

Symposium on Water Chemistry and Corrosion in Nuclear
Power Plants in Asia - 2017&5th International Symposium
on Materials and Reliability in Nuclear Power Plants

セッション概要報告

日本原子力学会 水化学部会

2018年2月

Session 1: Plenary Lectures

【セッション全体の概要】

- 主催者挨拶の後、中、日、米、台、仏から 5 件の基調講演が行われた。
- 中国からは、Y. Dou (SPIC) がプラント設計、建設、運転のライフサイクルにわたる高経年化マネジメントのプログラムにつき、特に EQ (Equipment Qualification) に重点を置いて紹介した。
- 日本からは、高木 (東芝) が我が国の現状に鑑みて、福島廃止措置およびプラント再稼働後の水化学管理の現状と課題について報告した。ヨウ素化学の必要性、給水鉄と亜鉛注入による線量低減に関心が示された他、福島の水化学管理には何人関わっているのかとの質問も出された。
- 米国からは、P. Andresen (元 GE) が原子力の材料環境腐食の「再解決」(Re-solving) と題して、材料問題には依然として未解決の課題は多く、immune として設計し、トラブルを unique な事象と捉え、真因を捉えない対策を取ることに警鐘を鳴らし、協力と不断の努力が必要と述べた。
- 台湾からは、T. K. Yeh (清華大) が台湾の原子力政策、電力事情につき詳細に報告し、LNG、石炭、再生可能エネルギーを主力とする国のエネルギー政策実現性がなく、原子力の維持は必須と説いた。金山 1、2、国聖 2 は廃炉が決定したとのこと。
- 仏国からは、D. Feron (CEA) が PWR ニッケル合金の SCC について、歴史的な取組みと対策を述べた。古くは” Coriou effect” に始まり最近 H-18 トレーサー利用に至るまで、Ni 含有率や不純物影響に焦点を当てて、SCC 対策の経緯が述べられた。

【トピックス・感想】

- 今回は 5th IMRNPP (原子力発電所材料健全性国際シンポジウム) と AWC2017 (アジア水化学シンポジウム) の合同開催となり、水化学と材料の関係者が一堂に会し議論できた。
- 基調講演では各国の特色が出ており、中国は設計、建設、運転、廃炉の一貫したエンジニアリングを強調している点が印象深かった。これに対し、我が国は福島廃止措置の現状に鑑み、再稼働に向けなすべき課題を指摘。台湾は運転停止が相次ぐ状況で原子力の重要性を訴える内容。米、仏は、それぞれ材料の代表的専門家が BWR/PWR の材料問題を歴史的な視点も含めてレビューした。
- 建設途上の中国、運転中ながら材料劣化、D&Dにも注力する各国、福島対応が喫緊の課題である日本と、特色のあるセッションとなった。中でも中国の勢いを感じさせるセッションであった。

【作成者氏名】高木 純一 (東芝)

Session 2: Operation Experience & Corrosion

【セッション全体の概要】

- 運転経験と腐食に関するセッション2では、東芝の高木氏の司会により、3件（4件中、1件キャンセル）の発表が行われた。
- 日立GEの和田氏から、BWR-5における腐食環境が運転状態に与える影響について、水素水化学に係る放射線分解モデルを用いた解析結果について報告がなされた。
- KAERIのSoon-Hyeok Jeon氏から、PWR運転中に蒸気発生器伝熱管の外側に沈着する腐食物の特徴について報告がなされた。
- スウェーデンのABスタズビック工業のJohan Frodigh氏から、蒸気発生器伝熱管にスタズビック690合金を用いた場合のニッケル放出の低下について報告がなされた。

【トピックス・感想】

- 和田氏の発表では、解析の結果、炉心流量が増えるほど水の放射線分解が促進すること、サイクル末期に炉心周辺領域の出力が低下すると、水素水化学効果が低下すること等の結果が得られたことが紹介された。
- Jeon氏の発表では、蒸気発生器伝熱管の沈着物の主要な成分は、気孔質の磁鉄鉱に加え、塩化物、硫化物、鉛イオンであり、これらによって熱伝達効率が低下すること等が紹介された。
- 高燃焼度化によるニッケル放出量の増加が作業員被ばくの増加を招くことが問題となっているが、Frosdigh氏の発表では、スタズビック690合金を用いた場合にニッケル放出量の低下が見込まれるとのことであった。

