

■緊急提言：どうする、ごみ固形燃料化技術！	鍵谷 司	2
－過渡期のRDF発電と普及の必要性－		
■特別企画：「環境-エネルギーフォーラム」信州WSより		13
再生可能エネルギーと廃棄物・バイオマス由来の発電・エネルギー利用の戦略		
－主要企業幹部等の意見・情報交換会から－		
《総括》阿部清一の視点	阿部清一	21
■シリーズ：ごみ処理施設訪問《特別編》	山根和範	22
日量5トンの片付けごみを焼却 対策地域内第1号施設		
－福島県飯館村 小宮地区仮設焼却施設－		
■新シリーズ：福島問題の考え方放射線を正しく理解する	西嶋茂宏	25
【第1章】汚染食品を食した場合の被ばく		
－放射線の単位と許容被ばく限度－		
■寄稿：最終処分場への取り組み①	柳瀬龍二	36
最終処分場のプロ集団化を目指して		
－好気性領域拡大型準好気性埋立と維持管理－		
■寄稿：最終処分場への取り組み②	堀井安雄	46
最近の最終処分場における課題と対策		
－最終処分場の廃止対策について－		
■特別寄稿：爆発事故を起こしたRDFサイロ内の温度変化	中村正秋	55
■Topics on Waste Management		62
MHIEC 愛知県・尾三衛生組合から基幹改良受注 / 日造 茅ヶ崎市焼却施設基幹改良受注 / JFEエンジ 福島県楢葉町で焼却・減容化処理受託 / 荏原環境 北秋田市エネルギー回収推進施設建設を受注 / メタ 御殿場小山組合ごみ再資源化施設PFI契約 / JFEエンジ 都市環境プラント4施設の基幹改良受注 / 三菱重 G シンガポールで廃棄物焼却発電参画 / MHIEC 兵庫県西宮市焼却施設改良工事受注 / 新日鉄住金エンジ ごみ処理施設基幹改良3件受注 / MHIEC 茨城県牛久市基幹改良受注 / 荏原環境 西濃環境保全センター流動床炉基幹改良受注		
■クローズアップ：		
稼働から約半年、燃料電池の消化ガス発電が順調	山根和範	67
－長野県松本市上下水道局 両島浄化センター－		
■シリーズ：廃棄物埋立跡地の問題と安全利用（Ⅳ）	鍵谷 司	72
発生ガス（メタン）の特性と事故事例・対策について（Ⅰ）		
■講演録：環境と経済のこれまでと将来	南川秀樹	82
－足尾銅山事件から地球温暖化、福島と原発－		
■連載：Front Line④⑦	村山愉偉	92
JFEエンジの技術の粋、練馬清掃工場		
東日本大震災に襲われたプロジェクトが完工		
■トピックス		
海外事情① 香港で始まったリサイクルファンド	鈴木進一	95
海外事情② 第19回海外（米国・カナダ）調査団活動概要	杉島和二郎	98
－都市環境フォーラム「エネルギー・環境問題研究会」主催－		
■Topics on Biomass		100
横河電機 ブラジル最大バイオ発電施設の制御システム受注 / 住友商事 酒田市に木質バイオマス発電所建設 / 神鋼環境 下関市下水消化ガス発電で基本協定締結 / MKE 宮城県南三陸町でバイオガス施設を完成 / 日造 秋田メタン発酵ガス化バイオマス発電事業へ出資 / 日造 ホーチミン市の汚泥処理プロ受託 / 水ing 岩手県と消化ガス発電事業の基本協定締結		
■連載：見栄ごみ処理プラントエンジニア講座	鈴木康夫	103
第6回 ガス化溶融炉（1回目）		
■連載コラム：多事雑言（第5回）	吉業正行	104

どうする、ごみ固形燃料化技術！

—過渡期のRDF発電と普及の必要性—

技術士（衛生工学・建設・環境）・環境カウンセラー等

環境計画センター専任理事 **鍵谷 司**

RDF発電所が稼働・操業してから13年目を迎えた。発電施設の継続あるいは廃止を含めて次期のごみ処理方針及び計画の策定の決定段階に至っている。日本の水分の多いごみ質に対応できる独自に発展してきたRDF化技術であるが、三重県RDF発電所の事故により普及は停止した。一方、韓国や台湾では日本のRDF化技術を参考にして普及に取り組んでいると聞く。

RDF化技術から撤退することは果たして選択すべき判断なのであろうか！今後ともごみのリサイクルの拡大、エネルギーの効果的な活用、ひいては二酸化炭素（以下、CO₂）削減に寄与あるいは他の自然エネルギーと比較すると安定電源としての価値ははるかに大きいので、「捨てるにはもったいない技術」である。焼却処理技術と異なり、技術開発の歴史が浅く、実績のないプラントメーカーの参入などによりトラブルが発生したことは事実であるが、RDF化方式に関する批判のほとんどが誤解や数少ない失敗事例を取り上げたものである。今やタブー視されているが、次の理由から見直しの必要性があると考えて提言することにした。

【緊急提言；RDF発電の価値と普及のための方策について】

1. RDF化によるリサイクルの促進

ダイオキシン対策の一環として普及したRDF発電所の耐用年数が近づいている。平成15年8月に起こった三重県RDF発電所の火災・爆発事故により新たにRDF化方式を選択する事例は皆無となったが、すでに稼働した約50箇所のRDF化施設と5箇所のRDF発電所は操業を続けている。年間に約38万トンが製造され、このうちの8割がRDF発電所で利用されている。

ところで、平成12年6月に循環型社会形成推進基本法が施行され、ごみを「循環資源」と定義し、物質リサイクルと3R（Reduce；排出抑制、Reuse；再使用、Recycle；再生利用）を優先し、それでもできない場合には熱・エネルギーを回収するとしている。なお、単なるごみ焼却による熱利用あるいはごみ発電はリサイクルには含まないが、ごみを原料として燃料化したRDFは熱・エネルギー源としてリサイクルの範疇に含むこともある。

これまで基本法の理念に適合するごみ処理計画、処理施設について財政的な支援を行った結果、一般廃棄物の減量やリサイクルは確実に進展してきた。しかし、最近のリサイクル率は21%程度で横ばい状態であり、物質リサイクルの優先によるリサイクル向上はほぼ難しい状況である。突破口は廃棄物を燃料化して熱・エネルギーを回収することであり、その切り札としてRDF化が大きな役割を果たしうる。とくに、RDF化対象規模は、発電しても効率が低く、売電に多くを期待できないごみ処理量200トン/日以下の施設が該当しよう。これにより国全体のリサイクル率は大きく向上しうる。

2. RDFに関する誤解と実態について

多くの批判に曝されたRDF化方式については多くの誤解があるので以下に解説する。

①一つ目は、RDF化方式はごみ焼却よりも2倍も高いとの会計検査院報告があると報道されたことがある。しかし、検査院報告は、RDF製造単価

であり、ごみ焼却単価ではない。RDFはごみ量のほぼ半分が製造されるので、処理経費をRDF当りにすると2倍になる。ごみ処理量当たりでは焼却処理費用と同じことを示している。RDF製造単価とごみ焼却単価の区別できない某全国紙の間違いである。会計検査院のデータをもとに誤った報道をし、日本のごみ処理の方向をゆがめてしまった。根拠となるデータの解釈が間違っているのではお粗末としかいいようがない。

ごみ焼却処理やRDF化施設の経費はごみ質、処理能力、処理方式や運転時間（連続運転と間欠運転）に大きく影響を受け、処理規模が大きいほど処理単価は低下する。ほぼ同じ規模の施設ではRDF化が同等あるいは安価であることが分かっている。また、RDF化では灰処分費用は不要であるが、焼却方式では必要であるにもかかわらず含んでいないなど同じレベルで比較されていない。なお、焼却処理施設の処理費については施設規模や運転時間などを含めた根拠データを全く示さないまま2～3万円/ごみtとしており、根拠が示されていないなど、RDF化を非難するにはあまりにも拙劣であり、公平、公正性に欠けていた。

②二つ目は、平成15年8月の三重県RDF発電所の貯蔵サイロの事故以来、自然発火する危険な燃料であるとの誤解がある。しかも、その原因は「空気中の水分を吸湿して発酵・発熱した」との報告があるが、その後の調査研究によると「RDF中の有機物が空気中の酸素と反応して発生する微熱が大量保管により蓄熱して発火する酸化・蓄熱が原因」であることが究明され、消防機関などへ通知されている。RDFは燃料であるので燃えやすいことや石炭と同様に自然発火することは当然である。十分な安全対策が講じられていなかったことが事故につながったものである。その後、12年以上にわたり大きな事故は起こっていない。なお、発酵しないはずの廃プラを原料とした固形燃料（RPF）の取扱施設では発熱や小火災が頻発しているのである。RDFの自然発火の原因は発酵ではなかったことを示す傍証である。

3. FIT制度におけるバイオマス発電の価値について

ところで、平成24年7月にFIT制度の施行によりバイオマスを含むRDF発電の売電単価が高くなったことからトラブルの少ない施設ではほぼ黒字状態に転換している。しかし、FIT制度では、太陽光発電を優遇したため急激に普及し、平成26年度には再生可能エネルギーの総発電量が約286億kWに達した。その約66%（約189億kW）が太陽光発電を占め、風力や中小水力発電を合わせると87%に達し、安定電源であるバイオマス発電はわずか13%（約37億kW）に過ぎない。

自然エネルギーによる発電は、燃料が不要で、排ガスがないこと、自国で供給できることや発電した分が化石燃料の節約になるのでCO₂削減に大いに寄与する。しかし、自然エネルギーは不安定であり、発電量が多くなるに従って電力会社の安定送電は難しくなる。系統電力会社同士の融通電力量が不十分な状況では支障が生じかねない。これに対応するため平成27年度から太陽光発電抑制設備の設置が始まっている。また、台風や天気しただいで設備容量は大きくても発電できるとは限らない。このため、予備電源を確保しておく必要があり、電力会社には大きな負担になるが、これも最終的には電気使用者の負担になる。

ところで、FIT制度の中でバイオマス発電は、原料の違いにより5種類に区分されて調達価格が設定されているがその普及は芳しくない。現在のバイオマス発電の調達価格では普及促進は難しいことを実績が証明している。バイオマス発電の調達価格を単なる設備費を基本要因として決めるのではなく、安定電源としての価値を評価し、優遇措置を講じて促進を図るべきである。

