技術論文

Feasibility of Mega Solar Raft in Low-Latitude Pacific Ocean

低緯度太平洋メガソーラー発電筏の概略成立性

Takaji KOKUSHO
國生　剛治 *1

Abstract

Development of a huge wind-sailing solar cell raft of 25 km^2 in area proposed previously which can generate electricity comparable to a 1000 MW nuclear power plant in the low-latitude Pacific Ocean is crudely evaluated here in terms of technical and economical feasibilities.　Considering that the transportation of H_2-energy transformed from electricity is already possible in the form of MCH by oil tankers, principal technologies and associated cost estimates are evaluated, which reveals cost targets for solar modules for this energy system to be attainable as well as major technical challenges to realize better feasibility.

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

キーワード：低緯度太平洋，帆走筏，水素輸送，経済的成立性

1．構想の概要

ここで提案する発電システムは前論文 [1]で述べた通り，太平洋低緯度公海上でメガソーラー筏船団が移動しながら，太陽光発電により大規模安定的な自然エネルギー利用を図るものである。海洋でこそ容易に達成できるメガソーラー筏の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 8kWh/m^2，ソーラーモジュールの電気変換効率を 12%（家庭用太陽電池を多少下回る値）で試算すると 1 日当たりの発電量は 24GWh であり，24 時間連続運転の 100 万 kW 級の発電所に匹敵する。図 1 の構想図のように，南北太平洋の低緯度海域でソーラー筏や母船などからなる船団が，気象衛星などによる長期気象予報技術を活用して晴天域を低速帆走しつつ継続的に太陽光発電を行い，得られたエネルギーは水素に変換し大型タンカーで定期的に日本に輸送することを目指す。

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

2.　日射・気象海象条件と熱帯低気圧

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

*1 中央大学名誉教授（元同理工学部都市環境学科教授）
e-mail：koktak@ad.email.ne.jp
（原稿受付：2016 年 8 月 6 日，受理日：2016 年 10 月 7 日）

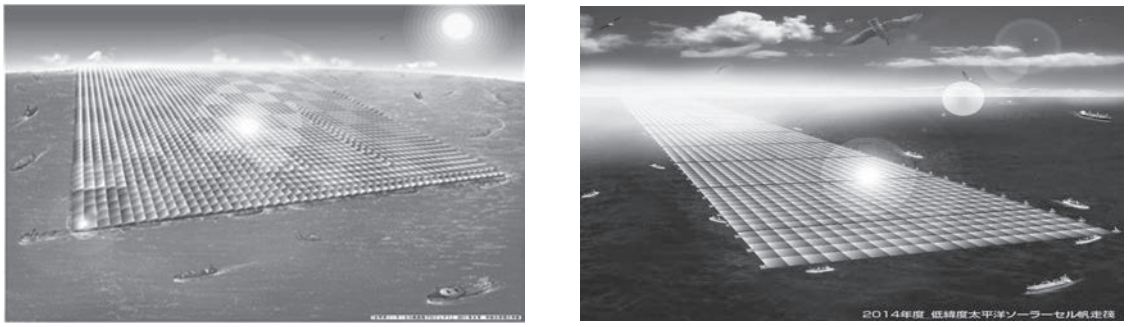

Fig.1 Concepts of mega PVC raft in low-latitude Pacific Ocean (left: square raft, right: slendar raft)
図 1　太平洋メガソーラー筏の構想図（左：正方形筏，右：細長形筏）

大な海域が存在する。これらの海域には雲形で描いたいくつかの排他的経済水域（EEZ）が含まれるが，それを除いた国際的公海に限ってもオーストラリア大陸やサハラ砂漠を凌ぐ日射量の広大な海域が赤道の南北に存在する。これらの低緯度海域を筏船団が可動性を生かし季節変動を考慮しながら最適ルートを回遊することで， 8.0 kWh/m^2/day 以上の日射エネルギーを得ることは十分可能と思われる [1]。

