

断路器 (15 16 20 8 9) を撤去し片母線接続とすることで、残った断路器 (5 6 10 18 19) が開放状態で嵌合部に電圧が課電しない構成となる。

また、断路器 2 台 (14 24) は 1、2 号機廃止に伴い撤去する。

#### (2) 接地開閉器の変更

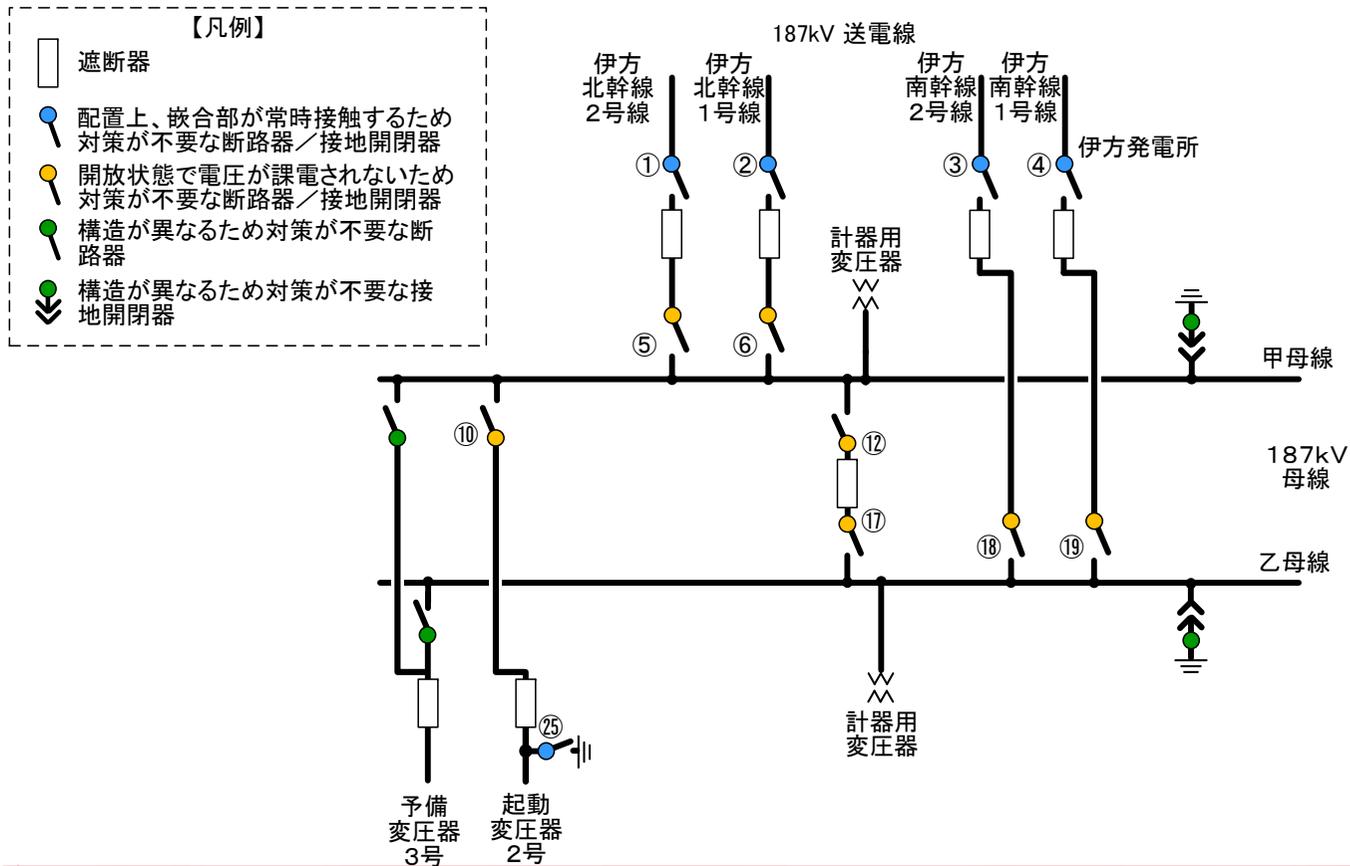
接地開閉器 (7 22) は撤去し、嵌合部に電圧が課電されない接地開閉器を新たに設ける。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策（5 / 6）

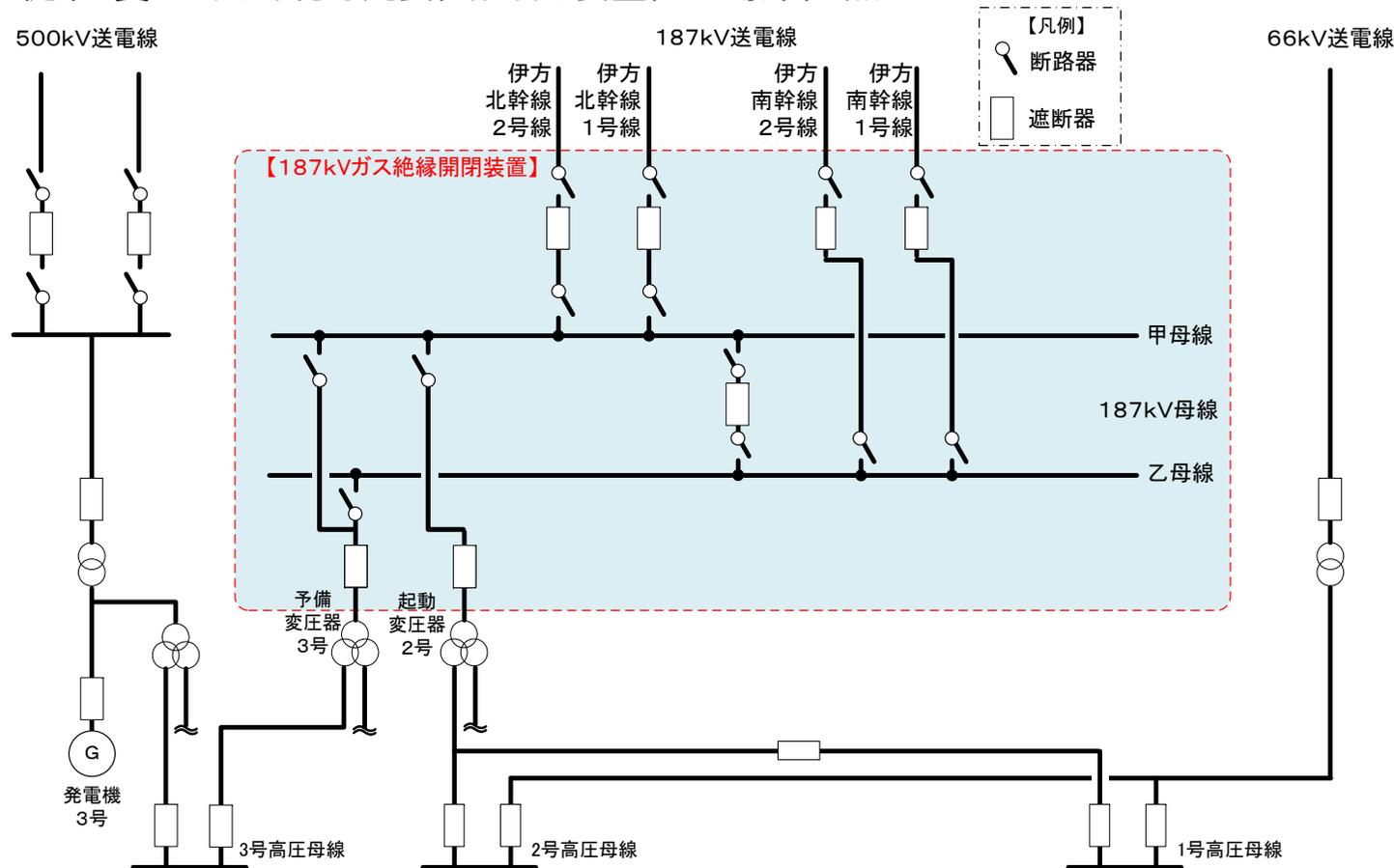
- 恒常的な対策完了後の伊方発電所187kV GISの構成図は下図のとおりとなる。
- 本工事は、187kV母線の停電が必要であるため3号機の定期検査中に実施する。また、部品製作等の進捗に合わせて進めるため、現在実施中の第15回定期検査で一部実施し、次回の第16回定期検査で本格的な工事を実施する予定。
- 恒常的な対策が完了するまで、部分放電診断（常時計測）と内部異物診断による状態監視（1カ月に1回計測）を確実に継続実施する。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (3) 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策 (6 / 6)

- 恒常的な対策完了後の伊方発電所の所内電源系統は下図のとおりとなる。
- 今回の恒常的な対策の完了後においても外部電源は、
  - ・3号機は500kV送電線が2回線と187kV送電線が4回線
  - ・1、2号機は187kV送電線4回線と66kV送電線が1回線であることは従来と変わらず、十分な冗長性があり、安全性への影響は無い。



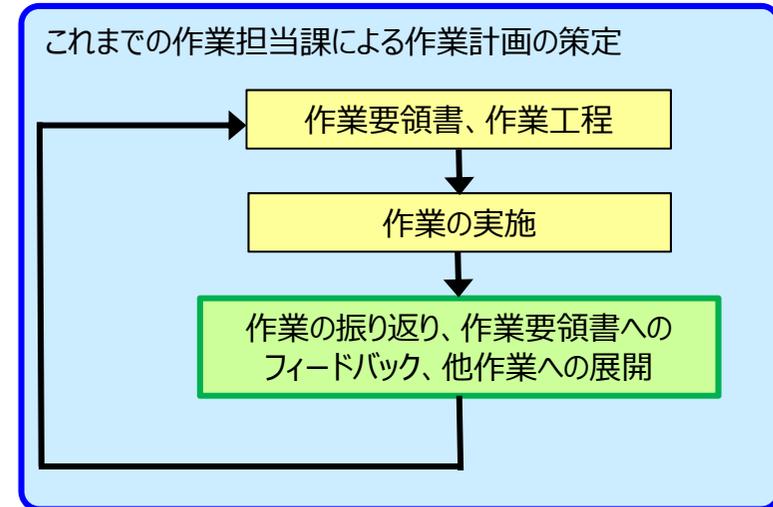
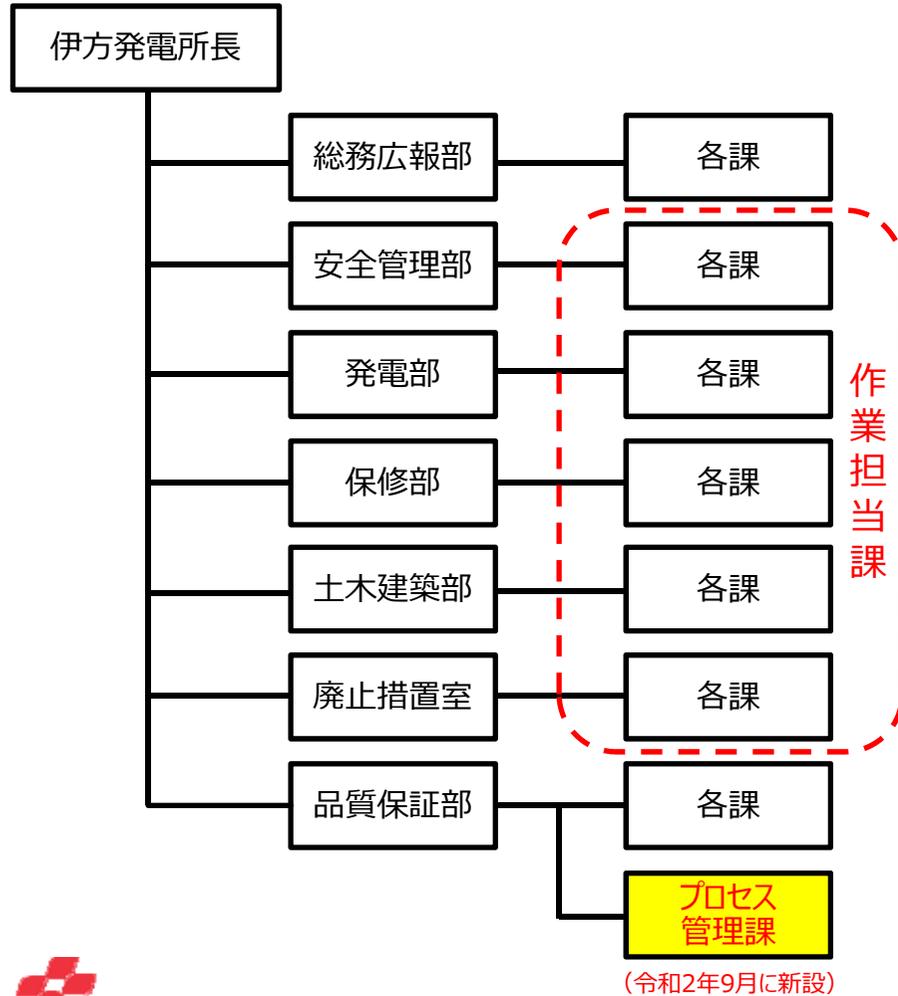
伊方発電所 所内電源系統 概要図

