



icdp *science plan*  
2020-2030

日本語版

# icdp *science plan* 2020-2030

日本語版

国際陸上科学掘削計画 (ICDP) は、陸域の科学掘削を行う国際プロジェクトで、  
日本は1998年から主要メンバー国の一員として貢献してきました。

『icdp science plan 2020-2030』は、  
2020年から2030年にICDPが目指す科学計画をまとめたものです。  
日本のみなさまにも陸上掘削を通じて私たちが何を目指し、  
社会課題にどのように貢献できるのか、わかりやすくお伝えするために  
日本語版を作成しました。

日本語版の作成にあたっては、なるべく元の英文の内容を変えずに、  
しかし日本語としてわかりやすいようまとめました。

日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC)  
ICDP部会執行委員会

INTERNATIONAL CONTINENTAL  
SCIENTIFIC DRILLING PROGRAM



> **20** member countries  
> **55** projects worldwide  
> **80** workshops internationally

## icdp mission:

私たちは、大陸科学掘削という最も直接的な方法によって、大陸地殻の内部構造、組成、そして様々な事象に対して最も正確で基礎的かつ世界的に重要な知見を得ることを目指しています。

<b>国際陸上科学掘削計画</b> International Continental Scientific Drilling Program	<b>02</b>
<b>会員の利点</b> Membership Benefits	<b>03</b>
<b>ICDPによる共同出資</b> Co-funding	<b>04</b>
<b>技術開発</b> Technology developments	<b>05</b>
<b>教育・普及活動</b> Education and Outreach	<b>06</b>
<b>数十億年の地球進化</b> Billions of Years of Earth Evolution	<b>07</b>
<b>地殻変動プロセス</b> Geodynamic Processes	<b>08</b>
<b>自然災害</b> Geohazard	<b>12</b>
<b>地質資源</b> Georesources	<b>16</b>
<b>環境変化</b> Environmental Change	<b>20</b>
<b>プロジェクトの進め方</b> How to Realize an ICDP Project?	<b>26</b>
<b>陸から海まで -land to sea (L2S) - 横断掘削調査</b> Land-to-Sea (L2S) Drilling Transects	<b>28</b>
<b>今後の展望</b> A Look Ahead	<b>30</b>
<b>参考情報</b> ICDP Info & References	<b>31</b>

# 国際陸上科学掘削計画

icdp: international continental scientific drilling program

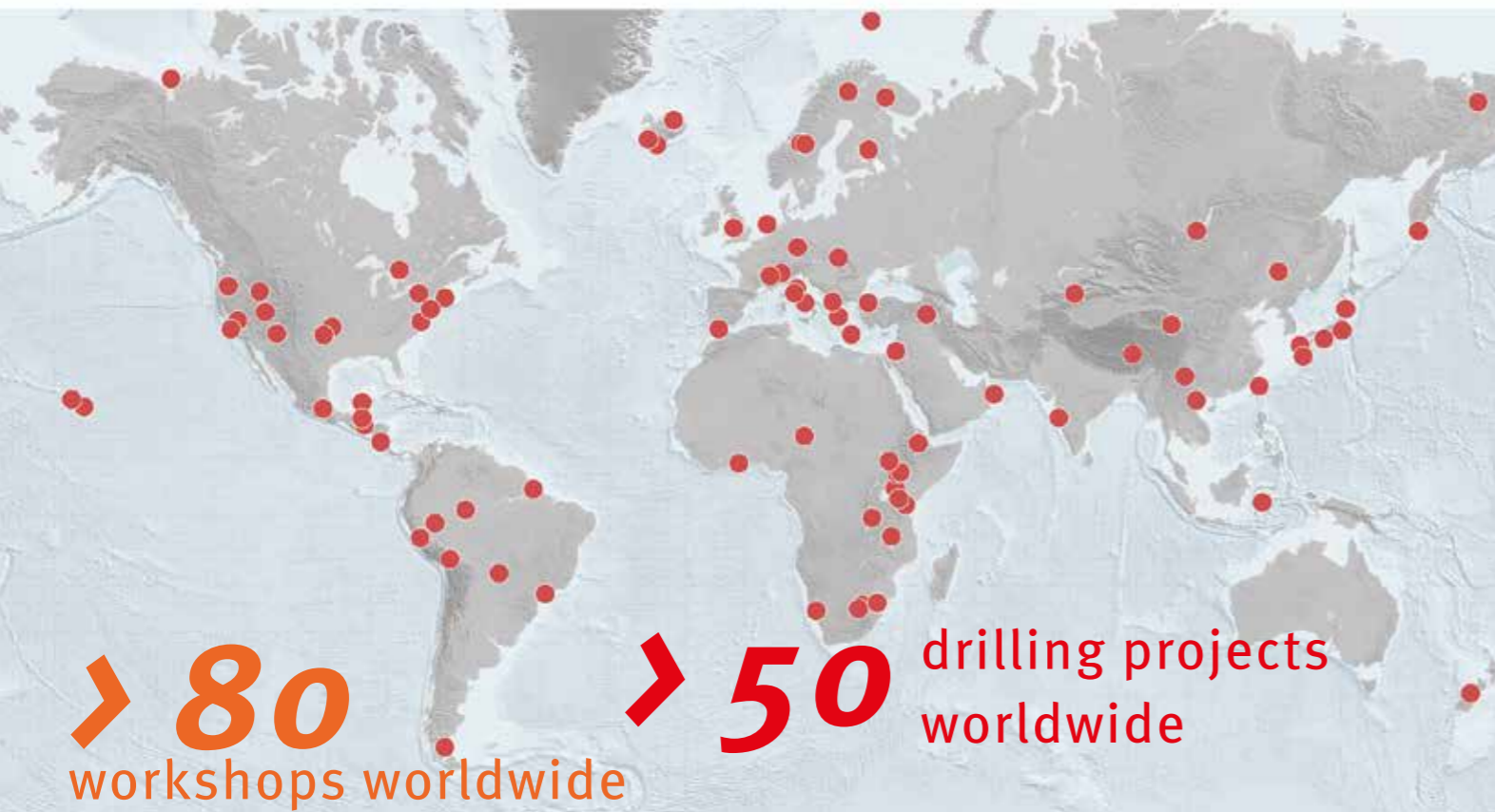


地球の表面をどのように調査しても、地球内部について得られる情報は間接的なものばかりで、構築されたモデルは様々な証拠の寄せ集めでしかありません。こうしたモデルを現実に即して検証するには、掘削が唯一の方法です。しかし、掘削してサンプルやデータを回収するには、コストがかかり、複雑な問題も伴い、時には危険も伴います。これこそが、国際陸上科学掘削計画 (ICDP) が必要とされている理由です。

ICDP の目的は、地球科学者が科学的な掘削という調査手段を用いて、地表の試料で構築したモデルを検証することを後押しすることにあります。掘削やボーリング調査は一般的に高い費用がかかるため、ICDP の支援を受けて掘削を行う場合には、社会的なニーズに焦点を当てた重

要な科学的問題に取り組む必要があることは明らかです。

この冊子で示しているサイエンスプランでは、ICDP が今後 10 年間に調査することを目指す、最も重要な課題を紹介しています。これらの課題は、基礎科学に関するものですが、その多くは、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) に包含されるより広範な社会的課題にも関連しています。特に、ICDP のプロジェクトは、「安全な水とトイレを世界中に」、「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」、「住み続けられるまちづくりを」、「気候変動に具体的な対策を」に関連する SDGs を支える重要な情報を提供することができます。



Worldmap of ICDP drilled and planned drillsites 2020



# 会員の利点 membership benefits

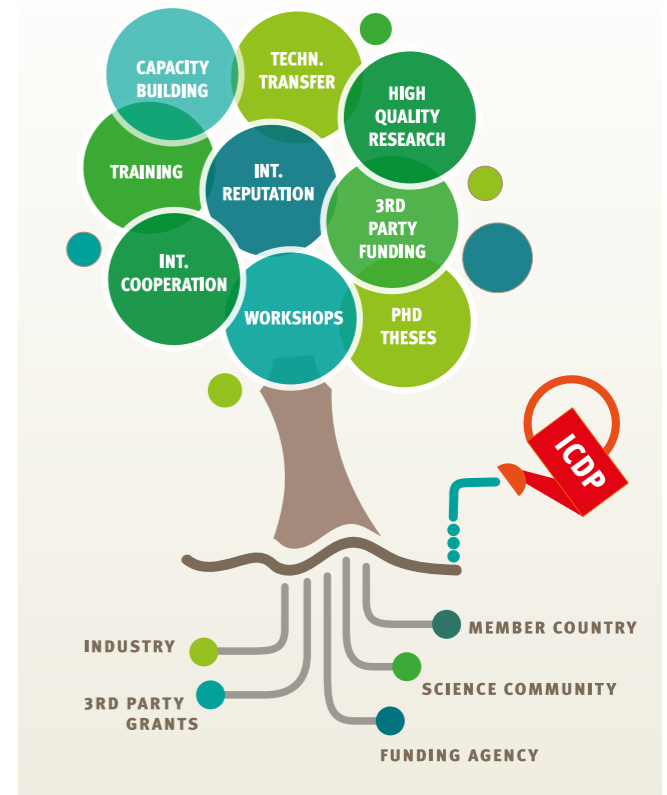
質の高い科学研究を実現  
Enabling high-quality scientific research

今日の地球科学者は、地球システムを解釈し理解することで、環境破壊を軽減し、自然災害に対して増大し続ける社会の脆弱性を緩和し、天然資源への過度な依存を持続可能な方法で抑制することに重要な役割を果たしています。科学掘削は、地球の基本的な仕組みを直接調べることができる唯一の方法であるため、これらの取り組みには欠かせません。しかし、掘削を手段とした研究はコストが高く、大規模なプロジェクトでなければなかなか実現できません。そこで ICDP では、共同出資者を募り、世界有数の場所で最先端の科学を育み、社会的に重要な地球科学の基礎的課題に取り組むことを目指しています。

ICDP は 1996 年に設立され、現在では世界の 20 カ国以上の国とユネスコが参加するまでに成長しました。ICDP は、プロジェクト提案の相互評価を行い、メンバーの年間分担金を組み合わせて、研究プロジェクトの一部資金を提供しています。会員になると、さまざまなメリットがあります。科学者やエンジニアは、プロポーザルを通じて資金を申請することができ、ICDP がシード資金を提供するプロジェクトを主導することができ、モラトリアム期間中はデータやサンプルに優先的にアクセスすることができます。また、メンバー国はワークショップ、教育プログラムに参加したり、ICDP 技術支援グループや ICDP Equipment Pool のサービスを利用したりすることもできます。さらに、メンバー国の代表機関にとって最も重要なことは、意思決定を行う ICDP のパネルでの発言権と投票権を持ち、方針、資金調達戦略、個々の助成金を決定できることです。ICDP は、通常、掘削プロジェクトの全費用の 10 ~ 50% を支援しますが、より重要なのは、プロジェクトチームが他の資金を調達するための様々な支援を行うことです。

ICDP のプロポーザルは、科学的メリットと社会的妥当性という明確な基準に基づいて、世界的に選抜された専門科学者である科学諮問グループ (SAG) と、加盟国の

経験豊富な掘削プロジェクトマネージャーである執行委員会 (EC) によって、強力かつ独立した評価を受けます。このように ICDP で承認されたプロジェクトは、さらに質の高い科学研究の基盤となります。例えば、ICDP プロジェクトで収集されたサンプルやデータを用いた継続的な研究は、多くの科学論文として公表され、若手科学者の育成につながります。また、ICDP のプロジェクトを掘削やサービスに係る現地の会社が請け負うこともあり、経済的な観点からも注目されます。



