

技術論文

水田すき込み稲わらの炭化・製鉄利用による温室効果ガス削減スキームの提案

Greenhouse Gases Reduction Scheme through Char Production and Steelmaking Utilization of Rice Straw Formerly Plowed into Paddy Fields

小林 一 暁* 吉野 博 之 関屋 政 洋
Kazuaki KOBAYASHI Hiroyuki YOSHINO Masahiro SEKIYA

抄 録

水田においてメタン発生源となっている稲わらを炭化し、製鉄所で石炭代替として利用することで、大きな温室効果ガス (GHG) 排出削減を図るスキームを提案した。現状では水田にすき込まれた稲わら起因のメタンと、製鉄所における石炭起因の二酸化炭素が排出されている。ここで稲わらを水田にすき込み処理せず、炭化し、製鉄所において石炭代替として利用すると両 GHG を抑制可能なため、効果的な GHG 削減スキームになり得る。本報告では稲わらによるメタン排出量と、石炭置換に必要な稲わらの量から、石炭置換による GHG 削減量を評価し、効果的に GHG を削減するスキームとなり得ることを確認した。

Abstract

A greenhouse gases (GHGs) reduction scheme is proposed by carbonizing rice straw, which is identified as a major methane source in paddy fields, and utilizing the bio char as a coal substitute in steelmaking. Currently, methane associated with rice straw plowed into paddy soils and carbon dioxide from coal use in steelworks are emitted to the atmosphere. By foregoing straw plowing into paddies, carbonizing the straw instead, and employing the carbonized product as a coal replacement in steel plants, both GHGs can be mitigated, rendering the approach a potentially effective GHG-reduction scheme. In this study, the GHGs abatement attributable to coal substitution was quantified based on estimates of methane emissions from rice straw and the amount of straw required to replace coal, confirming that the proposed scheme can effectively reduce overall GHGs emissions.

1. はじめに

地球温暖化を抑制するために、各国および各産業セクターにおいて温室効果ガス (GHG) の排出削減に向けた取り組みが進められている。パリ協定においては地球の平均気温上昇を産業革命以前と比較して 2℃未満に抑え、さらに 1.5℃未満に抑える努力を追求することが定められている¹⁾。そのターゲット達成のため、2050年までのカーボンニュートラル達成が必要とされている²⁾。

鉄鋼業における二酸化炭素 (CO₂) 排出量は、世界では 24億t/年³⁾、日本では 1.1億t/年⁴⁾前後とされている。カーボンニュートラル達成のためにはその削減が必要であることから、製鉄プロセスを中心に CO₂ 排出削減を狙った様々な研究開発が行われている⁵⁾。

ここでバイオマス燃料は、その成長過程において CO₂ を吸収することからカーボンニュートラルであり、かつ再生可能な資源であると言える。したがって鉄鋼業におけるカーボンニュートラル達成のために、バイオマスの利用を検討することは重要と言え、バイオチャーの製造技術や活用可能性についての整理も行われている⁶⁾。

著者らは GHG 排出量を大きく削減するスキームを提案している^{7,8)}。GHG は CO₂ のみならず、メタン (CH₄) や亜酸化窒素 (N₂O) 等、多くのガス種を含んでいる⁹⁾。もし全体として GHG が削減できれば、CO₂ に限らず他の GHG を削減してもその効果は同等と言える。

本スキームでは、有機物の嫌気性分解で発生するメタンに着目している。非化石燃料由来の CH₄ の温室効果は CO₂ の 27.0 倍 (100 年値の地球温暖化係数, GWP-100) や 79.7

* プロセス研究所 プロセス技術部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

倍(20年値の地球温暖化係数, GWP-20)である¹⁰⁾。したがってメタンを削減することは多量のCO₂を削減したことと同等と言える。

GHG等の増減が地球のエネルギー収支を、正味でどれだけ変化させたかを示す指標を放射強制力と呼ぶが、CH₄の放射強制力はCO₂のそれよりも大きい。すなわち1分子当たりや単位質量当たりとしてCH₄は赤外線をよく吸収し、効率よく熱を閉じ込めることから温室効果がCO₂よりも大きい。一方でCH₄の大気中の寿命は約9年と短いため、短期的影響が強く表れる。したがってGWP-20の値、すなわち20年値のように短期間に注目した場合の温室効果は大きくなり、GWP-100の値、すなわち100年値のように長期間に注目した場合の温室効果は小さくなると説明される¹¹⁾。

