

国名	鉱山での地震被害低減のための観測研究プロジェクト
南アフリカ共和国	

I 案件概要

事業の背景	南アフリカ共和国は豊富な鉱物資源に恵まれ、金やプラチナ、石炭など多くの鉱山を有している。鉱業セクターにおける全就業者数は約 50 万人で、そのうち 30 万人が鉱山災害のリスクがある坑内での作業に従事していた。行政指導及び鉱山会社による安全向上への取組みにより、年間犠牲者（平均）は、1980 年代の 1,000 人当たり 1.00 人～1.20 人（犠牲者総数：年間 677 人～855 人）から 1990 年代には 0.56 人～0.75 人（犠牲者総数：年間 246 人～290 人）に減少した。しかしながら、犠牲者のうち約 40%は、採掘活動により岩盤が破壊され、断層が生じることで発生する地震である「鉱山地震」に起因する落盤事故によるものといわれていた。鉱山地震は採掘域や坑道などの落盤事故だけでなく、地上において建築物倒壊などの被害を及ぼすこともある。そのため鉱山災害の被害者をさらに減少させるには、鉱山地震のリスクを評価し、より正確に強振動を予測するとともに、リスク評価に基づく採掘計画の修正や適切な採掘活動を行うことが極めて重要であった。		
事業の目的	本事業は、震源岩石の性質の解明、金鉱山における鉱山地震の準備と前駆変化への理解の促進、金鉱山における鉱山地震リスク評価の精度及び強振動予測の向上、並びに震源地域の想定及び鉱山地震被害の予測の精度の向上により、地震の準備及び発生への理解の促進と鉱山地震のリスク管理メカニズムの向上を図り、もって南アフリカ共和国及び世界各地における本事業で開発された鉱山災害リスク評価及び対策スキームの適用を目指した。 1. 想定された上位目標：本事業で開発された鉱山災害リスク評価及び対策スキームが南アフリカの鉱山及び世界各地で適用される。 2. プロジェクト目標：地震の準備と発生に関する理解が深まり、金鉱山地震の災害リスク管理体制が改善される。		
実施内容	1. 事業サイト： ファー・ウェスト・ランド鉱山地区（クック・フォー鉱山及びドリーフォンテイン鉱山）、クラークスドープ鉱山地区（モアブ・コツォン鉱山） 2. 主な活動：1) 震源とその周辺地域における観測や岩石サンプル収集、及び実験室における岩石の物性調査、2) 微小破壊活動と岩盤歪変化のモニタリングとそのデータ解析をし、前駆変化とその特性の解明 3) 圧力と岩盤安定性にかかる時空間変化の評価、及び鉱山災害リスク評価体制の強化、4) モニタリングデータに基づく強振動の地盤増幅の特性、および動的破壊プロセスにおける相似則の解明、5) 地表地震予測のためのパラメトリックモデルの開発と検証 3. 投入実績 日本側 相手国側 (1) 専門家派遣 50 人 (1) カウンターパート配置 54 人 (2) 研修員受入 3 人 (2) 土地・施設 執務室、事務備品、地球科学評議会（CGS）及び科学産業研究評議会（CSIR）内の日本人業務調整員用通信設備 (3) 機材供与 微小破壊活動、岩盤ゆがみ変化、及び鉱山振動のモニタリング用機材、鉱山モニタリングシステム (3) 業務費 (4) 現地業務費		
事業期間	2010 年 8 月～2015 年 8 月	事業費	（事前評価時）387 百万円、（実績）346 百万円
相手国実施機関	科学技術省（DST）、地球科学評議会（CGS）、科学産業研究評議会（CSIR）、ウィットウォーターズランド大学（Wits）		
日本側協力機関	立命館大学、東北大学、東京大学、京都大学、名古屋大学、高知大学、特定国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）		

II 評価結果

【留意点】

<想定される上位目標の検証>

事業デザインにおいて想定される上位目標の指標は設定されていなかったが、想定される上位目標の達成度は、本 SATREPS 事業で開発された鉱山災害リスク及び対策スキームの適用状況により検証を行った。

1 妥当性

【事前評価時の南アフリカ共和国の開発政策との整合性】

本事業は、「鉱山衛生と安全法」（1996 年）及び政府や鉱山企業並びに労働者間の合意のもと、鉱山被害者ゼロを最終目標とし、地下金鉱山における安全水準が 2013 年までに国際安全基準に達成することを目指す、南アフリカ共和国の開発政策に合致していた。

