



Orsted

# 木質ペレット貯蔵における 自然発熱リスクの最小限化

チーフスペシャリスト Jens Kai Holm

2026年3月12日

## 木質ペレットの反応性をラボ測定

### 背景と理由

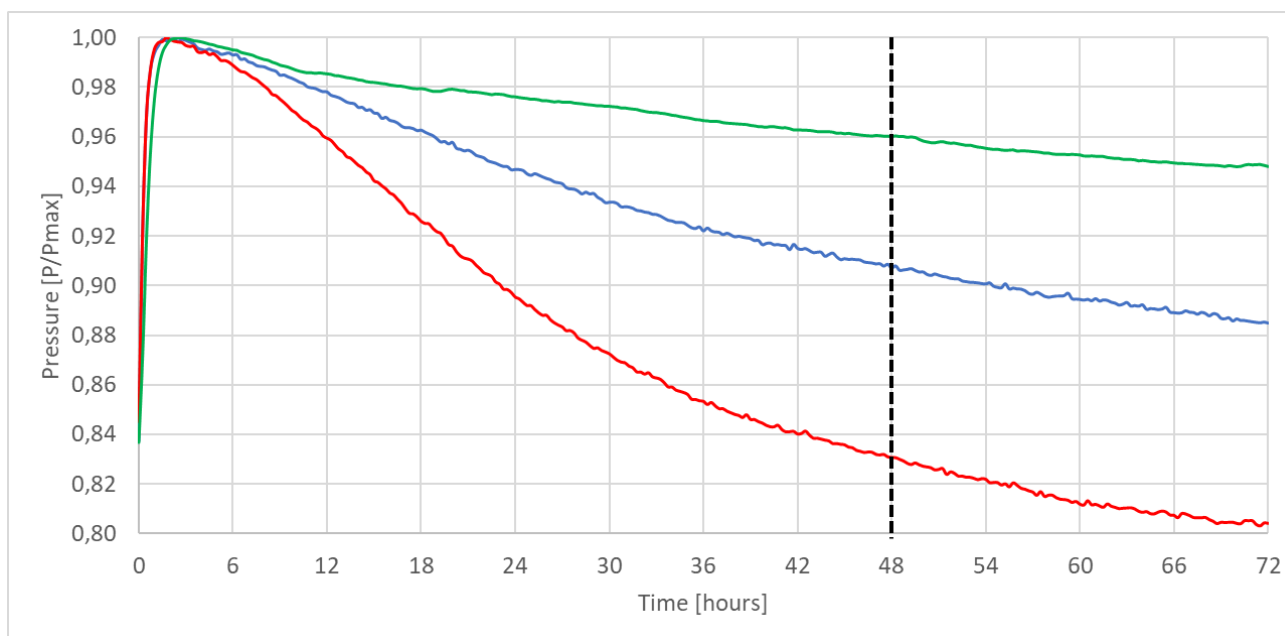
- あらゆるタイプの木質ペレットが使えるという自由性が業界にとって重要
- 反応性こそ、ペレット貯蔵におけるリスクを管理するカギ
- 基本課題: 反応性の異なるペレットをどう安全に取り扱うか
  
- **試験方法**
- ペレットの反応性ベースラインを決定するしっかりした方法が業界にとって必要
- 低温の自然発熱は時間のかかる反応であるため、高感度法か加速法が必要

