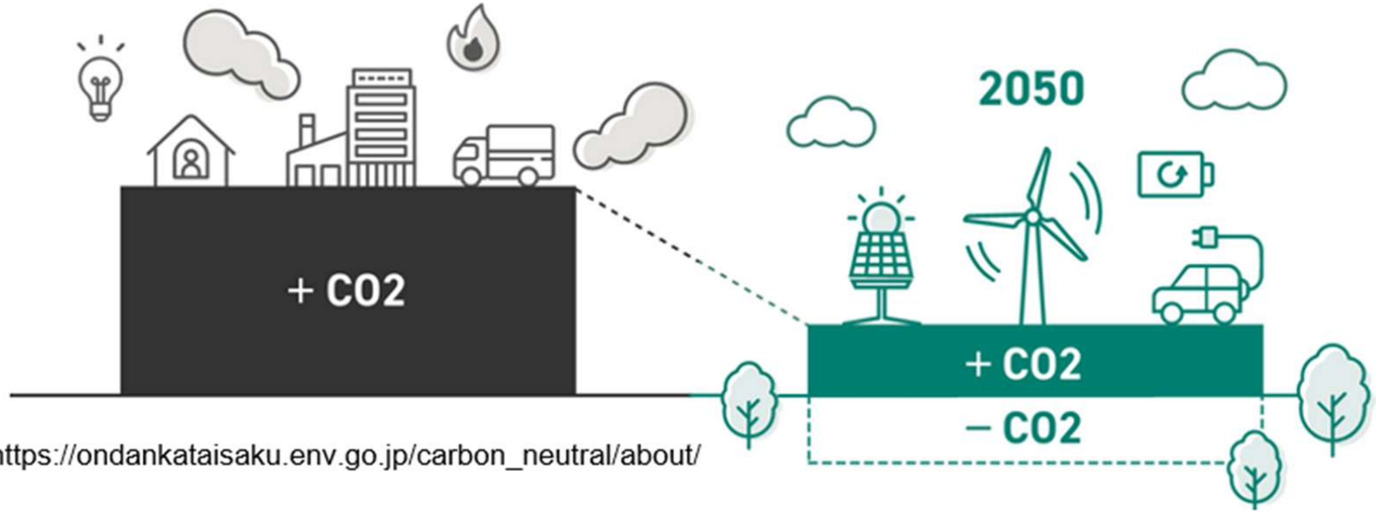
National Institute for Environmental Studies, Japan

脱炭素化を基調とした資源循環システム

国立研究開発法人国立環境研究所　資源循環領域
倉持秀敏



https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/

本日の内容

- 背景（未来志向プロとカーボンニュートラル）
- 資源循環分野における脱炭素化への戦略
- 福島（浜通り）の復興へ向けた研究の取り組み

背景（福島再生・未来志向プロジェクト）

2012.1
放射性物質汚染対処特別措置法に基づき、土壌等の除染等の措置や、汚染廃棄物の処理などを開始

2015.3
中間貯蔵施設への土壌等のパイロット輸送を開始

2017.7
福島地方環境事務所が開所

2017.11
特定廃棄物埋立処分場へ、福島県内の特定廃棄物の搬入を開始

2017.12
帰還困難区域内の特定復興再生拠点区域で、解体・除染工事に着手

2018. 3
帰還困難区域を除き、全ての市町村で面的除染が完了

2019. 4
「ふくしまグリーン復興構想」策定
環境省と福島県が共同で、「まもり、みがき、未来へつなぐ。至福のふくしま」をコンセプトに、自然環境の保全と調和を図りながら適正な利用を促進し、交流人口の拡大を図り、福島県全体の復興に寄与することを目指す

環境再生の取組

津波による災害廃棄物の処理

除染による線量低減

指定廃棄物の処理

被災家屋等の解体

2018. 8
「福島再生・未来志向プロジェクト」のスタート
福島県内の地元のニーズに応え、除染や汚染廃棄物対策といった環境再生の取組だけでなく、脱炭素、資源循環、自然共生といった環境省の得意分野においても、福島復興の新たなステージに向けた取組を地元と連携しながら全省的に推進

2020. 8
「福島の復興に向けた未来志向の環境施策推進に関する連携協力協定」の締結
福島県と環境省とで「福島の復興に向けた未来志向の環境施策推進に関する連携協力協定～環境から挑む福島の復興、そして希望ある未来へ～」を締結

４つの柱
- 産業創生への支援
- **脱炭素まちづくり**への支援
- ふくしまグリーン復興への支援
- 地域活性化への支援

⇩

脱炭素化を基調とした資源循環システム

⇩

地域循環共生圏
（地域SDGs）
ゼロカーボンシティ

2050年　カーボンニュートラル（CN）

2020年10月、菅前首相が「2050年カーボンニュートラルの実現を目指す」を宣言し、今後、二酸化炭素（CO_2）の排出を制御する必要がある。

カーボンニュートラル（CN）とは、

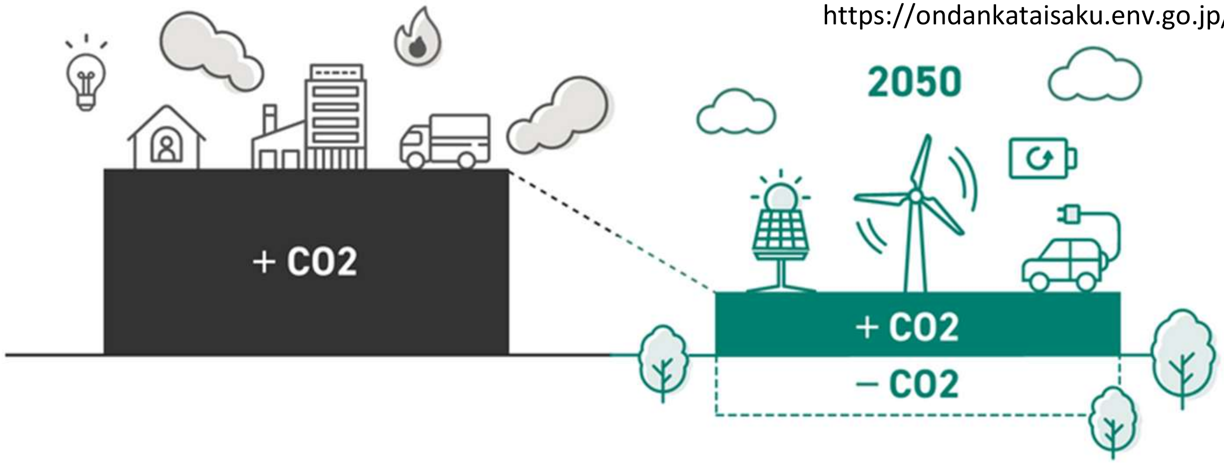
「排出を全体としてゼロ」というのは、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの「排出量」※から、植林、森林管理などによる「吸収量」※を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味しています。

