

**令和 6 年度新エネルギー等の保安規制高度化事業
(バイオマス発電設備の事故防止のための調査)**

事業報告書（公表版）

2025 年 3 月

一般財団法人カーボンフロンティア機構

(空白ページ)

目次

1 本調査の基本方針	5
1.1 本調査の目的	5
1.2 本調査の実施項目	5
2 近年のバイオマス発電の概要及び石炭火力発電との比較	6
2.1 調査項目と具体的な調査内容	6
2.2 調査結果	6
2.2.1 バイオマス発電と石炭火力発電の概要及び設備構成の比較	6
2.2.2 燃焼設備の構造の比較	14
2.2.3 運搬・受入設備の構造の比較	24
2.2.4 バイオマス燃料の種類及びその特徴	28
2.2.5 石炭と比較した場合の燃料の性質の相違点	32
2.2.6 石炭と比較した場合の燃料の性質の相違点	32
2.2.6 バイオマス燃料のリスクの洗い出し及び当該リスクの管理方法	35
3 固体バイオマス燃料の燃焼・火災・爆発の原理と事故の類型化	37
3.1 調査項目と具体的な調査内容	37
3.2 調査結果	37
3.2.1 導入	37
3.2.2 火災、爆発の発生原理	37
3.2.3 リスク評価、分析方法	47
3.2.4 固体バイオマス燃料の燃焼原理別の類型化	60
4 国内で発生したバイオマス発電設備の事故調査等（平成30年度以降）	66
4.1 具体的な調査内容と調査方針	66
4.2 調査結果	67
4.3 事故防止につながるデジタル技術についての調査	69
4.3.1 粉じん測定装置	69
4.3.2 ベルトコンベア監視システム	70
4.4.3 運転面からみたデジタル技術	70
4.4 国内バイオマス発電所へのアンケート調査	70
4.4.1 実施内容	70
4.4.2 対象先選定	71
4.4.3 アンケート内容	71
4.4.4 アンケート結果	73
5 諸外国におけるバイオマス発電設備に係る事故の発生状況と規制の現状	83
5.1 具体的な調査内容と調査方針	83

5.2 調査結果	83
5.2.1 調査対象国の選定	83
5.2.2 イギリス (United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland)	90
5.2.3 オランダ (Kingdom of the Netherlands)	97
5.2.4 スウェーデン (Kingdom of Sweden)	103
5.2.5 ドイツ (Federal Republic of Germany)	106
5.2.6 國際的な規格等の状況	111
6 バイオマス発電設備の事故防止に関する検討会の開催	115
6.1 実施方針	115
6.2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案	116

1 本調査の基本方針

1.1 本調査の目的

バイオマス発電には、メタン発酵用バイオマスと木質系バイオマスによる発電があり、力
ー・ポン・ニュートラルな電源として期待される。地産地消による地域経済活性化の観点から
も、2030年エネルギー・ミックスのうち、電源構成比で5%程度を目標として国内での導入が
推進されてきた。2012年7月のFIT制度（固定価格買取制度）の開始により、再生エネル
ギー電源構成比で2022年度は21.7%となり、2011年度の10.4%から大きく拡大している。¹
再生可能エネルギーについては、「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画202
4年改訂版（2024年6月21日閣議決定）」においても、「脱炭素電源として重要な再生可能
エネルギーの導入拡大に向けて、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、主力電源と
して、最大限の導入拡大に關係省庁・機関が密接に連携しながら、取り組む。」とされてお
り、「GX実現に向けた基本方針（2023年2月閣議決定）」において、「再エネの更なる拡大
に向け、安定的な発電が見込める、地熱、水力やバイオマスについても、必要となる規制や
制度の不断の見直しを行う」とこととされている。

しかし、バイオマス発電の拡大に関しては、課題も多く、発電コストの上昇、燃料確保が
大きく取り上げられるが、近年は、国内または海外のバイオマス発電所での火災・事故が頻
発しており、人災や長期間の運転停止が発生している。

バイオマス発電の健全な発展のため、それらの事故の原因等を調査した上で当該事故の
発生を防止するため、導入されているバイオマス発電設備の現状や、発生している事故の概
要・原因、関係法令等について、国内外含めて調査を行うことで、バイオマス発電設備の設
置者における自主保安の取組の高度化や、今後の技術基準の在り方、事故報告の在り方等の
検討につなげることを目的とする。

1.2 本調査の実施項目

調査目的を踏まえ、以下の（1）から（5）の項目について調査及び検討を行う。

- (1) 近年のバイオマス発電の概要及び石炭火力発電との比較
- (2) 固体バイオマス燃料の燃焼・火災・爆発の原理と事故の類型化
- (3) 国内で発生したバイオマス発電設備の事故調査等（平成30年度以降）
- (4) 諸外国におけるバイオマス発電設備に係る事故の発生状況と規制の現状
- (5) バイオマス発電設備の事故防止に関する検討会の開催

¹ https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/062_01_00.pdf

2 近年のバイオマス発電の概要及び石炭火力発電との比較

2.1 調査項目と具体的な調査内容

本調査は、以下の項目に関して調査を行う。

バイオマス発電と石炭火力発電の概要及び設備構成の比較

国内のバイオマス専焼発電所、石炭専焼及び混焼発電所の近年の建設・運転状況・燃料等の概要を調査し、バイオマス専焼発電所・石炭専焼発電所、石炭バイオマス混焼発電所の各々一般的な設備構成の比較を行い、相違点を明確にする。

燃焼設備の構造の比較

ボイラ本体及びボイラ周りの構造に関して、国内のバイオマス専焼発電所・石炭専焼発電所、石炭バイオマス混焼発電所の各々一般的な設備構成の比較を行い、相違点を明確にする。

運搬・受入設備の構造の比較

燃料受入桟橋、貯蔵場所等の受入設備及び発電所構内での各運搬設備の構造に関して、国内のバイオマス専焼発電所・石炭専焼発電所、石炭バイオマス混焼発電所の各々一般的な設備構成の比較を行い、相違点を明確にする。特にバイオマス発電所は、燃料による運搬・受入設備の相違点を明確にする。

バイオマス燃料の種類及びその特徴

国内のバイオマス発電所で現在使用されているバイオマス燃料の種類を調査し、各々の物理特性と特有のリスクについて調査し、石炭(亜瀝青炭～瀝青炭を対象とする。)との相違点を整理する。

石炭と比較した場合の燃料の性質の相違点

と同じ。

バイオマス燃料のリスクの洗い出し及び当該リスクの管理方法

発電所内における燃焼設備(周辺設備も含む)受入設備、運搬設備各々におけるバイオマス燃料の火災要因を整理し、及びで整理したバイオマス燃料のリスクに関し、当該リスクの管理方法として現在取り入れられている管理方法、または有効と考えられている対策・管理方法に関して調査・整理する。

2.2 調査結果

2.2.1 バイオマス発電と石炭火力発電の概要及び設備構成の比較

(1) バイオマス発電の概要

バイオマス発電は、動植物などから生まれた生物資源を直接燃焼、またはガス化するなどして電力を生み出すものである。バイオマス発電の技術開発に伴い、多様な未活用の廃棄物を燃料とできるようになり、循環型社会の実現にも貢献している。

国内の電源構成別の発電量の構成比を表2.2.1-1に示す。バイオマス発電が、発電量全体

に占める割合は、2010 年の 1.3% から 2022 年は 3.7% へ増加しており、他の再生可能エネルギーである太陽電池と同様に発電促進の施策を背景に成長を続けている。バイオマス発電にて国産材を活用できる環境であれば、エネルギー自給率の向上、災害時におけるレジリエンスの向上、さらに森林整備や林業活性化による地域の経済・雇用への波及効果が期待できる。

表 2.2.1-1 国内の電源構成（発電量ベース）

年度	(構成比)				
	2010	2015	2020	2021	2022
原子力	25.1%	0.9%	3.9%	6.9%	5.6%
石炭	27.8%	34.2%	31.0%	30.9%	30.4%
天然ガス	29.0%	40.9%	39.0%	34.3%	33.8%
石油等	8.6%	9.7%	6.3%	7.4%	8.4%
水力	7.3%	8.4%	7.8%	7.6%	7.7%
太陽電池	0.3%	3.3%	7.9%	8.4%	9.2%
風力	0.3%	0.5%	0.9%	0.9%	0.9%
地熱	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%
バイオマス	1.3%	1.8%	2.9%	3.2%	3.7%
合計	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

引用：資源エネルギー庁 総合エネルギー統計（4.電源構成(発電量)）

国内における FIT 認定バイオマス発電所状況を図 2.2.1-1 に示す。発電の原料の多様化もあり規模の大小の発電所が存在することがバイオマス発電所の特徴である。なお、発電燃料については 3 章で詳述する。

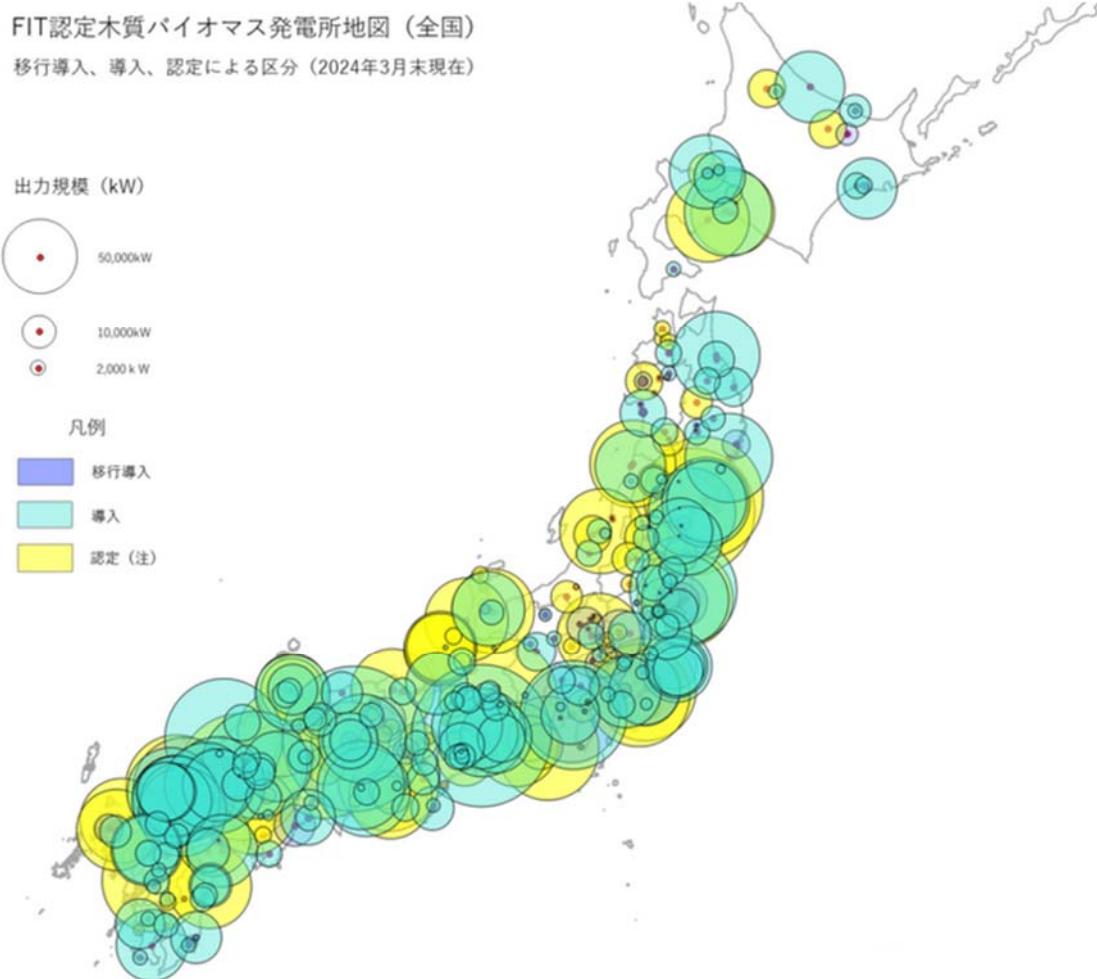


図 2.2.1-1 FIT 認定木質バイオマス発電所状況

引用：<https://jwba.or.jp/database/woody-biomass-database/fit/>

一方、課題として、バイオマス発電は他の再生可能エネルギーと異なり、発電の際の燃料費が全体コストの大部分を占めるといわれている。さらに、燃料であるバイオマス資源の安定調達を確保しなければならないが、山間部と離れている都市部では燃料の安定調達がいっそう困難となる。

木質バイオマス発電施設等でエネルギー利用されている燃料用チップの供給量の推移を図 2.2.1-2 に示す。バイオマス発電の普及に伴い、燃料材の国内生産、輸入とも年々増加している。特に、輸入量の増加は顕著であり、燃料材の総量に占める輸入の割合は、2017 年の 22.6% から 2023 年には 45.1% まで上昇している。今後、輸入の依存度が高まると、国際情勢によって価格や供給量が不安定になり、国際競争が激化した結果、低質の燃料材が混入する可能性が高まる。低質な燃料材を使用する発電所が国内で多くなることは、将来的に燃料起因の発火事故が増加する危険性が高くなると思われる。

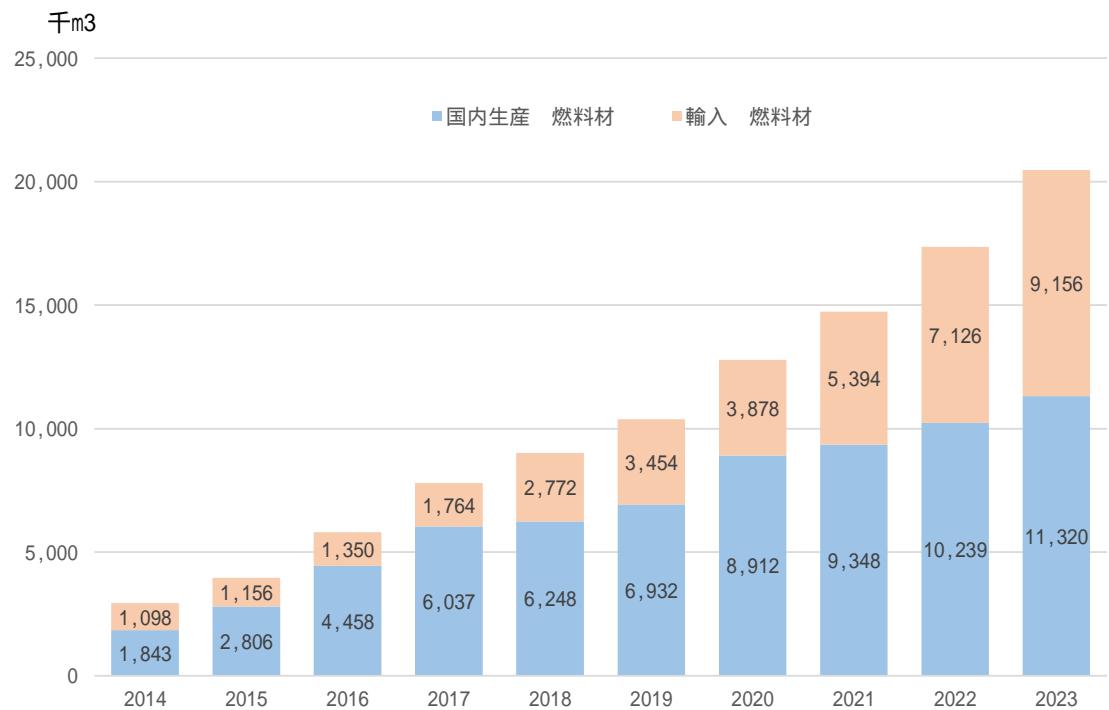


図 2.2.1-2 木質バイオマス発電施設等にて利用された燃料用チップの供給量

引用 : e-Stat 木材需給(供給)量累年統計から一部を抜粋のうえ作成

FIT/FIP におけるバイオマス発電の稼働・認定状況(2023 年末時点)によれば、稼働件数は 656 件である。発電用燃料の比率としては、「一般木質材」として、木質ペレット等、PKS、パーム油関連がほとんどを占めている。

(2) 石炭火力発電の概要

国際的なカーボンニュートラルに向け、石炭火力発電の休廃止に向けた動きが進んでおり、非効率な石炭火力のフェードアウト等政策的な動きはあるが、今後国内でのデータセンターや半導体工場の新增設等により、電力需要が増加する見込みもあり、電力の供給量が一層求められる中、図 2.2.1-3 に示す国内発電電力量推移の通り、2030 年の電源計画でもバックアップ・ベースロード電源として、石炭火力発電は一定の稼働が求められている。

再生エネルギーによる発電量増加のため、近年大型の石炭火力発電所でもバイオマスの混焼化が実施されている。主要石炭火力発電所の稼働状況一覧を表 2.2.1-3 に示す。多くの発電所で、バイオマスの混焼が可能となっている。既存の石炭火力発電所の改造による場合がほとんどであり、混焼率も、設計条件や運転状況を見ながら、その設備に見合う最適な条件を見極めながら混焼率を高めていく手法がある程度常識的なアプローチといえる。設計会社や運転会社の見解としては、20% ~ 30% 程度が費用対効果の面で妥当な線との見解がある。今後、化石燃料(主に石炭原料の場合)の規制がかかってくる観点では、より混焼率

の高みへのアプローチが必要になると予想される。

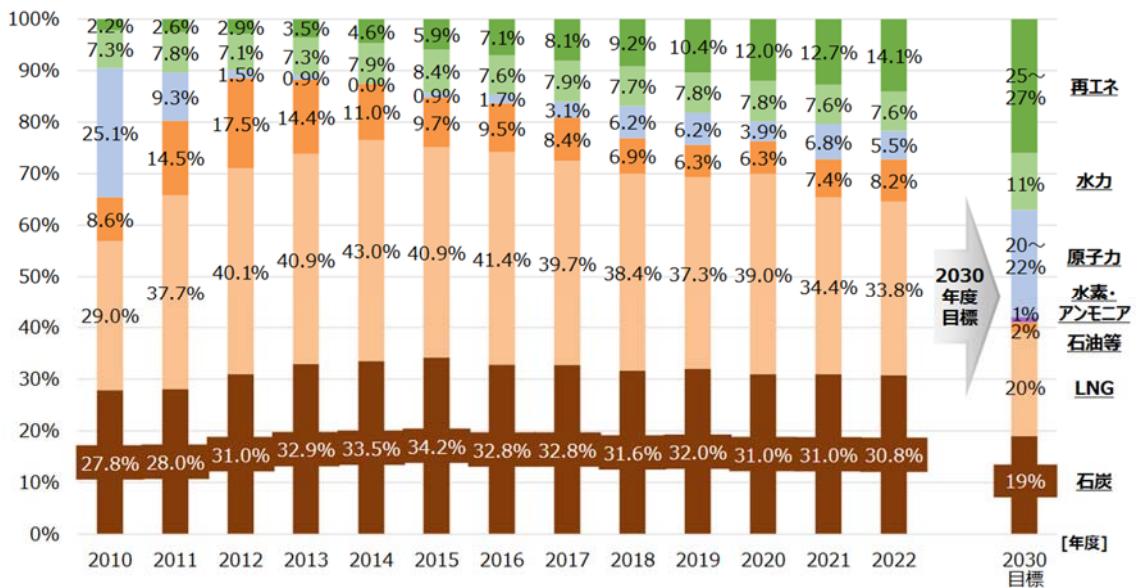


図 2.2.1-3 国内発電電力量推移

引用：2024年5月8日資源エネルギー庁「今後の火力政策について」

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/074_10_00.pdf

(3) バイオマス発電と石炭火力発電の設備構成

ア. バイオマス専焼発電所

バイオマス利用には、熱利用と発電利用がある。本調査では主に、大規模な発電利用に焦点をあてて、その過程における設備や稼働に関する事故調査とする。

現在日本で普及しているバイオマス発電の仕組みは大きく分けて、直接燃焼、熱分解によるガス化、発酵によるガス化の3つ存在する。本調査では、平成31年から令和6年に発生しているバイオマス燃料関連の火災事故のほとんどが直接燃焼のため、直接燃焼のみを対象とする。直接燃焼は、ボイラの中でバイオマスを直接燃焼して水蒸気を作り、蒸気タービンを回して発電する方法で、燃料は乾燥系バイオマスが対象となり、木質チップ・木質ペレット・ヤシ殻 (PKS: Palm Kernel Shell)・製材や建築廃材が該当する。

バイオマス専焼発電所の一般的な設備フロー図を図2.2.1-4に示す。バイオマス発電所は、各フロー(受入・運搬設備、燃焼設備、発電設備、その他)において、表2.2.1-4に示す主要設備で構成される。

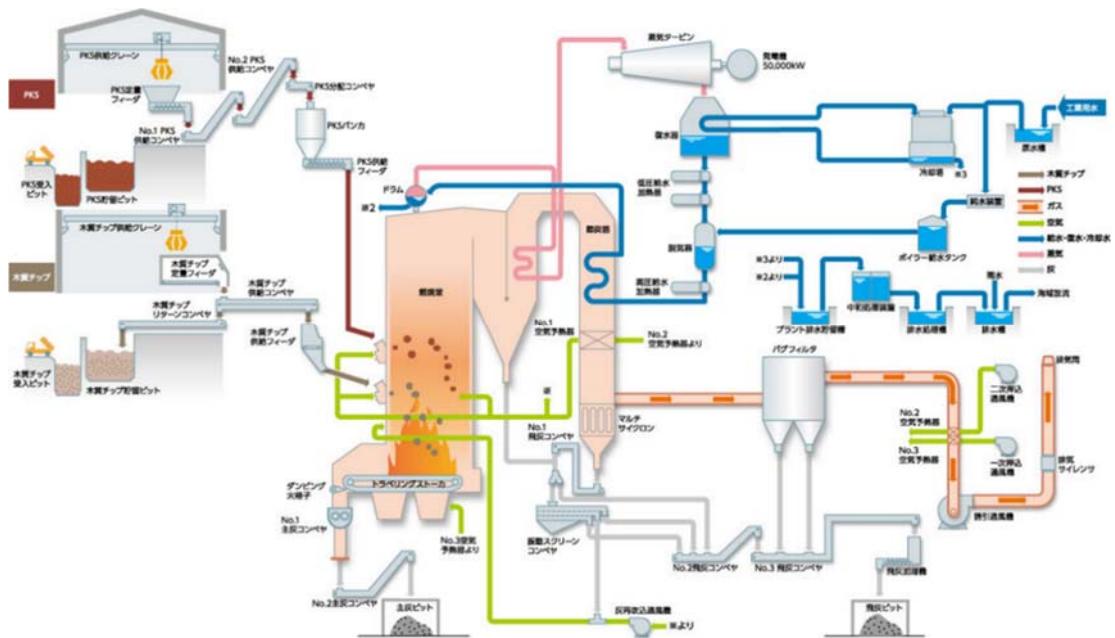


図 2.2.1-4 バイオマス専焼発電所の設備フロー

引用：<https://cepohanda.com/facilities/>

表 2.2.1-4 バイオマス専焼発電主要設備

受入・運搬設備	前処理設備	燃焼設備	発電設備	その他
<ul style="list-style-type: none"> ・ホッパ(港・保管設備前) ・ピット ・保管設備(サイロ、倉庫、ヤード) ・供給フィーダ ・コンベア 	<ul style="list-style-type: none"> ・篩(メッシュ) ・メタル除去装置 ・粗粉碎機 ・乾燥機 ・ミル 	<ul style="list-style-type: none"> ・パンカ ・ボイラ ・ドラム ・バーナ ・節炭器 	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気タービン ・発電機 ・復水器 ・冷却塔 	<ul style="list-style-type: none"> ・バグフィルタ ・灰ピット ・空気予熱器 ・排気筒 ・スタートアップ用燃焼設備

イ. 石炭火力発電所

石炭火力発電所のボイラプラント全体系統図を示す(図 2.2.1-5 参照)。一般的な石炭火力発電所は微粉焚きボイラを使用し、瀝青炭の場合は前処理設備として微粉炭バーナに供給するための微粉碎機(ミル)がある。また、原料の性状にもよるが、一般に自治体との間に公害防止のために協定があり、SOx、NOx、ばいじんなどの規制値があるため、脱硫装置、脱硝装置、(バグ)フィルタが設置される。

なお、火炉のスタートアップに備えて暖気用の石油(灯油や重油)の貯蔵タンク燃焼用バーナなど付帯設備がある(表 2.2.1-5 参照)。

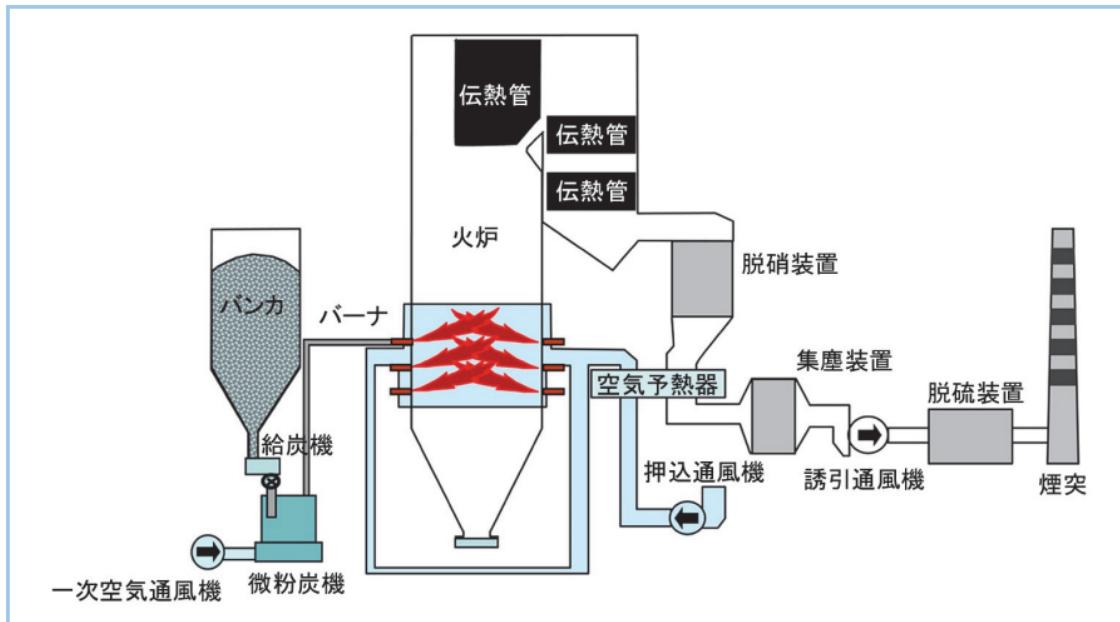


図 2.2.1-5 ボイラプラント全体系統図

引用：三菱重工技報 Vol.55 No.4 (2018)

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/554/554190.pdf>

表 2.2.1-5 石炭火力発電主要設備

受入・運搬設備	燃焼設備	発電設備	その他
<ul style="list-style-type: none"> ・ホッパ（港・保管設備前） ・ピット ・保管設備（ヤード） ・供給フィーダ ・コンベア 	<ul style="list-style-type: none"> ・バンカ ・ボイラ ・ドラム ・バーナ ・節炭器 ・ミル 	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気タービン ・発電機 ・復水器 ・冷却塔 	<ul style="list-style-type: none"> ・脱硫装置 ・脱硝装置 ・バグフィルタ ・灰ピット ・空気予熱器 ・排気筒 ・スタートアップ用燃焼設備

ウ. バイオマス/石炭混焼火力発電所

バイオマス/石炭混焼火力発電所は、燃料の多様化を図るために、既存の微粉焚きボイラを有効に使用することにある。そのために、燃料種によりボイラに供給するための調整プロセスが必要となる。火炉への燃料の性状の違いにより、石炭用前処理設備との併用は困難な場合が多く、木質原料を受入、貯蔵、粉碎工程で、石炭とは異なる現象が起きていることも事実であり、安定した操業のための技術的な改良・改善を

する必要がある。一般的なバイオマス石炭混焼火力発電所の設備フロー図を示す（図2.2.1-6 参照）。設備構成は石炭火力と同じであるが、バイオマス専用の受入・搬送・粉碎設備が加えられる。

なお、混焼率や燃料の粉碎性により、バイオマス専用ミルを必要とせず、粉碎設備への投入前から混合して使用されるケースもある。

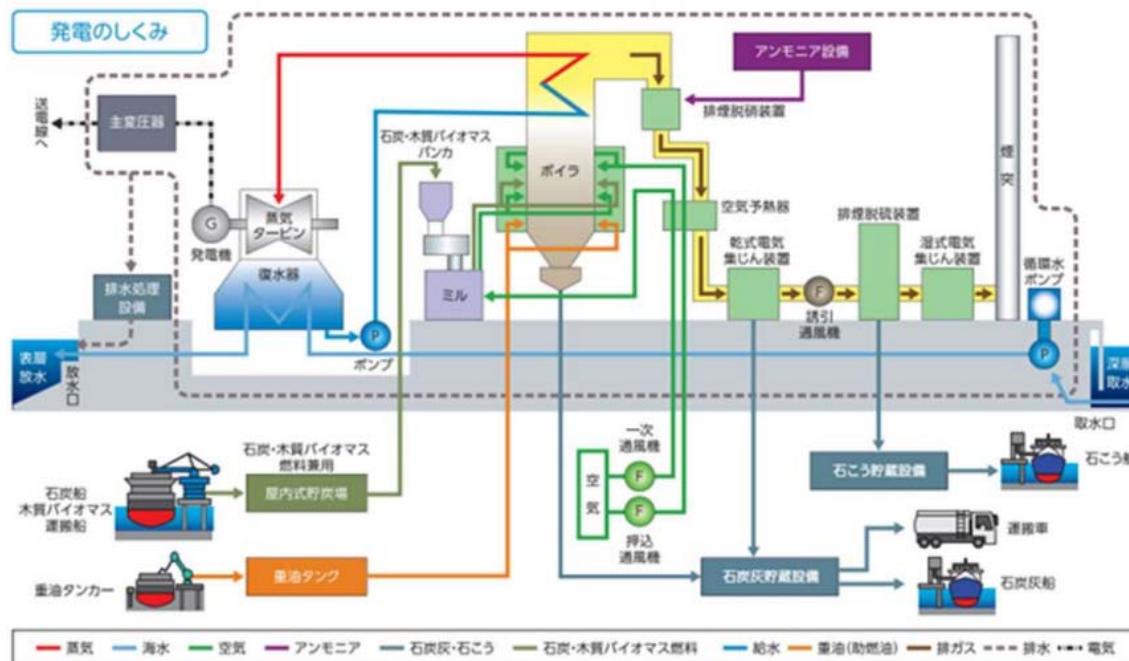


図 2.2.1-6 バイオマス/石炭混焼設備フロー図

引用：第20回電気設備自然災害等対策WG資料2-2 武豊火力発電所における火災事故について
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/pdf/020_02_02.pdf

ベースとして石炭火力発電所があり、バイオマス関連施設を加えることにより、バイオマス/石炭混焼発電所に代わる。一般に石炭はヤードへ野積み貯蔵するが、バイオマスは吸湿を避けるためにサイロ貯蔵、危険物倉庫貯蔵、コンテナ貯蔵等の方法が採用される。バイオマスうちPKSはヤードへの野積み貯蔵が行われている。

微粉炭火力発電所でのバイオマス混合方法としては、バイオマスを事前に石炭と混合させて一緒に搬送・粉碎して、ボイラで燃焼させる「ラインブレンド方式」とバイオマス専用の燃料系統を付加し、微粉炭ボイラに別系統で投入する「炉内混合方式」に大別される。

100万kW発電する微粉炭火力発電所で ca13%のバイオマス混焼を実施すると稼働率70%で年間約17万トンのCO₂排出量を削減できる。

表 2.2.1-6 バイオマス/石炭混焼火力発電主要設備

受入・運搬設備	燃焼設備	発電設備	その他
<p><石炭火力用設備></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ホッパ(港・保管設備前) ・ピット ・保管設備(ヤード) ・供給フィーダ ・コンベア ・粉碎機(ミル) <p><バイオマス用設備></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ホッパ(港・保管設備前) ・保管設備(サイロ、倉庫、コンテナ、PKSはヤード) ・供給フィーダ ・コンベア 	<p><石炭火力用設備></p> <ul style="list-style-type: none"> ・バンカ ・ボイラ ・ドラム ・バーナ ・節炭器 ・ミル(混焼率が高い場合は木質ペレット専用ミル) 	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気タービン ・発電機 ・復水器 ・冷却塔 	<ul style="list-style-type: none"> ・脱硫装置 ・脱硝装置 ・バグフィルタ ・灰ピット ・空気予熱器 ・排気筒 ・スタートアップ用燃焼設備

2.2.2 燃焼設備の構造の比較

(1)バイオマス専焼発電所の燃焼設備

ア. バイオマス燃焼メカニズム

バイオマス燃焼の第一ステップとして、バイオマスに外部から熱を与えると水分の蒸発が始まり、100 ℃に達する辺りで絶乾状態になる。したがって、水分が多いければ多いだけ、乾燥にエネルギーを必要とする。200～300 ℃にかけてバイオマスは緩やかに熱分解を始め、水蒸気や CO₂のような不燃性ガスと一酸化炭素、メタン、エタン、水素のような可燃性ガスが発生する。この時点でバイオマスの表面は黒く変色し、変形し炭のようになる。この状態になるまで、外部から熱を与え続けなければならない。スタートアップ用に、石油類や容易に燃焼性の高い固体燃料を用いる場合がある。

バイオマスの種類にもよるが、250 ℃を超えると急速に熱分解が始まり、可燃性ガスの生成も一挙に増大し、バイオマスは引火する。通常、引火温度は 300～350 ℃である。350～400 ℃でガスの状態の揮発性成分(一酸化炭素、水素、その他炭化水素類)の放出量が最大化する。揮発性成分はバイオマスに含まれる可燃成分の 75%にも達することから、バイオマスの燃焼は主にガスの燃焼といえる。400 ℃になると熱分解ガスの生成が終了し、450 ℃までの温度でタール分が生成、および一部は、ガス化によりメタン等の可燃性ガスが生成する。

また、これ以降は炭が急激に形成され、燃焼によって熱エネルギー（一部は光として）が生み出される。800～900℃では可燃性ガスがほとんど存在せず、固体の炭素（木炭）が残る。高温加熱した炭は強力な還元力をもつため、酸素と激しく反応して水素や一酸化炭素を発生する。このガスが燃えることが炭の燃焼であり、バイオマスのエネルギーを最大限引き出すことができる。

イ. バイオマスボイラ

バイオマスの直接燃焼を行うバイオマス専焼発電所のボイラ形式として、ストーカ式（階段ストーカ式、トラベリングストーカ式）、バブリング流動床式、循環流動層式の3種類がある（図2.2.2-1参照）。

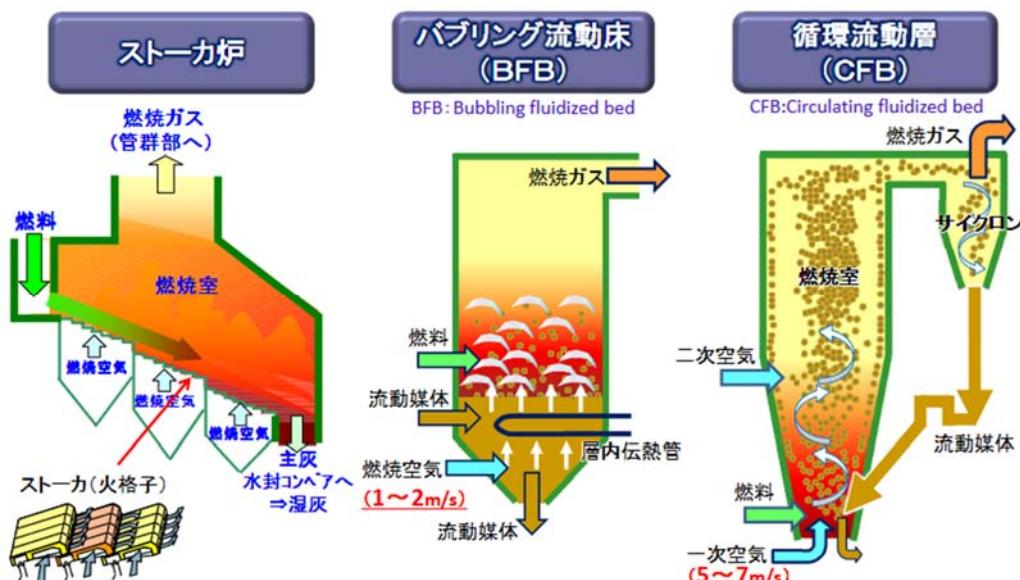


図2.2.2-1 バイオマス専焼発電所の3種類の燃焼設備

引用：JFEエンジニアリング株福嶋・国際研究産業都市構想発表資料

https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/150223/150223_01f.pdf

ストーカ式

ストーカとは火格子を階段状に並べた燃焼装置である。階段状の火格子が前後に動くことで、バイオマスと空気を効率的に接触させ、「バイオマス」という不均質な性状のものでも安定して燃焼させることができる。火格子は可動段のみが前進・後進を繰り返し、ストーカ上のバイオマスを下流に送る。火格子の前進・後退により、バイオマスは攪拌され、効率よく空気と接触し、良好な燃焼が行われる。

