

微生物と電気化学操作による ステンレスからの有用金属回収

海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門
超先鋭研究開発プログラム

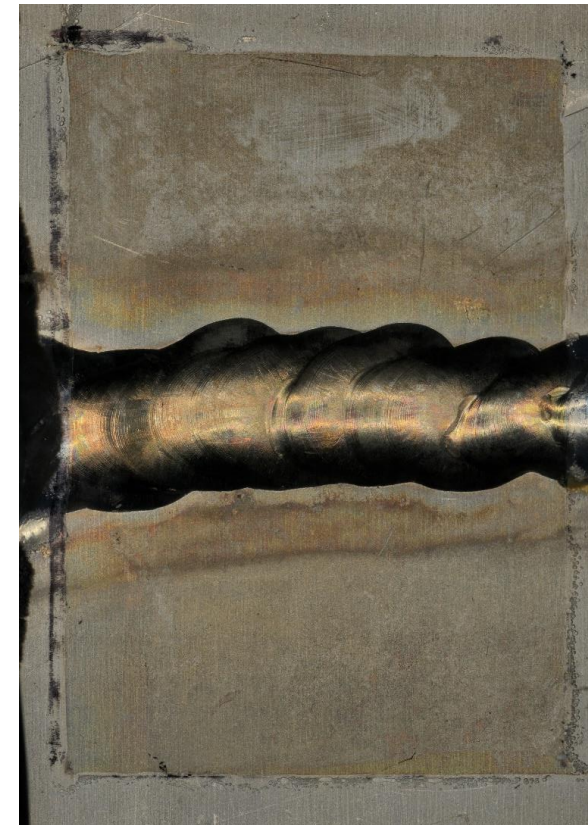
プログラム長代理（主任研究員） 若井 暁

2025年9月19日

新技術の概要

深海由来微生物の培養物にステンレス鋼を入れ、電圧を印加することでステンレス鋼の溶解反応を生じさせ、制御する電圧によって回収したい有用金属（NiあるいはCr）を回収する技術を開発しました。不要なステンレス廃材から電池分野で利用可能なNiを回収することに加えて様々な利用方法が期待されます。

