

土木学会エネルギー委員会主催講演会
於:土木学会講堂
2020年1月28日

太平洋で再生可能エネルギー100%を目指す —低緯度太平洋メガソーラー帆走筏構想と成立性—

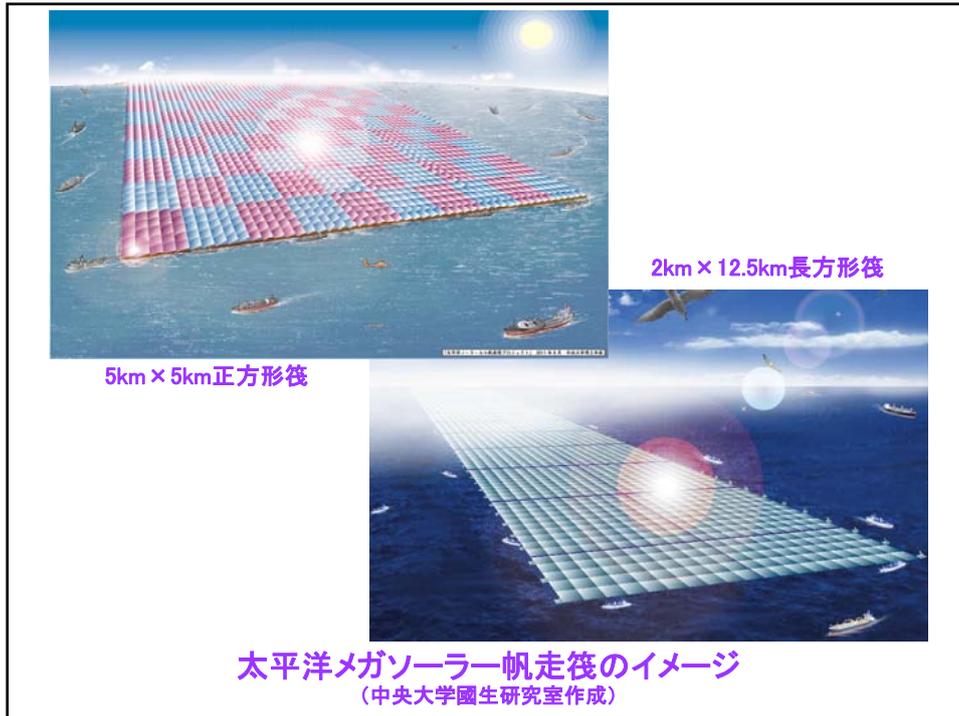
中央大学名誉教授
國生 剛治

1

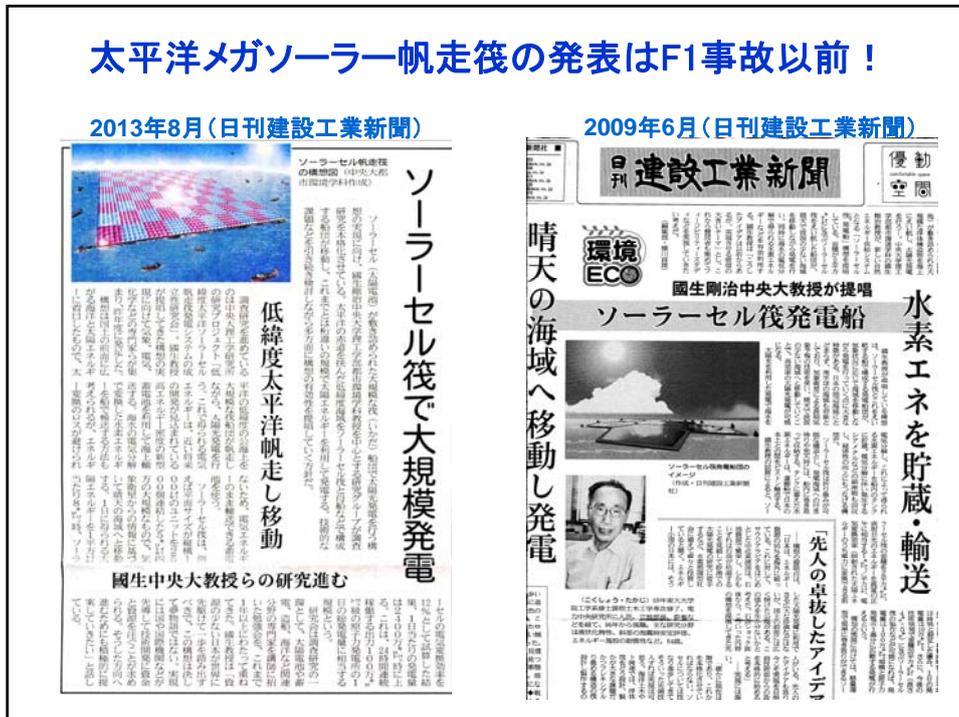
太平洋

- 人類に残された自然エネルギー持続利用可能な未利用空間。
- 低緯度太平洋公海は地球屈指の高密度太陽エネルギー宝庫。
- 高緯度に比べ穏やかな気象・海象条件。
- エネルギー変換、運搬の基本技術は既に存在し利用可能。
- 技術の実用化・高度化・大型化・低コスト化が課題。
- 国際法的に当然認められる公海の平和的商業利用。
- 公海利用のルール作りへ国際的合意形成が課題。
- まずニーズが高い日本が実現に向けて一步踏み出すべき。

2



3



4

自然エネルギーの基幹利用可能性追求

- 我が国はエネルギー資源を90パーセント以上海外依存。
- 世界では欧州中心に自然エネルギーへの依存度を拡大。
洋上風力の他、サハラ砂漠メガソーラー発電計画。
- サウジアラビア始め中近東諸国は石油枯渇を見越し太陽エネルギー利用技術の研究開発に投資。
- 我が国は国土が狭く、日照率などからも砂漠国のようなメガソーラー発電は無理で、基幹エネルギーとするのは無理と諦めがち。

5

本プロジェクト提案の狙い

- 我が国は砂漠こそないが、国土の前面に開けた太平洋で安定したメガソーラー発電の可能性あり。
- 障害物の無い海洋だからこそ、長さ数キロメートル四方の広大なメガソーラー筏により太陽光発電可能。
- エネルギー輸送が課題だが水素化すれば現状でも可能。
- CO₂ 排出量削減のみならず、資源の海外依存度も軽減。
- 従来の自然エネルギー(小規模・分散・不安定)とは異なり究極的には原子力並みの基幹エネルギー利用可能。
- 人類エネルギー利用の大転換に繋がる世界に先駆けての試み。

6

構想の概要

- 太平洋低緯度海域でメガソーラー筏や母船などの船団が操業。
- 長期気象予報により晴天域を低速帆走しつつ太陽光発電。
- 公海上を商業活動を目的として航行することは国際法上の権利。
- 公海航行中の再生可能エネルギー利用は資源収奪ではない。
- 筏の大面积化(究極的には25km²)で原子力発電相当出力に相当。

7

発電量の試算

- 面積: 25km² (5km × 5km)
- 1日の累積太陽エネルギー: 8 kWh/m²
- ソーラーモジュールの電気変換効率: 12%
(現在のシリコンタイプの値)
- 1日の発電エネルギー:
 $8 \text{ kWh/m}^2 \times 0.12 \times 25,000,000 \text{ m}^2 = 24,000,000 \text{ kWh}$
- 1日24時間で平均すると:
 $24,000,000 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = 1,000,000 \text{ kW}$
- 24時間連続稼働する100万kW級の原子力発電所に匹敵。

8

既往の類似構想と本構想の特徴

既往の類似構想の特徴: 太陽熱発電・定点固定筏

- 1970年代オイルショック直後に横浜国大・マイアミ大の計画
- 定点筏上のミラー(静穏性重要)で太陽熱を集め水素製造
- 1980年代船舶技術研究所において要素技術研究.

本構想の特徴: 太陽光発電・省エネ帆走筏

- 帆布一体型ソーラーモジュールによる太陽光発電.
- ミラー集光とは異なり, 静穏条件が大幅緩和, 筏の簡素化・コスト低減.
- 気象衛星情報による航海計画と晴天域の追跡.
- 常時帆走で, 直下海中への太陽光遮断による海生生物影響を抑制.
- ソーラーモジュール一体型帆による風力帆走や海流利用移動.

9

中央大学研究会での予備調査(2012~2014)

- 中央大学技術士会など学際メンバー(電気・化学・土木・気象など)が参加,
- 調査項目.
 - 本エネルギーシステムの基本条件設定
 - 気象・海象データの収集分析
 - ソーラーモジュール, エネルギー輸送技術の現状・将来動向調査
 - 筏船団の基本概念検討, 筏ユニット概念設計
 - 成立性の概略検討
- 講演テーマ: 海洋開発・太陽電池・蓄電池・電気分解・水素輸送・船体構造・海洋法など
講演機関: 「海洋開発分野の洋上再生エネルギーについて」: 海上技術安全研究所 田村兼吉氏, 「低炭素社会構築に向けた蓄電池の役割」: 産業総合技術研究所 大久保将史氏, 「太陽電池の現状と将来展望」: 中央大学研究開発機構 池田富樹教授, 「電気エネルギー・メガソーラー・蓄電池・電力輸送等」: 東京電力(株)技術開発研究所 中島達人氏, 「船体構造について」: サノヤス造船(株)前野嘉孝氏, 藤井康成氏, 「リチウム-空気電池の開発状況」: 産業総合技術研究所 北浦弘和氏, 「太陽光発電の動向と今後の見通し」: 産業総合技術研究所 櫻井啓一郎氏, 「ソーラー発電等のLCA評価について」: 産業総合技術研究所 田原聖隆氏, 「ソーラーセル超大型帆走筏の実現に向けて」: 日本海事機構 赤星貞夫氏, 「水素エネルギーの大規模貯蔵輸送システムと水素サプライチェーン構想」: 千代田化工建設(株) 岡田佳巳氏, 「海水の電気分解について」: 元・旭化成(株) 野秋康秀氏, 「HDPE製ソーラーフロートについて」: 日本管財センター(株) 浅見・遊佐・小田原氏
- 資金協力: 中央大学理工学研究所, 中部電力(株)
- 報告書: <http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/top/houkokusyo%20honsastu.pdf>

10

低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システムの成立性研究会メンバー

大石 克嘉	中央大学応用化学科教授	林 知幸	林技術士事務所
池田 富樹	中央大学研究開発機構教授	永井 仁	(株)クリエイティブ
江本 永二	江本技術士事務所		テクノソリューション
金川 護	金川技術士事務所	萩野 太郎	萩野技術士事務所
内藤 堅一	内藤技術士事務所	足立 元良	(株)ドラムエンジニアリング
藤森 勲	藤森技術士事務所	坂林 和重	(株)日本技術サービス
藤森 公彦	藤森技術士事務所	笹尾 圭哉子	中日本建設コンサルタント(株)
中尾 愛人	千鉱エンジニアリング(株)	世古 隆志	シニアネット水戸



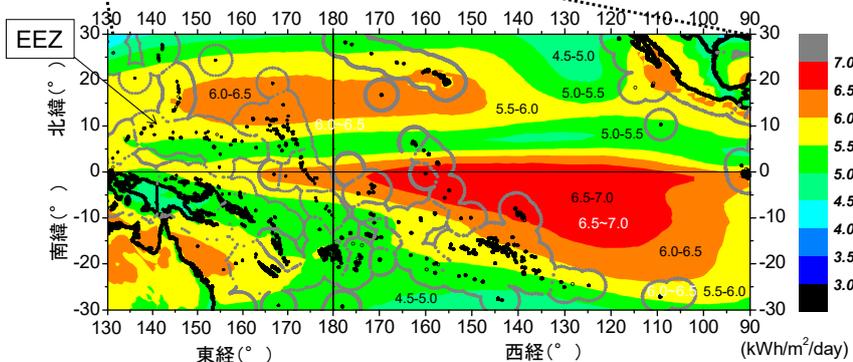
11

太平洋低緯度海域の日射エネルギー



この海域で得られる太陽エネルギー：
年平均5~7.0 kWh/m²/day

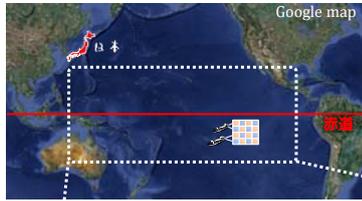
気象衛星による長期気象予報技術を活用し、
晴天域を回遊することで、**8 kWh/m²/day**以上の
日射エネルギーを実現する。



