

東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理について ～災害廃棄物の保管時における自然発火の原因と対応について～

環境計画センター

技術士（衛生工学・建設・環境）・環境カウンセラー（事業者部門）

第一種放射線取扱主任者、甲種危険物取扱者など

専任理事 ^{かぎや}鍵谷 ^{つかさ}司

震災で発生した大量の災害廃棄物が除去され、仮保管されている。廃棄物の種類はあらゆるものが含まれているが、津波で流された木材などの可燃性廃棄物が7～8割といわれている。発生量が膨大すぎて短期間で処理することができないので、可燃ごみ、不燃ごみや金属類などと大雑把に分類されて仮保管されている。仮保管場所の確保が十分にできないため次第に高くなり、20mにもなっているとの報道もある。5月以降に仮保管場所で自然発火と思われる火災が頻発し、この9月までに10か所で発煙を伴う発火、火災が確認されている。それに対応して環境省からも仮置場における火災防止に関する通知や情報が提供されている。

自然発火の原因はいくつか考えられるが、その主たる発熱原因は、①微生物による発酵発熱と②有機物の酸化反応に伴う発熱である。特に、①微生物による発酵反応は、空気が存在する好気性雰囲気では発熱を伴い二酸化炭素が発生し、空気のない嫌気性雰囲気では発熱はしないが可燃性のメタンガス等を発生する。一方、②酸化反応では、空気が十分に存在すれば発熱して二酸化炭素が発生し、空気が不十分であれば無煙燃焼で微発熱し一酸化炭素が発生する。とくに、保管量が多くなると放熱が小さくなるので、蓄熱して温度が上昇し、急激に反応・発熱が早くなる。なお、微生物反応では一酸化炭素は生成しないことがわかっている。

このような基礎的な知見に基づいて仮置場における発熱・火災防止を検討すると、放熱を促すためにガス抜き管を設置すると、空気の流入を促進し、発熱が促進される可能性がある。一方、窒息消火を意図してカバーなどで空気流入を阻害すると、嫌気性状態になり可燃性ガスの発生を促進する。また、放水すれば水分が供給されて発酵をさらに促進することになる。つまり、放熱を促すと発熱促進になり、反応抑制のため空気を遮断すると可燃性ガスが発生して危険性が増すなど相反する事態を招く。これでは、発熱現場でどのように対応してよいのか判断できないことになり、非常に困っているのではないかと考えられる。

私は、これまでにリサイクルセンター火災事件に伴う保険金請求事件（裁判）において自然発火について20件以上の意見書や見解書を提出した。また、RDFの自然発熱について保管実験や理論解析、検討委員及び現場指導など多くの実務体験をしてきた。発熱、発煙が起こった現場の仮置き状況（廃棄物の種類、量、保管の仕方や高さなど）は様々であり、一概に発熱抑制できるとは言い難いが、以下に、自然発火について最近の知見等を合わせて紹介したい。参考になれば幸いである。

1. RDFの発熱に関する最近の知見；発熱原因は酸化・蓄熱によるもの。

自然発火といえば平成15年8月19日に発生

した三重県 RDF 発電所貯蔵サイロの爆発・炎上事故を思い出す。ごみから製造した固形燃料 (RDF) を貯蔵サイロに保管したところ、自然発熱により発煙・発火・火災・爆発を起こした事例である。同様の構造をもつ各地の RDF 発電所貯蔵サイロにおいても発熱や発煙が確認され、RDF の自然発熱が大きな社会問題になった。三重県をはじめ公的機関において原因究明が行われ、わずか4ヶ月程度の短期間で有機物が発酵して発熱し、放熱を発熱が上回ったために温度が上昇し、火災を引き起こしたものと結論された。^{※1)}

しかしながら、水分がほとんどない RDF (数%程度) を貯蔵した場合にも発熱するし、微生物による発酵は起らないとされている廃プラスチック等を大量に保管した場合にも発煙やボヤが頻発している。各地の RDF 貯蔵サイロで起こった現象を発酵発熱説ですべて合理的に説明することはできないにも関わらず、発酵防止対策に重点を置いた対策が取られてきた。内容を精査すると、実験的に RDF を空気中で加湿すると発熱することが検証されただけで、発熱を起こすどのような微生物が存在したのか、微生物の増殖数と発熱との相関などほとんど明らかにされていない。さらに、発酵発熱が実際の貯蔵サイロ内で起こったことは全く実証されていないのである。

その後、三重県と同様の RDF 発電を実施している大牟田リサイクル発電所では、事業主体である(株)電源開発、大牟田市や福岡県が委員会を組織し、4年間にわたって発熱原因を詳細に検討した結果、主たる発熱原因は RDF の酸化・蓄熱によるものと結論されている。

