

2050年カーボンニュートラル実現に向けてのバイオマス貢献 Part III メタン発酵とエネルギー地産地消

飯塚泰雄

はじめに

2002年に閣議決定されたバイオマス・ニッポン総合戦略は、将来必ず訪れる化石資源枯渇の時代を見据え、再生可能で人が利用可能な賦存量としてのバイオマス2億4000万トンの有効利用を企図する政策である。その目標の最初に地球温暖化防止が掲げられている。このことは、大気中のCO₂蓄積増加の抑止を目的とする「2050年カーボンニュートラル」に沿い、バイオマスをエネルギー源として活用、その分化石資源使用量抑止につなげるのが、最も政策目標に適合していることを示している[1]。この政策をうけて農林水産省主導で、各自治体でのバイオマス有効利用を支援、促進する「バイオマスタウン構想事業」が発足した[2]。

2011年宮津市から提案されたバイオマスタウン事業「みやづビジョン2011」では、バイオマスからメタン発酵を介して発生したバイオガスを利用して熱と電気を製造、且つメタン発酵消化液を液肥とする複合利用が盛り込まれ、プロジェクトで産み出される熱と電気を利用する分、化石資源の使用量削減、CO₂蓄積抑止に貢献している[3]。

実際、メタン発酵バイオガス発電は、平成25年にバイオマスタウン事業の発展的解消に伴い、引き継がれたバイオマス産業都市事業において、多くの自治体で実施されている事業であり[4]、FIT（電気の固定価格買い取り制度）の優遇措置の下、2023年3月末の時点において、246の施設が運転を開始、発電規模は8.8万kWに達し、その分、化石資源消費により排出されるCO₂量の削減に寄与している[5]。

一方、ドイツのバイオガス産業は、2000年に導入された再生可能エネルギー法の固定価格買い取り制度（FIT）等の後押しを受けて発展し、2020年時点で、バイオガス発電プラントの累積設備容量（発電ベース）は、5,700MW、国内には約9,600のバイオガスプラントがあり、年間の発電量は33TWhとドイツの総発電量の約9.6%と成長している[6]。日本と比べ発電施設数は40倍、発電規模は65倍と違いは2桁に近く、この事業に関しては、ドイツが断然世界をリードしている。この稿においては、バイオマスのメタン発酵事業を主題として取り上げ、ドイツでの実施例を紹介する。次いで日独でのメタン発酵事業を比較したうえで、

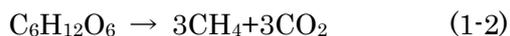
今後の日本におけるバイオマスのメタン発酵事業の課題、最後にニュータウン(団地)における太陽光発電とメタン発酵を併用する生活消費エネルギーの地産地消の可能性について述べたい。

1. メタン発酵バイオガス発電

バイオマスは、植物が(1-1)式に従って、光合成によって作り出すブドウ糖をその体内で酵素の働きのもと、でんぷん、セルロース、ヘミセルロース、リグニン等のより高次の構造の炭水化物に重合、高分子化、更に地中から吸収した栄養塩類も用いてたんぱく質等に変化したものも加わって構成される植物体物質からなっている[7]。



メタン発酵では嫌気性条件下、メタン菌がバイオマスを構成する炭水化物の分解に働き、その最終過程は、モデル的にはブドウ糖が(1-2)式で示されるように分解され、 CH_4 と CO_2 のモル比1:1のバイオガスと呼ばれる混合ガスが生成される反応であろう。



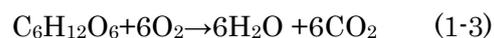
メタン発酵でバイオマスを構成する全ての炭水化物が気体成分まで分解されるわけではない。セルロースやリグニンといった木質部分は未分解残滓として、またバイオマスのかなりを構成する水分は、発酵消化液と呼ばれる液体成分となって残る。即ち、メタン発酵により、バイオマスは、気体、固体、液体の三成分に分解される[8]。

バイオガス中の CH_4 は可燃性で、バイオガス発電機に導き電気と熱に変換活用できる。この際の燃焼により発生する CO_2 は元々植物が大気中から吸収したものであるため、メタン発酵バイオガス発電プロセス

により大気中の CO_2 濃度は増加することなく、カーボンニュートラルである。バイオガス中に含まれる CO_2 は不燃性で、燃焼効率を下げる方向に働く。バイオガスから選択的透過膜等を用いて CO_2 、更に硫黄等微量有害成分を除去、アップグレードしたガスをバイオメタンと呼ぶ。燃焼効率が天然ガスに近く、今後、バイオメタンを天然ガスパイプラインに接続、家庭や事業所における燃料として、また天然ガス自動車の燃料として利活用することが期待されている[6]。バイオメタンは、タンクに貯蔵することが出来る。これからの時代、再生可能エネルギーとして太陽電池や、風力発電による電力利用が進んでいくであろうが、これらのエネルギー源は太陽高度や天候等の自然条件に影響される。ストックされたバイオメタンは、電力需要に応じて使用することが出来、再生可能エネルギー時代における緩衝材的役割を担うことが出来る。

植物が地中から吸収した窒素、リン、カリ等の栄養塩類は、バイオマスが気体、液体、固体の3成分に分解されるメタン発酵プロセスにおいて、液相に濃縮される。その結果、発酵消化液は液体肥料(バイオ液肥)として農地利用が出来、更に発酵残滓も堆肥として利活用できる。

バイオマスを牛糞などと混ぜて、直接堆肥にした場合、バイオマス中に含まれる炭水化物は、植物が吸収した栄養塩類と共に農地に還元され、好気性発酵条件下、



$$\Delta G_0^\ominus = -1173 \text{ kcal/mol} (-4928 \text{ kJ/mol})$$

に従い、ゆっくりと熱発生を伴いながら CO_2 と H_2O に戻る。一方、メタン発酵を経る場合は、栄養塩類は液相に分離濃縮され、

液肥として農地に還元される。炭水化物成分は全部ではないにしろ、嫌気性発酵条件の下 CH_4 と CO_2 の混合ガスに変換され、エネルギーとして人に利活用される経路を経たのちに CO_2 と H_2O に戻る。

