

## &lt; 講演 &gt;

## 三重ごみ固形燃料発電所サイロ事故について

笠倉 忠夫

前 豊橋技術科学大学教授\*

Tadao KASAKURA

## 1 はじめに

平成 15 年 8 月 19 日午後 2 時過ぎ、三重ごみ固形燃料発電所のごみ固形燃料（以下 RDF と略す）を貯蔵していた大型鋼製サイロ（4,000m<sup>3</sup>）で爆発が発生、サイロの屋根で消火活動に当たっていた 2 名の消防士が屋根諸共に吹き飛ばされ殉職した。この事故は新エネルギー事業、廃棄物分野の関係者にとって大変大きな衝撃であった。何故ならば、RDF 発電事業は NEDO の推進する環境調和型エネルギーコミュニティ形成促進事業の具体的モデルとして、或いは近年のダイオキシン問題に対応する広域ゴミ処理事業の先端システムとして注目を集めていた事業であったからである。この事故によって RDF 発電事業への信頼は大きく崩れた。それだけに留まらず、この事故が廃棄物処理施設という公共施設で発生したことで行政への批判が高まり、消火活動中の消防士が犠牲になったことは施設近隣の住民に大きな不安を与えた。そしてこの事故はマスコミによって大々的に報道され全国的に多くの人々の耳目を集めた。

一方、三重県は事故の発生と同時に「ごみ固形燃料発電所事故調査専門委員会」（以下専門委員会と略す）を設置し、この事故の原因究明に当たることとした。専門委員会の委員には燃焼工学、安全工学、環境化学、微生物学の専門家 8 名が選任され、筆者は委員会の委員長に任命された。以後 3ヶ月に渉り専門委員会は事故の原因究明に向けて、各種の実験を始め、関係者へのヒアリング、他の RDF 発電所への視察など多方面に渉る調査を実施した。これらの調査結果は 7 回の専門委員会の議論を経て一定の見解にまとめられ、11 月 22 日に調査報告書とし

て三重県知事に提出された。この報告書を受けて、RDF 発電や RDF サイロの爆発に関わる諸官庁（環境省、経済産業省、総務省消防庁）はそれぞれの立場から報告書を発表している。

本文は、今後の RDF 事業に於いて多量の RDF を取り扱う際の安全対策への一助となればとの思いから、専門委員会の議論の過程を通して得られた知見を基に事故の経緯と事故の原因についてまとめたものである。

## 2 RDF の由来と RDF 発電

廃棄物中の可燃物を代替燃料として有効利用しようという概念は米国で生れ、米国では 1970 年代末には 1 日当り 2,000t の廃棄物を処理して RDF を始め有価物を回収するという超大型廃棄物資源化施設が稼動していた<sup>1)</sup>。米国では ASTM によって RDF は 7 種類に分類されているが、米国で一般的に用いられているのは RDF-4 (Dust-RDF) で微粉炭ボイラーの燃料として混焼されている。RDF-1~3 (Fluff-RDF) も所によって用いられていると聞くが、筆者はオイルショックを契機に下水汚泥焼却の補助燃料に Fluff RDF を用いる研究の経験がある<sup>2)</sup>。一方、我が国では一般廃棄物の場合、米国に比べてごみ質（特に水分）が異なり、水分や他の性状を調整する目的で破碎-乾燥-成型工程を通して固形化する方式が導入され（ASTM の RDF-5 ; Densified RDF に相当）、従って我が国で RDF という時にはこの固形化 RDF を指している。

我が国で最も早く一般廃棄物処理に RDF 化を導入した自治体は青梅市であり、今から丁度 20 年前の 1984 年である。その後 1990 年代に入ると、RDF 化技術の研究も進み<sup>3)</sup>、RDF 化施設を導入する個所が増加した。消防庁の調べによれば<sup>4)</sup>、現在 RDF に関連する施設は全国

\*〒 478-0013 知多市南巽が丘 2-118  
TEL:0562-34-9235 FAX:0562-34-9235  
E-mail:QYL00031@nifty.ne.jp

