

令和 5 年度沖縄型クリーンエネルギー導入促進事業調査
(その他クリーンエネルギー等の導入に関する FS 調査)

沖縄県内に賦存する
未利用木質廃棄物と草本系バイオマス混合による
混焼燃料の生産に関する調査実施報告書

令和 6 年 3 月

沖縄出光株式会社

目次

<u>第 1 章</u>	<u>序論</u>	1
1.1	はじめに	1
1.1.1	カーボンニュートラルに対する世界の動向	1
1.1.2	現状の石炭燃焼について	2
1.2	ブラックペレットの可能性	3
1.3	原材料について	3
1.3.1	未利用木質廃棄物の可能性	3
1.3.2	ソルガムの可能性	3
1.4	調査事業の目的	3
<u>第 2 章</u>	<u>ブラックペレットについて</u>	4
2.1	ブラックペレットの特徴	4
2.1.1	ブラックペレットの貯蔵・保管性能	4
2.1.2	ブラックペレットの燃焼性能	4
<u>第 3 章</u>	<u>原材料について</u>	5
3.1	未利用木質廃棄物の特徴	5
3.2	ソルガムについて	5
3.2.1	ソルガムの特徴	5
3.2.2	ソルガム多段階利用の可能性	5
3.2.3	ソルガムの栽培	6
<u>第 4 章</u>	<u>ブラックペレット製造工程の調査</u>	7
4.1	ブラックペレットの製造工程	7
4.2	原材料の乾燥工程	8
4.2.1	乾燥工程の必要性	8
4.2.2	乾燥工程の選択肢	8
4.3	原材料のペレット化工程	9

4. 3. 1 ペレット化のメリット.....	9
4. 3. 2 ペレット化方法の選択肢.....	9
4. 4 原材料・ペレットの半炭化工程.....	9
4. 4. 1 半炭化工程の原理・基礎理論.....	9
4. 4. 2 半炭化方法の選択肢.....	10
<u>第 5 章 ブラックペレットの製造.....</u>	<u>11</u>
5. 1 製造方法.....	11
5. 2 各工程の結果および課題.....	12
5. 2. 1 乾燥工程の結果および課題.....	12
5. 2. 2 ペレット化工程の結果および課題.....	13
5. 2. 3 半炭化工程の結果および課題.....	16
5. 3 各製法(前ペレ・後ペレ)の結果および課題.....	19
5. 3. 1 前ペレ製法の結果および課題.....	19
5. 3. 2 後ペレ製法の結果および課題.....	19
<u>第 6 章 ブラックペレットの性状分析および燃焼試験.....</u>	<u>20</u>
6. 1 サンプルの選定.....	20
6. 2 結果および考察.....	20
6. 2. 1 基礎性状分析結果および考察.....	20
6. 2. 2 混焼試験結果および考察.....	22
6. 2. 3 燃焼時排ガスデータの結果および考察.....	23
6. 2. 4 灰付着性評価試験結果および考察.....	23
<u>第 7 章 結論.....</u>	<u>24</u>
<u>第 8 章 今後の課題とスケジュール.....</u>	<u>24</u>
<u>参考文献.....</u>	<u>24</u>

第1章 序論

1.1 はじめに

1.1.1 カーボンニュートラルに対する世界の動向

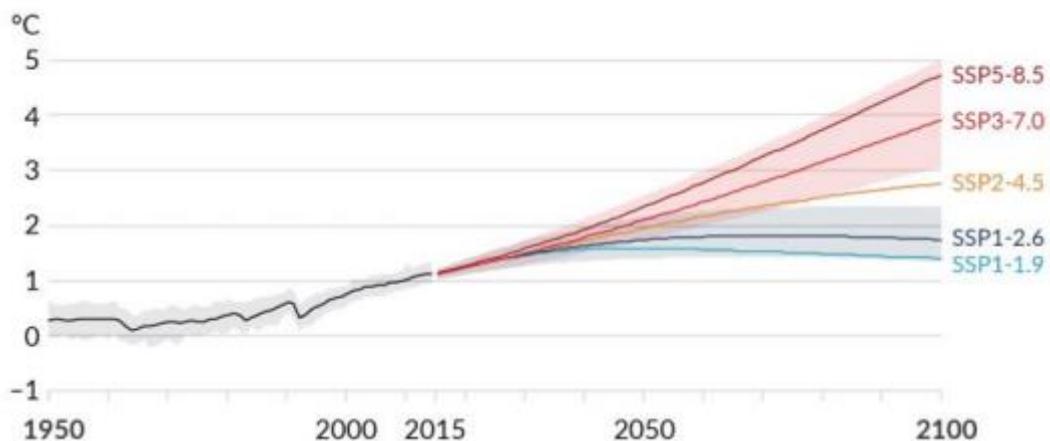


図1 1850年～1900年を基準とした世界平均気温の変化 [1]

世界における平均気温を見ると、1900年代に比べ2020年時点では約1.1°C上昇しており、このまま対応せず同じ状況が続ければ更なる上昇が予想される。また近年、世界各地で気象災害が頻発しており、地球温暖化がこのまま進めば、平均気温の上昇や災害発生リスクがさらに高まると予想されている。そのため、地球温暖化の原因とされる温室効果ガスを削減し、実質ゼロにするカーボンニュートラルが対策として有効と目されており、COP26が終了した2021年11月時点で、154カ国・1地域が2050年等の年限を区切ったカーボンニュートラルの実現を表明している。このような状況下で、地産地消型の循環社会を実現することには大きな意義があると考える。