ICDP の資金を元に連携して科学的掘削の成果を拡大



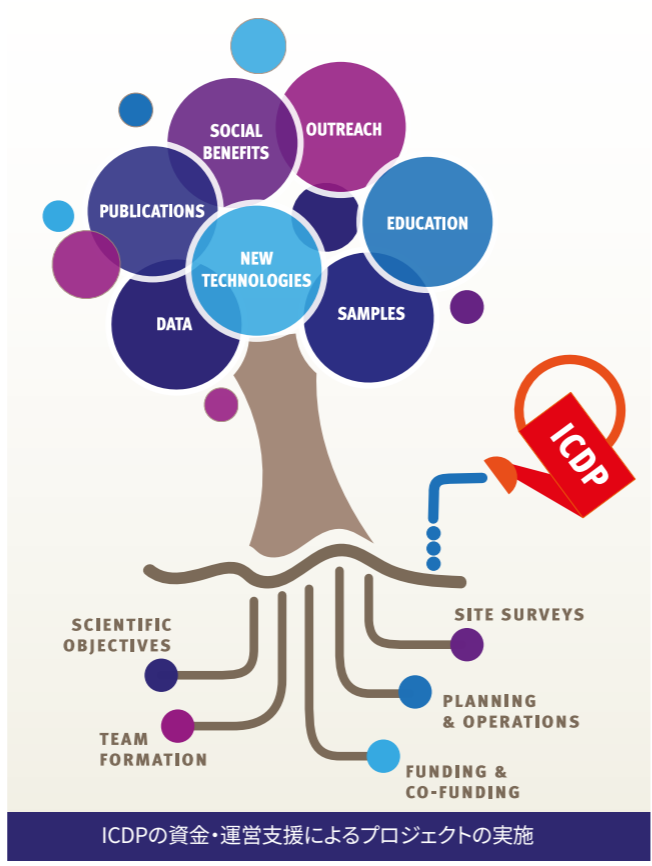
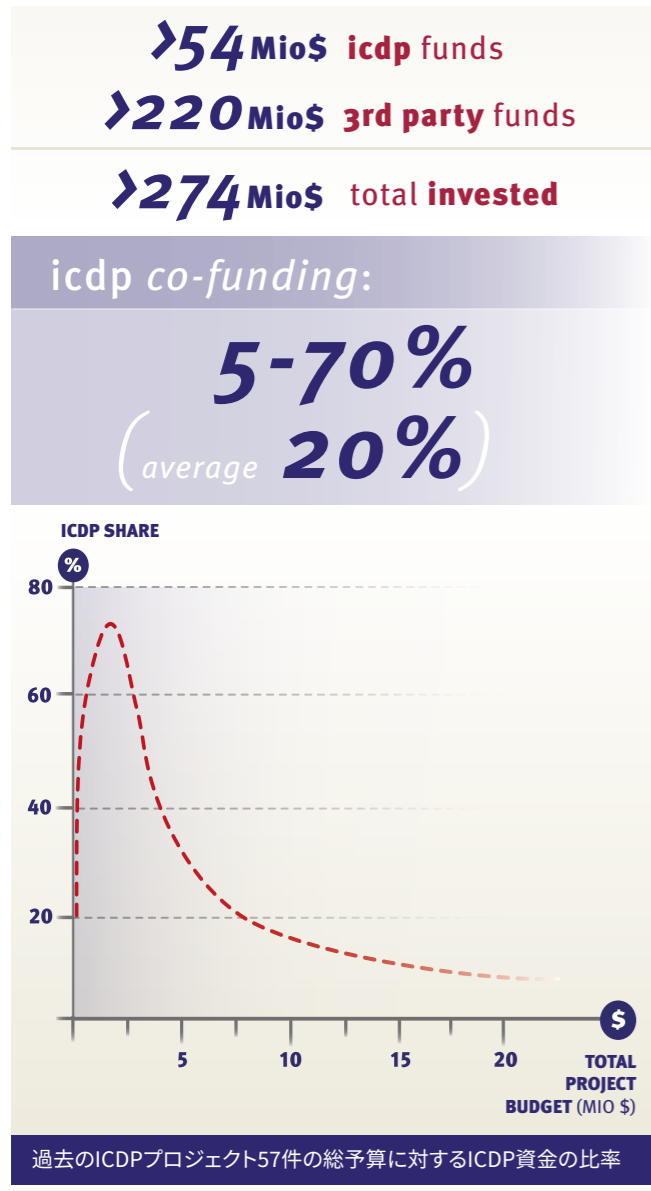
# ICDPによる共同出資 icdp co-funding

## ICDPの最大のサクセスストーリーのひとつ One of ICDP's greatest success stories

掘削プロジェクトがプログラム内で承認され、ICDPの共同出資額が割り当てられると、提案者は通常、自国の資金調達機関から追加の資金を確保する作業を行います。このように、国際的なチームを支援するというプログラムの方針は、各プロジェクトに様々な資金調達の機会を確保するという意味で、非常に重要なものとなっています。

この「シードマネー」の考え方は、ICDP 科学諮問グループによる優れた詳細なレビューと相まって、「ドアを開く」ことに役立ち、提案者が追加の資金源から必要な共同資金を求める機会を提供します。ICDP の指定資金は、ホスト機関であるドイツ地球科学研究センター (GFZ) で、プロジェクトの運営に十分な資金が蓄積されるまで保管されます。

資金の共同利用は、ICDP の最大の成功例の一つです。過去 20 年以上にわたって得られた資金総額を振り返ると、プロジェクトごとの ICDP の出資比率は、かなりのばらつきがあるにもかかわらず、総運営費の平均 20%程度です。これまでに、ICDP は 57 以上のプロジェクトに約 5,400 万米ドルを投資し、さらに 2 億 2,000 万米ドルをさまざまな第三者から調達してきました。



# 技術開発 technology development

## 地球科学分野の主要な技術開発への資金提供 Funding for key technology developments in Earth Sciences

地下深くに隠された答えを求めて地球の内部を調査する研究者にとって、科学掘削は常に大きな挑戦となります。ICDP は失敗のリスクを最小限に抑えるために努力していますが、掘削にリスクがないわけではなく、研究用の掘削孔は必然的に地球内部を評価するための新技術の実験台となります。ICDP のプロジェクトは、掘削研究の科学的な限界を押し広げることが多く、孔内や実験室でプロセスをモニタリングするための新しい方法や機器が必要になります。これらの新技術の設計とテストは、科学的な掘削への応用に直結する一方で、掘削業界の企業との密接な協力関係により、それらの成果を商業的な応用に移す機会が生まれます。

技術革新の例としては、アイスランド深部掘削プロジェ

クト (IDDP) で適用された 500°C を超える超高温掘削法、世界のいくつかの大きな湖で実施された軟質堆積物の連続コアリング、地震動や地面の変形・ひずみの高感度一体型孔内観測装置の設置、孔内蛍光 X 線センサーなどのメモリ内蔵式地球物理学的検層装置の開発、プラットフォームに依存しない「モバイル・ドリリング・インフォメーション・システム (mDIS)」などが挙げられます。

ICDP の科学者には、ICDP が開発したツールや手法を ICDP Instrument Pool から利用することができ、運用支援グループが展開を支援しています。このようにして、科学掘削における発明を複数のプロジェクトで実施し、関連する知識を転用することができます。



### DRILLING, CORING MONITORING

- high-temperature drilling
- continuous complete coring
- fibre-optic installations
- continuous data recording



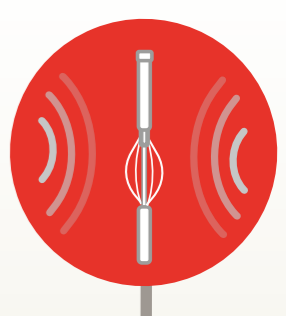
### DATA MANAGEMENT

- integrated field and repository software
- rig-, log- and lab-data integration



### FIELD LAB INSTRUMENTS

- multi-sensor logging
- ct-core scanning
- drill fluid analyses
- standardized analytics



### DOWNHOLE MEASUREMENTS

- high-temperature logging
- retrievable monitoring strings
- multi-sensor logging
- logging while drilling

## 科学掘削における主要な技術的課題

## 教育・普及活動 education and outreach

教育・普及活動は、パブリックアクセプタンスに重要で、ICDPのポリシーに不可欠な要素  
Education and outreach are very important to ensure public acceptance and are an integral part in the policy of ICDP

ICDP が掘削を行うほとんどの場所で、地元の人々は自分たちの地域への影響を懸念しています。どのような掘削であっても、近隣のコミュニティに影響を与える可能性のある大規模なプロジェクトの一部であると考えるのが一般的です。したがって、科学掘削を行う際には、できるだけ早い段階で住民とのコミュニケーションを開始し、非商業的な研究目標や使用する技術について、透明性と説得力のある方法で説明することが重要です。

誘発地震、汚染、その他の環境への影響などの潜在的なリスクについては、透明性のある方法で対処し、すべ

てのリスクを明確に評価する必要があります。ICDP では、何十ものプロジェクトにおける長年の経験に基づき、地元の人々やステークホルダーに受け入れられるような効果的なアウトリーチの「最適なソリューション」を提供しています。関係者や影響を受ける人々に情報を提供する義務は、掘削そのものだけでなく、調査や結果の公表も含まれます。掘削情報の一部は、ICDP プロジェクトで調査された地域の博物館やその他の教育機関で紹介されています。また、ICDP の科学プロジェクトは、多くの若手研究者に新しい技術を学び、ネットワークを構築する機会を提供し、科学的な掘削コミュニティを強化しています。

> 500 世界各地のICDPトレーニング活動に参加する科学者たち



ニュージーランドのアルパイン断層で行われたICDPトレーニングコースでの掘削技術の解説の様子



## 数十億年の地球進化 billions of years of earth evolution

ICDPの今後10年の4つの主要科学テーマ  
ICDP's 4 prime science themes for the next decade

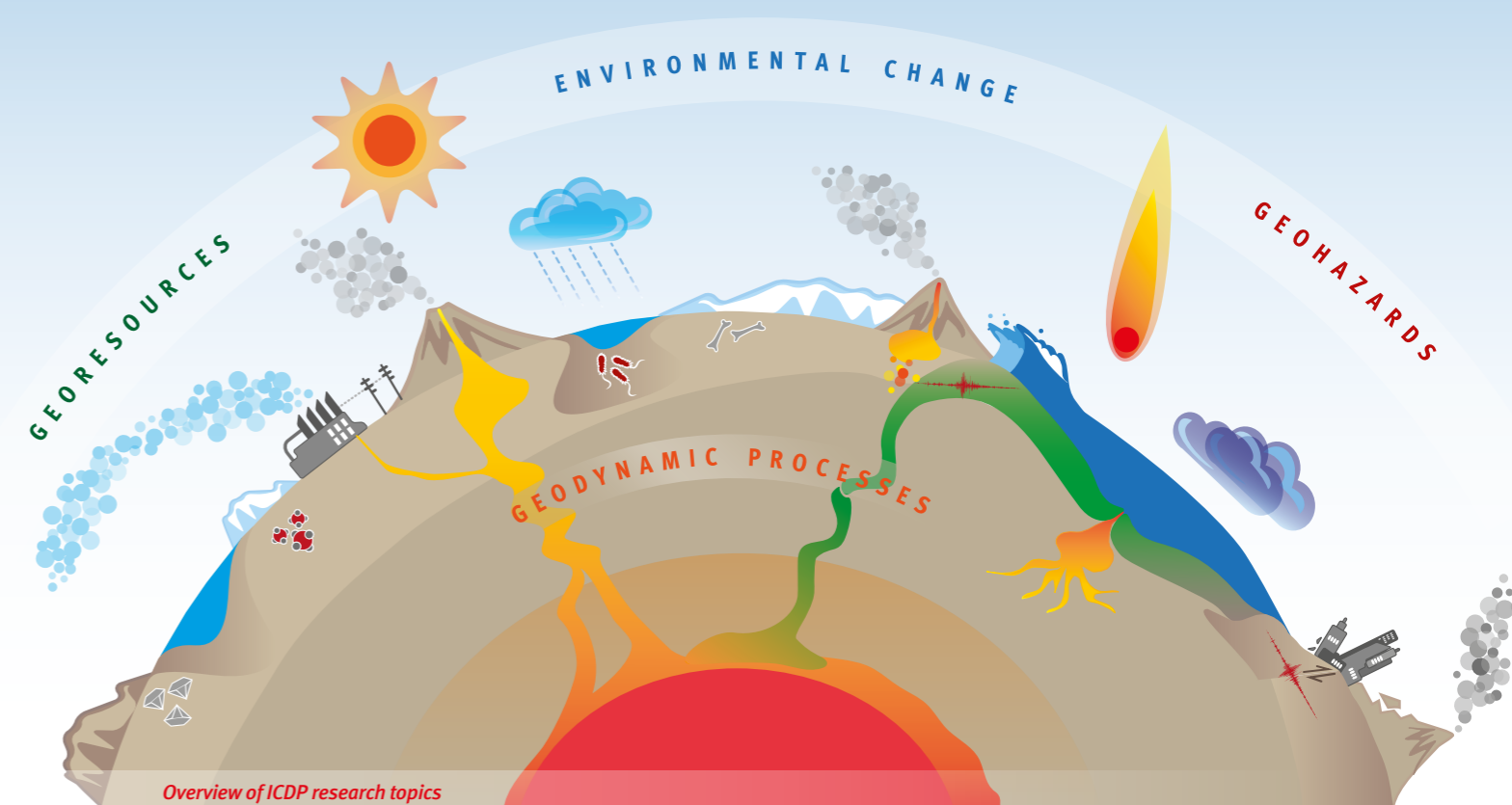
ICDP の最もユニークで重要な点は、大陸を構成する物質を通じて約 40 億年に及ぶ地球の記録にアクセスできることです。

