

水化学部会セッション

福島第一原子力発電所廃炉への水化学からの取組み

Contribution of water chemistry to the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

(3) 放射線下における腐食挙動評価

(3) Evaluation of corrosion behavior under irradiation

*阿部 博志¹¹東北大学

1. はじめに

福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2020 (NDF) によれば、建屋内滞留水および燃料デブリのリスクレベルは、依然として高く設定されている。すなわち、燃料デブリ由来の放射性物質の閉じ込めはリスク管理上の最重要課題の一つであり、不完全ながらも PCV のバウンダリ機能を維持することが求められている。PCV 内部は窒素脱気に伴う溶存酸素濃度の低下や塩化物イオン除去により、腐食環境は事故直後と比べて大きく改善されているものの、想定される当該環境下における腐食データは極めて不足していた。このような状況下で、例えば NDF 研究連携タスクフォース中間報告において、「特殊環境下の腐食現象の解明」が 6 つの重要研究開発課題の 1 つに選定されるなど、この重要性は広く認識されつつあり、当該課題に関する議論や研究開発^[1]が進められてきている。

今後想定される PCV 内部環境の変化と腐食に及ぼす影響の観点からは、デブリ取り出し時において放射性物質が外部に放出されることを防ぐ目的で、PCV 内部を負圧に管理することが検討されている。すなわち外部からの大気流入に伴う溶存酸素濃度の上昇により、腐食が加速されることが考えられる。その他には、再臨界を防ぐために中性子吸収材として五ホウ酸ナトリウムを冷却水に添加することが検討されている。しかしながら、五ホウ酸ナトリウムは炭素鋼の不働態化作用を有すると共に冷却水の電気伝導率の上昇にも寄与するため、局部腐食が生起する可能性が指摘されている^[2]。

本講演では、放射線下における腐食挙動評価に関する既往の知見と最近の研究成果について紹介する。一方で本稿では、著者らが近年実施してきている研究成果^[3]について記載する。

2. 背景ならびに目的

PCV 内部調査結果によると、PCV 内壁は水膜に覆われていると想定される。中性水溶液中における炭素鋼腐食は酸化剤の拡散律速であり、水膜下や喫水部では拡散層厚さが薄くなることで局所的に腐食が加速される^[4]。また、ガンマ線照射下では水の放射線分解により過酸化水素が生成され、酸化剤濃度が上昇するため腐食が加速される^[5]。しかしながら、喫水部近傍においてガンマ線照射が重畳した場合の腐食加速については知見が極めて限られている。

本研究では、ガンマ線照射環境下における喫水部の腐食速度を評価すると共に、喫水部における腐食加速のモデル化を行った。

3. 試験方法

3-1. 腐食試験

試験片鋼材として SA738B(化学組成(wt%): C 0.09, Si 0.20, Mn 1.45, P 0.005, S 0.001, Fe Bal.)を用いた。また、PCV 内の冷却水の塩化物イオン濃度が 1 ppm 以下であることから、試験溶液には人工海水(アクアマリン、八島薬品株式会社)を 20,000 倍に希釈して用いた。腐食試験セットアップの概要図を図 1 に示す。本試験では試験片を全浸漬、半浸漬、気相にそれぞれ 1 つずつステンレスワイヤで設置した。ワイヤと試験片の間はアルミナ管で絶縁されている。試験温度は 50±1 °C で制御した。また、デブリ取出時において負圧管理された際

の最大腐食速度を求めするため、大気開放とした。試験時間は336時間とした。線源は⁶⁰Coを用いた。

試験当時と同位置でアラニン線量計を用いた線量率計測を別日に行い、実測した日からの経過時間を考慮して半減期を用いた減衰補正計算により線量率を評価した結果、試験片位置の試験期間中における線量率は2.11 kGy/hであると推定された。また、非照射試験は同等の試験装置を用いて実験室で行った。