2. ゲッチンゲン大学 地域貢献 『バイオエネルギー村』プロジェクト

2.1 世界初のバイオエネルギー村 Jühnde 村

ドイツでは、農村で必要なエネルギー（電気と熱）を再生可能で、且つ CO_2 蓄積量を増やさないバイオマスエネルギーで全て賄うとのコンセプトのもとに計画実施された“バイオエネルギー村”が 2014 年時点で 140 ヶ所以上誕生している[9]。ここでは、ゲッチンゲン大学の「バイオエネルギー村」プロジェクトの指導により世界初のバイオエネルギー村として誕生、認定されたユンデ（Jühnde）村での実施例について、そこを訪れ見聞、調査した惣田等の報告を紹介したい[10]。

ゲッチンゲン大学は、ドイツ中部、人口 13 万人のゲッチンゲン市にあり、創立 1737 年、ノーベル賞学者をこれまで 45 人輩出しているドイツ一番の名門大学である。その大学の地域貢献プログラムの一つとして、立ち上げられ活動を実施したのが、『バイオエネルギー村』プロジェクトチームであり、専門分野の異なる 11 人の教員からなる。

プロジェクトの狙いを以下に記す[11]。

1) 資源保全及び温暖化防止：再生可能な資源に切り替えていくことで化石燃料の寿命を延ばすと同時に、温暖化ガスの排出を抑えることにより地球温暖化の防止に貢献する。

2) 国土保全及び水質保全：バイオガスコジェネ施設に必要なエネルギー作物（トウモロコシ、穀物類、ヒマワリなど）を計画的に作付けすることで、土壌や地下水の状態を改善する。特に、窒素や生態環境破壊物質は明らかに減らすことが出来る。

3) 生物多様性の保全：食用の作物と違い、燃料用のエネルギー作物は種類を問わないため除草剤を使う必要がない。そのために、雑草や地域に特有の植生が守られる。

4) 地域経済の向上：地域内の資源を利活用するため、これまで資源を得るために地域外に流出していた費用が地域内に留まるようになる。一方、農家にとっては、エネルギー作物や家畜ふん尿、間伐材を資源として販売することで、副収入を得ることが出来るようになる。これにより、農業に競争力が生まれ、活力のある農村が維持され、又施設を建設する際に地域内で雇用が生まれる。

5) 住民参加による地域の活性化：プロジェクトは元々大学の共同研究事業として誕生したが、実現化に際し、密接な住民との対話がなされた。説明会を各地で開催した後、関心のある住民が多い地域をモデルに選んでいるために、その時点で住民の関心は高まっている。モデル地域がユンデ村に決まった後も住民同士の意見交換会や合意形成に向けた討論会等を数多く開いた。現在では、このプロジェクトはユンデ村の村民のプロジェクトであり、様々な決定は住民自身が下している。

6) エネルギー供給の地域分散化：エネルギーの供給地が一極化していることのリスクを減らすことが出来る。地域分散化すれば、地元の企業（組織）がエネルギーの供給を担う。

7) 生き甲斐ややりがいによる地域への愛着心養成・向上：ユンデ村の住民が大学と共に育て上げたバイオエネルギー村プロジェクトは先駆的で、しかも今後大きな期待が持たれている。国内外からの大きな期待を受け、住民たちはこのプロジェクトに強いやりがいを感じている。同時に村社会内の結びつきも強化されている。このプロジェクトを通じて住民の地域への愛着心、誇りが一層はぐくまれている。

8) 化石燃料依存社会から自然エネルギー社会への変革：更に大きな遠い先の目標として、これを成功事例として社会に積極的に発信、バイオエネルギー村が自殖的に増えていく、これにより化石燃料依存社会から自然エネルギー社会への変革への起爆剤としたい。

このプロジェクトには、土壌学者、心理学者、社会学者、経済学者、地理学者、エネルギー作物学者など多分野の専門家がスムーズな社会変革という目的の実現のために参画協力している[10,11]。

Jühnde村は、ゲッチンゲン市南東50km、北緯51度の位置にある。日本でいえば、北海道の宗谷岬をはるかに北に超えて、樺太島のほぼ中間に当たり、冬はずいぶん寒く、10-11月の平均気温は-3℃、3-4月は-2℃くらいで、冬季の暖房は必須の地域である。世帯数200戸で760人くらいが暮らし、酪農家が9戸、牛400頭が飼われており、常に牛糞が発生する。農地面積は1,200haほどあるが、その1/3の400haをトウモロコシ(30%)、甜菜糖(5%)、ライ麦・小麦混合種(65%)等のエネルギー作物の栽培に充てている。村内には多くの林があり、木材チップの入手が可能、間伐材も十分にある。村で収

穫されたエネルギー作物はチップ状に裁断、牛糞と混ぜ合わされ、3,000m³の発酵タンクに自動投入される。発酵消化液は、農地に移送、散布されるのに先立ち、4,800m³の液肥タンクに貯められる[10]。

発生バイオガスは、脱硫処理後、村の協同組合が所有する500kW発電機を2基備えたコジェネレーション設備に導かれ、ここでは電気400万kWh/年と温水280万kWh/年が製造されている。これとは別に550kWの発電機を備えた木材チップボイラーと1,750kWの発電機を備えたオイル温水ボイラー設備があり、それぞれ、電力・温水供給、及び非常時の電力・温水供給に供されている。温水は、冬場は全量、村中にめぐらした5.5kmに及ぶ配管を通じて70℃から72℃に制御され142戸に供給、村内のセントラルヒーティング用に供され、夏場は木材チップの乾燥用として用いられている[10]。

電力は全て売電されており、村人は温水を購入する。表1にユンデ・バイオエネルギー村を創設するのに要した設備投資金額内訳を示す。総額8億円に達する投資金額のかなりの部分は温水配管の敷設に使われたが、村人の負担額は6~7万円である。表2に、バイオエネルギー村運営の事業収益(試算)を示す。電気と温水の売り上げによる収入は1億2,450万円で、この額は設備償却等を合わせた諸経費1億0,816万円を上回り、事業は1,600万円ほどの利益を生み出している。村民は、電気と温水を購入するが、バイオ植物は村内で全量調達す

表1 ユンデ・バイオエネルギー村設備投資[10]

投資資金内訳	金額
国	2億2,500万円

村民負担	900 万円
銀行借り入れ	5 億 6,100 万円
総額	7 億 9,500 万円

表 2 ユンデ・バイオエネルギー村事業収益 (試算) [10]