廃棄物系バイオマスの調達価格は、ごみ発電の出力6,000kW以上の大規模施設の設備費の実態に基づいて設定している。これは日量約600トン規模のごみ発電施設に相当し、わずか20箇所（約1.7%）にすぎない。設備費や維持管理費は規模が大きいほど安価になることを考えれば、とても日本のごみ発電の実状に即した基礎データではなく、ごみ発電が普及するはずがない。

化石燃料による予備電源を確保するよりは安定電源であるバイオマス発電を普及推進することが合理的である。なお、間伐材等を原料とするバイオマス発電は、間伐材を近隣で長期間にわたって安定して確保することは難しいこと及び森林保護や土石流防止などの災害防止の役割を担っているので、二倍くらいの調達価格に引き上げれば、雇用の確保や林業の発展に結びつくものと考えられる。

4. RDF 発電の安定電源としての新たな役割について

一般廃棄物を燃料とする廃棄物発電及びRDF発電は、バイオマスを含むのでFIT対象であり、従来よりも高い価格での買取が定められている。ごみ発電は、本来ごみ処理が目的であり、その発電効率も12%程度と低く、しかも税金で運営されているので調達価格が操業に及ぼす影響はほとんどない。しかしながら、RDF発電は、発電事業であり、売電価格が運営に大きな影響を及ぼす。しかし、廃棄物中に重量で約15%程度含まれる廃プラが化石燃料を原料としていることからこの分が対象外になる。しかも発熱量案分であることからわずかに15%であっても発熱量で40～50%に相当し、この分が従来価格での売電となる。なお、従来価格は、電力会社、季節、時間帯により変動するので価格は明らかでないが7～10円/kW程度と推測している。一方、バイオマス分は50～60%程度になり、FIT価格の18.36円/kWでの売電となるので、実質11円/kW程度となり、最終的には全体で15～16円/kW程度になると算定される。

ところで、RDF発電の推移を振り返ると、いずれの事例も当初計画よりも経費が増えたことからRDF処理費（チップングフィー）の徴収を余儀なくされた。燃料を製造しているにも関わらず処理費用を支払うことは受け入れ難いものである。当初の売却できるとの説明と大きく食い違ったことから大問題になった。さらに貯蔵サイロの安全対策の追加、維持管理費の高騰あるいは3R推進によりごみ量が減少し、RDF供給量が減少したことから操業率が低下し、チップングフィーは1万円/

RDFtを越えた事例もある。ここでFIT制度の開始により売電価格が上昇したことからいずれの発電所においても経営が安定化し、チップングフィーを値下げしても黒字化に転換しつつある。

都市ごみは、途切れることなく安定して発生することや、比較的近い範囲内で大量に収集できることからRDFの原料としては魅力的である。つまり、自然エネルギーによる不安定電源の予備電源として大きな役割を担うことができる。ドイツでは、自然エネルギーによる発電の予備電源として国内で生産される安価な褐炭による発電が普及している。しかし、稼働すればCO₂の排出量が増加するジレンマに陥っている。バイオマスを含むRDF発電であればむしろCO₂の削減、化石燃料の節約に寄与するので普及・推進すべき重要な施策であるとの大義がある。正に新たな役割が浮上している。

5. RDF 発電の普及のための施策について

廃棄物の燃料化は、リサイクル率の向上の切り札になり、循環型社会推進形成基本法の目指すリサイクル社会の形成を実現する技術である。とくに、ごみ発電もバイオマスを含んでいるのでFIT対象であり、かつ他の自然エネルギーよりも安定して発電できる。しかし、ごみ発電では発電効率が12%程度と低いことや、腐敗性の生ごみを含むので長期の貯留はできないこと、さらに、ごみ処理が第一義に運転されるので必ずしも電力需要の高い時間帯に最大電力を供給できないことなどから安定電源としての価値は劣る。

一方、RDF発電は、貯留性や輸送性に優れ、かつ発熱量が高く、変動が小さいので、発電効率は30%程度と高い。輸送も通常のトラック輸送ができるので、遠方からの集荷も容易である。ごみ発電と違い電力需要の多い時間帯にフル稼働も容易であり、予備電源としての価値は高い。自然エネルギーによる発電の普及に伴い、安定電源としての価値が見直されることは必定である。さらに、バイオマスを効率よく発電することは、化石資源の節約、ひいてはCO₂削減にも大きく寄与するので

地球温暖化対策の一環としての役割も大きくなる。

以下に施策の推進方策について財政支援の視点から考えてみた。

- ①循環型社会形成推進交付金の活用；廃棄物処理法を改正することなく、通達により循環型社会形成推進基本法の理念を達成するための財政支援を行うことは難しいことではない。とくに、RDF発電所は製造したRDFを安定、確実に消費し、確実にごみ処理を完結する最善の方法である。従来、発電所でのRDF利用時には処理費が徴収されていたが、少なくとも処理費を撤廃できるだけの支援が重要である。また、熱効率や発電効率の低い200トン/日以下の中小のごみ焼却処理施設の補助率を引き下げ、RDF化施設の補助率を引き上げれば、ごみ処理方式は、RDF化・RDF発電へと誘導され、その優位性が認識されれば300トン/日規模にも拡大すると考えられる。自治体のごみ処理を選択するにあたっては財政面の優位性は大きな決定要因なのである。

- ②FIT調達価格の優遇措置：RDF発電は、原料にバイオスを含むのでFIT対象となっているが、含まれる廃プラ分が対象外になる。バイオマス発電が普及しない要因は調達価格が安すぎるのが大きな理由である。バイオマス発電は自然エネルギーによる発電量が大きく変動するのに対して安定的に電力供給ができ、予備電源としての役割も果たすことができる。

このように安定かつ予備電源になりうるバイオマス発電の促進は、CO₂削減の役割も大きくなる。バイオマス発電の調達価格の設定は18.36円/kWであるので、これを担保するためには調達価格を28～30円/kWに引き上げるべきである。

これらの施策により一般廃棄物のリサイクル率が大きく向上するとともに、RDF発電の普及により化石燃料の節約、CO₂の削減が評価される。かつて3R施策が世界をリードしたと同じくらのインパクトがある。我が国のRDF技術及び発電技

術が世界のトップレベルにある現状を考えれば、今が推進すべき重要施策であると考ええる。かつて世界をリードし、圧倒的なシェア占めていた太陽光発電が僅かな支援策を廃止した結果、短期間にドイツなどに追い抜かれ、世界シェアも10%以下に急落した教訓を忘れてはならない。

私は、平成20年過ぎに台湾工業技術院及び台湾花蓮県、並びに韓国機械研究院の招聘でRDF技術について相談、指導で訪問した。台湾では工業技術院の指導ですでに20t/日規模のRDF化実用施設が稼働していた。また、韓国では焼却からRDF化へと転換し、ソウル市に200トン規模のRDF化施設の建設計画があった。

RDF化方式は、三重県RDF貯蔵サイロの事故後、反対が多く、いわば禁句状態である。しかし、このままでは諸外国にリードされかねないと危惧している。広大な面積を有する諸外国において高度で高額な焼却・溶融処理技術の必要性は低く、世界に広く普及するとは思えない。しかし、RDFの原料はごみ以外にもバイオマスは広範囲に、大量に存在し、入手が容易であるので拡大する要素は限りなく大きい。短所を強調して撤退することは誠に先見性に欠け、またまた禍根を残すことになりかねない。「タブー視されているRDF技術」を前向きに見直す英断が必要な時である。

【解 説】

1. 一般廃棄物のリサイクルの状況と推進方策

1. 1 一般廃棄物のリサイクルの現状と課題

平成25年度における焼却処理施設数は1,172箇所であり、このうち590箇所が日量100トン以下の小規模施設である(図1)。発電以外の余熱利用設備は約33.6%、発電利用が28.0%で、残りの33.6%(394箇所)は利用していない。

一般廃棄物のサイクル率は、循環型社会形成推進基本法の施行直後の平成13年度の15%から年々高くなったが、平成19年度以降は20%台で横ばい状態である。つまり、物質リサイクル(再使用、再利用)を最優先に取り組んでいる現状の施策ではこれ以上のリサイクルの拡大は期待できないこ

とを示唆する。

一方、熱・エネルギー回収では、ごみ焼却時の余熱利用や発電利用の熱効率は15%程度であり、発生する熱の大半を捨てているのである。ところが、RDF化による熱利用では、ボイラー熱効率が80%以上であり、RDF発電効率は30%程度である。RDFを製造するためには乾燥（石油）や駆動（電気）を使用するので批判の対象となりやすいが、ごみを焼却でも方式（ストーカ、流動床、熔融方式）によって大きく異なるが、ごみトン当たり100～500kWの電気を消費するのであり、RDF化工程（200kW/ごみt程度）と同等以上の電気を消費するとの報告もある^{※1)}。さらに灰熔融を付加すると155kW/ごみt、灰1トンあたりに換算すると900～1,000kWもの電気を消費するのである。熔融物は砂利と同じであり、高く売却できるはずもなく、売却できなければ廃棄物として埋立処分せざるを得ない。とくに、流動床方式ではほとんどが飛灰となる。これは特別管理一般廃棄物に該当するので、自治体の一般廃棄物最終処分場では埋立処分ができないことに留意する必要がある。

※1) 盛岡、藤原、田中；低炭素社会における廃棄物発電の評価に関する研究－維持管理データ分析による電力・エネルギー収支；環境技術、No.38-9、pp.624-632（2009）

※2) 鍵谷；寄稿「明日への展望」ごみ固化燃料（RDF）の過去、現在そして未来、環境施設、No.136、pp.8-15（2014.6）

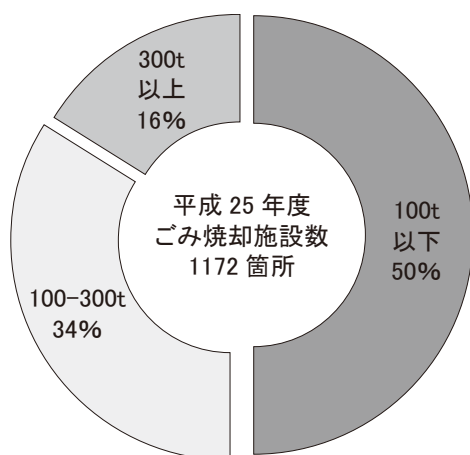


図1 平成25年度ごみ焼却施設の規模別施設数

1. 2 リサイクル推進の施策について

（1）助成の仕組みについて

平成12年6月に施行された循環型社会形成推進基本法によりごみ処理は、①排出抑制、②再使用、③再利用、④熱回収、⑤適正処理の優先順位に基づいて推進された結果、リサイクル率が向上した。当然、施策を推進するために財政支援が行われる。一般的に、法律では経費等に関する規定はないので、担当省庁の裁量で決められる。いわば通達行政である。国の通達は、行政機関が所属の組織や職員に対して発する法令の統一的解釈や事務取り扱い上の基準を示した文書であり、あくまでも行政機関内部における指針である。国が行政監督権限に基づき発することができ、法律の根拠を要しないものである。