【事前評価時の南アフリカ共和国における開発ニーズとの整合性】

本事業の活動は、鉱山地震のリスク評価、強振動のより正確な予測、採掘計画の調整、リスク評価に基づく適切な支援が含まれており、鉱山被害者ゼロを最終目標としている南アフリカ共和国のニーズに合致していた。

【事前評価時における日本の援助方針との整合性】

¹ SATREPS とは、「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム」（Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development）を指す。

本事業は、2010年4月の第10回南アフリカ・日本パートナーシップフォーラムで合意された、科学技術分野の技術協力である。日本の対南アフリカ共和国援助方針では、鉱山地域における地震観測支援を含む科学技術振興、及び気候変動対策支援を重点分野として掲げており、開発協力方針に合致していた²。また、災害観測、予測、及び予警報技術にかかる人材育成支援は、2005年1月に開催された仙台防災協力イニシアティブで重点分野とされていた。

【評価判断】

以上より、本事業の妥当性は高い。

2 有効性・インパクト

【プロジェクト目標の事業完了時における達成状況】

プロジェクト目標は、事業完了時まで達成された。研究成果は、国際的かつ幅広く発信され、米国、カナダ、オーストラリア、スイス、スウェーデン、オーストラリア、チリ、及び中国等を会場とした国際的な専門家会合で65回の発表が行われた（指標1）。南アフリカ共和国における鉱山の安全性向上に関する提言は、事業完了時において策定中であり、提出はされなかった（指標2）。岩盤変形及び圧力測定は、鉱山企業やコンサルティング企業により、3つの対象鉱山において適用された（指標3）。3名の南アフリカ共和国の学生は、本SATREPS事業に関連する研究により、プレトリア大学及びウィットウォーターズランド大学で修士号を取得した。また、5名の日本人学生は日本の所属大学院の修士号を取得した（指標4）。

【事業効果の事後評価時における継続状況】

本事業の効果は、事業完了後も継続している。本SATREPS事業の主たる研究成果は、様々な関係者により活用されており、3つの対象鉱山において、移転された技術は継続して活用されている。鉱山会社は、地震及び地震工学的なモニタリングとその解析、圧力測定、数値モデリングに関する知識を得た。鉱山地震及び地盤工学に関するサービスプロバイダー（Groundworks Consulting）は、本SATREPS事業で導入された圧力測定技術を活用し、データ収集している。ウィットウォーターズランド大学の職員及び大学院生は、プロジェクト終了後も現場を支援し、設置機材によるデータ収集を行っている。また、彼らはデータ解析・解釈に関与し、ワークショップやセミナーにも参加している。一部の職員や学生は、日本側大学の会議に参加したり、日本のラボで実験したりしている。同様に、日本人職員や大学院生も、南アフリカ共和国の金鉱山を訪問し、ウィットウォーターズランド大学の岩盤工学研究所や地震反射研究センターで実験を行った。鉱山衛生・安全検査局の岩盤工学技術者は、プロジェクトの最も重要な成果が発表された、例えば鉱山安全会議などのワークショップやセミナーに参加した。

CGSは、鉱山地域の日常的なデータ分析や地震頻度の記録のため、本SATREPS事業で設置された機材を維持・運用している。得られた情報は、地震学関連のレポートに組み入れられたり、CGS内の研究に活用されたりしている。また、ファー・ウェスト・ランド鉱山地域の地表に設置された強振動センサー網は、アンテロープ地震プロセスシステムと合わせて、CGSにより継続して運用されている。しかしながら、鉱山内部の感度系機材は、本SATREPS事業による実験で、一連の実験が完了したため活用されていない。地震活動が活発だと予想された地形の近隣にあり、かつ鉱山開発が計画されていた、クック・フォー鉱山、ランガナニ鉱山、及びモアブ・コツォン鉱山の一部において、2010/11年にセンサーが設置された。それら実験サイトでの採掘は完了し、取り外し可能なセンサーは回収されたが、試錐孔に埋め込まれたものは取り外しできずそのまま放置された。データ記録機は回収された。

