

RBS Lab. 基礎編

自然浄化法リアクターシステム[®]

自然浄化法のしくみと特徴



JNC エンジニアリング株式会社

改定日：2026.07

基礎編 目次

1. 自然浄化法リアクターシステム®について	2
2. 自然浄化法リアクターシステム®に用いる 2 つの資材	4
3. 活性汚泥中の微生物	6
4. 細菌がエネルギーを得るための 3 つの代謝経路	7
5. 廃水浄化施設での悪臭発生メカニズム	10
6. 自然浄化法リアクターシステム®における腐植物質の役割	12
7. 自然浄化法リアクターシステム®が悪臭の発生を抑制するメカニズム	14
8. 自然浄化法リアクターシステム®では活性酸素が発生する	15
9. まとめ	16
【参考文献】	16

1. 自然浄化法リアクターシステム[®]について

自然浄化法リアクターシステム[®]（以下、本システム）は、廃水浄化技術の一つであり、活性汚泥法と同様に微生物の働きによって廃水中の汚濁物質を除去するシステムです。標準活性汚泥法と異なる点は、土壌由来の腐植資材（腐植ペレット）と軽石をリアクター内で曝気し、その成分を少しずつ生物処理槽内に供給することで、これらを利用する微生物の活動を活性化している点です（図 1-1）。

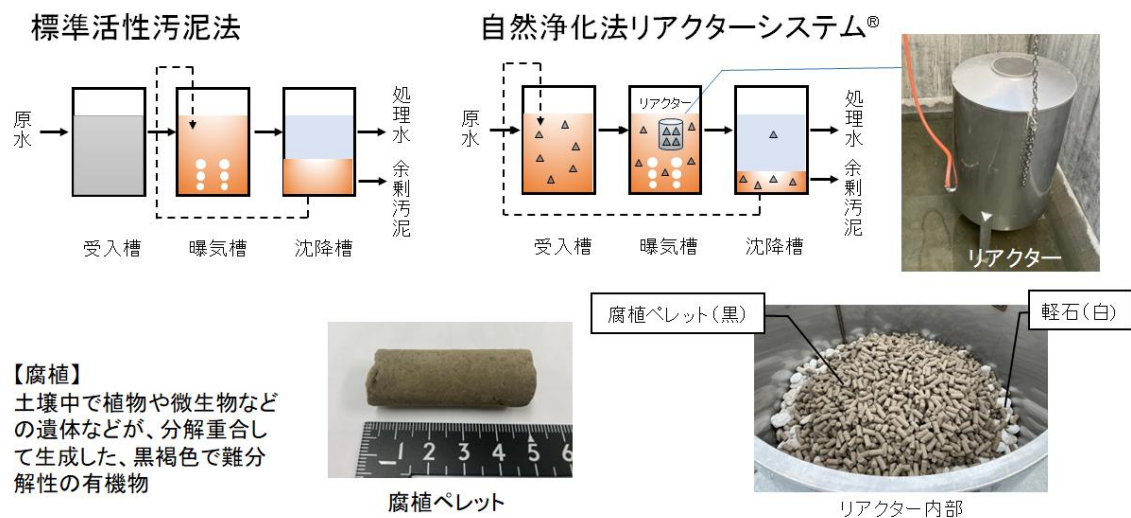


図 1-1 自然浄化法リアクターシステム[®]の概要

その結果、標準活性汚泥法と比較して、次のような特徴が現れます（図 1-2）。



図 1-2 自然浄化法リアクターシステム®の効果

しかし、これらの特徴について「なぜそのような現象が起こるのか」というメカニズムは、これまで十分に解明されておらず、科学的根拠に基づいた説明もほとんどありませんでした。

そこで私たちは、既存の科学論文の調査や自社ラボでの実験を通じて、本システムの作用メカニズムの解明に取り組み、一定の知見を得ることができました。

「基礎編」では、本システムのメカニズムを理解していただくうえで必要となる基礎的な内容を整理してご説明します。「専門編」ではラボでの実験結果を、「発展編」では本システムで得られた余剰汚泥から製造した肥料を用いた栽培試験の結果などをご紹介します、さらに理解を深めていただきたいと考えています。

