

# 高い金属吸着能を持つ 硫酸化酵母の開発

大阪公立大学 大学院工学研究科  
物質化学生命系専攻・化学バイオ工学分野  
教授 東 雅之

2023年10月31日

## 研究背景： 溶液中からの金属の回収・除去

- ① 精密機器に必須な貴金属・レアアースの安定供給は大きな課題  
都市鉱山に眠る製品は有用金属資源の宝庫
- ② 工場廃水中の有害重金属には環境基本法で厳しい排水基準が規定  
ppmオーダーの金属処理は未だ困難

→ 低環境負荷で効率的な金属回収技術が求められている

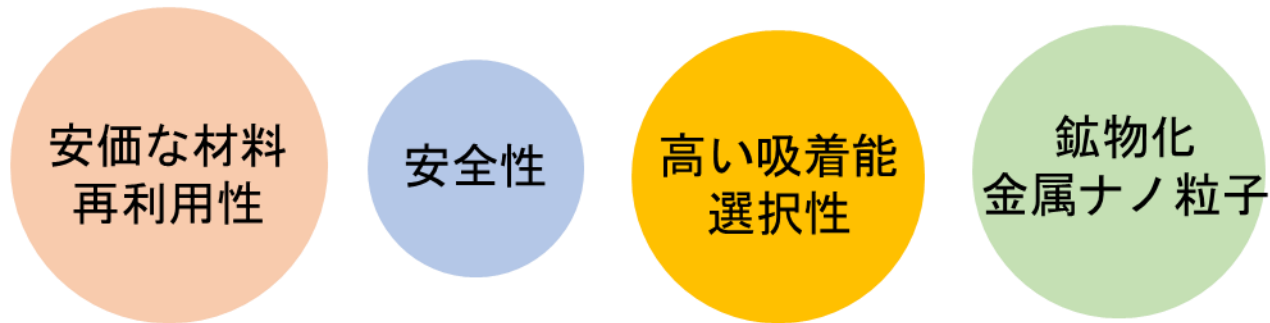
### 従来の回収・除去方法の特徴

	物理化学的手法 (イオン交換樹脂、溶媒抽出など)	生物学的手法 (生物吸着など)
除去能力	High	Low
環境負荷	High	Low
コスト	High	Low

生物吸着材料の吸着能力の改善に着目

# 金属吸着剤による社会課題解決イメージ

## 実用性の高い低環境負荷型金属吸着剤



# 金属吸着剤のマーケット

	マーケットニーズ	想定市場規模(国内)
廃水中のレアース回収	レアースの安定確保のため、 <u>都市鉱山からの回収が期待されているが、現時点では生物材料を使って確立した技術は存在しない</u>	<b>約834億円/年</b> レアメタルリサイクルの市場規模 (R3年度 環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書より)
有害金属除去	工場廃水に水質汚濁防止法等で指定された重金属が含まれる場合、 <u>厳しい排水基準が適用されるが、ppmオーダーの金属除去は困難である。</u>	<b>約120億円/年</b> イオン交換樹脂の市場規模予測より推計 (H&Iグローバルリサーチ株式会社レポート)

★ 海外市場についても調査を行った結果、染物業界の廃水 (アフリカ) や油中からの重金属除去などにも強いニーズがある

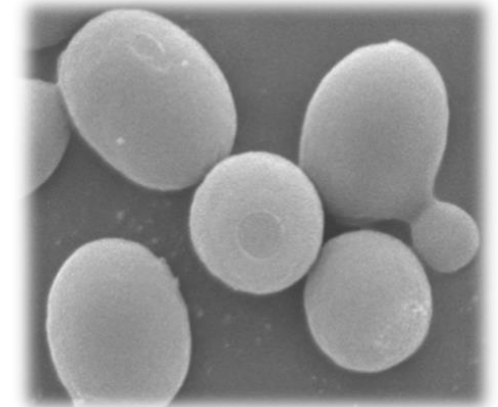
# 研究背景：酵母を用いた生物吸着

## 【微生物材料の課題】

- ・ 金属の吸着・蓄積能力が低い
- ・ 培養を伴う細胞内蓄積は室外での運用が難しい

## 【パン酵母を吸着材に用いるメリット】

- ・ 直径約5  $\mu\text{m}$ の均一な大きさ
- ・ 多孔質な細胞壁構造
- ・ 自然沈降による溶液から回収が可能
- ・ 食品に利用され安全で、流通から確保も可能
- ・ 容易に培養でき、余剰酵母の有効利用も可能
- ・ 生分解性で焼却処分も可能

