

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



FutureMetrics LLC™

協贊

Creating our future with renewable energy.



Media Sponsor



日本バイオマス安全性セミナー

まずは基本から：
取扱いと貯蔵、理解による防止



Kayleigh Rayner Brown, MSc, P.Eng., Obex Risk Ltd. Fahimeh Yazdan Panah, PhD, PMP, P.Eng, WPAC

バイオマスの取り扱いハンドリング及び貯蔵上の配慮点

- 一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、場合によっては水素 (H₂)、そして酸素枯渇 – オフガス発生。
- 自己発熱や外部発火源。 例としてスパーク、摩擦、過熱等 → 燻り及び火災の発生。
- 可燃性の粉塵とガスの生成 – ガス爆発及び粉塵爆発の発生。

バイオマス貯蔵の安全性

- バイオマス貯蔵はバイオエネルギーサプライチェーンの根幹部分。これなしにはバイオエネルギーシステムに対する継続的な原料供給はない。
- 固体バイオ燃料の貯蔵所は、係員が必要な場合を除いては、人々の滞在も通行もない場所である。
- 固体バイオ燃料貯蔵施設への立ち入りは、設置や保守のような、加熱設備の運転に関連する理由でのみ行う。

貯蔵中は、生物学的、化学的、物理的な自然変化が進行し、以下が発生する。

- 乾燥 - 質量損失
- オフガス発生
- 自己発熱
- 可燃性ガス及爆発性粉塵



Dry-matter loss



Off-gassing



Self-heating

オフガス発生と酸素枯渇

- 凝縮性ガスと非凝縮性ガス： 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デヒドとケトンが発生することで知られている。これにはアセトン、メタノールに加え、ヘキサナールとペンタナールも含まれる。
- こうした生物学的及び化学的なプロセスは、酸素を消費し、貯蔵環境内で酸素枯渇が発生させる。
- 酸素濃度が低くなると、閉鎖された貯蔵空間に適切な換気が行われていないまま、係員が入った場合、窒息しかねない。



オフガス発生と酸素枯渇

- オフガス発生によるリスクは、サイロ、貯蔵バンカー、船倉など、閉鎖された貯蔵空間や貯蔵槽で大きい。
- 閉鎖空間では、CO の発生と酸素枯渇が基本的な懸念事項である。
- COの致死濃度は 1% (10,000 ppm) 近くで、閉鎖貯蔵空間で発生が記録されている。輸送中及び積み下ろし作業中の船舶で死亡事故が複数発生している。



一酸化炭素、二酸化炭素、メタン、酸素の危険濃度

化学物質名	閾値	
CO ₂	5,000 ppm で 8 時間	OSHA の認める職場における8時間での最大許容値
	30,000 ppm 以上 (短時間暴露)	頭痛、思考力喪失、めまい、眠気、動悸
	25 ppmで 8 時間	OSHA の認める職場における8時間での最大許容値
	200 ppm で 2-3 時間	軽い頭痛、倦怠感、吐き気、めまい
CO	400 ppmで 1-2 時間	激しい頭痛- 他の症状も悪化。3時間続くと命に支障あり。
	800 ppm で 45 分	めまい、吐き気、けいれん。2時間で意識不明に陥る。2-3 時間で死亡。
	1600 ppm で 20分	頭痛、めまい、吐き気。1 時間以内に死亡。
	3200 ppm で 5-10分	頭痛、めまい、吐き気。1 時間以内に死亡。
	6400 ppm で 1-2分	頭痛、めまい、吐き気。25-30分以内に死亡。
CH ₄	12800 ppm で 1分	死亡
	500,000 ppm- 8 時間	この濃度で酸素を置換すると窒息に至る可能性あり。CH ₄ の最大の危険性は爆発。CH ₄ は天然ガスの主成分である。空気よりも軽いため、発生しても換気によって排出されやすい。
O ₂	17%	呼吸が早く深くなる。思考力が損なわれる可能性もある。
	16%	酸素欠乏証の最初の兆候が現れる。
	< 6%	けいれん様の動き、呼吸困難が発生する。呼吸が停止するとまもなく心臓停止となる。

オフガス発生と酸素枯渇

揮発性有機化合物の注意点:

- ヘキサナールは皮膚と気道上部を刺激する。
- メタナールとエタナールは、多量であると発がん性の疑いあり。
- モノテルペンも目や呼吸器系に刺激を与える。

COの注意点:

- 単体では爆発リスクはないが、粉塵の自己発熱または高濃度の粉塵と組み合わせされると、相乗効果で発火事故や爆発事故につながる。
- 死亡事故のほとんどが一酸化炭素中毒によるもの。

オフガス発生と酸素枯渇

メタンの注意点:

- 毒性はあまり高くないが、非常に引火性が高く、空気と一緒に爆発性の高い混合気を生成する。
- 酸素枯渇により、メタン濃度の高い空気を呼吸すると、呼吸や脈拍が早くなる、運動機能の喪失、情緒不安定、吐き気、嘔吐、意識喪失、呼吸不全、死亡などの健康被害リスクが発生する。

CO₂の注意点

- 酸素枯渇のリスクが高まる。呼吸や脈拍が早くなる、運動機能の喪失、情緒不安定、吐き気、嘔吐、意識喪失、呼吸不全、死亡などの健康被害リスクが発生する。したがって換気を十分に行うことが必須である。

固体バイオ燃料貯蔵に関するISO規格

- 規格及び技術仕様書計6本が発行済みか策定中。
- ISO 20023 - 固体バイオ燃料－ 固体バイオ燃料ペレットの安全性－住宅用その他小規模用途における木質ペレットの安全な取扱及び保管
- ISO 20024 - 固体バイオ燃料－ 商用及び産業用途における木質ペレットの安全な取扱及び保管.
- ISO 20048 - 固体バイオ燃料－ オフガス発生と酸素枯渇の判定
(2 parts: Part 1-試験所における方法, Part 2-運用上における方法).
- ISO 20049 - 固体バイオ燃料－ 自己発熱の判定
(2 parts: Part 1- 等温熱量測定, Part 2-バスケット法加熱試験).

安全性に対する提言



- サイロにバルクとして保管中のペレットをガス検知システムを使用して監視するか、サイロ内のCO/CO₂濃度をガス濃度計で監視する。
測定はサイロ上部空間内と、できれば払出し口近くでも行う。
- 各種非常事態に対する計画策定においても、緊急対策実施中においても、有毒ガスへの暴露や酸素濃度の低い場所などの係員の傷害リスクに配慮する。
- 木質ペレット倉庫内の平常の作業が粉塵環境を発生させる可能性があり、ペレットからのオフガスと一緒にする場合について、健康上からも火災や爆発のリスクからも検討しておく必要がある。

自己発熱

- 分解したり空気によって酸化される可能性のある物質は、発熱して自然燃焼する可能性がある。
- 石炭 (ならびに木材チップ) のように、木質ペレットは、ばら積みしておくと自己発熱を引き起こす。
- 自己発熱で、バルク温度が上昇し、自然発火点に至ることがある。
- サイロ火災には、通常の火災とは異なる対策が必要である。



自己発熱

- 自己発熱と自然発火は、火災を引き起こし、大きな被害をもたらす。
- 正しい対応を行わないと、貯蔵所とプラントの両方に壊滅的な被害を与える可能性があり、最悪の場合は、人命にもかかわる。
- 自己発熱状況の抑制方法を知ることが肝要であり、サイロや山積み状態における火災には、通常の火災とは異なるアプローチが必要である。めったに発生しないが、発生すると大事故となることが多い。
- 消防・救急隊員はサイロ火災の経験があまりないことが多い。



可燃性粉塵： 木粉はどのようなときに爆発性になるか？

次の条件下：

- 乾燥 - 含水率25% 未満
- 微細なため空中浮遊 < 500 ミクロン
- 空気中に爆発性濃度で存在 - 立米当たり40グラム以上
- 閉鎖空間中

これに着火源と酸素があると爆発に至る。





可燃性粉塵



可燃性粉塵： 粉塵爆発とは何か？

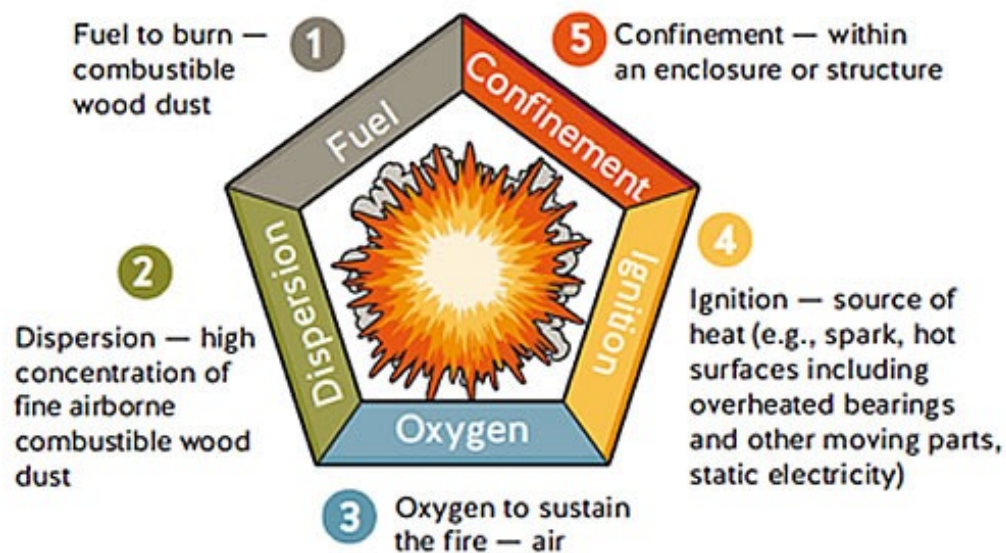
微細な可燃性粉塵が空中に浮遊しているところへ引火すると粉塵爆発が発生する。

引火すると、急速に燃焼が拡がり、可燃性ガスが放出され、瞬時に圧力が上昇して爆発に至る。



可燃性粉塵： 粉塵爆発の五角形

Dust explosion pentagon



If a high concentration of wood dust becomes airborne and contacts an ignition source in a contained area, an explosion will likely occur.