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (4) 新チームの活動 (1 / 5)

- 作業担当課が策定した作業計画を独立した立場からレビューし、妥当性を確認するための新チームを令和2年4月に設置し、令和2年9月に恒常的な組織として「プロセス管理課」を設置した。

伊方発電所組織概略図

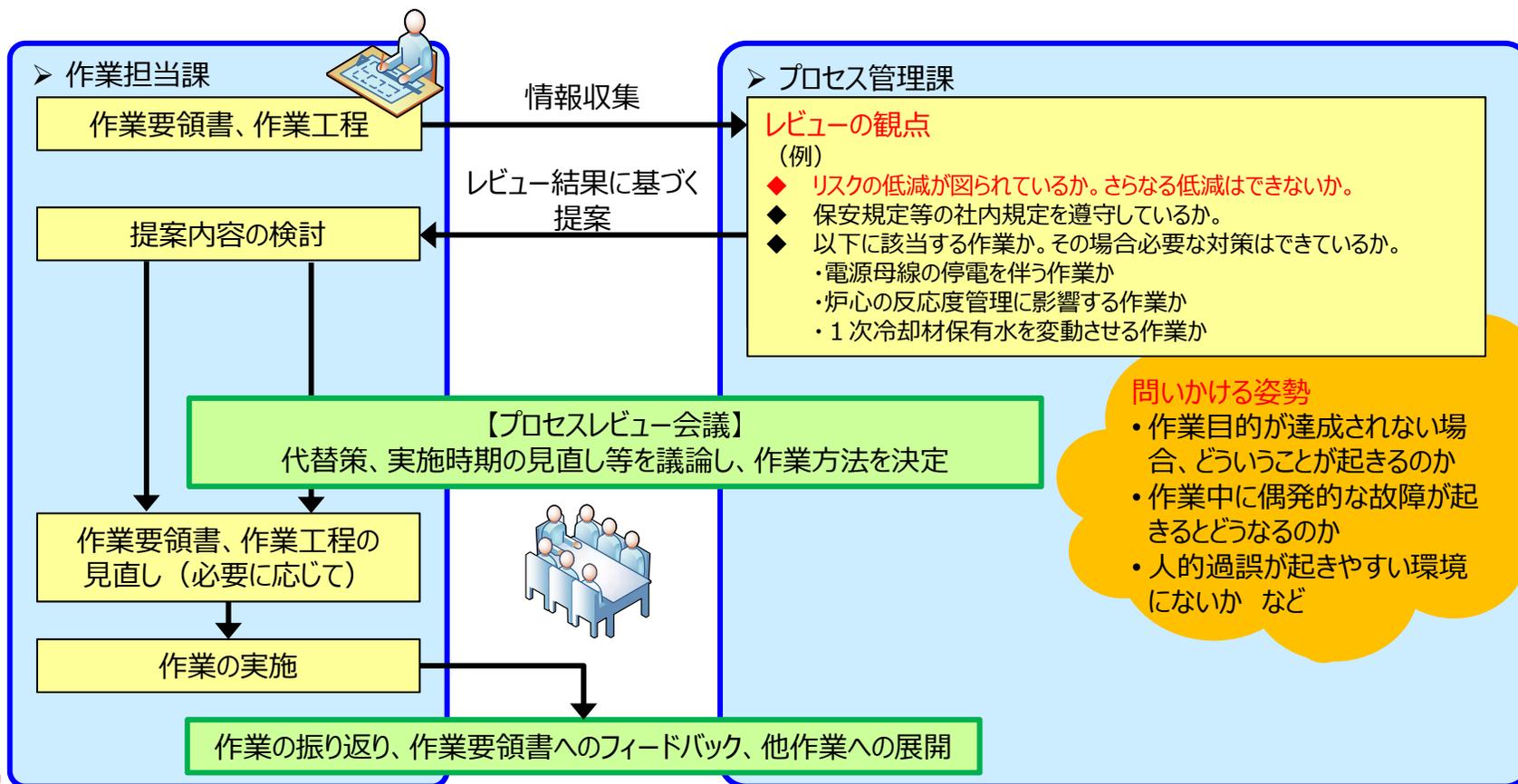


プロセス管理課を設置し、作業担当課から独立した立場で作業計画をレビューする。

## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (4) 新チームの活動 (2 / 5)

- プロセス管理課での活動は、リスクマネジメントの視点を取り入れ、リスク上重要な作業に着目してレビューを行う。
  - ✓ 作業担当課が策定した定期検査等の作業要領書や作業工程等の作業計画を独立した立場でレビューする。
  - ✓ 作業計画の妥当性を様々な観点から確認し、必要により提案を実施（作業に特化した提案、作業に対する一般的な提案）
- これらの活動については、日本保全学会第17回学術講演会（7月6日～8日）で発表した。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (4) 新チームの活動 (3 / 5)

活動実績例① 3号機 使用済燃料ピットポンプ3 B 電動機点検作業計画の確認

使用済燃料ピット (S F P) ポンプ3 Bの点検が計画されている。

#### <プロセス管理課でのレビュー>

##### <情報収集・確認>

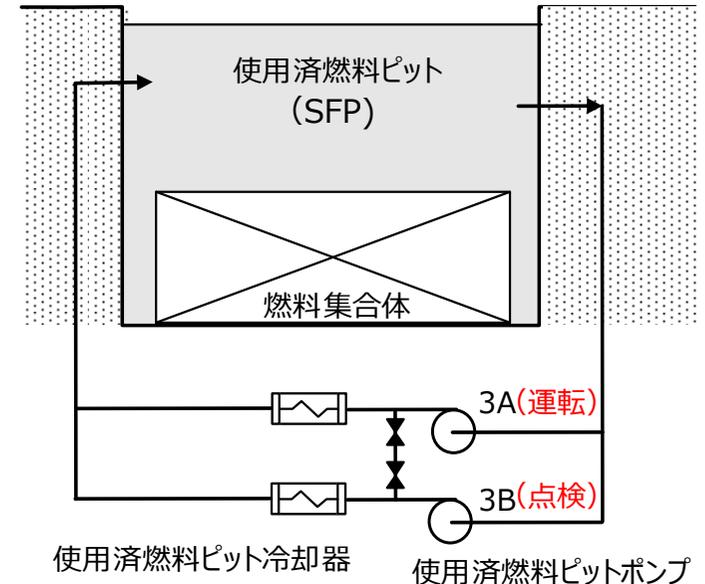
- ✓ 本点検に伴いS F P ポンプ2 台中1 台が運転不能となるため、本点検期間中に万一、運転中のS F P ポンプ3 Aが運転不能となった場合、使用済燃料の冷却ができなくなるリスクがある。
- ✓ 作業担当課では、万一、ポンプが全台運転不能となった場合でも、点検中のS F P ポンプ3 Bの復旧に要する時間は最大約2 4 時間であることから、S F P 温度が52℃に到達する(41.1時間)前に点検中のS F P ポンプ3 Bを運転してS F Pの冷却を再開できることを確認。

##### <提案>

- ✓ 作業員に本作業のリスクを認識してもらうため、本作業はS F P 冷却機能喪失となるリスクがあることを作業前に作業員に周知することを提案。
- ✓ 提案が反映されていることを確認。

##### <参考：S F Pの温度評価>

- ・S F P ポンプ1 台運転中のS F P 温度：30.2℃
- ・S F P ポンプ全台使用不能時のS F P 温度上昇率：0.53℃/時間 (ポンプ点検時点におけるSFP内の燃料集合体の崩壊熱から算出)
- ・S F P ポンプ全台使用不能時S F P 温度 52℃ (社内規定) 到達時間：41.1時間後
- ・S F P ポンプ全台使用不能時S F P 温度 65℃ (制限値) 到達時間：65.7時間後



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (4) 新チームの活動 (4 / 5)

活動実績例② 2号機 原子炉容器等のサンプル採取作業※ (廃止措置作業) 計画の確認

2号機 原子炉容器等のサンプル採取作業が計画されている。

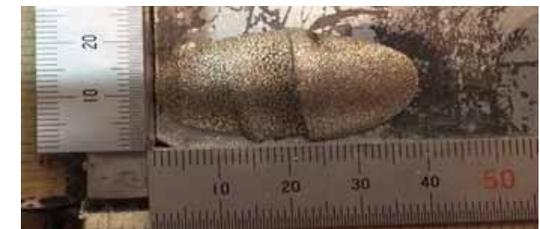
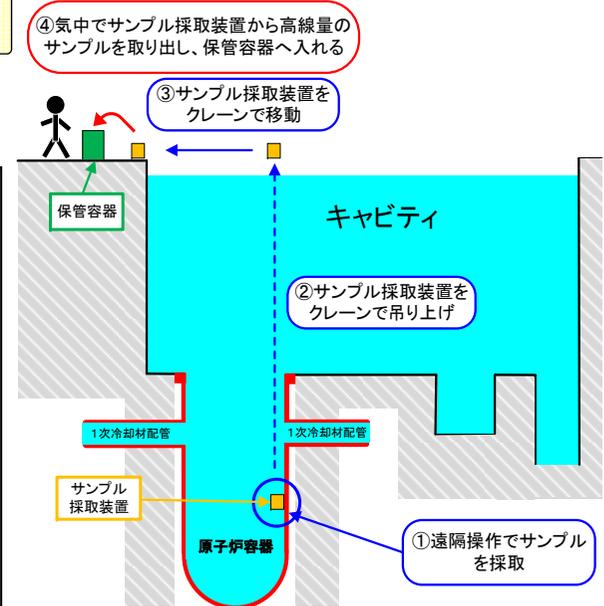
#### <プロセス管理課でのレビュー活動>

##### <情報収集・確認>

- ✓ 本作業は、キャビティに水を張った状態で専用装置を用いた遠隔操作で実施することから作業員が被ばくする可能性は低いが、採取したサンプルを床面に引き上げ保管容器に入れる作業は、作業員が高線量のサンプルを気中で取り扱うため、作業員の被ばくリスクがある。
- ✓ 作業担当課で作業の被ばく管理を取りまとめた「放射線作業計画書」を作成していることを確認。

##### <提案>

- ✓ 被ばく低減対策を確実に実施する観点から以下の提案を実施。
  - 当該作業に特化した被ばく低減対策、具体的作業要領を「放射線作業計画書」へ記載すること
  - 作業開始前ミーティング時に、被ばく低減対策について周知すること
  - 作業員は交代勤務となるため体調面に十分配慮すること
- ✓ 提案が反映されていることを確認。



採取したサンプル  
(原子炉容器下部炉心構造物)

※原子炉容器等のサンプル採取作業

今後の解体計画を策定するため、放射能レベルが高い原子炉容器等の放射エネルギーを把握する必要があることから、専用の試料採取装置にて原子炉容器および炉内構造物の金属サンプルを採取する。採取したサンプルは社外機関にて今後、分析を実施する。



## 2. 愛媛県からのご要請への取り組み状況

### (4) 新チームの活動 (5 / 5)

活動実績例③ 3号機の定検総合工程の確認

「総合工程表」は、作業担当課が所内各課の作業計画等を調整して作成し、確率論的リスク評価（PRA）等を行う担当箇所でもPRA手法も用いた定検リスク評価を実施したうえで、総合工程表を確定（所長承認）している。

[補足説明資料4参照]



#### <プロセス管理課でのレビュー活動>

- ✓ 総合工程表が確定（所長承認）する前に、定検リスク評価結果を参考に、「更にリスクの低下はできないか（停電工程の短縮・時期変更はできないか 等）」、「リスクは許容できるレベルか」などの原子力安全確保の観点で総合工程表の確認を行っている。

#### 【今後のリスク低減に向けた取り組み】

当社は、電力中央研究所原子力リスク研究センターの支援や電力大の研究成果等を活用したPRAモデルの高度化・精緻化を継続的に進めており、今後もリスク評価の活用に取り組んで行く。