ICDP プロジェクトでは、地球の熱進化、プレートテクトニクスの始まり、磁場の発生、生命の起源と進化、大規模な隕石衝突の影響、鉱床の形成、大気と海洋の進化と酸素の発生、古気候、全球凍結、生物の大量絶滅などを調査し、火山や断層帯の現場観測や掘削調査を行います。このような研究は、地球-生命システムの進化、自然災害の発生プロセス、現代社会に不可欠な資源の

確保、過去から現在に至る気候変動などに関する基本的な疑問に答えるために非常に重要です。

このようなプロジェクトこそが、何十億年にも及ぶ地球の進化を教えてくれる可能性を秘めているのです。以下のページでは、ICDP の科学的課題を、「地球力学プロセス」、「自然災害」、「地質資源」、「環境変化」の4つのテーマに分けて紹介します。

## Billions of Years of Earth Evolution



Overview of ICDP research topics



# テーマ 01: 地球力学プロセス THEME01: geodynamic processes

## 現在の地球を形成したプロセスの解明

Understanding the processes that shaped the planet's present conditions

45.4 億年にわたる地球の進化は、私たちの住む環境と私たちが利用する資源を生み出しました。現在の地球を形成したプロセスを理解することは、将来的に環境と資源を維持するために不可欠です。私たちの主な注目点は次のとおりです。

- 1) プレートテクトニクスはいつ、どのようにして始まり、地殻やマントルはどのように進化してきたのか？
- 2) 地球の水圏・大気圏・生物圏のシステムは何によって形成され、関連する化学物質はどのように循環しているのか？
- 3) 地球上の生命はどのようにして誕生し、どのようにして環境に影響を与えたのか？

### 過去の成果

大陸地殻は厚さ 20 ~ 80km で、地球の表面積の 40% 近くを占めており、この地殻の中には、これまでのプレートテクトニクスやブルーム活動による地球の物理的・化学的進化が記録されています。40 億年以上前の地殻はほとんど存在しないので、大陸の地殻成長のメカニズムや、数十億年の地球史にわたるマントルの進化がそれとどのように関係しているのかを理解することは、基本的な問題です。ICDP のいくつかのプロジェクトは、地殻形成プロセスとマントル進化の理解に大きな貢献をしてきました。例えば、南アフリカのバーバートン・グリーンストーンベルト掘削計画は、太古代のマントルの組成について重要な知見を提供し、オマーンのオフィオライト掘削計画は、白亜紀の未成熟地殻の形成と物質のマントル内の移動および熱水変質によるマントル・地殻・海洋間の移動を評価しました。スウェーデンのスカンジナビアン・カレドニデスでの衝突造山運動解明計画 (COSC) では、地質時代の山脈の深部で作用しているテクトニックなプロセスを調査しました。



岩の上の生徒たち:地殻からマントルへ移行する不連続面(モホ)の上に立つ生徒たち

地球の歴史における生命とその環境の進化は、私たちの世界を根底から形作ってきました。先カンブリア時代において、生物圏は3つの基本的な進化を経験しました。すなわち、太古代に原核生物と酸素を発生する光合成が発達し、原生代中期に多細胞の真核生物が誕生し、そして約 5 億 4 千万年前の生命大爆発により、最終的に我々人類につながる種が誕生したのです。これらの生物圏進化革命は、まず液体の水が地表に安定して存在するようになった 42 億年前に発生し、さらに、大気中の酸素が急増した約 25~21 億年前と約 8~5.4 億年前に起こりました。ICDP の研究は、フェノスカンジヤ北極圏ロシア初期地球掘削計画 (Far-Deep) など、初期の生態系や環境、無酸素状態から部分的に酸素のある世界への移行についての理解の基礎となっています。

太陽系は極限環境であり、大小の岩石惑星の表面では隕石衝突によりクレーターが形成されます。現在、地球上では 190 以上の衝突クレーターが確認されています。太陽系の他の惑星や月とは異なり、地球では地殻変動によってクレーターが不明瞭になったり、消滅してしまったり、堆積物によって埋まってしまったりするため、衝突クレーターを見いだすのは困難です。そのため、正確な年代測定のための岩石を採取し、このような構造の起源を確認し、その形成過程を理解するためには掘削が必要です。過去 25 年間に ICDP は、恐竜絶滅の原因となった有名な白亜紀 - 古第三紀 (K-Pg) 境界 (メキシコのチクシュルーブ・クレーター、幅 200km) から、ガーナのボスムトウィ湖 (約 10km) まで、規模の大きな 4 つの衝突構造の掘削に成功しました。これらの掘削プロジェクトでは、クレーターの形成過程、被衝突岩体および衝突体の挙動、クレーター内外での衝突岩の配置、噴出物の生成、さらには衝突後の複雑な一連の物理的、化学的、生物学的プロセスに関する新たな知見が得られました。掘削コアの研究は、主に地震学的な地球物理学的データと合わせて、これらの構造の内部の 3 次元形態を明らかにしました。

クレーターの掘削は、しばしば他の ICDP の目標と組み合わせられて行われました。また、ガーナのボスムトウィ湖とロシアのエルギットギーン湖の湖底から回収された衝



ヒマラヤ型造山帯のルーツに迫るCOSC科学掘削プロジェクト (スウェーデン)

突後の堆積物は、それぞれ西アフリカモンスーンの 100 万年の詳細な記録と、北シベリアの 300 万年前から 200 万年前にかけての北極圏の森林から永久凍土の生態系への移行の記録という、ユニークな高解像度の古気候の記録を明らかにしました。2016 年にメキシコで行われたチクシュルーブの海洋掘削は、国際深海科学掘削計画 (IODP) との共同プロジェクトとして実施されました。特に興味深いのは、地球の地質学的、生物学的な進化に対する影響と危険性です。例えば、6,500 万年前に起きた巨大なチクシュルーブ衝突事件は、生物圏に壊滅的な影響を与えたと言われています。地球上の衝突を調査する ICDP プロジェクトは、米国のチェサピーク湾衝突構造深部掘削プロジェクト (CBAY) など、衝突プロセスや生物学的影響に関する重要なデータを提供しています。

## 基本的な疑問

プレートテクトニクスはいつ頃始まったのか、地球の地殻はどのように成長し進化してきたのか、などの重要な問題について議論が続いています。地殻とマントルの進化に関する現在のモデルには、大陸地殻が生成され、のちにリサイクルされるというものと、過去 40 億年にわたり連続的あるいは断続的に成長したとするものがあります。この議論は地殻の成長に関連した地球の変動や火山活動、さらに、若い地殻の生成において島弧やマントルブルームが果たす役割についての議論と絡み合っています。島弧は若い地殻の付加体であり、マントルブルームは大きな火成岩地帯や海洋台地を介して新鮮なメルトを地殻に供給します。

また、プレートテクトニクスの様々な過程や、大きな大陸の形成と出現、地球史の重要な時期における古気候と環境の変化の関係を制御するさまざまなフィードバックメカニズムを理解することも、ICDP の主要な課題です。このようなトピックは、微生物の進化の初期条件やその後の複雑な生物の広がり、すなわち生命の理解にも重要です。

地球の歴史の最初の 25 億年の間の衝突記録については、ほとんど知られていません。地球上で知られている最古の衝突構造は約 20 億年前のもので、約 34 億年前から 25 億年前の間に起こった衝突の証拠として、衝突によって遠くまでまき散らされたと思われるスフェリユール層が存在します。これらの層は、南アフリカとオーストラリアに見られ、地球の初期（太古代）の衝突記録を示す唯一の痕跡となっています。いくつかのスフェリユール層では、異常に高い鉄分濃度が検出され、最近の衝突よりもはるかに大きい直径約 60km の衝突体（隕石）サイズに対応しています。このような衝突は、巨大なエネルギーを放出し、地球の大気、水圏、生物圏に大きな変化をもたらす可能性があります。このような重要性ゆえに、こうした出来事の調査が不可欠です。

## 将来の科学的ターゲット

今後 10 年の間に、ICDP の掘削ターゲットは、これらの課題のいくつかを解決することになるでしょう。

例えば、南アフリカでは、世界最大の苦鉄質 - 超苦鉄質貫入岩を掘削するブッシュベルト複合体掘削計画

(BCDP) があります。アイスランドでは、クラフラマグマ掘削計画 (KMDP) が、カルデラの下にある流紋岩質マグマの物理的・化学的・力学的条件を調べるために、流紋岩質マグマを掘削することを提案しています。どちらのプロジェクトも、初生的なマントルメルトに関連する地殻形成プロセスをその場で評価する重要な機会を提供するものです。

先カンブリア時代における生命の発生と進化を解明するために、世界で最も保存状態の良い地層を対象とする ICDP プロジェクトもあります。すでに承認されているプロジェクトでは、南アフリカのバーバートン太古代地球表層解明計画 (BASE) のように、酸素発生型光合成の進化を対象とするものや、新原生代統合地質学的研究：エディアカラ紀からカンブリア紀への移行（GRIND）のように、大気中の酸素増加、地球の気候変動、動物の進化の相互作用を対象とするものがあります。GRIND ではナミビア、ブラジル、中国に掘削サイトがあります。異なる大陸間で、環境や生物の変化の重要な時期の、最も保存状態の良い層序区間を掘削することで、ユニークな試料ライブラリを提供し、そこから複数のプロキシを開発することが可能になります。それによって過去の地球環境や生物の進化の重要な時期に応用することができます。また、南アフリカの BASE プロジェクトでは、太古の隕石衝突の名残である初期地球で形成されたスフェリユール層を採取できる可能性があり、地球の歴史におけるこの重要な時期についてユニークな知見を与えてくれると期待されます。

このような進展があってもかかわらず、たとえ大規模な物理探査データと組み合わせたととしても、巨大な衝突構造内の単一の掘削では、限られた範囲しか見ることができないことは明らかです。チクシュルーブの事例は、15 年の間をあけて行われた 2 つの深部掘削プロジェクトが、いかにして得られた知識を倍増させたかを示しています。将来的には、厳選された衝突構造の掘削プロジェクトによって、クレーター形成プロセスや生物地球圏への潜在的な影響についての理解が深まる可能性があります。そのためには、次のようないくつかの特徴を兼ね備えた構造を選択することが重要です。すなわち、異なる種類の被衝突岩体に形成されていること、長期的な熱水活動や大規模な鉱床を生み出した

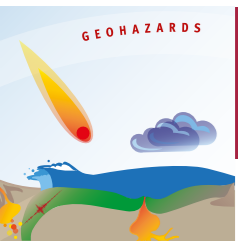


ナミビアのGRINDドリルサイトで採取された  
深度185m付近の3m分のコア試料



GRINDのメインターゲットの一つであるナミビアのエディアカラ-カンブリア紀の変遷





## テーマ 02: 自然災害 THEMEO2: geohazards

### 災害発生からリスクまでの一連の流れを理解する Understanding the full chain from hazard to risk

自然災害は、人類にとってかつてないほどの脅威となっています。その背景には、世界各地の災害発生の危険性のある地域で人口が急激に増加し、地域社会が自然災害と脆弱なインフラによるリスクにさらされていることがあります。地球上の主な自然災害は、地震、火山、マスマーブメント（山崩れや地すべり）です。また、隕石の衝突という形で宇宙からの危険もあります。これらの災害は、地域の地質条件に強く依存して非常に異なる時間と空間のスケールで発生するため、それぞれの災害の評価と予測は困難です。災害からリスクまでの一連の流れを理解するためには、災害の根本的な原因とそれを発生させる物理的プロセスを解読することが最も重要です。陸上科学掘削は、これらの科学的な疑問を調査するための重要な手段であり、ICDP の課題の中で災害が最も重要である理由でもあります。