以下に、私も委員として4年間にわたって参加し、検討したこの報告書のポイントを紹介する。

〈大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書；平成20年6月〉

大牟田 RDF 貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書 平成20年6月 大牟田

RDF 貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価委員会 (委員長 松本東大大学院教授。委員は鍵谷等5人、オブザーバ；経済産業省原子力安全・保安院電力安全課、環境省、総務省消防庁、独立行政法人消防研究所、福岡県、大牟田市、電源開発関係者) の上記報告書の概要は、平成20年8月に消防危第333号消防庁危険物保安室長 通達「再生資源燃料における廃棄物固形化燃料等の安全対策について」として全国の消防関係機関に対して情報提供されている。

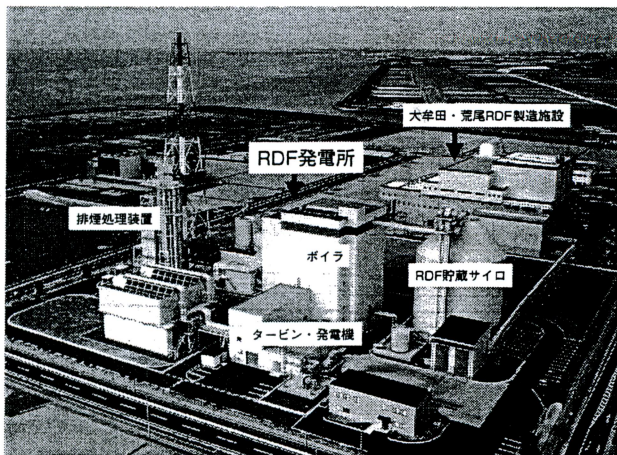


写真-1 大牟田 RDF 発電所の全景

【大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽の概要】

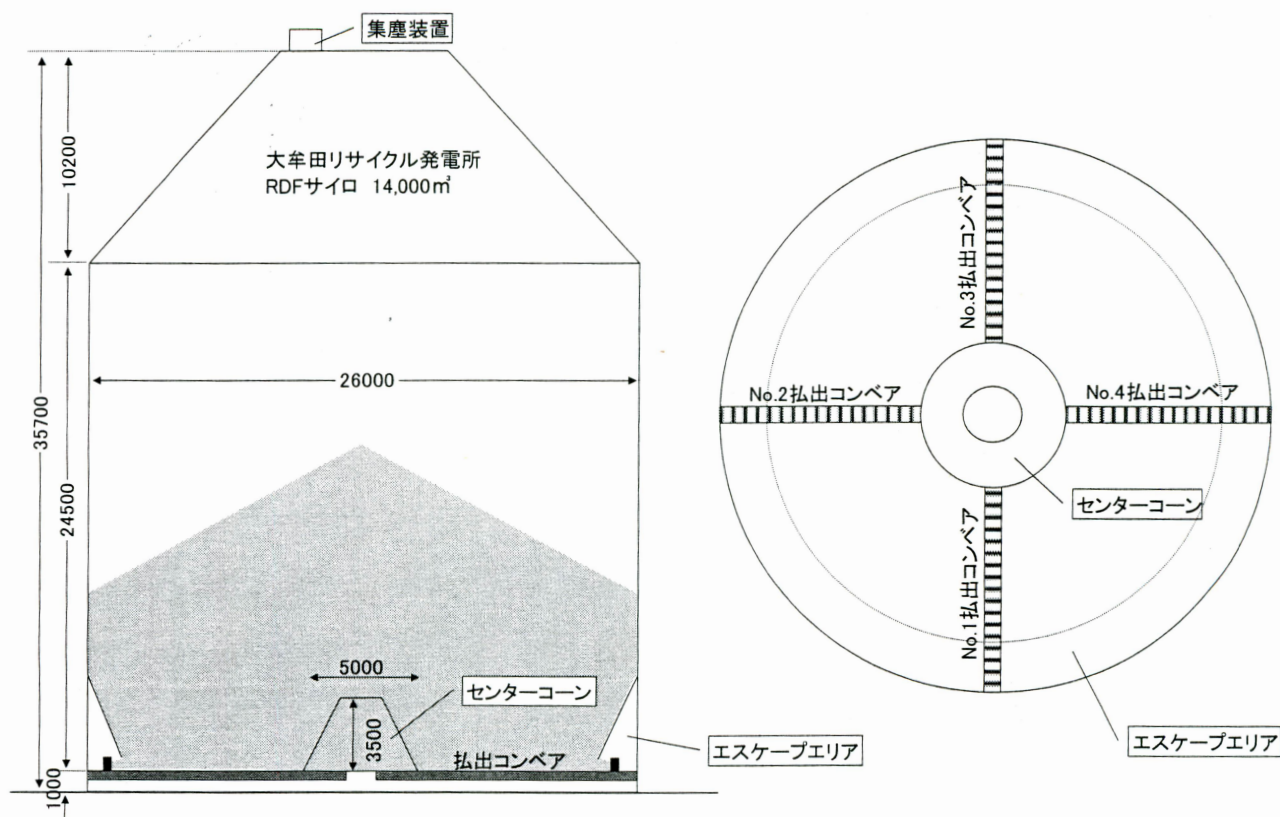
RDF 貯蔵槽は、鋼板二重壁構造で、容量 14,000m³ (直径；26m、高さ；35m) が1基であり、三重県 RDF 発電所貯蔵サイロ (4,000 m³) と同じアトラス型サイロであるが、国内で最も大きい。貯蔵サイロの概要図を図-1 に示した。