【想定された上位目標の事後評価時における達成状況】

想定された上位目標は、一部達成された。知識及び技術移転への取組みは、例えば、デュルハム教授は、鉱山資源・エネルギー省の落盤・山はねタスクチームに就任し、小笠原教授及びデュルハム教授は、9名で構成されるシバニエ-スティルウォーターの専門家パネルに就任したことで、現在も続いている。その活動の成果にあたる「シバニエ-スティルウォーター深層金鉱山における地震対策調査」のドラフト・レポートは、2020年8月7日に調査依頼元に提出された。また、本SATREPS事業での調査結果は、南アフリカ共和国の鉱山において50年以上にわたり実施されてきた研究事業を補完し、かつ進展するものである。本SATREPS事業は、鉱山地震分野の知識を探究するものであり、また、鉱山地震研究事業においては、恐らく最も野心的な研究範囲と取組み内容であった。そのため、事後評価時点において、例えば地震発生の予防、地震の規模や発生時期、及び発生場所を正確に予測するための技術開発等による山はねの解決には至らなかった。

他方、主な研究成果は継続的に活用されている。新しい圧力測定法は、アングロゴールド・グシャンティ、グラウンドワークコンサルティング、ウィットウォーターズランド大学の職員に技術移転された。P波及びS波の到達時間を自動的に検出するアルゴリズムは、CGSにおいて問題なくテストされ、導入された。CGSは、堀内教授により開発されたソフトウェアの研究を継続する意向があったが、人材不足のため継続できていない。

また、本SATREPS事業の研究成果を活用した新たな研究事業が開始された。「南アフリカ共和国・M2.0-M5.5規模地震の震源地における鉱山深部の掘削」、略して「DSeis」と呼ばれる事業（2015年10月～2018年6月）は、特筆すべき研究事業である。その事業は、地震物理学及び地球深層生物学の調査のために、国際陸上科学掘削計画（ICDP）に対し、研究プロポーザルを提出・採択された。採択の背景には、2014年8月5日に発生したオークニー地震（M5.5）は、CGSと本SATREPS事業で鉱山及び地表に設置したセンサーにより、十分なデータ記録がなされた点がある。また、その研究チームは、日本、南アフリカ共和国、オーストラリア、ドイツ、イスラエル、スイス、及び米国と多国籍で、岩盤工学エンジニアや地球微生物学者で構成されていた。

【事後評価時に確認されたその他のインパクト】

事後評価時点において、いくつかの正のインパクトが確認された。本SATREPS事業に参加した研究者及び大学院生の多くが、データ収集、論文作成、会議への参加といった面での研究能力を継続的に向上させている。デュルハム教授は、現在、上述の通り、本SATREPS事業に直接的に関連する研究を行っている、3名の修士課程及び4名の博士課程の学生を指導、または共同指導している。加えて、本SATREPS事業に参加した元CGS職員は、研究、特に、地震のP波及びS波の自動予測の研究の恩恵を受けた。さらに、本SATREPS事業のプロジェクト・マネージャーであったデュルハム教授は、落盤及び山はねタスクチームへの参加を、鉱物資源・エネルギー大臣から任命された。こうした役割において、同教授は本SATREPS事業で培った知識を活用している。

政府の科学技術に関するリテラシーについては、CGSの地震学者、岩盤エンジニア及びCSIRが、現場での支援を行い、機材整備及びデータ収集を行った。また、データ解析・解釈を行い、ワークショップやセミナーに参加した。CGSは、国全体の地震モニタリングを所管しており、地震発生地での自動検知を行うための、ファー・ウェスト・ランド金採掘場に構築さ