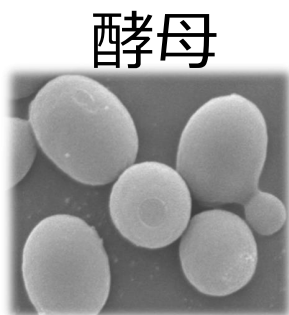


## 【吸着性能のアップには】

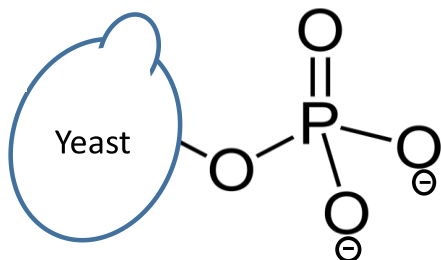
遺伝子改変や化学修飾による改善

前者の検討は盛んだが後者の取り組みはほとんどない

# 研究背景：酵母の化学修飾



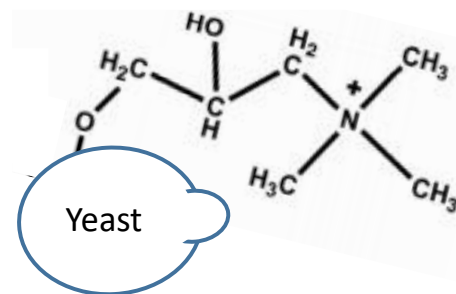
食品添加物による化学修飾



カチオン性有価・有害金属  
レアアース、銅、水銀、鉛

リン酸基修飾酵母 (P-yeast)

シャンプーの成分合成に使う反応



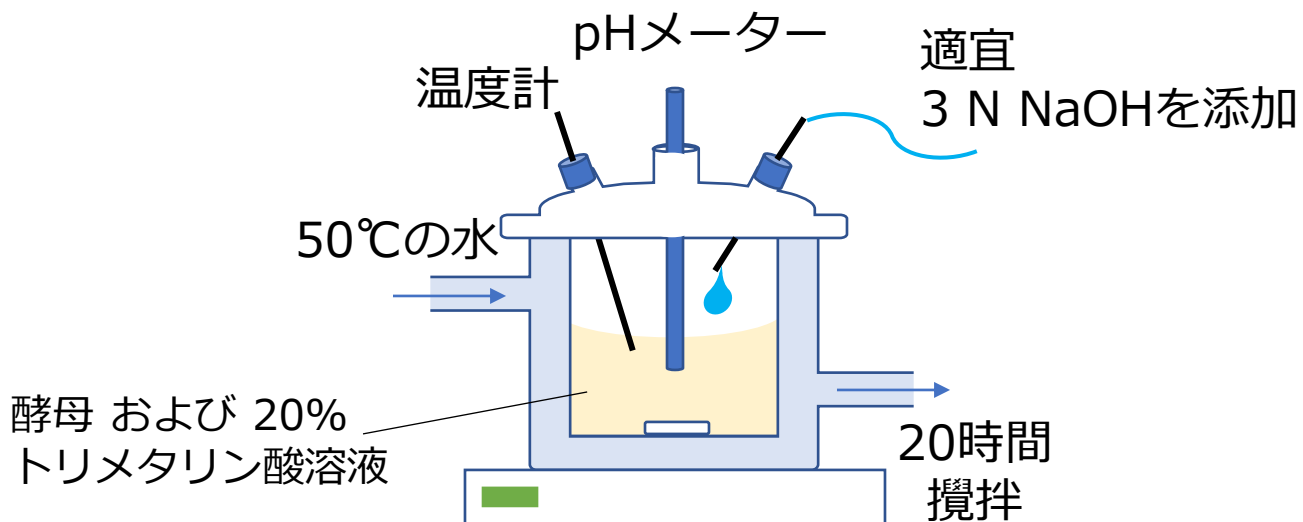
アニオン性有害金属  
セレン酸、クロム酸、ヒ酸

カチオン化酵母 (C-yeast)

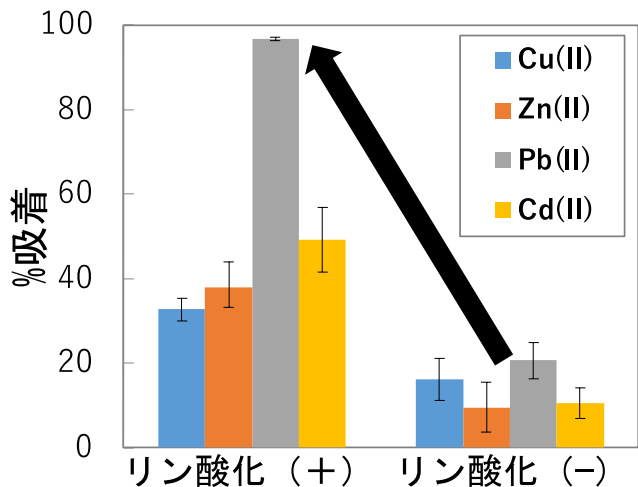
特許出願 (特願2021-145545)