- 粉塵爆発が発生するには、これら5つの要素がそろっていないといけない。
- 閉鎖された空間で、燃料である粉塵が酸素中に拡散し、十分な濃度に達しているところで、着火源、すなわち熱に接触することで粉塵爆発は発生する。

Credit: WorkSafeBC

可燃性粉塵： 一次爆発と二次爆発

- 一次爆発は閉鎖空間で発生する。
- すると、垂木や高いところの天面に蓄積していた粉塵が舞い上がる。
- こうした粉塵が空中に浮遊すると、二次爆発と呼ばれるより大きな爆発の原因となる。

出典: OSHA Factsheet Hazard
Alert: Combustible Dust Explosions.
米国労働省

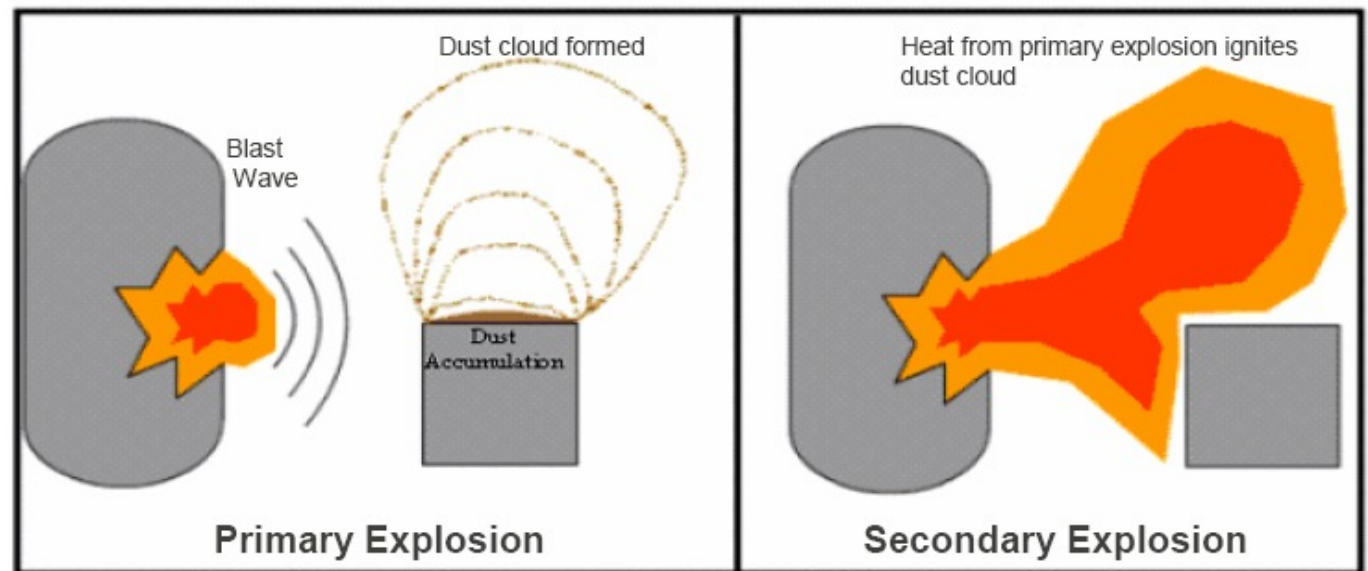
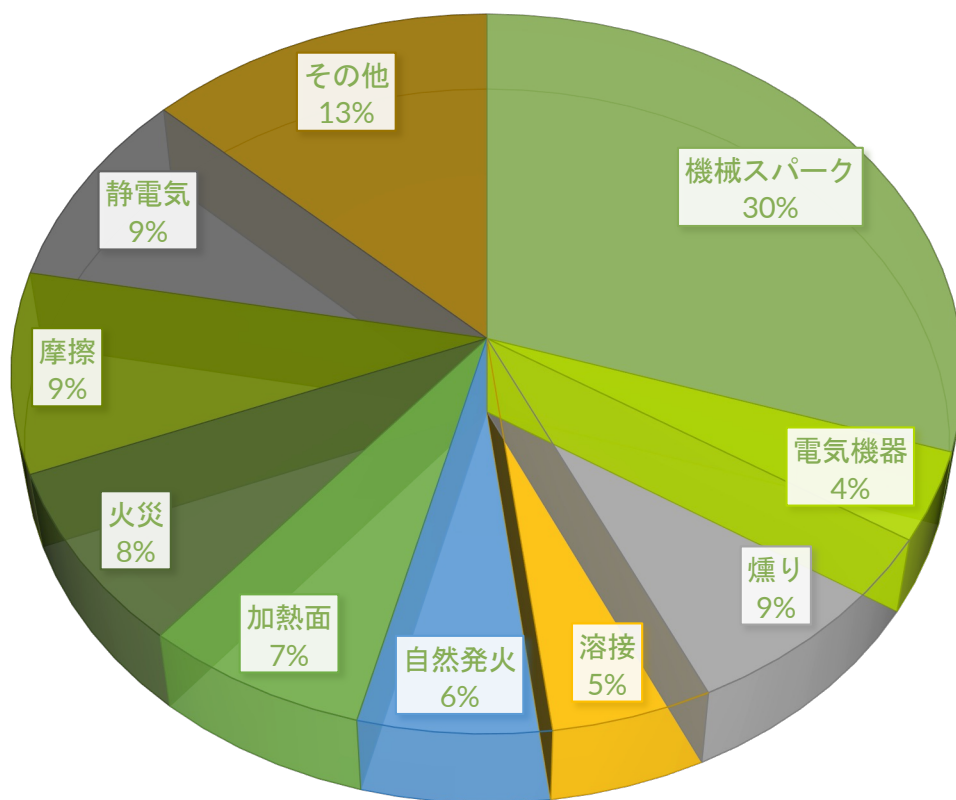


Figure 2

可燃性粉塵: 着火源



- 火災は爆発の原因の 8% にすぎない。
- 粉塵爆発の最大の原因は機械スパークで、30%となっている。
- これら原因の多くは、定期的な保守作業と火災安全手順を守ることで防止できる。

可燃性粉塵： 粉塵ハザード評価

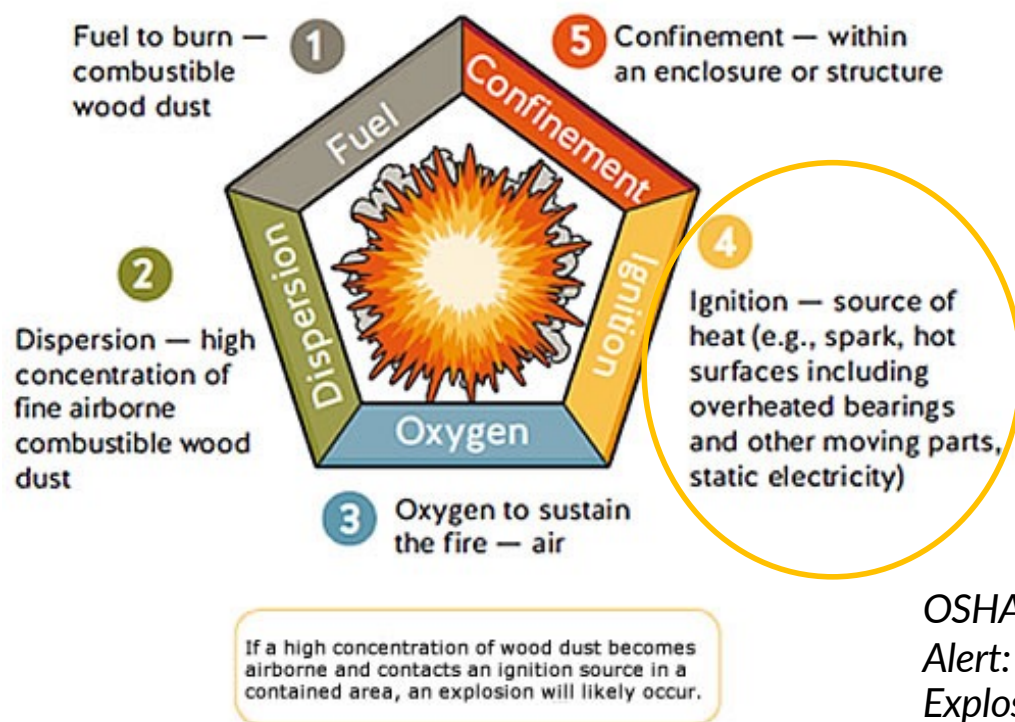
- 定期的にハザード及びリスク評価を実施する。
- 一般に検討すべき場所：原材料及び完成品保管場所、破砕機/ハンマーミル、コンベヤ、ホッパー、スクリーニング。
- あまり検討されない場所も検討する：
 - 集塵装置
 - 電気ボックス内
 - ベルトコンベヤの乗り継ぎ点
 - 平らな天面
 - 導管、パイプのラック、ケーブルトレイ、垂木、吊り天井の裏側

可燃性粉塵： 抑制方法

パッシブ	工学手法	清掃管理
- 粉塵発生の問題がある場所を同定し、その場所に粉塵を密閉しておくか、封じ込める方法を検討する。 - 例: カバー付きベルトコンベヤ	- 粉塵を除去する集塵システムが最善の方法。 - 噴霧器のような抑制装置は有効だが、寒冷気候では問題がある。 - 壁や天井にファンを取り付けるなど換気設備を設けると空気が流通し、問題となる粉塵を管理する一助となる。 - 粉塵抑制装置は、点検を行い、良好な運転状態にしておくこと。	- 目安:厚み 3 mm 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。 - 定期的に清掃を行う。 - 壁と梁に注意する。 - 掃除機を使う、水で洗淨する、箒、ブロワーを使うなど。 - 定期的に点検し、問題があればメモを取り、是正措置が取られることを確認する。

可燃性粉塵: 着火防止

Dust explosion pentagon



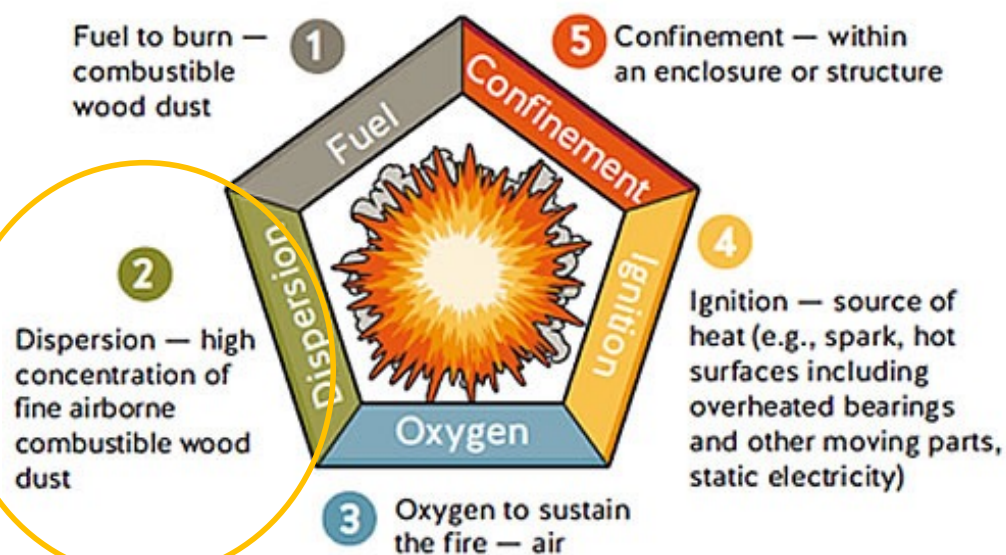
管理点

- 火気作業
- 予防的保守
- 機械由来のスパークや摩擦
- 電気機器
- 静電気
- 高温機器及び高温面
- 煙と炎

OSHA Fact Sheet, Hazard
Alert: Combustible Dust
Explosions

可燃性粉塵: 拡散管理

Dust explosion pentagon



If a high concentration of wood dust becomes airborne and contacts an ignition source in a contained area, an explosion will likely occur.

