

指定可燃物（わら類、石炭、木くず）の主な火災事例

発生月	都道府県	損害	発火源	火災概況	発生原因
平成元年4月	福岡	サイロ及びびサイロ内の牧草	牧草	牧草（乳牛飼育用飼料）を貯蔵する縦型円筒形タンク（有効容量 293 立方メートルの密閉式サイロ）内部で火災が発生し、サイロのルーフが吹き飛んだ。	牧草の自然発火と推定され、サイロには水分含有率 30～40%と推定される低水分飼料が 100 立方メートル貯蔵されていた。
平成 13 年 1 月	北海道	牧草ローラー 160 個、牛 6 頭、プロック造 2 階建、延べ 406 平方メートル延べ 702 平方メートル全焼	牧草ローラー	昭和 46 年建築のプロック造 2 階建て、延べ 406 平方メートル延べ 702 平方メートルの建物で 1 階を牛舎、2 階を牧草ローラー保管場所として使用していたが、火災により全焼。	牧草ローラーに何らかの水分補給が行われ、自然発火により出火に至ったと推定。
平成 13 年 9 月	北海道	牧草ローラー 140 個、木造タンク 1 階建、延べ 272 平方メートル全焼	牧草ローラー	昭和 60 年建築の木造タンク張り、延べ 272 平方メートルの建物で牧草ローラー保管場所として、約 140 個の牧草を保管していたが、火災により全焼。	牧草ローラーの中に芯のみ焼けている牧草ローラーが確認されていることから、何らかの水分補給が行われ、自然発火により出火に至った。
平成 13 年 9 月	北海道	牧草ローラー 175 個、鉄骨造 1 階建、506 平方メートルの牛舎兼置場を半焼	牧草ローラー	昭和 63 年建築の鉄骨造、延べとも 506 平方メートルの牛舎兼置場の建物で牧草ローラー保管場所として、約 175 個の牧草を保管していたが、火災により半焼。	牧草ローラーに何らかの水分補給が行われ、自然発火により出火に至ったと推定。
平成 11 年 2 月	北海道	石炭約 0.5 トン	石炭	約 300 平方メートルの敷地に約 1,500 トンの輸入石炭をコンクリートの囲いの中で野積みしているところにおいて、石炭約 0.5 トンが焼損した火災。	コンクリート壁と石炭が接しているところから蓄熱し自然発火により出火に至った。
平成 13 年 8 月	神奈川県	木くず約 1 立方メートル	木くず	野積みされた木くず約 3,000 立法メートルのうち、1 立方メートルを焼損した火災。	野積みされた木くずが自然発酵により自然発火に至ったと推定。
平成 13 年 12 月	和歌山	木くず約 50 立方メートル	木くず	約 3,000 平方メートルの敷地で、約 15,000 トンの繊維質に粉砕した木くずを集積し、発酵させ、堆肥を製造している木くず集積場において、木くず約 50 立方メートルが焼損した火災。	木くずが約 5～6 メートルの高さに積み上げられていたことにより、内部での微生物の酵と酵素の働きによる発酵と分解生成物の酸化反応により温度上昇が続き、自然発火による出火に至った。
平成 14 年 7 月	滋賀	スチール製の物置 2 個（3、6 平方メートル）	油ぼろ	油をしみこませた布を段ボール箱に入れ、スチール製の物置で保管中、当該布から出火しスチール製物置 2 つを焼損した火災。	段ボール箱内の油をしみこませた布の酸化反応により温度上昇が続き、自然発火により出火に至った。



廃プラスチックのリサイクル施設における自然発火事例

いな ば とし ひろ
稲 葉 敏 寛*

容器包装リサイクル法施行に合わせ、各地で廃プラスチックの再資源化に関する事業が推進されている。新規事業では思わぬ原因から災害が発生することがある。

川崎市消防局管内の廃プラスチックのリサイクル施設において自然発火と推定される火災が発生したので、その概要を紹介する。

キーワード：廃プラスチック、自然発火、磁気テープ

1. はじめに

2000年4月から施行された容器包装リサイクル法に合わせ、各地でプラスチック製容器包装の再資源化に取り組む事業が推進されているが、川崎市に所在する廃プラスチックのリサイクル施設において、平成12年11月23日(木)7時33分ころ自然発火による火災が発生したので、その概要を紹介する。

2. 廃プラスチックの高炉還元剤化

この事業所では、廃プラスチックを製鉄所の高炉に

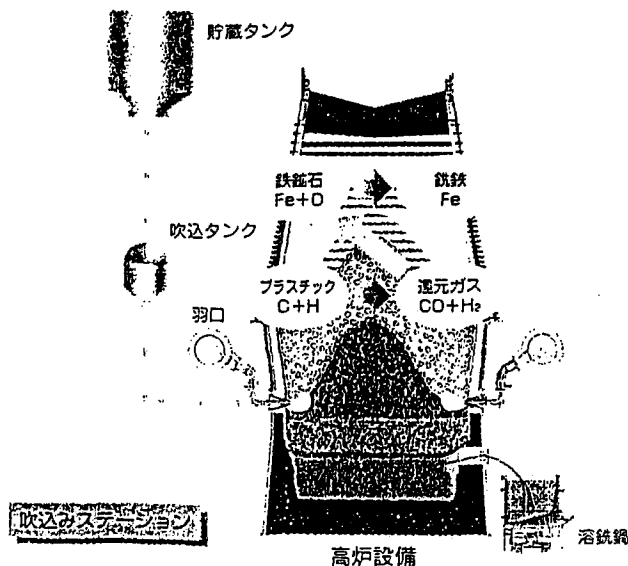


図1 高炉における廃プラスチックの利用

おいて還元剤として使用できる形に加工する事業を営んでいる。

一般的に高炉では、頂部から鉄鉱石とコークスを交互に投入し下部(羽口)から空気を吹き込むことにより、まずコークスが燃焼して一酸化炭素になり、この一酸化炭素により鉄鉱石(酸化鉄)が還元され熔融した鉄鉄となり、炉底部に蓄積していく構造となっている。鉄鉱石を還元した一酸化炭素は二酸化炭素となり、大気に放出される。

そこでコークスの代わりとして廃プラスチックを使用すると、プラスチックの構成元素の炭素と水素が還元剤として作用する(図1)。大気に放出されるのは二酸化炭素と水蒸気となることから、二酸化炭素の発生が抑えられ、廃プラスチックの有効利用とともに地球温暖化防止にも役立つ。

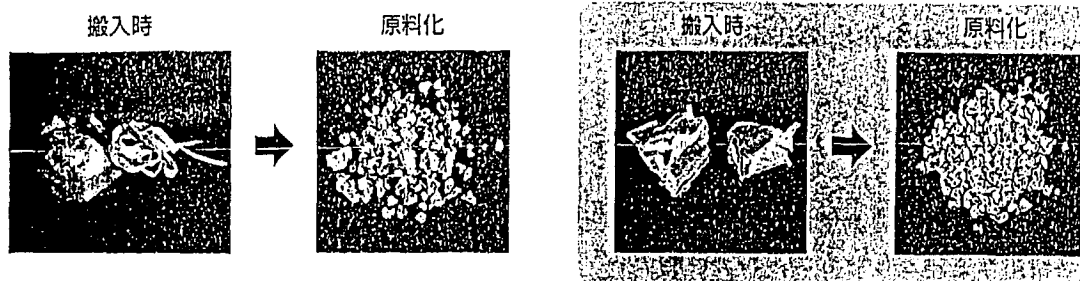
3. 廃プラスチックの造粒

廃プラスチックは、2000°C程度の炉下部で一気に炭素と水素に分解させる必要があることから、羽口から空気と一緒に炉内に吹き込むことが必要であり、このため廃プラスチックはペレット状に加工(造粒)する必要がある。

廃プラスチックは、ペットボトルのような固形・ボトル系のもものと、磁気テープ、ラミネートフィルム、発泡ウレタン、スポンジ、カード屑、農業用ポリシート、ポリエチレン袋などのフィルム系のもものとに分別して収集され、それぞれ処理される(図2)。

固形・ボトル系のもものは破砕機により破砕することにより空気管輸送に使用できるものとなるが、フィルム系のもものは破砕したのみでは、空気管による輸送中に管の内壁に張り付くなどの障害が発生するため、破砕したものを熔融造粒機によりいったん熔融してから

* 川崎市消防局予防部保安課：〒210-8563 神奈川県川崎市川崎区南町20-15



(a) フィルム系プラスチック (薄くて軽い)

(b) 固形プラスチック (硬くて大きい)

図2 廃プラスチックの造粒

固化させることにより造粒する必要がある。

フィルム系の廃プラスチックを造粒するには、貯留ヤードからショベルローダでコンベヤを經由して破碎機に投入し破碎した後、選別機で重量や磁力によりフィルム系のものとその他のものに選別し、熔融造粒機に送り込む。熔融造粒機は密閉構造となっており、中では2枚の羽が高速回転しており、ここを通過することによりさらに細かく切断されながら擦り潰されていく。そのときの摩擦熱で150~200℃になり、フィルム系プラスチックが軟化熔融状態となる。軟化熔融した状態で、一気に散水冷却することにより粒状(原料プラスチック)にすることができる。

この作業が終わると、熔融造粒機の排出ゲートが開放され、造粒された原料プラスチックは振動排出装置のふるいの上に移され、ふるいを通過したものが貯留サイロに貯蔵される(図3)。

一方、ふるいを通過しなかった造粒未完成の廃プラスチック(未完成品)は、通常1日1~3回、1回につきみかん箱一つ程度の量が回収され、貯留ヤードに戻される。

今回の火災は、フィルム系の廃プラスチックを貯蔵

している貯留ヤードから出火し、廃プラスチック約10m³、貯留ヤードの建物約100m²を焼損したものである(図4)。



図4 貯留ヤード火災現場

なお、当日の気象状況は、天候曇り、風向北北西、風速2m/s、気温8℃、相対湿度61%、実効湿度65%であった。

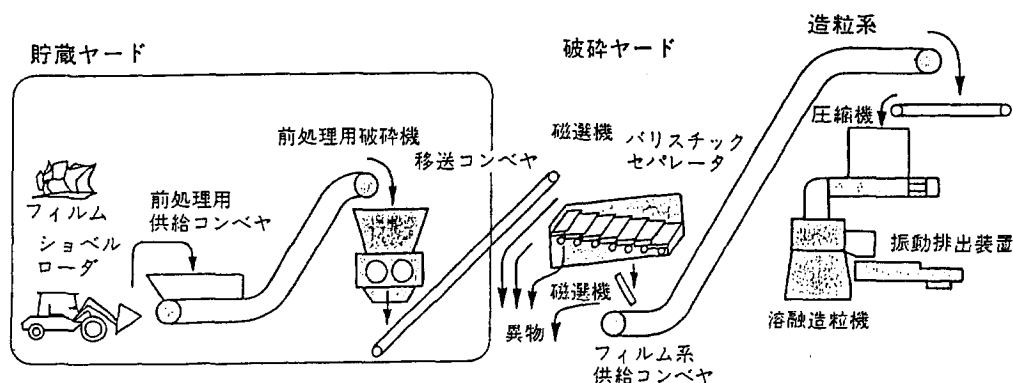


図3 フィルム系廃プラスチックの造粒工程

4. 火災前の作業の状況

廃プラスチックのリサイクル作業はバッチ式に行われており、火災当日の作業状況はつぎのとおりである。

貯留ヤードには、おもに農業用ポリシートを主体としたもの、容器系を主体としたもの、および廃テープ（磁気テープ）、廃テープロール、PPバンド、ラミネートフィルム、発泡PU、スポンジなどの「混合材」に分類して山積みになっており、ここから15分に1回程度の割合でショベルローダで破碎機などに供給する前処理コンベヤに投入される。

発災当日の6時前までは、農業用ポリシートを主体としたものを装置に投入していたが、6時からは混合材を装置に投入していた。

6時00分ころ：貯留ヤードから、混合材をショベルローダで前処理コンベヤに投入した。

6時21分ころ：熔融造粒機に前処理工程から送り込まれた混合材の廃プラスチックの造粒作業を開始した。

6時30分ころ：熔融造粒機のふるい上に、粒状にならず枯葉状になった未成品が多量にあったためこれを集め、ショベルローダで貯留ヤードに戻した。

これ以降は、交代の準備のため、貯留ヤードへの人の出入りはなかった。

6時36分ころ：造粒作業が終了したが、このときふるい上には枯葉状になったフィルムは認められなかった。

7時38分ころ：廃プラスチック貯留ヤードの自動火災報知設備が作動したので、当該建物内に設置されたテレビモニターで確認したところ火災が認められた。

火災発生前の作業の状況は以上のとおりで、熔融造粒機のふるい上で、粒状にならず枯葉状になった未成品を集め、ショベルローダで貯留ヤードに戻した約1時間後に出火している。

5. 現場調査の結果

火災の後、現場を調査したところ、熔融造粒機の排出ゲートの周りに廃プラスチックのかすが付着しており、排出ゲートが完全には閉鎖されていなかったこと、およびこの排出ゲートの隙間から枯葉状になった熔融造粒途中の廃プラスチック約0.2m³がこぼれ落ちていたため、作業員が回収し貯留ヤードに戻していたことが判明した。

このとき作業員は、表面を手で触って温度を確認したが、特に熱くはなかったと証言している。

また、火災当日の6時からの投入では、混合材の山

の中から、廃テープがまとまって積み上げられていた部分と、廃テープのみでは造粒がうまくいかないことから、その他の廃プラスチックの部分を見た目で半分くらいずつショベルローダにすくい上げ、装置に供給したと証言している。

火災が発生した貯留ヤードには火気を使用する設備は一切なく、また喫煙管理も十分行われていることから、自然発火が疑われ、調査したところつぎのことが判明した。

6. 造粒途中の廃テープ類の熱挙動

熔融造粒機のふるい上で、粒状にならず枯葉状になったフィルムを集め、貯留ヤードに戻した約1時間後に出火していることから、当日と同じと思われる貯留ヤードの山から、廃テープとその他の廃プラスチックを半分ずつ混ぜたものを熔融造粒機にかけ、造粒機内の壁体に設置された温度計で120℃まで昇温した時点で散水冷却せずに造粒機のゲートを開け強制的に振動排出装置の上に取り出したところ、廃テープ類は枯葉状（熔融せずにしわくちゃになった状態）になっていた。

これを直径約30cmのポリバケツに入れ、中央部に熱電対を挿入して熱挙動を調査したところ、50分後に約240℃まで上昇した後、いったん約130℃まで降下したが、測定開始から150分後に再び温度が上昇し、最高約300℃に達した。

また、表面温度も放射温度計で測定したところ、測定開始直後は31℃であったものが、33分後には199℃に達し、発煙が認められた。さらに、61分後には発煙量が多くなったのが確認されたが、表面の温度はほとんど変わらなかった（図5）。

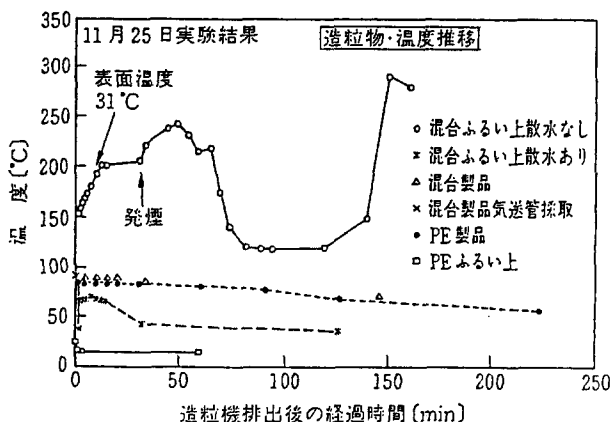


図5 火災となった廃プラスチックの熱挙動

7. 廃プラスチックの種類ごとの示差熱分析

事故当時廃プラスチックの中に含まれていたと考えられる廃テープロール、フレコンバック、PPバンド、スポンジ、ラミネートフィルムなど物体ごとの示差熱分析試験を行い比較したところ、「発熱開始温度」は廃テープロールが159.6℃であったのに対し、ラミネートフィルムが220.2℃、発泡PUが222.3℃などで廃テープロール以外のフィルム系プラスチックは220℃以上であった(表1, 図6~図14)。

一方、「発熱開始温度」と「減量を伴う発熱開始温度」は、廃テープロール以外のフィルム系プラスチックは同じであるのに対し、廃テープロールは「発熱開始温度」が159.6℃に対し「減量を伴う発熱開始温度」が368.6℃であり、減量を伴う発熱が開始する(≒燃焼を開始する)前になんらかの発熱反応を起こしていることが判明した。

以上のように、廃テープロールの「発熱開始温度」が最も低く、かつ実際の熔融造粒機通過後の温度に近

表1 廃プラスチックの示差熱分析結果

	発熱開始温度 [°C]	減量を伴う 発熱開始温度 [°C]
廃テープロール	159.6	368.6
ラミネートフィルム	220.2	220.2
発泡PU	222.3	222.3
トリミングロスロールバラ	223.9	223.9
フレコンバック	226.8	226.8
PPバンド	230.0	230.0
スポンジ	262.8	262.8
ラミネートフィルムロール	378.7	378.7
硬シート	383.4	383.4

く、一方、廃テープロール以外のフィルム系プラスチックの「発熱開始温度」は実際の通過温度よりかなり高いことから、廃テープ(磁気テープ)ロールが今回の火災の原因と考えられ、これについて考察を行った。