どちらも死菌で生態系に影響しない

# 研究背景：P-yeastの特徴



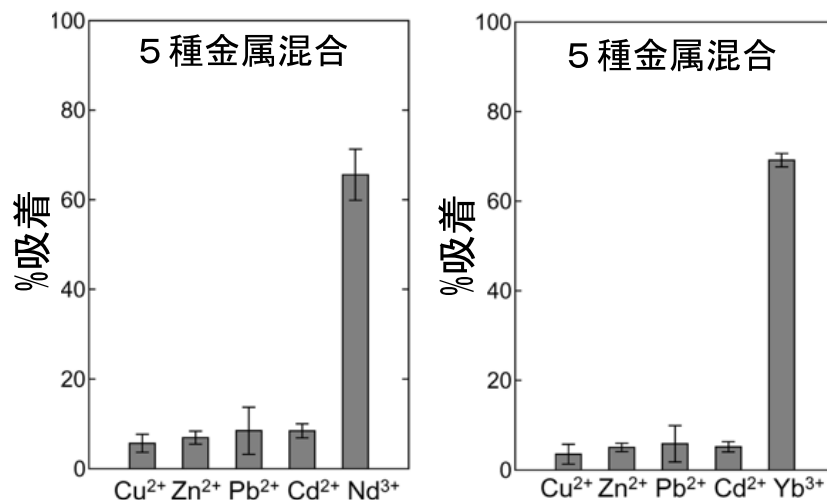
## ① 吸着能大幅アップ



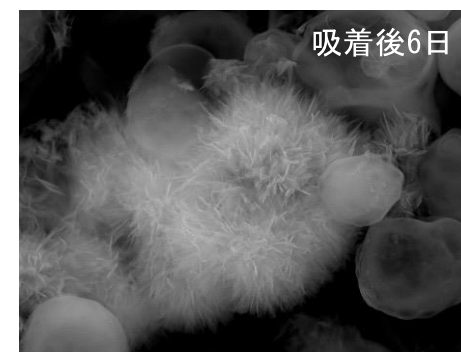
イオン交換樹脂に匹敵

$\text{Cu}^{2+}$ : 1.08 mmol/g dw

## ② レアアースの選択吸着が可能



## ③ 鉱物化、安定回収



イオン交換樹脂等  
にない新たな特徴

Y. Ojima et al. Sci. Rep., 9:225 (2019)

Y. Ojima et al. PLOS ONE, 15(9),e0239774 (2020)

# 研究背景：合成海水からのDy回収

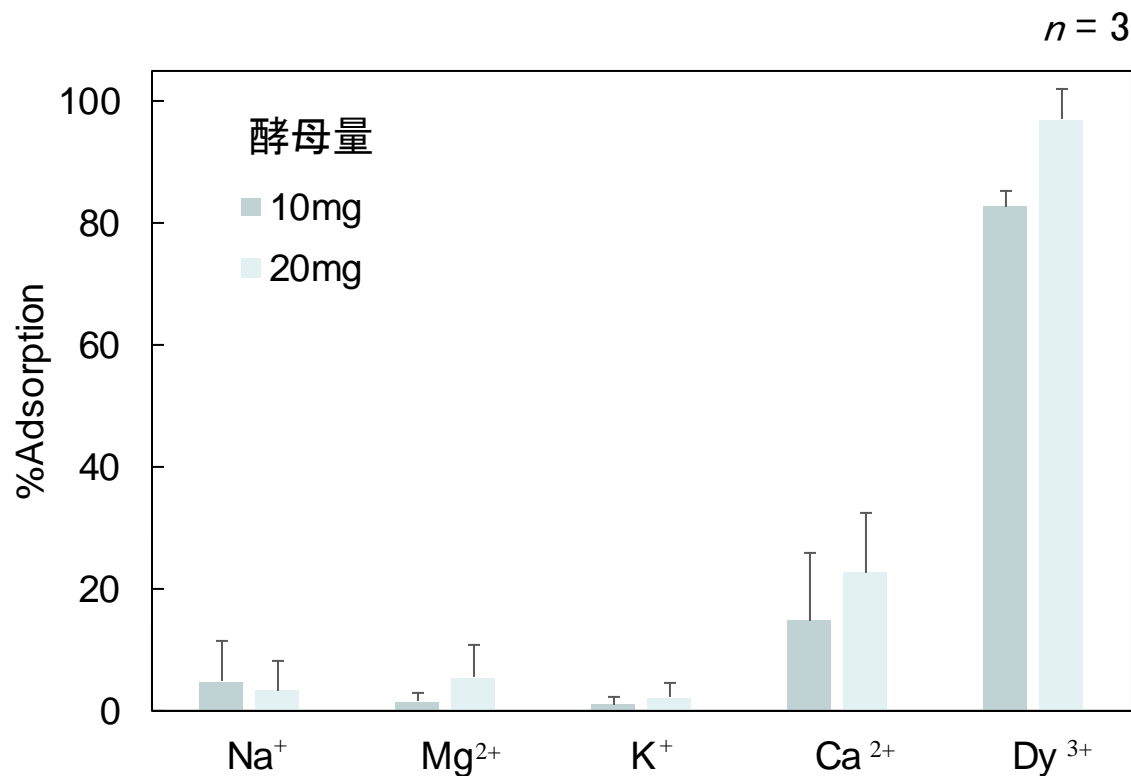
海水での陽イオン濃度 (ppm)

	天然	合成海水*
Na <sup>+</sup>	10760	10419
Mg <sup>2+</sup>	1294	1239
Ca <sup>2+</sup>	412	401
K <sup>+</sup>	399	375

Dy<sup>3+</sup>濃度: 5 ppm

\*Hatanaka, *et al. Nature*

*Communications* **8**, 15670 (2017)



塩酸濃度: 0.01 M  
液量: 4 mL  
吸着時間: 10分  
温度: 30°C



# 研究背景：温泉水からのレアアースの濃縮

## 【玉川温泉(秋田県)】

大噴と呼ばれる湧出口からpH 1.2と日本一の強酸性の温泉水が湧出

温泉水中に、希土類元素の存在が確認されている



<https://www.tamagawaonsen.com>より

## 玉川温泉水における各元素濃度 (ppm)

	Metal elements		Rare earth elements	
	(文献値)	(測定値)	(文献値)	(測定値)
Mg	40.6	36.8	La	0.022
Al	209.5	180.5	Ce	0.056
Ca	127.7	119.1	Gd	0.014
Fe	138.7	80.0	Dy	0.016