※人為的なもの

カーボンニュートラルの達成のためには、温室効果ガスの排出量の削減・吸収作用の保全及び強化をする必要があります。

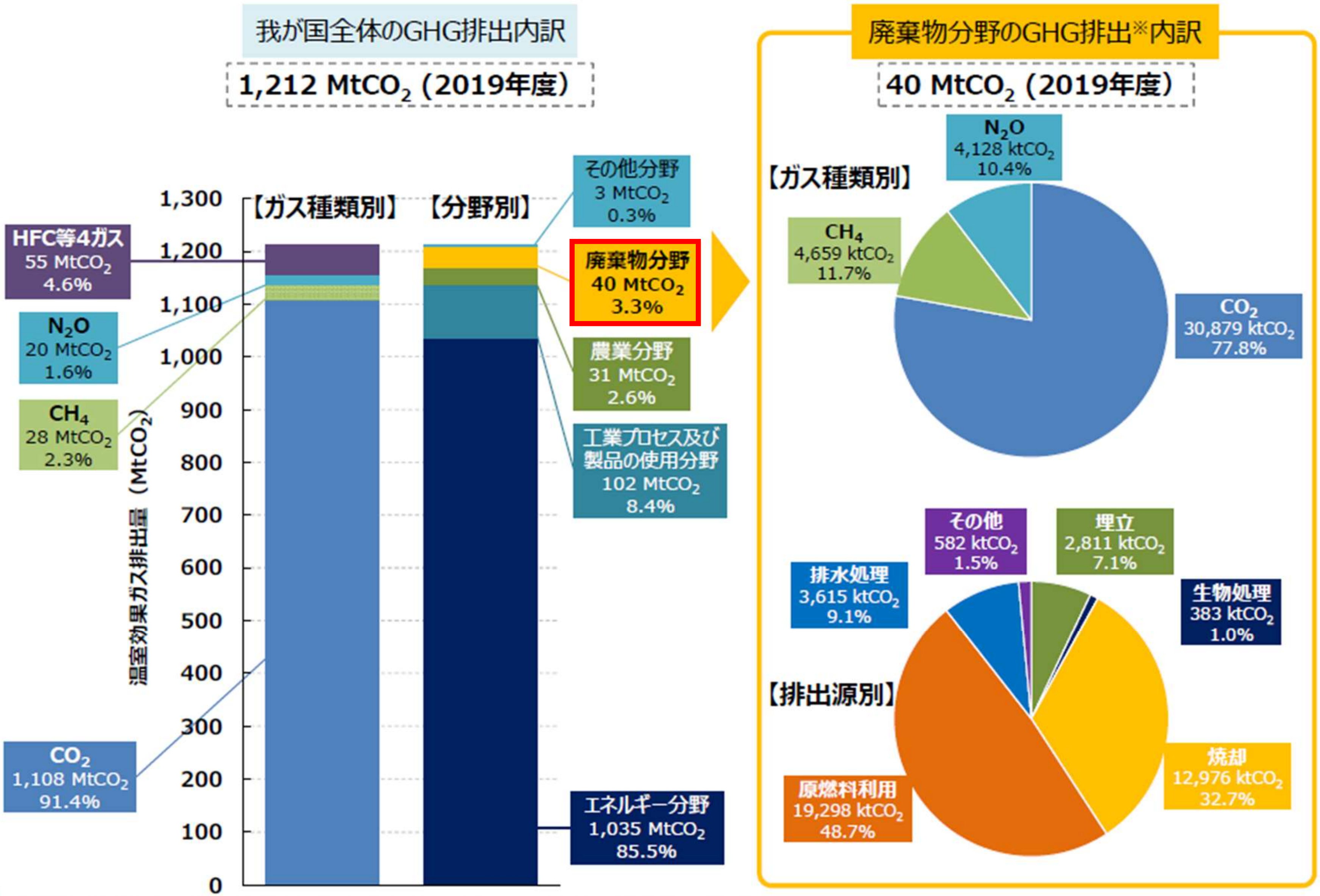
2030年度に、温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す

https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/



2021年8月　廃棄物・資源循環分野における温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)

我が国全体及び廃棄物分野のGHG排出量（2019年度）



※「2019 年度（令和元年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について」（環境省）におけるGHG排出分野の定義に基づき集計しており、後述する「廃棄物・資源循環分野のGHG排出」とは集計対象が異なる。
出典：（国研）国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス、日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2019年度）確報値をもとに作図