たとえば、上記の基本法に規定する目的を達成するためには、自治体の作成するごみ処理計画が基本法で定める優先順位を満たしていること、ごみ焼却処理能力が日量100トン以上であること、熱回収効率が15%以上であることなどの助成条件が審査され、適合した場合に国庫補助金等が交付される仕組みである。ごみ処理には膨大な費用がかかるので、国の補助なしで施設を整備することはほぼ不可能であり、国の方針を推進するための絶大な力であり、「切り札」である。

（2）RDF化対象規模について

物質リサイクルの普及は20%程度で限界に達しており、これ以上の促進を図ることは新たに資源・エネルギー、資金や労力をつぎ込まなければならず合理的ではない。環境省データによるとRDFを含まない物質リサイクル率と燃料化（RDF）を含むリサイクル率があり、統計資料では前者で表示しているが、燃料化を含む場合は約0.8%高くなる。

今後、基本法に則つとると、リサイクル率の向上は熱・エネルギー利用がターゲットになり、燃焼技術の改良やメタン発酵によるガス燃料の回収・発電が対象になるが、燃料化（RDF）が大きな役割を果たすと考えられる。とくに、熱効率の低い中小規模のごみ焼却施設が対象になるので、平成25年度の規模別の焼却量と発電量を調べ、これを

RDF 発電した場合の発電量を算定して表 1 に示した。その結果は、次の通りであり、当面、日量 200 トン以下を対象とすることが妥当であろう。これにより熱・エネルギーリサイクル率は約 34% となり、物質リサイクルを含めると 50% 程度を達成することができる。

- ①日量 100 トン以下のごみ焼却施設における処理量は約 13%（約 454 万トン）であり、発電量は約 1 億 kW で総発電量の約 1.2% である。これを全て RDF 発電にすると約 33 億 kW となり、現状の約 33 倍の発電量となる。ごみ発電の効果はほとんど無視できる程度である。
- ②日量 200 トン以下の場合は、処理量は約 34%（約 1,180 万トン）であり、発電量は約 8 億 kW で総発電量の約 10% である。これを全て RDF 発電にすると約 86 億 kW となり、現状の約 11 倍の発電量となる。RDF 発電の効果が著しく大きくなるので、対象量にすべきである。
- ③日量 300 トン以下の場合は、処理量は約 53%（約 1,830 万トン）であり、発電量は約 22 億 kW で総発電量の約 28% である。これを全て RDF 発電にすると約 133 億 kW となり、現状の約 6 倍の発電量となる。

なお、ごみ・RDF 発電はバイオマス分が CO₂ 排出量に算定しないので、発電量 kW 当たりの発生原単位は石炭火力の 40% 程度に相当するので、排出削減に大きく寄与する。

RDF 化を推進するにあたり最も難しい課題は、作り上げられた「RDF は危険」あるいは「RDF 化は高い」とのイメージの払拭である。とくに、施策の遂行に不可欠である市町村、都道府県、国会

議員、ひいては住民の理解が必須である。新しい施策は短期的な目先のことも重要であるが、中長期的な視点から取り組まなければ大きな禍根を残すことになる。ごみ焼却方式やガス化溶融技術は世界に広く普及あるいは先導することはできないことはこれまでの実績が示している。とくに、溶融処理方式では、事故の頻発、経費の増大、あるいは、満足に稼働していない事例も多いが、マスコミで大きく取り上げられることはほとんどない。

RDF 化技術の推進に理解が得られ、方針さえ決まれば通達を発し、補助金で優遇すれば難しいことではない。むしろ、RDF は注目を浴びる用語であり、ほとんど理解することもなく RDF 化反対を唱える風潮がある。予算時における審議が大変であるが、大義をもって突破できないものか！

2. RDF に関する誤解について

2. 1 RDF 化方式はごみ焼却よりも 2 倍も高い； 会計検査院報告の引用の誤り

RDF 施設の経費に関し会計検査法に基づき立入等の検査が行われ、検査報告が行われた。

これを全国紙などのマスコミが大々的に取り上げ、自社調査と比較して「RDF 方式はごみ焼却方式の 2 倍も高い！ 税金の無駄遣いである」と集中的に報道された。RDF 事故に引き続いてまたまた逆風が吹いた。

平成 22 年に公表された会計検査院の RDF 施設に関する検査は次の観点及び着眼点から実施された。「RDF 化施設の中には、整備後の様々な事情により運営に支障を来し、休止するなどしている施設も散見される状況にある。このため、効率性、

表 1 平成 25 年度焼却処理施設規模別ごみ発電と RDF 発電の比較

焼却施設規模 (t/日)	年間焼却量 (t/年)	割合 (%)	ごみ発電量 (千万 kW)	割合 (%)	RDF 製造量 (t/年)	RDF 発電量 (千万 kW)	RDF/ごみ 発電比率
0～100	4,539,569	13.0	9.9	1.2	2,269,784	331.4	33.4
0～200	11,797,463	33.9	80.1	10.0	5,898,732	861.2	10.6
0～300	18,263,668	52.5	221.2	27.7	9,131,834	1,333.2	6.0
300 以上	34,803,659	100.0	798.6	100.0	17,401,830	2,540.7	3.2

※環境省 廃棄物処理情報 平成 25 年度調査結果、施設整備状況より

有効性等の観点からRDF化施設を選択した理由、補助金等により整備されたRDF化施設におけるRDFの生成から引渡しまでの一連の運営状況、RDFの利用状況、あるいは効率的な運営のために改善すべき点などに着眼して検査し、公表された。このうち、RDFの生成費が最も大きな問題となった。検査院の内容を抜粋して次に示す。

「RDF化施設では、ごみを粉碎する破砕機、ごみを高温の熱風で乾燥させる乾燥機、加圧押出する成形機、成形直後の生成品を冷却する空気送風機等の各種機械の稼働に要する電力や石油等の燃料費、これらの各種機械の修繕費等の維持管理経費がRDF生成のために必要となっていた。そして、46施設における19年度のRDF 1t当たりの生成費の状況は、最低で27,352円、最高で170,721円、平均62,606円となっており、施設間で相当な開差が生じていた。」

つまり、会計検査院の調査報告書は、RDF製造単価であり、ごみ焼却単価ではないのである。なお、際立ってRDF製造単価の高い事例では、堆肥化施設などのすべてをごみ処理費に含めた結果、異常に高く算定されたものである。

ところが、某全国紙がごみ焼却施設のサンプル調査を行い、ごみ焼却費用を算定してRDF施設の維持管理費が2倍高いと断じて全国に報道したものである。調査したごみ焼却費用とは、ごみ焼却費（灰処理費を含まない）をごみ焼却量あたりに換算したものである。一般的にRDF製造量はごみ量の約1/2に相当するので、会計検査院が公表したRDF製造単価をごみ処理単価に換算するとその平均は約3万円/ごみトン程度である、つまり、検

査院報告は、ごみ焼却処理単価とRDF化処理費用はほとんど変わらないことを実証したことになる。

また、一般的にRDF施設の施設能力は小さく、8時間運転が多い。一方、ごみ焼却施設では基本的に日量100トン以上の規模で24時間連続運転が基本である。いずれの方式においても施設規模が小さくなるほど処理単価は高くなる。つまり、同じ規模で比較しなければ正しい評価はできないのである。なお、維持管理費としては、物件費、燃料費、役務費、補修修繕費、委託費、人件費、RDF売却収入と輸送費負担から構成される。とくに、補修修繕費は、年度ごとに大きく変動する。メーカ保証期間が終了する稼働後2～3年後から発生し、機器・装置類が古くなるに従って経費が増大するので、しだいに処理単価は高くなる。

平成19年当時に全国紙が独自に調査して公表したデータを表2、表3に示す。RDFは焼却よりも高いと結論することは不適であり、誤りであることを指摘しておきたい。

※3）鍵谷：シリーズRDF専門家の眼③：Q & A・疑問に回答、解説 読売新聞（平成22年10月25日夕刊）のRDFに関する記事について ～RDF化方式の維持管理費は本当に高いのか！～、環境施設、No.122、pp.68-83（2010）

※4）鍵谷：シリーズRDF専門家の眼④：Q & A・疑問に回答、解説 RDFに関する「検査報告」（会計検査院；平成22年11月24日更新）～国庫補助金により整備されたごみ固形燃料（RDF）化施設の運営について～、環境施設、No.123、pp.62-71（2011.3）

表2 稼働時間、処理能力別のごみ焼却施設の処理費用（毎日新聞記事より抜粋）

処理能力の範囲	能力範囲 (t/日)	調査件数 (件)	焼却費用 (円/ごみt)	備 考
小規模・バッチ運転（8時間）	6～12	9	71,831	
中規模・バッチ運転（8時間）	16～62	26	58,143	
中規模・準連続運転（16時間）	54～300	15	36,325	
平均値（単純平均）		50	52,529	加重平均：39,708円

※除外施設：産業廃棄物対象施設、RDF化後炭化する施設、調査データが未記載

表3 100t/日以上の大規模RDF施設の処理費用（毎日新聞記事より抜粋）

施 設 名	運転開始	系列数	RDF化費用 (円/ごみt)	処理能力 (t/16hr)
広域鹿島RDFセンター	平成13年3月	2系列	29,481	142
桑名市資源循環センター	平成14年12月	3系列	51,143	230
伊賀上野さくらリサイクルセンター	平成14年11月	3系列	46,979	135
河北郡市クリーンセンター	平成14年4月	2系列	31,747	119
大牟田・荒尾RDFセンター	平成14年11月	3系列	20,676	225
エコセンターはつかいち	平成16年11月	2系列	24,027	105
福山市ごみ固形燃料工場	平成16年1月	4系列	15,398	300

