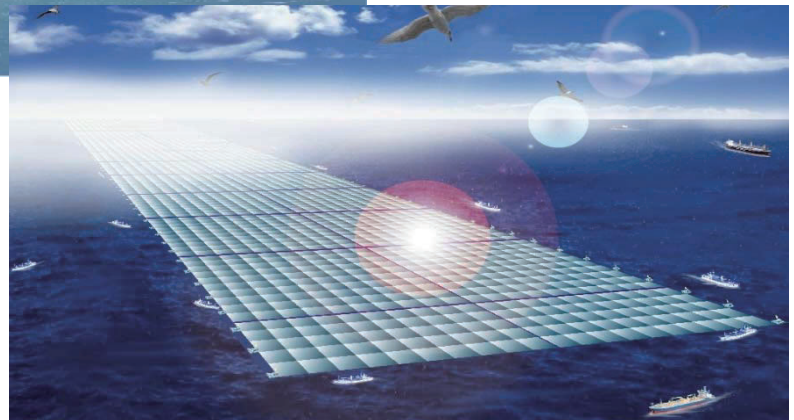
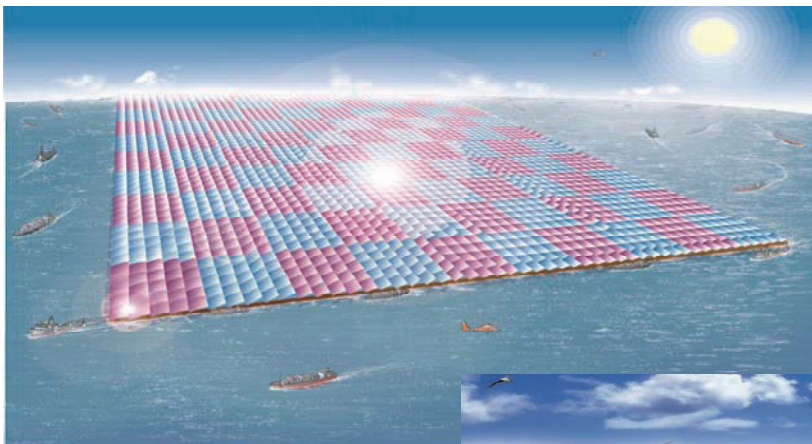


中央大学理工学研究所プロジェクト研究

「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

(2015年3月)



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

目次

1. まえがき	1
2. 低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システム構想の概要	2
3. 研究計画と研究項目	7
4. 研究会の構成メンバー	8
5. 研究会の活動経緯	9
6. 低緯度太平洋の気象・海象条件	13
6.1 日射条件	13
6.2 風速・風向条件	14
6.3 波高条件	15
6.4 海流条件	16
6.5 熱帯低気圧	18
6.6 気象・海象データの変動幅	21
6.7 まとめ	26
7. 筏船団と関連課題	28
7.1 筏ユニット・サブユニット	29
7.2 鋼製筏	30
7.3 HDPE 製筏	32
7.4 筏平面形状	35
7.5 機器帆柱設置ユニット	36
7.6 筏船団の航行・制御・運用	39
7.7 筏システムの保守・点検システム	40
8. 太陽電池と電気集約システム	42
8.1 太陽電池の種類	42
8.2 技術開発の見通し	44
8.3 ソーラーセル筏の集電システム	44
9. エネルギー輸送システム	54
9.1 エネルギー輸送手段の種類	54
9.2 蓄電池による電気輸送技術の検討	55
9.3 水素によるエネルギー輸送の検討	60
10. 法規・海洋環境など関連課題	66
10.1 環境	66
10.2 法制度	66

1 1.	技術的・経済的成立性の概略検討	68
11.1	成立性評価の基本条件	68
11.2	技術的成立性	68
11.3	経済的成立性	76
11.4	成立性の総合評価	89
1 2.	まとめと実現への課題	92
12.1	主要な結果のまとめ	92
12.2	実現への課題	98
	参考文献	100

付録集（添付 CD 収録）

付録-1：研究会議事録集（2012～2014 年度）

付録-2：国連海洋法条約（「海洋法に関する国際連合条約」外務省ホームページ）

付録-3：講演会配布資料集

付録-3-1 「海洋開発分野の洋上再生エネルギーについて」

付録-3-2 「低炭素社会構築に向けた蓄電池の役割」

付録-3-3 「太陽電池の現状と将来展望」

付録-3-4 「電気エネルギー・メガソーラー・蓄電池・電力輸送等」

付録-3-5 「船体構造について」

付録-3-6 「リチウムー空気電池の開発状況」

付録-3-7 「太陽光発電の動向と今後の見通し」

付録-3-8 「ソーラー発電等の LCA 評価について」

付録-3-9 「ソーラーセル超大型帆走筏の実現に向けて」

付録-3-10 「水素エネルギーの大規模貯蔵輸送・サプライチェーン構想」

付録-3-11 「海水の電気分解について」

付録-3-12 「HDPE 製ソーラーフロートについて」

「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）」

要旨

我が国の前面に開けた低緯度太平洋の晴天海域を面積 25km^2 の巨大ソーラー筏の船団が帆走しながら原子力発電所なみの発電をし、そのエネルギーを本土までピストン輸送する構想を 2009 年に発表した。この構想の 20~30 年先の実現性を検討するために、中央大学理工学研究所のプロジェクト研究「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」において 2012~2014 年度の 3 ヶ年にわたり研究活動を行ってきた。

気象・海象の概略調査により低緯度太平洋中央部には常に帆走航行することにより $8.0\text{kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の地球最大クラスの日射量が得られ、年間を通し風・波も穏やかで台風の脅威も極めて低く商用船舶の航行も少ない海域が広く広がっていることが分かった。

25km^2 のソーラー筏については、 $100\text{m}\times 100\text{m}$ の筏ユニット 2,500 枚、各筏ユニットは $25\text{m}\times 25\text{m}$ のサブユニット 16 枚を基本単位として、相互間をピンジョイントする柔構造概念を構築した。筏の材質としては鋼鉄を基本としつつ HDPE（高密度ポリエチレン）についても検討した。柔構造の HDPE 筏の方が経済的に有利となったが、それでも筏コストは極めて高く、成立性改善のために一層の革新的アイデアが求められる。筏集合体の全体形状としては発電エネルギーの集約・貯蔵を分散的に行う場合には細長い蛇型となるが、母船で集中的に行う場合には正方形が有利と考えられる。

筏船団から日本までのエネルギー輸送については、実用化段階に入った電解水素を MCH の形でタンカー輸送する方式が、エネルギー効率は悪いが、早期実現性は高い。ただし電気分解設備、水素化反応設備が大きなコストを占めており一層のコストダウンが必要である。将来型の高エネルギーバッテリーによる電気の直接輸送についても検討したところ、経済的に成立するためのバッテリー価格は $1500\sim 2200\text{円/kWh}$ となり、現在のバッテリー価格の $1/10\sim 1/20$ 程度の大幅なコストダウンが必要となる。

筏の全面を覆う薄型撓み性ソーラーモジュールとしてはシリコンタイプとは異なるが既に実績のある CIS タイプが有望で、帆布と一体化したモジュールを開発し 12%以上の効率を実現することは十分可能と考えられる。日本での水素の目標価格を 30円/m^3 とした場合、経済的に成立するには現状のシリコン太陽電池価格の $1/7\sim 1/4$ 程度の大幅なコストダウンが必要である。一方、水素目標価格を 50%アップするとソーラーモジュールの限界コストが現状価格の $1/1.5\sim 1/1.2$ 程度まで近づくため、とりあえずの目標水素価格を $30\sim 45\text{円/m}^3$ に設定して技術開発をスタートすることが現実的と考えられる。

このようにハードルは決して低くはないが、まずは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基本的に示された。今後は成立性の評価精度を高める共に、具体的な R&D に取りかかるために政府機関・マスコミ・関連国際機関などに働きかけていく必要がある。

1. まえがき

我が国はエネルギー資源を 95 パーセント以上海外に依存するエネルギー小国である。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い島国である。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、時間的変動があることから、基幹エネルギーにはなれないと考えられてきた。

我が国には砂漠こそないが、国土の前面は広く開けた太平洋が赤道はおろか南半球まで広がっている。これを利用してメガソーラー筏発電船団が帆走しながら、桁違いの規模で太陽光発電できる可能性があることに気付くべきである。障害物の無い海洋で、長さ数キロメートル四方の広大なメガソーラーセル筏により太陽光発電を行う。産み出されたエネルギーは輸送船により本土までピストン輸送する。このような構想が適切なコストで実現できれば、資源の海外依存度を軽減し CO₂ 排出量の削減に寄与できる。究極的には人類のエネルギー利用のパラダイムシフトを引き起こす可能性を持つこの壮大な試みに向かって、資源小国の我が国は世界に先駆けて一步を踏み出すべきと考える¹⁾。

本報告書はこのような目標に向かって必要なこの構想の基本的成立性を検討するために、中央大学理工学研究所において理工学研究所プロジェクト研究「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」として 2012～2014 年度の 3 カ年にかけて行った研究成果をまとめたものである。このうち 2014 年度については中部電力（株）からの調査委託研究を含んでいる。

今後は本研究で行った本構想の成立性についての評価結果に対応して、その評価精度を高める精緻な技術・経済性評価研究と具体的な R&D に取りかかるために、政府機関や国際機関などに働きかけていく必要がある。

本報告書をまとめるに当たっては、多数回の講演会での講演内容を大幅に参考にさせていただいた。またそれに加え、サノヤス造船（株）、日本管材センター（株）、野秋秀康氏（元・旭化成（株））からは数々の専門的知見や情報を頂いた。

また、中央大学理工学研究所からは 2012 年度～2014 年度にわたり、プロジェクト研究費を頂いた。さらに 2014 年度は中部電力株式会社より委託研究費を頂いた。

末筆ながら関係各位に深謝の意を表します。

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

主査：國生剛治

2. 低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システム構想の概要

(1) 構想イメージ

ここで提案するエネルギーシステムは国土の前面に広がる海洋に着目し、太平洋低緯度公海上で大規模な筏船団が移動しながら、従来とは桁違いの規模で安定的な太陽エネルギー利用を目的とするものである¹⁾。実用化した時点での正方形のソーラー筏船団のイメージ（筏サイズ 5km×5km）を図-2.1 に示している²⁾。またその後の検討を経て考えられた蛇型筏船団のイメージ（筏サイズ 2km×12.5km）を図-2.2 に示す。

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べき基本的権利であるから、航行しながら発電することも基本的に自由であると考えてよい。ただしその際、他の船舶の海洋利用に極力影響を与えないことが求められる。しかし従来全く存在しなかったこれだけ大規模な海洋利用を、他の船舶航行等に全く影響を与えずに新たに持ち込むことは本来不可能と思われる。したがって、この海洋利用が人類のエネルギー利用形態のパラダイムシフトにつながる意義を世界的な共通認識にまで高め、現行の海洋利用ルールの枠組みに対し新形態の大規模海洋利用として認知されるよう調整していくことが不可欠となる。

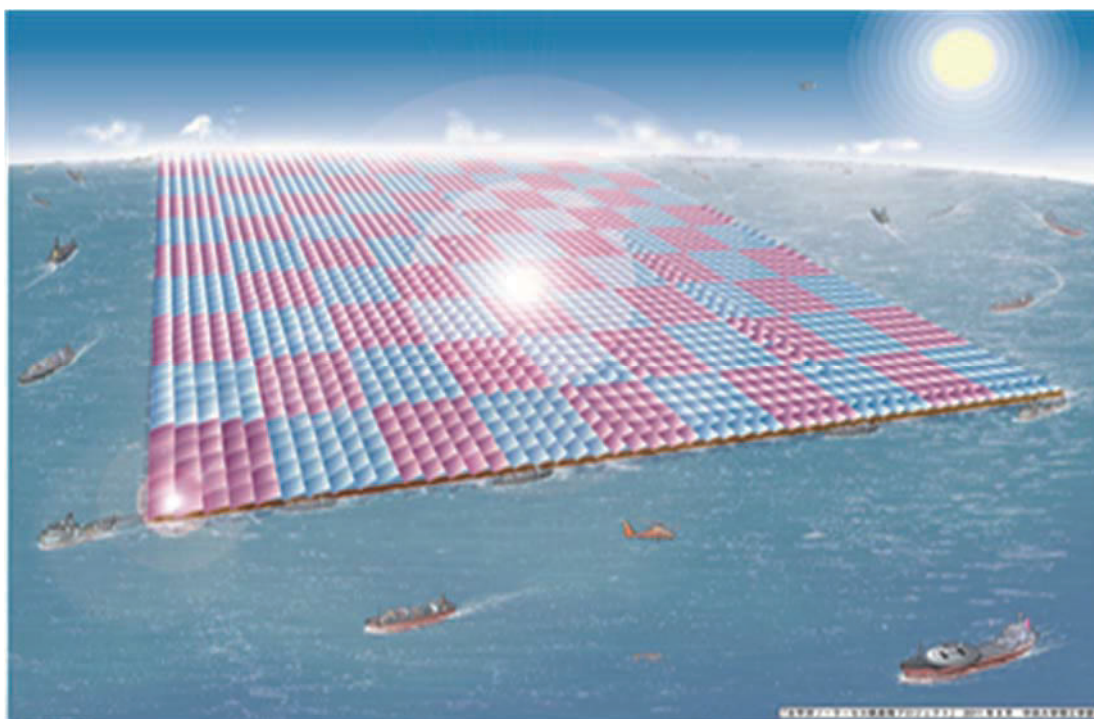


図-2.1 太平洋ソーラーセル帆走筏の構想図：正方形筏（中央大学都市環境学科作成）

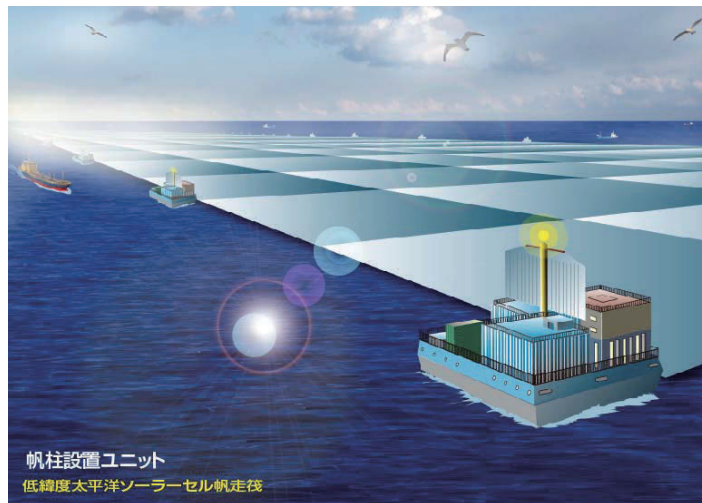
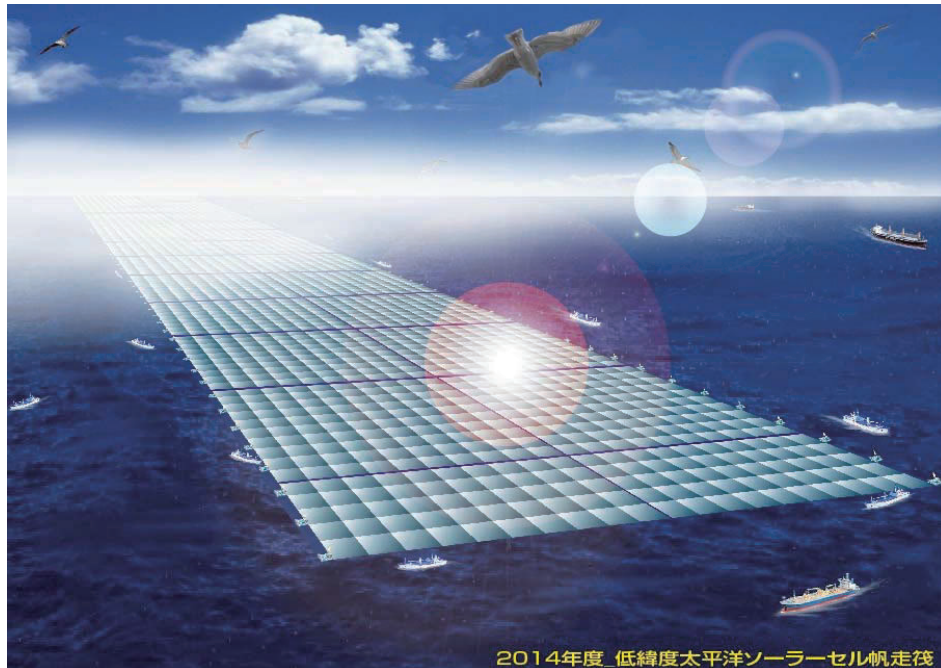


図-2.2 太平洋ソーラーセル帆走筏の構想図：蛇型筏（中央大学都市環境学科作成）
 （上段：全体的イメージ）、（下段：機器帆柱設置ユニットと筏のイメージ）

(2) 発電容量試算

海洋でこそ容易に達成できるソーラーセル筏の大面積化を追求して究極的には 25km^2 とし、1日で得られる太陽エネルギーを $8\text{kWh}/\text{m}^2$ 、ソーラーセルの電気変換効率を 12%（現時点での家庭用太陽電池を多少下回る値）で試算する。1日当たりの発電量は

$$8\text{kWh}/\text{m}^2 \times 0.12 \times 25,000,000\text{m}^2 = 24,000,000\text{kWh}$$

であり、これは 24 時間連続稼働する 100 万 kW 級の原子力発電所の 1 日の総発電量

$$1,000,000\text{kW} \times 24\text{h} = 24,000,000\text{kWh}$$

に匹敵する。太平洋の赤道を挟んだ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南北太平洋の晴天域を低速帆走しつつ、 $8\text{kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の強い太陽エネルギーにより太陽光発電をすることを目指す²⁾。

(3) 既往の構想との違い

このような海洋での太陽エネルギー利用の類似アイデアとしては、オイルショック直後の1970年代に横浜国大³⁾とマイアミ大⁴⁾により、洋上の定点にとどまった筏上に設置したミラーにより太陽熱を集めて発電し消費地に運ぶ計画が検討された。また、1980年代には当時の船舶技術研究所において、上記の海洋太陽熱発電計画を実現するための要素技術の検討がなされているが^{たとえば5)}、その後、実現へ向けての動きは見られていない。本構想はそれらとは一線を画し、ここ最近あるいは近未来のソーラーセル技術の急速な進展を見据え、赤道近傍の公海上で常に帆走しながら原子力に匹敵する太陽光による大出力発電を行う。ソーラーセルによる太陽光発電方式では、ミラー集光が必要な太陽熱発電方式とは異なり筏の静穏性への要求が大幅に緩和でき、筏の簡素化・大型化により、スケールメリットを生かすことが容易である。これにより従来的小型・分散・不安定という自然エネルギー利用の制約を打ち破り、大型基幹エネルギーとしてスケールメリットを生かすことが可能であり、調べた限りではこれまでに同様な提案は見当たらない。

(4) 帆走性

本構想の最大の特徴は発電筏船団の晴天域を求めての可動性にある。これは海洋ならでのメリットであり、また移動することにより直下の海中への太陽光の遮断は短時間に押さえられ海生物に大きな影響を与えずにすむ。船団の航海に大量のエネルギーを使うことはせず、低速ではあっても風力や海流による帆走を基本とする。ソーラーセル筏を構成する膨大な数の筏ユニットの集合体が、気象衛星情報などに基づいた長期気象予測により長期航海計画にしたがって低緯度海域を回遊する。長期航海計画は事前に予告され、周辺の航行予定船舶への影響を極力低減する。

(5) 筏と船団

各筏ユニットは、撓み性のソーラーセルで覆われた帆と帆柱それを支える軽量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可能な範囲で角度制御される構造とする。個々の筏ユニットはワイヤー・圧力チューブ・電気ケーブル類で結ばれて集合体を形成し、母船・作業船などと共に一体となって発電しながら晴天海域を移動していく。母港から操業海域までは膨大な数の筏ユニットはコンパクトに分解されて運搬・曳航され、発電海域に到着後速やかに組み立て、海上広く展開できる構造とする。また母船は作業船とともに、筏全体の発電・帆走制御、発電エネルギーの一時貯蔵とエネルギー輸送船への受渡しなど筏船団全体の運転機能を担う。

(6) 日射・気象海象条件

この構想の実現性を支配する重要な要素として太平洋低緯度帯での気象・海象条件がある。

まずは日照条件であるが、太平洋低緯度海域には、1日あたりの日射量が年平均 6.0 kWh/m²/day 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 6.5~7.0 kWh/m²/day に達する広大な海域が存在する。これに季節変動を考え晴天海域を移動することにより、得られる最大日射量は大幅に伸びることは確実である。これらの海域には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はるかに凌ぐ太陽エネルギーの広大な海域が赤道の南北にわたって存在する。これらの海域を筏船団が可動性を生かして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。

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、大陸周縁海域とは異なり風向も安定している。日本近海で問題となる台風は、日射条件の良い低緯度海域では極めて稀にしか発生せず、2~3 週間の長期予報により退避も可能と考えられる。波浪についても低緯度帯については波高が 1m 程度かそれ以下の静穏海域が期待できる。ソーラーセル筏は海面静穏性への要求が緩やかであり、数メートルの波高にも耐える設計が簡単な筏構造で可能と思われ、低緯度海域はこれに十分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、風と海流を利用することにより赤道を横切って北半球と南半球を行き来する省エネ型低速帆走航海が可能になると考えられる。

(7) 本構想実現に必要な主要技術課題

このシステムの実現のために種々の基本的課題の検討が必要だが、そのうち鍵を握る 3 つの主要技術課題として、エネルギー輸送、ソーラーセル、筏浮体が挙げられる。

① エネルギー輸送

発電したエネルギーの海上輸送は最大の課題であり、ここでは 2 つの方法を並行的に考える。第 1 に海水の電気分解を使って変換した水素エネルギーのタンカー輸送、第 2 に将来型の高エネルギー密度新型蓄電池を使ったバッテリータンカーによる電力輸送である。電気エネルギーのままの蓄電池輸送は電気利用での変換ロスを大幅に減らすことができるため有利であるが、一方、燃料電池による水素の直接利用が社会に普及すれば、水素エネルギー輸送の有利性が高まる。特に水素輸送についてはトルエン・MCH を用いた有機ケミカルハイドライド法が最近急速に実用化され、将来型蓄電池と肩を並べるエネルギー密度での輸送・貯蔵が可能となってきた。

② ソーラーセル

ソーラーセルについては帆布と一体化した薄膜型撓み性ソーラーセルの開発を大前提としており、これに適したのものとして化合物系などの太陽電池が考えられる。CIGS 化合物半導体タイプなど技術開発がかなり進んでおり、わずかな資源量で大受光面積の電池が製作でき、これから 20~30 年先を見越せば、モジュールでも 20%程度の効率が予想でき、この発電システムの成立性が大幅に改善することが期待される。

③ 筏構造

発電を担うソーラーセル筏については1ユニットの平面サイズを100m×100mとした場合、2500 ユニット程度必要である。これだけ大規模な筏船団が動力航行するには大量のエネルギーが必要であり、低速ではあっても風力や海流による移動が必須となる。コストダウンを考え、新材料を活用した軽量で革新的な浮体構造を創出する必要がある。主に天候の良好な海域を航行するとしても、海象・気象条件、経済性や航行性などに対応してこれまで検討されてこなかった先駆的アイデアが必要とされる。

(8) 本構想実現の意義

自然エネルギーを基幹エネルギーとして利用できる本システムの実用化が図れば、我が国の本格的低炭素化への足掛かりとなるばかりでなく、人類全体のエネルギー利用形態に抜本的变化を引き起こす先駆けとなる。すなわち化石燃料への依存が低下し、太陽エネルギーにより人類文明を支える持続可能な社会の実現に近付ける。実際、我が国のみならず世界の多く国が多数の筏船団を浮かべて基幹エネルギーを賄えるほど、地球を取り巻く日射エネルギーの豊富な低緯度海域は広大である。その低緯度海域において密度の薄い自然エネルギーを集中的に集められるこの構想は、従来の自然エネルギー利用の制約をうち破り、エネルギーの主役と成りうるものである。

3. 研究計画と研究項目

本研究会では、2012年度より3年計画でこの発電システム構想の基本概念の検討と概略成立性評価を行ってきた。太平洋の気象・海象データ収集から始まり、ソーラーセル技術の動向調査、エネルギー輸送技術の動向調査、筏ユニットの構造・材料、組み立て・運搬方法、メンテナンス方法、発電電力エネルギーの運搬方法などを検討してきた。さらに公海利用に関する制約条件・国際法、環境問題など関連課題の調査も行った。それらにより、今回の検討のおよぶ範囲で、このエネルギーシステムの技術的・経済的成立性について調査した。

以下に、各年度に取り組んだ検討課題を列記している。

- ◆ 2012年度：本エネルギーシステムの成立性検討基本条件の設定，気象・海象データの収集，薄膜撓み性ソーラーセル，筏浮体の基本概念検討
- ◆ 2013年度：気象・海象データの分析，高密度エネルギー蓄電池の将来動向調査，筏ユニット試設計
- ◆ 2014年度：水素輸送技術最新動向調査，電気分解技術最新動向調査，筏船団材料調査ならびに基本概念検討，本エネルギーシステムの制御・運用方法の検討，本システムの技術的成立性と経済的に成立するための目標コストの明示，実現までのロードマップの提案

第6章以下では、これらを項目別にまとめて得られた結果について述べる。

4. 研究会の構成メンバー

國生 剛治 (主査)	中央大学都市環境学科教授	
谷下 雅義	中央大学都市環境学科教授	
佐藤 尚次	中央大学都市環境学科教授	
大石 克嘉	中央大学応用化学科教授	
池田 富樹	中央大学研究開発機構教授	
江本 永二	江本技術士事務所	客員研究員
金川 護	金川技術士事務所	客員研究員
内藤 堅一	内藤技術士事務所	客員研究員
藤森 勲	藤森技術士事務所	客員研究員
藤森 公彦	藤森技術士事務所	客員研究員
中尾 愛人 (幹事)	千鈺エンジニアリング(株)	客員研究員
林 知幸	林技術士事務所	客員研究員
永井 仁	(株)クリエイティブ テクノソリューション	客員研究員
萩野 太郎	萩野技術士事務所	客員研究員
足立 元良	(株)ドラムエンジニアリング	客員研究員
坂林 和重	(株)日本技術サービス	客員研究員
笹尾 圭哉子	中日本建設コンサルタント(株)	客員研究員
世古 隆志	シニアネット水戸	客員研究員
加藤 達也	中央大学都市環境学科	研究補助員
古賀 洋平	中央大学都市環境学科	研究補助員
金子 陽輔	中央大学都市環境学科	研究補助員
岡田 侑子	中央大学都市環境学科	研究補助員
川合 昭彦	中央大学都市環境学科	研究補助員
田畑 喜彦	中部電力 (株)	オブザーバ
青木 弘喜	(元)ネクストエネルギー・ アンド・リソース (株)	オブザーバ
浅見 信一	日本管材センター (株)	オブザーバ
遊佐 明信	日本管材センター (株)	オブザーバ
藤崎 勝利	鹿島建設 (株)	オブザーバ

5. 研究会の活動経緯

このエネルギーシステムのコンセプトは2009年頃から専門紙・定期刊行誌などに発表されてきた¹⁾。2012年度からは中央大学理工学研究所のプロジェクト研究として位置づけ、研究会活動を始めた。そのため、海象・気象・海洋問題・筏構造・材料・太陽電池・劣化評価・エネルギー変換・貯蔵/輸送・システム制御などに至るまでの分野をカバーできる専門家からなる研究グループを中央大学理工学研究所の中に組織した。

(1) 研究会（講演会を含む）

2012年度～2014年度に開催した研究会（講演会を含む）を以下にリストアップし、各研究会の議事録は巻末の付録にまとめている。

2012年度

回	開催月日	主な議題	出席者
1	4月10日	これまでの経緯 今年度の研究計画 プロジェクト研究の進め方	14名
2	6月16日	メガソーラー視察報告 太平洋の台風の経路等 ソーラーセル・二次電池等	11名
3	6月30日	講演：「海洋開発分野の洋上再生エネルギーについて」：独法 海上技術安全研究所 田村兼吉氏	17名
4	8月11日	講演：「低炭素社会構築に向けた蓄電池の役割」：独法 産総研 大久保将史氏	16名
5	11月17日	講演：「太陽電池の現状と将来展望」：中大研究開発機構 池田富樹教授	14名
6	1月19日	桶川市の水上太陽光発電所の概要 講演：「電気エネルギー・メガソーラー・蓄電池・電力輸送等」：東電 技術開発研究所 中島達人氏 講演：「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	14名
7	2月2日	2012年度報告書について	11名

2013 年度

回	開催月日	主な議題	出席者
1	4月20日	講演：「リチウムー空気電池について」： 独法 産総研 北浦弘和氏 今年度の研究計画	12名
2	7月20日	視察報告（桶川市水上メガソーラー） 工業所有権について	12名
3	8月10日	講演：「太陽光発電の動向と今後の見通しについ て」：独法 産総研 櫻井啓一郎氏	12名
4	10月12日	講演：「ソーラー発電等のLCA評価について」： 独法 産総研 田原聖隆氏	11名
5	12月21日	水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術 中部電力委託調査	7名
6	3月 8日	講演：「海洋利用における課題等について」： 日本海事協会 赤星貞夫氏	12名

2014 年度

回	開催月日	主な議題	出席者
1	7月 7日	講演：「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について」： 千代田化工建設（株） 岡田佳巳氏	17名
2	8月25日	講演：「アルカリ水電解と海水電解による水素製 造について」： NYテック 野秋康秀氏（元：旭化成（株））	13名
3	9月29日	講演：「HDPE製ソーラーフロートについて」： 日本管材センター（株） 浅見信一氏	16名

(2) 研究会での講演講師

3ヶ年の研究会で以下の講師に講演を頂き、その内容は報告書に反映されている。講演配布資料については、本報告書の付録-3にまとめている。

- ◆ 2012年6月30日「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
- ◆ 2012年8月11日「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 大久保將史氏

- ◆ 2012年11月17日「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
- ◆ 2013年1月19日「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
- ◆ 2013年1月19日「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
- ◆ 2013年4月20日「リチウムー空気電池の開発状況」：
産業総合技術研究所 北浦弘和氏
- ◆ 2013年8月10日「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
- ◆ 2013年10月12日「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
- ◆ 2014年3月8日「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
- ◆ 2014年7月7日「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
- ◆ 2014年8月25日「海水の電気分解について」：
元・旭化成（株） 野秋康秀氏
- ◆ 2014年9月29日「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

(3) 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中央大学より出願した。

- ◆ 海洋移動型太陽光大規模発電システム： 特願 2011-537212（国内）・
PCT/JP2010/067908(国際)，発明者：國生剛治
- ◆ 特許出願 CU1301（保守点検システム）（2013年12月出願）発明者：國生剛治・
江本永二・金川 護・世古隆志・内藤堅一・中尾愛人・林 知幸
- ◆ 特許出願 CU1302（再生可能エネルギー搬送再生方法）（2013年12月出願）発明者：
國生剛治・江本永二・金川 護・世古隆志・内藤堅一・中尾愛人・林 知幸

(4) 論文発表（査読付き）

基本構想の紹介・低緯度太平洋の気象海象条件・技術課題など

- ◆ 日本太陽エネルギー学会論文⁶⁾
- ◆ 米国土木学会（ASCE）Journal of Energy Engineering 論文集⁷⁾

(5) 各方面への広報・講演・説明

① 広報

- ◆ 日刊建設工業新聞「ソーラーセル発電船」(2009年6月)⁸⁾
- ◆ 建設コンサルタンツ協会 Consultant への投稿(2010年4月)¹⁾
- ◆ 電力土木総説への寄稿(2012年3月)⁹⁾
- ◆ 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)¹⁰⁾
- ◆ 技術総合誌 OHM Headline Review への寄稿(2013年10月)¹¹⁾
- ◆ 土木学会誌論説への寄稿(2014年2月)¹²⁾
- ◆ 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)

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)
- ◆ 中大技術士会講演会(2014年1月)

③ 説明・展示

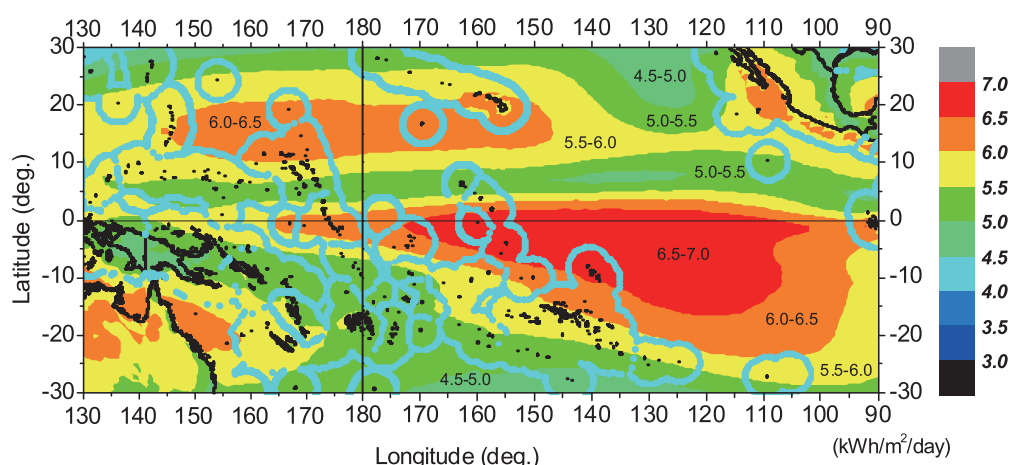
- ◆ 資源エネルギー庁 斎藤 省エネ・新エネ部長(2009年10月)
- ◆ 民主党 山崎 衆議院議員(2011年5月)
- ◆ イノベーションジャパン展示(JST 主催)(2012年8月)
- ◆ PV ジャパン展示(2012年11月)
- ◆ 東京電力(株) 武部技術開発担当常務(2012年12月)
- ◆ 電源開発(株) 前田会長・福田常務取締役(2013年11月)
- ◆ 産業総合技術研究所 大谷 再生エネルギーセンター・チーム長(2014年1月)
- ◆ NEDO 上西 太陽エネルギー研究主幹(2014年6月)
- ◆ 環境省 神谷 地球環境局温暖化対策調整官(2014年7月)
- ◆ 自民党 額賀 衆議院議員(2014年7月)

6. 低緯度太平洋の気象・海象条件

6.1 日射条件

新太陽エネルギーハンドブックの全地球日射エネルギー分布¹³⁾よれば、太平洋の赤道を挟む北緯・南緯 25 度以内の海域では最大年平均日射エネルギーは 5 kWh/m² 程度とされている。本研究では、NASA が 1983 年 7 月から 2005 年 6 月までの衛星情報を用いて算出した水平面全天日射量データを利用して分析を行った。NASA の原データ¹⁴⁾では、北緯 90 度～南緯 90 度、西経 0 度～東経 180 度までの 1 度メッシュの全球データが、連続で 1 ファイル (5 MB) に格納されている。この膨大な原データから我々が必要とする太平洋南北低緯度海域を抽出するためにはデータの並び替えなど膨大な作業が必要であり、計算プログラムを作成し自動抽出を行った。図-6.1 はこのようにして得られた太平洋中央部の北緯 30 度～南緯 30 度、東経 130 度～西経 90 度までの水平面全天の 1 日当たり年平均日射量を示している。ここに対象とした範囲は、細線で輪郭を描いた大陸や島の分布から明らかなように、西は日本列島の直ぐ南からオーストラリア大陸南部まで、東はハワイ諸島の遙か東のカリフォルニア半島からペルー沖太平洋を含む海域である。図中に示す日射量の数値より、6.0 kWh/m²/day 以上の海域は帯状に広く広がっており、文献 10) に示された日射量よりかなり大きいこと、特に南米寄りの赤道から南緯 15°の海域では 6.5～7.0 kWh/m²/day に達する広大な海域が存在することが分かる。

