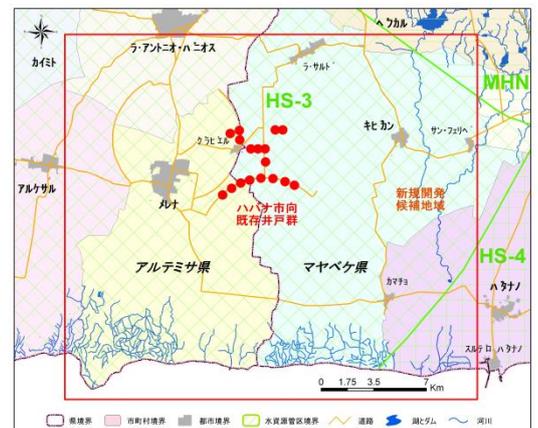


# キューバ国

## 地下帯水層への塩水侵入対策・地下水管理能力強化プロジェクト

—塩水侵入対策を含めた地下水開発・管理能力の向上—

2017 年 2 月



### 1. プロジェクトの背景と問題点

キューバ国は、カリブ海に浮かぶ約 1,600 の島から成る国土面積 11 万 km<sup>2</sup>、人口約 1,124 万人の島国です。首都ハバナ市（人口約 220 万人）の年間水需要量は約 600 百万 m<sup>3</sup>と推定されていますが、実際の給水量は約 60%に留まっており、大幅な不足が生じています。

ハバナ南西部沿岸地域のマヤベケ県（Provincia de Mayabeque）とアルテミサ県（Provincia de Artemisa）には、クエンカ・スル（Cuenca Sur）と呼ばれる 300km<sup>2</sup>に亘る地下水源地帯があり、ハバナ市への年間送水量の約 17.3%を占める主要な給水源となっている他、両県内の飲料水、農業用水としても利用されており、

同地域にとって極めて重要な水源となっています。

一方、キューバ国政府の調査によると、クエンカ・スルでは気候変動の影響によって降水量の減少や平均海水面の上昇が生じており、過去 10 年間で取水量は 2000 年の 105 百万 m<sup>3</sup>/年から 55 百万 m<sup>3</sup>/年へとほぼ半減している他、過去 5 年間で平均海水面が 0.05m 上昇したことに伴い、地下水への塩水侵入が進行していることが報告されています。一般的に、塩分濃度が 1,000mg/L を超えると農作物に影響が出るとされていますが、現在、アルテミサ県内では、深度 40m 以深で同値を超える井戸が複数確認されています。キューバ国全土の利用水量全体に占める地下水の割合は 2011 年で 33.3%（水利公社、Grupo Empresarial de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos : GEARH）で

あることから、適切な地下水管理を行わなければ、キューバ国全土の沿岸部において地下帯水層への塩水侵入が進行し、全国的に十分な給水量の確保に支障が生じることが予測されています。しかし、水資源庁 (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos : INRH) を筆頭として水資源行政を担う各機関では、塩水侵入が地下帯水層に与える影響調査、地下水モデルによる塩水化実態の再現と将来予測、有効な対策手法の検討及び実施のための技術や人材等が不足しており、持続的な地下水開発・管理に係る対策を講じることが火急の課題となっていました。

## 2. 問題解決のためのアプローチ

本プロジェクトは、水資源庁 (INRH) がキューバ側の主管官庁であり、その傘下の土木コンサルティング公社 (Grupo Empresarial de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería : GEIPI)、ハバナ水利調査・プロジェクト公社 (Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana : EIPH-ハバナ)、水利公社 (GEARH)、マヤベケ県水利公社 (Empresa de

Aprovechamiento Hidráulicos de Mayabeque : EAH-マヤベケ)、アルテミサ県水利公社 (Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Artemisa : EAH-アルテミサ) が実施機関となりました。

キューバ国側の実施体制は、プロジェクトの全責任を担うプロジェクト・ダイレクター (INRH 副長官) のもとにプロジェクト・マネージャー (GEIPI 総裁) 及び副プロジェクト・マネージャー (GEARH 総裁) がおり、両者がプロジェクトの責任と意思決定を担いますが、日々の具体的な意思決定や実際の活動の推進役を担うプロジェクト・アドミニストレーターとして GEIPI 技術部長をチーフ・アドミニストレーター、GEARH 水理地質チーフエンジニアを副アドミニストレーターとし、これら 2 名がプロジェクト全体の調整を行いました。このチーフ・アドミニストレーターと副アドミニストレーターは、緊密な連携をとりつつそれぞれの傘下の機関を取り纏めました。アドミニストレーションは国の中央レベルの組織に設置されましたが、そのもとにハバナ、マヤベケ県、アルテミサ県という国レベルから一段下位レベルの組織があり、そこに属する技術者を中心に構成され

