

JAERI-Research

95-006



電子線を用いた下水処理技術

1995年2月

電子線下水処理技術検討委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	いばらき印刷(株)

電子線を用いた下水処理技術

日本原子力研究所
電子線下水処理技術検討委員会

(1995年1月9日受理)

日本原子力研究所で開発を進めてきた下水処理関連分野への電子線の利用技術に関する評価を行うため、理事長の諮問機関として電子線下水処理技術検討委員会が設置された。本報告書は、同委員会における下水汚泥の電子線殺菌とコンポスト化、下水放流水の殺菌、使用済み活性炭の再生、微量有機汚染物質の分解及び汚泥脱離液の処理に関する技術的及び経済的評価の審議結果をまとめたものである。

Sewage Treatment Technologies by Electron Beams

The Committee for the Evaluation on Sewage Treatment Technologies
by Electron Beams

Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 9, 1995)

An advisory committee was organized for the president of JAERI in order to evaluate the technologies on electron beam application to sewage treatment which had been developed in JAERI. This report summarized the technological and economical evaluations by the committee on the electron beam disinfection and composting of sewage sludge, disinfection of secondary effluent from sewage treatment plant, regeneration of used activated carbon, decomposition of micropollutants and treatment of supernatant from sewage sludge.

Keywords: Electron Beam, Sewage Sludge, Disinfection, Composting, Secondary Effluent, Activated Carbon, Regeneration, Supernatant, Micropollutants, Economical Evaluation

まえがき

環境汚染は、1970年代から国際的にも、国内的にも深刻な問題となり、その保全技術の開発が緊急の課題となってきた。日本原子力研究所高崎研究所（以下、原研という）では、このような背景と社会的ニーズを考慮し、下水汚泥の電子線殺菌とコンポスト化（促成堆肥化）、下水放流水の殺菌、脱臭や廃水処理等に用いた使用済み活性炭の再生、微量有機汚染物質の除去、汚泥脱離液の処理等、電子線照射による下水処理関連技術の開発を行ってきた。特に、電子線照射による汚泥の殺菌とコンポスト化の分野は、資源の有効利用の観点からも下水道関係者の関心が極めて高く、その技術の実用化が望まれていた。

このような状況に鑑み、「汚泥の電子線殺菌－コンポスト化プロセスの技術的課題と実用性評価、並びにその他の下水処理への電子線利用技術の適用性に関する評価」を行うため、昭和62年8月「電子線下水処理技術検討委員会」が設置され、検討・評価を開始した。昭和63年12月1日、理事長から電子線下水処理技術について、当時、日本原子力研究所で開始した下水汚泥コンポスト化パイロット試験の技術的評価を含め、その技術的・経済的評価に関する諮問を受けた。

上記諮問事項について、5か年にわたる試験・調査・検討・評価を行い、平成5年3月に答申が取りまとめられた。本報告書はこの答申をもとに電子線を用いた下水処理技術の内容とそれに対する評価の結果を放射線とその特徴に関する解説を加えて取りまとめた。

電子線下水処理技術検討委員会

委員長	左 合 正 雄	(東京都立大学名誉教授)
委員	柏 谷 衛	(東京理科大学教授)
	熊 沢 喜久雄	(東京農業大学教授)
	石 樽 顕 吉	(東京大学教授)
	石 川 忠 男	(日本下水道事業団 技術開発部長)
	稲 葉 紀久雄	(建設省 土木研究所 下水道部長)
	井 上 邦 弘	(新技術事業団 プロジェクト部長)
	西 口 勇	((社) 日本下水道協会 技術部長)
	山 本 毅	(東京都下水道局 計画部参事)
	吉 田 作 治	(横浜市下水道局 担当部長)
	荻 原 英 生	(群馬県土木部長)
	都 丸 徳 治	(茨城県土木部長)
	佐 藤 章 一	(日本原子力研究所 高崎研究所長)
	川 上 和市郎	(日本原子力研究所 高崎研究所 材料開発部長)
	大 野 新 一	(日本原子力研究所 高崎研究所 環境・資源利用研究部長)

- 幹事 徳永興公 (日本原子力研究所 高崎研究所
環境保全技術研究室長)
- 橋本昭司 (日本原子力研究所 高崎研究所
資源利用技術研究室長)
- 新井英彦 (日本原子力研究所 高崎研究所
主任研究員・環境保全技術研究室)

専門部会

- 部会長 柏谷衛 (東京理科大学教授)
- 専門委員 勝村庸介 (東京大学助教授)
- 竹島正 (日本下水道事業団 技術開発部総括主任研究員)
- 佐藤和明 (建設省 土木研究所 下水道部新下水処理研究官)
- 高橋正宏 (建設省 土木研究所 下水道部三次処理研究室長)
- 大味一夫 (新技術事業団 プロジェクト部 第1課長)
- 那須才 ((社)日本下水道協会 技術部 専門調査役)
- 内田真吾 (東京都下水道局 施設管理部 設備設計課長)
- 地田修一 (東京都下水道局 計画部 技術開発課長)
- 香林仁司 (横浜市下水道局 建設部 技術開発担当課長)
- 大竹建次 (群馬県土木部 下水道課長)
- 益子哲也 (茨城県土木部 下水道課長)
- 大野新一 (日本原子力研究所 高崎研究所
環境・資源利用研究部長)
- 田中隆一 (日本原子力研究所 高崎研究所
イオンビーム施設課長)
- 徳永興公 (日本原子力研究所 高崎研究所
環境保全技術研究室長)
- 橋本昭司 (日本原子力研究所 高崎研究所
資源利用技術研究室長)
- 宮田定次郎 (日本原子力研究所 高崎研究所
主任研究員・環境保全技術研究室)
- 新井英彦 (日本原子力研究所 高崎研究所
主任研究員・環境保全技術研究室)

(括弧内は、委員在任当時の役職)

目 次

1. 下水及び汚泥の処理と放射線照射	1
2. 汚泥の電子線殺菌とコンポスト化	8
3. 下水放流水（二次処理水）の殺菌	22
4. 使用済み粒状活性炭の再生	38
5. 微量有機汚染物質の分解	44
6. 汚泥脱離液の処理	48
7. 電子加速器利用の最適化の検討のために	53
8. 電子線法の安全性	55
9. 下水処理への放射線利用の実施例	56
10. 結 論	58
参考文献	59
用語集	62
参考資料	65

Contents

1. Ionizing Radiation for Treatment of Sewage and Sludge	1
2. Electron Beam Disinfection and Composting of Sludge	8
3. Disinfection of Secondary Effluent from Sewage Plant	22
4. Regeneration of Used Activated Carbon	38
5. Decomposition of Micropollutants	44
6. Treatment of Supernatant from Sludge Dewatering Process	48
7. For Optimization of Electron Accelerator Utilization	53
8. Safety of Electron Beam Methods	55
9. Examples of Actual Application of Radiation to Sewage Treatment	56
10. Conclusion	58
References	59
Technical Terms	62
Appendix	65

1. 下水及び汚泥の処理と放射線照射

1. 1 物質に対する放射線の作用

放射線は物質中を通過するとき、その物質に自らのエネルギーを与えていく。その結果、物質に化学的、物理的变化を生じさせる。表1に物質に対する放射線の主な作用とその利用を示す。放射線には微生物処理では分解できないような有機物をも分解したり、化学構造を変えたりする作用がある。例えば、水に放射線があたると、水が分解され、酸化力の強い活性種（OHラジカル等）が生成する。この作用を利用して、フェノールや染料等の微生物難分解性物質を放射線により分解あるいは脱色する研究が試みられた¹⁻⁵⁾。また、放射線の殺菌作用を利用することにより二次処理水や脱水汚泥の殺菌を行うことができる^{6, 7)}。

表1 放射線の主な作用とその利用

主な作用	利 用
重合反応、高分子材料の橋かけ 有機物や無機物の化学構造変化 有機物の酸化分解 微生物の殺滅 コロイド粒子の性質変化	高分子材料の製造、電線の耐熱化、表面塗装等 染色排水の脱色、NO _x 、SO _x の除去等 PCB、農薬等の有害物質の分解 食品、医療用具、下水汚泥等の滅殺菌 汚泥の沈降性、脱水性の改善

1. 2 放射線の種類

工業用あるいは研究用に使用されている放射線には、ガンマ線やX線等の電磁波と、アルファ線、電子線、中性子線等の粒子線とがある。これらの中で大規模に用いられているのはガンマ線と電子線である。ガンマ線はコバルト60やセシウム137から、また、電子線は電子加速器により得られる。図1及び2にガンマ線照射施設並びに電子線照射施設の例を示す。

ガンマ線は電磁波の1種であり、電子線はその名の通り電子の流れであるが、物質に対する照射効果はほとんど同一であることが知られている。表2にガンマ線と電子線の性質の比較を示す。

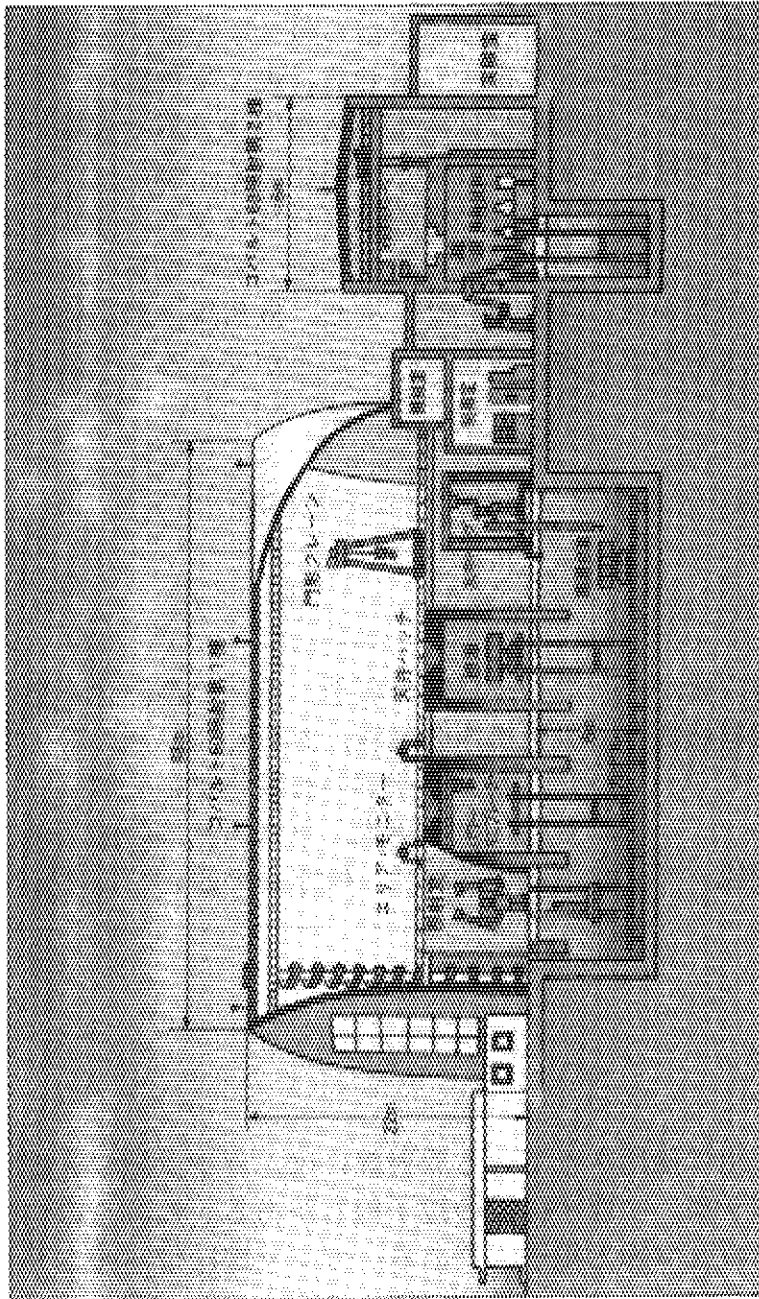


図1 ガンマ線照射施設の概念図

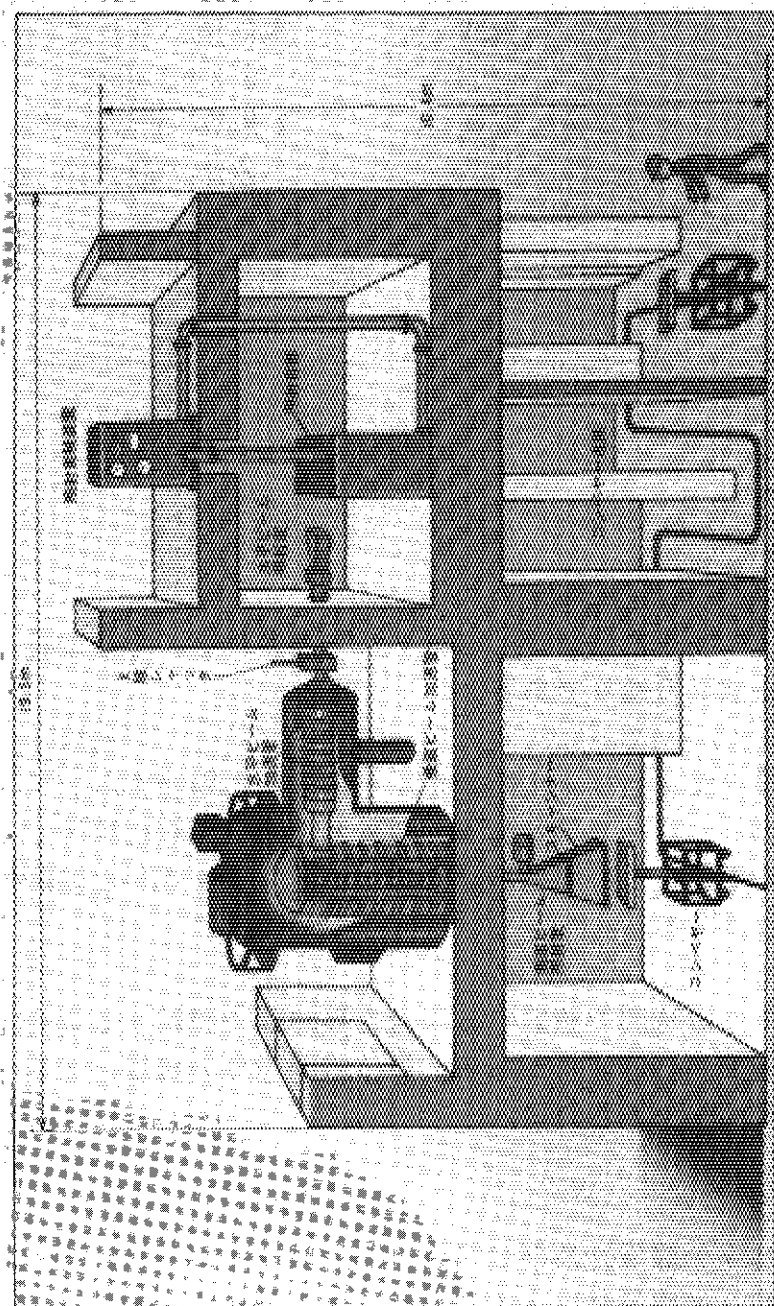


図2 電子線照射施設の概念図

表2 電子線とガンマ線の比較

	ガンマ線	電子線
本性 エネルギー	電磁波 コバルト60で1.25 MeV	荷電粒子 主に用いられているもので 0.3~5 MeV
透過性	水中11cmで半分に減衰	2 MeVのエネルギーのとき 水中で最大10 mm
発生源 照射の制御	コバルト60, セシウム137 水中からの取出しならびに 水中への格納	電子加速器 電源のON-OFF

1. 3 線量評価

1) 吸収線量の単位

物質に対する放射線の吸収量はグレイ (Gy) で表される。その定義と他のエネルギー単位との関係は次の通りである。

- ・ 1 Gy の線量は物質 1 kg 当り 1 J のエネルギー吸収に相当する。
- ・ これは、水 1 トン当り、0. 278 kWh のエネルギー吸収に相当する。
- ・ これまで吸収線量の単位として用いられてきたラド (rad) との関係は $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ である。

同一の線量であっても短時間で照射する場合と長時間で照射する場合とでは、引き起される反応に差が生じる場合がある。単位時間当りの線量は線量率と呼ばれ、一般に $\text{kGy}/\text{時}$ 、等で表される。

2) 線量測定

線量の測定にはフリッケ線量計及びCTA (三酢酸セルロース) 線量計が通常用いられている。フリッケ線量計は水中における第1鉄イオンの放射線による酸化を利用したもので測定精度が高い。また、CTA線量計は照射による三酢酸セルロースフィルムの紫外部における吸収の変化を利用しており、前者に比べて取扱が容易である。

1. 4 物質中における線量の分布

電子線照射の場合、図3に示すように、線量は表面からの厚さ（透過距離）が大きくなるに従い、一旦は増加してピークを経た後に減少する。ピークを与える厚さと最大透過距離は電子線が持つエネルギーと共に大きくなる。このエネルギーはMeV単位で表され、1MeVは電子が1MVの電圧で加速された時に得られるエネルギーである。表面での線量と等しい線量が得られる厚さを有効飛程と呼ぶ。

一方、ガンマ線照射時における物質中の線量分布は図4に示すように表面からの厚さとともに指数関数的に減少する。しかし、電子線の場合と比較して、その減少は緩やかである。

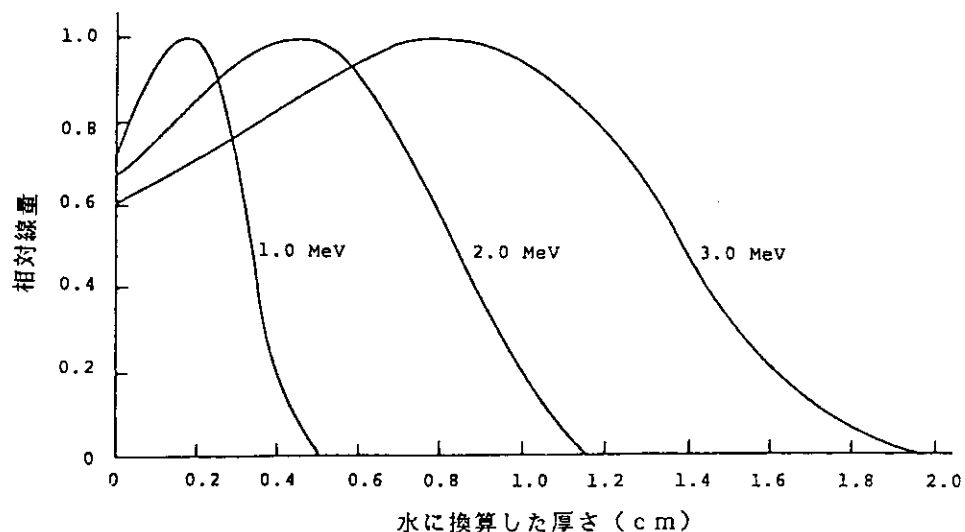


図3 電子線の透過距離と強度

1. 5 照射用線源の選択

照射用線源の選択に当たっては次の点を考慮することが必要となる。

- ①必要とする出力が容易に得られること。
- ②建設費、処理費が安いこと。
- ③保守、安全性の点で優れていること。

①について、現在では800kWという大出力の電子加速器が使用可能であり、照射の幅も最大4mまで可能である。コバルト60でこれだけの出力を得るためには、5千万キュリー以上の膨大な量が必要である。

- ②について、大量処理を行うほど、単位処理量当りのコストは安価となる。特に電子加速器では、1台当りの出力が大きいものほど経済的である。
- ③について、コバルト60の場合には2m以上の厚さのコンクリート遮蔽が必要である。電子線の場合には透過能力は小さいが、電子線が物質にあたった時に発生する制動X線を遮るコンクリート壁が必要となる。しかし、電子加速器は出力密度が高く、設置に広い場所を必要としないこと、電源を切れば完全に放射線を停止できる点で優れている。

電子加速器は以上のような優れた特長を持っているが、最大の難点は電子線の透過能力が低いことである。このため、照射には特殊な技術を必要とする。ただし、照射時のエネルギーを大きくすることにより、この難点は多少解消される。