## 研究背景：温泉水からのレアアースの濃縮

温泉水液量：50 mL

吸着時間：3時間

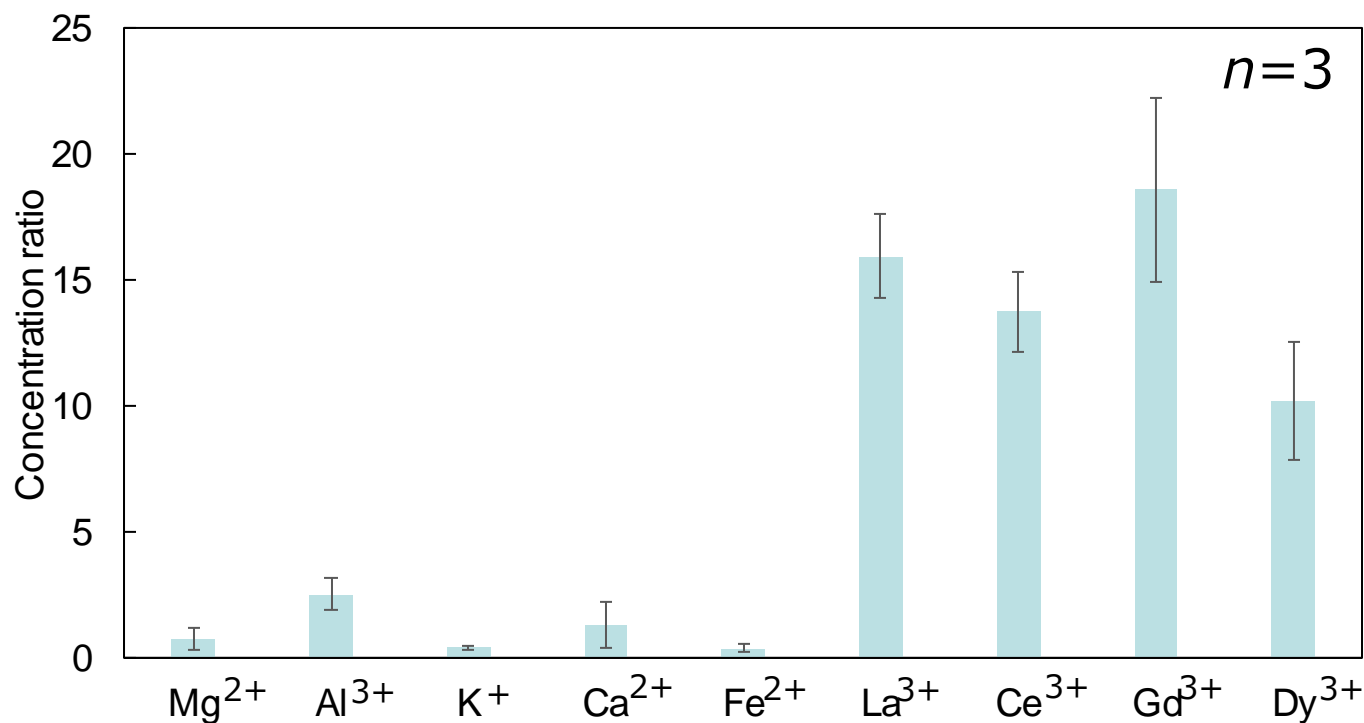
NaOH濃度：0.1 M

酵母量：100 mg

以上の条件で、沈殿を除去後に吸着



1 mLの0.1 M HClで脱離



4種類の希土類元素全てが10倍以上濃縮、ごく微量でも回収可能

## 研究背景： 他の方法との比較

### 本材料と他の金属吸着方法の比較

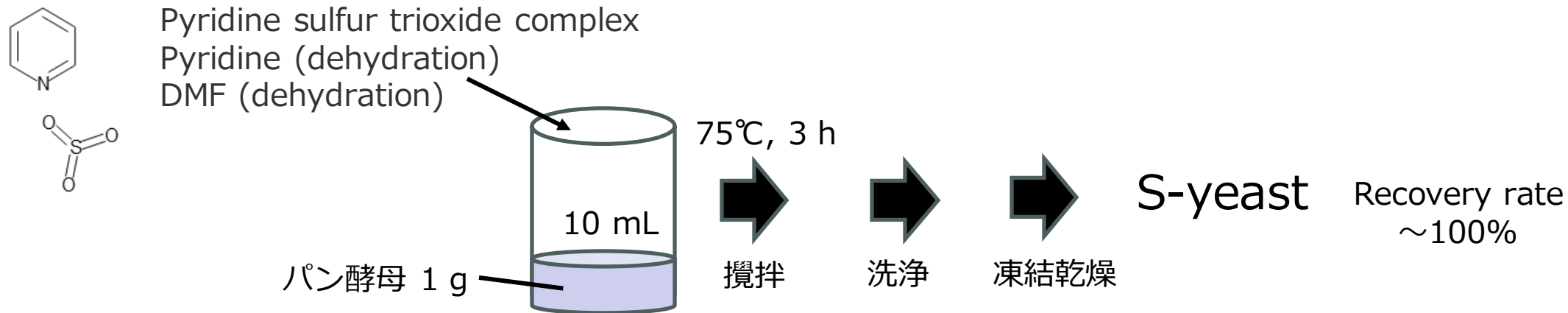
	金属吸着能	金属選択性	材料の安定性	材料の安全性	環境負荷	コスト	安定供給
<b>本材料</b>	○	△	○	◎	◎	◎	◎
イオン交換樹脂	○	△	◎	△	△	△	◎
細胞機能	×	△	×	○	○	○	○
細胞抽出物	△	△	×	◎	○	△	○
バイオマス	△	×	△	◎	◎	◎	○

