

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22310057

研究課題名（和文） 海洋バイオマス利用による CO₂ 削減およびバイオ燃料化に関する研究

研究課題名（英文） The study of the stabilization of carbon dioxide and the development of new energy through the use of marine biomass

研究代表者

瀬名波 出 (SENAHA IZURU)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：70253945

研究成果の概要（和文）：

本研究では火力発電所や下水処理施設などから排出される二酸化炭素（CO₂）を海藻を育てるための資源として再利用した。高濃度の CO₂ を海水に人工的に溶かし、それを海藻に与えることで藻類の光合成（成長速度）を飛躍的に高めた。通常の海水に比べて約 1.9 倍以上に成長が高まる結果を得た。また海藻を原料としたバイオエタノールの試作を成功させた。このように CO₂ を減らし、また CO₂ を新たな資源として再利用する「炭素回生システム」研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this research, CO₂ emitted from thermal power plants and sewage treatment equipment are used as resources for the cultivation of marine algae. By artificially dissolving high concentrations of CO₂ into seawater and using it to grow marine algae, photosynthesis (i.e. growth rate) of marine algae becomes significantly rapid. The growth rate of marine algae will be accelerated by more than 1.9 times, as compared to that in normal seawater. Moreover, we tried making a bio-ethanol using the marine algae, and succeed. Thus, we developed the "carbon recycle system" which reduces CO₂ and reuses CO₂ as new resources.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境技術・環境材料

キーワード：海洋、バイオマス、二酸化炭素削減、海藻、バイオ燃料、炭素回生

1. 研究開始当初の背景

大気中への二酸化炭素拡散削減については既に国際的な問題である。その実現のため我が国でも種々の対策が検討されているが、最も効果的な方策としてその排出濃度が高い火力発電所等における二酸

化炭素（以後、CO₂と記す）を適切に分離回収し固定化を行うことが挙げられる。火力発電所から排出されるガス中の CO₂ 濃度は約 14%で、大気中の CO₂ 濃度 0.034%に対して約 400 倍にもなる。このような大型プラントから排出される

CO₂を拡散することなく回収・固定化さらに再利用を行う「炭素回生システム」を実現すれば、CO₂拡散削減および新エネルギー開発において非常に有益な方法となる。

本研究ではその実現可能性を示す独自のかつ画期的なキー技術として二酸化炭素の新しい溶解技術と海藻による二酸化炭素固定化技術の2点を挙げ、これら技術をベースに独自の環境技術の開発を行う。

2. 研究の目的

本研究は、火力発電所やゴミ焼却施設等の化石燃料（石油、石炭、天然ガス等）を大量に使用する大型施設から排出される二酸化炭素を、沖縄の豊富な日射量と高い海水温を活用して高効率に、海洋性のプランクトン藻類を増殖させて回生（植物に吸着固定させ、再利用する）させるシステムを開発することを目的とする。

その第1ステップとして、自然状態の二酸化炭素溶解状態に比して約400倍高濃度の二酸化炭素を海水に溶解する新技術の開発およびその高濃度二酸化炭素が溶解された海水を利用した海藻類高効率増殖技術の開発、さらに大量養殖された海藻類を用いたバイオエタノール等のバイオエネルギー製造方法の開発を行う。

また同時に海藻類への二酸化炭素固定化技術の水産業への応用として、栽培漁業への適用可能性を検討する。これにより、二酸化炭素の大幅な排出抑制と再利用を可能とし、海洋資源を利用した「炭素回生システム」を可能とすることで日本における独自の環境技術の創生を目指すものである。その概略を図1に示す。



図1 炭素回生システム概略

3. 研究の方法

本研究は、火力発電所等によって排出される排ガス中のCO₂を新しく提案する無気泡溶解方式により低コスト・高効率に海水に溶解させ、さらにCO₂固定化方法として沖縄の豊富な日射量と高い海水温を活用して海藻類を養殖させることで植物への固定化を行う。本研究における最終段階として、高効率

養殖した海藻類を用いたバイオエタノール等のバイオエネルギー製造を行うことで、「炭素回生システム」実証および事業可能性を検討する。以上の研究を行う計画概要として、大別して以下の三つのサブテーマに分けられる。