### 中心的な方法2つ

- **等温熱量測定** – 発熱量の直接測定
- **Oxipres**（オキシプレス） – 酸化ポテンシャルの加速試験（酸素爆弾法）

## オキシプレス法で、高温、過圧酸素下で酸化を加速化。木質ペレットの酸化安定性を評価

圧力低下\* - 大きいほどペレットの反応性が高い

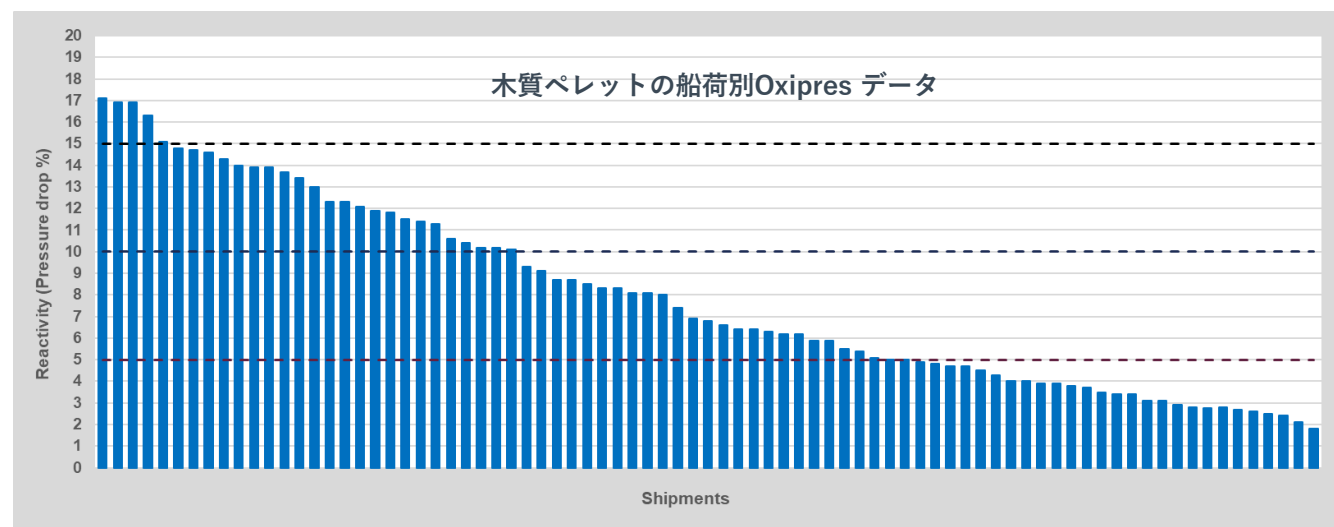


## 木質ペレットの危険段階自然発熱ポテンシャルを荷口で評価してランク付け。オーステッドの暫定的なランキング方法

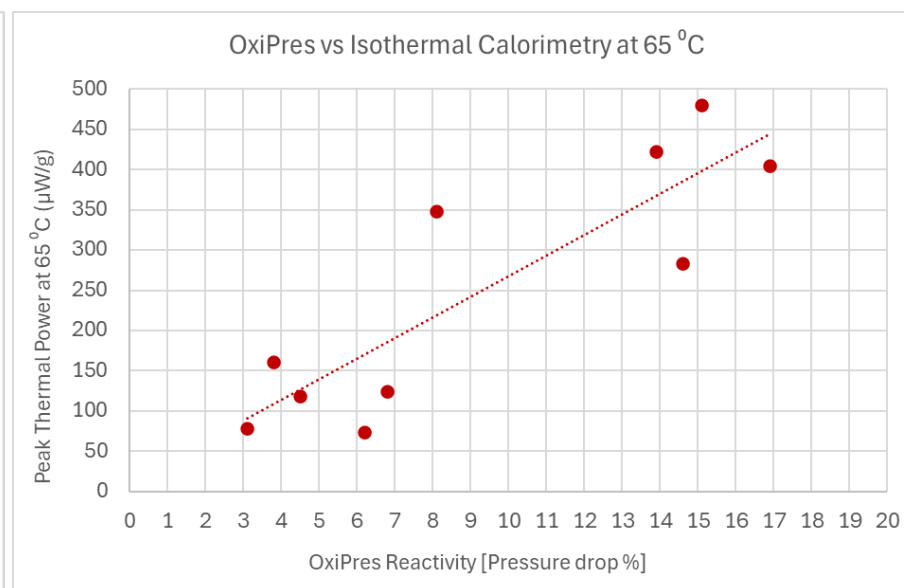
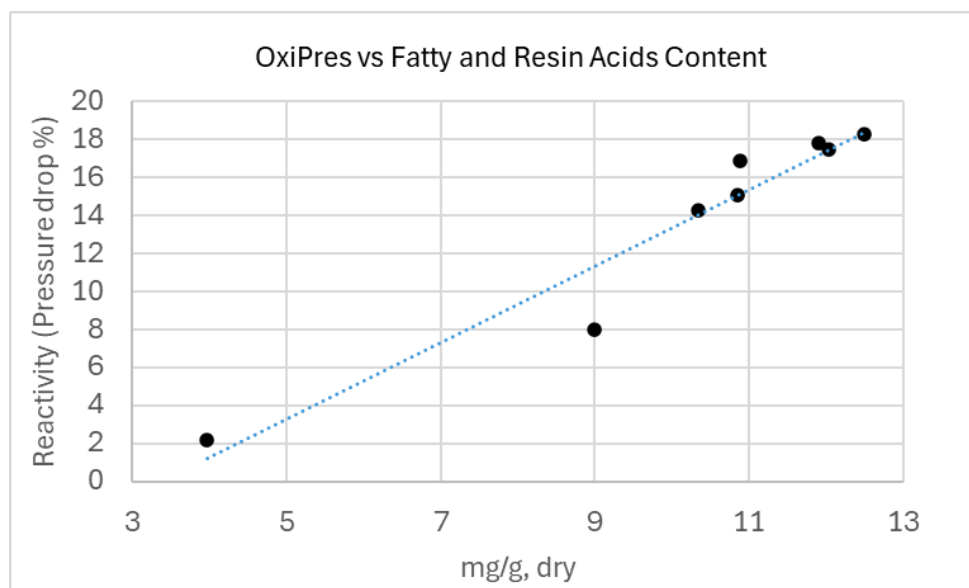
- ペレットはデンマーク到着前に船荷毎に分析
- 高反応性もしくは非常に高反応性の木質ペレットは、オーステッドの施設で貯蔵する前にリスク評価を実施しなければならない。
- ランキングスコアは、貯蔵施設の現場経験を総体的に反映。