修飾方法を変えて化学修飾酵母の更なる改善ができないか？

# 硫酸化酵母 (S-yeast)の調製 (1)



## (1) SO<sub>3</sub>-Py法

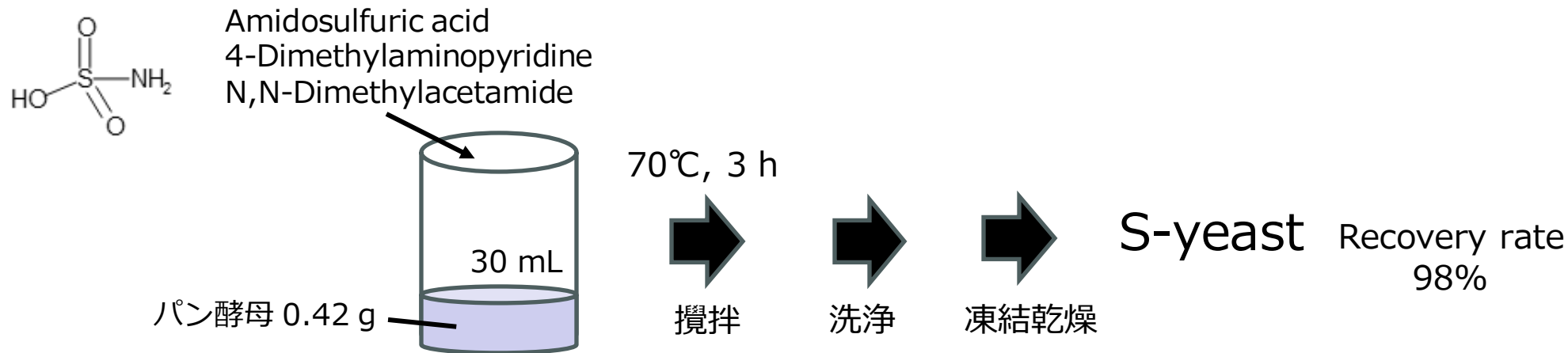


## 硫酸化の評価

	S 含量 (%)	Zeta-電位 (mV)
Sulfation (+)	10.3	- 26.0 ± 1.5
Sulfation (-)	0.36	- 13.5 ± 1.9

# S-yeastの調製 (2)

(2) アミド硫酸法 Xua Y. et al., International Journal of Biological Macromolecules, 109, 1344 (2018)



## 硫酸化の評価

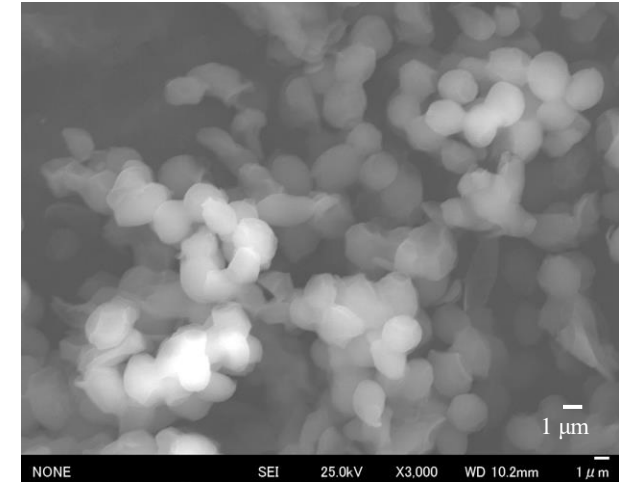
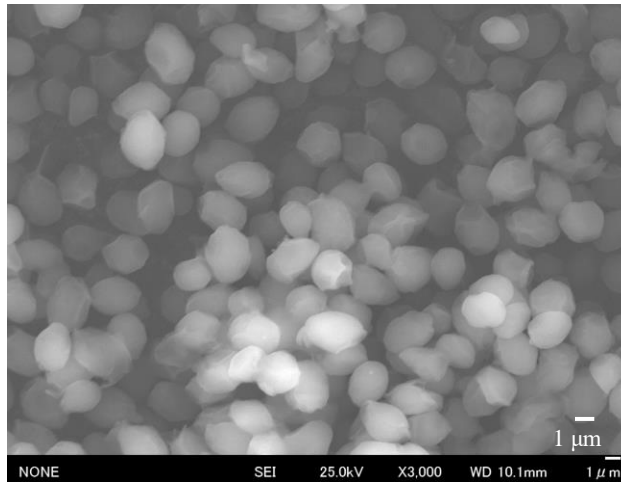
	S 含量 (%)	Zeta-電位 (mV)
Sulfation (+)	12.4	-35.1±1.1
Sulfation (-)	0.32	-19.9+1.3

