

国名	統合バイオリファイナリー研究拠点構築プロジェクト
インドネシア	

I 案件概要

事業の背景	インドネシア経済は、石油やガスといった豊富なエネルギー資源に加え、動植物油脂や天然ゴムといった豊かな天然資源に支えられ、顕著な成長をみせてきた。インドネシア政府は、さらなる経済成長を維持するために、電力の安定供給システムの構築、エネルギー資源の多様化及び電化率の向上をめざす政策を打ち出した。一方で、インドネシアはエネルギー供給の大半を石油に依存していた。2011 年のデータによると、インドネシアのエネルギー消費量 1,176BOE（石油換算バレル）のうち、46.7%が石油資源に由来していた。エネルギー供給が石油資源のみに依存していた場合、石油価格の高騰により国家財政や産業活動に大きな影響を及ぼし、国民の生活に社会的不安定をもたらす可能性があった。インドネシアは、石油のみに依存しないためのエネルギー源の多様化と、今日世界的に高まっている環境問題に対応するための低炭素エネルギー社会への転換という課題に取り組んでいた。		
事業の目的 <sup>2</sup>	本事業は、インドネシアにおいて、リグノセルロース系バイオマスの前処理手順の確立、リグノセルロース分解酵素の生成、分離技術を用いた微生物の開発、分離された化学物質からのバイオベースポリマーの生産、及び民間セクターを含む共同バイオリファイナリーの促進により、バイオマス利用を推進するための統合的バイオリファイナリー戦略の構築を図り、もって同国の潜在的なバイオマスからバイオベース製品を生産するための統合バイオリファイナリー技術の実施に寄与することをめざす。		
	1. 想定された上位目標：インドネシアにおける、潜在的なバイオマスからバイオベース製品を生産するための統合バイオリファイナリー技術の実施 2. プロジェクト目標：「インドネシアにおける革新的バイオ生産（iBio1）：燃料及び化学物質生産のための、スーパー微生物を活用したバイオマス利用促進に向けた統合バイオリファイナリー戦略」の構築		
実施内容	1. 事業サイト：インドネシア（全国）※研究活動は主にチビノン市のインドネシア科学技術院（LIPI）によって実施された。 2. 主な活動： (i) オイルパーム及びサトウキビ産業由来のリグノセルロース系バイオマスの前処理手順を確立 (ii) リグノセルロース分解酵素を生成・評価 (iii) バイオ燃料及びバイオ化学品を生産するための分離技術を備えた微生物を開発 (iv) 分離された化学物質からバイオベースポリマーを生産 (v) フィージビリティ調査を実施し、統合バイオリファイナリープロセスを促進 3. 投入実績 日本側 ※終了時評価時 (1) 専門家派遣 13 人（研究者） (2) 機材供与 ガスクロマトグラフィー質量分析計（GC-MS）、ゲル浸透クロマトグラフィー、発酵装置（バイオフィロー）、遠心分離機等の実験機器等 相手国側 ※終了時評価時 (1) カウンターパート配置 68 人 ※LIPI の研究者 64 人とインドネシア大学の研究者 4 人 (2) 土地・スペース 研究・事務スペース供与		
事業期間	(事前評価時)2013 年 5 月～2018 年 3 月（60 カ月） <sup>3</sup> (実績)2013 年 11 月 1 日～2018 年 10 月 31 日（60 カ月）	事業金額（日本側のみ）	（事前評価時）301 百万円、(実績) 348 百万円
相手国実施機関	インドネシア科学技術院（LIPI） ※LIPI は 2021 年 9 月に国家研究イノベーション庁（BRIN）に統合された。		
日本側協力機関	神戸大学、長崎大学、静岡県立大学、三重大学		

II 評価結果

【留意点】  
・事後評価時における事業効果の継続状況は、SATREPS 事後評価枠組みに基づいて、個別のプロジェクト目標指標の達成状況とその目標値の比較ではなく、成果の活用状況や関連研究の継続・発展に焦点を当てて評価した。