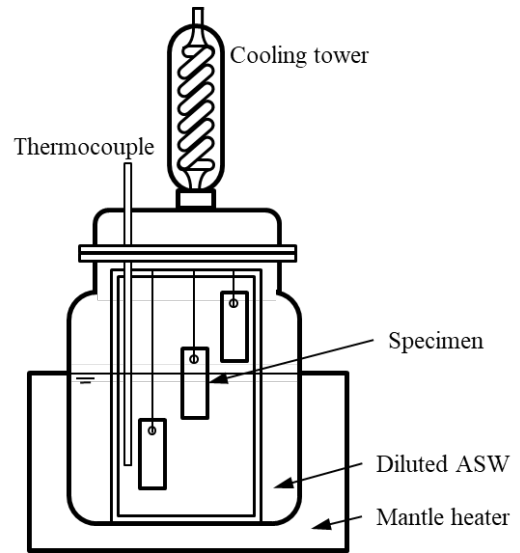


図1 腐食試験セットアップの概要図

3-2. 腐食速度の算出

平均腐食速度の算出には重量法を用いた。腐食生成物除去用薬液として5% HClと0.3%のインヒビター(イビット No. 2S 旭化学)を使用した。また、水深方向の局所的な腐食深度を計測するために、3D形状測定(VR-3000、KEYENCE)を実施した。これから得られる腐食深度が、同条件の試験片断面観察と差が無いことを予め確認している。半浸漬試験片を水深方向に1 mm 間隔の区画に分け、半浸漬試験片の腐食が激しくない気相部を基準面として腐食深度を計測し、腐食速度を算出した。ただし、研磨の影響を除くために試験片の端部は測定対象から外した。

3. 腐食に及ぼす水膜効果ならびに照射効果

非照射および照射下で336時間の腐食試験に供した半浸漬試験片について、各高さ位置の腐食速度について解析した。解析結果を図2に示す。棒グラフで示されているものが各高さ位置における腐食速度(C.R._{local})である。直線で表されているものは、重量法で求めた半浸漬試験片の平均腐食速度(C.R._{weight})である。破線は喫水線の位置を表す。図2より、照射の有無に依らず喫水部でC.R._{local}が最大となっている。これは喫水部で形成される水の濡れ上がり部における水膜効果が原因であると考えられる。また、ほぼ全ての高さ位置で照

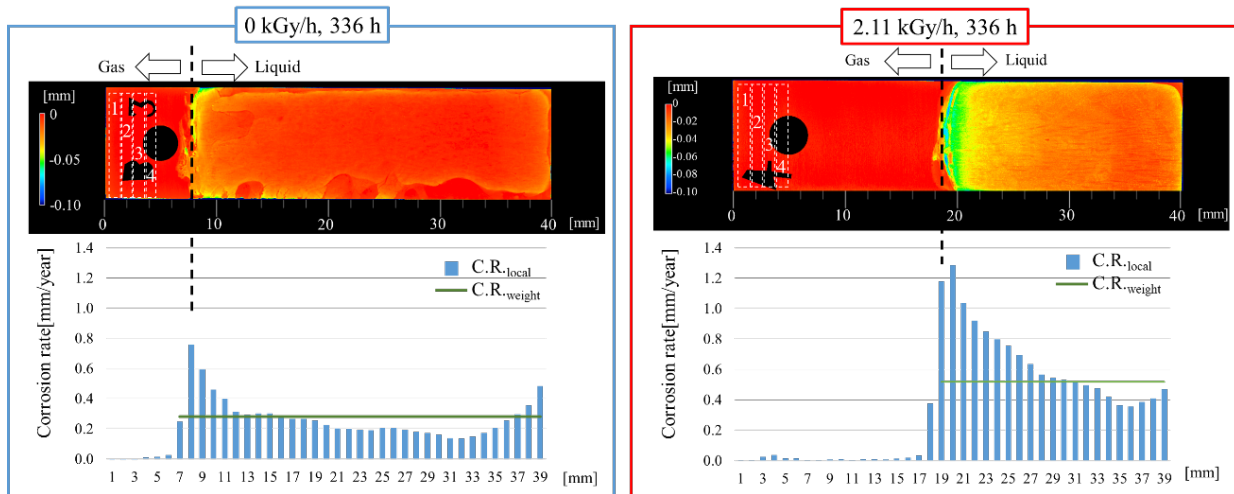


図2 試験片浸漬深さ方向の腐食速度の分布 (半浸漬試験片)

表1 水膜効果ならびに照射効果による腐食加速の評価結果

mm/year	0 kGy/h	2.11 kGy/h
C.R. _{weight} Full immersion	0.255	0.421
C.R. _{local} At water line	0.795	1.28
	× 2.8	× 3.0
	× 1.65	× 1.61