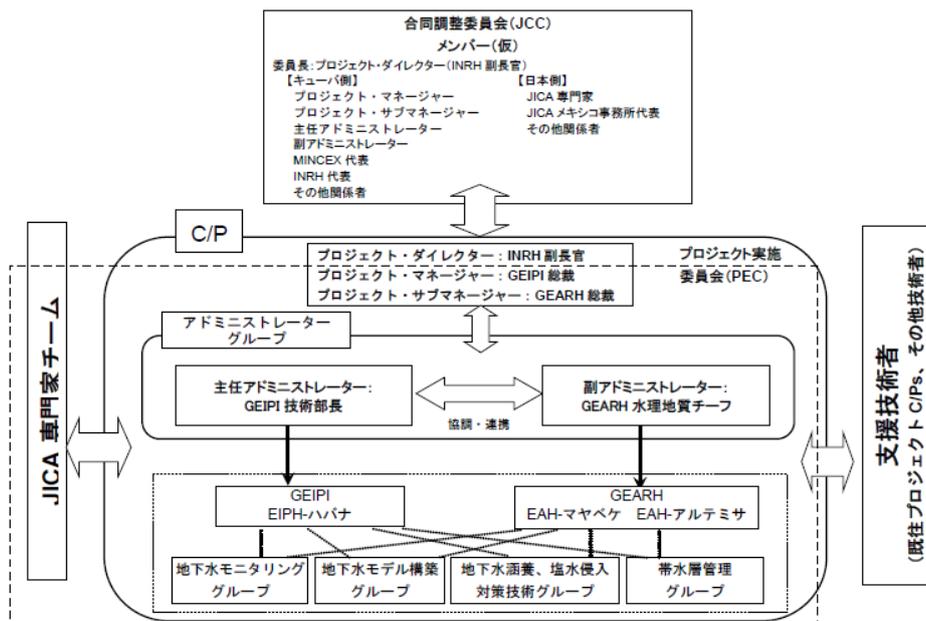


図 1 : プロジェクト実施体制図

る 4 つのグループ、すなわち、①地下水モニタリンググループ、②地下水モデル構築グループ、③地下水涵養・塩水侵入対策技術グループ、④帯水層管理グループが日常的な活動を遂行していきました。このような体制を構築することによって本プロジェクトの実施体制が強固なものになりました。

本プロジェクトでは、「対象地域における地下水管理実施機関の塩水侵入対策を含めた地下水管理能力が向上する」ために、地下水に係る 4 分野の技術移転を行いました。すなわち、地下水モニタリングの技術移転、地下水モデル構築の技術移転、地下水涵養、塩水侵入対策の技術移転、帯水層管理の技術移転です。

地下水モニタリング能力を強化することにより（成果 1）、精緻化されたデータが得られ、それに基づいて現在の地下水・水質動態を示す地下水モデルが構築される（成果 2）。また現況に基づき、複数の塩水侵入対策工が検討され、提案された対策工を現況の地下水モデルに入力し、その効果を検討することによって、最も適切な対策工を抽出する（成果 3）。適切な対策工の具体的な設計を現況地下水モデルに入力し、地下水モデルの解析結果を検証し将来予測を行なうことによって、地下水管理計画及び実施要領が策定／活用され（成果 4）、その結果、適切な取水量管理が実施される、というのが本プロジェクトのデザインです。

### **(1) 成果 1（地下水モニタリングの技術移転）を通じたレベル向上**

成果 1 のための活動では、①対象地域のモニタリング体制が整備される、②観測データが「GIS<sup>1</sup>データベース（GIS/DB）」で管理される、③地下水モデルや帯水層管理に利用される、ことを目的に現地作業

<sup>1</sup> GIS（Geographic Information System：地理情報システム）とは、位置や空間に関する様々な情報を、コンピュータを用いて重ね合わせ、情報の解析を行ったり、情報を視覚的に表示させる技術です。

