

2008年3月環境システム学専攻修了

超臨界水酸化法を用いた感染性医療廃棄物の新規オンサイト処理システムの開発

66760 立野 良 (指導教員 大島義人教授)

Key words: Supercritical water oxidation, Medical waste, Continuous flow reactor, 2-stage treatment process

1. 緒言

近年、医療技術の高度化や多様化に伴って多種多様な医療廃棄物が排出されるようになり、多くの医療機関では分別や保管、処理における経済的負担が増している。医療廃棄物の組成としては、注射器やカテーテル、輸液セットのようなプラスチック製ディスポーザブル器具が約 40% を占める^[1]が、血液・体液等が付着した感染性廃棄物や、注射針やメス、破損したガラスなどの鋭利な損傷性廃棄物についても同時に適正処理することが求められている。現在 95%以上の医療機関では外部委託による処理が行われている^[2]ものの、排出者と処理業者の間でのリスクコミュニケーションが不十分であることも少なくなく、保管・輸送中の針刺し事故等の院内外感染や悪質業者による不適正処理・不法投棄のリスクにつながるという問題がある。こういったリスクを最小限に抑えるためには、医療廃棄物の排出現場（オンサイト）で排出者が責任を持って迅速に無害化を行う原点処理が望ましい。

本研究では、外部委託式の焼却処理に代わる感染性医療廃棄物の中間処理方法として、超臨界水酸化法を利用した新規オンサイト無害化処理システムを提案する。この処理システムでは、超臨界水酸化法によって医療廃棄物の分解と感染性物質の滅菌を同時に行えるため、感染性廃棄物の大幅な減容が可能となる。また、注射器や真空採血管等の複数の素材からなる医療廃棄物の分別が不要となるため、分別作業中の感染を最小限に抑えることが期待できる。これまでに、450 °C・25 MPa の超臨界条件で 20 分間反応することでポリプロピレンが完全に酸化分解することや、毒素の無害化を含めた大腸菌の滅菌が可能であることが示された^[3]ものの、実際の排出現場への適用を想定すると、コンパクトで処理能力のある処理システムの設計が不可欠である。

本研究では代表的な感染性廃棄物であるディスポーザブル注射器及び真空採血管に着目し、針や金属部分の取り外しをせずに丸ごと処理できるような処理プロセスの構築に向けた実験的検討を行い、モデル廃棄物の処理を行う小型処理装置の製作を目標とする。

2. 回分式反応器による医療廃棄物の分解実験

(1) 実験方法

超臨界水酸化法による医療廃棄物の分解の可能性を確認する実験として、回分式反応器を用いた針付き注射器と真空採血管の処理実験を行った。使用した医療器具は、ポリプロピレン製のオールプラスチック注射器 (Henke Sass Wolf、NORM-JECT 2 mL) および SUS304 製の注射針 (テルモ、テルモ注射針 20G×1½”) と、血清分離剤 (0.109 mol/L のクエン酸ナトリウムを含む緩衝液) 入りの真空採血管 (テルモ、ベノジェクト II) である。

針付き注射器 (総重量 1.5 g) もしくは採血管 (総重量 8.6 g) に、酸化剤として過酸化水素水 75.4 mL を加えてインコネル 625 製回分式反応器 (内容積 690 mL) へ封入した。高周波誘導加熱炉 (鈴木商工) を使用し、約 30 分かけて室温から 450 °C まで昇温した後、450 °C・25 MPa の超臨界条件を 20 分間維持した。反応終了後は室温まで放冷するのに約 6 時間を要した。

また、血液中に含まれる塩素分による影響を調べるため、生理食塩水 (0.9% 塩化ナトリウム水溶液) を血液のモデルとして使用した注射器の分解実験を行った。注射器片 0.1 g 及び注射針 3 cm と共に生理食塩水を希釈して SUS316 製回分式反応器 (内容積 10 mL) に封入した。この反応器をサンドバスに浸漬して 450 °C・25 MPa で 5~30 分間加熱を行い、終了後は直ちに冷却水に浸して反応を停止させた。