1.1.2 現状の石炭燃焼について

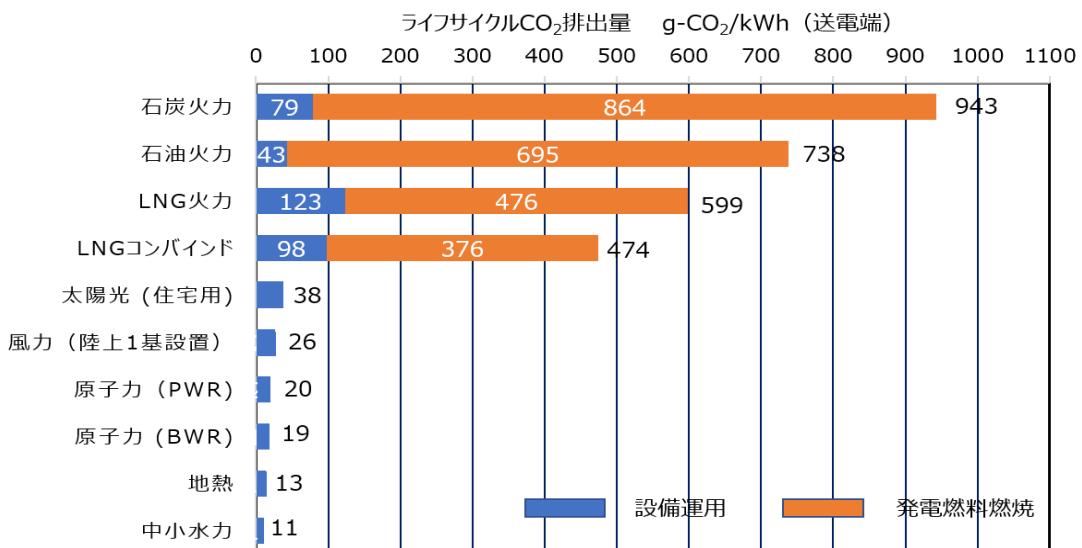
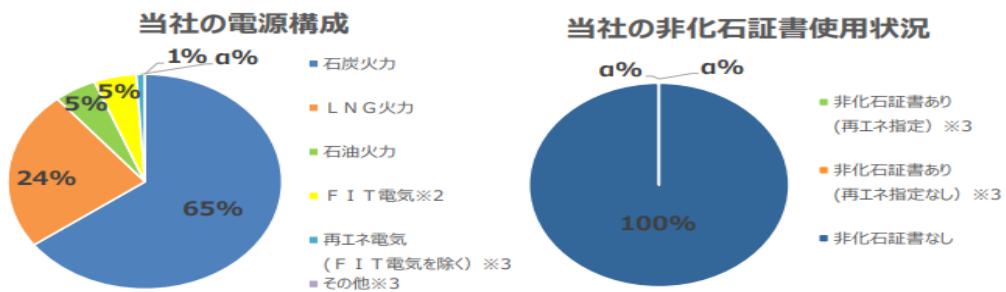


図2 電源別 CO₂排出量 [2]

図2から石炭火力が、他の電源を用いる発電と比較し CO₂の排出量が極めて高いことがわかる。

当社の電源構成・非化石証書使用状況について※1 (2022年度実績値)

当社は非化石証書を活用した実質的に再生可能エネルギー由来のCO₂フリー電気等を一部のお客さまに対して販売しております。それ以外のメニューの電源構成および非化石証書使用状況は以下のとおりです。



※1 本資料は経済産業省資源エネルギー庁の制定する「電力の小売営業に関する指針」に基づき、算定・公表しています。

※2 当社がこの電気を調達する費用の一部は、当社のお客さま以外の方も含め、電気をご利用の全ての皆さまから集めた賦課金により賄われています。この電気のうち、非化石証書を使用していない部分は、再生可能エネルギーとしての価値やCO₂ゼロエミッション電源としての価値は有さず、火力発電なども含めた全国平均の電気のCO₂排出量を持った電気として扱われます。

※3 構成比が1%未満となっているため「a」で表示しています。

○当社の2022年度のCO₂排出係数（調整後排出係数）は0.680kg-CO₂/kWh（暫定値）です。

○当社は非化石証書の購入により、実質的に、非化石電気の割合の向上をはかります。

○四捨五入の関係で、合計が100%にならないことがあります。

Copyright © The Okinawa Electric Power Company, Incorporated. All Rights Reserved.

図3 沖縄電力の電源構成 [3]

しかし、図3からわかるように沖縄における電源は約65%が石炭火力となっている。

1.2 ブラックペレットの可能性

木質ペレットは、森林から発生する間伐材、樹皮、のこ屑などを細粉・加圧してペレット状に加工したもので、木材の部位や製造方法から各種呼び名が異なる。樹皮を含まない樹幹のみの木質ペレットはホワイトペレット、樹皮と樹幹からなるものはブラウンペレット（全木ペレット）、木質ペレットを半炭化したものはブラックペレットと呼ばれる。木質ペレットは樹木の成長過程で吸収したCO₂を燃焼時に出すことからプラスマイナスゼロと考えられ石炭混焼によるCO₂削減に貢献できると言える(1)。

1.3 原材料について

1.3.1 未利用木質廃棄物の可能性

沖縄では、県内で排出される木質廃棄物のうち、年間約3万t程度が未利用のチップ状態で賦存する。本調査事業では、この未利用で賦存する木質廃棄物を処理しつつ、ライフサイクルGHGを形成すべくブラックペレットの原材料としての利用可能性を探る。

1.3.2 ソルガムの可能性

イネ科、一年生の穀物であるソルガムは日本ではあまりなじみがないが、世界五大穀物のひとつとされている。弊社は、後述する生育の特徴および多段階利用における可能性の幅広さから、ブラックペレット原材料に用いることに可能性を感じ、本調査事業にて調査することとした。

1.4 調査事業の目的

沖縄県内に大量に賦存する未利用バイオマス資源（木質廃棄物）と成長の早い草本系バイオマス（ソルガム種）を混合させた石炭混焼材を火力発電所へ供給するスキームを構築し、石炭使用量を減少させCO₂の削減を図る。バイオマスによる混焼材は、地産地消に重点を置くことでライフサイクルGHGの観点において優位性を持たせると共に、バイオマス循環によって沖縄のGX（グリーン・トランスフォーメーション）への貢献を目指す。

第2章 ブラックペレットについて

2.1 ブラックペレットの特徴

2.1.1 ブラックペレットの貯蔵・保管性能



図4 木質チップの保管に関する注意書き [4]

