

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.1-6

新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた開発事業
フェーズC(再生可能エネルギー熱利用促進分野)

超臨界地熱発電の実現に貢献する、 高温・耐腐食性新合金の開発

発表：2025年7月17日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名	工藤哲男
*団体名	(株) C&A、(国)東北大学
問い合わせ先	株式会社C&A E-mail: info@c-and-a.jp TEL: 022-796-2117

1. 目的

超臨界地熱発電に用いるケーシング材用の新合金を提案し、新合金の組成を最適化することで、最終的に超臨界水に対する耐腐食性とコストを満足し、配管形状への製造法も確立する。

2. 期間

2023年9月1日～2025年8月31日

3. 目標（最終）

- ・超臨界水に対する耐性（～400℃・～30MPaの条件で0.1mm/年以下の損耗）
- ・耐酸性（濃硫酸、330℃の条件で0.1mm/y以下の損耗）
- ・高温強度（400℃以上の温度差による熱衝撃試験に対しクラックが発生しない）
- ・材料コスト（4万円/kg）

4. 成果・進捗概要

各種酸や超臨界水溶液に対して、極めて高い耐食性を有するケーシング材用の新合金を見出した。また配管形状への製造法として線材化およびステンレス基材への成膜を行い、耐熱衝撃性に関する優れた特性を明らかにした。

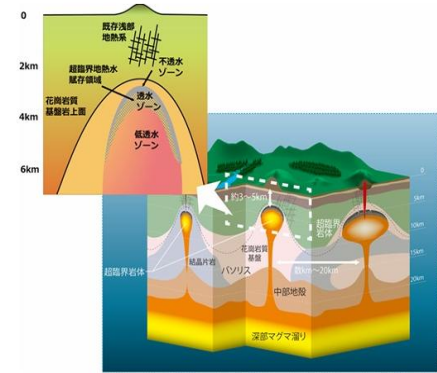
超臨界地熱発電

- ・日本は23 GWに達する世界でもトップレベルの地熱資源ポテンシャルを保有。
- ・地下3～5 kmの高温岩体領域に高温地熱資源（**超臨界地熱資源**）が存在。
- ・超臨界水は、高温（400～500℃）、酸性（pH2～3）の状態が存在するとされる。

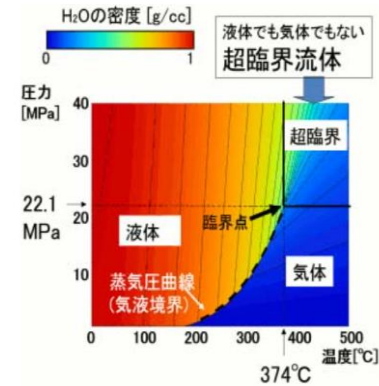
課題

- ・ケーシング材等の部材における**高温及び酸性状態での耐食性**
→従来のNi基, Ti基超合金やSiC/SiC複合材では、耐食性（<0.2 mm/y）が低く、高コスト。

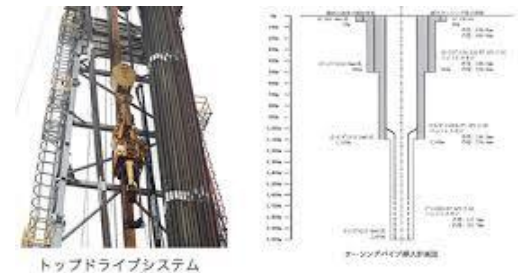
酸性の超臨界水に対する耐食性、高温強度、コストに優れる材料開発の必要性



超臨界地熱系の概念図[1]



超臨界流体の存在条件[2]



坑井掘削とケーシング[3]

[1] NEDOプレスリリース(2019) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101146.html

