

第3回燃料・材料技術検討会

議事録

1. 日時

平成27年4月21日（火）13：30～14：35

2. 場所

原子力規制委員会 13階会議室B

3. 出席者

外部専門家

有馬 立身 九州大学工学研究院エネルギー量子工学部門助教
兼松 学 東京理科大学理工学部建築学科准教授
黒崎 健 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻准教授
望月 正人 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻教授

原子力規制庁

迎 隆 技術基盤課 企画調整官
河原木 千恵 技術基盤課 係長
鬼沢 邦雄 安全技術管理官（システム安全担当）
田口 清貴 安全技術管理官（システム安全担当）付 首席技術研究調査官
小澤 正義 安全技術管理官（システム安全担当）付 主任技術研究調査官
高倉 賢一 安全技術管理官（システム安全担当）付 技術参与
渡辺 大貴 安全技術管理官（システム安全担当）付 係員

4. 議題

- (1) 平成26年度 安全研究プロジェクトの技術的評価
(燃料・材料技術事後評価)
- (2) その他

5. 配付資料

名簿

資料1 平成26年度 事後評価調査票

参考資料 平成26年度 事後評価調査票説明資料

6. 議事録

○迎企画調整官 それでは、定刻になりましたので、第3回燃料・材料技術検討会を開催いたします。

本日は、お忙しい中、検討会に御出席いただきましてありがとうございます。

今回は、前回同様、技術基盤課企画調整官の迎が議事進行をさせていただきます。

前回の検討会では、安全研究成果の中間評価をいただいたところではありますが、今回は、平成26年度に終了した安全研究プロジェクト1件の事後評価をお願いいたします。

それでは、事務局より事務的な連絡と資料の確認をさせていただきます。お手元に、座席表とともに議事次第、名簿を御用意しております。めくっていただきますと、その次に、資料1として、評価の対象となる安全研究プロジェクトの成果をまとめた調査票を御用意しています。次に、参考資料として、本日の説明用のスライドのコピーを用意しております。また、机の上には、A3サイズのコメントシートを御用意しております。中間評価と同様に、このコメントシートに安全研究プロジェクトに対する技術的コメントを記載いただきたいと思います。このシートの電子媒体は、追って事務局からお送りいたしますので、一週間程度を目途に、事務局までメール等にて御送付いただければと存じます。過不足はございますでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、早速ですが、安全研究プロジェクトの成果の説明をさせていただきます。海水腐食評価事業について、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全技術管理官(システム安全担当)付の小澤主任技術研究調査官から説明をお願いいたします。

○小澤主任技術研究調査官 では、小澤です。よろしく申し上げます。

それでは、説明させていただきます。

まず、目次なんですけど、本日、説明させていただく内容について、ざっとこのように考えてございます。まず一つ目が、研究の概要、二つ目として、事業の主要な成果で、まず2.1、この事業は、東京電力福島第一原子力発電所の事故がきっかけになったわけですが、その事故のときに海水が入れられて、それに対して1Fの評価をどのように腐食の観点からしていかないといけないかということで、腐食現象の選定を慎重にやってございます。そ

の懸念される腐食現象について、このように大きく三つ、炭素鋼と炭素鋼配管の腐食、あと、ステンレス合金の腐食、あと、アルミニウム合金の腐食評価を実施する必要があるだろうということで、このような事業を、展開してやっております。最後にまとめを御説明させていただきます。

3ページ目の背景でございますが、まず、平成23年の3月に発生しました東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故では、原子炉及び使用済燃料プールに海水が注入されました。これは、皆さん、御承知のとおりだと思います。

一方、その2カ月後に、今度、中部電力株式会社の浜岡原子力発電所5号機において、主復水器細管損傷に伴って原子炉へ海水流入事象が発生してございます。

これらを受けまして、我々としましては、原子力発電所で海水に晒された機器・設備の材料、具体的には、炭素鋼、ステンレス合金——ステンレス合金というのは、ステンレス鋼あるいは高ニッケル合金を示していますが、そのような合金——あと、アルミニウム合金において懸念される腐食現象の発生や進展に係る知見を取得して、腐食評価手法を整備しましょうということを目的に実施しています。ここで得られた成果は、例えば原子力施設等の検査等の原子力安全規制への技術的支援に知見として蓄えて、それでいつでも使える状態にしていきたいということです。

当然のことながら、原子力発電所の原子炉等では、海水が入るということは、当初、想定されていないわけで、その辺、きちっと腐食評価をして、健全性を担保していかないといけないというのがこの事業の大きな目的でございます。

4ページ目でございますが、これは成果の概要でございます。まず、一つ目としまして、研究対象とする腐食現象の選定。要は、材料と環境の組み合わせを考慮して、懸念される腐食現象を抽出しまして、本事業で評価すべき腐食現象を選定いたしました。

それで、その選定に伴って、この三つの腐食、炭素鋼、ステンレス合金、アルミニウム合金の腐食について評価することとしまして、まず、炭素鋼及び炭素鋼配管の腐食評価では、一つ目は、不動態化傾向を判断する指標を提案いたしました。もう一つは、不動態化時の局部腐食発生条件の評価をいたしました。三つ目といたしまして、腐食進展予測手法を評価いたしました。通常環境では、炭素鋼というのは、よく皆さん御承知のとおりですが、赤さびを伴って均一腐食等を発生するわけなんですけど、今回、いろいろ検討した結果、炭素鋼も、従来から知られている現象ではあるんですけど、ある環境では炭素鋼も不動態化します。不動態化というのは、ステンレス合金等は、通常、不動態化している状態