【RDF の発酵に関する実機試験等】

1) RDF の発酵確認試験

①吸湿試験；貯蔵サイロ内に2ヶ月間 RDF を吊下げて重量を定期的に測定した。重量増加をすべて水分とすると1%程度増加した。なお、埃付着防止ネットで覆って試験した。

一方、三重県報告書の吸湿試験では、湿度 90%、温度 40℃ の条件下で 13.8～19.2% に増



図－１ 大牟田リサイクル発電所RDF貯蔵サイロの概要図

加したとあるが、実際のサイロでは考えられない高い湿度での実験であり、その流通量や埃防止対策については記載されていない。^{*1)}

②RDFの発酵試験；ピーカ内において水分率が30%程度で嫌気性発酵が起ったが、pH10以上であれば起らないことを確認した。なお、発酵するためには、約30%程度の十分な水分状態になることが必要であることが明らかにされている。

③貯蔵サイロ内における微生物菌の測定；RDFが発熱した現場付近において微生物が増殖した形跡は認められなかった。また、存在する微生物のクローン解析の結果は、付着微生物は周辺の自然環境から付着したもので、耐熱菌や高熱菌の混入も確認されなかった。

2) サイロ内の発生ガス等確認試験

①サイロ内のCO発生量の予測；CO濃度はRDFの温度、貯蔵量、通気ガス流量の影響を受け、サイロ内温度が高く、貯蔵量が増

加した場合に濃度も高くなる。

$$\text{CO発生量 (1/t-RDF・日)} = 2.56 \times 10^{11} \times \exp \{-66100/(R/T)\}$$

R；気体定数 (8.31J/(mol・K))、T；絶対温度 (K)

この関係式を用いて、温度とRDF貯蔵量の条件を設定することによりサイロ内のCO発生量及び濃度を高い精度で予測することができる。このことは、たとえ0℃（絶対温度；273K）でもCOが発生して発熱しうることを示している。

②RDF発生ガス中のTHC成分確認試験；RDFサイロ内ガス中には、アルコール類、アルデヒド類、ケトン類、酢酸が含まれており、条件によるが、アルデヒド類が4割程度含まれていた。

3) 発熱事故再現シミュレーション結果；センターコーン内に設置されている払出口

ンベアのモータによる入熱が一定量 (7 w/m^2) であると仮定した場合には比較的短期間 (3~4ヶ月) で自然発火する可能性が示された。また、大牟田RDF貯蔵サイロでの発熱・発煙トラブルは、発酵発熱によるものではないことが確認されている。なお、三重県の事例については、受入基準の遵守、長期に倉庫に保管したRDFの搬入など事情が異なることから当該結論が適用できるとは限らないので、発酵による温度上昇や空気流入による酸化反応の促進もありうるとし、これらに対する管理、対策も重要であるとした。

【結論：発熱・発火原因】

RDFに30%程度の水分が十分に存在すると発酵が起るが、大牟田RDF貯蔵サイロでは受入れRDFの水分率は数%以下であり、発酵・発熱は起っていないかった。実際は、サイロ底部の搬出コンベアを動かす駆動モータの発生する熱がコンベアを通じてセンターコーン内へ移流し、RDFの酸化・蓄熱により発煙したものと結論された。温度、CO、酸素濃度など各種管理指標を定めて安全対策を講じているが、センターコーン及び駆動モータ室内のクレーン設置後には発熱等のトラブルは発生していない。

なお、平成15年11月に国立環境研究所より環境計画センターに委託研究があり、湖東広域衛生管理組合RDF施設（リバースセンター）において製造直後の高温RDF ($40^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$) 500kgを断熱容器に保管し、内部温度やCO濃度を測定し、酸化蓄熱の可能性を検証した。その結果、発酵が起らなくても内部温度が初期温度よりも上昇することを実験的に検証した。（廃棄物学会論文誌；18-4、pp.264-273 (2007)）※2）。

2. シュレッダーダスト固化物の保管時の自然発熱特性

災害廃棄物の仮置場においては温度管理が重要であるが、自然発熱した場合の内部にお

ける温度分布特性を理解しておくことが重要である。とくに、内部温度が上昇して表面が発火に至った状態で、内部温度はどのような分布を示すのであろうか？

その研究事例として「堀井、飯田；使用済み自動車シュレッダーダスト固化物の自然発火現象について、自動車研究、30-12、p.59-62 (1998.12)」の論文がある。これは自動車シュレッダーダスト（廃プラスチック主体）の発火事例が報告されていたが、その研究事例があまりなかったことからその固化物の発火現象を解析し、発火防止対策の手掛かりを得ることを目的として行われた。

