

食糧とエネルギーの自立した地域社会の実現

東北大学名誉教授

(化学工学会 元会長)

新井 邦夫

1. 食糧とエネルギー

経済大国を誇る日本の食糧自給率は40%を切っています。また、エネルギーの自給率はたった4%程度に過ぎません。国民の生活に一日も欠かすことのできないこれら両物資は先進諸国でも最低の自給率です。このような状況で、国民が安穩として暮らして居られるのは、世界が平和で、自由経済のもと食糧もエネルギー資源も市場に豊富に出回り、お金さえ出せば必要なだけ手に入るからです。日本は、高度な科学技術を駆使し、世界の人々が喜んで購入したがる工業製品を開発、製造し、輸出し、それにより獲得した外貨でエネルギーと食糧を好きなだけ輸入し、豊かな生活を享受しています。すなわち、日本の繁栄は科学技術の優位に裏付けられた自由経済、自由市場の申し子といっても過言ではありません。

しかし、近年、膨大な人口を有する中国やインドでも、急速な経済発展に伴い石油や天然ガスのエネルギー資源と食糧の需要が急速に拡大しています。さらに、近い将来予想される石油の枯渇に備え、ロシア等の資源大国ではエネルギー資源はもはや市場製品ではなく、自由な取引が規制された政治製品、戦略製品とみなす傾向にあります。このような背景のもと、現状では石油、天然ガスは十分な生産量があるにも拘らず、膨大な投機マネーが石油市場に流れ込み、原油1バレルが\$100を超えてしまいました。エネルギー資源のこれ以上の高騰と自由市場の縮小は、エネルギーを全面的な輸入に頼る日本の安全保障を脅かし、日本経済に大きな打撃を与えることは必定

と考えられます。食糧においては、現在、エネルギーほどの危機感はありませんが、米国等の穀物輸出国における穀物のバイオ燃料への転換や、膨大な人口を有する中国等の経済発展に伴う需要の急増により、穀物価格の高騰が進行しており、さらには、発展途上国の食の高級化や多様化も進み、日本がほぼ独占輸入していた食品でさえも競り落としできない場合が多々あると報道されています。さらには、輸入食品の安全性の問題も表面化し、食糧自給率の低さへの国民の不安は拡大しつつあります。

一方、現在の化石エネルギーの大量消費には地球温暖化の進行という別な危険な側面を有し、大気中の二酸化炭素蓄積の主因である石油、天然ガスや石炭等の化石資源の大幅な消費削減が求められています。特に、地球温暖化による急激な気候変動は、気温変化の直接的な影響に加えて、旱魃や豪雨、超大型台風の襲来、海面上昇等々を引き起こし、生物種の分布変化や絶滅等々、生態系に様々な不可逆的变化をもたらしつつあります。このような生態系の変化は農林水産業の一次産業にも大きな打撃を与え、世界人口のさらなる増加が進めば、世界的な食糧危機が早期に起こることが懸念されます。世界全体での絶対的な食料不足が発生した場合、食糧が市場製品であるという立場は崩壊し、日本のような食糧輸入国の食糧確保は極めて危うくなることは明白です。さらには、農林水産業においてもその生産効率の向上に化石エネルギーを大量に使用しており、エネルギー資源が不足すれば大幅な食糧減産となり、エネルギー危機は食糧危機に直ちに結びつくと考えられるべきものです。

両者の自給率のきわめて低い日本は、どうすればその自給率を向上させ、予想される2つの危機を、持続性を損なわないで克服できるのか、真剣に考え、早期にその有効な対策を実行しなければなりません。勿論、地球温暖化の影響も少なく、事実上枯渇の心配のないエネルギー（多分核融合か？）が開発され、物質循環社会が成立し、地球環境が維持され、世界人口が適切に保たれ、大きな思想的、政治的紛争もなく、自由経済が維持され、かつ、日本は高い科学技術を駆使し、世界が必要とする製品を途切れなく輸出できれば、エネルギーと食糧自給率が低くとも、経済的な繁栄は今と

