

私たちの未来と再生可能エネルギー ～地域資源を活かすエネルギー循環～

酪農学園大学
農食環境学群 循環農学類
農業施設学研究室
准教授 石川 志保
shiho@rakuno.ac.jp



RAKUNO GAKUEN UNIVERSITY
酪農学園大学



自己紹介

北海道（札幌市）出身

<経歴>

博士（農学）（北海道大学）

2004年～2016年

帯広/札幌市内 民間コンサルタント 技師

（↑バイオマス関連の仕事）

2016年～2021年

北海道大学情報科学研究院 電力システム研究室 特任助教

（↑バイオガス発電等の再生可能エネルギー電源の研究）

2021年～2022年

北海道大学工学研究院 循環共生システム研究室 助教

（↑バイオマスのエネルギー化に関する研究）

2022年～現在に至る

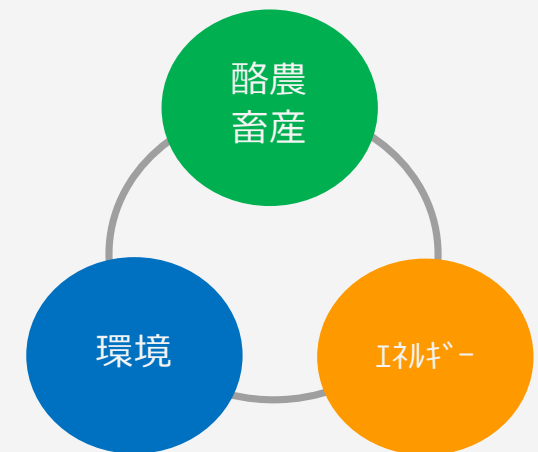
酪農学園大学 農業施設学研究室 准教授

（↑家畜，ヒト，地球に優しい新たな酪農システムを創造する）

2023年～現在に至る

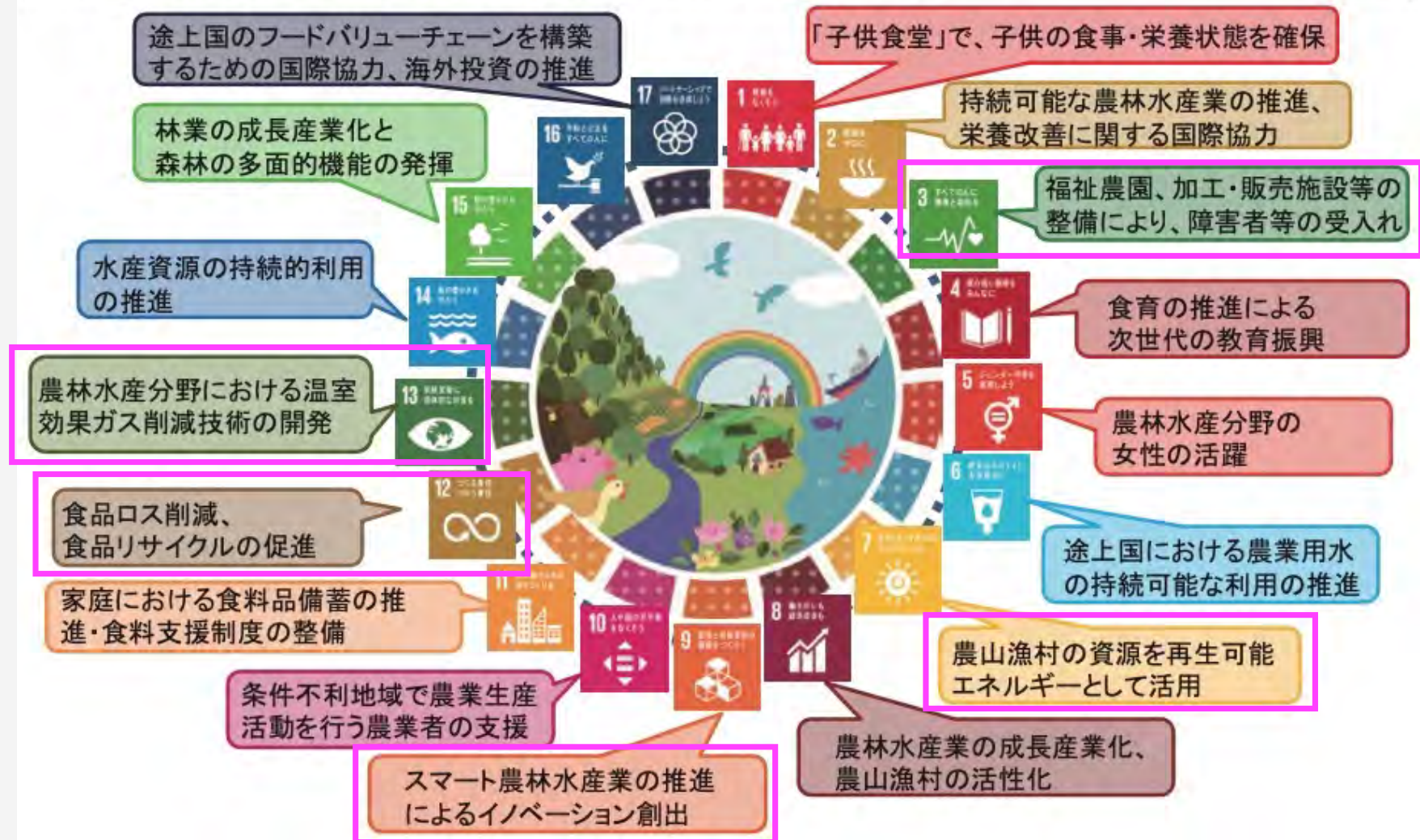
北海道大学工学研究院 循環共生システム研究室 クロスアポイントメント准教授

私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～



農林水産分野とSDGs17目標との関係

○ 農山漁村において、農地・森・海といった自然環境を基盤に、食料の生産を担っている農林水産業は、SDGs17目標に各分野と幅広く関わっています。



出典：農林水産省

バイオマスとは

1 定義

再生可能な生物由来の有機性資源で、化石資源を除いたもの

バイオマス・ニッポン総合戦略より引用

「<http://www.maff.go.jp/biomass/senryaku/senryaku.htm>」

2 種類 資源化の対象になる生物資源

