



窒素分離膜を利用した破碎機の安全対策技術

廖 赤虹、尾川 義雄、佐宗 祐子、鶴田 俊
(独立行政法人消防研究所)

1 はじめに

家庭や産業から排出された廃棄物の処理は、現代社会の正常な営みを維持するための重要な事業である。一方、廃棄物処理における事故は一般の産業に比べて多く、事故の発生率は全産業平均値の10倍近くもある⁽¹⁾。廃棄物は通常、家庭などから排出される一般廃棄物と、生産活動に伴って発生する産業廃棄物およびし尿に分類され、これらの分類に従って整理した事故発生率は、一般廃棄物と産業廃棄物がほぼ同数で、し尿はかなり小さい⁽¹⁾。また、一般廃棄物と産業廃棄物の事故の中で火災と爆発が占める割合は、一般廃棄物処理においては41%、産業廃棄物処理においては50%である⁽¹⁾。廃棄物処理における火災・爆発事故の対策は重要な課題である。

産業廃棄物処理における詳細のデータがないが、一般廃棄物処理において、1992年～1996年の5年間の統計によると、火災・爆発事故の約60%が粗大ゴミの破碎工程で発生している。また、ごみ焼却や資源ごみの処理などにおけるほかの事故の発生率は安定、または減る傾向にあるのに対し、粗大ゴミ処理施設における事故は漸増傾向にある⁽¹⁾。平成2年度末の統計では、日本全国で、破碎工程を持つ粗大ゴミ処理施設の数574箇所へのぼり、1日の処理能力は24,000トン以上である⁽²⁾。従って、廃棄物処理における火災・爆発事故を減らすには、破碎工程での安全対策が大きな意味を持っている。

破碎工程は、ごみを効率よく運搬、貯留、および埋立てまたは焼却するために、空隙の多い

固形廃棄物を破碎し、減容またはゴミの均一化処理をする工程である。そのため、粗大ゴミ処理施設の多くは破碎設備を持っている。破碎設備は処理するゴミの質や処理量に応じて、切断式、回転式および圧縮式の3種類が使われている⁽²⁾。

火災・爆発事故は、可燃物と着火源の存在により発生する。破碎工程における爆発の原因物質は、半数弱が不明とされているが、それを除いて、残りのうちの約8割はポータブルコンロ、カセットコンロおよびエアゾール缶などに充填されるブタンやプロパンガスである。残りのうちの2割は、塗料類、金属粉および有機物粉などである。また、火災の原因物質としては、やはり一位は上述のガスボンベに充填される可燃性ガスであり、その次は油類や塗料類とされている⁽³⁾。当然、着火しやすい紙くずや破碎によって綿状になっているプラスチック類などの可燃物も火災の原因物質になりうる。なお、着火源としては、衝撃火花や摩擦熱などが挙げられ、バッテリー中のアルカリ金属と水との反応も考えられる。

ゴミは多種多様の物質の集合体である上に、形態も一定しておらず、そのため、破碎工程に入る前に、ガスボンベのような発火可能性の高いものを完全に選別・除去することは事実上不可能と言える⁽³⁾。消費者からごみが排出される段階とごみ収集の段階でそれらを除去する努力も必要であるが、前者は個々の人の認識と自覚に関わる問題で、消費者からまったく危険なご

みを出さないことは期待できないだろう。また、後者は処理施設と同じ理由でそれを完全に除去することが困難である。さらに、ガスボンベがないとしても、ほかの可燃物が存在する限り着火の可能性がある。

また、着火源としての摩擦熱や火花は、どのタイプの破砕機を使用しても、発生の可能性がある。特にもっとも汎用性が高く多く使われている高速回転式のゴミ破砕機は、構造上、火花がよく発生するものであるため、それを防止することも事実上不可能である。

従って、破砕工程、特に破砕機において防火・防爆対策を施すことが、安全への唯一の道とも言える。

2 既存の対策とその欠点

破砕機の特質から着火源の排除が困難であるため、現在、主な対策として、爆発時の被害低減策、つまり破砕機と建屋を構造的に耐爆・放爆仕様にするのと、破砕機内の爆発防止策が採用されている。後者の具体的な方法は、破砕機内に多量の空気を吹き込んで可燃性ガスが爆発範囲に入らないように希釈する方法と、水蒸気、二酸化炭素、窒素などの不活性ガスを破砕機内に吹き込む方法があるとされているが、実際に使用されているのは、希釈空気吹込み式と水蒸気吹込み式防爆装置のようである⁽²⁾。