今、私たちが注目している主な疑問と課題は以下の通りです。

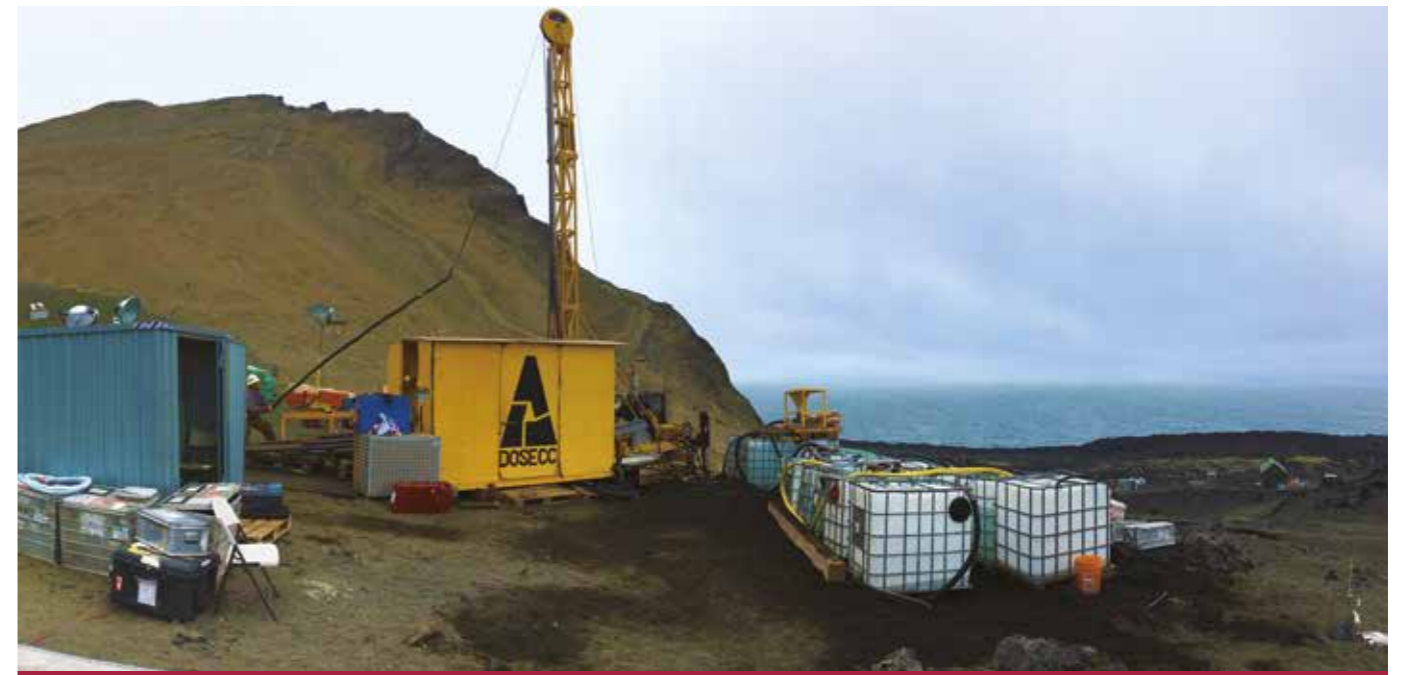
- 1) 地震、火山噴火、地すべりなどの大規模災害を引き起こし、制御する要因は何か？
- 2) 緊急の脅威をもたらす断層、火山、地すべりの可能性を、どのようにして危険性の低いものと区別するか？

3) どのようにして物理的プロセスの定量的な理解を深め、自然災害に伴うリスクを軽減するための事前警告を行うことができるのか？

地震、火山、地すべりの科学研究は 19 世紀に始まり、20 世紀の終わりには地表や宇宙から地球内部を調べる新しい技術が開発され、大きく進展しました。しかし、断層や火山、マスマーブメントなどをその発生源、すなわち、地球の深部で調査しなければならないという重要な課題に取り組むためには、私たちの理解に大きなギャップがあります。科学掘削は、地表や宇宙からの調査と異なり、このような災害の原因となる現象を、その発生源で計測・観察・監視する手段を提供します。

#### これまでの実績

断層帯の掘削は、地震のエネルギーが蓄積・放出される深さにアクセスする唯一の手段であり、1996 年の ICDP 設立以来、中心的な課題として取り組まれてきました。断層掘削の代表例としては、カリフォルニア州の「サン-アンドレアス断層帯深部観測プロジェクト (SAFOD)」があります。SAFOD は、ドイツの超深度大陸掘削プロジェクト (KTB) で成功した「プレサイトサーベイ-パイロットホール-メインホール-モニタリング」というマルチス



「SUSTAIN」プロジェクト: アイスランド沖の海洋孤島、スルツィー火山での2つの掘削孔をベースに進められている

トップアプローチを踏襲したものです。このプロジェクトでは、鍵となる深さ 3 km の位置において、主要なトランスフォーム断層の掘削に成功し、地震発生を支配するプロセスについて、これまでにない斬新な知見を得ることができました。現在、SAFOD の後継プロジェクトであるインドのコイナでのダム誘発地震プロジェクトでは、6 km より深いところで発生したマグニチュード 6.2 のダム誘発地震の震源域への掘削を目指して、新たな試みを始めています。また、ニュージーランドのアルパイン断層を対象とした深部断層掘削プロジェクト (DFDP) や、日本の東北地方太平洋沖地震の原因となった断層の上端を掘削するプロジェクト (IODP JFAST プロジェクト) など、浅部掘削でも大きな進展が見られます。ICDP は、台湾のチェルンブ断層掘削プロジェクト (TCDP) や、トルコの北アナトリア断層恒久ダウンホール物理観測所 (GONAF) など、他の断層帯掘削・モニタリングプロジェクトを支援することで、重要な一歩を踏み出しました。

噴火によって住民やインフラが危険にさらされる重要な火山は、過去の ICDP プロジェクトの対象となっています。例えば、西暦 79 年にヴェスヴィオ火山の噴火でポンペイの街が破壊された超巨大火山の上にあるイタリアのナポリ・カンピ・フレグレイ地域、数多くの活火山があるホットスポットのアイスランド、ICDP で火道掘削された日本の雲仙火山、ハワイ-天皇火山列の中で最も活発な

ハワイ島、アメリカのイエローストーンの超巨大火山などが挙げられます。これらの場所で大規模な噴火が起これば、人類に甚大な影響を及ぼすため、詳細な調査が必要とされています。

#### 基本的な問題

自然災害に関する理解は、現場での観察、実験室での研究、理論的な研究を通して常に進化しています。最近では、学際的な研究により、地震、地すべり、火山噴火がどのようにして起こるのかが解明されつつあります。それにもかかわらず、自然災害の主要テーマである地震、火山、地盤変動のそれぞれにおいて、基本的な問題が残されています。

地震はどのようにして発生し、伝播し、停止するのか？ 深さ方向の主要なすべり帯の幅や構造はどうなっているのか？ 断層岩の鉱物組成、変形メカニズム、摩擦特性はどうなっているのか？ 断層が動くとき、地震波、非地震性変形、摩擦熱、岩石粉碎などの過程で、エネルギーはどのように分配されるのか？ 応力や間隙水圧の値はどのようなもので、地震サイクルの中でどのように変化するのか？ 断層帯の透水性や流体圧は、地震の発生時や発生後にどのように変化するのか？ 地下への注水や高いダムの建設によって、どのような条件で地震が誘発されるのか、またその地震はどの程度の規模になるのか？ こ



自然災害: 火山噴火、マスマーブメント、地震、インパクトクレーター

これらの例は、地震が発生する深さにある断層の組成と特性を包括的に理解する必要性を示しています。科学コミュニティは、さらなるコンセプトやプロジェクトのアイデアを積極的に開発することが求められています。これには、現在の ICDP-SEISM イニシアチブ (Scientific exploration of Induced SEISMicity and Stress) のような能動的に制御された地震発生実験や、地熱産業や石油産業との共同研究も含まれるかもしれません。

火山の噴火は、健康面や社会経済面で大きなリスクをもたらします。地域住民への明白なリスクに加えて、大規模な噴火は、短期的には航空交通に、より長い時間スケールでは気象や気候に、世界的な影響を及ぼします。火山災害に関する基本的な未解決問題は、噴火の時期と規模の予測にあります。地震活動、微動、噴気、山体変形など、火山噴火の前兆となる現象をどのように利用すれば、噴火警報システムの即時性と精度を向上させることができるのでしょうか。人々やインフラへのリスクを軽減するために、地域住民への警報発出のタイミングを改善する新しい観測を見出すことができるでしょうか。将来の噴火の規模や脅威のレベルを予測する噴火前のシグナルはあるのでしょうか。地震活動、微動、

噴気、山体変形などは地上でモニターすることができますが、これらの発生条件や発生過程を、火道やマグマ溜まりの内部やそれらの周辺において調べるためには、科学掘削が必要です。また、地熱を再生可能なエネルギー源として効率的に利用するためには、直接観察して得られた知見が必要となります。

急激で巨大な地すべりは、地球上で最も強力な自然災害の一つです。最大のものでは、数百万立方メートルの岩石や堆積物を流動させることもあります。地すべりの発生は、降水量、地殻変動による隆起速度、岩盤中の脆弱な層 (地下の粘土鉱物に富んだ層など) など、複数の要因によって支配されます。また、フランスやイタリアのリビエラ地方の脆弱な海岸で見られるような、浅海での崩落と鉄砲水も発生します。さらに、地すべりは水域に影響を与え、津波を引き起こして危険性を増大させる可能性があります。潜在的なすべり面に沿った重要なプロセス、例えば、間隙水圧の変化の影響などは、十分に理解されていません。掘削では、これらの重要な場所からコア試料を回収して実験室で研究したり、現場に設置した機器を使って孔井の状態をモニターしたりすることができます。

### 今後の科学的目標

地震発生の理論を構築し、検証するためには、断層の状態を原位置でサンプリングし、モニタリングする必要があります。地震が発生し、伝播する深さに到達するためには、深い掘削が不可欠です。また、より浅い掘削でも、IODP-JFAST プロジェクトのように、断層の構造や時間経過に伴う地震後の影響を研究するという重要な科学的目標を達成することができます。これらの目標を達成するためには、国際深海科学掘削計画 (IODP) と協力して、陸上と海底の両方で世界的な断層帯掘削プログラムを実施する必要があります。災害の定量的な理解を含む地震発生メカニズムの包括的なモデルの構築に必要な新しい知見を、カギとなる場所で得ることで、科学は一步步進化していきます。これらの知識は、災害が発生しやすい環境に住む人々を守るために、リスク軽減のための新しいコンセプトにつながります。

地下実験室や専用施設で行われる地震発生実験、あるいは、地熱発電や非従来型石油採掘の一環として行われる、原位置での制御地震実験も研究プログラムの重要な要素です。地震発生実験は、大規模な計画を必要とし、地域住民の理解を得るための話し合いが必要ですが、破壊核の形成や初期の断層の成長に関する疑問に答えるユニークな機会を提供します。

火山の噴火前の挙動は多岐にわたるため、噴火の時期や規模を予測することは困難です。イエローストーンのように噴火に至らない程度の活動が何十年も続いている火山もあれば、アラスカのカサトチ島のように数日のうちに休眠状態から完全な噴火に至る火山もあります。地域住民を脅かす非爆発性の火山から、大規模な破局的噴火によって気候を乱す可能性のある巨大な珪長質カルデラまで、噴火に至るまでの化学的・力学的変化をより深く理解することが最も重要です。また、多くの活火山や地表近くのマグマシステムでは、浅いところでも高温になるため、クリーンエネルギー資源開発の機会にもなります。この分野では、貯留層の岩石の物理的な理解から、掘削技術、高温用の検層ツール、化学的に強力な地層流体による腐食問題の解決まで、様々な課題に取り組んでいます。