【作成者氏名】日高 昭秀、端 邦樹 (JAEA)

Session 3: Materials & Reliability -I

【セッション全体の概要】

- Peter Andresen 氏の司会で、4 件の発表が行われた。内容は主に応力腐食割れによるものである。
- VTT の Ulla Ehrnstén 氏による招待講演があり、軽水炉のステンレス配管の IGSCC に関する研究のレビューがなされた。材料や応力の影響に重点を置いて紹介されており、特に加工時の表面状態等と与える影響について言及された。
- VTT の Juha Piippo 氏から、炭素鋼の SCC における不純物の鉛の影響について調べた研究結果が報告された。
- University of Oxford の Shen Zao 氏から、PWR 条件下でのオーステナイト系合金のき裂進展挙動への Ni 含有量の影響についての研究結果が報告された。
- Shanghai Research Institute of Materials の Guangfu Li 氏から、CANDU 炉の重水中での配管材料の腐食割れ挙動に関する研究結果が報告された。304L、316L ステンレス鋼、690 合金および炭素鋼 A106B の 4 材料を対象とし、250℃の水中および 150℃の水蒸気中での 4 材料の腐食挙動についての実験結果が議論された。

【トピックス・感想】

- Piippo 氏の発表では、VVER の蒸気発生器で使用される炭素鋼を用いて、酸化条件を模擬した環境での腐食挙動に対する鉛の影響について実験により調べた結果が紹介された。鉛が含まれることにより SCC の減少や全面腐食速度の低下が見られた一方で、電極電位が高い条件では鉛による SCC を助長する作用は確認できていないとのことである。
- Zao 氏の研究は、Ni 含有量が 20 - 45 wt.%の合金に見られる高い SCC 耐性について理解することを目的とし、より Ni 含有量の低い SUS316 や含有量の高い 600 合金等の材料を対象として行われたものである。SCC 進展をもたらす 2 つのメカニズムの Ni 含有量依存性についての議論がなされた。異なる材料の SCC 進展挙動を、Ni 含有量をパラメータにして一様に評価した点が興味深い。

【作成者氏名】 端 邦樹 (JAEA)

Session 4: Water Chemistry & FAC

【セッション全体の概要】

- Tsung-Kuang Yeh 氏の司会で行われた。5 件の発表が予定されていたが、中国の Jiakang Zhang 氏による” Remove oxygen by adding hydrazine in reactor coolant system” がキャンセルになり、4 件の発表が行われた。
- エネルギー総合工学研究所の内田俊介氏から、FAC による配管減肉の予測と点検に基づくプラント信頼性向上に関する研究発表がなされた。
- 東工大の小嶋正義氏から、FMEA (Failure Modeling Effect Analysis) 法を取り入れた新しい配管のメンテナンスマネジメントプログラムに関する研究成果が報告された。
- Ulsan National Institute of Science and Technology の Seunghyun Kim 氏から、炭素鋼と Fe-2.2Cr-1Mo 合金について FAC を疑似的に発生させた試験結果に関する報告がなされた。微細組織分析や酸化被膜の成分分析から、Cr と Mo による FAC 抑制効果について議論がなされた。
- IMR, CAS (中国) の Okpo Ekerenam 氏から、銅ニッケル合金 (90Cu-10Ni) 配管材料の 3.5 wt. % NaCl 水溶液浸漬後の電気化学挙動に関する研究成果の報告があった。異なるサプライヤーから入手した 3 種類の材料について比較したものである。

【トピックス・感想】

- 内田氏の発表では配管減肉速度を予測する FAC コードの整備が紹介されたが、このような解析的評価手法を点検時に取り入れ、かつ点検結果をコードの改良にフィードバックしていくことにより、点検業務の効率化が期待される。

【作成者氏名】 端 邦樹 (JAEA)