経費 (支出)		販売 (収入)	
内訳	金額/ 万円	内訳	金額/ 万円
バイオ植物買い付け	3,750	電力収入 * 1	7,500
運転経費	500	温水収入 * 2	4,500
設備メンテナンス投資	1,500	雑収 (見 学等)	450
金利 2%/年	516	収入総額	12,450
設備償却 費 15 年	3,750	事業収益	
人件費	800	収入総額	金額
経費総額	10,816	一経費総 額	1,634 万円

*1 電力売電価格は 18 円/kWh 程度と思われる。

*2 温水 (末端温度 72°C とした場合)、約 53 円/L。

ることになっており、その買取りは年間契約で 3,750 万円と価格保証されているので、村民は気候による作物の収穫高の変動を心配することなく、プロジェクトの指導に従ってエネルギー作物を栽培、収穫、施設に持ち込み、収入を得る。この活動により、それまで購入に頼っていた天然ガス、石油、重油などの購入が不要となり、これに相当する CO₂ 削減量は 3300 トン/年、住民一人当たり約 4 ton となり、CO₂ 排出量削減に大き

く貢献している[10]。因みに、2020 年度の日本人一人当たりの CO₂ 排出量は計算上 8.2 ton である[12]。

2-2 ユンデ村に注がれる太陽エネルギーとメタン発酵事業で産み出されるエネルギーとの比

Jühnde 村では、400ha の農地でエネルギー作物を栽培、メタン発酵を介し、コジェネレーション設備で一年間に電気 400 万 kWh と温水 280 万 kWh が製造され、収益的にプラスとなる協同組合事業が展開されている。この事業で産み出されるエネルギーは、400ha の農地に一年間に注がれる太陽エネルギーのどれくらいの割合になるのだろうか？

ゲッチンゲンは北緯 51 度に位置する。ゲッチンゲンの冬至、春分、夏至、秋分における太陽の南中高度及び日照時間を調べ[13]、本シリーズの Part I で述べた手法を用いて[14]、一年間にゲッチンゲン大気圏上空に注がれる太陽エネルギーの値を表計算で求めたところ、2,521 kWh/m²・年という値が得られた。計算の経過と結果を付録の Table 1 シートに示す[13, 14]。大気圏の上端に注がれる太陽エネルギーの約 30%は地表面による反射、大気中での散乱、雲による反射により宇宙空間に戻り、残りの約 70%が地表に達することから、Jühnde 村の田畑には $2521 \times 0.7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{年} = 1765 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{年}$ のエネルギーが到達している。

Jühnde 村では一年間、雲一つない快晴の日が続くわけではない。曇りや雨の日には畑に注がれる太陽の光は弱くなる。付録の Table 2 シートに示されるように、ゲッチンゲン付近の一年間の月ごとの晴れの日と曇りの日の割合が調べられていて[15]、

一年間平均すると 40%が晴れの日、60%が曇りの日とまとめられる。晴天時に地上に注がれる太陽エネルギー強度は曇天時にはどれくらいの値になるのであろうか？ゲッチンゲン付近で観測された結果ではないが、日本の岐阜大学の敷地で一年間にわたって地上に降り注がれる太陽光の強度を光量子束値 ($\mu \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$) として定量的に調べた結果が公表されている [16]。測定は毎日正午に行われ、波長 300~800nm の領域にわたって各 100nm 毎の光量子束の値が記録された。付録の Table 3 シートに季節を代表する八つの日の付近に測定された各 100nm 毎の光量子束の値から、波長 400~700nm のそれらを合計し、光合成有効光量子束の値としてまとめている。季節に関わらず晴天日は曇天日のほぼ 3 倍の値となっており、一年間の平均では、晴天日の太陽光の強度を 100 とすれば、曇天日は 30 という値になる。

これらのデータを用いると、ゲッチンゲン近郊の Jühnde 村の地上に一年間に単位面積あたりに注がれる太陽エネルギー量は、大まかには、 $1765 \times 0.4 + 1765 \times 0.6 \times 0.3 = 1024 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{Y}$ と計算される。これより、Jühnde 村でエネルギー作物が栽培されている 400ha の農地に一年間に注がれる太陽エネルギーの値は、1ha=10000m² より、

$$\frac{1024 \text{ kWh}}{\text{m}^2} \times 400 \times 10000 \text{ m}^2 = 4.11 \times 10^9 \text{ kWh}$$

と見積もられる。

一方、Jühnde 村のコジェネレーション設備で一年間に産み出されるエネルギーは、電気 400 万 kWh、温水 280 万 kWh とされているので、この事業で産み出されるエネルギー量と 400ha の農地に一年間に注がれる

太陽エネルギー量の比は

$$\frac{680 \times 10^4}{4.11 \times 10^9} \times 100 = 0.165\%$$

電気エネルギーに限ると、

$$\frac{400 \times 10^4}{4.11 \times 10^9} \times 100 = 0.097\%$$

と求められる。

この結果は、メタン発酵を介して、400ha のエネルギー作物農園に注がれる太陽エネルギーの僅か 0.165% を利用可能なエネルギーに変換するだけで Jühnde 村のエネルギーの自給自足を達成できるばかりではなく、売電、温水販売により利益を生み出すことが出来ることを意味し、改めて太陽から地球に供給されるエネルギーの膨大さを感じさせる。

このシリーズの Part II の表 3 において、日本国土において純生産量としてバイオマスに蓄積される太陽エネルギー量はバイオマスがすべてセルロースと仮定して年間に照射される太陽エネルギー総量の 0.24% であるとの結果を示した [17]。更にバイオマス発電事業では、バイオマスに蓄積されたエネルギーの発電効率は 20% とされているので [17]、国土に注がれる太陽エネルギー量の利用効率は、

$$0.24 \times 0.20 = 0.048\%$$

と計算される。この値に比較するとユンデ村でのメタン発酵を介する事業での太陽エネルギーの利用効率は、その 3.4 倍となる。

2-3 バイオエネルギー村の存続とエネルギー作物栽培

日本では一般にバイオマスは広く、薄く分布し、石炭、石油に比べてエネルギー密度が低く、エネルギー源として活用しにくいとの考えが浸透しているように思える。

一方、ユンデ村に実現されているバイオエネルギー村の活動が継続され、且つその数が自殖的に増えてゆくためには、各村民の自主的な事業参加に加え、1) その事業が経営的に収益を上げ続けること、2) 事業によって産み出されるもの、電気、ガス、熱、液肥、堆肥等が貯まることなく、確実に消費に回され、収入につながり続けることが必須の条件であろう。