通常の木質ペレットでは纖維が残るため石炭混焼には石炭粉碎ミルなどの改造が必要であり疎水性にも課題があるが、ブラックペレットであれば石炭粉碎ミルを流用できるうえに疎水性に優れており野積みも可能と報告されている。ただし、図4の通り、野積みに関しては雨水等により発酵が進み発熱、発火の可能性もあり、石炭同様に取扱いに関しては注意が必要である。

2.1.2 ブラックペレットの燃焼性能

半炭化し石炭の性状に近づけることで、一般的にホワイトペレットでは混焼率の上限が3%程度であるところ、ブラックペレットであれば20%程度の混焼が可能であり、研究が進めばそれ以上の混焼率やブラックペレット専焼の可能性も考えられている。半炭化により一手間必要で製造コスト増となるが、それに見合う恩恵が得られると言える。

第3章 原材料について

3.1 未利用木質廃棄物の特徴

本調査事業で用いる木質廃棄物は、道路にはみ出した樹木等を伐採した際に発生するような剪定枝が主である。そのため、様々な種類の樹木等が混在しており、原材料の性状が安定しているとはいえない。また、収集業者では土壌や小石等が付着しているものは収集しないとしているが、完璧には確認できないため多少イレギュラーな混入物を含むリスクがある。混入物の除去をどのようにして行うかについては今後検討が必要になる。

3.2 ソルガムについて

3.2.1 ソルガムの特徴



図5 栽培したソルガム(約4.7t)

ソルガムは、国家事業にて名古屋大学が開発した3~4ヶ月で草丈5mに迫る長大型系統を使用した。当該ソルガムは成長が早く、サトウヒの夏植えにおける間作期利用が可能である。この間作期のソルガム栽培は、サトウヒ農家にとって収入面に寄与し、生産意欲を高める効果が期待できる。今後、サトウヒとの競合を回避しながら栽培面積を拡大できる可能性があると考えられる。

3.2.2 ソルガム多段階利用の可能性

ソルガムは多段階利用の可能性も多く秘めており、種子を用いたグルテンフリー食材、家畜飼料、糖度の高さを活かした酒や燃料の製造等が挙げられ、既に流通しているものも多い。多段階利用を行うことでブラックペレットのコスト低減を図ることができる。

3.2.3 ソルガムの栽培



図6 収穫したソルガムの種子

ソルガムの栽培は、顧問指導のもと行なった。国頭村農地 20 a では、堆肥、化成肥料を土壤に混ぜ 4 月下旬に播種を行なった。3 か月後収穫を行い刈取後重量約 4.7t を収穫することができた。

また、同じく 4 月下旬に播種した伊計島農地 15 a では 12 月まで栽培を行い種子の収穫を行うこととした。11 月中旬ごろから出穂し、12 月上旬から下旬にかけて種子の収穫をおこない脱穀後重量は 127.1kg であった。(多段階利用調査については 3 月以降実施予定)。

顧問曰く、ソルガムは沖縄では 11 月で出穂、12 月で収穫でき、出穂は播種からの経過日数ではなく季節によって起こることだった。つまり理論上は 4~7 月、7 月~10 月で 2 期栽培を行い、ペレット原料や飼料、搾汁液として利用し、10 月~12 月で種子を収穫するという 3 期作が可能であるといえる。

伊計島農地では台風の影響で一部倒壊し、立て起こしや株出しを行う対応が必要となつたが、国頭村農地では播種後は何も行わず収穫まで行うことができ、基本的に手がかかるない栽培しやすい植物であることがわかった。

第4章 ブラックペレット製造工程の調査

4.1 ブラックペレットの製造工程

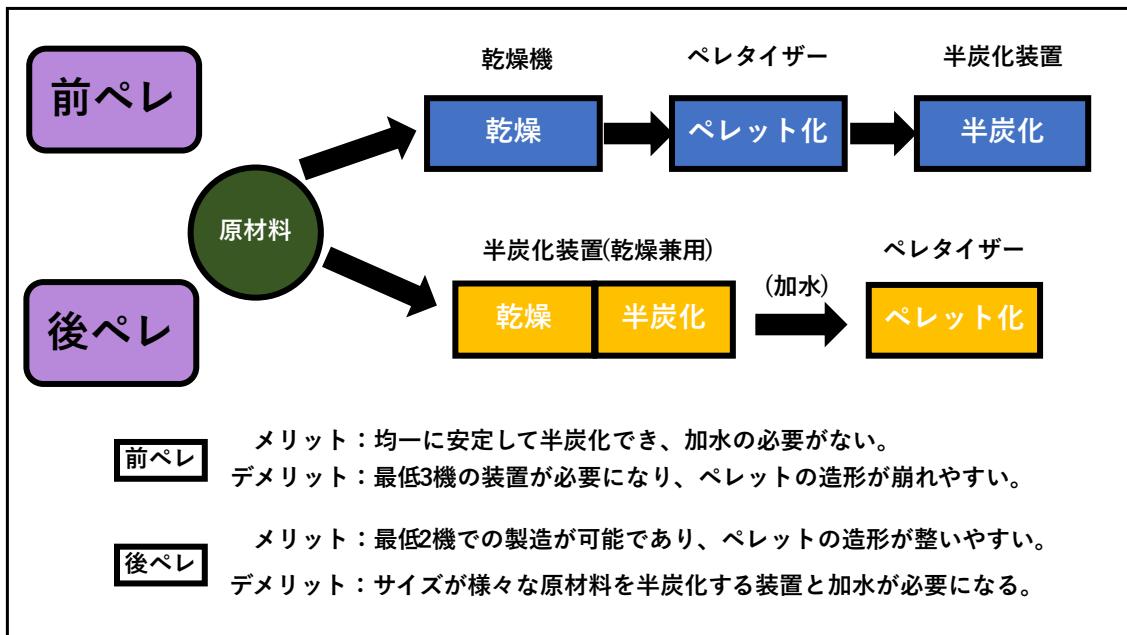


図7 前ペレ後ペレのメリットおよびデメリット

ブラックペレットの製造工程において、原料をペレット化後に半炭化という流れが一般的であるが、弊社では原料を半炭化後にペレット化することで得られるメリットもあると考えた。図7に両工程のメリット、デメリットを示した。ペレット化には原材料の含水率が10%～15%という条件がある。そのため、後ペレでは加水が必要になり、あわせて不揃いの原材料を半炭化する技術が必要となるが、この課題をクリアできるのであれば後ペレの可能性も大いにあると言える。本調査では、両工程でサンプル製造を試み、まずは成型が可能かを検証することとした。

