

浜岡原子力発電所5号機 主復水器細管損傷の影響調査

Effect of sea water intrusion from main condenser, damaged by break on reactor core internals, Hamaoka Unit 5

| | | | |
|---------|-------|--------------------|------------|
| 中部電力(株) | 市川 義浩 | Yoshihiro ICHIKAWA | Non-Member |
| 中部電力(株) | 釘本 三男 | Mitsuo KUGIMOTO | Non-Member |
| 中部電力(株) | 渡辺 哲也 | Tetsuya WATANABE | Member |
| 中部電力(株) | 三谷 和己 | Kazumi MITANI | Non-Member |
| 中部電力(株) | 山本 優介 | Yusuke YAMAMOTO | Non-Member |

In the process of achieving cold shutdown following the shutdown of Hamaoka Nuclear Power Station Unit 5 on May 14, 2011, the readings of conductivity meters monitoring the purity of the water in the main condensers began to rise, and the conductivity of the water in the reactor also began to rise.

After cold shutdown, investigation identified that a high volume of seawater had flowed into the reactor facility due to damage to the main condenser tubes.

Evaluations focusing on corrosion of materials have been conducted, through inspection of equipment and material tests, in order to verify the soundness of the equipment exposed to sea water. These evaluations have been performed with consideration of the opinions of outside experts.

Keywords: sea water infiltration, corrosion, condenser pipe break, field experience, plant survey

1. 諸言

浜岡原子力発電所5号機（以下、「5号機」という。）（定格電気出力 138 万 kW）は、経済産業大臣からの運転停止要請「浜岡原子力発電所の津波に対する防護対策の確実な実施とそれまでの間の運転の停止について」を受け、平成 23 年 5 月 14 日 10 時 15 分に発電を停止し、原子炉減圧操作中のところ（平成 23 年 5 月 14 日 12 時 59 分に原子炉未臨界に到達した後）、復水器の細管損傷による原子炉施設内に海水が混入する事象^[1]が発生した。

ここでは、当社が実施してきた5号機の原子炉施設への影響調査の結果概要を報告する。

2. 事象の概要

平成 23 年 5 月 14 日 16 時 30 分に、復水器蒸気室(A-1)の細管が損傷し、ホットウェル(A)内への海水流入を介して原子炉施設内に海水が混入した。後日の調査により、損傷配管の近傍の電動機駆動給水ポンプ(A)ミニマムフロー配管の閉止板が脱落したのを確認した。

Fig.1～3 に当該損傷部の状況を示す。

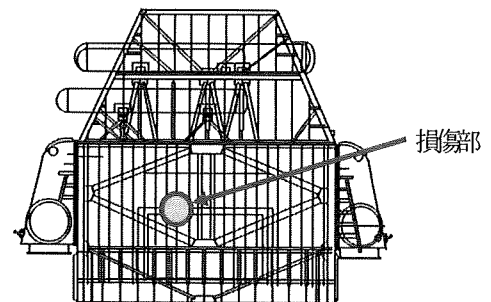


Fig.1 Outline of main condenser



Fig.2 Damaged tube of main condenser

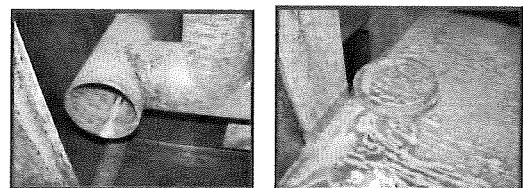


Fig.3 Damaged end-cap of main condenser
(SCMV3-1 weld metal)

渡辺哲也, 〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地
中部電力株式会社原子力部運営グループ,
E-mail : Watanabe, Tetsuya@chuden.co.jp

3. 原子炉施設への海水混入

3.1 原子炉施設への海水混入

復水器ホットウェルから混入した海水は、復水脱塩装置にて海水中の成分（主に塩化物イオン）を除去できていたが、時間経過とともに除去能力を超え、給水系及び復水ブースターポンプ入口配管に繋がる制御棒駆動系を通じて、原子炉圧力容器内に混入した。また、復水貯蔵槽にも混入した。

