

## 論文内容の要旨

論文題目 余剰汚泥減量型活性汚泥プロセスにおける無機物質の汚泥内への蓄積  
(Accumulation of insoluble inorganic substances  
in activated sludge process with excess sludge reduction)

氏名 廣岡 佳弥子

下水道事業において発生する汚泥は下水道普及率の増加に伴って年々増加しており、最終処分場に送られる産業廃棄物の約4割は下水汚泥である。下水汚泥の再利用や減量化は産業廃棄物の減量を目指す上で非常に重要であるが、そのための設備にかかるエネルギーと費用は大きく、問題となってきた。

余剰汚泥減量型 (Excess Sludge Reduction : ESR) 活性汚泥法は、この問題の解決の一つとして、そもそも下水処理から発生する汚泥の量を減らすことを目的に開発された。これは一般的な下水処理の一つである活性汚泥法において、汚泥の一部を可溶化処理し曝気槽に戻することで汚泥の消化率を上げ余剰汚泥発生量を減量する手法であり、可溶化の種類が様々に検討されそれぞれ80~90%の発生余剰汚泥の減量が報告されている。

この手法は有機物の処理に主眼を置いて開発され、無機物質については考慮されていなかった。従って長期に渡って運転を続けると下水中の不溶性無機物質が活性汚泥に蓄積される可能性が指摘されてきた。幾つかの実験プラントでは、ESR活性汚泥のVSS/SSは通常の活性汚泥に比べて減少するという結果が得られた。しかし、これらの実験では活性汚泥中の無機物質はMLSSとMLVSSの差から全量として求められ、個々の無機元素の挙動についての詳しい研究はほとんどされてこなかった。

一般的に活性汚泥プロセスは系内の固形物の総量 (MLSS) で制御されているため、活性汚泥中の無機物質の割合が増加するとプロセス中の有機物質 (微生物) は相対的に減少し、

下水処理効率は低下する。また、各種の重金属はごく低濃度でも微生物の増殖の阻害・もしくは微生物を殺滅する作用を有することが知られている。これらは活性汚泥に対する悪影響ばかりでなく、環境中に放出されたときにも生態系に対して同様の害を及ぼす。このようなことから、無機物質は ESR 活性汚泥プロセスを用いた廃水処理を広く適切に運用するにあたって見過ごすことのできない重要な要因であると考えられる。

本研究では ESR 活性汚泥法のこれまでの研究において重要視されてこなかった無機物質について焦点をあてた。特に無機物質の中で知見が不足している個々の無機元素の挙動について注目し、それぞれの挙動について詳しい情報を得ることを目的とした。

第 4 章では実際の下水処理場に近い条件で ESR 活性汚泥法のリアクターを運転し、ESR 活性汚泥法を用いる廃水処理の現場で起こっている現象を把握した。流入下水に含まれる無機物質が総量としてどの程度活性汚泥に蓄積するかを調べ、さらに個々の無機元素についても同様に汚泥への蓄積を調べた。また流入下水、処理水中の無機元素の濃度を測定して物質収支をとることを試みた。

その結果、まず ESR 活性汚泥法では通常の活性汚泥法に比べて ESR 活性汚泥中の総無機成分の割合は増加したが、一定値に達すると飽和しそれ以上増加しないことを確認した。これはこれまでの研究報告でも指摘されてきたことであった。さらに活性汚泥への個々の無機元素の蓄積を調べると、Al, P, Ca, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb が ESR 活性汚泥中に蓄積されることがわかった。特に Al, Ca, Fe, Cu, Zn の濃度は、通常の活性汚泥法に比べて一定割合増加した後、それ以上濃度の差は広がらなかった。Ni は測定期間を通じて、ESR 汚泥により多く蓄積される傾向があった。P, Cr, Pb ははつきりとした傾向はわからなかった。その一方で Mn のように ESR 活性汚泥中の蓄積量が通常の活性汚泥法に比べて少なくなる元素があることがわかった。また、Na は通常の活性汚泥法の場合と違いがなかった。

流入下水、処理水中の無機元素の濃度を測定して物質収支をとることを試み、元素ごとの挙動についていくらかの知見を得た。下水中的 Na, Ca は溶解性で、ESR 活性汚泥プロセスに流入したほぼ全量がそのまま溶解性として処理水に流出した。Al, Fe, Cu, Zn は SS 性で流入する割合が大きく、それらは大部分が活性汚泥中に一度蓄積し、処理水中 SS として流出するか余剰汚泥として引き抜かれない場合は系内に蓄積するという傾向がわかった。また Mn は Na・Ca と Al・Fe・Cu・Zn の中間のような挙動をとり、溶解性で流入する割合が大きく、また溶解性で流出する割合も Al, Fe, Cu, Zn に比べて大きかったが、全部が溶解性で流出するわけではなく、一部は活性汚泥に蓄積した。

