

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

第13回 佐賀大学 海洋エネルギー研究所 (2022.9.2)

12:05-12:10 (5分):研究所・センターの概要

12:10-12:25 (15分):海洋の温度差から安定した電力の創出

―システムと熱交換器伝熱面形状の最適化に挑む― 安永 健

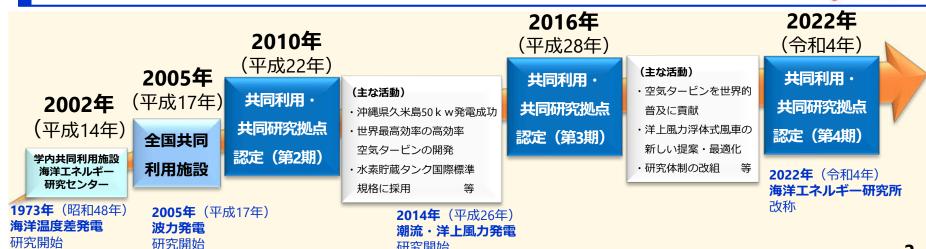
12:25-12:45(20分): 質疑応答

海洋エネルギー研究所の役割

- 世界は今、新たな海洋再生可能エネルギー産業(海洋温度差・波力・潮流・洋上風力発電) の勃興期 → 発電装置の開発は、熾烈な世界競争
- 政府が掲げる「温暖化ガスの排出量を 2050年に実質ゼロにする目標」において、最も期待されて いる再生可能エネルギーの一つである「海洋再生可能エネルギー」は、我が国のエネルギー 政策上(GXおよびカーボンニュートラル)の極めて重要な課題
- ⇒ 佐賀大学「海洋エネルギー研究所」は、我が国唯一の海洋エネルギーに関する科学技術を 戦略的に推進する先導的な共同利用・共同研究拠点として、世界的な海洋エネルギー産業の 発展に資する研究開発・人材育成に貢献

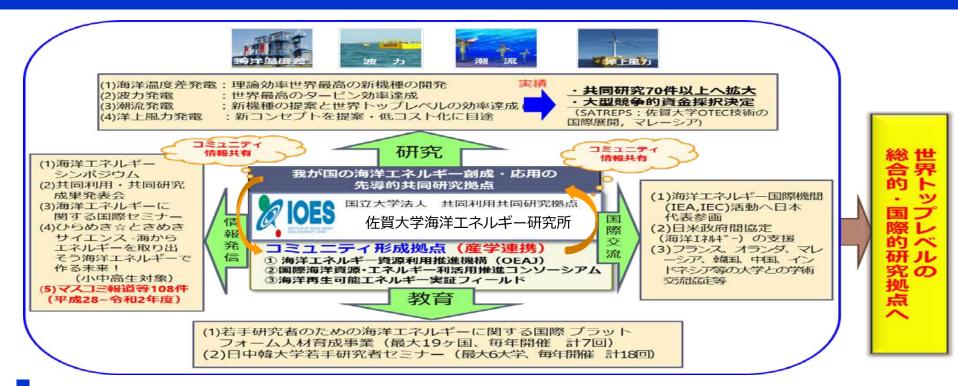
研究所の沿革





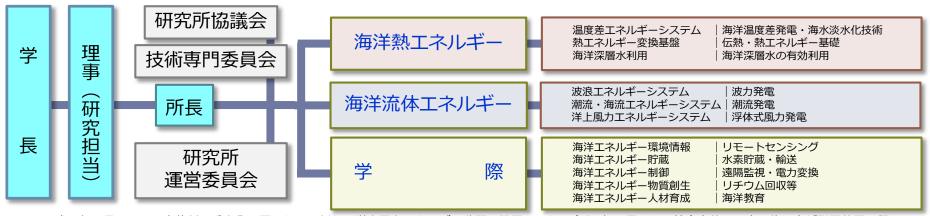
研究開始

研究所の全体像



研究所の体制 教員28名(専任12名、併任13名、特任3名)

(令和4年4月1日現在)



※ 平成29年10月には、研究体制の重点化を図るため、新たに洋上風力エネルギー分野を設置。また、令和2年11月には、社会実装への応用的研究が発電装置の個々の基礎技術だけでなく、システム全体の性能を考慮した開発が重要とし、分野にエネルギーのみから「システム」という名称を追加し統一

研究所の有する施設・設備

研究環境支援を可能とする施設

- **研究所本部**(佐賀県佐賀市)
 - → 研究室、会議室
- 伊万里サテライト(佐賀県伊万里市)
 - → 研究室、大型コンピュータ室、 宿泊施設等
- ◆ 久米島サテライト(沖縄県久米島町)
 - → 実験室
- **嬉野サテライト**(佐賀県嬉野市)
 - ➡ 実験室(温泉水発電実証:令和2年)