http://www.env.go.jp/council/03recycle/y030-38b/mat01_1.pdf

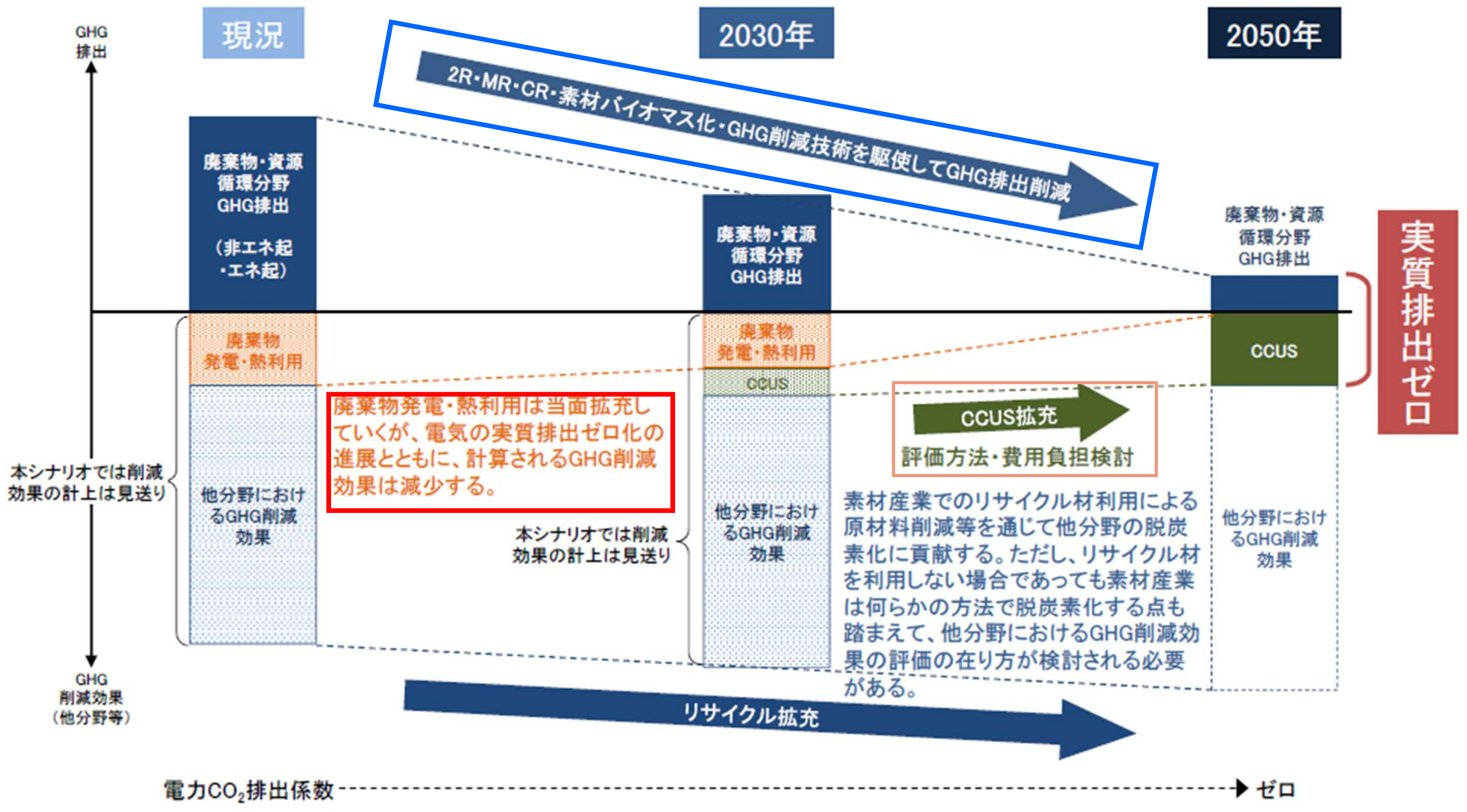
中長期シナリオ(案)の資源循環システムの脱炭素化

【資源循環・適正処理システムの脱炭素化】

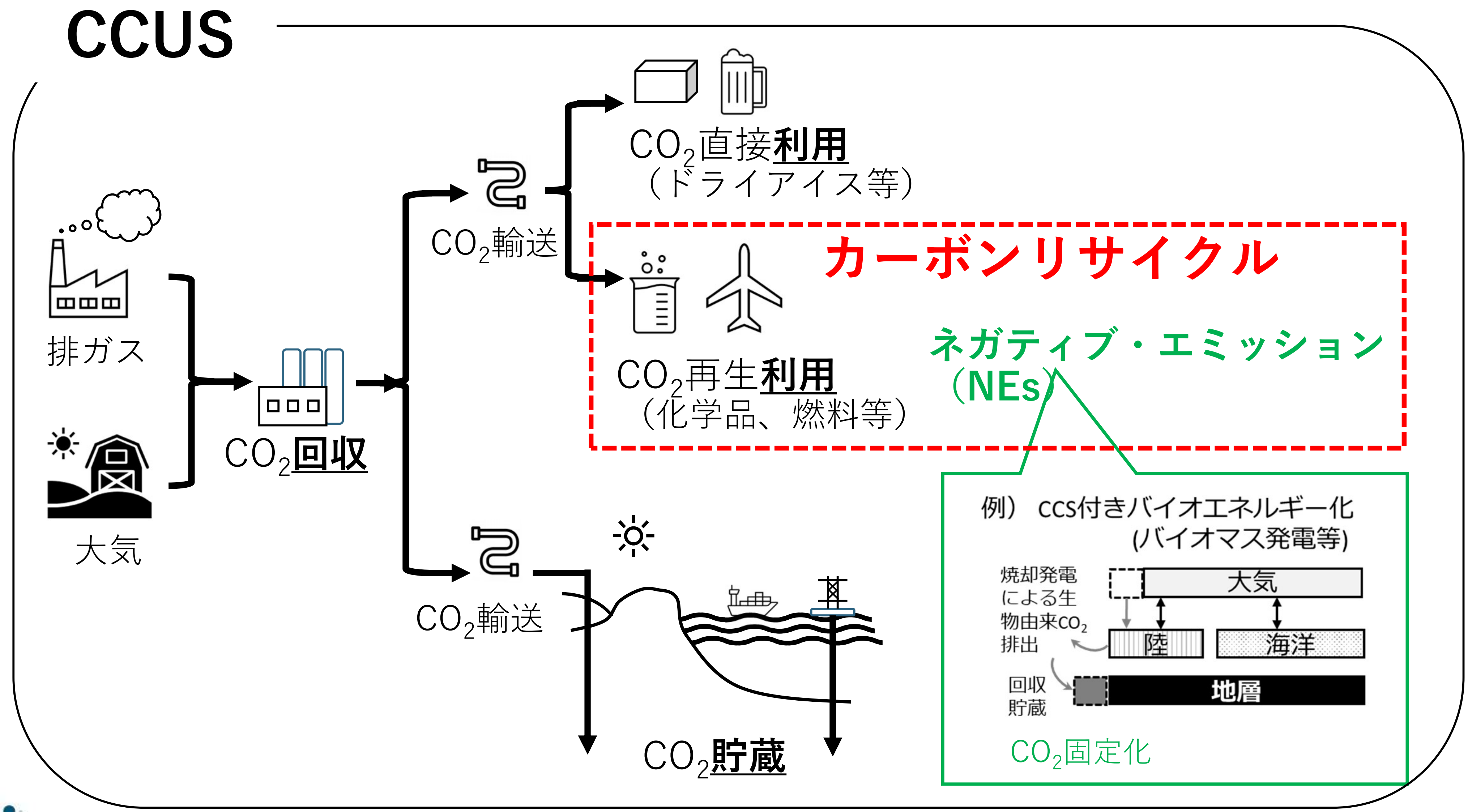
- 廃棄物・資源循環分野では、化石系廃棄物等の焼却・原燃料利用やバイオマス系廃棄物の埋立等に伴い、廃棄物由来のGHGが排出されている。この非エネルギー起源GHGを削減するためには、3Rの強化・GHG排出量が少ない処理の選択に加え、製品原材料のバイオマス化を含む素材転換が必要。
- 廃棄物の処理に伴い排出されるエネルギー起源CO_2については、廃棄物エネルギーの活用、処理に要するエネルギーの消費量の削減及び再生可能エネルギーの導入等の取組が必要。同時に、原材料化に適さない廃棄物は、バイオマス比率の増大も前提に、効率の高い燃料化や熱回収により、他分野のエネルギー起源CO_2排出量の削減に貢献できる。
- ただし、衛生面から最小限の焼却処理は求められることなどから、以上の取組を経てもなお廃棄物分野からのGHG排出はゼロにならないこと(本分野の残余排出)が想定される。
- 一方、焼却排ガス等に含まれるCO_2はバイオマス起源も含まれることも踏まえれば、CCUSの導入により、本分野からの排出を実質ゼロ化、さらにはネガティブ化できる可能性が期待されるとともに、CN化した将来における炭素供給源としての役割を担うことも考えられる。
- 社会を支えるインフラの一つである廃棄物処理施設の整備では、構想から竣工までに10年程度、その後30年以上運転される場合もあることなどを踏まえ、2050年CNに向けて、速やかに将来の方向性を提示・共有していく必要がある。