地すべりを理解する上で最も大きな問題点の一つは、長



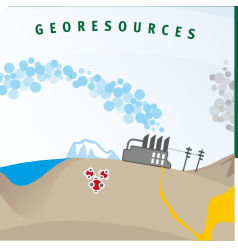
熊本地震で発生した地滑り

期的な前駆的要因、地震や降雨などの短期的な誘因、流動した体積や定置・流出の様式などの結果を結びつける直接的な観測が不足していることです。最近の地すべり現象では、崩落の始まりから、しばしば居住地域に影響を及ぼす崩落の末端部までをつなぐ複雑で未解明な連鎖過程が重要な役割を果たしていることが示されています。地形の恒久的な再編成を伴う最もダイナミックなセッティングは、三角州または急峻ですべりやすい斜面であり、いずれも大きな湖のある地域に影響を与えます。人間の活動による急激な温暖化による永久凍土の融解により溶けだした水は、地下の応力場や地盤の安定性を変えることで、山腹や海岸線全体の安定性に影響を与える可能性があります。ボーリングは、特に新しいリアルタイムのセンシング技術と組み合わせることで、因果関係を確実に評価することができます (地盤工学的な掘削、間隙流体の圧力や流れなどのポアホールモニタリング、地震の揺れに対する局所的な応答など)。

Can we identify *new observables* that *improve warning times* to local *population* for mitigation of risks to people and infrastructure

早期警戒情報となる観測データを見つけられるか

ストロンボリ式火山噴火



# テーマ 03: 地質資源 THEMEO3: georesources

## 地下の理解を深める Improved understanding of the subsurface

私たちは、人口増加や気候変動の影響を受けながら、急速に変化する環境の中で暮らしています。政府や産業界が温室効果ガスの排出削減に取り組む中、エネルギーや輸送手段を低炭素のものに切り替える必要があります。また、「気候変動に関する政府間パネル」や国連の予測では、地球温暖化を2°C以下に抑えるためには、CO<sub>2</sub>の回収・貯留が不可欠であるとされています。

私たちが早急に取り組むべき主要な問題と課題は以下の通りです。

- 1.) どのようにして低炭素エネルギー源、特に地熱エネルギーへの理解を深め、アクセスできるようにするか？
- 2.) 煙突から排出されるCO<sub>2</sub>や、空気中のCO<sub>2</sub>（この除去はより困難だが）を除去し、間隙中の超臨界流体や固体の炭酸塩鉱物として地下に永続的に貯蔵するための最も信頼できる方法は何か？
- 3.) 低炭素技術に不可欠な原材料、特に電池の材料となるリチウムやコバルトなどの鉱物・金属資源を濃縮するプロセスを理解するためには何が必要か？
- 4.) 将来の水資源をどう見極めるか？



ヘトリスハイジ地熱発電所(アイスランド)



カンピ・フレグレイのカルデラ群は、イタリア・ナポリ湾に沿った最大の火山地形

これらのテーマは、いずれも地下の理解を深める必要があります。これまでのところ、この分野に焦点を当てた掘削プロジェクトは比較的少ないですが、将来的にはICDPの重要な研究分野となるでしょう。

### これまでの実績

地熱エネルギーはICDPの設立当初から関心の高い分野であり、アイスランド深部掘削プロジェクト（IDDP）のようなプロジェクトでは、超臨界地熱システムの実現可能性と経済的可能性を研究しています。

CO<sub>2</sub>を固体の炭酸塩鉱物に変換する自然のプロセスは、オマーン・オフィオライト・ドリリング・プロジェクトの重要な焦点です。このプロジェクトでは、沈み込み帯の上にあるマントルが、深部で沈み込んだ堆積物から脱揮によって生じたCO<sub>2</sub>を多く含む水と反応して形成された、完全に炭酸化したマントルかんらん岩を1つの掘削孔で採取しました。また、幾つかの掘削孔からなる「マルチポアホール観測システム」は、マントルかんらん岩が風化する過程で、地下水から溶存CO<sub>2</sub>を取り込み、炭酸塩鉱物を生成する過程を記録するコア試料と水のサンプリングに使用されます。さらに、かんらん岩が風化する過程で水和と炭素鉱物の生成に伴う体積変化によって形成される亀裂の分布を把握するために、ポ

アホール・ハイドロフォンと地表地震計が設置されています。自然のプロセスを理解することは、天然の二酸化炭素鉱物化プロセスを模倣し、それを加速する人工的なプロセスを設計するための鍵になります。

ICDPは、南アフリカのブッシュベルトコンプレックス掘削プロジェクト（BCDP）により、重要な原料資源の理解に大きく貢献します。ブッシュベルトコンプレックスは、地球上で知られている最大の層状貫入体で、世界の白金族元素、クロム、バナジウム資源のかなりの割合を占めています。BCDPでは、既存のコア試料を収集し、知識の不足している部分を新たに掘削することで、ブッシュベルトコンプレックスの全断面を作成し、鉱石形成プロセスのより完全な理解を深めるための研究を行います。

ICDPの掘削孔は、重要な帯水層を有する可能性のある地質ユニットを通過することが多いのですが、水文地質学的な化学研究は多くのICDPプロジェクトでまだ行われていません。例外は、トルコのヴァン湖です。ヴァン湖は閉塞された塩水湖で、60万年前の年縞堆積物というユニークな気候記録を持っており、間隙水の塩分濃度の変化が湖の水位変化を反映しているため、水文地質システムを理解することができます。

## 基本的な問題

地熱エネルギーは、低 CO<sub>2</sub> 再生可能エネルギーの中でも最も魅力的な資源であるにもかかわらず、世界の電力生産量の数十分の一を占めるにすぎません。地熱は、広範囲に分布しており、どの電源よりも設置面積が小さく、ベースロードの再生可能エネルギーを提供することができます。しかし、現在のところ、高い経済的リスク、長い開発期間、掘削コストの高さ、従来型地熱エネルギーの電力への変換効率の悪さなどが、その利用を妨げています。マグマに関連する超高温地熱流体を利用することで、これらの問題の多くを解決し、地熱を化石燃料火力発電のエネルギー変換効率にまで引き上げることができます（例：Krafla drilling initiative）。地熱掘削は、マグマ領域に入り込んだことが何度もありますが、すべて想定外のものであり、この重要でありながら未踏の地殻領域については、ほとんど何もわかっていません。しかし、これらの掘削経験は、掘削の技術的可能性と、坑井 1 本あたりの熱出力が桁違いに大きくなることの両方を実証しています。このような超高温の地熱領域を理解することは、ICDP の主要な未解決問題の一つです。

温室効果ガス削減のための人工的な二酸化炭素鉱物化の可能性については、地質学的に重要で未解決の問題がいくつかあります。まず最初に決めなければならないのは、(1) 空気中の CO<sub>2</sub> を除去するという特定の目的

のために採掘され、粉碎された鉱山の鉱滓や岩石の表面風化、または (2) CO<sub>2</sub> を含む流体が地下の反応性岩石を循環する原位置プロセス、のどちらに焦点を当てるかです。どちらにも、それぞれのメリットとデメリットがあります。原位置プロセスを成功させるためには、炭酸塩鉱物やその他の反応生成物が間隙で結晶化する間、いかにして間隙と透水性を維持するかが第二の課題となります。後者のプロセスは、流体の消費、固体質量の増加、固体密度の低下による体積変化から、流体の継続的な流れと新鮮な鉱物表面へのアクセスを確保する正のフィードバックが生じます。どのような入力や環境条件が正のフィードバック体制に有利なのか？この疑問を解決するために、実験やフィールド調査を行う必要があります。

化石燃料から再生可能で低炭素なエネルギー源への転換に伴い、原材料が非常に必要となります。これらの原材料の多くは、現在、少数の国でしか生産されておらず、需要の大幅な増加が予想されることから、「クリティカルマテリアル（重要な原材料）」と呼ばれています。金や銅などの主要金属の鉱物システムはよく理解されていますが、リチウム、コバルト、ニッケル（電池用）、希土類元素（電気モーターや風力発電機用）、テルル（ソーラーパネル用）などの重要な原材料の鉱床については、科学界がより良い地質学的モデルを開発することが急務となっています。鉱床の多くは地下に埋もれているため、

その成り立ちを理解するためには掘削が不可欠です。探鉱会社が品位のみを重視するのに対し、科学的な掘削は、より広範な問題に取り組み、包括的な鉱床モデルとシステムの理解を深めることができます。

最も重要な天然資源である水は、ほとんどの ICDP の掘削プロジェクトの焦点ではありませんが、回収されたコア試料の間隙水には、地質学、地球微生物学、水循環に関する重要な情報が含まれています。しかし、帯水層の水文地質学的調査や水資源の調査は、ICDP プロジェクトの重要な副次的ターゲットとなる可能性があり、多くの場合、社会的に直接的に寄与できるものと考えられます。

## 将来の科学的目標

低炭素の未来のための地熱資源の理解は、今後数年間の科学の強力な推進力となるでしょう。ICDP と地熱産業との関係をさらに発展させ、共同プロジェクトを展開することで、マグマと地熱のカップリングの科学的探究を、必要とされるエンジニアリングや技術開発と組み合わせることで推進することができます。このようなプロジェクトは、グリーンエネルギー、マグマ・地殻形成の基礎科学、信頼性の高い火山モニタリングにも有益なものになります。

炭素の鉱物化や CO<sub>2</sub> の地中貯留に関しては、アイスランドで進行中の CarbFix プロジェクトや、米国ワシントン州で過去に行われた Wallula プロジェクトのように、ICDP は有望な地域でパイロット実験を行うことができます。また、CO<sub>2</sub> を注入して石油の増進回収を行うことは、経済的に実現可能な技術であり、産業界にも大きな影響を与えています。一方で、地下の人工的な炭素鉱床に関する過去の研究は稀です。ICDP は、マントルカンラン岩や玄武岩質溶岩中の炭素貯留、特に CO<sub>2</sub> 輸送流体として水が容易に利用できる海岸線付近での二酸化炭素地下貯留に今後重点的に取り組むことで、大きな貢献ができると考えています。この種の研究は、高温の地下亀裂システムを介して水や超臨界 CO<sub>2</sub> を循環させる強化地熱システム（EGS、Enhanced Geothermal Systems）の研究との間に、大きな相乗効果を生むことが期待されます。

クリティカルマテリアルの分野では、ICDP が取り組むことのできる基本的な科学的問題があります。これらの元素の多くは、地殻の上部数百メートルでしか採掘されま



オマーンオフィオライトのトラバーチン中のアルカリ性泉

せんが、ICDP ではさらに深く掘り下げて、鉱床の形成に不可欠な深部のプロセスを調査することができます。リチウム、コバルト、ニッケル、希土類元素などの元素は、通常、部分溶解、分別結晶化、液体不混和、熱水変質・沈降などのマグマ・熱水プロセスによって濃縮されます。掘削は、このようなシステムのより深い部分を調査することで、これらのプロセスを直接ターゲットにする機会を提供し、より広範な鉱物システムのモデルを構築します。

全体として、ICDP は、現代および過去のマグマ・熱水システムを理解し、地熱循環を生み出す際の流体と岩石の相互作用の役割を研究し、CO<sub>2</sub> を閉じ込めたり、金属を濃縮する鉱化生成に大きく貢献できることが明らかになっています。ICDP の特に素晴らしいところは、このようなシステム内のすべての相互作用を調査するためにあらゆる科学コミュニティを結集することです。



ミヴァートン地熱地帯(アイスランド)



## テーマ 04: 環境変化 THEMEO4: environmental change

### 大陸掘削:地球がどのように進化してきたか記録する堆積物 Continental drilling: sedimentary archives telling us how Earth evolved

過去 45 億年の間に、地球深部は分化し組成を変え、地球表層環境も非常に大きく変化しました。生命は地球誕生後の早い時期に誕生し、すぐに地球の表層環境に大きな影響を与え始め、現在も地球の物理的・化学的側面で影響を与え続けています。生物化学的な物質循環や地球の軌道変化による太陽光強度の変動に伴う CO<sub>2</sub> レベルの自然なゆらぎによって、地球の気候は、あるときはゆっくりと、またあるときは急激に、様々な段階を踏んで進化してきました。直近の温暖期には人類の文明が繁栄していましたが、「人新世」を迎えた今、地球の歴史上初めて人類という一つの種が地球の気候を大きく変え始め、将来の世代に多くの課題をもたらしています。地球の歴史全体にわたって、地球内部現象と生物圏との相互作用や地表の物理・化学過程との相互作用の記録が堆積物に保存されています。このような記録は、過去と未来の環境変化が地表をどのように変化させたか、

そして今後も変化させ続けるかを理解する鍵を握っています。私たちがすぐに注意を払うべき重要な科学的疑問と課題は以下の通りです。

- 1.) 水循環の将来の変化を予測するために、地球の気候における過去の「温室」状態から何を学ぶことができるか?
- 2.) 地下の生物圏は、生化学的フラックスと炭素循環を制御する上で、どのような役割を担っているのか?
- 3.) 人類の分散は、発祥地から到達地までの移動経路において、どのように環境変化に左右されたのだろうか?
- 4.) 地表のプロセスや初期大気との相互作用をどのように記録しているのだろうか?