4.2 原材料の乾燥工程

4.2.1 乾燥工程の必要性

乾燥工程の必要性として、前述したペレット化における条件がある。水分が低すぎ、または高すぎると固化しにくく、形になったとしても脆いペレットになるためハンドリング性が悪くなる。弊社ではペレタイザーメーカーの指定に則り、含水率 10%～15%程度を目安とし乾燥を行なった。

もう一つの乾燥工程の必要性として、原材料の発酵防止が挙げられる。特にソルガムは糖度が高く発酵しやすい。発酵すると悪臭に加え発熱が起り発火の原因ともなり得るため収穫後 3 日以内には全量乾燥を行なった。

4.2.2 乾燥工程の選択肢



図 8 実際に用いた真空乾燥機

原材料の乾燥方法として、天日干し、乾燥用シート、真空乾燥機、ロータリーキルン等が挙げられる。本事業では乾燥委託を受けてくださる業者様のバッチ式真空乾燥機を用いて乾燥を行なった。

4.3 原材料のペレット化工程

4.3.1 ペレット化のメリット

ペレット化のメリットとして、運搬性・取扱性の向上、粉塵がでにくいことによる粉塵爆発防止、保管容積の縮小(密度を高くするため)等が挙げられる。

4.3.2 ペレット化方法の選択肢



図9 リングダイ方式とフラットダイ方式 [5]

ペレタイザの構造には大きく分けてリングダイ方式、フラットダイ方式の2種類がある。それぞれ特性が異なるが、弊社としては適合原料サイズ・含水率の幅が広いとされるフラットダイ方式のペレタイザを用いることとした。また、フラットダイ方式は比較的メンテナンスが容易であるという点も選定の理由である。

4.4 原材料・ペレットの半炭化工程

4.4.1 半炭化工程の原理・基礎理論

「半炭化」とは、別名「トレファクション」とも呼ばれ、木質バイオマスを低酸素状態かつ200~300°Cで加熱することで有機物を分解して炭素成分が多い物質にするための燃料化技術のことである。半炭化することで、体積あたりの保有エネルギー密度が高くなり、乾燥前よりも重量と体積が減るため運搬性がよく、さらにペレット化すれば疎水性にも優れるため屋外での保存にも適するといったメリットが挙げられる。

4.4.2 半炭化方法の選択肢



図10 ロータリーキルン式(左) 過熱水蒸気式(右)

弊社内で検討した半炭化装置はロータリーキルン, 過熱水蒸気, 水蒸気爆碎の3方式であった。処理量, 設備費用, 騒音などの運転条件等を比較し, 本調査事業ではロータリーキルン, 過熱水蒸気の2方式でブラックペレットのサンプル製造および性状分析, 燃焼試験を行い比較検討することとした。

第5章 ブラックペレットの製造

5.1 製造方法

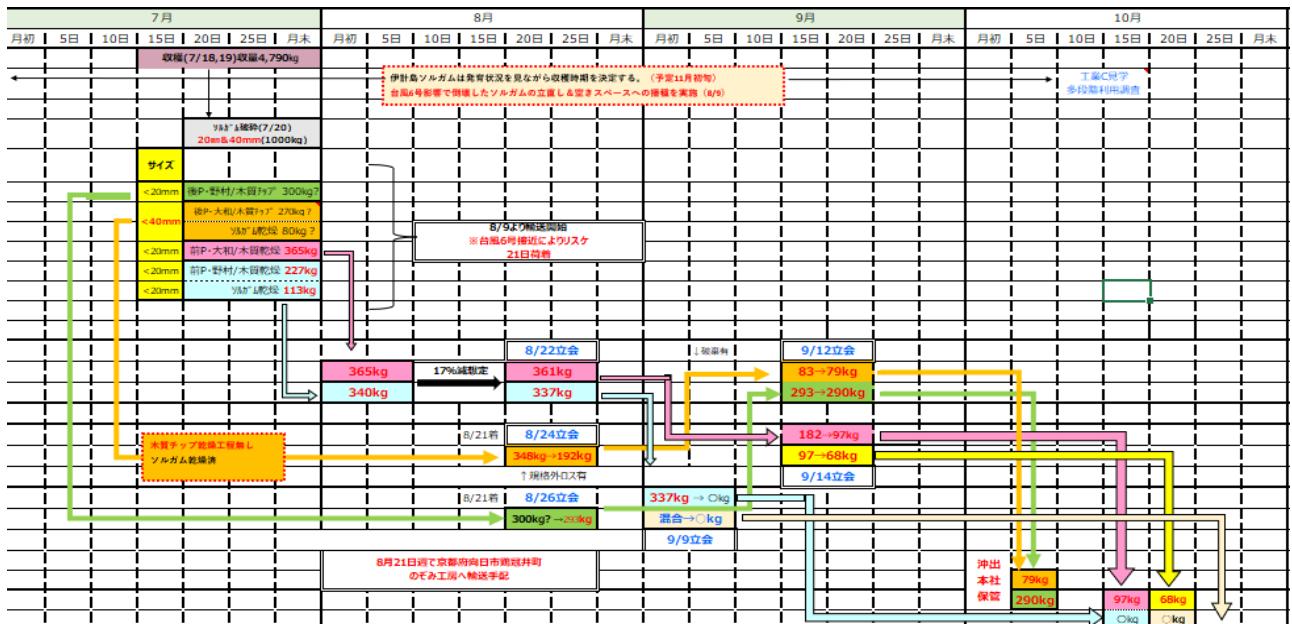


図 11 ブラックペレットサンプル製造スケジュール

本調査事業では、まず7月にソルガム収穫および木質廃棄物の手配、乾燥を実施した。8月には半炭化装置メーカー2社およびペレタイザーメーカー1社、計3社へ原材料を輸送し現場立会のうえで処理テストを実施いただいた。処理後のサンプルはペレタイザーメーカーから半炭化装置メーカーへ、半炭化装置メーカーからペレタイザーメーカーへ輸送した。9月に処理テストを実施し以下の6検体を得た。(当初は4検体製造予定だったが、歩留まりが想定より良く、燃焼試験における最低必要量を6検体でも製造できると判断し6パターンの製造となった。)