燃料の前処理の必要性が比較的容易であることから、バイオマス以外の建築廃材や

汚泥、一般廃棄物系の固体燃料に多用される場合が多い。

バブリング流動床式

バブリング流動床燃焼は、大きな熱容量を持つ砂などの流動媒体により、高水分含有燃料や難燃性燃料までを安定して燃焼させることができるために、木質建築廃材などの木質バイオマス系から廃タイヤなどの産業廃棄物系まで幅広く多様な燃料が利用できる。

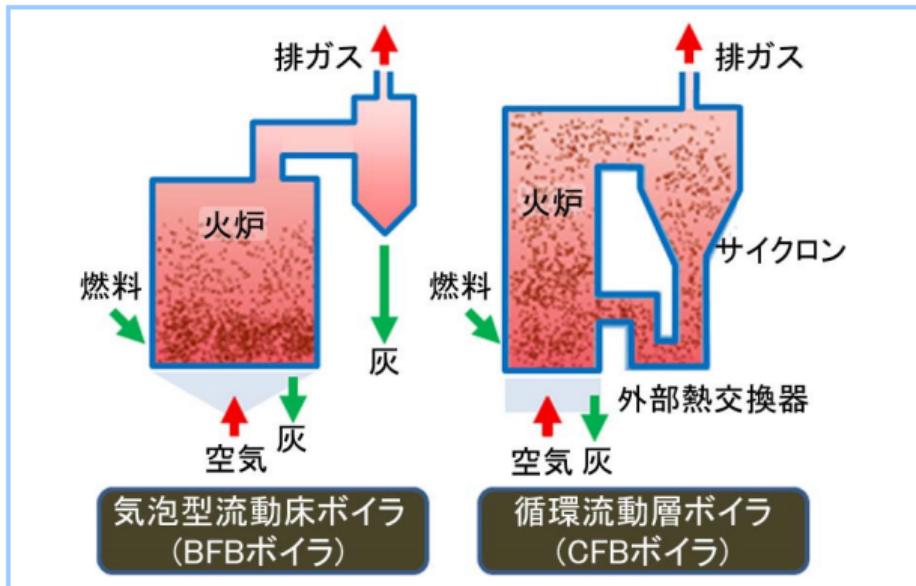
流動床の底部に燃料中の異物量に応じたベッドドレン抜出方式を採用し、適切な炉底形状および空気ノズル形状を採用することにより、燃料とともに流動床に持ち込まれる異物を安定して系統外へ排出し、流動床内部での堆積に伴う流動不良を防止する。

また、約 900 以下の低い温度で燃焼させることができるために、窒素酸化物 (NOx) 等の発生が抑制され、環境負荷の低い運転が可能となる。燃料を地産地消とする場合には、その集荷性や輸送性の点から発電設備は小規模とすることが好ましい。

循環流動層式

循環流動層燃焼は、バブリング流動床燃焼よりも火炉内のガス速度（空塔速度）を上げ、粒子・ガスの混合を活発化し、燃焼反応の向上を図った方式である。木質バイオマス、製紙スラッジ、RPF (Refuse Paper & Plastic Fuel)、廃タイヤなど広範な燃料を燃焼可能であり、かつ高い燃焼効率を有する。火炉から飛び出す流動砂および燃料をサイクロンで捕集し、再び火炉へ循環させることにより燃焼効率の向上を図っている。バブリング流動床式と循環流動層式の比較を図 2.2.2-2 に示す。

また、火炉内での燃焼温度は、800～900 と低いため、窒素酸化物 (NOx) 等の発生を抑制できるとともに、二段燃焼の採用により NOx 発生量を 100ppm 以下とすることが可能である。



ウ. コンベンショナルボイラ

コンベンショナルボイラはバーナ燃焼方式であり、多様なバイオマス燃料への適合性としては流動床燃焼方式に比べて限られたものとなるが、蒸気サイクル効率向上に必要な高温高圧蒸気条件に対応したプラントでバイオマスペレット専用のミルと専用バーナを用いてバーナ燃焼を行うことにより、バイオマスを利用した高効率発電が可能となる。

なお、バイオマスペレットは揮発成分が石炭と比較して多いことや燃料中水分が石炭と比較して少ないことから、その自然着火エネルギーは石炭に比べて非常に小さい。このため、バイオマス燃料の専用粉碎方式では自然発火などに対する十分な配慮が必要となる。

また、バーナの設計にあたり燃料の燃焼テストで「燃え切り」(燃焼速度)等のデータや燃焼性・排ガス特性 (NOx 生成量、未燃分等) のチェックを行う必要がある。燃料の性状による炉材質、形状への影響などを設計条件に活かすこととなる。特に、火炉の中での燃焼状況は目視で確認できるので、有効な情報になる(図 2.2.2-3 参照)。

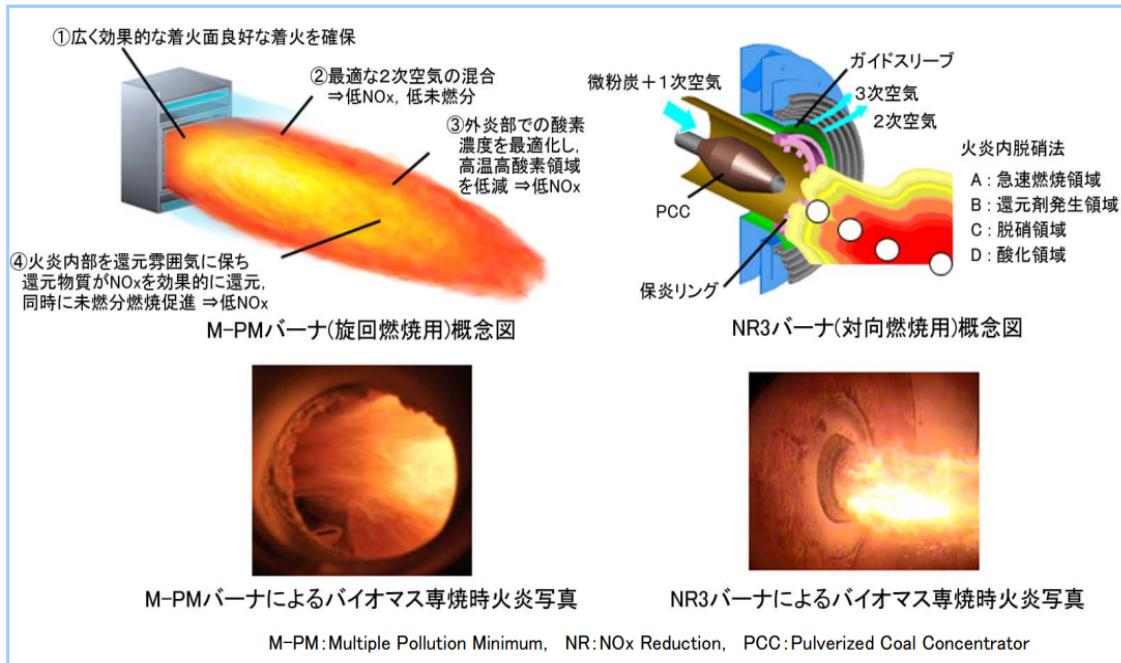


図 2.2.2-3 バイオマスペレット専焼時火炎状況

引用：三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/543/543054.pdf>

工. 燃焼設備の選定について

一般的には、燃料の種類により、火炉への前処理が必要になる。その際、燃料の粉砕性(可否もあり)により、ハンドリング過程や燃焼効率(燃焼速度や燃え切りなど)の課題がある。また、水分が多い燃料では、乾燥工程の有無によりボイラ効率への影響が問題になる。前処理が比較的困難な燃料の場合は、ストーカ式や比較的フレキシビリティがある循環流動層式などが選択される。それぞれの火炉の特徴と原料との組み合わせ、操業に当たっての運転の容易さ等を総合的に評価して燃焼設備を選定する。

(2)石炭火力専焼発電所の燃焼設備

ア. 微粉炭燃焼のメカニズム

微粉炭燃焼方式には直接燃焼方式と貯蔵燃焼方式がある。直接燃焼方式は石炭粉砕機(ミル)で粉砕された微粉炭を一次空気と混合してバーナから吹出させ、空間に浮遊させて燃焼させる方式である。直接燃焼方式の長所は、設備が比較的簡単で取り扱いが容易であり、大型化に伴う困難がなく、設備費の上昇も低く抑えることができる。燃焼室の空間を有効に利用でき、応答性も優れている。さらに予熱空気によって石炭粉砕機内部で乾燥が行われ、一般に乾燥機を省略できるなどであり、ほとんどのボイラでこの方式が採用されている。短所は小型炉に適さず、炭種融通性に乏しい点であ

る。

貯蔵燃焼方式は、石炭粉碎機で粉碎された微粉炭を一旦微粉炭貯蔵槽に入れて蓄え ておき、微粉炭フィーダにより必要量を空気流に載せてバーナへ送る方式である。

貯蔵燃焼方式の長所は、微粉炭の燃焼率が石炭粉碎機の容量により制限を受けないのでボイラ負荷の変動に追従しやすいことや石炭粉碎機はボイラの負荷に関係なく最高効率で運転でき、石炭粉碎機故障の場合でも貯蔵した微粉炭を用いてボイラ運転が可能である点である。短所は設備が増加するので設備費が上昇する点である。

イ. ボイラ

一般的な石炭火力専焼発電所の燃焼設備を図 2.2.2-4 に示す。大型の発電所では微粉炭ボイラを用いている。ボイラでは、復水器から戻された水を加熱器により蒸気に変換し、主蒸気管を使って高圧タービン入口に送る。タービンを回転させた蒸気は温度が低下し、湿度が増加するので高圧タービン出口から蒸気を抽出し、再熱器に送り再加熱して中圧タービンあるいは低圧タービンへ送る。ボイラではこのようにして再熱サイクルを加えることで中圧タービンあるいは低圧タービンの液滴による損傷を防止するとともに、熱効率を高めている。ボイラの中で過熱器管および再熱器管は最も高温にさらされ、過熱器管は高圧を受けることから構造材料の選択が重要である。

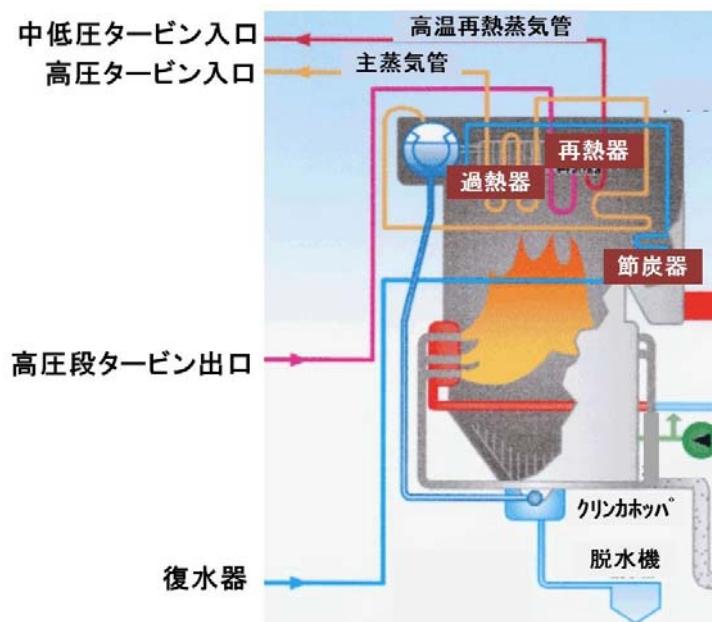


図 2.2.2-4 石炭火力発電用燃焼設備（ボイラ）の構造図

引用：https://www.hepco.co.jp/info/2007/1173676_829.html

(3)バイオマス/石炭混焼火力発電所燃焼設備

バイオマス/石炭混焼火力発電のコンセプトは、地球温暖化対策および効率向上の観点から火力発電所におけるバイオマス燃料の利用は有効な手段とされてきた。石炭専焼の設備は大量の CO₂ の発生源となっており、現有設備にバイオマスを混焼することにより、少しでも CO₂ の削減を図ることにある。比較的大型の石炭吹きボイラは微粉炭焚きとなっており、バイオマスも同様な微粉炭吹きでの混焼が開発された。改良された石炭バイオマス混焼火力発電燃焼設備のフロー図を、図 2.2.1-6 に示した。

原燃料のバイオマスの混焼率を 50% の高みを目指す場合の適用例を図 2.2.2-5 に示す。基本的には、石炭の場合と同様な方法でデータを採取し、設備（特にバーナーノズルや位置等）の設計変更や改造箇所の洗い出しを行うことになる。

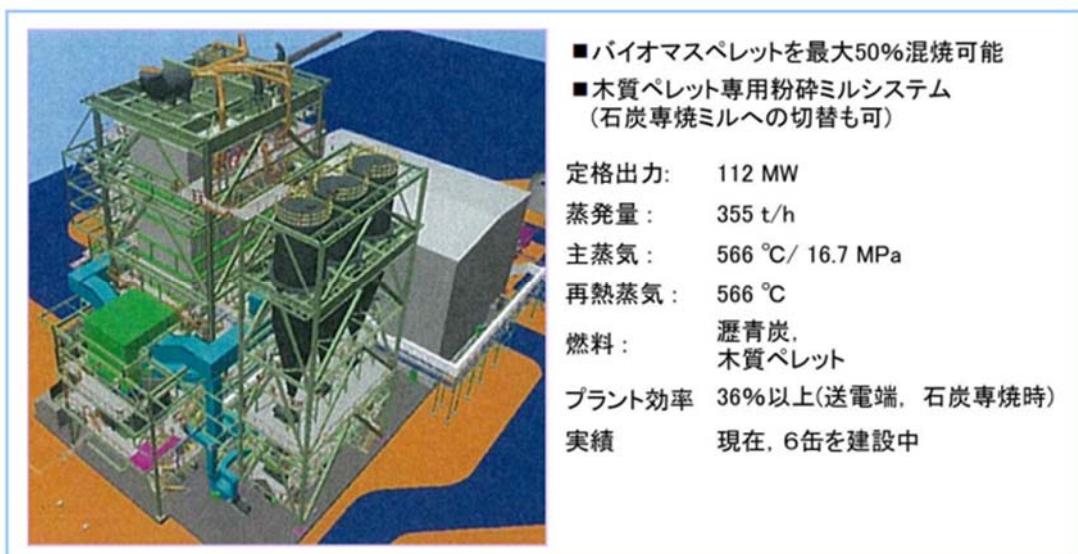


図 2.2.2-5 バイオマス混焼ボイラの概要

引用: 三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/543/543054.pdf>

図 2.2.2-6 に示す通り、専用粉碎方式ではミルとバーナは別系統で持ち、バイオマス混焼率に適したそれぞれの専用粉碎台数を選定し、かつバーナの設置位置もボイラ効率の観点と公害対策 (NO_x の低減等) 上の配慮も考慮に入れて、設計する必要がある。

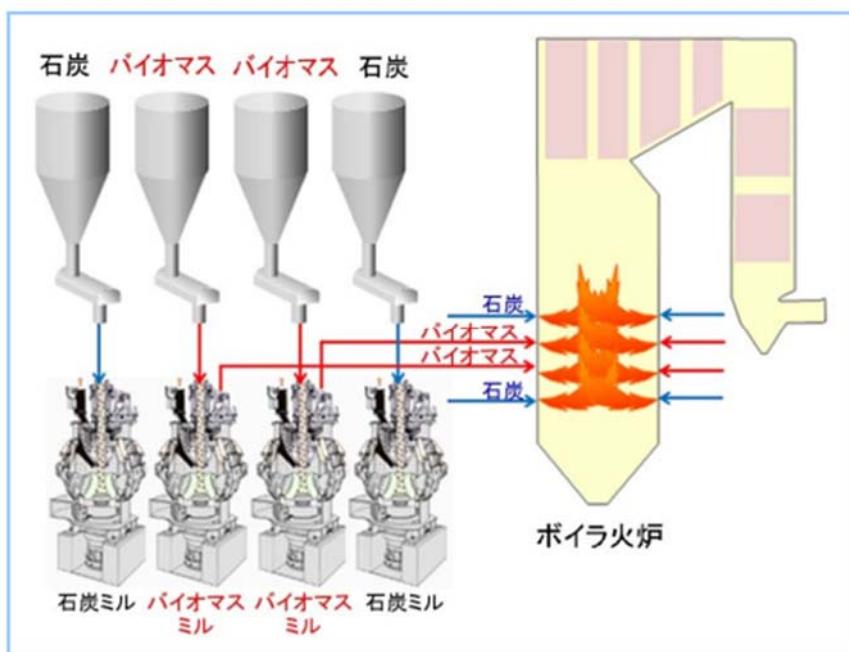


図 2.2.2-6 専用粉碎方式を使用した混焼適用例

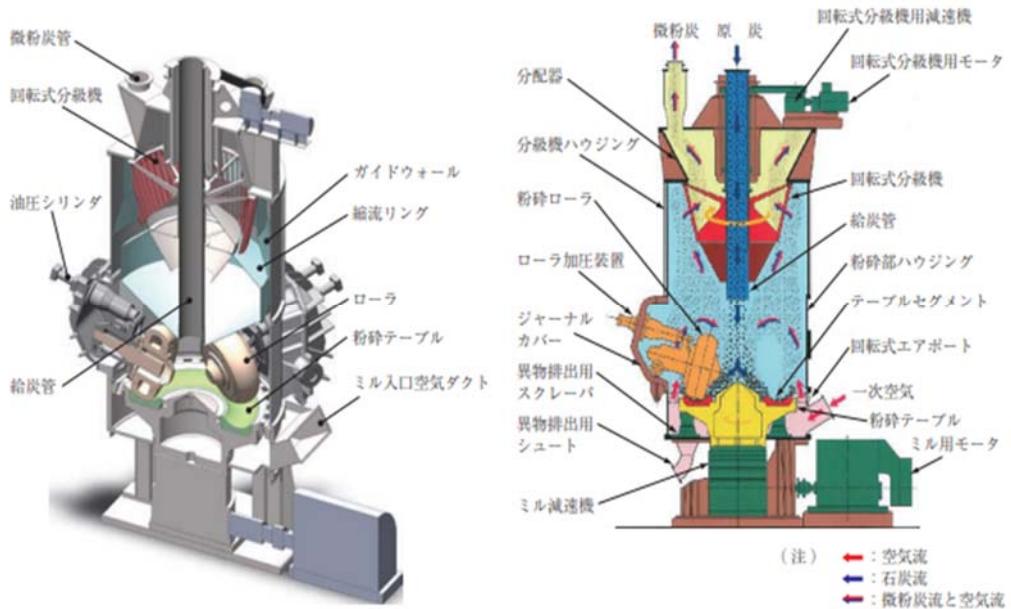
引用：三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/543/543054.pdf>

図 2.2.6-7 に、木質ペレットミルと石炭ミルの比較を示す。基本的に、木質バイオマス燃料専用ミルは、一般的には以下の特性に合わせ石炭ミルの改造により設計される。

- ・ 揮発分が多く、燃え切り良好のため、粉碎後の形状が 1mm 以下
- ・ ローラによる解碎が容易のため、滞留時間は短時間

設計上の改良の要点としては、縮流リングの装着による憤死容量増大を達成できたことがある。また、木質ペレットや木質チップの場合の注意点として、木の枝や根などの纖維質によるローラに付着や巻き付き現象による能力の低下がおこることである。そのためには原料の木質燃料の状態のチェックが重要である。



木質ペレット粉碎ミル

石炭粉碎ミル（微粉炭機）

図 2.2.2-7 木質ペレット粉碎ミルと石炭粉碎ミル（微粉炭機）の比較

引用：IHI 技報 Vol.52 No.4 (2012)

https://www.ihc.co.jp/technology/techinfo/contents_no/_icsFiles/afieldfile/2023/06/16/e77d1194900a4a246f6811d907fa8ff8.pdf

また、専用粉碎方式を適用したバイマス混焼ボイラ内の微粉碎バーナによる燃焼状態を図 2.2.2-8 に示す。火炎の状態は燃料の燃焼性(燃焼速度や燃え切り状態など)により異なる。一般に木質系燃料は石炭に比べ、燃え切る速度は速いといわれている。

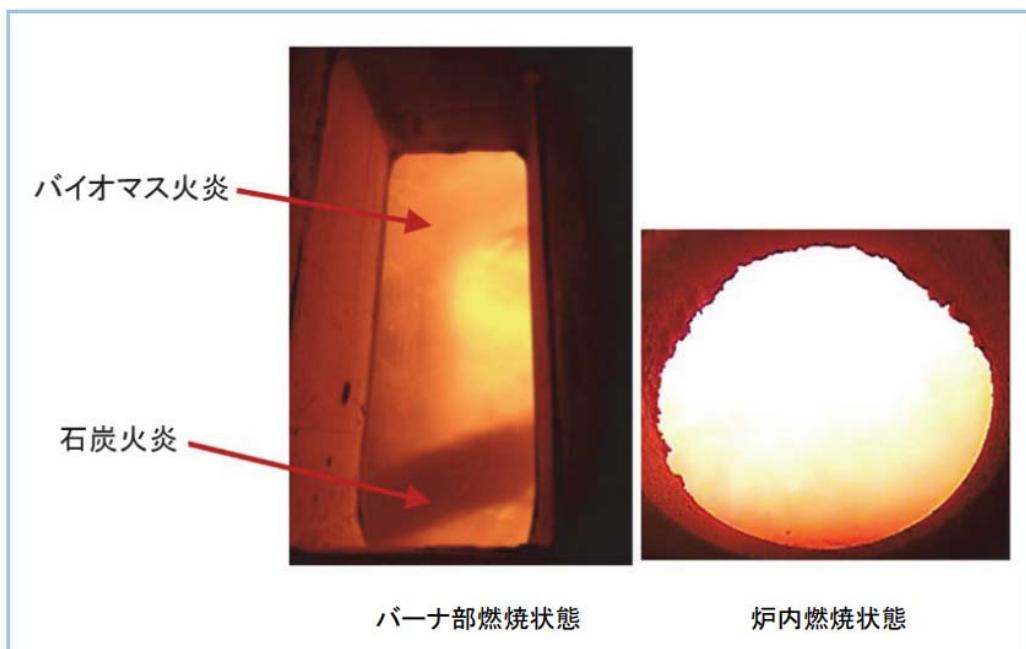


図 2.2.2-8 バイオマス混焼の燃焼状況

引用：三菱重工技報 Vol.55 No.4 (2018)

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/554/554190.pdf>

(4)燃焼設備まとめ

バイオマス専焼は、発電目的と熱供給目的により、キャパシティ(容量)に適したボイラの形式が選択されている。石炭ボイラは比較的大型が可能であり、発電用が主流となっている。バイオマス混焼は、温室効果ガスである CO₂の削減の要求に応える方法の一つであることから、当面は混焼率の上昇を目指した設備の器量や運転・保守を実施していくことになる。

ボイラ及びボイラ周りの設備構成を取りまとめて示す(表 2.2.2-1 参照)。

表 2.2.2-1 ボイラ及びボイラ周りの設備構成の比較

項目	バイオマス専焼	石炭専焼	バイオマス混焼
ボイラ本体	ストーカ炉 バブリング流動床 (BFB) 循環流動床(CFB)	微粉焚き	微粉焚き
バンカ	要自然発熱防止	粉じん飛散対策	粉じん飛散対策
ミル	石炭用を一部改良型	石炭専用ミル	石炭専用ミル 木質ペレット専用 ミル
バーナ	改良型のバーナ	低 NO _x バーナ 微粉炭バーナ	低 NO _x バーナ 微粉炭バーナ

2.2.3 運搬・受入設備の構造の比較

(1)バイオマス専焼発電所

バイオマス専焼発電所では、木質ペレット、木質チップ、PKS の 3 種類の中から 1 種類あるは 2 種類以上を燃料として使用する。

木質ペレット

日本では、ベトナム産木質ペレットの使用量が 1 位でカナダ産木質ペレットの使用量が 2 位である。木質ペレットは公共岸壁に木質ペレット運搬船を接岸し、運搬船搭載のクレーンを用いて専用ホッパへ荷揚げされる。

ホッパより木質ペレット運搬トラックの荷台に積み込まれて危険物倉庫かサイロへ運搬されて貯蔵される

近年、木質ペレットはバルクコンテナで輸入されることがある(写真 2.2.3-1 参照)。バルクコンテナには以下のメリットがある。

- ・ 保管と輸送に使えるため燃料保管用倉庫の建設が不要である。作業時間短縮で作業コストが低減される。
- ・ ベンチレータ付きなのでコンテナ内の温度が安定し、コンテナ内で燃料が自然発火しても延焼の心配がない。
- ・ 密閉されているので粉じんや水濡れの心配がなく、近隣への影響も抑えられる。



写真 2.2.3-1 再生可能エネルギー用バルクコンテナの例

(左:荷揚時ホッパとバルクコンテナ、右:保管状況)

引用：<https://www.nx-shoji.com/news/2019/000301.html>

木質チップ

木質チップ製造工場で建設廃材や間伐材を破碎して、製造される。木質チップ運搬トラックの荷台に積み込まれて運搬され、発電所の木質チップピットへ投入される。

PKS

PKS は公共岸壁に PKS 運搬船を接岸し、運搬船搭載のクレーンを用いて専用ホッパへ荷揚げされる。専用ホッパより PKS 運搬トラックの荷台に積み込まれ、野積み場に積み上げて保管する。野積み場においてホイールローダを用いてトラックに積み込み、日々の必要量を発電所まで運搬して使用する。

表 2.2.3-1 にバイオマス専焼発電所の荷揚げ、桟橋からの運搬、貯蔵設備を取りまとめて示す。

表 2.2.3-1 バイオマス専焼発電所荷揚げ・運搬・貯蔵設備

荷揚げ設備	桟橋からの運搬設備	貯蔵設備
・船搭載クレーン ・ホッパ(港)	・運搬トラック ・バルクコンテナ	・サイロ(木質ペレット) ・危険物倉庫(木質ペレット) ・バルクコンテナ(木質ペレット) ・野積み場(PKS)

(2)石炭専焼火力発電所

一般に石炭専焼火力発電所では、発電所専用桟橋に設置した受入設備で荷揚げする。連続アンローダ(揚炭機)は複数のバケットで効率的に石炭の荷揚げを行い、アンローダに接続した搬送ベルトコンベアで桟橋から貯炭場へ石炭を輸送する。貯炭場は多くの場合、野積み場を利用している。

夏場等の乾燥時期の貯炭場は、温度上昇及び粉じん飛散対策のため、散水を行っている。野積み場の石炭に蓄熱の可能性がある場合は、定期的な場所の積み替えを行う。目安として、表面から一定の深さの温度管理を行い、蓄熱による自然発熱・自然発火を避けるため温度測定のモニターを備えている。



写真 2.2.3-7 揚炭桟橋・連続アンローダ (揚炭機)・搬送設備・屋内式貯炭場の一例

引用：https://www.jera-taketoyo.com/pdf/setumeikai_0525.pdf

表 2.2.3-2 に石炭専焼発電所の荷揚げ、桟橋からの運搬、貯蔵設備を取りまとめて示す。

表 2.2.3-2 石炭専焼発電所荷揚げ・運搬・貯蔵設備

荷揚げ設備	桟橋からの運搬設備	貯蔵設備
・専用桟橋 ・連続アンローダ (揚炭機)	・コンベア	・野積み場

(3)バイオマス/石炭混焼火力発電所

バイオマス/石炭混焼火力発電所は、一般にベースとして石炭火力発電所があり、バイオマスを別系統で取り付けた施設が大部分である。

その場合、石炭を荷揚げする施設を利用して、バイオマスの荷揚げを行ったり、石炭を搬送するコンベアを用いて、バイオマスの搬送を行ったりするケースが多い。

石炭の研磨性に耐えることができるよう、ゴム化合物、PVC、合成纖維等の比較的硬い素材でコンベアベルトはできている。石炭とバイオマスの材質の違いに配慮して、コンベアの

搬送速度を低下させるなどの対策を取り、バイオマスの粉じん化を抑制することが重要である。

表 2.2.3-3 バイオマス/石炭混焼発電所荷揚げ・運搬・貯蔵設備

荷揚げ設備	桟橋からの運搬設備	貯蔵設備
<p><バイオマス/石炭同一荷揚げ></p> <ul style="list-style-type: none"> 専用桟橋 連続アンローダ (揚炭機) <p><バイオマス別荷揚げ></p> <ul style="list-style-type: none"> 船搭載クレーン ホッパ (港) 	<ul style="list-style-type: none"> コンベア <p><バイオマス別荷揚げ></p> <ul style="list-style-type: none"> 運搬トラック バルクコンテナ 	<p><石炭></p> <ul style="list-style-type: none"> 野積み場 <p><木質ペレット></p> <ul style="list-style-type: none"> 危険物倉庫 サイロ バルクコンテナ

(4) 運搬・受入設備まとめ

運搬・受入設備を取りまとめて示す (表 2.2.3-4 参照)

表 2.2.3-4 運搬・受入設備の比較

項目	バイオマス専焼	石炭専焼	バイオマス/石炭混焼
荷揚げ	<ul style="list-style-type: none"> 公共岸壁 船搭載クレーン ホッパ 	<ul style="list-style-type: none"> 専用桟橋 アンローダ (揚炭機) 	<ul style="list-style-type: none"> 専用桟橋 アンローダ (揚炭機) <p><バイオマス別荷揚げ></p> <ul style="list-style-type: none"> 公共岸壁 船搭載クレーン ホッパ
貯蔵場所等への運搬設備・方法	トラック輸送	ベルトコンベア	<ul style="list-style-type: none"> ベルトコンベア <p><バイオマス別荷揚げ></p> <ul style="list-style-type: none"> トラック輸送
貯蔵場所	<p><木質ペレット></p> <ul style="list-style-type: none"> 危険物倉庫 サイロ バルクコンテナ 	野積み場	<p><石炭></p> <ul style="list-style-type: none"> 野積み場 <p><木質ペレット></p> <ul style="list-style-type: none"> 危険物倉庫

	<p><木質チップ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・半屋外（屋根付き） <p><PKS></p> <ul style="list-style-type: none"> ・野積み場 		<ul style="list-style-type: none"> ・サイロ ・バルクコンテナ <p><木質チップ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・半屋外（屋根付き） <p><PKS></p> <ul style="list-style-type: none"> ・野積み場
発電所構内での運搬設備の構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルトコンベア 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルトコンベア 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルトコンベア

2.2.4 バイオマス燃料の種類及びその特徴

バイオマスとは、動植物などから生まれた生物資源の総称であり、これらの資源から製造する燃料をバイオマス燃料と称している。主要なバイオマス燃料を表2.2.4-1に示す。バイオマス燃料の形態としては、木質バイオマスに代表される固体燃料、バイオエタノールやBDF（バイオディーゼル燃料）などの液体燃料、バイオガスなどの気体燃料と多岐に渡る。木質バイオマスについては、ガス化や液化による利用もある。

表2.2.4-1 主要なバイオマス燃料

	製造方法	種類	利用方法
木質バイオマス	バイオマスを薪、チップ、ペレットなどに加工する	固体燃料/液体燃料/気体燃料	ボイラの燃料、発電燃料、化学原料、エタノールなど
バイオエタノール	バイオマスを発酵・蒸留する	液体燃料	ガソリンの代替燃料
バイオディーゼル	バイオマスマタノールと化学反応（メチルエステル化）させる	液体燃料	軽油の代替燃料
バイオガス	微生物の働きでバイオマスをメタン発酵させる	気体燃料	発電燃料

国内のバイオマス専焼発電所および石炭バイオマス混焼発電所で使用される主たるバイオマス燃料は木質バイオマスである。木質バイオマスとは、樹木の伐採や造材時に発生した枝葉などの林地残材、また製材工場などから発生する樹皮やおが屑などのほか、住宅の解体材などを加工し、燃料にしたものである。加工方法によって主に 薪、チップ系、ペレ

ット系の3種類に分けられる。薪については、そのまでのハンドリングの制約から発電ボイラ用燃料としては向きであり、チップ系とペレット系の利用が主体となる。

(1)チップ系燃料

木質チップ

木質チップは、樹木から樹皮を剥いた丸太などの木質系の原料を切削もしくは破碎し木片にしたものである。

バーク

バークチップは、樹木から剥いた樹皮を碎いて加工したものである。

(2)ペレット系燃料

丸太、樹皮、枝葉や製材時に発生する端材、おがくずなどを乾燥させて破碎し、その後に水分量を調節して小粒の棒状に圧縮成型して作られた燃料を木質ペレットと称している。形状は直径6mm-8mm程度、長さ10mm-20mm程度の円筒形のものが多い。代表的な製造方法として、粉碎して粉状になった原料の含水量を調整し、ペレタイザーと呼ばれる成型機を通して、原料に圧力を加えて固める方法が用いられる。木にはリグニンという成分が含まれてあり、これに圧力を加えるとリグニンが溶け接着剤の役割をし、同じく木に含まれるセルロースとヘミセルロースが接着される事で成型される。このとき含水量が20%を越えると固まらず、5%を下回ると固まりにくいため、10%前後に調整される。したがって、一般的に木質ペレットには成形のための接着剤(バインダー)は使われていない。そのため、湿度の高い環境で保管した場合や、強い衝撃や圧力を加えた場合など、木質ペレットが崩れてしまい、粉化するなどの不具合を生じる場合がある。

木質ペレットの品質は、原料の産地や針葉樹か広葉樹かなどの樹種により差があるとされるものの、原料の使用部位や加工処理の違いにより、概ね以下のよう名称の木質ペレットが利用されている。

ホワイトペレット(木部ペレット)

樹皮を除いた木部を主体とした原料を用いて製造した木質ペレットである。灰分が非常に少ない(1.0%未満)ことが特徴の一つである。

バークペレット(樹皮ペレット)

樹皮を主体とした原料を用いて製造したペレットである。ホワイトペレットに比べ、灰分が多いこと(8%未満)が特徴である。

全木ペレット(混合ペレット)

木部と樹皮を含む木材を原料として製造したペレットである。樹皮と木部を任意の割合で混合した原料を用いて製造したペレットを混合ペレットとして区別する場合がある。灰分は1%-2%となっている。

ブラックペレット

色が濃い褐色であることからブラックペレットと称される木質ペレットで疎水性、粉碎性に有利な燃料である。ブラックペレットの製造方法としては、ロータリーキ

ルンなどの加熱炉で半炭化するトレファクション法と圧力容器で蒸煮する水蒸気爆碎法の二通りが知られている。トレファクション法では、半炭化処理することで発熱量の増加と纖維質の減少による粉碎性の改善が図れる利点がある。その製造においては、先にペレット化してその後半炭化する方法と、先に半炭化した後にペレット成形する方法がある。一方、水蒸気爆碎法は、原料を耐圧容器に入れ、高温高圧の水蒸気で蒸煮し、一気に圧力を開放して粉碎することによって、纖維質の分解を図る方法であり、主に粉碎性の改善に効果がある。現在ブラックペレットと呼ばれているものは、トレファクション法で製造されたものを指すことが多い。

建築廃材混合ペレット

建築廃材として使われなくなった廃木材等を再利用して製造した木質ペレットであり、沖縄県で事例がある。但し、建築廃材には、防腐剤や接着剤が含有されている場合があり、燃焼時の環境汚染物質の排出が懸念されるため、少量の混焼利用に留まる。

