

AWC2019の概要報告

Plenary Session

【セッション全体の概要】

・第1日は最初に Plenary Session が持たれ、KHNP(韓国)、EPRI(米国)、MHI(日本)から3件の基調報告がなされた(台湾の1件はキャンセル)。

Overview on Water Chemistry Program of KHNP (Soon-Hwan SON、 Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Korea)

・韓国 PWR の建設・運転の立場から、PWR 一次系・二次系の運転状況、SG の保全状況が KHNP より詳細に述べられた。一次系では炉水 pH の最適化、高 DH 管理が行われており、被ばく低減として積極的に Zn 注入が採用されている。また、AOA 対策としての燃料の超音波洗浄、マクロポラス樹脂の適用なども実施している。二次系では、pH 管理と酸化還元最適化として、エタノールアミンおよびヒドラジンによる腐食生成物の発生抑制を図っている。また、SG 健全性維持の一環として、クレビス環境の中性化、スラッジのプロードダウン強化などが実施されている。

Theoretical Predictions on the Water Chemistry of Light Water Reactors (Tsung-Kuang YEH、 National Tsing Hua University、 Taiwan)

=CANCELED=

SMART Chemistry -Online Chemistry Monitoring and Modelling (David PERKINS、 Electric Power Research Institute、 United States)

・水化学管理の方法として旧来はバケツとポリビンによるサンプリング・分析が主流だったが、実は未だにその点に関して大きな改善はなされていない現実がある。EPRI で提唱している SMART Chemistry は、このような状況に対して、サンプリング・分析の自動化を図り、遠隔でデータ収集を行い、的確にデータ処理を行ってプラント運転にフィードバックすることを目指しており、必要なデータを連続的に収集し、時系列データによりプラント診断を行おうとするものである。すでにプラントでのデモンストレーションの段階にきており、2021 年には最初のデモを実施する予定である。

Water Chemistry Management for Plant Start-up after Long-term Outage (Shingo YAMAZAKI、 Mitsubishi Heavy Industries、 Ltd., Japan)

・三菱重工より、震災後の長期保管における我が国 PWR の水化学管理の詳細が報告された。停止中の脱酸素の方策として、ヒドラジン添加を実施している。放射線下ではヒドラジンによる脱酸素反応は加速されるため、効率が良いと考えられる。Zn 注入により形成された酸化被膜について分析を行ったが、コバルト放射能の取り込み挙動に関しては長期的な変化のないことを確認した。

【トピックス・感想】

・今回、Plenary Session で BWR からの基調報告(日、台)がなかった点は残念であった。

・一方、韓国でもエネルギー政策の転換に直面しており、台、日、韓で同様な原子力政策後退の局面にある中で、再稼働、新規建設に向けての情報共有の場は非常に重要であり、有意義である点は共有されたと言える。

・韓国の PWR 建設・運転は KHNP が主体的に動いているが、一次系、二次系、SG の水化学管理について総括的な報告がなされ、より理解が深まったと感じた。米国 EPRI の SMART Chemistry 構想は、着眼は理解できるが、定着にはまだ時間と合意が必要と感じた。日本からの報告は福島事故を受けた長期停止に対する適切な水化学管理の重要性について、現場経験に基づく実績の紹介であり、通常炉の再稼働に資する有意義な報告であった。