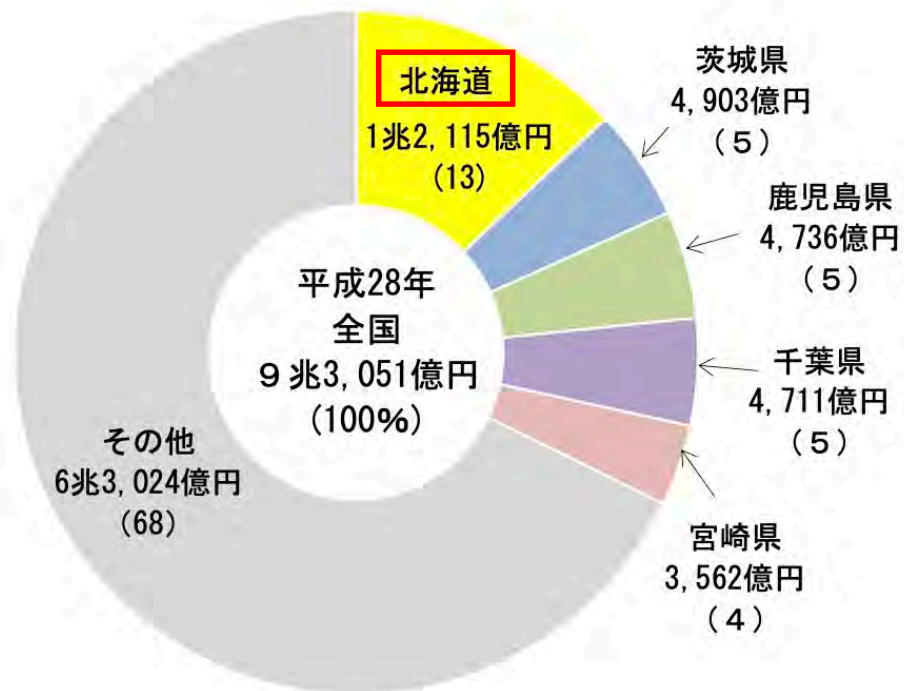
- ・ 農業系 ： 麦わら、米ぬか等
- ・ 林業系 ： パルプ黒液、オガクズ、間伐材等
- ・ 畜産系 ： 家畜ふん尿等
- ・ 水産系 ： 水産加工残渣
- ・ 廃棄物系： 生ごみ、下水汚泥

- ・ 廃棄物系
- ・ 未利用のもの
- ・ 資源作物

農業産出額から見る北海道酪農，畜産の情勢

ア 上位の都道府県別割合

全国に占める割合は13%

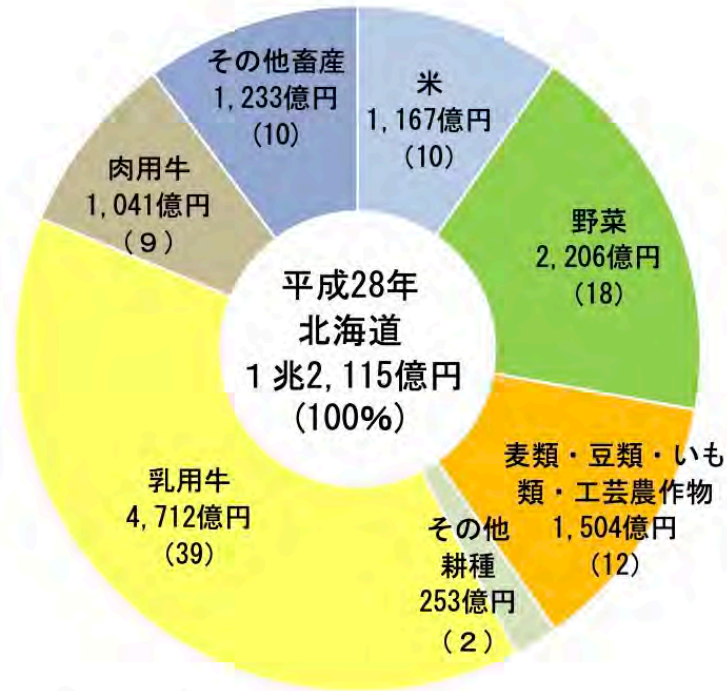


資料：農林水産省「生産農業所得統計」

注： 全国の9兆3,051億円は、全国における各地域のシェアに利用する都道府県計の値であり、全国を推計単位とした「農業総産出額（全国）」は9兆2,025億円である。

イ 北海道の部門別割合

畜産の割合が5割以上を占める



資料：農林水産省「生産農業所得統計」

注：1 その他耕種は、耕種計から米、野菜、麦類、豆類、いも類及び工芸農作物を差し引いて算出した。

その他畜産は、豚、鶏等であり、畜産計から乳用牛及び肉用牛を差し引いて算出した。

2 四捨五入のため計と内訳が一致しない。

出典：北海道農業の概要－グラフでみる北海道のすがた：農林水産省北海道農政事務所（平成30年8月）

道内の家畜ふん尿量の内訳（H19年）

R2年 乳用牛820,900頭

（単位：千 t /年）

畜 種	頭羽数	ふん尿
乳用牛	836,000	13,017
肉用牛	474,200	4,374
豚	552,900	1,277
鶏	10,894,000	477
馬	36,625	374
合 計	12,793,725	19,519

搾乳牛の飼養形態（北海道）

- ・ つなぎ飼いが全生乳出荷戸数の60%程度を占め、フリーストールが30%程度
- ・ 畜産クラスター事業等を活用し、フリーストールの整備、搾乳ロボットの導入等の**規模拡大が進展**