近年の日本におけるCH₄排出量は、GWP-100を用いて換算するとおよそ3000万t-CO₂e/年であり、CO₂に次いで排出量が2番目に多いGHGである⁴⁾。またカーボンニュートラル達成の目標とした2050年まで25年を切った中、短期の温暖化対策としてCH₄を含む短寿命気候強制因子(SLCF)への対策が大きな影響を与え得ることも指摘されており¹⁰⁾、CO₂の排出削減と並行して重要な課題であると言える。

本報告では水稲栽培により発生するCH₄ならびにその発生源となっている稲わらに着目する。日本におけるCH₄排出量のうち水稲栽培によるものが40%以上を占めており⁴⁾、主要な発生源となっている。

有機物の分解によって発生するCH₄は無酸素状態下での微生物活動によって生成促進されることから、湛水した水田の土壌はメタン生成に適した状態である。日本における約80%の水田において、稲わらが有機肥料として土壌にすき込まれており、稲わらの量を炭素量で表現すると、その量は2t-C/(ha・年)前後となっている¹²⁾。

稲わらをバイオマス燃料として捉えた場合、その収量は日本で747万t、世界で7.3億tと推定されており¹³⁾、非常に多い。また一年草であるため継続的な入手が可能である。さらに日本において稲作は平野部で行われていることが多く、山間部で栽培される木材よりも収集が容易であると予想される。このように、稲わらはバイオマス燃料として有望な条件を多く備えていると言える。

本報告では、現在は水田にすき込まれメタンを発生している稲わらをバイオマス燃料として捉え、その稲わらを炭化物とし、製鉄所において石炭代替物として利用したときのGHG削減量を評価した結果について説明する。

2. 提案するGHG削減スキームの概要

2.1 スキームの全体概要

本報告で提案するスキームでは、前述の通り有機物として稲わらに着目する。

GHG発生源として水田と製鉄所に着目すると、現状で

は“水田にすき込まれた稲わら起因のCH₄”と“製鉄所における石炭起因のCO₂”が排出されている。

ここで稲わらを水田にすき込まず製鉄所において石炭代替として利用するとCH₄とCO₂の両方を削減可能なため、CH₄発生のない一般的なバイオマス利用よりも効率の良いGHG削減スキームになり得る。

既報⁹⁾においては炭化していない生の稲わらを石炭と置換した場合のGHG削減効果について検討した。しかしながら製鉄プロセスでの利用を考えると、揮発分の少ない炭化物に変換してからの利用が望ましい場合が多いものと考えられる。そこで本報告においては、製鉄所で使用される石炭の置換を、稲わら炭化物を用いて行った場合のGHG削減効果について検討する。

2.2 メタン排出量の計算方法

水田からのCH₄排出量は、DNDC-Riceモデル¹⁴⁾を元にした回帰式^{15,16)}を用いる。

DNDCモデルは、土壌の炭素や窒素循環をシミュレートするために開発されたプロセスベースの生物地球化学モデルである^{17,18)}。そのモデルを改良し、水田からのCH₄排出量を精密に予測するために開発されたモデルがDNDC-Riceモデルである。

モデルにおいては、有機肥料の分解と土壌中に溶解した有機炭素(DOC)の生成、DOC、水素、窒素等の拡散現象、酸化還元反応によるCO₂やCH₄等の生成消費、大気からの酸素の取り込み、CH₄やCO₂等の大気への放出といった生物化学的な輸送現象が計算される。

ここで水田にすき込まれた稲わらや有機肥料は生物反応により分解され、DOCやCO₂等の土壌中への供給源となる。すなわちすき込まれた稲わらの一部がCH₄に変換され、大気に排出される。

