

核融合炉ブランケット及びダイバータ材料の高温高压水腐食に関する研究 Study on corrosion property of structural materials for fusion reactor blanket and divertor under high temperature/pressurized water

中里 直史¹、岸本 弘立¹、中島 基樹²、黄 彦瑞²、野澤 貴史²、芹澤 久³、森 裕章³
Naofumi Nakazato, Hirotatsu Kishimoto, Motoki Nakajima, Yen-Jui Huang,
Takashi Nozawa, Hisashi Serizawa, Hiroaki Mori

室蘭工大¹、量研機構²、阪大³
Muroran Institute of Technology¹, QST², Osaka University³

1. 背景・目的

核融合炉を実現するためには、ブランケットやダイバータといったプラズマ対向機器の研究開発が重要である。日本の原型炉は水冷方式を採用している。プラズマ対向機器の冷却配管材料としては、低放射化フェライト鋼であるF82Hや析出強化型のCuCrZr合金が候補である。一方、プラズマ対向機器と接続される炉外の冷却システム配管には、オーステナイト系ステンレス鋼であるSUS316Lが使用される。2種類の材料の配管内に共通の水化学条件の冷却水が流れることから、両材料に加え、それら接合部の健全性を維持可能な水化学条件を見出す必要がある。しかしながら、F82H、CuCrZr合金及び、それら接合部の高温高压水腐食データは限定的であるため、これら材料の基礎的な腐食データを取得し、蓄積することは非常に重要である。また、腐食による材料の劣化や放射性腐食生成物の発生量を推定することは、原型炉の設計に不可欠である。

冷却水はプラズマ対向機器内を通過する際に、核融合反応から生じた中性子により照射され、水の放射線分解を生じ、冷却水中の溶存酸素量などが変化する。水中の溶存酸素と溶存水素の濃度は、構造材料の腐食挙動に影響を与える代表的な要因である。軽水炉において、冷却水の溶存酸素濃度は照射によって上昇するため、水素注入によって溶存酸素濃度を抑制している。水素を注入していない軽水炉の場合、溶存酸素濃度は100~200 ppbと報告されている。また、冷却配管中には応力負荷部が生じることも想定されるため、応力腐食割れ（SCC）や水素脆性等の環境脆化評価も必須である。

本研究では、構造材料やその接合部の腐食特性や環境脆化に関する基礎データを取得する

ことを目的とし、室蘭工業大学（室蘭工大）、量子科学技術研究開発機構（量研機構）、大阪大学（阪大）が共同し、研究を進めている。

本概要では室蘭工大にて取り組んでいる原型炉ブランケット構造材料であるF82Hの高温高压水腐食に関する研究、阪大で進めている異材接合材の作製及び水素脆性評価、量研機構で開発中の腐食試験装置について紹介する。

2. 構造材料の高温高压水腐食研究

供試材には低放射化フェライト鋼のF82Hと、炉外水冷却システムの配管材料であるオーステナイト系ステンレス鋼のSUS316Lを用いた。腐食試験片は微細組織評価用のクーボン試験片と、SCC特性評価用の応力を付与した逆U字ベント（RUB）試験片、予亀裂を入れて応力を付与した0.5TサイズのWOL（Wedge Open Loading）試験片である。

浸漬試験は高温高压水腐食試験装置にて実施し、浸漬条件は温度: 290 °C、圧力: 9 MPa、流量: 7 L/h、溶存酸素量: 100 ppb、浸漬時間: ~2000 hとした。浸漬試験後の評価として、重量測定、マイクロスコープ及びSEMによる表面組織観察、XRD、XPSによる腐食層の構造解析を行った。

図1(a)にF82HとSUS316Lの浸漬時間と重量変化の関係を示す。F82H及びSUS316L共に、本条件下において重量増加を示し、浸漬時間1500時間までは浸漬時間の増加に伴い重量が増加する傾向を示した。浸漬時間2000時間の平均重量変化は浸漬時間1500時間と同様の値であるため、両材料共に浸漬時間1500時間程度で飽和する傾向にあることが伺える。鋼種間の差異としては、F82Hの方がSUS316Lよりも重量増加量が大きく、腐食挙動が異なることが示唆される。

