

農林業との連携によるカーボンニュートラルシナリオ 2030年に向けた石炭火力発電のトランジション策

内 藤 敏

2050年までにカーボンニュートラルを達成するためには、世界中の電気の約4割を担う石炭火力発電の段階的な改善策（トランジション策）が求められている。これまで異業種連携により、CO₂の「排出源削減策」と「吸収源増加策」となる要素技術開発を行ってきた。これらの要素技術を組合せた技術システムと石炭火力発電との連携により、「エネルギー」「食糧」「環境」のトリレンマ問題の解決を目指したトランジション策となり、農林業との連携による循環経済の創出に繋がる「モデル農場・苗づくり」事業の実現に取り組んでいる。

キーワード：石炭燃焼助剤，フライアッシュ，有機汚泥，鉄キレート，植生基盤，カーボンリサイクルシステム

1. はじめに

ロシアによるウクライナ侵攻の終わりが見えない状況で、エネルギー・食糧・環境のトリレンマ問題の解決がより困難となり、人類の持続可能性が危機的な状況となる事が危惧されている。

世界中の電気の約4割を担う石炭火力発電は、我が国においても31%のベースロード電源である。政府は2030年度において温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目標とする具体策として、石炭火力の発電構成を19%とし、低効率とされる100基程度の石炭火力発電所の休廃止と、CO₂の排出を抑えた効率の良い石炭火力発電技術の推進を発表した（図1）。大規模電気事業者を除く紙パルプ、化学、繊維、セメント等で石炭ボイラーを設置している工場は全国に165工場あり（2010年）、いずれも地域の基幹産業となっている。これらの基幹産業が国際競争力を維持

しつつ、2050年までにカーボンニュートラルを達成するためには、低コストで安定供給の維持ができる環境負荷の少ない次世代型電源が開発されるまでの、段階的な改善策（トランジション策）が求められている。

我が国における地球温暖化ガス（GHG）排出量は約12億トン（2019年）で、世界全体の排出量520億トン（CO₂換算）の2.3%に当たり、その内農林業由来のGHG排出量は約4,750万トンで、日本全体の約4%世界全体の0.1%である。一方、世界全体では水田・家畜の消化管内発酵からのCH₄、農地土壌・肥料・家畜排泄物からのN₂O等、全GHGの約23%が農林業で排出されており、現状の対策継続では2050年の農林業のGHG削減は13%に留まると言われている¹⁾。このため農林地の炭素吸収能力を最大限に発揮させるなどの技術開発が喫緊の課題となっている。

これまで異業種連携により、CO₂の「排出源削減策」と「吸収源増加策」となる要素技術開発を行ってきた。これらの要素技術の組合せにより石炭火力発電所からの電源・熱源・CO₂源・石炭灰：フライアッシュ（FA）を徹底的に活用することで、「エネルギー」「食糧」「環境」のトリレンマを解決できるトランジション策とし、地域連携によるサーキュラー・エコノミー（循環経済）の創出に繋がる「モデル農場・苗づくり」事業の実現に取り組んでいる。

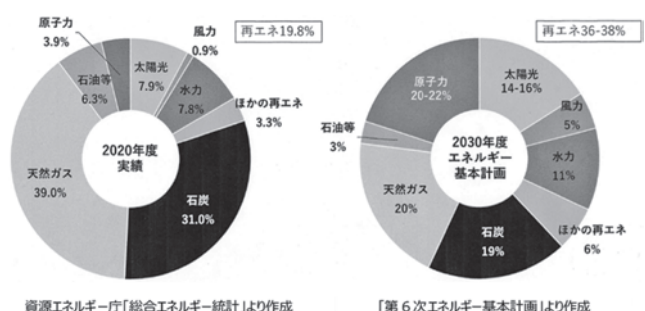


図1-1 日本の電源構成：2020年度実績と2030年度目標

2. カーボンニュートラルにつながる要素技術開発

(1) バイオマスー炭酸カルシウム・石炭系燃焼助剤 (CCI) 製造／石炭混焼技術

製糖工場排出物のライムケーキ (LC) や製紙工場排出物のペーパースラッジ (PS) は合成炭酸カルシウム・バイオマス系の廃棄物であり、これと粉状石炭を混合・成形した石炭混焼用燃焼助剤 (Coal Combustion Improver, 以下 CCI) を開発している (図-2)。