² 外務省「ODA 国別データブック 2010 年」

れた強振動ネットワーク、アンテロープ・ソフトウェア及び鉱山地震発生源自動検出のための堀内方式を運用している。これらのシステムは、継続的に機能している。

本 SATREPS 事業による負のインパクトは、事後評価時点で確認されなかった。

【評価判断】

以上より、本事業の有効性・インパクトは高い。

プロジェクト目標及び上位目標の達成度

目標	指標	実績
プロジェクト目標 地震の準備と発生についての理解が深まり、金鉱山地震の災害リスク管理体制が改善される。	(指標1) 1) プロジェクトの成果が少なくとも5つの国際的な専門家会議で報告される。	達成状況：達成（継続） (事業完了時) ● 研究成果は、米国、カナダ、オーストリア、スイス、スウェーデン、オーストラリア、チリ、及び中国における国際的な専門家会合で 65 回発表された。 (事後評価時) ● 上位目標の達成度として検証。
	(指標2) 各鉱山会社が定めている「安全管理規則」改訂に際しての提言が、(鉱山衛生安全評議会) 鉱山労働安全衛生チーム (MOSH)、岩盤工学の現場従事者、労働組合、鉱物資源省鉱山保健安全監督局 (MHSI) に提出される。	達成状況：未達成（一部達成） (事業完了時) ● 南アフリカ共和国における鉱山の安全性の改善に向けた提言は策定されたが、MOSH チーム及びその他関係者に対し提出はされなかった。 (事後評価時) ● ドュルハム教授は、2017 年 10 月の「鉱業山はねワークショップ」及び 2017 年 8 月の「MINESAFE2017 規則順守による被害ゼロに向けた取組み」会合において、実践的かつ実施可能な本 SATREPS 事業の成果に関する提言を発表した。なお、鉱山の安全性の改善に向けた提言の提出にはいっていない。
	(指標3) 少なくとも2つの移転された技術が南アフリカ鉱山で採用される。	達成状況：達成（継続） (事業完了時) ● 岩盤変形及び圧力測定技術は、3 つの対象鉱山、クック・フォー、モアプ・コツォン及びドリフオンティン鉱山の鉱山会社及び鉱山コンサルティング企業により、適用された。 (事後評価時) ● 対象 3 鉱山では、移転された技術を継続活用している。
	(指標4) 少なくとも4人の若手研究者が、プロジェクトに関係する研究において上級学位を取得する。	達成状況：達成（継続） (事業完了時) ● 南アフリカ側の学士号保有者 3 名は、プレトリア大学またはウィットウォーターズランド大学で、本事業に関連する研究により修士号を取得した。日本側学士号保有者 5 名は、本事業に関連する研究により修士号を取得した。 (事後評価時) ● 持続性において検証。
想定された上位目標 本事業で開発された鉱山災害リスク評価及び対策スキームが南アフリカの鉱山及び世界各地で適用される。	なし	達成状況：一部達成。 知識及び技術移転への取組みは、例えば、デュルハム教授は、鉱山資源・エネルギー省の落盤・山はねタスクチームに就任し、小笠原教授及びデュルハム教授は、9 名で構成されるシバニエ・スティルウォーターの専門家パネルに就任したことで、現在も続いている。 ● 新たな圧力測定技術 (CCBO、DCDA 及び DRA) は、Anglogold Gshati、Groundwork Consulting 及びウィットウォーターズランド大学の職員に移転された。しかしながら、実践する立場の職員が転職したり、鉱山の所有者が変わったり、閉山したりしたため、技術の継承に課題がある。 ● CFS において、P 波及び S の到達時間を自動的に検出するアルゴリズム（その結果、震源を特定できる）は、成功裡に試験が行われ、実行された。CGS は、堀内教授により開発されたソフトウェアに関する研究を継続する意向であったが、継続することができる人材がいなくなった。 ● 研究成果は、概ね活用されているが、特筆すべきケースとしては、上述の ICDP-DSeis プロジェクトである。

(出所) 終了時評価報告書、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 終了報告書、プロジェクト・マネージャーや CGS への質問票調査及びインタビュー

3 効率性

本事業の事業費及び事業期間は計画通りであったが（計画比：89%、100%）本事業のアウトプットは計画通り発現した。よって、本事業の効率性は高い。

4 持続性

【政策面】

改訂された「1996 年第 29 号鉱山衛生安全法」により、鉱山衛生安全評議会 (MHSC) が、国家レベルの公的機関として設立されている（付則 3A）。同評議会の主な任務は、南アフリカ共和国の鉱山における労働衛生安全法の整備、労働衛生安全の向上及び促進に焦点を当てた、社会実装にかかる鉱物資源大臣への助言である。また、同評議会は、その傘下の各委員会の活動監理、鉱業セクターにおける労働衛生安全の普及と推進、鉱山労働衛生安全状況レビュー会議の隔年開催、鉱山技術庁及び鉱山労働衛生安全に関係する他国家機関との連絡調整も行っている。鉱山における落盤及び山はね事故の事例を集め教訓とした MHSC の対策ガイドラインは、鉱山衛生安全法に準拠している。1996 年に改訂された鉱山衛生安全法により、鉱山労働者及び鉱山操業により影響を受けるコミュニティの衛生安全の保護を目的として、鉱物資源省の任務を遂行する鉱