で使われているんですが、均一腐食は起こしにくい状態が不動態化という意味でございます。ただ、不動態化すると、今度、局部腐食のリスクも出てまいりますので、どういう環境で炭素鋼が不動態化するか。あと、不動態化したときに、どのような条件で局部腐食、すきま腐食が発生するかというのを評価したものでございます。

次に、ステンレス合金の腐食評価でございます。まず、Type304鋼のすきま腐食発生境界条件の明確化というのをこの事業では急いで行いました。急いで行ったというのは、このType304鋼というのは、福島第一原子力発電所の4号機、1号機から4号機の使用済燃料プールの水に接する部分にライニングされているという材料でございまして、それとあわせて、1F、4号機の使用済燃料ラックもこの合金で使われておりまして、まず、局部腐食するかどうかというのを急いで平成24年度に評価いたしました。

あとは、ステンレス合金ですので、Type304鋼は、すきま腐食の境界条件はある程度ベースになる評価方法があったものですから、それを応用して実施できましたが、例えばステンレスの316L鋼とか、あと、高ニッケル合金につきましては、こういう発生感受性評価方法とか、あと、局部腐食進展の継続性の評価方法というのが、今、世の中にはなかなか定量的な評価方法がないもので、それについて、これは委託研究で東北大学さんに研究していただいているところですが、そのようなこともあわせて実施してきました。

それと、もう一つが、アルミニウム合金の腐食評価です。これ、あのような海水の入ったところというのは、従来知見もそれなりにあったんですが、そこに今度は使用済燃料プールの冷却系で鉄イオンが、要は炭素鋼配管が腐食して、使用済燃料プールに鉄イオンが導入されることとか、あと、一時話題になりましたが、使用済燃料プールの中にコンクリートが入ってしまっている。そういう状況でpHが上がったときにどうなるかとか、その辺についても確認をして、それで、その腐食評価書を構築しましょうということで、そういう構築されたということでございます。

5ページですが、これは工程表です。簡単に工程表を示していますが、まず、炭素鋼については、配管の腐食試験と、あと、炭素鋼の腐食試験を実施してまして、それぞれ、最終的な成果は均一腐食進展予測手法を整備したり、あるいは不動態化傾向の判断指標等々を整備するための試験でございます。

ステンレス合金は、局部腐食の発生条件の検討を24年～25年度に行っています。あと、感受性評価方法とか、局部腐食の進展継続性の評価方法につきましては、25年度と26年度で実施しています。

あと、アルミニウム合金の腐食試験は、24、25年度で実施しまして、26年度、総合評価を実施したというところです。

6ページ目からが、主要な成果について御説明させていただきます。この表は、腐食事象の選定について整理した表ですが、既存のさまざまな先生たちがおられますので、その方々の知見をいただきながら、福島第一原子力発電所における使用環境(温度、溶存酸素濃度、塩化物イオン濃度、pH、流速等)から想定される腐食事象について網羅的に想定しました。それらの腐食現象の発生と進展の可能性について検討を行って、本事業で研究対象とする腐食現象を選定しております。

この1番と2番は、ここは炭素鋼についてなんですが、炭素鋼としては、配管としてはSTPG370Sの配管、あるいは、このような格納容器の炭素鋼板ですが、そういうものについて、どういうことがあるかということ、まず中性環境で低流速、あとはここに溶存酸素が加わると均一腐食が発生するという事です。あと、アルカリ性で高流速、ホウ酸塩投入につきましては、これも溶存酸素がある条件ではありますが、そうすると、ある条件では均一腐食、また、ある条件では局部腐食、不動態化して局部腐食を起こすということが想定されますので、そのような腐食現象を想定したということです。

あと、ステンレス合金、これは使用済燃料貯蔵ラックとか、あと、使用済燃料プール内の内張、あと、圧力容器の内張、炉内構造物、配管等々で使われておりますが、Type304鋼とか、あと、高ニッケル合金です。これにつきましては、塩化物イオンが混入すると局部腐食が起きることが知られておりますので、それについて評価を行うということです。

あと、使用済燃料貯蔵ラックのアルミニウム合金でございますが、これは、まずアルカリ性、強酸環境あるいは強アルカリ環境では均一腐食が起きると。あと、塩化物イオンが混入すると局部腐食として孔食やすきま腐食が起きると。あと、ステンレス鋼との電氣的導通があつて、それプラス、水が電気をよく通す性質であると、これがそこで電池が形成されましてガルバニック腐食が起きるということで、その辺を評価しないといけないということで、このような腐食事象を選定してございます。

7ページ目が、ここからは炭素鋼板及び炭素鋼配管の腐食評価で、静止水環境での炭素鋼板の不動態化挙動ということの評価した結果でございます。背景としましては、まず、重炭酸イオンは不動態化を促進するということがもう古くから知られているところです。あと、ここに、五ホウ酸ナトリウム、東京電力が再臨界を防止するために水の中に投入したりしていますが、もし今後、デブリを取り出すときに、取り出す作業を冠水工法でやる