Ranking	Risk	Reactivity
1	Very high	> 15
2	High	10 - 15
3	Medium	5 - 10
4	Low	0 - 5

Oxipres データは、すべて同一分析時間  
48 時間、65 °C で取得



データは、オキシプレスによる反応性、等温熱量法ならびに脂肪酸と樹脂酸の含有量は、正の相関関係を示す。



## 木質ペレットのサイロ貯蔵とばら積み貯蔵の作業状況: 窒素パーージと強制曝気

### 防止対策

- サイロの窒素パーージで酸素濃度を下げる (低温酸化を抑制)。
- ばら積みでは、強制曝気でペレットの温度を下げる。

### 軽減対策

- 危険段階の自然発熱や熱分解が疑われるときは、強化窒素パーージで抑止。
- 危険段階の自然発熱が疑われる場合は強制曝気を実施しない。

### オーステッドのサイロにおける強制曝気

- 空気臨界流量は推定  $\sim 0.05$  m/s、170 m/h 又は平方メートル当たり  $100$  m<sup>3</sup>/h に相当。
- Studstrup サイロの必要曝気能力は、少なくとも  $33$ 万 m<sup>3</sup>/h。
- ファンは要求電力量が合計でメガワットベースになりうる。しかも、まだ窒素も軽減対策として必要。オーステッドはもっぱら窒素パーージを活用。
- とはいえ、木質ペレットのばら積みでは、オーステッドは可搬式曝気ファンを使って局所的な冷却を実施。

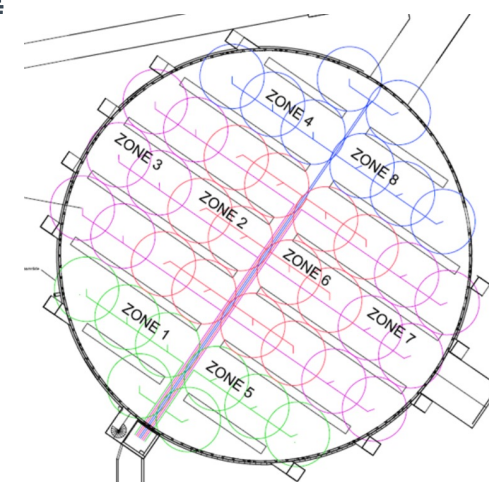
## 木質ペレットサイロにおける軽減対策としての窒素パージ

### サイロ火災報告書\* (Henry Persson)の勧告

- 4.5 m<sup>3</sup>のサイロ実験による、熱分解ホットスポットの解消に必要な**臨界窒素流量**：**3 m/時**
- 推奨安全係数: **3 × 臨界流量 = 9 m/h**
- これに相当する実験用サイロの窒素注入流量：**5 kg/m<sup>2</sup>/時**