微生物なし

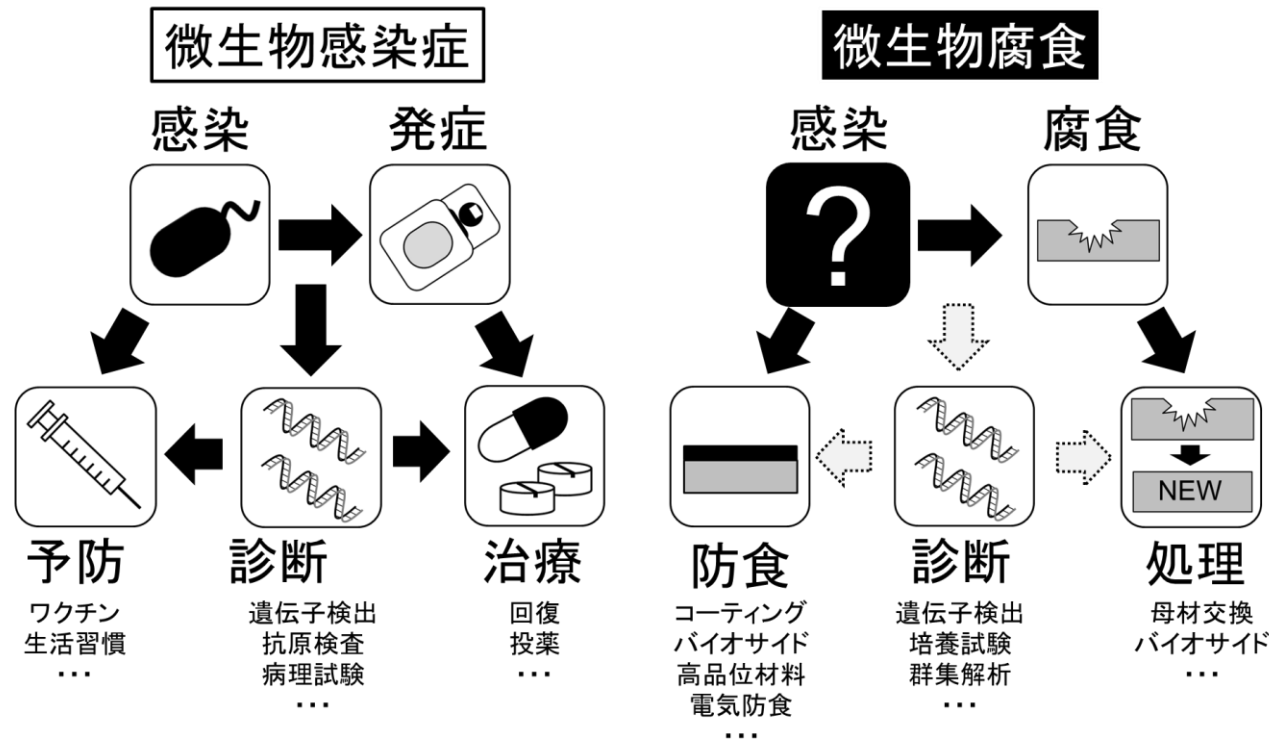


微生物あり



研究分野の背景：微生物腐食

微生物による金属腐食 (微生物腐食)研究

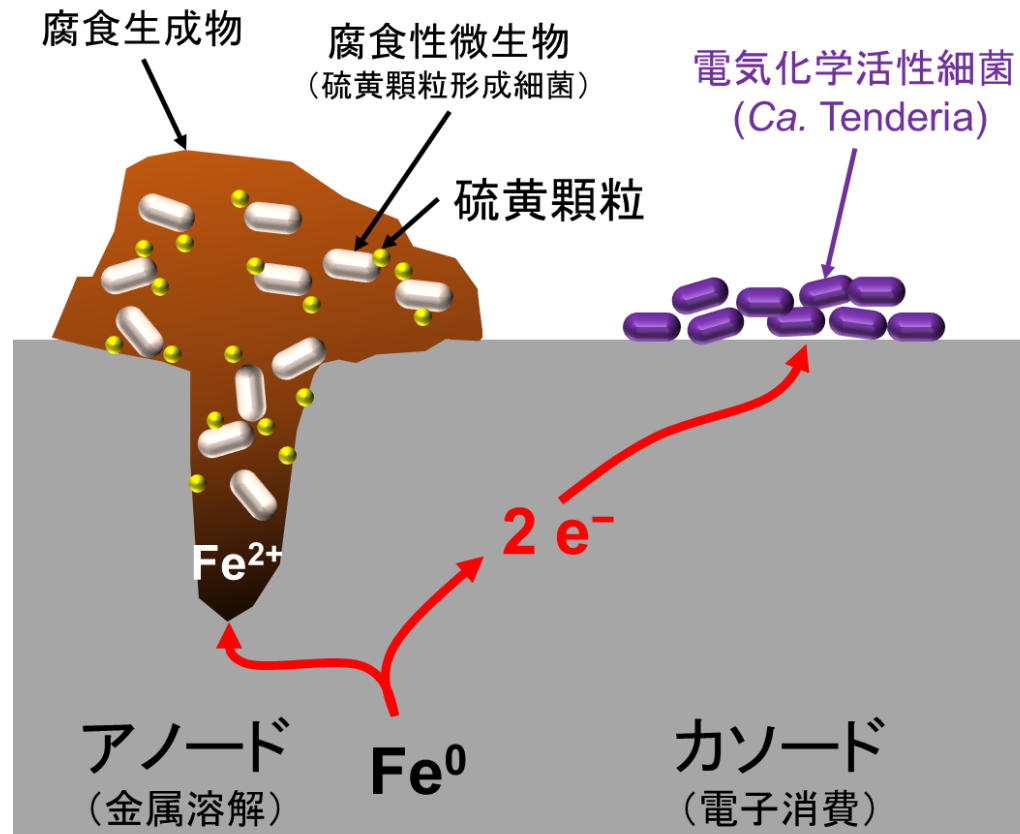


- 金属材料の腐食に係る日本国内のコストは年間約6兆円を超えるという試算あり
- その中でも微生物腐食は、突発的かつ加速的に進行するため制御・予測が難しい
- 化学工場、オイル・ガス環境、原子力環境での微生物腐食の発生は環境汚染という二次災害をもたらし得る

微生物腐食現象をしっかりと理解することで、微生物腐食というネガティブな現象をポジティブに変換できる可能性がある

研究分野の背景：微生物電気化学

新しい微生物腐食電気化学 反応モデルの提唱



- 微生物腐食において微生物のもつ電気化学活性の影響が近年指摘されている
- ステンレス鋼の腐食において、同一材料上にアノードとカソードが形成されている
- さらに、ステンレス鋼腐食では、組織選択的な溶解現象が認められる



この組織選択的現象を利用することで、ステンレス鋼から有用金属を回収できる可能性を考えた

研究分野の背景：有用金属元素の国際的獲得戦略

- EUのバッテリー規則（Regulation (EU) 2024/1542）により、バッテリー用金属（ニッケル、リチウム、コバルトなど）の需給構造が変化する可能性がある
- EU圏に輸出するバッテリーに対しても再利用原料含有率が義務化される
- 都市鉱山的に国内に現存する廃棄物等から有用金属を回収する技術が必要になる

身近に使用されているステンレス鋼には、バッテリー用金属であるニッケルが含まれており、廃ステンレス材料からニッケルを回収できれば、バッテリー規則への対策となり得る。

