

安全な木質ペレット貯蔵  
自然発熱事故の防止、検知、対策

# 技術的な深掘り: 自然発熱の原因、 寄与要因、検知方法

カナダ木質ペレット協会  
副エグゼクティブディレクター  
Fahimeh Yazdan Panah



「免責条項: 以下の推奨案は、ガイダンスとして提供するにすぎない。業界の経験知、制御実験、査読済み発表論文に拠った推奨案であり、法的要件とも規制要件とも解釈するべきではない。」

---

# なぜ問題か

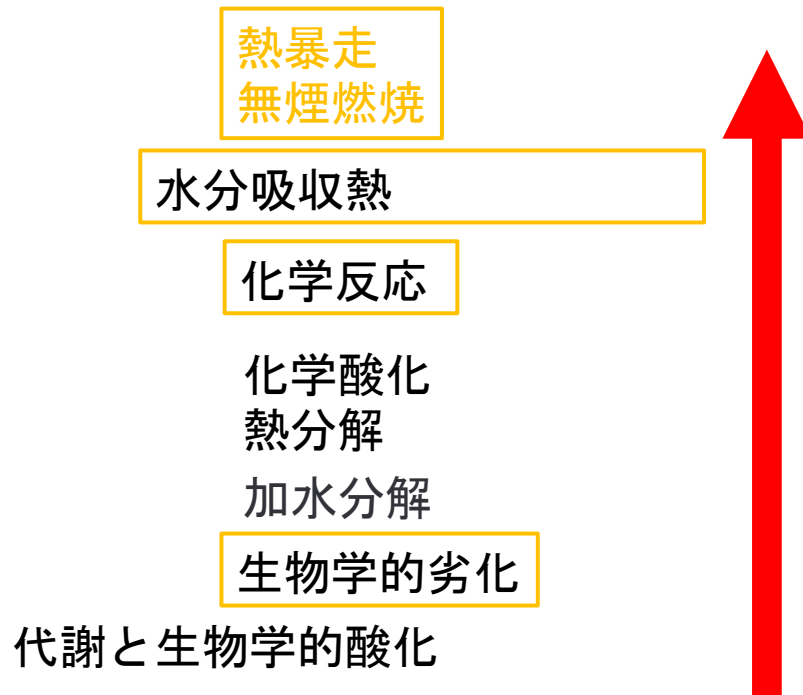


## 自然発熱とは何か

- 自然発熱とは、生物学的または化学的反応による内発性蓄熱プロセスであり、放置されると燃焼につながる可能性
- 分解性または空気酸化される物質であれば、発熱によって自然燃焼に至る可能性
- 木質ペレットは、バルクで貯蔵されると石炭のように自己発熱する
- 自己発熱によってバルク温度が自然発火点まで上昇する
- Sサイロ火災には、通常の火災とは異なる手法が必要

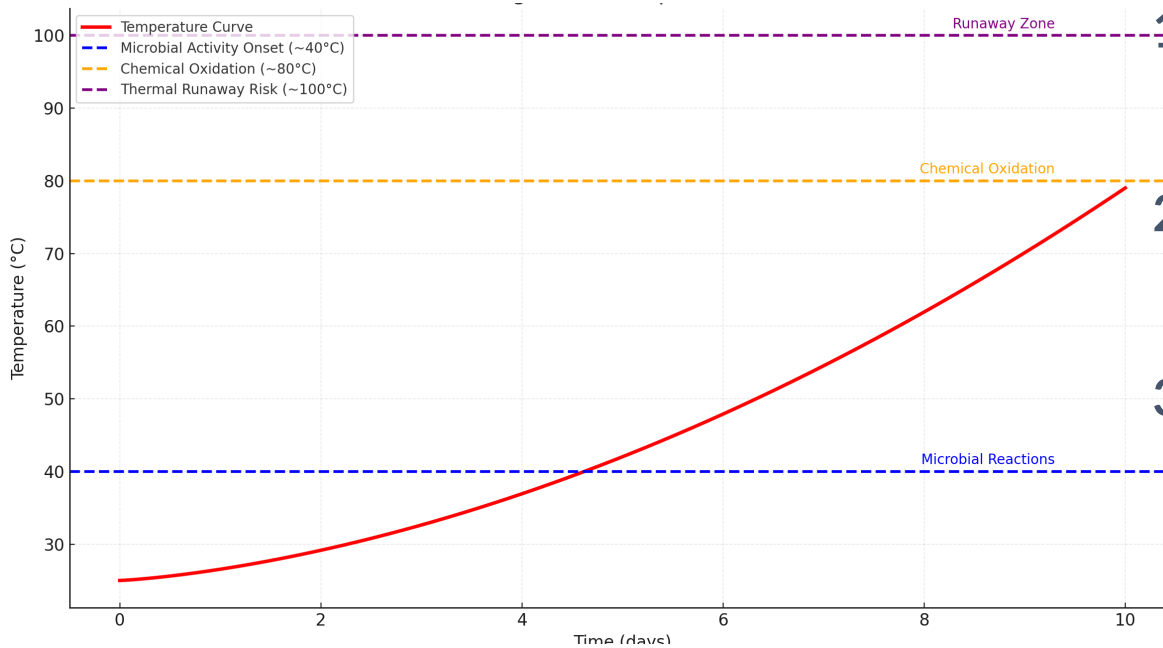


# 自己発熱と熱暴走



自己発熱は、当初はささやかな発熱現象。微生物作用もしくは酸化反応として始まり、ゆっくりと発熱する場合がある。この熱を拡散できないと、温度上昇が続き、ひいては熱暴走、燃焼に至る。

