

一般財団法人 油脂工業会館

第45回 表彰

油脂産業優秀論文

審査委員特別賞

再生可能エネルギー増進への油脂産業の役割

チューブワームによる硫黄の有効活用とメタン発酵の推進

日油株式会社

こみや ひろゆき
小宮 博之

かきやま ともか
柿山 朝香

目 次

はじめに ······ 1

第1章 バイオマスエネルギーの現状

1-1 注目される再生可能エネルギー ······ 1
1-2 バイオマス事業を牽引するメタン発酵 ······ 2
1-3 メタン発酵の現状と課題 ······ 2

第2章 バイオマス資源の利用を阻む硫黄

2-1 硫黄のマテリアルフロー ······ 3
2-2 硫黄の潜在的価値 ······ 4

第3章 チューブワームによる硫黄の有効利用

3-1 極限世界で生きる知恵 ······ 5
3-2 チューブワームによる硫黄変換 ······ 6

第4章 チオタウリンの用途展開とメタン発酵の推進

4-1 油脂産業と硫黄化合物 ······ 7
4-2 チオタウリンの用途展開 ······ 8
4-3 ダブルリファイナリーによるメタン発酵の推進 ······ 10

おわりに ······ 10

参考文献 ······ 12

はじめに

2008年、オワンクラゲから緑色蛍光タンパク質（GFP）を発見した下村博士にノーベル化学賞が授与されたことは記憶に新しい。GFPは生命科学の研究に役立つ道具として用いられるようになり、例えばがん細胞の増殖や転移の様子が観察できるようになったことから、新しい治療法や薬剤の開発に貢献している。このように、海洋生物には我々が応用できるすばらしい機能やシステムが存在する。本稿では、筆者が考案した海洋生物を利用して再生可能エネルギーを推進するシステムについて述べ、これを活用する上で必要となる油脂産業の役割を提案する。

第1章 バイオマスエネルギーの現状

1－1 注目される再生可能エネルギー

地球温暖化の主要な緩和策は温室効果ガスの排出量削減であり、文部科学省・気象庁・環境省の三者が取りまとめた「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」では、再生可能エネルギーの導入拡大が有効と位置づけられている¹⁾。また、東日本大震災による原子力発電所の事故をきっかけに、現在ほとんどの原子力発電所が停止しており、将来の再生可能エネルギーへの期待は一層高まる予測されている。政府が発行した「革新的エネルギー・環境戦略」²⁾によれば、再生可能エネルギーの導入量は図1－1に示すように、2010年の1,060億kWhから2030年には3,000億kWhに拡大し、総発電電力量に占める割合は10%から31%に増加すると想定されている。政策面では2012年7月に「再生可能エネルギー特別措置法による固定価格買い取り制度」が施行され、政府主導で再生可能エネルギーの導入拡大が推進されている。

再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどが挙げられ、農林水産省が中心となって取りまとめた「バイオマス事業化戦略とバイオガス事業（2012.10.3）」³⁾には、バイオマスは大気中の二酸化炭素を増加させない「カーボンニュートラル」と呼ばれる特性により地球温暖化対策としての有効性が示されている。また、季節や天候、昼夜で発電量が変わることの多い太陽光や風力と異なり、バイオマスは常時安定した出力が得られることから、一年を通して一定以上の需要を賄うベース電源になるという利点もある。

1－2 バイオマス事業を牽引するメタン発酵

図1－2に主要なバイオマス利用技術の状況を示す³⁾。ここでは、バイオマスとして利用されている資源が、どのような技術によって電気や燃料などの製品に変換されるかを示している。図1－2に示されるバイオマス資源のうち、廃棄物系では汚泥7,800万t、家畜排泄物8,800万t、食品廃棄物1,900万tと大量に資源が発生し、バイオマス資源全体の72%を占める³⁾。これらの廃棄物系資源は、メタン発酵、直接燃焼、固体燃料化などの変換技術により電気や熱として利用されている。また、これらの変換技術の中でもメタン発酵は古くて新しい技術と称され、近年は環境保全や循環型社会の構築という観点から実用化が進んでいる。特に、下水汚泥から取り出したメタンガスの利用は各地で実用化されており、例えば神戸市では、下水処理場で発生するバイオガスを精製し、自動車用燃料や都市ガスとして利用する「こうべバイオガス」の取組みが行われている。汚泥から発生するバイオガスのうち、事業所内で利用する分以外の余剰ガスはこれまで焼却処分されていた。最近は、得られたバイオガスを高度に精製してメタンの含有率を97%以上とすることで、バスやタクシー、ごみ収集車などの燃料として使用したり、熱量を調整することで都市ガスとしての使用が可能となった。都市ガスとして導入されるバイオガスは2010年の時点で約80万m³であり、これは2,000世帯が1年間に使用する量に相当する。また、事業所内での焼却処分を止めたことで二酸化炭素排出量は年間1,200t削減された⁴⁾。このように既に広く実用化されているメタン発酵は、バイオマス資源をエネルギーとして活用するための最も有力な変換技術といえる。

1－3 メタン発酵の現状と課題

メタン発酵装置の例を図1－3に示す⁵⁾。下水処理場から回収された汚泥は、遠心濃縮機などで機械的に濃縮され、メタン発酵槽に送られる。メタン発酵槽で発生したバイオガスは脱硫塔を経てガスホルダに一時貯蔵され、発電に供される。また、発電で生じる廃熱は熱交換器で温水や蒸気に変換され、メタン発酵槽の保温など、施設内の熱源として利用される。

下水汚泥より発生するバイオガスは特に消化ガスとも言われ、この中にはメタン、二酸化炭素に加え硫化水素や窒素も含まれる。このうち硫化水素は発電エンジンやボイラー機器などを腐食したり、燃焼により亜硫酸ガスを発生したりする

ため、脱硫塔で除去している。また、メタンガスを採った後に残る残渣を消化液と言い、この中にはアンモニアが多く含まれることから、硝化、脱窒工程で窒素ガスに変換して除去している。

メタン発酵は長い歴史を持ち、既に実用化されている技術であるが、今後の普及拡大には課題も存在する。主な課題と対策、今後の展望を表1-1に示す。消化液中のアンモニアの除去については、硝化、脱窒と二段階の工程を要していたが、アンモニアを直接窒素ガスに変換する嫌気性アンモニア酸化（Anammox）の開発が進んだ結果、処理コスト低減、省スペース化が可能となり、対策に目処が立ちつつある。

一方、消化ガス中の硫化水素の除去については、乾式脱硫と湿式脱硫があり、乾式脱硫は硫化鉄の形で硫化水素を取り除く方法であるが、硫化鉄は使用されること無く埋設処理されているのが実情である。また、湿式脱硫は多量の排水が発生するため廃液処理が必要となる。しかし、硫化水素の除去方法は、環境負荷低減や発生物の有効利用といった観点において対策が不十分であると考えられる。僅かであっても環境に負荷をかける硫化水素の処理方法には疑問を感じずにはいられない。

これらに代わる技術として、微生物により硫化水素を硫酸や硫黄に変換する技術（生物学的脱硫技術）がNEDO等により検討されており、硫黄酸化細菌を利用した脱硫方法が一部で実用化されている。特に、畜産が盛んな農村部では家畜の排泄物を利用した小規模なメタン発酵設備においてこの技術の導入が進んでいるが、これは脱硫工程から得られた硫酸をその場で肥料化して使用できるというメリットがあるためである。今後は、多量に発生する下水汚泥や食品廃棄物を利用した大規模なメタン発酵技術の導入が都市部において進められる。都市部で発生した多量の硫酸を、農村部と同じく堆肥化して使用することは考えられない。なぜなら、多量に発生する硫酸や硫黄については、今後バイオマス資源の利用を阻む大きな課題を抱えているからである。

第2章 バイオマス資源の利用を阻む硫黄

2-1 硫黄のマテリアルフロー

日本と硫黄の繋がりは深く、かつて日本には多くの硫黄鉱山があり、産出された硫黄が韓国や中国へと輸出されていたとの記録がある。ところが、産出量が大

きく減少し、石油の脱硫装置からの回収が可能となり生産量が急増したことで、1970年代前半にはすべて閉山している。現在、国内の硫黄はすべて石油の脱硫により回収されたものである。図2-1に示すように、供給量は1971年に50万tであったものが、およそ200万tまで増加している⁷⁾。需要量に関しても供給量とほぼ同様に推移しており、需給バランスは安定している。

一方、世界的な硫黄需給状況に関しては、2013年は供給量5,810万t、需要量5,730万tと現状では需給バランスは安定しているものの、2017年には供給量7,200万t、需要量6,420万tと、石油や天然ガスからの回収量の増加により供給過剰になると予測されている⁸⁾。