海外のペレット品質規格と日本のペレットの品質規格

参加国は欧州以外にロシア、米国、カナダ、マレーシアなど35か国で、認証に参加している。2015年の非産業用認証ペレットの生産は770万トン（EU需要の7割）であり、欧州では、品質規格で評価された一定水準以上の品質を持つことが欧州ペレット市場参入への必須要件となっている。

【EN規格】2011年欧州規格 EN14961-2 制定（非産業用のみ）

【ISO規格】2014年国際規格 ISO 17225-2 制定（非産業用+産業用基準）

ISO17225-2は2021年に第2版に改訂

【ENPlus】2015年8月 ISO 17225-2に準拠したver3が発効（ISOよりやや厳しい）

【日本のペレット品質規格】JPA規格：ISOとも整合性がある。

表2.2.4-1にJPA品質規格とISO17225-2の違いを整理して示す。

表2.2.4-1 JPA品質規格とISO17225-2の違い

品質項目	JPA品質規格 (木質ペレット2023年4月改正)	ISO17225-2(2021年)	
原料起源 と由来	A1・A2・Bの全等級で同一 ・樹幹木部、全木 (根・枝葉・末木(ウラキ)を除く) ・化学処理されていない木材加工工場からの副産物または残材、樹	A1 等級	・樹幹材 ・化学処理されていない製材残材
		A2 等級	・根を除く全樹木 ・樹幹材 ・化学処理されていない製材残材

	皮	B等級	・天然林、人工林、その他からの原木 ・木材産業からの副産物及び残材 ・化学処理されていない使用済み木材
かさ密度 BDkg/m3	650 以上 750 以下 杉の多い日本において、かさ密度 600 では機械的耐久性の担保が厳しい	600 以上 750 以下	
灰分 AC%	A 等級 0.7%以下 (小出力の家庭用のペレットボイラやストーブでは、0.5%以下推奨) A2 等級 1.2%以下 B 等級 2.0%以下	A1 等級 0.7%以下 A2 等級 1.2%以下 B 等級 2.0%以下	
硫黄 S%	A1, A2 等級 0.04%以下 B 等級 0.05%以下	A1, A2 等級 0.04%以下 B 等級 0.04%以下	
窒素 N%	A1 等級 0.3%以下 A2 等級 0.5%以下 B 等級 1.0%以下	A1 等級 0.3%以下 A2 等級 0.5%以下 B 等級 1.0%以下	

引用：ペレットクラブシンポジウム（2024年10月25日）及びJPA木質ペレット品質規格

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

（3）その他の木質系燃料

PKS

PKS は、パーム椰子の殻の部分で、パーム油を生産する過程で発生する農作物残渣である。水分含有量が少なく、発熱量が高いことから、バイオマス燃料として利用されている。但し、クルミの殻のように硬いことが特徴であり、粉碎性に難点がある。

EFB

EFB は、パーム搾油工場から排出されるパームヤシ空果房であり、ほとんど有効利用されず、パーム農園に放置されている農作物残渣である。腐敗によるメタン放出についても問題となるため、固形燃料化し、石炭火力での混焼用燃料としての利用が試みられた実績がある。

（4）木質系以外の固体バイオマス燃料

木質系以外で固体バイオマス燃料として使用実績があるものとして、下水汚泥系燃料がある。下水汚泥の固形燃料化技術は、汚泥乾燥技術と汚泥炭化技術に大別され、汚泥乾燥技術には、造粒乾燥、油温減圧乾燥、改質乾燥があり、汚泥炭化技術は、炭化温度により、低温炭化、中温炭化、高温炭化に区別する場合がある。

下水汚泥から製造された炭化物は、低品位の石炭並みの品質で無臭・粉体形状のため石炭等の固形燃料の代替として利用可能となっている。下水汚泥は化石燃料ではないため、製造された炭化物はカーボンニュートラルな燃料と見做されている。

2.2.5 石炭と比較した場合の燃料の性質の相違点

石炭の燃料性状は、一般に発熱量、工業分析、元素分析、灰組成により事前評価される。これらの観点で石炭とバイオマスの燃料性状を比較したものを表 2.2.5-1 に示す。なお、本表は一例であり、必ずしも代表値を示すものではない。

2.2.5 石炭と比較した場合の燃料の性質の相違点

石炭の燃料性状は、一般に発熱量、工業分析、元素分析、灰組成により事前評価される。これらの観点で石炭とバイオマスの燃料性状を比較したものを表 2.2.5-1 に示す。なお、本表は一例であり、必ずしも代表値を示すものではない。

表 2.2.5-1 燃料性状一覧

分析項目	試料名		ワンド炭 ベース	松(皮)	松(幹)	松(葉)	松(全体)	杉(全体)	竹(幹)	檜(全体)	広葉樹(全体)	
	単位											
高位発熱量	気乾	kJ/kg	29,650	18,750	18,160	21,460	19,080	18,560	18,360	17,870	18,280	
全水分	到着	%	8.05	48.3	58.5	52.5	51.8	49.1	39.4	44.2	39.3	
恒温試料水分	恒温	%	4.66	15.0	12.5	12.2	13.1	12.8	11.1	12.2	11.8	
工業分析	気乾試料水分	気乾	%	3.15	10.91	9.36	8.87	9.68	8.40	7.35	8.41	7.92
	揮発分	無水	%	27.27	70.13	86.15	76.59	80.40	81.25	80.42	81.64	83.31
	固定炭素	無水	%	60.74	26.93	13.67	21.44	18.63	18.01	18.19	17.64	15.66
	灰分	無水	%	11.97	2.94	0.18	1.97	0.97	0.74	1.39	0.72	1.03
元素分析	C	無水	%	72.91	54.87	51.35	56.43	53.42	52.04	49.41	51.96	49.7
	H	無水	%	4.62	5.64	6.12	6.77	6.23	6.19	6.11	5.99	6.05
	O	無水	%	8.18	36.22	42.23	33.53	39.04	40.74	42.57	40.99	42.89
	N	無水	%	1.92	0.31	0.10	1.16	0.30	0.26	0.18	0.32	0.31
	S	無水	%	0.43	0.05以下	0.05以下	0.10	0.05以下	0.05以下	0.05以下	0.05以下	0.05以下
YGP指数	CI	無水	%	0.019	0.016	0.02	0.043	0.036	0.033	0.34	0.025	0.022
	YGP指数	気乾	mg/kg	-	18.0	17.27	1以下	8.29	6.57	10.11	5.75	10.00
灰の溶融性	軟化点 酸化性	灰化	°C	1220	-	-	-	1350	1380	-	1460	1370
	溶融点 酸化性	灰化	°C	1350	-	-	-	1460	1420	-	1480	1400
	流动点 酸化性	灰化	°C	1440	-	-	-	1470	1430	-	1490	1430
	軟化点 還元性	灰化	°C	1190	-	-	-	1310	1420	-	1480	1370
	溶融点 還元性	灰化	°C	1340	-	-	-	1400	1460	-	1500	1390
	流动点 還元性	灰化	°C	1420	-	-	-	1440	1470	-	1500	1420
灰組成	SiO ₂	灰化	%	63.6	31.9	13.3	14.1	14.3	5.29	22.7	12.0	5.06
	Al ₂ O ₃	灰化	%	15.0	12.3	4.69	6.39	6.97	1.81	0.69	3.02	9.63
	Fe ₂ O ₃	灰化	%	5.94	4.01	1.43	1.34	1.49	0.85	0.56	1.49	0.66
	CaO	灰化	%	3.41	31.4	41.5	26.5	37.6	55.3	3.23	44.5	42.5
	MgO	灰化	%	2.32	3.48	8.71	8.13	6.19	6.15	10.6	5.65	5.66
	TiO ₂	灰化	%	0.67	0.31	0.12	0.13	0.16	0.07	0.04	0.10	0.05
	SO ₃	灰化	%	2.56	1.86	3.57	5.35	10.7	3.04	3.48	3.12	2.79
	P ₂ O ₅	灰化	%	0.23	1.48	2.50	9.56	3.77	3.37	7.86	3.72	3.31
	Na ₂ O	灰化	%	0.86	1.60	1.50	3.16	1.40	2.41	4.85	1.98	1.49
	K ₂ O	灰化	%	0.75	4.79	5.63	14.1	6.64	4.92	30.00	8.56	10.10
元素分析	MnO	灰化	%	0.10	0.69	3.56	4.95	2.64	0.16	1.17	1.42	1.95
	Hg	灰化	mg/kg	0.04	0.07	0.32	0.07	0.10	0.11	0.02	0.02以下	0.02以下
	Cu	灰化	mg/kg	0.01以下	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
	Cr	灰化	mg/kg	0.08	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.01	0.01以下
	As	灰化	mg/kg	0.0006	0.0007	0.0006	0.0007	0.0008	0.0004	0.0002	0.0004	0.0002

引用：NEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発石炭・木質バイオマス混焼技術の研究開発」平成14年度成果報告書

木質バイオマスの発熱量は、石炭の約2/3程度である。このため、ボイラにて石炭と同等の熱量を得ようとした場合、木質バイオマスの燃料投入量は約1.5倍となる。木質バイオマスをペレット化した場合、圧縮成型により単位重量当たりの発熱量は増加する。さらに炭化処理をすると発熱量はより増加するが、炭化の度合いにより発熱量は異なるものとなる。

工業分析値においては、木質バイオマスは石炭に比べ、揮発分が多く、固定炭素分が少ないという特徴がある。石炭の燃焼性は、固定炭素と揮発分の比であらわされる燃料比(=固定炭素/揮発分)で事前判断しており、発電用ボイラで使用される石炭においては、燃料比の範囲が1~2程度である。燃料比1では燃焼性がかなり良好であり、燃料比2では燃焼性が悪いと判断される。これに対し、表に示した木質バイオマスにおける燃料比を算出すると、0.16~0.38となり、木質バイオマスの可燃分の燃焼性は、石炭に比べ圧倒的に良いと判定

される。但し、木質バイオマスは水分が多いことや、粉碎性が悪く粒子径が大きくなるなど、燃焼性に対してマイナス要因もあるため、燃焼性はこれらが相殺された結果となることに留意しておく必要がある。灰分については、石炭が 10~15% であるのに対し、木質バイオマスでは少ないので 0.2% 程度、多いもので 3% 程度と非常に少なく、燃焼灰の排出量が少なくなることが大きなアドバンテージとなる。

元素分析値においては、木質バイオマスの硫黄分や窒素分は石炭に比べて少ない。窒素分に起因する NO_x の発生量は、窒素分が少ない方が低くなる傾向になるが、燃焼場の酸化・還元雰囲気を調整することで発生量がコントロールされるため、石炭燃焼時に設定されている低 NO_x 燃焼条件が木質バイオマス利用時にそのまま適用できるかは確認しておく必要がある。硫黄分に起因する SO_x の発生量は、含有硫黄分に依存するので、木質バイオマスの方が石炭よりも SO_x の発生量は少なくなる。

灰組成においては、石炭に比べて木質バイオマスでは Si、Al が少なく、Na、K、Ca、Mg が多い。アルカリ金属、アルカリ土類金属が多い場合、炉内のスラッギング、ファウリング等のトラブルが懸念されるが、その影響においては灰分が少ないことも考慮しておく必要がある。特に石炭との混焼を利用する場合には、石炭の灰分が多いことで、木質バイオマスのアルカリ金属、アルカリ土類金属の含有率は相対的に希釈される方向になるため、混焼率の設定においてこれらの関係は重要な検討事項となる。

自然発火性については、石炭の場合、石炭表面での酸化反応が主体であり、長年の経験・知見からその対策も確立されている。これに対し、木質バイオマスについては、発酵による発熱が伴い、石炭の自然発熱の原理がそのまま適用できず、チップやバークの利用においては、運搬時に自然発熱状態に至っていることもあり、受け入れた日のうちに使い切る運用をすることで大きな事故に至ることはほとんどなかった。その後使用され始めた木質ペレットにおいては、微生物による発酵に不可欠な水分が低く抑えられており、自然発熱のリスクは低いと考えられてきた。近年になって、木質ペレットの吸湿性も懸念されるようになり、木質ペレットにおいても、図 2.2.5-1 に示すようなメカニズムにより、自然発熱の可能性があることが示唆されている。

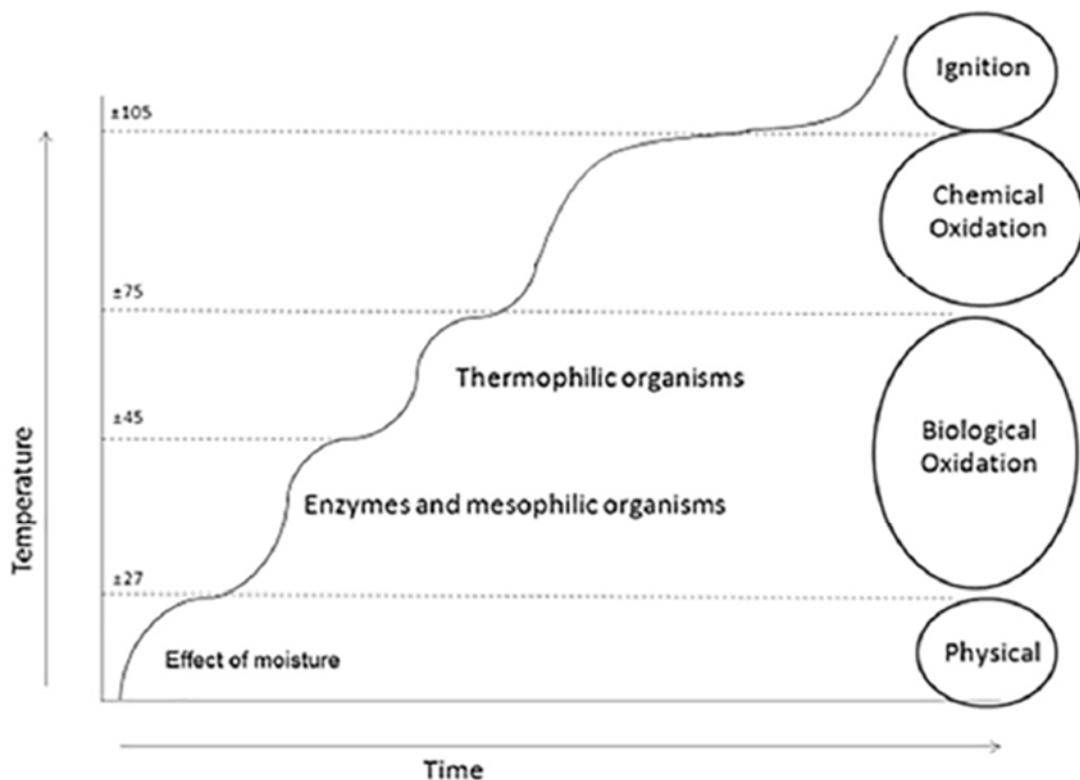


図 2.2.5-1 木質ペレットの自然発熱メカニズム図

引用 : Fuel Processing Technology 174 (2018) 1-8

2.2.6 バイオマス燃料のリスクの洗い出し及び当該リスクの管理方法

バイオマス発電所の比較的大きな火災・事故事例から、事故が生じている発電所の構成機器は、燃料倉庫（貯蔵庫）・燃料搬送装置（コンベア）・ボイラに大別される。以下に機器ごとに、事故の要因、リスク、対策等について述べる。

(1) 燃料倉庫（貯蔵庫）

燃料の主たる貯蔵方法としては、ヤードでの野積み、サイロ内への貯蔵になる。事故原因は主に自然発火になる。このため、燃料のリスクおよび貯蔵設備の特性を十分に把握した上で燃料の管理を行うことが重要である。

- ・ 古い燃料から排出することで貯蔵期間を短くする（先入れ・先出し）ことを徹底
- ・ 白煙の発生など温度上昇が疑われる燃料には水噴霧および攪拌を行って、燃料の温度を上げない

(2) 燃料搬送装置（コンベア）

事故としては、コンベアの爆発やローラの摩擦による発熱が原因の火災などがある。コンベアは、バイオマス発電所に限らず、火災事故が多い装置の一つである。

コンベアは、多数のローラがベルトやチェーンを回転・送り出すことで駆動し、燃料を搬

送するもので、ローラやベルトが詰まると摩擦や過熱を起こし、火災が発生する危険性がある。

木くずがローラなどの隙間に入り込んで回転不良を起こす場合もある。1つのローラから出火すると、コンベアは急に停止できないため、燃料とともに火災も運んでいくため、延焼のリスクが大きい。ベルト式の場合、火災発生時にベルト自体が延焼媒体になる。雨水や異物の混入防止のために取り付けたフードは、火災発生時に煙突効果を生じてコンベア内で急激に火が回る。コンベア内部へのアクセスが容易でないことから消化が困難となる。

対策として、コンベア内への温度センサの設置や、コンベアの途中に散水設備を設置している事例もある。ただし、バイオマス発電所における設置事例はまだ少ない。温度センサは火災が起きた後に反応するものであり、温度センサと散水設備が連動して自動起動する事例はほとんど見られない。実際には、火災が発生した後に、中央操作室の運転員が温度センサでの温度異常を認知して消化配管の開弁を判断し、手動で開弁操作することになる。よって、効果的な消火には運転員の迅速かつ的確な判断が必要であり、運転員の実務経験が非常に重要となる。

(3) ボイラ

ボイラ内での事故は、水管の破裂が主たるものと推察される。これはバイオマスの利用によるものと言うよりは、石炭専焼でも生じうるものであり、灰によるコロジョンが主要因と考えられる。ただし、木質バイオマスは、アルカリ金属、アルカリ土類金属が多いいため、懸念される影響を事前評価しておくことが重要である。

3 固体バイオマス燃料の燃焼・火災・爆発の原理と事故の類型化

3.1 調査項目と具体的な調査内容

国内のバイオマス発電所で現在使用されている固体バイオマス燃料に関して、固体バイオマス燃料各々の燃焼・火災・爆発の科学的原因を明らかにし、その結果を基に原理と原因の類型化を行う。この事故類型に基づき、対策の提示、リスク評価を行う。

3.2 調査結果

3.2.1 導入

現在国内で頻発している固体バイオマス燃料の燃焼、火災、爆発事故は、石炭火力への混焼、バイオマス専焼問わず発生しており、背景にはバイオマス燃料の物理的性状および化学的性状に由来する以下の共通した原因があると考えられる。

- ・ 粉じん火災、粉じん爆発（主に浮遊粒子への着火によるもの）
- ・ 自己発火（主に貯留中の固体バイオマス燃料や、プラント内に堆積した粒子の化学的反応、生物的反応を経た発火によるもの）

本章では、石炭火力発電所への混焼や、バイオマス専焼発電所で実際に使用されている以下の固体バイオマス燃料種を対象に、これらの燃料のもつ特性に起因する燃焼、火災、爆発リスクの類型化を行う。本調査の対象とする固体バイオマス燃料種は以下のとおりである。ただし、実際には産地や管理方法の違いによって性状が異なることがある。

- 木質ペレット (Wood Pellets)：製材廃材や間伐材などを細かく粉碎し、圧縮成形した粒状燃料。形状が均一で、エネルギー密度が高く輸送性に優れる。
- ブラックペレット (Black Pellets)：木質ペレットを半炭化処理し、耐水性やエネルギー密度を向上させた燃料。
- パームヤシ殻 (PKS: Palm Kernel Shell)：オイルパーム果実から抽出された種子の殻を利用した燃料。
- 木質チップ (Crushed Wood Chips)：原木を破碎、粉碎して作られる燃料。
- バーク、剪定枝 (Bark and Pruned Branches)：樹木の樹皮や剪定された枝を利用した燃料。
- 建築廃材 (Construction Waste)：解体工事等で排出される廃材による燃料。
- 災害廃棄物 (Disaster Debris)：台風や地震などで発生した木質系廃棄物を燃料化したもの。

3.2.2 火災、爆発の発生原理

固体バイオマス燃料の火災、爆発事故の原因は「粉じん火災、粉じん爆発」によるものと「貯留中の固体バイオマス燃料や堆積・残留物の自己発火」によるものに大別される。

(1) 粉じん火災、粉じん爆発の発生原理

ア. 粉じん火災、粉じん爆発の事例

粉じん爆発を引き起こす物質は、固体バイオマス燃料以外にも小麦粉や砂糖などの有機系、マグネシウム、アルミニウム等金属系など多岐にわたり、世界では 1800 年代後半からこれまでの間に製粉、製糖や木材加工工場において多数の犠牲者を出す重大インシデントが発生してきた。

イ. 粉じん火災、粉じん爆発の発生フロー

固体バイオマス燃料が発じんし、発火、爆発に至るまでのフローを図 3.2.2-1 に示し、それについて以下に概説する。

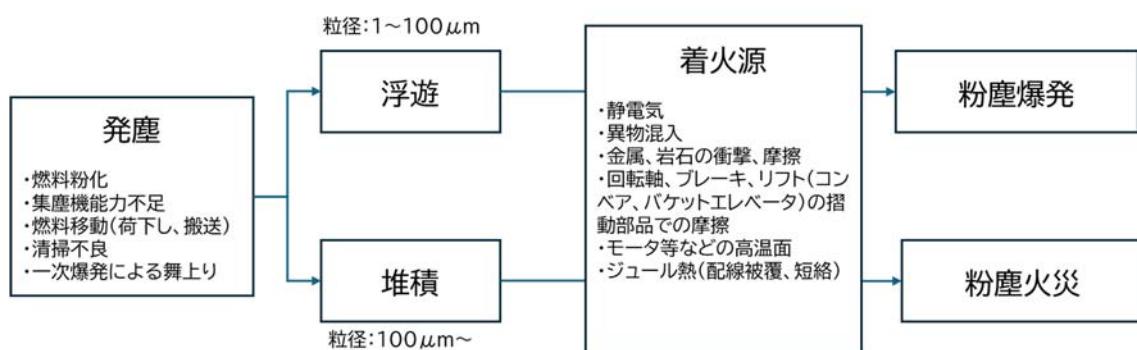


図 3.2.2-1 粉じん火災、粉じん爆発の発生フロー

a. 固体バイオマス燃料の発じん

固体バイオマス燃料は、燃料製造時や燃料荷下ろし、搬送、貯留時に必ず細片や粉体が発生し、そのサイズは $1\text{ }\mu\text{m} \sim 1000\text{ }\mu\text{m}$ (1mm)程度である。固体バイオマス燃料の中でも、ペレット、ブラックペレットは微粉を成型して作っているため、機械的強度の低いペレット、ブラックペレットは搬送、貯留中に強度を失って微粉に戻ってしまうことが懸念される。

粉じん火災、粉じん爆発の発生は、一般に大気中に浮遊可能な粒子径は $1 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ といわれており、 $100\text{ }\mu\text{m}$ を超える粒子は空気の流動のある状況では浮遊可能であるものの、重力の支配を受け堆積しやすい。密度の小さい粒子、不規則な形状の粒子は浮遊しやすいため、固体バイオマス燃料のように低密度で軽く、不定形の粒子は浮遊しやすいと考えられる。

これらの粉体は可燃性粉じんとして浮遊あるいは堆積し「粉じん爆発」「粉じん火災」を引き起こす原因となる。以下、「粉じん爆発」と「粉じん火災」についてそれ概説する。

b. 粉じん爆発の原理

1) 発生原理

粉じん爆発とは、空気中に浮遊した可燃性粉じんが以下の粉じん爆発発生の条件が揃うことにより発火し、爆発的な燃焼が起こる現象をいう。

粉じん爆発の 5 条件

- ・ 可燃物
- ・ 点火源
- ・ 場の閉鎖性
- ・ 支燃物（酸素）
- ・ 粉じんの分散（粉じん濃度が爆発濃度内にあること）

火災の 3 条件（可燃物、酸素、着火源）に「粉じんの分散（粉じん濃度が爆発濃度内にあること）」「場の閉鎖性」が加わったものが粉じん爆発の 5 要素である。

粉じんを構成する粒子 1 個の堆積はわずかなものであるが、何らかの熱エネルギーが与えられことで表面温度が上昇し熱分解によってガス状になった場合、その体積はもとの固体と比べ 2 衍程度大きいものとなる。このガスは空気と混合し爆発性の混合気体を形成し火炎を形成する。それがさらに他の粉じん粒子の熱分解、ガス化を促進し連鎖反応的に火炎を伝播することになる。この連鎖反応が閉空間で発生した場合に急激な圧力上昇を引き起こし爆発に至るのが粉じん爆発と言われる現象である。

また、浮遊する粒子群には必ず濃淡むらがあるため局所的な当量比のむらと火炎面積の増大が起こるため、浮遊する粒子群の燃焼は必ず乱流燃焼となる。発生する爆風や衝撃波によって周囲の粉じんを巻き上げ、二次的に連鎖的な爆発に至ることもあり、重大事故につながりやすい。（図 3.2.2-1 参照）

粉じん爆発の発生には粉じん濃度が爆発下限界濃度（Lower Explosive Limit, LEL）以上であり、かつ上限界濃度（Upper Explosive Limit, UEL）以下であることが必要である。爆発下限界濃度は、粉じんが空气中で爆発を起こすために必要な最低濃度を示しており、これを下回ると燃焼プロセスを持続させるエネルギーが不足する。一方、爆発上限界濃度は、粉じんの濃度が高すぎることで逆に酸素が不足し、爆発が発生しなくなる濃度を示している。この範囲内で粉じん濃度が存在する場合に着火源が加わることで爆発が引き起こされる。（図 3.2.2-2 参照）

爆発下限濃度は粒子の種類、大きさ等にもよるが $30 \sim 50\text{g/m}^3$ のものが多い。視覚的には、粉じん爆発を起こす粉じん濃度は、2m 放れて 25W 電球の光が見えにくくなるほどであると言われる。（図 3.2.2-3 参照）

しかしながら、一般に販売されている煤じん濃度計（ダストモニタ）の測定濃度は低濃度(0.1mg/m^3) ~ 中濃度(1.0g/m^3) 程度であり、 $30 \sim 50\text{g/m}^3$ 程度の濃度域を測定することが困難である（各種メーカーへのヒアリングによる）。

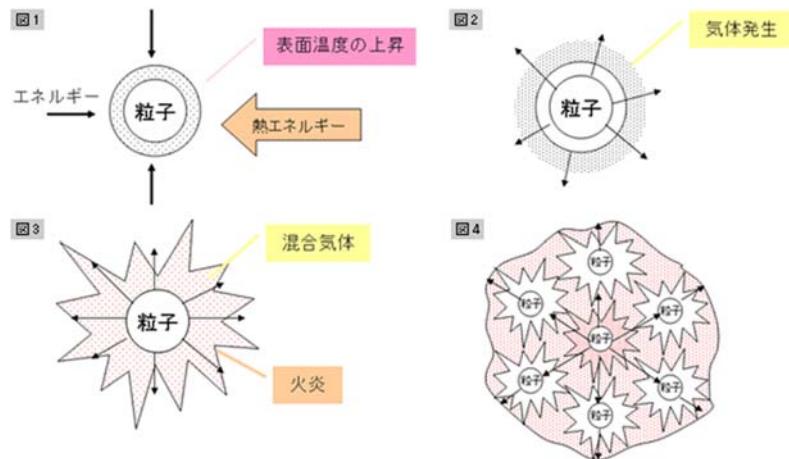


図 3.2.2-1 粉じん爆発の概念図

引用：日清エンジニアリング株式会社ホームページ

<https://www.nisshineng.co.jp/news/tech-info10.html>



図 3.2.2-2 爆発限界濃度

参照：株式会社アピステホームページ

<https://www.apiste.co.jp/gde/technical/detail/id=4774>

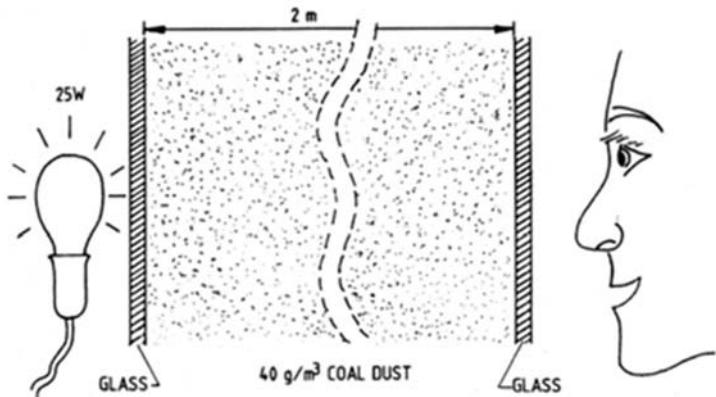


図 3.2.2-3 粉じん爆発を起こす粉じん雲濃度

引用 : R.K. Eckhoff: Dust Explosion in the Process Industries Third Ed., Gulf Professional Publishing, p.9, (2003)

2) 着火源

粉じん同士の衝突や周辺装置器壁との摩擦によって粉じんは静電気を帯びやすく、静電気による放電が着火源になる危険性がある。

静電気の原因はこれ以外にも多岐にわたり、例えば作業員の歩行時に床面と靴との摩擦帯電によって絶縁性の靴裏が帯電し、その静電誘導を受けて人体が帯電するケースや、絶縁性のフレキシブルコンテナへの粉体出し入れ作業時にフレキシブルコンテナが強帯電し、その静電誘導を受けて人体が帯電するケース等もある。²

その他、搬送ベルトや作動中の機械から発生する火花、電源プラグに粉じんが溜まり吸湿することにより発生するトラッキング現象などが着火源になることもある。

さらに、燃料中に混入した異物が火花を引き起こすことも原因の一つとして考えられる。このような異物は燃料製造や搬送の過程で混入することがあり、金属片や石などの硬質な異物が機械や装置内での衝突や摩擦により火花を発生させるリスクがある。

c. 粉じん火災の原理

1) 発生原理

100 μm を超える粒子群は重力の影響を受け、例えば配管ラックや電気ボックス内、天井裏、柱、梁などプラント内の様々な箇所に堆積するが、これらの堆積

² 住友化学 化学プラントの静電気危険性の評価と対策
https://www.sumitomo-chem.co.jp/rd/report/files/docs/20040205_qyu.pdf

粒子の近くに高温部、配線の短絡などによる着火源が存在すれば引火する可能性がある。微粉の堆積粒子同士に十分な酸素が存在しない場合燃焼が継続せず失火すると考えらえるが、何らかの条件（例：攪拌作用による空気供給、またパイル中に部分的に空隙ができることによる煙突効果など）で燃焼を継続させるに十分な酸素が供給されてしまった場合、燃焼から発炎することも考えられる（粉じん火災）。

発火によって堆積していた粒子が飛散、浮遊してしまうことも考えられる。この場合、浮遊粒子が「粉じん爆発の原理」に記載した5条件を満たした場合に粉じん爆発を誘引する可能性もある。さらに、長期的に堆積し続ける場合には、低温酸化や微生物発酵による自然発火のリスクも生じる。（自然発火については、次項にて解説する。）

これらの現象は、微粉を構成する粒子径や堆積厚、固体バイオマス燃料種の違いなど非常に複雑な条件によって引き起こされるため予測が難しいが、発火の抑制のためには粉じんの堆積が極力無いことが望ましい。

発火の抑制のためには、厚み3mmを超えて堆積している面積が全体面積の5%を超えてはならないことが推奨されている。³

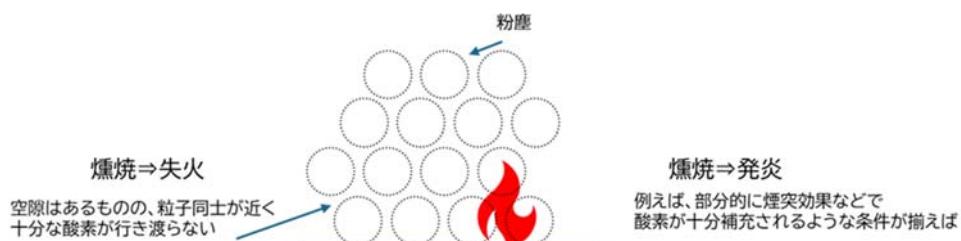


図3.2.2-4 粉じん火災の概念図

2) 着火源

モータ等の高温部や配線被覆のジュール熱、また電気配線接続部に粉じんが付着することによって短絡して発火、あるいはコンベア周辺に堆積したコンベアローラの保有熱などにより加熱され、何らかの条件で燃焼を継続させるに足る空気が補充されるような条件が揃った場合に発火する可能性がある。

粉じん火災の発生原理で述べたように、粒子同士の間に十分な酸素が存在しないような堆積層では、瞬間的な静電気エネルギーや火花では燃焼が継続しにくいと考えられるが、一方で、粉じん爆発よりも堆積粉じんの方が着火しやすい物

³ 日本バイオマス安全性セミナー バイオマス取り扱いハンドリング及びサイロのより安全な運用：火災と爆発の防止

質もあるということである。⁴

(2) 自己発火の発生原理

ア. 自己発火による火災、爆発の事例

ベイルート港のサイロ火災のように、自己発熱による発火もまた重大インシデントを引き起こす危険性を孕んでいる。世界中では粉じん爆発同様、自己発火による火災、爆発事故が多数発生している。

イ. 発生フロー

貯留あるいは堆積、残留した固体バイオマス燃料が酸化や発酵によって自己発火に至るフローを図 3.2.2-5 に示す。

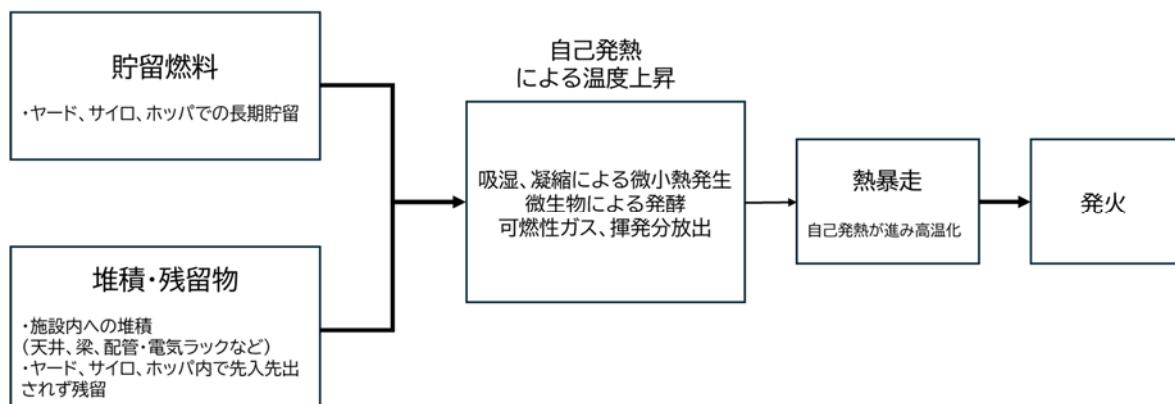


図 3.2.2-5 固体バイオマス燃料自己発火の発生原理

ウ. 発生原理

バイオマス燃料の自然発火は、外部からの明確な火種がない状態で発生する現象である。固体バイオマス燃料の物理的反応、生物学的反応、化学反応による自己発熱、発火プロセスの模式図を図 3.2.2-6 に示す。

⁴ 物質安全の基礎 - その 5 : 可燃性粉じん - Vol.47 No.1(2008) 住友化学(株) 生産技術センター
https://www.jstage.jst.go.jp/article/safety/47/1/47_39/_pdf/-char/ja

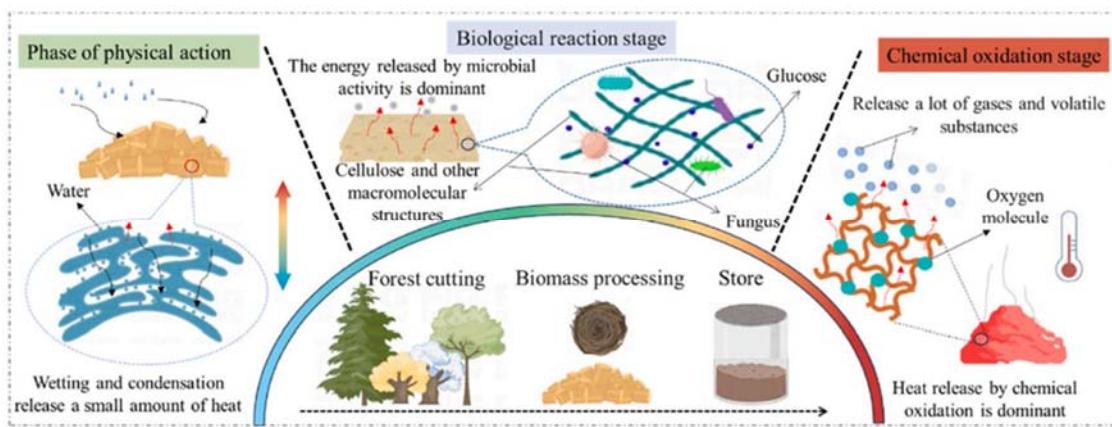


図 3.2.2-6 固体バイオマス燃料の自然発火プロセスの模式図

引用 : Comparison and analysis of spontaneous combustion control between coal storage silos and biomass silos Liyang Gao ,2023, Energy

