蔵前バイオエネルギー公開講座「水と環境」第10回講座 2025年11月21日

海洋環境における微生物の機能を活用したインフラの維持・改善に向けた取り組み

東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門
牧田寛子

SUGAR-project, X-STAR, JAMSTEC

牧田寛子

東京海洋大学 海洋資源環境学部 海洋環境科学科

専門：微生物生態学、生物工学、地球科学、宇宙生物学、船舶海洋工学

研究内容：

無機物をエネルギー源とする微生物

鉄に関連した微生物

・鉄利用微生物の生理・生態の解明

硫黄に関連した微生物

・深海底より単離した新規な*Epsilonproteobacteria*の性状解析

・硫黄不均化菌による硫黄同位体分別効果の解明

共生微生物

・貝や甲殻類の共生微生物生態系

<u>**インフラに関連した微生物**</u>

・インフラ材料への微生物の影響調査と微生物による劣化防止や再生など

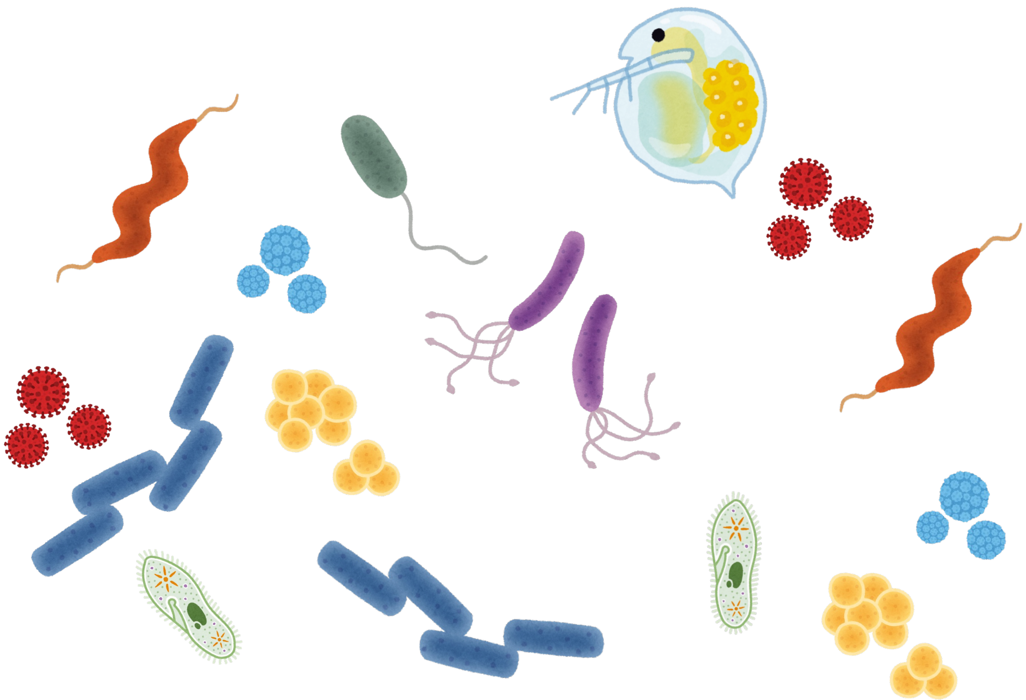
・道路舗装材に関与する微生物の調査

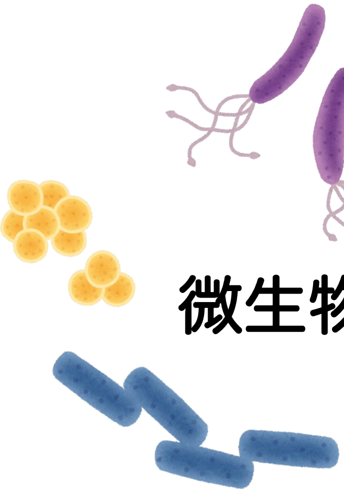
宇宙生物学的な研究

・水惑星での生命圏に関する研究

微生物とは。。

微小な生物全体の総称。
肉眼で見ることができない生物は、すべて微生物と呼ばれる。





微生物生態学

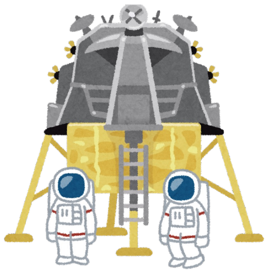
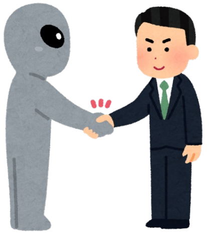
どのようなところに、どのような微生物が？
どのくらい？
そこで何をしているか？
微生物と環境の相互作用を明らかにする

生物工学

生物の機能を実社会に利用する
生物を工学的見地から研究し応用する技術
医薬品、食品、環境浄化など

宇宙生物学

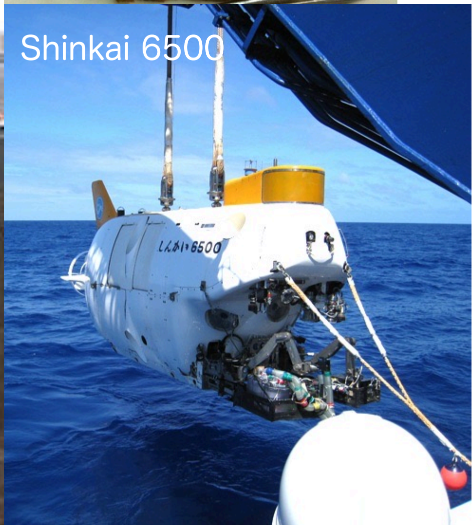
「宇宙と生命」、生物生存の実態や生物現象の普遍的な仕組みや生命の起源を明らかにするため、宇宙物理学、天文学、鉱物学、海洋学、化学、生物学、情報学など、さまざまな専門分野からアプローチしている学問

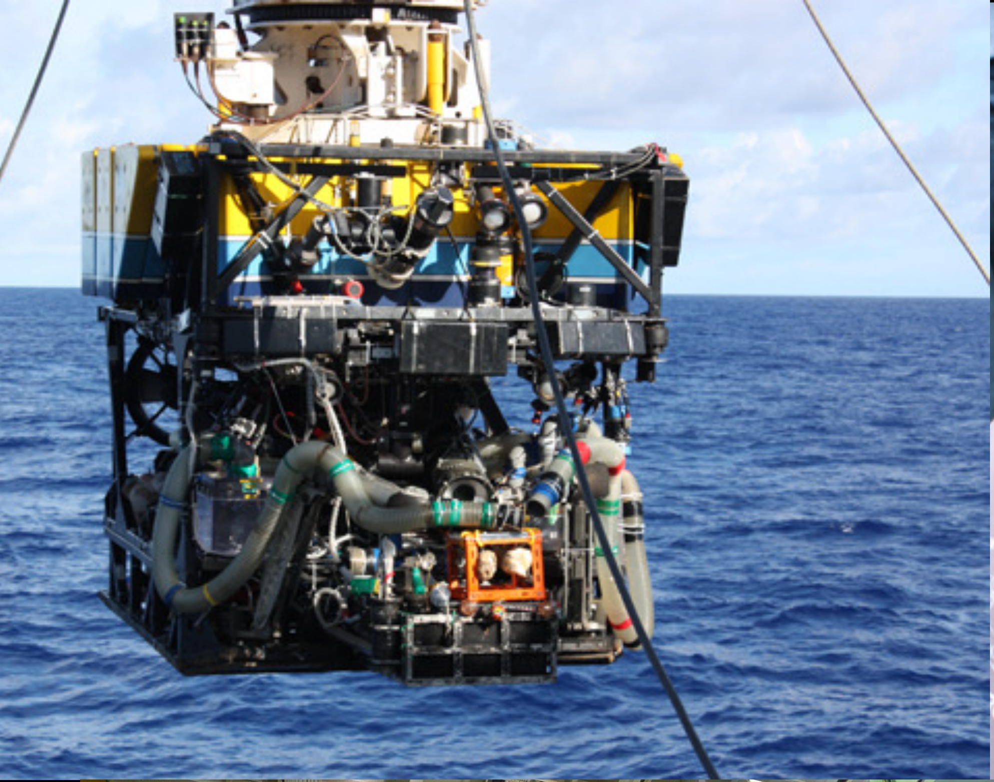



海洋研究開発機構(JAMSTEC)
Yokosuka HQ

SUGAR project

Microbiology＋Geochemistry in Extreme environments





Oceanographic Institution

2018.10.01~
東京海洋大学
Tokyo University of marine science and technology (TUMSAT)

Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT)