伊万里サテライト 平成15年設置



久米島サテライト 平成26年設置

研究環境支援を可能とする設備

- 海洋温度差発電関係(6装置)
- 海洋流体エネルギー関係(4装置)
- 海水からの物質回収関係(1装置)
- 水素貯蔵関係(3装置)
- 化学分析機器(8装置) 計22装置
- 学術資料(成果報告書等)、データベース等







2次元造波水槽



回流水槽



温度成層回流水槽

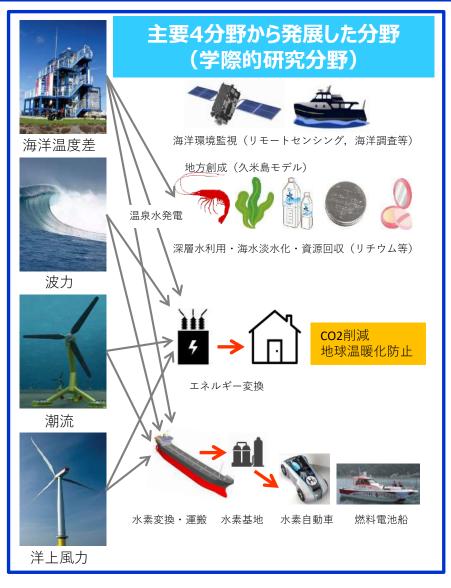


リチウム回収実験装置

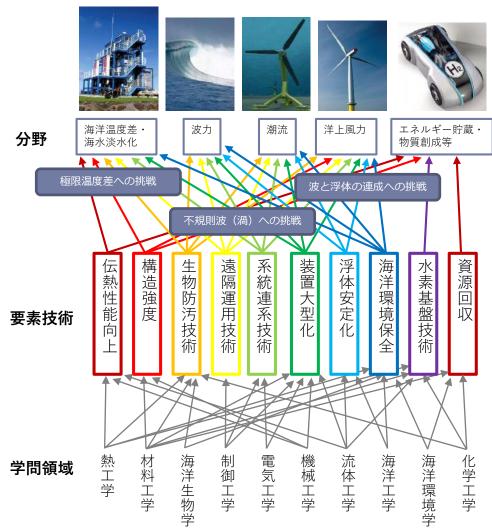


水素製造・貯蔵 実験装置

研究所の研究概要 (学際的研究分野)



研究所の研究分野と要素技術開発



研究所の学際的研究分野

研究所の学問領域と要素技術開発

研究所の研究活動状況 特色・強み・実績

(1)海洋温度差発電

- 海洋温度差発電装置(30KW)の開発、正味出力の確認【世界初】 → 有効性を証明
- 世界最高水準の研究設備の評価【『再生可能エネルギー白書』】
- 世界に先駆けて、実海水のみを用いた海洋温度差発電実証設備(沖縄県久米島:発電機100KW)の開発協力・発電成功 【平成25年~29年: 当時世界唯一:5年連続運転に成功】
- 新しいシステム(多段ランキンサイクル)を開発し、二段ランキンサイクルに関する実証実験を実施 【国際特許取得(平成30年・米国)】
- 研究成果を活かした国際プロジェクトに採択【 **SATREPS^{※1}・**令和元年、**CTCN^{※2}・**令和2年】

 ※1 SATREPS: JST/JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力 ※2 CTCN: 国連関連機関である「気候技術センター・ネットワーク」

(2)波力発電・潮流発電

- 高効率空気タービンの開発【中間羽根付き衝動タービン:世界最高効率: 52%】
 - → 世界的普及に貢献(研究所の技術が インド、中国、欧州等で導入実績)
- 上記タービン搭載の固定式及び浮体式波力発電装置の水槽実験・実海域実験
 - → 同上 NEDO 波力発電プロジェクト 実証研究
- 装置の最適設計に必要な新しい粘性流体解析法を提案
- 長崎湾において実海域検証試験(潮流発電)を実施

- → 実用化促進に貢献
- → 日本船舶海洋工学会賞 (論文賞)・ 日本造船工業会賞等(平成28年度受賞)
- → 世界トップレベルの効率を確認

(3)洋上風力発電

- スパー型浮体式風車の新しいコンセプト(トラス スパー型)を提案
 - → 低コスト構造で動揺低減を可能に → 実用化促進に貢献
- ●ダウンウィンド式風車の研究開発は、国内および海外でリーダーシップを発揮し牽引