図-6.1 は 1 年間の平均値を示しているが、NASA の原データから取得可能な月別平均値の 12 カ月間での変動係数を示したのが図-6.2 である。北緯・南緯 10°以内での 10%以下から、北緯・南緯 30°付近での 30%程度までほぼ連続的に変化している。このような季節変動を考



NASAが1983年7月から2005年6月までの衛星情報を用いて算出した水平面全天日射量の年平均値（水色の太線で囲われた範囲は排他的経済水域（EEZ）²⁾

図-6.1 中・低緯度太平洋における年平均日射量分布

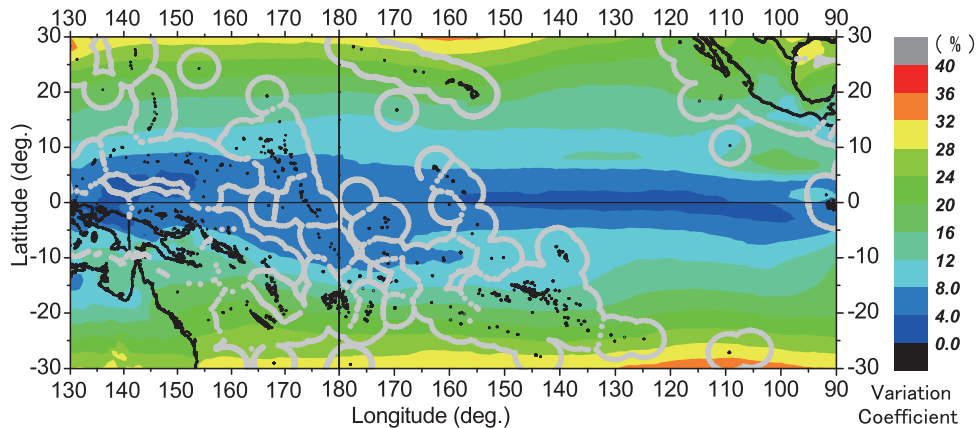


図-6.2 中～低緯度太平洋における年平均日射量分布の変動係数

え晴天海域を移動することにより、最大値は平均値より大幅に伸び $8 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ を上回ることは確実と思われる。

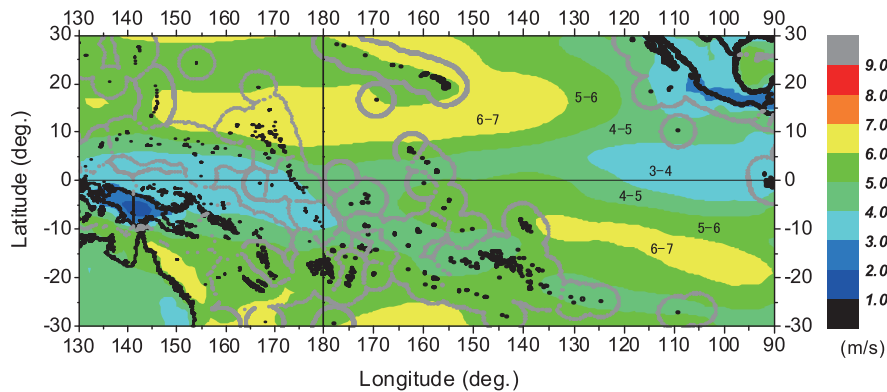
図-6.1～2 に示す多くの雲形の曲線の範囲は、排他的経済水域（EEZ）である。間断なく降り注ぐ太陽エネルギーは、収奪により失われる漁業・海底地下資源とは明らかに性質が異なり、EEZ の規制対象にすべきではない。しかし仮に EEZ で規制されることになったとしても、太平洋東部を中心に年平均 $6.0\text{-}7.0 \text{ kWh/m}^2/\text{日}$ のエネルギーが降り注ぐサハラ砂漠やオーストラリア砂漠を凌ぐ莫大な面積の公海が存在することが分かる。勿論、筏の移動速度や晴天域の移動速度を考慮した現場海域での実証試験は必要であるが、筏船団が可動性を生かして季節変動や天候を考慮しつつ $8.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 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。

6.2 風速・風向条件

図-6.3 はやはり NASA が衛星情報により算出した風の全球データ¹⁰⁾ から、太平洋低緯度帯だけを選び出して作成した海面上 10m での年平均風速である。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 $3\text{-}7 \text{ m/s}$ と比較的穏やかであることが分かる。

図-6.4 は気象庁資料による北太平洋の風向・風速を 1 月と 7 月について示している¹⁵⁾。北緯 $10^\circ\text{-}20^\circ$ の帯では年間を通じて北東風（貿易風）が吹いており、その強さは図から 7 m/s 程度であることがわかる。貿易風は年間を通してほぼ同じ風向であるため、良い風況条件はベクトル平均でも明瞭に現れる。この貿易風は大航海時代に帆船の航行に利用された風であり、低気圧性の風と比べればはるかに安定した風で、筏帆走に利用できる。

中緯度より北の海域は季節風帯であるため、ベクトル平均とスカラー平均の差が大きくなる。すなわち、ベクトル平均で見るとあまり強くなくても、季節（北半球では冬季）によっては、かなり強い風が吹く。このような傾向は北緯 30 度くらいから北の海域で明瞭になる。



(スカラー平均：単位は m/s)

図-6.3 NASA データより作成した太平洋低緯度海域での 1° メッシュの年平均風速

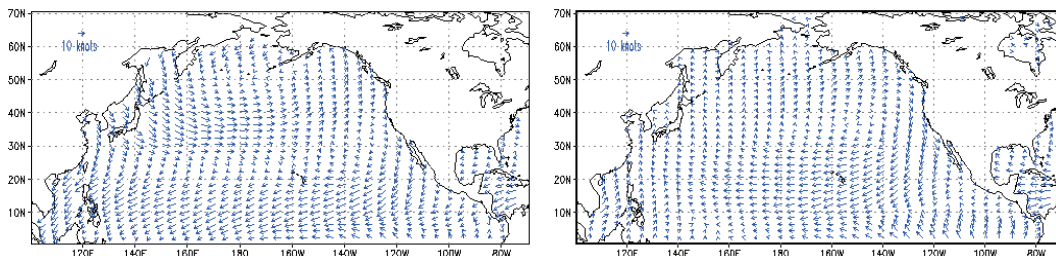


図-6.4 北半球太平洋での風向と風速 (ベクトル平均) (左：1月：右：7月)¹⁵⁾

北緯 30 度以南で注意を要するのは台風 (熱帯低気圧) である。ソーラー筏構想に大きな影響を与える熱帯低気圧については後ほど改めてとりあげる。

6.3 波高条件

図-6.5 には気象庁資料による北太平洋での 2 月と 9 月の波高 (有義波高) 分布を示している。アリューシャン近海を中心とする高緯度 (太平洋北部) 海域では波が高く低緯度ほど波高が低い傾向にあり、赤道付近では季節を問わず 1m 以下の海域が広く分布する。冬季には北太平洋の南北で波高差が大きい、これは温帯低気圧が日本の東方からアリューシャンにかけて頻繁に通過・発達・停滞するため、波高 2m の南限が北緯 20 度付近 (ハワイ近海) まで南下する。このような中でも北緯 20 度以南は概ね波高 1.5 m 以下、赤道付近では 1m 以下である。一方、夏季を代表する 9 月には波高 2m の南限は北緯 40 度付近まで北上し縮小するが、日本付近には波高 1.5 m 以上の海域が残る。これは、時々通過する台風が平均波高を高くしているためである。北緯 25 度以南は概ね波高 1.5m 以下、北緯 10 度以南は波高 1m 以下で、50cm 以下の海域もある。南半球については現時点でデータはないが、定性的には赤道をはさんで北半球と対称的な波高分布が予想され、低緯度帯については波高が 1m 程度かそれ以下の静穏海域が期待できる。

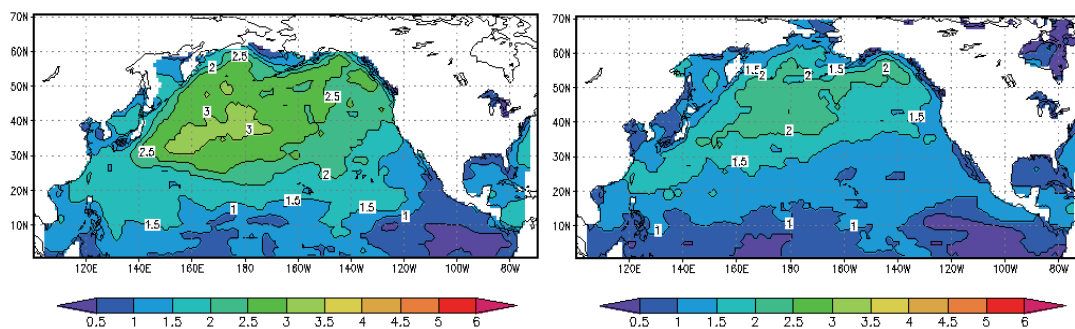


図-6.5 北太平洋の波高分布 左：2月，右：9月¹⁵⁾

波高は基本的には、その場所で吹く風の強さと向きによって支配されるが、遠方から伝わってくる長周期の波（うねり）が顕著になることもある。長周期波の極端な例として津波がある。津波でわかるように、海岸付近で浅海効果により波高が高くなるが、波長が長いので沖合では大した影響はない。ソーラー筏構想は主に深海域を対象としているから、大部分のうねりは問題にならないであろう。

ただし後述するように稀ではあるが、ハワイ近海程度の緯度帯では熱帯低気圧が近くを通過することがあり、この際には高波が襲来する。また、大洋では様々な波長（周期 10～20 数秒）の長周期波が行き来しているため、筏の固有周期を考慮した上で、これら長周期波の影響を検討する必要あろう（共振の問題）。さらに気象条件と海域によっては、異なる方向から伝播してくる波がぶつかり合って、高い波を生ずることもある（合成による高波）。これら長周期波の発生源は、強い季節風、顕著な恒常風（南極近海）や温帯低気圧本体、および熱帯低気圧である。

低緯度海域で考慮する必要があるのは、近くの熱帯低気圧または遠方から伝播してくるうねりである。遠方からの例としてアリューシャン近海や南極近海で発生したうねりが伝播してくることは毎年必ずあることと考えるべきで、さらに場合によってはこれらと熱帯低気圧からの波の相互作用は考慮する必要があるだろう。波浪の発生と伝播、減衰、および相互作用は気象庁の波浪スペクトルモデルでわかるように、数値シミュレーションによる解析方法が確立しており、本件当該海域についても適用可能である。

前述のように、ソーラーセル筏は海面静穏性への要求が比較的緩やかであり、数メートルの波高にも耐える設計が可能と思われ、低緯度海域はこれに十分適合しうる波浪条件と考えられる。

6.4 海流条件

図-6.6 には南北太平洋での海流の流況を示している¹⁶⁾。北太平洋について見ると、大きく見て時計回りの大規模に循環する流れが目立つ。低緯度では西へ流れる「北赤道海流」があり、これが北向きへ転じて「黒潮」となり日本の南岸を東へ流れる。「黒潮」は日本か

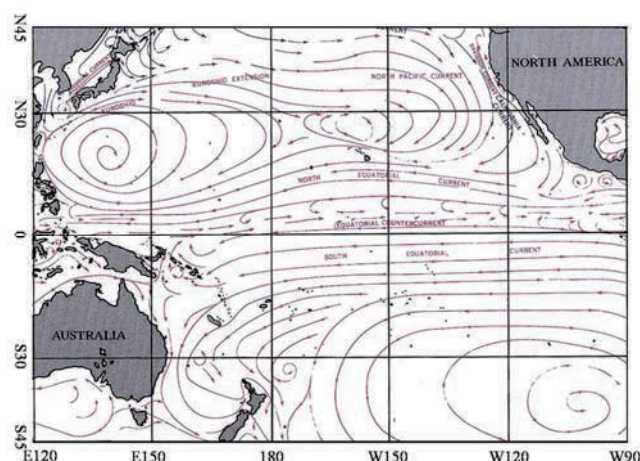


図-6.6 太平洋中央部の海流¹³⁾

ら離れた後「黒潮続流」として東へ流れ、さらに「北太平洋海流」となって米国西岸付近へ達する。その後、この流れは南下して再び「北赤道海流」となって西へ向かう。さらに詳細に見ると、日本の南方とハワイ諸島北方に「渦」循環がある。前者の渦は黒潮続流がハワイ諸島の手前で分流・南下することによるものである。後者の渦は北太平洋海流から北赤道海流へ変化する内側海域であり、日本付近からの漂流物が溜まる海域として知られている。

赤道を挟んで北側低緯度には「北赤道海流」が、また南側低緯度には「南赤道海流」が対称的に存在し、両海流ともに西へ向かう。これら両海流の間の赤道直下～北緯5度付近にかけて「赤道反流」があり、これは東へ向かう流れである。これらの海流を利用した航路を有効に組み合わせることにより、赤道を横切って北半球と南半球を行き来する省エネ型低速帆走航海が可能になると考えられる。

大航海時代には貿易風などの風とともに、海流も帆船の航行に利用された。中緯度より北の海域では、季節風により風向が変化するが、海流の場合はそれほど大きな季節変動はない。概ね安定している。

日本近海を流れる黒潮は、メキシコ湾流と並んで世界最強の海流である。「西岸強化」の作用によって、日本近海では特に流れが速くその調査データも多い。しかし、太平洋全域でみると、流向・流速について十分なデータを得るに至っていない。20世紀100年間を振り返ってみると、波高などの海洋データは商船の観測に依存していた部分もある。商船の航路は経済性から最短ルートをとるため、航空路ほどではないが、一定の幅に集中する。具体的には、日本からの北米航路、ハワイ航路、およびオーストラリア航路である。北米～ハワイ間の航路は、もちろん多い。しかし、これら航路以外の商船航行は極めて少なく、海洋データは希薄である。本プロジェクトでは、更に海流データを収集する必要がある。

しかし現時点で得られる情報のみでも、低緯度帯に吹く穏やかな定常風と後述する循環海流も利用して、筏船団が最小限の動力によって低速ではあるが省エネ航海することが可能と考えられる。

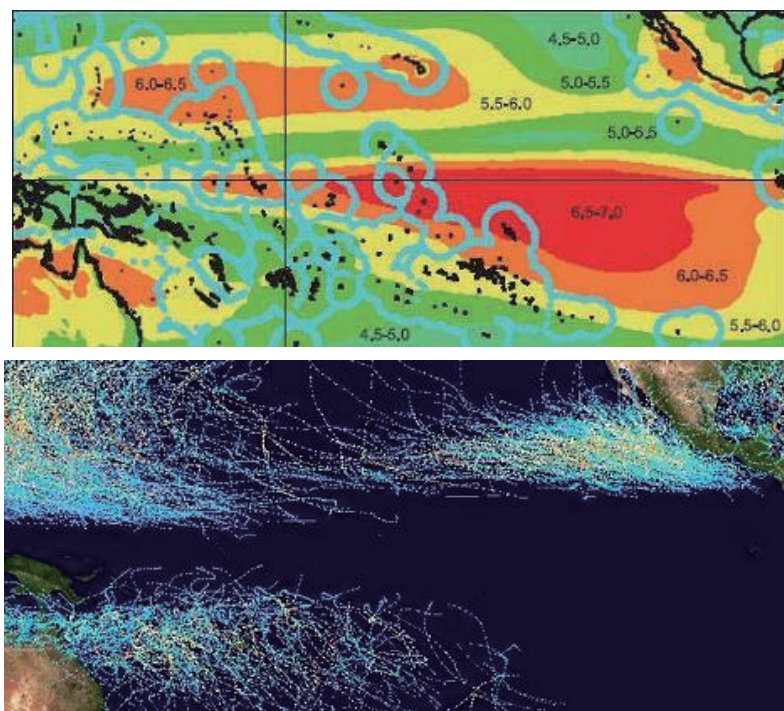
6.5 熱帯低気圧

台風などの熱帯低気圧はソーラーセル筏の成立性に深刻な影響を与えかねないため、最優先の調査項目と考えられる。

図-6.7の上段は図-6.1と全く同じ中・低緯度太平洋における年平均日射量分布を示し、同図の下段は全く同じ海域で熱帯低気圧発生位置からの経路を重ね書きしている。日射エネルギーの高いソーラーセル発電に有望な南太平洋海域は、熱帯低気圧の危険性が極めて小さく全くゼロといってよい海域と重なっていることが一見して分かる。ソーラーセル筏発電には理想的な海域であるが、太平洋の中では日本から遠い位置にある。これに準ずる好条件を持つ海域を特定するために、熱帯低気圧についてさらに詳しく調べる。

図-6.8に示すように太平洋には①～③の三つの熱帯低気圧活動海域があり、それぞれ異なる様相である。我国に身近な台風は①のエリアである。各特徴を理解すれば、熱帯低気圧を回避しつつ、発電に効率的な運用が可能であると考えられる。

なお、上述「南太平洋海域は、熱帯低気圧の危険性が極めて小さく全くゼロといってよい海域」が存在する理由は、南米大陸の西岸には南から北へ向かう寒流（ペルー海流）が存在し海水温が低いためである。



上下段図ともに、南北方向は北緯30度から南緯30度まで、東西方向は東経130度から西経90度まで。日射量はNASA資料で単位はkWh/m²/day、熱帯低気圧は1985～2005年に発生したものでWikipediaからの引用。熱帯低気圧は赤道から南北5度程度の範囲内で発生ゼロ。上段図中に示す水色の太線で囲われた範囲は、排他的経済水域EEZ。

図-6.7 日射量分布図（上段）と同海域での熱帯低気圧の経路（下段）

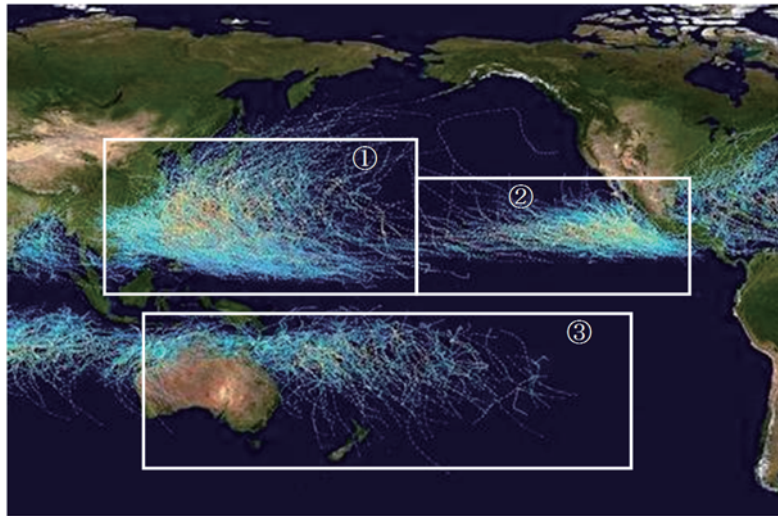


図-6.8 1985～2005年に発生した熱帯低気圧の経路 (Wikipedia¹⁷⁾)

また赤道付近（南北両方向，緯度10度くらいまで）では熱帯低気圧が発生しないことが図-6.7または図-6.8から理解されるが，これには次のような物理的理由がある。すなわち，熱帯低気圧の発生には海水面の温度条件の他に，渦を作り出すコリオリ力（地球自転に伴う「みかけの力」）が必要であるが，コリオリ力は緯度（ ϕ ）の正弦（ $\sin \phi$ ）に比例し，赤道ではコリオリ力がゼロであるため，赤道付近では台風は発生しない。このように緯度10度未満の赤道付近では台風は発生しないが，その北側または南側で発生した熱帯低気圧の進路は β 効果により赤道から離れる方向（北または南）なので，熱帯低気圧が赤道を横切るような進路をとることはない。

以下に，①～③での各熱帯低気圧発生海域について考察する。

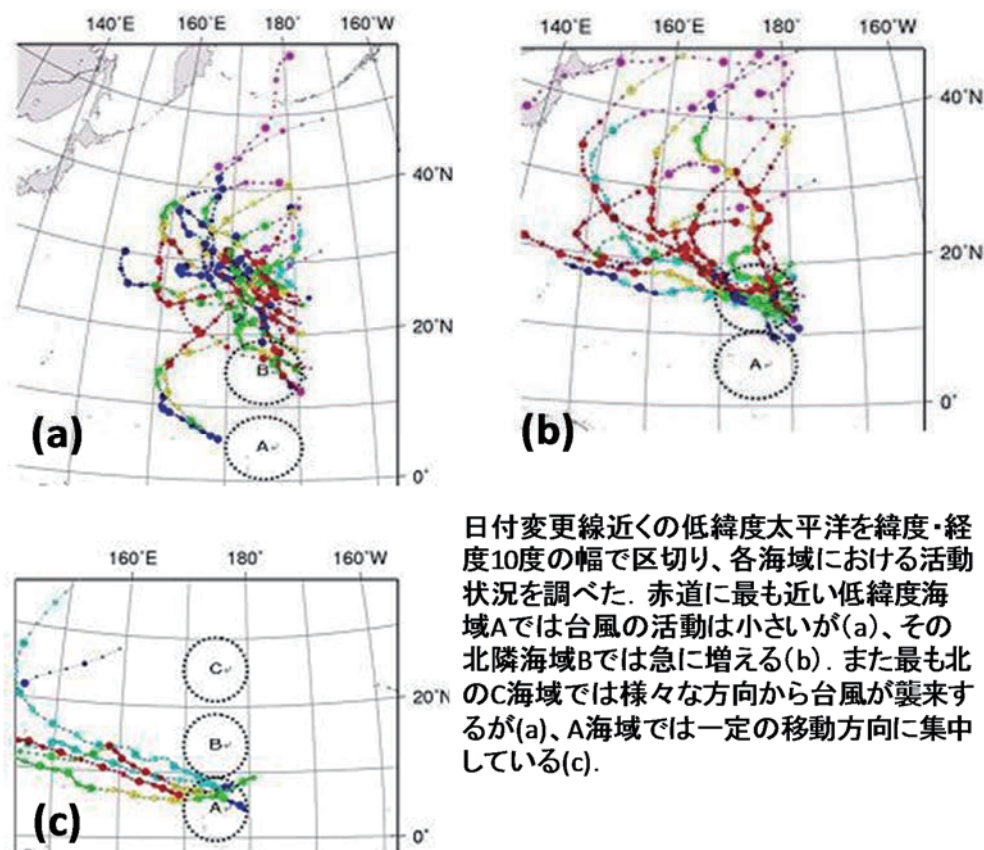
① 太平洋北西部（台風）

太平洋北西部の低緯度海域における熱帯低気圧（台風）が，本プロジェクトにどのようなリスクをもたらすかを分析した。

日付変更線の西側に沿う南北方向の海域を緯度・経度10度の区画として分割し，各分割海域で発生または通過する台風の個数と強さを調べた結果を図-6.9に示す。

気象庁データ（1951～2011年の61年間）によれば，一般に北緯0～10度の低緯度では，その北側10～20度より通過数は少なく，弱い台風であることが確かめられた。例えば北緯0～10度・東経170～180度の海域（=A海域）では，この61年間に960hPa未満の台風は通過していないこと，960～980hPa（並の強さ）の台風は3～4回通過していることがわかった。この頻度は10～20年間に1回程度と言える。

A海域で発生する台風は西方へ進むためその後は発達するが，A海域にあるときはまだ弱い。また，並の強さ（960～980hPa）でA海域に入ってくる台風は，その東側にあたる下記②の北東太平洋海域から日付変更線を越えて来たものである。その確率は10数年に1回程度であることは上に述べた。

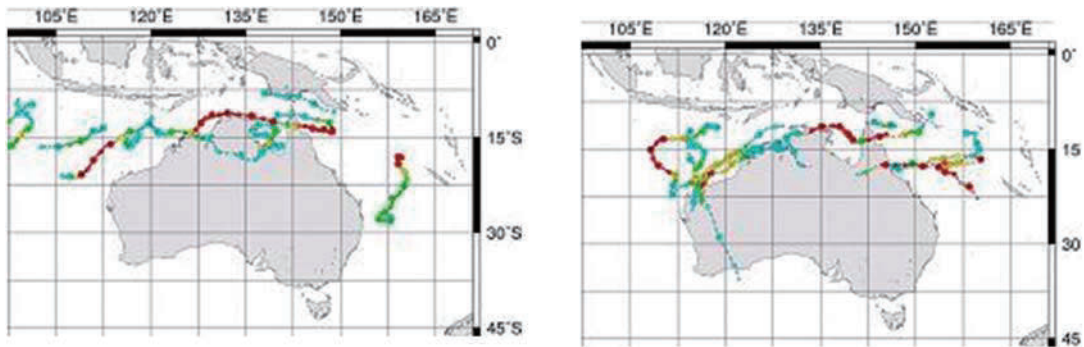


日付変更線近くの低緯度太平洋を緯度・経度10度の幅で区切り、各海域における活動状況を調べた。赤道に最も近い低緯度海域Aでは台風の活動は小さいが(a)、その北隣海域Bでは急に増える(b)。また最も北のC海域では様々な方向から台風が襲来するが(a)、A海域では一定の移動方向に集中している(c)。

図-6.9 海域別・台風の活動状況（国立情報学研究所「デジタル台風」¹⁸⁾）

このような並みの強さ台風でもソーラーセル筏に致命的な被害をもたらすため、絶対に避けなければならない。台風の進路予想は、現行の天気予報では1週間程度が限界だが、本プロジェクトでは更に長い1～2ヶ月程度先の予報が必要になると想像される。これに沿う天気予報は存在しないが、台風の特化すれば、その発生ポテンシャルを推定することは可能と考えられる。すなわち熱帯低気圧は、その物理的性質として水温25度以上などの高温海域でしか発生または発達しないことがわかっているの、このような高水温の海域を把握または予想することにより、1～3ヶ月程度先を見通した筏のオペレーションが可能と考えられる。

このベースとなる海洋学およびこれと気象学が結合した分野は、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た。かつ、そのリーダー的な役割を果たしてきたのが日本の研究機関（海洋研究開発機構：JAMSTEC等）である。本プロジェクトにとっては、この分野の研究動向を把握するとともに、独自の予報システムを構築することが可能であると考えられる。



左図は2004年、右図は2005年

図-6.10 サイクロン経路の実例（2004年、2005年）（気象庁資料デジタル台風¹⁸⁾）

② 太平洋北東部（サイクロン）

台風（上述①）の年間発生数が27個程度であるのに対して、②太平洋北東部の年間発生数は16個程度である。また「カテゴリ3」（1分間最大風速が50～58 m/s）以上の勢力数は、①の9個程度に比べて②は4個程度と少ない。多くはメキシコ沖の太平洋で発生して西方へ進み、太平洋東部海域内で消滅するが、ごく一部は更に西へ進み、日付変更線を越えて①の海域へ侵入する。このうち「並」強さのサイクロンが②から①の海域へ進むことが、10～20年間に1回程度あることは上述の通りである。

③ 南太平洋（サイクロン）

この海域では、図-6.10に示すようにインドネシア南方～ニューギニア南方～フィジー諸島付近の南緯7～15度付近で発生して、西～南西方向へ進みオーストラリア大陸に接近または上陸するものがある。年間発生数は10個程度と少ない。「カテゴリ3」（風速50～58 m/s）以上になるのは年間で2個程度である。

半数以上はオーストラリアの北～北西海域で活動しており、本プロジェクトで問題になるフィジー諸島より東側海域での活動数は少ない。すなわち、図-6.10の経路例に示すようにフィジー諸島付近が発生海域となって西へ進むものが多く、オーストラリアとの間が活動海域であるため、同諸島の東側海域ではほとんど問題ない。

6.6 気象・海象データの変動幅

上記では主に気象・海象データの平均値を扱い、それらの変動幅については述べてこなかった。変動幅を知るには衛星データからでは難しく、観測用海洋係留ブイの時系列データを調べなくてはならない。

米国ブイセンター（NDBC：National Data Buoy Center¹⁹⁾）によれば、太平洋に図-6.11に示すような多数のブイが気象観測や津波モニタリングのために設置されている。ここでは

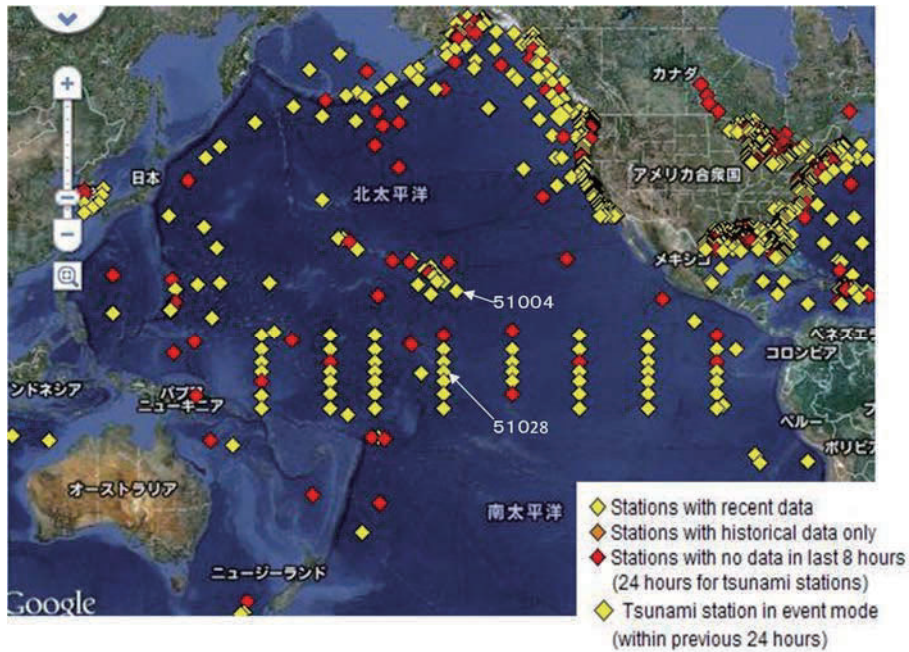
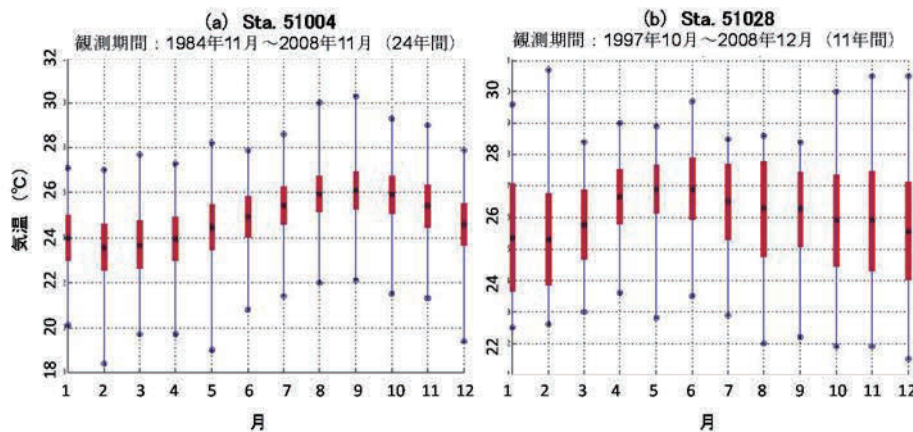


図-6.11 米国が設置する海洋ブイの種類と位置 (NOBC : National Data Buoy Center¹⁹⁾)



(a) 観測点 51004 : 年間を通して平均気温は 24~26℃で推移
 (b) 観測点 51028 : 年間を通して平均気温は 25~27℃で推移

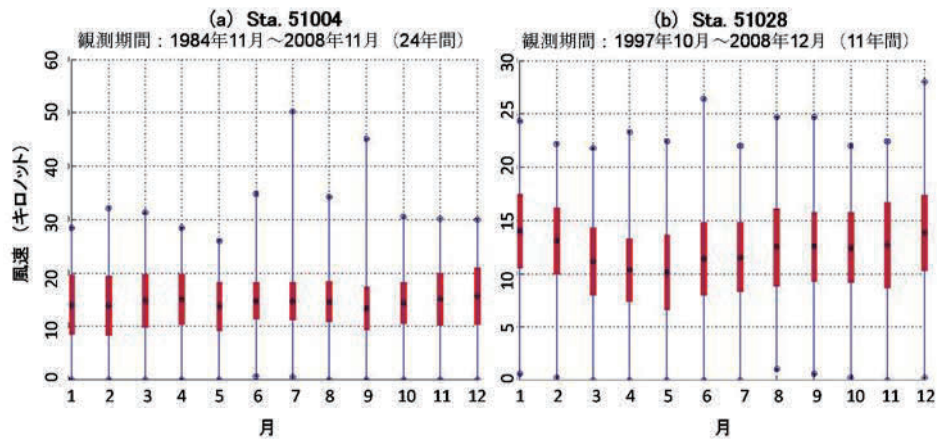
図-6.12 観測用ブイによる月別の平均気温, 標準偏差 (赤帯), 最大・最小値

インターネットで入手可能な情報¹⁹⁾ から, ハワイ近海 (51004 : Southeast Hawaii) とクリスマス島近海 (51028 : Christmas Island, 赤道直下) の 2 地点についてデータ分析を行った。これら両地点 Sta. 51004 と Sta. 51028 はほぼ南北に並び, 両者間の距離は約 1,800 km である。

分析項目は①気温, ②8 分間の平均風速, ③瞬時風速 (5 秒間の平均風速), ④有義波高, ⑤全波の平均周期, ⑥有義波の卓越周期であり, その結果は以下のとおりである。

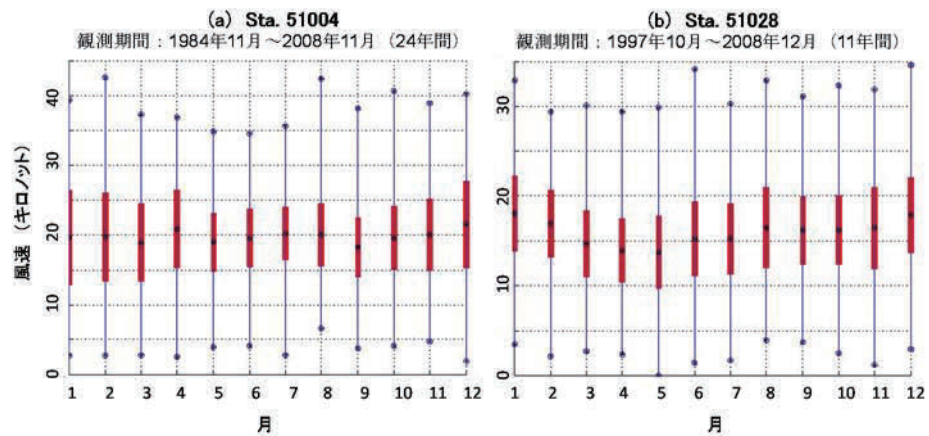
① 気温 (図-6.12 参照)

年平均気温は Sta. 51004 が 24.9℃, Sta. 51028 が 26.1℃であり, 赤道直下にある Sta.