ステンレスの定義

クロム含有量10.5%以上
炭素含有量1.2%以下

ステンレスの組成（代表例）

オーステナイト系（磁性なし）

SUS304: 18% Cr, 8% Ni

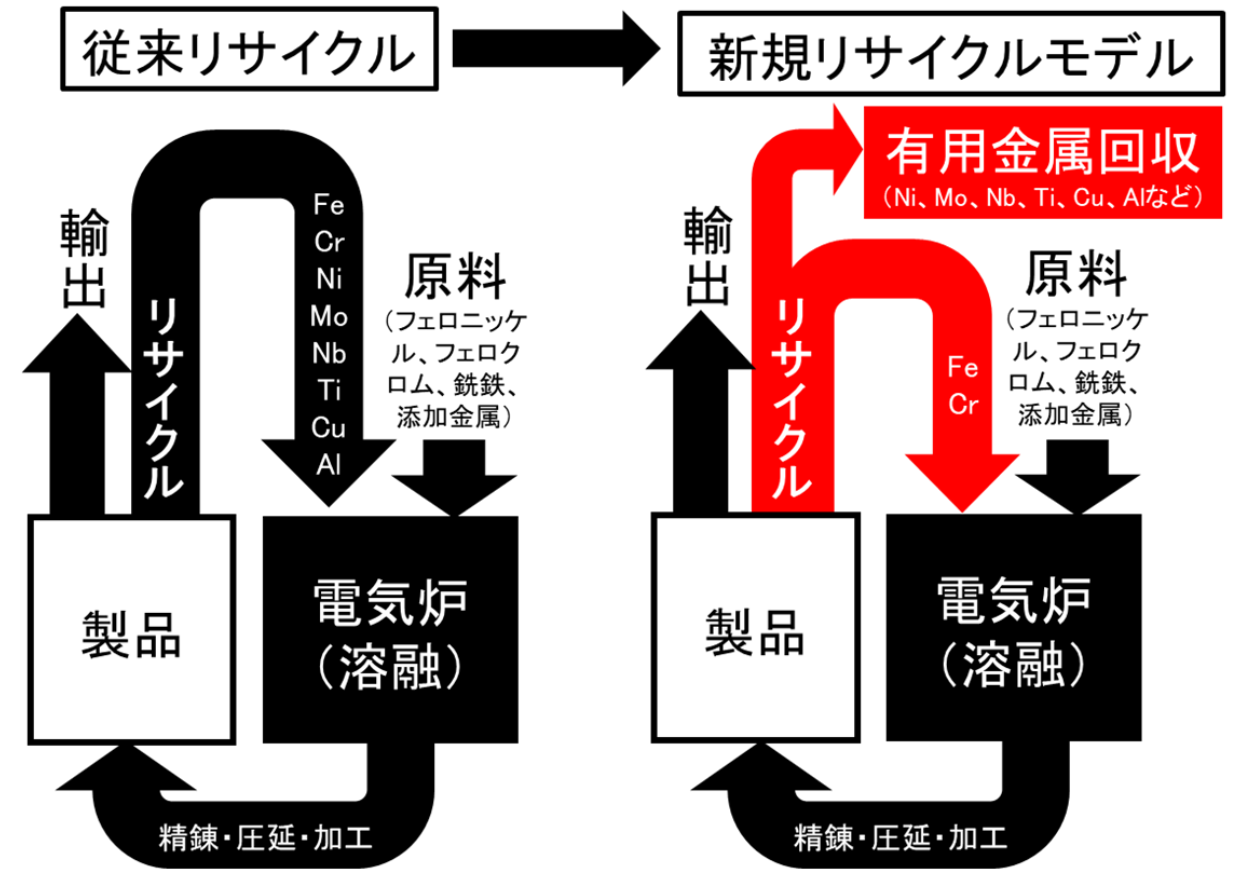
SUS316: 18% Cr, 12% Ni, 2.5% Mo

フェライト系（磁性あり）

SUS430: 18% Cr

従来技術・競合技術との比較

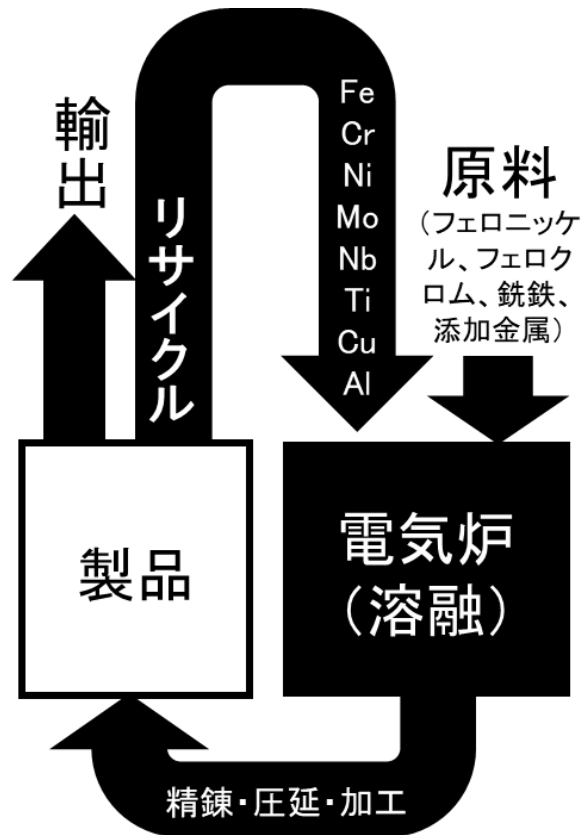
現状で、ステンレス鋼はステンレス鋼としてリサイクルされている。ステンレス鋼に過剰に電圧を印加することで溶解させることは以前から可能であったが、有用金属回収はできていない。今回、微生物反応を組み合わせることで小さな印加電圧（数10mV）でステンレス鋼の溶解が可能であり、かつ、**有用金属の回収が可能**になった。さらに、印加電圧を変えることで回収したい金属を変えることも可能になった。