「バイオエネルギー村」プロジェクトの戦略の最も大きな柱となっているのは、エネルギー作物の栽培である。ユンデ村では、これを裁断、牛糞と混ぜ合わせてメタン発酵させることによりメタンの発生量を増やし、バイオガス発電量の大幅増加に結び付けている。表 2 では、電力販売が収入の 60%を占め、「バイオエネルギー村」プロジェクト事業の主要な柱となっている。エネルギー作物の栽培は、ゲッチンゲン大学の Machan 教授の指導に基づいてコジェネレーション施設から半径 5km 以内の地域で行われ、村民により施設に持ち込まれている[10]。Machan 教授はバイオガス村プロジ

ェクト推進メンバーの一人であり、専門はエネルギー作物の研究であり、その著書、「バイオガスプラント運営者向けのエネルギー作物の生産」には彼女の研究成果がまとめられている[18]。その数々の教えの中にエネルギー作物からのメタンガス収率は家畜ふん尿からのそれに比べて、トン当たり 6 倍とある。更に、発酵のため、コメ、麦、トウモロコシなどのエネルギー作物の収穫は成長中の穀粒が乳熟期から初期の糊熟期に行う。この時期の作物の乾燥重量は全体の 25~35%であり、水分豊富で木質化(=セルロース化)は進んでおらず、メタン菌による発酵が効率よく進み、メタン収率が最も高くなるとある[18]。

図 1 は、Machan 教授の教えの一つであるトウモロコシ(二期作)とライ麦のそれぞれの植え付けと収穫の時期を示す栽培ローテーションと日照時間との関係を示している[10,18]。これにより土地は一年中夏作物のトウモロコシと、冬作物のライ麦によって蔽われ、風雨や日光からの土地浸食から保護される。更にメタン発酵残滓・残液を肥料

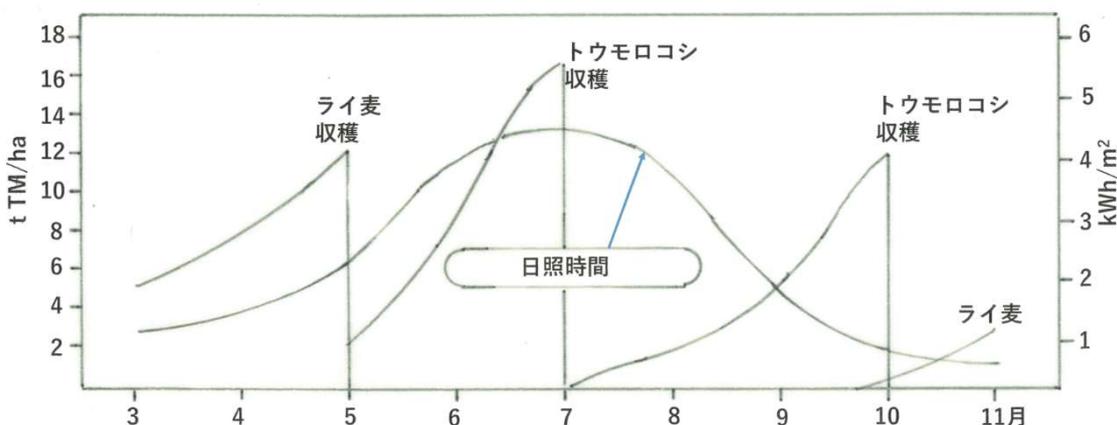


図 1 トウモロコシ、ライ麦の収穫時期と日照時間[10,18]

として耕地に散布還元することにより耕地内における養分循環サイクルが実現される。

このために、化学農薬の使用量を大幅に減らすことが出来る[18]。

即ち、バイオマスエネルギー村プロジェクトにおいては、バイオマスについて一般に考えられている、広く、薄く分布し、且つエネルギー密度が薄いという弱点を、1)メタン収率の高いエネルギー作物を発電施設から半径 5km 以内の限られた地域において集中的に栽培、且つ 2)メタン収率が最も高くなる時期に収穫するといった工夫を組み合わせるにより克服している[18]。

一方、表 2 が示すところによると、温水収入が収入総額の 36%を占めている。温水収入は村人、即ち、このプロジェクトの実施メンバーによる買取りによっている。つまり、事業の収益は、村人による温水購入によってプラスに転じている。熱は本質的に逸散するものであり、温水の供給先は自ずと発電施設から遠くないユンデ村に暮らす人々750人の暮らす限られた地域となる。このことは、収益的に保証されるバイオエネルギー村事業の実施単位はバイオガス発電により発生した熱が有効利用され、販売収入に結び付く供給範囲の地域毎となることを意味する。

3. 中規模酪農家の個別型バイオガス発電プラントの日独経営比較

ドイツでは、中規模酪農家が個別にバイオガス発電プラントを所有し、運転することも盛んに行われている。日本でも同規模の酪農家が個別にバイオガス発電プラントを所有、発電している例がある[19]。

表 3 は、バイオガス発電プラントを有する中規模酪農家の日独の経営比較を示している[20,21]。北海道十勝は北緯 43.5° の位置にあり、G 農家は帯広から北へ約 30km の士幌町佐倉において酪農を営み、牛 270

頭ほどを飼っている。この牧場からの生乳出荷量は年間 2,295 トン、単価は 80 円/kg であり、牛乳の売り上げは、1 億 8,360 万円となっている。40ha 以上の農地も所有し、牛が日々排泄する糞尿は肥料として農地還元していた。しかし、悪臭がひどく、その対策として、牛糞をメタン発酵させ、得られたメタンを電気に変えるバイオガスプラントを建設した。バイオガス発電プラント設置の初期投資額は 1 億 6,000 万円、発電機の規模は 50kW、得られた電気は自家消費するとともに余剰の電気を売電、一年間に 1,555 万円の利益を得ている。売電収入は牧場の利益の一角を占めている。また、メタン発酵後の消化液は、即効性の高い液肥として、圃場及び近隣の畑作農家にも散布され耕畜連携、資源の地域内循環が図られている[20]。

