

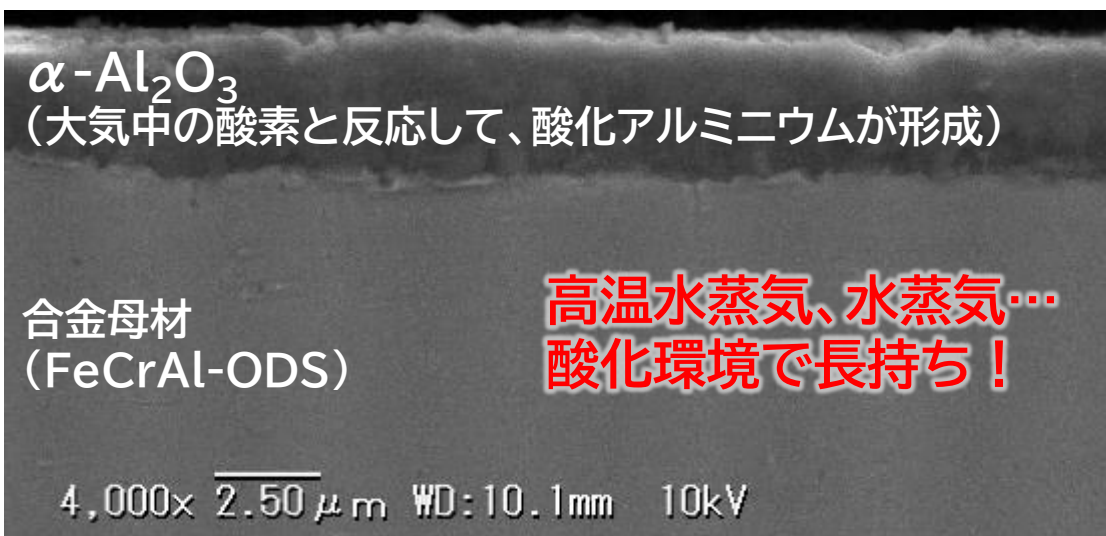
液体金属腐食環境に耐える クラッド鋼板及びその製造方法

横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門
准教授 大野 直子

2023年6月6日

鉄にアルミニウムとクロムを加えると、
高温酸化環境で、緻密な酸化アルミニウムの被膜ができる。

1000°Cの大気中で、64時間保持したFeCrAl-ODS合金の断面



$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (酸化アルミニウム)の性質

- 融点2072°C
- 化学的に安定
- 電気を通さない(絶縁性)
- 水素を通さない(水素透過抑制)

データ参考：

Fig. 9, Sakamoto, K. et al. Development of accident tolerant FeCrAl-ODS fuel cladding for BWRs in Japan. J Nucl Mater 557, 153276 (2021).

鉄にアルミニウムとクロムを加えると、
高温酸化環境で、緻密な酸化アルミニウムの被膜ができる。

原子力・核融合分野では、

- 軽水炉の事故耐性燃料被覆管
- 液体鉛冷却高速炉の炉心構造材
- 鉛リチウム増殖ブランケットの配管構造材

・・・として期待されている。

FeCrAl合金の応用例

軽水炉の事故耐性燃料被覆管(FeCrAl系のODS合金)

- 既存のジルコニウム合金(ジルカロイ)と置き換えて過酷事故時のメルトダウンを防止
(水蒸気との反応速度が、ジルカロイの1/100)
- 水素(トリチウム)の透過も抑制
(水素透過量が、ステンレス鋼の1/10以下)