- | | |
|-------------------|-----------------|
| ①前ペレ (木質単体) | 半炭化 : 過熱蒸気式 |
| ②前ペレ (木質+ソルガム) 混合 | 半炭化 : 過熱蒸気式 |
| ③前ペレ (木質単体) | 半炭化 : ロータリーキル方式 |
| ④前ペレ (木質+ソルガム) 混合 | 半炭化 : ロータリーキル方式 |
| ⑤後ペレ (木質単体) | 半炭化 : 過熱蒸気式 |
| ⑥後ペレ (木質+ソルガム) 混合 | 半炭化 : ロータリーキル方式 |

5.2 各工程の結果および課題

5.2.1 乾燥工程の結果および課題

【北川鉄工所向け】

乾燥量 (a)	目標含水率	投入原料	乾燥機投入量/b	処理時間/b	乾燥量/b	燃料使用量/b	aを作る為の機械稼働回数	aを作るために掛かった時間	使用した燃料総量	電気使用量5.85kw/h
木質乾燥300kg	15%	約1200kg	約300kg	6時間	70kg	18ℓ	4 b	26時間	72ℓ	152.1kw
ソルガム乾燥150kg	15%	約1100kg	約280kg	16時間	35kg	48ℓ	4 b	64時間	192ℓ	374.4kw

【北川鉄工所向け】

乾燥量 (a)	目標含水率	投入原料	乾燥機投入量/b	処理時間/b	乾燥量/b	燃料使用量/b	aを作る為の機械稼働回数	aを作るために掛かった時間	使用した燃料総量	電気使用量5.85kw/h
木質乾燥400kg	15%	約1800kg	約300kg	6時間	70kg	18ℓ	6 b	36時間	108ℓ	201.6kw

【大和三光製作所向け】

乾燥量 (a)	目標含水率	投入原料	乾燥機投入量/b	処理時間/b	乾燥量/b	燃料使用量/b	aを作る為の機械稼働回数	aを作るために掛かった時間	使用した燃料総量	電気使用量5.85kw/h
木質乾燥300kg	50%以下	約300kg	約300kg	6時間	70kg	18ℓ	乾燥なし			
ソルガム乾燥150kg	15%	約1100kg	約280kg	16時間	35kg	48ℓ	4 b	64時間	192ℓ	374.4kw

【京都向け】

乾燥量 (a)	目標含水率	投入原料	乾燥機投入量/b	処理時間/b	乾燥量/b	燃料使用量/b	aを作る為の機械稼働回数	aを作るために掛かった時間	使用した燃料総量	電気使用量5.85kw/h
木質乾燥400kg	15%	約1800kg	約300kg	6時間	70kg	18ℓ	6 b	36時間	108ℓ	201.6kw

図 12 真空乾燥機による乾燥処理データ

図 12 のデータ通り木質廃棄物(含水率 50%前後)300kg の乾燥に約 1 日程度, ソルガム(含水率 60~70%前後)に関しては含水率の高さ, および収穫日に雨に打たれることも影響してか 150kg の乾燥に 2.5 日以上かかる結果となった. 本調査事業では処理テストや燃焼試験の日程に間に合わせるためマンパワーで全量を乾燥させたが, 事業化に向けては他の乾燥方法を検討する必要がある.

5.2.2 ペレット化工程の結果および課題



図 13 使用ペレタイザー



図 14 前ペレ(左), 後ペレ(右)原材料外観および性状



図 15 前ペレ(左), 後ペレ(右)ペレット外観

		T-1	T-2	T-3			T-1	T-2
条件	材料名称	木チップ	ソルガム+木チップ	ソルガム+木チップ	結果	名称	木チップ (半炭化)	ソルガム+木チップ (半炭化)
	水分率	11.7%	14.2%	14.2%		水分率	10%(加水調整)	12%(加水調整)
	材料投入方法	スクリュー・コンベヤ	←	←		材料投入方法	手投入	←
	ダイス	Φ7mm 標準	Φ7mm 標準	Φ7mm 標準+5mm		ダイス	Φ7mm 標準-3mm	Φ7mm 標準-9mm
	ローラ形状	平行溝	←	←		ローラ形状	平行溝	←
	ローラ負荷平均値	19.0A	16.1A	15.8A		ローラ負荷平均値	23.1A	17.7A
	製造能力	85.2kg/h	65.5kg/h	55.4kg/h		製造能力	72.7kg/h	63.0kg/h
	ダイス温度平均値	91.5°C	79.3°C	90.0°C		ダイス温度平均値	95.8°C	77.6°C
	ペレット嵩密度	0.72kg/L	0.64kg/L	0.71kg/L		ペレット嵩密度	0.84kg/L	0.70kg/L
	ペレット水分率	9.9%	8.6%	8.5%		ペレット水分率	4.9%	6.1%
結果	歩留率*	98.8%	99.1%	99.4%		歩留率*	99.0%	95.7%
	機械的耐久性	—	—	—		機械的耐久性	93.4%	90.3%
	ペレット成形可否	○	○	○		ペレット成形可否	○	○
	ペレット回収量	170kg	25kg	168kg		ペレット回収量	290kg	79kg
		T-4	T-5					
	材料名称	ソルガム+木チップ	木チップ					
	水分率	14.2%	11.7%					
結果	材料投入方法	スクリュー・コンベヤ	←					
	ダイス	Φ7mm 標準+5mm	Φ7mm 標準					
	ローラ形状	平行溝	←					
	ローラ負荷平均値	18.5A	19.3A					
	製造能力	87.5kg/h	84.6kg/h					
	ダイス温度平均値	84.3°C	88.2°C					
	ペレット嵩密度	0.72kg/L	0.75kg/L					
結果	ペレット水分率	8.8%	8.1%					
	歩留率*	99.3%	98.8%					
	機械的耐久性	97.8%	95.7%					
	ペレット成形可否	○	○					
	ペレット回収量	144kg	191kg					