一方、ドイツのルールモーザー家は、北海道士幌とほぼ同緯度の北緯 47.5° のバイエルン州にあつて、同じく酪農業を営む隣家と合わせ、搾乳牛 70 頭、及び肥育用子牛 370 頭を飼育し、隣家と合わせた農地面積は 122ha となる。年間の生乳出荷量と単価は、それぞれ 555 トン、40 円/kg であり、生乳販売額は 2,220 万円と士幌町 G 農家に比べて約 1/8 と少ない。ヨーロッパでは、生乳の出荷単価が日本に比べて半分であることが酪農経営を圧迫している。ルールモーザー一家では、隣家と共同で 150kW の発電機を有するバイオガス発電プラントを初期投資額 8,250 万円で建設、メタン発酵の原料には牛糞にエネルギー作物の飼料用トウモロコシ、サイレージ牧草、穀物(小麦・大麦等)を混ぜたものを用いることにより、発電量を増やし、士幌町 G 農家の約 2 倍の

3,102 万円の売電収入を得ている[21]。レー
ルモーザー一家では、士幌町 G 農家と比べ売
電収入が確りとした経営の柱になっている

表 3 ドイツと日本の中規模酪農家による個別型バイオマスガスプラント経営比較

	士幌町佐倉 G 農家[20]	ルールモーザー家+隣家[21]
位置	北海道 十勝 帯広 北緯 43.5°	ドイツ バイエレン州 ミュンヘン 北緯 47.5°
搾乳牛	270 頭	70 頭
肥育用子牛		70 頭+300 頭
農地	40ha 以上	72ha+50ha
生乳出荷量と単価	2,295 トン 80 円/kg	555 トン 40 円/kg
生乳販売額	1 億 8,360 万円	2,220 万円
バイオガスプラント初期投資額	1 億 6,000 万円	8,250 万円
発電規模	50kW	150kW
原料	牛ふん尿のみ	牛ふん尿+エネルギー作物（トウモロコシ、サイレージ牧草、穀物）
売電収入	1,555 万円	3,102 万円

士幌町の G 農家のケースとの顕著な違いとして、1) 発電機の規模が 3 倍であるのに、発電プラントの初期投資額が約半分であること、2) メタン発酵の原料に G 農家は牛糞しか用いていないのに対し、ルールモーザー一家では、エネルギー作物を混ぜることにより、発電量を大幅に増やし、売電収入に確りとなげているとの 2 点があげられる。日本では、エネルギー作物の栽培という考え方がほとんど根付いておらず、バイオガスプラントの初期投資額がドイツに比べて、単純に発電規模当たりの比較で約 6 倍と顕著に割高になっていることが、メタン発酵→バイオガス発電普及の妨げになっている。

4. 日本におけるバイオエネルギー村誕生

4-1. “Das Geld des Dorfes dem Dorfe !”

ドイツに誕生したバイオエネルギー村では、太陽光、バイオマス(=エネルギー作物)を利用して、村で必要な電気、熱を生み出し、エネルギーの自給自足を実現、収入につなげるとともに、これに相当する CO₂排出量の削減に貢献していることを述べた。経済的視点からは、それまで購入に頼っていた天然ガス、石油、重油が不要となり、その分村から流出していたお金が村にとどまることを意味する。さらに、発電により産み出した電気や、アップグレードしたメタンガスを都市に回すとその分のお金が都市から流入することになる。即ち、これまで、石油、

石炭、天然ガス等の化石エネルギー資源輸出に流れていたお金の流れの少なくとも一部が、国内の都市から農村に流れるようになり、これにより農村に新しい雇用が生まれ、都市から農村への人の流れが生まれることになる。事実、ドイツでは、「村のお金は村のために！“Das Geld des Dorfes dem Dorfe!”をスローガンに掲げ、太陽光、バイオマス、風力を利活用し地域内経済循環を作るための協同組合の数が増えている[21]。

4-2. 日本における“バイオエネルギー村”の誕生、

日本における“バイオエネルギー村”の誕生、その数の自殖的増大は誰しも望むところであろう。そのためには米、野菜に加えてエネルギー作物を栽培する農家の出現、日本の気候、風土にあったエネルギー作物を見出す必要がある。エネルギー作物からメタン発酵を経て産み出される電気やメタンガスは、現在又将来にかけて社会の必需品であり、これによりCO₂排出量削減、また農村地域における経済活性化につながる。

しかし、日本でのバイオエネルギー村誕生にはいくつかの高い壁がある。ドイツに比べ、日本は山国であり、耕地面積は442万haであるのに対し、ドイツのそれは1,179万haと約2.7倍である[10]。食料自給率は、日本は異常に低く38%、ドイツは86%である[22]。そのような事情の下、狭い耕地でのエネルギー作物の栽培には強い抵抗感が働くであろう。一方で、米の自給率は100%であり、生産過剰となったコメの生産量を抑制するために実施された減反政策が50年程続き、遊休農地(=耕作放棄地)の面積は2015年には、42.3万ha、日本の国

土の1.1%に達している現実もある[10, 23]。

日本にエネルギー作物の栽培の考え方が根付くのは、まだ遠い先のように思えるが、仮に耕作放棄地にエネルギー作物を栽培、メタン発酵を介して、発電した場合に産み出される電力量を、42.3万haの土地に一年間に注がれる太陽エネルギー量、及びユンデ村での実績からその0.097%が電力に変換されるとして計算すると 5.50×10^{12} kWhの値が得られる。この値は2022年度における日本の一次エネルギー量(全消費エネルギー量、18314PJ)の中、電力の占める割合(=47%, 2391×10^9 kWh)の0.22%に相当する。(計算は付録に記載)

ドイツでの実施例に学ぶとすれば、バイオエネルギー村の誕生には地元住民の事業への参画、自主的な活動が必須である。日本では、2002年12月のバイオマス・ニッポン総合戦略の閣議決定以降、2011年末に318のバイオマスタウンが生まれているが、その平均人口は約73,000人、運営主体は地方自治体であり、バイオマス利用の効果は自ずと広く薄くとならざるを得ない[24]。一方、ドイツのバイオエネルギー村プロジェクトにおける平均人口は約1,000人である。バイオエネルギー事業は地元住民の下からの運動であり[24]、Júhnde村での事例にみられるように、事業の黒字化、持続性の成否を担っているのは、温水供給先からの収入である。

日本において、バイオエネルギー村が誕生するには、現状のバイオガスパラント建設初期投資額は表3に示すようにあまりにも高すぎ、その金額が少なくとも半分に下がるか、負担を半減する施策が必要であろう。事業は住民同士のコミュニケーション

が成立し、メタン発酵バイオガス発電で発生する熱の利用可能な領域でまず試みる必要があるだろう。

4-3. ドイツにおけるエネルギー作物による減反農地利用制度[25]