[2] (株)ITEC HP https://www.itec-es.co.jp/efforts/pro_momi_index/

[3] 日鉄鉱山コンサルタント(株) HP <https://www.nmconsults.co.jp/geothermal/drilling/>

従来の知見と候補材料

- 超臨界状態の酸に対する耐食性については、研究事例が非常に少ない。
- コストと加工性を両立する新合金の探索が必要。

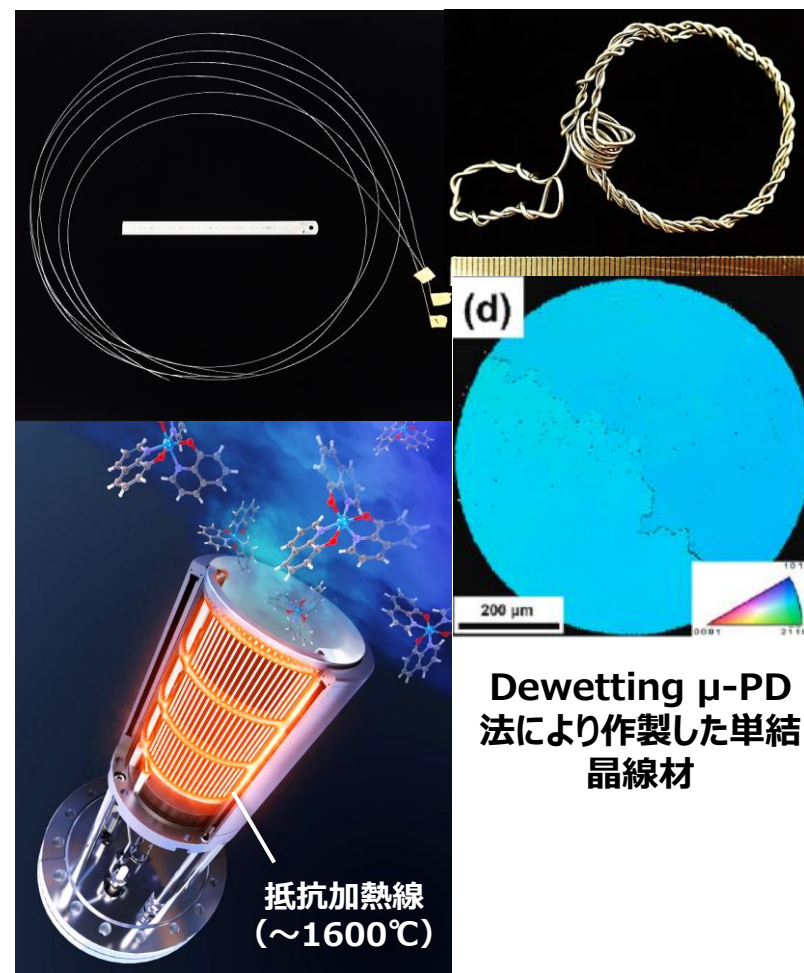


近年、我々のグループでは、耐久性と加工性に優れる、**Mo-W系新合金**を開発。

- ・真空中1600℃で>3000時間の耐久性
- ・引張強度>500 MPa、破断伸び>80%
- ・**塩酸、硝酸**といった酸に対して溶解しない

実装に向けた課題と本研究の目的

- 各種酸や超臨界水溶液への耐食性評価
- 配管形状への製造のための
ステンレス基材への成膜試験

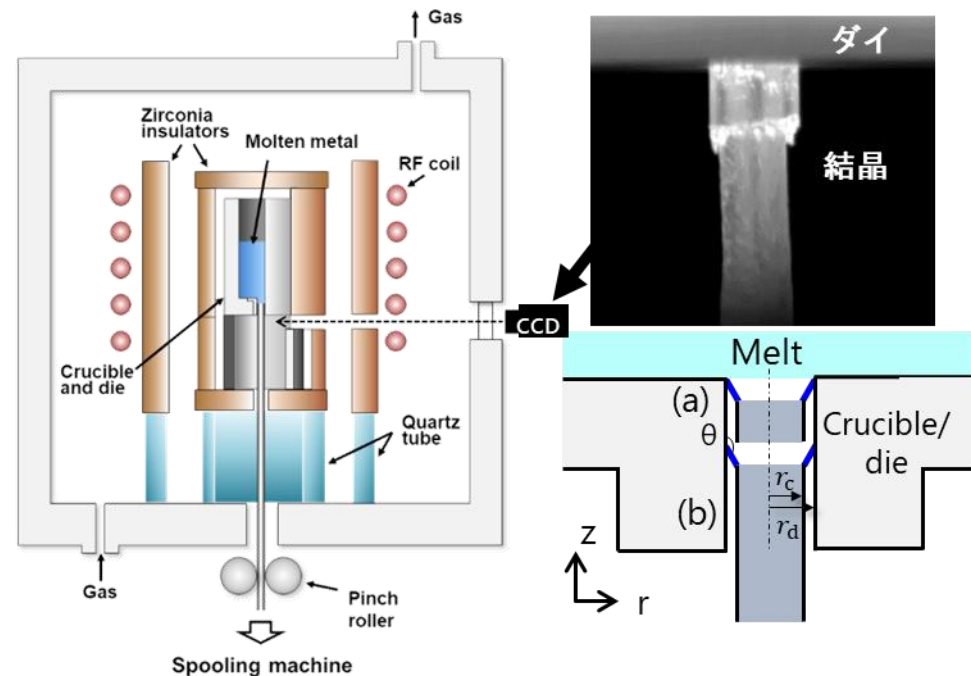
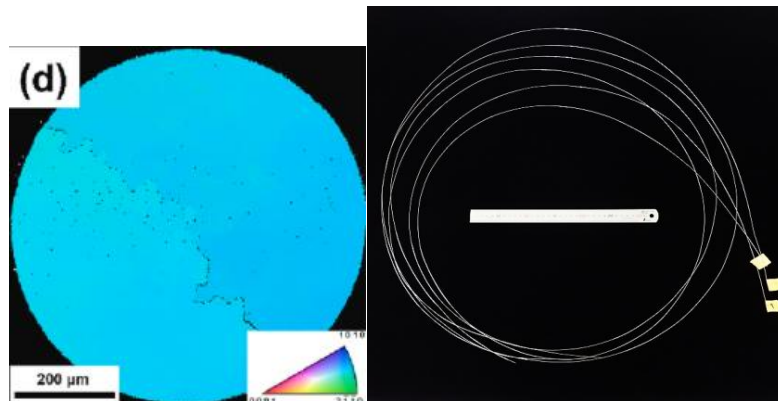