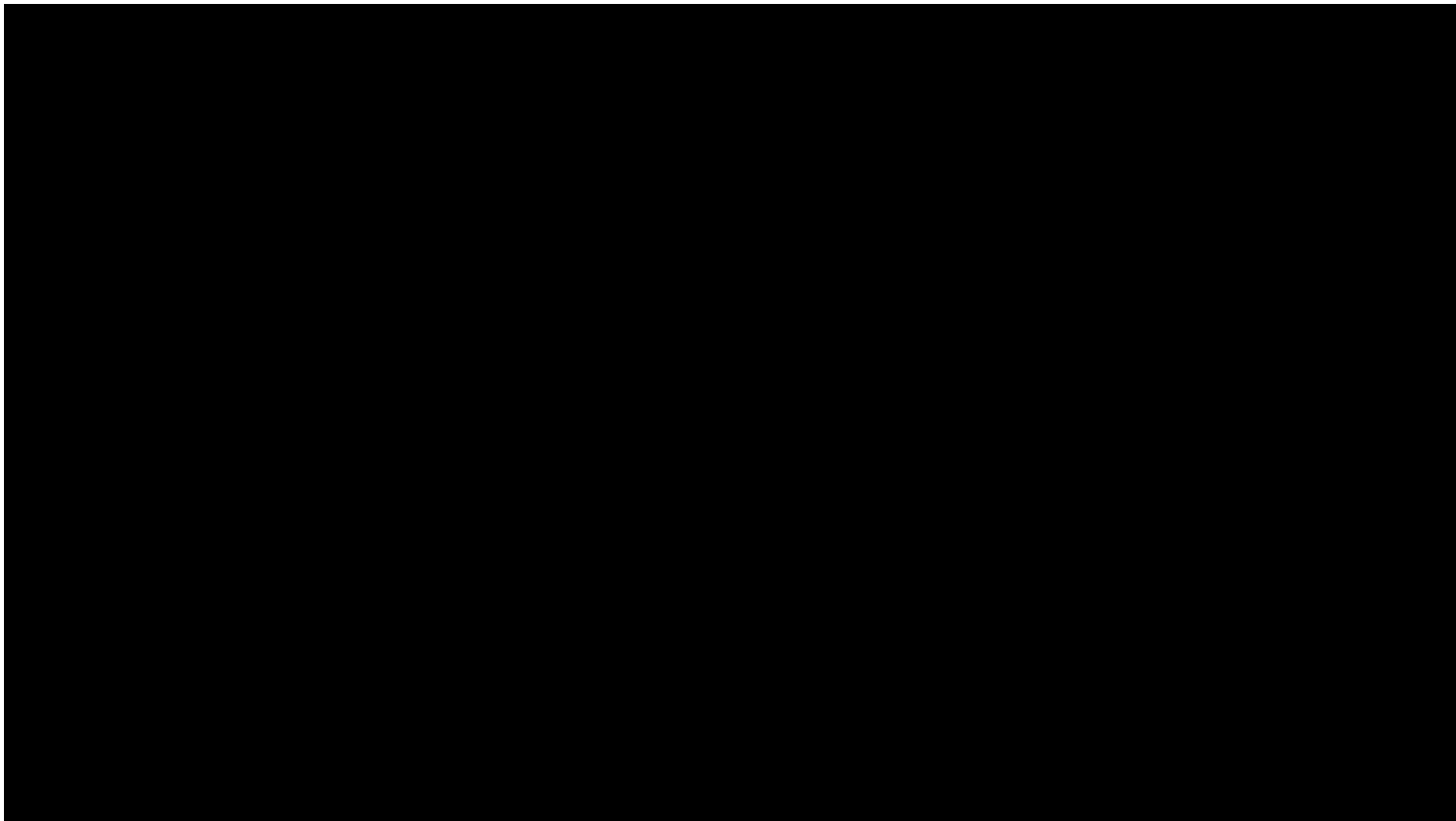
- 拡散機序を同定する
- 拡散した粉塵の特性を検討する
- 拡散を下げる方策を検討する
- 変化や変更があると新しいハザードが発生するかもしれないので、注意する。

OSHA Fact Sheet, Hazard Alert: Combustible Dust Explosions

可燃性粉塵: 緊急手順

- 緊急時の手順を文書化しておき、全職員の訓練を行っておく。
- 避難経路を設定し、表示しておくこと。
- 年に最低一度は非常訓練を実施して、記録しておくこと。

可燃性粉塵



可燃性ガスとは何だろう？

- 可燃性ガスは主として一酸化炭素、水素、メタン、あるいは天然ガスから構成されている。プロセス機器内の不完全燃焼で発生する。
- 貯蔵中の木質ペレットも可燃性ガス放出の可能性がある、特に自己発熱中に可燃性ガスを発生しやすい。
- 高温乾燥中は、揮発性有機化合物（VOC）と共に一酸化炭素、水素、メタンなどのガスが発生する。
- 燃焼と爆発が始まるには、常に空気中に酸素の存在がなければならない。
- 結果として発生するガスは引火性があり、高濃度では爆発性となりうる。
- 換気によって外気へ放出されない場合や換気装置が(停電などで)動作していない場合、ガス濃度が高くなる可能性がある。

可燃性ガスとは何だろう？

現実には発生したサイロの爆発である。燻りを消そうとするうちに、静電気の放電があり、そのためにサイロ上部空間のガスに着火して発生したものであろう。

写真提供: ノルウェー、Dag Botnen,
Hallingdal brann- og redningstenste iks,



可燃性ガス： 最大のリスクはどこに？

- 乾燥装置が火災や爆発の最大の危険性。
- 予期せず突然発生する停電または電力サージ。
- 稼働停止プロセス中に予定されている保守期間。
- サイクロンの詰まり、搬入口エアロックの動作不良、コントロールダンパの不良などのドライヤーの部品故障。
- 散水ノズルの目詰まりやノズルの欠損などの機器の不良、消火ノズルのソレノイド弁の不良。
- プラント内の他の場所で問題が発生したのが原因で、乾燥設備が保護機器には対応しきれないスピードで急停止する場合のような、不用意な運転。



可燃性ガス：リスクの軽減

- 完全なリスク評価を実施して、可燃性ガスが最も発生するのがいつか、最も蓄積しそうなところがどこかを把握する。
- 警報管理システムを利用して、火災と爆発のリスクを軽減する。
- 乾燥設備または燃焼設備内に監視システムを設置する。
- 非常用電源を設置しておく。
- ダクトをクリーンに保ち、換気装置が効果的に機能しているようにする。



バイオマス (ペレット、チップ、PKS)の自己発熱

- バイオマス（木質ペレット、木材チップ、PKS）の自己発熱の傾向。
- バイオマスの自己発熱性に影響する特性。
- サイロ内におけるバイオマスの自然燃焼と火炎の拡がり。
- サイロ火災のシナリオ (火災の疑いと確認された火災)。

自己発熱: 原因と検知

自己発熱の原因の可能性:

- 生物学的代謝反応（細菌繁殖）発熱
化学反応（酸化反応）。
- 発熱性理学プロセス（例:水分吸収）
で、バイオ燃料の乾燥状態、湿潤状態の両方で発生する可能性。
- 積み上げたパイルやサイロが大きく、
発生した熱が消散しにくいと問題となる可能性がある。



自己発熱と熱暴走: 原因と検知

熱暴走
燻り燃烧

吸水性発熱

化学反応

酸化反応
熱分解
水分解

生物学的劣化

代謝及び生物学的酸化

自己発熱の影響要因

- バルク内の酸素濃度
- バルクの濡れ
- 相対湿度

主要素:

- ペレット温度及び含水率
- パイル中の熱伝導と熱対流
- 物理様態 (ペレット破片と微粉)

自己発熱と熱暴走: 原因と検知

- 50°Cを超えると、化学的分解の方が生物学的分解より大きくなる。
- 濡れたバイオマスは、温度が次第に上昇し100度で安定し、水分が抜けバイオマスが乾燥するまで続く。乾燥すると、温度は急激に上昇する可能性がある。特に空気が流通しない密閉されたサイロや保管槽（ビン）では上昇する可能性がある。
- 温度は上昇を続け、ついにはバイオマス内部で熱分解（自然発火）が発生する温度になることがある。190°Cになると発熱性酸化反応による熱暴走が始まる。
- 熱分解がパイル表面や酸素濃度の高い部分に広がると、炎を出して燃え始める。サイロ内で自己発熱からバイオマス燃焼につながって重大な事故にいたった事例がいくつか存在する。パイルやサイロ内で発火が発生すると、消火は難しく、何日も何週間も燻り続ける。

自己発熱と熱暴走: 原因と検知

自己発熱は、最終的に自然発火に至りうるプロセスの第一歩と見ることができる。次のような段階を踏むと説明できる。

1. **自己発熱:** 当該バイオ燃料内の発熱反応により温度が上昇
2. **熱暴走:** 自己発熱が進み急激に高温に至る
3. **自然発火:** 熱暴走により目視で分かる煙りや炎が発生



SELF HEATING: CAUSES AND DETECTION

- 最も重要な予防措置は、バルク内何か所か異なる場所で貯蔵物の温度を監視することである。
- バルクの動きを検知するために、ペレット上面の上の空中 CO濃度を測定することが望ましい。
- 自己発熱が続いている場合の最初の兆候は、いやなきなくさい臭いであることが多い。
- そういう臭いがしたときは、バルク内で 熱分解が既に始まっているので、消火作業を開始しなければならない。



自己発熱とサイロ火災



木材チップの入ったサイロ内の火災;
Lancaster, PA, 2015
年12月; Lancaster
Online.