イスラエル・死海深層掘削プロジェクト (DSDDP)

地球上の初期生命体がどのような環境で生息し、広がっていったのかという疑問に答えることは重要です。その理由は、太古代の地層の調査から、火星や他の惑星での探査戦略の青写真を描けること、高温で地殻変動が激しく過酷だった初期地球上で生命が直面した問題や障害がわかるからです。また、これらの地層は、太陽系外惑星のスペクトルを分析して生命の存在を確認する際に有望な生物学的データを提供してくれます。

現在の大陸には、地球の過去の環境の様々な状態に関連する重要なプロセスを記録した貴重な地層が保存されています。直近 2 億年の地球史の解明では、海洋掘削で得られた試料が、環境変化を調査するための陸上掘削を補います。特に海洋掘削と大陸掘削をリンクさせたプロジェクトでは、大陸や海の進化で重要な時期の環境変動に関して、シームレスな情報を得ることができます。大陸掘削は、海洋地殻の年代を超える期間において、地球がどのように進化してきたかを示す堆積物アーカイブを与えてくれます。

#### 過去の実績

ICDP の多くのプロジェクトは、堆積物コア試料の分析を通して、多くの科学的目的に取り組んできました。その対象となる地層は、太古の昔に堆積したものから、第四紀の環境変化について新たな知見を与える現代の湖沼まで多岐にわたります。湖底からより最近の地球史を解明するために、ICDP は 1998 年に GLAD 湖底掘削システムプロジェクトを開始し、その後、DLDS (Deep Lake Drilling System) を開始しました。これらのプロジェクトは大きな成功を収めており、掘削関係者は 5 つの大陸で約 20 の現在と過去の湖を掘削することができました。

これらのプロジェクトでは、更新世中期から後期にかけての古気候の記録に焦点を当て、最終氷期を越えた降雨、気温の記録だけでなく陸域生態系の情報を提供してきました。これらの記録は、第四紀後期の地球の軌道の変化と気候変動に関する新たな切り口を見出しました。例えば軌道変化と低緯度熱帯の「大規模干ばつ」や北極の「スーパー間氷期」との因果関係などです。こ



Bosumtwi 衝突構造で掘削したコア試料の湖沼堆積物から見つかった魚の化石 (ガーナ)

れらは地球の気候変動がいかに地球自身の大規模変動に敏感に反応するかを示してきています。

このような湖沼掘削プロジェクトの例として、イスラエルの死海深層掘削プロジェクト (DSDDP) は、古気候、テクトニクス、地下生物圏に関する知識を深め、これら全てを統合した学際的な研究推進に成功しました。湖岸段丘に露出した湖成層を何年もかけて調査した後、2010 年～2011 年にかけて ICDP 深層掘削プロジェクトが実施され、死海の最深部に相当する地層から連続したコア試料が回収され、周辺の露頭から得られた情報のギャップを埋めることができました。回収された最も長いコアは、掘削深度 455 m (現在の死海の湖面から 750 m、海面から 1,177 m) に達し、過去 22 万年分をカバーしています。

#### 基本的な疑問

今後数十年の間に、気候変動は気温と水の循環に大きな変化をもたらし、人間とそのインフラに深刻な影響を与えることとなります。すでに世界人口の 3 分の 2 近くが、1 年のうちのすべて、あるいは一部の期間、水不足に対処しなければならない状況にあります。今後の気候変動を理解するためには、過去の気候を理解することが不可欠です。将来、地球温暖化が進行すると、理論的にもモデル的にも、地球規模では降水量の多い地域の降水量が増え、乾燥した地域の降水量が減るはずですが、しかし、この「降雨地域により雨が降るようになる」

という予測が陸域で通用するかどうかは明らかではありません。さらに、データは少ないですが過去の地球で「温室」と呼ばれる CO<sub>2</sub> 濃度の高かった時期に、降水量が変化した記録があります。最近の気候モデルの進歩により、様々なミスマッチは解消されつつありますが、これらの気候変化の速度や変動を引き起こすメカニズムについてはまだ完全には理解されていません。

人間生活における水の重要性を考えると、ICDP コミュニティの重要な課題は、戦略的に配置され、特に温暖な時期に重点を置いて、高分解能で古気候を復元するネットワークを通じて、過去の水文学的变化に関する科学的信頼性が高く社会活動に直結する情報を提供することです。より長い時間軸で見ると、地球の気候は大気中の高濃度の CO<sub>2</sub>（人類誕生前の 3 倍以上）に起因した温暖で氷河のない「温室」状態の期間から、CO<sub>2</sub> 濃度が低く南極や北極に大陸規模の氷床が発達した「アイスハウス」状態への変化を経験してきました。人類がこれまでに大気へ放出した CO<sub>2</sub> の量を外挿すると、過去 300 万年の間に地球が経験したことの無いレベルにまでも到達すると予測されています。このような温室効果ガスの世界では、地球の気候は異なるモードで動いており、砂漠がサバンナに変わり、海洋無酸素化、海洋酸性化、藻類の大発生などが発生していました。これらの過去の

温暖化した時期の地質情報は、地球の海洋・大気・生物圏の結合システムが、高い CO<sub>2</sub> レベルが今世紀末までに日常化してしまうであろう世界で、どのように機能するのか評価する材料を与えてくれます。また、人類文明の発達以来、経験したことのない温暖な気候に、生態系がどのように反応していくかを評価するための手段となります。

海洋掘削によって、温暖な気候であった白亜紀後期から鮮新世の地域ごとの海の記録が得られています。その一方で海洋掘削のターゲットと同じ時代の大陸物質のサンプリングも必要です。それは同時代の気候変動が大陸物質へ記録されているからだけではありません。海底堆積物では不十分か入手不可能な古海洋の記録が、陸上試料では入手可能だからです。

湖沼や大陸盆地系の高解像度の堆積物記録を科学的に調査することは、現在および将来の社会活動に影響を与える大陸の気候変動の歴史を、十分な空間的・時間的スケールで解明するための最良のアプローチの一つです。温室効果ガスの影響を受けて大陸は、海洋よりも劇的に温暖化すると予想されていますが、この予測を検証できないのは、過去の温室効果時の大陸に残された岩石中の記録が十分な解像度で得られていないことが主



トルコのヴァン湖。閉鎖塩水湖だが、淡水が潜在しており、降雨履歴と水文地質システムについての知見を得ることができる。

な原因です。

人間が現代の生態系や環境の形成に大きな影響を与えているのは疑いの余地がありません。人間の環境への影響評価や逆に環境変化が人類の歴史形成に果たした役割を理解するためには、人類発生前の環境変動記録の解明が不可欠です。後期中新世から現在までに及ぶヒトの進化に呼応した長時間で途切れのない古環境進化はアフリカの大陸物質に記録されているとされていますが、詳細な科学的情報は得られていません。このような記録は、環境変化と人類の進化の関係を理解する上で不可欠であり、気候の傾向と変動、陸域生息地の拡大・縮小・断片化、地溝構造の変化などと、ヒト科動物の化石記録に見られる数多くの進化の変遷との関連性を検証することができます。

また、より短い更新世の記録を統合し組織化することで、気候変動が初期人類の移動分散に与えた影響を解明することができます。特に、人類が乾燥条件によって熱帯アフリカから「押し出された」のか、それとも近東のより

有利な条件を求めてアフリカから脱出したのかを明らかにすることができます。これらの移動における環境変化の役割を理解することで、考古学的記録における初期人類の移動分散をより広く理解することができるでしょう。

将来の環境変化は、「クリティカルゾーン」と呼ばれる、樹木の頂上から地下水の底までの透水性の高い層を大きく変化させるでしょう。科学掘削は、このゾーンの過去と現在のダイナミクスを理解するのに役立ちます。このゾーンの変化が、地表のプロセス、景観の進化、化学的・物理的な風化プロセス、関連する生物地球化学サイクルにどのような影響を与えるのかは、現在のところ不明です。掘削は、このゾーンを超えて、大陸深部の生物圏全体を調査することも可能です。この地下生命圏には、地球上のバイオマスの 2 ~ 20% が存在すると推定されており、そのほとんどが微生物です。地球の進化の過程で、オゾン層がまだ存在していなかった頃、生命は太陽の深紫外線照射から守られた場所、すなわち海面下や大陸の地下浅部でのみ生存し、繁栄することができました。



インドネシア・スラウェシ島のトウティ湖で長尺コア試料を採取するトウティ掘削プロジェクト (TDP)

これらの太古の生命体の痕跡は、系統樹から初期に枝分かれし現存する微生物として、今でも見られる可能性があります。

また、ゆっくりと拡散・浸透する地下水や急速に堆積した堆積物に伴ったり、地震に誘発された熱水の循環に伴う水の移動によって、微生物が地下深部に移動することもあります。酸素を発生させる光合成の出現により、表層生物は増殖し、地下浅部に還元状態の炭素と窒素を供給しました。それに比べて、地下深部は一般的にエネルギー源や栄養源が不足しており、深部生命圏はスローライフを余儀なくされています。このように、表層の生態系に由来し代謝を低下させることで地下に適応した深部地下生命圏は地球上の初期の生命の生き方を記録しています。これまで ICDP の掘削プロジェクトでは、堆積物と生物由来の有機分子の両方を分析することで、初期続成作用における微生物の存在の大きさと影響を調べてきました。さらに、堆積物に記録された過去および現在の微生物活動を示す化学的「足跡」や、生物地球化学サイクルへの影響を明らかにしました。

多くの未解決の問題は、ICDP の掘削によって解決する

ことができます。微生物の多様性や活性が、表層からの深さ、地下の地球化学的特徴、堆積物自身の組成や年代によってどのように変化するのか？また、同一の湖沼堆積盆全体の中のある時間断面において、活動的もしくは非活動的な微生物がどのように関係しているのか、などが解決すべき重要な問題です。また、関連する問題として、地表とは異なる物理化学的条件下で、微生物が栄養とエネルギーの不足をどのように解決するのかということ、湖沼の地下生命圏の限界はどこにあるのか、ということが挙げられます。埋没した微生物は、条件が悪ければまず代謝を低下させます。一般的に、深部地下で生命がどのように進化できるのか、また、これまで想定されてきたほど安定しているのかどうかは、まだわかっていません。深部地下生命圏は、地球の気候変動、炭素の循環と回収、エネルギー変換、医療などに対する新たな生化学的解決策のための「甘い果実」となり得るのか、さらに深部生命圏の研究が「火星に生命は存在するのか」というアストロバイオロジーの疑問に答えられるのか？なども重要な科学的課題です。

#### 今後の科学的目標

ICDP は、古環境の重要課題に取り組むための複数のプ



微生物起源の方解石結晶



ICDPの白亜紀Songliao盆地掘削プロジェクト(SBDP)は、新設計の掘削装置で深さ7,018 mに到達し、直径が20cm以上もある長さ40 mに達するコア試料を回収した。このコア試料は白亜紀全体にわたる気候や環境の変遷の解明を可能にする。

プロジェクトを実施する態勢が整っており、中新世—鮮新世の温暖化、暁新世—始新世の温暖化極大、さらに新生代全般といった重要な時間軸を調査するために、少なくとも10のプロジェクトが様々な段階で進められています。

バーバトン・太古代表層環境計画 (BASE) では、南アフリカのバーバトン緑色岩帯にある32億年前のムーディーズ層群の太古代堆積岩を探索します。コア試料を用いて、太古代の大陸風化の様子から潮位変化、隕石が降り注ぐ頻度まで、過去の環境パラメータを復元することができます。これらのデータは、海水の酸化還元状態、温度、組成、初期続成作用に関係した流