Tab.1 三重ごみ固形燃料発電所の概要

項目	内容
事業主体	三重県企業庁
施工業者	富士電機株式会社
設置年月	平成14年12月1日
設置場所	三重県桑名郡多度町力尾地内
計画能力	RDF 240 t/日 (120 t/日 × 2 系列)
処理方法	焼却処理 (循環流動層ボイラー)
発電出力	12,050 kW
売電量	約 7,000 万 kWh/年
RDF 製造	県内 26 市町村; 7 施設で製造し, 発電所へ輸送
RDF 貯蔵	鋼製サイロ (内径 15.4m × 高さ 22.0m, 有効容積 4,000m <sup>3</sup> )

で120箇所を越え、自治体の関与する施設は約その半数である。これらの中で RDF を発電用燃料に使用し、電気事業法に基づく届出をしている発電所が16箇所あり、その丁度半分の8箇所が RDF と他の産業廃棄物などの混焼施設、残り8箇所が RDF 専焼発電所である。そして、RDF 専焼発電所の内4箇所の大型発電所は何れも先の広域ごみ処理事業に該当する施設である。

広域ごみ処理事業で RDF 発電システムの先行モデルとも言える三重ごみ固形燃料発電所の構想は、1993年にFS(可能性調査)が開始され、従来のごみ発電の2~3倍に当る30%程度の発電効率の確保をターゲットしたNEDOの委託調査事業が1994、95年の2年間行われた。その後幾つかの審議、審査を経て2001年には廃棄物処理施設としての認可を取得した。実際のプラント建設は2001年から2002年に掛けて行われ、試運転は2002年12月から開始された。Table.1に三重ごみ固形燃料発電所の概要を示す。

### 3 事故の経緯

三重ごみ固形燃料発電所での RDF 貯蔵サイロ (Fig.1) で発生した爆発事故は、それがマスコミによって大々的に報道されたため、一般には突発的に発生した印象を与えているのではないだろうか。しかし、当発電所では運転開始以来、サイロを始め RDF を堆積した数箇所が発熱又は発火事故を引き起こしており、爆発事故はその最後に招いた大惨事だったのである。事故の全容が把握し易い様に、運転開始から爆発に至るまでの経過を、発熱又は発火事故を中心に Table.2 にまとめて示した。

当発電所は平成14年12月1日に運転を開始したが、運転に備えて10月末から RDF をサイロに貯蔵し始めた。運転を開始してから10日後(サイロに RDF を貯蔵開始後約40日経過後)、サイロ頂部ベントから水蒸気が立ち上るのが発見された。サイロ内部で発熱している兆候で

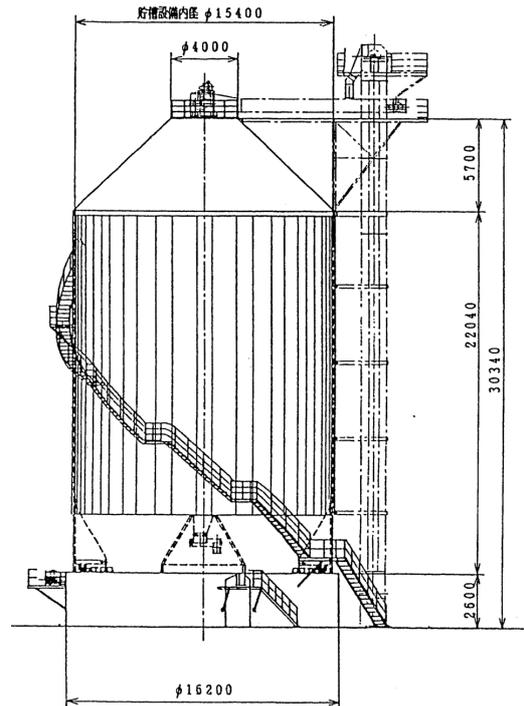


Fig.1 RDF貯蔵サイロの外形図

あったが、それから8日後にはサイロ底部から発煙、そして更に5日後には下部間隙に炎が認められた。サイロの使用を停止し、底部から RDF の払い出しを行ったが、全量を取り出すには1ヶ月以上を要し、完了は2月上旬であった。これがサイロでの第1回目の発熱・発火事故である。

サイロの使用が再開されたのは2月下旬であるが、この間1月末には隣接する物置に堆積した RDF が堆積後2日程で内部発熱し、最高温度は100°C前後であったという経験をしている。又2月初旬には、製造されて行き場無く倉庫に保管されていた RDF の堆積層の内部で発熱が起き、頂部から水蒸気が出ているのが見つかった。このケースは発熱初期であったと思われ、山を均して放