Surface meteorology and Solar Energy:Release 6.0 Data Set, NASA, Jan 2008

12

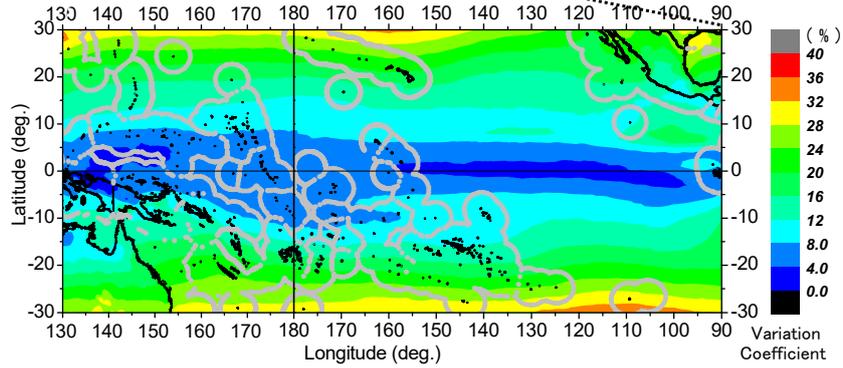
日射エネルギーの変動係数



変動係数=標準偏差÷平均値

日射エネルギーには10~25%程度の季節変動があり、ソーラー筏が帆走航海することにより、**8kWh/m²/day**以上の日射エネルギーを実現する。

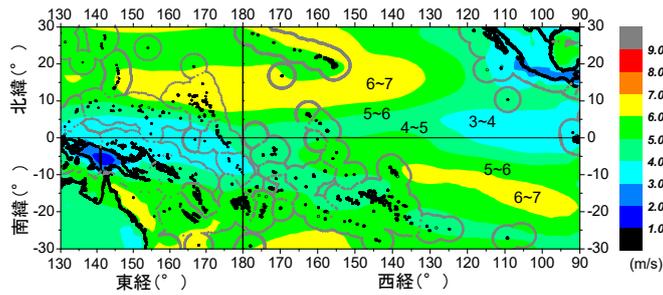
出典: NASA



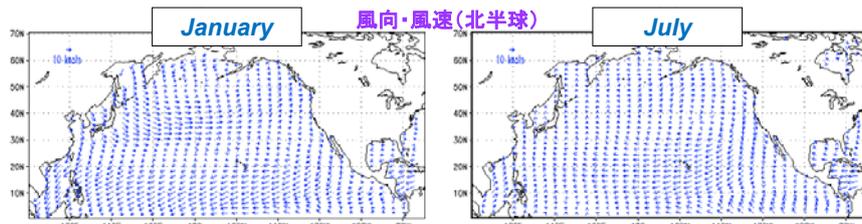
Surface meteorology and Solar Energy:Release 6.0 Data Set, NASA, Jan 2008

13

太平洋低緯度海域の風速・風向



低緯度太平洋風速(海面上10m:NASAデータによる)

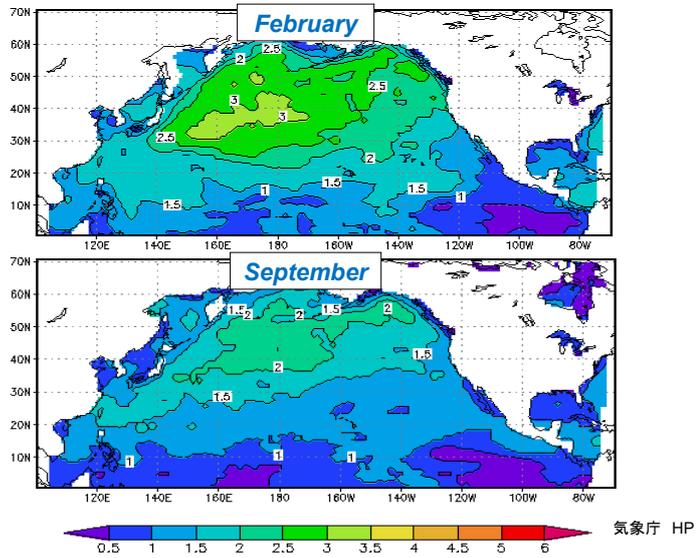


帆走省エネ航海に適した穏やかな海上風

気象庁 HP

14

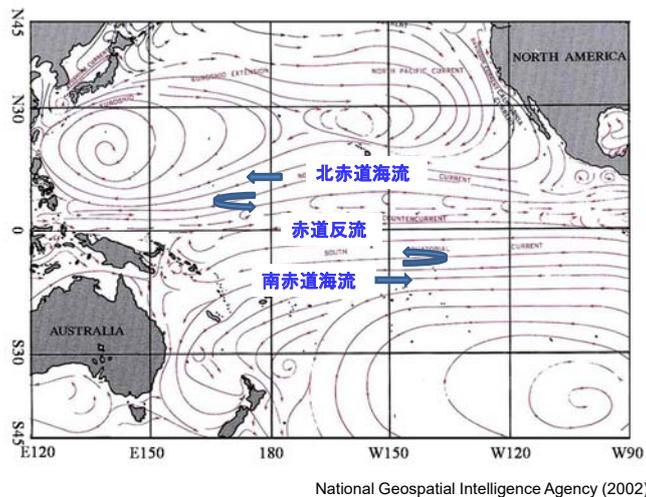
発電海域の波高



低緯度海域は年間を通して平均波高1m程度と穏やか。

15

発電海域の海流

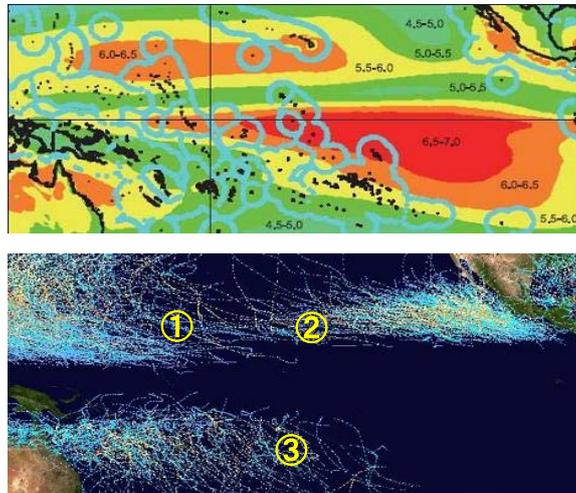


海流速度1~3ノット(2~6km/h)

北赤道海流・南赤道海流・赤道反流を使って省エネ航海が可能

16

熱帯低気圧のリスク



1985年～2005年に太平洋で発生した熱帯低気圧の軌跡(3エリアに分けられる)

(下図: Wikipedia)と同海域での日射エネルギー分布(上図: NASA)の比較:

- ◆ 台風は赤道±数度では地球自転のコリオリの力(β効果)により発生・通過はまれ。
- ◆ 低緯度南太平洋には台風の発生しない広大な低温海水域があり、晴天域と重なる。

17

気象海象条件のまとめ

- 太平洋中央部は年平均日射量 $6.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の海域、赤道～南緯 15° は $6.5 \sim 7.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$.
- 季節変動を考慮すれば $8.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 以上は達成可能。
- 風は低緯度は高緯度に比べ弱く、陸地周縁より風向安定。
- 平均波高は北緯 25° 以南は $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$, 10° 以南は $1 \text{ m} \sim 0.5 \text{ m}$ 。
- 海流は赤道を挟んで赤道反流, その南北には循環流。
- 穏やかな定常風と海流による低速省エネ航海で最大日射を追尾。

- 熱帯低気圧のリスクは低緯度高日射量海域では非常に小さい。
- 他の低緯度海域ではリスクは増すが日本近海に比べれば好条件。
- 予報技術の発展により1か月先予測ができ危険回避可能。

18

海洋エネルギー利用での環境問題・法制度

- 環境面の検討課題は、海洋気象・海洋環境・衝突事故防止・海洋汚染防止・海生生物影響など。
- 国際海洋法によれば公海は自由に利用可能だが、他国特に周辺国にも考慮を払う必要。
- ソーラー筏の国際海洋法上の位置づけなど国際海事機関(IMO)で合意必要(その際、自然エネルギー大規模利用という人類史的大転換のため、国連などで慣行に捉われない海洋利用の枠組みを考えるべき)。
- 公海を利用する他船舶への影響の最小化のため、正確な位置や航海計画を周辺船舶などへ周知することが必要。
- 国内法上は、安全・構造上の法規・管理運営面、税制など多くの制約条件あり。但し日本の漁業権は公海上まで及ばない。

19

実現に必要な主要技術開発課題

このシステムの実現には以下に示す
3つの技術開発課題の解決が不可欠。

ソーラーモジュール

薄膜型撓み性ソーラー
モジュールの高効率化:
12% → 20%以上

帆布のような柔軟性の
ある基盤材料の開発

エネルギー輸送

1) 水素・化合物輸送
電気分解で生産した
水素または水素化合物
のタンカー輸送

2) 将来型バッテリー輸送
金属空気電池などの新型
電池開発によるエネルギー
大量輸送の効率向上

革新的筏浮体

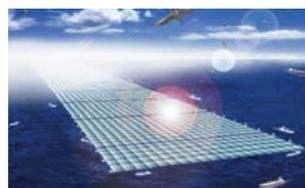
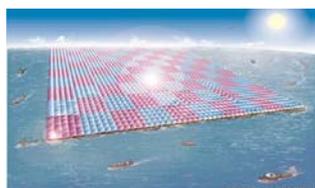
新材料を活用した
軽量で簡易組立て
可能な革新的浮体

浮体のメンテナンス技術

20

革新的筏浮体

- 晴天海域を求め、常に低速帆走するための最適構造の追及。
- 全体形状は5km×5kmの正方形、または12.5km×2kmの長方形。



- 膨大な数(例えば2500)の筏ユニット(100m×100m)で構成。
- 筏浮体は撓み性ソーラーモジュールで覆われた帆・帆柱とそれを支えるフロートから構成され、帆は受光効率と帆走効率を考慮して角度制御。
- 母港から操業海域への運搬時は筏ユニットはサブユニットに分解運搬し、操業海域到着後に現地組み立て展開。

21

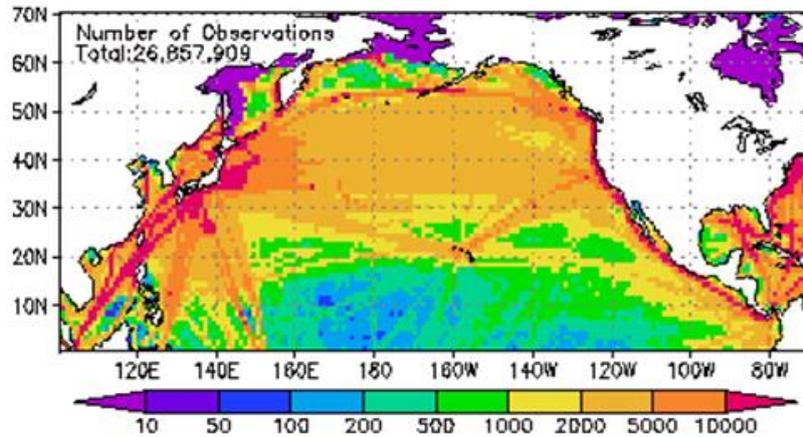
参考とした海洋運輸専門家のコメント

- 現状の海洋エネルギー利用は風が中心で太陽エネルギーが含まれていない。太陽光パネルなら同じ面積で風車の1.5倍程度の発電が可能。
- 筏が船舶か海洋構造物かの位置づけ問題。IMOなどで合意必要。
- ソーラーセルの効率低下を避けるため、定期的塩分洗浄が必要。
- 母船で巨大筏を曳航することは船の出力などからほぼ不可能で自力帆走が必要。
- 赤道付近は貧栄養で海生生物の付着も少ない。日本の漁業権は公海上までは及ばない。
- 多くの船舶航路は太平洋の極めて狭い大圏航路に集中、低緯度での商用航行への影響は小さい。

(独)海上技術安全研究所 田村 兼吉氏提供

22

北半球太平洋の海運利用状況



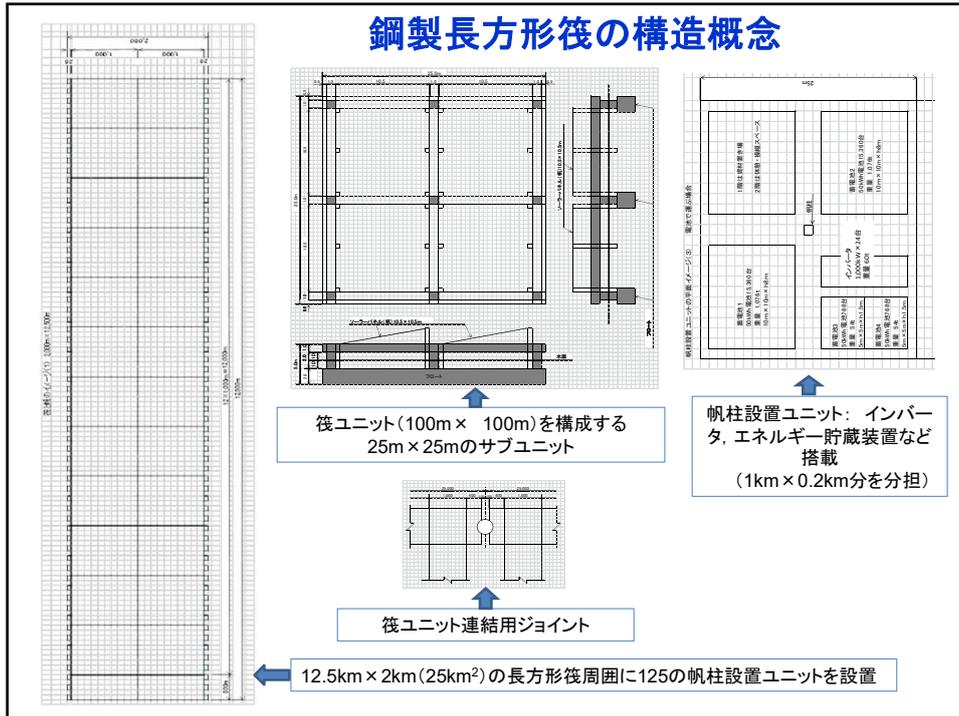
- ◆ 商船からの雲量データ観測数(全2700万件)の報告位置(気象庁データ)
- ◆ これより商船は太平洋中央部低緯度海域をあまり航行しないことが分かる。