「蛙の子は蛙」から「鳶が鷹を生む」へ

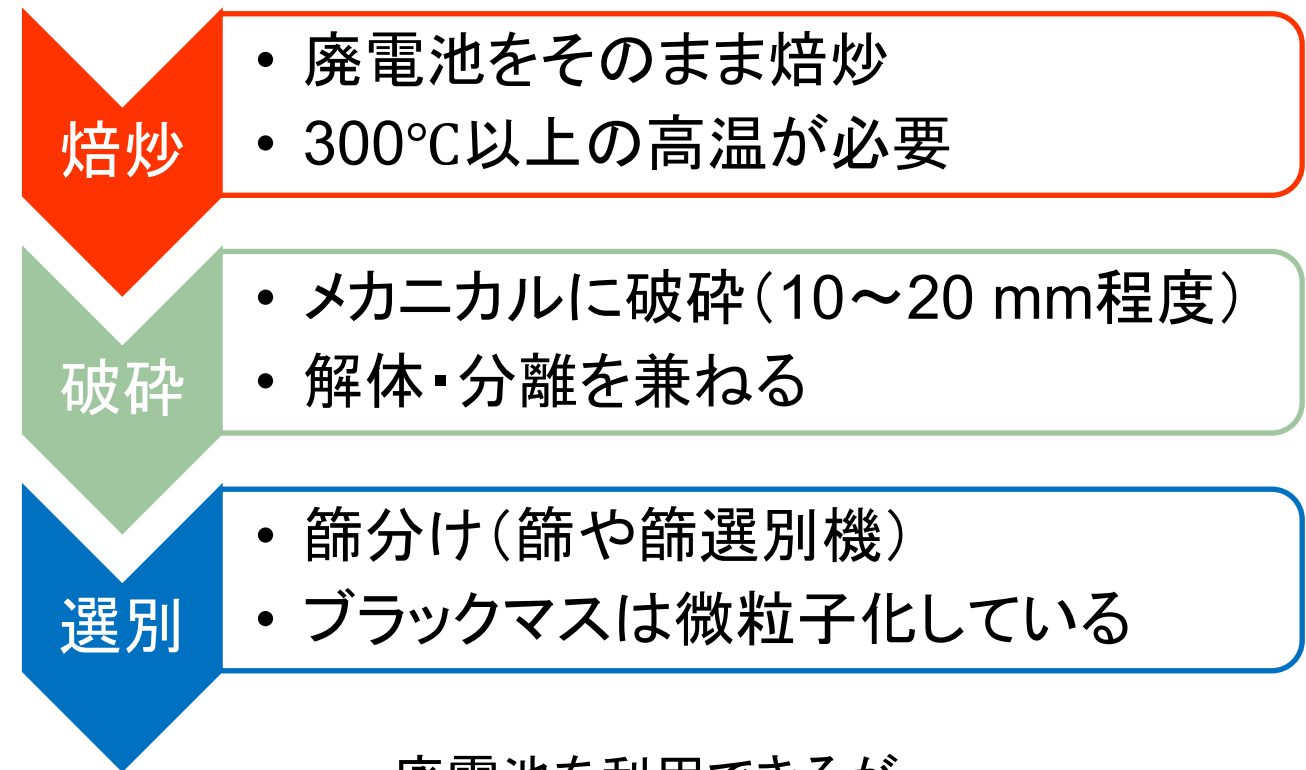
従来技術との比較

ステンレス鋼のリサイクル



非常に高いリサイクル率を有しており、リサイクルシステム自体に問題はない。一方で、有用な金属元素を回収する**アップサイクル的な技術は存在しない**。また、電気化学的に溶解させることは可能であるが、高い電圧や溶媒としての酸が必要であり、元素選択的な溶解は難しい。

廃リチウムイオン電池からの有価金属の回収方法(特開2025-40692)

