

安全な木質ペレット貯蔵
自然発火事故の防止検知管理

万が一出火したときの効果的な消火活動

ワークショップスポンサー



2026年3月12日 東京
FutureMetrics オペレーションエキスパート John Swan



自然発熱

推定原因

1. 外部着火源
 - 貯蔵ペレット内に高温物体が誤って落下
 - 高温異物 - 高温の半材料など
 - コンベアベルトやベアリングの破損部など
2. ペレット製造関連
 - 原料の調整
 - 粒度分布 (PSD) - ばらつき
 - 乾燥温度が高すぎ - 表面硬化し繊維体内に水分を閉じ込める
 - ペレットの冷却時間が不十分 - 冷却が短かすぎるとやはり表面硬化しペレット内に熱と水分を閉じ込め、後で放出（酸化）となる
3. 生物学的活性 - 化学組成
 - バイオマス種
 - リグニンと脂肪酸が多いバイオマス種には自己発熱を発生しやすいものがある
 - 木質ペレット製造後の酸化
 - 不良な製造工程で閉じ込められた熱と水分を放出
4. 上記の特性を有す木質ペレットを長期貯蔵すると自然発熱しやすい



サイロ/倉庫 消火方法と手順

「消防にとって、そこまで行くのが困難な深部の無炎火災が一番難しい」

「木質ペレットの貯蔵火災は長期戦を覚悟する。
確実に火災を抑制したうえで安全にサイロの払出しを行うためだ。」

1. サイロ/倉庫の火災対応計画
 - 従業員、地元消防署、消防団、近隣コミュニティなど、対応計画を全関係者と共有する。
2. 窒素ページを用意し、総量と流量を計算する
 - 窒素供給業者を見つけて連絡し、窒素を手配し蒸発器を運び込む。
 - サイロの容積を計算し、必要な流量と総量を決定する（ガスエキスパートに連絡）。
3. ガス濃度 (CO, O₂) を監視してサイロ/倉庫を安全に払出しできるタイミングを決定する
4. 搬出したペレットを安全に広げられる場所を用意するか、予定しておく



サイロ火災報告書 – Henry Persson

消火活動と防止・準備対策


- サイロ火災報告書は、スウェーデンのSP技術研究所、燃焼科学技術センター、スウェーデン民間緊急事態庁、業界関係者が実施した研究の包括的な報告書。
- 当該研究から得られた知見によるサイロ火災の基本的な消火方法は、高温ペレットを監視して消火しながら、サイロ底部から **気体窒素** を注入してサイロの不活性化を行い、その後でサイロの払出しを実施する、という組み合わせ方式。
- 本報告書は、木質ペレットの貯蔵と取扱いにかかわる全関係者の**必読書**




Henry Persson

Silo Fires

Fire extinguishing and preventive and preparatory measures



Henry Persson works at the SP Technical Research Institute of Sweden on the Fire Safety Engineering Department. He has worked for more than 30 years with testing and research with his main focus on fire and fire safety problems in industry, and the fire service and then with fire extinguishing as his specialist field. In many cases his research projects have been of the problem-solving type, which have led to concrete results and applications, e.g. the building of the large-scale firefighting equipment for tank fires (SMC), which are now available in four locations in Sweden. For about 10 years now there has been considerable focus on biofuels, and on that he and his colleagues have worked on projects related to fire risks, emissions during fires and fire-extinguishing, both in solid biomass and waste. Several projects have focused specifically on the risks involved in the handling of wood pellets silos, the risk of spontaneous combustion and extinguishing problems.