- (a) 観測点 51004 : 年間を通して平均風速は 6~7m/s で推移
- (b) 観測点 51028 : 年間を通して平均風速は 5~7m/s で推移

図-6.13 観測用ブイによる月別の 8 分間平均風速の平均値, 標準偏差 (赤帯), 最大・最小値



- (a) 観測点 51004 : 瞬間風速の年内変動は小さく 10m/s 前後で推移
- (b) 観測点 51028 : ハワイ付近より小さく年間を通して 7~9m/s で推移

図-6.14 観測用ブイによる月別の 5 秒間平均風速の平均値, 標準偏差 (赤帯), 最大・最小値

51028 の方がやや高い。標準偏差は Sta. 51028 の方が大きい。すなわち図-6.2 で示した日射エネルギーの変動とは異なり、気温の変動はハワイ近海より赤道直下の方が大きい。この理由は、ハワイ近海が 1 年中、北東貿易風帯にあるのに対して、赤道直下では南北両半球の気流が入るためと考えられる。

② 平均風速 : 8 分間の平均風速 (図-6.13 参照)

年平均風速は Sta. 51004 が約 7 m/s, Sta. 51028 が約 6 m/s で、ハワイ近海の方がやや強い。ハワイ近海では時に強い風が吹く。統計期間 24 年間に 1986 年 07 月 22 日に 25.9 m/s, 1990 年 09 月 18 日に 23.2 m/s の記録がある。いずれも熱帯低気圧が接近したと推定される。一方、赤道直下の Sta. 51028 での観測期間は 11 年間であり Sta. 51004 の

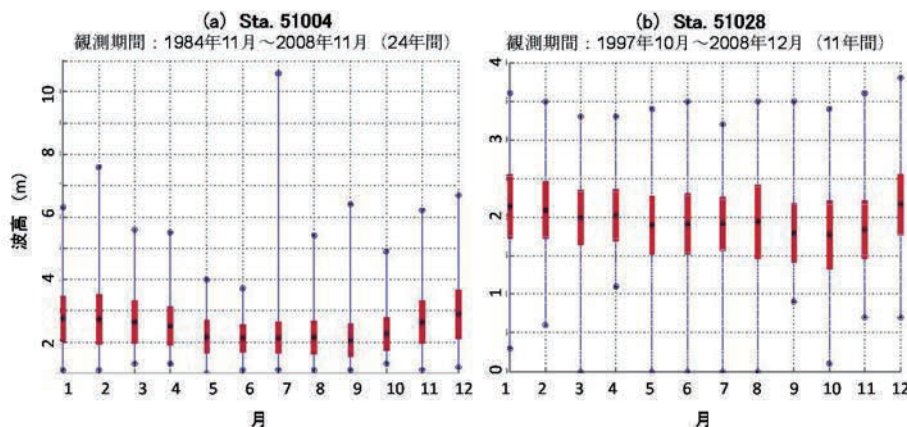
約半分であるが、風速の変動は小さい。11年間の最大は2006年12月16日の14.4 m/sである。このように低緯度海域では風況は概ね安定しているが、稀に強風をもたらすのが熱帯低気圧の接近である。ただし低緯度海域といっても、緯度10度未満の赤道付近では熱帯低気圧の発生や通過はないと考えてよい。

③ 瞬時風速：5秒間の平均風速（図-6.14 参照）

観測期間は両地点について同程度である（8.5年間と11年間）。Sta. 51004（ハワイ近海）での最大は2004年02月29日の21.9 m/sであり、2007年08月14日の21.8 m/sがこれに続く。他の年にも20 m/s程度が数回ある。Sta. 51028（赤道直下）では2006年12月16日の17.8 m/sが最大である。なお、Sta. 51004では瞬間風速が平均風速より小さいが、この理由は不明である。

④ 有義波高：上位3分の1の波について20分間の平均波高（図-6.15 参照）

統計期間はSta. 51004が24年間、Sta. 51028が10.5年間である。この期間における全平均と標準偏差はそれぞれ、Sta. 51004が2.4mと0.6m、Sta. 51028が2.0mと0.4m

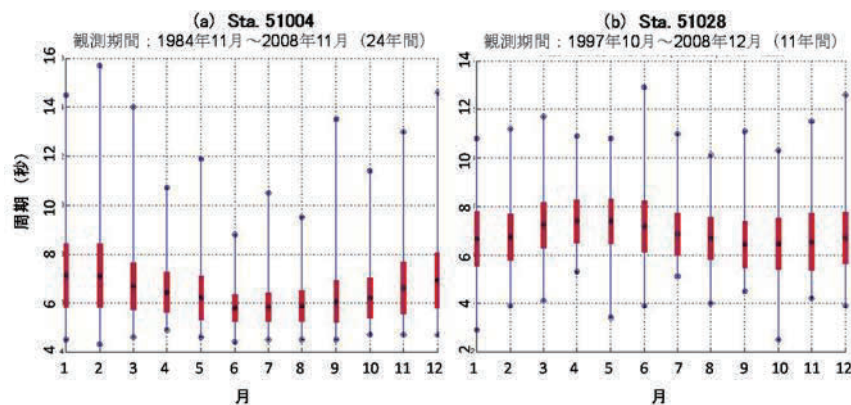


(a) 観測点 51004：年間を通して有義波高は2~3mで推移

(b) 観測点 51028：ハワイ付近（左図）より小さく年間を通して1.5~2.0mで推移

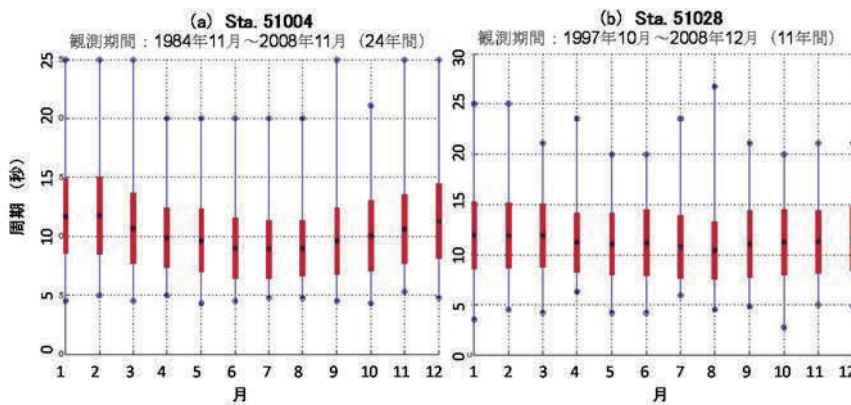
図-6.15 観測用ブイによる有義波高の平均値、標準偏差（赤帯）、最大・最小値

であり、赤道直下の方が穏やかであることがわかる。日本の気象庁が作成した北太平洋の波浪図（図-6.5）によると、ハワイ近海での年平均波高は1.3~1.5m程度、またハワイ南方の赤道直下では1.0m程度であるから、NDBCの観測値がかなり大きい。この理由は不明だが、観測方法の違いもあり得るので、現時点では深く追究できない。極値ではSta. 51004において1986年07月22日に10.6mの記録があるのに対して、Sta. 51028では2004年12月25日の3.8mが最大であり、赤道付近が穏やかであることが波高からも確かめられた。一方、風速と同様にハワイ近海では時に非常に高い波がされる。この「1986年07月22日の10.6m」は、上記平均風速の極値「1986年07月22日の25.9 m/s」と同一日である。熱帯低気圧が通過したと推定される。



(a) 観測点 51004：最も長周期なのは1月と2月の7.1秒，最も短周期なのは6月と7月の5.8秒
 (b) 観測点 51028：最も長周期なのは4月と5月の7.4秒，最も短周期なのは9月の6.4秒

図-6.16 観測用ブイによる月別の波の平均周期の平均値，標準偏差（赤帯），最大・最小値



(a) 観測点 51004：最も長周期なのは2月の11.8秒，最も短周期なのは6月と7月の8.9秒
 (b) 最も長周期なのは1月～3月の11.9秒，最も短周期なのは8月の10.4秒

図-6.17 観測用ブイによる月別の最大エネルギーを有する波の周期の平均値，標準偏差（赤帯），最大・最小値

⑤ 波の平均周期（図-6.16 参照）

NASA の説明では「20 分間の全波平均」とある。統計期間は Sta. 51004 が 24 年間，Sta. 51028 が 10.5 年間である。この期間における全平均と標準偏差はそれぞれ，Sta. 51004 が 6.4 秒と 1.0 秒，Sta. 51028 が 6.9 秒と 1.0 秒である。両海域が約 1,800 km 離れているとはいえ，発生する波の特徴に大差はない。特徴的な差は季節変化であり，Sta. 51004 では冬季に周期が 1 秒程度長くなる。これに対して Sta. 51028 では春に最も周期が長い，季節差は Sta. 51004 より小さい。ハワイ近海の Sta. 51004 では冬季にアリューシャン低気圧の影響が及ぶためと考えられる。

⑥ 波の卓越周期（最大エネルギーを有する波の周期）（図-6.17 参照）

NASA の説明では「最大エネルギーを有する波の周期」とある。このデータは非常に興味深く，多くの重要なことを示唆している。年間を通してベースとなる卓越周期

が 8~10 秒であることや、14 秒付近に二つ目の極大域があることは両観測点に共通している。しかし 25 秒程度の超長周期波については、両海域で差が見られる。

Sta. 51004 では卓越周期が明瞭に 2 極分化している。すなわち冬季には周期 14 秒程度の長周期波が卓越し、更にこの 14 秒から遠く離れた 25 秒程度の非常な長周期波が時々入る。そして春~夏 (4 月~8 月) にはこの超長周期波が完全に消える。Sta. 51004 において年間を通してベースとなる卓越周期は 8~9 秒で、春~夏にはこの周期が卓越する。一方 Sta. 51028 において、年間を通してベースとなる卓越周期が 8~10 秒であることや、14 秒付近に二つ目の極大域があることは Sta. 51004 と共通しているが、10 月から 3 月にかけて 14 秒付近の極大域が優越する点が Sta. 51004 と異なる。

25 秒程度の超長周期波は Sta. 51004 では 10 月~3 月に、Sta. 51028 では 1 月~8 月に入り、秋~初冬にはない。Sta. 51004 における冬季の超長周期波はアリューシャン低気圧が非常に発達した時に伝播してきたものと推定される。また Sta. 51028 における超長周期波の多くは南極海での嵐が原因で、1 月~2 月は Sta. 51004 と同様にアリューシャン低気圧の影響であろう。

6.7 まとめ

- ◆ 低緯度太平洋南東部には、地球上で最高レベルの高日射海域がある。ここでの日射エネルギーはサハラ砂漠・オーストラリア砂漠より大きい。他の広い海域も太陽エネルギーの条件はこれに次いで良好である。
- ◆ 日射量の 12 カ月での変動係数は、北緯・南緯 10°以内での 10%以下から、北緯・南緯 30°付近での 30%程度までほぼ連続的に変化しており、筏船団が可動性を生かせば 8.0 kWh/m²/day 以上の日射量が得られる条件が低緯度海域に広く存在する。
- ◆ 最高レベルの高日射海域では熱帯低気圧のリスクは非常に小さい。太平洋の他の低緯度海域では、熱帯低気圧のリスクは多少増加するが、日本近海に比べればそのリスクは比較的 low、太陽エネルギーと熱帯低気圧リスクの両面ではるかに良い海域が広大にある。
- ◆ 熱帯低気圧の活動海域は太平洋には三つあり、それぞれ異なる様相である。これら 3 海域での熱帯低気圧の特徴を理解し、かつ気象・海洋 (海水温など) 予報を活用すれば、ソーラーセル筏の安全かつ効率的な運用が可能である。
- ◆ 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 と比較的穏やかであり、北緯 10°~20°の帯では年間を通じて北東風 (貿易風) が吹いている。低緯度帯に吹く穏やかな定常風と循環海流も利用して、筏船団が最小限の動力によって低速で省エネ航海することが可能と考えられる。
- ◆ 北緯 25 度以南は年間を通して概ね有義波高 1.5~2.0m 以下で、北緯 10 度以南は波

高 1m 以下であり，50cm 以下の海域もある．南半球についても北半球と対称的な波高分布が予想され，低緯度帯については波高が 1m 程度かそれ以下の静穏海域が期待できる．

- ◆ 上記のように現時点の情報からでも低緯度帯の穏やかな定常風と循環海流も利用して，筏船団が動力を使わず低速で省エネ航海することが十分可能と判断できる．
- ◆ 筏船団の設計などには平均値のみでなく変動係数等の情報が必要である．これを調べる手段として，インターネットで航海されている米国ブイセンタ（NDBC：National Data Buoy Center）の代表的 2 地点を調査したところ，気温，8 分間の平均風速，瞬時風速（5 秒間の平均風速），有義波高，波の平均周期，波の卓越周期の平均・標準偏差・最大最小値に関する過去 24～11 年間にわたる情報が得られた．今後さらに他地点についても同様な分析を進め，筏の設計条件に反映することが可能であることが分かった．
- ◆ 海流については全般に不明点が多く，低緯度海域については情報が特に少ない．地理的に細かな分布としての流向や流速が必要である．

7. 筏船団と関連課題

筏船団は発電を担うソーラー筏はじめ多数の船舶から構成される。それらは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やさらに小型の作業・運搬船など種類・役割が多岐にわたる大小合わせて10隻以上の船舶からなる。

母船は筏船団全体の発電制御・航行・エネルギー運搬制御・運転員の居住などを受け持つ司令塔的役割を持つ。200～300人に上る運転員が長期間快適な生活を送れる居住環境も備える。また，エネルギー輸送船との仲立ちの機能も備える。

オプションとしてFPSO母船方式を採用することも考える。FPSO（Floating Production, Storage and Offloading system：浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備）とは，海底油田開発で採用されている生産設備・貯蔵タンク・輸送船への積み出し設備を備えた図-7.1に例示する大型プラント船で，現在世界で150隻以上が稼働中である（サノヤス造船（株）情報）。この場合には上記の母船の役割だけでなく，エネルギーの集中的変換・貯蔵設備もすべて母船の機能に加わることになる。

また，メガソーラー筏の最初の組み立て作業とその後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5000積載トン程度のクレーン付き作業用船が必要である。現在エネルギー資源開発で使われている図-7.2に例示するようなオフショア支援船（プラットフォーム・サプライ船：PSV）がほぼこれに対応する。

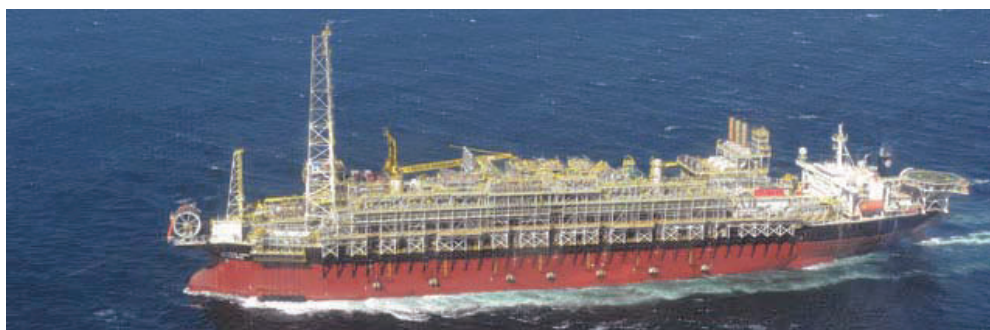


図-7.1 FPSO (Floating Production, Storage and Offloading system：浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備の例 (三井海洋開発(株) HP²⁰⁾)



図-7.2 5000トン級オフショア支援船(PSV: Platform Supply Vessel)の例(川崎汽船(株) HP²¹⁾)

以下ではまず、この構想で中心的な発電機能を担うソーラー筏について検討する。その際、筏の主要構造材料として最も実績もあり従来の設計概念になじむ鋼材を用いる鋼製筏が中心となるが、新材料として埋設パイプや養殖筏などへの用途を近年急速に拡大している高密度ポリエチレン（HDPE）を用いた HDPE 製筏についても検討する。

筏は全体を組み上げた形で日本から曳航するのではなく、可能な限り組み立てた部材を現場海域まで運搬船で運び、現場海域で畳んだものを拡げるか、組み立てるものとする。筏は晴天域を求め、また数年に1回程度発生する低気圧を避けるために、微速で東西南北に帆走と補助動力で移動できるものとする。

7.1 筏ユニット・サブユニット

- ◆ $5\text{ km} \times 5\text{ km} = 25\text{ km}^2 = 2,500\text{ ha}$ の筏は $100\text{ m} \times 100\text{ m} = 10,000\text{ m}^2 = 1\text{ ha}$ のユニットを基本単位としこれを 2,500 枚連結する。
- ◆ 材料・構造・運搬などの面から現実的な案として、図-7.3 に示すように $25\text{ m} \times 25\text{ m}$

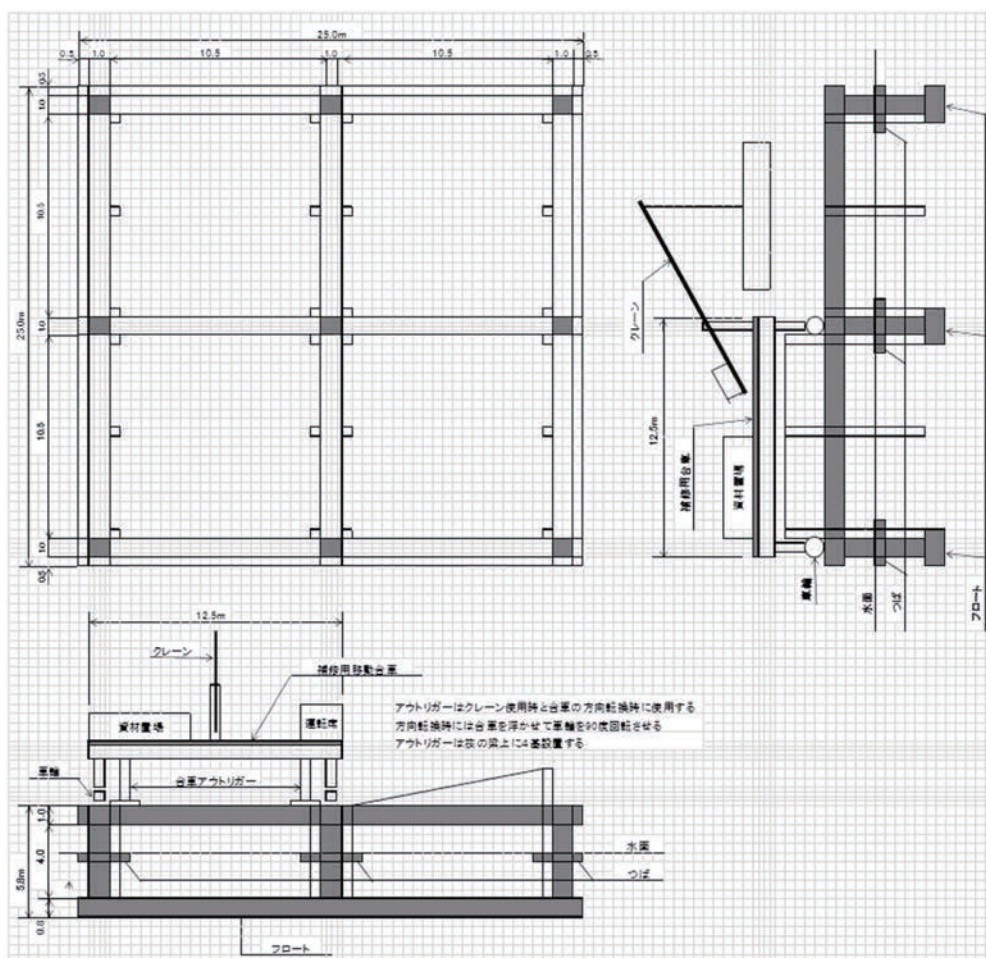


図-7.3 鋼製筏のサブユニットの概念

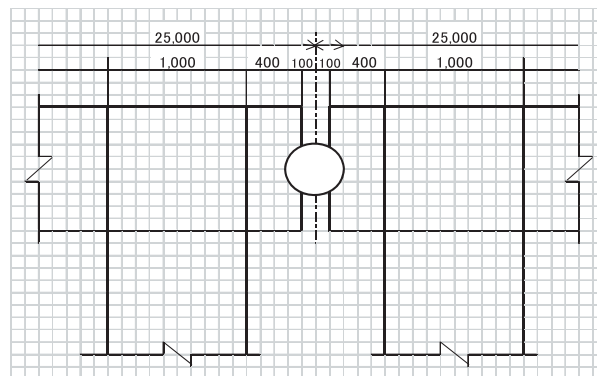


図-7.4 鋼製筏サブユニットのジョイントの概念

のサブユニットを基本単位として、これを16枚連結して100 m×100 mの筏ユニットを作成することを考える。

- ◆ この場合の1つの帆（ソーラーパネル）の大きさは12.5 m×12.5 mの正方形とし、これを4枚使って25 m×25 mのサブユニット全面を覆うことができる。ただし、サブユニット上に帆に覆われないオープンな巡回路を確保する場合には10.5 m×10.5 mのソーラーパネル4枚で覆うこととする。（図-7.3 参照）
- ◆ 梁材の端部にジョイントを設置して、16個のサブユニットを連結させることにより、100 m×100 mの筏を作る。ジョイントの構造は図-7.4のように電車の連結部のようなイメージを考えている。ジョイントは回転自由であり、これにより100 m×100 mの筏が一枚の剛版ではなく、波に追従変形できる構造とする。
- ◆ さらに100 m×100 mの筏を同じく回転自由度を持たせたジョイントで連結し、メガソーラー筏に組み立てていく。

7.2 鋼製筏

7.2.1 基本構造（図-7.3 参照）

- ◆ 筏は骨組み構造とし、潜水式のフロートに支えられる。
- ◆ ユニット・サブユニットは回転自由度のあるピンジョイントで連結し、筏面のフレキシブルな動きを可能にする。
- ◆ 25 m×25 mのサブユニットの中に4枚の帆（10.5 m×10.5 m）を張る。帆の下は海面であるので、落下防止用の網を張る。
- ◆ 25 m×25 mのサブユニットの外周には1.5 mの点検修理用の歩廊を設置する。骨組み部材の幅を1 mとし落下防止用の手摺りを設置するとこの上を歩くことも可能である。
- ◆ 帆の面積に対しそれを支える構造材や巡回路の面積が大きくなる通常の設計を考えているが、巡回路の帆の直下に置く設計とすれば、帆の面積の割合を増やすこと

は可能と考える。

7.2.2 鋼製筏サブユニットの重量計算

(1) 梁材：

$$(1.00 \times 1.00 - 0.98 \times 0.98) \times 24.78 \times 3 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 23.11 \text{ t}$$

$$(1.00 \times 1.00 - 0.98 \times 0.98) \times (24.78 - 3) \times 3 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 20.31 \text{ t}$$

$$\text{面板：} 1.0 \times 1.0 \times 0.01 \times 12 \times 7.85 = 0.95 \text{ t}$$

$$\text{梁材合計：} 23.11 + 20.31 + 0.95 = 44.37 \text{ t}$$

柱材：

$$(1.00 \times 1.00 - 0.98 \times 0.98) \times 4.0 \times 9 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 11.19 \text{ t}$$

(2) フロート：

$$(1.20 \times 0.80 - 1.18 \times 0.78) \times 24.18 \times 3 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 22.55 \text{ t}$$

$$\text{面板：} 1.2 \times 0.8 \times 0.01 \times 6 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 0.45 \text{ t}$$

$$\text{フロート合計：} 22.55 + 0.45 = 23.00 \text{ t}$$

(3) ソーラー帆布：

$$10.5 \times 10.5 \times 0.005 \times 4 \times 1.00 \text{ t/m}^3 = 2.2 \text{ t}$$

(4) 補修用移動台車の重量

$$\text{梁材：} (0.70 \times 0.70 - 0.688 \times 0.688) \times 12.488 \times 3 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 4.90 \text{ t}$$

$$\text{梁材：} (0.70 \times 0.70 - 0.688 \times 0.688) \times (12.488 - 0.70 \times 3) \times 3 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 4.07 \text{ t}$$

$$\text{面板：} 0.7 \times 0.7 \times 0.006 \times 4 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 0.09 \text{ t}$$

$$\text{床板：} 12.5 \times 12.5 \times 0.006 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 7.36 \text{ t}$$

$$\text{柱材：} (0.70 \times 0.70 - 0.688 \times 0.688) \times 2.3 \times 4 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 1.20 \text{ t}$$

$$\text{アウトリガー：} (0.50 \times 0.50 - 0.488 \times 0.488) \times 2.3 \times 8 \times 7.85 \text{ t/m}^3 = 1.71 \text{ t}$$

$$\text{自重合計：} 4.90 + 4.07 + 0.09 + 7.36 + 1.20 + 1.71 = 19.33 \text{ t}$$

クレーン・資材重量：5 t

$$\text{補修用移動台車の合計重量：} 19.33 + 5 = 24.33 \text{ t}$$

平面形：12.5m×12.5m，床板厚：6mm，梁，柱断面：0.7m×0.7m

鋼材の厚さ：6 mm，本数4本

アウトリガー断面：0.5m×0.5m，鋼材厚：6mm 本数8本

(5) 全重量

$$\text{補修用移動台車なし} \quad 44.37 + 11.19 + 23.00 + 2.2 = 80.76 \text{ t}$$

$$\text{補修用移動台車あり} \quad 44.37 + 11.19 + 23.00 + 2.2 + 24.33 = 105.09 \text{ t}$$

(6) 浮力の計算

① 補修用移動台車なし

$$\text{フロート} \quad 1.20 \times 0.80 \times 24.2 \times 3 \times 1.02 \text{ t/m}^3 = 71.09 \text{ t}$$

$$\text{柱} \quad 1.00 \times 1.00 \times 2.00 \times 9 \times 1.02 \text{ t/m}^3 = 18.36 \text{ t}$$

合計浮力 $71.09 + 18.36 = 89.45 \text{ t} > 80.76 \text{ t}$

② 補修用移動台車あり

フロート $1.20 \times 0.80 \times 24.2 \times 3 \times 1.02 \text{ t/m}^3 = 71.09 \text{ t}$

柱 $1.00 \times 1.00 \times 4.00 \times 9 \times 1.02 \text{ t/m}^3 = 36.72 \text{ t}$

合計浮力 $71.09 + 36.72 = 107.81 \text{ t} > 105.09 \text{ t}$

7.3 HDPE 製筏

ここでは、近年急速に普及が進み耐久性や軽量性の面から有望と考えられる高密度ポリエチレン（HDPE）を用いた筏の概念を検討する。この際、従来の構造設計と異なり変形性については鋼製筏のように微小変形に抑えることは考えず、筏に必要な機能を満足する範囲で大変形を許容することとする。



(直径 80m 管径 400mm 程度：大きな変形にも追随し破断しない)

図-7.5 HDPE 製の養殖筏（日本管材（株）提供）

7.3.1 HDPE の材料特性と特徴（日本管材（株）浅見氏講演資料）

- ◆ HDPE の比重は 0.97，強度は 23MPa で，塩化ビニールよりはるかに高い。
- ◆ ヤング係数は 1000MPa 程度と鋼材よりかなり低く，鋼鉄製筏に比べて大きな変形が発生しやすい。
- ◆ しかし延性に富み，強度を超えて引張ひずみ 600%まで変形しても破断せず，元の形に戻る性質がある。
- ◆ 加工性に優れ，熱融着により簡便に構造体の組み立てが可能であり，融着部も素材と遜色ない強度が出る。
- ◆ HDPE は日本では耐震ガス管などが主な用途だが，ヨーロッパでは最大径 1.6m で 100m 長さの管材の実績もある。
- ◆ フロートの材料はカーボン添加した高密度ポリエチレン（HDPE：PE-100）で，紫外線劣化にも強く（熱帯地方での養殖施設などの実績有り），廃棄後も溶解成形して再利用が可能であるため，資源環境の観点からも優れている。
- ◆ 管材製品のコストは 2.5USD/kg で，それほど高価ではない。

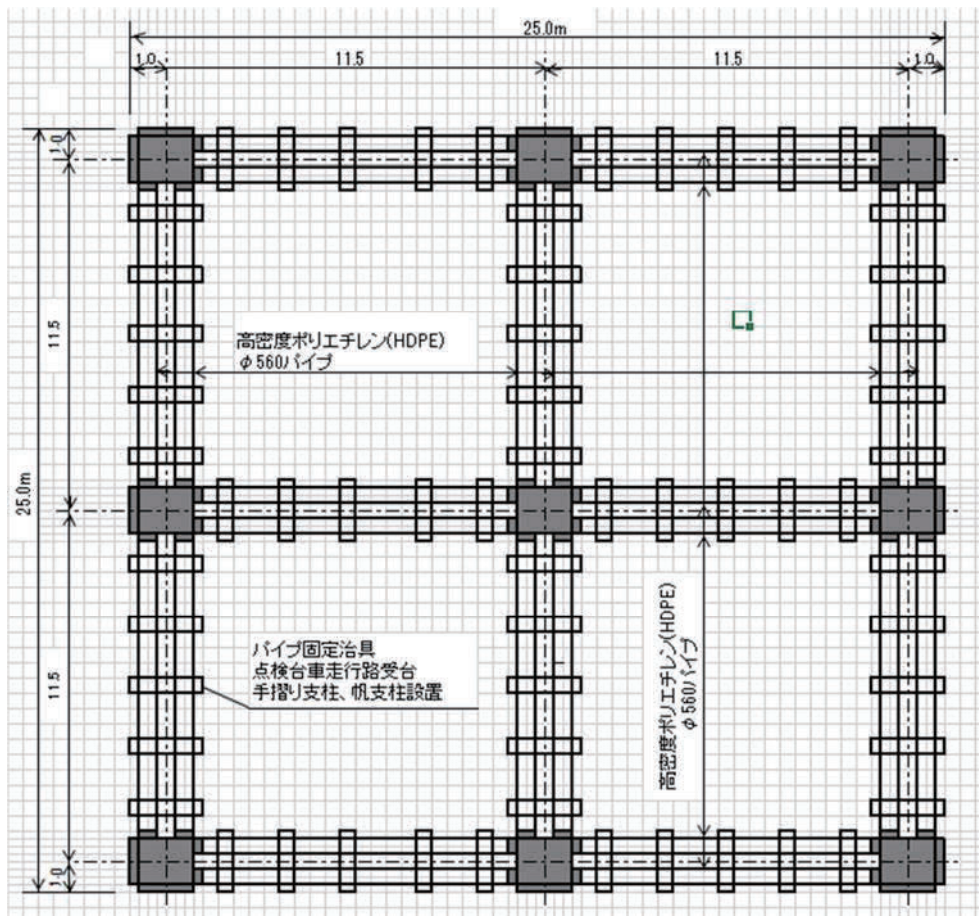


図-7.6 HDPE 製筏のサブユニットの平面概念図

- ◆ 図-7.5 に示すように漁業関連養殖施設などの実績があり、ノルウェイでは直径50 cm程度のパイプで最大直径120 mもの円形養殖筏を波の荒い北海で問題なく使っている。
- ◆ したがって微小変形内に抑えた鋼鉄製筏と異なり、波と共に変形するような柔構造筏として設計することになる。
- ◆ 柔構造筏の上に帆柱を立てそれに撓み性ソーラー帆布を取り付ける。保守点検用回廊の取り付けも養殖筏での実績例がある。
- ◆ HDPE製漁具には海生性生物付着は起きにくいことが経験的に知られている。

7.3.2 HDPE 製筏サブユニットの基本構造

図-7.6 の平面図に示すようなイメージの HDPE 管材（外径 560mm 肉厚 33.2mm）の 2 本組からなる 25 m×25 m 格子状のサブユニットを直接海に浮かべ、取付部材を介してソーラー帆布を支える。すなわち鋼鉄製筏と異なり浮体と上部骨組みが一体化した簡単な構造である。図-7.7 にはサブユニット隣接部の断面イメージを示す。鋼鉄製のような半潜水式浮体を持たない本来の筏方式であり揺動の影響を受けやすいが、北海の厳しい波浪条件でも養殖筏として使われている実績がある。これらサブユニット 16 個をジョイントで連結して 100m×100m の筏ユニットを組み、さらにそれら筏ユニットをつなげて 25km² の筏全体を組み上げる。

田形に組んだ 25m×25m の高密度ポリエチレン（HDPE）に取付治具を設置したユニットを国内で製作し、これを輸送船で低緯度太平洋に運び、海上で柱とソーラーパネル（帆）を取り付け、これを連結して筏船団を完成させる。

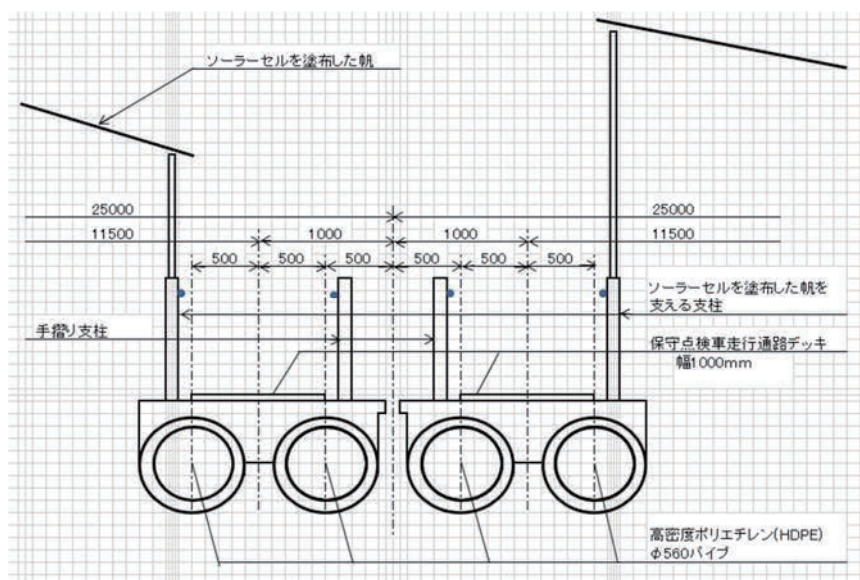


図-7.7 HDPE 製筏サブユニットの隣接部の断面概念図

7.3.3 HDPE 筏ユニットの重量計算

外径 560mm 肉厚 33.2mm の HDPE 材 (SDR17 PE-100 パイプ) の 2 本組で図-7.6 のような 25m×25m の熱融着により組み立てたサブユニット骨組み重量は以下のように計算される。

- ◆ 単位長重量：115kg/m
- ◆ サブユニット：HDPE パイプ全長：150m
- ◆ サブユニット HDPE パイプ重量：
115kg/m×150m→17.6 トン
- ◆ ソーラー帆布：2.2 t

これ以外にソーラー帆布支柱，補修用移動台車用通路などが加わるが，詳細は未決定。

7.4 筏平面形状

本研究では 100m×100m の筏ユニットの集合体であるソーラー筏の全体形状は，第 1 案として図-2.1 のイメージ図に示す 5km×5km の正方形を考えてきた。この場合，発電した電気エネルギーの集約・貯蔵を一か所で集中して行うことが可能であれば，正方形の方がコンパクトで全体管理がし易いとの見方ができる。

一方，集電時の電圧降下を減らすため距離を短縮し，後述のように筏の周縁部にエネルギー集約・貯蔵，メンテナンスなどの機能をもった機器帆柱設置ユニットを分散配置する場合などでは細長い形状の方が優れているとの見方もある。

そのためここでは正方形筏に加えて，図-7.8 に示すような 2km×12.5km の細長い蛇型筏平面形状 (図-2.2 参照) を考えた。この場合，筏中央部から機器帆柱設置ユニットのエネルギー貯蔵設備までの距離が短くなるため，集電システムでのエネルギーロスが減らせ，維持保守・点検上も有利と考えられる。筏両側の四角が機器帆柱設置ユニットであり，延長方向に 125 台設置している。図-7.9 には 2km×1km の部分についての詳細を示す。

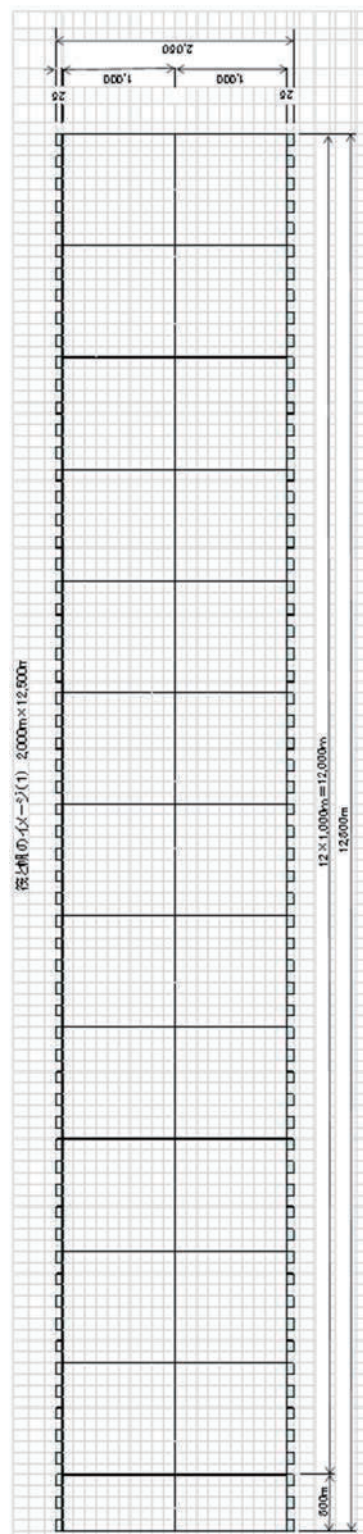


図-7.8 蛇型の筏構造メー
(2,000m × 12,500m)