日本における硫黄の需要に目を向けると、1990年代から国内需要は減少し、輸出が大きく増加しており、2010年には輸出は7割を占めるまでに至っている⁷⁾。このような世界的な需給バランスの崩れから、日本の硫黄輸出は国際競争にさらされると懸念される。図2-2に示すように、2009年以降は輸出量が減少している⁹⁾。これは、中国の需要減に起因すると言われており、世界的に需要が減少すれば、さらなる輸出量の減少は避けられない。しかも、海外では固形硫黄の貯蔵や輸送といった取り扱いが可能であるのに対し、日本は世界で唯一溶融硫黄しか取り扱うことができないという不利な状況もある。需給バランスの崩れはすでに始まっており、海外では行き場を失った固形硫黄を図2-3のように野積みすることにより、一時的に回避している。しかし、日本ではこのような対応すら不可能なのである。

2-2 硫黄の潜在的価値

前章で述べたように、メタン発酵では硫化水素が発生し、これを除去する必要がある。「革新的エネルギー・環境戦略」に示されるバイオマスエネルギーの使用目標をもとに、現在のバイオマスの資源量³⁾、バイオマス中の硫黄含有率^{10)、11)}からメタン発酵の脱硫により発生する硫黄量を試算すると、図2-4に示すように、硫黄換算で2020年は6.3万t、2030年には9.1万tが発生すると見込まれる。現在の脱硫方法では、これらは硫化鉄や硫酸となるが、前項でも述べたように、世界的に硫黄は供給過剰となり、硫黄がこれ以上増加することは許されない状況になることが予想される。このままでは余剰硫黄の問題で、バイオマスエネルギーの中核をなすメタン発酵の導入推進が立ちゆかなくなってしまう。

硫黄とは使い道に困るような利用価値の低い元素なのであろうか。硫黄化合物は、アニオン、カチオン、ラジカルと多様な振る舞いをすることから、反応のバリエーションが豊富であり、例えば高いラジカル捕捉能を活かして抗酸化剤や連鎖移動剤として用いられる。また、金属との親和性を活かした電子部品用接着剤や、ゴム用添加剤、チオール／エン反応を利用したUV硬化性材料などに用いられ、樹脂の熱力学的物性や光学物性を制御する材料としても応用されている。人体においては、システインやメチオニンなどの含硫アミノ酸として、メラニン色素の生成抑制や肝臓の解毒機能を高める作用を有している。このように、硫黄は反応性に富み、独特な性質を有する非常に魅力的な元素なのである。

メタン発酵で生成する硫黄を、上述のような硫黄の特性を活かした化合物に変換することができれば、余剰硫黄の問題に阻まれることなくメタン発酵が推進できるはずである。そればかりか、得られた化合物を様々な分野に応用することで、メタン発酵の導入を加速する推進力にもなるであろう。

メタン発酵にふさわしい硫黄の変換方法としては、エネルギー消費が少なく、簡便であり、かつ持続可能な方法が望ましい。そこで筆者は、既に自然界に存在している持続性のあるシステムを適用できないかと考えた。

第3章 チューブワームによる硫黄の有効利用

3－1 極限世界で生きる知恵

自然界には、硫黄、硫酸及び硫化水素等の無機硫黄化合物を酸化、還元し、得られたエネルギーを利用する種々の硫黄細菌が棲息している。先述した生物学的脱硫技術では、硫黄細菌の一種である硫黄酸化細菌が用いられている。硫黄酸化細菌は、光エネルギーを利用して、二酸化炭素と硫化水素を炭水化物と水、そして硫黄に変換する化学合成細菌である。しかし、硫黄細菌の働きでは、硫黄と無機硫黄化合物の変換を繰り返すだけであり、新たに用途を拡大できるような物質には変換されない。

一方、深海では化学合成細菌が一次生産者となる生態系が形成されており、硫黄を様々な形に変え、有効に利用している。その生態系とは海底から湧き上がってくるメタンや硫化水素をエネルギー源にしている生物の集まりであり、「化学合成生物群集」と呼ばれている。そこには二メートルを超えるような巨大なチュ

ブ状の奇妙な生物が存在する。太陽光も届かない非常に資源の乏しい深海という場所で、このような巨大生物が繁栄できることは非常に興味深い。そこには資源の豊富な地上とは異なり、限られた資源から効率良くエネルギーを得ようとする独自のシステムが存在しているに違いない。筆者は、化学合成細菌から巨大な生物を形成するこの化学合成生物群集のシステムをヒントにすれば、地上のシステムからは想像もできないような硫黄の新たな変換ができるのではないかと考えた。

このチューブ状の生物は、図3-2に示すような「チューブワーム」というゴカイの仲間である。しかし、チューブワームはゴカイと違って口も胃も肛門もない。その代わり、栄養体と呼ばれる細長い部分に硫黄酸化細菌を共生させ、棲管（せいかん）と呼ばれるキチン質でできた硬い管から鰓（えら）を出して硫化水素を吸い、硫黄酸化細菌が作り出す炭水化物を利用して生きている^{1,2)}。棲管の先端から外に出ている器官が、ちょうど羽織のように見えることから和名はハオリムシという。

一方、硫化水素はチューブワームにとって本来は有毒であるため、それを無害化するために、図3-3に示すような、体内のヒポタウリンを硫化水素と反応させてチオタウリンに変換する機構を備えていると考えられている。それにより、チューブワームの体内からは多量のチオタウリンを得ることができる^{1,3)}。チオタウリンは、生体内にも存在するアミノ酸であり安全性が高いだけでなく、図3-4に示すように、ジブチルヒドロシキトルエン（BHT）やアスコルビン酸を上回る高い抗酸化能を有する化合物である^{1,4)}。また、分子内にチオスルホン酸基とアミノ基の二つの官能基を有していることから、様々な化合物への変換も可能である。まさに硫黄の本来のポテンシャルを活かす化合物であり、幅広い分野へ応用できる可能性を秘めている。

このチューブワームの硫黄変換機構を利用すれば、硫化水素は処理に困る物質などではなく、チューブワームが生きるために必要な物質であると同時にチオタウリンを作り出す原料となるのである。そこで筆者は、図3-5に示すように、メタン発酵で発生する硫化水素をチューブワームに与え、チオタウリンとする硫黄変換方法を提案したい。

3-2 チューブワームによる硫黄変換

深海に棲むチューブワームを陸上で人工的に飼育することはできるのであろうか。驚くことに、チューブワームは（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）、

かごしま水族館、新江ノ島水族館などの施設で実際に人工飼育されている。特に日本近海の水深290～1,430mの湧水域や熱水噴出域に棲息する、体長1m程度のチューブワーム（種名：サツマハオリムシ）は、硫化水素や二酸化炭素を高濃度に、酸素を低濃度に制御し、さらに温度、pH、光量を調整することで、海底の高水圧がなくとも飼育できるようになった^{15), 16)}。

では、硫化水素の処理量はいかほどのになるのであろうか。新江ノ島水族館の根本らによる「江ノ島式サツマハオリムシの飼い方」¹⁶⁾を参考に、硫化水素の処理量を試算した。飼育条件の一例として、チューブワーム150個体を容積275Lの水槽に収容し、濃度20g/Lの硫化ナトリウム水溶液1.3Lを、一時間毎に9回分割投入との記載がある。これに基づき、1kgの硫化水素を1日で処理するのに必要な水槽の容量を算出すると約9m³となる。では、第1章で述べた「こうべバイオガス」にチューブワームによる硫黄変換を導入する場合にはどのような規模の水槽が必要であろうか。こうべバイオガスでの硫化水素発生量は、4.4t/年(12kg/日)と試算される¹⁷⁾ことから、必要な水槽容量は110m³となる。これは25mプール(長さ25m×幅12m×水深1m)の約1/3の大きさであるが、年間950万m³ものバイオガスを生産する規模のプラントに対しては十分コンパクトといえる。

硫化水素からチオタウリンへの変換率を50%と仮定して、「革新的エネルギー・環境戦略」に示されるバイオマスエネルギーの使用目標をもとに、生成するチオタウリンの量を試算すると、2030年には20万tにもなる。このようにチューブワームによる硫黄変換は、自然界に存在する持続可能なシステムを利用していることから環境に負荷をかけずに硫化水素を処理することができ、そればかりか有用物質であるチオタウリンを産出する一石二鳥の脱硫法なのである。

第4章 チオタウリンの用途展開とメタン発酵の推進

4-1 油脂産業と硫黄化合物

チューブワームによる硫黄変換を運用する上で、生成するチオタウリンの利用拡大は欠かせない。そしてそれは、油脂産業こそが先導的役割を担う産業であると考える。その根拠を以下に示す。