有機EL成膜に用いる真空蒸着セル用高
効率・長寿命抵抗加熱線

I. マイクロ引き下げ法 (μ -PD法) による試料作製

《 Dewetting μ -PD法 》

- 難加工性合金を融液から直接線材に成形可能。
- レーザークラディング等による成膜が可能。



Dewetting μ -PD法

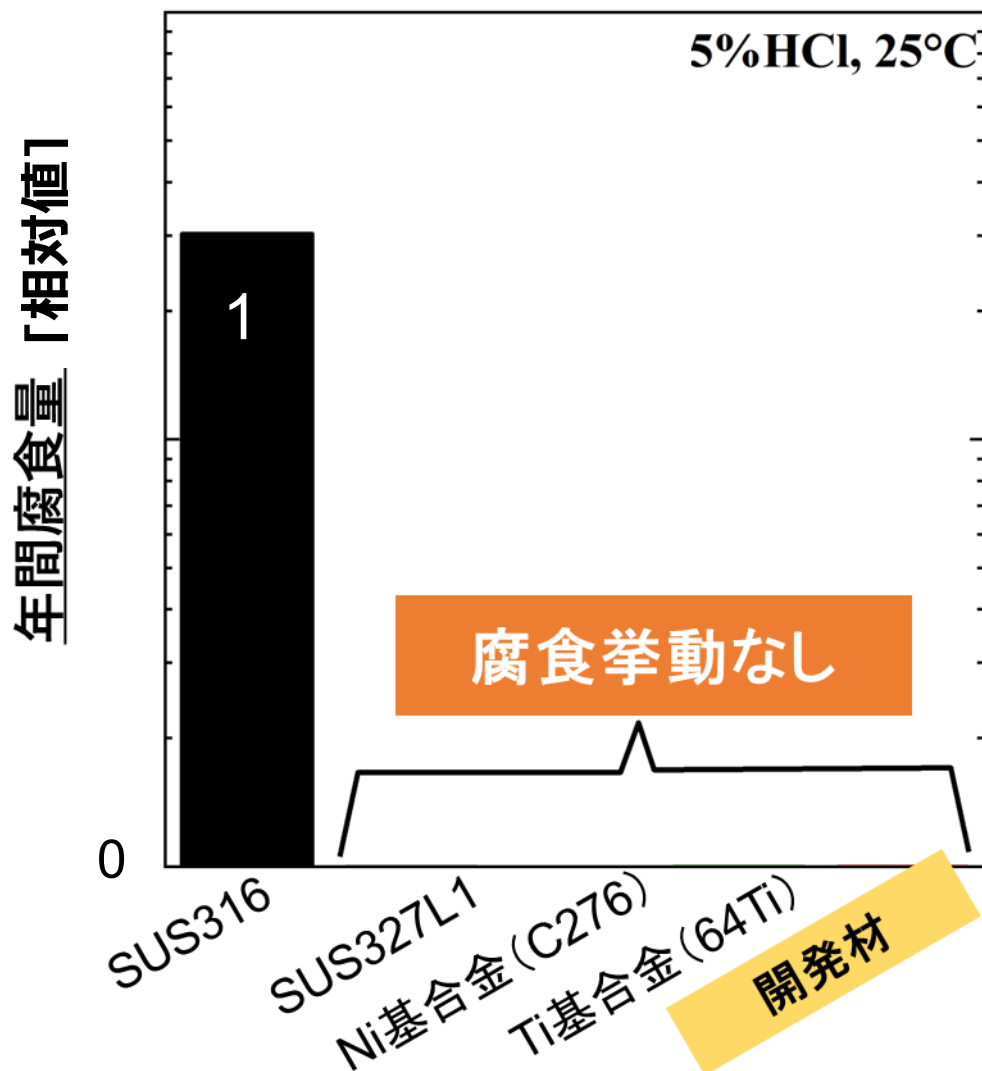
《 耐食性試験 》

1. ①塩酸(HCl)、②加熱硫酸(H_2SO_4)、③加熱フッ酸(HF)
2. pH1.6の温泉での長期浸漬
3. 超臨界硝酸水溶液



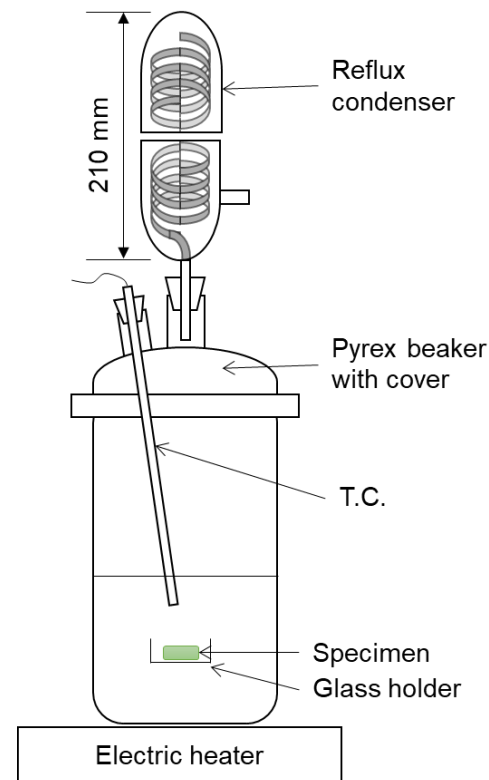