海洋温度差発電装置 (2段 サイクル)



久米島プラント 【海洋深層水利用学会賞】



高効率空気 タービン



波川発電 NEDO プロジェクト

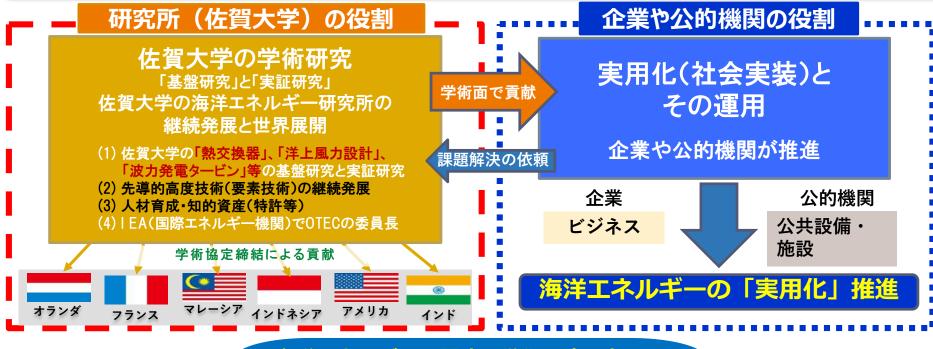




潮流発電タービンと 洋上風力発電 長崎県での実正実験風景 非水密軽量構造に転換

GXとオープンイノベーションによる「知の世界展開」

- ⇒ 研究所は、海洋エネルギーに関する学際的な<u>「基盤研究」</u>と<u>「実証研究」</u>の推進、国内および海外における佐賀大学の有する技術の『知の世界展開』で貢献
- ⇒ 海洋エネルギーに関する社会実装は企業や国内および国際的な公的機関が推進し、研究所は、学術的な面で貢献
- ⇒ 研究成果の「見える化」は、NASAが提唱した「TRL」などを用いて、知的資産および学術的な成果を公開し、 残された課題および期待される成果を明確にする。



海洋エネルギーに関する学術研究と実用化



※技術成熟度(Technology Readiness Level(TRL),1989年にNASAが初めて提唱)

企業や公的機関

海洋温度差発電

24時間安定して発電可能 (ベース電源としての役割を目指す) 純国産の技術として世界を牽引 第2次 開発ブーム期に 世界で先駆けて発電開始。 海洋エネルギーとして 日本で最初に系統連系



海洋温度差発電の主な実績と今後の展望

海洋温度差発電

- 海洋温度差発電装置(30KW)の開発、**正味出力の確認【世界初】→** 有効性を証明
- 世界最高水準の研究設備の評価(『再生可能エネルギー白書』)
- 世界に先駆けて、実海水のみを用いた海洋温度差発電実証設備(沖縄県久米島:発電機 100KW)の開発協力・**発電成功**【平成25年~30年:当時**世界唯一:5年連続運転に成功**】
 - 実用化促進に貢献
- 新しいシステム(多段ランキンサイクル)を開発し、二段ランキンサイクルに関する 【国際特許取得(平成30年•米国)】
- 研究成果を活かした国際プロジェクトに採択(SATREPS*1·令和元年、CTCN*2·令和2年)

(IEA 国際エネルギー機関)

海外の海洋温度差発電の動向

KUMEJIMA MODEL



SATREPS: JST/JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力 ※2 CTCN: 国連関連機関である「気候技術センター・ネットワーク」

学術面	原理実証	性能向上要因 解析	条件可変型試 験	条件可変による 最適化 試験・用途 開発立案	長期試験での 課題抽出・用途開 発	
実用化面	要素試験	モデル機 製作・実証	室内実証機製 作・実証	海面実証機製 作・実証	海面大型実証機 製作・実証	
100 性能 (相対値) ● 50	原理実証・取得ステー	生能/ /	第一世代実装化 ● 第一世代機 性能解析		代実装化ステージ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	本 正味出力 ライン
	1970 198	30 1990	2000 20 年	10 2020	2030 2040	ı

(年)

海洋温度差発電に関する「知の世界展開」

複合利用PJT:SATREPSマレーシアPJT

SATREPS

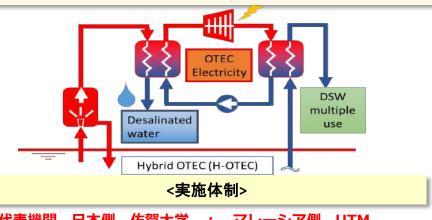
国際科学技術共同研究推進事業 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム

Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development

マレーシアにおける革新的な海洋温度差発電(OTEC)の開発による 低炭素社会のための持続可能なエネルギーシステムの構築

<研究開発目標>

- <期間>2019年4月 2025年3月
- ・ハイブリッド OTEC (佐賀大学特許出願) の技術確立
- ・ハイブリッド OTEC を用いた海洋深層水複合利用(マレーシアモデル)の確立
- ・マレーシアにおける若手人材育成











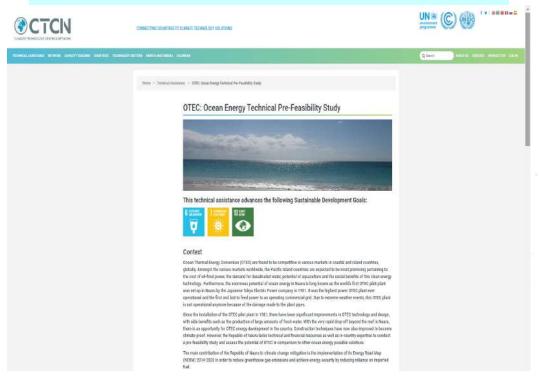
ハイブリッドOTECを用いた海洋深層水複合利用 (マレーシアモデル)



キックオフ会議 (SU & UTM Vice-presidents・在マレーシア日本大使等) 11

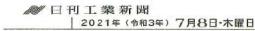
国連関連機関(UNIDO)の再工ネ事業に採択

気候技術センター・ネットワーク(Climate Technology Centre & Network:CTCN)のナ ウル共和国でのOTECのFS<国際公募>



https://www.ctc-n.org/technical-assistance/projects/otec-ocean-energy-technical-pre-feasibility-study

我が国の再生可能エネルギーの技術として初採択





CTC

22

INDUSTRY

https://www.saga-u.ac.ip/koho/press/2021062821985

国連関連機関(UNIDO)の再工ネ事業に採択

Nauru Ocean Energy Technical Pre-Feasibility Study



United Nations Industrial Development Organization

TERMS OF REFERENCE (TOR)

Title: Ocean Energy Technical Pre-Feasibility Study

CTCN request reference number 2020000016

Countries: Nauru

27 July 2020

CTCN: 気候技術センター・ネットワーク (Climate Technology Centre & Network: 日本政府から約12.7百万米ドルが拠出されて いる(2021年3月時点)

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ctcn.html

GCF:緑の気候基金(Green Climate Fund: :先進国及び開発途上国(計43か国)から GCFへの拠出表明総額が約103億米ドル、日本 は15億米ドル(約1,540億円)を拠出 https://www.env.go.jp/earth/ondanka/gcf.html

GCFプロジェクトの規模

極小規模(micro):総事業費1,000万米ドル以下

• 小規模 (small) : 総事業費1,000万~5,000万米ドル

• 中規模(medium): 総事業費5,000万~2.5億米ドル

• 大規模(large): 総事業費2.5億米ドル以上

UNIDO (United Nations Industrial Development Organization)

CTCN^{*1} (Climate Technology Centre & Network)

As an executing agency to promote technology transfer related to climate change, it was decided to establish it at COP16 (2010) and started operation and service provision in 2013.



The Japan Team (OECC, IOES, University of Tokyo cooperating) is the first in Japan to adopt for renewable energy



X2: Government of Japan contributes \$1.5 billion





東京電力によるナウル共和国 海洋温度差発電プロジェクト(1981年)

国際海洋温度差発電協会設立 (OTEA: Ocean Thermal Energy Association)

- 1. 設 立:2020年10月
- 2. 参加国:38以上の国と地域(アメリカ、イギリス、中国、台湾、韓国、日本など)
- 3. 参加者:400人以上(研究者、企業、政府系機関など 8月1日)
- 4. 活動:
 - 海洋温度差発電に関する情報共有と情報発信
 - ・国際的な海洋温度差発電のR&Dの推進および支援
 - ・海洋温度差発電の実用化の推進と支援
 - ・国際海洋温度差発電シンポジウムの開催と支援
 - ・国際的な学会賞の選考・授賞("Uehara Prize")

(海洋温度差発電分野では国際的に最も権威がある賞)

- •その他
- 5. 組 織:

会長:日本

副会長:イギリス(欧米地区)、

シンガポール(アジア太平洋地区)

ExCO: 17の国と地域の代表







individuals and organizations with interest in the development of Ocean Thermal Energy technology and closely related activities.