DNDC-Riceモデルから推定されたCH₄排出フラックスを回帰したモデルが日本GHGインベントリ¹²⁾における水田からのメタン排出量算定に採用されている。このモデルでは、CH₄排出フラックスを、日本の地域、水田の排水区分、水管理区分ごとに、肥料の炭素量の関数として回帰している。

なお排水区分とは、降雨に対する水田の排水能力の区分を意味し、排水能力が高い順に4時間排除、日排除、排水不良と区分されている。排水能力が低いほど嫌気性雰囲気になりやすいため、メタン発生量に関係が深いことが分かる。

水管理区分は水田の湛水状態に関する区分を意味し、常時湛水と間断灌溉の区分がある。常時湛水は田植えから中干しまで、ほぼ常に水を張った水管理であり、間断灌溉は水を張った状態と水を落とした状態を繰り返す水管理である。常時湛水の方が嫌気性雰囲気になりやすいため、常時湛水の方がメタン発生量は多い。

その CH₄ 排出量と排出係数はそれぞれ次の式で表現される。

$$E = \sum_{i,j,k,l,m} [A_{i,m} f_{D,i,j} f_{W,i,k} f_{O,l} EF_{C,i,j,k,l,m}]^{16} \quad (1)$$

$$EF_C = aX + b \quad (2)$$

E : 水田からの CH₄ 排出量 [kg-CH₄/年],

A : 水稲作付面積 [ha],

f_D : 排水性割合 [-],

f_W : 水管理割合 [-],

f_O : 施用有機物割合 [-],

EF_C : CH₄ 排出係数 [kg-CH₄-C/ha/年],

i : 地域,

j : 排水性,

k : 水管理,

l : 施用有機物,

m : 中干し期間の延長,

X : 有機物施用量 [kg-C/ha/年],

a : 回帰式の傾き [kg-CH₄-C/kg-C],

b : 回帰式の切片 [kg-CH₄-C/ha/年].

本報告では日本の水田を評価対象とした。日本の地域(北海道, 東北, 北陸, 関東, 東海・近畿, 中国・四国, 九州・沖縄)ごと, 水田の排水区分ごと, また水田の水管理区分ごとに式(2)の a , b が与えられる。日本 GHG インベントリ¹²⁾に記された水田に関する統計データ, すなわち有機物投入量, 水田面積, 排水性割合, 水管理割合, 施用有機物割合を用いて, 稲わらを施用している水田における, 地域ごとの CH₄ 排出フラックスを計算した。

なお有機物施用量は, 施用される有機物の炭素含有量として表現される。稲わらの炭素含有量は文献¹⁹⁻²¹⁾を参考に乾ベースで 40%と仮定した。

2.3 稲わら炭化物と石炭の置換方法

石炭を置換するための稲わら炭化物を作成する試験を行った。稲わら炭化物の収率ならびに発熱量の測定を行った。

まず稲わらは飼料用に市販されているものを用いた。稲わら炭化物の製作は試験電気炉を用いて行った。試験電気炉内に稲わらを充填し, 炉内を窒素置換する。窒素を流通させた状態で炉を昇温し, 炉内の温度が 700℃に到達後 30 分保持することで炭化した。その後窒素の流通を続けることで冷却し, 炭化物を得た。

炭化前後の重量を測定し, 収率を算出したところ, 稲わら炭化物 1kg-dry を得るために必要な稲わらは 4.76kg-dry となった。また低位発熱量は 16.2MJ/kg-dry となった。炭化していない稲わらの低位発熱量は例えば 15.01MJ/kg-dry とされており¹⁹⁾, 約 8%上昇したことが分かる。

この稲わら炭化物と石炭との置換は, 発熱量等価で行うこととした。

湿状態基準の石炭 1kg-wet の発熱量を 24.8MJ/kg-wet,

CO₂ 排出係数を 2.32kg-CO₂/kg-wet²²⁾, 全水分を 13.7%²³⁾ とした。これらの数値を用いると, 無水基準の石炭 1kg-dry の発熱量は 28.4MJ/kg-dry, CO₂ 排出係数は 2.66kg-CO₂/kg-dry と計算できる。

以上をまとめると, 一般炭 1kg-dry を低位発熱量等価で置換するために必要な稲わら炭化物は 1.75kg-dry となり, 炭化していない稲わら換算で 8.34kg-dry となる。