オーステッドの Studstrup 木質ペレットサイロ（10万 m<sup>3</sup>）

運転モード	窒素流量	総窒素注入重量	総窒素注入体積量
平常運転、逸脱運転	最大 1,6 m/h	~3.600 kg/h	3.000 m <sup>3</sup> /h
エスカレート	~ 3,6 m/h	~ 8.000 kg/h	6.900 m <sup>3</sup> /h
火災	~ 5,6 m/h	~ 12.500 kg/h	10.800 m <sup>3</sup> /h



Studstrup サイロの窒素パージゾーン

## ばら積み貯蔵における「局所」冷却のための可搬式曝気ファン

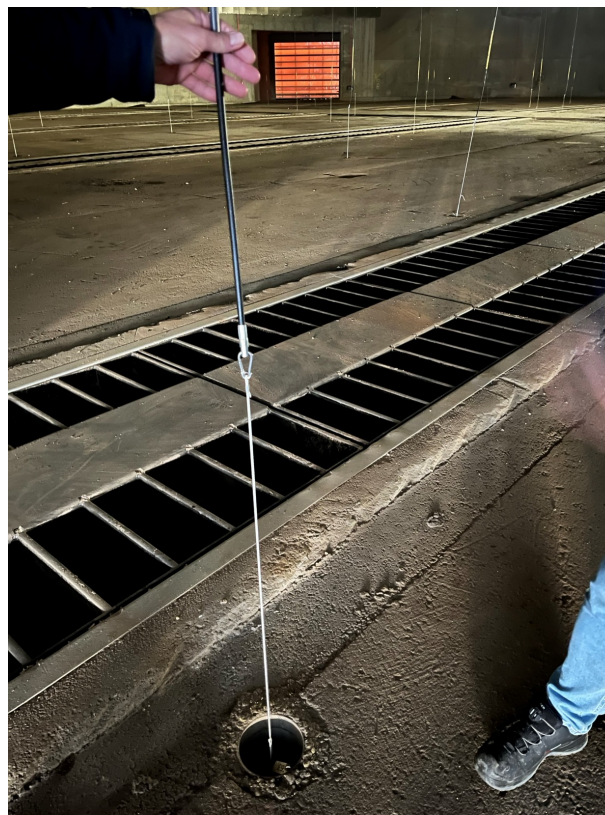


"クロッカス曝気装置。  
流量能力 ~1,500 m<sup>3</sup>/h  
推定曝気実効面積: 5 x 5 m  
深さ 5 m (ペレットの多孔性次第)



## 木質ペレットのサイロ及びばら積み貯蔵における対策: サイロ内温度監視

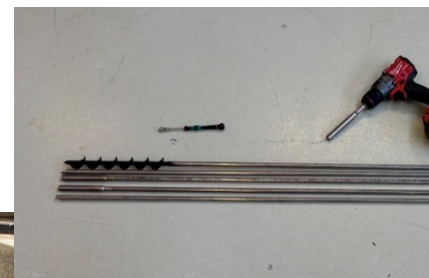
- ペレットのバルク温度の監視体制が必須。赤外線による表面監視、ガスのモニタリング、曝気/窒素パーシは、程度の差こそあれ間接手法にすぎない。
- 可能なかぎり、温度計測ケーブルはサイロの床に固定する。垂れ下げるだけでは位置が変わり、データの信頼性が落ちる。
- Studstrupでは 65 本の熱電対ケーブルを設置。床に係留している。
- データは、トレンド分析機能のあるダッシュボードからチェックできるようにする。





## 木質ペレットのサイロ貯蔵及びばら積み貯蔵における対策: ばら積み貯蔵の温度監視

- 現行は、突き刺し型温度センサ/ IRカメラ
- 深さ1-2 m / IR は表面温度のみ
- 課題: 木質ペレットのばら積みは、内部の熱伝導が遅く  
深部のホットスポットの検出が手遅れになる危険性