## おわりに

- 伊方発電所は1号機、2号機の廃止措置作業を行いながら、特定重大事故等対処施設の設置工事、3号機の運転再開に向けた取り組み、使用済燃料乾式貯蔵施設の設置など様々な作業・取り組みを行っておりますが、3号機の定検再開、廃止措置計画および使用済燃料乾式貯蔵施設設置の事前協議の了解時に愛媛県知事および伊方町長からいただきましたご要請についてもしっかりと取り組みながら、新型コロナウイルスの感染防止対策を徹底し、いずれも安全確保を最優先に取り組んでまいります。
- また、愛媛県や伊方町との「信頼関係の礎」である「えひめ方式」による通報連絡をこれまでどおり迅速・的確に行うとともに、地域の皆さまにご理解いただけるよう、懸命に取り組んでまいります。



# [補足説明資料 1]

## 連続発生したトラブルの概要等 (1/2)

	概要	原因	再発防止対策と【対応状況】(赤文字は未完)
<p>事象Ⅰ</p> <p>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>	<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"> <li>•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。</li> <li>•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。</li> <li>•「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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•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。</li> <li>【社内規定へ反映し運用開始済】</li> <li>•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。</li> <li>【社内規定へ反映済・継続実施】</li> <li>•保安規定の運用について追加教育を行う。</li> <li>【教育実施】</li> <li>•定期的の実施している、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。</li> <li>【社内規定へ反映済・継続実施】</li> </ul>
<p>事象Ⅱ</p> <p>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>	<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"> <li>•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。</li> <li>•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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•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。</li> <li>【作業要領書へ反映済】</li> <li>•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。</li> <li>【作業要領書へ反映済】</li> <li>•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。</li> <li>【3-15定検実施済・継続実施】</li> </ul>

# [補足説明資料 1]

## 連続発生したトラブルの概要等 (2/2)

	概要	原因	再発防止対策と【対応状況】(赤文字は未完)
事象Ⅲ  燃料集合体点検時の落下信号発信	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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】</li> <li>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】</li> <li>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】</li> <li>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】</li> </ul>
事象Ⅳ  所内電源の一時的喪失	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。 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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>断路器の設備故障が直接的な原因であった。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>故障した当該断路器の部品を新品に交換する。【済】</li> <li>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】</li> <li>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】</li> <li><b>恒常的な対策を検討する。【恒常的な対策を実施中】</b></li> <li>当該断路器を加えた断路器(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】</li> <li>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】</li> </ul>

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (1/17)

#### フェーズ 1 調査結果：外観観察結果 (SUS410)

- 雰囲気試験前後の試験片表面を観察したところ、①、②の試験共に黒色化が認められた。
- 雰囲気試験後の試験液中懸濁物をフィルタでろ過・回収して観察したところ、①の試験では赤褐色だったものが、②の試験では黒色であった。

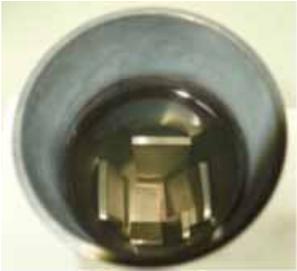
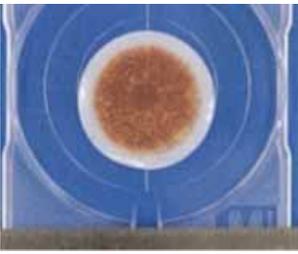
試験条件	試験前	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	0日	2日	5日	10日	10日+10日
装置内状況					
試験片表面					
懸濁物					

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (2/17)

#### フェーズ 1 調査結果 : 外観観察結果 (SUS316)

- 雰囲気試験前後の試験片表面を観察したところ、①の試験で金属光沢が消失、②で僅かな黒色化が認められた。
- 雰囲気試験後の試験液中懸濁物をフィルタでろ過・回収して観察したところ、①の試験では赤褐色だったものが、②の試験では一部黒色化が見られた。SUS410と比較した場合、回収された懸濁物の量が顕著に少なかった。

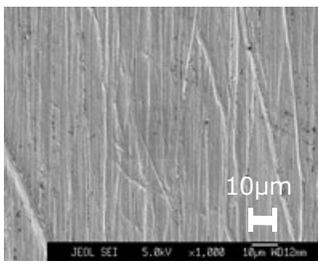
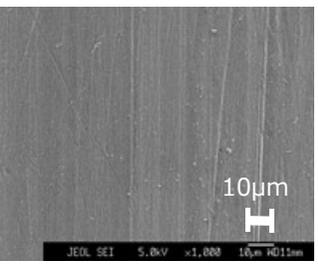
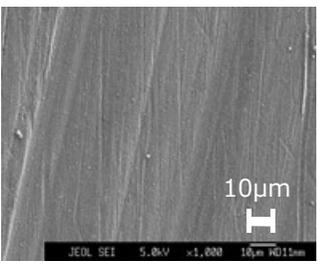
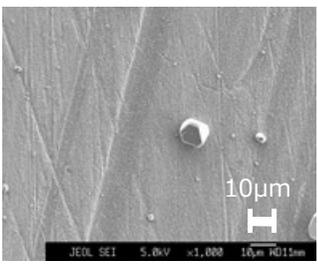
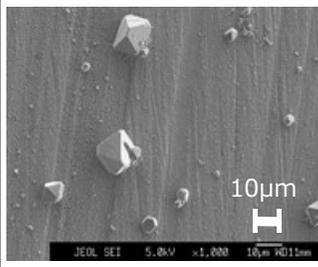
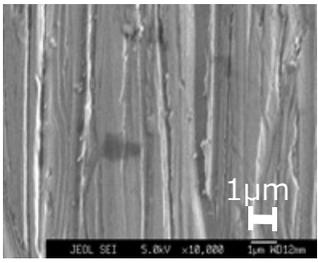
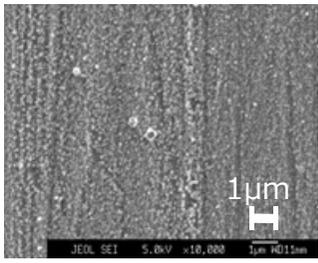
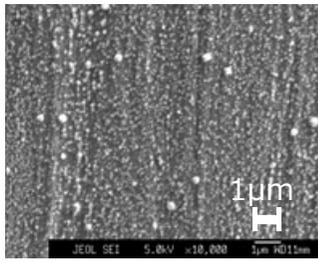
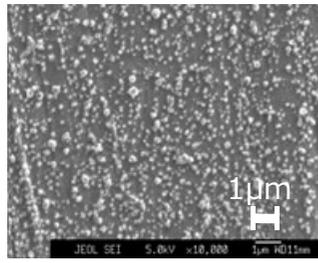
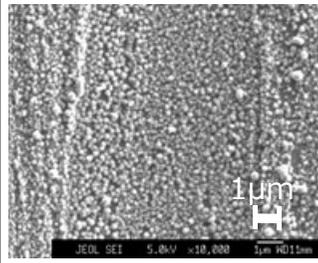
試験条件	試験前	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	0日	2日	5日	10日	10日+10日
装置内状況		-	-		
試験片表面		-	-		
懸濁物		-	-		

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (3/17)

#### フェーズ 1 調査結果：SEM観察結果 (SUS410試験片表面)

- ①の試験では、2日目には粒径0.1 $\mu\text{m}$ 程度の微粒子が高密度に付着していた。一方、10日目には微粒子の径の増大とともに粒子密度は減少し、少数ではあるが最大10 $\mu\text{m}$ 程度の比較的大粒径の八面体粒子が観察された。
- ②の試験では、①の10日目と比較して微粒子の粒径は同程度であったが、粒子密度は増加していた。また、大粒径の粒子についても粒子数の増加が認められた。

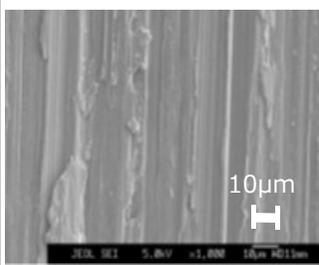
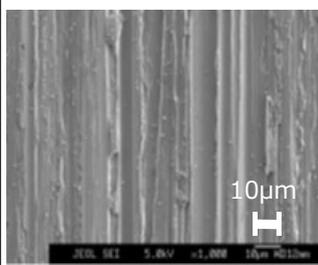
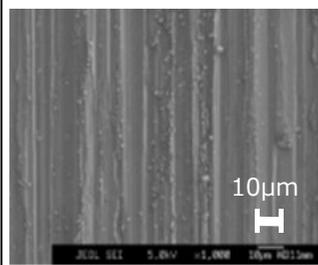
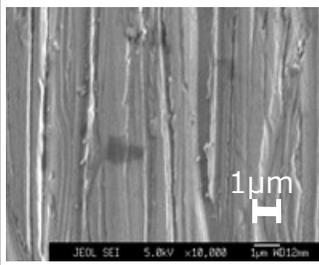
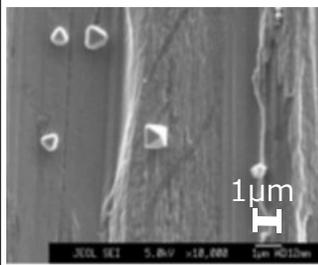
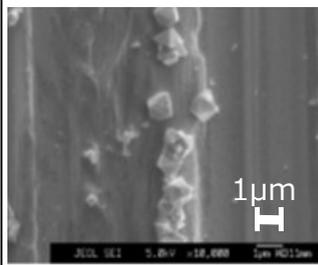
試験条件	試験前	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	0日	2日	5日	10日	10日+10日
試験片表面 $\times 1,000$					
試験片表面 $\times 10,000$					

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (4/17)

#### フェーズ 1 調査結果 : SEM観察結果 (SUS316試験片表面)

- ①の試験では、浸漬10日目には1 $\mu$ m程度の小粒径の八面体粒子が観察されたが、同試験条件時のSUS410と比較して粒子の付着密度は顕著に低かった。
- ②の試験では、①の10日目と比較して付着密粒子の径は同程度であったが、付着密度が若干増加した。

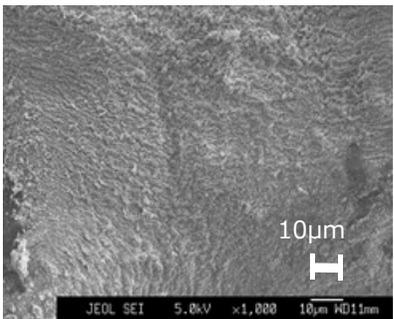
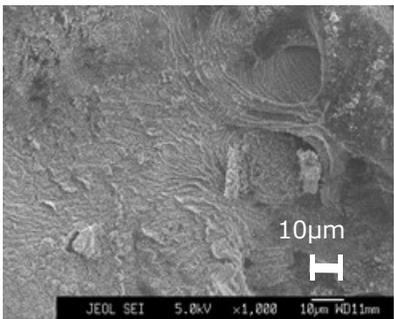
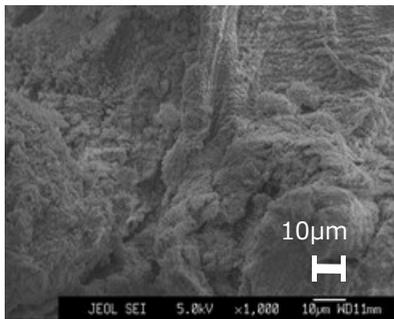
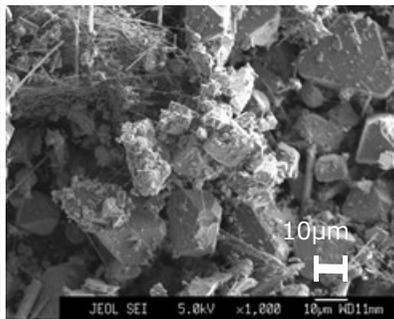
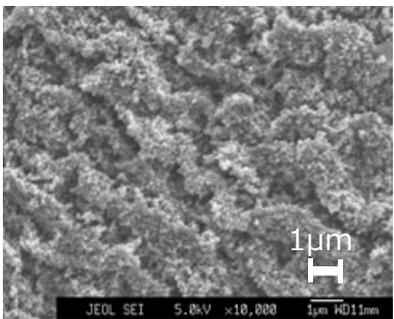
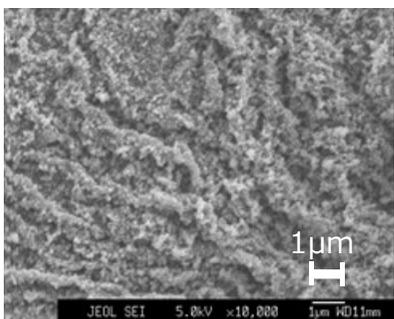
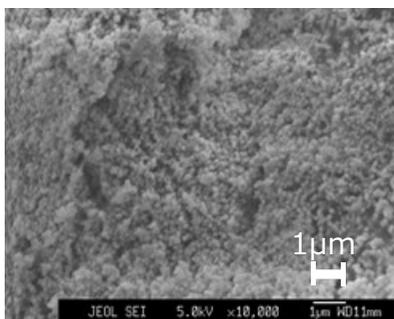
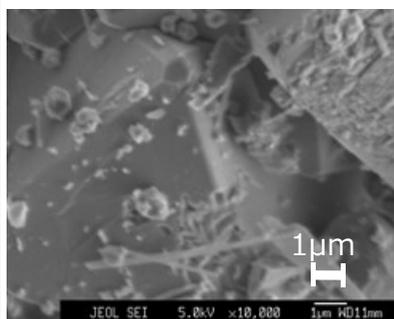
試験条件	試験前	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	0日	2日	5日	10日	10日+10日
試験片表面 ×1,000		-	-		
試験片表面 ×10,000		-	-		