Fig.4 に5号機の原子炉施設に混入した海水範囲を示す。

3.2 海水の混入量

事象発生前後の復水器ホットウェル及び復水貯蔵槽の水位変化から、全体で約 400m³ の海水が原子炉施設内に混入したものと算定した。

3.3 原子炉施設の浄化

海水が混入した設備への影響については、主たる材料であるステンレス鋼や炭素鋼において腐食が発生、進展する可能性があることから、原子炉施設の浄化を実施した。原子炉圧力容器内の原子炉水の浄化を最優先として実施し、塩化物イオン濃度の目標値は、原子炉停止時の原子炉水に対する社内規定に基づき 0.5ppm 以下とした。

4. 健全性評価

4.1 健全性評価の方法

海水混入による影響は、ステンレス鋼については局部腐食、炭素鋼については全面腐食の発生・進展を考慮^{[2][3]}し、これらに着目した健全性評価を行うこととした。

機器レベルの健全性評価は、機器の外観点検、分解・開放点検、作動試験等の結果から、機器の健全性評価を行うこととした。また、系統レベルの健全性評価は、機器の健全性を確認した後に、系統の運転確認を行い、系統全体の機能が正常に発揮されることを総合的に確認することとした。

4.2 実機調査

実機の腐食状況を把握するため、ポンプ、熱交換器、弁、計測機器等のうち、構造や機種を考慮して選定した機器を分解・開放し、海水混入による影響調査を実施した。

これまでに、原子炉設備の機器として、制御棒駆動機構（以下、「CRD」という。）、原子炉冷却材再循環系ポンプ（以下、「RIP」という。）モータ、余熱除去（以下、「RHR」という。）ポンプ、RHR 熱交換器、CRD ポンプ、水圧制御ユニット（HCU）、復水貯蔵槽（以下、「CSP」という。）、弁などの実機調査を行った。また、タービン設備の機器として、高圧給水加熱器（HP Htr）、