# 自己発熱と熱暴走



1. 自己発熱: 燃料の発熱反応による温度上昇

2. 熱暴走: 急激に高温に至る自己発熱

3. 自然燃焼: 熱暴走によって、見てわかるくすぶりや炎に至る

# 自己発熱: 原因と検知

## 原因

- 微生物による劣化 (早期、高湿貯蔵)
- 化学酸化 (抽出成分、脂肪酸)
- 吸水熱
- バルク貯蔵における蓄熱 (換気不良、断熱効果)

## 検知

- オフガス—酸化炭素 (早期指標)
- におい (例 酸臭、刺激臭)
- 温度勾配の監視
- ペレットの色や質感の変化



## 自己発熱: 原因と検知

- 最も重要な防止策はバルク内複数箇所で貯蔵ペレットの温度監視
- バルク内の反応の検知には、CO 濃度をバルク表面より上の空中で測定
- 進行する自然発熱の最初の兆候のひとつが、鼻につくいやな臭い
- そうした臭いが感じられたら、バルク内で熱分解がすでに始まっているため消火作業を始める必要
- ペレットの色や質感に変化



# 自然発火 VS 外部から着火

<u>項目</u>	<u>自己発熱</u>	<u>外部着火</u>
引き金	内因性生物/化学反応	外熱/炎/火花源
一般原因	水分再吸収、微生物活性、酸化	溶接、静電気、高熱面
経過	ゆっくりで見えないことが多い(複数時間から複数日)	突然、目視可能
検知	センサ要(CO、温度、IR)	一般に目視で発見、または煙・火災警報器
防止策	監視、冷却、水分管理	高熱作業許可、火花防止装置、所内清掃管理
消火策	慎重に消火活動(排気、不活性化、放水なし)	一般的な消火方法(水/泡/消防活動)
リスクゾーン	サイロ内部、ばら積みパイル、屋内貯蔵	コンベヤ、機械室、オープンエリア

## 自己発熱の寄与要因

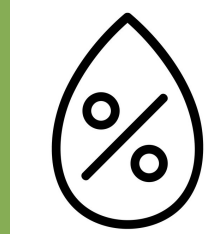
内部要因	作業上の要因
原料の鮮度	貯蔵の温度と湿度
抽出成分 (脂肪酸、樹脂)	可用酸素量
含水率	乾燥温度/方法
粒度分布	ドライヤ滞留時間
密度&多孔性	貯蔵滞留時間
内部表面積	

# 内部要因

抽出成分 &  
脂肪酸含有量



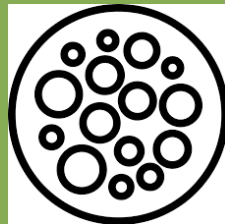
含水率



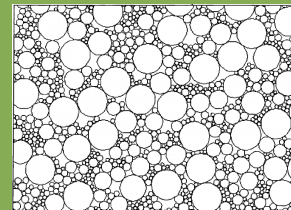
粒度分布



ペレット密度  
多孔性



内部表面積



原料鮮度



## 内部要因 - 抽出成分 & 脂肪酸

- 脂肪酸と樹脂分の高い樹種 → 反応性がより高く、放熱ポテンシャルがより高い
- 近年の研究 (2023-2024) が、樹種による抽出成分含有量と原料の古さが、自己発熱リスクの重要な内部要因であることを示す
- 樹種構成と原料の履歴をモニターすることが、水分と温度の管理と同様に重要

## 内部要因- 含水率

### 危険段階への閾値

- 自己発熱リスクは、含水率が6-8%を超えると急激に上昇する
- この水準未満であれば、微生物活性と酸化は限定的

### 機序

- 微生物の繁殖 → 貯蔵早期に生物学的な発熱
- 水分吸着 → 高発熱性で、ペレットが水分を吸収すると発熱量大
- 酸化の加速化 → 含水率が高いと脂肪酸と樹脂の酸化反応を助長

水分が自己発熱の**単独で最も重要な**内部推進要因  
再湿潤で発生する二次発熱量は、当初の酸化熱の**15-18倍**の可能性

## 内部要因 - 粒度分布

### 表面積

- 微粉になると酸素と接触する表面積が劇的に大きくなる
- そのため酸化反応が加速化し、放熱量が増大する

### ホットスポット形成

- 微粉はパイルの中で局所的に蓄積する
- 微粉ポケットは空気の流れを制限し、断熱効果を生み出す → 発熱が集中し、ホットスポットが局部的に発生

**生産、取扱い、貯蔵中の微粉の発生を管理することが  
自然発熱リスク低減に必須**

## 内部要因 - ペレットの密度と多孔性

- **多孔性大** → ペレット内部の酸素拡散が増大 → 酸化と自己発熱をサポート
- **高密度** → 熱を内部に保持 → 放熱が減り局所的な温度上昇を増幅
- **多孔性も密度も極度に大きい**とリスクを高める - ただし、リスクの機序は異なる