Tab.2 RDF 貯蔵サイロ事故の経過

年月日	主 な 事 項
14.10.28	試作品受け入れ（成型状態悪し）
12.10	上部ベントより水蒸気発生（1,500t 貯蔵中）
12.18	底部コンベアより発煙（2,000t 貯蔵中）
12.23	排出部より発煙（この時まで温度計も無く、何もせず、2,000t 貯蔵中） エスケープ間隙から炎（サイロ使用停止）
12.24	サイロ壁面に開口、注水開始
12.25	温度計取り付け
12.27	沈静化と判断、しかし再度温度上昇（以降 2 月上旬まで RDF 全量取出し）
	この間に製造された RDF を四日市（12.14～2.25）及び鈴鹿（2.18～3.14）の倉庫に保管する 2.7 に <u>四日市竹本倉庫の堆積山から水蒸気</u> が出ているのを発見（均して放熱させる）
15. 2.26	サイロ使用開始（桑名は受入せず、4.21 より受入）
6 月初旬	サイロを一旦空にする（再開後サイロ内温度が上昇傾向にあり）
7. 2	鈴鹿倉庫貯蔵品の貯蔵開始
	7.19 に鈴鹿倉庫で最初（2.18）に搬入した堆積山から白煙 が出ているのを発見（山の表面温度 35°C、内部 62°C、内部からは青白い炎が出ていた）、火の粉上り初期消火をするも効果なく、消防による消火が行われる。 （倉庫での発火後は倉庫からの搬入品はサイロに貯蔵せず、直接投入に切り替え）
7.20	<u>サイロ上部より水蒸気の発生</u> を発見 最高温度（センターコーン）47°C、頂部 CO 濃度 >300pp
7.21	最高温度（センターコーン）48°C（サイロへの RDF 受入を中止）
7.22	企業庁へ報告、サイロからの排出中止
7.23	仮設コンベアから RDF 取出し点検、正常と判断サイロからの排出開始
7.27	サイロ上部より発煙、最高温度（エスケープ部）52°C（サイロからの RDF 排出中止）
7.31	エスケープ部最高温度 181°C
8. 1	サイロ下部から仮設コンベアでの RDF 排出開始（炭化物混入）
8. 5	サイロへの注水開始（8.11 までは温度低下）
8.14	噴出事故発生、センターコーン温度 116°C（以降、徐々に低下） エスケープ部温度 90°C（以降、急上昇、500°C 以上となり燃焼状態）
8.19	<u>サイロ爆発・炎上</u> （9.27 鎮火）
	9.23 大牟田 RDF 発電所、10.15 石川北部 RDF 発電所でそれぞれ発熱事故発生

熱することにより事無きを得た。しかし、他の倉庫に 5ヶ  
月程保管されていた RDF 堆積層は 7 月中旬に発火した。  
作業員が消火に当たったが対応し切れず、消防署による消  
火が行われた。この様に、RDF の堆積物はサイロ以外の  
場所でも発熱又は発火を繰り返していたのである。

さて、12 月の事故後発電施設はサイロを用いず、搬入  
される RDF を受け入れホッパーから直接ボイラー投入  
用バンカーに受ける方式によって運転が続けられていた。  
6 月初旬には設備の定期点検が行われ、終了後の 6 月 10  
日からサイロ使用が再開された。その後、前回のサイロ  
事故と同じく貯蔵開始後 40 日を経過した 7 月 20 日、サ  
イロ頂部から水蒸気の排出が発見された。1 週間後には  
頂部から発煙が確認され、さらに 9 日後にはサイロ下部  
で炎が見られ、ここまでの経過は前回 12 月の事故と殆ど  
同じ経過を辿っている。しかし、8 月 14 日にはサイロ下  
部で小爆発が起き、以降消防による消火活動が行われた