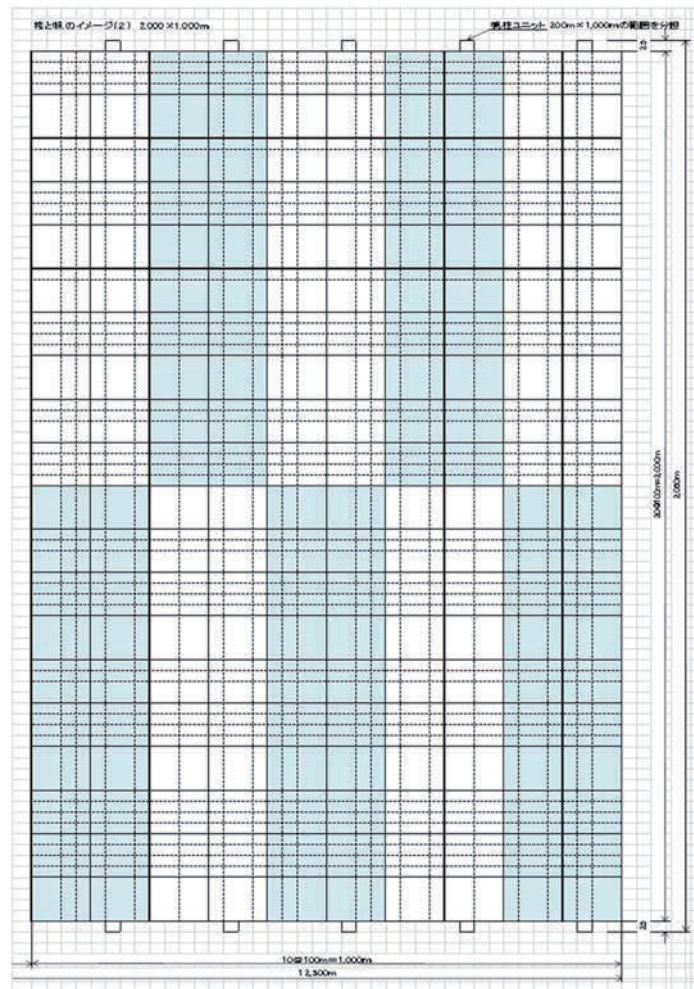


図-7.9 蛇型の筏構造の詳細イメージ (2,000m×1,000m 部分)

7.5 機器帆柱設置ユニット

ここでは、筏集合体を分割して制御・管理する役割として機器帆柱設置ユニットを考える。重要度高い機器類を搭載し、航行時の目印となる高い帆柱を備え、発電した電気エネルギーの貯蔵や受け渡し、筏のメンテナンスなどの役割を持ち、航行補助動力も備える。すなわち、図-7.10 (平面) と図-7.11 (立面) のようなイメージの多数の機器帆柱設置ユニットを筏ユニットの集合体の周縁に分散配置する案を考える。

ただし、重要度高い機器類を FPSO 母船上に集中配置するケースについても参考として 11 章の経済性検討において追加的に検討する。この場合にも航行時の目印となる帆柱、筏のメンテナンス、航行補助動力を備えた小型の帆柱設置ユニットを筏の周縁に配置する。

- (1) 蛇型筏の場合には、200m×1,000m (0.2km²) の筏面積ごとに 1 カ所機器帆柱設置ユニットを置くこととする。つまり 25km² の筏に対し $25\text{km}^2 \div 0.2\text{km}^2 = 125$ 個の機器帆柱設置ユニットを考える。

- (2) 機器帆柱設置ユニットの基本仕様を考える上で、ソーラーセル筏で起こした電気を、電池蓄電または水の電気分解で生産した水素としてエネルギー貯蔵し、その2週間分を運搬船で日本に運ぶ前提で機器類の台数、重量、容積を試算する。
- (3) 電気エネルギーを直接貯蔵する場合は、NEDOのロードマップで目指す0.7kWh/kgの蓄電池が開発されることを前提に将来想定 of 電池での蓄電と輸送を考える。図-7.10、7.11は蓄電池貯蔵の場合について描いた図である。以下にこの場合の搭載機器の試算を行う。
- ① 蓄電池1, 2は日本への電力輸送用、蓄電池3, 4は機器帆柱設置ユニットの運用に使用する。蓄電池1, 2はそれぞれ7日分、両方で14日分を蓄電する。
 - ② 蓄電池1, 2の容量はそれぞれ、200m×1,000mの範囲のソーラーセル筏で起こす電

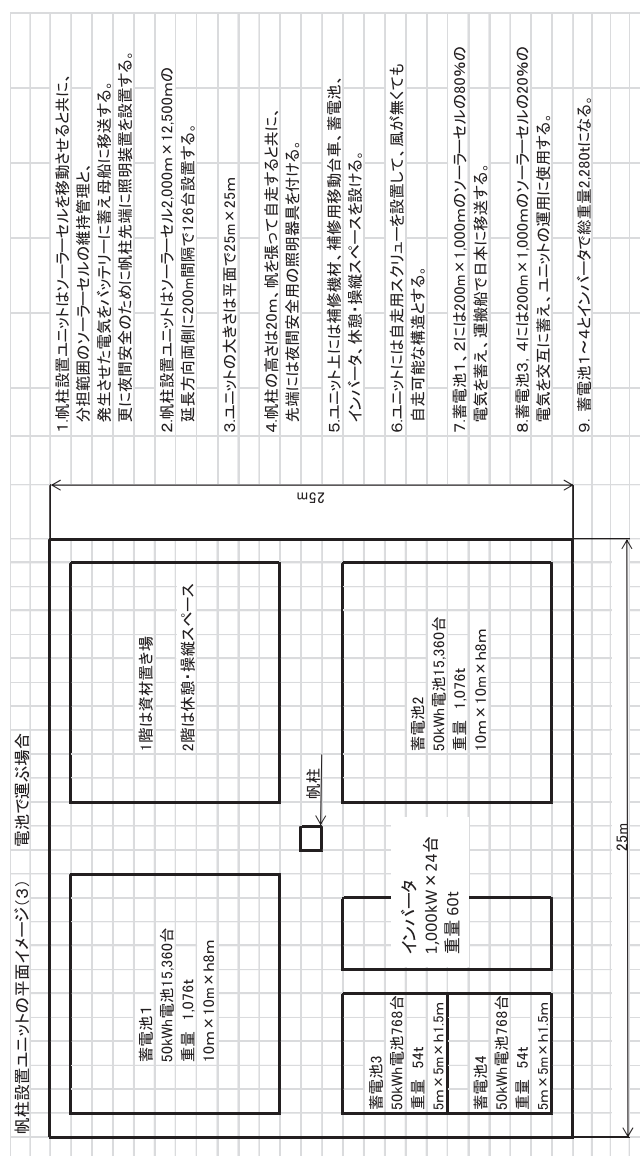


図-7.10 蓄電池貯蔵による機器帆柱設置ユニットの平面配置イメージ

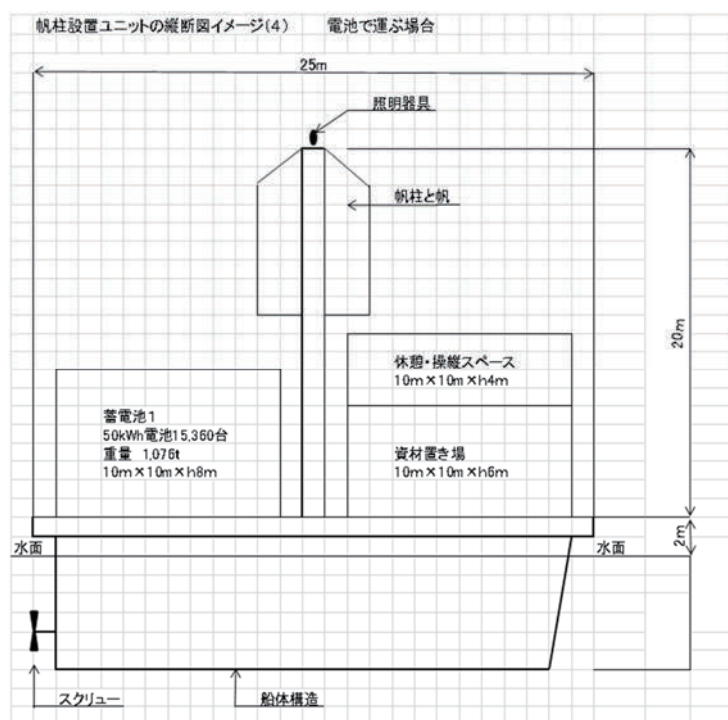


図-7.11 蓄電池貯蔵による機器帆柱設置ユニットの断面イメージ

気をそれぞれ7日分蓄電する。14日ごとに運搬船でバッテリーを日本に運ぶ。交互に新しい電池に入れ替え、積み替えの重量を軽くするため2つに分けている。蓄電池3, 4は所内動力用電源とする。

- ③ 電池の容量の試算を示すと、分担面積： $200\text{m} \times 1,000\text{m} = 200,000\text{m}^2$ ，発生電力： $8\text{kWh/m}^2 \times 0.12 \times 200,000\text{m}^2 = 192,000\text{kWh}$ ，1日分の蓄電池の重量： $192,000\text{kWh} \div 0.7\text{kWh/kg} \rightarrow 274\text{t}$ ，蓄電池1・2の重量 $274\text{t} \times 7\text{日} \times 2 \div 3840\text{t}$ 。詳細検討は11章で行っているが、実際は発電電力の内97%を貯蔵すると考えて3730tとなる。
- ④ インバータの容量を試算すると、発生電力： $8\text{kWh/m}^2 \times 0.12 \times 200,000\text{m}^2 \div 8\text{h} = 24,000\text{kW}$ ，インバータの台数： $24,000\text{kW} \div 1,000\text{kW} = 24$ 台，インバータの重量： $2.5\text{t/台} \times 24\text{台} = 60\text{t}$
- (4) 水素貯蔵については、発電電力を電気分解して発生した水素をリアルタイムでトルエンに吸収させMCHとして1/500の体積で貯蔵することを考える。この場合の搭載機器の試算は11章で行っており、その値をここで用いる。
 - ① 個々の機器帆柱設置ユニットが受け持つ $1\text{km} \times 0.2\text{km} = 0.2\text{km}^2$ の筏ユニットの発電量による1日の水素生産量は $41,300\text{m}^3/\text{day}$ で、昼間8時間でのリアルタイム水素生産量は $41,300\text{m}^3 \div 8\text{h} = 5,170\text{m}^3/\text{h}$ となる。
 - ② 大型アルカリ水電解槽の水素生産能力1個 $500\text{m}^3/\text{h}$ として機器帆柱設置ユニット当たり11個の電解槽を設置する。
 - ③ 電解水素ガスは水素化プラントで1/500のMCHに減容され、各機器帆柱ユニット当

たり 2 週間で $41,300 \text{ m}^3/\text{day} \div 500 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 14 \text{ day} = 1160 \text{ m}^3$ の MCH が生産される。

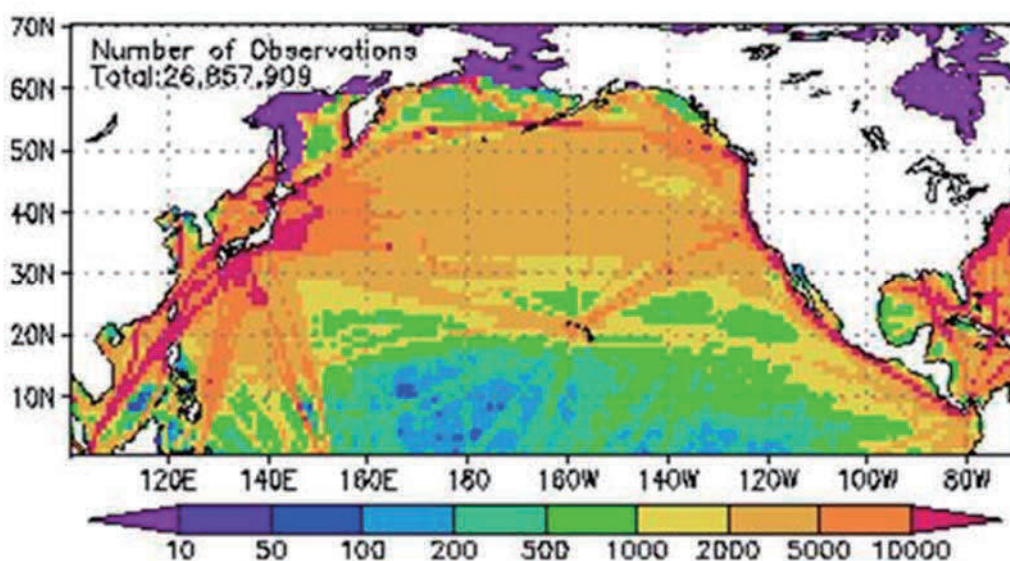
- ④ つまり各機器帆柱設置ユニットには 2 週間分のトルエンと MCH を貯蔵することを考えると、 $82.6 \text{ m}^3/\text{day} \times 14 \text{ day} = 1160 \text{ m}^3$ であり、 1500 m^3 のタンクを 2 基用意すれば良い。
- ⑤ 以上の電解槽、水素化プラント、タンク 2 基やそれらの付属設備および所内動力用蓄電池（前記 3，4）とインバータを合わせた重量と容積は前記の電気エネルギーで直接貯蔵する場合とほぼ同等と考えられる。

7.6 筏船団の航行・制御・運用

低緯度太平洋は大圏航路から遠く離れており、商用船舶の航行は激しくない。図-7.12 はその実態を示すために気象庁が発表している商船からの雲量データ観測数(全 2700 万件)の報告位置を示す。北半球に限られたデータではあるが、低緯度太平洋は明らかに商用航行が少ないことが読み取れる。

しかし、公海を利用する上で他の船舶への影響を最小限に抑えることは重要となる。筏船団は常に GPS 衛星情報を受信し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する。また、常に気象衛星情報により気象分析を行い、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。

ちなみに、赤道付近は貧栄養であり海生生物資源は高緯度海域ほど豊富ではないが、低緯度太平洋でも漁業は行われており、日本の漁協の漁業権は公海上までは及ばないにしても、種々の調整の必要性が生じると思われる。また、低緯度海域特に島嶼海域では海賊対策が必要となる可能性もある（海洋技研：田村氏情報）。



(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)

図-7.12 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²²⁾):

航行制御においては、風向、風力計、セルの角度、船の向きなどのデータより風による走力を計算し、航路を維持する。このため、制御可能な可動帆や補助動力を備えることとする。

7.7 筏システムの保守・点検システム

洋上を帆走する筏システムの制御・運用で重要な課題は、その運用中の膨大なソーラー帆布・電気系統・制御系統などの保守点検である。その方法としては例えば、外周を走行する作業船に搭載した点検用ヘリコプターにより機材や点検員を筏上を下ろして点検作業を行い、点検後に点検船まで戻るといった方法が考えられるが、ソーラセルユニット上にヘリコプター着陸する機能を持たせるのは無駄が多い。

そこで、洋上発電システムに適した合理的な保守点検システムが必要となる。その概念を図-7.13に示す。その目的としては、異常状態にあると判断された特定の太陽光パネルの位置をリアルタイムで特定し、最適経路によりその位置まで到達・保守点検作業を行う保守点検システムを提供することにある（特許出願 CU1301（保守点検システム））。

その保守点検システムは

- ① 各太陽光パネルにつけたモニタリング装置、
- ② モニタリング装置の位置情報及び太陽光パネル健全度情報の管理センター
- ③ 保守点検補修用器具を搭載した台車と保守点検チーム

からなる。このうち①ソーラー帆布パネルのモニタリング装置は

- ◆ ソーラーパネルの状態を検知するセンサ（日射計または照度計と電力計）
- ◆ センサからの検知信号に基づいてソーラーパネルが異常か否かの判断回路
- ◆ 異常状態にあるソーラーパネル情報を管理センターに送信する送信手段

を有し、②管理センターは

- ◆ 異常状態と特定された太陽光パネルの情報に基づいて、位置情報を算出
- ◆ 最適アクセス可能位置から当該太陽光パネルに至る最適経路情報を算出
- ◆ 最適経路情報を作業船の③保守点検チームに伝達する送信手段

保守点検システムによる太陽光パネルの異常判断条件としては、①異常状態が連続的に所定時間を越えて継続する場合、②異常状態が間欠的に所定日数を越えて継続する場合、③異常状態が特定条件下で所定日数を越えて継続している場合、などが考えられる。

また太陽光パネルの位置情報の取得などに GPS 衛星を活用することも考慮する。母船から異常を知らせたソーラーパネル（帆）の位置情報を得た保守点検チームは、筏船団の両側側面に 200m 間隔で設置された機器帆柱設置ユニットから、補修部材、器具を搭載した点検台車で当該ソーラーパネル（帆）に最適経路により最短距離で移動する。

点検台車は、鋼製筏の場合は鋼柱で支えられた鋼梁上を、HDPE 製筏の場合は海に浮かんだ HDPE 梁上を縦横に車輪走行できる設計とする。方向転換の際は、アウトリガーで台

車を浮かせた状態でタイヤの方向を 90 度回転させる。点検台車では、低緯度海域の炎天下での作業が可能な条件を整備する。

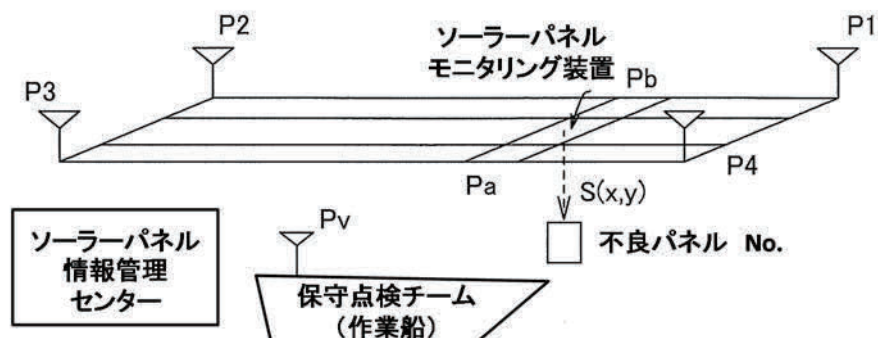


図-7.13 ソーラー帆布保守点検システムの概念

8 太陽電池と電気集約システム

多くの種類がある太陽電池のうち、現在最も使われ実用化が進んでいるのはシリコン系であり、家庭用でもエネルギー変換効率は 14%になっている。しかし、ソーラーセル筏に用いる太陽電池は広大な面積を占めることになり、まずは軽量・省資源型でなければならない。そのため、通常使われている厚さ数ミリメートルもあるシリコン系ではなく、数ミクロン程度の薄膜タイプで軽量・省資源型、さらに帆布と一体化した撓み性のある大面積のソーラーモジュールの開発が必要である。

ソーラーセル筏を実現するためには、広大な面積に敷き詰めたソーラーモジュールから発電電力を集め、エネルギー貯蔵するまでの効率的な集電システムも重要である。

8.1 太陽電池の種類

太陽電池はその光電変換層を構成する材料で分類され、図-8.1 に示すような多くの種類がある。これらはシリコン系、化合物系、有機系に大別される。現在シリコン系が最も広く使われているが、化合物系も実用化が進んでおり、さらに有機系の開発も行われている。

(1) シリコン系：

シリコンを用いる太陽電池は大きく結晶シリコン系とアモルファスシリコン系に分類できる。またその形態から薄膜型や多接合型などに分別されるが、最近はこちらを複合させたものも実用化されている。現時点のモジュール変換効率は単結晶シリコンで 20%、多結晶シリコンで 15%、アモルフォス（薄膜非晶質）9%程度である²³⁾。シリコン系太陽電池は温度特性が大きく、高温で変換効率が低下する性質がある。また通常厚さが数 mm の硬質板状のものが多く使われ、これらは重量・資源量・運搬性・温度特性などからも

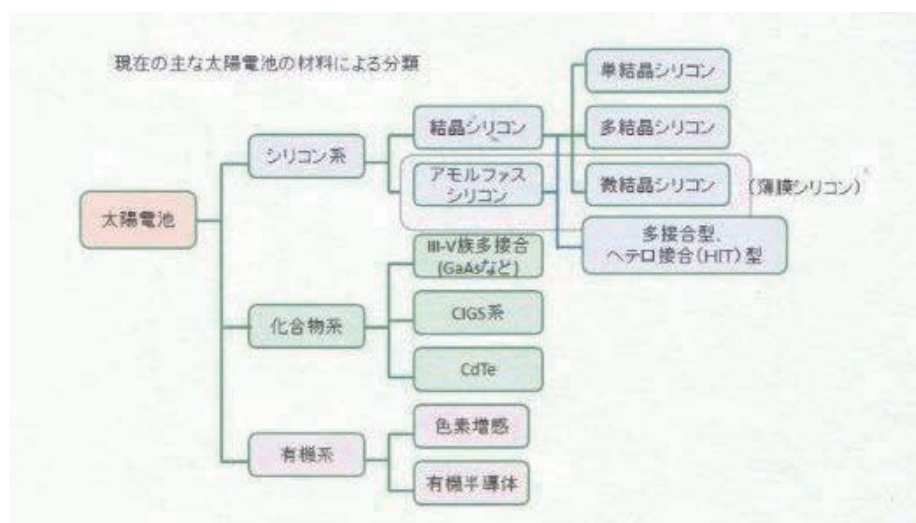


図-8.1 太陽電池の種類²⁴⁾

ソーラーセル筏に使うには適さないと考えられる。

(2) 化合物系

代表的なものとして、銅 (Cu) , インジウム (In) , ガリウム (Ga) , セレン (Se) などからなる化合物半導体を使用するCIS 系 (またはCIGS 系) 太陽電池である。実用化されてから歴史は浅いが、薄膜で省資源などの長所を持つ。モジュール変換効率も年々向上し現時点で14%に達している²³⁾。温度や劣化による効率低下が少ないことも大きな特徴であり、コストはシリコンタイプより現時点で高めであるが、ソーラーセル筏に最適なタイプと考えられる。現在、CIGSタイプに使う希少資源であるインジウム、ガリウムを安価な金属資源である亜鉛・スズ・硫黄に置き換えたCZTSタイプも開発中で、小面積セルの変換効率で12%以上に達しており将来のコストダウン可能性も見える。

(3) 有機系

色素増感タイプと有機薄膜タイプに分類される。色素増感太陽電池は、透明基板に色素と酸化チタンからなる負極と、対極である正極との間に電解液を注入した構造となっており、酸化チタンの表面に吸着した色素が光エネルギーを吸収し、励起した電子が酸化チタンに移動する原理で発電する。現在、小面積セルで 11.9%の変換効率が見られており低コスト化も見込まれているが、耐久性が課題である。

有機薄膜タイプは、2 種類の有機半導体を混ぜて溶かした液を、電極の付いた基板上に塗布して薄膜にした後、薄膜上に電極を形成することにより簡易に作製することができる。現在、小面積セルでの変換効率は12%²³⁾で、資源使用量が少なく製作工程が簡単のため大幅な低コスト可能性がある。ただし、有機材料を用いるため、耐久性

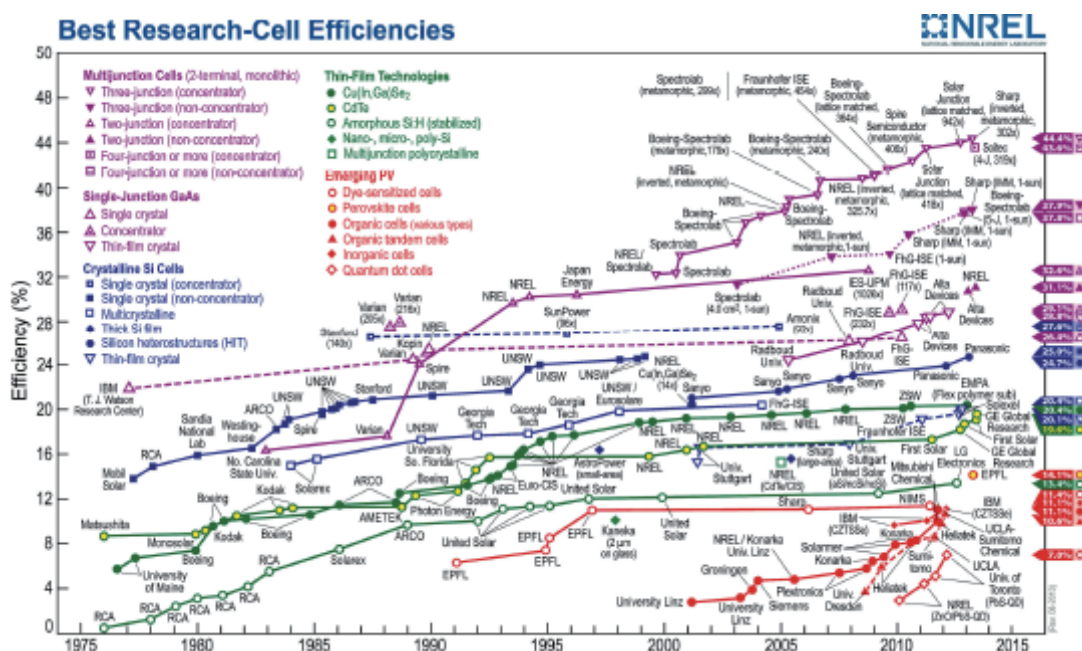


図-8.2 太陽電池の変換効率²⁵⁾

表-8.1 NEDOによる太陽電池（ソーラーセル）ロードマップでの効率²⁶⁾

太陽電池 ^①	現状		2017年		2025年		2050年
	モジュール(%)	セル ^⑤ (%)	モジュール(%)	セル ^⑤ (%)	モジュール(%)	セル ^⑤ (%)	モジュール(%)
結晶Si ^②	~16	25	20	25	25	(30)	40%の超高効率 太陽電池 (追加開発)
薄膜Si	~11	15	14	28	18	20	
CIGS系	~11	20	18	25	25	30	
化合物系 ^③	~25	41	35	45	40	50	
色素増感	-	11	10	15	15	18	
有機系 ^④	-	5	10	12	15	15	

①セルは技術の到達水準を示す指標で、研究室での小面積セル、モジュールは実用化技術段階
 ②結晶シリコンは単結晶、多結晶などを区別せず、シリコン基板を用いた太陽電池として設定
 ③集光時の変換効率

向上がこれからの課題である。

8.2 技術開発の見通し

図-8.2 に米国再生可能エネルギー研究所 NREL が提供している Best Research-Cell Efficiencies²⁵⁾から、40 年間にわたる太陽電池の多くの研究開発機関による光電変換効率改善への取り組みの足跡が見て取れる。表-8.1 には、NEDO が目標としている太陽電池の効率向上についてのロードマップを示す²⁶⁾。

前記のように、このソーラーセル筏構想では帆布と一体化した薄膜型撓み性太陽電池の開発を前提としている。これに適したのものとして上記の化合物系太陽電池が考えられる。特に技術開発がかなり進んでいる CIGS 化合物半導体タイプ（あるいは研究段階の CZTS タイプ）については光吸収係数が可視光領域で大きく、厚さ 2 μ m 程度の薄膜でも十分に太陽光を吸収できる。そのため、わずかな資源量で大受光面積の電池が製作でき、コストダウン効果も期待できる。また、薄膜系太陽電池の中でも格段に変換効率が高く、現時点で小面積セルの変換効率は現時点で 20%程度に達しているが、量産集積型モジュールでは 10-14%にとどまっており、今後大幅な効率向上のための技術開発の余地が大きい²⁷⁾。また、未だ効率は低い有機薄膜タイプについても、これからの技術進展次第では可能性が考えられる。

さらに、撓み性の電池基盤としてこれまではステンレス薄膜が中心であり、帆布のような風になびく繊維系素材と一体化された高変換効率薄膜ソーラーセルと合理的製造法の開発、製造コスト低減が課題である。ソーラーセル筏発電船団の実用化を 20~30 年先とすれば、これからの技術開発と量産体制の確立により光電変換効率が 20% を超えるソーラー帆布タイプの太陽電池は大量安価に製造できるようになるものと思われる。

8.3 ソーラーセル筏の集電システム²³⁾

ソーラーセル筏構想は洋上での太陽光発電であるが、その集電システムは基本的には陸上でのメガソーラー発電システムと変わらない。しかしソーラーセル筏は平面積25km²のこれまで例のないメガソーラーシステムである。また海洋に常に浮かんだ状態で運用する

ことから、防水性・耐塩性など陸上のメガソーラーとは異なる種々の特殊性が考えうる。

ここでは、在来の一般的ソーラー発電施設の集電システムについて整理するとともに、ソーラーセル筏での集電システムの基本条件について検討する。

8.3.1 一般的な太陽光発電システム²³⁾

太陽光発電の基本的なシステムは図-8.3に示すように、太陽電池モジュール・アレイ、接続箱・集電盤、パワーコンディショナなどで構成される。

(1) 太陽電池モジュール

複数の太陽電池セルを所定の出力が得られるように電氣的に接続し、長期間の使用に耐えられるよう耐久性と機械的強度を確保するとともに、固定設置するための枠を取り付けたものをいう。

(2) 太陽電池アレイ

電圧を高めるため、太陽電池モジュールを複数枚、直列に接続したものを太陽電池ストリングと呼ぶ。太陽電池ストリングをさらに複数並列に接続して所定の電力が得られるように構成し、架台などに固定したもののアレイという。

(3) 接続箱

目的の電流・電圧が得られるよう太陽電池アレイを構成するために、必要な枚数の太陽電池モジュールをつなぎ込むための端子台を備えた機器をいう。端子台機能の他に、故障や事故でストリング間に電圧差が発生したときに高電圧のストリングから他のストリングに電流が流れ込むのを防ぐための逆流防止ダイオード、誘導雷などによって発生した雷ノイズを吸収するためのサージアブソーバ、保守点検時のための直流側開閉器などが内蔵されている。また、屋根スペースの関係で太陽電池モジュール

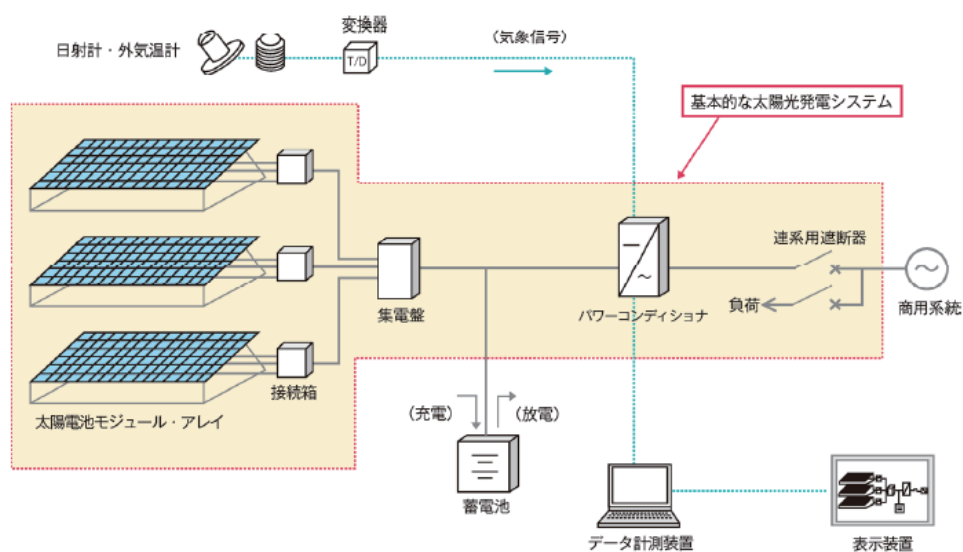


図-8.3 太陽光発電のシステム構成²³⁾

の直列数が少なく、既定の電圧が取れない場合や、各ストリングの電圧が不均一になってしまう場合に、各ストリング間の電圧バランスを調整するためのコンバータ機能を内蔵した接続箱も使われる。

(4) 集電盤

発電した直流電力を一つにまとめてパワーコンディショナに供給する装置をいう。ただしソーラーセル筏では、集電盤は各アレイからの電力を直流開閉器で一度受電しエネルギー貯蔵装置の特性に応じて供給する。

(5) パワーコンディショナ

陸上ソーラー発電では太陽電池からの直流電力を商用系統と連系したり、自動運転するために必要な各種保護・制御機能を備え、DC・DCコンバータとDC・ACインバータからなる装置である。ただしソーラーセル筏では発電電力を蓄電池などに一旦エネルギー貯蔵するため、系統連携のためのDC・ACインバータは必要ない。

(6) 蓄電池

陸上ソーラー発電では系統連系システムに蓄電池を設置することによって、出力変動の抑制、電力貯蔵、災害時の電力供給などを行う。ソーラーセル筏では所内動力用に蓄電池による電力貯蔵が必要である。

また、発電管理を目的として発電電力や日射量などを計測・記録するためには、

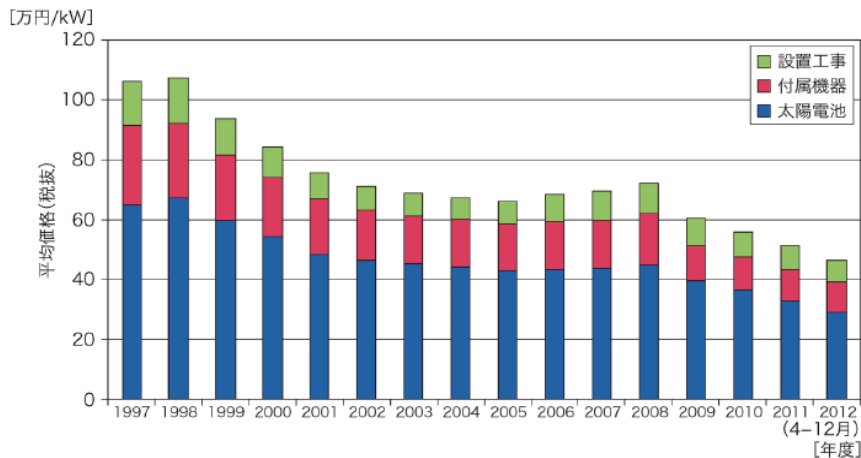


図-8.4(a) 日本の住宅用太陽光発電システム平均価格の推移²³⁾

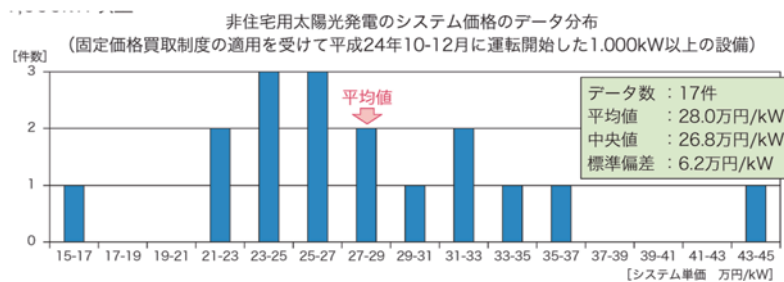


図-8.4(b) 日本の1000kW以上の太陽光発電システムの価格分布²³⁾

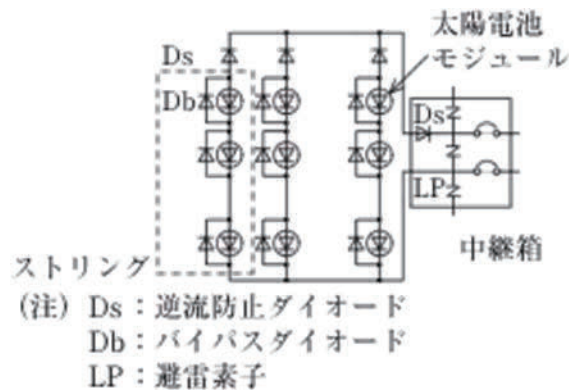


図-8.5 太陽電池アレイの回路²⁸⁾

日射計などが必要である。

図-8.4(a)には住宅用太陽光発電システムの平均価格の推移を示すが、近年急激に低下しており、太陽電池（シリコン系が主流）のみの価格で30万円/kW以下になっていることが分かる。付属設備費は電池本体の30%程度、工事費は10～20%となっていることが分かる。しかしこれまでに前例がない海洋で使われるソーラーセル筏でこの割合がどの程度になるかは不明であり、現時点ではすべてを含んだシステム価格として評価する。図-8.4(b)には2012年に我国で設置された1000kW以上の太陽光発電のシステム価格の範囲を示すが20万円/kW以下から40万円/kW以上まで広く分布している。これより、住宅用に比べて大型化によるコストダウン効果が読み取れる。また条件によるシステム価格の幅が非常に広く、条件次第では20万円/kW程度も可能であることが分かる。