山衛生安全検査局が設立された。これにより鉱山会社は、鉱山周辺への配慮を行うための上述のガイドラインに沿った「実施規則（CoP）」を遵守することが求められている。こうした CoP は、新たな知識や技術を反映するため、定期的に更新されている。

【制度/体制面】

CGSは、国内の鉱山地震モニタリングを所管し、鉱山地区で鉱山地震による強振動のモニタリングネットワークの運営・維持管理、及びアンテロープ・ソフトウェアと震源地検出のための堀内方式のパッケージの活用を業務として行っている。また、CGSは、ファー・ウェスト・ランド金鉱山地区に構築された強振動モニタリングネットワーク、アンテロープ・ソフトウェア、及び震源地自動検出のための堀内方式の運用も担当していた。CGSは、堀内博士が開発したソフトウェアの研究を継続したい意向があったが、ソフトウェアを担当していた職員がCGSを退職し、予算制限のため代替人員を確保できなかった。

本SATREPS事業の社会実装としては、本事業によって得られた新たな知識の普及・実装にMHSC傘下の委員会が直接関与している点だと言える。例えば、鉱山規制委員会（MRAC）は規定の改定、実施規則ガイドラインに関する助言、南アフリカ共和国基準局の承認を必要とする国家基準に関する助言をし、新たに設立された鉱山労働安全委員会（MOSAC）は、労働安全リスク、安全規制、安全に関する研究やデータについて、安全・政策・標準化・システム化・実施の面でMHSCに助言している。また、鉱山安全研究委員会（SIMARC）は、労働衛生安全（OHS）リスクの評価、OHS研究事業に関する要望のとりまとめ、その財源を確定するための基準の整備、研究申請書の評価、研究事業の管理、及び研究成果の技術移転を行っている。

【技術面】

本SATREPS事業に参加した研究者は、本事業で習得した鉱山地震データの収集・解析、圧力測定技術（円錐孔底ひずみ法、コア変形法、変形率分析、地震頻度と数値化モデルの統合に関する知識や技術、断層破壊の実験技術などをICDP-DSeis事業含む新たな事業で活用している。また、本SATREPS事業では、鉱山資源大臣から指示を受けたCGSが、鉱山地震発生頻度に関する週報を提供し、CGSの能力向上につながった。

研究者が鉱山地震学、及び鉱山安全分野で研究を継続する機会としては、ICDP-DSeis事業、SIMRCが資金提供しMHSCへの報告を目的とした事業、及び研究開発イノベーション（SAMERDI）³プログラムが資金提供する南アフリカ鉱物採収事業がある。

若手研究者の研究能力開発については、プロジェクト・マネージャーのデュルハム教授が、ウィットウォーターズランド大学の同僚及び大学院生とともに、鉱山地震及び電波による断層写真技術の活用、及び機械学習といった技術を活用した、「先進鉱体知識(Advanced Orebody Knowledge)」、熱切断やダイヤモンド製ワイヤー、及びのこぎりによる切断技術を活用した「非爆発岩盤破壊」に関する事業に積極的に参加している。また、デュルハム教授は、本SATREPS事業に直接関連した研究を行う、前出の修士課程学生3名及び博士課程学生4名の指導及び共同指導を現在行っている。

本SATREPS事業で設置された研究設備・機材は、ファー・ウェスト・ランド金山の鉱山地震強振動モニタリングネットワーク、膨大な鉱山地震データを効率的に処理するアンテロープ及び堀内教授のソフトウェアパッケージである。これらは、CGSにより維持管理されており、高頻度で活用されている。

【財務面】

MHSCの予算は、国家歳入より配分されており、国会への説明責任が課されている。CGSは、管轄する省からの資金を活用し、観測所のデータを活用した研究事業を行い、また、ファー・ウェスト・ランド金鉱山地区に設置された鉱山地震強振動観測所や、アンテロープ及び堀内教授によるソフトウェアパッケージの運用や維持管理を継続している。鉱山安全に関する社会実装を所管する政府機関は数多く存在しており、鉱山事故対策が実施されている。