同様維持できると思います。しかし、この考えは、多くの仮定の基に成立する極めて楽観的な希望であり、現実性はきわめて低くいと言わざるをえません。

本稿では、地球環境の持続性を保ちつつ、エネルギーと食の自立を実現し、持続可能な社会を構築するには我々は何をすべきなのかを考え、それを達成させる基盤技術として、水と二酸化炭素を利用した超臨界流体技術が重要であることを紹介します。

2. 地球環境の持続性

植物は光合成により水と二酸化炭素を原料として糖を合成し、太陽エネルギーを有機物に変換する重要な役割を有しています。地球上のあらゆる生物は、この光合成生成物を基点とした食物連鎖を通して、エネルギーを取り込み、生命を維持して、再び水と二酸化炭素に戻す壮大な炭素循環を構成しています。生物の一種である人間も基本的にはこの自然界の炭素循環を逸脱して生命を維持することはできません。これに対し、20世紀の人間社会は、自然界における炭素循環の枠外で、石油や石炭等の化石資源を大量に消費し、膨大なエネルギーを利用して、次々と新製品を作り出しては廃棄する一方通行的な物質の流れの上で活動してきました。自然界の炭素循環を直接利用している一次産業も、化学肥料、散水、農耕作業の機械化、温室栽培、産地から消費地への食糧の長距離輸送、等々、化石資源に依存して成立しています。

ところで、地球は、太陽光を受け、宇宙に赤外放射してエネルギーの均衡を保ち、穏やかな気候を維持していますが、物質に関しては、宇宙とのやり取りがなく、地球を構成している元素の量と種類は不変とみなせます。このような系を熱力学では閉鎖系と呼びます。一般に、系外とのエネルギーの流れ存在すると、種々の現象が引き起こされ、それに関与した物質の状態が変化します。閉鎖系内では、物質の変化を相殺する系外との物質の授受がないため、物質の状態変化に伴い、環境は刻々変化します。例えば、雷により山火事が発生すれば草木は焼失し、水と二酸化炭素が発生し、環境は一変します。環境が復元されるためには、状態変化した全ての物質をもとの状態に

戻す循環システムが構成されていなければなりません。地球環境は、太陽エネルギーによる炭素循環や水循環が存在していることにより、焼け野原をもとの緑に復元し、維持されます。しかし、閉鎖系地球のサブシステムである人間社会は、自然界から種々の物質を取り入れ、不用になった物質を自然界に廃棄する開放系として長い間振舞ってきました。現代以前の活動は、局地的な環境破壊はともかくとして、地球規模の物質循環を乱すほど大きなものではなかったといえます。すなわち、人間社会の廃棄物に対しても自然の浄化作用が有効に働き、開放系である人間社会が自然界の物質循環過程の一要素として取り込まれていたと言えます。これに対し、20世紀には科学技術が急速に発展し、資源・エネルギーを膨大に使用する（できる）文明が成立し、人間の活動が自然界の浄化作用の限界を越えてしまい、自然界の物質循環を乱し、環境を悪化させつつあります。往々にして「科学技術で自然の浄化作用を代行する」こと、例えばごみ焼却場や下水処理場等の完備が根本的な環境対策と捉えられがちです。しかし、その処理が自然界の物質循環に調和できないものであれば、それらは常に対症療法的で、ごみを処理した結果、また別のごみを環境に排出していることになりかねません。閉鎖系内での持続可能な社会の構築のために為すべきことは、「太陽エネルギーのみを利用し、開放系である人間社会を自然界の物質循環システムの一要素として適合させる」こと以外にはありえないことを認識することが肝要です。