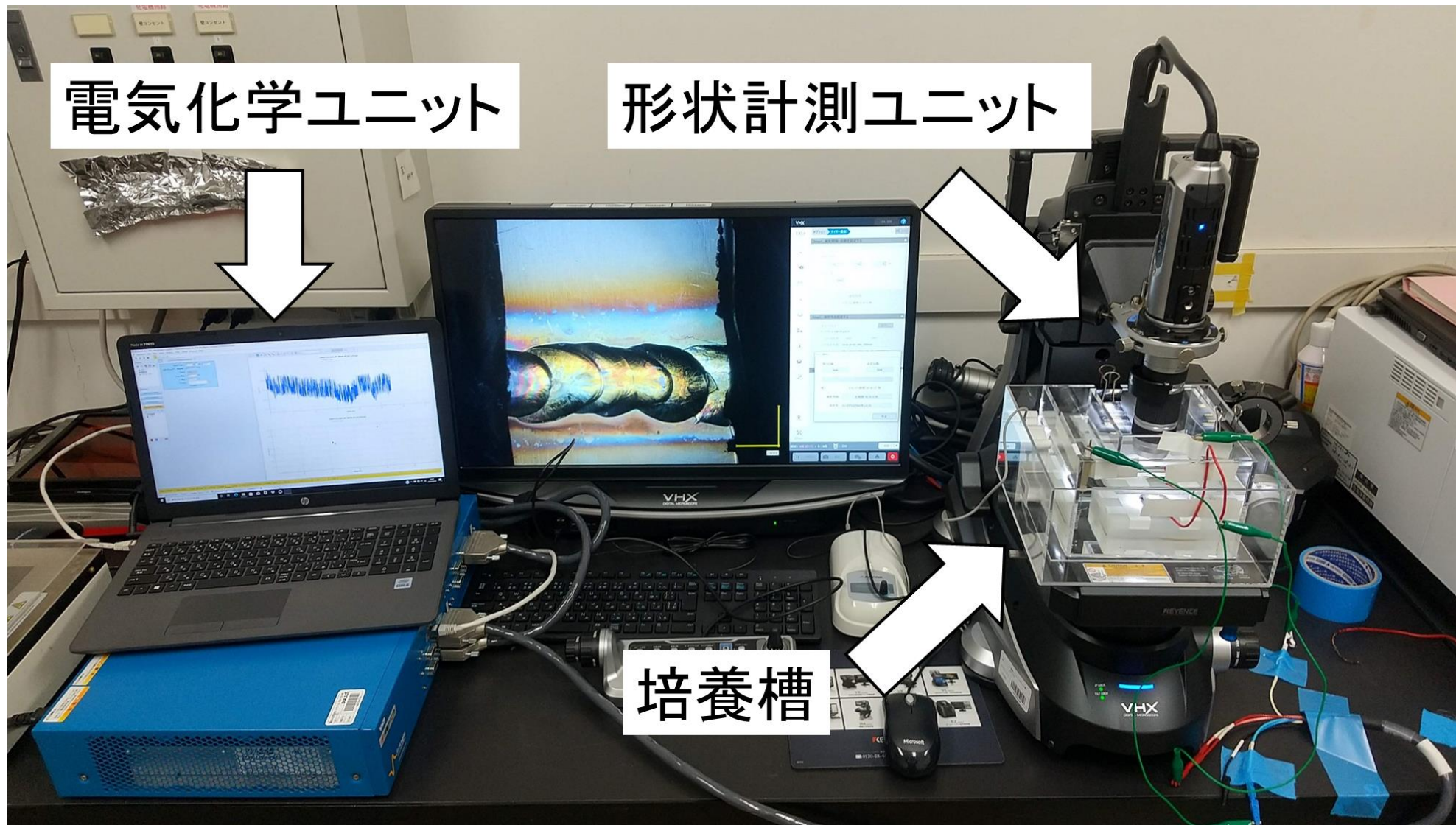


廃電池を利用できるが、**高温やメカニカルなエネルギーが必要**

新技術の特徴

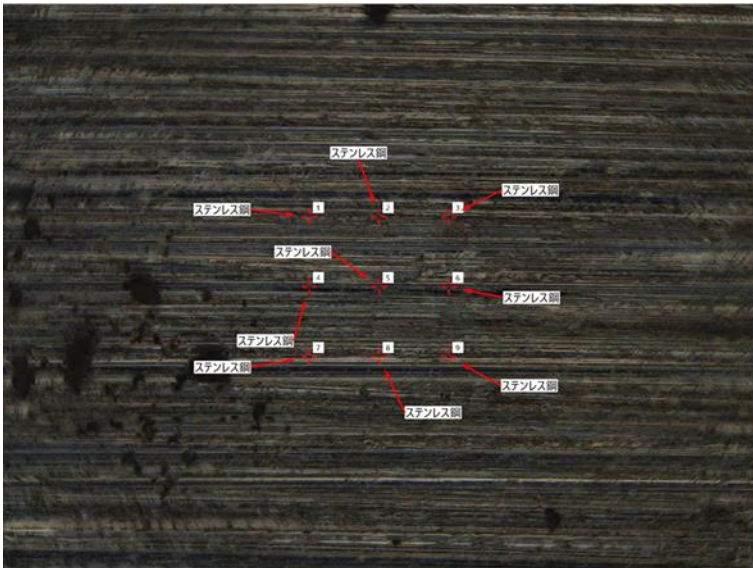
- 印加電圧を変えることで回収できる金属元素を変えることができる
- 材料側を適切にマスクすることで金属表面にパターンニングが可能
- ゲル中でも反応が可能

現在の反応システム外観：電気化学計測と観察



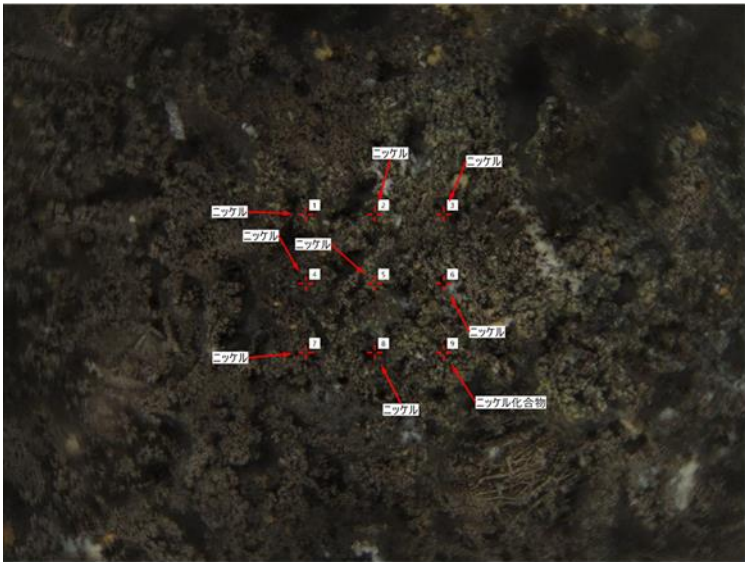
元素選択：数十mVの電圧印加でニッケルの濃縮

被覆健全部



| No. | 推定物質 | Fe | Cr | Na | Ni | O |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | ステンレス鋼 | 63.7% | 21.1% | 8.8% | 6.4% | |
| 2 | ステンレス鋼 | 71.8% | 19.3% | 1.2% | 7.7% | |
| 3 | ステンレス鋼 | 42.6% | 22.7% | 34.7% | | |
| 4 | ステンレス鋼 | 64.8% | 14.0% | | 7.2% | 14.0% |
| 5 | ステンレス鋼 | 74.3% | 16.4% | 1.1% | 8.2% | |
| 6 | ステンレス鋼 | 72.4% | 16.7% | 1.4% | 9.5% | |
| 7 | ステンレス鋼 | 74.3% | 14.1% | 3.1% | 8.5% | |
| 8 | ステンレス鋼 | 74.4% | 15.6% | | 10.0% | |
| 9 | ステンレス鋼 | 75.9% | 13.9% | 1.2% | 9.0% | |