固化物が自然発火する条件は、内部で発生した酸化反応熱が放熱を上回ると蓄熱して内部温度が上昇する。つまり、ダスト温度が高いほど反応速度が速くなり、保管量が多くなるほど放熱速度が小さくなって内部温度が上昇して最終的に発火に至る。固化物を図-2に示した断熱容器（内壁に断熱材を張った鉄製で容積約 1 m^3 ）に充填し、表層から、①50cmの中央部、②70cmの底層部、③30cmの中層部及び④10cmの表層部の4ヶ所で温度を測定した研究事例である。投入時の固化物温度を 150°C にした場合、10時間後に発火することが確認された研究事例である。

断熱容器内部の温度の推移は、図-3に示した。この図より次のことがわかる。なお、当論文は、自然発熱の理論的な解析を目的としたものであり、図で示された内部温度の推移について考察されていない。

○蓄熱による温度上昇は、断熱容器内では、①中央部で顕著に表れ、高い温度の空気は軽いので上昇し、時間が遅れて上層の②中層部から③表層部が次第に温度上昇する。これは、中央部が最も放熱し難いのである時点で急激に温度が上昇すると解される。つまり、シュレッダーダスト固化物は主として廃プラスチックであり、温度上昇とともに急激に酸化反応が起こったことを示唆する。現場で温度管理をするのであれば中

中央部での温度測定が最も重要であることを示す。

有機物の酸化反応速度は、低温では遅いが常温でも絶対温度で約300Kであり、反応は進行する。一般的に温度が10℃上昇すると反応速度は2～3倍に早くなる。つまり、内部温度が100℃に達すると、常温と比較して反応温度は平均的に約1,500倍も速くなる。

○中央部温度が上昇するとその直上の③中層部から④表層部へと熱移動が起こり昇温する。しかしながら、④表層温度が上昇する時点では①中央部や③中層部の温度はすでに150℃以上も高くなっているのである。

この結果は、表面温度で測定しても内部の温度状況を全く把握することができないことを示す。図からも表面温度と中央部はわずか40cm離れただけで、表層部の温度が180℃に達した時には中央部では300℃を超えており、熱分解が進行していると考えられる。

このような堆積時の温度特性を理解せずに、表面温度で監視すると極めて誤った対応を導く可能性がある。外気の最高温度よりも高くなった時点で対応を図る必要がある。

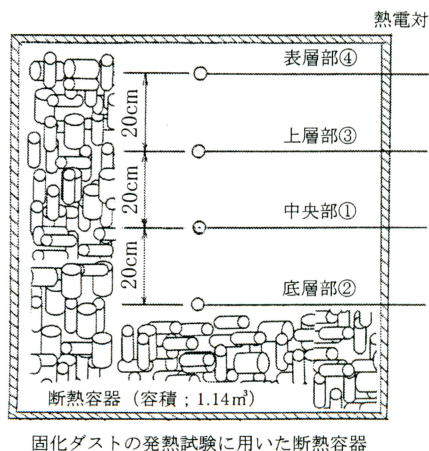
○底層部においてはほとんど温度上昇が認められないが、中央部での高温状態が続くと、ある時点で急激に昇温し、温度が最も高く

なった後に発火に至る。250℃以上の温度では、プラスチック主体の固化物は熱分解が起るので、高温の炭化物が落下したものと考えられる。このため、急激に温度が上昇し、450℃程度で発火したものと推測される。

つまり、仮置場において自然発火が起こったことは、すでに中央部と底層部では有機物が熱分解で消失しており、空間が生じていることを示唆する。したがって、発煙時に掘り起こしなどの作業で重機を操作する場合には、陥没などの危険性があるので、要注意である。

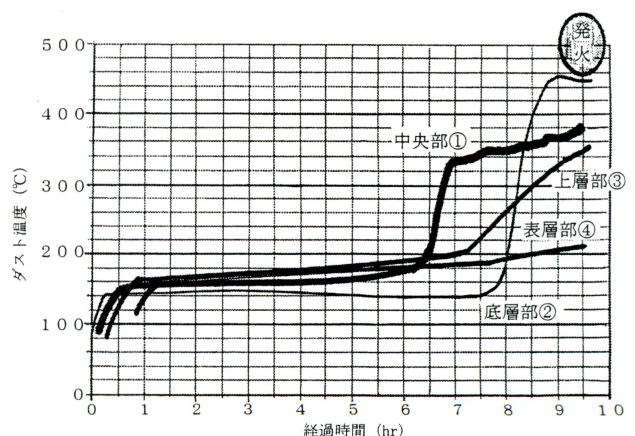
自然発火における内部温度の状態を類推させる非常に貴重な論文である。とくに、私もごみ固形燃料（RDF）を断熱容器内に500kgを充填して初期温度と内部温度の変化を実測し、同様な傾向を把握しているが、発火までの実験は危険なので実施できなかった。^{※2)}