【作成者氏名】東芝 ESS・高木

Session 1 : PWR Water Chemistry

【セッション全体の概要】

- ・中国、韓国、台湾から計3件の発表があった。
- ・中国の X. Wu (Institute of Metal Research、 Chinese Academy of Sciences) から、アコースティックエミッション法 (以下 AE 法) による高温水中 SUS304 の SCC 監視技術に関する研究が紹介された。溶存酸素の変化させた時の SSRT 試験で得られた AE 信号と SCC 発生の関係からランダムフォレストによる SCC 評価モデルを構築。ただし、現状の評価条件では実機環境を全て模擬できていないため、今後、条件拡張したモデル構築を予定しているとのことである。
- ・韓国の S. H. Jeon (Korea Atomic Energy Research Institute) から、PWR2 次側伝熱管表面へのスケール付着特性に対する給水 pH 影響について模擬試験で評価した研究が紹介された。ETA による給水 pH9.0 及び pH10.0 模擬試験での伝熱管表面スケールのモフォロジーは実機同様であり、pH とスケール生成の関係性が評価できた。今後、アンモニア等による別条件での試験を予定しているとのことである。質疑では、模擬試験の鉄注入系統から過剰量の鉄イオンを注入していることから、伝熱管表面のスケールモフォロジーは鉄注入系統からの鉄供給に依存する可能性が指摘されていた。
- ・台湾の W. Lai (National Tsing Hua University) から、PWR2 次側伝熱管環境を模擬したインコネル 600 合金及び 690 合金の SCC 及び隙間腐食試験結果の報告。従来知見と同様に、600 合金及び 690 合金ともに優れた耐食性を有し、また SCC 発生と進展速度は 690 合金よりも 600 合金の方が速いことが報告された。

【トピックス・感想】

- ・PWR 水質管理の実績そのものではなく、水質管理の目的である材料評価手法やスケール生成メカニズム解明によるプラントマネジメント手法開発といった基礎研究が盛況であり、それら分野への積極的な投資が行われている印象を感じた。

【作成者氏名】三菱重工業(株) 山崎

Session 2: Operation Experiences and BWR Water Chemistry

【セッション全体の概要】

- ・1件 (F-088) のキャンセルがあり、4件の発表が行われた。
- ・BWRプラントのSCC予防保全技術として米国を中心に貴金属注入が実機適用されているが、炉内に注入した貴金属の触媒作用により原子炉冷却材浄化系再生熱交換管出口の溶存酸素濃度が減少し、下流側炭素鋼配管の流れ加速型腐食 (FAC) が発生している。一方、酸化チタン注入の場合は溶存酸素濃度減少は原理的に生じない。J. Takagi(Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation、Japan)らは、ステンレス鋼熱交換管に酸化チタンおよび貴金属を付着させた後、水素/酸素の再結合試験により溶存酸素消費に及ぼす影響を実験的に検討し、配管表面での再結合反応速度定数を評価した。その結果、貴金属注入の場合は再結合反応により酸素消費を生じFACの発生を誘起するが、酸化チタン注入の場合はその懸念がないことが確認された。さらに、実機体系での酸素消費速度の評価手法についての提言があった。
- ・C. Stiepani(Framatome GmbH、Germany)らにより、Framatomeが実機(主にPWR)において実施しているフィルムフォーミングアミン(FFA)の適用に関する報告があった。腐食抑制技術として知られるFFAの適用だが、実機への適用の際には安全に配慮した段階的なアプローチを用いて行われており、水化学管理に悪影響となる事例は起こっていないとのことである。
- ・W. Sugino(The Japan Atomic Power Company、Japan)らにより、敦賀2号機の原子炉補機冷却水系(CCW)冷却器における伝熱管の減肉事象の原因と対策に関する発表があった。海水中に含まれる硫酸還元菌が冷却器の待機保管中に活性化し、アルミブラス製の伝熱管を浸食したことが原因であり、待機保管前に冷却器内を脱塩水で洗浄する対策を講じたことにより減肉が停止したことが述べられた。
- ・D. Kim(Korea Institute of Nuclear Safety、Korea)らは、炉内で使用されるステンレス鋼の溶体化熱処理について、その温度と保持時間の妥当性に関するラボ試験を実施した結果について報告した。SUS304や316を用い、温度、保持時間等をパラメータとした熱処理後に粒界腐食試験を実施することで、各条件での効果を調べた。1037.8–1121.1の温度で、0.5–1時間保持することで鋭敏化が抑えられることを確認した。

