

地球規模課題対応国際協力プログラム (SATREPS) 研究課題別追跡調査報告書

I. 序文

SATREPS 追跡評価実施要領 (<https://www.jst.go.jp/global/hyouka/pdf/follow-up-evaluation-procedure.pdf>) に基づき、追跡調査を実施した。具体的には、プロジェクト終了後の各研究課題の国際共同研究の成果の発展状況や活用状況を明らかにするために、対象課題の研究者に対し質問票による基礎データ調査を行い、その結果を踏まえた研究者インタビュー調査を経て得られた情報を整理しまとめた¹。

今般の研究課題別追跡調査にあたっては、以下の方々にご協力頂き厚く御礼申し上げます。

鯉沼 秀臣 (東京工業大学 名誉教授 エスシーティー株式会社 代表取締役)

角谷 正友 (物質材料研究機構 主席研究員)

伊高 健治 (弘前大学 教授)

II. プロジェクト基本情報

1. 課題名

サハラを起点とするソーラーブリーダー研究開発

2. 日本側研究代表者名

鯉沼 秀臣 (プロジェクト終了時 東京大学 新領域創成科学研究科 客員教授)

(現 東京工業大学 名誉教授

エスシーティー株式会社 代表取締役)

3. 相手国側研究代表者名

Amine Boudghene Stambouli (オラン科学技術大学(USTO) 電気・電子工学部 教授)

4. 国際共同研究期間

2010年11月～2015年11月

5. 研究概要

(1) 目的

砂漠はシリコンの原料となるシリカ(SiO₂)および日照に富んでいる。アルジェリア国土の大部分を占める世界最大のサハラ砂漠を起点とし、砂漠を新エネルギー資源(シリコン太陽電池の原

¹ 2021年11月から2022年3月に各種調査および報告書のとりまとめを実施した。

料の供給および発電の拠点)として利用する。具体的には、アルジェリアシリカ資源の探索、珪砂および砂を原料とするシリカ還元プロセス技術の開発、Si 製造のテストプラントによる実証、太陽光パネルによる機能試験等を通して、ソーラーブリーダー(ソーラーシリコン工場+Si 太陽光発電所)の増殖的建設の可能性を探る。また発電したエネルギーの低損失供給の可能性を実証する。さらにアフリカ地域のエネルギー工学研究の拠点を形成し、日本発の多機能遠隔教育・情報交流システムを活用してエネルギー教育・研究に取り組む。

(2)各グループの研究題目と実施体制

研究題目 1. 砂漠からのシリコン原料供給に関する検討及び太陽電池パネル・高温超伝導ケーブルの基礎的データの収集(鯉沼秀臣・東京大学 新領域創成科学研究科、USTO)

研究題目 2. WebELS²をベースとした情報フレームと教育システムの構築(上野晴樹・国立情報学研究所(NII) 情報学プリンシプル研究系、USTO)

研究題目 3. シリコン還元プロセスにおける低エネルギー化と高収率化手法の開発(角谷正友・物質材料研究機構(NIMS) 光・電子材料ユニット ワイドギャップ機能材料グループ)

研究題目 4. 高純度シリカから太陽電池級シリコンへ還元するプロセスの開発(伊高健治・弘前大学 北日本新エネルギー研究所、USTO)

(3)SATREPS 期間中の各グループの成果

研究題目 1: 砂漠からのシリコン原料供給に関する検討及び太陽電池パネル・高温超伝導ケーブルの基礎的データの収集

A. 砂漠からのシリコン原料供給に関する検討

砂漠の砂のアルカリ溶解プロセスについて、アルジェリア産 Diatom などにも応用できることを明らかにし、溶解収率を向上するプロセスを開発した。地中温度と5種類の太陽電池の発電特性のアルジェリア国 Saida における日内変動、年内変動のデータを集積している。

B. 太陽電池の性能評価

発電特性の異なる5種類の太陽電池をアルジェリア国 Saida 大学に設置して、日内変動、年内変動のデータを集積した。テロの影響で設置時期がずれ込み、想定したデータ取得期間が短くなったが、1年以上の運転時間を確保した。アルジェリアでのこれまでの計測は定量的ではなく、長期本格運用の指針となるデータはなかったが、Saida 地域での太陽電池運用に必要なデータ取得を行うことができた。