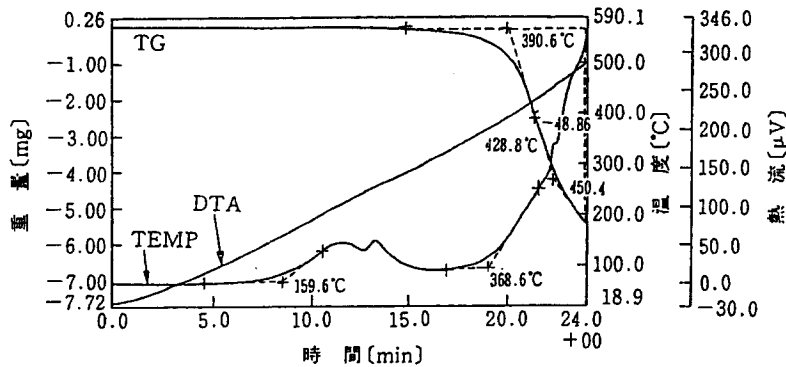


図6 示差熱分析チャート(廃テープロール)

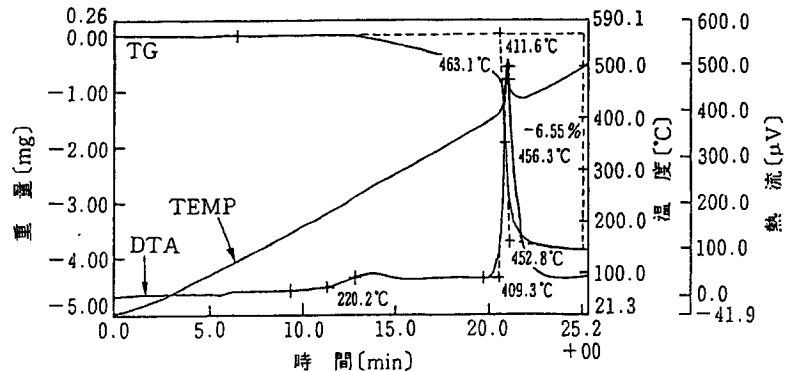


図7 示差熱分析チャート(ラミネートフィルム)

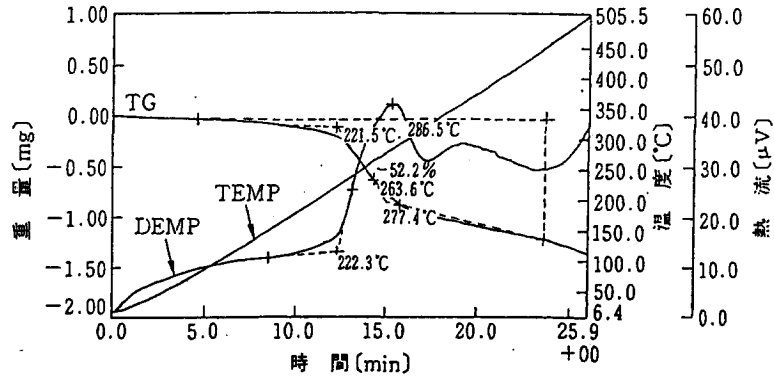


図8 示差熱分析チャート (発砲PU)

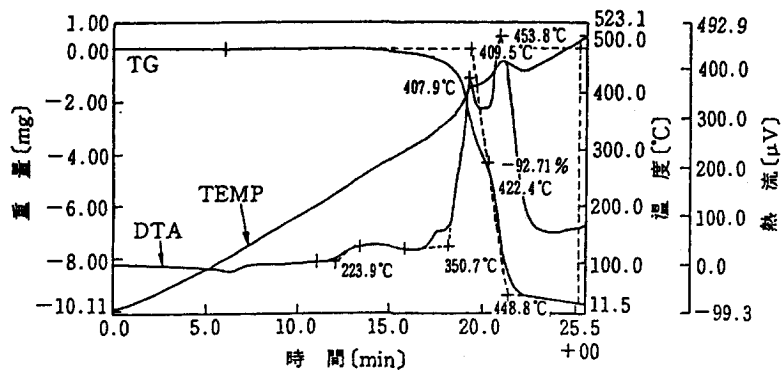


図9 示差熱分析チャート (トリミングロールバラ)

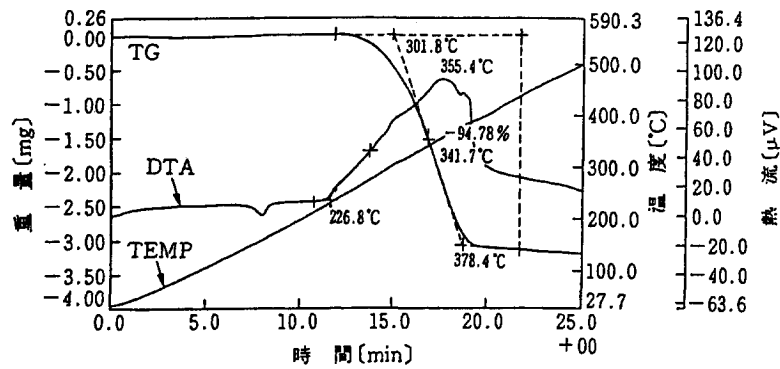


図10 示差熱分析チャート (フレコンバック)

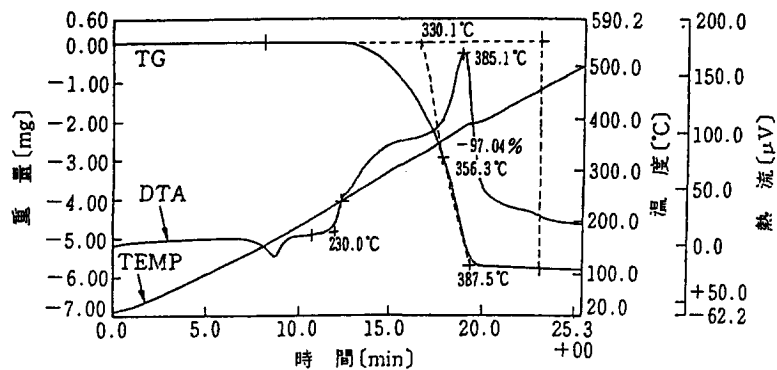


図11 示差熱分析チャート (PPバンド)

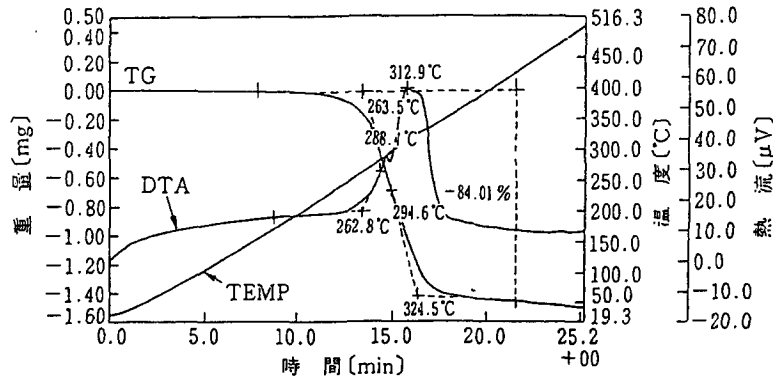


図12 示差熱分析チャート (スポンジ)

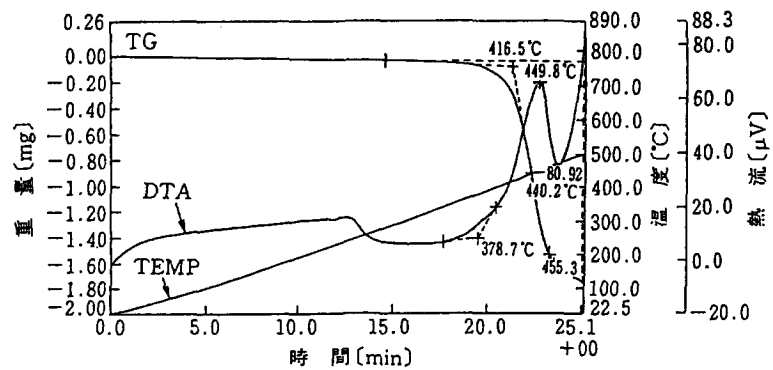


図13 示差熱分析チャート (ラミネートフィルムロール)

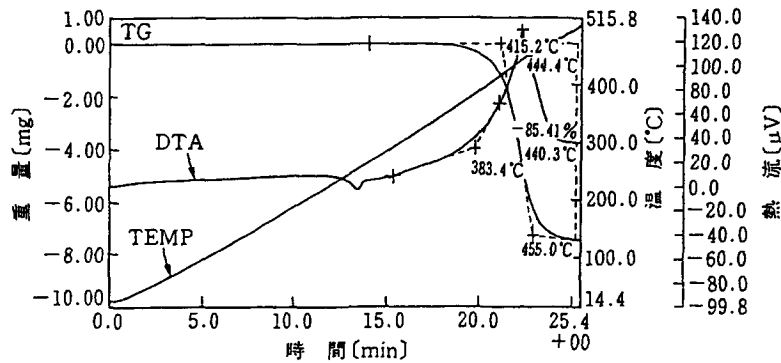


図14 示差熱分析チャート (硬シート)

8. 磁気テープの特徴

磁気テープは、ポリエチレンテレフタレート製のベースフィルムの上に数十 μm ×1 μm の大きさの磁性体の粉末を有機溶剤で練ったものを塗布してある。磁性体はノーマルテープと呼ばれるものでは酸化第二鉄系統のものを使用しており、メタルテープと呼ばれるものでは純鉄を使用している。

磁性体に純鉄を使用しているのはオーディオ用のメタルテープのほか、ビデオ用の8mmテープ、DVC

テープなどがある。

純鉄を使用しているメタルテープ系のものでは、有機溶剤に直接磁性体を練りこんだままで製造すると、テープの表面の磁性体が露出している部分で酸化が進み、性能が劣化するため、個々の磁性体を保護層に包んだ形態のものが使用されている。

したがって、メタルテープ系の場合には条件が整った場合は廃テープ（磁気テープ）ロールの示差熱分析の結果のとおり、磁性体の酸化反応により発熱する可能性がある。

9. 火災原因の推定

磁気テープが造粒される場合、完全に造粒が終了したものは、いったん溶融しているため磁性体が溶融したベースフィルムなどに取り込まれた状態となり、空気と接触する可能性は少ないが、120℃程度で造粒機から排出されてしまったものはベースフィルムなどが溶融するまでに至っておらず、造粒機の羽によって保護層などが剥ぎ取られて、磁性体が空気と接触する状態となる可能性が高くなる。

このため、メタルテープに使用されていた純鉄の粉体が空気に触れて酸化される状態となったこと、十分に冷却を行わないうちに貯蔵ヤードに堆積させてことから酸化反応が促進されたこと、放熱しにくい状態に置かれたことにより、酸化熱が蓄積して昇温を始め、

やがて出火したものと推定した。

10. おわりに

新規事業の推進にあたっては、事業者は十分な安全性を検討したうえでに行っていると思われるが、予想外のところで危険が存在することがある。

特に、廃棄物を処理する場合には、その中身の把握が不十分である場合が多く、これが原因で思わぬ災害を発生させることがある。川崎市では、平成9年にも液体の産業廃棄物処理施設の地下タンクの中で化学反応が進み、爆発的な火災に至ったことがある。

今回の事故は、廃棄物を処理する新規事業の施設からの火災であり、同様の事故の防止に役立てていただければ幸いである。

牧草の自然発火事例

年月 昭和 52 年 10 月 29 日

場所 北海道広尾郡

概要 焼損建物は、牧草収納庫（木造平屋、波トタン外壁、トタン葺、1,320 m²、約 15 m x 91 m）一棟、焼損物件は、牧草のロールペーラ（乾燥した牧草をロール状に巻いたもの。形状は、直径長さとも約 1.5 m で、一個 700 kg）608 個及び大型巻取磯（外国製で、牧草をロールペーラする機械）等である。特殊可燃物である牧草、しかも一個 700 kg もある機械で強く巻きあげたロールペーラのため、水の浸透が悪く、表面の燃焼を押えたかに見えても、僅かな残り火で次々と燃え出す。このロールペーラが、三段積みされていた。そこで、輻射熱を防ぎながら、バックレーキ（トラクターの先端にブルドーザーの先端のようなものを取り付けた車）で搬出または積段をくずし、拡散させ消火するか、焼滅させるかいずれの戦術を取るか判断しなければならない。検討の結果、拡散焼滅消火の作戦ときまった。最後には、大型湿地用ブルドーザーや大型ユンボを使い埋没消火をした。予防対策として以下のことがあげられる。

- 1 発酵しない様に乾燥を良くして梱包する。
- 2 野積みで発酵熱を放散させ、2 週間以上経過してから収納する。
- 3 収納庫は空気の流通を良くし湿気を排除する。
- 4 高く段積みする場合、栈木等で重圧及び空気の滞溜を防ぐ工夫をする。
- 5 収納後は発酵の湯気や刺激性の臭いに注意する。
- 6 収納庫に機械類を乾草と一緒に収納しない。
- 7 大型収納庫より分散収納庫を考える。

参考文献

南十勝消防本部:牧草の自然出火, ほのお, 8 号, pp. 14-16, 1980.

南十勝消防事務組合 大樹消防署:自然出火による干草収納庫火災, 近代消防, 1 月号, pp. 164-167, 1978.

牧草の自然発火およびくん炭化

牧草の自然発火に関する事例は、海外でも古くから知られており、アメリカでは、乾草やサイレージ調製上、水分域 30～40% をファイヤゾーン（自然発火域）と呼んでおり、最も危険な水分域としている。すなわち、水分域 30～40% は、特に高温微生物の増殖・発酵に最も適しており、水分が低いと、牧草中の栄養源を溶出して微生物の栄養源とするのが難しくなり、十分な増殖ができなくなる。他方、水分が高くなると、内部の密度が高まり、空気中の酸素との接触が不十分となるため、好気性菌の増殖はある程度緩慢となり、しかも水分が高い状態では変敗により堆肥化してしまう。このように、水分域 30～40% が自然発火の上で危険帯と言うことになると、乾草では水分を 20% 以下に調製すべきであるものの、乾燥不十分な、いわゆる水分の高い状態で貯蔵された場合であり、他方、サイレージでは、むしろ水分が低すぎる状態である。

したがって、乾草およびサイレージで問題となるのは、乾草を調製していたが、なかなか天候が良くならないため乾燥が不十分な状態であるにもかかわらず、仕方なしに梱包し、乾草として貯蔵してしまう例であり、また同じく乾草として調製していたが、十分な乾燥ができないためサイレージとしては乾き過ぎの状態であるにもかかわらず、サイレージとして調製してしまう例である。

もちろん、サイレージ調製中の過乾燥も危険な状態となる。この際、乾草調製は開放的貯蔵のため自然発火につながり、サイレージ調製は閉鎖的貯蔵のためくん炭化につながる。

また、サイレージ調製の場合、密封条件下では、酸素との接触が遮断されるため、一定の嫌氣的発酵を行い、その後サイレージとして安定する。しかし、この際に、密封がなんらかの理由で不十分になると、そこから酸素が侵入し、好氣的微生物、特にカビによる変敗により発熱を起し、二次発酵、さらには過乾燥の場合、くん炭化現象に結びつく。

他方、良質のサイレージが調製されたとしても、低水分の状態では、密度が低く、フワフワした状態のため、取り出しによる開口と同時に空気が侵入し易いため、二次発酵による変敗を起す。もし、変敗速度が取り出し量を上回ると、次第に変敗部が加速され、発酵・発熱を起し、くん炭化現象を引き起こすことになる。いずれにせよ、過乾燥となった牧草のサイレージ調製は、最もくん炭化現象を引き起し易いと言える。

実は、乾草の自然発火に拍車をかけたものに、乾草の大型梱包、いわゆるビッグベールの普及がある。ビッグベールは一貫した機械化作業体系がとれるため、省力化の点で優れ、このため、近年、根釧地域で急速にビッグベールの導入が広まっている。このビッグベールが普及するまでは、コンパクトベールが主体であった。もちろん、コンパクトベールでも自然発火の例は見られたが、ビッグベールほどではなかった。

ビッグベールはコンパクトベールが 1 梱包 15 kg 前後であるのに対し、1 梱包 300 kg に及ぶため、内部で一度微生物の増殖による発熱が起ると、放熱がなかなかうまくゆかず、温度が内部に蓄積するチャンスが大きくなる。したがって、ビッグベール内における蓄積熱をできるだけ防止するような対策も、自然発火防止の上から重要になってくる。

とりわけ、ビッグベールの乾草による自然発火が多いことから、これまで述べてきたことを主点に、その自然発火のメカニズムを、その対策を含めてフローチャートに示した。その防止対策を表に整理した。なお、このように、十分な注意を払っても、時として危険な状態に陥ることがある。もし、サイレージの取り出し中に、くん炭化が確認された場合には、サイロ内部が一部灰になり空洞化している場合があるので、サイロ内に入る時には、板や梯子を置いてから入る等の注意が必要である。

ビッグベール乾草の場合には、草舎に収納後 1 カ月間は、観察をこまめに行ない、サイレージ臭、焦げ臭（タバコ臭）、湯気、煙等に十分注意し、もし、異常に気付いた場合には、自然発火の危険があるので、消火の準備をしつつ、ベールを草舎から搬出し、放冷する等の対策が必要である。

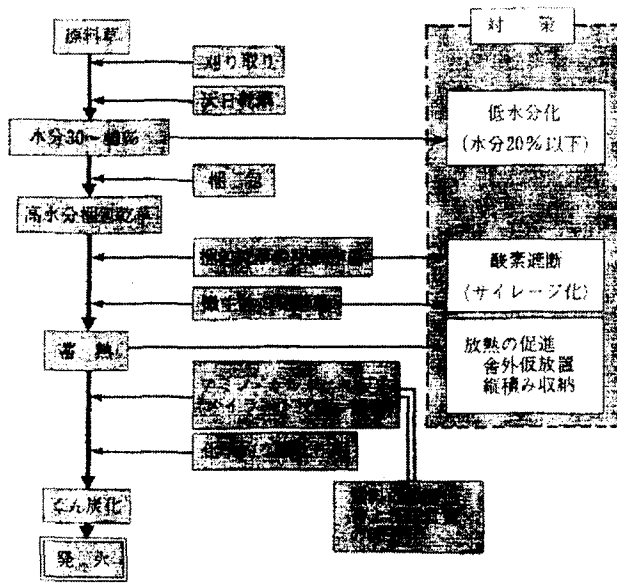


図 ビッグベール乾草の自然発火のメカニズム

表 牧草のくん炭化及び自然発火防止対策

分	対策
サイレージ (くん炭化)	<ul style="list-style-type: none"> ○サイロ取り出し口のパッキン、ハッチのヒビ割れの点検、排汁口の密閉等、サイロの気密性の保持。 ○水分50%以下での調製を避ける。 ○適正な取り出し量で利用する。 ○詰め込み密度をできるだけ高め、酸素の侵入防止に努める。 ○サイレージが黒変し、発熱が持続する場合には、高熱のサイレージを取り出し、発熱がおさまるまで完全に密閉する。
高水分 (自然発火)	<ul style="list-style-type: none"> ○極力水分を低下させ、水分20%以下で梱包する。 ○乾燥不十分な状態で梱包した場合には、舍外に仮置きし、熱や水分を散发させてから収納する。 ○ビッグベールの積み方は、少なくとも下2段は横積み避け縦積みとし、しかも堆積段数は3段以内に止め、風通しを良くする。 ○原料草の乾燥むらをできるだけ小さくし、雨漏り等による雨水の防止を図る。

注) 特に、水分30~40%域はファイヤーズンであるので、この水分域での貯蔵は避ける。

参考文献

杉本亘之, 牧草の自然発火およびくん炭化防止対策, 畜産の研究, 43(11), pp. 1279-1284, 1989.