(1) CO₂の新たな溶解技術（無気泡溶解方式）に関する実験

温室効果ガス削減の対象として、火力発電所等から発生する排ガス中のCO₂削減を行う。火力発電所からの発生する排ガス中のCO₂は大気中と比べ約400倍も高い濃度であり、これを直接回収することにより大気・海中に広く分散してしまったCO₂を削減するより効率的である。本研究で提案するCO₂回収方法は、ガス中に海水を噴霧しながらその成分を吸収する方式を応用するものである。また消化ガス（メタン発酵ガス）からのCO₂回収実験も行った。消化ガス中にはCO₂が約40%が含まれており、これを回収することで高濃度メタンガス化が達成できる。CO₂溶解装置および溶解実験概要を図2に示す。



図2 CO₂溶解装置およびCO₂溶解実験概要

(2) 微細藻類の培養・養殖研究開発

回収したCO₂の固定化については高い二酸化炭素溶存率の海水と恵まれた沖縄の気象条件下で、海藻類を養殖することで高効率に炭素固定が可能となる。なお海藻類のCO₂固定化能力については陸生系の植物に比して、圧倒的に成長サイクルが短く10倍以上の炭素固定能力を有することより、生産プロセスのコストダウンを図ることが出来る。これにより沖縄の地域産業である海産物（海ぶどう、オゴノリ等）の高効率養殖技術への応用も行った。

(3) 微細藻類のバイオエネルギー化に関する研究

バイオマスエネルギーは、新エネルギー戦略の一端を担うものである。本研究では海藻類を用いたバイオマスエネルギー化のための、海藻成分分析ならびに、それに適したバイオマスエネルギー化設計および試験を進める。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① 火力発電所排ガスからのCO₂溶解実験

本研究で提案する気体溶解装置を用いて、実際の火力発電所（沖縄電力）から排出された排ガス中から CO₂ を分離・溶解する実験を行った。その結果を図 3 に示す。タンク内の排ガス圧力が低圧力（0.12MPa）、高圧力（0.19MPa）いずれの場合でも、行わない場合に比べて明らかに CO₂ 溶解濃度が上昇していくことが確認された。排ガス溶解濃度は 7.5~8.5%（排ガス中 CO₂ 濃度 14% に対して）と非常に高い溶解濃度を得た。特に低圧力について、ほとんど高圧力と変わらない結果を得られた。これは自然界の海水中 CO₂ 濃度 0.035% に対して約 214 倍以上の高濃度である。

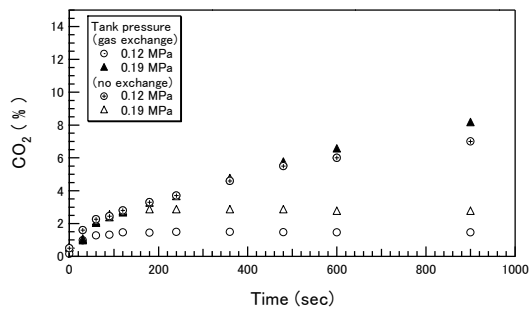
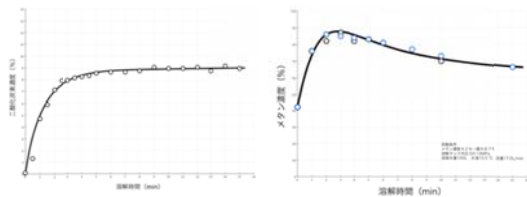


図 3 排ガスからの CO₂ 溶解実験結果

②消化ガスからの CO₂ 溶解実験

消化ガス（下水処理施設からのメタン発酵ガス）中から CO₂ を分離・溶解する実験を行った。その結果を図 4 (a) (b) に示す。実験に用いた消化ガス組成は当初メタン：CO₂=42：58 であった。(a) 図に示すように溶媒水の CO₂ 濃度は最初の 3 分で急激に上昇し、約 5 分で平衡に達する。また (a) 図に示すようにメタン濃度は約 3 分後に最大 87% まで高まった。



(a) 溶媒水中の CO₂ 濃度 (b) メタンガス濃度
図 4 消化ガスからの CO₂ 溶解実験結果

③CO₂ 溶解海水による高速培養実験結果

沖縄県の主要水産物であるクビレヅタ（海ブドウ）およびオゴノリについて、CO₂ を溶かした海水を用いて培養実験を行った。それぞれの結果を示す。まずクビレヅタについては予め前実験で調べた海水中の最適 CO₂ 濃度 0.5% において、培養 8 日後でコントロール海水（通常の海水）の場合に比べて約 1.9 倍の成長促進効果を得た。（図 5）つぎにオゴノリの場合、予め前実験で調べた海水中の最適 CO₂ 濃度 1.0% および十分な光量を与えた場合において、培養 8 日後でコントロール海

