

3. 東京電力(株)の原因調査に対する評価

(1) リング部（下部リング及びシュラウドサポートリング）のひび割れについて

東京電力(株)は、以下の理由から、柏崎刈羽2号機の炉心シュラウドのリング部に発生したひび割れは応力腐食割れ⁷であると推定した。

福島第二3号機及び柏崎刈羽3号機では、それぞれ平成13年及び平成14年に、下部リングの溶接部（H6a）外側近傍またはシュラウドサポートリングの溶接部（H7a）内側近傍に全周にわたるひび割れが確認された。サンプル調査の結果、これらのひび割れは応力腐食割れであると推定された。（サンプル調査の結果：参考資料3-1、3-2参照）

柏崎刈羽2号機において確認された、下部リングの溶接部（H6a）外側近傍及びシュラウドサポートリングの溶接部（H7a）内側近傍のひび割れは、福島第二3号機及び柏崎刈羽3号機のひび割れと、発生状況が類似している。

柏崎刈羽2号機の炉心シュラウドは、福島第二3号機や柏崎刈羽3号機と同様の製造履歴であり、これらの炉心シュラウドのリング部の表面は、機械加工によって表層部にビッカース硬さ⁸（HV）300を超える硬化層が形成されることが確認されている。このように硬化した表層部では粒内型応力腐食割れ⁹が発生する可能性がある。また、粒内型応力腐食割れを起点として、粒界型応力腐食割れ¹⁰が進展することが確認されている。

溶接によって発生する残留応力¹¹を有限要素法¹²により解析した結果、下部リングの外側表面及びシュラウドサポートリングの内側表面に300MPa程度の引張応力が生じていたものと評価された。

柏崎刈羽2号機の原子炉内の水に溶けている酸素濃度は200～300ppb程度と応力腐食割れが発生する可能性のある環境であったことが確認された。

(2) 胴部のひび割れについて

東京電力(株)は、柏崎刈羽1号機及び福島第一4号機の炉心シュラウド中間部胴の溶接部（H4）内側近傍からひび割れのサンプルを採取し、原因究明のための調査を行った。このサンプル調査については、第三者機関である日本原子力研究所の専門家の現場立会・レビューの下で、日本核燃料開発(株)が調査を行うとともに、日本原子力研究所も同じデータを用いて詳細評価を行った。（サンプル調査の結果：参考

⁷ 応力腐食割れ：溶接や外力等によって発生する応力並びに腐食環境の因子等によって発生する割れのこと。応力とは物体が外力を受けたとき、外力に応じて物体の内部に生じる抵抗力をいう。

⁸ ビッカース硬さ：材料の硬さを表す尺度の一つ。正四角錐の圧子で、試験体表面を一定の力で押し付け、その時生じたくぼみの面積から硬さを求める。数字が大きいほど硬いことを表す。

⁹ 粒内型応力腐食割れ：結晶粒内を貫通して進展する応力腐食割れのこと。

¹⁰ 粒界型応力腐食割れ：結晶粒界に沿って進展する応力腐食割れのこと。

¹¹ 残留応力：溶接や切削加工等を行うことにより、物体内に残留する応力のこと。応力とは物体が外力を受けたとき、外力に応じて物体の内部に生じる抵抗力をいう。

¹² 有限要素法：構造解析に用いられる数値解析法の一つ。構造物を有限な大きさの要素に分割し、これらの要素を特定の関係式を用いて解くことにより、全体の構造物状態について解析する。

資料3 - 3、3 - 4参照)

サンプルの破面観察及び断面観察の結果、表層部では金属の結晶粒¹³の内部を貫通する割れが認められた。また、表層部から内側に入るにつれて金属の結晶粒界¹⁴に沿って割れが発生しており、応力腐食割れに特徴的なひび割れであることが確認された。また、ひび割れは、表面では放射状に進展するとともに、内部で複雑に分岐していた。

東京電力(株)は、サンプルの破面及び断面の観察結果を踏まえ、以下の～が確認されたこと等から、福島第一4号機及び柏崎刈羽1号機の炉心シュラウドの中間部胴に発生したひび割れは応力腐食割れによるものであり、表層部に発生した粒内型応力腐食割れを起点として、内部で粒界型応力腐食割れが進展したものと推定した。