が、残念ながらその効果も空しく 8 月 19 日の大惨事に  
至ってしまった。

#### 4 事故の原因

三重ごみ固形燃料発電所の事故を契機に、環境省によっ  
て RDF 製造施設などでの事故調査が行われ、半数以上の  
施設で発熱、発火或いは火災事故を起こしていることが  
報告されていた<sup>5)</sup>。新聞などではこれら製造施設の事故  
と発電所での事故を同列に扱う嫌いがある。しかし、こ  
の両者の事故の間にはその事象が全く異なることに注意  
する必要がある。RDF 製造施設での事故は乾燥工程で  
の過乾燥や成型時の摩擦熱など明らかな熱源によって引  
き起こされている。これに対して発電所で起きた一連の  
事故では、事故経過から明らかな様に、常温で堆積され  
た RDF の発熱・発火の原因が問われたのである。或いは

RDF 堆積層内で何が発熱のトリガーとなったのか、そして発熱から発火に至るメカニズムは何だったのか、と問い直しても良いであろう。

事故原因の究明の中でも事故の発端となる発熱のトリガーが何であったかの推定が特に重要であり、これについては世間でも様々な憶測が行われ、専門委員会でも長時間の議論を戦わせた。Fig.2 に RDF 発熱の FAT (Fault Analysis Tree) を示す。発熱のトリガーとなり得る四つ



Fig.2 RDF サイロ内での発熱 FAT チャート

の事象が示されているが、摩擦熱は RDF を倉庫内に堆積したケースには適用出来ず、無機物の化学反応は実験結果からトリガーと成り得ないと推定された。従って、可能性のあるトリガーとしては「有機物の化学反応」と「好気性発酵」の二つとなる。しかも、これら二つの事象は石炭、自動車のシュレッダーダスト、ウッドチップ、穀物、豆類、牧草などの有機固形物を野積み或いはサイロ貯蔵など大量に堆積した際に生起する発熱や発火の原因とされており、今回の事故に於いても重要な要因と目された。それぞれの分野に於いて多くの経験が蓄積されており、これらの知見を簡単に要約して見よう。

i) 有機物の化学反応 (化学的酸化反応)

この反応は石炭堆積層の発熱原因とされ国内に於いて多くの研究が行われたが、星沢ら<sup>6)</sup>がその総括を行っている。石炭は堆積層内で雰囲気中の酸素と直接反応し発熱する。しかし、常温からの反応は『低温酸化反応』と呼ばれる通り反応速度が遅く、温度上昇には極めて長時間を要する。結局温度上昇は発熱と放熱のバランスで決まり顕熱化は堆積量に依存する。最近、この低温酸化反応は自動車のシュレッダーダストや下水汚泥炭化物の堆

積層での自然発火の原因としても注目されている。

ii) 好気性発酵 (生物学的酸化反応)

有機性廃棄物のコンポスト化の様な有機物の微生物による酸化分解 (呼吸) 反応を好気性発酵と通称しているが、当然発熱反応であり、農産物 (穀類, 豆類), 植物体 (牧草, わら), 廃木材 (ウッドチップ, ソーダスト) などを含湿状態, 好気下で堆積すると例外なく観察される現象である。我が国でも農産物をサイロ貯蔵した際の発熱現象については農業機械分野で盛んに研究され、農業機械学会誌や農業施設学会誌に多数の報文がある。しかし、これらは主に農産物の保全を扱ったものである。これに対して、海外では「サイロ火災 (silo fires)」を扱った刊行物がかかり発行されており、その幾つかを挙げてみよう。

“ Occasionally, we hear reports of an upright or tower silo containing a fire. The majority of these silo fires are slow, smoldering ordeals that become a frustration to farmers and fire fighters. A few have resulted in raging fires or explosions, some with fire fighters being injured or killed. ”

(PB1307, Oct., 1988, The University of Tennessee, Agricultural Extension Service)

“ Spontaneous heating and combustion when sufficient moisture, oxygen and organic matter are present together to support the growth of bacteria and molds. This growth results in an initial temperature peak of 54~65. When the forage reaches this temperature range, a chemical process may occur, causing additional heat generation. ”

(Ontario State Ministry of Agriculture and Food, Factsheet; Silo and Hay Mow Fires on Your Farm. 1993)

“ Bacteria and fungi break down the materials, and heat is released which raised the temperature of the pile. This temperature-increasing mechanism continues up to a temperature of about 80, at which point other exothermic chemical process can take over, further increasing the temperature of the pile. ”

(Per Blomqvist, “ Brand Posten† ”, No.27, p17, Dec. 2002)

†Brand Posten is issued by SP(Swedish National Testing and Research Institute) staff.