1 妥当性/整合性
<妥当性>
【事前評価時のインドネシア政府の開発政策との整合性】

<sup>1</sup> 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。

<sup>2</sup> 英文版の目標文に忠実に翻訳した。和文報告書における目標文は次のとおり。上位目標：インドネシア国において統合バイオリファイナリーの技術を利用したバイオ製品がインドネシア国内のバイオマスから生産される。プロジェクト目標：インドネシア国において統合バイオリファイナリーの構築に係るバイオ生産技術が実証される。

<sup>3</sup> 事業事前評価表には「2013 年 5 月～2018 年 3 月（5 年間）」と記載されている。2013 年 5 月から 2018 年 3 月までの月数は 59 カ月だが、討議議事録（R/D）には「期間は 5 年間」と記載されており、実施機関も同じ認識を共有している。このため、計画された事業期間は 60 カ月（5 年間）であったと考えられる。

本事業は、事前評価時点におけるインドネシアの開発政策と、整合性が高い。2006年1月、国家エネルギー政策に関する大統領令第2006-5号が策定され、「2025年を目標年とし、2006年の水準から石油消費量を20%削減し、代替エネルギーとして天然ガスとバイオ燃料の使用を30%増加させ、再生可能エネルギーを15%増加させる」と規定された。また、バイオ燃料の供給と使用に関する大統領令第1号（2006年）は、バイオ燃料の使用拡大を定めている。さらに、2010年にはバイオ燃料に関する国家開発目標が策定され、バイオ燃料産業の振興と、約220万ヘクタールのバイオ燃料作物栽培面積の拡大をめざし、(1)350万人の雇用創出、(2)農民収入の向上を目標として掲げている。

【事前評価時のインドネシアにおける開発ニーズとの整合性】

本事業は、事前評価時点におけるインドネシアの開発ニーズと、整合性が高い。上記「事業の背景」に記したとおり、エネルギー源の多様化と低炭素エネルギー社会への転換を図るために、バイオマス利用の促進が求められていた。

【事業計画/アプローチの適切性】

本事業の計画/アプローチは、非常に適切である。本事業は、弱者層に公平な利益をもたらすことを目的として計画された。インドネシアは多島国として、地域や島ごとに燃料及びエネルギー資源へのアクセスに多様な課題を抱えている。この格差は特に、伝統的なエネルギー資源が乏しく入手困難な遠隔地や周縁地域のコミュニティに影響を及ぼしている。そのような状況下で、本事業はバイオマスが豊富な地域に焦点を当てることで、これらの課題に対応する重要な役割を果たした。本事業では、持続可能でありながら地域の資源に適応可能なバイオリファイナリー技術を導入した。農業廃棄物や林業廃棄物等の地域バイオマスを活用することで、遠隔地のコミュニティはエネルギー自給自足を実現できるようになる。このアプローチにより、従来の燃料輸入への依存が軽減され、再生可能資源の利用が促進される。その結果、本事業は地域に根ざした手頃で持続可能なエネルギーソリューションを提供することで、脆弱なコミュニティに直接利益をもたらし、エネルギーの自立を可能にする。このことは、エネルギーアクセスが進展の障害となっていた地域における地域開発や経済的回復力の向上にも寄与する。

本事業の最も顕著なアプローチの一つは、インドネシアの関係者との効果的なコミュニケーションの確立であった。開かれた継続的な対話により、コミュニティのニーズや懸念が理解され、事業全体を通じて対応された。また、このアプローチは、円滑な調整、より強固なパートナーシップ、及び地域の関与を促進し、本事業の成功と長期的な持続性にとって不可欠な要素となった。

【評価判断】

以上より、本事業の妥当性は③<sup>4</sup>と判断される。

＜整合性＞

【事前評価時における日本の援助方針との整合性】

本事業は、事前評価時の日本の対インドネシア援助方針と整合している。日本は、「対インドネシア共和国国別援助方針」（2013年）において、「アジア地域及び国際社会の課題への対応能力向上のための支援」を優先分野として位置づけ、高効率エネルギー、エネルギーの省力化及び代替エネルギーの促進に協力していた。これは、温室効果ガス排出量の抑制及び気候変動に伴う負の影響の軽減を目的とした制度構築をめざすものであった。