飼養形態	家族経営体			組織経営体		備 考
	放牧主体	繋ぎ飼い	フリーストール	うち搾乳ロボット	組織経営体	
	 (5月～10月)					
1戸(経営体)当たり 経産牛飼養頭数(※)	～約80頭/戸	～約80頭/戸 搾乳ユニット自動搬送装置や自動給餌機等により100頭程度まで可能	約100頭/戸～	約60～120頭/戸 一台で約60頭の搾乳可能 台数増により多頭飼育も可	約250頭/戸～	
1頭当たり平均乳量(※)	6,000～8,000kg/年	8,000kg/年	9,000～10,000kg/年	9,500～10,000kg/年	9,000kg～/年	・経営体間の差異が大きい ・道内平均:8,568kg/頭 (H30年度)
飼養形態割合	5～10%	60%程度	30%程度	5～6%	5～6%	生乳出荷戸数計5,311戸 (R2. 2. 1)
メリット	・牛が自ら採食するため、飼養管理、飼料生産の省力化	・飼料給与や繁殖確認等の個体管理が容易	・搾乳や給餌の労力が減少、牛のストレスも軽減	・搾乳作業の実働が極めて少なくなり、労働時間が短縮	・出役日や勤務時間の調整により、休日取得や労働時間の短縮が可能	
デメリット	・購入飼料費の削減などによる低コスト生産が可能	・1頭当たりの施設面積が小さくて済む	・発情行動がわかりやすくなる	・搾乳回数の増加(3回/日程度)により、乳量が増加	・設備投資額が大きくなる	
	・1頭当たりの乳量が他の飼養形態と比較して少なくなる可能性。	・人が動くことが必要であり、搾乳や給餌に労力がかかる	・設備投資額が大きくなる	・設備投資額が大きくなる	・設備投資額が極めて大	
	・搾乳施設の周辺に、まとまって整備された放牧地が必要		・繋ぎ飼いのような個体管理が困難(群管理)	・乳用牛をロボットに馴れさせることが必要	・経営主による労務管理能力の向上が必須	