#### **【上位目標】**

**本プロジェクトで構築された地下水管理計画策定の技術が、他の地域へ普及・活用される。**

#### **【プロジェクト目標】**

**本プロジェクトに参加する機関の対象地域における塩水侵入の抑制を含めた地下水開発・管理能力が向上する。**

#### **【成果-1】**

**対象地域の帯水層のモニタリングが適切に実施される。**

#### **【成果-2】**

**対象地域の地下水モデルが構築される。**

#### **【成果-3】**

**地下水涵養、塩水侵入対策の観点から各種技術が研究される。**

#### **【成果-4】**

**実施要領（ガイドライン及びマニュアル）に沿って、対象地域の地下水管理計画の運用が試験的に開始される。**

（水理地質踏査・物理探査<sup>2</sup>・水質調査等の現地調査、観測機材の設置など）と室内解析作業（水理地質解析<sup>3</sup>、GIS など）を併せて実施しました。そのため、本活動は、①水理地質構造/水文解析サブグループ、②地下水観測サブグループ、③GIS/DB サブグループを形成して活動を行いました。

#### **1) 水理地質構造/水文解析サブグループ**

本サブグループは、観測網整備のベースとなる水

<sup>2</sup> 物理探査とは、空中、地表やボーリング孔で地盤の物理的性質を測定することで地下構造を調べる探査方法です。物理探査法は、対象とする物理的性質によって「弾性波探査」「電気探査」「電磁探査」「磁気探査」「重力探査」「放射能探査」「地温探査」等に区分されます。

<sup>3</sup> 水理地質解析では、地下水の物理的および化学的性質、地質学的プロセスにおける地下水の役割、自然の動き、回復、汚染などを明らかにするために、地層の空隙の性質、水理特性、帯水層の構造、分布などを解析します。

理地質調査・物理探査・水文調査を行いました。従来の水理地質調査技術に加え、本プロジェクトでは新たに機材を供与し、孔内検層や揚水試験における解析技術や精度の向上を図りました。

## 2) 地下水観測サブグループ

本サブグループは、上記の水理地質構造/水文解析サブグループの現地調査と並行して、地下水及び表流水観測データを収集・整理するとともに、現地での観測を続け、新たに必要と考えられる観測地点の提言を行ない、地下水観測ネットワークの整備を行いました。

## 3) GIS/DB サブグループ

本サブグループは既存データを基に GIS/DB を構築し、上記の 2 サブグループの活動で得られる新たなデータを管理・更新するとともに、管理されているデータを下記の地下水モデル構築グループに提供しました。

### 【成果 1 の活動】

- 1-1 地下水モニタリンググループを組織し、技術料を診断する。
- 1-2 水理地質調査・物理探査・水文調査を実施する。
- 1-3 既存観測井に観測機器を設置する。
- 1-4 試験井戸の掘削、孔内検層、揚水試験、観測機器の設置を行なう。
- 1-5 観測網を構築する。
- 1-6 GIS/DB を構築し、収集・整理されたデータを管理・更新する。

## (2) 成果 2 (地下水モデル構築の技術移転) を通じたレベル向上

成果 2 のための活動は、キューバ国側技術者が地下水モデルを体系的に習得し、地下水モデルが地下水/帯水層管理に適切に利用されることを目的とし、OJT により実施しました。具体的には、現況モデルの構築、基礎的な予測モデルの構築、地下水管理計

画に反映させるモデル計算を順次進めました。

### 【成果 2 の活動】

- 2-1 地下水モデル構築グループを組織し、技術力を診断する。
- 2-2 水収支及び地下水涵養量解析のための各種要因を分析する。
- 2-3 地下水モデル/塩水侵入モデルを構築する。
- 2-4 新たな地下水観測データや水理地質データに基づきモデルの補正・更新を行なう(年1回程度)。
- 2-5 地下水流動メカニズム及び塩水侵入の予測解析を行なう。

## (3) 成果 3 (地下水涵養、塩水侵入対策の技術移転) を通じたレベル向上

成果 3 のための活動は、キューバ国側技術者の地下水涵養及び塩水侵入対策技術の能力向上を目的に、OJT により実施しました。

対象地域においては、塩水化対策として地下水位を下げないことを目的とするディケ・スル(地下水涵養ダム)が建造され、塩水侵入対策の基礎的知識を有している技術者も C/P 機関には多く在籍しています。そこで、本プロジェクトでは、地下ダム<sup>4</sup>や雨水貯留浸透施設<sup>5</sup>等の新たな知見を導入した上、対象地域のみを対象とせずキューバ国内で適用可能な技術全般を理解し、対策計画策定能力が向上すること目標としました。