うとすると、やはり水の中に五ホウ酸ナトリウムを投入することが想定されますが、それを投入した水溶液で腐食試験をすると、どうやらホウ酸塩に炭素鋼を不動態化する働きがあるということがわかってきたということでもあります。こういうこともありまして、重炭酸イオンとホウ酸塩は、いずれも炭素鋼を不動態化させる働きがあるということが知られてきています。

不動態化環境にある金属材料は、すきま腐食等の局部腐食を生起する可能性があるということで、このすきま腐食によって局部腐食を起こすと、その後、例えば応力腐食割れに進んでいく場合も想定されまして、そうすると、均一腐食よりも、もしかすると、炭素鋼の板と、材料としての健全性を担保するのが厳しい状況になる可能性もあるということが想定されます。

それで、目的としましては、炭素鋼の不動態化挙動と不動態化時のすきま腐食発生条件について評価を行うということとしました。この結果は、炭素鋼材料の健全性を確保するために必要な水質管理方法の妥当性判断に活用できる知見を整備するということでございます。

8ページ目が、試験方法についての整備したものです。静止水環境中での不動態化挙動で、試験は、ビーカーの中に、まず溶液、ここ、A、B、C、D、E、F、Gと、この下の表に試験の水質分析結果を示していますが、Aが代替海水、人工海水のことでございます。Bとしては、淡水の代表である水道水を用いて試験をしています。あと、C、D、Eが、淡水に五ホウ酸ナトリウムを加えたもの、あと、Fが淡水に重炭酸アンモニウムですが、要は重炭酸イオンを加えたもの、Gが淡水に五ホウ酸ナトリウムを加えたものに、さらに重炭酸イオンを加えたものとしています。温度は50℃で、供試材は炭素鋼の代表的材料でありますSS400を用いています。これをこの試験溶液の中に炭素鋼板を浸漬しまして、空気吹き込み下で21日間自然浸漬して、試験後の試験片の腐食状況を確認しました。

これが試験後の試験片の腐食状況を示した写真です。ここで見ますと、AとBとFは、このように赤さび、あるいは黒色のもので発生が認められていまして、これはいわゆる均一腐食の状況を呈していました。一方、CとDとEとGは、このように腐食試験後も発生は認められていませんでした。そしてまた、顕微鏡で確認したんですが、孔食等、局部腐食である孔食も確認されなかったという結果を得ています。

細かな字で恐縮ですが、10ページ目が、もう一つ、自己不動態化はどういう状況で起きるかということは何らかの指標として求めてやろうということで、検討したのがこの結果

でございます。Larsonらは、炭素鋼の腐食に及ぼす水質因子の影響は、Larson-Skold指数、LSI、Larson Skold Index、これ、重炭酸イオン濃度で、硫酸イオンと、あと塩化物イオン濃度の足したものを割った、そういう指標なんです、こういう式で、こういうLSIで整理されることを示しています。ここで示されたLSIが、どの程度以上だと腐食が起きます、どの程度以下だと腐食が起きませんと、そういうような指数になっているんですが、それで整理することが示されています。これ、もう60年ほど前の文献でございます。Larsonらの実験結果から、腐食速度が0であるか否か、即ち不動態化するか否かの境界濃度は、重炭酸イオン濃度に対して硫酸イオンの2分の1とCl⁻イオンが、硫酸イオンを2で割ったものとCl⁻、この量的なところでちょうど等価な効果を有すると見なし得るということもあわせて示されていて、ここでは、不動態化指数として、硫酸イオンを2で割ったものと塩化物イオン濃度を足したものを重炭酸イオン濃度で割ると、このような不動態化指数、SPIと呼んでいます、このような式で表現できると仮定しました。

一方、先ほど、背景のところでも申し上げましたが、五ホウ酸ナトリウムを添加した水溶液で腐食試験を行っても、炭素鋼を不動態化する働きがあるということが報告されておりました、ここでは、仮に重炭酸イオン濃度と等価に五ホウ酸イオンが不動態化を促進する働きがあると仮定して、拡張SPIをこのように表現しました。これ、分母がM-アルカリ度になっていて、このM-アルカリ度は、要は、腐食試験溶液を分析した結果、試験溶液における重炭酸アンモニウムと五ホウ酸ナトリウムとの調合濃度とM-アルカリ度の分析結果がほぼ一致する傾向を示したことから、これとこれを足したものをM-アルカリ度と見て、それで拡張SPIというのを定義して評価してみたということです。これは本当に仮に評価したところです。

この図は、横軸にM-アルカリ度、縦軸に硫酸イオンの2分の1の量とプラス塩化物イオン濃度を当量濃度で整理したものです。こちらに描いていますが、塗り潰された印のところは均一腐食が確認されているもので、Open Marksは不動態化又は局部腐食が観察されている水質を示しています、我々の先ほどの腐食したものは、ここの青い○で示されていて、白く均一腐食を呈さなかったのが、ここの四つの○の水質環境を示しています。1がFukayaさん、Akashiさんの2007年のデータと。あと、2番のこの辺がFukayaさんのデータと。あと3番のUmemuraさんの2004年のデータで見ると、このように、2番、Fukayaさんのところで、最近のデータでちょっと合わないところもあるんですが、大体拡張SPIの0.4の線で、大体こっちが不動態化、こっちが均一腐食というような形で分けられるんじゃない