C. 超伝導送電関連

— AASEF³(2011年)で超伝導セッションを開催した。また、中部大での送電実験設備の現地見学を行った。

² WebELS: Web-based e-Learning system(インターネットを通して情報処理資源やデータを共有するシステムで、アプリケーションを共有するタイプ)

³ AASEF: Asia-Africa Sustainable Energy Forum

- Saida における測定装置の設置方法、作業分担等について温度計測システムを設置した。
- 在アルジェリアの日本大使館、および JICA アルジェ事務所において、説明および協力要請を行った。

研究題目 2 : WebELS をベースとした情報フレームと教育システムの構築

本 SATREPS 当時は、メインサーバを国立情報学研究所(NII)に置き、オープンソースサービスをするとともに、オラン工科大学(USTO)と、もう一カ所(オランの南 150km のサハラ砂漠の入り口にある Saida 大学)に WebELS サーバを置き、管理のための技術研修も行った。USTO には WebELS サーバ室が設置され、その部屋の一つで、NII のサーバを使って弘前大からオンライン講義と質疑を行った。それ以外にも留学希望者とのオンライン面接等、色々オンラインの打ち合わせ等を行った。

9000KM も離れた遠隔地を結んだ通常の Internet による方法であったが、スライド、ビデオ、音声とも十分な品質であり、WebELS が日本—アフリカ間で十分に実用できることを実証できた。この成功は、我が国の科学技術貢献の方法として十分なインパクトを与えるものと確信する。なお、WebELS ソフトウェアは教育等の非営利活動には無償提供している。

研究題目 3 : シリコン還元プロセスにおける低エネルギー化と高収率化手法の開発

これまでは水素ラジカル効果について装置内を大気圧にして、反応部内の SiCl_4 分圧の熱フィラメント(水素ラジカル濃度)依存性を測定した。1200°Cより高温で化学的に安定な SiCl_4 原料でもその分圧が減少することが確認できた。これは外部から大気圧で反応炉内に水素ラジカルを供給できることを意味し、外部から導入しても失活することがないほど寿命が長いことを示唆する結果となった。これまで水素ラジカルガンとして外部より供給する装置は減圧下で動作させているのに対して、数 Torr でも水素ラジカルの存在が確認できたインパクトは大きい。

水素ラジカルに暴露されると光吸収が変化する(黒化) WO_3 ガラスに関する論文を参考に、水素ラジカル濃度を計測する装置を作製した。水素ガスそのものでは WO_3 が変色することはなく、水素ラジカルのみで反応することを確認した。600nm の吸光度から求められる水素ラジカル濃度の圧力依存性を測定した。 WO_3 ガラスはアパチャー⁴から約 20cm の位置に設置した。1 気圧においても水素ラジカルが $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 存在することがわかった。 WO_3 ガラスの位置を 50cm 以上離しても水素ラジカルが存在することもわかり、外部から導入した水素ラジカルでも SiCl_4 と反応できるほど十分に寿命があることが示唆された。リモートタイプの誘導コイル型プラズマでは、より高い水素ラジカル濃度が検出されているが、プラズマ装置自体の熱対策が必要なことが課題となる。

研究題目 4 : 高純度シリカから太陽電池級シリコンへ通常の炭素もしくは水素ラジカルにより還元するプロセスの開発

純度に関しては、ほぼ原料のボロン・リンの不純物レベルの維持ができることがわかり、目標を達成した(ボロン、リン濃度 10ppm 以下)。また反応量に関しては、適切なバインダーを用い

⁴ アパチャー：画像を扱う光学機器において、画面の大きさを制限する枠の開口、またはレンズの絞りの開口

た造粒プロセスを最適に行うことで、表面からのガスの離脱を押さえることに成功した。これによって年産換算で1.2トン/年ベースで還元反応をできるようになった。また派生した結果として金属添加物を微量に導入することで、還元反応を劇的に加速できることがわかった。この添加物によって反応温度を抑制できる可能性もあり、今後の展開が期待される効果であり、特許出願(特許第6304632号・2018年03月16日登録)を行った。

シリカ還元炉については、弘前大でまず装置を開発して1年間ほど調整・改良を進めてからアルジェリアに移設を行った。これによって、アルジェリア側では、最新式の装置を手に入れることができ、技術移転もかなり迅速に行うことができた。