過酷な腐食環境で、従来材 (SUS、Ni基、Ti基) との比較を実施

I -1. ①浸漬試験[5% HCl , 25 $^{\circ}\text{C}$, 24h]



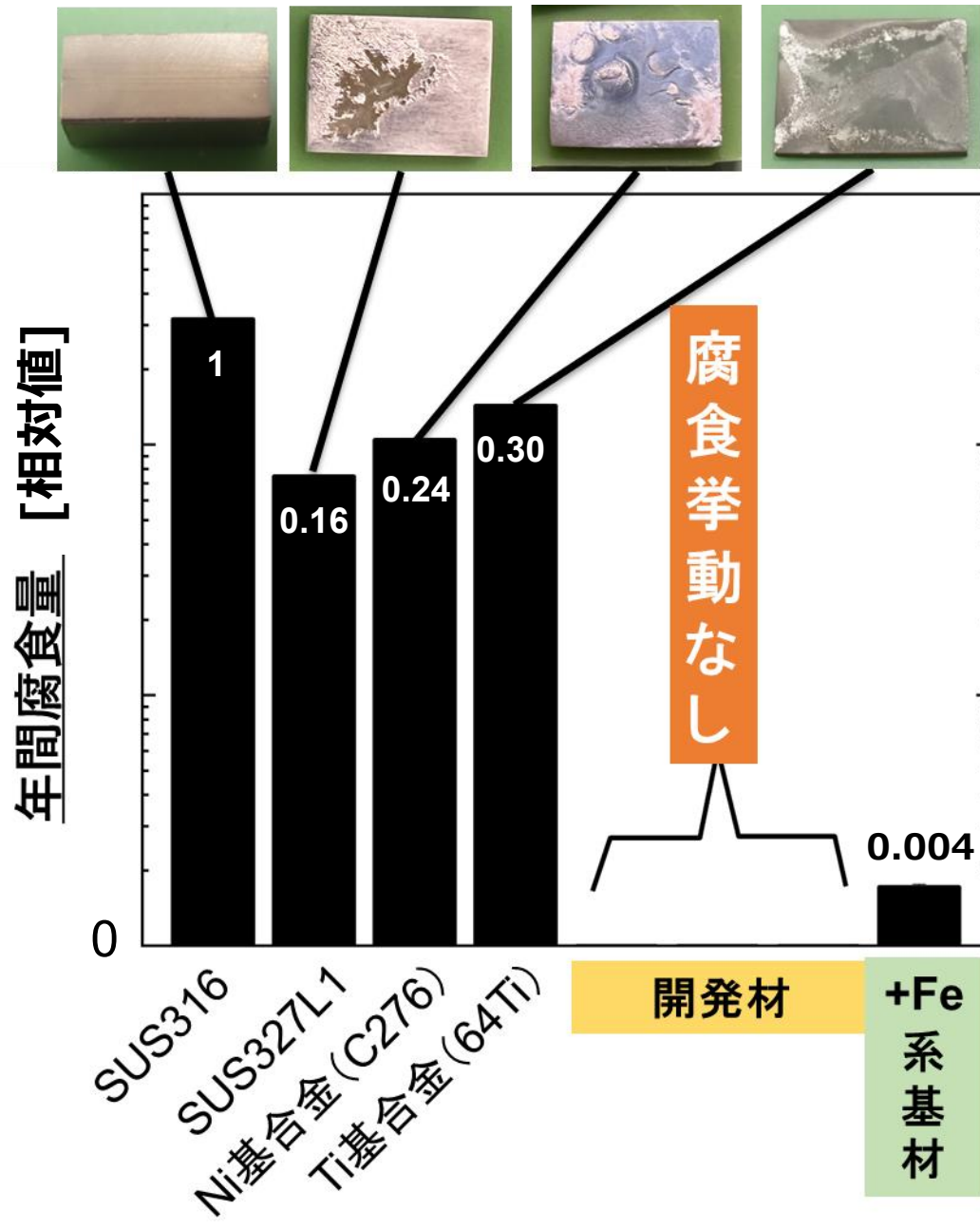
年間腐食量 [mm/y]

$$= [365(\text{日}) \times 24(\text{時間}) \times 3600(\text{秒}) \times \text{重量減少量}(\text{kg})] / [\text{密度}(\text{kg}/\text{m}^3) \times \text{試験片表面積}(\text{m}^2) \times \text{試験時間}(\text{s}) \times 1000]$$