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

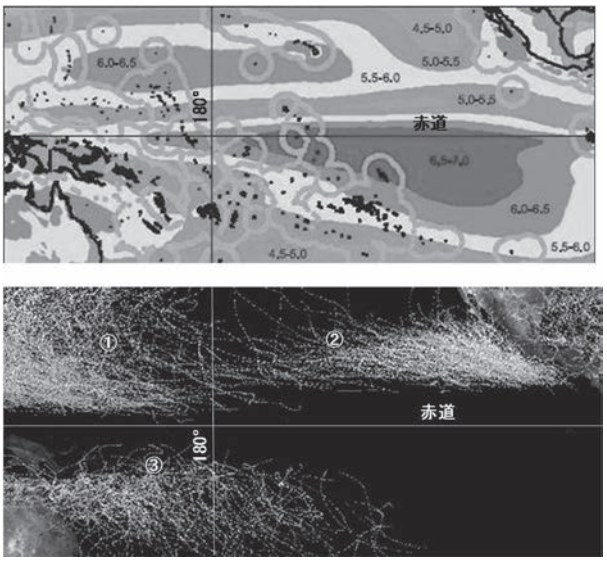

Fig. 2 Solar energy density (top) and Tropical storms (1985-2005) in low-latitude Pacific Ocean (bottom).
図 2　低緯度太平洋の日射エネルギー密度（上段）[1]と熱帯低気圧の経路(1985〜2005 年)（下段）[2]

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

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

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

3.　ソーラー筏船団

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

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

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

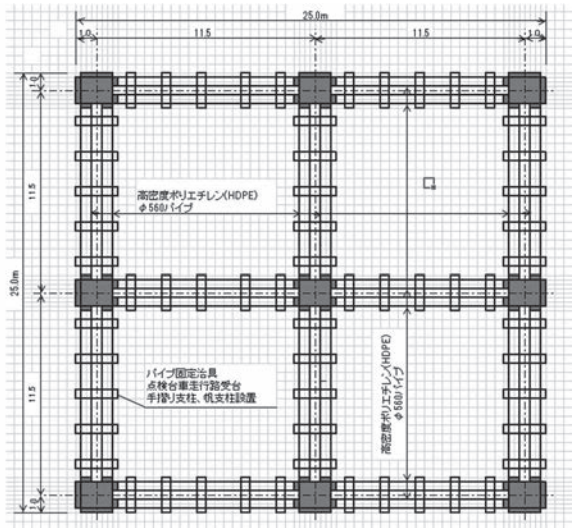

Fig.3. Flexible subunit of solar raft made of HDPE
図 3　撓み性の HDPE 製ソーラー筏サブユニット [2]

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

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

4.　ソーラーモジュール・集電システム

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

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

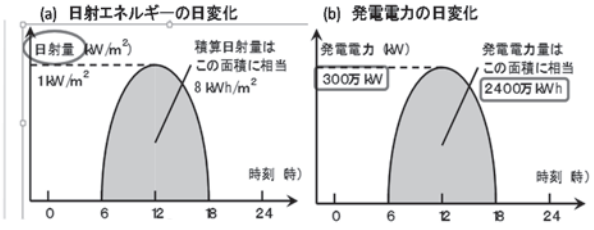

Fig.4 Daily variations of solar energy (a) and electricity (b)
図-4　(a)日射エネルギーと(b)発電電力の日変化 [2]

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

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

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

5.　エネルギー貯蔵・輸送

メガソーラー筏で発電された 100 万ｋW 級の原子力発電に匹敵する電力を一時貯蔵し日本に運ぶ手段の中から，既に実用化段階を迎えた MCH による水素貯蔵輸送を考える。すなわち発電した直流電気によりアルカリ水電気分解装置で水素を生産し，それをリアルタイムで有機ケミカルハイドライト法によりトルエンに吸収させメチルシクロヘキサン（MCH）に変換する（水素化反応）。MCH は常温常圧で液体であり，水素を体積が 1/500 の MCH に変換し石油とほぼ同じ方法で貯蔵・輸送が可能である。日本では MCH から水素ガスを分離しトルエンに戻す（脱水素化反応）。その際研究会で得た専門技術者からの情報 [2]を参考に，水素化・脱水素化反応による水素回収率を 95%，タンカーによる輸送エネルギー10%を考慮している。

6.　海洋利用での環境問題・法制度

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

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

7.　成立性の概略評価

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

メガソーラー筏全体での水素の出荷量は 5,170,000 m^3/day であり，2 週間分を 1 隻のタンカーで運び，日本ではそのうちの 95%が回収されるとすると [2]タンカー一隻当たり 30 円/m^3×5,170,000 m^3/day×14day×0.95→20.6 億円，年間では 20.6 億円×365day/14day≒538 億円/年，30 年間稼働した時の総買取価格は 538 億円/年×30 年=16100 億円となる。これに対し必要な初期資本費と 30 年間の運転操業費について，可能な限りの費用の推定と積み上げを行い，帆