Tokyo University of Fisheries

Shinagawa Campus

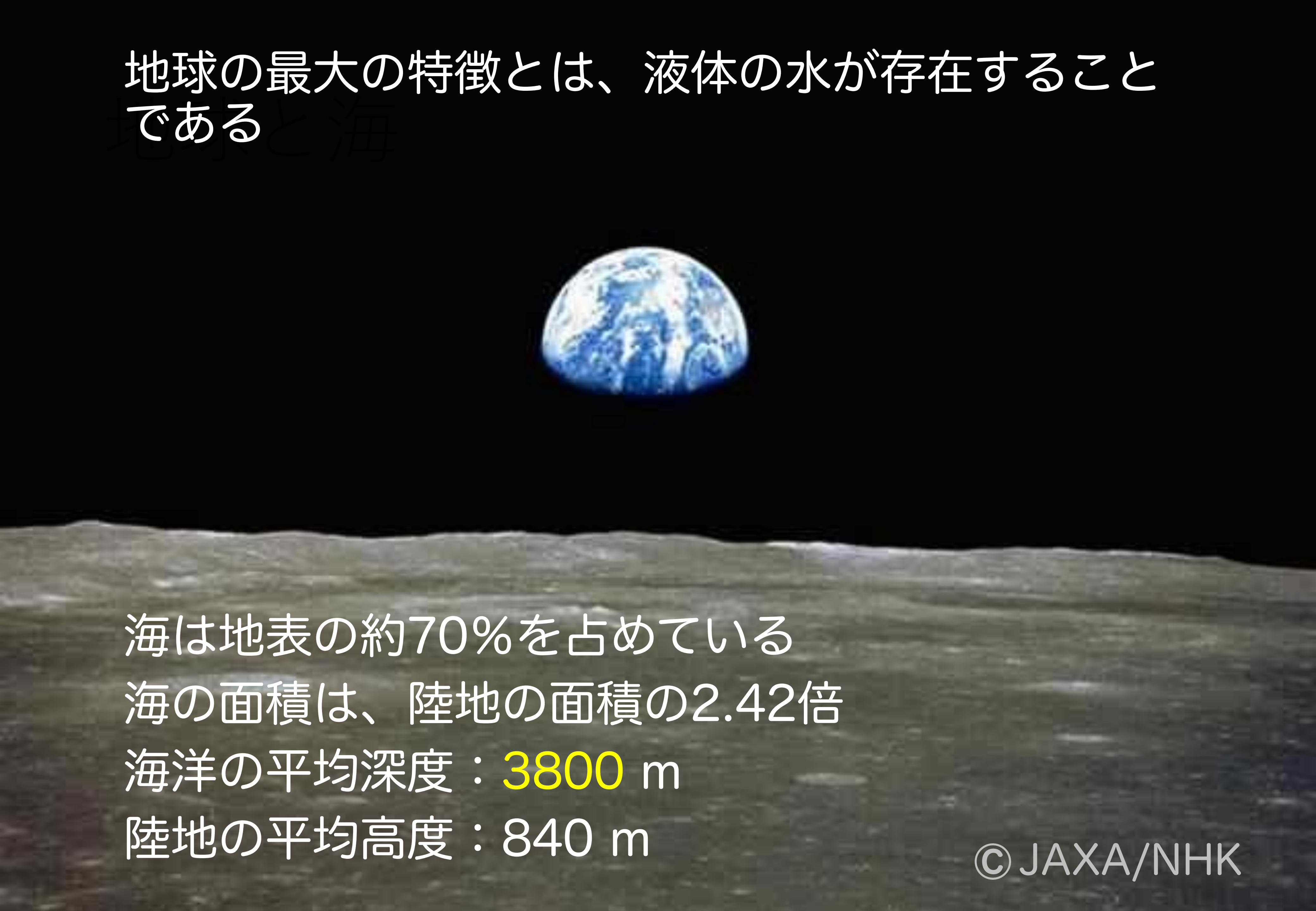
Since 2003

Tokyo University of Mercantile Marine

Etchujima Campus

地球と海

地球の最大の特徴とは、液体の水が存在すること
である



海は地表の約70％を占めている

海の面積は、陸地の面積の2.42倍

海洋の平均深度：3800 m

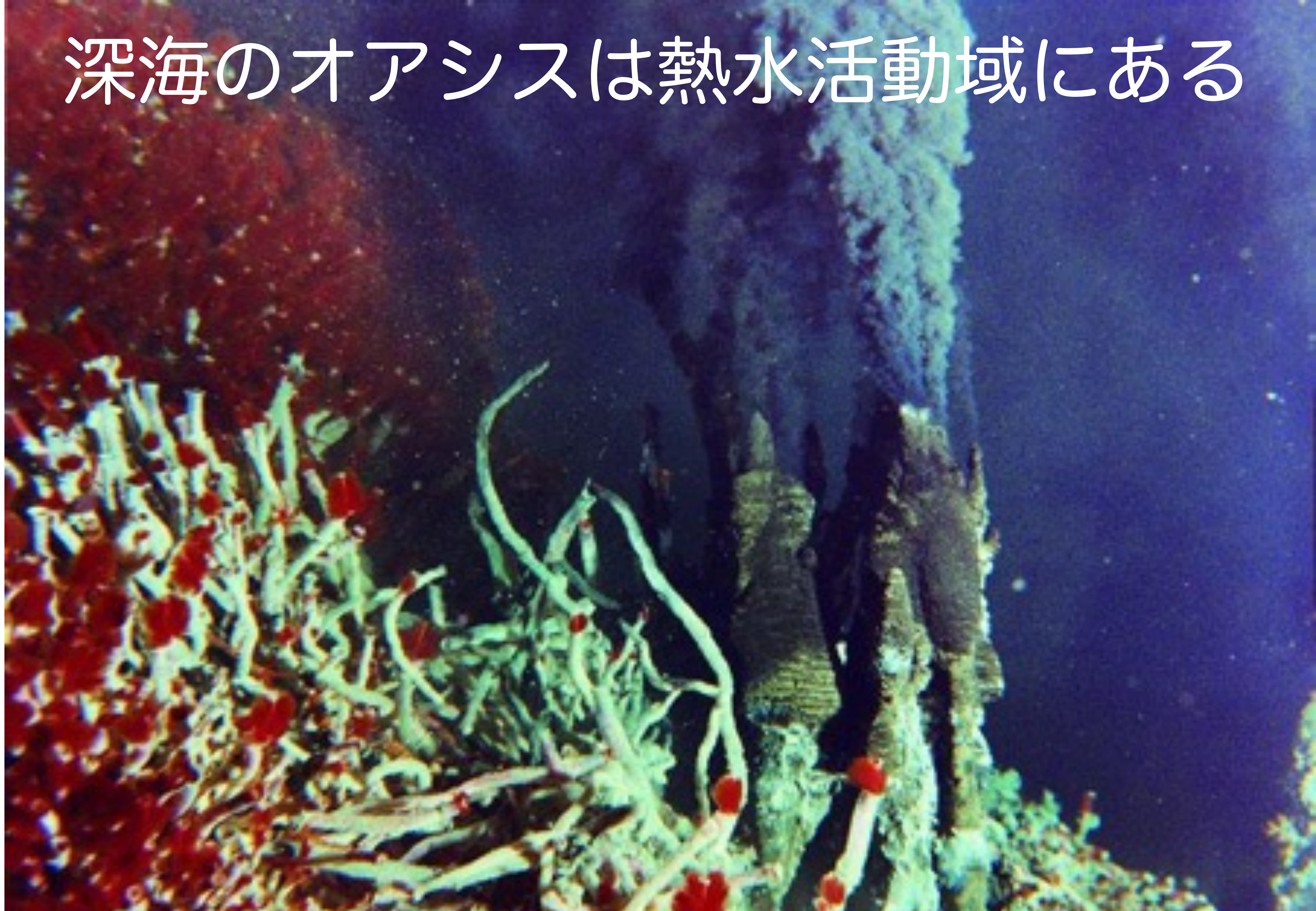
陸地の平均高度：840 m

© JAXA/NHK

深海の環境とは

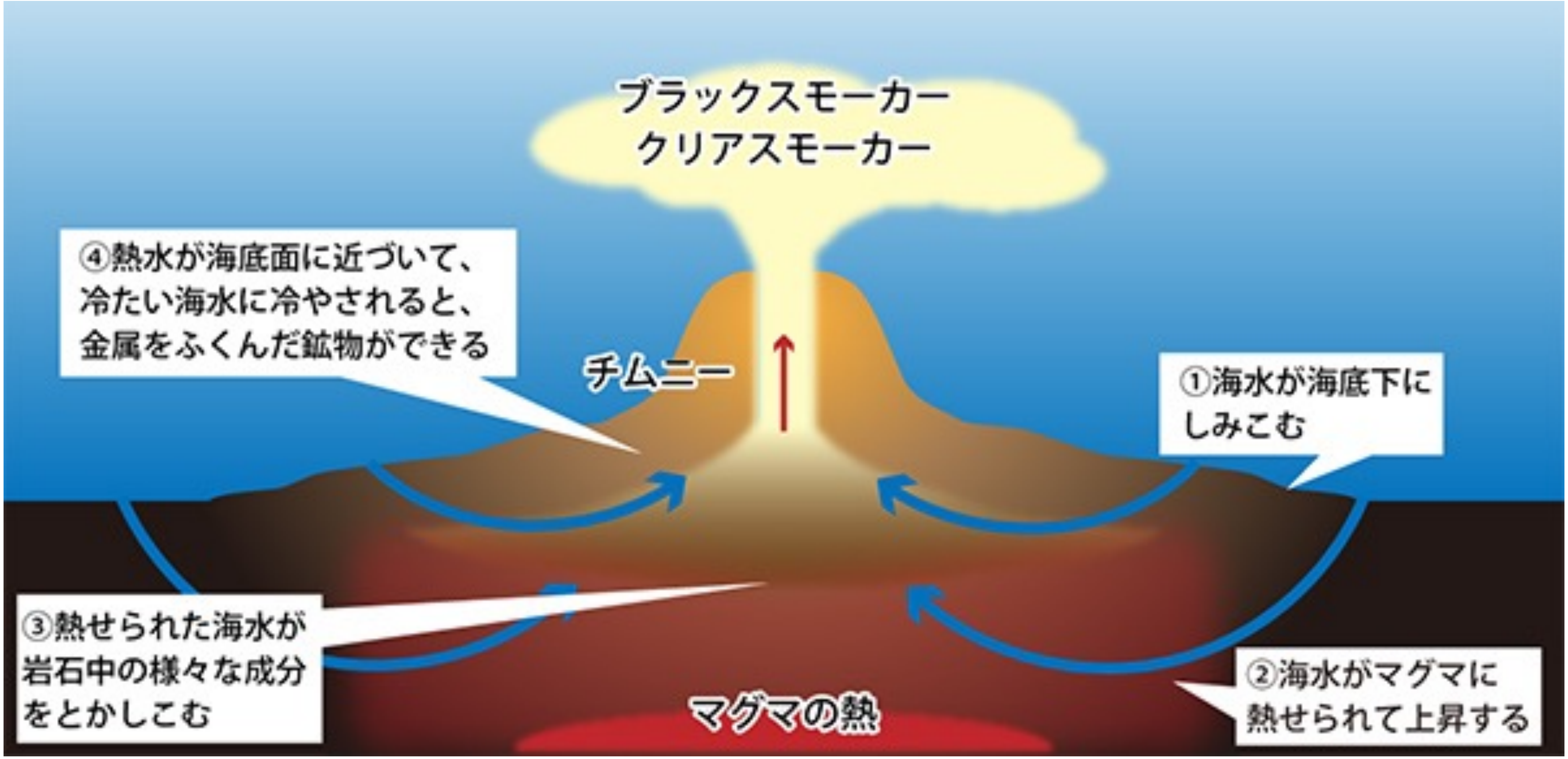
- 太陽光が届かない
- 圧力が高い
- 温度（水温）が低い
- 生物種や量は水深とともに少なくなる