いかということで、不動態化傾向は、拡張SPIで概ね整理できるんじゃないかということがわかってきています。この出ている二つは、これ、Fukayaさんの文献を当たっていただくと思うんですが、ホウ酸塩、五ホウ酸ナトリウムをかなり入れている条件でして、ちょっと五ホウ酸ナトリウムはかなり不動態化には大きな影響を及ぼしているのかなということではあるんですけど、大体こういう形で評価できるということがわかっています。今、3月31日までの仕事では、ホウ酸イオンの働きももう少し評価して、この評価式も、拡張SPIも、もう少し今、検討を重ねているところです。

あと、今回示すことはできないんですけど、このような環境で、どういう条件ですきま腐食が起きるかということも評価を進めているところです。まだデータが出たばかりで、今回は御説明はまだ少しできないんですが、とにかくこういう形で不動態化挙動を整理して、すきま腐食等の局部腐食の発生感受性についても評価すると、しましたということです。

次、流水環境における炭素鋼配管の腐食挙動についての結果の主なところを説明させていただきます。まず、背景ですが、まず、1Fの使用済燃料プールでは、海水が注入された後、RO膜等による浄化と循環冷却が行われまして、現在は塩化物イオン濃度が100ppm以下に、水温は40℃以下にまで低下しています。

SFPからの使用済燃料プールの取り出しについては、4号機はもう既に終了しましたが、3号機は2015年度、今年度から、あと1号機は17年度、2号機は2017年度以降、1号機、2号機はまだ検討中でございますが、そのように計画されています。このような期間、炭素鋼配管がある程度健全じゃないといけないということで、腐食評価をしています。ここで、炭素鋼配管の腐食試験により腐食挙動を検討し、腐食量の評価を行い、SFPの冷却浄化系配管の健全性に係る知見を取得するということを目的としています。

これが、13ページ目が試験条件でございまして、供試材はSTPG370(公称直径が150Aと200A)、これは、まさに1Fで使われている材料でございます。そこに流速で実機配管を模擬した水の流速を流して試験をしました。これ、実際は、この実機で使われている配管に、実機で使われているのと同仕様のポンプを持ってきて、そのポンプの定格流量で水を流して試験をしたということです。試験環境は、1Fの水質観測データがある程度ございますので、それで、どの程度、淡水で希釈されて、その後、浄化されたかといったことを溶液化学の知見を用いてシミュレーションした結果に基づいて設定しました。

設定した結果が、これ、下の表になりますが、試験環境①としましては、まず塩化物イ

オン濃度が2000ppm程度を目標にして、結果的に2075ppmになったんですが、この試験環境①、あと硫酸イオンが200ppm、重炭酸イオンが400ppm、LSIが9.6で、温度は40℃としています。試験温度を40℃としていますのは、当初、使用済燃料プールは80℃～90℃の温度にまでなったことが報告されていますが、ここで冷却が始まって、初めて炭素鋼配管に水が流れるわけですが、当初、80℃～90℃あった使用済燃料プールも、一晩ぐらいでもう温度が40℃になったということが東京電力の報告でも示されていますので、長期健全性については、この40℃で試験をして評価するのが妥当だろうということで、40℃で評価しています。

試験環境②でございますが、これはかなり浄化が進んできた状況で、塩化物イオン濃度が100ppm、硫酸イオン濃度が約10ppm、重炭酸イオン濃度が395ppmということです。LSI、先ほどのLarson Skold Indexとしては0.47と。

あと、試験環境の③としては、これが恐らく今、一番現状に近い水質でございますが、塩化物イオン濃度として20ppm、硫酸イオン濃度として2ppm、重炭酸イオン濃度として376ppmというところで、試験をしてございます。

環境の浄化に伴って塩化物イオン濃度はどんどん下がって、それと同じく、硫酸イオンも低下していくわけですが、重炭酸イオンは、これ、大気中、あるいは使用済燃料プールは、水、循環冷却はプールにいっぱいになった水がすきまサージタンクのところに流れ落ちて、要は滝のように水が流れ落ちて、そこからまた配管を通過して、ぐるっと回ってプールに戻るということになっていますので、そうすると、大気に接することで重炭酸イオンが供給されるということで、大体同じようなレベルで試験するということになっています。

これが実機の1Fの1、2、3、4号機の使用済燃料プールの水の分析結果と、これは塩化物イオン濃度の分析結果からLarson Skold Indexをシミュレーションして、推定した結果をここに示していますが、試験環境①が、これ、まだRO処理とかもできていない状況の環境でLSIも高くなっていますが、これがRO処理、若干進められてきたこの条件で、試験環境②がこの辺り、試験環境③が、もう浄化も進んで、今後、一番長い時間さらされるであろう環境でございます。

14ページですが、これが試験結果の一つです。これは3,000時間の試験でございまして、試験環境①のものと②のもので、試験体、150Aと200Aです。減肉量の平均と最大をここに示しています。