表層部においてHV300を超える硬化層が確認されており、このように硬化した極表層部では粒内型応力腐食割れが発生する可能性がある。

溶接によって発生する残留応力を有限要素法により解析した結果、当該炉心シュラウドの中間部外側の表面において、軸方向及び周方向に200～300MPa程度の引張応力が生じていたものと評価される。

柏崎刈羽1号機及び福島第一4号機の原子炉内部にある水に溶けている酸素濃度を測定した結果、200～300ppb程度であったため、応力腐食割れが発生する可能性がある環境であったことが確認された。

また、東京電力(株)は、福島第二3号機、同4号機、及び柏崎刈羽2号機の炉心シュラウド胴部に発生したひび割れについて、ひび割れの発生状況が福島第一4号機及び柏崎刈羽1号機のもの類似していることから、応力腐食割れによるものと推定した。なお、福島第二3号機及び同4号機では、ひび割れのレプリカ¹⁵を採取し、表面上で折れ曲がりながら進展する応力腐食割れに特徴的なひび割れの形態が確認された。

なお、東京電力(株)は、応力腐食割れ以外の原因の可能性についても検討を行ったが、金属調査等から、材料不良、溶接不良、腐食及び疲労がひび割れの原因となる可能性はないものと評価した。

(3) その他(アライナーブラケット、上部格子板用ベース及びシュラウドヘッドボルトブラケット)の近傍のひび割れについて

東京電力(株)は、これらのひび割れが応力腐食割れに特徴的な細かい折れ曲がりを持つ表面形状をしており、また機械加工により表面が硬化し、すみ肉溶接により引張残留応力が発生していると考えられることから、応力腐食割れによるものと推定した。