データ参考：

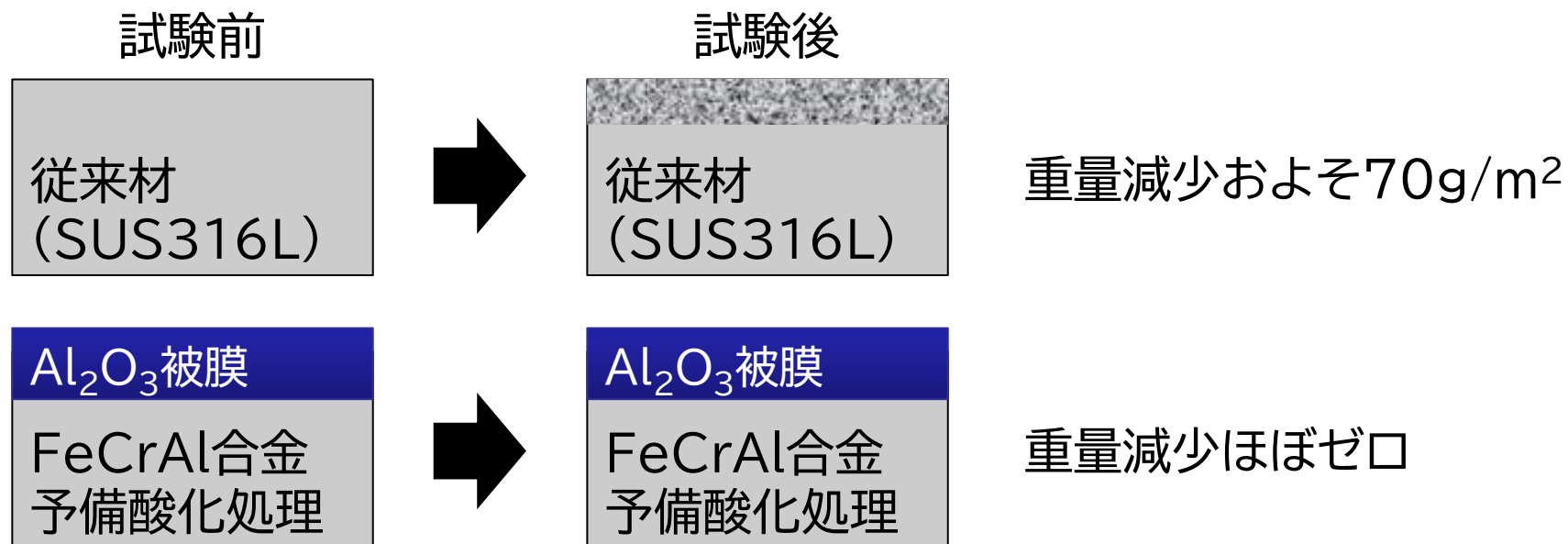
Fig. 8, Sakamoto, K. et al. Development of accident tolerant FeCrAl-ODS fuel cladding for BWRs in Japan. J Nucl Mater 557, 153276 (2021).

Fig. 6, Sakamoto, K. et al. Development of accident tolerant FeCrAl-ODS fuel cladding for BWRs in Japan. J Nucl Mater 557, 153276 (2021).

FeCrAl合金の応用例

核融合炉の液体金属増殖ブランケット配管材

900℃でも、液体金属(鉛リチウム)による腐食をほとんど受けない。



データ参考：

Fig. 8 and 10, Kondo, M., Hatakeyama, S., Oono, N. & Nozawa, T. Corrosion-resistant materials for liquid LiPb fusion blanket in elevated temperature operation. Corros Sci 197, 110070 (2022).

東工大-横浜国大-QSTプレスリリース「高性能核融合炉ブランケットの新概念に見通し」

URL: <https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/27685/detail.html>

従来技術とその問題点

従来技術

FeCrAl合金の高温における耐酸化性は広く知られている


- 高温電気炉のヒーター線材 など
- 強度が問題にならない部分のチューブ材
- 分散強化を組み合わせることによる、高温強度の担保

問題点

- フェライト系であること・・・高温強度が低いため、そのままでは強度が求められる高温部材には使用できない
- 高温強度と耐酸化性を両立させるため、強化が必要→コスト高い