なお、可燃物を保管した場合、蓄熱による自然発熱特性は、一般的にFrank-Kamenetskiiの「熱発火理論式」を用いて堆積高さや自然発火温度の関係を計算することができる。計算は、堆積物の比熱、密度、初期温度、熱伝導率、反応頻度因子や活性化エネルギー等のパラメータが必要である。ここでは発熱特性を予測する方法や事例については割愛します。



（使用済み自動車シュレッダーダスト減用・固化・乾留ガス化技術の開発研究
研究開発報告書 資料集 平成10年6月（社）日本自動車工業会（JAMA））

図-2 断熱容器の構造と温度測定地点
（論文より筆者が作成）



断熱容器内部のダスト温度推移
（投入時のダスト温度；150℃）

図-3 断熱容器内における測定地点別温度推移
（論文より筆者が作成）

3. 災害廃棄物の仮置場時における

自然発熱・発火抑制に関するQ & A

仮置場における火災防止対策については、環境省から情報が提供されており、発煙や火災時における対応策も示されている。しかしながら、発熱原因が複数存在すること及び放熱を抑えると発熱を促進し、散水やカバーで空気を遮断すると可燃性ガスの発生を促進するなど相反する現象が起きる可能性がある。最も気になる事は微生物による発熱防止に重点が置かれていることである。すでに述べたように、最近の知見では、発酵しない廃プラスチックや水分率の低いRDFが大量に保管された場合には自然発熱することは常識であり、発酵は起こるであろうが、主たる発熱原因は有機物の酸化反応によるものであるとの見解である。発酵発熱であるならば、少なくとも発熱した現場において微生物の種類（DNA鑑定）や温度の高い箇所における微生物数など実験室ではなく現場での科学的な知見が必須である。

なお、三重県RDF発電所貯蔵サイロの発熱・火災・爆発事故究明は、サイロ等が火災・爆発で完全に焼失したので、室内実験データに基づいた推論であり、実際のサイロ内における実験データではない。同じ構造のサイロを設置した大牟田リサイクル発電所貯蔵サイロで起こった発熱原因調査では、室内実験及び実際のサイロ内でのデータに基づいて原因が究明されている。

以下に単純な疑問等に対してQ & Aの形式で解説を試みた。

Q-1；自然発火の原因は他になにがあるでしょう？

Q-2；有機物の発酵反応と酸化反応の特徴的なことはなにか！

Q-3；自然発熱・発煙現場で起こっていることを想像すると！

Q-4；自然発熱・発火において最も重要視しなければならないことは！



写真-2 煙が上がるがれき仮置き場＝名取市関上（2011.9.16；会田聡撮影）



写真-3 ガレキの仮置場の状況（ゴミタビ；瀬戸義章撮影）

Q-5；発熱現場においてはどのように対応すべきか！

Q-1 自然発火の原因は他になにがあるでしょう？

これまで大量保管時の自然発火の原因は、好気性雰囲気における発酵による発熱と有機物の酸化反応に伴う発熱に焦点をあてて解説したが、他に発熱の原因には何があるのだろうか！

これまで廃棄物の保管や埋立処分場において発煙や火災になった事例は数多く報告されている。その原因は必ずしも解明されていないものの、いくつかの事例について紹介する。特に、ごみ焼却方法が普及する以前には、生ごみを含む廃棄物が他の廃棄物と混合して埋

立てられていたことから各地で自然発火が続発した。生ごみが混合していたので、発酵発熱であるとの見方が主流であるが、すべての事例が発酵発熱であったか否かは必ずしも検証されていない。

つまり、10m以上もの厚さで埋立てた場合に、埋立地内部が好気性雰囲気を持てていることを示すデータは見たことがない。常識的には埋立地の下層部は嫌気性の可能性があり、嫌気性発酵であればメタンガスが発生するが、発熱を伴わない。むしろ、水分低下とともに低酸素雰囲気できりうるチャー燃焼（無煙燃焼）による発熱の可能性が高い。

さて、このような発酵や酸化反応に伴う発熱以外の発熱原因として次のようなものが考えられる。

- ①混合埋立地においてガラスくずやペットボトルなどのレンズ作用による自然発火
- ②タイヤを大量に保管して自然発火した事例では、タイヤから露出したスチールが酸化反応により発熱し、蓄熱したために発火に至った事例がある。
- ③石灰の中和反応による発熱；生石灰は水と反応して中和熱を発生する。中和熱は燃焼熱に比べて数分の一以下であり、水分が多いと高温になることはないが、蓄熱すれば火災の原因になる。
- ④がれき類には可燃物質が混合し、特に、破砕物や塵状の可燃物は着火しやすい。たとえば、がれき類が崩れた場合におこる摩擦熱、重機操作時に金属類や小石など堅い物質との摩擦あるいは静電気による火花が発生するので、着火することもありうる。
- ⑤災害廃棄物中にボヤや火災を消火した後の残さが持ち込まれる事例が多い。残さには家具や木材などの大型の可燃物は無煙燃焼により炭化物（炭）が残る。高温の炭化物は散水しても内部まで完全に消火することは難しいので、残り火を含んだ状態で災害廃棄物に混入し、発熱や発火源になりうる。
- ⑥災害廃棄物中には、重油、灯油やガソリン