## 内部要因 - 原料の鮮度

- 新鮮な原料: 反応性が高い → 自己発熱のリスク高い
- 時間の経った原料: ペレット化される前に酸化による劣化が発生の可能性 → 貯蔵早期に一酸化炭素が発生するかもしれないが、全体的な反応性は一般に低い
- 時間が経つと抽出成分(樹脂、脂肪酸)の部分酸化につながる
- すると劣化産生物が発生するが、反応性化合物の全体量は減少する

**新鮮な原料** が反応性最大 → しっかりした管理要 (冷却、モニタリング)  
**経時原料** はリスクは残っているが (早期 CO とある程度の発熱)、全般的に  
ひどい熱暴走の可能性は低い

# 作業上の要因

貯蔵温度



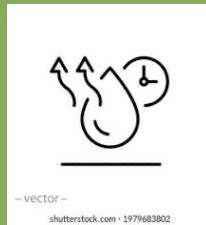
相対湿度  
/水濡れ



酸素可用量



乾燥温度と  
乾燥時間



ペレタイザーの  
圧力と温度



冷却効率



## 操業上の要因-貯蔵温度



ゆるやかな温度勾配



バイオマスの断熱効果



水分 & 発熱のフィードバック現象



「危険段階」に入る

## 作業上の要因-冷却効率



プレスから出て来る  
ペレットは高温  
(~70-90°C)



潜熱保持



水分 + 結露サイクル



増幅循環

残留熱 + 水分 + 限定的な空気流量 =  
酸化反応の完璧な条件

## 操業上の要因-乾燥

### 過剰乾燥のリスク

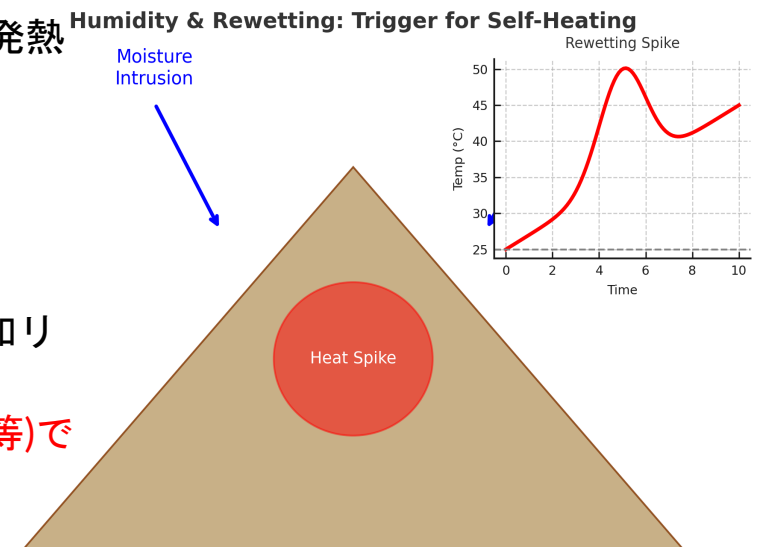
- もろいペレットになり**微粉と粉塵を過剰に発生**
- 微粉は**比表面積**はるかに**高く、酸化反応**を加速化する
- 自己発熱、オフガスのスピードが速くなり、マテハン中の爆発リスクまで高くなる

### 乾燥不足のリスク

- 過剰な**残留水分**がペレットに残る
- 貯蔵早期に**微生物活性**が発現し、生物学的発熱が発生
- 過剰な水分は、水分吸着による発熱につながり、それが二次的な化学酸化の引き金となる

# 操業上の要因-湿度と水分再吸収

- 水分侵入源: 湿潤な空気、水漏れ、温度の低いペレット表面の結露、水蒸気の再吸収
- 直近の作用: 乾燥したペレット表面の水分吸着は、非常に発熱性が高く、急激かつ局所的な熱スパイクを引き起こす
- 二次作用:
  - 酸化と微生物活性を加速化するホットスポットを形成
  - パイル内の相対湿度を上げ、自己増幅サイクルに至る
  - ペレットの構造を弱体化し、微粉を発生してさらに参加リスクを増大する
- 短期的な再濡れ事象 (雨、冷却中の結露、湿潤空気の侵入等) であっても自己発熱暴走の引き金に十分なりうる。



## 操業上の要因- ペレタイザーの温度と圧力

- ペレット加工中の金型温度と圧力が高いとペレットの構造と化学組成が変化する
- 脂肪酸、樹脂、リグニンの熱劣化の可能性→ 反応性化合物の生成
- ペレットの多孔性と内部応力を変化させる → 酸化感受性を増大
- ペレタイザーの運転条件が長期的な貯蔵安定性に直接影響
- 加熱や加圧の行きすぎは、酸化が速く、自己発熱しやすいペレットとなる可能性がある

## 操業上の要因- 酸素可用量

- 抽出成分/脂肪酸の低温酸化 → 熱 + オフガスとしてCO/CO<sub>2</sub>
- パイル内に勾配が発生: 中心部は酸素欠乏状態だが、表面部分は豊酸素のまま。発熱は酸素と水分の両方が存在する部分に局在
- オフガスと相関関係: 方法論研究が、自己発熱と一酸化炭素オフガスの間に強い相関関係を示す (O<sub>2</sub>推進型酸化の実践的な早期指標)
- 不活性化/パージで反応が抑制される: 実験用リアクタ/容器では、窒素パージ、酸素量低下でオフガスが顕著に下がり反応激化が止まる