図 16 ペレット化テスト結果【前ペレ:T-1～T-5(左), 後ペレ:T-1～T-2(右)】

前ペレにおいては大きな問題はなく造粒することができ、歩留率は平均で99%近くあった。しかし、機械的耐久性において、日本木質ペレット協会の定める試験方法に準拠して計測した結果、木質ペレット品質規格の97.5%を満たしていない検体もあった。



図 17 形状の異なるダイス

後ペレにおいても大きな問題はなく造粒することができた。しかし、図 16 の通り歩留率と機械的耐久性において木質単体とソルガム混合では差が出た。これはダイスの条件変更により、ダイスの摩擦熱による温度上昇やローラ負荷が軽くなることによって違いがでたことが原因と考えられる（図 9 参照）。また、後ペレでは原材料のサイズにばらつきがあり（原材料調達時点の問題であると考えられ、原因調査中）、連続運転前半と後半によってペレットの品質に大きなばらつきが発生したことも影響していると考える。

続いて安定稼働の面について、後ペレでは今回半炭化装置の受入可能原料サイズ等の関係から、20mm アンダーと 40mm アンダーの半炭化した原材料をペレット化した。結果として 40mm アンダーの原材料は時間当たりの処理量が落ち、ダイスが詰まる等の事象も発生した。そのため、この 2 種では 20mm アンダーの方がペレット化に最適なサイズであることがわかった。

全体の考察として、一般にダイス温度の上昇とともにペレット品質（嵩密度、歩留率）は低下する傾向にあるが、前ペレ後ペレ共に温度上昇に比例して品質も向上したため実機においても安定したペレット成型が可能であると考えられる。通常と逆の結果になつた原因として材料性状にばらつきがあることが関係していると推測する。

5.2.3 半炭化工程の結果および課題

①ロータリーキルン前ペレの場合



図 18 ロータリーキルン(YCS-02)



図 19 単体品(左)混合品(右)別, 投入原料(上)および処理品(下)

No.	項目	分類	単位	Run2	Run4
1	サンプル			単体品	混合品
2	処理温度	設定値	°C	700	700
3	処理前質量	設定値	kg/h	18.0	18.0
4	入口水分	測定値	%W.B.	8.54	9.63
5	入口見掛密度	測定値	kg/m ³	740	670
6	無水分質量	計算値	kg/h	16.5	16.3
7	出口水分	測定値	%W.B.	0.78	0.63
8	出口見掛密度	測定値	kg/m ³	540	500
9	処理後回収量	測定値	kg/h	8.9	9.3
10	揮発率	計算値	%-DS	46.3	44.4
11	乾燥速度	計算値	kg/m ³ h	6.8	7.8
12	炭化速度	計算値	kg/m ³ h	42.2	41.3
13	単位処理量	計算値	kg/m ³ h	83.6	83.6
14	装置容積	設定値	m ³	0.215	0.215
15	滞留時間	計算値	min	28	25

Run1～Run4 まで実施した。単体と混合品の比較では、揮発率等でソルガム有無による影響と思われる数値の違いが多少散見されるが、現時点の知見では誤差の範疇であると認識している。

運転中の問題として、出口ダクト等でダストによる閉塞や燃りが散見された。実機ではダスト対策を施しているとのことだが、懸念点のひとつであるといえる。

図 20 試験内容および結果

②ロータリーキルン後ペレの場合

TRT試験機	
<p>試 料 名 : 木質チップ+ソルガムの混合品</p> <p>使 用 試 験 機 : 通気回転半炭化装置『TRT-03』</p> <p>シェル寸法 : $\phi 500 \times 1500$ [mm]</p> <p>シェル容積 : 0.295 [m³]</p> <p>試験機熱源 : LPガスバーナ</p>	

図 21 ロータリーキルン(TRT-03)



図 22 投入原料(左), 処理品(右)

No.	項目	分類	単位	Run4
1	処理温度	設定値	°C	300
2	処理前質量	設定値	kg/h	15.0
3	入口水分	測定値	%W.B.	25.84
4	入口見掛け密度	測定値	kg/m ³	100
5	無水分質量	計算値	kg/h	11.1
6	出口水分	測定値	%W.B.	2.31
7	出口見掛け密度	測定値	kg/m ³	85
8	処理後回収量	測定値	kg/h	9.3
9	揮発率	計算値	%-DS	12.9
10	乾燥速度	計算値	kg/m ³ h	12.4
11	炭化速度	計算値	kg/m ³ h	17.3
12	単位処理量	計算値	kg/m ³ h	50.9
13	装置容積	設定値	m ³	0.295
14	滞留時間	計算値	min	13

Run1～Run6まで実施した。結果としてRun4の条件が安定条件の中では最も高い揮発率となった。ただし、一般的なサンプルよりは比較的揮発率が上がりにくい傾向にあった。これは原材料の形状が不均一であることが要因の一つであると考えられる。

図 23 試験内容および結果

③過熱水蒸気の場合



図 24 処理品前ペレ(左)後ペレ(右)

過熱水蒸気の利用させていただいた装置は実機であったため数字での試験結果は得られていない。用いた装置はペレットや木くずを想定しておらず竹チップ用として設計されているため、装置内での転がりが読めずスピード調整が難しかった。そのため一部サンプルは 2 度処理を行う等の対応が必要になり必要以上にペレットが受ける衝撃を増やす形となった(設計段階で緩和は可能とのこと)。

半炭化面に関しては過熱水蒸気の特徴通り、外観は芯まで均等に炭化が進んでいるよう見え、燻りもあまりみられなかった。250kg/h ほどの処理量であったが、目視では炭化度合のムラもないようにみえた。

炉内温度が設定温度以上に達すると排出口にて自動で散水する設備もついており、応用すれば含水率の調整等も可能であると考えた。

5.3 各製法(前ペレ・後ペレ)の結果および課題

5.3.1 前ペレ製法の結果および課題

ペレットの半炭化を行う段階で、前述した2度処理を実施したことや衝撃を受けやすい設計であったことも相まって、比較的もろい形状のペレットになった。ただし、過熱水蒸気メーカーについてはペレット用として設計することはできるとのことであったため解決できる可能性はある。