Doean Thermal leters to the naturally-occurring temperature difference in the surface and deep layers in the neven. The surface of the ocean is warmed by radiation from the sun, while deep water remains cold and pristine. This vast ocean resource can be safely and cleanly converted to electricity via technologies such as Dearn Thermal Energy Conversion (OTEC), in addition to electricity, other useful products and services can be supported by the ocean water and temperature outflows associated with Ocean Thermal Energy, Researchess, governments, and companies around the world are working to establish and expead operational relimites for is land and oceant in eyons. The OTEA will support their efforts.

What is Ocean Thermal Energy?

http://www.ocean-thermal.org/

学術成果を活かした民間との「GXの社会実証」 「社会的インパクト」への貢献

MOL 商船三井

ンエネ「海洋温度差発電

1号規模の発電所の稼働を

につながる

海水で冷やして再利用

フロンを蒸発させタービ める。温かい海水で代替

蒸気を冷たい

県が持つ設備の運営を始 でも研究が進んできた。

することで発電コストを

企業情報 >

事業案内 ∨

サステナビリティッ

IR情報 V

プレスリリ

2021年

2020年

2019年

2018年

2017年

2016年

2015年

さらに見る

トップページンプレスリリース 2022年ンモーリシャスにおける資洋温度差殊素の実活要件適合性振調者がNEDO事業に採択へ沖縄四久美蔵での実活の構造やへの参属に加え、海洋再生可能

モーリシャスにおける海洋温度差発電の実証要件適合性等調査がNEDO事業に採択 ~沖縄県久米島での実証設備運営への参画に加え、海洋再生可能エネルギーの早期実用化を目指

当社は2022年4月より、ゼネシスが維持管理を行う沖縄県久米島での100kW級OTEC実証設備ロ(図1)の運営に参画して おり、国内で唯一存在する同設備への運営参画を通じてOTEC運営ノウハウを蓄積し、海洋再生可能エネルギーの早期実用

株式会社商船三井(代表取締役社長:橋本剛、本社:東京都港区、以下「当社」)が株式会社ゼネシス(代表取締役社長: 福島賢一、本社:東京都江東区、以下「ゼネシス」、註1) および国立大学法人佐賀大学(以下「佐賀大学」、註1) と共 同で取り組むモーリシャスにおける海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion、以下「OTEC」)を核とした 海洋深層水複合利用に関する実証要件適合性等調査が、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下

化を目指します。

(図1) 久米島における100kW級 OTEC実証設備

日経新聞:令和4年3月30日

規模となる見込みだ。

が課題だった。 海洋温度差発電はコス 建設費用は数十億円 通営を踏まえり

③冷たい深層水で 蒸気を冷やし、液体

育の試算によると30年時 147時あたり20円程度

りも安い水準となる。 の洋上風力や石油火力

ない点を生かし、

を活用して発電コストを 養殖業向けなどの取水管

海洋温度差発電の

①温かい表層水で 代替フロンなど を蒸発させる

仕組みの一例

温かい表層水

OTECは、海面における表層の温水と深海の冷水の温度差を利用して発電を行う仕組みで、水深600m以深の海域から海洋 深層水を汲み上げ、表層水との温度差でエネルギーを取り出すものです。気象に左右されないため、安定的に発電量を予測



ご清聴ありがとうございました。

文部科学省と国立大学附置研究所・センター個別定例ランチミーティング

第13回 佐賀大学海洋エネルギー研究所

海洋の温度差から安定した電力の創出

―システムと熱交換器伝熱面形状の最適化に挑む―

2022年9月2日

海洋エネルギー研究所 海洋熱エネルギー部門 海洋温度差エネルギーシステム分野 助教 **安永 健**

自己紹介

<u><経歴></u>

2003 同志社大学 工学部 卒業

2008 佐賀大学大学院 後期課程 修了 博士(工学)

2008-2015 三菱重工業株式会社

2015-現在 佐賀大学海洋エネルギー研究所 助教

<u><研究トピック></u>

- ・低温度差発電の熱力学基礎理論(熱輸送論、有限性)
- ・海洋温度差発電(OTEC)の最適設計(正味出力最大化)
- ・プレート式熱交換器の伝熱面形状最適化
- 海洋熱利用の海水淡水化装置の最適設計(造水量最大化)
- ・超撥水性被膜を用いた伝熱性能促進