Tab.3 RDF の性状試験結果

項目	単位	資料 1	資料 2
工業分析			
水分	%	6.8	6.5
灰分	%	9.5	9.7
揮発分	%	71.3	71.6
固定炭素	%	12.4	12.2
元素分析			
炭素	%	49.0	49.4
水素	%	6.57	6.65
酸素	%	31.7	30.8
窒素	%	1.21	1.22
塩素	%	1.22	1.50
硫黄	%	0.14	0.13
カルシウム	%	2.71	1.97
高位発熱量	kcal/kg	4,570	4,930
低位発熱量	kcal/kg	4,200	4,560
着火温度	°C	250	240
高比重			
ゆるめ	t/m <sup>3</sup>	0.54	0.58
かため	t/m <sup>3</sup>	0.61	0.64

有機固形物の堆積層で条件が満たされれば殆ど例外なく上記の様な事象が生起するならば、RDF も条件次第で同様な事象が生起するのであろうか。専門委員会は二つの事象について実験を実施した。RDF の低温酸化反応については「国連勧告に基づく試験法」(この試験では雰囲気温度 140°C) に準拠して自己発熱試験を行った。試験結果は極僅かな温度上昇を示しただけで自己発熱には至らず、RDF の自己発熱温度は 150°C 以上である。いずれにしても、RDF は常温から酸化反応によって発熱することは難しく、或る温度まで上昇させないと自己発熱しないということである。ではトリガーは海外文献が指摘するような好気性発酵であろうか、これを検証するため専門委員会は数回の発酵実験を行った。Fig.3 はその一例で、水分を変化させた時の実験結果である。又、Table.3 は実験に用いた RDF の性状を示したものである。

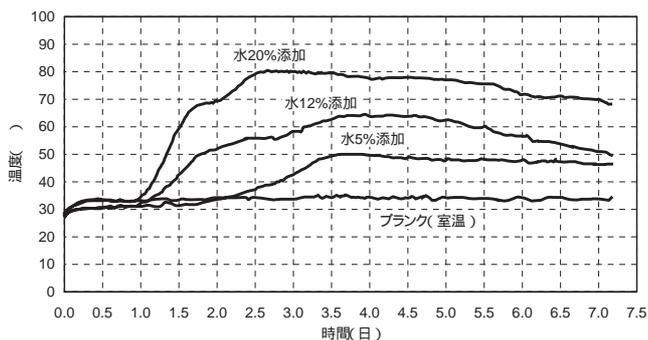


Fig.3 RDF の好気性発酵実験結果の例

RDF は主に水分に依存して発酵することは明らかであるが、問題は RDF が発酵し得る含湿状態にどの様に達するのかに有り、ここに議論が集中した。専門委員

会は、濡れた RDF の持込、サイロ内 RDF への外部からの湿度の供給、堆積層での水分の移動、層内での水分溜り (moist pocket) の生成などを考慮すると、RDF の堆積層内での発酵は生じ得ると判断した。

トリガーが判明すれば、これに引き続いて生起する化学的酸化反応が問題となる。この反応には二つの条件が関与している。一つは、発酵によって有機物が低分子化され反応性がより高まるということ、他の一つは、RDF の熱的特性、特に熱伝導率が小さく(消防研究所の測定値;  $0.059 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )蓄熱性が高いことから、熱発火理論から導かれるように堆積高さによって発火点が低下することである。後者について、専門委員会では Frank-Kamenetskii 式を用いて発火温度推定をした。堆積高さが 2~3m を越えると、限界発熱温度は急激に低下することが分かった。一方、自己発熱試験において容器寸法を  $(100\text{mm})^3$  から  $(300\text{mm})^3$  に拡大すると、自己発熱温度の低下が確認される。環境省報告書の資料中に高温; 105°C の RDF を 500kg  $(1,000\text{mm})^3$  のコンテナに入れて放置すると、一旦は温度が下がるが、一定時間後温度が上昇しはじめ温度上昇を続けるという結果が報告されているが、この結果は容器の拡大により自己発熱温度が 100°C 前後まで低下したことを示すものと考えて良いであろう。この様に、堆積層内の RDF は発酵に引き続く化学的酸化反応によって自己発熱 - 着火へと結びつくと考えられる。