希釈空気吹込み式防爆装置は、装置が簡単で設置コストが安いという利点があるが、可燃性ガスが急激に発生すると、一時的かつ部分的に雰囲気組成が爆発限界濃度範囲内に入る場合もあり、水蒸気吹込み式防爆装置に比較すると信頼性が低くなり⁽²⁾、現実にこの方式の爆発・火災対策を採用される施設にも爆発火災が起きていると報告された⁽⁴⁾。また、摩擦熱や火花による固形可燃物の着火を防止することができない。さらに、大量空気の送・排風を行うので、ブロワー、ダクト、集塵機が大きくなり、スペース的

には不利になるという欠点がある。

一方、水蒸気吹込み式防爆装置は、希釈空気吹込み式防爆装置より大きい防爆効果を期待できるが、水蒸気発生源のボイラー、燃料タンクまたは燃焼ガス配管、蒸気配管、保温工事、計装機器などが必要であり、設置費用とランニングコストが高く、規模の大きい施設しか利用できない。そのほかに、水蒸気吹込み式防爆装置について、以下のような問題点が挙げられる。

- 1) 施設内における高温水蒸気の存在と可燃物である燃料の貯蔵や供給は、新たな危険要因となっていること。
- 2) 飽和水蒸気濃度が周囲の温度に左右されること。温度が下がると、凝縮により水蒸気分圧が急激に低下するため、水蒸気による防爆効果は保温されている高速破砕機の内部に限られる。可燃性ガスを含む混合気が保温されていない破砕機の外部に出ると、たとえ破砕機内で水蒸気により燃焼下限界以下に希釈されていても、温度の低下により再び可燃範囲に戻る可能性がある。
- 3) 水蒸気の凝縮過程が、放熱過程であること。ボイラーで発生した多くの熱が水蒸気によって破砕機に運ばれ、機器や構造に熱疲労を与えるだけでなく、破砕物の温度を上昇させ、集積される破砕物の出火の危険性を高める恐れがある。
- 4) 高温の水蒸気により、破砕物に含まれる炭水化物やたんぱく質の熱変成が促されること。破砕物が腐敗しやすい状態に変化するとともに、破砕物中から臭気の原因になる化学物質、例えばアルコール類、アルデヒド類、カルボン酸類、エステル類、ケトン類などが抽出されるため、注入された水蒸気が排気側で悪臭の原因となり、人間の健康や環境に悪影響を与える恐れがある。
- 5) 水にかかると破砕物が破砕機の壁に付着するため、水蒸気が使えない破砕機もある⁽⁴⁾。

3 窒素分離膜を利用する可能性

3.1 窒素分離膜

窒素や二酸化炭素ガスを適切に使うと、水蒸気と同様に破碎機に対する防火・防爆効果があることは言うまでもない。実用化されていない最大の理由は、経済性にあると思われる。もちろん、二酸化炭素の場合、人に対する毒性も考慮しなければならない。

従来の窒素ガス供給方法として、気体の窒素を高圧容器から供給する方法と低温の液体窒素を気化して使う方法がある。これらはガスの補給などに手間がかかるほかに、大量使用になると、コストがかかる問題もある。それに比較すると、水蒸気を使った方がコストの面においても、また、メンテナンスの面においても有利である。

しかし、近年、高分子材料を用いて気体分子を選択的に透過または吸着し、異なる種類の気体を分離する技術の進歩が目覚ましい。特に、大気中から酸素と窒素を分離する技術は、すでに窒素ポンベの代わりに窒素を供給する手段として、樹脂成型時などにおける酸化防止用途、粉体輸送時の爆発防止、また、青果物の調整された雰囲気での貯蔵（CA貯蔵）などの各種雰囲気ガス供給用途に幅広く使われている⁽⁶⁾。市販の窒素発生装置には、気体分離膜を利用する方式と吸着剤を用いる圧力スイング吸着方式（PSA）があり、いずれも気体の圧力差を利用して空気中の酸素と窒素を分離する。これらの方法は、圧縮空気、つまり空気を圧縮する動力さえあれば、まわりの大気から窒素を取り出すことができる。従って、それらを利用すると、水蒸気の使用と同様に、ガスの供給や貯蔵の手間が要らなくなる。また、発生ガスの窒素濃度は、PSA方式の場合では通常99%~99.99%の中高純度領域に、分離膜方式の場合では、運転状況により、99.9%以下の低中純度の領域に幅広く制御できる。