¹³ 結晶粒：原子が規則的に並んでいる固体物質を結晶という。金属は結晶が集まってできており、この場合、個々の結晶を結晶粒という。

¹⁴ 結晶粒界：結晶粒と結晶粒の境界面。

¹⁵ レプリカ：複製又は複製を作成することをいい、ひびの有るところに型をあて、そこに樹脂を流し込んでひびを転写する。

(4) 東京電力株が実施した原因調査に対する当院の考え方

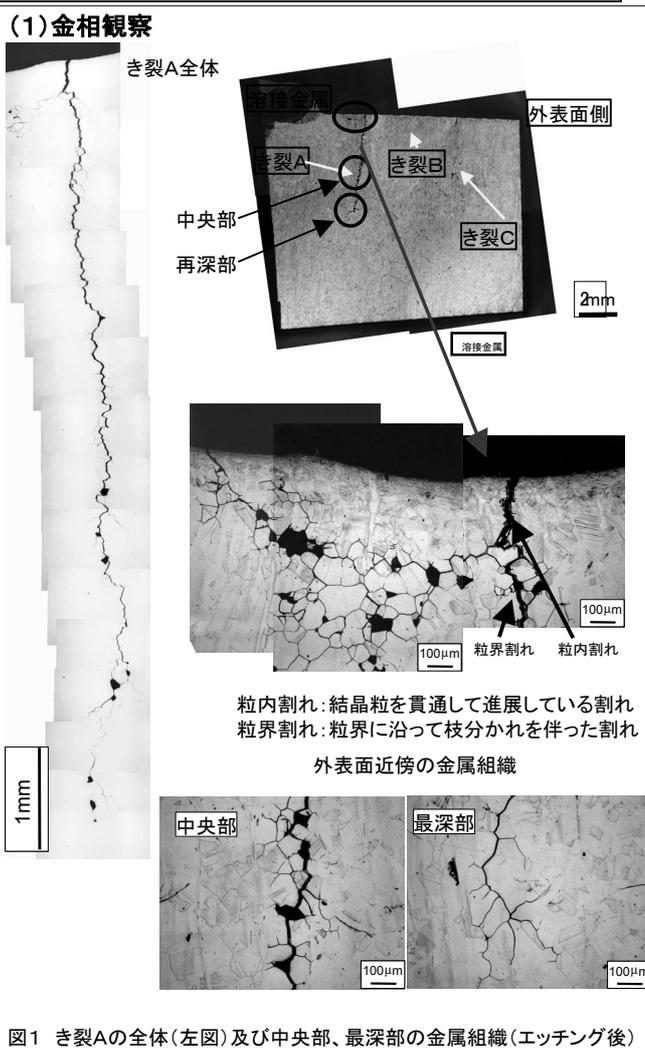
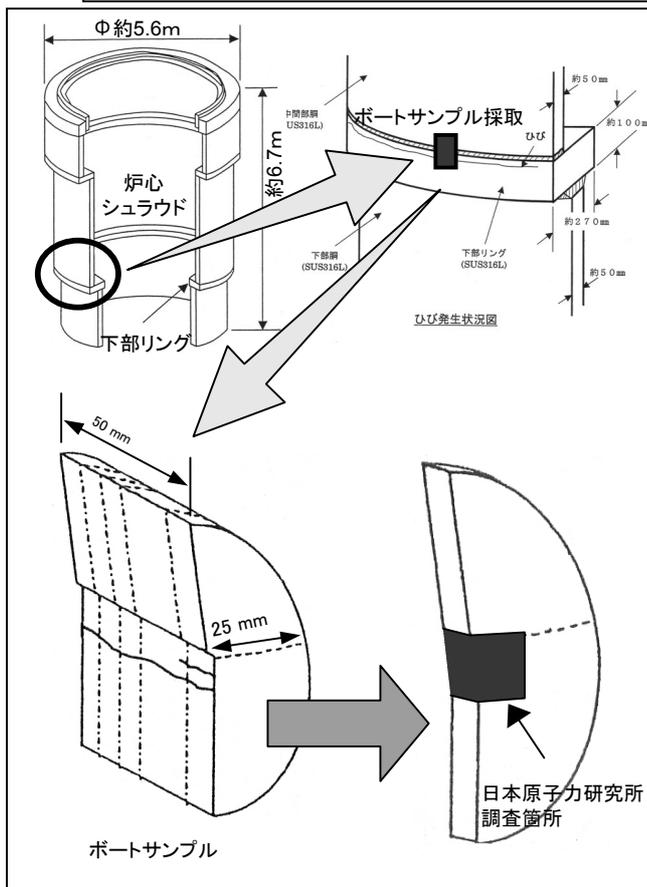
当院としては、東京電力株が実施したこれらの原因調査については、材料不良、溶接不良、疲労、応力腐食割れ等ひび割れの原因となり得る事項を幅広く検討したものであるとともに、今回のサンプル調査結果、福島第二3号機及び柏崎刈羽3号機で発生したひび割れの原因究明で得られた知見等を総合的に勘案したうえで実施されたものであると考える。また、今回のサンプル調査の実施に当たっては、公正を期すために第三者機関の立会・レビューを受けており、その調査結果は信頼できるものであると考える。

また、当院としては東京電力株がひび割れの発生原因を応力腐食割れであると推定したことについては、サンプル調査を始めとする各種の調査及び解析の結果からみて、科学的合理性を有するものと考えている。

福島第二3号機 H6aボートサンプル調査

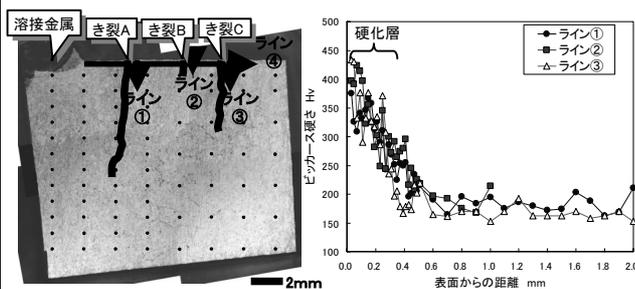
参考資料3-1

第11回定期検査(平成13年実施)においてひび割れ(以下、き裂)が確認された福島第二3号機のシュラウド下部リング外表面の溶接部近傍から採取した材料サンプルの残材について、各種検査を改めて日本原子力研究所にて実施した。