半炭化段階においては、ペレットに成型されサイズが均一になるため、炭化度合のムラや燻りが発生しにくく処理もスムーズに行うことができた。

5.3.2 後ペレ製法の結果および課題

最大の課題は、木質廃棄物の半炭化であった。木質廃棄物は様々な植物が含まれておりサイズも不均一であるため炭化が均一に進まず、ムラや燻りが発生する等の問題が発生しやすかった。今後木質廃棄物を用いて後ペレを行う場合には対策が必要である。

また、ペレット化において投入原料の含水率は10%～15%が好ましく、範囲外であると成型がうまくできない。後ペレでは、半炭化を行い含水率が数%まで低下したものをペレット化するため加水する工程が必要になる。本調査事業では手作業で加水を行なつたが、後ペレで事業化を目指す場合には自動で指定した含水率に加水できるシステムを導入する必要があると考える。

最終的な成果物としては、最終工程でペレット化を行うため形状が安定しており、ハンドリング性等が期待できる外観となっていた。また、今回は乾燥機にて乾燥を行なつたが、後ペレの場合は乾燥兼半炭化を1つの装置で行うことができる可能性がある点も特徴であるため、この点に関しては引き続き調査していきたい。

第6章 ブラックペレットの性状分析および燃焼試験

6.1 サンプルの選定

製造した6検体は製法(前ペレ・後ペレ),原材料(木質単体・ソルガム混合),半炭化製法(過熱水蒸気,ロータリーキルン)の3要素が異なる。本調査事業では半炭化製法による品質の違いを見るため「前ペレ(木質+ソルガム)混合」を過熱水蒸気とロータリーキルンによって半炭化した2検体で性状分析および燃焼試験を行うこととした。また,石炭混焼試験を行うため,混焼する石炭の性状分析もあわせて行なった。

6.2 結果および考察

6.2.1 基礎性状分析結果および考察

項目	単位	豪州一般炭 (MO炭)	ロータリーキルン BP (BP①)	過熱水蒸気 BP (BP②)	K ₂ O		1.60	6.84	7.14
全水分	wt%	3.3	0.5	3.1	P ₂ O ₅		0.19	2.24	2.24
HGI		47.0	75.0	69.0	MnO		0.03	0.12	0.13
高位発熱量	kcal/kg, AD	7,000	4,040	4,040	V ₂ O ₅		0.04	0.00	0.04
工業分析	水分		3.2	1.0	NiO		0.00	0.00	0.01
	灰分		11.4	39.1	SO ₃		1.35	1.00	1.08
	揮発分		32.9	30.9	Cl		180	4,367	4,877
	固定炭素		52.5	29.0	F		64	119	106
元素分析	炭素		80.27	74.51	Hg		0.036	<0.005	<0.005
	水素		5.60	4.67	As		2.3	3.6	2.9
	窒素		2.12	2.39	Se		0.52	0.15	0.15
	硫黄		0.59	0.00	B		19	40	34
	酸素		11.42	18.43	Cr		22	39	34
全硫黄	wt%, DB	0.58	0.14	0.14	微量元素 含有量 mg/kg, DB				
灰中硫黄	wt%, Ash	0.54	0.40	0.43					
灰融点	酸 IDT		1,460	1,235					
	HT		1,495	1,240					
	FT		>1,500	1,280					
	還 IDT		1,290	1,220					
元	HT		1,410	1,235					
	FT		1,455	1,260					
灰組成	SiO ₂		59.26	38.05					
	Al ₂ O ₃		24.78	6.73					
	TiO ₂		1.33	0.40					
	Fe ₂ O ₃		4.60	4.68					
	CaO		2.65	23.60					
	MgO		1.40	2.70					
	Na ₂ O		0.67	0.81					

図25 石炭, ロータリーキルン BP, 加熱蒸気 BP の性状

図 25 から次の 8 つの分析項目について考察した.

[HGI]:石炭の粉碎性を示す指標であるが, 石炭に比べ高い数値となっており, BP が粉碎しやすいことを示している. これは石炭粉碎ミルの消費電力削減等の効果を見込むことができる.

[高位発熱量]:石炭には及ばない結果となった. しかし, 用いる石炭や混焼率を調整すれば実用を見込むことができる妥協点の数値であると考える.

[灰分]:非常に高い数値となった. 灰分が多いと炉に悪影響を及ぼすため数値の低減を図る必要がある. 草本系のうち特に葉の部分には灰分が多いと情報を得たため, 葉を除いて数値がどれほど低減するか検証する必要があると考える.

[灰融点]:両 BP の灰融点は 1235°C という結果になった. 燃焼炉 1300°C 帯の温度を下回る数値となっている. その結果, 後述する灰付着性評価試験にて灰の融解が発生し石炭混焼には不適であることが明確となった. 融点を引き上げるために灰分, ナトリウム, カリウム, 塩素等の低減を目指す必要がある.

[CaO]:非常に高い結果となった. 数値が高いと溶融温度や灰の付着しやすさに悪影響を与える. 考えうる要因として, 木質廃棄物に石灰石がコンタミしていた可能性や土壤成分等が考えられる. 木質廃棄物の性状分析やコンタミ有無の確認等を行い, 原因を特定していく必要があると考える.

[K₂O]:高い数値となった. 数値が高いと CaO と同様に炉内へ悪影響を及ぼす. 草本系由来の含有量の多さに加え, ソルガムの土壤成分を吸い上げやすい特性の影響を調査する必要がある. 原料の水洗浄による低減の度合いも確認していきたい.

[C1]:ボイラの規格を大幅に超えるほどの高い数値となった. 考えうる原因として, ソルガム収穫直前に散布した除草剤や, 木質廃棄物の残留成分, 葉のクロロフィルによる数値の上昇等が考えられる. 除草剤を用いていないソルガムや, 木質廃棄物の性状分析, 葉を除いた原料の性状分析を行う必要があると考えられる.

[Cr]:比較的高い数値となった. 今回の分析内容では三価・六価の判別はできないが, 六価であれば毒性があり, 人体や環境負担に大きな悪影響を及ぼし危険であるため, 確認が必要であると考える.