2.4 稲わら乾留に必要なエネルギー

稲わらを乾留するためにはエネルギーを必要とする。しかしながら必要なエネルギー量を正確に見積もることは難しい。そこでここでは安全側に見積もるよう, より高温で乾留が行われるコークス炉のエネルギー消費量を参考にした。コークス炉の熱量原単位は一例として石炭 1t-dry 当り 550~600Mcal (2.3~2.5GJ) であることが示されている²⁴⁾。稲わら乾留に対しても同程度のエネルギーが必要であると仮定する。

コークス炉においては石炭の乾留によりコークス炉ガス(COG)が発生し, COGの一部および製鉄所で発生するその他の副生ガスを用いて乾留の熱エネルギーに充当している。すなわち都市ガス等の外部燃料を使用せずに乾留が行われている。そこで稲わらの乾留においても乾留ガスのみで乾留が行える可能性があるかを検討した。

稲わらを乾留した際に放出されるエネルギー量は以下で計算した。

$$\Delta E = LHV_s \cdot Ms - LHV_c \cdot Mc \quad (3)$$

ΔE : 放出されるエネルギー量 [MJ],

LHV_s: 稲わらの低位発熱量 [MJ/kg-dry],

LHV_c: 稲わら炭化物の低位発熱量 [MJ/kg-dry],

Ms : 乾留前の稲わら量 (=4.76) [kg-dry],

Mc : 乾留後の稲わら炭化物量 (=1.00) [kg-dry].

図1に計算結果を示す。稲わら 4.76kg-dry に対して 55.2 MJが放出されるので, 稲わら 1t-dry 当りでは 11.6GJとなる。この値は前述の石炭 1t-dry 当りの熱量原単位の値 (2.3~

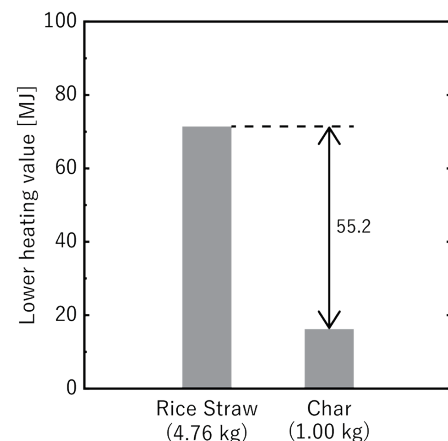


図1 稲わら乾留時に放出されるエネルギー
Energy released during the dry distillation of rice straw

2.5GJ)と比較して十分大きい。したがって稲わら乾留にあたっては乾留ガスのみで、追加の燃料を必要とせず乾留が行える可能性があることが分かった。そこで本検討においては、稲わら乾留に伴う外部エネルギーは不要と想定した。

なお稲わらの乾留により得られるガスの発熱量は未測定であるが、例えば木質バイオマスの場合 2500~4000kcal/Nm³ (10~17MJ/Nm³)²⁵⁾であり、転炉ガス (LDG) (8.3MJ/Nm³)²²⁾と同程度以上である。稲わらもバイオマスであるため同様と予想され、その場合、乾留用の燃料として十分利用可能なものと考えられる。

3. 結果および考察

3.1 水田から発生するメタン排出量

現状における水田からの CH₄ 排出量を図2に示す。前述の通り、地域ごとだけでなく排水区分および水管理区分ごとに CH₄ 排出量が算出されるが、各区分の水田面積を用いて地域ごとの加重平均値として表現した。北海道、東北、北陸の3つの地域における CH₄ 排出フラックスは、その他の地域のものよりも大きい。その理由は稲わらをすき込む時期にあると考えられる。温暖地域では秋の収穫後に稲わらがすき込まれている。秋にすき込まれた稲わらは、土壌温度が高い秋の間に土中で好気性分解が進むため、春に湛水した後の CH₄ 発生量が少ない。一方で降雪地域では春の融雪後に稲わらがすき込まれ、すぐに湛水される。そのため嫌気性雰囲気が強くなり、CH₄ 発生量が多い¹⁵⁾。CH₄ 排出フラックスの大きさが似ていることを考慮して、ここでは北海道、東北、北陸地域を北日本地域、それ以外を南日本地域として取り扱うこととする。