# S-yeastの表面観察

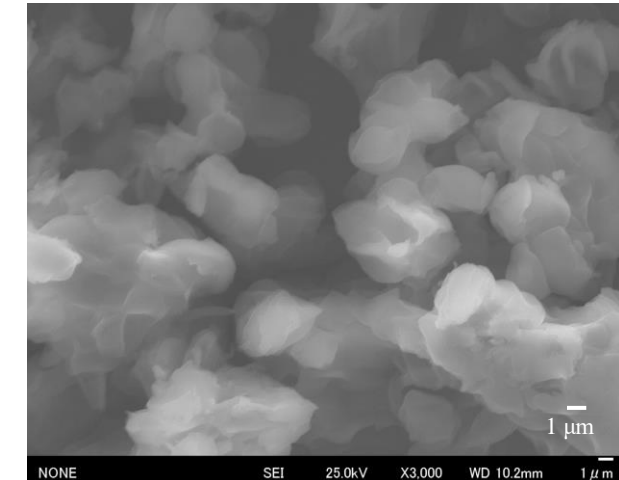
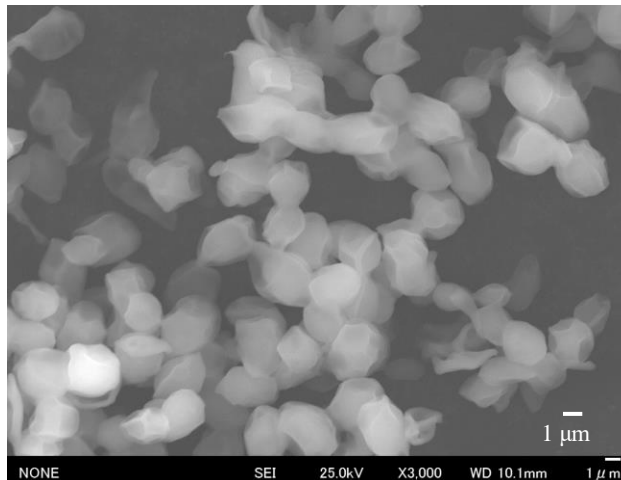
SO<sub>3</sub>-Py法

アミド硫酸法

Sulfation (-)



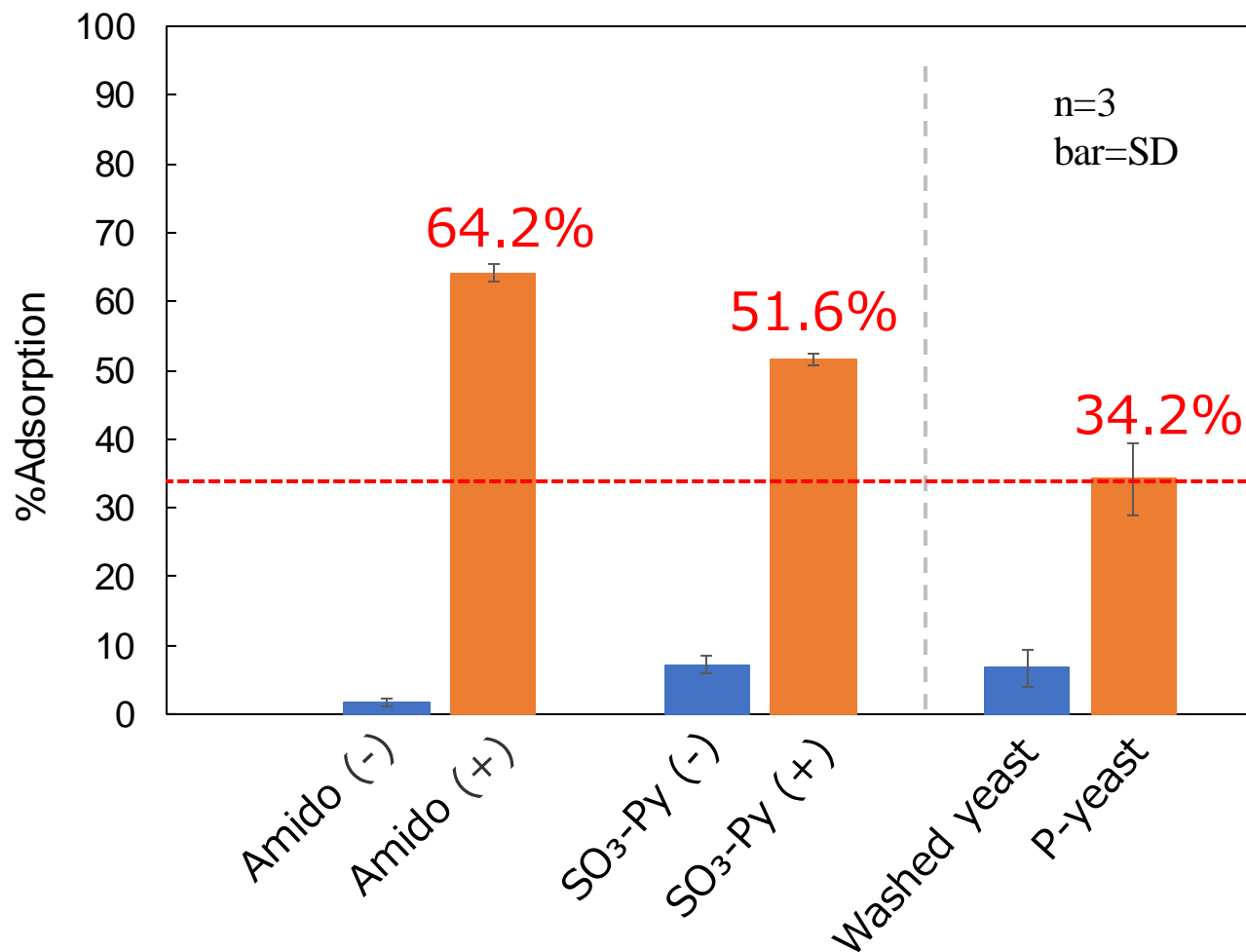
Sulfation (+)