[▶ 目次に戻る](#)

2. 自然浄化法リアクターシステム®に用いる 2 つの資材

本システムでは、リアクターと呼ばれるステンレス製の容器に、腐植ペレットと軽石の 2 種類の資材（以下、2 つ合わせて「充填剤」と呼びます）を投入し、その表面が少しずつ削られることで生じる細かな粒子を生物処理槽内に供給します。

リアクターには、処理槽内に沈めて設置する「内装型」と、処理槽上部に設置する「外装型」の 2 種類があります。

2-1. 腐植ペレット

腐植ペレットは、有機物を多く含む土壌をペレット状に成形した資材であり、その有機物部分には腐植物質が多く含まれています。

国際腐植物質学会では、腐植物質を次のように定義しています^[1]。

“Humic substances (HS) are complex and heterogeneous mixtures of polydispersed materials formed in soils, sediments, and natural waters by biochemical and chemical reactions during the decay and transformation of plant and microbial remains (a process called humification).”

「腐植物質（HS）は、植物および微生物遺骸の分解・変質過程（腐植化：humification）において生じる生化学的および化学的反応によって、土壌、堆積物、および天然水中に形成される、複雑で不均一な様々な大きさの物質の混合物である。」（筆者訳）

森や畑では、植物や動物の生と死が繰り返され、その遺体由来の有機物は微生物の働きによって少しずつ分解されます。その過程で元の形をとどめなくなり、化学的に安定した状態になったものが腐植物質です。

腐植物質は土壌中に多く含まれており、土を黒っぽく見せる原因の一つでもあります。また、腐植物質は単なる「分解され残ったもの」ではなく、土壌の性質を良くする重要な役割を持っています。例えば、腐植物質があることで土壌は団粒構造を形成しやすくなり、固くにくく、水や空気を保持しやすくなります。その結果、植物の根が伸びやすくなり、植物が育ちやすい環境が整います。

本システムでは、このような腐植物質を含んだ土壌を圧縮して固め、ペレット状に加工しています。ペレット状にすることで、表面から腐植物質などが徐々に溶け出し、生物処理槽内に連続的に供給されるようになります。

腐植物質の構造や性質の詳細については「専門編」でご説明します。

2-2. 軽石

軽石は、マグマが急速に冷えて固まる際、内部のガスが抜けることで多孔質構造を形成した火山岩です。

軽石の表面には無数の微細な穴があり、多孔質であるため、微生物が付着・定着するための「住み家」として利用されます。これにより、増殖速度の遅い微生物でも、生物処理槽内に長期間とどまりやすくなります。

成分としては、主にケイ酸塩からなりますが、アルミニウムや鉄などの成分も含まれます。本システムにおいては、軽石から供給される微量ミネラル、特に鉄分が本システムに大きな影響を及ぼしていると考えています。

腐植ペレットと軽石は、リアクター内で強く曝気されることにより表面が少しずつ削られていきます。削られて生じた細かな粒子はリアクターの外へ流出し、汚泥の間を浮遊するか、汚泥ブロック内に取り込まれながら、処理槽全体に分布します。

これらの充填剤は徐々に減っていくため、内装型リアクターの場合は半年～1年ごとに、処理槽から引き上げて再充填する必要があります。外装型リアクターの場合は、あらかじめ決めた頻度で充填剤を追加投入します。定期的に補充することで、処理プロセスの安定した運転を維持することができます。

[▶ 目次に戻る](#)

3. 活性汚泥中の微生物

活性汚泥法では、多様な微生物が関与し、廃水中の汚濁物質（主に有機物）を分解・除去しています。活性汚泥中の微生物は、主に次の3つのグループに分類されます。

- 細菌類
- 原生動物
- 後生動物

このうち、廃水浄化に最も直接的に関与しているのは細菌です。細菌は一般に1～10 μm 程度の大きさで、有機物を分解するための酵素を供給します。また、細菌は粘性の高い物質を産生し、「フロック」と呼ばれる塊を形成します。このフロックは汚濁物質を取り込みながら沈降し、上澄み水の水質を清澄にする役割を果たします。