アンモニア/水を用いた発電装置

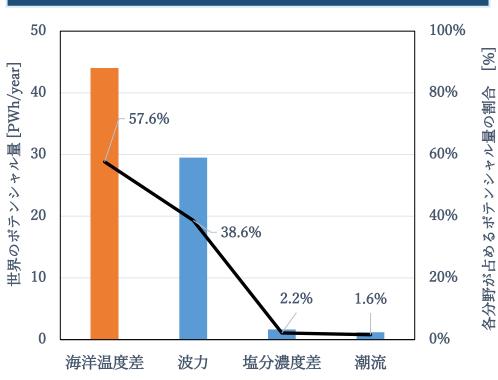


沖縄県100kW実証試験装置

海洋エネルギー研究所(IOES)の研究分野とポテンシャル

研究分野 洋上風力 海洋温度差 波力 潮流 塩分濃度差





Data) IRENA, Innovation outlook: Ocean Energy Technologies (2020)

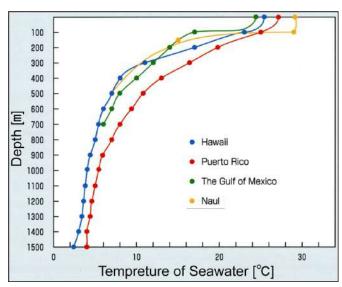
海洋温度差発電(OTEC)の潜在エネルギー量は、 世界の海洋エネルギー※の約58% その賦存量は世界の電力使用量の約2倍

※洋ト風力を除く

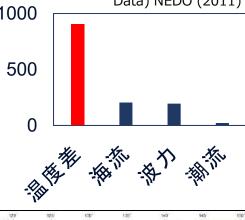
海洋温度差発電発電(OTEC)とは

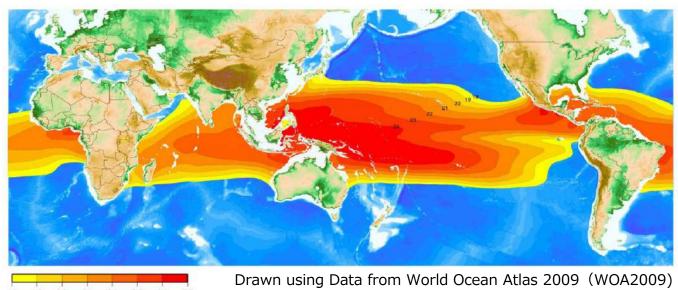
海洋温度差発電:Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)

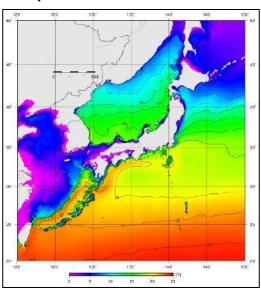
OTECは、海洋表層と水深 約600~1000mの温度差 (約20~25℃)を利用し 発電するシステム。 表層海水が年間を通して 温かい赤道付近の地域 (特に島しょ国)が OTECの好適地。











Data) NEDO (2011)

海洋温度差発電(OTEC)の特徴

海洋温度差発電:Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)



- ・地表の**7割**を占める海が 太陽エネルギーを蓄熱 (熱源)
- ・95%以上の海水が海洋深層水 (冷却水)



- ・**24/7 発電**が可能 (小グリッドのベースロード)
- ・系統安定化装置が不要
- ・高い設備利用率

副産物

- ・海水淡水化による造水
- ・海洋深層水を資源として活用

発電だけでなく、飲料水の製造、海洋深層水を水産、冷熱源(省エネ)、 食品、化粧品 等の資源として活用することができる

海洋温度差発電(OTEC)のプロジェクト

海洋深層水(水深600~1000m)の取水が可能で、表層海水が年間を通して温かい 赤道付近の地域(特に島しょ国)がOTECの適地

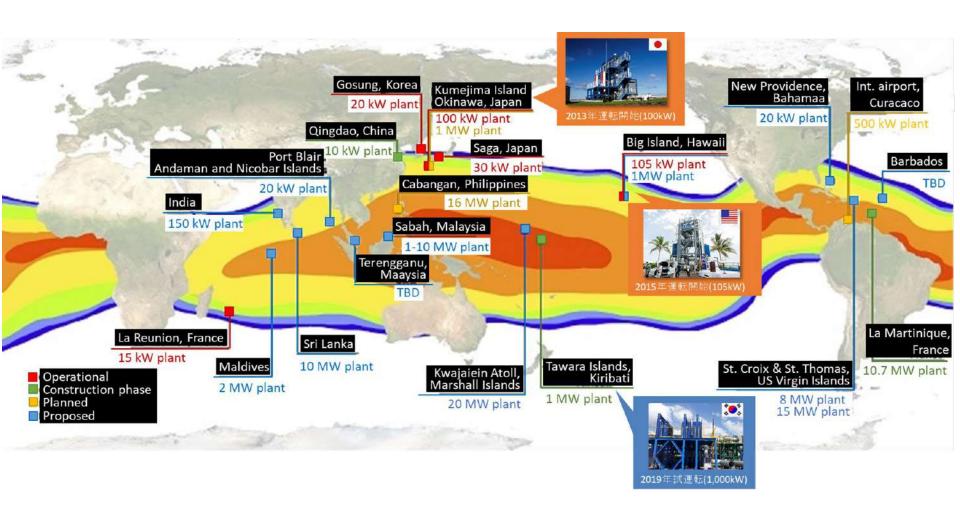


Figure: IEA-OES (http://www.oceanenergysystems.org/oes-projects/status-of-otec-and-its-resource-assessment/) Modified by presenter