一般に陸上メガソーラー発電では、多数の太陽電池モジュールを直列、並列に接続し、計画した直流電圧と発電出力が得られるように太陽電池アレイを構成する。図-8.5には一般の太陽電池アレイの回路構成を示す（日本電気技術者協会）。太陽電池アレイはモジュールの集合体であるストリング、逆流防止ダイオード素子、バイパスダイオード、中継箱などで構成される。太陽電池アレイが所定の出力電圧を満足するように太陽電池モジュールを直列に接続したブロックをストリングと呼び、各ストリングは逆流防止素子を介して並列接続される。これは太陽電池アレイの一部が日影になった場合に、逆防止ダイオードはアレイ間の電圧アンバランスによるアレイ間の逆電流を防止する。また、太陽電池モジュールと並列のバイパスダイオードは日影の電池モジュールの保護やアレイ出力低下を押しさえるためにある。

アレイを組む時、各ストリングの電圧を高く設定すれば直列接続する太陽電池を増加でき並列回路を減らせるため、部材や機器・敷設作業が削減できコストダウンにつながる。つまり (出力)=(電圧)×(電流) により、同じ出力を得るために電圧が高ければ電流は下げられる。また、(送電ロス)=(電流)²×(抵抗)、つまり、電流が下がればその2乗に比例して回路抵抗による送電ロスは減少するため、なるべく高圧化することが望ましい。

8.3.2 ソーラーセル筏の集電システム

ソーラーセル筏構想は世界的にもかつてない洋上環境での巨大メガソーラー発電システムであり、その電気回路についても未経験な部分が多い。既に述べたように 25km² の広大な筏を帆布と一体化した無数のソーラー帆布で覆い、発電した電力を効率よく集約することが必要である。現在使用されている汎用品の組み合わせではなく、将来の技術開発を想定し、効率や仕様が向上したものを活用することとなる。

電力集約システムを考える上でのソーラー発電の基本条件は以下のとおりである。

- ◆ 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）連続発電することにより図 8.6(a)に示すように 1 日 8kWh/m² の発電ができる。つまり、1 日のうちの日射量変化を図に示すように正弦波の 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
$$\int_{6h}^{18h} \sin(\pi(t-6h)/12h) dt = 24h/\pi \approx 8$$
 により、ほぼ 8kWh/m² となる。すなわちピーク発電 1 kWh/m² が 8 時間続くのと同値となる。
- ◆ 25km² のソーラーセル筏での発電量の日変化は同図(b)のようであり、1 日の総発電量は電気変換率 12%として 8kWh/m²×0.12×25,000,000m²=24,000.000kWh, ピーク時の発電電力は 24,000.000kWh÷8h=3,000,000kW に相当する。
- ◆ 既述のようにソーラーセル筏は 100m×100m の筏ユニット 2500 個からなり、各筏ユニットは 25m×25m のサブユニット 16 個から構成されるが、各ユニットは 1200kW (= 3000000kW÷2500), 各サブユニットは 75kW (=1200kW÷16) の最大電力で発電する。

各サブユニットは 4 枚のソーラー帆布シートで覆われることになる。各帆布シート 1 枚のサイズは、巡回路のエリアを別途設ける図-7.3 の筏設計案では 10.5m×10.5m, あるいは筏全面を覆う案では 12.5m×12.5m のサイズとなる。つまりソーラーセル筏全体では、この

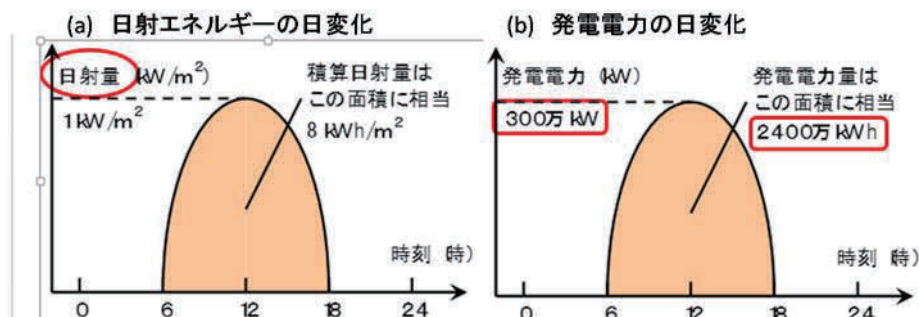


図-8.6 ソーラー筏発電システムの日射エネルギー(a)と発電電力の日変化のモデル化

(東京電力：中島達人氏講演資料より抜粋)

サイズのシートが $4 \text{ 枚} \times 16 \times 2500 = 160,000$ 枚必要で、これら膨大な数のソーラー帆布シートから電気エネルギー一時貯蔵設備まで発電電力を集める電気回路システムを考える必要がある。この貯蔵設備は筏周辺に配置される機器帆柱設置ユニット上に分散配置するか、または FPSO 母船上に集中配置する。

分散配置は、太陽電池で発電された直流電気エネルギーをそのまま直流で集約する場合に、長距離配線による電圧降下とエネルギー損失が大きな問題となるためである。一方、この問題を緩和しエネルギーの集中貯蔵をためには、直流を一旦交流に変換することにより交流集電システムを採用する可能性も考えられ、ここでは、一般家庭などで実績のある太陽光発電方式を参考に概略検討する。

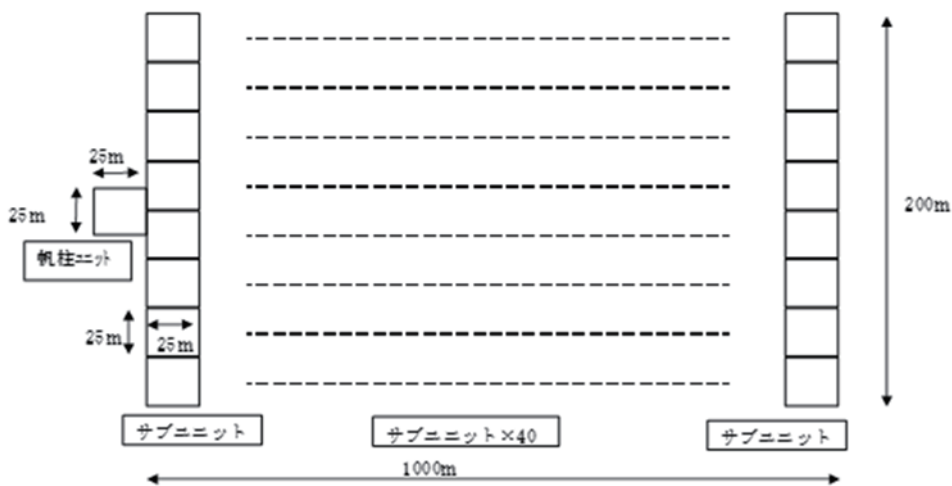


図-8.7 ソーラー筏の概念 (1000m x 200m)

表-8.2 高圧PV用ケーブルの仕様表²⁹⁾

公称断面積		導体		絶縁体厚さ	シース厚さ	仕上外径 (約)	最大導体抵抗		参考 概算質量	
mm ²	構成	本/mm	外径 (参考) mm				Ω/km	Ω/km		kg/km
2	7/0.8	1.8	0.7	1.1	5.7	20C	9.24	11.8	46	
3.5	7/0.8	2.4				90C	6.63	65		
5.5	7/1.0	3.0				1.2	7.1	3.93	4.25	90
8	7/1.2	3.6				7.7	2.31	2.95	120	
14	7/1.6	4.8	0.9	1.3	11.0	8.9	1.30	1.68	185	
22	7/2.0	6.0				11.0	0.824	1.05	280	
38	7/2.6	7.8				12.5	0.487	0.621	435	
60	円形圧縮	9.3	1.0	1.4	15.0	0.305	0.389	650		

(1) 直流システム

istring直流電圧を現時点で実績のある最高電圧 1000V とすることを前提にした場合、太陽電池アレイの組み方においては、筏内での集電時エネルギー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 7 章の筏平面形状の検討でソーラーセル筏全体形状を 5km×5km でなく 2km×12.5km とした主な理由である。この場合、図-8.7 に示すように最大 1 km の送電距離となる。これでも表-8.2 に示す現状の汎用ケーブル仕様ではかなり厳しいが、特注で 150mm² のケーブルが発注できるとして検討する。

図-8.8 に示すように、25m×25m の筏サブユニットには最大 75kW の電力を発電するソーラーアレイで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ものとする。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%以下となるケーブルサイズが必要となる。

電圧降下の簡略式よりケーブルサイズを計算すると、機器帆柱設置ユニットから各筏ユニットまでの距離 D に応じて以下の必要ケーブル断面積が決まる。

- $D=1000\text{m}$: ケーブル断面積 $=35.6 \times 1000 \times 75/1000/20=133.5$ →使用ケーブル 150[mm²]
- $D=800\text{m}$: ケーブル断面積 $=35.6 \times 800 \times 75/1000/20=106.8$ →使用ケーブル 150[mm²]
- $D=600\text{m}$: ケーブル断面積 $=35.6 \times 600 \times 75/1000/20=80.1$ →使用ケーブル 100[mm²]
- $D=400\text{m}$: ケーブル断面積 $=35.6 \times 400 \times 75/1000/20=53.4$ →使用ケーブル 60[mm²]
- $D=200\text{m}$: ケーブル断面積 $=35.6 \times 200 \times 75/1000/20=26.7$ →使用ケーブル 38[mm²]

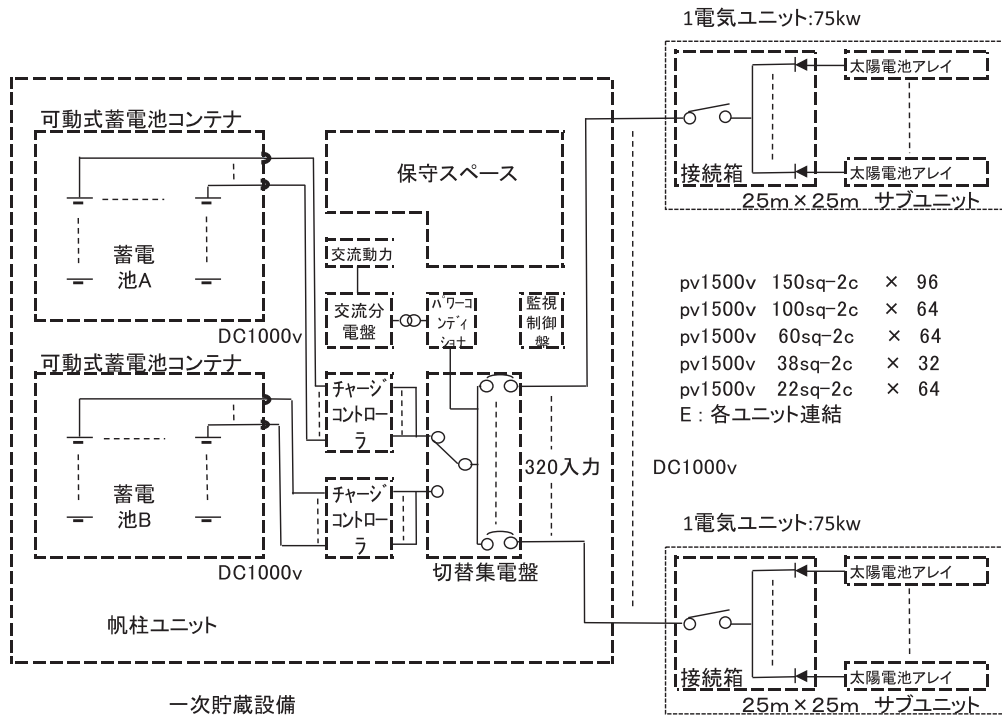


図-8.8 ソーラー筏の電気集約直流システム概念図 (1000m×200m分散型バッテリー貯蔵の場合)

エネルギー貯蔵設備は、200m×1000mの筏範囲での320個のサブユニットの電力を集電しパワーコンディショナー（パワコン）を通して水素（MCH）に変換し貯蔵するか、あるいは蓄電池に充電する設備である。主な機器は、水素貯蔵ではアルカリ水電気分解設備と水素化反応設備、電気貯蔵では高密度バッテリーとなる。

水素変換の場合はアルカリ水電解槽に導いてリアルタイムで水素変換し直ちに貯蔵したトルエンと水素化反応させ、生産されたMCHは専用タンクに貯蔵し定期的に出荷する。

蓄電池充電の場合、充電済の蓄電池は母船にある放電済み蓄電池と定期的に積み替えられ、積み替え中はB系蓄電池が充電されこの作業が繰り返される。

またパワーコンディショナーで交流電力に変換された電力の一部は、所内動力用蓄電池に蓄えられ、監視制御用や位置情報システム・標識灯・航行補助用動力等の電源として使用される。

(2) 交流システム

一般家庭では太陽電池モジュールは2.5kW～3.0kW、集合住宅では5.0kW程度が使われている。集電方式としては図-8.9に示すように、インバータ（パワコン）DC245V/AC202Vを経由して単相50Hzまたは60Hzに変換されて系統に接続され、さらにAC200V/AC6,600Vの変圧器で高圧系統へ連系されている。AC6600V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、これを参考にソーラーセル筏での交流集電システムを考える場合もこの方式を踏襲する。

電線の定格電流は、通電による発熱と電圧降下の両面から決定されており、電圧降下は距離100mで数ボルト以下とされている。今回の分散型集電・貯蔵方式ではエネルギー貯蔵設備を設置する機器帆柱設置ユニットまでの最大距離は1kmとなるように計画しているため、AC6,600Vの高圧系統で負荷容量2,000kW毎に系統を分けた場合、電圧降下は配線距離1kmで50Vとなり、一般的に使用されている電圧降下限界10%以内（600V）に十分収ま

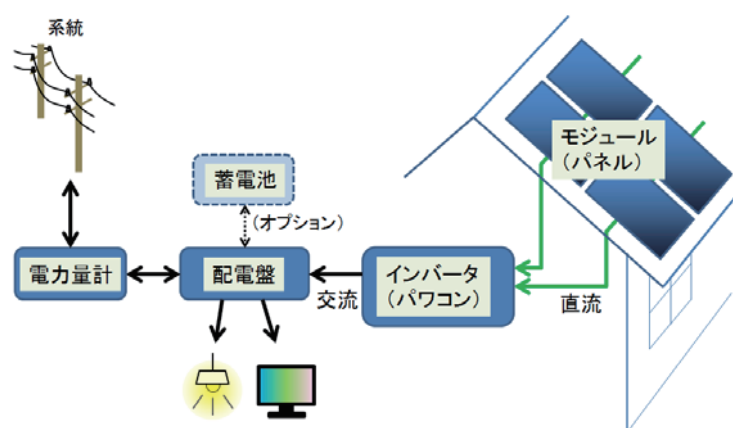


図-8.9 一般家庭用太陽光発電で電気集約システムの概念図

(太陽光発電 - Wikipedia³⁰⁾)

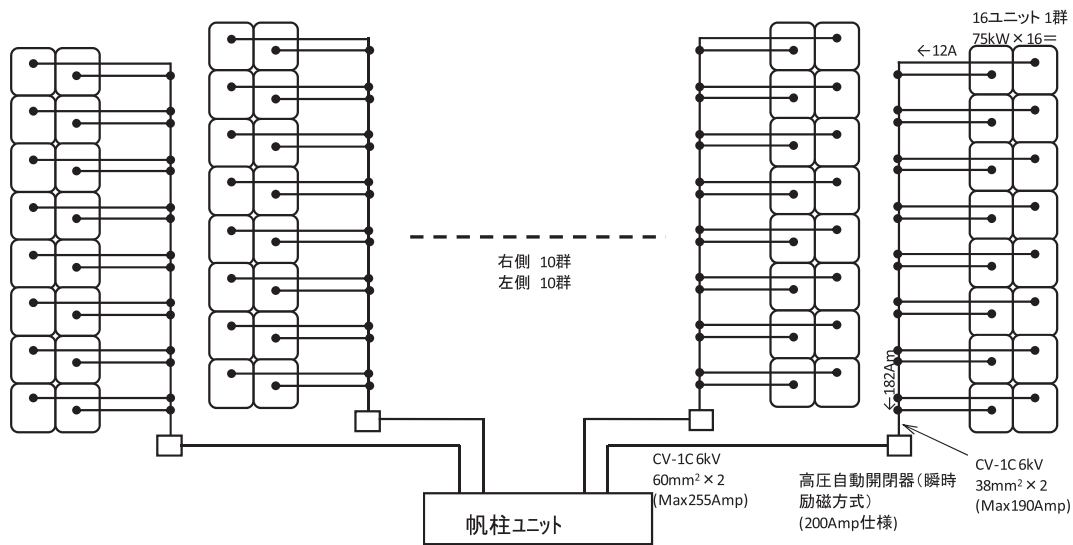


図-8.10 機器帆柱設置ユニットまでの電気集約交流システム

る。この場合の 75kW の各ユニットから機器帆柱設置ユニットまでの電気集約システム概念例を図-8.10 に、さらに1ユニットの構成の例を図-8.11 に示す。

一方、筏サイズ集中型エネルギー集約貯蔵方式で筏の端から端まで電気を送ることを考えた場合でも、図-8.12 に例示するように距離は 7.5km 内外、最長でも 10km は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。

交流システムを採用する場合、エネルギー貯蔵設備の前に再び直流への変換設備が必要にはなるが、直流システムよりは総合的には物量が軽減でき集電時のエネルギーロスも減らせる可能性もある。今後、メガソーラーセル筏の全体形状との関連も考慮しながら直流・交流の両面から検討していく余地がある。

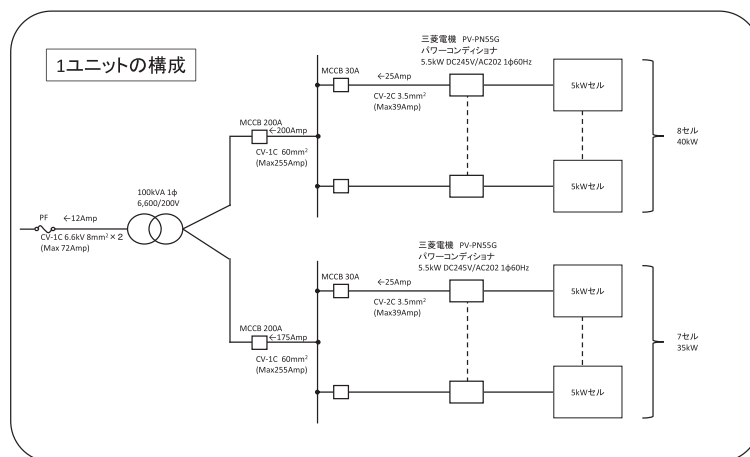


図-8.11 1ユニット (75kW) の構成図

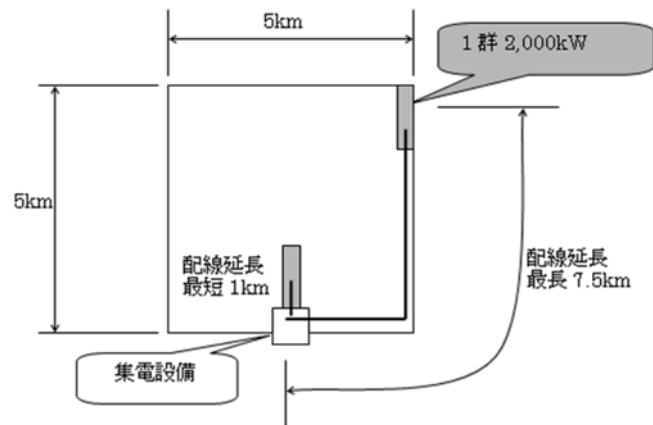


図-8.12 5km×5km 筏での交流システムによる集電イメージ

9. エネルギー輸送システム

9.1 エネルギー輸送手段の種類

低緯度太平洋においてソーラーセル帆走筏で起こした大量の電力をどのように日本に運ぶかは大きな問題である。ここではまず一般的に考えられる手段を取り上げ、整理してみることにする。

9.1.1 電気エネルギーのままでの運搬

発電電力を途中でのエネルギー変換ロスなしに電気エネルギーのまま運ぶことが最も好ましい手段であり、以下のような方法が考えられる。

- ◆ 蓄電池
- ◆ マイクロ波
- ◆ レーザーエネルギー

マイクロ波やレーザー光線を使う方法は宇宙航空研究機構（JAXA）で宇宙太陽光利用システムとして研究されているが³¹⁾、1万トンを超える大量の資材を宇宙に運ばなければ実現できず、現状では本プロジェクトで利用することは考え難く、蓄電池による方法が現実的であると考えられる。ただし、現状よりは2~3倍エネルギー密度が高い蓄電池が必要と見込まれる。

9.1.2 電気以外の物質に変換したエネルギー運搬

大量の電気を他の物質に変換して輸送する方法としては以下が代表的である。

- ◆ 水素
- ◆ メタン
- ◆ マグネシウム

このうち、水素やメタンの検討例は多い。マグネシウムはサハラ砂漠やオーストラリアの砂漠地帯で太陽光を利用する研究で考えられた例がある。水素については別途詳細に検討するため、以下ではメタンとマグネシウムについて述べる。

(1) メタンによる輸送

水素の輸送に代わり、燃料として実績のあるメタンに変換して輸送する選択肢も考えられる。この場合の工程は以下のようなものである。

- ◆ 日本からの船で炭酸ガス CO_2 を筏船団に運搬する。
炭酸ガスと水素でメタンを合成する。メタンの合成は工場では一般に一酸化炭素と水素を使うが、触媒の利用により炭酸ガスと水素でメタンを合成することは可能である。



- ◆ このメタンを運搬船で日本に運び、火力発電所で燃焼させる。燃焼で発生する炭酸ガスを吸収して筏船団に送ることでエネルギー循環が生まれる。
- ◆ 炭素を吸収する技術としては既に多くの工場で利用されているアミン系の炭酸ガス吸収材がある。また中央大学工学部応用化学科大石克嘉教授のCO₂吸収材の利用も考えられる。

(2) マグネシウムによる輸送³²⁾

マグネシウムは、現在は300円/kgと高価でエネルギー輸送物質としては現実的でないが、20~40円/kgで製造できれば、下記の技術により利用できる可能性がある。

- ◆ 酸化マグネシウムMgOを還元してMgを作る方法には電気分解法とピジョン法の2つの方法がある。
- ◆ 電気分解法は現在使われていないが、大量の電気がある場合には可能性がでてくる。酸化マグネシウムに塩素を加えて、無水塩化マグネシウムを作り、これを電気分解すれば、マグネシウムが得られる。
- ◆ 酸化マグネシウムをソーラー筏船団に送り、ソーラー筏から日本にマグネシウムを送り返すという循環が生まれる。
- ◆ 日本でマグネシウムから電気を得る方法としては、マグネシウム燃料電池またはマグネシウム火力発電がある。燃焼させたマグネシウムは酸化マグネシウムMgOになるので、これを還元すればマグネシウム循環ができる。

以上のようにソーラー筏の発電電力エネルギーを日本に運搬する方法としてはいくつかのオプションが存在するが、ここではその内から以下の2つの輸送方法について詳しい検討を行う。

① 将来型高エネルギー密度蓄電池による輸送

電気を蓄電池に貯蔵→バッテリー輸送船で日本に輸送→蓄電池から送電網に放電→放電後の蓄電池を載せたバッテリー輸送船を筏船団まで回送

② 電気分解水素のMCHによる輸送

発電電力でアルカリ水電気分解→トルエン水素化反応設備→生産されたMCHをタンカーで日本に輸送→MCH脱水素反応設備による水素放出→元に戻ったトルエンをタンカーで筏船団まで返送。

以下では方法①に必要な蓄電池技術と、②に必要な電気分解+水素輸送技術について詳しく述べる。

9.2 蓄電池による電気輸送技術の検討

図-9.1には蓄電池(2次電池)の歴史を示す。鉛電池から始まり種々の蓄電池が開発され、エネルギー密度が時代と共に増加してきた。現在、大容量の蓄電池としてはNAS電

池が実用的に使われており、エネルギー密度は0.2kWh/kgである。一方、それより小容量で自動車用に開発されてきたリチウムイオン電池があり、エネルギー密度は現時点で0.25kWh/kg程度である。さらに20～30年先にエネルギー密度0.7kWh/kgのエネルギー密度を目指した将来型蓄電池の開発がNEDOの2次電池ロードマップの目標に掲げられている³³⁾。

以下ではこれらのソーラー筏プロジェクトでの大量の電気エネルギー輸送への適用可能性について述べる。

(1) NAS 電池 (東京電力(株) 中島氏講演資料)

図-9.2にはNAS電池の諸元と概要をまとめており、その要点は以下の通りである。

- ◆ 負極のナトリウムと正極の硫黄の間に導電性セラミック隔壁があり、ナトリウムと硫黄を液体状態に維持し導電性を保つため、300°Cに保温し続けなければならない。
- ◆ 蓄電した電気を保温のために使うと例えば50kW×7.2h=360kWhの電池では、7.5日で使ってしまう。したがって長時間かけて低緯度太平洋から電気を運ぶことはできない。
- ◆ 保温を切って運ぶことも考えられるが、陽極と陰極の隔壁に厚さ1.5mmのセラミックスを使っているという電池の構造上の問題から、温度の上下は7回程度が限度である。将来この問題をクリアする可能性もあろうが現段階ではこの電池をソーラー筏からの電力輸送に適用するのは困難である。

(2) リチウムイオン電池 (産総研 大久保氏講演資料)

- ◆ リチウムイオン2次電池は高エネルギー密度(現時点で0.25kWh/kg程度)、高出力密度、高耐久性を兼ね備えている。
- ◆ インターカレーションにより化学反応を伴わず充放電ができるため電極の劣化がわずかで理想的な電池と言える。

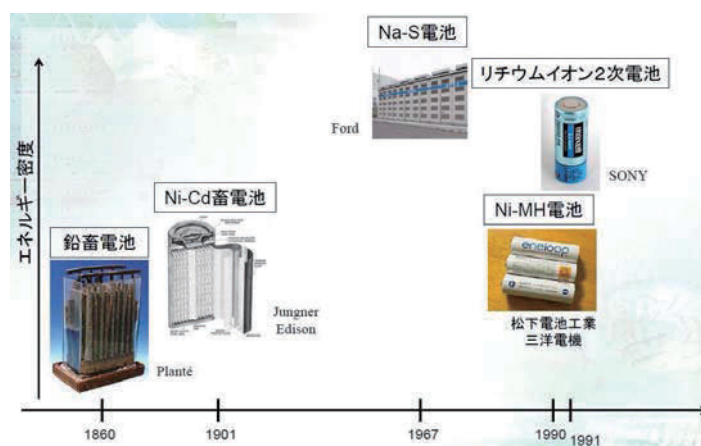


図-9.1 二次電池の歴史 (産総研: 大久保氏講演資料)

▶ NAS電池の主要諸元
【単電池】



約0.23kWh/kg

型 式	T5(大型)
開路電圧	2V
定格出力	153W
定格容量	1220Wh
効 率	89%
寸 法	Φ91×513mm
重 量	5.3kg

【50kWモジュール】

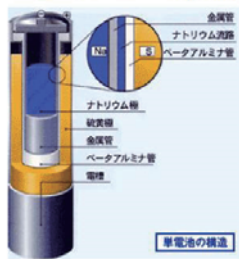
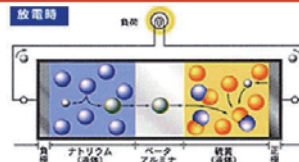


約0.11kWh/kg

型 式	E50kW
単電池本数	384本
定格出力	52.6kW
定格容量	379kWh
効 率	80~85%
寸 法	2.2×1.7×0.6m
重 量	3.4トン

▶ NAS電池の概要まとめ

- 負極：ナトリウム, 正極：イオウ
- 電解質：ベータアルミナセラミックス
- 高温で動作させる(約300°C)
- 鉛電池よりエネルギー密度が高い。
- リチウムイオン電池とは異なり, 数1000kW~数万kWが実運転中。
- 2500~4500充放電サイクル寿命あるとされている。
- ヒーターで保温するため効率はやや低い(充放電電力量比で約85%)。



ユニット電池の構造



50kW×7.2時間の標準モジュール
電気ヒーター+真空断熱



二又風力用34MW

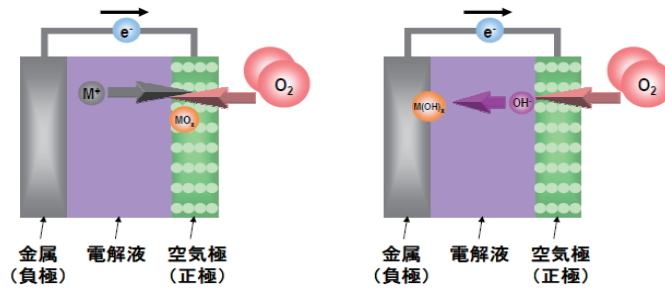
19

図-9.2 NAS電池の緒言と概要 (東京電力: 中島氏講演資料)

- ◆ ただし希少金属リチウムを使用し主に自動車用に開発されており, 電力大量輸送の目的には適さないと考えられる。

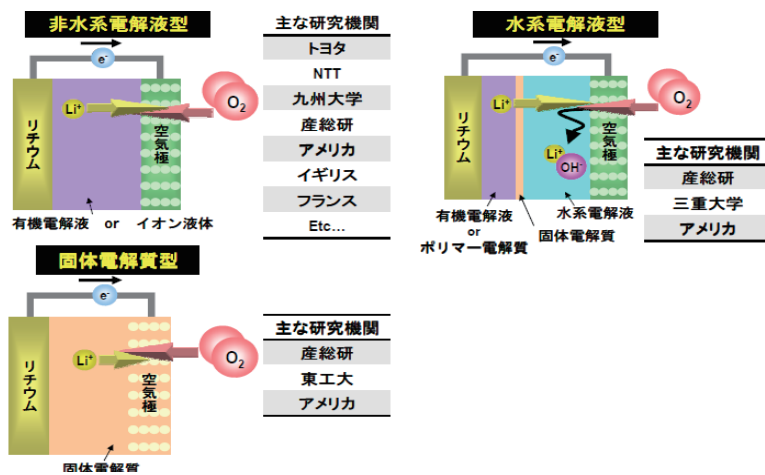
(3) 将来型高エネルギー密度蓄電池 (産総研 北浦氏講演資料)

NEDOのロードマップは, 20~30年ほど先には, エネルギー密度0.7kWh/kgの蓄電池開発を目標としている。現在その有力候補と考えられているのは金属-空気電池で, 特にリチウム-空気電池を中心に研究されている。その要点は以下の通りである(図-9.3, 9.4参照)。



Type	Reaction	Energy density
Zn-Air	$2\text{Zn} + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{ZnO}$	1090 Wh/kg
Fe-Air	$2\text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$	764 Wh/kg
Al-Air	$4\text{Al} + 3\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{Al}(\text{OH})_3$	2800 Wh/kg
Li-Air	$2\text{Li} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{Li}_2\text{O}_2$	3500 Wh/kg

図-9.3 リチウム-空気電池の原理とエネルギー密度 (産総研：北浦氏講演資料)



タイプ	特徴	塩	溶媒
水溶液	イオン伝導性が高い 電位窓が小さい	LiNO_3	H_2O
有機電解液	電位窓が広い 水溶液よりも低いイオン伝導性 発火の危険性 安全性が高い	LiPF_6 LiClO_4	Ethylene Carbonate Propylene Carbonate
イオン性液体	イオン伝導性が低い コストが高い	LiTFSI	EMI-TFSI
固体ポリマー電解質	安全性が高い イオン伝導性が低い	LiTFSI	Polyethylene oxide
無機固体電解質	安全性が非常に高い イオン伝導性が低い		Li-Al-M-PO_4 Li-P-S

図-9.4 リチウム-空気電池の電解質による種類分けと特徴 (産総研：北浦氏講演資料)

- ◆ 金属-空気 2 次電池では、炭素からなる極にある空気中の酸素(O_2)が正極なるため、重量を軽減できエネルギー密度が大幅に向上する。
- ◆ 負極としてはリチウムが最もエネルギー密度が高く、理論的には 3.5kWh/kg にもなるが、アルミ・亜鉛・鉄などの安い金属でも高い値が望める。リチウムは資

源量は少ないが、Zn や Mg に比べて負電極電位が大きく取れるためメリットが大きい。

- ◆ 電解質としては、非水系電解液型・水系電解液型・固体電解質型があり、それぞれ一長一短がある。安全上は固体電解質型が優れているが、イオン電導性が問題。
- ◆ 電池の理論容量 (mAh/g、Ah/kg) やエネルギー密度 (Wh/g、kWh/kg) の分母の質量は電極だけの場合、電極+電解液の場合、電池全体の場合などバラバラで表示されるため、注意が必要。
- ◆ 金属-空気電池の研究は産総研、自動車会社、大学で行われているが、電池メーカーの動向は不明。まだ実用化したものは表れていないが、IBM リサーチが進める Battery 500 プロジェクトで自動車用電池を目標に開発中のものが実用化に近い。
- ◆ 主な技術的課題は、①充電時にリチウムデンドライトが析出 (金属リチウムが樹枝状に析出) し機械的トラブルを起こす点、②放電時に空気中の CO₂ が Li₂CO₃ を生成しそれを分解するために充電時に高い電圧が必要となり、充放電でのエネルギー損失が大きい点である。
- ◆ リチウム-空気電池の安全性に関わる点は、金属リチウムと水が接することによる激しい反応、有機質電解液の発火性などがある。
- ◆ リチウム-空気電池は負極に金属リチウムをつければ放電が始まる。リチウムと水 (電解液) がある限り放電し続けることが可能であり、バッテリー容器を運ばなくても電力が運べる可能性ある。他の金属電極でもこの方法は原理的に成り立ち、このような金属の形で大電力が運べることを利用した蓄電池のコンセプトは今のところ存在しない。

(4) 大量電力輸送用の将来型金属-空気電池の可能性

大電力を運ぶことに特化した高エネルギー密度蓄電池のコンセプトは今のところ存在しないことを受けて、ここでは金属電極を持ち運ぶ大量電力輸送用の金属-空気電池の概念を以下のように案出した (特許出願 CU1302 再生可能エネルギー搬送再生方法)。その基本的考え方は図-9.5 の流れに示している。ソーラー筏において充電した金属-空気電池の陰極に析出した金属棒を取り出すとともに、バッテリー電解容器にある電解液を抜き取り、電解液は輸送船の化学液体貯槽に貯蔵し、電極は固体貨物として別の保管庫に入れて輸送する。