http://www.env.go.jp/council/03recycle/y030-38b/mat01_1.pdf

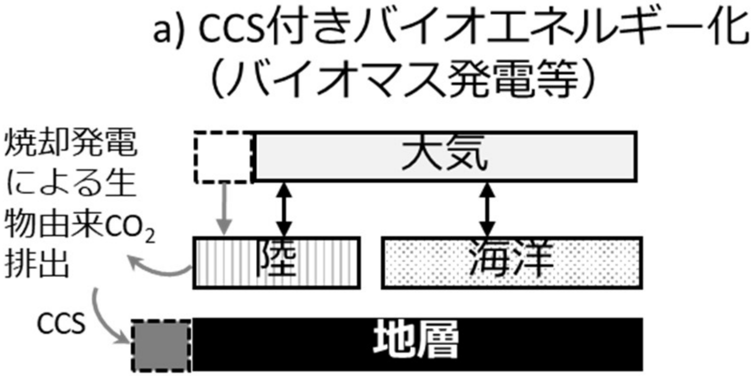
廃棄物・資源循環分野の計画

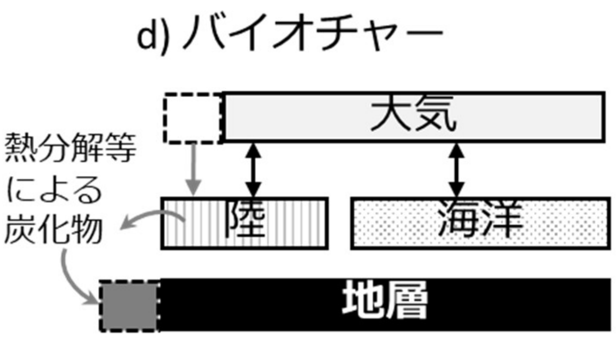


CCUS（二酸化炭素回収利用貯蔵）とは

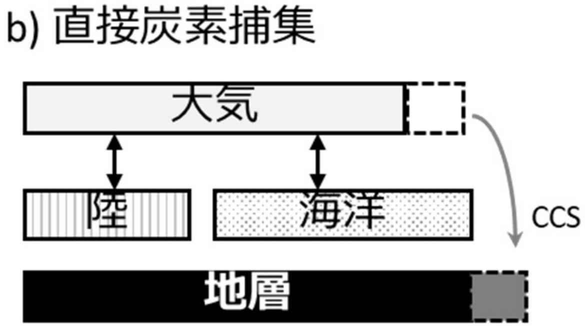


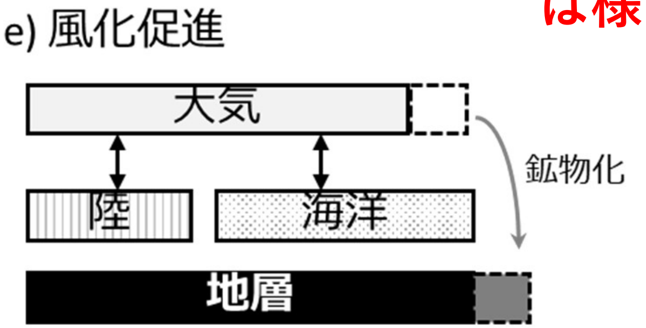
参考資料　ネガティブ・エミッション（NEs）

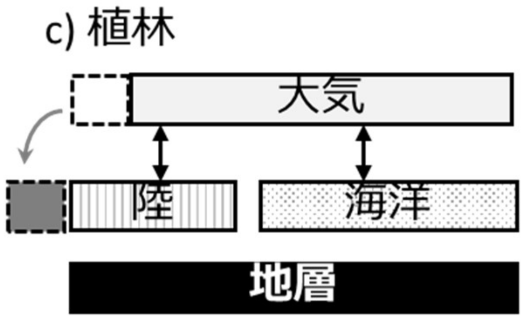


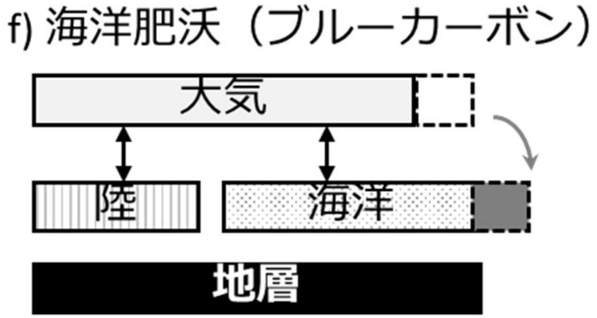


◎技術によって、必要とされるエネルギー（横軸）、土地（色）、投資コスト（円の大きさ）、水（青色）は様々







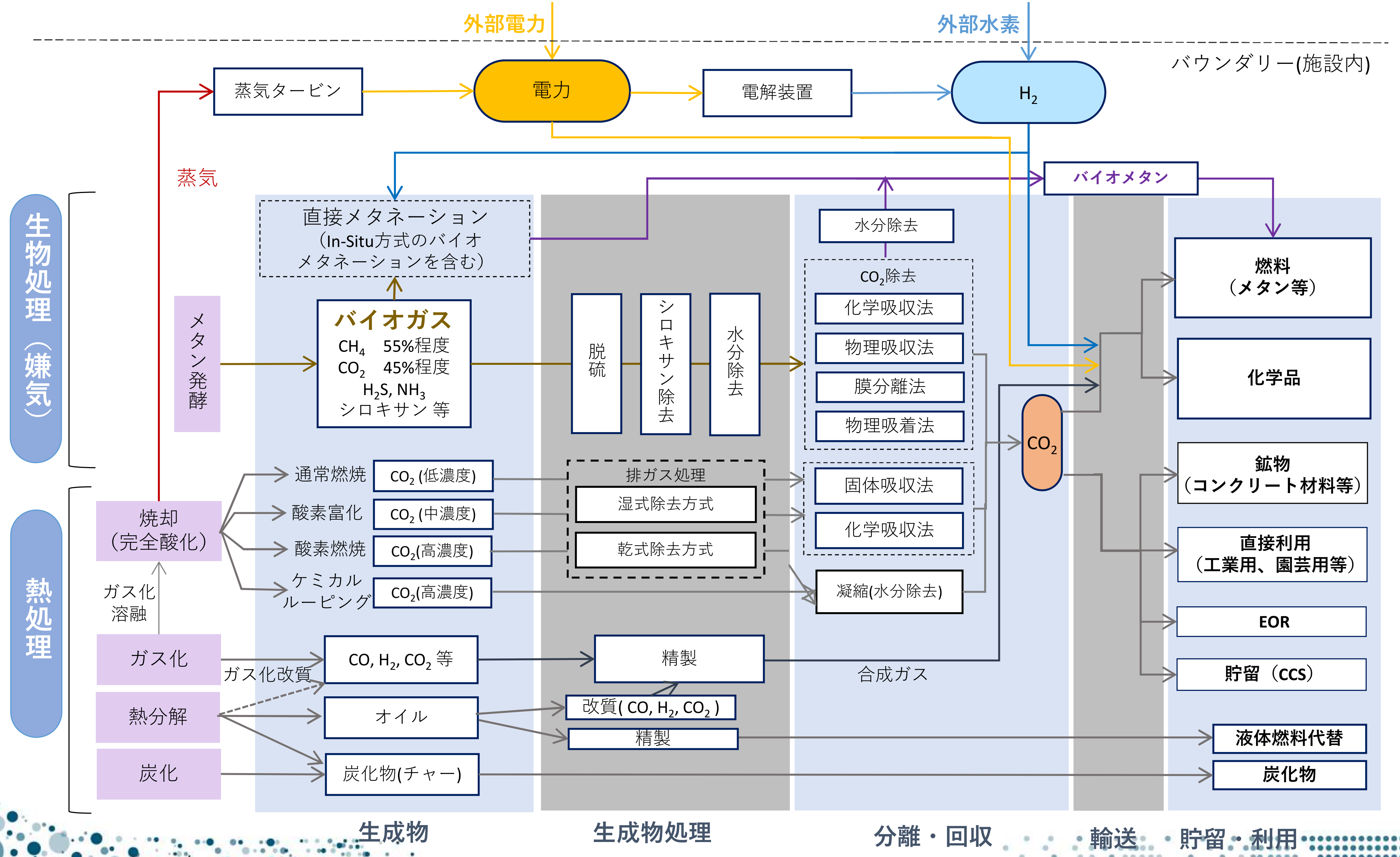


*Smith et al. (2016) Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. Nature Climate Change 6, 42-50.

ネガティブ・エミッション(NEs)とカーボンフラックス[四角形はカーボン量を、矢印はカーボン移動を示す]（文献*を参考に一部改編）

廃棄物・資源循環分野におけるCCUSの適用

National Institute for Environmental Studies, Japan



2050年に向けた地域循環共生圏のイメージ

- 背景（未来志向プロとカーボンニュートラル）
- 資源循環分野における脱炭素化への戦略
- 福島（浜通り）の復興へ向けた研究の取り組み（木質バイオマス利活用の研究を中心に）

背景（バイオマス利活用のニーズ）

面的除染終了で
復興フェーズへ
2018 → 2021（現在） ‐‐‐‐→ 2030-2050

地域循環共生圏
（地域SDGs）
ゼロカーボンシティ

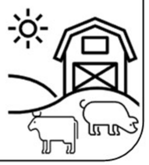
環境省未来志向プロジェクト（脱炭素まちづくり等）始動

バイオマス利活用の検討

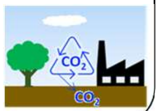
浜通り
12 市町村

木質バイオマス発電が先行
2019　田村市（建設開始）
2020　飯舘村（事業者選定）

→ 他の未利用バイオマスの利活用



→ 先進的分散型連携システム(CCUS付き



しかし、課題も

今後のニーズ

バイオマス利活用の喫緊の課題

・**樹皮(現在90%未利用*)**を原料としたいが、**技術的知見が少ない**

⇐**樹皮（バーク）**

***: 福島県**

バイオマス利活用の中長期的ニーズ

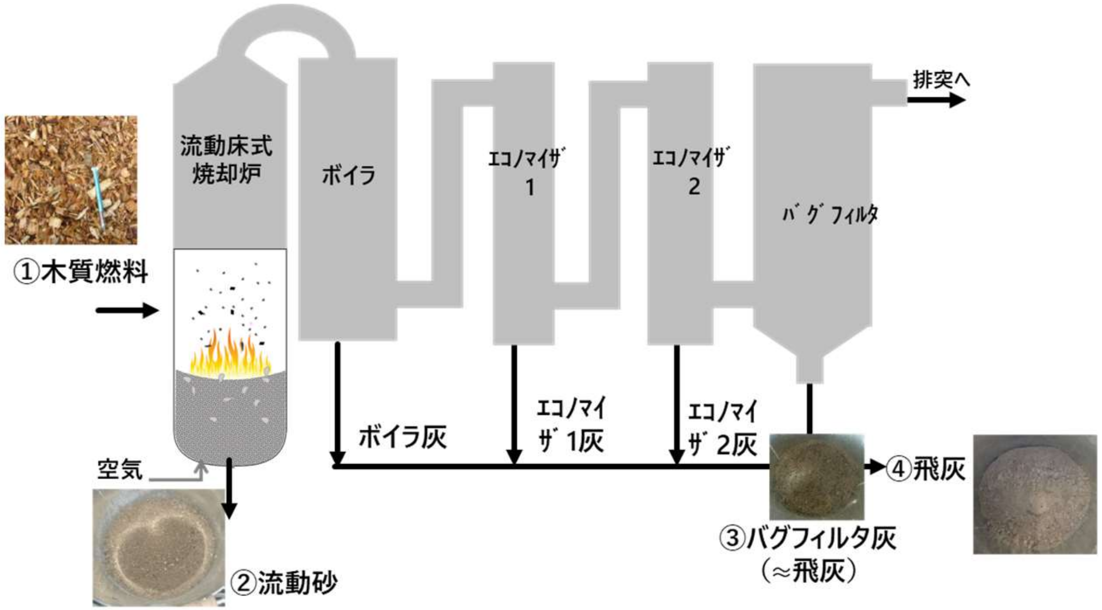
- **滞留する家畜糞尿等のメタン化**
- **先進的なCCUS[炭素回収利用貯留]付き分散型バイオマス変換システム**
- **地域事情のニーズに沿った将来像を予測した技術導入シナリオ**

飯舘村の発電計画

建設予定地	飯舘村蕨平地区（仮設減容化施設跡地）　⇒
運転期間	2024年から20年
出力	7,500kW（流動床式）
利用燃料	間伐材、**バーク**を調達（約9.5万トン/年）