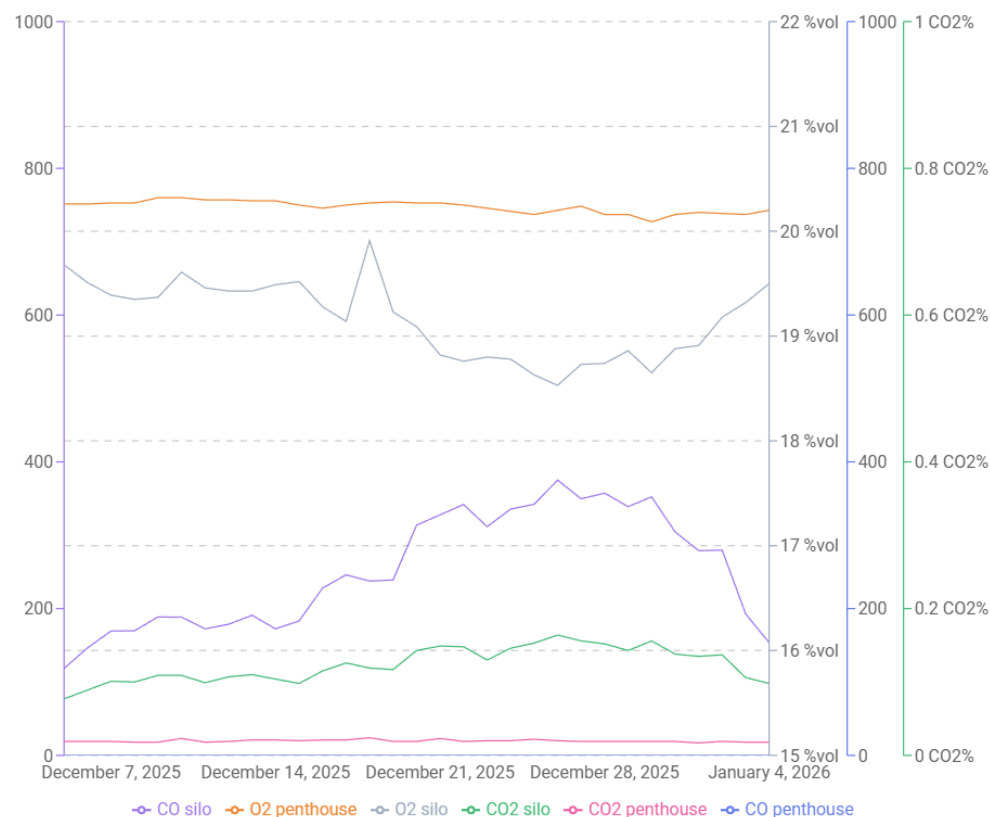


## 推奨閾値温度と防止対策

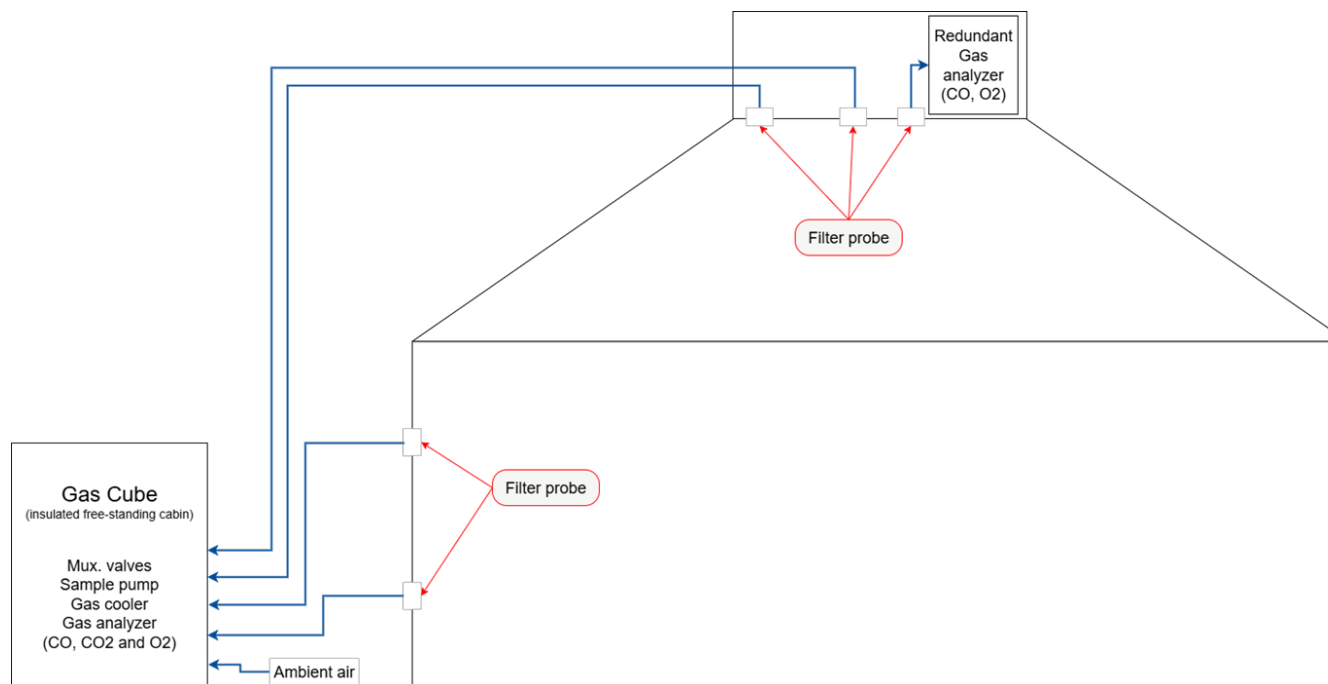
ばら積み		
反応性	高い、非常に高い反応性	低い、中程度の反応性
貯蔵期間	長期貯蔵なし: 最大 3 ヶ月 3 ヶ月を超えるときは、高さ 4 メートル以下	1 2 ヶ月まで
強制曝気	バルク温度が 50 ° C を超えると必要	バルク温度が 55 ° C を超えると必要
ペレット搬出を検討	バルク温度が 55 ° C を超える場合	バルク温度が 60 ° C を超える場合

## 木質ペレットのサイロ貯蔵及びばら積み貯蔵における対策: ガス監視

- しっかりしたガス監視システムを設置し、分析装置はサイロや貯蔵エリアの外に置く。
- 幅広い測定範囲で O<sub>2</sub>, CO, 及び CO<sub>2</sub> を監視:
  - CO: 0–100,000 ppm
  - CO<sub>2</sub>: 0–30%
  - O<sub>2</sub>: 0–25%
- 容易に警報/警告閾値が設定でき、データのトレンド分析ができるシステムとする。
- 複数のサンプリング点を設けて正確性を期す。
- システムの限界を知る。自動カリブレーションやセンサ飽和で間違った値が出る可能性があることに注意。



# ガス監視システム



## 設計上の重要点

- 平常条件と火災条件で動作**  