Miao らは、牧草の自然発火過程を実験的に調べた。試料として、イタリアンライグラスを使用した。等温断熱型反応装置により空気相対湿度、空気流量、初期温度、試料含水率、充填密度などの条件を変えて実験を行った。

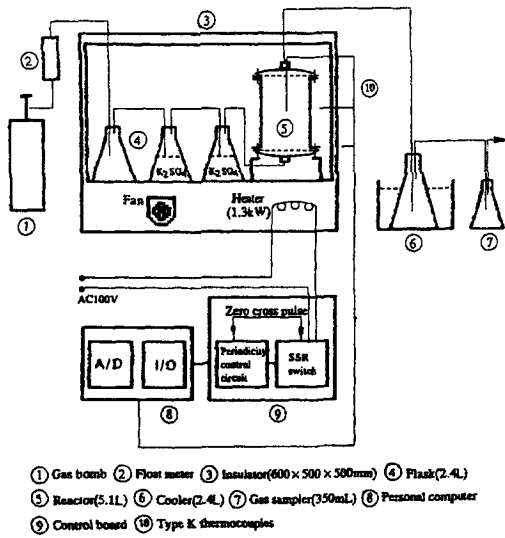


図1 実験装置

内容積 5.1 dm³ のステンレス製円筒容器を恒温槽中に設置

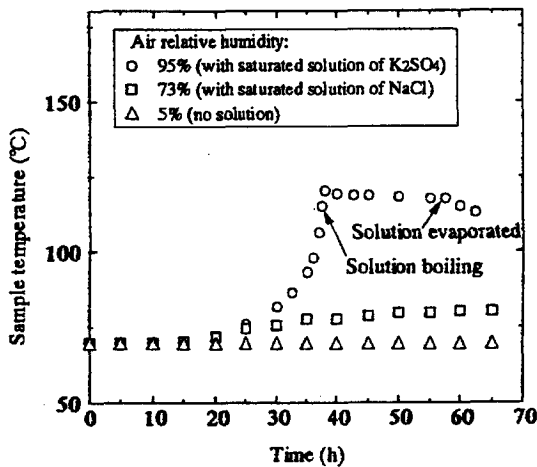


図2 空気相対湿度の効果

空気流量=20 cm³/min
 初期温度=70 °C
 試料含水率=1 ~ 2%
 充填密度=50 kg/m³

空気相対湿度=95%の場合で、温度が 125 °C くらいまで上昇した後、低下したのは、水の蒸発によるものと推定される。

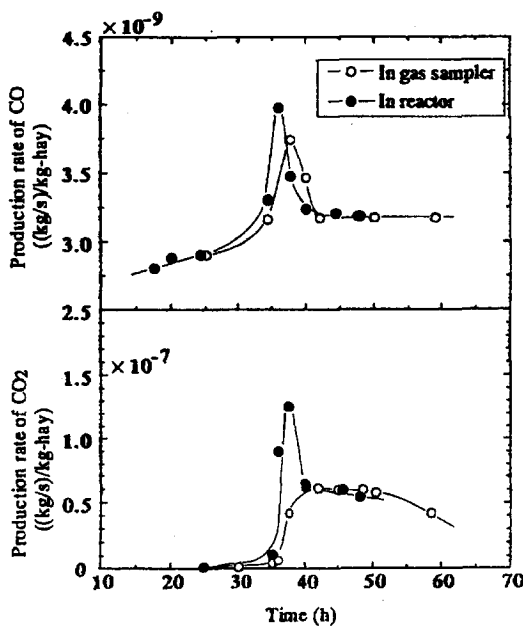


図3 自然発熱時における気体の発生速度

空気相対湿度=95%
 空気流量=20 cm³/min
 初期温度=70 °C
 試料含水率=1.3%
 充填密度=50 kg/m³

温度の上昇にあわせて、二酸化炭素、一酸化炭素が発生した。

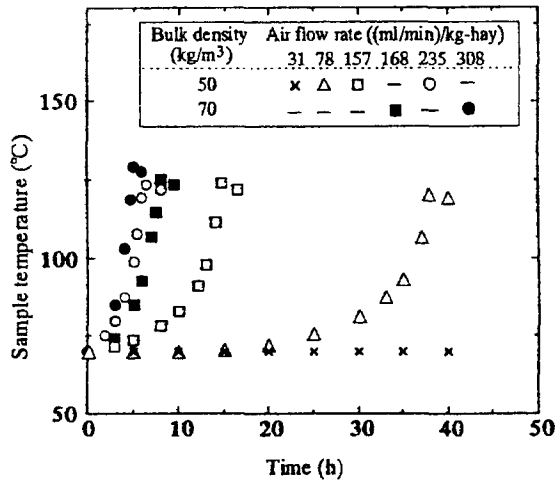


図4 空気流量と充填密度の効果
 空気相対湿度=95%
 初期温度=70℃
 試料含水率=1～2%

空気流量が大きいほど、温度が130℃に達するまでの時間が短かった。

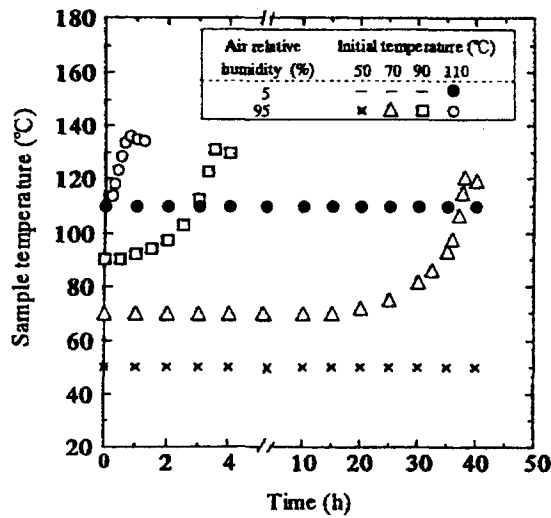


図5 初期温度の効果
 空気流量=20 cm³/min
 試料含水率=1～2%
 充填密度=50 kg/m³

相対湿度が小さい場合、初期温度が高くなっても自然発熱は観察されなかった。

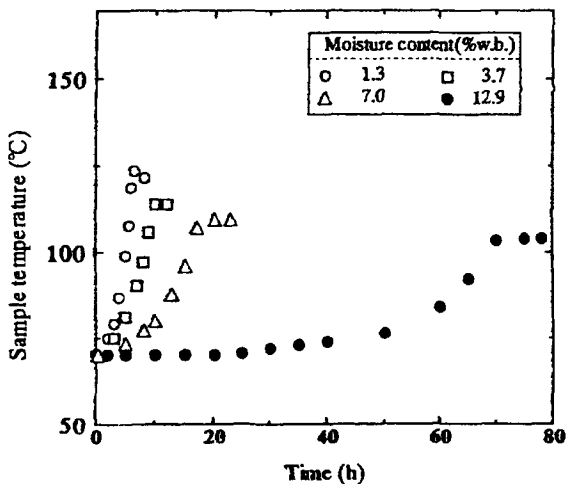


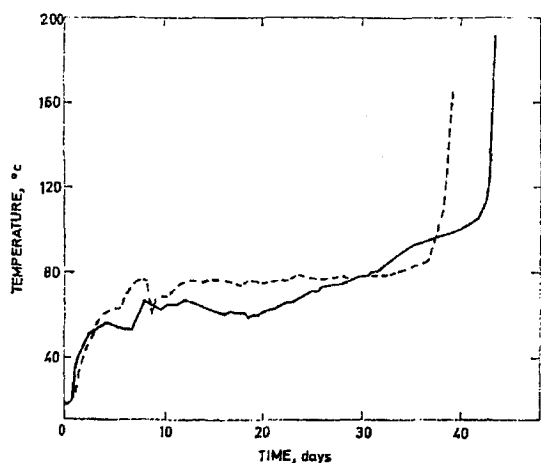
図6 試料含水率の効果
 空気相対湿度=95%
 空気流量=60 cm³/min
 初期温度=70℃
 充填密度=50 kg/m³

含水率が大きいほど温度上昇に時間がかかった。

参考文献

Y. Miao and S. Yoshizaki, Mechanism of Spontaneous Heating of Hay Part 1 - Necessary Conditions and Heat Generation from chemical Reactions, Transactions of ASAE, 37(5), pp. 1561-1566, 1994

Currie らは、牧草の自然発火過程を実験的に調べた。空気相対湿度、空気流量などの条件を変えて実験を行った。



100 °Cを超える自然発熱を観察した例

実線：1 dm³ の dewar 瓶に牧草をいれた場合
空気流量=10 cm³/min(試料温度が 65 °Cに達する 6
日目まで)
空気流量=5 cm³/min(試料温度が 65 °Cを超えた
後)

点線：1 dm³ のビーカーに牧草を入れ、ビーカー
を、容積 4.5 dm³ のデシケーター中に設置
空気流量=10 cm³/min(19日目まで)
19日目以降は空気の強制通気を停止し、周囲か
らの拡散のみとした

試料含水率=42 ~ 45%

試料容器は容積 30 dm³ の恒温槽内に設置した。恒温槽内の温度を制御し、試料容器が見かけ上断熱状態になるようにした。

参考文献

J. A. Currie and G. N. Festenstein, Factors Defining Spontaneous Heating and Ignition of Hay, J. Sci. Fd Agri., 22, pp. 223-230, 1971.

サイロの火災・爆発

サイロの爆発事例（国内）

年月 平成元年 4 月

場所 福岡県糸島郡

概要 乳牛飼育用飼料を貯蔵するサイロ内部で火災が発生した。消防ポンプ自動車 2 台、指揮車 1 台、救急車 2 台、人員 16 人、消防団、消防ポンプ自動車 1 台、人員 20 人が出動した。消火活動中、突然轟音と共に爆発した。消防職員 3 人（重症 1、中等症 2）が負傷した。

施設の概要は以下の通りである。

牧草をサイロに入れて乳酸発酵により乳牛飼育用の飼料を作る加工及び貯蔵用の気密性のサイロ
形状：縦型円筒形タンク

構造：鋼板（両面ガラスコーティング）

有効容積：293 m³

活動の経過は以下の通りである。

一三時〇六分：現場到着後所有者から状況を聴取すると、「煙が上がって中が燃えているようだが他の事は何もわからない、ルーフのマンホールから確認できる。」との返答を得て、分隊長がルーフに登り確認を急いだ。ルーフには、メインとサブのハッチがあり両方とも開放状態で、内部は白煙が充満し状況は見分できなかつた。再度質問すると、「飼料取出口から内部が見えるかも知れない。」とのことで、そこから内部を覗くと中央部付近が広範囲に燃焼していた。

一三時一六分：飼料取出口から燃焼物を取り出しながらの消火を試みたが、周囲に可燃物が集積され、取出口が狭く内部機器が注水を妨げ効果が期待できないため、サイロ内部での消火を実施することとした。注水は、ルーフハッチからと決定、高所であるため無人注水を行うこととし、A 隊員がルーフに登り作業を実施した。

一三時一七分：隊員の増強と豊富な水量を確保のため第二分隊の出動を要請

一三時二九分：第二分隊現場到着

一三時三五分：第一分隊への中継送水を開始した。

一三時三六分：第二分隊の B 及び C 隊員の二人がルーフ上で作業中の A 隊員と協力し新たにホースをルーフへ延長するとともにすでに注水中の第一線ホースの結着補強を行った。

一三時三九分：作業を完了して降下を開始した直後、飼料取出口から突然「ブオー」という低い音と共に黒煙と灰塵が吹き出してきた。続いて「ズボー」という大きい音がしてサイロ上部が黒煙に包まれた。

一三時四〇分：サイロは、ルーフが吹き飛び胴板は、内側へ歪んでいた。サイロのステップ上部に A 隊員、その横の垂れ下がったサイロルーフステップに C 隊員が確保ロープに吊り下がり、B 隊員は、サイロ直下の飼料倉庫スレート屋根を突き破り地面へ落下していた。爆発後のサイロの消火には、被災を免れた隊員と消防団が当たり、倒壊による二次災害を防ぐため筒先を固定して無人放水を実施した。

二一時 00 分：鎮火

出火原因は、自然発火と推定された。畜産用サイロ（密閉式）に、水分含有率 30～40%と推定されるヘイレージ（低水分飼料）が約 100 m³ が貯蔵されていた。四月一八日一九時頃、サイロの飼料取出口の蓋を開け開放状態で放置した。四月一九日一二時頃、サイロルーフのセンターハッチ（直径 60 cm）とサブハッチ（直径 43 cm）を開け開放状態で放置した。サイロに空気が流入し微生物が活動を始めて、ヘイレージが変敗し発熱したと推定された。

参考文献

糸島郡消防厚生施設組合:サイロ火災による爆発事故, ほのお, 1 号, pp. 9-11, 1991.

サイロの爆発事例（国外）

年月 1985年8月27日

場所 米国オハイオ州 Marshallville

概要 飼料用密閉型サイロが消防活動中に爆発し、消防隊員3名が死亡、1名が負傷した。爆発発生時には、サイロ頂部から放水活動中であった。

施設の概要は以下の通りである。

飼料の加工及び貯蔵用の気密性のサイロ

形状：slipped-form construction（76 ft in height, 20 ft in diameter）

構造：コンクリート製、ハッチは5カ所（頂部に2カ所、頂部近くの側面に2カ所、底部に1カ所）

活動の経過は以下の通りである。

7:00 p.m. 消防隊が現場に到着した。サイロ頂部のハッチから煙がでていているとの、所有者からの通報による

サイロ外側の階段を使用して、高さ76 ftの頂部に上ったところ、ハッチ1個が開放されていたエレベーターのハッチを開放し、1 1/2 inch line と straight stream nozzle で送水を開始した

約30分間で3000 gallonの放水をした。タンク車の水を使いきったので、頂部から後退した

15から20分後、消防隊員3名がサイロ頂部に部署し、放水を再開した

地上では、消防隊員2名がサイロ底部から放水した

8:00 p.m. サイロが爆発し、コンクリート製の屋根が4 ft持ち上がった

屋根が大きな破片に分解し始め、消防隊員3名が転落した。消防隊員#1、#2は地上に転落した。

消防隊員#3はサイロ内、地上から高さ28 ftの位置に転落した。地上にいた消防隊員1名が屋根の破片にあたり、脚を骨折した。

犠牲者は病院に搬送された、検視の結果、消防隊員#1は地上に転落したことにより死亡、消防隊員#2、#3は爆発により死亡したとされた

出火原因はサイレージの自然発火と推定された。証言によると、消防隊の到着時には、サイロの頂部と底部のハッチが開放されていた。発災時には、サイロ基部から高さ12 ftまでサイレージが積んであった。コーン状に積んであり、側面は高さ40 ftになっていた。爆発後、高さ28 ftとなった。

サイロ内部には、可燃性気体または粉塵があり、放水のためサイロ頂部のハッチを開放したこと、放水された水が空気を巻き込んだことにより、内部に酸素が供給され、可燃性気体または粉塵が可燃濃度になったと推定された。放水により粉塵が舞い上がった可能性もある。

勧告1 気密性のサイロでの消防活動中は、頂部のハッチから注水するべきではない

考察 気密性のサイロでは、内部に可燃性気体が存在しうるので、酸素が供給されると、可燃性混合気が形成される。消火法としては、内部に液体窒素、または二酸化炭素を供給する事があげられる。サイロ製造業者は、通常、サイロ火災の消火法の手引きを用意している。

勧告2 内部に貯蔵されていようといまいと、サイロのハッチは常に閉じておくべきである。

気密性を確保するために適切な維持管理がなされるべきである。

考察 気密性のサイロでは、気密が保たれていれば、自然発熱の可能性は低い。サイロの製造業者から、適切な使用と維持管理に関する手引きを入手すべきである。

参考文献

National Institute for Occupational Safety and Health, Face-85-49: Three fire fighter killed fighting silo fire in Ohio

サイロの爆発事例（国外）

年月 1996年10月15日火曜日 晴れ

場所 米国ミネソタ州 Louiston 近くの農場

概要 作業中に、穀物サイロが爆発した。静電気が着火源となり、粉塵爆発が発生したと推定される。

サイロの概要 形状 直径 21 feet、高さ 30 feet

構造 fiberglass 製、穀物貯蔵用 気密サイロ 建造後約 18 年

作業員 A が金属製のパイプを通してサイロ頂部からトウモロコシ(含水率 24%)を投入していた。投入前まで、頂部のハッチは閉まっていた。

3:15 pm 爆発が起きた。

作業員 B によると、投入が始まってから約 2 分後に爆発が起きた。

サイロの上部 1/3 に亀裂ができた。亀裂ができた部分より下に穀物があった。

トウモロコシの粉末が静電気により着火され、粉塵爆発を起こしたと推定された。

教訓

気密サイロ内では穀物の粉塵爆発が起こりうる。粉塵爆発の可能性がある場合、消防隊員は注意しなければならない。一般に、気密サイロでは粉塵爆発は起こりにくい。しかし、外部との開口ができれば、粉塵爆発は起こりうる。爆発による威力は、構造を破壊し、周囲に死傷者を発生させるのに十分である。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, pp. 15-17, 1998.