私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

牛舎の種類



つなぎ飼い牛舎



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

つなぎ飼い牛舎

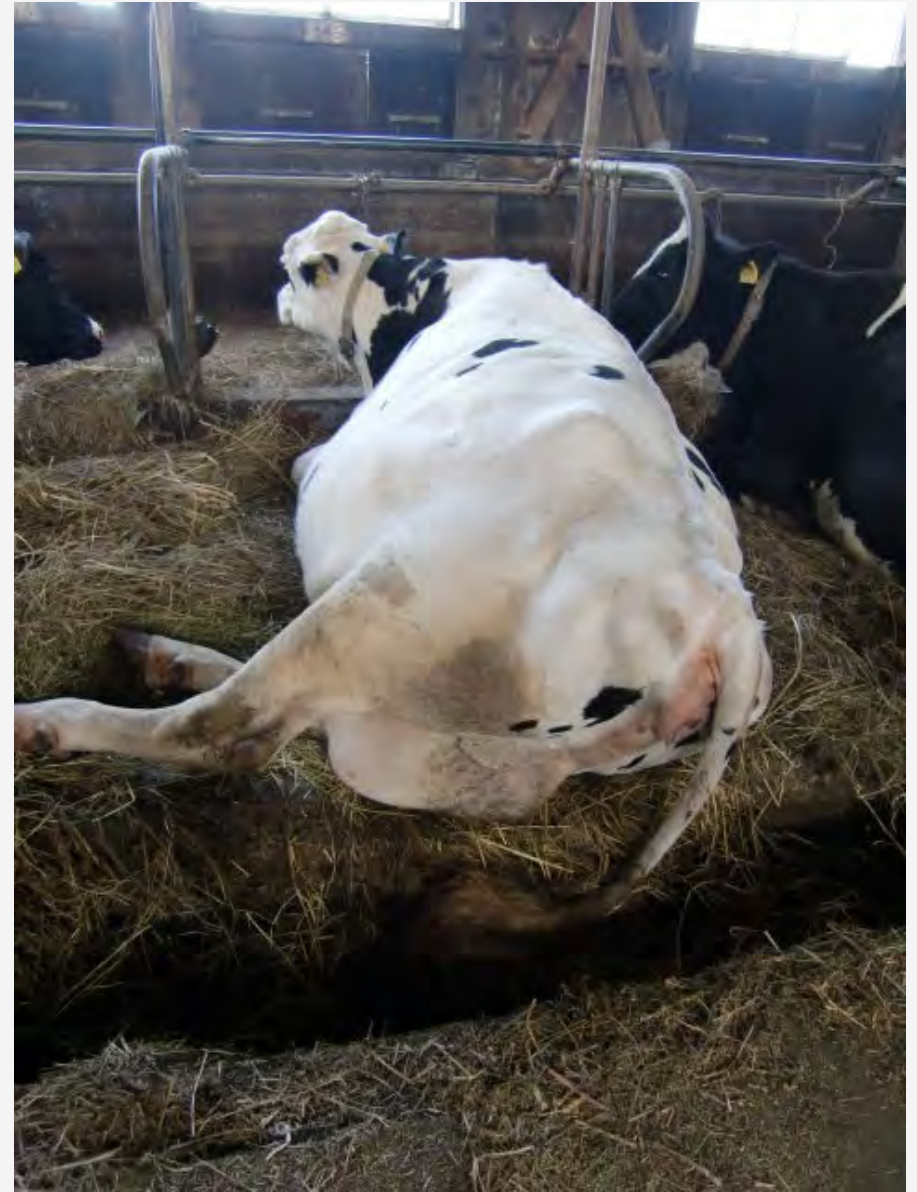


飼養頭数
：約80頭／戸*

出典：北海道農政部生産振興局畜産振興課（令和3年1月）

発生するバイオマス

- ・ 固形ふん
- ・ 尿，敷料の混合物



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

フリーストール牛舎



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

フリーストール牛舎



飼養頭数

：約100頭～／戸＊

出典：北海道農政部生産振興局畜産振興課（令和3年1月）

発生するバイオマス

・ふん，尿，敷料の混合物



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

開放／半開放型牛舎



発生するバイオマス

- ・ふん, 尿, 敷料, 砂土,
雨雪などの混合物



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

ふん尿の管理方式



固形ふんの
処理向き

バークリーナー



堆肥化処理施設



液肥化处理



乾燥処理装置



バイオガスプラント

液状ふんの
処理向き

酪農業と環境問題の現状



出典：畜産環境をめぐる情勢（令和3年3月）

私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

嫌気性発酵／バイオガスプラントとは

バイオマスを嫌気性発酵により分解し，悪臭発生の低減と，エネルギーとして利用可能なバイオガスを発生する装置

発酵後の液（消化液）は良質な肥料へ

発生ごみ：150m³/t
家畜ふん尿：30m³/t

バイオガス：5,100kcal/m³
(メタンガス：8,500kcal/m³)
プロパンガス：4,000kcal/m³
都市ガス：10,900kcal/m³

バイオマス



家畜ふん尿



生ごみ

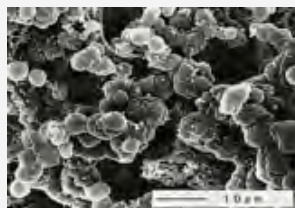


下水汚泥



嫌気性発酵

メタン菌によりバイオマスを分解，バイオガス（CH₄ 60%，CO₂ 40%）を発生させる。

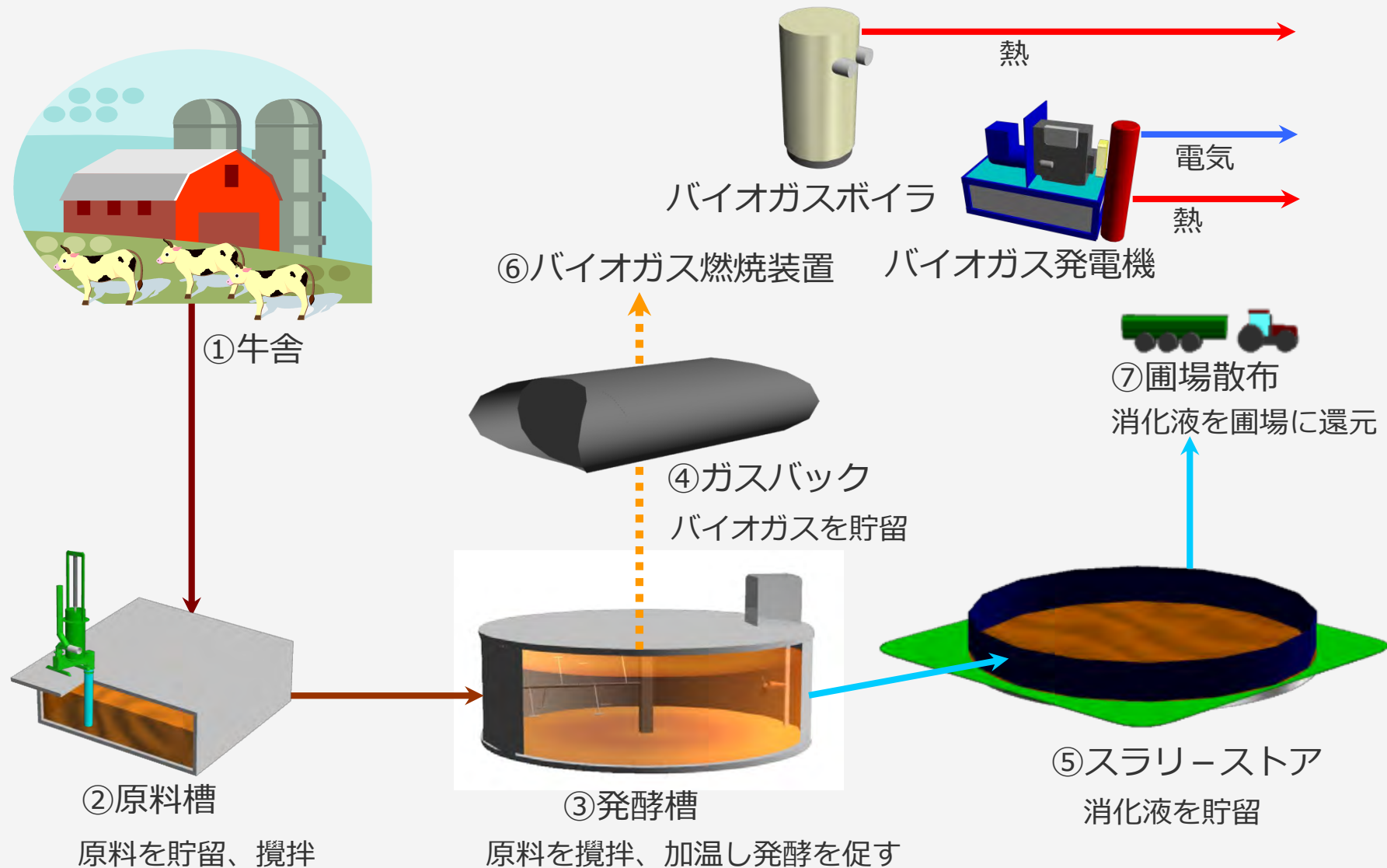


エネルギー化

発生したバイオガスを発電機やボイラーを使って電気や熱を作る。



バイオガスプラントのシステムフロー



バイオガスプラント導入・普及の背景

- バイオガス用の原料（家畜排せつ物，農産物残渣）が豊富
- エネルギー（バイオガス，電気，熱）生産可能
- 消化液の散布可能な農地が十分にある
- 悪臭対策→環境問題の解決にも寄与