[▶ 目次に戻る](#)

4. 細菌がエネルギーを得るための3つの代謝経路

微生物が増殖し、活動を維持するためにはエネルギーが必要です。生物は、エネルギーを一旦 ATP（アデノシン三リン酸）という分子の形で蓄え、その ATP を利用して、タンパク質や DNA などの合成、物質の輸送、運動、増殖などさまざまな生命活動を行っています。

細菌における代表的な ATP 生成の仕組みとして、次の3つの代謝が知られています（表 4-1）。

- ・好気呼吸
- ・嫌気呼吸
- ・発酵

以下では、それぞれの代謝様式の特徴と、本システムや悪臭発生との関係についてご説明します。

表 4-1 細菌がエネルギーを得るための主な代謝経路

		好気呼吸	嫌気呼吸	発酵
代謝経路	解糖系	○	○	○
	クエン酸回路	○	○	×
	電子伝達系	○	○	×
最終電子受容体	酸素 (O_2)	硝酸イオン・硫酸イオンなど	ピルビン酸など（代謝中間体／有機分子）	
エネルギー効率（ATP産生量）	最高（約38個）	中（好気よりやや劣る）	最低（2個）	
有機物の分解度	完全分解（ CO_2 と H_2O ）	完全分解（ CO_2 と還元物質）	不完全分解（有機酸やアルコール）	
廃水処理での用途・現象	活性汚泥法（主要な有機物除去）	脱窒（窒素ガスの放出） 硫酸還元（硫化水素生成）	メタン発酵の初期段階（酸生成）	

4-1. 好気呼吸

好気呼吸は、溶存酸素が十分に存在する条件下で行われる代謝で、活性汚泥法の曝気槽などで中心となります。

・代謝経路

グルコース（ブドウ糖）を例にとると、まず「解糖系」と呼ばれる代謝経路で約 10 段階の反応を経てピルビン酸まで分解されます。その後、「クエン酸回路（TCA サイクル）」と呼ばれる代謝経路に入り、約 8 段階の反応を経て最終的には二酸化炭素（CO₂）と水（H₂O）まで完全に酸化されます。

この過程で得られた電子は、細胞膜上の「電子伝達系」を流れることでエネルギーを生み出し、そのエネルギーを用いて多量の ATP が合成されます。細菌の場合、グルコース 1 分子あたり最大約 38 分子の ATP が生成されるとされています。

・電子受容体

電子受容体とは、電子伝達系の末端で電子を受け取る物質のことです。好気呼吸では、酸素（O₂）が最終電子受容体として機能します。酸素は電子を強く引き付ける性質を持っており、細胞外から取り込まれて電子の受け皿として利用されます。

4-2. 嫌気呼吸

嫌気呼吸は、酸素が存在しない条件下での代謝で、硝酸塩や硫酸塩などが酸素の代わりになります。

・代謝経路

嫌気呼吸では、好気呼吸と同様に、解糖系・クエン酸回路・電子伝達系が機能します。そのため、有機物は最終的に二酸化炭素までほぼ完全に酸化分解されます。

・電子受容体

酸素の代わりに、廃水中に溶けている硝酸イオン（NO₃⁻）や硫酸イオン（SO₄²⁻）などの無機イオンが電子受容体として利用されます。ただし、これらは酸素ほど電子を強く引き付けることができないため、電子伝達系から得られるエネルギーは好気呼吸の場合より少なくなり、ATP 生成量も低下します。

4-3. 発酵

発酵は、メタン発酵処理の酸生成段階などで見られる代謝であり、酸素だけでなく硝酸イオンや硫酸イオンなどの外部電子受容体もほとんど存在しない極端な嫌気条件下で起こります。

・代謝経路

外部電子受容体が存在しないため、クエン酸回路や電子伝達系はほとんど機能せず、解糖系のみが ATP を生成する経路として働きます。この場合、グルコース 1 分子あたり約 2 分子の ATP しか得られません。

・電子受容体

電子を受け取る外部物質がないため、微生物は自らが生成したピルビン酸などの代謝中間体を電子の受け皿として利用します。その結果、有機物は二酸化炭素まで完全に分解されず、酢酸や酪酸などの有機酸（揮発性脂肪酸：VFA）やアルコールなどが多量に生成・蓄積します（不完全分解）。