(2) 硬さ測定

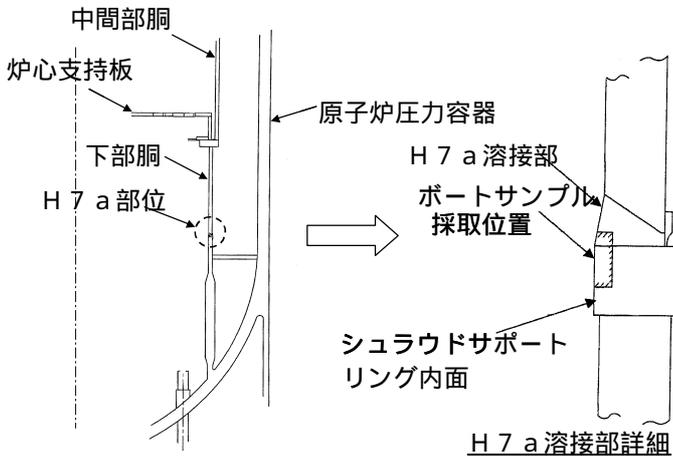
- 1) 試料断面全体の硬さ分布測定(1mmまたは2mmピッチ)
- 2) き裂に沿った外表面から深さ方向の硬さ分布測定(き裂から0.5mmの位置)
- 3) 外表面近傍の硬さ分布測定(深さ50μmの位置)



(3) 結果

- ・き裂は溶接金属端から約3~9mm離れた位置に3箇所観察され、最大深さは約8mmであった。
- ・2箇所の子裂破面を観察した結果、き裂破面のほぼ全面が粒界割れであったが、き裂開口部には、約300μmの範囲に粒内割れが観察された。
- ・表面から約500μmの深さまで、最高Hv400を越える硬化層が形成されていた。
- ・溶接により想定される引張残留応力及び炉水の溶存酸素濃度レベル(250ppb)を考えると、き裂は応力腐食割れであると推察される。

柏崎刈羽3号機 H7aボートサンプル調査



H7a溶接部詳細

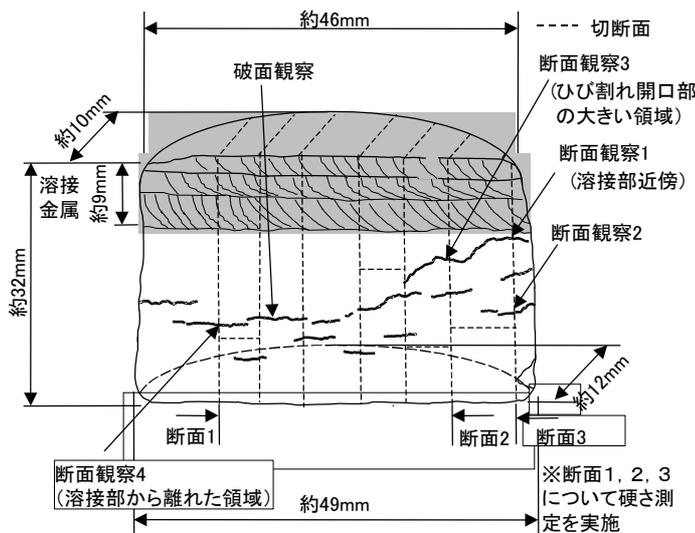


図1 ボートサンプル切断面および観察点

結果

- ・断面観察より外表面から数十 μm までは粒内割れであり、その後粒界割れで進展。加工硬化層は外表面から深さ100 μm 弱。
- ・金属内部(外表面から250 μm 以上内側)では粒界型応力腐食割れの特徴である粒界割れが観察された。
- ・硬さ分布により、溶接線から約4mm以上離れた表面近傍にHV300を超える硬化層が認められており、機械加工による硬化と考えられる。また、溶接線近傍は、硬さが減少している。
- ・溶接により想定される引張残留応力及び炉水の溶存酸素濃度レベル(250ppb)を考えると、ひび割れは応力腐食割れであると推察される。

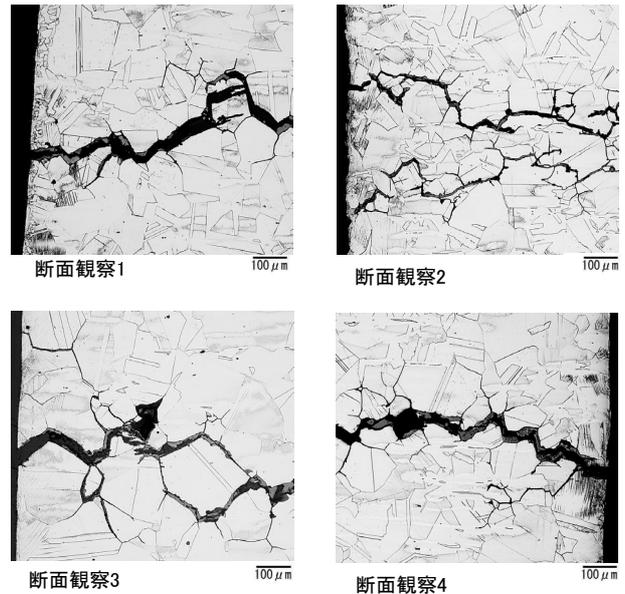


図2 断面観察結果(観察倍率: $\times 100$)