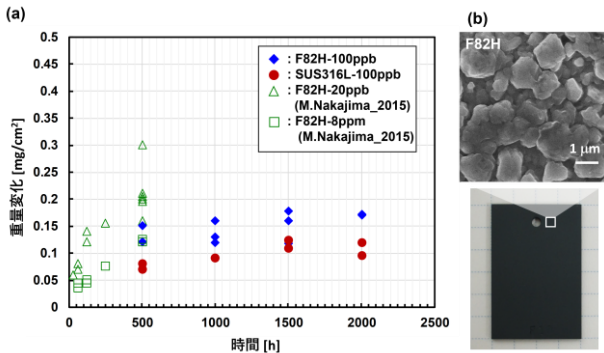


図1 (a) F82H及びSUS316Lの浸漬時間と重量変化の関係及び、(b) 浸漬後のF82H表面の微細組織

図1(b)に500時間浸漬後のF82Hの外観及び表面微細を示す。試料表面全体には粒子状の腐食生成物が観察された。F82H表面のXRD測定から、母材であるFeの他にFe₂O₃、Fe₃O₄、FeCr₂O₄の複数の酸化物が同定されたことから、F82H表面に形成した酸化皮膜は複数の酸化物により構成されていると考えられる。XPSを用いた詳細な表面分析の結果、酸化被膜厚さは約1.3 μmと推定され、酸化被膜の内層はFeCr₂O₄、外層はFe₂O₃、Fe₃O₄により構成され、2層構造を有していることが示唆された。

RUB試験片を用いたSCC感受性評価において、試験後のマイクロスコープ表面観察結果の範囲では、浸漬時間2000 hまではき裂の発生は観察されなかった。また、WOL試験片を用いたSCCき裂進展挙動評価からも、明確なき裂進展は観察されていない。より長時間の評価は必要であるが、浸漬時間2000 hまでの本条件下におけるF82HのSCC感受性は低い結果が示されている。

3. F82H/SUS316L異材接合材の作製

図1で示したように、F82HとSUS316Lの腐食挙動が異なることから、F82H/SUS316L異材接合部の評価も重要であるため、異材接合材の作製・評価も進めている。阪大にてファイバーレーザーを熱源として接合試験を実施し、図2に示すようなF82H/SUS316L異材接合材の作製に成功している。こちらの異材接合材からクーポン試験片とSCC感受性評価用試験片を採取し、腐食試験を開始している。発表では現在進行中のF82H/SUS316L異材接合材の高温高压水腐食挙動やSCC感受性についても報告する予定である。

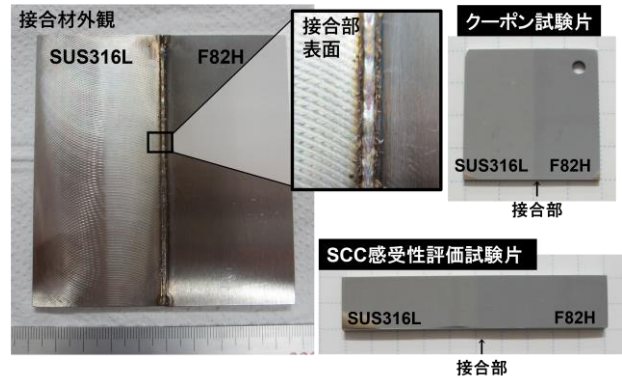


図2 作製したF82H/SUS316L異材接合材と腐食試験片外観

4. 水素脆性評価

阪大ではSSRT試験と水素の拡散・集積シミュレーション技術を組み合わせ、F82Hレーザ溶接継手材の水素脆性評価を実施している。水素の拡散・集積挙動と溶接残留応力を求めた結果と、SSRT試験により求めた低温割れ感受性クライテリアとの比較から、溶接時に不活性ガスによるシールドを十分に行った場合、溶接部への水素混入量が数ppm程度以下に低減され、F82H同種継手において低温割れの発生が抑制される可能性が示唆されている。現在はF82H/SUS316L異材接合材を対象とした評価を実施中である。

5. 核融合炉用高温高压水腐食試験装置の開発

量研機構では核融合特有の環境を模擬するための装置開発を行っている。特に腐食に影響を及ぼす事象として核融合中性子による材料照射損傷および水の放射線分解、磁場などが挙げられる。それらのうち水の放射線分解を模擬した環境で実施するため、水素ならびに過酸化水素を添加できる流動腐食試験装置の開発や磁場環境流動腐食試験装置の設計を進めている。

6. まとめ

本概要では原型炉開発共同研究課題の1つである核融合炉用構造材料の高温高压水腐食研究の現状について紹介した。核融合炉の安全性・信頼性を確保するためにも、構造材料と冷却材との共存性の理解は重要であるため、今後も水化学条件策定のための多様な水化学環境下における構造材料及びそれら接合部の水腐食特性データの蓄積を進めていく計画である。