いずれの実験においても、反応後は残存液中の全有機炭素濃度を TOC 計 (島津製作所、TOC-5000A) で測定し、残存 TOC 濃度及び TOC 転化率を分解の指標とした。

(2) 結果及び考察

針付き注射器及び採血管を超臨界水酸化法による処理を行った際の、反応前後の反応器内容物の様子を Fig. 1 に示す。注射器の分解後は針を除いて固体残渣は存在せず、液体成分のみが回収された。残存液の TOC 転化率は 99.8%以上となり、超臨界水酸化法によって針が付いたままの状態の注射器 1 本をほぼ完全に分解処理できることが示唆された。一方、採血管の場合は、残存 TOC 濃度が 453 mg/L とやや高い値を示し、分解後は金属製のフィルム栓と薬剤由来の無機固体物が約 12 mg 残留した。採血管の分解処理では、十分な酸化剤を加えた上で固体残留物の分離除去にも留意することで、注射器と同様に丸ごと処理が可能であると思われる。

次に、血液付着注射器のモデル廃棄物の分解実験では、反応時間が大きくなるほど黄色の呈色が濃くなると共に、黒色残渣の量が増えた。残存液には反応器及び注射針の素材であるステンレス中のクロムが溶出しており、黒色の残渣は腐食によって金属表面から剥離した酸化被膜であると思われる。反応器壁及び封入した注射針の腐食も反応時間に比例して進行しており、超臨界水中で塩素による腐食が顕著に生じていることが明らかとなった。また、Fig. 2 に示すとおり、塩分濃度が大きいほど TOC 転化率が伸び悩み、プラスチックが完全酸化に至っていないことが分かった。これは、腐食による酸化被膜の形成で酸素が消費されるため、酸化剤としての酸素が超臨界水酸化反応において不足したためであると考えられる。

実際には、本実験で用いた条件よりも塩分濃度が希釈された状態で医療廃棄物が排出されると想定されるが、超臨界水酸化法による処理システムへのプロセス化を図る際には、血液等に含まれる塩分への対策についても検討を行うべきであろう。

3. 2 段式溶融－流通式処理装置を用いた医療廃棄物の分解実験

(1) 2 段式処理プロセスの概要

プラスチック系医療廃棄物が超臨界水酸化法によって分解処理できることが示されたものの、回分式反応器単独での医療廃棄物処理は、処理時間やコスト、メンテナンス等の問題からオンサイト処理には適していない。そこで、前段で医療廃棄物を溶融し、後段の管型反応器にて超臨界水酸化処理を行う 2 段式処理プロセス (Fig. 3) の検討を行った。2 段式処理プロセスでは、溶融炉と反応器を独立して操作することが可能となる。このため、反応器の昇温や冷却等の時間ロスなく溶融炉へ医療廃棄物を追加投入することで、連続運転による処理量増加が期待できる。また、感染性物質の滅菌と、血液やプラスチック中に含まれる塩素分の除去を溶融過程で行える可能性や、溶融段階で熱量を消費するため、酸化反応の際の熱暴走を抑制できること、処理システムの小型化に伴うコスト低減と運転維持管理が容易となるなどのメリットが考えられる。