<sup>4</sup> 地下ダムは、地中に水を通さない壁をつくって、地下水の流れをせきとめ、地下水をためる施設です。次のように、地下ダムには大きく 2 つの機能があります。①地下水位をせき上げて、地下水量を増加させます。②海岸部では、海水の地下水への浸入を防ぎ、地下水の塩水化を防止します。

<sup>5</sup> 雨水貯留浸透技術とは、雨水を一時的に貯めたり、台地に浸透させて、河川への流出量を調整しようとするものです。雨水貯留の方法としては、雨水が降った個々の場所で貯留するオンサイト型と、ある程度離れた場所で貯留するオフサイト型があります。雨水浸透の方法としては、敷地内では浸透地下トレンチ、浸透柵、浸透井、浸透池などがあり、道路では透水性舗装を行います。その他に地下水の涵養を目的とした雨水浸透が行われています。

### 【成果3の活動】

- 3-1 地下水涵養、塩水侵入対策技術グループを組織する。
- 3-2 世界各地の事例研究を行なう。
- 3-3 対象地の自然条件、社会条件、政治及び経済条件を考慮した最適な工法の検討を行なう。

### (4) 成果4（帯水層管理の技術移転）を通じたレベル向上

成果4のための活動は、成果1~3までの結果に基づいて適切な帯水層管理システムが構築されることを目的に、OJTにより実施しました。キューバ国においては、GEARHによって「水バランス」という名称で水利用計画の策定と水供給のオペレーションが行なわれています。オペレーションの際には、「地下水のバランスコントロールグラフ」と呼ばれる過去の1か月毎の水位測定結果から基準水位を設定し、この基準水位と実際の地下水位を比較することで地下水揚水量の管理を行なっています。この方法は流域全体を一つの基準水位で管理しようとするものですが、本プロジェクトで策定するような3次元の地下水管理ではないため、両者を併用することで、より良い地下水管理及び水利用計画の立案を目指しました。

また、作成した地下水管理計画・実施要領を広め、その実践方法の解説を行なう「地下水管理計画の運用に係る技術セミナー」を開催し、今後のキューバ国全土への展開の足掛かりとしました。

### 【成果4の活動】

- 4-1 帯水層管理グループを組織し、技術力を診断する。
- 4-2 地下水モデル、塩水侵入モデルのシミュレーション結果を検証する。
- 4-3 許容し得る帯水層の基準状態を設定する。
- 4-4 毎年キャリブレーションされる新しい地下水モデルの解析結果に基づき、個々の生産井の年間

揚水計画を作成する。

- 4-5 地下水管理計画及びその実施要領（ガイドライン、マニュアル）を策定する。
- 4-6 長期的視点から塩水侵入抑制に関連する技術の導入計画を策定する。
- 4-7 気候変動や塩水侵入抑制に関連する対策の効果等を踏まえ長期の地下水管理計画を策定する。
- 4-8 地下水管理計画の運用に係る技術セミナーを開催する。

## 3. アプローチの実践結果

各成果の主要な活動結果を以下に示します。

### (1) 成果1：地下水モニタリング（水位・水質）とGIS/DBの構築

既存の水理地質調査資料の整理・解析を進めるとともに、第2年次からは本プロジェクトで供与した物理探査機材（電気探査機、物理検層機）を用いて、3元的により精度の高い調査・解析を行いました。



写真1 孔内検層の実施

また、水理地質構造及び地下水位変動解析結果から、継続的な地下水位観測が必要と判断される7地点と試掘井戸3井に自記水位計を設置するとともに、塩水侵入の状況が把握できるように観測井を選定して、毎月深度別の水質測定を続けています。



