

I. 調査課題名

令和 3 年度 厳しい環境条件下におけるサンゴ礁の面的保全・回復技術開発実証委託事業（沖縄沿岸海域）

II. 実施機関及び担当者

一般社団法人水産土木建設技術センター

米山正樹、中村良太、鈴木泰弘、武田真典、完山暢、岩本典丈、濱満靖、高間億人、中島智之、古堅風紗

株式会社エコー

高橋由浩、田村圭一、白木喜章、川崎貴之、大澤寛之、安武陽子、今泉久祥、眞喜志一、片山理恵、中村将平、栖原有里

国際航業株式会社

小松俊晶、米澤泰雄、内木場俊、片山美可、藤家亘、佐々木秀勝、浅田宣親、本田謙一、高橋大二郎、上道奈瑠実、三浦雄太

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所

鈴木豪、山下洋

Ⅲ. 調査のねらい

サンゴ礁は多様な水産動植物の生息場となり豊かな漁場を育むが、近年の海洋環境の変化等によりサンゴ礁生態系の減少が危惧されている。このため、国内外ではサンゴの保全・再生を図るための調査研究等が盛んに行われている。

わが国最南端の沖ノ鳥島では、多様なサンゴが生息しているが、台風等による波や流れ、砂礫の移動等の影響を受けるため、サンゴ幼生の着生と生育が厳しい環境となっている。沖ノ鳥島は、貴重な生態系を有し、かつ排他的経済水域の重要な拠点であるが、波浪による侵食や地球温暖化に起因する海面上昇により島の水没が危惧されており、サンゴ礁の有する消波機能やサンゴ砂礫の集積などによる生態工学的な島の保全・再生が強く求められている。

そこで、種苗生産、移植、保全、モニタリング等一連のサンゴ増殖技術と、移植・生育したサンゴ群集を核として、沖ノ鳥島のサンゴ礁を面的に拡大させる技術が、平成 29 年度までの「厳しい環境条件下におけるサンゴ増殖技術開発実証委託事業」において開発された。また、得られた技術や知見を反映させた「有性生殖によるサンゴ増殖の手引き（平成 31 年 3 月 水産庁漁港漁場整備部）（以下手引き）が作成、公表されている。

しかしながら、サンゴ礁の衰退が進行している現状においてはより大規模に、効率的にサンゴ礁を保全・回復させる手法が求められる。本事業では、これまでに得られた知見・技術を活用し、将来的に改善・高度化された技術を沖ノ鳥島で展開することを見据えてサンゴ幼生を一定密度以上で広範囲に供給する手法を沖縄沿岸で開発した。さらに、高温耐性型サンゴの増殖技術や種苗生産技術を開発し、サンゴの減耗を抑えることで、規模・質の両方向からサンゴ礁の面的保全・回復の効率化を目指す。

1. 設定目標

実海域にてサンゴが増殖する過程は「産卵」「着底」「育成」の 3 段階に大きく分けられる。本事業は幼生の供給をコントロールしつつ、効果的にサンゴ礁を面的に保全・回復させることを軸としているため、「着底」の段階における目標を設定することとした。

設定された事業 5 年目（令和 4 年度）までの目標を下に記す。

設定目標：幼生の着底密度 100 個/m² 以上で 10ha 程度に展開可能な技術を開発する。

この目標を設定することで、着底した幼生数に対して 5 年後の生残率約 6%が見込まれる。これは着底から 5 年後に産卵可能な親サンゴが 6 群体/m² の密度で生残している可能性を示しており、再生産へ必要とされているサンゴ親群体の生息密度である「1 群体/m²」を大きく上回っている。仮にオニヒトデの異常発生や高水温等の想定外の事態が発生しても再生産可能な親群体の維持が期待できる点からも、上述の目標設定がされている。なお、下の過去の実績 2 つから 5 年後生残率が約 6%となると見込んでい

