

放射線誘起表面活性効果を用いた超臨界圧軽水冷却炉の基盤技術研究

(受託者) 国立大学法人東京海洋大学

(研究代表者) 波津久達也 学術研究院

(再委託先) 国立大学法人東京大学、学校法人早稲田大学

(研究期間) 平成27年度～30年度

1. 研究の背景とねらい

超臨界圧軽水冷却炉は、経済性に優れた我が国提唱の第4世代原子炉であり、その概念炉の設計研究が進められている。一方、放射線誘起表面活性 (Radiation Induced Surface Activation, RISA) は、放射線照射下で基盤材料及び酸化被膜熱伝達表面の電氣的相互作用により熱伝達率の向上及び防食効果を生ずる、これも我が国で世界に先駆けて確認された現象であり、その特性が鋭意研究されている。

本研究は RISA を用いた超臨界圧軽水冷却高速炉の基盤技術研究というまったく新しい研究開発であり、(1) 超臨界圧条件下における RISA 材料の電気化学特性に関する研究、(2) 超臨界圧条件下における RISA 材料の表面特性に関する研究、及び(3) 亜臨界圧力条件下における RISA 材料の濡れ性に関する研究、の実施により超臨界圧力条件下及び亜臨界圧力条件下における RISA による金属材料の電気化学的特性、表面特性及び濡れ性向上を定量的に評価し、超臨界圧軽水冷却炉の基礎的設計指針に反映することを目的としている。もとより実炉内の強放射線環境における超臨界圧力実験は非常に困難であり、この研究ではサイクロトロン加速器による放射化試験、 γ 線放射施設を使用した放射線実験に限定するため、実炉に適用した場合の安全性向上または経済的効果などを定量的に示すことはできない。したがって、弱放射線環境において RISA 効果が超臨界圧力・亜臨界圧力下で生ずるかを明らかにするという基礎的な実験を目的としている。

2. これまでの研究成果

(1) 超臨界圧条件下における RISA 材料の電気化学特性に関する研究

① 高温高压下の金属材料電気化学計測装置の整備

平成27年度は、高温高压下における金属材料の電気化学計測実験に使用するオートクレーブを改造すると共に、電気化学的測定に必要なポテンショスタットを整備した。装置は、高温高压水環境を得るためのオートクレーブ、加熱装置、温度調節装置、電気化学測定システムで構成される (図1)。オートクレーブは、内径80 mm、深さ170 mmのステンレス製であり、設計温度と設計圧力は、それぞれ、360℃と22 MPaである。このオートクレーブをセラミックスバンドヒータ式の加熱装置により加熱し、温度調節装置によりオートクレーブ内の熱水を所定の圧力と温度に設定した後、オートクレーブ内の熱水中に浸漬した試験体の腐食電位を、電気化学測定システムにより計測する。

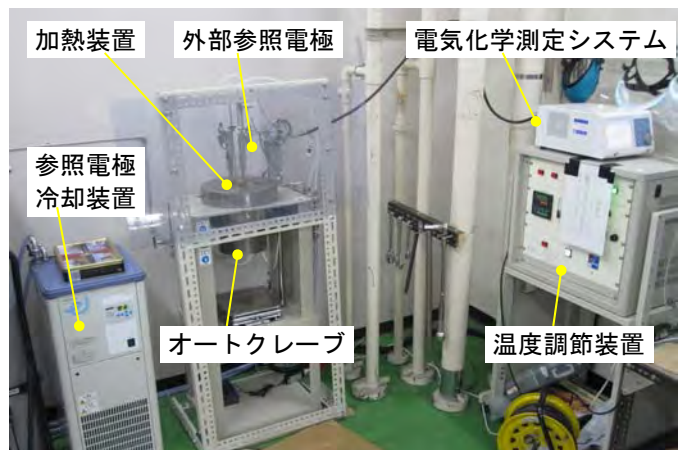


図1 高温高压下金属材料電気化学計測装置の外観

②放射線非照射下における予備実験

製作された電気化学計測装置と高温水用参照電極の動作確認を目的として、圧力 22MPa、温度 350℃までの高温条件における放射線非照射下の予備実験を行った。なお、これまでに 350℃までの温度条件において金属材料の電気化学計測を実施した例は報告されていない。図 2 は 350℃における昇温曲線とそれに伴う腐食電位の変化を示したものである。図から、350℃で一定に推移している間、腐食電位は比較的安定していることがわかる。