23

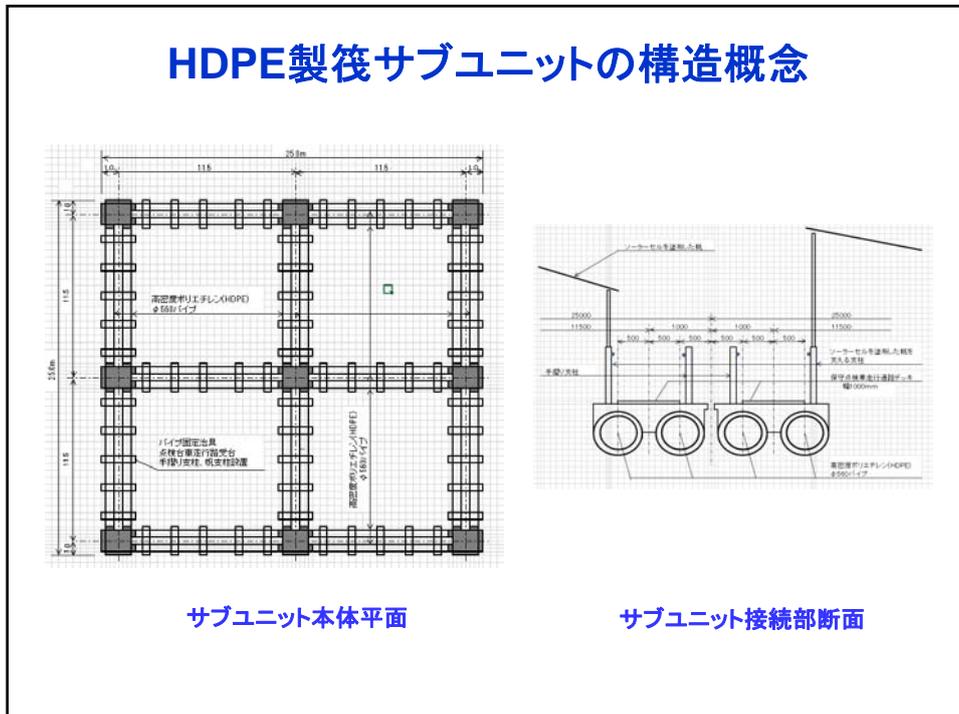
筏構造概念

- 25km²の筏⇒100m×100mの筏ユニット×2,500個連結
- 100m×100mの筏ユニット⇒25m×25mのサブユニット×16個連結(運搬性)
- 25m×25mのサブユニットに4枚のソーラーモジュール帆布
- 筏材質:実績ある鋼鉄または高密度ポリエチレン(HDPE)。
- 鋼鉄サブユニット: 水中フロートを持つ半潜水式骨組み構造
支柱でソーラー帆布を支持
鋼板厚は撓み抑制・腐食代を考慮
重量は81トン
- HDPEサブユニット:田形に組んだ撓み性のフロート
直結した支柱でソーラー帆布を支持
重量は17.6トン
- 筏ユニット・サブユニットは回転可能ジョイントで連結, 波浪に対し可撓性。
- 長方形筏(2km×12.5km)⇒分散的エネルギー集約・貯蔵システム。
200m×1,000mの125区画ごとにエネルギー集約貯蔵設備用の船台配置、
- 正方形筏(2km×12.5km)⇒集中的エネルギー集約・貯蔵システム。
母船(FPSO)へエネルギー集約貯蔵設備を集中設置。

24

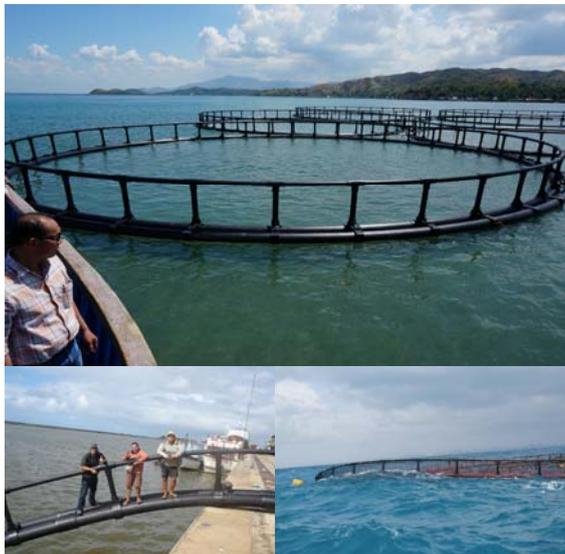


25



26

HDPEを使った養魚施設の例



日本管材センター(株)提供

ノールウェーでは北海の荒波にも長期間耐えるHDPE製養魚施設が使われている。

27

メガソーラー筏船団の構成

- 巨大な筏本体に加え、母船、作業船、運搬船など大小10隻以上の船舶から構成。
- 母船は筏船団全体の運転・制御・航行・エネルギー運搬制御・運転員の居住など。FPSO (Floating Production, Storage and Off-loading system: 浮体式海洋石油ガス生産貯蔵積出設備は海底資源開発で採用されている生産設備・貯蔵タンク・輸送船への受渡し設備を備えた大型プラント船。世界で150隻以上が稼働中)が参考となる。
- 作業船は筏の現地組み立て、維持補修や筏船団内での物品輸送などに当たる5000積載トン程度のクレーン付き。海洋資源開発で使われるオフショア支援船が参考となる。



FPSOの例



オフショア支援船の例

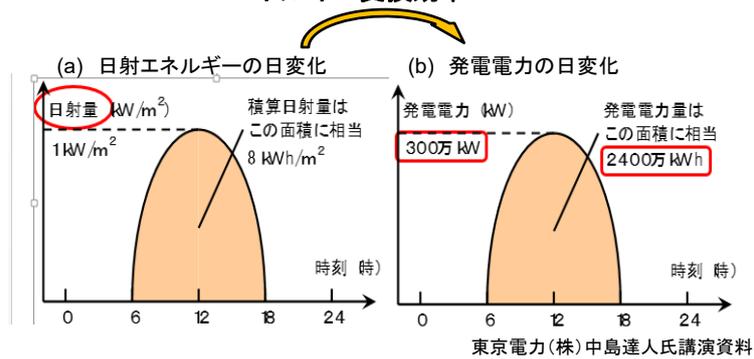
サノヤス造船(株)提供

28

ソーラーモジュール

- 資源量の観点から薄膜・撓み性とし、帆布一体化型。
- 厚さ2ミクロンの薄膜を帆布基盤上に連続作製する製造技術開発が必要。
- 日射12時間でピーク日射量 $1\text{kWh}/\text{m}^2 \Rightarrow$ 1日の日射エネルギー $=8\text{kWh}/\text{m}^2$ 。
- 変換効率12%として筏全体発電量 $=24\text{GWh}$, ピーク時発電電力 $=300\text{万kW}$ 。

エネルギー変換効率=12%



29

太陽電池の分類

無機系

シリコン系 ... 単結晶・多結晶・アモルファス

化合物系

結晶 ... III-V族化合物半導体

薄膜 ... CIGS, CdTe

有機系

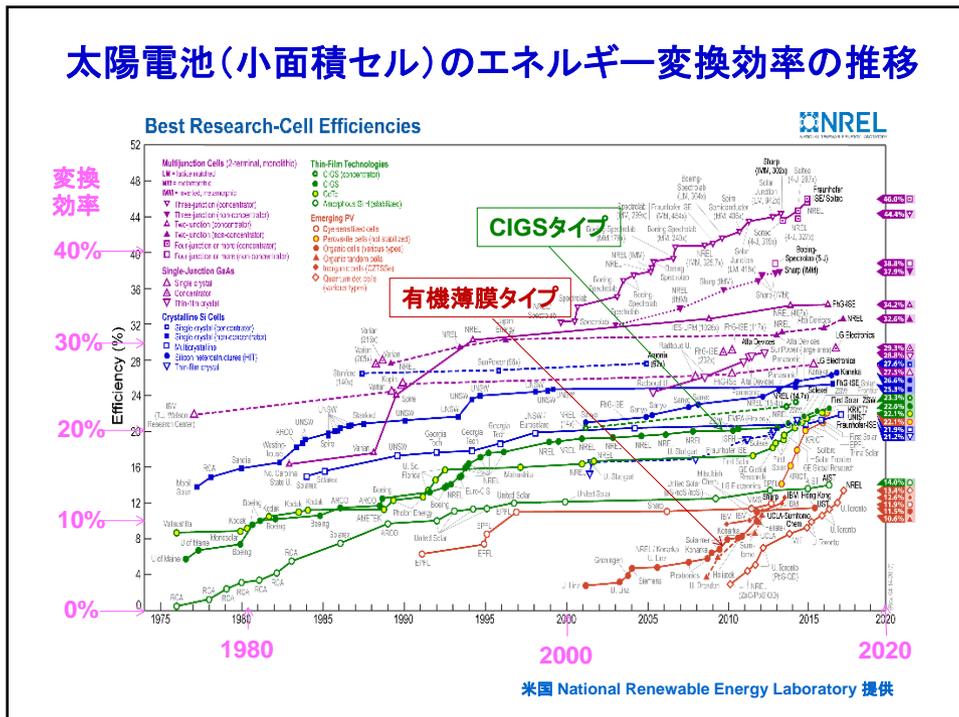
色素増感 ... Grätzelセル
(液体系)

薄膜 ... 真空蒸着型・塗布型
(固体系)

本プロジェクトへの適性大

30

太陽電池(小面積セル)のエネルギー変換効率の推移



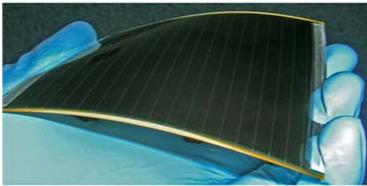
31

薄膜・撓み性太陽電池

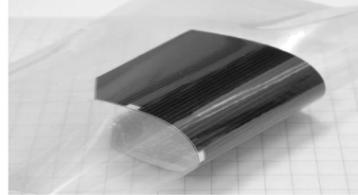
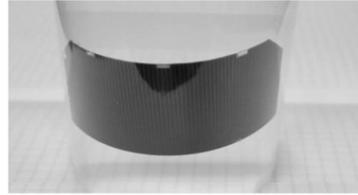
- ・ CIGS化合物半導体タイプ(既に実用化)と有機系薄膜タイプ。
- ・ CIGS: 可視光の光吸収係数が大
厚さ0.5~2 μmの薄膜で十分太陽光を吸収。
軽量・省資源で大受光面積が製作できる。
変換効率は、小面積セル20%、モジュール10~12%・将来20%以上
長期耐久性・温度特性も優れる。
CZTSタイプ(インジウム・ガリウム⇒低コストの亜鉛・スズ)も開発中。
- ・ 有機系薄膜タイプは現在効率5%、将来的は10数%は可能。
- ・ 撓み性帆布基盤と一体型の高効率モジュールの大量生産・コスト低減が課題。

32

撓み性薄型ソーラーセルの例



産業技術総合研究所
変換効率：17%



シャープ
変換効率：25%

33

メガソーラー筏の集電システム

全体で160,000枚(=50×50×16×4)のソーラーモジュールからエネルギー変換・貯蔵設備までの集電システム⇒**直流システム**または**交流システム**

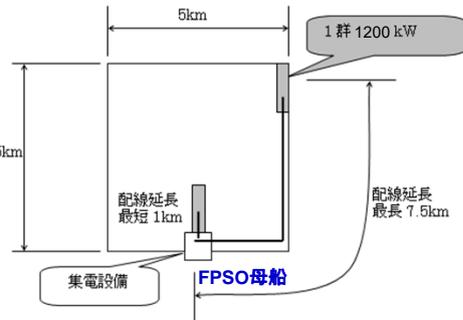
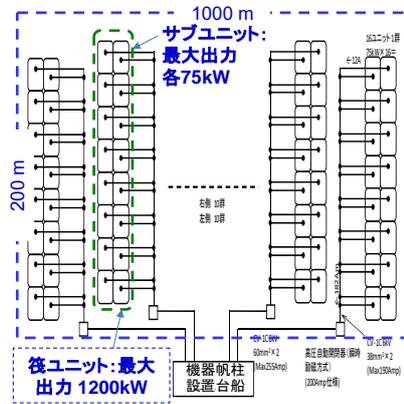
- **直流システム**：電圧降下が大きい⇒2km×12.5kmの**長方形筏**、機器帆柱設置台船上の分散的エネルギー変換・貯蔵設備まで集電距離を1km以内に。
- **交流システム**：インバータを介した交流変換で集電距離は緩和でき、5km×5kmの**正方形筏**によりFPSO母船で集中的エネルギー変換・貯蔵。直流への再変換必要だが、直流システムより有利な可能性。
- 膨大な数のソーラーモジュールの効率的な監視・保守・点検システムは重要な技術開発項目。

34

メガソーラー筏の集電システム

直流集電:分散的(長方形筏)

交流集電:集中的(正方形筏)



- ◆ 電圧降下を考え最長集電距離は1km。
- ◆ 至近の機器帆柱台船への分散的集電。

- ◆ 交流では長距離集電が可能。
- ◆ 遠方のFPSO母船への集中的集電。

35

エネルギー輸送

1) 水素・化合物輸送(エネルギー変換ロスあるが実現近い)