- ① 着底場所となるサンゴ着床・育成基盤と同様の基本機能を有する角筒型着床具では着底 2 年後の生残率が約 27%であった。
- ② 実海域に移植されたサンゴの 1 年後の生残率は約 60%であった。

$$27\% \times (60\%)^3 \approx 6\%$$

2. 調査フロー

本事業は、平成 30 年度から令和 7 年度までの全体期間を 8 年間としている。今年度はその 4 年目にあたり、実証結果や検討委員会での意見を反映させつつ初年度に立案した事業全体計画に沿って技術開発を取り進めた。実海域におけるサンゴ幼生の面的拡散特性の把握を 1.0ha 規模で実施し、海域実証に必要となるハビタットマップの作成、幼生着生・育成基盤の設計・試作・設置、面的拡散シミュレーションモデルの構築・改良等を実施し、さらにサンゴ被度計測技術の高度化に取り組んだ。また、高温耐性型サンゴ増殖技術の開発の観点から、ハマサンゴ属等のリスクニング技術の開発、サンゴ自体の高温耐性それぞれの活用に取り組んだ。

調査全体のフレームワークを図 1 に示す。サンゴ礁を面的に保全・回復させるため、図中で水色塗されたサンゴ産卵ファームづくりに必要な技術の開発に取り組んでいる。

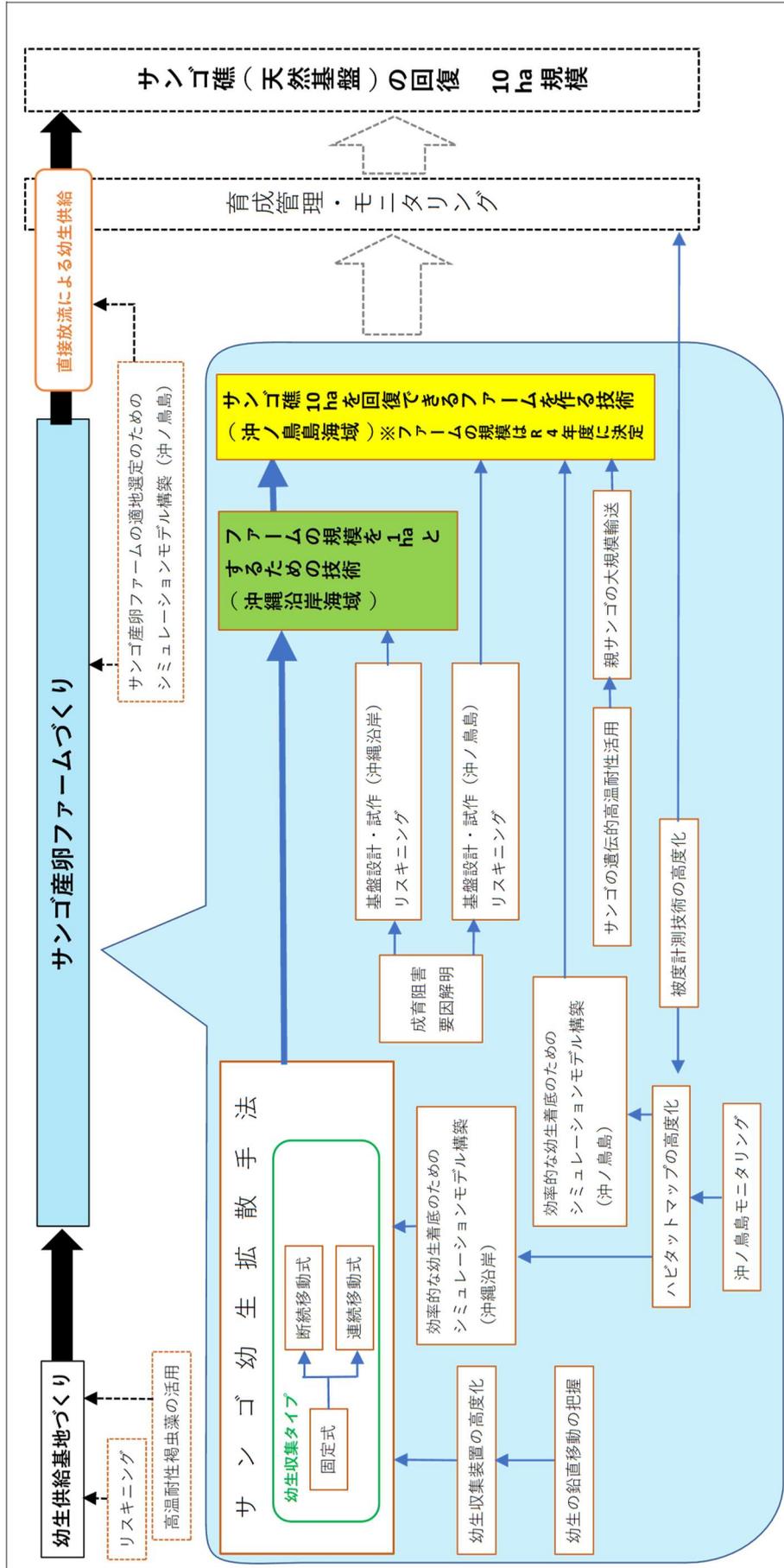


図1 調査全体のフレームワーク

3. 事業開始 5 年目までのスケジュール

本事業において計画されている各調査メニューの 5 年目までの実施計画を表 1 と表 2 に示す。

なお、表 1 と表 2 には「令和 3 年度 厳しい環境条件下におけるサンゴ礁の面的保全・回復技術開発実証委託事業（沖縄沿岸海域）」および、「令和 3 年度 厳しい環境条件下におけるサンゴ礁の面的保全・回復技術開発実証委託事業（沖ノ鳥島海域）」の内容が含まれている。

表1 5年間の事業計画 (1/2)