# S-yeastの銅イオン吸着

[吸着条件]

酵母：2 mg, 溶液量：4 mL, 銅イオン濃度：100 ppm

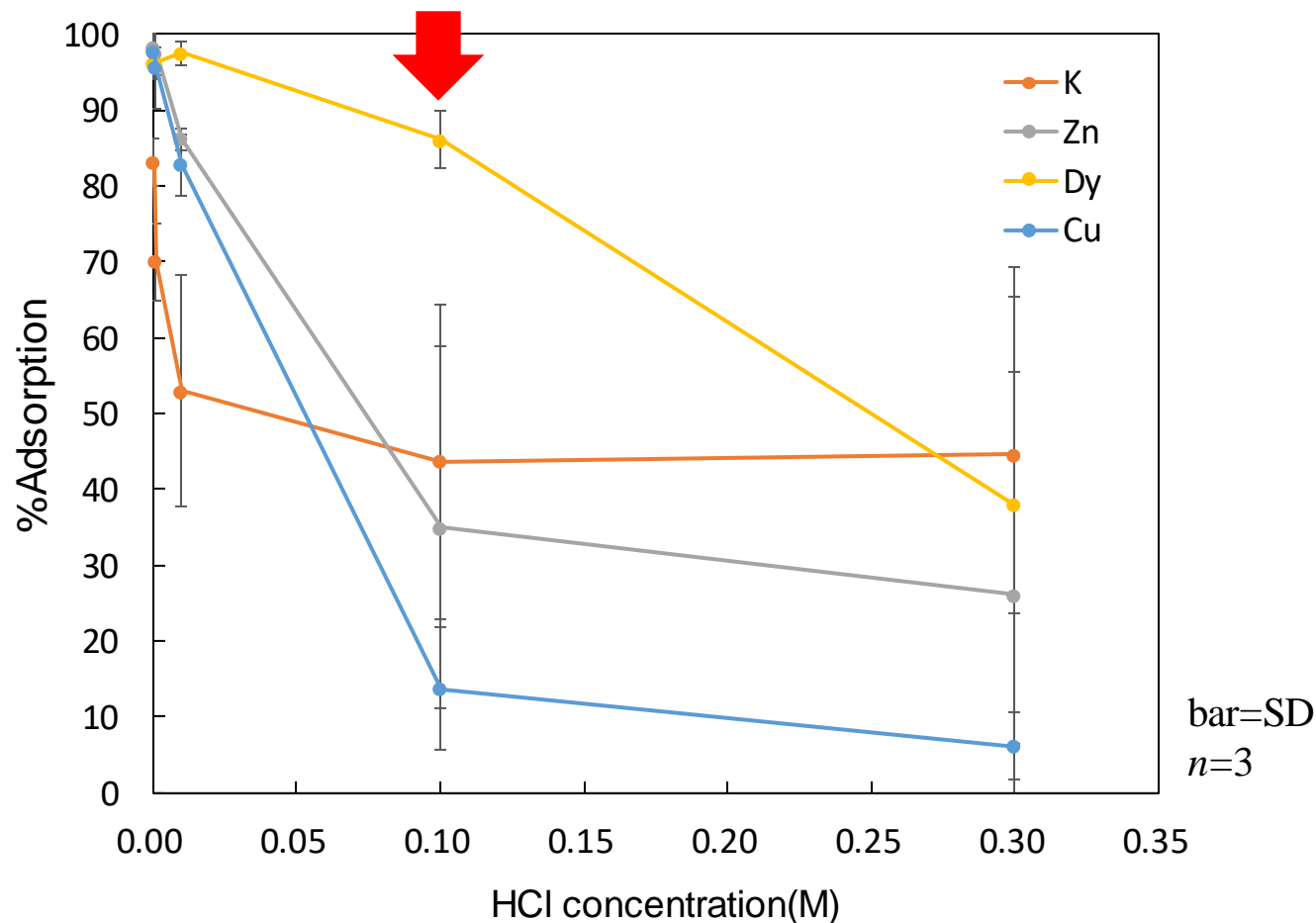


P-yeastより高い吸着能を持つことが分かった

# HClの添加がS-yeastの金属イオン吸着に与える影響

[吸着条件]