次に、純水中で SUS304 の分極を試みた。オートクレーブを対極として、腐食電位より 1.0 mV まで 25 mV/min の電位走査速度でアノード分極した。図 3 に得られた分極曲線を示す。250、300℃ の分極曲線を比較すると、温度が高いほど電流密度が高くなることがわかる。

以上、予備実験により、試験片にステンレス材を使用した場合、圧力 22MPa、温度 350℃までの高温高圧環境下において腐食電位及び分極曲線を安定して計測できることを確認した。平成 28 年度は、高温高圧下における腐食電位計測と分極曲線計測の再現性、信頼性を確認するための実験を行うとともに、放射線非照射下におけるデータベースを構築する。

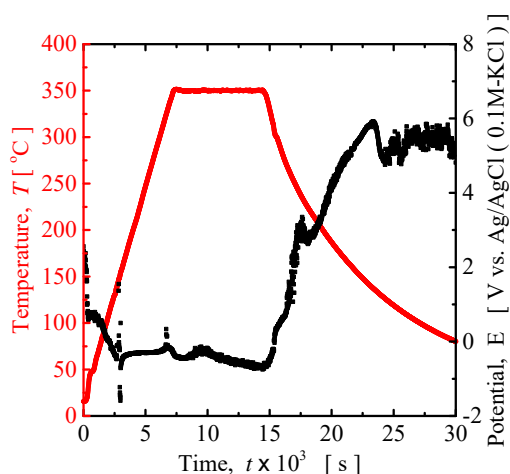


図 2 350℃における腐食電位測定

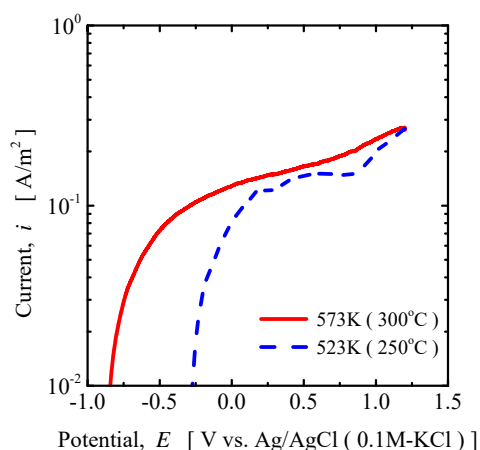


図 3 250、300℃におけるアノード分極測定

③放射化試験片およびγ線照射施設の調査

先行研究により製作された放射化試験片の使用可否を確認するため、東京大学工学系研究科原子力専攻研究施設に保存されている放射化試験片の表面放射線量の計測を行った。その結果、いずれの試験片も中性子線照射から 6 年以上経過していることから線量率が低く、RISA 効果の発現を確認するための試験片として使用することができないと判断した。平成 28 年度は東北大学サイクロトロン加速器を用いて放射化試験片の予備製作を行う。

また、東京海洋大学の放射性同位元素利用施設 (RI 施設) における放射化試験片を用いた実験およびコバルト γ 線照射施設 (京都大学原子炉実験所、大阪府立大学放射線研究センター、JAEA 高崎量子応用研究所) における照射実験の可否について現地調査に基づき検討した。放射化試験片を用いた実験は、生成する放射性核種によって東京海洋大学の RI 施設を利用できない可能性があり、東北大学サイクロトロン加速器施設内、もしくは東京大学工学系研究科原子力専攻の RI 施設における実験も検討することとした。コバルト γ 線照射実験については、線源周囲に実験装置の設置スペースを確保しやすい JAEA 高崎量子応用研究所の照射施設、もしくはこれまでに利用実績のある株式会社アトックスの照射施設を利用することとした。