SUS316のみ明確に腐食。スーパーステンレス(SUS327L1)、Ni基合金、Ti基合金、開発材では腐食挙動が見られなかった。

I-1. ②浸漬試験[Conc.H₂SO₄, 300℃, 24h]



開発材

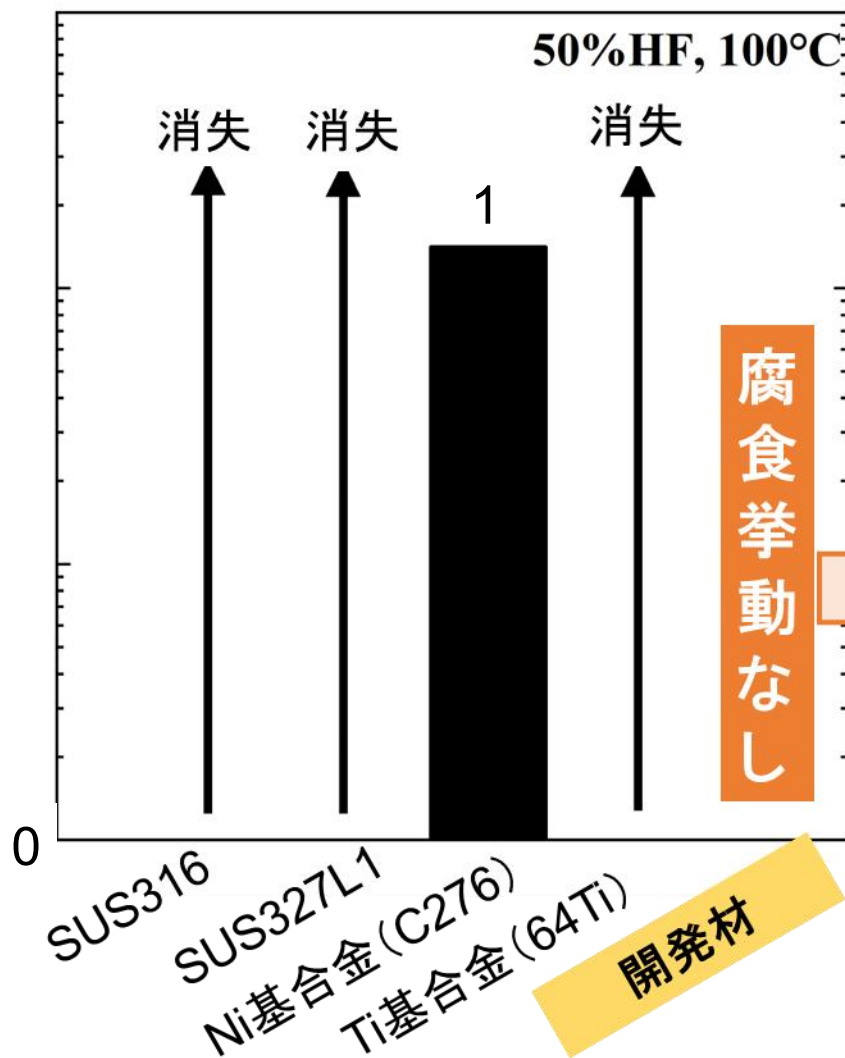


浸漬試験後も金属光沢を維持

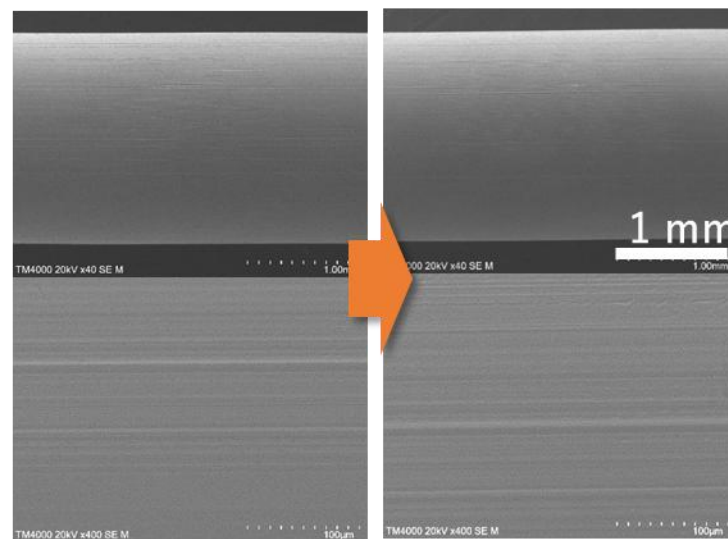
- ・従来材と比べて極めて良好な耐食性。
($< 0.3 \text{ mm/y}$)
- ・開発材はFe系基材と混合しても高い耐食性を維持。