3. 太陽エネルギーは化石資源に代わり得るのか

「太陽エネルギーは化石資源に代わり得るのか」－この質問は、太陽エネルギーの全面的利用に際して、殆ど否定的な意味で使われていますが、極めて愚問です。前述したように太陽エネルギーに替えなければ持続可能な社会の実現はありえないからです。替えられないとしたならば、破綻を何時まで先延ばしできるかであり、究極のエネルギーと言われる核融合が実用化しても、地球上の有限な物質を原料とする限り同じことです。しかも、資源の一方的消費は、原料が枯渇する前に、大気中の二酸化炭

利用可能なバイオマス 1.700億トン／年*		
バイオマス用途	100億人の需要量	個人需要量
食糧	100億トン／年←	1 トン/人/年
用材(パルプ、製材等)	16億トン／年←	0.16トン/人/年
有機製品原料	50億トン／年** ←	0.1 トン/人/年
エネルギー	1534億トン／年 →	8.5 kW／人
		∨
日本の一次エネルギー使用量(平成16年度)		5.6 kW／人
*計算の根拠 世界の農耕営林地 30億ha		
バイオマス生産量 80トン／年／ha (太陽エネルギー 150W/m ² 、光合成効率3%)		
農耕営林地でのバイオマス生産量 2400億トン／年		
** バイオマスから有機製品への変換効率を20%と仮定		
参考(C.Okkerse and H. van Bekkum Green Chemistry April 1999)		

図1 世界のバイオマス生産量と化石資源代替の可能性

素濃度増加のような生物圏での物質分布の変化、さらにはヒートアイランド現象のような膨大な集中的廃熱等により、気候変動あるいは環境に本来存在しない廃棄物の蓄積による環境汚染等予測が困難で不可避な問題に必ず遭遇すると考えるべきことと思います。一方、地球環境はこの地表に遍く降り注いでいる太陽エネルギーで維持されていますが、その量は石油換算にして1日2000億トンで、現在の全世界エネルギー消費量の10,000倍にも相当します。前述したように、植物のバイオマス生産を起点とする炭素循環は太陽エネルギーを駆動力とした自然界で最も壮大で重要な物質循環と言えます。C. Okkerseらは、全世界で利用可能なバイオマス量は現在消費している化石資源量を十分に凌駕することを示しています。図1に彼らの報告を参考に、この地球に収容可能な最大人口を100億人と仮定し、その100億人が日本人並のエネルギーの使用と生活レベルを維持することができるかを示しました。彼らは農耕や営林等人間の手がいった土地でのバイオマス生産量は年間1,700億トンと推定しています。バイオマスの最優先用途は食糧であり、間接摂取も含めて一人当たり年間穀物を1トン必要とすると、100億トンのバイオマスが必要となります。営林地では、薪や炭等のエ

エネルギー用途以外に、パルプや製材、ベニヤ板等の用材原料を供給しています。その一人当たりの年間消費量は0.16トン程度であり、総量は16億トンになります。さらに我々はプラスチック等の種々の有機物製品を一人当たり年間100kg必要としますが、それをバイオマスを原料とし20%の収率で生産するとすれば、年間50億トンのバイオマスが必要となります。残り1534億トンのバイオマスを一次エネルギーとして利用するとすれば、セルロースの燃焼熱17,000kJ/kgで見積もれば、100億の人々が各々毎秒8.5kJ(仕事率8.5kW)のエネルギーを利用できることになり、現在の日本人のエネルギー消費量5.8kWを凌駕することになります。

このように、量的にはバイオマスは石油や石炭等の有機系化石資源を代替するのに十分なほど存在しますが、その産生は薄く、広く分布し、しかも、多様な種類、形態で産出します。そのため一次エネルギーとして集中して大量に使用することは、集荷、選別や原料の不均質性を考えると本質的に困難であり、効率的生産方式とされる大量生産の原料としては、化石資源の代替は極めて困難と理解できます。現在の集中大量生産方式は、エネルギーおよび原料が大量かつ安価で安定に供給されることを前提として、スケールメリットの経済性を追求した結果成立したものです。当然のことですが、分散した多様なバイオマスの使用が不可避とすれば、**生産方式そのものを大量集中生産から適量分散生産へ変換することが必須**になります。