自己発熱に係るパラメータ

- バイオマスの自己発熱性は、多数の要因が係わっており、バイオマス自体の特性（本質的要素）と環境/貯蔵条件（外部要素）の大きく2つに分けることができる。
- これらには、木質ペレットの含水率、貯蔵場所の湿度、水分への暴露状態、ペレットの古さ、貯蔵温度などがある。
- パイルが様々なロット（荷口）を含むものであると、粒度も含水率も異なるバイオマスが混在し、パイル内の空気の流通が一様にならないためにホットスポットが発生し、局所的な発火に至るため、自己発熱と発火のリスクが大きくなる。
- 自己発熱はまた、バイオマスの化学的構成でも影響を受ける。リグニンと脂肪酸の含有量の多いバイオマスは自己発熱の傾向が強い。

自然発火か外部着火源か？

- 温度上昇は自己発熱が原因の場合も、スパーク、摩擦、過熱、サイロに投入時に燻っているものが混じっていたなどの外部の着火源が原因の場合もありうる。
- 自己発熱は、バイオマスの化学的な成分構成にも影響を受け、リグニンと脂肪酸の含有量の多いバイオマスは自己発熱の傾向が強い。

バイオマス着火の防止

- マテリアルハンドリング設備の機械的一体性
- 火気作業
- 変更管理 (MOC)
- 爆燃の隔離
- サイロ監視
- 本質的安全設計 (ISD).

マテリアルハンドリング設備の構造一体性

- マテリアルハンドリング設備には、ドラッグチェーンコンベア、バケットエレベータ、回転バルブ、ベアリング、ファンなどがある。
- 事故 (火災や爆発を含む) は、マテリアルハンドリングの部品に不良、故障、誤作動などがあると発生する可能性がある。
- マテリアルハンドリング中に金属や異物が混入すると（搬入物の汚染または機器不良）、着火源が発生するリスクとなりうる。
- 動作状況を観察し、問題点をあらかじめ検知するための重要な手法には、振動分析、温度監視、目視監視、予防的保守を制度化することがある。
- 振動分析は、オンラインで設定してリアルタイムで実施すること、訓練された係員による定期点検で実施することも可能である。
- 自動停止を開始する振動スイッチを備えている機器も存在する。

マテリアルハンドリング機材の構造一体性

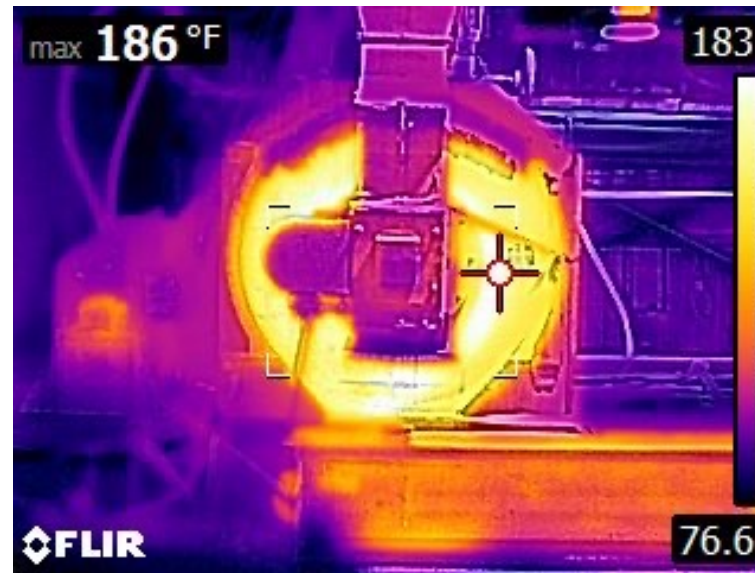
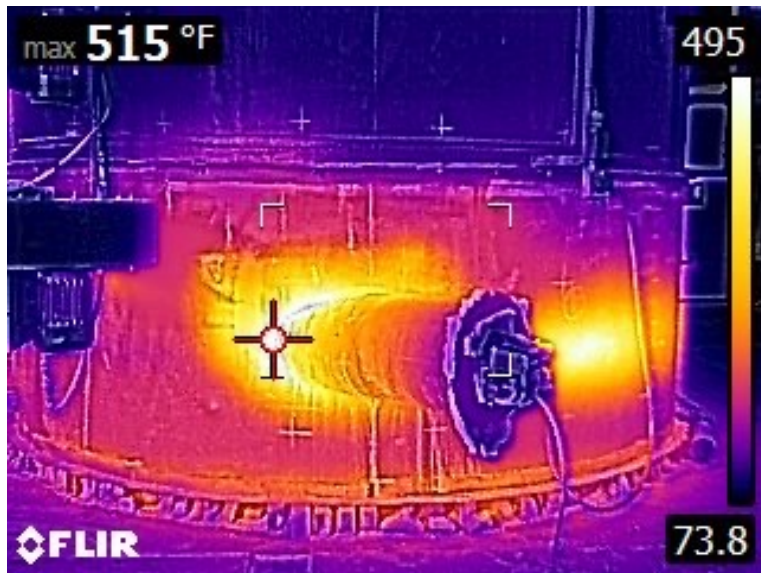
- 温度監視は、オンラインシステムでリアルタイムでも、訓練された係員による定期点検でも実施できる。



熱画像カメラ写真
(Shaw Renewables
提供)

マテリアルハンドリング機材の構造一体性

- 赤外線ビデオカメラ(IR) も、目視カメラと共に利用できる。



熱画像カメラ写真
(Shaw Renewables
提供)

マテリアルハンドリング機材の構造一体性

- 全設備に対する予防的保守計画を正式に文書化することが望ましい。
- 予防的保守の一部として、運用係員がシフト中に目視で観察することができる。
- 予防的保守計画には、定期的な清掃、油圧ライン、ベルト、ファンモーター、燃料とオイルのレベル、消火設備、ベアリング、センサーの点検と交換を含めることが望ましい。

火気作業

- 火気作業は、火炎の暴露、熱やスパークを発生する一時的な作業をいう。溶接、ロウ付け、切削、研削、その他加工や機材でスパークを発生するものを含める。
- 火気作業手順は、制度化して文書化するのが望ましい。以下等の作業を含める。
 - 火気作業がせずに済むものかどうか検討する。
 - 火気作業を完了するときには、プロセスを停止する。
 - その場所を清掃し可燃物を除去しておく。
 - 「スパーク監視係」の人間を指定する（火気作業中の安全性を確保する担当者）
 - 消火器と消火用ブランケット（耐火性）を傍に用意しておく。

変更管理 (MOC)

- 変更管理 (MOC)は、設計、機器、手順、組織体制の変更や手直しに関連するリスクを管理するプログラムである。
- MOCプロセスには以下を含めるべきである (NFPA 664, 2020):
 - 貯蔵物の配置と高さ、プロセス機器、材料、生産スピードなど、場所の使用の状況変更とプロセス変更
 - 防火設備及び警報システムに対する小さな変更も含めた変更 (給水、自動スプリンクラー、警報装置を含む)。
 - 暴露状況の変化 (野積み、直近の施設の変化など)。
 - 係員の変更
 - インフラ新規建設や既存インフラの変更

爆燃隔離

- 爆燃（爆発）の圧力と炎は、当該プロセスから相互連結している設備に拡がりうる。(NFPA 652, 2019)
- 爆燃隔離は、パイプやダクトでつながっている設備の間の圧力と炎を遮断するか、中断するもの。(NFPA 69, 2019)
- 爆燃隔離方法には以下がある。
 - フラップ弁
 - 化学的隔離
 - 機械的な弁
- 隔離手段の一般的な設置場所は、ハンマーミル、集塵機、バケットエレベータ、ドラッグチェーンコンベヤ、サイクロン。



化学的な隔離装置の例。提供 Fike (許可を得て使用)

本質的安全設計 (ISD)

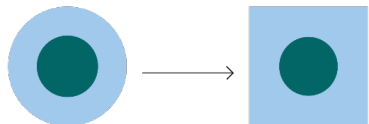
- ISD は、機器や手順を追加して対応するのではなく、ハザードを除去すること、ハザードをその発生源で処理することを中心とする。最も好ましく、効果的なリスク軽減方法である。
- ISDをどう思いますか？ 4つのキーワードと基本則をご覧ください。

最小化



もう使用していないハザードとなりうる機器を撤去

緩和



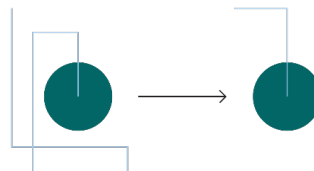
ハザードとなりうる機器を作業員から離れた場所に移転

代替



当該用途に対してよりしっかりした建設材料や機材に置き換える

単純化

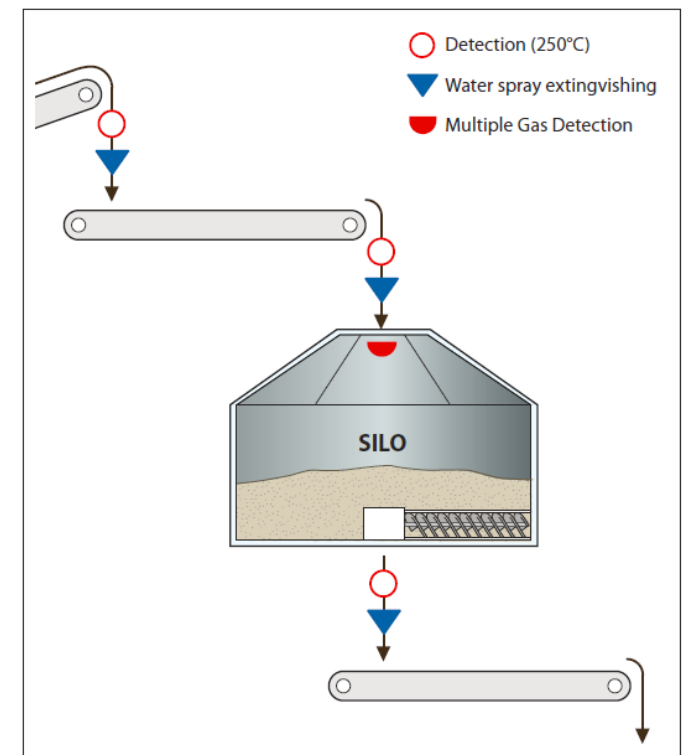


プロセス設備と手順を、エラーが発生しにくく追加的な安全手段を使いすぎないものとして設計する

Credit: Obex Risk Ltd. (2023)

サイロ監視体制

- サイロ監視体制を構成する防止システムは、サイロ内の燻りを早期に警告してくれる。これには以下などがある。
 - コンベヤ設備についてサイロの前後にIR検知装置を設置
 - サイロ上部空間にガス検知器
 - バルク材料の内部に温度センサー（複数）
- サイロの設計も再検討するのが望ましい。
(例：気密性、換気装置、非常時用排出、防爆)



Credit: Henry Perrson (2019)

有難うございました!

Kayleigh Rayner Brown, MAsC, P.Eng.