2. 2 RDF発電所貯蔵サイロの発煙・火災事故原因；発酵・発熱は主原因ではない！

ごみ処理の切り札あるいはダイオキシン対策として脚光を浴びてRDF化方式が普及し、製造したRDFの安定利用施設としてRDF発電所が整備された。しかしながら、稼働開始直後から各地のRDF発電所貯蔵サイロで発熱や発煙トラブルが頻発した。2003（平成15）年8月19日には三重県RDF貯蔵サイロで人身事故を伴う火災・爆発が起こり、社会不安を引き起こすような大事故となった。自治体の施設でこのような大事故を引き起こすことはこれまで事例がなく、想定できないことであった。あらゆるマスコミがこのニュースをショッキングに報道したが、RDFを見たことも研究したこともない学識者やにわか専門家が注目を浴びるようなコメントを連発し、一般社会では「RDFは危険な燃料である」との認識が定着した。三重県事故原因究明委員会はずか3ヶ月後に「RDF保管時に空気中の水分を吸着して発酵が起こり、発熱・発火した。」と結論した。その後に発酵・発熱が起こるとした偏った研究・調査を行っているが、事故時の現象をこの説ですべて科学的に説明できていないし、多くの疑問があった。

とくに、RDF製造現場に精通した技術職員、メーカー技術者や専門家から見ると発酵は起こっただろうが主原因ではないことは経験上、疑う者はいない。なぜなら、ごみが簡単に発酵し、蓄熱して発火するのであれば、ごみ焼却施設のごみピットではごみを大量に保管しているにもかかわらず自然発火による火災は問題になったことはない。

水分の多い発酵しやすい生ごみを大量に含み、しかも深さが十数メートルのピットに数週間も貯留されているのである。その後、主たる発熱、発火原因は、有機物を含むRDFが空気中の酸素との化学反応により発生した熱が、大量に保管されたため放熱しにくく、蓄熱したためであることが主原因であることが明らかにされている。^{※5)6)7)}

火災事故が起こってもRDF発電設備を停止するとごみ処理に支障が生じるので、簡単に停止することはできない。しかも、RDF化施設を新たに建設する事例は皆無となつてはいるが、全国で50数箇所のRDF化施設が稼働しており、年間約38万トンものRDFが製造され、利用されているのである。その内訳は、RDF発電所（発電能力が5箇所で約6.3万kW）で約8割が利用され、残り2割が熱利用されている。RDF発電所は高温燃焼炉であり、その耐用性は20年程度と比較的短い。他方、RDF化施設は部分的な設備更新ですむので、稼働後23年以上を経てもほとんど大きなトラブルもなく稼働している事例もある。

※5）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）

※6）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

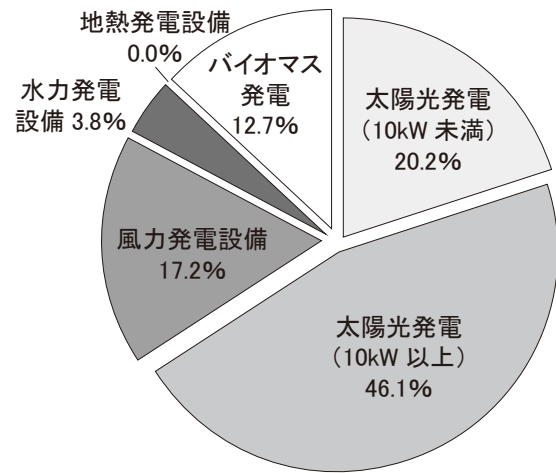
※7）清水芳忠、若倉正英、新井充；ごみ固形燃料の蓄熱危険性評価に関する研究、廃棄物学会論文誌、Vol.19、No.6、pp.382-391（2008）

3. FIT制度におけるバイオマス発電の価値について

3. 1 再生可能エネルギーの調達価格と発電状況について

再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT；Feed-in Tariff）が平成24年7月から実施された。この制度では再生可能エネルギーの調達価格は毎年見直しが行われており、平成26年度の買取価格はkWあたり①太陽光発電；30～37円、②風力発電；22～55円、③水力発電；24～34円、④地熱発電26～40円、⑤バイオマス発電：13～39円であった。とくに、太陽光発電については普及促進を図る目的で平成27年6月まで優遇措置を講じたため、急速に普及した。その結果、平成26年度の実績では図2に示すように太陽光発電量が再生可能エネルギーの66%（約189億kW）を占めており、不安定電源の急速な普及に伴って様々な問題が発生している。なお、平成27年度の調達価格の一覧表を表4に示す。

一方、安定電源であるバイオマス発電はわずか約13%（約37億kW）に過ぎない。ごみ発電による発電総量は約80億kWであるが、バイオマス以外の廃プラや助燃あるいは化石燃料分が発熱量で案分されるので、再生可能エネルギーとしてはほぼ半分が計上されていると推測される。系統電力会社間の送電容量がまだまだ不十分な状態でこのような不安定な電気が大量に供給されると、安定供給が難しくなるとされており、発電抑止設備の設置など複雑な対応が求められる。送電網が広範囲にわたって充実しているEU圏とは同じように対応できないのである。



平成26年度再生可能エネルギー発電総量；286億kW

図2 平成26年度再生可能エネルギーの発電割合（資源エネルギー庁データから鍵谷作成）

ドイツでは、不安定電源である自然エネルギーの普及に伴い、南部の需要地と北部の主たる風力発電所が1,000kmも離れているので、新たに数兆円を投じて十年以上をかけて送電網の整備が必要になっている。最も大きな問題は、自然エネルギーは気象条件に大きく影響を受けることであり、必ずバックアップ電源が必要になる。ドイツでは国内で供給でき、安価な褐炭火力発電がその役割を担っているが、これによりむしろCO₂発生量が増加し、自然エネルギーの普及が必ずしもCO₂削減に寄与しないことが問題になっている。

3. 2 バイオマス発電の普及の必要性について

このうち、安定電源であるバイオマス発電の調達価格は5種類に区分されており、表5に示す。

表4 再生可能エネルギー別調達価格と調達期間（平成27年度）

再生可能エネルギーの種類	調達価格（円/kW）	調達期間（年間）	備考（買取価格変動条件）
太陽光発電（10kW未満）	27～35円	10	※余剰買取、出力制御対応（10kW以上）
太陽光発電（10kW以上）	29円＋税	20	※利潤配慮期間；27年6月まで27円＋税
風力発電	22～55円＋税	20	※20kW未満または以上、洋上発電
地熱発電	26～40円＋税	15	※15,000kW以上または未満
水力発電	24～34円＋税	20	※200、～1,000、～3,000未満の3段階
バイオマス発電	13～40円＋税	20	※メタン発酵、木質、建廃、廃棄物の6種類

メタン発酵によるバイオガス発電が約42.1円と最も高く、ついで、バイオマス燃焼に伴う発電であり、立木竹の伐採又は間伐により発生する未利用の木質バイオマスを燃料とした場合には約34.6円と高く、逆に、物質として利用価値の広い建設資材廃棄物等では約14.0円と低く設定されている。最も燃料確保が容易で発電量も多いと予測される一般廃棄物（固形燃料を含む）は約18.4円である。一般廃棄物については、3Rの推進により物質としてリサイクルできる紙ごみや廃プラスチック類の多くは回収・除外されており、ごみ中には生ごみの割合が多くなり、発熱量は低下傾向にある。最も大きな問題は、廃棄物発電あるいはRDF発電においてごみに含まれる廃プラが化石燃料に該当するので、この分を発熱量で案分して除外した分がバイオマス分としてFIT対象なることである。廃プラの発熱量が約8,610kcal/kgと定められており、わずかに約15%含まれると、バイオマス分の発熱量は全体の50～60%程度に低下する、すなわち、18円/kWとしても10円/kW程度になる。残りが化石燃料分として安価な従来価格（季節、時間帯などで変動する）になるので全体として15～16円/kW程度の売電価格となり、やや期待はずれである。

また、調達価格検討委員会は、廃棄物系バイオマスの調達価格は大規模な設備を想定しており、コストデータは出力6,000kWh以上の規模の設備費の実態に基づいて設定している。これは日量約600トン以上のごみ発電施設に相当し、1,199箇所の焼却施設数のうちわずか20箇所（約1.7%）にすぎない。設備費や維持管理費は規模が大きいほ

ど安価になることを考えれば、とても日本のごみ発電の実状に即した基礎データではなく、ごみ発電が普及するはずがない。

※平成26年度調達価格及び調達期間に関する意見；平成26年3月7日（金） 調達価格等算定委員会

3. 3 安定電源を優遇すべき

バイオマス発電は、原料さえ確保及び貯留できれば安定的に発電ができるので、太陽光や風力などの自然エネルギー発電とは基本的に異なる。また、CO₂の排出量にカウントされないことや化石燃料の節約に寄与することなどの特性がある。とくに、近隣で安定的に確保できるバイオマスを含む廃棄物は魅力的でさえある。

一般廃棄物を原料とする廃棄物発電は、あくまでもごみ処理が目的であり、発電を優先することは難しく、所内電力を補えば十分である。また、生ごみを含むので、長期間の貯留ができないことや確実に毎日搬入されるので、確実に処理することが最優先である。ごみ量が多いので、発電規模も大きいですが、その発電効率はずか12%程度であり、燃焼時に発生した熱はほとんど捨てられているのである。

一方、RDF発電では、RDF化工程でごみを加工しなければならないが、貯留・輸送ができること、安定して発熱量が高いので効果的な発電が可能になり、発電効率は30%程度に達する。しかし、RDF発電による売電価格は、廃プラ分とバイオマス分を案分して算定すると全体として15～16円/kW程度になる。従来よりも高い売電価格ではあ

表5 バイオマス（固形燃料燃焼）発電；1kWの調達価格（消費税8%を含む；円）

バイオマス（再生可能エネルギー）発電設備の区分等	調達価格
1. 下水汚泥・家畜糞尿・食品残さ由来のメタン発酵ガス	42.12
2. 立木竹の伐採又は間伐により発生する未利用の木質バイオマス	34.56
3. 一般木質バイオマス・農作物残さ：製材端材、輸入材 ※パーム椰子殻、もみ殻、稲わら	25.92
4. 建設資材廃棄物：建設資材廃棄物、その他木材	14.04
5. 一般廃棄物その他のバイオマス：剪定枝・木くず、紙、食品残さ、廃食用油、汚泥、家畜糞尿、黒液	18.36