サイロ火災対応計画 - Step 1

窒素注入設備のなかったサイロに窒素設備を用意

- 窒素業者に連絡
- 可搬式窒素蒸発器を搬入
- 注入ランスを製作し、サイロの（底部）側面に設置
- 窒素分配マニホールドを設置して連結
- 必要な窒素流量と総量を計算
- サイロ上部にスプレー式泡消火器を試してみる
- 可能であればサイロの通気口を密閉してガスリークを防ぐ
- ガスモニター (CO, O₂) を使い、上部空間の濃度をチェックして、サイロの払出しが安全なときを探る (CO が 5% 未満かつ O₂ が 5% 未満)





サイロ火災対応計画 – Step 2 続く

窒素注入設備のなかったサイロに同設備を用意

- ランスを製作: パンチ穴パイプランス4本を用意し、サイロの四分画に1本設置。サイロ半径の半分まで届く長さとする。径20mm - 24mmのランス（パイプ）に、サイロの半径と必要な流量能力に応じて、ピッチ25mmで径3 - 4mmの開口を1 - 2mの長さにわたって設ける。
- サイロにランスを設置する準備を行う。ボーリングや切削によってランス挿入用穴あけを行うときは火花を発生しないように、酸素ができるだけ入らないように注意。
- ランスを、駆動装置やドリルドライバーを使ってサイロに差し込む。（パンチ穴がサイロ外部には出ていないように）差し込んだら、密封し、ランスを接地する。
- 安全に設置できるのであれば、ランス又は口の開いたパイプをサイロの上部空間に設置する。
- 上部空間に窒素を注入するかわりに、中高密度の発泡剤を使用するという代案もあるが、するとサイロ天部に泡消火器が必要。
- マニホールドからホースをつなぎ、窒素注入を開始する。





サイロ火災対応計画 – Step 2

窒素注入設備のなかった倉庫に窒素を用意

ランスを製作: 径 20mm - 24mm のランス (パイプ) の連結セクション(6m)を用意しピッチ25mmで径3 - 4mm の開口を設ける。セクションのねじ切り部をつないで倉庫の四方からランスが中心部に届くようにして細くなった先をペレットのパイルに押し込む。サーマルカメラを使ってホットスポット (カラム状又はボール状の無炎熱分解中のペレット塊) を同定し、熱分解安定化に最も効果的な場所にランスが行くようにする。

- 当該倉庫の壁にハッチも開口部もない場合は、窒素注入ランスを倉庫に入れられるように準備する。ランス用開口部をボーリングや切削で設ける場合は、火花を発生しないように、酸素ができるだけ入らないように注意。
- ペレットのパイルのできるだけ底の方に行くように、駆動装置やドリルドライバーを使ってランスを倉庫に差し込む。(パンチ穴が倉庫外部には出ないように) 差し込んだら、密封し、ランスを接地する。
- 天井に泡一斉開放式消火スプレーを設けていない場合は、倉庫内のペレットパイルに中高密度の泡消火剤をスプレーしても安全であればスプレーし、窒素の消失を最小限に抑える。
- マニホールドからホースを連結し、窒素注入を開始する。





サイロ火災対応計画 – Step 3

窒素注入流量と総量計算

サイロ火災報告書

- サイロの平米あたり容積を計算。
- 窒素流量は、ペレットの多孔性によるが、消火活動初期には $5\text{kg}/\text{m}^2$ 以上、できれば $10\text{kg}/\text{m}^2$ までの多い方が望ましい。
- ガス供給業者の技術サポートに相談する (ガス事業者は通常、ガスエキスパートが社内にいるか、コンサルタントを持っている)。
- サイロの上部空間へ(注入が可能な場合) の窒素流量は、リークさせないように $1-3\text{kg}/\text{m}^2$ と、底部の流量よりも小さい。
- 窒素の必要量と消費量は、(換気システムとハッチの) リーク量によるが、実際のサイロ火災の経験をもとにしたガイドラインでは、サイロの総容積によって総消費量 $5-15\text{kg}/\text{m}^3$ となるであろう。