- ◆ これにより電解容器の運搬重量を削減できるだけでなく、輸送中の放電ロスがゼロとなり安全性も増す。ただし日本では電解液を入れ金属棒を挿入して放電するための電解容器が別途必要となる。
- ◆ 日本からメガソーラー筏への帰路は、日本で放電後に金属溶解した電解液を回

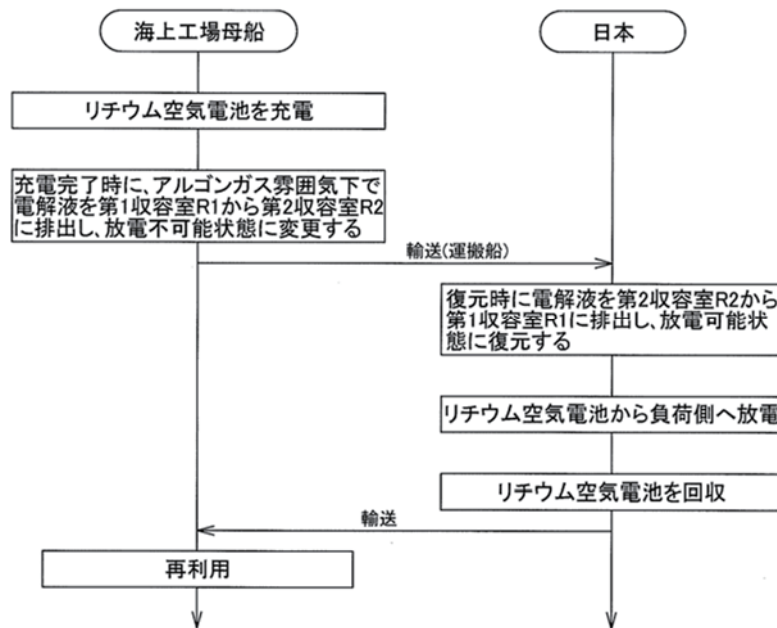


図-9.5 金属-空気電池による大量電力輸送用の概念

収し、同じ輸送船の化学液体貯槽に入れて運ぶことになる。

- ◆ これをソーラー筏での電解容器に満たし電極を挿入して充電することにより、電解液に溶解した金属を陰極に析出させる。

現時点では単なる蓄電用の金属空気 2 次電池についても未開発であるが、今後、このような大容量電力輸送用蓄電池へ開発の方向性が向くことが期待される。

9.3 水素によるエネルギー輸送の検討

ここではソーラー筏で発電した電気を使ってリアルタイムで水を電気分解し、生産・貯蔵された水素を輸送する技術について考える。以下ではまず水の電気分解技術と水素の貯蔵輸送技術に分けて述べる。

9.3.1 電気分解技術 (元・旭化成 (株) : 野秋氏講演資料)

水電解は、工業的には 90 年以上前から実用化された技術であり、図-9.6 に示す以下の 3 種類が知られている。

- ① アルカリ水電解：電解質として苛性カリ溶液を用いて、古くから実用化され、大型水電解装置が稼働している。現在は、水素製造コスト削減のため電解電圧低減と高電流密度化，設備コスト削減の努力がなされている。
- ② 固体高分子水電解：電解質として固体高分子膜を利用している。1セル当たりの電解面積は小さいが、「アルカリ水電解」より高電流密度で電解でき、電解圧力も

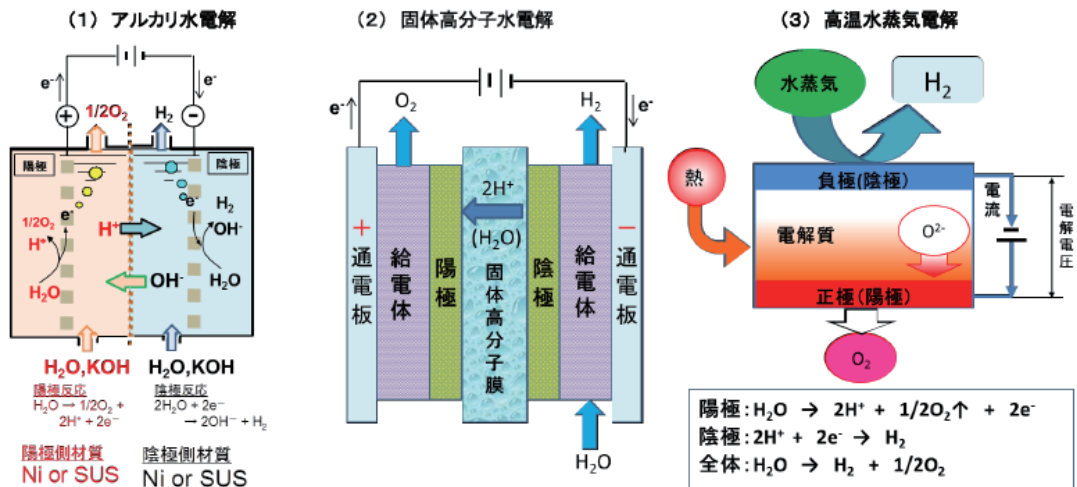


図-9.6 水の電気分解の種類 (元・旭化成 (株): 野秋氏講演資料)

高くできる特徴がある。水素ステーションなどでオンサイト水素製造に適している。

- ③ 高温水蒸気電解：電解質としてセラミック導電体を用いている。大型化しにくいですが、高温で電解できるため高温蒸気を導入して電解電圧を低減できる。高温廃熱が利用できる場合は有利である。

一方、海洋では海水を直接電気分解することが当然考えられている。無限にある海水を用い高濃度アルカリを使用しない環境に優しい電解技術が開発中（東北大学橋本研究室）であるが、未だ実用段階にない。問題点としては塩類濃度が低いいため電解電圧が高く電力ロスが大きいことや、電流密度が低いため設備コストが高いことなどである。それに対し純水を使ったアルカリ水分解は成熟技術であり、大型プラントへの適用も可能である。

水電解と類似した技術として、イオン交換膜法食塩電解の技術がある。最近ではイオン交換膜法食塩電解の技術をベースに、水電解の技術向上・性能向上・コストダウンが進められている。

アルカリ水分解技術の要点は以下の通りである (元・旭化成 (株): 野秋氏情報)。

- ♦ 500m^3 の発生水素に対し、アルカリ水分解に必要な純水は**0.40トン**と少量である。既に確立された逆浸透膜法製造技術により純度を特に高めた場合でも水素 1m^3 当たりの**0.4~0.5円/ m^3** となり、水素コストを**30円/ m^3** とするとその割合は**1~2%**と小さい。電解質として水酸化カリウム (KOH25%溶液) は入れ替えなしに継続使用し、純水のみを補給して連続運転できる。
- ♦ アルカリ水分解は1気圧下の反応であり、アルカリ物質の耐漏洩性については十分実績があるため、環境汚染に特に注意が必要な海洋でも対応可能と思われる。

- ◆ アルカリ水分解のエネルギー効率（生成された水蒸気の蒸発潜熱を含んだHHVベース）は最大82%と高く、電解温度を高温にするほど効率が上昇するため、トルエンにH₂を吸収させてMCHにする時に発生する発熱量を電解槽に導いて効率向上に繋げられる可能性あり。
- ◆ 大型水電解槽で現在実用化されているものとして 図-9.7に示すNEL-Hydrogenがあり、500Nm³/hの水素ガス製造能力がある。この必要電力は4~5kwh/Nm³H₂/hである。NEL Hydrogenのアルカリ水電解プロセスは、アルカリを陽極側と陰極側一つのポンプで供給し、気液分離タンクで酸素、水素を分離する非常に簡単なプロセスである。

9.3.2 水素の大量長距離輸送技術

水素輸送技術は以下の3方法に分けられる。

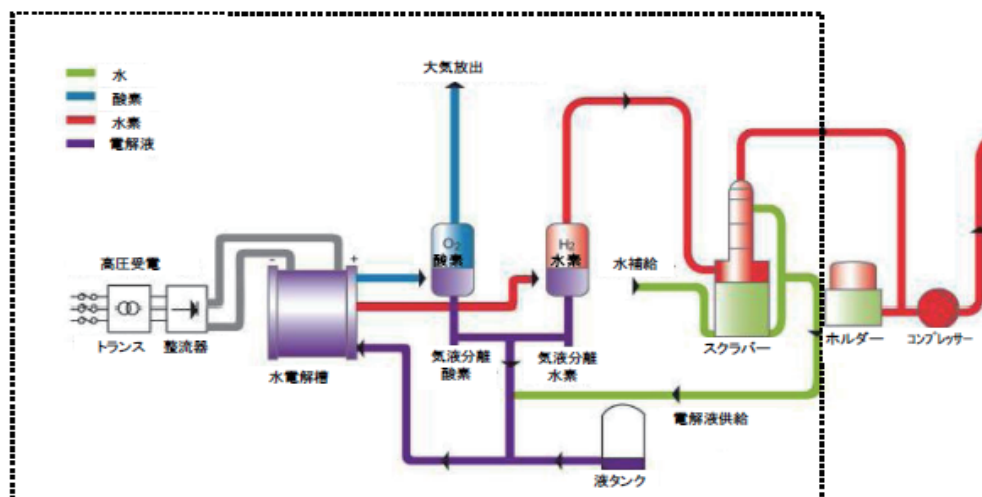


図-9.7 大型水電解槽で現在実用化されている NEL-Hydrogen の写真とフロー

(元・旭化成(株)：野秋康秀氏講演資料)

① 有機ケミカルハイドライド法

トルエンなどの芳香族化合物を水素化して水素化芳香族化合物として水素を貯蔵し、常温・常圧の液体で貯蔵・輸送を行い、使用場所で脱水素反応を行って水素を取り出す化学的な貯蔵・輸送方法である。この有機ケミカルハイドライド法は、1980年代に、カナダで製造した水素をヨーロッパに海上輸送することを目的としたユーロ・ケベック計画の中で検討された技術であるが、長期運転が可能な安定性の高い脱水素触媒が開発されておらず、これまで実用化に至っていない。

② 液化水素法

液化天然ガス (LNG) の沸点 -160°C よりはるかに低い -253°C まで温度を下げ、水素を液化して輸送する方法である。LNGの輸送技術がどの程度応用できるかや、一桁違う冷凍技術がコスト的に成り立つかを調べる必要があるが、ドイツでは液化水素のスタンドがあるとのことである。

③ 圧縮水素法

水素ガスを $150\sim 750$ 気圧まで圧縮した気体状態での輸送である。日本の燃料電池自動車では水素ポンペを 500 気圧程度にすることを考えているが、LNG輸送船のような球形大型タンクではそれほどの高圧は達成できていない。

このうち、a)の有機ケミカルハイドライド法については、近年日本の企業が固定床に安定した活性を発現する脱水素触媒の開発により実用化に成功し、既に実用化段階を迎えている。以下ではその技術について専門家の講演(千代田化工建設(株):岡田佳巳氏)に基づき述べる。

9.3.3 有機ケミカルハイドライド法による輸送技術(千代田化工建設(株) 岡田氏講演資料)

有機ケミカルハイドライド法の概要を図-9.8に示すが、トルエン(Toluene)に H_2

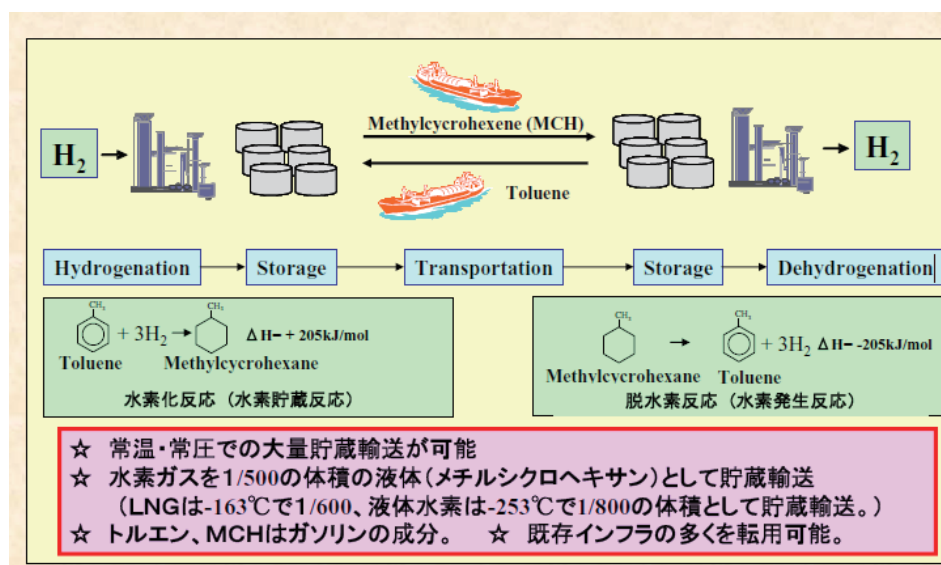


図-9.8 有機ケミカルハイドライド法の概要 (千代田化工建設(株):岡田氏講演資料)

を吸収させて MCH（メチルシクロヘキサン：Methyl-cycro-hexane）にする水素化反応と MCH から H₂ を分離してトルエンに戻す脱水素化反応の組み合わせからなる。トルエンの水素化技術ではニッケル系触媒を用いているが、既に 1970 年代から実用化されていた。一方、MCH を脱水素化技術は 1980 年代カナダユーロケベックの水素輸送計画の中で研究されたが、触媒の寿命が短くて実用化に至らなかった。日本で開発された白金アルミナ触媒では白金粒子を 1nm 以下と小さくすることで、寿命が 1 万時間まで伸び（2 年に 1 回交換）実用化にこぎつけた。ちなみに触媒に用いる白金資源は国内にリサイクル量として十分な賦存量が確保できており心配ないとのことである。

現状技術の要点を以下にまとめる。

- ◆ 横浜市子安には実証プラントが稼働中である。2016 年度中に川崎臨海部に商用プラント（8 万 Nm³/時間）を開業し、水素化した MCH を海外からタンカー輸送する予定。その後、大阪、九州などでもプラント建設を計画。
- ◆ このシステムは脱水素化反応器（国内）と水素化反応器（海外）からなり、反応熱はそれぞれ 400℃、200℃、圧力は 10 気圧で、高压ガスの扱いたが特殊条件ではない。MCH 体積の 500 倍の水素（Nm³）の貯蔵輸送が可能で長期貯蔵での品質劣化もない。
- ◆ トルエンと MCH は石油とほぼ同じ成分であり、既存の石油貯蔵輸送インフラがほぼそのまま転用できる。
- ◆ 川崎プラントでの水素の値段は 30 円/Nm³ が目標。中東では化石燃料から生産した 10 円/Nm³ 以下の水素が CO₂回収エネルギー費や輸送費などで日本では 30 円/Nm³になる。
- ◆ 水素化・脱水素化システムによる水素輸送効率は 70%で、損失 30%のうち 10%はタンカーによる輸送エネルギー（東南アジアの場合）、20%はシステム損失（低温排熱など）である。上記の 20%システム損失はこの反応熱エネルギーのうち、80℃以下の低温排熱以外を有効活用することを前提として算出しており、発熱反応の熱を全て捨てる場合には損失は 40%以上になる。
- ◆ 水素化反応は発熱反応、脱水素化反応は吸熱反応である。これは MCH に結合した状

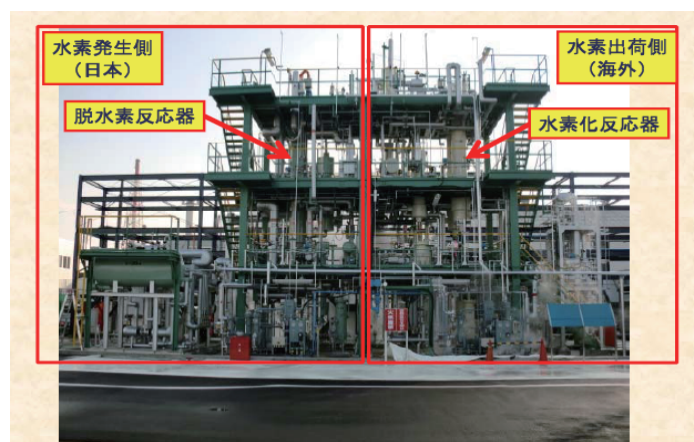


図-9.9 水素化・脱水素化反応器を備えた有機ケミカルハイドライド法実証プラント
（千代田化工建設（株）：岡田氏講演資料）

態の水素エネルギーが H_2 ガスに比べて 30%低いエネルギー状態であるためその分のエネルギーの出し入れが水素化・脱水素化の際に必要なためである。

- ◆ 脱水素化反応（吸熱反応）は水素需要地での水素生産時に生じるため、たとえば隣接してコージェネ発電所を造りその排熱を利用することでエネルギー有効活用ができる。水素化反応は水素生産地で起き、水素生産用電解槽のエネルギー効率上昇への有効活用が考えられる。
- ◆ 電気分解（アルカリ水電解槽）のエネルギー効率は $4.5 \text{ kWh} / 1\text{Nm}^3\text{H}_2$ （このうち電気分解使用分 4.0 kWh ，ポンプなど補機分 0.5 kWh ）であるのに対し、水素発電では $1 \text{ kWh} / 1\text{Nm}^3$ と大変に効率が悪い。
- ◆ 現時点の水素輸送は化石燃料を原料とするものである。再生可能エネルギーの水素輸送としては水力・風力が有利で、パタゴニアの風力発電で電気分解した水素を運ぶ計画を立てている。水素の目標価格は $20\sim 30 \text{ 円/m}^3$ である。
- ◆ 将来技術による再生可能エネルギーの水素輸送を考えた場合、電気分解が不可欠な PV（太陽電池発電）はエネルギー変換効率上余り有利でない。これに対し、光触媒装置や藻類による水素の直接生産は将来的には 10%程度の変換効率も考えられ、その方向性も目指すべきとの見方がある。

10. 法規・海洋環境など関連課題

本エネルギーシステムは太平洋の低緯度公海上で運用されるが、ソーラー筏船団の構造、製作場所・維持管理やエネルギー運搬法など等がまだ具体的に固まっていない。したがって環境・法制度については、現時点で考えられる課題のみを抽出することとする。

なお、付録-2 に外務省資料「海洋の国際法秩序と国連海洋法条約」を参考に掲載する。

10.1 環境

本システムは、公海上（赤道近く）を他の船舶などとの調整を図りながらゆっくりと航行しながら運用するものであり、他の船舶への影響を除いては海洋環境に及ぼす影響は大きくはないと思われるが、あえて環境的課題を抽出すると次の事項が挙げられる。

- ① 海洋気象に与える影響（大気、流れ、波、水質 等）
- ② 海中への影響（浮体下の暗黒の世界、付着生物 等）
- ③ 構造物の事故による影響（火災、沈没、廃棄物流出、船舶衝突、航空機衝突）
- ④ 海洋生物に対する影響

今後、これら個々の課題についての具体的検討が必要である。

10.2 法制度

10.2.1 法制度全般

本システムは、大規模な構造物であり、公海上を運行するものであるが、どこで製作し公海まで運搬し設置するか、その後の維持管理保守点検や太陽光エネルギーの運搬方法など運用面により法も多種多様であり、法の適用も変わってくる。以下では、関連法規についての調査や専門家の講演（日本海事協会）などを参考にして要点をまとめる。

国連海洋法条約（「海洋法に関する国際連合条約」）（外務省ホームページ「外務省 海洋の国際法秩序と国連海洋法条約：付録-2」より引用）によれば、「公海はすべての国に開放され、すべての国が公海の自由（航行の自由、上空飛行の自由、漁獲の自由、海洋の科学的調査の自由等）を享受する。」

さらに本システムに関係する国内法を抽出すると次のとおりである。

(1) 安全上・構造上に関する法規課題

公海で帆走筏方式にて航行しながらソーラー発電する構造は、我が国の関連法では船舶安全法、港湾法、建築基準法、消防法、鉱山保安法、電気事業法など法的適用を受ける。

(2) 管理・運営面に関する法規課題

本システムの管理・運営面でも我が国の関連法では船舶安全法、港湾法、建築基

準法，消防法，鉱山保安法，電気事業法など法的適用を受ける。

(3) 税制等の関連する法規課題

本システムの事業主体により，どのような権利がえられるのか，登記して第三者に対して対抗できるのか，どのような税制が適用されるのかを検討する必要がある。

(4) 公海上での課題

公海は，自由に使用してよいが，他国の利益に妥当な考慮を払って行使する必要がある。(海洋法条約第87条①) また，公海上の資源は人類の共同財産であるとの考えがあるので，公海上のエネルギー資源を利用しようとする場合は，国連に上程し協議しなければならないと思われる。

10.2.2 日本海事協会の講演要旨(日本海事協会 赤星氏講演資料)

海洋利用の法的側面についての講演概要は以下の通りである。

- ◆ 国際海洋法で定められる公海での航行の自由に関し，ソーラー帆走筏が航行に該当するかについては，国際条約上の解釈や取り扱いを確認し実現可能性を確認する必要がある。
- ◆ ソーラーセル筏は日本の船舶安全法では船舶としての規制対象になると解釈される。特殊船舶として特別基準の適用も考えられるが，浮体の強度・耐久性・操縦性・係留性などの要件が想定される。
- ◆ 海上衝突予防法によれば，航行中に会った相手船舶を避ける義務は，動力船>帆船>漁業に従事している船舶>運転不自由船、操縦性能制限船の順序で帆船の場合は，動力船の方がよけることになっている。
- ◆ 赤道直下の海域は遠洋区域のカテゴリーに該当し，現状では航行区域制限が無い一定の推進性能の動力船でなければ航行できないことになっている。

10.2.3 現状での見通し

本プロジェクトで提案するソーラー帆走船団については，以上の講演内容で示された国内法での船舶安全法に適合しない面がある。しかし大量の日射エネルギーが降り注ぐ公海を帆走して基幹エネルギー収集の場として活用する場合，従来まったくなかった人類のエネルギー利用形態を実現し化石燃料利用からの転換を図る構想を実現するためには，規制の枠組みに新たな考え方を持ちこむことが必要であると思われる。

ちなみに低緯度太平洋は図-7.9 に示すように商用船の航路としては極めて利用度の低い海域であり，ソーラーセル筏の他の船舶の航行に与える影響は小さいと考えられるが，他船舶への対策としては，例えばソーラーセル筏の航行ルートについての事前予告は勿論，周囲の船舶への電波による位置情報発信，先導船によるガイドなどが考えられる。

11. 技術的・経済的成立性の概略検討

11.1 成立性評価の基本条件

低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システムは極めて大規模・広範なエネルギーシステムであり、その成立性には低緯度太平洋で操業する筏船団および日本との間を往復するエネルギー輸送のみでなく国内外の多様な関連機関が関わることになる。しかしここでは、このエネルギーシステムの成立性検討の対象範囲を、筏船団自体の建設・運転・保守とエネルギー輸送（電気分解水素輸送とバッテリー電気輸送を考える）に関する部分に限定して評価することとする。

成立性評価の大前提としてソーラー筏全面積 25km^2 を受光面積としたときの太陽電池の電気エネルギーへの変換効率を 12%、1 日当たりの日射エネルギーを $8\text{kWh/m}^2/\text{day}$ としたときの発電量

$$8\text{kWh/m}^2/\text{day} \times 0.12 \times 25,000,000\text{m}^2 = 24,000,000\text{kWh/day}$$

をベースに考える。

またこのシステムの発電時間は昼間の 8 時間(h)のみと考えると、このシステム全体の発電容量は

$$24,000,000\text{kWh} \div 8\text{h} = 3,000,000\text{kW}$$

となる（図 8.6 参照）。

このエネルギーを貯蔵し 2 週間に 1 回の頻度でエネルギー運搬船に引き渡すこととする。その場合、筏内でのエネルギー集約・貯蔵システム（電解水素貯蔵あるいはバッテリー貯蔵）での損失と筏船団所内使用電力の合計を全エネルギーの 3%と仮定すれば、筏船団からエネルギー輸送船へ 2 週間に 1 回引き渡すエネルギー総量は

$$24,000,000\text{kWh/day} \times 14\text{day} \times (1.00 - 0.03) = 325,920,000\text{ kWh} \rightarrow 326\text{Gwh}$$

となる。

11.2 技術的成立性

11.2.1 筏船団

(1) メガソーラー筏本体：

2500 個の筏ユニット（ $100\text{m} \times 100\text{m}$ ）からなり、各筏ユニットは 16 個のサブユニット（ $25\text{m} \times 25\text{m}$ ）からなる。主要部の材料については、鋼材と HDPE（高密度ポリエチレン）の 2 ケースを考え、7 章での検討結果を使う。鋼材筏では半潜水浮体・浮体上の骨組み構造架台と帆柱・ソーラー帆布からなり、HDPE 筏では浮体の上にソーラー帆布支柱・ソーラー帆布が載る。すべてのユニット・サブユニットはジョイントで連結される。

2種類の筏本体の重量は以下の通りである。

① 鋼製筏

- ◆ 筏サブユニット単体重量=81 トン
- ◆ 筏ユニット単体重量=81×16=1296 トン
- ◆ 筏本体全体重量=1296 トン×2500=3,240,000 トン

② HDPE 筏

- ◆ 筏サブユニット単体重量=17.6 トン
- ◆ 筏ユニット単体重量=17.6×16=282 トン
- ◆ 筏本体全体重量=282 トン×2500=704,000 トン

筏の形状については7章・8章で検討した通り、多数の機器帆柱設置ユニットを備え、電気集約距離が短く保守管理の容易な2km×12.5kmの蛇型を主な対象とするが、今回具体的検討は不十分ではあるがFPSO母船方式と組み合わせた5km×5kmの正方形筏についても参考のためごく概略の検討を行う。

(2) ソーラー帆布：

- ◆ CIS 薄膜ソーラーモジュールで、撓み性帆布との一体型を考える。
- ◆ 25m×25mの筏サブユニット全面が12.5m×12.5mで変換効率12%のソーラー帆布4枚で覆われる条件を基本とする。
- ◆ 7章で述べた筏の設計においては、ソーラーモジュールに覆われるのは巡回路などを除いた全面積の70.6%となるようにしているため、当初計画通り全筏で300万kWの発電容量を得るためには $12\% \div 0.706 = 17\%$ に設定し直さなければならない。この場合はモジュールの将来的変換効率向上を見越して17%程度と再設定することは可能と考える。
- 現状で帆布を基盤とする薄膜・撓み性ソーラーモジュールは存在しないが、ニーズがあれば十分開発可能と考える。7章の筏の概念設計によれば、ソーラー帆布の面積はサブユニット当たり $10.5\text{m} \times 10.5\text{m} \times 4 = 441\text{m}^2$ ($25 \times 25\text{m}^2 = 625\text{m}^2$ の70.6%)で筏ユニット当たり $441\text{m}^2 \times 16 = 7056\text{m}^2$ であり、筏全体では $7056\text{m}^2 \times 2500 = 17,640,000\text{m}^2$ となる。
- ソーラー帆布（厚さ5mm）のソーラーセル・配線・防水コーティングなどを含めた密度を $1.00\text{t}/\text{m}^3$ と仮定すると、重量は1筏サブユニット当たり $10.5 \times 10.5 \times 0.005 \times 4 \times 1.00\text{t}/\text{m}^3 = 2.2$ トン、1筏ユニット当たり $2.2\text{t} \times 16 = 35.2$ トンであり、筏全体では $35.2\text{トン} \times 2500 = 88,000$ トンとなる。なお、筏サブユニット全面（25m×25m）をソーラー帆布（変換効率12%）で覆う設計でも、元々軽量の帆布が重量的に大きく影響することはないと考えられる。

(3) 電気エネルギー集約システム：

膨大な数のソーラー帆布から電気を集約する機器帆柱設置ユニットまでの電力損失

を少なくするため、最大距離 1000 m で最大電圧 1000 ボルトの直流電気集約システムを基本に考える。このために 2km×12.5km の蛇型筏であることが必要である。世界的には現状の陸上メガソーラーでもこの電圧レベル 1000 ボルトが使われ始めており、技術的に可能と思われる。また、エネルギー貯蔵設備に繋ぐためのインバータなどの設備についても、規模拡大は必要だが既に十分な技術的実績がある。

一方、8章で述べたように、直流交流変換を介したさらに長距離の交流電気集約システムも可能と考えられ、この場合 5km×5km の正方形筏により FPSO 母船方式によるエネルギー集中貯蔵方式が浮上してくる。そこでこれを適用した場合についても後述の成立性評価でオプション案として検討する。

(4) 機器帆柱設置ユニット：

前述のように、2km×12.5km の蛇型筏を想定した場合、0.2km×1km 当たりには 1 個の割合で機器帆柱設置ユニットを筏外縁に設置する。筏本体は耐波浪設計条件を緩和して軽量の骨組み構造によりコストダウンを図るのに対し、機器帆柱設置ユニットは重要度の高い設備（発電エネルギーの一時貯蔵設備、筏ユニットメンテナンス設備、高い帆柱や航行灯などの航行用設備）を載せ、航海用補助動力も備えるため、設計条件を筏ユニットよりアップさせるものであり、通常の船舶に近いものとなる。

以下に機器帆柱設置ユニットへの積載物重量を算定する。

① 水素貯蔵の場合

水素化プラント（500 トン）、アルカリ水電解槽（1000 トン）、トルエン・MCH 貯蔵タンク（[1200]トン×2）、内部動力用蓄電池（300 トン）、インバータ（60 トン）、移動用台車（25 トン）、航海用帆柱（50 トン）。

② バッテリー電気貯蔵の場合

機器帆柱設置ユニットの積載物は金属-空気蓄電池（3800 トン）、内部動力用蓄電池（300 トン）、インバータ（60 トン）、保守点検用移動台車（25 トン）、航海用帆柱（50 トン）。

このように、機器帆柱設置ユニットの積載重量はいずれも 5000 トン以下であり、5000 トン積載できるバージ船を想定する。

一方、5km×5km の正方形筏についてエネルギー貯蔵設備の FPSO 母船への集中設置を図る場合、機器帆柱設置ユニットには重要機器を設置する必要はなくなる。そこで、航海標識用帆柱や保守点検台車を設置し航海用補助動力を備えた 1000 トン積載程度の台船を筏の周囲に 200m 間隔で 100 台を等間隔に配置することを考える。

(5) エネルギー貯蔵設備：

各機器帆柱設置ユニット上に設置するエネルギー貯蔵設備はアルカリ電解水素生産・貯蔵設備あるいは高エネルギー密度バッテリーからなる。

発電電力を各機器帆柱設置ユニット上に設置したエネルギー貯蔵設備に貯蔵し 2 週間に 1 回エネルギー輸送船との交換引き渡しを行うこととする。機器帆柱設置ユニットの総数は 125 個であり、各ユニット当たりの 2 週間分の貯蔵エネルギー量は

$$325,920,000 \text{ kWh} \div 125 = 2,610,000 \text{ kWh}$$

各ユニット当たり 1 日当たりの貯蔵エネルギー量は

$$2,610,000 \text{ kWh} \div 14 \text{ day} = 186,000 \text{ kWh/day}$$

となる。

① アルカリ水電解水素の MCH 貯蔵

発電電力を各機器帆柱設置ユニット上に設置したアルカリ水電解槽により水素ガスに変換し、それをタンク貯蔵したトルエンと反応させ、有機ケミカルハイドレート法によりメチルシクロヘキサン (MCH) を生産する。これらの反応はすべてリアルタイムで行われるため、余分なエネルギー貯蔵設備は必要としないと考える。MCH は 2 週間に 1 回輸送船が積んできたトルエンと交換・引き渡しする。この際、トルエン・MCH の貯蔵船への中継として作業運搬船に備えた貯槽も活用する。このエネルギー貯蔵方法は高エネルギー密度バッテリー貯蔵方式に比べて既に実用化段階に達しており、以下では具体的な設備規模の試算を試みる。

- アルカリ水電解により 1 Nm^3 の H_2 を生産するための電力は現状で 4.5 kWh/m^3 である。排熱利用による反応槽の高温化や技術開発によりさらに効率化できる可能性があると思われるが、ここでは 4.5 kWh/m^3 を用いる。
- 個々の機器帆柱設置ユニットが受け持つ $1 \text{ km} \times 0.2 \text{ km} = 0.2 \text{ km}^2$ の筏ユニットの発電量は 1 日で $24,000,000 \text{ kWh/day} \times 0.97 / 125 = 186,000 \text{ kWh/day}$ である。これより 1 日での水素生産量は $186,000 \text{ kWh/day} \div 4.5 \text{ kWh/m}^3 = 41,300 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。
- 実際は昼間 8 時間発電している間でのリアルタイム水素生産が必要であるため時間当たりの生産量は $41,300 \text{ m}^3 \div 8 \text{ h} = 5,170 \text{ m}^3/\text{h}$ となる。
- ここで大型アルカリ水電解槽としてノルウェイ製の NEL Hydrogen (元・旭化成(株)野秋氏講演資料) を参考にすると、水素生産能力は 1 個当たり $500 \text{ m}^3/\text{h}$ であるから $5,170 \text{ m}^3/\text{h} \div 500 \text{ m}^3/\text{h} = 10.3$ となり一つの機器帆柱設置ユニット当たり 11 個の電解槽を設置することになる。その重量は $80 \text{ トン} \times 11 = 900 \text{ トン}$ である。
- この時に必要な純水は母船上の海水淡水化設備で所内電力を使い生産することになろう。各機器帆柱設置ユニット当たり $33 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度であり、逆浸透膜法海水淡水化設備で生産でき、電解質として加える水酸化カリウムは入れ替えなしで使用できるとしている。
- 生産された水素ガスは水素化プラントでほぼ $500 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$ が 1 m^3 の MCH に固定化されるため、各機器帆柱ユニット当たり $41,300 \text{ m}^3/\text{day} \div 500 \text{ m}^3/\text{m}^3 = 82.6 \text{ m}^3/\text{day}$ の MCH が生産される。

- ◆ このため各機器帆柱設置ユニットに置かれる水素化プラント全体の重量は、NEL Hydrogen 11 個分に相当しほぼ 1000 トンになる。
- ◆ 各機器帆柱設置ユニットに置かれるプラントで生産される 2 週間分のトルエンと MCH を貯蔵することを考えると、 $82.6 \text{ m}^3/\text{day} \times 14 \text{ day} = 1160 \text{ m}^3$ であり、 1200 m^3 のタンクを 2 基用意すれば良いことになる。
- ◆ ソーラー筏全体での 1 日の水素生産量は $41,300 \text{ m}^3/\text{day} \times 125 = 5,170,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 、MCH の生産量は $5,170,000 \text{ m}^3/\text{day} \times 1/500 = 10,300 \text{ m}^3/\text{day}$ 、2 週間分の MCH の総量は $10,300 \text{ m}^3/\text{day} \times 14 = 14.5 \text{ 万 m}^3$ となる。
- ◆ 日本での水素生産には脱水素化プラントが必要となる。その 1 日当たりの MCH 処理能力は $14.5 \text{ 万 m}^3 \div 14 \text{ day} = 1.03 \text{ 万 m}^3/\text{day}$ である。

上記のオプションとして機器帆柱ユニットでの分散エネルギー貯蔵ではなく FPSO 母船方式により集中的に貯蔵する方式を考える。この場合は、時間当たりの発電量 $3,000,000 \text{ kWh}$ により $3,000,000 \text{ kWh} \times 0.97 \div 4.5 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2 = 647,000 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ の割合で水素生産するために $647,000 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h} \div 500 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h} = 1290$ 個分の NEL Hydrogen に相当する集中型大型電解設備が必要となる。また $647,000 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ の水素をリアルタイムでトルエンと反応させて $647,000 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h} \div 500 = 1290 \text{ m}^3/\text{h}$ の MCH を生産する集中型大型水素化設備、さらにエネルギー輸送船に引き渡すまでの 2 週間分すなわち $1290 \text{ m}^3/\text{h} \times 8 \text{ h/day} \times 14 \text{ day} = 145,000 \text{ m}^3$ のトルエンと MCH を貯蔵するための 15 万 kL タンク 2 基が必要である。これらのタンク・プラント設備や純水生産設備などの重量を考慮すると、FPSO 母船は 40 万積載トン級となる。