最後に問題となるのはサイロでの爆発である。RDF はその組成から明らかなように揮発分に富み、燃焼によって高温場が形成されると、その周辺の RDF は熱分解を始め可燃性ガスを放出し炭化が進行する。サイロへの空気の流通が悪く、サイロ内で酸素が不足すると炭化物は

炎を出さず、くすぶり燃焼状態で長時間燃焼を継続する。そして徐々に燃焼域が広がれば熱分解も更に進み、燃焼しない可燃性ガスがサイロ空間部に溜まるであろう。このような状態の所へ何らかの理由によって空気が流入し、可燃性ガスと爆発混合気を形成すれば、火種は何であろうと爆発は不可避である。

国内でもサイロ爆発の事例はあるが、今回の爆発事故と酷似する、米国オハイオ州で1985年に起きた事例が報告されている<sup>7)</sup>。飼料を貯蔵したサイロで自然発火が発生し、3名の消防士がサイロ頂上で消火活動中突然爆発が起き、3名の消防士は殉職した。その後も同様なサイロの自然発火や爆発事故は後を絶たず、USFA<sup>†</sup> Technical Report Seriesには幾つもの事例が記載されている。これらの事例から言える事は、この種密閉状態になり易いサイロ(oxygen limited silo)では自然発火(spontaneous combustion)が発生した場合、サイロ内部に空気を侵入させないことが重要である。発熱・発火に際して大牟田及び石川北部 RDF 発電所で採った、サイロ内への窒素注入による空気混入防止と可燃性ガスのパーズの方法は適切な措置であったと考えられる。安全管理に於いては事故の早期発見、早期対応が鉄則であるが、万々に備えた万全の対策を講じることも又必至である。

## 5 おわりに

三重ごみ固形燃料発電所に於ける今回の一連の事故の背景を考察してみると、次の二つの点を指摘する事が出来る。一つは、この事故全体を通してここでは同じ経験を何度も繰り返しているということである。システムを運営管理する立場、施設を運転管理する立場、それぞれの当事者に危機管理意識が甚だ欠如していたと考えざるを得ず、誠に残念であった。今後の運転に際しては保安、

危機管理に万全を期し、信頼の回復を図っていかなければならない。もう一つは、上述して来た様に同種の事象に起因する事故、トラブルの情報は国の内外を問わず多数発信されていたにも拘わらず、情報過多と言われる時代の中で、それらの情報が当該分野には伝達されていなかったという事実である。施設の計画、設計段階で他分野を含めた必要な情報を如何に取り込むか、そしてそれを実際の施設運転にどの様に活用していくかが問われる問題である。いずれにしても、今回の事故によって得られた教訓をどの様に活かして行くかが今後に課せられた大きな課題である。

最後に、筆者は RDF 発電による広域処理システムは廃棄物処理分野において有効なシステムであると考えているが、今回の事故によってこのシステムが大きなダメージを受けた事は否定出来無い。それだけに決して容易なことではないが、今回の事故を教訓として当事者の努力によりこのシステムの信頼を回復し、RDF 発電システムが廃棄物処理システムの有効な選択肢として再認識される事を強く望むものである。

### [参考文献]

- 1) 笠倉忠夫：“汚泥研究年報”，環境技術研究協会(1983)，p.85
- 2) T. Kasakura：Regional Jour. of Energy, Heat and Mass Transfer, 5 (1983), 71
- 3) 廃棄物研究財団：“分別ごみの固形燃料化技術について”(1995)
- 4) 総務省消防庁：“ごみ固形燃料化燃料等関係施設の安全対策調査検討委員会報告書”，平成15年12月12日
- 5) 環境省ごみ固形燃料適正管理検討会：“ごみ固形燃料の適正管理方策について”，平成15年12月25日
- 6) 星沢欣二他：燃料協会誌，64(1985)，224
- 7) NIOSH<sup>‡</sup>；DHHS Publication No.86-118

<sup>†</sup>USFA；United State Fire Administration

<sup>‡</sup>National Institute for Occupational Safety and Health