すき込みがない場合、すなわち式(2)における X を 0 とした場合の CH₄ 排出量を評価した結果を図3に示す。有

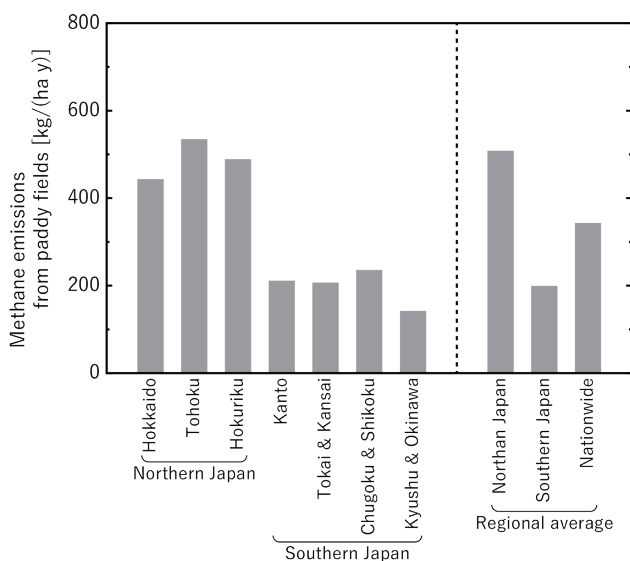


図2 日本の各地域における、稲わらをすき込んだ水田からのメタン排出量の推定⁸⁾
 Estimation of methane emissions from paddy fields with straw plowed in each region of Japan⁸⁾

機物の施用がなくとも、CH₄ は少ないながらもまだ排出される。これは刈り取られたときに残った根や茎等、地中に残存した有機物の影響等が考えられる。

図2と図3の差分が、すき込みを行わなかったときの CH₄ 削減量となり、北日本地域では 439kg-CH₄/(ha・年)、南日本地域では 182kg-CH₄/(ha・年)、全国平均では 302kg-CH₄/(ha・年)と算出される。

3.2 石炭置換当りの GHG 削減量の評価

石炭 1t 置換当りの GHG 削減量を図4に示す。現状の GHG 排出量は、製鉄所における石炭使用によるものと水田における CH₄ 排出におけるものの合計である。ここでは石炭 1t-dry 当りで検討するため、熱量等価な稲わら炭化物 1.75t-dry について、さらにその稲わら炭化物を製造するために必要な乾留前の稲わら 8.34t-dry から発生する CH₄ について考える。

石炭 1t-dry の使用に伴い排出される CO₂ は、前述の CO₂ 排出係数より 2.66t である。一方で 8.34t-dry の稲わらからの CH₄ 排出量は北日本地域で 750kg、南日本地域で 360kg、全国平均では 562kg であり、GWP-100 を用いて CO₂ 等価量に換算すると北日本地域で 20.3t-CO₂e、南日本地域で 9.73t-CO₂e、全国平均では 15.2t-CO₂e となる。したがって現状における石炭 1t 置換当りの GHG 排出量は北日本地域で 22.9t-CO₂e、南日本地域で 12.4t-CO₂e、全国平均では 17.8t-CO₂e となる。

次に稲わらをすき込まず石炭置換に用いた場合、石炭使用に伴う CO₂ 排出が削減される。また CH₄ 排出量は北日本地域で 102kg、南日本地域で 31kg、全国平均では 68kg に低下し、GWP-100 を用いて CO₂ 等価量に換算すると北日本地域で 2.76t-CO₂e、南日本地域で 0.84t-CO₂e、全国平