III. 調査結果まとめ

1. 研究の継続・発展について

- ー 本 SATREPS の開始とともに、国際会議 AASEF を設立し、日本—アルジェリアで交互に毎年開催し、アフリカからはアルジェリア以外のチュニジア、エジプト等の国からも参加してきた。本 SATREPS 研究の終了時、初期の目標は達成したとの評価とともに継続的な SSB 計画⁵に向けた研究を継続する提言(5th and final AASEF@つくば)を採択し署名した。JST-JICA にも提出して、返信を期待している。共同研究者であった、NIMS の角谷主席研究員、弘前大の伊高教授の研究室で、研究室経費や科研費による基礎研究は継続し、アルジェリアからの留学生関連の研究室(USTO)でもソーラーグレードを作る研究が、日本側で提供した装置を使って進行している。地球環境やエネルギーに関連する国際会議からの招待講演依頼も多数きているが、最近はコロナ禍で実質的な参加はできない状況にある。細々と継続はしているが、発展する研究費はない。
- ー 一方、本 SATREPS の開始直後から、中央アジアのトルクメニスタン科学アカデミー(AST)から、該国にも砂漠があるので、SSB 計画を開始したいとの申し出があり、トルクメ経費や、JST さくらサイエンスプログラムによる若手研究者の短期受入れ等の関係があった。

1-1. 研究題目 1：砂漠からのシリコン原料供給に関する検討及び太陽電池パネル・高温超伝導ケーブルの基礎的データの収集：東京大

砂漠の砂を高純化し、一段の省エネ還元反応でソーラーグレードシリコンを作る研究は、弘前大の伊高研、NIMS/筑波大の角谷研でオランエ大との連携を含め、若手研究者による、以下の活動は続いている。

トルクメニスタンに波及した研究は、トルクメニスタン科学アカデミーの先端科学研究センターから Oguz Han 工大に引き継がれ、ハライドペロブスカイト⁶太陽電池の基礎研究と合わせ、トルクメ経費で実施された。

⁵ SSB 計画：サハラソーラーブリーダー計画

⁶ ハライドペロブスカイト：安価な溶液法で作製できる半導体でありながら非常に高い光電変換効率を持ち、次世代の太陽電池材料として高い注目を集めている物質

JST さくらサイエンスプログラムにより、10名のトルクメニスタン研修生(科学アカデミー及びOguz Han 工大の学生及び若手研究員)を受け入れた(ホスト教官：東北大工学系研究科・松本祐司教授。約1週間で3カ所(東北大・つくば/NIMS・東京⁷)。3年間実施。)

SSBの基本構想は、SDGsレベルで、中国の「一帯一路」をより大きく超え、科学的根拠、基礎研究の実績もある。砂漠からの大規模ソーラー発電用省エネSiとハライドペロブスカイト高効率ハイブリッド太陽光発電、100kmを超える高温超伝導直流送電への目途を付けた石狩プロジェクトを組み合わせた日本発の3点セットの独自技術で真のSustainable未来社会を目指すポリシーである。CCS⁸や、水素エネルギー、バイオマス、等々、科学的根拠よりムードを盛り上げて資源、エネルギー、研究開発費を浪費する風潮があるが、研究開発費の有効性を見定めなければ継続・発展の見通しはない。広い学識と見識を有するポリシーメーカーによる、発展を目指すべきである。

1-2. 研究題目2：WebELSをベースとした情報フレームと教育システムの構築：NII

NIIのサーバ管理規則はセキュリティ管理が厳格であり、現役の教員が運営管理責任者である必要がある。SSBプロジェクトが終了するまでという条件で管理責任者になってもらった人がいたが、プロジェクト終了とともにWebELSサーバはネットから外され、その後廃棄処分となった。ポストドクとPhD学生に開発と管理を担っていたので、プロジェクト終了とともに管理できる人間がNIIには居なくなった。