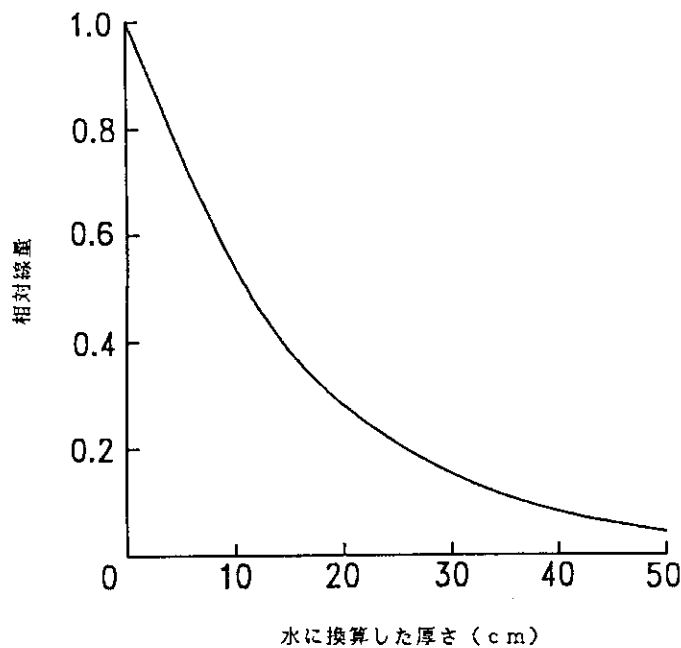


図4 コバルト60ガンマ線の通過距離と強度

1. 6 下水及び汚泥処理への電子線利用の可能性

下水及び汚泥処理への電子線の利用としては下水処理水（簡易処理水及び二次処理水）の殺菌と難分解性有機物の分解処理、汚泥の沈降性と脱水性の改善^{8, 9)}、汚泥脱離液中の有機物除去と脱色等が挙げられる。この他にも脱臭あるいは下水の高度処理に使用した粒状活性炭の再生の可能性も挙げられる。図5には下水処理場を中心として、下水及び汚泥の処理への電子線利用の可能性をフローチャートの形で示した。

2. 汚泥の電子線殺菌とコンポスト化

2. 1 はじめに

汚泥を緑農地で土壌改良材として利用するためのコンポスト化は、下記の条件を満たすために必要となる。

- a) 汚泥中の病原性微生物，寄生虫卵，植物病原菌，雑草の種子等の殺菌並びに不活化を図ること。
- b) 汚泥の運搬，貯蔵あるいは施用にあたっての悪臭を防ぐこと。
- c) 易分解性有機物質の安定化を図り，土壌中での汚泥の分解を制御し，農作物への障害を防ぐこと。
- d) 含水率を低下させて取扱い易くすること。

これらを達成するため，一次発酵プロセスでは一般に急速発酵形式がとられ，この目的のための装置が開発されており，既に実用に供されている。このプロセスで既開発装置を用いた場合には，発酵期間は10～14日とされており，その間において，汚泥の殺菌・衛生化を図ることを主たる目的として，65℃以上の温度を2日以上持続させることが必要とされてきた¹⁰⁾。

放射線が殺菌や殺虫に有効であること，また，殺菌に必要な線量で殺虫並びに雑草種子の発芽抑制も同時に可能であることは既に知られてきた¹²⁾。放射線による脱水汚泥の殺菌は，熱殺菌に比べて，悪臭が発生せず，加えるエネルギーも少なく，薬剤のように毒性が残留することもない等の特徴を有する。

2. 2 技術の概要

原研では，図6に示すように，わが国の大多数の下水処理場で発生するポリマー添加汚泥脱水ケーキ（以下，本章では単に汚泥と呼ぶ）を電子線により殺菌した後，通気性改良材並びに種菌を加えて発酵させ，比較的低温でコンポスト化を行うという新しい汚泥処理技術，“電子線殺菌-コンポスト化法”（以下，本章では電子線法と呼ぶ）の開発を行ってきた。この方法により，従来よりも短期間でコンポスト化が可能であり，且つ，病原菌や寄生虫卵を含まないクリーンなコンポストが得られることを明らかにした。さらに，製品コンポストを加えて造粒することにより通気性改良材を加えることなく，コンポスト化できることを明らかにした。

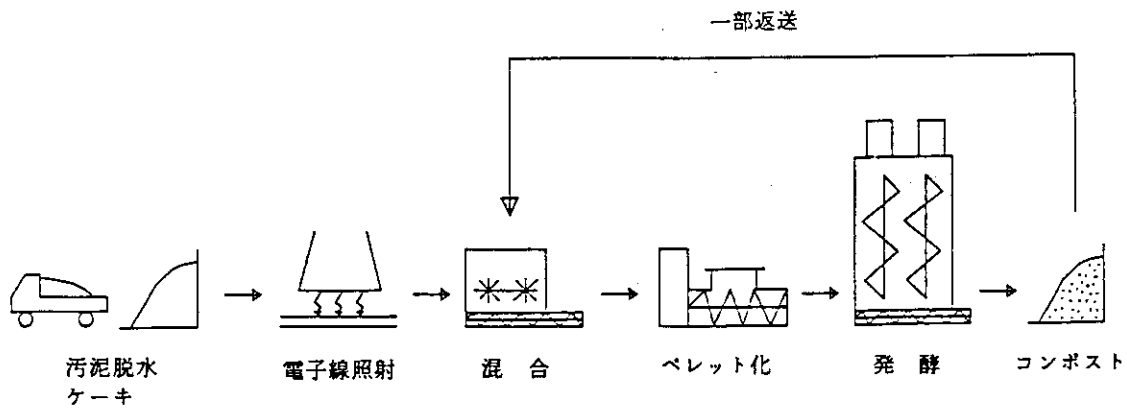


図6 電子線殺菌-コンポスト化法の概念図

2. 3 調査結果及びその技術的評価

2. 3. 1 小規模装置による試験

1) 汚泥の電子線殺菌

コバルト60のガンマ線並びに電子線を用いた汚泥の殺菌試験により次のことを明らかにした¹¹⁾。

- ①汚泥中の総菌数は、通常1グラム当り $10^8 \sim 10^9$ のオーダー、病原菌汚染の指標である大腸菌群数は、 $10^7 \sim 10^8$ のオーダーであった。
- ②図7に示すように、汚泥に5 k Gyの電子線を照射すると総菌数を4オーダー程度減少させることができ、また、大腸菌群は2 k Gyの照射で検出されなくなった。
- ③ガンマ線と電子線とでは、その効果にほとんど差が見られなかった。

2) 殺菌汚泥のコンポスト化

殺菌汚泥中の易分解性有機物を安定化するためのコンポスト化に影響を及ぼす因子について10～20グラムの汚泥を用いた小規模装置による試験で発酵に伴う炭酸ガスの発生量等の変化の解析(図8)並びに発酵産物の分析を行い、次のことを明らかにした¹²⁻¹⁶⁾。

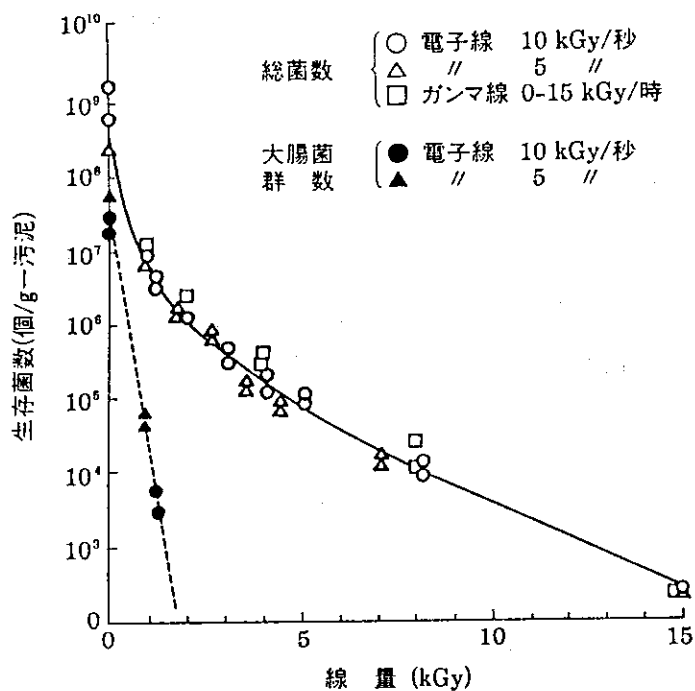


図7 放射線照射による汚泥中の総菌数と大腸菌群数の低減

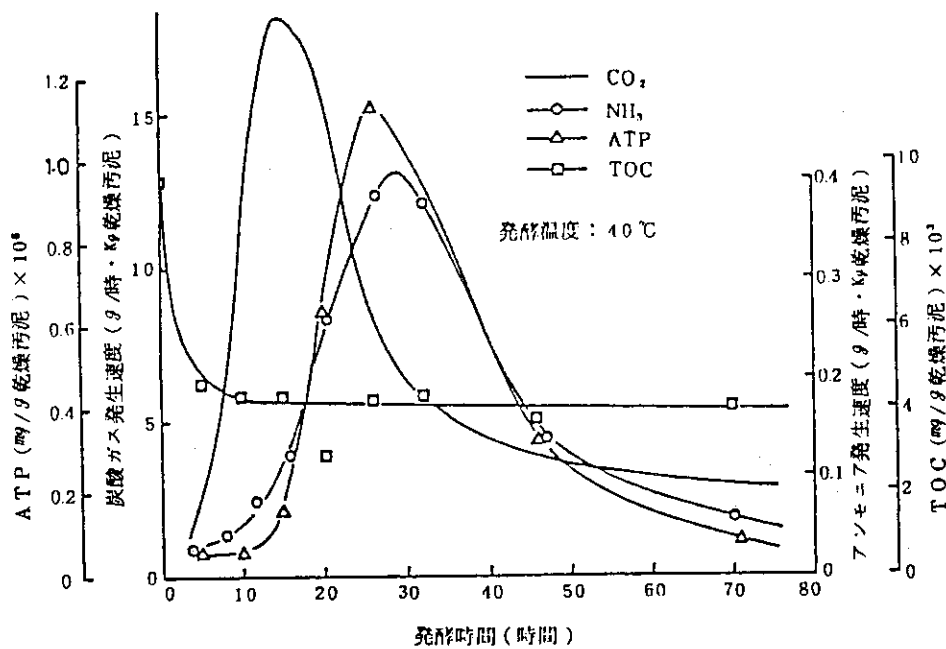


図8 好気性発酵に伴う炭酸ガス、アンモニア濃度の変化

- ①汚泥中の有機物が微生物によって分解されて炭酸ガスとして放出される量は、40～50℃において最も大きくなった（図9）。
- ②図10に示すように、初期pHが中性から弱アルカリ性の場合において炭酸ガスの発生は短時間でピークに達し、またそのピーク値も大きくなった。
- ③汚泥をコンポスト化するためにはあらかじめペレット化するのがよい。そしてペレットの粒子内部にまで発酵に必要な酸素を供給するためのペレット径は5mm程度がよい。
- ④種菌としては製品コンポストを返送利用できる。

上記条件を保った発酵により、図11に示すように非常に短期間で発酵に伴う炭酸ガスの発生が止まり、図12に示すように抽出液中の易分解成分濃度も減少しコンポスト化が終了することが分かった。

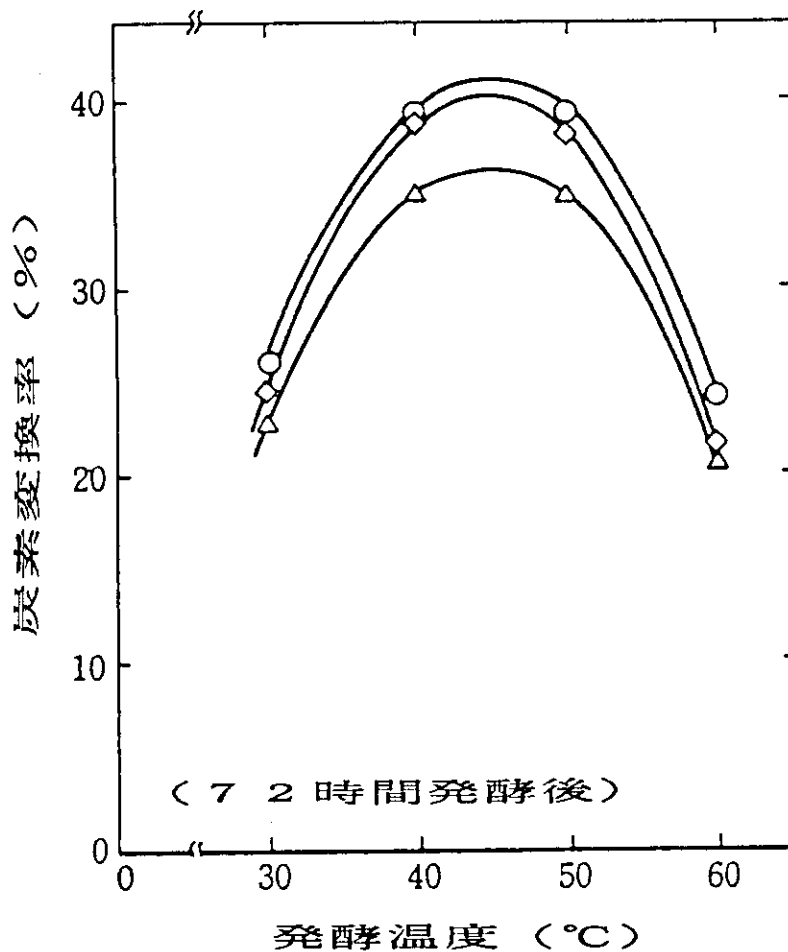


図9 炭素変換率と発酵温度との関係

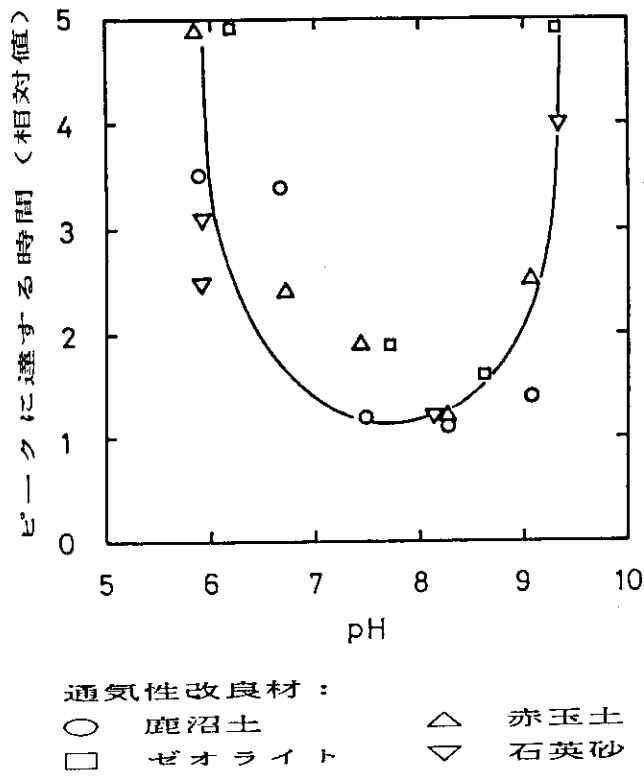


図10 pHと炭酸ガス発生ピークに達する時間との関係

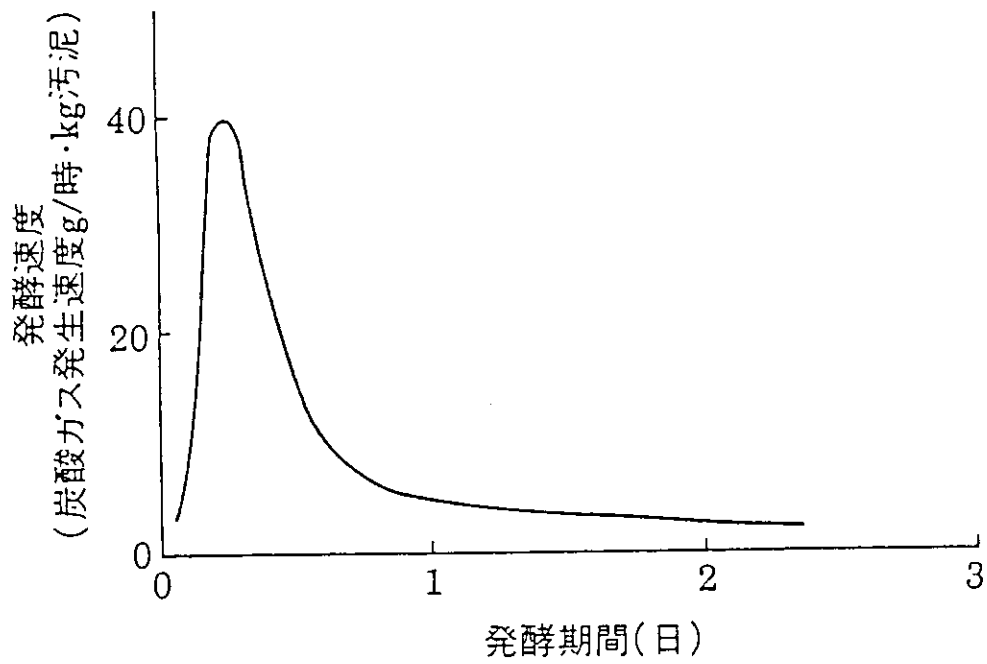


図11 照射汚泥の発酵に伴う炭酸ガス発生速度の変化

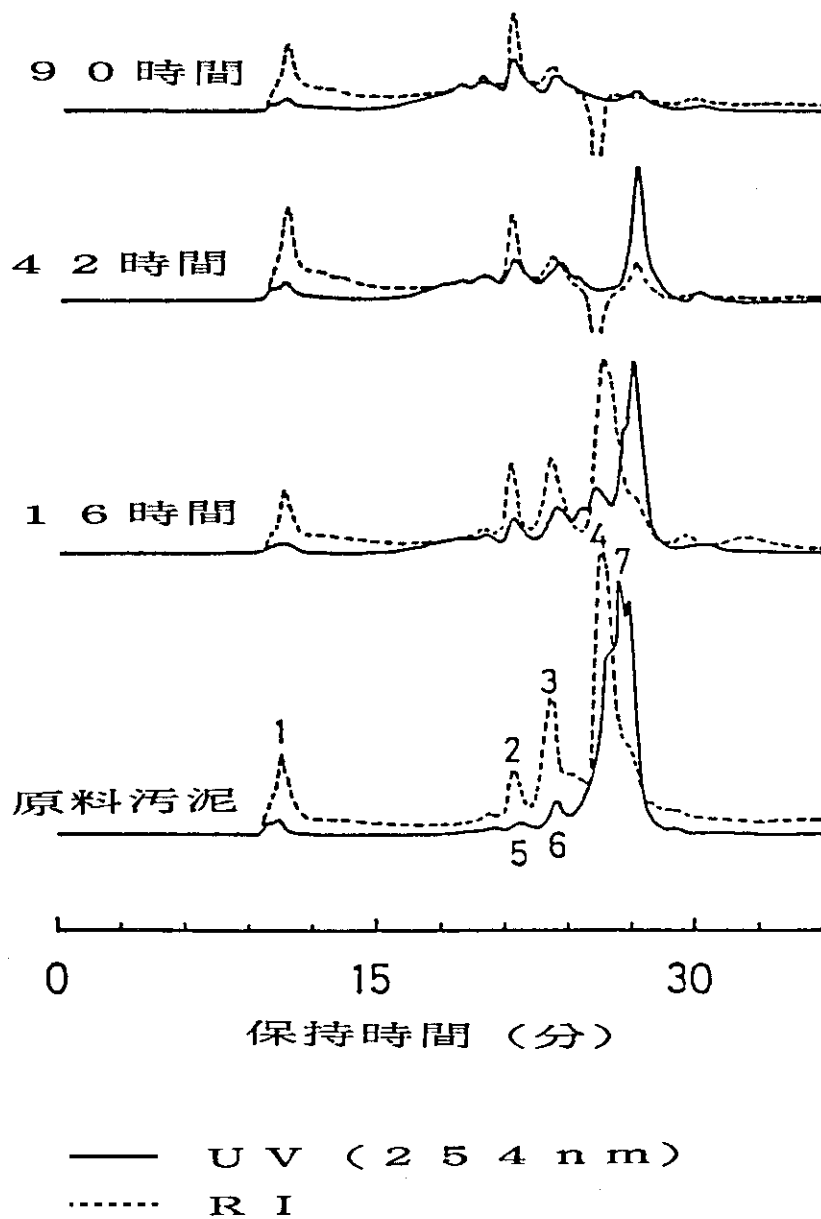


図12 発酵に伴う照射汚泥コンポスト抽出液組成の変化

2. 3. 2 パイロットプラント試験

小規模試験の結果に基づき、昭和62年から9月末から平成元年3月末まで、高崎市阿久津下水処理場の敷地を借り、電子線殺菌汚泥コンポスト化パイロットプラント試験を行った¹⁷⁾。試験の基本方針は次の通りであった。