(2) 超臨界圧条件下における RISA 材料の表面特性に関する研究

① RISA 材料の表面分析施設の整備

平成 27 年度は、RISA 効果の分析に用いる機器の立ち上げ作業を行うと共にメンテナンスを実施した。RISA 材料の分析を行う装置として、原子間力顕微鏡、引張試験機、レーザー顕微鏡、超微小硬さ試験機、示差熱重量分析装置、顕微ラマン分光装置を導入した。また、循環式およびバッチ式の超臨界圧水腐食試験装置を整備した（図 4）。平成 28 年度はこれらの装置を用いた RISA 効果の分析方法を確立すると共に、高温高压下の腐食試験を実施する。

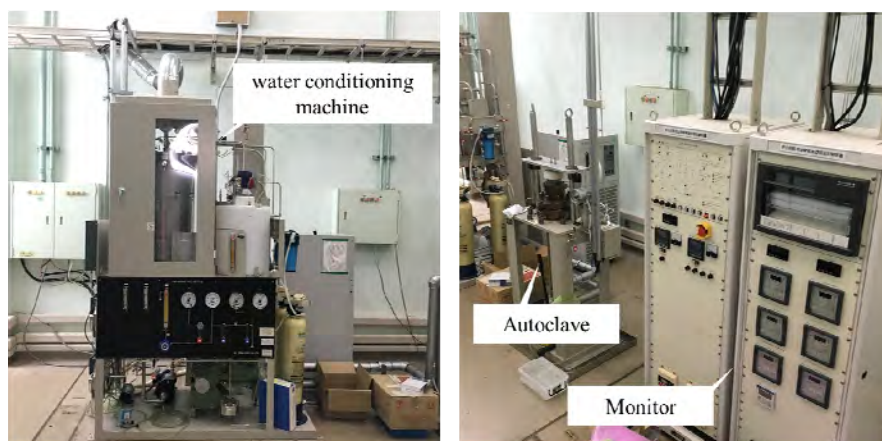


図 4 超臨界圧ループ式腐食試験装置

② 表面特性計測予備実験および文献調査

上記の各種材料分析装置類の正常な動作を、予備実験をとおして確認した。また、これまでに得られている RISA 効果に関する知見を文献調査に基づき整理した。さらに、RISA 現象の機構論を光触媒親水化反応の知見を参考に、励起過程、表面反応過程、親水化状態の素過程に分解し（図 5）、その推測機構に関して段階ごとに検証点を抽出するとともに、本事業で対象とする高温水環境における RISA 事象へ影響する因子を整理した。平成 28 年度以降、これらの点について実験結果に基づき明らかにしていく。