酵母 (SO<sub>3</sub>-Py) : 2 mg, 溶液量: 10 mL, 金属濃度: 10 ppm,



0.1MのHCl添加がDyの選択的吸着に適している



## 従来技術とその問題点

競合する金属イオン吸着剤として、イオン交換樹脂が多く使用されている。生物材料由来の吸着剤は検討段階のものがほとんどで使用には至っていない。

イオン交換樹脂にも、コスト、環境負荷、金属イオンの選択性という点で課題があり、新たな材料、金属回収・除去方法が求められている。

## 新技術の特徴・従来技術との比較

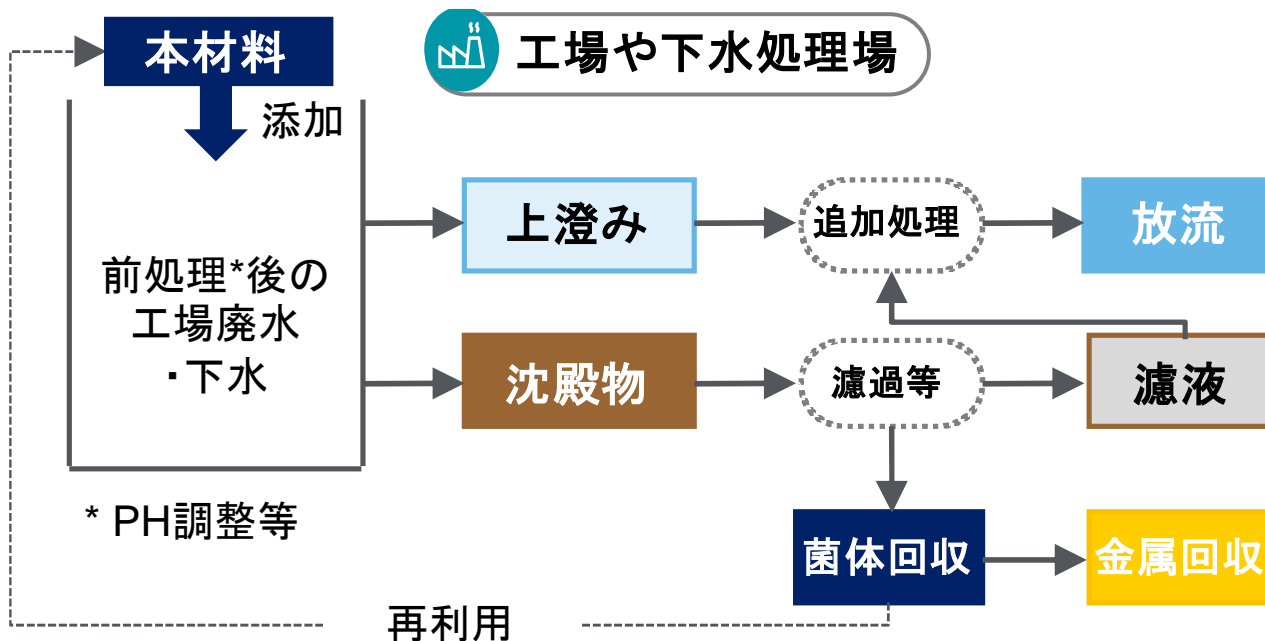
- 生物材料の問題点であった低い吸着能をイオン交換樹脂レベルにまで改良することに成功した。
- 先行して開発したP-yeastでも吸着力はイオン交換樹脂レベルにあったが、S-yeastはさらにその性能アップに成功した。実用化に一步近づいたと言える。

# 想定される用途

- 鉱山、工場排水などからの有害重金属の除去、都市鉱山やレアアースなどを含む環境水からの有害金属の回収

## 重金属処理工程のイメージ

レアアース回収や  
有害金属の除去の例



## 実用化に向けた課題

- 現在、イオン交換樹脂レベルにまで吸着能を高めることに成功。しかし、金属イオンに対する選択性に関しては詳細な検討は行えていない。
- また、環境中で実地試験を行う必要があるが、材料作製においてgスケールでしかできておらず、数百g程度の作製を行う必要がある。
- 今後、硫酸化反応を精査することによりさらに吸着能が改善できる可能性もある。

## 企業への期待

- 金属イオンの選択性の検討や吸着能の改善は引き続き当研究室で行えると考えている。
- S-yeastの大量生産について、酵母を材料に簡単な化学修飾でき、将来その製造を希望するような企業があれば共同研究を希望。
- また試験用に廃液を提供頂ける企業や、環境中での試験について現場を提供いただける企業があれば共同研究を希望。

## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 硫酸化酵母及びその製造方法
- 出願番号 : 特願2023-114666
- 出願人 : 公立大学法人大阪
- 発明者 : 東 雅之、尾島 由紘、山田 ころろ

## 産学連携の経歴

- 2021年-2022年  
JST 研究成果展開事業社会還元加速プログラム  
(SCORE拠点都市環境整備型) 採択

## お問い合わせ先

大阪公立大学

URAセンター 関山 泰司

T E L 06-6605-3550

F A X 06-6605-2058

e-mail [gr-knky-chizai@omu.ac.jp](mailto:gr-knky-chizai@omu.ac.jp)