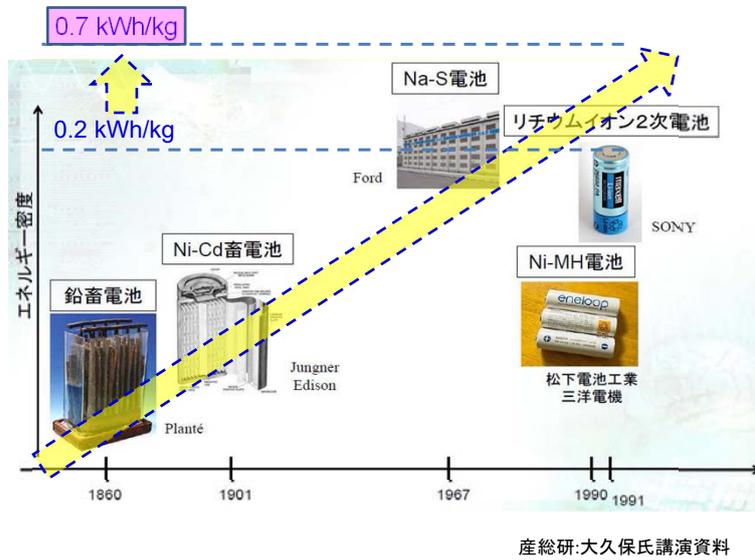
- ・ アルカリ水電気分解で水素エネルギーに変換(現状効率:70%程度)
- ・ 水素の輸送方法:
 - ①有機ケミカルハイドライド法
 - ②液化水素法
 - ③圧縮水素法
 - ④メタノール・エタノールなどへの変換法
- ・ 有機ケミカルハイドライド法:すでに実用化段階
トルエンなど芳香族化合物を水素化
常温・常圧液体貯蔵・輸送。
使用場所で脱水素化により水素に戻す

2) バッテリー(2次電池)輸送(エネルギーロス小さいが将来技術)

- ・ 大電力貯蔵用NaS電池が実用化している(0.2 kWh/kg)が、輸送用に不適。
- ・ リチウムイオン電池のエネルギー密度 0.2 →0.7 kWh/kg(20年先:NEDO)
ただし自動車向けなどで大電力輸送に不適。
- ・ 大電力輸送用バッテリー開発はこれから(本研究会で基本特許取得)。

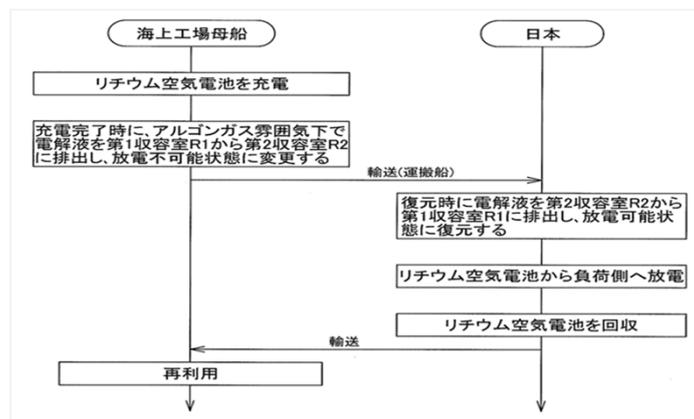
36

2次電池技術の歴史



37

特許願書類での大量電力輸送用金属-空気電池の概念 (特許取得済み)

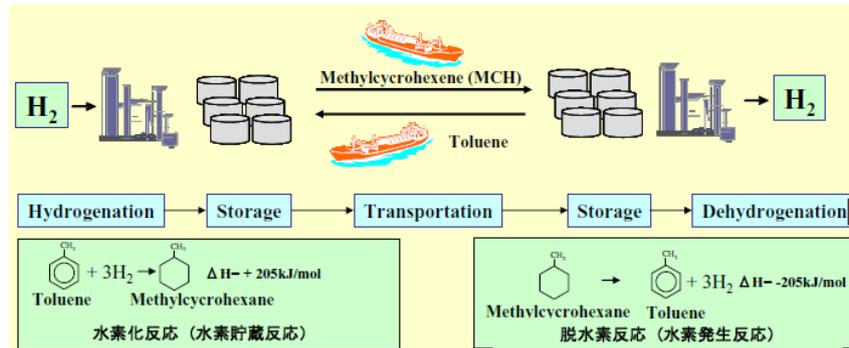


- ◆ 大電力輸送を考えた2次電池はこれまで存在しなかった。
- ◆ 理論的に最もエネルギー密度が大きな**金属空気電池**、マイナス電極(金属)と電解液を切り離し輸送。
- ◆ これにより輸送物量を少なくし、かつ安全に船舶輸送。

38

有機ケミカルハイドライド法による水素輸送

- 発電した直流電気⇒アルカリ水電気分解⇒リアルタイムで水素生産。
水素+トルエン⇒メチルシクロヘキサン(MCH)にリアルタイム変換(水素化)。
- MCHは常温常圧で液体、水素の体積が1/500に、石油と同じ貯蔵・輸送可能。
- 輸送先ではMCH⇒水素+トルエン(脱水素化)。
- 水素化・脱水素化反応による水素回収率95%。
- すでに実用化段階。

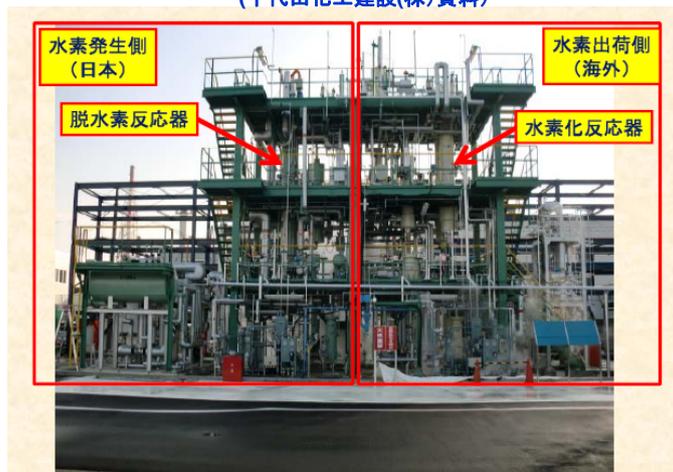


千代田化工建設(株)資料より

39

水素化・脱水素化反応器を備えた有機ケミカル ハイドレート法実証プラント

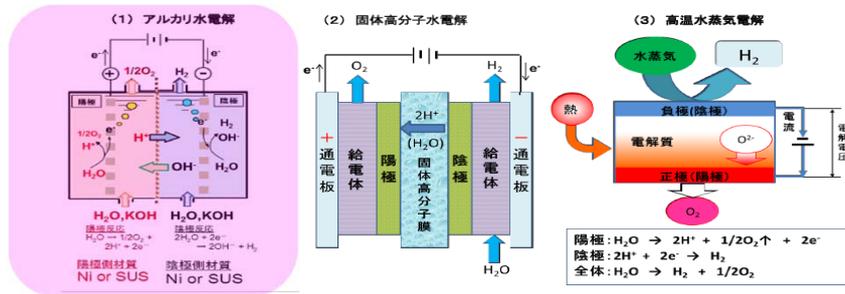
(千代田化工建設(株)資料)



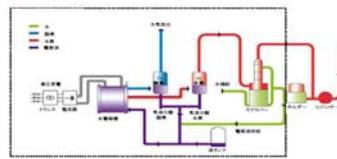
2020年に川崎市と共同でブルネイの水素を日本へ海上輸送し発電するNEDOプロジェクト。

40

電気分解による水素製造技術



代表的な大型アルカリ水電気分解装置 (NEL Hydrogen 2kW)



元旭化成:野秋氏講演資料

- ◆ 水電解法には海水電解など幾つか方法があるが、アルカリ水電解が最も実用的。
- ◆ 現状の大規模な装置として500N/m² (2000kW)が最大級。
- ◆ 後プロジェクトの巨大なニーズに対応するには更なる大型化必要。

41

成立性の概略評価

- 稼働期間を30年とし、現時点で可能な推定によりごく概略の成立性評価。
- エネルギー(水素)の買取価格: 30円/Nm³ に設定。
(2030年代/パタゴニア風力プロジェクト(同じく水素輸送)の目標値、化石燃料価格は考慮せず)
- 筏船団の水素出荷量(5,170,000Nm³/日×2週間分)を1隻のタンカーで輸送。日本で95%回収。
- タンカー一隻当たり: 30円/m³×5,170,000 m³/day×14day×0.95=20.6億円, 年間538億円⇒30年間の総買取価格: 16100億円。
- 必要な初期資本費と30年間の運転操業費用の推定と積み上げ⇒
成立するためのソーラーモジュール単価(帆布・集電システムを含む)を検討。
- 詳細は
<http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/top/houkokusyo%20honsastu.pdf>

42

1) 筏本体

- **鋼鉄筏**: 鋼材単価 60円/kg, 加工・組み立て・防錆, ジョイントなどの費用50%上乗せ9万円/トンと仮定, 筏全重量81トン×16×2500=324万トン⇒**2920億円**。
- **HDPE筏**: 製品単価に加工組み立て工賃など50%上乗せ33万円/トンと仮定, 筏全重量17.6トン×16×2500=70.4万トン⇒**2320億円**。
- 機器帆柱設置台船はバージ船なみの設計条件で必要最小限の推進動力も備え, 5000トン積載のプラントバージの建設コストを参考に4億円/隻。125台のコストは4億円/個×125個=**500億円**。一方, FPSO母船方式をとる場合, 重要機器なしの帆柱設置台船を5km×5kmの筏の周縁に200m間隔に1000積載トンの動力付き台船100台設置するため, 2億円/個×100個=**200億円**。

2) 母船など

- 母船については, 筏船団全体の発電制御・航行・エネルギー受け渡し制御・運転員の業務・居住スペースを有する30万積載トン程度のプラント船の価格を専門企業の情報により**300億円**と想定。
- オプションとしてFPSO母船方式を採用する場合, エネルギー変換・貯蔵設備も母船の機能に加わるが, これらの設備価格は別途考えているため, **400億円**と仮定。
- 作業船については, メガソーラー筏の維持補修や船団内物品輸送に当たる5000積載トン級クレーン付き作業船で, 現状のオフショア支援船を参考に小型の作業・連絡船(10隻程度)も含め, 50億円/隻×4隻=**200億円**。

43

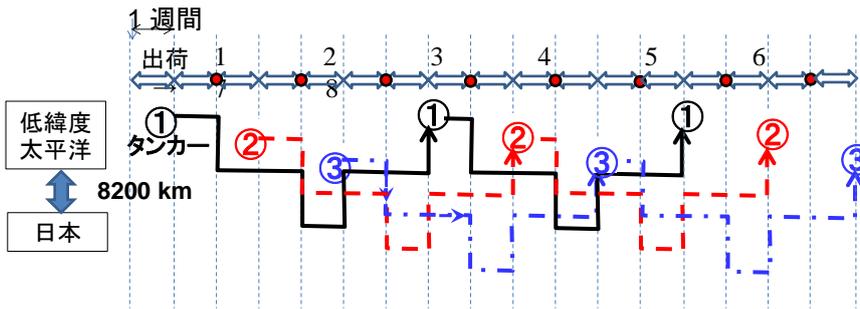
3) エネルギー変換・貯蔵設備

- **アルカリ水電解設備**: 全体で500Nm³/h/台×1375台が必要
現状では1台3億円だが, 将来的には研究開発により必要なセル数が半減、
量産効果により1台あたり1億円以下になるとの専門家の見解⇒
分散設置方式(長方形筏): 0.8億円/台×11台×125= **1100億円**
集中設置方式(正方形筏): 集中化により **900億円**
- **水素化・貯蔵プラント**: 反応速度5,170 m³/h/台×125台が必要
文献を参考に将来単価6億円が可能と推定,
分散設置方式(長方形筏): 6億円×125= **750億円**
集中設置方式(正方形筏): 集中化により **600億円**
- **脱水素化・貯蔵プラント**: MGH処理量10,300 m³/日, 水素発生量5,170,000 m³/日
24時間稼働のため昼間集中稼働する水素化設備に比べて安価,
文献に基づき **240億円**

44

4) エネルギー輸送タンカー

- 図のような低緯度太平洋から日本まで平均8200kmの航海スケジュール。
- 14.5万トンのMCHを輸送する20万トン級オイルタンカーを3隻必要。
- 現在のVLCC(20万トン級)を参考に60億円/隻 × 3隻=180億円。



45

5) ソーラー筏の操業海域への運搬

可能な限り国内で組立て貨物船により操業海域まで輸送:

- 鋼鉄製筏: 全重量3,240,000トン, ジョイント+帆布などで10%増し⇒360万トン, 30万トン積載重量の貨物船12隻の往復航海により運搬。片道8200kmの運搬コスト単価を現状価格を参考に5000円/トン⇒総運搬コスト: 175億円。
- HDPE製筏: 全重量704,000トンに関連部品を含め70%増し⇒120万トン ⇒総運搬コスト: 60億円。

6) ソーラー筏の現地組上げ

静穏海上や近隣島嶼国で全体組上げ:

- 筏本体コストの7~5%と仮定⇒鋼鉄製で195億円, HDPE製で115億円。

7) 運転操業費

- 20万トン級VLCCによるMCH輸送コスト(積荷価格の10%): 30年間で610億円。
- 船団とプラント諸設備全体の保守・点検・補修コストは, 30年で初期投資設備全体が更新されることを根拠に, 初期運搬・組立てを除く初期資本費合計の 3%/年。
- 筏船団運転・操業コストは, 運転員の人件費, 運転エネルギー費, 通信費, 税金・保険など諸費用含み, 上記初期資本費合計の 1%/年。

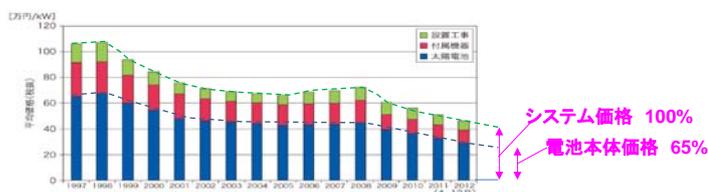
46

8) ソーラー帆布(集電システムを含む)の現状

- 1000kW以上のメガソーラーシステム価格, 好条件の場合 **20万円/kW** 程度。
そのうち, 電池本体価格は65%残りは集電システム。
- CIGSの場合タイプは異なるが, これを元に成立性を最終評価。



日本の住宅用太陽光発電システム平均価格の推移



日本の1000 kW以上の太陽光発電システムの価格分布

(NEDO再生可能エネルギー技術白書)