地球表面の７割を占める海。
その水深は平均3800m にも達し、
体積で考えると海の95%以上はヒトを寄せつけ
ない暗黒・高圧の世界

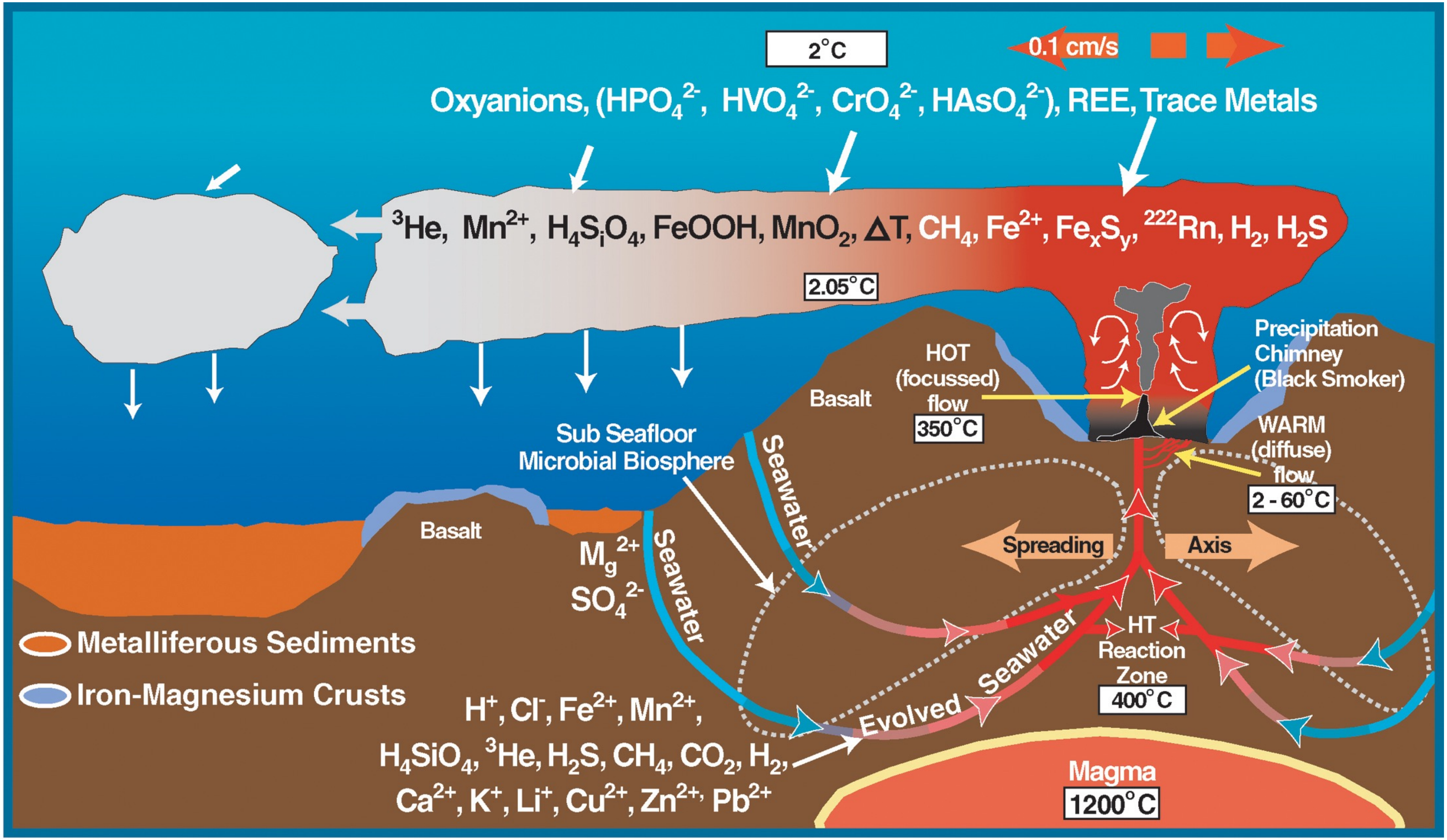

深海のオアシスは熱水活動域にある

熱水活動域とは

熱水活動とはマグマの熱で加熱された海水が、
温泉水となって吹き出す現象である

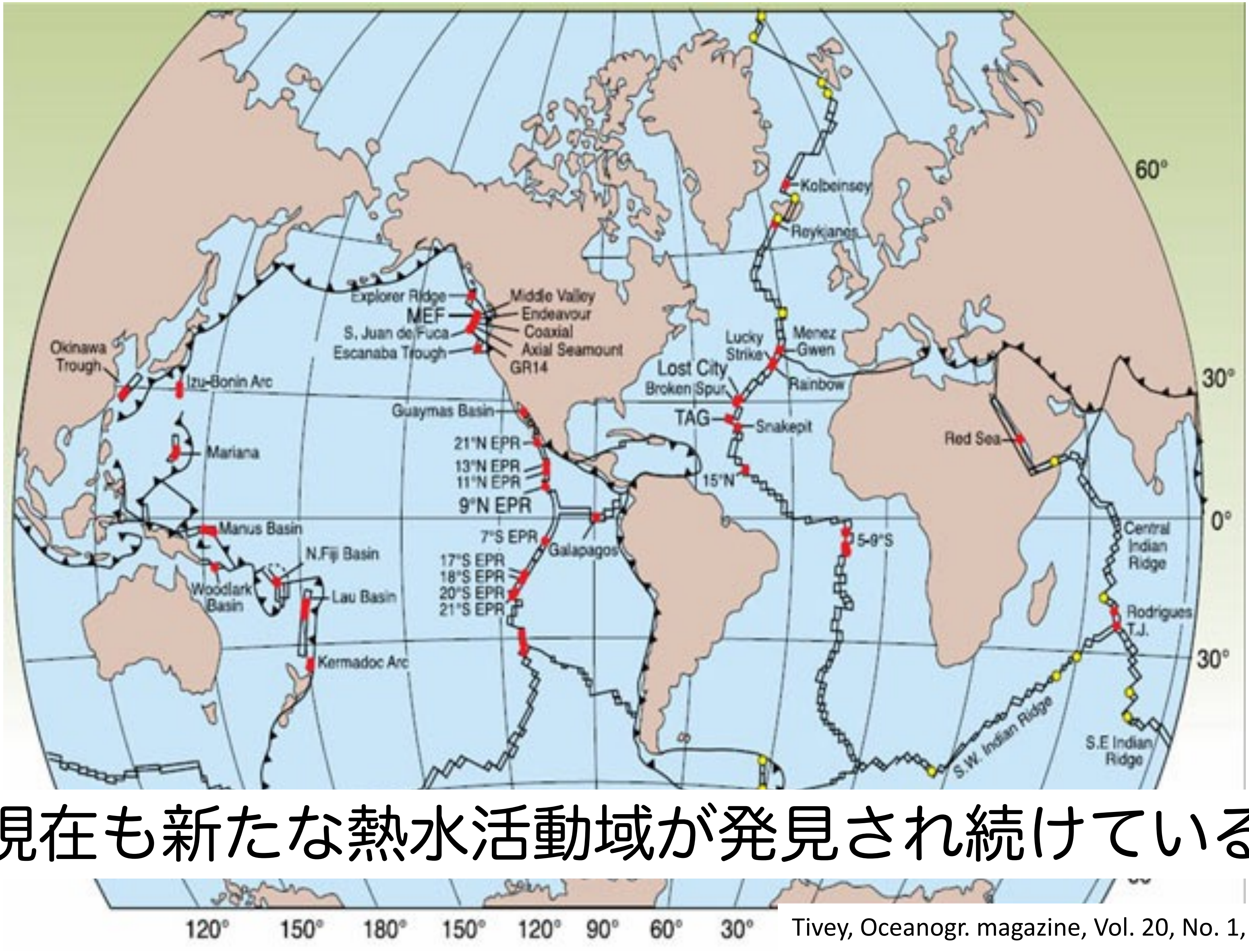


様々な物質が供給される場所



http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/207229

2007年までに見つかっている熱水活動域の分布図



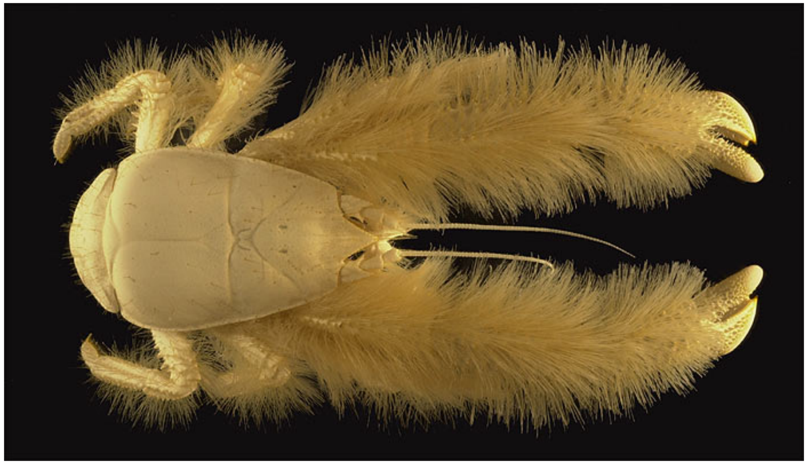
現在も新たな熱水活動域が発見され続けている

Tivey, Oceanogr. magazine, Vol. 20, No. 1, 2007

深海では不思議な生物の発見が続いている

ゾンビワーム（Osedax,sp）

Yeti Crab



White Scaly foot snail

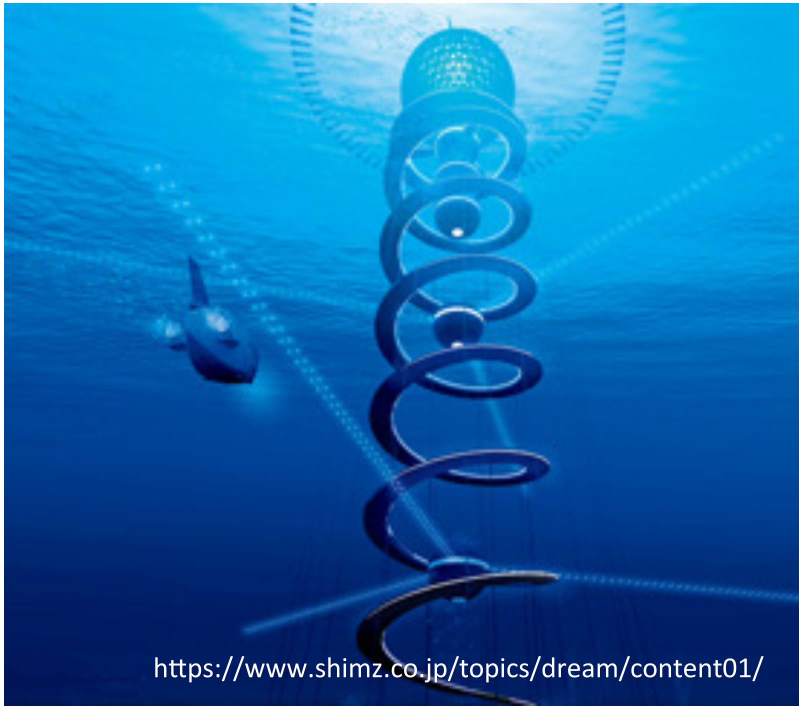
Black Scaly foot snail

私達は未だ生物のうち20％の種しか
認識できていないという

深海の環境とは

- 有機物に乏しく、光の届かない暗黒の世界
- 低温、高圧の極限環境
- 微生物の化学合成活動により二酸化炭素から有機物が生産され、大型生物はそのような微生物と共生することにより、過酷な環境を生きている
- すなわち、深海環境の生物は地球由来の物質を食べて生きている。→ 化学合成生態系

現在、洋上、海中、海底など海洋環境の利活用の検討が盛んに行われている

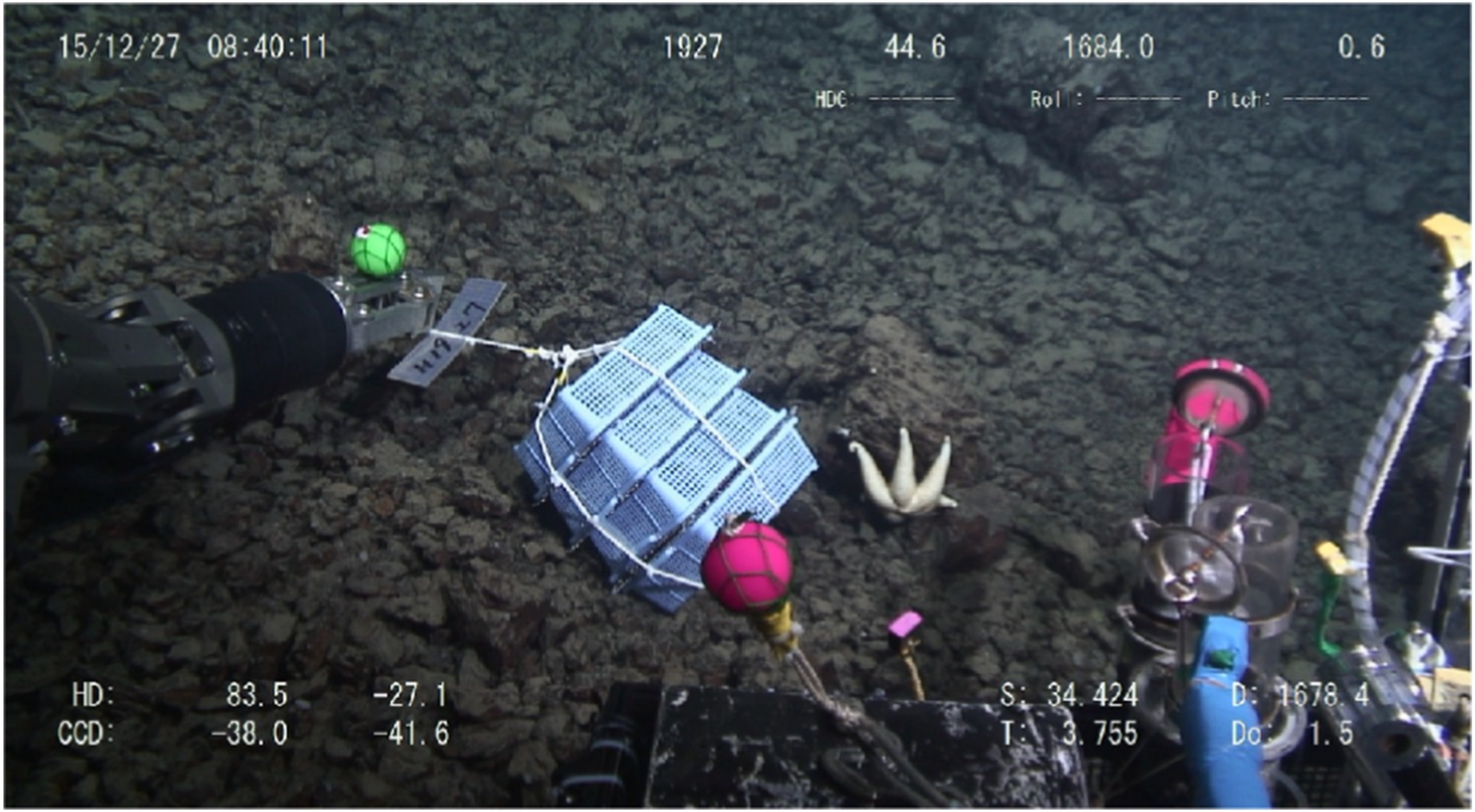


海底利用に欠かすことができないインフラ構造物

一般的にコンクリート
内部は高pH環境
pH ~ 12.0 – pH 13.3

インフラ構築に必須のコンクリート材の耐久性向上は喫緊の問題である。
また、目視で確認出来ない微細な亀裂や迅速な対応が困難な海底での画期的な対処法はない。さらに200m以深の深海環境は、海底の有効利用が期待されているが,コンクリート材の深海環境での挙動について、**ほとんど明らかになっていない**

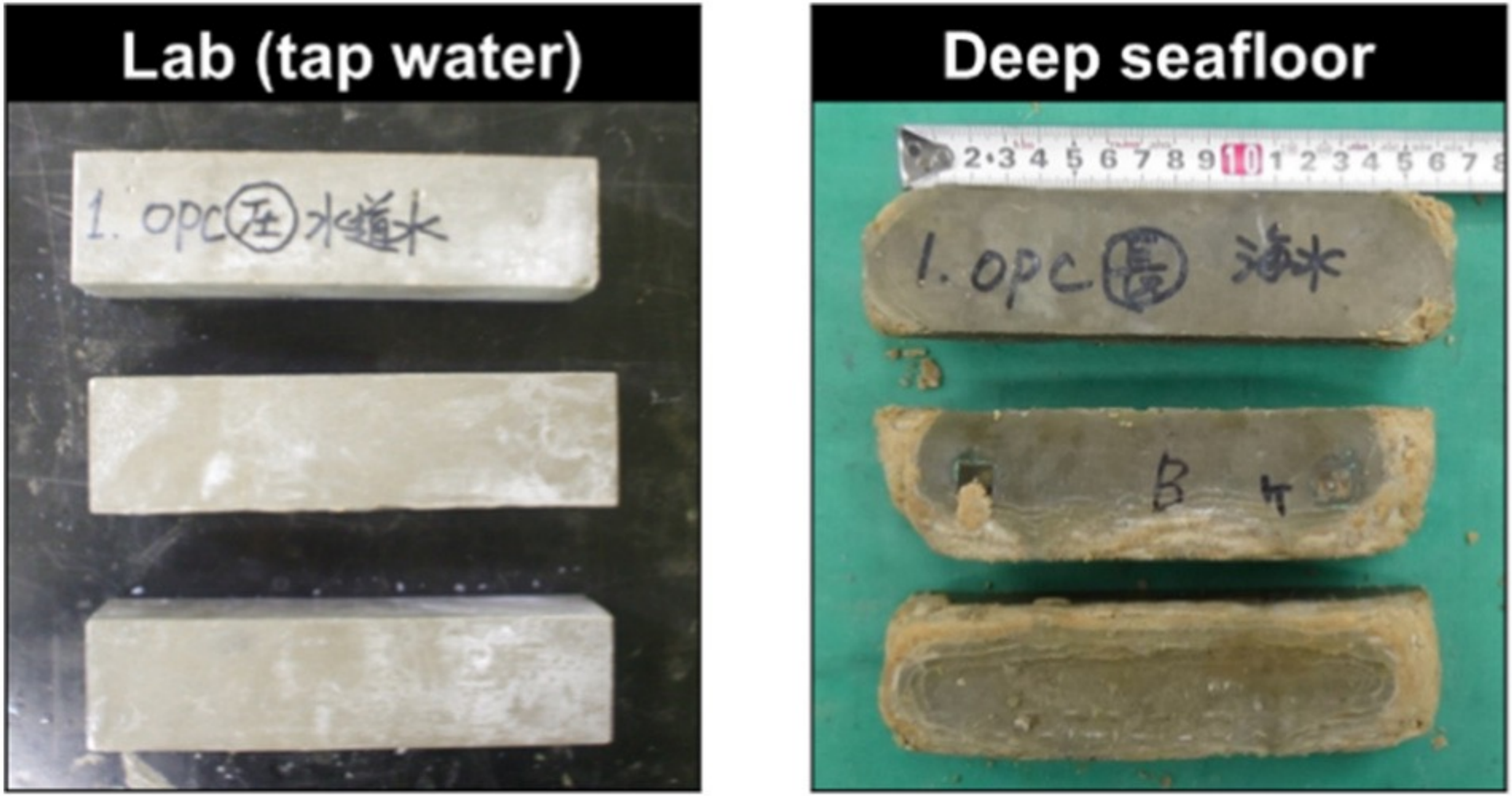
深海環境はセメント系材料の劣化を促進させる?