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (5/17)

#### フェーズ 1 調査結果 : SEM観察結果 (SUS410懸濁物)

- ①の試験では、10日目まで懸濁物のほとんどが粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の不定形な微粒子であった。
- ②の試験では、大きいもので $10\mu\text{m}$ を超える八面体等の多面体粒子が主体となり、微細な粒子は減少していた。

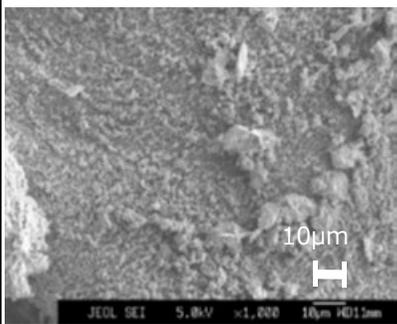
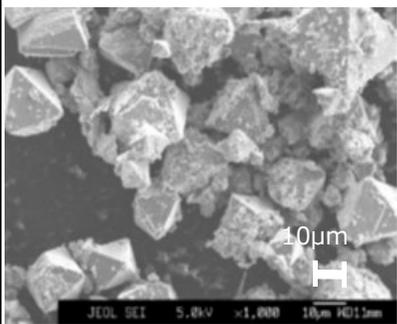
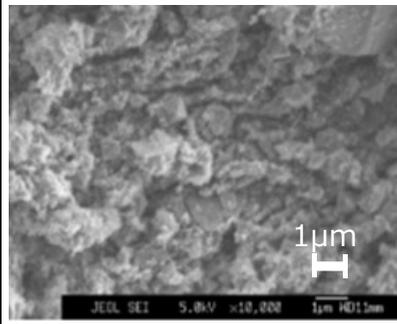
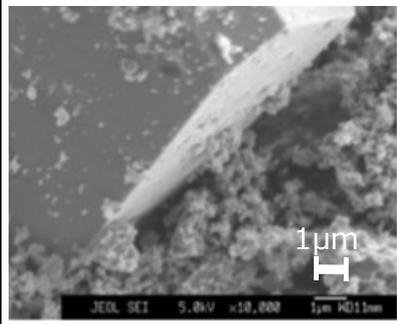
試験条件	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	2日	5日	10日	10日+10日
懸濁物 $\times 1,000$				
懸濁物 $\times 10,000$				

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (6/17)

#### フェーズ 1 調査結果 : SEM観察結果 (SUS316懸濁物)

- ①の試験では、10日目では粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の不定形な微粒子にくわえ、少数ではあるが粒径 $1\mu\text{m}$ 程度の八面体等の多面粒子も観察された。
- ②の試験では、SUS410と同様に $10\mu\text{m}$ を超える八面体等の多面粒子が主体となり、微細な粒子は減少した。

試験条件	①酸化性雰囲気			②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
	2日	5日	10日	10日+10日
懸濁物 $\times 1,000$	-	-		
懸濁物 $\times 10,000$	-	-		

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (7/17)

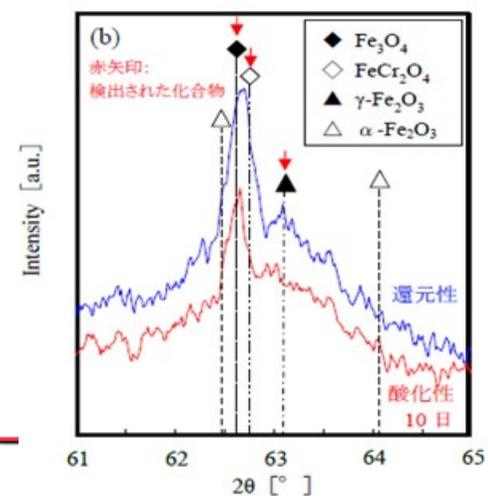
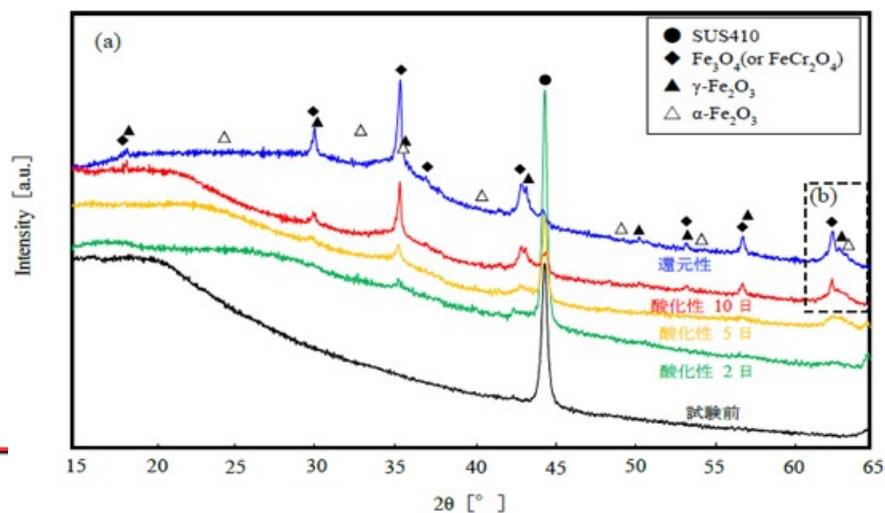
#### フェーズ 1 調査結果：元素組成、結晶構造分析 (SUS410試験片表面)

- 試験片表面における腐食生成物（酸化皮膜）の結晶構造分析並びに元素組成分析の結果から、①②の試験ともに主成分はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、副成分はマグヘマイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) と推察された。
- 酸化皮膜の金属元素組成から、①②の試験ともにクロマイト ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) の存在も推定されるが、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と近似した結晶構造のため確定的に示すことができなかった。

#### <元素組成分析>

試験条件		EPMAによる試験片表面の元素組成の半定量結果 (atom%)			
		Fe	Cr	Ni	O
①酸化性雰囲気	0日	84.3	15.2	0.5	ND
	2日	69.3	14.5	0.5	15.8
	5日	53.9	15.2	0.4	30.5
	10日	40.4	17.0	0.5	42.1
②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気	10日+10日	35.8	18.7	0.5	45.4

#### <結晶構造分析>



## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (8/17)

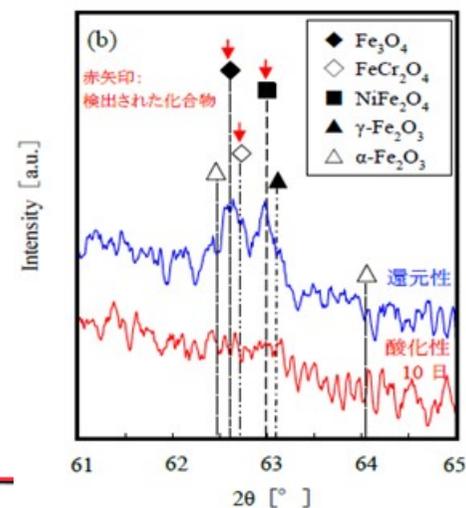
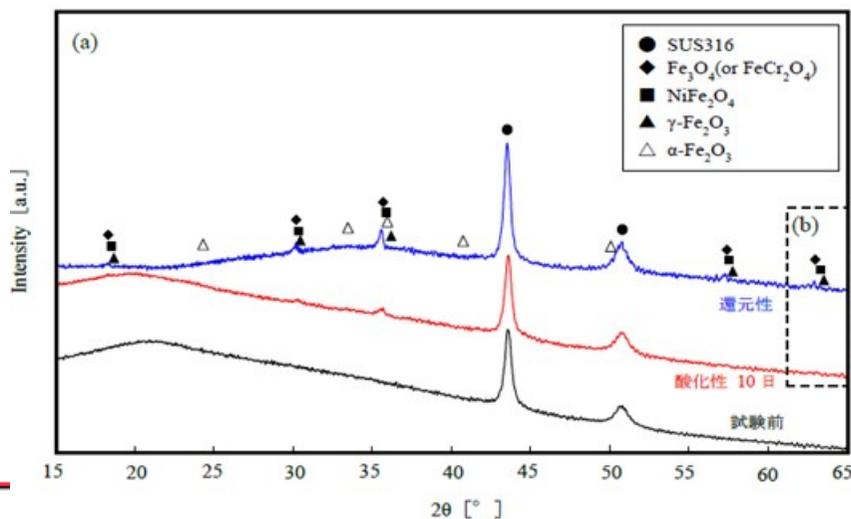
#### フェーズ 1 調査結果：元素組成、結晶構造分析 (SUS316試験片表面)

- 試験片表面における腐食生成物（酸化皮膜）の結晶構造分析並びに元素組成分析の結果から、①②の試験ともに主成分はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) と推察された。
- ①の試験では、その他の同定可能な有意なピークを検出できなかったが、元素組成からニッケルフェライト ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) やクロマイト ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) の存在も示唆された。②の試験では、副成分として  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  と推察されるピークが検出されるとともに、酸化皮膜の元素組成から  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  の存在も推定された。

#### <元素組成分析>

試験条件		EPMAによる試験片表面の元素組成の半定量結果 (atom%)			
		Fe	Cr	Ni	O
①酸化性雰囲気	0日	69.4	20.4	9.4	ND
	10日	66.0	19.9	9.4	3.8
②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気	10日+10日	64.0	19.5	9.1	6.6

#### <結晶構造分析>



## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (9/17)

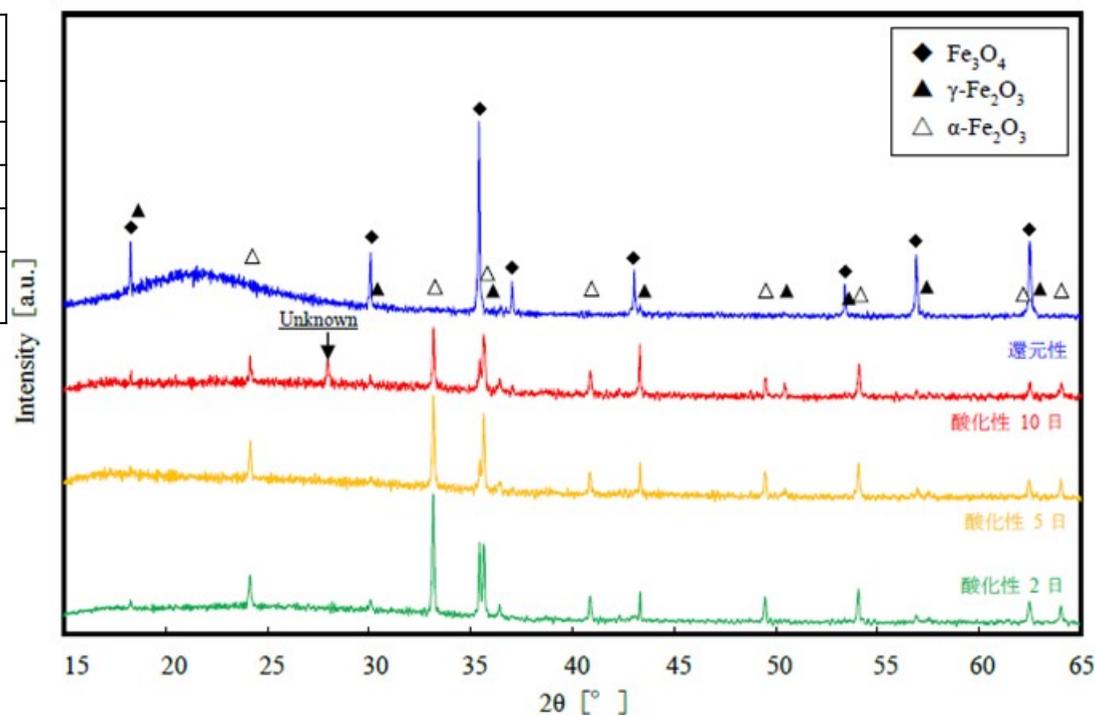
#### フェーズ 1 調査結果：元素組成、結晶構造分析 (SUS410懸濁物)