水の場合に比べて約 2.9 倍の成長促進効果を得た。（図 6）

さらにオゴノリの場合について、長期培養実験を行った。その結果を図 7 に示す。最適 CO₂ 濃度 1.0% の場合で、培養 32 日後でコントロール海水の場合に比べて約 4.6 倍の成長促進効果を得た。またこの実験により海藻の高密度培養にも CO₂ 溶解海水の利用が効果的であることを示される。

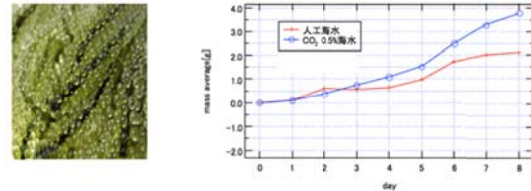


図 5 クビレヅタの CO₂ 溶解海水による培養

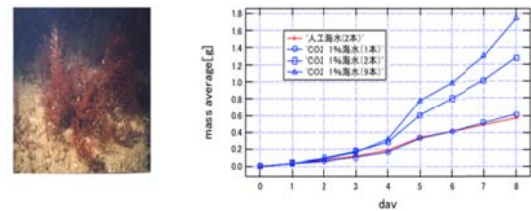


図 6 オゴノリの CO₂ 溶解海水による培養

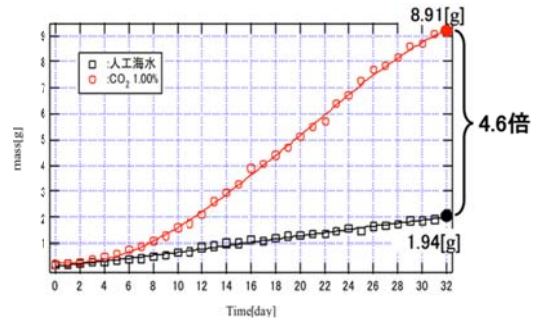


図 7 CO₂ 溶解海水による長期培養

④排ガス CO₂ による海藻培養実験結果

火力発電所排ガス中からの CO₂ 溶解海水によるホソエダアオノリ培養結果を図 8 に示す。CO₂ 海水は異なる圧力で溶解した CO₂ 溶解海水を 1% 濃度を調整した。7 日後の湿重量は若干の差異はあるが、高圧・低圧での CO₂ 溶解海水の場合がコントロール海水の場合に比べて約 1.7~1.9 倍成長する結果を得た。

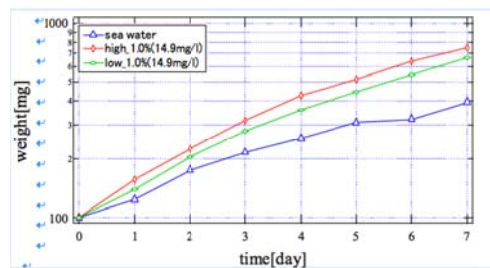


図 8 排ガス CO₂ 溶解海水による海藻培養

⑤流れの制御による培養

海藻の成長は主に光量、海水温度および海水から得られる栄養塩・CO₂によって決定されるものと思われる。ここで海藻の栄養塩・CO₂吸収量については物質伝達率の大きさに依存する。そのため海藻周りの流れが変化した場合、物質伝達率が変わり、海藻成長に影響を与えると思われる。そのことを確かめるため 50Lアルテミア水槽中にオゴノリを固定し、その周りの海水速度を変えた場合の培養実験を行った。その結果を図9、図10に示す。これらの結果から、海藻周りの流れがあり、かつCO₂が溶解した場合が最も成長速度が早くなることが確認された。