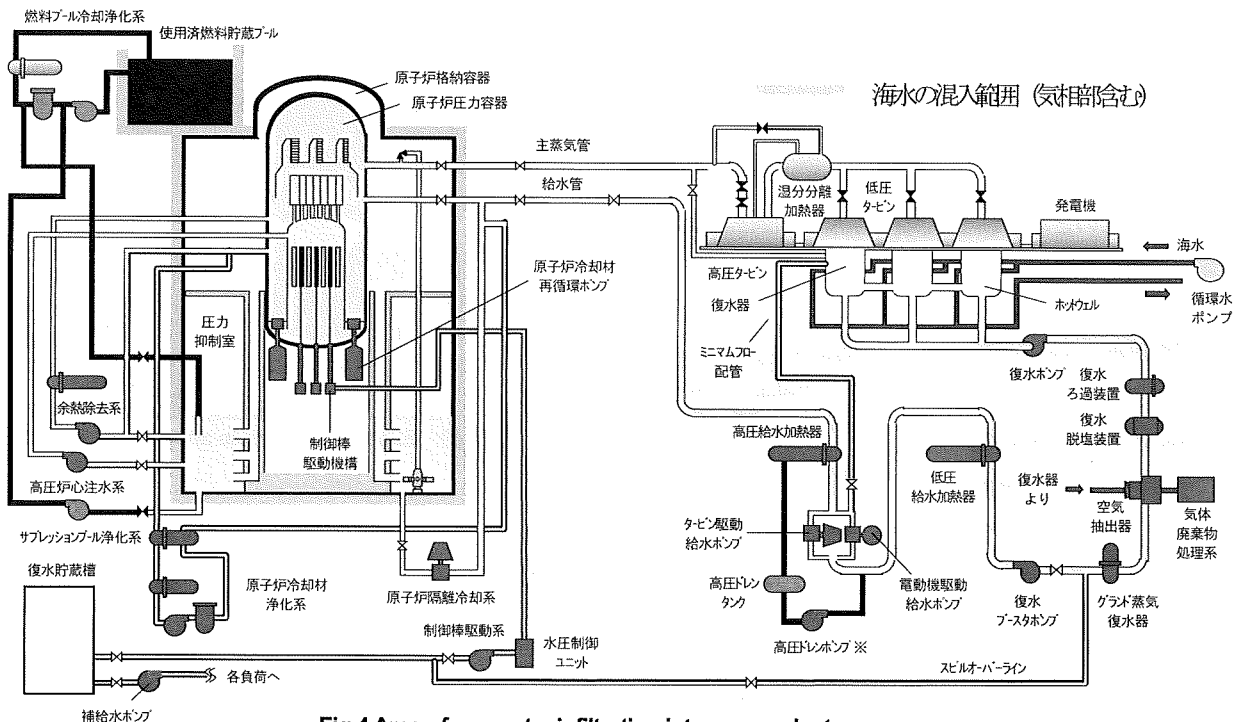


Fig.4 Area of sea water infiltration into power plant

低圧給水加熱器 (LP Htr), グランドスチームコンバータ (GSC), 復水ブースタポンプ (以下, 「CBP」という。), 復水器, 弁などの実機調査を実施した。調査結果を以下に示す。

a. 設備全般

- ・ 全般的に過去の点検時に比べて付着物や錆が多く認められたが, 手入れにより除去可能な程度であった。

b. 原子炉設備

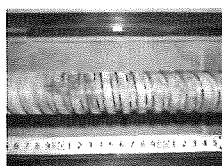
Fig.5~9 に原子炉設備 (代表設備) の点検結果を示す。

- ・ CRD については, 窒化処理されている部分等に腐食が認められた。
- ・ CRD 系, 補給水 (以下, 「MUWC」という。) 系等の一部の弁において, 弁蓋嵌め輪や弁棒バックシート部等に腐食が認められた。
- ・ CSP の内張り材 (SUS304) の溶接部及び溶接部近傍に 40 個の孔 (底部 35 個, 壁部 5 個) が認められた。

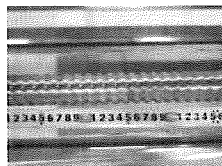
c. タービン設備

Fig.10 及び 11 にタービン設備 (代表設備) の点検結果を示す。

- ・ CBP については, 分解前のハンドターニングでシャフトが回転しない事象が発生した。分解調査の結果, ブッシュとスリーブに錆が認められた。
- ・ 復水器 (A) で細管損傷が認められたほか, 復水再循環ラインに繋がる復水器 (B) 細管に, 腐食によるものと思われる渦流探傷試験の優位な指示 (変形) が認められた。



as found condition



after maintenance

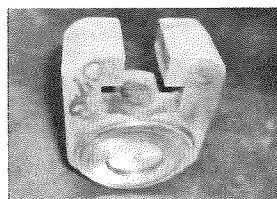
(ボールねじ: SUS630)



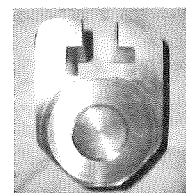
as found condition

(ピン: XM-19 窒化処理)

Fig.5 Surface appearance of CRD Parts



as found condition



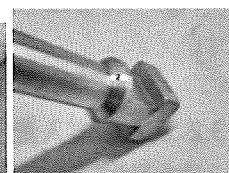
after maintenance

(CRD 系弁体: SUSF316 ステライト盛金)

Fig.6 Surface appearance of CRD valve disc



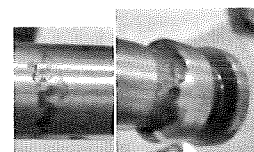
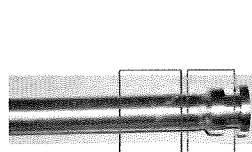
as found condition



after maintenance

(CRD 系弁棒: SUS630)

Fig.7 Surface appearance of CRD valve stem



after maintenance

(MUWC 系弁棒及びバックシート部: SUS403-B)

Fig.8 Surface appearance of MUWC valve parts

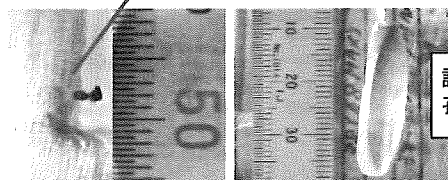
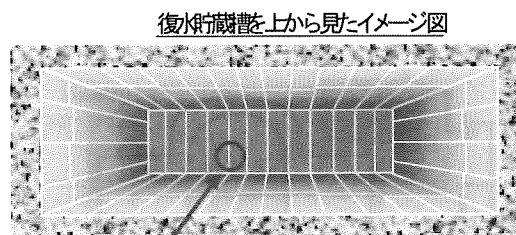
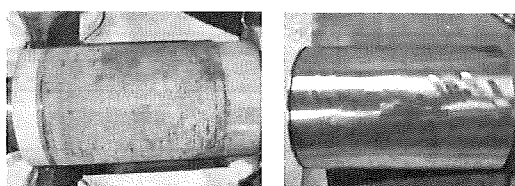
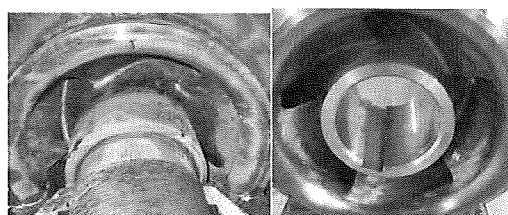