【JICA他事業・支援との連携/調整】

事前評価時に計画された、本事業とJICAの他のSATREPS事業「生命科学研究及びバイオテクノロジー促進のための国際標準の微生物センターの構築プロジェクト」（2011年～2016年）（以下「SATREPS1」）との連携/調整は想定どおりに実施され、事後評価時に正の効果が確認された。SATREPS1はLIPIのインドネシアカルチャーコレクション（インドネシア生物資源センター）（InaCC）の整備を支援し、本事業ではInaCCに微生物株を要請し、提供を受けた。その後、本事業では株のスクリーニングを実施し、エタノール生産用のホスト株として有望な酵母株6株を選定した。その中で、生バイオマスから高いエタノール生産が可能なInaCC株1株を取得することに成功した。

さらに、本事業は、別のSATREPS事業「バイオマス廃棄物の流動接触分解ガス化・液体燃料生産モデルシステムの開発プロジェクト」（2014年～2019年）（以下「BPPTプロジェクト」）のメンバーと会議を行った。BPPTプロジェクトは、バイオマス廃棄物（オイルパーム空果房等）からエタノール及びメタノールを生産するプロセスの開発を目的としていた。この会議では、本事業、BPPTプロジェクト、バンドン工科大学の研究者間で情報が共有された。

【他機関との連携/国際的枠組みとの協調】

事前評価時に計画された他機関による介入との連携/協調（後掲の表中、プロジェクト目標指標4にて言及した連携を参照）が想定どおりに実施され、事後評価時に正の効果が確認された。BRINは、このような連携の取り組みが、支援ネットワークの強化及び資源の共有を促進し、プロジェクト目標の達成に貢献したことを確認し、他の関係者との効果的な連携/協調の価値を示していると評価している。

【評価判断】

以上より、本事業の整合性は③と判断される。

【妥当性・整合性の評価判断】

以上、本事業の妥当性及び整合性は③と判断される。

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】

事業完了時までに、プロジェクト目標は、おおむね計画どおりに達成された。本事業は、オイルパーム空果房やサトウキビバガスといったバイオマスの効率的な前処理プロトコルの開発、適切なリグノセルロース分解酵素の特定、バイオ燃料（エタノール）及びバイオ化学品（乳酸）生産のための微生物株の最適化、乳酸ポリアミドブレンド（PLA）のようなバイオベースポリマーの合成など、計画された成果の大部分を達成した。その結果、新技術の開発、特許の登録、及び日本とインドネシアの機関間での協働バイオリファイナリーの取り組みが実現した。ISIジャーナル（Institute for Scientific Informationデータベースにインデックスされているジャーナル）への論文発表数は19件で、目標の15件を上回った（指標1）。特許出願は5件が計画され、3件が登録済み、1件が登録待ちであった（指標2）。博士課程の学生数は16人に達し、目標の10人を上回った（指標3）。一方、企業との協力関係は目標の2件に対して1件にとどまった（指標4）。

【事業効果の事後評価時における継続状況】

事後評価時点で、本事業の効果は継続している。本事業の多くの成果が活用されている。例えば、オイルパーム空果房の前

<sup>4</sup> ④：「非常に高い」、③：「高い」、②：「やや低い」、①：「低い」

処理手順、酵素（ペクチナーゼ、キシラナーゼ、マンナーゼ）の生産、オリゴ糖（マンナンオリゴ糖（MOS）、キシロオリゴ糖（XOS）、フラクトオリゴ糖（FOS）、キシリトール）の生成及びPLAの生産技術が、LIPI、BRIN、及び一部の機関や企業によって適用されている。また、BRIN、パジャジャラン大学及びムラワルマン大学が、SATREPS事業「フードエステート廃棄物の変換技術によるバイオ循環経済の樹立」（2023年～2028年）（以下「バイオ循環経済SATREPS」）を通じて行っているものを含め、統合型バイオリファイナリーに関する多様な研究が進行中である。

本事業で利用されたすべての微生物及びそのバイオリファイナリー能力に関する情報は公開されており、InaCCカタログで入手可能、または掲載準備中である。このことにより、研究者や実務者はバイオリファイナリー及び関連分野でのさらなる研究や応用のために、これらの貴重な情報に容易にアクセスし、活用できる。この透明性は、科学コミュニティ内での協力及び知識共有を促進する役割を果たしている。