- ①原料汚泥の殺菌には原研で既に所有している電子線用汚泥殺菌照射試験装置を用いる。殺菌を確実にするために、線量は5 kGyとする。
- ②パイロットプラント試験装置の処理規模は、電子線用汚泥殺菌照射試験装置の処理能力を考慮して500~600 kg/回とする。
- ③原料の通気性を上げるために小規模装置では土壌改良材として市販されているパーライトを用いた。しかし、電子線法に限らず、処理量が多い場合には、通気性改良材の入手は非常に困難となる。そこで、パイロットプラント試験では、照射汚泥と返送コンポストを混合して含水率を調節した後、造粒（ペレット化）する方式を採用する。
- ④発酵熱を除去し、発酵槽内を最適温度を40~50℃に保つために、発酵槽への通気量を調節し、原料中の水分の蒸発による熱除去の速度を調節することにより、コンポスト中の水分含量を低下させる。
- ⑤通気並びに温度分布を均一にするため、発酵槽内の攪拌を頻繁に行う。

図13にパイロットプラント建屋の外観、図14に原料造粒装置、また、図15にコンポスト化槽内部の様子を示す。

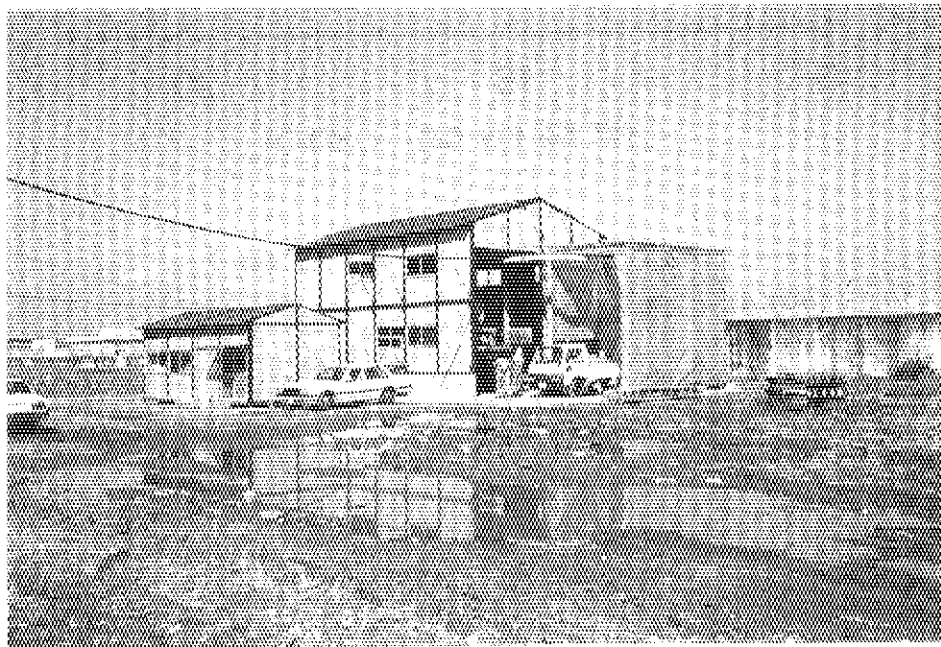


図13 照射汚泥コンポスト化パイロットプラント設備の外観

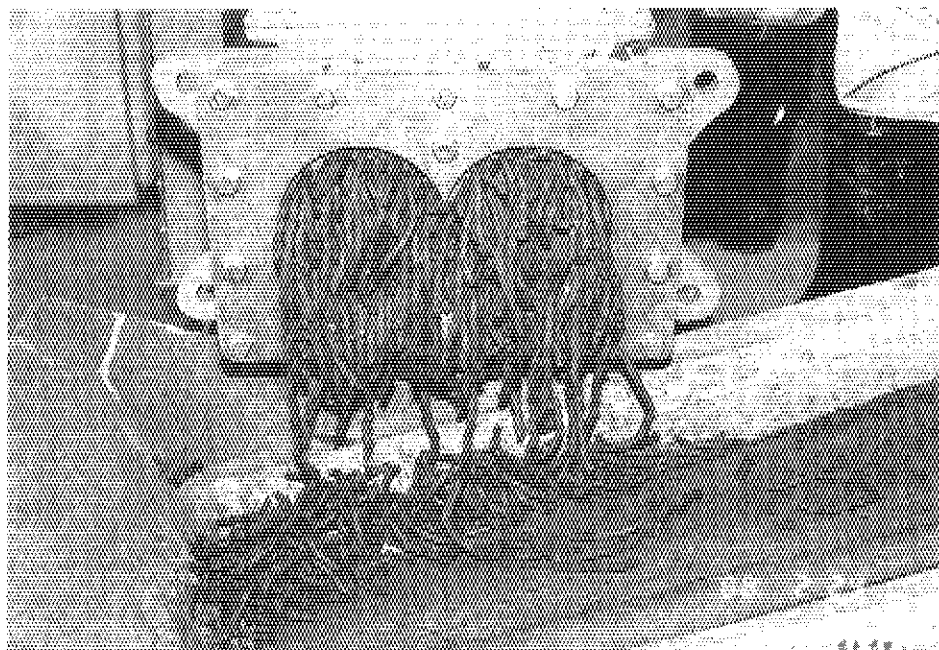


図14 コンポスト原料の造粒装置

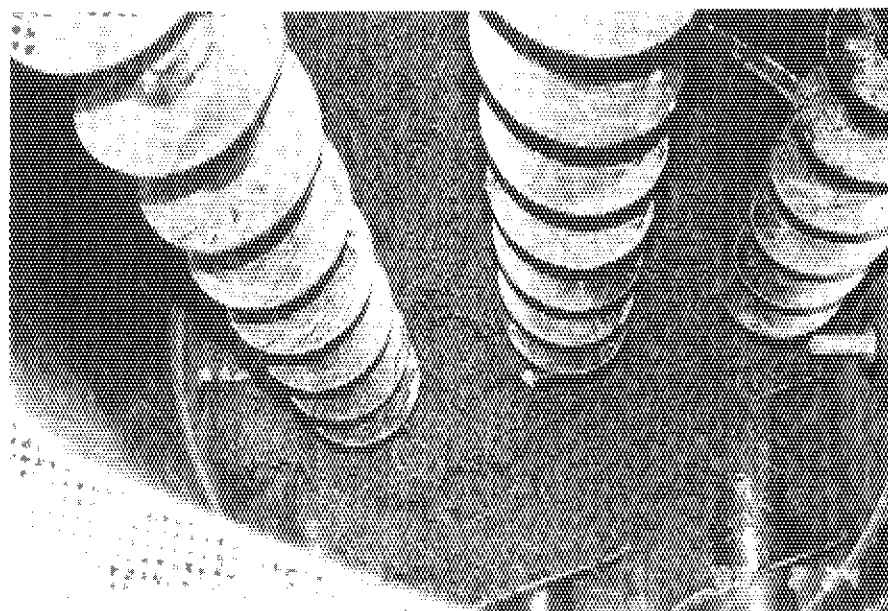


図15 コンポスト化槽内部

試験結果及び評価は次のとおりである。

1) 汚泥の電子線殺菌

1. すでに述べたように、汚泥を殺菌するための放射線源としては、コバルト60と電子加速器が一般的である。現在では大出力の電子加速器を容易に製作することができ、大量処理に適している。しかし、コバルト60のガンマ線に比べて電子線の透過能力は小さい。例えば、電子の持つエネルギーが2 MeVのとき、最大飛程は水に換算すると10 mm程度である。また、有効飛程は6～7 mmである。そこで、電子加速器を照射用線源として用いる場合には、図16に示すように汚泥を平型ノズルから押し出す等の方法により薄層化する。原研における試験によれば、コンポスト化パイロットプラント試験用の汚泥500～600 kg/回を20回程度にわたって大きなトラブルなしに薄層化し、照射することが可能であった。

なお、モデル設計によれば、処理水量100,000 m³/日の下水処理場から発生する汚泥(含水率78%)は約70トン/日と推定された。この汚泥に5 kGyの電子線照射を行う場合に必要な電子加速器の出力は約7 kWである。

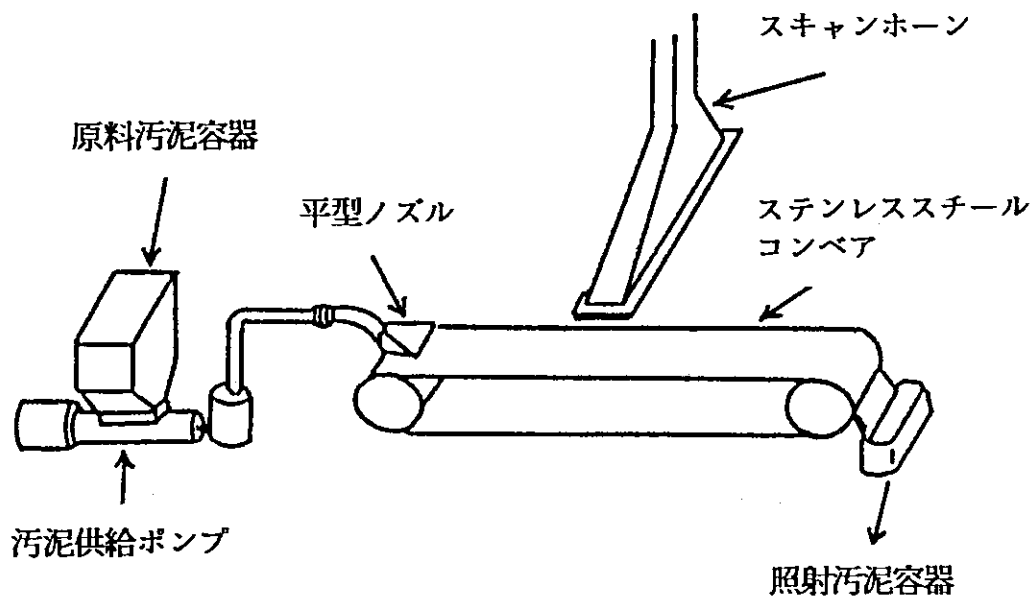


図16 電子線による汚泥脱水ケーキの照射

2) 電子線殺菌汚泥のコンポスト化

パイロットプラント試験では大規模のコンポスト化処理において問題となる粉がら等の通気性改良材の調達を製品コンポストの返送と原料(汚泥, 種菌並びに

通気性改良材を混合したもの)の造粒という操作により不要にできることを明らかにすることができた。このときのコンポスト原料の含水率は50%、ペレットの粒径は7mm程度である。また、通気量の調節並びに攪拌による発酵最適温度への制御が可能であることを見出した。また、冬季においてコンポスト原料の含水率を下げる等、年間を通しての安定運転に必要な条件を明らかにした。すなわち、含水率を50%に調整したコンポスト原料を7mm程度に造粒することとすると、発酵に必要な酸素を原料粒子内部にまで十分に供給できるとともに、40~50℃の最適温度で発酵させ得る。これにより、コンポスト化期間を従来法の1/3程度に短縮することができることが見い出された。

電子線法では、予め汚泥を殺菌するため、コンポスト化作業を安全に行うことができ、また、得られたコンポストは病原菌の指標である大腸菌群を含まず、極めて衛生的であることが認められた。

しかし、この発酵期間短縮にはやや高度な技術が必要とされる。まず、通気の確保については、コンポスト原料の粒径を小さくすることが必要となる。また、この粒径を維持するため、原料の含水率を50%付近に調整し、粒子相互の接合による塊状化を防ぐ。発酵温度が60℃以上の高温になると、発酵に関与する微生物の活性が著しく低下するため、発酵に最適な温度40~50℃を維持する。このため、通気量の調節による発酵熱の除去と攪拌による発酵槽内温度分布の均一化に注意を要する。パイロットプラント試験の結果によれば、この方法により、発酵後の含水率を30%程度に低下させることができた。

コンポスト化装置は年間を通じて安定運転が要求される。しかし、晩秋から冬季にかけては外気温が低下し、汚泥の脱水性の低下に基づく粘性増加の性状変化がおこることがある。これらの変化は、通常、発酵に悪影響を及ぼす。したがって、外気温の低下や汚泥の性状の変動を速やかに把握し、適切に対処することにより、年間を通じた安定な発酵状態が得られるようにする。

電子線殺菌による汚泥のコンポスト化の適用については、パイロットプラント試験を行った高崎市阿久津下水処理場の汚泥のみでなく、群馬県県央水質浄化センター、東京都南多摩処理場等の汚泥での試験結果からみて、高分子凝集剤を添加して脱水した汚泥(ポリマー汚泥)ケーキに広く適用できると考えられる。

2. 3. 3 製品コンポストの農作物等への施用効果

昭和63年までに電子線照射汚泥コンポストの農作物への施用効果が群馬県農業総合試験場において実施され、電子線照射汚泥コンポストの施用効果が従来法コンポストと較べて同程度かそれを上回ることが明らかにされた。平成元年度から平成2年度にかけて群馬県農業総合試験場で引き続き施用試験が行われ、さらに詳細なデータが得られた。平成元年度の施用試験では、高崎市阿久津下水処理

場内に設置したパイロットプラントで生産された電子線照射汚泥コンポストを用いている。試験品目は、水稲、野菜類並びに切花である。ハウレンソウによるポット試験結果の一例を表3に示す。各試験品目の施用試験結果の概要は次の通りであった^{18, 19)}。

表3 電子線照射汚泥コンポストのハウレンソウ施用試験

試験区	コンポスト施用量 (トン/10a)	草丈 (cm)	地上部重 (g)	相対重量 (%)
1	0	15.9	65.0	100
2	2.5	20.0	100.0	154
3	5.0	19.3	85.5	132
4	7.5	18.8	78.0	120
5	10.0	18.6	79.5	122

1/2, 000aポット, 4連

1) 水稲に対しては、10アール当たり2~4トンの施用で標準施肥区に比べ、生育が極めて旺盛になり、玄米量も増収となった。

2) ハウレンソウ、コマツナ等の野菜については、2.5~5トンの施用で生育が旺盛になることが認められた。

3) 切花の宿根アスターについては、4~8トンの施用で分岐数が増加し、茎長も20%程度大きくなった。

平成2年度の施用試験では、群馬県奥利根水質浄化センターのコンポスト化施設を借用して、高崎市阿久津下水処理場の汚泥を原料として電子線照射汚泥コンポストを製造した。群馬県農業総合試験場の協力により行われた水稲並びにハウレンソウ、コマツナ等の野菜への施用試験では、前年度同様に、作物に対して良好な結果が得られた。

以上の施用試験の結論として、電子線照射汚泥コンポストは、従来法コンポストと同程度かそれを上回る効果があり、従来法コンポストへの代替え利用が十分可能であることが確認された。

2. 4 経済的評価

ポリマー添加脱水汚泥ケーキ発生量が10トン/日から200トン/日の規模について、電子加速器で殺菌後、横型スクープ式発酵槽あるいは縦型発酵槽でコンポストを製造する場合の建設費と維持管理費を試算した。線量を5 kGyとし、終夜運転により照射処理を行う場合に必要な出力は10トン/日のケースで約1 kW、200トン/日のケースで約20 kWとなる。表4に試算結果を示す。

1) 建設費

汚泥コンポストの製造を一次発酵までとし、製品コンポストの袋詰めを行わない場合について、横型スクープ式発酵槽で汚泥コンポストの製造を行うことを想定した計算例によれば、プラント建設費は、製造規模50トン/日のケースで約22億円と試算された。製造規模の増加に対する建設費の増加の割合は小さい。従来法との比較では、25トン/日以下では従来法が安価であり、50トン/日以上では電子線法が安価となる。縦型発酵槽を想定した計算例によれば、プラント建設費は横型スクープ式発酵槽よりも割高となるため、処理規模が25トン/日以上では電子線法が若干安価になる。

2) 維持管理費

電力、薬品等のユーティリティーについては、電子線法では50トン/日製造のケースで約4,500円/トンとなり、規模が大きいほど割安となる。従来法と比較すると電子線法が安価であり、この差は製造規模が大きくなるに従って大きくなる。ユーティリティーに人件費、設備償却費及び補修費を加えた維持管理費は、横型スクープ式による電子線法で製造規模50トン/日のケースで約2万円/トンとなる。従来法との比較では、25トン/日以下では従来法が安価であり、それ以上では電子線法が有利である。縦型発酵槽で製造規模25トン/日で従来法と電子線法とではほぼ同じであり、これより小規模では従来法、大規模では電子線法が安価となる。

3) その他

製造プラントの建設用地については地区の状況によって異なることから、建設費の試算には含まれていない。電子線法では発酵槽が従来法に比べて小規模となる。例えば、処理規模50トン/日の時で、建設用地は約2,600m²となり、従来法の4,600m²に対して約1/2程度となる。従って、地価の高い都市部あるいは、その近郊では電子線法がさらに有利となる。そこで、従来法を採用している既設の製造施設の拡張が困難な場合、電子線法を適用することとすると、既設の製造能力アップを図ることが可能となる。

表4 電子線照射汚泥コンポスト化装置の建設費並びに維持管理費

[建設費]		単位 百万円				
発酵槽 形式	処 理 方 式	製造規模 (t/日)				
		10	25	50	100	200
横 型 スクープ	電子線法	1,150	1,400	2,200	3,200	5,100
	従 来 法	950	1,300	2,300	3,700	6,500
	造 粒 法	850	1,200	2,150	3,200	5,700
豎 型 発酵槽	電子線法	1,300	1,500	2,500	3,400	5,500
	従 来 法	1,200	1,600	2,900	4,500	7,800
	造 粒 法	1,100	1,500	2,600	4,100	7,200

造粒法：電子線法の場合と同様、コンポスト原料の粒径を7mmに造粒，発酵。

[維持管理費]		単位 百万円/年				
処理法	内 訳	製造規模 (t/日)				
		10	25	50	100	200
電子線法	1-ユーティリティ-費	23	44	84	157	307
	人件費	24	30	30	42	60
	設備消却費	101	142	223	326	520
	補修費	12	14	23	45	54
	合 計	160	230	360	570	940
従 来 法	1-ユーティリティ-費	24	49	92	184	363
	人件費	24	30	30	42	60
	設備消却費	94	128	225	359	615
	補修費	8	13	22	35	62
	合 計	150	220	370	620	1,100
造 粒 法	1-ユーティリティ-費	23	47	91	179	358
	人件費	24	30	30	42	60
	設備消却費	85	112	219	318	555
	補修費	8	11	20	31	57
	合 計	140	200	360	570	1,030

2. 5 評価のまとめ

- 1) 汚泥を（脱水ケーキ）薄層化することにより効果的な電子線殺菌が行える。従って、薄層化装置と電子加速器とを組み合わせることにより、汚泥の効果的な殺菌処理が可能となる。
- 2) コンポスト原料の造粒，発酵槽内温度の制御，攪拌等の操作を行うことにより，発酵期間を従来法（10～14日間）の約1/3に短縮できる。
- 3) プラント建設費と維持管理費は製造規模25～50トン/日を境として，これより小規模の場合には従来法，大規模の場合には電子線法が有利である。ユーティリティーについては，電子線法がやや有利である。
- 4) 電子線照射汚泥コンポストの施用効果は，従来法コンポストと同程度かそれを上回ることがわかり，従来法コンポストとの代替が可能であることが見い出された。