I-1. ③浸漬試験 [50%HF, 100℃, 100h]

年間腐食量 [相対値]



24時間浸漬後
(SUS316)



浸漬前

100 hr浸漬後

SUS316、スーパーステンレス、Ti基合金は消失。Ni基合金では顕著な腐食。
開発材では腐食挙動が見られなかった。

I-2. 北海道 川湯温泉での長期耐久性試験



pH : 1.6-1.9
水温 : 58℃



↑ 使用したニッパー
作業中短時間で腐食

北海道 川湯温泉での長期耐食性試験を実施。



試験開始直後



2ヶ月後

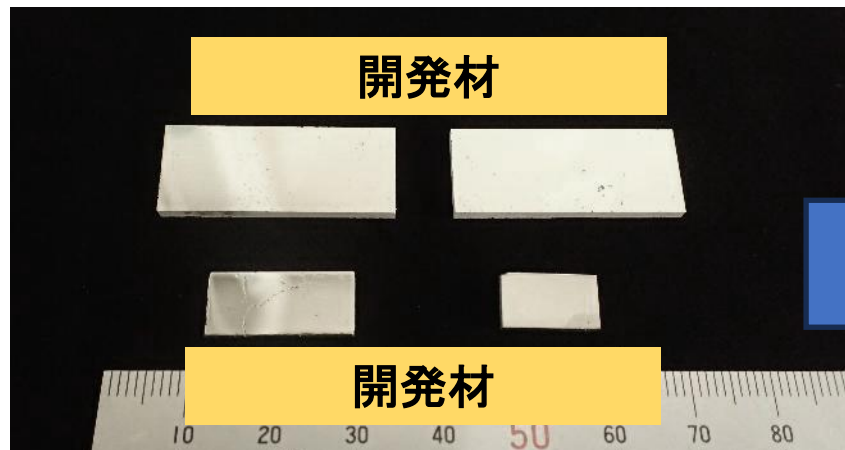


3ヶ月後 回収時

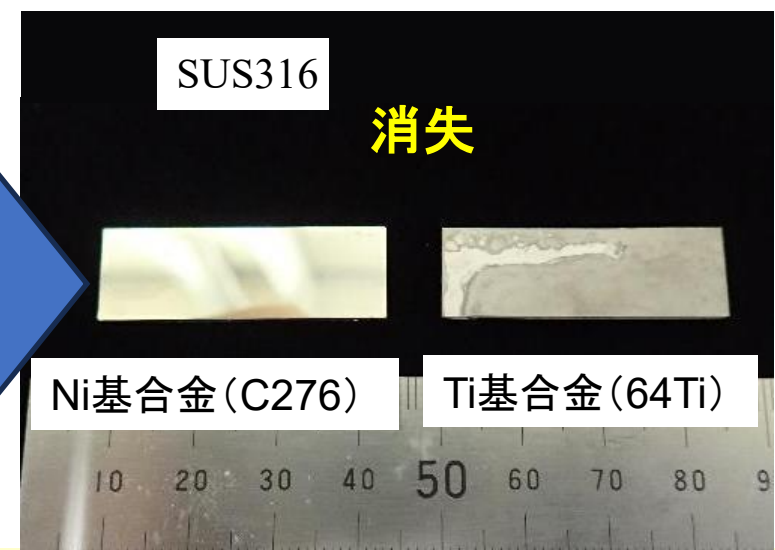
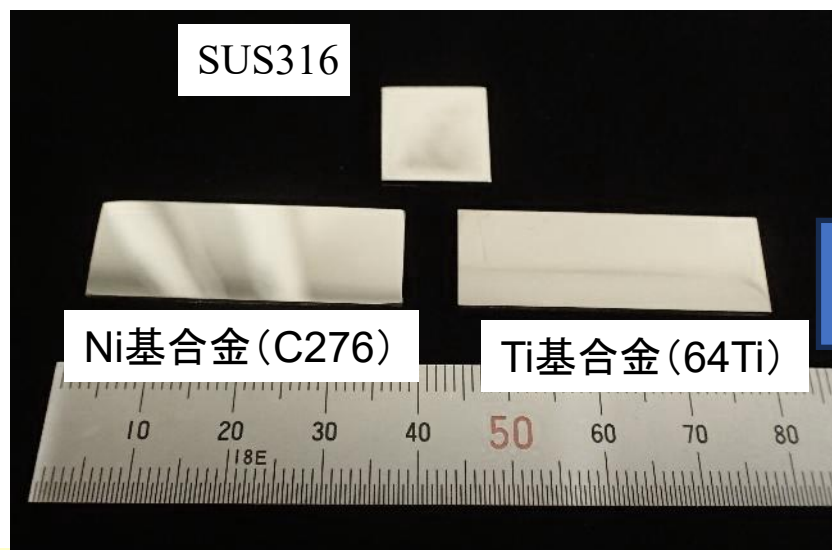
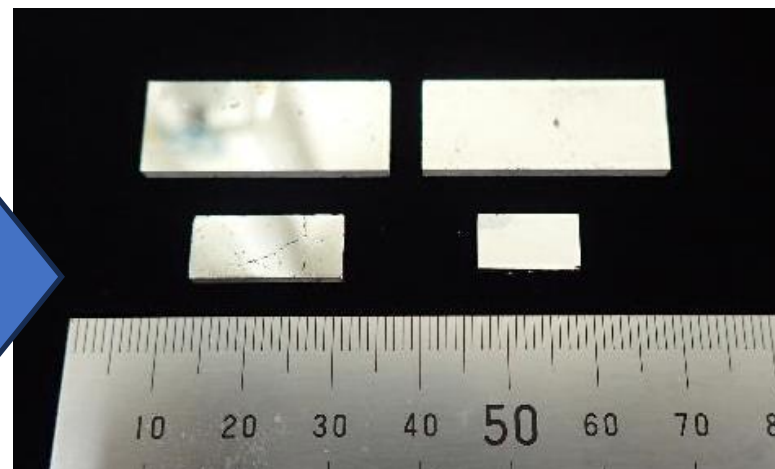
I-2.長期耐久性試験結果