細菌の酸素要求性による分類

細菌は、酸素の存在に対する要求性によって大きく次の 3 つに分類されます。

- ・偏性好気性菌：酸素がある環境でのみ生育できる細菌
- ・通性嫌気性菌：酸素がある環境を好むが、酸素がなくても生育できる細菌
- ・偏性嫌気性菌：酸素がある環境では生育できない細菌

通性嫌気性菌の中には、酸素があるときにはエネルギー効率の高い好気呼吸を行い、酸素がなくなると硝酸イオンなどを電子受容体とする嫌気呼吸へと切り替え、さらにそれらも利用できなくなると電子伝達系の働きを停止し、発酵へと切り替える細菌も知られています。

自然浄化法リアクターシステム®は通性嫌気性菌を主体に浄化しますが、活性汚泥の遺伝子解析の結果からは、通性嫌気性菌だけでなく、偏性好気性菌、偏性嫌気性菌どちらも存在していることが分かりました。

[▶ 目次に戻る](#)

5. 廃水浄化施設での悪臭発生メカニズム

廃水浄化施設における悪臭発生の最大の原因は「酸素不足」です。前述した3つの代謝経路のどれが優勢になるかによって、悪臭物質が生成されるかどうか左右されます。

処理槽内で溶存酸素が十分に維持され、好気呼吸が安定して行われている場合には、悪臭はほとんど発生しません。しかし、次のような状況では酸素が不足し、嫌気呼吸や発酵が起こりやすくなります。

- ・原水中の有機物量の増加により、好気性微生物の活性が高まって酸素の消費量が増加した場合

- ・汚泥フロックの内部、バイオフィルムの内部
- ・処理槽底部の汚泥堆積層など、酸素が届きにくい局所的な嫌気領域が形成される場合
- ・ブロワーの故障 など

このような酸素不足の状態では、微生物は好気呼吸から嫌気呼吸、さらには発酵へと代謝様式を切り替え、その過程で悪臭物質が生成されます（表 5-1）。主なメカニズムは次の3つです。

表 5-1 廃水浄化施設で発生する悪臭の種類と特徴

	硫酸塩還元	有機物の発酵	アミノ酸の嫌気性分解（腐敗）
代表的な臭気	腐卵臭	酸っぱい臭い、汗臭い臭い、蒸れた靴下臭	生魚臭、し尿臭、生ゴミ臭、腐ったタマネギ臭、腐ったキャベツ臭
主な生成物	硫化水素（ H_2S ）	酢酸、プロピオン酸、酪酸など の揮発性脂肪酸（VFA）	アンモニア、トリメチルアミン、メチルメルカプタン、ジメチルサルファイド
主な微生物	硫酸塩還元菌	従属栄養微生物（発酵菌）	腐敗菌・嫌気性細菌
利用される基質	有機物、硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）	糖類・有機物	タンパク質、アミノ酸
エネルギー獲得の仕組み	SO_4^{2-} を電子受容体として利用	発酵によってATPを生成	アミノ酸を分解してエネルギー獲得
主な代謝経路	有機物 → SO_4^{2-} 還元 → H_2S 生成	有機物 → 発酵 → VFA生成	タンパク質 → アミノ酸 → NH_3 ・含硫黄化合物生成

5-1. 硫酸塩還元による「硫化水素 (H_2S)」の発生（卵が腐ったような臭い）

酸素 (O_2) および硝酸イオン (NO_3^-) が枯渇すると、硫酸塩還元菌と呼ばれる特定の微生物が、エネルギー獲得のために廃水中の硫酸イオン (SO_4^{2-}) を電子受容体として利用し始めます。その結果、強い腐卵臭を持つ硫化水素 (H_2S) が生成されます。