3. 下水放流水（二次処理水）の殺菌

3. 1 はじめに

下水処理場から公共用水域への処理水等の放流は、下水道法によって大腸菌群数は3,000個/mlに制限されており、放流前に塩素により殺菌処理されている。しかし、この殺菌処理ではトリハロメタン等の有機塩素化合物の生成が懸念されており²⁰⁾、これに代る殺菌技術の開発が望まれてきた。これまでにオゾン法や紫外線法等が検討され、実用化された例もある²¹⁾。しかし、オゾン法では排ガスの処理が必要であり、処理水にオゾン臭が残るなどの問題がある。紫外線法ではランプ表面に付着するスライムの除去が必要である。また、殺菌効果が懸濁物質に影響されたり、大量処理が困難等の問題も有している。

3. 2 技術の概要

電子線による下水の殺菌に関しては、米国ボストン市のディアアイランド下水処理場で大規模な試験が実施されてきた^{22, 23)}。現在は、マイアミ市下水処理場で試験が行われている²⁴⁾。下水放流水は年間80億m³（昭和62年）²⁵⁾を越すと言われており、量的に安定した水資源として期待されているが、下水放流水を再利用するためには、目的に応じた高度処理が必要であり、電子線照射はこの分野でも利用が期待できる。

原研では、下水放流水の殺菌技術としての電子線の実用性を検討するため、ビーカースケール並びに小型試験装置による試験を実施するとともに、各種調査、検討を行った。ここでは、本試験で得られた結果について、技術的、経済的見地から評価した結果を述べるとともに、実用化する上で重要な検討課題の一つである電子加速器の信頼性についても調査を行った。

電子線による二次処理水の殺菌技術の実用性を明らかにするため、二次処理水の水質や電子線照射の条件が殺菌効果に及ぼす影響を調べた。ビーカースケールの回分式試験及び小型試験装置（最大処理能力10.8m³/時）を用いた流通式試験により殺菌効果を検討した⁶⁾。

3. 3 調査結果及びその技術的評価

3. 3. 1 回分式殺菌試験

回分式試験では、高崎市の下水処理場から採取した二次処理水に一次処理水（ 10^4 個/ $m\ell$ の大腸菌を含む）を10%程添加して大腸菌群数を $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ 個/ $m\ell$ に調整したモデル処理水（COD10~12mg/ ℓ ，SS2~5mg/ ℓ ，pH~7）を使用し，COD，SS，DO及びpH等の水質，並びに照射温度，水深等の照射条件が殺菌効果に及ぼす影響について検討を行うとともに，ウイルスについても大腸菌を宿主とするバクテリオファージを用いて検討した。このモデル処理水の水質は一般的な未殺菌の下水二次処理水の水質に類似していた。

試験は，硬質ガラス製のシャーレに所定の水深になるようにモデル処理水を入れ，垂直方向から所定の強度の電子線（2MeV）を照射することにより行った。大腸菌群と一般細菌については菌数測定を行い，ファージは，宿主菌としてE. coli K-12 LE392を用いて，プラーク形成法により測定を行った。

(1) 電子線による殺菌及びウイルス不活化の効果

モデル処理水に電子線を照射すると，大腸菌群の生残率（初期菌数に対する照射後の菌数の比率， N/N_0 で表わす）は吸収線量に対してほぼ指数関数的に減少し，電子線が高い殺菌効果を有することが確認された。有効な液深の範囲（0.35 cm/MeV以下）において，モデル処理水は0.25kGyの線量で大腸菌群数を下水道法による放流水の大腸菌群数の基準値の1/10以下，100~200個/ $m\ell$ にまで減少できることが明らかになった。一般細菌に対しても大腸菌群とほぼ同様な殺菌効果を有することが認められた。

ウイルスの不活化については，同じ0.25kGyの線量を照射することにより，下水放流水中のウイルス（約10PFU/ $m\ell$ ）を検出限界以下にできることも確認した。図17は，0.1~0.8kGyの線量を水深6mm及び8mmの試料に照射した時の大腸菌群とバクテリオファージの生残率を示す。ウイルスの不活化は大腸菌群の殺菌よりも困難であるが，試験を行った下水処理水中のウイルス数が大腸菌群に比べて著しく少なかったことから，大腸菌群の殺菌線量程度の線量で検出限界以下に不活化できた。ウイルスの塩素による不活化では，通常の殺菌に比べ高濃度の塩素に長時間接触させる必要があり，比較的低い線量を用いてのウイルス不活化は電子線法の特長の一つであるといえる。

(2) 殺菌効果に及ぼす水質の影響

殺菌効果に及ぼす水質の影響を明らかにするため、次に示す水質の濃度範囲について殺菌効果を調べた。

化学的酸素要求量 (COD) : 5 - 50 mg/l,
 浮遊物 (SS) 濃度 : 3 - 40 mg/l,
 pH: 5 - 9, 水温: 10 - 26°C,
 溶存酸素 (DO) 濃度 : 0 - 40 mg/l
 [0 - 8 mg/l : 空気吹込み]
 [10 - 40 mg/l : 純酸素吹込み]

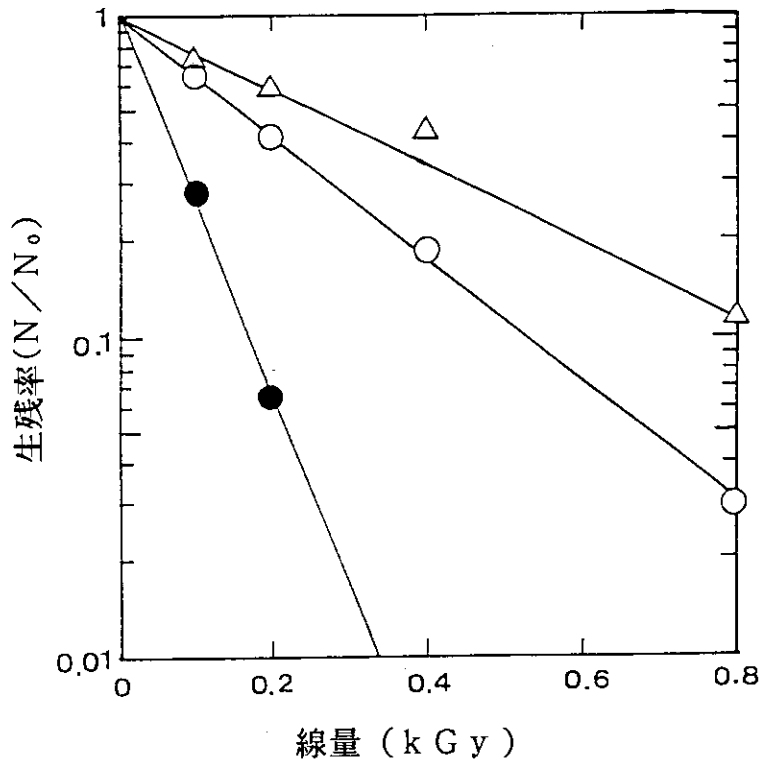


図17 電子線照射による下水一次処理水中の大腸菌群数の減少とウイルスの不活化

大腸菌群数 (初期値 35, 500個/ml)

● : 水深 6mm

COD : 31 mg/l

バクテリオファージ (初期値 505個/ml)

○ : 水深 6mm

△ : 水深 8mm

電子線 : 2 MeV, 0.2 ~ 0.4 mA

その結果、CODの殺菌効果に及ぼす影響については、線量を変化させて調べた結果、図18に示すように、 $10\text{ mg}/\ell$ 以下では殺菌効果が若干高くなるものの、一般的な二次処理水のCOD濃度の範囲では、影響はないことが明らかになった。しかし、COD濃度はSS濃度とも関係があり、CODの影響を論ずるにはSSの影響も考慮すべきである。別途、SSの殺菌効果に及ぼす影響を検討した結果では、この影響は無視し得ることが確認された⁶⁾。従って、電子線殺菌ではCODとSSの影響は考慮しなくてよい。これに対して、オゾンや紫外線による二次処理水の殺菌では、殺菌効果がCODやSSに影響されると言われてきた²¹⁾。

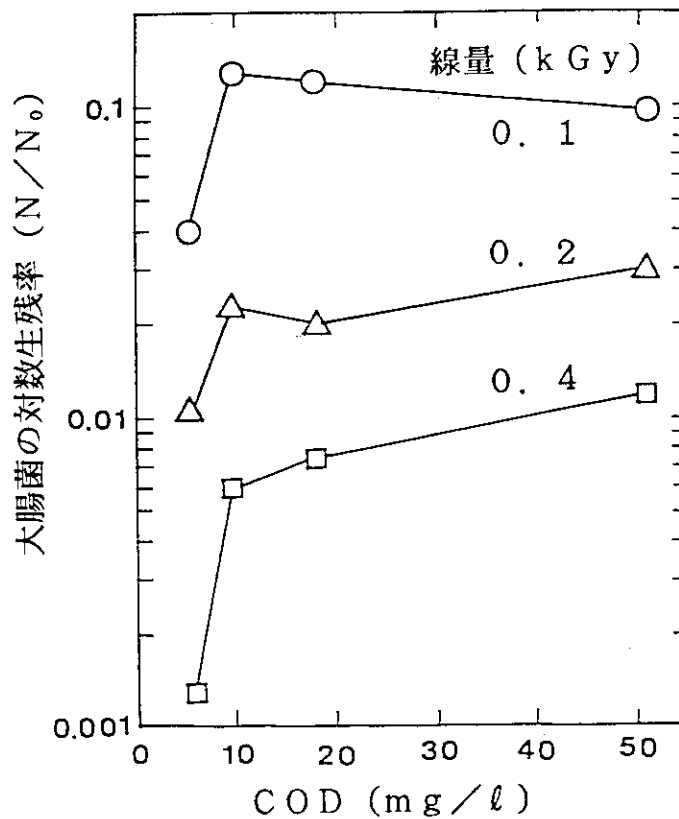


図18 電子線殺菌における大腸菌群生残率に及ぼすCODの影響

$N_0 = 1.4 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^5$ 個/ m^3

SS = 0.6 ~ 36 mg/ℓ , 液深: 8 mm

またDOの影響についての実験結果を図19に示す。下水二次処理水のDOは通常 $5\text{ mg}/\ell$ 程度であるので、DOの影響は無視し得るとしてよい。試料の

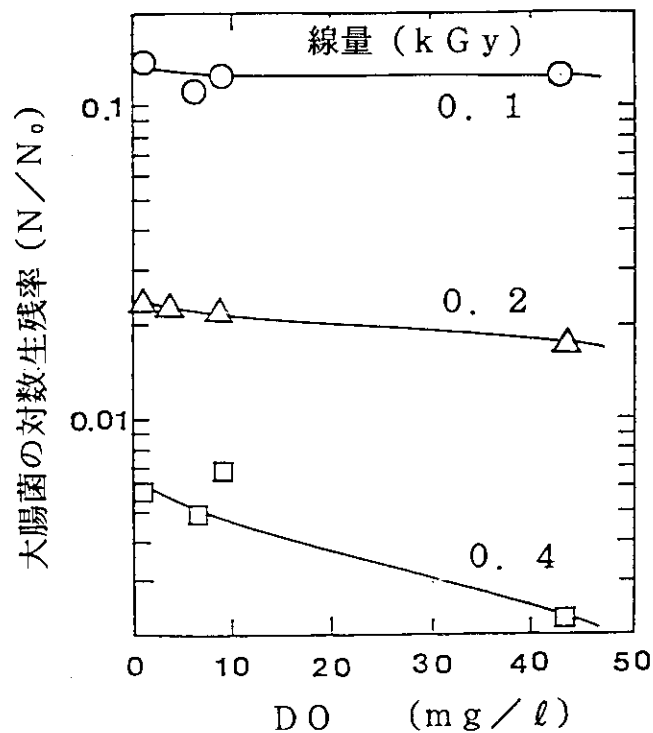


図19 電子線殺菌における大腸菌群生残率に及ぼすDOの影響
 $N_0 = 1.5 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4$ 個/ml
 COD = ~ 10 mg/l, SS = 5 mg/l,
 液深: 8 mm

pH及び温度に関しても、顕著な影響は認められなかった。しかし、水温の影響については、図20に示すように、水温が高くなると、大腸菌群の生残率は小さくなっており、低温よりも高温の方が電子線殺菌には有利であるという結果が得られた。従って、高水温な夏季では、殺菌には好都合である。

以上のように、電子線殺菌は通常に下水処理水では水質の影響をほとんど受けないとえる。このことは電子線法の特長と言える。

(3) 殺菌効果に及ぼす水深の影響

水中における電子線の透過距離は短く、エネルギー1 MeV当り約5 mmであ

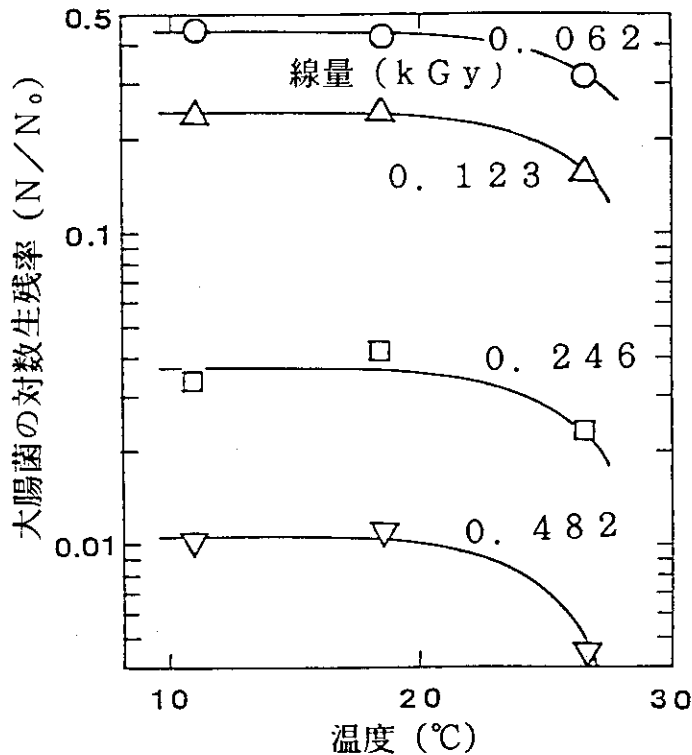


図20 電子線殺菌における大腸菌群生存率に及ぼす水温の影響

$N_0 = 1.5 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4$ 個/ml

COD ~ 10 mg/l, SS ~ 5 mg/l,

液深: 8 mm

り、水に与えられる電子線エネルギーは電子線の透過距離によって変化する。つまり、吸収線量に深さ方向の分布が生じる。そのために、十分な殺菌効果を得るためには水深と殺菌効果との関係を明らかにする必要があった。

電子線の水中での最大飛程 (0.5 cm/MeV) の範囲内で、水深を変化させて殺菌効果を調べた。その結果、図21に示すように、水深が7 mmを越えると殺菌効果が急速に低下し、殺菌に有効な水深は、電子線の水中最大飛程の約70% (0.35 cm/MeV) であることが明らかとなった。

3. 3. 2 流通式殺菌試験

電子加速器から発生する電子線は、照射面積を大きくするために、高速で走査

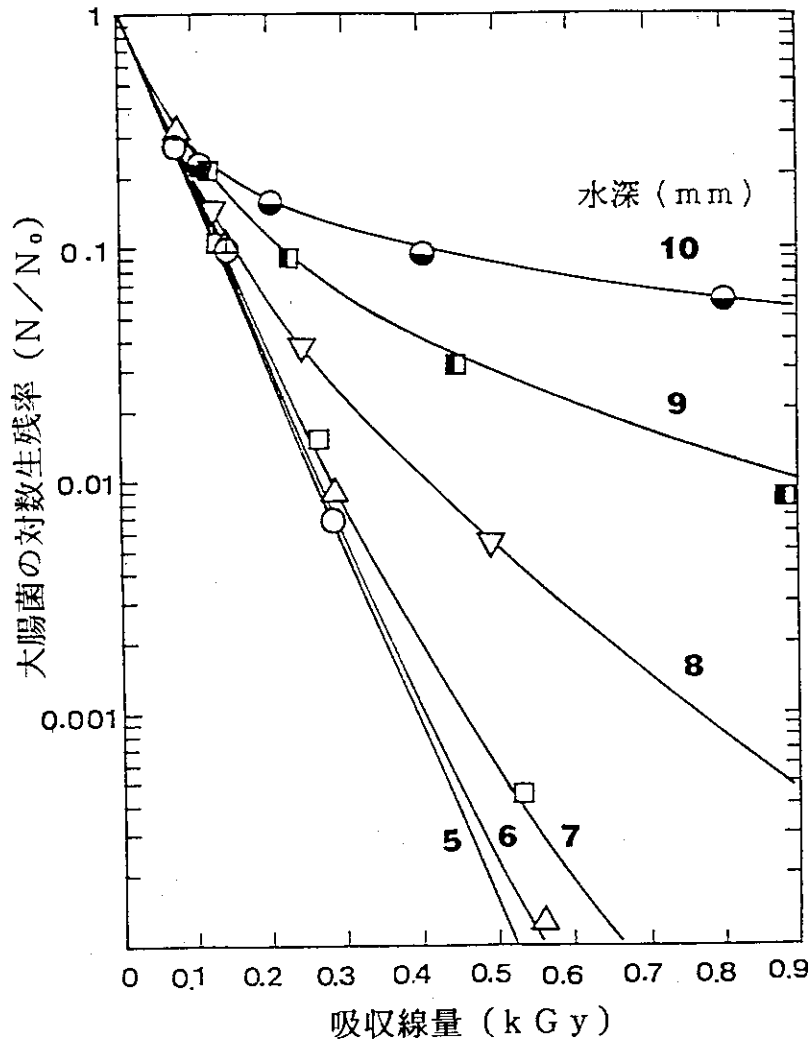


図2.1 電子線殺菌における大腸菌群生残率に及ぼす水深の影響
 照射条件：加速電圧2MV，ビーム電流0.2～1mA
 試料水質：COD 12mg/l，DO 9mg/l
 pH 7.2，大腸菌群数 1.4×10^4 個/ml

されており，水への照射は周期的（通常周波数100Hz）に行なわれる。そのために流通式の照射では，水流速度が大きいと照射されずに照射容器を通過する可能性があり，殺菌効果を低下させる恐れがある。そこで，水流速度が殺菌効果に及ぼす影響の検討のため，図2.2及び図2.3に示す小型試験装置を用いた試験を行った。この試験でもモデル処理水を用いたが，この試験の大腸菌群数は $2.4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ 個/mlであり，平均的な水質はCODが12mg/l，