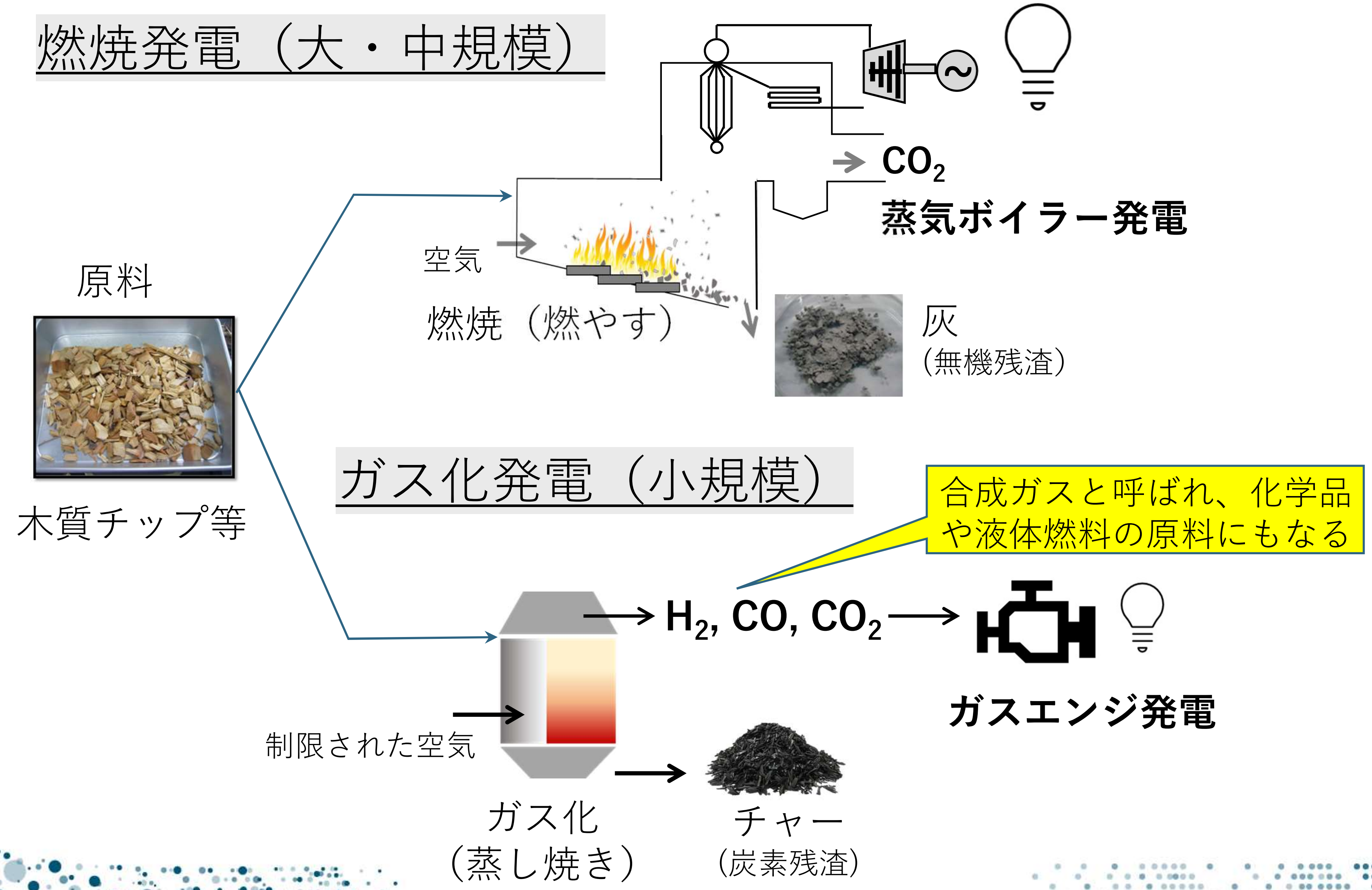
http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/iitate/processing_warabidaira.html

◎発電だけでなく、ハウス栽培等へ熱供給も予定



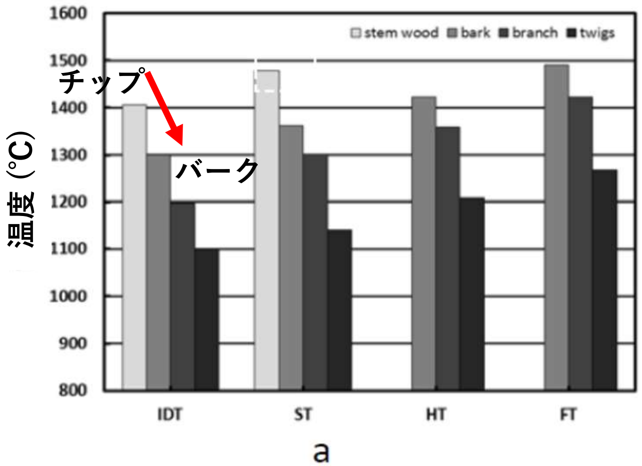
流動床式燃焼発電施設の概略

木質バイオマス発電とは

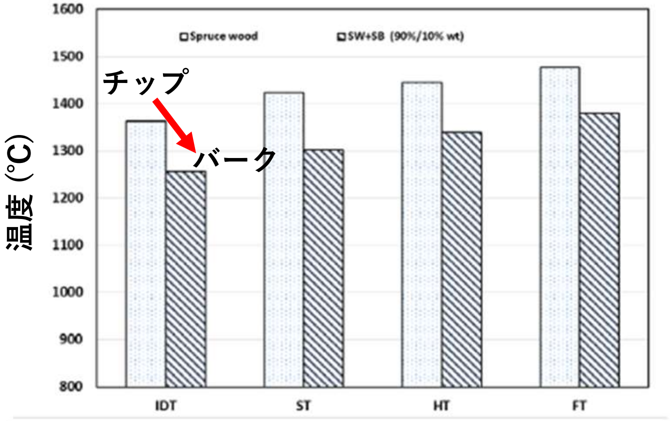


バーク燃焼の懸念

バークの灰分の融点が低く、ボイラーを含む燃焼炉内にクリンカ（溶融物によって生じた塊）の生成（付着・成長）
⇒　熱伝導の低下、偏流の発生、落下による破損が懸念



Chemical Engineering Transactions, 37, 37-42 DOI: 10.3303/CET1437007



Liang Wang et al. / Energy Procedia 158 (2019) 1342–1347

参考：焼却で生じたクリンカ

（IDT：灰の溶け始め温度）

燃焼発電に関する研究の課題

1. 木質バイオマス燃焼時における放射性セシウム（Cs）の挙動や焼却残渣からの溶出性が不明。ただし、ストーカ式と流動床式がある

安全性

2. 原料の木質チップ及びバークの灰分の融解特性の把握と混焼における注意点の提示

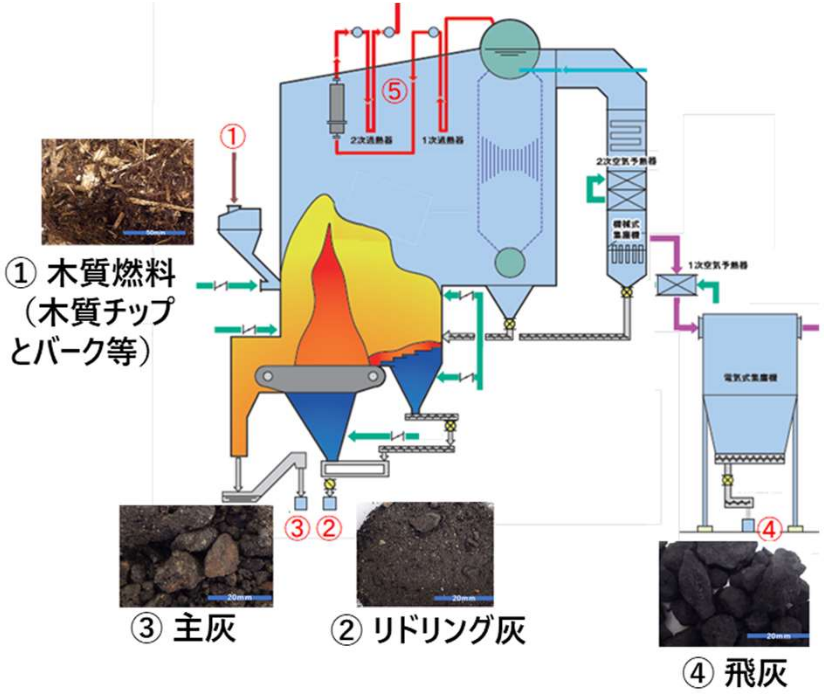
3. 木質バイオマス発電施設における低融点灰はどこで発生し、バークの影響を明らかにする

安定運転

成果の紹介（ストーカ式燃焼における挙動）

各灰の主要元素濃度

	木質燃料	リドリング灰	主灰	飛灰
Cl / Wt%	<0.01	0.02	0.01	1.13
K / Wt%	0.074	4.26	4.03	3.55
Na / Wt%	0.015	1.23	1.08	0.52
Cs / ppmw	0.05	2	2	10
Al / Wt%	0.062	5.78	5.36	1.47
Ca / Wt%	0.309	6.99	7.86	8.70
Si / Wt%	0.154	21.13	19.87	2.84