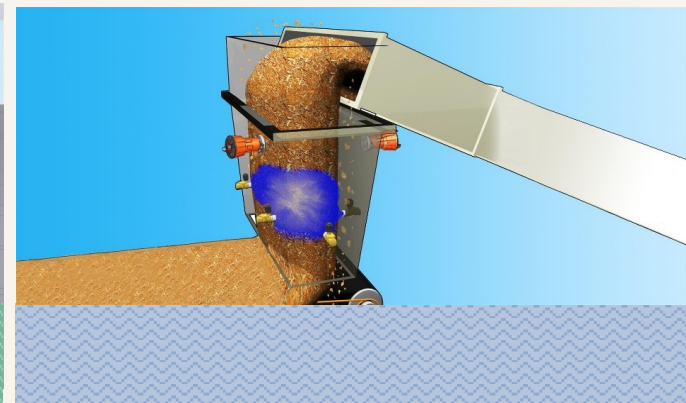
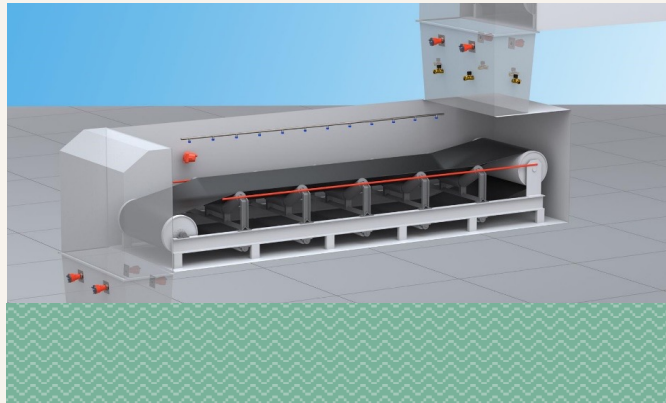
kayleigh@obextrisk.com





Short Introduction to Firefly

Anders Bergström, Firefly AB





FIREFLY – SHORT INTRODUCTION

- Firefly AB – a Swedish company founded in 1973
- Designing and manufacturing high-tech fire protection systems for the process industry
- We conduct risk assessments and consulting assignments
- Head office in Stockholm, subsidiaries in Poland and Italy and agents/distributors worldwide
- Service centers located in all continents of the world
- We are active in over 80 countries

FIREFLY'S INVOLVEMENT IN STANDARDIZATION GROUPS

We are involved in many different standardization groups.

Some examples:

- CEN/TC 142/WG 10 Chip and dust extraction systems
- ISO/TC 199/WG Safety of Machinery Fire prevention and protection
- ISO/TC 300/WG 6 Safety of solid recovered fuels (ISO 21912)
- ISO/TC 238/WG 7 Safety of solid biofuels (ISO 20024)



FIREFLY'S INVOLVEMENT IN PELLET SILO TESTS IN SWEDEN

Firefly have been involved in two Silo tests with SP (Swedish National Testing and Research Institute) and Henry Persson

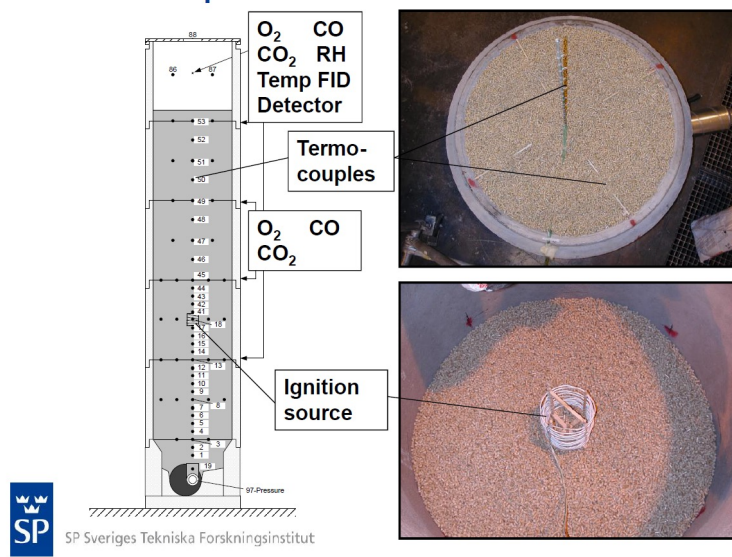
2006 – Four Silo Fire Experiments

- A series of four Intermediate scale silo tests were conducted
- Purpose to provide guidelines regarding fire fighting of silo fires
- Possible detection methods were studied in the experiment

2013 - Large-scale silo storage test

- Performed within European project SafePellets.
- Silo capacity: 3000 ton Wood Pellets
- The main purpose to monitor possible self-heating and off-gassing
- Also to evaluate this data with various gas/fire detection systems.

Test set-up and instrumentation inside the silo





PREVENTIVE PROTECTION SYSTEMS FROM

firefly ab
SWEDEN

Anders Bergström
General Manager – Industrial Applications
Firefly AB

anders.bergstrom@firefly.se
+46-(0)70-229 38 84

Jonas Persson
Area Sales Manager - Japan
Firefly AB

Jonas.persson@firefly.se
+46 (0)73 086 24 18

CHANGING THE WORLD OF INDUSTRIAL FIRE PROTECTION

日本バイオマス安全ワークショップ

火災発生時における鎮火のための 効果的アプローチ



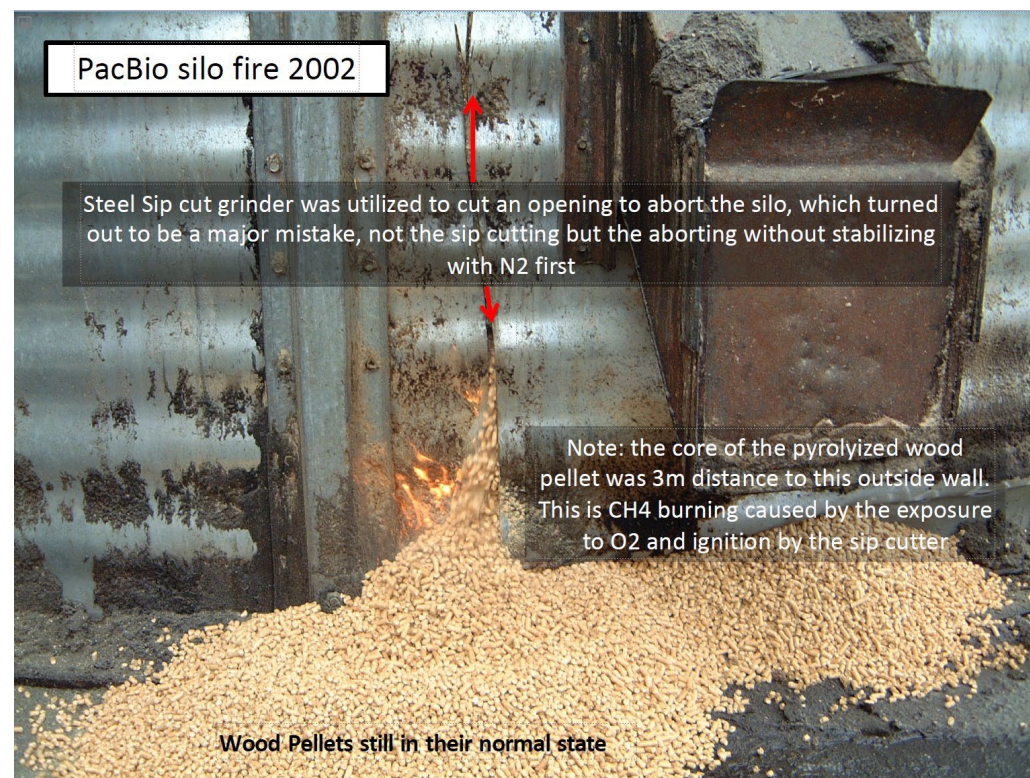
ジョン・スワーン
FutureMetrics

サイロ消火活動手法と手順

「経験」 - 正しい方法 と 誤った方法

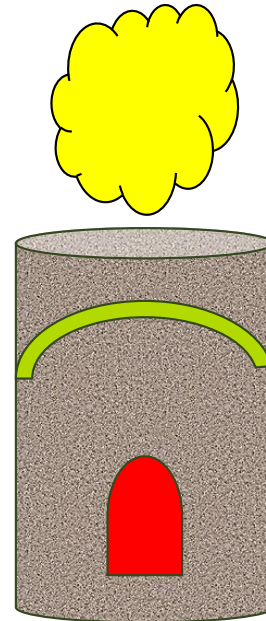
- 黄色～灰色の煙がサイロの換気口から出て、生産建屋に入った。
- サイロ内の通常火災と想定して、サイロの払い出しを開始した。
- 写真にあるように、SIP製グラインダーの切削による火花が、サイロ内で燻っていたペレットの塊から発生したCH₄に着火。
- 換気口を閉じる試みは行われず、爆発がサイロの上部を吹き飛ばすまで、ペレットの払い出しを続けた。

火災の原因: 外部の高温物質



一体何が爆発を引き起こしたのか???

- ペレットが燃ると、熱分解で CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2 ガスを発生させる。
- サイロ内の木質ペレットの高さが燃っているペレットの高さまで下がったこと（払い出し）により、 O_2 が燃っているペレットと接触し、 CH_4 が放出され、着火とその後の爆発を引き起こした。
- 燃っているペレットが互いにくっつき、塊になって、サイロの払い出しの際にブリッジを形成し、閉塞を引き起こした。



「経験」 - 正しい方法 と 誤った方法

2002年のサイロ火災から学んだ教訓:

- スエーデンのSP Technical Instituteが実験を行い、Henry Perssonが、木質ペレットのサイロ火災に対する正しい対処方法に関する「サイロ火災」と題する報告書を作成。
- 木質ペレットのサイロ火災事故対処の最良の方法は、払い出し前に N_2 を注入して燻るペレットの熱分解を安定させること。これが安全にサイロの払い出しをするために最も効果的で、人に対する危険とサイロや周囲の施設に対する損害を最小限にとどめることが判明。
- N_2 注入量及び注入率も計算し、検証。
- O_2 を制限し、 N_2 をサイロの上部空間に注入することが良い結果をもたらすことがわかった。ただし、サイロ頂部から N_2 が失われ火災が発生する可能性を緩和するため、中～高密度の泡噴霧装置を使用することが選択肢として特定された。



PacBio サイロ火災
2017年

火災の原因は自己発熱とみられる。

サイロ火災対応計画

注入システムが設置されていないサイロにN₂を注入するための方法

- N₂供給業者に連絡する
- 移動型N₂噴霧器を持ってくる
- 注入ランスを作り、サイロの（底部の）側面部に設置する
- N₂ 配給マニホールドをセットアップし接続する
- N₂の必要供給率及び必要供給量を計算する
- サイロの頂部に泡噴霧を散布する試みが行われた
- ガス漏れを防ぐため、可能であれば、サイロの換気口を閉じる
- サイロの払い出しを安全に開始できる時期を判断するために、ガス (CO、O₂) モニター装置を使って、ガス濃度を監視する(O₂ は10%以下)