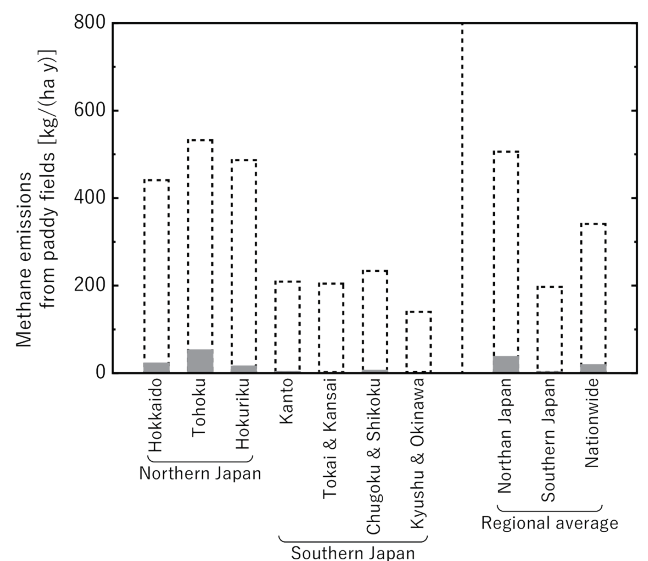


図3 日本の各地域における、稲わらすき込みがない水田からのメタン排出量の推定⁸⁾
 Estimation of methane emissions from paddy fields in each region of Japan with no-straw plowed⁸⁾

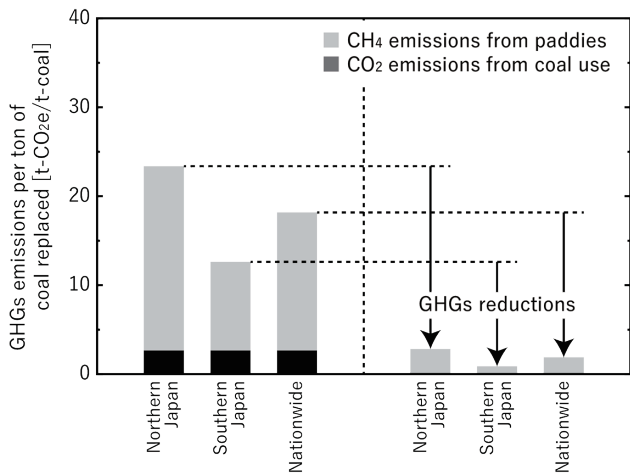


図4 提案するスキームのGHG削減効果 (GWP-100による換算)

GHGs emissions and reductions per ton of coal replaced using GWP-100

均では1.83t-CO₂eとなる。石炭使用に伴うCO₂排出がないこと、稲わら炭化物はバイオマス燃料であることから、その使用に伴うCO₂排出を計上する必要がないことを考慮すると、稲わら炭化物により石炭を置換した場合のGHG排出量は北日本地域で2.76t-CO₂e、南日本地域で0.84t-CO₂e、全国平均では1.83t-CO₂eとなる。

これらの差分が稲わら炭化物により石炭を置換した場合のGHG削減量となり、石炭1t置換当たり11.6~20.1t-CO₂eのGHG削減量となる。

CH₄発生を伴わない、木質バイオマスといった通常のバイオマスにより石炭を置換した場合、石炭使用に伴い発生するCO₂が削減されるのみであることから、そのGHG削減量は石炭1t置換当たり2.7t-CO₂である。しかしながら本スキームでは、先に示した通り、それよりも大きな削減が可能であり、石炭1tを置換すると4.3~7.6tの石炭削減に相当するGHGを削減できることを意味する。

同様の評価を、GWP-20を用いて行った結果を図5に示す。GWP-20の方がGWP-100よりも大きいため、CH₄削減によるGHG削減効果が大きい。その結果、石炭置換1t当たり28.9~54.3t-CO₂eのGHG削減効果が得られる。言い換えれば、石炭1tを置換すれば、GHG削減の観点からは石炭を10.9~20.4t-dry削減したことに相当する。

提案したスキームを用いれば、製鉄所における全ての石炭使用量を削減せずとも、13~23% (GWP-100を用いて換算した場合)、もしくは5~9% (GWP-20を用いて換算した場合)の石炭を置換すればカーボンニュートラルを達成可能と言える。

このGHG削減効果は、炭化していない生の稲わらを石炭と置換した場合のGHG削減効果について検討した既報⁸⁾における効果と比較して大きい。これは熱量等価において石炭1t-dryを置換する際、乾留しない稲わらと置換する場合は1.9t-dryの稲わらとの置換となるが、稲わら炭化