**水分 × 酸素 = 高リスク**

- 水分が高くなると酸素消費と発熱が増大する。酸素と水分の相互作用が発熱暴走の主たる原因

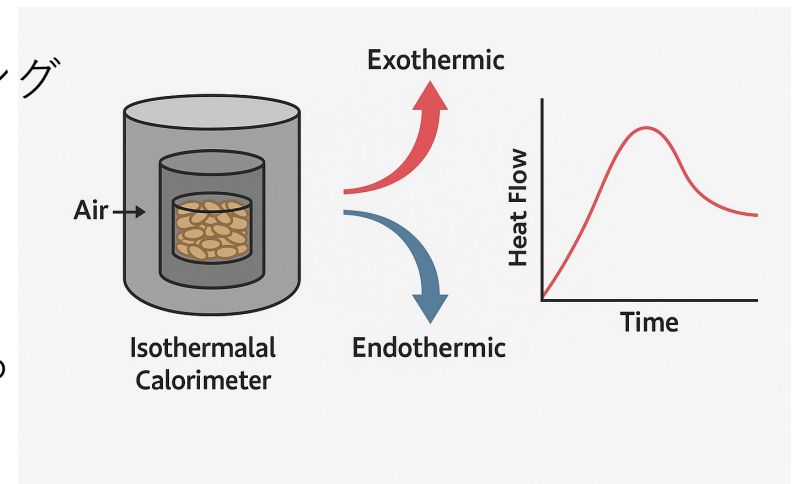
**可能な場合は酸素の侵入を制限する (閉鎖施設なら全面被膜/不活性化)**

**水分を管理して酸素が増幅する自動酸化を避ける**

**ヘッドスペースのCO/CO<sub>2</sub>ならびにO<sub>2</sub>を、早期警告指標として監視する**

## 検出方法 (等温熱量測定法 (ISO 20049-1))

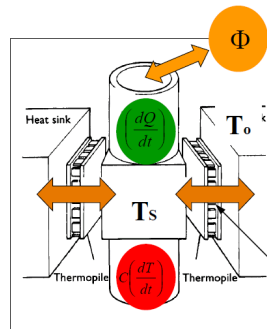
- 木質ペレットを空気流量制御付き等温チャンバに入れる。
- 経時的に**熱発生率**を測定する設備
  - **発熱** = 正の熱の流れ (酸化、微生物活性等)
  - **吸熱** = 負の熱の流れ (乾燥、分解等)
- 生物学的または化学的な酸化の発現タイミング
- **発熱率** と以下による変化
  - **含水率**
  - **酸素可用量**
  - **貯蔵温度**
- **熱暴走**に至りうる条件を予測する一助となる



# 検出方法 (TAM)



TAM III, TA Instrument



General Heat Balance Equation

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi + c \left( \frac{dT}{dt} \right)$$

Rate of Heat Production = Rate of Heat Exchange + Rate of Heat Accumulation  
The measured property

After calibration the following holds:

$$\text{Rate of Heat Production (dQ/dt)} = \text{Heat flow Monitored by TAM}$$

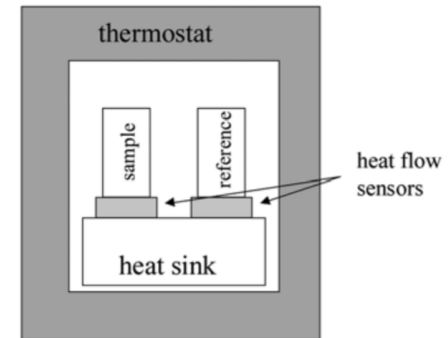
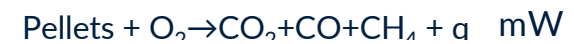


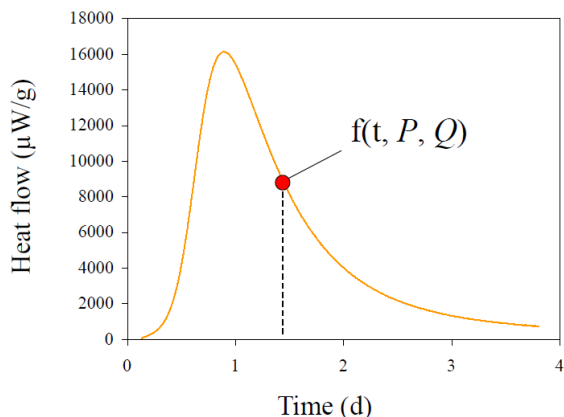
Figure 1 - Schematic drawing of an isothermal calorimeter



熱量計は、熱流にかかわるすべての理学的・化学的プロセスに感受性を持つ  
 熱量計の対象とする熱流には、複数のプロセス由来の熱流が入っている可能性  
 測定熱流値は、発熱反応に比例

# 等温熱量測定

熱流量率計算式:



経時的に反応がどう変化するかを示す。

発熱反応  
吸熱反応

正の熱流信号  
負の熱流信号

$$\frac{dC}{dt} = k \cdot f(c) \quad \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{s}} \right]$$