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

(1) 筏・船舶関連

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

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

母船については，筏船団全体の発電制御・航行・エネルギー受け渡し制御・200~300 人に上る運転員の業務・居住などに必要な機能とスペースを有する 30 万積載トン程度のプラント船の価格を専門企業の情報により 300 億円と想定する [2]。オプションとして FPSO 母船方式を採用する場合については，エネルギー変換・貯蔵設備もすべて母船の機能に加わることになるが，これらの設備価格は別途考えているため，それほど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，現状のオフショア支援船を参考に 50 億円/隻×4 隻=200 億円となる。さらにこれら船舶のコストの中にその他の小型の作業・連絡船（10 隻程度）も含めて考える。

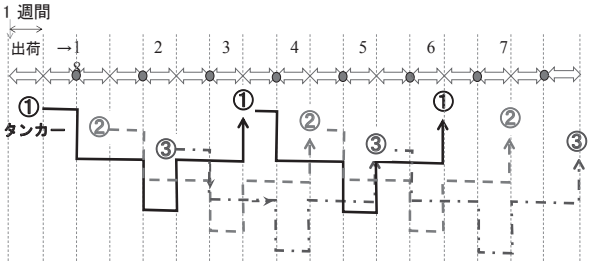

Fig.5 Shuttle schedule of 3 MCH tankers

図-5　3 隻の MCH タンカーの概略航海スケジュール [2]

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

(2) エネルギー変換・貯蔵関連

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

一方，前述の FPSO 母船への集中設置のケースでは物量をかなり軽減できるためそれを一律に 20%と仮定すると，アルカリ水電解設備については 1100 億円→900 億円に，水素化設備（646,000 m^3/h H_2）についても 750 億円→600 億円にコストダウンできると考える。

日本に設置する脱水素化プラントについては，1 日当たり MCH 処理量は 10,300 m^3/day，水素発生量は 5,170,000 m^3/day となり，上記文献 [5] に基づき時間当たり処理量を考慮すると 240 億円と算定され [2]，上記の昼間に集中稼働する水素化設備価格に比べて安価となる。

(3) ソーラー帆布（電気集約系統を含む）

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変換貯蔵設備までの電気集約系統（ケーブル・コンバータなど）のコストも含むこととする。

メガソーラー筏全体では 300 万 k W 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 km^2 全面を覆うとした場合，単位面積当たりの価格は 0.12×A 円/m^2 となる。

(4) ソーラー筏の操業海域への運搬と組み立て

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

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

項目		鋼製筏・分散方式（億円）	HDPE製筏・分散方式（億円）	鋼製筏・集中方式（億円）	HDPE製筏・集中方式（億円）
水素ガス30年間総売り上げ		16100 (24150)： 基本ケース30円/m^3 (参考ケース45円/m^3), 水素回収率95%			
初期資本費	ソーラー筏本体（ジョイント・防錆など含む）	2920	2320	2920	2320
	機器帆柱設置ユニット	500		200	
	ソーラー帆布・電気系統	0.03×A　（3,000,000kW×A 円/kW：A 円/kW=ソーラー帆布単価）			
	電解槽＋水素化プラント＋脱水素化プラント	(1100+750+240=) 2090		(900+600+240=) 1740	
	MCH輸送船	180			
	母船	300		400	
	作業船	200			
	ソーラー筏の操業海域への運搬	175	60	175	60
	ソーラー筏の組み立て	195	115	195	115
初期資本費計		6560+0.03×A	5765+0.03×A	6010+0.03×A	5215+0.03×A
運転操業費	MCH水素輸送	1610			
	保守・点検・補修・部分更新	(6190+0.03×A)×0.03×30	(5590+0.03×A)×0.03×30	(5640+0.03×A)×0.03×30	(5040+0.03×A)×0.03×30
	筏船団運転	(6190+0.03×A)×0.01×30	(5590+0.03×A)×0.01×30	(5640+0.03×A)×0.01×30	(5040+0.03×A)×0.01×30
	30年間運転操業費	(6190+0.03×A)×1.2＋1610+175+195	(5590+0.03×A)×1.2＋1610	(5640+0.03×A)×1.2＋1610+175+195	(5040+0.03×A)×1.2＋1610
初期資本費+30年間運転操業費総計		(6190+0.03×A)×2.2＋1980	(5590+0.03×A)×2.2＋1610+60+115	(5640+0.03×A)×2.2＋1980	(5040+0.03×A)×2.2＋1610+60+115
経済的成立性の条件（基本水素価格）水素30円/m3，輸送効率95%		(6190+0.03×A)×2.2＋1980 =16100 → A=7610円/kW	(5590+0.03×A)×2.21785 =16100 → A=30600円/kW	(5640+0.03×A)×2.2＋1980 =16100 → A=25900円/kW	(5040+0.03×A)×2.2＋1785 =16100 → A=48900円/kW
経済的成立性の条件（参考：水素価格50%増）水素45円/m3，輸送効率95%		(6190+0.03×A)×2.2＋1980 =24150 → A=130000円/kW	(5590+0.03×A)×2.2＋1785 =24150 → A=153000円/kW	(5640+0.03×A)×2.2＋1980 =24150 → A=148000円/kW	(5040+0.03×A)×2.2＋1785 =24150 → A=171000円/kW