写真 2 深度別水質の測定

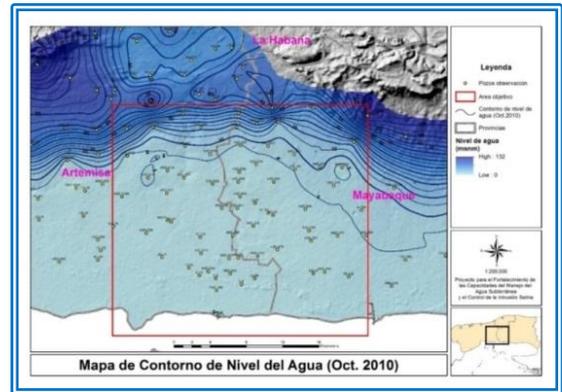


図 3 GIS 作成図面

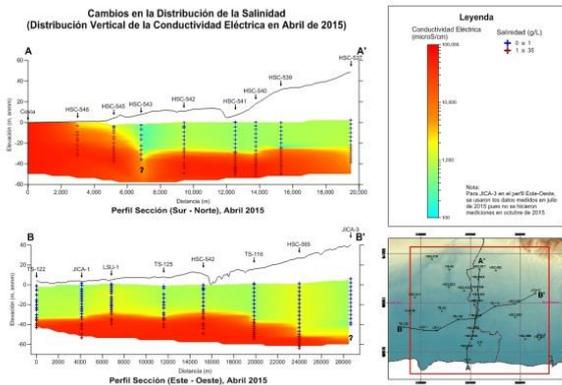


図 2 深度別水質 (EC) の解析結果事例<sup>6</sup>

上記の測定結果を管理するために GIS/DB システムを構築し、既存データを新しいシステムに移行するとともに、上記の観測データを毎月蓄積し、EIPH-ハバナ・EAH-マヤベケ・EAH-アルテミサの 3 機関で情報の共有化を行っています。

## (2) 成果 2 : 広域 3 次元デルによる予測解析

第 1 年次に、対象地域中央部の南北断面において断面 2 次元 (V2D) モデル<sup>7</sup>による試行シミュレーション解析を行いました。また、併せて 3 次元モデルの構築も進め、第 4 年次に詳細構造モデルを完成させました。このモデルを使用して、揚水量・涵養量・海面水位の変化を組み合わせた複数の予測シナリオによる地下水位・水質の変化を予測しました。

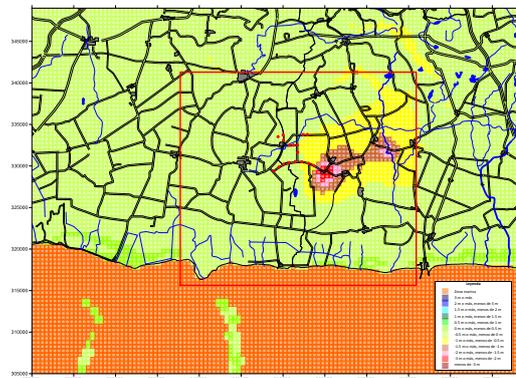


図 4 新規井戸開発に伴う地下水位低下量予測

<sup>6</sup> 地下水は、海水と境界を接していてもすぐに海水と混合することなく、両者の密度の関係から、地下水は海水の上にレンズ状に分布します。また、地下水位の変化や海面の潮汐変動等によって、その境界面は複雑に変化します。この断面図では、電気伝導度 (EC) の分布を示すことで地下水 (黄緑色) と海水 (赤色) の分布状況を明らかにしています。

<sup>7</sup> 断面 2 次元モデルは、水理地質断面図上に地下水流動を再現させる方法で、地層間の地下水流動や塩分濃度の変化等を詳細に解析することが可能です。ただし、地下水流動方向と水理地質断面方向が一致するという仮定を設定する必要があります。

### (3) 成果 3：塩水化対策事例の研究と対策施設の検討

成果 3 の活動の一つとして、地下水涵養及び塩水侵入対策工の事例研究のセミナーを開催し、これらのセミナーで使用した資料のテキスト化を行いました。また、本邦研修の際に行なった既存地下ダム及び地下ダム建設現場の視察や最新の雨水貯溜浸透施設に関連する研修によって、対象地域に適した対策施設の導入計画を作成しました。



写真 3 既存地下ダムの視察（宮古島）

### (4) 成果 4：地下水管理計画の運用開始

第 1 章（計画の基本的事項）、第 2 章（対象地域の地下水の現況の推計）、第 3 章（地下水を取り巻く状況の変化）、第 4 章（地下水の保全目標）、第 5 章（将来予測）、第 6 章（目標達成のための施策）から成る地下水管理計画が完成し、運用が始まるとともに、国家政策とするための検討も始まりしました。



写真 4 地下水開発計画作成検討会

## 4. プロジェクト実施上の工夫・教訓

### (1) 工夫

#### 1) 若手技術者の参加と研修開催場所

本プロジェクトの参画機関は、いずれも技術者の高齢化を課題の一つに挙げており、若手技術者の育成の機会を望んでいました。既往プロジェクト（気候変動対策のための地下水開発・管理能力向上プロジェクト）ではセミナー参加を除いて 20 代の技術者のプロジェクトへの参加の機会がありませんでしたが、本プロジェクトにおいては活動計画作成の段階から 20 代の若手技術者が参加しました。