本事業で提供された主要な研究機器は活用されており、プロジェクトメンバーだけでなく、インドネシア各地のBRIN所属研究者にも利用可能となっている。BRINによれば、このように施設・機器の利用範囲が広がり、本事業計画段階で想定された成果を大きく上回る影響を及ぼしている。また、BRINは、これらの資源の共同利用が研究機会の増大を促進し、科学的知識及び応用の進展に貢献していると述べている。

【想定された上位目標の事後評価時における達成状況】

事後評価時点までに、上位目標は計画どおりに達成された。2019年以降、インドネシアの民間企業1社が本事業の統合型バイオリファイナリー技術を活用している（指標1）。しかし、新型コロナウイルス感染症流行により、2020年以降、本事業の技術を活用した民間企業でのバイオ生産基盤構築の取り組みは計画どおり進められず、多くの研究開発の活動が中断された。もっとも、BRINによれば、2020年に直面した上記課題にもかかわらず、2019年に築かれた基盤は、協力関係を育み、インドネシアにおける民間セクターのバイオ生産への関与を促進するための強固な土台を築くという取り組みの現れであるとのことである。

なお、事後評価時点において、大規模なバイオマス前処理を含む完全な統合型バイオリファイナリープロセスは、実用的なレベルでは完全には確立されていない。2018年にパイロットプロジェクトが実施されたが、企業レベルに限られており、より広範な社会実装には至っていない。このことは、初期の研究活動が行われたものの、より広範囲で効果的なバイオリファイナリープロセスを実現するにはさらなる努力が必要であることを示している。

【事後評価時に確認されたその他のインパクト】

本事業は、関与した研究者の研究能力を大幅に向上させた。具体的には、本事業の期間中に少なくとも10人が博士号取得に向けた学業に取り組んだ。この学位取得による進展は、分野における専門知識及び技能を高め、より高度な研究の実施や、現在及び将来のプロジェクトへの効果的な貢献を可能にした。この能力強化は、研究者個人に利益をもたらすだけでなく、彼らが所属する機関全体の研究能力をも強化している。

関連する政府機関及び組織の科学的リテラシーに関して、BRINは、BRIN及び各大学が「統合型バイオリファイナリー」という用語の使用に精通していることを指摘している。エネルギー・鉱物資源省及びPT. プルタミナ（国有石油・天然ガス関連会社）も、バイオ燃料生産のためのバイオマス利用に関心を示している。2013年から本年（2024年）まで、BRINは毎年定期的に「インドネシア革新的バイオ生産バイオテクノロジー国際シンポジウム（ISIBio）」を開催しており、学術関係者、規制当局、民間企業などから講演者及び参加者を招いている。

プランテーションから排出され、以前は廃棄物と見なされていた農業残渣の利用に関して、BRINは、それらが現在では効果的に活用されていると報告している。例えば、これらの残渣由来のバイオマスが農家によって販売され、新たな収入源を提供している。この変革は、廃棄物削減に寄与するだけでなく、農家の経済的福祉を向上させるものであり、農業廃棄物をバイオ生産及びバイオリファイナリープロセスに統合する実質的な利点を示している。このポジティブな変化を単一の研究プロジェクト（本事業）の成果とみなすのは困難だが、本事業は残渣の効果的な活用を促進しており、将来的な貢献が期待されている。