日本と同様、ドイツにおいても穀物生産は過剰となっており、義務的減反等の生産調整施策が実施されている。義務的減反とは、食料としての農産物生産用途から農地を引き上げることの意味し、耕作を中断するいわゆる「休耕」ばかりではなく、農地にバイオマス燃料となる菜種等のエネルギー作物や植物由来プラスチック原料である澱粉用ジャガイモ等工業原料作物、即ち非食糧農産物の作付けをすることが認められている。このように義務的減反農地に作付けされる非食糧農産物は、NawaRo (= Nachwachsender Rohstoff; 持続利用可能な原料) と名付けられ、一般農地に作付けされた同様の作物と区別されている[25]。

ドイツでは、再生可能エネルギー法 (Erneuerbare Energie Gesetz, EEG) により、エネルギー作物を用いて発電を行った場合、これを売電するにあたって、小規模なバイオマス発電施設からの買電価格が高く設定されており、中でも最も高い買電価格が設定されているのは、義務的減反農地において生産された NawaRo を原料に用いた発電施設である。NawaRo では、農家による自家発電への利用が推奨されており、NawaRo を用いたバイオマス発電施設には通常の5割増し(発電能力150kW未満の場合)の買電価格が設定されている。農家は、NawaRo の生産により義務的減反要件をクリアして直接支払いを受けるのに加えて、

NawaRo を用いた発電により追加的な収入を得ることが可能になる。例えば、K 農家では平均約500ユーロ(約7万円)/月の追加的収入を得ている[25]。

このように、再生可能エネルギー法が、小規模な減反農地産のエネルギー作物を利用した発電施設に対し、有利な買電価格を設定していることが、減反農地におけるエネルギー作物栽培成立の背景にあり、NawaRo の作付面積は、2003年で83万haにまで拡大した。即ち、ドイツでは、農業施策とエネルギー施策の統合的運用によりエネルギー作物による減反農地利用が図られ、エネルギー作物生産の場としての農業の新たな機能と農家の追加的収入源が付与されることにより、総合的な農村振興につながると言える[25]。

5. 太陽光とバイオマスを用いた団地で消費するエネルギー(電気とガス)の地産地消

昭和30~40年代の日本の高度経済成長期、都市部での急激な人口増加に対応するために、都市近郊の丘陵地をベッドタウンとして開発、いわゆるニュータウンの建設が日本の各地で進められた。それから半世紀以上が経過し、経済成長鈍化、少子高齢化、人口減少の令和の時代に入り、団地では若者が就職、世帯分離による急激な人口減少、施設の老朽化、それらに伴い活気が低下する、所謂ニュータウン問題が生じている。筆者の近くにも、昭和40~44年に開発された中規模の団地(敷地面積216ha、8,500世帯15,000人)があり、過日、ニュータウン問題を議論する会議が開かれ、出席する機会があった。その関りから、ゲッチングン大

学エネルギー村プロジェクトの狙いの7)に”エネルギーの地産地消”が「生き甲斐ややりがいによる地域への愛着心養成・向上」と結びついているとあり、団地で消費するエネルギーの地産地消が可能かどうか計算を行った。

電気

1) 団地敷地に一年間に注がれる太陽エネルギー量と全世帯の消費電力量の比

1-1 単位面積あたりに注がれる太陽エネルギー照射量

大気圏上空 3090kWh/m²・年、その70%が地上に到達[14]

年間日照率 晴れ 0.43(=100%到達)
曇りから雨 0.57 (=30%到達) [14,16]

天候を考慮した年間の太陽エネルギー照射量

$$3090 \times 0.7 \times (0.43 + 0.57 \times 0.30) \\ \text{kWh/m}^2 \cdot \text{年} \\ = 1300 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{年}$$

1-2. 敷地全域に一年間に注がれる太陽エネルギー総量

$$\text{地区面積 } 216 \text{ ha、} 1 \text{ ha} = 10,000 \text{ m}^2 \\ 1300 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{年} \times 216 \times 10,000 \text{m}^2 \\ = 2.81 \times 10^9 \text{ kW/年}$$

1-3. 団地全世帯の一年間の電力消費量
一世帯当たりの年間電力消費量 4,175 kWh[26]であるところから、

$$4,175 \text{ kWh/世帯} \cdot \text{年} \times 8,500 \text{ 世帯} = 3.55 \times 10^7 \text{ kWh/年}$$

1-4. 一年間に注がれる太陽エネルギー総量と電力消費量との比

$$\frac{2.81 \times 10^9}{3.55 \times 10^7} = 0.79 \times 10^2 = 79$$

団地の敷地には、全世帯の電力消費量の約80倍のエネルギーが太陽から注がれてい

る。

2) 金剛地区の全世帯の電力消費を太陽光発電でまかなうとした場合に必要となる太陽光パネル設置必要面積

2-1. 太陽電池の太陽光エネルギー変換効率を15%とした場合の太陽光パネル単位表面積当たりの一年間の発電量
1300kWh × 0.15 = 195 kWh/m²・年

2-2. 必要設置面積

$$\frac{3.55 \times 10^7}{195} = 1.82 \times 10^5 \text{ m}^2 = 18.2 \text{ ha}$$

2-3. 団地敷地面積に対する割合

$$\frac{18.2}{216} \times 100 = 8.4\%$$

全ての団地建物の屋上を太陽光パネルで覆う程度ではなかろうか。

ガス

1. 団地全世帯のガス使用量
一世帯当たりの都市ガス(天然ガス、CH₄)年間使用量 203 m³[26]

$$8500 \text{ 世帯} \times 203 \text{ m}^3/\text{世帯} \cdot \text{年} = 1.73 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2. 燃えるごみを収集、メタン発酵させて得られるメタン量