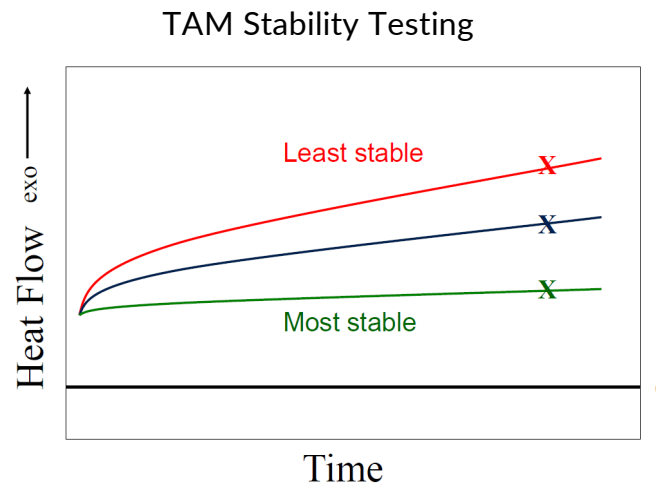
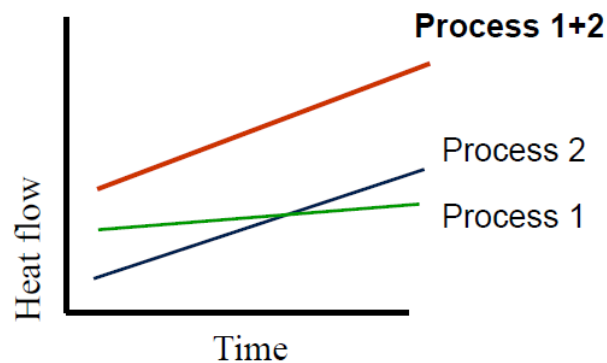
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dC}{dt} \Delta H \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{s}} \right] = \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{s}} \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$$

$$\frac{dQ}{dt} = \Delta H \cdot k \cdot f(c) = \text{Heat flow signal from calorimeter}$$

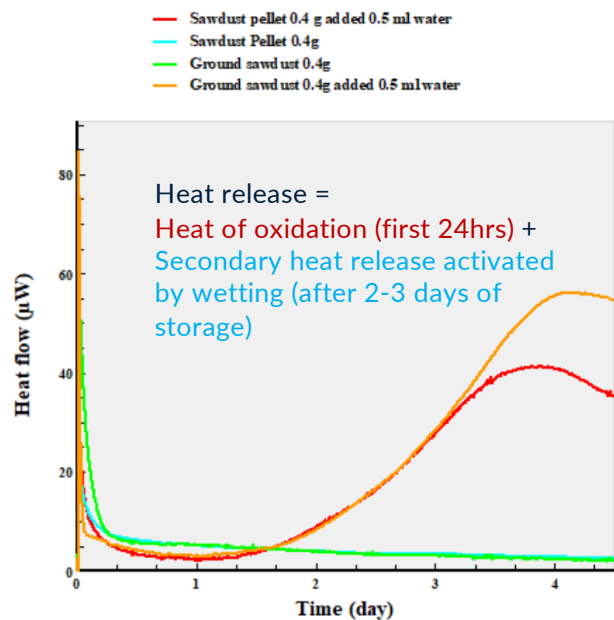
Enthalpy, Thermodynamic Information      Reaction rate, Kinetic Information      Concentration, Analytical Information

# 等温熱量測定

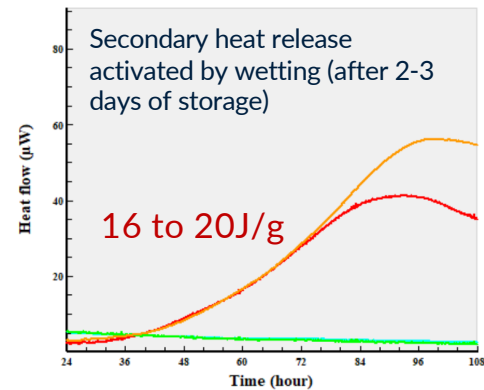
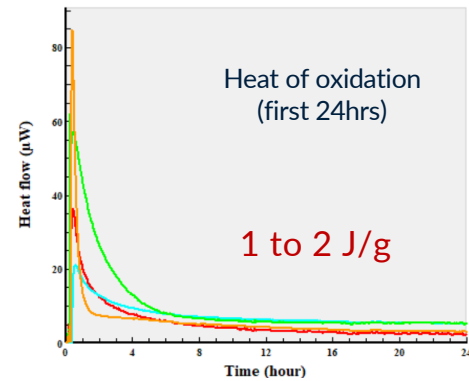
- 熱量計は、熱流にかかわるすべての理学的・化学的プロセスに感受性を持つ。したがって、対象とする熱流には、複数のプロセス由来の熱流が入っている可能性がある
- 個々の熱流は、試験条件を変更することで識別することができる場合がある