船上火災事故

- バンクーバー港のネプチューンターミナルで積み込んだ船舶
- 24時間後、船が別の港に寄港した際に、タールのような液体がハッチカバーの下の換気筒から漏れているのに気づく。
- 火災の原因: ハッチ灯のカバーの破損により、粉塵がハッチ灯のエレメントの周囲に堆積し、積み込みから数時間後、他の商品を他のハッチに積み込もうと当該ハッチ灯を誤って点燈した際に粉塵に着火。ハッチ灯の下の特レットの熱分解が始まった。
- 数名の船員が一酸化炭素中毒により病院に航空搬送された。
- 船の換気システムが木質ペレットを入れた船倉から隔離されていなかったのに、近隣の船倉に入ったため。
- 払い出しの際、直径約1m、深さ約3mの熱分解された円筒形の物質（既に不活性）がハッチ灯の下から掘り出された。残りの貨物はベルギーの発電所で使用された。



商船 Herdla - 2005

火災の原因
破損したハッチ
灯が誤って点燈
された

鎮火のための効果的アプローチ

長距離走の準備をすること 行動計画を策定すること

窒素を使ってサイロを不活性化することが、サイロの払い出し（搬出）の前に木質ペレットの燻り火を鎮火する最良の解決策であることが証明されている。

- 液体窒素は二酸化炭素より噴霧しやすく、より入手しやすく、より経済的
- 注入中の静電気のリスクなし

警告: 使用不可

- 水は気相に移行することで爆発性 H_2 を生成する可能性があるため、サイロ内での水の使用は不可。ホッパー型サイロの場合、サイロの外壁を伝って水が落ちてサホッパー部分に入ると、ペレットが膨張し、払い出しが非常に難しくなる。サイロのヘッドスペースへの泡噴霧、又は N_2 の注入のみ可！
- CO_2 は、大量の CO 及び H_2 の生成につながる可能性があるので使用不可

Henry Perssonの「サイロ火災」報告書及びEnplus Safety Module 12を勉強することを強く推奨

「消防隊員・救急隊員にとって最も困難なシナリオは、
近づくことが極めて困難な、深いところで燻る火災である」

サイロ火災発生時 窒素注入のためのサイロの準備

- 全ての換気システムを停止し、サイロの頂部、底部のすべての換気ハッチを閉鎖する（可能であれば密封する）（サイロの上に登っての作業の場合は注意すること）。圧力逃がしのみ、あるいはゴムシートを使う。
- 窒素供給業者、移動型気化器、ホースを含むガス配給マニホルドシステムの手配をする。

サイロ火災発生時 窒素注入のためのサイロの準備

N₂ 注入ノズル及び/又はランスがサイロの床もしくはホッパーの底部、そしてサイロの上部空間に既に設置されていない場合は以下とする。

- ランスを作る: 穴の開いたランス(パイプ) 4本。サイロの1/4周毎に1本のランス。サイロの半径の半分に到達することができる長さとする。ランスの太さは20mm～24mm径で、サイロの半径と望ましい窒素量に基づき、長さ1～2mの部分に25mm間隔で3～4mmの穴を開ける。
- 注入用ランスをサイロに挿入する準備をする。ランス挿入用の穴を開ける際や切削する際に火花が発生しないように、同時に O₂ の流入を最小限に抑えるように注意すること。
- 可搬式機器やドリルドライバーを使ってランスをサイロに挿入する。挿入したら（穴の開いた部分がサイロの外に出ていないようにすること）、密封し、ランスを接地する。
- 安全に問題がない場合は、ランスか中空のパイプをサイロの上部空間に設置する。
- N₂ ではなく、中～高密度の泡を上部空間に注入することも可能であるが、その場合はサイロの上部に泡ステーションが必要。
- マニホールドのホースを接続し、N₂ の注入を開始する。

窒素供給率・供給量－計算

- サイロの容積を計算する。
- 窒素の流量は 5kg/m^2 以上とする。初期消火中は 10kg/m^2 が望ましいが、実際の流量は、ペレットの空隙率による。
- ガス供給業者の技術支援チームに相談すること（ガスの専門家を通常配置している。またはガス供給業者に相談すること）。
- ヘッドスペースへの窒素注入（可能な場合）の流量は、漏れを避けるため、底部への注入よりは低く $1\sim 3\text{kg/m}^2$ である。
- 必要とされる窒素の総量及び消費される窒素の総量は、（換気システムとハッチの）漏れによるが、サイロ火災の実経験に基づくガイドラインによると、ガスの総消費量は、サイロの総容積に対し $5 - 15\text{kg/m}^3$ と考えられる。

ガスの観察測定によってサイロから安全な払い出し

- ガスモニターがない場合や損傷を受けている場合、ライン（サイロ頂部）とガスポンプを安全な位置に設置して、CO及びO₂のガス濃度を監視しなければならない。
- N₂の注入を始める前に、N₂濃度の判断の参考として、これらのガス濃度を測定すること。
- 主としてCO濃度の低下は、火災の強度が弱まってきた兆候である。
- CO濃度1% 未満、酸素濃度約5%未満の比較的低レベルにガス濃度が安定したら、N₂の流量を1 kg/m²にまで減らすことができる。

警告: 発熱性火災が安定
するまで、サイロからの
搬出を試みないこと

サイロ・倉庫からの安全な搬出

火災が安定して搬出できるようになるまでには数日、サイロの大きさと N_2 漏れの程度によっては、それ以上かかる。

- サイロや倉庫からの払い出し計画を策定すること。直火や酸化ガス発生の可能性を管理でき、人やその他インフラストラクチャに対して危険の及ばない、安全な場所を選ぶこと。
- ブリッジ化した物質が落下してサイロ内の不活性ガス安定濃度を攪乱させる可能性があるので、搬出作業中、ガス濃度を監視すること。
- 酸化進行中の物質は出火する可能性があるので、払出搬出用マテハン機材の温度及び火災を監視すること。
- ハンドリングシステムや搬出した物質を安全な場所で散水・鎮火できるよう準備をしておくこと。
- 搬出場所の雰囲気監視すること。搬出場所の作業員、消防隊員はSCBA/SABA (呼吸装置)の着用が義務付けられている。
- 火災事故の熱分解（燻り）によって形成された塊は、ブリッジ化し、材料払い出しの流れを遮断する可能性がある。これは手作業で除去する必要がある。

サイロ火災防止- 方法と実践

ペレットの品質に関する理解

工程温度 (乾燥中・冷却中)、含水率、微粉

- 木質ペレット製造工程温度 – 自己発熱に影響を及ぼす
 - 高温の乾燥温度は表面硬化を引き起こし、繊維粒子中に水分を封じ込める。
 - ペレット冷却 – 短い滞留時間で大量の空気流量による水分抽出は表面硬化を引き起こし、ペレット中に水分を封じ込め、ペレットの酸化が始まると過度の一酸化炭素を発生させる。
 - 含水率が高い場合やばらつきがあると、自己発熱を加速する。
 - 過度の微粉は、ペレットがサイロ・倉庫内でカスケード（自重落下）するときに層を形成する。この微粉層は、木質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。
- 供給業者が木質ペレットの製造工程をどの程度把握しているかが、供給業者選定時の重要な基準の1つである。

サイロ及び倉庫の保護

サイロの新規建設又はレトロフィットの際に窒素注入システムやパージシステムを設置することが、最も効果的なサイロ火災防止方法である。

サイロ

- N₂注入システムの設置 – サイロホッパーの底部又は平底部にノズルを設置
- 通常の運用状態においてノズルが邪魔にならないように又は損傷を受けないように、ノズルを設置すること
- 地域の鎮火システム会社・エンジニアに相談のこと（エンジニアが木質ペレット火災事故対策に精通していることを確認すること）
- 地域の当局・消防署がスプリンクラーの設置を主張するなら、サイロの頂部に泡噴霧ステーションを設置すること。ただし、N₂の利点について啓蒙を試みること

倉庫

- 火災事故の際にランスを挿入できる挿入口を倉庫の外側に沿って設置することが望ましい（サーマルカメラを使用して燻っているホットスポットを検知し、より適切にランスを挿入するのもよい）。
- 泡噴霧システムは、ある程度密封性を出して、N₂の損失を最小限に抑える、良い解決方法である。

サイロ・倉庫の温度及びガスの監視

- 複数の温度ケーブルを設置して複数の高さで温度を読み取っても、自己発熱の発生場所を正確に特定するのに十分な読み取り値が必ずしも得られるわけではない。しかし、通常、自己発熱が発生しているという兆候を得ることはできる。
- 通常、一酸化炭素及び湿度の上昇が自己発熱の最初の兆候であるため、高品質のガスと湿度のモニター装置が不可欠である。
- 外部の高温物質（故障したベアリング、ゴムベルト等）から保護するためには、ホットスポット検出装置をマテハン機械の材料搬入部に設置し、疑わしい材料を拒否する必要がある(Firefly - GreCon)。

貯蔵ペレットの回転

木質ペレットを1か月以上貯蔵すべきか？

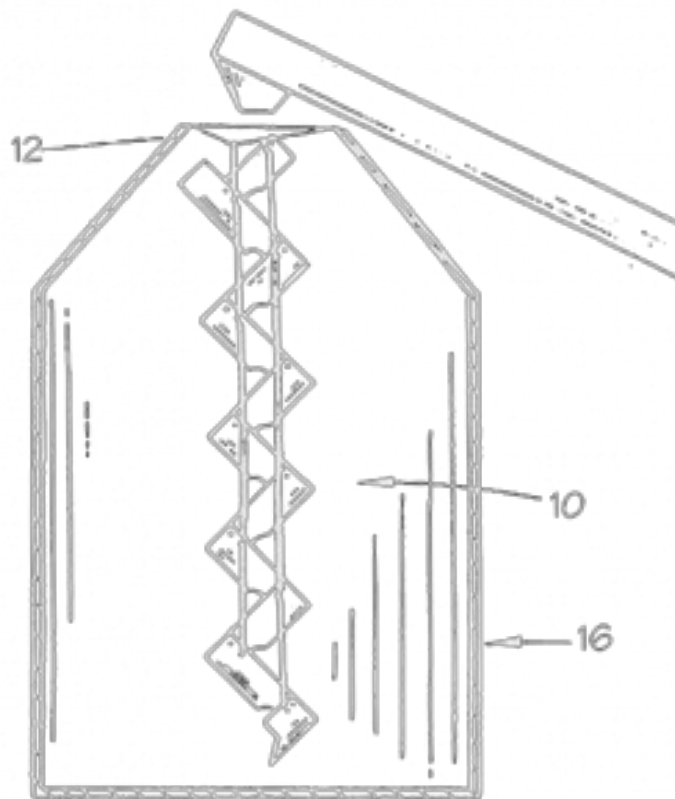
- 木質ペレットがサイロや倉庫に2年以上安全に貯蔵された実績はある。ただし、正しく製造され、樹脂（脂肪酸）含有量の低い樹種で、微粉量は非常に少なく、十分換気された貯蔵施設で貯蔵されていた（更なる研究が必要）。
- （もし可能であれば）最低1か月に一度、貯蔵されている混合木質ペレットを回転させることを推奨する。
- ガス濃度が疑わしいレベルに上昇し始めたら、既に自己発熱が熾火燻り段階にまで進んでいる可能性があるので、回転させるのではなく、 N_2 注入が必要である。