射下の $C.R._{local}$ が非照射下よりも大きいことから、照射効果は高さ位置に依存せずに腐食を加速させることが分かる。

水膜効果による腐食加速を評価するために、喫水部の $C.R._{local}$ と同セル内に設置していた全浸漬試験片の $C.R._{weight}$ を比較する。照射効果による腐食の加速の評価には、非照射および照射下で得られた $C.R._{weight}$ および喫水部で求められた $C.R._{local}$ を比較する。比較結果を表 1 にまとめる。これより、水膜効果は非照射、照射環境下で同程度の腐食の加速効果を持つことがわかる。照射効果についても全浸漬試験片に対する加速効果と喫水部に対する加速効果が同程度である。以上のことから、照射環境下における喫水部の腐食は水膜効果と照射効果が重畳して加速されることが分かった。

次に、酸化剤の供給に着目した喫水部における腐食モデルを、非照射環境と照射環境に分けて図 3 に示す。非照射環境においては、水膜効果による酸素供給量の増大が腐食を加速させていると考えられる。照射環境においてはこれに加えて、ラジオリシスによる過酸化水素生成によっても腐食が加速されていると理解できる。

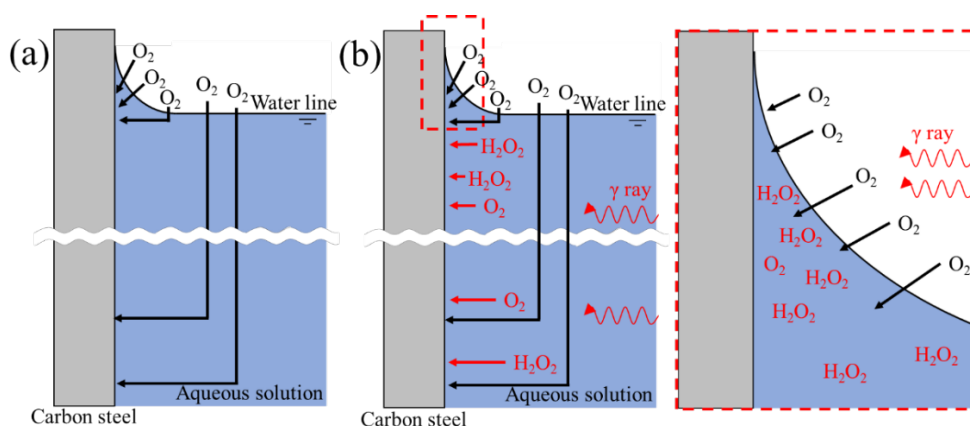


図 3 酸化剤の供給に着目した喫水部における腐食モデル；(a)非照射環境、(b)照射環境

4. まとめ

本研究では、ガンマ線照射環境下における喫水部の腐食速度を評価すると共に、喫水部における腐食加速のモデル化を行った。照射環境下における喫水部での炭素鋼の腐食は、水膜効果および照射効果が重畳して加速されることが分かった。非照射環境においては、水膜効果による酸素供給量の増大が腐食を加速させていると考えられる。照射環境においてはこれに加えて、ラジオリシスによる過酸化水素生成によっても腐食が加速されていると理解できる。

謝辞

本研究の一部は文部科学省 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(廃炉加速化研究プログラム(国内研究))「放射線環境下での腐食データベースの構築」の成果である。本研究で行われたガンマ線照射試験に大変なご尽力を頂きました、量研 高崎量子応用研究所の田口光正 様、清藤一 様に謝意を表します。

参考文献

- [1] 加治芳行ら, 第 66 回材料と環境討論会, A-307, (2019).
- [2] Y.Fukaya and Y.Watanabe, Journal of Nuclear Materials,498,(2018),159-168.
- [3] T.Arigo, H.Abe, and Y.Watanabe, Proceedings of 19th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors,(2019),960-966.
- [4] M. Yamashita and H. Nagano, J. Japan Inst. Metals 61 (1997), 721-726.
- [5] M. Yamamoto et al. Proceedings of European Corrosion Congress 2015, (2015), 7.

*Hiroshi Abe¹

¹Tohoku Univ.