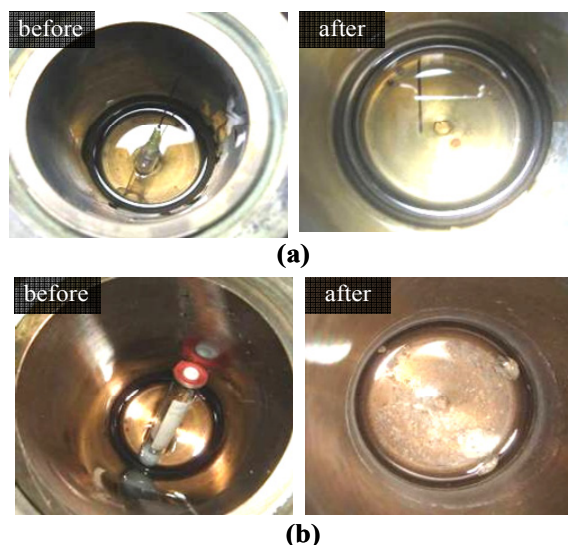


Fig. 1 回分式反応器による注射器 (a) 及び採血管(b)の分解実験

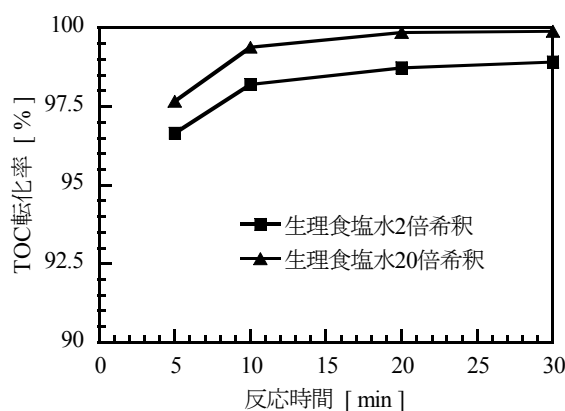
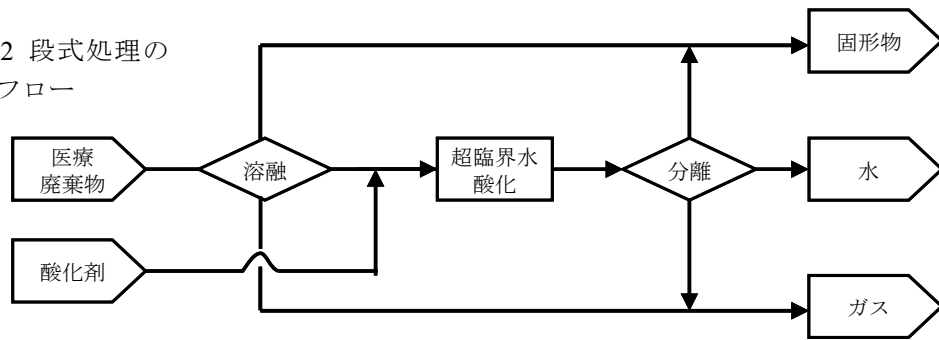


Fig. 2 塩分濃度とTOC転化率の関係 (450 °C・25 MPa)

Fig. 3 2 段式処理の
プロセスフロー



(2) 実験方法

2 段式処理プロセスの実用性を探るために、Fig. 4 に示す 2 段式熔融一流通式処理装置の製作を行った。攪拌器付きの熔融炉を通じて送液されるプラスチックと、酸化剤として過酸化水素水を別個に予熱し、GC 恒温槽内で 400 °C に加熱した管型反応器 (1/4 インチ SUS 管、内容積 1.5 mL) にて合流して超臨界水酸化法による反応を行う。熔融処理については、注射器片 0.1~0.3 g もしくは針付き注射器 (総重量 1.5 g) と水 300 mL を封入してから、熔融炉で出入口部にあるストップ弁 SV-1、SV-2 を閉じて熔融炉を閉鎖系とし、260~270 °C (5.0~6.0 MPa) で 30 分間加熱を行った。反応系を予め 25 MPa 程度に昇圧した状態で、バイパス間のストップ弁 SV-3 を閉じてから SV-1 を開けてポンプから熔融炉へと水を供給して昇圧した。昇圧中も熔融炉内が一定温度になるように加熱は継続し、熔融炉内の圧力が反応系とほぼ等しくなった時点で SV-2 を開き、熔融したプラスチックを反応器側へと送液した。熔融炉から出たプラスチックが冷えて再固結するのを防ぐため、熔融炉から恒温槽に至る間の配管はリボンヒーターで 200°C に保温した。反応器は触媒として酸化マンガン (粒径 180~500 μm) 3.3 g を充填した固定床管型流通式反応器であり、400 °C・25 MPa にて酸化剤過剰の条件で超臨界水酸化法によるプラスチックの分解を行った。処理後に熱交換器及びフィルターを通した排出液は逐次サンプリングし、TOC 計で残存 TOC 濃度を測定して分解の指標とした。