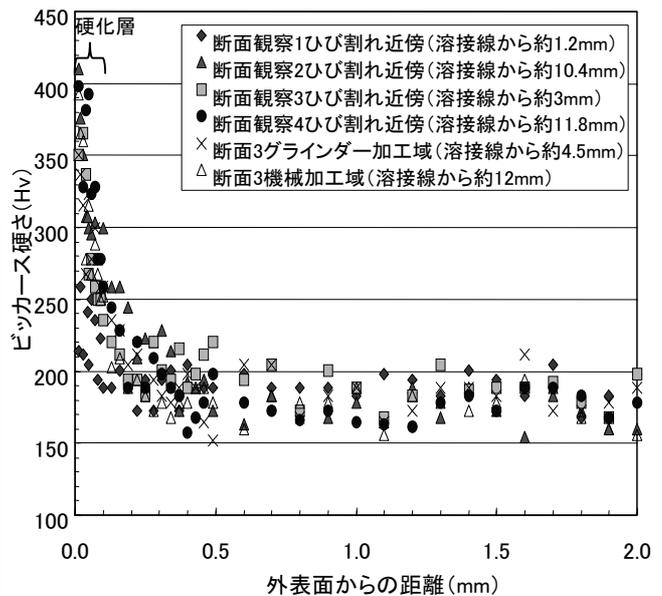


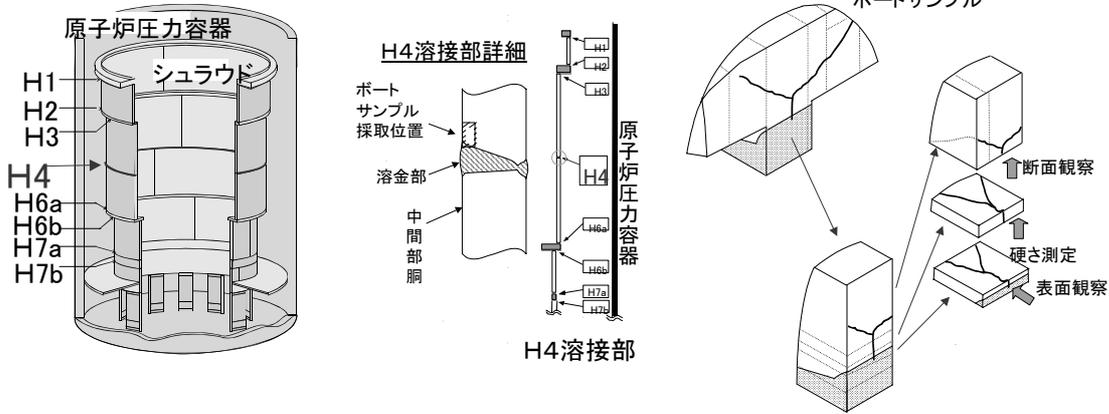
図3 硬さの分布

柏崎刈羽1号機H4ボートサンプル調査

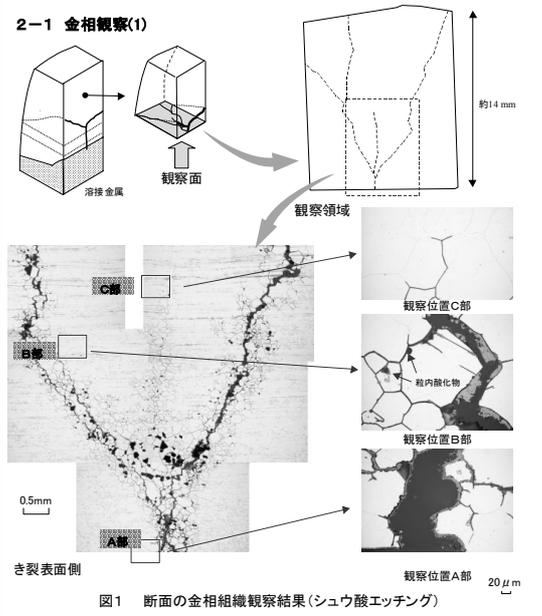
参考資料3-3

1. 目的

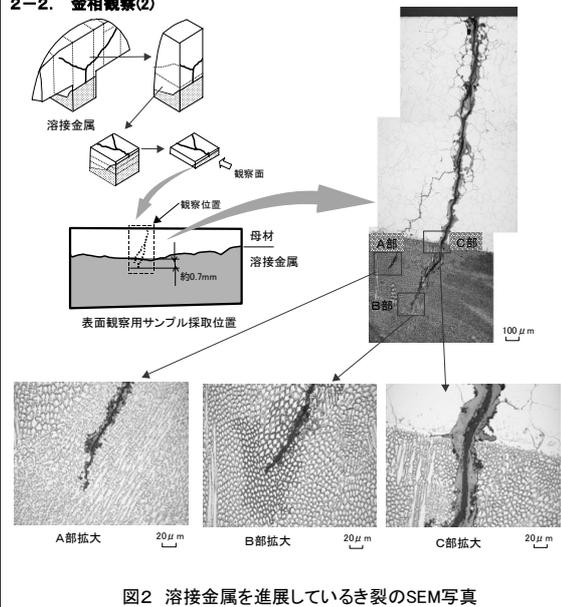
定期検査においてひび割れ(以下、き裂)が確認されたシュラウド中間部胴溶接部から採取したサンプルの各種検査を実施し、き裂発生の原因究明に資する。



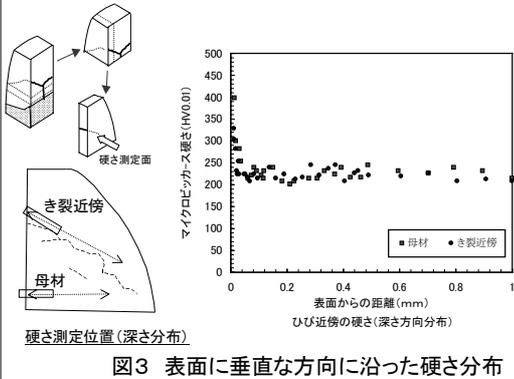
2-1 金相観察(1)



2-2 金相観察(2)