47

成立性の概略評価結果(億円)

項目	鋼製筏・分散方式(億円)	HDPE製筏・分散方式(億円)	鋼製筏・集中方式(億円)	HDPE製筏・集中方式(億円)	
水素ガス30年間総売り上げ	16100 (24150): 基本ケース30円/m ³ (参考ケース45円/m ³ , 水素回収率95%)				
初期 資本費	ソーラー筏本体 (ジョイント・防錆など含む)	2920	2320	2920	2320
	機器帆柱設置ユニット	500		200	
	ソーラー帆布・電気系統	0.03 × A		(3,000.000kW × A 円/kW: A 円/kW=ソーラー帆布単価) ← 未知数	
	電解槽+水素化プラント +脱酸素化プラント	(1100+750+240=)		(900+600+240=)	
	MCH輸送船	2090		1740	
	母船	300		400	
	作業船	200			
	ソーラー筏の作業海域への運搬	175	60	175	60
ソーラー筏の組み立て	195	115	195	115	
初期資本費計	6560+0.03 × A	5765+0.03 × A	6010+0.03 × A	5215+0.03 × A	
運転 操業費	MCH水素輸送	1610			
	保守・点検・補修・部分更新	(6190+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5590+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5640+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5040+0.03 × A) × 0.03 × 30
	筏閉運転	(6190+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5590+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5640+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5040+0.03 × A) × 0.01 × 30
	30年間運転操業費	(6190+0.03 × A) × 1.2 + 1610+175+195	(5590+0.03 × A) × 1.2 + 1610	(5640+0.03 × A) × 1.2 + 1610+175+195	(5040+0.03 × A) × 1.2 + 1610
初期資本費+30年間運転操業費総計	(6190+0.03 × A) × 2.2 + 1980	(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1610+60+115	(5640+0.03 × A) × 2.2 + 1980	(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1610+60+115	
経済的成立性の条件(基本水素価格)	(6190+0.03 × A) × 2.2 + 1980 =16100 → A=7610円/kW	(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1785 =16100 → A=30600円/kW	(5640+0.03 × A) × 2.2 + 1980 =16100 → A=25900円/kW	(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1785 =16100 → A=48900円/kW	
経済的成立性の条件(参考:水素価格50%増)	(6190+0.03 × A) × 2.2 + 1980 =24150 → A=130000円/kW	(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1785 =24150 → A=153000円/kW	(5640+0.03 × A) × 2.2 + 1980 =24150 → A=148000円/kW	(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1785 =24150 → A=171000円/kW	

- ◆ 鋼製筏・HDPE製筏ごとに機器設置を分散(長方形筏)・集中(正方形筏)で評価。
- ◆ 水素価格は30円/Nm³(基本ケース)と45円/Nm³(補助金ケース)に設定。
- ◆ 成立するためのソーラーモジュール価格Aを算定。

48

成立性概略評価のまとめ

エネルギー売渡単価		基本ケース 水素:30円/Nm ³		参考ケース(50%増) 水素:45円/Nm ³	
ソーラー帆布(含集電システム)単価と 対現在価格比 (現在価格=20万円/kW)		ソーラー帆布 単価(円/kW)	対現在価格比	ソーラー帆布 単価(円/kW)	対現在価格比
機器帆布設置ユニット 分散型エネルギー集約 貯蔵方式	鋼製筏	7610	1/26	130000	1/1.5
	HDPE筏	30600	1/6.5	153000	1/1.3
FPSO母船方式 集中型エネルギー集約 貯蔵方式	鋼製筏	25900	1/7.7	148000	1/1.4
	HDPE筏	48900	1/4.1	171000	1/1.2

- ◆ 参考ケース(補助金政策)によれば成立性は高まるものの、市場エネルギー価格(基本ケース)を達成するにはさらに大幅なコストダウン努力が必要。
- ◆ 最大のコスト要因である筏は、さらに革新的な構造概念・材料の導入が不可欠。
- ◆ 電気分解装置や水素化・脱水素化装置もさらなる技術革新・量産化・大型化などによるコストダウン必要。
- ◆ ハードルは決して低くないが、技術開発によって成立性が射程内に入る可能性を確認。

➡ 太平洋の自然エネルギー大規模利用は夢物語ではない！

49

これまでの成果

工業所有権出願

この構想全体に関わる基本技術について以下の工業所有権を出願。

- ◆ 海洋移動型太陽光大規模発電システム：特許第6754029号
発明者：國生剛治
- ◆ 再生可能エネルギー搬送再生方法：特許第6496479号
発明者：内藤堅一・國生剛治・江本永二・金川 護・
世古隆志・中尾愛人・林 知幸

論文発表(査読付き)

- ◆ 日本太陽エネルギー学会論文：低緯度太平洋メガソーラー発電筏の概略成立性，太陽エネルギー，日本太陽エネルギー学会，Vol.42，No.6，61-67，2016.
- ◆ 日本太陽エネルギー学会論文：ソーラーセル帆走筏構想と太平洋低緯度帯の気象・海象条件，太陽エネルギー，日本太陽エネルギー学会，Vol.38，No.1，49-57，2012.
- ◆ 米国土木学会(ASCE)：Sailing solar cell raft project and weather and marine conditions in low-latitude Pacific Ocean, Journal of Energy Engineering, ASCE, 139(1), 2-7, 2013.

50

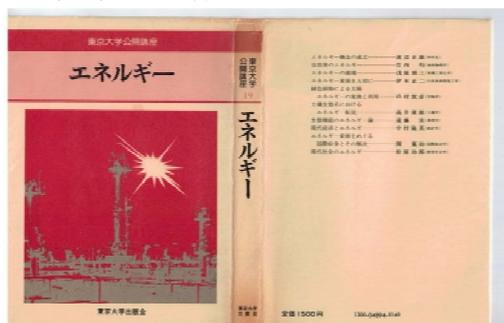
これまでの情報発信

- ① 広報
 - ◆ 日刊建設工業新聞「ソーラーセル発電船」(2009年6月)
 - ◆ 建設コンサルタンツ協会Consultantへの投稿(2010年4月)
 - ◆ 電力土木総説への寄稿(2012年3月)
 - ◆ ベース設計資料 No.152 土木編 2012 年前期版への寄稿(2012年3月)
 - ◆ 技術総合誌OHM Headline Reviewへの寄稿(2013年10月)
 - ◆ 土木学会誌論説への寄稿(2014年2月)
 - ◆ 日刊建設工業新聞「ソーラーセル筏で大規模発電」(2013年8月) など
- ② 講演
 - ◆ 中央大学学術講演会(長野県支部・松本市)(2012年7月)
 - ◆ 土木学会エネルギー土木委員会講演会(2013年3月)
 - ◆ 日本技術士会電気・電子部会講演会(2019年4月) など多数
- ③ 説明・展示
 - ◆ 資源エネルギー庁 斎藤 省エネ・新エネ部長(2009年10月)
 - ◆ 民主党 山崎 衆議院議員(2011年5月)
 - ◆ イノベーションジャパン展示(JST主催)(2012年8月)
 - ◆ PVジャパン展示(2012年11月)
 - ◆ 東京電力(株) 武部技術開発担当常務(2012年12月)
 - ◆ 電源開発(株) 前田会長・福田常務取締役(2013年11月)
 - ◆ 産業総合技術研究所 大谷再生エネルギーセンター・チーム長(2014年1月)
 - ◆ NEDO 上西 太陽エネルギー研究主幹(2014年6月)
 - ◆ 環境省 神谷 地球環境局温暖化対策調整官(2014年7月)
 - ◆ 自民党 額賀 衆議院議員(2014年7月)

51

こんなことを考え始めたキッカケは1980年代

東京大学公開講座:エネルギー (1974年刊)
第II章: 自然界のエネルギー 竹内 均



1. 地球にそそぐ太陽エネルギー
2. 固体地球エネルギーの両横綱
3. 固体地球エネルギーの源
4. 人間活動のエネルギー
5. 日本のエネルギー消費は世界平均の70倍
6. エネルギー資源は枯渇するか
7. 将来の問題—人口とエネルギー

「人類は資源枯渇に困る前に、
熱汚染のような環境問題で行き
詰まってしまう」

52

パリ協定とその影響

- 2015年COP21にて、2020年以降の温暖化対策の多国間協定(パリ協定)採択。
- 温室効果ガス最大排出国の①中国と②アメリカも含め2016年での批准国は110。
- 2019年11月、アメリカは本協定から離脱、現時点で批准国は187カ国。
- 日本はパリ協定を踏まえ、「地球温暖化対策計画」を2016年5月13日閣議決定。
- 2030年度に温室効果ガスを2013年度比26%排出削減の中期目標。
- 2050年までに温室効果ガスを80%排出削減の長期目標。

53

原子力災害とCO₂削減への我国の選択

- 3.11災害は「原子力推進によるCO₂削減」の方針に大きな影響。
- 原子力推進から現状維持または低減への大転換。
- 既存エネルギーへの回帰:天然ガス(LNG)・石炭+CO₂貯留など
新エネルギー:シェールガス・メタンハイドレートなど。
- 自然エネルギー(水力・地熱・太陽熱・太陽光・風力など)は
国内では限られ、基幹エネルギーにはなり得ない。
- CO₂排出量の長期削減方針を達成できる基幹エネルギーは見えていない。
- 科学・技術がそれを実現する役割を担っている。

54

太平洋での自然エネルギーが日本(人類)を救う!!!

利用エネルギー

太陽(太陽光・太陽熱)・風力・海洋温度差

関連分野

電気・機械・化学・船舶・海洋土木・気象・環境・生物・国際法

共通課題:

経済的なエネルギー大量生産技術開発

経済的なエネルギー大量輸送技術開発

経済的な浮体建造運転保守技術開発

気象海象環境評価技術

海洋利用拡大環境整備

55

実現に向けての歩み出し

- ・ 社会・政府・企業への情報発信・合意形成
- ・ 国連機関・国際社会への提案・環境整備
- ・ 必要なR&D項目の抽出・役割分担・協力関係の設定
- ・ 太平洋島嶼国への情報発信と協力関係構築

56

太平洋島嶼国との協力の重要性

【第8回太平洋・島サミット開催】太平洋の島々との連携強化を目指す：
Vol.1 再生可能エネルギーの推進（JICA 2018）

ミクロネシア、ポリネシア、メラネシアに位置する太平洋島嶼(とうしょ)国は、真っ青な海に点在する美しい島々といったイメージでとらえられています。一方で、「国土が狭く分散し、電気や水道などの社会サービスが行き渡らない」「国際市場から遠く、産業が育ちにくい」「自然災害や気候変動に脆弱」といった共通の課題を抱えています。



57

むすび

- ・ 自然エネルギーの大規模利用⇒疑いようのない人類の長期的課題。
- ・ 技術的には努力すれば手の届くところにある。
- ・ 地球温暖化加速の一方で全世界の発展途上国が先進国並みのエネルギー需要に達する時点は意外と早く訪れる。
⇒太平洋低緯度海域に溢れる太陽エネルギーは遅かれ早かれ国際社会が先を競って開発目標に。
- ・ 最もニーズが高く太平洋に面した島国
⇒国際社会と協力が率先し公海上に溢れる自然エネルギーを経済的に利用するため革新的技術開発・環境整備に取りかかる。
- ・ 総合工学・市民工学としての土木学会は学際性の高いこのプロジェクトに最適の先導役・まとめ役に位置づけられる。

ご清聴ありがとうございました。

58

Feasibility of Mega Solar Raft in Low-Latitude Pacific Ocean

低緯度太平洋メガソーラー発電筏の
概略成立性Takaji KOKUSHO
國生 剛治¹

Abstract

Development of a huge wind-sailing solar cell raft of 25 km² in area proposed previously which can generate electricity comparable to a 1000 MW nuclear power plant in the low-latitude Pacific Ocean is crudely evaluated here in terms of technical and economical feasibilities. Considering that the transportation of H₂-energy transformed from electricity is already possible in the form of MCH by oil tankers, principal technologies and associated cost estimates are evaluated, which reveals cost targets for solar modules for this energy system to be attainable as well as major technical challenges to realize better feasibility.

