

# 海水が流入した浜岡5号機に生じた孔食の再稼働後の進展性検討

Will the deep pitting corrosion that occurred in the RPV of Hamaoka Unit 5 during seawater intrusion progress further as SCC after restart?

## 計算コードSCANPでの評価結果をもとに今後の課題を検討した

浜岡5号機の原子炉の内表面クラッド溶接部近傍に生じた孔食がその後に成長するか停止するかは再稼働時における重要課題である。今回、試行的に(一財)電力中央研究所のSCANPを使用し、欠陥をSCCと仮定する等の保守的な前提条件で評価を行った。今後の対処方法等についての有意義な知見が得られたので報告する。



執筆者

原子力安全技術研究所  
プラントグループ  
熊野 秀樹

## 1 はじめに

2011年5月に浜岡原子力発電所5号機の炉内に海水が流入した。その後、弊社は第三者委員会(社内委員会)を構成し、炉内構造物のさまざまな部位の海水影響についての検査結果やその影響を評価してきた。そこでは、腐食の専門家をはじめとする先生方に結果をお諮りし、今後の再稼働に向けた方針案の検討をお願いしている。なお、上記委員会の最中でも別途、国の委員会の再開が想定される。

再稼働におよぼす海水混入の影響は①炉内構造物のすき間腐食、②圧力容器の欠陥発生、およびその結果生じる③水質管理に影響を与える。これまでの弊社内での経験から、前者の2つについてコメントできると考えた。

### ① 炉内構造物のすき間腐食

すき間腐食は、炉内構造物の構造健全性を左右することではなく、海水中の塩化物イオンを完全に除去せずとも大きな影響は無いと想定する。ただし、すき間部内の残留塩化物イオンは②に示す圧力容器に発生した欠陥へ再付着する可能性を有する。

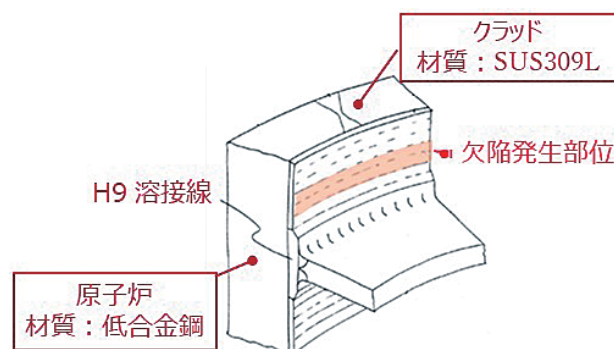
### ② 圧力容器の欠陥発生

原子炉内面のクラッドに孔食が発生しており、再稼働時にその欠陥の取り扱いは重要な問題である。欠陥を残置した場合、クラッドを通り抜けて圧力容器に達する。圧力容器鋼に欠陥が進展する場合、鋼中の硫化マンガンMnS成分の量によっては、進展が減速する知見もある。そのため、圧力容器鋼中のSCCメカニズムは世界的な関心事であると共に、塩化物イオン $Cl^-$ の相乗効果の可能性もあるので、検討すべき課題と考える。

以上の通り、検討すべき課題は主に圧力容器にある。その検討方法の1つとして、欠陥をそのまま放置した場合と除去した場合、その後の成長を計算機シミュレートする方法がある。なお本稿は昨年8月に原子炉構造力学国際会議(SMiRT、於カナダ)で公表した内容のダイジェストである。

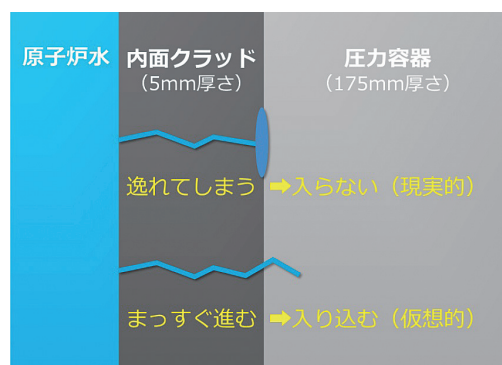
## 2 進展計算の前提

実機では第1図のような部位に孔食が発生している。この部位に特徴的な残留応力、環境および材質を踏まえて再稼働後におけるSCC進展計算を実施することとした。



第1図 5号機の当該部位

第2図は、深い孔食を過度に保守的に応力腐食割れ(SCC)とし、2通りのシナリオを考えた。1つ目はクラッド/圧力容器の境目で全面腐食となる(現実的)、もう1つは真っ直ぐに進む想定である(仮想的)。(一財)電力中央研究所のSCANP(Surface Crack Analysis Program)という計算プログラムでは、真っ直ぐに圧力容器に浸入する場合の進展量が計算できる。