ベンチスケールの循環流動層炉や乱流微粉炭燃焼炉で行った難燃焼性石炭と CCI の混焼試験により燃焼性改善による石炭使用量削減効果 (従来比 5% 以上)、燃焼灰 (FA) 改質効果、排ガス処理コストの削減等、多面的な効果を確認している²⁾ (表-1)。特に FA は炭酸カルシウムと CO₂ の反応による鉱物化に適している。

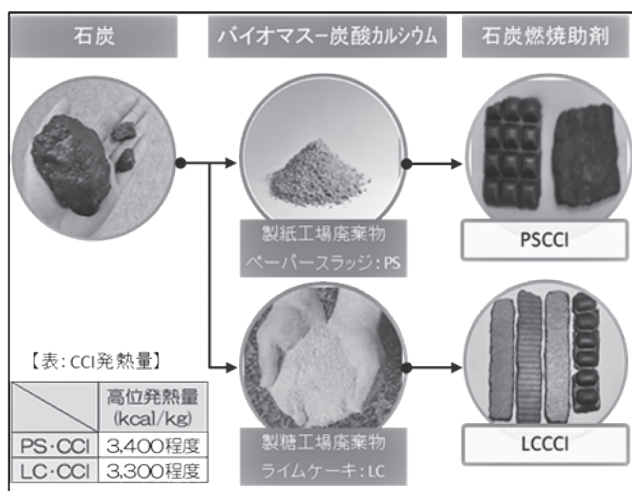


図-2 石炭混焼用燃焼助剤 (CCI)

表-1 CCI 混焼により確認された効果

①燃焼性改善	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭使用量の削減効果 ・脱硫効果 ・NOx低減効果 ・揮発性フッ素の溶出抑制効果
②燃焼灰(FA)改質効果	<ul style="list-style-type: none"> ・FAの水和硬化性改善: 自硬性・ポゾラン反応性、セメント質配合硬化特性による各種土木資材化 (土工材料) ・FAの粒度構成改善: 品質、粉体特性によるセメント混合材、コンクリート混和材等利用 ・粒度構成改善によるサブミクロンFAの効率的回収 (集塵) ・ファウリング、スラッジ抑制への可能性
③CCI導入メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・発電効率アップ ・灰処理、利用の向上 ・揮発性金属 (P,K,Fe2O3等) によるトラブル防止 ・バイオマス燃料 (Fit対応)

(2) 石炭灰 (FA) の CO₂ 洗浄改質による CCF 製造技術

石炭は植物が堆積した地中に埋没し、地圧と地熱を長い間受けて生成した物質と考えられている。従って石炭は植物生長に必要とした元素と生成環境中に存在した元素の集合体と言える。この石炭を燃焼して排出される石炭灰:フライアッシュ (FA) の国内排出量は1,200万トンにのぼり、そのうちの約75%はエネルギー転換部門から排出されている (2018年)。

FAは主にセメント、土木建築の分野において有効利用されているが、農林水産業への利用は1%ほどにとどまっている。このように利用分野に偏りが生じる理由として、品質管理をされない非JIS灰は粒度構成や性状が不均一であることや土壌環境基準を超える重金属類 (六価クロム, セレン, ヒ素, フッ素, ホウ素など) が溶出する可能性があり、そのままでは肥料や土壌改良材として使用することができず用途が限定されてしまうことなどが挙げられる。