(3) 結果及び考察

2 段式処理装置を用いて注射器の分解実験を行ったときの、排出液中の残存 TOC 濃度の時間変化を Fig. 5 に示す。熔融炉に注射器片を 0.1 g 封入し、管型反応器における反応時間 (接触時

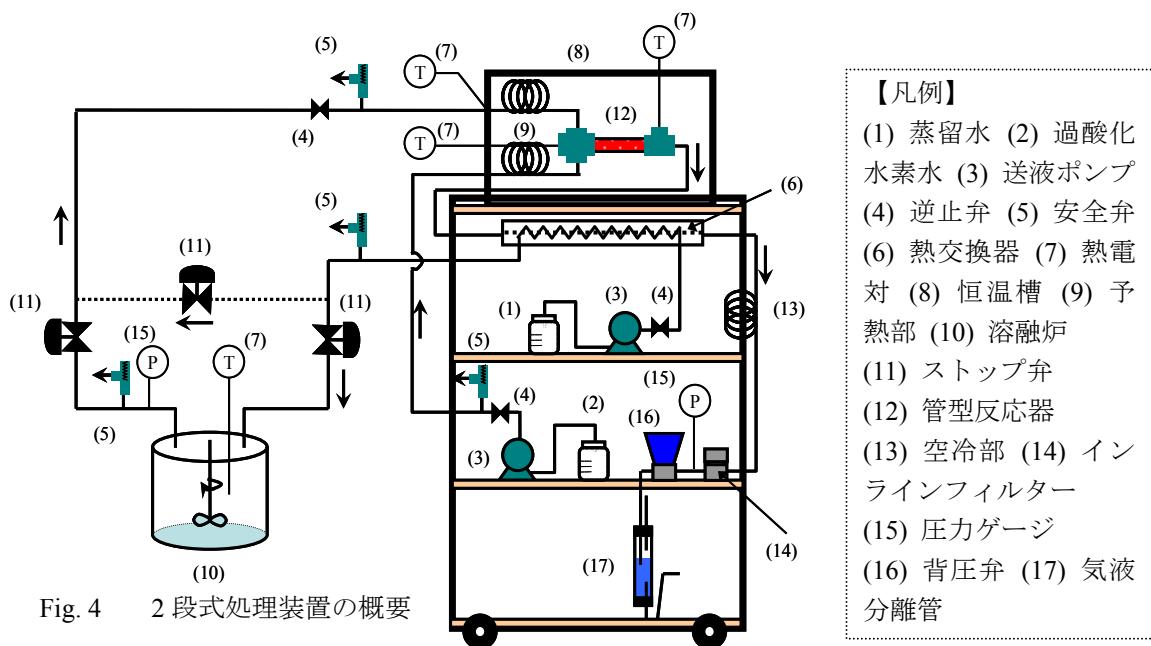


Fig. 4 2 段式処理装置の概要

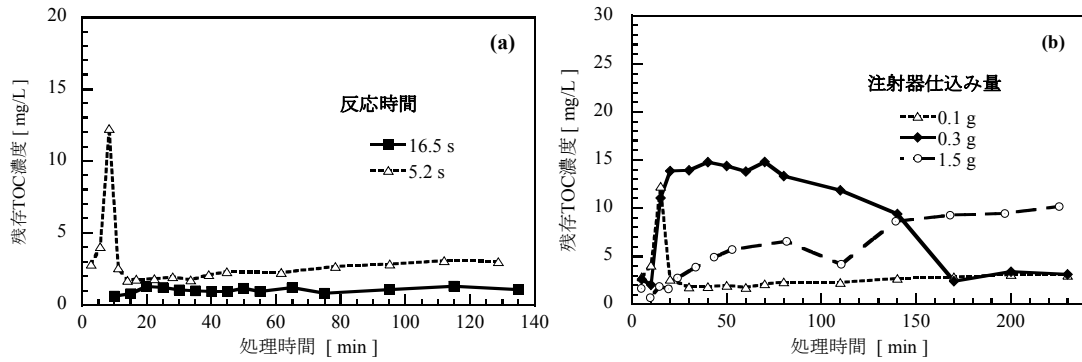


Fig. 5 2 段式処理装置を用いた注射器分解排液の残存 TOC 濃度の時間変化：
(a) 反応時間による影響、(b) 処理量による影響

間) を 16.5 秒とした場合、残存 TOC 濃度は約 1 mg/L でほぼ一定となった。反応前の初期 TOC 濃度が約 170 mg/L であることから TOC 転化率は 99.4%程度となり、プラスチックが熔融炉において均一に混合した状態で反応器へと安定的に送液された結果、超臨界水酸化反応で迅速に処理されていることが確認できた。また、流量を大きくして反応時間を 5.2 秒とした場合も、処理開始直後にやや高いピークを示した以外はほぼ同様の傾向を示し、TOC 転化率は約 98.7%となった。しかし、同じ反応時間の条件でも注射器処理量を増やすと、処理開始から 2 時間程度に渡って残存 TOC 濃度が 5~15 mg/L と比較的高い値を示し、注射器 1 本を丸ごと封入すると、時間の経過と共に残存 TOC 濃度が大きくなるという異なる傾向を示した。なお、反応時間が 5.2 秒の場合、注射器片を 0.1、0.3、1.5 g 封入した際に反応に関与した正味の TOC 量及び排出液中の総 TOC 量を見積もることで処理全体での TOC 転化率を算出したところ、それぞれ 91.7%、92.9%、99.0%となった。酸化剤過剰の条件にも関わらず完全酸化に至っていないのは、本処理装置で用いた管型反応器の処理能力が不足し、反応時間が非常に小さい条件であるが故に、一部の成分が二酸化炭素まで分解せずに残留しているためであると考えられる。