Mortar specimens exposed to the deep seafloor conditions at a depth of approximately 1680 m.

Kobayashi et al., *CCR* (2021)

深海環境はセメント系材料の劣化を促進させる?



Mortar specimens cured in the lab by immersion in tap water (left) and submerged to the deep seafloor (right) for 608 d

Kobayashi et al., *CCR* (2021)

深海環境がセメント系材料に与える影響

影響を与える要因として,３つ挙げられる

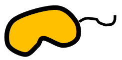
物理学的要因

高圧、低温、水流 etc.

化学的要因

海水組成 etc,
溶存イオン
との反応

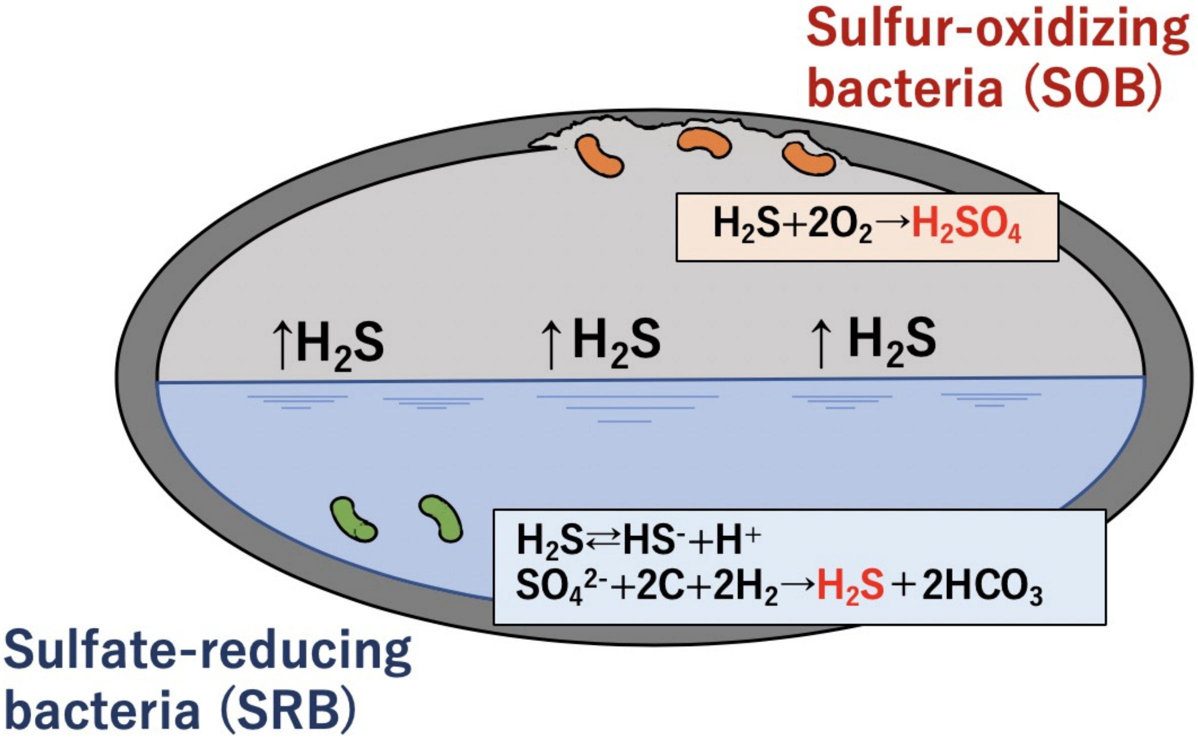
生物学的影響については全く情報がない

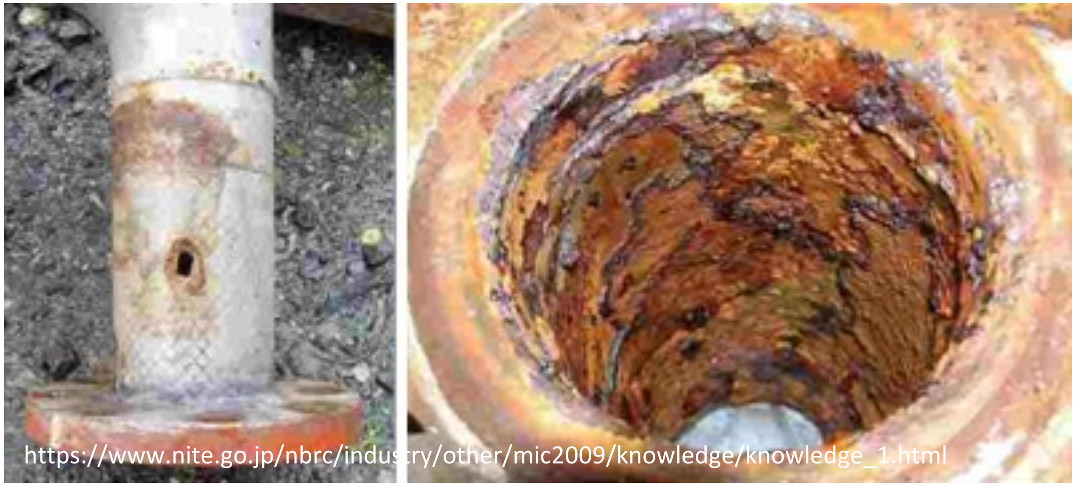


生物学的要因

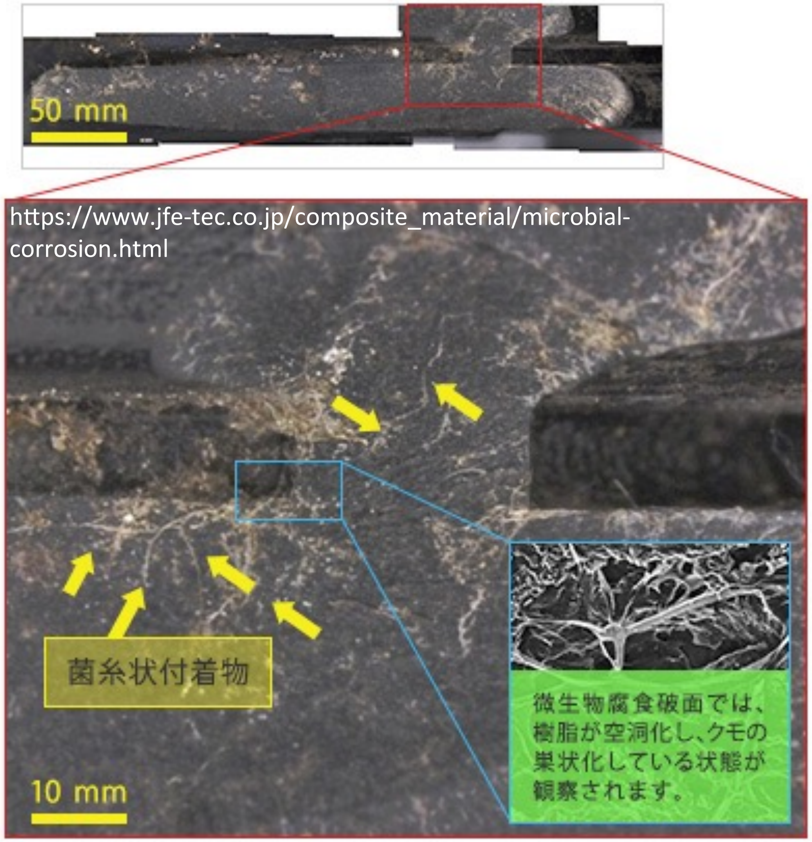
深海生物
特に微生物
化学的劣化の促進・抑制

インフラと微生物

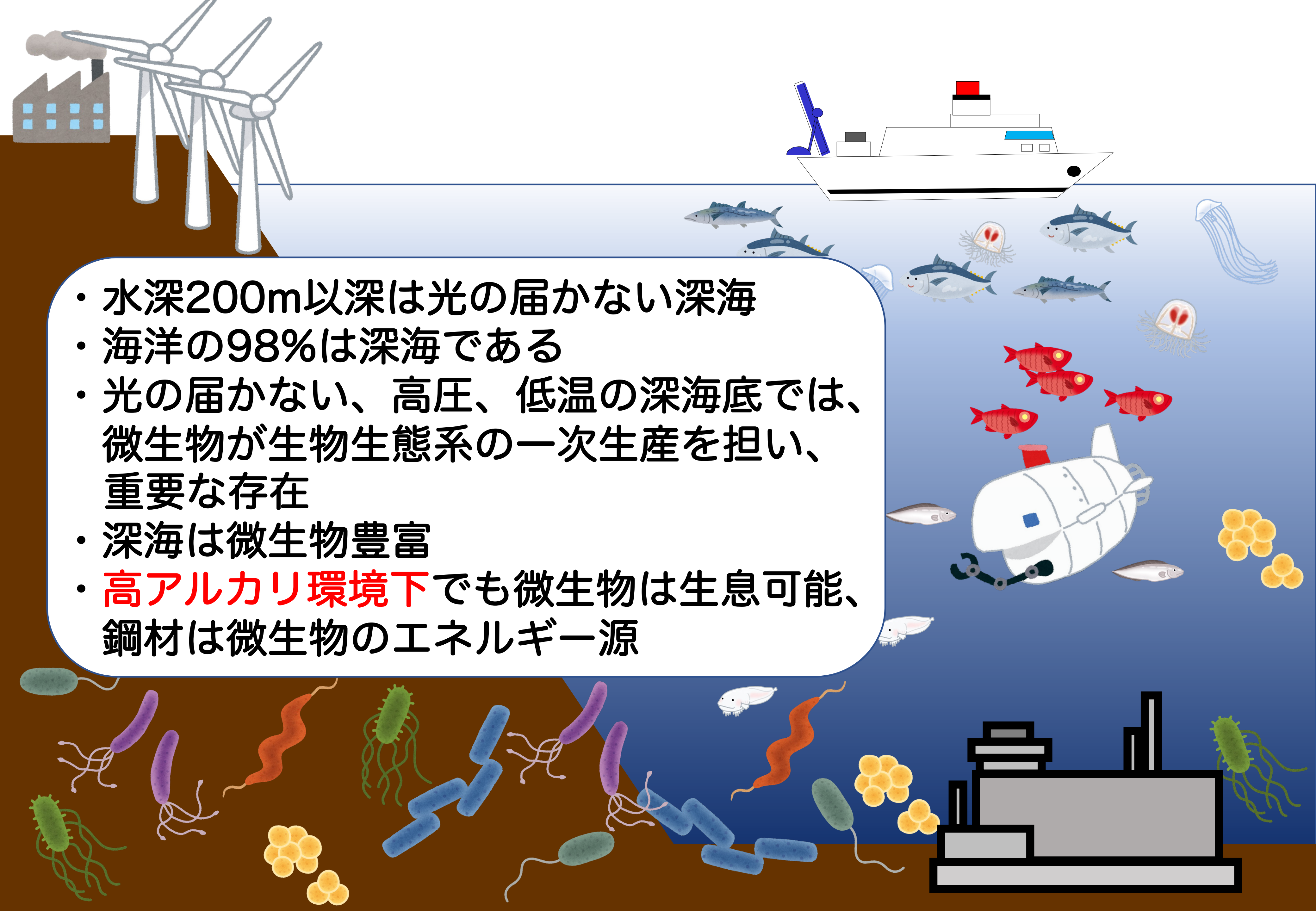




破損部の断面観察



微生物とインフラ材料の関係は、長きにわたり、劣化の原因として研究が行われてきた

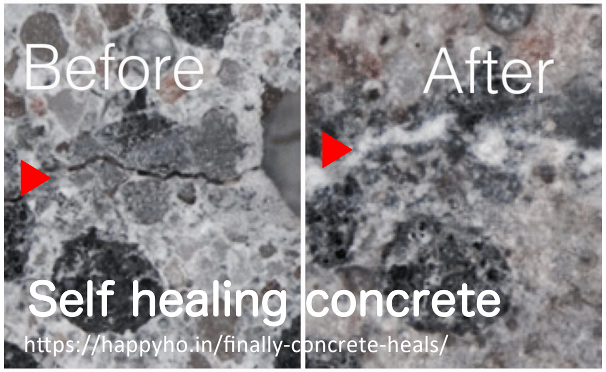

・水深200m以深は光の届かない深海
・海洋の98%は深海である
・光の届かない、高圧、低温の深海底では、
微生物が生物生態系の一次生産を担い、
重要な存在
・深海は微生物豊富
・高アルカリ環境下でも微生物は生息可能、
鋼材は微生物のエネルギー源

海底利用に欠かすことができないインフラ構造物

The bedrock of wind power generation system is concrete base.