るが、事業として多額の投資をして設備更新を行う決め手にはなりにくい。つまり、このままでは、せっかくの安定電源にもかかわらず大きな普及は見込めないことになる。

自然エネルギーは、地熱を除いて非常に変動が大きく、予備電源確保が大きな負担になるはずである。原料を確保し、貯留性に優れたバイオマスはより一層の安定電源として役割を果たせることになる。単なる設備費の算定に基づく調達価格ではなく、安定電源としての価値を評価し、kWあたり30～60円程度の優遇措置、つまり廃プラが混入しても全体で18円を担保できる価格設定が望ましいと強く思っている。

また、立木竹の伐採又は間伐により発生する未利用の木質バイオマス発電では、調達価格を約35円と高く設定しているが、長期間にわたる原料の安定確保が極めて難しい。燃焼設備費のみならず、運搬費などにも配慮した価格を設定しなければ普及は頓挫する。とくに、森林の間伐は、山を守ると共に、最近多発している土石流等の災害防止にも大いに役立つと考えられる。間伐材等バイオマス発電の調達価格を2倍程度にすることにより、森の荒廃を防ぎ、土石流防止、さらには雇用拡大に大きな原動力になると思うが、いかがでしょう！

おわりに

以上、RDF発電所の耐用期間・寿命が近づいていることに鑑み、今後のごみ処理、とくに日量が200トン以下の中小ごみ処理施設の方向性について検討し、選択すべき処理方式をRDF化・RDF発電を推進すべきことを提案した。その理由についてまとめると次の通りである。

- ①循環型社会形成推進基本法の理念をリサイクル率から見ると、RDF化を除く物質リサイクルを優先してきたが、20%程度が限度であることを実績が示している。今後、基本法の理念に則り、物質リサイクルが難しい可燃物から熱・エネルギー回収によるリサイクルが大きなテーマになる。とくにRDF発電はRDF

化によるごみ処理を確実に完結するためには不可欠の施設であり、日量200トン以下の施設に適用すればリサイクル率はさらに33%程度向上し、物質リサイクルと合算すると50%程度を達成できる。なお、ごみ焼却に伴う熱・エネルギー回収では、熱効率が低い上、リサイクルに含まれていない。

- ②再生可能エネルギーによる発電量が急増しているが、不安定電源である太陽光や風力発電が約87%を占め、安定電源のバイオマス発電はわずか13%と低迷している。RDFにはバイオマスを含むので廃プラ分以外の発電量はFIT対象となり、高価格で売電できる。

しかし、現状の大規模処理施設整備費を基本にして調達価格を設定したのでは、原料の長期的な安定確保、輸送費の増大などがネックになり、事業としての魅力に欠ける。その中でもRDF発電は、日々安定して発生する家庭ごみを対象としており、かつバイオマス発生源は限りなく広い。また、貯留性や輸送性に優れているので、安定電源としての機能は優れている。さらに、発電分は化石燃料の節約、CO₂排出量の削減に寄与するなど優れた特性を合わせ持っている。

バイオマス発電を優遇することにより、不安定電源である風力発電や太陽光発電とバイオマス発電を組み合わせたハイブリッド発電で安定化を図る道も開かれよう！

RDF発電の始動した当初にはRDF貯蔵サイロでの発煙、発火、爆発事故が起り、社会的に嫌われ者のレッテルを張られたが、リサイクルの推進と安定電源の確保、CO₂削減の切り札として再び光を当てるべきである。焼却処理技術や熔融技術では決して世界をリードできないが、RDFの原料はバイオマスであり、限りなく広範囲に分布する。RDF発電は、3Rに続いて世界に普及するに値する価値を有すると認識している。「作られたタブーに挑戦する時」がきている。

発生ガス（メタン）の特性と事故事例・対策について（1）

技術士（衛生工学・建設・環境）・第1種放射線取扱主任者等

環境計画センター専任理事 **かぎや つかさ**
鍵谷 司

はじめに

廃棄物埋立跡地の利用は、最終処分場として維持管理が必要でなくなったことを最終処分基準省令に規定する「廃止基準」に適合していることが確認され、「指定区域」に指定された後に行われる。廃止基準の判定は、保有水等（原水）の水質、発生ガス量及び地中温度等について規定されている。発生ガスについては、「埋立地からガスの発生がほとんど認められないこと、又はガスの発生量の増加が2年以上にわたって認められないこと」と規定されているが、発生量及びガス組成について具体的な規定はない。なお、廃棄物学会で検討した事例では、 $1.4\text{m}^3/\text{日}$ （1リットル/分）以下を条件としている^{*1)}。指定区域内における跡地利用にあたっては、「土地の形質変更届」に該当する場合には、掘削工事等により生活環境への影響がないことを確認して行われる。

ところで、廃棄物の埋立が終了した後は最低50cm以上厚さの覆土が施され、入口が閉鎖されるが、最終処分場としての維持管理は継続して行われる。埋立中は自然に空気が流入しやすい準好気性埋立工法（自然の吸排気等を利用して好気性状態を維持する埋立構造）で行われるが、終了・閉鎖時には最終覆土が施されるので埋立地内は空気の流入が難しくなる。このため、埋立地内部が嫌気性になり、有機物が存在する限り、メタンガスや硫化水素などが長期間にわたって発生し続ける。しかもメタンは爆発性、硫化水素は有毒ガスであり、跡地利用時に対応を誤ると大きな事故につながりかねない。

今回は、埋立跡地において発生するガスの現地

調査方法、内容と留意事項、発生ガスについてガイドラインを参考にして解説するとともに、メタンガスの特性と跡地利用時に起こった事故事例並びに安全対策について実務的な視点から解説する。なお、埋立跡地における作業中及び建造物の発生ガス対策については次回に解説します^{*2)}。

1. 現地調査の内容

1. 1 現地における試掘調査

跡地を利用するにあたり指定区域内である廃棄物埋立跡地の過去の経歴が重要である。管理型産業廃棄物及び一般廃棄物の最終処分場跡地と安定型最終処分場跡地の区分、埋め立てられた廃棄物の種類や量、埋立層厚、廃止時の発生ガス、保有水の性状あるいは底部に敷設された遮水工の種類、方法が利用性に大きく影響する。とくに、覆土下には廃棄物が残存するので、地下工事を行うと廃棄物が乱され、貯留していたガスの噴出、ガス発生促進や地下水の水質悪化を招く可能性がある。土地購入前及び利用時の事前調査が極めて重要である。

（1）試掘等に関する届出

ガイドラインでは、指定区域内におけるボーリング等による試掘について次のように定めている。指定区域内では、最低50cm以上の厚さで覆土が義務付けられており、これにより廃棄物の露出、ガスや臭気の発散、雨水の浸透防止が図られている。所定の手続きを経て住宅や駐車場が建設された後においても、廃棄物層から厚さ50cm以下になるようなボーリング及び掘削では届出が必要である。たとえば、覆土が1mの場合、地表から

70cmまで掘削することは、覆土層が30cmよりないので、届出対象となる。しかし30cm程度の掘削であれば、覆土厚は70cmなので軽易な行為に該当し届出対象とはならない。なお、ガイドラインで「ガス」とは、廃棄物埋立地から発生する悪臭成分を含むガスや可燃性ガス等をいう。また、「試掘」とは、廃棄物埋立地の廃棄物の種類やガス等の性状を把握するためボーリングやバックホウ等により廃棄物を掘削することをいう（写真1～3）。

（2）試掘に係る届け出書類

廃棄物埋立跡地の利用にあたり、指定区域内における土地の形質変更届出書の提出に当り、地下にある廃棄物の種類や搬出の有無などを記載しなければならない。このためには、掘削が必要であり、「試掘」に関する工事計画書の添付が義務付けられている^{*1)}。

- 試掘機械の種類
- 試掘の径と深さ
- 試掘時の環境保全計画
- 試掘終了後の復旧計画
- 掘削廃棄物の適正処理計画

なお、所定の手続きで住宅開発が行われた跡地で自宅の駐車場でこれらの手続きを行わずに試掘（直径：8cm、深度6m）を行ったところ、県より直ちに埋め戻すこと、掘削物の適正処理（掘削物を埋め戻すと廃棄物処理法違反になるので、実

際はボーリングケースに保管）の指示と始末書の提出を求められた事例があった。

（3）試掘で用いる重機類について

試掘の目的により簡易から詳細な試掘まで多様であり、代表的な事例を写真1～3に示す。埋立処分場跡地は、廃棄物の搬入路が整備されているので、調査機械の現場搬入は容易である。掘削規模にもよるが、最新のボーリング機械は、自走式で簡易なので住宅地内にも容易に搬入、実施ができる。指定区域については土地台帳が都道府県・政令市の産業廃棄物担当課で調整されて閲覧ができるので、埋立層厚、廃棄物の種類などを確認した上、適切な重機による現地調査をお勧めしたい。

1. 2 現地調査内容等の目安

ガイドラインより主に可燃性ガスに関係する部分を抜粋して示す。

（1）埋立廃棄物の内容を確認するための現地調査内容（遮断型を除く）

埋立物が不明時には試掘により確認する必要がある。ボーリングあるいはバックホウにより掘削して確認する。

- 測定項目：廃棄物組成
- 測定位置の目安：土地の形質変更の面積により最低3本以上
- 測定深さ：埋立層厚を網羅できる深さ。遮水工から1m以上浅い地点まで



写真1 機械式簡易ボーリング



写真2 小型自走式
ボーリング機械



写真3 バックホウ（油圧ショベル）

○測定方法；ボーリングやバックホウなどで採取した廃棄物は組成分析により廃棄物の種類を判定。また、ダイオキシン類等の含有量を把握するために含有試験を行う。なお、掘削時にボーリングを用いる場合は、その孔を保有水等や可燃性ガス等の採取用観測井として利用できる。

(2) 土地利用に係る現地調査（測定位置、測定回数、測定方法については一部省略）

跡地の利用計画を策定するにあたり、地下に埋っている廃棄物の性状のみならず、地下水の汚染状況や発生ガスの状況を把握し、利用時に周辺環境に影響を及ぼさないような対策を講じる必要がある。ガイドラインが示す調査内容は次の通りである（一部省略）。

- ①廃棄物層内観測井の設置；埋立廃棄物の変化するごとに1ヶ所
- ②廃棄物の分析；酸化還元電位、TOC、溶出試験（排水基準項目）
- ③臭気分析；悪臭防止法で定める項目、掘削した場合の臭気を把握する。
- ④廃棄物埋立地内部における可燃性ガス等；ガス発生量、 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 、 O_2
- ⑤地表面下50cmにおける可燃性ガス等； CH_4 、 H_2S 、 CO_2 、 O_2
- ⑥廃棄物層内保有水等の水質、放流水の水質、周縁地下水・土壌、場内観測井内温度、地盤の土質特性…測定位置、測定回数、測定方法については省略