固体バイオマス燃料は、水分、貯留・堆積状況（高さ、深さ）、粒径、換気条件、バイオマス種類、セルロース、ヘミセルロース、リグニン含有率等に影響を受け、非常に複雑な反応を起こすため、現象を一概に説明するのは困難であるが、物理的、生物学的、化学的反応が起こる温度域はおおよそ図 3.2.2-7 に示すようであるといわれている。

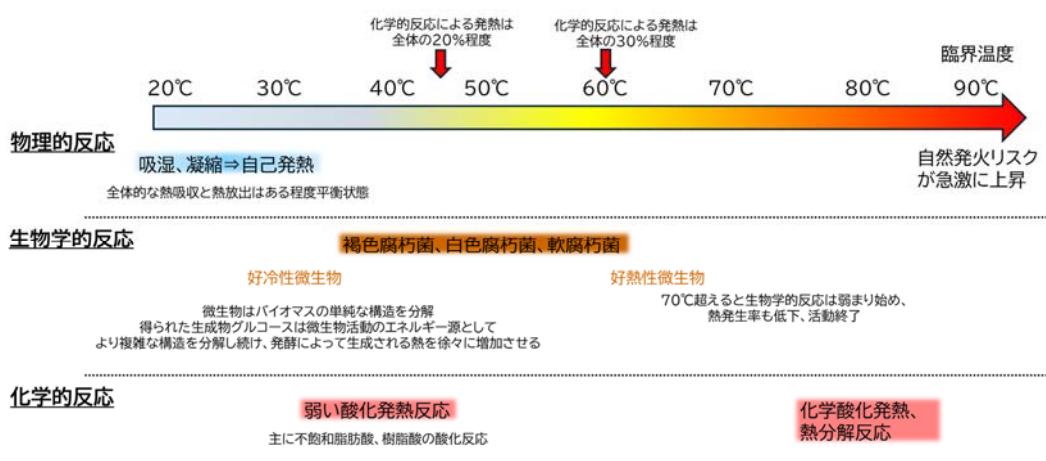


図 3.2.2-7 固体バイオマス燃料の温度域ごとの自然発火メカニズム

引用 : Comparison and analysis of spontaneous combustion control between coal storage silos and biomass silos Liyang Gao ,2023, Energy より作成

まず物理的反応として固体バイオマス燃料が吸湿することで発生する微小熱が考えられる。しかし、これは周辺への熱放出とある程度平衡状態が保たれるため、熱暴走には至りにくい。

次に微生物反応であるが、これは一般に発酵と呼ばれる。この反応は微生物が酸素と水分と有機物を取り入れ、発熱するとともに CO_2 を排出し、有機物を堆肥化する原理と基本的には同じである。微生物には好冷性のものと好熱性のものが存在するが、70 以上になると微生物は死滅するため発酵による熱発生は停止する。

一方、化学的反応としての酸化反応は 60 ~ 105 程度の温度域で活発化してくる。酸化反応速度はアレニウス型で温度上昇に対し指数関数的に増加する。このことから、断熱されると反応が加速されることが懸念されるため、できるだけ固体バイオマス燃料の貯留時のパイルを大きくしないことが望ましい。東日本大震災では、がれきの発火防止のため、可燃性廃棄物の積み上げ高さを 5m 以下にし、蓄熱しないよう注意喚起された。⁵

アレニウス型： 化学反応の温度依存性を説明するモデルの一つで、スウェーデンの化学者 Svante Arrhenius (スヴァンテ・アレニウス) によって提唱されたアレニウス式に基づくもの。温度が高くなると反応速度が速くなることを説明する際によく用いられる。

固体バイオマス燃料の堆積高さと発火温度の関係については、以下の Frank-Kamenetski (フランク・カメンツキー) の熱発火理論で説明される。

$$\delta = \frac{QAR^2}{\lambda Ea} \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right)$$

： フランク=カメンツキー数 発熱と熱拡散の比を表す。

臨界値を超えると堆積物内部で自己発熱が止まらず温度が上昇し発火が起こる。

Q: 単位堆積あたりの発熱量 (反応のエネルギー)

A: 反応速度の頻度因子

R : 堆積物の特性長 (ここでは堆積高さや半径)

： 热伝導率 (热の拡散能力)

Ea : 反応の活性化エネルギー

T: 絶対温度 (K)

この式より、堆積高さ (R) が大きくなる、つまり堆積物が高くなると熱が内部に蓄積しやすくなり、発火温度に達しやすくなることがわかる。したがって、堆積高さを低く抑えることが内部熱の蓄積を防ぎ発火を防ぐことに繋がる。

⁵ <https://nri.fdma.go.jp/news/20191030/20191030.pdf>

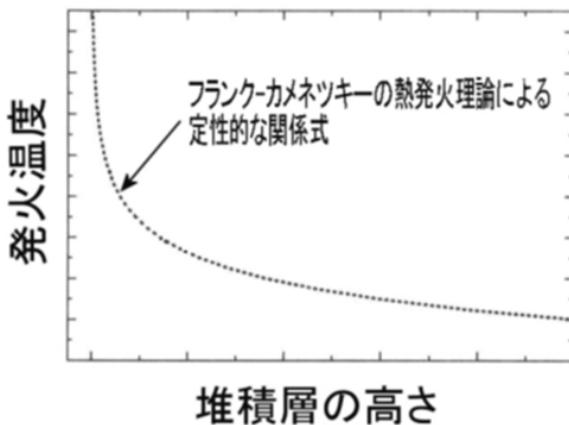


図 3.2.2-8 フランク = カメネツキーの熱発火理論による定性的な関係

引用： 固形燃料ペレット貯蔵における自然発火（労働安全衛生総合研究所）

https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/mail_mag/2023/182-column-1.html

生物学的反応で 70 度まで温度が引き上げられ化学的反応に接続されていき、この熱による熱分解がパイル表面や酸素濃度の高い部分に広がると、一気に発熱・発火に至ることがある。この一連の流れが自己発熱からの発火の原理である。

発火の予防のために堆積物の切り返しを行い、内部温度を下げる方法もあるが、切り返し時に燃焼のための空気が供給され発火を促進してしまうことも考えられる。しかしながら、これは、粒子径や堆積層の厚み、粒子間の空隙の状況（重機等で圧密されている場合は蓄熱を促進してしまうが、燃焼に必要な酸素は存在しにくくなる）発火地点などの複雑な条件によるため、一概にはいえない。

微生物の活動のためには適度な水分が必要になるが、発酵の指標である水分活性値から判断すると、微生物の増殖に適した値(0.9)となる水分濃度が概ね 15% であり、これを超えると発酵が生じる可能性があるということである。一方、木質ペレット層を断熱状態にし、自然酸化による発熱が生じる温度条件を調べた結果、約 65 度で発熱が始まることが確認された。

木質ペレットの貯蔵時にいて、湿った空気の流入や結露により局所的な水分の集中が起こった場合、微生物による発酵熱が生じ、これが蓄熱されるとさらに自然酸化により発熱し、発火に至ると考えられる。木質ペレットの吸湿性を調べた結果、20% 前後の水分濃度まで達することが示されたことから⁶、長期貯留中の環境によっては自然発熱から発火に至ることは十分考えられる。

一方、木質チップの場合は、木材の含水率が纖維飽和点（含水率約 30%）以上にな

⁶ 電力中央研究所報告「木質ペレット貯蔵時の自然発火性に関する調査 自然発火メカニズムと実証試験法」
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=M08022&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=7139>

ると腐朽の発生や進行の危険性が著しく高まると考えられる⁷。ヒノキチオールなど強い抗菌作用を持ち高耐久性を持つヒノキ、ヒバなどは腐朽しにくいと言われるが、このような樹種であっても辺材部分は腐朽しやすいというデータもある⁸、当報告書では、未乾燥の木質チップは一般的に腐朽菌により劣化しやすいものとみなす。水分に対しての明確な安全基準については不明で、自己発熱、自然発火を抑えるためには、長期貯留を避けるということがもっとも効果的である。

工. 着火源

バイオマス燃料の自然発火は、外部からの明確な火種がない状態で発生する現象である。

3.2.3 リスク評価、分析方法

固体バイオマス燃料の粉じん火災・爆発、自然発火の発生リスク評価、分析する方法として以下のような手法がある。

(1) 各種分析方法 (以下、ア. ~ カ. に記載)

- ア. 粉化、発じんに関するもの
- イ. 自然発熱、自然発火性に関するもの
- ウ. 燃焼性、爆発性に関するもの(爆発のしやすさを表す危険特性値に関するもの(感度))
- エ. 爆発の激しさを表す危険特性値に関するもの(威力)
- オ. 浮遊性、付着性、ホッパ落下性、静電気に関するもの
- カ. 撥水性、疎水性に関するもの

ア. 粉化、発じんに関するもの

a. 発じん評価 (ASTM D547)

粉体材料の発じん性(dustiness)を評価するための標準試験方法。ただし 1980 年の改定を最後に廃版(1986 年に廃版)となっている。

b. 機械的耐久性

ペレットの機械的耐久性の判定方法を規定したもの。機械的耐久性は、取り扱いおよび輸送において生じる衝撃または摩耗に対する圧縮燃料の抵抗性を測定する試験方法である。機械的耐久性試験器の構造と仕様を図 3.2.3-1 に示す。回転箱は、表面は平滑なスチール、アルミニウムあるいはアクリル樹脂製で、リベットやねじ釘などの突出部はできるだけ小さく角を丸く仕上げ、また微粉が漏れないように隙

⁷ 森林総合研究所「木材腐朽のメカニズムとその防止」

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwpa/42/3/42_132/_pdf

⁸ 日本木材防腐工業組合技術委員会「高耐久な樹種であっても辺材は適切な保存処理が必要」

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwpa/48/1/48_23/_pdf/-char/ja

間のない構造とする。寸法は 300(縦) × 300(横) × 125(幅) mm で、内部には緩衝翼 (230 × 50 mm) を対角線方向に強固に取り付ける。試料の投入扉を側面に一箇所設ける。回転箱を 50 rpm の速度で回転するため、300 × 300 mm の壁の中心位置に、壁に直角に回転軸を取り付ける。耐久性試験器は図 3 のようにツイン方式で、一度に 2 測定ができるようにする。

当試験は試験終了後に発生した 3.15 mm 未満の微粉を測定する試験であり、100 μm 以下のような細かいサイズの粉じんのみを測定している項目ではないことに注意が必要である。

なお、機械的耐久性の測定規格である ISO17831-1 は、ペレットおよびブリケット用の試験規格であり、Thermally treated and densified biomass fuels (一例としてブラックペレット等) の燃料仕様及び分類規格である ISO17225-8 にも引用されている。

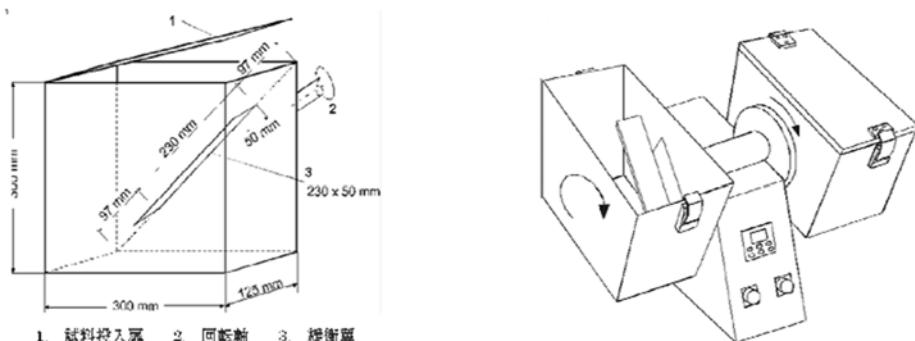


図 3.2.3-1 耐久性試験機の回転箱(左)耐久性試験機の例(ツイン回転箱)(右)

引用：木質ペレット品質規格 一般社団法人日本木質ペレット協会

<https://www.w-pellet.org/image/pellet-kikaku-201104-.pdf>

木質ペレット協会の木質ペレット品質規格は事実上廃版となり、現在は日本農林規格である JAS0030 に統一されている。

イ. 自然発熱、自然発火性に関するもの

a. 自然発火性試験 (SIT)

低温酸化による自然発熱しやすさを調べるための方法。自然発熱試験装置 (SIT) を用いて試験を行う。断熱制御しながら初期温度から 200 まで温度上昇する間の時間を測定する。試験時間は 24 時間。SIT 装置を用いた一般的な実験手順は次の通りである。試料を試料室に詰め、恒温槽の中に置き、窒素などの不活性ガスを流す。試料室の周囲を断熱制御用ヒータ で囲み、試料内で発生した熱の外部への流出を防ぎ、試料内に蓄熱するよう断熱制御を行う。恒温槽の温度を発火テストを行う温度に設定すると、やがて試料温度も恒温槽の温度に達し平衡状態となる。ここで試料室に流すガスを窒素から空気に切り替える。試料が空気と反応して酸化が起こ

るものの場合、酸化熱が試料室内に蓄積され、試料温度が恒温槽の温度よりも高くなり、発熱性を知ることができる。一方、試料が自己反応性物質の場合は空気の流入が無くても熱が蓄積され温度上昇が起こる。発熱が起こった場合、断熱制御用温度は試料温度の上昇に追従して上昇する。24時間以内に設定温度から60℃を超える発熱が起こらない場合は、その温度で自己発熱性はないものとする。⁹

ただし、明確な試験規格があるわけではないので、決まった測定方法の定義が存在しない。24時間以外の試験時間で測定する場合もある他、初期温度を上げると発熱性を示すなど結果が変わる場合がある。

| 測定試料（実績）

- 石炭
- 汚泥
- 廃棄物固化化燃料(RDF、RPF)
- 木質ペレット等

| 装置仕様及び測定条件

- 装置：島津製作所製 SIT-2
- 試料容器：約2mL（石英ガラス製）
- 温度：50℃～200℃（初期温度、一定）
- 雰囲気：空気、酸素濃度調整ガス
- ガス流量：2～5mL/min

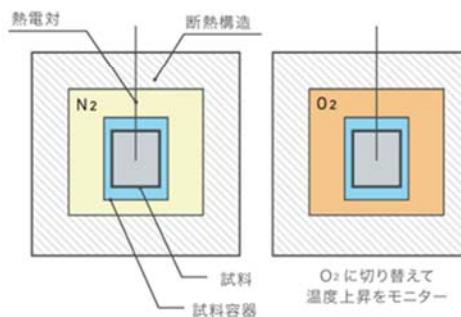


図3.2.3-2 SIT(自然発火性試験)試験装置

引用：株式会社MCエバテックホームページ

https://www.mcet.co.jp/service/analysis/material/img/pyrophoric_test.pdf

b. 貯蔵時の自然発火のリスク評価（ワイヤーバスケット法）

貯蔵時の状態を模擬的に再現し、その状態での蓄熱・放熱バランスから、自然発熱性を評価する試験として「ワイヤーバスケット試験」がある。一定粒度に調整したバイオマスをワイヤーで作ったバスケット（サイズ：30cm角など）に充填し、乾燥機内に静置した状態を熱電対およびガス分析計で計測する。これにより、温度、ガス成分情報から自然発火性の傾向を把握することができる。（IIC REVIEW/2021/04. No.65）試験方法について図3.2.3-3に示す。ただし、一般的なワイヤーバスケット法では、ガス成分まで測定するものではなく、温度のみの測定である。

⁹ 消防研究技術資料 第79号 再生資源燃料等の危険性評価に関する研究報告書

https://nrifd.fdma.go.jp/publication/gijutsushiryo/gijutsushiryo_41_80/files/shiryo_no79.pdf

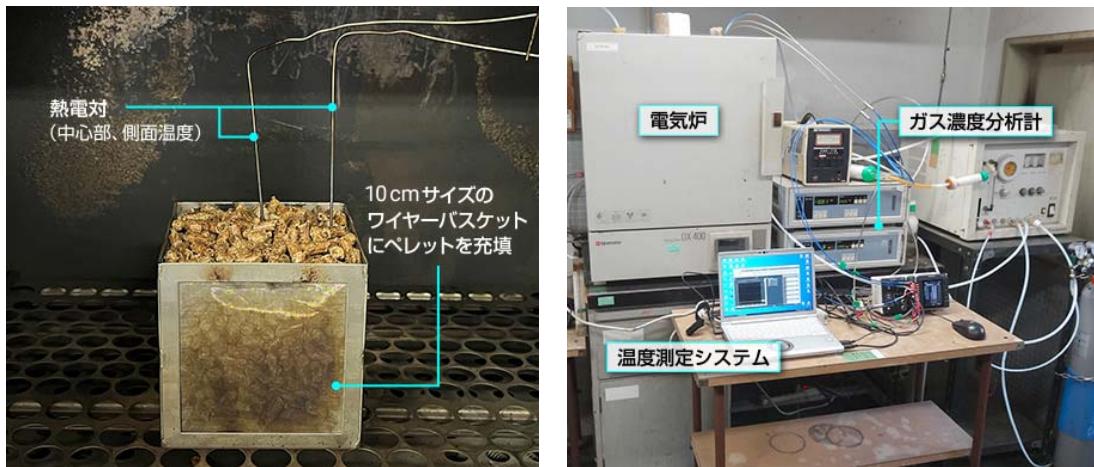


図 3.2.3-3 ワイヤーバスケット試験
(左: ワイヤーバスケットへの充填状況、右: 試験装置全体図)

引用: 株式会社 IHI 検査計測ホームページ

<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-03-08/>

c. BAM 蓄熱貯蔵試験

自己反応性を有する物質は、長時間高温に置かれると反応が徐々に起こり、反応熱が内部に蓄熱して熱爆発に至ることがある。この自己加速分解を起こす最低温度を SADT (Self-accelerating Decomposition Temperature) と呼び、貯蔵・保管時の危険性を示すデータの一つとなる。SADT 試験はいくつかの方法があるが、そのうちの一つがこの試験法。BAM (ドイツ連邦材料試験研究所) 蓄熱貯蔵試験は、500mL のデュワービンに 400mL の試料を入れ、断熱材の蓋をして一定温度の空気恒温槽に入れ、試料温度が雰囲気温度に達してから自己加速分解に至るまでの誘導時間を測定する方法である。¹⁰

d. 高圧示差走査量熱分析 (HP-DSC)

示差走査熱量計 (DSC) は、一定の熱を与えながら、基準物質と試料の温度を測定して、試料の熱物性を温度差として捉え、試料の状態変化による吸熱反応や発熱反応を測定する装置である。¹¹

酸素、窒素や水素加圧下での発熱挙動解析や、急速な温度変化が材料に及ぼす影響の評価から、航空宇宙材料や水素インフラ用材料の評価に使われる。

¹⁰ <https://www.scas.co.jp/services/materialscience/hazard-protection/thermal-stability/Evaluation-during-storage.html>

¹¹ <https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/cta/dsc/>



図 3.2.3-4 高圧示差走査熱量計

引用：神奈川県立産業技術総合研究所ホームページ

<https://www.kistec.jp/connect/equipment/20230000027-0/>

e. 発酵試験 (OxiTop 法)

微生物の発酵のしやすさを調べるための方法であり、OxiTop 法試験装置を用いて試験する。微生物が有機物を分解するときに必要とする酸素の消費量を装置内の圧力変化として検出する。

微生物による基本的な呼吸作用によって発生する CO_2 は、水酸化ナトリウムにより吸収される。一般的な反応式は以下の通りである。¹²



OECD 301F に準拠した試験装置を以下図 3.2.3-5 に示す。専用の試験装置を用いて密閉容器中で培養し、微生物による分解で消費される酸素の量、BOD(生物化学的酸素要求量)を連続測定する。測定された酸素量 (BOD) と検体が完全に分解されて無機物になるために必要な酸素の量、ThOD(理論的酸素要求量)の比から生分解度を算出する。分解が進むと BOD は多くなり、ThOD に近づく。

$$\text{生分解度 (\%)} = \text{BOD} / \text{ThOD} \times 100$$

試験期間は、約 1.5~2 ヶ月。

¹² 環境技術紹介 圧力センサ方式呼吸活性測定器による生分解性試験

<https://www.jeta.or.jp/jeta127/pdf/kangikyou/%E6%8A%80%E8%A1%93%E7%B4%B9%E4%BB%8B127-1.pdf>



図 3.2.3-5 OxiTop 試験装置

引用：一般財団法人日本食品分析センターホームページ

<https://www.jfrl.or.jp/storage/file/779.pdf>

ウ. 燃焼性、爆発性に関するもの(爆発のしやすさを表す危険特性値に関するもの(感度))

a. 爆発下限界濃度試験 (JIS Z 8818-2002 可燃性粉じんの爆発下限測定濃度測定)

可燃性粉じんが爆発を起こすために必要な最小濃度である爆発下限濃度もまた爆発の発生リスクを評価する指標として用いられる。表 3.2.3-1 にいくつかの爆発下限濃度に関して示す。爆発下限界濃度もまた最小着火エネルギーと同様に粒径が小さいものほど小さくなる傾向がある。

可燃性粉じんの爆発下限界濃度はハルトマン式 (Hartmann) 吹き上げ測定装置等を使って測定される。(図 3.2.3-6 参照)。これは米国鉱山局で 1960 年ごろに開発された装置で爆発下限界、最小発火エネルギーなどの粉じん爆発特性値を測定するのに使用される。

表 3.2.3-1 可燃性粉じんの爆発下限濃度例

粉じん種別	平均粒径 (μm)	爆発下限濃度 (g/m ³)
セルロース	51	60
リグニン	18	15
木粉 (切屑)	43	60
コーンスターチ	16	60

表 3.2.3-2 爆発下限濃度の評価基準

0 ~ 40 (g/m ³)	危険性高
40 ~ 100 (g/m ³)	危険性中
100 ~ (g/m ³)	危険性低 (危険性がないわけではない)



有機物の爆発



無機物の爆発

図 3.2.3-6 ハルトマン式吹き上げ試験方法

引用 : JSS マニュファクチャリング株式会社ホームページ

https://jss-m.jp/tes/?page_id=91

b. 最小着火エネルギー試験 (JIS Z 8834 最小着火エネルギー測定方法)

可燃性物質が空気中で燃焼を開始するために必要な最小のエネルギーは MIE (Minimum Ignition Energy、最小着火エネルギー) と呼ばれ、火災や爆発の発生リスクを評価する指標の一つである。

MIE の値は、粉じんの特性によって変化する。例として、粒子径が小さく比表面積が大きい粉じんほど MIE は低下し、着火しやすくなる。一方で、高湿度環境下では MIE が上昇し、着火しにくくなる。また、粉じんの種類によっても値が異なり、金属粉じんと比較すると、有機系物質は一般的に MIE の値が大きく着火に必要なエネルギーが高い傾向を示す (表 3.2.3-4 参照)。

同じ木質系の粉じんであっても、燃料の種類そのものよりも粉化度 (粒子の細かさ) が MIE に大きく影響を与えると考えられる。

表 3.2.3-4 可燃性粉じんの最小着火エネルギー一覧

Material	MIE (mJ)	MEC (g/m3)
Aspirin	30	40
Coal	40	40
Cocoa	100	65
Corn flour	20	40
Corn starch	30-60	60
Flour	25-80	40+
Mixed grain	10-60	60+
Paper dust	20-60	40+
Plastics (various)	5-150	40-1,000+
Resins	3-30	25+
Rice dust	40-120	65
Sugar dust	30-100+	100+
Sulphur	1-15	40+
Wheat starch	20-60	60
Wood dust	20-60	40+

引用 : The importance of Minimum Ignition Energy (MIE) and Minimum Explosive Concentration (MEC) in combustible dust explosivity testing, Jack Osborn,

表 3.2.3-5 最小着火エネルギーの評価基準

0 ~ 10 (mJ)	危険性高
10 ~ 100 (mJ)	危険性中
100 ~ (mJ)	危険性低

引用 : The importance of Minimum Ignition Energy (MIE) and Minimum Explosive Concentration (MEC) in combustible dust explosivity testing, Jack Osborn,

c. くすぶり温度 (層着火温度)

「着火のし易さ」を評価し、高温発熱体への接触着火危険性を判断する。動力機器や発熱体の表面（高温熱面）に堆積して発火することを想定した試験を行うことができる。

測定方法

- 図 3.2.3-7 に示す測定器を使用し、プレート上に堆積した粉体試料を徐々に加熱し着火。
- 温度を目視によって確認。
- 電気抵抗加熱装置上に、測定用リング（内径 110mm 高さ 5mm）と、測定用リング中央部に試料装填用リング（内径 32mm 高さ 13mm）を乗せる。
- 試料を試料装填用リング内に高さ 5mm（層状）となるように置く。

- ・ 測定用リングと試料装填用リングとの間にタルク（高さ 5mm）を入れる。
- ・ 温度調節器によって徐々にプレートを加熱する。
- ・ 着火が確認される温度（くすぶり温度）を測定する。

測定範囲は、室温～450 とするが、溶解した場合は試験を中止し、溶解した温度を明記する。

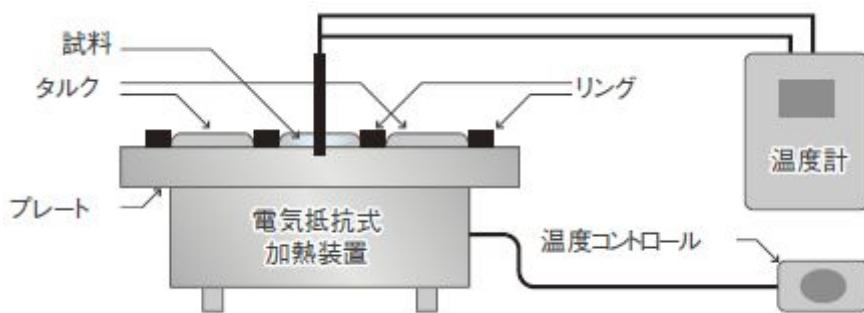


図 3.2.3-7 くすぶり温度 測定装置

- ・ 電気抵抗加熱装置（上限温度：450 まで、BRANSTEAD/TERMOLYNE 社製）
- ・ 温度ハイテスタ 3441（日置電機社製）

引用：株式会社環境衛生研究所ホームページ

<https://www.eiseiken.co.jp/service/funtai/ondo.html>

a) 着火状態による（弊社基準より）

ランク	状態	対策
1	燃焼せず	必要無し
2	炭化するが着火せず	必要なし
3	着火し徐々に延焼	消火器の設置
4	着火し急激に延焼	消火器の設置
5	有炎或いは閃光を発して延焼	集じん機へ消火剤投入口の設置

b) 温度による（発火度として評価する（産業安全研究所 工場電気防爆指針 粉じん防爆より）

分類		区分（温度上昇限度）	
発火度	温度範囲	過負荷になる恐れのない物	過負荷になる恐れのある物
13	150°C < 着火温度 ≤ 200°C	80°C	70°C
12	200°C < 着火温度 ≤ 270°C	120°C	105°C
11	270°C < 着火温度	175°C	150°C

図 3.2.3-8 評価基準

引用：株式会社環境衛生研究所ホームページ

<https://www.eiseiken.co.jp/service/funtai/ondo.html>

工. 爆発の激しさを表す危険特性値に関するもの（威力）

a. 最大爆発圧力 (Pmax) 最大圧力上昇速度 (KST)

粉じん爆発性の評価の中で、「爆発の激しさ」を評価するもの。

測定内容としては、最大爆発圧力及び圧力上昇速度を測定し、KSt を求め、JIS に規定された評価判定基準により「爆発の激しさ」を爆発危険等級に分類する。尚、この試験によって得られた数値は、集じん機等の装置の爆発防護を目的とした放散口面積の設計に利用される。

測定方法

- ・ 球形試験容器内に濃度に見合った量の試料を均等に入れる
- ・ 密閉した後、真空ポンプによって目的の真空まで減圧する。
- ・ 電磁弁を開放し球形試験容器内に粉じんを均一に分散し、着火信号によって内部に設置してある火薬 (10kJ) に着火し爆発させる。
- ・ 爆発の圧力は圧力変換器を通して動ひずみ計に信号が入り、デジタルアナライザによって波形を観測する。
- ・ 電磁弁が開放し球形容器内が大気圧になった時点を起点とし、最大に到達した電圧を最高圧力とし、最高圧力に到達するまでの時間変化による圧力変化

を圧力上昇速度とする。

- 測定は 3 濃度以上行い、濃度に関係なく最高圧力を最大圧力とし、最も高い圧力上昇速度を最大圧力上昇速度とする。
- 最大圧力上昇速度の評価は KSt 値として評価 (1m³測定器の測定値に換算した値)

$$KSt = (\text{試験容器容積 } 0.03\text{m}^3)^{1/3} \times \text{最大爆発圧力上昇速度}$$

測定範囲：濃度 3000g/m³を吹上限界濃度とし、測定濃度間隔は 250g/m³とする。

試料必要量

JIS ふるい目開き 63 μm 程度 (通常 75 μm) 下、

または、目開き 300 μm 下の試料を 300g 以上

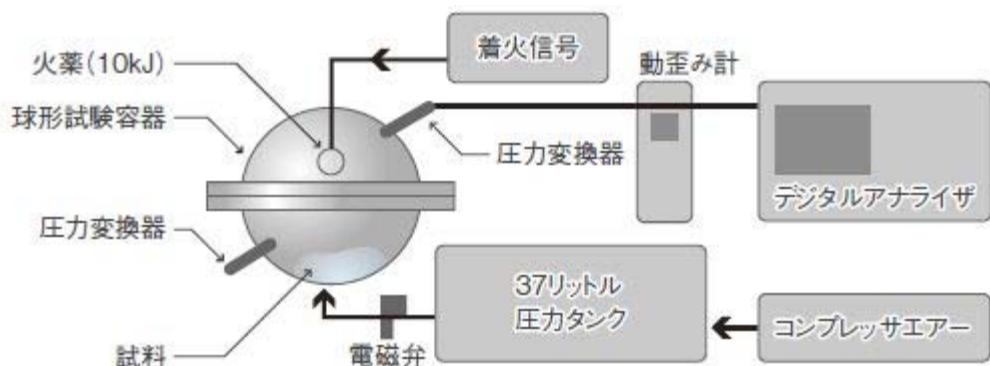


図 3.2.3-9 最大爆発圧力、最大圧力上昇速度 測定装置

引用：株式会社環境衛生研究所ホームページ

<https://www.eiseiken.co.jp/service/funjin/atsuryoku.html>

爆発危険等級	$KSt(\times 10^2 \text{KPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆発の激しさ
St0	0	0 (爆発せず)
St1	$0 < KSt \leq 200$	弱
St2	$200 < KSt \leq 300$	強
St3	$300 \leq KSt$	激

図 3.2.3-10 最大圧力上昇速度の評価

引用：株式会社環境衛生研究所ホームページ

<https://www.eiseiken.co.jp/service/funjin/atsuryoku.html>

才. 浮遊性、付着性、ホッパ落下性、静電気に関するもの

a. デュラム試験、新デュラム試験

デュラム試験は主として貯槽等からの排出性を評価する試験である。石炭の場合、傾斜角 45 度のステンレス製ホッパに石炭 12kg (湿炭ベース) を投入したのち、左右に振動させ、10 秒後に底部のシャッターを開き、石炭全量が落下する時間を測定する。全水分量を変化させて同様の試験を行うことにより、全水分と排出時間との関係が得られる。(図 3.2.3-11 参照)

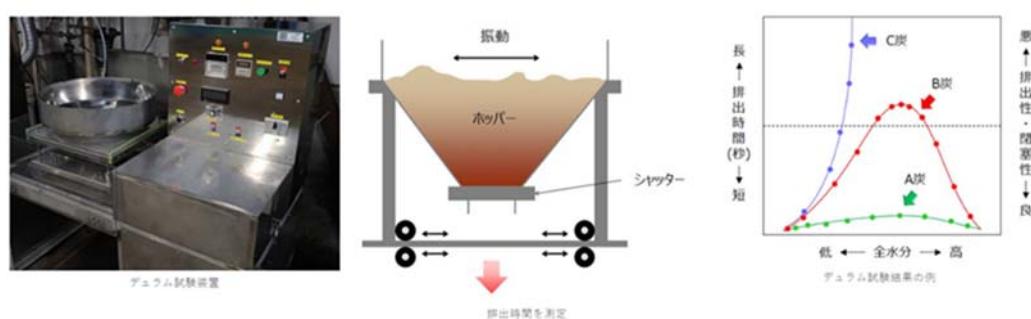


図 3.2.3-11 デュラム試験

引用：出光興産株式会社ホームページ

<https://www.idemitsu.com/jp/business/coal/service/handling.html>

b. 付着凝縮力試験

付着凝縮力試験は、主としてベルトコンベア乗り継ぎ部のシートにおける石炭同士の固着性を評価する試験である。石炭の場合、石炭試料のうち-5mm 部分を採取し、これを 4,000kgf の荷重で成型し、約 100mm 四方の立方体を作製し、次に、成型物を一軸圧縮試験機で破壊し、その時の破壊強度を測定する。付着凝縮力が大きい石炭は、シート壁にあたった際に強固な固着物を形成する可能性が高くなる。

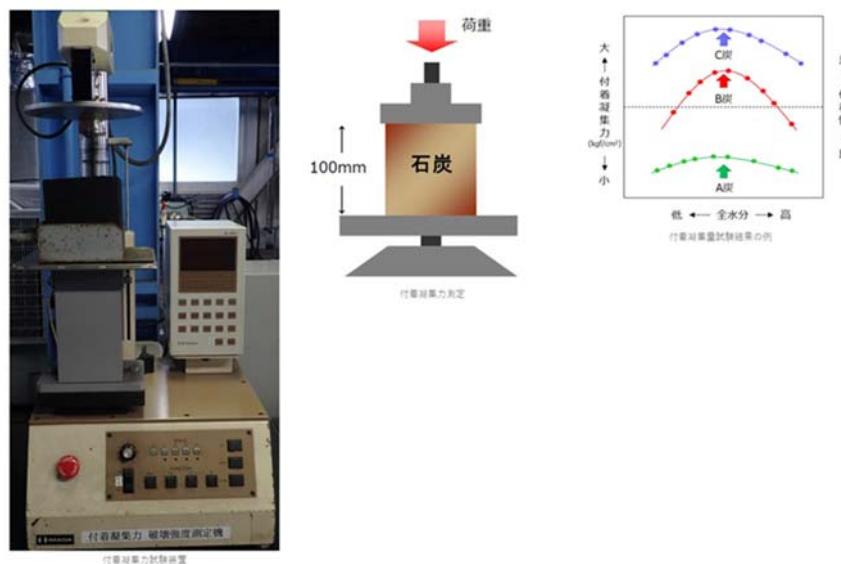


図 3.2.3-12 付着凝集力試験

引用：出光興産株式会社ホームページ

<https://www.idemitsu.com/jp/business/coal/service/handling.html>

力. 撥水性、疎水性に関するもの

a. 水中浸漬試験

水柱浸漬前後で、EN15210-1 に基づいて測定した機械的耐久性の値を比較することによって評価。水中浸漬前の機械的耐久性 (Du1) に対して、一定時間後の水柱申請後の機械的耐久性 (Du2) の比 (=Du2/Du1) が 1.00 以上で耐水性ありと評価する¹³。これ以外にも Thermally treated biomass 専用試験規格として、ISO 23343-1 もある。

水分吸収にどの程度耐性があるか、雨などの湿気にさらされた場合に耐久性をどの程度維持できるのかを調べる試験項目である。当試験は吸湿性 Water sorption (W_{SOP}) と耐久性の低下 post-immersion durability reduction (DURpi) を確認するための試験規格であるが、ISO17225-8 (Graded thermally treated and densified biomass fuels for commercial and industrial use) において “Values should be stated” とされており、報告義務があるものの基準値は未だ明確に定められていない。