6.2.2 混焼試験結果および考察

項目		単位	MO 炭 100%	MO 炭:BP①=	MO 炭:BP②=
高位発熱量		kcal/kg, AD	6,970	6,340	6,390
工業分析	水分	wt%, AD	3.0	2.9	2.9
	灰分		11.9	17.0	15.9
	揮発分		32.6	32.2	34.7
	固定炭素		52.5	47.9	46.5
元素分析	炭素	wt%, DAF	81.38	81.35	79.88
	水素		5.55	5.44	5.59
	窒素		1.96	2.07	2.14
	硫黄		0.62	0.05	0.04
	酸素		10.49	11.09	12.35
全硫黄		wt%, DB	0.60	0.51	0.49
灰中硫黄		wt%, Ash	0.48	2.68	2.79
粒度 (乾式)	+0.25mm	wt%, AD	0.00	0.42	0.85
	0.15~0.25mm		1.90	5.73	6.50
	0.1~0.15mm		6.63	12.10	10.28
	0.075~0.1mm		11.30	13.28	11.74
	-0.075mm		80.18	68.47	70.64

図 26 燃料の性状

石炭:BP=4:1 の割合で混焼し性状の分析を行なった。基礎性状分析では石炭単味と比較すると高位発熱量、灰分とともに大きな違いがあったが、図 26 から 20%混焼になると比較的差が狭まったことがわかる。今後は、この数字の違いがどれほど燃料に影響を及ぼすのかどうかをユーザーに確認し改善すべき項目と程度を確認していく必要がある。

6.2.3 燃焼時排ガスデータの結果および考察

項目	単位	MO 炭 100%	MO 炭 80%+BP ① 20%	MO 炭 80%+BP ② 20%
NO _x	ppm	395	330	327
NO _x (O ₂ %換算)	ppm	353	296	294
SO ₂	ppm	432	386	392
O ₂	vol%	4.23	4.27	4.29

図 27 燃焼時の排ガスデータ

BP の未燃焼分が少ないことが影響して, NO_x・SO₂ とともに石炭単味よりも数値が低い結果となった. BP 混焼のメリットといえる良い結果を得ることができた.

6.2.4 灰付着性評価試験結果および考察

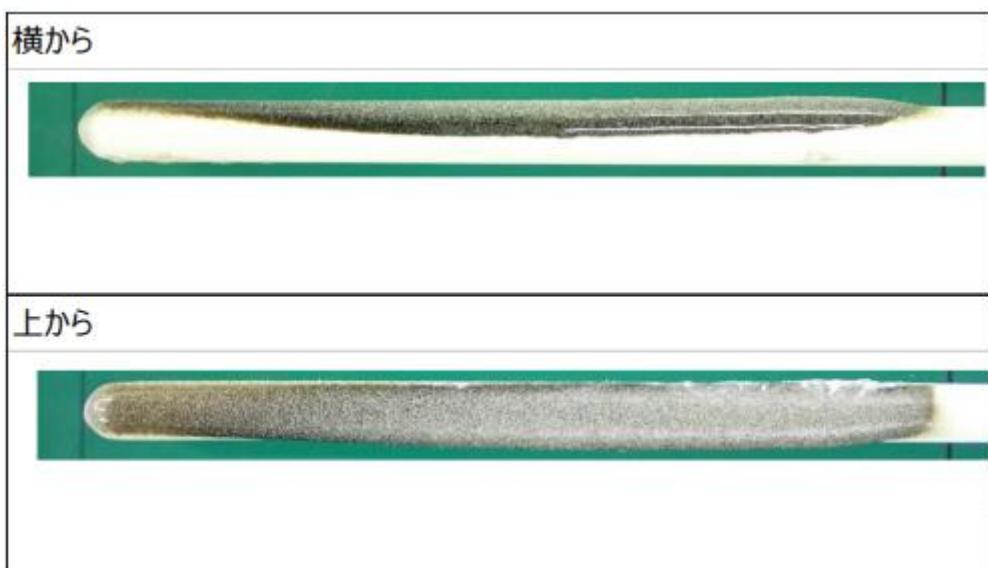


図 28 ロータリーキルン BP20%混焼時の 1300°C プローブ

灰付着試験にて, 初期付着灰形成後の灰層の状態および成長を評価した. 1100°C 帯, 1300°C 帯で評価を行なったが, 図 28 の通り 1300°C 帯で付着粒子の溶融が発生し強固な付着が生じていた. 一般的に炉内では灰層形成→剥離が連続して行われるような灰性状が好ましい. しかし, 今回の試験結果のように灰の溶融が発生すると灰が炉の壁面に堆積し続け運転に悪影響を及ぼすため, 混焼燃料としては不適であると言える.

第7章 結論

ブラックペレットとして形にすることはできたが、コスト低減や効率化の面において多くの改善余地があるため、製造工程・方法については引き続き検討していく必要がある。

石炭火力発電の混焼燃料としては不適な成分および性状であることがわかったため、各項目についての原因や対応策を調査し、混焼燃料としての最適化を進めていく必要がある。

第8章 今後の課題とスケジュール

- ・灰融点の改善(灰分, Ca, Na, K, Cl の低減)
- ・ソルガム栽培および利用用途の調査
(植え付け間隔, 敵, 除草剤選定および散布時期, 別品種の検討, 飼料, 食品)
- ・製造工程および使用機の再検討(乾燥工程, 半炭化方法, 設計)

参考文献

(1) 株式会社ファインテック, 製品案内, 半炭化装置, 半炭化とは

[1] IPCC 第6次評価報告書 第1作業部会報告書, 気候変動 2021: 自然科学的根拠

[2] 今井・井内・坂東, 電力中央研究所報告「日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価」, 2016

[3] 沖縄電力, 沖縄電力の電源構成・非化石証書使用状況について(2022年度実績値)

[4] 弘前地区消防事務組合消防本部予防課危険物係, 「木質チップ等の自然発火に注意!」

[5] 一般社団法人日本木質ペレット協会, 木質ペレットの製造工程 2

<https://w-pellet.org/pellet-2/seizou2/>