コンクリート内部; 高pH環境
pH ~ 12.0 – pH 13.3

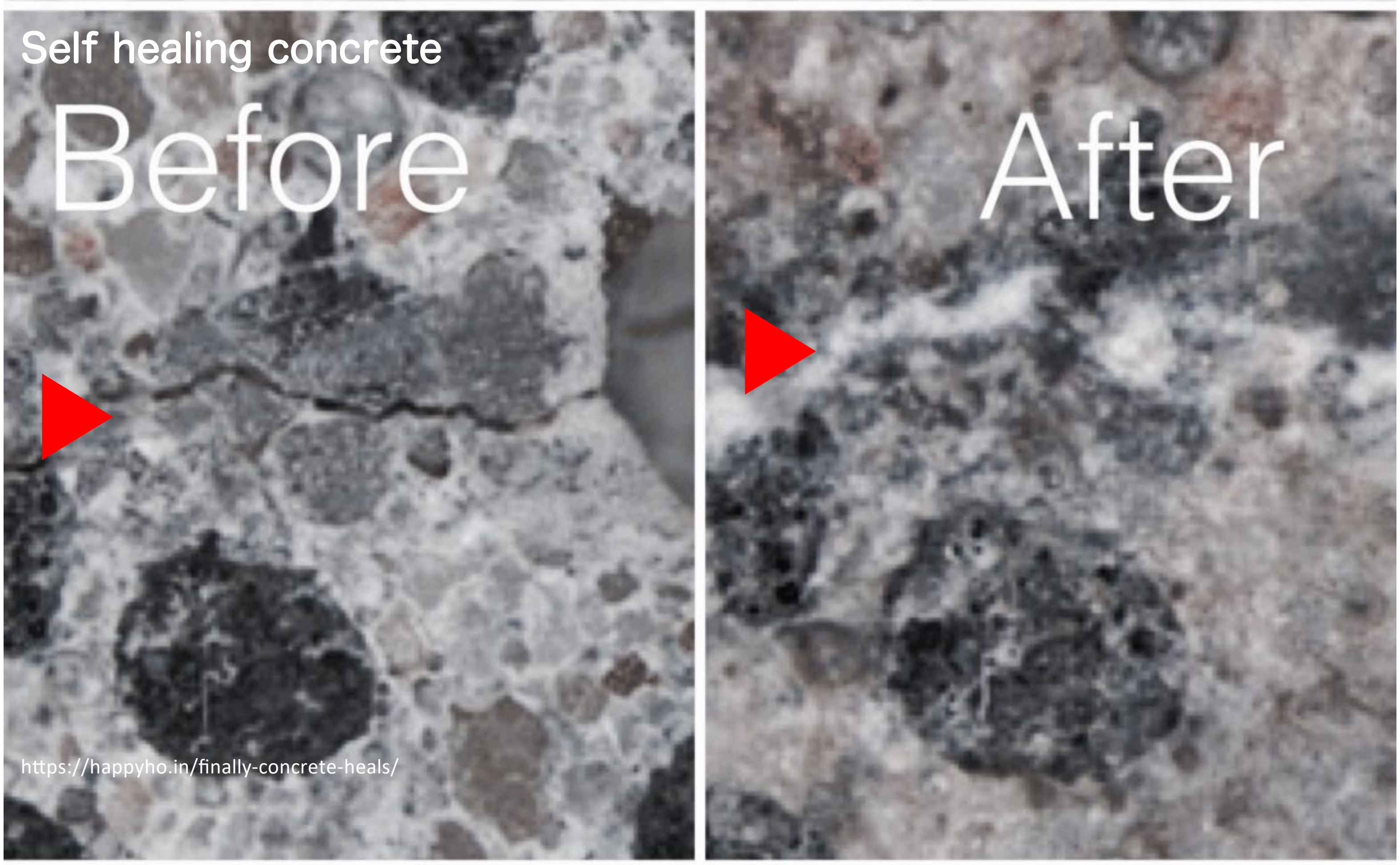
極限環境



By mixing concrete with limestone-producing bacteria, Jonkers found that any cracks that formed in the concrete were patched over. (Jonkers H., 2007)

- コンクリートの内部は
  強アルカリ性であり極限環境
- インフラ建材は自然にはない
  そこに住み着くのは極限環境微生物
- 新たな極限環境微生物生態系が
  形成される

海底利用に欠かすことができないインフラ構造物

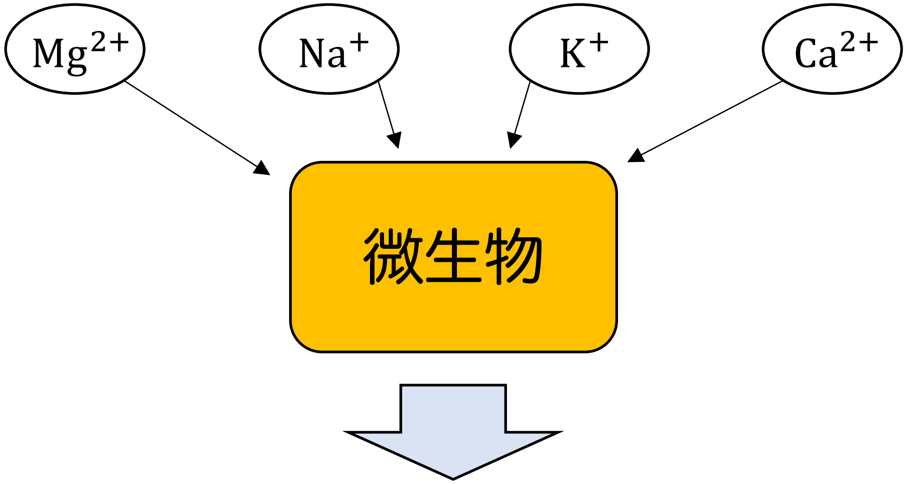


By mixing concrete with limestone-producing bacteria, Jonkers found that any cracks that formed in the concrete were patched over. (Jonkers H., 2007)

微生物が産生する炭酸塩について

自然環境における$CaCO_3$の生化学的沈殿

微生物のバイオミネラリゼーションにより生成される



生化学反応

Micro-biologically Induced Calcite Precipitation
（MICP：微生物によって誘発されたカルサイト沈殿）

微生物が産生する炭酸塩について

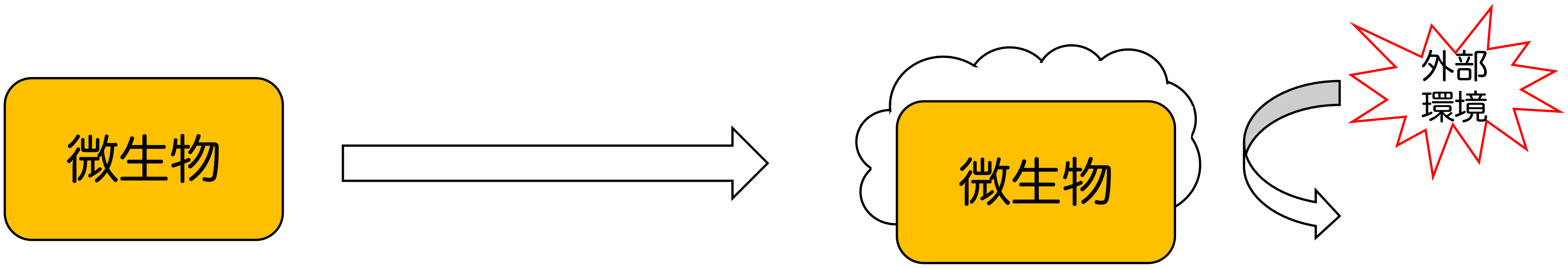
代謝によってウレアーゼを産生

$$(NH_2)_2CO + H_2O \xrightarrow{\text{ウレアーゼ}} CO_2 + 2NH_3$$

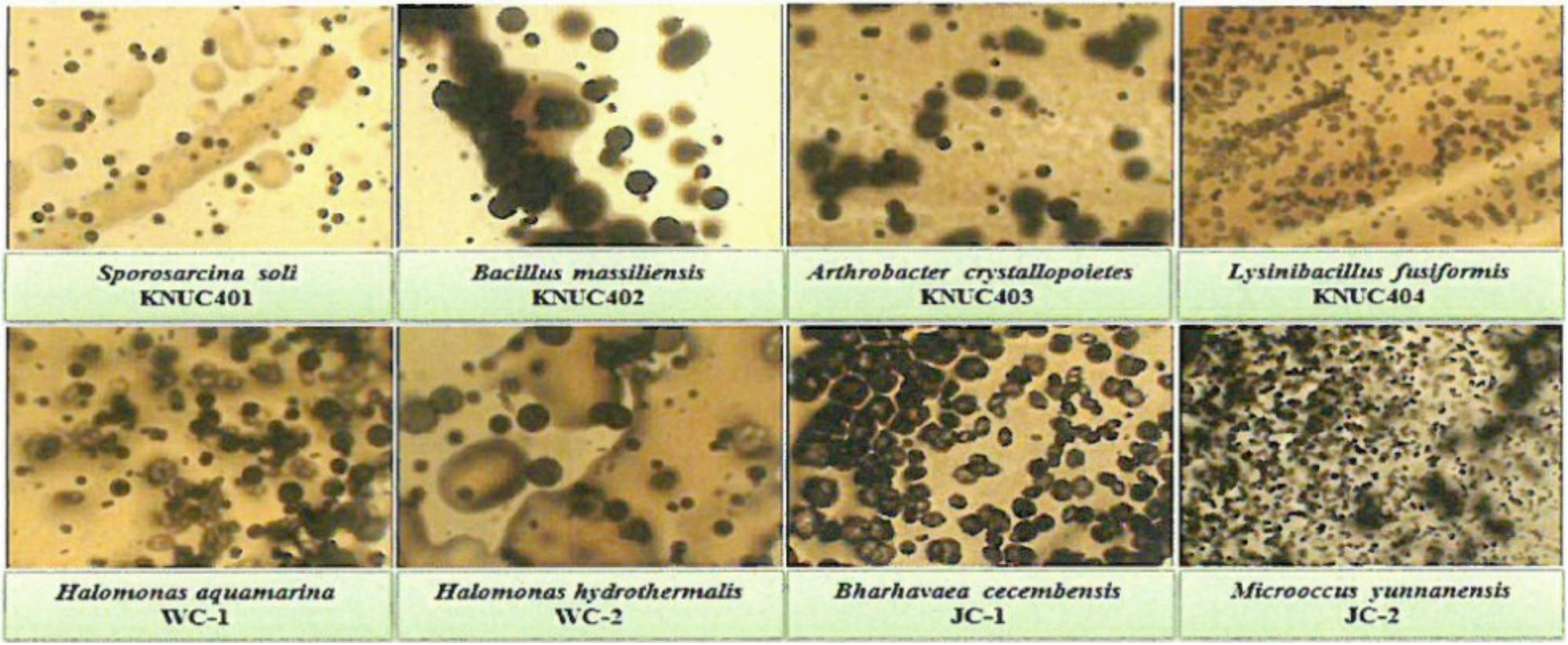
$$Ca^{2+} + Cell \rightarrow Cell \cdot Ca^{2+}$$