このうち、④可燃性ガス等の現地調査内容は、廃棄物の分解に伴って発生するガスについて掘削時の火災の発生、有毒性や廃棄物の分解の進行状況の判定データとなる項目を対象としている。また、ガス発生量は石けん膜流量計や熱線式流量計で測定し、ガス濃度は、観測井から自然状態でサンプルバッグに採取し、ガスセンサーやガスクロマトグラフを用いて分析するとしている。

(3) 現場における課題と留意事項について

埋め立てられた廃棄物は、その種類と性状、廃棄物層厚、埋立地点、覆土方法、雨水の浸透状況

や空気の通気状況などが地点や深度ごとに大きく異なる。このため、残存する有機物の分解条件が変わるので、ガスの発生量やガス組成が変動する。また、気象条件に大きく影響を受けるので詳細に調査しても発生ガス量及び組成を高い精度で把握することは難しい。また、発生ガス量及びガス組成は、測定地点ごとに変動が大きいことに留意すべきである。つまり、発生ガス対策は、かなり余裕を見込んだ対策を講じることが重要である。

これまで埋立跡地の現場調査で経験した発生ガスの特性を以下に紹介する。

①発生ガスの測定について

測定方法により桁違いに大きく変動する。ガイドライン等でも掲載されている石鹸膜流量計、微気圧計、テトラバッグ法などは微気圧による作用を利用する方法では正しい測定値は得られない。下記文献で紹介したようにガスの流れを測定する発煙管法（鍵谷－中川法）及びアネモマスター（流速計；加熱した白金線が風速により冷却される程度を測定する）法が優れていた。とくに、発煙管法は、透明パイプ内を流れる白煙の流速を手動で測定する方法であるが、圧力の影響を受け難く、孔口からガスの流れ（排気、吸気）を視認できる。発生ガスは常に内部から大気中へ放出されるのではなく、気象条件により埋立地内部へ空気を吸引することもあるので注意する必要がある。

※鍵谷等；廃棄物埋立跡地における発生ガスの挙動について（Ⅱ）～発生ガスの測定方法と挙動について～、第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集、22-8、pp.895-897（1997）

②発生ガス量の予測について

発生ガス対策を講じるにあたり、ガスの発生速度が予測できれば将来を見通した適切な対策を講じることができる。発生ガス量の予測方法はとして様々な方法が提案されているが、現場埋立地では埋立物中の有機物量が大きく変動する、埋立工法や埋立構造あるいは気象条件が異なるので、精度の高い予測は極めて難しい。経時的に発生ガス量を実測してデータを蓄積することによりおおまかな発生量及び予測は可能であるが、精度は低い。

最終処分場の廃止時には50cm以上の最終覆土が義務付けられているので、埋立地内に残存する有機物の分解雰囲気が変わり、準好気性状態から嫌気性状態になる。その結果、長期間にわたってメタンガスが発生することになる。

少なくとも埋立地内の廃棄物を掘削・採取して熱しゃく減量（有機物）と発生ガス量を把握すること、埋立地内における汚水の採取及び全有機炭素（TOC）濃度などの水質を把握し、発生ガスの予測に利用できれば有効な発生ガス対策を講じることが可能であろう。

※鍵谷：廃棄物埋立跡地における発生ガスの予測と実態について、第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集、15-14、pp.731-733（1996）

③発生ガスの発生特性について

廃棄物埋立地において発生するガスには次のような特徴がある。発生するガス量は大きく変動するので、発生ガス量の多くなる降雨後、低気圧、気温などを把握した上で測定値を解析する必要がある。

○埋立構造（地中埋設型、盛土型）に大きく影響を受けるが、時間、月日、季節、年月により発生量は変動する。また、埋立地内部へ空気が吸引されることもある。

○気象条件による変動：低気圧が近づくと発生量は多くなり、高気圧では抑制される。気温の低い朝方に発生量は多いが、温度の上昇とともに排出量は抑制される。また、晴天が続く、強い降雨があった場合には、かなり強い悪臭が漂う。埋立物中の空隙に滞留していたガスが浸透する雨水と交換して押し出されるためと考えている。

○降雨水のみならず埋立地内では保有水の移動があるので、有機物の多い箇所などに移流すると発生量、あるいは組成（ CH_4/CO_2 ）の割合が変動することもある。

2. 埋立跡地におけるメタンガスの特性と事故事例

埋立跡地から発生するガスは微生物分解する雰囲気により異なり、水（ H_2O ）、二酸化炭素（ CO_2 ）、

メタン（ CH_4 ）、水素（ H_2 ）、硫化水素、アンモニアなどの悪臭物質であるが、一酸化炭素は発生しない。発生ガスによる火災、爆発、及び酸欠・中毒等を含む労働災害を防止するためには、それぞれのガス特性を理解しておくことが重要である。とくに、メタンガスは可燃性であり、その特性を理解せずに安易に工事を行うと、人身事故を伴う爆発などの大事故が引き起こすことになる。

2. 1 埋立跡地において発生するメタンガスの特性

（1）埋立跡地において発生するガスの種類

ここでは、廃プラ以外の有機物を埋立対象としている一般廃棄物最終処分場及び管理型産業廃棄物最終処分場の跡地について検討したものである。ここでは、水汚染やガス発生がほとんどない安定型最終処分場や有害物質を埋め立てた遮断型最終処分場跡地は対象にしない。

有機物はそのものあるいは他の廃棄物に付着、混入して埋め立てられており、微生物により分解される。有機物は炭素、酸素、水素等が多数結合した高分子量体であり、これが切断されて小さな分子になり、これが水に溶解したり、ガスとして外部に揮散する（図1）。

水に溶解した有機物は、生物学的酸素要求量（BOD）、化学的酸素要求量（COD）、全窒素（T-N）などの水質汚濁成分となり、浸出水に溶存して外部の水域に流出する。一方、より小さな分子に分解されたものは CO_2 、 CH_4 、 H_2 やアンモニアやメチルカプタンなどの微量成分となり、軽いのでガスとして大気へ放出される。

ところで、微生物の分解は、雰囲気により好気性分解と嫌気性分解に大別される。埋立処分構造は準好気性方式が採用されている。埋立地内を自然の作用でできる限り好気性になるような構造である。有機物を構成する炭素や水素は、酸素が供給されると好気性微生物により分解されて CO_2 と H_2O を生成する。好気性分解では発熱を伴うので内部温度が上昇する。 H_2O は地中温度が高い場合には、湯気（ゆげ）となって大気へ放出される。しかし、温度が低下すると凝縮されて水滴となっ

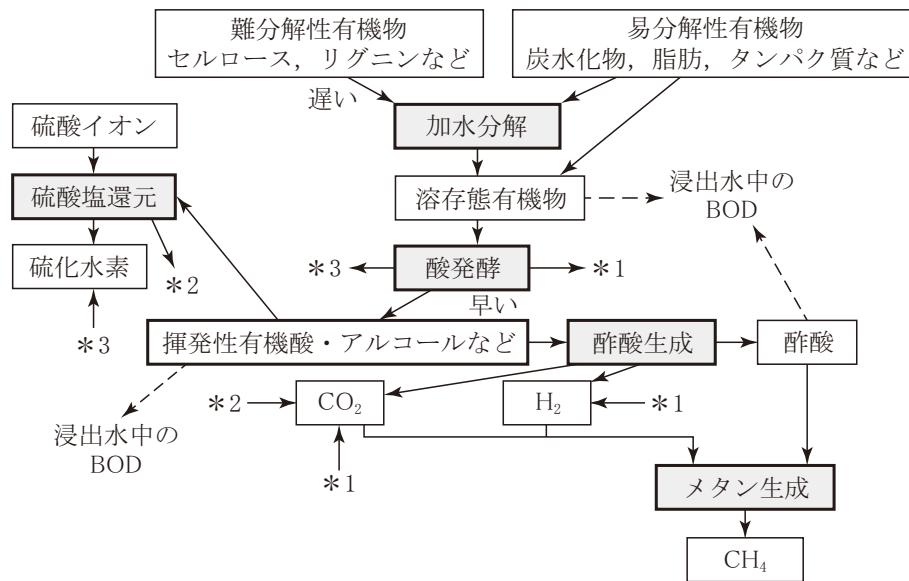


図1 有機物の嫌気性分解過程 (Christensen, 1993)

て埋立物に付着あるいは汚水として流出する。また、好気性分解は、嫌気性分解と比べると100倍以上の速さで有機物を分解するので、できる限り好気性を維持することが望ましい。なお、埋立地内は、部分的に嫌気性部分が存在するので、CH₄ガスを伴うことが多い。

他方、酸素のない嫌気性状態では嫌気性微生物により有機物が分解され、CO₂、CH₄や微量悪臭物質が生成される。嫌気性分解は吸熱反応であるので温度は上昇しない。なお、空気の無い嫌気性状態においても、有機物を構成する分子には酸素が結合しているので、分解過程でCO₂が生成する。埋立処分場が終了し、閉鎖されて廃止されると、少なくとも50cm以上の最終覆土が施される。つまり、埋立地内では嫌気性になるので、処分場の操業時と異なり、CH₄ガスの発生量が顕著に増えることが知られている。かつ、分解速度が非常に遅いので、長期間にわたってガス発生が続く。

※水蒸気は無色の気体であり、眼に見えない。冷えると凝縮して水滴になり、光が反射して白く見えるのが湯気（ゆげ）である。

(2) 埋立跡地において発生するガスの組成

有機物を含む廃棄物の微生物分解に伴う発生ガスは、埋立初期から終了まで次の5段階に分類される(図2)。

- (Ⅰ) 好気性分解期；酸素がただちに消費され、CO₂が生成する。
- (Ⅱ) 通性嫌気性菌が支配的な嫌気性酸発酵期；O₂がすべて消費され、CO₂の生成が活発で、H₂も発生する。
- (Ⅲ) 絶対嫌気性菌が支配的なCH₄生成発達期（CH₄生成菌により水素が消費され、CH₄の生成量が増加する。）
- (Ⅳ) 難分解性有機物が徐々に可溶化・分解されるCH₄生成定常期；CH₄の生成により廃棄物層内のガス圧が上昇する。
- (Ⅴ) 有機物が少なくなり、大気が拡散侵入するCH₄発酵終末期；窒素や酸素の濃度が相対的に増加する。