 **140基以上導入**（R3年度まで）

バイオガス発電の位置付け

再生可能エネルギー法

2011年8月26日

「電気事業者による再生可能エネルギー電気の
調達に関する特別措置法」

固定価格買取制度

2012年7月1日

固定価格買取制度の仕組み



出典：経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック2019年度版

再生可能エネルギー調達価格・調達期間

電源 【調達期間】	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	価格目標
太陽光発電 (10kW以上) 【20年】	40円	36円	32円	29円※1 27円※1 ※1 7/1～(利権配当期間終了後)	24円	21円 (10kW以上 2,000kW未満)	18円 (10kW以上 2,000kW未満)	14円 (10kW以上 500kW未満)	12円 (50kW以上 250kW未満) 13円※2 (10kW以上 50kW未満)		7円 (2025年)
太陽光発電 (10kW未満) 【10年】	42円	38円	37円	33円	31円	28円	26円※3 28円※3 ※3 10/1～(利権配当期間終了後)	24円※3 26円※3	21円		卸電力 市場価格 (2025年)
風力 【20年】※4		22円(20kW以上)					20円	19円	18円		8～9円 (2030年)
					36円(洋上風力(着床式・浮体式))		36円(着床式)	36円(浮体式)	入札制 (着床式)		
バイオマス 【20年】 ※4 ※6 ※7		24円(バイオマス液体燃料)				24円 (20,000kW以上)	21円 (20,000kW以上)	入札制	入札制		
		24円(一般木材等)				24円 (20,000kW以上)	21円 (20,000kW以上)	入札制 (10,000kW以上)	入札制 (10,000kW以上)		
						24円 (20,000kW未満)		24円 (10,000kW未満)	24円 (10,000kW未満)		
		32円(未利用材)					32円(2,000kW以上)				
							40円(2,000kW未満)				
							その他(13円(建設費付燃費費)、17円(一般事業費その他(バイオ)、39円(20,000kW以上(40,000kW未満)※5))				
地熱 【15年】※4					26円(15,000kW以上)						
					40円(15,000kW未満)						
水力 【20年】※4		24円(1,000kW以上30,000kW未満)				24円		20円(5,000kW以上30,000kW未満)			
								27円(1,000kW以上5,000kW未満)			
					29円(200kW以上1,000kW未満)						
					34円(200kW未満)						

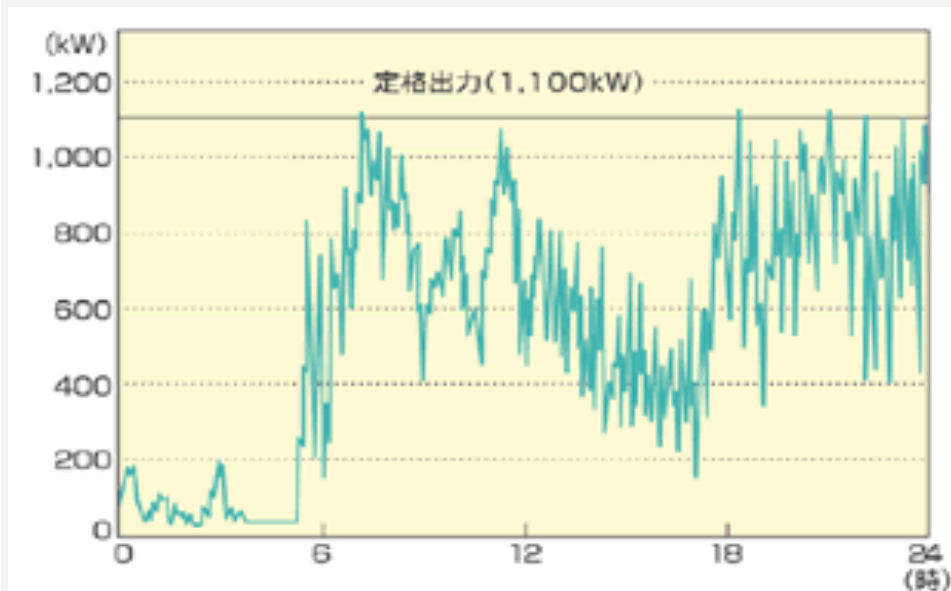
メタン発酵
35円/kWh
(2023年度～)

FIT制度
からの
中長期的な
自立化を
目指す

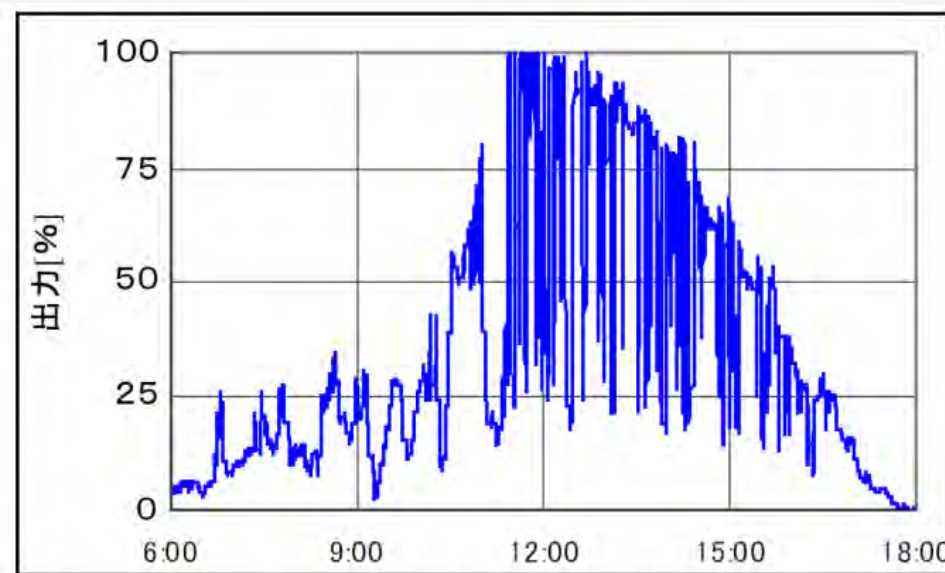
酪農家買電価格：25～28円？/kWh

発電出力の特性

太陽光・風力発電は気象条件によって出力が大きく変動



風力発電出力変動の例（日）



太陽光発電出力変動の例（日）

では、バイオガス発電の特性は？

バイオガス発電の出力特性

■ バイオガスを燃料に電気と熱の生産が可能



■ 発電出力が安定

■ 火力発電所と同様の安定した連続発電が可能

■ ガスホルダを併設することにより発電調整可能

■ 発電規模 (kW) は小さく、発電効率は30%程度



■ 燃費は供給されるメタンガスの濃度により変動

■ 酪農地帯ではガスインフラが整っていないためバイオガスの直接利用は困難 (非現実的)

■ 原料となるバイオマスは有限

バイオガス発電の価値 (優位性)