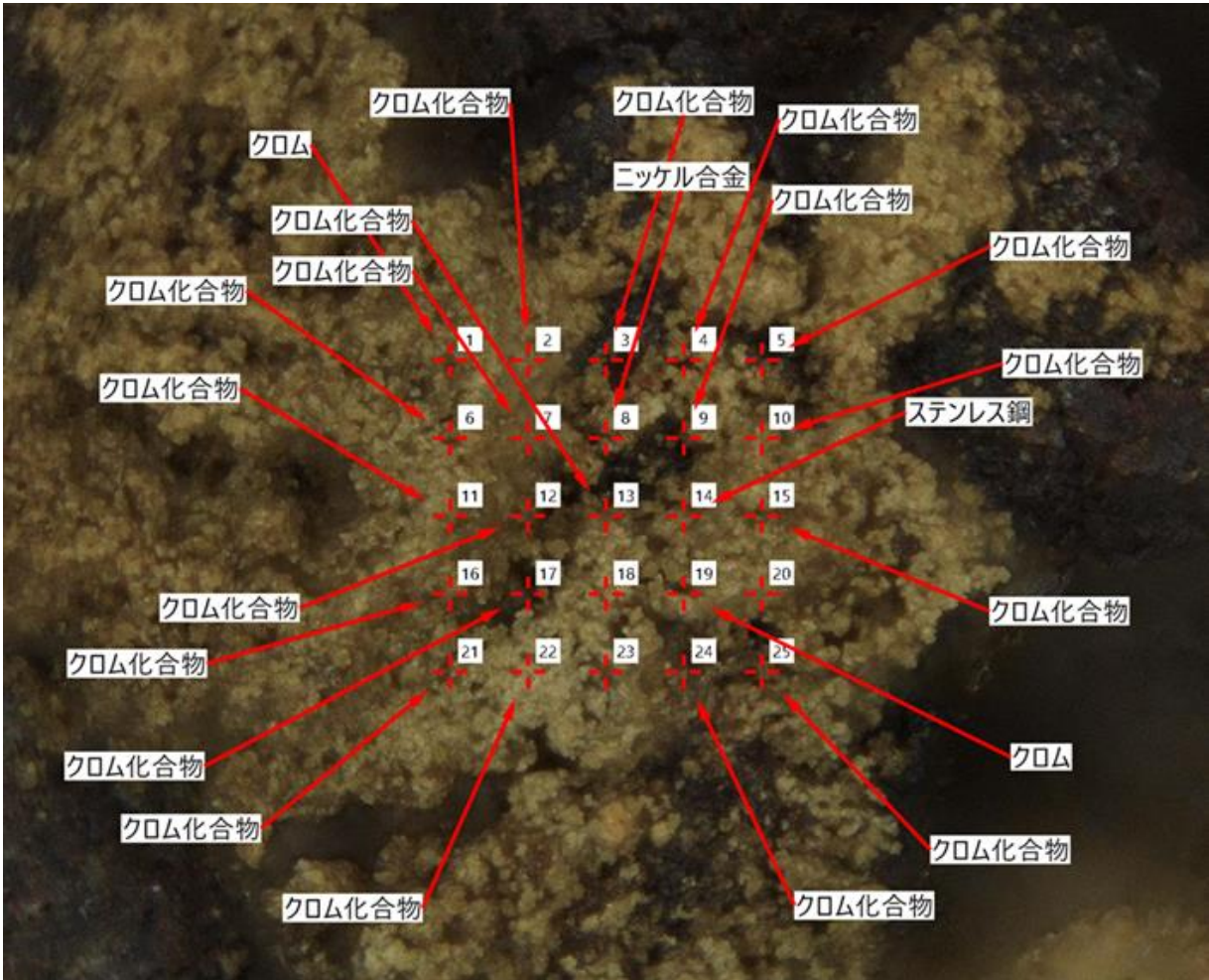
溶解残存部



| No. | 推定物質 | Ni | O |
|-----|---------|--------|-------|
| 1 | ニッケル | 100.0% | |
| 2 | ニッケル | 100.0% | |
| 3 | ニッケル | 100.0% | |
| 4 | ニッケル | 100.0% | |
| 5 | ニッケル | 100.0% | |
| 6 | ニッケル | 100.0% | |
| 7 | ニッケル | 100.0% | |
| 8 | ニッケル | 100.0% | |
| 9 | ニッケル化合物 | 75.7% | 24.3% |

被覆健全部では、汎用ステンレス鋼に見られる約10%のNi濃度を確認。
溶解残存部における108点(9点×12か所)の分析により、
平均94%という高濃度でのNiの濃縮を確認。

元素選択：数百mVの電圧印加でクロムの濃縮



| No. | 推定物質 | Fe | Cr | Ni | Mo | O | H |
|-----|--------|----|-------|----|------|-------|-------|
| 1 | クロム | | 20.2% | | | 79.8% | |
| 2 | クロム化合物 | | 7.4% | | | 39.3% | 53.3% |
| 3 | クロム化合物 | | 5.2% | | | 43.3% | 51.5% |
| 4 | クロム化合物 | | 15.9% | | | 73.4% | |
| 5 | クロム化合物 | | 5.2% | | | 40.9% | 53.9% |
| 6 | クロム化合物 | | 5.6% | | | 35.0% | 59.4% |
| 7 | クロム化合物 | | 7.0% | | | 35.7% | 57.3% |
| 8 | ニッケル合金 | | 4.6% | | 1.3% | 43.1% | 49.4% |
| 9 | クロム化合物 | | 15.5% | | | 84.5% | |
| 10 | クロム化合物 | | 6.0% | | | 41.1% | 52.9% |
| 11 | クロム化合物 | | 5.4% | | | 43.8% | 49.5% |
| 12 | クロム化合物 | | 13.6% | | | 86.4% | |
| 13 | クロム化合物 | | 15.0% | | | 85.0% | |
| 14 | ステンレス鋼 | | 13.2% | | | 76.2% | |
| 15 | クロム化合物 | | 16.3% | | | 83.7% | |
| 16 | クロム化合物 | | 12.7% | | | 87.3% | |
| 17 | クロム化合物 | | 14.2% | | | 85.8% | |
| 18 | | | | | | | |
| 19 | クロム | | 19.4% | | | 80.6% | |
| 20 | | | | | | | |
| 21 | クロム化合物 | | 5.8% | | | 40.6% | 53.6% |
| 22 | クロム化合物 | | 14.6% | | | 85.4% | |
| 23 | | | | | | | |
| 24 | クロム化合物 | | 14.3% | | 1.6% | 77.7% | |
| 25 | クロム化合物 | | 6.0% | | | 45.2% | 48.8% |

