



第15回原子力機構報告会

地下研究施設を活用して  
明らかにされた地下微生物生態系  
— 暗黒の世界に生きる微生物たち —

令和2年11月17日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター

基盤技術研究開発部 核種移行研究グループ

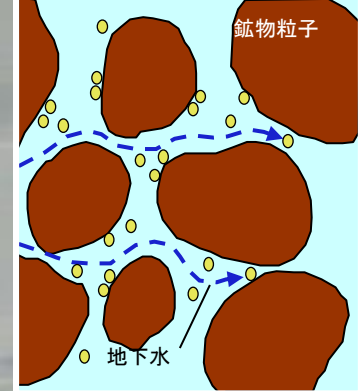
天野 由記

## 地下の特徴：

- ・ 太陽光がない
- ・ 分子状酸素がない
- ・ 高圧
- ・ 空隙が小さい
- ・ 貧栄養

## 過酷な環境

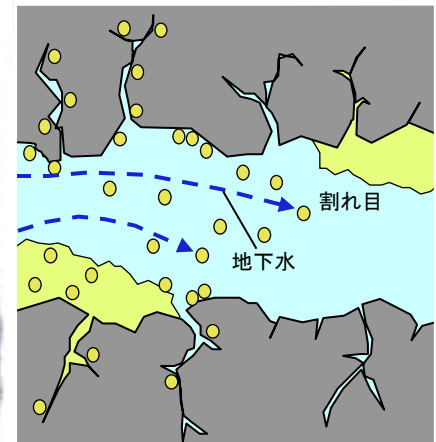
堆積岩



岩石の空隙率：30-60% (Kurikami et al., 2008)

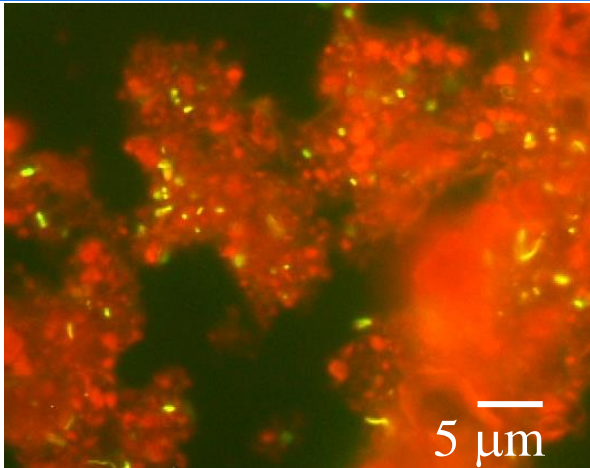
堆積岩：砂や泥などが堆積して固まった岩石

花崗岩

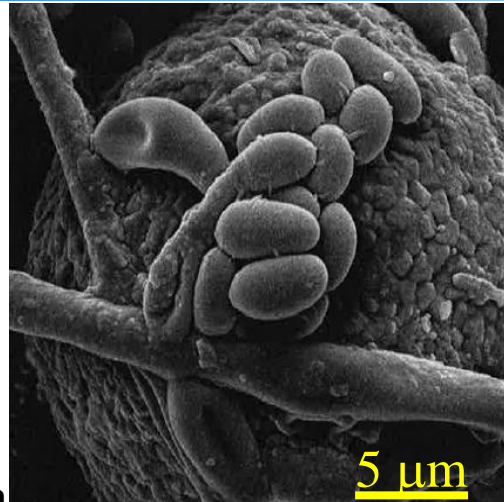


岩石の空隙率：～5.63% (石橋ほか, 2016)