体の特徴、大気組成などに関する基礎データを提供し、太古代初期の地球表面状態に新たな光を当てることとなります。

今後の掘削計画では、海洋と陸域を組み合わせた一連の掘削プログラムによって海洋と地球のつながりや境界部分での現象を見出していきます。「つながり」や「境界部分」の研究により、多くの未知の古環境変動要因の重要で高解像度の記録を得ることができます。

# プロジェクトの進め方 how to realize an icdp project

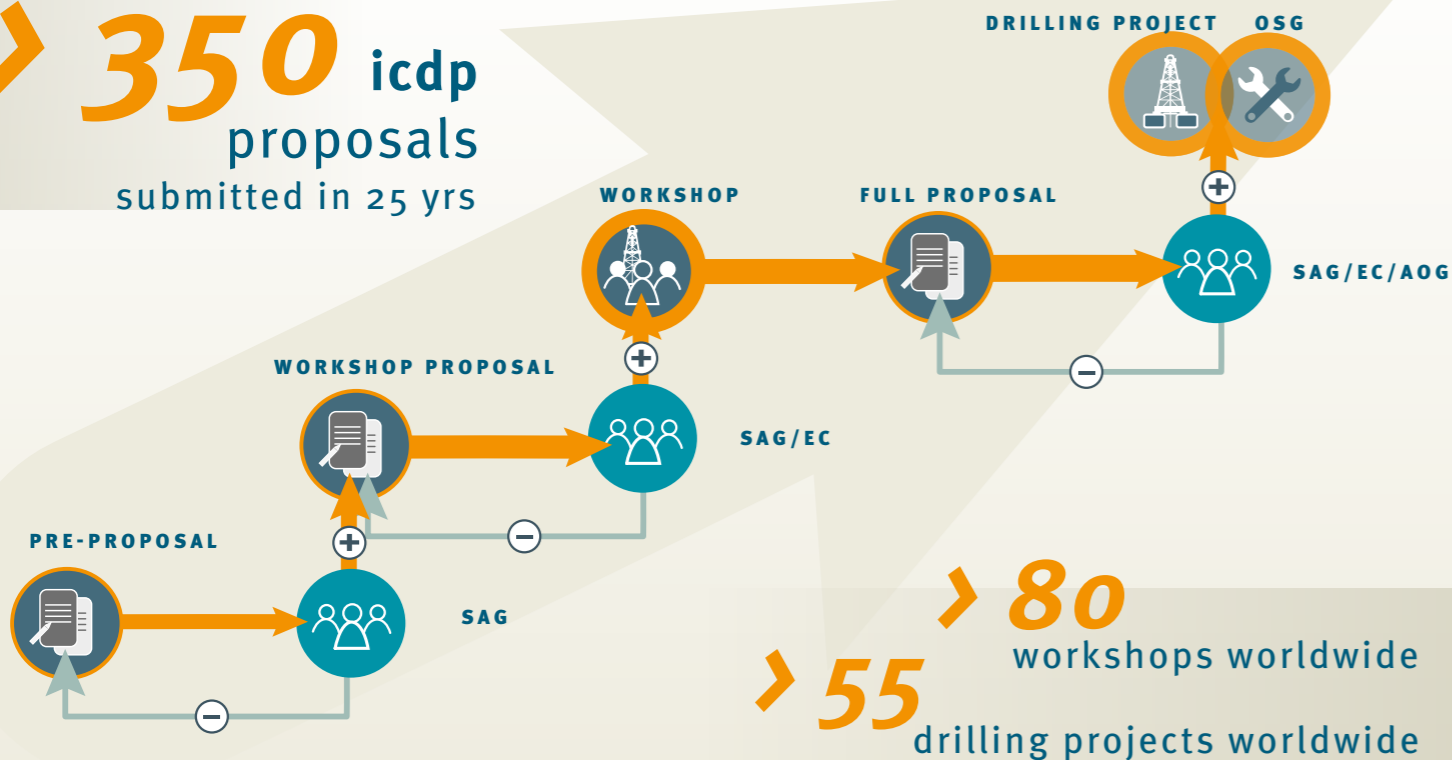
## パートナーシップと協力 Partnership & Cooperations

大陸掘削を必要とする、社会的意義の大きいプロジェクトのアイデアを持つ科学者の国際的なグループは、ICDPを通じて資金援助を申請することができます。ICDPは、提案書作成の負担を最小限にするために、初期段階のアイデアの科学的妥当性をプレプロポーザルと呼ばれる方法で審査します。ICDPの科学的審査委員会である科学諮問グループ(SAG)が肯定的に評価した場合、提案者はワークショップ提案の提出を求められます。この提案には、さらに詳細な科学的根拠、基本

的な現地調査、掘削位置と深さの計画案、国際科学者チームの編成が含まれます。ICDPが資金を提供するワークショップでは、テーマの幅を広げて参加者を募り、それぞれの分野の第一人者からなる国際チームを結成し、ICDPへのフルプロポーザルを作成します。フルプロポーザルには、掘削、科学、コスト、予算、管理に関する詳細な計画が含まれます。これらの作業には、ドイツのポツダムにあるGFZの技術支援グループ(OSG)のサポートを受けることができます。

<b>理事会(AOG)</b> ICDP加盟国の資金提供機関からの代表者で構成される監督・管理機関	<b>執行委員会(EC)</b> ICDP加盟各国の代表により構成される運営管理委員会	<b>科学諮問グループ(SAG)</b> 科学的な専門性に基づいて指名された専門家からなる、プロポーザルの詳細な科学的評価のための委員会	<b>技術支援グループ(OSG)</b> 研究代表者の提案書作成、掘削プロジェクトの計画・実行を支援する、掘削に関連するあらゆる分野の専門家からなるグループ
--	--	---	---

➤ **350 icdp proposals** submitted in 25 yrs



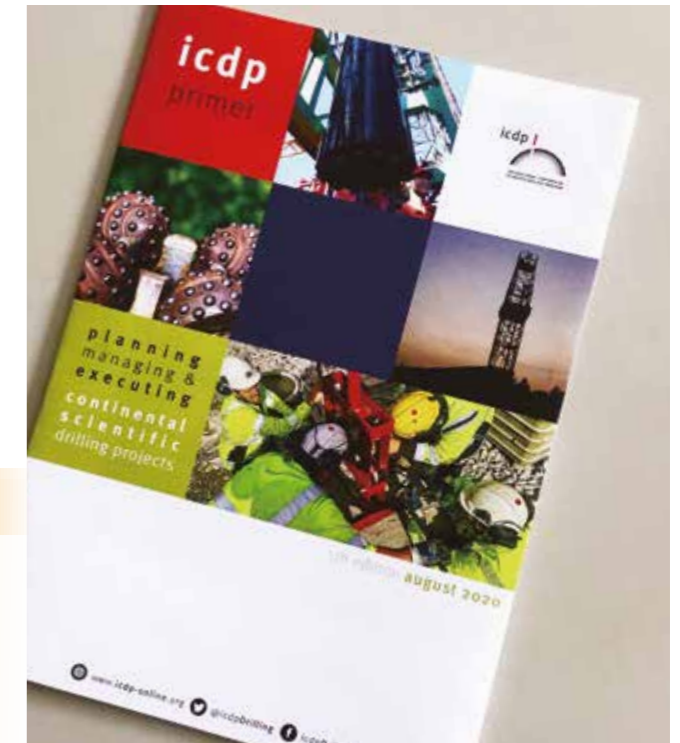
➤ **80 workshops** worldwide  
 ➤ **55 drilling projects** worldwide

ICDPの枠組みでのプロジェクト展開

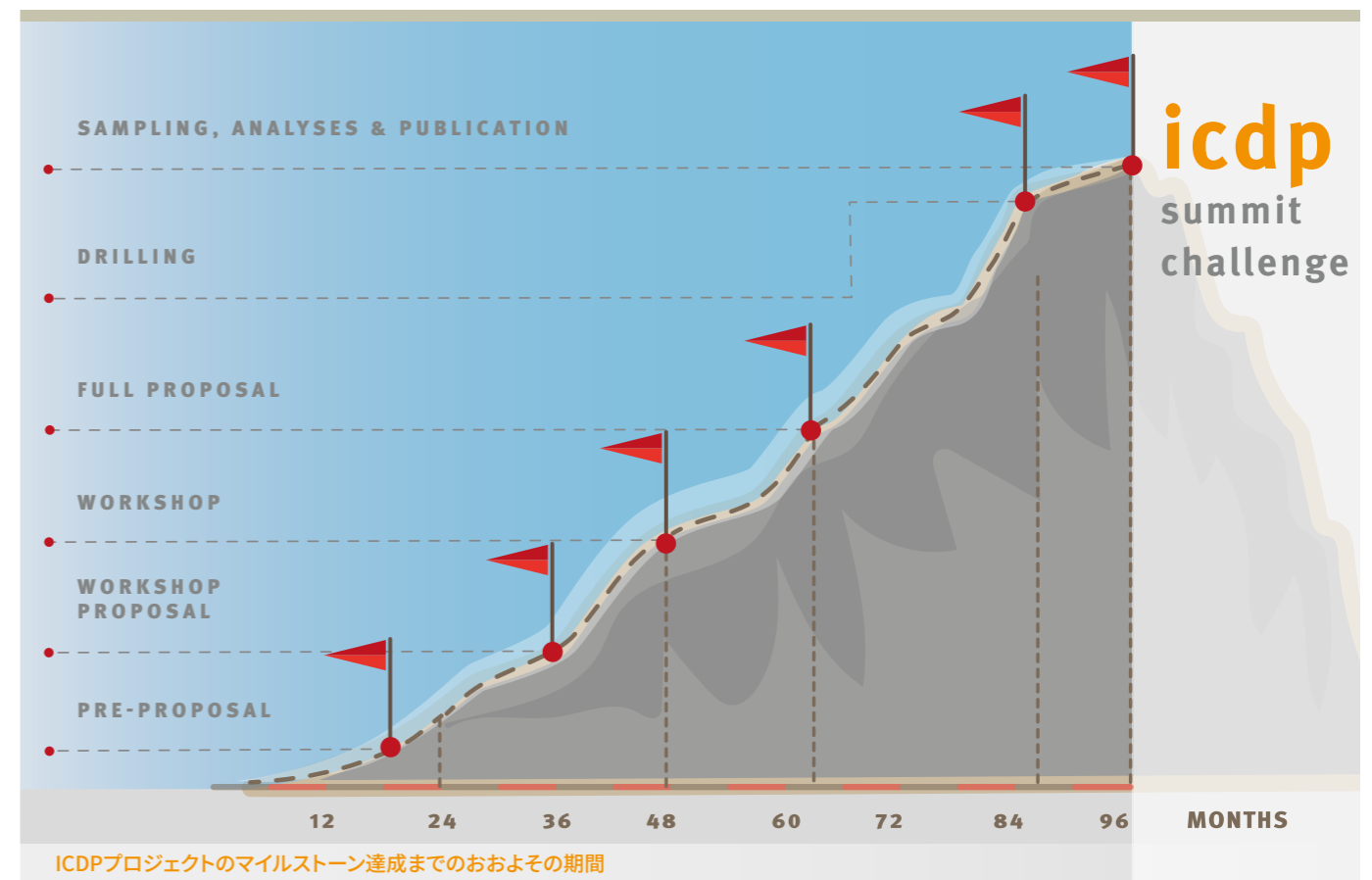
フルプロポーザルがICDPと共同出資機関によって承認されると、研究代表者はプロジェクトの実施に向けて準備を進めます。必要に応じてOSGの各専門家がサポートし、当局への許可、掘削などの必要なサービスの契約、現場や研究所での科学的作業の詳細な計画を行います。これまでのプロジェクトで得られた経験は、掘削、サンプリング、測定の詳細な計画と実施、科学雑誌への論文やデータの掲載、サンプルや科学データの長期的なキュレーションの調整に活かされます。

## ICDP手引書

技術支援グループ(OSG)は、科学掘削プロジェクトの計画と実施における主要なトピックについて、定期的に更新される手引書を提供しています。陸上科学掘削プロジェクトに初めて取り組む方にとっては、ベストプラクティスとして参考になるものです。