- ①②の試験ともに懸濁物の主要元素はOとFeであり、CrやNiは検出はごく微量 (<0.1%)、若しくは検出されなかった。
- ①の試験では、主成分としてヘマタイト ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )、副成分としてマグヘマイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 及びマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) と推察されるピークも検出された。
- ②の試験では、主成分として $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、副成分として $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と推察されるピークも検出された。②の試験への移行にともないFeの割合が増加した。

#### <元素組成分析>

試験条件		EPMAによる懸濁物の元素組成の半定量結果 (atom%)			
		Fe	Cr	Ni	O
①酸化性雰囲気	2日	38.0	< 0.1	ND	61.9
	5日	39.9	< 0.1	< 0.1	60.1
	10日	39.4	< 0.1	< 0.1	60.4
②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気	10日 + 10日	49.2	< 0.1	< 0.1	50.7

#### <結晶構造分析>



## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (10/17)

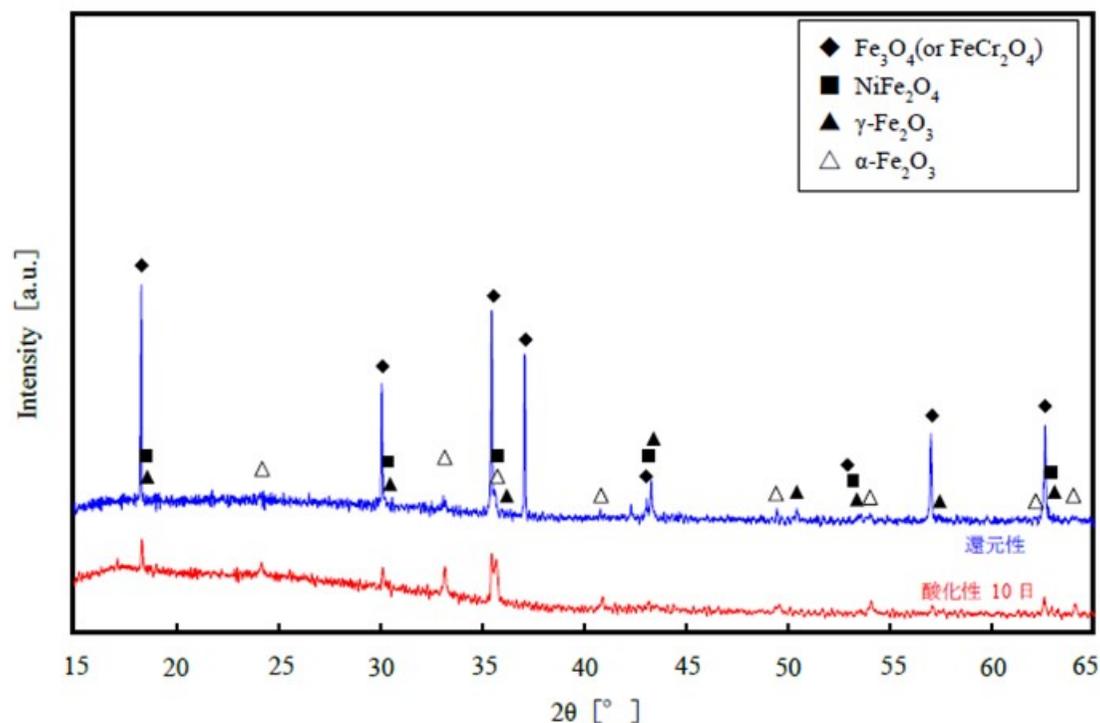
#### フェーズ 1 調査結果：元素組成、結晶構造分析 (SUS316懸濁物)

- ①②の試験ともに懸濁物の主要元素はOとFeであり、CrやNiもそれぞれ1～3%程度検出された。
- ①の試験では、主成分はヘマタイト ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) およびマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) と推察された。また、副成分としてニッケルフェライト ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) と推察されるピークが検出されるとともに、元素組成分析の結果からクロマイト ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) の存在も推定された。
- ②の試験では、主成分は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、副成分は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ やマグヘマイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) や $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ と推察され、元素組成分析の結果から $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ の存在も示唆された。

#### <元素組成分析>

試験条件		EPMAによる懸濁物の元素組成の半定量結果 (atom%)			
		Fe	Cr	Ni	O
①酸化性雰囲気	10日	38.8	3.0	2.2	55.6
②酸化性雰囲気 →還元性雰囲気	10日+ 10日	46.9	1.3	2.4	49.2

#### <結晶構造分析>

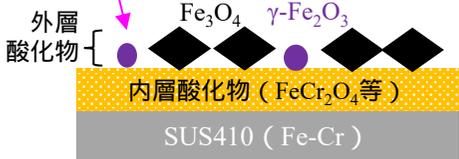
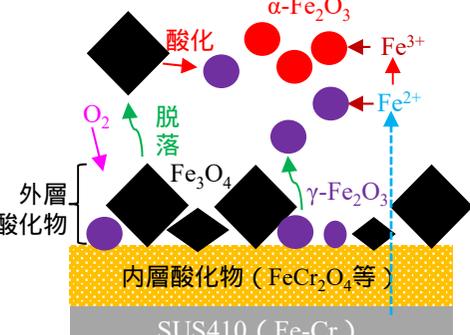
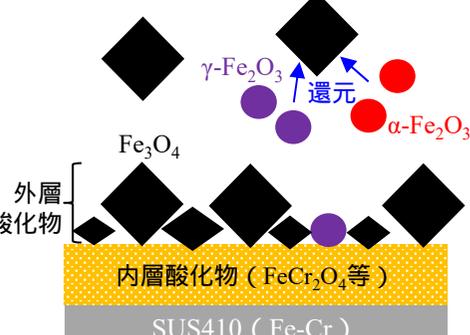


# [補足説明資料 2]

## マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (11/17)

### フェーズ 1 調査結果：まとめ (試験結果 [SUS410] から推察されるマグネタイト生成過程)

- 今回のSUS410を用いた試験の結果から推定される、プラント起動初期段階における駆動軸表面での腐食生成物の生成過程は以下のとおり。

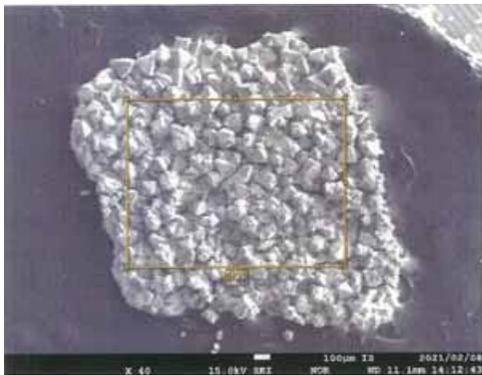
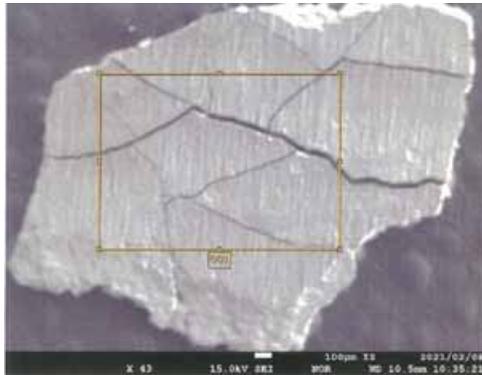
		酸化性雰囲気 (高溶存酸素環境下)	還元性雰囲気 (脱酸素環境下)	
マグネタイト生成過程	 <p>① 初期皮膜の形成</p> <p>母材組織表面の微細な加工傷等を起点として金属が腐食(酸化)し、極薄い酸化物の被膜を形成</p>	 <p>② 内層・外層の形成</p> <p>Fe, Crの酸化物中の拡散速度の差(Fe&gt;Cr)から</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>内層には、空孔や粒界を拡散してきたO等がFeやCrと反応してCrリッチな酸化物層(FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>等)を形成</li> <li>外層には、母材から内層を拡散したFeが酸化・析出してFeリッチな酸化物層(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等)を形成</li> </ul>	 <p>③ 外層の脱落、酸化(変態)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>成長した外層酸化物の一部は水流や温度変化を受けて表面から脱落</li> <li>また、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の一部は酸化して、γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に変態する可能性あり</li> <li>液相中に溶出したFeは、酸化して不定形な微粒子(α, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)になり懸濁</li> </ul>	 <p>④ 酸化物の還元</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>還元性雰囲気(脱酸素環境)への移行に伴い、外層のγ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が還元されるとともにFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が成長</li> <li>液相中のα, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>も還元され、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に変態</li> </ul>
	今回の試験で得られた知見	<p><b>試験片表面</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>試験片表面の酸化物(黒色)の主成分はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(黒色/結晶形は八面体)であり、その他にγ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(褐色)も検出された。また、元素組成からFeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(黒色)の存在も推定される。</li> </ul> <p><b>懸濁物</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>懸濁物(赤褐色)の主成分はα-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(赤褐色)であり、その他にγ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(褐色)やFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(黒色/結晶形は八面体)も検出された。なお、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>は検出されなかった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験片表面(黒色)の酸化物主成分はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とγ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であり、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>の存在も推定される。</li> <li>懸濁物(黒色)の主成分はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>であり、微量ではあるがγ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>も検出された。なお、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>やα-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は検出されなかった。</li> </ul>	

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (12/17)

#### 【参考1】制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物の分析結果

- 制御棒クラスタのスパイダ頭部内（アドレスD 4）から回収された堆積物の両面について、SEM観察および元素組成分析を実施した。
- SEM観察の結果、片側（A面）の面には成長した八面体粒子が観察されており、こちらの面が接液側であったと推定される。
- 元素組成分析の結果、両者の結果に有意な差はなく、主成分はFeとOであった。

項目	SEM観察結果	元素組成分析結果																							
A面		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="5">EPMAによる元素組成の半定量結果 (atom%)</th> </tr> <tr> <th>C※</th> <th>O</th> <th>Cr</th> <th>Fe</th> <th>Ni</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A面</td> <td>3.4</td> <td>51.5</td> <td>0.9</td> <td>43.7</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>B面</td> <td>2.6</td> <td>59.2</td> <td>1.2</td> <td>35.9</td> <td>1.1</td> </tr> </tbody> </table> <p>※：測定バックグラウンドの影響によるCも検出されていると考えられる。</p>		EPMAによる元素組成の半定量結果 (atom%)					C※	O	Cr	Fe	Ni	A面	3.4	51.5	0.9	43.7	0.5	B面	2.6	59.2	1.2	35.9	1.1
	EPMAによる元素組成の半定量結果 (atom%)																								
	C※	O	Cr	Fe	Ni																				
A面	3.4	51.5	0.9	43.7	0.5																				
B面	2.6	59.2	1.2	35.9	1.1																				
B面																									

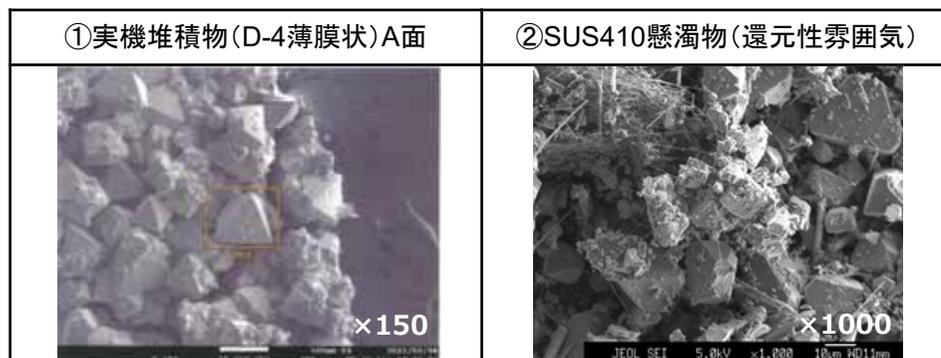
## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (13/17)