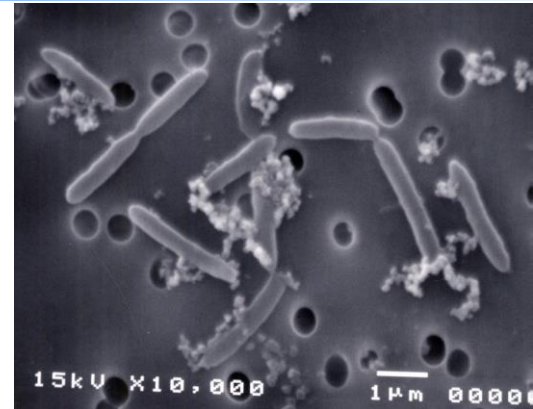
花崗岩：マグマが冷えて固まった岩石 1



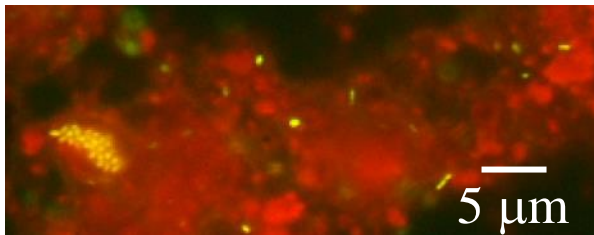
幌延；堆積岩地下水；深度210 m



フランボイダルパイライト  
(黄鉄鉱) に群がる微生物



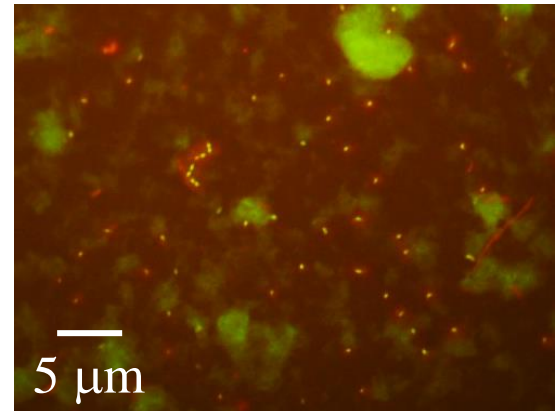
ウランを食べる硫酸還元菌



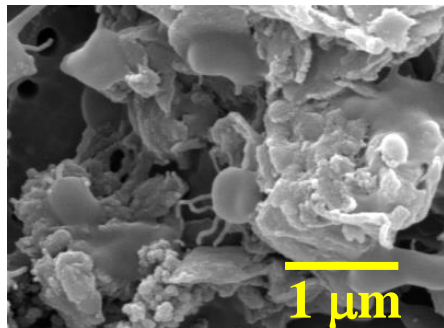
幌延；堆積岩地下水；深度210 m



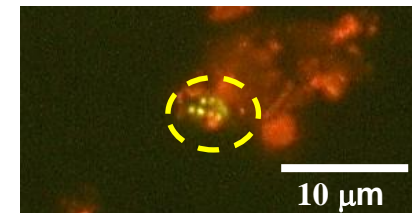
鉄の粒子で覆われた  
微生物



瑞浪；花崗岩地下水；深度500 m

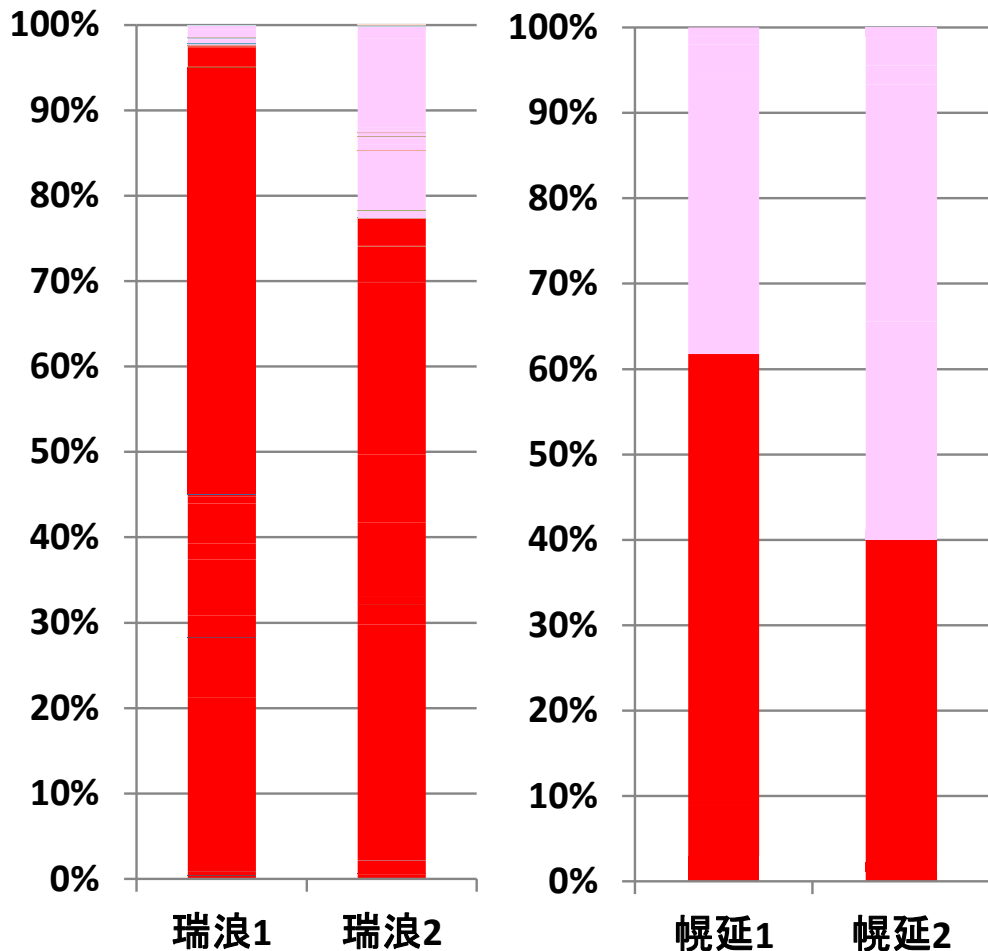


触手を伸ばす細胞



瑞浪：花崗岩割れ目の鉱物の隙間  
で発見された微生物

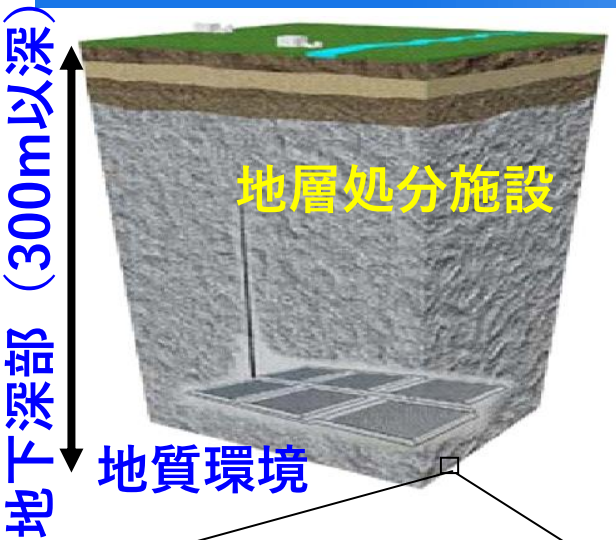
## 16S rRNA遺伝子解析に基づく未知微生物群の割合



地下環境中の  
最大で約95%の  
微生物は  
代謝機能の未解明  
な未知微生物

未知微生物群：  
未だかつて培養に成功していない  
代謝機能の未解明な微生物群のこと

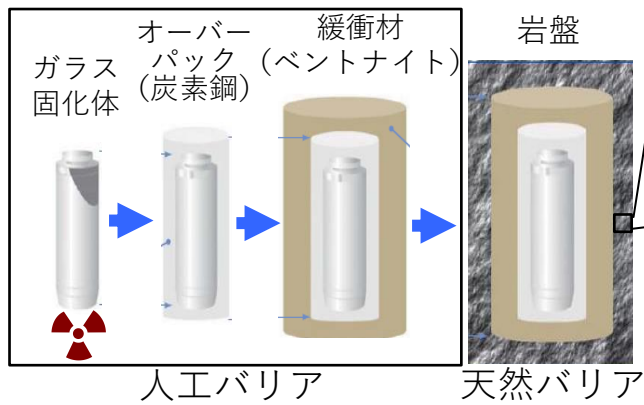
 既知微生物  
 未知微生物



放射性廃棄物の地層処分システムにおいて  
地下微生物が核種移行に及ぼす影響の概念図



多重バリアシステム



評価すべき微生物現象

- 金属容器の腐食
- 微生物コロイドや微生物由来ナノ物質の核種収着・取込
- バイオフィルム形成による岩石の核種収着・拡散能力の変化
- 微生物活性に伴う水質の変化 (pH, 酸化還元状態, 地下水組成)
- 生化学的作用 (ガス, 酸生成, 有機分解物の生成)