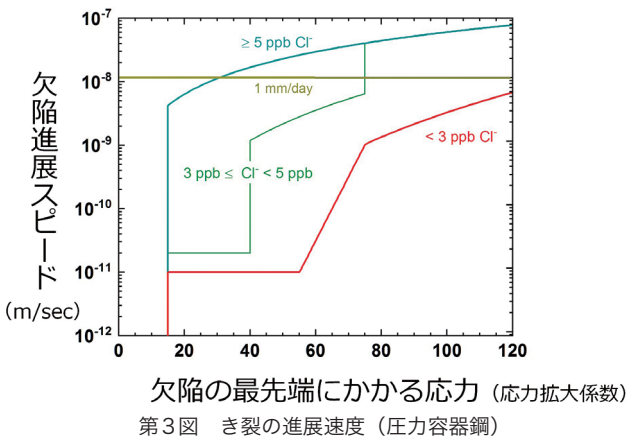
第2図 想定される2つの進展経路  
(上側) 全面腐食になる(現実的)  
(下側) 真っ直ぐに進展する(仮想的)

第1表 計算諸元

|      |                        |
|------|------------------------|
| 初期欠陥 | 圧力容器中に設定（第2表の通り）       |
| 進展速度 | 第3図を参照                 |
| 残留応力 | メーカー計算値（プラントメーカーへの別委託） |

この計算の前提となる諸条件は第1表の通りとした。この表中にH9溶接線近傍の残留応力があるが、本稿のスペースの観点からは詳細が長くなるので割愛する。

次に第3図に低合金鋼中をSCCが進展する場合の進展速度の応力拡大係数（き裂の開口する力のようなもの）依存性を示している。このデータは現在、米国電力研究所（EPRI）で収集予定となっており、これにも保守性が入っている。



第3図 き裂の進展速度（圧力容器鋼）

3 初期欠陥寸法の想定

SCANPでは、以上のように初期欠陥寸法、進展速度および残留応力を決めれば、その後の欠陥の進展量の計算が可能となる。この中で、初期欠陥形状について述べていなかったが進展量を左右するので重要である。初期欠陥形状は第2表の通り、2通りに設定した。1つ目はクラッド中に発生した深さ5mm、幅2mmの縦に細長い孔食状の欠陥であり、2つ目はクラッドを除去し、クラッドに含まれていた欠陥も残留応力も共に除去した例である。この2つ目の例で示した深さ20μm、幅50μmの小さな凹んだ欠陥は一見、想定することは不要のように思えるが、先述のようにSCC進展量の計算には必須なため保守的に設定した。

第2表 計算条件

| 初期欠陥寸法   |      |      |          |
|----------|------|------|----------|
| 形状       | 深さ   | 幅    | 初期欠陥の想定  |
| 表面<br>楕円 | 5mm  | 2mm  | クラッド中に残置 |
|          | 20μm | 50μm | クラッドから除去 |

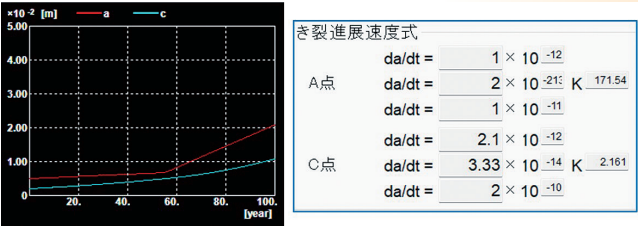
4 計算結果

第4図 (a) は初期欠陥形状を深さ5mm、幅2mmにした場合、(b) は深さ20μm、幅50μmにした場合の計算結果を示した。赤い線aは最深点方向の深さを、水色の線cは表面方向の進展量を示す。

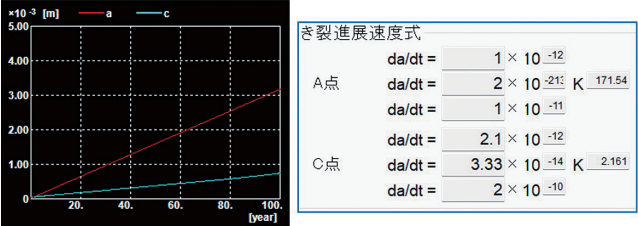
まず (a) の欠陥を除去せず残した場合は、60年間で2～3mm進展し、それ以降は少し加速度的に進展する傾向を確認した。応力拡大係数が15MPa√mより低い場合（第3図）の進展速度を10<sup>-12</sup> (m/s) と10<sup>-13</sup> (m/s) の2ケースを設定したが、両者で差は生じないという意外な結果が得られた。

次に (b) のクラッド中の欠陥を削り落とした場合、すなわち深さ20μm、幅50μmの小さな初期欠陥しかない場合でも60年で2mm程度、進展することが分かった。

内面クラッド中のSCC進展はクラッドが金属学的異方性を有する溶接金属であるため、その影響を大きく受けることが今回の計算で初めて分かった。これまで最深点の低合金鋼のみ着目してきたが、表面点も重要と気付くことができた。



(a) 初期欠陥寸法：深さ5mm、幅2mmの例



(b) 初期欠陥寸法：深さ20μm、幅50μmの例

第4図 第2表で定めた初期形状と進展の関係  
(※ (a) と (b) で縦軸の単位が異なることに注意)

5 まとめと今後の展開

浜岡5号機に発生した孔食がSCCとして進む場合を想定した、過度に保守的な想定下での計算結果を紹介した。結果はクラッド中の欠陥の残置と除去であまり変わらなかったものの、若干後者の方がより裕度が大いと思われる。

今後は表面のステンレス鋼の異方性を考慮した検討も進め、安全・安心を基本に原子力の活用につなげて参りたい。