#### 【参考2】制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物とフェーズ 1 調査結果との比較

##### <SEM観察・元素組成分析>

- 両者ともに八面体等の多面体粒子が確認された。元素組成分析の結果、両者ともに主成分はFeとOであった。

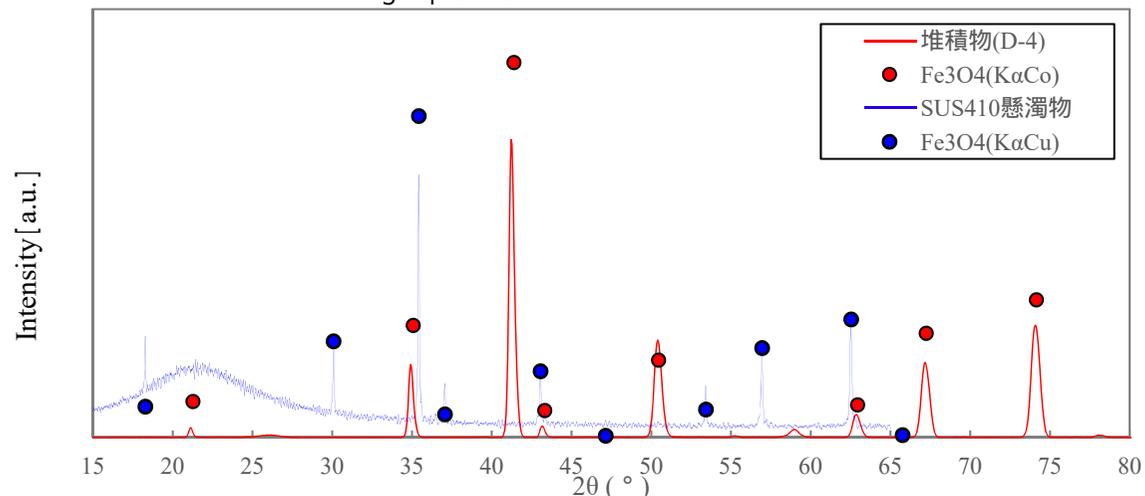


試料	EPMAによる元素組成の半定量結果 (atom%)				
	C	Fe	Cr	Ni	O
①実機堆積物 (D-4薄膜状) A面	3.4 (-)	43.7 (45.2)	0.9 (1.0)	0.5 (0.5)	51.5 (53.3)
②SUS410懸濁物 (還元性雰囲気)	4.7 (-)	46.1 (49.2)	< 0.1 (< 0.1)	< 0.1 (< 0.1)	49.2 (50.7)

※ : ( )は、測定バックグラウンドの影響によるCを除いた元素組成を示す

##### <結晶構造分析>

- 結晶構造分析の結果、両者ともに主成分は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と推察された。



※使用したX線回折装置の違いにより、試料に照射するX線の波長が異なるため、同じマグネタイトでも回折角に差が生じている。

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (14/17)

#### 【参考 3】 供試試料

##### 【SUS410】

- 試験片①縦45mm×横25mm×板厚4mm, 試験片②縦30mm×横15mm×板厚4mm  
(実機条件を正確に模擬するため伊方3号機の駆動軸と同様の熱処理条件、化学成分としたものを使用)

##### 【SUS316】

- 試験片①縦45mm×横25mm×板厚4mm, 試験片②縦30mm×横15mm×板厚4mm  
(比較対象として、腐食試験データが豊富なオーステナイト系ステンレス鋼であって、伊方3号機の1次冷却材系統にも使用しているSUS316を選定)

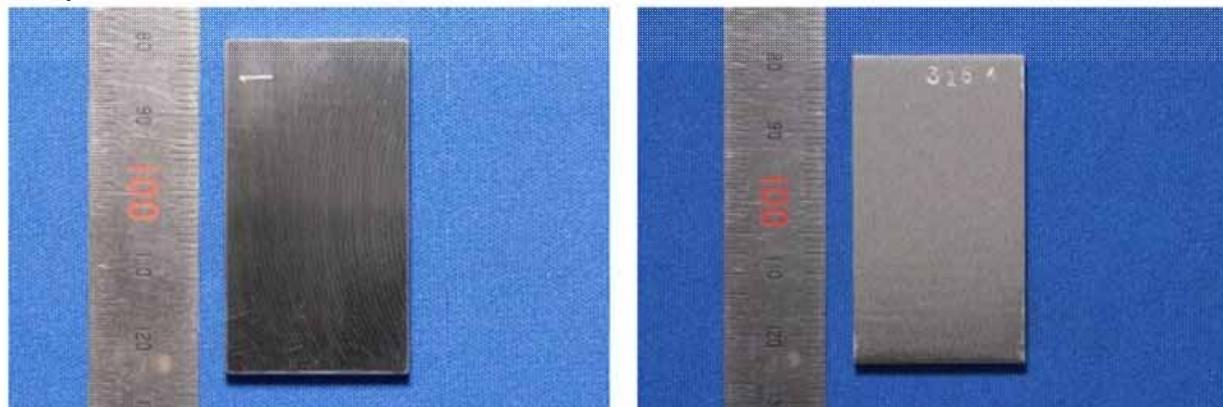


図 試験片の外観 (左: SUS410、右: SUS316)

表 試験片の性状

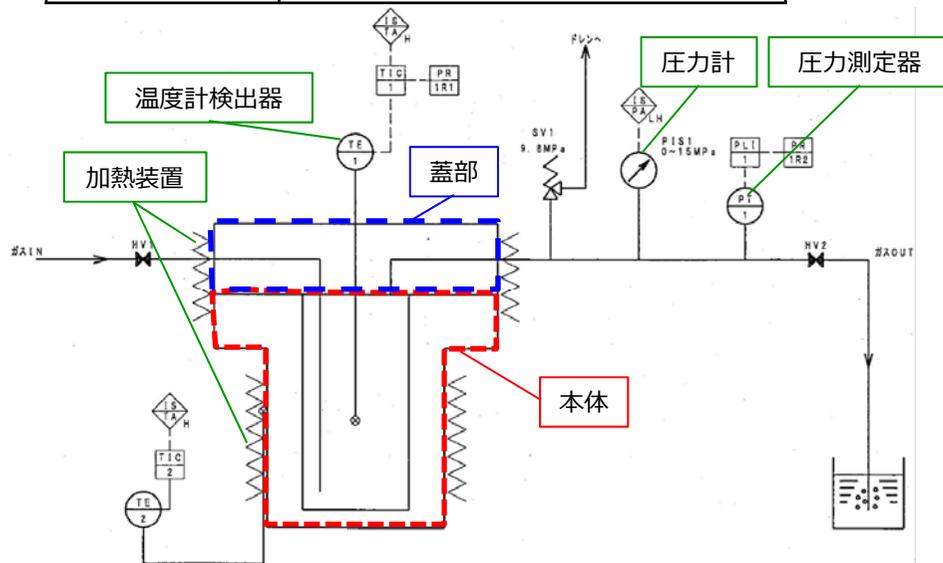
試験片材質	化学成分 (%) 【JIS G 4303 ; 2012】									表面粗さ (Ra, μm)	表面積 (dm <sup>2</sup> )
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe		
SUS410	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.04	≤0.03	11.5~ 13.5	≤0.6	No Data	Bal.	0.4	①0.28
SUS316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03	16.0~ 18.0	10.0~ 14.0	2.00~ 3.00	Bal.	1.2	②0.13

## [補足説明資料 2]

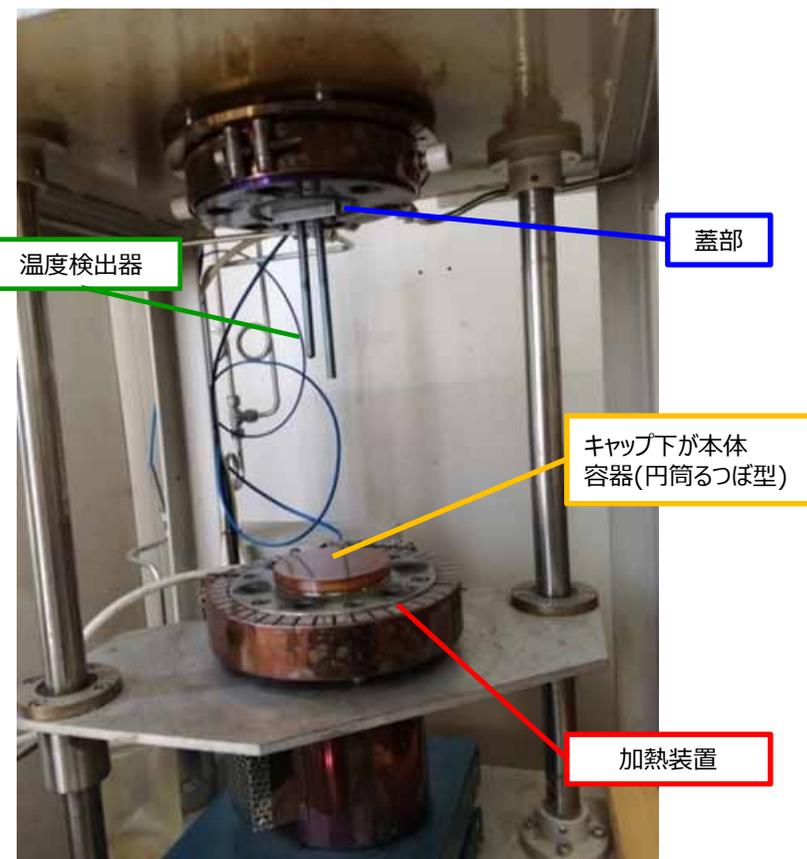
### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (15/17)

#### [参考 4] 試験装置仕様 (1 / 2)

	チタン製 オートクレーブ装置
最高使用温度	300℃
最高使用圧力	10MPa
容量	396mL (内径60mm×深さ140mm)
材質	本体：チタン 2種 蓋部：チタン 2種
シール	チタンパッキン箔シール
加熱装置	ニクロム線 200V 3kW
圧力計	ブルドン管式
圧力測定器	ひずみゲージ式
温度検出器	熱電対 (温度調節 PID電流制御)



試験装置の概要図



試験装置外観 (チタン製オートクレーブ装置)

## [補足説明資料 2]

### マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (16/17)

#### 【参考 4】 試験装置仕様 (2 / 2)

	電子線マイクロアナライザ (EPMA)
型式	JXA-8200 (日本電子 (株) )
分析元素範囲	${}^5\text{B} \sim {}^92\text{U}$
X線分光器	①エネルギー分散型 X線分光器 (EDS) EDS検出器: リチウムドリフト型シリ コン半導体検出器
	②波長分散型 X線分光器 (WDS) X線分光範囲: 0.087~9.3nm
加速電圧	0.2~30kV(0.1kVステップ)
照射電流範囲	$10^{-12} \sim 10^{-5} \text{ A}$
二次電子分解能	6nm (WD11mm, 30KV)
走査倍率	$\times 40 \sim 300,000$ (WD11mm)

	X線回折分析装置
型式	D8 ADVANCE Super Speed (ブルカー・エイエックスエス (株) )
①X線発生装置	
形式	回転対陰極タイプ
X線ターゲット	Cuアノード
最大定格	18kW
管電圧	20~60kV
管電流	10~400mA
②ゴニオメータ	
形式	試料水平型 2 軸 ( $\theta_s / \theta_d$ 運動)
③検出器	
形式	NaIシンチレータ

# [補足説明資料 2]

## マグネタイト生成メカニズム、挙動等に関する調査 (17/17)

### [参考 5] 保全学会での発表

PWR 1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  
Investigation on magnetite formation mechanism in PWR primary coolant system environment.

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

Inadvertent withdrawal of a control rod cluster was observed during lifting of the upper core structure on the 15<sup>th</sup> 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. As a result, magnetite was mainly observed in the corrosion product of SUS410; It strongly suggests that the causal magnetite sludge originates in the SUS 410 corrosion products.