サイロ火災対応計画- Step 4 安全な払出しと消火されたペレットの管理

警告: 発熱火災が安定化するまでサイロの搬出は試みてはならない

払出しできるまで安定させるには、サイロの規模と窒素リーク次第で数日以上かかる可能性

- サイロや倉庫の払出し計画を作成し、屋外火災と酸化剤ガスのポテンシャル管理が可能で、人員その他インフラに危険性のない、安全な場所を選定しておく。
- ブリッジとなったペレットが落下してサイロ内の不活性状態を乱す可能性があるため、ペレット払出中にガス濃度を監視する。
- ペレットが酸化されて炎上するかもしれないので、払出し設備内の温度や炎の監視を行う。
- ペレットマテハン設備に水の消火装置、搬出したペレットに散水する装置を安全な場所に用意する。
- 払出しエリアの雰囲気ガスの監視を行う。払出しエリア内で作業する人員も消防隊員も SCBA/SABA (自給式呼吸具)が必要。
- 火災事故では熱分解(無炎燃焼)によって形成されたペレット塊が払出し中に詰まったり作業中断の原因になり、手作業で除去することが必要な場合もある





サイロ火災防止－方法と実践

- ペレットの品質を把握－加工温度 (乾燥 & 冷却)、含水率と微粉
 - 木質ペレットの製造加工温度－これが自然発熱に影響
 - 乾燥温度が高いと繊維粒子が表面硬化し水分を封じ込める（トラップ）
 - ペレット冷却－空気流量大で冷却滞留時間小となると表面硬化でペレット内に水分を封じ込め、酸化が始まるとCOが余剰発生
 - 含水率が高すぎたり、含水率のばらつきが大きいと、自然発火が早まる
 - 微粉が多いと、ペレットがサイロや倉庫にカスケード（重力落下）搬入されるときに複数の層を形成する。こうした微粉層はペレットの多孔性を下げ、通気性を下げて、自然発熱の可能性を急激に上昇させる

サプライヤの選定には、木質ペレットの製造工程が重要であることを理解しているところにする。



サイロ及び倉庫の保護

窒素注入 - 泡消火剤スプレー

サイロの新築やレトロフィットにおいて、窒素注入または窒素パーズがサイロ防火の最も効果的な方法

• サイロ

- 窒素注入設備 - サイロのホッパーの底もしくは平底面にノズルを配置。
- 注入ノズルを平常運転条件では邪魔にならず損傷を受けることもないように設置。
- 地元の防火設備会社またはエンジニア(木質ペレット火災事故対策の知見があるエンジニアであること)に相談。
- 地元当局または消防隊がスプリンクラー設置を主張するときは、泡消火剤設備をサイロ天部に設置。しかし、窒素の利点について啓蒙するよう努める。

• 倉庫

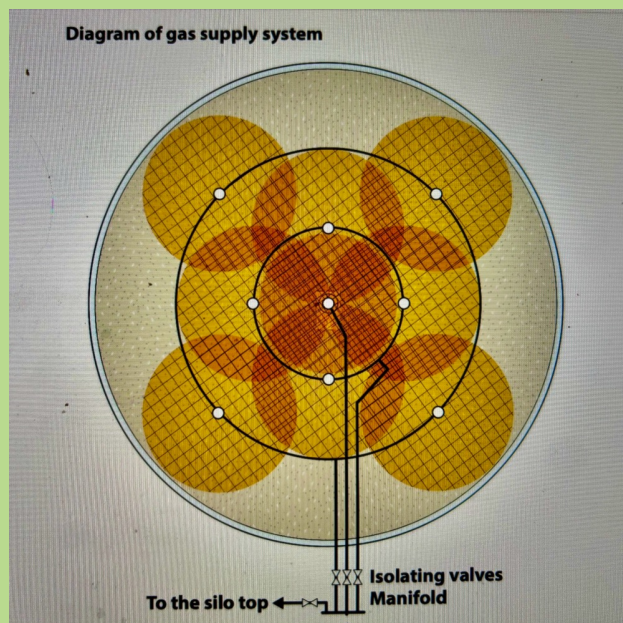
- 倉庫外周に、火災の場合にランスを挿入するためのポートを設置する(サーマルカメラを使って無炎燃焼のホットスポットを探し、ランスの挿入精度をあげるのもよい。
- 泡消火剤一斉開放設備はある程度の密封性を提供するため、窒素消失を最小化する良い方法。