科学掘削のためのICDPベストプラクティスパムフレット



ICDPプロジェクトのマイルストーン達成までのおおよその期間





## 陸から海まで -land to sea (L2S)- 横断掘削調査

land to sea (L2S) drilling transects

### ブレイクスルーへの試み

A successful breakthrough

ICDP とその兄弟である国際深海科学掘削計画 (IODP 2013 - 2023) には、25 カ国以上の国々が参加しています。地球上の 2 つの異なる地理的領域を対象としているにもかかわらず、科学的な大陸掘削と海洋掘削は、持続的かつ革新的な掘削戦略によってのみ達成可能な重要な地質学的記録にアクセスできるという点で、科学的目的において一致しています。land to sea (L2S) の掘削を共同で行うことにより、両プログラムの科学計画に記されているような、人類が直面しているいくつかの課題に関する、大きな科学的ブレイクスルーを得ることができます。L2S プロジェクトでは、沿岸域を研究領域とし、海洋底から陸上まで横断した調査を行うことを重視し、革新的な共同掘削を可能とします。

共通の科学的目標とは、地球の古気候に関する包括的で統合された知識基盤を構築し、陸域と海洋の両方のアーカイブから将来の気候や環境の変化を予測することです。また、海岸線における淡水と海水の相互作用、大陸地殻と海洋地殻の遷移、微生物や火山、関連元素

の循環による持続可能な地球資源の形成などについての理解を深めるためには、共同で科学的なフロンティアを開拓する必要があります。ICDP と IODP を組み合わせることで、地震、津波、爆発的な火山活動などの自然災害をより総合的に評価することができます。また、隕石の衝突や大規模な火成岩地域が陸地や海洋に形成された後、地球システムがどのように回復するかについての基礎知識を深めることができます。両プログラムは、関連する科学的目標を推進するために、L2S 掘削プロジェクトでの協力関係を強化し、活動的および不活発な大陸縁辺部から陸地への横断面に沿って、相互に関連する地球システムを探索します。

例えば、不活発プレートの縁辺部、沿岸から沖合への構造変化、それに伴うマグマや堆積物の収支などを正確に把握することで、肥沃なこれらの重要な環境の形成プロセスやタイムスケールが明らかになります。さらに、海底と陸上の層序の対比は、地球規模の物質収支、特に「炭素循環」を評価する上で非常に重要です。なぜ



IODP調査の掘削プラットフォームでの作業風景

approx. **100 km** drilled length  
**60 km** length cored  
**91%** core recovery

掘削調査船の甲板に置かれたコア試料

なら、これらの地域は重要な炭素貯留層を有し、CO<sub>2</sub>の隔離に適しているからです。また、地球規模の海面変化は、沿岸地域に直接影響を与えるだけでなく、大陸棚にあるメタンハイドレート貯留層の安定性にも影響を与え、「炭素循環」や地球の「気候工場」に壊滅的な影響を与える可能性があります。これらの例は、世界人口の約 40% が海岸線から 100km 以内の場所に住んでいることを考えると、L2S 研究が人類の重要な課題に取り組むために不可欠であることを示しています。

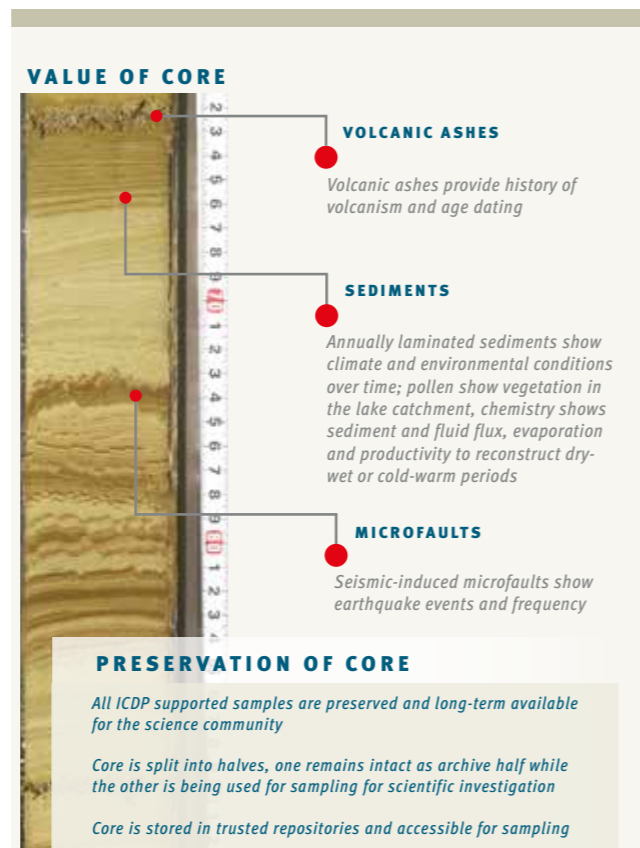
科学海洋掘削と大陸掘削の将来計画では、地球深部のプロセスとそれらの短時間スケールの地質学的、環境的、経済的、社会的影響との関連性を考慮に入れ、相

互に関連した動的システムとして地球を考慮する必要性が強調されています。相互関連性を重視するためには、海洋掘削と大陸掘削の協力関係を強化し、科学がこれらの境界を越える必要がある場合には、統合された L2S キャンペーンを開発する必要があります。陸から海へと広がる科学的問題のように、私たちの調査も同じように行わなければなりません。

## 今後の展望 a look ahead

大陸の科学掘削は、かつてなく重要になっています。環境悪化を招くことなく人類の進歩を維持するにはどうすればよいか、自然災害に対する社会の脆弱性を軽減するにはどうすればよいか、天然資源への依存度を持続的に満たすにはどうすればよいかなど、社会の喫緊の課題と問題に対する答えを、貴重なコア試料から得ることができます。

世界をリードする科学の実現に向けて、国際協力・協力を強化し、プログラムおよび資金提供されたプロジェクトが広く受け入れられ、費用対効果に優れた運営ができるようにする。－これが国際陸上科学掘削プログラム（ICDP）の近い将来の目標です。



トルコのヴァン湖で採取されたコア試料に見られる火山灰と小断層

icdp cores:

# 4 billion years of Earth history

icdpコア:40億年の地球史

オウトクンプ(フィンランド)のコア試料

## 参考情報 icdp infos & references

Find further information on ICDP at:  
[www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org)

ICDP media for press, public and science:  
[www.icdp-online.org/media](http://www.icdp-online.org/media)

For a digital version of the ICDP Science Plan:  
<https://www.icdp-online.org/media/icdp-science-plan/>

ICDP on social media:  
Twitter: [icdpDrilling](https://twitter.com/icdpDrilling)  
Facebook: [www.facebook.com/ICDPDrilling](https://www.facebook.com/ICDPDrilling)

Links to ICDP members and funding agencies:  
[www.icdp-online.org/members](http://www.icdp-online.org/members)

The products of each of the ICDP funded projects comprise scientific samples, data and publications. ICDP is taking care to make this legacy available for future scientific investigations through partnerships with trusted core repositories. Data and publications for each individual project can be found on our website at:  
[www.icdp-online.org/projects](http://www.icdp-online.org/projects)

Core and other sample materials of ICDP projects online:  
[www.icdp-online.org/facts/project-facts/by-tables/repositories/](http://www.icdp-online.org/facts/project-facts/by-tables/repositories/)

All images by ICDP except:

- p07 top: Impact crater (Francesco Ungaro, Pexels)
- p08 below: Students standing on the Moho, the discontinuity marking the transition from the Earth's crust to the mantle (© Geoverbund ABC//)
- p09 top: The scientific drilling project COSC provides unique insight into the roots of a Himalayan-type orogeny (COSC)
- p10 below: The Ediacaran-Cambrian transition in Namibia, one of the main targets of GRIND (A. Prave)
- p11 top: Posing with a 3 m core at 185 meters in Namibia (GRIND)
- p12 below: Geohazards: volcanic eruptions, mass movements, such as land slides, earthquakes and impact craters (J. Feignon, I Putu Krishna Wijaya, GFZ Potsdam, C. Koeberl)
- p14 below: Stromboli Volcanic Eruption (S. Barde-Cabusson, [imagegeo.edu.eu](http://imagegeo.edu.eu))
- p15 top: Landslide triggered from the Kumamoto earthquake (picture alliance / AP Photo)
- p16 below: Iceland's Hellisheiði Geothermal Power Station (Árni Sæberg / CarbFix)
- p17 top: The Campi Flegrei caldera cluster is the largest volcanic feature along the Bay of Naples (NASA / USA)
- p18 below: Iceland's Myvatn geothermal area (Handriyanti Diah Puspitarini, [imagegeo.edu.eu](http://imagegeo.edu.eu))
- p19 top: Alkaline spring in travertine of the Oman ophiolite (Oman Science Team)
- p21 top: Fish fossil in drill core from lake sediments in Bosumtwi impact crater, Ghana, at section break of core 5B located at 240 m blf during an ICDP project in 2004 (C. Koeberl)
- p22 below: The Towuti Drilling Project (TDP) recovering long sediment cores from Lake Towuti, on the island of Sulawesi, Indonesia (TDP)
- p23 top: Lake Van (Turkey), a closed saline lake with freshwater potential provides insight into precipitation history and the hydrogeological system (NASA/USA)
- p24 below: Calcite crystals of microbial origin (Henrik Drake, [imagegeo.edu.eu](http://imagegeo.edu.eu))
- p25 top: The Songliao Deep Drilling Project (Qingtian Lu)
- p28 top: ICDP/IODP Drilling platform (ECORD/IOPD)
- p28 below: Core on deck on a purpose-designed geotechnical vessel equipped with a permanent drilling rig (ECORD/IOPD)
- p29 top: Busy on the drill rig platform during an offshore phase of an IODP Expedition (ECORD/IOPD)
- p31 below: Drill bit seen from the end of the drill string (D. Smith, ECORD/IOPD)

ドリルストリングの先端から見たドリルビット



# icdp osg: operational support group

Providing a working infrastructure

**Santiago Ruben Aldaz Cifuentes**

*Drilling Engineering*

s.aldaz@icdp-online.org

**Knut Behrends**

*System Administration*

k.behrends@icdp-online.org

**Marco Groh**

*Sonde Engineering*

m.groh@icdp-online.org

**Ulrich Harms**

*Head of OSG*

u.harms@icdp-online.org

**Katja Heeschen**

*Project Data Acquisition*

k.heeschen@icdp-online.org

**Ursula Heidbach**

*Design & Outreach*

u.heidbach@icdp-online.org

**Carola Kögler**

*Panel & Membership Support*

c.koegler@icdp-online.org

**Jochem Kück**

*Downhole Logging*

j.kueck@icdp-online.org

**Cindy Kunkel**

*Data Management*

c.kunkel@icdp-online.org

**Simona Pierdominici**

*Logging Interpretation*

s.pierdominici@icdp-online.org

**Ines Thoß**

*Team Assistant*

ines.thoss@gfz-potsdam.de

**Martin Töpfer**

*Sonde Mechanics*

m.toepfer@icdp-online.org

**Thomas Wiersberg**

*Education & Outreach*

t.wiersberg@icdp-online.org

*Find further information on ICDP at:*

[www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org)



**INTERNATIONAL CONTINENTAL  
SCIENTIFIC DRILLING PROGRAM**

**INTERNATIONAL CONTINENTAL SCIENTIFIC DRILLING PROGRAM**

[www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org)

Helmholtz Centre Potsdam

GFZ German Research Centre for Geosciences

Telegrafenberg

D-14473 Potsdam

2020

DOI: <https://doi.org/10.2312/icdp.2020.001>

Version: 2020-12-09

*This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*

日本語版の発行にあたっては、ICDP本部より、オリジナルの計画書への改変の許可を得て作成しました。

日本語版 制作：日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC) ICDP 部会執行委員会  
2023年4月発行



icdp



SCIENCEPLAN AUTHORS



including contributions by the **icdp** OPERATIONAL SUPPORT GROUP

icdp



INTERNATIONAL CONTINENTAL  
SCIENTIFIC DRILLING PROGRAM

Telegrafenberg A69  
14473 Potsdam  
Germany  
[www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org)

ISSN 349012345678905255636363634636