事業年度		1年目 (H30年度)	2年目 (H31・R1年度)	3年目 (R2年度)	4年目 (R3年度)	5年目 (R4年度)	6～8年目 (R5～R7年度)		
海域実証による面的拡散特性の把握	幼生収集タイプ	規模	10m×10m(0.01ha) 崎枝湾	・直径60m(約0.3ha) 崎枝湾 ・直径60m(約0.3ha) 浦底湾	・断続移動式:直径40m・2箇所(0.2ha):浦底湾 ・連続移動式:10m×200m(0.2ha):浦底湾	・断続移動式:42m×120m(0.5ha):浦底湾 ・連続移動式:50m×100m(0.5ha):浦底湾	・連続移動式:1ha:浦底湾	【沖ノ島島】 ●幼生収集タイプ(移動式)を基本として実証 【沖縄沿岸】 ●沖ノ島島の結果の検証等を必要に応じて補完する(予備実証等)	
		使用基盤	角筒型着床具	格子状基盤(実証用)、角筒型着床具	格子状基盤(実証用)、角筒型着床具	格子状基盤(実証用)、角筒型着床具	格子状基盤(実証用)、角筒型着床具		
		基盤配置	角筒型着床具を1mピッチで基盤目状に100個配置	格子状基盤(約2m×2m)を2基程度、角筒型着床具9個単位を放射線状5～10m間隔に1基設置	格子状基盤(約2m×2m)を2基程度 ・断続移動式放流:角筒型着床具9個単位を放射線状5～10m間隔に1基設置 ・連続移動式放流:同上の着床具を線状の測線に沿って20m間隔で5基程度ずつ設置	格子状基盤平型2基、凸凹型3基 ・断続移動式放流:角筒型着床具9個単位を放射線状5～10m間隔に1基設置 ・連続移動式放流:同上の着床具を線状の測線に沿って20m間隔で5基程度ずつ設置	格子状基盤平型1基、凸凹型1基、角筒型着床具9個単位を線状の測線に沿って20m間隔で5基程度ずつ設置		
		検証方法	幼生保持、4日後放流、同時流況観測して、流況と幼生拡散・着生状況を検証	350万及び50万の幼生を保持後、それぞれを流速の異なる海域で前年度と異なる高さから放流し、開放高さ、流速と拡散の関係を把握する。(2ケースの実験は放流幼生が交じり合わないよう、離れた箇所で行う。)	・断続移動式放流:500万の幼生を2回(約150万と約350万を想定)、1m高さから放流、10分ずつ2、3回開閉して幼生を採集し、1回当りの放流量を把握するとともに流況と拡散範囲を確認する。 ・連続移動式放流:1,500万の幼生を保持した収集装置から400m曳航移動させながら、基盤直上で幼生放流し、曳航速度と放流量、拡散範囲を把握する。	・断続移動式放流:1000万の幼生を4回(各250万を想定)、1.5m高さから各回10～20分開閉して放流・移動を繰り返し、1回当りの放流量を把握するとともに流況と拡散範囲を確認する。 ・連続移動式放流:1,000万の幼生を保持した収集装置を0.5haの範囲を曳航移動させながら、基盤直上高さから幼生放流する。放流量、拡散範囲を把握する。	・断続移動式放流:海域での拡散実証は行わず、幼生の沈降速度のデータ収集を実施する。また、沖ノ島島を念頭にした収集装置の改良を行う。 ・連続移動式放流:2,000万以上の幼生を1.0haの範囲に放流する。なお、放流手法を実用性を考慮して、面的な往復方法から線的な曳航方法に変更する。結果からR3年度に課題となった放流量計算式を検証する。		