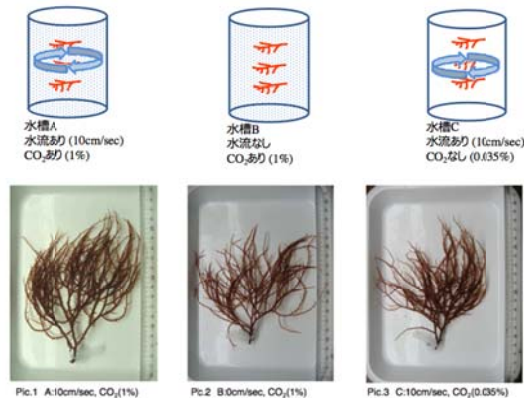


図9 水流速度を変えた場合の培養実験

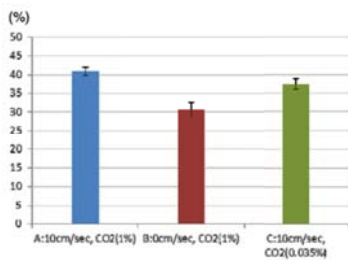


図10 培養期間(7日)における日間成長率

⑥海藻培養における流れ場数値シミュレーション

海藻の連続培養方法における最適装置開発のため海藻培養シミュレーションの開発を行った。またシミュレーションとの比較実験装置として円筒型海藻培養装置の試作を行った。試作装置およびシミュレーション概要を図11に示す。

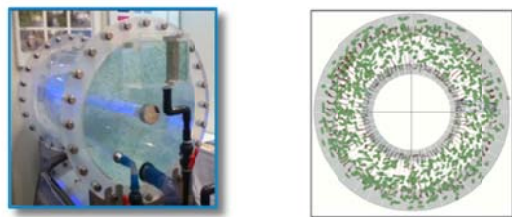


図11 円筒型海藻培養水槽試作および模擬海藻培養シミュレーション概要

シミュレーション結果を図12に示す。装置内流れの解析と海藻運動が確認できるモデルの構築ができた。その結果、装置内において時間経過とともに海藻は外壁に向かって移動し、また外壁付近は流れ速度が小さいために、外壁付近に停滞することが示された。

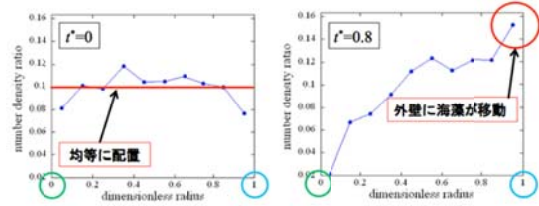


図12 時間経過後の海藻移動位置結果

⑦海藻の分析およびバイオエタノール化

各種藻類の乾燥重量当たりの全糖量及び糖化液の糖組成分析を行った結果、乾燥重量当たりの全糖量はオキナワモズク、ウミブドウ、ホソエダアオノリにおいて30%~40%と高い数値を示した(表1)。スジアオノリとホソエダアオノリのグルコースの割合は同程度であったが、乾燥重量当たりの糖含量はホソエダアオノリがスジアオノリの2倍量であった。以上の結果から、バイオエタノールの生産にホソエダアオノリが適していることが示唆された。

表1 各種藻類の全糖含有量・糖組成

藻類	糖含量	Fuc	Rha	Ara	Gal	Glc	Xyl/Man	U.A.
ユーグレナ	18	4.5	N.D.	N.D.	0.8	87.1	6.7	—**
オキナワモズク	31	50.5	N.D.	N.D.	1.6	8.5	5.4	33.7
ウミブドウ	41	N.D.	N.D.	N.D.	8.6	38.7	51.0	1.8
スジアオノリ	11	N.D.	1.6	103	4.1	59.7	19.9	3.8
ホソエダアオノリ	31	N.D.	0.7	19.1	5.1	58.0	5.4	11.6

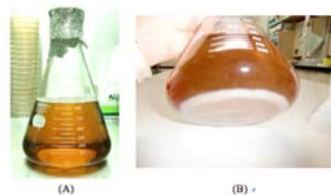
糖含量は藻類の乾燥重量当たりの割合(%)。

**未測定。

N.D.: 未検出。

Fuc, フルクトース; Rha, ラムノース; Ara, アラビノース; Gal, ガラクトース; Glc, グルコース; Xyl/Man, キシロースまたはマンノース; U.A., ウロン酸。

表1の結果をもとにホソエダアオノリからのバイオエタノール試作を試みた。ホソエダアオノリ糖化液をドライイーストで発酵させた。酵母は良好に生育した。また発酵開始から12時間でエタノール濃度は約0.2% (w/w, 2g/L) となり、その後はほぼ変化しなかった。それらの結果を図13、図14に示す。変換効率は約50%で、得られた発酵液400mLを蒸留した結果、1.5%エタノール溶液が50mL得られ、蒸留によって93%以上のエタノールが回収された。