あるいはシンナー、アセトンなどの有機溶剤、塗料などの入った瓶や缶あるいは小型ガスボンベ、ライターなども混合しているので、破損部から可燃性ガスが揮発し、摩擦熱や静電気により着火する可能性がある。

- ⑦マッチ、花火などの火薬類や薬品類は濡れた状態では安全であるが、乾燥した場合にはわずかな火源で爆発的に着火しうる。
- ⑧その他；破砕物は切断部で酸化反応を起し易いので、注意が必要である。とくに、破砕されたアルミやスチールの金属表面、磁気テープの破断面などが酸化反応などで発熱することが知られている。

他にも色々な原因が考えられるが、このように発熱・発火源が多数あるので、廃棄物の現場を知らない場合には困惑することになる。内部の温度分布、発生したガスの性状などから判断することになるが、現場でのデータがないので、確定することは困難である。このように発熱の要因は多数存在し、いずれも可能性があるため、原因は単なる推察にならざるを得ない。発熱要因を減らすことは重要であるが、むしろ、基本的には発熱しても発煙や発火が防止できれば安全上の問題はないとの考え方で対応することが現実的であろう。

Q-2；有機物の発酵反応と酸化反応の特徴的なことはなにか！

有機物の発酵反応と酸化反応の特徴の比較一覧を次表に示す。（鍵谷作成）

主たる発熱反応と想定される発酵反応及び酸化反応はいずれも反応条件（濃度、温度、水分、雰囲気等）により発熱の有無、発生ガス組成が異なる。

発酵反応では、水分が不可欠であり、空気（酸素）の有無により発熱する好気性発酵と吸熱する嫌気性発酵がある。なお、好気性発酵では二酸化炭素や水は発生するがメタンなどの可燃性ガスは発生しない。一方、嫌気性

表-1 RDFの酸化反応と発酵反応の特徴

比較項目	酸化反応	発酵反応
臭気の発生	・ 焦げ臭い ・ アルデヒド系の臭気	・ アンモニア系 ・ 硫黄系の臭気
熱の発生	・ 瞬間的でピークをとまなう	・ 緩やかに発熱する
水分の影響	・ 水分がなくても反応する ・ 水分濃度の影響は不明	・ 必要 ・ 細菌は10以上の水分が必要 ・ カビは10%以下でも生育可
メタンガスの発生	・ 発生しうる	・ 大量に発生（%オーダー）
二酸化炭素の発生	・ 発生する	・ 大量に発生（%オーダー）
一酸化炭素の発生	・ 発生する	・ 発生しない
水素の発生	・ 発生しうる	・ 嫌気発酵で発生しうる（ただし吸熱反応）

発酵では二酸化炭素、メタンや水素などの可燃性ガスを発生、強い臭気を伴う。なお、生物発酵では一酸化炭素は発生しないので、これが確認されると酸化反応が起こっていることを示す。また、微生物による発酵は有機物のなかでも微生物の餌（栄養）となる成分のみであり、繊維など発酵に適さないものも多い。いわば、BOD成分が主たる栄養源となる。酸化反応はすべての有機物が反応対象である。つまり、反応対象物（濃度）が著しく多いのである。

酸化反応では、空気（酸素）が十分に存在すれば、二酸化炭素と水が発生し、空気が不足した場合には、一酸化炭素やメタンなどの炭化水素類が発生する。いずれも大きな発熱を伴う。常温では、反応速度は非常に小さいが、温度が10℃上昇するごとに速度は2～3倍に大きくなるので、常温から数十度に上昇すると、およそ400倍程度に早くなり、大きな発熱を伴う。酸化反応による発熱速度は、発酵による発熱速度よりも著しく早いので、これを抑制する方策を講じるべきである。なお、常温から50℃程度の範囲における微生物反応と酸化反応の発熱速度と比較したデータは見当たらない。また、少量の水分は酸化反

応を促進することが知られているが、明確ではない。

Q-3；自然発熱・発煙現場で起こっていることを推測すると！

Q-2で述べた微生物反応と酸化反応に伴う発熱の基本的な特性を勘案して災害廃棄物の保管現場における発熱特性を推測すると次の事が言えよう。

〈現場における微生物発酵に伴う発熱について〉

①十分な空気と30%程度の水分が十分に存在すると、好気性発酵が継続して起こり、発熱する。現場内部では好気性と嫌気性雰囲気混在していると考えられる。

②発熱しても水分の昇温や蒸発に熱が吸収されるので、ゆっくりと昇温し、50～70℃程度になる。一般に55℃以上では微生物の死滅速度が速くなるので、発酵は抑制される。^{※3)}