4. バイオマスの総合利活用

国土が狭く集約農業には不適で農業の競争力が極めて低く、バイオマス資源が乏しいとされる日本の国土にかぎっても、毎秒生産されるバイオマスの保有エネルギーは10億kW(kJ/s)以上と推定されます。この量は、現時点での日本の総エネルギー消費を凌駕し、人口密度の比較的大きな日本においても、エネルギー資源としてのバイオマスの潜在能力は極めて大きいと言えます。再生バイオマスを全て人類が独占使用することは現実には不可能ですが、前項で示したように太陽エネルギー利用形態の主要

量分散型の生産にならざるを得ません。このような生産方式は当然のことですが、大量集中生産でのスケールメリットによるコスト削減は期待できず、現在の市場経済では競争力が弱く、実現性は低いと考えられています。しかし、生活の基本物資である食とエネルギーが、その地域で産するバイオマスで自給され、さらに図2に示したバイオマスの総合利活用で、先ずはその地域住民の日常的需要に応える物資の供給ができれば、基本的には外国や遠い地域の資源や労働に頼らず、環境の持続性を有する自立した地域経済が成立することになります。外貨の獲得が不要な、現在のグローバルなマネー経済とは明らかに異なる、競争での価格設定が無意味となる地産地消のローカルな経済が優位となり、適量分散型の生産方式が十分に成立すると考えます。

5. 超臨界流体技術とバイオマスの総合利活用

5-1 超臨界流体技術と適量分散型生産方式

適量分散型生産方式が成立する要件として、装置コストの削減と環境適合性が挙げられます。装置コストの削減は装置の小型化と工程の簡略化を図ることが重要です。装置の小型化の実現には高速な現象の利用が、工程の簡略化には制御性の高い現象の利用が効果的です。超臨界流体は臨界温度、臨界圧力を超えた気相、液相をつなぐ高温・高圧領域の流体相として定義されますが、超臨界相操作は気相操作における現象の高速性と液相操作における現象の制御性の両者を兼ね備えており、装置の小型化と工程の簡略化を本来的に実現できる技術として期待されるものです。例えば、従来技術では安定操作が困難とされる高温下における超高速現象を利用した装置の小型化です。数十分の反応を数ミリ秒にできれば、 1m^3 の反応器が 1cm^3 になります。従来は殆ど使用されていないこのような超高速領域の制御にはマイクロ、ナノ空間の利用が有効と考えられます。工程の簡略化には石油からバイオマスへの原料転換が極めて有効です。石油化学はオレフィンや芳香族等の簡単な分子に官能基を導入する化学で成立しており、そのプロセスは一般に多段の工程を必要とします。これに対し、バイオマ

ス化学はグルコースのように多官能基の分子から官能基を削減する化学となり、そのプロセスはいわゆる One Pot Reaction も視野に入れた単純な工程で成立する可能性が高いことに特徴があります。さらに、適量分散型生産では多くの工場が地域に分散されて立地されることになり、本質的な環境適合性を有するプロセスでなければなりません。工場が多数立地されればされるほど、安全性の確保は重要で、環境負荷の高い薬剤や有機溶媒の使用は本来的に避けるべきで、エネルギーのみならず物資の自給をも目指したバイオマスの総合利活用を考えた溶媒や薬剤等の選定が重要です。