(2) 各種分析手法の固体バイオマス燃料への適用性

以上のように、固体バイオマス燃料の物理特性および化学性状、または発酵試験といった

¹³ 日本エネルギー学会機関紙 えねるみくす 101, 27-37(2022) 半炭化ペレットの開発 ~ ラボ試験から商業運転まで ~

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jieenermix/101/1/101_27/_pdf/-char/ja

生物化学的性状を測る方法等を列挙したが、これらの測定結果をもって、爆発・火災リスクを予知するのは実際には困難である。

なぜなら、これらの測定は、爆発・火災を防止するために定められたものではなく、また、規定された分析方法（粒径調整などの検体処理、測定時間等）と発電所の実態は大きく乖離してしまうためである。

分析手法の問題点を下記に述べる。

本来の目的や対象物が異なる分析項目もあり、固体バイオマスの保管時や使用時における爆発・火災を防止するために定められた分析手法ではない。

各分析方法で必要な前処理工程の中で予備乾燥、平衡化、試料の調製が必要な場合、発電所の実情（保管時の粒径、含水率、プラント内で飛散している粉じんの粒径や粒度分布、堆積高）と乖離した条件となってしまう。

何らかの結果が得られたり、現象が確認されたりしても基準値が無く安全性のための判定ができない。

実際に発電所等で発生する爆発・火災の現象は非常に複雑で複合的な現象であるが、ここに記載したような分析方法による結果は、画一的に設定した条件下でのあくまでも一側面に過ぎないため、これらの結果をもって、爆発・火災の予防が十分に行えるとまではいえないと考えられるが、使用するバイオマス燃料の特性（粉化性や湿潤性）の傾向を事前に把握することで、発電所においての燃料の運用や取扱いと言う点では参考になる。

3.2.4 固体バイオマス燃料の燃焼原理別の類型化

(1) 本調査で対象とする固体バイオマス燃料に関する評価

本調査で対象としている固体バイオマス燃料に対し、それぞれ粉じん火災・爆発、自己発熱による発火に関する評価を行う。なお、各固体バイオマス燃料については、産地、樹種、管理方法等により評価は異なるが、本調査では一般的な評価に留まる。

ア. 木質ペレット

<粉じん火災・爆発>

粉じん火災・粉じん爆発は固体バイオマス燃料の粉化しやすさに影響を受ける。もともと木質ペレットは木材を粉碎、破碎した粒子を固めて製造するため、何らかの原因で強度が低下した場合に、微粉発生の可能性は高いと考えられる。

また、石炭や乾燥下水汚泥と比較したデータを以下の図3.2.4-1に示す。これによると、 $63\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微粉の場合、木粉の最小着火エネルギーや最大爆発圧力等は乾燥下水汚泥と石炭の間にある。しかしながら、これはあくまでも $63\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微粉の場合の測定データであるため、この程度の微粒子がその空間で爆発下限界濃度を上回ら

ないように、集じん、清掃の徹底が必要である。

Dust	Ignition sensitivity			Explosion severity	
	LIT [°C]	MIT [°C]	MIE [mJ]	P _{max} [bar(g)]	K _{St} [bar·m/s]
Coal (< 63 µm)	> 400	670	> 1000	7.0	81
Wood (< 63 µm)	330	420	50–60	8.2	161
Dried sewage sludge (< 63 µm)	280	460	100–500	7.6	143

図 3.2.4-1 最小着火エネルギーの評価基準

引用 : Chapter 20 - Myth No. 19 (Pentagon): It Makes Sense to Combine Explosion Parameters in a Single Index, Paul Amyotte

<自然発火>

3.2.2.(1) 自己発火の発生原理 で解説したように、微生物の増殖に適した含水率は 15%以上で木質ペレットの自然発火性は高いと考えられる。通常、木質ペレットそのものの含水率は 10%以下程度であるが、空気の流入や結露による吸湿で、含水率 20%程度まで上昇することが示されていることから、好ましくない貯蔵条件や長期貯留時は自然発火性が上がる。⁶

また、木質ペレットは貯蔵中に CO、CO₂、CH₄のような非凝縮性ガスと少量のアルdehyd、ケトンを発生することが知られている。こうした生物学的、化学的なプロセスは酸素を消費し、酸素枯渇を起こし、火災だけでなく窒息の可能性もある。

実際の現象は複合的であると思われるが、長期貯留することによって生物学的反応と化学的反応が進むと非常に危険性が高まると予想される。

微粉が多いペレットがサイロ、倉庫内で自重落下するときに層を形成することがある。この微粉層は、ペレットの空隙率を減少させ、その結果換気する能力が減退し、自己発熱の可能性が増大することも考えられる。

イ. ブラックペレット

<粉じん火災・爆発>

ブラックペレットは耐水性、疎水性を持ち、雨水と接触しても粉に戻りにくく形状を保持できる性質をもつため¹⁴、粉じん化は抑えられると考えられる。加えて、粉じ

¹⁴ UBE 三菱セメント株式会社 「MUCC トレファイドペレットの概要と微粉炭火力発電所におけるバイオマス混焼事例」

https://www.safety-chugoku.meti.go.jp/electric/files/seminarDocuments/chiefBoilerTurbineEngineer/R05_5-1.ubemucc.pdf

んの飛散を防止するための散水を行えるメリットもある。

なお、ブラックペレットが耐水性を得るメカニズムは以下のように説明される（図3.2.4-2）。

- 半炭化工程で温度上昇にしたがい木材に含まれる有機酸が液状となって一次粒子であるバイオマス粉同士の隙間を埋め、その後有機酸の蒸発と熱分解が起こり疎水物が粉同士の間隙に固着して固架橋が発達。
- その後、温度が低下しても固架橋はそのまま残り、粉同士の接着が維持される。
- この結果、バイオマス粉同士が接着されて水の侵入を抑制し耐水性が発現。

ただし、PATプロセスによるブラックペレットは、半炭化工程で有機酸の熱分解が起こり表面は疎水性になるものの、その後に粉碎して成型を行うため、PBTプロセスによるブラックペレットのようにバイオマス粉同士の架橋は形成されず粉同士の間隙に水が容易に侵入し、PBTに比べて耐水性が低い。

PBTプロセス (Pelletizing Before Torrefaction)

木質チップ 乾燥・粉碎 ペレット成型 半炭化

PATプロセス (Pelletizing After Torrefaction)

木質チップ 乾燥・半炭化 粉碎 ペレット成型

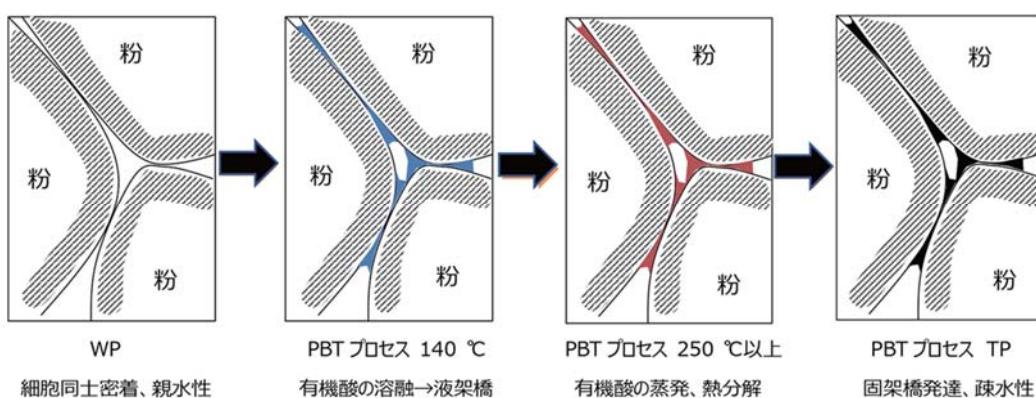


図3.2.4-2 耐水性発現メカニズムの推定

引用：日本エネルギー学会機関紙 えねるみくす、101, 27-37 (2022)

半炭化ペレットの開発 ~ラボ試験から商業運転まで~

<自然発火>

トレファイドバイオマスは低酸素環境でトレファクション処理されるため、酸素と再接触する際に反応性が高まり、自己発熱や自己発火が生じると考えられる。特に湿気を含んだ空気や水滴に触れるとき、この反応が加速する可能性がある。トレファイドバイオマスの貯蔵中に、湿った空気や雨や漏水による水滴と接触したときにも自己発熱は起こり得るため、石炭の貯蔵の場合と同様に、通気性の確保や適切な積み上げの

形状が推奨される。

自己発熱に関連する要因として、通気性、山の形状、酸素の供給、および熱の散逸が挙げられており、石炭と同様の予防措置が有効であるとされる。¹⁵

針葉樹の樹皮やおがくずの半炭化(トレファクション)試料を対象に自己発熱性を評価した研究結果では、固定炭素の増加に伴い発熱性が高まる傾向が明らかにされている。また、固定炭素が炭化物の自己発熱性を相対的に評価する際の重要な管理指標の一つであると記載されている。¹⁶

一方、微生物反応に関しては、半炭化処理によりセルロースやリグニンが分解され、固定炭素の割合が高まっているため起きにくくなっているものと思われる。

原料の違いや半炭化方式やプロセスの違いによって状況は異なると考えられるが、既に利用実績のある亜瀝青炭の貯蔵時間やCO濃度に倣った運用方法で安全サイドに運用できるのではないかと考えられる。¹⁷

ウ. PKS

<粉じん火災・爆発>

PKSはアブラヤシの実からパーム油を搾り取った後の殻のことであり、Palm Kernel Shellの略称である。外観は半分に割った楕円体の様をしており、硬くて粉化しにくい。石炭火力発電所での混焼を考えた場合、PKSの非常に硬く粉碎性の悪い性質は利用が難しいため、低温炭化技術が開発されている。

<自然発火>

PKSにパーム油の油分が10~15%程度残留していた場合、酸化反応が促進され自己発熱が顕著になると報告されている。また、乾燥したPKSでは自己発熱は示さなかつたが、15%以上の含水率に達すると温度が急速に上昇し自己発熱が始まりやすくなつたとも報告されている。¹⁸したがって、残留油分と水分値の測定と管理が重要である。

エ. 木質チップ(破碎チップ、バーク、剪定枝生木、建築廃材、災害廃棄物等)

一般に、比較的含水率が高く形状の大きな木質チップを許容できる固定床(ストーク燃焼)や流動層による木質専焼発電では粉じん火災・爆発の可能性は低いと考えられるが、発酵による自己発熱の可能性があるため長期貯留を避けることが望ましい。

¹⁵ Torrefaction of Biomass for Energy Applications From Fundamentals to Industrial Scale 2018, Pages 183-189 Chapter 8 - Torrefied Biomass Safety Aspects

¹⁶ D. C. C. Ceballos, K. Hawboldt, R. Hellier, Effect of production conditions on self-heating propensity of torrefied sawmill residues, Fuel, 160, 227-237(2015).

¹⁷ 貯蔵時における木質バイオマス炭化物の自己発熱挙動に関する研究 Journal of Japan Solar Energy Society, 48(1), 69-78(2022)

¹⁸ Sea Transportation of Some Agriculture Products Liable to Self-heating, International Journal of marine Navigation and Safety of Sea Transportation

一方、石炭混焼発電の場合は、ミルでの粉碎性を考慮すると含水率の低い木質チップが望まれるため、粉じん発生の可能性がある。また、飛散した粉じんが堆積することで自己発熱する可能性もあるため、集じん、清掃が重要となる。

発電に用いられる各種木質チップそれぞれの粉じん火災・爆発および自然発火は以下のように考えられる。

<粉じん火災・爆発>

a. 破碎チップ

伐採された原木を破碎することによって製造する破碎チップは、含水率が40～60%度あるため粉じんは舞いにくく、粉じん火災・粉じん爆発の可能性は低いと考えられる。

b. バーク、剪定枝

伐採された原木から剥皮されたバークや破碎、乾燥などの処理を経ていない剪定枝は、含水率が40～60%程度あるため粉じんは舞いにくく、粉じん火災・粉じん爆発の可能性は低いと考えられる。

c. 建築廃材

住宅解体材や廃家具材の含水率は低く、破碎や乾燥工程で微粉が舞いやすい。塗料や接着剤の成分が付着していれば、さらに燃焼性が高くなる可能性もある。加工状態（粉碎、乾燥等）粒径、含水率、保管条件、取り扱い環境により危険性は異なると考えられるが、閉空間内で微粉が舞いやすいような条件を作らないことが重要である。

d. 災害廃棄物

災害廃棄物の受け入れからエネルギー利用までの流れ（受け入れ 分別 破碎・乾燥 燃料化 エネルギー利用（発電・熱利用） 副産物処理）の中で、特に破碎・粉碎工程に関しては粉じん火災・爆発の可能性があると考えられる。災害廃棄物の含水率は状況により異なると予想されるが、特に発電プラント場内で破碎・粉碎を行う場合は注意が必要である。また、金属片や異物が混入している可能性も高いため、建築廃材の処理と同様に、火花発生の危険性もある。また、塗料や油などの成分が混在することにより燃焼性が高くなることも考えられる。

<自然発火>

a. 破碎チップ

伐採された原木を破碎することによって製造する破碎チップは、含水率が40～60%程度あるため、貯留中の破碎チップが発酵・温度上昇することは十分想定される。

b. バーク、剪定枝

伐採された原木のバークや、乾燥処理がなされていないバークの一般的な含水率は40~60%であるため、貯留中のバークが発酵・温度上昇することは十分想定される。加えて、灰分量が多く無機物を豊富に含むバークは自己発熱性に優れているという研究結果もあり、樹皮や枝部の自然発火性は高いと言える。

c. 建築廃材

一般木造住宅の構造用木材の含水率を調査した研究によると、構造材の含水率は12~17%程度と低く¹⁹、微生物発酵が起きにくいと考えられる。しかしながら、当然、他の固体バイオマス燃料と同様、貯留中の条件によるため、適切な管理が必要である。

d. 災害廃棄物

災害廃棄物の熱特性を把握することを目的とし、モデル試料として木材（針葉樹、広葉樹）と畳（イグサ、ワラ及びボード）を使用して出火危険性を評価した研究によると、イグサやワラは木材と比べて出火危険性が高く、塗料等の混合物が5%程度添加されるだけでも出火危険性がさらに高まることが報告されている。²⁰

¹⁹ 木造住宅の構造材に現れた含水率分布 木材工業 森林文化會 57巻 10号 p.438-443 2002-10

²⁰ 消防技術安全所報 52号 2015年

4 国内で発生したバイオマス発電設備の事故調査等（平成30年度以降）

4.1 具体的な調査内容と調査方針

経済産業省等の審議会資料等において公表されている事故案件である、米子バイオマス発電所、武豊火力発電所、石狩新港バイオマス発電所、袖ヶ浦バイオマス発電所、ひびき灘石炭・バイオマス発電所、CEPO 半田バイオマス発電所、常陸那珂火力発電所、下関バイオマス発電所、舞鶴発電所を調査について調査を行い、下記の項目について整理する。

a. 設備構成（モデル図、フロー図）

各類型において代表的な事故案件について、現地調査等を行い、混焼／専焼の違い、燃料の種類による設備構造の特徴を調査し、相違点を整理する。

b. 事故の概要・全体像

各類型において代表的な事故案件について、現地調査等を行い、事故発生状況（日時、場所、背景、経緯、等）の整理、および事故発生に至るまでのファクト調査を行い、事故の概要と全体像を整理する。

c. 事故の原因

各類型において代表的な事故案件の詳細な事故の背景要因（粉じん濃度、貯蔵期間、燃料温度、発酵ガス濃度）を調査したうえで、ハード面（技術・設備・機器・防爆構造、バイオマス燃料の性質等）の原因、およびソフト面（組織的な点検・清掃体制等）の原因に関して体系化し、バイオマス燃料が発電に使用されるまでの一連のプロセス（受入、運搬、貯蔵、前処理（粉碎等）、燃焼）の中で、事故が発生したプロセスを中心に調査を行い、原因を整理する。

d. 事故を踏まえ、事業者において実施・検討されている再発防止策及びその取組状況

事故発生時から現在に至るまでの再発防止策を時系列で整理し、その成果または課題等を調査する。また、今後検討されている取組について、ハード面・ソフト面各々調査・整理する。

e. 事故防止につながるデジタル技術についての調査

一連のプロセス（受入、運搬、貯蔵、前処理（粉碎等）、燃焼）の中で事故防止を目的としたデジタル技術の実際の使用状況を調査する。

また、事故防止に資するデジタル技術に関し、実際に導入事例がある、もしくは導入が期待できるデジタル技術のリストアップを行い、技術成熟度レベル（TRL）、コスト、仕様条件等を整理する。

4.2 調査結果

表 4.2-1 に、第 21 回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループの「バイオマス発電所における爆発・火災事故及びその対応について」(資料 2-1) 及び第 22 回同電気設備自然災害等対策ワーキンググループの「石狩新港バイオマス発電所 B 側燃料受入設備爆発・火災事故」(資料 2) から、本調査対象発電所における火災事故の発生設備・推定原因等に関して整理する。なお、各事故の本調査結果の詳細については非公表とするが、第 6 章に記述する爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案に反映している。

表 4.2-1 本調査対象発電所における火災事故の発生設備・推定原因等

発生年月日	発電所名 (専焼・混焼の別)	事故発生設備	原因類型	推定原因
令和 2 年 10 月 13 日	ひびき灘石炭・バイオマス発電所 (石炭との混焼) 燃料:木質ペレット	ベルトコンベア(搬送設備)	摩擦熱(機器間)	燃料(木質ペレット)搬送用ベルトコンベア内のローラ設備の摩擦等により発熱し、燃料に着火、コンベア内を延焼
令和 4 年 2 月 12 日	CEPO 半田バイオマス発電所 (バイオマス専焼) 燃料:木質チップ	ベルトコンベア(搬送設備)	粉じん + 複数の着火源が推定される	ア. 電気配線接続部に燃料チップの粉塵が付着し、短絡により発火 イ. コンベア周りに堆積した燃料チップの粉塵が、コンベアローラの保有熱もしくは燃料チップ加工時に加熱された金属屑により加熱され発火
令和 4 年 9 月 10 日	常陸那珂火力発電所 (石炭との混焼) 燃料:石炭、木質ペレット	バゲットコンベア(搬送設備)	粉じん + 発酵による発熱	受入コンベア(バゲットコンベア)の下部に堆積していたバイオマス粉末が発酵し、自然発火して粉じん爆発が生じた可能性あり
令和 4 年 9 月 29 日	武豊火力発電所 (石炭との混焼) 燃料:石炭、木質ペレット	ベルトコンベア(搬送設備)	粉じん + 摩擦熱(機器間)	ベルトコンベア駆動装置用のブレーキが作動する際に摺動面から火花が発生し、床面堆積したペレットの粉じんに引火
令和 5 年 1 月 1 日	袖ヶ浦バイオマス発電所(バイオマス専焼)	サイロ(貯蔵設備)	発酵による発熱	サイロ内に貯蔵された木質ペレットが自己発熱して発火

	燃料：木質ペレット			
令和 5 年 1 月 21 日	下関バイオマス発電所(バイオマス専焼) 燃料:木質ペレット、PKS	バンカ(燃焼用 機器)	粉じん + ボイラの火炎 が飛び火	バンカ内部点検を行うため、木質 ペレットを焚き切る途中、ボイラ の火炎が飛び火し、バンカ内の粉 状のペレットに引火
令和 5 年 1 月 23 日	武豊火力発電所(石 炭との混焼) 燃料：石炭、木質ペ レット	ベルトコンベ ア(搬送設備)	粉じん + 摩擦熱(機器 間)	ベルトコンベア下部のキャリアロ ーラに異物噛みこみ、ベルトとロ ーラの摩擦・発熱より堆積したペ レットの粉じんに引火
令和 5 年 3 月 14 日	舞鶴発電所(石炭と の混焼) 燃料：石炭、木質ペ レット	サイロ(貯蔵設 備) ベルトコンベ ア(搬送設備)	発酵による発 熱 + 可燃性ガス発 生	サイロ内の木質ペレットの一部が 発酵・酸化して発熱し、酸化の進行 により可燃性ガスが発生、発酵の 進行により自然発火して当該ガス に引火
令和 5 年 5 月 17 日	米子バイオマス発電 所(バイオマス専焼) 燃料:木質ペレット、 PKS	サイロ(貯蔵設 備)	発酵による発 熱	燃料サイロ内に貯蔵された木質ペ レットが自然発酵して発火
令和 5 年 9月 9 日	米子バイオマス発電 所(バイオマス専焼) 燃料:木質ペレット、 PKS	ホッパ(受入設 備) バゲットコン ベア(搬送設 備)	粉じん + 摩擦熱(異物と 機器)	粉じん濃度が爆発下限界以上で異 物と金属製バケットの衝突・摩擦 により着火 粉じん爆発による火災
令和 6 年 1 月 31 日	武豊火力発電所(石 炭との混焼) 燃料：石炭、木質ペ レット	バンカ(燃焼用 機器) ベルトコンベ ア(搬送設備)	粉じん + 摩擦熱(機器 間)	粉じん濃度が爆発下限界以上でベ ルトとカバープレートの摩擦・発 熱により着火 粉じん爆発による火災
令和 6 年 7 月 19 日	石狩新港バイオマス 発電所(バイオマス 専焼) 燃料:木質ペレット、 PKS	ホッパ(受入設 備) バゲットコン ベア(搬送設 備)	粉じん + 摩擦熱(機器 間)	粉じん濃度が爆発下限界以上でベ ンドローラの軸と外装板の接触に よる摩擦熱により着火 粉じん爆発による火災

引用：

第 21 回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ資料 2-1 バイオマス発電所における爆発・火災事故及びその対応について

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/pdf/021_02

01.pdf

第 22 回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ資料 2 石狩新港バイオマス発電所 B 側燃料受入設備爆発・火災事故

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/pdf/022_02_00.pdf

4.3 事故防止につながるデジタル技術についての調査

多くのバイオマス発電所では、バイオマス燃料の受入・搬送設備（ベルトコンベアやバケットコンベア）が利用されており、中央制御室で監視を実施している。事故の予見や防災のためには、デジタル技術を用いた局所的な監視を強化することが考えられる。

多くのバイオマス発電設備において、主な発災原因となっている箇所は下記の場所が多い。ただし、粉じん発生している個所では、カメラの汚れの防止策を工夫・検討する必要がある。

- ・ ベルトコンベアの周辺
- ・ ベルトコンベアやバケットコンベアの乗り継ぎ部
- ・ 受入建屋またはケーシング内部の空間
- ・ その他粉じんが堆積する箇所

4.3.1 粉じん測定装置

(1) レーザ解析式粒子径分布測定装置

粒子群にレーザ光を照射し、そこから発せられる回折・散乱光の強度分布パターンから計算によって粒子径分布を求めるものである。粒子径が大きい場合、粒子から発せられる回折・散乱光は前方（レーザビームの進行方向）に集中し、狭い角度範囲で激しく変動する。粒子径が小さくなるにつれ、回折・散乱光のパターンは前方方向から周辺へ広がっていく。粒子径がさらに小さくなると、側方光や後方光も強くなる。

(2) 散乱スペクトルを利用した粒子径分布測定装置

散乱スペクトルから得られる散乱光信号を電気信号に変換し、広範な粒子径測定を可能とする。乾燥粉体を乾式分散ユニットに投入し、エアーコンプレッサーの振動や高圧によって粉体粒子が均一に分離され、粒子が測定部を通過し粒子径分布測定を行うものである。

(3) ダスト濃度計

煙道または煙突に直接光を照射し、煤じんによる散乱光を受光し、電気信号に変えて測定する「非吸引採取式（ノンサンプリング式）」で、過酷な環境（水分の多い排ガス、高温高圧下）でも測定が可能であり、現場での粉じん測定を可能とする。

(4) リアルタイム連続粒子径分布測定装置

粉体の粒子径分布をリアルタイムで連続的に測定し、モニタリングできるオンラインの粒子径分布測定装置である。大気中でサンプリングすることなく粒子径分布を測定することができるため、品質管理用測定機として用いることができる。

4.3.2 ベルトコンベア監視システム

(1) ベルトコンベアローラの軸受損傷を早期検知する技術

ベルトコンベアローラの異常をトルクセンサによって検知し、結果をコンベアから離れたところに表示することで、早期の異常検知、点検作業の安全化を実現する。現状では主に人の目視・聴覚で行われている点検時の危険や、熟練者による点検での見逃しを回避でき、点検業務の合理化をしつつ軸受の損傷状態を的確かつ遠隔で確認できる技術である。石炭火力発電所やバイオマス発電所だけでなく、粉じんの多い劣悪な作業環境におけるベルトコンベア等、多種多様な施設でも広く利用が可能である。

(2) ベルトコンベア光ファイバセンシング監視

長大なコンベアのリアルタイム監視が可能で、リモートの監視／診断によりローラ故障を予知できる。広いエリア、普段人が立ち入らないエリアでも、24時間365日監視可能となる。

4.4.3 運転面からみたデジタル技術

(1) 3D撮影×センサ配置データ統合システム

高精度3D撮影×センサ配置データを統合し、効率的でスムーズな監視により、早期異常を発見、また遠隔保全や監視の複雑化の解消を図る。

(2) ワイヤレス振動状態監視

配線不要で手軽に回転機械の状態監視が可能になるワイヤレス振動センサを活用した常設モニタリング監視システムである。常設監視システムは高所、危険区域での設置・連続監視が可能であり、振動のみならず温度データ、圧力・流量・ガス濃度データ、その他連動可能なプロセスデータもアクセスポイントにて受信したのち伝送が可能となる。

4.4 国内バイオマス発電所へのアンケート調査

4.4.1 実施内容

国内のバイオマス専焼発電所または石炭・バイオマス混焼発電所を対象に近年、国内のバイオマス発電所で発生している一連の火災・爆発事故を受けて、バイオマス発電所における

保安確保の取組状況を把握する。

4.4.2 対象先選定

下記の選定方針に従い、調査対象となる発電所を選定した。表 4.5.2-1 にアンケート調査対象発電所のリストを載せる。

(1) バイオマス専焼発電所

ア. エネ庁事業計画認定情報公表用ウェブサイトから国内バイオマス専焼発電事業者を絞り込む。

<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>

イ. 上記リストアップされた中から以下の「設備 ID」に該当し、定格出力 2MW 相当(1.9MW 以上も含む)事業者を対象先とする。なお、本事業で現場調査する過去事故が発生した発電所の規模と同規模の設備等を有すること等の理由から定格出力 2MW 相当以上を対象とした。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/fit_2017/youshiki_mihon_01.pdf#page=10

【設備 ID】

N バイオマス発電設備（間伐材等由来の木質バイオマス）2,000kW 以上
(N には 1,950kW ~ 1,990kW が含まれている)

3 バイオマス発電設備（一般木質バイオマス・農産物の収穫に伴って生じるバイオマス固体燃料）10,000kW 未満

4 バイオマス発電設備（一般木質バイオマス・農産物の収穫に伴って生じるバイオマス固体燃料）10,000kW 以上

Q バイオマス発電設備（建設資材廃棄物）

(2) 石炭・バイオマス混焼発電所

ア. エネ庁 2024 年度統計表一覧のウェブサイトのうち、2-(1) 発電実績から石炭及びバイオマス燃料を使用している発電事業者を絞り込む。

https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html#headline2

イ. 上記リストアップされた中で、弊機構が該当する発電事業者のウェブサイト等を深堀調査し、バイオマス燃料を混焼している発電所を特定し、住所等の情報を整理した。

ウ. 調査対象は、石炭・バイオマス混焼 35 件、バイオマス専焼 44 件とした。

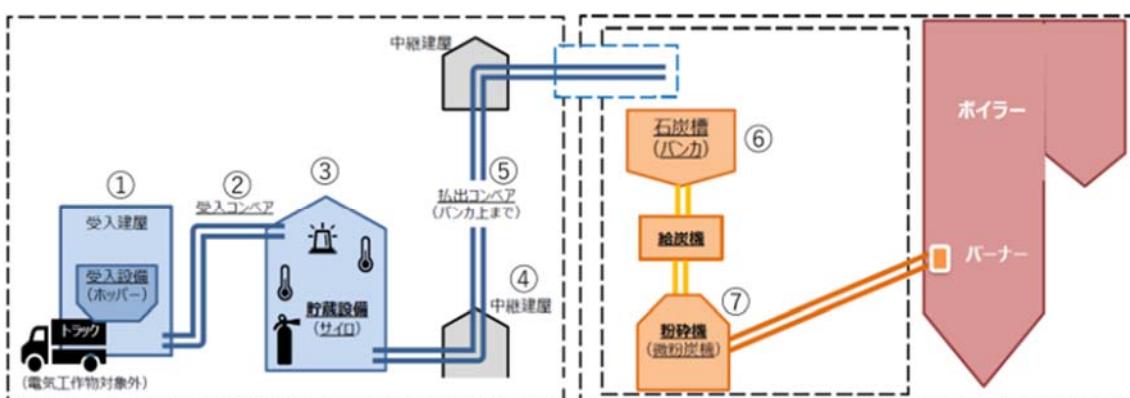
4.4.3 アンケート内容

(1) 発電所の名称を教えてください。

(2) 主に使用している燃料の種類を教えて下さい。(複数回答可)

- a. 木質チップ
- b. 木質ペレット
- c. ブラックペレット
- d. PKS
- e. 石炭（混焼）
- f. その他

- (3) 上記(2)の設問でその他と回答した場合は、使用している燃料を記載ください。
- (4) 受入設備(受入建屋も含む) 受入コンベア、貯蔵設備、中継建屋/乗り継ぎ部、
払出コンベア、バンカ、粉碎機(ミル)において、粉じん爆発や発酵熱による火
災防止のため、どのような装置を設置していますか？(複数回答可)
- a. 温度計の設置(機器の摩擦熱)
 - b. 温度計の設置(バイオマス燃料の発酵熱)
 - c. 湿度計の設置
 - d. 発酵等による可燃性ガス検知装置の設置(メタン、一酸化炭素、水素)
 - e. その他ガス検知装置の設置(酸素、CO₂)
 - f. 不活性ガスの封入装置の設置(窒素等)
 - g. 消火設備の設置(散水設備等)
 - h. 集じん機の設置(系統内に粉じんを戻すものに限る)
 - i. 集じん機の設置(系統内に粉じんを戻さないもの)
 - j. 集じん機配管閉塞検出装置の設置
 - k. ペレット等の再造粒装置の設置
 - l. 異物除去装置の設置(マグネットセパレーター等)
 - m. 粉じん濃度の検知装置の設置



引用：経済産業省産業保安・安全グループ 電力安全課「バイオマス発電所における爆発・火災事故及び
その対応について」を編集

- (5) 上記(4)の設問で回答いただいた装置に関して、具体的にどのような装置(仕様や特徴)
か教えてください。

- (6) 上記(4)の設問で回答した以外の装置で安全対策のために導入しているものがあればご回答ください。
- (7) 上記(4)の設問で回答いただいた各装置及び上記(5)～(6)の設問でご回答いただいた装置で、どの装置が火災または人災事故の防止に特に有効に機能していると考えていますか？（複数回答可）
- (8) 粉じんの除去のためにどの設備（上記設問(4)の設備）のどのような箇所について、どの程度の頻度で点検・清掃を実施していますか？
- (9) その他、火災・爆発防止のために対策を取っている場合はどのような対策をとっていますか？

4.4.4 アンケート結果

45 発電所からアンケートの回答を受領した。なお、表 4.4.4-1 に回答があった 45 事業者に対して発電出力毎に区分したもの、表 4.4.4-2 に使用している燃料に区分した件数を記載する。

表 4.4.4-1 発電出力毎に区分した件数

発電出力/kW	件数
10,000 以下	13
10,000 以上 100,000 未満	6
100,000 以上 500,000 未満	9
500,000 以上 1,000,000 未満	5
1,000,000 以上	9
公表資料では確認できず	3
合計	45

表 4.4.4-2 使用している燃料に区分した件数

使用している燃料	件数
木質チップ	14
木質チップ、木質ペレット	1
木質ペレット、PKS	1
木質チップ、木質ペレット、バーク	1
その他（廃プラスチック・医療系廃棄物）	1
木質チップ、木質ペレット、ブラックペレット	1
木質チップ、石炭	6
木質チップ、木質ペレット、石炭	2

木質チップ、PKS、石炭	2
木質チップ、廃タイヤ・RPS、石炭	1
木質チップ、木質ペレット、下水汚泥、石炭	1
木質ペレット、石炭	7
木質ペレット、下水汚泥、石炭	2
木質ペレット、PKS、石炭	1
PKS、石炭	1
下水汚泥、石炭	1
現在使用していない	2
合計	45

(1) 各設備での監視・保安装置について

表 4.4.4-3 に設問(4)の集計結果(データ)及び図 4.4.4-1～図 4.4.4-7 に、設問 4 について、各々の設備箇所における回答数(最大 45)を整理した。これらの結果から、以下の特徴がみられた。

- ・ 運搬設備(受入コンベア、中継建屋、払い出しコンベア)では、湿度計やガス検知器の設置をしている事業者が少ない。
- ・ 不活性ガスの封入装置の設置(窒素等)を採用している事業者が少ない。
- ・ 集じん機(系統内に粉じんを戻さないもの)は、集じん機(系統内に粉じんを戻すもの)に対して 1/5 程度である。また再造粒設備を有している事業者は 4 件にとどまる。
- ・ 集じん機の設置はほとんどの事業者で見られるが、配管閉塞検出装置の設置はほとんどない。
- ・ 運搬設備(受入コンベア、中継建屋、払い出しコンベア) 貯蔵設備等(貯蔵設備、バンカ)の両者に、粉じん濃度検知器の設置がほとんどない。

表 4.4.4-3 設問 4 の集計結果(データ)

全ての燃料	受入設備(受入建屋も含む)	受入コンベア	貯蔵設備	中継建屋/乗り継ぎ部	払出コンベア	バンカ	粉碎機(ミル)
温度計の設置(機器の摩擦熱)	3	11	3	6	11	1	6
温度計の設置(バイオマス燃料の発酵熱)	9	11	22	0	10	17	7
湿度計の設置	0	1	10	0	1	0	0

発酵等による可燃性ガス検知装置の設置(メタン、一酸化炭素、水素)	1	0	14	1	4	11	1
その他ガス検知装置の設置(酸素、CO ₂)	1	1	13	1	2	2	1
不活性ガスの封入装置の設置(窒素等)	0	1	9	0	1	1	11
消火設備の設置(散水設備等)	26	22	32	19	26	22	18
集じん機の設置(系統内に粉じんを戻すものに限る)	9	10	12	10	16	6	0
集じん機の設置(系統内に粉じんを戻さないもの)	6	6	1	3	3	0	2
集じん機配管閉塞検出装置の設置	2	1	0	0	1	0	0
ペレット等の再造粒装置の設置	0	0	1	2	1	0	0
異物除去装置の設置(マグネットセパレーター等)	7	14	1	5	12	0	3
粉じん濃度の検知装置の設置	1	1	0	0	1	0	0