1) 油脂産業は古くから社会背景に適した硫黄系界面活性剤を開発してきた

2) 油脂産業は硫黄化合物の合成技術、応用技術、評価技術を有している

3) 油脂産業は幅広い産業分野に製品を提供する土台を有している

1) については、油脂産業と硫黄の繋がりは古く、1834年にはドイツでオリーブ油に濃硫酸を作用させてアルカリ中和した硫酸化油が発明されている¹⁸⁾。以降、図4-1に示すような社会背景の変化に応じて多様な硫黄系界面活性剤を開発し、人々の暮らしに役立ててきた。油脂産業は早くから硫黄の有効性に着目し、その機能を信じて人々に提供してきた産業であると言える。硫黄化合物であるチオタウリンに関しても、その性質を活かした化合物を開発していくことができるであろう。

2) は上で述べた硫黄との長い付き合いの中で、硫黄を有効に活用するノウハウを蓄積していることである。油脂産業はアミド化、スルホン化、エステル化等の反応を経て硫黄を有用な化合物へと変換できる合成技術を持ち、分散化、乳化、可溶化といった硫黄化合物の性能を存分に引き出す応用技術を併せ持っている。更には官能評価、熱分析、力学分析などの評価技術により得られた結果を、他の技術にフィードバックすることで硫黄化合物の性能を深化させてきた。これらの技術を用いれば、チオタウリンは様々な用途への応用が可能となる。

3) は油脂産業が他の多くの産業と広い繋がりを有する産業であることを意味する。現在、油脂産業で扱う製品は他の様々な産業が有する素材に対し、要求される機能を付与する役割を担っているものが多い。それ故、自動車、ライフサイエンス、食品、化成品、電子材料、エネルギー関連など多くの分野に製品を提供しており、チオタウリンを様々な産業に展開できる土台を有している。この土台を活用することで、チオタウリンの応用分野を広げることができる。

図4-2に油脂産業がチオタウリンを広く展開できる産業であることを示した。次に、油脂産業の技術を用いて、チオタウリンをどのような用途に展開できるかを考察した。

4-2 チオタウリンの用途展開

チオタウリンの用途展開として筆者が調査した結果、化粧品、界面活性剤、繊維、酸化防止剤、畜産飼料、極圧剤、リチウムイオン電池正極材、タイヤ添加剤、ゴム製品、レンズ、フィルム、塗料などへの応用が可能と考えられる。油脂産業によるチオタウリンの応用例を表4-1に示す。

前章で述べたようにチオタウリンは安全性に優れ、酸素との反応性が高いことから、化粧品の抗酸化剤として実際に使用されている。加えて、グリセリンに劣らない高い保湿効果を有しており¹⁴⁾、化粧品市場で伸長を続けるアンチエイジング化粧品の原料として非常に有用と考えられる。また、油脂産業が有する合成技術により、タイヤ用添加剤や、極圧剤、リチウムイオン電池正極材、機能性食品素材などに利用することも可能と考えられる。タイヤ用添加剤としては、図4-3に示すように、チオタウリンをチオスルホナート化合物に変換し、粘弾性改善用添加剤として使用できる¹⁹⁾。現在注目されている環境対応タイヤは、天然ゴムやセルロース系素材、オレンジオイルなどを使用して非石油系資源の使用比率を高めており、チオタウリン由来の添加剤はこのような取り組みにも好適と考えられる。極圧剤に関しても、硫黄系添加剤は塩素系添加剤の代替とされており、ノンハロゲン化への流れを促進することが期待される。また、硫黄系材料はリチウムイオン電池における正極材の高容量化を達成する材料として位置づけられている²⁰⁾。チオスルホン酸系有機化合物の二次電池正極材料への応用例が報告されており²¹⁾、図4-4に示すような、ジスルフィド結合を有する芳香族化合物が正極材として使用可能であることが示されている。また、この際に生成するタウリンは、健康食品として注目を集めており²²⁾、食品分野にも展開できることが期待される。当然、油脂産業がチオタウリンやタウリンを脂肪酸と反応させて界面活性剤として使用することは言うまでもない。環境に優しい界面活性剤として消費者に受け入れられるであろう。

この他にも様々な分野でチオタウリン及びチオタウリン誘導体を使用することが可能と考えられる。筆者は、チューブワームを用いて硫化水素をチオタウリンに変換し、それを油脂産業の技術で様々な産業に応用するシステムを、バイオマスからメタンとチオタウリンという二つの有用物質を取り出せるバイオリファイナリーであることから「ダブルリファイナリー」と名付ける。図4-5にダブルリファイナリーの全体像を示す。各分野で見込まれるチオタウリンの使用量と、それに伴う硫黄の処理量の試算結果を表4-2に示す。この試算結果より、硫黄の最大処理量は約14万tと試算され、図2-4に示した2030年におけるメタン発酵より発生する硫黄の予測量9万tを上回る。従って、ダブルリファイナリーの導入により、メタン発酵は計画通りどころか計画以上に推進することが可能となる。

4－3 ダブルリファイナリーによるメタン発酵の推進

ダブルリファイナリーを利用して、メタン発酵の導入が計画通りに増加する場合、2030年には、発電電力量は65億kWhとなり、発電した電力すべてを売電したとすると、バイオガス事業推進協議会が提示する39円／kWhの単価を適用して、2,500億円の売電収入になると試算される。一方、チューブワームによる硫黄変換により生成したチオタウリン及びチオタウリン誘導体の市場は、表4－2に示すようにおおよそ2,300億円と見込まれる。これはバイオガスを用いて得られる売電収入に匹敵する規模である。また、2030年までのチューブワームによる硫黄変換の設備コストを試算すると、表4－3に示すように初期投資は780億円と見積もられる。

国際エネルギー機関（IEA）によると、2008年の一次エネルギー需要に占めるバイオマスエネルギーの割合は、世界全体で10%、米国4%、EU6%、インド26%、ブラジル32%に対し日本は1%となっている。現状ではわが国の割合は低く、政府は2030年までに3%まで引き上げる計画であるが、依然として低い水準であると言わざるを得ない³⁾。事実、世界的にもバイオマスエネルギーは2008年の10%から2035年には12%に増加するとされており、日本は現在の計画以上に推進しなければならない。それにはバイオマスエネルギーの中核をなすメタン発酵の導入を加速することが欠かせない。ダブルリファイナリーは、メタン発酵における硫黄の処理問題を回避するだけではなく、油脂産業の力によるチオタウリンの市場展開により、メタン発酵の導入を拡大するものである。

本稿の作成にあたり、筆者は生命創生の頃から延々と続くチューブワームのような深海生物の営みと、人類がこれまで育んで来た技術の融合との視点から課題解決に向けた議論を重ねてきた。再生可能エネルギーの導入には、これから多くの現実的な課題が発生するであろう。本稿が再生可能エネルギーの導入推進の一助となることを願っている。

おわりに

科学技術の進歩により人類はその活動範囲を宇宙空間にまで広げ、高度370km上空には国際宇宙ステーションが建造されるまでに至っている。一方深海は、最深部でも約10kmの水深であるが、水圧の壁に阻まれ、人類にとっては近く

て遠い領域である。そこには本稿で取り上げたチューブワームの他にも、硫化鉄を身にまとう貝「スケーリーフット」や、体に生えた毛にバクテリアを繁殖させ、それを糧に生きる「ゴエモンコシオリエビ」など、陸上に住む我々にとっては驚異としか言いようのない生物が発見されている。未だ発見されていない未知の生物も存在するであろう。地表の約7割は海であり、深海は海面全体の8割を占める。我々人類が更なる発展を遂げる上で、今回提案したダブルリファイナリーのように、深海をこれまで以上に有効利用する日がいずれやって来ると筆者は考える。わが国は、水深5,000mよりも深い海域の体積が世界一というデータもあるなど、深海大国としての顔を持つ。深海の有効利用には、深海大国たるニッポンのリーダーシップが欠かせないのである。