	直接放流タイプ	規模	-	-	-	-	-		
		使用基盤	-	-	-	-	-		
		基盤配置	-	-	-	-	-		
		検証方法	-	-	-	-	-		
	【参考】産卵親群と幼生量見込	崎枝湾	親群体	約20	30	100	100	100	【計画数量】 ●R5 →親群体:60 幼生数:250万 ●R6 →親群体:120 幼生数:500万 ●R7 →親群体:240 幼生数:1000万
			幼生	4,000,000	7,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	
浦底湾		親群体	0	0	200	200	200		
		幼生	0	0	30,000,000 (実証値 22,000,000)	20,000,000	20,000,000		
施設育成(久米島)		親群体	0	0	0	0	300		
		幼生	0	0	0	0	3,000,000		
計	親群体	約20	30	300	300	600			
幼生	4,000,000	7,000,000	40,000,000	30,000,000 (推定25,500,000以上)	33,000,000				
海域実証に必要な技術開発	(1) 海域特性の把握による面的保全・回復海域の選定(ハビタットマップの高度化) ※面的拡散シミュレーションと連動して実施		①崎枝湾で海域特性データ(サンゴ被度、風況、流況、地形)を取得 ②浦底湾のサンゴ生息分布マップの作成 ③崎枝湾、浦底湾でハビタットマップを作成、成育適性環境の確認	①崎枝湾、浦底湾で海域特性データ(サンゴ被度、風況・流況、水温、光量)を取得 ②浦底湾のサンゴ生息分布マップの作成 ③サンゴ成育適性環境の確認 ⇒大規模放流実証実験の検討資料	①直接放流実験のための海域特性データの取得(候補地A) ②ハビタットマップの作成 ③サンゴ成育適性環境の確認 ⇒大規模放流実証実験の検討資料	①直接放流実験のための海域特性データの取得(候補地A以外の候補地又は追加実施) ②ハビタットマップの作成 ③サンゴ成育適性環境の確認 ⇒大規模放流実証実験の検討資料	【沖ノ島島】 ●現地調査データを元に改良		
	(2) 幼生の鉛直移動		産卵1日後～4日後までの幼生の鉛直分布を把握	-	-	-	-	-	
	(3) 幼生着底技術の開発		①放流による着床範囲と着底量把握 ②放流密度に対する着底量・加入量把握 ③放流試験による岩盤への加入量把握	①幼生放流の高さによる着底量・加入量把握 ②流速による拡散状況、着底量等の把握 ③1年目試験のモニタリングの継続	①幼生供給方法による着底量、生残率を既往実験結果と比較(改良) ②着底したサンゴのモニタリングの継続	①幼生供給方法による着底量、生残率を既往実験結果と比較 ②幼生着底に適した幼生供給方法の検討 ③着底したサンゴのモニタリングの継続	①着底したサンゴのモニタリングの継続 ②幼生着底に適した幼生供給方法の開発	【沖ノ島島】 ●実証実験用基盤のモニタリング 【沖縄海域】 ●実証実験用基盤のモニタリング	