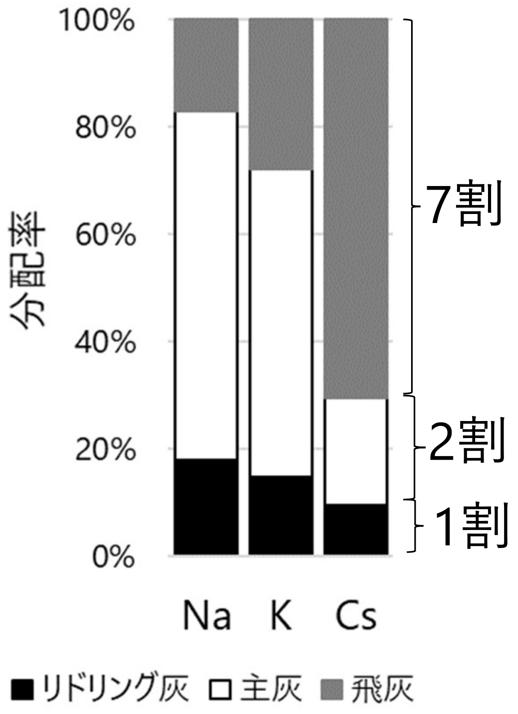


✓Csは灰に高度に濃縮されるが、**Cs濃度が特に高い灰は飛灰** ⇒ 飛灰の保管・管理には注意

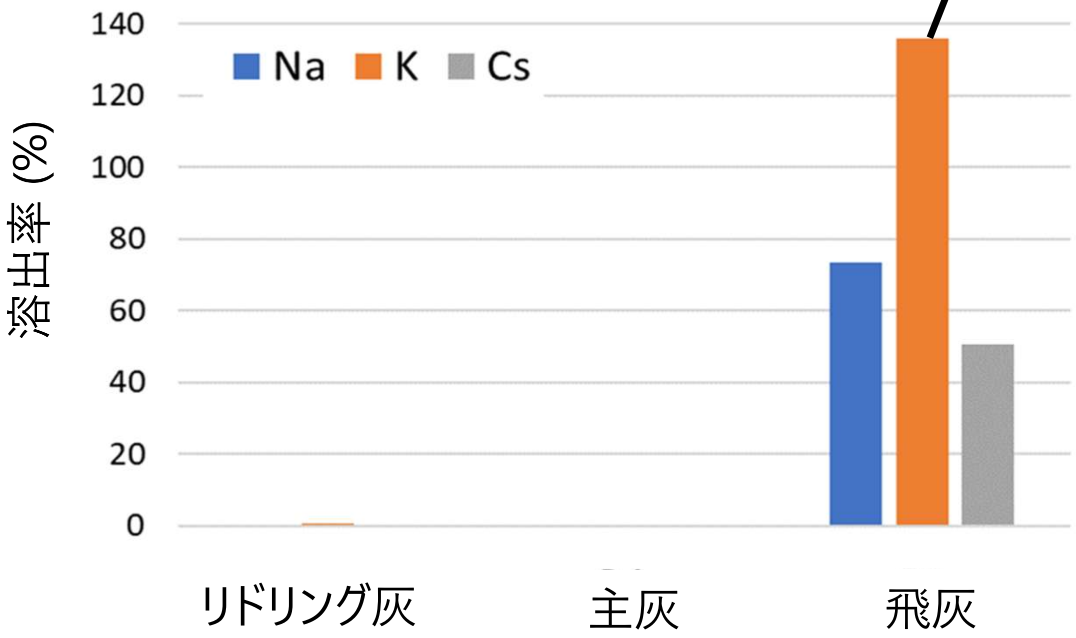
✓塩化物（CsCl）ガスとして揮発し、排ガスの冷却過程で飛灰へ凝結と推察

倉持ら、第9回環境放射能除染研究発表会, 2020

成果の紹介（ストーカ式燃焼における分配率と灰からの溶出性）



Csの各灰への分配



各灰からのアルカリ金属の溶出率

- KとNaとは違い、**Csは主に飛灰へ分配される（70％）**
- 主灰とリドリング灰からの溶出は極めて低いが、**飛灰からの溶出率は50％**

倉持ら、第9回環境放射能除染研究発表会, 2020

成果の紹介（流動床式燃焼における挙動）

National Institute for Environmental Studies, Japan

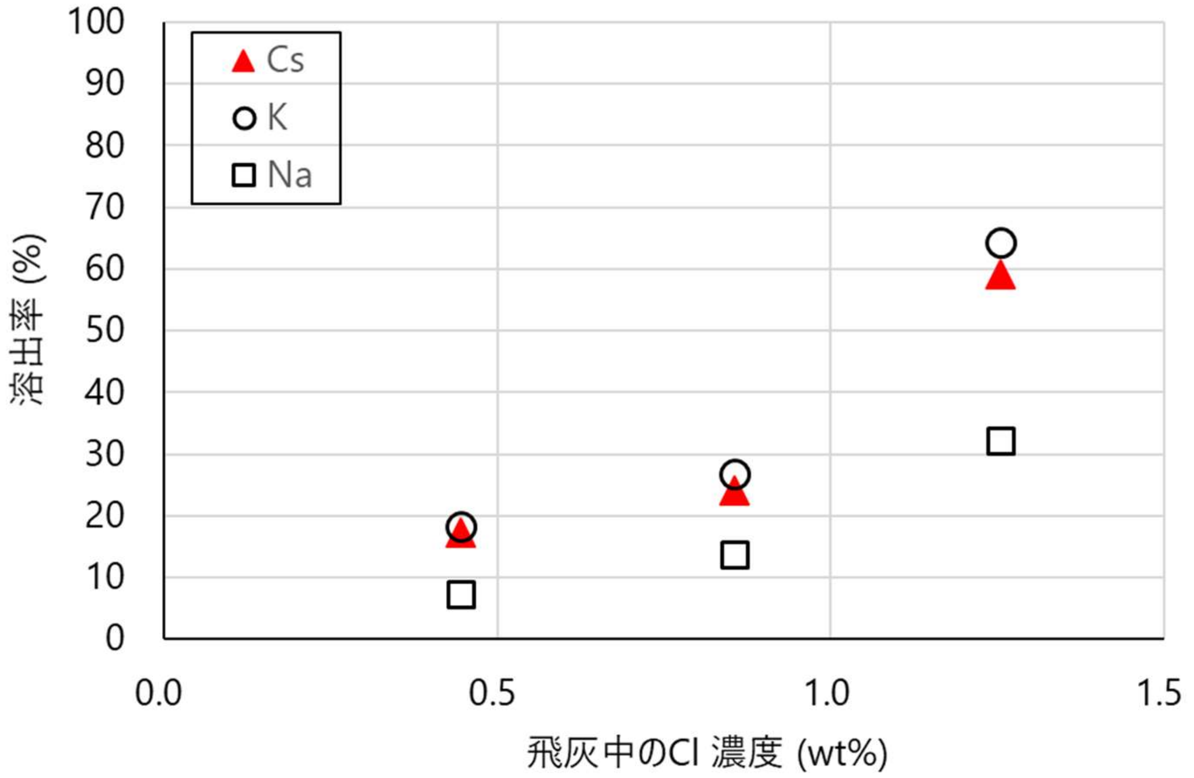
各灰の主要元素組成及び流動砂中のアルカリ金属濃度

	木質燃料	BF灰	飛灰 1	飛灰 2	流動砂 (使用前)	流動砂 (使用後)
Cl / Wt%	<0.01	0.45	0.86	1.25	na	na
K / Wt%	0.14	6.45	8.31	12.81	1.33	6.48
Na / Wt%	0.016	1.53	1.51	1.06	0.08	1.37
Cs / ppmw	0.058	**5.3**	**6.6**	**10.0**	0.45	**2.0**
Al / Wt%	0.036	7.32	5.76	3.48	na	na
Ca / Wt%	0.17	10.27	13.05	17.86	na	na
Si / Wt%	0.089	17.77	16.0	10.0	na	na