5-2. 有機物の発酵による「揮発性脂肪酸 (VFA)」の発生（酸っぱい・汗臭い臭い）

酸素がない環境では、従属栄養微生物がエネルギー (ATP) を得るために発酵を行います。その過程で次のような揮発性脂肪酸が蓄積し、悪臭の原因となります。

- ・酪酸：蒸れた靴下のような臭い
- ・プロピオン酸：酸っぱい臭い
- ・酢酸：刺激性のある酸っぱい臭い

これらが混ざり合うことで、「酸っぱい」「汗臭い」といった不快な臭いとなります。

5-3. アミノ酸の嫌気性分解による「窒素・硫黄化合物」の発生（生魚・糞尿・生ゴミの臭い）

廃水中に含まれるタンパク質やアミノ酸が、酸素のない環境で微生物により分解（腐敗）される際に、次のような悪臭物質が発生します。

- ・アンモニア (NH_3)：し尿臭
- ・トリメチルアミン：生魚が腐ったような臭い

さらに、メチオニンなどの「硫黄を含むアミノ酸」が分解されると、次のような強烈な悪臭物質が生成されます。

- ・メチルメルカプタン (CH_3SH)：腐ったタマネギの臭い
- ・ジメチルサルファイド：腐ったキャベツの臭い

これらは嗅覚閾値（人が臭いを感じ始める濃度）が非常に低く、ごく微量でも強い悪臭として感じられます。

[▶ 目次に戻る](#)

6. 自然浄化法リアクターシステム®における腐植物質の役割

本システムでは、腐植ペレットや軽石から腐植物質や鉄などの成分を少しずつ生物処理槽内に供給しています。

腐植物質（特にフミン酸）が嫌気呼吸の電子受容体として利用できることは、1997 年にマサチューセッツ大学の Lovley 教授らの研究グループにより明らかにされ、学術誌「Nature」に報告されています^[2]。また同時に、腐植物質が他の物質へ電子を受け渡す「電子シャトル」として機能することも示されています。

このことについては専門編で詳しく説明します。

つまり、ある種の微生物は腐植物質を電子受容体として用いて嫌気呼吸を行い、ATP を生成することができます（図 6-1）。この能力を持つ微生物は、生物処理槽のような競争環境において非常に有利に働くと考えられます。

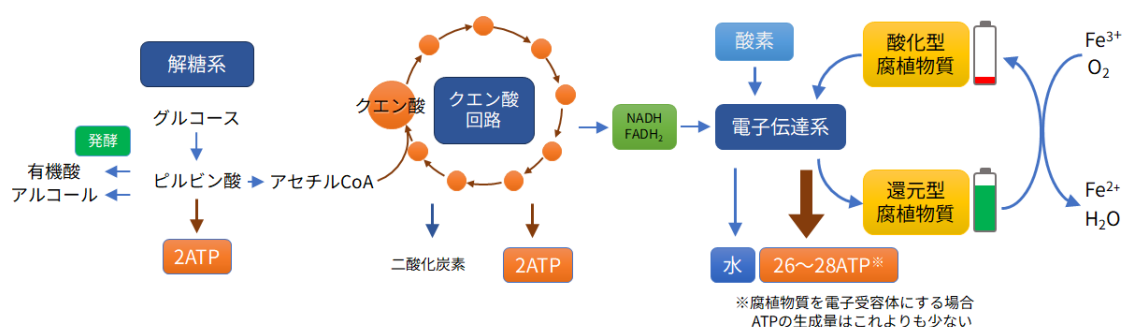


図 6-1 腐植物質を電子受容体として利用した ATP 生成の模式図

6-1. なぜ腐植物質は電子受容体として機能するのか？

腐植物質が電子受容体として機能できる理由は、その分子構造中に「キノン構造」と呼ばれる電子を受け取りやすい構造が多数存在しているためです。

腐植物質を電子受容体として利用する細菌は、腐植物質中のキノン構造に電子を渡すことで電子伝達系を動かし、ATP を生成します。このとき、腐植物質は電子を受け取ることで「酸化型」から「還元型」へ変化します。

腐植物質を電子受容体として利用できる細菌は、複数のグループにわたって知られており、本システムの活性汚泥中にもこのような微生物が存在することを、私たちはラボ実験で確認しています。詳細については「専門編」でご紹介します。