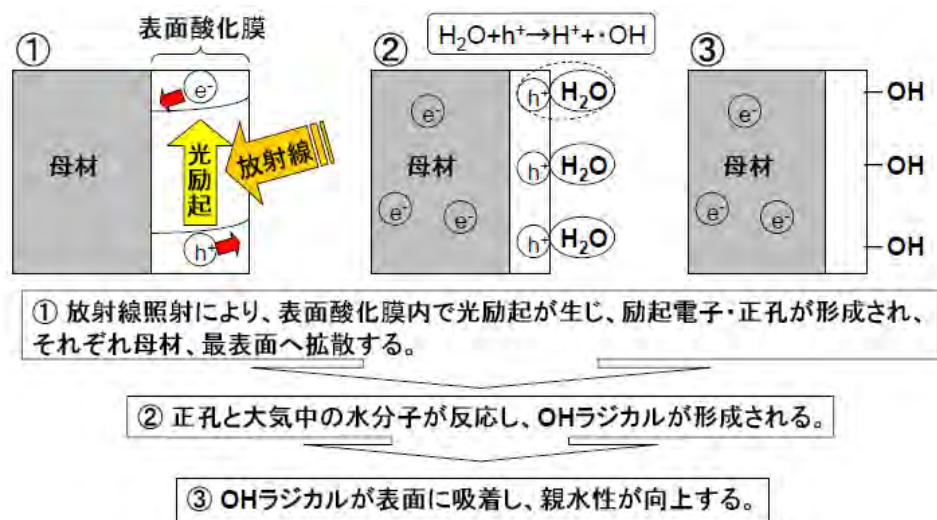


図 5 放射線誘起濡れ性向上現象の推測メカニズム

(3) 亜臨界圧力条件下における RISA 材料の濡れ性に関する研究

① 高温高圧下の金属材料濡れ性計測装置の整備

平成 27 年度は、亜臨界圧条件下において金属材料表面の濡れ性を計測できる実験装置と計測システムを整備した（図 6）。亜臨界条件までの高温高圧雰囲気を得るため、設計圧力 25 MPa、設計温度 350℃の高温高圧容器を新規に製作した。また東京海洋大学が所有する加熱装置および液滴供給装置を整備し、温度 300℃までの高温条件下において、材料表面に滴下される液滴の濡れ性（接触角）をカメラにより可視化観察する実験体系を確立した。平成 28 年度は、製作された高温高圧下濡れ性計測装置を用いて、放射線非照射下における金属材料の濡れ性に関する実験データを取得し、また、 γ 線照射後試験片を用いた実験の準備を行う。

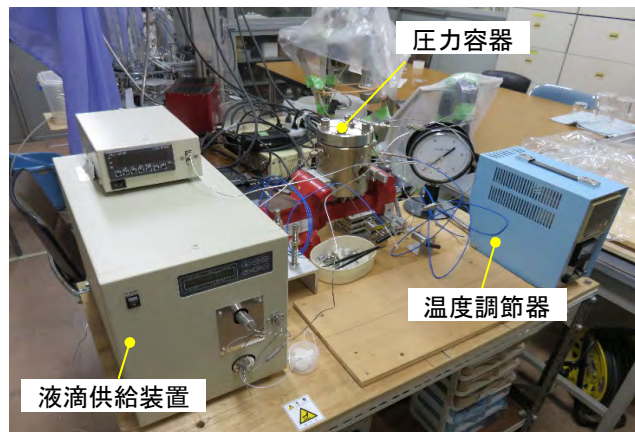


図 6 高温高圧下の濡れ性計測装置の外観

② 模擬稠密炉心内濡れ性評価試験の検討および文献調査

模擬稠密炉心内の濡れ性を評価する試験装置の設計検討および濡れ性を計測する方法について検討するとともに、平成 28 年度以降の放射線照射下実験の試験計画を作成した。また、亜臨界圧下における稠密炉心部の濡れ性向上に及ぼす CHF への影響の文献調査を開始し、関連文献を抽出した。

3. 今後の研究

以下に、平成 28 年度の実施計画を示す。

- (1) 非放射線照射環境において高温高圧下の金属材料の電気化学計測実験を実施し、実験パラメータを設定すると共に、非放射線照射環境における材料電位特性に関する実験データベースを作成する。また、放射化試験片の電気化学計測予備実験を行う。
- (2) 非放射線環境において高温高圧下の金属材料の濡れ性計測実験を実施し、非照射環境における実験データベースを作成する。また、 γ 線照射後の試験体の濡れ性を計測する予備実験を行い、 γ 線照射後試験片を用いた実験の課題を抽出する。
- (3) 超臨界条件において放射線を照射し、RISA 効果を発現している材料表面を原子力顕微鏡を用いて観察することによって表面の濡れ性を評価するとともに、濡れ性の改善が期待される材料をスクリーニングする。