最終処分基準省令で定める廃止基準は、第1段階の安定化で「土の中にとどまっている限り、外部の環境に影響を与えない状態」とであると定義されており、分解期Ⅲ～Ⅳの境界に相当する。

最終覆土を施した跡地はしだいにⅤ段階に至り、CO₂とCH₄の発生割合はほぼ同じ程度になる。なお、発生ガス量は極めて少なくなるがわずかながら発生が継続する。一般廃棄物の平地埋立跡地の事例では、廃止後10年後には発生ガス量は約10分の1に減少したが、その後20年以上にわたって発生量は増減を繰り返した。また、ガス組成は、

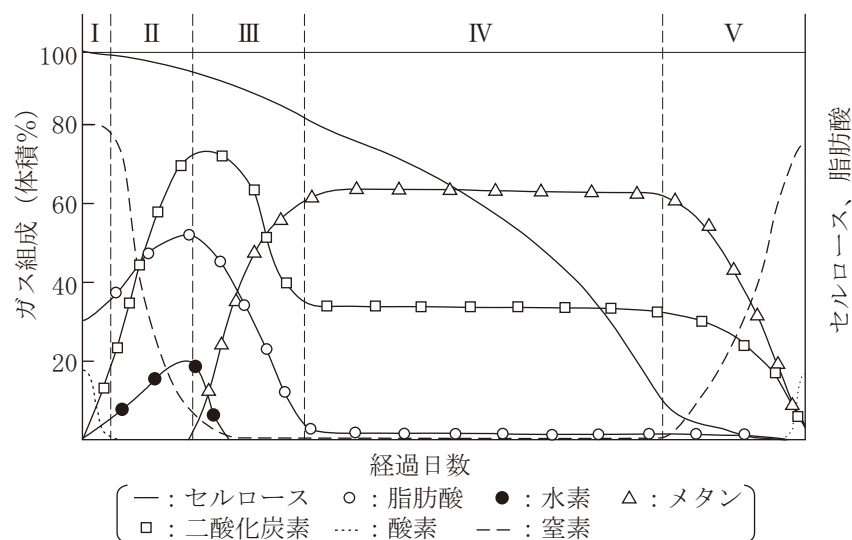


図2 埋立地におけるガス組成変化 (Rees, 1980)

廃止後にCH₄の割合が80～90%になるがしだいに低下し、30年後にはほぼ50：50になっている事例もある。

(3) メタンガスの性質

CH₄ガスの化学的な性質は、表1に示したように、可燃性で空気よりも軽いので、低濃度であっても密閉空間においては上昇し、天井付近では空気と置換して濃度が高くなる特性がある。濃度が爆発限界範囲になると着火源があれば爆発的に燃焼する。着火源は、バーナや煙草の火が想定されるが、発火エネルギーが小さいので衝撃や摩擦あ

るいる静電気でも着火する。

建物に限らず廃棄物埋立跡地における工事中には、重機や資材保護用に覆ったカバー内部、屋根などの建屋ができ始めた構造物における火災、あるいは工場やテントなど頂点が三角形の形状の場合には、頂上部の空気と上昇したCH₄と置換して高濃度になり、爆発的に燃焼することもある。CH₄ガスが存在する場合には、天井の自然換気は必要不可欠である。

(4) メタンガスの燃焼特性

CH₄ガスの爆発限界濃度はほぼ5～15%

表1 メタンの物理的及び化学的性質

項 目	基本的性質	跡地発生時の特性等
概 要	○可燃性の無色、無臭の気体 ○常温で安定物質	※家庭用（都市ガス；メタン）等は着臭してある。 ※跡地発生ガスはごみ臭等の悪臭を伴う。 ※安定した物質なので毒性は低い（有害情報なし）。
○比重	0.56（空気：1）	※空気より軽いので上昇する。閉鎖性空間で濃縮し、危険になる。
○沸点	－161.5℃	※通常的环境下では気体（ガス）。
○爆発範囲	5.3～14%	※低濃度でも濃縮、高濃度では空気中では希釈されて爆発範囲濃度になりうる。着火源があると燃焼や爆発する。
○着火温度	537℃	※火炎をはじめ、裸火（煙草の火など）、静電気、摩擦熱が着火源になりうる。
○発火温度	650℃	※周囲が650℃になると火源が無くても自然発火する。
○引火温度	－187.7℃	※これ以下では着火しても燃え続けることはない。
○分解温度	約700℃	※分解を開始し、エチレンやアセチレンを生成する。

※環境計画センター 鍵谷作成（平成27年10月）

(VOL%)である。CH₄ガスが空気中にこの濃度で存在すれば、着火源があれば燃焼する。爆発下限以下の低い濃度であれば着火源があっても燃焼しないが、濃度にはばらつきがあることに注意する必要がある。また、爆発上限以上の高い濃度の場合にも燃焼は起こらないが、強い着火源があれば局部的に燃焼が起こり、一時的に火災が発生することもある。また、高い濃度であっても空気中に漏出すると次第に希釈されて爆発限界濃度になるので火災は継続する。

例えば、埋立跡地ボーリング孔から発生するCH₄ガス濃度は70%程度であっても、空気中に拡散して希釈されて燃焼濃度に至る。着火すると孔口の上部で燃焼するが、孔口あるいは内部では着火し難い。CH₄ガスが主成分である都市ガスのガスコンロに着火した場合、燃焼は空気と混合する少し上で燃えることと同じである。なお、CH₄ガスが密閉状態で燃焼した場合には高圧を発生し、器物や建屋を破損する爆発を起こす。

(5) 適用法令；労働安全規則の規定

規則第389条の8でずい道等の建設の作業を行う場合、ずい道などの内部における可燃性ガスの濃度が爆発限界の値の30%以上であることを確認できたときは、直ちに、労働者を安全な場所に退避させ、及び火気その他の火源となるおそれのあるものの使用を停止し、かつ、通風や換気等の対策を講じなければならない」と定められている。

廃棄物埋立地の工事は、ずい道のように閉鎖性空間における作業はないが、作業箇所によっては小規模の閉鎖性空間ができることも考えられる。この規定を準用してCH₄ガスの爆発下限界の5%に30%を乗じてCH₄濃度1.5%を安全の目安に、あるいは一般にガス濃度は徐々に高くなることが多いのでその対策として1.5%よりも低い濃度で対応を促す安全管理基準とすることが多い。なお、ずい道では、CH₄濃度が0.25%以上で火気使用禁止、1.0%以上で一般作業員退避を標準の管理濃度としている。

ところで、消防法で規定する危険物は常温で固体や液体が対象であり、CH₄ガスなどのガスにつ

いての規定がない。それに対して高圧ガスは品名などの定め無く、一定の状態をもって「高圧ガス」として規制している。また、CH₄は主に都市ガスで使用されている場合にはガス事業法が適用され、高圧ガス保安法は適用されない。が、都市ガス以外の用途でCH₄を1メガパスカル(10気圧)以上の圧力で使用すれば高圧ガス保安法の規制を受ける。

2. 2 跡地におけるメタンガスによる事故と対策事例(写真4、写真5)

廃棄物埋立跡地の火災・爆発事故では、平成20年3月に発生した兵庫県網干沖埋立跡地に建設された姫路市清掃センターの事故がある。竣工1週間前に隣接して建設中の健康増進センターで爆発が起こり、建物損壊と数名の重軽症者を伴う大規模な爆発事故であった。その概要は次の通りである。なお、下記の資料を参考にした。

※網干健康増進センター事故に係る調査報告書

網干健康増進センター事故に係る調査・安全対策検討委員会(平成23年1月)

(1) 埋立跡地と利用施設の概要

ここは、昭和60年代に整備された海面埋立処分場であり、浚渫汚泥や姫路市の焼却灰や下水汚泥等が埋立処分された。埋立終了後、7年後の平成18年12月から姫路市ごみ焼却場を主体とする「エコパークあぼし」の整備事業が始まった。なお、当時の海面埋立処分場の場合、廃棄物が埋立物の1/3以下であれば廃棄物最終処分場には該当しないとされていた。このため、姫路市等の廃棄物が埋め立てられたにもかかわらず、法律上は廃棄物最終処分場として登録されない。

①海面埋立処分場；姫路市網干区網干浜

○埋立面積；81ha

○埋立容量；約360万m³(約660万t)

○埋立期間；昭和60年9月～平成11年3月

○埋立物；浚渫土砂(約104万t)、建設残土(240万t)、一般廃棄物(約40万t)、産業廃棄物(約46万t)、下水汚泥(約40万t)；廃棄物が約125万tで全体の19%弱

②跡地利用「エコパークあぼし」の概要※⁴⁾

- 姫路市ごみ焼却施設；シャフト式ガス化溶融炉（134t/日×3炉＝402t/日）
- 健康増進センター；温水プール、トレーニングジム等；延べ床面積；4,280m²
- 資源化施設、環境学習センター、芝生広場および緑地帯

③健康増進センターの概要

- 施設の概要；ごみ焼却施設の余熱を利用して、温水プール、温浴施設を整備し、市民の健康増進の機会を提供する施設
- 建築面積；3,285m²
- 延床面積；4,046m²
- 地上2階、鉄骨造り
- 地盤高さ等；ごみ焼却施設の地盤高さが4.9mあるが、センターは集客施設として周辺の眺望に配慮して6.4mの高台としている。地下ピットの深さは4.5mまで掘削している。また、污水配管、ガス配管、ろ過水再利用配管など多数の埋設工事が周囲で行われ、スリーブを通じて建屋内へ引きこまれている。

（2）事故原因と対策

①事故概要；鉄骨造り2階のうち、建物1m²が焼損、建物内約3,000m²を破損（写真5）

爆発があったのは、1階ろ過室の床下にある配管用スペース（縦2m、横1m、深さ1.8m）で、作業員らがガスバーナを使って配管に断熱

材を巻き付けていたところ、突然、爆発した。爆風で南側の外壁が30mほど吹き飛ばされた他、天井や鉄骨の柱なども激しく破損。近くにいた作業員数人が、落下した資材などで生き埋めになったが、救出された。当時、現場付近では約80人が建設作業に携わっていた。

②事故原因；地下ピットで激しく爆発したことから汚泥等に含まれる有機物が嫌気性発酵により発生したCH₄ガスが埋め立てられたスラグの空隙に滞留およびここは地盤が高いことから周辺のCH₄ガスがピット内へ流入し、バーナが着火源となり爆発したと報じられた。