Session 5: Materials & Reliability - II

【セッション全体の概要】

- 招待講演を含め、韓、中、台から計5件の講演が行われた。
- 招待講演では D. J. Kim (KAERI, 韓国) により、PWR 二次系における Alloy 600 と Alloy690 との ODS/SCC 感受性の比較が報告された。Alloy690TT は SG 管材として優れているが塩素、硫酸、鉛等が濃縮すると SCC 感受性を示す。リバーズ U ベンド試験により PbO 添加での SCC 試験を行った結果、Alloy690 は Alloy600 より高い SCC 感受性を示した。さらに、塩素や硫酸の共存による相乗効果も認められた。
- D. H. Xia (CASIMR, 中国) からは、Sandvik 社製 SG 管材の UNS N08800 の不働態化の劣化事象につき報告があった。イオウは低温で不働態皮膜を破壊することが知られているが、塩化物イオンとチオ硫酸イオンを添加し、20、40、90℃で分極測定を行った結果、チオ硫酸は S、S2⁻、S₂⁻ に還元され不働態皮膜に取り込まれる。ただし、塩化物イオンとの競合ではチオ硫酸が多量にあると塩化物イオンの影響を緩和する効果がある。
- Y. T. Chen (清華大、台湾) は、BWR 起動時の白金処理を施した 304L ステンレス鋼表面 SCC 挙動につき報告した。SSRT 試験の結果、水素注入のない酸化性雰囲気では、250℃では同等だったが、280℃では白金処理はかえって腐食電位を高める方向に働き、白金処理のない場合よりも高い SCC 感受性を示した。
- 同じく、Y. H. Chang (清華大、台湾) は、高温水中での白金処理を施した 304L ステンレス鋼の電気化学的挙動につき報告した。予備酸化を過酸化水素 100ppb、溶存水素 100ppb の 2 条件で行い、白金溶液を 280℃にて 7 日間付着させた後、白金付着有り／無し試験片について 200℃、250℃、288℃の 3 条件で分極測定（腐食電位－腐食電流測定）を実施した。（発表がなく、結果については不明）
- J. Wang (上海交通大、中国) は、塩化物イオンを含む高温水中での PWR ノズルセーフエンドの SCC 挙動につき、SCC 発生試験、SCC 亀裂進展試験、腐食電位測定の結果を報告した。対象部位は低合金鋼-溶接金属-ニッケル合金 (508III-52M-690) の異材溶接部である。その結果、SCC 感受性が劇的に増大する腐食電位および溶存酸素濃度の閾値を決定した。

【トピックス・感想】

- いずれも材料の SCC 発生に関する発表であったが、電気化学的アプローチで議論している報告が多かった。このテーマは材料腐食と水化学・放射線化学との境界領域であり、材料・化学合同のシンポジウムの特徴が良く表れていたと思われる。
- 今後のシンポジウムでも BWR/PWR とともに継続的に議論して行くことが望ましい領域であると言える。

【作成者氏名】高木 純一（東芝）

Session 6: Water Chemistry & Fuel

【セッション全体の概要】

Invited Lecture として日本の東芝 高木氏より，燃料デブリ回収の際に問題となる α 線が混在した場合の放射線分解による水素発生について，デブリ粒子の微細化により表面積が大きくなった場合， α 線による水素発生が支配的になるとの報告があった。中国の China Nuclear Power Technology Research Institute Xing Gong 氏より，事故耐性燃料のための燃料被覆管材料の開発状況及び候補としている表面改良型ジルカロイ及び酸化物分散強化型 (Oxide dispersion strengthened: ODS) モリブデン被膜の高温酸化試験結果について，いずれの候補材においても良好な酸化耐性が確認できたとの報告があった。韓国の Ulsan National Institute of Science and Technology Taeho Kim 氏より燃料被覆管材料であるジルコニウム合金の酸化層に及ぼす DH 濃度依存性について，DH 濃度及び酸化時間によって酸化物層の結晶構造の安定性に変化が見られたとの報告があった。中国の Shanghai Jiao Tong University Donghai Du 氏より，高温水中における冷間加工ステンレス鋼の SCC 進展速度に及ぼす亜鉛注入の効果について，60 ppb の亜鉛注入により進展速度が 1/3 に低下するとの報告があった。

【トピックス・感想】

日本国内においても PWR 一次系の DH 濃度最適化を目指しており，燃料被覆管健全性への影響も考慮する必要があるため，先行して行われている韓国の研究は注目すべきものであった。また，亜鉛注入時の SCC 進展速度の変化についても国内では十分なデータが得られておらず，中国の研究成果は参考となるものであった。

【作成者氏名】 中野 佑介 (日本原子力発電)