爆発により上部に亀裂が生じたサイロ

サイロの爆発事例（国外）

年月 1994年4月29日火曜日

場所 米国アイオワ州 Merville 近くの農場

概要 サイロ内でサイレージが燃焼していたため、底部から取り出そうとしていたところ、爆発が起き、サイロの屋根が吹き飛んだ。

サイロの構造 トウモロコシのサイレージ、ヘイレージの貯蔵用 気密サイロ

サイロ内でサイレージが1週間以上燃焼していたため、所有者が底部から取り出そうとしていた。breather bag が破れ、サイレージが空気と接したため、自然発火が起きたと推定される。

9:30 a.m. 爆発が起きた。

サイロの屋根が吹き飛び、100 feet 離れた地点に落下した。

一酸化炭素が空気と混合し可燃範囲に入り、自然発火温度に達し、爆発したと推定された。

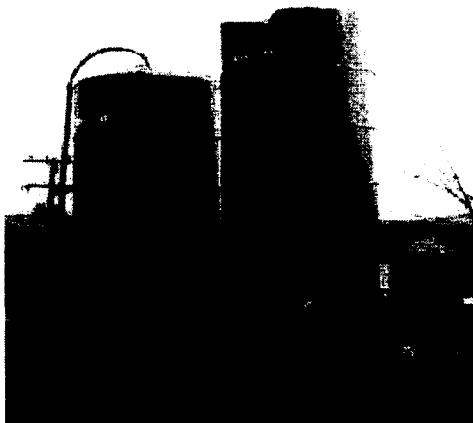
作業員は別棟かその近くにいたため、負傷者はなかった。

教訓

気密サイロでも爆発は起こりうる。爆発の威力はサイロの構造を破壊し、破片を遠くに飛ばすのに十分である。この事例では、breather bag が破れ、内容物が空気と接したため、自然発火した。一酸化炭素の混合気が着火し、バックドラフトのような爆発が生じた。爆発の威力により、屋根が遠くまで飛んだ。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, pp. 18-20, 1998.



爆発により変形したサイロ



爆発により吹き飛んだ屋根

サイロの火災事例 (国外)

年月 1991年5月20日

場所 米国アイオワ州 Delmar

概要 サイロから出火し、隣接した建物に延焼した。原因はサイレージの自然発火と推定された。

サイロの構造 通常型サイロ、コンクリート製、縦型、サイレージを貯蔵

直径 18 feet、高さ 88 feet

4:30 p.m. 東側サイロから牛に給餌していた農夫が火災を発見した。

通報により消防隊が駆けつけたところ、サイロの給餌室が燃えていた。

サイロの南側にある牛舎(28' x 120')にすぐに延焼した。さらに、牛舎の南にある建物(feed bank, 16' x 88')は激しく焼損し、それに隣接し牛舎の南東にある倉庫(daily barn, 50' x 60')は全焼した。

サイロ1基の内容物が焼損した。

東側サイロ内部でサイレージが自然発火したと推定された。サイレージを取り出した際に、燻り状態の炭化物が給餌室に落ち、室内の可燃物を着火させ、延焼していったと推定された。

教訓

通常型サイロ内で自然発火が発生した場合、サイロの内容物が擾乱を受けなければ、サイロ内で緩やかに火災が進行する。火災が外部に拡大した場合、火勢は急激に強まる。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, pp. 24-25, 1998.



東側のサイロ(写真 右)から出火
他の建物に延焼



全焼した建物

サイロの爆発事例（国外）

年月 1997年12月21日

場所 米国ノースカロライナ州 Statesville

概要 サイロ内の火災の消火のため、屋根から注水した。内容物を取り出すため底部の取り出し口を開けたところ、爆発が起きた。屋根が吹き飛び、屋根で作業していた消防隊員3名が転落した。取り出し口付近からも炎が吹き出し、開口近くにいた消防隊員がとばされた。

サイロの構造 気密サイロ 農業用として建造されたが、燃料として利用される木質系廃棄物の貯蔵用に転用された

サイロの屋根に消防隊員が登り、屋根のハッチから内部へ注水した。約2時間後、完全に消火するため、底部の取り出し口を開け、内容物を取り出すこととなった。底部の取り出し口を開けた時、サイロの頂部と底部にいた隊員は、空気が流入し、鈍い音がしたのに気付いた。大きな音とともに爆発が起きた。屋根が吹き飛び、屋根で作業していた消防隊員3名が転落した。取り出し口付近からも炎が吹き出し、開口近くにいた消防隊員がとばされた。

屋根で活動していた消防隊員#1は、サイロ内部に落下した。顔と首に2度火傷を負って病院に搬送された。屋根で活動していた消防隊員#2は、サイロの隣にある建物の屋根に落下した。救助され手当された。火傷を負い、痣をつくった。屋根で活動していた消防隊員#3は、屋根の近くに引っかかっていた。膝と肩に外科手術が必要な重傷を負った。消防隊員#1と#3の救助に約2時間要した。開口近くにいた消防隊員#4はとばされたが、負傷しなかった。

教訓

空気の供給が制限される状況であり、燃焼生成気体が可燃性であれば、密閉サイロではバックドラフトのような爆発は起こりうる。農業用の密閉サイロの消火活動中に爆発が起こり、消防隊員が死亡したことがある。不完全燃焼により高温の可燃性気体が生成し滞留しているところへ、空気が流入すると、バックドラフトのような爆発が起こりうる。サイロに貯蔵されていたのは木屑であったので、木粉が舞い上がって爆発威力を大きくしたかもしれない。

密閉サイロの屋根に隊員を部署させてはならない。

どのような危険性があるかを注意深く評価し、戦術と防御を考えることである。

参考文献

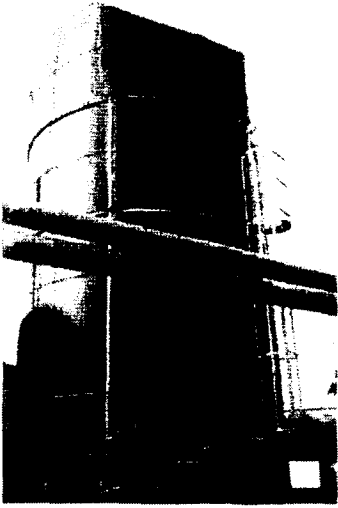
United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, pp. 26-28, 1998.

United States Fire Administration, Industrial Silo Fire and Explosion, Report 122 of the Major Fire Investigation Project.



消防隊員1名が右側の建物の屋根にとばされた

屋根の一部が右へ400 feet飛んだ



底部の取り出し口

サイロの火災事例（国外）

年月 1995年3月10日

場所 米国ミネソタ州 Elgin

概要 サイロの取り出し口付近で火災となっていた。消防隊がサイロ外部から消火活動を行った後、サイロ内に入り放水し鎮火させた。

サイロの構造 通常型 コンクリート製 縦型 サイレージを貯蔵

消防隊が到着した際、火災は2カ所で起きていた。サイレージ表面が燃えているのが、取り出し口 (unloading door) から見る事ができた。さらに取り出し口付近でもV字状の火炎が見えた。サイレージ表面と屋根の間の空間はやや濃い煙で満たされていた。

消防隊はサイロ外部から消火活動を行った。取り出し口からサイレージ表面の燃焼している部分に放水した。別の隊員は silo fire probe nozzle を使用して放水した。約1時間後、火災はほぼ鎮火し、サイレージ表面と屋根の間の空間の温度も外気なみに低下した。煙も薄くなった。サイロ内に梯子をわたして、内部に進出した。サイロの外壁と取り出し口付近の温度を監視した。燃えている部分を見つけては放水し、鎮火させた。

火災原因は自然発火と推定された。

教訓

通常型サイロの火災は消火可能である。作戦を検討する時間もとれる。火災を鎮火させたようにみえても、高温の部分や炭状になって燻っている部分があることを予期すべきである。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, pp. 21-23, 1998.

FIRE FOLLOWING
UNLOADING DOORS



取り出し口付近での火災

サイロの爆発事例（国外）

年月 1993年8月5日

場所 米国ジョージア州 Morgan County, Bostwick

概要 密閉サイロでの消火活動中に爆発が起こり、屋根が吹き飛んだ。屋根で活動していた消防隊員2名が死亡した。

サイロの概要 密閉サイロ

水と泡で消火活動中に爆発が起こり屋根が吹き飛んだ。屋根で活動していた消防隊員2名が死亡した。1名は100 yd離れた地面に落下し、もう1名は近くの建物の屋根を突き抜けて地面に落下した。地上で活動していた隊員2名も破片で負傷した。

サイロの上部15 ftは激しく損傷した。隣接するサイロは破片でへこんだ。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, p. 5, 1998.

サイロの火災事例（国外）

年月 2003年2月末

場所 スウェーデン Igelsta CHP plant

発災した施設の種類：ボイラーの燃料に使用される廃棄物再生燃料貯蔵用サイロ

施設の場所：Igelsta CHP plant, Sodertalje

サイロの形状：直径27m、高さ20m

火災原因は特定されていない。

発災時には1200 tonの廃棄物再生燃料が貯蔵されていた。これは、80-90 MWのボイラーの3日分の燃料に相当する。

発災後、サイロに連結されているコンベヤーに延焼、火は消し止められたが、サイロ内で燃焼が続いていた

現地に派遣されたSP Fire Technologyの担当者により、消火法として、以下の方法が検討された。

- ・二酸化炭素または窒素の使用

底部より供給する。ただし、サイロ上部に可燃性混合気形成されるのを阻止するため、時々、サイロ頂部からも供給する。

- ・散水

濡らしやすくするため、少量の界面活性剤を混ぜる。ただし、大量注水すると、大量の汚水が生成する。

検討の結果、SP Fire Technologyより、以下のような消火法が提案された。

側面から長い管を入れ、水噴霧を内部の燃えている部分に注水する。内容物の制御下での燃焼を継続させる。ただし、この方法は、時間がかかることと、周囲への環境影響を考慮すると非現実的に思われた。

発電所とも協議した後、消防隊により、以下の方法が採用された。

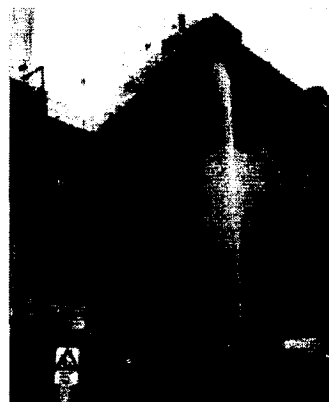
- ・サイロ頂部に仮設のノズルをつけ、水を内部に噴霧する。燃料表面、および、燃料表面とサイロ頂部の間の空間を水噴霧で冷却する。

- ・高圧ウォータージェットを用いて、燃料内部に穴を開け、燃料内部にノズルをつけ、燃料内部に放水する。燃料内部の温度を監視し、必要時に放水する。

1週間後に、消防隊により、火災はほぼ鎮圧されたと判断され、サイロを開け、燃料を搬出することになった。消防隊によると、活動そのものに問題はなかったが、燃焼により発生した煙が周囲を困らせた。

参考文献

H. Persson: Fire in a recovered waste materials fuel silo extinguished by water injection, Brandposten(English version), No. 28(June), pp. 26-27, 2003.



サイロに外部から放水中

密閉サイロの火災の消火について

火災時の注意点

- ・いかなる場合でも、消防隊員は密閉サイロの火災を消火しようとしてはならない。代わりに、サイロの製造業者や代理店と連絡を取るべきである。
- ・消火には、窒素や二酸化炭素を注入する方法を用いることができる。そのためのつなぎ手やパイプは代理店から入手可能である。
- ・消防隊員は、密閉サイロの火災時には、バックドラフトの危険性があることを考慮しなければならない。密閉サイロでバックドラフトが起きた場合、その威力は重い構造物を数百フィート離れたところへ飛ばすことが可能である。
- ・水も泡も使ってはならない。
- ・煙や蒸気が屋根の開口（例えば、breather bag の弁、圧力開放バルブ）からでてくるのが見えるとき、音が明確に聞こえるとき、サイロが明確に振動しているときには、サイロから離れているべきである。
- ・サイロ内に水を噴霧したり、開口を通して水を噴霧してはならない。水は、サイロの内容物に浸透しないし、燃焼している部分には届かない。それどころか、空気を巻き込んでバックドラフトのような爆発の原因となる。
- ・取り出し口、扉などの全ての開口が、閉じていることを確認せよ。サイロが振動していたり、音を発しているならば、近づいてはならない。燃え尽きるのを待つべきである。

参考文献

United States Fire Administration, The Hazards Associated with Agricultural Silo Fires, Report 096 of the Major Fire Investigation Project, p. 43, 1998.

石炭貯蔵用サイロの安全について

屋内の石炭貯蔵(ドーム方式あるいはサイロ方式)を対象に、その保安防災対策について述べる。

1. 災害の種類とその現象

1. 1 自然発火

石炭は、長期間大量に堆積しておくで緩慢な酸化反応に伴って発生する熱により、石炭温度が徐々に上昇して遂に自然発火することがある。石炭の自然発火に至るまでに表1の過程をたどる。自然発火に関係する因子は数多くあるが、その主なものをあげると下記のようになる。

①石炭の物理的・化学的特性に関する事項

粒度、比表面積、石炭性状(湿分・揮発分・炭素分ほか)

②石炭の堆積状態に関する事項

積付方法、積付形状、貯炭量、貯炭期間、

③環境状態に関する事項

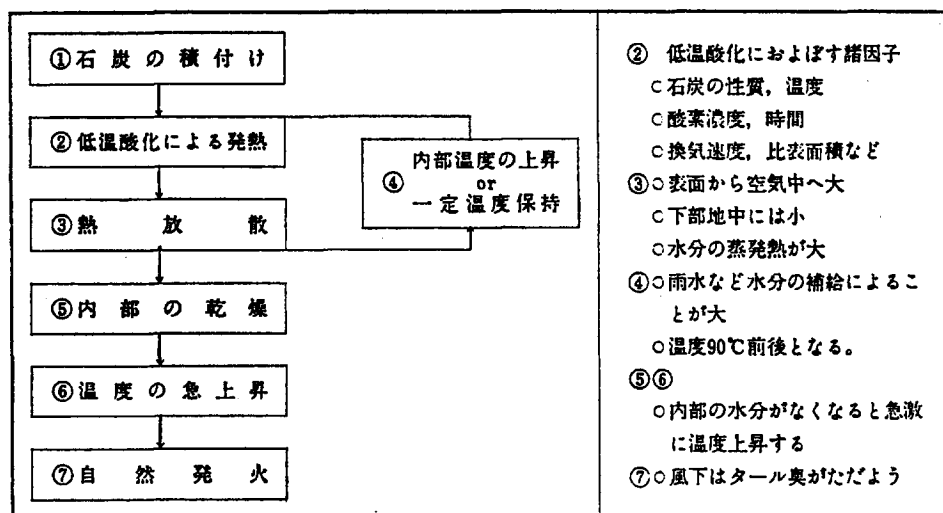
外気温度・湿度、風向風速・換気状態

これらの条件の組合せは無数にあり、その説明は非常に困難であるが、対象石炭の物理的・化学的特性を知ることと貯炭実績から、実用上支障のない程度の自然発火防止策が可能である。

その特性確認項目は次のとおりである。

工業分析値、元素分析値、組織分析値、比表面積、熱伝導率、定温酸素吸着量、着火温度

表1 石炭の自然発火過程



1. 2 炭じん(または、粉塵)およびガス爆発

石炭の輸送過程等に空気中で炭じん雲ができると、炭じん爆発を起す可能性がある。炭じん爆発が起るためには、炭じん濃度・着火エネルギーなどが一定値以上必要である。爆発の危険性を調べるためのデータとしては次の項目がある。

最低着火濃度(g/m³)、最低着火温度(°C)、最小着火エネルギー(mJ)、発火性能(炭種別相対比較値)、爆発圧力(kg/cm²)

石炭の発じん性は、石炭粉砕性に関係する。この粉砕性は、石炭の特性に影響されるものであり、ある領域までは炭化度が進むにつれて粉砕しやすくなる傾向にある。発じん性を調べるための分析・測定項目は次のとおりである。

工業分析、元素分析、組織分析、粒度分布、気孔率、ハードグループ指数、粉砕比

石炭中には、石炭化の過程で発生するメタンガス等の可燃性ガスが包蔵されており、これらのガスはハンドリング等に伴う石炭の粉砕により新しい表面が現れると大気中に放散する。発生するガスは主にメタンガスであるが、一部には、エタン、プロパンが発生する場合もある。ただし、

その発生量は非常に微量である。

可燃性ガスの発生による危険性は、最大に発生するメタンガスでさえ、爆発下限濃度5%よりはるかに低いことが過去のデータから証明されており、それ自体が単独で爆発現象を起すとは考えられない。むしろ、炭じん雲中に可燃性ガスが存在する場合、その炭じん爆発下限濃度を著しく下げ危険性を増すことに問題がある。