2-1 団地全世帯において一年間に発生する燃えるごみ量

一人当たり燃えるごみ排出量 890g/日 [27]

$$15,000 \times 890 \times 365 \text{ g/年} = 4.87 \times 10^9 \text{ g/年}$$

2-2. 燃えるごみを C₆H₁₂O₆ (分子量 180 ブドウ糖) と仮定し、メタン発酵(C₆H₁₂O₆ → 3CO₂ + 3 CH₄)により得られる CH₄ 量

$$\frac{4.87 \times 10^9}{180} = 2.7 \times 10^7 \text{ mol}$$

$$2.7 \times 10^7 \text{ mol} \times 3 = 8.1 \times 10^7 \text{ mol}$$

メタン標準体積(m³)に換算

$$\frac{8.1 \times 10^7 \times 22.4}{1000} = 1.81 \times 10^6 \text{ m}^3$$

この値は金剛地区全世帯のガス使用量とほぼ同じである。現在、排出一人一日当たり890gとされているごみは、大部分焼却処分されているが、最近では、廃棄物からのエネルギー回収を図るために厨芥、紙類を分別回収し、メタン発酵を通じバイオガス化することが検討されている。河野らによると[28]、乾式メタン発酵の投入VS(=廃棄物系バイオマス中の有機物量)当たりのバイオガス(平均メタン濃度57.8%)の発生量は生ごみで680 Nm³-dry/ton-投入VS、紙類で550 Nm³-dry/ton-投入VSとされており、厨芥と紙を8:2で混合した場合は、比例計算で、620 Nm³-dry/ton-投入VSとなる[28,29]。大隅らは、高温メタン発酵連続試験において投入VSあたりのバイオガス発生量は、メタン濃度57.8%として生ごみで600 Nm³-dry/ton-投入VS、バイオウエイスト(=生ごみと紙を8:2で混合したもの)で540 Nm³-dry/ton-投入VS、紙で420 Nm³-dry/ton-投入VSと計算している[29]。白井らは、家畜排せつ物と、地域の生ごみを用いたメタン発酵処理施設におけるバイオガス発生量は、649m³/ton-投入VSで、メタン濃度は64.6%であったと報告している[30]。上記の計算は、投入するごみの化学組成がC₆H₁₂O₆で表され、メタン発酵では全てCH₄+CO₂のバイオガスに変換すると仮定しているが、この仮定の下にゴミ1ton当たりのバイオガス発生量を計算すると、747 Nm³/tonの値が得られる。この値は、河野等の620 Nm³-dry/ton-投入VS[28]、大隅

等の540 Nm³-dry/ton-投入VS[29]、白井等の649m³の値[30]よりも大きい。この差は、計算では発酵残滓を考慮していないことに拠っているのであろう。

バイオマス資源として見た団地の各家庭で発生する生ごみは、季節に関わらず一定量、規則的に、毎日必ず発生する。発生の場所も定まっている。ある程度調理され、裁断されており、メタン発生は容易であり、コミュニティの確立した団地では、ごみの分別、収集は容易であろう。ユンデ村プロジェクトで工夫された諸条件が団地からの燃えるごみでは発酵の時点で既に整っている。

メタン発酵ではCH₄とCO₂が同じモル数発生する。各家庭で現在使用の都市ガスと同様に使用するためには、CO₂を選択的透過により除去する設備を通してバイオメタンとする必要がある。メタンは、貯蔵、蓄積することが出来、夜間太陽光発電による電力発生が止まるときにはメタンを電力に変える緩衝材としても使用でき、余剰分は、都市ガスとして他地区に供給することも出来よう。

太陽熱温水器

一般家庭のエネルギー消費の26%は、風呂、給湯など40℃付近の温水を作るために用いられている[31]。温水を作るために、既に太陽熱温水器が開発、実用化されている。太陽光エネルギー利用効率は、40から60%と報告されていて、この数値は太陽光パネルのそれ(=15%)3~4倍に当たり、設置の費用も太陽光電池の設置にかかるそれよりも格段に低い。

エネルギー作物栽培→メタン発酵→発電事業では電気と共に発生する熱を如何に活用、収入に結び付けるかがポイントとなっている。熱の逸散は避けられず、生産と消費

の場の近接が肝要である。団地に居住する全世帯の消費エネルギーの地産地消を計画するにあたって、団地の建物の屋上に太陽熱温水器を設置、至近距離にある各世帯に温水を供給するのは理に適っていると言えよう。

ニュータウンにおいて、電気、ガス、温水等消費するエネルギーを団地の敷地内において自給自足する仕組みが出来れば、とりもなおさず、脱炭素の実現である。2050年カーボンニュートラルの観点からすれば、国全体でのCO₂排出量は、産業部門と運輸部門の両方で約50%を占め、家庭部門からのそれは15%程度であるので[12]、全国のニュータウンでエネルギー地産地消が実現されても、日本の2050年カーボンニュートラルへの貢献は微々たるものであろう。しかし、限られた地域であってもその実現は、海外の化石資源エネルギーへの依存からの脱却であり、化石資源枯渇の時代における太陽光とバイオマスエネルギーの基軸とする社会の姿の体現でもある。人々が、エネルギーを大量に使うその一方で、大気中へのCO₂蓄積を続け、気候変動を加速させている今の生活、社会活動をニュータウンでのエネルギーの地産地消をきっかけに、見直し、変革する動きにつながればと願う次第である。

謝辞

この稿を執筆するきっかけとなる資料を提供くださった元国会議員吉井英勝氏、国立国会図書館の小山瑞樹氏、山口聡氏にそれぞれ厚くお礼申し上げます。

引用文献

- [1] <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/biojapan-4.pdf> バイオマス・ニッポン総合戦略 平成18年3月31日閣議決定
- [2] <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b-sangyo-toshi/attach/pdf/b-sangyo-toshi-13.pdf> バイオマスタウン構想策定マニュアル
- [3] 村田武・渡邊信夫、「脱原発・再生可能エネルギーとふるさと再生」第3章 宮津市の「バイオマスタウン構想」—自立循環型経済社会をめざした日本三景「天橋立」のある街宮津市の挑戦、筑波書房、p.43-61.
- [4] https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_sangyo_toshi/attach/pdf/b_sangyo_toshi-20.pdf バイオマス産業都市について 令和6年2月 農林水産省
- [5] https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/088_11_00.pdf 「メタン発酵バイオガス発電に関わる情勢」2023年10月27日 第88回調達価格等算定委員会 資料11 一般社団法人日本有機資源協会
- [6] https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2022/02/15/2022du_yoshizawa.pdf 「ドイツのバイオガス産業と事業機会—輸送部門でのバイオメタン・バイオLNG利用が拡大へ—MITSUI & CO. GLOBAL STRATEGIC STUDIES INSTITUTE 2022/02 p.1-6
- [7] 改訂新太陽エネルギー利用ハンドブック