3. 硬さ試験



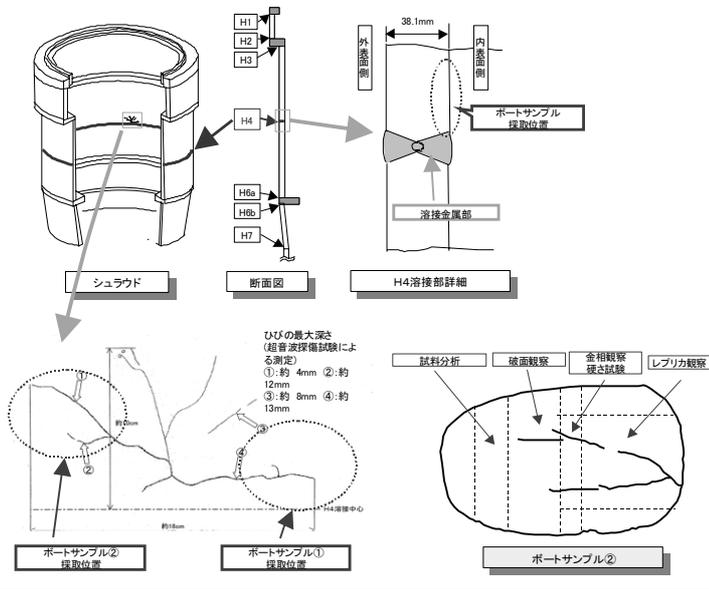
4. 結論

- ・表面側で発生したき裂は、内部への進展に伴い、3次的に複雑に分岐する成長挙動を呈しており、サンプル採取部の厚さ約14mmを貫通していた。
- ・き裂の主たる形態は粒界型であった。
- ・き裂の一部は溶接金属に到達していた。
- ・き裂の内壁面には、皮膜が厚く、酸化物が粒内に成長した部位も見られた。
- ・表面の加工層は、通常の研磨や機械加工で入り得る数10μm程度であった。
- ・結晶粒界には、従来の鋭敏化材に見られるCr濃度の顕著な低下傾向が見られなかった。
- ・組成は、JIS規格SUS316Lを満足しているが、Cr, Ni, Moの量は下限側に近い値であった。