✓Csは他のアルカリ金属と同様に**飛灰へ濃縮**　⇒　飛灰の保管・管理には注意
✓Csは流動砂とも反応・固定化　⇒　炉内点検等には注意

倉持ら、第9回環境放射能除染研究発表会, 2020

成果の紹介（流動床式燃焼灰からの溶出性）



飛灰からの溶出率は20%-60%で、Cl濃度の増加に伴い溶出率も高くなる。

⇒ 飛灰についてはCs濃度が高く、溶出率も高い。

倉持ら、第9回環境放射能除染研究発表会, 2020

成果の紹介（クリンカ対応：原料灰分の融点）

National Institute for Environmental Studies, Japan

DSC曲線及びJIS法による各種灰分の融解特性評価

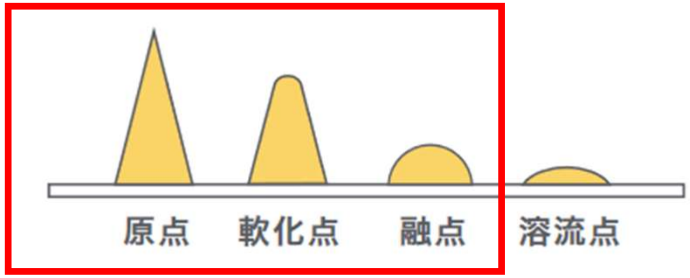
樹種	方法	温度	バーク灰	木質チップ灰
杉	DSC	融解開始温度/°C	1126	1351
		融解ピーク温度/°C	1190	1365
	JIS 8801	軟化点/°C	**1170**	**1360**
		融点/°C	1190	1400
雑木	DSC	融解開始温度/°C	1159	1332
		融解ピーク温度/°C	1280	1372
	JIS 8801	軟化点/°C	**1270**	**1380**
		融点/°C	1310	1390
檜	DSC	融解ピーク温度/°C	1262	1382
松	DSC	融解ピーク温度/°C	1245	1358

軟化点：
灰が溶け始める温度

参考資料（灰の分析方法）

●灰分の融解特性：

JIS M 8801（灰の溶融性試験方法）にて軟化点及び融点を測定した。



軟化点	試験すいの頂部が溶けて丸くなり始めた温度
融　点	試験すいが溶解して、その高さが底部の見掛け上の幅のほぼ 1/2 に等しくなった時の温度
溶流点	溶解物が支持台に流れ融点の時の高さ 1/3 の高さになった時の温度

https://www.mcet.co.jp/service/analysis/apparatus/img/melting_test_ash.pdf

●灰の元素組成分析：

一部サンプルでは、遊星ボールミル等で粉砕処理を行い、波長分散型蛍光Ｘ線分析装置（リガク、Supermini200）を用いて、FP法による半定量分析

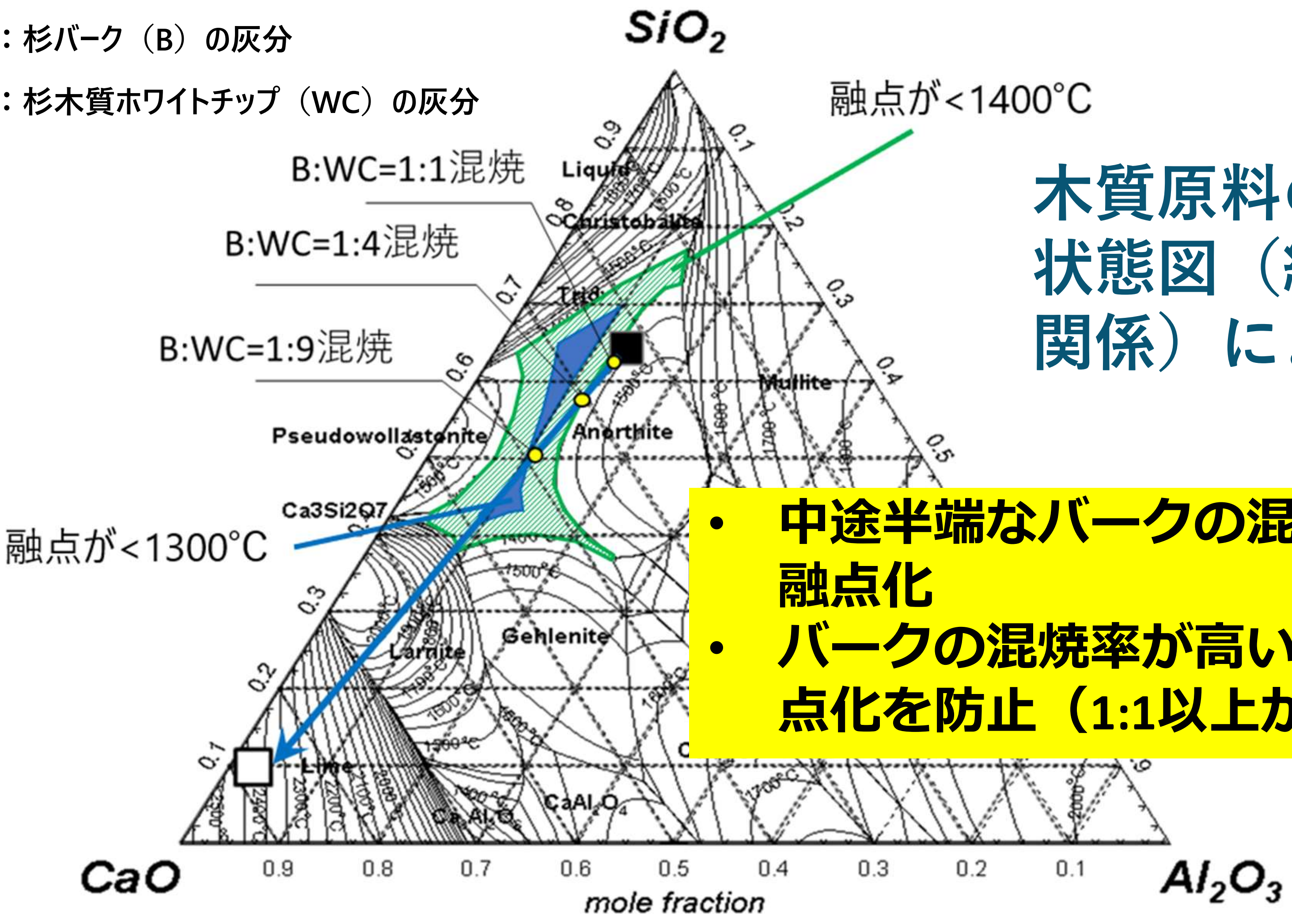
Supermini200

倉持ら、第10回環境放射能除染研究発表会, 2021

成果の紹介（杉のチップとバークの灰分の融点と混焼条件の影響）

■：杉バーク（B）の灰分

□：杉木質ホワイトチップ（WC）の灰分



木質原料の灰分組成と状態図（組成と融点の関係）による解析から、

- **中途半端なバークの混合は、低融点化**
- **バークの混焼率が高いほど低融点化を防止（1:1以上が良い）**

倉持ら、第10回環境放射能除染研究発表会, 2021

成果の紹介（発電施設におけるバーク混焼試験）

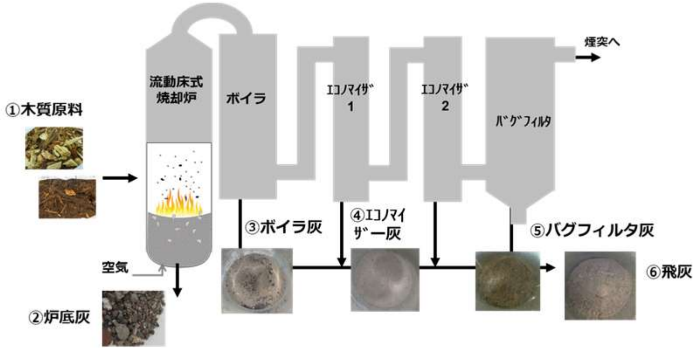
National Institute for Environmental Studies, Japan