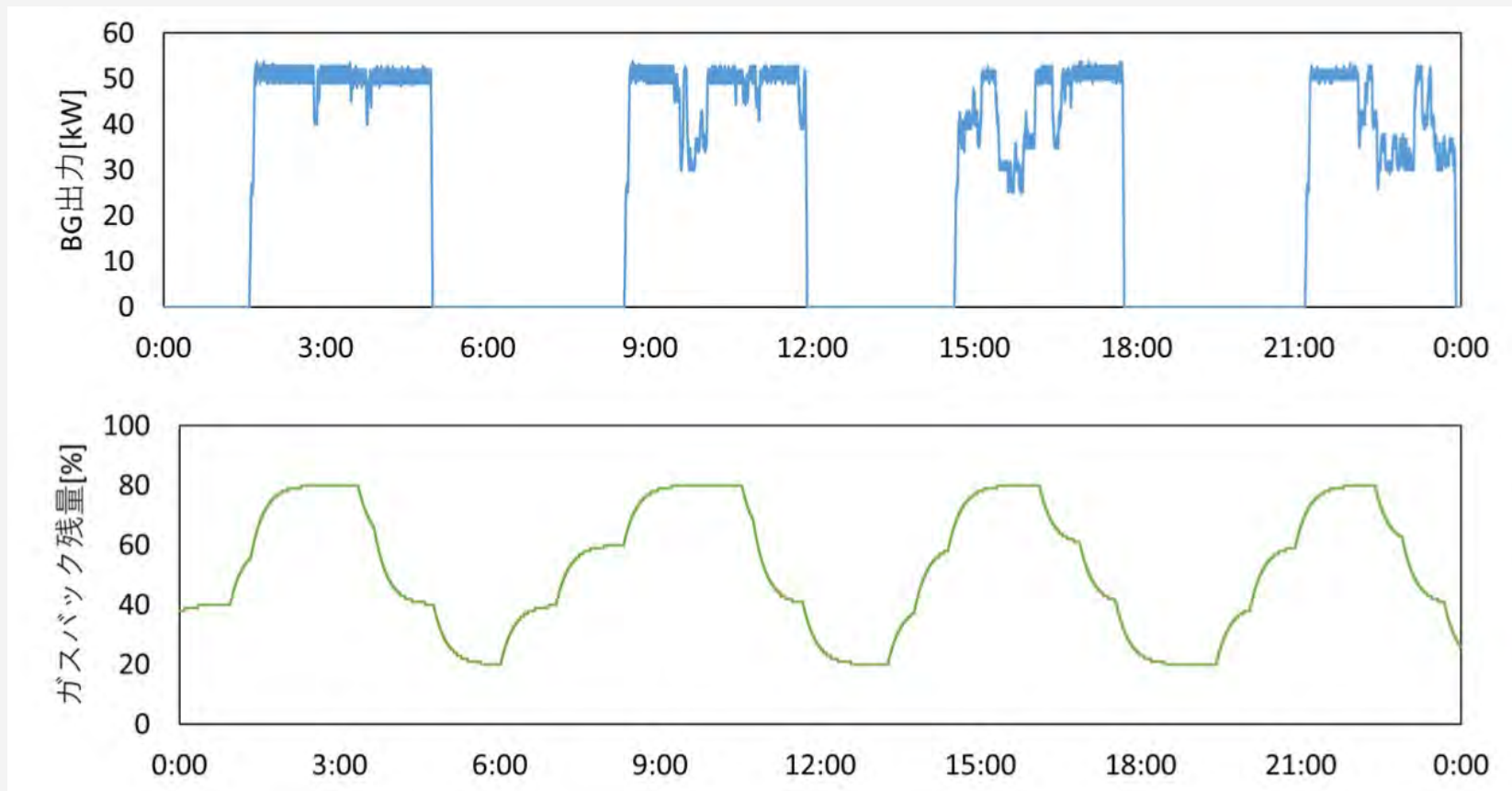
サステナブル, 低環境負荷はもちろん…

- ・ 可制御電源
- ・ バイオガスCHPは一定規模の熱供給も可能
- ・ 廃棄物系バイオマス有効活用

Shiho Ishikawa, Nicholas O. Connell, Raphael Lechner, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita and Markus Brautsch: "Load response of biogas CHP systems in a power grid", RENEWABLE ENERGY, Vol. 170, pp.12 - 26 (2021)

私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

FIT制度でのバイオガス発電機の運転例



- ・バイオガス発電機は高出力帯ほど発電効率が良いため、できるだけ定格出力をとる。
- ・ガスバック内のガス量が30%を下回った場合は、ガス切れの可能性があるため、ガス量が70%以上となるまでバイオガス発電機を停止する