近年のOTECの実証試験装置



近年のOTECの実証試験装置





2019年9月 釜山沖(韓国)で試験 約17℃の温度差で 338 kW の発電に成功 (世界記録)

本事業は、試運転後キリバスに輸送・設置予定。 新型コロナウイルスの影響で、移設は未完了。

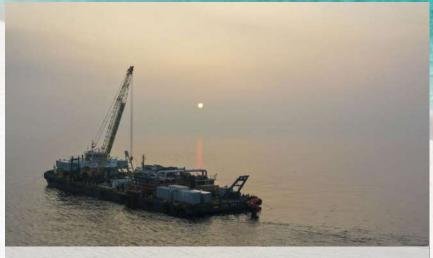


Photo courtesy: Dr. Hyeon Ju Kim, KRISO

システム性能の大局的視点から機器の最適化

1. 熱力学 モデルの構築

システム
 最適設計

3. 機器の 高性能化

1. 熱力学モデルの構築

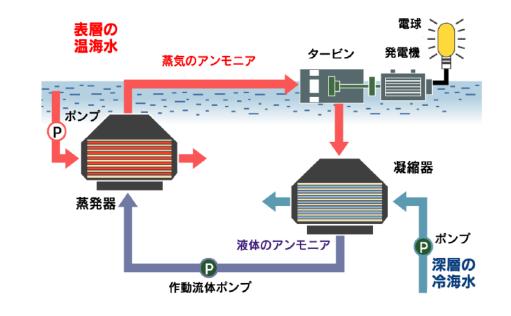
- ・発電ポテンシャル量の算出
- ・発電装置の性能評価手法の確立
- ・構成機器の性能評価手法の確立

2. 発電システム最適設計

- ・装置の低コスト化 (サイクル構成,熱バランス等)
- ・運転時の出力最大化
- ・ 構成機器の性能評価手法の確立

3. 機器の高性能化

- ・機器の高性能化(低コスト化)
- ・運転時の出力最大化
- ・ 構成機器の性能評価手法の確立



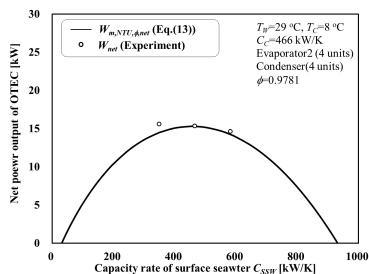
プロセス全体の正味出力を最大化する、 という視点から、 発電装置、構成機器の研究・開発を実施

「熱輸送を考慮した新しい熱力学モデル」の構築

- 熱輸送および熱源流量、温度の有限性を考慮した、 新しい熱力学モデルを構築※
- <u>熱効率に従来の熱機関へ投入する熱量ではなく、海水が保有する</u> 熱エネルギーを用いることで、**熱効率と出力のパラドックスを解消**
- <u>エクセルギーの**基準状態に平衡温度**を用いる</u> (最大出力とエントロピー生成量の最小化条件が一致)

**** FTT: Finite-Time Thermodynamics (Non-equilibrium Thermodynamics)**



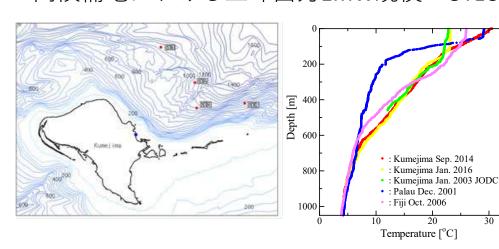


海洋エネルギー研究所のOTEC実験装置を用いて、実験的に検証を実施

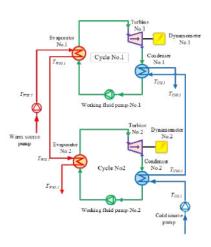
発電システムの最適設計

海洋深層水取水量を最小化する設計手法の確立

久米島で導入が検討されている日量10万の海洋深層水取水管敷設計画に合わせ、 同候補地における正味出力1MW規模のOTECの試設計を実施







久米島の海底地形図

海水温度分布

2段システムを用いた実証設備

2段システムフロー図

Data) Urata, K., et al., (2021), Deep Ocean Water Research (in Japanese), Vol.22, No.2, pp.39-47.