【評価判断】

以上より、本事業の有効性・インパクトは③と判断される。

プロジェクト目標及び上位目標の達成度

目標	指標	実績	情報源
プロジェクト目標 「インドネシアにおける革新的バイオ生産（iBio1）：燃料及び化学物質生産のためのスーパー微生物を活用したバイオマス利用促進に向けた統合バイオリファイナリー戦略」の構築	（指標1） ISI ジャーナルへの投稿が15論文。	達成状況（継続状況）：計画を超えて達成（継続） （事業完了時） ・論文発表：19件の論文を発表、2件の論文を投稿 ・シンポジウム：2015年、2016年、2017年に国際シンポジウムを開催。4件のシンポジウム報告書を発行 ・紀要（ブリテン）：プロジェクト活動を促進するために8件のブリテンを発行 ・学会発表：招待講演4件、口頭発表26件、ポスター発表30件 （事後評価時） ・本事業の研究成果を活用し、関連研究が継続されている。	合同終了時評価報告書、BRIN
	（指標2） 知的財産権出願数が5つ以上。	達成状況（継続状況）：おおむね計画どおり達成（継続） （事業完了時） 1) 鉱物粘土を支持体とするスズ触媒を用いたPLAの調製（登録済み） 2) PLAとセルロース微小繊維（MFC）の複合材料製造法（登録済み） 3) タンパク質及び二次代謝産物生産のための宿主細胞としてストレプトマイセス・アルブスの原形質体を作製する方法（登録済み） 4) リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産を増加させる酵母細胞（登録予定） （事後評価時） ・本事業の研究成果を活用し、関連研究が継続されている。	合同終了時評価報告書、BRIN
	（指標3） プロジェクト研究	達成状況（継続状況）：計画を超えて達成（継続） （事業完了時）	合同終了時評価報告書、BRIN

	者が10名博士課程へ進学する。	本事業での博士課程学生の総数：16人 ・神戸大学での博士課程学生：合計8人（在籍中6人、博士課程入学予定2人） ・海外（神戸大学以外）の博士課程学生：3人 ・インドネシア国内大学での博士課程学生：5人（事後評価時） ・本事業の研究成果を活用し、関連研究が継続されている。博士課程候補者の増加が見られる。	
	（指標4） インドネシア、日本の民間企業が、2件のバイオリファイナリーの研究協力を行う。	達成状況（継続状況）：一部達成（継続）（事業完了時） 本事業では、LIPI、神戸大学、インドネシア及び日本の民間企業間で覚書を締結し、1件の協力関係を確立した。 ・協力事業名及び場所：インドネシアにおける統合型バイオリファイナリー技術の開発及び実施に関する協力 ・インドネシア側企業名：LIPI イノベーションセンター、生物工学研究センター、P.T. Agricol Indonesia ・日本側企業名：神戸大学、バイオエナジー株式会社 ・最終成果品：1) インドネシアにおけるバイオマス由来バイオ燃料の生産技術の開発及び実施、2) パーム酸油及び/または粗パーム油を原料とする酵素処理によるバイオディーゼルのパイロットスケール生産の確立及び運用化（事後評価時） ・下記の上位目標欄を参照。	合同終了時評価報告書、BRIN
想定された上位目標 インドネシアにおける、潜在的なバイオマスからバイオベース製品を生産するための統合バイオリファイナリー技術の実施	（指標） インドネシア国において統合バイオリファイナリーの技術を利用したバイオ生産が少なくとも1民間企業で行われる。	達成状況：計画どおり達成（事後評価時） 民間企業：1社 ・PT. Agricol Indonesia（2019年～現在） 国営企業及び国営企業傘下の機関：2機関（2019年のみ） ・Petrosida Gresik（2019年） ・Indonesian Coffee and Cocoa Research Institute（2019年）	BRIN

### 3 効率性

事業費は複合的な要因によりやや計画を上回ったが（計画比：116%）、事業期間は計画どおりであった（計画比：100%）。

	事業金額（日本側の支出のみ、円）	事業期間（月）
計画（事前評価時）	301 百万円	60 カ月
実績	348 百万円	60 カ月
割合（%）	116%	100%

アウトプットは計画どおり産出された。

以上より、効率性は③と判断される。

### 4 持続性

#### 【政策面】

事後評価時点で、本SATREPS事業の研究成果を活用するための政策や制度が政府によって整備されている。特に、統合型バイオリファイナリー研究がインドネシアの重点研究分野として位置づけられ、国家プログラムとして採択されていることは、政策立案に研究を活用するという政府の取り組みを示している。これにより、本SATREPS事業で導入された研究施設や機器が有効に活用され、開発やイノベーションが継続して進められている。また、エネルギー・鉱物資源省が掲げる「2060年までのゼロエミッション」政策のように、統合型バイオリファイナリーの方針に沿った取り組みを支える国家政策も進められている。こうした政府の取り組みは、バイオリファイナリー技術が農業や産業の発展に果たす重要な役割を裏付けており、研究成果が持続可能な開発に向けた課題や機会に生かされる道を開いている。