Fig.9 Example of Surface appearance of CSP



as found condition after maintenance
(軸スリーブ：SCS2)

Fig.10 Surface appearance of CBP shaft sleeve



as found condition after maintenance
(インペラ：SCS1 Mod)

Fig.11 Surface appearance of CBP impeller

4.3 材料試験

海水が混入した設備の腐食状況の把握及び設備を継続使用する場合における腐食挙動に関する知見拡充のため、実機環境（海水混入時以降の塩分濃度、水温）を再現・模擬した材料の腐食試験を実施した。

材料試験は、海水混入時の原子炉圧力容器内の過渡的環境（短時間の高温環境）を模擬した試験（以下、「海水混入環境模擬試験」という。）及び海水を含む低温水に長期間さらされた環境を模擬した試験（以下、「水質改善段階模擬試験」という。）を計画し、材料の腐食挙動を確認した。

以下に、原子炉設備を対象として現在までに実施した海水混入環境模擬試験及び水質改善段階模擬試験の概要を示す。

4.3.1 海水混入環境模擬試験

(1) 試験方法

原子炉機器で使用されているステンレス鋼、ニッケル基合金、低合金鋼、炭素鋼を材料とした平板試験片及びすきま腐食を評価するための重ね合せ試験片（JIS G 0592 に準じる）を用いて腐食試験を実施した。

試験装置は、水質調整タンクから予熱器を経て、4つの試験槽ユニットに繋がる閉ループ式の腐食試験装置を用いた。

Fig.12 に試験片の形状を、Table 1 及び 2 に試験対象

とした原子炉設備に使用されている材料の一覧を示す。

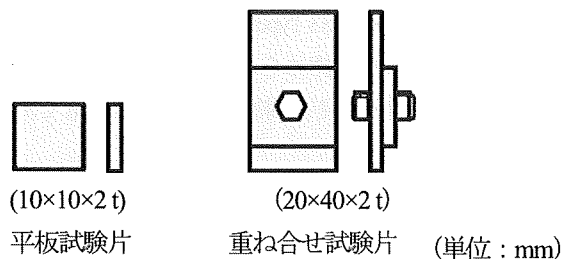


Fig.12 Schematic illustrations of test specimen

また、試験片中央部にノンフィラービードオン溶接を行うことで引張残留応力を付与させた試験片を用いて、応力腐食割れ発生の有無を確認するための浸漬試験を行った。

(2) 試験条件

原子炉圧力容器内の機器が経験した高温で、高塩化物イオン濃度の過渡的な環境条件として、①炉水環境（塩化物イオン濃度は炉内の水質を模擬した 450ppm にて、温度を 240℃で 3 時間、その後 7.0℃/hr で 50℃まで降温、降温保持後、試験開始後 84 時間で試験終了）及び、塩化物イオン濃度のより高い環境にさらされた復水系統から RIP や CRD などの原子炉設備に繋がる系統を模擬した環境条件として、②パージ水環境（パージ水の流入した水質を模擬した塩化物イオン濃度 6000ppm で、240℃で 3 時間、その後 7.0℃/hr で 50℃まで降温、試験開始後 84 時間で試験終了）の 2 条件で試験を実施した。

(3) 試験結果

上記条件による材料試験により、以下の結果が得られた。

Table 1 に平板試験の結果を示す。平板試験でステンレス鋼（SCS19A）に確認された腐食の状況を Fig.13 に示す。また、Table 2 に重ね合せ試験の結果を示す。重ね合せ試験でオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）に確認された腐食の状況を Fig.14 に示す。

a. 平板試験

- ・ステンレス鋼（SCS19A）で、最大深さ約 60μm の腐食孔が観察された。他の材料（SUS403, SUS304, SUS316(LC), SUS316L, XM-19, Y308L, Y316L, NCF600, X-750, Alloy82, SA-533 TypeB Class1, STPT410）では、いずれも局部腐食は確認