地下環境の重要な条件

- ・ 還元的
- ・ 地下水の動きが遅い
- ・ 放射性元素が動きにくい

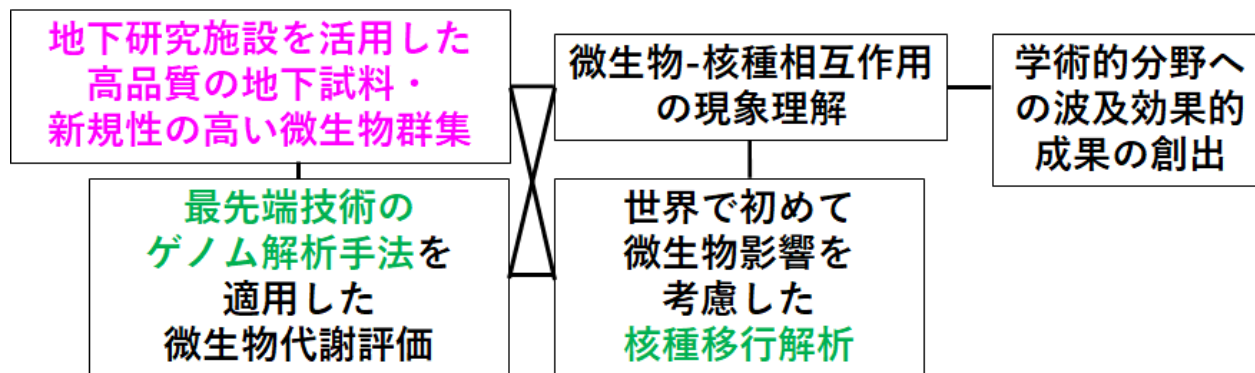
## 【課題】

- 地下環境に存在する **未知微生物の代謝機能や放射性元素の移行への影響** を定量的に評価する手法が開発されていない。
- 微生物コロイド・バイオフィルム特性やそれらの元素との相互作用等、定量的評価に必要な地下微生物データが不足している。

## 【解決策】

- 従来の培養法に依存しない **ゲノム解析手法** を適用し、未知微生物を含むすべての微生物の代謝機能を網羅的に評価。
- 地下研究施設を活用した、陸上由来物質による汚染のない **高品質** な地下試料を用いたデータ取得

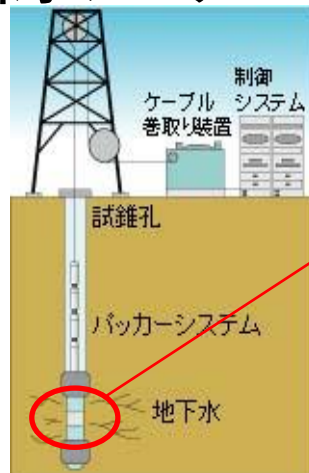
ゲノム：生物に含まれている、その生物をつくるのに必要なすべての遺伝情報  
 ゲノム解析：生物のゲノムを構成する遺伝情報を総合的に解析すること