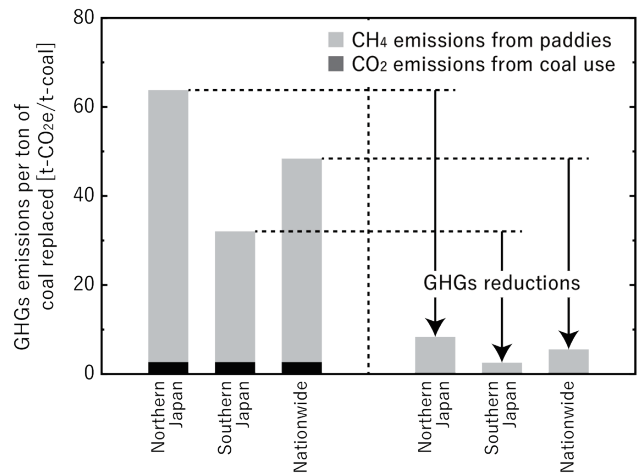


図5 提案するスキームのGHG削減効果 (GWP-20による換算)

GHGs emissions and reductions per ton of coal replaced using GWP-20

物と置換する場合は8.3t-dryの稲わらとの置換となる。したがって石炭1t-dry置換当りに削減されるCH₄が多いためである。

3.3 国内の稲わら利用によるGHG削減効果のポテンシャル

最後に、国内の稲わら全てを稲わら炭化物として石炭置換に利用した際の、GHG削減量のポテンシャルを試算する。

日本GHGインベントリ¹⁴⁾には地域ごとの稲わら施用量が記載されており、それを集計すると日本全体では648万t-dry/年の稲わらが水田においてすき込まれている。その稲わらを乾留し炭化物として、石炭置換に用いた場合、石炭置換量は78万t-dry/年となる。削減されるCH₄は38万t/年となり、GWP-100を用いて換算した場合のGHG削減量は石炭削減を含めて1200万t-CO₂e/年、GWP-20を用いて換算した場合は3300万t-CO₂e/年となる。これは日本の鉄鋼業におけるCO₂排出量の10~28%に相当し、非常に大きな効果があると言える。

ただし稲わらは水田土壌を改善し、収量を向上させる肥料としての役割を有するため²⁶⁻²⁸⁾、それを持ち出して工業利用するには、代替肥料の検討等を行う必要があると考えられ、引き続き検討を行いたい。

4. 結 言

現在は水田にすき込まれ、メタンを発生している稲わらを炭化物とし、石炭代替として利用する、GHG削減効果の大きいスキームを提案し、以下の結論を得た。

GWP-100を用いて換算した場合、本スキームにおける石炭1t-dry置換当りのGHG削減量は11.6~20.1t-CO₂eとなる。すなわち稲わら炭化物によって石炭を1t置換することは、GHG削減効果として石炭4.3~7.6tの置換に相当する

ことを意味する。

一方、GWP-20を用いて換算した場合、この効果はさらに大きくなり、石炭 1t-dry 当りの GHG 削減量は 28.9～54.3t-CO₂e となる。すなわち、稲わら炭化物によって石炭を 1t 置換することは、GHG 削減効果として石炭 10.9～20.4t 分の置換に相当することを意味する。これは、メタンを排出しない通常のバイオマスによる石炭置換と比較して、10.9～20.4 倍の削減効果に相当する。

提案したスキームを用いれば、製鉄所における全ての石炭を削減せずとも、GWP-100を用いて評価した場合には 13～23%、また GWP-20を用いて評価した場合には 5～9%の石炭を稲わら炭化物で置換することで、実質的なカーボンニュートラルを達成可能であると言える。

今後は本スキームを通じて鉄鋼業における GHG 削減を実現できるよう、社会実装に向けた取組みを続けたい。

謝 辞

この成果は国立環境研究所資源循環領域のアドバイスの下、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業 (JPNP21019) の結果得られたものである。関係各位に深く感謝する。