1. 3 酸素欠乏症・一酸化炭素中毒症

酸素欠乏（以下、酸欠と言う）が起るには酸素濃度が低くなること即ち、その雰囲気の中に酸素以外のガスが多く存在しなければならない。現在考えられる酸素以外のガスは次のとおりである。

メタンガス（CH₄）、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）

この災害の特徴は、頭痛等の軽度な障害から場合によっては重度障害につながることもある。屋内貯炭場は炭坑と異なり有害ガスの発生は微量であり、換気状態が正常であれば内部の環境条件は比較にならないほど良い。通常の換気状態においては問題のない箇所であっても、換気装置の故障・補修などで換気されない場合および空気淀みの発生する箇所では、点検・補修作業員の安全確保を行う必要があり対策を実施する。

2. 災害予防と発生時対策

2. 1 自然発火および火災

(1) 自然発火

①貯炭温度管理

基本的に積付払出を「先積先出」方式とすることが肝要である。石炭の監視温度は自然発火防止上の注意温度60℃とし、万一積付炭が60℃以上に上昇する傾向にある場合は可能な限り早期消費をはかる必要がある。定期点検等により消費できない場合も考えて散水等により昇温防止対策が行えるよう設備対応しておく必要がある。

②自然発火の発見方法

石炭の自然発火は緩慢であり、発火近くでは異臭および白煙を発生するため、定期的なパトロール員による石炭露出面の監視および制御室からのテレビ監視などにより早期発見を行う。また、自然発火の初期状態においては低温酸化による一酸化炭素の発生とともに酸素濃度も変化するので、一酸化炭素・酸素検出器を設置し連続監視を行う。

③自然発火した石炭の処置

自然発火した場合、大量注水により消火を行う。その後、周囲の石炭も含めて冷却したのち早期消費または積替えを行う。

(2) 火災

①火災防止対策

貯炭場内は火気取扱厳禁とする。作業等で火気を使用する場合は、事前に安全作業要領を策定して関係各所に周知徹底のうえ十分な安全保護養生を行うとともに、万一に備えて消火器・消火ホースなどを用意し初期消火できる準備をしておく。

②火災の発見方法

機器運転中の火災に対しては、火災発生時に変化する空気温度や酸素濃度などの計器監視や制御室からのテレビ監視により早期発見を行う。作業場の火災に対しては、監視人を配置して早期発見に努める。

③火災発生時の処置

作業時の火災には、事前に準備した消火器・消火ホースなどで初期消火を行う。

2. 2 炭じんおよびガス爆発

爆発は瞬間的なもののため発生時点では音等で直ちに発見できるが抑制するための役には立たない。事前の予防が何より肝要であり、その防止対策は次のとおりである。

〔設備面〕

1) 炭じん濃度を下げるために、全体換気・集じん装置を設置する。

2) 発じん抑制のために散水装置を設置する。

3) 着火エネルギーを与えないために、電気機器に防爆構造仕様のものを採用する。

4) 可燃性ガス検知器を設置する。

〔運用面〕

- 1) 発じん性の高い石炭へ水または界面活性剤を散布する。
- 2) 発じんの少ない積付方法を採用する。
- 3) 堆積炭じんの清掃を励行する。
- 4) 爆発要因項目(炭じん濃度、メタンガス濃度、着火原となる自然発火)を重点監視する。
- 5) 換気装置を連続運転して常に炭じん濃度を下げる。

万一貯炭場内の雰囲気炭じん爆発限界濃度の範囲内で均一に充満し爆発したとしても、貯炭場屋根を爆発ペントとして爆発圧力を放散できる構造とし側壁コンクリート強度も十分に設計していれば、貯炭場周辺に直接被害を及ぼすことはない。

2・3 酸素欠乏症・一酸化炭素中毒症

災害の発生事例から見ると、一見複雑多岐に見えるが、その内容を分析すると、その原因は次に分類することができる。

- 1) 換気なしの場合
- 2) 換気が不十分の場合
- 3) 測定せず酸欠場所へ立入った場合
- 4) 救助者の空気呼吸器等不携帯での救助
- 5) 作業員の酸素欠乏症・一酸化炭素中毒症防止知識不足
- 6) 転落注意場所での命綱不携帯

具体的な防止対策としては換気が第一に取上げられるべきものである。酸素濃度測定の実施、保護具の使用、緊急時における作業員の救出用具および避難施設・用具の整備、その他作業時における作業員数確認励行・監視人の配置、必要な標識や表示の整備、作業員に対する安全教育の徹底などが大切である。

実際の屋内貯炭場における換気設備としては、空気淀みの生じない風量とシステムを計画し、メタンガス・一酸化炭素・酸素検出器などと合わせ総合的に監視する必要がある。また、換気装置が停止した場合、メタンガスの停滞防止のためドーム頂部の換気口や二酸化炭素の溜まるおそれのある最深部通路に非常用送風機を設置してしている例もある。

3. 防災監視システム

3.1 監視項目および方法

(1) メタンガス濃度

「石炭鉱山保安規則」によれば、排気中の可燃性ガス含有率は1.5%以下で、坑内通行箇所の気流中においては、これを2%以下としなければならない。また、通気に異常のある時に可燃性ガスが停滞するおそれがある所で電気工作物を設置した箇所、その他必要な箇所へガス検出器の設置が義務づけられている。屋内貯炭場においては、酸化昇温によるガスの発生を考慮して上記保安規則を準用し、メタンガスの比重が空気より軽く拡散しやすい性質を利用して、排ガス流の集合部である貯炭場上部へメタンガス検出器を取付け連続監視を行う。

(2) 一酸化炭素ガス濃度

「石炭鉱山保安規則」および「労働安全衛生規則」によれば、毒性ガスである一酸化炭素ガス濃度は酸素濃度19%以上において1.0%以下としなければならない。屋内貯炭場においては、低温酸化による一酸化炭素ガスの発生を考慮して上記保安規則等を準用し、一酸化炭素ガスは比重が空気より若干軽い程度であることから、ほぼ空気と同じように流れると思われ、作業環境の保全、石炭の自然発火予知のため、点検通路付近へ一酸化炭素ガス検出器を設置し連続監視を行う。

(3) 酸素濃度

「石炭鉱山保安規則」および「酸素欠乏症等防止規則」によれば、安全な作業環境のためには18%以上の酸素濃度が必要であるとしている。屋内貯炭場においては、石炭の酸化および換気システムの故障による酸素濃度減少を考慮して、コンベア経路でのパトロールおよび補修作業などでの酸欠による事故防止のため、コンベア経路ならびに空気淀みや二酸化炭素ガスの溜まるおそれのある底部場所へ酸素ガス検出器を設置し連続監視を行う。また、積付炭自然発火の初期状態においては、一酸化炭素ガスの発生とともに酸素ガス濃度も変化することより、自然発火予知のためにも、貯炭場内に酸素ガス検出器を設置し連続監視を行う。

(4) 空気温度

「石炭鉱山保安規則」によれば、坑内作業場における空気温度は 37℃以下としなければならない。また「炭鉱用電気機器の防爆構造」(JIS)によれば、電気機器の使用状態における基準周囲温度の限度は特に指定のない限り 40℃としている。屋内貯炭場においては、通常運転時は無人であるので、電気品保護のため最悪でも 40℃を超えないように周囲温度を維持する換気風量を確保することが必要である。貯炭場内の気温上昇を早期発見するため、温度検出器を設置し連続監視を行う。

(5) 貯炭温度

自然発火防止に最も有効な監視方法は、貯炭層内部温度を直接測定することである。屋内貯炭場においては、有線式検出器の使用が困難な場合、無線式検出器を使用し連続監視を行う。

(6) 炭じん濃度

石炭はハンドリング・積付時において散水・界面活性剤散布などの発じん対策を行うことにより発じん濃度は低く抑えられ、炭じん爆発の危険性が非常に小さくなる。貯炭場内は換気を行うことで炭じん濃度の低下がはかれる。万一の事態を考え集じんダクト等に炭じん濃度計を設置し貯炭場内の炭じん濃度を監視することが望ましいが、現状の連続測定型計器(光透過式・光散乱式・接触帯電式)は、いずれも煙道の乾燥ガス中ばいじんを対象に開発されたものであり、湿分がある炭じんに対しては付着・目詰りなどにより信頼性に欠けるため、炭じん濃度の測定は定期および必要のつど可搬式計器で行うことが必要である。

(7) 貯炭場内全体監視

貯炭場内の次の項目について、場内中心上部に ITV カメラを設置して常時監視する。ITV カメラに比べると高価ではあるが、サーマルイメージカメラも有効である。

積付・払出状況および積付山形状の監視、積付機等の位置および稼動状況の確認、自然発火・火災の監視、その他全体状況監視

各監視項目を簡単にまとめると表 4 のとおりとなる。

表 4 屋内貯炭場監視項目一覧表

監視項目	目的	型式(参考)
1. メタンガス(CH ₄)	ガス滞留による爆発防止ならびに炭じんと混合爆発防止	半導体式
2. 一酸化炭素(CO)	自然発火予知 作業環境保全	〃
3. 酸素(O ₂)	自然発火予知 作業環境保全	隔膜ガルバニ電池式
4. 雰囲気温度	電気機器保護 作業環境保全	測温抵抗体
5. 貯炭温度	自然発火予知	測温抵抗体(無線式)
6. 炭じん濃度	炭じん爆発防止 作業環境保全	—
7. 貯炭場内全体監視	自然発火・火災監視 石炭積付払出状況監視 内部機器稼動状況監視 他	テレビカメラ

3. 2 管理基準の設定

屋内貯炭に起因する災害に対し、万一の場合を想定して管理基準を定め運用することが必要である。貯蔵量や方式によっても異なるが、管理基準の一例を表 5 に示す。

表5 屋内貯炭場防災管理基準

防災対策	検出項目	危険値	管理基準	対策方法
自然発火	温度	200 °C	I. 60 °C	優先使用 散水による湿分補給 大量散水
			II. 80 °C	
	CO濃度		濃度変化	監視体制強化
炭じん爆発	炭じん濃度	50 g/m ³	I. 0.01 g/m ³	監視体制強化 散水 投入コンベア停止
			II. 0.10 g/m ³	
	III. 1.00 g/m ³			
ガス爆発	CH ₄ 濃度	5 %	I. 0.25 %	監視体制強化 換気量UP 換気以外の設備停止
			II. 0.50 %	
			III. 1.50 %	
空気温度	温度		40 °C	人為作業の中止と 換気の徹底
酸欠	O ₂	18 %	19 %	
中毒	CO	1.50 %	0.05 %	

参考文献

火力原子力発電技術協会, 入門講座 「燃料および燃焼」 IX. 1 保安・防災対策 [石炭貯蔵設備], 火力原子力発電, 40(3), pp. 305-314, 1989.

中国電力と三菱重工が建設した三隅発電所では、石炭の貯蔵にサイロ方式が採用された。そこでの貯槽内石炭の安全対策についてのべる。

2. 5 サイロ防災設備

石炭サイロにおいて予想される災害に対して、次のような防災設備を設置し、災害の未然防止に努める。

①自然発火防止対策

石炭はその性状に応じて、炭種ごとに貯炭可能期間を設定し、設定期間内に払出しを行うことを原則とする。設備的には、各槽ごとに石炭温度・メタンガス・一酸化炭素濃度の連続監視が可能なものとし、自然発火が予想される場合は、優先払出し、再循環による積替え、散水等を行う。消火設備としては、水噴霧ノズルを貯槽内に設置するとともに屋内消火栓を設置した。

②ガス・炭塵爆発防止対策

サイロ換気設備を設け、爆発下限濃度以下になるように常時集塵換気を行うとともに、メタンガス・一酸化炭素濃度計測による監視を行う。石炭サイロ内の電気機械器具は、粉塵防爆構造（一部耐圧防爆構造）としている。

③作業環境の確保

点検スペース等、可燃ガスが滞留する可能性が高い場所についても、換気設備と監視用の酸素濃度計を設置する。

4・3 貯槽内石炭の自然発火防止対策

石炭は空気中の酸素によって徐々に酸化され、酸化による発生熱が放散熱よりも大きいと次第に温度上昇をきたし、遂に発火に至る。発熱速度は、温度、石炭の組成、石炭粒度、酸素分圧、湿分等に影響される。自然発火を防止するには、サイロ貯槽内の石炭の昇温状況を把握することが最も重要である。そこで、サイロ貯槽内の形状と石炭の粒径・湿分によりサイロ内の温度分布を予測するシミュレーションプログラムを開発し、炭種ごとに経時的な昇温情向を把握できるようにした。図9に、昇温シミュレーションの一例を示す。サイロ運用においては、このシミュレーションに基づき、異常昇温・自然発火が起こらないよう、石炭の受入・払出計画および再循環コンベヤによる積替え計画等の管理システムを構築する。なお、この管理システムでは、下部のコンクリートホップ上部および鋼製サイロの特徴を生かして、貯槽壁内の空間に温度計を設置し、石炭の昇温状況をリアルタイムに把握できる計画とした。

4. 4 ガス・炭塵爆発防止対策

サイロ貯炭時の発生ガス、受入れ時の発生炭塵が爆発限界濃度に達するのを防止するため、換気設備を設置した。換気設備の計画にあたっては、まず石炭からのガス発生速度とサイロ貯槽内への投炭によって生じる炭塵発生量を実験によって把握し、次に炭径・表面水分と爆発限界濃度の関係を求めた。図10に、炭種とメタンガス発生量を、図11に、燃料比と炭塵爆発下限濃度との関係を示す。

さらに、1/20換気モデルを製作し、サイロ貯槽内の換気流動を確認しながら、貯槽内ガス・炭塵濃度を検証した。図12に、ガス換気試験装置を、図13に、炭塵換気試験装置を示す。これらの実験により、ガスおよび炭塵発生率の高い炭種ごとに、貯炭時の必要換気量と受入れ時の必要換気量を得た。また、貯槽内への吸気口・排気口の大きさと適正な位置を決定した。

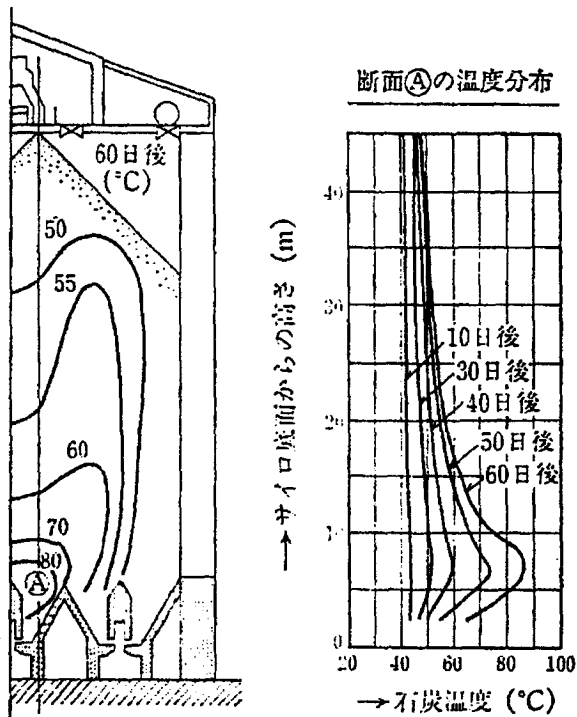


図9 貯炭開始後60日経過時のサイロ内温度分布予測

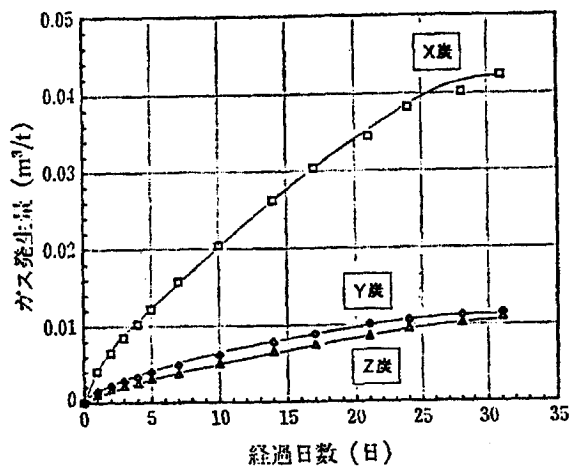


図10 長期貯炭時のメタンガス発生量

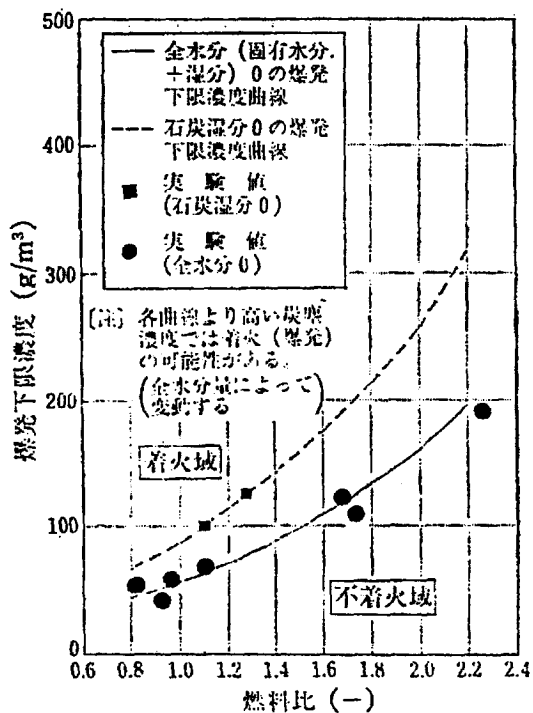


図11 燃料比と炭塵爆発下限濃度

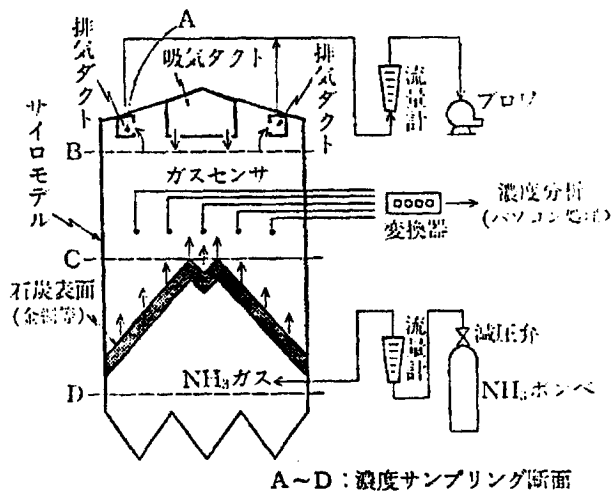


図12 ガス換気試験装置

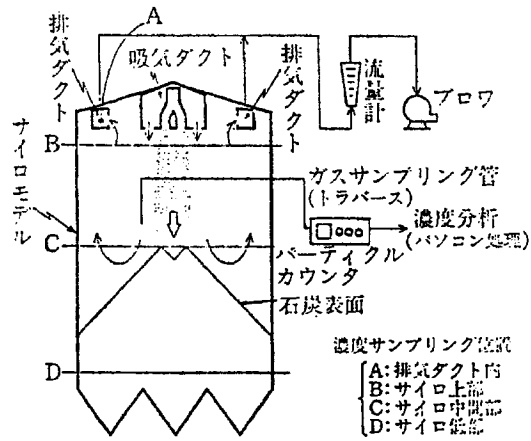


図13 炭塵換気試験装置

参考文献

廣實登志行 他, 大型鋼製角形集合石炭サイロの開発, 火力原子力発電, 46(12), pp. 1448-1457, 1995.