## 陸上掘削現場の風景



## 採水システムの例



## ボーリングコア写真



### 微生物分析

- ・微生物量
- ・微生物種
- ・微生物代謝など

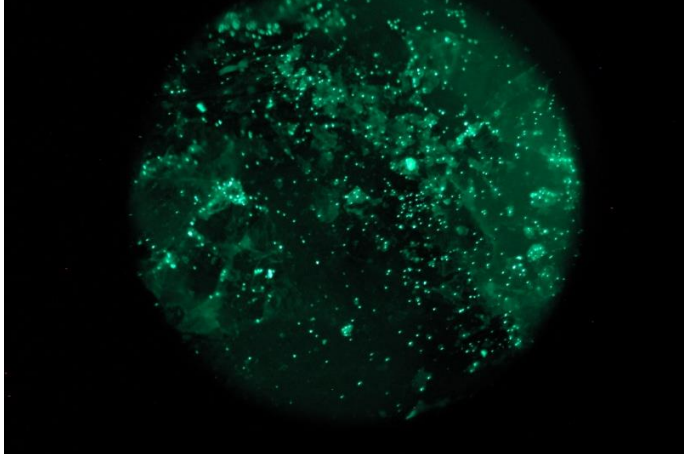
### 問題点

- ・掘削による陸上由来物質の汚染の影響
- ・採取可能な試料量の制限

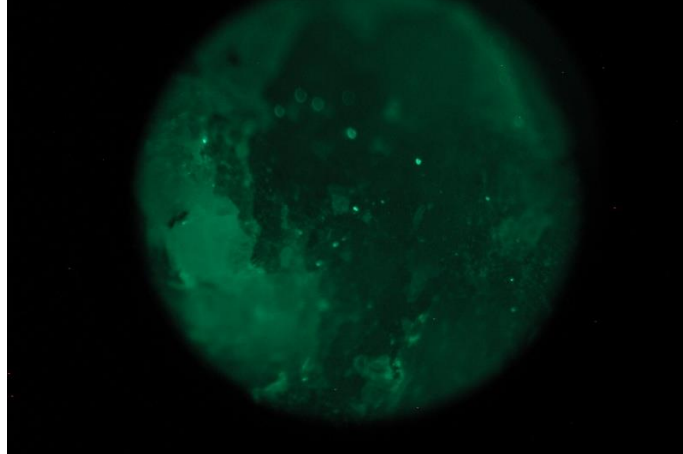
## 蛍光ビーズを指標にした岩石コア試料に対する汚染

天野 (2005) JNC技術報告書

### 開口割れ目断面

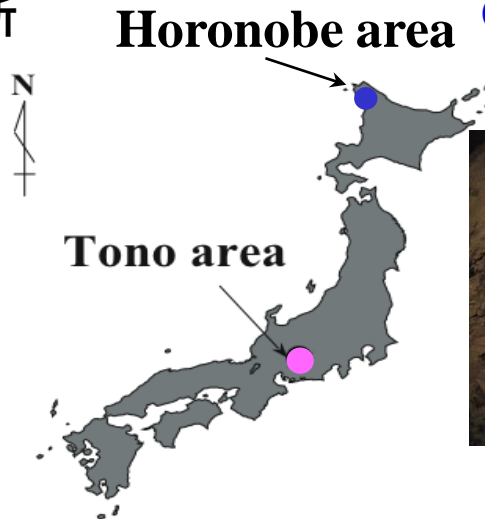


### 健岩部



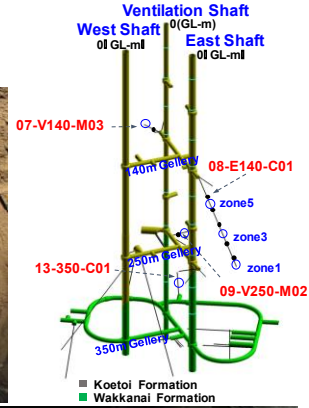
● 瑞浪超深地層研究所

● 東濃ウラン鉱山



● 幌延深地層研究センター

- ・ 堆積岩
- ・ 海水系地下水



- ・ 陸上由来物の汚染を極力排除した高品質試料の取得
- ・ 原位置の環境条件を保持した状態での試料採取
- ・ 分析試料量の増加

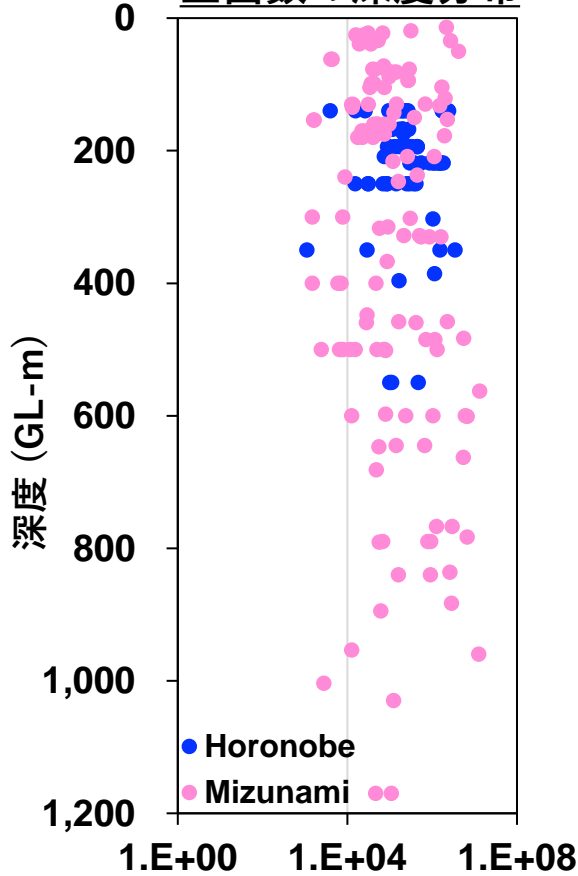


耐圧容器による地下水採取・原位置での大容量地下水濾過





## 全菌数の深度分布

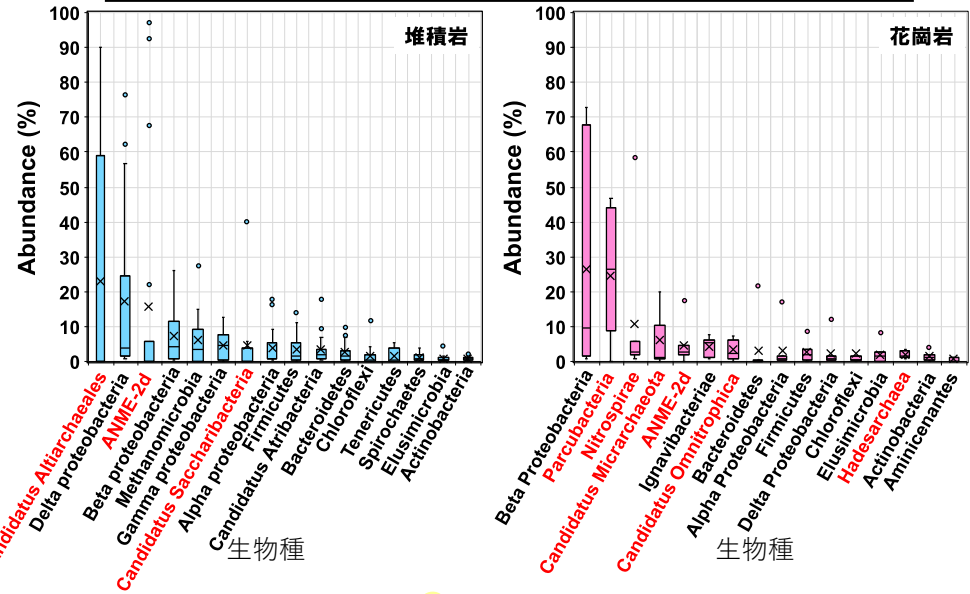


全菌数(cells/ml)