これまでFAの農林水産業への利用促進を図る為、旋回噴流攪拌技術を保有する企業と共同で、重金属の溶出が無いセラミック粉体原料「Cleaned Coal Combustion Ceramic Fines: 以下 CCF」製造技術を開発した (図-3)。旋回噴流攪拌技術とは、水槽の底からガスや液体を噴出し旋回現象を起こす事で反応効率が格段に向上する特許技術で、石炭灰を入れた水槽にCO₂ガスを吹き込むことで酸性化し重金属類の溶出を促進する。CCFは軽量・極小・球形・中性で、優れた毛管作用、濡れ性・分散性・透水性を有し、植物生長に欠かせない微量要素であるホウ素を含有している³⁾。

(3) 鉄キレート剤処理による有機廃棄物からの肥料製造技術

近代農学の基礎的原理である「リービッヒ (Liebig) の無機栄養説」では、植物の根から吸収される養分の主要な形態は「水溶性の無機態である」という事である。また、植物は土壌に蓄積しているが土壌溶液中に溶解していない難溶解性の物質 (鉱物や土壌有機物など) を分解し、より溶けやすい形態 (水溶性の無機態) へと変換させ、吸収する能力を持っている⁴⁾。

窒素ではアンモニア態窒素 (NH₄⁺) や硝酸態窒素 (NO₃⁻) の無機態窒素を吸収しているが、NO₃⁻を吸収した場合は光合成によるタンパク質合成に植物自体の糖分を利用するため生育阻害の原因となる。また、肥料から供給される窒素で植物に吸収されない窒素は土壌中でGHGの原因物質であるN₂Oを発生する。