Session 7: Materials & Reliability – III

【セッション全体の概要】

中国科学院金属研究所（以下 IMR）から 2 件、中国の大学から 1 件、韓国の研究所から 1 件の計 4 件が報告された。

【トピックス・感想】

高温高压水中での重要腐食因子 IMR En-Hou Han 氏

PWR 一次系環境でのステンレス、Ni 基合金上に生成する皮膜の分析、評価に関する発表である。材料表面に生成する酸化皮膜が二層構造となっていること、及び、それぞれの酸化物の半導体的性質が腐食予防に効果があることが報告された。

PWR 一次系での Ni 基合金酸化挙動に与える Cr の影響 KAERI Hee-Sang Shim 氏

Cr 濃度を 16%-30%まで変更した Ni 基合金の試験片を用いた PWR 一次系環境での腐食試験を実施し、腐食速度、及び表面酸化物の観察を行った。Cr 量 22%までは腐食量低減が見られ、22%以上では同程度の腐食量を示した。また、22%以上の高 Cr 合金では、針状の Ni 化合物発生量の低減、スピネル型酸化物 $(Ni, Cr)_xFe_{3-x}O_4$ の析出など、Cr の影響とみられる変化が複数確認された。

高温高压水中の SUS316LN の腐食疲労に与える温度の影響 IMR Ziyu Zhang 氏

腐食疲労の温度依存性について腐食特性を中心とした考察を行っている。PWR 環境における腐食疲労は複数のき裂が発生し、典型的疲労のストライエーションが発生する一方で、他の環境では大きなき裂が確認されていることから、環境因子も腐食疲労の影響因子と考えられる。金属面のスリップで表れる新生面からの腐食が重要であり、この腐食形態は温度依存性が高いという結論が示された。

き裂先端におけるクリープ速度と酸化皮膜の破損モデル 西安科技大学 Yinghao Cui 氏

SCC き裂先端を模擬した加工硬化試験片等を用いて SCC 進展速度を評価した。材料、応力面の評価が主であり、水化学との関連は低い。

【作成者氏名】柴崎 理（東芝）

Session 8: Simulating & Monitoring

【セッション全体の概要】

- 招待講演を含め、日、中からそれぞれ2件ずつ、計4件の発表があった。インド (BARC) からの発表は当日キャンセル。
- ステンレス鋼に導入された予ひずみの電気化学的評価手法の開発、超音波とラム波を利用した配管内流速分布ならびに肉厚評価、弾塑性有限要素解析と硬さ試験による残留応力測定、304 ステンレス鋼すきま部における高温水中酸化挙動に関する発表があった。

【トピックス・感想】

- 当該セッションにおいて、水化学に関連する講演は304 ステンレス鋼すきま部における高温水中酸化挙動に関する研究のみであった。人工すきま内において、形成された酸化物種や構造が場所によって大きく異なり、これは溶液の溶存酸素濃度と pH がすきま内で分布を持つためと考えられる。すなわち、電位-pH 図と形成された酸化物種から、すきま内環境が推定可能である。他の研究からも同様の知見は得られているが、当然すきま形状によって結果が異なるため、計算によるこれらの再現と種々のすきま形状への拡張が望まれる。

【作成者氏名】 渡邊 豊、阿部 博志 (東北大)

Session 9: Radiation & Decontamination

【セッション全体の概要】

日本からは JAEA および東芝から各 1 件、中国からは大亜湾原子力発電所 (Daya Bay NPP) から同一発表者で 2 件の発表があったが、インド (BARC) からの発表は当日キャンセル。