研究資金確保の面では、研究者は持続的な課題を抱えているものの、鉱山地震分野における研究を継続するために、多くの資金源から研究費を得ている。例えば、国際大陸科学掘削プログラム（ICDP）は、DSeisコンソーシアムに対し、マグニチュード5.5のオークニー地震の震源地での掘削を行うため、100万ドルの資金を提供した。この研究資金は、南アフリカの鉱山企業からの現物出資や日本、ドイツ、スイス及び米国の金融機関からの研究費の呼び水となり、およそ100万ドルの追加資金が集まった。デュルハム教授は、探査・地震及び鉱山地震の分野において、南アフリカ研究議長（SARChI）を務めており、自身の研究費の一部を、大学院生支援やそれらの分野における研究事業運営費に充てている。また、ブリアン・ワトソン教授の支援を受け、大学院（地学研究科及び鉱山工学研究科）において研究事業が実施されている。年間予算は、50万ランドである。ウィットウォーターズランド大学・反射地震学研究センターのマンジ教授は、同分野における大学院生及び研究事業の運営費に自身の研究費の一部、50万ランドを充当している。SMERDIプログラムは、より深度のある金鉱山及びプラチナ鉱山の効率的かつ安全な採掘に向けた研究を支援している。デュルハム教授、マンジ教授及びンワイラ教授は、合計100万ランド強の2020/2021年度（2020年4月から2021年3月末）研究予算により、様々な事業を行っている。鉱山企業であるシバニエ・スティールウォーター社は、カウッド教授が統括する鉱山工学研究科の鉱山地震、及び山はねに関連する研究を行うDigiMine事業に対し、2020/2021年度に100万ランドの資金提供を行った。いずれの研究資金についても、デュルハム教授が責任者となっている。

【評価判断】

以上のとおり、研究機関のいずれの面においても問題はみられなかった。よって、本事業によって発現した効果の持続性は高い。

5 総合評価

本事業は、地震準備及び発生に関する理解の強化、及び鉱山地震のリスク管理の向上というプロジェクト目標を達成し、南アフリカの深度のある鉱山における地震危険度評価及び対策スキームの提供という上位目標を一部達成した。

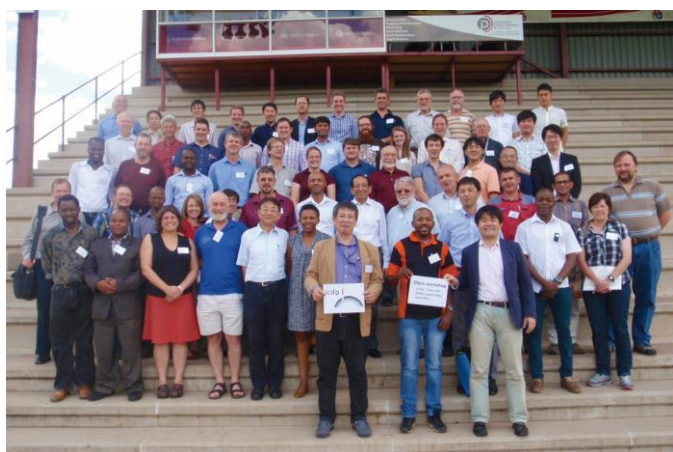
以上より、総合的に判断すると、本事業の評価は非常に高い。

III 提言・教訓

JICA への教訓：

³ SAMERDI 戦略では、鉱業近代化に関する 2030 年までの道程が示されている。

- 両国の研究者からも提案があったが、事業完了後に相手国における会合・ワークショップ開催のための予算を JST または JICA が確保しておくことは、一案である。これにより、上位目標の達成に向けて、事業に参加していたメンバーの意識を維持し、動機付けにつながったり、更なる研究成果を周知することにより研究成果のビジネス化や社会実装につながる可能性があると考えられる。また、会合では事業終了の 3 年から 5 年後に実施される事後評価についてもプロジェクトメンバーに再認識してもらう機会になると考えられる。



ICDP 及び立命館大学主催の Potchefstroom における DSeis の掘削前ワークショップに参加した本 SATREPS 事業の中核メンバー
<https://www.sciencemag.org/news/2017/05/deep-south-african-gold-mine-scientists-drill-heart-earthquake>



写真3 高知大学／JAMSTECの高知コアセンターで試料を整理する様子。