【トピックス・感想】

- ・韓国開催であったためか、BWR関連の発表が少なかった。
- ・酸化チタンやFFAといった技術の発展・普及が期待される。

【作成者氏名】JAEA 端

Session 3: Lifetime Management and Plant Aging

【セッション全体の概要】

・ J. Tan(Institute of Metal Research、 Chinese Academy of Sciences、 China)らが 304 鋼の疲労挙動を大気中(室温)および高温水中(280、325)で検証した。室温では切り欠き試験片の方が平滑試験片よりも疲労寿命が長かった。これは切り欠き周辺の応力勾配によると考えられる。切り欠き試験片を用いた荷重制御試験において、280 よりも 325 の方が腐食速度が小さく、DSA は大きく、これにより 280 よりも 325 の方が腐食疲労寿命が長くなったと考えられる。平均ひずみ速度を小さくすると DSA および腐食の影響は大きくなるが、DSA 増大よりも腐食速度増大の方が大きく、これにより平均ひずみ速度を小さくすると寿命は短くなったと考えられる。

・ V. Subramanian(BARC Facilities、 India)らはエタノールアミン(ETA)溶液中でのインコロイ 800 に対するオクタデシルアミン(ODA)添加による皮膜形成の影響を 75 (液相)および 200 (気相、液相)で検証した。ODA を添加すると 75、200 (気相、液相)すべてにおいて疎水性皮膜が形成された。75 では 15ppm の ODA 添加で効果が最大となり、腐食は半分に抑制された。200 の気相で形成された皮膜と液相で形成された皮膜は組成、構造が異なるが、ともに腐食抑制の効果があった。これは金属/酸化物界面での物質移動が阻害されたためと考えられる。ODA 濃度は 12ppm が最適であり、それ以上では酸化物が剥離する。

・ S. C. Yoo(Ulsan National Institute of Science and Technology、 Korea)らは 600 合金の PWSCC 感受性をこれまでより実機に近い条件(低温かつ長時間での時効、三軸荷重)で検証した。2種類の形状(ノッチ有/無)で3種類の熱時効処理(時効なし、10年時効相当、20年時効相当)を行った試験片で SSRT を行った結果、ノッチ無では10年時効相当が、ノッチ有では20年時効相当が最もPWSCC発生までの時間が短かった。ノッチ無では不連続な粒界析出物と Cr 欠乏が、ノッチ有では分解せん断応力がそれぞれ感受性に影響したと考えられる。いずれにせよ熱時効による劣化を評価するには粒界に沿った Cr の拡散を考慮することが重要である。

・ 高温水中での腐食疲労寿命評価のために、当該温度における大気中の疲労寿命との比(F_{en})を評価することが提案されているが、疲労における歪みの振幅が考慮されていない。Z. Zhang(Institute of Metal Research、 Chinese Academy of Sciences、 China)らは歪み振幅が腐食疲労寿命および F_{en} に及ぼす影響を 316LN 鋼で検証したところ、振幅が大きいほど疲労寿命は短くなり、さらに振幅が大きいほど F_{en} は小さくなった。これらの結果より歪み振幅を考慮した F_{en} の導出式を提案した。歪み振幅が小さい場合は平面すべり変形が支配的であり、これが金属表面、き裂先端、粒界に多数の欠陥を生じさせたと考えられる。高温水中では粒界やすべり線において環境水との反応が起きるため、低歪み振幅では高歪み振幅より環境水の影響が大きくなったと考えられる。

【トピックス・感想】

・ 各国でプラントに用いられる材料の劣化評価・予測、およびプラントの寿命延長の重要性が増してきている中で、まだまだ研究・改善の余地があると感じた。また、実機の条件を実験室で再現することについてもまだまだ改善の余地があり、これによってより精密な評価ができると感じた。

【作成者氏名】東北大・有賀、館、渡邊

Session 4. Water Chemistry and Corrosion

【セッション概要】

F-024: Contribution of Cathodic Reaction inside Crevice to Development of Crevice Corrosion in 304L SS (Kazuki YAKATA, Yutaka WATANABE, Yuichi FUKAYA, Tohoku University, Japan)