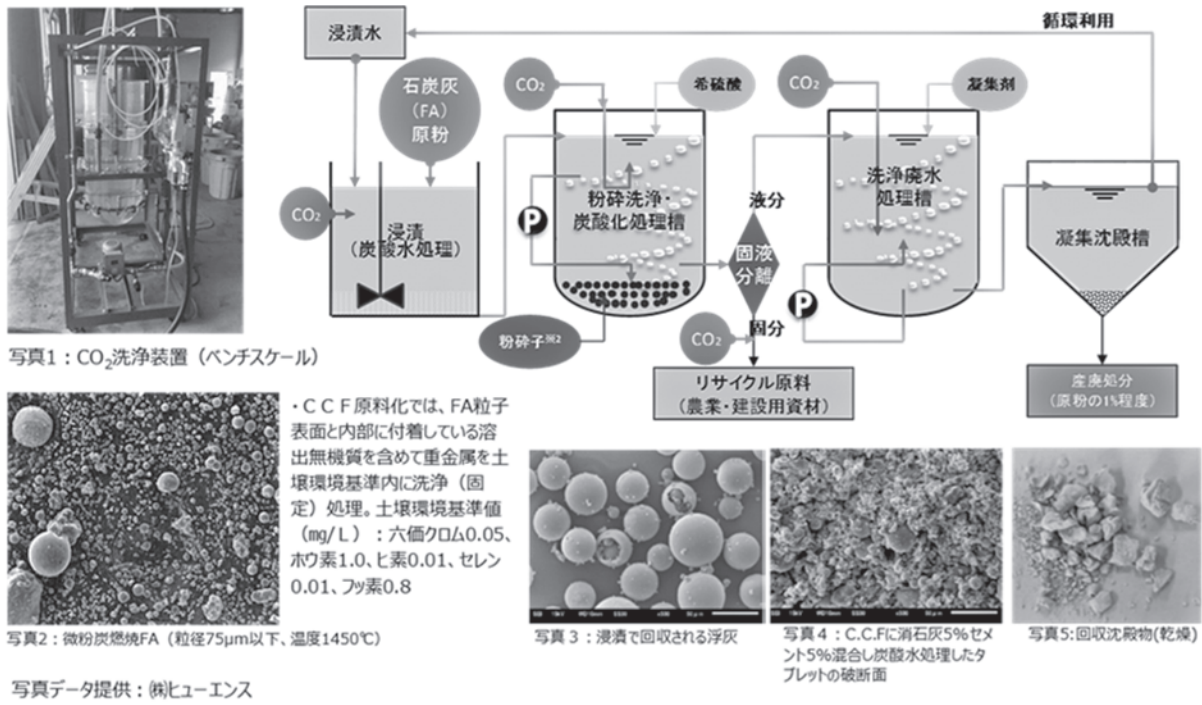


図-3 CCF 製造技術

鉄キレート剤 (Quick2) は窒素の硝酸態化を抑制する資材で酪農糞尿スラリー等の有機汚泥に添加し、更にCCFを20%程度混合すると容易に固液分離しNH₄⁺を保持した有機肥料(固体・液体)を製造できる。これを化学肥料代替とすれば植物の生長促進によるCO₂吸収の増加が図られ、高品質・高収量化が達成できる(図-4、表-2)。

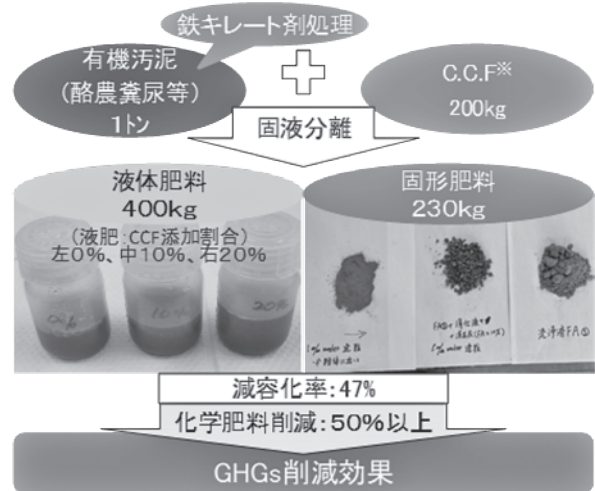


図-4 鉄キレート剤とCCFを用いた有機肥料製造技術

(4) 人工腐植による植生基盤と大苗促成栽培技術

岩石が物理的風化と化学的風化によって細かい物質になり、さらに物質のミネラルが酸化と還元を繰り返す環境の中で多くの有機物を取り込みながら分解が進み「無機有機の複合体」(暗色無定形の高分子有機物群)へと生成されていく。これが腐植物質となり地力の維持、植物の生長に大きな影響を及ぼす。この腐植物質の機能は以下のとおりである。

- 1) 土壤の酸性化を抑制する緩衝能を有する
- 2) K, Ca, Mg, Fe など栄養金属イオン (ミネラル分) を保持する陽イオン交換能
- 3) N, P 等を有機態として保持する酸化還元能
- 4) 団粒構造化による土壤の保水性, 透水性, 通気性の向上
- 5) 植物生長ホルモン様物質(オーキシン, ジベリリン) による生理活性効果

肥沃な土壤は腐植物質を含み農業や生態系の基本的な機能, 食糧安全保障の基盤として地球上の生命を維持するために不可欠な存在である。

表-2 固形・液体肥料の成分分析

分析項目	単位	鉄キレート剤処理+CCFによる固液分離			
		液体		固体	
		原物中	乾物中	原物中	乾物中
水分	%	98.030		2.890	
全窒素	%	0.139	7.056	0.665	0.685
リン (P2O5)	%	0.006	0.305	0.603	0.621
カルシウム (CaO)	%	0.191	9.695	1.240	1.277
マグネシウム (MgO)	%	0.088	4.467	0.385	0.397
カリウム (K2O)	%	0.248	12.589	0.687	0.708
pH		7.54		7.01	
硝酸態窒素	ppm	2.200	111.675	3.196	3.291
アンモニア態窒素	ppm	1354.500	68756.345	101.585	104.618
無機態窒素	ppm	1356.700	68868.020	104.782	107.900