# 等温熱量測定- 水分の作用

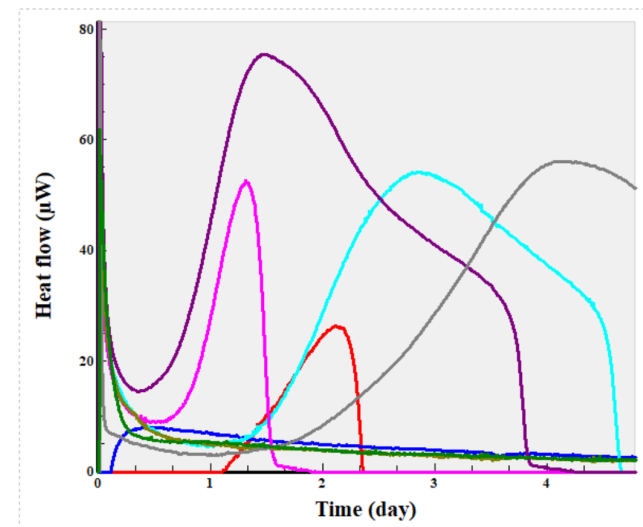
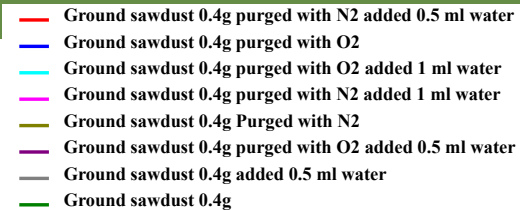


おがくずペレットと粉碎おがくずの  
大気貯蔵5日間の発熱量  
加水の有無別



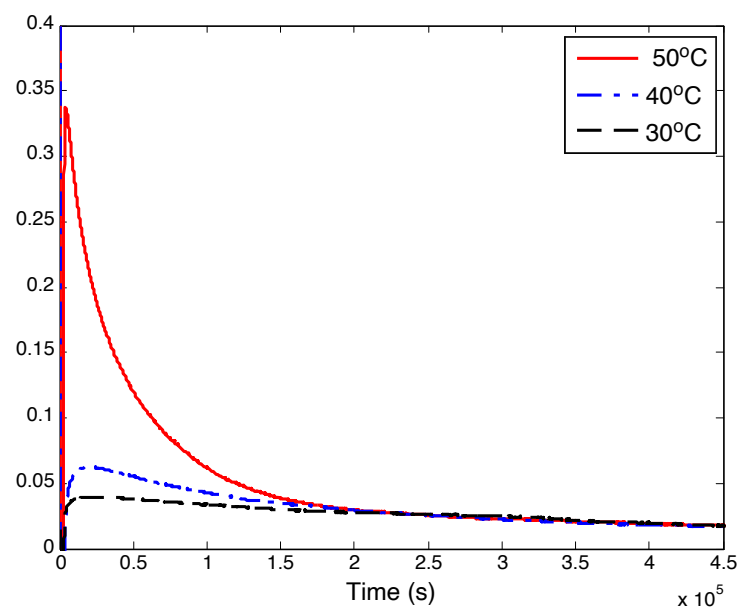
## 等温熱量測定- 酸素と湿潤の作用

- 水分を伴ったときの酸素の効果大→  
自動酸化であり、発熱量大
- 酸素の欠乏環境では、それだけでは  
反応を持続できない→自動酸化なし
- 発熱における水濡れの作用は、酸素  
の作用よりもはるかに大きい。大気/  
湿潤環境の発熱は、豊酸素湿潤環境  
と同じ程度に大きい。