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日解除)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薄膜状及び粒子状のマグネタイトの堆積が確認され、これが本事象に影響したものと考えられた。

このマグネタイトは、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が、起動工程の進行に伴いマグネタイトに変態して脱落・堆積したものと推定されたが、SUS410に関する1次冷却水環境下での腐食挙動や腐食生成物の形態についての試験・検討は十分なされていない。

本検討は、PWR型原子力発電所1次冷却水の水質環境を模擬してSUS410等の腐食試験を行うことにより、腐食生成物の生成状況、腐食速度等についての知見の拡充を図るもので、本報ではフェーズ1として実施した起動時の水質環境下で生成する腐食生成物の化学形態とその遷移等に関する試験結果について報告する。

#### 2. 調査計画

プラント起動初期の制御棒駆動軸は全引抜状態にあり、駆動軸は全長にわたり高温・高溶存酸素の水質環境下におかれるが、起動工程の進行に伴い溶存酸素は除去され、水質は還元性雰囲気となる。

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]

注) 個人情報保護の観点から個人名等をマスキングしています。

フェーズ1では、この温度や水質を模擬し、表1に示す条件でSUS410と、比較対象としてSUS316の腐食試験を実施した。

表1 試験概要

	試験① 酸化性雰囲気試験	試験② 酸化性雰囲気 →還元性雰囲気試験
概要	1次系水張後の駆動軸、ハウジング内環境を想定した条件にて、SUS410とSUS316の腐食生成物生成状況を確認	試験①の手順の後に、水質調整後を想定した条件にて、SUS410とSUS316の腐食生成物生成状況を確認
試験条件	気相: 大気ガス 液相: ほう酸(4,500ppm)/Li(1.0ppm)水溶液	気相: 大気ガス→窒素ガス 液相: ほう酸(4,500ppm)/Li(1.0ppm)水溶液 還元性はt <sub>1/2</sub> 添加
試験材料	SUS410(実用駆動軸同等材)、SUS316試験片	
試験装置	チタン製オートクレープ装置を使用	
試験手順	1. 試験片を装置に収納(浸漬させ、蓋閉止) 2. 目標温度(200℃)まで昇温 3. 昇温、昇圧状態で保持(2.5, 10日) 4. 試験片を回収、分析	1. 試験片(10日保持) 2. t <sub>1/2</sub> 添加(液層)、窒素置換(気層) 3. 目標温度(200℃)まで昇温 4. 昇温、昇圧状態で保持(10日) 5. 試験片を回収、分析
分析項目	1. 外観観察 2. 試験片表面分析、3. 試験液懸濁物分析(元素組成【EPMA】、結晶構造【X線回折】)	

#### 3. フェーズ1 調査結果

##### 3.1 外観観察

試験前後のSUS410試験片表面を観察したところ、試験①、②共に黒色化が認められた。試験後の試験液中

懸濁物は、試験①の酸化性雰囲気試験では赤褐色であったが、②の酸化性→還元性雰囲気試験では黒色であった。

一方、SUS316試験片表面の色調変化はSUS410よりも軽微であり、試験①では金属光沢が消失し、試験②で僅かな黒色化が認められる程度であった。試験後の試験液中懸濁物は、試験①では赤褐色だったものが、②の試験では一部黒色化が認められた。

回収された懸濁物の量は、SUS410と比較して顕著に少なかった。

##### 3.2 元素分析、結晶構造分析

制御棒駆動軸材料であるSUS410の試験片表面の腐食生成物(酸化皮膜)の主成分は、試験①②ともにマグネタイト(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)であった。試験液中の懸濁物については、試験①の酸化性雰囲気ではヘマタイト( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が主成分であったが、試験②の還元性雰囲気への移行に伴いFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>へ変態した。

また、比較対象として用いたSUS316では、試験①②いずれにおいても試験片表面及び懸濁物ともに主成分はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>であった。

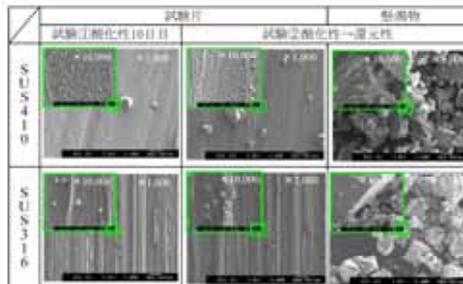


図1 試験片表面および懸濁物の電子顕微鏡像

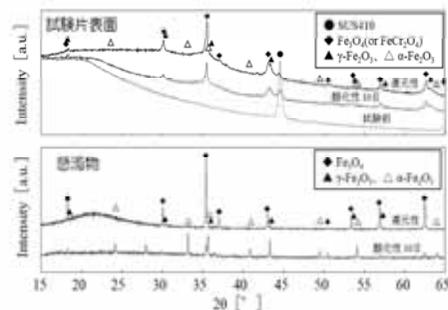


図2 SUS410試験片表面および懸濁物のX線回折分析結果

表2 SUS410懸濁物の元素組成 (EPMA半定量分析) (atom%)

	Fe	Cr	Ni	O
試験①酸化性10日	39.4	<0.1	<0.1	60.4
試験②酸化性→還元性	49.2	<0.1	<0.1	50.7

表3 生成された腐食生成物

試験片	試験条件	主成分		副成分
		酸化性	還元性	
SUS410	試験① 酸化性雰囲気	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO <sub>x</sub> (不定)	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	試験② 酸化性→還元性雰囲気	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SUS316	試験① 酸化性雰囲気	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	有意なピーク検出なし
	試験② 酸化性→還元性雰囲気	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , FeO <sub>x</sub> (不定)

#### 4. まとめ

一般に高温水中でのステンレス鋼の表面は、腐食によって緻密な内層と粗な外層の二層からなる酸化被膜を形成し、イオン状およびクラッドと呼ばれるFeを主成分とした粒子状の腐食生成物を放出する<sup>[1]</sup>。また、Crは、内層酸化物内に留まりやすいとされている<sup>[2]</sup>。今回のプラント起動初期を模擬した腐食試験では、

- 1) 外層酸化物と考えられる試験片の表面および試験液中の懸濁物の主成分はFeであり、文献<sup>[1][2]</sup>の酸化被膜形成・放出メカニズムと整合している。
  - 2) 腐食生成物は還元性雰囲気中でFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に変態しており、制御棒クラスタのスパイダ頭部内から回収された堆積物の結晶構造と合致した。
  - 3) 腐食生成物の元素組成は、一次冷却水中の金属クラッドと比較してニッケル、クロム成分が少なく、回収された堆積物の組成に近いものであった。
- 以上から、制御棒クラスタのスパイダ頭部内から回収されたマグネタイトは、主に駆動軸内部で生成し堆積した可能性が示唆された。

また、今回の試験条件では、回収された懸濁物の量に材料間で大きな差があり、SUS316の腐食量はSUS410と比較して小さいことを確認した。

#### 5. 今後(フェーズ2調査)について

SUS410の腐食挙動に関する知見のさらなる拡充を図るため、プラント運転中の制御棒駆動軸内で想定される環境条件をもとに、腐食に影響するパラメータ(温度、pH、溶存酸素等)を変動させる試験を実施する。

#### 参考文献

- [1] 石博顕吉, "原子炉におけるクラッド挙動と水化学", 防食技術, 32, 1983, pp. 276-285
- [2] 西岡弘雅ら, "PWR一次系模擬水中で形成した照射ステンレス鋼の酸化皮膜分析", INSS JOURNAL, Vol. 19, 2012, pp. 131-143

# [補足説明資料 3]

## 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策（1 / 3）

### 断路器内での短絡発生メカニズム

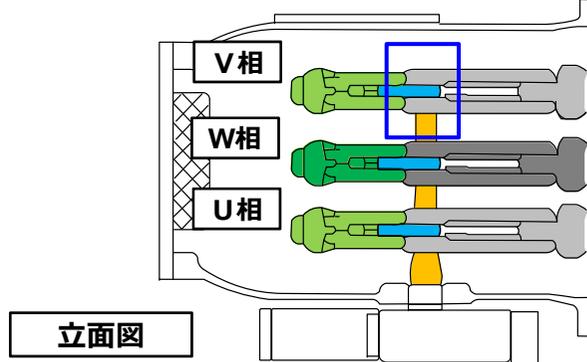
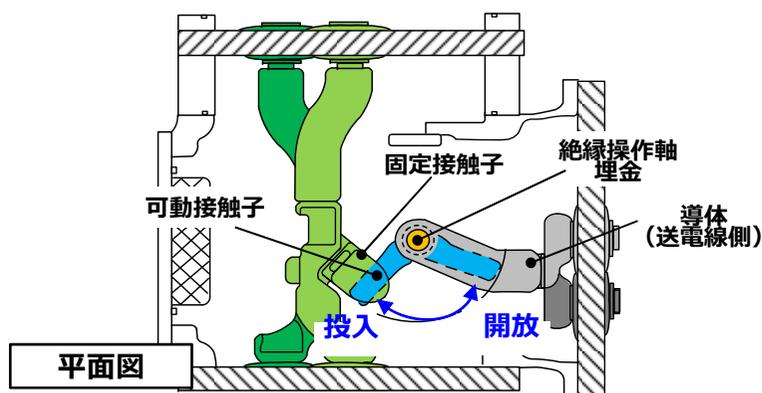
	非接触状態の継続／嵌合部の隙間拡大	金属くずの発生	金属くずの付着	相间短絡	
推定メカニズム	<ul style="list-style-type: none"> <li>断路器の開放位置において、絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部が非接触となる状態が継続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>嵌合厚さが薄くなったことから動作時の嵌合部の擦れによって金属くずが発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生した金属くずが絶縁操作軸または導体表面に付着</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高電界部に付着した金属くずを起点にV相-W相間で短絡が発生</li> </ul>	
概要図					

# [補足説明資料 3]

## 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策（2/3）

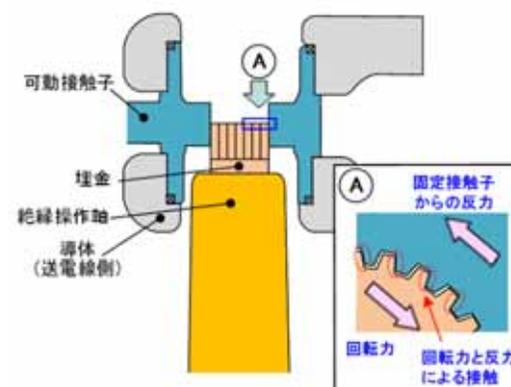
a. 開放状態で嵌合部に電圧が課電されないもの

投入状態では、可動接触子の回転力と固定接触子からの反力によって嵌合部は常時接触する。一方、開放状態では非接触となる可能性があるが、仮に非接触となっても電圧が課電されなければ放電は発生しない。このため、開放状態で嵌合部に電圧が課電されないものについては、対策不要とした。

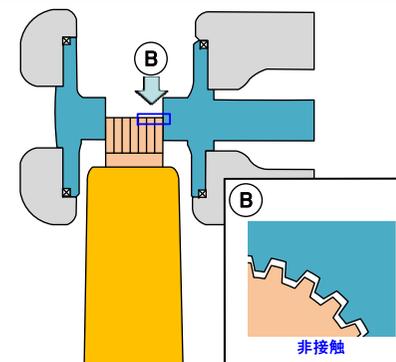


断路器ユニット内部 概要図

・投入状態



・開放状態

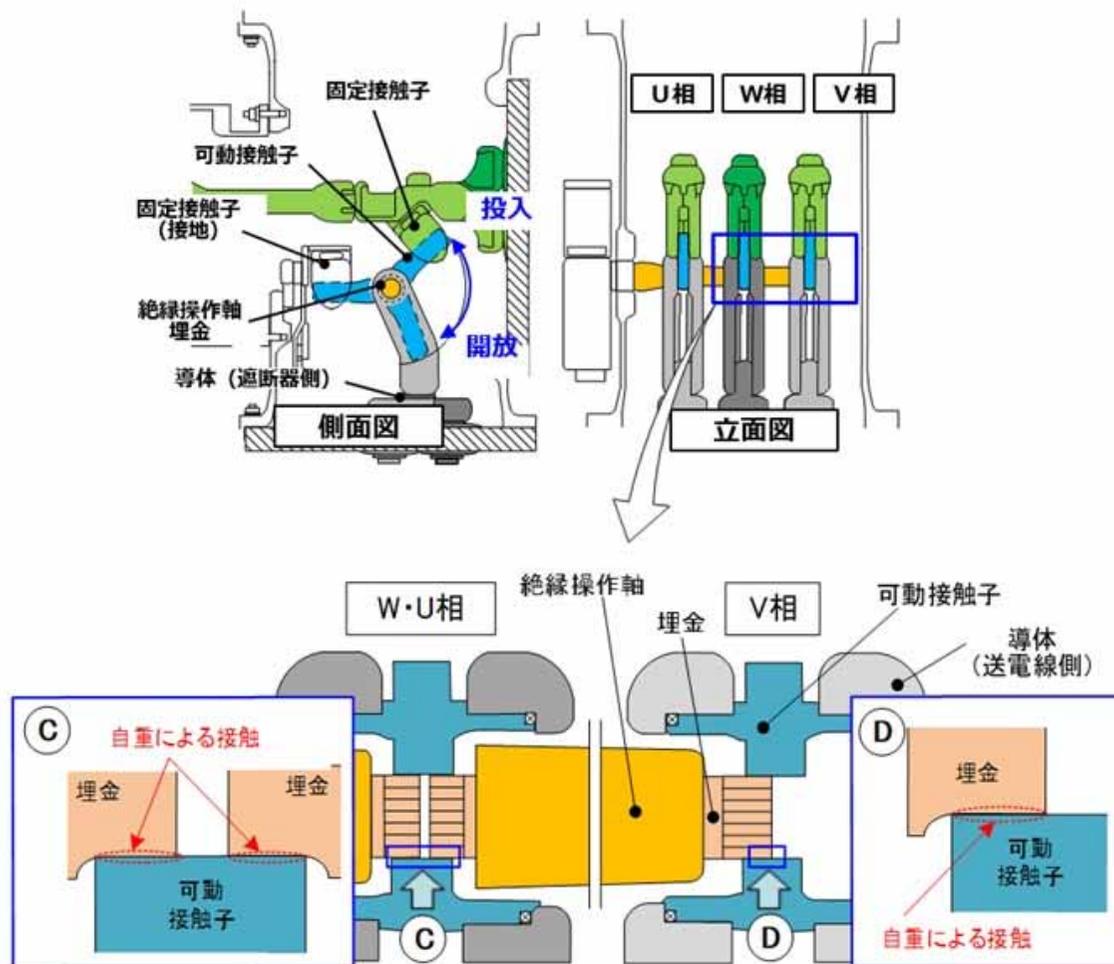


## [補足説明資料 3]

### 187kVガス絶縁装置断路器の恒常的な対策（3 / 3）

b. 配置上、嵌合部が常時接触するもの

絶縁操作軸が水平となるものについては自重により嵌合部が常時接触するため、嵌合部に電圧が課電されても放電は発生しない。このため、配置上嵌合部が常時接触するものについては、対策不要とした。



# [補足説明資料 4]

## 新チームの活動 (1/3)

### [参考 1] 保全学会での発表

#### 作業計画レビュープロセスの構築について

Implementation of Risk Management in the Work Planning review process

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

Regarding the work plan for refueling outage at the Ikata Nuclear Power Station, a review process was constructed by a department independent of the department in charge of work, incorporating a risk management perspective. Introducing the efforts at the power plant.