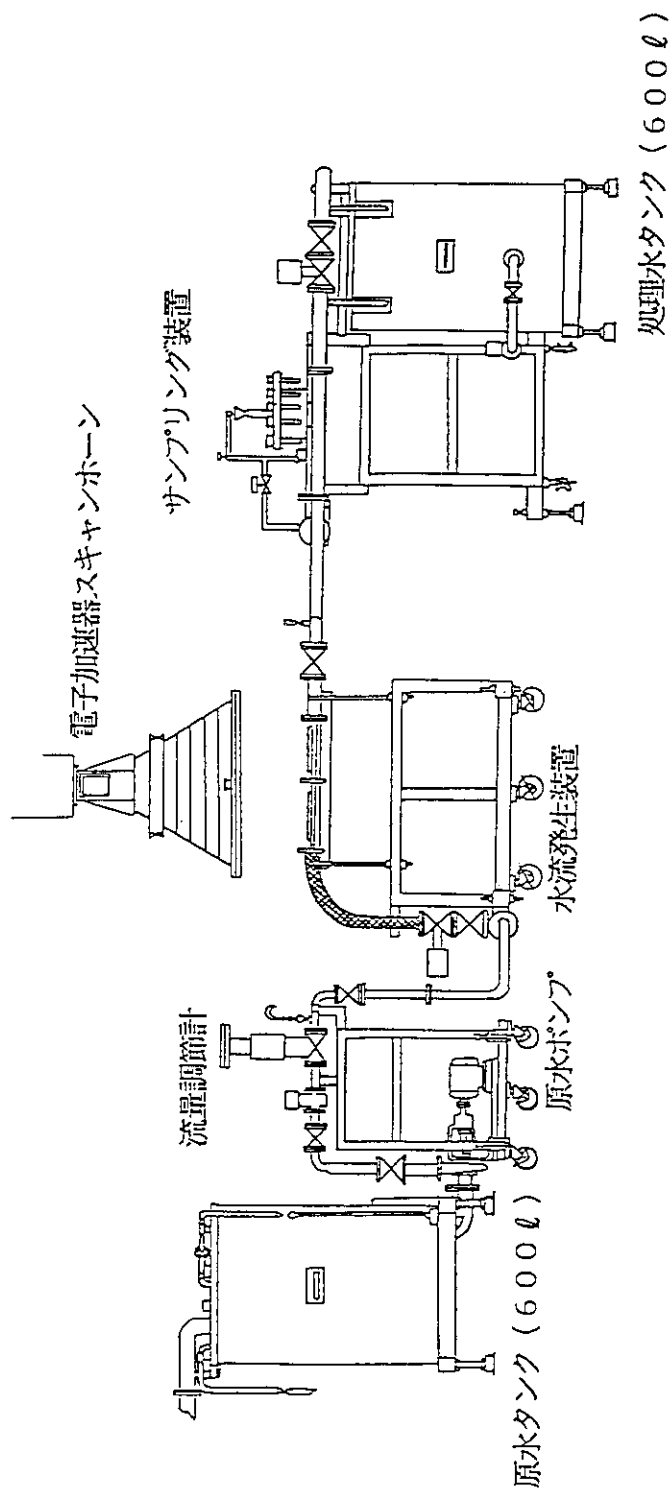


図 2 2 流通式殺菌試験装置の概要

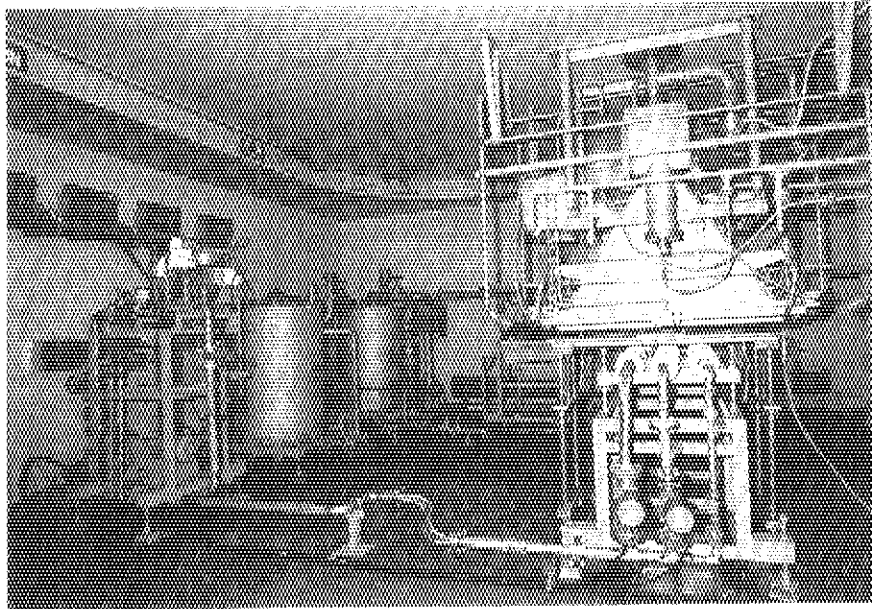


図 2 3 電子線による流通式殺菌試験に用いた小型試験装置

SSが 6 mg/l ，pHは7附近であった。なお，DOは飽和濃度（ $9\sim 10\text{ mg/l}$ ）附近であった。

この試験では，一定の加速電圧（ 2 MV ）のもと， 0.1 から 0.8 kGy の吸収線量の範囲について，本装置により試験可能であった 3.5 m/秒 までの水流速度での影響を調べた。

水流速度 3.5 m/秒 までは，殺菌効果は流速にほとんど影響されず，流通系でも問題ないことが分った。試料は高速で流れるので乱流の状態にあり，試料の混合や攪拌が起こっている。試料の攪拌や混合が充分であれば殺菌効果に与える水深の影響は小さくなるはずであるが，回分式試験から推定された大腸菌群の生残率曲線と比較して，最大の水流速度 3.5 m/秒 までにも有意義な差は認められなかった。

図24は、照射容器上面に張られたチタン薄膜の水圧に伴う膨張による補正を考慮に入れた平均水深6.7及び7.6 mmについて得られた結果を示した。点線で示した理論値と実験値はかなり良く一致しており、本試験装置による殺菌では、水に電子線が照射されている時間が0.024秒と極めて短いために混合や攪拌の効果が現れなかったと考えられる。

試験に用いた電子線は100 Hzで走査されているが、この場合でも計算によれば10 m/秒までの水流速度では均一な照射が可能である。従って、通常的水流速度の範囲では、殺菌効果が流速により著しく影響されることは無いと推定されるが、実用化に当っては、試験により確認する必要がある。

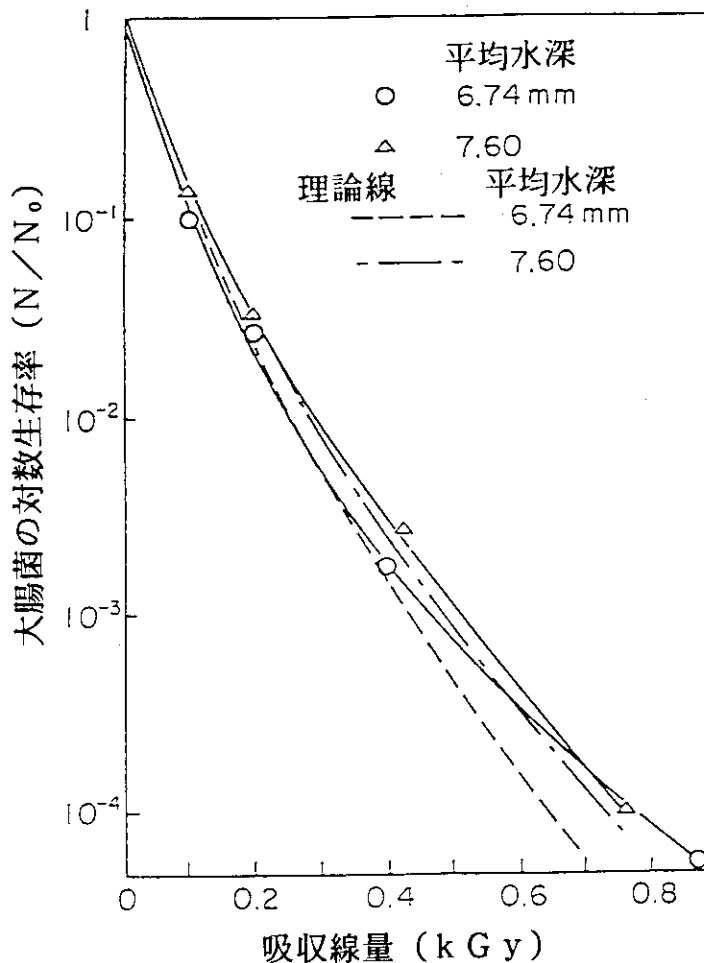


図24 流通式殺菌試験結果 (流速3.5 m/秒)

3. 3. 3 殺菌後の大腸菌群数の経時変化

下水放流水は殺菌処理されて、河川や海等に放流される。電子線殺菌は、塩素殺菌のように殺菌処理後の残留効果を持続できないので、河川や海等に放流されるまでに大腸菌群や一般細菌が再増殖し、規制値をクリアーできない恐れも考えられる。そこで、殺菌後の大腸菌群数の経時変化について試験を行った。図25は、初期大腸菌群が 1.1×10^4 個/m ℓ 存在する試料に電子線を0.4 kGy照射することにより約500個/m ℓ になるように殺菌した試料について、照射後の大腸菌群数の変化を調べた結果を示す。同図には、比較のために初期大腸菌群数が 8.0×10^3 個/m ℓ である試料に同線量のガンマ線を照射することにより

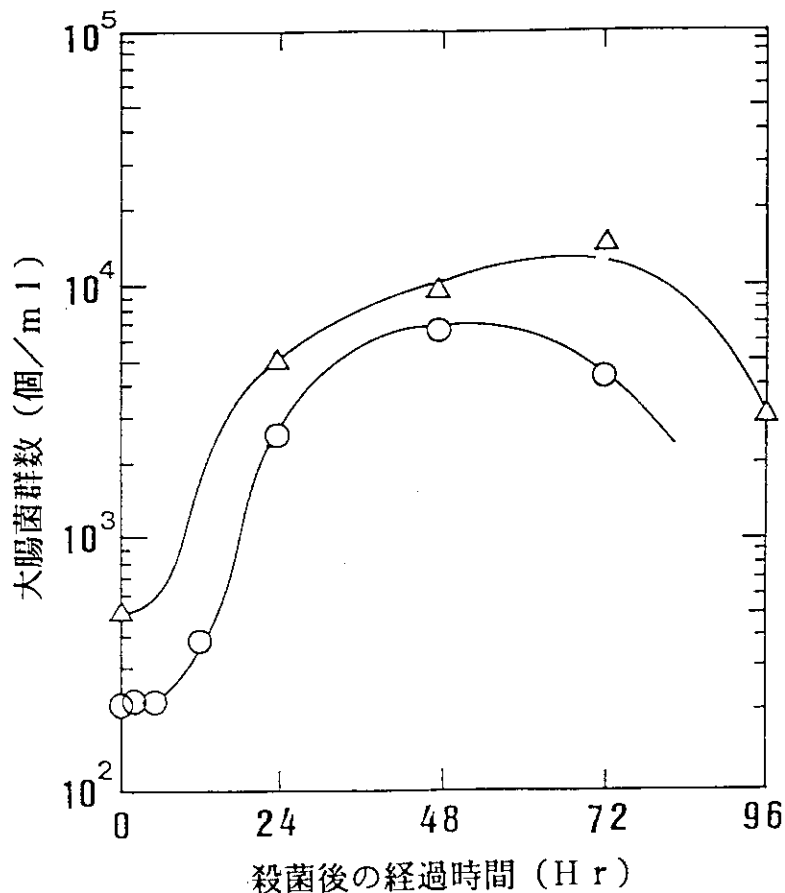


図25 大腸菌群数の殺菌処理後の経時変化

初期菌数： $8 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$ 個/m ℓ

平均吸収線量：0.4 kGy

△：電子線殺菌， ○：ガンマ線殺菌

約200個/mlに殺菌した試料についても、同様の変化を示してある。いずれのケースでも、照射後約6時間までは大腸菌群数はほとんど増加しないことが確認された。従って、殺菌処理水を河川等に放流する場合の大腸菌群の再増殖については特段考慮する必要はない。なお、アメニティー利用のように下水処理水を長時間滞留させるケースでは再増殖を抑制させるために水を循環し、一定の時間間隔で再照射を行うことも考えられる。

3. 3. 4 電子線殺菌処理設備の開発

下水放流水の殺菌では大量処理の能力と共に、水量変動に対応できる能力も要求される。また、電子線の水中透過距離は短い。従って、電子線殺菌処理設備としては、次の条件を満たすことが必要である。

- a) 水を薄膜状にして高速で流しながら照射できること、
- b) 大量処理能力と水量変動に対応できる能力を有すること。

水を薄膜状にして高速で流しながら電子線を照射する方式には、下水やスラッジの電子線殺菌を目的として行なわれた米国ボストン市のディアアイランド下水処理場や現在下水中の有害物質の除去を目的として行なわれているマイアミ市下水処理場で実施されている方式がある。この方式では、水を滝のように落下させるために、高速の安定な薄膜を得ることが容易でなく、1秒当たり数mの薄膜水流速度を得るのが限界である。下水処理場では、日量数万 m^3 またはそれ以上の水を処理する。これだけ大量の下水を電子線法で処理するには、10m/秒程度の水流速度を得る必要があり、しかも動力を要しないで実現できることが望ましい。この目的に適合した装置の開発を検討した。

図26に、その処理設備概念図を示すように、この設備は、噴射ノズルを用いるもので、無重力で10m/秒の薄膜の高速水流を発生させることが可能であった。この装置1台の処理能力は、例えば、水の流速8m/sec、水流巾8m（1台にスキャンホーン2基を設置）、電子加速器出力270kW（5MeV、54mA、エネルギー吸収効率90%）の場合、約96,000 m^3 /日の処理が可能となると推定された。なお図27には、この方式により実際に噴流を発生させた状況を示す。

3. 3. 5 電子線殺菌処理設備の維持・管理

この設備では水量変動に対しては、導水きょの貯水と水流巾（電子線スキャン巾）の調整による対応が考えられている。また、設備が地下に設置されており、

太陽光が当たらないので、藻類の繁殖についての問題はない。

噴流方式では照射室が地下に設置されるので、河川の増水による浸水や噴流発生装置の破損の場合に照射室が水没し、電子加速器が被害を被る恐れがある。それを避けるため、電子加速器の本体部を地上に設置し、かつ水位の急激な上昇が検出されると直ちに閉鎖できるゲートをスキャンホーンと加速器本体間に設ける等の水没対策も必要となる。

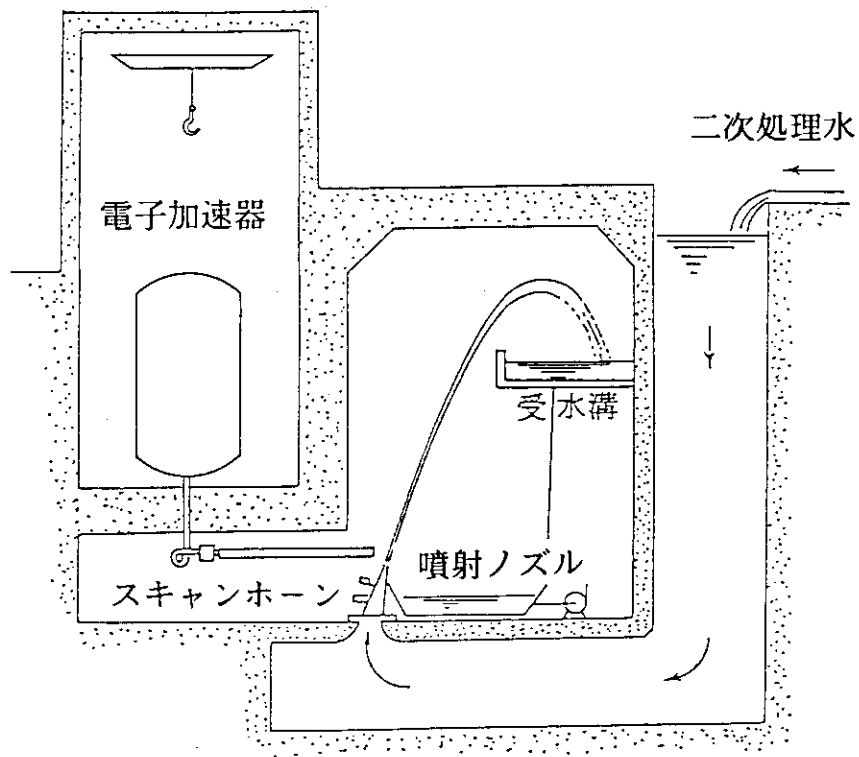


図 26 電子線殺菌処理設備の概念図

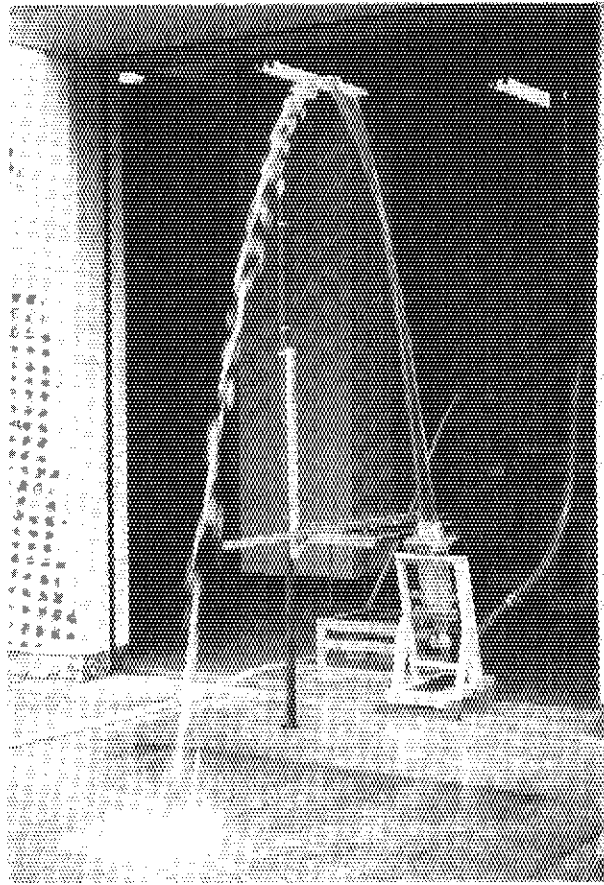


図 2 7 噴射ノズルにより重力を利用した噴流発生試験

3. 3. 5 電子加速器の信頼性及び維持・管理

下水放流水の殺菌では電子加速器の長時間連続運転が要求される。現在、日本で約200台以上の電子加速器が稼働している。電線の耐熱性向上等を目的とした工場生産ラインでは年間7,000-8,000時間の連続運転が行なわれている。また、耐用年数としては15年を越える実績がある。

電子加速器の維持、管理としては、通常の保守・点検に年に数日間を要する。それ以外は照射窓に用いられているホイル、フィラメント等の消耗品類の交換であり、長年使用しても特に問題はない。また、高湿度下での使用の実績もある。

なお、電子加速器が通常の保守・点検のための期間を必要とすること、及び故

障の場合を考慮して、能力的に余裕を持たせるとともに、電子加速器と殺菌処理設備を複数設置することが望ましい。

3. 4 経済的評価

本研究で得られたデータ、並びに原研で開発された噴流方式による設備の概念設計に基づき、10,000-200,000 m³/日の範囲で、処理コストを試算した。対照としてオゾン法と紫外線法を選定し、同一規模の設備についても処理コストを試算した。その結果を表5にまとめて示す。

表5 下水放流水の殺菌処理コスト比較

処理水量*	処理コスト** (円/m ³)		
	電子線法	オゾン法	紫外線法
(m ³ /日)			
10,000	29.2	24.6	16.8
50,000	7.3	8.6	7.1
100,000	5.0	6.4	5.4
200,000	4.1	5.3	4.7

*処理量100,000 m³/日は、処理対象人口20万人に相当。

**運転費、設備償却費、人件費を含む。

設計条件：電子線法は、殺菌線量0.25 kGy、有効水深0.35cm/MeV、

紫外線法は、照射量 10 mW・sec/cm²、オゾン法は、注入量

4 mg・O₃/ℓ、接触時間10分。

この試算結果を要約すると次のようになる。

- (1) 処理水量10,000 m³/日程度の小規模な下水処理場では、電子線法は建設費と電力費がともに高価となり、他の処理法に比べて不利となる。
- (2) 下水処理場の規模が大きくなると、電子線法は処理水量当りの建設費と電力費が低下する。その結果処理水量50,000 m³/日規模ではオゾン

法よりも経済的に有利になる。

- (3) 下水処理場の処理規模100,000m³/日以上で、電子線法はオゾン法、紫外線法よりも有利になる。

3. 5 評価のまとめ

1) 電子線法は、大腸菌群の殺菌だけでなくウイルスの不活化に対しても高い効果が期待できる。また、その殺菌効果は、CODやSS等の水質に影響されない。

2) 電子線法は、流速10m/秒程度の高速薄膜水流により、加速電圧5MV、出力270kWの電子加速器1台で約100,000m³/日の下水放流水の大量処理ができる。この規模の処理ではオゾン法や紫外線法に比べて経済的に有利になる。

3) 電子線法は、処理規模10,000m³/日以下の小規模な下水処理場での適用は経済的に不利である。

以上のように、電子線法は、下水放流水の殺菌に必要な技術的条件を満たすとともに、経済性についても処理規模によっては他処理法より有利になる可能性がある。

電子線法は塩素法に比べると経済的には難点があるが、放流先に魚介類やノリ等の養殖場や漁場がある場合や、処理水をアメニティーに利用する等の特別な理由があり、塩素以外の殺菌法を検討している地方自治体等には推奨できる処理法である。また、5. で述べるように、紫外線法やオゾン法では分解されない有機塩素化合物等の微量有機汚染物質の除去に対しても大きな効果が期待でき、この点からも電子線法は有利な殺菌法である。