$$Cl^{-} + HCO_3^{-} + NH_3 \Leftrightarrow NH_4Cl + CO_3^{2-}$$

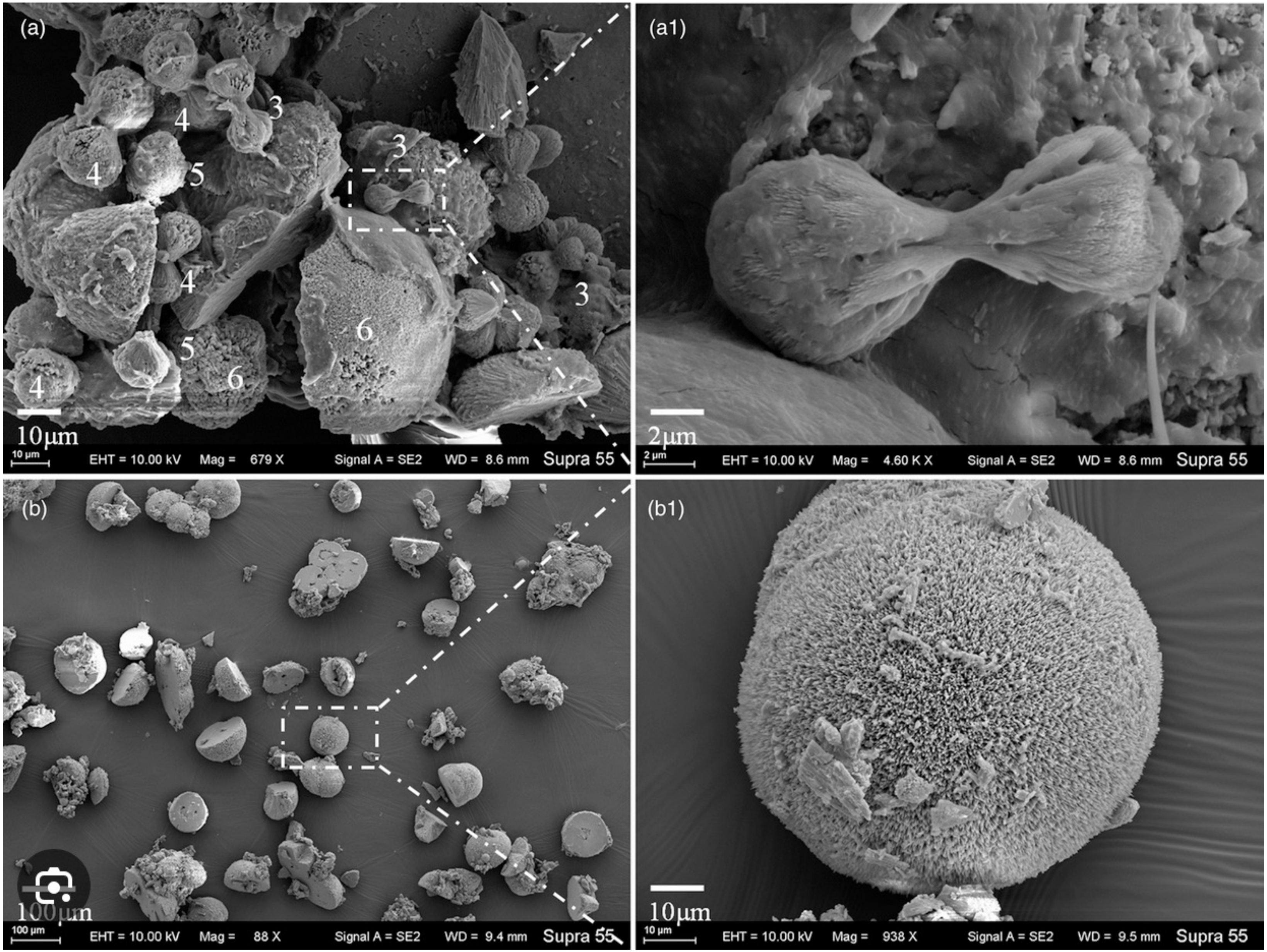
$$Cell \cdot Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow Cell \cdot CaCO_3 \downarrow$$



尿素-$CaCl_2$培養中の各微生物によるMICP



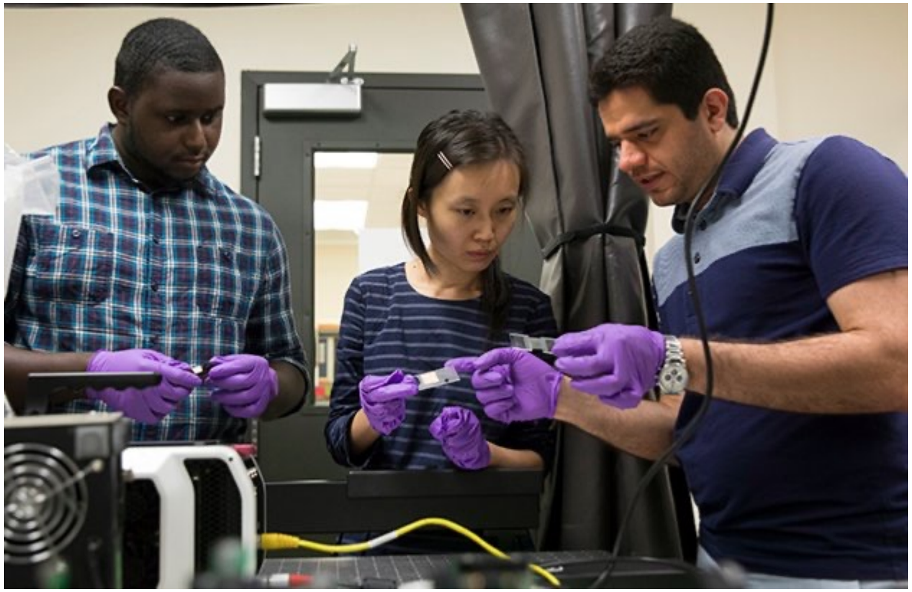
Wha-Jung Kim et al., 2011



Zhang et al., Controlled Crystallization and Transformation of Carbonate Minerals with Dumbbell-like Morphologies on Bacterial Cell Templates, 2020

自己修復コンクリートは崩壊しつつあるインフラストラクチャに持続可能な解決策を提供する可能性がある

Henk Jonkers, of Delft University of Technology, in the Netherlands, has designed a new type pf concrete that can fix its own cracks.
https://edition.cnn.com/2015/05/14/tech/bioconcrete-delft-jonkers/index.html



Assistant professor Congrui Jin (center) with two Binghamton University graduate students from the Mechanical Engineering Department.
https://www.sciencedaily.com/releases/2018/01/180117152511.htm

This team aims to develop a concrete mix that contains bacteria within microcapsules, which will germinate when water enters a crack in the concrete to produce limestone (Calcite), plugging the crack before water and oxygen has a chance to corrode the steel reinforcement. The project is funded by a £2m EPSRC grant, matched by an additional industrial contribution of just over £1 million, and will involve our researchers in collaboration with Cardiff University (the lead partner) and the University of Cambridge.
Read more at: https://phys.org/news/2013-05-micro-capsules-bacteria-self-healing-concrete.html#jCp

RESILIENT MATERIALS 4 LIFE 2020

INTERNATIONAL CONFERENCE

RM4L2020

20-22 SEPTEMBER 2021

ONLINE

我々の生活を支える強靭な素材

£ 4,851,937！
日本円で約10億円

2020 RESILIENT MATERIALS 4LIFE INTERNATIONAL CONFERENCE

supported by

rilem
ice Knowledge
Concrete Society
aci American Concrete Institute *Always advancing*
The Institute of Concrete Technology
IOM3 Institute of Materials, Minerals & Mining
The Institution of StructuralEngineers

THE CONSORTIUM

CARDIFF UNIVERSITY PRIFYSGOL CAERDYDD
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE
UNIVERSITY OF BATH
UNIVERSITY OF BRADFORD MAKING KNOWLEDGE WORK

自己治癒材料に関する国際会議

Organization:

CSIC — Consejo Superior de Investigaciones Científicas

TU Delft — Delft University of Technology

Supporting organizations:

AEMAC — Asociación Española de Materiales Compuestos

RPM — Revista Plásticos Modernos

Sponsors:

Comunidad de Madrid

CABOT

SUMITOMO RIKO

NETZSCH

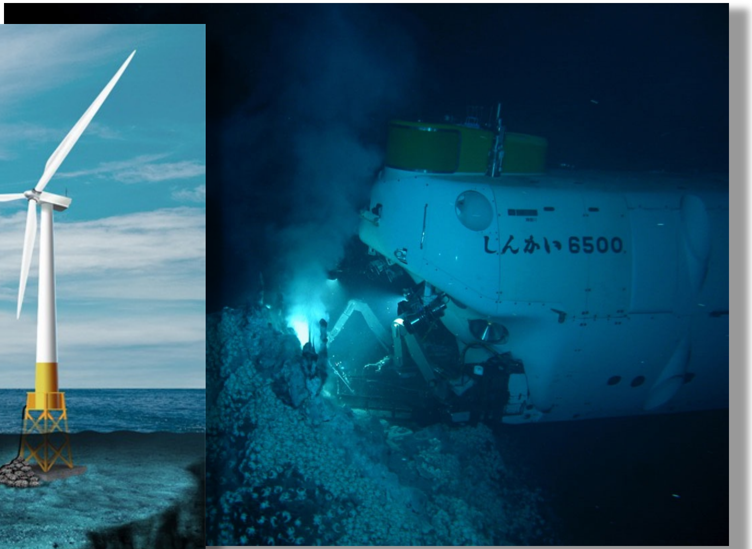
polymers — an Open Access Journal by MDPI

Royal Society of Chemistry

Madrid Convention Bureau

深海インフラと微生物

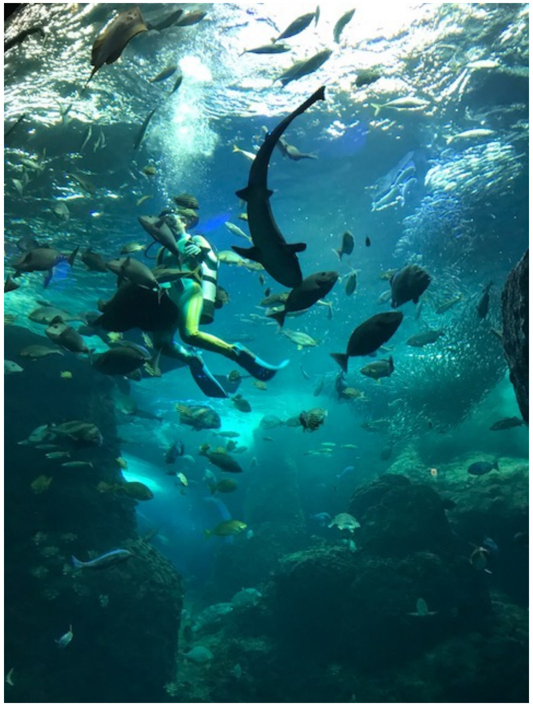
・微生物は様々な環境生育可能であり、インフラ材料も微生物の住処となる
・陸上ではインフラ材の劣化の原因とされてきたが、近年では微生物治癒（微生物をコンクリの補強に応用する）研究が進んでいる。
しかし、**海洋環境、特に深海でのインフラ材料と微生物の関係は未知**である。

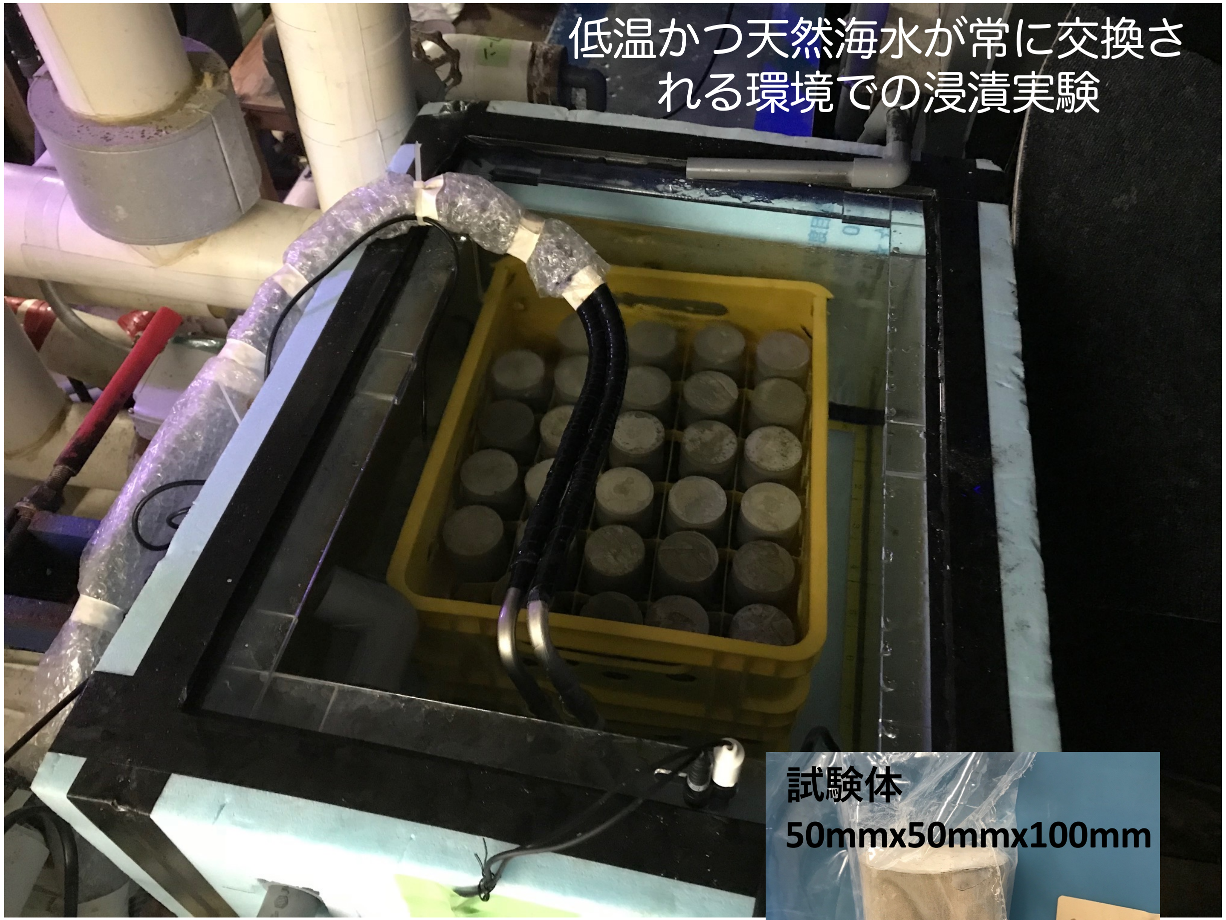


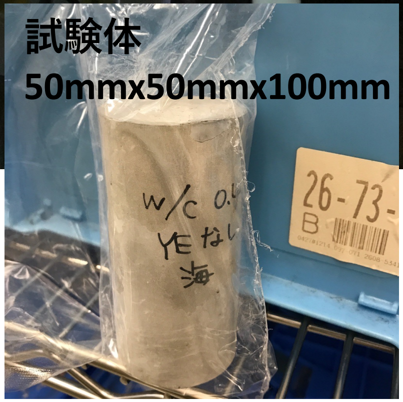
研究の目的

深海に建造されたインフラ構造物を人工的な極限環境であると捉え、
現場環境でインフラ材料環境を好む微生物生態系を解明し、
さらにインフラ材料にどのような影響を与えるか調査し、それらの知見を海洋に適したインフラ材料の提案・開発に役立たせる