粉碎おがくずの貯蔵5日間の発熱量  
加水ありで、大気環境、豊酸素環境、ならびに豊窒素環境

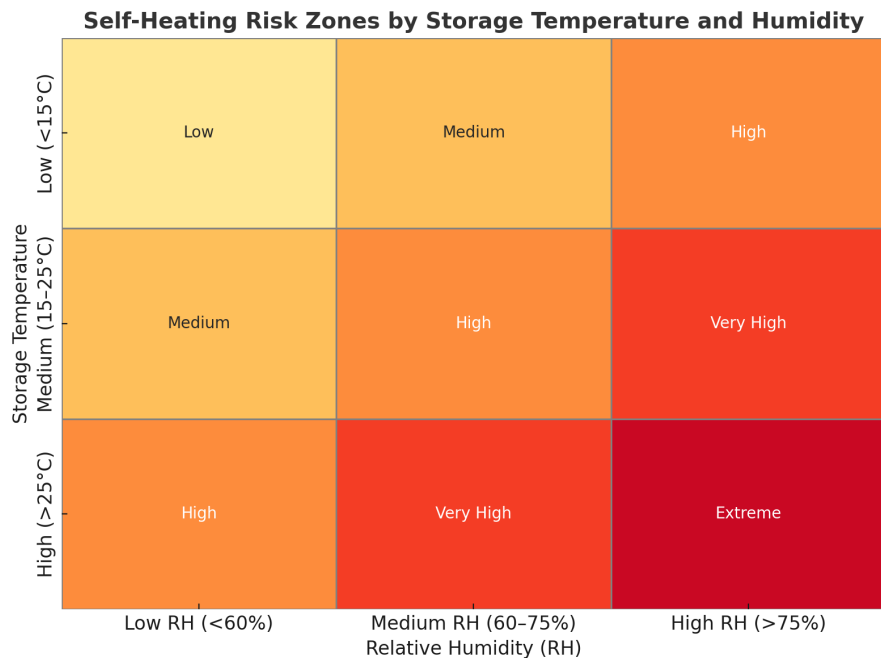
## 等温熱量測定- 温度の作用



温度は発熱率を大きく左右する

貯蔵温度 30, 40 及び 50Cで大気環境におけるおがくずの貯蔵10日間の発熱量

# 例示: 複数因子によるリスクゾーン



## Guo et al. (2019)

### 貯蔵中のバイオマスペレットの自然燃焼特性

異なる水分と貯蔵温度下におけるパインペレットの発熱を研究。

相対湿度と温度の両方が一酸化炭素オフガスと自己発熱リスクに影響することを示す。

## Blomqvist et al. (2017)

### 等温熱量測定と木質ペレットのオフガス

相対湿度と高い貯蔵温度が酸化発熱を加速化することを実証。

## Wang et al. (2002)

### 木質チップとペレットのバイオマス貯蔵と自己発熱

異なる周囲条件でパイル内部温度を記録。

高温で発熱暴走が発生するうえで水分の持つ大きな役割を強調。

## Siwale et al. (2024)

### 貯蔵中の「若い」対「成熟」木質ペレットの熱反応性

周囲条件 10-25°C が高含水率サンプルの大きな発熱につながった。

相対湿度と温度のシナジー効果を確認。

## Bartknecht, W. (1981)

### 爆発防護

閉鎖式バイオマス貯蔵において蓄熱が放熱を上回る閾値を説明(水分下で>25°C等)。

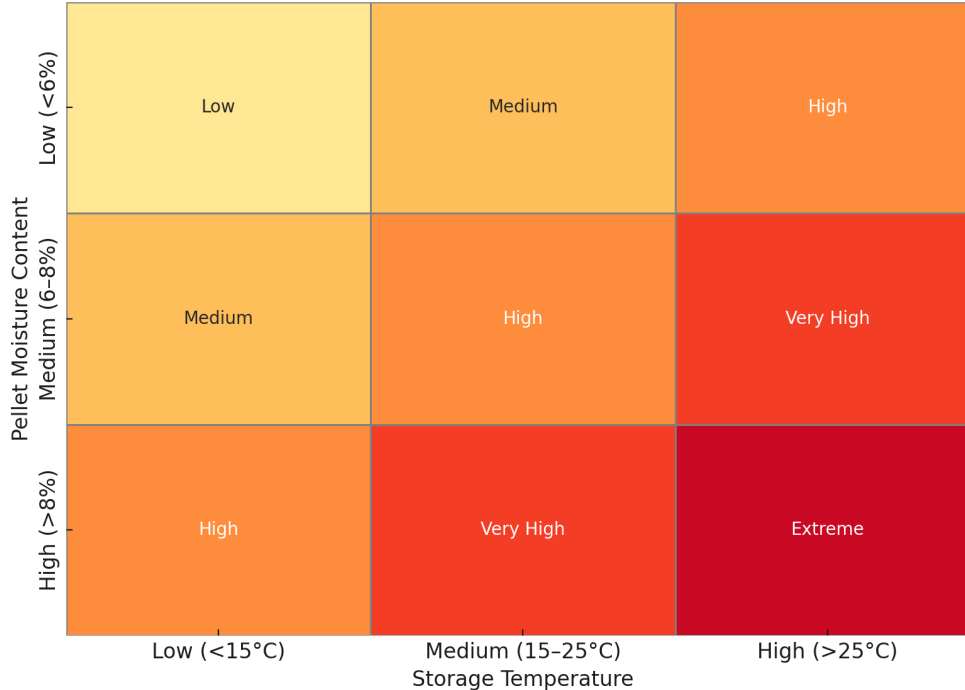
## Statheropoulos & Kyriakou (2000)