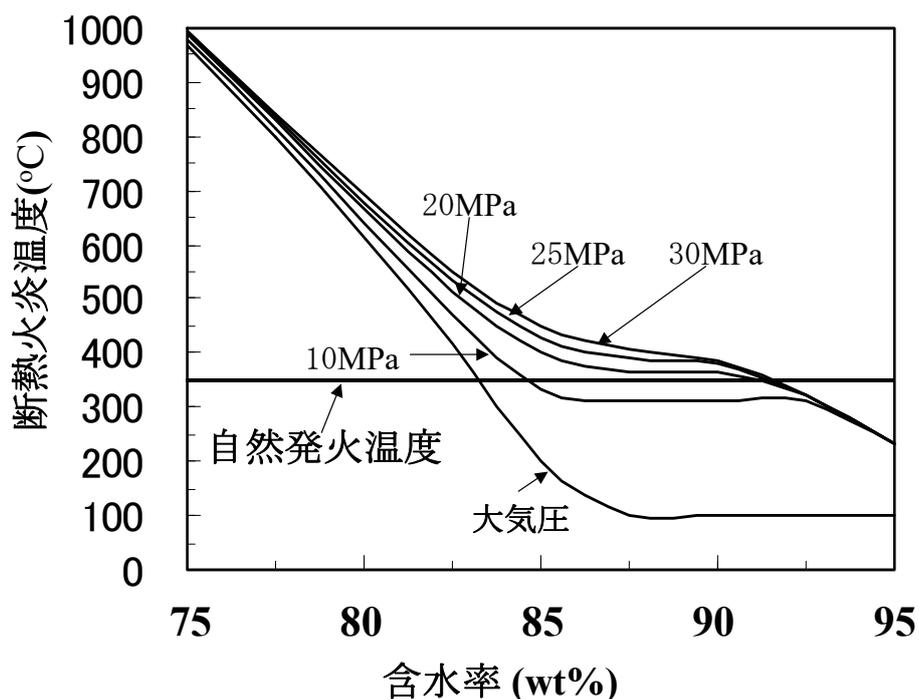
以上のことから、適量分散型生産への適応技術として、生態系の物質循環の主役である水と二酸化炭素を機能性溶媒とした超臨界流体利用技術が特定されます。本技術は図2示したバイオマスの総合利活用を図る上での不可欠な基盤技術として位置付けられるものです。特に、高温・高圧技術をエネルギー多消費型で、装置コストの高い特殊技術と考える従来の常識を打破するエンジニアリングの開発が進めば、水と二酸化炭素の超臨界流体利用技術はエネルギーと食の自立を図る基盤技術として確立され、高度な科学技術を駆使した自給自足の地域が並存（並んで存在）、並栄（並んで繁栄）する持続可能な地域経済社会の実現につながるものと考えます。

5-2 バイオマスの総合利活用要素技術としての超臨界流体技術

図2に示した総合利活用のための要素技術の多くに水と二酸化炭素の超臨界流体技術を用いた開発が進められています。特に、水を多量に含むバイオマスの処理として超臨界水、亜臨界水での処理が適しており、ガス化、分離、可溶化、加水分解、変換反応への応用が期待されています。

5.2.1 燃焼／超臨界水酸化（SCWO）

バイオマスを化石資源と同様に直接燃焼し、電気や動力に変換すると同時に廃熱を利用することができれば、分散型生産方式のエネルギー供給として最も効率的と考えられます。しかし、バイオマスの燃料化の難しさは多くのバイオマスが含水状態で存在し、通常のボイラーで燃焼させるためには、乾燥や固体燃料化等の前処理が必要で、



原料: セルロース、初期温度: 25 °C, 酸化剤: 理論等量の純酸素

図3 断熱火炎温度の含水率依存性

木材等極めて限定されたバイオマスしか利用できません。

燃焼には、燃料と酸化剤が共存し、雰囲気温度が発火温度以上であることが必要です。すなわち、外部から特別なエネルギーを加えないで、持続的に燃焼が進行するためには、その燃焼系の断熱火炎温度がその系の発火温度を超えていることが最低限必要です。断熱火炎温度とは、所定量の燃料と酸化剤を導入された外部と完全に熱が遮断された装置で、一定圧力下で燃焼が完全に進行したときに、その系が到達できる最終温度と定義されます。図3に、種々の含水率のもとにセルロースを、理論量の純酸素を用いて、初期温度 25°C、種々の圧力下で完全燃焼させたときの断熱火炎温度の計算値を示しました。大気圧下では共存する水の蒸発潜熱が大きく、含水率 88%以上では水の標準沸点 100°Cを超えることができません。バイオマスの自然発火温度、すなわち、酸化が有意な速度で進行する下限温度は 350°C付近と考えられますが、大気圧下では含水率が 83%以下でないとい断熱火炎温度は自然発火温度には到達しません。勿