② 高エネルギー密度バッテリー貯蔵：

高エネルギー密度バッテリー技術については未だ不確定部分も多いため、色々なオプションが考え得る。ここではエネルギー密度目標値 0.7 kWh/kg のみを用いて概略物量を推定する。

- ◆ 金属-空気蓄電池のエネルギー密度を 0.7 kWh/kg とすると、2 週間分で蓄電池重量は $2,610,000 \text{ kWh} \div 0.7 \text{ kWh/kg} = 3,730,000 \text{ kg} \rightarrow 3730$ トンとなり約 3800 トンのバッテリー重量を各機器帆柱設置ユニット当たり想定する。
- ◆ ソーラー筏全体では $3730 \text{ トン} \times 125 = 466,000$ トンのバッテリー重量となる。
- ◆ FPSO 母船方式ではこれらがすべて母船に集中するため、60 万積載トン級の超大型船舶が必要となる。

(6) ソーラー筏の操業海域への運搬・組み立て

① 筏部材の運搬

25 km^2 もの膨大なソーラー筏を操業海域まで如何に運搬するかは大きな技術的

課題である。日本沿岸で全体を組み上げて操業海域まで航行することは気象条件などから困難と考えられる。

ここで最も成立性があると考えられる方法として、筏部材を可能な限り事前組み立てを済ませた上で運搬し易い（例えば 25m）サブユニットサイズ単位に区分し、部材間には現地で容易に組み上げられるジョイントを付ける方式を考える。なお、船舶構造を持つ機器帆柱設置ユニットについては日本の造船所で全て建設し、組み立て海域まで自走することを考える。

物量の膨大さを考えた場合、現地への筏ユニットの運搬には多数の貨物船を使い、多数回の往復が必要になる。

② 筏部材の組み立て

現地での組み立てについては、低緯度太平洋の島を借地して組み立て基地とする場合と、気象・海象条件の良い公海上で組み立てるオプションに分けられるが、ここでは条件は厳しいがより自由度のある公海上での組み立てを想定する。

クレーン吊り上げ・溶接・ボルト合わせなどによる海上での組み立て作業は波浪が 1m 以上あると困難とのことであり、容易に組み上げられる簡易接続ジョイントの必要性が高い。海上で使えるクレーンの容量は通常 150 トンから 200～700 トンまであり、鋼材筏部材の場合でも 80 トン前後の筏サブユニットを扱える 100 トンクレーンを用意すればよい。HDPE 筏部材の場合はもっと小型のクレーンで間に合い、作業船上での熱融着による組み立てが多用される。

海上での組み立て作業は多数の作業船が当たり、多数の貨物船から降ろされた筏部材を作業船甲板でサブユニットに組み、さらに海上でクレーンにより筏ユニットと全筏集合体に組み上げる。海面に下ろした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。

(7) ソーラー筏の維持・補修設備

2500 もの筏ユニットからなるメガソーラー筏は、その耐用年数（30 年）の間は常に操業海域に留まり、操業しながら操業海域で維持・補修を繰り返すことを想定している。このため 7 章で述べたように、補修用移動車を機器帆柱設置ユニット上に備え、異常検知システムに応じて維持補修を行う。

(8) 母船・作業船などの筏船団を構成する船舶

母船は筏船団全体の発電制御・航行・エネルギー運搬制御・運転員の居住などを受け持つ司令塔的役割を持つ。200～300 人に上る運転員が長期間快適な生活を送れる居住環境も備える。また、エネルギー輸送船との仲立ちの機能も備える。

オプションとして FPSO 母船方式を採用する場合は、上記の母船の役割だけでなくエネルギー集約・貯蔵 もすべて母船の機能に加わることになる。

また、メガソーラー筏の最初の組み立て作業とその後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 5000 積載トン程度のクレーン付き作業用船が必要である。現在エネルギー資源開発で使われているオフショア支援船がほぼ対応する。ここではそれを 4 隻に設定し、それ以外に多くの小型作業・運搬船も加える。

これら船団の構成と関連技術については、現行の海洋資源エネルギー開発の経験・実績が大幅に適用でき、技術的課題は多くはないと考えられる。

11.2.2 エネルギー輸送

ソーラー筏船団から日本へのエネルギー輸送は、電気分解で生産した水素の MCH タンカー輸送あるいは電力エネルギーのままのバッテリー輸送を考える。バッテリー輸送ではエネルギー変換ロスがないためエネルギー効率が良いが、そのためには高エネルギー密度バッテリー技術の大幅な進展を待たなければならない。ここでは既に実用化段階となった水素の MCH タンカー輸送を第一に考えるが、バッテリー輸送についても将来的な可能性を考えて取り上げる。

(1) 電解水素の MCH 輸送

有機ケミカルハイドレート法で製造した MCH は常温・常圧下で常に液体で、大量輸送・貯蔵が可能であり、石油関連の既存インフラがほぼそのまま活用できる。すなわち、一時貯蔵には石油タンクなみの重要度の設備を用意し、海上輸送には石油タンクとほぼ同等の船舶を用いることができるため、荷役・貯蔵などの問題も少ない。輸送・貯蔵中の水素エネルギーの損失は無視できる程度である。これらの技術はすべて実用化段階になっており、2016 年からは川崎市で脱水素化実用化プラントが動き出し、タンカー輸送された MCH からの水素生産が始まる予定とのことである(千代田化工建設(株)岡田氏講演資料)。

ただし、日本で脱水素化プラントにより水素ガスに戻す工程が必要となる。その効率は実証試験で 95%以上となっているため(千代田化工建設(株)岡田氏講演資料)、ここでも 95%に設定する。

(2) 高エネルギー密度バッテリー輸送

電気輸送に使うバッテリーについては現存するものでは能力的に不足で、NEDO のロードマップで 20~30 年後に実用化するエネルギー密度 0.7kWh/kg の将来型バッテリーを考えている。その有力候補としてここでは金属-空気電池を考える。

ただしこれまでのバッテリーの設計目的が車輛または定置型のエネルギー貯蔵や負荷平準に限られており、大量の電気エネルギー輸送のために大型バッテリーを使うことは考えられたことは無い。ここではそのために新たに考案した方法として、バッテリー容器から取り出した陰極金属(亜鉛・アルミニウム・マグネシウムなどで電気エネルギーを貯蔵)と電解液を分離してタンカーで安全に輸送する技術を案出している。

バッテリーの充電・放電サイクルによるロスを考慮した電力回収効率は 90%と考える。

① ソーラー筏から日本へ：

各帆柱ユニット上の充電済みのバッテリーから陰極に析出した金属棒を取り出すとともに、バッテリー電解容器にある電解液を抜き取り、電解液は同一輸送船の化学液体貯槽に電極は固体貨物として輸送する。これにより、まず運搬重量をかなり削減できるだけでなく、放電ロスが減少し輸送時の安全性も増す。バッテリー全重量は 475,000 トンであり、このうち日本まで輸送する金属電極と電解液の重量割合を 60%と仮定すると、 $475,000 \text{ トン} \times 0.6 = 285,000 \text{ トン}$ になる。ただし日本では電解液を入れ金属棒を挿入して放電するための電解容器が別途必要となる。

② 日本からソーラー筏へ：

放電後に金属が溶解した電解液を容器から回収し、同じ輸送船の化学液体貯槽に入れて運ぶ。この時の金属が溶解した電解液の重量を 285,000 トンに設定する。

(3) 輸送日数

一般的な商船の航海速度を 14 ノット (26km/h) として、東京湾から西経 150 度の赤道上海域の筏船団までの大圏距離約 4400 海里 (8200km) を平均距離とすれば、片道 13.1 日となる (サノヤス造船 (株) の情報)。したがって、片道航海を 2 週間、筏船団と日本での荷役日数は余裕を見て 1 週間ずつと考えれば、エネルギー輸送の 1 サイクルに 6 週間 (42 日) を要することになる。それに基づき考えた概略の航海計画を図-11.1 に示す。

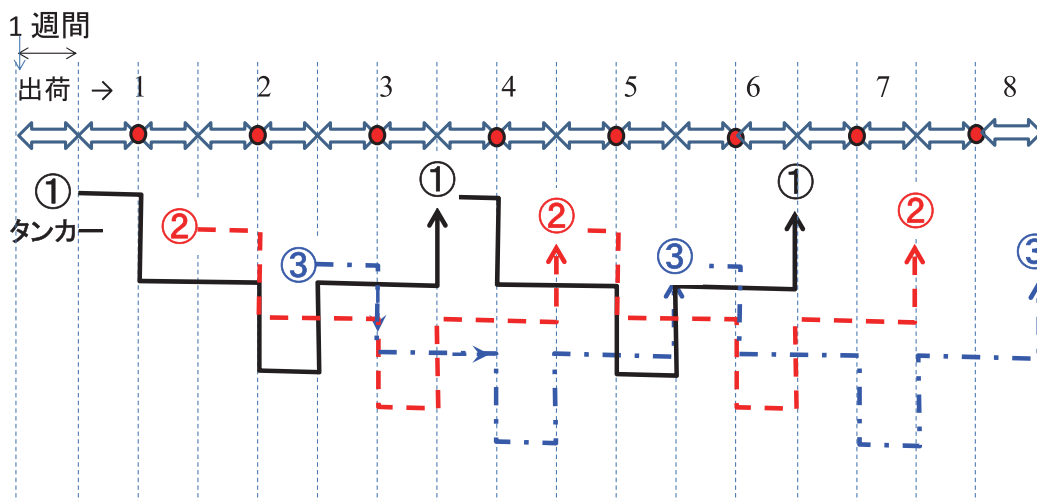


図-11.1 エネルギー輸送船の運航計画案

11.3 経済的成立性

このエネルギーシステムは未だ未確定な部分が多いため、詳細な経済的成立性を評価するにはかなりの困難が伴うが、多くの仮定条件を入れてごく概略の経済性評価を試みる。経済性評価については正式には費用便益分析・資本投資・利子・経済指標などを考慮した経済分野での評価法が適用されるべきであろうが、将来技術として不確定性の多い本エネルギーシステムでもあり、ここでは単なるコスト積み上げによる評価に留める。

評価のもっとも基本条件である将来のエネルギー価格は、現在のエネルギー価格を参考に設定する。ただし、本研究では人類のエネルギー使用における化石燃料からの脱却を長期目標としていることから、現状の化石燃料をベースにしたエネルギー価格との大小比較は行わない。

以下に経済性評価の基本方針をまとめる。

- ◆ 30年間の稼働期間を考える。
- ◆ 既に実用段階に入っている電解水素のMCH輸送と、未だ将来技術であるバッテリーによる電気輸送に分けて考える。
- ◆ いずれの場合も面積25km²のソーラー筏から2週間に1回の頻度でエネルギーを日本に輸送するものとする。
- ◆ 経済性に大きな影響を与えると想定される3大技術項目（ソーラー帆布、エネルギー輸送、筏構造）のうち、筏構造については比較的具体的検討が可能であるため、積み上げ方式でコスト推定を行う。
- ◆ 新技術の開発段階においては、技術開発費や設計費が必要であるが、ここでは技術が成熟段階に達した場合を想定し、これらの費用を考慮しない。
- ◆ コストの大きな部分を占める筏については、鋼製筏とHDPE（高密度ポリエチレン）製筏の2種類を検討する。
- ◆ エネルギー輸送技術のうち、電解水素のMCH輸送について経済的に成り立つためのソーラー帆布の限界コストを試算する。さらにそのソーラー帆布限界コストを使って、最も不確定性の大きな将来型高エネルギー密度バッテリーによる電気輸送の限界コストを推定する。
- ◆ 筏形状についてはエネルギー集約経路が短くエネルギー貯蔵を分散させた蛇型筏（2km×12.5km）を主に考えるが、FPSO母船方式の集中型エネルギー貯蔵による正方形筏（5km×5km）についても補足的に比較検討する。

11.3.1 エネルギー総売上額の算定

経済性評価の大前提となるエネルギー（電気・水素）の総買取価格を以下のように設定する。

(1)水素の輸送：

日本に輸送した水素ガスの買取価格の参考値として 2030 年代パタゴニア風力プロジェクトの目標値 20~30 円/Nm³（元・旭化成(株)野秋氏講演資料）を参考に 30 円/Nm³ と設定する。

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。

- ◆ 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

(2) バッテリーによる電気輸送：

前提条件として日本に輸送した電気の買取価格を現在の陸上風力の発電価格³⁴⁾ とほぼ競合できる水準として、20 円/kWh に設定する。

メガソーラー筏全体での出荷電力量は、2 週間分を 1 隻のタンカーで運び、バッテリーの充電・放電サイクルによるロスを考慮した電力回収効率を 90%として計算すると以下の通り。

- ◆ 20 円/kWh ×326,000,000 kWh×0.9→58.7 億円
- ◆ 年間では 58.7 億円×365day/14day≒1530 億円/年
- ◆ 30 年間稼働した時の総買取価格は 1530 億円/年×30 年=45900 億円

以上のように、2 つの輸送方法によるエネルギー総売上額には大きな違いがあるが、これは水素製造時の比率（4.5kWh : 1Nm³H₂）が大きく影響するためである。つまり当然ではあるが、発電した 2 次エネルギーの電気のままで運ぶ方が一旦 1 次エネルギーの水素に変換して運ぶよりはるかに有利であることになる。

ただし、電気で運ぶための高エネルギー密度バッテリーは未だ実用化が見えない将来技術であり、以下ではすでに実用化段階を迎えた水素による輸送技術を利用した場合を中心に経済性評価を考えていく。

11.3.2 初期資本費

(1) ソーラー筏本体

① 鋼鉄製筏

主要構造材が鋼鉄の筏について国内での鋼材単価 60 円/kg をベースに、まだ詳細の詰められていない加工・組み立て・防錆、筏サブユニット・ユニット間ジョイントなどの費用を含めて 50%上乗せし、9 万円/トンと仮定する。この価格は現在の国内水準

よりかなり低めと思われるが、筏自体は高度な加工技術を要するものではなく、発展途上国を含め国際的に最も有利な価格条件を求めることにより達成できると考える。

- ◆ 筏サブユニット単体重量=81 トンであるから、9 万円/トン×81 トン=729 万円
- ◆ 筏本体コストは 729 万円×16×2500≒2920 億円

② HDPE 製筏

主要構造材が HDPE (高密度ポリエチレン) の筏について現在の HDPE 素材単価は 170 円/kg また製品単価は 250 円/kg であるが (日本管材センター(株)浅見氏の情報)、製品単価を将来の生産効率向上や膨大な筏部材の量産効果などにより 220 円/kg まで低減できることを前提に筏の HDPE 部分のコストを計算する。これに加工・組み立て費に加えて筏サブユニット・ユニット間ジョイント、ソーラー帆布支持用架台、点検用通路などを加えて 50%上乗せし、33 万円/トンと仮定する。

- ◆ 筏サブユニット単体重量=17.6 トンであるから、33 万円/トン×17.6 トン=581 万円
- ◆ 筏本体コストは 581 万円×16×2500≒2320 億円

(2) 機器帆柱設置ユニット

重要物を積載するため、ソーラー筏より安全性の高いバージ船なみの設計条件とし、必要最小限の推進動力も備える。

- ◆ 両輸送方法共に 5000 トン積載のプラントバージの建設コストを参考に、機器帆柱設置ユニット 1 個の単価を 4 億円とする。ただしこの中に、水素輸送でのアルカリ水電解槽・水素化設備と、バッテリー輸送での金属-空気蓄電設備のコストは含まず、別途算定する。
- ◆ したがって全体で 125 台必要な機器帆柱設置ユニットのコストは 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。

(3) ソーラー帆布 (電気集約系統を含む)

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貯蔵設備までの電気集約系統 (インバーターなど) のコストも含むこととする。

- ◆ 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 $25,000,000\text{m}^2$ 全面を覆うとした場合、単位面積当たりの価格は $0.12 \times A$ 円/ m^2 となる。
- ◆ ソーラー帆布が筏面積を覆う割合が 100%でも 7 章の概念設計のように 70.6%でも、全発電量は 300 万 kW 一定とすることでソーラー帆布の kW 当たり単価 A 円/kW は覆う面積割合に無関係となる。ただし面積割合を 70.6%とするためにはソーラー帆布の発電効率を $12\% \times 1/0.706$ すなわち 17%とする必要がある。

(4) 水素化プラント・アルカリ水電解設備

前記のように、各機器帆柱設置ユニットごとにエネルギー貯蔵設備を分散設置する案では、 $5,170\text{ m}^3/\text{h H}_2$ の水素を生産するアルカリ水電解設備・水素化プラントが必要となる。

これとは異なり、FPSO 母船方式によりエネルギー貯蔵設備 ($5,170\text{ m}^3\text{ H}_2/\text{h} \times 125 \div 646,000\text{ m}^3/\text{h H}_2$) を集中設置する場合についても追加的に概略検討する。

一方、日本の港には 1 日当たり MCH 1.03 万 m^3/day ($5,170,000\text{ m}^3/\text{day H}_2$) の脱水素化プラントが必要となる。

① 各機器帆柱設置ユニットのアルカリ水電解設備

各機器帆柱設置ユニットごとに既述のように 11 台のアルカリ水電解設備 ($500\text{Nm}^3/\text{h}/\text{台}$) が必要である。現状で 3 億円/台だが、将来的には高効率化・量産効果などで大幅にコストダウンでき可能性がある。すなわち経済産業省で進めている「再生可能エネルギー貯蔵輸送等技術開発」³⁵⁾により数年以内に電解設備に必要なセルの数は $1/2 \sim 1/3$ に減らすことができるので価格は半減することは確実である。さらに現在 $500\text{Nm}^3/\text{h}$ 規模の大型装置の年間生産台数は 40 台に過ぎないが、20~30 年後には 3000 台を超えてくると予想されるため、量産効果によりさらに 1 億円以下の価格になると推定されている (元・旭化成 (株) 野秋氏情報)。ここでは 0.8 億円/台と評価することにより、全体では 0.8 億円/台 $\times 11$ 台 $\times 125 = 1100$ 億円となるが、それでもかなりの高額である。

② 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

トルエン水素化設備の価格推定をするために、文献「製油所の副生水素の発生実態と利活用技術」³⁶⁾を参考に考える。この文献では製油所の副生水素を使って有機ケミカルハイドライド法により水素化した MCH を輸送し、水素ステーションで脱水素化するシステムを考えている。水素化反応設備価格は $1000\text{Nm}^3/\text{h}$ の反応速度に対し 3 億円とされており、この価格を機器帆柱設置ユニットでの反応速度 $5,170\text{ m}^3/\text{h}$ に比例的に当てはめると、 3 億円 $\times 5170/1000 \div 15$ 億円になる。一方、上記文献³⁶⁾では脱水素化反応設備価格は地下タンクまで含め $500\text{Nm}^3/\text{h}$ に対して将来シナリオ価格 0.56 億円とされており、同じ反応速度 $1000\text{Nm}^3/\text{h}$ に直すと 0.56 億円 $\times 1000/500 = 1.12$ 億円となる。本来、水素化・

脱水素化設備は類似の化学プラントであり、水素化設備では触媒がニッケル系に対し脱水素化設備では白金系で比較的高価であることなどから2~3割が高くなると考えられる。それにも関わらず水素化の方がはるかに高価となっている理由は、水素化設備3億円では現在価格を考え脱水素化設備1.12億円では将来シナリオ価格を考えたためと考えられる。したがって本文献³⁶⁾にならい、将来的には大型化・効率化により6億円(≒15億円×1.12億円/3億円)にまでコストダウンが可能と考えることとする。ソーラー筏全体では6億円×125=750億円となる。

③ FPSO 母船への集中設置のケース

上記のように貯蔵設備などを125の機器帆柱ユニットに細分化して設置することは明らかにコスト高の要因と考えられ、合理化のためには設備の集中化を図ることが重要であると思われる。8章で検討したように、交流の電気集約システムを適用すれば5km×5kmの正方形ソーラー筏での遠距離集電も可能との見解を受け、機器帆柱設置ユニットにエネルギー貯蔵設備を分散させるのではなく、1隻のFPSO母船にエネルギー貯蔵設備も集中させる場合についての概略コスト評価も追加する。この集中効果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(5,170 m³ H₂/h×125≒646,000 m³/h H₂)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20%コストダウンできると考える。

④ 日本に設置する脱水素化プラント

1日当たりMCH処理量は10,300 m³/day、水素発生量は10,300 m³/day×500=5,170,000 m³/dayとなる。上記の副生水素の文献³⁶⁾では反応速度500Nm³/hに対して脱水素化設備価格が地下タンクまで含め0.56億円とされていることに基づき、0.56億円×5170000/24/500=240億円となる。これは上記の水素化設備を集中化させた場合の価格600億円に比べてかなり安価であるが、脱水素化設備の反応速度は昼間に集中して稼働する水素化設備の1/3でよく、同一反応速度の設備価格にも2~3割の違いがあることを反映している。

(5) 金属-空気蓄電池

現状で参考となるコストデータがないため、kWh当たりの金属-空気蓄電池の単価を未知数B(円/kWh)で表わすことにする。これは電極・電解液・電解容器など関連部品を含んだ価格である。

- ♦ 2週間分の筏船団から輸送船への引き渡し電気エネルギーは326,000,000 kWhであるから、そのバッテリー価格は326,000,000 kWh×B円/kWhであり、バッテリー輸送船は3隻必要であるから全体では326,000,000 kWh×B円/kWh×3→9.78×B億円となる。
- ♦ なお蓄電池によるエネルギー貯蔵では、機器帆柱設置ユニットでの分散貯蔵と

FPSO 母船方式での集中貯蔵にコスト的に大きな違いは生じないと考える。

(6) 母船・作業船

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300億円（サノヤス造船（株）情報）と想定する。

オプションとしてFPSO母船（図-7.1）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、それほどの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、オフショア支援船（図-7.2）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。

(7) 水素エネルギー輸送船（図-11.1 参照）

- ◆ 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必要になる。また、14.5万トンのトルエンのコストは船の価格に含めて考える。
- ◆ このタンカーの片道航海日数を前述のように平均14日（2週間）、筏船団と日本での荷役日数を余裕を見て7日（1週間）づつ（サノヤス造船（株）情報）とすれば、42日（6週間）で1サイクルとなり、14日に一回筏船団から発電エネルギーを出荷するためには3隻必要となる。
- ◆ この3隻分のタンカーと積荷のコストは現在のVLCC（20万トン級）の60億円を参考に60億円/隻×3隻=180億円とする。

(8) バッテリー輸送船（図-11.1 参照）

- ◆ 9章で述べたように、将来型大量電力輸送用金属-空気電池を使って、専用輸送船でソーラー筏において充電した金属-空気電池の陰極金属棒を取り出すとともに、バッテリー電解容器にある電解液を抜き取り、電極は固体貨物として保管庫に入れ、電解液は輸送船の化学液体貯槽に貯蔵して輸送する。この場合の輸送重量はバッテリー全重量の60%と仮定する。
- ◆ 466,000トン×0.6（電解容器を除く）=280,000トンのバッテリーを輸送する30万トン級専用タンカーが必要となる。
- ◆ このタンカーの片道航海日数を14日（2週間）、筏船団と日本での荷役日数を余裕を見て7日（1週間）づつとすれば、42日（6週間）で1サイクルとなり、14日に

一回づつ筏船団から発電エネルギーを出荷し続けるためには 3 隻の専用タンカーが必要となる。

- ◆ このタンカーのコストは現在の VLCC (30 万トン級) の 100 億円を参考に、特殊仕様を考えて 50%アップした 150 億円/隻と仮定し、150 億円/隻×3 隻=450 億円とする。

(9) ソーラー筏の操業海域への運搬と組み立て

① 鋼製筏

- ◆ 鋼鉄製ソーラー筏の全重量は 3,240,000 トンであるから、筏ユニット・サブユニット間の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、1 隻当たり 30 万トン積載重量の貨物船により $360 \text{ 万トン} \div 30 \text{ 万トン} = 12$ 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豪州からの貨物船 で 1700 円/トンを参考に 5000 円/トンとすると、総運搬コストは $3,500,000 \text{ トン} \times 5000 \text{ 円/トン} = 175$ 億円となる。
- ◆ 組み立て費用についても参考データがないため、ここでは鋼鉄製ソーラー筏本体コストの 5%と仮定すると、 $3890 \text{ 億円} \times 0.05 = 195$ 億円となる。

② HDPE 製筏

- ◆ 筏サブユニットの HDPE 部材重量は 17.6 トンであり、ソーラー筏全体での HDPE 部材重量は $17.6 \text{ トン} \times 16 \times 2500 = 704,000$ トンである。筏ユニット・サブユニット間のジョイントや帆支柱・帆布、点検路などの関連部品を含めほぼ 70%増しの 120 万トンとすると、1 隻当たり 30 万トン積載重量の貨物船により $120 \text{ 万トン} \div 30 \text{ 万トン} = 4$ 隻の往復航海により運搬できることになる。
- ◆ 上記鋼製筏と同様に計算すると、総運搬コストは $1,200,000 \text{ トン} \times 5000 \text{ 円/トン} = 60$ 億円となる。
- ◆ 組み立て費用についても参考データがないため、鋼鉄製ソーラー筏本体コストと同じ 5%と仮定すると、 $2300 \text{ 億円} \times 0.05 = 115$ 億円となる。

11.3.3 運転操業費

(1) エネルギー輸送コスト

① 水素輸送：

- ◆ 14.5 万 m^3 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積荷エネルギー価格の **10%** (千代田化工 岡田氏講演内容) と仮定する。
- ◆ 従って 30 年間の総積荷価格に対しては、 $16100 \text{ 億円} \times 0.10 = 1610$ 億円となる。

② バッテリー輸送：

- ◆ 285,000 トンのバッテリー (電解容器を除く) を輸送する 30 万トン級専用輸送

船の輸送コストを以前の検討⁷⁾を参考に積荷エネルギー価格の**6%**と仮定する。

- ◆ したがって 30 年間の総積荷価格に対しては、45900 億円×0.06=2750 億円となる。

(2) 保守・点検・補修コスト

広域に広がるソーラー筏船団全体の保守点検は不可欠で、特にソーラー帆布や電気回路の経年劣化や技術的老朽化が考えられ、部分更新も含めた補修コストも考える必要がある。また、エネルギー輸送のためのバッテリーや水素化プラント関連の諸設備も経年劣化や技術的老朽化が考えられ、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、1 年当たり初期資本費 a-1~a-9 の合計（海域への筏の運搬・組み立て費用を除く）の**3%**を考慮することとする。

(3) 筏船団運転コスト

200~300 人におよぶ運転員の人件費、運転エネルギー費、通信費、税金・保険など諸費用を含む。これらについても詳細が不明なため、1 年当たり初期資本費 a-1~a-9 の合計の**1%**を考慮することとする。

11.3.4 経済的成立性評価結果

(1) 設定エネルギー価格（水素：30 円/m³，電気：20 円/kWh）によるケース

表-11.1(a),(b)にそれぞれ鋼鉄製筏と HDPE 筏について、今回主として検討した機器帆柱設置ユニットによる分散型エネルギー集約貯蔵方式（蛇型筏形状）の評価結果を示す。表-11.2(a),(b)にはそれぞれ鋼鉄製筏と HDPE 筏について、FPSO 母船方式（正方形筏形状）による集中型エネルギー集約貯蔵方式の評価結果を、今回は概念的検討のみではあるが、示す。さらにこれらの評価結果の要点を表-11.3 にまとめて示す。これらより、以下の要約ができる。

- ◆ 通常の鋼構造設計法による鋼製ソーラー筏の価格は 2920 億円なのに対し、HDPE 製ソーラー筏は 2320 億円と評価される。これは鋼製筏では半潜水構造で変形の少ない設計とするのに対し、HDPE 筏では筏機能に差し支えない範囲で大きなたわみを許容する考え方により軽量化を図っているため、当然の結果と言える。いずれにしても価格全体に占める筏コストの割合がきわめて大きい。
- ◆ 分散型エネルギー集約貯蔵方式の場合、水素輸送方式により経済的に成立するためのソーラー帆布・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 筏の方が筏コストの低さが影響し大幅に有利となる。

表-11.1.1(a) 鋼製筏・分散型エネルギー集約貯蔵方式の評価結果

	項目	MCH水素輸送(億円)	バッテリー電気輸送(億円)	備考
30年間 総売り上げ	水素ガスの売上	16100 (24150)	x	水素30円/m ³ (45円/m ³). 輸送効率95%
	電気の売上	x	45900 (68850)	電気20円/kWh (30円/kWh). 輸送効率90%
初期資本費	a-1 鋼製製ソーラー筏本体 (ジョイント・防錆など含む)	2920	2920	3,240,000トン×9万円/トン
	a-2 機器帆柱設置ユニット	500	500	4×125 (5000種載トン)×100万円/台
	a-3 ソーラー帆布・電気系統	0.03×A	230 (3890)	3,000,000kW×A 円/kW →0.03×A 億円
	a-4 金属-空気蓄電池	x	9.78×B	326,000,000 kWh×B 円/ kWh×3
	a-5 水素化プラント・アルカリ水電解槽 + 脱水素化プラント	2090	x	電解設備: 0.8億円/台×11台×125=1100 億円 水素化プラント: 6億円×125=750億円 日本での脱水素化プラント: 1台 240億円
	a-6 バッテリー輸送船	x	450	150×3 (30万種載トン級)
	a-7 MCH水素輸送船	180	x	60×3 (20万種載トン級タンカー)
	a-8 母船	300	300	300 (5万種載トン多機能プラットフォーム船)
	a-9 作業船	200	200	50×4 (50,000種載トンクレーン作業船)+小型ボート10隻程度
	a-10 ソーラー筏の操業海域への運搬	175	175	3,500,000トン×5,000円/トン=175億円
	a-11 ソーラー筏の組み立て	195	195	3890億円×0.05=195億円
運転作業費 (30年間)	初期資本費計	6560+0.03×A	4970+9.78×B	
	b-1 バッテリー輸送	x	2750	
	b-2 MCH水素輸送	1610	x	
	b-3 保守・点検・補修・部分更新	(6190+0.03×A)×0.03×30	(4600+9.78×B)×0.03×30	各年初期資本費(a1~a9)×3%
b-4 筏船団運転	(6190+0.03×A)×0.01×30	(4600+9.78×B)×0.01×30	各年初期資本費(a1~a9)×1%	
30年間運転作業費		(6190+0.03×A)×1.2+1610+175+195	(4600+9.78×B)×1.2+2750+175+195	
初期資本費+30年間運転作業費総計		(6190+0.03×A)×2.2+1980	(4600+13.4×B)×2.2+3120	
経済的成立性の条件(基本エネルギー価格)		(6190+0.03×A)×2.2+1980=16100 より A=7610円/kW	ソーラー帆布: A=910円/m ² a-3: 228億円 に加え 金属-空気蓄電池: (4600+9.78×B)×2.2+3120= 45900 より B=1520円/kWh	水素30円/m ³ , 輸送効率95% 電気20円/kWh, 輸送効率90%
経済的成立性の条件(参考:エネルギー価格50%増)		(6190+0.03×A)×2.2+1980=24150 より A=13000円/kW	ソーラー帆布: A=15500円/m ² a-3: 3890億円 に加え 金属-空気蓄電池: (8260+9.78×B)×2.2+3120= 68850 より B=2210円/kWh	水素45円/m ³ , 輸送効率95% 電気30円/kWh, 輸送効率90%

表-11.1(b) HDPE 筏・分散型エネルギー集約貯蔵方式の評価結果

	項目	MCH水素輸送(億円)	バッテリー電気輸送(億円)	備考
30年間 総売り上げ	水素ガスの売上	16100 (24150)	x	水素30円/m ³ (45円/m ³)、輸送効率95%
	電気の売上	x	45900 (68850)	電気20円/kWh (30円/kWh)、輸送効率90%
	HDPE製ソーラー後本体 (ジョイント・帆布設置支柱など含む)	2320	2320	33万円/トン × 17.6トン/サブユニット × 16 × 2500 → 2320億円
	機器・支柱設置ユニット	500	500	4 × 125 (5000種載トンバージ船+船用電池)
初期資本費	ソーラー帆布・電気系統	0.03 × A	920 (4580)	3,000,000kW × A 円/kW → 0.03 × A 億円
	金属-空気蓄電池	x	9.78 × B	326,000,000 kWh × B 円/kWh × 3
	水素化プラント・アルカリ水電解槽 + 脱酸素化プラント	2090	x	電解設備: 0.8億円/台 × 11台 × 125 = 1100 億円 水素化プラント: 6億円 × 125 = 750 億円 日本での脱酸素化プラント: 1台 240 億円
	バッテリー輸送船	x	450	150 × 3 (30万種載トン級)
	MCH水素輸送船	180	x	60 × 3 (20万種載トン級タンカー)
	母船	300	300	300 (5万種載トン多機能プラント船)
	作業船	200	200	50 × 4 (5000種載トンフレージ作業船) + 小型ボート10隻程
	小計	5590+0.03 × A	4690+9.78 × B	
	ソーラー筏の操業海域への運搬	60	60	1,200,000トン × 5000円/トン = 60億円
	ソーラー筏の組み立て	115	115	2040億円 × 0.06 = 115億円
	初期資本費計	5765+0.03 × A	4865+9.78 × B	
運転操業費 (30年間)	バッテリー輸送	x	2750	
	MCH水素輸送	1610	x	
	保守・点検・補修・部分更新	(5590+0.03 × A) × 0.03 × 30	(4690+9.78 × B) × 0.03 × 30	各年初期資本費(a1~a9) × 3%
	筏船団運転	(5590+0.03 × A) × 0.01 × 30	(4690+9.78 × B) × 0.01 × 30	各年初期資本費(a1~a9) × 1%
30年間運転操業費		(5590+0.03 × A) × 1.2 + 1610	(4690+9.78 × B) × 1.2 + 2750	
初期資本費+30年間運転操業費総計		(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1610 + 60 + 115	(4690+9.78 × B) × 2.2 + 2750 + 60 + 115	
経済的成立性の条件(基本エネルギー価格)		(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1785 = 16100 よりソーラー帆布単価: A = 30600円/kW	ソーラー帆布: A = 3670円/m ² に加え 金属-空気蓄電池: (4690+9.78 × B) × 2.2 + 2925 = 45900 より B = 1520円/kWh	水素30円/m ³ 、輸送効率95% 電気20円/kWh、輸送効率90%
経済的成立性の条件(参考:エネルギー価格50%増)		(5590+0.03 × A) × 2.2 + 1785 = 24150 よりソーラー帆布単価: A = 153000円/kW	ソーラー帆布: A = 6550円/m ² に加え 金属-空気蓄電池: (8350+9.78 × B) × 2.2 + 2925 = 68850 より B = 2210円/kWh	水素45円/m ³ 、輸送効率95% 電気30円/kWh、輸送効率90%