4. 使用済み粒状活性炭の再生

4. 1 はじめに

粒状活性炭は、優れた吸着性能を持っていることから、上水原水や下水の高度処理として用いられてきた。また、大都市などでは脱臭剤としても使用されている。粒状活性炭は一定の期間使用すると、吸着性能が低下する。粒状活性炭は再生利用が可能なことから、繰り返し再生し使用する方法が確立されてきた。しかしながら、現在の高温水蒸気再生法では、再生コストが高く、また、活性炭の損失も多い（約10%）。このため、経済的な再生法の確立が望まれてきた。

4. 2 技術の概要

使用済み粒状活性炭には、吸着した有機物が濃縮された形で存在している。このため、電子線エネルギーを効率よく利用でき、吸着した有機物の分解による効果的な再生が可能と考えられる。この可能性に注目して、電子線照射による使用済み活性炭の再生試験を行ってきた。本試験では、試料としてモデル廃水、染色工場廃水二次処理水を吸着処理した老廃炭及び下水処理場の脱臭に使用した老廃炭を用いた。これらの老廃炭約2gを薄型の気密照射容器に5~7mmの均一な厚さになるように採り、窒素、水蒸気流あるいは混合気流中で110℃もしくは210℃に予熱後、厚さ50 μ mのチタニウム箔の照射窓を通して電子線を照射した。照射した老廃炭の吸着性能の回復は、主による素吸着性能を指標として調べた。

4. 3 技術調査結果及びその技術的評価

4. 3. 1 再生効果

試験の結果、照射による試料（老廃炭）の吸着性能の回復について、次のようなことが明らかとなった²⁶⁾。

1) モデル有機物として、洗剤の主成分であるラウリル硫酸ソーダを1g当り0.05~0.28g吸着した粒状活性炭を110℃で予熱後、窒素気流中で照射すると、図28に示すように、線量の増加と共に吸着性能が回復することが明らかになった。図にみられるように、粒状活性炭体積の約3000倍の二次処理水を処理した活性炭とほぼ同程度のよう素吸着性能（0.12gを吸着）の老廃炭では、線量800kGyの照射で吸着性能は90%回復した。また、同じ線量で比

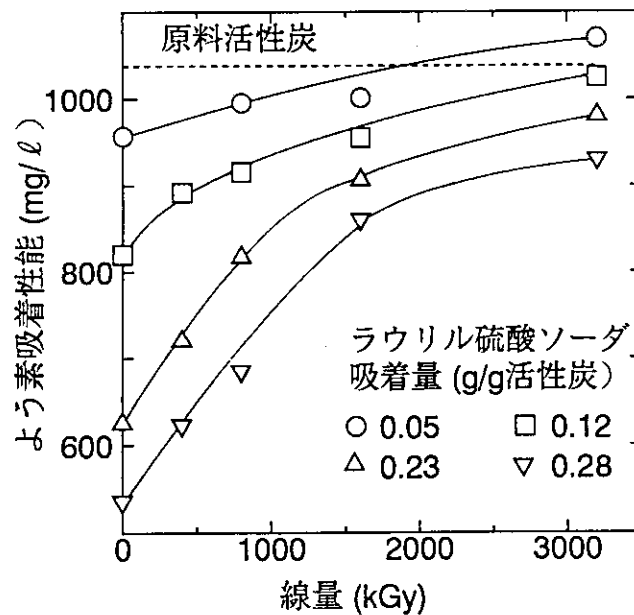


図 2 8 異なる量のラウリル硫酸ソーダを吸着した老廃炭の窒素気流中の電子線照射による吸着性能の回復 (110℃予熱)

較すると、吸着量が小さいほど吸着性能が容易に回復する。水蒸気流中でも同様な結果が得られた。

2) ラウリル硫酸ソーダ0.12 g/g吸着した老廃炭の場合にみられるように、照射前の予熱温度が高いほど、また、照射ビーム電流値が大きいほど、高い回復率が達成された(図2.9参照)。照射中の老廃炭の最高到達温度は350℃程度であった。また、この温度での加熱だけでは、吸着性能は回復できなかった。

3) 二次処理水を吸着した老廃炭及び脱臭に使用した老廃炭は図3.0に示すように、線量800 kGyの照射により吸着性能は90%以上回復できた。

4) 水中の微量有機汚染物質の吸着に寄与すると考えられる平均孔径10~30オングストロームのマイクロポアが照射により効果的に回復できた。

4. 3. 2 照射による活性炭損失量

窒素及び水蒸気流中照射では、線量3200 kGyを照射した場合でも活性炭の重量損失はほとんど起きなかった。再生時に活性炭の損失がほとんどないことも、従来法に比べ有利な点である。

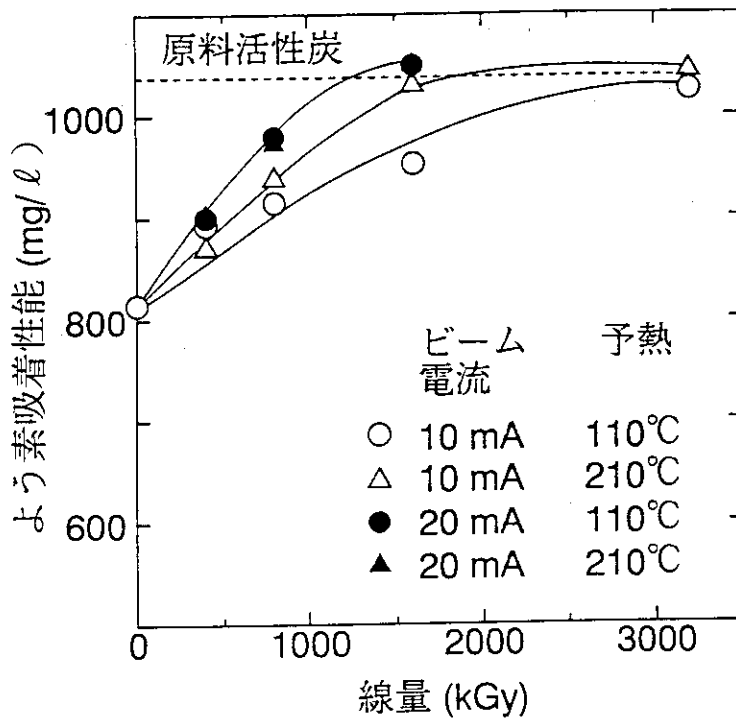


図29 ラウリル硫酸ソーダ0.12 g/g吸着させた老廃炭の窒素気流中の照射による吸着性能の回復

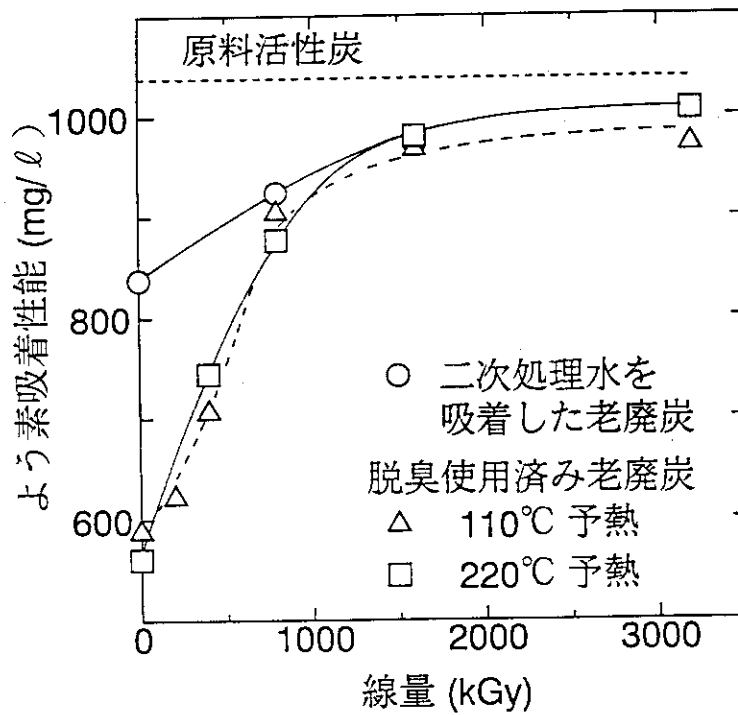


図30 二次処理水及び下水処理場の脱臭に使用した老廃炭の窒素気流中の照射による吸着性能の回復

4. 3. 3 排出ガスに含まれる物質

上記の使用済みの活性炭を電子線照射時に排出されるガスの分析から、次の物質が含まれていることが分った。

1) ラウリル硫酸ソーダを吸着した老廃炭を窒素気流中で照射した場合は、数百 ppm のメタン、プロパン、ブタンなどが検出された。

2) ラウリル硫酸ソーダを吸着した活性炭を窒素・水蒸気混合気流中で照射したとき、800 ppm 前後の有機酸及び3~4 ppm のホルムアルデヒドが検出された。

3) 染色工場廃水の二次処理水を吸着した活性炭を窒素・水蒸気混合気流中で照射した場合は、150~200 ppm の有機酸、200~600 ppm の硫化水素及び10~30 ppm の全メルカプタンが検出された。硫化水素及びメルカプタンは染色工場廃水に含まれる硫黄成分によるものであった。

4) フミン酸を吸着した老廃炭では、200~300 ppm の有機酸が検出されたが、硫化水素及び全メルカプタンは検出されなかった。

5) 脱臭に用いた老廃炭を窒素・水蒸気混合気流中で照射したとき、400 ppm の硫化水素、200 ppm の全メルカプタン及び100 ppm の有機酸が検出された。

4. 3. 4 活性炭電子線再生装置の概念設計

電子線照射による使用済み活性炭の再生装置は、図31に示すような装置になると考えられる。

1) 老廃炭を200℃に予熱後、気密式のコンベア（幅1m）で供給しながら水蒸気流中で、加速電圧2MV、出力100kWの電子加速器により線量800kGyを照射して賦活する。

2) この再生装置により、1回当たり約170kg、1時間当たり360kgの老廃炭の再生処理が行なえると想定される。この時の排出ガス量は、約50Nm³/時間であり、このガス中の硫化水素やメルカプタンを除去するため廃ガス処理装置を設置する必要がある。

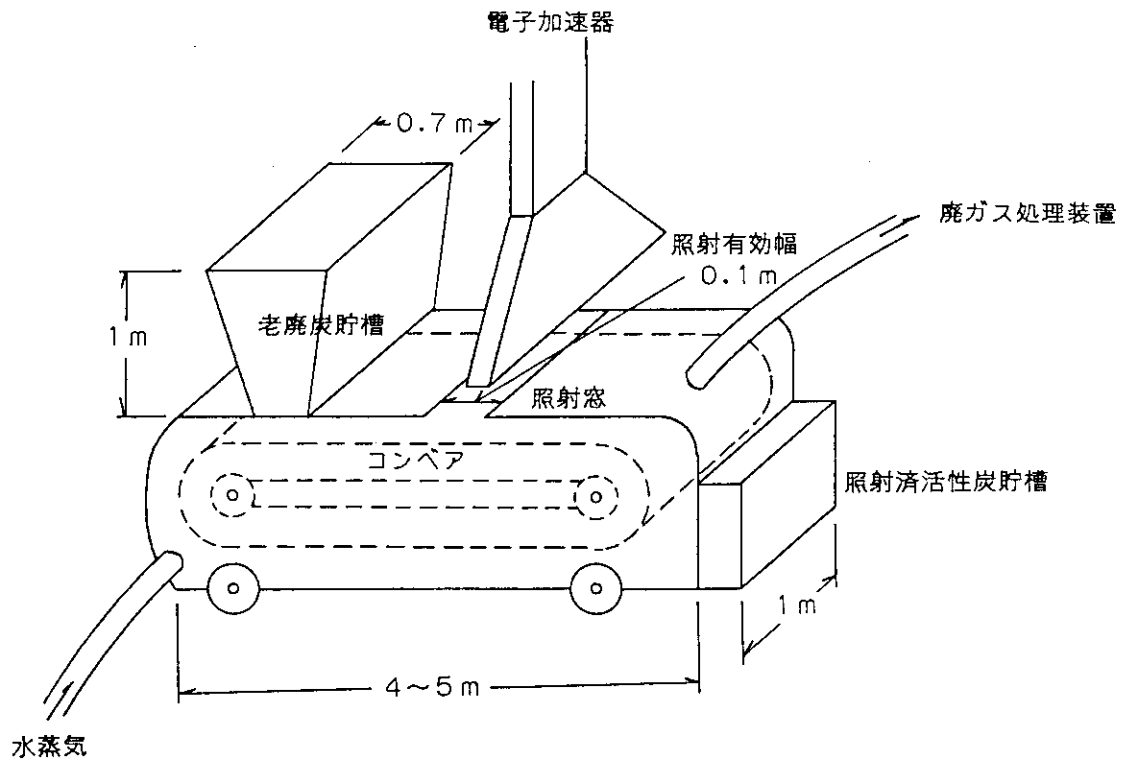


図31 使用済み活性炭の電子線再生装置の概念図

4. 4 経済的評価

老廃炭の再生に必要な線量を800 kGyとすると、再生に要するエネルギーは、加速器の付帯設備の電力及び予熱に必要なエネルギーを含めて、再生活性炭1 kg当たり約0.4 kW・hである。このエネルギー量は、従来法の約1/8と推定される。この理由は、電子線法では老廃炭を照射により直接加熱できることと吸着した有機物の照射による分解と加熱による分解が相乗的に起きたためと推定される。このエネルギー量から再生に必要な電力費は、約7.2円/kgと試算された。

出力200 kWの電子加速器1台により、年間約3,600トンの活性炭の再生が可能となる(16時間/日, 250日/年として)。付帯設備を含めた建設費は、およそ4.6億円と試算される。償却費を含めた総再生コストは、23円/kgと推定される。

4. 5 評価のまとめ

上述の結果から、電子線法による使用済み活性炭の再生には、次のような利点があると考えられる。

- 1) プロセスが簡単であり、高度な熱管理技術を必要としない。
- 2) 省エネルギープロセスといえる。
- 3) 活性炭の損失が極めて少ない。

また、コスト試算結果によれば、電子線法のコストは従来法と比べ相当低くなると推定され、電子線法は経済的にも有利であることが想定される。

使用済み活性炭は、貯蔵・運搬が可能であるので、電子線による再生装置は個別の下水処理場等に設置する必要はなく、また、24時間の連続運転も必要としない。地区ごとに再生センターを設け、使用済み活性炭を集め、連続的に再生することが可能である。電子線照射装置の建設費は現在のところ高いので、中規模以下では個別の下水処理場ごとに設置することは経済的ではない。しかし、使用済み活性炭の電子線による再生装置のように、地区ごとに1個所のセンターを設置すればよいことになれば、効果的、経済的に利用していただけることになる。再生時の排出ガスについては、従来の再生法と同様に、吸収塔あるいはアフターバーナーを設置することにより対処できる。

5. 微量有機汚染物質の分解

5. 1 はじめに

トリクロロエチレン等の有機塩素化合物、農薬、殺虫剤、その他の有害な微量有機汚染物質による地下水、河川水等の汚染が進み、飲み水の危機として社会問題となってきた。平成4年12月には水道水質基準の改定が行われ、新しい水質基準が平成5年12月から施行された。これらの微量有機汚染物質は従来の方法では十分な除去が困難であり、その効果的な除去技術の開発が緊急の課題となっている。上水道水源の上流に位置する下水処理場からの放流水についても、公共用水域に放流する前にこれらの微量有機汚染物質の分解・除去が必要になってくることは確実である。

5. 2 技術の概要

微量有機汚染物質を含む地下水、下水放流水等に放射線あるいは電子線を照射すると、これらの微量有機汚染物質が効果的に分解・除去できる可能性がある。この試験（文献も含む）では、純水、地下水、生下水及び下水の二次処理水にトリクロロエチレンや農薬を $100\mu\text{g}/\ell$ 前後溶解させた後、ガラス容器内で放射線照射²⁷⁾あるいは滝状に落下させながら電子線照射を行っている²⁸⁾。また、下水の二次処理水や水道水をガラス容器に採りガンマ線照射を行い、含まれている全有機ハロゲン(TOX)の変化を調べた。さらに、汚染水を活性炭で処理した後、その活性炭を照射して吸着した汚染物を分解する方法についても調査した。

5. 3 調査結果及びその技術的評価

5. 3. 1 直接照射する方法

1) トリクロロエチレン等の分解・除去

水中に数 mg/ℓ の酸素が溶存している場合、純水中の $1\text{mg}/\ell$ 程度のトリクロロエチレンは、 $30\sim 40\text{Gy}$ という殺菌線量より少ない線量で分解できた(図32参照)²⁷⁾。炭酸イオンを含む地下水中では、 $100\mu\text{g}/\ell$ のトリクロロエチレンの除去には 100Gy 程度の線量が必要である²⁹⁾。この場合、照射初期の主要生成物は蟻酸(20%)、ジクロロ酢酸(10%)、グリオキシル酸(5%)であり、線量が増すにつれて、これらの生成物の大部分が分解して、一部がシュウ酸となることが明らかにされた。生下水では同濃度のトリクロロエチレンは 5kGy の線量で90%以上の分解が可能であった²⁸⁾。さらに、オゾ

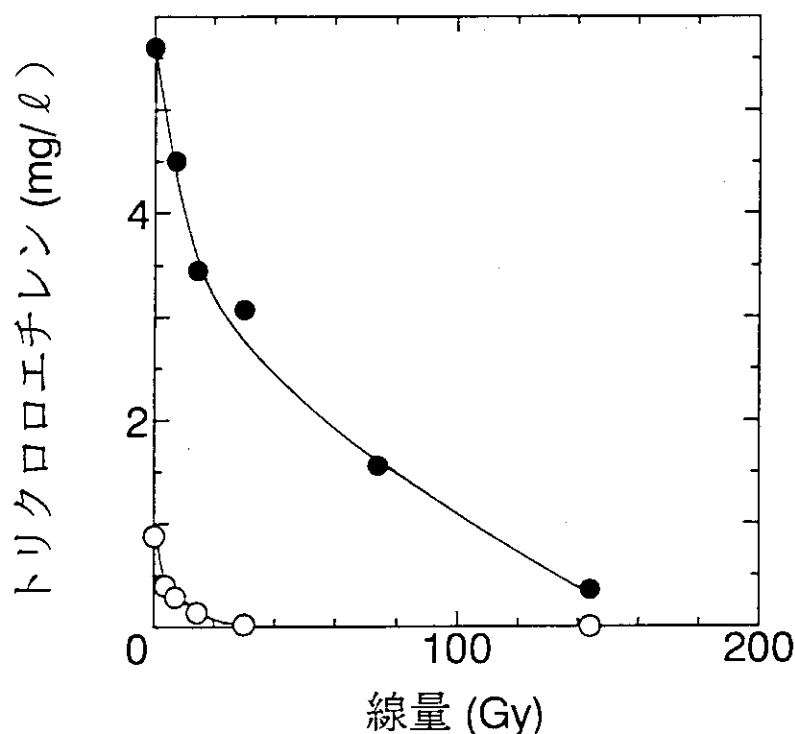


図3 2 純水中でのトリクロロエチレンの放射線照射による濃度の低減効果

ンを併用すると、より効果的な分解が可能となることも見出された³⁰⁾。

また、水道水及び下水二次処理水中に $20 \sim 40 \mu\text{g}/\ell$ 程度含まれる全有機ハロゲン (TOX) は、図3 3に示すように、 1 kGy の線量で約90%除去され、 3 kGy の線量ではほとんど検出されなくなった。このことは、照射により含まれている有機塩素化合物中の塩素がすべて無害な塩素イオンに変換されたことを示している。

さらに、繊維状活性炭に吸着されたトリクロロエチレンも、少量の水を添加した後で、照射を行うことにより、図3 4に示すように、吸着トリクロロエチレンの塩素原子がほとんど100%無害な塩素イオンに変換され、水中に溶出することが見出された。

2) 芳香族化合物の分解・除去

生下水あるいは下水二次処理水に $100 \mu\text{g}/\ell$ 程度添加されたベンゼンやキシレンは $1 \sim 5 \text{ kGy}$ の線量で90%以上分解された²⁸⁾。生下水中で分解速度が遅いのは、含まれる有機物濃度が高く分解効率が低下するためである。