参 考 文 献

- 1) 文部科学省・気象庁・環境省、「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」（2013）
- 2) エネルギー・環境会議、「革新的エネルギー・環境戦略、（平成24年9月14日）」（2013）
- 3) 山田耕士、農林水産省、「バイオマス事業化戦略とバイオガス事業」
2012. 10. 3 講演資料（2012）
- 4) 大阪ガス、2010年10月12日プレスリリース（2010）
- 5) 野池達也、「メタン発酵」、技報堂出版（2009）
- 6) 横浜市環境創造局ホームページ、北部汚泥資源化センター
- 7) 「化学経済」、1973・8月増刊臨時号 他
- 8) 「化学工業日報」、2013/7/9
- 9) 「硫酸と工業」、66(1) (2013) 他
- 10) Bull. Jap. Env. Sanit. Cent.,
No. 23 (1996)
- 11) 羽田ら、東京ガス、「下水汚泥を利用したガス化システムに関する実証試験事業」（2010）
- 12) 北村雄一ら、「動く！深海生物図鑑」、講談社（2010）
- 13) 猛毒の硫化水素をエネルギー源とする深海生物の生存戦略、バイオサイエンスとインダストリー Vol. 70 No. 4 (2012)
- 14) 河野善行、「皮脂抗酸化剤＝チオタウリン」の開発と化粧品への応用,
FRAGRANCE JOURNAL 1998年12月号 (1998)
- 15) WO 2008/114720号公開公報
- 16) 根本卓ら、「江ノ島式サツマハオリムシの飼い方」、JAMSTEC主催
ブルーアース2012ポスターセッション予稿 (2012)
- 17) 神戸市建設局下水道河川部工務課、こうべバイオガスプロジェクトの
取組み (2007)
- 18) 中曾根弓夫、「石鹼・合成洗剤の技術発展の系統化調査」、国立科学博物
館 技術の系統化調査報告 第9集 (2007)
- 19) 特開2012-207148号公報

- 20) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、「NEDO二次電池技術開発ロードマップ2013」（2013年8月）
- 21) 米子高専、「次世代型二次電池を指向した新規有機系正極活物質」
- 22) 食品化学新聞社、「食品添加物・素材市場レポート2012」

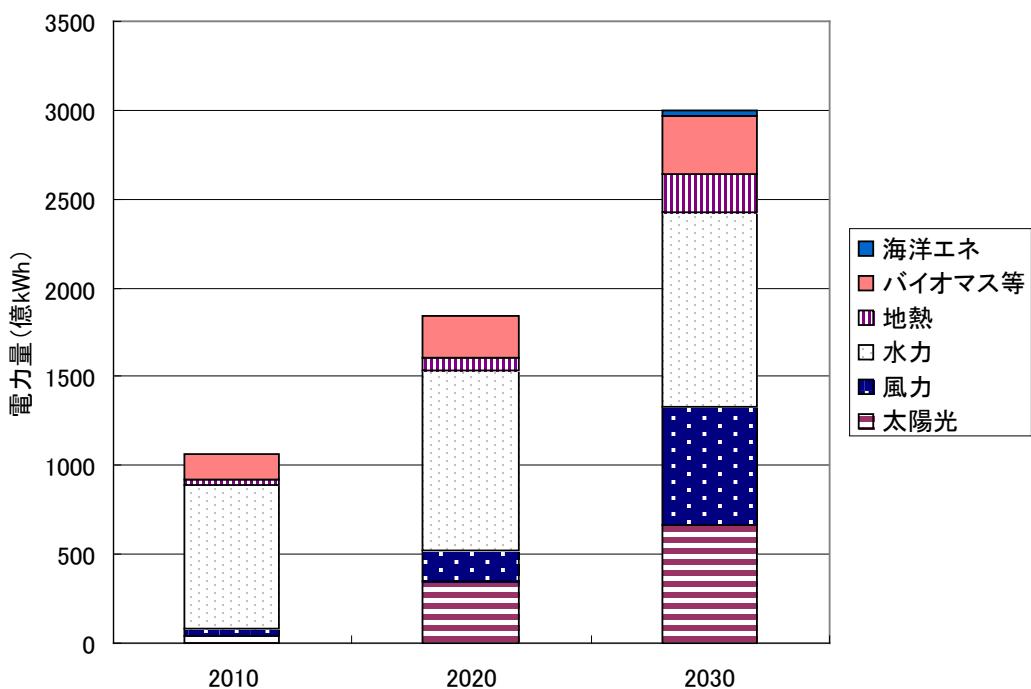


図 1－1 再生可能エネルギーの導入量

(「革新的エネルギー・環境戦略」をもとに作成)

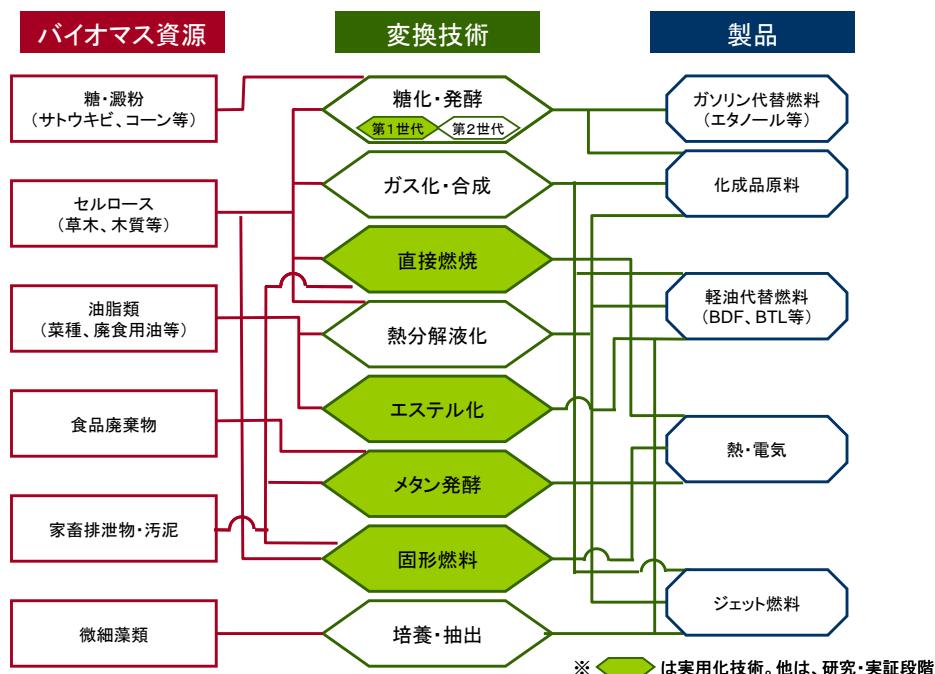


図 1－2 主要なバイオマス利用技術の状況

(「バイオマス事業化戦略とバイオガス事業」をもとに作成)