**Keywords:** Work plan review, Review process, Risk management

#### 1. はじめに

四国電力伊方発電所3号機は、第15回定検にあたり2019年12月26日に運転を停止し定検作業を開始した。開始直後から、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等の4件のトラブルが連続して発生したことから、個々のトラブルの原因究明と再発防止対策を策定した。

また、それぞれの原因(直接原因)に関する視点、トラブルの背後に存在する要因(背後要因)などあらゆる視点から幅広く調査し、以下の5つの改善策を策定し実施した。

- ①作業要領書の充実
- ②作業計画段階におけるレビューの強化
  - ・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し、継続的な改善を図る
- ③包括的な改善活動の推進
- ④安全意識共有の充実
- ⑤技術力・現場力の維持・向上

これらのうち改善策②を受けて、伊方発電所に新組織としてプロセス管理課を設置した。

連絡先: [マスク]  
〒796-0495 愛媛県西予郡伊方町九町字コナカ 3-40-3  
四国電力株式会社 原子力本部  
伊方発電所 品質保証部 プロセス管理課  
E-mail: [マスク]

#### 2. 作業計画のレビュー

##### 2.1 作業計画レビュープロセスの構築

プロセス管理課設置にあたっては、以下の事項を方針とした。

- ✓ 作業要領書の単純なダブルチェックではなく、新たなレビュー視点、方法を取り入れる。
- ✓ 活動を通じて、安全文化の醸成、包括的な改善等を図る。
- ✓ 原子力安全以外の分野(労働安全、放射線・環境安全等)もレビューできる仕組みとする。

これらの方針を踏まえ、リスクマネジメントの視点を取り入れたレビュープロセスを構築し、リスクアセスメント(確率的リスク評価(PRA)含む)を導入するとともに、レビュー結果を意思決定プロセスに取り入れる仕組みとした。リスクアセスメントは、各分野について当該活動に関連して発生しそうな問題や故障等の発生頻度(確率)と影響度合の定性的な格付け表を作成し、これに基づくリスクスコア表(確率×影響)からリスク上重要な作業に着目することにより実施する。

以下に具体的な実施要領を示す。

各作業担当部門が準備している作業計画、作業要領書について予備チェックを実施し、リスクスコア表に基づきリスク上重要な作業を選定する。選定した作業については詳細レビューを行うこととし、社内規定類、安全余裕、システムの冗長性、補償措置の状況、潜在リスク(原子

力安全、放射線安全、労働安全等)、作業現場の状況、経験知見等の観点に基づきレビューを実施する。レビューにあたっては、以下のような「問いかける姿勢」を通じて作業担当課とのコミュニケーションを図っている。

- ・作業目的が達成されない場合、どうすることが起こるのか
  - ・作業中に偶発的な故障が起こるとどうなるのか
  - ・人的過誤が起こりやすい作業環境にないか、等
- また詳細レビューにおいては、定型化(テンプレート化)したレビューシートを作成することにより、網羅的にレビューを実施できる仕組みとしている。

詳細レビューの結果、必要に応じて作業時期の変更や作業要領書の修正、作業管理上の一般的注意事項等を推奨事項として作業担当部門へフィードバックする。その意見に異論が出た場合はレビュー会議を開催し、協議を実施することとしており、レビュー会議では、代替策、実施時期の見直し等を議論し、作業方法を決定する。

以上のレビュープロセスを経て、作業担当部門は作業工程、作業要領書の見直し等を行った後に作業を実施するとともに、必要に応じて他の作業要領書への展開を行う。

##### 2.2 作業計画レビュー実施例

次に、作業計画をレビューした実施例を示す。

伊方3号機では、第15回定検において炉心から燃料を取り出した期間中に、使用済燃料ピット(以下「SFP」という)ポンプ電動機の点検を行う計画があった。使用済燃料冷却システムを図1に示す。実施にあたっては、SFPポンプ2台のうち1台を隔離する必要があるが、社内規定では、使用済燃料冷却システム2系統を運転可能状態とすることを定めている。ただしSFPポンプ出口連絡ラインが使用可能である場合には、冷却システム1系統を待機除外することができ、SFP水温は5.2℃以下を保持するよう努めることが規定されている。(制限値: 6.5℃)

当課にて作業計画のレビューを実施し、

- ・SFPポンプ全台停止時に、SFP水温が5.2℃に到達するまでの時間は約4.1時間後であること

- ・電動機点検中に万一、運転中のSFPポンプが運転不能となった場合、点検中のSFPポンプを復旧する時間は最大約2.4時間であること

を評価して、SFP水温が5.2℃に上昇する前に点検中のSFPポンプを使用可能状態とできることを確認した。レビューを踏まえて作業担当部門に対しては、「本作業は計画通り実施することで問題ないが、SFP冷却機能喪失となるリスクがあることを、作業前に作業員に周知する」旨をリスク低減に関する推奨事項として伝えた。こうした評価や注意喚起は、従来は行っていないものである。

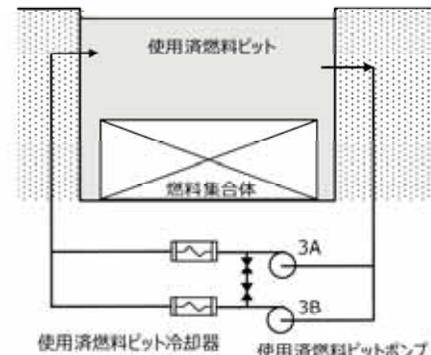


図1 伊方3号機 使用済燃料冷却システム

#### 3. まとめ

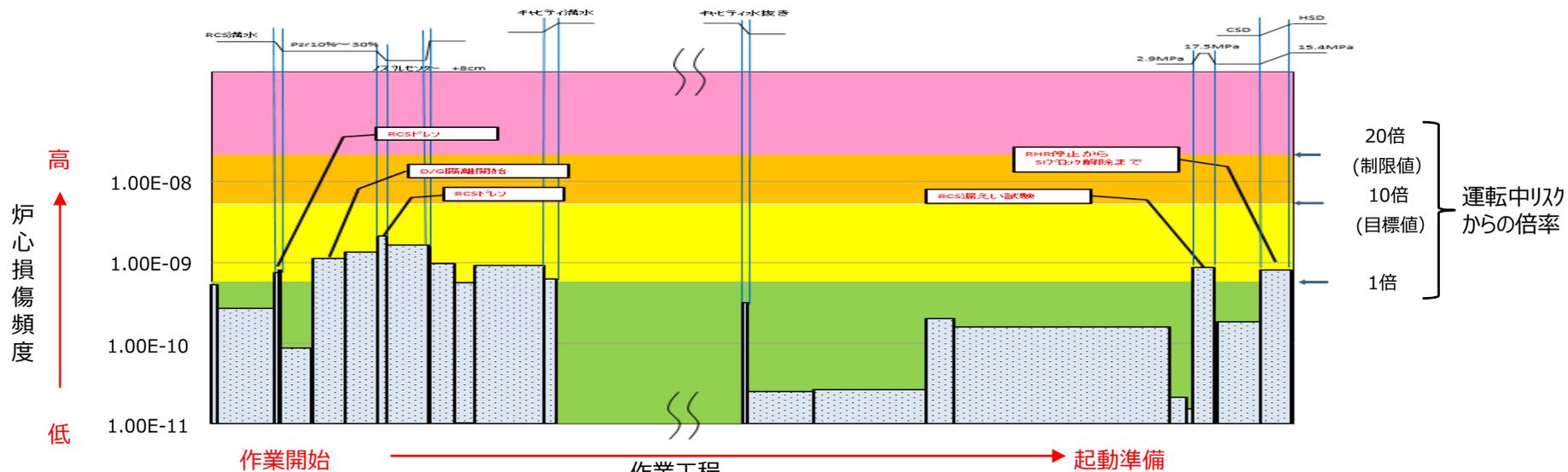
伊方発電所における作業計画レビュープロセスの構築と、その実施状況を紹介した。現在実施中の、伊方3号機第15回定検(特別な点検)作業についても、事前に作業計画レビューを実施し、作業担当部門に対し必要な提案を実施する。

今後も引き続きレビュープロセスの改善に取り組むとともに、PRA活用も含めたリスク情報の適用範囲拡大に取り組んでいく。

# [補足説明資料 4] 新チームの活動 (2/3)

## 【参考 2】 P R Aモデルを使った定検リスク評価 (1/2)

総合工程表策定におけるリスク評価



P R Aを用いた定検リスク評価結果 (例)

リスク評価結果は、運転中リスクを基準として4段階に識別 (カラーコード管理) し、必要な補償措置を実施している。

赤	非常に高いリスクであり、特別な理由がない限りこの領域への侵入を許容しない。
橙	高いリスクであり、「黄」領域の補償措置に加え継続時間短縮のための措置を検討・実施する。
黄	やや高いリスクであり、注意喚起等を実施する。また、合理的に可能な範囲で補償措置を検討・実施する。
緑	特別な措置は必要としない。ただし、リスク低減対策を行った結果本領域に入っている場合は、それらの対策を維持するための措置を実施する。

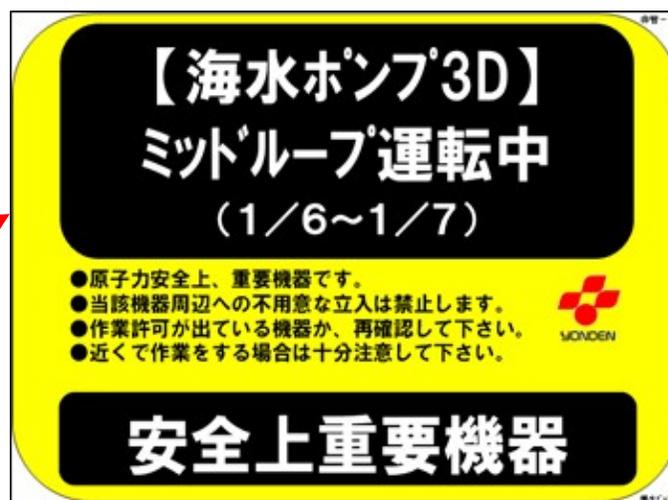
## [補足説明資料 4]

### 新チームの活動 (3/3)

#### 【参考 2】 P R Aモデルを使った定検リスク評価 (2/2)

[具体例]

- ✓ 従来から定検工程上、比較的风险が高い期間中は、安全上重要な機器に注意喚起を促す表示を行い、作業員などに注意喚起するなどの取り組みも行っている。(写真、図はサンプル)



#### ミッドループ運転

- 原子炉容器上蓋取り外し準備等により、1次冷却系の水位を原子炉ノズルセンター付近まで低下させた状態。
- この期間は、1次冷却材の保有水量が低下している状態にあり、1次冷却材システムの冷却が停止した場合の炉心露出又は燃料破損までの余裕時間が他の状態に比べて少なくなる。

[今後の取組み]

- ✓ さらなるリスク低減を目指して、注意喚起を促す表示を行う対象機器、対象期間拡大の検討について取り組んで行く。