サイロ/倉庫の保護 窒素注入設備の設置



サイロのランス設置



サイロ底部の窒素注入ノズル



倉庫やドーム倉庫のランス挿入口



サイロ/倉庫 温度とガスの監視

- 読取りレベルが複数ある温度ケーブルを何本も設置しても個別の自然発熱を常に読み取れるとはかぎらないが、自然発熱が進行している兆候は大体示す。
- (質の高い) ガスと湿度のモニターを設置し、通常、一酸化炭素と湿度の上昇を自然発熱の最初の兆候として把握する。
- 外部の高温物質（ベアリングやゴムベルトの破損部など）から保護するために、ホットスポット検出器を受入れ口下流の中継点のマテハン設備に設置し、疑わしいペレットを搬出できるようにする(Firefly)。



ペレットのローテーション（循環）

木質ペレットは1カ月以上保管してもいいだろうか。

- 木質ペレットは、これまで2年以上もサイロなり倉庫なりに安全に保管されてきた。これらは適切に製造されたペレットで、樹脂分（脂肪酸）の少ない樹種由来であり、微粉が最小限で、貯蔵施設は換気が良好であった（研究が必要）。
- (可能であれば) 混合貯蔵の木質ペレットを一カ月には一度、ローテーション（循環）を行うことを推奨。
- 万が一ガス濃度が危険段階に入った場合は、自然発熱がすでに無炎燃焼段階に入っている可能性があるため、ローテーションよりも窒素注入が必要。



微粉の削減－ハンドリングをやさしく

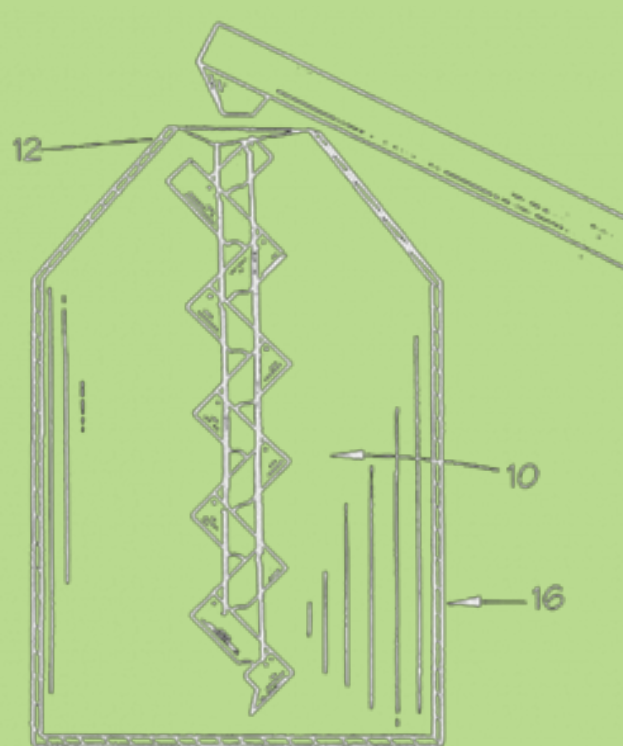
サイロ/倉庫において、微粉分布を下げることで自然発熱を防止

- サイロや倉庫に搬入落下時にペレット上に微粉が層状に積もっていき、ペレットの多孔性を下げる。すると、酸化熱と水分を放出する換気能力が下がり、自然発熱が加速化する。
- ジェントルハンドリング設備は、ペレットの自然落下を減らし、微粉をサイロ内のパイル中央に集積するという効果を示す。
- 倉庫は、スライダー設備を使って、ペレットを落下させずにパイル頂部から転がり落ちるようにする。でなければ、パイル近くから落ちるように搬入吐出口をこまめに調整する。