周知のように、水素やアルカリ金属のような特殊な物質を除いて、一般の物質に対する消火や着火防止に必要な酸素濃度は10~15%であり、空気中の窒素濃度を85~90%まで高めれば防消火のニーズに応えられる。この濃度範囲はちょうど分離膜により窒素富化空気を大量にかつ低コストで供給できる範囲である。それに加え、窒素分離膜を利用する窒素発生装置は、体積が小さく、操作が簡単で起動から安定運転までの時間が短いなどの利点があるため、消防防災に役立つ有望な要素と考えられている⁽⁶⁾。図1に窒素分離膜のイメージを示す。圧縮空気を膜の片側に導入すると、膜を通りやすい酸素が膜の壁を通して低圧側の大気に多く放出され、一方、膜を通りにくい窒素は流路に沿って下流側に流れる。このようにして、大気より窒素濃度が高められた窒素富化空気を発生できる。

3.2 破碎機内の酸素濃度の設定

現在使用されている水蒸気吹込式防爆装置は、おおむね破碎機内の酸素濃度を14%以下になるように管理されている。窒素の消火能力は水蒸気より低いので、同等の効果を確保するには酸素濃度をより低く維持する必要がある。水蒸気の消火効果は二酸化炭素と同等であるため⁽⁷⁾、水蒸気と同等の効果をj得るには、窒素注入時の酸素濃度を水蒸気の時より約2%低下させる必要がある。また、スプレー缶、ガスライターおよびカセットポンベによく充填され、破碎工程においてもっとも危険とされるボタンに対して、信頼できる燃焼限界測定法（管状火炎バーナー）で測定された窒素の爆発抑制濃度は48.6%で、これに対応する酸素濃度は10.3%である⁽⁸⁾。従って、破碎機内の酸素濃度を窒素富化空気の注入により10%程度に維持すれば、現在の水蒸気吹込式防爆装置と同等、あるいはそれ以上の防爆効果が確保できると考えられる。

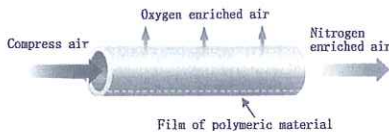


図1 窒素分離膜のイメージ

3.3 窒素富化空気と水蒸気との発生費用の比較

経済性の面で破碎機の防爆装置に窒素分離膜を利用する可能性を検討するために、各窒素供給方法における窒素の単価と、所定の酸素濃度を持つ窒素富化空気（NEA：Nitrogen Enriched Air）を発生するときの単価を試算した。窒素分離膜は圧縮空気を使って窒素と酸素を分離するものであるため、その動力消費は基本的に圧縮空気を供給するコンプレッサーの動力消費である。また、同じ分離膜でも、膜に導入される圧縮空気の温度や圧力などによりエネルギーの利用効率が変わるが、ここでは、圧縮空気の温度を25℃、圧力を0.7MPaとするときのデータに基づいて、圧縮空気を供給するコンプレッサーの電力消費から算出

したものである。なお、窒素ポンベや液体窒素の価格は一般の市販価格を参考とした。表1に示したように、窒素分離膜により発生した窒素の単価は、窒素ポンベや液体窒素を利用するときの10%程度である。また、高純度の窒素を薄めて使用せず、直接10%の酸素濃度を持つ窒素富化空気を発生し使用する場合は、そのコストはさらに低減でき、窒素ポンベや液体窒素を利用するときの3%程度となる。このように、窒素分離膜技術を上手に利用すれば、防爆に必要な窒素ガスを従来の方法よりかなり低いコストで得ることができる。