溶解残存部において、鉄とニッケルの溶解によるクロムの濃縮を確認

マスキングによるパターニング

反応前



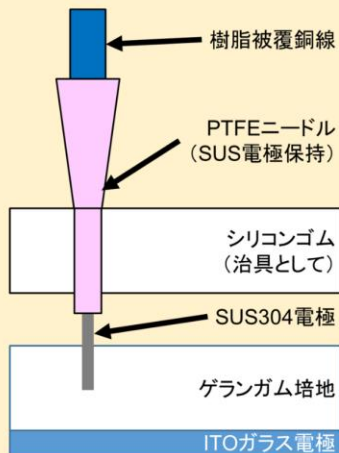
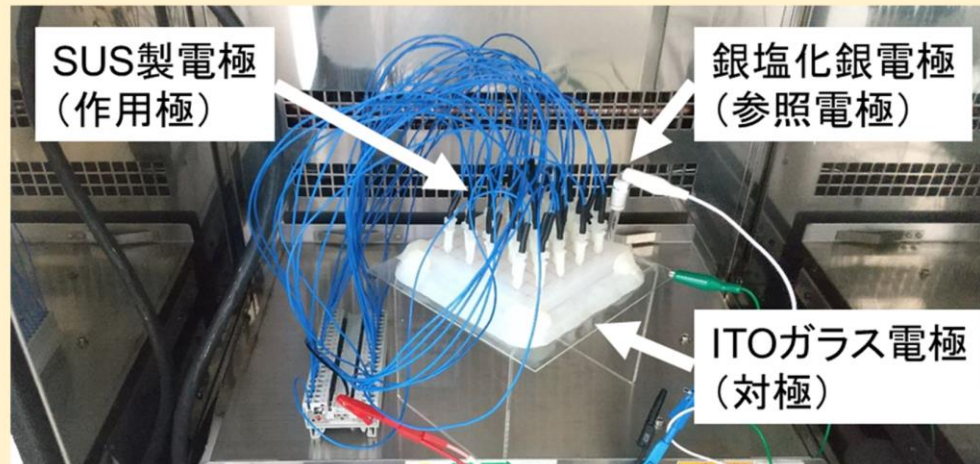
反応後



露出面においてのみ反応が進行。
すなわち、絶縁テープ等を用いて
パターニングが可能。

ゲル中での反応(可能性の提示)

電極脱着式多重微小電極培養

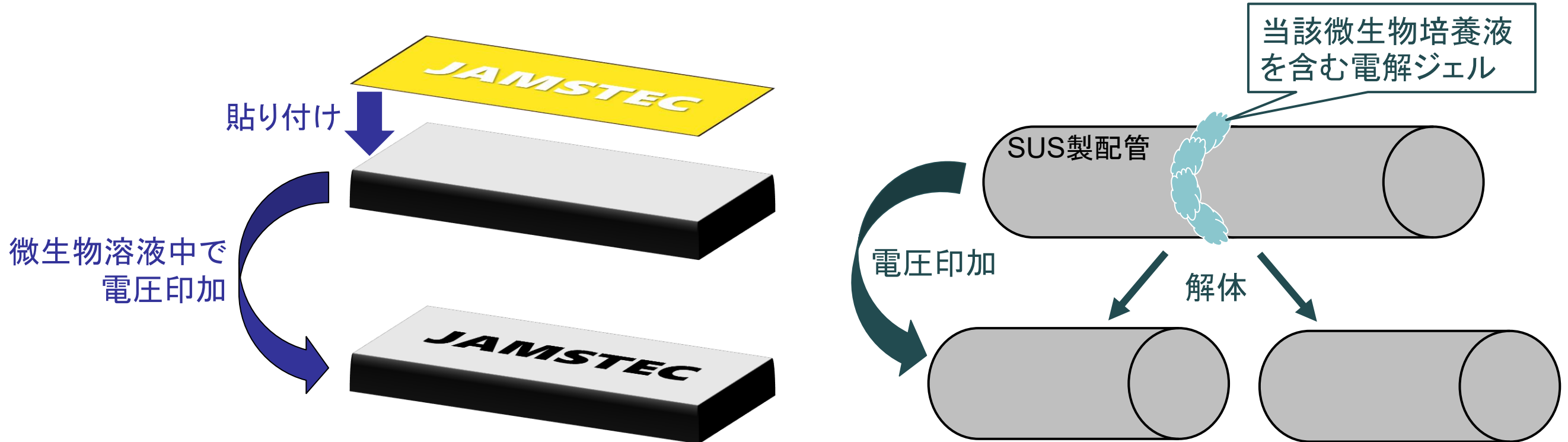


作用極: SUS304製電極(1 mm径) × 40本
参照電極: 銀塩化銀電極(3M KCl)
対極: ITOガラス電極(15 × 15 cm)
培地: ゲランガムで固化した無機塩培地
培養温度: 15 or 30°C
電位: +400 mV
電気化学装置: Biologic社製ポテンショガルバノスタット
※SUS電極はPTFEニードルでシリコンゴム板に固定されており、それぞれ独立して抜き取ることが可能。