論、断熱火炎温度が発火温度付近で安定的に燃焼させる既存の大気圧下での燃焼ボイラーは存在せず、含水率 50%程度 of 木材でも、燃焼を安定的に持続させるためには更なる乾燥が必要とされます。これに対し、図 3 に示したように、燃焼圧力を増加させると、断熱火炎温度は上昇し、水の蒸発潜熱が小さい 20MPa 以上では燃焼熱が顕熱に効率的に変換され、含水率が 0.9 程度でも自然発火温度(350°C)以上になることが分かります。しかも、このような高圧下の閉じられた空間での燃焼は、超臨界水酸化反応 (Supercritical Water Oxidation, SCWO) と呼ばれ、自然発火温度以上で、種々の有機物の安定的な持続的酸化(炎のない燃焼)が進行することが明らかにされています。SCWO 技術は PCB やダイオキシン等の有害有機物の無害化処理として数多くの論文や特許が提案され、また一部実用化もされています。また、下水汚泥等の分解処理に、250°C程度の熱水環境下で酸化触媒を使用した湿式酸化法も提案され、その有効性も確認されています。

このような SCWO 技術をバイオマス燃焼に適用した場合、たとえば、含水率 85%の湿潤バイオマス(セルロースで近似) 1000kg を、圧力を 25MPa に設定し、初期温度 25°C、理論酸素量 177kg で断熱燃焼させたとき、圧力 25MPa、温度 420°Cの超臨界水 933kg、超臨界二酸化炭素 244kg が発生し、効率的な動力変換が可能です。しかも、これまでの廃棄物処理の開発経験から SCWO の基本的な技術課題の多くは特定され、検討されています。

しかし、SCWO を汎用的なバイオマスボイラーに適用する場合、新たな技術課題として、多様な形状、形態のバイオマスの高圧装置への供給方法や安定的な熱出力の実現に加え、装置の簡素化、操作の簡便化、高い熱効率の達成など分散型プラントとしての経済性を実現しなければなりません。これらは全て技術的課題であり、本ボイラーの実用化に対する社会的な重要性を考えた場合、擬似移動層等の化学工学的発想と手法の適用により、解決すべきテーマとして早期プロジェクト化を図る必要があると考えています(特願 2007-135728)。

5.2.2 ガス化

超臨界水中で、バイオマスの低温（400℃）ガス化の可能性を見出されています（ENERGY & FUELS 18 (2): 327-333 , 2004）。

5.2.3 分離と溶解

多くの有効成分がバイオマスに含まれており、その抽出操作はバイオマスの総合利活用にとって極めて重要です。二酸化炭素あるいは水を溶媒とすることにより、バイオマス成分の選択的溶解が可能となります。特に、超臨界領域では圧力と温度により大幅な溶解力の調整が可能で、効率的な分別精製も実現できます。また、必要に応じて、共溶媒としてエタノールを使用することにより、分離効率を上げることも可能です。超臨界二酸化炭素抽出は植物油や魚油、ポリフェノール、ビタミンや多くの天然物の分離、生成に利用されています。また、亜臨界水や超臨界水によるバイオマス成分の分離も極めて興味深く、例えばバガスを 380℃、30MPa の超臨界水で秒オーダーの短時間処理により純度の高いセルロースを分離することができます。これは、水に不溶なセルロースが熱水に溶解することとバイオマス成分の熱水中での分解反応の特性の差異によるものです。