オラン工科大学のWebELSサーバが現在も使われているかどうかは確認していない。

1-3. 研究題目3：シリコン還元プロセスにおける低エネルギー化と高収率化手法の開発：NIMS

- 学内の研究資金により共同研究を継続している。
- 水素ラジカル発生装置をバージョンアップしている。

1-4. 研究題目4：高純度シリカから太陽電池級シリコンへ還元するプロセスの開発：弘前大

- 科研費基盤研究Cで、当該研究に関連するテーマを継続している。

2. 地球規模課題の解決に向けた科学技術の進展への貢献について

- 日本学術会議提案のSSB計画は最近のSDGs関連PJに比べ遥かにスケールの大きい日本オリジナルの提案であり、本SATREPSはその土台を築いたに過ぎない。地球環境・エネルギーに真に寄与する国際外交技術として関心を高め、SSB計画の復興機運が高まり、それなりの資金が投入される事態に備える準備はできている。
- SiO₂を炭素(木炭等)で還元する方法(弘前大の還元炉)は、化学的には金属Siを製造する第1段プロセス同様、CO₂の発生を伴う。これは鉄の高炉精錬と同様に、大量のCO₂を発生し、地球温暖化防止に逆行しているように見えるが、実は熱力学、経済性から見ておかしくない。

⁷ 東京では神奈川大(横浜)の松本准教授研究室、東大物性研・Lippmaa Lab.、あるいは東京工専の見学案内など

⁸ CCS：carbon capture and storage または carbon capture and sequestration または carbon control and sequestration (二酸化炭素回収・貯留)

- ー 高温超伝導直流送電網の構築については、共同研究者・中部大学の山口作太郎教授(鯉沼も客員教授として参画)をリーダーとする NEDO 等の PJ により、石狩での 1km 試験施設、技術が世界を先行してきた。100km 以上に長距離化し高効率な国際的送電網の構築に向けた基礎研究(サイダ大学の PV サイトで、砂漠下での液体窒素冷却条件(地下 2m データ)を得た)と課題解決のプランは用意できている。COP26 では、インド首相による関連提案があった。

2-1. 研究題目 1 (東京大)

SSB で真に地球規模課題の解決に向けた研究成果を上げる第一歩として実施したのが総経費 5 億円の本 SATREPS である。次のステップとして 500 億円(200 億円 for SOG-Si/ハライドペロブスカイト PV+300 億円 for 150km 超電導直流送電)レベルの日本の独創技術をベースにする国際共同研究にステップアップする必要がある。

2-2. 研究題目 2 (NII)

WebELS は動画のファイルフォーマット用に(Adobe)フラッシュプレーヤーを用いているが、2020 年末で使用不能となった。それ故 WebELS そのものも使えなくなったと思われる。

2-3. 研究題目 3 (NIMS)

- ー 成果を応用物理学会で発表し、論文を投稿した。
- ー 水素社会に向けた取組として、水素ラジカルによる還元反応の促進に貢献する可能性がある。

2-4. 研究題目 4 (弘前大)

- ー 再生可能エネルギーの中で、太陽光発電はもっとも二酸化炭素排出量が多いと考えている。本グループはカーボンニュートラルに適した二酸化炭素排出量の抑制ができるさらに新しいプロセスに向けた開発に向けて、発展的に研究を進めている。

3. 地球規模課題の解決、及び社会実装に向けての発展について

基礎研究レベルの課題は、ほぼ解明されてきた。スケールアップ、社会実装への課題は、ポリシーメーカーの意識改革、国際外交戦略、グローバル研究に貢献する日本の科学技術外交 PR、時機を得た適切な基盤技術の高度化に対する支援策にある。

3-1. 研究題目 1. (東京大)

本 SATREPS の予備実験成果である、サハラ砂漠産珪砂、およびオラン近郊の豊富な珪藻土から高純度珪砂を作る研究がアルジェリアでのメインパートナーのオラン工科大で継続し、Si への還元も本 SATREPS で日本側が設計試作、提供した還元炉を使って、現地の研究者、学生が実験を進めている。

3-2. 研究題目 3. (NIMS)

- ー 基礎的な水素ラジカル発生に関する研究を行っているが、社会実装には及んではない。
- ー まだ基礎的な段階である。

3-3. 研究題目 4. (弘前大)

- － 基礎的な段階ではあるものの、新たな流れであるカーボンニュートラルに向けて発展的に研究を進めている。再生可能エネルギーの中でもっとも二酸化炭素排出量の多い太陽光発電を支えていくには原料シリコン問題の解決を図っていくことが最重要である。またウイグル問題などの人権問題に対処していくためには、1 国に偏らない多角的な原料シリコンサプライチェーンの構築が日本には不可欠である。
- － 当該分野の日本企業 (SEAVAC 社) より産学連携の打診があり、協議を進めている。