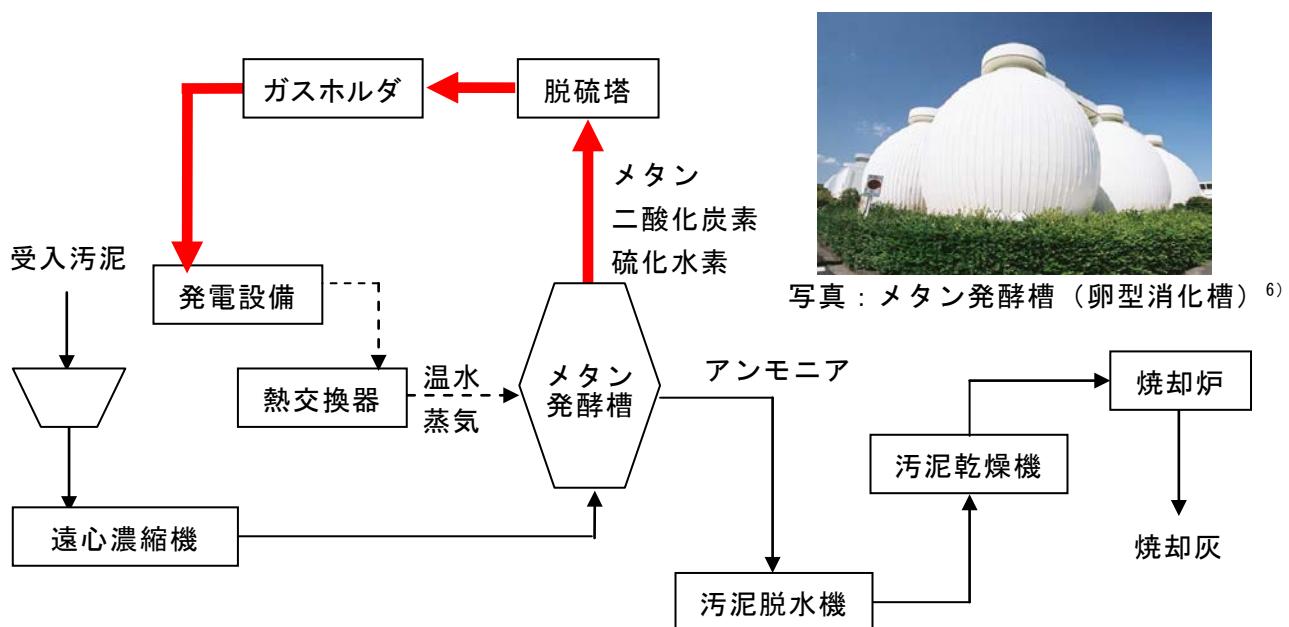


図 1－3 メタン発酵装置の例

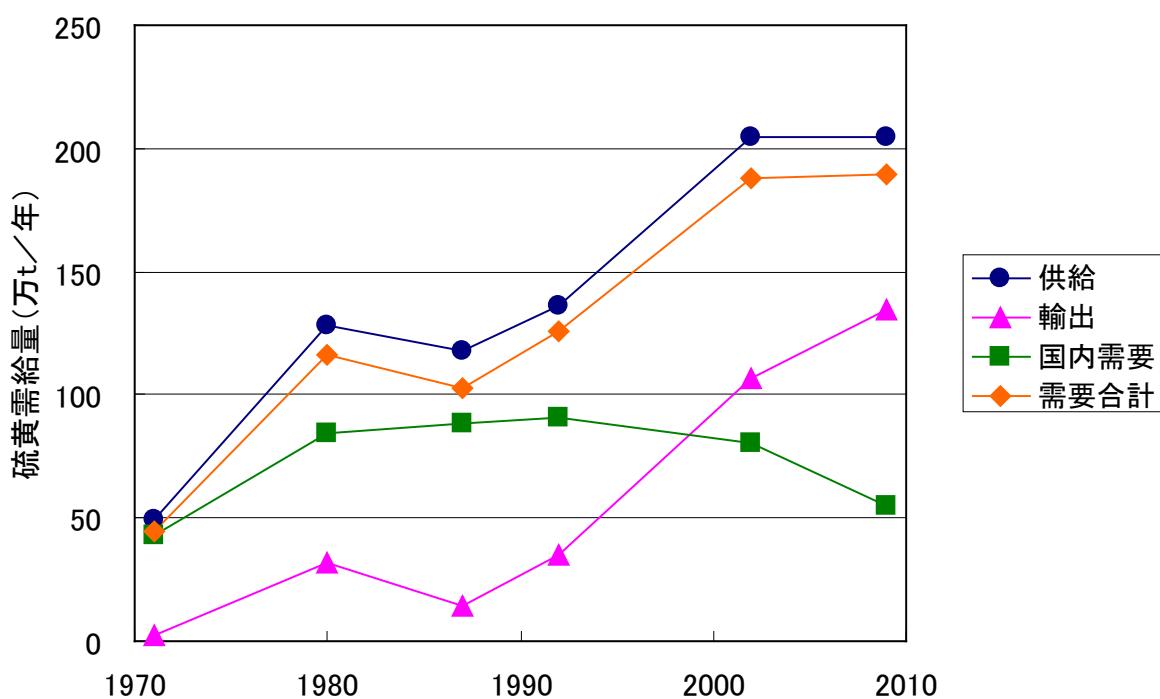


図 2－1 国内の硫黄需給（「化学経済」をもとに作成）

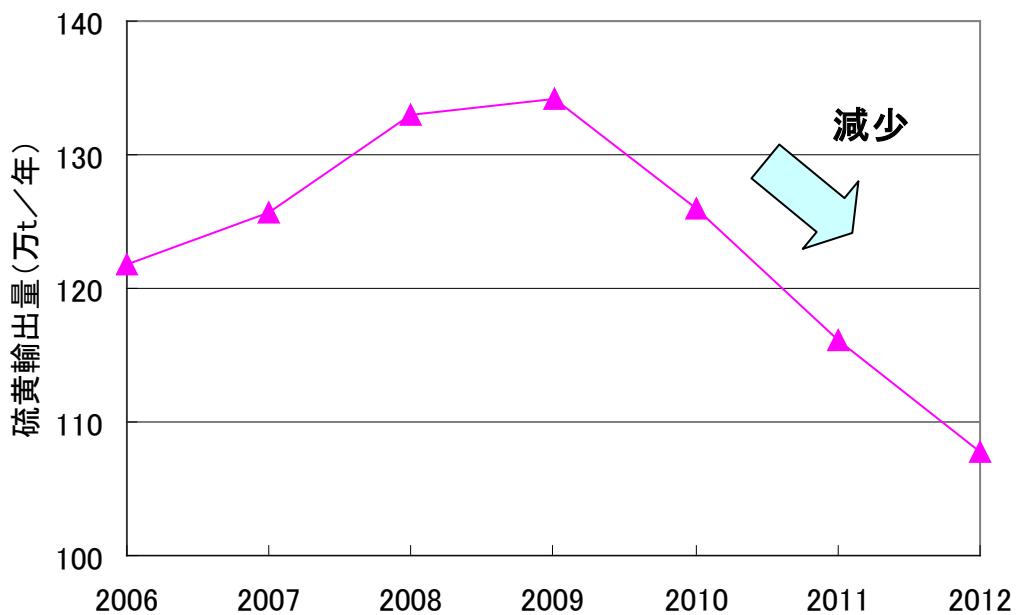


図 2－2 硫黄輸出量実績（「硫酸と工業」をもとに作成）



図 2－3 バンクーバー港に野積みされる固体硫黄
(Panoramicより引用)