	(4) 幼生収集装置の高度化		①スカート部と収容部の分離方式を開発	①収集効率の向上(複数基盤から収集) ②最大収容密度の把握	①収集効率の向上(改良:大規模実証試験で実証) ②前年までの結果を反映した装置高度化	-	①沖ノ島島での実証を想定した改良(装置の補強、規模等の改良)	【沖ノ島島】 結果を反映し沖ノ島島に最適化	
	(5) 基盤の設計と試作	実証実験用(沖縄沿岸海域)	10年程度耐用出来る構造設計・試作	実証実験用基盤の設置(2基)、製作(4基)	実証実験用基盤の設置(4基)、追加製作(5基)	実証実験用基盤の追加製作(2基)、設置(5基)	実証実験用基盤の設置(2基)	-	
		実証実験用(沖ノ島島海域)	-	設計条件の設定及び設計、実証用基盤の試作	実証用基盤の設置	①実証用基盤の安定性の確認 ②実証用基盤の製作、設置	①実証用基盤の安定性の確認 ②実証用基盤の製作、設置	【沖ノ島島】 ●実証実験用基盤の設置を継続	
		事業展開用	①設計条件の整理及び対応策の設定 ②標準形状の設定	構造設計・詳細設計の実施	構造設計・詳細設計の改良	構造設計・詳細設計の改良	①モニタリング結果を踏まえた構造設計・詳細設計の改良 ②沖ノ島島用の構造設計、詳細設計の実施	-	
シミュレーション	(1) 沖縄沿岸海域		①崎枝湾で海域特性データを取得 ②シミュレーションモデルの構築 ③幼生放流実験結果の検証 ④次年度の実証実験の移動・拡散予測→次年度実験計画の立案 ⑤直接放流実験の移動・拡散予測	①浦底湾で海域特性データを取得 ②シミュレーションモデルの改良 ③幼生放流実験結果の検証 ④次年度の実証実験の移動・拡散予測→次年度実験計画の立案 ⑤直接放流実験の移動・拡散予測	①放流実験結果の検証 ②検証データを踏まえたモデルの改良 ③次年度の大規模実証実験の移動・拡散予測→次年度実験計画の立案	①大規模放流実験結果の検証 ②大規模実験の検証データを踏まえたモデルの改良 ③R4年度の大規模放流実験の移動・拡散予測	①シミュレーションモデルの改良、完成		
	(2) 沖ノ島島海域		-	沖ノ島島で過去に得られたデータの再分析	①沖ノ島島ハビタットマップの確認・改訂 ②沖縄沿岸海域の実証を踏まえた上での沖ノ島島の幼生放流シミュレーションの実施(幼生収集タイプ、直接放流タイプ)	①沖縄沿岸海域の実証を踏まえた上での沖ノ島島の幼生放流シミュレーションの実施(放流地点変更) ②沖ノ島島における実証実験計画の立案 ③サンゴ産卵ファームの適地を検討	①沖縄沿岸海域の実証を踏まえた上での沖ノ島島モデルの改良 ②沖ノ島島における実証実験計画の改善 ③サンゴ産卵ファームの規模を決定	【沖ノ島島】 ●実証結果からモデルの再検証・改良	