6-2. 腐植物質は「電子シャトル」として鉄に電子を受け渡すことができる

腐植物質の大きな特徴は、電子を受け取って終わるのではなく、その電子を別の物質に受け渡す「電子シャトル（電子の運び屋）」として働く点です。

電子の受け渡し先となる物質は、腐植物質よりも電子を強く引き付ける性質を持っている必要があります。その一つが三価鉄イオン (Fe^{3+}) です。本システムで使用する腐植ペレットと軽石には、どちらも約 4% の鉄分が含まれており、処理槽内には常に鉄が存在する状態になっています。

嫌気呼吸において電子を受け取った還元型腐植物質は、その電子を Fe^{3+} に渡し、 Fe^{2+} に還元します。電子を渡した腐植物質は再び酸化型に戻り、再度電子受容体として利用されます。

このように腐植物質は、電子を受け取る（還元される）、電子を渡す（酸化される）というサイクルを繰り返すことができます。言い換えると、腐植物質は生物処理槽内で「充電式電池」のように充放電を繰り返していると考えられます。

[▶ 目次に戻る](#)

7. 自然浄化法リアクターシステム®が悪臭の発生を抑制するメカニズム

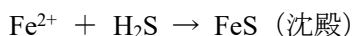
本システムの最大の特徴の一つは、悪臭の発生を抑制できる点です。特に硫化水素（ H_2S ）については、本システムの導入後に劇的に改善される事例が多く見られます。その理由として、前述した腐植物質の二つの機能、

- ・嫌気呼吸の電子受容体として機能すること
- ・電子シャトルとして鉄を還元すること

が大きく関与していると考えられます。

電子受容体は物質ごとに電子を引き付ける強さ（電子親和性）が異なります。腐植物質の電子親和性は、硝酸イオン（ NO_3^- ）より低く、硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）より高いことが知られています。つまり、嫌気条件下で酸化型腐植物質が存在する場合、硫酸イオンよりも腐植物質の方が先に電子を受け取ることができます。その結果、硫酸塩還元菌による硫酸イオンの還元が抑制され、硫化水素の生成が抑えられます。

さらに、還元型腐植物質は電子シャトルとして Fe^{3+} に電子を渡し、 Fe^{2+} を生成します。 Fe^{2+} が存在すると、生成した硫化水素と反応して硫化鉄（ FeS ）が形成されます。



このように、硫化水素は FeS として沈殿・固定化されるため、気体として放出されにくくなります。硫化水素の発生と放出を抑制することにより、悪臭の低減だけでなく、コンクリートや金属設備の腐食を抑え、設備寿命を延ばす効果も期待できます。

また、発酵により、プロピオン酸や酢酸などの揮発性脂肪酸が生成しても、腐植物質を電子受容体とする嫌気呼吸が行われることで、 CO_2 まで酸化分解することが可能です。

同様に、アミノ酸やタンパク質についても酸化的な分解が進みます。

腐植物質の受け取る能力にも限界があります。それを超えてしまうと硫酸還元菌による硫化水素の発生や、発酵が起こるため、定期的に曝気を行うことで、酸化型に戻す必要があります。

[▶ 目次に戻る](#)

8. 自然浄化法リアクターシステム®では活性酸素が発生する

ヒドロキシラジカル ($\cdot\text{OH}$) は、活性酸素種の中でも最も強い酸化力を持つ物質で、ほとんどあらゆる有機物から瞬時に電子を引き抜くことができます。タンパク質、DNA、脂質などの生体成分を酸化し損傷させるため、生体にとっては非常に有害な物質でもあります。

一方で、その強い酸化力を利用し、ヒドロキシラジカルを人工的に生成して難分解性有機物を分解する「促進酸化法 (AOP : Advanced Oxidation Process)」という技術が実用化されています。AOP におけるヒドロキシラジカルの生成方法には、紫外線と過酸化水素の組み合わせなどいくつかの手段がありますが、その一つに「フェントン反応」と呼ばれる、二価鉄 (Fe^{2+}) と過酸化水素 (H_2O_2) を用いる方法があります。