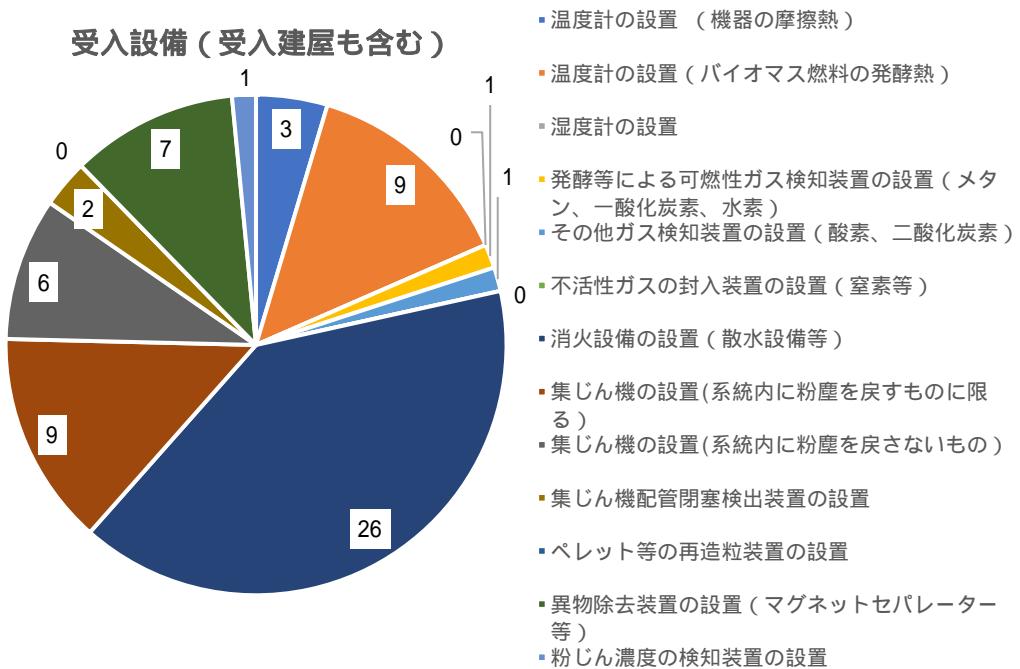


図 4.4.4-1 受入設備（受入建屋も含む）における回答数

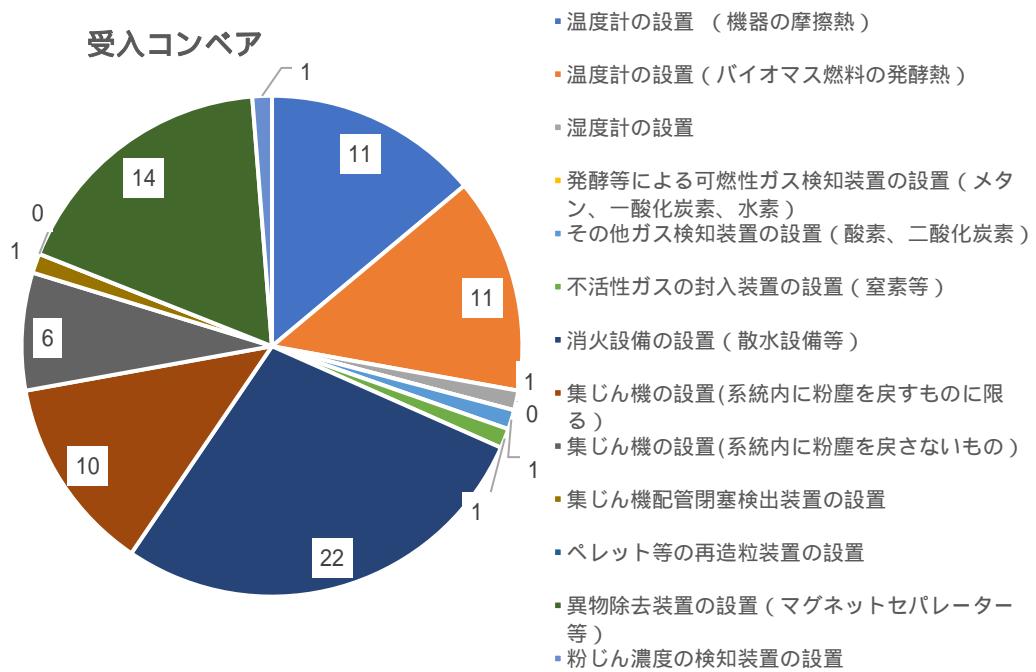


図 4.4.4-2 受入コンベアにおける回答数

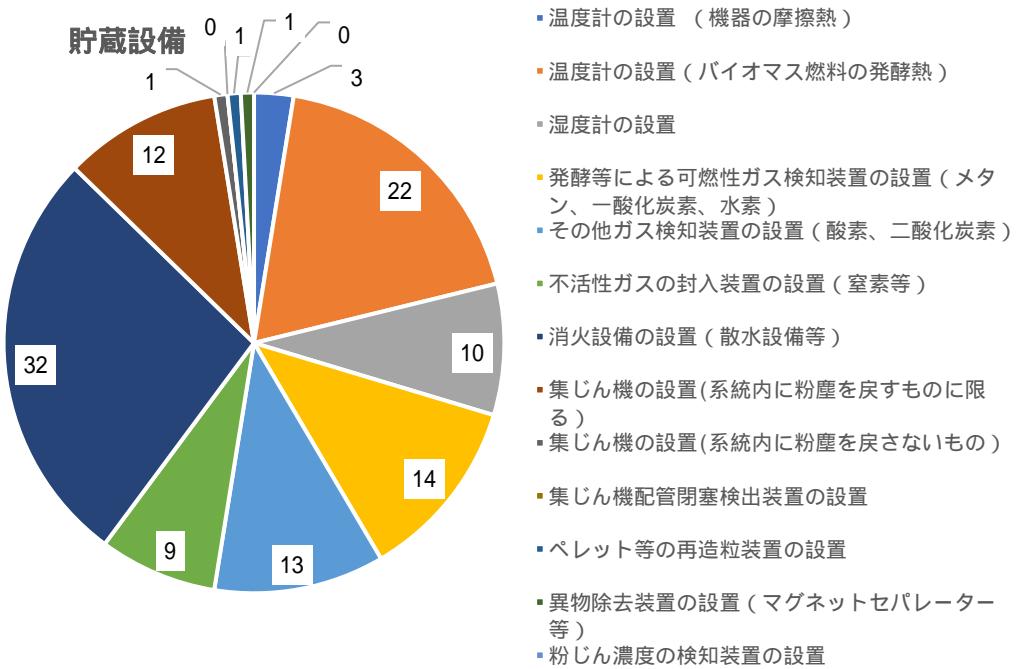


図 4.4.4-3 貯蔵設備における回答数

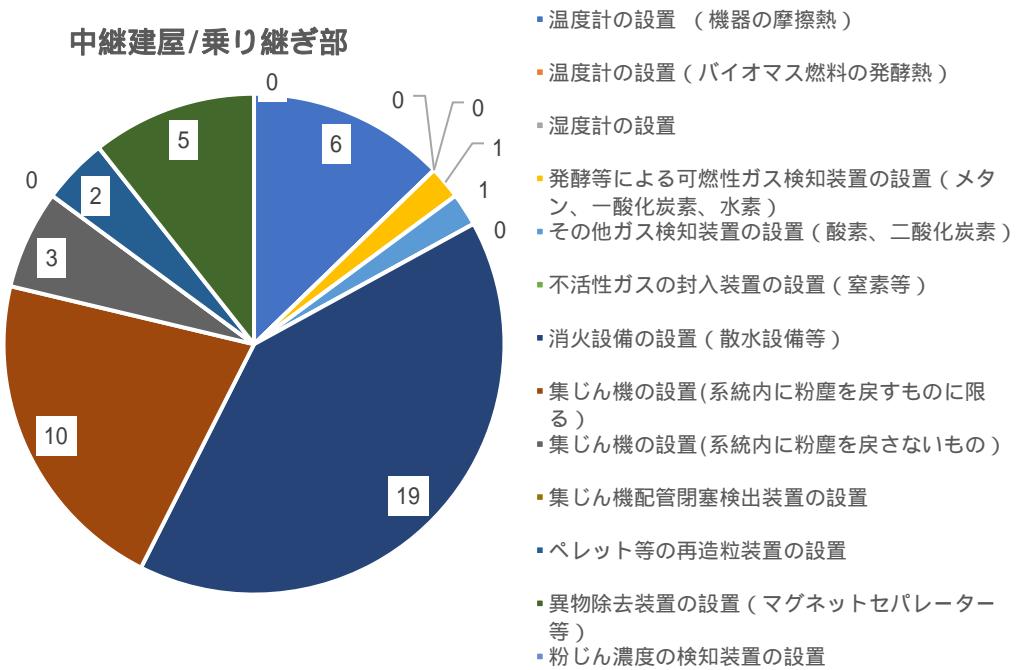


図 4.4.4-4 中継設備/乗り継ぎ部における回答数

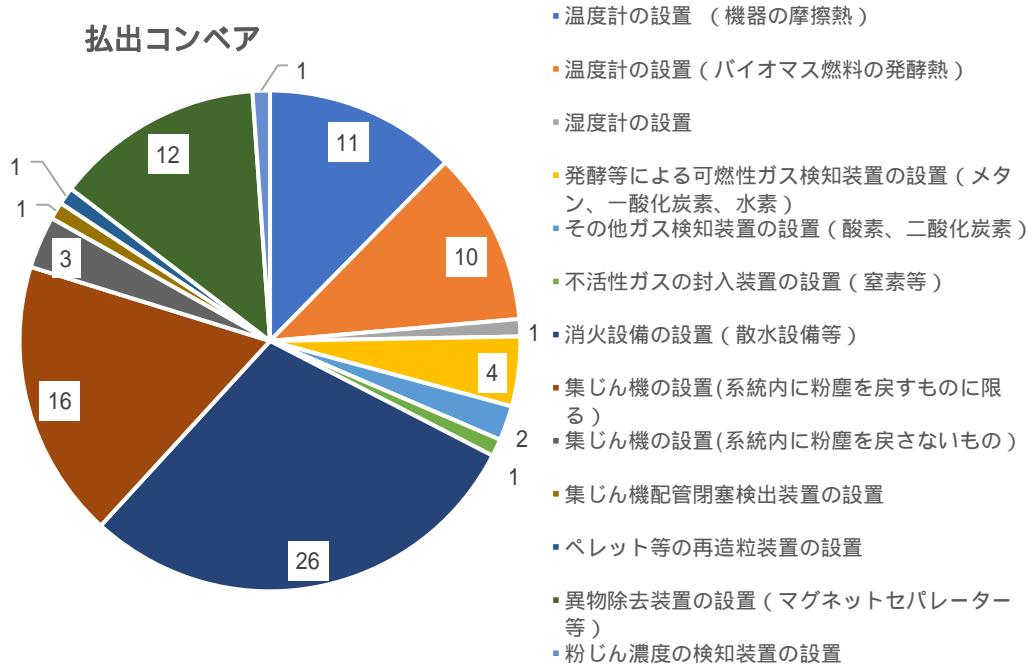


図 4.4.4-5 払出コンペアにおける回答数

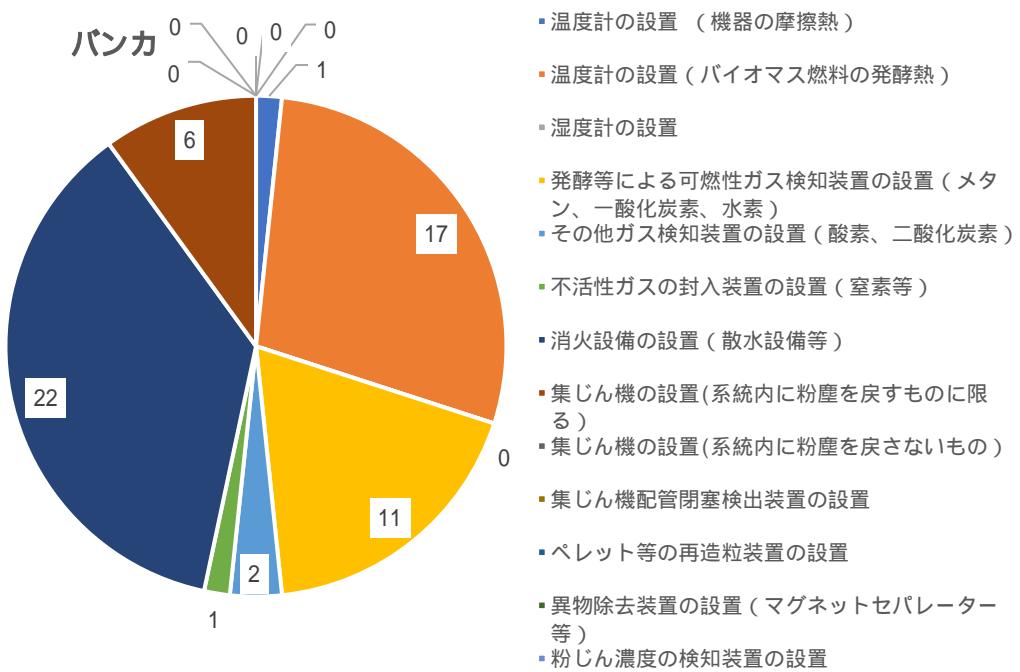


図 4.4.4-6 パンカにおける回答数

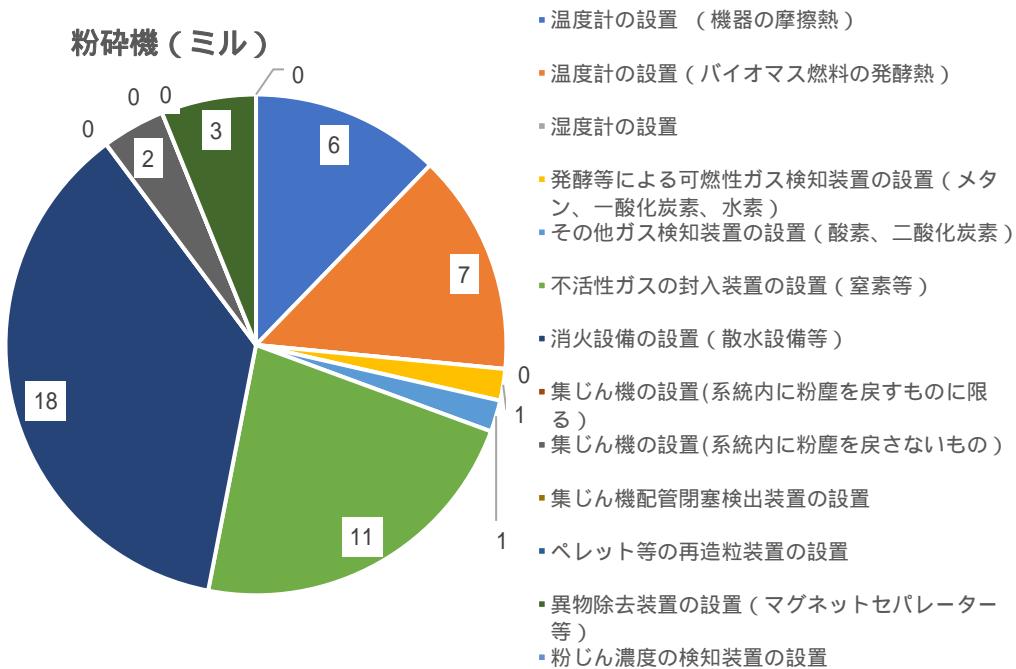


図 4.4.4-7 粉碎機 (ミル) における回答数

(2) 安全対策及び有効な方法

表 4.4.4-4 にアンケートで得られた各発電所で実施している主な「安全対策のために導入しているもの」及び「火災または人災事故の防止に特に有効に機能しているもの」を示す。なお、○太字 > 太字 > 細字 (例: ○温度計設置 > 消火栓 > 換気システム) で回答件数の濃淡を表すこととする。

表 4.4.4-4 「安全対策のために導入しているもの」及び「火災または人災事故の防止に特に有効に機能しているもの」

安全対策のために導入しているもの	火災または人災事故の防止に特に有効に機能しているもの
<ul style="list-style-type: none"> ●○コンベア駆動部・バケット等に樹脂採用 (摩擦による火花発生を防ぐ) ●○貯蔵および搬送設備への温度感知器の設置 ● 受入ホッパ・コンベア周りの電気品に防爆仕様採用 ● 貯蔵サイロ循環運転系統の設置 ● カメラ設置によるモニター監視 ● 換気設備 	<ul style="list-style-type: none"> ●○温度検知器 ●○集じん機 ●○可燃性ガス検知器 ●○散水装置 ●○定期的なパトロールや清掃 ● 消火設備 ● 換気設備 ● 避難誘導灯 ● 熱画像監視カメラ

<ul style="list-style-type: none"> ・ 避雷器 ・ 可搬式放射温度計 ・ 消火器の設置 ・ 消火栓 ・ 電気機器は防爆仕様 ・ 火災報知器の設置 ・ 12 時間毎のコンベア点検 ・ 長期保管しない ・ ボイラへの燃料投入コンベア内の散水装置 ・ 燃料消火用蒸気弁 ・ スクリューコンベアに CO 計、消火用蒸気、散水ライン、温度計（逆火確認用） ・ 火花検知器の設置 ・ 破碎機下に火災検出器、破碎機内部に可燃性ガス検出器の設置 ・ 異物防止のためのグリズリスクリーン（200mm × 200mm）の設置 ・ 各受入コンベアに出口シート詰り、引き綱動作、蛇行検知器動作にて停止するインターロックを敷設 ・ 払出コンベアに散水装置 ・ ミル内にイナート蒸気噴霧機能付き ・ バンカ内ミスト装置 ・ 貯槽への外部接続による窒素ガス封入 ・ コンベアローラ等の軸受は防じんタイプを使用 ・ ローラ異音検知器（ローラ回転不良等による摩擦発熱の早期発見）の設置 ・ 微粉炭機に検出機器（温度スイッチ、一次空気圧力スイッチ、差圧計）の設置 ・ ヤードの清掃は 2 ヶ月を超えない様に実施 ・ 搬送コンベアは週 2 回の清掃 ・ 燃料ホッパ内は半年毎に点検・清掃 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ストレーナやマグセバ等の異物除去 ・ モニター監視 ・ コンベア内の温度異常検知システム ・ 可動部の金属製品不採用 ・ 防じん仕様ローラ ・ 防爆仕様蛇行検知器 ・ 窒素封入系統 ・ 酸素濃度監視 ・ コンベア非常停止用コード ・ コンベアに敷設した光ファイバ温度計 ・ 火災報知器
--	--

<ul style="list-style-type: none"> 定期現場パトロール実施（数回/日） 密閉型コンベアに爆発口設置 払出搬送量の抑制 	
--	--

(3) 粉じんの除去の頻度・清掃

表 4.4.4-5 にアンケートで得られた各発電所の「粉じんの除去の頻度・点検・清掃方法」を示す。

表 4.4.4-5 粉じんの除去の頻度・点検・清掃方法

設備	頻度・点検・清掃方法
受入設備（受入建屋も含む）	<ul style="list-style-type: none"> 受入建屋内の清掃は 2 回/年実施 ホッパ下の清掃は毎日 コンベヤ落炭、落粉バキューム回収清掃作業（1 回/2 週間） ペレット船揚荷約 5 日間においては、都度、パトロールにより粉じん堆積状況を確認し、所内の粉じん除去にかかる機能を最大限動員 毎日定例での清掃点検
受入コンベア	<ul style="list-style-type: none"> 搬送機器において 1 回/年 各コンベヤ等の回転部点検は毎日 受入コンベア（垂直形状）の上部・下部に設置する集じん装置の点検・清掃は 600 トン受入毎に実施（ほぼ毎日） 1 回/週（1~2 日程度かけて実施）清掃 受入船毎に清掃 1 回/日（搬送の都度） 木質ペレット運搬コンベアは 1 回/2 ヶ月、石炭運搬コンベアは 1 回/1 ヶ月の頻度でローラーの点検と清掃。粉じんの溜まりやすいテール部などは 1 回/1~2 週間、本格的な定期点検清掃は 1 回/6 ヶ月。 1 回/月（コンベア狭隘部、コンベア下部清掃）
貯蔵設備	<ul style="list-style-type: none"> 倉庫内を毎日作業終了後粉じん除去清掃 サイロは定期点検毎清掃 毎日定例での清掃点検 点検・清掃は 3 回/日
中継建屋 / 乗り継ぎ部	<ul style="list-style-type: none"> 搬送乗り移り部稼動前後に点検 1 回/日（搬送の都度）
払出コンベア	<ul style="list-style-type: none"> 払出コンベアのローラ等に付着する堆積物の点検除去は頻度 2~3

	<p>回/日</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1回/3ヶ月の頻度で粉じん除去清掃 ・ 毎日（範囲を決めて順繰り）清掃 ・ 1回/日（搬送の都度） ・ 日々のボイラバンカー向けペレット払い出し完了後、現場パトロールを行い堆積状況を鑑み清掃 ・ 每日定例での目視点検 ・ バンカ上コンベア：1回/週（コンベア狭隘部、コンベア下部及び室内床面清掃）
バンカ	-
微粉碎機（ミル）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 稼働の都度清掃
全体または場所が特定できないもの	<ul style="list-style-type: none"> ・ 月に1度点検・清掃・運転 ・ コンベア含む全体清掃を1回/月の頻度で実施 ・ 毎夕作業終了時、徹底して粉じん等の清掃 ・ 日々エアーにて清掃を実施 ・ 差圧警報が発せられる都度清掃を実施 ・ 各燃料受入、貯蔵、移送、供給系統において毎日パトロール、点検を実施 ・ 各装置の点検を2回/日 ・ パトロールは設備起動前、運転中午前・午後共に1回/日以上（受入・払出がない場合でも1回/日以上実施（毎週日曜は受入・払出が共になくパトロールもなし）） ・ 月1回の設備点検に合わせて、清掃も実施 ・ バグフィルタについては、1回/年ろ布の交換 ・ 集じん機は1回/年分解点検 ・ 換気扇は3回/年フィルタ取替

5 諸外国におけるバイオマス発電設備に係る事故の発生状況と規制の現状

5.1 具体的な調査内容と調査方針

バイオマス発電について欧州諸国の状況を調査し、バイオマス発電の普及状況、規制の厳格さ、事故発生の有無等の観点から、適切な調査対象国を4ヶ国以上選定し、以下の調査項目を整理する。

- a. 調査対象国におけるバイオマス発電に係る規制(法令・ガイドライン等)の具体的な内容(発電に係る規制・危険物の取扱いに係る規制も含む)
- b. 調査対象国におけるバイオマス発電の普及状況
- c. 調査対象国におけるバイオマス発電の特徴(専焼/混焼、使用されるバイオマス燃料の種類)
- d. 調査対象国における事故の発生状況
- e. 調査対象国における当該事故を踏まえて取られている具体的な対策(ハード・ソフト)

5.2 調査結果

5.2.1 調査対象国の選定

再生可能エネルギーの先進地域である欧州において、特にバイオマス発電が積極的に導入されている4か国について調査を実施した。対象国の選定は、バイオマス発電の種類や普及状況、事故発生状況等を参考とした。

EU(欧州連合)²¹のEU energy statistical pocketbook and country datasheets: 2024(欧州連合エネルギー統計手帳及び各国データシート2024)をもとに、欧州27カ国の統計情報から各国のバイオマス発電と熱利用を比較した。

バイオマス発電の量をSolid biofuels & Renewable wastes²²(固体バイオマス燃料と再生可能廃棄物)のうちのGross Electricity Generation, by Fuelであると考えると、オランダが飛びぬけて多く48.32TWh、二番目のドイツ15.82TWh、スウェーデン13.02TWh、フィンランド12.5TWhであった。その他の国は10TWh未満である(ちなみに日本は34.5TWh²³)。

また、バイオマスによる熱供給がSolid biofuels & Renewable wastesのGross Heat Generation、Heat Soldだと考えると、スウェーデンが最も多く135.3PJ、次いでフィンランド90.4PJ、デンマーク79.5PJ、フランス70.8PJ、ドイツ62.3PJ、オーストリア43.5PJとなっている。

²¹ イギリスは2020年1月31日をもってEUを離脱しているため、EUの統計には反映されていない。ただし、アイルランドはEUに含まれる。

²² ただし、これらの数字には廃棄物系の燃料が含まれている点に注意が必要である。

²³ IEA Energy Statistics Data Browserによると2022年のElectricity generation from biofuel and waste by sourceの発電量は24.483TWhであった。

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=JPN&fuel=Energy%20supply&indicator=WasteGenBySource>

表 5.2.1-1 EU における固体バイオマス燃料と再生可能廃棄物による発電量と熱供給量
(2022)

国名	総発電量 (TWh)	総熱供給量 (PJ)
ベルギー(BE)	3.85	2.4
ブルガリア(BG)	2.05	6.2
チェコ(CZ)	2.79	10.8
デンマーク(DK)	6.70	79.5
ドイツ(DE)	15.82	62.3
エストニア(EE)	1.56	15.8
アイルランド(IE)	0.85	0.0
ギリシャ(EL)	0.05	0.0
スペイン(ES)	5.80	0.0
フランス(FR)	6.79	70.8
クロアチア(HR)	0.72	3.8
イタリア(IT)	6.68	13.0
キプロス(CY)	0.00	0.0
ラトビア(LV)	0.55	17.1
リトアニア(LT)	0.55	24.2
ルクセンブルク(LU)	0.31	4.4
ハンガリー(HU)	1.82	4.7
マルタ(MT)	0.00	0.0
オランダ(NL)	48.32	22.6
オーストリア(AT)	4.10	43.5
ポーランド(PL)	6.24	22.4
ポルトガル(PT)	3.85	0.0
ルーマニア(RO)	0.56	3.0
スロベニア(SI)	0.16	1.9
スロバキア(SK)	1.10	5.9
フィンランド(FI)	12.50	90.4
スウェーデン(SE)	13.02	135.3

引用 : EU energy statistical pocketbook and country datasheets: 2024

https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/eu-energy-statistical-pocketbook-and-country-datasheets_en

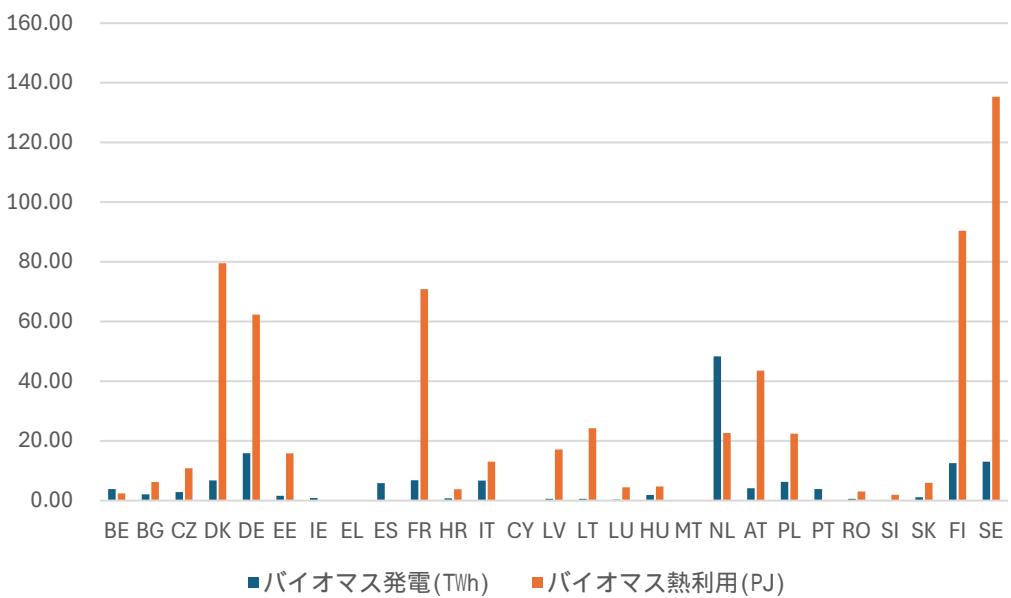


図 5.2.1-1 EU27 力国のバイオマス発電と熱利用 (2022)

引用 : EU energy statistical pocketbook and country datasheets: 2024

https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/eu-energy-statistical-pocketbook-and-country-datasheets_en

EU の統計とは別に、フランスの再生可能エネルギー関連の団体である EurObserv'ER が発行する “Solid biofuels barometer 2024” によると、バイオマスによる総発電量は、多い順にフィンランド、スウェーデン、ドイツ、ポーランド、デンマーク、オランダ、フランス、スペイン、イタリア、ポルトガルと続く（表 5.2.1-2 参照）。

しかしながら、これらは CHP : Combined Heat and Power (熱電併給) を含んでいるので、発電のみのプラント (Condensing Power Plant : 直訳すると凝縮発電所、日本でいうところの火力発電所) に限ると、発電量の多い順にドイツ、スペイン、イタリア、オランダ、ポルトガル、ベルギー、ポーランド、オーストリア、フランス、ハンガリーである。

このフランスの資料からわかる通り、EU のバイオマス発電市場で特徴的なのは、バイオマスによる総発電量が一番目と二番目に多かったフィンランドとスウェーデンには、日本のようなバイオマス発電所（バイオマスの凝縮発電所）が皆無であるという点である。この両国では、エネルギーの総合利用効率の観点からバイオマス発電が推奨されておらず、発電は CHP の場合でのみ成立している。

例えば、スウェーデンでは、スウェーデン環境法²⁴やエネルギー法²⁵といった国内法令の

²⁴ The Swedish Environmental Code (Miljöbalken)
<https://faolex.fao.org/docs/pdf/swe50970.pdf>

²⁵ The Energy Act (Energilagen)
https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningsamling/ellag-1997857_sfs-1997-857/

他、EU の規制や指令によって、バイオマス発電（凝縮発電所）は事実上、経済的に実行可能ではない。

これは、高緯度地域に属する両国が、冬季の暖房で大量の熱エネルギーを消費するという地理的な背景があること、CHP で発生した熱を導管により地域に供給する DH : District Heating（地域熱供給）の供給網がインフラとして整備されているからに他ならない。

逆に言えば、発電による熱を排熱として捨ててしまったうえで、電力のみを利用する日本型のバイオマス発電は、EU では非主流派であり、バイオマス発電の 75% までもが CHP 由来なのである。

表 5.2.1-2 EU 各国における固体バイオマス燃料からの総発電量 (TWh)

2022 年	発電のみのプラント	CHP プラント	合計
フィンランド	0.000	11.908	11.908
スウェーデン	0.000	11.284	11.284
ドイツ	4.931	5.732	10.663
ポーランド	1.222	4.712	5.934
デンマーク	0.000	5.679	5.679
オランダ	1.905	4.849	6.755
フランス	0.889	3.658	4.547
スペイン	4.125	0.807	4.932
イタリア	2.266	2.092	4.358
ポルトガル	1.473	2.071	3.544
チェコ	0.001	2.658	2.659
オーストリア	1.126	0.880	2.006
ベルギー	1.464	1.379	2.843
ブルガリア	0.409	1.644	2.053
エストニア	0.553	0.970	1.523
ハンガリー	0.620	1.073	1.693
スロバキア	0.006	1.043	1.049
クロアチア	0.000	0.720	0.720
ラトビア	0.000	0.552	0.552
リトアニア	0.000	0.394	0.394
ルーマニア	0.062	0.494	0.557
アイルランド	0.482	0.026	0.508
ルクセンブルク	0.000	0.288	0.288
スロベニア	0.000	0.162	0.162

ギリシャ	0.009	0.043	0.052
EU27 力国の合計	21.544	65.117	86.661

注) 木炭を除く

引用 : EurObserv'ER2024 Solid biofuels barometer 2024

<https://www.eurobserv-er.org/solid-biofuels-barometer-2024/>

一方、イギリスは 2020 年に EU から離脱しているため、最近の欧州の統計に含まれていない。Department for Energy Security & Net Zero が発行した " UK ENERGY IN BRIEF 2024 " によるとイギリスでのバイオマス発電量は 2023 年時点で 31.1TWh であった。詳細な内容はこの報告書からは不明であるが、EU の統計と見比べると、オランダに次ぐバイオマス発電の大國であることがわかる。

表 5.2.1-3 2000 年以降の再生可能資源からの発電量 (TWh)

	2000	2010	2020	2021	2022	2023
陸上風力	0.9	7.2	34.9	29.3	35.4	32.6
洋上風力	-	3.1	40.8	35.6	45.1	49.7
太陽電池	-	0.0	12.5	12.1	13.3	13.9
水力	5.1	3.6	6.9	5.4	5.7	5.5
埋立地ガス	2.2	5.2	3.5	3.3	3.1	3.0
その他のバイオエネルギー	1.7	7.0	35.1	36.7	32.7	31.1
再生可能エネルギー合計	9.9	26.2	133.6	122.5	135.4	135.8

引用 : UK ENERGY IN BRIEF 2024

https://assets.publishing.service.gov.uk/media/66a76bf2ce1fd0da7b592e5d/UK_Energy_in_Brief_2024.pdf

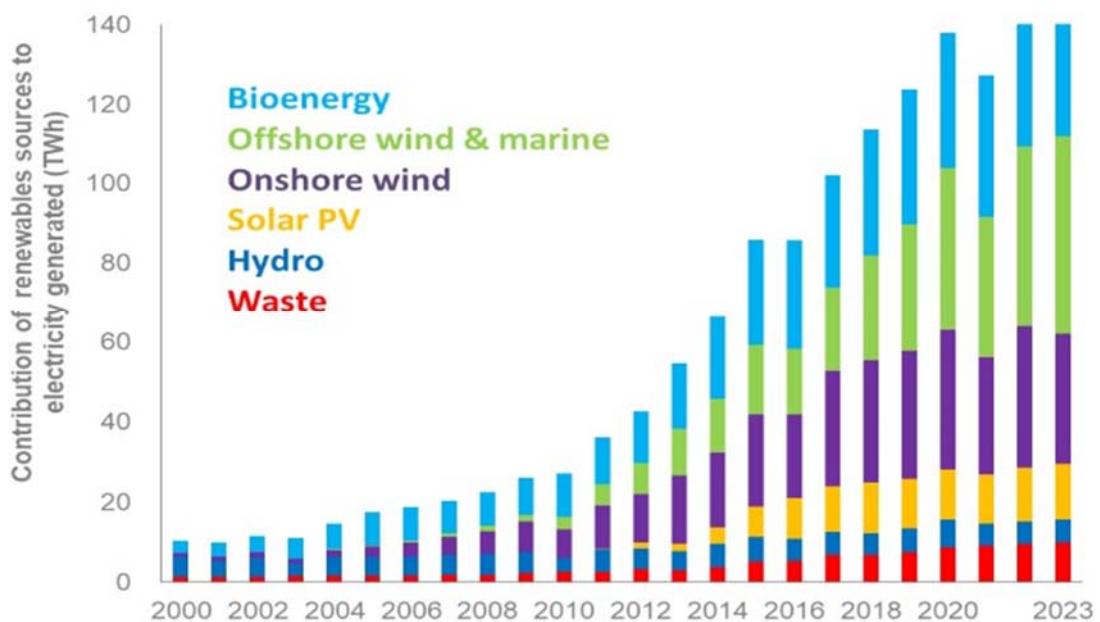


図 5.2.1-2 2000 年以降の再生可能資源からの発電量

引用 : UK ENERGY IN BRIEF 2024

https://assets.publishing.service.gov.uk/media/66a76bf2ce1fd0da7b592e5d/UK_Energy_in_Brief_2024.pdf

次に、バイオマス発電に関する火災などの事故について、インターネットと文献により調査を行った。各種情報には曖昧な記述多いため、可能な限りバイオマスに関するものを分類して精査した。世界的に見ると、アメリカ、イギリス、カナダ、フランスの順で事故事例が多いことがわかった。

バイオマス燃料の輸入量に関して、特に石炭火発の混焼やバイオマス発電所で使われることの多い木質ペレットについて調査した。2023 年実績で比較すると、世界最大のペレット輸入車はイギリスで 632 万トン、次いで日本の 580 万トン、3 位がオランダの 370 万トン、4 位が韓国の 360 万トン、5 位がデンマークの 290 万トンであった。

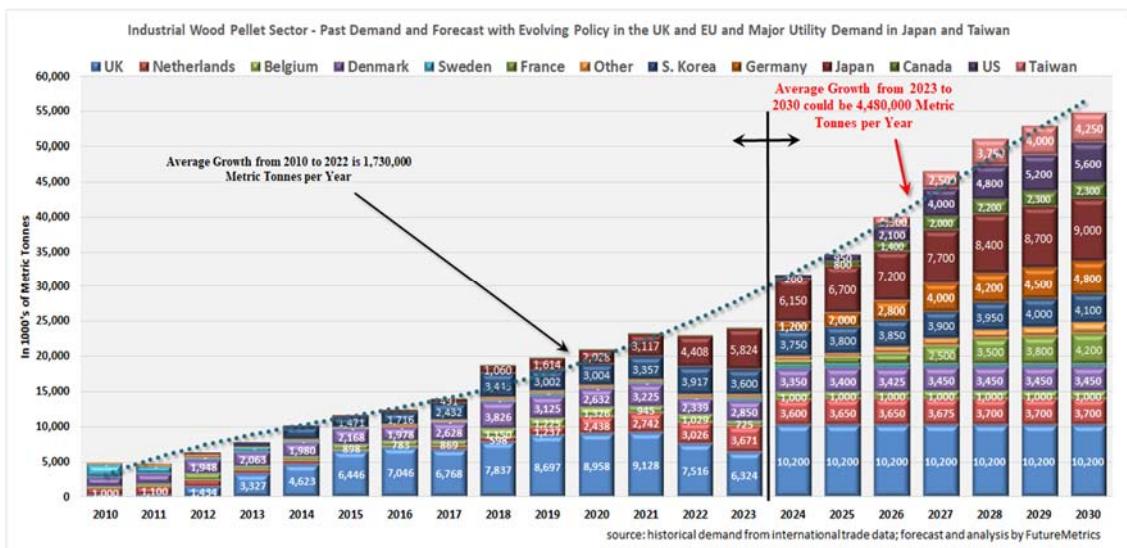


図 5.2.1-3 発電用ペレットの需要予測（2030 年まで）

引用 : Canadian Biomass

<https://www.canadianbiomassmagazine.ca/global-wood-pellet-markets-2023-in-review-and-why-industrial-wood-pellets-are-key-for-the-future/>