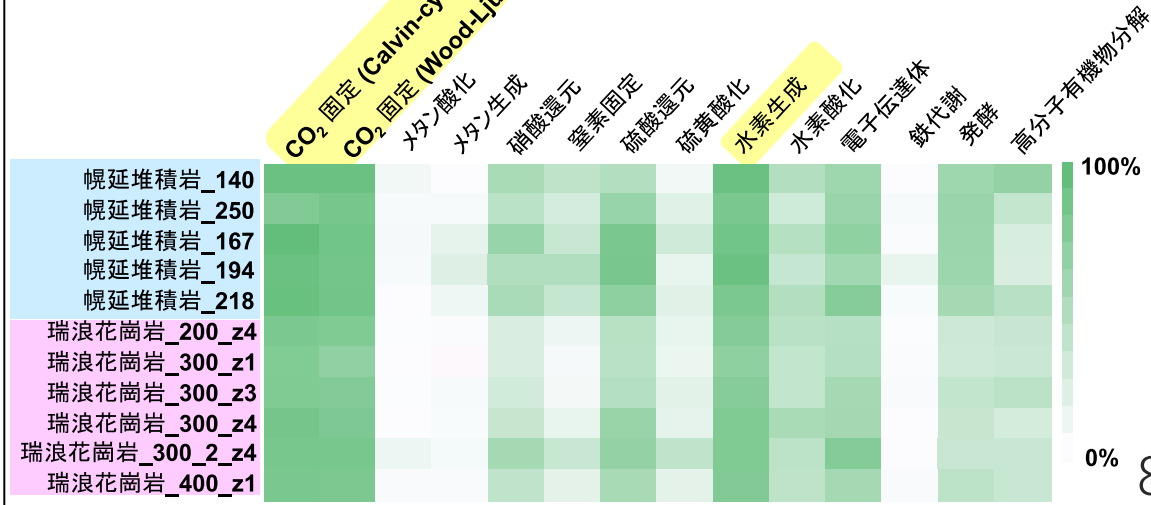
全菌数は陸上および地下研究施設内  
ボーリング調査を合わせたデータを示す

- 深度1000m程度までは高い菌密度
- 優占種の多くは未知微生物
- 構成種は異なるが、代謝機能は類似

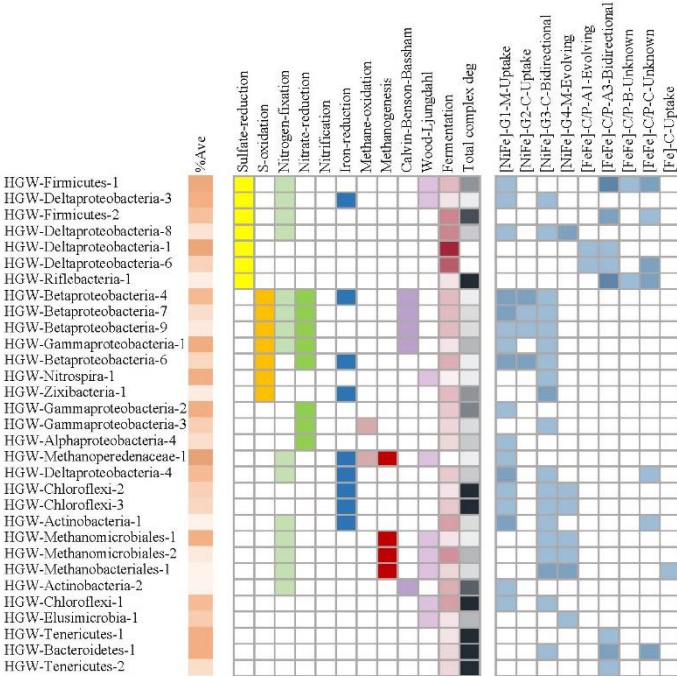
## 各サイトにおける微生物群集構成種の違い



## 各サイトにおける微生物代謝機能の違い



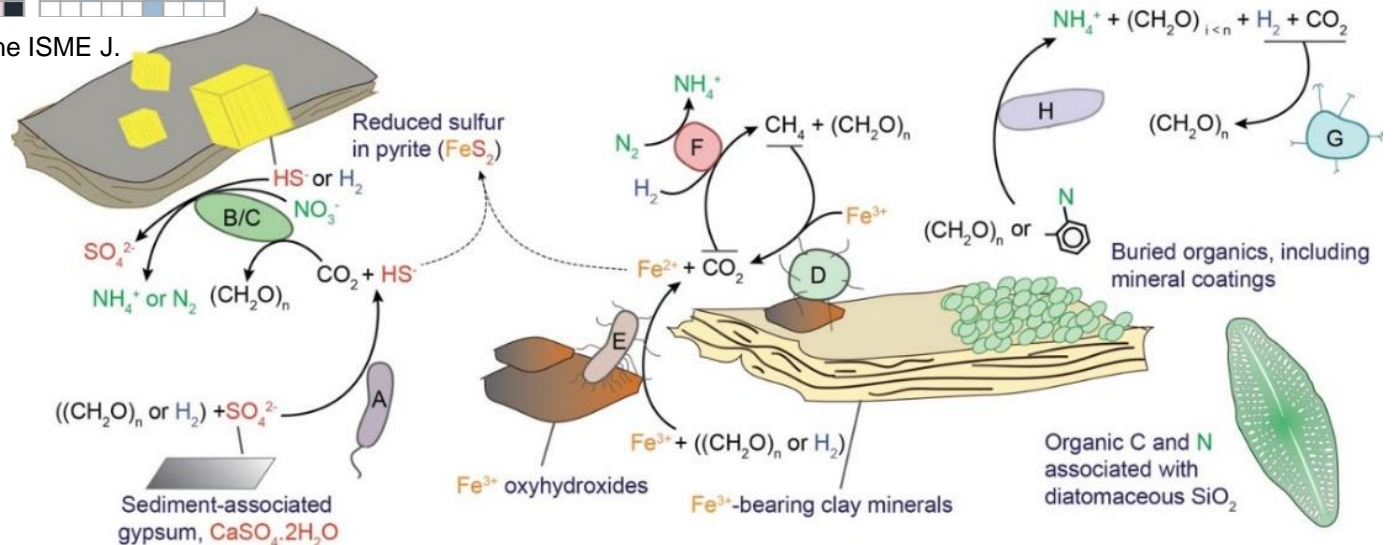
## 幌延堆積岩地下環境中の微生物代謝の推定



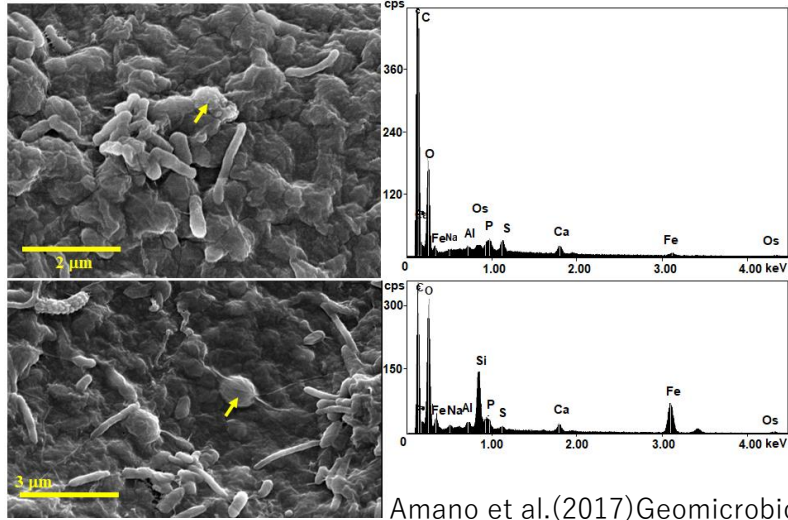
- 大部分の微生物種が水素関連の代謝機能を有する。
- 優占種である嫌氣的メタン酸化古細菌は鉄還元代謝を行う。