※Bの白い泡は良好に増殖した酵母。

図13 ホソエダアオノリ糖化液・発酵液

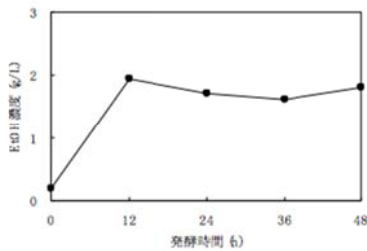


図 14 ホソエダアノリ糖化液のアルコール発酵の時間変化

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

まず国内初の実際の火力発電所排ガスからの回収およびそのでの海藻培養を行った。これにより炭素回収システムが成り立つことを示した。また消化ガスからの回収により新エネルギーとしてのバイオガス有効性を高められることを示した。これらの結果は削減および新エネルギー開発から非常に高い注目を受けている。

つぎに溶解海水による海藻培養は、従来までの培養技術とは全く異なるものである。また海水流れ速度が海藻成長に影響を与えることを示した事例は国内外においてほとんど見当たらない。さらに海藻成長をコンピュータシミュレーションすらなど、これらは工学と水産学のコラボによる新技術開発であり、水産業からの高い期待を得ている。

(3) 今後の展望

特に消化ガスからの高品位バイオガス製造と回収したによる海藻培養技術の連携した技術開発により、島嶼地域に適した環境エネルギー技術開発につながる。水産分野と工学分野のコラボにより、関連した特許技術取得と社会実証化が可能となると考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① Muhammad Aziz, Takuya Oda, Takao Kashiwagi, Enhanced high energy efficient steam drying of algae, Applied Energy, 査読有、109、2013、163-170

② Teruko Konishi, Ikuko Nakata, Yuto Miyagi, Masakuni Tako, Extraction of β -1,3 Xylan from Green Seaweed, Caulerpa lentillifera, J. Appl. Glycosci, 査読有、59, 2012, 161-163

③ Shoko Onagaa, Kohta Chinenb, 1, Susumu Ito, Toki Taira, Highly thermostable chitinase from pineapple: Cloning, expression, and enzymatic properties,

Process Biochemistry, 査読有、Volume 46, Issue 3, 2011, 695-700

④ 瀬名波出, 沖縄における海洋バイオマスによる CO₂ 排出削減および炭素回収システムの開発、南方資源利用技術研究会誌、査読無、No. 26, Vol. 1、2010、11-18

[学会発表] (計 16 件)

① 永松和成, 瀬名波出, 排出 CO₂ を利用した海藻類の培養技術、日本応用藻類学会第 12 回大会、2013 年 6 月 8 日、東京海洋大学

② 永松和成, 瀬名波出, 高濃度 CO₂ 海水を利用したクビレスタ養殖技術の開発、日本応用藻類学会第 12 回大会、2013 年 6 月 8 日、東京海洋大学

③ 小田拓也, Innovative Integrated Marine Biomass Utilization、2nd International Conference on Energy Systems and Technologies、2013 年 2 月 18 日～21 日、エジプト、カイロ

④ 石川正明, 伊良部邦夫, 照屋功, 新田宗宏, サイクロン型マイクロバブル発生装置の流れの可視化、第 40 回可視化情報シンポジウム, Vol. 32-Suppl. No. 1, 2012 年 7 月 24 日、工学院大学、東京

⑤ 永松和成, 瀬名波出, 高効率 CO₂ 溶解技術を応用した海洋バイオマス生産利用技術の開発、日本応用藻類学会第 11 回大会、2012 年 3 月 24 日、東京海洋大学

⑥ 瀬名波出, 永松和成、炭素回収システム (CRS) の構築に向けた海藻の生産技術および利用方法の開発、日本応用藻類学会第 11 回大会、2012 年 3 月 24 日、東京海洋大学

⑦ 瀬名波出, 大城邦夫, 消化ガスからの二酸化炭素削減およびその利活用方法開発、日本エネルギー学会バイオマス部門・第 7 回バイオマス科学会議、2012 年 1 月 19 日、盛岡市、岩手

⑧ 大城邦夫, 瀬名波出, 浄化センターから発生する消化ガスの有効利用とビジネスモデルについて、日本機械学会社会と技術部門講演会、2011 年 11 月 19 日、琉球大学、沖縄

⑨ 三木孝彦, 若井謙介, 瀬名波出, 微細藻類を用いた CO₂ の削減とそのバイオディーゼル燃料化、自動車技術会 2011 年秋季大会、2011 年 10 月 12 日、札幌、北海道