5.2.4 加水分解と変換反応

酸やアルカリで促進される有機反応が超臨界水中で、無触媒で、従来の反応条件下と比較して、数オーダーも高速で進行することが多数報告されています。我々は、超臨界水中でセルロースの加水分解が短時間で選択的に生じることを見出しており（J. SUPERCRITICAL FLUIDS 13 (1-3): 247-252 (1998)）、生島らは選択的高速ベックマン転移反応等を報告しています（JACS, 122 (9), pp. 1908-1918(2000)）。さらには、我々はグルコースの超臨界水中での反応経路を詳細に特定しており（J. Supercritical Fluids, 42 (1), pp. 110-119. (2007)）、これらの知見を利用すると石油化学では多くの工程で合成される物質が単工程で合成できる等、極めて工程が簡略化される反応も幾つか見出しています。これらの結果は広範な温度、圧力領域の水が多様な溶媒機能を発現し得る

ことを示しており、石油化学産業に代わる新たなバイオマス化学産業の可能性を示唆するものと考えています。

6. おわりに、 エネルギーと食糧の自立した持続可能な社会

バイオマスの総合利活用は、地域、地域での農林水産業の特色を生かし、食糧のみの生産だけではなく、有効成分の分離、精製によるファインケミカルの製品化、未利用バイオマスを原料とした化学製品の製造、さらに未利用バイオマスの効率的なエネルギー変換技術の確立によりエネルギーの自給を図り、食糧生産の効率と経済性を高め、食糧自給率を100%に近づけつづけるための基本的な施策と言えます。図4に100haの農耕地を想定し、1次産業と2次産業が融合した新たなバイオマス産業のエネルギーと物質の流れを示します。近未来の持続可能な社会は、規模や風土により原料と製品にそれぞれ特徴を有するこのようなバイオマス産業の複数のユニットが必要に応じて有機的に集合体を形成して、それら地域全体として多様な食糧が自給自足され、さらには、バイオマスに加えて、太陽電池や水力、風力等、地域内の太陽由来の自然エネルギーで金属等の無機資源を含めた地域内の多くの物資の物質循環が達成されている、経済的に独立した地域が並存、並栄している社会と想像されます。

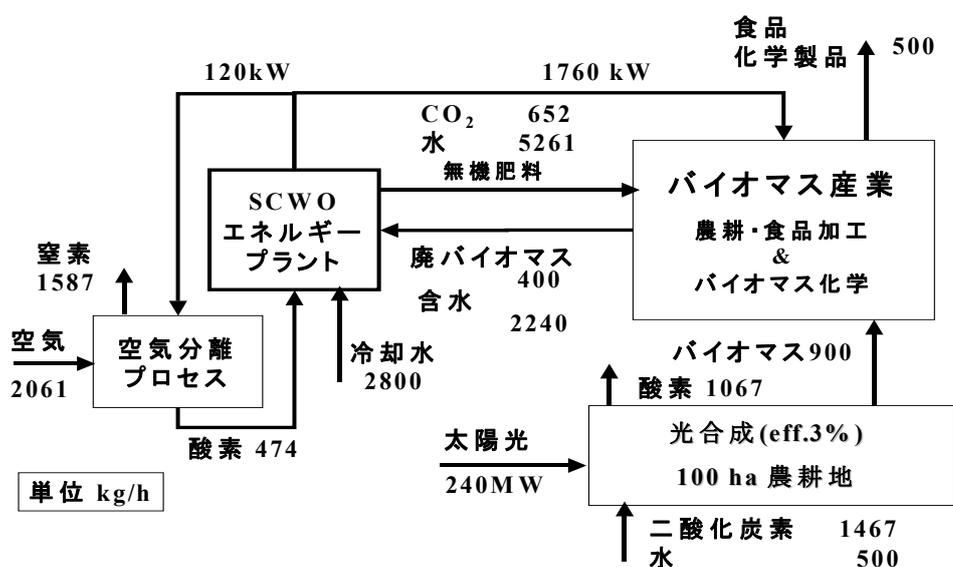


図4 エネルギーと食糧の自給を目指した新たなバイオマス産業ユニット