- 幌延地下微生物群集の代謝機能について概略を推定し、物質循環モデルを構築。

## 幌延堆積岩地下環境中の微生物代謝と物質循環モデルの構築

Herndorf et al. (2017) The ISME J.

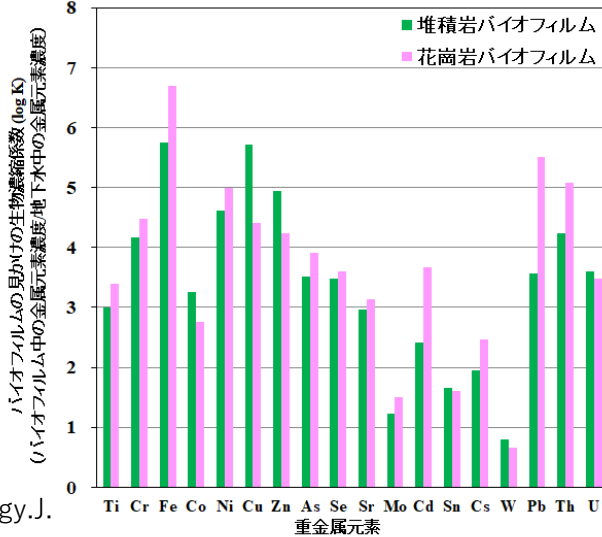


## 地下環境下のバイオフィーム観察例

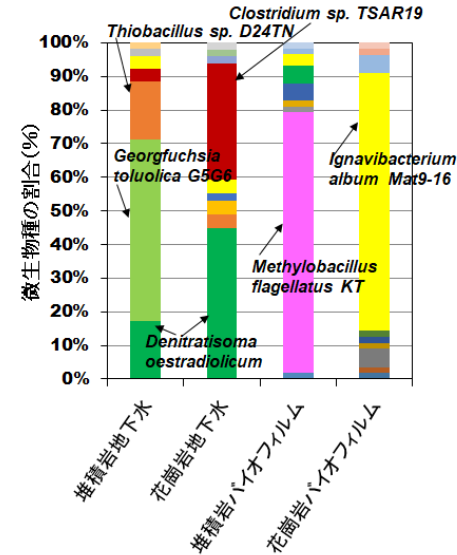


Amano et al. (2017) Geomicrobiology J.

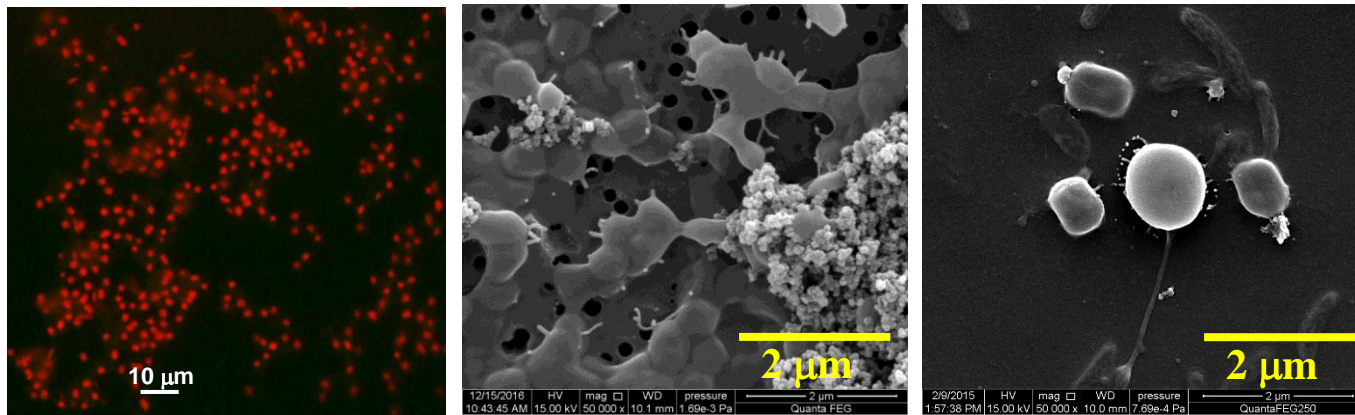
## バイオフィームへの金属濃集



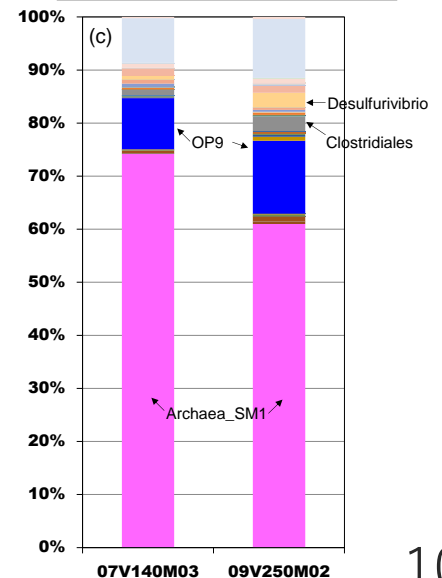
## 群集組成 (瑞浪)