- ・東北大学より、SUS304 のすきま腐食の進展機構に関する発表があった。
- ・浜岡 5 号機の復水器細管破損や 1F での原子炉への海水注入をきっかけとして注目されているステンレス鋼のすきま腐食は、隙間内でのアノード反応を外表面でのカソード反応が支えると考えられていたが、近年、隙間内でのカソード反応により腐食が進展継続する可能性が示唆されたため、これを検証、評価した。
- ・その結果、外表面を持たない隙間部のみの試験片においても、隙間内における水素発生と隙間内に侵入した酸素の還元のカソード反応によってすきま腐食が進展継続することが示された。
- ・このことから、実機においても環境の溶存酸素濃度と塩化物イオン濃度がある程度高い場合には外表面とのセルが形成されていなくてもすきま腐食が進展継続することが示唆され、溶存酸素濃度を十分低くすることですきま腐食を停止させることができるとのことであった。

F-020: A Detailed TEM and SEM Characterization of Oxide Films on Alloy 690 Steam Generator Tubes in Simulated Primary Water Conditions of PWR (Sivaprasad PALLA VENKATA, Johan FRODIGH, Lisa LAUTRUP, AB Sandvik Materials Technology, Sweden)

- ・サンドヴィック(スウェーデン)より、PWR の蒸気発生器 (SG) 伝熱管からの Ni 溶出速度を抑制するためのプレフィルミングに関する報告があった。
- ・690 合金のプレフィルミングについて、330 ℃、ほう素 : 700ppm、Li : 1.2ppm、DH : 35 cc/kg の条件で 3 週間を 1 サイクルとし、1~6 サイクル実施後の Ni 溶出量を比較したところ、6 サイクル実施後の Ni の初期溶出速度は 1 サイクルの 1/4 に低減した。
- ・また、その際の酸化被膜を SEM、TEM で詳細分析した結果、プレフィルミング実施後は Ni と Cr の酸化物と水酸化物の 2 種類の酸化被膜が形成されるとのことであった。

F-055: Magnetite-accelerated Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 in Secondary Side Environments of PWRs (Geun Dong SONG, Jeoh HAN, Soon-Hyeok JEON, Do Haeng HUR, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea)

- ・KAERI(韓国)より、PWR の 600 合金製 SG 伝熱管二次側において、多孔質マグネタイト付着部での SCC 発生機構に関する報告があった。
- ・600 合金製伝熱管の二次側での SCC は、マグネタイトスケール付着部での不純物濃縮による pH シフトが原因と言われているが、実機での急速な SCC 発生を十分に説明できないことから、600 合金の表面に部分的にマグネタイトスケールを模擬付着した試験片を用いて U ベンド試験を行い、電気化学的観点から SCC 発生機構を検討した。
- ・この結果、模擬マグネタイト付着部と非付着部の境界で割れが生じたことから、従来から言われている pH シフトに加えて、600 合金とマグネタイトのガルバニック効果により SCC が急速に進展するのではないかと報告であった。

【トピックス・感想】

- ・本セッションも、東北大学の発表を除き PWR に関するものであった。
- ・東北大、KAERI の発表は、これまで常識とされていた腐食機構に一石を投じるものであり、基礎的な分野においてもまだまだ R&D の余地があることを認識させられた。

【作成者氏名】原電・杉野

Session 5: Fuel Crud

【セッション全体の概要】

・ Yun Sik CHO (Hanyang University, Korea)らが時間依存成長メッシュとマルチフィジックスフレームワークを使用した CRUD 生成の予測について報告。従来のクラッド厚みとボロン付着量を予測する MAMBA シミュレーションコードに熱水力と中性子工学コードを組み合わせたマルチフィジックスフレームワークの開発が進められている。本研究ではクラッド層内の熱伝導を解く in-crud 計算ドメインを開発し、続いてこの計算と境界領域のクラッド成長モデルを組み合わせてクラッド厚みの計算を確立した。感度分析の結果から、将来の感度分析の最適化の必要性が確認された。