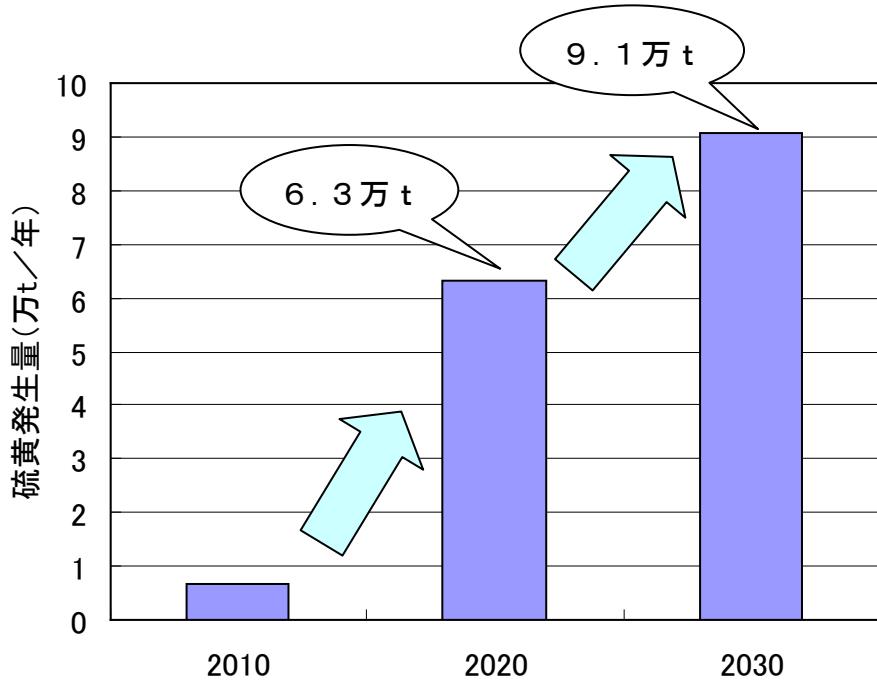


図 2-4 メタン発酵に関する硫黄（筆者試算）

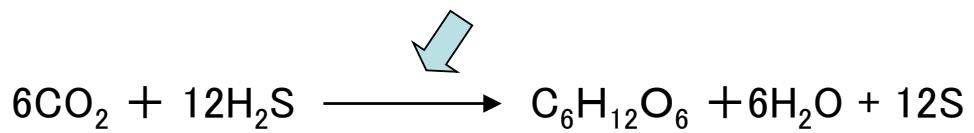
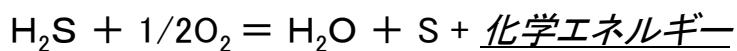
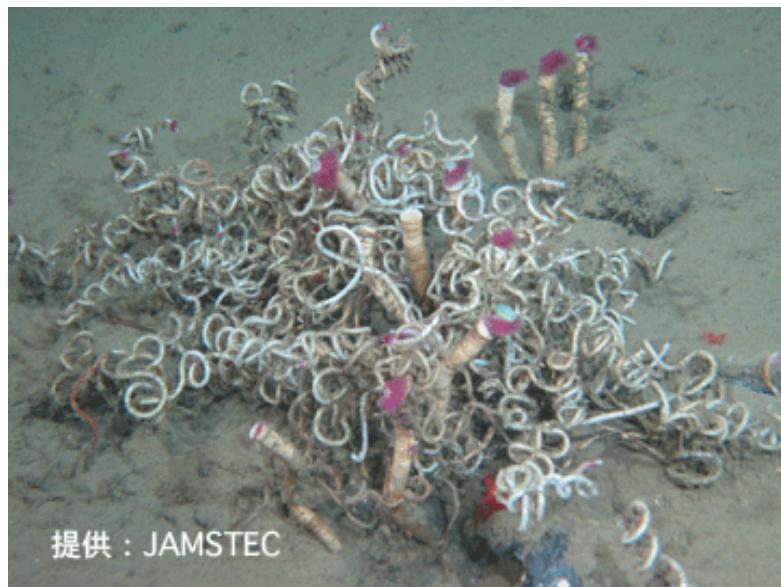
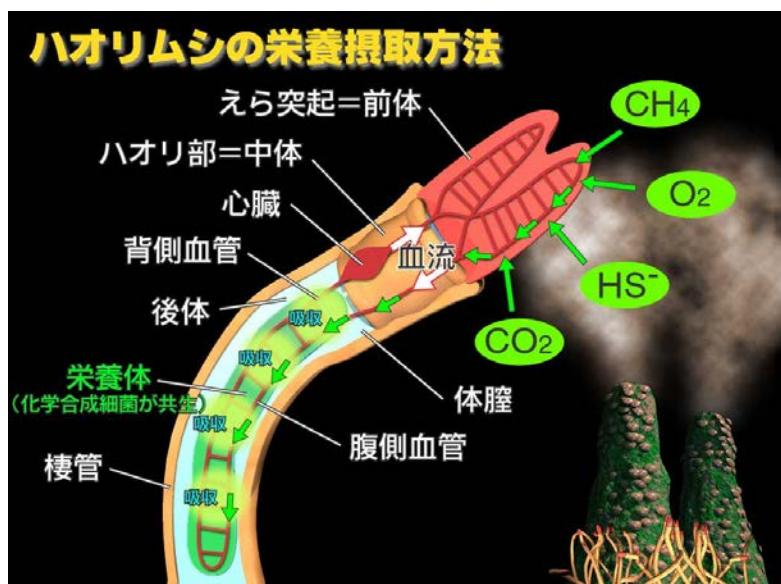


図 3-1 硫黄酸化細菌による硫化水素の酸化反応



(J A M S T E C H P より)



(独立行政法人科学技術振興機構HPより)

図 3－2 チューブワームの生態

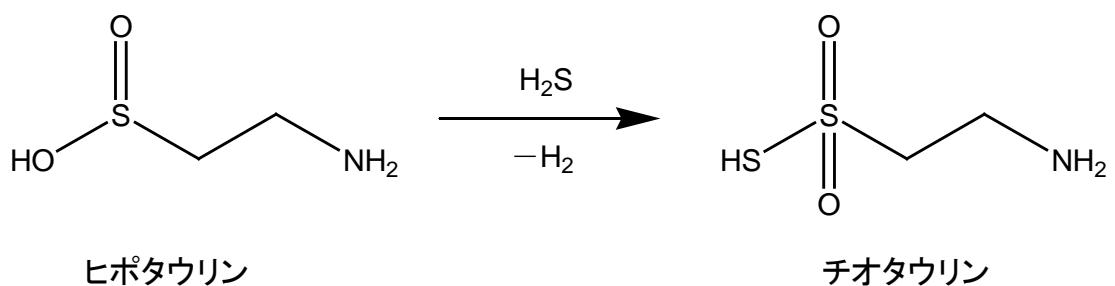


図 3－3 チューブワーム体内における硫化水素の無毒化機構

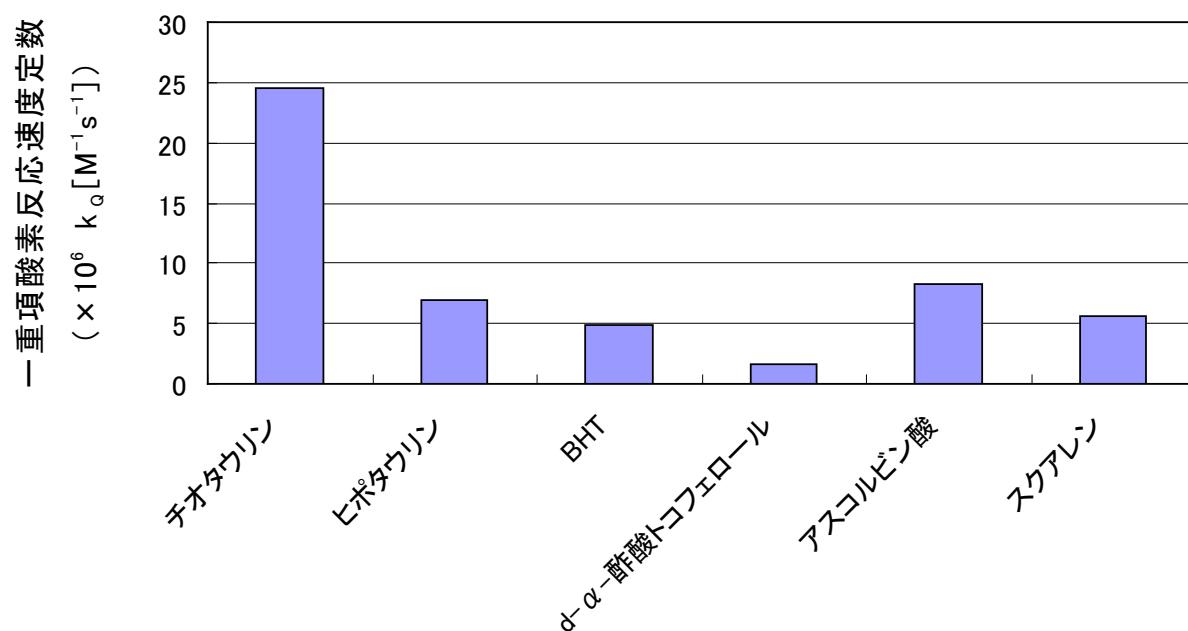


図 3－4 抗酸化剤の一重項酸素反応速度定数 (k_q)