以上の点から、き裂は、浅い加工層を有する表面で応力腐食割れ(SCC)により発生後、SCCとして内部へ分岐しながら結晶粒界を經由して3次的に成長し、き裂の一部は溶接金属内部へ進展していた。なお、主き裂に沿った粒界腐食の発生状況及び粒界や粒内の酸化物の成長状況等から、放射線により発生した遊離基の影響等環境側の腐食条件がより厳しかった可能性も示唆される。

福島第一4号機H4ポートサンプル調査

1. 目的 ひび割れ(以下、き裂)が検出されたシュラウド中間部胴溶接部上方から採取したサンプルの各種検査を実施し、き裂発生の原因究明に資する。



2. 金相観察(ポートサンプル②)

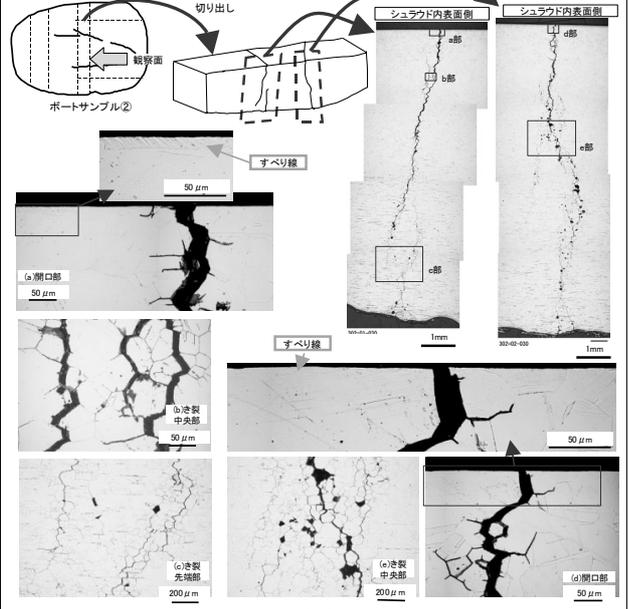


図2 ポートサンプル②の断面金相観察

3. 硬さ試験

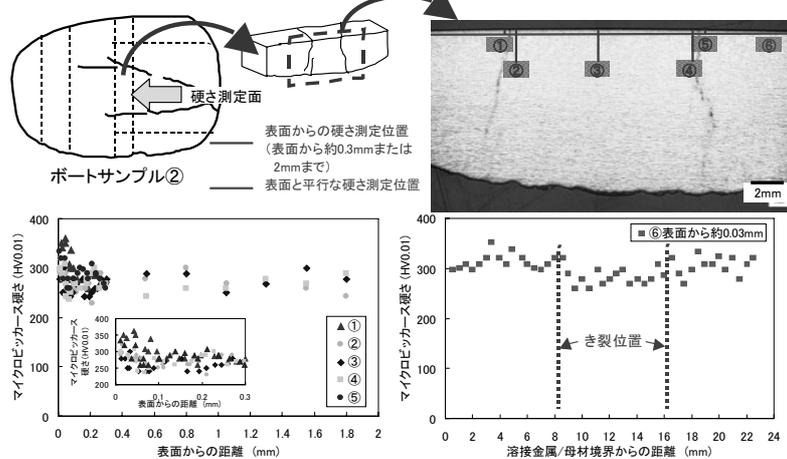


図3 き裂近傍及び表面近傍の硬さ分布

4. 結論

- ・シュラウド内表面で発生したき裂は、表面では放射状に進展していた。
- ・観察したき裂のほぼ全体が粒界割れであった。き裂内部には腐食生成物が付着し、一部は粒内に成長していた。また、2次き裂の一部は溶接金属に達していた。
- ・表面(50 μm程度まで)は硬さがHV=300程度に高くなっていた。また、照射硬化による母材の硬化が認められた。
- ・結晶粒界でのCr濃度の低下とNi及びSi濃度の増加が観察され、これら合金元素の濃度変化は照射誘起偏析によると考えられる。

本調査の結果と溶接により発生する引張残留応力及び炉水中の比較的高い溶存酸素濃度を考慮すると、このき裂は応力腐食割れ(SCC)であると考えられる。