・ Hwa Jeong HAN (Soonchunhyang University, Korea)らがマルチフィジックスフレームワークを用いたクラッドソースタームの予測について報告。この研究の目的は腐食生成物挙動の分析とマルチフィジックスフレームワークを用いた PWR 一次系の腐食生物量の計算についてである。このモデルでは一次系内における腐食生成物の濃度分布を計算し、これがクラッド成長モデルやクラッド化学モデルの計算に使用される。計算結果は、関連する文献および実験から入力条件を使用したベンチマークによって検証し、ニッケル濃度はプラントデータと同等の値で得られた。

・ Seungjin SEO (Krea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)らが炉心クラッド層内のマクロスケールマルチフィジックスモデル化について報告。クラッド層内でのマルチフィジックスを用いたマクロスケールモデルがボロンのハイドアウト予測のために開発された。開発したコードによる計算結果は、温度、SNB フラックス、ボロン量が Seabook 発電所 5 サイクルとオーダーが一致していた。しかし、MAMBA-3D とは分布が異なっていた。

・ Hee-sang SHIM (Korea Atomic Energy Research Institute, Korea)らが 13 MPa での燃料被覆管表面上の沸騰音響信号の検出によるクラッド堆積挙動の解釈について報告。表面粗さ、ZrO₂ 厚み、熱流束の増加でサブクール沸騰(SNB)が活性化することがわかった。加えて SNB の増加はすべての条件でクラッド付着量の増加をもたらした。しかし、溶存水素濃度は SNB の挙動に影響を与えず、クラッド量への影響も小さかった。本研究の音響計測結果に基づき、音響計測技術はクラッド付着を緩和する様々な研究において有効に適用できることが確認された。

・ Yunju Lee (Ulsan National Institute of Science and Technology, Korea)らが様々な熱流束条件で燃料被覆管に形成されるクラッドの化学分析について報告。クラッドの作製は Ni25ppm、Fe12ppm で、熱流束 46kW/m² の低熱流束と 100kW/m² の高熱流束条件とした。クラッド層厚みはどちらの熱流束でも 50um 程度で差がなかった。しかし、低熱流束のクラッドはポーラスであったのに対して、高熱流束のクラッドは稠密であった。元素組成にも差があり、低熱流束のクラッドの Ni/Fe 比は 0.55 であったのに対して高熱流束のものは 2.14 であった。これらの現象は Wick 沸騰によって説明される。

【トピックス・感想】

・ PWR の燃料クラッドに起因する出力異常や局部腐食に関する報告で、5 件の報告者はいずれも韓国からであった。PWR の課題の一つであり、韓国内で集中して取り組んでいる様子が伺えた。

【作成者氏名】日立・細川、伊藤

Session 6: Decommissioning and Decontamination

【セッション全体の概要】

- ・日本、韓国から計4件の発表があった。
- ・S. Kim(Korea Atomic Energy Research Institute、 Korea)が、HyBRID(Hydrazine Based Reductive metal Ion Decontamination)法による SUS304 の除染性能について報告。
HyBRID 法は有機酸を使用しないことを特徴としており、 KMnO_4 、 HNO_3 、 H_2SO_4 による酸化処理および N_2H_4 、 HNO_3 、 H_2SO_4 、 Cu^{2+} による還元処理を2回実施する。本手法をハヌル原子力発電所で使用されていたサンプリングライン配管(L 80cm、 ϕ 1 inch、 $112 \mu\text{Sv/h}$)に適用した結果、DF20を達成した。
- ・有賀智理(東北大学)が、炭素鋼のガンマ線照射時における腐食挙動について報告。ガンマ線照射下では喫水部の腐食速度が最大となり、非照射時と比較して最大で8倍となることをラボ試験により確認した。本事象は、ガンマ線照射による水の放射線分解により生成した酸化種が要因であると考えられる。
- ・H. Lee (Kyungpook National University、 Korea)が、除染廃液中の Fe^{2+} や Mn^{2+} を水酸化物として沈降させることで回収する手法について報告。 Fe^{2+} および Mn^{2+} 含有溶液に NaOH や $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 等のアルカリ溶液を加え、攪拌することで生じる水酸化物化反応は、通常アルカリ環境下でのみ進行するが、溶液のpHを2以下の酸性溶液にした後にアルカリ溶液を加えることで、酸性や中性環境下においても水酸化物の沈殿を生成することを確認した。
- ・J. Lee (Michigan Technology、 Korea)が、ナノ粒子状の0価鉄を用いた促進酸化法とバイオリアクターを組み合わせた復水処理装置の再生廃液に含まれるの処理方法について報告。
廃液中の主成分であるエタノールアミン及びヒドラジンは0価鉄による促進酸化法によってそれぞれ0.3%、48.75%まで処理され、残留分についてはCODやTNとともにバイオリアクターで処理される。本手法による廃液に含まれるエタノールアミン、ヒドラジン、COD、TNの除去率はそれぞれ100%、97.3%、98.8%、99.9%となり、高い除去性能を有することを確認した。