微粉の削減 – 優しい取り扱いハンドリング

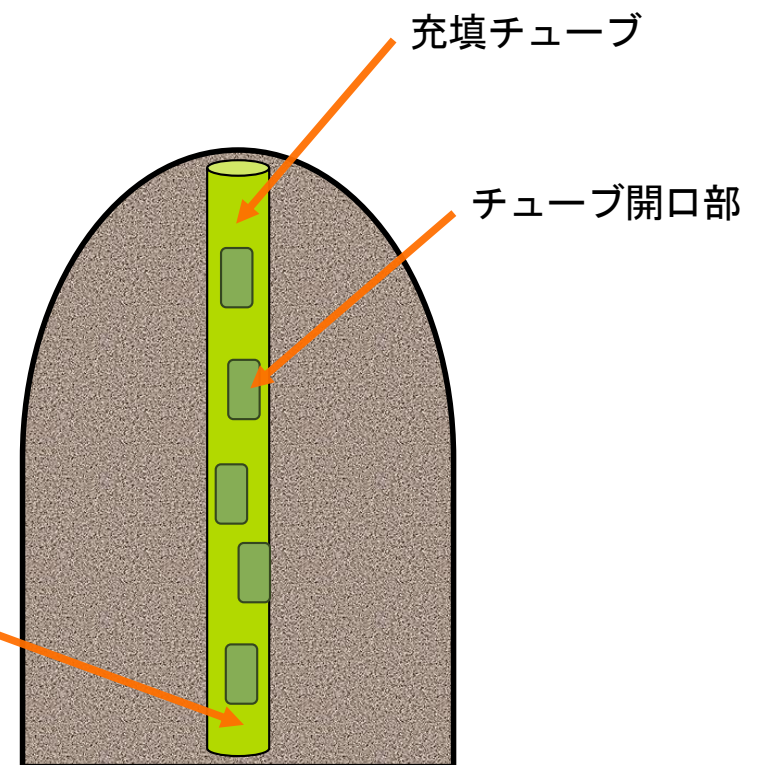
サイロ・倉庫内の微粉の分散を低減することにより、自己発熱を防止

- サイロ・倉庫にペレットを入れる際に、微粉が分散してペレットの上に層状に積み重なると、ペレットの空隙率が減少し、酸化熱と水分を放出するための換気能力が低下し、自己発熱が加速する。
- 優しくハンドリングを行う機器であれば、ペレットの自由落下を低減し、微粉をサイロ内のペレットの山の中心に封じ込め、自己発熱を低減するという、よい結果をもたらした。
- 倉庫にスライドシステムを設置して、ペレットが自由落下するのではなく、スライドの上を滑り落ちるようにすることができる。
- 倉庫で使えるもう一つの方法は、ペレットの山の近くに落ちるようにガイドする方法である。

優しいハンドリングの例 (BEAN LADDERS)



微粉はチューブ
内に集まる、又
はチューブに近
いところに分散



Peebles Industries 社 - ドーム技術サイロ設備

防止策・準備対応策

サイロ保護システム・手順

サイロ消火手順 - 事故対応テンプレート

- ・サイロ火災現場ハンドブックを作成すること (FMテンプレート参照 - リンク → [ここ](#))

サイロ保護システム - レビュー

- ・ガスモニター装置、温度センサー、湿度センサー
- ・ホットスポット検知装置 - 木質ペレット材料ハンドリング機材
- ・窒素注入システム - 現場気化器
- ・窒素パージシステム - 小型窒素発生装置 (PSA)
- ・泡噴霧ステーション - サイロ・倉庫の頂部

職員の安全性

サイロ火災に対する意識向上- 研修

- 全職員が以下の報告書を学習することを推奨
 - Henry Persson著書のサイロ火災報告書
 - WPAC 安全報告書
 - Enplus 安全報告書

消火手順に関する研修

- サイロ・倉庫現場用に作成されたサイロ火災ハンドブックの学習を全職員に推奨
- 定期的に現場訓練を行うこと

情報発信

地元の消防署の意識向上と研修

- サイロの頂部やサイロ内には散水してはならない。サイロ・倉庫からの払い出しの前に、火災の不活性化のために散水ではなく、窒素注入を行うこと。
- サイロ火災ハンドブックを地元消防署と共有すること。

地元当局 - 規制当局

- サイロ内にスプリンクラーを設置するようにという圧力がある場合は、妥協策として、サイロの上に泡噴霧器及び泡噴霧発生装置を取り付けること。

保険会社

- 同上 - 教育をすること

窒素供給業者・ガス専門家

サイロ火災事故が起きた場合に関わる可能性のあるすべての関係者にこちらから連絡し、周知徹底

熱処理を施したペレットには、
貯蔵や取り扱いハンドリング上の利点があるか？

はい！

連続工程を使った蒸気処理（水蒸気爆砕）ペレットにはいくつかの利点がある

- ✓ 自己発熱も自然発火もしない
- ✓ 一酸化炭素 (CO) をオフガスとして発生しない
- ✓ 取り扱いハンドリングにおいて発生する粉塵量のはるかに少ない（爆発リスクが低い）

蒸気処理ペレットの生産

連続工程蒸気処理ペレットは、フランスの Européenne de Biomasse (EdB) の工場で年間 125,000 トン生産されており、大量生産実証済み



パリの地域暖房システムで石炭に代わって使用されている、EdBが生産した蒸気処理ペレットの山の前に立つジョン・スワーン氏

貯蔵中の一酸化炭素の生成

Valmet連続工程を使ってEdBが生産した
蒸気処理ペレット

一酸化炭素排出ゼロ

バッチ工程を使って生産した蒸気処理ペレット (Zilkha)

バッチ工程では一酸化炭素の排出量がなぜ多いかについての理論 - バッチ工程では木繊維の一部が変化せずにそのまま残り、ペレット中に水分と共に封じ込められ、その結果、一酸化炭素の排出量が増大する。

1. CO production during storage :



Phase 1 :

Suspending the sample (5 kg) in a container sealed above a volume of water + sodium chloride

Phase 2 :

Over a period of 5 days, with 2 measurements per day capture of CO and O2 fumes.

Oxidation test :

Semi-daily measurement reading

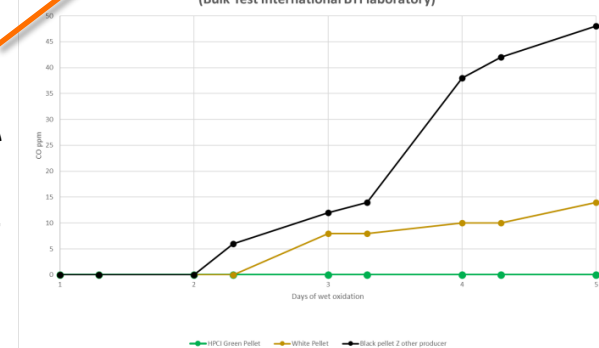
Water uptake test by capillary action :

Total H2O at the end of the test - initial H2O of the biofuel

Equipment : container, gasket, grid, etc...

Day	HPCI Green Pellet	White Pellet	Black pellet Z other producer
1,0	0	0	0
1,3	0	0	0
2,0	0	0	0
2,3	0	0	6
3,0	0	8	12
3,3	0	8	14
4,0	0	10	38
4,3	0	10	42
5,0	0	14	48

Evolvement of CO (ppm) by day of wet storage (forced oxidation)
(Bulk Test International BTI laboratory)



自己発熱試験

1. Self-heating test :



Hot storage test – 140°C – 10 cm – “EDB Pellets” (original part)

A hot storage test was carried out at a constant temperature of 140°C and at a cubic volume of 1 liter (10 cm wide).

No exothermic reaction and no ignition was observed at an oven temperature of 140°C (mesh container metallic, 1000 ml).

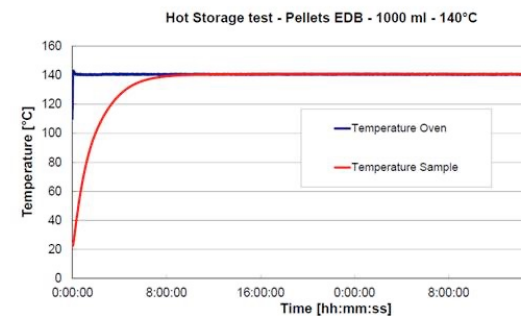
The maximum temperature of 140°C was reached after 4 p.m.

Sample temperature did not reach 200°C within 24 hours.

By consequently, the auto-ignition temperature of the “Pellets EDB” sample (fraction original) - 1000ml cubic wire mesh basket is above 140°C.

Appendix 3 shows a graph of the storage test temperature history at hot :

Annexe 3: Hot storage test – 140 °C – 10 cm – “Pellets EDB”
(fraction originale)



自己発熱なし

The following classifications can be assigned to the “EDB Pellets” sample in accordance with UN Transport of Dangerous Goods* and CLP Regulation**:

- Classification according to UN: **No self-heating substance of the Division 4.2.**
- Classification according to CLP [2009]: **No self-heating substance**

*“Recommendations on the transport of dangerous goods Part III Section 33.3 division 4.2 – United Nations New York and Geneva 2003”

有難うございました!

ジョン・スワーン

John.Swaan@FutureMetrics.com



日本バイオマス安全性ワークショップ

戦術に取り組む: 対応計画の策定

John Swaan
FutureMetrics

Kayleigh Rayner Brown, MAsc, P.Eng.
Obex Risk Ltd.