試験環境①では、腐食の減肉量は、試験環境②に比べて、平均で大体2倍程度以上は大

きい結果が得られています。

あと、試験環境①では均一腐食の傾向が認められ、流速が高い150Aと200Aの平均減肉量はほぼ同等だったんですが、最大減肉量は150Aのほうが大きかったという傾向を示しています。

試験環境②は、流速の高い150Aのほうが200Aに比べて減肉量が小さかったということです。

試験環境②で、どうして減肉量が小さかったのかということも含めて検討したんですが、それがこのシート、15ページ目になります。これが、横軸、試験時間で、縦軸がpHをとったデータです。試験環境①については、このようにpHがどんどん試験時間に伴って上がっていく。ところが、試験環境②は、一旦上がったんですが、その後、あるところで飽和している傾向が認められています。

これ、鉄が腐食すると、鉄イオンと、あと電子が放出されるわけですが、カソード反応のほうで、今度は当量のOH⁻ができて、水酸イオンですね。水酸イオンができるとpHが上がっていくということで、このpHの挙動というのが、試験環境①では、もうずっと継続的に均一腐食が進展していったということがわかります。

一方、こちら、試験環境②のほうなんですけど、pHが上がるのは、途中からなくなったということで、これは恐らく不動態化したんじゃないかと。で、鉄イオンの放出がなくなって、OH⁻がそれ以上増えることもなくなって、不動態化したんじゃないかということ、今、考えています。

これは、先ほどのSPIの線の上に、試験環境①、②、③と示したもののなんですけど、試験環境①はもう均一腐食の領域にあるんですが、②はちょうど境界のところにあって、③は不動態の領域にあるということです。

藤井さんという方がおられまして、その方が、データをとったところでは、彼の環境はこの辺なんです。試験環境はこの辺なんですけど、ここでも流速を上げると不動態化することが報告されていまして、恐らく試験環境②のもので、流速が高いと考えられる150Aのほうは、200Aに比べて減肉量が小さかったということは、150Aのほうがより不動態化が進んだことによるものではないかということに対応すると考えています。

試験後の腐食面、内面について観察した結果、6,000時間の試験後のものですが、試験環境②と試験環境③の150Aの配管については、局部腐食による孔食が観察されています。

次が、炭素鋼の腐食進展モデルの高度化としまして、16ページでございますが、まず背

景としては、SFPの使用済燃料取り出しまでに冷却浄化系配管の健全性を確保しないといけないんですが、それに関する知見が不足している。

一方で、炭素鋼配管の均一腐食進展モデルとしては、明石さんが中性自然水環境において均一腐食の予測式を提案しているところでありまして、それで、既存の知見と、あと我々のデータを明石さんの式に入れ込んで、何とか海水を含む環境まで、その進展予測式を適用できるようにできないかということで検討したのが、この腐食進展モデルの高度化でございます。

17ページ目が、その腐食の式について、細かな字で書いてございます。恐縮ですが、式(4)で腐食の進展深さが求められるということは、検討した結果、わかっていて、これが電気化学的な経験式等で、あと、配管内の流速とか、あと、動粘性係数等々を入れ込んでやると、腐食の予測ができると、そういうモデルでございます。

18ページが、これ、横軸が腐食進展量の予測値、縦軸が観測値を示しています。Solid Marksのほうが、これがビーカーの中で、静止水の中で試験をしたもので、我々のデータのほかに、Fukayaのデータ、あと、Ishiokaのデータを含んでいます。あと、パイプの中で水の流れる条件で試験したものがOpen Marksでございますが、このように、大体概ね0.5~2倍の範囲に予測値と観測値がおさまってしまっていて、よい対応関係が得られたんじゃないかということで、この腐食進展モデルは十分に値すると、現在、我々は考えております。

次に、19ページでございますが、Type304鋼の局部腐食の発生感受性評価でございます。SFPのライニング等に使われている304鋼について、すきま腐食が発生するかどうかを評価したと、そういう試験、研究でございます。

20ページでございますが、JIS G 0592というのを基本としまして、すきま腐食発生境界条件を求めました。この赤い線が、結果的に求められたすきま腐食の発生境界条件です。この赤い線からこちらの環境、要は塩化物イオン濃度が高い環境、温度が高い環境であると、すきま腐食についてセンシティブであるということで、あともう一つ、こちらの左側で、塩化物イオン濃度が低くて、温度が低い環境であると、すきま腐食に対しては耐性があるということでございます。

これを見ますと、あと、これが1Fの2号機と4号機の使用済燃料プールの水質の変化を示しています。現状は40℃程度で、塩化物イオン濃度としては100ppm以下のこの環境にありますので、すきま腐食の発生感受性だけで評価すると、今のところ、新たにすきま腐食は

発生しないということが、この線から評価できたということです。

ただ、今ので、次、21ページに行きますが、じゃあ、発生はしないから、もうそれよいかというと、それはどうも、それで安心していいかどうかというのは、我々、慎重に考えています。というのは、低いということは確認されたけど、じゃあ、1回、高塩化物イオン濃度条件下で発生して進展した可能性のある局部腐食が、その後、環境中の塩化物イオン濃度が低下するにしたがって、本当に進展が止まるかどうかということについては、あまりというか、全然確かめた人がいないということでございます。というのは、すきま腐食が起きると、かなり細いすきまとか、小さな孔食、食孔の中に塩化物イオン濃度が取り残されたままである可能性がありまして、そうすると、いつまでも止まらないんじゃないかという心配もあるということを考えています。