一方、水蒸気の発生単価は、水蒸気の圧力、つまり水の加熱温度により変わるので、各施設や装置において必ずしも一致するものではない。表2のデータは某廃棄物処理施設の実機データをもとに試算したものである。それによると、水蒸気の方が窒素ガスより発生単価はかなり低く、分離膜と比べても1/3程度である。しかし、ブタンガスに対するピーク濃度まで希釈した場合、水蒸気の3.2円/Nm³に対し、NEAは4.1円/Nm³である。水蒸気の凝縮を考

表1 窒素の供給方法とコスト

供給方法	単価 (円/Nm ³)			備 考
	窒素ガス	10%O ₂ NEA	12.5%O ₂ NEA	
窒素ガスポンベ	286 ^{a)}	150	116	空気で薄める
液体窒素ポンベ	231 ^{b)}	121	94	空気で薄める
窒素分離膜	24 ^{c)}	4.1	3.6	直接に発生する。 電気代は22.5円/kWhとする ^{d)}

a) 市販の7 m³充填の窒素ポンベを2,000円/1本とする

b) 大口需要者への液化窒素ポンベ（ガス状で108m³）の卸値は1本あたり25,000円とする

c) 窒素濃度は99.9%である

d) 家庭料金の全国平均値⁽⁹⁾

表2 水蒸気の発生コスト

蒸気圧	加熱温度	蒸気流量	ボイラー効率	プロパン消費量	ガス単価	水蒸気単価	酸素濃度を12.6%に希釈する時の単価 ^{c)}
(kPa)	(K)	(Nm ³ /min)	(%)	(Nm ³ /min)	(円/m ³)	(円/Nm ³)	(円/Nm ³)
203.9 ^{a)}	394 ^{a)}	37.3 ^{a)}	75	2.0	148 ^{b)}	8.1	3.2

a) 某廃棄物処理施設の実機データ

b) 家庭料金の全国平均値⁽⁹⁾

c) 二酸化炭素のブタンガスに対するピーク濃度にあたる⁽⁸⁾

慮すると、このペースでは、もはや両者の発生コストが同格であると見たほうが妥当である。

3.4 窒素ガスの有効利用

上述のように、窒素分離膜を利用すると、水蒸気とほぼ同等の発生コストで破碎機防護用の窒素富化空気を獲得することが可能であり、それによって、第2節に述べた水蒸気使用時の欠点を回避できる。また、水蒸気と違い、窒素ガスは温度の低下による凝縮がないことから、工夫次第で水蒸気より有効に利用することが可能である。

高速回転式のゴミ破碎機は、高速で回転しながら、ゴミを破碎し排出するため、遠心力で内部が負圧となり、入り口と排出口の差圧に伴う流れが生じる。このため、破碎機内の酸素濃度を目標値に維持するには、つねに一定量の不活性ガスを注入し続けなければならない。水蒸気の場合、破碎機から出てしまうと、拡散のほか、温度の低下による凝縮が起こるので、有効に再利用することは難しい。一方、窒素の場合には、温度の低下により凝縮することがないため、シールさえすれば、以下のように有効に再利用できる。

現在の水蒸気吹込式防爆装置と同等のランニングコストを維持する場合、破碎機から出た窒素富化空気を破碎機下流側にあるベルトコンベヤに導入することができる。それによって破碎機のみならず、出火頻度の高いベルトコンベヤも防護できる。さらに、ウォーターミストなどを利用すれば、破碎物の集積ピットまで防護することが可能である⁹⁹。

破碎機の防護のみを考慮する場合には、図2のように、破碎機のゴミ排出口とゴミ投入口との間を連通ダクトでつなぎ、回転の遠心力により排出された窒素富化空気を破碎機内の負圧、または送風機を利用して破碎機に戻すことができる。この循環使用により、拡散で消失したNEAの分のみ補給すれば済むため、新たに注入する窒素富化空気の量が水蒸気使用時より少なくなり、ランニングコストを大幅に削減することが期待できる⁹⁹。