⑩ Masaaki Ishikawa, Kunio Irabu, Isao Teruya, Munehiro Nitta, A PIV Measurement on a Cyclonic Type Micro-Bubble Generator、9th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Book of Abstracts、2011、pp.104, USB-Proceedings-ID: 232、2011 年 7 月 22 日、神戸大学、神戸

⑪ 瀬名波出, 大城邦夫, 消化ガスからの小型二酸化炭素吸収装置の開発、日本機械学会第 21 回環境工学総合シンポジウム、2011 年 6 月 29 日、東京都・産業技術総合研究所

⑫瀬名波出, 平岡雅紀, 小西照子, 平良東紀
Development of absorption and recirculation system of CO₂ by marine biomass, International Workshop on Process Intensification 2010、2010年12月3日、九州大学、福岡

⑬瀬名波出, 平岡雅紀, Contact of algae with condensed carbon dioxide to accelerate solid/gas reaction in the living body, International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems, 2010年11月30日、シンガポール

⑭瀬名波出, 小西照子, 平良東紀, 海洋バイオマスを利用したCO₂回収・リサイクル技術の開発、2010年度日本機会学会年次大会、2010年9月、名古屋

⑮瀬名波出, 平岡雅紀, 藻類利用によるCO₂吸収システム開発、2010環境工学シンポジウム、2010年6月27日、パシフィコ横浜、神奈川県

⑯瀬名波出, 微細藻類利用によるCO₂吸収および新エネルギー開発、第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月、札幌コンベンションセンター、北海道

[図書] (計1件)

瀬名波出 (共著分担)、サイエンス&テクノロジー出版、「二酸化炭素の有効利用技術」、2010、277-287

[その他]

報道関連情報：

① NHK ワールド “GREENSTYLEJAPAN”, 「CO₂削減の新たな取り組み」, 2012年2月16日

② 北日本放送 “KNB news every”, 「とやま近未来4 環境未来都市とは」, 2012年2月3日

③ 沖縄テレビ放送 “OTV スーパーNEWS”, 「切り札は海藻！再生エネルギーでCO₂削減」, 2011年12月29日

④ FM沖縄・FMモーニングビュー「海洋バイオマスによる二酸化炭素削減および新エネルギー開発研究紹介」、2011年12月4日

⑤ 琉球新報「琉大、CO₂溶解技術紹介 千葉アグリビジネスフェア」、2010年11月25日

⑥ NHK ワールド “Begin Japanology”, 「Seaweed」, 2011年9月29日

⑦ NHK 総合 “爆問学問”, 「間違いだらけのエネルギー選び」, 2011年6月2日

⑧ NHK 教育 “サイエンスゼロ”, 「資源になる！？二酸化炭素を利用せよ (No. 305)」, 2010年5月15日

⑨ NHK 総合 “スタジオパーク”, 「生物パワーで地球を救え」, 2010年5月10日

⑩ 毎日放送 “西日本8局特番”, 「チャレ

ンジ25%の道筋」, 2010年5月5日

⑪ 毎日放送 “VOICE”, 「スクスク育つバイオ燃料」, 2010年4月29日

⑫ 日経産業新聞「2030年への挑戦 次世代産業技術 藻類を燃料に」、2010年4月14日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬名波出 (SENAHA IZURU)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：70253945

(2) 研究分担者

小西照子 (KONISHI TERUKO)
琉球大学・農学部・准教授
研究者番号：30433098

平良東紀 (TAIRA TOKI)
琉球大学・農学部・准教授
研究者番号：60315463

玉城史郎 (TAMAKI SHIROU)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：80163666

藤村弘行 (FUJIMURA HIROYUKI)
琉球大学・理学部・准教授
研究者番号：20398303

石川正明 (ISHIKAWA MASAOKI)
琉球大学・工学部・助教
研究者番号：00398306

若井謙介 (WAKAI KENSUKE)
琉球大学・工学部・助教
研究者番号：10314741

大城尚紀 (OOSHIRO NAOKI)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：10295298

小田拓也 (ODA TAKUYA)
東京工業大学・ソリューション研究機構・准教授
研究者番号：20505929

平岡雅規 (HIRAOKA MASANORI)
高知大学・総合研究センター・准教授
研究者番号：30380306

原田周作 (HARADA SYUSAKU)
北海道大学・工学(系)研究科・准教授
研究者番号：80315168