4. 日本と相手国の人材育成や開発途上国の自立的な研究開発能力の向上について

アルジェリアサイドのパートナー (オラン大、及びサハラ砂漠の入り口にある Saida 大学の首脳部)、アルジェ近郊とサハラ砂漠の中心に近いオアシスの町にある太陽光研究所の研究者も、AASEF に参加し研究発表や質疑応答を通して情報を共有し交流を深めた。

駐日大使を 10 年以上にわたって務めた Hannachi チュニジア大使 (および筑波大・北アフリカ研究センターの磯田教授) を通じて、チュニジア、モロッコ、エジプト等との研究連携につながる芽も吹きかけたが、本 SATREPS の終了、アラブの春の停滞で、頓挫している。

4-1. 研究題目 2. (NII)

本 SATREPS 終了とともに、USTO からの留学生は Ph.D を取得したが、USTO には就職できず、東京の IT 企業に就職した。日本の博士号が認められない問題があった。プロジェクトメンバーであったポスドクも東京の IT 企業に就職した。

4-2. 研究題目 3. (NIMS)

- － プロジェクトに参画した相手国研究機関や育成された研究者が主体的に活動していて、NIMS のプログラムで招いて、若手人材の育成に取り組んでいる。
- － プロジェクトを契機に相手国側で継続的・自立的に人材の輩出が行われており、NIMS に招いた女学生が学位を取得しようとしている。
- － 相手国のオラン工科大学で学位を取ろうと努力している学生がいる。

4-3. 研究題目 4. (弘前大)

- － 相手国からの留学生で博士号取得者が 3 名おり、人材育成に大きく貢献している。また、相手国の自立的な研究開発能力の向上につながっている。

5. 日本と開発途上国との国際科学技術協力の強化、科学技術外交への貢献について

SSB は、先進国が開発途上国に、開発済みの技術を教育訓練してあげるといった貢献ではなく、対等の立場で、基礎科学技術を一緒に考えましようとの提案である。開発途上国への貢献という考え方ではない。

5-1. 研究題目 4. (弘前大)

- － アジアアフリカ持続可能エネルギーフォーラム (AASEF) を開催して、日本と開発途上国との

国際科学技術協力の強化につながった。チュニジアなど近隣諸国にも拡がりを見せ、科学技術外交への貢献している。

6. 終了時評価における要望事項に対する現状報告

要望事項：

太陽電池の生産技術を産業化することや、砂漠地帯での太陽光発電を実現することは重要な課題であり、本プロジェクトはそれに向かったの第1歩である。研究活動が持続的に発展していく見込みは高いが、今後さらに研究を展開し、産業化に向けてには具体的で定量的な実証、説明および推進が必要であり、課題は多い。

- 太陽電池技術については対中国の競争力に疑問がある。日本製と言っても中国製の部品を輸入して組み立てている。
- NEDOのCIS系⁹などの重点化戦略には疑問を感じる。
- ただ、根本原料(Si種：砂漠の砂)まで遡ってコスト競争を検討する方法はあるかも知れない。Si製造は製鉄に似ている。SSBの生き残る道はあると信じている。
- 発電にしても短波長はペロブスカイトで、赤外領域はSiでと言ったコストダウンを考える手はあろう。
- 還元反応も水素ラジカル法や、SiCl₄原料など大きな改善の道もある。
- Cを使ったSi合成は最もCO₂を発生する「脱炭素」である。トータルを考えた脱炭素を考えねばならない。「太陽光発電と脱炭素」という原点から考え直さねばならないと思う。

7. プロジェクトの上位目標を踏まえた現状報告

上位目標： 不毛の砂漠をエネルギーの源泉として活用し、獲得した電力を砂漠地域ひいては西欧・中東・アジア各国へ展開させる。温暖化や資源枯渇といった地球規模の課題に挑戦、また、国家間の共同研究により国際連携や途上国の人材発掘の促進に貢献する。

- 現在の科学技術革新は「滅亡前の時代」に差し掛かっているという認識のもとリスクを考える必要がある。
- 国家間の「経済安保」などの問題にとどまらず、人類が生き永らえられるかどうかを前提に科学を考える必要がある。
- エレクトロニクス(Fermi粒子)時代(量子統計力学)からフォトンクス(Bose粒子)時代(BE凝縮)への変遷の中にあると捉え鯉沼名誉教授はレーザー研究に向かっている。

以上

⁹ CIS系太陽電池：銅(Cu)、インジウム(In)、セレン(Se)の3つの元素を主原料とする化合物半導体系太陽電池。