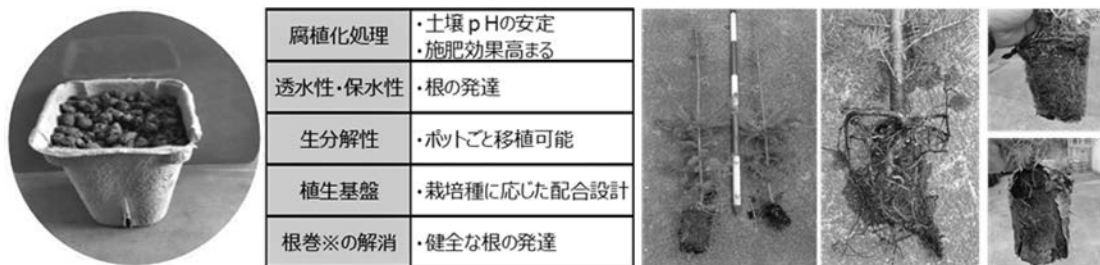
これまで鉄キレート系触媒利用技術による人工腐植製造技術を用いた植生基盤（培土）の開発に取り組んできた。人工腐植は自然腐植と同様な機能を有し、それによる各種作物等育成上の効果もこれまでに確認している⁵⁾。その腐植質特性による効果は、同様に植林用苗木育成にも期待できるとして、林業分野への展開を目指している。

本技術を用いた土壌の酸性化を緩和する緩衝能を有する植生基盤と栽培技術により、肥料焼けせずに生長に必要な施肥が出来る大苗促成栽培技術として(国研)森林総合研究所から評価を得ている⁶⁾。この栽培技術は化学肥料削減によるGHG削減と生長促進によるCO₂吸収量増加策となる(図一5)。

3. 地域連携によるカーボンニュートラルシナリオ

安定的な供給や経済性の側面から国内の石炭火力発電は長く重要な役割を担ってきた。他の化石燃料と比較しても単位当たりの二酸化炭素の排出量が多い石炭火力発電を廃止するまでのトランジション策として、要素技術の統合化と地域連携によるカーボンリサイクルシステムを提案する(図一6)。

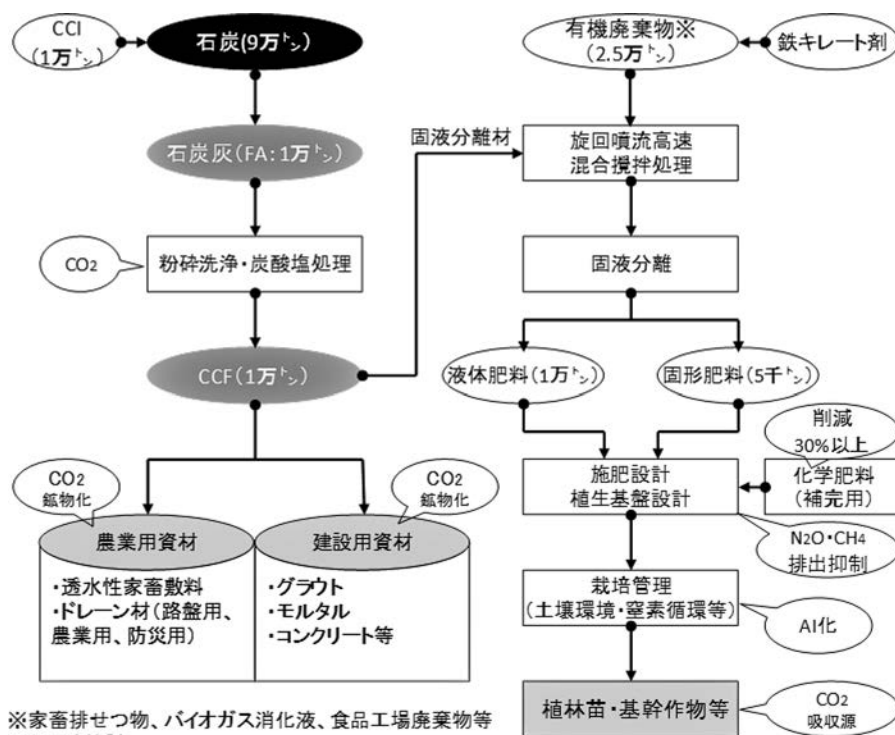
モデル地域の1つである北海道釧路・根室地域は石炭火力発電をエネルギー源とする製紙産業、国内唯一の海底炭鉱による石炭産業、大規模酪農業及び水産業等を基幹産業としている。この地域のカーボンニュー