これからのバイオガス発電機の運転条件



30分毎の変動データ

月毎の固定価格

$$(\text{売電収入}) = (\text{市場価格}) + (\text{プレミアム価格}) - (\text{balancing cost})$$

プレミアム価格

FIT価格 = 35円

$$(\text{プレミアム単価}) = (\text{基準価格}) - (\text{参照価格})$$

- ・ JEPX (日本卸電力取引所) のFIP参照価格より算出 (北海道の価格を使用)
- ・ プレミアム単価は調整しない

今回は運用方法に注目するため、数値の厳密性には注意しない

私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

バイオガス発電機の効率的活用に向けて

ケース1：（連続した「安い」時間数）＜（ガスバッグが満杯になる時間数）

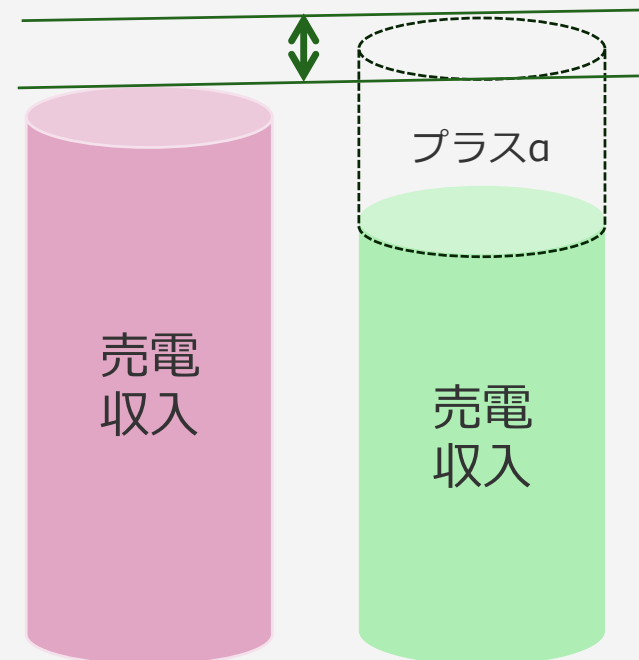
この場合は「安い」時間帯は貯めておけばよい。

ケース2：（連続した「安い」時間数）＞（ガスバッグが満杯になる時間数）

この場合が重要で、次の2パターン

- (a) 「安い」時間に売るくらいなら、水素製造など他用途での利用を検討
- (b) 売電金額の予測モデルを作成し、最も高額に売却できる手法を開発

売電以外への「価値のある」バイオガス転用を創出することでバイオガスプラントの効率の良い運用につながる。



バイオガスプラント導入・普及の背景

- バイオガス用の原料（家畜排せつ物，農産物残渣）が豊富
- エネルギー（バイオガス，電気，熱）生産可能
- 消化液の散布可能な農地が十分にある
- 悪臭対策→環境問題の解決にも寄与

 **140基以上導入**（R3年度まで）

消化液の利用（鹿追町の事例）

バイオガスプラントに参画する11戸（1,320頭分）の酪農家は消化液を買い戻して農地に散布

バイオガスプラント周辺の耕種農家19戸でも利用

散布代 = 500円/t

肥料代（3年目から） = 酪農家（50円/t）

耕種農家（100円/t）

	飼 料 作 物		耕 種 作 物		合 計	
	面積 (ha)	散布量 (t)	面積 (ha)	散布量 (t)	面積 (ha)	散布量 (t)
2007	254.8	9,308	22.7	939	277.5	10,247
2008	350.5	10,108	210.2	8,277	560.7	18,440
2009	317.7	9,030	325.2	13,050	642.9	22,080
2010	404.6	14,339	374.9	15,282	779.5	29,620

消化液の散布方法



インジェクション方式
(土中散布)
ふん尿の悪臭低減

特に北海道の堆肥貯留施設では…



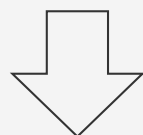
春先に満杯になって溢れている事例が散見される



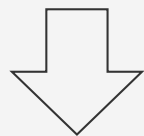
冬期間（6ヶ月）の貯留容量
が不足している原因

含水率が85%を超えており、
積み上がらず流れてしまう

補助事業では堆積高 2 ～ 3 m で計画される。

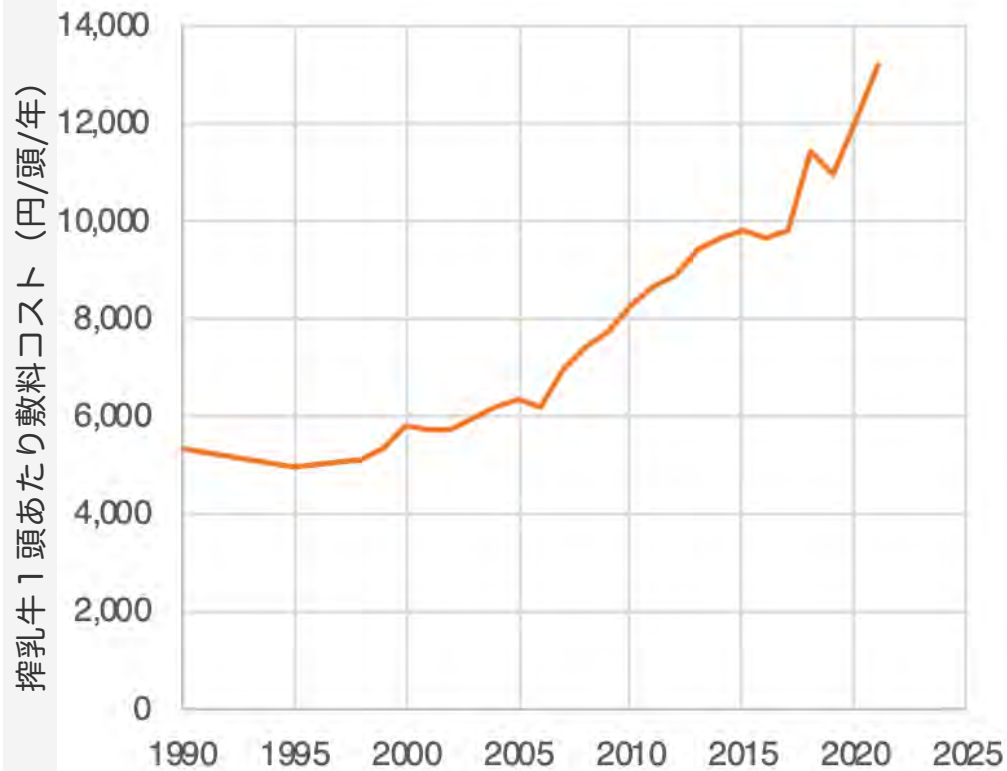


実際には 2 m の高さで積み上げることは困難であるため、冬期間の容量が不足してしまう。



水分調整が必要

おが粉敷料の不足、価格高騰



敷料コストの推移

搾乳牛1頭あたり敷料コスト (円/頭/年)



飼養頭数別の敷料コスト

- 地域によっては4,000~5,000円/m³
- 大規模化, フリーストール化による敷料需要増
- FIT売電による木質バイオマス需要増

敷料の生産・利用



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

ソーラーシェアリング実証実験の取組み

カーボンニュートラル宣言

2024年度の8つの重点活動目標のひとつに、
「カーボンニュートラル」と「自然共生」を掲げる。



学校法人酪農学園
理事長 高島英也



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

垂直式太陽光発電パネルの概要



- ✓ 太陽光パネル128枚
- ✓ 年間発電量：初年度約85,000kWh（想定）
- ✓ 地表からモジュールまでの高さを江別地区の垂直積雪量に対応し1.4m に設定
- ✓ 各列の間隔を 8m から 10m にして 4 列設置