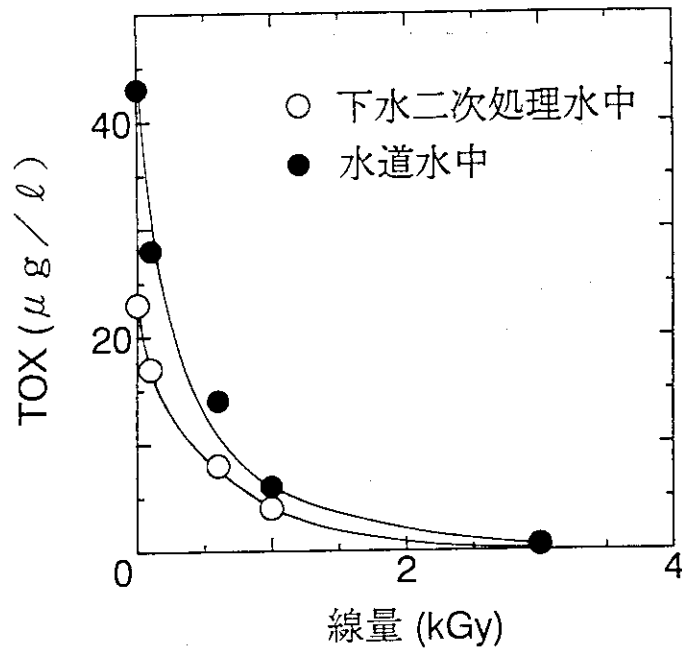


図3.3 下水二次処理水及び水道水中の全有機ハロゲン (TOX) の放射線照射による濃度の低減効果

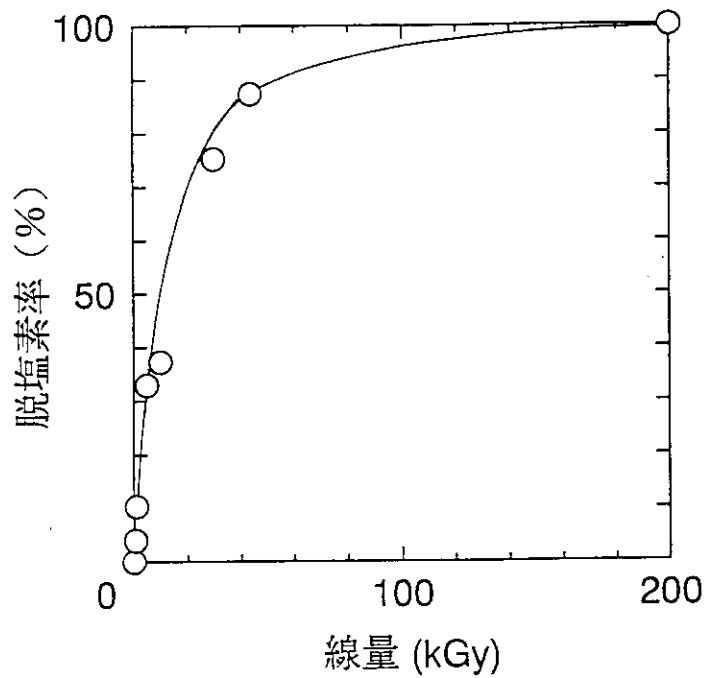


図3.4 繊維状活性炭に吸着したトリクロロエチレンのガンマ線照射による脱塩素率

トリクロロエチレン吸着量: 0.82 g/g活性炭
 水添加量: 10 ml/g活性炭

3) 農薬の除去

下水放流水及び地下水では $20 \mu\text{g}/\ell$ 程度のMBPMC及びアシュラム（ゴルフ場で主に除草剤として使用されている農薬）は、図35に示すように 1 kGy の照射により $1 \mu\text{g}/\ell$ 以下にまでその濃度が低減された。

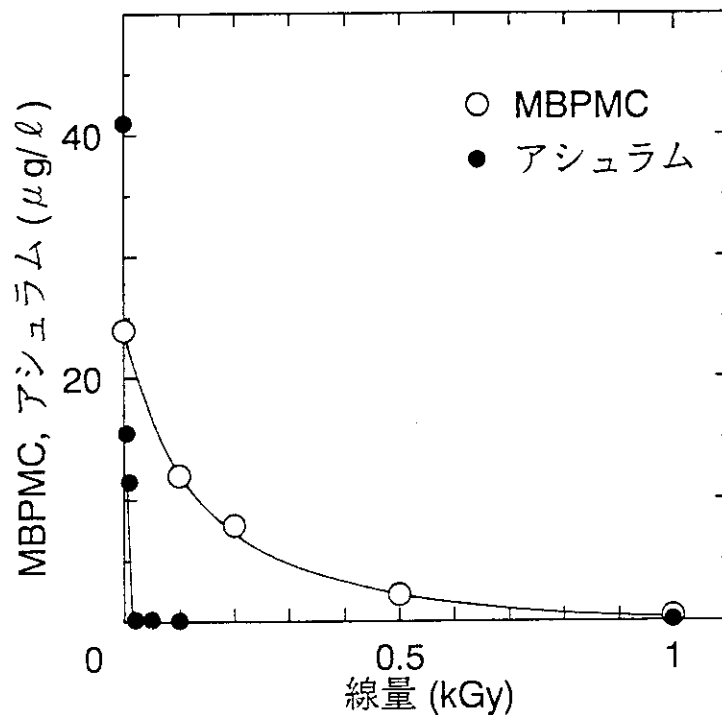


図35 下水二次処理水中での除草剤（アシュラム及びMBPMC）の放射線照射による濃度の低減効果

5. 4 評価のまとめ

これまでの実験及び文献調査により、水中に存在するか、あるいは活性炭に吸着された有機塩素化合物や芳香族化合物は電子線照射により分解できる可能性があることが明らかにされた。

6. 汚泥脱離液の処理

6. 1 はじめに

汚泥の嫌気性処理や熱処理に伴って発生する汚泥脱離液は、生物難分解性成分を含む高濃度の有機物や栄養塩類を多量に含むため、直接下水処理系に返水すると、下水の生物処理に障害をもたらす、処理水質を悪化させる恐れがある。このため、あらかじめ前処理することが望まれているが、そのため効果的・経済的な処理技術の開発が必要になってきている。

6. 2 技術の概要

原研では、電子線照射による下水処理研究の中で、生物的に難分解性の有機物も、溶存酸素のある状態で電子線照射すると、水の分解で生じるOHラジカルにより酸化されて、次第に生物分解性に変化していくことを見出してきた³¹⁾。この効果を利用すれば、電子線照射と生物処理を組み合わせることにより汚泥脱離液を効果的に処理できる可能性がある。この効果に着目して、汚泥脱離液の電子線処理法の実用性評価の試験を実施してきた。この研究では、汚泥脱離液のCODを規制値(20~30 mg/l)以下に低減する技術を開発することが、目標として設定され検討された。

6. 3 調査結果及びその技術的評価

6. 3. 1 バッチ式照射による処理試験^{32), 33)}

この試験は、嫌気性消化汚泥の脱離液(COD 440 mg/l及び800 mg/l)について、①直接に放射線を照射する方法と②生物処理後に電子線照射を行い再び生物処理する方法、の二つについて行った。

1) 直接に放射線を照射する方法による処理効果

嫌気性消化汚泥脱離液の原水(COD 440 mg/l)に放射線を照射した場合に、図36に示すようにいくつかの効果が認められた。

- a) 比較的少ない線量(0.5 kGy)の照射では、水中にBODの増加が認められた。これは、照射により生物難分解性成分の一部が酸化され、生物易分解性成分に変換されたためと考えられる。

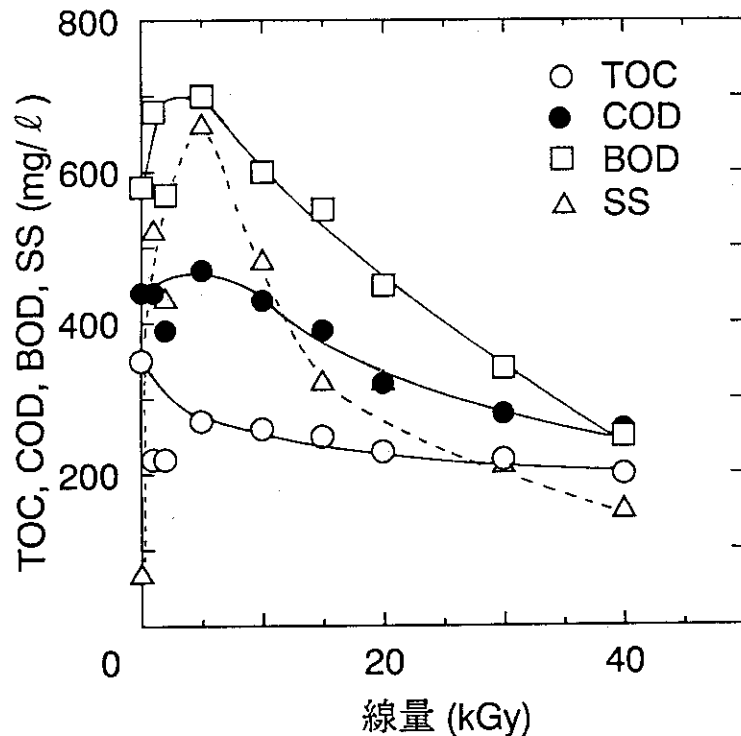


図36 放射線照射による汚泥脱離液中のTOC, COD, BOD及びSSの変化

- b) 0.5 kGyの照射ではSSの増加が認められた。線量をさらに増加すると、SSの可溶化が認められた。
- c) 30~40 kGyの照射により、CODはおよそ半分以下にまで減少したが、100 kGyの照射によってもCODを30 mg/l以下にまで低減することはできなかった。

2) 電子線照射法と生物処理との組み合わせによる処理効果

汚泥脱離液を電子線照射のみにより処理した場合、CODの減少は少ない。これは汚泥脱離液中の有機物濃度が高いためと考えられる。脱離液に含まれている分解可能な有機物成分を生物処理により除去することによって、照射の効果が改善されることが見出された。そこで、消化汚泥脱離液(COD 800 mg/l)を予め制限曝気法により処理し、有機成分の一部を除去した。次いで、バッチ式照射容器(35 l)で酸素ガスを供給しながら電子線照射し、再度、活性汚泥処理を行った。これらの試験から、次の結果を得た。

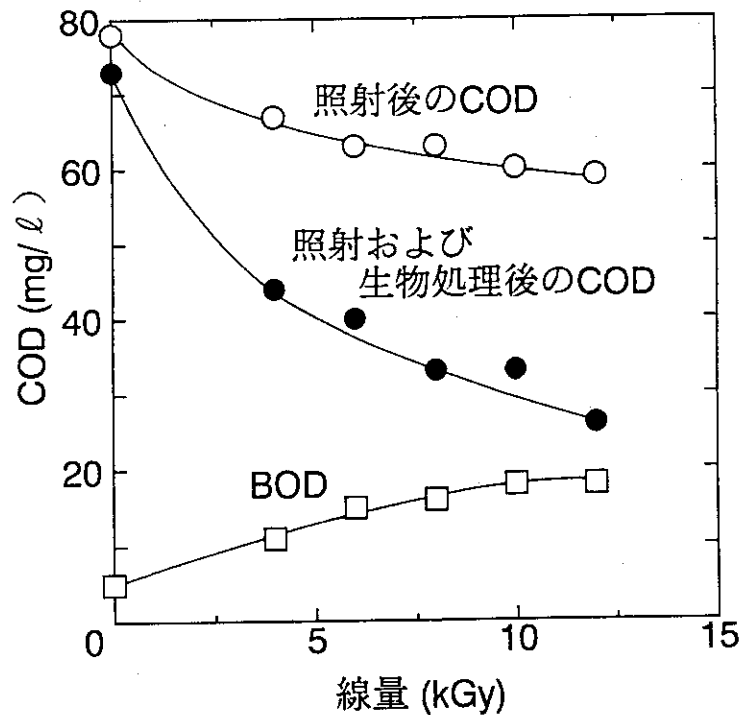


図3.7 汚泥脱離液生物処理水の電子線照射によるCOD及びBODの変化並びに照射後の生物処理によるCODの変化

- 制限曝気法による生物処理では、CODは800mg/lから80mg/l程度にまで低減し、BODは、910mg/lから5mg/lまで低下した。
- 上記の生物処理後、電子線照射(8~10kGy)することによりCODは80mg/lから60mg/lに低下し、BODは、5mg/lから18mg/lに増加した。すなわち、水中の難分解性有機物が照射により易分解性有機物に変換されたと考えられる。
- 4~6kGyの照射により70~80%の色度が減少し、下水臭がほとんど消失した。
- 電子線照射した汚泥脱離液をさらに活性汚泥処理することにより、図3.7に示すようにCODを30mg/l以下に低下させることができた。

6. 3. 2 流通式照射法を用いる処理^{34, 35)}

水中の有機物を電子線照射により効果的に酸化するためには、水中に十分な溶存酸素が存在することが必要となる。空気曝気時の溶存酸素(約8mg/l)は

0. 5 k G y 程度の線量で消費されてしまう。本技術の実用化のためには、試料水を溶存酸素の存在下で連続的に1~10 k G y 照射できる方法を開発する必要があった。そこで、試料水に酸素を加圧下で溶解(約40 mg/l)させてから電子線照射する方法を試みた。

この試験では、まず、皮革工場廃水処理の汚泥脱離液(COD 200 mg/l)を使用した。この試料水を制限曝気法により処理し、CODを53 mg/lにまで低下させた。この処理液にゲージ圧2 kg/cm²で酸素を溶解し、この脱離液をノズルから噴き出させながら照射を行い、CODの低減効果を調べた。これらの試験から、次のような結果を得た。

- a) 酸素加圧下で酸素を溶解させることにより、酸素が存在した状態で試料水に連続的に1~20 k G y の照射を行うことにより、CODを大幅に低下させることが確認できた。
- b) 6 k G y の照射ではCODを30 mg/l程度まで低下できた。

6. 4 経済的評価

汚泥脱離液の電子線照射と生物処理との組み合わせによる処理の結果から、汚泥脱離液(COD 800 mg/l程度)のCODを最終的に30 mg/l以下に低下させるのに必要な線量は、安全側にみて10 k G yであった。電子加速器による照射に必要な電力費の他にその6割程度の電力が必要なことを考慮すると、この照射に要する電力費は、電気単価を18円/kWhとすると、80円/m³と試算された。

この設備は大規模な下水処理場等で使用されるとして、嫌気性消化汚泥脱離液計画処理量3,000 m³/日(この規模は、処理対象人口60万人、流入下水処理量300,000 m³/日に相当する。)を例として電子線照射施設の建設費を試算した。線量10 k G yの場合、電子加速器の出力は、280 kW(24時間運転)となる。この規模の電子加速器の価格は、およそ3億円と推定される。この他、据え付け、付帯設備、照射容器、遮蔽室、建屋等を含めると、設備総額は約6億円となる。

6. 5 評価のまとめ

本技術は、まず、生物処理を行うことにより分解可能な有機成分を除去し、次いで、10 k G yで電子線照射を行うことにより、難分解性成分の一部を易分解性成分に変換し、さらに、生物処理を行うことによって、汚泥脱離液中のCOD

を処理目標値である $30 \text{ mg} / \ell$ 以下にまでに低下することができた。

この方法では電子線照射により、汚泥脱離液中の病原菌等も殺菌されるので、衛生上からも効果的な方法であるが、生物処理を2度行うのでシステムがやや複雑となるのが欠点である。

7. 電子加速器利用の最適化の検討のために

電子加速器の値段は、主として加速電圧に依存しており、出力に対する依存性は比較的小さい。このことは、同一の加速電圧であれば、大出力の電子加速器を用いる方が単位出力当たりの運転費が安いことを意味している。そこで、小型の電子加速器複数台を下水処理場の各種の処理に個別に用いるよりも、大出力の電子加速器1台を多目的に利用することにより経済性の向上が期待される。

この可能性を検討するため、①コンポスト化のための汚泥の殺菌、②汚泥の脱水、③汚泥の濃縮、④汚泥脱離液の処理、⑤放流水の殺菌等、電子線の下水処理プロセスへの適用に関する研究結果を整理し、各プロセスに電子加速器を個別に使用した場合のモデル設計と切り替え等による後続のプロセスへの接続の可能性及びそれぞれのケースの経済性についての検討を行った。その結果、次の諸点が明らかになった。

1) 上記プロセスに個別に電子加速器を利用したとき、表6に示すように加速器出力として最小はコンポスト化のための汚泥脱水ケーキの殺菌であり、次いで汚泥の脱水、汚泥脱離液の処理、汚泥の濃縮、放流水の殺菌の各プロセスの順に大出力の加速器が必要となる。放流水の殺菌に必要な電子加速器出力は、汚泥脱水ケーキの殺菌に必要な電子加速器出力の約80倍であった。

2) 一台の電子加速器を複数のプロセスに同時に、あるいは切り替えにより時間差を設けて利用することの実用上の可能性は低い。むしろ、汚泥の濃縮あるいは脱水等のプロセスで照射し、殺菌も同時に可能であるような照射方法を取ることが望ましい。

3) 汚泥の濃縮プロセスで照射すると汚泥濃縮タンクが小型化でき、後続の各プロセスの装置も小型化することができる。また、殺菌を兼ねることができるため、コンポスト化前での汚泥脱水ケーキの電子線照射が不要になる可能性がある。そこで、建設費の上では有利となるが処理量がやや多いため運転費は若干高めとなる。

4) 脱水プロセスで汚泥に電子線照射すると、脱水ケーキの含水率の低下により、コンポスト化プロセスでの汚泥乾燥設備の小型化が可能となる。従って、建設費、運転費両面で経済的となる可能性がある。

上記より、電子加速器による照射を上記①～⑤で個別または切り替え等により

行うよりも、脱水プロセスにおいて照射し、脱水率の向上と殺菌の目的を同時に達成できるような適用方法を検討して行くことが、高価な電子線照射装置を下水処理場に設置して行くための決め手となるであろう。

表6 下水及び汚泥の処理に必要な電子加速器の出力
処理規模 10万t/日

処理項目	処理量(t/日)	線量(kGy)	加速器出力(kW)
汚泥の殺菌(含水率78%)	69	5	7
2次処理水の殺菌	100,000	0.3	579
汚泥脱離液の処理	229	10	44
汚泥の濃縮	1,505	2	58
汚泥の脱水	510	3	30

8. 電子線法の安全性

電子加速器は高分子材料の改質，医療用具の滅菌，食品照射等に，広く用いられている。日本全国では，200台以上の電子加速器が稼働しており，既に数多くの運転実績がある。従って，電子線法の安全性についても十分なノウハウが蓄積されてきた。

1) 電子線照射施設の安全性

電子加速器は，電子銃から出た電子を高電圧により加速し，高速の電子流を発生させる装置である。従って，電源スイッチを切ることにより，電子線の発生を速やかに停止させることができる。

1MV以上の加速電圧の電子加速器を有する事業所は，第1種放射線取扱主任者の選任が必要であるが，運転員は特殊な資格を必要としない。また，電子線照射施設は放射線障害防止法の基準を満たすように設計される。施設の建設に当たっては，建設前並びに施設の使用開始前に科学技術庁の審査により，安全性の確保が行われる。このように建設された照射室の壁は十分厚いので，地震等の災害時にも十分な安全性を有する。

2) 照射作業時の安全性

照射室内には非常時のための停止用のスイッチが設けられている。さらに，照射室の遮蔽扉が開放されているときには電子線を発生させることができず，また，照射時には遮蔽扉を開くことができない等のインターロック機構を備えることにより作業時の安全性が確保されている。

3) 照射汚泥及び照射水の安全性

加速電圧10MV以下の電子線の照射により，汚泥や下水放流水等に放射能を帯びることはない。照射による殺菌あるいは汚染物質の分解は，水中に生じた活性種によって起り，処理後は活性種は速やかに消滅する。この作用機構は，オゾン法と類似しており，薬物による殺菌と異なり，毒性が残留することもない。照射によって細菌等の病原性が増大することがないことも明らかにされている。