以上の概略調査を経て、詳細な調査の対象国をイギリス、オランダ、スウェーデン、ドイツの 4 か国とした。

調査対象国	バイオマス発電の特徴
イギリス	大型石炭火力発電所をバイオマス専焼あるいは混焼に転換。発電のみのプラントが多く、石炭からペレットに 100% 転換もしくは混焼にした後に火災事故を起こした例がある。USA に次いで事故数が多い。発電用の固体バイオマス燃料の多くを輸入に頼る。HSE がイギリス独自の規制 (the 2016 EPS regulations と DSEAR) を出している。
オランダ	バイオマス発電用の燃料火災が多発。大型のバイオマス発電所でも事故事例がある。バイオ燃料の品質試験や認証を行っている企業が発電所での事故に詳しく述べ、火災予防のシステムを販売している。
スウェーデン (フィンランド)	両国のバイオマス発電の総量は EU 内でトップ。ただし、総合エネルギー効率の観点から、バイオマス発電は大規模な熱電併給施設 (CHP) でしか存在しない。スウェーデンには火災に関する国立の研究機関 (RISE) があり、ISO/TC238/WG7 の委員長として ISO にお

	けるペレット燃料の安全性に関する議論を主導している他、バイオマス発電所の火災予防システムを世界的に販売している企業がある。
ドイツ	小規模なバイオマス CHP や熱供給施設が多い。一方で EU における固体バイオマスの最大生産国であり、スウェーデンとともに最大消費国の一つ。発電目的のバイオマス燃料の最大の消費者（バイオマス燃料の総消費量の 27.7%、バイオガス消費量の 57.0%）でもある。EN/ISO を牽引する DEPV や発電所の規格を作る VGB といった団体がある。

5.2.2 イギリス (United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland)

(1) バイオマス発電の普及状況

イギリスは 18 世紀の産業革命以降、石炭の利用が盛んな国であり、石炭火力発電の発祥の地とされる。2008 年に世界で初めてとなる気候変動法 (Climate Change Act2008²⁶) が制定され、以降 50 年にわたる気候変動対策を規定した。この法律は 2019 年に改正され、G7 では初めて 2050 年までに国内の GHG の純排出量ゼロを法制化した²⁷。この方針は 2020 年 1 月 31 日に EU を離脱して以降も堅持され、2024 年 9 月 30 日には、これも G7 で初めて、国内最後の石炭火力発電所の運転を終了し、142 年にわたる石炭への依存から脱却した²⁸。このような構造変化の中で、電力分野では、風力発電が大きく増加している他、従来の石炭火力発電がバイオマス発電へと転用されている。

IEA の Country and regions によると、イギリスの最終エネルギー消費に占める再エネの割合は 2021 年時点で 12.15% である。発電のみに限ると、2023 年の総発電量の 42% が再エネ由来であった。

²⁶ <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>

²⁷ <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2021/0401/aadaa8339e8db539.html>

²⁸ <https://www.bbc.com/japanese/articles/cd7x252d2z9o>

BBC, イギリスが石炭火力発電を廃止 産業革命以来 142 年の歴史に幕, 2024/10/01

表 5.2.2-1 イギリスの電源構成 (2023)

電源	GWh	%
石炭	4,472	1.6
石油	2,360	0.8
天然ガス	96,226	33.7
バイオマス	29,007	10.2
廃棄物	9,943	3.5
原子力	40,748	14.3
水力	7,018	2.5
太陽電池	13,826	4.8
風力	81,989	28.7
潮力	11	0.0
合計	285,600	100

引用 : IEA Countries and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

発電に占めるバイオマスの使用は過去 10 年間で大幅に増加した (図 5.2.2-1 参照)。第一に、イギリスの電力システムが大きな変化を遂げ、2024 年 9 月に石炭火力発電が完全に廃止されたことが大きい。

現在では発電の 10%をバイオマスが占めており、うち 62%が固体バイオマス燃料である。その 95%は改造された石炭火力発電所で利用されており、燃料の多くは海外から輸入されている。

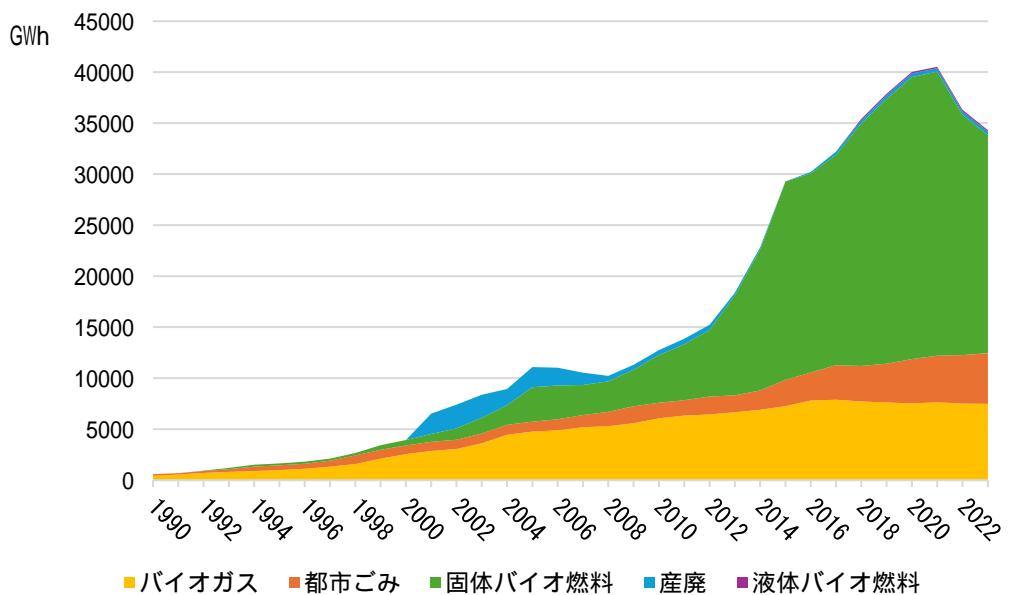


図 5.2.2-1 再エネ燃料による発電量の推移

引用：<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

(2) バイオマス発電の特徴（専焼／混焼、使用されるバイオマス燃料の種類）

Biomass Feedstocks Innovation Programme によると、イギリスで固体バイオ燃料を使用するバイオマス発電所 19 のうち 18 が石炭との混焼発電である（図 5.2.2-2 参照）。その他、規模は小さいが CHP での利用も進んでおり、天然ガスを中心として約 2,000 の CHP 施設が存在する。CHP での固体バイオ燃料の割合は 6.3% である。

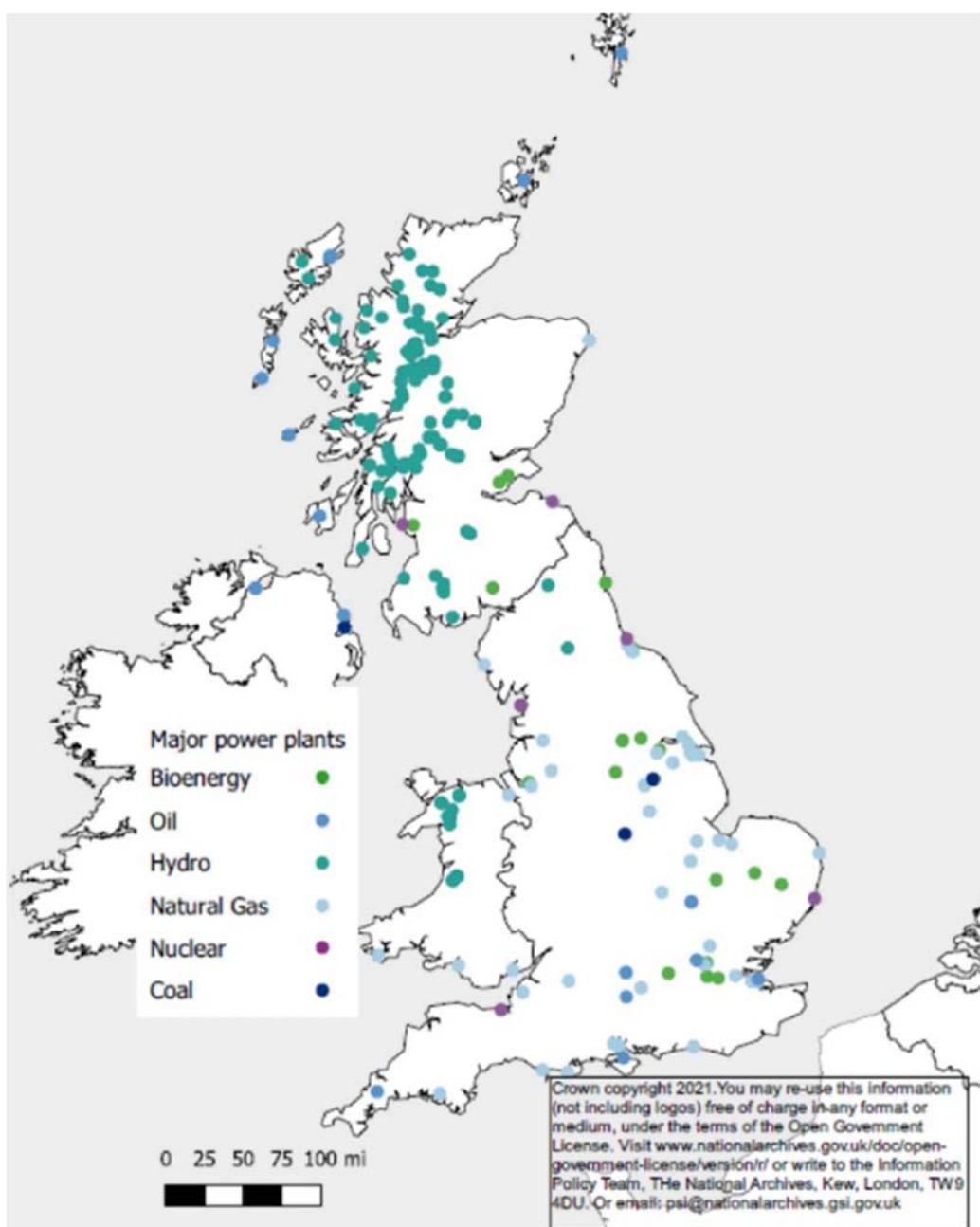


図 5.2.2-2 主な発電所の位置 (2022 年 5 月時点)

引用 : Biomass Feedstocks Innovation Programme

<https://www.biomassconnect.org/technical-articles/data-summary-solid-biomass-consumption-tends-in-the-uk-energy-sector-2016-2021/#>

(3) バイオマス発電に係る規制 (法令・ガイドライン等) の具体的な内容 (発電に係る規制・危険物の取扱いに係る規制も含む)

イギリスのバイオマス発電において、発電所が参考にしている法令はかつて加盟していた EU の ATEX の他、イギリス独自の DSEAR がある。また Health and safety in biomass

systems という熱電併給 (CHP) を含むバイオマスの燃焼システムにおけるガイドブックがある。

ア. DSEAR : The Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations:2002²⁹
(危険物質および爆発性雰囲気規制 2002)

イギリスの HSE³⁰ (Health and Safety Executive : 安全衛生庁) による規制で、危険物質によって引き起こされる可能性のある火災や爆発のリスクを雇用主が評価することを義務付けている。DSEAR は危険物質を火災、爆発、その他のエネルギー的事象を引き起こす可能性のある物質と定義しており、バイオマスは危険物質に該当するため、施設の運営者は DSEAR に準拠した危険区域分類調査を実施しなければならない。この法律の重要な要件は、可燃性雰囲気が発生する可能性のあるエリアをゾーンに区分することにある³¹。

表 5.2.2-2 DSEAR によるゾーニング

ゾーン	定義
20	空気中の可燃性粉じんの形で爆発性雰囲気が継続的または長期間、あるいは頻繁に存在する場所
21	通常の運転中に、空気中の可燃性粉じんの形で爆発性雰囲気が発生する可能性のある場所
22	空気中の可燃性粉じんの形の爆発性雰囲気が、通常の運転では発生する可能性はない、もしくは発生しても短時間しか持続しない場所

引用 : Hazardous Area Classification for Biomass

<https://www.icheme.org/media/8923/xxiv-paper-28.pdf>

イ. Health and safety in biomass systems:2011 (バイオマスシステムにおける健康と安全)

イギリスの CEA : Combustion Engineering Association (燃焼工学協会) が 2011 年に発行したガイドブック。ここでは熱電併給 (CHP) を含むバイオマスの燃焼システムにおける健康と安全に関する設計および操作のための指針を示している。これは Renewable Heat Incentive government scheme:2011³² (再生可能熱奨励金制度) の導入を受けて、イギリスが他の欧州諸国から 20 年遅れている状況を踏まえ、バイオマ

²⁹ 法令は [Legislation.gov.uk](https://www.legislation.gov.uk) [https://www.legislation.gov.uk/](https://www.legislation.gov.uk) よりダウンロードできる。

³⁰ HSE: Health and Safety Executive <https://www.hse.gov.uk/index.htm>

³¹ Sherwen, S. & Phylaktou, H. (2014) Hazardous Area Classification for Biomass. によると、この論文の研究目的は火力発電用のバイオマスを処理および取り扱う施設の危険区域分類 (HAC) を支援するアプローチを提案することにある。 <https://core.ac.uk/download/pdf/161125408.pdf>

³² Renewable Heat Incentive government scheme: 2011

<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a796f14ed915d07d35b5721/1387-renewable-heat-incentive.pdf>

スによる暖房システムに直接的に関係する重大事故を予防するために、安全設計と安全作業体制の確保のために記されたものである。

(4) 事故の発生状況

2012年2月26日にRWE（ドイツ）が所有するイングランドのエセックスにあるティルベリーB発電所（75万kW）で火災発生。火災は8、9、10号機のうち9、10号機の燃料サイロのホッパーで発生。原因是自己発熱によるくすぶり火災だとされている。当時、サイロには4,000～6,000トンのペレットが貯蔵されており、火災に際して水を注入したものの、水でペレットが膨張してそれ以降の水の注入が阻まれたため、泡消火剤を使って空気を遮断する方法が取られた。



写真 5.2.2-1 ティルベリー発電所の火災

引用：デイリー・ミラー

<https://www.mirror.co.uk/news/uk-news/severe-blaze-engulfs-tilbury-power-744865>

2014年2月4日にE.ON（ドイツ）が所有するイングランドのウェスト・ミッドランズにあるアイアンブリッジ発電所の1号機で火災発生。原因是蒸気タービンのペアリングの故障とされる。この火災で2基あるボイラのタービンのうち1台が焼失し、その後、再建されなかった。

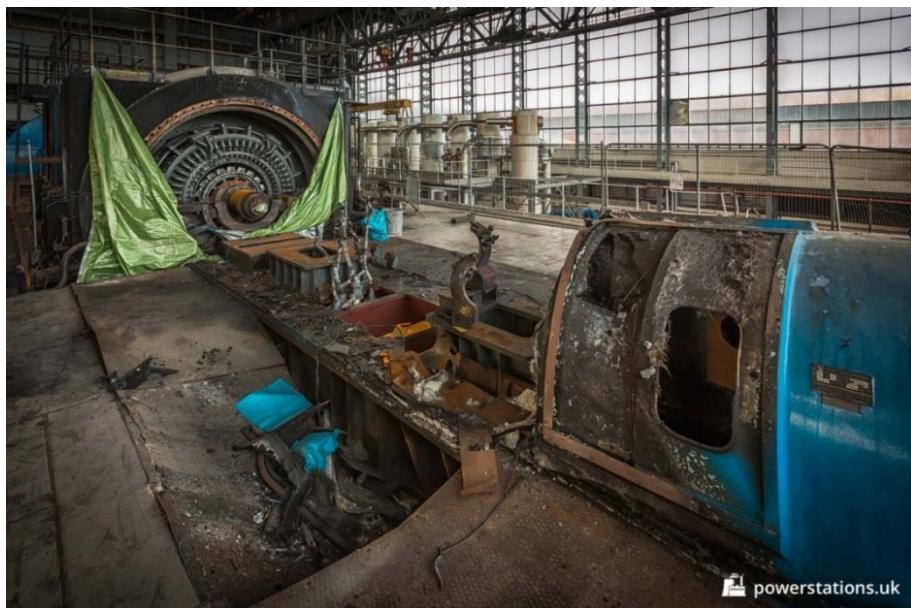


写真 5.2.2-2 損傷したタービン

引用 : Power Stations of the UK

<https://www.powerstations.uk/ironbridge-turbines/>

2017 年 12 月 15 日にイングランドの北ヨークシャーにて、ドラックス（イギリス）が所有する発電所で火災発生。火災は、北米から輸入された木質ペレットが貨物船から貨車に移され、貨車から大型貯蔵ドームに移される施設間のベルトコンベアで発生した。



写真 5.2.2-3 ドラックスのサイロ

引用：ドラックス

<https://www.drax.com/sustainable-bioenergy/how-do-you-build-a-dome-bigger-than-the-albert-hall/>

(5) 当該事故を踏まえて取られている具体的対策（ハード・ソフト）

ドラックスは、イギリス初の大型サイロ（木質ペレットを貯蔵する4つの大型貯蔵ドーム（高さ35.7m、直径61.6m、容量8万トン/1基）を保有し、2021年には830万トンのペレットを消費した³³（サイロ1基の内容物が約半月で入れ替わる計算）。

サイロ内部には火災防止のためのCOバージ、N₂充填のシステムを備え、内部の温度測定、ソナーによる貯蔵量の管理、CO/CO₂/O₂の測定、内部の圧力調整を行っている。消火用にはCO₂と水の注入システムを準備。燃料は機械的にサイロに運ばれ、空気圧でボイラに送られる。ベルトコンベアはすべて密閉され、コンベア上の搬送ポイントは、粉じんの発生を最小限に抑えるか、粉じんが発生した場所から排出するように設計されている。

また、ATEXおよびDSEARの要件を満たすために必要な緩和表面積と配置場所を計算し、屋根の開口部のサイズを決定した³⁴。

5.2.3 オランダ (Kingdom of the Netherlands)

(1) バイオマス発電の普及状況

³³ <https://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/Drax-briefing-2022-2.pdf>

³⁴ <https://www.dometechnology.com/projects/drax-cogeneration-plant-yorkshire-wood-pellet-bulk-storage/>

オランダでは、2019年に施行した The Climate Act (Klimaatwet³⁵)において、GHG の削減目標を定めた。その後、2023年に改訂され、EU の European Climate Law³⁶と足並みをそろえた。その内容は、2030年までに GHG を 1990 年比で少なくとも 55% 削減するというものである。

オランダは干拓地が多い為、風車を利用した揚水の風景が有名だが、そのイメージ通り、ここ 10 年ほどは発電分野での風力と太陽電池の伸びが著しい。電源構成は比率の多い順に天然ガスが 38%、風力が 24%、太陽電池が 17%、石炭が 9%、バイオマスが 4.6% となっている。

IEA の Country and regions によると、オランダの最終エネルギー消費に占める再エネの割合は 2021 年時点で 12.22% である。発電のみに限ると、2023 年の総発電量の 48% が再エネ由来であった。そのうち、バイオ燃料の割合は 2023 年時点で 4.6% である。

表 5.2.3-1 オランダの電源構成 (2023)

電源	GWh	%
石炭	10,706	8.8
石油	1,531	1.3
天然ガス	45,987	37.9
バイオ燃料	5,625	4.6
廃棄物	3,787	3.1
原子力	3,985	3.3
水力	68	0.1
太陽電池	19,992	16.5
風力	29,164	24.0
その他	482	0.4
合計	121,327	100.0

引用 : IEA Countries and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

³⁵ https://climate-laws.org/document/climate-act_4bc4

³⁶ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en

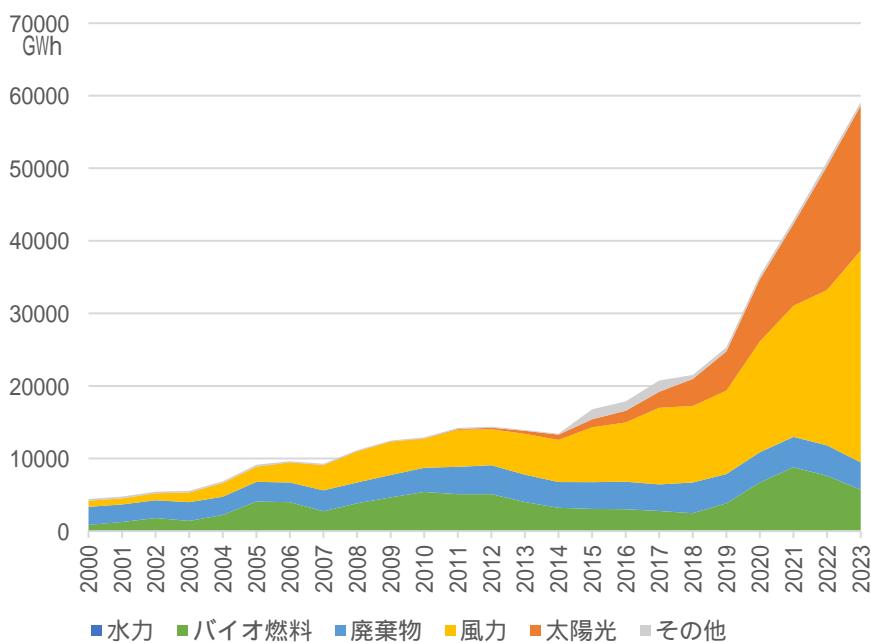


図 5.2.3-1 再エネ燃料による発電量の推移 (2000 ~ 2023)

引用 : IEA Countries and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

(2) バイオマス発電の特徴（専焼 / 混焼、使用されるバイオマス燃料の種類）

石炭火発でのペレット混焼には、オランダ政府から補助金が支出されている。2013 年に再生可能エネルギー発電のための資金を含むオランダ・エネルギー協定が締結された。これによって、オランダ版の FIP 補助金 (SDE+ : Stimulering Duurzame Energieproductie/ Stimulation of Sustainable Energy Production) が施行され、大規模な石炭火力発電も対象になったことでペレットの石炭混焼が進んだ³⁷。その後、同補助金は 2020 年に FIP 補助金である SDE++(Stimulation of sustainable energy production and climate transition) として更新され、持続可能なエネルギー生産の促進だけでなく、CO₂削減に重点が置かれた操業に対する補助政策となっている。

このような背景から、2010 年にはすでに混焼用の大きな市場となっていたが、木質バイオマス利用に対する政府の支援が一時的に打ち切られたため、2012 年以降、市場は急速に縮小した。2013 年に締結されたオランダ・エネルギー協定以降、オランダ政府は SDE+のもと、木質ペレットと石炭の混焼に 8 年間の補助金を支出した。この補助金では 4 つの大型石炭火力発電所が補助対象となった。Uniper Maasvlakte は容量の 15%まで、ENGIE の施設は 10%まで、Amer 発電所は 80%まで、RWE Eemshaven は 15%までペレットを使用できる。結果として、オランダの木質ペレットの消費量は 2018 年から急激に増加し、デンマークと

³⁷ https://www.egnret.ewg.apec.org/sites/default/files/2018-09/3.%20Biomass%20co-firing%20experience%20in%20NL%20%26%20Black%20pellets%20status%20update_Michiel%20Carbo.pdf

ベルギーを上回り、2023年にはイギリスと日本に次ぐ世界第3位の木質ペレットの輸入市場となった。輸出元はアメリカとカナダといった北米が42%で、次いでラトビアの23%となっている。

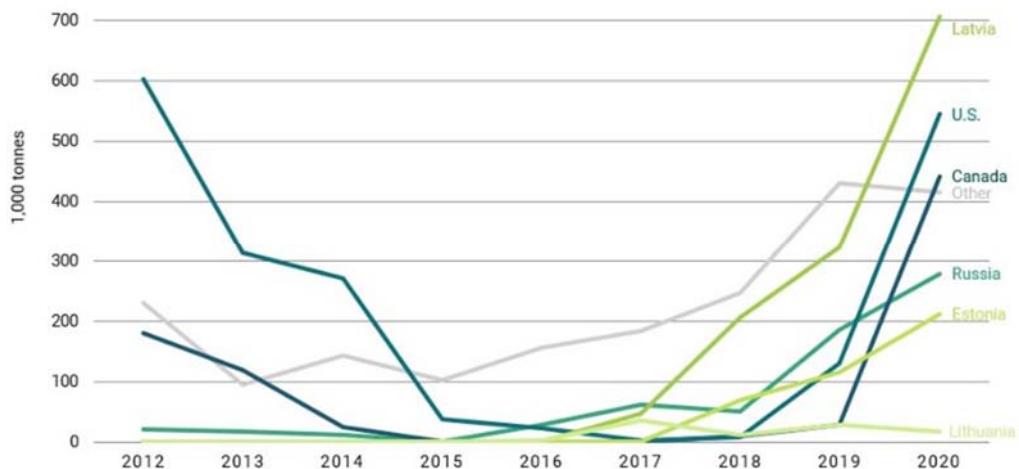


図5.2.3-2 オランダの国別ペレット輸入量(2012~2020)

引用：グリーンピース

<https://www.greenpeace.org/static/planet4-netherlands-stateless/2021/06/20ea8571-wood-pellets-nl-210601.pdf>

EUでは、再生可能エネルギー導入を促進し化石燃料からの脱却することによってエネルギー安全保障の確保と持続可能なエネルギー調達を目指すために Renewable Energy Directive (RED: 再生可能エネルギー指令)を2009年に発効した。その後改訂を重ね、2022年のREDでは、EUの再生可能エネルギーの比率を45%に増加させることが承認された。と同時に、バイオマス発電については、CHPを除いて、2027年以降の補助金支出を原則として取りやめるよう勧告した³⁸。

オランダは、EUでREDの議論を牽引しており、オランダ政府は今後、バイオマス発電に関する全ての補助金を廃止もしくは規制する準備があるとしており、気候エネルギー大臣は「バイオマスは SDE++の中でもはや奨励されない」と語っており³⁹、石炭混焼を含む輸入バイオマスのエネルギー利用に対する批判の高まりと政策的な制約が予想される。

(3) バイオマス発電に係る規制(法令・ガイドライン等)の具体的な内容(発電に係る規制・危険物の取扱いに係る規制も含む)

³⁸ <https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20220928.php>

³⁹ <https://www.fern.org/publications-insight/netherlands-ends-all-biomass-subsidies-for-electricity-with-more-restrictions-expected/>

オランダ独自の規制は存在しないが、発電所は ATEX 指令に準拠する必要がある。

(4) 事故の発生状況

2014年9月10日にRWE(ドイツ)が所有するアメールセントラーレ発電所(CHP)の9号機で火災が発生。原因は不明であるが、ペレットをサイロに充填中にコンベアベルトから出火⁴⁰。

(5) 当該事故を踏まえて取られている具体的対策(ハード・ソフト)

アメールセントラーレ発電所(CHP)では、事故後、篩と金属分離機を導入し、すべての機器を ATEX 指令へ準拠した。貨物船からの圧縮空気式アンローダの導入、トラフ型の密閉式(防爆型、粉じん清掃付)ベルトコンベアの採用、フラットスライドゲート、ダストフィルターシステムを設置した。

オランダでは、天井の低い倉庫でペレットをバルクで保管することが多いことから、これらの燃料の自己発熱が問題になる。その対策の中心は、温度監視であり、GPS 付のプローブには温度センサが 2 つあり温度を通知する。それらのトレンドを分析し、温度が高くなった場所のペレットをホイールローダ等で取り出して攪拌し、自己発熱から生じた熱を取り除くものである。このシステムは消防と連携している他、オプションでガス計測(CO、CO₂、CH₃、H₂)も可能である。

⁴⁰ IEA Bioenergy TASK32 "The status of large scale biomass firing"
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/IEA_Bioenergy_T32_cofiring_2016.pdf



写真 5.2.3-1 TEMO のプローブ

引用: Control Union

<https://www.controlunion.com/service/inspections/commodity-inspections/temperature-monitoring-temo/>

5.2.4 スウェーデン (Kingdom of Sweden)

(1) バイオマス発電の普及状況

2018 年に施行された気候法 (The Climate Act) において、スウェーデンは 2045 年までに 1990 年基準で 85% の地球温暖化ガスを削減するという目標を設定し、炭素税などの政策手段を講じて、2045 年にはネットゼロ炭素社会を構築するとしている。

スウェーデンの電源構成は、他の国とはかなり異なり、石炭や石油、天然ガスといった化石燃料の比率が極めて小さく、合計しても全体の 1% に満たない。逆に、再エネが 7 割となっている。

表 5.2.4-1 スウェーデンの電源構成 (2023)

電源	GWh	%
石炭	526	0.3
石油	259	0.2
天然ガス	222	0.1
バイオ燃料	8,556	5.2
廃棄物	4,462	2.7
原子力	48,289	29.1
水力	66,336	40.0
太陽光	3,098	1.9
風力	34,074	20.5
合計	165,822	100.0

引用 : IEA Countries and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

IEA の Country Report 2024 によると、スウェーデンにおけるバイオエネルギーの主な用途は、直接暖房（主に産業用）と地域暖房の両方における熱利用である。スウェーデンの燃料 / 熱供給（ヒートポンプ / 電気暖房を除く）の約 70% は、固体バイオマス燃料の直接使用によるものである（図 5.2.4-1 参照）。

スウェーデンの電力システムは、原子力と水力発電（それぞれ 2022 年の発電量の 30% と 40%）が主流。風力エネルギーの割合が増加しており（2022 年には 19%）、バイオマス電力（熱電併給による発電）の割合は 8%、太陽電池発電と化石燃料の割合は低くなっている（2022 年にはそれぞれ約 1%）。

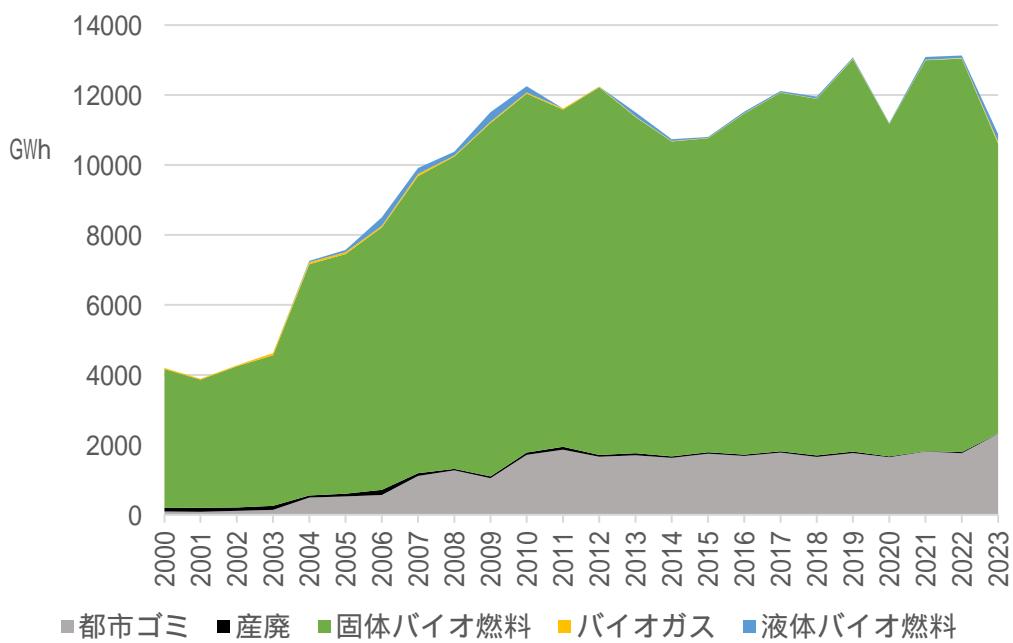


図 5.2.4-1 バイオマスまたは廃棄物燃料による発電量の推移 (2000 ~ 2023)

引用 : Country Report 2024

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/12/CountryReport2024_Sweden_final.pdf

IEA Bioenergy “Global database of biomass conversion facilities, including advanced biofuels combustion, gasification and pyrolysis plants”⁴¹によると、スウェーデンの固体バイオマス燃料を使用する 16 の発電所のうち 14 が石炭との混焼発電である。使用されるバイオマス燃料は 木質、木質廃棄物、ピート、オイル、バーク、木質ペレット、様々な廃棄物である。

(2) バイオマス発電の特徴（専焼 / 混焼、使用されるバイオマス燃料の種類）

スウェーデンでは、いわゆるバイオマス発電施設が存在せず、全てが CHP であり、大規模な施設が大多数である。

(3) バイオマス発電に係る規制（法令・ガイドライン等）の具体的な内容（発電に係る規制・危険物の取扱いに係る規制も含む）

スウェーデン独自の規制は存在しないが、発電所は ATEX 指令に準拠する必要がある。

(4) 事故の発生状況

2004 年 9 月 4 日、ヘルノサンド港にあるペレットのサイロで火災が発生。5 つのサイロ

⁴¹ <https://www.ieabioenergy.com/installations/>

のうち、3つは完全に燃え、1つはペレットの変質が見られた。サイロ火災に対処するため、サイロを空にして外側から消火した。



写真 5.2.4-1 ヘルノサンドのサイロ火災

引用：MSB

<https://www.msb.se/siteassets/dokument/publikationer/english-publications/silo-fires-fire-extinguishing-and-preventive-and-preparatory-measures.pdf>

(5) 当該事故を踏まえて取られている具体的対策（ハード・ソフト）

スウェーデンでは、爆発や火災、バイオマスの燃焼などの調査研究を国立の研究所である SP (Technical Research Institute of Sweden : SP スウェーデン技術研究所) が長年実施しており、バイオマスボイラやストーブなどの試験と製品の認証なども行っている。2018 年に他の複数の国立研究所と統合して 3,300 名の職員を抱える RISE (Research Institute of Sweden : スウェーデン国立研究所) となった。RISE は現在も ISO/TC238 の WG7 Safety of solid biofuels (固体バイオ燃料の安全性) の委員長を務めており、バイオマス燃料の安全性に関する国際的な規格作りをリードしている。

5.2.5 ドイツ (Federal Republic of Germany)

(1) バイオマス発電の普及状況

ドイツは日本において環境先進国として紹介されることが多く、実際、2019年12月に国会が施行した気候保護法 (Climate Change Act⁴²) では、2050年までに温暖化ガスを実質的に排出量ゼロにすることを明記した⁴³。これとは別に、ドイツ政府は東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、2011年3月時点で17基の原発によって総電力の1/4を供給していたにもかかわらず2022年までに全廃すると決めた⁴⁴。その後、2022年2月24日にロシアがウクライナに侵攻した影響で天然ガスの価格が急騰し、欧州におけるエネルギー危機が発生したが、それでもドイツは2023年4月15日に残る3基の原発を停止し、これにて原発の全廃を成し遂げた。また、石炭火発に対しては、2020年8月に石炭火力発電の削減・廃止に係る石炭廃止法 (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz: KVBG⁴⁵) を施行し、2038年までに国内の石炭火発を全廃するとしている⁴⁶。

バイオマスを燃料とする電力は、2010年の34TWhから2014年には50TWhに増加し、現在では電力生産の8.8%を占めている（図5.2.4-1参照）。

⁴² 2019年に制定されたこの法律は2021年に改正された。<https://www.bundesregierung.de/bregen/service/archive/climate-change-act-2021-1936846>

⁴³ 2021年に改正された。<https://www.nies.go.jp/social/navi/colum/bg06.html>

⁴⁴ <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany>

⁴⁵ <https://www.gesetze-im-internet.de/kvbg/BJNR181810020.html>

⁴⁶ ショルツ政権によって2030年までに全廃を前倒しすることが計画された。

https://coal.jogmec.go.jp/info/docs/240621_1.html

5.2.5-1 ドイツの電源構成 (2023)