参考文献

- United Nations Framework Convention on Climate Change: Paris Agreement (2015), https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed 2025-07-03)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (2018), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf (accessed 2025-07-03)
- International Energy Agency: Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector (2021), <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (accessed 2025-07-03)
- National Institute for Environmental Studies, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan: National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan 2026 (2026), https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/qu9bd60000050ys2-att/NID-JPN-2026-v3.0_gioweb.pdf (accessed 2026-05-07)
- Ariyama, T.: ISIJ Int. 65, 165 (2025), <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-320>
- Ibitoye, S.E. et al.: Bioresour. Bioprocess. 11, 65 (2024), <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00779-z>
- Sekiya, M. et al.: Nippon Steel Tech. Rep. (127), 77 (2022), <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/127-13.pdf> (accessed 2025-05-30)
- Kobayashi, K. et al.: ISIJ Int. 65, 2064 (2025), <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2025-183>
- IPCC 2006: 2006 IPCC Guidelines for National for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, IGES, 2006, Vol. 1, Chap. 1, p.5
- Masson-Delmotte, V. et al. (eds): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, (2023), 1017, <http://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Saunio, M. et al.: Earth Syst. Sci. Data. 17, 1873 (2025), <https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025>
- National Institute for Environmental Studies, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan: National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan 2023, (2023), Chapter 5, 1, <https://cger.nies.go.jp/publications/report/i164/i164.pdf> (accessed 2025-05-30)
- Kurokuchi, Y.: Wood Ind. 76, 244 (2021) (in Japanese)
- Fumoto, T. et al.: Global Change Biol. 14, 382 (2008), <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01475.x>
- Katayanagi, N. et al.: Sci. Total Environ. 547, 429 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.149>
- Katayanagi, N. et al.: Sci. Total Environ. 601-602, 346 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.090>
- Li, C. et al.: J. Geophys. Res. Atmos. 97, 9759 (1992), <https://doi.org/10.1029/92JD00509>
- Li, C.: Global Biogeochem. Cycles. 8, 237 (1994), <https://doi.org/10.1029/94GB00767>
- Ishii, K. et al.: Development of torrefaction technology for the rapid expansion of fuel use of agricultural residues, JFE 21st Century Found. Tech. Res. Rep. (2019) (in Japanese), https://www.jfe-21st-cf.or.jp/furtherance/pdf_hokoku/2019/20.pdf (accessed 2025-05-30)
- Zhao, H.: Energy Fuels. 29, 6404 (2015), <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00851>
- Okumura, Y.: Trans. JSME B. 79, 2798 (2013) (in Japanese), <https://doi.org/10.1299/kikaib.79.2798>
- Agency for Natural Resources and Energy: Standard Calorific Value and Carbon Emission Factor for Fossil Fuel Energy Sources in Japan, 2022 Revised Edition (2022) (in Japanese), https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte_039.xlsx, (accessed 2025-05-30)
- Kainou, K.: RIETI Discussion Paper Series 14-J-047, Research Institute of Economy, Trade and Industry, (2014) (in Japanese)
- The Iron and Steel Institute of Japan: Steel Handbook. 5th Edition. Vol. 1, 2014, p. 116 (in Japanese)
- Sasauchi, K.: J. Combust. Soc. Jpn. 47, 31 (2005) (in Japanese), https://doi.org/10.20619/jcombsj.47.139_31

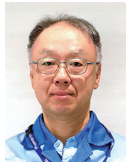
- 26) Fang, K. et al.: J. Soils Sediments. 25, 2255 (2025), <https://doi.org/10.1007/s11368-025-04073-z>
- 27) Zhang, P. et al.: Plants. 13, 1357 (2024), <https://doi.org/10.3390/plants13101357>
- 28) Sekiguchi, K., Kanum, N.: Bulletin of Gunma Agricultural Technology Center, 19, 13 (2022) (in Japanese), <https://www.pref.gunma.jp/uploaded/attachment/46059.pdf> (accessed 2026-02-20)



小林一暁 Kazuaki KOBAYASHI
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



関屋政洋 Masahiro SEKIYA
デジタル改革推進部 部長代理



吉野博之 Hiroyuki YOSHINO
プロセス研究所 プロセス技術部
上席主幹研究員