- ク 一般社団法人 日本太陽エネルギー学会編 2015年 第9章 生物環境と太陽エネルギー利用 p.291-297
- [8] <https://maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-18.pdf> 「メタン発酵バイオ液肥利用の取り組み事例紹介」農林水産省 環境バイオマス政策課
- [9] <https://www.amita-oshiete.jp/column/entry/015091.php> バイオエネルギー村 | 地域エネルギーの地産地消を目指すドイツでの事例
- [10] 惣田 昱夫 世界初のバイオマス村 ドイツ・ユンデを訪ねて ―コストから見たバイオマス発電― ブイツーソリューション 2007年
- [11] IZNE Institut für Bioenergiedörfer Göttingen e.V. Projektgruppe Bioenergiedorfer (バイオエネルギー村 研究所ゲッティンゲン) Das Bioenergiedorf-Voraussetzungen und Folgen einer eigenständigen Wärme- und Stromversorgung durch Biomass für Lanwirtschaft, Ökologie und Lebenskultur im landlichen Raum (バイオエネルギー村 - 農村地域の農業、エコロジー、ライフスタイル ―バイオマスを通じ熱と電力の自給自足体制構築のための要件と効果―)
- [12] <https://www.ene100.jp/zemen/2-1-11> 原子力・エネルギー図面集 部門別 CO₂ 排出量の推移 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
- [13] <https://ja.weatherspark.com/y/64456/> ゲッティンゲン、ニーダーザクセン州、ドイツにおける年間の平均的な気候
- [14] 飯塚泰雄、「2050年カーボンニュートラル実現に向けてのバイオマス貢献 Part I 日本のエネルギー消費を賄うのに必要な太陽電池接地面積」、触媒懇談会ニュース No.166 May 1 2024
- [15] <https://ja.weatherspark.com/y//64456/> ゲッティンゲン、ニーダーザクセン州、ドイツにおける年間の平均的な気候
- [16] https://www.jstage.jst.go.jp/article/eb1963/40/2/40_2_207/_article/ char/ja/ 石井征亜・山崎敬亮、「岐阜における昼光の分光光量子束の日及び年変化」、生物環境調節 40(2), 207-213, 2002
- [17] 飯塚泰雄、「2050年カーボンニュートラル実現に向けてのバイオマス貢献 Part II バイオマスの活用」触媒懇談会ニュース No.190 September 1 2024
- [18] M. K. Machan, “Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber”, 「バイオガスプラント運営者向けのエネルギー作物生産」VERLAG 2005
- [19] 梅津一孝、竹内良曜、岩波道生、「先進国におけるバイオガスプラントの利用実態に学ぶ：北海道における再生可能エネルギーの利用促進に関する共同調査報告書」、畜産の情報 68(2013)67-78.
- [20] 田畑保、「地域振興に活かす自然エネルギー」第3章 バイオマスのエネルギー利用による地域の農業、林業・木材産業の振興 筑波書房 p.130-136
- [21] 村田武・渡邊信夫 「脱原発・再生可能エネルギーとふるさと再生」第4章 ドイツに見る再生可能エネルギーと農業・農村 筑波書房 p.62-89

[22] 食料自給率 関東農政局
<https://www.maff.go.jp/kanto/kids/future/selfsupport.html>

[23] 保坂稔、「再生可能エネルギーを活用したドイツの地方創成とその理念ーバイオエネルギー村における「価値創造」」、第5章 日本への導入に向けて、新泉社 p.189-223

[24] 保坂稔、「ドイツバイオエネルギー村の特色に関する検討ー日本のバイオマスタウン構想との比較からー」、長崎大学総合環境研究 第21巻第1号 pp.22-30 2018年12月

[25] 武山絵美、ドイツにおけるエネルギー作物による減反農地利用制度とその農村計画的効果、農業土木学会論文集 Trans. Of JSIDRE 240(2005.12) p.125-1130

[26] [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/energy/01/#;~:text=\(令和3年度\)環境省 家庭部門のCO2排出実態統計調査](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/energy/01/#;~:text=(令和3年度)環境省 家庭部門のCO2排出実態統計調査)

[27] https://www.env.go.jp/press/press_01383.html 環境省 一般廃棄物の排出及び処理状況等（令和3年度）について

[28] 河野孝志、平尾知彦、益田光信、「有機系廃棄物再資源化実証プラントの運転報告（その2）、第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集、(2001)305-307.

[29] 大隅省二郎、坪田潤、津野洋、「生ごみ及び紙の高温メタン発酵残渣に対する超高温可溶化処理の定量的評価」、廃棄物資源循環学会論文誌、Vol.23, No. 5(2012)224-231.

[30] 白石誠、滝本英二、高取健治、小林宙、疇地勅和、「メタン発酵施設実証試験」、岡山県総合畜産センター研究報告、第17号、103-106.

[31] <https://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/ztmnen/1-2-12.jpg> 家庭部門用途別エネルギー消費量

付録

日本の耕作放棄地 42.3 万 ha にエネルギー作物を栽培、メタン発酵を介して発電する場合に産み出される電力量

1) 42.3 万 ha の土地に注がれる太陽エネルギー量

1-1. 3090 kWh/m²・年 大気圏上空

1-2. 3090 kWh/m²・年×0.7 地上到達

1-3. 年間日照率 晴れ 0.43(100%)
曇り 0.57(30%)を考慮した年間到達エネルギー量

$$3090 \times 0.7 \times (0.43 + 0.57 \times 0.30) = 1300 \frac{kWh}{m^2 \cdot 年}$$

1-4. 42.3 万 ha の耕作放棄地に1年間に注がれる太陽エネルギー量

$$1 \text{ ha} = 10^4 m^2$$

$$42.3 \times 10^4 \times 10^4 \times 1300 = 5.50 \times 10^{12} kWh$$

2) 42.3 万 ha の耕作放棄地にエネルギー作物を栽培、メタン発酵を介した発電により産み出される電力量

2-1. ユンデ村での実績値、及び牛糞に加え下水汚泥等も使えると仮定

$$5.50 \times 10^{12} \times \frac{0.097}{100} = 5.33 \times 10^9 kWh$$

3) 2022 年度における日本の一次エネルギー量（全消費エネルギー量、18314PJ）の中、電力量の占める割合(=47%)を電力に換算 1 kWh=3.6×10⁶J

$$18314 \times 10^{15} \times \frac{0.47}{3.6 \times 10^6}$$
$$= 2391 \times 10^9 kWh$$

- 4) 同上電力量と耕作放棄地でのエネルギー作物栽培→メタン発酵→発電での電力量との比

$$\frac{4.79 \times 10^9}{2391 \times 10^9} \times 100 = 0.22\%$$

e-mail: iizuka-fujino@nifty.com