PSリサイクルポットを用いた植生基盤

(森林総合研究所評価)
 ・植林用苗(トドマツ)樹高90cm以上を達成(生育期間38ヶ月)
 ・「根巻き」は発生しておらず、まだまだ根が生長できるスペースがあり、大苗生産の可能性あり。
 ・生育期間21ヶ月(2016年7月～2018年3月)で、PSリサイクルポットの生分解性が確認できた。

図一5 植生基盤と植林苗の促成栽培技術



図一6 カーボンリサイクルシステム

表一3 GHG 排出源削減策・吸収源増加策による CO₂ 削減目標

GHG排出源削減策・吸収源増加策	GHGs	Gs量 (千 t)	GWP	CO ₂ 削減量 (万t/年)
1. CCI (1万t/年) 混焼による石炭使用量削減 (0.5万t/年)	CO ₂	15	1	1.5
2. 酪農スラリーからの液体肥料による化成肥料代替 (2万t/年)	N ₂ O	0.996	298	29.7
3. 土壌からのN ₂ Oガス排出削減 (酪農スラリー 5万t/年)	N ₂ O	0.194	298	5.7
4. 酪農からのメタン排出削減 (2千頭/年)	CH ₄	0.022	25	0.05
5. 大苗促成栽培と植林による吸収源増加 (植林苗 100万本/年)	CO ₂	0.2	1	0.02
石炭 (10万t/年) によるCO ₂ 排出量=30万t			合計	36.97

トラルシナリオを実現する CO₂ の「排出源削減策」と「吸収源増加策」による GHG 削減目標を設定した(表一3)。石炭 10 万トン/年を燃焼した際に発生する CO₂ を 30 万トン/年とし、カーボンリサイクルシステムを用いた削減策・吸収策によりカーボンニュートラルを達成すると共に、価格が高騰している化学肥料・飼料を代替することで「環境と経済の好循環」を達成するシナリオである。

(試算結果)

算定方法については、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」2021年：((国研) 国立環境研究所)を基に行った。

① CCI (1 万 t/ 年) 混焼による石炭使用量削減 (0.5 万 t/ 年) による CO₂ 削減量

一般炭の炭素含有量(無水・無灰ベース)を 82%, 燃焼率を 99%とした場合の使用石炭減量 (t) 当たりの CO₂ 排出削減量は、 $0.82 \times 0.99 \times 3.67 \left[\frac{44}{12} \text{ (CO}_2\text{)} / 1 \text{ (C)} \right] = 2.99 \div 3 \text{ t}$

ゆえに、0.5 万 t/ 年の石炭使用量削減による CO₂ 削減量は、 $0.5 \text{ 万 t} \times 3 \text{ t} = 1.5 \text{ 万 t}$

②酪農スラリーからの液体肥料による化成肥料代替(2 万 t/ 年)

鉄触媒処理した酪農スラリー 5 万 t に CCF を 20% (1 万 t[※]) 混合し、固液分離した液分中の肥料成分を化成肥料代替とした場合の CO₂ 削減量について試算。