発熱に伴って水分が蒸発するので、しだいに増殖が抑制されるが、水分が少なくなると有機物自体の温度は上昇すると考えられる。
※水分が15%程度になると有機物の酸化反応が起こると想定されるが、明確な実験データはない。

③空気の供給がなければ一層嫌気性状態にな

り、嫌気性発酵が起こり、メタンなどの可燃性ガスが発生する。なお、この反応速度は好気性発酵速度と比べて著しく遅く、かつ吸熱反応であるので、温度上昇はない。

- ④好気性発酵及び嫌気性発酵が起こっても一酸化炭素は発生しない。

※発酵実験の中には、低水分率が低くても発酵が起こるとの報告もあるが、自己発熱が確認されただけで、微生物の種類、増殖の程度あるいは一酸化炭素の有無等が確認されていない。低水分状態では、酸化反応による発熱であると考えられる。

〈現場における酸化反応に伴う発熱について〉

- ①生物発酵が起こらない0℃程度の温度雰囲気でも、速度は遅いが、発熱反応が起こる。たとえば、0℃では微生物反応は起こらないが、絶対温度で273Kであり、化学反応に必要な温度であり、反応は進行する。

- ②通常、化学反応は、温度が10℃上昇するごとに2～3倍上昇する。蒸発温度の100℃における反応速度は常温の約1,500倍程度に早くなる。水分が蒸発して乾燥状態になると吸熱がほとんどなくなるので、温度は急激に上昇する。

- ③空気が十分に存在する状態で発生したガスに着火すると炎（熱）と光を発して激しく燃える。炎燃焼が起こり、散水による温度低下や空気を遮断することにより消火は比較的容易である。なお、燃焼に伴うガスは、二酸化炭素や水（温度が高いので、水蒸気）等である。

- ④酸素がない状態でも無煙燃焼が起こり発熱する。反応速度は遅いが、わずかな酸素や有機物が分子中に持つ酸素により反応が継続するので、消火は難しい。身近な事例ではバーベキューで使った炭の残火であり、灰をかぶせても、散水しても完全に消すことは難しい。なお、無煙燃焼では、一酸化炭素の他にメタンなどの全炭化水素が発生する。

Q-4 自然発熱・発火において最も重要視しなければならないことは！

通常の火災防止の基本は、火災を引き起こすような危険な発火源の除去や監視であろうが、廃棄物の保管時における自然発火の原因は、Q-1で羅列したように多数存在し、いずれも無視できない項目ばかりである。原因に惑わされると発火の対応を見誤ることになりかねない。対応とは、自然発熱は許容範囲であり、むしろ発煙や発火が起こらないように対策を講じるべきである。つまり、発熱が起こっても100℃以上に昇温しなければ、大きな問題にはならない。これは水の蒸発温度であり、これ以下では有機物の燃焼は起こらないし、燃焼に伴う大気汚染物質も発生しない。

本来、廃棄物の埋立てに伴う発生ガス及び火災（燃焼）で発生する燃焼ガスは二酸化炭素と水（水蒸気）であり、ばいじん等を伴う。このうち、ガス類は目には見えないはずであるが、被災地における火災現場では煙がもうもうと立ち上がっている。この煙の成分がわかれば、少しは火災の本質が見えてくる。単なる水蒸気か、あるいは一酸化炭素、二酸化炭素、窒素酸化物などの燃焼排ガス、あるいはメタンやアルデヒドなどの可燃性ガス、燻っているのでは様々な臭気などのデータがあれば、内部状況を予測することは可能である。

目に見えている煙は、水が水蒸気になり、空気中で冷やされてミストになり、これに光が反射して白く見えると解している。どのような色のガラスでも粉々に砕くと光が全反射して白く見えるのに似ている。また、黒いばいじんなども光反射により白く見えるのである。もくもくとたなびく煙の成分は主に水蒸気であろうが、ガス成分はなんであろう！！成分が把握できれば、内部における反応の概要を推測することが可能であり、発煙防止や適切な消火方法に多くの知見が得られよう。

いずれにしても大量の有機物を保管した場合、自然発熱を止めることは非常に難しいの

で、温度上昇を抑制する手段を講じることが現実的な対応であろう。

Q-5 発熱現場においてはどのように対応すべきか！

以上の特徴に基づくと、様々な有機物を含む災害廃棄物を屋外に大量に保管しているので、自然発熱を防ぐことは非常に難しい。しかしながら、微生物発酵に伴う発熱では50～70℃程度の上昇であり、水分が十分にあったとしても反応速度、つまり昇温速度は遅く、かつ微生物は死滅するので、一定温度（おおよそ70℃以上）以上に上昇することはない。

一方、酸化反応は水分が少ない条件で昇温とともに急激に早くなり、発煙や発火を引き起こすという特徴がある。つまり、水分が十分にあればたとえ発熱はあったとしても酸化反応に伴う急激な温度上昇は抑制できるので、発煙や発火は防止できることを示唆する。