【トピックス・感想】

- ・この分野では既存の処理方法の除染性能向上ではなく、発生させる廃棄物量を低減するような代替手法の研究・開発に注力している印象を感じた。

【作成者氏名】東芝エネルギーシステムズ・原

Session 7: Accident Tolerant Fuel Cladding

【セッション全体の概要】

- ・米国からの発表がキャンセルとなり、本セッションでは韓国から 2 件の講演が行われた。
- ・どちらも ATF 燃料の被覆管候補の 1 つである FeCrAl 合金を対象として、過酷事故環境での腐食と PWR 模擬環境での腐食に関するものであった。
- ・FeCrAl 合金の過酷事故環境での腐食については、1200 の高温水蒸気で形成される酸化皮膜の生成挙動を SEM や TEM を用いて分析し、形成される酸化物は主として α -Al₂O₃ で剥離は生じなかったこと、二層皮膜の外層には Fe や Cr が少し含まれるが内層では純粋なアルミナであることなどを報告した。
- ・韓国で開発された高 Al 含有の ADSS(Alumina-forming Duplex Stainless Steels)と市販の 347SS、APM、2205DSS の 4 つの鋼種について PWR の加速環境で SCC 試験を実施した結果について報告があり、ADSS はやや耐 SCC 性が他の鋼種より小さいことが報告されていた。

【トピックス・感想】

- ・福島事故以降 ATF 燃料が再注目されるようになり、活発な開発が行われているが、水化学の国際会議でセッションとして取り上げられたのは最初である。
- ・ポスターセッションでも ATF 被覆管に関する発表があり、ジルカロイとステンレスを室温で圧延することでギャップのない被覆管が形成できるというもので、従来のジルコニウムへのコーティング、FeCrAl 系合金、SiC という三大被覆管候補と少し異なったアプローチであり注目される。

【作成者氏名】日立 GE・長瀬

Closing Session

【セッション全体の概要】

・「閉会セッション」では、技術委員長の Dr.Hur 氏(KAERI)から会議総括が述べられ、参加国数は 10 ヶ国、参加人数は 165 名(韓国 132 名、日本 15 名、中国 4 名、台湾 3 名、UAE3 名、インド 2 名、米国 2 名、スウェーデン 2 名、ドイツ 1 名、インドネシア 1 名)、9 セッションで 58 件の発表がなされたと報告された。

・その内訳は、口頭発表が 32 件 (韓国 15 件、日本 5 件、中国 4 件、台湾 3 件(2 件キャンセル)、インド 1 件、米国 2 件(1 件キャンセル)、ドイツ 1 件、スウェーデン 1 件)、ポスター発表が 26 件 (韓国 22 件、日本 4 件)であった。

・次回開催は日本であり、2021 年 10 月 19-22 日に東北大学にて開催予定であることが報告された。組織委員長は東北大・渡邊教授が務める予定である。

・最後に、AWC2019 組織委員長の Prof.Rhee 氏(SCH(順天郷)大)が閉会宣言を行った。

【作成者氏名】東芝・高木