Key Words: Low-latitude Pacific Ocean, Sailing raft, Hydrogen-transportation, Economical feasibility

キーワード：低緯度太平洋，帆走筏，水素輸送，経済的成立性

1. 構想の概要

ここで提案する発電システムは前論文¹⁾で述べた通り、太平洋低緯度公海上でメガソーラー筏船団が移動しながら、太陽光発電により大規模安定的な自然エネルギー利用を図るものである。海洋でこそ容易に達成できるメガソーラー筏の面積化を追求して究極的には25km²とし、1日で得られる太陽エネルギーを8kWh/m²、ソーラーモジュールの電気変換効率を12%（家庭用太陽電池を多少下回る値）で試算すると1日当たりの発電量は24GWhであり、24時間連続運転の100万kW級の発電所に匹敵する。図1の構想図のように、南北太平洋の低緯度海域でソーラー筏や母船などからなる船団が、気象衛星などによる長期気象予報技術を活用して晴天域を低速帆走しつつ継続的に太陽光発電を行い、得られたエネルギーは水素に変換し大型タンカーで定期的に日本に輸送することを目指す。

本構想の概略成立性を見るため、中央大学工学研究所にて2012~2014年にわたりプロジェクト研究会を立ち上げ、多方面の専門家による調査活動や専門企業・機関からの技術情報収集などをおこなった。以下では、本プロジェクト研究で纏められた報告書²⁾に基づき、本構想の成立性に関わる検討結果について述べる。すなわち低緯度太平洋の日射・気象海象条件と熱帯低気圧のリスク検討に引き続き、このシステム実現のため不可欠な3つの主要技術；ソーラー筏船団、ソーラーモジュール・集電システム、エネルギー貯蔵・輸送についての概略検討の結果について述べる。さらに海洋利用での環境問題・法制度について触れ、最後に本構想の概略成立性の見通しについてまとめる。

2. 日射・気象海象条件と熱帯低気圧

前論文¹⁾で述べた通り、太平洋低緯度海域には、1日あたりの日射量が年平均6.0kWh/m²/day以上の海域は帯状に広く広がっており（図-2上段）、特に南米寄りの赤道（中央横線）から南緯15°には6.5~7.0kWh/m²/dayに達する広

*1 中央大学名誉教授（元同理工学部都市環境学科教授）

e-mail : koktak@ad.email.ne.jp

（原稿受付：2016年8月6日，受理日：2016年10月7日）

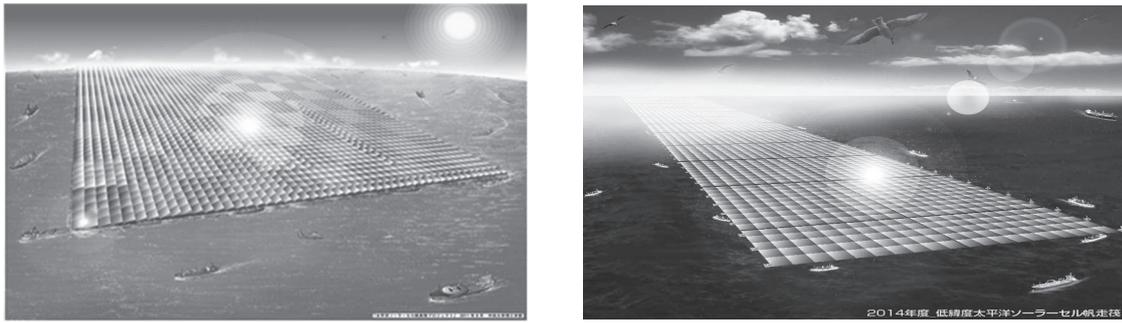


Fig.1 Concepts of mega PVC raft in low-latitude Pacific Ocean (left: square raft, right: slender raft)
 図1 太平洋メガソーラー筏の構想図 (左：正方形筏，右：細長形筏)

大な海域が存在する。これらの海域には雲形で描いたいくつかの排他的経済水域 (EEZ) が含まれるが、それを除いた国際的公海に限ってもオーストラリア大陸やサハラ砂漠を凌ぐ日射量の広大な海域が赤道の南北に存在する。これらの低緯度海域を筏船団が可動性を生かし季節変動を考慮しながら最適ルートを回遊することで、8.0 kWh/m²/day 以上の日射エネルギーを得ることは十分可能と思われる¹⁾。

また低緯度海域は高緯度海域より全般に風が弱く、年平均風速は3~7 m/s と比較的穏やかで、風向も安定している。波浪についても低緯度帯では平均波高が1m程度がそれ以下が期待できる¹⁾。ソーラーモジュール筏は海面静穏性への要求が緩やかで数メートルの波高にも耐える筏構造設計が可能と思われ、低緯度海域はこれに適合しうる波浪条件と考えられる。さらに赤道付近では東西方向に流れる海流が存在し、風と海流を利用し北半球と南半球を往來する省エネ低速帆走航海が可能になると考えられる¹⁾。

ただし熱帯低気圧は本構想の成立性に深刻な影響を与えかねない。図-2 下段は上段と全く同じ海域で熱帯低気圧発生点とその後の経路を重ね書きしているが、その危険性が極めて小さく全くゼロといってよい海域がある。これはペルー寒流により海水温が低いため、日射エネルギーの高い海域ともほぼ一致し、本構想には理想的な海域である。これ以外の海域も対象とすると、熱帯低気圧の発生頻度が問題となる。同図から分かるように、太平洋には①西部②東部③南部の三つの熱帯低気圧活動海域があり、それぞれ異なる特徴を有する²⁾。

まず①の太平洋西部低緯度海域における熱帯低気圧(台風)であるが、年間発生数は27個程度である。気象庁データ(1951~2011年の61年間)によれば、北緯0~10度の低緯度では、その北側の10~20度より通過数は少なく勢力は弱い。またここで発生する台風は移動中に発達するがここではまだ弱い。次に②の太平洋東部の年間発生数は16個程度であり、勢力が強いものは①に比べ少ない。多くはメキシコ沖太平洋で発生して西方へ進み太平洋東部で消滅するが、ごく一部は西へ進み日付変更線を越えて①へ侵入する。南部③については年間発生数10個程度で強いものは年間2個程度と少ない。南緯7~15度付近で発生して多くは西~南西方向へ進み、フィジー諸島より東側海域での活動数は少ない。

以上のような各海域の特徴を十分に理解すれば、熱帯低気圧を回避しつつ、筏船団の航行を可能にできると考えられる。そのためには現行の1週間程度から1~2ヶ月程度先の熱帯低気圧に特化した予報技術が必要になる。海洋学・気象学分野のデータベースは、海洋ブイデータの蓄積とシミュレーションモデルの進化によって、過去20年くらいの間に急速に進歩してきており、ニーズが高まれば今後の急速な発展が期待できる。

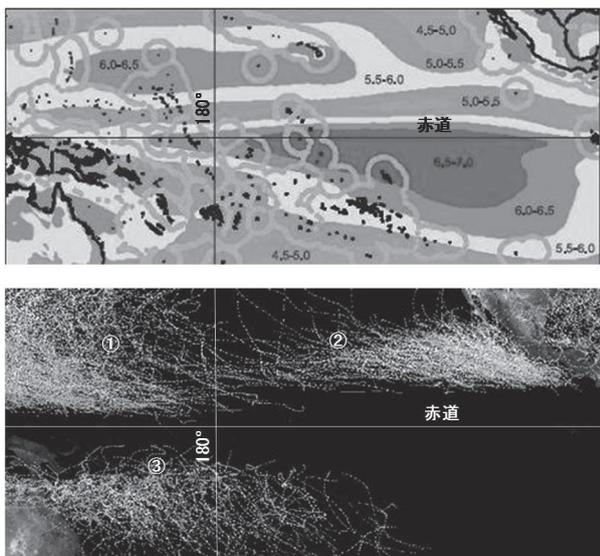


Fig. 2 Solar energy density (top) and Tropical storms (1985-2005) in low-latitude Pacific Ocean (bottom).

図2 低緯度太平洋の日射エネルギー密度 (上段)¹⁾と熱帯低気圧の経路(1985~2005年) (下段)²⁾

3. ソーラー筏船団

メガソーラー筏は後述の集電システムとの関係で図1のように正方形または細長形の全体形状を考えている。そ

れ以外に筏船団全体を統率制御する母船、メンテナンスなどを担う作業船さらに小型の作業・運搬船など種類・役割が多岐にわたる大小合わせて 10 隻以上の船舶から構成される。母船は筏船団全体の運転・制御・航行・エネルギー運搬制御・運転員の居住などを受け持つ。オプションとして FPSO 母船方式を採用した場合、エネルギー変換・一時貯蔵・受渡しなどの機能も具備する。FPSO (Floating Production, Storage and Off-loading system : 浮体式海洋石油ガス生産貯蔵積出設備) とは、海底資源開発で採用されている生産設備・貯蔵タンク・輸送船への受渡し設備を備えた大型プラント船で、世界で 150 隻以上が稼働中であり筏船団の母船を考える上で参考となる²⁾。また筏の現地組み立て作業、維持補修や筏船団内での生産エネルギー移送、物品輸送などに当たる 5000 積載トン程度のクレーン付き作業用船を考える。現在海洋資源開発で使われているオフショア支援船が参考となる。

物量が圧倒的に大きい 25km² のメガソーラー筏について、100m×100m の筏ユニットを基本単位としてこれを 2,500 個連結する構造概念を構築する。筏ユニットは運搬性を考えて 25m×25m のサブユニット 16 枚から構成し、その上に 4 枚のソーラーモジュール帆布を張る。筏の材質はまず鋼鉄を考えるが、海洋施設での実績がある高密度ポリエチレン (HDPE) についても考える。鋼鉄製筏の場合、サブユニットは水中フロートを持つ半潜水式骨組み構造とし、その上に立てた支柱でソーラー帆布を支える。鋼板厚は波による部材撓みの抑制や腐食代も考慮して決定する²⁾。HDPE 製筏の場合、サブユニットは水面に図-3 のように田形に組んだ撓み性のフロートを浮かべ、直接その上に立てた支柱でソーラー帆布を支持する。ちなみに最大の物量を占める筏の基本単位である筏サブユニットの重量

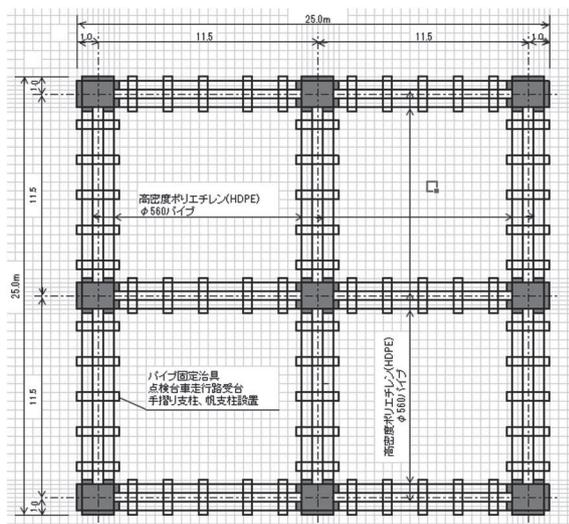


Fig. 3. Flexible subunit of solar raft made of HDPE
 図3 撓み性の HDPE 製ソーラー筏サブユニット²⁾

は鋼鉄製では 81 トン、HDPE 製では 17.6 トンと試算される²⁾。筏ユニット・サブユニットは回転可能なジョイントで連結し、筏構造に可撓性を持たせる。

メガソーラー筏の全体形状を 2km×12.5km の細長型とした場合、多数の筏ユニットを区画 (200m×1,000m) に分け、125 の区画ごとに機器帆柱設置ユニットを 1 個ずつ配置し、その上にエネルギー変換貯蔵設備や航海・標識用帆柱、筏点検用台車などを配置する分散的エネルギー集約・貯蔵システムとする。一方、母船への集中的エネルギー集約・貯蔵システムも採用できるとして、機器帆柱設置ユニットが不要な 5km×5km の正方形筏の案も考える²⁾。

4. ソーラーモジュール・集電システム

筏を覆うソーラーモジュールは使用資源量などの観点から薄膜・撓み性で、帆走のための帆布と一体化されたものとする。モジュール本体は 2 ミクロン程度の薄さであり、帆布基盤上に連続ロール状に作製する効率的製造法開発が必要である。特に CIS (CIGS) 系は現時点で撓薄膜撓み性太陽電池の効率は 10% 以下ではあるが一応実用化されており、長期耐久性や温度特性の観点からも問題は比較的少ないようである²⁾。ニーズがあれば帆布を基盤とした太陽電池の開発も可能と考えられる。CIGS→CZTS のように汎用資源への切り替えや製造技術の合理化などコストダウン努力もされており、将来的にはモジュールサイズでも 20% を超える効率が期待できる²⁾。

前論文¹⁾でも述べたように、晴天域を常に航行することにより、毎日の日射エネルギーピークが 1 kWh/m² で日中 12 時間 (6 時~18 時) 連続発電できる条件では、図-4 に概念的に示すように 1 日 8kWh/m² の発電ができる。つまり 1 日の日射量変化を正弦波の 1/2 波長でモデル化すると、6 時から 18 時までの発電量はほぼ 8kWh/m² となり、ピーク発電 1 kWh/m² が 8 時間続くのと同値となる²⁾。この場合の 1 日の総発電量は 24GWh、ピーク時の発電電力は 300 万 kW になる。メガソーラー筏の各筏ユニットは 300kW÷2500=1200kW、各サブユニットは 1200kW÷16=75kW の最大電力で 4 枚のソーラー帆布シートで覆う計画とする。ソーラー筏全体では、このサイズのシートが 4

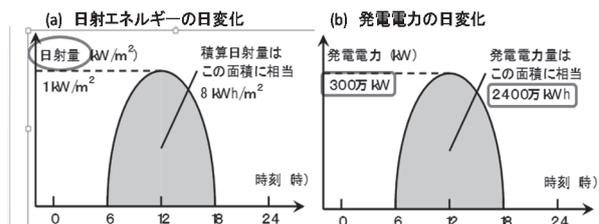


Fig. 4 Daily variations of solar energy (a) and electricity (b)
 図-4 (a)日射エネルギーと(b)発電電力の日変化²⁾

枚×16×2500=160,000 枚必要で、これら膨大な数のシートからエネルギー変換貯蔵設備まで電力を集める集電システムが必要である。実績のない洋上環境でのメガソーラー発電システムであり、発電電力を集電するための電気系統設備について未経験な部分が多い。将来の技術開発により効率や仕様が向上したものを使用することとなるだろうが、ここでは現状技術の範囲内で推定することとする。

すなわち、ソーラー帆布シートで発電した直流電気をそのまま直流で集電するシステムでは電圧降下が大きいため、前述のように近距離の機器帆柱設置ユニット上に交換・貯蔵設備を分散設置する案が考えられる。直流電圧を現時点で実績のある 1000V とすると、筏内での集電時ロスを減らすために直流回路の距離を 1000m 程度に抑える必要がある。これが 2km×12.5km の細長筏形状を考える主な理由である。これでも現状の汎用ケーブル仕様ではかなり厳しいが、150mm² のケーブルが特注できるとして検討する。25m×25m の筏サブユニットには前述のように最大 75kW の電力を発電するソーラーアレイが組み入れ、直流開閉器や保護装置を設備した接続箱を一基設備する。75kW を 1000V で送電すると電流値は 75A となる。ケーブル断面積 22 mm² 以上あれば 75A は許容電流であるが、許容電圧降下率 2%以下とするためのケーブルサイズは機器帆柱設置ユニットから各筏ユニットまでの距離に応じて 150～38 mm² の必要ケーブル断面積が決まる²⁾。