 「平常」のオフガス中と火災時の両方でガス組成を監視する。自立式分析設備 ("Gas Cube") を使用。耐熱チューブとフィルタを使ってガスの試料採取を行う、測定範囲も広いシステム。
- ペントハウスにガス分析器を設置して冗長化。**  
 測定エラーを検出できるようにし、一次分析設備の検定と保守の作業中も監視が途切れないようにする。

## 木質ペレットのサイロ貯蔵及びばら積み貯蔵における対策: ガスのモニタリング



## Studstrup ペレットサイロの改善火災戦略としての運転モード

従前の火災戦略では、運転モードが「平常」と「火災」の2つしかなかった。改善された戦略では、4つの運転モードを定義。

### 平常運転

- サイロが標準条件で運転中。温度もガス濃度も平常範囲内

### 逸脱運転

- パラメータのうち、ひとつ以上が逸脱運転の警告水準に到達（温度上昇、CO等）
- 要点: 原因を究明し防止策を講じる

### エスカレート

- パラメータのひとつ以上がエスカレートの警告水準に到達。例：火花検知器の警報が繰り返されるが炎は観察されない
- 要点: リスクを低減 — 予防のための搬出を検討、窒素パーージ増強、消防署に連絡

### 火災

- 以下の場合には火災を想定する
  - 互いに独立したシステム2つで火災警報レベルに到達
  - 吸引システムからの警報、又は
  - 直接感知（おき、炎、煙、超高温）
- 行動: 消防署に連絡、人員と施設の安全を確保

Thank you

ご質問は？

 Orsted  
Love your home