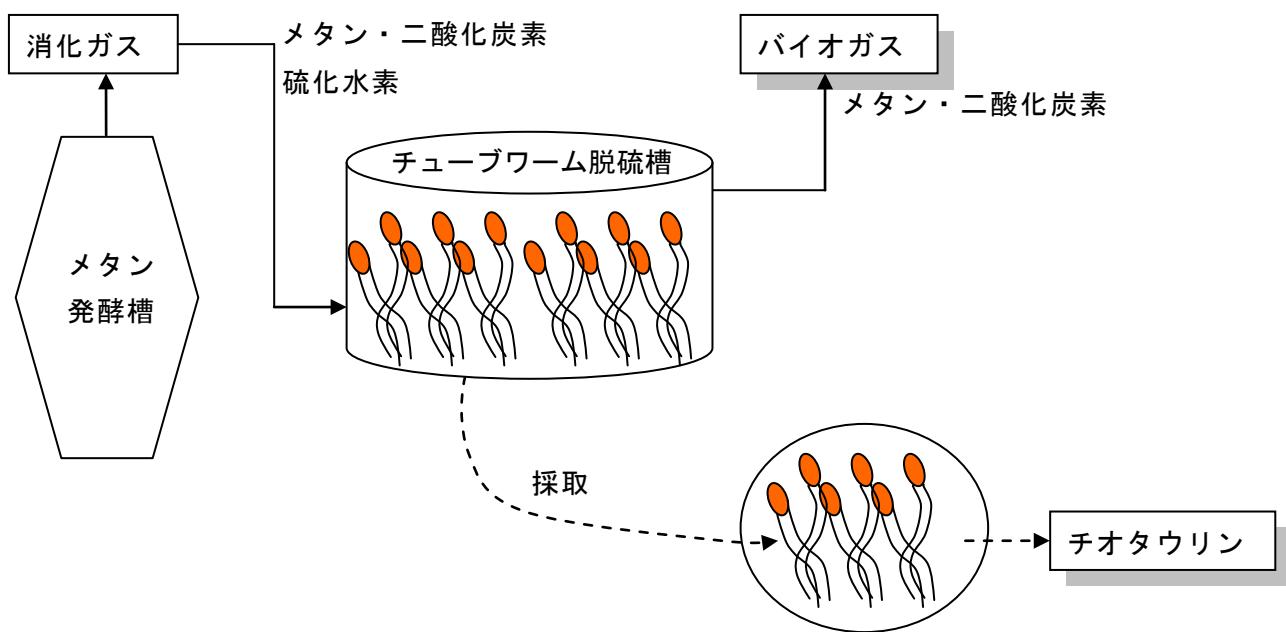


図 3－5 チューブワームによる硫黄変換の概念図

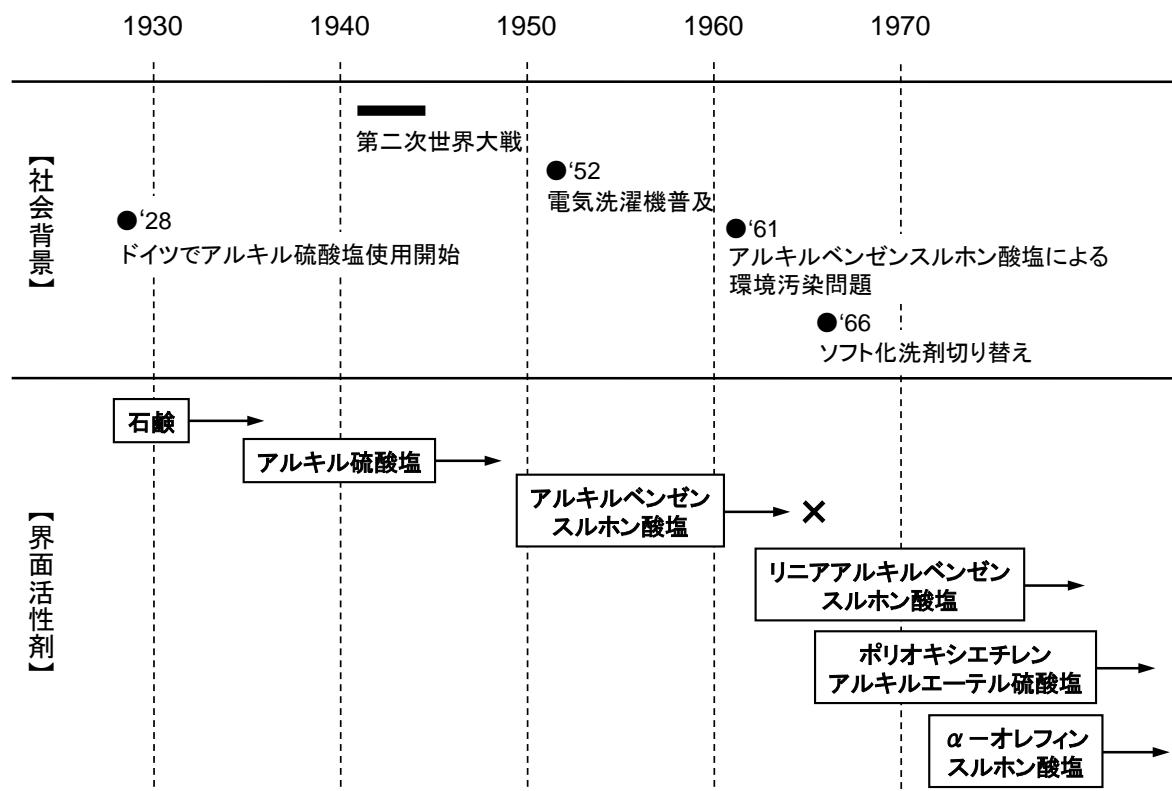


図4－1 日本の界面活性剤の発展経緯

(「石鹼・合成洗剤の技術発展の系統化調査」をもとに作成)