西条発電所では、石炭の貯炭にサイロ方式を採用した。その防災対策の一部を示す。

5. サイロの保安対策

(2) 石炭の温度上昇と自然発火

石炭が空気と接触すると酸化作用を起し酸化熱を発生するが、石炭は熱伝導率および比熱が小さいため、発熱量が放熱量を上回り蓄熱されて温度が上昇し、さらには自然発火に至る。石炭の酸化作用は高温になるに従い急激に促進され、一般的には 40～60℃が警報温度、70～80℃が危険温度と言われている。石炭の温度上昇、自然発火については、下記の対策をとることとした。

①サイロ上部の石炭受入口、下部ホップの払出部には、それぞれダンパおよびゲートを取付け、必要時以外には閉めて空気の流通を遮断する。

②石炭の温度が上昇した場合は、払出装、循環コンベアを運転して、サイロ底部の石炭をサイロ上部へ循環積替えができるようにする。

③サイロ上部に散水ノズルを設け、消火ポンプにより、石炭に散水する設備を設ける。

④サイロ内の石炭温度を連続監視するとともに、自然発火の初期の段階では不完全燃焼であるため一酸化炭素が発生することから、一酸化炭素濃度も連続監視する。また、この時には、O₂濃度も変化することから、これについても連続監視するようにしている。

温度エレメント取付個所および一酸化炭素濃度、O₂濃度測定個所については、温度測定は、筒体部に4点、コーン部に4点、合計8点設け、濃度測定個所（一酸化炭素、O₂は同じ測定個所である）は、サイロ内上部に4点、サイロ下部ホップの外側に4点設けている。ただしサイロ下部のものは、一酸化炭素中毒および酸欠事故の防止をはかるのを目的としたものである。

石炭温度の警報設定値は、側壁部で55℃、屋根部では外気温度の影響を考慮して60℃としている。一酸化炭素濃度およびO₂濃度の警報設定値は50ppm、18VOL%にしている。

(3) 炭塵爆発

サイロは密閉容器であるため、炭塵爆発についての対策を講じておく必要がある。

炭塵爆発の最小濃度は、種々の資料で調べたところ40～60 g/m³Nの範囲であり、密閉容器内での爆発圧力は一般に69,000 kg/m²と言われている。

当サイロは計算上、内圧が700 kg/m²が以上になると損傷する。これらの点から、炭塵爆発については次のような対策を講じることとした。

①サイロ内部に、電気・機械設備は設けない。なお、サイロ下部払出部に設ける電気設備は、粉塵防爆構造とする。

②サイロ内へ石炭を投入するとき、バグフィルタ式集塵装置を運転することにより炭塵濃度を極力低減する。

集塵装置は、常用1台、予備1台設置し、常用機が故障停止した場合は予備機を自動起動させ、2台とも運転ができないときには、受入コンベアを自動停止させるようにしている。

なお、発塵性の高い石炭を受入るときは、揚炭機または受入コンベアに設けた散水装置で散水し、サイロ積付時の発塵を抑える。

③万一、炭塵爆発が発生した場合、損傷を最小限度にとどめるため、サイロの鋼板製屋根部に、内圧が約400 kg/m²以上になると開放する放圧扉（4個）を設ける。

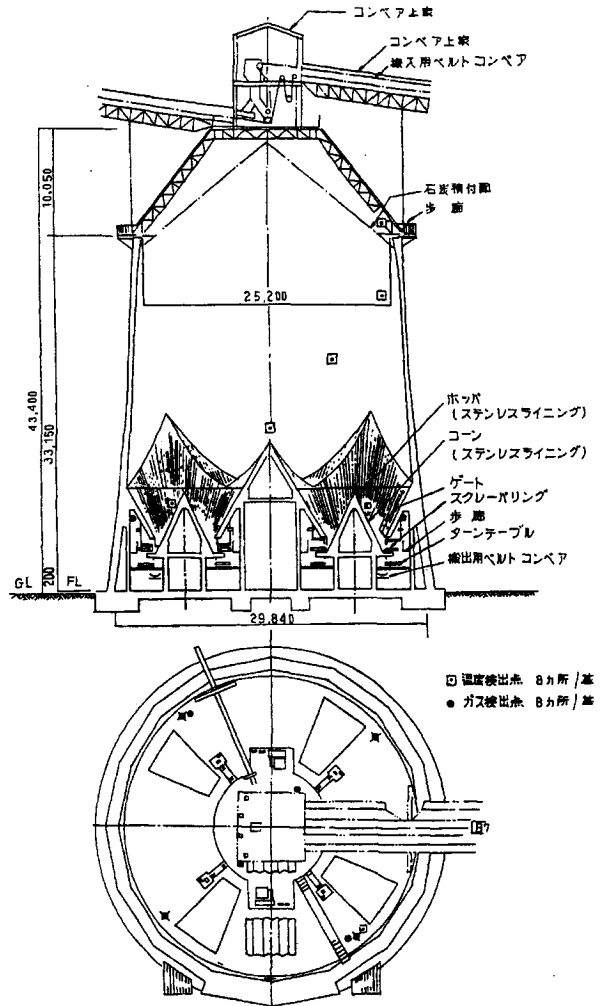
(4) メタン爆発

石炭層にもメタンを主成分とするガスが存在しており、石炭層の空隙中、あるいは孔隙中にとじこめられた水に溶解した状態、さらに、一部は石炭組織中の微細表面に吸着または吸蔵の状態を平衡を保っているものと考えられているが、採掘に際しては、遊離状メタンとして放出され、採掘後、数日間で大部分の量が脱離してしまうと言われている。また、メタンガスの爆発濃度範囲は5～15%とされており、9.5%のときが最も爆発が激しい。

このように、石炭から発生する可燃性ガスは大半がメタンであるため、メタンを検知し、メタンガス濃度が5%以下になるように管理すれば、ガス爆発は防止できる。

メタンガス濃度測定個所は、一酸化炭素濃度、O₂濃度と同じ個所であり、連続監視するとともに警報点（1.25 VOL%に設定）に達するとバグフィルタ式集塵装置を自動運転して、サイロ

内メタンガス濃度を爆発最小濃度以下に維持するようにしている。
サイロの安全性についてまとめたものを第2表に示す。



第7図 サイロ断面図および温度エレメント取付個所とガス採取個所

第2表 貯炭サイロの安全性

想定事故	予防対策設備	トラブルの事前予知	異常時の処置																					
自然発火	<p>1. 貯炭容量1・2号定格時10日分貯炭口数を短くして自然発火の機会を少なくした。</p> <p>2. サイロの石炭投入口および排出口にゲート取付サイロ内への空気流通を遮断し、石炭の温度上昇を防止する。</p>	<p>1. サイロ内部の温度およびCO、O₂の検知 石炭の温度上昇を連続測定感知する。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>測定箇所</th> <th>検出数/サイロ</th> <th>警報値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>床板部</td> <td>1</td> <td>60℃以上</td> </tr> <tr> <td>ホップおよび橋体部</td> <td>7</td> <td>55℃以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>CO、O₂ガスを検出して初期状態の自然発火を感知する。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>ガス</th> <th>検出数/サイロ</th> <th>警報値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>8</td> <td>50ppm以上</td> </tr> <tr> <td>CH₄</td> <td>8</td> <td>1.25V%以上</td> </tr> <tr> <td>O₂</td> <td>8</td> <td>18V%以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>2. 管理日誌による状況把握 サイロ貯炭量、温度、ガス濃度の変化状況を把握しトラブルの事前防止をはかる。</p>	測定箇所	検出数/サイロ	警報値	床板部	1	60℃以上	ホップおよび橋体部	7	55℃以上	ガス	検出数/サイロ	警報値	CO	8	50ppm以上	CH ₄	8	1.25V%以上	O ₂	8	18V%以上	<p>1. 石炭積替え 石炭の温度が上昇傾向にある場合または、上昇したときリサイクル運転にて石炭の積替えをおこなない温度の上昇を防止する。</p> <p>2. 消火、散水 自然発火時サイロ内部の場合は、散水装置から散水し、サイロ下部（払出部）の場合は、消火器または屋外消火栓で対処する。</p>
測定箇所	検出数/サイロ	警報値																						
床板部	1	60℃以上																						
ホップおよび橋体部	7	55℃以上																						
ガス	検出数/サイロ	警報値																						
CO	8	50ppm以上																						
CH ₄	8	1.25V%以上																						
O ₂	8	18V%以上																						
炭塵・ガス爆発	<p>1. 集塵装置の設置 パダグアイル式集塵機を設置し、サイロ内部および下部のガスを換気する。 注) サイロ内部用2台・サイロ下部用1台</p> <p>2. 防爆電気品の使用 サイロ下部（払出口）の電気品は粉塵防爆構造とし、サイロ内部には電気品を使用していない。</p> <p>3. 揚炭機および受入コンベアに散水装置設置 発塵性の高い石炭の受入時は、揚炭機または受入コンベア散水装置にて散水を行ない、サイロ積付時の発塵を少なくする。</p>	<p>1. サイロ内部のCO、CH₄、O₂の検知 ガス濃度を測定感知する。 注) ガス濃度の警報値は前記上表と同じ。</p> <p>2. 管理日誌による状況把握 サイロ貯炭量、温度、ガス濃度の変化状況を把握し、トラブルの事前防止をはかる。</p>	<p>1. 集塵装置の運転 ガス濃度が警報値まで上昇した時は、集塵機が自動起動し、ガスを換気する。</p> <p>2. 受入コンベアの非帯電止 石炭受入中に集塵機が故障した時は、受入コンベアを自動停止させサイロ内の炭塵発生を防止する。</p> <p>3. 放圧扉の作動 爆発時は、各サイロ4個の放圧扉が開き、サイロの破損を防止する。</p> <p>注) 内圧400kg/m²にて開放</p>																					

参考文献

村井郁夫, 西条発電所サイロ貯炭システム, 火力原子力発電, 35(4), pp. 351-364, 1984

大型石炭サイロ（日立金属と共同で開発したアトラスサイロ）の防災技術を確認するために、石炭の昇温特性実験、石炭サイロの模型実験及び実機サイロでの実態調査を行った。実験では、3万 ton サイロの 1/10 スケール模型体によりその特性を把握した。更に、室内実験、模型実験の結果をもとに作成した防災管理基準の妥当性を確認する目的で、1万 ton クラスの実機サイロで実態調査を行った。以下のような結果を得た。

1. 自然発火について

自然発火シミュレーションの結果、通常の貯炭温度及び貯炭期間では自然発火に至ることはないが、サイロ投入時の初期温度が高いときは短期間の貯炭でも危険な場合が考えられる。従って、サイロ受入時の石炭温度を測定することは極めて重要である。

また、サイロ受入口を閉じて通気を抑えると自然発火には至らないため、長期間の貯炭ではサイロの密閉化が基本的対策となり、より一層の安全を考えるならばサイロ内に CO 濃度計を設置し、石炭の発熱に伴って発生する CO ガスを常に監視することによって部分的昇温なども含めて発熱の有無を検知する。

2. 炭じんについて

石炭受入れ時のサイロ内の炭じん濃度は、落下高さが大きいほど高く、その濃度分布はサイロ底部で高い傾向になるが、その差は小さい。模型実験及び実機サイロでの測定値と爆発限界濃度と比較すると、非常に低い炭じん濃度である。これは通常行われている湿分補給で十分に炭じんを抑制できることを示している。また、湿分の少ない乾燥した石炭であってもコンベヤ乗継部などで散水により炭じん抑制が可能である。

3. メタンガスについて

サイロ内のメタンは、その発生が緩やかであるため、模型実験及び実機測定結果に示したようにサイロ内の空間部では、濃度分布の変化をもたない。また、天井部の開口により、自然換気が行われていればメタンガスは蓄積しない。しかし、1. で述べたように自然発火対策として、サイロの密閉性を高めた場合にはメタンガスが蓄積することが考えられ、メタンガス濃度を検知し管理基準値以上で強制換気を行う必要がある。

参考文献

原田実，横田依早弥，大塚誠治，石炭サイロの防災技術に関する研究（その2），鹿島建設技術研究所年報，32，pp. 213-220，1984

穀物貯蔵用サイロでの安全について

労働衛生(酸欠の防止、ガス中毒の防止、粉塵爆発の防止)に関しては、基準がある。

共同乾燥調製、貯蔵施設に関する基準

昭和48年12月17日付 48農蚕第5222号 農林事務次官から地方農政局長あて通達

5. 作業および運転操作の注意事項

(6) サイロにおける作業

ア サイロ上は、原則として、関係者以外の立ち入りを禁止すること。

イ サイロ内部は、原則として、立ち入らないものとする。点検、補修、清掃などのためやむを得ずサイロ内部に立ち入るときは、十分な事故防止措置を講じなければならない。

(労安規則 585 条の 4)

ウ 次の場合は、サイロ内部への立ち入りを禁止すること。

(ア) 穀粒のサイロへの投入時及びサイロからの排出時

(イ) 穀温が異状に上昇したとき(穀温上昇の兆候がみられる程度で必要やむを得ない場合を除く。ただし、カに示す事項に十分注意すること。)

(ウ) くんじょう中のとき、

(エ) 浮遊粉じんが充満しているとき。

エ 事業者は、強風、大雨、大雪等の悪天候のため危険が予想されるときはサイロ上における作業に作業者を従事させてはならない。

(労安規則 522 条)

オ 酸素欠乏危険作業主任者である主任技術者は、次の事項を行うこと。

(酸素欠乏 3 条)

(ア) サイロ内部における作業の指揮を行うこと。

(イ) サイロ内部及びサイロの附属設備について点検をし、異常を認めるときは、直ちに必要な措置をとること。

(ウ) 立ち入りに先立ちサイロ内部及びサイロ下における空気環境等の作業環境の状態について点検及び測定し、異常を認めるときは、直ちに必要な措置をとること。

(エ) (イ) 及び (ウ) によりとった措置について記録しておくこと。

カ 作業者は、サイロ内部に立ち入る場合、次の事項を守ること。

(ア) 酸素欠乏危険作業主任者である主任技術者の指揮に従うこと。

(イ) 立ち入りに先立って、サイロ内部における酸素濃度、ちっ息性ガス濃度、中毒性ガス濃度、粉じんの発生状態等の測定結果より安全を確認すること。

(ウ) 酸素欠乏又はちっ息ガスによる危険発生のおそれがある場合には、空気呼吸器等を着用すること。

(エ) 中毒性ガスによる危険発生のおそれがある場合には、当該ガスに対して有効な防毒マスク等の呼吸用捉護具を用いること。

(オ) 濃度の高い浮遊粉じんがある場合には、防じんマスク及び防じん眼鏡を着用すること。

(カ) 命綱及びなわばしごを確実に使用すること。

この場合、命綱及びなわばしごは、サイロに備えた装着装置に一端を装着すること。

(キ) 3人以上の作業による組作業とし、うち少なくとも2人は、サイロ外にいてサイロ内部の作業の安全を確保すること。サイロ内部の作業者は、サイロ外の作業者と常に連絡を保ち、安全を確認しつつ作業を行うこと。

(ク) サイロ内部に立ち入る場合には、安全な構造の照明器具を用意すること。

(ケ) サイロ内部に立ち入る場合には、集中制御盤の当該サイロ操作スイッチにサイロ点検中等の札をかける等により誤操作による事故を防止すること。

キ 作業はサイロにおける作業に従事する場合、次の事項を守ること。

(ア) 酸素欠乏危険作業主任者である主任技術者の指揮に従うこと。

(イ) サイロ及びサイロ下は、清掃を行い清潔を保つこと。

(ウ) サイロ上において作業を行う場合には、転落事故防止に努めること。転落のおそれのある作業を行う場合は、命綱及びなわばしごを確実に使用すること。命綱及びなわばしごは、サイに備えた装着装置に一端を装着すること。

(エ) サイロ下における作業においては、転倒、つまづき、ベルトコンベヤーの巻込み、突起物への頭部の衝突等を起さぬよう十分注意すること。

(オ) 跨橋以外のところではベルトコンベヤーを渡らないこと。

(カ) くんじょうを行ったサイロにおいては、エアレーション等の方法で十分に中毒性ガスを排除した後でなければ、サイロから穀粒を排出させてはならない。くんじょう後、サイロから穀粒を排出させるときは、サイロ下の換気を行うとともに、当該中毒性ガスに対して有効な防毒マスクを着用して作業に従事すること。