## 幌延：堆積岩環境下のバイオフィーム観察例 未知微生物群に属するSM1種

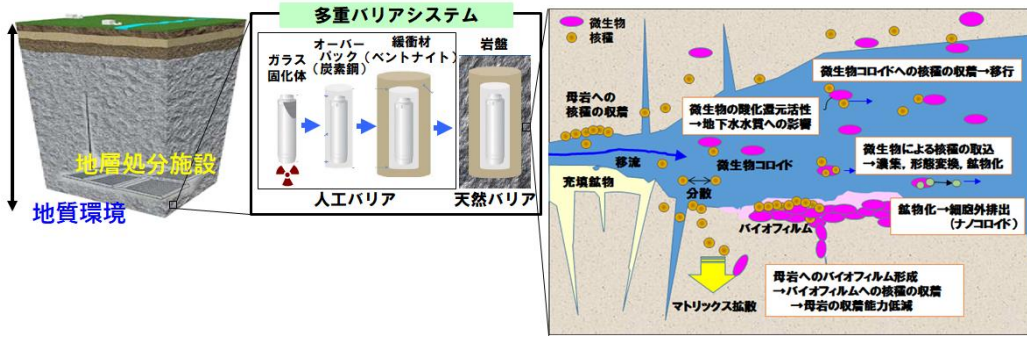


## 群集組成 (幌延)



- 地下環境下においてもバイオフィームは形成されている。
- バイオフィームは重金属など様々な元素を濃集する。
- バイオフィームを構成する微生物群集の多様性は極めて低い。

## 地層処分システム概念図

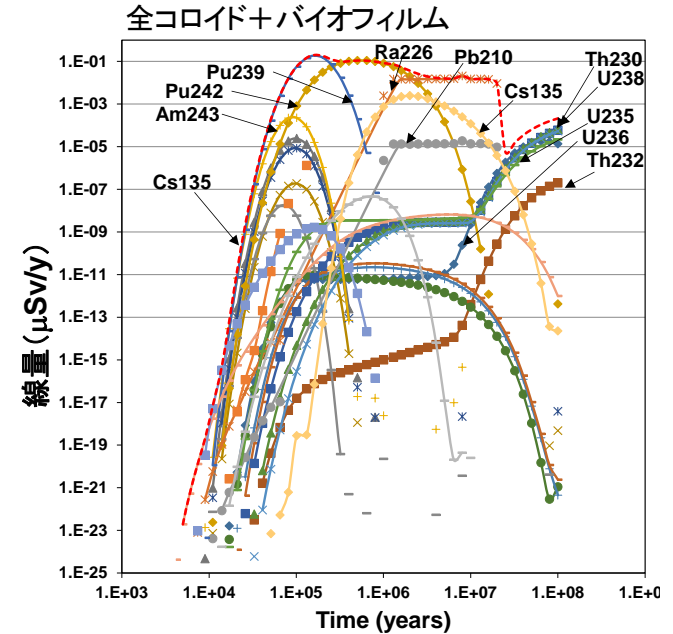
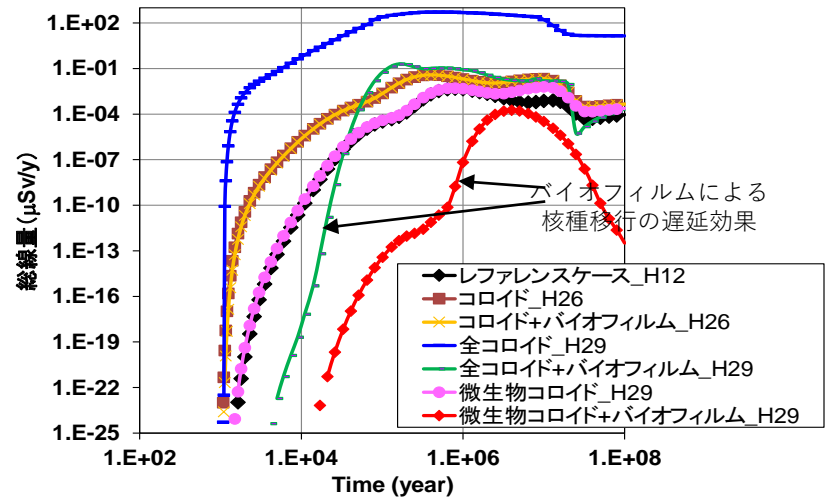


- 地層処分システムの長期的安全性評価のために、既存の解析コードを改良し、**微生物影響を考慮した定量的な放射性元素の移行評価手法を開発**。
- 地下研究施設にて取得した地下環境データを用いた放射性元素の微生物影響解析を、世界で初めて実施。