#### 【制度・体制面】

本SATREPS事業の成果を活用するための組織体制が整備されている。BRINの研究・イノベーション活用担当副部長が、研究の実施管理を担っている。2016年から2020年まで活動していたLIPIの統合型バイオリファイナリー中核研究センターは、その取り組みを継続し、研究協力センター（RCCs）へと進化している。この移行は、研究機関や政府当局間の連携が継続しており、研究成果に基づいた政策やプログラムの実施を推進していることを示している。RCCsの設立により、パートナーシップの強化、知識の共有、及び統合型バイオリファイナリー研究から得られる成果の創出が促進されている。なお、人員配置に関する情報は得られていない。

また、本SATREPS事業で設置された研究施設及び機器の運用・維持管理のための組織体制も整備されている。BRINの研究・イノベーションインフラ局（DIRI）がこれらの活動を監督する責任を担っている。同局は、施設の適切な維持管理及び運用を確保し、継続的な研究活動を支援するとともに、設置された機器を科学技術の様々な進展に最大限活用できるよう努めている。

関連部門及びセンターの人員配置が十分であるかどうかに関する情報は得られなかった。しかし、効果・影響のセクションで述べられている活動の継続状況が良好であることを踏まえると、特段の問題は見受けられない。

#### 【技術面】

事後評価時点で、研究機関及び組織は本SATREPS事業の成果を活用するための技術力を有しており、研究者のスキル向上や政府機関の科学的リテラシーの向上が確認された。これらの進展は、現在進行中のバイオ循環経済SATREPS等の今後の取り組みを支えるものといえる。研究者は、外部の専門家との協力、バイオリファイナリーに関する研究資金の確保、及び博士課程

候補者の増加を通じて能力を維持している。また、神戸大学や他のネットワークとの協力は、知識交換及びスキル向上を引き続き支援している。

【財務面】

事後評価時点で、各研究機関は本SATREPS事業の成果を維持・拡大するための財源を確保している。主な取り組みとして、BRINによるインハウスプログラム共同研究（Rumah Program）があり、継続的な研究に対する体系的な管理及び資金提供を行っている。また、バイオマス、バイオ製品、微生物、遺伝子工学、及びクリーンテクノロジーに特化したRCCsの設立により、資金調達を促進している。さらに、酵素生産を国家的な重点課題として位置づけ、バイオ製品の品質向上及び規模拡大を目指したGMP（適正製造規範）バイオプロセスへの投資が進められている。加えて、支援が得られている財源として、パーム油部門の研究を支援するパーム油プランテーション基金管理機関（Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit：BPDPKS）、教育及び研究活動を支援する教育基金管理機関（Lembaga Pengelola Dana Pendidikan：LPDP）、研究施設・機器の運用及び維持管理を担う研究・イノベーションインフラ局（DIRI）がある。

政府当局も研究成果を活用するための財源を確保しており、特に政策やプログラムの実施に活用されている。特に、前述の「2060年までのゼロエミッション」政策が挙げられる。さらに、構造生物学やバイオリファイナリー分野の新たな政府プログラムが設立され、研究及びイノベーションの推進が図られている。これにより、持続的な取り組みを進め、国家目標を達成するための財源が確保されている。

【環境・社会面】

環境・社会面の問題は確認されず、対応策を講じる必要はなかった。

【評価判断】

以上より、政策面、制度・体制面、技術面、財務面、環境・社会面いずれも問題なく、本事業によって発現した効果の持続性は④と判断される。

5 総合評価

本事業は、バイオマス利用を促進するための統合型バイオリファイナリー戦略の確立というプロジェクト目標及びその戦略の実施という上位目標を、おおむね計画どおりに達成した。

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といえる。

IV 提言・教訓

JICA への教訓：

本事業は他の SATREPS 事業との良好な連携を実現しており、優良事例として参考になる。連携の効果として、他の SATREPS 事業の研究成果（本事業においては有用な酵母株）の活用や、他の SATREPS 事業に関与するインドネシアの研究機関間での情報交換（本事業においてはバイオマス廃棄物からのエタノール及びメタノール生産プロセスの開発に関する情報）が挙げられる。JICA は、SATREPS 事業の計画時に他事業との連携を考える際、本事例を参考にすることが望まれる。