【トピックス・感想】

- 福島第一原発事故(事故後期)でのセシウム挙動と化学形態(招待講演) 日高氏(JAEA)
東海村で測定された Cs の空気中性状が 3 月 30 日にガスから粒子状に変わったことに関し、 B_4C を用いた Phébus FPT3 実験や WSPEEDI 逆算の結果を参照して、CsOH が B_4C 起源の H_3BO_3 と反応して生成する $CsBO_2$ の再蒸発に由来すると評価。また、 $CsBO_2$ は環境中で逆反応を起こし、 H_3BO_3 が水に溶けたことが B の測定を難しくしていると予測。評価は、3 月 20 日以降の炉心冷却注水量の最適化に伴う温度上昇時の環境中への放出量増大と合わせ、放出挙動を的確に再現できているが、推論の実証が重要である。今後は、様々な測定データを詳細に分析し、B の存在を確認することが重要と考える。
- 希薄海水に浸漬後の NWC 条件下での酸化挙動 柴崎氏(東芝)
希薄海水に浸漬後の炭素鋼試験片の酸化被膜生成および酸化被膜中への ^{60}Co の付着、蓄積について実験した結果を報告したもの。AWC2015 での発表に引き続いて、予備酸化被膜挙動の重要性にスポットを当てている。AWC2017 では、明確ではなかった予備酸化被膜への Ni 取込みの影響が明確になった。ただし、Ni 濃度 (0.2 ppb、2 ppb) の被膜生成量への影響は見られたが、 ^{60}Co 付着量への影響は見られなかった。
- 線量率低減のためのオンライン化学除染 W. Zheng (Daya Bay NPP、中国)
嶺澳 (Lingao) 原子力発電所 1 号機での EMMA POA 除染 (AREVA) の適用例を紹介。
- 発電機固定子冷却系目詰抑制のための化学洗浄 W. Zheng (Daya Bay NPP、中国)
同上 2 号機での固定子冷却系の CuO 蓄積抑制のオンライン洗浄。一部聴衆に誤解を与えたようであるが、オンオペレーション洗浄ということで理解を得た。
- オゾン法による化学除染 P. Candramohan (BARC、インド) キャンセル
今回インドからの参加者はゼロで、口頭発表、ポスターともすべてキャンセル

【作成者氏名】内田 俊介 (IAE)

Session 10: Materials & Reliability – IV

【セッション全体の概要】

- 招待講演を含め、日本から 1 件、中国から 3 件、計 4 件の発表があった。
- 304 ステンレス鋼の PWR 一次冷却水模擬環境中における腐食への照射影響、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の低温熱時効硬化挙動、異材溶接部の金属組織ならびに各種特性評価、高速フレーム溶射法による Fe コーティングの耐食性の観点からの溶射条件の最適化、に関する発表があった。

【トピックス・感想】

- 当該セッションにおいて、水化学に関連する講演は 304 ステンレス鋼の PWR 一次冷却水模擬環境中における腐食への照射影響に関する研究のみであった。照射量が増大するに従い、粒内ならびに粒界酸化が促進される傾向を示した。これは、照射誘起欠陥と粒界の Cr 欠乏によるものとされた。すなわち、照射誘起欠陥により鉄イオンの拡散が促進されて酸化物形成が進むこと、また粒界酸化物の Cr 含有量が低下することで粒界の耐食性も低下することが示された。

【作成者氏名】 渡邊 豊、阿部 博志（東北大）

Session 11: Auxiliary Systems & Future

【セッション全体の概要】

本セッションは、初めに招待講演として、三菱化成の Goda 氏が PWR の浄化系で使用する樹脂の開発について発表した。樹脂の耐酸化性と除鉄性能はクロスリンケージがトレードオフの関係になる。クロスリンケージが低いほど除鉄性能は良くなるが耐酸化性が低下する。樹脂設計を PWR 向けに最適化し、クロスリンケージ 10% の USMN10 を開発した。次に、通常の発表として 2 件の発表があった。まず、上海応用物理研究所の Jia 氏は溶融塩炉の腐食の研究を発表した。LiF 系冷却材中の Te が Hastelloy の粒界を運転温度 (600-800°C) で拡散して Te-Cr 化合物を生成することによって粒界で脆性割れが生じる。粒界性格制御材では耐食性が向上した。金属材料研究所の Xue 氏は処分容器の炭素鋼の腐食特性をベントナイト中で研究した。ベントナイト中は鉄の拡散が遅く腐食が抑制された。電気化学インピダンス分光分析から、塩化物イオンを添加すると腐食速度が増加して電荷移動律速から拡散律速に転ずることがわかった。インドからのアンチモンのイオン液体による吸着除去に関する発表が 1 件キャンセルされた。

【トピックス・感想】

樹脂については従来の水化学、溶融塩中の Hastelloy の粒界割れとベントナイト中の炭素鋼の腐食は材料劣化に関する内容である。従来の水化学に関連するテーマは全体として少なめという感想。

【作成者氏名】 和田 陽一 (日立)