されなかった。

- ・低合金鋼(SA-533 TypeB Class1)と炭素鋼(STPT410)で全面腐食が認められたが、試験時間(84hr)の減肉量はそれぞれ、約11 μm 及び約6 μm であった。

Table 1 A list of test conditions and results

| 対象部位例 | 材質 | 試験結果 | |
|-----------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| | | 炉水環境 | パージ環境 |
| 配管/弁 | SUS403 | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| CUW熱交配管弁, FMCRD | SUS304 | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| RPV, 炉内構造物, 計装 | SUS316(LC) | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| RPV, 炉内構造物, CR, CUW熱交 | SUS316L | 局部腐食なし | — |
| 炉内構造物, CR計装 | XM-19 | 局部腐食なし | — |
| RPV, 炉内構造物, RIP | Y308L | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| 炉内構造物 | Y316L | 局部腐食なし | — |
| RPV, 炉内構造物, RIP | NCF600 | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| 炉内構造物計装 | X-750 | 局部腐食なし | — |
| RPV, 炉内構造物, RIP | Alloy82 | 局部腐食なし | 局部腐食なし |
| 炉内構造物, CR | SCS19A | 局部腐食あり | — |
| RPV(ノズル部) | SA-533 TypeB Class1(低合金鋼) | 局部腐食なし 全面腐食あり | — |
| 配管/弁 | STPT410(炭素鋼) | — | 局部腐食なし 全面腐食あり |

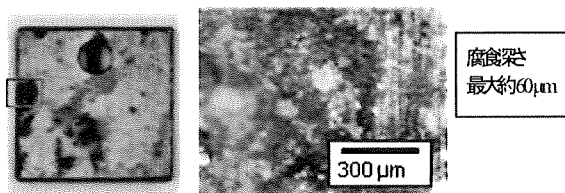


Fig.13 Surface observation results of test specimen (SCS19A)

b. 重ね合せ試験(すきま腐食試験)

- ・オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304, SUS316L, SCS19A, XM-19)及びマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS403)においてすきま腐食(局部腐食)が確認された。
- ・ニッケル基合金(NCF600, X-750)においては、すきま腐食(局部腐食)の発生は確認されなかった。

Table 2 A list of test conditions and results

| 対象機器 | 材質 | 試験結果 | |
|-----------------------|--------------|--------|------------------|
| | | 炉水環境 | パージ環境 |
| 配管/弁 | SUS403 | 局部腐食あり | 局部腐食あり |
| CUW熱交, 配管/弁, FMCRD | SUS304 | 局部腐食あり | 局部腐食あり |
| RPV, 炉内構造物, CR, CUW熱交 | SUS316L | 局部腐食あり | — |
| 炉内構造物, CR | SCS19A | 局部腐食あり | — |
| 炉内構造物, CR, 計装 | XM-19 | 局部腐食あり | — |
| RPV, 炉内構造物, 計装 | SUS316(LC) | 局部腐食なし | 局部腐食あり |
| RPV, 炉内構造物, RIP | NCF600 | 局部腐食なし | — |
| 炉内構造物, 計装 | X-750 | 局部腐食なし | — |
| 配管/弁 | STPT410(炭素鋼) | — | 局部腐食なし 全面腐食あり |

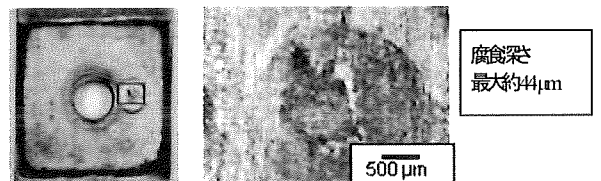


Fig.14 Surface observation results of test specimen (SUS304)