それで、電気化学的にその辺を検討したいということで、検討しました。結果としましては、ある特定の条件におけるステンレス鋼のすきま試験片上で進展しつつある腐食すきま、これ、実験的につくったので、すきま腐食ではなくて、わざわざ腐食すきまと言い換えています。でも、そのすきま腐食は、発生臨界電位よりもずっと低い、200mVも低い電位域までその進展持続が可能であることが示されたということで、これは言い換えると、バルクの環境をきれいにしても、もしかすると、すきま腐食は止まらない可能性もあるんだよということを示した結果でありまして、これは今後も引き続き、慎重に議論していかないといけない問題だと思っています。

次、アルミニウムの腐食評価手法でございますが、先ほど申し上げましたが、SFPの炭素鋼配管の腐食によって鉄イオンが流入していたり、あるいはコンクリート混入があるので、その辺を試験で確認しています。

まず一つ目が、本試験で得ましたA5083のこのアルミニウム合金の自然浸漬電位の最高値は-0.2~-0.1Vでありました。これ、鉄イオンを17~300ppm含んだ環境で、このような自然浸漬電位を示しているということです。一方で、文献データ等は、大体-0.8~-0.7ぐらいであるとの報告がありまして、これ、電位が上がるということは、すきま腐食等の発生感受性に大きな影響を及ぼす可能性がありまして、今後、局部腐食、孔食とかすきま腐食を評価するときには、やはり鉄イオン濃度もある程度考慮しないといけないということがわかったということです。

あとは、ガルバニック腐食の試験についてですが、コンクリートでpH11に調整した環境と、あと、水酸化カルシウムで調整した環境で、pH11に調整した環境での試験をやったと

ころ、どうもコンクリートのほうが腐食が進んだということがございました。その辺も今後は考慮して、アルミニウム腐食評価をしていかないといけないんじゃないかということで考えてございます。

このように、アルミニウムの腐食評価のフローをつくりまして、そのときに腐食評価上、どういうことを考慮しないといけないかということを観点としてまとめたというのが、これがアルミニウム合金の腐食評価表です。

以上で、まとめになります。まず、腐食事象の選定ですが、材料と環境の組み合わせを考慮して、腐食現象を抽出して、本事業で評価すべき腐食現象を選定しました。

あと、炭素鋼につきましては、拡張自己不動態化指数というのを提案して、不動態化傾向を判断する指標を提案しています。

あと、不動態化時のすきま腐食の発生条件について評価を行っています。

あと、既存の炭素鋼の均一腐食進展モデルを高度化して、淡水から海水まで幅広くカバーできる均一腐食進展予測手法を整備いたしました。

あと、ステンレス合金の腐食評価としましては、Type304鋼のすきま腐食発生境界条件を明らかにしました。

あと、Type316鋼、高ニッケル合金のすきま腐食発生感受性評価方法を創案しています。

あと、ステンレス合金に一度腐食した局部腐食進展継続性について評価方法を創案して、知見を得ました。

あと、アルミニウム合金の評価手法について、それを構築して、腐食評価上考慮すべき観点を整理いたしました。

以上、長くなりましたが、説明を終わらせていただきます。

○迎企画調整官 御質問、御意見ございましたらお願いします。

黒崎委員、お願いします。

○黒崎准教授 三つ確認したいのが、これまで、多分海水とか、いろんな何でもいいんですけど、金属の腐食研究というのはすごくたくさんされてきていると思うんですけど、要は、そういった知見を踏まえて、本当に必要最小限の、あるいは必要十分な試験というのがされているのかどうかというところが、ちょっと今回の説明からではあまりわからなかったんですけど、その辺どうですか。きちんと必要十分なことだけができていると考えてよろしいのでしょうか。

○小澤主任技術研究調査官 まず、この事業を最初に始めるときに、当然、我々の中でも、

もう60年、70年前までの文献まで遡って、先生のおっしゃるとおり、重大なたくさんの知見が世の中にはあるわけで、それをサーベイしました。

もう一つ、その上で、この材料と環境をいろいろ突き合わせてみて、どういうことが懸念されるかということについて、これ、腐食防食学会に相談しまして、学会で委員会組んでいただきまして、その中で、懸念されるどういう腐食現象があるかと。あと、それに対してどういう知見があるか、どの辺が足りないかということ半年かけて十分議論していただいた上で、この試験を実施しています。

○黒崎准教授 わかりました。それならいいと思います。

○迎企画調整官 ほかに御意見、御質問ございますでしょうか。

兼松委員、お願いします。

○兼松准教授 兼松です。

最後のほうでちょっとわからなかったこと、コンクリートのデブリというか、がらが落ちてという話がありましたが、pH11に設定したのは、どうして11だったんですか。実測されて、燃料プールか何かを想定されているんですか。