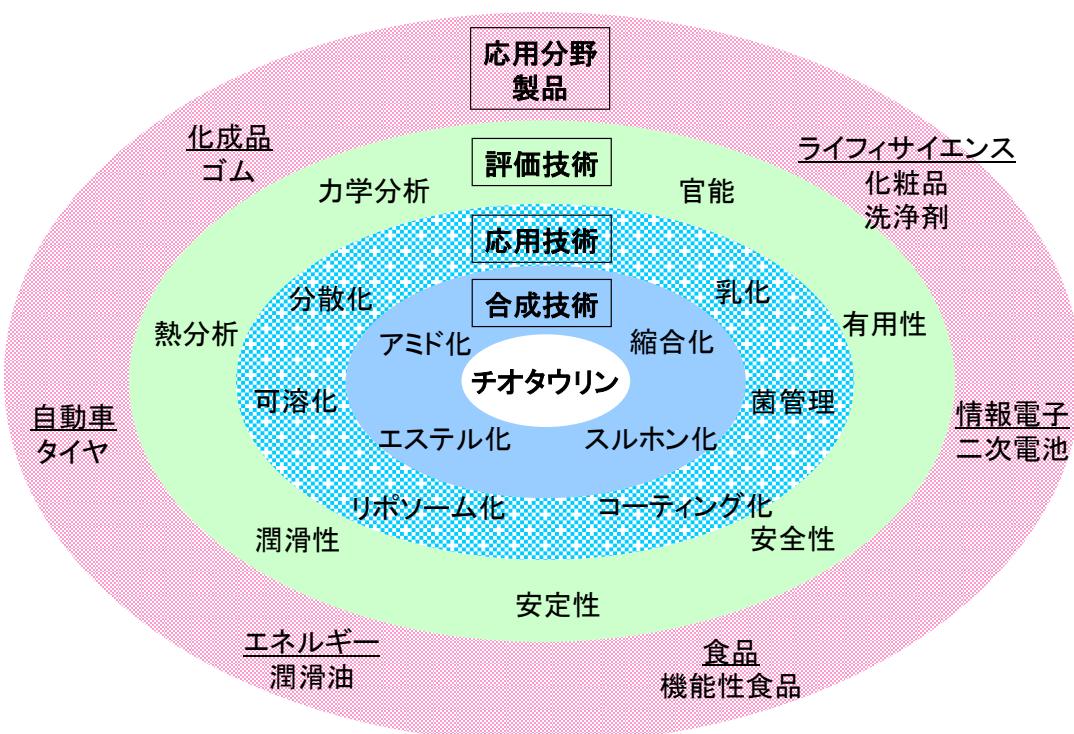


図 4－2 油脂産業の技術と応用分野

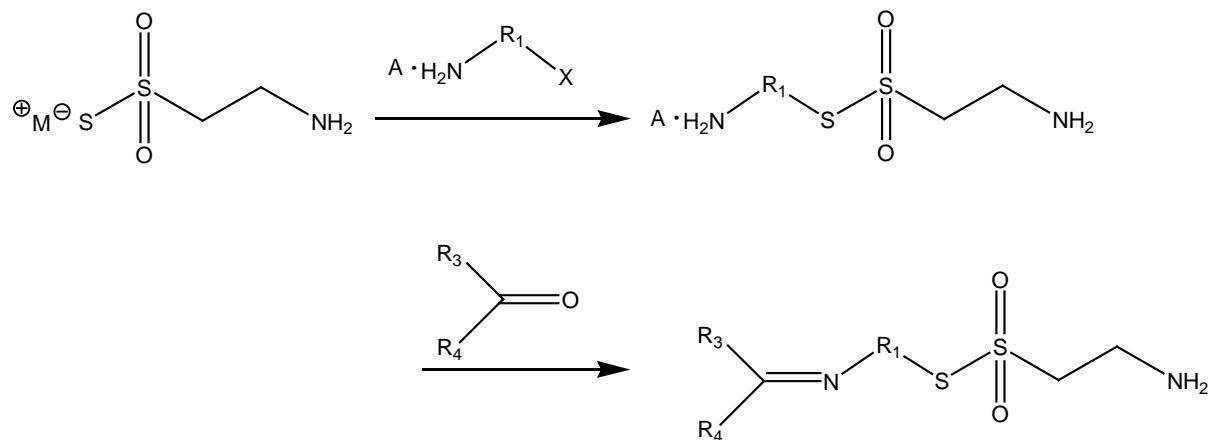


図 4－3 チオタウリンのタイヤ用添加剤への変換

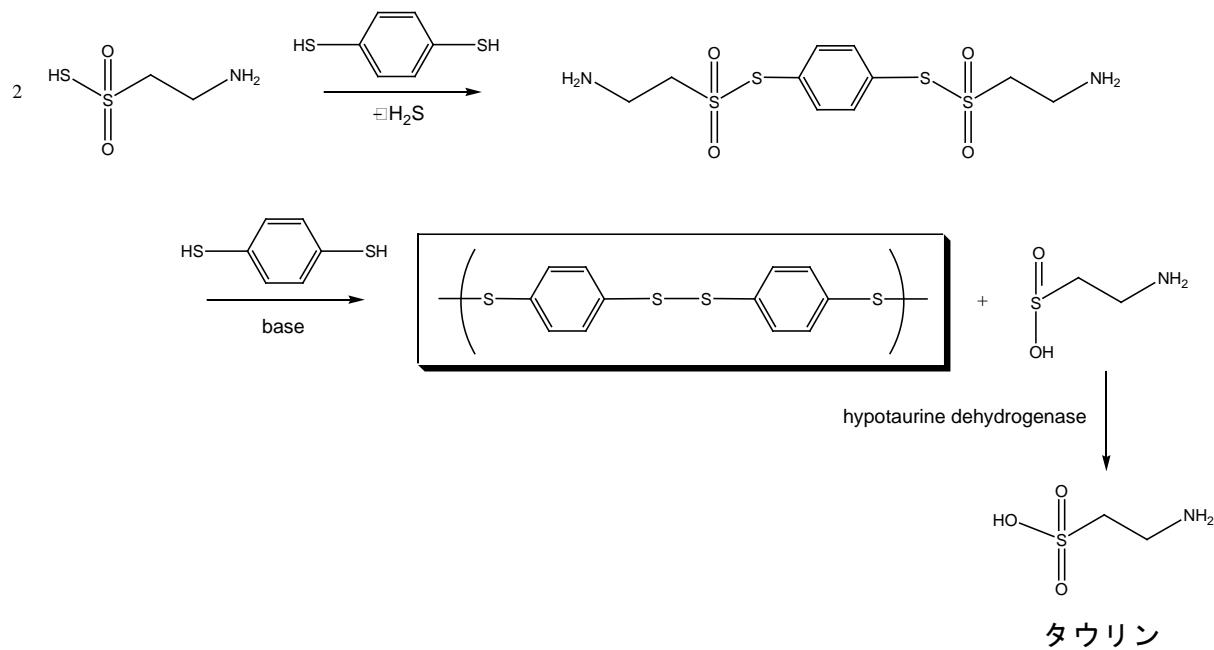


図 4－4 チオタウリンの電池材料への変換

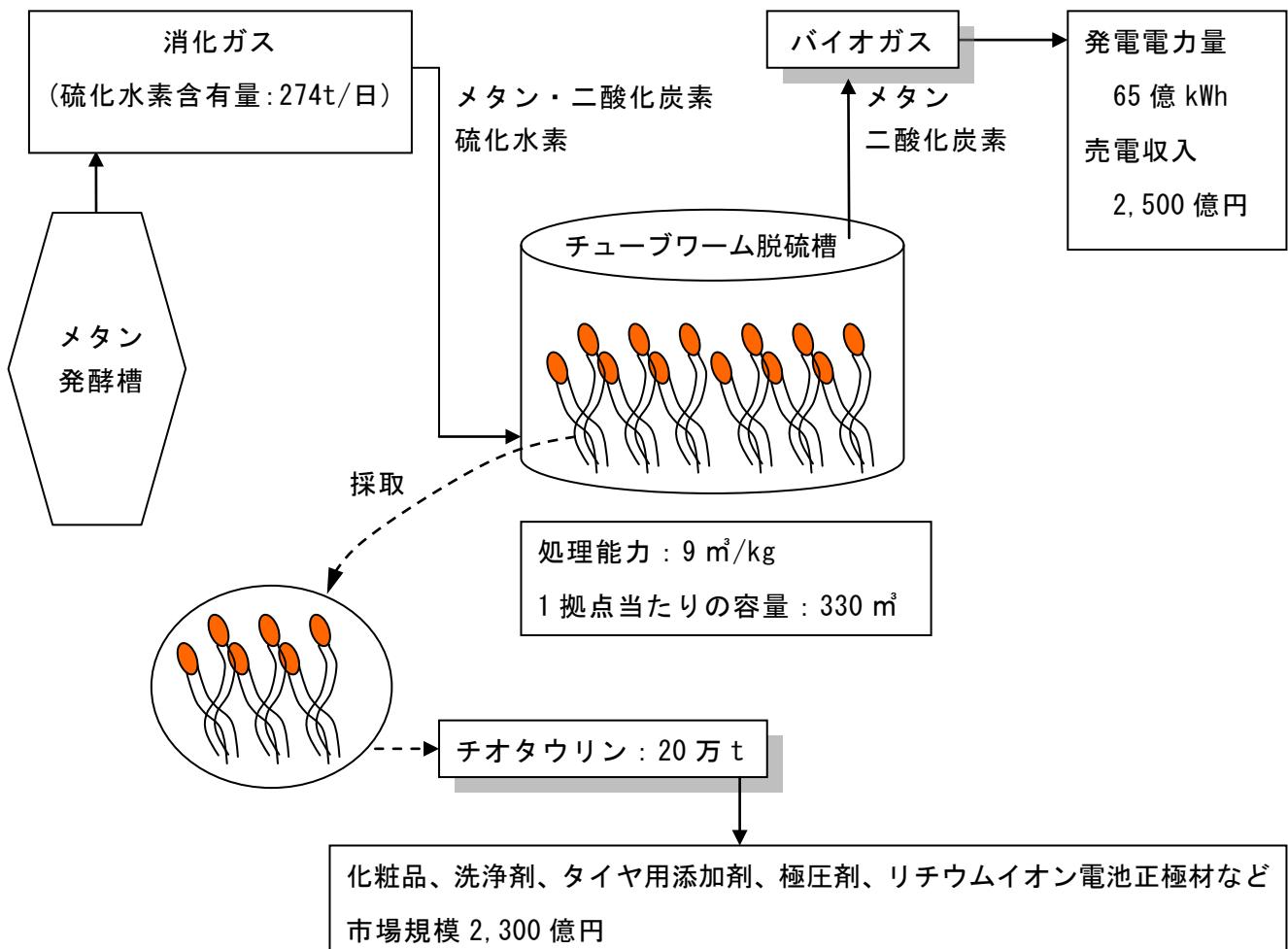


図 4－5 ダブルリファイナリーの全体像

表 1－1 メタン発酵における主な課題と対策

課題	影響	現状の対策	検討されている対策
消化液中の アンモニアの除去	<ul style="list-style-type: none"> メタン発酵の阻害 消化液の液肥利用時の 環境負荷 	<ul style="list-style-type: none"> 水希釀による負荷低減 加熱・pH調整によるガス化, 除去 	嫌気性アンモニア酸化 (Anammox)
消化ガス中の 硫化水素の除去	<ul style="list-style-type: none"> 発電エンジン・ボイラー 機器の腐食 燃焼時の亜硫酸ガス の発生 	<ul style="list-style-type: none"> 乾式脱硫 湿式脱硫 	生物学的脱硫技術の 安定的運用

表4－1 油脂産業によるチオタウリンの応用例

応用分野	製品	合成技術	応用技術	評価技術
ライフサイエンス	化粧品 洗浄剤	スルホン化 エステル化 アミド化	可溶化・乳化 分散化・菌管理	官能 有用性 安全性
自動車	タイヤ	エステル化	分散化	熱分析・力学分析
エネルギー	潤滑油	エステル化	分散化	潤滑性・安定性
電子材料	電池	縮合化	分散化	安定性
食品	機能性食品	-	リポソーム化 コーティング化	有用性 安全性

表4－2 チオタウリンの市場と硫黄処理量（筆者試算）

応用分野	チオタウリン 使用量(万t)	硫黄 処理量(万t)	市場規模(億円)
化粧品	0.03	0.02	19
界面活性剤	0.90	0.41	823
繊維	0.68	0.31	205
酸化防止剤	1.23	0.56	10
畜産飼料	8.14	3.69	63
極圧剤	7.50	3.40	400
リチウムイオン電池正極材	5.07	2.30	642
タイヤ添加剤	2.30	1.04	40
ゴム製品	0.53	0.24	9
レンズ、フィルム	3.44	1.56	69
塗料	1.49	0.68	30
計	31.31	14.21	2,311

表4－3 2030年までのチューブワームによる硫黄変換設備コスト

項目	試算値
硫化水素発生量(t/年) ¹⁾	100,000
硫化水素発生量(t/日)	274
硫化水素処理能力、水槽容量(m ³ /kg 硫化水素/日) ²⁾	9
必要水槽容量(千m ³)	2,575
メタン発酵拠点/2030年(箇所) ³⁾	7,800
1拠点当たりの水槽容量/2030年(m ³)	330
水槽設置費用(万円/基)	1,000
設備コスト(億円)	780

1) 第2章の試算結果

2) 第3章の試算結果

3) 図1-1 再生可能エネルギーの導入量と2010年 約600箇所より試算

平成26年 2月21日
〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-13-11
一般財団法人 油脂工業会館
☎東京 03(3271)4307 (代表)
<http://www.yushikaikan.or.jp>