一方、インバータを介した交流変換集電システムとすれば距離の制約条件は大幅に緩和でき、FPSO 母船方式で集中的にエネルギー変換・貯蔵する案が考えられる。エネルギー貯蔵の前に再び直流へのコンバータが必要にはなるが、直流システムより有利な可能性もある。一般家庭の太陽電池モジュールではインバータを経由して単相交流に変換されて系統接続され、AC200V/ AC6,600V の変圧器で高圧系統へ連系されている。AC 6600V の高圧系統は負荷容量 2,000kW 毎に系統を分けるのが一般的であり、ここでもこの方式を考える。正方形筏の隅々から FPSO 母船に電気を送ることを考えた場合でも、最長距離は 10km を越えないと考えられ、電圧降下 10%以内 (600V) の限界に近い配線距離ではあるが実用可能と判断できる。

5. エネルギー貯蔵・輸送

メガソーラー筏で発電された 100 万 kW 級の原子力発電に匹敵する電力を一時貯蔵し日本に運ぶ手段の中から、既に実用化段階を迎えた MCH による水素貯蔵輸送を考える。すなわち発電した直流電気によりアルカリ水電気分解装置で水素を生産し、それをリアルタイムで有機ケミカルハイドライド法によりトルエンに吸収させメチルシクロヘキサン (MCH) に変換する (水素化反応)。MCH は常温

常圧で液体であり、水素を体積が 1/500 の MCH に変換し石油とほぼ同じ方法で貯蔵・輸送が可能である。日本では MCH から水素ガスを分離しトルエンに戻す (脱水素化反応)。その際研究会で得た専門技術者からの情報²⁾を参考に、水素化・脱水素化反応による水素回収率を 95%、タンカーによる輸送エネルギー10%を考慮している。

6. 海洋利用での環境問題・法制度

大規模なソーラー筏発電の環境面の検討課題は、海洋気象・海洋環境・衝突事故などの影響・海生生物への影響などが考えられる。海生生物の付着問題については、赤道付近は貧栄養であり高緯度海域よりも少ない可能性がある。

法的には、国際海洋法によれば公海は自由に使用してよいが、他国の利益にも妥当な考慮を払う必要がある²⁾。公海上を低速帆走するソーラー筏については、船舶かその他構造物かの位置づけが問題となる。また国内法上、安全・構造上の法規・管理運営面、税制など現状では多くの制約条件がある²⁾。公海を利用する上で影響を最小限に抑えることは重要であり、衛星情報により船団全体の正確な位置を特定して周囲の船舶に情報伝達し、さらに常に 2~3 週間先までの正確な航行計画を発表し、関係機関や周囲の船舶などに連絡することが必要となろう。ただし船舶航路は太平洋の大圏航路の狭い線上に集中しており低緯度航路は少ないため、低緯度海域を搬送するソーラー筏船団は漁船などを除き一般海運の障害にはなり難い²⁾。いずれにしても公海上のエネルギー資源を利用しようとする場合は、国連の国際海事機関 (IMO) のような場で協議しなければならないが、大規模な自然エネルギー利用という人類史上の転換点を目指すためには、従来の考え方に固執せず、海洋利用の新たな枠組みを考えていくべきである。

7. 成立性の概略評価

未だ詳細は不確定なこのエネルギーシステムではあるが、その稼働期間を 30 年とし現時点で可能な推定に基づきごく概略の成立性評価を試みた²⁾。大前提となるエネルギー (水素) の買取価格は、同じく自然エネルギーの MCH 輸送を想定した 2030 年代パタゴニア風力プロジェクト³⁾ の目標値を参考に 30 円/Nm³ と設定した。

メガソーラー筏全体での水素の出荷量は 5,170,000 m³/day であり、2 週間分を 1 隻のタンカーで運び、日本ではそのうちの 95%が回収されるとすると²⁾タンカー一隻当たり 30 円/m³×5,170,000 m³/day×14day×0.95→20.6 億円、年間では 20.6 億円×365day/14day≒538 億円/年、30 年間稼働した時の総買取価格は 538 億円/年×30 年=16100 億円となる。これに対し必要な初期資本費と 30 年間の運転操業費について、可能な限りの費用の推定と積み上げを行い、帆

布と一体化したソーラーモジュール関連(集電システムを含む)の単価がどの程度になれば成立するかを検討した。

(1) 筏・船舶関連

まず特に大きな割合を占める筏本体については、鋼鉄筏について鋼材単価 60 円/kg をベースに、加工・組み立て・防錆、ジョイントなどの費用を含めて 50% 上乘せし、9 万円/トンと仮定した場合、筏全重量 81 トン×16×2500=324 万トンに対して 2920 億円となる。また HDPE の筏については、製品単価に加工組み立て工賃など 50% 上乘せして 33 万円/トンと仮定すると、筏全重量 17.6 トン×16×2500=70.4 万トンに対して 2320 億円となる²⁾。

細長形筏形状で重要物を積載するための機器帆柱設置ユニットはバージ船なみの設計条件で必要最小限の推進動力も備えるとして、5000 トン積載のプラントバージの建設コストを参考に 1 個 4 億円とする。全体で 125 台必要として、コストは 4 億円/個×125 個=500 億円となる。一方、FPSO 母船方式をとる場合、機器帆柱設置ユニットは重要機器なしの帆柱設置ユニットを 5km×5km の筏の周縁に 200m 間隔に 100 台設置することにする。そのため小型で 1000 積載トンの動力付き台船を考え、その単価を 2 億円と想定すると、2 億円/個×100 個=200 億円となる。

母船については、筏船団全体の発電制御・航行・エネルギー受け渡し制御・200~300 人に上る運転員の業務・居住などに必要な機能とスペースを有する 30 万積載トン程度のプラント船の価格を専門企業の情報により 300 億円と想定する²⁾。オプションとして FPSO 母船方式を採用する場合については、エネルギー変換・貯蔵設備もすべて母船の機能に加わることになるが、これらの設備価格は別途考えているため、それほどコスト増加にならないと考え、400 億円と仮定する。

作業船については、メガソーラー筏の維持補修や筏船団内での生産エネルギー移送や物品輸送に当たるクレーン付き作業用船の機能を備えた 5000 積載トンの船で、現状のオフショア支援船を参考に 50 億円/隻×4 隻=200 億円となる。さらにこれら船舶のコストの中にその他の小型の作

業・連絡船 (10 隻程度) も含めて考える。

エネルギー輸送については図-5 のような低緯度太平洋から日本までの航海スケジュールを考えると、14.5 万トンの MCH を輸送する 20 万トン級オイルタンカーが 3 隻必要となりそのコストは現在の VLCC (20 万トン級) を参考に 60 億円/隻×3 隻=180 億円となる。

(2) エネルギー変換・貯蔵関連

各機器帆柱設置ユニットごとに 11 台のアルカリ水電解設備 (500Nm³/h/台) が必要で現状では 1 台 3 億円だが、将来的には研究開発^(例えば 4)により必要なセル数が半減することと量産効果により 1 台あたり 1 億円以下になるとの専門技術者の見解²⁾に基づき、0.8 億円/台×11 台×125=1100 億円とする。また各機器帆柱設置ユニットに分散設置する水素化プラント (反応速度 5,170 m³/h) については、文献⁵⁾を参考に将来的には価格を 6 億円にまでコストダウンが可能と考え、ソーラー筏全体では 6 億円×125=750 億円としている²⁾。

一方、前述の FPSO 母船への集中設置のケースでは物量をかなり軽減できるためそれを一律に 20% と仮定すると、アルカリ水電解設備については 1100 億円→900 億円に、水素化設備 (646,000 m³/h H₂) についても 750 億円→600 億円にコストダウンできると考える。

日本に設置する脱水素化プラントについては、1 日当たり MCH 処理量は 10,300 m³/day、水素発生量は 5,170,000 m³/day となり、上記文献⁵⁾に基づき時間当たり処理量を考慮すると 240 億円と算定され²⁾、上記の昼間に集中稼働する水素化設備価格に比べて安価となる。

(3) ソーラー帆布 (電気集約システムを含む)

帆布を基盤とした撓み性薄型ソーラーモジュールについて現状で参考となるコストデータがないため、ソーラー帆布の単価を未知数 A 円/kW で表わすことにする。この中には各ソーラーモジュールから帆布設置ユニットのエネルギー変換貯蔵設備までの電気集約系統 (ケーブル・コンバータなど) のコストも含むこととする。

メガソーラー筏全体では 300 万 kW であるから、ソーラー帆布全体価格は 0.03×A 億円となる。ソーラー帆布が筏面積 25 km² 全面を覆うとした場合、単位面積当たりの価格は 0.12×A 円/m² となる。

(4) ソーラー筏の操業海域への運搬と組み立て

鋼鉄製ソーラー筏の全重量は 3,240,000 トンであるから、ジョイントや帆布など関連部品を含めほぼ 10% 増しの 360 万トンとすると、30 万トン積載重量の貨物船 12 隻の往復航海により運搬できることになる。片道 8200km の距離の運搬コスト単価を現状価格を参考に 5000 円/トンとすると、総運搬コストは 175 億円となる。HDPE 製筏について

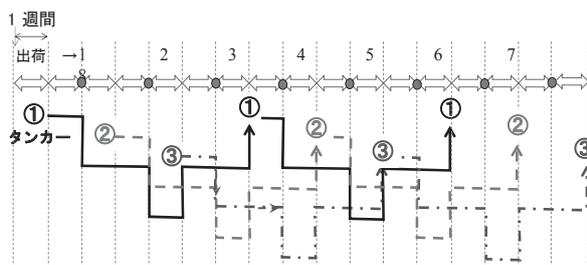


Fig.5 Shuttle schedule of 3 MCH tankers
図-5 3隻のMCHタンカーの概略航海スケジュール²⁾

Table 1 Crudely evaluated economical feasibility considering initial capital cost and operation cost during 30 years
表-1 初期資本費と30年間の運転操業費を考慮した経済的成立性の概略評価結果²⁾

項目	鋼製筏・分散方式(億円)	HDPE製筏・分散方式(億円)	鋼製筏・集中方式(億円)	HDPE製筏・集中方式(億円)	
水素ガス30年間総売り上げ	16100 (24150): 基本ケース30円/m ³ (参考ケース45円/m ³), 水素回収率95%				
初期資本費	ソーラー筏本体 (ジョイント・防錆など含む)	2920	2320	2920	2320
	機器帆柱設置ユニット	500		200	
	ソーラー帆布・電気系統	0.03 × A (3,000,000kW × A 円/kW: A 円/kW=ソーラー帆布単価)			
	電解槽+水素化プラント +脱水素化プラント	(1100+750+240=) 2090		(900+600+240=) 1740	
	MCH輸送船	180			
	母船	300		400	
	作業船	200			
	ソーラー筏の操業海域への運搬	175	60	175	60
ソーラー筏の組み立て	195	115	195	115	
初期資本費計	6560+0.03 × A	5765+0.03 × A	6010+0.03 × A	5215+0.03 × A	
運転操業費	MCH水素輸送	1610			
	保守・点検・補修・部分更新	(6190+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5590+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5640+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5040+0.03 × A) × 0.03 × 30
	筏船団運搬	(6190+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5590+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5640+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5040+0.03 × A) × 0.01 × 30
	30年間運転操業費	(6190+0.03 × A) × 1.2 + 1610+175+195	(5590+0.03 × A) × 1.2 +1610	(5640+0.03 × A) × 1.2 + 1610+175+195	(5040+0.03 × A) × 1.2 +1610
初期資本費+30年間運転操業費総計	(6190+0.03 × A) × 2.2 +1980	(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1610+60+115	(5640+0.03 × A) × 2.2 +1980	(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1610+60+115	
経済的成立性の条件(基本水素価格) 水素30円/m ³ , 輸送効率95%	(6190+0.03 × A) × 2.2 +1980 =16100 → A=7610円/kW	(5590+0.03 × A) × 2.2 +1785 =16100 → A=30600円/kW	(5640+0.03 × A) × 2.2 +1980 =16100 → A=25900円/kW	(5040+0.03 × A) × 2.2 +1785 =16100 → A=48900円/kW	
経済的成立性の条件(参考:水素価格50%増) 水素45円/m ³ , 輸送効率95%	(6190+0.03 × A) × 2.2 +1980 =24150 → A=130000円/kW	(5590+0.03 × A) × 2.2 +1785 =24150 → A=153000円/kW	(5640+0.03 × A) × 2.2 +1980 =24150 → A=148000円/kW	(5040+0.03 × A) × 2.2 +1785 =24150 → A=171000円/kW	

は全重量 704,000 トンに関連部品を含めほぼ 70%増しの 120 万トンとすると、30 万トン積載重量の貨物船 4 隻の往復航海により運搬できることになり、総運搬コストは 60 億円となる。これらは可能な限り国内で組立てた状態で貨物船により操業海域まで輸送し、作業船などにより全体を組み上げることを考える。

静穏海上での組み立て作業は多数の作業船が当たり、貨物船から降ろされた筏サブユニットを海上で筏ユニットと全筏集合体に組み上げる。サブユニット間やユニット間は簡易接続ジョイントにより海上でワンタッチ接続できる構造とする。組み立て費用については参考データがないため、筏本体コストの 7~5%と仮定すると、鋼製と HDPE 製についてそれぞれ 195 億円、115 億円となる。