新江ノ島水族館の海水水槽を用いた実験

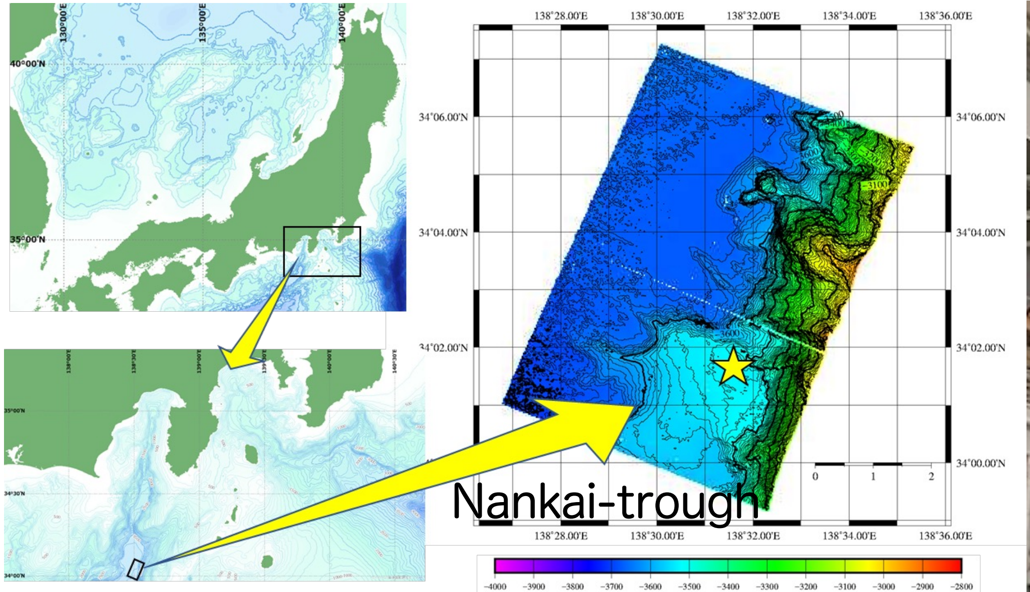






2018年9月から実施

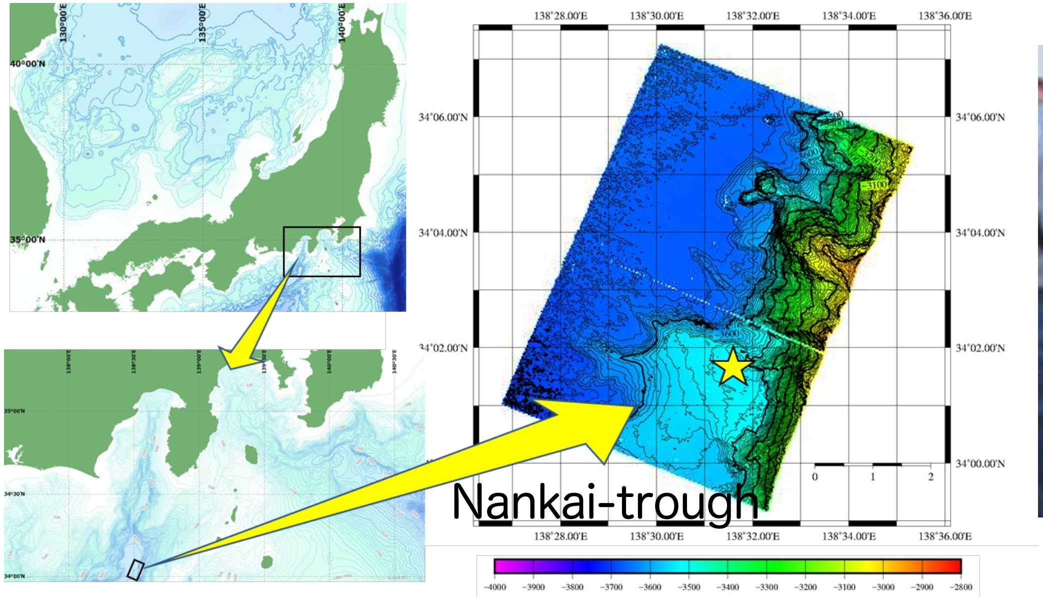
実際の深海環境での実験



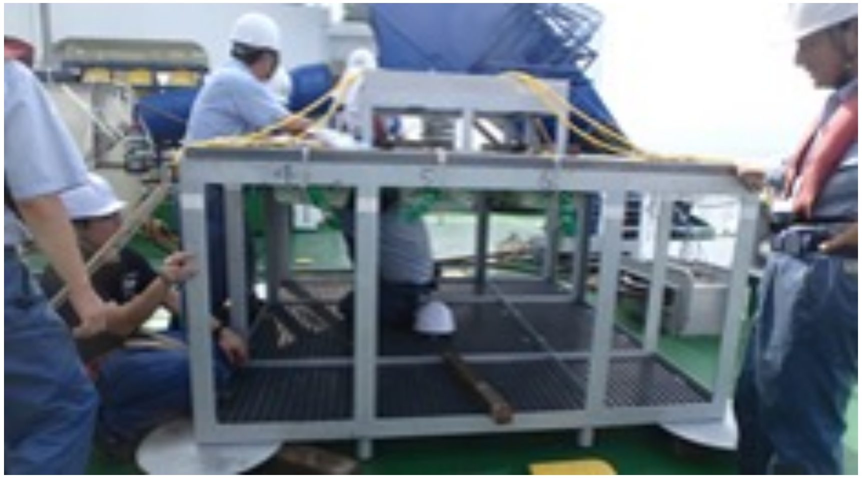
Installation location, Depth: 3500 m

海洋研究開発機構の船舶を用いて、実際の深海底、水深1,000mから3,500mにてセメント系材料の浸漬実験を計画・実施

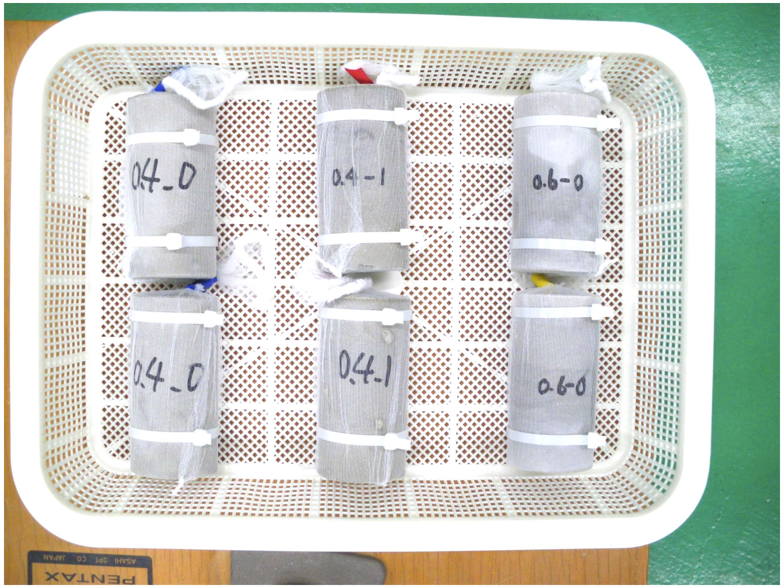
実際の深海環境での実験_2018年から開始



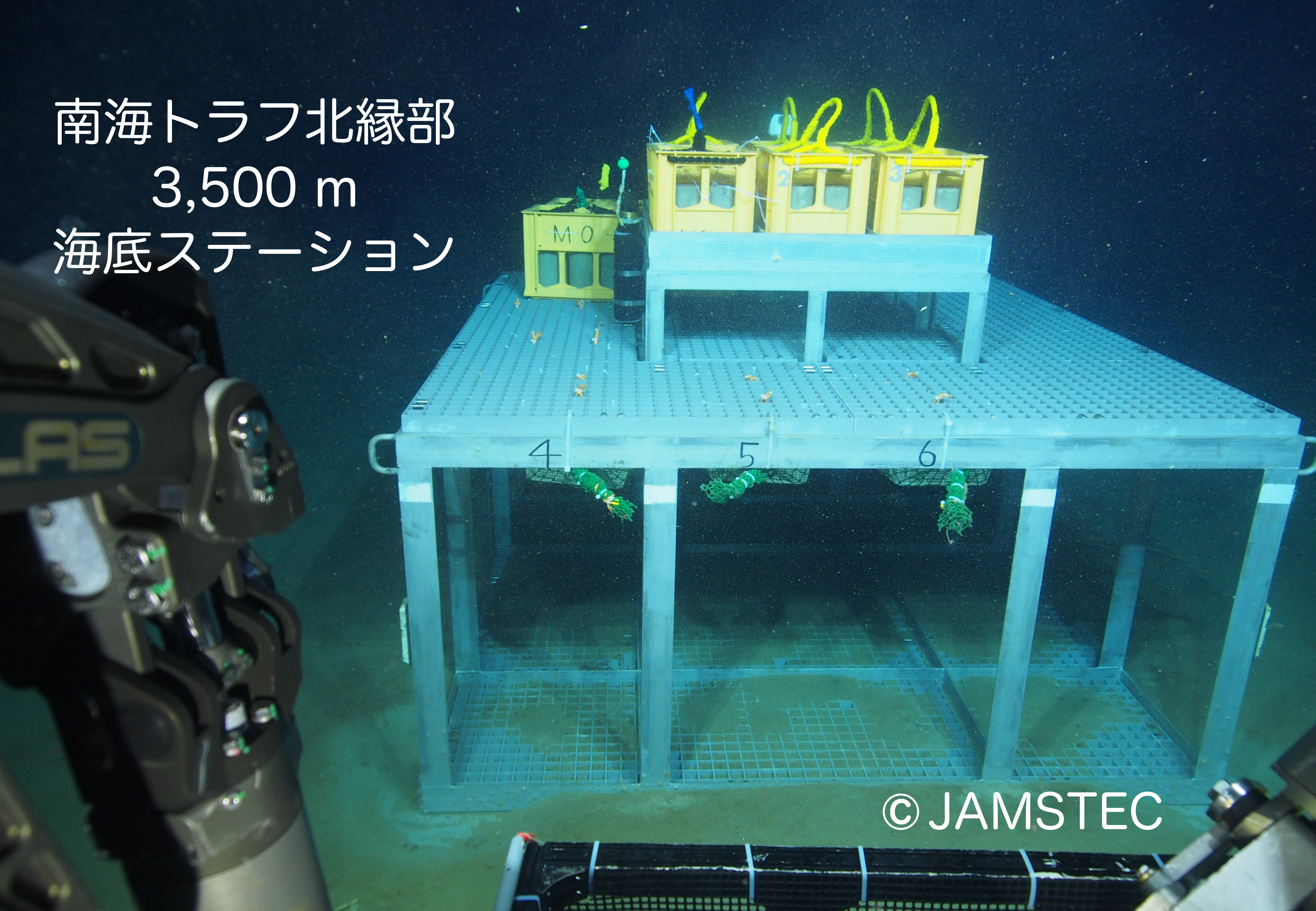