しかしながら、熔融炉からのプラスチックの送液及び管型反応器におけるプラスチックの分解がスムーズに行われていることから、2 段式処理プロセスが医療廃棄物の処理に有効であり、処理量と反応時間を調整して十分な反応条件を設けることで、安定した分解処理が可能であることが確認できた。

4. 結言と今後の展望

感染性医療廃棄物の分解処理技術として、超臨界水酸化法を用いた処理方法の実験的検討を行い、回分式反応器を用いた場合には 450 °C・25 MPa で 20 分間程度処理を行うことで注射器や採血管を丸ごと 1 本分解できることを確認した。また、前段で医療廃棄物を熔融し、後段の管型反応器で超臨界水酸化法による連続処理を行う 2 段式処理プロセスを考案し、製作した 2 段式熔融一流通式処理装置を用いて注射器の連続処理を安定的に行うことに成功した。この 2 段式処理プロセスのパラメータとして、反応時間や酸化剤量、医療廃棄物の封入量を調整することで、感染性廃棄物を迅速に分解無害化できるオンサイト処理システムが実現できるものと期待できる。今後は、実際の医療機関での運用を想定して、熔融処理過程での塩分除去方法と、熔融炉の開閉及び昇温昇圧操作における時間ロスを抑制する処理システムの検討を行う必要があるだろう。

参考文献

- [1] 松島肇・宮澤雄一：感染性廃棄物処理の現状と問題点、安全工学、43(6)、pp. 420-426 (2004)
- [2] 田中勝：医療廃棄物白書 2007、自由工房 (2007)
- [3] 野々上友也：東京大学大学院修士論文 (2007)