地下研究施設を活用して拡充したデータ：  
**原位置環境を対象**

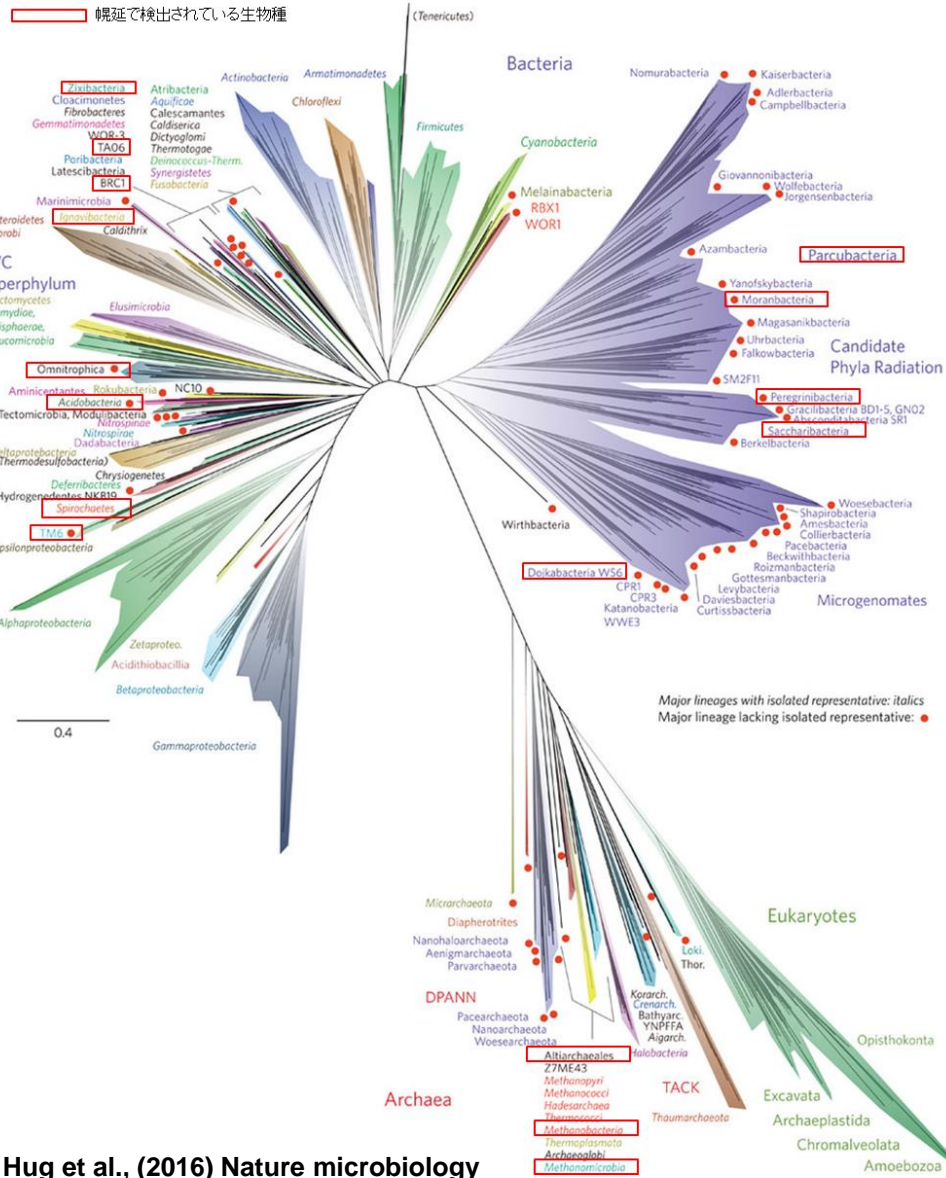
- ・全コロイド濃度
- ・微生物コロイド濃度
- ・バイオフィーム密度
- ・バイオフィーム厚み
- ・全コロイド分配係数
- ・微生物コロイド分配係数
- ・バイオフィーム分配係数
- ・微生物代謝機能特性

## GoldSimを用いた各解析ケースの総線量の比較



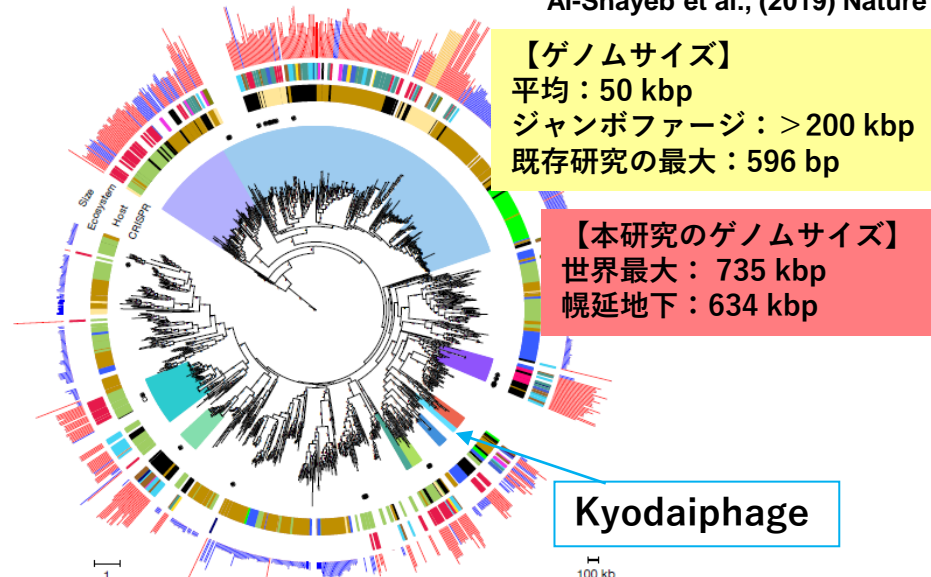
## 地下研究施設を活用した最先端の科学的知見への貢献

### 未知微生物を含む全生物の系統樹の再構築



### 世界の様々な環境から採取した巨大ファージの系統学的解析

Al-Shayeb et al., (2019) Nature



バクテリオファージ（ファージ）：  
バクテリア（細菌）に感染するウイルス

- 幌延地下微生物を含む地球上の様々な環境から取得したゲノム情報を用いて、全生命の系統樹を再構築。
- 真核生物や古細菌と比較して、細菌が非常に多様であること、未知微生物群の重要性を示唆。
- 幌延地下から、超巨大なゲノムサイズのバクテリオファージを発見。

## 本研究成果のまとめ

- 地下研究施設を活用することにより、微生物量や代謝機能について高精度のデータを取得し、環境における微生物生態系の解明につながる情報を取得できた。
- 高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおける、定量的な微生物影響評価手法を開発した。

## 本成果の波及影響

- わが国の地下研究施設で得られたデータも活用した全生物を対象とした系統樹の再構築など、地層処分分野以外の研究領域への大きなインパクトのある先端科学的成果を創出。

## 将来展望

- 地層処分システムへの微生物影響評価だけでなく、抗生物質などの医薬品開発、環境汚染浄化、CO<sub>2</sub>地中貯留、水素エネルギー開発など世の中に役に立つ有用微生物の探査およびこれらの実証試験のための地下研究施設の活用。