(キ) サイロ内部又はサイロ下に穀粒、わらくず、堆積粉じんがある状態、又は高濃度の浮遊粉じんが立ちこめた状態で溶接、溶断又は加熱の作業を行ってはならない。

(ク) サイロ内壁又は外壁の清掃は危険防止のためこれをなるべく専門の業者に依頼すること。ただし、サイロのホッパー部又は壁面下部の比較的安全に作業できる箇所については、安全に対し十分の措置を講じたうえ清掃を行う場合は、この限りではない。

9. 貯蔵工程用設備

(1) サイロ（労安規則 261 条 519 条）

ア サイロ屋上に転落防止用のさくを設けること。

イ 投入口は、投入の際、サイロ外に穀粒、粉じん等が飛散しない構造であること。

ウ 排出口は、排出時に穀粒、粉じん等が飛散しない構造であること。

エ くんじょうを行う場合、サイロにあっては、気密性及び適正な排気を有する構造とすること。

オ 清掃、保守点検のため屋上及びホッパーにマンホールを備えること。屋上のマンホールには、命綱又はなわばしご及びこれらを確実に装置するための設備等を備えること。

カ サイロ下は、粉じんによる火災又は爆発の危険を防止するため排じん装置を備えること。また、清潔に保てる床構造とすること。

キ サイロには、上部に有効な爆発戸等を設けること。

ク サイロ上部のダンパーゲートその他の主要操作部分は、監視操作室で遠隔制御できるものであること。

穀物貯蔵サイロの管理について

石橋、吉田らによると、穀物の貯蔵中の変化は以下のようなものである。

1. 物理的变化

1.1. 吸湿、放湿

穀物は吸湿性物質であるために、一度乾燥した穀物でも高湿度の場所に貯蔵しておくと、吸湿して含水率が高くなり品質を損う恐れがある。貯蔵に当っては、周囲空気の湿度を貯蔵穀物の平衡相対湿度に保つことが必要である。

1.2. 温度勾配および水分移動

ほぼ均一なサイロに搬入された穀物は、外気温の変化によって外壁から加熱や冷却されて、サイロ内部に不均一な温度分布が次第に形成される。穀物の充填層の熱伝導度は低いので、サイロの塔径が大きくなるに従ってサイロ中央に外気温が伝わるまでの時間が長くなる。外気温の季節的な変動が、サイロ中央でどのように現れるかについては、測定例がある。図1は小麦サイロ内の温度変化を示したもので、壁から2.44 m内側の穀温は、外気温の季節的な変動から4～5ヶ月遅れて追従している。つまり外気温が最低に近づく初冬になって、サイロ内部の穀温はやっと最高値を示している。サイロの塔径が小さい程、時間遅れは短くなり、変動の振幅は外気温のそれに近くなる。

外気温の日変動が鋼板製サイロの内壁近傍の穀物に及ぼす影響についての計算によると、外気温の日変動は壁から10 cm以内の穀物には、はっきりした影響を与えるものの、30 cm内側の穀温は、ほとんど変動を示さない結果が得られている。

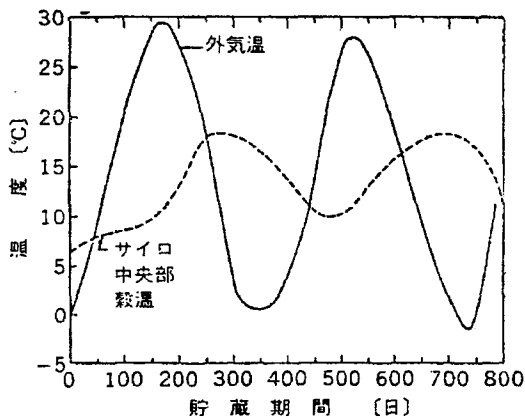


図1 コンクリートサイロ内の穀温変化

穀物は熱伝導率が小さいため、大量のバラ貯蔵の場合等には穀物層間に温度勾配が生じ、そのために貯槽中の空気は循環する。そのとき暖い空気は水分を拾い、空気温度が下ると空気中の水分は凝縮する。この水分がある局部に蓄積してその部分の穀物の変質を招くことがあると想像される。例えば、冬場、内壁付近では穀温が下がり、下向きに空気が対流する。逆に中央部分では上昇流が生じるが、その穀温はまだ高く、空気が徐々に暖められ水蒸気濃度を高める。この高温多湿な空気が穀物層表面に達すると、急速に冷やされて、相対湿度が上がると共に、多くの場合、水が凝縮する。穀物層からその上部空間に上昇した空気は、更に冷やされて屋根に水分を凝縮させる。再び穀物周囲を内壁に沿って下降する低温低湿空気は、穀物から熱と水分を奪うことになる。このように冬場サイロ内半径方向に生じる大きな温度勾配は、サイロ内部に自然対流を引き起こし、そして穀物層を湿らす。図2にその様子を模式的に示す。実際に、大型サイロ内の天井に水分が凝縮し、下の穀物層に落下する現象は数多く観察されている。図3にその例を示す。田中らは大豆サイロにおける自然対流と穀物中の水分移動を求めた。大型サイロ（塔径7.5 m、塔高35 m）内に1000トンのトウモロコシが11月初めに搬入されたと想定して、翌年3月に示すであろう温度と含水率分布を図4に示す。穀物層表層部には吸着水分とは別に440 kgの水が凝縮して穀物を濡らしている。

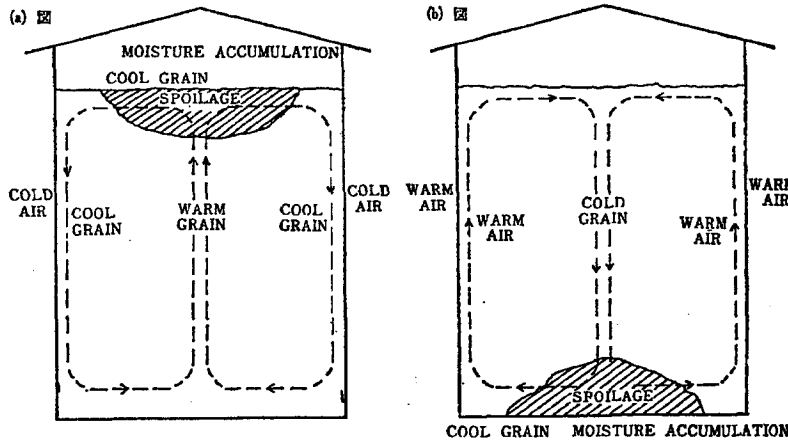


図2 サイロ内の対流

- (a) 内部温度よりも周囲温度が低い場合
- (b) 内部温度よりも周囲温度が高い場合

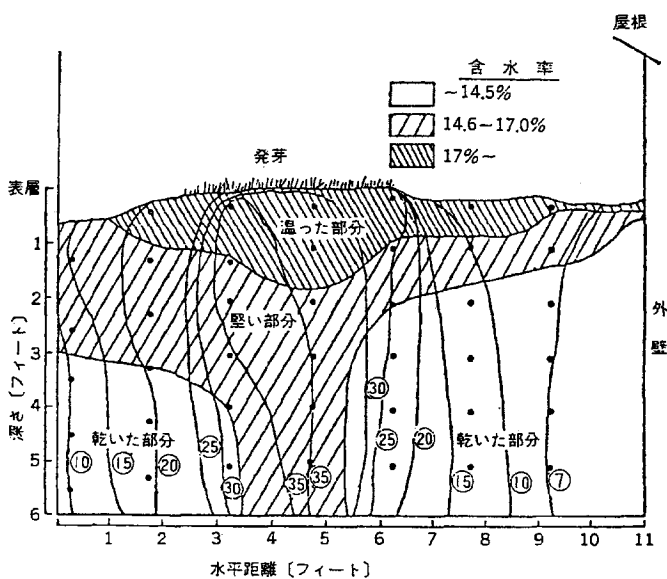


図3 小麦貯蔵槽内に形成された温度と含水率の分布

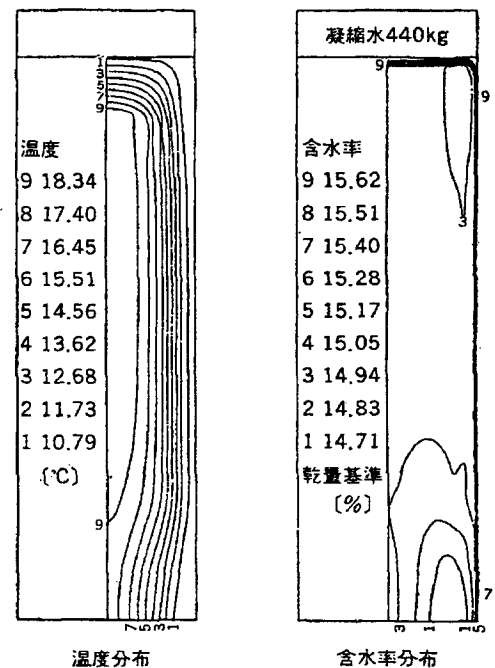


図4 1000 tonサイロ内3月下旬の温度と含水率分布の計算結果

2. 化学的变化

貯蔵穀物では程度の大小，進行の遅速があっても呼吸，酸化および酵素作用などにより化学的变化が常に起きている。穀物主成分のなかでも脂肪の変化が澱粉、蛋白質の変化より速やかで，脂質分解酵素リパーゼの作用によって分解して遊離脂肪酸がふえ，澱粉の変化がこれに次いでいる。

3. 生理的变化

3.1. 呼吸作用

穀物は生きており，貯蔵中にも呼吸作用をして，熱，炭酸ガスおよび水分を生成する。虫害を受けていない乾類した穀物の呼吸量は非常に小さいが，害虫あるいはダニによって害を受けたり湿ったり，カビが繁殖したりすると呼吸量は非常に大きくなり，その結果生じる多くの熱と水分は貯蔵穀物に重大な損害を与える原因となる。

3.2. 発熱

穀物貯蔵中の発熱は，呼吸作用による呼吸熱，害虫や微生物による生活熱，主に多湿時に起る醗酵熱などによる。水分がある局部にたまと微生物が生育し始める。ことにカビの繁殖につれて呼吸量が増大して発熱するに至る。

3.3. 休眠

3.4. 生物による被害

4. 貯蔵穀物の変化の測定例

図 5 のように、断熱状態で貯蔵した大豆の温度と CO₂ 発生量の変化が測定されている。比較的含水率の高いこの大豆粒子上には徐々に黒黴が繁殖し始め、その発熱によって 20 日後には穀温が 50℃まで上昇した。この後一時的に CO₂ 発生量が低下するが、これは黒黴が、自ら発した熱によって死滅してしまうことが原因になっている。しかし、断熱状態で高温状態となった大豆粒子層は、そのまま植物性油の酸化反応を引き起こし、暴走を始めている。

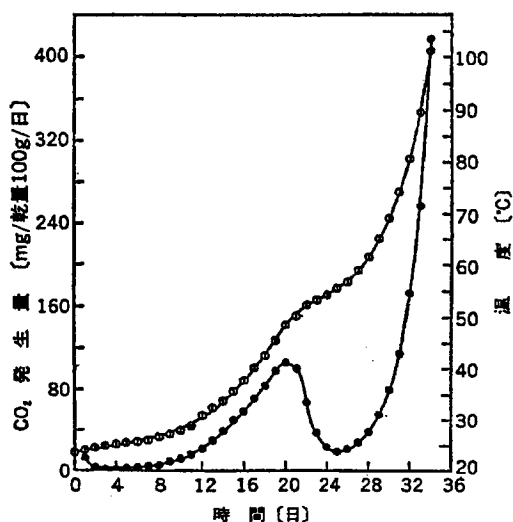


図 5 含水率 18% の大豆の発熱現象と二酸化炭素の発生量

●: CO₂, ○: 温度

現実のサイロ内でも、穀物によって形成された充填層は熱伝導が悪いために、サイロ容量が大きい程断熱効果に優れ、同様な現象が生じ易くなると考えられる。

高橋は、穀物、特に、ばら粕の保管管理上の注意点として以下のようなことをあげている。

1. サイロビンの清掃

生もみだけでなく保管中のもみにも、塵埃だけでなく、多数のカビやバクテリアが付着している。これらのもみを保管するビン内は汚れているので、もみの投入前には、サイロビン、コンペアー、バケットエレベーター等、もみが残留したり、塵埃の付着しやすい箇所の清掃をおこなうとともに、前年産もみが病虫害の被害を受けたビンは、メチルプロマイドで空くん蒸をおこなわなければならない。

2. 穀温の管理

ア. 保管中の穀温

保管中は、できるだけ穀温の変化を少なくすることが品質保全上の基本的な要件である。

イ. 穀温の季節変動

保管中のもみ温は、秋から冬にかけては、サイロの側壁と上層部および下層部から低下し、中心部の低下はおそい。春から夏にかけては、サイロの側壁と上層部および下層部から上昇し、中心部が最もおそい。

第5表 穀温の季節変動例(八郎湯公社)

(単位℃)

位置	12月		1月			2月			3月			4月		
	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
上	5.6	4.5	4.5	4.0	4.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4.5	6.5
中	4.0	4.0	4.5	4.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.0	4.0
下	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	3.0	3.5	4.0	4.0

位置	5月			6月			7月			8月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
上	7.0	8.0	9.6	10.0	11.0	13.5	14.2	14.5	16.2	20.2	24.5	
中	4.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	15.3	19.7	23.2	
下	4.5	5.5	6.5	7.0	7.3	8.5	8.5	9.0	13.5	17.0	23.0	

(注) ① 秋田食糧事務所の資料による (昭和45年産額)
 ② 7月下旬以後の穀温の上昇は、収穫開始のためである。

ウ. 穀温の測定

サイロの場合、穀温の動きを知ることが、品質の状態をチェックする唯一の手段である。

保管中は、もみのサンプリングができないので、穀温計が故障すると盲保管となり、有事の際、迅速な措置がとれず事故を大きくした事例がある。穀温は、慢然と測るのではなく、グラフで図示し、前回の測定結果と対比して、変動の発見を容易にし、変動があれば、その原因を慎重に検討して、正常か異常かの判断を誤らないようにしなければならない。

- 3. ローテーション
- 4. エアーレーション
- 5. 結露対策

参考文献

吉田邦夫 他, 穀物のサイロ貯蔵における環境制御, 化学工学, 48(5), pp. 355-360, 1984.
 石橋貞人, 田中俊一郎, 米の品質と乾燥および貯蔵の原理, 農業機械学会誌, 33(3), pp. 312-322, 1971.
 H. Tanaka and K. Yoshida, Heat and Mass Transfer Mechanisms in a Grain Storage Silo, Engineering and Food, 1, pp. 89-98, 1984.
 高橋信吉, カントリー・エレベーターにおけるもみの貯蔵性と保管管理の要点, 農業倉庫と防災, 2, pp. 21-27, 1978.

嫌気性消化によるメタン回収

好気性コンポスト化と嫌気性消化について表1に示されている。好気性コンポスト化では、資源である腐植土を生成する過程で二酸化炭素が生成され、その後腐植土中の炭素は土壤中で長期間にわたって二酸化炭素に変換される。また、嫌気性消化では、資源であるメタンを生成する過程で二酸化炭素が生成され、メタン中の炭素は燃焼により二酸化炭素に変換される。エネルギーについては、同一種・量の有機性廃棄物から出発するとすれば、廃棄物中の炭素が最終的に二酸化炭素になるまでの過程で放出される量という点では同じであるが、好気性コンポスト化では直接利用できる形のエネルギーの回収はなく、空気の供給や攪拌混合でエネルギーを消費するのに対し、嫌気性消化では攪拌や加熱でエネルギーを消費するものの、生成されるメタンによって直接利用できるエネルギーを得ることができる。

炭水化物、脂質およびたんぱく質は、嫌気性下において図2に示すように嫌気性細菌の作用で分解され、炭素は加水分解反応、酸生成反応、アセトジェニック反応およびメタン生成反応の四つの段階を経てメタンと二酸化炭素になる。第一段階である加水分解反応では、微生物の体外酵素によって高分子の炭水化物、脂質、たんぱく質がそれぞれ糖分、脂肪酸、アミノ酸に分解・可溶化される。第二段階である酸生成反応では、加水分解で生成された低分子有機物質がプロピオン酸、酪酸および低級アルコールへと分解される。ついで、第三段階であるアセトジェニック反応では、有機酸およびアルコールが酢酸、水素、二酸化炭素に分解される。例として、プロピオン酸から酢酸の生成反応を式(1)に示す。

プロピオン酸から酢酸の生成 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (1)

最後の段階であるメタン生成反応では、式(2)に示すように酢酸がメタンと二酸化炭素に分解される(酢酸分解型メタン生成)とともに、式(3)に示すように水素と二酸化炭素が結合してメタンが生成される(CO₂還元型メタン生成)。

酢酸分解型メタン生成 $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ (2)

CO₂還元型メタン生成 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (3)

これらの反応は嫌気性細菌によって行われるが、30～36℃が最適な中温菌による中温発酵と50～57℃が最適な高温菌による高温発酵とがある。

表2はドイツの例であるが、家庭ごみに含まれる有機物質の比率と生物による分解特性である。約20%を占めるリグニンは分解し難いが、その他のものは分解し易いことがわかる。

表1 好気性コンポストと嫌気性消化の比較

特 徴	好気性コンポスト化	嫌気性消化
エネルギー使用	エネルギー消費型	エネルギー生産型
最終生成物	腐植土, CO ₂ , H ₂ O	汚泥, CO ₂ , CH ₄
減容	最大50%	最大50%
処理時間	20～30日	20～40日
第1目標	減容	エネルギー生産
第2目標	コンポスト製造	減容, 廃棄物安定化