・試験前後 外観写真

試験前



試験後



114日間の長期耐久性試験の結果より、SUS316は消失。Ti基合金は顕著な腐食。
Ni基合金と開発合金では高い耐食性が得られた。

I-3. 超臨界硝酸水溶液による腐食試験（従来材）

SUS
316



SUS
327L1



Ni基合金
(C276)



Ti基合金
(64Ti)



材質

SUS316

SUS327L1

C276

64Ti

試験前重量(g)

1.78089

0.65169

1.03908

0.65858

試験後重量(g)

1.78103

0.65171

1.01917

0.65860

重量変化

(g/cm²)

0.7

0.1

-96.3

0.1

腐食速度

(mm/y)

-0.272

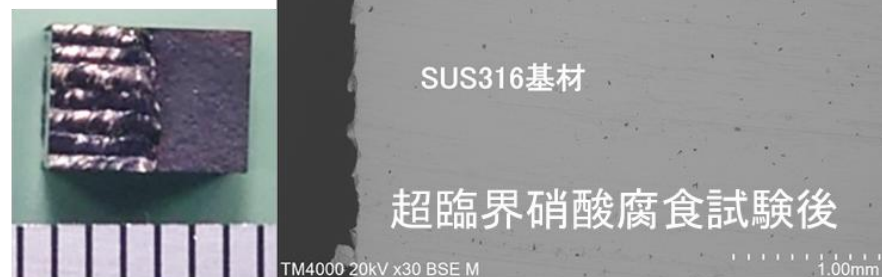
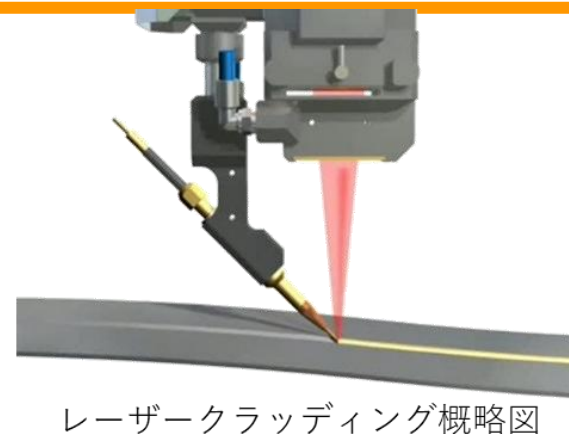
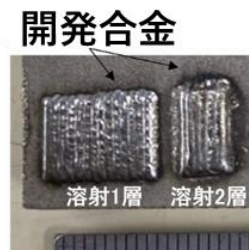
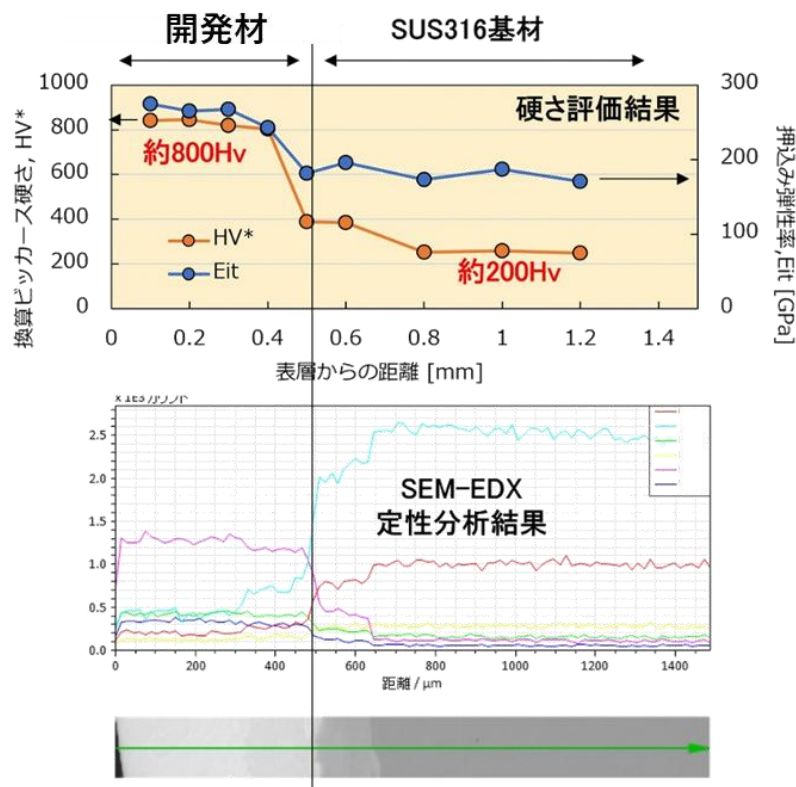
-0.040