本システムでは、腐植ペレットや軽石に鉄分が含まれており、前述の通り、還元型腐植物質の働きによって二価鉄 (Fe^{2+}) が生成します。過酸化水素は先にも述べた電子伝達系で誤って発生するスーパーオキシドという活性酸素を除去する際に発生することが知られています。また、腐植物質そのものを曝気することでヒドロキシラジカルが発生することも報告されています^[3]。

実際に私たちは、本システムの活性汚泥からヒドロキシラジカルが発生していることをラボでの実験により確認しました。詳細は専門編をご覧ください。

ヒドロキシラジカルは寿命が極めて短く、発生するとほぼその場で周囲の物質と反応してしまうため、生物処理槽の中で直接測定することは非常に困難です。また、ヒドロキシラジカルが大量に生成されてしまうと、活性汚泥中の微生物自身が損傷・死滅してしまいます。

したがって、本システムにおけるヒドロキシラジカルの正確な生成量を見積もることは出来ませんが、有機物の分解を促進している可能性が高いと私たちは考えています。

[▶ 目次に戻る](#)

9. まとめ

以上のように、自然浄化法リアクターシステム[®]では、

- ・酸素のない環境で腐植物質を電子受容体として利用して呼吸を行う微生物の活性化
- ・腐植物質と鉄による電子シャトル機構
- ・ヒドロキシラジカルの生成

といった要素が、廃水浄化や悪臭抑制に大きく関与していると考えています（図 9-1）。

一方で、

- ・窒素除去が進みやすいこと
- ・汚泥の沈降性が向上すること

など、本システムで観察される現象の中には、まだ十分に解明されていない点も残されています。これらの点については、今後も研究を継続し、科学的な裏付けと技術の最適化を進めてまいります。

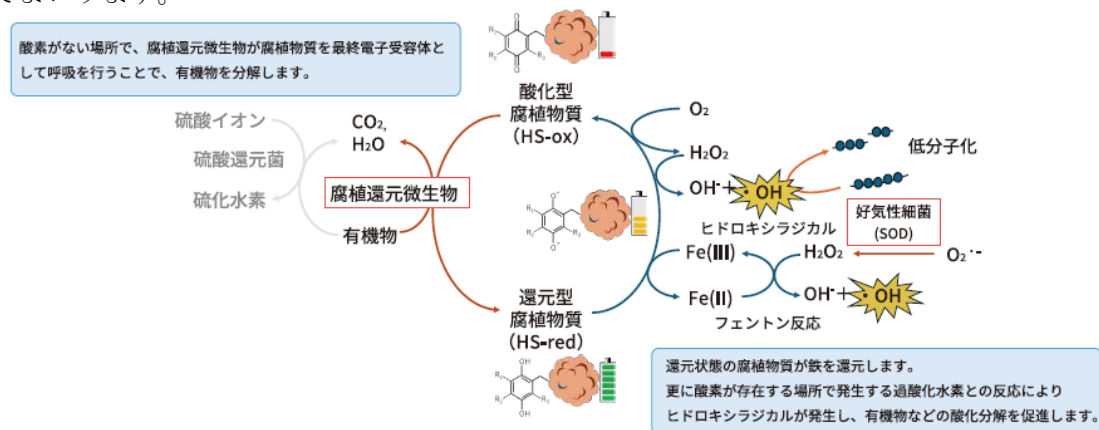


図 9-1 自然浄化法リアクターシステム[®]のメカニズム

【参考文献】

- [1] International Humic Substances Society, “What are Humic Substances?”, <https://humic-substances.org/> (2026.7.21 閲覧)
- [2] Lovley, D. R.; Coates, J. D.; Blunt-Harris, E. L.; Phillips, E. J. P.; Woodward, J. C. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature* **1996**, 382 (1), 445–448.
- [3] Page, S. E.; Sander, M.; Arnold, W. A.; Mcneil, K. Hydroxyl Radical Formation upon Oxidation of Reduced Humic Acids by Oxygen in the Dark. *Environ. Sci. Technol.* **2012**, 46, 1590–1597.

※本記事に掲載している一部画像・図は、生成 AI を利用して作成したイメージです。実在の設備、人物、現場等をそのまま示すものではありません。詳細は当社「生成 AI 利用ポリシー」をご確認ください。

[▶ 目次に戻る](#)