また、ノンフィラービードオン試験片を用いた浸漬試験では、ステンレス鋼、ニッケル基合金、炭素鋼のいずれの材料においても応力腐食割れ(ひび割れ)は認められなかった。

(4) まとめ

- ・海水流入直後の高温で塩化物イオンを含む過渡環境条件での腐食試験結果から、機器のすきま構造となる部位のうち、マルテンサイト系ステンレス鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼部材に局部腐食が確認されており、すきま腐食を生じうる環境条件であると評価した。
- ・炭素鋼、低合金鋼においては全面腐食が発生したが、短時間の過渡環境にさらされた期間内での減肉量は10 μm 程度であり、有意な腐食量ではなかった。

4.3.2 水質改善段階模擬試験

(1) 試験方法

RHR 系, CRD 系及び MUWC 系の機器には, 海水流入後, 低温 (一時高温) で高濃度の塩化物を含む水に長時間 (20~300 日程度) さらされたことから, これらの機器に主として用いられているステンレス鋼, 炭素鋼を対象とした平板試験片及びすきま腐食を評価するための重ね合せ試験片 (JIS G 0592 に準じる) を用いた腐食試験を実施した。

Fig.15 に試験片の形状を示す。

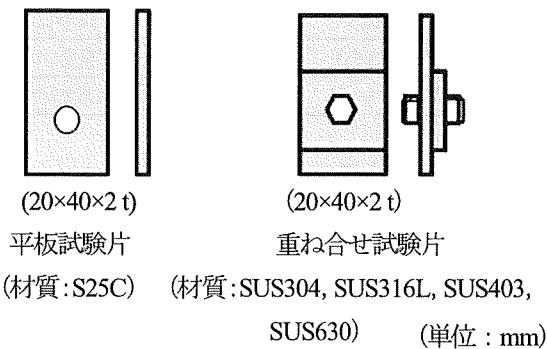


Fig.15 Schematic illustrations of test specimen

また, 焼入れ構造のため分解ができない RHR ポンプのベアリング (カーボン焼結体) とベアリングケース (SUS403) を組合せた試験体を製作し, 腐食試験を実施した。

(2) 試験条件

海水混入後から水質改善段階の低温で高濃度の塩化物イオンを含む環境として, RHR 系, CRD 系, MUWC 系の各システムで, 海水混入直後から海水浄化もしくは脱塩水置換までの温度履歴や水質条件を整理し, これを基に試験条件 (温度, 水質) を設定した。

なお, 試験の一部は, 文献データ¹⁴⁾に基づき実機環境の温度に対し温度を上げた加速環境 (40°C→75°C : 20 倍, 60°C→75°C : 3.0 倍, 40°C→55°C : 4.4 倍) とすることで試験時間を設定した。

Table 3 に各システムの試験条件を示す。Table 4 に試験ケースを示す。

(3) 試験結果

上記条件による材料試験により, 以下の結果が得られた。

Table 4 に水質改善段階模擬試験の結果一覧を示す。また, Fig.16 に重ね合せ試験のうち RHR (C) の環境

を模擬した試験でマルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS403) に確認された腐食の状況を示す。

a. 平板試験

- ・ RHR (A) 条件②と RHR (C) の模擬環境下での炭素鋼 (S25C) の腐食試験の結果, いずれの試験片も全面腐食が認められた。減重量は RHR (C) の場合 (試験時間 178h) で約 18μm であった。
- ・ いずれの試験ケースにおいても, 局部腐食は認められなかった。

Table 3 A list of the test conditions

| | 水源 | | | |
|---------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | 炉水 (450ppm Cl ⁻) | バーンズ水 (6000ppm Cl ⁻) | S/C (60,65ppm Cl ⁻) | CSP (550ppm Cl ⁻) |
| RHR(A) 条件① | | | ○ 75°C×125hr | |
| RHR(A) 条件② | | | | ○ 75°C×125hr |
| RHR(B) | ○ 75°C×40hr | | ○ 75°C×23hr | |
| RHR(C) | ○ 140°C×4hr 140→55°C×12.2hr 55°C×54hr | | ○ 55°C×108hr | |
| CRD | | ○ 60°C×5hr | | ○ 75°C×67.5hr |
| MUWC | | | | ○ 75°C×388hr |

b. 重ね合せ試験 (すきま腐食試験)