③ 事故後の対策

- CH₄発生削減対策；埋立層内部に空気が流入させて準好気性雰囲気気に改善する。
- CH₄ガス抜き対策
 - ・空間地；埋立層内に滞留しているCH₄ガスを頂部にベンチレータのついた引抜管を設置して半強制的に大気へ排出する。引抜管は敷地外周のフェンスの支柱を利用する。
 - ・建物内；亀裂や配管スリーブから建屋内への浸入を防止するため、通気性のよい配管、地下埋設を避ける。
 - ・共同溝；ケーブルや上下水道管を収めた共同溝には強制換気設備とガス検知器の設置。
 - ・マンホール；密閉構造にならないガス抜きマンホール蓋を用いる。

③工事中のガス対策；開放系で工事が行われている時点では、CH₄ガスは希釈、貯留しないので大きな事故は起こり難い。が、カバーあるいは建屋が完成して配管や内装が始まる時期に危険性が高くなる。とくに、地下配管を施工する場合、掘削や埋戻し作業を伴うためガスの通り道になりやすい。ガス通気溝やガス排気筒、地下ピットには強制換気設備を設けてCH₄が滞留しない対策を講じる。

（3）網干健康増進センターのガス対策

可燃性ガス対策として三段構えの設備対策を講じている（図3、図4）。

※エコパークあぼし（網干健康増進センター）ホー



写真4 健康増進センターは広場中央の半円形建屋（エコパークあぼしのホームページより）



写真5 全国紙でも大きく報道された

ムページより

1) 安全対策の基本的な考え方

- ①可燃性ガスが発生しても建物内に進入しない構造とする。
- ②可燃性ガスが地中より自然に抜けるように施設周辺に碎石を敷き詰める。また、地下地層にガ

ス抜管を配置して地上の排気塔より排気する。さらに、施設の地下室に空間を設け、施設内に進入したガスを地下ピットを通して排気塔より排出する構造とする。

- ③本施設内95ヶ所にガス検知器を設置し、万一に備える。

2) 定期的な情報の提供

- ①可燃性ガス濃度測定値データの公開について
 - 本施設スタッフが常時ガス濃度測定器を携帯し、ガス濃度を把握
 - 測定結果は、ロビーに掲示し、利用者へ告知
- ②安全対策資料の掲示について
 - 可燃性ガスが発生する立地の特性について、本施設の可燃性ガス濃度検知器のシステムや安全対策概要等を分かりやすくビデオにまとめて映写

3) 可燃性ガスによる事故の未然防止策

- ①本施設の可燃性ガス安全対策行動計画を定め、スタッフ全員に定期的な研修・訓練を通じて周知徹底
- ②ガス検知設備は、定期的な動作点検を実施し、その精度を保持
- ③日常的にスタッフが中央監視盤のチェックを行い、利用者の安全を確保

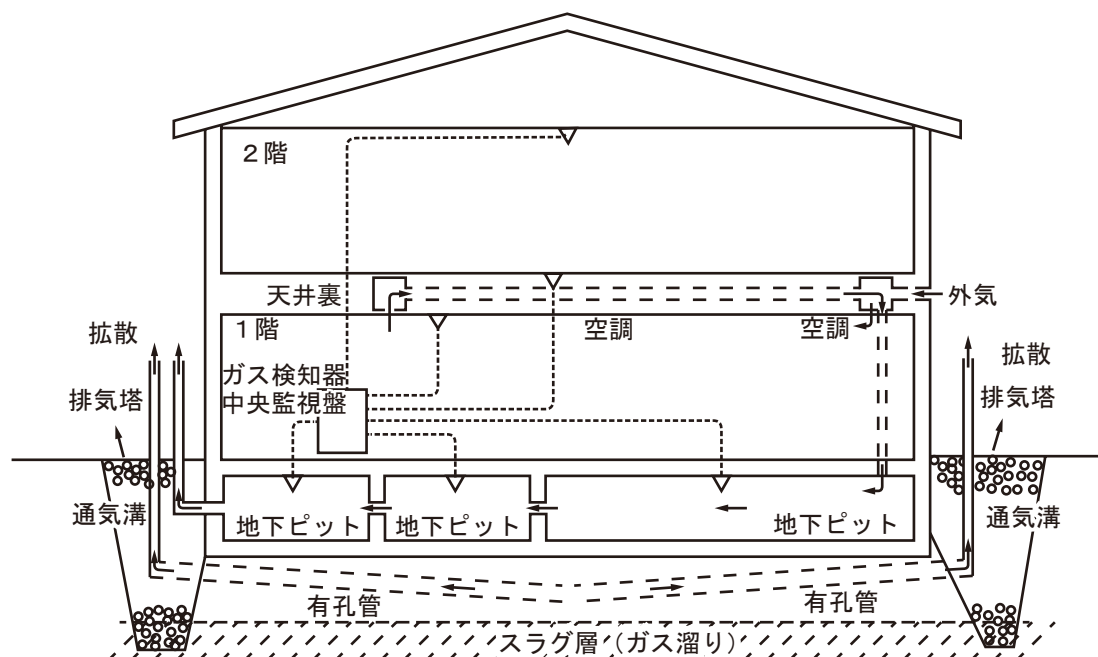


図3 健康増進センターのガス対策の概要

B-1～4 建物下ガス抜き管用排気塔

G-1～19 ガス排出溝用排気塔

P-1～21 ピット内排気用排気塔

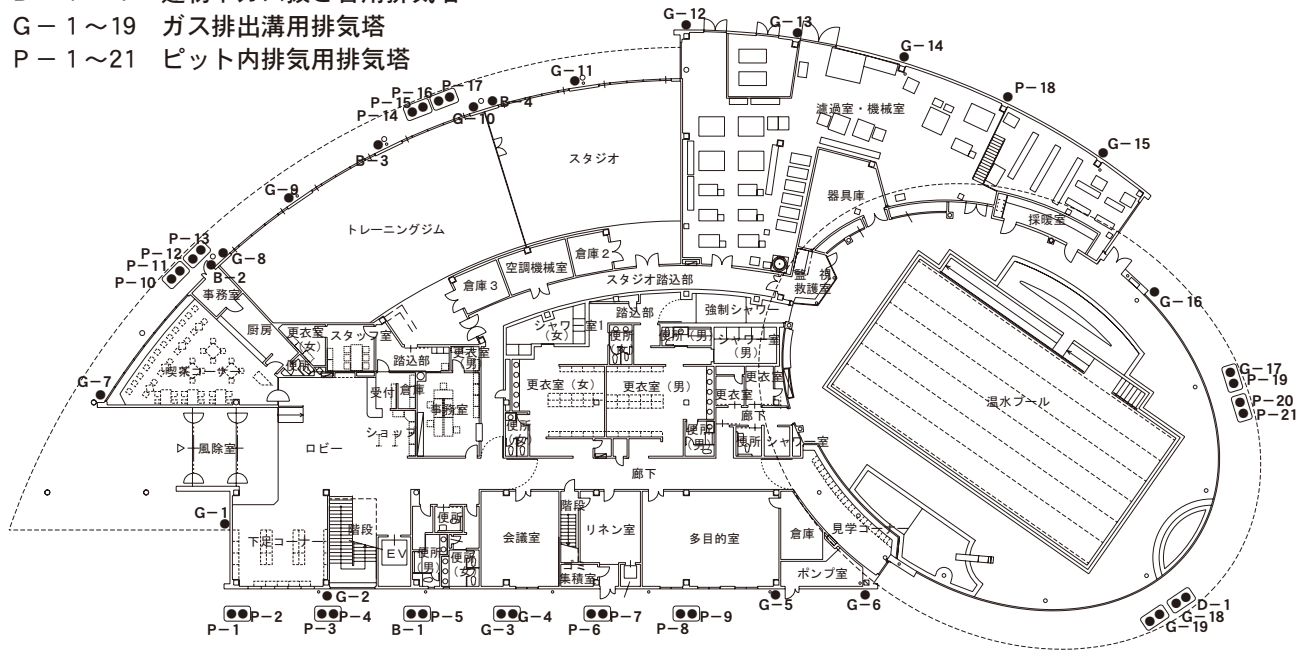


図4 健康増進センターにおける排気塔の配置図

おわりに

廃棄物の埋立処分場の跡地は貴重な土地である。しかしながら、自然地盤とは異なり、最終処分場として廃止されたとしても自然地下水よりはかなり悪質な汚水が発生し、かつ発生ガスが放出される。とくに、発生ガスは、空気よりも軽く、爆発性の CH_4 ガス、あるいは濃度は低いものの、人の健康に悪影響を及ぼす硫化水素や不快な悪臭成分を含むので、様々な環境保全あるいは安全対策を講じる必要がある。

このような土地を人が集まる場所として利用するに当たっては慎重な調査と万全な対策を講じなければならない。最近の事故事例として姫路市の事例を掲載したが、仮に、廃棄物は埋め立ててい

なかった、現地調査では確認できなかったなど真実を隠し、爆発事故が原因不明あるいは別の原因をデッチ上げされていたならばいずれ同じような事故が多発することになる。姫路市が事故の詳細や対策を公表し、対応していただいたことは、非常に貴重な事例を提供していただいたことになる。同じ轍を踏まないためにも公開していただいたことに感謝する次第です。なお、検討内容を精査したが、現場に精通した経験豊富な学識者・専門家が検討したと思われる適切な対応であり、大いに参考にさせていただきました。

次回は、廃棄物埋立跡地における作業時及び建造物の発生ガス（メタン）安全対策について紹介します。

〈参考・引用資料〉

- 1) 廃棄物学会 廃棄物埋立処理処分研究部会；廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法 ～安定化と廃止の考え方～ 平成14年3月
- 2) 最終処分場跡地地質変更に係る施行ガイドライン；廃棄物最終処分場跡地地質変更に係る基準検討委員会；財団法人廃棄物研究財団（環境省委託調査）
- 3) 鍵谷；廃棄物埋立跡地の問題と安全利用（Ⅲ）～埋立処分場跡地の指定区域における施行手順について、「環境施設」、No.139、pp.113-115（2015.3）
- 4) 特集企画・ごみ焼却施設の経済的運営のポイント（第24回）視察シリーズ②・エコパーク網干 ～発電した電力が民間業者の経営安定化に寄与～、環境施設、No.132、pp.48-53（2013.6）