4 まとめ

廃棄物処理施設、特にその破碎工程における火災・爆発は、全産業の平均より遥かに高く、その安全対策が重要な課題である。現在一般に

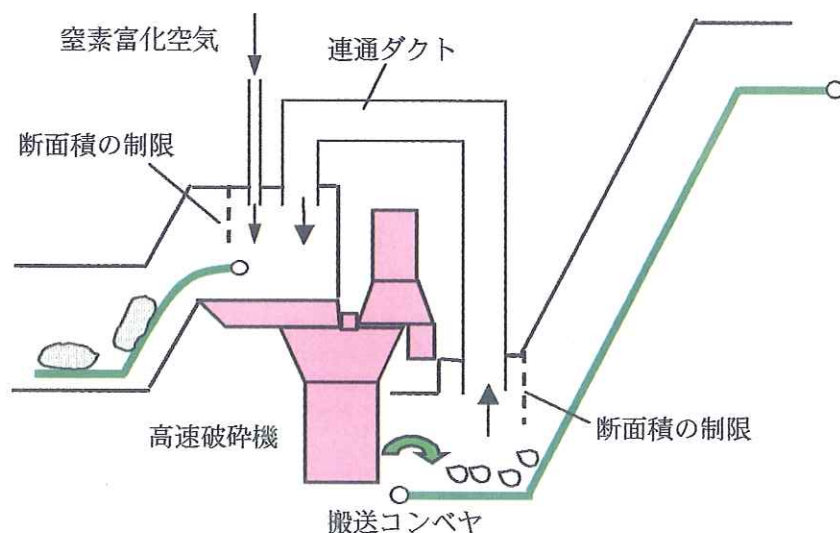


図2 窒素富化空気の循環使用のイメージ

使用されている水蒸気吹込式防爆装置は、設置費用とランニングコストが高く、規模の大きい施設しか利用できないほかに、それ自身も不安安全の要因を抱えている。

本論文は、破碎機の吹込式防爆装置に窒素分離膜が利用できる可能性を検討し、その利用により、以下のようなメリットが期待できることを示した。

- (1) 従来の水蒸気吹込式防爆装置と同等のランニングコストを維持する場合、窒素富化空気の再利用により、防護対象を破碎機からベルトコンベヤ、さらに集積ピットまで広げることができる。
- (2) 破碎機のみ防護する場合、ランニングコストを従来の水蒸気吹込式防爆装置より大幅に削減することができる。
- (3) 水の使用量を大幅に削減できる。
- (4) 施設内において高温水蒸気や燃料の供給・貯蔵のような不安安全要因を避けられる。
- (5) 水蒸気の凝縮による機器や構造物の熱疲労を避けられる。
- (6) 高温の水蒸気により発生した臭気がなくなり、労働環境が改善される。

以上の結果は調査と計算から得たものであり、実際の利用にあたっては、窒素富化空気の利用に合わせた装置改良と実機による実験が必要であろう。

参考文献

- (1) 若倉、岡、廃棄物処理における事故解析、1998。
<http://www.chemrisk.org/report/report11.pdf>
- (2) 永田ら、破碎処理施設の爆発事故防止対策

マニュアル、(社)全国市有物件災害共済会、1993。

- (3) 板垣、廃棄物破碎設備での火災・爆発の現状と防止対策、火災、Vol. 46 No. 6, pp.13-17,1996。
- (4) 八島、粗大ごみ破碎処理施設における爆発防護に関する現地調査、産業安全研究所特別研究報告、pp.31-40, 2004。
- (5) 中垣正幸 (監修)、「気体分離膜、モジュール」、普及版膜処理技術、(株)フジ・テクノシステム、pp639-674 (1999)
- (6) 廖、「気体分離膜を用いるガス系防消火システムの有用可能性」、火災、Vol. 54, No. 1, pp. 38-43, (2004.2)
- (7) Naoshi Saito and Chihong Liao, "Suppression Effect of Water Vapor on Flammability Limits of Hydrocarbon Fuels-A Study on Fire Suppression by Water Mist", 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology 17-20, March, 2004, Daegu, Korea, pp.958-964.
- (8) Chihong LIAO, Naoshi SAITO, Yuko SASO and Yoshio OGAWA, "Flammability Limits of Combustible Gases and Vapors Measured by Tubular Flame Method," Fire Safety Journal. 27 (1996) pp.49-68
- (9) 内閣府、公共料金の窓、
<http://www5.cao.go.jp/seikatsu/koukyou/>
- (10) 廖、尾川、佐宗、鶴田、「火災防止システム及び廃棄物処理施設」、特願2004-072376。(出願中)