9. 下水処理への放射線利用の実施例

下水汚泥を放射線照射により衛生化処理して肥料あるいは土壌改良材として利用しようとする研究は、欧米では早くから行われている。例えば、ドイツではミュンヘン近郊にコバルト60による液状汚泥照射実プラントが建設され、1973年から現在に至るまで稼働している。このプラントでは270トン/日の液状汚泥の照射が行われている³⁶⁾。照射した液状汚泥は肥料として用いられている。図38にプラントの概要を示す。インドでは1989年にコバルト60を用いた液状汚泥の照射施設が建設された。この施設の最大処理能力は110トン/日である。現在、調整運転並びに照射した液状汚泥の肥料としての利用の試験が行われている。また、カナダでは、コバルト60を用いた乾燥汚泥の殺菌の実用化が進められている。米国では、ボストンに375トン/日、マイアミには650トン/日の電子線による液状汚泥照射試験施設が、また、アルバカーキには8トン/日のコバルト60による乾燥汚泥照射試験施設が建設されたが実用化には至らなかった。マイアミの電子線照射施設は現在、下水中の有機塩素化合物等の有害物質の分解試験ならびに下水の殺菌研究用に用いられている²⁸⁾。その他、ロシア、インドネシア、タイ、メキシコ等において汚泥の放射線処理に関する基礎的研究が行われている。表7に海外における実施状況を要約したものを示す。

表7 汚泥処理への放射線利用の実施例

実施場所	線源	汚泥の種類	最大処理規模	備考
ドイツ				
ガゼルブラハ	コバルト60	液状汚泥	270 t/d	実施中
ミュンヘン	コバルト60	液状汚泥	40 t/d	実施中
インド				
パロータ	コバルト60	液状汚泥	110 t/d	実施中
カナダ	コバルト60	乾燥汚泥	40 t/d	計画中
米国				
ボストン	電子加速器(0.85MeV)	液状汚泥	375 t/d	実施済み
マイアミ	電子加速器(1.5MeV)	液状汚泥	650 t/d	実施中
アルバカーキ	コバルト60	乾燥汚泥	8 t/d	実施済み
その他				
ロシア, タイ, インドネシア, メキシコ等	コバルト60あるいは電子加速器	液状あるいは脱水汚泥		基礎的研究として実施中

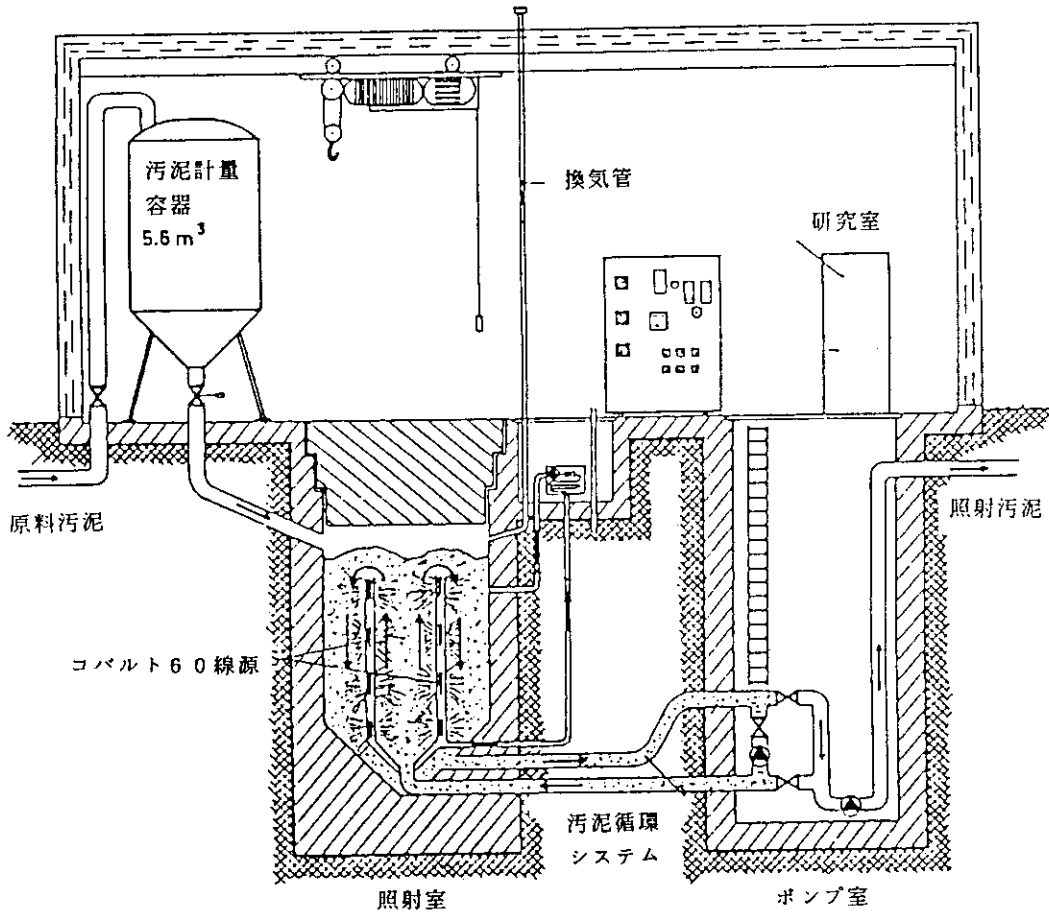


図38 ドイツの液状汚泥照射プラント

10. 結 論

電子線は、下水汚泥の殺菌・コンポスト化、放流水の殺菌、汚泥脱離液の生物分解性の向上、使用済み活性炭の再生等、下水処理分野においても技術的に広く応用が可能であり、また、処理に伴う衛生条件の改善にも有効であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 橋本, 宮田, 鷺野, 川上: A Liquid Chromatographic Study on the Radiolysis of Phenol in Aqueous Solution, Environ. Sci. & Technol., 13, 71-75(1979).
- 2) 橋本, 宮田, 川上: Radiation-Induced Decomposition of Phenol in Flow System, Radiat. Phys. Chem., 16, 59-65(1980).
- 3) 鈴木, 長井, 堀田, 鷺野: The Radiation-Induced Degradation of Azo Dyes in Aqueous Solutions, Int. J. Appl. Radiat. & Isotopes, 26, 726-730(1975).
- 4) 川上, 橋本, 西村, 宮田, 鈴木: Electron-Beam Oxidation Treatment of a Commercial Dye by Use of a Dual-Tube Bubbling Column Reactor, Environ. Sci. & Technol., 12, 189-194 (1978).
- 5) 橋本, 川上: 活性汚泥法を併用する染色廃水の放射線処理, 用水と廃水, 22, No.11, 28-34(1980).
- 6) 近藤, 中尾, 新井, 宮田: 電子ビームによる下水処理水の殺菌, 下水道協会誌論文集, 28, No.324,28-39 (1991).
- 7) 渡辺, 伊藤, 飯塚, 武久: 下水汚泥中の細菌数と放射線殺菌効果の季節変動, 発酵工学, 59, No.5, 449-454 (1981).
- 8) 沢井, 山崎, 下川, 関口, 沢井: 放射線照射による下水汚泥処理に関する研究, 東京都立アイソトープ総合研究所報告昭和63年2月第5号別冊.
- 9) 沢井, 山崎, 下川, 関口, 沢井: Improvement of Sedimentation and Dewatering of Municipal Sludge by Radiation, Radiat. Phys. Chem., 35, Nos. 1-3, 465-468(1990).
- 10) 下水汚泥資源利用協議会編: 下水汚泥コンポストの指標, 1980.
- 11) 橋本, 西村, 渡辺, 川上: Disinfection of Sewage Sludge by an Electron Accelerator, J. Ferment. Technol., 64, No.4, 299-304 (1986).
- 12) 橋本, 渡辺, 西村, 川上: 放射線照射した下水汚泥のコンポスト化, 下水道協会誌, 18, No.210, 58-67 (1981).
- 13) 橋本, 西村, 渡辺, 川上: 汚泥のコンポスト化における酸素供給の評価 I - 層状での発酵挙動の検討 -, 下水道協会誌, 20, No.233, 38-45 (1983).
- 14) 橋本, 西村, 渡辺, 川上: 汚泥のコンポスト化における酸素供給の評価 II - 発酵速度に及ぼす原料粒子径の影響の推算 -, 下水道協会誌, 21, No.237, 51-56 (1984).
- 15) 橋本, 渡辺, 西村, 川上: 下水汚泥及びコンポスト抽出液の液体クロマトグラフィー, 発酵工学, 61, No.2, 69-76 (1983).
- 16) 橋本, 渡辺, 西村, 川上: 下水汚泥のコンポスト化に伴う抽出液組成の

- 変化, 発酵工学, 61, No.2, 77-83 (1983).
- 1 7) 橋本, 西村, 岩部, 品部: Pilot Plant Test of Electron-Beam Disinfected Sludge Composting, Wat. Sci. Tech., 23, Kyoto, 1991-1999 (1991).
- 1 8) 平成元年度群馬県下水道研究会報告書, No.12 (1989).
- 1 9) 平成2年度群馬県下水道研究会報告書, No.13 (1990).
- 2 0) 渡辺春樹: 下水の塩素処理過程におけるトリハロメタンの生成, 用水と廃水, 23 (8) 66-70 (1981).
- 2 1) EPA(1986) Municipal Wastewater Disinfection, Design Manual, EPA-625/1-86-021, ch2.
- 2 2) J.G.Trump, E.W.Merrill, K.A.Wright: Disinfection of Swage Wastewater and Sludge by Electron Treatment, Radiat.Phys.Chem., 24, 55-66 (1984).
- 2 3) M.R.Cleland, R.A.Fernald, S.R.Maloof: Electron Beam Process Design for the Treatment of Wastes and Economical Feasibility of the Process, *ibid.*, 24, 179-190 (1984).
- 2 4) D.Mores: Accelerating Electrons, Civil Engineering, Apr., (1989).
- 2 5) 栗原秀人: 下水処理水再利用の水質基準, 下水道協会誌, 27, No.314, 38-41 (1990).
- 2 6) 朱, 新井 (英), 細野: 電子線照射による活性炭再生に関する研究, 輻射研究と輻射工芸学報, 1, No.1, 54-58 (1991).
- 2 7) 新井 (陸), 新井 (英), 作本: γ 線照射による水中のトリクロロエチレンの除去, 第22回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 86 (1985).
- 2 8) J.Cooper, M.G.Nickelsen, D.E.Meacham, E.M.Cadavid, T.D.Waite, C.N.Kurucz: High Energy Electron Beam Irradiation, An Innovative Process for the Treatment of Aqueous Based Organic Hazardous Wastes, J. Environ. & Health, Part A, A27, No.1, 219-244 (1992).
- 2 9) P.Gehring, E.Proksch, W.Szinovatz, H.Eschweiler: Radiation-induced Decomposition of Aqueous Trichloroethylene Solutions, Appl. Radiat. Isot., 39, No.12, 1227-1231 (1988).
- 3 0) P.Gehring, E.Proksch, H.Eschweiler, W.Szinovatz: Remediation of Ground Water Polluted with Chlorinated Ehylenes by Ozone-electron Beam Irradiation Treatment, Appl. Radiat. Isot., 43, No.9, 1107-1115 (1992).
- 3 1) 作本, 宮田, 新井 (陸), 新井 (英): 廃水の浄化に関する放射線化学的研究, J A E R I 1281 (1982).
- 3 2) 新井 (英), 新井 (陸), 作本, 細野, 山本, 清水, 杉山: 電子線照射と

- 生物処理との組合わせ法による汚泥脱離液の処理. I. 照射による水質の変化, 水処理技術, 31, No.10, 541-547 (1990).
- 3 3) 新井 (英), 新井 (陸), 作本, 細野, 山本, 清水, 杉山: "電子線照射と生物処理との組合わせ法による汚泥脱離液の処理. II. 生物処理法との組合わせ法による処理, 水処理技術, 31, No. 10, 613-618 (1990).
- 3 4) 細野, 新井 (英), 藍沢, 下岡, 山本, 清水, 杉山: 酸素過飽和電子線照射法による汚泥脱離液処理の研究, JAERI-M 93-007 (1993).
- 3 5) 細野, 新井 (英), 藍沢, 山本, 清水, 杉山: "Decoloration and Degradation of Azo Dye in Aqueous Solution Superoxidized with Oxygen by Irradiation of High-Energy Electron Beams", Applied Radiat. Isotopes, 44, 1199-1203 (1993).
- 3 6) T. Lessel and A. Suess: Ten Year Experience in Operation of a Sewage Sludge Treatment Plant Using Gamma Irradiation, Radiat. Phys. Chem., 24, No.1, 3-16(1984).

用語集

*汚泥脱離液

下水処理の過程で発生する汚泥の濃縮あるいは脱水の工程で固形分から分離されて生じる廃水で、分離液あるいは返流水ともいわれる。一般の下水と比べ汚濁物濃度が高く、生物では分解されにくい有機物を多量含んでいることから、通常の下水处理システムでは処理しにくいものとされている。

*COD (化学的酸素要求量)

CODは、水中の有機物などの還元性物質が分解されたときに要した酸素量として表した水質汚濁指標で、湖沼・貯水池及び河川の環境基準及びこれらの水域へ廃水する際の排水基準として用いられている。測定では、試料水を一定条件で酸化剤(通常、過マンガン酸カリウム)で処理することにより水中の有機物を酸化し、消費した酸化剤の量を求め、それを当量酸素に換算してmg/l単位で表される。CODは無機性の還元物質も測定にかかるうえ、有機物の種類によって酸化分解度がBODの場合と異なるので、必ずしもBODと値が一致しない。

*活性汚泥及び活性汚泥法

下水に十分空気を供給すると、好気性微生物が下水中の有機物を栄養源として繁殖し、褐色状の集合体(フロック)をつくる。この集合体を活性汚泥といい、吸着力が強く、下水中の汚濁物質を凝集して沈殿させる。この活性汚泥の働きを利用して下水の浄化を行う方法が、活性汚泥法である。現在、我が国の下水の大部分は通常この方法により処理されている。具体的には、下水を返送汚泥(最終沈殿池で沈殿分離されてエアレーションタンクに戻される活性汚泥)とともにエアレーションタンクに導いて空気を吹込むなどして、混合液(下水と活性汚泥の混合液)の溶存酸素濃度を高めることにより、下水中の有機物を活性汚泥に吸着、さらに酸化、固化することにより、溶離性の有機物を除去するとともに透明な処理水を得る。

*コンポスト化

畜産廃棄物、農業廃棄物、都市ゴミあるいは下水及び廃水の処理によって生じる汚泥などの有機性廃棄物を通気下で人工的に好気発酵させて、易分解性物質を分解除去し、悪臭が出ない状態にすると共に、安定な腐食物質に富んだものにすることをいう。コンポストは、その製品である。

*色度

水の色の程度を示す指標で、一定組成の着色液をつくり、この標準液の色を基準として色度を表す。

*スライム

下水管内部などに生じる泥状の粘着性物質で、一般に微生物の繁殖で生じる。

*生物処理

微生物を利用して下水処理を行うことをいい、酸素あるいは空気を吹込みながら好気性菌により主として有機物を酸化分解する好気性分解と酸素の無い状態で嫌気性菌により有機物を還元してメタンなどにする嫌気性分解の方法がある。通常下水処理に用いられる活性汚泥処理法は、前者の方法であり、汚泥を発酵させメタンを回収する方法は後者の方法である。

*制限曝気法

活性汚泥法の一つで、下水の生物処理を回分式で行う。通常の活性汚泥法では、活性汚泥処理と汚泥の分離を別々の槽で行うが、この方式では、同一の槽で時間を区切って活性汚泥処理と汚泥の分離を行う。原水流入終了後曝気を開始することで、汚泥の浮上を抑制することができる。嫌気-好気のサイクルを利用することで、リン・窒素除去が可能である。

*消化及び消化汚泥

微生物が水中の有機物を栄養源として摂取し、生長増殖しながら水、炭酸ガス、アンモニア、メタンなどを放出して浄化作用を行う現象を消化という。下水処理によって生じた汚泥は、ある場合には減量やエネルギー回収を目的に消化処理される。この消化処理済み汚泥を消化汚泥という。

*線量

電離放射線の照射によって物質の単位質量当りに与えられたエネルギー量。国際単位 (S I 単位) では物質 1 k g 当りに吸収されたエネルギーが 1 ジュール (J) のとき、1 グレイ (記号 G y) という。k W · h 単位との間には、 $10 \text{ k G y} = 2.78 \text{ k W} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ (水) の関係がある。

*大腸菌群

人間及び動物の腸管から排出される大腸菌やこの大腸菌と似た性質をもっていて、土や水に広く分布している細菌の総称。大腸菌群が検出されることは、その水が消化器系病原菌により汚染されている可能性がある。このことから、大腸菌群試験は水のふん便性汚染の有無を簡便・確実に知る方法として知られている。

*トリハロメタン

クロロホルム (CHCl_3) のように、メタンの4つの水素原子のうち3つがハロゲン原子 (フッ素, 塩素, 臭素, ヨウ素) で置換された化合物。下水放流水の塩素殺菌では、放流水中の有機物と塩素が反応してトリハロメタンが生成する。トリハロメタンは、発がん性の疑いがあることから、水道水では、暫定基準として $0.1 \text{ mg} / \ell$ が設けられている。

*バクテリオファージ

細菌に寄生して増殖するウイルスの総称で、単にファージともいう。

*BOD (生物化学的酸素要求量)

BODは、水中の微生物分解可能な有機物が好氣的微生物によって分解するために消費した酸素量として表した水質指標であり、河川の環境基準及び河川に排水する際の排水基準の指標として用いられている。測定では、希釈水の15分後及び20℃で5日間保存したときの溶存酸素濃度の差に希釈率を掛けて算出する。

*浮遊物質 (SS)

水中に浮遊する不溶解性小粒状物の総称で、プランクトンなどの微生物やその分解物などの有機物及び泥などの無機物からなる。河川、湖沼、貯水池及び海域の環境基準及びこれらの水域に排水する際の排水基準の指標として用いられる。水質指標としては、水中の浮遊物質で2mm目のフルイを通して孔径1 μm のフィルター上に残留するものの乾燥重量から濃度を求め、 mg / ℓ 単位で表す。

参考資料

審議に参加したその他の委員及び専門委員

電子線下水処理技術検討委員会には、前記 (p.iii及びiv) の委員の他、下記の委員及び専門委員が審議に参加した (括弧内は、委員在任当時の役職名)。

委員

村 上 健	(建設省 土木研究所 下水道部長)
松 井 大 吾	(建設省 土木研究所 下水道部長)
安 中 徳 二	(建設省 土木研究所 下水道部長)
田 中 和 博	(日本下水道事業団 技術開発部長)
江 崎 康 彦	(新技術開発事業団 プロジェクト部長)
室 田 幹 雄	(新技術開発事業団 プロジェクト部長)
大 島 康 司	(新技術事業団 プロジェクト部長)
松 下 行 雄	((社) 日本下水道協会 技監)
村 田 恒 雄	(東京都下水道局 計画部長)
神 戸 義 雄	(東京都下水道局 計画部長)
小 岩 三 郎	(東京都下水道局 計画部長)
井 深 弘	(横浜市下水道局 建設部長)
柳 沢 宏	(群馬県土木部長)
島 倉 幸 夫	(群馬県土木部長)
内 山 茂 樹	(茨城県土木部長)
武 久 正 昭	(日本原子力研究所 高崎研究所長)
朝 岡 卓 見	(日本原子力研究所 高崎研究所長)
町 末 男	(日本原子力研究所 高崎研究所長)
田 村 直 幸	(日本原子力研究所 高崎研究所 開発部長)

専門委員

茅 野 充 男	(東京大学 助教授)
大 島 吉 雄	(建設省 土木研究所 下水道部 汚泥研究室長)
青 木 正 信	(日本下水道事業団 技術開発部 総括主任研究員)
阿久津 赳	((社) 日本下水道協会 技術部参事兼工務課長)
中 村 和 弘	((社) 日本下水道協会 技術部参事兼第2課長)
安 田 康 宏	(東京都下水道局 計画部 技術開発課長)
金 子 宣 治	(横浜市下水道局 建設部 技術開発担当課長)
矢 嶋 雅 夫	(群馬県土木部 下水道課長)
長 山 智 由	(茨城県土木部 下水道課長)