しかし、実際の処理場に近い条件という観点から選んだ生下水リアクターであるがゆえに、運転結果の考察が難しくなるという問題がおこった。生下水は流入濃度が時間・曜日・季節で変動し活性汚泥や処理水中の無機元素濃度に影響を与えるため、観察される傾向が ESR 活性汚泥法ゆえのものなのか判断することが難しくなった。Cr, Ni, Pb, P のように挙動動

傾向が Na・Ca・Al・Fe・Cu・Zn・Mn ほど明確でないもの、Al、F のように上で述べた挙動だけでは流入の行方を全て説明することができないものなどがあった。

第 6 章では 4 章の結果を踏まえて、挙動傾向の把握をより正確に詳しく行う為には、ある程度系を単純化したリアクターの運転が必要であると考え、人工下水流入させるリアクターを運転した。生下水リアクターに比べて単純化された系では運転が安定しやすく運転条件による影響がわかりやすいので、より詳細な分析が可能となった。活性汚泥中に蓄積すると傾向があった Cr、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb、P と蓄積しない Mn に対象を絞って詳しい研究をおこなった。

第 4 章の結果と同様に、ESR 活性汚泥には Cr、Fe、Ni、Cu、Zn、P が蓄積され、逆に Mn は蓄積しなくなることがわかった。ただし P に関しては 4 章の結果と逆になり活性汚泥中に蓄積しなくなった。流入下水が変化しなければ、すべての元素で汚泥中濃度がある値になるとそれ以上の増加も減少もしなくなった。その時の物質収支を計算して元素の挙動は主に 3 つのグループに分類できることがわかった。つまり ESR 活性汚泥法で余剰汚泥の引き抜きがない場合、Cr や Cu などの元素は活性汚泥中に蓄積を続け SSあたりの含有量を増やし、処理水中の SS 成分として系外に出ていく分が流入量とつりあいが取れるまで増加を続けた。一方、Mn や P のように余剰汚泥の引き抜きがない分、処理水中に溶解する分が増加して流出することで流入とのバランスをとる元素があった。また Fe はこれらの中間的な挙動をし、活性汚泥に蓄積して処理水の SS 性として出て行く分を増やしつついくらかは処理水中の溶解性濃度も増加させ、両方の効果から流入とのバランスをとった。

単に通常の活性汚泥法と ESR 活性汚泥法を比べるだけでなく、ESR 活性汚泥法の中でも汚泥の可溶化処理の方式を変えたり、流入下水中の無機元素濃度以外の組成を変更することによって、無機元素の汚泥への蓄積に影響が出るかの検討もおこなった。汚泥可溶化処理としてオゾン処理と好熱性細菌を用いる手法を比較した結果、Cu の蓄積速度や Mn の減少速度に明らかに違いが出た。Cr や Ni、Zn のようにほぼ全く影響がないものもあった。また流入下水中から EDTA を除いたところ Fe、Cu、Zn、Pb の汚泥への蓄積傾向が増加した。特に Zn と Pb に与えた影響は著しかった。しかし Cr、Ni、P にはほぼ影響はなかった。

処理水の詳しい分析も行い、溶解性無機物質の溶解性形態についての情報もいくらか得た。孔径の異なるフィルターで濾過することにより溶解性物質のサイズを調べたり、化学的性質の異なるカートリッジで吸着処理をおこなうことによって化学的性質を調べた。活性汚泥への蓄積傾向と同様に、ESR 活性汚泥法の影響や無機元素の種類によって得られる結果は異なった。

第 4 章で出た生下水リアクターの問題点の解決として第 6 章では人工下水リアクターを運転したが、別の手法でその問題点を解決しようとしたのが第 5 章である。5 章では、稼動している複数の実廃水処理プラントから長期間のデータを提供してもらい、解析をおこなっ

て結果を比較考察した。人工下水リアクターの運転は生下水の組成の激しい変動や関わってくる様々な不確定要因を排除することで傾向をみやすくすることを目指したが、これに對して 5 章での解析は、データの数と種類を増やすことによって不確定要因を内包しながらそれを越えて共通する傾向を見出し、それによって結論に説得力をもたせることを目的とした。

結果、次のような傾向が明確になった。ESR 汚泥減量運転を続けることによって、活性汚泥中の無機物質の割合が増加し、無機物質の割合が一定値になると増加は止まった。ただし安定値の値はプラントによって異なった。この時 SS 性無機物質の物質収支の計算をおこなったところ、全てのプラントにおいて ESR 活性汚泥法で運転をおこなった系では input に比べて output の値が小さくなつた。これは、SS 性で流入した無機物質の一部が SS 性以外の形態で流出したという可能性を示唆している、すなわち溶解性形態、は非常に小さな粒子になり、処理水中の SS として捉えられずに流出するようになったということである。