おわりに

■ 食料・農業・農村をめぐる課題

高齢化

軽労化

安全・安心

労働力不足

多収・高品質

■ 環境問題

地球温暖化防止, 地下水汚染, 生物多様性の確保 等

■ エネルギー問題

化石燃料（特に石油）枯渇・安定供給

システム工学的視点

モデリング

シミュレーション

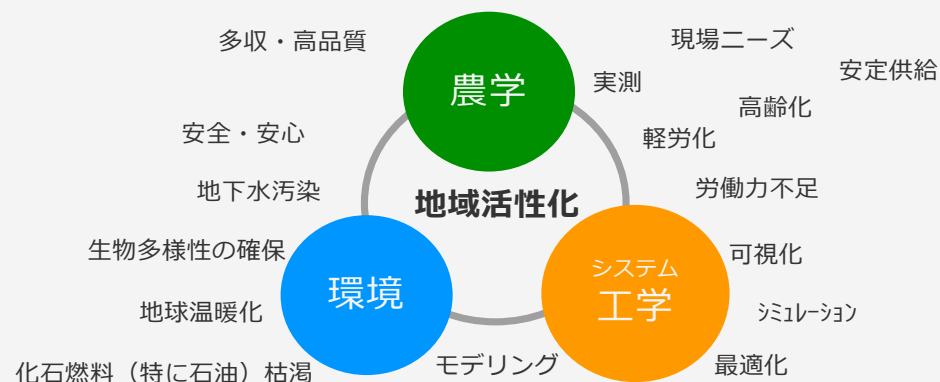
最適化

可視化

持続可能な社会の構築に貢献する研究を見据え、

先端技術×農業×環境

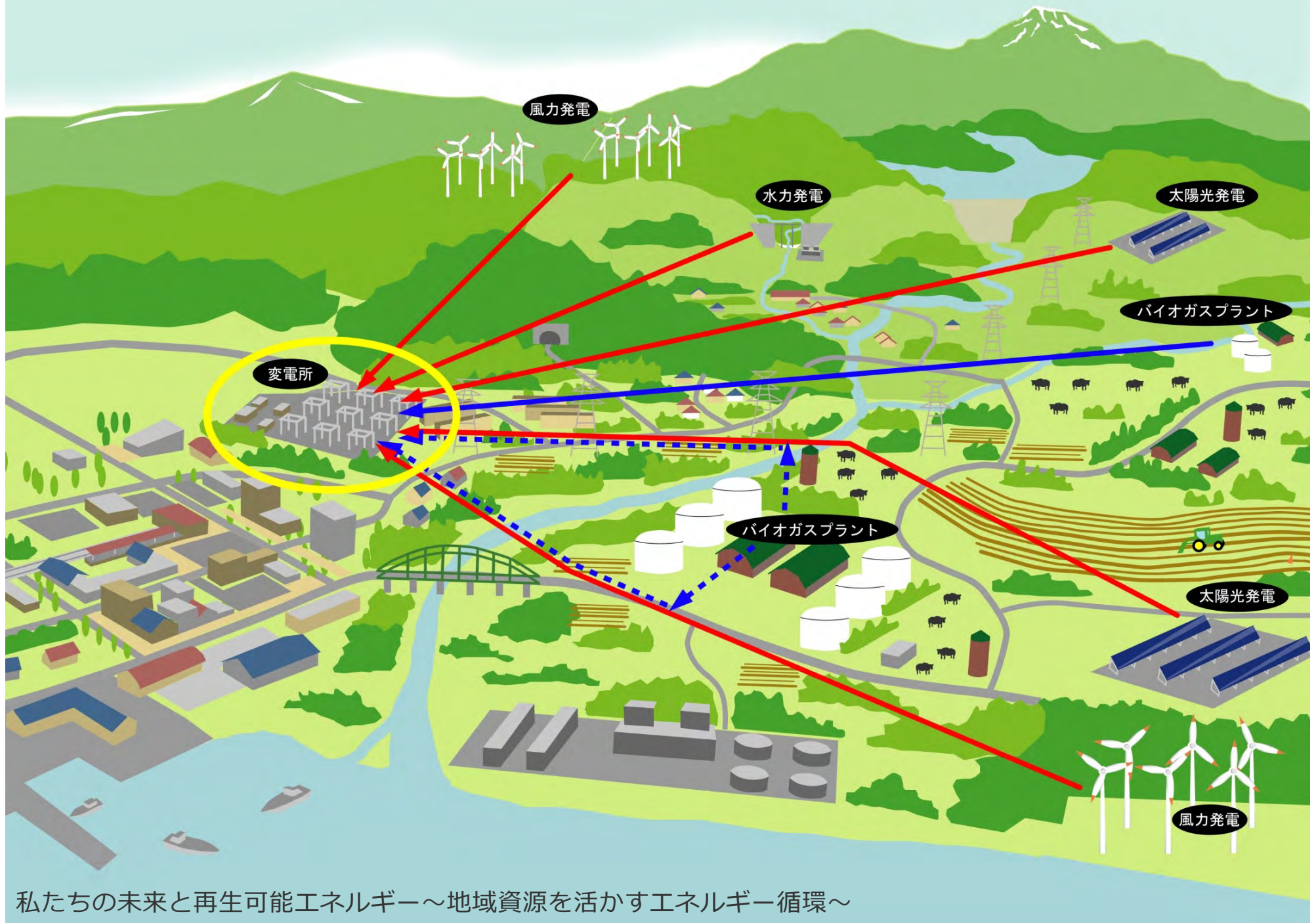
農村地域が、物質循環や地域・地球環境との調和を図りつつ、
主体的に自立することに貢献する研究



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～



農村におけるBIOスマートグリッド構想



私たちの未来と再生可能エネルギー～地域資源を活かすエネルギー循環～

2024/12/11

令和6年度 第2回せたな町ゼロカーボン推進協議会



ご清聴ありがとうございました