解決策

FeCrAlの使用量をなるべく低く抑えつつ、
高い強度を有する構造材をつくる。



そのために

高温強度が見込める既存のオーステナイト系の合金
とのクラッド材にする。

FeCrAl合金とクラッドを作る際の課題

優れた耐酸化性は、不活性の α - Al_2O_3 の性質よって得られる。

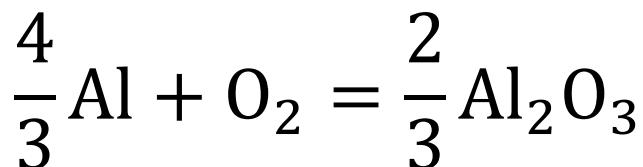


α - Al_2O_3 が存在すると、接合材とも反応しない→接合困難。

酸化のし易さ…

(例)

1050°Cにおける酸化反応の平衡酸素分圧(eq. P_{O_2})は

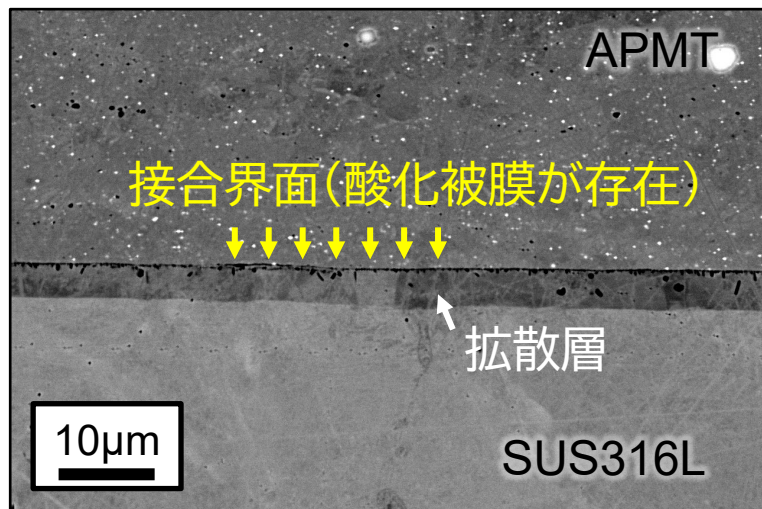


$$P_{\text{O}_2} < 10^{-33} [\text{atm}] \cong 10^{-28} [\text{Pa}]$$

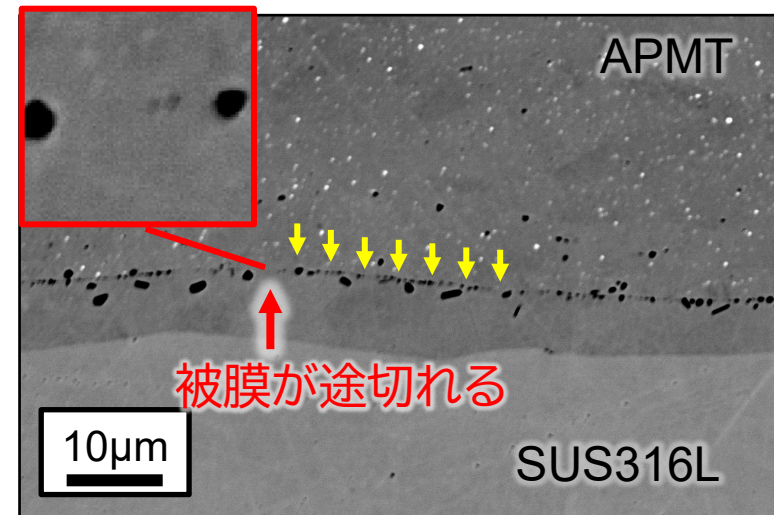
真空中で接合しても、クラッドの界面に α - Al_2O_3 ができてしまう。

仮接合→熱間圧延のプロセスによる、接合強度の向上

1050°C仮接合
($6.0 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1}$ Pa)