FFTを活用した目的関数を用いて特定の条件で試設計し、

発電に必要な海洋深層水の大幅な取水量低減の可能性を示した



<u>今後、商用機の実績(性能、仕様、コストデータ)によって</u> コスト関数が得られれば、更に低コストな設計手法への反映が可能

機器の高性能化 ~熱交換器伝熱面形状最適化~

熱力学 (FTT) モデルを伝熱面形状最適化時の目的関数へ導入

個別の機器の性能を、正味出力へ与える影響として評価

特に**熱交換器**の性能は、**伝熱性能**と**圧力損失**のトレードオフ

伝熱性能の向上 ⇒ 熱機関の出力向上 **圧力損失**の増加 ⇒ 海水ポンプ動力の増加



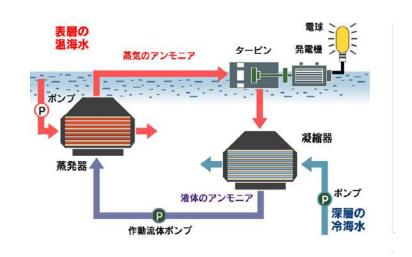


OTEC設計時の熱交換器の選定や性能比較に用いる**性能指標**が必要

- ① 伝熱性能,作動流体側圧力損失 →熱機関の出力₩
- ② 熱源側圧力損失→海水ポンプ動力P

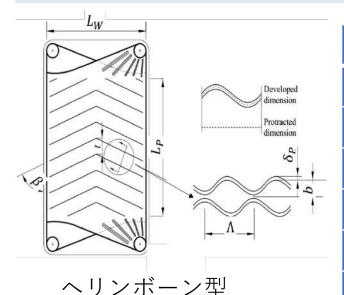
$$\begin{cases}
\min(1/\omega) \\
\omega = f(W, P, A, m)
\end{cases}$$

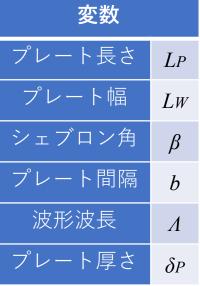
熱力学(FTT)モデルを用いて、 伝熱面積A、海水流量m 当たりの 正味出力としてモデル化し、 熱交換器の性能指標を構築

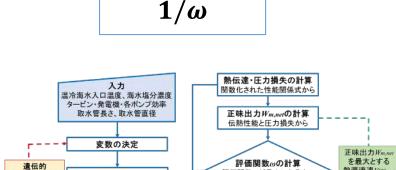


機器の高性能化 ~熱交換器伝熱面形状最適化~

熱力学(FTT)モデルを伝熱面形状最適化時の目的関数へ導入







評価関数のが最小になるまで

計算を繰り返す

出力

目的関数

プロジェクト要因の反映 (各プロジェクト特有の 要因をモデルへ反映)

プレート面形状最適化

面形状の 最適化 海水側の伝熱・流動抵抗を基に、最適化問題で伝熱面形状を決定

熱源流速の決定

最適熱源流速VHS.optを求める

Fine-Tuning

熱交換器 性能検証

アルゴリズム

最適化された面形状の性能の検証

(蒸発・凝縮性能検証、システム設計の実施)

今後の研究課題と研究成果の社会的インパクト

熱交換器の伝熱面最小化の更なる発展

- (1) 伝熱面形状と数値流体解析(CFD)を活用した最適化
 - -CFD (単層強制対流)と最適化計算の連成計算プログラムの構築
 - ー機械学習の適用
- (2) 熱交換器性能の実験的検証
 - -3Dプリンタを活用したプレート伝熱面の製造・試験
 - 一蒸発・凝縮を伴う熱交換器の性能予測式の作成



(3) 伝熱促進技術の適用

一超撥水面膜を適用した相変化を伴う伝熱性能促進



本熱力学(FTT)モデルを他のシステムへ適用

世界的に豊富に存在するが、未だ利用度の低い熱エネルギー・資源の効果的活用へ貢献





温泉•地熱

未利用の<u>低熱源</u> (150℃以下) (排熱エネルギーの約7割)

潜在的なエネルギー・資源の活用に向けた研究開発の礎

オーガニック・ランキン サイクル(ORC)の高性能化

発電ポテンシャル量の算出、**性能評価方法の標準化** 等へ貢献したい