○小澤主任技術研究調査官 コンクリートが落ちて、pHが一番上がって、一度、東京電力が対応したときがありましたけど、そのときが10.5とか、それぐらいのところだったと思うんですけど、そこを、そのデータを見据えて、保守的に評価できるところで11で評価しました。

○兼松准教授 その後は、そのプールの中なりのpHの環境というのは改善されている、要するに、循環させてということですかね。

○小澤主任技術研究調査官 pHで行くと、大体8~9の間ぐらいで、今、どの号機も推移してございます。アルミニウム合金の均一腐食の感受性が出始めるのが、8ぐらいから始めて、9、10と、一気に感受性としては大きくなっていくんですが、現状はそんなに均一腐食の感受性の高くはない環境だとは思っています。

○兼松准教授 ちなみに、このコンクリートと水カルの違いというのは何にあったとお考えなんですか。

○小澤主任技術研究調査官 これ、ガルバニック腐食評価において差が出たんですが、ガルバニック腐食というのは、水の導電率、要は水の中の電流のを通しやすさ、それに大きく影響を受けることが知られています。今のところ、想定しているのは、コンクリートだと恐らくいろんなものが入ってきて、イオンとして。導電率を少し上げてしまったのかな

と。

一方、水酸化カルシウムについては、それだけですので、イオンとしてはそんなに多くなくて、その辺で差が出たと思われるんですけど、ちょっと詳しいところまでは評価できていないというのが現状です。

○兼松准教授 何か違うとしたら、ナトリウム、カリウム辺りかなと。ナトカリ辺りかなと思うんですけども、それは循環のプロセスで取り除かれているんですかね。Clのみ取り除いているんですか。

○小澤主任技術研究調査官 全て取り除かれています。

○兼松准教授 全部、安全側に評価されているというイメージでよろしいんですかね。わかりました。ありがとうございます。

○迎企画調整官 ほかに御質問、御意見ございますでしょうか。

有馬委員、お願いします。

○有馬助教 そしたら、これはスライドの14、表4なんですけども、流水試験で減肉を見ておられる表があるんですが、ここで、平均とか、最大とかで御説明されたんですけども、その重要度というのは、最大で見るのがいいのか、平均で見る、どちらも重要だとは思いますが、どういふふうなお考えなんでしょうか、そこら辺は。

○小澤主任技術研究調査官 基本的には、材料の寿命を決めているのは最大値ですので、健全性等を評価するためには、最大値で評価しないといけないと考えています。

○有馬助教 わかりました。そうですね。わかりました。

それと、あとは、これは図5ですか、スライドの18ですね。これは、結局、予測式を構築して、それに実験値を乗せて、合っている、合っていないということですよ。こういうのを、例えば、評価に使われると思うんですが、例えばどこまで予測式と合っていたらいいとか、悪いとかというところを判断するのかなというのはちょっと思ったんですけど、例えば静水の試験だとよく合っているけど、その上の流水のほうだとばらついているとかありますけど、それは、それぐらいの誤差というか、その違いですよ。それは許されるものなんですかね。

○小澤主任技術研究調査官 現状の技術というか、我々の知見では、今のところ、ここでこういう0.5から2倍の範囲で評価して、その誤差というか、その間を想定して、実際は評価していかないといけないのかなということで考えています、この式の適用のときには。ここ、流れると、やはりどうしてもこのモデルは層流ベースにつくってしまっていて、これは

流れの乱流とまでは行かないかもしれないですけど、ある程度、試験は、皆さん、我々にしても、Kodama先生にしても、いろいろ流れというか、乱流の影響をできるだけ小さくするような試験はやっているんですが、やはり流れて、そういう乱流とかの影響がここに出してしまうと。当然配管のサイズも、あるいは形状をとりましてもさまざまですので、これぐらいの不確実さを含めて、実際の腐食の評価のときには、その辺も含めて評価していかないといけないということで考えます。

○有馬助教 終わります。

○迎企画調整官 黒崎委員、お願いします。

○黒崎准教授 私も同じことを思っていて、例えば私の分野だと、その核燃料の熱伝導率とか、あと、融点とか、そういったものも実験で求めて、あるいはシミュレーションで求めてというようなことをやるんですね。そのときに、計算値と実験値が0.5から2倍の範囲におさまるとなるようなことはあり得なくて、相当何かこれ、広いといいますか、そもそもこれ、予測値になっているんだろうかというぐらいに、私としては思うようなものなんですけど、ですから、分野が違うので、ちょっと何とも言えないんですが、さっきの有馬先生の話と同じになるんですけど、本当にこれで大丈夫ですかという、そこですね。大丈夫という答えだったんですけど、ちょっと気になるなという。

○小澤主任技術研究調査官 我々も、実は引き続き、この式については検証してまして、去年の秋の学会で発表されたデータも、この上に、実はまだ十分検証を済んでいないので、今回はお見せできなかったんですけど、乗せて見えています。そうすると、ほかの方々のデータも、大体この色をつけている範囲におさまってきていて……。