- ・ RHR (A) の条件①及び条件②, RHR (B), RHR (C), CRD 系, MUWC 系の各システムの腐食試験の結果から, いずれもマルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS403, SUS630) のすきま構造部位で局部腐食が認められた。すきま腐食が生じた試験片のうち多くの試験片では, すきま部のとば口近傍に腐食生成物が認められた。
- ・ 一方, オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304, SUS316L) では, いずれの系統の環境下でもすきま腐食 (局部腐食) は認められなかった。

c. 組合せ試験 (ポンプベアリングとベアリングケースの組合せ模擬試験)

- ・ RHR (A) 条件①及び RHR (C) の模擬環境下での腐食試験の結果, SUS403 のすきま部に局部腐食

Table 4 A list of the test conditions and results

| 試験片種類 | 材質 | 試験環境 (上段：水質 (塩化物イオン), 下段：温度×浸漬時間) | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------|
| | | RHR (A)系 条件① | RHR (A)系 条件② | RHR (B)系 | RHR (C)系 | CRD系 | MUWC系 |
| | | 60ppm | 550ppm | ①450ppm ②60ppm | ①450ppm ②65ppm | ①6000ppm ②550ppm | 550ppm |
| | | 75°C×125h | 75°C×125h | ①75°C×40h ②75°C×23h | ①140°C×4h ①55°C×66h ②55°C×108h | ①60°C×5h ②75°C×68h | 75°C×388h |
| 重ね合せ試験 (すきま腐食試験) | SUS304 | — | 腐食なし | — | 腐食なし | 腐食なし | 腐食なし |
| | SUS316L | — | 腐食なし | — | 腐食なし | 腐食なし | 腐食なし |
| | SUS403 | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり |
| | SUS630 | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり | 腐食あり |
| 平板試験 | S25C (炭素鋼) | — | 局部腐食なし 全面腐食あり | — | 局部腐食なし 全面腐食あり | — | — |
| 組合せ試験 (ベアリングとベア リングケース) | カーボン焼 結体/ SUS403 | 腐食あり | — | — | 腐食あり | — | — |

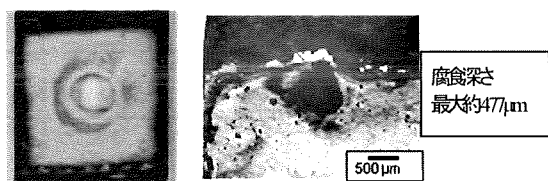


Fig.16 Surface observation results of test specimen (SUS403)

が認められた。一方、カーボン焼結体には腐食は認められなかった。

- ・SUS403 とカーボン焼結体のすきまのとば口で腐食生成物が認められた。

(4) まとめ

- ・RHR系、CRD系及びMUWC系の各系統の水質を考慮した温度加速条件での腐食試験の結果から、いずれの条件においても、マルテンサイト系ステンレス鋼のすきま構造部位において、局部腐食が認められた。
- ・RHR系の環境を模擬した腐食試験の結果から、炭素鋼に全面腐食が認められたが、過渡環境にさらされた期間内での減肉量は20μm程度であり、有意な腐食量ではなかった。
- ・RHRポンプのベアリング部の環境を模擬した腐食試験の結果から、SUS403に局部腐食が認められた。焼嵌め構造に塩化物イオンが浸入したものと考えられた。

5. 結言

海水が流入した設備の分解、開放点検や材料試験を継続して行っており、7月より原子炉を開放して炉内設備の点検を行う計画である。年内を目途に点検及び試験結果を踏まえた設備の健全性評価を完了する予定である。

なお、機械設備の健全性評価にあたっては、株式会社東芝及び日立GEニュークリア・エナジー株式会社の技術的支援を受けるとともに、社内に設備健全性評価検討委員会を設置し、社外専門家のご意見を踏まえながら検討を進めている。東北大学 庄子教授をはじめ、同 渡辺教授、腐食防食協会 辻川東京大学名誉教授、静岡大学 東郷教授、同 藤井助教及び日本原子力研究開発機構 山本GLには、多忙の中委員を引き受けて頂き多くの助言を頂いたことを、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 中部電力株式会社「浜岡原子力発電所5号機における復水器管割傷の影響の調査について」、平成24年4月
- [2] ステンレス鋼更覧 第3版、ステンレス協会編 日工業新聞社、pp.325
- [3] 腐食・防食ハンドブック、腐食防食協会編 丸善株式会社、pp.172
- [4] 松橋也 材料と環境、58、pp.378-385 (2009)