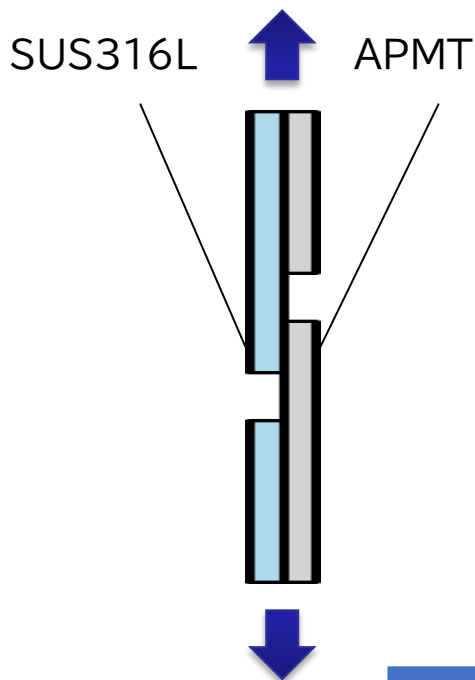


1050°C仮接合→30.6%熱間圧延
(大気圧, 0.44m/sec, >850°C)



仮接合→熱間圧延のプロセスによる、接合強度の向上

引張せん断試験



1050°C 仮接合
($6.0 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1}$ Pa)



界面にき裂

1050°C 仮接合 → 30.6% 熱間圧延
(大気圧, 0.44m/sec, >850°C)



界面から
破断した様子は
見られなかった。

仮接合温度 熱間圧延率	1050°C 仮接合	1050°C 30.6%
破断箇所	APMT	界面(角)?
せん断応力(仮) [MPa]	209	474
引張強度(仮) [MPa]	278	632

新技術の特徴・従来技術との比較

- 真空中での仮接合→熱間圧延という2段工程によって、酸化被膜が接合の妨げとなる難接合材料でも強固なクラッドが得られる。
- 酸化・腐食が問題となる環境側に予備酸化処理したFeCrAl合金を対面させて、壁面や配管の減肉を防ぐ。
- FeCrAl合金が使われる高温の環境で、安価にオーステナイト鋼レベルの強度を保てる。
(FeCrAl合金のみの場合:数万円/kg
→ オーステナイトとクラッドにした場合:千円/kg*)

*市販のSUS316の参考価格

想定される用途

- 液体金属冷却高速炉および核融合炉の
液体金属に触れる部分の構造材
- 液体金属冷却高速炉および核融合炉の
液体金属に触れる部分の構造材
- その他、 α - Al_2O_3 被膜が必要とされる
高温酸化・腐食環境での壁面構造材

実用化に向けた課題

- 現在、市販の材料の組み合わせによるクラッド材の製法を開発済み。しかし、正確な破断強度や高温の相互拡散速度についての情報は未だない。
- 今後、上記について実験データを取得し、長期使用に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、量産技術を確立する必要もあり。

企業への期待

- 高温の相互拡散については、拡散バリアの技術により克服できると考えている。
- プロセスを大型化できる技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、クラッドを開発中の企業や、液体金属・バイオマス等の高温腐食環境に課題を抱える分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : クラッド鋼板及びその製造方法
- 出願番号 : 特願2023-034768
- 出願人 : 横浜国立大学
- 発明者 : 大野直子、長野太郎

産学連携の経歴

- 2008年-2011年 京都大学特定研究員(産学官連携)として、複数の企業と共同研究実施
- 2013年-2015年 北海道大学助教として、MEXT原子力システム研究開発事業に、研究分担者として参画
- 2019年 北海道大学助教として、受託研究に、研究分担者として参画
- 2021年～ 横浜国立大学で、複数の企業と共同研究実施

お問い合わせ先

横浜国立大学

研究推進機構 産学官連携推進部門

産学官連携支援室

T E L : 045 – 339 – 4450

F A X : 045 – 339 – 3057

e-mail : sangaku-cd@ynu.ac.jp