Installation location, Depth: 3500 m



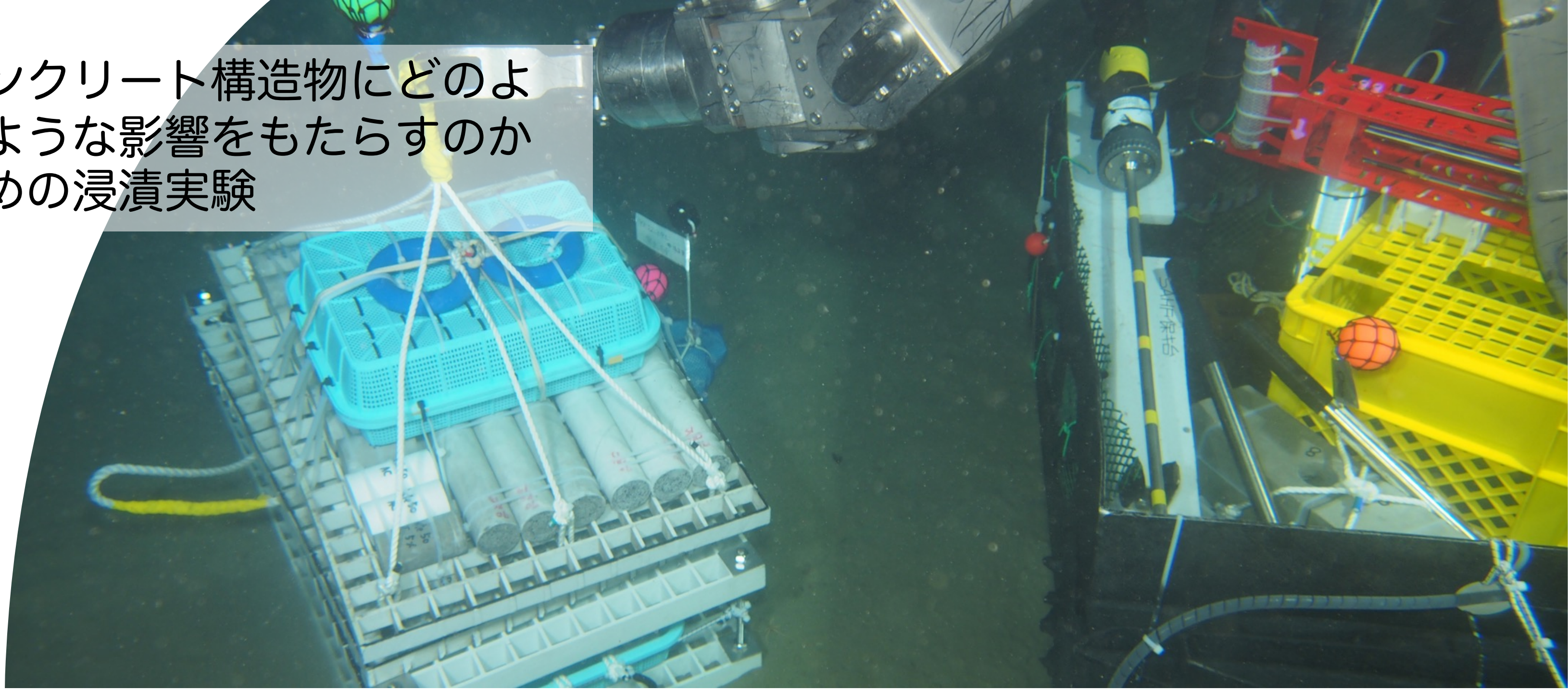
YK18-09研究航海時の様子



海底浸漬実験の試験体セット

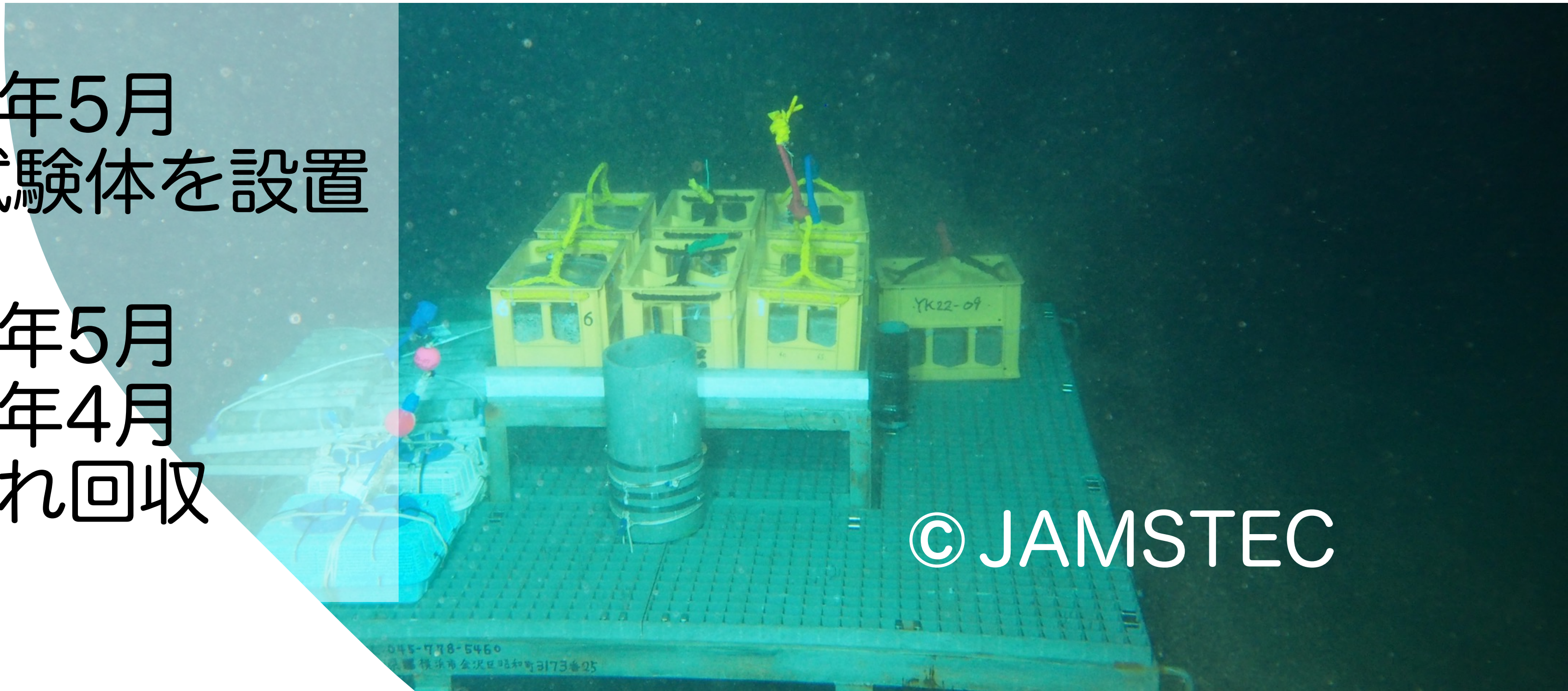

南海トラフ北縁部
3,500 m
海底ステーション
©JAMSTEC

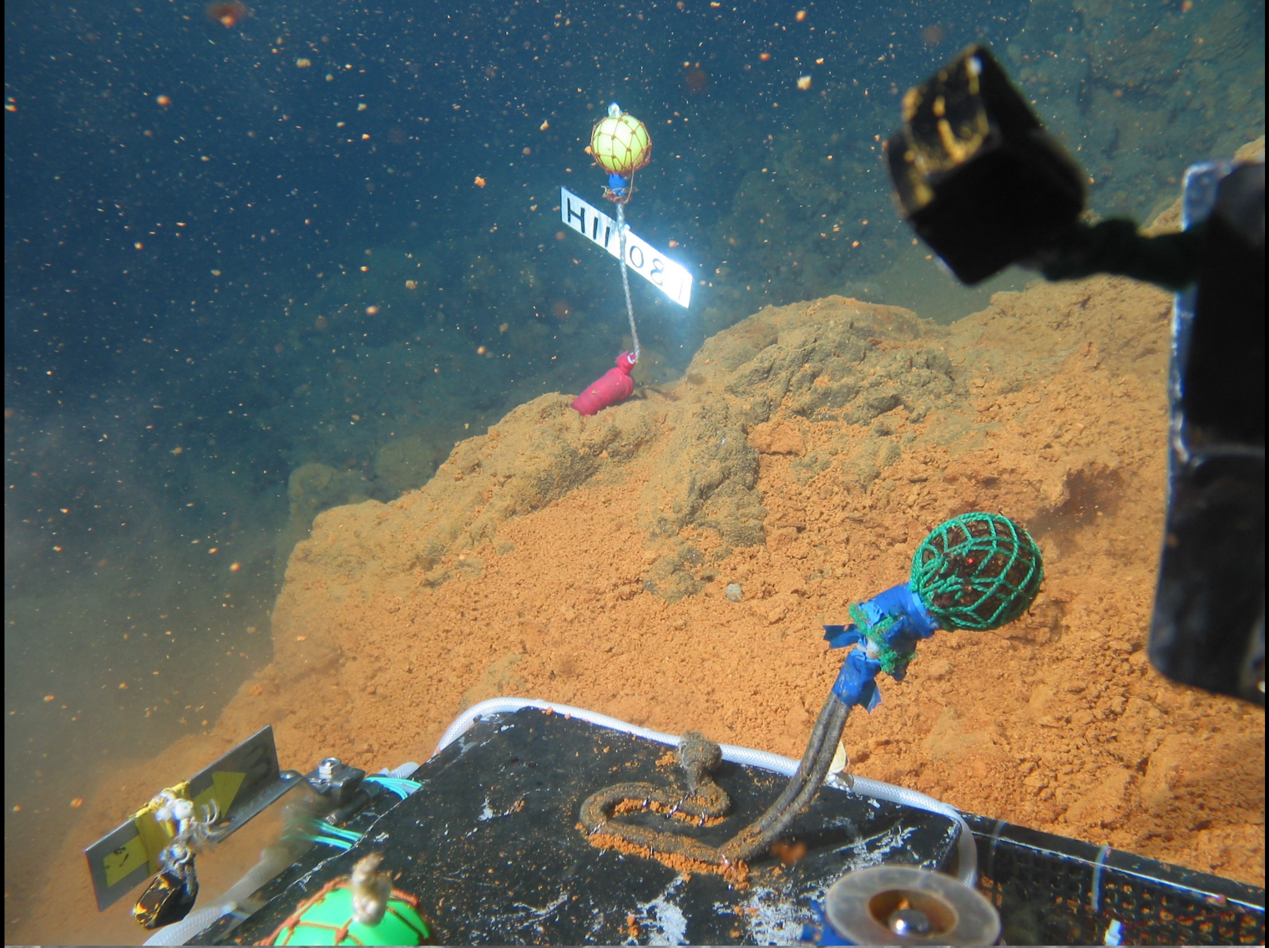
深海環境中のコンクリート構造物にどのような微生物がどのような影響をもたらすのかを明らかにするための浸漬実験

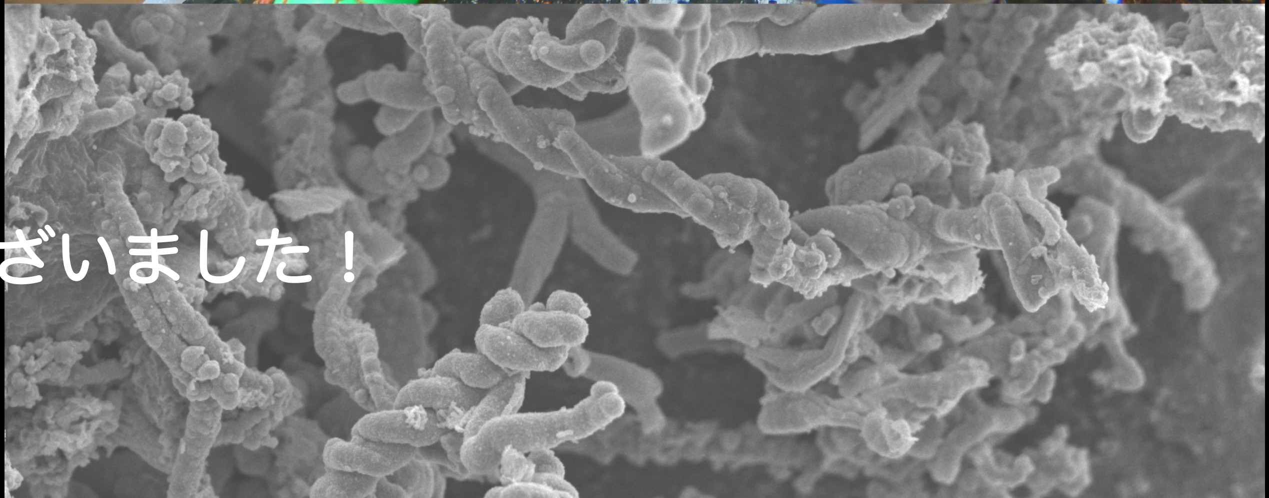


2022年5月
3500mに試験体を設置

2023年5月
2025年4月
それぞれ回収







ご清聴ありがとうございました！