※一般炭 9 万 t + CCI 1 万 t の混焼による石炭灰 (FA) の排出量を 1 万 t/ 年と設定した。

算定方法

$$E = \sum_{ij} (F_{SNij} \times EF_{1ij}) \times 44/28$$

E : 農用地の土壌への無機質肥料(化学肥料)の施肥に伴う N₂O 排出量 [kg-N₂O]
F_{SNij} : 作物種 *i* の農用地土壌に投入された化学肥料 *j* の施用量 [kg-N]
EF_{1ij} : 作物種 *i* の化学肥料 *j* を投入した場合の排出係数 [kg-N₂O-N/kg-N]
i : 作物種
j : 肥料の種類(硝化抑制剤入りまたはなし)

式一1

N₂O 排出係数:0.62% (その他作物・硝化抑制剤なし)
 計算結果

液体肥料 1 t 当たり無機態窒素 = 68,868.02/1,000,000

× 1,000 kg = 68.9 kg (表一2 より)

※鉄キレート剤処理したスラリーの無機態窒素は、N₂O 発生源とならないで、全て植物の生長に利用される。

削減効果算定

N₂O 削減量 = 68.9 kg/t × 20,000 t × 0.46 × 44/28/1,000 = 996.1 t-N₂O

CO₂ 削減量 = 996.1 t × 298 = 29.7 万 t-CO₂

③土壌から N₂O ガス排出削減

酪農スラリー 5 万 t に含まれる全窒素からの N₂O ガス排出削減量を算定した。

算定方法

$$E = \sum_i (N_{ONI} \times EF_{1i}) \times 44/28$$

E : 農用地の土壌への有機質肥料の施用に伴う N₂O 排出量 [kg-N₂O]
N_{ONI} : 作物種 *i* の農用地に投入された有機質肥料に含まれる窒素量 [kg-N]
EF_{1i} : 作物種 *i* の有機質肥料を投入した場合の排出係数 [kg-N₂O-N/kg-N]
i : 作物種

式一2

計算結果

酪農スラリー中の窒素量を 0.4% と設定した。排出係数は、0.62 とした。

計算結果: 5 万 t × 0.004 × 0.62 × 44/28 = 194.9 t-N₂O
 GWP = 298

CO₂ 削減量 = 194 t × 298 = 5.7 万 t-CO₂

④酪農からのメタン (CH₄) 排出削減

計算結果

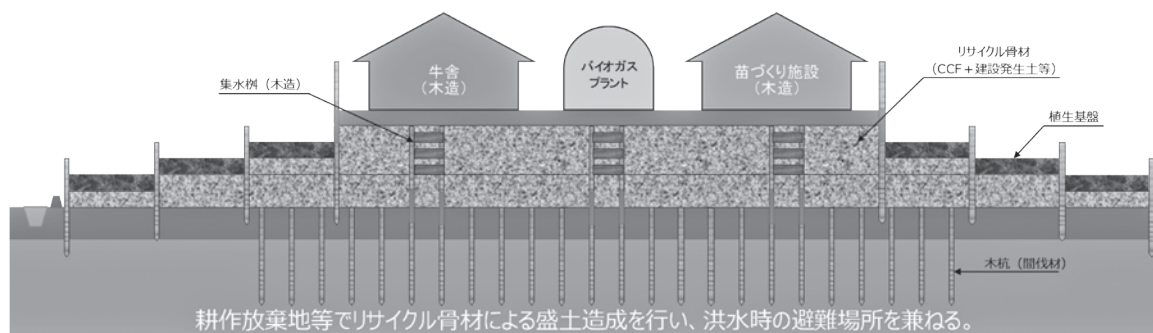
酪農スラリー 5 万 t/ 年を排出する乳牛を 2 千頭と設定。

乳牛の消化管内発酵排出係数: 0.11 tCH₄/ 頭
 メタン (CH₄) 排出削減率: 10%

尚、鉄キレート剤処理したスラリーにより栽培された牧草によるサイレージ飼料は高品質(高糖度)サイレージであり、消化率が上がることにより排出削減ができると想定したが、詳細については今後の課題としている。