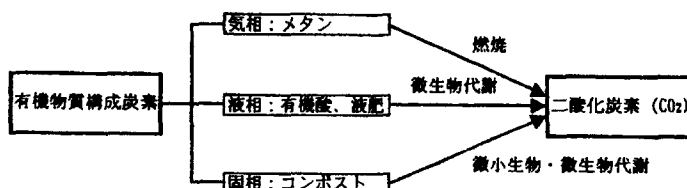
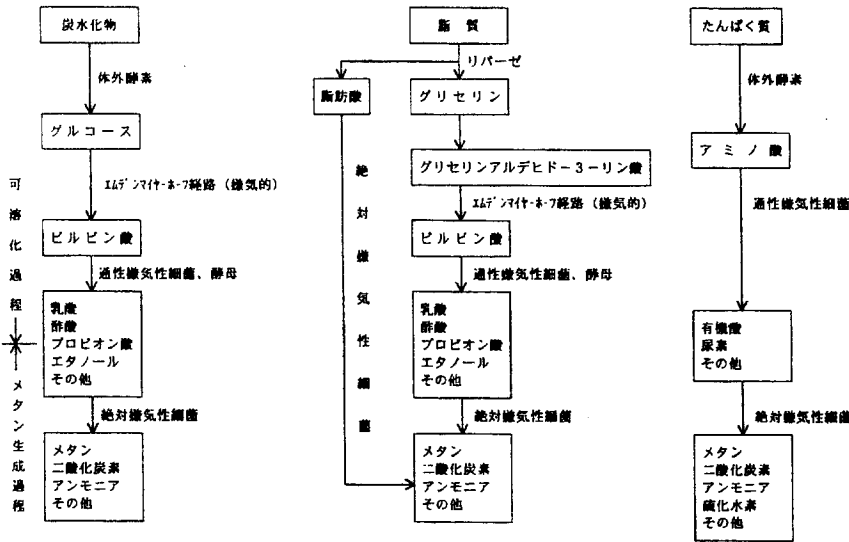


図1 炭素の形態変化

図2 嫌気分解



成分	分解特性	比率 (%)
炭化水素	ほとんどしない	微量
炭水化物		
糖, デンプン	とてもし易い	11
ヘミセルロース	とてもし易い	63
セルロース	し易い	—
リグニン	し難い	19
脂肪分, 油分, 加熱後のろう	し易い	3
タンパク質		
ミュージン	とてもし易い	4
ケラチン	とてもし難い	—

表2 家庭ゴミに含まれる有機物の割合と分解特性

出典

河村清史, 有機性廃棄物の資源化技術—嫌気性消化によるメタン回収—, 廃棄物学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 34-4354, 2000

生ゴミのメタン発酵

メタン発酵プロセスには多種類の細菌が関わって共生集団を形成する。都市ごみのような固形高分子のメタン発酵処理に関わる微生物はその代謝機能に基づき、

- ①加水分解・酸発酵性細菌
- ②ホモ酢酸生成細菌
- ③共生（水素生成性）酢酸生成細菌
- ④メタン生成細菌

の4グループに大別される。その中で、加水分解・酸発酵性細菌グループは炭水化物、脂肪、タンパク質などを酢酸、プロピオン酸、酪酸、水素等にまで分解するグループで、一般的に酸生成菌と略称される。一方、プロピオン酸や酪酸などの中間代謝産物は共生酢酸生成菌によって一旦酢酸と水素に分解された後、メタン生成菌に利用される。また、関与する微生物はその温度特性に基づき、35～40℃を至適温度とする中温菌と50～60℃を至適温度とする高温菌に分類される。

生ごみに含まれる有機物は炭水化物、タンパク質、脂質、粗繊維に大別されるが、その主な元素構成は炭素(C)、水素(H)、酸素(O)および窒素(N)である。表1に示すように、メタン発酵において有機物は加水分解を受けて、含窒素化合物がアンモニアに分解される。その他の元素はメタンと二酸化炭素からなるバイオガスに転換される。

表1 都市ごみと排水処理汚泥等の固形有機廃棄物のメタン発酵の化学量論関係

	メタン発酵の化学量論式 (菌体増殖の影響を考慮していない)	ガス発生率	ガス中CH ₄ 率
食品生ごみ	$C_{17}H_{29}O_{10}N + 6.5 H_2O \rightarrow 9.25 CH_4 + 6.75 CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$	0.88 L/g-VS	57.8 %
都市ごみ	$C_{46}H_{73}O_{31}N + 14 H_2O \rightarrow 24 CH_4 + 21 CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$	0.89 L/g-VS	53.3 %
下水汚泥	$C_{10}H_{19}O_3N + 5.5 H_2O \rightarrow 6.25 CH_4 + 2.75 CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$	1.00 L/g-VS	69.4 %
活性汚泥	$C_5H_7O_2N + 4.0 H_2O \rightarrow 2.5 CH_4 + 1.5 CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$	0.79 L/g-VS	62.5 %

出典

李玉友:都市ゴミの高速メタン発酵処理システム, 化学工学, 64(9), pp. 459-462, 2000.

生ゴミの発酵によるコンポスト化

コンポスト (compost) の原義は、mixture あるいは compound で、もともとは土壌を肥沃にし改良するために用いられる動植物を分解したものの混合物を意味するといわれている。コンポストと堆肥は同義と考えてよいが、わが国ではコンポストと堆肥を区別して使用することがある。そのときにはコンポストは、近年になって、大量に発生するようになった都市ごみや下水汚泥などから強制的な通気や温度管理を伴う制御された方法でつくられた堆肥のことをさしていることが多い。

図 1 に堆肥化の原理を示す。好気条件下のコンポスト化では有機物の分解速度が速く、発熱量も大きいので高温を達成することができる。衛生的で、原料中に存在するかもしれない、はえの卵や病原菌などを死滅させることもできる。表 1 に死滅させるために必要な温度を示す。発熱を利用して水分を蒸発させ、できあがったコンポストを貯蔵やハンドリングに有利な乾燥状態にすることができる。図 2 および図 3 に模式的に示すように、微生物の活性を最大に維持するためには水分と酸素が同時に十分に存在することが必要であるが、コンポスト堆積層の含水率が高くなると微生物への酸素供給が困難になり、好気条件が保たれなくなる。一方、水分が少な過ぎても微生物は活性を失い、水分 30 % 以下で有機物分解速度は極端に低下することがわかっている。コンポスト化においては有機物が活発に分解されるための最適含水率が存在する。

コンポスト堆積層の温度は、微生物による有機物の酸化分解によって生じる発熱と、そこからの水分の蒸発に必要な潜熱、通気する空気の昇温に用いられる顕熱、および堆積層から失われる熱のバランスによって決まる。堆積層の体積が小さければ堆積層からの熱損失の占める割合が大きくなり、また通気量が大きければ水の蒸発に用いられる熱が大きくなって、いずれの場合も堆積層温度は低下する。堆積層の体積が大きい場合には、堆積層内部の温度はしばしば、80 °C 近い高温に達する。また、80 °C を越えて温度が上昇することがあるが、これは化学的な作用（有機物と周囲の酸素との酸化反応）に起因していると推定されている。表 2 に示すように、80 °C を超えると多くの菌は活動できなくなる。

コンポスト化における有機物分解は、中性から弱アルカリ性の範囲で活発におこる。pH が中性付近から極端にずれていると、有機物が活発に分解されるようになるまでに長い時間がかかる。

加熱処理法を用いて廃材から肥料を製造する方法(例えば、Fersolin 法)もある。木材は少量の酸が存在する場合には 100 °C 以上にさらされると縮合反応が行われるが、この場合は分子内の脱水反応で、同時に CO₂、蟻酸、アルデヒド、ケトンが生成される。発熱分解は一般に 275 °C 以上で生じるが、酸が存在する場合にはこれを触媒としてさらに低温で縮合が始まる。

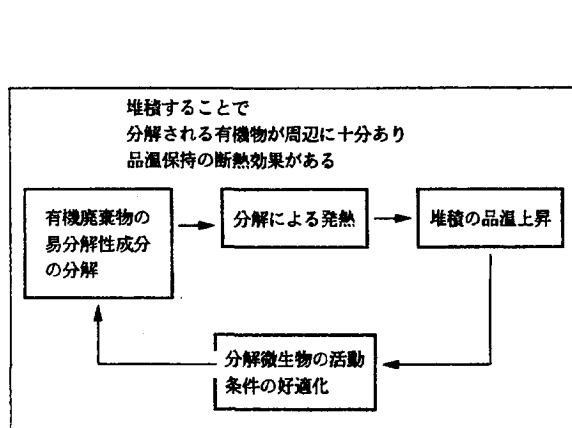


図 1 堆肥化の原理

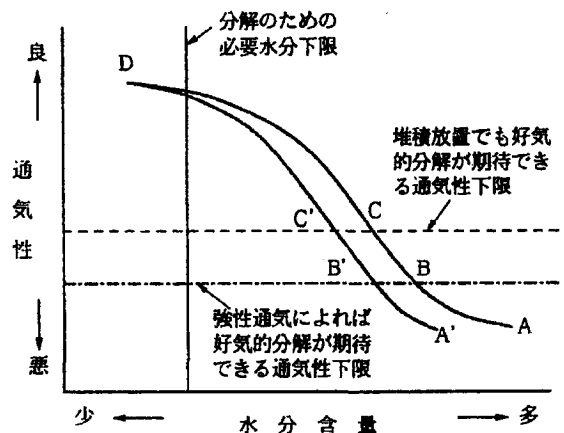
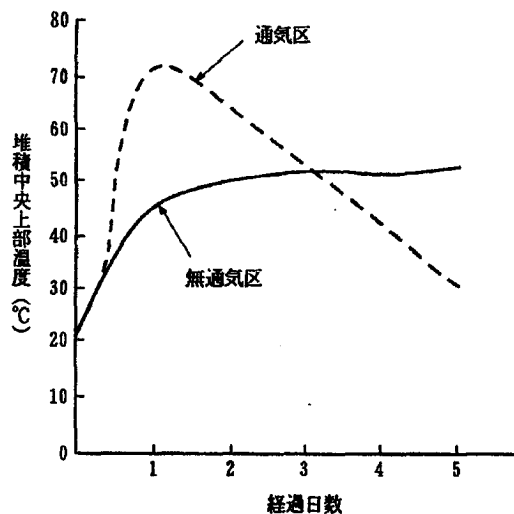


図 2 堆肥原料の通気性と水分の定性的関係

図3
通気の有無が温度に及ぼす影響



微生物		死滅温度(°C)	時間(分)
<i>Salmonella typhosa</i>	腸チフス菌	55~60	30
<i>Salmonella spp.</i>	サルモネラ菌	56	60
		60	15
<i>Shigella spp.</i>	赤痢菌	55	60
<i>Escherichia coli</i>	大腸菌	55	15~20
<i>Micrococcus pyogenes var. aureus</i>	ブドウ球菌	50	10
<i>Streptococcus pyogenes</i>	化膿連鎖球菌	54	10
<i>Mycobacterium tuberculosis var. hominis</i>	結核菌	66	15~20
<i>Mycobacterium diptheriae</i>		55	45
<i>Brucella abortus or suis</i>	牛・豚流産菌	61	3
<i>Endamoeba histolytica</i> (cysts)	赤痢アメーバ(嚢胞)	55	
<i>Ascaris lumbricoides</i> (eggs)	回虫(卵)	60	15~20

表1
病原菌と寄生虫の熱死滅

微生物	温度 (°C)											
	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>Bacillus globisporus</i>			←→									
<i>Micrococcus cryophilus</i>			←→									
<i>Candida sp.</i> (Stokes)			←→									
<i>Pseudomonas alboprecipitans</i>			←→									
<i>Xanthomonas ricinora</i>			←→									
<i>Escherichia coli</i> (大腸菌)			←→									
<i>Vibrio comma</i> (コレラ菌)			←→									
<i>Haemophilus influenzae</i> (インフルエンザ菌)			←→									
<i>Lactobacillus lactis</i> (乳酸桿菌)			←→									
<i>Bacillus subtilis</i> (枯草菌)			←→									
<i>Lactobacillus delbruckii</i>			←→									
<i>Bacillus coagulans</i>			←→									
<i>Bacillus stearothermophilus</i>								←→				
温泉細菌 (Brock)												→

表2
微生物の種類と生育温度範囲

1本の矢印で終わる線はその菌種の少なくとも1菌株について確立された増殖温度限界を示す。一部菌種では菌株間でばらつきがある。二重矢印は実際の温度限界がこの間にあることを示す。点線で終わる実線は最低増殖温度が確立されていることを示す。

出典

中崎清彦: 生ゴミのコンポスト化技術, 化学工学, 63(8), pp. 446-449, 1999.

伊澤: 堆肥化技術の基本システム, 有機廃物資源化大事典, pp.7-22, 農村漁村文化協会, 1997.

河田弘: バーク(樹皮)堆肥, 博友社, 1981.

コンポスト化における発酵

原料中の炭水化物、蛋白質、脂質を空気（酸素）の存在下で好気性微生物が司る生化学的酸化反応により分解し、炭酸ガス、水、アンモニアなどに無機化および低分子化（異化作用）させる。そしてこのエネルギーの一部を利用し有機物と酸素を取り込んで、微生物自体の細胞を合成増殖（同化作用）する。さらに、最終的には微生物自体が有機物として酸化分解され、全体として大部分の有機物が無機化し、微生物学的に安定な有機物として変化していく。発酵分解においては、これらの多くの反応が同時並行的に進行することになり、かつ対象となる有機物は多種多様であるうえ、反応に関与する微生物も多種に及ぶ。

発酵反応の制御因子として、含水率、通気量、pH、微生物の添加、攪拌、原料の堆積量などがあげられるが、いずれも発酵原料の物性（例えば、有機物含有量およびその組成、含水率、粒度、付着性、pH、初期の微生物濃度など）や発酵状態に大きく影響され、その制御因子の条件設定は経験に頼る部分が多い。これらの制御因子の発酵への影響について、表にまとめる。

制御因子	発酵への影響
①含水率	<ul style="list-style-type: none"> ●最適含水率は50～60% ●75%程度まで発酵可能。しかし、高含水率での発酵速度は若干小 ●40%以下では発酵がほとんど停止
②通気量	<ul style="list-style-type: none"> ●発酵原料の有機物含有量およびその組成より最適値に差異 <ul style="list-style-type: none"> ・炭水化物が主の原料では通気量を小さくする ●発酵状態により適正化 <ul style="list-style-type: none"> ・材料温度を下げない範囲で通気量を大きくする ・含水率の高い状態では水分の揮散を配慮する ●表面通気と内部通気のパランスの適正化 <ul style="list-style-type: none"> ・含水率の高い状態では水分の揮散のため表面通気を大きくする
③pH	<ul style="list-style-type: none"> ●初期が4以下では発酵の立上りが極端に低下 ●初期が4以上では特別なpH調整は不要
④微生物の添加 (植菌)	<ul style="list-style-type: none"> ●初期の菌濃度が低い原料で、バッチ処理の時は効果あり ●その他のほとんどの場合、特別な菌の添加は不要
⑤攪拌 (切返し)	<ul style="list-style-type: none"> ●発酵段階や発酵状態により適正化 <ul style="list-style-type: none"> ・発酵状態の良い時ほど攪拌頻度を大きくする ・発酵初期で昇温するまでは攪拌頻度を小さくする ●均一攪拌であることが必要 ●破碎機能の大きな方式が最適 ●移送機能の大きな方式が最適
⑥原料の堆積量	<ul style="list-style-type: none"> ●発酵原料の有機物含有量およびその組成より最適値に差異 <ul style="list-style-type: none"> ・炭水化物が主の原料では堆積量を大きくする ・蓄熱・放熱との関連が大きい

参考文献

永井達夫 他、コンポスト化技術の現状と問題点、バイオサイエンスとインダストリー、54(4)、pp. 264-269、1996

バークの自然発火事例

年月 昭和 63 年 1 月

場所 富山県新湊市内

概要 この事例は、22,000 m² の燃料開発会社の敷地の大部分に、約 20 m の高さで、28 万トンのバークを野積みしてあったもので、この堆積したバークの内部から出火し、消火作業のためバークの山を掘削すると表層より内部の焼き範囲が広大な状況であった。そこで、火災原因調査のため敷地内に野積みされたバークの内部温度について表面から 70 cm の深さまで 7 箇所を測定すると、40～60℃で、最も高いところは 74℃であった。

年月 昭和 63 年 12 月

場所 石川県金沢市

概要 この事例は、バークコンポスト製造業者が山間の落差 30 m の谷間を利用してコンポストを作る目的で約 32,000 トンのエゾマツのバークを投棄したもので、谷間に大量に堆積したバークの内部から自然発火したものである。平成元年 4 月 6 日に現地調査した時点では、自然発火による燃焼箇所から離れた、新たなバーク投棄箇所から盛んに水蒸気が立ち上っており、この部分のバーク内部温度を測定すると、表面から 30 cm までの深さでは 40～60℃、70 cm では 73℃、1 m の深さでは 79℃であった。

なお、バークコンポストとは、木材の樹皮（バーク）を主原料とした堆肥（コンポスト）である。コンポストは主に固形有機廃棄物（わら、草、バーク等と家畜糞尿、生ゴミ、汚泥などの混合物）を堆積しておくことによって、主に好気性微生物の分解により 50℃以上の温域で腐敗させて、土壌還元しやすい形態に堆肥化（コンポスティング）したもので、バークコンポストの場合は通常、鶏糞と尿素などの化学肥料に適度な水分を加えて堆積発酵させ、肥料のみならず優れた有機質土壌改良材として、広く利用されている。

参考文献

林俊勝, 張田俊宏: 発酵熱からの出火に関する考察, 月刊消防, 7月号, pp. 28-33, 1989.