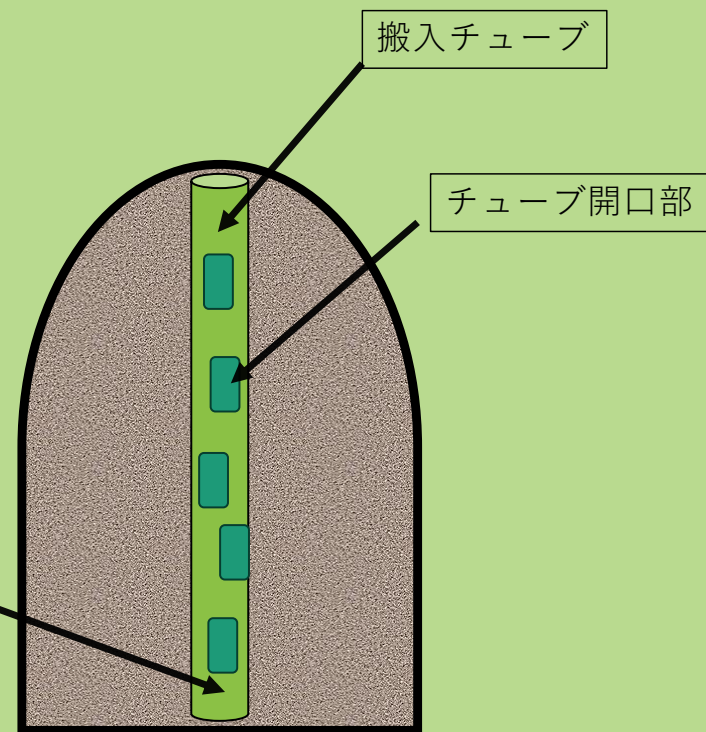


ジェントルハンドリング設備の例

別名ビーンラダー（つる豆支柱）



微粉はチューブ
内に集積するか、
チューブ近くに
集散



参照 Peeples Industries – Dome Technology Silo Installation



防止及び準備策

サイロ保護システムとプロトコル

サイロ消火プロトコル－事故対応テンプレート

- オンサイトサイロ火災ハンドブック

サイロ保護システム－レビュー

- ガスモニタ、温度センサ、湿度センサ
- ISO等温熱量測定、TAM、ワイヤーバスケット加熱装置で木質ペレット試験を練習し自然発熱ポテンシャルを測定
- ホットスポット検出器－木質ペレットハンドリング設備
- 窒素注入設備－オンサイト蒸発器
- 窒素パージ設備－小型窒素製造機 (PSA)
- 発泡剤消火設備－サイロや倉庫の天部



人員の安全性

- サイロ火災に対する意識－トレーニング
 - 全従業員に以下の報告書の学習を推奨
 - Henry Persson著サイロ火災報告書
 - WPAC 安全報告書
 - Enplus 安全報告書
- 消火手順トレーニング
 - オンサイトのサイロや倉庫用に作成したサイロ火災ハンドブックを全従業員が学習することを推奨
 - 定期的に訓練を実施



コミュニケーション

サイロ火災事故にかかわりうる人々に積極的に連絡し
火災について知ってもらうようにする

- 地元消防署、消防団の意識と訓練
 - **ペレットパイルの頂部やサイロ内の放水ではなく、窒素注入で燃焼を不活性化して、サイロや倉庫の払出しを行う。**
 - サイロ火災ハンドブックを消防署・消防団と共有。
- 地元当局 – 規制機関
 - サイロ内にスプリンクラーを設置するように指導されたら、妥協案としてサイロ天部に泡一斉開放消火設備と泡スプレー発生器を設置する。
- 保険業者
 - 同上 – 啓蒙する。
- 窒素供給業者とガスエキスパート

サイロ火災事故にかかわり
うる人々に積極的に働きか
け、火災について知って
もらうようにする。



有難うございました。

John Swaan

john.swaan@futuremetrics.com