31.644

-0.056

有力な候補材であるNi基合金(C276)において
顕著な腐食減量が発生。

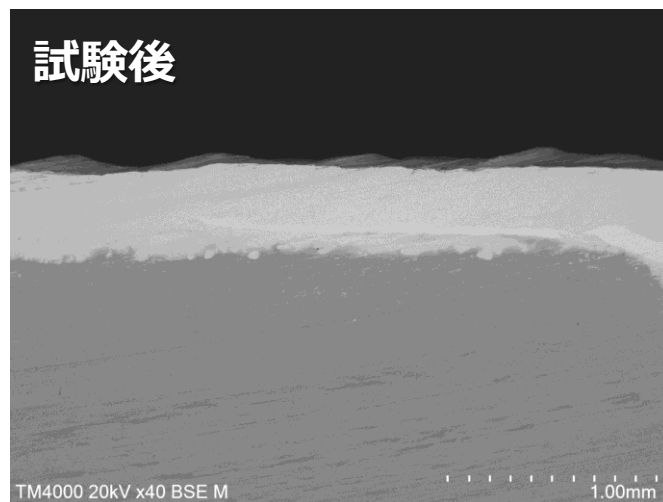
Ⅱ. 成膜試料の硬度分布と超臨界硝酸腐食試験



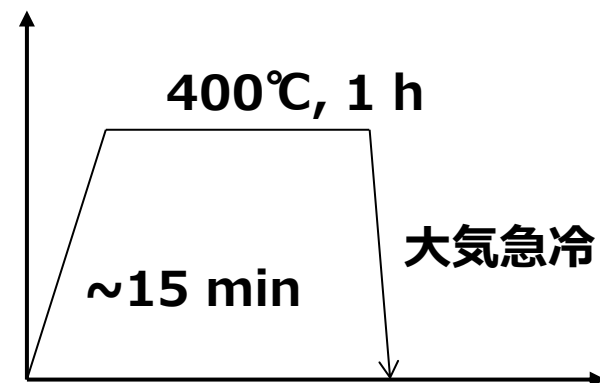
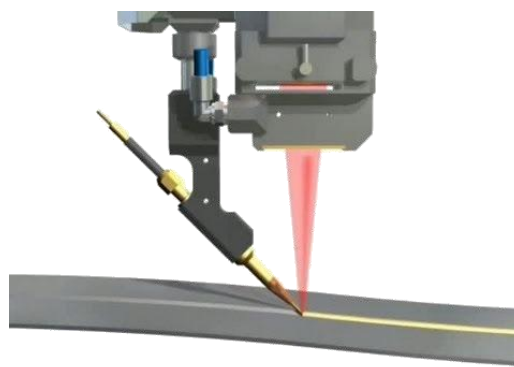
成膜部材の硬度分布と試験後の状態

400℃、30MPaの超臨界硝酸水溶液にて、基材のSUS316が腐食した一方、開発合金では**金属光沢を維持**。

II. 成膜試料に対する耐熱衝撃試験



マッフル炉



熱衝撃試験温度プロフィール

ステンレス基板上に開発合金をレーザークラッディング成膜を実施。**400°Cの大気中昇降温によりクラックや膜の剥離が発生しないことを確認。**

まとめと今後の予定

I. 各種酸や超臨界水溶液への耐食性評価

塩酸、沸騰硫酸、加熱フッ酸、超臨界水溶液に対して、開発合金が極めて良好な耐食性を有することが明らかになった。

開発合金成膜部材は、400℃、30MPaの硝酸水溶液への暴露に耐えることを示した。

II. 配管形状へのためのステンレス基材への成膜試験

超臨界地熱発電用の高耐食性合金として、Mo-W基の単結晶線材をDewetting μ -PD法によって作製し、レーザークラッディングによりステンレス基材への成膜が可能であることを実証した。

超臨界水溶液における腐食挙動は予測が困難であり、今後、様々な条件での試験を実施して、コスト・耐食性・機械強度に優れる合金・成膜部材の探索を実施していく。

<謝辞>

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP10020)の結果得られたものです。