表2 5年間の事業計画 (2/2)

事業年度		1年目 (H30年度)	2年目 (H31・R1年度)	3年目 (R2年度)	4年目 (R3年度)	5年目 (R4年度)	6～8年目 (R5～R7年度)
サ ン ゴ の 成 育 阻 害 因 の 解 明	(1) 幼生供給基盤のための遮光(シェーディング)技術	①水槽試験:最適な遮光率を把握 ②海域試験:藻類繁茂による遮光率の変化の把握、水深移動による白化抑制効果検証	-	-	-	-	-
	(2) 幼生供給基盤のためのオニヒトデ対策	オニヒトデの這い上がり防止対策の効果検証	-	-	-	-	-
サンゴ被度計測技術の高度化		①ドローン・船上水中ビデオカメラによる群体レベルの画像を撮影する手法の開発(実証海域) ②分類手法のAI(深層学習)化の検討	①1年目検証結果による計測方法、分類解析(AI)手法の改善と精度向上策の実施と精度評価(実証海域) ②沖ノ島島でのドローン及び船上水中撮影及びサンゴ分布データの取得	①ドローン及び船上水中撮影のAI学習モデルの改良による高精度化、高効率化の実施(実証海域) ②沖ノ島島で計測方法の改善と、AI(深層学習)による分類解析の実施	沖縄沿岸及び沖ノ島島での観測及び分析	①沖縄沿岸及び沖ノ島島での観測及び分析 ②R5以降の実証場所を衛星画像等から検討	【沖ノ島島】 ●技術を活用して実証試験箇所を確認・選定(地形測量も実施) 【沖ノ島島・沖縄海域】 ●技術の取りまとめ
サンゴの水産生物増殖効果の把握		・既往知見整理:サンゴ礁の水産物上の有効性、水産物の増殖機能等について整理 ・便益算定項目の設定	・現地調査:既往知見で不足するデータの取得(原単位設定に必要な各種餌料生物量等) ・便益算定の原単位を設定	-	・沖縄海域での事業化を仮定した費用対効果分析を実施	-	-
海 洋 環 境 等 変 化 に 順 応 で き る サ ン ゴ 増 殖 技 術 の 開 発	ハマサンゴ属等のリススキニング技術による増殖技術の実用化	①沖縄海域:ハマサンゴ属等のリススキニング実験に着手(海域と水槽で種類別、サイズ別の実験) ②沖ノ島島:ハマサンゴ属等のリススキニング実験に着手(中間育成施設内に固定)	①沖縄海域:種類・サイズによる生残・成長率、従来移植とリススキニング断片の生残・成長率、海域と水槽の生残・成長率を比較 ②沖ノ島島:リススキニング実験の継続、1年後のモニタリング実施	①沖縄海域:生残・成長率のモニタリング継続、海域に適したリススキニング手法(断片化・固定方法)の開発 ②沖ノ島島:リススキニング実験の継続、2年後のモニタリング実施	①沖縄海域:前年度までの成果と課題を踏まえ、モニタリングを継続(新規移植試験は終了) ②沖ノ島島:前年度までの成果と課題を踏まえ、モニタリングを継続(新規移植試験は終了)	①沖縄海域、②沖ノ島島:前年度までの成果と課題を踏まえ、モニタリングを継続するか否かを検討 開発したリススキニング手法の総合評価 ②基盤へのリススキニングを試行	【沖ノ島島】 ●リススキニングによる被覆モデル基盤を実証 【沖ノ島島・沖縄海域】 ●技術の取りまとめ
	高温耐性褐虫藻の活用	クレードDを持つ長期飼育サンゴのクレード組成の安定性の検証 効率良くクレードDを取り込ませる方法の開発(人為的な白化後にクレードD添加)	①成体に達した段階でのクレード組成の安定性の検証 ②高水温への暴露による高温耐性の確認	-	-	-	-
	サンゴ自体の高温耐性活用	高水温耐性の異なる群体間において特異なDNA部位を特定 高水温への暴露による、高い耐性を持つ親サンゴの選定	前年度結果と既存情報を比較し、高温耐性と関連している遺伝子を推定 高水温耐性親サンゴからの種苗生産、並びに0歳齢稚サンゴの高温耐性の確認、適正飼育環境の把握	①前年度結果と既存情報を比較し、高温耐性と関連している遺伝子を推定(継続) ②上記の結果をもとに、高温耐性サンゴを特定するためのDNAマーカー開発に着手	①高温耐性サンゴを特定するためのDNAマーカー開発 ②DNAマーカーによる種苗生産稚サンゴの耐性の検査	DNAマーカーによる種苗生産稚サンゴの耐性の検査	【沖ノ島島】 ●ウスエダミドリシ以外での高温耐性遺伝子の特定 【沖ノ島島・沖縄海域】 ●高温耐性サンゴの育成 ●技術のとりまとめ
	沖ノ島島間への大規模長距離輸送技術の開発	-	-	-	-	-	親サンゴ輸送を試行し、輸送方法や輸送による産卵への影響を検討する
サンゴ増殖の手引きの改訂		-	-	-	-	5年間の概要資料の作成	【沖ノ島島・沖縄海域】 ●8年間の結果を踏まえた改訂