(5) 運転操業費

エネルギー輸送コストとして、14.5 万 m³ の MCH を輸送する 20 万トン級オイルタンカーの輸送コストを関連企業からの情報²⁾を元に積荷エネルギー価格の 10% と仮定すると、30 年間の総積荷価格は 610 億円となる。

船団全体の保守・点検・補修コストとしては、特にソーラー帆布や電気回路の経年劣化や技術的腐朽化が問題で部分更新も含めた補修コストを考える必要がある。また、エネルギー変換・貯蔵・輸送関連のプラント諸設備についても経年劣化や技術的腐朽化に対し補修のみでなく部分更新のコストも考える必要がある。これらについては詳細

が不明であるが、30 年程度で初期資本全体が更新されることを根拠に、初期運搬・組立てを除く初期資本費合計の 3%を考えることとする。このように技術革新を反映した補修・更新を年々重ねれば、30 年経過後にはそのまま次の 30 年に引き継ぎ可能であると仮定している。また筏船団運搬・操業コストとしては、運転員の件費、運転エネルギー費、通信費、税金・保険など諸費用を含み、1 年当たり上記初期資本費合計の 1%を考えることとする。

上記経済的成立性の概略評価の集約結果をそれぞれ鋼鉄製筏と HDPE 製筏について、分散型エネルギー集約貯蔵方式(細長形筏)と集中型エネルギー集約貯蔵 FPSO 母船方式(正方形筏)に分けて表-1 に示す。変形の少ない設計とする鋼製ソーラー筏の価格 2920 億円に対し、大きなたわみを許容する HDPE 製ソーラー筏は 2320 億円と多少低く評価されるが、いずれも 30 年間の水素ガス売り上げ額に占める筏コストの割合がきわめて大きい。

分散方式の場合、経済的に成立するソーラー帆布・電気系統の kW 当たり単価は鋼製筏で A=7610 円/kW、HDPE 筏で A=30,600 円/kW となり、HDPE 筏の方が有利となる。集中方式の場合は、FPSO 母船への集中効果により鋼製筏 A=29300 円/kW、HDPE 筏 A=48900 円/kW となり、やはり HDPE 筏の方が有利となる。

近年ソーラーモジュールの価格は急速に低下しており、1000kW 以上のメガソーラー発電の集電システムまで含めたシステム価格は、好条件の場合 20 万円/kW 程度までになっている⁶⁾。本構想とは種類の異なるシリコンタイプ太

Table 2 Threshold cost for feasibility of solar module sail cloth (including electric system) and ratio to present cost
表-2 成立するためのソーラー帆布（電気系統含む）の限界単価と対現在価格比²⁾

エネルギー売渡単価	基本ケース 水素: 30円/Nm ³ 電気: 20円/kWh		参考ケース(50%増) 水素: 45円/Nm ³ 電気: 30円/kWh		
ソーラー帆布(含集電システム)単価と対現在価格比 (現在価格=20万円/kW)	ソーラー帆布単価(円/kW)	対現在価格比	ソーラー帆布単価(円/kW)	対現在価格比	
機器帆布設置ユニット 分散型エネルギー集約 貯蔵方式	鋼製筏	7610	1/26	130000	1/1.5
	HDPE筏	30600	1/6.5	153000	1/1.3
FPSO母船方式 集中型エネルギー集約 貯蔵方式	鋼製筏	25900	1/7.7	148000	1/1.4
	HDPE筏	48900	1/4.1	171000	1/1.2

陽電池ではあるが、ここではこれを現状で達成可能な基準価格と考えると、表-2に示すように鋼製筏・分散方式では現状の1/26までのコストダウンが必要であり事実上不可能に近い。これに対し鋼製あるいはHDPE製の筏で集中型エネルギー集約貯蔵方式でのソーラー帆布・電気系統の単価は1/7~1/4のコストダウンであり、ハードルは高いが努力目標の範囲に入りうると思われる。さらに上記の基本ケースに加え参考のため、経済性評価で大前提としたエネルギー買取価格をMCH輸送水素については30円/m³→45円/m³に50%アップさせた場合について算出したソーラー帆布・電気系統価格を表-2に追記している。これよりソーラー帆布・電気系統の単価は現状達成最小価格20万円/kWに対し1/1.5~1/1.2で経済的成立性が得られることになり、まずはこれを目標とすることが現実的である。

8. まとめ

以上より、メガソーラー筏を低緯度太平洋に浮かべて、日射エネルギーの高い公海上を帆走しながら太陽光発電を行うことにより、ある程度市場性のある価格で安定した自然エネルギーを化石燃料脱却の観点から大量に獲得するための概略の成立条件を推定することができた。

その結果は、補助金政策によれば成立性は高まるものの、市場エネルギー価格を達成するにはさらに大幅なコストダウン努力が必要であることを示唆している。特にコストに占める割合の大きい筏については、さらに革新的な材料・構造概念の導入が不可欠である。またこれも大きなコストを占めるアルカリ電気分解装置や水素化・脱水素化装置について、さらなる技術革新・量産化・大型化などによるコストダウンが必要となる。このようにハードルは決して低くはないが、水素によるエネルギー輸送を使った低緯度太平洋での大規模ソーラー筏発電システムの成立性がこれからの技術開発によって射程内に入る可能性が確認できた。

自然エネルギーの大規模利用は疑いのない人類の長期

課題であり、全地球規模で見た場合に太平洋低緯度海域に溢れる太陽エネルギーは遅かれ早かれ必ず国際社会が先を競って開発目標に掲げる日が訪れることを確信するものである。その日に備え、ニーズがあり太平洋に面した我が国は国際社会に率先して、成立性を高めるための革新的技術開発に取りかかることを提案したい。

謝辞

本論文の内容は著者が主査を務めた中央大学理工学研究所のプロジェクト研究会の2012~2014年度3ヶ年の成果をまとめた報告書²⁾に基づいている。研究会で貢献いただいた中大技術士会をはじめとする多数のメンバー、とくに報告書作成など具体的作業を分担いただいた金川 護氏、内藤堅一氏、江本永二氏、中尾愛人氏、林 知幸氏、藤森公彦氏、坂林和重氏、萩野太郎氏、世古隆志氏のご尽力とご協力に深謝の意を表す。また、研究会での講演を通じて情報のご提供とご指導を賜った海上技術安全研究所、産業技術総合研究所、日本海事機構、東京電力(株)、千代田化工建設(株)、サノヤ造船(株)、日本管材センター(株)など各機関・企業の専門家の方々にも感謝申し上げます。末筆ながら本研究を資金的に支えていただいた中央大学理工学研究所と中部電力(株)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 國生剛治, 江本永二, 加藤達也 (2012): ソーラーセル帆走筏構想と太平洋低緯度帯の気象・海象条件, 太陽エネルギー, 日本太陽エネルギー学会, Vol.38, No.1, 49-57.
- 2) 「低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システムの成立性 (2014年度報告書)」<http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/top/houkokusyo%20honsastu.pdf>
- 3) 渡部朝史, 村田謙二, 神谷祥二, 坂田 興, 石本祐樹 (2010): 国際的な水素エネルギーシステムの環境価値を含めた経済性について—日本とアルゼンチン間の経済性検討—, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 31, No.6, 24-31.
- 4) 経済産業省「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発事前評価報告書」産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会平成24年6月 www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h24/450.pdf
- 5) 加納達也(2008): 製油所の副生水素の発生実態と利活用技術: Best Value Vol.20, 価値総合研究所.
- 6) NEDO (2014): 再生可能エネルギー技術白書 (第2版) http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html

シリーズ「50 年後の国土への戦略」

我国のエネルギー自給は夢ではない —低緯度太平洋メガソーラー筏構想—



國生剛治
論説委員
中央大学
理工学部 教授

この数年、世界各国で太陽熱・太陽光発電の導入やソーラーセルの大量生産・効率アップが進められている。またサハラ砂漠にメガソーラー発電所を建設し、ヨーロッパまで長距離送電する計画が進行中である。振り返って我が国は国土が狭く、気候・日照率などの点からも砂漠国のように大規模なメガソーラー発電は無理で、自然エネルギーの導入量には限界があり基幹エネルギーとしては期待できないと諦めがちである。

我が国は砂漠こそないが、国土の前面は広く開けた太平洋が南半球まで広がっている。これを利用して巨大筏船団が帆走しながら桁違いの規模でメガソーラー発電する。すなわち障害物の無い海洋で、長さ数キロメートル四方の広大なソーラーセル筏により太陽光発電を行う提言を筆者らの研究グループが行っている¹⁾。

公海上を商業活動を目的として航行することは国際法上当然認められる権利であり、航行しながら発電することも基本的に自由である。単位面積当たり 1 日で得られる太陽エネルギーを 8 kWh/m^2 、ソーラーセルの電気変換効率を 12% (現時点の家庭用太陽電池の値) で試算すると、究極的に 25km^2 ($5\text{km} \times 5\text{km}$) のメガソーラーを目指した場合、その発電電力は 24 時間連続稼働する 100 万 kW 級の原子力発電所に匹敵する。

本構想の大きな特徴は、海洋でこそ可能なメガソーラー筏の規模拡大と晴天域を求めての可動性にあり、常に移動することにより海生物に大きな影響を与えずにすむ。以前より提案されてきた海洋での太陽熱利用構想に比べ、太陽光利用の本構想では筏の揺動に対する設計条件が大幅に緩和でき、大型化・合理化が図りやすい。ソーラーセル筏を構成する膨大な数の筏ユニット (例えば総面積 25km^2 の場合、平面サイズ $100\text{m} \times 100\text{m}$ のユニットが 2500 個) は、ワイヤー・圧力チューブ・電気ケーブル類で結ばれる。筏の移動には大量のエネルギーは使わず、風力や海流による低速移動となる。南北太平洋低緯度海域で、ソーラーセル筏や母船などからなる船団が、気象衛星などによる長期気象予報技術を活用して晴天域を低速帆走しつつ、太陽光発電をする。

発電は帆走筏の帆布と一体化した薄膜型撓み性ソーラーセルで行う。その候補として既に実用化している化合物系太陽電池があり、厚さ 2 ミクロンで大受光面積の電池が製作できる。変換効率は現時点で量産型モジュールでは 12%にとどまっているが 20~30 年先を見越せば、20%を超える効率が予想できる。

発電した大量の電力輸送は最大の課題であり、海水の電気分解により水素エネルギーとして運ぶか、あるいは蓄電池により電気エネルギーのまま輸送することを考える。NEDO のロードマッ

プによれば、20 年ほど先には例えば金属空気蓄電池の開発により現状の 4~7 倍の 0.7 kWh/kg までエネルギー密度を向上することが目標とされている。これが実現すれば、現在運航している最大級石油タンカー並のバッテリータンカーを建造して 25km^2 の発電筏の 10 日~2 週間程度の発電電力がその 6%の運送エネルギーで運べる計算となる。

膨大な数の筏ユニットは、撓み性のソーラーセルで覆われた帆・帆柱とそれを支えるフロートから構成され、波浪による揺動を減らすために半潜水式フロートが採用され、筏上には全面を覆うソーラーセル帆布が取り付けられる。軽量性や経済性を考え、新材料を活用した革新的な浮体構造を創出する必要がある。膨大な数の筏ユニットは母港から操業海域まではコンパクトに折り畳まれて運送され、到着後に海上広く展開できる構造となる。

余り知られていないことだが、太平洋低緯度帯での気象・海象条件は、実際この太陽光発電システムに最適の条件を有している。NASA のデータに基づいて作成した太平洋中央部の年平均日射量によれば $6.0 \text{ kWh/m}^2/\text{日}$ 以上の海域は帯状に広く広がっており、特に南米寄りの赤道から南緯 15° の海域ではサハラ砂漠をも凌ぐ $7.0 \text{ kWh/m}^2/\text{日}$ に達する地球上最強の日射エネルギーが降り注ぐ広大な海域が存在する。なおこれは年間平均であり、季節変動を考えた最大値はさらに大きく伸びるため、筏船団が可動性を生かして $8.0 \text{ kWh/m}^2/\text{日}$ 以上の日射エネルギーを実現することは十分可能である。また低緯度海域の平均風速は $3\sim 7 \text{ m/s}$ と穏やかで風向は安定しており、台風の影響も東経 160 度以東ではほぼ無視できることも分かっている。北緯 25 度以南は概ね波高 1.5m 以下、南半球についても同様な波高が予想され、赤道付近では年間を通して波高が 1m 程度かそれ以下の極めて静穏な海面が期待できる。以上より、低緯度帯に吹く安定した風と海流を利用した航路を有効に組み合わせることにより、筏船団が赤道を横切って晴天域を追いかける省エネ型低速帆走航海が可能になる。

このように、本エネルギーシステムは地球上に残された広大な未利用空間の海洋で、従来の自然エネルギー利用の制約を打ち破り本格利用を図るものである。その実現のためには、まずは技術的・経済的成立条件を明らかにし次の技術開発段階に進むことになるが、それと並行し国連のような場における合意形成や国際プロジェクト化も重要である。

産業革命以来続いてきた化石燃料利用から自然エネルギー利用へのパラダイムシフトは、地球の資源・環境面から間違いなく人類の最重要課題の一つであり、その意義は計り知れないほど大きい。今回の原子力災害を契機として、資源小国・海洋国である我が国がエネルギー自給を目指し、20~30 年先の初号機実現へ向けて世界に先駆け検討を始めることを提言したい。

- 1) 國生剛治, 江本永二, 加藤達也 (2012): ソーラーセル帆走筏構想と太平洋低緯度帯の気象・海象条件, 太陽エネルギー, 日本太陽エネルギー学会, Vol.38, No.1, 49-57.