また、本プロジェクトに参加している機関の拠点が 2 県 1 市に及ぶため、交通手段等の関係から研修等に関係全技術者が集合することが難しい面もありました。第 2 年次後半から EAH-マヤベケや EAH-アルテミサでの研修を増やすことにより、より多くの技術者が活動に参加できるようにしました。

#### 2) 関係機関との連携体制

本プロジェクトは、CUJAE (Ciudad Universitaria Jose Antonio Echvarria) =ISPJAE (Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverria) と、特に地下水モデル関係について連携しながら業務を進めました。その他にも、大学の教官や若手研究者が本プロジェクトの技術セミナーや研修に参加したり、CUJAE 構内で実施された物理探査実習への協力をプロジェクトが行なったりもしました。

また、CITMA (科学技術・環境省) の技術者には活動当初に本プロジェクトの説明を行なっている他、CITMA 及び農業者関連を始めとする地下水利用団体の技術者を技術セミナーにも招待してプロジェクトの内容を理解してもらうよう努めました。

#### 3) 広報活動

キューバ国においてはインターネットに接続できる人・場所は未だ限られている状況であるため、キ

キューバ国内においては調査の進捗にあわせて年間二回程度紙媒体のニュースレターを発行し、C/Pを通じて INRH 傘下の機関、関連機関、研究機関、自治体に配布しました。

また、毎年開催した技術セミナーにマスメディアを招待することにより、新聞やラジオを通してプロジェクトが毎年紹介されました。

## (2) 教 訓

キューバ側技術者と専門家チームは、活動を通して、以下の教訓を得ることができました。

### 1) 詳細な活動計画の作成とその実施

上記したように、本プロジェクトのキューバ国側参加者の所属が 5 機関 (INRH を含めると 6 機関) に及び、かつ各技術者の活動拠点もハバナ市、マヤベケ県、アルテミサ県と分散しています。また、本プロジェクトでは多分野の活動を同時並行で行いましたが、複数の活動グループに属している技術者も多数いました。

キューバ国側技術者が研修、現地調査、解析作業等に参加し易いように、詳細な活動計画を早期に作成してキューバ国側への連絡に努める必要がありました。また、成果間でデータ・解析結果等の活用が有効に行なわれるように、成果間の時系列も考慮した活動計画を作成する必要がありました。さらに、一つの成果の遅れが他の成果の活動に影響を及ぼさないように計画の確実な実施と、必要が生じた際には、全体の活動計画を踏まえた臨機応変な個々の活動の修正が重要でした。

### 2) キューバ国側技術者の経験・技術と専門家チームの技術の融合

本プロジェクトに参加している 5 機関の多くの技術者は、対象地域の調査・解析を長年に亘って実施してきました。また、他国と比べて情報が入手し辛いというキューバ国の特殊事情の中で、独自の工夫を施した調査・解析・施工等も行なっています。

キューバ国側技術者の経験・技術と専門家チームの有する技術が融合して、より効果的な成果が得られるように、両国の技術者がより親密に情報交換を行ないながら活動を実施していくことが重要でした。

また、終了時評価においては、以下の 4 項目が、本プロジェクトから得られた教訓として評価されました。

- 過去のプロジェクトでの成果や人材の活用。
- 大学と協力した若手人材の育成
- プロジェクト活動に合致した本邦研修の計画、実施
- キューバにおける組織制度改革を踏まえた案件形成と実施



写真 5 CUJAE の学生を対象とした物理探査実習

(プロジェクト実施期間:2013年1月~2016年12月)

参考文献：

独立行政法人国際協力機構 (2012) 「キューバ国 地下帯水層への塩水侵入対策・地下水管理能力強化プロジェクト 詳細計画策定調査報告書」

独立行政法人国際協力機構 (2015) 「キューバ国 地下帯水層への塩水侵入対策・地下水管理能力強化プロジェクト 中間レビュー報告書」

独立行政法人国際協力機構 (2016) 「キューバ国 地下帯水層への塩水侵入対策・地下水管理能力強化プロジェクト 終了時評価報告書」

独立行政法人国際協力機構（2017）「キューバ国 地下帯水層への塩水侵入対策・地下水管理能力強化プロジェクト プロジェクト業務完了報告書」