4. 実施体制

実施にあたっては、(一社)水産土木建設技術センター、(株)エコー、国際航業(株)、(国研)水産研究・教育機構水産技術研究所の4者で実施する。主な役割は下記のとおり。

- (一社)水産土木建設技術センター
 - 本事業の全体統括
 - 検討委員会の事務局
 - 実証試験で必要となるサンゴの飼育
 - 高温耐性型サンゴの種苗生産技術の開発
 - サンゴ着床・育成基盤設置の費用対効果の分析
- (株)エコー
 - サンゴ幼生の面的拡散シミュレーションの開発
 - ハマサンゴ属等のリスクニング技術による増殖技術の実用化
- 国際航業(株)
 - 海域実証によるサンゴ幼生の面的拡散特性の把握
 - 海域特性の把握による面的保全・回復海域の選定
 - サンゴ幼生着床・育成基盤の設計・試作・設置
 - サンゴ幼生の面的拡散シミュレーションの開発
 - ICT技術を活用したサンゴ被度・計測技術の開発
- (国研)水産研究・教育機構 水産技術研究所
 - 海域実証によるサンゴ幼生の面的拡散特性の把握
 - 海域特性の把握による面的保全・回復海域の選定
 - 基盤の設計と試作

5. 検討委員会

サンゴ礁の面的な保全・回復技術の開発、実海域における技術の実証及び事業展開に向けた計画・実施手法について検討・評価し、とりまとめることを目的とし、サンゴ生態学、水産学、海洋環境学及び海洋工学に精通する専門家5名で構成する検討委員会を設置した。設置期間については事業実施期間と合わせ、平成30年度～令和7年度までとする。

検討委員会の開催時期及び委員は表3、表4のとおり。検討委員会では、海域実証による面的拡散特性の把握、海域実証に必要な技術開発、面的拡散シミュレーション、海洋環境等変化に順応できる産の増殖技術の開発等に関する事業全体計画、実施方法、評価方法等に関して助言をいただいた。また、いただいた助言を元に事業計画・実施方法を改良した。

表3 サンゴ増殖技術検討委員会 スケジュール

実施回数	開催時期 及び場所	主 な 議 題
第1回	9月1日 (東京都)	○全体計画の協議 1) 本年度調査結果(中間報告)について 2) 今後の調査方針・検討方針について
第2回	3月2日 (東京都)	○最終報告の協議 1) 各検討項目の本年度結果と課題について 2) 次年度調査計画について

表4 サンゴ増殖技術検討委員会 委員

委員名	所 属	専 門 分 野
茅根 創	東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 教授	地球科学 サンゴ礁学
鹿熊 信一郎	佐賀大学海洋エネルギー研究センター 特任教授	亜熱帯海域の水産学
佐々木 淳	東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 教授	海岸工学 環境水工学
瀬戸 雅文	福井県立大学海洋生物資源学部生物資源学科 教授	水産土木学 水産環境整備
服田 昌之	お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科研究院 教授	進化発生学 サンゴ礁生物学