○黒崎准教授 それは、やっぱりログログでとると、やっぱりそれは乗ってくると思いますよ。それはもう、ですから、0.5から2倍やったら大体乗るんじゃないかなという、どんなことをやってもというのが僕の感触ですね。さっきの熱伝導率とか融点だと、もう半分になるみたいな予測なんかは、予測じゃないという、 UO_2 の熱伝導率、例えば室温で9とか10ぐらいなんですけど、やっぱりそれぐらいの値というのがきちんとシミュレーションでも出てくるような、そういったシミュレーションをして、きちんと解析できたと我々は言っているので、さっきも言いましたが、分野が違うので、これがいいのかもしれませんが、私の感覚から見ると、ちょっと違和感があるというのが正直なところです。コメントです、これは。

○小澤主任技術研究調査官 ありがとうございます。ただ、世の中にこのような予測式が

まだなかったもので、こういうのを提案できたことは一つの大きなものかなと思っています。ありがとうございます。

○迎企画調整官 ほかに御意見、御質問ございますでしょうか。

兼松委員、お願いします。

○兼松准教授 今回の発表の内容とはちょっと違うのかもしれないですけども、腐食の対象として、そのコンクリート構造物の内部の鉄筋の腐食なんていうのは対象にしないんですか。圧力容器を支える部分だとか、生体遮蔽だとか、幾つかあると思うんですよね。そこら辺のところは今回の対象にできなかったということですか。

○小澤主任技術研究調査官 はい、今回は対象にはしていません。

○兼松准教授 そこら辺はあまり考慮しなくてよろしいんですかね。このプロジェクトでやらないのであっても、結構腐食としては大事なところだと思うんですけど。

○田口首席技術研究調査官 システム安全の田口でございます。

今の御指摘につきましては、我々、この前にご説明しました高経年化の事業のほうで調査事業をやりまして、広く、今、調査しております。必要に応じて、安全研究に取り組みたいと考えてございます。今、現時点ではまだ取り組んでいないというところが実態でございます。

○兼松准教授 長いものだとは思いますが、ただ、大事だと思いますので、ぜひやっていただければと思います。

○田口首席技術研究調査官 了解いたしました。

○迎企画調整官 ほかに御意見、御質問ございますでしょうか。

望月委員、お願いします。

○望月教授 いろいろと丁寧に聞かせていただいて、僕の印象では、かなり定量的にも貴重なデータが得られたのかなというようなのが、小澤さんの発表の中で聞こえてきたというような形ではあったんですけど、この実施期間3年間の中で、全体の網羅的な整理と選定から始まって、そして、炭素鋼、ステンレス、アルミと、相当に直接使えるような、きつとデータがとれたなというようなところは感じました。

その上で、少し質問があるのが、どの材料のものに対しても、現在、検討中であるとか、今後、検討予定というようなコメントが出ていたんですけど、この要は福島事故が起きて、その後、大急ぎで3年間のという形で、これ、かなり頑張って、要は長時間のデータまでとられているというのはよくわかるんですけど、その後というようなところは、また

考えてられるわけですか。

○小澤主任技術研究調査官 安全研究の計画の個票を見ていただくとわかるんですが、27年度、結局、3年間の短期間だったもので、この事業のデータをとるところまでで終わっちゃった分も実のところあります。安全研究計画の個票では、27年度にそのデータを全部見て、全体を整理するという計画になっていまして、ということです。ですので、27年度、今年度3月31日までにとれたデータをまとめて、それを秋の腐食防食学会で発表するとともに、何らかの適切な学会に論文投稿をして、それで、この事業を最終的な取りまとめたいと考えてございます。

○望月教授 了解しました。今日は、いわゆる3年間の事後評価ということで、さらに本年度、27年度の取りまとめ、もちろんこの3年間の中での僕の感覚では、出ているデータだけでも、極めて重要なデータが、これ、安全規制という観点に立つ上でとれていると思うんですけど、さらにそれをより予測ができるような形、外挿できるようなものも含めて検討いただけるはずですし、さまざまところに適用できるようなところまで、ぜひ視野を広げて考えておいていただければ、とてもいいんじゃないかと思います。

○小澤主任技術研究調査官 ありがとうございます。

○迎企画調整官 ほかに御質問、御意見ございますでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、事後評価の対象となる安全研究プロジェクトの説明については、以上です。

全体を通して、何か運営関係でも結構ですので、コメントございますでしょうか。

じゃあ、望月委員、お願いします。

○望月教授 先ほどの質疑応答の中でも出てきたんですけど、プロジェクト個票、ぜひ、このような事後評価のときだとか、あと3月にも実施されました中間評価のときに、全体の流れがわかるような資料もあわせて添付しておいていただけると、その中の、例えば今回はこの3年間のこの事業が評価をするものだと。当然その前、後、やっぱりわかったほうがいいと思いますので、ぜひそこは次回以降の検討会のときには検討いただければと思います。

○迎企画調整官 すみません、次回はちょっと1年後になってしまいますが、承知しました。来年の評価のときには、計画のほうもあわせて御紹介したいというふうに考えます。

ほかにごございますでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、ちょっと事務的な連絡なんですけど、冒頭に御説明させていただいたとおり、コメントシートの電子媒体は、追って事務局からお送りいたしますので、一週間程度を目

途に事務局までメール等にて御返送をお願いいたします。

それでは、これで第3回燃料・材料技術検討会を終了いたします。

本日はどうもありがとうございました。