計算結果: 2,000 頭 × 0.11 tCH₄/ 頭 × 0.1 = 22 t-CH₄
 GWP = 25

CO₂ 削減量 = 22 t × 25 = 550 t ÷ 0.05 万 t-CO₂



図—7 モデル農場イメージ (断面)

⑤大苗促成栽培と植林による CO₂ 吸収量

町有林 50 ヘクタールに 100 万本植林することを想定し、鉄キレート剤処理した酪農スラリー 5 万 t/年に CCF を 20% 混合し、固液分離した固形肥料約 1 万 t/年を植生基盤として使用する。尚、栽培試験 (供試植物: 小松菜) において、2 倍以上の生長促進効果を確認しているが、CO₂ 吸収量の算定については今後の課題としている。

計算結果

処理スラリー 1 t 当たり全無機態窒素 = 107.9/1,000,000 × 1,000 kg = 0.1 kg

※鉄キレート剤処理したスラリーの無機態窒素は、N₂O 発生源とならないで、全て植物の生長に利用される。

削減効果算定

N₂O 削減量 = 0.1 kg/t × 10,000 t × 0.46 × 44/28/1,000 = 0.722 t-N₂O

CO₂ 削減量 = 0.722 t × 298 = 215 t ≒ 0.02 万 t-CO₂

4. おわりに

北海道釧路・根室地域では「環境と経済の好循環」という発想の下、地域振興につながる各種施策が実施されている⁷⁾。これらの取組と連携しながら、「モデル農場・苗づくり」の実証事業に取り組む地域連携コンソーシアムの組成に関して可能性調査を行う計画である。カーボンリサイクルシステムを用いた「モデル農場・苗づくり」事業は耕作放棄地等に造成した盛土上に牛舎、苗づくり施設、バイオガスプラントを設置し、新たな農場のモデルを目指したものである。栽培する苗は、植林苗の他、基幹作物、土砂かん止林用苗、

郷土種などを想定している (図—7)。

脱炭素社会の実現を目指す世界にとって 2030 年を「Point of No Return = 復帰不能点」にしないためには、エネルギー・食糧・環境の相互的好循環につながる技術開発に真剣に取り組む研究機関や企業・団体と連携し、悪循環からもたらされる地域的課題を解決するための有効な解決策が求められている。この実現を目指す「モデル農場・苗づくり」事業は産官学連携、省庁連携、環境金融の利用の他、多くのシビルエンジニアによる連携が必要である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 世界の農林業由来の温室効果ガス排出量：IPCC 土地関係特別報告書 (2019 年) 及び、日本の農林水産分野の温室効果ガス排出量：温室効果ガスインベントリオフィス (GIO)
- 2) 「難燃焼性石炭のバイオマス-炭酸カルシウム・石炭系燃焼助剤混焼による燃焼性等改善 (I), (II)」：日本エネルギー学会 2018 年 3 月
- 3) 「連続処理システムによるフライアッシュの粒度調整と重金属成分除去」：鉄と鋼 Vol.103 No.3 (2017)
- 4) 作物はなぜ有機物・難溶解成分を吸収できるのか 根の作用と腐植蓄積の仕組み：阿江教治・松本真悟 農文協
- 5) 平成 28 年度北海道リサイクル技術研究開発補助事業：地域基幹産業からの廃棄物を原料とする人工腐植化資材を用いた植生基盤の開発と低価格・高品質な苗木の促成栽培・供給システムの開発
- 6) 「土づくり」「苗づくり」で地方創成を目指す」：(一社) 日本プロジェクト産業協議会 (JAPIC) 森林再生事業化委員会(株)熊谷組 森林技術 No883.2015.10
- 7) 「農林業との連携によるカーボンニュートラルシナリオの実現・地域連携による「モデル農場・苗づくり」事業」：土木施工 2022 年 11 月号

【筆者紹介】

内藤 敏 (ないとう さとし)
(株)熊谷組
土木事業本部 営業部
担当部長