課題

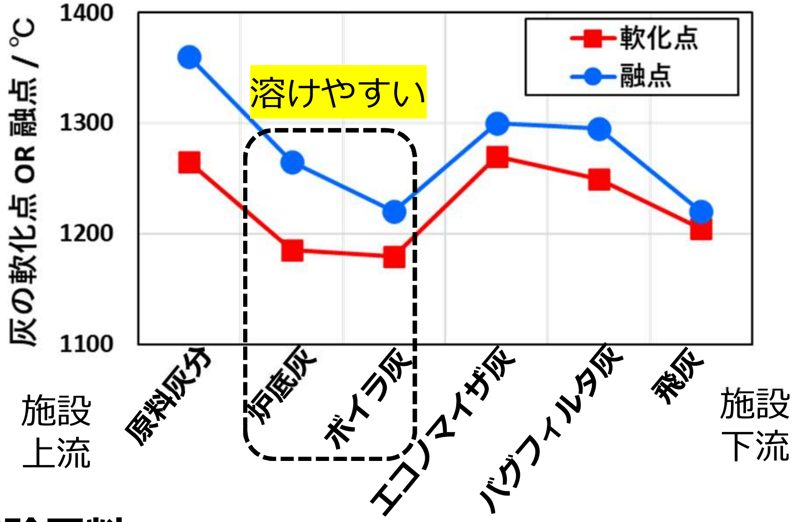
バークによる灰の融解（低融点化）
⇒炉内付着による熱伝導の低下等が懸念

研究

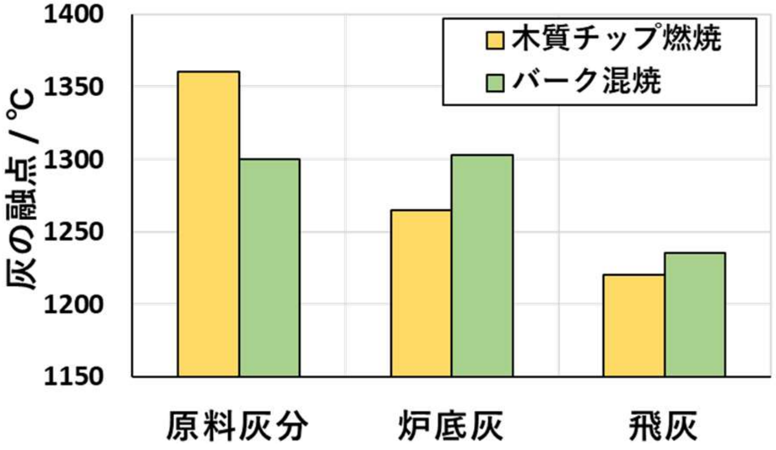
同一の木質バイオマス発電施設でバーク混焼試験
1)低融点灰が生じる場所の特定
2)バーク混合が低融点化を誘発？



1) 施設内の低融点灰の特定



2) 70%バーク混合が融点に与える影響



燃焼試験原料：

通常の木質チップ

70%バーク混合

成果

- ✓ 炉底灰とボイラ灰が低融点灰
- ✓ 70%バーク混合では、灰は低融点化しない
- ✓ **熱力学計算**でも**融点は概ね同じ⇒実測を支持**

◎施設、自治体、住民に知見を提供済み

倉持ら、第10回環境放射能除染研究発表会, 2021

今後の展開

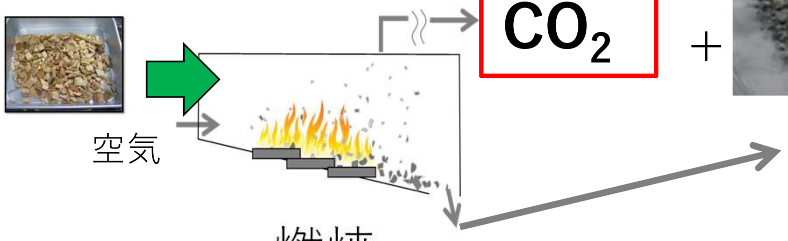
① 卒FITを意識すると、燃焼灰の資源化が必要（国内共通の問題）。灰は肥料や融雪剤等への利用が期待されるが、有害重金属の濃度や溶出性は懸念事項（省略）

② 脱炭素化（CCUS）への展開（2050年CN）

③ 研究成果の実装を意識した地域循環共生圏モデルの設計とその評価

CCUSへの展開（検討中）

燃焼研究（進行中）

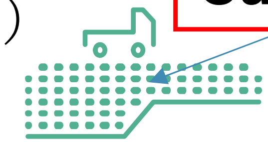


CO_2 ＋

灰

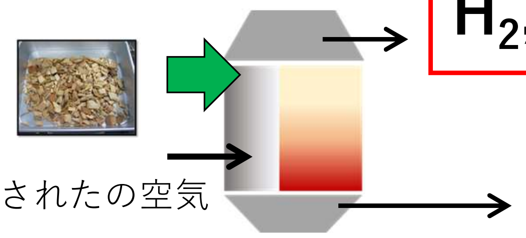
◎炭酸塩化（鉱物化）して骨材等に利用

$CaCO_3$



●肥料としての価値もあり、そことのバランスに注意

ガス化研究（分散型へ向け）



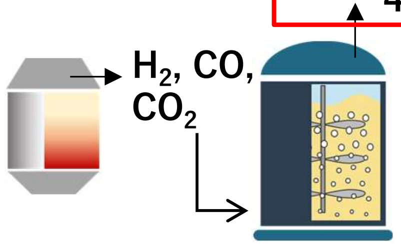
H_2, CO, CO_2

メタネーションして**バイオメタン(CH_4)**

チャー
(炭素残渣)

◎土壌改良剤として利用
◎メタン発酵におけるガス化促進剤として利用

CH_4



ガス化-メタン発酵コンバインド型メタネーション

ガス化-発酵コンバインド型CO_2リサイクル技術の開発

National Institute for Environmental Studies, Japan

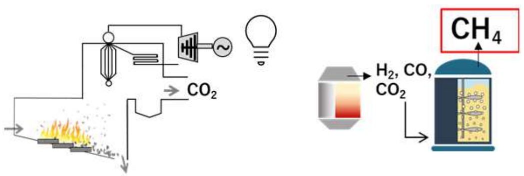
分散型でのCCUSを想定し、ガス化とメタン発酵を合理的にコンバインドさせ、シナジー効果により、ガスの洗浄・分離回収プロセスを省略したミニマム構成要素のバイオメタン化システムを構築する。（本年度は準備、来年度から本格検討）

③　実装を意識した地域循環共生圏モデルの設計とその評価

バイオマス利活用による出力

・電気
・熱
・メタン
・合成ガス

etc

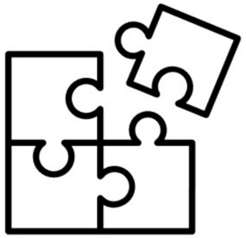


・残渣
・肥料
・炭酸塩
・土壌改良剤

etc

最適な設計

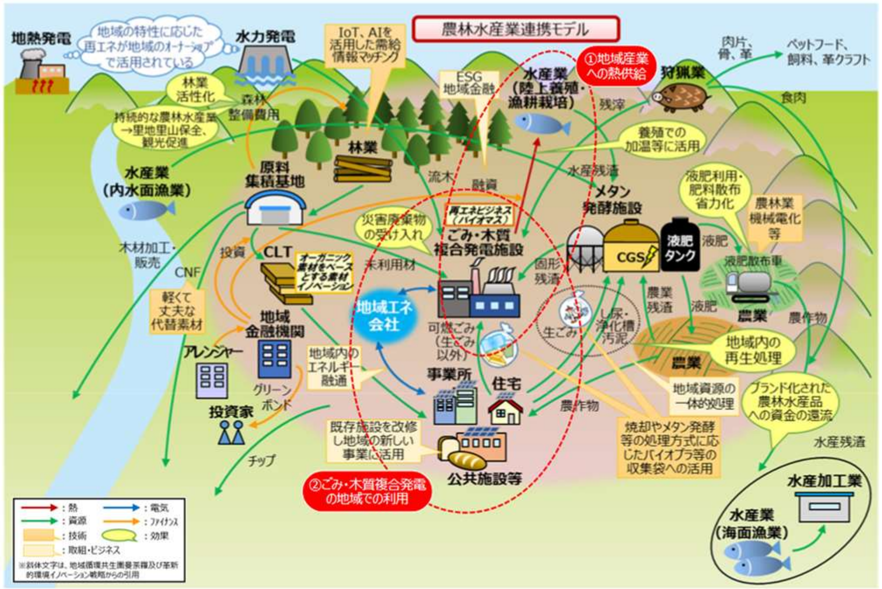
・地域需要
・コスト
・持続可能性
（脱炭素）



◎技術特性も様々

地域循環共生圏モデル（農林水産連携モデル）

https://www.env.go.jp/council/03recycle/council/03recycle/y030-37-s1-1.pdf



メリット
✓　複合発電によるエネルギー回収の向上
✓　林業活性化、里山保全、観光促進
✓　ごみ処理施設から養殖等の産業への熱供給

NIESだけでは対応が困難、他機関との連携も必要

まとめ

✓ 中長期視点から脱炭素化を基調した資源循環システムの方向性の紹介

✓ 浜通りの脱炭素まちづくりに向けた研究の紹介（木質バイオマスの利活用を中心に）

- 木質バイオマス燃焼発電施設における安全・安定運転のための研究成果（セシウムの挙動やクリンカ生成防止等）を紹介

- 今後の展開として、CCUSやまちづくりの設計に関する研究の構想を紹介

謝辞

研究成果の一部は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20211002）により実施しました。

ご清聴ありがとうございました