仮置場における発煙・火災防止は、水を十分に供給すれば温度が低下すること、及び蓄熱しないように放熱を促進するガス抜き管の設置が有効であるとの結論に至る。なお、大量の散水は、地下水汚染や汚水の流出による環境汚染が懸念されるので、簡易ろ過して循環散布するなどの対応が現実的である。いずれにしても現場での実証実験が必要であり、底層部、中層部、表層部の温度推移、発生ガスの組成調査を行ない、その有効性を短期間に確認する必要がある。

おわりに

災害廃棄物の仮置場は大小様々な可燃物が屋外に大量に保管されており、自然発熱条件である降雨による水分供給、粗大物が多いので空気流入が容易であることから発酵をはじめ酸化反応による発熱は容易に起こる。保管量が多くなるにしたがって熱の放熱が小さくなり、発熱が上回ればしだいに蓄熱して内部温度が上昇する。とくに、水分が低くなると吸

熱が小さくなるので、酸化反応は促進され、急激に温度が上昇し、発煙・発火に導く。

有機物が存在するのであるから基本的には自然発熱を止めることは難しい。が温度上昇を抑制することが有効であり、とくに、過剰の水分は有機物の酸化反応を抑制し、100℃以上には昇温しないので、湿潤状態を保つことが酸化反応の抑制、ひいては火災防止に有効であるとの考え方が成り立つ。なお、過剰な散水は底部に溜まると嫌気性状態になり、メタン等を発生する嫌気性発酵が起こることに留意する必要がある。

仮置きされた廃棄物の組成、性状、寸法、形状、混合などは千差万別であり、保管状況、水や空気供給条件等も異なるので、一概に結論することはリスクを伴うので、小規模でもいいので現場実験で管理しながら確かめることが望ましい。

追記；

○現場における発熱を監視するに当たっては、酸化反応の目安となる一酸化炭素濃度を監視すべきである。酸化反応は発酵反応よりも速度が速いので、短時間に温度が急上昇する可能性が高い。さらに、無煙燃焼はわずかな空気で行進し、表面温度が外気温よりも高い時点では内部が150℃以上の高温になっている可能性が高い。想定ではあるが内部温度が250℃程度では熱分解により発煙が確認されうる。なお、無煙燃焼を抑制・消火することは極めて難しい。

○降雨及び散水量の増加により汚水量（浸出水）が増加することになる。一般的に1ha（高さを5mとして5万m³）の埋立処分場における汚水発生量は30～40m³/日程度である。なんらかの処理をしなければ、河川等公共水域を汚染することになりかねない。少なくとも簡易処理（簡易凝集沈殿、ろ過）は必要である。汚水処理施設が設置されていない場合、仮置場であるので、例えば、車載型の移動式排水処理施設を準備し、仮

置場を巡回して処理するなどの対応を図ることが現実的ではなかろうか。

- 木くずや廃プラなどを細かく破碎することは、構成する高分子が切断されるので、末端に反応性の高い二重結合やラジカルが生成するので、酸素や水分と反応して過酸化物などの活性種が生成し、反応性が高くなる。つまり、低温でも発熱しやすくなることに留意する必要がある。
- 現在、災害廃棄物の仮置場から東京都内へコンテナで運搬されている。仮置場では分別されることなく、様々な廃棄物が保管されており、これをコンテナに積み込んで、都内の選別等処理施設に運搬され、最終的に不要物が埋立処分される。破碎等が行われていないとはいえ、自然発火要因はいくつかあるので、十分に注意して運搬する必要がある。
- また、輸送効率の向上を図るために破碎し

て嵩密度を大きくして運搬すると、発熱や蓄熱しやすく、運搬中などの少量取り扱い時でも発熱や発煙することも起こりうる。乾燥した有機物は発酵しなくても酸化反応などにより自然発熱することに留意すべきである。とくに、コンテナやフレコンバッグなどで運搬・保管中に表面温度を測定しても中央部の温度を把握できないので、CO濃度のモニタリングを行うべきである。また、CO濃度と内部温度の相関性の把握、及び発熱や発煙時の対応をマニュアル化しておくべきである。

- コンテナでの運搬時に発熱し、発煙が確認された場合には、空気を入れると内部に燃焼範囲（メタン：5～15%）の濃度があると、爆発的に燃焼する可能性がある。安易にコンテナを開けたりしないことなど、白煙時の対応をマニュアル化しておくことが必要である。

〈参考資料〉

- ※1) 三重県「ごみ固形化燃料発電所事故調査最終報告書」；平成15年11月22日
- ※2) 鍵谷ら；RDF保管時における発熱特性に関する研究、廃棄物学会論文誌、Vol.18、No.4、pp.264-273（2007）
- ※3) 人見ら；有機性廃棄物メタン発酵における菌の死滅速度と温度の関係、廃棄物学会研究発表会講演論文集 ポスター1 B3-6、p.480-482（2004）