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

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

(5)　運転操業費

エネルギー輸送コストとして，14.5 万 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関連企業からの情報 [2)]を元に積荷エネルギー価格の 10%　と仮定すると，30 年間の総積荷価格は 610 億円となる。

船団全体の保守・点検・補修コストとしては，特にソーラー帆布や電気回路の経年劣化や技術的老朽化が問題で部分更新も含めた補修コストを考える必要がある。また，エネルギー変換・貯蔵・輸送関連のプラント諸設備についても経年劣化や技術的老朽化に対し補修のみでなく部分更新のコストも考える必要がある。これらについては詳細が不明であるが，30 年程度で初期資本全体が更新されることを根拠に，初期運搬・組立てを除く初期資本費合計の 3%を考えることとする。このように技術革新を反映した補修・更新を年々重ねれば，30 年経過後にはそのまま次の 30 年に引き継ぎ可能であると仮定している。また筏船団運転・操業コストとしては，運転員の人件費，運転エネルギー費，通信費，税金・保険など諸費用を含み，1 年当たり上記初期資本費合計の 1%を考えることとする。

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

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

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

Table 2 Threshold cost for feasibility of solar module sail cloth (including electric system) and ratio to present cost

表-2　成立するためのソーラー帆布（電気系統含む）の限界単価と対現在価格比 [2)]

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

陽電池ではあるが，ここではこれを現状で達成可能な基準価格と考えると，表-2 に示すように鋼製筏・分散方式では現状の 1/26 までのコストダウンが必要であり事実上不可能に近い。これに対し鋼鉄製あるいは 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・電気系統の単価は 1/7～1/4 のコストダウンであり，ハードルは高いが努力目標の範囲に入りうると思われる。さらに上記の基本ケースに加え参考のため，経済性評価で大前提としたエネルギー買取価格を MCH 輸送水素については 30 円/m^3→45 円/m^3 に 50%アップさせた場合について算出したソーラー帆布・電気系統価格を表-2 に追記している。これよりソーラー帆布・電気系統の単価は現状達成最小価格 20 万円/kW に対し 1/1.5～1/1.2 で経済的成立性が得られることになり，まずはこれを目標とすることが現実的である。

8.　まとめ

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

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

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

謝辞

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

参考文献

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

2) 「低緯度太平洋ソーラーセル帆走筏発電システムの成立性（2014 年度報告書）」http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/top/houkokusyo%20honsastu.pdf

3) 渡部朝史，村田謙二，神谷祥二，坂田 興，石本祐樹（2010）：国際的な水素エネルギーシステムの環境価値を含めた経済性について－日本とアルゼンチン間の経済性検討－，Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 31, No.6, 24-31.

4) 経済産業省「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発事前評価報告書」産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会平成 24 年 6 月 www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h24/450.pdf

5) 加納達也(2008)：製油所の副生水素の発生実態と利活用技術：Best Value Vol.20,価値総合研究所.

6) NEDO (2014)：再生可能エネルギー技術白書（第２版）http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html