表-11.2(a) 鋼製筏・集中型エネルギー集約貯蔵方式の評価結果

	項目	MCH水素輸送(億円)	バッテリー電気輸送(億円)	備考
30年間 総売り上げ	水素ガスの売上	16100 (24150)	x	水素30円/m ³ (45円/m ³), 輸送効率95%
	電気の売上	x	45900 (68850)	電気20円/kWh (30円/kWh) 輸送効率90%
	a-1 鋼製製ソーラー筏本体	2920	2920	3,240,000トン×9万円/トン
	a-2 帆柱設置ユニット	200	200	2.0×100 (1000積載トン/バジ船+船用電池)
a-3 ソーラー帆布・電気系統	0.03×A	778 (4440)	3,000,000kW×A円/kW →0.03×A 億円	
a-4 水素化プラント・アルカリ水電解槽 +脱水素化プラント	1740	x	集中型電解設備: 646,000 m ³ H ₂ /h 1台 900 億円 集中型水素化プラント: 646,000 m ³ H ₂ /h 1台 600 億円 日本での脱水素化プラント: 5,170,000 m ³ H ₂ /day 1台 240 億円	
a-5 金属-空気蓄電池	x	9.78×B	326,000,000 kWh×B円/kWh×3	
a-6 MCH水素輸送船	180	x	60×3(20万積載トン級タンカー)	
a-7 バッテリー輸送船	x	450	150×3 (30万積載トン級)	
a-8 母船	400	400	集中型エネルギー変換・貯蔵設備搭載のFPSO方式母船	
a-9 作業船	200	200	50×4 (5000積載トンクレーン作業船)+小型ボート10隻程度	
a-10 ソーラー筏の操業海域への運搬	5640+0.03×A	4950+9.78×B		
a-11 ソーラー筏の組み立て	175	175	3,500,000トン×5,000円/トン=175億円	
初期資本費	初期資本費計	195	195	3890億円×0.05=195億円
	MCH水素輸送	6010+0.03×A	5320+9.78×B	
	バッテリー輸送	1610	x	
	保守・点検・補修・部分更新	x	2750	
運転操業費 (30年間)	保守・点検・補修・部分更新	(5640+0.03×A)×0.03×30	(4950+9.78×B)×0.03×30	各年初期資本費(a1~a9)×3%
	筏船団運転	(5640+0.03×A)×0.01×30	(4950+9.78×B)×0.01×30	各年初期資本費(a1~a9)×1%
	30年間運転操業費	(5640+0.03×A)×1.2+1610+175+195	(4950+9.78×B)×1.2+2750+175+195	
	初期資本費+30年間運転操業費総計	(5640+0.03×A)×2.2+1980	(4950+9.78×B)×2.2+3120	
経済的成立性の条件(基本エネルギー価格)	ソーラー帆布: (5640+0.03×A)×2.2+1980=16100 より A=25900円/kW	ソーラー帆布: A=3510円/m ² a-3: 880億円 に加え 金属-空気蓄電池: (4950+9.78×B)×2.2+3120= 45900 より B=1480円/kWh	水素30円/m ³ 輸送効率95% 電気20円/kWh, 輸送効率90%	
	ソーラー帆布: (5640+0.03×A)×2.2+1980=24150 より A=14800円/kW	ソーラー帆布: A=18100円/m ² a-3: 4540億円 に加え 金属-空気蓄電池: (3610+9.78×B)×2.2+3120= 68850 より B=2170円/kWh	水素45円/m ³ 輸送効率95% 電気30円/kWh, 輸送効率90%	
経済的成立性の条件(参考:エネルギー価格50%増)				

表-11.2 (b) 鋼製筏・集中型エネルギー集約貯蔵方式の評価結果

	項目	MCH水素輸送(億円)	バッテリー電気輸送(億円)	備考	
30年間 総売り上げ	水素ガスの売上	16100 (24150)	x	水素30円/m ³ (45円/m ³), 輸送効率95%	
	電気の売上	x	45900 (68850)	電気20円/kWh (30円/kWh) 輸送効率90%	
	a-1	2320	2320	33万円/トン × 17.6トン/サブユニット × 16 × 2500 → 2320億円	
	a-2	200	200	2.0 × 100 (1000種載トンバナージ船 + 船用電池)	
初期資本費	a-3	0.03 × A	1470 (5130)	3,000,000kW × A 円/kW → 0.03 × A 億円 集中型電解設備: 646,000 m ³ H ₂ /h 1台 900 億円	
	a-4	1740	x	集中型水素化プラント: 646,000 m ³ H ₂ /h 1台 600億円 日本での脱水素化プラント: 5,170,000 m ³ H ₂ /day 1台 240億円	
	a-5	x	9.78 × B	326,000,000 kWh × B 円/kWh × 3	
	a-6	180	x	60 × 3 (20万種載トン級タンカー)	
	a-7	x	450	150 × 3 (30万種載トン級)	
	a-8	400	400	集中型エネルギー変換・貯蔵設備搭載のFPSO方式母船	
	a-9	200	200	50 × 4 (5000種載トンクレーン作業船) + 小型ボート10隻程度	
	a-10	5040+0.03 × A	5040+9.78 × B		
	a-11	115	115	1,200,000トン × 5000円/トン = 60億円 2040億円 × 0.06 = 115億円	
	運転経費 (30年間)	b-2	1610	x	
		b-1	x	2750	
b-3		(5040+0.03 × A) × 0.03 × 30	(5040+9.78 × B) × 0.03 × 30	各年初期資本費(a1~a9) × 3%	
b-4		(5040+0.03 × A) × 0.01 × 30	(5040+9.78 × B) × 0.01 × 30	各年初期資本費(a1~a9) × 1%	
30年間運転経費		(5040+0.03 × A) × 1.2 + 1610	(5040+9.78 × B) × 1.2 + 2750		
初期資本費+30年間運転経費総計		(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1610 + 60 + 115	(5040+9.78 × B) × 2.2 + 2750 + 60 + 115		
経済的成立性の条件(基本エネルギー価格)		(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1785 = 16100 よりソーラー帆布単価: A=48900円/kW	ソーラー帆布: A=5870円/m ² , a-3: 1470億円 に加え 金属-空気蓄電池: (5040+9.78 × B) × 2.2 + 2926 = 45900 より B=1480円/kWh	水素30円/m ³ 輸送効率95% 電気20円/kWh, 輸送効率90%	
経済的成立性の条件(参考:エネルギー価格50%増)		(5040+0.03 × A) × 2.2 + 1785 = 24150 よりソーラー帆布単価: A=171000円/kW	ソーラー帆布: A=20500円/m ² a-3: 5130億円 に加え 金属-空気蓄電池: (9200+9.78 × B) × 2.2 + 2926 = 68850 より B=2120円/kWh	水素45円/m ³ 輸送効率95% 電気30円/kWh, 輸送効率90%	

- ◆ 集中型エネルギー集約貯蔵方式の場合、水素輸送方式により経済的に成立するためのソーラー帆布・電気系統の面積当たり単価は、鋼製筏で A=29300 円/kW，HDPE 筏で A=48900 円/kW となり、やはり HDPE 筏の方が有利である。
- ◆ エネルギー集約貯蔵方式で分散型と集中型を比べると、鋼製筏・HDPE 筏いずれについても FPSO 母船方式による集中型の経済性が有利となる。これは設備の1か所への集中設置効果と考えられる。
- ◆ 現状での太陽電池の価格は急速に低下しており、1000kW 以上の陸上ソーラー発電の電気集約設備まで含めたシステム価格は、図-8.4(b)に示すように好条件の場合 20 万円/kW 程度までになっている²³⁾。すなわち現状でも 20 万円/kW が可能な場合があるためこれを基準価格と考える。
- ◆ 表-11.3 に示す通り、鋼製筏で分散型エネルギー集約貯蔵方式では現状の 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。これに対し鋼鉄製あるいは 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 kW 当たり単価は 29300 円/kW あるいは 48900 円/kW で 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。
- ◆ 上述の水素輸送を前提として算出したソーラー帆布・電気系統の kW 当たり単価 29300 円/kW あるいは 48900 円/kW を用いて、今度はバッテリーによる電気の直接輸送を考える場合に経済的に成立するバッテリー価格を推定すると、いずれも 1480 円/kWh となる。現状でのバッテリーの価格は 25,000 円/kWh 程度 (NAS 電池) であることから、1/17 程度の大幅なコストダウンが必要になる。

(2) エネルギー価格 50%割増の影響

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日本の港での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，バッテリー貯蔵電気については 20 円/kWh→30 円/kWh に 50%アップさせた場合について、表-7.1，7.2 を

表-11.3 エネルギー価格基本ケースと参考ケース (50%増) の評価結果集約

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	
		水素輸送 ソーラー帆布電気系統 (円/kW) 現在価格比 現在価格=20万円/kW	電気輸送 バッテリー (円/kWh) 現在価格比 現在価格=2.5万円/kWh	水素輸送 ソーラー帆布電気系統 (円/kW) 現在価格比 現在価格=20万円/kW	電気輸送 バッテリー (円/kWh) 現在価格比 現在価格=2.5万円/kWh
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	1520 1/17	130000 1/1.5	2210 1/11
	HDPE筏	30600 1/6.5	1520 1/17	153000 1/1.3	2210 1/11
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	1480 1/17	148000 1/1.4	2170 1/12
	HDPE筏	48900 1/4.1	1480 1/17	171000 1/1.2	2120 1/12

見直して算出したソーラー帆布・電気系統価格とバッテリー価格を表-7.3 に追記している。これより以下の指摘ができる。

- ◆ 水素輸送を前提とした場合に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・HDPE 製筏あるいは分散・集中エネルギー集約貯蔵方式すべての場合に 130,000～171,000 円/kW の範囲で、現状の価格 20 万円/kW に対し 1/1.5～1/1.2 であり経済的に十分成立性が得られると考えられる。
- ◆ バッテリーによる電気の直接輸送を考える場合にこのソーラー帆布・電気系統の価格 130,000～171,000 円/kW を前提に経済的に成立するバッテリー価格を推定すると、2120～2170 円/kWh となり、現状でのバッテリーの価格は 25,000 円/kWh 程度 (NAS 電池) に比べて、やはり 1/17 程度の大幅なコストダウンが必要になる。
- ◆ 一方、ソーラー帆布・電気系統の価格を現状価格 30 万円/kW の 1/5 の 6 万円/kW まで合理化できたとして同じ評価をした場合、バッテリー価格は 2510 円/kWh となり現状価格の 1/10 となりやはり大幅なコストダウンが必要である。

11.4 成立性の総合評価

以上のように低緯度太平洋帆走筏の技術的・経済的成立性について検討した結果は、以下のようにまとめられる。

(1) ソーラー帆布：

- ◆ 大きな技術的課題としては帆布一体型薄型撓み性ソーラーモジュールの開発がある。これまで帆布を基盤とするニーズは大きくなかったが、すでに技術開発の進んでいる CIS タイプ太陽電池と帆布を一体化したソーラーモジュールを開発し、12%～17%程度までの効率向上を目指すことは可能と考えられ、技術的成立性は期待できる。
- ◆ 問題は現状価格(シリコンタイプ)の 1/7～1/4 程度の大幅なコストダウンである。これまでの主流であるシリコンタイプよりは物量や重量がはるかに少ない CIS タイプによるため、帆布への薄膜太陽電池の連続プリント張り付けなど製造法の合理化による大幅なコストダウン効果や筏船団 1 基あたり 25 km² もの膨大な必要電池面積による量産効果も期待できる。
- ◆ また CIS タイプだけでなく、さらに安価な金属資源を使った CZTS タイプによる可能性も探ることにより、さらなるコストダウンも期待される。
- ◆ 水素価格目標を 50%アップし 45 円/m³ に設定することで経済的に成立するソーラーモジュールの限界コストが現状価格の 1/1.5～1/1.2 程度まで近づく。とりあえずの目標として一気に 30 円/m³ とせず 30～45 円/m³ あたりを目標に技術開

発を開始することが考えられる。

(2) エネルギー輸送

- ◆ 既に実用化段階に入った有機ケミカルハイドライド法により電解水素を MCH によりタンカー輸送する方式の方が、電気を一旦水素に変換することによるエネルギー損失は生じるものの、早期実現性が高い。特に家庭や自動車で燃料電池が普及し、水素の直接利用が進むほど水素輸送の環境が整い有利となる。
- ◆ 電解水素の MCH 輸送においてアルカリ電気分解、水素化反応設備が大きなコストを占めている。現状ですでに合理化技術のプロジェクトが始まっているが、ソーラー筏のような極めて大規模なシステムに対しては未経験の範囲であり、大規模化・量産化・習熟化による更なるコストダウンが必要である。
- ◆ 電気の直接輸送の実現性について 20～30 年後に実用化するエネルギー密度 0.7kWh/kg の高エネルギー密度バッテリーを考える。
- ◆ これまで大量の電気エネルギー輸送のための大型バッテリーについてはニーズがないため考えられたことは無かった。ここでは金属-空気電池全体のうち、電解容器から取り出した陰極金属と電解液をタンカーで安全に輸送する方法を新たに案出した。この方式は現時点で全く前例がないが、原理的には問題がなくこれからの技術開発の方向性と考えられる。
- ◆ この方式が可能になることを前提に評価しても、経済的成立性が成り立つためのバッテリー価格は 1500～2200 円/kWh となり、現在のバッテリー価格の 1/10～1/20 程度の大幅なコストダウンが必要となる。

(3) 筏構造

- ◆ 構造材として実績のある鋼鉄により筏を設計した場合、極力軽量化を図っても重量削減には限界があり、ソーラー筏本体のコストは 3000 億円に近い非常に高額となる。
- ◆ 大幅なコストダウンのために、ノルウェイ北海の厳しい海象条件で養殖施設として実績のある高密度ポリエチレン (HDPE) 材料を用いた柔構造の筏を考えた場合、ソーラー筏本体のコストは 2300 億円程度となる。
- ◆ エネルギー集約・貯蔵システムとしては、筏内での長距離直流集電システムによるエネルギーロスが大きな問題であり、それを避けるためには多数の機器帆柱設置ユニットへの分散型システムが必要であり、筏も細長い蛇型が望ましい。一方、交流集電システムを導入することができれば、集中的長距離集電による FPSO 母船方式の方が経済的に有利と考えられ、正方形筏形状も可能と考えられる。

以上より、1GW の出力を有するソーラーセル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、化石燃料脱却の観点か

らほぼ市場性のある価格で安定した自然エネルギーが大量に獲得するための技術的成立性の程度が確認され、経済的成立性が成り立つための概略の条件が明らかにされた。

これからの技術開発の順序としては、以下が考えられる。

- ◆ 特にコストに占める割合の大きい筏について、鋼材や高密度ポリエチレン（HDPE）を活用したソーラー筏本体構造の合理化・コストダウン技術の開発。
- ◆ 今回は検討が十分でない FPSO 母船方式によるエネルギー集約・貯蔵システムと筏との連結法などの検討。
- ◆ 既に実用化段階に入った電解水素を MCH によりタンカー輸送する方式でのソーラー筏システムの実現に向けて、ソーラー帆布の開発と効率向上・コストダウン技術の開発。
- ◆ 特に電解水素をタンカー輸送する方式で大きなコスト圧迫要因となってい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、量産化や大型化などによるコストダウン。
- ◆ 大量の電気エネルギー輸送用に特化したバッテリー新技術の開発。

12. まとめと実現への課題

2009年に発表した「低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システム」について、中央大学理工学研究所プロジェクト研究に位置づけ、2012～2014年度にわたりその基本的成立性について検討を重ねてきた。3カ年の主要成果を以下に要約するとともに、今後の課題についてまとめる。

12.1 主要な結果のまとめ

(1) 気象・海象条件

低緯度太平洋についての NASA データの分析や気象庁資料などに基づき、下記の主要な知見が得られた。

- a) 太平洋中央部には年平均日射量が $6.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の海域は帯状に広く広がっており、赤道から南緯 15° の海域では $6.5\sim 7.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ に達し、その日射強度はサハラ砂漠・オーストラリア大陸を凌ぎ地球最大である。
- b) 日射量の 12 カ月での変動係数は、北緯・南緯 10° 以内での 10% 以下から、北緯・南緯 30° 付近での 30% 程度までほぼ連続的に変化する。したがって筏船団が可動性を生かして季節変動を考え晴天海域を移動することにより、常に $8.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の日射量が得られる条件が南北太平洋の低緯度海域に広く存在することになる。
- c) 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 $3\sim 7 \text{ m/s}$ と比較的穏やかであり、北緯 $10^\circ\sim 20^\circ$ の帯では年間を通じて北東風（貿易風）が吹いている。低緯度帯に吹く穏やかな定常風と循環海流も利用して、筏船団が動力を使わず低速で省エネ航海することが可能と考えられる。
- d) 北緯 25 度以南は年間を通して概ね有義波高 $1.5\sim 2.0\text{m}$ 以下、北緯 10 度以南は波高 1m 以下で、 50cm 以下の海域もある。南半球についても北半球と対称的な波高分布が予想され、低緯度帯については波高が 1m 程度かそれ以下の静穏海域が期待できる。
- e) 赤道を挟んで対称的に西に向かう海流とその間の東へ向かう赤道逆流があり、その南北には大きな循環流がある。これらを利用して北半球と南半球を行き来する省エネ低速帆走航海が可能と考えられる。
- f) 太平洋には三つの熱帯低気圧活動海域があり、それぞれ異なる様相である。各特徴を理解すれば、熱帯低気圧を回避しつつ発電に効率的な運用が可能であると考えられる。
- g) 日射エネルギーの高い南太平洋海域は、熱帯低気圧の危険性が極めて小さく全くゼロといってよい海域と重なっている。ソーラーセル筏発電には理想的な海域であるが、太平洋の中では日本からは遠い。

- h) 太平洋の東経 150 度以西の他の低緯度海域では、熱帯低気圧のリスクはそれほど大きくはないが皆無ではない。ただし日本近海に比べれば、これら太陽エネルギーと熱帯低気圧の少なさの両面ではるかに条件の良い海域が広大にある。
- i) 日本近海では台風があり、その危険な海域は北緯 15 度以北と東経 150 度以西で、通過する台風が多い上に勢力も強い。これらの熱帯低気圧は季節性のものであるから、筏船団が日本へ接近する場合はその季節をはずす必要がある。
- j) 本プロジェクトのために 1 ヶ月程度先の台風予報技術が必要になると想定されるが、水温 25 度以上の高温海域を把握または予想することにより、台風発生とその進路の長期予測が行え、筏のオペレーションが可能と考えられる。
- k) このベースとなる海洋学およびこれと気象学が結合した分野は、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急速に進歩しており、独自の予報システムを構築することが可能であると考えられる。
- l) 筏船団の設計などには気象・海象データの平均値のみでなく変動係数等の情報が必要である。これを調べる手段として、インターネットで航海されている米国ブイセンター（NDBC : National Data Buoy Center）のブイデータによれば、気温、8 分間の平均風速、瞬時風速（5 秒間の平均風速）、有義波高、波の平均周期、波の卓越周期の平均・標準偏差・最大最小値に関する過去 24～11 年間にわたる情報が得られ、筏の設計条件に反映することが可能であることが分かった。

(2) ソーラー筏船団と関連課題

筏船団は発電を担うソーラー筏と母船、作業船などから構成されると考え、特にソーラー筏を中心に概略構造や関連課題を検討した。

- a) 25km² の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 枚連結することを基本に、現実的構造概念の構築を試みた。
- b) 100m×100m の筏ユニットはさらに 25m×25m のサブユニット 16 枚から構成し、各サブユニットは 4 枚の帆を張る。このサブユニットのサイズであれば、母港から操業海域までの船上運搬が容易になる。
- c) 筏の材質は骨組み構造・フロートとも、まず鋼鉄を考える。また、高密度ポリエチレン（HDPE）についても可能性を考える。
- d) 鋼鉄製筏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。HDPE 製筏サブユニットは水面に HDPE フロートを浮かべその上に立てた支柱でソーラ帆布を支持する。
- e) 筏ユニット・サブユニットはジョイント構造で連結し、全体的にフレキシブルな動きを可能にする。
- f) ソーラー筏の全体形状としては直流集電システムの限界距離を考慮し 2km×12.5km の細長形状の蛇型筏を基本案として考える。この場合、多数の筏ユ

ユニットを区画 (200m×1,000m) に分け、各区画あたりに機器帆柱設置ユニットを 1 個配置し、エネルギー貯蔵設備や航海・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・貯蔵システムを基本案とした。

- g) 一方、交流集電システムを採用すれば母船への集中的エネルギー集約・貯蔵システムが可能となるとの考えの下に、5km×5km の正方形形状についても参考的に検討した。
- h) 以上の基本概念やエネルギー集約方法の概略検討に基づき、発電量に応じた蓄電池などの設備の物量を概略検討し、筏ユニット・サブユニット、機器帆柱設置ユニットとそれらの集合体の概略構造・重量や概念図を作成した。
- i) 大量の筏サブユニット (鋼鉄製では 81 トン、HDPE 製では 17.6 トン) は可能な限り国内で組み立てた状態で貨物船で操業海域まで大量輸送し、作業船などにより静穏海域で全体を組み上げることを考える。
- j) 筏船団の航行制御に関しては、低緯度太平洋は大圏航路から遠く離れており、他の船舶航行への影響は限られると考えられる。しかし、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、GPS 衛星情報を受信し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を考える。
- k) 本発電システムでは、莫大なソーラー帆布パネルのための合理的な保守点検システムが必要となる。それにより異常状態にある太陽光パネルの位置を特定し、最適経路によりその位置まで到達して保守点検補修作業を合理的に行うシステムを考える。

(3) ソーラー帆布

広大な筏を覆うソーラーモジュールは使用資源量や重量などの観点から薄膜撓み性で帆布と一体化されたものを使用することを前提に種々の検討を行い、以下のような結果が得られた。

- a) 米国再生エネルギー研究所 (NREL) の情報によれば、太陽電池変換効率はセルサイズ (1cm 四角) で最大 40%を超えており、さらに新型セルの開発 (硫化鉄半導体など) により効率向上が進んでいる。
- b) モジュールサイズではセルサイズより効率は半分程度に低下するものの、将来的には 20%を超える効率が期待できる。
- c) 現時点での効率はまだ高くはないが、CIS (CIGS) 系や有機薄膜系など薄型・撓み性のモジュールも開発され、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いる。これらのタイプは長期耐久性や温度特性の観点からも問題は少ないようである。
- d) 現時点で撓み性の薄型太陽電池の効率は 10%以下であるが実用化されており、帆

布を基盤とした太陽電池の開発はそれほど困難ではないと考えられる。CIS タイプ太陽電池は 2 ミクロン程度の薄さであり、ロール状帆布基盤上に塗布・蒸着・印刷技術などにより連続的に作製でき、製造法の合理化が図り易いと考えられる

- e) 晴天域を常に航行し日射エネルギーピークが 1 kWh/m^2 で日中 12 時間 (6 時~18 時) 連続発電することにより 1 日 8 kWh/m^2 の発電ができる。1 日の総発電量は電気変換率 12%として $8 \text{ kWh/m}^2 \times 0.12 \times 25,000,000 \text{ m}^2 = 24,000.000 \text{ kWh}$, ピーク時の発電電力は $24,000.000 \text{ kWh} \div 8 \text{ h} = 3,000,000 \text{ kW}$ に相当する。
- f) ソーラーセル筏の各筏ユニットは 1200 kW , 各サブユニットは 75 kW の最大電力で 4 枚のソーラー帆布シートで覆われることになる。ソーラーセル筏全体では、このサイズのシートが $4 \text{ 枚} \times 16 \times 2500 = 160,000$ 枚必要で、これら膨大なソーラー帆布シートからエネルギー貯蔵設備まで電力を集める集電システムが必要である。
- g) 太陽光発電は直流であるため電気集約システムも直流とした場合、電圧降下により集電距離に限界があるため、貯蔵設備は近距離の機器帆柱設置ユニット上に分散設置する案を基本として考える。
- h) 一方、インバータを介した交流変換集電システムによれば距離の制約条件は大幅に緩和でき、FPSO 母船に集中的にエネルギー集約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変換設備が必要にはなるが、直流システムより有利な可能性もあり、ソーラーセル筏の全体形状との関連も考慮しながら検討していく余地がある。

(4) エネルギー輸送

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どのように日本に運ぶかは、最大の技術課題である。水の電気分解により水素に変換し水素またはその化合物の形で運ぶ方式と、蓄電池により直接電気エネルギーの形で運ぶ方式がある。ここでは最近急速に実用化段階を迎えた水素輸送による方法と将来技術ではあるがエネルギー変換ロスが少ない蓄電池輸送について検討し以下の結果を得た。

1) 電解水素輸送

- a) 発電した電気によりアルカリ水電気分解装置で水素を生産し、それを直ちに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)。
- b) アルカリ水電気分解技術は十分確立された技術であり、未だ研究開発途上の海水の電気分解に比べ有利である。
- c) MCH は常温常圧で液体であり、水素を体積が 1/500 の MCH として石油とほぼ同じ施設を利用して貯蔵・輸送が可能である。日本に着いたら MCH をトルエンに戻し水素ガスを分離する(脱水素化反応)。
- d) 水素化・脱水素化反応による水素減少率は 5%以内である。エネルギー損失は 30%

で、そのうち 10%はタンカーによる輸送エネルギー、20%はシステム損失で低温排熱の有効利用を図った場合の値である。

- e) 水素化・脱水素化はそれぞれ発熱・吸熱反応であり、日本での脱水素化プラントを発電所に隣接させて排熱利用することで、エネルギー効率を向上できる。また、脱水素化反応には白金触媒が必要だが、白金の資源備蓄量は国内的にも十分である。

2) 蓄電池輸送

- a) Li イオン電池はエネルギー密度 0.2kW/kg で 0.7kWh/kg を達成するのはかなり困難であり、また大量の電力貯蔵目的には不適と考えられる。大量の電力貯蔵用に開発されてきた NAS 電池は現時点で 0.2kW/kg のエネルギー密度で、Na も S も安い資源であることもメリットであるが、常時保温する必要があり温度変化の高低サイクルは 7 回までに限られなど、エネルギー輸送用には適さない。
- b) NEDO の 2 次電池ロードマップでは 20~30 年後に 0.7kWh/kg の高密度エネルギーバッテリーを開発することを目標としており、その候補としては金属-空気電池があげられる。
- c) 金属 (Li, Zn, Al など) - 空気電池では正極に空気中の O₂ を使うため、原理的にはエネルギー密度を飛躍的に大きくできる。アイデアは昔からあるが実用見通し時期は現時点で不明である。充電時の金属 dendrite (樹枝状結晶) 析出防止と空気中 CO₂ による充放電時電圧差で生じるエネルギー損失の解消が 2 つの大きな課題である。
- d) これまでに存在しなかった大電力輸送のためのバッテリーとして、金属-空気電池のうちプラス極や電池容器を除き、マイナス極金属と電解液のみを分離して専用船で運ぶ概念を案出した。この技術を実現できれば、エネルギー輸送効率を大幅に向上できる。

(5) 海洋利用での環境問題・法制度

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。低緯度海域では風力よりむしろ太陽光の方が効率は良いと考えられるにも関わらず、世界的にも太陽エネルギーが注目されていないのが現状である。海洋に関する環境・法制度についての調査、講演などにより以下の知見を得た。

- a) 公海は自由に使用してよいが、他国の利益に妥当な考慮を払って行使する必要がある。公海上の資源は人類の共同財産であるとの考え方があるので、公海上のエネルギー資源を利用しようとする場合は、国連に上程し協議しなければならないと思われる。
- b) 公海上を低速帆走するソーラー筏については、船舶かその他海洋構造物かの位置づけが国際海洋法的に問題となる。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。この状況で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必要がある。

- c) 多くの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一般海運の障害にはなり難いと考えられる。
- d) 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・海生生物への影響が考えられる。このうち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。
- e) 日本の漁協の漁業権は公海上までは及ばない。また低緯度海域特に島嶼海域では海賊対策が重要となろう。

(6) 技術・経済的成立性

このエネルギーシステムの成立性を筏船団および船団と日本との間を往復するエネルギー輸送のみに限って検討した。

- a) 筏船団の主要技術として、メガソーラー筏本体、ソーラー帆布、電気エネルギー集約システム、機器帆柱設置ユニット、エネルギー貯蔵、エネルギー輸送、操業海域への運搬・組み立て、ソーラー筏の維持・補修、母船・作業船などについて検討し、高エネルギー密度バッテリー開発を除いては概略の技術的成立性が確認できた。
- b) 上記 a)のうち特に大きな問題とされるエネルギー輸送の技術的成立性に関しては、電解水素の有機ケミカルハイドライド法による MCH 輸送はすでに実用化段階にあることが分かった。高エネルギー密度バッテリー輸送については大電力輸送用に特化した金属-空気電池の概念を案出したが、その技術開発はこれからの大きな課題である。
- c) これまで帆布を基盤とする太陽電池の開発ニーズは大きくなかったが、すでに技術開発の進んでいる CIS タイプと帆布を一体化したソーラーモジュールを開発し、12%以上の効率向上を目指すことは可能と考えられ、技術的成立性は期待できる。
- d) ソーラー筏の稼働期間を 30 年、水素買取価格を 30 円/m³とした場合、経済性の得られるソーラー帆布の価格は現状価格（シリコンタイプ）の 1/10 程度の大幅なコストダウンである厳しい評価となり、物量や重量がはるかに少ない CIS タイプの特徴や帆布への薄膜太陽電製造法の合理化・量産効果による大幅なコストダウンが必要である。
- e) 水素価格目標を 50%アップし 45 円/m³に設定することでソーラー帆布の成立性限界価格が現状価格の 1/2 程度まで近づくため、とりあえず 30~45 円/m³を目標に技術開発を開始することが考えられる。

- f) 電解水素の MCH タンカー輸送方式の方が、未だ実現性の見えない高密度バッテリーによる電気輸送より早期実現性が高い。特に燃料電池が普及し、水素の直接利用が進むほど水素輸送の環境が整い価格条件も有利となる。
- g) 電解水素の MCH 輸送においてアルカリ電気分解、水素化反応設備が大きなコストを占めており、大規模化・量産化・習熟化による更なるコストダウンが必要である。
- h) 電気の直接輸送の実現性について 20～30 年後に実用化するエネルギー密度 0.7kWh/kg の高エネルギー密度バッテリーを考えており、ここでは金属-空気電池全体のうち、電解容器から取り出した陰極金属と電解液をタンカーで安全に輸送する方法を新たに案出した。ただしこの方式によっても、経済的に成り立つためのバッテリー価格は 1500～2200 円/kWh となり、現在のバッテリー価格の 1/10～1/20 程度の大幅なコストダウンが必要となる。
- i) 構造材として実績のある鋼鉄により筏を設計した場合、極力軽量化を図っても重量削減には限界があり、ソーラー筏本体のコストは 3000 億円に近い非常に高額となる。
- j) 大幅なコストダウンのために、荒海での養殖施設として実績のある高密度ポリエチレン (HDPE) 材料を用いた柔構造の筏を考えた場合、ソーラー筏本体のコストは 2300 億円程度となる。
- k) ソーラー筏の全体形状については、機器帆柱ユニットへの直流回路による分散型のエネルギー集約・貯蔵システムをとる場合、筏も細長い蛇型が望ましい。一方、交流集電システムを導入することができれば、長距離集電による FPSO 母船方式の方が経済的に有利と考えられ、正方形筏形状も可能となる。

12.2 実現への課題

以上のような 3 カ年の研究活動の結果、取りあえずの目標として電解水素の MCH 輸送により近い将来に低緯度太平洋でソーラー筏システムにより太陽エネルギーを本格利用する可能性を追い求めていく必要があると考える。

そのための今後に残された課題としては以下が挙げられる。

- (1) 気象・海象条件についてさらに詳細なデータ収集するとともに、現地海域での観測も行い、平均値のみでなくピーク値についてのデータ収集に基づき筏の設計条件を決定する。
- (2) 筏船団の構成・船体構造の具体化と基本設計を進めると共に、筏ユニット・サブユニットの材料面・構造面・運送方法・組み立て方法について基本設計・模型実験・解析による詳細な検討を行い大幅な合理化を目指す。

- (3) 薄型撓み性ソーラー帆布の開発・高効率化を進めると共に、ソーラー帆布の合理的な大量製造技術を開発する。
- (4) ソーラー筏の機能を一式備えた小型プラントを試設計し、その小型モデルを作製して、プール上で模型実験を行い、基本的な性能試験を行う。その後、順次スケールアップした海上での試験に移行し、スケールアップを図る。

一方、人類の自然エネルギーの大量利用に関するこの技術に対しては既成の海洋利用の枠組みの中で様々な法的制約条件をクリアする必要がある。開発投資や海洋利用法の国内・国際的な合意形成のためには、上記の技術面だけでなく政府・関係機関・学会・マスメディア・国際機関などへの情報発信や広報活動が不可欠であり、今後これらを継続的に行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 國生剛治(2010) : エネルギーパラダイムシフトへの挑戦—太平洋光発電筏構想—, 建設コンサルタンツ協会会誌 Consultant Vol.247, pp.70-73.
- 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研究会 (2013) : 2012年度報告書「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」, 中央大学理工学研究所プロジェクト研究.
- 3) 太田時男(1978) : エネルギー, Vol.11, No.1.
- 4) Veziroglu et al.; Solar direct energy conversion at sea, University of Miami and Escher Technology Associates (1977).
- 5) 渡辺健次・森下輝夫・内藤正一・菅 進 (1983) : 太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究 (第4報:技術的可能性), 船舶技術研究所報告 第20巻 第2号 研究報告, 93-128.
- 6) 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.
- 7) Kokusho, T., Emoto, E. and Kato, T. (2013): Sailing solar cell raft project and weather and marine conditions in low-latitude Pacific Ocean, Journal of Energy Engineering, ASCE,
- 8) 「ソーラーセル筏発電船」日刊建設工業新聞特集記事 2009年6月
- 9) 國生剛治 (2012) : 総説:原子力災害を自然エネルギー本格利用の出発点に - 太平洋ソーラーセル帆走筏プロジェクトの提案 -, 電力土木 No.358, 20-24.
- 10) 國生剛治(2012) : 太平洋ソーラーセル帆走筏構想—人類のエネルギー利用パラダイムシフトへ向けて—, ベース設計資料 No.152 土木編 2012年前期版, 61-64.
- 11) 國生剛治(2013) : 低緯度太平洋メガソーラー帆走筏発電構想の実現に向けて (中大技術士会とのプロジェクト研究), OHM 2013年10月号, 4-5.
- 12) 國生剛治 (2014) : 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—, 土木学会誌2月号論説.
- 13) 新太陽エネルギー利用ハンドブック(2006) : 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編, 日本太陽エネルギー学会, p35.
- 14) 22-year Monthly & Annual Average (July 1983 - June 2005)- NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE)- Release 6.0 Data Set (2008). <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>:
- 15) 北太平洋海洋気候図(2003) : 気象庁.
<http://www.data.kishou.go.jp/db/toukatsu/stat/index.html> .
- 16) National Geospatial Intelligence Agency (2002):
<http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal>
- 17) 熱帯低気圧 <http://ja.wikipedia.org/wiki>
- 18) 気象庁デジタル台風 <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>

- 19) National Data Buoy Center www.ndbc.noaa.gov
- 20) 三井海洋開発（株） <http://www.modec.com/jp/business/fpso/index.html>
- 21) 川崎汽船（株） <http://www.kline.co.jp/service/energy/osv/>
- 22) 気象庁データ <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 23) NEDO 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
- 24) 産総研太陽光発電工学研究センター <https://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/>
- 25) NREL : National Center for Photovoltaics <http://www.nrel.gov/ncpv/>
- 26) 太陽光発電ロードマップ (PV2030+) (2009) : , 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- 27) 仁木 栄・石塚尚吾・小牧弘典・古江重紀・山田昭政・柴田 肇・松原浩司 (2011) : 産総研における CIGS 太陽電池の産業化に向けた研究開発, 特集: 化合物薄膜太陽電池—CIGS 太陽電池の開発の現状—, 太陽エネルギー201, Vol.37, No.1, 21-29.
- 28) 太陽光発電システム 日本電気技術者協会講座
<http://www.jeea.or.jp/course/contents/03401/>
- 29) 昭和電線の太陽光発電システム用ケーブル
<http://www.swcc.co.jp/cs/products/catalog/pdf/solar.pdf>
- 30) 太陽光発電 <http://ja.wikipedia.org/wiki>
- 31) 宇宙太陽光発電システム (SSPS) について : 宇宙航空研究開発機構
<http://www.ard.jaxa.jp/research/hmission/hmi-ssps.html>
- 32) 矢部 孝・山路 達也 (2009) : マグネシウム文明論, PHP 新書
- 33) 二次電池技術開発ロードマップ (Battery RM2010) (2010) : 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- 34) 日本の陸上風力発電コストの現状と分析 公益財団法人自然エネルギー財団
<http://jref.or.jp/images/pdf/>
- 35) 再生可能エネルギー貯蔵輸送等技術開発, 経済産業省
<http://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2013/pr/pdf>
- 36) 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