グループ活動

- 参加者は、火災の場合について、一緒に対処計画の策定を行う
- 計画についてグループディスカッションを行い、観点および経験則を共有する

サイロ火災の対応計画

- 次のサイロ火災対応計画を検討する。
- 配布した用紙の項目をすべて記入すると、自らの現場で実行するための計画策定の一助となる。



対応計画について

- 対応計画について何か質問はありませんか？
- サイロ火災対応計画の人員訓練について何か質問はありませんか？
- 作業員や初期対応者、その他サイロ火災に係る人々との連携、啓蒙、関与をどうするかについて、何か質問はありませんか？
- 誰に連絡を取るかという点について質問はありませんか？
- サイロ火災について初期対応者/消防署へ提示できる資料などがありますか？もっと情報が必要ですか？
- 窒素の供給と注入設備の設置について質問はありませんか？
- 保守と校正なども含め、ガスのモニタリングについて質問はありませんか？

日本バイオマス安全性ワークショップ

現実はどうか: 事例研究

John Swaan
FutureMetrics

Kayleigh Rayner Brown, MAsc, P.Eng.
Obex Risk Ltd.



CASE STUDIES ケーススタディ

- サイロ火災の実例から以下に注目する
 - 対応
 - 行動計画
 - 予防策
- プラント従業員と地元の消防署向け訓練
- これまでに取り上げた事例を再検討し、主な学習点をさらに突っ込んでみる。

事例研究 #1: 炎の着火源からの伝播

- 施設/設備のレイアウト
- 事故
- 根本原因/なぜ起きたか
- 教訓

事例研究 #2: 自己発熱

- 施設/設備のレイアウト
- 事故
- 根本原因/なぜ起きたか
- 教訓

事例研究 #3: 機械の故障

施設/設備のレイアウト

- おがくずと木材チップの貯蔵サイロ
- 2つの貯蔵サイロ (高さ約10m、径約5.5m)を有す木工所、金属シェル構造。
- サイロ頂部にバグハウスとフィルター設備。
- サイロ内では、大型たて型スクリーンがおがくずと木材チップをロータリーバルブへ送り込み、敷地内の火力発電所に送り出して使用。

Russo, P., De Rosa, A., Mazzao, M. (2017). Silo explosion from smoldering combustion: A case study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.22815>

Dust Safety Science (2023). [Case Study – Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

事例研究 #3: 事故

- サイロ底部に煙と炎が見えた。
- サイロ頂部のマンホールから消火を試みた。
- 焼けた材を出すため底部マンホールを開けた際に、煙突効果が発生したとみられる。頂部マンホールから底まへ酸素を引き込み、内部にくすぶり燃焼が生じた。
- 爆発が発生してサイロの屋根が吹き飛ばされた。消防士4名が負傷、高所プラットフォームから1名が転落して病院で亡くなった。

Russo, P., De Rosa, A., Mazzao, M. (2017). Silo explosion from smoldering combustion: A case study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.22815>

Dust Safety Science (2023). [Case Study – Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

CASE STUDY #3: ROOT CAUSE/WHY IT HAPPENED

ケーススタディNO.3-

- 着火源：コンベヤー内部のたて型スクリー(故障して高熱となった)と思われる。
- 熱分解ガスが上部空間に蓄積。
- サイロ上部には爆燃ベントが設置されていたが、バグフィルターの設定位置が悪かったために当該ベントがブロックされて排気効率が低下していた。
- サイロの腐食が爆発による亀裂に寄与した。
- 爆発排気が不十分だったため、死亡に至った。

Russo, P., De Rosa, A., Mazzao, M. (2017). Silo explosion from smoldering combustion: A case study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.22815>

Dust Safety Science (2023). [Case Study – Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

事例研究 #3: 教訓

1. 火災や爆燃を止めるために必要な方法として温度センサーやガス検知器、水泡スプリンクラー、ガス不活性化システムがあげられる。
2. 機械の故障と着火源の可能性となることを防ぐため、設備保守を遂行しなければならない。腐食を検査して、機器の構造一体性を確保しなければならない。
3. 粉塵爆発やガス爆発のリスクを最小限に抑えるために、サイロ火災を消し止めるベストプラクティス(先に概要を説明、Persson(2013)にて詳述)に従うことが望ましい。
4. 爆燃ベントは適切に設計されなければならない。障害物があると、爆発圧力を軽減するために必要な面積が大きくなる。

Russo, P., De Rosa, A., Mazzao, M. (2017). Silo explosion from smoldering combustion: A case study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.22815>

Dust Safety Science (2023). [Case Study – Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

日本バイオマス安全性ワークショップ

総まとめ:より安全なサイロへの次なるステップ

John Swaan
FutureMetrics

Kayleigh Rayner Brown, MAsc, P.Eng.
Obex Risk Ltd.



サイロ火災の場合の対応措置をまとめよう

- ワークショップディスカッションのまとめと考察
- サイロ火災の場合の主要な措置と行動のおさらい
- より安全なサイロとするため、本ワークショップの情報をどう活用できるだろうか

サイロ火災対応策のまとめ

1. サイロと火災の種類を特定する。サイロは何タイプか？サイロは酸素量を制限しているか、それとも可燃性ガスを逃がすか？火災に気づいたのはいつか？どのくらいの時間、燃えていたか？火災の大きさは判断できるか？
2. 初期リスク評価を遂行する。酸素濃度が低下しているか、または一酸化炭素濃度が増加しているエリアがサイロ内にあるかどうかを判断する。
3. .ガス爆発もしくは粉塵爆発の危険性を検討する。対策チームは、爆発の影響を受ける可能性のある場所から遠ざける。

Persson (2013). [Silo Fires: Fire extinguishing and preventive and preparatory measures](#)

Dust Safety Science (2023). [Case Study - Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

サイロ火災対応策のまとめ

4. 空気のエントレインメント（飛沫同伴現象）を最小限に抑えるためサイロを閉じる。開口部を密閉し、換気システムを停止する。酸素がサイロに入ると、火災が拡大する可能性がある。不活性ガスも逃げてしまう可能性がある。
5. 窒素ガス(最も望ましい)と機材の手配をする。窒素は液体で供給されるため、気化装置も必要となる。
6. サイロの底部から窒素を注入する。サイロ火災は従来は頂部から消火活動を行ってきたが、作業員を上部に配置するのは危険があり、サイロ雰囲気の不活性化の方がより効率的である。

Persson (2013). [Silo Fires: Fire extinguishing and preventive and preparatory measures](#)

Dust Safety Science (2023). [Case Study - Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

サイロ火災対応策のまとめ

7. ガス測定器を組み立てる。サイロ上部空間内の酸素とCO₂の濃度を測定し、爆発の危険性を評価するために使用する装置である。
8. 必要に応じて上部空間に泡を散布する(つまり、上部空間で火炎が貯蔵物表面上に発生した場合、サイロ上部が燃えて、隣接するサイロまたはコンベヤに延焼する可能性がある)。泡はこれを防ぐのに役立つが、作業中にサイロに流入する酸素を最小限に抑えなければならない。サイロ頂部の作業員は個人用保護具(PPE)を着用しなければならない。
9. サイロを不活性化する。ランスを使い窒素をポンプで送り込み不活性化する。サイロ環境が燃焼を維持できなくなると火災は消える(「鎮火」/「不活性化」)。

Persson (2013). [*Silo Fires: Fire extinguishing and preventive and preparatory measures*](#)

Dust Safety Science (2023). [*Case Study - Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality*](#)

サイロ火災対応策のまとめ

10. 材料の払い出しは、火災がおさまリ、ガス測定によって作業をしても大丈夫であることが示されたら行う。
11. ゆっくり実行する。搬出作業は時間がかかる。粉塵爆発を避けるため、粉塵雲や粉塵の飛散を防ぐためにゆっくりと行う。
12. 払い出し中に出てくる材料を分別する。つまりサイロ内容物を2つに分ける—燃えたものと大丈夫なもの。積み上がったパイルを調べて何もくすぶっていないことを確認する。
13. 払い出し中も窒素の注入を続ける。材料を払い出しながら、サイロ内の酸素濃度が5%を超えないようにガス流を維持する(これにより爆発の危険性が軽減される)。

Persson (2013). [Silo Fires: Fire extinguishing and preventive and preparatory measures](#)

Dust Safety Science (2023). [Case Study - Insufficient Venting During Sawdust Silo Explosion Leads to Fatality](#)

まとめと考察

自己発熱による火災の危険性を高める要因

1. 理学特性が異なる、さまざまな供給源からのペレットの混合/ミキシング。
 2. 微粉層複数の蓄積。
 3. 在庫保管期間が長い。
- サイロが装備されていれば、火災や自己発熱のリスクを軽減できる。
 - 窒素不活性化システムは火災に備えて、即時使用可/待機状態にしておくことができるし、あるいは連続運転して、サイロを不活性化させることもできる。

まとめと考察

- 公式化したな方針と手順を実施することで、変更管理(MOC)、機械および設備の構造一体性、相互接続された機器(マテリアルハンドリング)の予防的保守などの工程安全性リスクを管理できる。
- さらに保護対策レイヤーを提供できる追加的な可燃性粉塵安全対策には、防爆、スパーク検出、サイロ投入口に高流量散水装置を取り付ける、などがあげられる。
- プロセス安全管理(PSM)は、可燃性粉塵の火災や爆発に関連するリスクを体系的に管理するためのフレームワークである。

参考資料とリソース

- BC Forest Council (2023). *Combustible Dust*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://www.bcforestsafe.org/wood-pellet-association-of-canada-safety-committee-wpac/resources/combustible-dust/>
- Danish Technological Institute (2012). *Guideline – Storage and Handling of Wood Pellets*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://www.montana.edu/extension/forestry/wood-burning/pellets/RK%20report%20storage%20and%20handling%20of%20pellets.pdf>
- Future Metrics. *Best Practices for Fighting and Preventing a Fire in Wood Pellet Storage Dome or Silo*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://www.futuremetrics.info/wp-content/uploads/2017/12/FutureMetrics%20White%20Paper%20-%20Preventing%20and%20Fighting%20a%20Fire%20in%20a%20Wood%20Pellet%20Storage%20Dome%20or%20Silo.pdf>

参考資料とリソース

- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). US Department of Labor. (2013). *Firefighting Precautions at Facilities with Combustible Dust*. Last accessed on November 22, 2023 from https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA_3644.pdf
- Henry Persson (2013). *Silo Fires: Fire extinguishing and preventive and preparatory measures*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://www.msb.se/siteassets/dokument/publikationer/english-publications/silo-fires-fire-extinguishing-and-preventive-and-preparatory-measures.pdf>
- Wood Pellet Association of Canada (2023). *Safety*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://pellet.org/safety/>
- WorkSafeBC (2023). *Combustible Dust*. Last accessed on November 22, 2023 from <https://www.worksafebc.com/en/health-safety/hazards-exposures/combustible-dust>
- Reach out to local nitrogen suppliers, and fire protection and equipment companies.

有難うございました！

John Swaan john.swaan@futuremetrics.com

Kayleigh Rayner Brown, MAsC, P.Eng. kayleigh@obextrisk.com



協贊

Creating our future with renewable energy.



Media Sponsor