	GWh	%
石炭	138,403	26.6
石油	4,485	0.9
原子力	89,122	17.1
バイオ燃料	39,800	7.7
廃棄物	12,164	2.3
原子力	7,216	1.4
水力	25,345	4.9
太陽電池	61,536	11.8
風力	140,538	27.0
地熱	206	0.0
その他	1,188	0.2
合計	520,003	100.0

引用 : IEA Country and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

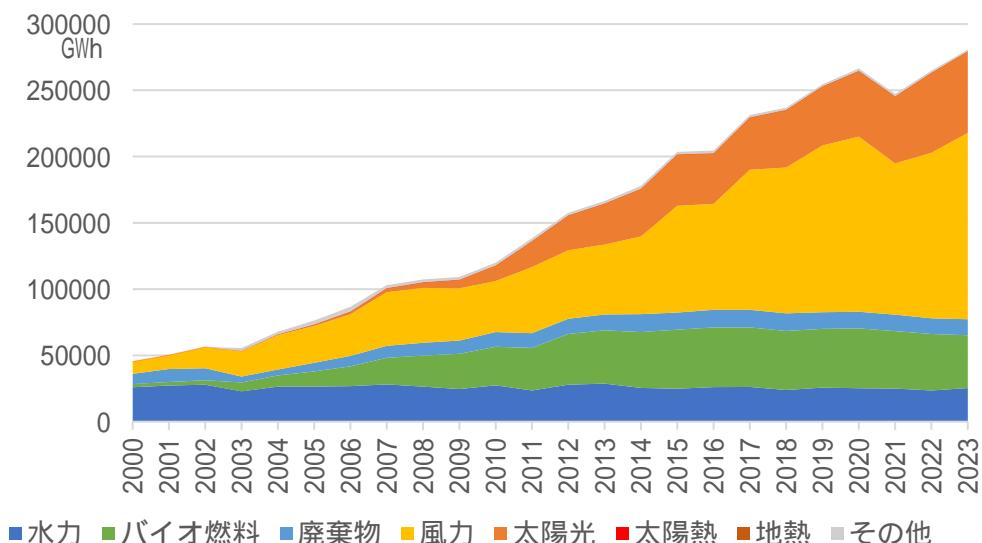


図 5.2.5-1 再エネ燃料による発電量の推移 (2000~2023)

引用 : IEA Countries and regions

<https://www.iea.org/countries/united-kingdom/renewables>

(2) バイオマス発電の特徴 (専焼 / 混焼、使用されるバイオマス燃料の種類)

発電に関して、電力のみの発電所と熱電併給 (CHP) 発電所の違いみると、石炭火力発電の90%以上と原子力発電の100%が電気のみのプラントで生産されている。

一方、バイオマス（特にバイオガス）からの電力の70%は、CHP プラントで生産され、有用な熱も生産されている。2012 年以降、風力や太陽電池発電による変動する発電量とのバランスをとるため、バイオガスプラントをより柔軟な方法で運転するための価格インセンティブが EEG: German Renewable Energy Sources Act⁴⁷（ドイツ再生可能エネルギー法）によって与えられている。

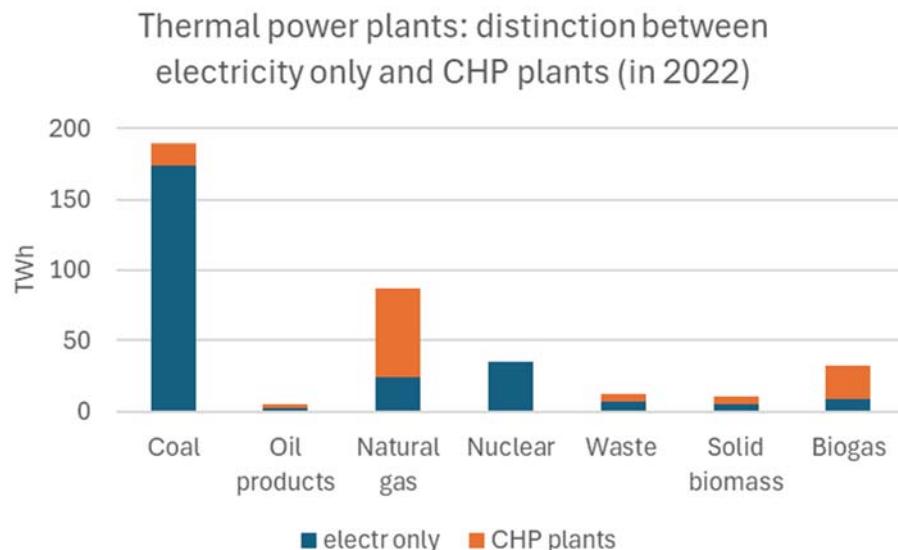


図 5.2.5-2 2022 年の電力のみの発電と CHP プラントでの発電の比較

引用 : IEA Bioenergy, Country Reports, Implementation of bioenergy in Germany - 2024 update
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/12/CountryReport2024_Germany_final.pdf

(3) バイオマス発電に係る規制（法令・ガイドライン等）の具体的な内容（発電に係る規制・危険物の取扱いに係る規制も含む）

ドイツでは、バイオマス発電やバイオマス燃料に関する団体が数多くあり、連携しつつ規格や認証などの事業を展開している。

ア. VGB PowerTech e.V. : The technical association of power plant operators (発電所運転者技術協会)

VGB はドイツで 1920 年に設立された発電所の運転者の国際的な団体で、電気と熱の生産と貯蔵に関する技術的な支援を行っている。発電技術（火力、原子力、再生可能エネルギー）のまとめ役として、発電の安全、安定供給、採算性、環境などの分野でその促進と強化を目的として勧告やガイドライン、規則、規格を独自に作成している。さらに、発電技術に関するガイドラインや規則の統一化、規格化、圧力容器や蒸気ボイラ、原子力技術に関する安全規制問題でドイツ政府や EU などの外部機関と協

⁴⁷ <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/stromerzeugung/stand-der-fleksibilisierung-von-biogasanlagen>

力している⁴⁸。

バイオマスに関しては、Fire and Explosion Protection in Biomass Power Plants VGB-S-018-00-2013-12-EN(バイオマス発電所における火災と爆発からの保護)が出版されており、バイオマス発電所における注意点を網羅的に扱っている。

イ. DEPV : Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (ドイツエネルギー木材ペレット協会)

DEPI (The German Pellet Institute : ドイツペレット研究所)は2008年にDEPVの子会社として設立された。DEPIはISOのペレット規格(ISO17225-2)の元となったEN規格(EN14961-2)のさらに元となったDIN規格(DIN51731)を作成した。現在もISO/TC238において、ISO17225ならびにISO20023に関する議論を牽引している。

その他、ペレット燃料の世界的な認証スキームであるENプラス認証も、元はDEPIが開発したDINプラス認証である。DEPIはエネルギー効率の観点から、一貫してバイオマスの熱利用もしくは熱電併給を推奨しており、関連する規格や認証もストーブやボイラによる熱利用に関するものが中心となっている。

(4) 事故の発生状況

2023年4月24日、ハーゲンにあるバイオマス発電所のサイロで火災が発生。発電用の燃料として使用される廃材2,000トンを収容する2つのサイロのうち1つで発生。当初は窒素で消火しようとしたが大量の煙が発生し、自然発火の危険があつたため、消防隊がサイロを開けて掘削機で空にした。残念ながらこれによりさらに酸素が供給され、火に燃料が供給された。煙はハーゲン市境を越えて、近くのドルトムントとシュヴェルテに広がった。

⁴⁸ ベルリン@対話工房. “ドイツの原子力規制構図”. 2003年1月.

https://taiwakobo.de/neu/energie/downloads/D_Akw_Reg.pdf



写真 5.2.5-1 サイロ火災の様子

引用 : WDR

<https://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/brand-hagen-silo-100.html>



写真 5.2.5-2 鎮火後の様子

引用 : WESTFALENPOST

<https://www.wp.de/staedte/hagen/article238232179/Hagen-Brand-in-Kraftwerk-Feuerwehr-fueellt-Silo-mit-Schaum.html>

5.2.6 國際的な規格等の状況

バイオマスの発電設備に関する規制や基準、規格といったものはそれぞれの国の国内制度にとどまらず、ISO（国際標準化機構）やEU（欧洲連合）といった枠組みで制度化されている。

(1) ISO : International Organization for Standardization (国際標準化機構)

ISOはスイスに本部を置く非政府機関として、国際的に通用する規格を発行しており、日本も1952年よりJSIC:Japanese Industrial Standards Committee(日本産業標準調査会)が加入している。ISOでは、主にTC238:Solid Biofuels and Pyrogenic Biocarbon(第238技術委員会:固体バイオマス燃料と発熱性バイオカーボン)において、バイオマス燃料に関する様々な規格が議論され発行されている。日本では2024年よりJBSA:Japan Biomass Fuel Standardization Association(固体バイオマス燃料標準化協議会)が国内審議団体としてJISCの承認を受け、TC238のPメンバーとして参加している状況にある。

そもそも、固体バイオマス燃料は地球上に普遍的な資源として、幅広い種類の原料と加工、流通、使用の方法があるため、ISOではそれらの仕様と分類について規定されている。

また、固体バイオマス燃料の取扱いと貯蔵は、火災や爆発の危険性があるだけでなく、一酸化炭素の発生による中毒や酸素濃度の低下による窒息、アレルギー反応などの健康リスクをもたらす可能性があるため、関連する規格が発行されている。

ア. ISO 17225

Solid biofuels - Fuel specifications and classes(固体バイオマス燃料 - 燃料の仕様及び分類)はPart1からPart9までが発行されており、それらの内容は次の通り。バイオマス発電所で使用されるバイオマス燃料は、必ずしもISO規格に準拠したものである必要はないものの、世界中で流通しているバイオマス燃料の多くはISO規格に準拠して生産され、一部は認証を受けていることから、バイオマス発電所での火災に関する安全管理においても、当該発電所で使用する燃料がどの規格に則って生産されたのか、また認証されたものかを知っておく必要がある。

表 5.2.6-1 ISO17225 に含まれる規格

規格	名称
ISO 17225-1: 2021	一般要求事項
ISO 17225-2: 2021	等級別木質ペレット
ISO 17225-3: 2021	等級別木質ブリケット
ISO 17225-4: 2021	等級別木質チップ
ISO 17225-5: 2021	等級別薪
ISO 17225-6: 2021	等級別非木質ペレット
ISO 17225-7: 2021	等級別非ブリケット
ISO 17225-8: 2023	等級別民生用及び産業用熱処理圧密バイオ燃料
ISO 17225-9: 2021	等級別産業用破碎チップ及び切削チップ

イ. ISO 20023

Solid biofuels - Safety of solid biofuel pellets - Safe handling and storage of wood pellets in residential and other small-scale applications (固体バイオマス燃料 - 固体バイオマス燃料ペレットの安全性 - 木質ペレットの家庭ならびに小規模な用途における安全な取り扱いと貯蔵) は 2018 年に ISO によって制定された規格で、貯蔵量 100 トン未満の施設が対象となるが、エンドユーザーの貯蔵量が 1,000 トン未満であって、貯蔵の原則や施設の仕様が ISO20023 の目的に合致するならば、ISO20023 を適用可能とされる。

この規格はペレット工場においてペレット成型のプロセスからペレット燃料が出てきて輸送されるまでと、流通業者において荷受けから出荷まで、産業用のエンドユーザーにおいて荷受けから燃焼プロセスに投入するまでを規定している。

主にバルク輸送を対象としたものであることから、ペレット燃料のバルク利用が盛んなドイツとオーストリアで利用されている規格になる。規格の内容は現在、見直し期間にある。

ウ. ISO 20024

Solid biofuels - Safe handling and storage of solid biofuel pellets in commercial and industrial applications (固体バイオマス燃料 - 商業および産業用途における固体バイオマス燃料ペレットの安全な取り扱いおよび貯蔵) は 2020 年に ISO によって制定された規格で、原則として 100 トン以上の固体バイオマス燃料を貯蔵する大規模な発電所や熱供給施設の所有者、物流業者、設備の供給業者・製造業者、コンサルタント、行政機関、保険業者に対して、固体バイオマス燃料ペレットの取り扱いと貯蔵におけるリスクの評価と軽減のための支援、助言、ガイダンスを提供している。

本書では、一般的な作業安全要件に従って、従業員の安全保護と予防措置に関する一般的なガイダンスが提供されている。また、固体バイオマス燃料のリスクの判定と評価の一環として、適用される品質規格と関連する試験方法について議論し、追加的な方法論の推奨を示している。固体バイオマス燃料は、生物資源からできているため、経年劣化や湿気などの影響を受け、反応性にはらつきが生じ、リスク評価においてマージンが必要となる。固体バイオマス燃料の出荷は、自己発熱やオフガスの点で他の燃料と物理的・化学的特性が大きく異なる可能性があるため、こまめなモニタリング、頻繁な試験、保管が推奨されている。

(2) EU : European Union (欧州連合)

欧洲連合は経済的・政治的な関係を持つ国家で構成された共同体で、その加盟国は主権国家でありつつも、一部の主権を連合に委譲することで世界最大の単一市場を形成している。故に、法令や規格(EN)なども加盟国間で統一されており、それらの一部は欧州市場における発電事業に影響を与えている。

ア. ATEX 指令 (Atmosphere Explosibles Directive)

EU の ATEX 指令は爆発の危険性がある雰囲気で使用される機器に与えられる規制で、ATEX 指令には 2 つがあり、一つは機器、もう一つは職場が対象となっている。

ATEX 認証は ATEX 指令で規定されている厳格なテストを受け、EU での使用目的に沿って安全に動作することを保証され、ATEX 指令に準拠している製品は使用が認定されているゾーンに固有の爆発の危険性がある雰囲気のある環境で安全に使用できることが証明される。

- a. ATEX 114 " equipment Directive " 2014/34/EU: Equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (爆発の危険性がある雰囲気で使用することを目的とした機器および保護システム)
- b. ATEX 153 " workplace Directive " 1999/92/EC: Minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (爆発の危険性がある雰囲気から潜在的に危険にさらされる労働者の安全と健康保護を改善するための最低要件)

(3) USA : United States of America (アメリカ合衆国)

ア. NFPA : National Fire Protection Association⁴⁹ (全米防火協会)

NFPA は電気、火災、爆発の安全性のあらゆる側面を網羅する 300 を超える規格と基準を管理している。

爆発保護システムの NFPA 規格では、ほとんどの爆発保護装置のテストと認証が義

⁴⁹ NFPA <https://www.nfpa.org/>

務付けられている。例として、無炎爆発ベント装置、爆発遮断弁、アクティブ保護システムなどがある。テストされた条件の範囲で装置が機能する公平な信頼性を確保するには、公開された一連のテスト手順に従って、信頼できる組織がこれらの装置を個別にテストする必要がある。

バイオマスに関して直接的に関係するものは、NFPA211: Standard for Chimneys, Fireplaces, Vents, and Solid Fuel-Burning Appliances 2024 (煙突、暖炉、排気と固体燃料燃焼機器の規格 : 2024) がある。

その他、粉じんに関連する規格として、NFPA 652 : Standard on the Fundamentals of Combustible Dust 2019 や NFPA 660 : Standard for Combustible Dusts and Particulate Solids 2025 がある。

6 バイオマス発電設備の事故防止に関する検討会の開催

6.1 実施方針

(1) 目的

日本国内で発生している事故の共通原因及び爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案について、本調査結果も踏まえて検討することを目的とする。

(2) 委員

委員	所属	専門
成瀬 一郎 教授	名古屋大学未来材料・システム研究所 教授	エネルギー変換、環境汚染物質、バイオマス、廃棄物、石炭
香月 正司 名誉教授	大阪大学工学研究科 名誉教授	燃焼工学
二宮 善彦 特任教授	中部大学工学部応用化学科 特任教授	環境化学工学、バイオマス燃焼
橋本 一輝 研究本部 主任研究員	電力中央研究所 エネルギートランسفォーメーション	固体燃料の発熱評価研究
武 昌信 品質管理部長	(株)サンコー環境調査センター 品質管理部長	固体バイオマス燃料の物理的・化学的特性
村上 宜之 課長補佐	(一社)日本海事検定協会 理化学分析センター 課長補佐	輸入バイオマス燃料のサンプリングと試験
高木 愛夫 技術部	一般社団法人 火力原子力発電技術協会 技術部	バイオマス発電設備技術基準、設備コスト
小林 剛士 マネージャー	(株)堀場製作所 東京セールスオフィス 海外営業部 Business Development Team 兼 エネルギー・環境戦略室 マネージャー	監視装置メーカー

(3) 日時及び主な検討内容

ア. 第1回

日時：2024年12月25日（水）14:56～17:10

主な検討内容：各調査項目の調査方針・方法、評価方法・取りまとめ方針案

イ. 第2回

日時：2025年3月6日（木）13:00～15:35

主な検討内容：バイオマス発電における爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案について

6.2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案

上記調査結果及びその他事例から、バイオマス発電所（混焼含む）の設備毎における火災事故の想定される火災・爆発要因を表6.2-1に示す。なお、図6.2-1に示す通り、設備をA～Dに区分して整理することとする。

区分：

A:受入設備等（桟橋の燃料受入設備、受入建屋、ホッパ）

B:貯蔵設備等（倉庫、サイロ、バンカ）

C:搬送設備等（各種コンベア、中継建屋、供給フィーダ）

D:微粉碎機

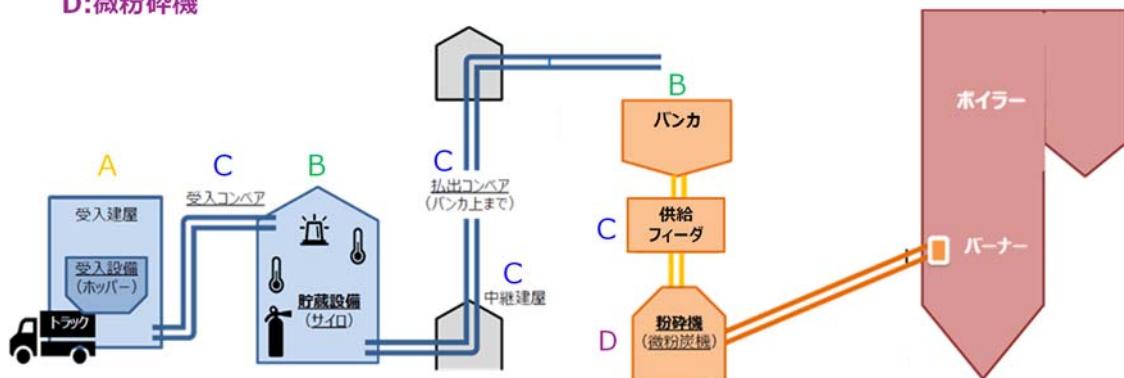


図6.2-1 バイオマス発電所設備区分

表6.2-1 設備毎における火災事故の想定される火災・爆発要因

爆発要素	箇所	対象設備	想定される火災・爆発要因
着火源	A	受入ホッパ	バイオマス燃料の発酵・酸化による蓄熱、その後熱暴走
	B	倉庫	ホイールローダと金属異物との接触による火花
	B	サイロ	バイオマス燃料の発酵・酸化による蓄熱、その後熱暴走
	C	バケットエレベータ	ケーシング部とその他金属部品、異物との接触による火花
	C	各種コンベア	ベルトと回転部の接触による静電気
	C	払い出しコンベア	ベルト蛇行等によるブーリ熱
	D	微粉碎機	粉碎機回転部と燃料粉の接触による火種

拡散(粉じん)	A	桟橋の燃料受入設備	アンローダによる粉じん拡散
	B	倉庫	バックホーのホー部分でのバイオマス燃料の押しつぶし/タイヤでの踏みつぶしによる粉じん拡散
	C	バケットエレベータ	バイオマス燃料のバケット搬送によるあおり、吹上げによる粉じん拡散
	C	払い出しコンベア	コンベア積替え場所等の落差によるバイオマス燃料の落下/破損による粉じん拡散
可燃物(ガス・粉じん)	A	ホッパ周辺	バイオマス燃料の粉じん堆積
	B	サイロ・倉庫	バイオマス燃料の発酵・酸化による発熱作用による可燃性ガスの滞留
	B	サイロ・倉庫	運転により発生する木くず・粉じんの堆積
	C	バケットエレベータ	ベルト部、ローラ部、ケーシング等の粉じん堆積
	C	払い出しコンベア	ベルト部、ローラ部等の粉じん堆積
	D	微粉碎機	ローラ部付近の堆積防止板への粉じん(石炭粉や木質粉)堆積
閉鎖空間(換気が乏しい箇所)	B	サイロ	可燃性ガスの滞留、バイオマス燃料の発酵・酸化による蓄熱
	C	バケットエレベータ	燃料受入建屋内の可燃性ガスの滞留、ブーリ等回転機の蓄熱
	C	中継建屋	可燃性ガスの滞留
	C	払い出しコンベア	コンベアカバー空間(ケーシング)での可燃性ガスの滞留、ブーリ熱等の蓄熱
	D	微粉碎機	粉碎機カバー空間による可燃性ガスの滞留
支燃剤(酸素)	B	バケットエレベータ	巡回点検時の通気・換気による酸素供給
	C	サイロ	巡回点検時の通気・換気による酸素供給
	C	払い出しコンベア	巡回点検時の通気・換気による酸素供給
	D	微粉碎機	巡回点検時の通気・換気による酸素供給

最後に、表 6.2-2 に、爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案を行う。なおこの表で示す対策案は例であり、この表も参考にして燃料、設備、運用等の実態に応じて的確な防火・防爆対策を施すことが考えられる。

表 6.2-2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案

項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
A : 受入設備等（建屋、棧橋の燃料受入設備）	揚炭棧橋の燃料受入設備	(1) バイオマス燃料専用の空気搬送式アンローダの採用を検討する。	特に石炭混焼発電所において、楊炭場所で石炭船用アンローダでは粉じん拡散の可能性がある。	拡散・可燃物抑制
		(2) 全天候型コンベヤ、雨の吹込みを防止するための扉、カーテンの設置を検討する。柱・梁からの雨露落下防止を検討する。	降雨あるいは凝縮水によるバイオマス湿潤を避けることで脆化、発酵、発熱を防ぐ。	可燃物の脆化抑制及び自然発熱抑制
	着火源対策	(1) ホッパ下部にスクリーンやマグネットセパレータ等の異物除去装置の設置を検討する。	異物混入によるスパークの防止などを抑制する。	着火源抑制
		(2) ホッパ周りの接地の徹底、さらに電気品に防じん・防爆仕様の採用を検討する。		着火源抑制
		(3) 受入建屋の換気を徹底する。	可燃性ガスの爆発限界濃度の滞留を防ぐ。なお、集じん装置を設置し、十分に集じん処理を行って喚起すること。	可燃物抑制
	監視	(1) 受入コンベアブーリー部、受入ホッパ拡出部に温度計（常時監視用）の設置を検討する。	異常を検知した際は、作業・機器の停止、また自動的に作動する消火設備（散水、CO ₂ 消火器等）を設ける。	着火源抑制
		(2) 火花検知器及びスプリンクラーの設置を検討する。	（アンケート参考） 異常を検知した際に自動的に作動する消火設備（散水、CO ₂ 消火器等）を設ける。	着火源抑制
受入ホッパ受入設備	防雨対策	(1) 雨天時作業の防雨対策のマニュアル化を検討する。	雨天時は湿度100%で、風雨時は雨の吹込みによりバイオマス燃料の湿潤が発生し、特に木質ペレットでは脆化の可能性がある。また、貯蔵設備等で水分を吸着する際の発熱、微生物の活発化により発酵を促進する可能性がある。	可燃物の脆化抑制及び自然発熱抑制

表 6.2-2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案（続き）

項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
B：貯蔵設備等（倉庫、サイロ、（パンカも含む））	着火源対策	(1) マグネットセパレータや振動選別機等の異物除去装置の設置を検討する。	ホイールローダ等による運搬の際、金属異物との接触による火花発生を防ぐ。	着火源抑制
	蓄熱防止	(1) 倉庫運用での燃料の先入先出を徹底する。		可燃物抑制
		(2) 雨の吹込みを防止するための扉、カーテン、隙間に雨切り用シートを敷設し、雨水侵入防止を徹底する。柱、梁からの雨露落下防止を検討する。	(アンケート参考) 降雨あるいは凝縮水によるバイオマス燃料の湿潤を避け、脆化、発酵、発熱を防ぐ。燃料種により適正なコンベアの速度の上限を検討する。	可燃物の脆化抑制及び自然発熱抑制
	粉じん対策	(1) 適切な箇所（受入・払出コンベア等のバイオマス燃料落下部や作業員による清掃が難しい箇所（立入禁止場所や閉鎖場所）等）に集じん機を設置する。	(アンケート参考) 浮遊粉じん濃度または堆積粉じんの低減が可能になる。	拡散・可燃物抑制
		(2) バンカ内にミスト装置の設置を検討する。併せて結露防止シート、パネルヒータ等の設置も検討する。		拡散抑制
		(3) 循環コンベアの速度をコンベア、燃料の種類の応じて適正にする。	運搬速度が大きいほど振動やスリップが発生し易くなりペレットの粉化の原因となる。	拡散抑制
	サイロの設計	(1) 不活性ガス（窒素等）による酸素濃度低減機構の設置を検討する。また不活性ガスの早期手配体制または窒素発生装置等の設置を検討する。	温度または可燃性ガス濃度の異常検知を確認した場合、自動的に不活性ガスを供給し、高温酸化反応を防ぐ。	着火源抑制
		(2) 集じん装置を有する循環運転系統の設置を検討する。	長期間貯蔵する場合は、循環運転による定期的な払出しを行い、燃料の蓄熱を防ぐ。	着火源抑制
		(3) サイロベント管内部（大規模サイロ）や屋根頂部内面（中小規模サイロの場合）に、差圧計による常時監視及び逃し機構（破裂板、ダンパ、ブリーザーバルブ等）の設置を検討する。	発生した燃焼ガスは開口部の最も圧力抵抗の低い箇所に流れ込むため、火災発生時にサイロ内圧力が制限値を超えないよう監視し、噴破事故を防止する。	閉鎖空間抑制・減災
	監視	(1) 倉庫においてサーモカメラや差込式熱電対等の活用により、堆積山状態の内部の温度監視を検討する。	(一部アンケート参考) 蓄熱が確認された場合は、積み直し等放散対策を施す。	着火源抑制
		(2) サイロ払出部及びサイロ上部にサーモカメラまたは熱画像監視カメラ等の設置を検討する。	(一部アンケート参考) 通常の温度計より広範囲に温度検知することで、火元の早期発見が可能となる。	可燃物抑制
		(3) サイロ払出部及びサイロ上部に可燃性ガス（CO、メタン等）検知器の設置を検討する。	異常高時の対策（警戒、バージング、設備停止等）をマニュアル化し、強制換気または不活性ガス封入による可燃性ガス濃度増加を防ぐ。	可燃物抑制
		(4) 遠隔内圧監視システム（温度変化やガス発生等による微小な圧力変動を検知し、中央制御にデータを伝送できる）の導入を検討する。	サイロ等立入厳禁で要防爆箇所を遠隔で監視することで、人災を防ぐ。	減災

表 6.2-2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案（続き）

項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
C ：搬送設備等（各種コンベア、中継建屋、供給フイーダ）	パケットエレベータ仕様	(1) 樹脂製バケットの採用を検討する。	ケーシング部やその他部品、金属異物との接触による火花の発生を防ぐ。	着火源抑制
		(2) 定期的な可動部調整、グリス注入、コーティング部補修を徹底する。	駆動部等の運転異常や摩耗による火災要因を防ぐ。	着火源抑制
		(3) 爆発安全装置、圧力逃し機構（破裂版）、消火用の自動散水装置（消火栓）の設置を検討する。	ケーシング内は狭い空間のため、圧力が直ぐに伝播して大きな事故につながる危険性があり、早期の減災機構が必要である。	減災
		(4) 付帯機器・駆動部に防じん型の採用を検討する。	摩耗・破損による火災要因を防ぐ。	着火源抑制
	コンベア仕様	(1) 大型コンベアについては樹脂コーティング等のベルト耐火対策の採用を検討する。併せて静電気防止のためのアース設置を検討すること。	ベルトコンベアによる延焼を防ぐ効果がある。	着火源抑制
		(2) 温度異常検出時の自動散水装置（消火栓）の設置を検討すること。	（アンケート参考）	減災
		(3) 爆発安全装置、圧力逃し機構（破裂版）、消火用の自動散水装置（消火栓）の設置を検討する。	ケーシング内は狭い空間のため、圧力が直ぐに伝播して大きな事故につながる危険性があり、早期の減災機構が必要である。	減災
		(4) 火花検知器の設置を検討する。	（アンケート参考） 検知した場合、直ちにコンベア等はインターロックにより停止する。	減災
		(5) 異音・振動監視システムの導入を検討する。	異常音が出た際の対策（調整、停止点検、緊急停止）をマニュアル化し、コンベア等の軸受け異常音（振動）を早期検出、ベルト蛇行等によるブーリ熱の発生を防ぐ。	着火源抑制
	粉じん対策	(1) 粉化しやすいバイオマス燃料は、空気搬送式の採用を検討する。	樹種、生産地、形状、品質不安定等によってベルトコンベアが適切でない場合に検討する。	可燃物抑制
		(2) 散水装置の追加を検討する。		可燃物抑制
		(3) 石炭混焼の場合、燃料をミルに供給する投炭装置はバイオマス燃料と石炭各自で設置することを検討する。	樹種、生産地、形状、品質不安定等によって混合搬送が適切でない場合に検討する。	可燃物抑制
		(4) コンベア乗継ぎ場所毎に集じん装置の設置を検討し、接続部の清掃を徹底する。	落差による燃料落下/破損は避けられず、堆積した粉じんが乾燥し、再度燃料に混ざった際は危険性が増加する。	可燃物抑制
	浮遊粉じん濃度低減	(1) コンベアケーシングの集じん機の追加設置または能力向上を検討する。		拡散・可燃物抑制
		(2) 搬送速度をコンベア、燃料の種類の応じて適正にする。	搬送速度の低下は、粉化率を低減できる。	拡散・可燃物抑制
		(3) 防じんシート等の敷設を検討する。	各設備の気密性を向上させ、粉じんの拡散を最小限にする。	拡散・可燃物抑制
		(4) 粉じんが溜まりやすい箇所にエアノッカーの設置、また巡回時にエアブローが可能となるホースコネクタの配備を検討する。		拡散・可燃物抑制
	粉じん処理	(1) 集じん機や清掃で収集された粉じんを全て系外に排出することを検討する。		拡散・可燃物抑制
		(2) 集じん機や清掃で収集された粉じんを再利用する場合、再造粒設備で処理したうえで系内に戻す対策を検討する。	再飛散による粉塵爆発を未然に防ぐ対策を取ったうえで再利用が望ましい。	拡散・可燃物抑制
	堆積低減	(1) コンベアのベルト部の付着物搔き落としにブラシ、スクラーパー、エアノッカー、エアショックの設置を検討する。また、手動での払い落としを可能にするエアガンホースコネクタの設置も検討する。	堆積粉じんに対して固定式払い落としでは完全には除去できないので、手動でも容易に除去できる対策が必要である。	拡散・可燃物抑制
		(2) 原則床面、踏板は塵の溜まりににくいグレーチング床の採用を検討する。		拡散抑制

表 6.2-2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案（続き）

項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
C : 搬送設備等（各種コンベア、中継建屋、供給	監視	(1) コンベアケーシング出口付近部に遠隔監視用（デジタル）差圧計の設置を検討する。	正差圧（例えば外界と5kPaなど）が確認された場合、スプレー噴射あるいはポンベから窒素等を自動的に噴射することで、爆発抑制が可能となる。	拡散抑制
		(2) 防じん機能付き監視カメラによるモニタリング、及び粉じん測定器等による定期的な粉じん濃度の測定を行う。	異常値検出時の対応マニュアルの作成を行う。粉じん爆発下限の50g/m ³ を直接測定できる濃度計は販売されていない（1g/m ³ までの測定器は存在）ので、サンプリングと重量測定の方法を検討する。	拡散抑制
		(3) 温度計の他、各設備に湿度計と可燃性ガス検知器の設置を検討する。	（アンケート参考）湿度増加による発酵促進や可燃性ガスによる着火を防ぐ。	可燃物抑制
		(4) コンベアケーシング出口付近部に光ファイバー温度計の設置を検討する。	異常値検出時の対応マニュアルの作成を行う。コンベア全体の温度監視が大幅に強化でき、異常の早期発見が可能となる。	可燃物抑制
		(5) コンベア騒音、モータ電流値の常時監視、及びブーリ温度測定を検討する。	（一部アンケート参考）コンベア全体の異常の早期発見が可能となる。	着火源抑制
	着火源対策	(1) 乗継部に異物除去装置の設置を検討する。	（一部アンケート参考）ステンレスやガラスは除去できないため、比重差を使った分級装置が必要になる。	着火源抑制
	ボイラ周辺設計	(1) 自動逆火防止ダンパ（緊急遮断弁）の設置を検討する。	ボイラ運転停止後、炉内からの逆火を自動的に防止する。なお、引火したバイオマス燃料が一次ホッパに逆入した場合は、縁切り（緊急遮断弁等の設置）の対策が必要である（サイロと同様の対策が必要となる）。	着火源抑制
	減災	(1) 火炎検知器及び消火設備の設置（散水設備等）の設置を検討する。	異常時に自動的に散水する。	減災
項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
D : 微粉碎機	監視	(1) 微粉碎機下に火災検出器、内部に可燃性ガス検出器の設置を検討する。	（アンケート参考）着火源及び可燃物の早期発見による運転停止または延焼防止が可能になる。	可燃物抑制
		(2) 微粉碎機の後段にバイオマス燃料を一時的に貯蔵する方式を採用する場合、不活性ガス雰囲気とする方法を検討する。	微粉碎されたバイオマス燃料は引火し易いため、酸素を遮断する必要がある。	可燃物抑制
	微粉碎機設計	(1) 堆積防止板の取り付け角度を急こう配に変更することを検討する。	粉じんの堆積低減に効果がある。	可燃物抑制
		(2) 静電気防止のための接地の設置を検討する。	静電気の帯電を防ぐ。	着火源抑制
	減災	(1) 微粉碎機の点検等で長期間停止する場合はバンカを不活性ガスで酸素欠乏雰囲気とする、または全量排出して空にすることを徹底する。	（アンケート参考）	減災

表 6.2-2 爆発・火災事故防止に効果的と考えられる対策案についての提案（続き）

項目	効果的と考えられる対策案		補足（理由・目的・異常時の対応策）	効果
その他（共通）	減災	(1) 圧力逃がし口（ラプチャーディスク、ダンパ等）の設置やスプリンクラーやCO ₂ 消火等の自動消火設備の増設を検討する。	万一爆発が発生した時はエネルギーを強制的に放散させ、二次爆発の発生を防止する。	減災
	清掃	(1) 点検・清掃（吸引清掃）を徹底する。	頻度・方法については、設備条件や燃料種によって異なるため、発電所にてマニュアル化すること。	拡散抑制
		(2) 吸引、エアブロー、掃き取り等に関し、機器別の清掃マニュアルを整備する。	清掃マニュアルは都度改訂すること。	拡散抑制
		(3) 吸引ホースコネクタを配備したセントラル吸引清掃設備の設置を検討する。	清掃負荷と品質を向上する。	拡散抑制
		(4) 静電防止作業着や静電靴、セントラル吸引清掃機器の採用を検討する。	静電気の帯電を防ぐ。	減災
	教育	(1) 安全マニュアルを作成し、日々のパトロールを徹底する。	(アンケート参考)	減災
		(2) 事故防止の意識向上と無人災のため、教育訓練と火気等の管理および消火設備の定期作動テストの継続を規定した安全マニュアルを整備する。		減災
		(3) 設備運用、点検、清掃の運転マニュアル及び安全マニュアルを整備して、作業内容の統一を図る。また定期的な座学（危険物の取扱い含む）を行う。		減災
		(4) 所轄消防との共同訓練の実施を検討する。		減災
	燃料	(1) 使用するバイオマス燃料について、ISO等の規格に則り機械耐久性等の分析を行い、産地や木質の種類・状態毎に脆化、粉化し易さを整理し、設計のみならず運転、安全管理に反映する。		減災