### バイオマス燃料の熱重力分析

酸素と相対湿度が早期酸化と乾燥発熱に影響する。

# 例示: 複数因子によるリスクゾーン

Self-Heating Risk Zones by Moisture Content and Storage Temperature



1. Guo et al. (2019) – 貯蔵中のバイオマスペレットの自然燃焼特性

高い温度かつ高い含水率 (>8%) では一酸化炭素と発熱が大きくなった。自然発熱の閾値に温度と水分の相互作用が大きく影響することを立証。

2. Siwale et al. (2024) – 「若い」対「成熟」木質ペレットの実験研究

貯蔵実験で、特に若いパインおがくずでそうであったが、高含水率のペレットの方が大きい温度上昇であった。

~25° Cの貯蔵で含水率6-10%で発熱が大きくなることを確認。

3. Wang et al. (2002) – バイオマスの貯蔵パイルの温度プロフィール

水分存在下で周囲温度と内部貯蔵温度が25° Cを超えると内部温度が非線形で急上昇することを示した。

4. Blomqvist et al. (2017) – 木質ペレットの等温熱量測定

含水率の小さな上昇でも発熱活性を劇的に増大させることを示した。温度と含水率が高いとピーク熱量がより早くより大きく現れる。

5. Bartknecht (1981) – サイロの爆発防護

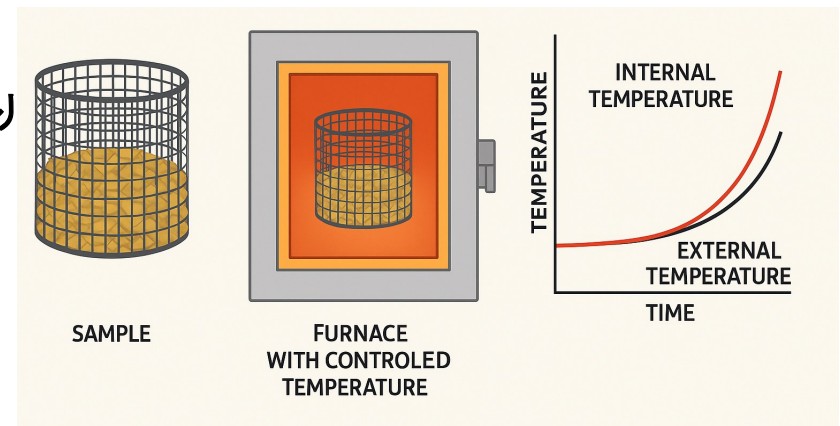
15° C未満では自然発熱リスクが最小限であり、25° Cを超えると急上昇し、特に水分の再吸収がある場合にそうであるという所見。

## 検出方法 (ワイヤーバスケット試験 (ISO 20049-2))

- ペレットやバイオマスのをワイヤーバスケットに入れる
- T\バスケットをオープンに入れ、一定温度 (120°C, 140°C等) で加熱
- サンプルの内部温度を連続観察
- 自己発熱が発生すれば、内部温度は周囲温度より高くなる

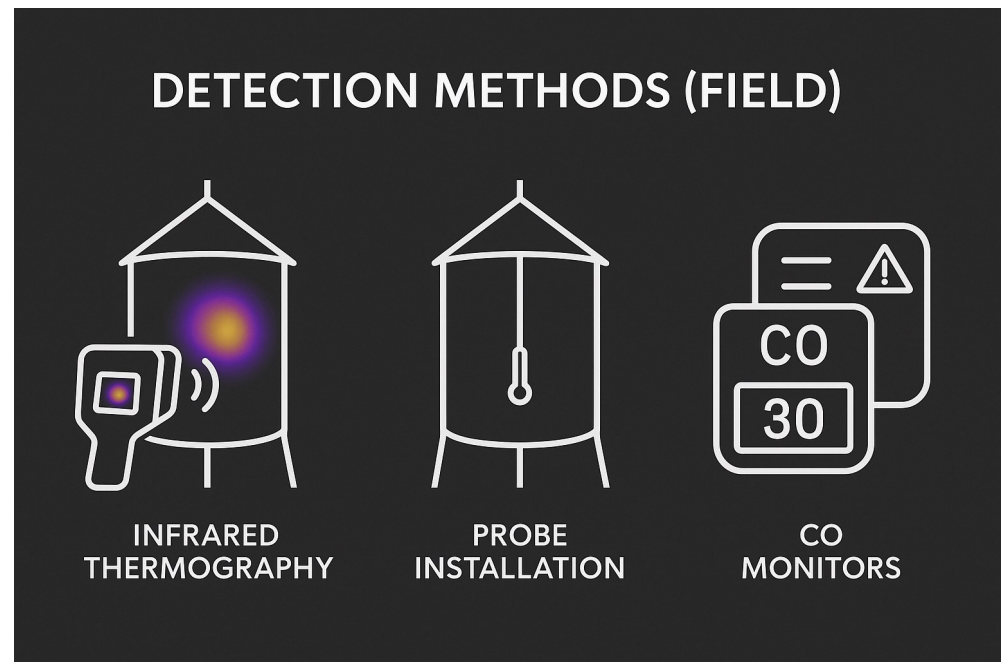
本試験が測定するのは?

- 定義した条件下における自己発熱傾向
- 熱暴走の発現温度
- 発火の危険段階(臨界)温度 ( $T_c$ )
- 材料の分類と原料比較に使用されている



## 検出方法(現場)

- 一酸化炭素 (CO)の監視
- 赤外線 (IR) サーモグラフィ
- 温度プローブ (マニュアル又は設置)
- 早期兆候観察  
(ヒト & 計器類)



---

# MENTIMETER QUESTIONSメンチメータ質問入力

## 主たる学習点: 自己発熱リスクの管理



自己発熱は、現れないが深刻な脅威。警告なしにエスカレーションしうる。監視は必須であってオプションではない。



**内部要因、操業上の要因の両方がかかわる。**  
樹種、含水率、貯蔵条件のどれもがリスク方程式の項目  
**早期発見こそ大きな違いをもたらす**



臭い、オフガス、温度の逸脱値が危険性の重要な早期兆候



**積極的な防止戦略が有効**

冷却、不活性化、定期的な検査、湿度管理で状況のエスカレーションを防ぐことができる

## 主たる学習点



### 温度が重要

貯蔵温度が低いと自己発熱リスクを大きく下げる。温度が高めだと、初期酸化と水分が引き起こす二次的な自動酸化の両方を大きく加速化する。



### 酸素は補助的役割

酸素は貯蔵中の発熱に寄与することがあり、**水分**が存在するとその影響が大きく増大する。乾燥条件では、酸素が主導する発熱は低いままで制御可能。



### 水分が主導要因

水分 (湿度、雨、水濡れ) が存在すると、自動酸化による**二次発熱**が一次発熱の **15-18 倍** となりうるため、水分が最重要なリスク要因。

**Thank you!**

Fahimeh Yazdan Panah  
[fahimeh@pellet.org](mailto:fahimeh@pellet.org)