- 電気化学活性微生物の培養のために、電解質を含んだゲランガム培地を用いた電気培養システムは構築済み。
- 本培養システムを応用することにより、マスキングによるパターンニングの逆で、電解質ゲルとの接触面のみで反応を進めることが可能。

想定される用途

- ステンレス廃材からの有用金属元素の回収
- マスキングと組み合わせた微細加工
- ステンレス構造物の省エネルギー型解体



実用化に向けた課題

- 大型化

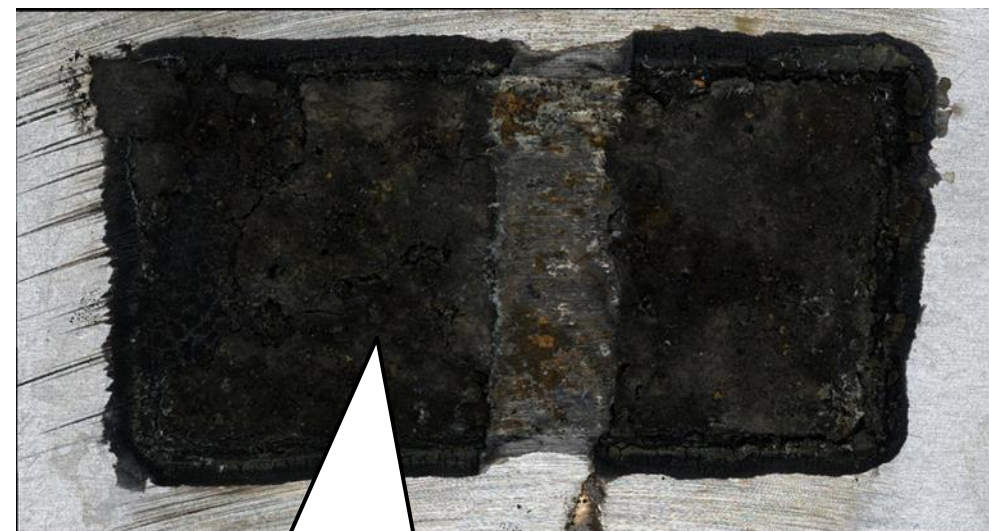
現在の試験系は1L反応液中での50×20×2 mmのステンレス鋼試験片を用いており、試験片の大きさや形状に対する反応の依存度は未検討

- 反応速度等の検討

現在の反応系は電圧制御のみで、24時間の反応しか検討しておらず、速度制御は未検討

- 残留固形分の回収方法

反応後の残留固形分に有用金属が濃縮しているが、回収方法については未検討(酸による溶解は確認済み)



有用金属(NiあるいはCr)
は残留固形分中に存在

社会実装への道筋

| 時期 | 取り組む課題や明らかにしたい原理等 | 社会実装への取り組みについて |
|------|---|--|
| 基礎研究 | ・ステンレス鋼腐食誘導微生物を取得 | |
| 現在 | ・微生物存在下で電圧依存的な溶解促進と元素濃縮が実現 | |
| 3年後 | <ul style="list-style-type: none"> ・反応速度論の理解(有用金属回収、パターニング、省エネルギー解体技術) ・回収方法の確立(有用金属回収) | ・JSTのA-STEP(産学共同ステージI)へ応募し研究資金獲得 |
| 5年後 | <ul style="list-style-type: none"> ・反応系の最適化(反応速度と投入エネルギーコスト)の実現 ・反応キット化(パターニング、省エネルギー解体技術) | <ul style="list-style-type: none"> ・JSTのA-STEP(産学共同ステージII)へ応募し研究資金獲得 ・パターニングや省エネルギー解体技術については設備構築よりもキット化をして販売する方が社会実装が早い |
| 7年後 | ・システムの大型化の実現 | ・有用金属回収においては、設備投資が必要であり、資金繰りやパートナー企業の存在が重要 |

企業への期待

- 大型化を検討できる企業との共同研究
- キット化開発を進められる企業との共同研究
- 電解溶液中の溶解有用金属の回収について技術を持っている、あるいは、開発が可能な企業との共同研究を希望
- 金属材料の微細加工等に興味のある企業とのマッチング
- エネルギーコストの低い解体技術に興味のある企業とのマッチング

企業への貢献、PRポイント

- 本技術はこれまで純粹なりサイクル（閉じたサイクル）しかできなかったステンレス鋼に対して、**アップサイクル的な要素を導入**できる技術です。
- 微生物代謝と電気化学（小さな印加電圧）を利用した**環境負荷の低い技術**であり、特にステンレス構造体の解体には頑強な構造体に対して**省エネルギーな解体**作業が可能です。
- 今後の開発次第では、**ステンレス鋼以外の材料や鉱物**にも応用可能な技術になると期待できます。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：遷移金属を回収する方法およびこの方法に用いるための微生物の生産方法
- 出願番号：特願2025-055722
- 出願人：国立研究開発法人海洋研究開発機構
- 発明者：若井暁、小川真弘

お問い合わせ先

国立研究開発法人海洋研究開発機構
管理部門 研究インテグリティ・コンプライアンス室

T E L : 046 - 867 - 9623
e-mail: chizai@jamstec.go.jp